



ใบรับรองวิทยานิพนธ์
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต (เทคโนโลยีการบรรจุ)

ปริญญา

เทคโนโลยีการบรรจุ

เทคโนโลยีการบรรจุและวัสดุ

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง การพัฒนาแท่นรองรับสินค้ากระดาษลูกฟูกด้านทานน้ำ

The Development of Water Resistance Corrugated Board Pallet

นามผู้วิจัย นางสาวณัฐพิชา ทรัพย์ประทานพร

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ธัญญารัตน์ จิฎุกาญจน์, Ph.D.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

(อาจารย์เลอพงศ์ จารุพันธ์, Ph.D.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

(อาจารย์รังรอง ยกสำน, วท.ด.)

หัวหน้าภาควิชา

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ธัญญารัตน์ จิฎุกาญจน์, Ph.D.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์กัญจนา ชีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ เดือน พ.ศ.

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การพัฒนาแท่นรองรับสินค้ากระดาษลูกฟูกต้านทานน้ำ

The Development of Water Resistance Corrugated Board Pallet

โดย

นางสาวณัฐพิชา ทรัพย์ประทานพร

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (เทคโนโลยีการบรรจุ)

พ.ศ. 2553

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ณัฐพิชา ทรัพย์ประทานพร 2553: การพัฒนาแท่นรองรับสินค้ากระดาษลูกฟูกด้านทานน้ำ
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (เทคโนโลยีการบรรจุ) สาขาเทคโนโลยีการบรรจุ ภาควิชา
เทคโนโลยีการบรรจุและวัสดุ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผู้ช่วยศาสตราจารย์
ชัยญารัตน์ จัญญาจัน, Ph.D. 138 หน้า

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาแท่นรองรับสินค้ากระดาษลูกฟูกด้านทานน้ำ ในเบื้องต้นได้ศึกษา
สมบัติของแผ่นกระดาษลูกฟูกซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักของโครงสร้างแท่นรองรับสินค้ากระดาษลูกฟูก โดย
ศึกษาสมบัติทางกายภาพ สมบัติการด้านทานน้ำ และสมบัติเชิงกลของแผ่นกระดาษลูกฟูกหลังเคลือบด้วยสาร
เคลือบพอลิเมอร์ชีวภาพ ซึ่งสารเคลือบที่ใช้ในงานวิจัยนี้แบ่งออกเป็น 3 กลุ่มคือ กลุ่มที่ 1 สารเคลือบเดี่ยว
ประกอบด้วยสารเคลือบไฮโดรโฟบิกสตาร์ช สารเคลือบซิน สารเคลือบกรดไขมันสเตียริก และสารเคลือบไขผึ้ง
แปรระดับความเข้มข้นร้อยละ 1 2 และ 3 กลุ่มที่ 2 สารเคลือบผสมหรืออิมัลชัน ได้แก่ สารเคลือบผสมระหว่าง
ไฮโดรโฟบิกสตาร์ชระดับความเข้มข้นร้อยละ 3 ร่วมกับกรดไขมันสเตียริกและไขผึ้ง โดยแปรระดับความ
เข้มข้นของกรดไขมันสเตียริกและไขผึ้ง ร้อยละ 1 2 และ 3 และกลุ่มที่ 3 สารเคลือบสองชั้น โดยเคลือบชั้นแรก
ด้วยไฮโดรโฟบิกสตาร์ชร้อยละ 3 และเคลือบสารเคลือบชั้นที่สองด้วยสารเคลือบซิน สารเคลือบกรด
ไขมันสเตียริก หรือสารเคลือบไขผึ้ง แปรระดับความเข้มข้นร้อยละ 1 2 และ 3 จากการศึกษาพบว่า
แผ่นกระดาษลูกฟูกที่เคลือบด้วยสารเคลือบเดี่ยวไฮโดรโฟบิกสตาร์ช กรดไขมันสเตียริก และไขผึ้งเกือบทุกทรีด
เมนต์มีมุมสัมผัสน้ำเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) โดยมีค่าเพิ่มขึ้นร้อยละ 3-9 ยกเว้นการเคลือบด้วย
สารเคลือบซินที่ทำให้ความสามารถในการด้านทานน้ำลดลง สำหรับกลุ่มสารเคลือบอิมัลชัน แผ่นกระดาษ
ลูกฟูกที่เคลือบด้วยอิมัลชันระหว่างไฮโดรโฟบิกสตาร์ชและกรดไขมันสเตียริกความเข้มข้นร้อยละ 3 มีค่ามุม
สัมผัสน้ำ เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) โดยมีค่าเพิ่มขึ้นร้อยละ 8 และในกลุ่มของสารเคลือบสองชั้นพบว่า
แผ่นกระดาษลูกฟูกเคลือบสองชั้นด้วยไฮโดรโฟบิกสตาร์ชและไขผึ้งมีค่ามุมสัมผัสน้ำเพิ่มขึ้นอย่างมี นัยสำคัญ
($p \leq 0.05$) โดยมีค่าเพิ่มขึ้นร้อยละ 2-4 ส่วนสมบัติเชิงกลของแผ่นกระดาษลูกฟูกเคลือบพบว่า แผ่นกระดาษ
ลูกฟูกเคลือบส่วนใหญ่มีความต้านทานแรงกดแผ่นลูกฟูกตามแนวตั้งลดลงอย่างมีนัยสำคัญ แต่ความต้านทาน
แรงกดแผ่นลูกฟูกในแนวระนาบไม่แตกต่างจากแผ่นกระดาษลูกฟูกที่ไม่เคลือบ และการศึกษาในส่วนถัดมาคือ
การศึกษาสมบัติการด้านทานน้ำของแผ่นกระดาษลูกฟูกเคลือบภายหลังเก็บภายใต้สภาวะการเก็บในคลังสินค้า
ทั่วไปสำหรับเขตร้อนชื้น พบว่าแผ่นกระดาษลูกฟูกเคลือบที่เคลือบด้วยสารเคลือบไฮโดร โฟบิกสตาร์ชร้อยละ 2
และสารเคลือบอิมัลชันระหว่างไฮโดร โฟบิกสตาร์ชและกรดไขมันสเตียริกความเข้มข้นร้อยละ 3 รวมทั้งการ
เคลือบสองชั้นด้วยไฮโดร โฟบิกสตาร์ชและไขผึ้งร้อยละ 1 ยังคงรักษาสมบัติในการด้านทานน้ำไว้ได้หลังผ่าน
การเก็บ 4 สัปดาห์ โดยมุมสัมผัสน้ำลดลงเพียงเล็กน้อย และสมบัติเชิงกลของชิ้นส่วนโครงสร้างแท่นรองรับ
สินค้ากระดาษลูกฟูกที่เคลือบด้วยสารเคลือบทั้ง 3 สูตรนี้ ยังคงมีสมบัติเชิงกลที่ดี โดยมีความต้านทานแรงกดไม่
แตกต่างจากชิ้นส่วนโครงสร้างแท่นรองรับสินค้ากระดาษลูกฟูกที่ไม่เคลือบ

ลายมือชื่อนิติ

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

Natthapicha Supprathanporn 2010: The Development of Water Resistance Corrugated Board Pallet. Master of Science (Packaging Technology), Major Field: Packaging Technology, Department of Packaging and Materials Technology. Thesis Advisor: Assistant Professor Tunyarut Jinkarn, Ph.D. 138 pages.

The main objective of this research was to develop water resistance corrugated board pallet by investigating on corrugated board material that was a main structure of a corrugated board pallet. This research focused on physical property, water resistance property and mechanical property of biopolymer coating corrugated board. There were 3 groups of biopolymer coatings observed in this research. The first group was single substance coating that was composed of hydrophobic starch coating, zein coating, stearic acid coating and beeswax coating. The concentration of all biopolymers was set at 1, 2, and 3 percent respectively. The second group was mixed biopolymer coating or emulsion coating that was composed of hydrophobic starch (3%, w/w) - stearic acid (1%, 2%, and 3%) (w/w) and hydrophobic starch (3%, w/w) – beeswax (1%, 2%, and 3%) (w/w). The third group was bi-layer coating that was composed of hydrophobic starch/zein, hydrophobic starch/ stearic acid and hydrophobic starch/beeswax. The results showed that water contact angle of corrugated boards coating with hydrophobic starch, stearic acid and beeswax were increased significantly ($p \leq 0.05$). The contact angles were increased in the range between 3 to 9 percent and this was differed from zein coating that the water contact angle was decreased. For emulsion coating group, corrugated board coating with hydrophobic starch (3%, w/w) and stearic acid coating (3%, w/w) was the only treatment that water contact angle increased significantly ($p \leq 0.05$) with the increment of water contact angle about 8%. For bi-layer coating, water contact angle of corrugated boards coated with hydrophobic starch/beeswax also increased significantly ($p \leq 0.05$) in the range of 2-4 percent. Further studies about mechanical properties of coated corrugated boards were found that, for most treatments, edge-wise resistance was decreased significantly, however, flat crush resistance remain unchanged. Water resistance results of corrugated boards coating with 2% (w/w) hydrophobic starch; emulsion of hydrophobic starch (3%, w/w) and stearic (3%, w/w); as well as bi-layer coating of hydrophobic starch (3%, w/w) and beeswax (1%, w/w) that were kept in warehouse condition of tropical region showed that all coated corrugated board still had good water resistance property throughout four weeks of storage time. Moreover, for these three types of coating, result on mechanical property of coated corrugated board pallet parts via a compression test was acceptable without any significant differences from uncoated corrugated pallet parts.

Student's signature

Thesis Advisor's signature

กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์รัชฎาภรณ์ จิฎกาญจน์ อาจารย์ที่ปรึกษา
วิทยานิพนธ์หลัก สำหรับการดูแลเอาใจใส่ ให้คำปรึกษาตลอดงานวิจัย และการตรวจแก้
วิทยานิพนธ์เล่มนี้ ขอกราบขอบพระคุณอาจารย์เลอพงศ์ จารุพันธ์ และอาจารย์รุ่งรอง ยกसान
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่ให้ความรู้ ความเอาใจใส่และคำแนะนำต่าง ๆ ในการดำเนินการ
วิจัย ตลอดจนสนับสนุนอุปกรณ์ และสารเคมีในการดำเนินการวิจัย และขอกราบขอบพระคุณ
อาจารย์ทุกท่านที่ให้ความรู้ ความเอาใจใส่ คำแนะนำ และกำลังใจ

ขอขอบพระคุณสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) และสำนักงานส่งเสริม
วิสาหกิจขนาดกลางและขนาดย่อม (สสว.) ที่สนับสนุนทุนในการวิจัย ขอขอบพระคุณ บริษัท
แมททีเรียล สเตนคาร์ด จำกัด สำหรับความอนุเคราะห์วัสดุดิบ และขอขอบพระคุณบริษัทเนชั่น
แนล สตาร์ชแอนเคมีคอล ประเทศไทย สำหรับความอนุเคราะห์สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัยนี้

ขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่ภาควิชาเทคโนโลยีการบรรจุและวัสดุทุกท่านที่ให้ความ
ช่วยเหลือ และติดต่อประสานงานกับหน่วยงานต่าง ๆ ขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่ควบคุมเครื่องมือ
ส่วนกลางที่ให้ความช่วยเหลือและอำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมือสำหรับทดสอบ
ขอขอบคุณที่ ๆ เพื่อน ๆ และน้อง ๆ ภาควิชาเทคโนโลยีการบรรจุและวัสดุ และภาควิชาพัฒนา
ผลิตภัณฑ์ โดยเฉพาะนางสาวสุชาดา ถาวรวิริยะนันท์ และนางสาวฉนกร หยกสหชาติ สำหรับ
ความช่วยเหลือ คำแนะนำ และกำลังใจ

และท้ายนี้ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อพัชรพงษ์ ทรัพย์ประทานพร คุณแม่รัชฎา
ล้วนเนตรเงิน คุณยายทองคำ ล้วนเนตรเงิน และคุณยายประไพ ยวงเงิน ที่คอยผลักดัน สนับสนุน
และให้กำลังใจตลอดมา ซึ่งทั้งหมดนี้เป็นแรงผลักดันช่วยให้ข้าพเจ้าทำงานจนสำเร็จลุล่วงไปได้
ด้วยดี

ณัฐพิชา ทรัพย์ประทานพร

ธันวาคม 2552

สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(6)
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	(11)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	4
การตรวจเอกสาร	5
อุปกรณ์และวิธีการ	35
อุปกรณ์	35
วิธีการ	37
ผลและวิจารณ์	46
สรุปและข้อเสนอแนะ	92
สรุป	92
ข้อเสนอแนะ	94
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	95
ภาคผนวก	104
ภาคผนวก ก วิธีการทดสอบ	105
ภาคผนวก ข ค่าทดสอบมูมสัมพัทธ์แบบต่อเนื่องของกระดาษหลังเคลือบ	116
ภาคผนวก ค ค่าทดสอบ DMA	123
ภาคผนวก ง มูมสัมพัทธ์น้ำของกระดาษหลังเคลือบภายหลังเก็บภายใต้การจำลอง สภาวะการเก็บในคลังสินค้าทั่วไป (25-32 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 68-74)	136
ประวัติการศึกษาและการทำงาน	138

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	ขนาดแท่นรองรับสินค้าที่จำแนกโดย ISO 6780	8
2	ขนาดของแท่นรองรับสินค้า 10 อันดับที่นิยมใช้ในอเมริกาเหนือในปี 2000	9
3	ขนาดของ EuroPallet	10
4	มาตรฐานลอนลูกฟูกของสหรัฐอเมริกา	16
5	สมบัติของแผ่นกระดาษลูกฟูก	47
6	สมบัติของชิ้นส่วนแท่นรองรับสินค้ากระดาษลูกฟูก	47
7	ความหนืดของสารเคลือบไฮโดรโฟบิกสตาร์ช สารเคลือบซิน สารเคลือบกรดไขมันสเตียริก และสารเคลือบไขผึ้งที่อุณหภูมิ 65 และ 75 องศาเซลเซียส	48
8	น้ำหนัก ความหนา และปริมาณความชื้นของแผ่น กระดาษลูกฟูกหลังเคลือบด้วยสารเคลือบไฮโดรโฟบิกสตาร์ช สารเคลือบซิน สารเคลือบกรดไขมันสเตียริก และสารเคลือบไขผึ้งที่ความเข้มข้นต่างๆ	53
9	ค่ามุมสัมผัสของน้ำของแผ่นกระดาษลูกฟูกหลังเคลือบด้วยสารเคลือบไฮโดรโฟบิกสตาร์ช สารเคลือบซิน สารเคลือบกรดไขมันสเตียริก และสารเคลือบไขผึ้งที่ความเข้มข้นต่างๆ	55
10	ค่าความต้านทานแรงกดแผ่นลูกฟูกตามแนวตั้งและค่าความต้านทานแรงกดแผ่นลูกฟูกในแนวระนาบของแผ่นกระดาษลูกฟูกหลังเคลือบด้วยสารเคลือบไฮโดรโฟบิกสตาร์ช สารเคลือบซิน สารเคลือบกรดไขมันสเตียริก และสารเคลือบไขผึ้งที่ความเข้มข้นต่างๆ	59
11	ความหนืดของสารเคลือบผสมระหว่างไฮโดรโฟบิกสตาร์ชและกรดไขมันสเตียริก และสารเคลือบผสมระหว่างไฮโดรโฟบิกสตาร์ชและไขผึ้งที่ไม่เติมและเติมอิมัลซิไฟเออร์ ณ อุณหภูมิ 65 และ 75 องศาเซลเซียส	64

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
12	น้ำหนัก ความหนา และปริมาณความชื้นของแผ่นกระดาษลูกฟูกหลังเคลือบด้วยสารเคลือบผสมระหว่างไฮโดรฟอบิกสตาร์ช และกรดไขมันสเตียริก และสารเคลือบผสมระหว่างไฮโดรฟอบิกสตาร์ชและไขมันที่มีการเติมอิมัลซิไฟเออร์	70
13	ค่ามุมสัมผัสของน้ำของแผ่นกระดาษลูกฟูกหลังเคลือบด้วยสารเคลือบผสมระหว่างไฮโดรฟอบิกสตาร์ชและกรดไขมันสเตียริก และสารเคลือบผสมระหว่างไฮโดรฟอบิกสตาร์ชและไขมันที่มีการเติมอิมัลซิไฟเออร์	72
14	ค่าความต้านทานแรงกดแผ่นลูกฟูกตามแนวตั้งและค่าความต้านทานแรงกดแผ่นลูกฟูกในแนวระนาบของแผ่นกระดาษลูกฟูกหลังเคลือบด้วยสารเคลือบผสมระหว่างไฮโดรฟอบิกสตาร์ชและกรดไขมันสเตียริก และสารเคลือบผสมระหว่างไฮโดรฟอบิกสตาร์ชและไขมันที่มีการเติมอิมัลซิไฟเออร์	75
15	น้ำหนัก ความหนา และปริมาณความชื้นของแผ่นกระดาษลูกฟูกที่เคลือบสองชั้นด้วยสารเคลือบไฮโดรฟอบิกสตาร์ช/ซิน ไฮโดรฟอบิกสตาร์ช/กรดไขมันสเตียริก และไฮโดรฟอบิกสตาร์ช/ไขมันที่ระดับความเข้มข้นต่างๆ	80
16	ค่ามุมสัมผัสของน้ำของแผ่นกระดาษลูกฟูกที่เคลือบสองชั้นด้วยสารเคลือบไฮโดรฟอบิกสตาร์ช/ซิน ไฮโดรฟอบิกสตาร์ช/กรดไขมันสเตียริก และไฮโดรฟอบิกสตาร์ช/ไขมันที่ระดับความเข้มข้นต่างๆ	81
17	ค่าความต้านทานแรงกดแผ่นลูกฟูกตามแนวตั้งและค่าความต้านทานแรงกดแผ่นลูกฟูกในแนวระนาบของแผ่นกระดาษลูกฟูกที่เคลือบสองชั้นด้วยสารเคลือบไฮโดรฟอบิกสตาร์ช/ซิน ไฮโดรฟอบิกสตาร์ช/กรดไขมันสเตียริก และไฮโดรฟอบิกสตาร์ช/ไขมันที่ระดับความเข้มข้นต่างๆ	85
18	สมบัติของชิ้นส่วนแทนรองรับสินค้ากระดาษลูกฟูกก่อนและหลังเคลือบ	91

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่	หน้า
ข1 มุมสัมผัสของหยดน้ำเมื่อเวลาผ่านไปของกระดาษหลังเคลือบด้วยสารเคลือบไฮโดรโฟบิกสตาร์ช สารเคลือบซิน สารเคลือบกรดไขมันสเตียริก และสารเคลือบไขผึ้ง ที่ความเข้มข้นร้อยละ 1 2 และ 3	117
ข2 มุมสัมผัสของหยดน้ำเมื่อเวลาผ่านไปของกระดาษหลังเคลือบด้วยสารเคลือบผสมระหว่างไฮโดรโฟบิกสตาร์ชและกรดไขมันสเตียริกที่เติม Tween 60 และสารเคลือบผสมระหว่างไฮโดรโฟบิกสตาร์ชและไขผึ้งที่เติม Tween 60 ที่ความเข้มข้นร้อยละ 1 2 และ 3	119
ข3 มุมสัมผัสของหยดน้ำเมื่อเวลาผ่านไปของกระดาษหลังเคลือบ 2 ชั้นด้วยสารเคลือบไฮโดรโฟบิกสตาร์ช สารเคลือบซิน สารเคลือบกรดไขมันสเตียริก และสารเคลือบไขผึ้ง ที่ความเข้มข้นร้อยละ 1 2 และ 3	121
ค1 ค่า storage modulus ของแผ่นกระดาษลูกฟูกหลังเคลือบด้วยสารเคลือบไฮโดรโฟบิกสตาร์ช สารเคลือบซิน สารเคลือบกรดไขมันสเตียริก และสารเคลือบไขผึ้งที่ความเข้มข้นต่าง ๆ ที่ dynamic sweep ระหว่าง 0.75-8.00 นิวตัน	124
ค2 ค่า loss modulus ของแผ่นกระดาษลูกฟูกหลังเคลือบด้วยสารเคลือบไฮโดรโฟบิกสตาร์ช สารเคลือบซิน สารเคลือบกรดไขมันสเตียริก และสารเคลือบไขผึ้งที่ความเข้มข้นต่าง ๆ ที่ dynamic sweep ระหว่าง 0.75-8.00 นิวตัน	125
ค3 ค่า $\tan \delta$ ของแผ่นกระดาษลูกฟูกหลังเคลือบด้วยสารเคลือบไฮโดรโฟบิกสตาร์ช สารเคลือบซิน สารเคลือบกรดไขมันสเตียริก และสารเคลือบไขผึ้งที่ความเข้มข้นต่าง ๆ ที่ dynamic sweep ระหว่าง 0.75-8.00 นิวตัน	126
ค4 ค่า storage modulus ของแผ่นกระดาษลูกฟูกหลังเคลือบด้วยสารเคลือบผสมระหว่างไฮโดรโฟบิกสตาร์ชและกรดไขมันสเตียริก และสารเคลือบผสมระหว่างไฮโดรโฟบิกสตาร์ชและไขผึ้งที่เติมอิมัลไฟเออร์ที่ dynamic sweep ระหว่าง 0.75-8.00 นิวตัน	128

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่	หน้า	
ค5	ค่า loss modulus ของแผ่นกระดาษลูกฟูกหลังเคลือบด้วยสารเคลือบผสมระหว่างไฮโดรโฟบิกสตาร์ชและกรดไขมันสเตียริก และสารเคลือบผสมระหว่างไฮโดรโฟบิกสตาร์ชและไขมันที่เติมอิมัลไฟเออร์ที่ dynamic sweep ระหว่าง 0.75-8.00 นิวตัน	129
ค6	ค่า storage modulus ของแผ่นกระดาษลูกฟูกหลังเคลือบสองชั้นด้วยสารเคลือบไฮโดรโฟบิกสตาร์ช/ซิน ไฮโดรโฟบิกสตาร์ช/กรดไขมันสเตียริก และไฮโดรโฟบิก สตาร์ช/ไขมันที่ระดับความเข้มข้นต่าง ๆ ที่ dynamic sweep ระหว่าง 0.75-8.00 นิวตัน	130
ค7	ค่า $\tan \delta$ ของแผ่นกระดาษลูกฟูกหลังเคลือบด้วยสารเคลือบผสมระหว่างไฮโดรโฟบิกสตาร์ชและกรดไขมันสเตียริก และสารเคลือบผสมระหว่างไฮโดรโฟบิกสตาร์ชและไขมันที่เติมอิมัลไฟเออร์ที่ dynamic sweep ระหว่าง 0.75-8.00 นิวตัน	132
ค8	ค่า loss modulus ของแผ่นกระดาษลูกฟูกหลังเคลือบสองชั้นด้วยสารเคลือบไฮโดรโฟบิกสตาร์ช/ซิน ไฮโดรโฟบิกสตาร์ช/กรดไขมันสเตียริก และไฮโดรโฟบิกสตาร์ช/ไขมันที่ระดับความเข้มข้นต่าง ๆ ที่ dynamic sweep ระหว่าง 0.75-8.00 นิวตัน	133
ค9	ค่า $\tan \delta$ ของแผ่นกระดาษลูกฟูกหลังเคลือบสองชั้นด้วยสารเคลือบไฮโดรโฟบิกสตาร์ช/ซิน ไฮโดรโฟบิกสตาร์ช/กรดไขมันสเตียริก และไฮโดรโฟบิกสตาร์ช/ไขมันที่ระดับความเข้มข้นต่าง ๆ ที่ dynamic sweep ระหว่าง 0.75-8.00 นิวตัน	134
ง1	มุมสัมผัสน้ำของกระดาษเคลือบด้วยสารเคลือบไฮโดรโฟบิกสตาร์ช สารเคลือบซิน สารเคลือบกรดไขมันสเตียริก และสารเคลือบไขมัน ที่ความเข้มข้นร้อยละ 1 2 และ 3 ภายหลังเก็บภายใต้การจำลองสภาวะการเก็บในสภาวะของ คลังสินค้าทั่วไป (25-32 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 68-74)	137

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	ส่วนประกอบหลักของแท่นรองรับสินค้าไม้แบบ stringe	6
2	ส่วนประกอบหลักของแท่นรองรับสินค้าไม้แบบ block	7
3	EuroPallet	10
4	แท่นรองรับสินค้าไม้	11
5	แท่นรองรับสินค้าพลาสติก	12
6	PennyPincher Pallet™	14
7	Loadek Pallet	14
8	SureStacker™ corrugated pallet	15
9	โครงสร้างและแนวหลักของกระดาศลูกฟูก	16
10	ประเภทของกระดาศลูกฟูก	18
11	การทดสอบความต้านทานแรงกดแผ่นลูกฟูกตามแนวตั้ง	20
12	การทดสอบความต้านทานแรงกดแผ่นลูกฟูกในแนวระนาบ	20
13	ชุดทดสอบ Cobb test	21
14	มุมที่หยดน้ำทำกับกระดาศ (ก) ไม่มีการดูดซึม (ข) มีการดูดซึม	22
15	เครื่องวัดมุมสัมผัส goniometer	22
16	ประเภทของพอลิเมอร์ชีวภาพ	24
17	โครงสร้างโมเลกุลของ OSA starch	29
18	ลักษณะทางกายภาพของซีน	30
19	โครงสร้างโมเลกุลของกรดไขมันสเตียริก	31
20	ลักษณะของกรดไขมันสเตียริก	31
21	โครงสร้างโมเลกุลของสารที่เป็นองค์ประกอบของไขผึ้ง	32
22	ชิ้นส่วนโครงสร้างแท่นรองรับสินค้าลูกฟูกบริเวณส่วนขาของแท่นรองรับ สินค้า	35
23	ตัวอย่างแผ่นกระดาศลูกฟูก (ก) ด้านหน้า (ข) ด้านหลัง	40
24	ชุดอุปกรณ์เคลื่อนแผ่นกระดาศลูกฟูก	40
25	ชิ้นส่วนแท่นรองรับสินค้ากระดาศลูกฟูก	46

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
26	ลักษณะสารเคลือบไฮโดรฟอบิกสตาร์ช ณ เวลา 0 นาทีและ 6 ชั่วโมงหลังการเตรียม (ก) H1; ไฮโดรฟอบิกสตาร์ชร้อยละ 1 (ข) H2; ไฮโดรฟอบิกสตาร์ชร้อยละ 2 (ค) H3; ไฮโดรฟอบิกสตาร์ชร้อยละ 3	50
27	ลักษณะสารเคลือบซิน ณ เวลา 0 นาทีและ 6 ชั่วโมงหลังการเตรียม (ก) Z1; ซินร้อยละ 1 (ข) Z2; ซินร้อยละ 2 (ค) Z3; ซินร้อยละ 3	50
28	ลักษณะสารเคลือบกรดไขมันสเตียริก ณ เวลา 0 นาทีและ 30 นาทีหลังการเตรียม (ก) S1; กรดไขมันสเตียริกร้อยละ 1 (ข) S2; กรดไขมันสเตียริกร้อยละ 2 (ค) S3; กรดไขมันสเตียริกร้อยละ 3	51
29	ลักษณะสารเคลือบไขผึ้ง ณ เวลา 0 นาทีและ 15 นาทีหลังการเตรียม (ก) B1; ไขผึ้งร้อยละ 1 (ข) B2; ไขผึ้งร้อยละ 2 (ค) B3; ไขผึ้งร้อยละ 3	51
30	ลักษณะแผ่นกระดาษลูกฟูกก่อนและหลังเคลือบ (ก) C; กระดาษที่ไม่ผ่านการเคลือบ (ข) H; เคลือบไฮโดรฟอบิกสตาร์ช (ค) Z; เคลือบซิน (ง) S; เคลือบกรดไขมันสเตียริก และ (จ) B; เคลือบไขผึ้ง	52
31	การลดลงของค่ามุมสัมผัสของหยดน้ำเมื่อเวลาผ่านไปสำหรับกระดาษหลังเคลือบ	57
32	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง storage modulus และ dynamic sweep ของแผ่นกระดาษลูกฟูกหลังเคลือบไฮโดรฟอบิกสตาร์ชร้อยละ 1 2 และ 3	61
33	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง storage modulus และ dynamic sweep ของแผ่นกระดาษลูกฟูกหลังเคลือบซินร้อยละ 1 2 และ 3	61
34	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง storage modulus และ dynamic sweep ของแผ่นกระดาษลูกฟูกหลังเคลือบกรดไขมันสเตียริกร้อยละ 1 2 และ 3	62
35	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง storage modulus และ dynamic sweep ของแผ่นกระดาษลูกฟูกหลังเคลือบไขผึ้งร้อยละ 1 2 และ 3	62

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
36	ลักษณะสารเคลือบผสมระหว่างไฮโดรโฟบิกสตาร์ชร้อยละ 3 และกรดไขมันสเตียริกความเข้มข้นต่างๆ ณ เวลา 0 นาทีและ 15 นาทีหลังการเตรียม (ก) HS1; ไฮโดรโฟบิกสตาร์ช-กรดไขมันสเตียริกร้อยละ 1 (ข) HS2; ไฮโดรโฟบิกสตาร์ช-กรดไขมันสเตียริกร้อยละ 2 และ (ค) HS3; ไฮโดรโฟบิกสตาร์ช-กรดไขมันสเตียริกร้อยละ 3	66
37	ลักษณะสารเคลือบผสมระหว่างไฮโดรโฟบิกสตาร์ชร้อยละ 3 และกรดไขมันสเตียริกความเข้มข้นต่างๆ ที่มีการเติม Tween 60 ณ เวลา 0 นาทีและ 15 นาทีหลังการเตรียม (ก) HS1+E; ไฮโดรโฟบิกสตาร์ช-กรดไขมันสเตียริกร้อยละ 1 + Tween 60 (ข) HS2+E; ไฮโดรโฟบิกสตาร์ช-กรดไขมันสเตียริกร้อยละ 2 + Tween 60 และ (ค) HS3+E; ไฮโดรโฟบิกสตาร์ช-กรดไขมันสเตียริกร้อยละ 3 + Tween 60	66
38	ลักษณะสารเคลือบผสมระหว่างไฮโดรโฟบิกสตาร์ชร้อยละ 3 และไขผึ้งความเข้มข้นต่างๆ ณ เวลา 0 นาทีและ 10 นาทีหลังการเตรียม (ก) HB1; ไฮโดรโฟบิกสตาร์ช-ไขผึ้งร้อยละ 1 (ข) HB2; ไฮโดรโฟบิกสตาร์ช-ไขผึ้งร้อยละ 2 และ (ค) HB3; ไฮโดรโฟบิกสตาร์ช-ไขผึ้งร้อยละ 3	67
39	ลักษณะสารเคลือบผสมระหว่างไฮโดรโฟบิกสตาร์ชร้อยละ 3 และไขผึ้งความเข้มข้นต่าง ๆ ที่มีการเติม Tween 60 ณ เวลา 0 นาทีและ 10 นาทีหลังการเตรียม (ก) HB1+E; ไฮโดรโฟบิกสตาร์ช-ไขผึ้งร้อยละ 1 + Tween 60 (ข) HB2+E; ไฮโดรโฟบิกสตาร์ช-ไขผึ้งร้อยละ 2 + Tween 60 และ (ค) HB3+E; ไฮโดรโฟบิกสตาร์ช-ไขผึ้งร้อยละ 3 + Tween 60	67
40	ลักษณะแผ่นกระดาษลูกฟูกก่อนและหลังเคลือบ (ก) C; กระดาษที่ไม่ผ่านการเคลือบ (ข) HS+E; เคลือบด้วยสารผสมระหว่างไฮโดรโฟบิกสตาร์ชและกรดไขมันสเตียริกที่มีการเติมอิมัลซิไฟเออร์ (ค) HB+E; เคลือบด้วยสารผสมระหว่างไฮโดรโฟบิกสตาร์ชและไขผึ้งที่มีการเติมอิมัลซิไฟเออร์	69

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
41	การลดลงของค่ามุมสัมผัสของหยดน้ำมันเมื่อเวลาผ่านไปสำหรับกระดาษหลังเคลือบ	73
42	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง storage modulus และ dynamic sweep ของแผ่นกระดาษลูกฟูกหลังเคลือบสารผสมระหว่างไฮโดรโฟบิกสตาร์ชและกรดไขมันสเตียริกร้อยละ 1 2 และ 3	76
43	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง storage modulus และ dynamic sweep ของแผ่นกระดาษลูกฟูกหลังเคลือบสารผสมระหว่างไฮโดรโฟบิกสตาร์ชและไขมันร้อยละ 1 2 และ 3	77
44	ลักษณะแผ่นกระดาษลูกฟูกก่อนและหลังเคลือบ (ก) C; กระดาษที่ไม่ผ่านการเคลือบ (ข) H/Z; เคลือบสองชั้นด้วยไฮโดรโฟบิกสตาร์ช/ซิน (ค) H/S; เคลือบไฮโดรโฟบิกสตาร์ช/กรดไขมันสเตียริก และ (ง) H/B; เคลือบไฮโดรโฟบิกสตาร์ช/ไขมัน	79
45	การลดลงของค่ามุมสัมผัสของหยดน้ำมันเมื่อเวลาผ่านไปสำหรับกระดาษหลังเคลือบ	83
46	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง storage modulus และ dynamic sweep ของแผ่นกระดาษลูกฟูกหลังเคลือบสองชั้นด้วยไฮโดรโฟบิกสตาร์ชและซินร้อยละ 1 2 และ 3	87
47	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง storage modulus และ dynamic sweep ของแผ่นกระดาษลูกฟูกหลังเคลือบสองชั้นด้วยไฮโดรโฟบิกสตาร์ชและกรดไขมันสเตียริกร้อยละ 1 2 และ 3	87
48	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง storage modulus และ dynamic sweep ของแผ่นกระดาษลูกฟูกหลังเคลือบสองชั้นด้วยไฮโดรโฟบิกสตาร์ชและไขมันร้อยละ 1 2 และ 3	88

สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่

หน้า

- 49 มุมสัมผัสน้ำของแผ่นกระดาษลูกฟูกก่อนและหลังเคลือบด้วยสารเคลือบไฮโดรโฟบิกสตาร์ชร้อยละ 2 สารเคลือบผสมระหว่างไฮโดรโฟบิกสตาร์ชและกรดไขมันสเตียริกร้อยละ 3 และการเคลือบสองชั้นด้วยสารเคลือบไฮโดรโฟบิกสตาร์ช/ไขมัน ภายหลังจากได้การจำลองสภาวะการเก็บในสภาวะของคลังสินค้าทั่วไป (25-32 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 68-74)

89

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

BC	=	กระดาษลูกฟูกชนิดลอน BC
CA	=	กระดาษกราฟท์ เกรด CA
KA	=	กระดาษกราฟท์ เกรด KA
DMA	=	dynamic mechanical analysis
E'	=	storage modulus
E''	=	loss modulus
MPa	=	MegaPascal
N	=	Newton
RH	=	relative humidity
rpm	=	round per minute
% (w/w)	=	percent weight by weight

การพัฒนาแท่นรองรับสินค้ากระดาษลูกฟูกต้านทานน้ำ

The Development of Water Resistance Corrugated Board Pallet

คำนำ

ในปัจจุบันทั่วโลกมีการใช้แท่นรองรับสินค้าจากไม้ (wooden pallet) ไม่ต่ำกว่า 30,000,000 ชิ้นในแต่ละปี คิดเป็นมูลค่าถึง 1.9 พันล้านเหรียญสหรัฐ ซึ่งเป็นสาเหตุให้ต้นไม้ถูกตัดไม่ต่ำกว่า 200 ล้านต้นต่อปี (Forward Pallet Pte Ltd., USA, 2009) ส่งผลให้เกิดภาวะโลกร้อนในปัจจุบัน นอกจากนี้พบว่าแท่นรองรับสินค้าจากไม้หลังใช้งานจำนวนมากถูกทิ้งปะปนในกองขยะ เป็นสาเหตุของการเกิดการเจริญเติบโตของแมลง ซึ่งหลายประเทศรวมทั้งสหรัฐอเมริกาและประเทศในยุโรป พบว่าพืชพันธุ์ไม้ต่าง ๆ ได้ถูกแมลงและสิ่งรบกวนที่มาจากแถบอื่นทำลาย โดยเฉพาะอย่างยิ่งแมลงและสิ่งรบกวนที่ติดมากับภาชนะบรรจุประเภทไม้ในระหว่างการขนส่งทางเรือและทางอากาศ รัฐบาลของประเทศเหล่านี้ต้องเสียค่าใช้จ่ายเป็นจำนวนมากในการกำจัดแมลงต่าง ๆ เช่น ในปี ค.ศ. 2003 ในรัฐนิวยอร์ก ประเทศสหรัฐอเมริกา ต้นไม้ถูกทำลายถึง 3,500 ต้น จากแมลงชนิด Asian Long Horn Beetle (Forward Pallet Pte Ltd., USA, 2009)

ปัญหาหลักประการหนึ่งพบว่า ผู้ผลิตแท่นรองรับสินค้าจากไม้ต้องแบกรับภาระในการเสียค่าใช้จ่ายและเสียเวลาในการอบให้ความร้อนกับแท่นรองรับสินค้าจากไม้เพื่อป้องกันเชื้อรา และแมลง การอบและสารเคมีที่ใช้ทำให้อายุการใช้งานของแท่นรองรับสินค้าจากไม้ลดลง ผู้ขนส่งและผู้ใช้แท่นรองรับสินค้าเองก็ประสบปัญหาไม่สามารถแยกความแตกต่างของแท่นรองรับสินค้าที่ได้ผ่านและไม่ผ่านกระบวนการอบและกระบวนการทางเคมี อีกทั้งการตรวจสอบที่เข้มงวดในการส่งออก ทำให้ผู้ขนส่งต้องเสียค่าใช้จ่ายในการตรวจสอบในขั้นตอนการนำเข้าสินค้าและอาจเป็นผลให้เกิดการยกเลิกการนำเข้าสินค้านั้นได้ ในประเทศไทยเองเช่นในช่วงไตรมาสแรกของปี พ.ศ. 2550 ผู้ผลิตและส่งออกอาหารจำนวนหนึ่งต้องประสบปัญหาในการดิถีกลับสินค้าอาหารสำเร็จรูปและอาหารแช่แข็งจากประเทศญี่ปุ่น เนื่องจากพบว่ามีสารปนเปื้อนของแมลงซึ่งมาจากการขนส่งที่มีไม้เป็นองค์ประกอบ (เดลินิวส์, 2550)

จากการตรวจสอบพบว่า แท่นรองรับสินค้าจากไม้โดยทั่วไปที่มีขนาด 48 x 40 นิ้ว มีน้ำหนักเฉลี่ยตั้งแต่ 18 ถึง 30 กิโลกรัม ซึ่งจะส่งผลต่อการเพิ่มค่าใช้จ่ายในการขนส่งและพบว่าการใช้แท่นรองรับสินค้าจากไม้นั้น อาจต้องเสียค่าใช้จ่ายค่อนข้างสูงในการกำจัดทิ้ง นอกจากนี้ยังต้องใช้ตะปูหรือนอตในการเชื่อมต่อโครงสร้าง ซึ่งอาจก่อให้เกิดปัญหาการบาดเจ็บในระหว่างการผลิตหรือระหว่างการใช้งาน รวมทั้งอาจก่อให้เกิดความเสียหายกับสินค้าได้ นอกจากนี้ ในระหว่างกระบวนการผลิตแท่นรองรับสินค้าจากไม้ อาจต้องมีการใช้สารเคมีเพื่อปรับสภาพของไม้ ซึ่งสารเคมีเหล่านั้นมีโอกาสที่จะปนเปื้อนไปสู่ผลิตภัณฑ์ เช่น อาหารหรือผลิตภัณฑ์ทางการแพทย์ โดยพบว่าในบางพื้นที่ของประเทศสหรัฐอเมริกาและยุโรปมีการสั่งห้ามการใช้แท่นรองรับสินค้าจากไม้ในโรงงานอาหาร ทั้งนี้เพื่อความปลอดภัยและสุขอนามัย

จากปัญหาดังกล่าวทำให้ผู้ขนส่งสินค้าส่วนหนึ่งหันมาใช้แท่นรองรับสินค้าจากพลาสติกและกระดาษ แท่นรองรับสินค้าพลาสติกนั้นมีราคาแพงและไม่เป็นที่นิยมในการขนส่งสินค้าแบบทางเดียว (one way) เป็นสาเหตุให้แท่นรองรับสินค้าจากกระดาษได้รับความนิยม เนื่องจากมีต้นทุนที่น้อยกว่ามากและไม่ต้องประสบกับปัญหาในการตรวจสอบที่เข้มงวดในการนำเข้าหรือส่งออกสินค้าสำหรับประเทศไทยในปัจจุบันแท่นรองรับสินค้ากระดาษนิยมผลิตจากกระดาษลูกฟูก ซึ่งสามารถออกแบบให้มีความแข็งแรงใกล้เคียงกับแท่นรองรับสินค้าจากไม้ เช่น สามารถรับน้ำหนักได้ถึง 5 ตัน และสามารถใช้ได้กับหลายผลิตภัณฑ์ อย่างไรก็ตาม กระดาษเป็นวัสดุที่มีข้อจำกัดบางประการ เช่น ความแข็งแรงลดลงเมื่อสัมผัสกับน้ำหรือเมื่ออยู่ในสถานะที่มีความชื้นสูง เป็นสาเหตุให้การใช้แท่นรองรับสินค้าจากกระดาษลูกฟูกยังเพิ่มสูงขึ้นไม่มากนัก วิธีการหนึ่งที่ใช้ในการแก้ปัญหาสำหรับกระดาษทางการบรรจุโดยทั่วไปในปัจจุบันคือการเคลือบกระดาษด้วยพลาสติก เช่น polyethylene (PE), polypropylene (PP), polyethylene terephthalate (PET), poly vinyl chloride (PVC) และ polystyrene (PS) ซึ่งวัสดุดังกล่าวไม่สามารถย่อยสลายได้ในธรรมชาติ ก่อให้เกิดความยุ่งยากในการแยกส่วนของพลาสติกออกจากกระดาษในกระบวนการหมุนเวียนใช้ใหม่ และหากไม่สามารถแยกออกได้ในส่วนชิ้นของพลาสติกนั้นอาจต้องใช้เวลานานในการย่อยสลายอย่างสมบูรณ์ ทำให้เกิดมลภาวะต่อสิ่งแวดล้อม อีกทั้งยังต้องเพิ่มค่าใช้จ่ายในการกำจัดภายหลังการใช้งาน นอกจากนี้พลาสติกที่ใช้เคลือบอาจก่อให้เกิดอันตรายต่อผู้บริโภคได้ หากเจือปนไปกับอาหาร ดังนั้นการนำวัสดุหรือพอลิเมอร์ชีวภาพมาเคลือบกระดาษอาจเป็นอีกแนวทางหนึ่งที่มีศักยภาพในการพัฒนาแท่นรองรับสินค้าจากกระดาษลูกฟูกที่ย่อยสลายได้ มีต้นทุนต่ำ และไม่เป็นอันตรายต่อผู้บริโภค

ในทางปฏิบัติการเคลือบหรือการลามิเนตกระดาษด้วยพลาสติกก่อนการผลิตเป็นแผ่นลูกฟูกนั้นทำให้ประสิทธิภาพการติดกาวของแผ่นลูกกลดลงหรือประสบกับปัญหาการลอ่อนหลุด หรือไม่ สามารถติดกาวได้ ทั้งในระหว่างการผลิตแผ่นลูกฟูกและในระหว่างการผลิตแผ่นรองรับสินค้ากระดาษ การจุ่มแผ่นรองรับสินค้าที่ผลิตแล้ว การทาสารเคลือบด้วยแปรง รวมทั้งการสเปรย์สารเคลือบพอลิเมอร์ชีวภาพที่สามารถต้านทานน้ำร่วมกับกระบวนการอบในสภาวะที่เหมาะสมจะช่วยให้เพิ่มความแข็งแรงและเพิ่ม ความสามารถในการต้านทานน้ำให้กับแผ่นรองรับสินค้าจากกระดาษลูกฟูกได้



วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาสมบัติทางกายภาพ สมบัติการต้านทานน้ำ และสมบัติเชิงกลของแผ่นกระดาษลูกฟูกหลังเคลือบด้วยสารเคลือบพอลิเมอร์ชีวภาพ ได้แก่ ไฮโดรโฟบิกสตาร์ช สารเคลือบซิน สารเคลือบกรดไขมันสเตียริก และสารเคลือบไขผึ้ง
2. เพื่อศึกษาสมบัติทางกายภาพ สมบัติการต้านทานน้ำ และสมบัติเชิงกลของแผ่นกระดาษลูกฟูกหลังเคลือบด้วยสารเคลือบผสมของพอลิเมอร์ชีวภาพ ได้แก่ ไฮโดรโฟบิกสตาร์ชร่วมกับกรดไขมันสเตียริก และสารเคลือบผสมระหว่างไฮโดรโฟบิกสตาร์ชร่วมกับไขผึ้ง
3. เพื่อศึกษาสมบัติทางกายภาพ สมบัติการต้านทานน้ำ และสมบัติเชิงกลของแผ่นกระดาษลูกฟูกหลังเคลือบสองชั้นด้วยไฮโดรโฟบิกสตาร์ชซึ่งเป็นสารเคลือบชั้นที่ 1 ร่วมกับ ซิน กรดไขมันสเตียริก และไขผึ้ง ซึ่งเป็นสารเคลือบชั้นที่ 2
4. เพื่อศึกษาสมบัติการต้านทานน้ำของแผ่นกระดาษลูกฟูกหลังเคลือบพอลิเมอร์ชีวภาพที่เก็บภายใต้การเก็บจริงในสภาวะของคลังสินค้าในเขตร้อนชื้นทั่วไป
5. เพื่อศึกษาสมบัติเชิงกลของชิ้นส่วนแท่นรองรับสินค้ากระดาษลูกฟูกหลังเคลือบด้วยพอลิเมอร์ชีวภาพ

การตรวจเอกสาร

แท่นรองรับสินค้า

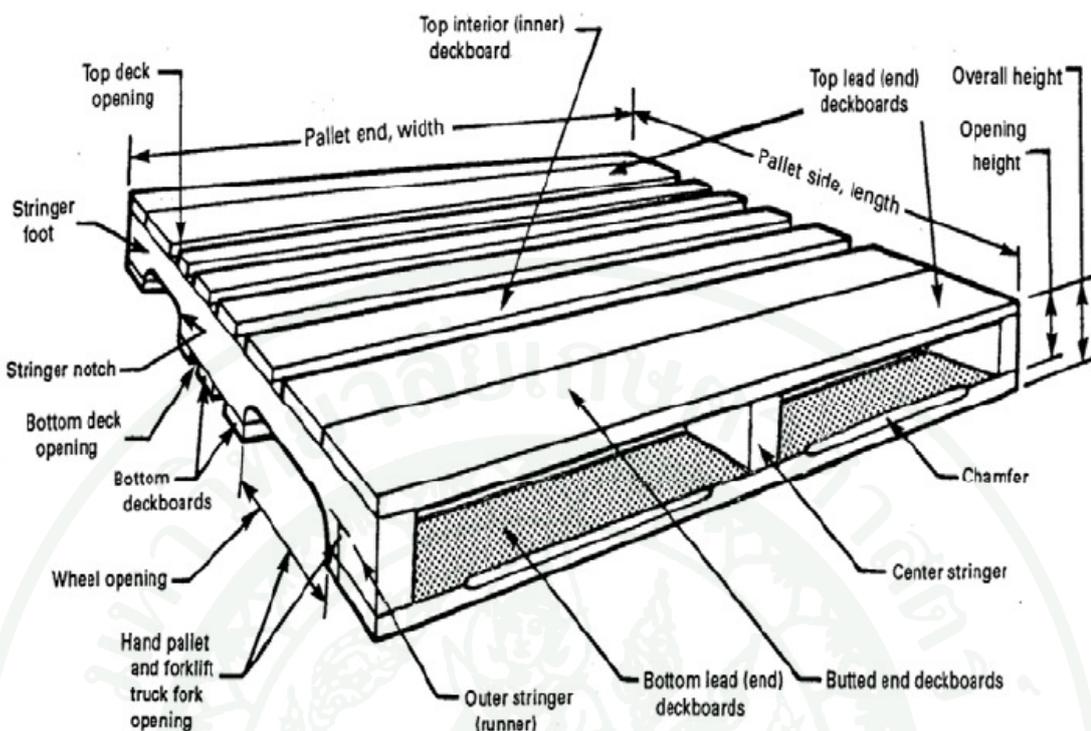
แท่นรองรับสินค้า (pallet) เป็นโครงสร้างลักษณะแบนเพื่อช่วยให้สินค้าตั้งอยู่อย่างมั่นคงขณะมีการเคลื่อนย้ายด้วยรถยก (forklift) หรือแม่แรงยกแท่นรองรับสินค้า แท่นรองรับสินค้าเป็นการรวมหน่วยสินค้าแบบหนึ่ง โดยวางสินค้าลงบนแท่นรองรับสินค้า และเพิ่มความปลอดภัยให้กับสินค้าโดยการพันด้วยสายรัดหรือฟิล์มพลาสติกยึด (wikipedia, 2009)

ระบบการขนส่งสินค้าเป็นตัวกระตุ้นให้เกิดการใช้แท่นรองรับสินค้า เนื่องจากความต้องการบรรจุภัณฑ์ที่สะอาด สามารถเคลื่อนย้ายได้ง่าย ซึ่งแท่นรองรับสินค้านี้ทำให้สามารถเคลื่อนย้ายบรรจุภัณฑ์ได้ง่าย เมื่อใช้รถยกหรือแม่แรงยกโดยใช้แรงเพียงเล็กน้อย แท่นรองรับสินค้าส่วนใหญ่สามารถบรรจุสินค้า 1000 ปอนด์ได้ (ประมาณ 2000 กิโลกรัม) ปัจจุบันมีการผลิตแท่นรองรับสินค้ามากกว่า 500 ล้านชิ้นต่อปี ซึ่งสหรัฐอเมริกาเป็นประเทศหนึ่งที่ใช้แท่นรองรับสินค้ามากถึงประมาณ 2 พันล้านชิ้น (wikipedia, 2009)

1. โครงสร้างของแท่นรองรับสินค้า

แท่นรองรับสินค้ามีโครงสร้างหลายแบบและหลายขนาด แต่ได้มีการแบ่งประเภทของแท่นรองรับสินค้าตามโครงสร้างเป็น 2 แบบหลัก ๆ คือ (Clarke, 2004)

1.1 Stringer pallet มีโครงสร้างหลักเป็นแผ่นไม้ 3 ชั้นที่เรียงขนานกันเป็นส่วนฐาน หรือที่เรียกว่า stringer และมีแผ่นไม้กระดานเรียงปิดอยู่ด้านบนบน stringer เพื่อเป็นโครงสร้างส่วนที่รองรับสินค้า stringer pallet หรือเรียกว่า แท่นรองรับสินค้า 2 ทาง (two-way pallet) เนื่องจากแม่แรงยกแท่นรองรับสินค้าสามารถเข้ายกได้ 2 ทิศทาง แทนที่จะเข้ายกได้ 4 ทิศทางเหมือนรถยก

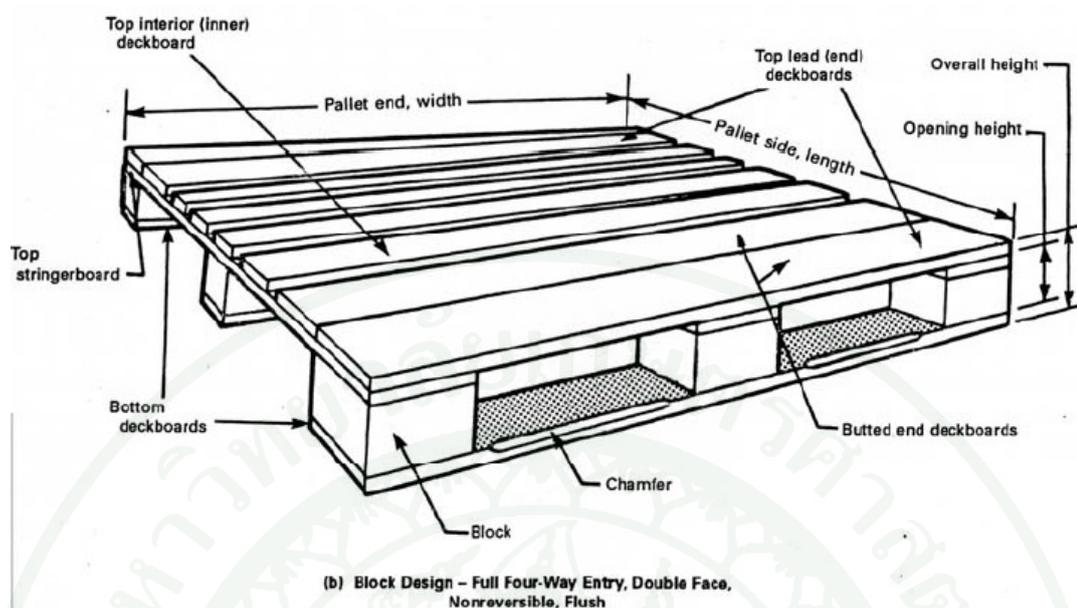


(a) Stringer Design - Partial Four-Way Entry, Double Face, Nonreversible, Flush

ภาพที่ 1 ส่วนประกอบหลักของแท่นรองรับสินค้าไม้แบบ stringer

ที่มา: Clarke (2004)

1.2 Block pallet ประกอบด้วย stringer เพื่อให้เคลื่อนย้ายได้อย่างมีประสิทธิภาพและสะดวกขึ้น block pallet หรือเรียกว่า แท่นรองรับสินค้า 4 ทาง (four-way pallet) เพราะแม่แรงยกแท่นรองรับสินค้าสามารถเข้ายกได้ในทุกทิศทาง โดยทั่วไปแล้ว block pallet จะมีความแข็งแรงมากกว่า stringer pallet



ภาพที่ 2 ส่วนประกอบหลักของแท่นรองรับสินค้าไม้แบบ block

ที่มา: Clarke (2004)

2. การระบุขนาดของแท่นรองรับสินค้า

ขนาดของแท่นรองรับสินค้าระบุจากความยาวของ stringer แล้วตามด้วยความยาวของ deckboard ดังนั้นแท่นรองรับสินค้าที่มี stringer ยาว 48 นิ้ว จึงเรียกว่าแท่นรองรับสินค้าขนาด 48 x 40 นิ้ว ไม่ใช่ขนาด 40 x 48 นิ้ว ส่วนขนาดของแท่นรองรับสินค้าแบบ block ระบุจากความยาวของ top stringerboard แล้วตามด้วยความยาวของ deckboard (Clarke, 2004)

3. การจัดมาตรฐานของแท่นรองรับสินค้าโดยขนาด

ปัจจุบันยังไม่มีมาตรฐานสำหรับขนาดของแท่นรองรับสินค้าที่ได้รับการยอมรับให้ใช้ทั่วโลก บริษัทและองค์กรในภูมิภาคต่าง ๆ ของโลกจึงใช้แท่นรองรับสินค้าที่มีขนาดแตกต่างกัน แต่ก็มีมาตรฐานขนาดของแท่นรองรับสินค้าที่สำคัญและใช้กันอย่างกว้างขวางในแต่ละภูมิภาค (wikipedia, 2009)

3.1 การจำแนกแท่นรองรับสินค้าตามระบบ ISO (ISO pallets)

International Organization for Standardization (ISO) ได้จำแนกแท่นรองรับสินค้าที่ใช้ระหว่างประเทศออกเป็น 6 ขนาด แสดงดังตารางที่ 1 พร้อมทั้งภูมิภาคที่ใช้

ตารางที่ 1 ขนาดแท่นรองรับสินค้าที่จำแนกโดย ISO 6780

ขนาด (มม)	ขนาด (นิ้ว)	ภูมิภาค
1200 x 1000	47.24 x 39.37	ยุโรป และเอเชีย
1200 x 800	47.24 x 31.50	ยุโรป
1219 x 1016	48.00 x 40.00	อเมริกาเหนือ
1140 x 1140	44.88 x 44.88	ออสเตรเลีย
1100 x 1100	43.30 x 43.30	เอเชีย
1067 x 1067	42.00 x 42.00	อเมริกาเหนือ ยุโรป และเอเชีย

ที่มา: Clarke (2004)

3.2 แท่นรองรับสินค้าในอเมริกาเหนือ

ปัจจุบันในอเมริกาเหนือมีการผลิตแท่นรองรับสินค้าใหม่ประมาณ 450 ล้านชิ้นต่อปี ขนาดของแท่นรองรับสินค้าที่ใช้กันมากในอุตสาหกรรมของอเมริกาเหนือ 10 ลำดับแรกแสดงดังตารางที่ 2 โดยแท่นรองรับสินค้าที่ใช้อย่างกว้างขวางที่สุดคือ Grocery Manufacturers' Association (GMA) pallet หรือ grocery pallet ซึ่งคิดเป็นร้อยละ 30 ของแท่นรองรับสินค้าไม้ที่ผลิตใหม่ทั้งหมด ในสหรัฐอเมริกา และ ISO ได้รับรอง GMA pallet เป็น 1 ใน 6 แท่นรองรับสินค้าขนาดมาตรฐาน

ตารางที่ 2 ขนาดของแท่นรองรับสินค้า 10 อันดับที่นิยมใช้ในอเมริกาเหนือในปี 2000

ขนาดแท่นรองรับสินค้า (นิ้ว)	ลำดับการผลิต	ประเภทอุตสาหกรรม
48 x 40	1	อุตสาหกรรมสินค้าประเภทของชำ และใช้ทั่วไป ในอุตสาหกรรมอื่น ๆ
42 x 42	2	อุตสาหกรรมอุปกรณ์โทรคมนาคมและสี
48 x 48	3	อุตสาหกรรม drums
40 x 48	4	อุตสาหกรรมเครื่องป้องกัน และซีเมนต์
48 x 42	5	อุตสาหกรรมสารเคมี และเครื่องดัด
40 x 40	6	อุตสาหกรรมนม
48 x 45	7	อุตสาหกรรมรถยนต์
44 x 44	8	อุตสาหกรรม drums และสารเคมี
36 x 36	9	อุตสาหกรรมเครื่องดัด
48 x 36	10	อุตสาหกรรมเครื่องดัด แผ่นวัสดุถุงหลังคา และ กระดาษเพื่อการบรรจุ

ที่มา: Clarke (2004)

3.3 แท่นรองรับสินค้าในทวีปยุโรป

ในทวีปยุโรปมีการใช้ EuroPallet (ภาพที่ 3) หรือ CEN pallet ในอุตสาหกรรมต่าง ๆ อย่างกว้างขวาง ผู้ผลิต EuroPallet จะต้องได้รับอนุญาตจาก EuroPallet Pallet Association (EPAL) EuroPallet ทั่วไปที่ใช้มี 4 ขนาด แสดงดังตารางที่ 3



ภาพที่ 3 EuroPallet

ที่มา: BPL Packaging Group Co., Ltd. (2551)

ตารางที่ 3 ขนาดของ EuroPallet

ชื่อ	ขนาด (มิลลิเมตร)
Pallet EUR	800 x 1200
Pallet EUR 2	1200 x 1000
Pallet EUR 3	1000 x 1200
Pallet EUR 6	800 x 600

ที่มา: wikipedia (2009)

3.4 แทนรองรับสินค้ามาตรฐานในออสเตรเลีย

แทนรองรับสินค้ามาตรฐานที่ใช้ในออสเตรเลีย เป็นแทนรองรับสินค้าที่ผลิตจากไม้เนื้อแข็งมีขนาด 1,165 x 1,165 มิลลิเมตร ซึ่งเป็นขนาดที่พอดีสำหรับตู้บรรทุกสำหรับการขนส่งทางรถไฟของออสเตรเลีย แต่เป็นขนาดที่ภูมิภาคอื่นไม่ใช้ และไม่เหมาะสมกับตู้บรรทุกมาตรฐาน ISO ที่ใช้ทั่วโลก

4. วัสดุที่ใช้ในการผลิตแท่นรองรับสินค้า

แรกเริ่มนั้นแท่นรองรับสินค้าทำจากไม้ ต่อมาได้มีการเปลี่ยนแปลงวัสดุที่ใช้ในการผลิตตามนวัตกรรมหรือการเปลี่ยนแปลงของตลาด

4.1 แท่นรองรับสินค้าจากวัสดุไม้

ไม้เป็นวัสดุเริ่มแรกที่ใช้ในการผลิตแท่นรองรับสินค้า และยังคงได้รับความนิยมในสหรัฐอเมริกาและทั่วโลก ข้อเสียของแท่นรองรับสินค้าไม้ คือ มีตัวยัดและเศษเล็ก ๆ ที่แตกออกที่สามารถทำให้เกิดอันตรายกับผลิตภัณฑ์ได้ อาจมีแมลงแฝงตัวอยู่ในวัสดุไม้ที่ใช้ทำแท่นรองรับสินค้า และมีความแปรปรวนมากระหว่างแท่นรองรับสินค้าแต่ละชั้น โดยแท่นรองรับสินค้าจากไม้แสดงดังภาพที่ 4



ภาพที่ 4 แท่นรองรับสินค้าไม้

ที่มา: Direct Industry (2009)

ข้อดีของแท่นรองรับสินค้าไม้ คือ สามารถทำต้นแบบได้ง่าย รวดเร็ว ปลอดภัย โดยวิธีที่มีต้นทุนต่ำ ใช้กระบวนการออกแบบที่ใช้คอมพิวเตอร์ช่วย ซึ่งเรียกว่า ระบบออกแบบแท่นรองรับสินค้า (Pallet Design System หรือ PDS) การกำหนดลักษณะของแท่นรองรับสินค้าไม้สามารถอ้างอิงได้จากมาตรฐาน American Society of Mechanical Engineers (ASME) สำหรับแท่นรองรับสินค้าไม้ เพื่อให้มั่นใจว่ามีวิธีการผลิตที่ดี (Clarke, 2004)

4.2 แทนรองรับสินค้าจากวัสดุพลาสติก

ในสหรัฐอเมริกามีการผลิตแทนรองรับสินค้าใหม่จากพลาสติกร้อยละ 2 หรือประมาณ 8 ล้านชิ้น ต่อปี วัสดุหลักที่ใช้ในการผลิตแทนรองรับสินค้าพลาสติก (ภาพที่ 5) คือ PE PP และ PVC ซึ่งมีราคาต่อปอนด์สูงกว่าวัสดุไม้ประมาณ 3-6 เท่า ดังนั้น แทนรองรับสินค้าพลาสติกน้ำหนัก 50 ปอนด์ จึงมีราคาสูงกว่าแทนรองรับสินค้าไม้ น้ำหนัก 50 ปอนด์ กระบวนการผลิตแทนรองรับสินค้าพลาสติกทั่วไปที่ใช้ คือ การขึ้นรูปแบบโครงสร้างโฟม (structural foam molding) การขึ้นรูปโดยการฉีด (injection molding) การขึ้นรูปโดยการอัดรีด (profile extrusion) การขึ้นรูปแบบหมุนรอบ (rotational molding) การขึ้นรูปโดยการกด (compression molding) และการขึ้นรูปโดยใช้ความร้อน (thermoforming)



ภาพที่ 5 แทนรองรับสินค้าพลาสติก

ที่มา: Direct Industry (2009)

ข้อดีของแทนรองรับสินค้าพลาสติก คือ มีความทนทาน สะอาด ไม่ใช่ตัวยึด เช่น ตะปู ปลอดภัย มีความทนทานต่อสภาวะอากาศ และมีความเป็นไปได้ในเรื่องการออกแบบ แต่แทนรองรับสินค้าพลาสติกนี้ก็มีข้อเสีย คือ ราคาสูง ทำต้นแบบได้ยาก ความเสียดทานต่ำ ความแข็งต่ำ ไม่สามารถซ่อมได้ (Clarke, 2004)

4.3 แทนรองรับสินค้าจาก composite wood

แทนรองรับสินค้าที่ผลิตจาก composite wood มีอยู่ในตลาดแทนรองรับสินค้าเพียงร้อยละ 2-4 ในอดีตแทนรองรับสินค้าเบียร์เป็นตลาดของแทนรองรับสินค้าที่ผลิตจาก composite wood สามารถใช้ในการนำเข้าและส่งออกได้ เนื่องจากได้รับการยกเว้นเรื่องข้อบังคับเกี่ยวกับแมลง และแทนรองรับสินค้าที่ผลิตจาก composite wood ยังมีราคาต่ำกว่าแทนรองรับสินค้าพลาสติกและแทนรองรับสินค้าโลหะ

ข้อดีของแทนรองรับสินค้าที่ผลิตจาก composite wood คือ มีความเรียบ ปลอดภัย แข็ง ทนทาน สร้างต้นแบบได้ง่าย แต่มีข้อเสีย คือ มีราคาสูง เสียค่าใช้จ่ายสูงในการซ่อม ทนทานต่อสภาวะอากาศได้น้อยกว่าพลาสติกและโลหะ และมีการใช้ตัวยึด เช่น ตะปู (Clarke, 2004)

4.4 แทนรองรับสินค้ากระดาษ

กระดาษที่นำมาใช้ผลิตแทนรองรับสินค้า ได้แก่ กระดาษลูกฟูก กระดาษรังผึ้ง (honeycomb) solid fiberboard และ molded pulp โครงสร้างแทนรองรับสินค้ากระดาษลูกฟูกมีลักษณะโครงสร้างที่ใช้กันทั่วไปอยู่ 2 แบบ คือ แบบ stringer และแบบ block (LeBlanc, 2002) เหมือนกับลักษณะโครงสร้างที่ใช้ทั่วไปในแทนรองรับสินค้าไม้ แทนรองรับสินค้ากระดาษที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบันมีหลายรูปแบบ จึงขอยกตัวอย่างแทนรองรับสินค้ากระดาษมาแสดงดังนี้

4.4.1 PennyPincher Pallet™

PennyPincher Pallet™ มีโครงสร้างหลักผลิตจากกระดาษลูกฟูก มีขนาด 48 x 40 นิ้ว น้ำหนัก 9 ปอนด์ และสามารถรองรับน้ำหนักได้สูงถึง 10,000 ปอนด์ (ประมาณ 22,000 กิโลกรัม) โดยแสดงดังภาพที่ 6



ภาพที่ 6 PennyPincher Pallet™

ที่มา: St. Marys Box Co. Inc. (2009)

4.4.2 Loadek Pallet

Loadek Pallet (US Patent Number 6,029,582) เป็นแท่นรองรับสินค้าที่ประกอบด้วยชิ้นส่วนแผ่นกระดาษลูกฟูก 2 ส่วนมาประกอบกันเป็นแท่นรองรับสินค้ากระดาษลูกฟูกโดยใช้เครื่องจักรในการประกอบ ผลิตจากกระดาษลูกฟูกรีไซเคิลร้อยละ 70 และเส้นใยคราฟท์ธรรมชาติร้อยละ 30 น้ำหนักต่อชิ้นประมาณ 7-12 ปอนด์ ซึ่งแสดงดังภาพที่ 7



ภาพที่ 7 Loadek Pallet

ที่มา: Paper Industries, Inc. (2000)

4.4.3 SureStacker™ corrugated pallet (US Patent Number 6,095,061)

มีโครงสร้างหลักผลิตจากกระดาษลูกฟูกและ hardboard มีขนาด 48 x 40 นิ้ว น้ำหนัก 19 ปอนด์ และสามารถรองรับน้ำหนักได้ 2,500 ปอนด์ ซึ่งแสดงดังภาพที่ 8



ภาพที่ 8 SureStacker™ corrugated pallet

ที่มา: SDI Packaging Inc. (2008)

ข้อดีของแท่นรองรับสินค้ากระดาษ คือ มีน้ำหนักเบา สามารถเคลื่อนย้ายได้ง่าย เหมาะสำหรับการขนส่งสินค้าแบบทางเดียว ช่วยลดต้นทุนการขนส่ง เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม สามารถรีไซเคิลได้ มีผิวหน้าที่เรียบ ปราศจากตัวยึด เช่น ตะปู ที่อาจก่อให้เกิดอันตรายต่อผลิตภัณฑ์สินค้าหรือผู้ใช้งาน มีความแข็งแรง ปลอดภัย ถูกหลักอนามัยและสามารถใช้กับผลิตภัณฑ์อาหารได้อย่างปลอดภัย (Halley, 2008; Paper Industries Inc., 2008; Forward Pallet Pte Ltd., USA, 2009) อย่างไรก็ตามกระดาษลูกฟูกเป็นวัสดุที่มีข้อจำกัดบางประการ คือ มีความต้านทานต่อสภาวะแวดล้อมต่ำ แผ่นกระดาษลูกฟูกจะสูญเสียความคงรูป (rigidity) และความแข็งแรงจะลดลงเมื่อสัมผัสกับน้ำหรือเมื่ออยู่ใน สภาวะที่มีความชื้นสูง (Allaoui *et. al.*, 2007; Modzelewska, 2006; Rhim, 2006)

กระดาษลูกฟูก

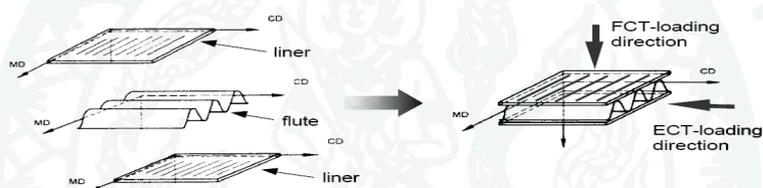
กระดาษประกอบไปโครงสร้างหลักที่เป็นเส้นใยเซลลูโลส (cellulose fiber) จำนวนมากที่ยึดเกาะกันด้วยพันธะไฮโดรเจน (hydrogen bond) กระดาษเป็นวัสดุที่มีความหนาแน่นน้อยเนื่องจากภายในโครงสร้างมีช่องว่างที่เกิดจากการเกาะเกี่ยวกันของเส้นใยอยู่มาก (ดวงทิพย์, 2550)

กระดาษลูกฟูก หมายถึง กระดาษที่ประกอบด้วยแผ่นปะหน้าและลอนกระดาษลูกฟูกอยู่ตรงกลาง (ภาพที่ 9)

1. ส่วนประกอบของกระดาษลูกฟูก

1.1 กระดาษผิวหน้า (liner) เป็นกระดาษที่ติดบนกระดาษลอนลูกฟูก จะใช้กระดาษกราฟที่ไม่ฟอกสีสำหรับการใช้งานที่ต้องการความแข็งแรงสูง นอกจากนี้อาจใช้กระดาษที่ผลิตจากเยื่อกระดาษเก่าสำหรับงานทั่วไป

1.2 กระดาษลอนลูกฟูก (corrugated medium) ใช้กระดาษที่ผลิตจากเยื่อกราฟที่เยื่อฟางข้าว หรือเยื่อกระดาษเก่า ขึ้นกับความแข็งแรงที่ต้องการนำมาขึ้นลอน กระดาษลอนลูกฟูกที่ได้รับความนิยมในการใช้งานสามารถแบ่งออกได้ 5 ประเภท ตามขนาดของลอน คือ ลอน A B C E และ F (wikipedia, 2008) โดยความแตกต่างของลอนลูกฟูกแสดงดังตารางที่ 4



ภาพที่ 9 โครงสร้างและแนวหลักของกระดาษลูกฟูก

ที่มา: Pflug *et al.* (1999)

ตารางที่ 4 มาตรฐานลอนลูกฟูกของสหรัฐอเมริกา

ประเภทของลอน	จำนวนลอน/ฟุต	ความสูงของลอน (นิ้ว)	จำนวนลอน/เมตร	ความสูงของลอน (มม.)
A	33 ± 3	3/16	108 ± 10	4.8
B	47 ± 3	1/8	154 ± 10	3.2
C	39 ± 3	5/32	128 ± 10	4.0
E	90 ± 4	1/16	295 ± 13	1.6
F	128 ± 4	1/32	420 ± 13	0.8

ที่มา: wikipedia (2008)

2. ประเภทของกระดาดลูกฟูก

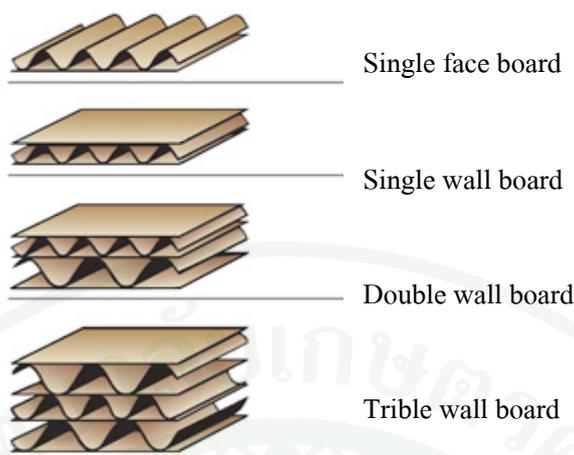
กระดาดลูกฟูกที่มีการใช้งานอยู่ในปัจจุบัน มี 4 ประเภท แสดงดังภาพที่ 10 (สมาคมผู้ผลิตกล่องกระดาษและแผ่นลูกฟูกไทย, 2550) คือ

2.1 กระดาดลูกฟูกหน้าเดียว (single face) ประกอบด้วยกระดาดทำผิวกล่อง 1 แผ่น ประกบติดกับลอนลูกฟูก 1 แผ่น นิยมใช้ห่อสินค้าหรือทำเป็นแผ่นรองภายในกล่อง เพื่อเป็นวัสดุกันกระแทก

2.2 กระดาดลูกฟูก 3 ชั้น (single wall) ประกอบไปด้วยกระดาดทำผิวกล่อง 2 แผ่น ทากาวประกบกับลอนลูกฟูก 1 แผ่น โดยลอนลูกฟูกจะอยู่ตรงกลางระหว่างกระดาดแผ่นเรียบทั้ง 2 แผ่น นิยมใช้กับสินค้าที่มีน้ำหนักปานกลางหรือไม่เน้นความแข็งแรงมากนัก ลอนมาตรฐานที่ใช้คือลอน B ลอน C และลอน E

2.3 กระดาดลูกฟูก 5 ชั้น (double wall) ประกอบด้วยกระดาดแผ่นเรียบ 3 แผ่น ประกบกับลอนลูกฟูก 2 แผ่น โดยกระดาดลอนลูกฟูกที่อยู่ติดกับผิวกล่องด้านนอกจะเป็นลอน B เพื่อประโยชน์ทางการพิมพ์ และกระดาดลอนลูกฟูกที่อยู่ด้านในจะเป็นลอน C เพื่อประโยชน์ทางด้านรับแรงกระแทก นิยมใช้สำหรับสินค้าที่ต้องการการป้องกันสูงหรือมีน้ำหนักมาก ลอนมาตรฐาน คือ ลอน BC (ลอน B จะอยู่ด้านนอก ส่วนลอน C จะอยู่ด้านใน)

2.4 กระดาดลูกฟูก 7 ชั้น (triple wall) ประกอบด้วยกระดาดแผ่นเรียบ 4 ชั้น ประกบกับลอนลูกฟูกอีก 3 ชั้น เป็นกระดาดลูกฟูกที่ผลิตเพื่อใช้งานในอุตสาหกรรมหนัก ที่ต้องรับน้ำหนักบรรทุก เป็นจำนวนมาก เช่น เครื่องจักรในอุตสาหกรรม



ภาพที่ 10 ประเภทของกระดาษลูกฟูก

ที่มา: Duropack Starpack (2008)

3. สมบัติของกระดาษลูกฟูก

คุณสมบัติหลักของกระดาษลูกฟูกทางการบรรจุประกอบด้วย สมบัติทางกายภาพ สมบัติเชิงกล สมบัติการต้านทานน้ำ ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

3.1 สมบัติทางกายภาพ (physical properties)

3.1.1 น้ำหนักมาตรฐาน (basis weight) หมายถึง คำนวณน้ำหนักต่อพื้นที่ของกระดาษ นิยมรายงานผลเป็นกรัมต่อตารางเมตร (g/m^2) หรือปอนด์ต่อ 1000 ตารางฟุต ($\text{lb}/1000 \text{ft}^2$) น้ำหนักมาตรฐานมีประโยชน์ใช้ในการควบคุมการผลิตกระดาษ คำนวณน้ำหนักมาตรฐานนิยมใช้เป็นเกณฑ์ในการซื้อขายกระดาษ และเป็นตัวที่จะบ่งบอกถึงสมบัติด้านอื่น ๆ ได้ เช่น กระดาษที่มีน้ำหนักมาตรฐานมาก จะมีความแข็งแรง ความหนาและความทึบแสงมากกว่ากระดาษที่มีน้ำหนักมาตรฐานน้อย

3.1.2 ความหนา (thickness) หมายถึง ระยะห่างระหว่างผิวกระดาษด้านหนึ่งไปยังผิวกระดาษอีกด้านหนึ่ง โดยวัดในแนวตั้งฉากกับผิวกระดาษและวัดในสภาวะและวิธีการตามมาตรฐาน

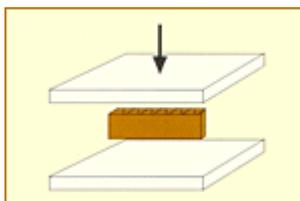
ที่กำหนดไว้ นิยมระบุหน่วยวัดเป็นมิลลิเมตร (mm) ไมโครเมตร (μm) หรือเป็นนิ้ว โดยทั่วไปเมื่อกระดาษมีน้ำหนักมาตรฐานเพิ่มขึ้น ความหนาของกระดาษมักจะเพิ่มขึ้นและทำให้กระดาษมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นด้วย โดยกระดาษลูกฟูกที่มีลอนลูกฟูกต่างกัน ส่งผลให้ความหนาของแผ่นลูกฟูกต่างกัน

3.1.3 ความชื้น (moisture content) หมายถึง ปริมาณน้ำในแผ่นกระดาษ ซึ่งจะแปรผันตามอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศ สมบัติด้านความชื้นมีความสัมพันธ์กับความแข็งแรงของกระดาษ หากความชื้นในกระดาษมากเกินไป จะทำให้กระดาษโค้งงอ เกิดรอยย่น มีการเปลี่ยนแปลงขนาดและเพิ่มความลำบากในการเคลื่อนย้าย แต่หากความชื้นในกระดาษน้อยเกินไป จะส่งผลให้กระดาษกรอบ ขาดความยืดหยุ่น เป็นต้น

3.2 สมบัติเชิงกล (mechanical properties)

3.2.1 ความต้านทานแรงดันทะลุ (bursting strength) เป็นความสามารถของกระดาษในการต้านทานแรงดันที่กระทำบนแผ่นกระดาษ วัดค่าออกมาเป็นแรงดันที่ทำให้แผ่นตัวอย่างทะลุจนขาด มีหน่วย เป็นกิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร (kg/cm^2) หรือกิโลปาสคาล (kilopascals, kPa) หรือปอนด์ต่อตารางนิ้ว (lb/in^2) ความต้านทานแรงดันทะลุเกี่ยวข้องกับพันธะที่ยึดกันระหว่างเส้นใยแต่ละเส้น ถ้าแรงเกาะยึดมีค่าสูง กระดาษจะมีความต้านทานต่อแรงดันทะลุดีขึ้น (สุชาติ, 2551) ความสมบูรณ์ของการยึดติดระหว่างแผ่นปะหน้าและลอนลูกฟูกมีส่วนสำคัญต่อค่าความต้านทานแรงดันทะลุของกระดาษลูกฟูก

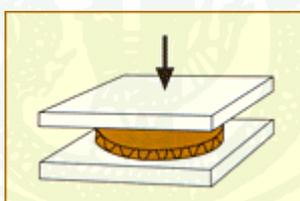
3.2.2 ความต้านทานแรงกดแผ่นลูกฟูกตามแนวตั้ง (edgewise crush resistance) หมายถึง ความสามารถในการต้านทานแรงกดของแผ่นลูกฟูกในทิศทางเดียวกับแนวตั้งของลูกฟูก มีหน่วยเป็นกิโลนิวตันต่อเมตร (kN/m) ค่าความต้านทานแรงกดแผ่นลูกฟูกตามแนวตั้งเป็นค่าที่บอกถึงความแข็งแรงของแผ่นกระดาษลูกฟูก ซึ่งมีความสัมพันธ์โดยตรงกับความแข็งแรงในการเรียงซ้อนของกล่องกระดาษลูกฟูกหรือค่าการรับแรงกดของกล่อง ค่าความต้านทานแรงกดในแนวตั้งสามารถนำมาคำนวณหาความต้านทานแรงกดของกล่องกระดาษลูกฟูกได้ โดยภาพแสดงการทดสอบดังภาพที่ 11



ภาพที่ 11 การทดสอบความต้านทานแรงกดแผ่นลูกฟูกตามแนวตั้ง

ที่มา: Multipakend (2009)

3.2.3 ความต้านทานแรงกดแผ่นลูกฟูกในแนวระนาบ (flat crush resistance) เป็นความสามารถในการต้านทานแรงกดของแผ่นลูกฟูกในแนวตั้งฉากกับผิวหน้าของแผ่นลูกฟูก มีหน่วยเป็นกิโลปาสกาลหรือปอนด์ต่อตารางนิ้ว กระดาษลูกฟูกที่มีโครงสร้างลอนที่ดีและมีความแข็งแรงเพียงพอจะมีค่าความต้านทานแรงกดลอนลูกฟูกสูง ส่วนกระดาษลูกฟูกที่มีลอนเอียง ลอนผ่านการบีบอัด หรือลอนไม่สมบูรณ์ จะมีค่าความต้านทานแรงกดลอนลูกฟูกต่ำ (TAPPI T 825 om-96) โดยการทดสอบแสดงดังภาพที่ 12



ภาพที่ 12 การทดสอบความต้านทานแรงกดแผ่นลูกฟูกในแนวระนาบ

ที่มา: Multipakend (2009)

3.2.4 สมบัติเชิงกลพลวัต (dynamic mechanical analysis, DMA) เป็นเทคนิคการวิเคราะห์ โดยการให้ความเค้น (stress) แก่ตัวอย่างและได้ค่าทดสอบเป็นความเครียด (strain) ซึ่งเป็นฟังก์ชันของทั้งความถี่และอุณหภูมิ โดยสามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร viscoelastic ต่าง ๆ เช่น storage modulus, loss modulus และ $\tan \delta$ โดยค่า storage modulus จะบอกถึงสภาพความยืดหยุ่นหรือความสามารถในการคืนกลับสู่สภาพเดิมได้ของวัสดุ โดยเมื่อวัสดุมีค่า storage modulus มาก คือสามารถคืนตัวกลับสู่สภาพเดิมได้สูง วัสดุนั้นก็จะมีค่า loss modulus ต่ำ (Jones, 1999)

3.3 สมบัติการต้านทานน้ำ (water resistance properties)

วิธีการทดสอบระดับความต้านทานน้ำของกระดาษโดยทั่วไปอาจแบ่งได้เป็น 3 วิธี ได้แก่ (สุชาติ, 2551)

3.3.1 Cobb test เป็นการหาความสามารถในการดูดซึมน้ำของกระดาษในพื้นที่ 1 ตารางเมตรภายในระยะเวลาที่กำหนด มีหน่วยเป็นกรัมต่อตารางเมตร ใช้สำหรับทดสอบกับกระดาษเหนียวและแผ่นลูกฟูก ค่านี้อาจบอกความสามารถของการดูดซึมน้ำของเหลวเข้าสู่กระดาษ ซึ่งมีความสัมพันธ์กับความแข็งแรงของกระดาษ เช่น ถ้ากล่องกระดาษลูกฟูกมีค่าการดูดซึมน้ำมาก กล่องจะมีความแข็งแรงลดลงเมื่อเกิดการดูดซึมน้ำ โดยชุดทดสอบ Cobb test แสดงดังภาพที่ 13



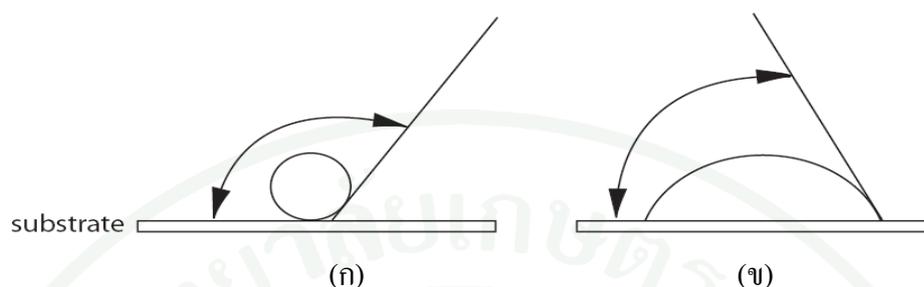
ภาพที่ 13 ชุดทดสอบ Cobb test

ที่มา: Zwick GmbH & Co. KG (2009)

3.3.2 Absorption time เป็นการทดสอบสมบัติการดูดซึมน้ำของเหลวของวัสดุประเภทเส้นใย โดยการหยดของเหลวที่มีปริมาตรคงที่ลงบนผิววัสดุ และจับเวลาที่หยดของเหลวนั้นซึมผ่านลงไปใวัสดุจนหมด ซึ่งเวลาที่ได้นี้จะเป็นตัวบ่งชี้ความสามารถในการดูดซับของเหลวของวัสดุ

3.3.3 Contact angle หรือ การวัดมุมสัมผัส เป็นวิธีการทดสอบการดูดซึมน้ำของกระดาษ โดยการวัดมุมที่ของเหลวสัมผัสกับผิวของวัสดุ (ภาพที่ 14) ซึ่งแสดงให้เห็นถึงสมบัติการเปียกของวัสดุชนิดนั้น หดที่มีมุมสัมผัสขนาดใหญ่จะไม่ชอบน้ำ (hydrophobic) มีการเปียก

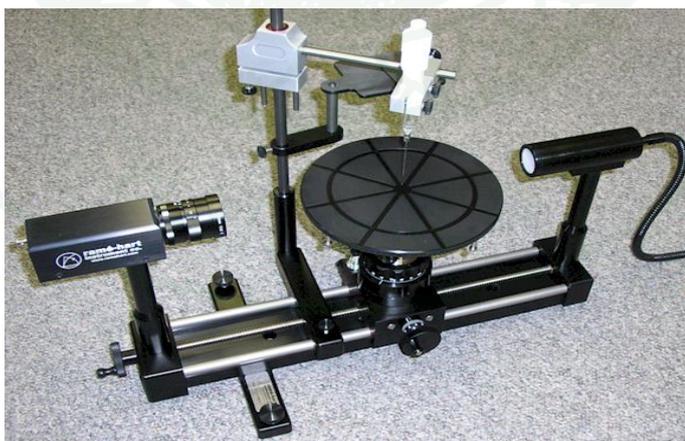
(wettability) การยึดติด (adhesion) และพลังงานผิว (surface energy) ถ้า ส่วนหยดที่มีมุมสัมผัสขนาดเล็กจะมีความชอบ น้ำ (hydrophilic) การเปียก การยึดติด และพลังงานผิวสูง



ภาพที่ 14 มุมที่หยดน้ำทำกับกระดาษ (ก) ไม่มีการดูดซึม (ข) มีการดูดซึม

ที่มา: ดวงทิพย์ (2550)

การวัดมุมสัมผัสมี 2 แบบ คือ แบบสถิตศาสตร์ (static) เป็นการวัดมุม ณ เวลาใดเวลาหนึ่ง และแบบพลศาสตร์ (dynamic) เป็นการวัดมุมสัมผัสอย่างต่อเนื่องในช่วงเวลาใดช่วงเวลาหนึ่ง ตัวอย่างเครื่องมือที่ใช้ในการวัดมุมสัมผัส เช่น goniometer (ภาพที่ 15) ซึ่งเครื่องมือนี้จะมีกล้องจับภาพลักษณะของของเหลวบนวัสดุที่เป็นของแข็ง และวัดค่ามุมสัมผัสระหว่างหยดของเหลวกับพื้นผิววัสดุ และสามารถนำค่าที่ได้ไปแปลผลเป็นค่าพลังงานผิวได้



ภาพที่ 15 เครื่องวัดมุมสัมผัส goniometer

ที่มา: Wikipedia (2008)

พอลิเมอร์ชีวภาพ

พอลิเมอร์ชีวภาพ (biopolymer) หมายถึง พอลิเมอร์ที่สามารถย่อยสลายให้เป็นโมเลกุลเล็ก ๆ ได้โดยเอนไซม์จากสิ่งมีชีวิต ทั้งในสภาพที่มีอากาศหรือไม่มีอากาศ พอลิเมอร์ชีวภาพจะมีโครงสร้างทางโมเลกุลที่เอื้ออำนวยให้เอนไซม์ของจุลินทรีย์ย่อยสลายได้ พอลิเมอร์ชีวภาพเป็นวัสดุที่ได้จากพืชและสิ่งมีชีวิตต่าง ๆ เป็นวัสดุที่สามารถหามาทดแทนใหม่ได้ สามารถย่อยสลายทางชีวภาพได้ ไม่เป็นพิษ สามารถใช้เป็นสารเคลือบหรือขึ้นรูปเป็นฟิล์มได้ (Weber *et al.*, 2002)

1. ประเภทของพอลิเมอร์ชีวภาพ

พอลิเมอร์ชีวภาพแบ่งตามแหล่งที่ผลิตออกเป็น 3 ประเภท (Cutter, 2006) (ภาพที่ 16) คือ

1.1 พอลิเมอร์ที่สกัดจากมวลชีวภาพ (biomass) แบ่งเป็น 3 ประเภท ได้แก่

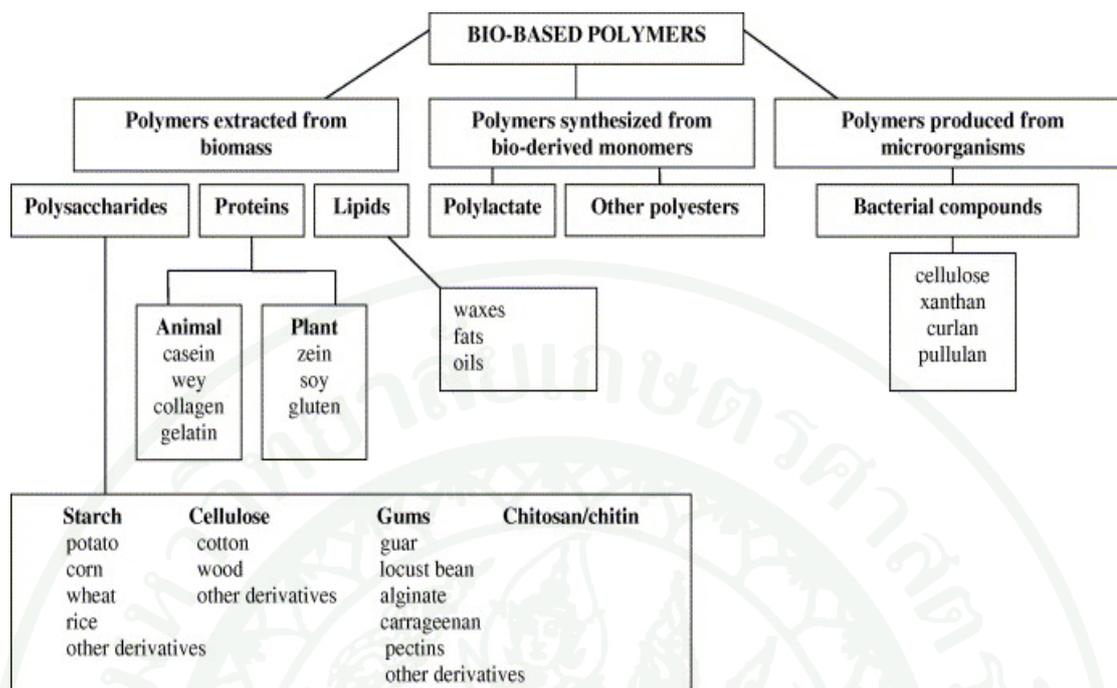
1.1.1 พอลิแซ็กคาไรด์ (polysaccharide) เช่น สตาร์ช (starch) เซลลูโลส (cellulose) กัม (gum) และไคติน (chitin) เป็นต้น

1.1.2 โปรตีน (protein) เช่น เคซีน (casein) เวย์ (whey) คอลลาเจน (collagen) เจลาติน (gelatin) ซีน (zein) ถั่ว และกลูเทน (gluten) เป็นต้น

1.1.3 ลิพิด (lipid) เช่น ไข (wax) ไขมัน (fat) และน้ำมัน (oil) เป็นต้น

1.2 พอลิเมอร์ที่สังเคราะห์จากมอนอเมอร์ที่ได้จากสิ่งมีชีวิต เช่น พอลิแลคติกแอซิด (polylactic acid)

1.3 พอลิเมอร์ที่ผลิตจากจุลินทรีย์ (microorganism) เช่น cellulose xanthan curlan และ pullan เป็นต้น



ภาพที่ 16 ประเภทของพอลิเมอร์ชีวภาพ

ที่มา: Cutter (2006)

2. พอลิเมอร์ชีวภาพที่ใช้ในการเคลือบกระดาษ

ปัจจุบันได้มีการศึกษาการเคลือบกระดาษและอาหารด้วยพอลิเมอร์อย่างกว้างขวาง เนื่องจากพอลิเมอร์สามารถเพิ่มสมบัติบางประการแก่วัสดุบรรจุได้ เช่น ลดการซึมผ่านของไอน้ำและไขมัน ปรับปรุงความแข็งแรงของโครงสร้างวัสดุให้แข็งแรง นอกจากนี้ยังสามารถยืดอายุการเก็บรักษาอาหารได้โดย ลดการสูญเสีย น้ำ การแพร่ของก๊าซ ลดสูญเสียกลิ่นรสของน้ำมันหอมระเหยต่างๆ และต้านทานการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ได้

2.1 ตัวอย่างงานวิจัยการเคลือบกระดาษด้วยพอลิเมอร์ชีวภาพที่มีองค์ประกอบหลักเป็นพอลิแซคคาไรด์

Matsui *et al.* (2004) ได้ผลิตกระดาษแข็งจากกากมันสำปะหลังร้อยละ 90 และกระดาษคราฟท์ร้อยละ 10 โดยใช้เทคนิคการผลิตกระดาษรีไซเคิล จากนั้นทำให้ชุ่ม (impregnate) ด้วยสตาร์ชอะซิเตต (starch acetate) และนำไปทดสอบสมบัติการดึงยึด (tensile strength) และการจุ่มตัวอย่างลงไปใต้น้ำโดยตรง พบว่าตัวอย่างที่ไม่ได้ทำให้ชุ่มด้วยสตาร์ชอะซิเตตมีความต้านทานน้ำเล็กน้อยเมื่อสัมผัสกับน้ำโดยตรง ส่วนตัวอย่างที่ทำให้ชุ่มด้วยสตาร์ชอะซิเตตสามารถดูดซับน้ำได้ครึ่งหนึ่งของตัวอย่างที่ไม่ได้ทำให้ชุ่มด้วยสตาร์ชอะซิเตต นอกจากนี้การทำให้ชุ่มด้วยสตาร์ชอะซิเตตยังส่งผลต่อสมบัติการดึงยึดเพียงเล็กน้อย

Larotonda *et al.* (2005) ศึกษาผลของการทำให้กระดาษคราฟท์ (kraft paper) ชุ่ม (impregnate) ด้วยคาสซาว่าสตาร์ชอะซิเตต (cassava starch acetate, CSA) ในสภาวะความดันบรรยากาศและสภาวะสุญญากาศ ต่อสมบัติการซึมผ่านของไอน้ำ (water vapor permeability, K^w) ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของไอน้ำ (water vapor diffusion coefficient, D_{eff}) และสมบัติการดูดความชื้นของวัสดุ (hygroscopicity properties) หรือค่าการดูดซึม (adsorptivity, β) ล้วนมีผลต่อการซึมผ่านของไอน้ำ ผลการศึกษาพบว่า ค่า K^w ลดลงอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากการสะสมของคาสซาว่าสตาร์ชอะซิเตต บริเวณผิวหน้าและภายในรูพรุนของกระดาษคราฟท์บางส่วน นอกจากนี้คาสซาว่าสตาร์ชอะซิเตตยังมีความสามารถในการดูดความชื้นได้น้อยกว่าวัสดุกระดาษ จึงทำให้ค่าการดูดซึมของกระดาษที่ทำให้ชุ่มด้วยคาสซาว่าสตาร์ชอะซิเตตลดลงอย่างมีนัยสำคัญ

Jansson *et al.* (2005) ศึกษาการเคลือบแป้งมันฝรั่งที่มีองค์ประกอบของอะไมเลส (amylase) ร้อยละ 21 และ 70 และผ่านการดัดแปรด้วย (a) ปฏิกิริยาออกซิเดชัน (oxidation) (b) ปฏิกิริยาออกซิเดชันและ hydroxypropylation (c) ปฏิกิริยาออกซิเดชัน และการทำให้มีคุณสมบัติเป็นไฮโดรโฟบิก (hydrophobic) ด้วยการทำปฏิกิริยากับหมู่ octenyl หรือ alkenyl ซึ่งถูกแทนที่ด้วย succinic acid anhydride ลงบนกระดาษและสิ่งทอ โดยใช้กลีเซอรอล (glycerol) เป็นพลาสติกไซเซอร์ (plasticizer) พบว่าการเคลือบด้วยแป้งมันฝรั่งที่มีองค์ประกอบของอะไมเลส ร้อยละ 70 ที่ผ่านการดัดแปรให้มีคุณสมบัติเป็นไฮโดรโฟบิก (hydrophobic) มีค่าอัตราการซึมผ่านของไอน้ำต่ำที่สุด และเมื่อเติมกลีเซอรอลปริมาณ 30 ส่วนต่อแป้ง 100 ส่วน จะทำให้ glass transition temperature (T_g) ของฟิล์มลดลง ซึ่งทำให้คุณสมบัติเชิงกลของฟิล์มเปลี่ยนแปลงไป

Kjellgren *et al.* (2006) ศึกษาการเคลือบกระดาษทนน้ำมัน (greaseproof paper) ด้วยไคโตซาน โดยให้น้ำหนักของสารเคลือบอยู่ระหว่าง 0-5.2 กรัมต่อตารางเมตร พบว่ากระดาษที่มีน้ำหนักของสารเคลือบ 2.4 กรัมต่อตารางเมตร สามารถป้องกันการซึมผ่านของแก๊สออกซิเจนได้ และกระดาษที่มีน้ำหนักของสารเคลือบ 5.2 กรัมต่อตารางเมตร สามารถป้องกันการซึมผ่านของแก๊สไนโตรเจนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ได้ ส่วนคุณสมบัติในการต้านทานการซึมผ่านของไขมัน พบว่ากระดาษที่มีน้ำหนักของสารเคลือบระหว่าง 2.4-5.2 กรัมต่อตารางเมตร มีประสิทธิภาพในการต้านทานน้ำมันดีมาก แต่ไม่สามารถป้องกันการซึมผ่านของไอน้ำได้

2.2 ตัวอย่างงานวิจัยการเคลือบกระดาษด้วยพอลิเมอร์ชีวภาพที่มีองค์ประกอบหลักเป็นโปรตีน

Parris *et al.* (2002) ศึกษาความสามารถในการรีไซเคิลของกระดาษกราฟท์และแผ่นปะหน้ากระดาษลูกฟูก (linerboard) ที่เคลือบด้วยโปรตีนจากข้าวโพด (corn zein) และพาราฟิน (paraffin wax) พบว่ากระดาษที่ผลิตจากการรีไซเคิลกระดาษกราฟท์ สามารถลดอัตราการซึมผ่านของไอน้ำได้ร้อยละ 16 และลดการซึมผ่านของไขมันได้ร้อยละ 100 ส่วนกระดาษที่ผลิตจากการรีไซเคิลแผ่นปะหน้ากระดาษลูกฟูก มีอัตราการซึมผ่านของไอน้ำลดลงร้อยละ 8 และอัตราการซึมผ่านของไขมันลดลงร้อยละ 97 กระดาษที่เตรียมจากการรีไซเคิลกระดาษกราฟท์ที่เคลือบด้วย zein isolate มีความแข็งแรงลดลงร้อยละ 12-19 ส่วนกระดาษที่เตรียมจากการรีไซเคิลกระดาษกราฟท์ที่เคลือบด้วย zein และ wax มีความแข็งแรงลดลงร้อยละ 20-30 จากการรีไซเคิลกระดาษกราฟท์ที่ไม่ได้ผ่านการเคลือบ จึงมีการเติม Pancreatin 8x และ sodium dodecylsulfate (SDS) ก่อนการรีไซเคิลเพื่อการแยกสารเคลือบออกได้ดียิ่งขึ้น ส่งผลให้กระดาษที่เตรียมมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น

2.3 ตัวอย่างงานวิจัยการเคลือบกระดาษด้วยพอลิเมอร์ชีวภาพผสมกันหลายประเภท

Rhim *et al.* (2006) ได้ใช้อัลจีเนต (alginate) และ soy protein isolate (SPI) เคลือบกระดาษแข็งร่วมกับการทำให้เกิดการเชื่อมข้าม (cross-linking) โดยใช้แคลเซียมคลอไรด์ (CaCl₂) หรือฟอรัมาลดีไฮด์ และการผสมกับ organically modified montmorillonite (OMMT) การเคลือบด้วยพอลิเมอร์ชีวภาพทำให้กระดาษแข็งมีความหนาเพิ่มขึ้นร้อยละ 9-16 และยังคงส่งผลให้กระดาษมีผิวหน้าที่เรียบและเป็นเนื้อเดียวกันมากขึ้น แม้ว่าความสามารถในการดึงยึด (tensile strength, TS) จะลดลงร้อยละ 12.5-37.5 ส่วนความต้านทานแรงกดวงแหวน (ring crush strength) ไม่ลดลง

นอกจากนี้การเคลือบด้วยพอลิเมอร์ชีวภาพยังส่งผลต่อสมบัติการเปียก (wetting properties) เช่น มุมสัมผัสของหยดน้ำ (contact angle of water drop) การเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่องของมุมสัมผัส (dynamic change in contact angle) การซึมผ่านของไอน้ำ (water vapor permeability, WVP) และการดูดซับน้ำ (water absorptivity) เช่น อัตราการเปลี่ยนแปลงมุมสัมผัสของน้ำบน กระดาษแข็งลดลงมากถึง 1.4-3.8 เท่า ตามชนิดของสารเคลือบและวิธีการปรับสภาพ โดยทั่วไป กระดาษแข็งที่เคลือบด้วย SPI มีความสามารถในการต้านทานน้ำสูงกว่ากระดาษแข็งที่เคลือบด้วย อัลจินต แต่อย่างไรก็ตาม กระดาษแข็งที่เคลือบด้วยอัลจินตแล้วผ่านการปรับสภาพด้วยสารละลายแคลเซียมคลอไรด์มีสมบัติการต้านทานน้ำเทียบเท่ากับกระดาษแข็งที่เคลือบด้วย SPI

Sothornvit (2009) ศึกษาผลของสารเคลือบไฮดรอกซีโพรพิลเมทิลเซลลูโลส (hydroxypropyl methylcellulose, HPMC) กลีเซอรอล (glycerol, Gly) และไขผึ้ง (beeswax) ต่อสมบัติทางกายภาพและการซึมผ่านของไอน้ำ (water vapor permeability, WVP) ของกระดาษที่ผ่านการเคลือบ พบว่ากระดาษที่เคลือบด้วย HPMC ที่ความเข้มข้นต่ำ (ร้อยละ 2.5) มีสมบัติทางกายภาพแตกต่างจากกระดาษที่ไม่ได้เคลือบอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) โดยมีความทนทานต่อการพับ (folding endurance) และการดึงยืด (stretch) เพิ่มขึ้น แต่ดัชนีความต้านทานแรงดึง (tensile index) ลดลง นอกจากนี้การเคลือบกระดาษด้วยสารเคลือบ HPMC ยังทำให้การซึมผ่านของไอน้ำลดลงและยังลดลงมากขึ้นเมื่อมีการใช้ไขผึ้งร่วมด้วย

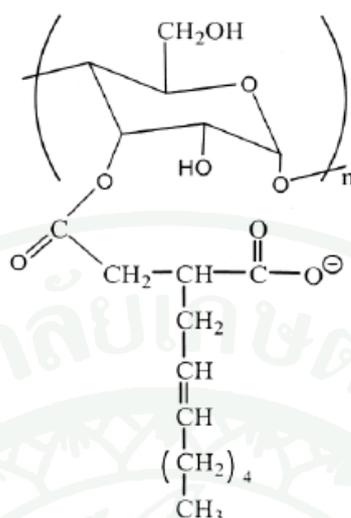
Khwaldia *et al.* (2005) ศึกษาผลของการเคลือบกระดาษด้วยสารผสมไมกา (mica, ความเข้มข้นร้อยละ 0-1.2 โดยน้ำหนัก) คาร์โนบาแว็กซ์ (carnauba wax ความเข้มข้นร้อยละ 0-0.8 โดยน้ำหนัก) กลีเซอรอล (ความเข้มข้นร้อยละ 0-6 โดยน้ำหนัก) และโซเดียมเคาซีนต (sodium caseinate, ความเข้มข้น 10-13 โดยน้ำหนัก) พบว่า ระดับความเข้มข้นของคาร์โนบาแว็กซ์และกลีเซอรอลมีผลต่อความสามารถในการซึมผ่านไอน้ำของกระดาษเคลือบมากที่สุด โดยเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของกลีเซอรอล ค่าความแข็งแรงต่อการต้านแรงดึง (tensile strength) จะมีค่าลดลง แต่ค่าร้อยละการยืดตัวเพิ่มมากขึ้น ส่วนค่าการซึมผ่านของไอน้ำจะเพิ่มขึ้นเนื่องจากกลีเซอรอลซึ่งทำหน้าที่เป็นพลาสติกไซเซอร์และมีความชอบน้ำ (hydrophilic) แต่หากเพิ่มความเข้มข้นของคาร์โนบาแว็กซ์และไมกาจะทำให้ค่าการซึมผ่านของไอน้ำลดลง

Rhim *et al.* (2007) ศึกษาการเคลือบกระดาษแข็งด้วยพอลิแลคติกแอซิดที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 1-5 โดยน้ำหนัก พบว่ากระดาษที่เคลือบพอลิแลคติกแอซิดที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก สามารถต้านทานการซึมผ่านของไอน้ำได้ดี กระดาษมีผิวหน้าเรียบขึ้น ค่าความแข็งแรงต่อการต้านแรงดึงลดลง ขณะที่ค่าร้อยละการยึดตัวมีค่ามากขึ้น และเมื่อทดสอบคุณสมบัติในการต้านทานน้ำ คือ ค่าการซึมผ่านของไอน้ำ (water vapour permeability, WVP) ค่าการดูดซับน้ำ (water absorptiveness, WA) และค่ามุมสัมผัสของหยดน้ำ (contact angle) พบว่าการเคลือบกระดาษแข็งด้วยพอลิแลคติกแอซิดสามารถปรับปรุงคุณสมบัติในการต้านทานการซึมผ่านของไอน้ำได้ โดยทำให้ค่าการซึมผ่านของไอน้ำลดลง 4.8-25.5 เท่า ค่าการดูดซับน้ำลดลง 11.9-17.9 เท่า และค่ามุมสัมผัสของหยดน้ำเพิ่มขึ้น เนื่องจากการเคลือบกระดาษด้วยพอลิแลคติกแอซิดทำให้กระดาษมีความเป็นไฮโดรโฟบิกเพิ่มมากขึ้น

3. ไฮโดรโฟบิกสตาร์ช

สตาร์ชเป็นสารที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรม เนื่องจากมีราคาถูก หาได้ง่าย และมีประสิทธิภาพสูงเมื่อเทียบกับราคา (Biswas *et al.*, 2006) ปัจจุบันมีการใช้สตาร์ชเป็นสารเคลือบและ sizing ในอุตสาหกรรมกระดาษและสิ่งทอ (Whistler & BeMiller, 1993) ฟิล์มจากสตาร์ชมีสมบัติในการต้านทานการซึมผ่านของออกซิเจนและคาร์บอนไดออกไซด์ที่ดี แต่มีความสามารถในการต้านทานการซึมผ่านของไอน้ำที่ต่ำ (Arvanitoyannis *et al.*, 1998; Pagella *et al.*, 2002) จึงได้มีการดัดแปรสตาร์ชเพื่อเพิ่มคุณสมบัติไม่ชอบน้ำให้แก่สตาร์ช เรียกว่า ไฮโดรโฟบิกสตาร์ช

ไฮโดรโฟบิกสตาร์ช หมายถึง สตาร์ชที่ถูกดัดแปรทางเคมีเพื่อให้มีคุณสมบัติไม่ชอบน้ำ ตัวอย่างของไฮโดรโฟบิกสตาร์ช คือ สตาร์ชที่ผลิตได้จากกระบวนการเอสเทอร์ริฟิเคชัน (esterification) ด้วยสาร octenyl succinic anhydride (OSA) เป็นต้น การแทนที่ของหมู่ไฮดรอกซิลด้วยหมู่ฟังก์ชันต่าง ๆ จะเกิดขึ้นที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 2, 3 และ 6 ภายในโมเลกุลของกลูโคส และเกิดขึ้นในบริเวณออสันฐานของสตาร์ช การดัดแปรสตาร์ชด้วยการแทนที่หมู่ไฮดรอกซิลด้วยโมเลกุลของ OSA นั้นทำให้ได้สตาร์ชที่เรียกว่า octenyl succinate starch (OSA starch) (ภาพที่ 17) ข้อดีของการมีหมู่ octenyl succinate คือช่วยรักษาสถิตีชอบน้ำของสตาร์ชไว้ในขณะที่สามารถเพิ่มคุณสมบัติไม่ชอบน้ำให้กับสตาร์ช ทำให้ OSA starch มีคุณสมบัติเป็นสารอิมัลซิไฟเออร์ (emulsifier) ที่ดีและยังมีคุณสมบัติในการเป็นฟิล์มที่ดี โครงสร้างโมเลกุลของ OSA starch (ดวงทิพย์, 2550)

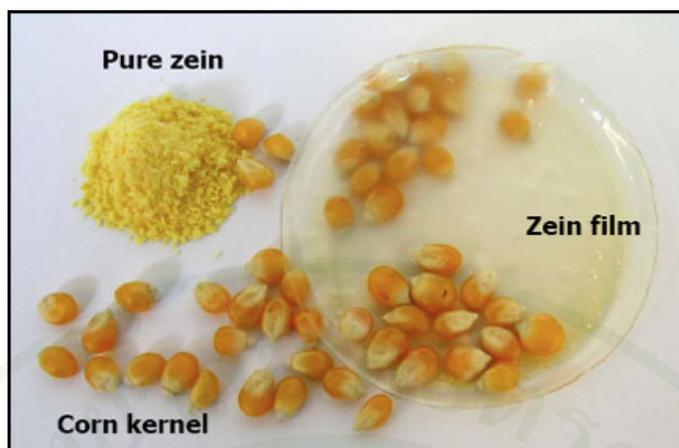


ภาพที่ 17 โครงสร้างโมเลกุลของ OSA starch

ที่มา: ดวงทิพย์ (2550)

4. ซีน (zein)

ซีน เป็นโปรตีนที่ได้จากข้าวโพด (ภาพที่ 18) ประกอบไปด้วยโมเลกุล 2 ส่วน ได้แก่ แอลฟา-ซีน (α -zein) ปริมาณร้อยละ 80 ของโมเลกุลซีนทั้งหมด ซึ่งมีองค์ประกอบของโมโนเมอร์และโอลิโกเมอร์ ที่เชื่อมกันด้วยพันธะไดซัลไฟด์ และส่วนที่เหลือเป็นเบต้า-ซีน (β -zein) มีองค์ประกอบของโอลิโกเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงกว่า ซึ่งสามารถละลายได้ในเอทานอล ไม่ละลายในน้ำเนื่องจากซีนประกอบไปด้วยกรดอะมิโน ที่ไม่มีขั้วปริมาณมาก คือ กรด กลูตามิก (glutamic acid) ร้อยละ 21-26 ลิวซีน (leucine) ร้อยละ 20 อะลานีน (alanine) ร้อยละ 10 และ โพรลีน (proline) ร้อยละ 10 (Paulis, 1982; Shukla and Cheryan, 2001) จึงมีการใช้ซีนเป็นสารเคลือบเพื่อป้องกันความชื้นและรักษาคุณภาพของธัญญาหาร (Druchta and Johnston, 1997)



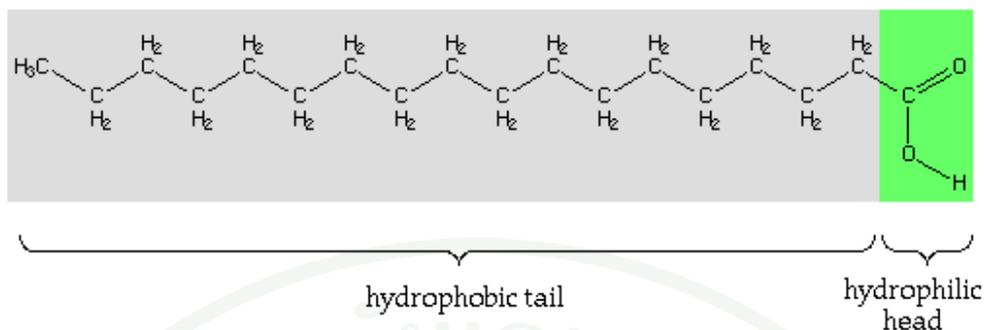
ภาพที่ 18 ลักษณะทางกายภาพของซีน

ที่มา: Global Protein Products, Inc. (2009)

ซีนสามารถขึ้นรูปเป็นฟิล์มได้เมื่อมีระบบของตัวทำละลายที่เหมาะสม โดยฟิล์มที่ได้จะมีความเหนียว มันวาว มีความทนทานต่อการขูด และต้านทานไขมัน ฟิล์มซีนจะขึ้นรูปได้โดยการเชื่อมกันด้วยพันธะไฮโดรเจน และพันธะไฮโดรโฟบิก อย่างไรก็ตามฟิล์มที่ได้ก่อนข้างมีความเปราะ จึงต้องมีการเติมพลาสติกไซเซอร์ เพื่อเพิ่มความยืดหยุ่นของฟิล์ม ส่วนการปรับปรุงประสิทธิภาพในการต้านทานน้ำ และการต้านทาน แรงดึง สามารถทำได้โดยเติม cross-linking agents เช่น formaldehyde

5. กรดไขมันสเตียริก

กรดไขมันสเตียริก เป็นกรดไขมันอิ่มตัวที่พบได้ในไขมันพืชและไขมันสัตว์ มีโครงสร้างเป็นสายโมเลกุลของไฮโดรคาร์บอนต่อกับกลุ่มของกรดคาร์บอกซิลิก (carboxylic acid group, $-COOH$) มีสูตรทางเคมี คือ $C_{17}H_{35}COOH$ ดังภาพที่ 19 โดยส่วนหางของโมเลกุลเกิดจากคาร์บอนและไฮโดรเจน ซึ่งเป็นส่วนที่ไม่ชอบน้ำ แต่ส่วนหัวของโมเลกุลสามารถสร้างพันธะไฮโดรเจนกับน้ำได้ กรดไขมันสเตียริกมีลักษณะเป็นผลึกสีขาว ดังภาพที่ 20 กรดสเตียริกมีจุดหลอมเหลวที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส ไม่ละลายน้ำ แต่สามารถละลายได้ในเอทิลอะซิเตต (ethyl acetate) เอทานอล (ethanol) และอะซิโตน (acetone) (Heryanto, 2007)



ภาพที่ 19 โครงสร้างโมเลกุลของกรดไขมันสเตียริก

ที่มา: University of Oregon, Chemistry Teaching Laboratories (2006)



ภาพที่ 20 ลักษณะของกรดไขมันสเตียริก

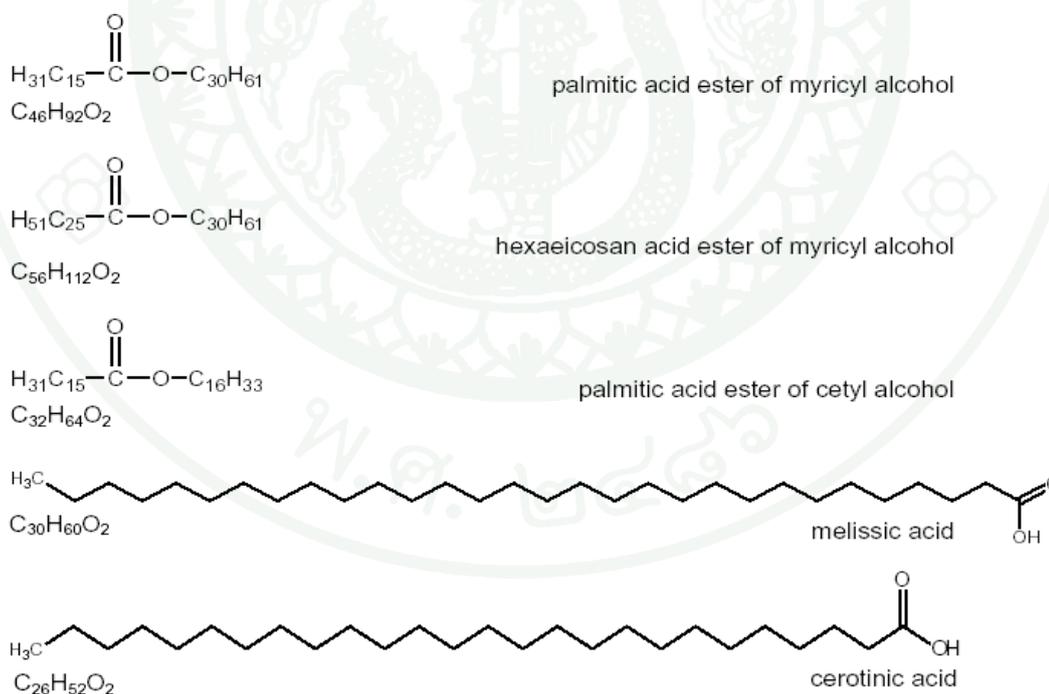
ที่มา: University of Oregon, Chemistry Teaching Laboratories (2006)

Ayranci and Tunc (2001) ศึกษาการซึมผ่านของไอน้ำของฟิล์มเมทิลเซลลูโลสที่มีการแปรชนิดและปริมาณของกรดไขมัน กรดไขมันที่ศึกษา คือ กรดไขมันสเตียริก กรดไขมันปาล์มติก และกรดไขมันลอริก พบว่ากรดไขมันสเตียริกมีประสิทธิภาพดีที่สุดในการลดการซึมผ่านของไอน้ำ นอกจากนี้อัตราการซึมผ่านของไอน้ำ (water vapour transmission rate, WVTR) เพอร์มีแอนซ์ของ

ไอน้ำ (water vapour permeance, WVPN) และสภาพให้ซึมผ่านได้ของไอน้ำ (water vapour permeability, WVP) จะมีค่าลดต่ำลงเมื่อปริมาณกรดไขมันเพิ่มมากขึ้นในองค์ประกอบของฟิล์ม นอกจากนี้ Butkinaree (2008) ยังพบว่า การเติมกรดไขมันสเตียริกลงในสารเคลือบสตาร์ชส่งผลให้กระดาษแข็งมีค่าการดูดซึมน้ำลดลง และระดับการดูดซึมน้ำลดลงมากขึ้น เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของกรดสเตียริกในสารเคลือบ

6. ไไขผึ้ง

ไขผึ้งเป็นลิพิดที่มีสถานะเป็นของแข็งที่อุณหภูมิห้อง (Yang and Paulson, 2000) ประกอบด้วย เอสเทอร์ของ long chain wax alcohol (C_{24} - C_{44}) ที่มี carbon acids (C_{16} / C_{18}) ร้อยละ 70 ไฮโดรคาร์บอน (C_{25} - C_{35}) ร้อยละ 13-18 free wax acids (C_{24} - C_{32}) ร้อยละ 10-15 และ free wax alcohols (C_{34} - C_{36}) ร้อยละ 1 มีจุดหลอมเหลวที่อุณหภูมิ 62-64 องศาเซลเซียส โครงสร้างของไขผึ้งแสดงดังภาพที่ 21



ภาพที่ 21 โครงสร้างโมเลกุลของสารที่เป็นองค์ประกอบของไขผึ้ง

ที่มา: Zen Backpacking Stove (2005)

ตัวอย่างงานวิจัยที่ศึกษาการประยุกต์ใช้ไขมันในการปรับปรุงคุณสมบัติการต้านทานการซึมผ่านของน้ำ

Monedero *et al.* (2009) ได้ศึกษาผลของการเติมสารผสมไขมัน (กรดโอเลอิกและไขมัน) ในอัตราส่วนต่าง ๆ เข้าไปในฟิล์ม soy protein isolate (SPI) พบว่า การเติมกรดโอเลอิกหรือกรดโอเลอิกผสมไขมันทุกอัตราส่วนส่งผลให้ฟิล์มมีสภาพความเป็นพลาสติกเพิ่มขึ้น การซึมผ่านของไอน้ำลดลง นอกจากนี้ยังพบว่า ฟิล์ม SPI ที่มีอัตราส่วนของโปรตีนต่อไขมันเป็น 1 : 0.25 และปริมาณไขมันอยู่ระหว่างร้อยละ 30 และ 50 สามารถลดการซึมผ่านของไอน้ำได้ มีความยืดหยุ่นและดึงยึดได้ ในขณะที่ยังคงมีความเงาใกล้เคียงกับฟิล์ม SPI การใส่ไขมันปริมาณมากขึ้นในสารผสมโปรตีนทำให้ฟิล์มมีความเป็นสีเหลืองลดลง แต่ไม่ได้ส่งผลให้มีสมบัติกันการซึมผ่านและสมบัติเชิงกลเพิ่มขึ้น

Fabra *et al.* (2008) ศึกษาสมบัติการดึงยึดและการซึมผ่านของไอน้ำของฟิล์มที่ได้จากการผสมโซเดียมเคซีนเนต (sodium caseinate, NaCas) พอลิแซ็กคาไรด์ (อัลจินตหรือแลมด้าคาราจีแนน) และไขมัน (กรดโอเลอิกและไขมัน) พบว่า สูตรฟิล์มที่ไม่มีไขมันแต่มีพลาสติกไซเซอร์นั้น พอลิแซ็กคาไรด์ในสูตรทุกความเข้มข้นทำให้สมบัติการดึงยึดดีขึ้น แต่ค่าการซึมผ่านของไอน้ำจะเพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน สมบัตินี้จะยิ่งเด่นชัดเมื่อพอลิแซ็กคาไรด์เป็นแลมด้าคาราจีแนน การเติมสารผสมไขมันทำให้ฟิล์มมีความยืดหยุ่นมากกว่าการเติมไขมันเพียงอย่างเดียว แต่ปริมาณไขมันที่มากขึ้นทำให้การซึมผ่านของไอน้ำลดลงมากขึ้น ฟิล์มที่มีการเติมไขมันและแลมด้าคาราจีแนนสามารถปรับปรุงสมบัติของฟิล์มได้ดีกว่าฟิล์มที่มีการเติมไขมันและอัลจินต ส่วนฟิล์มเคซีนเนตที่มีเติมแลมด้าคาราจีแนนและไขมัน แต่ไม่มีการเติมพลาสติกไซเซอร์นั้น แลมด้าคาราจีแนนในสูตรจะทำให้ฟิล์มแข็ง (stiffness) ไม่ยืด และมีค่าการซึมผ่านของไอน้ำลดลง เมื่อมีอัตราส่วนของไขมันในสารผสมไขมันต่ำกว่าร้อยละ 50

Fabra *et al.* (2008) ศึกษาสมบัติการซึมผ่านของไอน้ำและสมบัติการดึงยึดของฟิล์มโซเดียมเคซีนเนต (sodium caseinate film) ที่มีการเติมพลาสติกไซเซอร์ (กลีเซอรอลและซอร์บิทอล) และไขมัน (กรดโอเลอิกและไขมัน) ในอัตราส่วนต่าง ๆ พบว่า กลีเซอรอลมีประสิทธิภาพในการเป็นพลาสติกไซเซอร์ที่ดีกว่าซอร์บิทอล กรดโอเลอิกหรือกรดโอเลอิกที่ผสมกับไขมันมีผลเสริมสภาพความเป็นพลาสติกของฟิล์มให้มีความยืดหยุ่นเพิ่มขึ้น และลดการซึมผ่านของไอน้ำในฟิล์มโซเดียมเคซีนเนต ฟิล์มที่มีอัตราส่วนโปรตีน : กลีเซอรอล : ไขมัน เป็น 1 : 0.3 : 0.5 ที่มีการเติมกรด

โพลีเอทิลีนและโพลีโพรพิลีนในอัตราส่วน 70 : 30 เป็นฟิล์มที่มีสมบัติการดึงยึดและการซึมผ่านของไอน้ำที่ดี ฟิล์มที่ไม่เติมกลีเซอรอลมีสมบัติการต้านทานการซึมผ่านของไอน้ำดีที่สุดในบรรดาฟิล์มที่มีสมบัติการดึงยึดต่ำ

ดังนั้นจากข้อมูลข้างต้น จึงมีความเป็นไปได้ที่จะปรับปรุงสมบัติเชิงกลและสมบัติการต้านทานน้ำของแผ่นกระดาษลูกฟูกโดยใช้พอลิเมอร์ชีวภาพซึ่งประกอบด้วยไฮโดรโพลิเมอร์คาร์บอน ซีน กรดไขมันสเตียริกและโพลีเอทิลีน



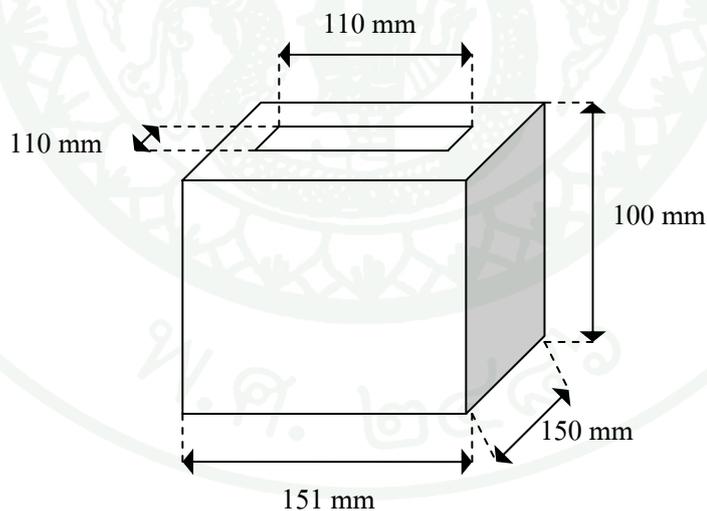
อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

1. วัสดุดิบ

1.1 แผ่นกระดาษลูกฟูก 5 ชั้น ชนิดลอน BC ซึ่งมีความหนาของแผ่นลูกฟูกประมาณ 7 มิลลิเมตร และประกอบด้วยกระดาษปะด้านนอกและด้านในสุด (outer and inner liner) ชนิด KA ที่มีน้ำหนักมาตรฐาน 150 กรัมต่อตารางเมตร ส่วนกระดาษทำลอนลูกฟูก (corrugate medium) และกระดาษปะชั้นกลาง คือกระดาษชนิด CA ที่มีน้ำหนักมาตรฐาน 125 กรัมต่อตารางเมตร (KA150/3CA125/KA150) จาก บริษัท สยามกราฟท์ จำกัด

1.2 ชิ้นส่วนโครงสร้างแท่นรองรับสินค้าลูกฟูกบริเวณส่วนขาของแท่นรองรับสินค้า จาก บริษัท แมททีเรียล สเตนดาร์ด จำกัด แสดงดังภาพที่ 22



ภาพที่ 22 ชิ้นส่วนโครงสร้างแท่นรองรับสินค้าลูกฟูกบริเวณส่วนขาของแท่นรองรับสินค้า

1.3 ไฮโดรโฟบิกสตาร์ช (Hydrophobic starch, Filmkote 370™) ได้รับความอนุเคราะห์จาก บริษัท เนชั่นเนล สตาร์ชแอนเคมิกคอล ประเทศไทย

1.4 ซีน (Zein, Fluka USA)

1.5 กรดไขมันสเตียริก (Stearic acid, Fluka USA)

1.6 ไขผึ้ง (Beeswax, Hong Huat CO., LTD.) นำเข้าจากเยอรมันผ่านร้านค้าปลีกสงหวัด โดย ไขผึ้งที่ใช้ประกอบด้วย เอสเทอร์ของ long chain wax alcohol (C24-C44) ที่มี carbon acids (C16/C18) ร้อยละ 70 ไฮโดรคาร์บอน (C25-C35) ร้อยละ 13-18 free wax acids (C24-C32) ร้อยละ 10-15 และ free wax alcohols (C34-C36) ร้อยละ 1 และมีจุดหลอมเหลวที่อุณหภูมิประมาณ 62-64 องศาเซลเซียส

1.7 อิมัลซิไฟเออร์ คือ Tween 60 (ACROS Organics, USA)

1.8 เอทานอลความเข้มข้นร้อยละ 90

2. อุปกรณ์

2.1 เครื่องชั่งละเอียดทศนิยม 3 ตำแหน่ง (Shimadzu BX300, Japan)

2.2 เครื่องชั่งละเอียดทศนิยม 4 ตำแหน่ง (Sartorius BP110S, Germany)

2.3 เครื่องทดสอบสมบัติเชิงกลพลวัต (Dynamic mechanical analysis, DMA, Eplexor, Germany)

2.4 ตู้ควบคุมอุณหภูมิและปริมาณความชื้นสัมพัทธ์ (WTB Binder KBF 240, Germany)

2.5 เครื่องกวนพร้อมแผ่นให้ความร้อน (Hot plate stirrer, Heidolph, Germany)

2.6 ชุดอุปกรณ์เคลือบแผ่นกระดาษลูกฟูก

2.7 เดซิเคเตอร์ (Desiccator)

2.8 เครื่องวัดความหนา (Mitutoyo ID-C112BS, Japan)

2.9 เครื่องทดสอบความต้านทานแรงกดลอนลูกฟูก (Testometric Micro 350, England)

2.10 อ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ (Mettler, Germany)

2.11 เครื่องแก้วที่ใช้ในการทดลอง

2.12 นาฬิกาจับเวลา

2.13 เครื่องวัดมุมสัมผัส (OCA 15EC, Dataphysics, Germany)

2.14 เครื่องตัดกล่อง (Sample cutter, Kongsberg model XL 22, Belgium)

2.15 เครื่องวัดความหนืด (Brookfield RV DV III, USA)

2.16 กล้องถ่ายภาพ (Kodak EasyShare C613, China)

2.17 เครื่องโฮโมจิไนเซอร์ (Homogenizer, IKA® T10 basic, Japan)

วิธีการ

1. การตรวจสอบสมบัติเบื้องต้นของวัตถุดิบ

1.1 ตรวจสอบสมบัติของไฮโดรโฟบิกสตาร์ช ได้แก่ ปริมาณความชื้น (AOAC 1995)

1.2 ตรวจสอบสมบัติของแผ่นกระดาษลูกฟูก

1.2.1 ปรับสภาวะกระดาษ (ISO 187:1990)

1.2.2 น้ำหนักแผ่นกระดาษลูกฟูก (ดัดแปลง ASTM D 646-96)

1.2.3 ความหนา (ASTM D 645-97)

1.2.4 ปริมาณความชื้นในกระดาษ (ASTM D 644-99)

1.2.5 มุมสัมผัสของน้ำ (ASTM D 5946-04)

1.2.6 ความต้านทานแรงกดแผ่นลูกฟูกตามแนวตั้ง (ISO 3037:1994)

1.2.7 ความต้านทานแรงกดแผ่นลูกฟูกในแนวระนาบ (ดัดแปลง TAPPI T 825 om-96)

1.2.8 สมบัติเชิงกลพลวัต (dynamic mechanical analysis)

1.3 ตรวจสอบสมบัติของชิ้นส่วนโครงสร้างแทนรองรับสินค้ากระดาษลูกฟูก

1.3.1 ปรับสภาวะกระดาษ (ISO 187:1990)

1.3.2 น้ำหนักชิ้นส่วนโครงสร้างแทนรองรับสินค้ากระดาษลูกฟูก (ดัดแปลง ASTM D646-96)

1.3.3 ความต้านทานแรงกด (compression test, ดัดแปลง ASTM D 642)

2. ศึกษาอิทธิพลของความเข้มข้นของสารเคลือบไฮโดรโฟบิกสตาร์ช ซีน กรดไขมันสเตียริก และ ไขมันพืชต่อสมบัติการต้านทานน้ำ สมบัติทางกายภาพ และสมบัติเชิงกลของแผ่นกระดาษลูกฟูก

2.1 แผนการทดลอง

ศึกษาอิทธิพลของระดับความเข้มข้นของไฮโดรโฟบิกสตาร์ช ซีน กรดไขมันสเตียริก และไขมันพืชในสารเคลือบ ที่มีผลต่อสมบัติการต้านทานน้ำ สมบัติทางกายภาพ และสมบัติเชิงกล โดยแปรระดับความเข้มข้นของสารทุกชนิด 3 ระดับ คือ ร้อยละ 1 2 และ 3 (โดยน้ำหนัก) เปรียบเทียบกับกระดาษที่ไม่ผ่านการเคลือบ วางแผนการทดลองแบบสุ่มอย่างสมบูรณ์ (completely randomized design, CRD) ทำการทดลองทั้งหมด 2 ซ้ำ

2.2 วิธีการเคลือบกระดาษ

2.2.1 การเตรียมสารเคลือบไฮโดรโฟบิกสตาร์ช

เตรียมสารเคลือบไฮโดรโฟบิกสตาร์ชความเข้มข้นร้อยละ 1 2 และ 3 (โดยน้ำหนัก) ตัวทำละลายที่ใช้คือ น้ำกลั่น และให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 85 ± 5 องศาเซลเซียส (ดวงทิพย์, 2550) โดยใช้เครื่องกวนพร้อมแผ่นให้ความร้อนที่ความเร็ว 500 รอบต่อนาที จนกระทั่งสารเคลือบมีลักษณะใส แล้วจึงนำสารเคลือบไฮโดรโฟบิกสตาร์ชที่ได้ไปควบคุมอุณหภูมิโดยใช้อ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิที่ 75 ± 5 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที เพื่อให้สารเคลือบมีอุณหภูมิคงที่ตามที่กำหนดไว้ก่อนการเคลือบ

2.2.2 การเตรียมสารเคลือบซิน

เตรียมสารเคลือบซินความเข้มข้นร้อยละ 1 2 และ 3 (โดยน้ำหนัก) ตัวทำละลายที่ใช้คือ เอทานอลร้อยละ 90 และให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 65 ± 5 องศาเซลเซียส โดยใช้เครื่องกวนพร้อมแผ่นให้ความร้อน ที่ความเร็ว 500 รอบต่อนาที จนกระทั่งสารเคลือบมีลักษณะเหลืองใส แล้วจึงนำสารเคลือบซินที่ได้ไปควบคุมอุณหภูมิโดยใช้อ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิที่ 65 ± 5 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที เพื่อให้สารเคลือบมีอุณหภูมิคงที่ตามที่กำหนดไว้ก่อนการเคลือบ

2.2.3 การเตรียมสารเคลือบกรดไขมันสเตียริก

เตรียมสารเคลือบกรดไขมันสเตียริกความเข้มข้นร้อยละ 1 2 และ 3 (โดยน้ำหนัก) ตัวทำละลายที่ใช้คือ เอทานอลร้อยละ 90 และให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 65 ± 5 องศาเซลเซียส โดยใช้เครื่องกวนพร้อมแผ่นให้ความร้อน ที่ความเร็ว 500 รอบต่อนาที จนกระทั่งสารเคลือบมีลักษณะใส แล้วจึงนำสารเคลือบกรดไขมันสเตียริกที่ได้ไปควบคุมอุณหภูมิโดยใช้อ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิที่ 65 ± 5 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที เพื่อให้สารเคลือบมีอุณหภูมิคงที่ตามที่กำหนดไว้ก่อนการเคลือบ

2.2.4 การเตรียมสารเคลือบไขผึ้ง

เตรียมสารเคลือบไขผึ้งความเข้มข้นร้อยละ 1 2 และ 3 (โดยน้ำหนัก) ตัวทำละลายที่ใช้คือ เอทานอลร้อยละ 90 และให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 65 ± 5 องศาเซลเซียส โดยใช้เครื่องกวนพร้อมแผ่นให้ความร้อนที่ความเร็ว 500 รอบต่อนาที จนกระทั่งสารเคลือบมีลักษณะใส แล้วจึงนำสารเคลือบไขผึ้งที่ได้ไปควบคุมอุณหภูมิโดยใช้อ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิที่ 65 ± 5 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที เพื่อให้สารเคลือบมีอุณหภูมิคงที่ตามที่กำหนดไว้ก่อนการเคลือบ

2.2.5 การวัดความหนืดของสารเคลือบ

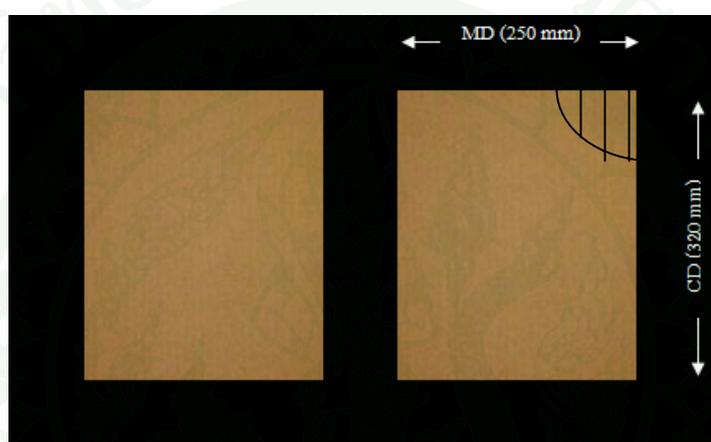
นำสารเคลือบที่เตรียมโดยวิธีในข้อ 2.2.1-2.2.4 มาควบคุมอุณหภูมิก่อนการวัดค่าความหนืด โดยแปรอุณหภูมิเป็น 2 ระดับ คือ 65 ± 5 องศาเซลเซียส และ 75 ± 5 องศาเซลเซียส วัดความหนืดด้วย Brookfield RV DV III ใช้หัววัดหมายเลข 21 ความเร็ว 100 รอบต่อนาที

2.2.6 การสังเกตความคงตัวของสารเคลือบ

นำสารเคลือบที่เตรียมโดยวิธีในข้อ 2.2.1-2.2.4 ตั้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง สังเกตการเปลี่ยนแปลงของสารเคลือบ ณ อุณหภูมิห้องเป็นระยะเวลา 6 ชั่วโมง หลังการเตรียม

2.2.7 การเคลือบแผ่นกระดาษลูกฟูก

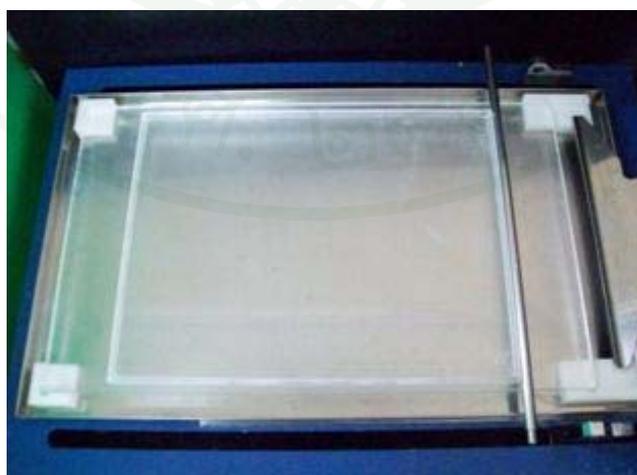
ตัดแผ่นกระดาษลูกฟูกตามแนวยาวของลอนให้มีขนาด 250 x 320 มิลลิเมตร ดังภาพที่ 23 วางลงในถาดอะคริลิกของชุดอุปกรณ์เคลือบแผ่นกระดาษลูกฟูก (ภาพที่ 24) และเคลือบสารเคลือบลงบนแผ่นกระดาษลูกฟูกโดยเทคนิค rod coating โดยใช้ปริมาณสารเคลือบ 10 มิลลิลิตรต่อการเคลือบแต่ละครั้ง จากนั้นทำให้แห้งที่อุณหภูมิห้องเป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง และเคลือบอีกด้านด้วยวิธีเดิม ก่อนนำตัวอย่างไปตัดเพื่อทดสอบสมบัติในลำดับต่อไป



(ก) ด้านหน้า

(ข) ด้านหลัง

ภาพที่ 23 ตัวอย่างแผ่นกระดาษลูกฟูก (ก) ด้านหน้า (ข) ด้านหลัง



ภาพที่ 24 ชุดอุปกรณ์เคลือบแผ่นกระดาษลูกฟูก

2.3 การทดสอบแผ่นกระดาษลูกฟูกหลังเคลือบ

นำแผ่นกระดาษลูกฟูกไปปรับสภาพตาม ISO 187:1990 ก่อนทดสอบสมบัติของแผ่นกระดาษลูกฟูกตามวิธีในข้อ 1.2.2-1.2.8

3. ศึกษาอิทธิพลของการเติมอิมัลซิไฟเออร์และระดับความเข้มข้นของซิน กรดไขมันสเตียริก และไขมันในสารเคลือบผสมระหว่างไฮโดรโฟบิกสตาร์ชและกรดสเตียริก และสารเคลือบผสมระหว่างไฮโดรโฟบิกสตาร์ชและไขมัน ต่อสมบัติของแผ่นกระดาษลูกฟูก

3.1 แผนการทดลอง

ศึกษาอิทธิพลของระดับความเข้มข้นของกรดไขมันสเตียริกและไขมันในสารเคลือบผสมไฮโดรโฟบิกสตาร์ช (ความเข้มข้นร้อยละ 3) โดยมีและไม่มีกรด Tween 60 ต่อสมบัติการต้านทานน้ำ สมบัติทางกายภาพ และ สมบัติเชิงกลของแผ่นกระดาษลูกฟูก โดยแปรระดับความเข้มข้นของกรดไขมันสเตียริกและไขมันเป็น 3 ระดับ คือ ร้อยละ 1 2 และ 3 (โดยน้ำหนัก) เปรียบเทียบกับกระดาษที่ไม่ผ่านการเคลือบ วางแผนการทดลองแบบสุ่มอย่างสมบูรณ์ (completely randomized design, CRD) ทำการทดลองทั้งหมด 2 ซ้ำ

3.2 วิธีการเคลือบกระดาษ

3.2.1 การเตรียมสารเคลือบผสมไฮโดรโฟบิกสตาร์ช-กรดไขมันสเตียริก

เตรียมสารเคลือบไฮโดรโฟบิกสตาร์ชความเข้มข้นร้อยละ 3 (โดยน้ำหนัก) ตัวทำละลายที่ใช้คือ น้ำกลั่น และให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 85 ± 5 องศาเซลเซียส โดยใช้เครื่องกวนพร้อมแผ่นให้ความร้อน ที่ความเร็ว 500 รอบต่อนาที จนกระทั่งสารเคลือบมีลักษณะใส จากนั้นเติม Tween 60 ร้อยละ 10 (โดยน้ำหนัก Tween 60 ต่อน้ำหนักกรดไขมันสเตียริก) (Butkinaree, 2008) แล้วโฮโมจีไนซ์ขณะร้อน 1 นาที จากนั้นจึงเติมกรดไขมันสเตียริกร้อยละ 1 2 และ 3 (โดยน้ำหนักกรดไขมันสเตียริกต่อน้ำหนักสารเคลือบ) ให้ความร้อนและกวนต่อเป็นเวลา 10 นาที แล้ว

โฮโมจิไนซ์ 5 นาที โดยใช้ความเร็วระดับ 4 แล้วจึงนำสารเคลือบที่ได้ไปควบคุมอุณหภูมิโดยใช้อ่างน้ำ ควบคุมอุณหภูมิที่ 75 ± 5 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที เพื่อให้สารละลายมีอุณหภูมิคงที่ตามที่กำหนดไว้ก่อนการเคลือบ

3.2.2 การเตรียมสารเคลือบผสมไฮโดรฟอบิกสตาร์ช-ไขผึ้ง

เตรียมสารเคลือบไฮโดรฟอบิกสตาร์ชความเข้มข้นร้อยละ 3 (โดยน้ำหนัก) ตัวทำละลายที่ใช้คือ น้ำกลั่น และให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 85 ± 5 องศาเซลเซียส โดยใช้เครื่องกวนพร้อมแผ่นให้ความร้อน ที่ความเร็ว 500 รอบต่อนาที จนกระทั่งสารเคลือบมีลักษณะใส จากนั้นเติม Tween 60 ร้อยละ 10 (โดยน้ำหนัก Tween 60 ต่อน้ำหนักไขผึ้ง) แล้วโฮโมจิไนซ์ขณะร้อน 1 นาที จากนั้นจึงเติมไขผึ้งร้อยละ 1 2 และ 3 (โดยน้ำหนักไขผึ้งต่อน้ำหนักสารเคลือบ) ให้ความร้อนและกวนต่อเป็นเวลา 10 นาที แล้วโฮโมจิไนซ์ 5 นาที โดยใช้ความเร็วระดับ 4 แล้วจึงนำสารเคลือบที่ได้ไปควบคุมอุณหภูมิโดยใช้อ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิที่ 75 ± 5 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที เพื่อให้สารละลายมีอุณหภูมิคงที่ตามที่กำหนดไว้ก่อนการเคลือบ

3.2.3 การวัดความหนืดของสารเคลือบ

นำสารเคลือบที่เตรียมโดยวิธีในข้อ 3.2.1 และ 3.2.2 มาวัดความหนืดตามวิธีในข้อ 2.2.5

3.2.4 การสังเกตความคงตัวของสารเคลือบ

ทำการสังเกตความคงตัวของสารเคลือบที่เตรียมโดยวิธีในข้อ 3.2.1 และ 3.2.2 ตามวิธีในข้อ 2.2.6

3.2.5 การเคลือบแผ่นกระดาษลูกฟูก

นำสารเคลือบที่เตรียมได้จากวิธีในข้อ 3.2.1 และ 3.2.2 มาเคลือบแผ่นกระดาษลูกฟูกตามวิธีในข้อ 2.2.7

3.3 การทดสอบแผ่นกระดาษลูกฟูกหลังเคลือบ

นำแผ่นกระดาษลูกฟูกไปปรับสถานะตาม ISO 187:1990 ก่อนทดสอบสมบัติของแผ่นกระดาษลูกฟูกตามวิธีในข้อ 1.2.2-1.2.8

4. ศึกษาอิทธิพลของระดับความเข้มข้นของจีน กรดไขมันสเตียริก และไขมันในสารเคลือบชั้นที่สองต่อสมบัติของแผ่นกระดาษลูกฟูก

4.1 แผนการทดลอง

ศึกษาอิทธิพลของระดับความเข้มข้นของจีน กรดไขมันสเตียริก และไขมันในการใช้เป็นสารเคลือบชั้นที่สองต่อสมบัติการต้านทานน้ำ สมบัติทางกายภาพ และสมบัติเชิงกลของแผ่นกระดาษลูกฟูกที่เคลือบสารเคลือบสองชั้น โดยเคลือบแผ่นกระดาษลูกฟูกในชั้นที่หนึ่งด้วยสารเคลือบไฮโดรโฟบิกสเตียริกความเข้มข้นร้อยละ 3 (โดยน้ำหนัก) และเคลือบสารเคลือบจีน กรดไขมันสเตียริก และไขมันเป็นชั้นที่สอง แปรความเข้มข้น 3 ระดับ คือ ร้อยละ 1 2 และ 3 เปรียบเทียบกับกระดาษที่ไม่ผ่านการเคลือบ วางแผนการทดลองแบบสุ่มอย่างสมบูรณ์ (completely randomized design, CRD) ทำการทดลองทั้งหมด 2 ซ้ำ

4.2 วิธีการเคลือบกระดาษ

4.2.1 การเตรียมสารเคลือบ

เตรียมสารเคลือบไฮโดรโฟบิกสเตียริกความเข้มข้นร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก ตามวิธีในข้อ 2.2.1 และเตรียมสารเคลือบจีน กรดไขมันสเตียริก และไขมันความเข้มข้นร้อยละ 1 2 และ 3 ตามวิธีในข้อ 2.2.2, 2.2.3 และ 2.2.4 ตามลำดับ

4.2.2 การเคลือบแผ่นกระดาษลูกฟูก

นำแผ่นกระดาษลูกฟูกมาเคลือบตามวิธีในข้อ 2.2.7 ด้วยสารเคลือบไฮโดรโฟบิกสเตียริกความเข้มข้นร้อยละ 3 (โดยน้ำหนัก) จากนั้นนำสารเคลือบจีน

กรดไขมันสเตียริก และไขมันที่เตรียมไว้มาเคลือบลงไปบนกระดาษที่เคลือบด้วยสารละลายไฮโดรฟอบิกสตาร์ชที่แห้งแล้วตามวิธีในข้อ 2.2.7 เช่นกัน

4.3 การทดสอบแผ่นกระดาษลูกฟูกหลังเคลือบ

นำแผ่นกระดาษลูกฟูกไปปรับสถานะตาม ISO 187:1990 ก่อนทดสอบสมบัติของแผ่นกระดาษลูกฟูกตามวิธีในข้อ 1.2.2-1.2.8

5. ศึกษาอิทธิพลของระยะเวลาการเก็บ ณ อุณหภูมิห้องต่อสมบัติการต้านทานน้ำของแผ่นกระดาษลูกฟูกเคลือบ

นำแผ่นกระดาษลูกฟูกที่เคลือบตามวิธีการในข้อ 2.2, 3.2 และ 4.2 เก็บไว้ที่สถานะอุณหภูมิห้อง (อุณหภูมิ 25-32 องศาเซลเซียส และความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 68-74) ซึ่งเป็นสถานะการเก็บสินค้าในคลังสินค้าในเขตร้อนชื้นโดยทั่วไป เป็นเวลา 4 สัปดาห์ ทำการสุ่มตัวอย่างทุก 1 สัปดาห์เพื่อมาทดสอบคุณสมบัติของน้ำตามข้อ 1.2.5 เปรียบเทียบกับแผ่นกระดาษลูกฟูกที่ไม่ผ่านการเคลือบ วางแผนการทดลองแบบสุ่มอย่างสมบูรณ์ (completely randomized design, CRD) ทำการทดลองทั้งหมด 2 ซ้ำ

6. ศึกษาอิทธิพลของการเคลือบด้วยสารเคลือบชีวภาพต่อสมบัติเชิงกลของชิ้นส่วนแท่นรองรับสินค้ากระดาษลูกฟูก

6.1 แผนการทดลอง

จากผลการทดสอบตัวอย่างแผ่นกระดาษลูกฟูกเคลือบทั้ง 33 ทรีตเมนต์ เลือกสารเคลือบที่ให้สมบัติการต้านทานน้ำและสมบัติทางกายภาพที่ดีที่สุด 3 ทรีตเมนต์ มาใช้ในการเคลือบชิ้นส่วนโครงสร้างแท่นรองรับสินค้ากระดาษลูกฟูก

6.2 การเคลือบชิ้นส่วนแทนรองรับสินค้ากระดาษลูกฟูก

เคลือบชิ้นส่วนแทนรองรับสินค้ากระดาษลูกฟูกทั้ง 4 ด้านโดยวิธี brush application จากนั้นทำให้แห้งที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ก่อนนำตัวอย่างไปทดสอบสมบัติในลำดับต่อไป

6.3 การทดสอบชิ้นส่วนแทนรองรับสินค้ากระดาษลูกฟูกหลังเคลือบ

ทดสอบสมบัติของชิ้นส่วน โครงสร้างแทนรองรับสินค้ากระดาษลูกฟูกตามวิธีข้อ 1.3

7. การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

วิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติโดยการทดสอบความแปรปรวน (Analysis of Variance, ANOVA) และเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยระหว่างทรีตเมนต์ด้วยวิธี Duncan's new multiple range test (DMRT) ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ด้วยโปรแกรม SPSS version 16.0

ผลและวิจารณ์

1. สมบัติเบื้องต้นของวัสดุคืบ

ไฮโดรโฟบิกสตาร์ชที่ใช้มีปริมาณความชื้นเริ่มต้นร้อยละ 11.30 โดยค่าปริมาณความชื้นของไฮโดรโฟบิกสตาร์ชนี้จะนำไปใช้ในการคำนวณปริมาณไฮโดรโฟบิกสตาร์ชที่จะใช้ในการเตรียมสารเคลือบ

แผ่นกระดาษลูกฟูกที่ใช้ในการศึกษานี้เป็นแผ่นกระดาษลูกฟูก 5 ชั้น ชนิดลอน BC ซึ่งมีความหนาของแผ่นลูกฟูกโดยรวมประมาณ 7 มิลลิเมตร และประกอบด้วยกระดาษปะด้านนอกและด้านในสุด (outer and inner liner) ชนิด KA ที่มีน้ำหนักมาตรฐาน 150 กรัมต่อตารางเมตร ส่วนกระดาษทำลอนลูกฟูก (corrugate medium) และกระดาษแผ่นเรียบชั้นกลาง คือกระดาษชนิด CA ที่มีน้ำหนักมาตรฐาน 125 กรัมต่อตารางเมตร แผ่นกระดาษลูกฟูกดังกล่าวมีสมบัติทางกายภาพ สมบัติเชิงกล และสมบัติการต้านทานน้ำก่อนการเคลือบดังตารางที่ 5

ชิ้นส่วนแทนรองรับสินค้ากระดาษลูกฟูกที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นชิ้นส่วนของโครงสร้างแทนรองรับสินค้า ประกอบไปด้วยแผ่นกระดาษลูกฟูก 5 ชั้นประกบติดกันสามแผ่นโดยใช้กาว มีลักษณะโครงสร้างเป็นสี่เหลี่ยมขนาดภายนอก (outer dimension) 151 x 150 x 100 มิลลิเมตร และขนาดภายใน (inner dimension) 110 x 110 x 100 มิลลิเมตร ดังภาพที่ 25



ภาพที่ 25 ชิ้นส่วนแทนรองรับสินค้ากระดาษลูกฟูก

ตารางที่ 5 สมบัติของแผ่นกระดาษลูกฟูก

สมบัติ	ค่าทดสอบ
น้ำหนักแผ่นลูกฟูก (กรัมต่อตารางเมตร)	803.673 ± 7.15
ความหนา (มิลลิเมตร)	7.046 ± 0.02
ความชื้น (ร้อยละ)	8.85 ± 0.18
มุมสัมผัสของน้ำของผิวกระดาษลูกฟูก (องศา)	121.99 ± 1.09
ค่าความต้านทานแรงกดแผ่นลูกฟูกตามแนวตั้ง (กิโลนิวตันต่อเมตร)	6.38 ± 0.11
ค่าความต้านทานแรงกดแผ่นลูกฟูกในแนวระนาบ (กิโลปาสคาล, kPa)	113.71 ± 3.58

ตารางที่ 6 สมบัติของชิ้นส่วนแทนรองรับสินค้ากระดาษลูกฟูก

สมบัติ	ค่าทดสอบ
น้ำหนักชิ้นส่วน โครงสร้างแทนรองรับสินค้ากระดาษลูกฟูก (กรัม/ชิ้น)	176.78 ± 1.22
ความต้านทานแรงกดในแนวตั้ง (กิโลกรัมแรง)	1522 ± 64

2. อิทธิพลของความเข้มข้นของสารเคลือบไฮโดรโฟบิกสตาร์ช ชิน กรดไขมันสเตียริก และไขมัน ต่อสมบัติการต้านทานน้ำ สมบัติทางกายภาพ และสมบัติเชิงกลของแผ่นกระดาษลูกฟูก

2.1 สมบัติทางกายภาพของสารเคลือบ

2.1.1 ความหนืดของสารเคลือบ

สมบัติทางกายภาพของสารเคลือบที่สำคัญ คือ ความหนืด โดยค่าความหนืดของสารเคลือบแสดงดังตารางที่ 7 พบว่า สารเคลือบไฮโดรโฟบิกสตาร์ช สารเคลือบชิน สารเคลือบกรดไขมันสเตียริกและสารเคลือบไขมันเกือบทุกความเข้มข้นมีความหนืดลดลงอย่างมีนัยสำคัญ เมื่ออุณหภูมิของสารเคลือบเพิ่มขึ้นจาก 65 องศาเซลเซียส เป็น 75 องศาเซลเซียส และเมื่อความเข้มข้นของสารเคลือบเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 1 เป็นร้อยละ 2 และ 3 พบว่าสารเคลือบไฮโดร โฟบิกสตาร์ชและ

สารเคลือบไขผึ้งมีความหนืดเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) ส่วนสารเคลือบซินและสารเคลือบกรดไขมันสเตียริกนั้นเมื่อความเข้มข้นของสารเคลือบเพิ่มขึ้น ความหนืดยังคงไม่แตกต่างกันทางสถิติ เนื่องจากไฮโดรโฟบิกสตาร์ชและไขผึ้งมีน้ำหนักโมเลกุลมาก เมื่อเพิ่มความเข้มข้นจึงทำให้ความหนืดของสารเคลือบไฮโดรโฟบิกสตาร์ชและสารเคลือบไขผึ้งเพิ่มมากกว่าความหนืดของสารเคลือบซินและสารเคลือบกรดไขมันสเตียริก ซึ่งค่าความหนืดที่มากขึ้นนี้จะส่งผลให้สารเคลือบซึมเข้าสู่โครงสร้างกระดาษได้ลดลง และมีสารเคลือบตกค้างที่ผิวหน้ากระดาษมากขึ้น (ดวงทิพย์, 2550)

ตารางที่ 7 ความหนืดของสารเคลือบไฮโดรโฟบิกสตาร์ช สารเคลือบซิน สารเคลือบกรดไขมันสเตียริก และสารเคลือบไขผึ้งความเข้มข้นต่าง ๆ ที่อุณหภูมิ 65 และ 75 องศาเซลเซียส

สารเคลือบ	ความหนืด (เซนติพอยด์)	
	65 องศาเซลเซียส	75 องศาเซลเซียส
ไฮโดรโฟบิกสตาร์ชร้อยละ 1	1.44 ± 0.04 ^{fgh}	0.94 ± 0.03 ^h
ไฮโดรโฟบิกสตาร์ชร้อยละ 2	2.05 ± 0.00 ^e	1.82 ± 0.08 ^{efg}
ไฮโดรโฟบิกสตาร์ชร้อยละ 3	2.83 ± 0.12 ^d	2.77 ± 0.05 ^d
ซินร้อยละ 1	1.67 ± 0.07 ^{efg}	1.50 ± 0.10 ^{efgh}
ซินร้อยละ 2	1.68 ± 0.13 ^{efg}	1.52 ± 0.10 ^{efgh}
ซินร้อยละ 3	2.01 ± 0.16 ^{ef}	1.87 ± 0.23 ^{efg}
กรดไขมันสเตียริกร้อยละ 1	1.26 ± 0.19 ^{gh}	1.26 ± 0.16 ^{gh}
กรดไขมันสเตียริกร้อยละ 2	1.34 ± 0.20 ^{gh}	1.26 ± 0.19 ^{gh}
กรดไขมันสเตียริกร้อยละ 3	1.41 ± 0.23 ^{fgh}	1.37 ± 0.24 ^{gh}
ไขผึ้งร้อยละ 1	3.95 ± 0.36 ^c	3.82 ± 0.26 ^c
ไขผึ้งร้อยละ 2	4.95 ± 0.76 ^b	4.65 ± 0.10 ^b
ไขผึ้งร้อยละ 3	5.74 ± 0.87 ^a	5.06 ± 0.71 ^b

หมายเหตุ ^{a-h} ตัวอักษรที่ต่างกันหมายถึงค่าเฉลี่ยมีความแตกต่างกันทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

เมื่อเปรียบเทียบสารเคลือบทุกชนิดที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส ที่ความเข้มข้นร้อยละ 3 พบว่า สารเคลือบไขผึ้งมีความหนืดมากที่สุด (5.74 เซนติพอยด์) รองลงมาคือสารเคลือบไฮโดรฟอบิกสตาร์ช (2.83 เซนติพอยด์) สารเคลือบซิน (2.01 เซนติพอยด์) และสารเคลือบกรดไขมันสเตียริก (1.41 เซนติพอยด์) ตามลำดับ

2.2.2 ลักษณะของสารเคลือบเมื่อตั้งทิ้งไว้ ณ อุณหภูมิห้อง

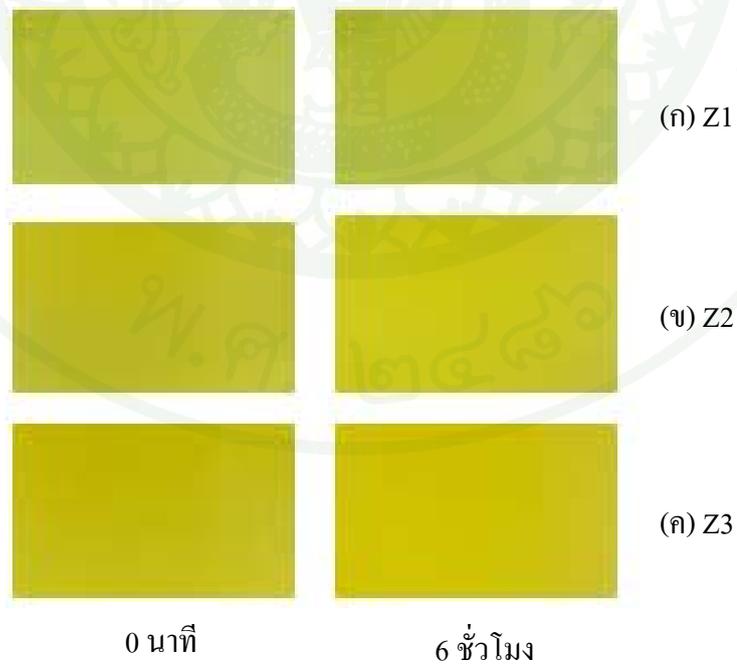
ลักษณะความคงตัวของสารเคลือบไฮโดรฟอบิกสตาร์ช ซิน กรดไขมันสเตียริก และไขผึ้งเมื่อตั้งทิ้งไว้ ณ อุณหภูมิห้องที่ระยะเวลาต่าง ๆ แสดงดังภาพที่ 26-29 จากการสังเกตสารเคลือบทุกชนิดที่เตรียมได้ พบว่า สารเคลือบไฮโดรฟอบิกสตาร์ชมีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกัน สีขาวค่อนข้างใส เมื่อตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นระยะเวลา 6 ชั่วโมง พบว่าสารเคลือบไฮโดรฟอบิกสตาร์ชทุกความเข้มข้นมีความขุ่นเพิ่มขึ้นเล็กน้อยและยังคงมีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกัน

สารเคลือบซินมีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกัน สีเหลืองค่อนข้างใส โดยที่ความเข้มข้นเพิ่มขึ้น สารเคลือบจะมีลักษณะเหลืองขุ่นมากขึ้น และเมื่อตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นระยะเวลา 6 ชั่วโมง พบว่า สารเคลือบซินทุกระดับความเข้มข้นยังคงมีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกันแต่มีความขุ่นเพิ่มขึ้นเล็กน้อย

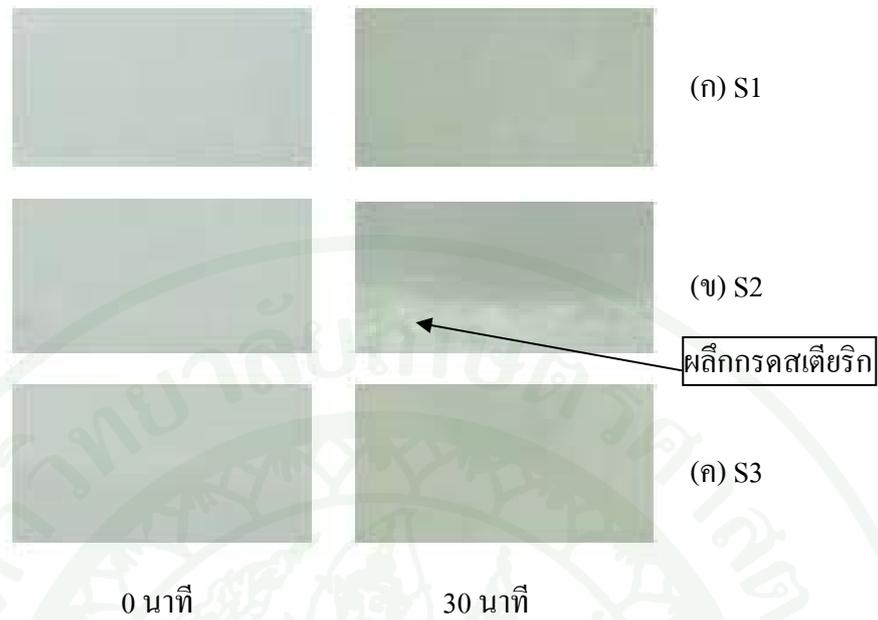
สารเคลือบกรดไขมันสเตียริกที่เตรียมได้ทุกระดับความเข้มข้นมีลักษณะใส เป็นเนื้อเดียวกัน แต่เมื่อตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง พบว่า สารเคลือบกรดไขมันสเตียริกเริ่มเกิดผลึกและมีความขุ่นเพิ่มขึ้น โดยสารเคลือบกรดไขมันสเตียริกที่มีความเข้มข้นสูงจะเกิดผลึกเร็วกว่าสารเคลือบที่มีความเข้มข้นต่ำ เมื่อพิจารณาจากภาพที่ 28 ณ ที่เวลา 30 นาที สารเคลือบกรดไขมันสเตียริกความเข้มข้นร้อยละ 1 เริ่มขุ่นแต่ยังไม่เกิดผลึก ในขณะที่สารเคลือบกรดไขมันสเตียริกความเข้มข้นร้อยละ 2 เกิดผลึกบางส่วน และสารเคลือบกรดไขมันสเตียริกความเข้มข้นร้อยละ 3 เกิดผลึกทั่วทั้งสารเคลือบ



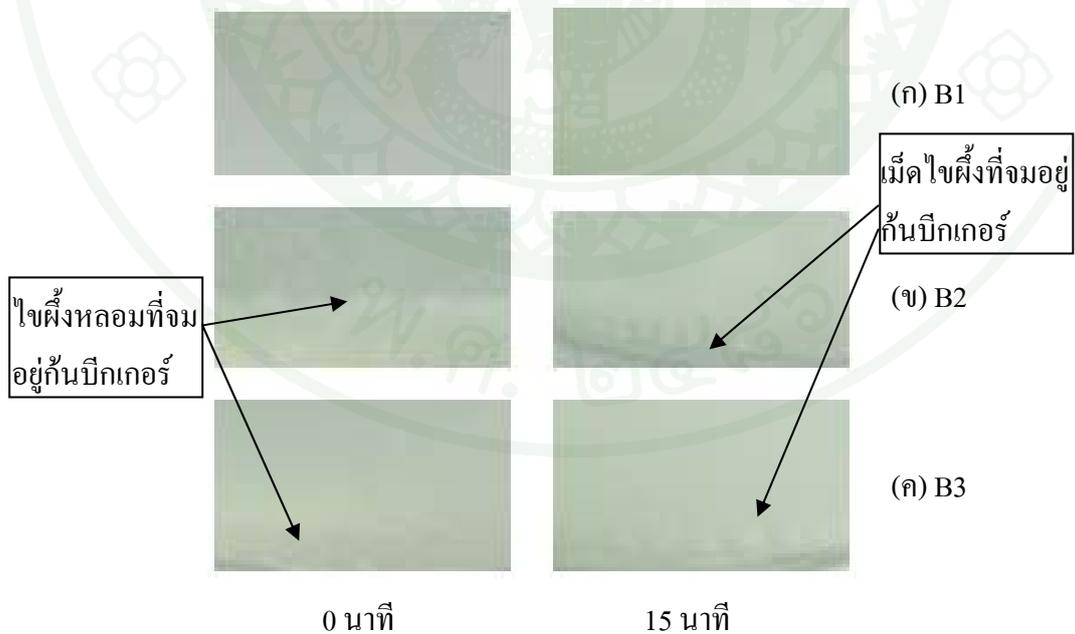
ภาพที่ 26 ลักษณะสารเคลือบไฮโดรโพรพิกสตาร์ช ณ เวลา 0 นาที และ 6 ชั่วโมง หลังการเตรียม
 (ก) H1; ไฮโดรโพรพิกสตาร์ชร้อยละ 1 (ข) H2; ไฮโดรโพรพิกสตาร์ชร้อยละ 2
 (ค) H3; ไฮโดรโพรพิกสตาร์ชร้อยละ 3



ภาพที่ 27 ลักษณะสารเคลือบชิติน ณ เวลา 0 นาที และ 6 ชั่วโมง หลังการเตรียม
 (ก) Z1; ชิตินร้อยละ 1 (ข) Z2; ชิตินร้อยละ 2 (ค) Z3; ชิตินร้อยละ 3



ภาพที่ 28 ลักษณะสารเคลือบกรดไขมันสเตียริก ณ เวลา 0 นาที และ 30 นาที หลังการเตรียม
 (ก) S1; กรดไขมันสเตียริกร้อยละ 1 (ข) S2; กรดไขมันสเตียริกร้อยละ 2
 (ค) S3; กรดไขมันสเตียริกร้อยละ 3

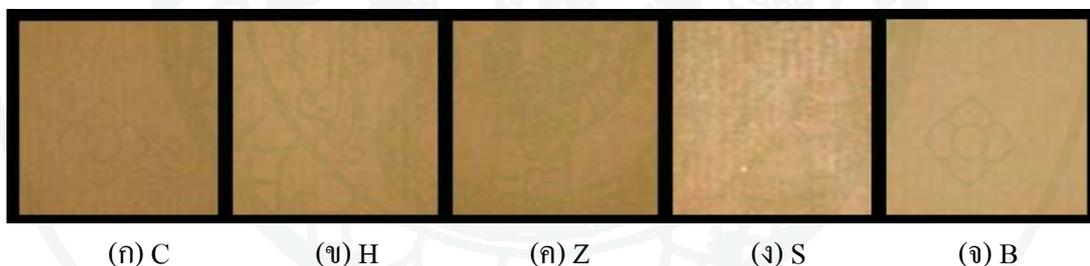


ภาพที่ 29 ลักษณะสารเคลือบไขมัน ณ เวลา 0 นาที และ 15 นาที หลังการเตรียม
 (ก) B1; ไขมันร้อยละ 1 (ข) B2; ไขมันร้อยละ 2 (ค) B3; ไขมันร้อยละ 3

สารเคลือบไขผึ้งมีลักษณะเป็นสารแขวนลอย โดยเม็ดยของไขผึ้งที่หลอมแล้ว กระจายอยู่ในตัวทำละลายเอทานอล ที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 1 เม็ดไขผึ้งกระจายแขวนลอยได้ดี ในเอทานอล แต่เมื่อระดับความเข้มข้นเพิ่มมากขึ้นเป็นร้อยละ 2 และร้อยละ 3 พบว่าขนาดของเม็ด ไขผึ้งมีขนาดใหญ่ขึ้นและมีส่วนหนึ่งจมอยู่ก้นภาชนะ เมื่อตั้งทิ้งไว้พบว่าที่เวลา 15 นาที สารเคลือบ ไขผึ้งความเข้มข้นร้อยละ 1 มีลักษณะขุ่นขาว ในขณะที่สารเคลือบไขผึ้งความเข้มข้นร้อยละ 2 และ ร้อยละ 3 มีลักษณะขุ่นขาวและเริ่มเกิดตะกอนสีขาวของไขผึ้งที่ก้นภาชนะ โดยที่ระดับความเข้มข้น ร้อยละ 3 เกิดตะกอนสีขาวของไขผึ้งที่มีขนาดใหญ่กว่าที่ก้นภาชนะ ทั้งนี้เนื่องมาจากไขผึ้งสามารถ ละลายในสารละลายเอทานอลร้อนได้เพียงบางส่วน เมื่ออุณหภูมิของสารเคลือบลดลง ไขผึ้งส่วนที่ ไม่ละลายจะแข็งตัวและจมอยู่ก้นภาชนะ

2.2 สมบัติทางกายภาพของแผ่นกระดาษลูกฟูกหลังเคลือบ

แผ่นกระดาษลูกฟูกหลังเคลือบด้วยสารเคลือบไฮโดรโฟบิกสตาร์ช ซีน กรดไขมัน สเตียริกและไขผึ้ง มีลักษณะแสดงดังภาพที่ 30



(ก) C

(ข) H

(ค) Z

(ง) S

(จ) B

ภาพที่ 30 ลักษณะแผ่นกระดาษลูกฟูกก่อนและหลังเคลือบ (ก) C; กระดาษที่ไม่ผ่านการเคลือบ (ข) H; เคลือบไฮโดร โฟบิกสตาร์ช (ค) Z; เคลือบซีน (ง) S; เคลือบกรดไขมันสเตียริก และ (จ) B; เคลือบไขผึ้ง

แผ่นกระดาษลูกฟูกที่เคลือบด้วยไฮโดรโฟบิกสตาร์ชจะมีลักษณะผิวหน้าที่เรียบและมันวาว แผ่นกระดาษลูกฟูกที่เคลือบด้วยซีน จะมีลักษณะผิวหน้าไม่แตกต่างจากแผ่นกระดาษลูกฟูก ที่ไม่ผ่านการเคลือบ แผ่นกระดาษลูกฟูกที่เคลือบด้วยกรดไขมันสเตียริกมีลักษณะผิวหน้าไม่ค่อย เรียบ ผิวหน้าเต็มไปด้วยสีขาวของกรดไขมันสเตียริกที่บางส่วนสามารถหลุดร้อนได้ง่ายเมื่อถูก สัมผัส อาจเนื่องจากสารเคลือบกรดไขมัน สเตียริกที่ใช้มีความเข้มข้นสูงเกินไป โดยจะสังเกตได้ จากลักษณะของสารเคลือบกรดไขมันสเตียริกที่เกิดการตกผลึกเมื่อตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง หลังจาก

นำไปเคลือบบนกระดาษและผ่านการทำแห้งระเหยตัวทำละลายออกไปแล้ว จึงเกิดผลึกบางส่วนอยู่บนผิวหน้ากระดาษ ซึ่งการยึดติดกับผิวหน้ากระดาษอาจไม่ดีพอและหลุดออกได้ง่าย ส่วนแผ่นกระดาษลูกฟูกที่เคลือบด้วยไผ่ฝ้านั้นผิวหน้าของแผ่นกระดาษเรียบและมีสีนวลขึ้น แต่เมื่อเคลือบด้วยความเข้มข้นที่สูง ผิวหน้าบางส่วนของแผ่นกระดาษจะไม่เรียบ มีไผ่ฝ้าเป็นก้อนเล็ก ๆ ติดอยู่บางจุด

ตารางที่ 8 น้ำหนัก ความหนา และปริมาณความชื้นของแผ่นกระดาษลูกฟูกหลังเคลือบด้วยสารเคลือบไฮโดรฟอบิกสตาร์ซ สารเคลือบซิน สารเคลือบกรดไขมันสเตียริก และสารเคลือบไผ่ฝ้าที่ความเข้มข้นต่าง ๆ

สารเคลือบ	ค่าทดสอบ		
	น้ำหนักแผ่นลูกฟูก (กรัมต่อตารางเมตร)	ความหนา (มิลลิเมตร)	ความชื้น (ร้อยละ)
แผ่นกระดาษลูกฟูกที่ไม่ผ่านการเคลือบ	803.673 ± 7.15 ^{ns}	7.046 ± 0.02 ^{ns}	8.85 ± 0.18 ^f
ไฮโดรฟอบิกสตาร์ซร้อยละ 1	805.248 ± 6.52 ^{ns}	7.046 ± 0.02 ^{ns}	9.64 ± 0.14 ^{ab}
ไฮโดรฟอบิกสตาร์ซร้อยละ 2	805.305 ± 4.19 ^{ns}	7.047 ± 0.01 ^{ns}	9.54 ± 0.09 ^{abcde}
ไฮโดรฟอบิกสตาร์ซร้อยละ 3	806.179 ± 5.85 ^{ns}	7.047 ± 0.02 ^{ns}	9.25 ± 0.12 ^c
ซินร้อยละ 1	804.709 ± 3.77 ^{ns}	7.046 ± 0.01 ^{ns}	9.28 ± 0.35 ^{cde}
ซินร้อยละ 2	805.159 ± 5.35 ^{ns}	7.047 ± 0.01 ^{ns}	9.50 ± 0.08 ^{bcde}
ซินร้อยละ 3	807.935 ± 4.66 ^{ns}	7.047 ± 0.02 ^{ns}	9.85 ± 0.07 ^a
กรดไขมันสเตียริกร้อยละ 1	808.310 ± 3.45 ^{ns}	7.046 ± 0.01 ^{ns}	9.62 ± 0.17 ^{ab}
กรดไขมันสเตียริกร้อยละ 2	809.370 ± 8.22 ^{ns}	7.046 ± 0.02 ^{ns}	9.37 ± 0.17 ^{bcde}
กรดไขมันสเตียริกร้อยละ 3	810.228 ± 8.02 ^{ns}	7.047 ± 0.01 ^{ns}	9.27 ± 0.13 ^{de}
ไผ่ฝ้าร้อยละ 1	808.294 ± 3.19 ^{ns}	7.047 ± 0.01 ^{ns}	9.58 ± 0.31 ^{abcd}
ไผ่ฝ้าร้อยละ 2	810.778 ± 5.70 ^{ns}	7.047 ± 0.02 ^{ns}	9.60 ± 0.03 ^{abc}
ไผ่ฝ้าร้อยละ 3	810.780 ± 6.09 ^{ns}	7.047 ± 0.01 ^{ns}	9.60 ± 0.18 ^{abc}

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

^{ns} หมายถึงค่าเฉลี่ยในแถวตั้งไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

จากผลการตรวจสอบน้ำหนักแผ่นลูกฟูก ความหนา และปริมาณความชื้นของแผ่นกระดาษลูกฟูกหลังเคลือบด้วยสารเคลือบไฮโดรโฟบิกสตาร์ซ สารเคลือบซิน สารเคลือบกรดไขมันสเตียริก และสารเคลือบไขผึ้งที่ระดับความเข้มข้นต่าง ๆ แสดงดังตารางที่ 8 เปรียบเทียบกับแผ่นกระดาษลูกฟูกที่ไม่ผ่านการเคลือบ พบว่า น้ำหนักและความหนาของแผ่นกระดาษหลังเคลือบด้วยสารเคลือบทุกชนิดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น แต่ไม่แตกต่างทางสถิติ เนื่องจากสารเคลือบไฮโดรโฟบิกสตาร์ซ สารเคลือบซิน สารเคลือบกรดไขมันสเตียริกและสารเคลือบไขผึ้งมีความเข้มข้นต่ำคือ ร้อยละ 1 2 และ 3 จึงไม่น่าจะมีอิทธิพลต่อการเพิ่มขึ้นของน้ำหนักของแผ่นลูกฟูกเนื่องจากมีปริมาณสารเคลือบบนกระดาษน้อย

เมื่อพิจารณาความชื้นของกระดาษที่ผ่านการเคลือบเปรียบเทียบกับกระดาษหลังเคลือบพบว่า กระดาษหลังเคลือบมีปริมาณความชื้นเพิ่มสูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) อาจเกิดจากสตาร์ซที่สามารถดูดซับความชื้นจากสถานะแวดล้อมได้บางส่วน และแผ่นลูกฟูกที่สามารถดูดซับความชื้นได้เช่นกันเมื่ออยู่ภายใต้สถานะที่มีความชื้นสูง (นวพร, 2549) โดยกระดาษที่เคลือบด้วยไฮโดรโฟบิกสตาร์ซมีความชื้นเพิ่มขึ้นร้อยละ 4.5-8.9 กระดาษที่เคลือบด้วยซินมีความชื้นเพิ่มขึ้นร้อยละ 4.8-11.3 กระดาษที่เคลือบด้วยกรดไขมันสเตียริกมีความชื้นเพิ่มขึ้นร้อยละ 4.7-8.7 และกระดาษที่เคลือบด้วยไขผึ้งมีความชื้นเพิ่มขึ้นร้อยละ 8.2-8.5

2.3 สมบัติการต้านทานน้ำของแผ่นกระดาษลูกฟูกหลังเคลือบ

ค่ามุมสัมผัสของน้ำของแผ่นกระดาษลูกฟูกที่ไม่ผ่านการเคลือบและ แผ่นกระดาษลูกฟูกที่เคลือบด้วยสารเคลือบไฮโดรโฟบิกสตาร์ซ สารเคลือบซิน สารเคลือบกรดไขมันสเตียริก และสารเคลือบไขผึ้ง แสดงดังตารางที่ 9 จากผลการศึกษา พบว่า การเคลือบแผ่นกระดาษลูกฟูกด้วยไฮโดรโฟบิกสตาร์ซ กรดไขมันสเตียริก และไขผึ้ง สามารถเพิ่มสมบัติการต้านทานน้ำของแผ่นกระดาษลูกฟูกได้อย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) โดยมุมสัมผัสน้ำมีค่าเพิ่มขึ้นร้อยละ 3.1-4.1 เมื่อเคลือบด้วยไฮโดรโฟบิกสตาร์ซ และเพิ่มขึ้นร้อยละ 5.7-6.5 เมื่อเคลือบด้วยกรดไขมันสเตียริก ส่วนการเคลือบไขผึ้งทำให้มุมสัมผัสเพิ่มขึ้นมากที่สุดคือร้อยละ 7.6-9.6

เมื่อความเข้มข้นของสารเคลือบกรดไขมันสเตียริกและไขผึ้งสูงขึ้นจะส่งผลให้ความสามารถในการต้านทานน้ำเพิ่มขึ้นตามไปด้วย (Ayranci and Tunc, 2001) โดยสารเคลือบไขผึ้งร้อยละ 3 ส่งผลให้ค่ามุมสัมผัสของน้ำมีค่ามากที่สุดที่ 133.76 องศา ในขณะที่มุมสัมผัสของน้ำของแผ่น

กระดาษลูกฟูกที่ไม่ได้เคลือบเท่ากับ 121.99 องศา เนื่องจากไผ่ซึ่งประกอบไปด้วยไฮโดรคาร์บอนสายยาวที่มีความไม่ชอบน้ำสูง จึงทำให้แผ่นกระดาษลูกฟูกที่ผ่านการเคลือบมีความต้านทานน้ำมากขึ้น (Yang and Paulson, 2000)

ตารางที่ 9 ค่ามอดูลัสของน้ำของแผ่นกระดาษลูกฟูกหลังเคลือบด้วยสารเคลือบ

ไฮโดรโฟบิกสตาร์ช สารเคลือบซิน สารเคลือบกรดไขมันสเตียริก และสารเคลือบไผ่ ซึ่งที่ความเข้มข้นต่าง ๆ

สารเคลือบ	มอดูลัสของน้ำ (องศา)
แผ่นกระดาษลูกฟูกที่ไม่ผ่านการเคลือบ	121.99 ± 1.09 ^c
ไฮโดรโฟบิกสตาร์ชร้อยละ 1	125.81 ± 3.95 ^d
ไฮโดรโฟบิกสตาร์ชร้อยละ 2	127.00 ± 0.81 ^{cd}
ไฮโดรโฟบิกสตาร์ชร้อยละ 3	120.90 ± 1.18 ^{ef}
ซินร้อยละ 1	117.47 ± 1.12 ^f
ซินร้อยละ 2	113.43 ± 0.25 ^g
ซินร้อยละ 3	109.67 ± 1.06 ^h
กรดไขมันสเตียริกร้อยละ 1	128.96 ± 0.91 ^{bcd}
กรดไขมันสเตียริกร้อยละ 2	129.33 ± 0.92 ^{bcd}
กรดไขมันสเตียริกร้อยละ 3	129.98 ± 0.42 ^{bc}
ไผ่ร้อยละ 1	131.36 ± 0.71 ^{ab}
ไผ่ร้อยละ 2	131.22 ± 2.54 ^{ab}
ไผ่ร้อยละ 3	133.76 ± 2.04 ^a

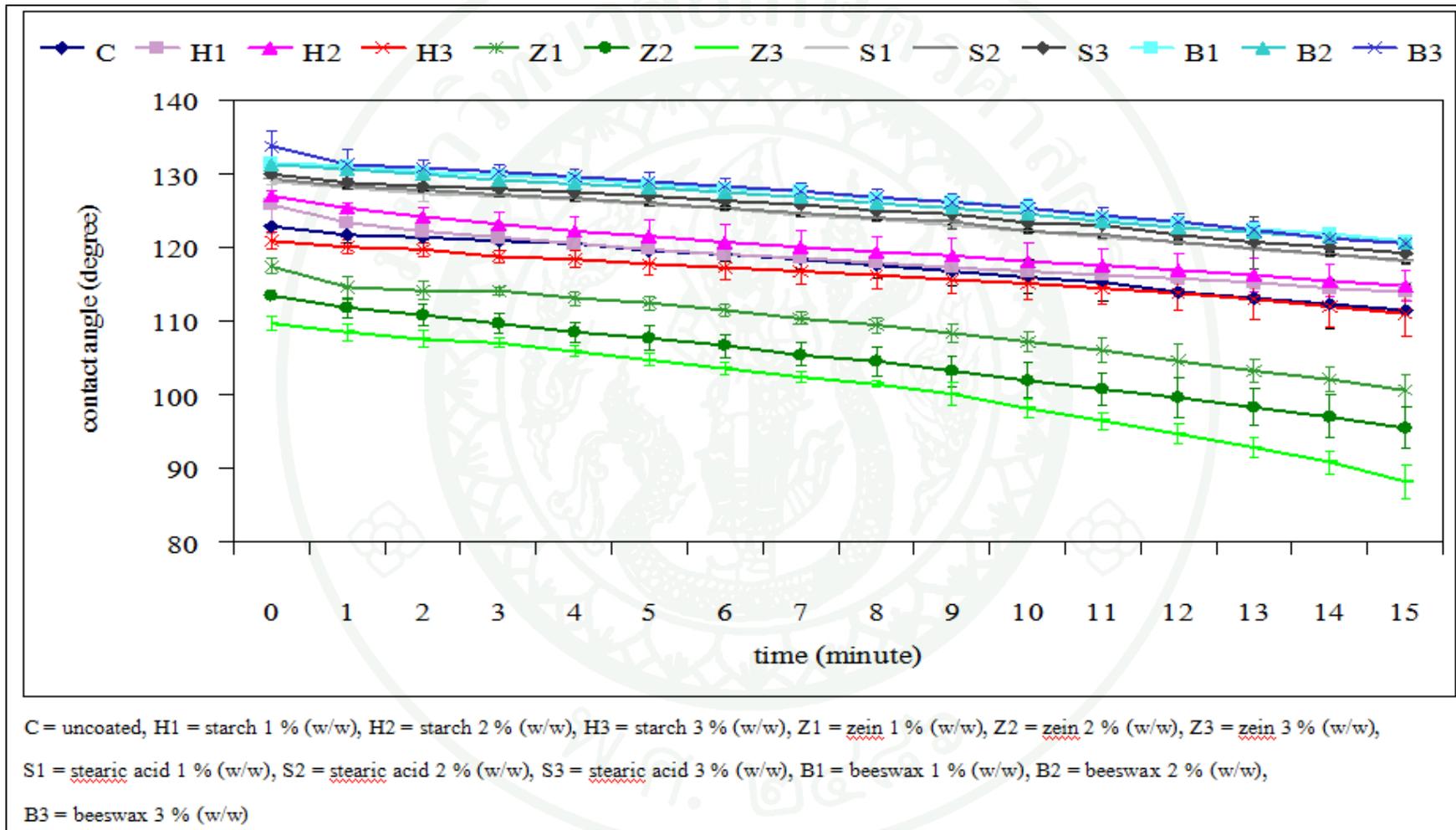
หมายเหตุ ^{a-h} ตัวอักษรที่ต่างกันแถวตั้งหมายถึงค่าเฉลี่ยมีความแตกต่างกันทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

การเคลือบแผ่นกระดาษลูกฟูกด้วยไฮโดรโฟบิกสตาร์ชร้อยละ 1 และ 2 สามารถเพิ่มความสามารถในการต้านทานการดูดซึมน้ำของแผ่นกระดาษลูกฟูกได้ เนื่องจากไฮโดรโฟบิกสตาร์ชสามารถแทรกซึมลงไปอุดช่องว่างของโครงสร้างผิวหน้ากระดาษ และสตาร์ชดังกล่าวมีการดัดแปรองค์ประกอบโมเลกุลบางส่วนให้มีความไม่ชอบน้ำ แต่เมื่อความเข้มข้นของไฮโดรโฟบิก

สตาร์ชเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 3 พบว่า มุมสัมพัทธ์มีค่าลดลงเนื่องจากสตาร์ชสามารถดูดความชื้นจากสถานะแวดล้อมได้ทำให้ความสามารถในการต้านทานการดูดซึมน้ำของกระดาษลดลงได้ ซึ่งมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกับงานวิจัยของดวงทิพย์ (2550) ที่พบว่า การเพิ่มความเข้มข้นของไฮโดรโฟบิกสตาร์ชจากร้อยละ 8 เป็นร้อยละ 15 ส่งผลให้กระดาษกราฟที่หลังเคลือบมีค่าการดูดซึมน้ำเพิ่มขึ้น

นอกจากนี้ค่ามุมสัมพัทธ์น้ำของแผ่นกระดาษลูกฟูกที่เคลือบด้วยไฮโดรโฟบิกสตาร์ชกรดไขมันสเตียริก และไขมันพืช มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของสารเคลือบเพิ่มมากขึ้น ส่วนการเคลือบแผ่นกระดาษลูกฟูกด้วยซินนิน นั้น ทำให้ความสามารถในการต้านทานการดูดซึมน้ำลดลง อาจเนื่องมาจากฟิล์มซินนินที่ได้ไม่มีความต่อเนื่อง มีลักษณะเปราะ แต่เนื่องจากงานวิจัยนี้ต้องการเปรียบเทียบสารเคลือบซินนินกับสารเคลือบชนิดอื่นที่เตรียมโดยมีองค์ประกอบของสารที่ต้องการศึกษาและตัวทำละลาย และจากการศึกษาของ Fabra *et al.* (2008) พบว่าการเติมพลาสติกไซเซออร์ในฟิล์มพอลิแซคคาไรด์ส่งผลให้สมบัติการดึงยึดดีขึ้น แต่ในขณะเดียวกันก็ส่งผลให้ค่าการซึมผ่านของไอน้ำเพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน จากเหตุผลดังกล่าวข้างต้น สำหรับงานวิจัยนี้จึงพิจารณาไม่เติมพลาสติกไซเซออร์ในสารเคลือบ ซินนิน นอกจากนี้เมื่อระดับความเข้มข้นของซินนินเพิ่มมากขึ้นความสามารถในการต้านทานน้ำยิ่งลดลงมากขึ้น อาจเนื่องจากซินนินเกิดการรวมตัวกันมากขึ้นที่ระดับความเข้มข้นที่สูงขึ้น ซึ่งสามารถสังเกตได้จากความขุ่นของสารเคลือบซินนินที่มีความขุ่นเพิ่มมากขึ้นเมื่อระดับความเข้มข้นของซินนินเพิ่มมากขึ้น (Kim and Xu, 2008)

มุมสัมพัทธ์น้ำแบบต่อเนื่องของแผ่นลูกฟูกหลังเคลือบแสดงดังภาพที่ 31 พบว่า เมื่อเวลาผ่านไปมุมสัมพัทธ์น้ำของ กระดาษหลังเคลือบด้วยสารเคลือบไฮโดรโฟบิกสตาร์ช สารเคลือบซินนิน สารเคลือบกรดไขมันสเตียริก และสารเคลือบไขมันพืชทุกความเข้มข้นมีค่าลดลงอย่างต่อเนื่อง แต่จะสังเกตได้ว่ามุมสัมพัทธ์น้ำของกระดาษหลังเคลือบด้วยสารเคลือบซินนินจะมีค่าลดลงอย่างเห็นได้ชัด อาจเนื่องมาจากลักษณะของฟิล์มซินนินที่ไม่มีความต่อเนื่องดังที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น



ภาพที่ 31 การลดลงของค่ามุมสัมผัสของหยดน้ำเมื่อเวลาผ่านไปสำหรับกระดาษหลังเคลือบ

2.4 สมบัติเชิงกลของแผ่นกระดาษลูกฟูกหลังเคลือบ

ค่าความต้านทานแรงกดแผ่นลูกฟูกตามแนวตั้งและค่าความต้านทานแรงกดแผ่นลูกฟูกในแนวระนาบของแผ่นกระดาษลูกฟูกที่เคลือบด้วยสารเคลือบไฮโดรโฟบิกสตาร์ช สารเคลือบซินสารเคลือบกรดไขมันสเตียริก และสารเคลือบไขผึ้ง เปรียบเทียบกับแผ่นกระดาษลูกฟูกที่ไม่ผ่านการเคลือบแสดงดังตารางที่ 10 พบว่า กระดาษหลังเคลือบด้วยสารเคลือบทุกชนิดมีค่าความต้านทานแรงกดแผ่นลูกฟูกในแนวระนาบเพิ่มขึ้นอยู่ในช่วงร้อยละ 0.5-5.2 แต่พบว่าไม่มีค่าความแตกต่างกันทางสถิติกับกระดาษไม่เคลือบ อาจเนื่องมาจากสารเคลือบพอลิเมอร์ชีวภาพที่ใช้มีความเข้มข้นค่อนข้างต่ำ มีปริมาณสารน้อยจึงส่งผลเพียงเล็กน้อยต่อค่าความต้านทานแรงกดแผ่นลูกฟูกในแนวระนาบ นอกจากนี้การเคลือบอาจไม่ได้ทำให้ลอนลูกฟูกมีความแข็งตัว เนื่องจากสารเคลือบปกคลุมเฉพาะกระดาษทำผิวลูกฟูกเท่านั้น ค่าความต้านทานแรงกดในแนวระนาบจึงไม่มีผลกระทบมากนัก

ส่วนค่าความต้านทานแรงกดแผ่นลูกฟูกตามแนวตั้ง พบว่า กระดาษหลังเคลือบด้วยสารเคลือบทุกชนิดมีค่าความต้านทานแรงกดแผ่นลูกฟูกตามแนวตั้งลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ยกเว้นกระดาษที่เคลือบด้วยไฮโดรโฟบิกสตาร์ชร้อยละ 3 ซึ่งอาจเป็นผลจากการที่สารเคลือบพอลิเมอร์ชีวภาพทั้งสามชนิดดังกล่าวได้แก่ ซิน กรดไขมันสเตียริก และไขผึ้งมีความสามารถในการประสานชั้นองค์ประกอบกระดาษได้ดี ประกอบกับตัวทำละลายเอทานอลอาจแทรกซึมลงไปทำลายความแข็งแรงของชั้นกาวซึ่งเป็นสารเชื่อม ณ จุดยอดลอนของกระดาษลูกฟูกในขณะที่เคลือบกระดาษ ส่งผลให้ค่าความต้านทานแรงกดแผ่นลูกฟูกตามแนวตั้งมีค่าลดลง (Modzelewska, 2006; Rhim, 2006) ในขณะที่สารเคลือบไฮโดรโฟบิกสตาร์ชนั้นเมื่อสารเคลือบแห้งยังทำหน้าที่ช่วยในการเป็นตัวประสานหรือเป็นสารเชื่อมระหว่างชั้นของกระดาษได้ อีกทั้งความแข็งแรงของกระดาษจะเพิ่มขึ้นเมื่อมีการซึมของสารละลายสตาร์ชเข้าสู่โครงสร้างของกระดาษ (Lipponen *et al.*, 2003) กระดาษลูกฟูกจึงยังคงมีค่าความต้านทานแรงกดแผ่นลูกฟูกตามแนวตั้งใกล้เคียงกับกระดาษที่ไม่ได้เคลือบ นอกจากนี้ยังพบว่าในงานวิจัยอื่น ๆ ที่มีสารเคลือบชีวภาพที่มีตัวทำละลายน้ำกลั่นเป็นองค์ประกอบ ส่งผลให้กระดาษหลังเคลือบมีความชื้นมากขึ้น จึงทำให้ค่าความต้านทานแรงกดในแนวตั้งลดลงได้ (สลิลดา, 2552)

ตารางที่ 10 ค่าความต้านทานแรงกดแผ่นลูกฟูกตามแนวตั้งและค่าความต้านทานแรงกดแผ่นลูกฟูกในแนวระนาบของแผ่นกระดาษลูกฟูกหลังเคลือบด้วยสารเคลือบไฮโดรโฟบิกสตาร์ซ สารเคลือบซิน สารเคลือบกรดไขมันสเตียริก และสารเคลือบไขผึ้งที่ความเข้มข้นต่าง ๆ

สารเคลือบ	ค่าทดสอบ	
	ค่าความต้านทานแรงกดแผ่นลูกฟูกตามแนวตั้ง (กิโลนิวตันต่อเมตร)	ความต้านทานแรงกดแผ่นลูกฟูกในแนวระนาบ (กิโลปาสกาล)
แผ่นกระดาษลูกฟูกที่ไม่ผ่านการเคลือบ	6.38 ± 0.11^a	113.71 ± 3.58^{ns}
ไฮโดรโฟบิกสตาร์ซร้อยละ 1	6.28 ± 0.25^{ab}	115.66 ± 5.70^{ns}
ไฮโดรโฟบิกสตาร์ซร้อยละ 2	6.31 ± 0.42^{ab}	117.54 ± 5.51^{ns}
ไฮโดรโฟบิกสตาร์ซร้อยละ 3	6.48 ± 0.08^a	117.50 ± 6.39^{ns}
ซินร้อยละ 1	6.11 ± 0.16^b	117.89 ± 7.65^{ns}
ซินร้อยละ 2	6.28 ± 0.13^{ab}	119.61 ± 7.10^{ns}
ซินร้อยละ 3	5.90 ± 0.21^c	114.47 ± 5.43^{ns}
กรดไขมันสเตียริกร้อยละ 1	5.88 ± 0.11^c	117.31 ± 8.22^{ns}
กรดไขมันสเตียริกร้อยละ 2	5.83 ± 0.18^{cd}	117.42 ± 3.41^{ns}
กรดไขมันสเตียริกร้อยละ 3	5.87 ± 0.24^c	117.98 ± 8.22^{ns}
ไขผึ้งร้อยละ 1	5.63 ± 0.23^{de}	114.29 ± 7.82^{ns}
ไขผึ้งร้อยละ 2	5.79 ± 0.14^{cde}	116.63 ± 9.25^{ns}
ไขผึ้งร้อยละ 3	5.58 ± 0.11^e	115.11 ± 3.52^{ns}

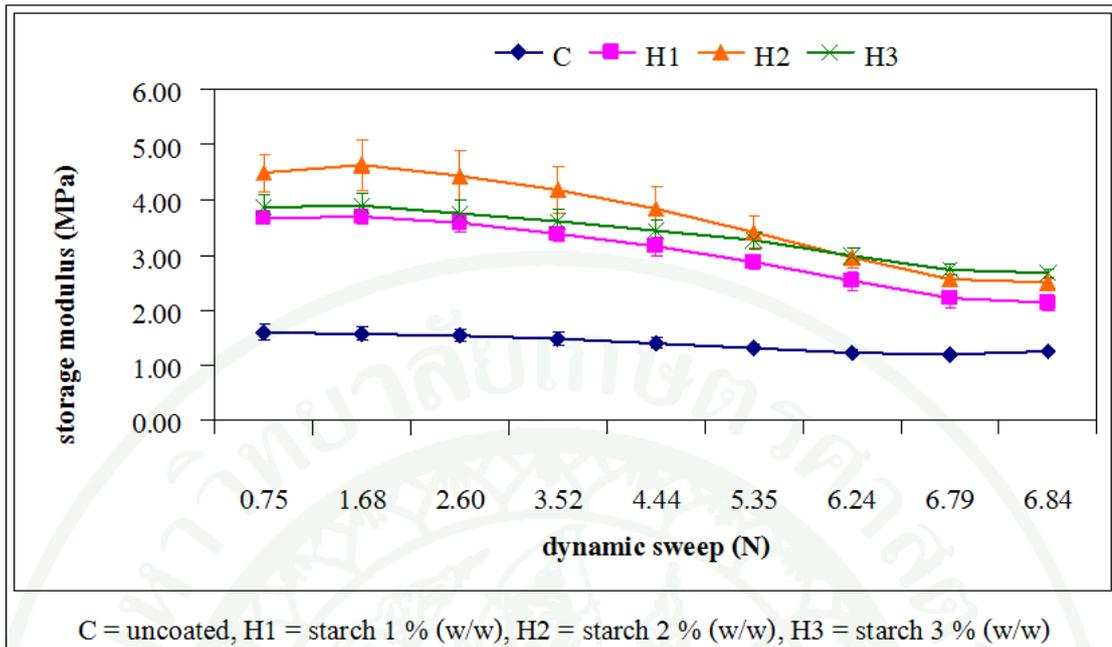
หมายเหตุ ^{a-c} ตัวอักษรที่ต่างกันแถวตั้งหมายถึงค่าเฉลี่ยมีความแตกต่างกันทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

^{ns} หมายถึงค่าเฉลี่ยในแถวตั้งไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

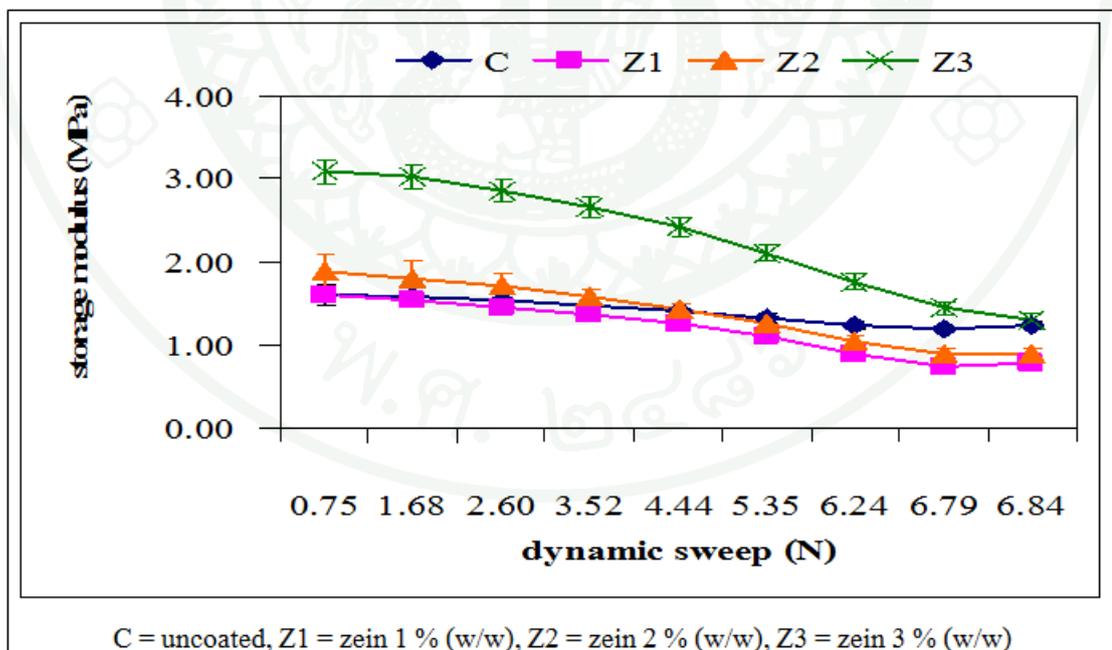
2.5 สมบัติเชิงกลพลวัตของแผ่นกระดาษลูกฟูกหลังเคลือบ

สมบัติเชิงกลพลวัตเป็นเทคนิคการวิเคราะห์โดยการให้ความเค้น (stress) แก่ตัวอย่าง และได้ค่าทดสอบเป็นความเครียด (strain) ซึ่งเป็นฟังก์ชันของทั้งความถี่และอุณหภูมิ โดยค่า storage modulus จะบอกถึงสภาพความยืดหยุ่นหรือความสามารถในการคืนกลับสู่สภาพเดิมได้ของวัสดุ โดยเมื่อวัสดุมีค่า storage modulus มาก ก็สามารถคืนตัวกลับสู่สภาพเดิมได้สูง วัสดุนั้นก็จะ มีค่า loss modulus ต่ำ (Jones, 1999)

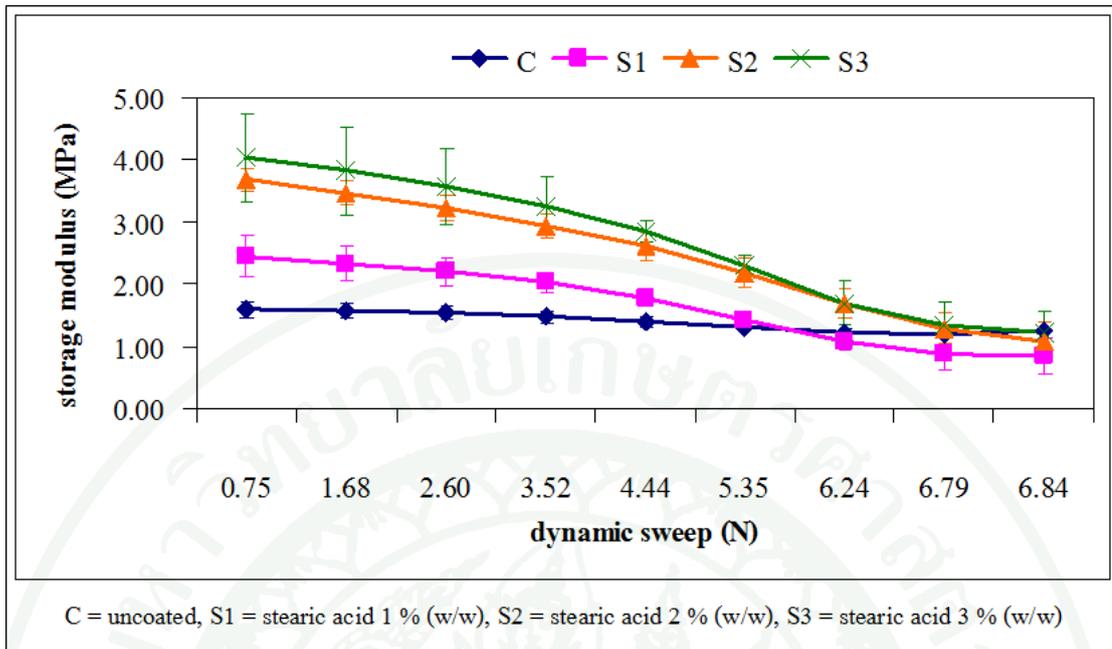
การเคลือบแผ่นลูกฟูกด้วยสารเคลือบไฮโดรโฟบิกสตาร์ช ซีน กรดไขมันสเตียริก และ ไขมันที่ระดับความเข้มข้นต่าง ๆ ที่แรงกดต่ำ ๆ (0.75-3.5 นิวตัน) ส่งผลให้กระดาษหลังเคลือบเกือบทุกชนิดมีค่า storage modulus เพิ่มขึ้นจากกระดาษที่ไม่ผ่านการเคลือบ (ภาพที่ 32-35) และเมื่อความเข้มข้นของสารเคลือบซิน กรดไขมันสเตียริกและไขมันเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 1 เป็นร้อยละ 2 และร้อยละ 3 ส่งผลให้กระดาษหลังเคลือบมีแนวโน้มของค่า storage modulus ที่แรงกดต่ำ ๆ เพิ่มขึ้นตามไปด้วย ในขณะที่กระดาษหลังเคลือบไฮโดรโฟบิกสตาร์ชมีค่า storage modulus ที่แรงกดต่ำ ๆ เพิ่มขึ้นแต่ไม่เป็นแนวโน้มตามความเข้มข้นที่เพิ่มขึ้น การที่กระดาษหลังเคลือบเกือบทุกชนิดมี storage modulus ที่แรงกดต่ำ ๆ เพิ่มขึ้นเนื่องจากสารเคลือบทุกชนิดส่งผลให้กระดาษมีสภาพความยืดหยุ่นเพิ่มขึ้นจึงมีค่า storage modulus เพิ่มขึ้น โดยการเคลือบด้วยไขมันความเข้มข้นร้อยละ 3 ทำให้กระดาษหลังเคลือบมีค่า storage modulus สูงที่สุด รองลงมาคือ ไฮโดรโฟบิกสตาร์ชร้อยละ 2 ไฮโดรโฟบิกสตาร์ชร้อยละ 3 กรดสเตียริกร้อยละ 3 ซีนร้อยละ 3 ไฮโดรโฟบิกสตาร์ชร้อยละ 1 กรดสเตียริกร้อยละ 2 ไขมันร้อยละ 2 กรดสเตียริกร้อยละ 1 ไขมันร้อยละ 1 ซีนร้อยละ 2 และซินร้อยละ 1 ตามลำดับ แต่เมื่อค่าแรงที่ใช้ในการทดสอบมีค่ามากขึ้นจนถึงประมาณ 6.5 นิวตัน กระดาษหลังเคลือบทุกชนิดจะมีค่า storage modulus ลดลง ความสามารถในการคืนตัวของกระดาษหลังเคลือบลดลงอย่างมากเนื่องจากลอนของแผ่นกระดาษลูกฟูกที่เป็นตัวรองรับแรงกดไม่สามารถทนแรงที่มากกระทำได้ โดยเมื่อโดนแรงกดมากจนถึงระดับหนึ่ง ลอนจะเกิดการยุบตัวและไม่สามารถคืนกลับสู่สภาพเดิมได้หรือสูญเสียความยืดหยุ่นไป



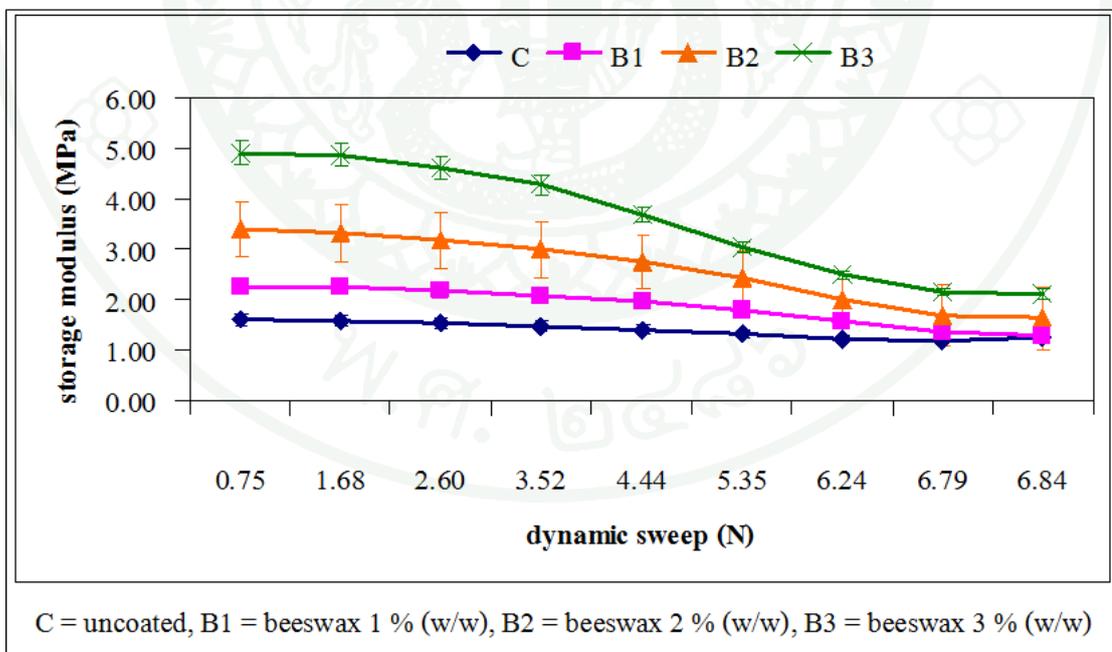
ภาพที่ 32 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง storage modulus และ dynamic sweep ของแผ่นกระดาษลูกฟูกหลังเคลือบไฮโดรโพลีบิกสตาร์ชร้อยละ 1 2 และ 3



ภาพที่ 33 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง storage modulus และ dynamic sweep ของแผ่นกระดาษลูกฟูกหลังเคลือบซีนร้อยละ 1 2 และ 3



ภาพที่ 34 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง storage modulus และ dynamic sweep ของแผ่นกระดาษลูกฟูกหลังเคลือบกรดไขมันสเตียริกร้อยละ 1 2 และ 3



ภาพที่ 35 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง storage modulus และ dynamic sweep ของแผ่นกระดาษลูกฟูกหลังเคลือบไขผึ้งร้อยละ 1 2 และ 3

จากภาพที่ 32-35 พบว่ากระดาษหลังเคลือบด้วยสารเคลือบที่ความเข้มข้นระดับสูงคือเคลือบด้วยไฮโดรฟอบิกสตาร์ชร้อยละ 2 และ 3 เคลือบด้วยซิน กรดสเตียริกและไขผึ้งที่ความเข้มข้นร้อยละ 3 จะมีการเปลี่ยนแปลงของค่า storage modulus มาก (เส้นกราฟมีความชันมาก) โดยที่แรงกดต่ำ ๆ จะมีค่า storage modulus สูง แต่เมื่อได้รับแรงมาก ค่า storage modulus จะลดลงมากกว่ากระดาษที่เคลือบด้วยสารเคลือบที่ความเข้มข้นต่ำ แสดงว่าที่ความเข้มข้นสูง กระดาษหลังเคลือบจะมีลักษณะแข็งแต่เปราะ

3. อิทธิพลของการเติมอิมัลซิไฟเออร์และระดับความเข้มข้นของกรดไขมันสเตียริก และไขผึ้งในสารเคลือบผสมระหว่างไฮโดรฟอบิกสตาร์ชและกรดไขมันสเตียริก และสารเคลือบผสมระหว่างไฮโดรฟอบิกสตาร์ชและไขผึ้ง ต่อสมบัติของแผ่นกระดาษลูกฟูก

3.1 สมบัติทางกายภาพของสารเคลือบ

3.1.1 ความหนืดของสารเคลือบ

ความหนืดของสารเคลือบผสมระหว่างไฮโดรฟอบิกสตาร์ชและกรดไขมันสเตียริก และสารเคลือบผสมระหว่างไฮโดรฟอบิกสตาร์ชและไขผึ้งที่เติมและไม่เติมอิมัลซิไฟเออร์แสดงดังตารางที่ 11 พบว่า สารเคลือบเกือบทุกชนิดมีความหนืดลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) เมื่ออุณหภูมิของสารเคลือบเพิ่มขึ้นจาก 65 องศาเซลเซียสเป็น 75 องศาเซลเซียส ยกเว้นสารเคลือบผสมระหว่างไฮโดรฟอบิกสตาร์ชและกรดไขมันสเตียริกความเข้มข้น ร้อยละ 2 และ 3 ที่มีการเติม Tween 60 ซึ่งพบว่า ความหนืดที่อุณหภูมิ 65 และ 75 องศาเซลเซียส ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ นอกจากนี้ เมื่อความเข้มข้นของกรดไขมันสเตียริกและไขผึ้งในสารเคลือบผสมเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 1 เป็นร้อยละ 2 และร้อยละ 3 ยังส่งผลให้ค่าความหนืดของสารเคลือบมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$)

เมื่อเติมกรดไขมันสเตียริกและไขผึ้งลงในสารเคลือบไฮโดรฟอบิกสตาร์ช ทำให้ความหนืดของสารเคลือบมีค่าเพิ่มขึ้น โดยการเติมกรดไขมันสเตียริกทำให้สารเคลือบมีความหนืดสูงกว่าการเติมไขผึ้ง เนื่องจากกรดไขมันสเตียริกมีขนาดโมเลกุลเล็กกว่าจึงสามารถผสมเข้ากับไฮโดรฟอบิกสตาร์ชได้ดีกว่าไขผึ้ง นอกจากนี้ยังพบว่า เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของกรดไขมันที่เติมลงไปโดยสารเคลือบ ส่งผลให้ค่าความหนืดของสารเคลือบเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) ซึ่ง

สอดคล้องกับงานวิจัยของสกลิตดา (2552) ที่พบว่า การเติมกรดไขมันสเตียริกปริมาณร้อยละ 1 2 และ 3 ลงในสารละลายไฮโดรโฟบิกสตาร์ชความเข้มข้นร้อยละ 15 โดยน้ำหนัก มีผลให้ค่าความหนืดของสารเคลือบเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) นอกจากนี้ การเติมอิมัลซิไฟเออร์ คือ Tween 60 ลงไปในสารเคลือบผสมระหว่างไฮโดรโฟบิกสตาร์ชและกรดไขมันสเตียริก และสารเคลือบผสมระหว่างไฮโดรโฟบิกสตาร์ชและไขมันสัตว์ ส่งผลให้ค่าความหนืดของสารเคลือบเพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากโครงสร้างของ Tween 60 มีทั้งส่วนที่ชอบน้ำและส่วนที่ไม่ชอบน้ำ ทำให้กรดไขมันสเตียริกและไขมันสัตว์ซึ่งเป็นสารที่มีความไม่ชอบน้ำสูงสามารถผสมเข้ากับไฮโดรโฟบิกสตาร์ชซึ่งเป็นสารที่มีความชอบน้ำสูงได้มากขึ้น

ตารางที่ 11 ความหนืดของสารเคลือบผสมระหว่างไฮโดรโฟบิกสตาร์ชและกรดไขมันสเตียริก และสารเคลือบผสมระหว่างไฮโดรโฟบิกสตาร์ชและไขมันสัตว์ที่เติมและไม่เติมอิมัลซิไฟเออร์ ณ อุณหภูมิ 65 และ 75 องศาเซลเซียส

สารเคลือบ	ความหนืด (เซนติพอยต์)	
	65 องศาเซลเซียส	75 องศาเซลเซียส
ไฮโดรโฟบิกสตาร์ช-กรดสเตียริกร้อยละ 1	2.88 ± 0.06 ^{defgh}	2.60 ± 0.08 ^{fgh}
ไฮโดรโฟบิกสตาร์ช-กรดสเตียริกร้อยละ 2	3.07 ± 0.07 ^{cde}	3.03 ± 0.13 ^{cdef}
ไฮโดรโฟบิกสตาร์ช-กรดสเตียริกร้อยละ 3	3.76 ± 0.04 ^b	3.41 ± 0.04 ^{bc}
ไฮโดรโฟบิกสตาร์ช-กรดสเตียริกร้อยละ 1 + Tween 60	3.01 ± 0.11 ^{cdefg}	2.90 ± 0.07 ^{defgh}
ไฮโดรโฟบิกสตาร์ช-กรดสเตียริกร้อยละ 2 + Tween 60	3.80 ± 0.13 ^b	3.75 ± 0.43 ^b
ไฮโดรโฟบิกสตาร์ช-กรดสเตียริกร้อยละ 3 + Tween 60	4.86 ± 0.11 ^a	4.80 ± 0.80 ^a
ไฮโดรโฟบิกสตาร์ช-ไขมันร้อยละ 1	2.77 ± 0.21 ^{efgh}	2.50 ± 0.20 ^h
ไฮโดรโฟบิกสตาร์ช-ไขมันร้อยละ 2	3.01 ± 0.34 ^{cdefg}	2.80 ± 0.10 ^{efgh}
ไฮโดรโฟบิกสตาร์ช-ไขมันร้อยละ 3	3.14 ± 0.28 ^{cde}	2.99 ± 0.10 ^{cdefg}
ไฮโดรโฟบิกสตาร์ช-ไขมันร้อยละ 1 + Tween 60	2.86 ± 0.13 ^{efgh}	2.56 ± 0.06 ^{gh}
ไฮโดรโฟบิกสตาร์ช-ไขมันร้อยละ 2 + Tween 60	2.97 ± 0.08 ^{defg}	2.99 ± 0.05 ^{cdefg}
ไฮโดรโฟบิกสตาร์ช-ไขมันร้อยละ 3 + Tween 60	3.33 ± 0.17 ^{cd}	2.96 ± 0.04 ^{defg}

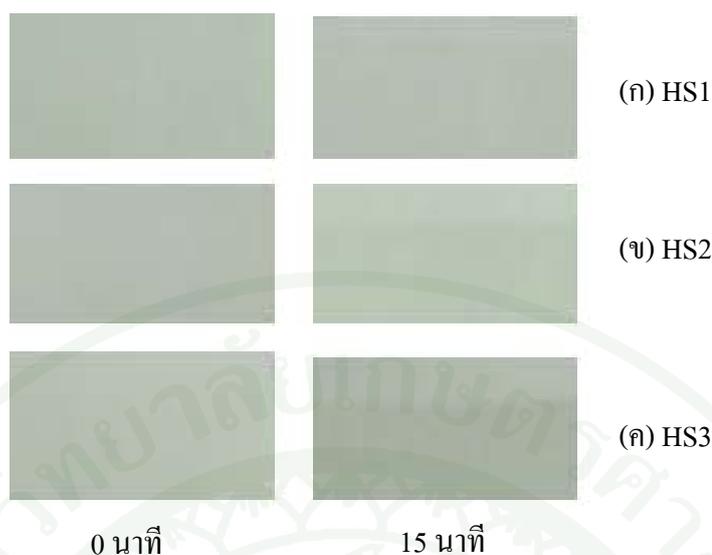
หมายเหตุ ^{a-h} ตัวอักษรที่ต่างกันในแต่ละแถวและแถวนอนหมายถึงค่าเฉลี่ยมีความแตกต่างกันทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

เมื่อเปรียบเทียบสารเคลือบทุกชนิดที่ความเข้มข้นร้อยละ 3 ณ อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส พบว่า สารเคลือบผสมระหว่างไฮโดรโฟบิกสตาร์ชและกรดไขมันสเตียริกที่เติม Tween 60 มีความหนืดมากที่สุด (4.86 เซนติพอยด์) รองลงมา คือ สารเคลือบผสมระหว่างไฮโดรโฟบิกสตาร์ชและกรดไขมันสเตียริกที่ไม่เติม Tween 60 (3.76 เซนติพอยด์) สารเคลือบผสมระหว่างไฮโดรโฟบิกสตาร์ชและไขมันที่เติม Tween 60 (3.33 เซนติพอยด์) และสารเคลือบผสมระหว่างไฮโดรโฟบิกสตาร์ชและไขมันที่ไม่เติม Tween 60 (3.14 เซนติพอยด์) ตามลำดับ

2.2.2 ลักษณะของสารเคลือบเมื่อตั้งทิ้งไว้ ณ อุณหภูมิห้อง

ลักษณะสารละลายของสารเคลือบผสมระหว่างไฮโดรโฟบิกสตาร์ชและกรดไขมันสเตียริก และสารเคลือบผสมระหว่างไฮโดรโฟบิกสตาร์ชและไขมันที่เติม Tween 60 ลงไปในสารละลายไฮโดรโฟบิกสตาร์ช ส่งผลให้สารเคลือบมีความข้นเพิ่มมากขึ้น อาจเนื่องมาจากการที่กรดไขมันสเตียริกและไขมันไม่ละลายในตัวทำละลายน้ำกลั่น แต่กระจายตัวแขวนลอยอยู่ ทำให้สารเคลือบมีลักษณะข้น เมื่อตั้งสารเคลือบผสมระหว่างไฮโดรโฟบิกสตาร์ชและกรดไขมันสเตียริกทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องพบว่าสารเคลือบเกิดการแยกชั้นเป็น 2 ชั้น ชั้นบนมีลักษณะขุ่นขาวกว่าชั้นล่าง ซึ่งชั้นบนน่าจะเป็นกรดไขมันสเตียริกที่เกิดการแยกชั้นออกมาจากสารละลายสตาร์ช จากภาพที่ 36 ณ ที่เวลา 15 นาที พบว่าสารเคลือบผสมระหว่างไฮโดรโฟบิกสตาร์ชและกรดไขมันสเตียริกความเข้มข้นร้อยละ 1 2 และ 3 เกิดการแยกชั้น โดยที่ระดับความเข้มข้นสูงจะเห็นการแยกชั้นของกรดไขมันสเตียริกที่ชัดเจนกว่าที่ระดับความเข้มข้นต่ำ

เมื่อตั้งสารเคลือบผสมระหว่างไฮโดรโฟบิกสตาร์ชและกรดไขมันสเตียริกที่เติม Tween 60 ซึ่งทำหน้าที่เป็นอิมัลซิไฟเออร์ลงไปในสารเคลือบทิ้งไว้ พบว่า สารเคลือบยังคงเกิดการแยกชั้นออกเป็น 2 ชั้น โดยชั้นบนมีลักษณะขุ่นขาวมากกว่าชั้นล่างเหมือนกับการแยกชั้นในสารเคลือบผสมระหว่างไฮโดรโฟบิกสตาร์ชและกรดไขมันสเตียริกที่ไม่เติม Tween 60 แต่ใช้ระยะเวลาเวลานานกว่าจึงจะเกิดการแยกชั้น จากภาพที่ 37 ณ ที่เวลา 15 นาที สารเคลือบผสมระหว่างไฮโดรโฟบิกสตาร์ชและกรดไขมันสเตียริกความเข้มข้นร้อยละ 1 ที่เติม Tween 60 ยังไม่เกิดการแยกชั้น ในขณะที่สารเคลือบผสมระหว่างไฮโดรโฟบิกสตาร์ชและกรดไขมันสเตียริกความเข้มข้นร้อยละ 2 และ 3 ที่เติม Tween 60 เกิดการแยกชั้น โดยจะสังเกตเห็นอย่างชัดเจนขึ้นเมื่อระดับความเข้มข้นของกรดไขมันสเตียริกเพิ่มมากขึ้น

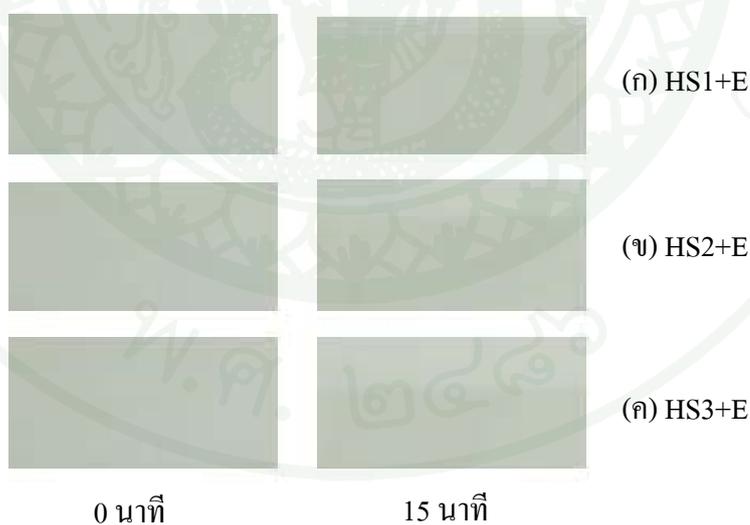


ภาพที่ 36 ลักษณะสารเคลือบผสมระหว่างไฮโดรโฟบิกสตาร์ชร้อยละ 3 และกรดไขมันสเตียริก ความเข้มข้นต่าง ๆ ณ เวลา 0 นาที และ 15 นาที หลังการเตรียม

(ก) HS1; ไฮโดรโฟบิกสตาร์ช-กรดไขมันสเตียริกร้อยละ 1

(ข) HS2; ไฮโดรโฟบิกสตาร์ช-กรดไขมันสเตียริกร้อยละ 2 และ

(ค) HS3; ไฮโดรโฟบิกสตาร์ช-กรดไขมันสเตียริกร้อยละ 3

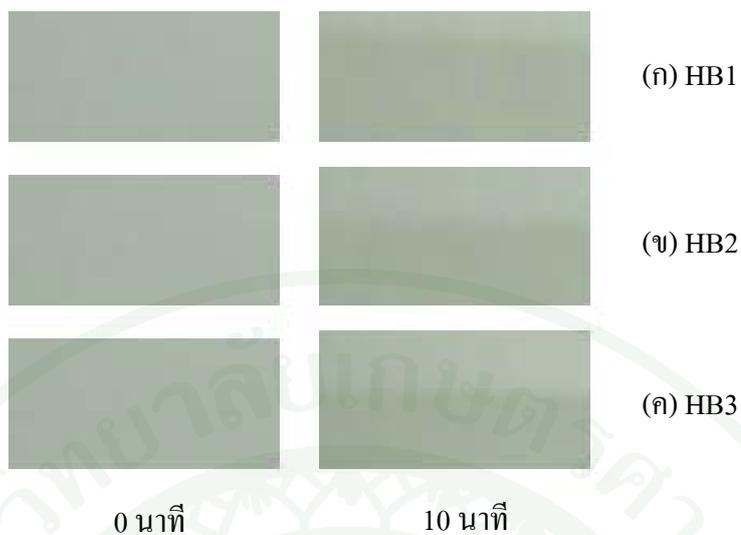


ภาพที่ 37 ลักษณะสารเคลือบผสมระหว่างไฮโดรโฟบิกสตาร์ชร้อยละ 3 และกรดไขมันสเตียริก ความเข้มข้นต่างๆ ที่เติม Tween 60 ณ เวลา 0 นาที และ 15 นาที หลังการเตรียม

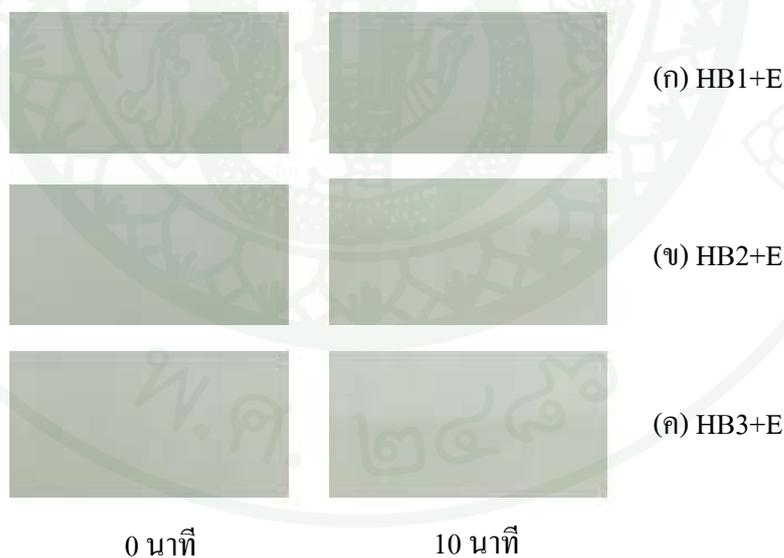
(ก) HS1+E; ไฮโดรโฟบิกสตาร์ช-กรดไขมันสเตียริกร้อยละ 1 + Tween 60

(ข) HS2+E; ไฮโดรโฟบิกสตาร์ช-กรดไขมันสเตียริกร้อยละ 2 + Tween 60 และ

(ค) HS3+E; ไฮโดรโฟบิกสตาร์ช-กรดไขมันสเตียริกร้อยละ 3 + Tween 60



ภาพที่ 38 ลักษณะสารเคลือบผสมระหว่างไฮโดรโฟบิกสตาร์ชร้อยละ 3 และไขมันความเข้มข้นต่าง ๆ ณ เวลา 0 นาที และ 10 นาที หลังการเตรียม (ก) HB1; ไฮโดรโฟบิกสตาร์ช-ไขมันร้อยละ 1 (ข) HB2; ไฮโดรโฟบิกสตาร์ช-ไขมันร้อยละ 2 และ (ค) HB3; ไฮโดรโฟบิกสตาร์ช-ไขมันร้อยละ 3



ภาพที่ 39 ลักษณะสารเคลือบผสมระหว่างไฮโดรโฟบิกสตาร์ชร้อยละ 3 และไขมันความเข้มข้นต่าง ๆ ที่เติม Tween 60 ณ เวลา 0 นาที และ 10 นาที หลังการเตรียม (ก) HB1+E; ไฮโดรโฟบิกสตาร์ช-ไขมันร้อยละ 1 + Tween 60 (ข) HB2+E; ไฮโดรโฟบิกสตาร์ช-ไขมันร้อยละ 2 + Tween 60 และ (ค) HB3+E; ไฮโดรโฟบิกสตาร์ช-ไขมันร้อยละ 3 + Tween 60

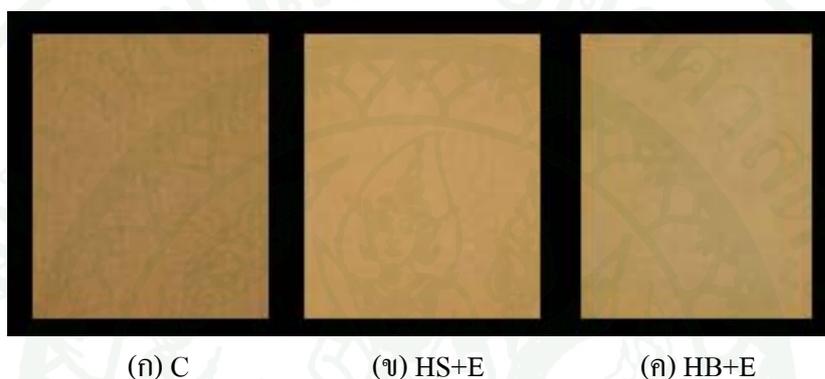
เมื่อตั้งสารเคลือบผสมระหว่างไฮโดรฟอบิกสตาร์ชและไขผึ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องพบว่า เมื่อเวลาผ่านไป 10 นาที สารเคลือบผสมระหว่างไฮโดรฟอบิกสตาร์ชและไขผึ้งความเข้มข้นร้อยละ 1 เริ่มเกิดการแยกชั้นเป็น 2 ชั้น โดยชั้นบนมีลักษณะขุ่นขาวกว่าชั้นล่าง ชั้นบนน่าจะเป็นไขผึ้งที่จับตัวกันเป็นแผ่นฟิล์มลอยอยู่ด้านบน ส่วนสารเคลือบผสมระหว่างไฮโดรฟอบิกสตาร์ชและไขผึ้งที่ความเข้มข้นร้อยละ 2 และ 3 เกิดการแยกชั้นอย่างชัดเจนเมื่อระดับความเข้มข้นเพิ่มขึ้น (ภาพที่ 38) การเติม Tween 60 ลงในสารเคลือบผสมระหว่างไฮโดรฟอบิกสตาร์ชและไขผึ้งสามารถชะลอการแยกชั้นของสารเคลือบได้

เมื่อเปรียบเทียบผลของการเติม Tween 60 ลงในสารเคลือบผสมระหว่างไฮโดรฟอบิกสตาร์ชและกรดไขมันสเตียริก รวมทั้งสารเคลือบผสมระหว่างไฮโดรฟอบิกสตาร์ชและไขผึ้ง พบว่า การเติม Tween 60 ลงไปในสารเคลือบผสมระหว่างไฮโดรฟอบิกสตาร์ชและกรดไขมันสเตียริก ส่งผลให้ไฮโดรฟอบิกสตาร์ชและกรดไขมันสเตียริกผสมเข้ากันได้ดีกว่าการผสมกันระหว่างไฮโดรฟอบิกสตาร์ชและไขผึ้ง โดยสังเกตจากเวลาที่สารเคลือบเกิดการแยกชั้น จะเห็นได้ว่าสารเคลือบผสมระหว่างไฮโดรฟอบิกสตาร์ชและกรดไขมันสเตียริกใช้เวลานานกว่าในการเกิดการแยกชั้น อาจเนื่องมาจาก Tween 60 มีโครงสร้างส่วนที่ไม่ชอบน้ำคล้ายคลึงกับโครงสร้างของกรดไขมันสเตียริก จึงช่วยให้กรดไขมันสเตียริกกระจายตัวในสารเคลือบไฮโดรฟอบิกสตาร์ชได้ดีกว่า

จากผลการทดสอบความคงตัวของสารเคลือบผสมระหว่างไฮโดรฟอบิกสตาร์ชและกรดไขมันสเตียริก และสารเคลือบผสมระหว่างไฮโดรฟอบิกสตาร์ชและไขผึ้ง ทั้งที่เติมและไม่เติมอิมัลซิไฟเออร์ จึงพิจารณาเลือกเฉพาะสารเคลือบสูตรที่มีการเติมอิมัลซิไฟเออร์ คือ Tween 60 เท่านั้น เพื่อนำไปใช้ในการเคลือบแผ่นกระดาษลูกฟูกและศึกษาสมบัติของแผ่นกระดาษลูกฟูกในขั้นตอนต่อไป เนื่องจากสารเคลือบสูตรที่มีการเติมอิมัลซิไฟเออร์มีความคงตัวของสารเคลือบมากกว่า และเนื้อสารกระจายผสมเข้ากันได้ดีกว่าสูตรที่ไม่เติมอิมัลซิไฟเออร์ ซึ่งสามารถสังเกตได้จากภาพการแยกชั้นของสารละลาย (ภาพที่ 36-39) และสังเกตจากค่าความหนืดของสารเคลือบ (ตารางที่ 11) สารเคลือบที่มีการเติมอิมัลซิไฟเออร์จะมีค่าความหนืดสูงกว่า แสดงให้เห็นว่าสารเคลือบมีความเข้ากันได้ดีกว่า

3.2 สมบัติทางกายภาพของแผ่นกระดาษลูกฟูกหลังเคลือบ

ลักษณะของแผ่นกระดาษลูกฟูกที่เคลือบด้วยสารผสมระหว่างไฮโดรโฟบิกสตาร์ชและกรดไขมันสเตียริกที่มีการเติมอิมัลซิไฟเออร์ และสารผสมระหว่างไฮโดรโฟบิกสตาร์ชและไขมันที่มีการเติมอิมัลซิไฟเออร์เทียบกับแผ่นกระดาษลูกฟูกที่ไม่ผ่านการเคลือบ พบว่าแผ่นกระดาษลูกฟูกหลังการเคลือบมีผิวหน้าเรียบและมีความสว่างมากขึ้น (ภาพที่ 40)



ภาพที่ 40 ลักษณะแผ่นกระดาษลูกฟูกก่อนและหลังเคลือบ (ก) C; กระดาษที่ไม่ผ่านการเคลือบ (ข) HS+E; เคลือบด้วยสารผสมระหว่างไฮโดรโฟบิกสตาร์ชและกรดไขมันสเตียริกที่เติมอิมัลซิไฟเออร์ (ค) HB+E; เคลือบด้วยสารผสมระหว่างไฮโดรโฟบิกสตาร์ชและไขมันที่เติมอิมัลซิไฟเออร์

น้ำหนักแผ่นลูกฟูก ความหนา และปริมาณความชื้นของแผ่นกระดาษลูกฟูกที่ไม่ผ่านการเคลือบและแผ่นกระดาษลูกฟูกที่เคลือบด้วยสารเคลือบผสมระหว่างไฮโดรโฟบิกสตาร์ชและกรดไขมันสเตียริก และสารเคลือบผสมระหว่างไฮโดรโฟบิกสตาร์ชและไขมันที่เติมอิมัลซิไฟเออร์ แสดงดังตารางที่ 12 โดยพบว่า แผ่นกระดาษลูกฟูกหลังเคลือบด้วยด้วยสารเคลือบผสมระหว่างไฮโดรโฟบิก สตาร์ชและกรดไขมันสเตียริกที่เติมอิมัลซิไฟเออร์ และสารเคลือบผสมระหว่างไฮโดรโฟบิกสตาร์ชและไขมันที่เติมอิมัลซิไฟเออร์มีน้ำหนักเพิ่มขึ้นจากแผ่นกระดาษลูกฟูกที่ไม่ได้เคลือบและแผ่นกระดาษลูกฟูกที่เคลือบสารเคลือบไฮโดรโฟบิกสตาร์ชเพียงอย่างเดียวอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) โดยน้ำหนักแผ่นลูกฟูกเพิ่มขึ้นร้อยละ 0.6-1.4 ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากความหนืดของสารเคลือบผสมที่มีค่าเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้มีปริมาณสารเคลือบในแผ่นกระดาษลูกฟูกมากขึ้น ส่งผลให้น้ำหนักแผ่นลูกฟูกเพิ่มมากขึ้น นอกจากนี้ปริมาณความชื้นของแผ่นกระดาษหลังเคลือบ

สารผสมยังมีค่ามากกว่าแผ่นกระดาษลูกฟูกที่ไม่ผ่านการเคลือบอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) โดยมีปริมาณความชื้นเพิ่มขึ้นร้อยละ 4.8-6.0 ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากผลของสสารที่สามารดูดความชื้นได้ส่วนหนึ่ง ผลจากการที่กระดาษสามารถดูดความชื้นจากสถานะแวดล้อมได้อีกส่วนหนึ่ง และอาจมีผลจากส่วนที่ซอบน้ำของอิมัลชันไฟเออร์ที่ส่งผลให้ความชื้นของแผ่น กระดาษลูกฟูกหลังเคลือบมีปริมาณความชื้นสูงขึ้น ส่วนความหนาของแผ่นกระดาษลูกฟูกที่ไม่ผ่านการเคลือบและเคลือบด้วยสารเคลือบไฮโดรโฟบิกสสารซ์ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ

ตารางที่ 12 น้ำหนัก ความหนา และปริมาณความชื้นของแผ่นกระดาษลูกฟูกหลังเคลือบด้วยสารเคลือบผสมระหว่างไฮโดรโฟบิกสสารซ์และกรดไขมันสเตียริก และสารเคลือบผสมระหว่างไฮโดรโฟบิกสสารซ์และไขมันที่เติมอิมัลชันไฟเออร์

สารเคลือบ	ค่าทดสอบ		
	น้ำหนัก (กรัมต่อตารางเมตร)	ความหนา (มิลลิเมตร)	ความชื้น (ร้อยละ)
แผ่นกระดาษลูกฟูกที่ไม่ผ่านการเคลือบ	803.673 ± 7.15 ^d	7.046 ± 0.02 ^{ns}	8.85 ± 0.18 ^b
ไฮโดรโฟบิกสสารซ์ร้อยละ 3	806.179 ± 5.85 ^{cd}	7.047 ± 0.02 ^{ns}	9.25 ± 0.12 ^a
ไฮโดรโฟบิกสสารซ์-กรดสเตียริก ร้อยละ 1 + Tween 60	808.264 ± 5.46 ^{bcd}	7.047 ± 0.01 ^{ns}	9.29 ± 0.06 ^a
ไฮโดรโฟบิกสสารซ์-กรดสเตียริก ร้อยละ 2 + Tween 60	810.431 ± 5.63 ^{abc}	7.047 ± 0.01 ^{ns}	9.28 ± 0.15 ^a
ไฮโดรโฟบิกสสารซ์-กรดสเตียริก ร้อยละ 3 + Tween 60	811.488 ± 4.81 ^{abc}	7.048 ± 0.01 ^{ns}	9.32 ± 0.09 ^a
ไฮโดรโฟบิกสสารซ์-ไขมันร้อยละ 1 + Tween 60	813.168 ± 8.09 ^{ab}	7.047 ± 0.02 ^{ns}	9.33 ± 0.11 ^a
ไฮโดรโฟบิกสสารซ์-ไขมันร้อยละ 2 + Tween 60	814.513 ± 5.61 ^{ab}	7.047 ± 0.01 ^{ns}	9.35 ± 0.15 ^a
ไฮโดรโฟบิกสสารซ์-ไขมันร้อยละ 3 + Tween 60	815.273 ± 4.87 ^a	7.048 ± 0.02 ^{ns}	9.38 ± 0.06 ^a

หมายเหตุ ^{a-d} ตัวอักษรที่ต่างกัน ในแถวตั้งหมายถึงค่าเฉลี่ยมีความแตกต่างกันทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

^{ns} หมายถึงค่าเฉลี่ยในแถวตั้งไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

3.3 สมบัติการต้านทานน้ำของแผ่นกระดาษลูกฟูกหลังเคลือบ

ค่ามัมสัมพัทธ์ของน้ำของกระดาษที่ไม่ผ่านการเคลือบและกระดาษหลังเคลือบด้วยสารเคลือบผสมระหว่างไฮโดรโฟบิกสตาร์ชและกรดไขมันสเตียริก และสารเคลือบผสมระหว่างไฮโดรโฟบิกสตาร์ชและไขมันที่เติมอิมัลซิไฟเออร์แสดงดังตารางที่ 13 พบว่ากระดาษหลังเคลือบด้วยสารเคลือบผสมระหว่างไฮโดรโฟบิกสตาร์ชและกรดไขมันสเตียริกที่มีการเติมอิมัลซิไฟเออร์มีค่ามัมสัมพัทธ์ของน้ำอยู่ในช่วง 122-131 องศา โดยเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของกรดไขมันสเตียริกเป็นร้อยละ 3 ทำให้มัมสัมพัทธ์ของน้ำที่มีค่ามากที่สุดคือ 131.54 องศา แสดงว่ากระดาษมีความต้านทานน้ำมากขึ้นเมื่อกรดไขมันสเตียริกมีความเข้มข้นเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Butkinaree (2008) ที่พบว่า มัมสัมพัทธ์ของน้ำของกระดาษแข็งที่เคลือบด้วยสารเคลือบผสมระหว่างไฮโดรโฟบิกสตาร์ชร้อยละ 15 และกรดไขมันสเตียริกร้อยละ 1 2 และ 3 ที่มีการเติม Tween 60 เป็นอิมัลซิไฟเออร์ มีค่าเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของกรดไขมันสเตียริกที่เพิ่มขึ้นในสูตรสารเคลือบ

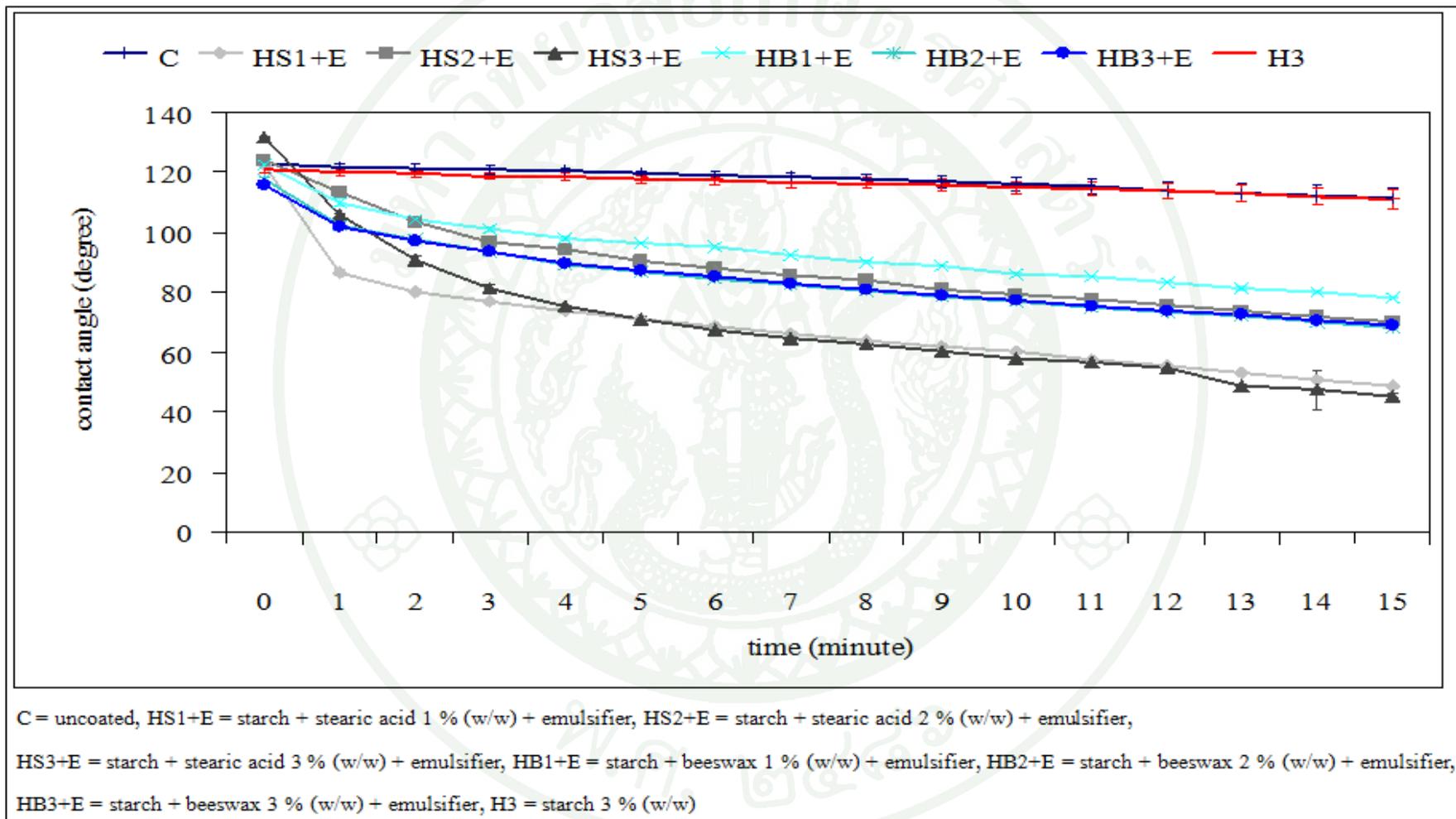
ที่เวลา 0 นาที หลังการหยดน้ำทดสอบค่ามัมสัมพัทธ์น้ำ กระดาษหลังเคลือบด้วยสารเคลือบผสมระหว่างไฮโดรโฟบิกสตาร์ชและไขมันร้อยละ 1 มีค่ามัมสัมพัทธ์ไม่แตกต่างกับแผ่นกระดาษลูกฟูกที่ไม่ผ่านการเคลือบ แต่มีค่ามากกว่าแผ่นกระดาษลูกฟูกที่เคลือบด้วยสารเคลือบไฮโดรโฟบิกสตาร์ชอย่างมีนัยสำคัญ และแผ่นกระดาษลูกฟูกที่เคลือบด้วยสารเคลือบผสมระหว่างไฮโดรโฟบิกสตาร์ชและไขมันร้อยละ 2 และ 3 มีค่ามัมสัมพัทธ์ของน้ำลดลงจากแผ่นกระดาษที่ไม่ได้เคลือบและเคลือบด้วยไฮโดรโฟบิก สตาร์ช อาจเนื่องมาจากการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างสตาร์ชและไขมัน (starch-lipid complex) (Han *et al.*, 2006) ทำให้ไขมันกระจายตัวในสารเคลือบไม่ดี ทำให้ความสามารถในการต้านทานน้ำลดลงมากกว่าการเคลือบด้วยสารเคลือบกรดไขมันสเตียริกหรือไขมันเพียงอย่างเดียว นอกจากนี้การที่ไขมันมีโมเลกุลที่ยาวกว่ากรดไขมันสเตียริกจึงส่งผลให้ไขมันเกิดสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างสตาร์ชและไขมันได้มากกว่า จึงส่งผลให้ความสามารถในการต้านทานน้ำของสารเคลือบผสมระหว่างไฮโดรโฟบิกสตาร์ชและไขมันลดลงมากกว่า

ตารางที่ 13 ค่ามูมสัมพัทธ์ของน้ำของแผ่นกระดาษลูกฟูกหลังเคลือบด้วยสารเคลือบผสมระหว่างไฮโดรโฟบิกสตาร์ชและกรดไขมันสเตียริก และสารเคลือบผสมระหว่างไฮโดรโฟบิกสตาร์ชและไขมันที่เติมอิมัลซิไฟเออร์

สารเคลือบ	มูมสัมพัทธ์ของน้ำ (องศา)
แผ่นกระดาษลูกฟูกที่ไม่ผ่านการเคลือบ	121.99 ± 1.09 ^b
ไฮโดรโฟบิกสตาร์ชร้อยละ 3	120.90 ± 1.18 ^{bc}
ไฮโดรโฟบิกสตาร์ช-กรดสเตียริกร้อยละ 1 + Tween 60	122.59 ± 2.27 ^b
ไฮโดรโฟบิกสตาร์ช-กรดสเตียริกร้อยละ 2 + Tween 60	123.95 ± 1.10 ^b
ไฮโดรโฟบิกสตาร์ช-กรดสเตียริกร้อยละ 3 + Tween 60	131.54 ± 1.48 ^a
ไฮโดรโฟบิกสตาร์ช-ไขมันร้อยละ 1 + Tween 60	122.67 ± 0.76 ^b
ไฮโดรโฟบิกสตาร์ช-ไขมันร้อยละ 2 + Tween 60	117.67 ± 2.06 ^{cd}
ไฮโดรโฟบิกสตาร์ช-ไขมันร้อยละ 3 + Tween 60	115.95 ± 2.91 ^d

หมายเหตุ ^{a-d} ตัวอักษรที่ต่างกันในแต่ละแถวหมายถึงค่าเฉลี่ยมีความแตกต่างกันทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

มูมสัมพัทธ์น้ำแบบต่อเนื่องแสดงดังภาพที่ 41 พบว่า เมื่อเวลาผ่านไปมูมสัมพัทธ์น้ำของกระดาษหลังเคลือบด้วยสารเคลือบผสมระหว่างไฮโดรโฟบิกสตาร์ชและกรดไขมันสเตียริก และสารเคลือบผสมระหว่างไฮโดรโฟบิกสตาร์ชและไขมันที่เติมอิมัลซิไฟเออร์ทุกความเข้มข้นมีค่าลดลงอย่างรวดเร็วในสองนาทีกแรก ในขณะที่ค่ามูมสัมพัทธ์น้ำของกระดาษที่ไม่ผ่านการเคลือบและกระดาษหลังเคลือบด้วยสารเคลือบไฮโดรโฟบิกสตาร์ชค่อย ๆ ลดลง



ภาพที่ 41 การลดลงของค่ามุมสัมผัสของหยดน้ำมันเมื่อเวลาผ่านไปสำหรับกระดาษหลังเคลือบ

3.4 สมบัติเชิงกลของแผ่นกระดาษลูกฟูกหลังเคลือบ

ความต้านทานแรงกดแผ่นลูกฟูกตามแนวตั้งและความต้านทานแรงกดแผ่นลูกฟูกในแนวระนาบของแผ่นกระดาษลูกฟูกที่ไม่ผ่านการเคลือบและแผ่นกระดาษลูกฟูกที่เคลือบด้วยสารเคลือบผสมระหว่างไฮโดรโฟบิกสตาร์ชและกรดไขมันสเตียริก และสารเคลือบผสมระหว่างไฮโดรโฟบิกสตาร์ชและไขมันที่เติมอิมัลซิไฟเออร์แสดงดังตารางที่ 14 พบว่า การเคลือบแผ่นกระดาษลูกฟูกด้วยสารเคลือบผสมระหว่างไฮโดรโฟบิกสตาร์ชและกรดไขมันสเตียริกที่เติมอิมัลซิไฟเออร์ และสารเคลือบผสมระหว่างไฮโดรโฟบิกสตาร์ชและไขมันที่เติมอิมัลซิไฟเออร์ทุกความเข้มข้นส่งผลให้ความต้านทานแรงกดแผ่นลูกฟูกตามแนวตั้งมีค่าลดลงจากกระดาษที่ไม่ได้เคลือบรวมทั้งกระดาษที่เคลือบด้วยไฮโดรโฟบิกสตาร์ชเพียงอย่างเดียวอย่างมีนัยสำคัญ โดยเมื่อความระดับเข้มข้นของกรดไขมันสเตียริกและไขมันในสารเคลือบเพิ่มขึ้นยิ่งส่งผลให้ค่าความต้านทานแรงกดแผ่นลูกฟูกตามแนวตั้งลดลงมากขึ้น โดยลดลงร้อยละ 4.5-10.3 เนื่องจากเมื่อเติมไขมันลงในสารละลายไฮโดรโฟบิกสตาร์ชที่มีความชอบน้ำทำให้ฟิล์มที่ได้ขาดความสมบูรณ์และความต่อเนื่องทางโครงสร้าง เนื่องจากมีไขมันแทรกอยู่ในชั้นฟิล์มไฮโดรโฟบิกสตาร์ช ดังนั้นเมื่อเติมกรดไขมันสเตียริกลงในสารละลายไฮโดรโฟบิกสตาร์ชจึงมีผลให้กระดาษหลังเคลือบมีความแข็งแรงลดลง (Colla *et al.*, 2006; Weller *et al.*, 1998; Sebti *et al.*, 2002)

นอกจากนี้แผ่นกระดาษลูกฟูกที่เคลือบด้วยสารเคลือบผสมระหว่างไฮโดรโฟบิกสตาร์ชและกรดไขมันสเตียริกร้อยละ 3 ยังส่งผลให้ค่าความต้านทานแรงกดแผ่นลูกฟูกในแนวระนาบลดลงอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากปริมาณกรดไขมันสเตียริกที่มีอยู่ปริมาณมากในสารเคลือบอาจทำให้ฟิล์มขาดความต่อเนื่องทางโครงสร้างเช่นกัน จึงส่งผลให้ค่าความต้านทานแรงกดแผ่นลูกฟูกในแนวระนาบลดลงได้ ในขณะที่กระดาษที่เคลือบด้วยสารผสมอื่นส่งผลให้ความต้านทานแรงกดแผ่นลูกฟูกในแนวระนาบเพิ่มขึ้นร้อยละ 0.6-5.3 อาจเป็นผลจากสารเคลือบที่เกิดเป็นชั้นฟิล์มบนผิวกระดาษ ทำให้กระดาษปะด้านนอกทั้งสองด้านมีความแข็งแรงมากขึ้นจึงส่งผลให้ความต้านทานแรงกดแผ่นลูกฟูกในแนวระนาบมีค่าเพิ่มขึ้น ส่วนการเคลือบแผ่นกระดาษลูกฟูกด้วยไฮโดรโฟบิกสตาร์ชเพียงอย่างเดียวส่งผลให้ทั้งความต้านทานแรงกดแผ่นลูกฟูกตามแนวตั้งและความต้านทานแรงกดแผ่นลูกฟูกในแนวระนาบเพิ่มขึ้นแต่ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากไฮโดรโฟบิกสตาร์ชช่วยในการเติมเต็มช่องว่างในโครงสร้างและช่วยในการยึดเกาะของเส้นใยกระดาษ มีผลให้กระดาษมีความแข็งแรงมากขึ้น

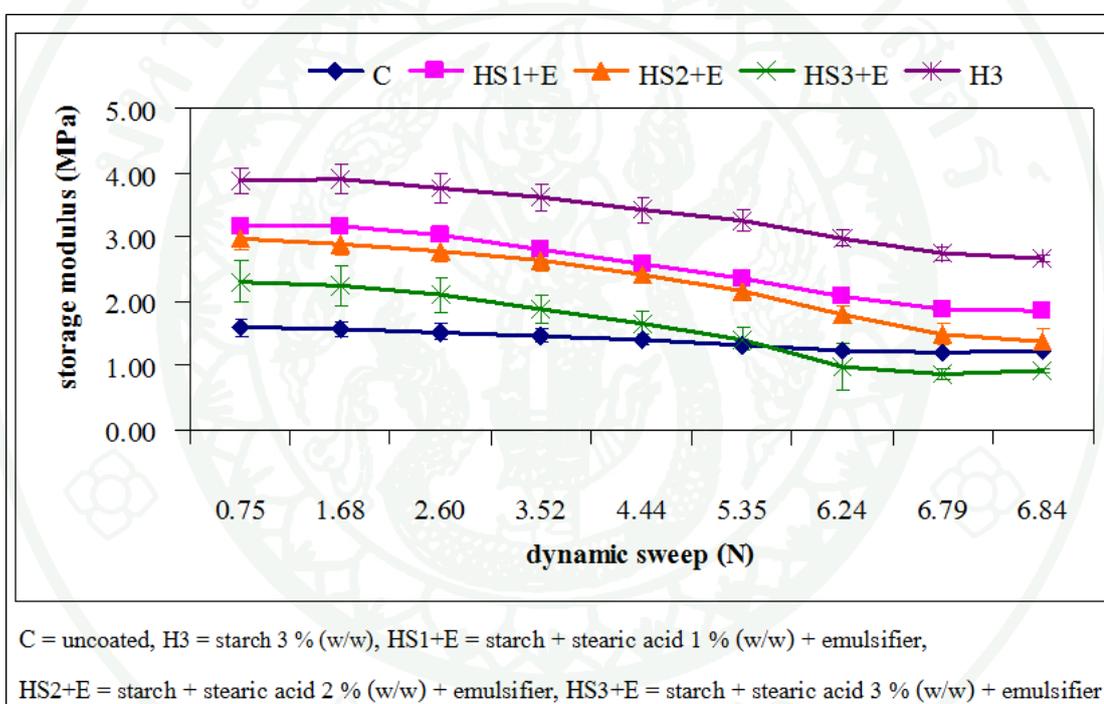
ตารางที่ 14 ค่าความต้านทานแรงกดแผ่นลูกฟูกตามแนวตั้งและค่าความต้านทานแรงกดแผ่นลูกฟูก
ในแนวระนาบของแผ่นกระดาษลูกฟูกหลังเคลือบด้วยสารเคลือบผสมระหว่าง
ไฮโดรโฟบิกสตาร์ชและกรดไขมันสเตียริก และสารเคลือบผสมระหว่าง
ไฮโดรโฟบิกสตาร์ชและไขมันที่เติมอิมัลซิไฟเออร์

สารเคลือบ	ค่าทดสอบ	
	ค่าความต้านทาน แรงกดแผ่นลูกฟูก ตามแนวตั้ง (กิโลนิวตันต่อเมตร)	ความต้านทานแรงกด แผ่นลูกฟูกในแนวระนาบ (กิโลปาสกาล)
แผ่นกระดาษลูกฟูกที่ไม่ผ่านการเคลือบ	6.38 ± 0.11 ^a	113.71 ± 3.58 ^a
ไฮโดรโฟบิกสตาร์ชร้อยละ 3	6.48 ± 0.08 ^a	117.50 ± 6.39 ^a
ไฮโดรโฟบิกสตาร์ช-กรดสเตียริกร้อยละ 1 + Tween 60	6.06 ± 0.10 ^b	118.53 ± 2.77 ^a
ไฮโดรโฟบิกสตาร์ช-กรดสเตียริกร้อยละ 2 + Tween 60	5.82 ± 0.19 ^c	114.36 ± 5.46 ^a
ไฮโดรโฟบิกสตาร์ช-กรดสเตียริกร้อยละ 3 + Tween 60	5.72 ± 0.14 ^c	106.92 ± 6.52 ^b
ไฮโดรโฟบิกสตาร์ช-ไขมันร้อยละ 1 + Tween 60	6.09 ± 0.14 ^b	119.78 ± 6.69 ^a
ไฮโดรโฟบิกสตาร์ช-ไขมันร้อยละ 2 + Tween 60	6.04 ± 0.15 ^b	115.72 ± 4.35 ^a
ไฮโดรโฟบิกสตาร์ช-ไขมันร้อยละ 3 + Tween 60	5.96 ± 0.15 ^b	114.48 ± 6.46 ^a

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

3.5 สมบัติเชิงกลพลวัตของแผ่นกระดาษลูกฟูกหลังเคลือบ

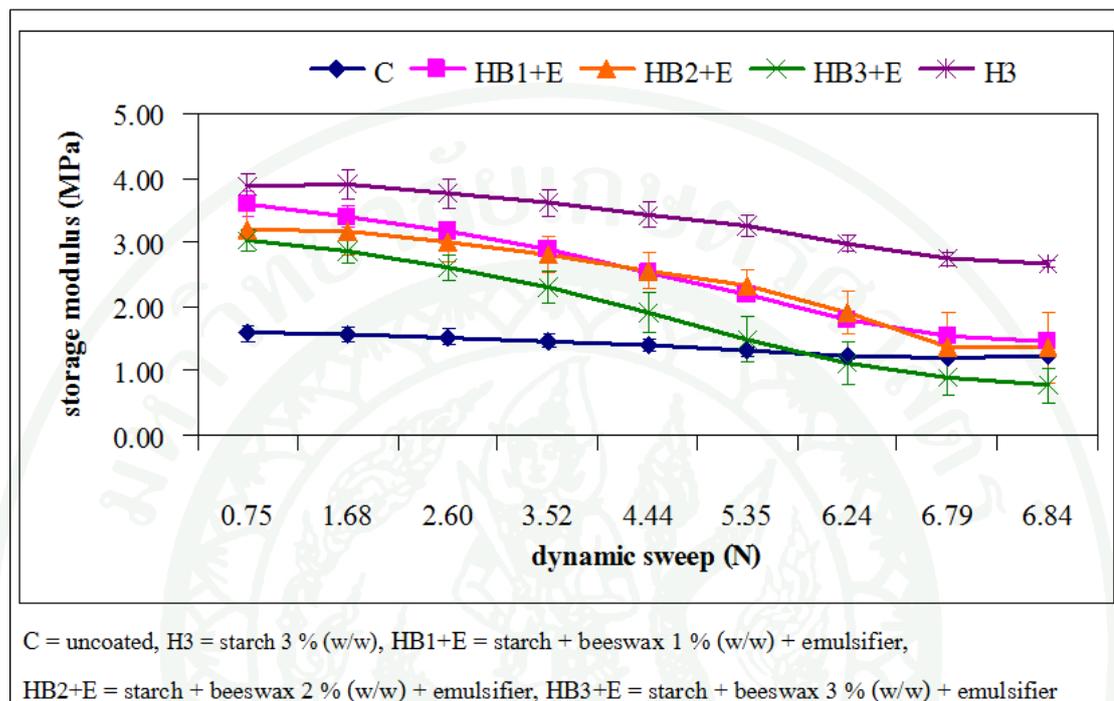
การเคลือบแผ่นกระดาษลูกฟูกด้วยสารเคลือบผสมระหว่างไฮโดรโฟบิกสตาร์ชและกรดไขมันสเตียริก และสารเคลือบผสมระหว่างไฮโดรโฟบิกสตาร์ชและไขมันที่ระดับความเข้มข้นต่าง ๆ โดยมีการเติมอิมัลซิไฟเออร์ร่วมด้วย ส่งผลให้กระดาษหลังเคลือบทุกชนิดมีค่า storage modulus เพิ่มขึ้นจากกระดาษที่ไม่ผ่านการเคลือบ โดยเฉพาะที่แรงกดต่ำ ๆ (0.75-3.5 นิวตัน) (ภาพที่ 42-43) ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Han *et al.* (2006) ที่พบว่าการเติมไขมันลงไปในพื้นที่ฟิล์มสตาร์ชถั่ว (pea starch film) สามารถเพิ่มค่า modulus ของฟิล์มสตาร์ชถั่วได้อย่างมีนัยสำคัญ



ภาพที่ 42 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง storage modulus และ dynamic sweep ของแผ่นกระดาษลูกฟูกหลังเคลือบสารผสมระหว่างไฮโดรโฟบิกสตาร์ชและกรดไขมันสเตียริก ร้อยละ 1 2 และ 3

เมื่อความเข้มข้นของกรดไขมันสเตียริกและไขมันเพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่า storage modulus ลดลง อาจเนื่องมาจากปริมาณสารพวกไขมันที่เพิ่มขึ้นในสารผสมระหว่างน้ำและน้ำมันส่งผลให้ความเข้ากันได้ของสารเคลือบลดลงจึงส่งผลให้สมบัติด้านความแข็งแรงลดลง นอกจากนี้การ

เคลือบกระดาษด้วยสารเคลือบผสมยังส่งผลให้ค่า storage modulus มีค่าต่ำกว่าการเคลือบด้วยสารเคลือบไฮโดรโฟบิกสตาร์ชเพียงอย่างเดียวอีกด้วย



ภาพที่ 43 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง storage modulus และ dynamic sweep ของแผ่นกระดาษลูกฟูกหลังเคลือบสารผสมระหว่างไฮโดรโฟบิกสตาร์ชและไขผึ้งร้อยละ 1 2 และ 3

เมื่อเปรียบเทียบสารเคลือบที่ระดับความเข้มข้นเดียวกัน ที่แรงกดต่ำ ๆ พบว่ากระดาษหลังเคลือบด้วยสารเคลือบที่มีองค์ประกอบของไขผึ้งมีค่า storage modulus มากกว่ากระดาษหลังเคลือบด้วยสารเคลือบที่มีองค์ประกอบของกรดไขมันสเตียริก ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองสมบัติเชิงกลพลวัตของกระดาษหลังเคลือบด้วยสารเคลือบเดี่ยว ที่สารเคลือบไขผึ้งให้ค่า storage modulus สูงกว่าสารเคลือบกรดไขมันสเตียริก

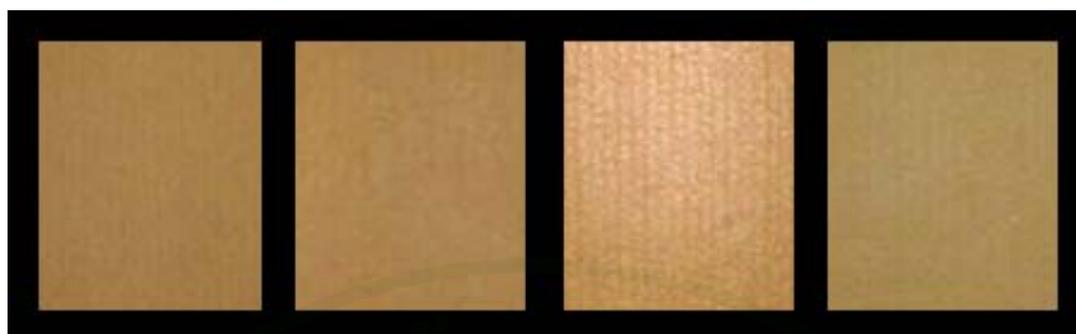
จากภาพที่ 42-43 พบว่ากระดาษหลังเคลือบด้วยสารเคลือบผสมระหว่างไฮโดรโฟบิกสตาร์ชและกรดไขมันสเตียริก และสารเคลือบผสมระหว่างไฮโดรโฟบิกสตาร์ชและไขผึ้งที่ระดับความเข้มข้นต่าง ๆ โดยมีการเติมอิมัลซิไฟเออร์ร่วมด้วย มีการเปลี่ยนแปลงของค่า storage modulus มากกว่ากระดาษที่ไม่ผ่านการเคลือบ (เส้นกราฟมีความชันมาก) โดยที่แรงกดต่ำ ๆ จะมีค่า storage

modulus สูง แต่เมื่อได้รับแรงกดมาก ค่า storage modulus จะลดลงมากกว่ากระดาษที่เคลือบด้วยสารเคลือบที่ความเข้มข้นต่ำ แสดงว่าที่ความเข้มข้นสูง กระดาษหลังเคลือบจะมีลักษณะแข็งแต่เปราะมากขึ้น

4. อิทธิพลของระดับความเข้มข้นของซิน กรดไขมันสเตียริก และไขมันในการใช้เป็นสารเคลือบชั้นที่สองต่อสมบัติของแผ่นกระดาษลูกฟูกเคลือบ

4.1 สมบัติทางกายภาพของแผ่นกระดาษลูกฟูกหลังเคลือบ

ลักษณะของแผ่นกระดาษลูกฟูกที่เคลือบสองชั้น โดยเคลือบชั้นที่ 1 ด้วยสารเคลือบไฮโดรโฟบิกสตาร์ช และเคลือบชั้นที่ 2 ด้วยสารเคลือบซิน กรดไขมันสเตียริกและไขมันเปรียบเทียบกับแผ่นกระดาษลูกฟูกที่ไม่ผ่านการเคลือบแสดงดังภาพที่ 44 พบว่า แผ่นกระดาษลูกฟูกที่เคลือบสองชั้นด้วยไฮโดรโฟบิกสตาร์ช (ชั้นที่ 1) และซิน (ชั้นที่ 2) หรือไขมัน (ชั้นที่ 2) มีลักษณะผิวหน้าเรียบมันวาวเล็กน้อยและมีสีสว่างขึ้น ซึ่งเป็นผลมาจากสตาร์ชที่เคลือบในชั้นที่ 1 ส่วนลักษณะผิวหน้าของแผ่นกระดาษลูกฟูกที่เคลือบชั้นที่ 2 ด้วยกรดไขมันสเตียริกมีความขรุขระมากกว่าแผ่นกระดาษลูกฟูกที่เคลือบชั้นที่ 2 ด้วยซินและไขมัน แต่ก็มีความไม่เรียบมากกว่าเนื่องจากมีผลึกกรดไขมันสเตียริกสีขาวซึ่งหลุดร่อนได้ง่ายติดอยู่บนผิวกระดาษ ยิ่งในการเคลือบด้วยระดับความเข้มข้นของกรดไขมันสเตียริกที่ความเข้มข้นสูงจะยิ่งเห็นผลึกสีขาวมาก อาจเนื่องมาจากความเข้มข้นของกรดสเตียริกที่มีค่ามากนั้นทำให้เกิดการตกผลึกเมื่ออุณหภูมิของสารเคลือบลดลงและตัวทำละลายระเหยไปขณะการทำแห้ง ซึ่งสอดคล้องกับลักษณะของฟิล์มสองชั้น (bi-layer) ที่ประกอบด้วยชั้นฟิล์มไฮดรอกซีโพรพิลเมทิลเซลลูโลส (HPMC) และชั้นฟิล์มกรดไขมันสเตียริกที่มีผลึกของกรดไขมันสเตียริกปกคลุมบนผิวหน้าของฟิล์มภายหลังการเตรียม 1 วัน (Kamper and Fennema, 1984a)



(ก) C

(ข) H/Z

(ค) H/S

(ง) H/B

ภาพที่ 44 ลักษณะแผ่นกระดาษลูกฟูกก่อนและหลังเคลือบ (ก) C; กระดาษที่ไม่ผ่านการเคลือบ (ข) H/Z; เคลือบสองชั้นด้วยไฮโดรโฟบิกสตาร์ช/ซีน (ค) H/S; เคลือบไฮโดรโฟบิกสตาร์ช/กรดไขมันสเตียริก และ (ง) H/B; เคลือบไฮโดรโฟบิกสตาร์ช/ไขผึ้ง

น้ำหนักแผ่นลูกฟูก ความหนา และปริมาณความชื้นของแผ่นกระดาษลูกฟูกที่ไม่ผ่านการเคลือบและแผ่นกระดาษลูกฟูกที่เคลือบสองชั้นด้วยสารเคลือบไฮโดรโฟบิกสตาร์ช/ซีน เคลือบด้วยไฮโดรโฟบิกสตาร์ช/กรดไขมันสเตียริก และเคลือบด้วยไฮโดรโฟบิกสตาร์ช/ไขผึ้ง ที่ระดับความเข้มข้นต่าง ๆ แสดงดังตารางที่ 15 พบว่า การเคลือบแผ่นกระดาษลูกฟูกด้วยสารเคลือบสองชั้นส่งผลให้น้ำหนักแผ่นกระดาษลูกฟูกมีน้ำหนักเพิ่มขึ้นจากกระดาษที่ไม่ผ่านการเคลือบและเคลือบด้วยไฮโดรโฟบิกสตาร์ชเพียงชั้นเดียวอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) โดยน้ำหนักแผ่นกระดาษลูกฟูกเพิ่มขึ้นร้อยละ 0.3-2.6 และน้ำหนักแผ่นกระดาษลูกฟูกมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของสารเคลือบเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตาม ความหนาของแผ่นกระดาษลูกฟูกที่เคลือบด้วยสารเคลือบสองชั้นและแผ่นกระดาษลูกฟูกที่ไม่ผ่านการเคลือบไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ($p \leq 0.05$) อาจเนื่องมาจากระดับความเข้มข้นของสารเคลือบยังอยู่ในระดับที่ค่อนข้างต่ำ นอกจากนี้พบว่าแผ่นกระดาษลูกฟูกที่เคลือบด้วย สารเคลือบสองชั้นทุกชนิดมีปริมาณความชื้นในกระดาษเพิ่มขึ้นจากแผ่นกระดาษลูกฟูกที่ไม่ผ่านการเคลือบและกระดาษลูกฟูกเคลือบเพียงชั้นเดียวด้วยสารเคลือบไฮโดรโฟบิกสตาร์ชอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) โดยปริมาณความชื้นเพิ่มขึ้นร้อยละ 6-9

ตารางที่ 15 น้ำหนักแผ่นกระดาษลูกฟูก ความหนา และปริมาณความชื้นของแผ่นกระดาษลูกฟูกที่เคลือบสองชั้นด้วยสารเคลือบไฮโดรโฟบิกสตาร์ช/ซิน ไฮโดรโฟบิกสตาร์ช/กรดไขมันสเตียริก และไฮโดรโฟบิกสตาร์ช/ไขผึ้งที่ระดับความเข้มข้นต่าง ๆ

สารเคลือบ	ค่าทดสอบ		
	น้ำหนักแผ่นลูกฟูก (กรัมต่อตารางเมตร)	ความหนา (มิลลิเมตร)	ความชื้น (ร้อยละ)
แผ่นกระดาษลูกฟูกที่ไม่ผ่านการเคลือบ	803.673 ± 7.15 ^c	7.046 ± 0.02 ^{ns}	8.85 ± 0.18 ^c
ไฮโดรโฟบิกสตาร์ชร้อยละ 3	806.179 ± 5.85 ^c	7.047 ± 0.02 ^{ns}	9.25 ± 0.12 ^b
ไฮโดรโฟบิกสตาร์ช/ซินร้อยละ 1	809.563 ± 6.72 ^{bc}	7.047 ± 0.02 ^{ns}	9.65 ± 0.02 ^a
ไฮโดรโฟบิกสตาร์ช/ซินร้อยละ 2	810.058 ± 7.46 ^{bc}	7.048 ± 0.02 ^{ns}	9.46 ± 0.07 ^{ab}
ไฮโดรโฟบิกสตาร์ช/ซินร้อยละ 3	812.915 ± 3.68 ^b	7.048 ± 0.01 ^{ns}	9.37 ± 0.03 ^{ab}
ไฮโดรโฟบิกสตาร์ช/กรดไขมัน สเตียริกร้อยละ 1	819.467 ± 6.55 ^a	7.047 ± 0.02 ^{ns}	9.47 ± 0.07 ^{ab}
ไฮโดรโฟบิกสตาร์ช/กรดไขมัน สเตียริกร้อยละ 2	820.208 ± 5.93 ^a	7.048 ± 0.02 ^{ns}	9.51 ± 0.13 ^{ab}
ไฮโดรโฟบิกสตาร์ช/กรดไขมัน สเตียริกร้อยละ 3	822.002 ± 7.56 ^a	7.048 ± 0.02 ^{ns}	9.59 ± 0.30 ^a
ไฮโดรโฟบิกสตาร์ช/ไขผึ้งร้อยละ 1	820.605 ± 6.45 ^a	7.047 ± 0.01 ^{ns}	9.59 ± 0.01 ^a
ไฮโดรโฟบิกสตาร์ช/ไขผึ้งร้อยละ 2	822.691 ± 6.39 ^a	7.048 ± 0.02 ^{ns}	9.58 ± 0.03 ^a
ไฮโดรโฟบิกสตาร์ช/ไขผึ้งร้อยละ 3	824.524 ± 6.20 ^a	7.048 ± 0.02 ^{ns}	9.35 ± 0.01 ^{ab}

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

^{ns} หมายถึงค่าเฉลี่ยในแถวตั้งไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

4.2 สมบัติการต้านทานน้ำของแผ่นกระดาษลูกฟูกหลังเคลือบ

ค่ามุมสัมผัสของน้ำของแผ่นกระดาษลูกฟูกที่ไม่ผ่านการเคลือบและแผ่นกระดาษลูกฟูกที่เคลือบสองชั้นด้วยสารเคลือบไฮโดรโฟบิกสตาร์ช/ซิน เคลือบไฮโดรโฟบิกสตาร์ช/กรดไขมันสเตียริก และเคลือบไฮโดรโฟบิกสตาร์ช/ไขผึ้งที่ระดับความเข้มข้นต่าง ๆ แสดงดังตารางที่ 16

ตารางที่ 16 ค่ามุมสัมผัสของน้ำของแผ่นกระดาษลูกฟูกที่เคลือบสองชั้นด้วยสารเคลือบไฮโดรโฟบิกสตาร์ช/ซิน ไฮโดรโฟบิกสตาร์ช/กรดไขมันสเตียริก และไฮโดรโฟบิกสตาร์ช/ไขผึ้งที่ระดับความเข้มข้นต่าง ๆ

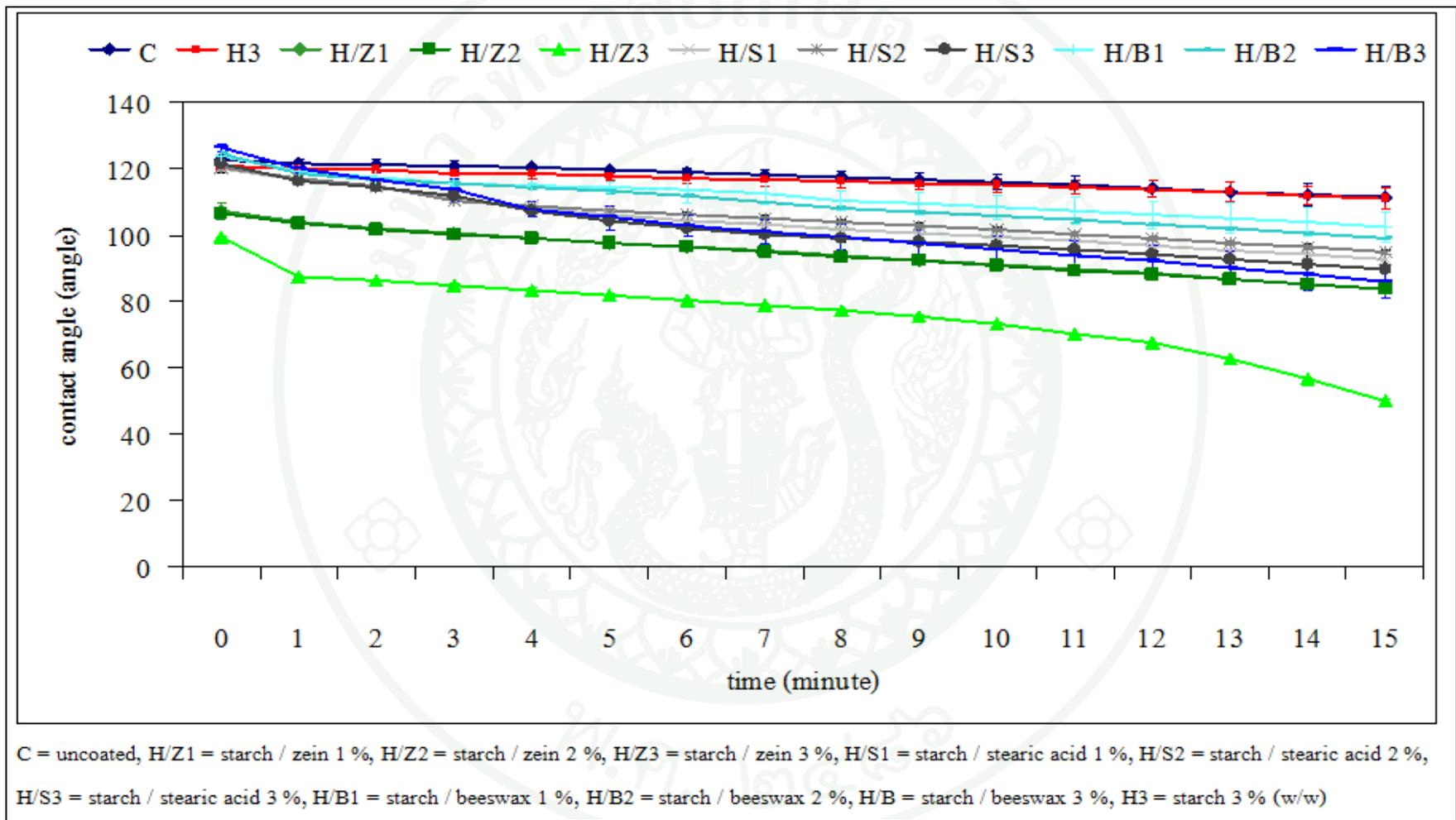
สารเคลือบ	มุมสัมผัสของน้ำ (องศา)
แผ่นกระดาษลูกฟูกที่ไม่ผ่านการเคลือบ	121.99 ± 1.09 ^{bc}
ไฮโดรโฟบิกสตาร์ชร้อยละ 3	120.90 ± 1.18 ^{bc}
ไฮโดรโฟบิกสตาร์ช/ซินร้อยละ 1	107.24 ± 2.36 ^d
ไฮโดรโฟบิกสตาร์ช/ซินร้อยละ 2	106.55 ± 1.05 ^d
ไฮโดรโฟบิกสตาร์ช/ซินร้อยละ 3	99.28 ± 1.80 ^c
ไฮโดรโฟบิกสตาร์ช/กรดไขมันสเตียริกร้อยละ 1	120.14 ± 1.39 ^c
ไฮโดรโฟบิกสตาร์ช/กรดไขมันสเตียริกร้อยละ 2	120.34 ± 1.52 ^c
ไฮโดรโฟบิกสตาร์ช/กรดไขมันสเตียริกร้อยละ 3	121.57 ± 1.66 ^{bc}
ไฮโดรโฟบิกสตาร์ช/ไขผึ้งร้อยละ 1	123.87 ± 0.45 ^{abc}
ไฮโดรโฟบิกสตาร์ช/ไขผึ้งร้อยละ 2	124.50 ± 2.05 ^{ab}
ไฮโดรโฟบิกสตาร์ช/ไขผึ้งร้อยละ 3	126.44 ± 2.19 ^a

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

จากตารางที่ 16 พบว่า การเคลือบชั้นที่ 2 ด้วยไขผึ้ง ส่งผลให้แผ่นกระดาษลูกฟูกมีมุมสัมผัสของน้ำสูงขึ้นจากแผ่นกระดาษที่ไม่ผ่านการเคลือบอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) เนื่องจากไขผึ้งประกอบไปด้วยไฮโดรคาร์บอนสายยาวที่มีความไม่ชอบน้ำสูง จึงทำให้แผ่นกระดาษลูกฟูกที่ผ่าน

การเคลือบมีความต้านทานน้ำมากขึ้น (Yang and Paulson, 2000) การเคลือบชั้นที่ 2 ด้วยกรดไขมันสเตียริกส่งผลให้ค่ามุมสัมผัสเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยเนื่องจากมีผลของไฮโดรโฟบิกสตาร์ชที่มีความชอบน้ำร่วมด้วย จึงทำให้มุมสัมผัสของน้ำไม่สูงเท่ากับการเคลือบแผ่นกระดาษลูกฟูกชั้นเดียวด้วยกรดไขมันสเตียริก ส่วนการเคลือบชั้นที่ 2 ด้วยซิน ส่งผลให้ค่ามุมสัมผัสของน้ำลดลงอย่างมีนัยสำคัญ และยังลดลงมากขึ้นเมื่อความเข้มข้นของซินเพิ่มมากขึ้น อาจเป็นผลเนื่องมาจากการที่ซินเกิดการรวมตัวกันมากขึ้นที่ระดับความเข้มข้นที่สูงขึ้น ซินกระจายตัวไม่สม่ำเสมอในฟิล์ม ทำให้ความสามารถในการต้านทานน้ำลดลง (Kim and Xu, 2008) และไฮโดรโฟบิกสตาร์ชที่เคลือบชั้นแรกก็สามารถดูความชื้นได้บางส่วนจึงสนับสนุนให้การต้านทานน้ำของกระดาษหลังเคลือบสองชั้นด้วยไฮโดรโฟบิกสตาร์ชและซินลดลง

มุมสัมผัสน้ำแบบต่อเนื่องของกระดาษเคลือบแสดงดังภาพที่ 45 พบว่า เมื่อเวลาผ่านไปมุมสัมผัสน้ำของ กระดาษหลังเคลือบสองชั้นด้วยสารเคลือบไฮโดรโฟบิกสตาร์ช/ซิน สารเคลือบไฮโดรโฟบิก สตาร์ช/กรดไขมันสเตียริก และสารเคลือบไฮโดรโฟบิกสตาร์ช/ไขผึ้งทุกความเข้มข้นมีค่าลดลงอย่างต่อเนื่อง แต่จะสังเกตได้ว่ามุมสัมผัสน้ำของกระดาษหลังเคลือบด้วยสารเคลือบไฮโดรโฟบิก สตาร์ช/ซินจะมีค่าลดลงอย่างเห็นได้ชัด อาจเนื่องมาจากลักษณะของฟิล์มซินที่ไม่มี ความต่อเนื่องดังที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น



ภาพที่ 45 การลดลงของค่ามุมสัมผัสของหยดน้ำมันเมื่อเวลาผ่านไปสำหรับกระดาษหลังเคลือบ

4.3 สมบัติเชิงกลของแผ่นกระดาษลูกฟูกหลังเคลือบ

ความต้านทานแรงกดแผ่นลูกฟูกตามแนวตั้งและความต้านทานแรงกดแผ่นลูกฟูกในแนวระนาบของแผ่นกระดาษลูกฟูกที่ไม่ผ่านการเคลือบและแผ่นกระดาษลูกฟูกที่เคลือบสองชั้นด้วยสารเคลือบไฮโดรโฟบิกสตาร์ช/ซิน ไฮโดรโฟบิกสตาร์ช/กรดไขมันสเตียริก และไฮโดรโฟบิกสตาร์ช/ไขมันที่ระดับความเข้มข้นต่าง ๆ แสดงดังตารางที่ 17 พบว่า การเคลือบแผ่นกระดาษลูกฟูกด้วยสารเคลือบสองชั้นทุกชนิดส่งผลให้ความต้านทานแรงกดแผ่นลูกฟูกในแนวระนาบมีค่าเพิ่มขึ้นร้อยละ 0.9-4.8 ในขณะที่ส่งผลให้ความต้านทานแรงกดแผ่นลูกฟูกตามแนวตั้งลดลงอย่างมีนัยสำคัญ โดยมีค่าลดลงร้อยละ 5.3-13.3 อาจเนื่องมาจากการเติมไขมันลงในสารละลายพอลิแซคคาไรด์ที่มีความชอบน้ำทำให้ฟิล์มที่ได้ขาดความสมบูรณ์และความต่อเนื่องทางโครงสร้าง เนื่องจากมีไขมันแทรกอยู่ในชั้นฟิล์มไฮโดรโฟบิกสตาร์ช จึงส่งผลให้แผ่นกระดาษหลังเคลือบมีความแข็งแรงลดลง (Colla *et al.*, 2006; Weller *et al.*, 1998; Sebti *et al.*, 2002) และจากการทดลองเคลือบแผ่นลูกฟูกด้วยตัวทำละลายเอทานอลเพียงอย่างเดียวแล้วนำไปทดสอบหาค่าความต้านทานแรงกดตามแนวตั้ง พบว่า แผ่นลูกฟูกเคลือบเอทานอลมีค่าความต้านทานแรงกดตามแนวตั้งเท่ากับ 481.88 กิโลนิวตันต่อเมตร ซึ่งน้อยกว่าแผ่นลูกฟูกที่ไม่ผ่านการเคลือบที่มีค่าเท่ากับ 575.78 กิโลนิวตันต่อเมตร ดังนั้นจึงอาจสรุปได้ว่าตัวทำละลายเอทานอลที่อาจแทรกซึมลงไปทำลายความแข็งแรงของชั้นกาวซึ่งเป็นสารเชื่อม ผน จุดยอดคลอนของกระดาษลูกฟูกในขณะที่เคลือบกระดาษ ส่งผลให้ความต้านทานแรงกดแผ่นลูกฟูกตามแนวตั้งมีค่าลดลง

ตารางที่ 17 ค่าความต้านทานแรงกดแผ่นลูกฟูกตามแนวตั้งและค่าความต้านทานแรงกดแผ่นลูกฟูกในแนวระนาบของแผ่นกระดาษลูกฟูกที่เคลือบสองชั้นด้วยสารเคลือบไฮโดรฟอบิกสตาร์ช/ซิน ไฮโดรฟอบิกสตาร์ช/กรดไขมันสเตียริก และไฮโดรฟอบิกสตาร์ช/ไขผึ้งที่ระดับความเข้มข้นต่าง ๆ

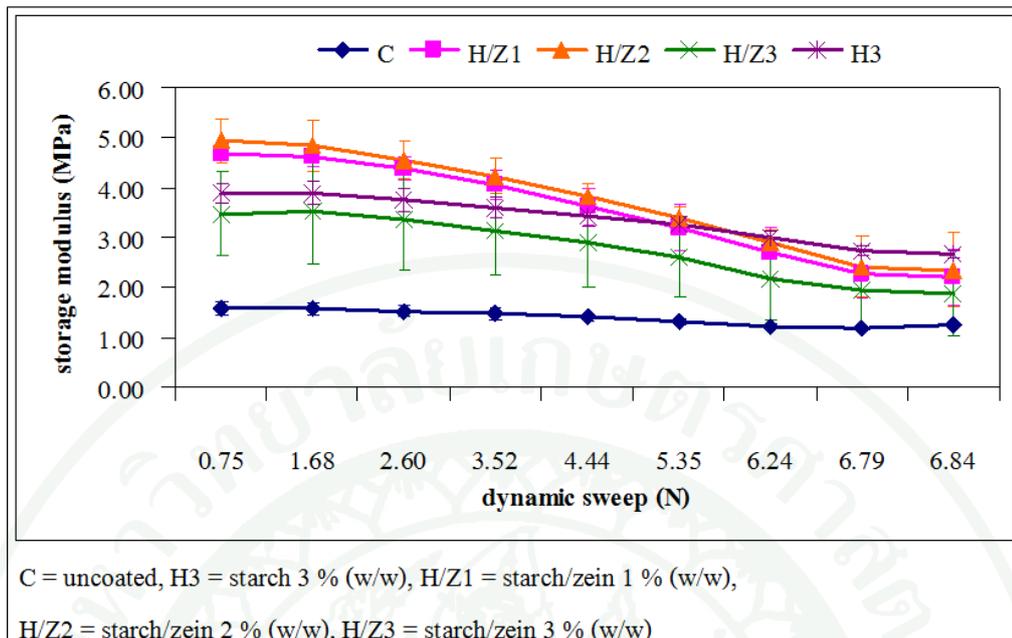
สารเคลือบ	ค่าทดสอบ	
	ค่าความต้านทานแรงกดแผ่นลูกฟูกตามแนวตั้ง	ความต้านทานแรงกดแผ่นลูกฟูกในแนวระนาบ
	(กิโลนิวตันต่อเมตร)	(กิโลปาสกาล)
แผ่นกระดาษลูกฟูกที่ไม่ผ่านการเคลือบ	6.38 ± 0.11 ^a	113.71 ± 3.58 ^{ns}
ไฮโดรฟอบิกสตาร์ชร้อยละ 3	6.48 ± 0.08 ^a	117.50 ± 6.39 ^{ns}
ไฮโดรฟอบิกสตาร์ช/ซินร้อยละ 1	6.04 ± 0.12 ^b	116.20 ± 9.13 ^{ns}
ไฮโดรฟอบิกสตาร์ช/ซินร้อยละ 2	5.88 ± 0.11 ^{bcd}	115.59 ± 7.57 ^{ns}
ไฮโดรฟอบิกสตาร์ช/ซินร้อยละ 3	5.86 ± 0.13 ^{cd}	114.69 ± 6.70 ^{ns}
ไฮโดรฟอบิกสตาร์ช/กรดไขมันสเตียริก ร้อยละ 1	5.75 ± 0.24 ^{de}	116.19 ± 6.76 ^{ns}
ไฮโดรฟอบิกสตาร์ช/กรดไขมันสเตียริก ร้อยละ 2	5.78 ± 0.23 ^{de}	117.27 ± 7.98 ^{ns}
ไฮโดรฟอบิกสตาร์ช/กรดไขมันสเตียริก ร้อยละ 3	5.79 ± 0.18 ^{de}	118.44 ± 6.47 ^{ns}
ไฮโดรฟอบิกสตาร์ช/ไขผึ้งร้อยละ 1	5.96 ± 0.07 ^{bc}	119.21 ± 3.06 ^{ns}
ไฮโดรฟอบิกสตาร์ช/ไขผึ้งร้อยละ 2	5.63 ± 0.14 ^{ef}	118.81 ± 3.35 ^{ns}
ไฮโดรฟอบิกสตาร์ช/ไขผึ้งร้อยละ 3	5.53 ± 0.15 ^f	118.33 ± 6.52 ^{ns}

หมายเหตุ ^{a-f} ตัวอักษรที่ต่างกันในแถวตั้งหมายถึงค่าเฉลี่ยมีความแตกต่างกันทางสถิติ ($p \leq 0.05$)
^{ns} หมายถึงค่าเฉลี่ยในแถวตั้งไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

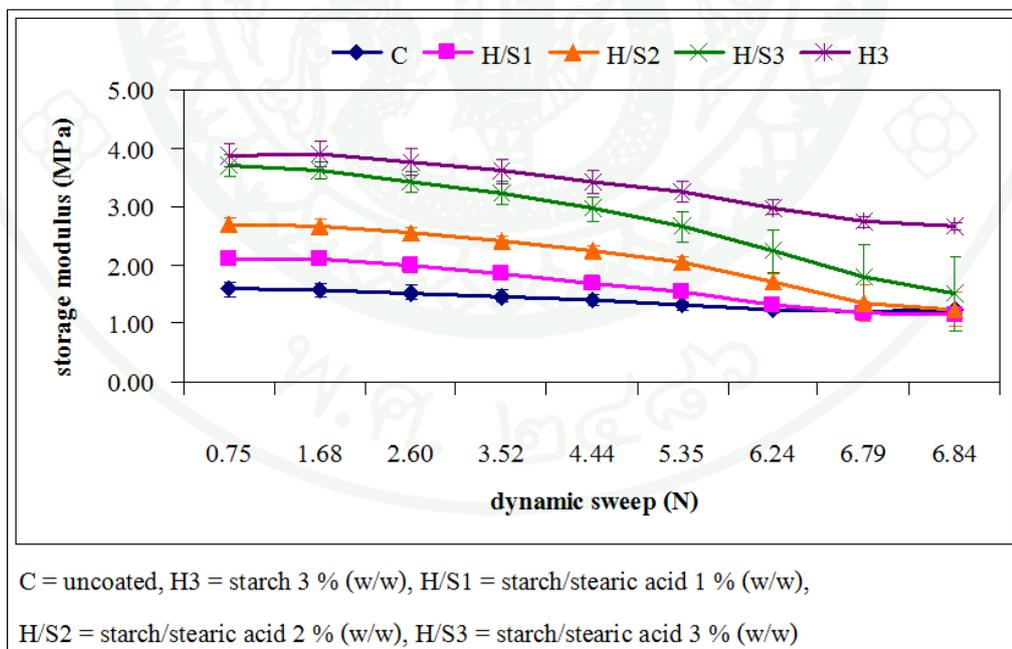
4.4 สมบัติเชิงกลพลวัตของแผ่นกระดาษลูกฟูกหลังเคลือบ

การเคลือบแผ่นลูกฟูกด้วยสารเคลือบไฮโดรโฟบิกสตาร์ช ซีน กรดไขมันสเตียริก และ ไขมัน โดยวิธีการเคลือบแบบสองชั้น โดยชั้นที่หนึ่งเคลือบด้วยไฮโดรโฟบิกสตาร์ชร้อยละ 3 ทุก ทริตเมนต์ ส่วนชั้นที่สองเคลือบด้วยสารเคลือบซิน กรดสเตียริก และไขมันที่ระดับความเข้มข้นต่าง ๆ พบว่า ที่แรงกดต่ำ ๆ (0.75-3.5 นิวตัน) กระดาษหลังเคลือบทุกชนิดมีค่า storage modulus เพิ่มขึ้น จากกระดาษที่ไม่ผ่านการเคลือบ (ภาพที่ 46-48) โดยค่า storage modulus ของกระดาษลูกฟูกหลัง เคลือบด้วยสารเคลือบไฮโดร โฟบิกสตาร์ช/กรดไขมันสเตียริกสเตียริก และสารเคลือบไฮโดรโฟบิก สตาร์ช/ไขมันมีแนวโน้มลดลงเมื่อความเข้มข้นของกรดไขมันสเตียริกสเตียริกและไขมันเพิ่มขึ้น อาจ เนื่องมาจากการยึดติดระหว่างผิวหน้าทั้งสองชั้นของไฮโดรโฟบิกสตาร์ชที่มีความชอบน้ำสูงและ สารพวกไขมันที่มีความชอบน้ำต่ำที่ไม่ดี ทำให้มีค่า storage modulus ลดลง ส่วนการเคลือบด้วยสาร เคลือบไฮโดร โฟบิกสตาร์ช/ซินนั้นส่งผลให้กระดาษหลังเคลือบมีค่า storage modulus เพิ่มขึ้น จากกระดาษหลังเคลือบไฮโดร โฟบิกสตาร์ชเพียงอย่างเดียว อาจเนื่องมาจากการผสมกันของสารทั้ง สองทำให้กระดาษเคลือบมีความยืดหยุ่นมากกว่า เพราะการผสมอาจทำให้ความต่อเนื่องของการยึด เกาะของโมเลกุลสารแต่ละชนิดลดลง และสารเคลือบซึ่งไม่แข็งตัวมากนัก

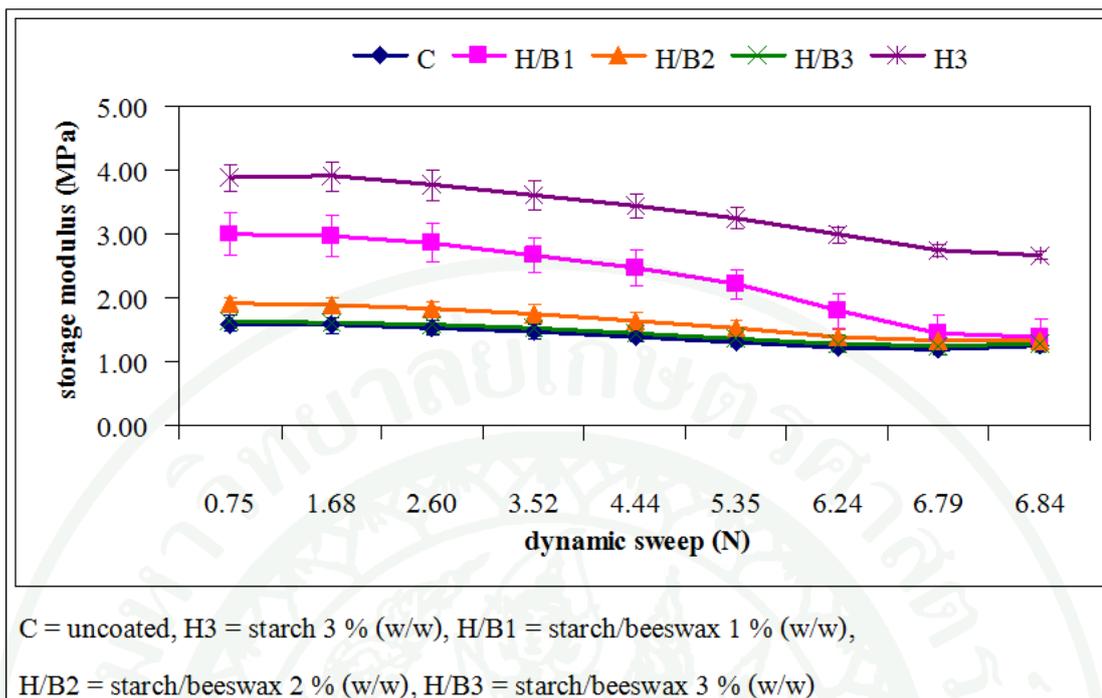
จากภาพที่ 46-48 พบว่ากระดาษหลังเคลือบทุกชนิด จะมีการเปลี่ยนแปลงของค่า storage modulus มาก (เส้นกราฟมีความชันมาก) โดยที่แรงกดต่ำ ๆ จะมีค่า storage modulus สูง แต่ เมื่อได้รับแรงมาก ค่า storage modulus จะลดลงมากกว่ากระดาษที่ไม่ผ่านการเคลือบ แสดงว่าการ เคลือบกระดาษด้วยสารเคลือบทุกชนิดทำให้กระดาษมีลักษณะแข็งแต่เปราะ



ภาพที่ 46 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง storage modulus และ dynamic sweep ของแผ่นกระดาษลูกฟูกหลังเคลือบสองชั้นด้วยไฮโดรโพลีบิกสตาร์ชและซีนร้อยละ 1 2 และ 3



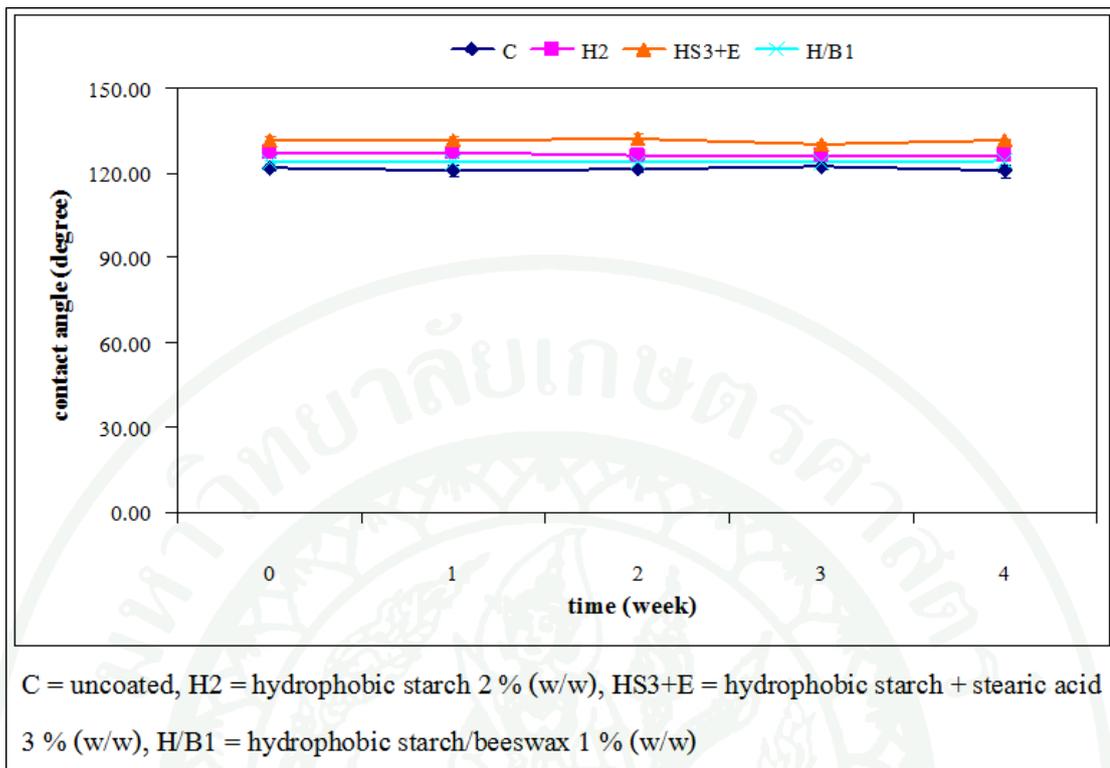
ภาพที่ 47 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง storage modulus และ dynamic sweep ของแผ่นกระดาษลูกฟูกหลังเคลือบสองชั้นด้วยไฮโดรโพลีบิกสตาร์ชและกรดไขมันสเตียริกร้อยละ 1 2 และ 3



ภาพที่ 48 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง storage modulus และ dynamic sweep ของแผ่นกระดาษลูกฟูกหลังเคลือบสองชั้นด้วยไฮโดรโฟบิกสตาร์ชและไขผึ้งร้อยละ 1 2 และ 3

5. ศึกษาอิทธิพลของระยะเวลาการเก็บ ณ อุณหภูมิห้องต่อสมบัติการต้านทานน้ำของแผ่นกระดาษลูกฟูกเคลือบ

จากการศึกษาสมบัติการต้านทานน้ำและสมบัติเชิงกลข้างต้น ได้เลือกแผ่นกระดาษลูกฟูกเคลือบที่ให้ผลการต้านทานน้ำและสมบัติเชิงกลที่ดีในแต่ละชุดการทดลองมาศึกษาสมบัติการต้านทานน้ำภายหลังการเก็บภายใต้การจำลองสภาวะการเก็บจริงที่อุณหภูมิ 25-32 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 68-74 เป็นเวลา 1-4 สัปดาห์ สารเคลือบที่เลือกในชุดสารเดี่ยวคือ สารเคลือบไฮโดรโฟบิกสตาร์ชความเข้มข้นร้อยละ 2 สารเคลือบที่เลือกในชุดสารผสมคือ สารเคลือบผสมระหว่างไฮโดรโฟบิกสตาร์ชและกรดไขมัน สเตียริกร้อยละ 3 ที่เติมอิมัลซิไฟเออร์ และสารเคลือบจากชุดการเคลือบด้วยสารเคลือบสองชั้น คือ การเคลือบชั้นที่ 1 ด้วยสารเคลือบไฮโดรโฟบิกสตาร์ชและเคลือบชั้นที่ 2 ด้วยสารเคลือบไขผึ้งร้อยละ 1 เหตุผลที่เลือกความเข้มข้นไขผึ้งที่ร้อยละ 1 เนื่องจากเมื่อความเข้มข้นของไขผึ้งเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 2 และ 3 จะทำให้ได้ลักษณะผิวหน้าของกระดาษที่ไม่ค่อยเรียบ มีก้อนไขผึ้งติดบางจุด



ภาพที่ 49 มุมสัมผัสพื้นผิวของแผ่นกระดาษลูกฟูกก่อนและหลังเคลือบด้วยสารเคลือบไฮโดรโฟบิก สตาร์ชร้อยละ 2 สารเคลือบผสมระหว่างไฮโดรโฟบิกสตาร์ชและกรดไขมันสเตียริกร้อยละ 3 และการเคลือบสองชั้นด้วยสารเคลือบไฮโดรโฟบิกสตาร์ช/ไขผึ้ง ภายหลังเก็บ ภายใต้การจำลองสภาวะการเก็บในสภาวะของคลังสินค้าทั่วไป (25-32 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 68-74)

จากภาพที่ 49 เมื่อเก็บแผ่นกระดาษลูกฟูกเคลือบทั้งสามวิธีที่เตรียมตัวภายใต้การจำลองสภาวะ การเก็บจริงที่อุณหภูมิ 25-32 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 68-74 พบว่า ตลอดระยะเวลา การเก็บ 4 สัปดาห์ แผ่นกระดาษลูกฟูกเคลือบทุกชนิดมีค่ามุมสัมผัสของน้ำลดลงเพียงเล็กน้อย สาร เคลือบทั้งสามชนิดยังคงรักษาสมบัติในการต้านทานน้ำไว้ได้หลังผ่านการเก็บ 4 สัปดาห์

6. อิทธิพลของการเคลื่อนด้วยพอลิเมอร์ชีวภาพต่อสมบัติเชิงกลของชิ้นส่วนขาของแท่นรองรับ สินค้ากระดาษลูกฟูก

จากการศึกษาสมบัติการต้านทานน้ำและสมบัติเชิงกลของกระดาษลูกฟูก ได้พิจารณาเลือกสารเคลือบที่ให้ผลค่าการต้านทานน้ำและให้สมบัติเชิงกลที่ดีในแต่ละชุดการทดลองมาใช้เคลือบชิ้นส่วนแท่นรองรับสินค้ากระดาษลูกฟูก จากผลการศึกษาการเคลือบแผ่นกระดาษลูกฟูกด้วยสารเคลือบเดี่ยวประเภทกรดไขมันสเตียริก พบว่าให้ค่ามอดุลัสที่สูง แต่เนื่องจากการยึดติดของกรดไขมันกับผิวหนังของแผ่นกระดาษลูกฟูกไม่ดีทำให้สารเคลือบบางส่วนหลุดร่อนได้ง่าย จึงไม่เลือกมาศึกษาต่อในขั้นนี้ ส่วนสารเคลือบเดี่ยวไขมันถึงแม้ว่าจะให้ค่ามอดุลัสของน้ำที่สูง แต่มีสมบัติเชิงกลต่ำ จึงไม่เลือกสารเคลือบไขมัน เนื่องจากแท่นรองรับสินค้านั้นต้องการสมบัติเชิงกลที่ดีด้วย

สารเคลือบที่เลือกในชุดสารเดี่ยวคือ สารเคลือบไฮโดรโฟบิกสตาร์ชความเข้มข้นร้อยละ 2 สารเคลือบที่เลือกในชุดสารผสมคือ สารเคลือบผสมระหว่างไฮโดรโฟบิกสตาร์ชและกรดไขมันสเตียริกร้อยละ 3 ที่เติมอิมัลซิไฟเออร์ และสารเคลือบจากชุดการเคลือบด้วยสารเคลือบสองชั้น คือ การเคลือบชั้นที่ 1 ด้วยสารเคลือบไฮโดรโฟบิกสตาร์ชและเคลือบชั้นที่ 2 ด้วยสารเคลือบไขมันร้อยละ 1 เหตุผลที่เลือกความเข้มข้นไขมันที่ร้อยละ 1 เนื่องจากเมื่อความเข้มข้นของไขมันสูงขึ้นจะทำให้ได้ลักษณะผิวหนังของกระดาษที่ไม่ค่อยเรียบ มีก้อนไขมันติดบางจุด

เนื่องจากตัวอย่างชิ้นส่วนโครงสร้างแท่นรองรับสินค้ากระดาษลูกฟูกที่นำมาใช้ในการศึกษาครั้งนี้คือ ชิ้นส่วนขาของแท่นรองรับสินค้ากระดาษลูกฟูกซึ่งเป็นส่วนที่ต้องรับแรงมากเมื่อเทียบกับพื้นที่ของชิ้นส่วนขา และต้องมีความแข็งแรงมาก ดังนั้นจึงเลือกศึกษาสมบัติเชิงกลคือ ความต้านทานแรงกด

สมบัติของชิ้นส่วนโครงสร้างแท่นรองรับสินค้ากระดาษลูกฟูกก่อนและหลังเคลือบด้วยไฮโดรโฟบิกสตาร์ชร้อยละ 2 เคลือบด้วยสารผสมระหว่างไฮโดรโฟบิกสตาร์ชและกรดไขมันสเตียริกร้อยละ 3 ที่มีการเติมอิมัลซิไฟเออร์ และเคลือบสองชั้นด้วยไฮโดรโฟบิกสตาร์ชและไขมันร้อยละ 1 แสดงดังตารางที่ 18 พบว่าน้ำหนักของชิ้นส่วนแท่นรองรับสินค้ากระดาษลูกฟูกหลังเคลือบด้วยสารเคลือบทั้ง 3 ชนิดแล้ว ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ อาจเนื่องมาจากความเข้มข้นของสารเคลือบที่ใช้ในการเคลือบมีความเข้มข้นที่ค่อนข้างต่ำ จึงส่งผลให้น้ำหนักของ

ชิ้นส่วนแท่นรองรับสินค้ากระดาษลูกฟูกไม่แตกต่างจากชิ้นส่วนแท่นรองรับสินค้ากระดาษลูกฟูกที่ไม่ผ่านการเคลือบ

ตารางที่ 18 สมบัติของชิ้นส่วนแท่นรองรับสินค้ากระดาษลูกฟูกก่อนและหลังเคลือบ

ทริตเมนต์	น้ำหนักชิ้นส่วนโครงสร้าง แท่นรองรับสินค้า กระดาษ ลูกฟูกหลังเคลือบ (กรัม)	ความต้านทานแรงกด (กิโลกรัมแรง)
แผ่นกระดาษลูกฟูกที่ไม่ผ่านการเคลือบ	177.76 ± 0.87 ^{ns}	1522 ± 64 ^{ns}
ไฮโดรฟอบิกสตาร์ชร้อยละ 2	176.57 ± 0.84 ^{ns}	1492 ± 38 ^{ns}
ไฮโดรฟอบิกสตาร์ช-กรดสเตียริกร้อยละ 3 + Tween 60	177.62 ± 1.05 ^{ns}	1505 ± 26 ^{ns}
ไฮโดรฟอบิกสตาร์ช/ไขผึ้งร้อยละ 1	178.05 ± 0.89 ^{ns}	1473 ± 0 ^{ns}

หมายเหตุ^{ns} หมายถึงค่าเฉลี่ยในแถวตั้งไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

สมบัติเชิงกลของชิ้นส่วนแท่นรองรับสินค้ากระดาษลูกฟูกที่ทำการทดสอบ คือ ค่าความต้านทานแรงกด (compression test) พบว่าชิ้นส่วนแท่นรองรับสินค้ากระดาษลูกฟูกที่เคลือบด้วยสารเคลือบทั้ง 3 ชนิดข้างต้นมีค่าความต้านทานแรงกดไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญกับชิ้นส่วนแท่นรองรับสินค้ากระดาษลูกฟูกที่ไม่ผ่านการเคลือบ ซึ่งแสดงว่ามีความเป็นไปได้ในการใช้สารเคลือบทั้ง 3 ชนิดนี้ในการเคลือบชิ้นส่วนแท่นรองรับสินค้ากระดาษลูกฟูกได้โดยไม่ทำให้ความสามารถในการรองรับน้ำหนักสินค้าของแท่นรองรับสินค้าลูกฟูกลดลง

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

จากการวิจัยผลของการเคลือบแผ่นกระดาษลูกฟูกด้วยสารเคลือบพอลิเมอร์ชีวภาพต่อสมบัติด้านต่าง ๆ ของแผ่นกระดาษลูกฟูก สามารถสรุปประเด็นสำคัญได้ดังนี้

1. สมบัติทางกายภาพของสารเคลือบ คือ ความหนืดและความคงตัวของสารเคลือบนั้น พบว่าเมื่อสารเคลือบมีอุณหภูมิที่สูงขึ้นจาก 65 องศาเซลเซียส เป็น 75 องศาเซลเซียส สารเคลือบทุกชนิดจะมีความหนืดลดลง และเมื่อความเข้มข้นของสารที่เป็นองค์ประกอบในสารเคลือบเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ความหนืดของสารเคลือบมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย สำหรับสารเคลือบผสมที่มีการเติมอิมัลซิไฟเออร์คือ Tween 60 จะทำให้องค์ประกอบในสารเคลือบผสมเข้ากันได้ดียิ่งขึ้นและส่งผลให้ความหนืดของสารเคลือบเพิ่มขึ้น โดยเฉพาะสารเคลือบผสมระหว่างไฮโดรโฟบิกสตาร์ชและกรดไขมันสเตียริกที่มีความหนืดเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) ทั้งนี้การเติมอิมัลซิไฟเออร์ยังส่งผลให้สารเคลือบมีความคงตัวมากขึ้นและแยกชั้นช้าลงอีกด้วย

2. ลักษณะทางกายภาพของแผ่นกระดาษลูกฟูกหลังเคลือบ พบว่า แผ่นกระดาษลูกฟูกหลังเคลือบส่วนใหญ่มีลักษณะปรากฏคล้ายกับแผ่นกระดาษลูกฟูกก่อนเคลือบ แต่มีผิวหน้ามันวาวและมีความสว่างมากกว่าแผ่นกระดาษลูกฟูกก่อนเคลือบ แผ่นกระดาษลูกฟูกที่เคลือบด้วยกรดไขมันสเตียริกมีลักษณะปรากฏที่แตกต่างจากการเคลือบด้วยสารเคลือบชนิดอื่นอย่างชัดเจน คือ มีความมันวาวมากกว่าและมีผิวหน้าไม่เรียบเนื่องจากการติดบนผิวหน้าแผ่นกระดาษลูกฟูกของสารเคลือบกรดไขมันสเตียริกที่ไม่ดี เกิดการหลุดร่อนของสารเคลือบได้โดยง่าย สำหรับการเคลือบด้วยสารเคลือบไขผึ้งที่ความเข้มข้นร้อยละ 2 และ 3 ส่งผลให้เกิดผิวหน้าที่ไม่เรียบ เกิดจุด ไขผึ้งในบางส่วนของผิวหน้าแผ่นกระดาษลูกฟูกที่เคลือบ

3. สมบัติทางกายภาพของแผ่นกระดาษลูกฟูกหลังเคลือบด้วยสารเคลือบพอลิเมอร์ชีวภาพ พบว่า น้ำหนักของแผ่นกระดาษลูกฟูกที่เคลือบด้วยสารเคลือบเดี่ยว คือ สารเคลือบไฮโดรโฟบิกสตาร์ช ซิน กรดไขมันสเตียริก และไขผึ้ง เพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย ส่วนการเคลือบแผ่นกระดาษลูกฟูกด้วยสารเคลือบผสมและการเคลือบสองชั้นส่งผลให้น้ำหนักแผ่นกระดาษลูกฟูกมีค่าเพิ่มมากขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) เมื่อเทียบกับแผ่นกระดาษลูกฟูกที่ไม่ผ่านการเคลือบ เช่นเดียวกับ

ปริมาณความชื้นในแผ่นกระดาษลูกฟูกที่เคลือบด้วยสารเคลือบทุกชนิดที่มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) เมื่อเทียบกับแผ่นกระดาษลูกฟูกที่ไม่ผ่านการเคลือบ ส่วนความหนาของแผ่นกระดาษที่ผ่านการเคลือบทุกชนิดและแผ่นกระดาษที่ไม่ผ่านการเคลือบมีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติ

4. สมบัติการต้านทานน้ำของแผ่นกระดาษลูกฟูกที่ทดสอบโดยการวัดค่ามุมสัมผัสของน้ำพบว่า ในส่วนของการเคลือบแผ่นกระดาษลูกฟูกด้วยสารเคลือบเดี่ยวไฮโดรโฟบิกสตาร์ช ชีน กรดไขมันสเตียริก และไขผึ้งเกือบทุกความเข้มข้นสามารถเพิ่มมุมสัมผัสของน้ำได้อย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) ยกเว้นการเคลือบด้วยสารเคลือบซินที่ทำให้ความสามารถในการต้านทานน้ำลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ส่วนการเคลือบแผ่นกระดาษลูกฟูกด้วยสารเคลือบผสมนั้น มีเพียงสารเคลือบผสมระหว่างไฮโดรโฟบิกสตาร์ชและกรดไขมันสเตียริกความเข้มข้นร้อยละ 3 เท่านั้นที่ทำให้ค่ามุมสัมผัสของแผ่นกระดาษลูกฟูกหลังเคลือบมีค่าเพิ่มขึ้นจากแผ่นกระดาษลูกฟูกที่ไม่ผ่านการเคลือบอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) ส่วนสารเคลือบผสมระหว่างไฮโดรโฟบิกสตาร์ชและกรดไขมันสเตียริกความเข้มข้นร้อยละ 1 และ 2 และสารเคลือบผสมระหว่างไฮโดรโฟบิกสตาร์ชและไขผึ้งส่งผลให้แผ่นกระดาษลูกฟูกเคลือบมีค่ามุมสัมผัสของน้ำใกล้เคียงแผ่นกระดาษลูกฟูกที่ไม่ผ่านการเคลือบ ในขณะที่สารเคลือบผสมระหว่างไฮโดรโฟบิกสตาร์ชและไขผึ้งความเข้มข้นร้อยละ 2 และ 3 ส่งผลให้ค่ามุมสัมผัสของน้ำลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ส่วนการเคลือบด้วยสารเคลือบสองชั้นนั้นมีเพียงการเคลือบแผ่นกระดาษลูกฟูกสองชั้นด้วยไฮโดรโฟบิกสตาร์ชและไขผึ้งทุกความเข้มข้นเท่านั้นที่ส่งผลให้ค่ามุมสัมผัสของน้ำมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$)

5. สมบัติเชิงกลของแผ่นกระดาษลูกฟูกหลังเคลือบ พบว่าการเคลือบแผ่นกระดาษลูกฟูกเกือบทุกทริทเมนต์ส่งผลให้ความต้านทานแรงกดแผ่นลูกฟูกในแนวระนาบมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยจากแผ่นกระดาษลูกฟูกที่ไม่ผ่านการเคลือบ ในขณะที่ความต้านทานแรงกดแผ่นลูกฟูกตามแนวตั้งของแผ่นกระดาษลูกฟูกหลังการเคลือบส่วนใหญ่มีค่าลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ส่วนการทดสอบสมบัติเชิงกลพลวัตของแผ่นกระดาษลูกฟูกหลังเคลือบในแนวระนาบนั้น พบว่าค่า storage modulus ของแผ่นกระดาษลูกฟูกหลังเคลือบมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น โดยเฉพาะที่ระดับแรงกด (dynamic sweep) ต่ำ ๆ

6. การศึกษาสมบัติการต้านทานน้ำของแผ่นกระดาษลูกฟูกเคลือบภายหลังการเก็บภายใต้การจำลองสภาวะการเก็บจริงที่อุณหภูมิ 25-32 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 68-74 เป็นเวลา 1-4 สัปดาห์ พบว่า แผ่นกระดาษลูกฟูกที่เคลือบด้วยสารเคลือบไฮโดรโฟบิกสตาร์ชร้อยละ 2 และสารเคลือบอิมัลชันระหว่างไฮโดรโฟบิกสตาร์ชและกรดไขมันสเตียริกความเข้มข้นร้อยละ 3 รวมทั้งการเคลือบสองชั้นด้วยไฮโดรโฟบิกสตาร์ชและไขมันร้อยละ 1 ยังคงรักษาสมบัติในการต้านทานน้ำไว้ได้หลังผ่านการเก็บ 4 สัปดาห์ โดยมีค่ามุมสัมผัสของน้ำลดลงเพียงเล็กน้อย

7. สมบัติเชิงกลของชิ้นส่วน โครงสร้างแท่นรองรับสินค้ากระดาษลูกฟูกที่เคลือบด้วยสารเคลือบไฮโดรโฟบิกสตาร์ชร้อยละ 2 และสารเคลือบอิมัลชันระหว่างไฮโดรโฟบิกสตาร์ชและกรดไขมันสเตียริกความเข้มข้นร้อยละ 3 รวมทั้งการเคลือบสองชั้นด้วยไฮโดรโฟบิกสตาร์ชและไขมันร้อยละ 1 ยังคงมีสมบัติเชิงกลที่ดี โดยมีความต้านทานแรงกดไม่แตกต่างจากชิ้นส่วน โครงสร้างแท่นรองรับสินค้ากระดาษลูกฟูกที่ไม่ผ่านการเคลือบ

ข้อเสนอแนะ

1. ควรมีการศึกษาการเคลือบสาร โดยวิธีการอื่น ๆ ที่มีขั้นตอนไม่ซับซ้อนและสามารถนำมาประยุกต์ใช้กระบวนการผลิตในอุตสาหกรรมการผลิตแท่นรองรับสินค้ากระดาษลูกฟูกได้ง่าย
2. ควรมีการศึกษาเพิ่มเติมถึงความสามารถในการแยกสารเคลือบออกจากเยื่อกระดาษในกระบวนการรีไซเคิลกระดาษ และศึกษาสมบัติเชิงกลของกระดาษที่ผ่านการเคลือบเปรียบเทียบกับกระดาษที่ไม่ผ่านการเคลือบ
3. กระดาษเป็นวัสดุที่มีความไวต่อความชื้น ในแต่ละครั้งของการทดสอบควรกำหนดสภาวะในการทดสอบแต่ละครั้งให้เท่ากัน เพื่อลดความคลาดเคลื่อนที่อาจจะเกิดขึ้นในการทดสอบ
4. ควรมีการศึกษาการกระจายตัวของอนุภาคไขมันในสารเคลือบผสมหรืออิมัลชันเพิ่มเติม เนื่องจากความเป็นเนื้อเดียวกันและการกระจายตัวของไขมันในระบบอิมัลชันส่งผลต่อความสามารถในการชะลอการส่งผ่าน (transfer) ความชื้นสู่ฟิล์ม (Pérez-Gago and Krochta, 2005)

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

นิรนาม. 2552. องค์ประกอบของกระดาษ. บริษัท สุพรีมพริ้นท์ จำกัด. แหล่งที่มา:

<http://www.supremeprint.net>, 9 มกราคม 2552.

_____. 2551. **Corrugated Board**. Toki Company Limited. แหล่งที่มา:

http://www.tokicompany.com/Corrugated_Board1.html, 12 ธันวาคม 2551.

_____. 2551. ความรู้เกี่ยวกับกล่องกระดาษลูกฟูก. บริษัท พรปณิชานแพ็ค จำกัด. แหล่งที่มา:

<http://pt-pack.com>, 25 ตุลาคม 2551.

_____. 2550. ประเภทของกระดาษลูกฟูก. สมาคมผู้ผลิตกล่องกระดาษและแผ่นลูกฟูกไทย.

แหล่งที่มา: <http://www.thaicorrugated.com/th/knowledge.php?cid=26>, 12 มิถุนายน 2552.

ดวงทิพย์ กู้เกียรติกุลชัย. 2550. ผลการเคลือบสตาตาร์ชดแปรและสารกันซึมต่อสมบัติของกระดาษคราฟท์ทำผิวกล่องเพื่อใช้งานในสถานะห้องเย็น. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

นวพร วรรณวิศาล. 2549. ผลของการเคลือบสตาตาร์ชดแปรที่มีต่อสมบัติด้านความแข็งแรงของกระดาษคราฟท์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

สถาพร ว่างฉาย, อริสรา ชัยกิตติรัตน และชาญยุทธ โกลิตะวงษ์. 2548. การศึกษาพฤติกรรมการเกิดความร้อนในชั้นส่วนวัสดุภายในใต้การรับภาระแบบวงรอบ. การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 19, จังหวัดภูเก็ต; 19-21 ตุลาคม 2548.

สลิลดา บุตรกนิรี. 2552. ผลของการเคลือบพอลิเมอร์ชีวภาพต่อสมบัติการกีดขวางและสมบัติเชิงกลของกระดาษแข็ง. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

สุชาดา ถาวรวิริยะนันท์. การปรับปรุงสมบัติการต้านทานน้ำของกระดาษแข็งโดยพลาสมาซัลเฟอร์เฮกซะฟลูออไรด์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

Allaoui, S., Z. Aboura and M.L. Benzeggagh. 2007. **Effects of the environmental conditions on the mechanical behaviour of the corrugated cardboard.** Composites Science and Technology 69: 104-110.

Anonymous. 2000. **Loadex Pallets vs. Wooden Pallets.** Paper Industries, Inc. Available Source: <http://www.loadex.com/>, November 18, 2009.

_____. 2005. **Backpacking Stove Fuels.** Zen Backpacking Stove. Available Source: <http://zenstoves.net/Fuels.htm>, July 20, 2009.

_____. 2006. **Stearic Acid, a Fatty Acid.** University of Oregon, Chemistry Teaching Laboratories. Available Source: http://chemlabs.uoregon.edu/GeneralResources/models/stearic_acid.html, July 14, 2009.

_____. 2008. **Corrugated Pallets.** SDI packaging inc. Available Source: http://www.sdipackaging.com/en/sure_stackier_partic.htm, October 10, 2008.

_____. 2008. **Corregated Profiles.** Duropack Starpack. Available Source: <http://www.duropack.hu/index.php?id=1005&L=0>, June 12, 2009.

_____. 2008. **FP Corrugated Paper Pallets – The Only Real Solution for Shippers.** Forward Pallet Ltd. Available Source: <http://www.forwardpallet.com/>, December 25, 2008.

_____. 2009. **Introducing the patented PennyPincher Pallet™.** St. Marys Box Co. Inc. Available Source: <http://www.pennypincherpallet.com/>, December 10, 2009.

_____. 2009. **The World's Leading Corrugated Pallet.** Packaging Unlimited, LLC. Available Source: <http://www.surestacker.com/>, November 2, 2009.

Anonymous. 2009. **Zein: A natural Biopolymer from a Renewable Resource**. Global Protein Products, Inc. Available Source: <http://www.globalprotein.com/zein.html>, June 30, 2009.

Arvanitoyannis, I., A. Nakayama and S. Aiba. 1998. Edible films made from hydroxypropyl starch and gelatin and plasticized by polyols and water. **Carbohydrate Polymer** 36 (2-3): 105-119.

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.

_____. 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 vapour and carbon dioxide transmissions of cellulose-based edible films. **Food Chemistry** 72: 231-236.

Biswas, A., R.L. Shogren, D.G. Stevenson, J.L. Willett and P.K. Bhowmik. 2006. Ionic liquids as solvent for biopolymers: Acylation of starch and zein protein. **Carbohydrate Polymers** 66: 546-550.

- Butkinaree, S., T. Jinkarn and R. Yoksan. 2008. Effects of biodegradable coating on barrier properties of paperboard food packaging. **Journal of Metals, Materials and Minerals** 18: 219-222.
- Clarke, J. 2004. **Pallets 101: Industry Overview and Wood Plastic Paper and Metal Options**. Grate Pallet, Inc. Available Source: http://www.ista.org/Knowledge/Pallets_101-Clarke_2004.pdf, October 25, 2008.
- 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. **Journal of Agricultural and Food Chemistry** 54: 6645-6653.
- Cutter, C. N. 2006. Opportunities for bio-based packaging technologies to improve the quality and safety of fresh and further processes muscle foods. **Meat science** 74: 131-142.
- DirectIndustry. 2009. **Wooden pallets**. DirectIndustry. Available Source: <http://www.directindustry.com/prod/rotom-nederland-bv/wooden-pallet-22518-373691.html>, October 3, 2009.
- Fabra, M. J., P. Talens and A. Chiralt. 2008. Effect of alginate and k-carrageenan on tensile properties and water vapour permeability of sodium caseinate–lipid based films. **Carbohydrate Polymers** 74: 419-426.
- Fabra, M. J., P. Talens and A. Chiralt. 2008. Tensile properties and water vapor permeability of sodium caseinate films containing oleic acid–beeswax mixtures. **Journal of Food Engineering** 85: 393-400.

- Halley, M.B. 2008. **PACKSPEC introduces 100% Recycled Paperboard Pallets.**
PACKSPEC Pty Ltd. Available Source: <http://www.packspec.com.au/>, November 25, 2008.
- Han, J.H., G.H. Seo, I.M. Park, G.N. Kim and D.S. Lee. 2006. Physical and Mechanical Properties of Pea Starch Edible Films Containing Beeswax Emulsions. **Journal of Food Science** (71), 290-296.
- Heryanto, R., M. Hasan, E.C. Abdullah and A. C. Kumoro. 2007. Solubility of stearic acid in various organic solvents and its prediction using non-ideal solution models. **ScienceAsia** 33: 469-472.
- 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.
- _____. 1994. **Corrugated fiberboard – Determination of edgewise crush resistance (Unwaxed edge method).** ISO 3037.
- Jansson, A. and L. Järnström. 2005. Barrier and mechanical properties of modified starches. **Cellulose** 12: 423–433.
- Jones, D.S. 1999. Dynamic mechanical analysis of polymeric systems of pharmaceutical and biomedical significance. **International Journal of Pharmaceutics** 179: 167-178.
- Jong-Whan R., L. Jun-Ho and H. Seok-In. 2007. Increase in water resistance of paperboard by coating with poly (lactide). **Packaging Technology and science** 20(6): 393-402.
- Kamper, S.L. and O. Fennema. (1984a). Water vapour permeability of edible bilayerfilms. **Journal of Food science** 49: 1478-1481, 1485.

- Kjellgren, H., M. Gallstedt, G. Engstrom and L. Jarnstrom. 2006. Barrier and surface properties of chitosan-coated greaseproof paper. **Carbohydrate Polymers** 65: 453–460.
- Khaoula, K., L. Michel, B. Sylvie and D. Stephane. 2005. Effects of mica, Carnauba wax, glycerol and sodium caseinate concentrations on water vapor barrier and mechanical properties of coated paper. **Journal of Food Science** 70(3): 192-197.
- Krochta, J.M., E.A. Baldwin and M.O. Nisperos-Carriedo. 1994. **Edible coatings and films to improve food quality**. 10 ed. Technomic Publishing Company, Inc., Pennsylvania.
- Larotonda, F. D. S., K. N. Matsui, P. J. A. Sobral and J. B. Laurindo. 2005. Hygroscopicity and water vapor permeability of Kraft paper impregnated with starch acetate. **Journal of Food Engineering** 71: 394–402.
- LeBlanc. 2002. **Limits on export pallets creating corrugated window of opportunity**. Available Source: <http://www.palletenterprise.com/articledatabase/view.asp?articleID=649>, September 3, 2551.
- Lipponen, J., Lappalainen, T., Astola, J., Gron, J. 2004. Novel method for quantitative starch penetration analysis of cross-sections of uncoated fine paper. **Nordic Pulp and Paper Journal** 19(3): 300-308.
- Matsui, K.N., F. D. S. Larotonda, S. S. Paes, D. B. Luiz, A. T. N. Pires and J. B. Laurindo. 2004. Cassava bagasse-Kraft paper composites: analysis of influence of impregnation with starch acetate on tensile strength and water absorption properties. **Carbohydrate Polymers** 55: 237-243.
- Modzelewska, I. 2006. Climatic conditions vs. hygrostability and strength properties of corrugated board. **Folia Forestalia Polonica**, Seria B, Zeszyt 37: 33-45.

- Monedero, F. M., M. J. Fabra, P. Talens and A. Chiralt. 2009. Effect of Oleic acid-beeswax mixtures on mechanical, optical and water barrier properties of soy protein isolate based films. **Journal of Food Engineering** 91: 509-515.
- Pagella, C., G. Spigno and D.M. De Faveri. 2002. Characterization of starch based edible coatings. **Food and Bioproducts Processing** 80: 193-198.
- Parris, N., 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(3): 24-29.
- Paulis, J.W. 1982. Recent developments in corn protein research. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 30 (1): 14-20.
- Pérez-Gago, M.B. and J.M. Krochta. 2005. Emulsion and bi-layer edible films. **Innovations in Food Packaging**: 384-402.
- Pflug, J., I. Verpoest and D. Vandepitte. 1999. Folded honeycomb cardboard and core material for structural applications. **Sandwich Construction** 5: 1-12.
- Rhim, J. W., J. H. Lee and S. I. Hong. 2006. Water resistance and mechanical properties of biopolymer (alginate and soy protein) coated paperboards. **LWT - Food Science and Technology** 39: 806-813.
- Roberts, J.C. 1996. **The Chemistry of Paper**. Royal Society of Chemistry.
- Sebti, I., F.R. Ham-Pichavant and V.R. Coma. 2002. Edible bioactive fatty acid-cellulosic derivative composites used in food-packaging applications. **Journal of Agricultural and Food Chemistry** 50: 4290-4294.

Shukla, R. and M. Cheryan. 2001. Zein: the industrial protein from corn. **Industrial Crops and Products** 13 (3): 171-192.

Soroka, W. 2000. **Fundamentals of Packaging Technology**. Institute of Packaging Professionals, Naperville.

Sothornvit, R. 2009. Effect of hydroxypropyl methylcellulose and lipid on mechanical properties and water vapor permeability of coated paper. **Food Research International** 42: 307–311.

Technical Association of the Pulp and Paper Industry. 1996. **Flat crush test of corrugated board (rigid support method)**. TAPPI T 825 om-96.

Weber, C. J., V. Haugaard, R. Festersen and G. Bertelsen. 2002. Production and applications of biobased packaging materials for the food industry. **Food Additives and Contaminants: Part A** 19: 172-177.

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.

Whistler, R.L. and J.N. BeMiller. 1993. **Industrial polysaccharides and their uses (third ed.)**. San Diego: Academic Press.

Wikipedia. 2008. **Contact Angle**. Article. Available Source:
<http://en.wikipedia.org/wiki/Pallet>, November 12, 2008.

Wikipedia. 2008. **Corrugated fiberboard**. Article. Available Source:
http://en.wikipedia.org/wiki/Corrugated_fiberboard, November 10, 2008.

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 คัดแปลงจาก AOAC 1995

อุปกรณ์

1. เครื่องชั่งละเอียดทศนิยม 4 ตำแหน่ง
2. ถ้วยอลูมิเนียมพร้อมฝาปิด (moisture can)
3. ตู้อบไฟฟ้า
4. เดซิกเคเตอร์พร้อมบรรจุสารดูดความชื้น

วิธีการทดสอบ

1. อบถ้วยอลูมิเนียมพร้อมฝาในตู้อบไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 105 ± 2 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นทิ้งไว้ให้เย็นในเดซิกเคเตอร์เป็นเวลา 30 นาที แล้วนำไปชั่งน้ำหนักถ้วยพร้อมฝาก่อนอบ นำไปใส่ในตู้อบไฟฟ้า 105 ± 2 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง โดยระหว่างการอบให้เปิดฝาด้วยเอาไว้เล็กน้อย
2. ชั่งน้ำหนักสตาร์ชประมาณ 3 กรัมใส่ในถ้วยอลูมิเนียม บันทึกเป็นค่าน้ำหนักสตาร์ชก่อนอบ นำไปใส่ในตู้อบไฟฟ้า 105 ± 2 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ทำซ้ำจนกระทั่งน้ำหนักที่ชั่ง 2 ครั้งติดต่อกัน มีค่าแตกต่างกันไม่เกิน 0.0010 กรัม บันทึกเป็นค่าน้ำหนักสตาร์ชหลังอบ
3. เมื่อครบเวลา ปิดฝาด้วยแล้วนำออกมาทิ้งไว้ให้เย็นในเดซิกเคเตอร์เป็นเวลาประมาณ 30 นาที แล้วนำไปชั่งน้ำหนัก จากนั้นนำไปอบอีกครั้งเป็นเวลา 1 ชั่วโมง ทำซ้ำจนกระทั่งน้ำหนักที่ชั่ง 2 ครั้งติดต่อกัน มีค่าแตกต่างกันไม่เกิน 0.0010 กรัม บันทึกเป็นค่าน้ำหนักสตาร์ชหลังอบ
4. ทำการทดสอบอย่างน้อย 5 ซ้ำต่อ 1 ตัวอย่าง รายงานผลเป็นค่าเฉลี่ยของความชื้นที่ได้ในหน่วยร้อยละ

การคำนวณ

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

การทดสอบหาน้ำหนักแผ่นกระดาษถูกฟู

มาตรฐานการทดสอบ คัดแปลง ASTM D 646-96

เครื่องมือ

1. เครื่องชั่งละเอียดตุนิยม 3 ตำแหน่ง
2. เครื่องควบคุมอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์
3. อุปกรณ์สำหรับตัดกระดาษ

วิธีการทดสอบ

1. ตัดแผ่นกระดาษถูกฟูขนาด 10×10 เซนติเมตร จำนวน 10 แผ่น นำกระดาษไปเก็บไว้ในเครื่องควบคุมอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ ที่อุณหภูมิ 27 ± 1 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 65 ± 2 เป็นเวลา 24 ชั่วโมง (ISO 187)
2. ชั่งน้ำหนักตัวอย่างกระดาษครั้งละ 1 แผ่น รายงานค่าน้ำหนักมาตรฐานเฉลี่ยเป็นกรัมต่อตารางเมตร

การคำนวณ

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

การทดสอบหาความหนาของแผ่นกระดาษลูกฟูก

มาตรฐานการทดสอบ ASTM D 645-97

เครื่องมือ

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

วิธีการทดสอบ

1. เตรียมแผ่นกระดาษลูกฟูกขนาด 30×150 มิลลิเมตร อย่างน้อย 10 แผ่น เก็บไว้ในเครื่องควบคุมอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ ที่อุณหภูมิ 27 ± 1 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 65 ± 2 เป็นเวลา 24 ชั่วโมง (ISO 187)
2. วัดความหนาด้วยไมโครมิเตอร์ แผ่นละ 5 จุด โดยให้ห่างจากขอบของแผ่นกระดาษลูกฟูกอย่างน้อย 6 มิลลิเมตร รายงานค่าความหนาเฉลี่ยเป็นมิลลิเมตร

การทดสอบหาปริมาณความชื้นในกระดาษ

มาตรฐานการทดสอบ ASTM D 644-99

เครื่องมือ

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

วิธีการทดสอบ

1. อบด้วยอลูมิเนียมพร้อมฝาในตู้อบไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 105 ± 2 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมงจากนั้นทิ้งไว้ให้เย็นในเดชีกเคเตอร์เป็นเวลา 30 นาที แล้วนำไปชั่งน้ำหนักด้วยพร้อมฝา
2. สุ่มตัวอย่างกระดาษเพื่อนำไปเก็บในเครื่องควบคุมอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ ที่สภาวะอุณหภูมิ 27 ± 1 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 65 ± 2 เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
3. ตัดกระดาษให้มีขนาดประมาณ 2×2 เซนติเมตร ใส่ในถ้วยอลูมิเนียมที่มีน้ำหนักประมาณ 3 กรัม บันทึกเป็นค่าน้ำหนักกระดาษก่อนอบ นำไปใส่ในตู้อบที่อุณหภูมิ 105 ± 2 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง โดยระหว่างการอบให้เปิดฝาด้วยเอาไว้เล็กน้อย
4. เมื่อครบเวลา ปิดฝาด้วยแล้วนำออกมาทิ้งไว้ให้เย็นในเดชีกเคเตอร์เป็นเวลาประมาณ 30 นาที แล้วนำไปชั่งน้ำหนัก จากนั้นนำไปอบอีกครั้งเป็นเวลา 1 ชั่วโมง ทำซ้ำจนกระทั่งน้ำหนักที่ชั่ง 2 ครั้งติดต่อกัน มีค่าแตกต่างกันไม่เกิน 0.0010 กรัม บันทึกเป็นค่าน้ำหนักกระดาษหลังอบ
5. ทำการทดสอบอย่างน้อย 5 ซ้ำต่อ 1 ตัวอย่าง รายงานผลเป็นค่าเฉลี่ยของความชื้นที่ได้ ในหน่วยร้อยละ

การคำนวณ

$$\text{ปริมาณความชื้น(ร้อยละ)} = \frac{(\text{น้ำหนักกระดาศก่อนอบ}-\text{น้ำหนักกระดาศหลังอบ}) \times 100}{(\text{น้ำหนักกระดาศก่อนอบ})}$$



การทดสอบค่ามอดุลัสของน้ำ

มาตรฐานการทดสอบ ASTM D 5946-04

เครื่องมือ

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

วิธีการทดสอบ

1. ตัดแผ่นกระดาษลูกฟูกตัวอย่างให้มีขนาด 1 x 5 เซนติเมตร
 2. นำตัวอย่างไปเก็บในเครื่องควบคุมอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ ที่สภาวะอุณหภูมิ 27 ± 1 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 65 ± 2 เป็นเวลา 24 ชั่วโมง (ISO 187)
 3. วางตัวอย่างแผ่นกระดาษลูกฟูกบนแท่นตัวอย่าง
 5. หยดน้ำกลั่นปริมาตร 5 ไมโครลิตร ลงบนตัวอย่างแผ่นกระดาษลูกฟูก
 6. บันทึกภาพหยดน้ำ และวัดค่ามอดุลัสด้วยเครื่อง OCA 15EC (Dataphysics, Germany)
 7. หากต้องการค่ามอดุลัสแบบต่อเนื่อง ให้ถ่ายวิดีโอหยดน้ำทุกๆ 1 นาที จนครบ 15 นาที
- ทำการทดสอบทั้งหมด 3 ซ้ำ
8. บันทึกไฟล์ภาพลงในคอมพิวเตอร์

การทดสอบค่าความต้านทานแรงกดแผ่นลูกฟูกตามแนวตั้ง

มาตรฐานการทดสอบ ISO 3037: 1994

เครื่องมือ

1. เครื่องควบคุมอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์
2. เครื่องทดสอบความต้านทานแรงกดแผ่นลูกฟูกตามแนวตั้ง (Testometric 350, England)
3. Guide blocks
4. อุปกรณ์สำหรับตัดกระดาษ

วิธีการทดสอบ

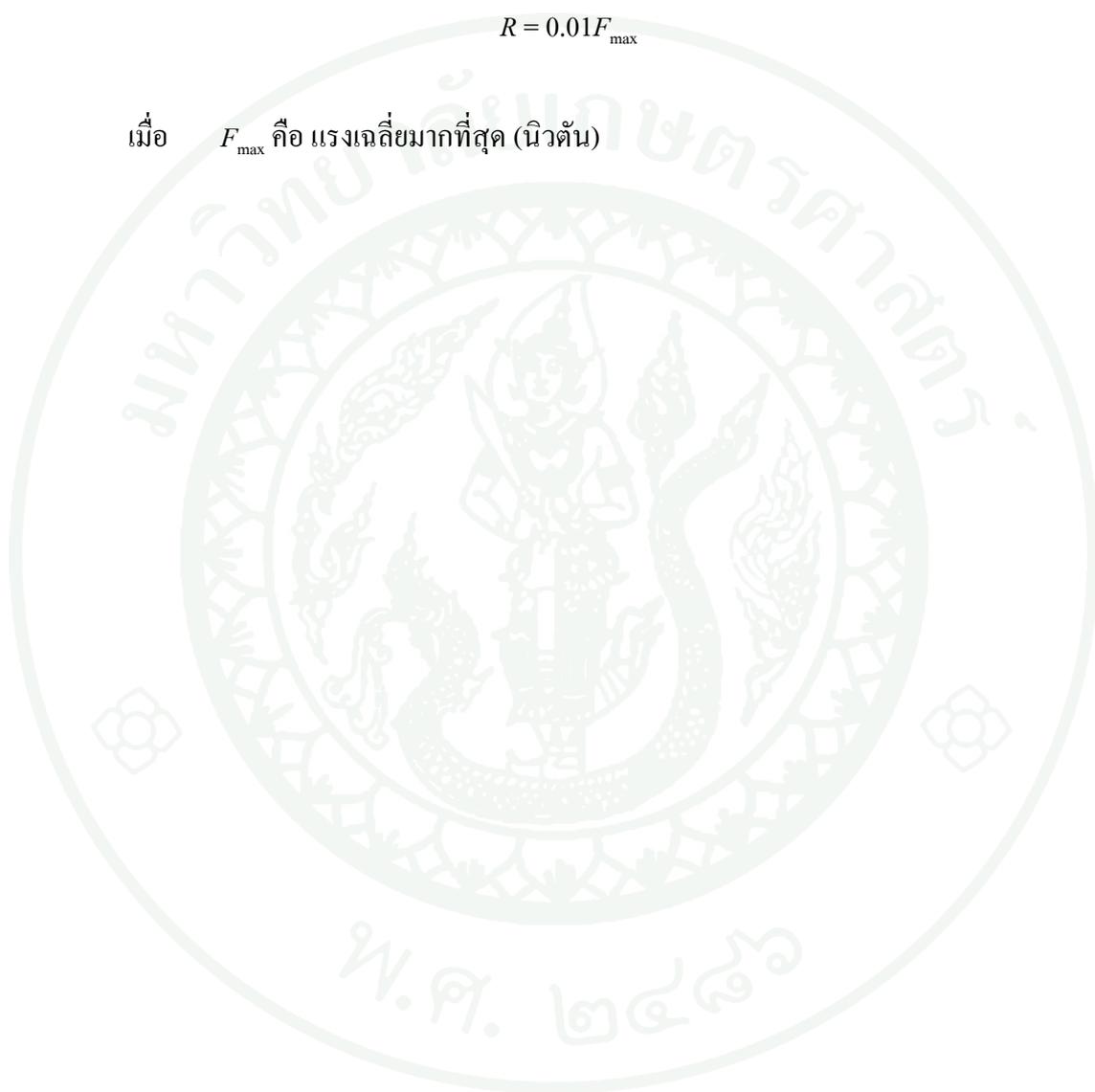
1. ตัดแผ่นกระดาษลูกฟูกตามแนวยาวของลอนลูกฟูกขนาด 25 มิลลิเมตร (± 0.5 มิลลิเมตร) x 100 มิลลิเมตร (± 0.5 มิลลิเมตร) นำกระดาษไปเก็บไว้ในเครื่องควบคุมอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ ที่อุณหภูมิ 27 ± 1 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 65 ± 2 เป็นเวลา 24 ชั่วโมง (ISO 187)
2. วางตัวอย่างบนแท่นทดสอบ โดยใช้ guide blocks ช่วยยึดตัวอย่าง
3. กดตัวอย่างด้วยเครื่องทดสอบความต้านทานแรงกดแผ่นลูกฟูกตามแนวตั้ง โดยใช้ อัตราเร็ว 12.5 มิลลิเมตร (± 2.5 มิลลิเมตร) ต่อนาที เมื่อแท่นกดสัมผัสขอบด้านบนของแผ่นกระดาษลูกฟูกให้นำ guide blocks กดตัวอย่างจนขอบขึ้นทดสอบเสียรูป
4. บันทึกค่าแรงที่คงที่ที่ทำให้แผ่นทดสอบยุบละเอียดถึง 1 นิวตัน
5. ทำการทดสอบทั้งหมด 10 ซ้ำ และรายงานค่าเฉลี่ยของค่าความต้านทานแรงกดแผ่นลูกฟูกตามแนวตั้งในหน่วยกิโลนิวตันต่อเมตร

การคำนวณ

คำนวณค่าความต้านทานแรงกดในแนวตั้ง (R) เป็นกิโลนิวตันต่อเมตรโดยใช้สมการ

$$R = 0.01F_{\max}$$

เมื่อ F_{\max} คือ แรงเฉื่อยมากที่สุด (นิวตัน)



การทดสอบค่าความต้านทานแรงกดแผ่นลูกฟูกในแนวระนาบ

มาตรฐานการทดสอบ คัดแปลง TAPPI T 825 om-96

เครื่องมือ

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

วิธีการทดสอบ

1. ตัดแผ่นกระดาษลูกฟูกตามแนวยาวของลอนลูกฟูกขนาด 65 มิลลิเมตร (± 0.5 มิลลิเมตร) x 65 มิลลิเมตร (± 0.5 มิลลิเมตร) นำกระดาษไปเก็บไว้ในเครื่องควบคุมอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ ที่อุณหภูมิ 27 ± 1 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 65 ± 2 เป็นเวลา 24 ชั่วโมง (ISO 187)
2. วางตัวอย่างบนแท่นทดสอบของเครื่องทดสอบความต้านทานแรงกดแผ่นลูกฟูกในแนวระนาบ
3. กดตัวอย่างด้วยเครื่องทดสอบความต้านทานแรงกดแผ่นลูกฟูกในแนวระนาบ โดยใช้ อัตราเร็ว 12.5 มิลลิเมตร (± 2.5 มิลลิเมตร) ต่อนาที กดตัวอย่างจนลอนยุบและเสียรูป
4. บันทึกค่าแรงที่คงที่ที่ทำให้แผ่นทดสอบยุบละเอียดถึง 1 นิวตัน
5. ทำการทดสอบทั้งหมด 10 ซ้ำ และรายงานค่าเฉลี่ยของค่าความต้านทานแรงกดแผ่นลูกฟูกตามแนวตั้งในหน่วยกิโลปาสกาล

การทดสอบสมบัติเชิงกลพลวัตของแผ่นกระดาษลูกฟูก

เครื่องมือ

1. เครื่องควบคุมอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์
2. เครื่องทดสอบสมบัติเชิงกลพลวัต (Dynamic mechanical thermal analysis, DMTA, Eplexor, Germany)
3. อุปกรณ์สำหรับตัดกระดาษ

วิธีการทดสอบ

1. ตัดแผ่นกระดาษลูกฟูกขนาด 15 มิลลิเมตร x 15 มิลลิเมตร นำกระดาษไปเก็บไว้ในเครื่องควบคุมอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ ที่อุณหภูมิ 27 ± 1 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 65 ± 2 เป็นเวลา 24 ชั่วโมง (ISO 187)
2. วางตัวอย่างบนแท่นทดสอบเครื่องทดสอบสมบัติเชิงกลพลวัต
3. ทดสอบโดยใช้ Static load 10.00 นิวตัน, Max strain ร้อยละ 40, Dynamic force 0.75-8.00 นิวตัน ความถี่คงที่ที่ 10 เฮิรท์ (Hz) และอุณหภูมิคงที่ที่ 27.0 ± 1.0 องศาเซลเซียส
4. ทำการทดสอบซ้ำทั้งหมด 3 ซ้ำ และรายงานค่าเฉลี่ยผลการทดสอบ



ตารางผนวกที่ ข1 มุมสัมพัทธ์ของหยดน้ำเมื่อเวลาผ่านไปของกระดาษหลังเคลือบด้วยสารเคลือบไฮโดรโฟบิกสตาร์ซ สารเคลือบซิน สารเคลือบกรดไขมัน สเตียริก และสารเคลือบไขผึ้ง ที่ความเข้มข้นร้อยละ 1 2 และ 3

สารเคลือบ	มุมสัมพัทธ์ (องศา)							
	นาที่ที่ 0	นาที่ที่ 1	นาที่ที่ 2	นาที่ที่ 3	นาที่ที่ 4	นาที่ที่ 5	นาที่ที่ 6	นาที่ที่ 7
C	122.91 ± 0.26 ^{cf}	121.70 ± 1.16 ^{de}	121.33 ± 1.45 ^{cf}	120.88 ± 1.40 ^c	120.62 ± 0.78 ^{cd}	119.63 ± 0.59 ^{cd}	119.12 ± 0.97 ^{cd}	118.39 ± 1.31 ^{cd}
H1	125.81 ± 3.95 ^{de}	123.32 ± 2.26 ^{cd}	122.22 ± 1.58 ^{de}	121.33 ± 1.02 ^{de}	120.51 ± 0.49 ^{cd}	119.75 ± 0.22 ^{cd}	119.09 ± 0.06 ^{cd}	118.62 ± 0.03 ^{cd}
H2	127.00 ± 0.71 ^{cd}	125.34 ± 0.59 ^c	124.22 ± 1.24 ^d	123.20 ± 1.63 ^d	122.23 ± 1.95 ^c	121.46 ± 2.19 ^c	120.75 ± 2.28 ^c	120.12 ± 2.15 ^c
H3	120.90 ± 1.15 ^f	120.12 ± 0.98 ^c	119.71 ± 1.04 ^f	118.77 ± 0.84 ^f	118.43 ± 1.20 ^d	117.75 ± 1.42 ^d	117.22 ± 1.54 ^d	116.70 ± 1.70 ^d
Z1	117.47 ± 1.12 ^g	114.56 ± 1.54 ^f	114.16 ± 1.25 ^g	114.09 ± 0.47 ^g	113.07 ± 0.95 ^e	112.43 ± 0.88 ^e	111.51 ± 0.88 ^e	110.40 ± 0.89 ^e
Z2	113.43 ± 0.24 ^h	111.85 ± 1.28 ^g	110.78 ± 1.46 ^h	109.68 ± 1.34 ^h	108.51 ± 1.25 ^f	107.71 ± 1.62 ^f	106.63 ± 1.59 ^f	105.47 ± 1.50 ^f
Z3	109.67 ± 1.05 ⁱ	108.51 ± 1.14 ^h	107.55 ± 1.16 ⁱ	107.01 ± 0.65 ⁱ	105.95 ± 0.74 ^g	104.68 ± 0.83 ^g	103.54 ± 0.77 ^g	102.40 ± 0.85 ^g
S1	128.96 ± 0.48 ^{bc}	128.08 ± 0.11 ^b	127.23 ± 0.85 ^c	126.99 ± 0.16 ^c	126.46 ± 0.17 ^b	125.79 ± 0.20 ^b	125.25 ± 0.21 ^b	124.39 ± 0.22 ^b
S2	129.33 ± 0.01 ^{bc}	128.25 ± 0.09 ^b	127.74 ± 0.12 ^{bc}	127.20 ± 0.15 ^c	126.62 ± 0.17 ^b	125.97 ± 0.21 ^b	125.40 ± 0.20 ^b	124.63 ± 0.22 ^b
S3	129.98 ± 0.41 ^{bc}	128.74 ± 0.70 ^{ab}	128.36 ± 0.87 ^{abc}	127.94 ± 1.05 ^{bc}	127.42 ± 1.12 ^{ab}	126.90 ± 1.31 ^{ab}	126.29 ± 1.25 ^{ab}	125.77 ± 1.61 ^{ab}
B1	131.36 ± 0.55 ^{ab}	131.07 ± 0.65 ^a	130.29 ± 0.74 ^a	129.73 ± 0.73 ^{ab}	129.30 ± 0.61 ^a	128.57 ± 0.36 ^a	127.93 ± 1.39 ^{ab}	127.63 ± 0.90 ^a
B2	131.22 ± 0.03 ^{ab}	130.56 ± 0.15 ^{ab}	129.89 ± 0.23 ^{ab}	129.20 ± 0.16 ^{abc}	128.66 ± 0.28 ^{ab}	128.06 ± 0.25 ^{ab}	127.45 ± 0.17 ^{ab}	126.77 ± 0.25 ^{ab}
B3	133.76 ± 2.04 ^a	131.23 ± 2.04 ^a	130.78 ± 1.17 ^a	130.26 ± 0.97 ^a	129.64 ± 1.01 ^a	129.03 ± 1.11 ^a	128.37 ± 1.08 ^a	127.61 ± 1.05 ^a

ตารางผนวกที่ ข1 (ต่อ)

สารเคลือบ	มมสัมพัทธ์ (องศา)							
	นาฬิกาที่ 8	นาฬิกาที่ 9	นาฬิกาที่ 10	นาฬิกาที่ 11	นาฬิกาที่ 12	นาฬิกาที่ 13	นาฬิกาที่ 14	นาฬิกาที่ 15
C	117.66 ± 1.68 ^{cd}	116.83 ± 2.01 ^b	116.01 ± 2.27 ^b	115.24 ± 2.59 ^b	114.02 ± 2.53 ^b	113.10 ± 2.97 ^c	112.30 ± 3.35 ^c	111.43 ± 3.51 ^d
H1	117.96 ± 0.19 ^{cd}	117.30 ± 0.22 ^b	116.82 ± 0.50 ^b	116.34 ± 0.75 ^b	115.74 ± 0.76 ^b	115.22 ± 0.79 ^c	114.39 ± 0.67 ^c	114.03 ± 1.09 ^{cd}
H2	119.37 ± 2.18 ^c	118.85 ± 2.41 ^b	118.14 ± 2.38 ^b	117.51 ± 2.41 ^b	116.84 ± 2.33 ^b	116.27 ± 2.26 ^{bc}	115.51 ± 2.26 ^{bc}	114.76 ± 2.13 ^{bcd}
H3	116.24 ± 1.77 ^d	115.66 ± 1.94 ^b	115.06 ± 2.08 ^b	114.51 ± 2.20 ^b	113.86 ± 2.34 ^b	113.03 ± 2.89 ^c	111.97 ± 2.74 ^c	111.06 ± 3.11 ^d
Z1	109.43 ± 1.08 ^c	108.39 ± 1.20 ^c	107.25 ± 1.34 ^c	106.02 ± 1.60 ^c	104.59 ± 2.27 ^c	103.27 ± 1.52 ^d	102.12 ± 1.67 ^d	100.67 ± 2.16 ^c
Z2	104.49 ± 1.89 ^f	103.19 ± 2.02 ^d	101.99 ± 2.36 ^d	100.83 ± 2.14 ^d	99.59 ± 2.63 ^d	98.35 ± 2.56 ^c	97.06 ± 2.81 ^c	95.58 ± 2.95 ^f
Z3	101.50 ± 0.41 ^g	100.12 ± 1.55 ^d	98.12 ± 1.27 ^c	96.45 ± 1.09 ^c	94.74 ± 1.32 ^c	92.84 ± 1.38 ^f	90.80 ± 1.50 ^f	88.19 ± 2.20 ^g
S1	123.83 ± 0.23 ^b	123.00 ± 0.25 ^a	122.24 ± 0.24 ^a	121.36 ± 0.27 ^a	120.70 ± 0.27 ^a	119.74 ± 0.25 ^{ab}	119.00 ± 0.31 ^{ab}	118.04 ± 0.31 ^{abc}
S2	123.95 ± 0.24 ^{ab}	123.43 ± 0.25 ^a	122.26 ± 0.23 ^a	121.68 ± 0.27 ^a	120.78 ± 0.25 ^a	119.97 ± 0.06 ^{ab}	119.14 ± 0.28 ^{ab}	118.17 ± 0.27 ^{abc}
S3	125.08 ± 1.60 ^{ab}	124.48 ± 1.94 ^a	123.40 ± 1.61 ^a	122.96 ± 1.82 ^a	121.64 ± 1.21 ^a	120.64 ± 3.52 ^{ab}	120.05 ± 1.28 ^a	119.18 ± 1.43 ^{ab}
B1	126.70 ± 0.56 ^{ab}	126.25 ± 0.94 ^a	125.25 ± 1.36 ^a	124.07 ± 0.31 ^a	123.32 ± 0.75 ^a	122.60 ± 0.27 ^a	121.95 ± 0.65 ^a	120.89 ± 0.84 ^a
B2	126.06 ± 0.20 ^{ab}	125.29 ± 0.29 ^a	124.49 ± 0.41 ^a	123.58 ± 0.77 ^a	122.75 ± 0.72 ^a	121.97 ± 0.64 ^a	121.32 ± 0.77 ^a	120.48 ± 0.67 ^a
B3	126.88 ± 1.08 ^a	126.11 ± 1.16 ^a	125.30 ± 1.13 ^a	124.38 ± 1.19 ^a	123.56 ± 1.17 ^a	122.32 ± 1.26 ^a	121.25 ± 1.18 ^a	120.58 ± 1.21 ^a

หมายเหตุ ^{a-i} ตัวอักษรที่ต่างกัน ในแถวตั้งหมายถึงค่าเฉลี่ยมีความแตกต่างกันทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

ตารางผนวกที่ ข2 มุมสัมพัทธ์ของหยดน้ำเมื่อเวลาผ่านไปของกระดาษหลังเคลือบด้วยสารเคลือบผสมระหว่างไฮโดรฟobicสตาร์ชและกรดไขมันสเตียริกที่เติม Tween 60 และสารเคลือบผสมระหว่างไฮโดรฟobicสตาร์ชและไขมันที่เติม Tween 60 ที่ความเข้มข้นร้อยละ 1 2 และ 3

สารเคลือบ	มุมสัมพัทธ์ (องศา)							
	นาที่ที่ 0	นาที่ที่ 1	นาที่ที่ 2	นาที่ที่ 3	นาที่ที่ 4	นาที่ที่ 5	นาที่ที่ 6	นาที่ที่ 7
C	122.91 ± 0.26 ^b	121.70 ± 1.16 ^a	121.33 ± 1.45 ^a	120.88 ± 1.40 ^a	120.62 ± 0.78 ^a	119.63 ± 0.59 ^a	119.12 ± 0.97 ^a	118.39 ± 1.31 ^a
H3	120.90 ± 1.15 ^c	120.12 ± 0.98 ^a	119.71 ± 1.04 ^a	118.77 ± 0.84 ^b	118.43 ± 1.20 ^b	117.75 ± 1.42 ^b	117.22 ± 1.54 ^a	116.70 ± 1.70 ^a
HS1+E	122.59 ± 0.57 ^b	86.64 ± 1.09 ^f	80.31 ± 0.43 ^c	76.94 ± 0.38 ^g	73.77 ± 0.57 ^f	70.95 ± 0.61 ^f	68.41 ± 0.60 ^c	66.13 ± 0.62 ^c
HS2+E	123.95 ± 0.31 ^b	113.39 ± 1.30 ^b	103.42 ± 0.49 ^b	96.74 ± 0.61 ^d	94.24 ± 0.31 ^d	90.44 ± 0.45 ^d	87.90 ± 0.25 ^c	85.48 ± 0.61 ^c
HS3+E	131.54 ± 0.33 ^a	105.85 ± 0.61 ^d	90.77 ± 1.35 ^d	81.44 ± 0.86 ^f	75.21 ± 0.56 ^f	70.80 ± 1.45 ^f	67.35 ± 1.70 ^d	64.79 ± 1.51 ^c
HB1+E	122.67 ± 0.97 ^b	109.89 ± 1.15 ^c	104.11 ± 0.50 ^b	101.09 ± 0.76 ^c	97.94 ± 0.77 ^c	96.57 ± 0.08 ^c	95.05 ± 0.22 ^b	92.24 ± 0.33 ^b
HB2+E	117.67 ± 0.45 ^d	102.30 ± 0.16 ^c	97.66 ± 0.29 ^c	93.67 ± 0.11 ^c	89.22 ± 0.16 ^c	86.97 ± 0.25 ^c	84.58 ± 0.39 ^d	82.36 ± 0.43 ^d
HB3+E	115.95 ± 0.14 ^c	102.08 ± 0.16 ^c	97.25 ± 0.29 ^c	93.51 ± 0.11 ^c	89.45 ± 0.16 ^c	87.32 ± 0.25 ^c	85.12 ± 0.39 ^d	82.97 ± 0.43 ^d

ตารางผนวกที่ ข2 (ต่อ)

สารเคลือบ	มูมสัมพัทธ์ (องศา)							
	นาที่ที่ 8	นาที่ที่ 9	นาที่ที่ 10	นาที่ที่ 11	นาที่ที่ 12	นาที่ที่ 13	นาที่ที่ 14	นาที่ที่ 15
C	117.66 ± 1.68 ^a	116.83 ± 2.01 ^a	116.01 ± 2.27 ^a	115.24 ± 2.59 ^a	114.02 ± 2.53 ^a	113.10 ± 2.97 ^a	112.30 ± 3.35 ^a	111.43 ± 3.51 ^a
H3	116.24 ± 1.77 ^a	115.66 ± 1.94 ^a	115.06 ± 2.08 ^a	114.51 ± 2.20 ^a	113.86 ± 2.34 ^a	113.03 ± 2.89 ^a	111.97 ± 2.74 ^a	111.06 ± 3.11 ^a
HS1+E	63.97 ± 0.70 ^c	62.04 ± 0.72 ^d	60.13 ± 0.75 ^d	57.53 ± 0.61 ^d	55.39 ± 0.56 ^d	53.00 ± 0.58 ^d	50.58 ± 0.64 ^d	48.76 ± 0.60 ^d
HS2+E	83.99 ± 1.36 ^c	81.04 ± 1.14 ^c	79.35 ± 1.20 ^c	77.66 ± 1.30 ^c	75.83 ± 1.39 ^c	73.74 ± 1.17 ^c	71.89 ± 1.31 ^c	70.26 ± 1.34 ^c
HS3+E	62.53 ± 1.52 ^c	60.34 ± 1.37 ^d	57.86 ± 1.59 ^d	56.60 ± 1.55 ^d	54.67 ± 1.55 ^d	48.60 ± 0.68 ^c	47.45 ± 6.53 ^d	45.37 ± 0.92 ^d
HB1+E	90.19 ± 0.35 ^b	88.86 ± 0.27 ^b	86.13 ± 0.19 ^b	85.09 ± 0.28 ^b	83.42 ± 0.23 ^b	81.31 ± 0.93 ^b	80.12 ± 0.28 ^b	78.22 ± 0.25 ^b
HB2+E	80.39 ± 0.31 ^d	78.54 ± 0.28 ^c	76.84 ± 0.25 ^c	75.15 ± 0.21 ^c	73.40 ± 0.24 ^c	72.04 ± 0.32 ^c	70.18 ± 0.34 ^c	68.33 ± 0.39 ^c
HB3+E	80.83 ± 0.31 ^d	78.94 ± 0.28 ^c	77.20 ± 0.25 ^c	75.46 ± 0.21 ^c	73.74 ± 0.24 ^c	72.49 ± 0.32 ^c	70.67 ± 0.34 ^c	68.88 ± 0.39 ^c

หมายเหตุ ^{a-c} ตัวอักษรที่ต่างกันในแต่ละแถวหมายถึงค่าเฉลี่ยมีความแตกต่างกันทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

ตารางผนวกที่ ข3 มุมสัมพัทธ์ของหยดน้ำเมื่อเวลาผ่านไปของกระดาษหลังเคลือบ 2 ชั้นด้วยสารเคลือบไฮโดรโฟบิกสตาร์ช สารเคลือบซิน สารเคลือบกรด ไกมันสเตียริก และสารเคลือบไขผึ้ง ที่ความเข้มข้นร้อยละ 1 2 และ 3

สารเคลือบ	มุมสัมพัทธ์ (องศา)							
	นาที่ที่ 0	นาที่ที่ 1	นาที่ที่ 2	นาที่ที่ 3	นาที่ที่ 4	นาที่ที่ 5	นาที่ที่ 6	นาที่ที่ 7
C	122.91 ± 0.26 ^{bcd}	121.70 ± 1.16 ^a	121.33 ± 1.45 ^a	120.88 ± 1.40 ^a	120.62 ± 0.78 ^a	119.63 ± 0.59 ^a	119.12 ± 0.97 ^a	118.39 ± 1.31 ^a
H3	120.90 ± 1.15 ^{dc}	120.12 ± 0.98 ^{ab}	119.71 ± 1.04 ^a	118.77 ± 0.84 ^a	118.43 ± 1.20 ^a	117.75 ± 1.42 ^a	117.22 ± 1.54 ^{ab}	116.70 ± 1.70 ^a
H/Z1	107.24 ± 2.36 ^f	104.08 ± 1.01 ^c	102.19 ± 0.77 ^c	100.45 ± 0.45 ^c	99.22 ± 0.58 ^d	97.62 ± 0.50 ^d	96.45 ± 0.27 ^c	95.18 ± 0.44 ^c
H/Z2	106.55 ± 0.63 ^f	103.62 ± 0.36 ^c	101.82 ± 0.25 ^c	100.30 ± 0.24 ^c	98.99 ± 0.25 ^d	97.46 ± 0.26 ^d	96.42 ± 0.23 ^c	95.03 ± 0.23 ^c
H/Z3	99.28 ± 0.15 ^g	87.30 ± 0.08 ^f	86.14 ± 0.56 ^f	84.77 ± 0.64 ^f	83.44 ± 0.61 ^e	81.96 ± 0.50 ^e	80.41 ± 0.38 ^f	78.79 ± 0.35 ^f
H/S1	120.14 ± 1.39 ^c	116.77 ± 0.43 ^{cd}	114.64 ± 0.40 ^{cd}	110.93 ± 1.03 ^d	108.09 ± 0.97 ^c	106.15 ± 1.87 ^c	104.48 ± 2.39 ^d	103.07 ± 2.78 ^{cd}
H/S2	120.34 ± 0.95 ^c	117.08 ± 0.80 ^{cd}	114.92 ± 0.84 ^{cd}	110.21 ± 0.45 ^d	108.77 ± 0.49 ^c	107.47 ± 0.45 ^c	106.17 ± 0.42 ^d	105.04 ± 0.46 ^c
H/S3	121.57 ± 0.07 ^{cdc}	116.39 ± 0.12 ^d	114.32 ± 0.06 ^d	111.72 ± 0.09 ^{cd}	107.21 ± 0.27 ^c	104.44 ± 0.55 ^c	102.18 ± 0.86 ^d	100.39 ± 1.01 ^d
H/B1	123.87 ± 0.19 ^{bc}	119.38 ± 0.58 ^b	117.38 ± 1.10 ^b	115.77 ± 0.42 ^b	115.02 ± 0.68 ^b	114.38 ± 1.54 ^b	113.85 ± 4.40 ^{bc}	112.56 ± 3.28 ^b
H/B2	124.50 ± 0.69 ^{ab}	118.60 ± 0.33 ^{bc}	116.75 ± 0.61 ^{bc}	115.60 ± 0.61 ^b	114.39 ± 0.56 ^b	113.32 ± 0.65 ^b	111.91 ± 0.58 ^c	109.95 ± 0.42 ^b
H/B3	126.44 ± 1.19 ^a	120.10 ± 1.52 ^{ab}	116.79 ± 2.16 ^{bc}	113.83 ± 3.37 ^{bc}	107.83 ± 2.49 ^c	105.31 ± 3.56 ^c	102.92 ± 3.34 ^d	101.14 ± 3.48 ^{cd}

ตารางผนวกที่ ข3 (ต่อ)

สารเคเลือบ	มมสัมพัทธ์ (องศา)							
	นาที่ที่ 8	นาที่ที่ 9	นาที่ที่ 10	นาที่ที่ 11	นาที่ที่ 12	นาที่ที่ 13	นาที่ที่ 14	นาที่ที่ 15
C	117.66 ± 1.68 ^a	116.83 ± 2.01 ^a	116.01 ± 2.27 ^a	115.24 ± 2.59 ^a	114.02 ± 2.53 ^a	113.10 ± 2.97 ^a	112.30 ± 3.35 ^a	111.43 ± 3.51 ^a
H3	116.24 ± 1.77 ^a	115.66 ± 1.94 ^a	115.06 ± 2.08 ^a	114.51 ± 2.20 ^a	113.86 ± 2.34 ^a	113.03 ± 2.89 ^a	111.97 ± 2.74 ^a	111.06 ± 3.11 ^a
H/Z1	93.82 ± 0.52 ^c	92.47 ± 0.41 ^f	91.02 ± 0.80 ^{fg}	89.56 ± 0.73 ^f	88.44 ± 0.53 ^f	86.74 ± 0.66 ^f	85.30 ± 0.49 ^f	83.85 ± 0.69 ^c
H/Z2	93.63 ± 0.25 ^c	92.40 ± 0.31 ^f	90.66 ± 0.29 ^g	89.30 ± 0.35 ^f	88.32 ± 0.35 ^f	86.56 ± 0.40 ^f	85.21 ± 0.38 ^f	83.63 ± 0.38 ^c
H/Z3	77.24 ± 0.30 ^f	75.54 ± 0.25 ^g	73.33 ± 0.31 ^h	70.35 ± 0.35 ^g	67.42 ± 0.13 ^g	62.57 ± 0.10 ^g	56.60 ± 0.41 ^g	49.93 ± 0.59 ^f
H/S1	101.77 ± 2.98 ^{cd}	100.63 ± 3.01 ^{dc}	99.52 ± 2.86 ^{de}	98.27 ± 2.80 ^{de}	96.93 ± 2.92 ^{de}	95.49 ± 3.00 ^{de}	94.13 ± 3.08 ^{de}	92.69 ± 3.01 ^d
H/S2	103.88 ± 0.54 ^c	102.76 ± 0.55 ^{cd}	101.54 ± 0.58 ^{cd}	100.25 ± 0.60 ^{cd}	99.00 ± 0.62 ^{cd}	97.61 ± 0.65 ^{cd}	96.31 ± 0.67 ^{cd}	94.82 ± 0.69 ^{cd}
H/S3	98.94 ± 1.02 ^d	97.82 ± 0.97 ^e	96.86 ± 0.90 ^{de}	95.65 ± 0.91 ^{de}	94.19 ± 0.96 ^{de}	92.63 ± 1.05 ^{def}	91.15 ± 1.14 ^{def}	89.70 ± 1.21 ^{de}
H/B1	110.36 ± 2.88 ^b	109.50 ± 3.43 ^b	108.38 ± 3.49 ^b	107.48 ± 4.15 ^b	106.13 ± 4.14 ^b	105.19 ± 4.58 ^b	103.89 ± 4.58 ^b	102.46 ± 4.54 ^b
H/B2	108.26 ± 0.44 ^b	107.04 ± 0.47 ^{bc}	105.89 ± 0.46 ^{bc}	104.62 ± 0.47 ^{bc}	103.29 ± 0.44 ^{bc}	101.91 ± 0.36 ^{bc}	100.49 ± 0.28 ^{bc}	98.99 ± 0.25 ^{bc}
H/B3	99.45 ± 3.78 ^d	97.54 ± 4.00 ^c	95.69 ± 4.24 ^{ef}	93.94 ± 4.52 ^{ef}	92.16 ± 4.78 ^{ef}	90.14 ± 4.87 ^{ef}	88.16 ± 4.99 ^{ef}	86.12 ± 5.14 ^e

หมายเหตุ ^{a-h} ตัวอักษรที่ต่างกันในแต่ละแถวหมายถึงค่าเฉลี่ยมีความแตกต่างกันทางสถิติ ($p \leq 0.05$)



ภาคผนวก ค
ค่าทดสอบ DMA

ตารางผนวกที่ ค1 ค่า storage modulus ของแผ่นกระดาษลูกฟูกหลังเคลือบด้วยสารเคลือบไฮโดรโฟบิกสตาร์ช สารเคลือบซิน สารเคลือบกรดไขมันสเตียริก และสารเคลือบไขผึ้ง ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ ที่ dynamic sweep ระหว่าง 0.75-8.00 นิวตัน

ทรีตเมนต์	storage moduls (E')								
	0.76 N	1.68 N	2.60 N	3.52 N	4.44 N	5.35 N	6.24 N	6.79 N	6.81 N
C	1.59 ± 0.13 ^d	1.57 ± 0.12 ^d	1.53 ± 0.12 ^d	1.47 ± 0.11 ^c	1.40 ± 0.09 ^c	1.32 ± 0.07 ^c	1.23 ± 0.04 ^{de}	1.20 ± 0.03 ^{cd}	1.24 ± 0.03 ^{cde}
H1	3.66 ± 0.05 ^{bc}	3.71 ± 0.15 ^{bc}	3.58 ± 0.18 ^{bc}	3.38 ± 0.13 ^{ab}	3.16 ± 0.17 ^{abc}	2.87 ± 0.15 ^{abc}	2.53 ± 0.17 ^{ab}	2.21 ± 0.16 ^{ab}	2.12 ± 0.14 ^{ab}
H2	4.49 ± 0.34 ^{ab}	4.63 ± 0.46 ^{ab}	4.44 ± 0.44 ^{ab}	4.18 ± 0.43 ^a	3.84 ± 0.39 ^a	3.41 ± 0.28 ^a	2.94 ± 0.18 ^a	2.56 ± 0.09 ^a	2.51 ± 0.06 ^a
H3	3.88 ± 0.20 ^{bc}	3.90 ± 0.23 ^{abc}	3.76 ± 0.24 ^{abc}	3.61 ± 0.22 ^{ab}	3.44 ± 0.20 ^{ab}	3.26 ± 0.17 ^a	2.99 ± 0.13 ^a	2.74 ± 0.09 ^a	2.67 ± 0.07 ^a
Z1	1.59 ± 0.03 ^d	1.53 ± 0.01 ^d	1.46 ± 0.00 ^d	1.37 ± 0.00 ^c	1.25 ± 0.00 ^c	1.09 ± 0.01 ^c	0.89 ± 0.00 ^c	0.74 ± 0.00 ^d	0.78 ± 0.01 ^c
Z2	1.89 ± 0.21 ^d	1.80 ± 0.20 ^d	1.70 ± 0.16 ^d	1.57 ± 0.10 ^c	1.42 ± 0.07 ^c	1.25 ± 0.06 ^c	1.04 ± 0.06 ^{de}	0.89 ± 0.07 ^d	0.88 ± 0.08 ^{cde}
Z3	3.58 ± 1.11 ^{bc}	3.54 ± 1.17 ^c	3.34 ± 1.10 ^c	3.11 ± 1.02 ^b	2.83 ± 0.94 ^{bc}	2.47 ± 0.82 ^{bcd}	2.09 ± 0.75 ^{bc}	1.73 ± 0.67 ^{bc}	1.62 ± 0.76 ^{bcd}
S1	2.45 ± 0.33 ^d	2.34 ± 0.27 ^d	2.20 ± 0.21 ^d	2.02 ± 0.16 ^c	1.78 ± 0.09 ^c	1.43 ± 0.00 ^c	1.08 ± 0.14 ^{de}	0.87 ± 0.26 ^d	0.85 ± 0.29 ^{de}
S2	3.68 ± 0.18 ^{bc}	3.47 ± 0.20 ^c	3.23 ± 0.21 ^c	2.94 ± 0.21 ^b	2.60 ± 0.23 ^{cd}	2.19 ± 0.24 ^{cd}	1.69 ± 0.23 ^{cd}	1.29 ± 0.25 ^{cd}	1.06 ± 0.34 ^{cde}
S3	4.03 ± 0.72 ^{abc}	3.83 ± 0.71 ^{abc}	3.58 ± 0.61 ^{bc}	3.27 ± 0.46 ^b	2.85 ± 0.17 ^{bc}	2.30 ± 0.17 ^{cd}	1.69 ± 0.36 ^{cd}	1.35 ± 0.37 ^{cd}	1.21 ± 0.36 ^{cde}
B1	2.25 ± 0.10 ^d	2.24 ± 0.10 ^d	2.17 ± 0.09 ^d	2.08 ± 0.08 ^c	1.95 ± 0.07 ^{de}	1.78 ± 0.05 ^{de}	1.56 ± 0.03 ^{cde}	1.36 ± 0.00 ^{cd}	1.30 ± 0.02 ^{cde}
B2	3.40 ± 0.54 ^c	3.33 ± 0.57 ^c	3.18 ± 0.56 ^c	2.98 ± 0.55 ^b	2.74 ± 0.54 ^{bc}	2.41 ± 0.55 ^{bcd}	2.00 ± 0.57 ^{bc}	1.69 ± 0.61 ^{bc}	1.64 ± 0.62 ^{bc}
B3	4.91 ± 0.24 ^a	4.86 ± 0.23 ^a	4.62 ± 0.22 ^a	4.27 ± 0.20 ^a	3.68 ± 0.15 ^a	3.05 ± 0.11 ^{ab}	2.49 ± 0.08 ^{ab}	2.14 ± 0.08 ^{ab}	2.11 ± 0.09 ^{ab}

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

ตารางผนวกที่ ค2 ค่า loss modulus ของแผ่นกระดาษลูกฟูกหลังเคลือบด้วยสารเคลือบไฮโดรฟอบิกสตาร์ซ สารเคลือบซิน สารเคลือบกรดไขมันสเตียริก และสารเคลือบไขผึ้งที่ความเข้มข้นต่าง ๆ ที่ dynamic sweep ระหว่าง 0.75-8.00 นิวตัน

ทรีตเมนต์	loss moduls (E'')								
	0.76	1.68	2.60	3.52	4.44	5.35	6.24	6.79	6.81
C	0.08 ± 0.01 ^c	0.08 ± 0.00 ^d	0.09 ± 0.00 ^c	0.10 ± 0.01 ^d	0.11 ± 0.01 ^d	0.12 ± 0.01 ^c	0.12 ± 0.01 ^{bc}	0.12 ± 0.00 ^{de}	0.12 ± 0.00 ^{de}
H1	0.22 ± 0.01 ^{ab}	0.24 ± 0.02 ^{ab}	0.25 ± 0.02 ^{abc}	0.25 ± 0.02 ^{abc}	0.25 ± 0.03 ^{abc}	0.25 ± 0.02 ^{ab}	0.24 ± 0.03 ^{ab}	0.22 ± 0.03 ^{abcd}	0.22 ± 0.03 ^{abcde}
H2	0.28 ± 0.03 ^{ab}	0.31 ± 0.04 ^a	0.32 ± 0.04 ^a	0.33 ± 0.04 ^a	0.32 ± 0.04 ^a	0.31 ± 0.04 ^a	0.29 ± 0.03 ^a	0.26 ± 0.03 ^{ab}	0.26 ± 0.03 ^{abc}
H3	0.24 ± 0.01 ^{ab}	0.27 ± 0.02 ^a	0.28 ± 0.02 ^{ab}	0.29 ± 0.02 ^{ab}	0.29 ± 0.02 ^{ab}	0.28 ± 0.02 ^a	0.28 ± 0.02 ^a	0.27 ± 0.01 ^{ab}	0.26 ± 0.01 ^{ab}
Z1	0.08 ± 0.00 ^c	0.09 ± 0.00 ^d	0.10 ± 0.00 ^{de}	0.11 ± 0.00 ^d	0.11 ± 0.00 ^d	0.11 ± 0.00 ^c	0.11 ± 0.00 ^c	0.09 ± 0.00 ^e	0.09 ± 0.00 ^e
Z2	0.11 ± 0.02 ^c	0.11 ± 0.02 ^{cd}	0.12 ± 0.02 ^{cde}	0.12 ± 0.01 ^{cd}	0.12 ± 0.01 ^{cd}	0.12 ± 0.01 ^{cd}	0.12 ± 0.01 ^{bc}	0.11 ± 0.01 ^{bcde}	0.10 ± 0.00 ^c
Z3	0.22 ± 0.08 ^{ab}	0.24 ± 0.09 ^{ab}	0.25 ± 0.09 ^{abc}	0.26 ± 0.09 ^{abc}	0.26 ± 0.09 ^{abc}	0.24 ± 0.08 ^{ab}	0.23 ± 0.08 ^{abc}	0.20 ± 0.07 ^{abcde}	0.19 ± 0.08 ^{abcde}
S1	0.14 ± 0.03 ^{bc}	0.15 ± 0.03 ^{bcd}	0.16 ± 0.02 ^{bcde}	0.16 ± 0.02 ^{bcd}	0.15 ± 0.01 ^{bcd}	0.14 ± 0.01 ^{bc}	0.12 ± 0.00 ^{bc}	0.10 ± 0.02 ^{de}	0.10 ± 0.01 ^c
S2	0.22 ± 0.01 ^{ab}	0.22 ± 0.01 ^{abc}	0.23 ± 0.01 ^{abcd}	0.23 ± 0.01 ^{abcd}	0.23 ± 0.01 ^{abcd}	0.21 ± 0.01 ^{abc}	0.18 ± 0.02 ^{abc}	0.15 ± 0.02 ^{de}	0.13 ± 0.02 ^{cde}
S3	0.25 ± 0.05 ^{ab}	0.26 ± 0.06 ^a	0.27 ± 0.06 ^{ab}	0.27 ± 0.06 ^{ab}	0.27 ± 0.06 ^{ab}	0.24 ± 0.03 ^{ab}	0.20 ± 0.01 ^{abc}	0.16 ± 0.03 ^{abcde}	0.15 ± 0.03 ^{abcde}
B1	0.12 ± 0.01 ^c	0.13 ± 0.01 ^{cd}	0.14 ± 0.01 ^{cde}	0.14 ± 0.01 ^{cd}	0.15 ± 0.01 ^{cd}	0.15 ± 0.00 ^{bc}	0.15 ± 0.00 ^{bc}	0.14 ± 0.00 ^{cde}	0.13 ± 0.00 ^{bcde}
B2	0.29 ± 0.04 ^{ab}	0.31 ± 0.04 ^a	0.33 ± 0.04 ^a	0.34 ± 0.04 ^a	0.34 ± 0.04 ^a	0.33 ± 0.04 ^a	0.31 ± 0.04 ^a	0.28 ± 0.04 ^a	0.28 ± 0.05 ^a
B3	0.31 ± 0.02 ^a	0.34 ± 0.02 ^a	0.35 ± 0.02 ^a	0.36 ± 0.02 ^a	0.36 ± 0.02 ^a	0.33 ± 0.02 ^a	0.29 ± 0.01 ^a	0.26 ± 0.01 ^{abc}	0.25 ± 0.01 ^{abcd}

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

ตารางผนวกที่ ๓ ค่า $\tan \delta$ ของแผ่นกระดาษลูกฟูกหลังเคลือบด้วยสารเคลือบไฮโดรโฟบิกสตาร์ซ สารเคลือบซิน สารเคลือบกรดไขมันสเตียริก และสารเคลือบไขผึ้งที่ความเข้มข้นต่าง ๆ ที่ dynamic sweep ระหว่าง 0.75-8.00 นิวตัน

ทรีตเมนต์	$\tan \delta$				
	0.76	1.68	2.60	3.52	4.44
C	0.048 ± 0.001 ^f	0.054 ± 0.001 ^g	0.061 ± 0.002 ^d	0.070 ± 0.002 ^{dc}	0.080 ± 0.001 ^{cd}
H1	0.060 ± 0.001 ^{abc}	0.064 ± 0.002 ^{bcde}	0.070 ± 0.003 ^{ab}	0.075 ± 0.003 ^{cde}	0.080 ± 0.004 ^{cd}
H2	0.062 ± 0.001 ^{ab}	0.066 ± 0.001 ^{abc}	0.072 ± 0.001 ^{ab}	0.080 ± 0.001 ^{abc}	0.086 ± 0.000 ^{bcd}
H3	0.061 ± 0.000 ^{ab}	0.069 ± 0.000 ^{ab}	0.075 ± 0.000 ^a	0.078 ± 0.000	0.082 ± 0.001 ^{cd}
Z1	0.052 ± 0.000 ^c	0.060 ± 0.002 ^{cf}	0.067 ± 0.002 ^{bc}	0.077 ± 0.001 ^{bcd}	0.089 ± 0.001 ^{abc}
Z2	0.055 ± 0.004 ^c	0.063 ± 0.004 ^{def}	0.070 ± 0.005 ^{bcd}	0.078 ± 0.005 ^{cde}	0.088 ± 0.004 ^{bcd}
Z3	0.061 ± 0.004 ^{ab}	0.067 ± 0.004 ^{abc}	0.074 ± 0.003 ^a	0.082 ± 0.003 ^{abc}	0.091 ± 0.002 ^{abc}
S1	0.059 ± 0.003 ^{bc}	0.065 ± 0.004 ^{abcd}	0.071 ± 0.004 ^{ab}	0.078 ± 0.004 ^{abc}	0.087 ± 0.003 ^{abc}
S2	0.059 ± 0.001 ^{bc}	0.065 ± 0.002 ^{abcd}	0.072 ± 0.002 ^{ab}	0.079 ± 0.003 ^{abc}	0.088 ± 0.003 ^{abc}
S3	0.061 ± 0.002 ^{ab}	0.068 ± 0.003 ^{abc}	0.075 ± 0.005 ^a	0.084 ± 0.008 ^{ab}	0.094 ± 0.015 ^{ab}
B1	0.054 ± 0.001 ^{dc}	0.058 ± 0.001 ^{fg}	0.063 ± 0.001 ^{fg}	0.069 ± 0.001 ^c	0.076 ± 0.000 ^d
B2	0.057 ± 0.001 ^{cd}	0.063 ± 0.000 ^{cdef}	0.071 ± 0.001 ^{cd}	0.079 ± 0.000 ^{abc}	0.088 ± 0.001 ^{abc}
B3	0.063 ± 0.001 ^a	0.070 ± 0.001 ^a	0.076 ± 0.001 ^a	0.085 ± 0.002 ^a	0.097 ± 0.002 ^a

ตารางผนวกที่ ค3 (ต่อ)

พรีตเมนต์	tan δ			
	5.35	6.24	6.79	6.81
C	0.091 ± 0.000 ^{bc}	0.100 ± 0.001 ^{bcde}	0.103 ± 0.001 ^{bcd}	0.098 ± 0.002 ^{bc}
H1	0.086 ± 0.004 ^c	0.094 ± 0.005 ^{cde}	0.102 ± 0.005 ^{cd}	0.102 ± 0.005 ^{abc}
H2	0.094 ± 0.000 ^{abc}	0.101 ± 0.001 ^{bcde}	0.109 ± 0.001 ^{abcd}	0.109 ± 0.000 ^{abc}
H3	0.086 ± 0.001 ^c	0.091 ± 0.001 ^c	0.096 ± 0.002 ^d	0.095 ± 0.003 ^c
Z1	0.103 ± 0.002 ^{ab}	0.119 ± 0.000 ^a	0.125 ± 0.004 ^a	0.122 ± 0.006 ^{abc}
Z2	0.100 ± 0.004 ^{abc}	0.113 ± 0.004 ^{ab}	0.118 ± 0.003 ^{abc}	0.119 ± 0.006 ^{abc}
Z3	0.099 ± 0.001 ^{abc}	0.109 ± 0.002 ^{abc}	0.118 ± 0.005 ^{abc}	0.119 ± 0.008 ^{abc}
S1	0.097 ± 0.005 ^{abc}	0.109 ± 0.010 ^{abc}	0.119 ± 0.019 ^{abc}	0.128 ± 0.031 ^a
S2	0.097 ± 0.004 ^{abc}	0.107 ± 0.004 ^{abcd}	0.117 ± 0.009 ^{abc}	0.124 ± 0.017 ^{ab}
S3	0.107 ± 0.021 ^a	0.118 ± 0.019 ^a	0.120 ± 0.012 ^{ab}	0.124 ± 0.012 ^{ab}
B1	0.083 ± 0.000 ^c	0.093 ± 0.000 ^{dc}	0.102 ± 0.001 ^{bcd}	0.104 ± 0.002 ^{abc}
B2	0.097 ± 0.003 ^{abc}	0.109 ± 0.004 ^{abc}	0.116 ± 0.006 ^{abc}	0.116 ± 0.006 ^{abc}
B3	0.108 ± 0.002 ^a	0.115 ± 0.002 ^{ab}	0.120 ± 0.000 ^{ab}	0.119 ± 0.000 ^{abc}

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

ตารางผนวกที่ ค4 ค่า storage modulus ของแผ่นกระดาษลูกฟูกหลังเคลือบด้วยสารเคลือบผสมระหว่างไฮโดรโฟบิกสตาร์ชและกรดไขมันสเตียริก และสารเคลือบผสมระหว่างไฮโดรโฟบิกสตาร์ชและไขมันที่เติมอิมัลไฟเออร์ที่ dynamic sweep ระหว่าง 0.75-8.00 นิวตัน

ทรีตเมนต์	storage moduls (E')								
	0.76	1.68	2.60	3.52	4.44	5.35	6.24	6.79	6.81
C	1.59 ± 0.13 ^c	1.57 ± 0.12 ^d	1.53 ± 0.12 ^c	1.47 ± 0.11 ^c	1.40 ± 0.09 ^d	1.32 ± 0.07 ^c	1.23 ± 0.04 ^c	1.20 ± 0.03 ^{cd}	1.24 ± 0.03 ^{cd}
H3	3.88 ± 0.20 ^a	3.90 ± 0.23 ^a	3.76 ± 0.24 ^a	3.61 ± 0.22 ^a	3.44 ± 0.20 ^a	3.26 ± 0.17 ^a	2.99 ± 0.13 ^a	2.74 ± 0.09 ^a	2.67 ± 0.07 ^a
HS1+E	3.18 ± 0.05 ^{bc}	3.18 ± 0.04 ^b	3.02 ± 0.02 ^{bc}	2.81 ± 0.00 ^b	2.59 ± 0.00 ^b	2.35 ± 0.01 ^b	2.09 ± 0.03 ^b	1.89 ± 0.08 ^b	1.86 ± 0.11 ^b
HS2+E	2.97 ± 0.15 ^c	2.89 ± 0.17 ^b	2.78 ± 0.16 ^{bc}	2.63 ± 0.15 ^{bc}	2.41 ± 0.13 ^b	2.15 ± 0.13 ^b	1.79 ± 0.13 ^b	1.48 ± 0.17 ^{bc}	1.39 ± 0.19 ^{bc}
HS3+E	2.31 ± 0.32 ^d	2.25 ± 0.31 ^c	2.10 ± 0.27 ^d	1.88 ± 0.22 ^{dc}	1.66 ± 0.18 ^{cd}	1.42 ± 0.18 ^c	0.99 ± 0.37 ^c	0.88 ± 0.09 ^d	0.93 ± 0.04 ^{cd}
HB1+E	3.59 ± 0.19 ^{ab}	3.40 ± 0.18 ^{ab}	3.16 ± 0.16 ^b	2.89 ± 0.14 ^b	2.54 ± 0.12 ^b	2.18 ± 0.10 ^b	1.81 ± 0.08 ^b	1.54 ± 0.07 ^{bc}	1.45 ± 0.06 ^{bc}
HB2+E	3.21 ± 0.34 ^{bc}	3.16 ± 0.36 ^b	3.00 ± 0.31 ^{bc}	2.81 ± 0.27 ^b	2.57 ± 0.28 ^b	2.33 ± 0.26 ^b	1.90 ± 0.34 ^b	1.39 ± 0.51 ^{bcd}	1.37 ± 0.54 ^{bc}
HB3+E	3.03 ± 0.17 ^c	2.86 ± 0.18 ^b	2.61 ± 0.20 ^c	2.29 ± 0.25 ^{cd}	1.90 ± 0.30 ^c	1.49 ± 0.35 ^c	1.12 ± 0.33 ^c	0.91 ± 0.28 ^d	0.78 ± 0.27 ^d

หมายเหตุ ^{a-c} ตัวอักษรที่ต่างกันในแต่ละแถวหมายถึงค่าเฉลี่ยมีความแตกต่างกันทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

ตารางผนวกที่ ค5 ค่า loss modulus ของแผ่นกระดาษลูกฟูกหลังเคลือบด้วยสารเคลือบผสมระหว่างไฮโดรโฟบิกสตาร์ชและกรดไขมันสเตียริก และสารเคลือบผสมระหว่างไฮโดรโฟบิกสตาร์ชและไขมันที่เติมอิมัลไฟเออร์ที่ dynamic sweep ระหว่าง 0.75-8.00 นิวตัน

ทรีตเมนต์	loss moduls (E'')								
	0.76	1.68	2.60	3.52	4.44	5.35	6.24	6.79	6.81
C	0.08 ± 0.01 ^c	0.08 ± 0.00 ^c	0.09 ± 0.00 ^c	0.10 ± 0.01 ^c	0.11 ± 0.01 ^b	0.12 ± 0.01 ^c	0.12 ± 0.01 ^{bc}	0.12 ± 0.00 ^{bc}	0.12 ± 0.00 ^{bc}
H3	0.24 ± 0.01 ^a	0.27 ± 0.02 ^a	0.28 ± 0.02 ^a	0.29 ± 0.02 ^a	0.29 ± 0.02 ^a	0.28 ± 0.02 ^a	0.28 ± 0.02 ^a	0.27 ± 0.01 ^a	0.26 ± 0.01 ^a
HS1+E	0.19 ± 0.01 ^{ab}	0.20 ± 0.00 ^{ab}	0.21 ± 0.00 ^{ab}	0.21 ± 0.01 ^{abc}	0.22 ± 0.01 ^{ab}	0.21 ± 0.01 ^{ab}	0.21 ± 0.01 ^{ab}	0.20 ± 0.01 ^{ab}	0.19 ± 0.01 ^{ab}
HS2+E	0.16 ± 0.01 ^{abc}	0.16 ± 0.01 ^{abc}	0.17 ± 0.01 ^{abc}	0.18 ± 0.01 ^{abc}	0.17 ± 0.01 ^b	0.17 ± 0.01 ^{bc}	0.17 ± 0.01 ^{bc}	0.15 ± 0.01 ^{bc}	0.15 ± 0.01 ^{bc}
HS3+E	0.13 ± 0.02 ^{bc}	0.14 ± 0.02 ^{bc}	0.15 ± 0.02 ^{bc}	0.15 ± 0.02 ^{bc}	0.14 ± 0.01 ^b	0.13 ± 0.01 ^{bc}	0.10 ± 0.04 ^c	0.09 ± 0.01 ^c	0.09 ± 0.01 ^c
HB1+E	0.23 ± 0.01 ^{ab}	0.24 ± 0.01 ^{ab}	0.24 ± 0.01 ^{ab}	0.24 ± 0.01 ^{abc}	0.24 ± 0.01 ^{ab}	0.22 ± 0.01 ^{bc}	0.20 ± 0.01 ^{abc}	0.18 ± 0.01 ^{bc}	0.17 ± 0.01 ^{bc}
HB2+E	0.19 ± 0.03 ^{ab}	0.21 ± 0.04 ^{ab}	0.22 ± 0.05 ^{ab}	0.22 ± 0.05 ^{ab}	0.22 ± 0.05 ^{ab}	0.21 ± 0.04 ^{ab}	0.20 ± 0.04 ^{ab}	0.16 ± 0.06 ^{bc}	0.16 ± 0.05 ^{bc}
HB3+E	0.19 ± 0.01 ^{abc}	0.21 ± 0.01 ^{bc}	0.22 ± 0.02 ^{bc}	0.22 ± 0.02 ^{bc}	0.20 ± 0.02 ^b	0.18 ± 0.03 ^{bc}	0.14 ± 0.04 ^{bc}	0.12 ± 0.03 ^c	0.11 ± 0.03 ^c

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

ตารางผนวกที่ ๑๖ ค่า $\tan \delta$ ของแผ่นกระดาษลูกฟูกหลังเคลือบด้วยสารเคลือบผสมระหว่างไฮโดรฟอบิกสตาร์ชและกรดไขมันสเตียริก และสารเคลือบผสมระหว่างไฮโดรฟอบิกสตาร์ชและไขมันที่เติมอิมัลไฟเออร์ที่ dynamic sweep ระหว่าง 0.75-8.00 นิวตัน

พรีตเมนต์	$\tan \delta$				
	0.76	1.68	2.60	3.52	4.44
C	0.048 ± 0.001^d	0.054 ± 0.001^d	0.061 ± 0.002^c	0.070 ± 0.002^{cd}	0.080 ± 0.001^{bc}
H3	0.061 ± 0.000^{ab}	0.069 ± 0.000^a	0.075 ± 0.000^b	0.078 ± 0.000^b	0.082 ± 0.001^c
HS1+E	0.058 ± 0.003^b	0.063 ± 0.001^c	0.069 ± 0.001^b	0.076 ± 0.003^{bc}	0.083 ± 0.003^{bc}
HS2+E	0.052 ± 0.000^c	0.057 ± 0.000^d	0.062 ± 0.001^c	0.067 ± 0.001^d	0.073 ± 0.001^d
HS3+E	0.058 ± 0.001^b	0.065 ± 0.002^{bc}	0.073 ± 0.001^b	0.081 ± 0.001^b	0.087 ± 0.002^{bc}
HB1+E	0.063 ± 0.001^a	0.069 ± 0.001^{ab}	0.076 ± 0.001^b	0.083 ± 0.001^b	0.092 ± 0.001^b
HB2+E	0.059 ± 0.002^b	0.065 ± 0.004^{bc}	0.071 ± 0.007^b	0.077 ± 0.008^b	0.083 ± 0.008^c
HB3+E	0.063 ± 0.001^a	0.072 ± 0.001^a	0.082 ± 0.001^a	0.094 ± 0.001^a	0.108 ± 0.004^a

ตารางผนวกที่ ๑๖ (ต่อ)

ทรีตเมนต์	tan δ			
	5.35	6.24	6.79	6.81
C	0.091 ± 0.000 ^{bc}	0.100 ± 0.001 ^{cd}	0.103 ± 0.001 ^{cd}	0.098 ± 0.002 ^d
H3	0.086 ± 0.001 ^{cd}	0.091 ± 0.001 ^c	0.096 ± 0.002 ^d	0.095 ± 0.003 ^d
HS1+E	0.091 ± 0.004 ^{bc}	0.099 ± 0.005 ^{cd}	0.105 ± 0.008 ^c	0.104 ± 0.009 ^{cd}
HS2+E	0.081 ± 0.001 ^d	0.093 ± 0.001 ^{de}	0.104 ± 0.003 ^c	0.106 ± 0.005 ^{bcd}
HS3+E	0.095 ± 0.005 ^{bc}	0.098 ± 0.006 ^{de}	0.106 ± 0.001 ^c	0.102 ± 0.003 ^d
HB1+E	0.099 ± 0.000 ^b	0.108 ± 0.000 ^b	0.114 ± 0.000 ^b	0.114 ± 0.000 ^{bc}
HB2+E	0.090 ± 0.007 ^{bc}	0.107 ± 0.002 ^{bc}	0.117 ± 0.002 ^b	0.117 ± 0.005 ^b
HB3+E	0.122 ± 0.006 ^a	0.132 ± 0.005 ^a	0.133 ± 0.002 ^a	0.145 ± 0.006 ^a

หมายเหตุ ^{a-c} ตัวอักษรที่ต่างกันในแต่ละแถวหมายถึงค่าเฉลี่ยมีความแตกต่างกันทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

ตารางผนวกที่ ๗ ค่า storage modulus ของแผ่นกระดาษลูกฟูกหลังเคลือบสองชั้นด้วยสารเคลือบไฮโดรฟอบิกสตาร์ช/ซิน ไฮโดรฟอบิกสตาร์ช/กรดไขมัน สเตียริก และไฮโดรฟอบิกสตาร์ช/ไขมันที่ระดับความเข้มข้นต่าง ๆ ที่ dynamic sweep ระหว่าง 0.75-8.00 นิวตัน

ทรีตเมนต์	storage moduls (E')								
	0.76	1.68	2.60	3.52	4.44	5.35	6.24	6.79	6.81
C	1.59 ± 0.13 ^f	1.57 ± 0.12 ^g	1.53 ± 0.12 ^f	1.47 ± 0.11 ^f	1.40 ± 0.09 ^c	1.32 ± 0.07 ^c	1.23 ± 0.04 ^c	1.20 ± 0.03 ^d	1.24 ± 0.03 ^c
H3	3.88 ± 0.20 ^b	3.90 ± 0.23 ^{abc}	3.76 ± 0.24 ^{ab}	3.61 ± 0.22 ^{ab}	3.44 ± 0.20 ^{ab}	3.26 ± 0.17 ^{ab}	2.99 ± 0.13 ^a	2.74 ± 0.09 ^a	2.67 ± 0.07 ^a
H/Z1	4.67 ± 0.19 ^a	4.61 ± 0.20 ^{ab}	4.37 ± 0.23 ^a	4.05 ± 0.29 ^a	3.64 ± 0.36 ^{ab}	3.20 ± 0.45 ^{ab}	2.70 ± 0.51 ^a	2.27 ± 0.50 ^{abc}	2.21 ± 0.56 ^{abc}
H/Z2	4.94 ± 0.44 ^a	4.84 ± 0.51 ^a	4.56 ± 0.38 ^a	4.22 ± 0.35 ^a	3.83 ± 0.25 ^a	3.39 ± 0.25 ^a	2.89 ± 0.27 ^a	2.42 ± 0.63 ^{ab}	2.36 ± 0.73 ^{ab}
H/Z3	3.47 ± 0.84 ^{bc}	3.53 ± 1.07 ^{cd}	3.37 ± 1.02 ^{bcd}	3.13 ± 0.90 ^{bcd}	2.91 ± 0.88 ^{bc}	2.60 ± 0.80 ^{bc}	2.81 ± 0.81 ^{ab}	1.94 ± 0.82 ^{abcd}	1.88 ± 0.86 ^{abc}
H/S1	2.11 ± 0.02 ^{ef}	2.09 ± 0.01 ^{efg}	1.98 ± 0.02 ^{ef}	1.84 ± 0.04 ^{ef}	1.70 ± 0.03 ^{de}	1.54 ± 0.02 ^{de}	1.33 ± 0.01 ^c	1.19 ± 0.02 ^d	1.15 ± 0.04 ^c
H/S2	2.69 ± 0.11 ^{de}	2.66 ± 0.13 ^{def}	2.55 ± 0.10 ^{de}	2.42 ± 0.08 ^{de}	2.26 ± 0.06 ^{cd}	2.04 ± 0.08 ^{cde}	1.71 ± 0.15 ^{bc}	1.34 ± 0.30 ^{cd}	1.25 ± 0.30 ^c
H/S3	3.71 ± 0.20 ^{bc}	3.63 ± 0.14 ^c	3.43 ± 0.16 ^{bc}	3.23 ± 0.20 ^{bc}	2.97 ± 0.22 ^{bc}	2.66 ± 0.27 ^{abc}	2.24 ± 0.36 ^{ab}	1.79 ± 0.57 ^{abcd}	1.51 ± 0.62 ^{bc}
H/B1	3.01 ± 0.34 ^{cd}	2.98 ± 0.33 ^{cde}	2.85 ± 0.31 ^{cd}	2.66 ± 0.28 ^{cd}	2.47 ± 0.27 ^c	2.21 ± 0.25 ^{cd}	1.80 ± 0.26 ^{bc}	1.45 ± 0.27 ^{bcd}	1.40 ± 0.27 ^{bc}
H/B2	1.91 ± 0.08 ^{ef}	1.90 ± 0.09 ^{fg}	1.85 ± 0.10 ^{ef}	1.74 ± 0.14 ^{ef}	1.63 ± 0.15 ^{de}	1.52 ± 0.13 ^{de}	1.39 ± 0.12 ^{bc}	1.32 ± 0.13 ^{cd}	1.33 ± 0.16 ^{bc}
H/B3	1.64 ± 0.13 ^f	1.62 ± 0.13 ^g	1.58 ± 0.13 ^f	1.53 ± 0.13 ^f	1.46 ± 0.13 ^e	1.37 ± 0.14 ^e	1.28 ± 0.13 ^c	1.25 ± 0.13 ^d	1.29 ± 0.14 ^{bc}

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

ตารางผนวกที่ ๑๘ ค่า loss modulus ของแผ่นกระดาษลูกฟูกหลังเคลือบสองชั้นด้วยสารเคลือบไฮโดรโฟบิกสตาร์ช/ซิน ไฮโดรโฟบิกสตาร์ช/กรดไขมัน สเตียริก และไฮโดรโฟบิกสตาร์ช/ไขมันที่ระดับความเข้มข้นต่าง ๆ ที่ dynamic sweep ระหว่าง 0.75-8.00 นิวตัน

ทริตเมนต์	loss moduls (E'')								
	0.76	1.68	2.60	3.52	4.44	5.35	6.24	6.79	6.81
C	0.08 ± 0.01 ^f	0.08 ± 0.00 ^f	0.09 ± 0.00 ^f	0.10 ± 0.01 ^f	0.11 ± 0.01 ^f	0.12 ± 0.01 ^f	0.12 ± 0.01 ^d	0.12 ± 0.00 ^b	0.12 ± 0.00 ^b
H3	0.24 ± 0.01 ^{bc}	0.27 ± 0.02 ^{bc}	0.28 ± 0.02 ^{bc}	0.29 ± 0.02 ^{bc}	0.29 ± 0.02 ^{bc}	0.28 ± 0.02 ^{ab}	0.28 ± 0.02 ^{ab}	0.27 ± 0.01 ^a	0.26 ± 0.01 ^a
H/Z1	0.29 ± 0.00 ^{ab}	0.32 ± 0.01 ^{ab}	0.34 ± 0.02 ^{ab}	0.35 ± 0.02 ^{ab}	0.34 ± 0.01 ^{ab}	0.33 ± 0.01 ^a	0.30 ± 0.02 ^a	0.27 ± 0.04 ^a	0.26 ± 0.04 ^a
H/Z2	0.32 ± 0.04 ^a	0.34 ± 0.03 ^a	0.36 ± 0.03 ^a	0.36 ± 0.03 ^a	0.35 ± 0.02 ^a	0.34 ± 0.03 ^a	0.31 ± 0.03 ^a	0.27 ± 0.06 ^a	0.26 ± 0.06 ^a
H/Z3	0.21 ± 0.06 ^{cd}	0.22 ± 0.07 ^{cd}	0.23 ± 0.08 ^{cd}	0.24 ± 0.08 ^{cd}	0.24 ± 0.08 ^{cd}	0.23 ± 0.07 ^{bc}	0.21 ± 0.07 ^c	0.20 ± 0.07 ^{ab}	0.19 ± 0.07 ^{ab}
H/S1	0.12 ± 0.01 ^{ef}	0.14 ± 0.01 ^{def}	0.14 ± 0.01 ^d	0.14 ± 0.01 ^b	0.13 ± 0.01 ^b				
H/S2	0.15 ± 0.01 ^{de}	0.17 ± 0.01 ^{de}	0.18 ± 0.01 ^{de}	0.18 ± 0.01 ^{de}	0.19 ± 0.01 ^{de}	0.18 ± 0.01 ^{cde}	0.17 ± 0.01 ^{cd}	0.15 ± 0.02 ^b	0.14 ± 0.03 ^b
H/S3	0.21 ± 0.01 ^{cd}	0.22 ± 0.01 ^{cd}	0.23 ± 0.01 ^{cd}	0.24 ± 0.01 ^{cd}	0.24 ± 0.01 ^{cd}	0.24 ± 0.01 ^{bc}	0.22 ± 0.02 ^{bc}	0.19 ± 0.04 ^{ab}	0.17 ± 0.06 ^{ab}
H/B1	0.16 ± 0.02 ^{de}	0.18 ± 0.02 ^{de}	0.18 ± 0.02 ^{de}	0.18 ± 0.02 ^{de}	0.19 ± 0.02 ^{de}	0.18 ± 0.02 ^{cd}	0.18 ± 0.02 ^{cd}	0.15 ± 0.02 ^b	0.15 ± 0.02 ^b
H/B2	0.10 ± 0.01 ^{ef}	0.11 ± 0.01 ^{ef}	0.11 ± 0.01 ^{ef}	0.12 ± 0.01 ^{ef}	0.12 ± 0.00 ^f	0.12 ± 0.00 ^{def}	0.13 ± 0.00 ^d	0.13 ± 0.00 ^b	0.13 ± 0.00 ^b
H/B3	0.08 ± 0.01 ^f	0.09 ± 0.01 ^f	0.10 ± 0.01 ^f	0.11 ± 0.01 ^f	0.12 ± 0.01 ^f	0.12 ± 0.01 ^{ef}	0.13 ± 0.01 ^d	0.13 ± 0.01 ^b	0.13 ± 0.01 ^b

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

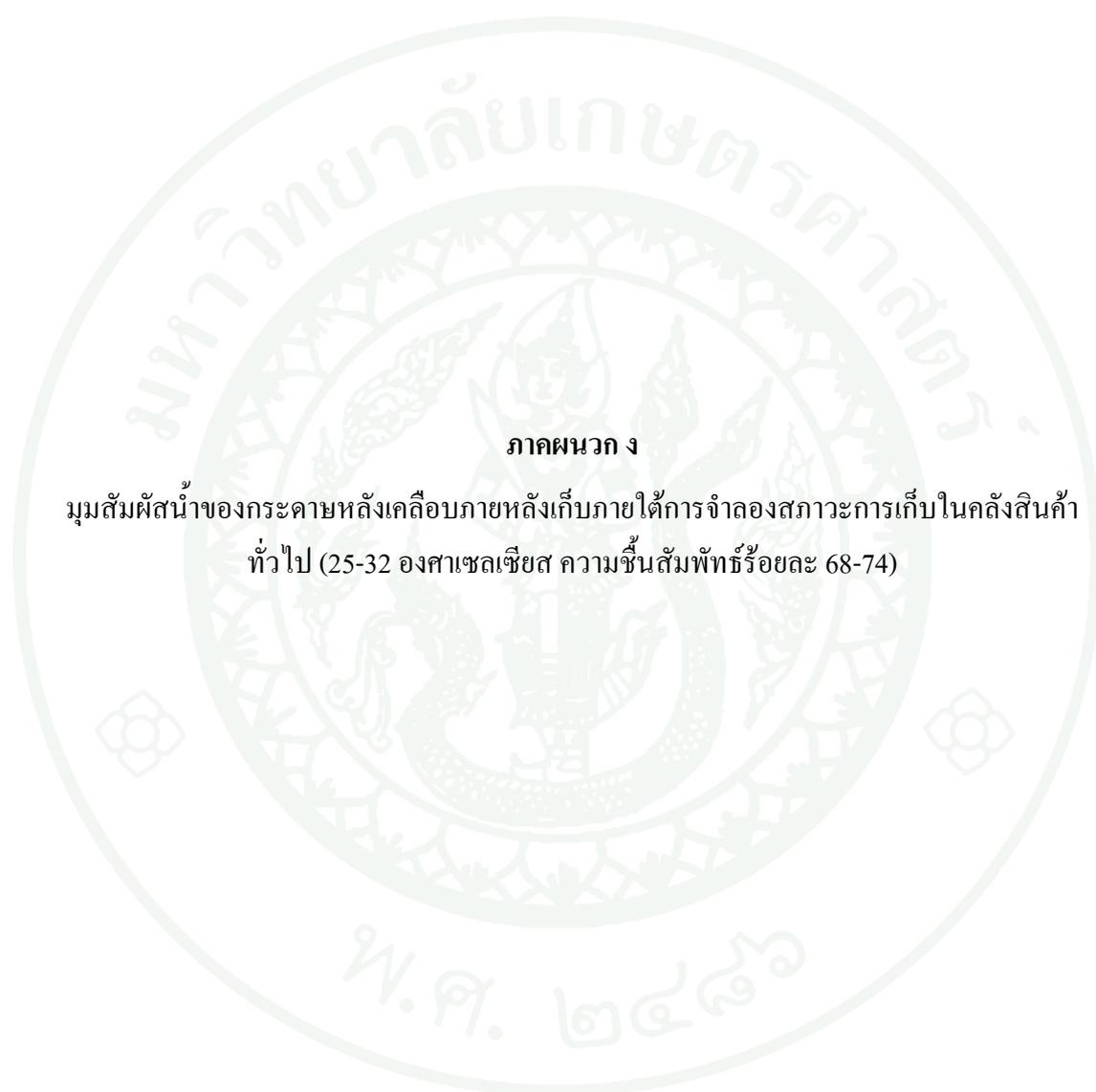
ตารางผนวกที่ ๑๑ ค่า $\tan \delta$ ของแผ่นกระดาษลูกฟูกหลังเคลือบสองชั้นด้วยสารเคลือบไฮโดรฟอบิกสตาร์ช/ซิน ไฮโดรฟอบิกสตาร์ช/กรดไขมันสเตียริก และ ไฮโดรฟอบิกสตาร์ช/ไขผึ้งที่ระดับความเข้มข้นต่าง ๆ ที่ dynamic sweep ระหว่าง 0.75-8.00 นิวตัน

ทรีตเมนต์	$\tan \delta$				
	0.76	1.68	2.60	3.52	4.44
C	0.048 ± 0.001 ^e	0.054 ± 0.001 ^e	0.061 ± 0.002 ^d	0.070 ± 0.002 ^{cd}	0.080 ± 0.001 ^{bc}
H3	0.061 ± 0.000 ^{ab}	0.069 ± 0.000 ^a	0.075 ± 0.000 ^{ab}	0.078 ± 0.000 ^{abc}	0.082 ± 0.001 ^{bc}
H/Z1	0.061 ± 0.004 ^{ab}	0.069 ± 0.006 ^{ab}	0.077 ± 0.009 ^a	0.086 ± 0.011 ^a	0.094 ± 0.011 ^a
H/Z2	0.064 ± 0.003 ^a	0.070 ± 0.001 ^a	0.078 ± 0.001 ^a	0.085 ± 0.001 ^{ab}	0.092 ± 0.000 ^a
H/Z3	0.058 ± 0.003 ^{bc}	0.063 ± 0.001 ^{bcd}	0.068 ± 0.002 ^{bcd}	0.075 ± 0.003 ^{bcd}	0.080 ± 0.002 ^{bc}
H/S1	0.058 ± 0.003 ^e	0.065 ± 0.006 ^e	0.072 ± 0.007 ^d	0.078 ± 0.008 ^{cd}	0.085 ± 0.008 ^{bc}
H/S2	0.057 ± 0.000 ^{bc}	0.062 ± 0.000 ^{abc}	0.069 ± 0.001 ^{abc}	0.075 ± 0.001 ^{abcd}	0.082 ± 0.001 ^{ab}
H/S3	0.056 ± 0.001 ^{bc}	0.062 ± 0.000 ^{cd}	0.068 ± 0.000 ^{bcd}	0.075 ± 0.001 ^{bcd}	0.082 ± 0.003 ^{bc}
H/B1	0.054 ± 0.001 ^{cd}	0.058 ± 0.001 ^{de}	0.064 ± 0.001 ^{cd}	0.069 ± 0.001 ^{cd}	0.075 ± 0.000 ^{bc}
H/B2	0.054 ± 0.004 ^c	0.058 ± 0.003 ^{de}	0.062 ± 0.003 ^{cd}	0.068 ± 0.002 ^d	0.074 ± 0.004 ^c
H/B3	0.049 ± 0.001 ^{de}	0.055 ± 0.000 ^e	0.061 ± 0.000 ^d	0.069 ± 0.001 ^{cd}	0.079 ± 0.001 ^{bc}

ตารางผนวกที่ ๙ (ต่อ)

ทรีตเมนต์	Tan δ			
	5.35	6.24	6.79	6.81
C	0.091 ± 0.000 ^{bcd}	0.100 ± 0.001 ^{abc}	0.103 ± 0.001 ^{bcd}	0.098 ± 0.002 ^{cde}
H3	0.086 ± 0.001 ^{cd}	0.091 ± 0.001 ^c	0.096 ± 0.002 ^{cd}	0.095 ± 0.003 ^e
H/Z1	0.104 ± 0.012 ^a	0.113 ± 0.012 ^a	0.121 ± 0.009 ^a	0.121 ± 0.012 ^a
H/Z2	0.100 ± 0.001 ^{ab}	0.107 ± 0.000 ^{ab}	0.114 ± 0.006 ^{ab}	0.113 ± 0.008 ^{abcd}
H/Z3	0.087 ± 0.001 ^{cd}	0.098 ± 0.002 ^{bc}	0.104 ± 0.003 ^{bcd}	0.104 ± 0.005 ^{bcde}
H/S1	0.094 ± 0.008 ^{bcd}	0.107 ± 0.007 ^{abc}	0.114 ± 0.005 ^{bcd}	0.114 ± 0.004 ^{cde}
H/S2	0.089 ± 0.001 ^{abc}	0.100 ± 0.001 ^{ab}	0.112 ± 0.006 ^{ab}	0.113 ± 0.006 ^{abc}
H/S3	0.090 ± 0.006 ^{bcd}	0.100 ± 0.008 ^{abc}	0.110 ± 0.011 ^{ab}	0.118 ± 0.011 ^{ab}
H/B1	0.084 ± 0.000 ^{cd}	0.100 ± 0.003 ^{abc}	0.110 ± 0.004 ^{abc}	0.111 ± 0.004 ^{abcde}
H/B2	0.082 ± 0.006 ^d	0.092 ± 0.006 ^c	0.097 ± 0.006 ^d	0.096 ± 0.008 ^e
H/B3	0.089 ± 0.001 ^{cd}	0.098 ± 0.001 ^{bc}	0.101 ± 0.001 ^{bcd}	0.098 ± 0.002 ^{de}

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



ตารางผนวกที่ ๑1 มุมสัมผัสน้ำของกระดาษเคลือบด้วยสารเคลือบไฮโดรโฟบิกสตาร์ชร้อยละ 2 สารเคลือบผสมระหว่างไฮโดรโฟบิกสตาร์ชและกรดไขมันสเตียริกร้อยละ 3 ที่เติม Tween 60 และเคลือบ 2 ชั้นด้วยสารเคลือบไฮโดรโฟบิกสตาร์ชและสารเคลือบไขผึ้งร้อยละ 1 ภายหลังจากการกำจัดสถานะการเก็บในสถานะของคลังสินค้าทั่วไป (25-32 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 68-74)

สัปดาห์ที่	มุมสัมผัส (องศา)			
	C	H2	HS3+E	H/B1
0	121.99 ± 1.09 ^a	127.00 ± 0.81 ^{ns}	131.54 ± 1.48 ^{ns}	123.87 ± 0.45 ^{ns}
1	120.90 ± 1.91 ^a	126.90 ± 0.71 ^{ns}	131.63 ± 1.31 ^{ns}	123.53 ± 1.91 ^{ns}
2	121.04 ± 0.72 ^a	126.11 ± 0.02 ^{ns}	131.99 ± 2.07 ^{ns}	123.63 ± 1.94 ^{ns}
3	122.05 ± 0.60 ^a	126.29 ± 0.28 ^{ns}	130.02 ± 0.29 ^{ns}	1123.62 ± 1.49 ^{ns}
4	120.54 ± 2.20 ^b	126.20 ± 0.58 ^{ns}	131.54 ± 0.31 ^{ns}	124.09 ± 1.86 ^{ns}

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

^{ns} หมายถึงค่าเฉลี่ยในแถวตั้งไม่มีความแตกต่างกัน

ประวัติการศึกษาและการทำงาน

ชื่อ	นางสาวณัฏฐพิชา ทรัพย์ประทานพร
เกิดวันที่	1 มีนาคม 2527
สถานที่เกิด	อำเภอบางรัก จังหวัดกรุงเทพมหานคร
ประวัติการศึกษา	วท.บ. (วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร) มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
ตำแหน่งปัจจุบัน	-
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	-
ผลงานดีเด่นและ/หรือรางวัลทางวิชาการ	-
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	ได้รับทุนวิจัยมหาบัณฑิต สกว. สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จากสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) (พ.ศ. 2550)