



การปรับปรุงสมบัติการดูดความชื้นของเทอร์โมพลาสติกที่เตรียมจากแป้งโดยใช้นุพันธ์ของไคโตซาน และกรดไขมัน

โดย

นายปิยะวิทย์ สดสุชาติ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์  
ภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ  
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร  
ปีการศึกษา 2552  
ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

การปรับปรุงสมบัติการดูดความชื้นของเทอร์โมพลาสติกที่เตรียมจากแป้ง  
โดยใช้อนุพันธ์ของไคโตซานและกรดไขมัน

โดย

นายปิยะวิทย์ สดสุชาติ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์

ภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

ปีการศึกษา 2552

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

**MOISTURE-ADSORPTION IMPROVEMENT OF THERMOPLASTIC STARCH  
BY USING CHITOSAN DERIVATIVES AND FATTY ACIDS**

**By  
Piyawit Sodsuchat**

**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree  
MASTER OF ENGINEERING  
Department of Materials Science and Engineering  
Graduate School  
SILPAKORN UNIVERSITY  
2009**

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร อนุมัติให้วิทยานิพนธ์เรื่อง “การปรับปรุงสมบัติการดูด  
ความชื้นของเทอร์โมพลาสติกที่เตรียมจากแป้งโดยใช้อนุพันธ์ของไคโตซานและกรดไขมัน” เสนอ  
โดย นายปิยะวิทย์ สดสุขชาติ เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตร  
มหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์

.....

(รองศาสตราจารย์ ดร.ศิริชัย ชินะตั้งกูร)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่.....เดือน..... พ.ศ.....

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

อาจารย์ ดร.อำนาจ สิทธีตระกูล

คณะกรรมการตรวจสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐกาญจน์ หงส์ศรีพันธ์)

...../...../.....

..... กรรมการ

(อาจารย์ ดร.อำนาจ สิทธีตระกูล)

...../...../.....

..... กรรมการ

(อาจารย์ ดร.วันชัย เลิศวิจิตรจรัส)

...../...../.....

..... กรรมการ

(อาจารย์ ดร. ศศิประภา รัตนติลก ณ ภูเก็ต)

...../...../.....

50402231: สาขาวิชาวิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์

คำสำคัญ : เทอร์โมพลาสติกสตาซ / ไคโตซาน / กรดไขมัน / การดูดความชื้น

ปิยะวิทย์ สดสุขชาติ :การปรับปรุงสมบัติการดูดความชื้นของเทอร์โมพลาสติกที่เตรียมจากแป้งโดยใช้นุพันธ์ของไคโตซานและกรดไขมัน. อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ : อ.ดร.อำนาจ สิริทัตตระกูล. 92 หน้า.

ปัจจุบันมีการนำผลิตภัณฑ์จากพลาสติกมาใช้กันอย่างแพร่หลาย โดยส่วนใหญ่ใช้วัตถุดิบจากอุตสาหกรรมปิโตรเลียม ซึ่งเป็นทรัพยากรที่ใช้แล้วหมดไปและไม่สามารถเกิดขึ้นใหม่ได้ในระยะเวลาอันสั้น รวมทั้งนับวันจะมีปริมาณที่น้อยลงและมีราคาค้นทุนที่สูง ยิ่งไปกว่านั้นผลิตภัณฑ์ยังส่งผลต่อสิ่งแวดล้อมเนื่องจากไม่สามารถย่อยสลายได้ด้วยกระบวนการทางชีวภาพ ขณะเดียวกันแป้งเป็นวัตถุดิบทางธรรมชาติที่มีอยู่มากและมีศักยภาพที่จะนำมาใช้แทนพลาสติกที่ผลิตมาจากทรัพยากรพวกปิโตรเลียมได้ งานวิจัยนี้พยายามที่จะพัฒนาเทอร์โมพลาสติกที่เตรียมจากแป้ง(TPS)ให้มีความว่องไวต่อความชื้นน้อยลงโดยการเคลือบผิว TPS ด้วยกรดไขมัน {กรดสเตียริก, กรดโอเลอิก, กรดไขมันที่ได้จากน้ำมันดอกทานตะวัน, และกรดไขมันที่ได้จากน้ำมันคาโนล่าห์} N-alkyl chitosan {N-butyl chitosan, N-undecyl chitosan, และ N-undecenyl chitosan} และ quaternized chitosan {(N,N,N)-tributyl chitosan, N-butyl-(N,N)-diundecyl chitosan และ N-butyl-(N,N)-dioctadecenyl chitosan} โดยวิธีการที่ใช้ในการเคลือบผิวชิ้นงาน TPS คือ solution dipping ซึ่งชิ้นงาน TPS ที่เคลือบผิวและไม่เคลือบผิวจะถูกนำไปเก็บไว้ในสภาวะที่มีการควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ที่ 53 %RH เป็นเวลา 15 วันเพื่อทดสอบสมบัติความว่องไวต่อความชื้น พบว่า ชิ้นงาน TPS ที่เคลือบผิวด้วยสารเคลือบชนิดต่างๆจะมีการดูดความชื้นน้อยกว่าชิ้นงาน TPS ที่ไม่ได้เคลือบผิว และชิ้นงาน TPS ที่เคลือบผิวด้วยกรดไขมันจากน้ำมันคาโนล่าห์จะดูดความชื้นน้อยที่สุดโดยจะมีการดูดความชื้นน้อยกว่าชิ้นงานที่ไม่ได้เคลือบผิวประมาณ 73 % ทั้งนี้อาจเป็นผลมาจากการเกิดปฏิกิริยา oxy-polymerization บริเวณพันธะคู่ของกรดไขมันไม่อิ่มตัว นอกจากนั้นยังพบว่า ชิ้นงานที่ไม่ได้เคลือบผิวจะมีการเปลี่ยนแปลงสมบัติความต้านทานต่อแรงดึงที่ลดลง และขณะที่สมบัติความต้านทานต่อแรงกระทำมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นงานที่มีการเคลือบผิวด้วยสารเคลือบชนิดต่างๆ ทั้งนี้เป็นเพราะความชื้นทำหน้าที่เป็น plasticizer ให้กับ TPS

---

ภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร ปีการศึกษา 2552  
ลายมือชื่อนักศึกษา.....

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ .....

50402231: MAJOR: POLYMER SCIENCE AND ENGINEERING

KEY WORDS: THERMOPLASTIC STARCH / CHITOSAN / FATTY ACIDS / MOISTURE ADSORPTION

PIYAWIT SODSUCHAT: MOISTURE-ADSORPTION IMPROVEMENT OF THERMOPLASTIC STARCH USING CHITOSAN DERIVATIVES AND FATTY ACIDS. THESIS ADVISOR: AMNARD SITTATTRAKUL, Ph.D. 92 pp.

Today commercial petroleum-based plastics are widely used in many applications. After usages these plastic wastes have contributed to serious plastic waste problems and landfill depletion since they have high volume to weight ratio and high resistance to degradation. Starch is one of the most abundant renewable resources, which has the potential to replace petroleum-based plastics. In this study, we try to develop thermoplastic starch (TPS) with low moisture sensitivity by coating its surface with various fatty acids {stearic acid, oleic acid, fatty acids from sunflower oil, and fatty acids from canola oil}. N-alkyl chitosan {N-butyl chitosan, N-undecyl chitosan, and N-undecenyl chitosan} and quaternized chitosan{(N,N,N)-tributyl chitosan, N-butyl,(N,N)-diundecyl chitosan and N-butyl,(N,N)-dioctadecenyl chitosan} The coating method of the TPS specimens is solution dipping. To test for the moisture sensitivity, coated and uncoated TPS specimens were kept in a 53 %RH chamber for 15 days and the moisture absorption of all specimens was determined. The results show that all coated TPS specimens have lower moisture absorption than the uncoated ones. The moisture absorption of TPS specimens coated with fatty acids from canola oils is lowest and lower than that of uncoated TPS around 73 %. The possible reason is an occurrence of oxy-polymerization reaction of unsaturated fatty acids. Tensile properties of the uncoated TPS decrease while impact properties of the uncoated TPS increase dramatically compared to the coated ones. The absorbed moisture acts as a plasticizer for the TPS specimen.

---

Department of Materials Science and Engineering Graduate School, Silpakorn University. Academic Year 2009

Student's signature.....

Thesis Advisor's signature.....

## กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยและวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความช่วยเหลือจากบุคคลหลายท่าน ต้องขอขอบพระคุณอาจารย์ ดร. อำนาจ สิริชิตตระกูล อาจารย์ที่ปรึกษา และอาจารย์ ดร. วันชัย เลิศวิจิตรจรัส สำหรับคำแนะนำ การชี้แนะแนวทางการดำเนินงาน และแนวทางการแก้ไขปัญหาในงานวิจัยเสมอ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐกาญจน์ หงส์ศรีพันธ์ ผู้เป็นประธานกรรมการตรวจวิทยานิพนธ์ และอาจารย์ ดร.ศศิประภา รัตนดิถก ณ ภูเก็ต ผู้เป็นคณะกรรมการตรวจวิทยานิพนธ์ ซึ่งได้ให้คำแนะนำในการทำเล่มวิทยานิพนธ์ขอขอบคุณภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร ที่ได้เปิดโอกาสให้ผู้วิจัยได้ศึกษาวิจัยในเรื่อง การปรับปรุงสมบัติการดูดความชื้นของเทอร์โมพลาสติกที่เตรียมจากแป้งโดยใช้อนุพันธ์ของไคโตซานและกรดไขมันและขอขอบพระคุณคณาจารย์ภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุทุกท่านที่ อบรม สั่งสอน แก่ข้าพเจ้าตลอดระยะเวลา 3 ปี ที่ผ่านมา ขอขอบคุณพี่พินิจ เจียรระลึก นักวิทยาศาสตร์ประจำภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ ที่ได้ให้คำแนะนำและควบคุมดูแลการใช้เครื่องมือต่างๆ ขอขอบคุณพี่ไพโรจน์ ตั้งศุภราช ช่างเทคนิคที่อำนวยความสะดวกในการติดตั้งและซ่อมแซมเครื่องในการทดลองให้ใช้ได้คืออยู่เสมอ ขอขอบคุณพี่ที่ภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุทุกคนที่อำนวยความสะดวกในด้านต่างๆ ขอบใจนราชัย ชมเมือง ที่ได้ช่วยเหลือในการเขียนและเรียบเรียงประโยคภาษาอังกฤษตลอดมาและขอบใจเพื่อน ๆ ปริญญาโทและน้องๆ ภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุทุกคน ที่เป็นที่ปรึกษาและเป็นกำลังใจที่ดี ตลอดระยะเวลาที่ทำงานวิจัย

ขอขอบคุณทุนการศึกษาและทุนสนับสนุนจากภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากรและศูนย์ความเป็นเลิศแห่งชาติด้านปิโตรเลียม ปิโตรเคมี และวัสดุขั้นสูง ภายใต้โครงการพัฒนานวัตกรรมศึกษาและวิจัยด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี สำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณบุคคลที่สำคัญที่สุดในชีวิตของผม คือ คุณแม่มลิสา สดสุชาติ และครอบครัวที่ให้โอกาสทางการศึกษาและคอยเป็นที่ปรึกษา เป็นกำลังใจ ตลอดจนดูแลเรื่องค่าใช้จ่ายจนการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี และเหนือสิ่งอื่นใดประโยชน์ที่เกิดขึ้นเนื่องจากวิทยานิพนธ์นี้ ย่อมเป็นผลมาจากความกรุณาของทุกท่านที่กล่าวมาข้างต้น ผมขอขอบพระคุณทุกท่านจากใจจริง ณ โอกาสนี้

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ.....	ณ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	5
แนวคิดงานวิจัย.....	6
ขอบเขตของงานวิจัย.....	6
ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย.....	6
ผลที่คาดว่าจะได้รับ.....	7
2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	8
ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับแป้ง.....	8
องค์ประกอบและสมบัติของแป้ง.....	8
ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับมันสำปะหลังไทย.....	10
กระบวนการผลิตแป้งมันสำปะหลัง.....	11
อุตสาหกรรมที่ใช้แป้งมันสำปะหลังเป็นวัตถุดิบ.....	12
อนาคตผลิตภัณฑ์แป้งมันสำปะหลัง.....	13
การเตรียม thermoplastic starch.....	14
ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับกรดไขมัน.....	15
คุณสมบัติของกรดไขมัน.....	18
ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับไคโตซาน.....	18
คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของไคโตซาน.....	19
ลักษณะการเสื่อมสลายของไคโตซาน.....	19

บทที่	หน้า
	การนำไปใช้ประโยชน์ของไคโตซาน..... 20
	การเตรียม N-alkyl chitosan และ quaternized chitosan..... 21
3	วิธีการดำเนินงานวิจัย..... 23
	สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง..... 24
	อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง..... 24
	เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์..... 24
	วิธีการดำเนินการวิจัย..... 24
	การเตรียมแป้ง..... 24
	การผสมแป้งที่เตรียมได้ในเครื่อง Internal mixer..... 24
	การขึ้นรูปชิ้นงานเทอร์โมพลาสติกสตาซ..... 25
	การสังเคราะห์สารเคลือบ..... 27
	การเคลือบผิวหน้าชิ้นงาน..... 29
	การศึกษาการยึดติดของสารเคลือบ..... 32
	การเก็บชิ้นงานไว้ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 53%RH..... 32
	การพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิค Fourier Transform Infrared..... 33
	การศึกษาสมบัติเชิงกลของชิ้นงาน TPS ที่เตรียมได้..... 33
	การศึกษาจุดคุ้มทุนและการตัดสินใจ..... 35
4	ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง..... 36
	การเคลือบผิวชิ้นงานเทอร์โมพลาสติกสตาซ..... 36
	การเคลือบผิวชิ้นงาน TPS ด้วยกรดไขมัน..... 36
	การเคลือบผิวชิ้นงาน TPS ด้วย N-alkyl chitosan..... 37
	การเคลือบผิวชิ้นงาน TPS ด้วย quaternized chitosan..... 37
	การพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิค FT-IR..... 39
	การพิสูจน์เอกลักษณ์กรดไขมัน..... 39
	การพิสูจน์เอกลักษณ์ N-alkyl chitosan..... 42
	การพิสูจน์เอกลักษณ์ Quaternized chitosan..... 43
	การศึกษาการเคลือบผิวชิ้นงานเทอร์โมพลาสติกสตาซ..... 46
	ลักษณะของชิ้นงานเทอร์โมพลาสติกสตาซ..... 47

บทที่	หน้า
การเคลือบผิวชิ้นงานเทอร์โมพลาสติกสตาซ ด้วยกรดไขมัน.....	47
ลักษณะการยึดติดของชิ้นงาน TPS กับกรดไขมันอิ่มตัว.....	49
ลักษณะการยึดติดของชิ้นงาน TPS กับกรดไขมันไม่อิ่มตัว.....	50
การเคลือบผิวชิ้นงาน TPS ด้วย N-alkyl chitosan.....	53
ลักษณะการยึดติดของชิ้นงานเทอร์โมพลาสติกสตาซกับ	
saturated N-alkyl chitosan .....	54
ลักษณะการยึดติดของชิ้นงานเทอร์โมพลาสติกสตาซกับ	
unsaturated N-alkyl chitosan.....	54
การเคลือบผิวชิ้นงาน TPS ด้วย quaternized chitosan.....	56
ลักษณะการยึดติดของชิ้นงานเทอร์โมพลาสติกสตาซกับ	
saturated quaternized chitosan.....	57
ลักษณะการยึดติดของชิ้นงานเทอร์โมพลาสติกสตาซกับ	
unsaturated quaternized chitosan.....	59
การศึกษาสมบัติการดูดความชื้น.....	60
การวิเคราะห์คุณสมบัติการทนทานต่อแรงกระแทก.....	67
การศึกษาสมบัติความต้านทานต่อแรงดึงยึด.....	72
การวิเคราะห์จุดคุ้มทุน.....	83
5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	86
สรุปผลการทดลอง.....	86
ข้อเสนอแนะ.....	88
บรรณานุกรม.....	89
ประวัติผู้วิจัย.....	92

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า	
1	มูลค่าการส่งออกพืชเศรษฐกิจระหว่างปี พ.ศ.2546 ถึง ปี พ.ศ.2552.....	2
2	ราคามันสำปะหลังเฉลี่ยรายเดือน ระหว่างปี พ.ศ.2550 ถึง ปี พ.ศ.2552.....	4
3	ปริมาณองค์ประกอบต่างๆ ที่พบในแป้งแต่ละชนิด.....	10
4	ชนิดและปริมาณของกรดไขมันที่มีอยู่ในน้ำมันประเภทต่างๆ.....	17
5	การเปรียบเทียบอัตราส่วน $A_{C-C}/A_{C=O}$ และอัตราส่วน $A_{C-O}/A_{C=O}$ ของสารเคลือบที่เป็นกรดไขมันต่างชนิดกัน.....	41
6	การเปรียบเทียบอัตราส่วน $A_{CH_2}/A_{C=O}$ หรือ $A_{1414}/A_{1641}$ ของอนุพันธ์ไคโตซาน.....	46
7	เปอร์เซ็นต์การเคลือบของ adhesion specimens impact specimens และ tensile specimens.....	47
8	แสดงลักษณะทางกายภาพของชิ้นงานเทอร์โมพลาสติกสตาซที่ไม่มีการเคลือบ และที่มีการเคลือบด้วยกรดไขมันต่างชนิดกัน.....	48
9	ลักษณะทางกายภาพของชิ้นงานเทอร์โมพลาสติกสตาซที่มีการเคลือบด้วย N-alkyl chitosan ต่างชนิดกัน.....	53
10	ลักษณะทางกายภาพของชิ้นงานเทอร์โมพลาสติกสตาซที่มีการเคลือบด้วย quaternized chitosan ต่างชนิดกัน.....	57
11	การดูความชื้นของชิ้นงาน TPS ที่มีการเคลือบด้วยสารเคลือบต่างชนิดกัน เทียบกับชิ้นงาน TPS ที่ไม่มีการเคลือบ ที่สภาวะ 53 %RH เป็นเวลา 15 วัน...	62
12	สมบัติการทนต่อแรงกระแทกของเทอร์โมพลาสติกสตาซ ที่มีการเคลือบผิวด้วยสารเคลือบต่างชนิดกัน โดยทำการทดสอบก่อนทำการควบคุมความชื้น และหลังควบคุมความชื้น.....	68
13	สมบัติการดึงยืดของ TPS ที่มีการเคลือบผิวด้วยสารเคลือบต่างชนิดกัน โดยทำการทดสอบชิ้นงานก่อนและหลังการควบคุมความชื้น.....	74
14	ค่าใช้จ่ายและราคาขายของสารเคลือบผิวชิ้นงานเทอร์โมพลาสติกสตาซ.....	84

## สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
1 โครงสร้างทางเคมีของอะไมโลส.....	9
2 โครงสร้างทางเคมีของอะไมโลเพกติน.....	9
3 ตัวอย่างกรดไขมันที่ไม่จำเป็น .....	16
4 ตัวอย่างกรดไขมันที่จำเป็นต่อร่างกาย.....	17
5 ปฏิกิริยา deacetylation.....	19
6 กลไกขั้นแรกเป็นการทำปฏิกิริยาระหว่างหมู่เอมีนของไคโตซานกับสารประกอบ แอลดีไฮด์.....	21
7 กลไกขั้นที่ 2 เป็นการเกิดปฏิกิริยาของ Schiff's base หรือ imine กับ ระหว่าง $\text{NaBH}_4$	22
8 กลไกเกิดปฏิกิริยา quaternization ระหว่าง N-alkyl chitosan กับ n-butyl bromide.....	22
9 เครื่อง Internal mixer.....	25
10 เครื่องบดเทอร์โมพลาสติกสตาซ.....	26
11 แป้งที่ผ่านการบดด้วยเครื่องบด.....	26
12 การเติมแป้งใส่ในแม่พิมพ์.....	26
13 เครื่อง Compression molding.....	26
14 ที่ตากชิ้นงาน.....	31
15 เครื่องอบสูญญากาศ.....	31
16 ตู้ควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ 53%.....	32
17 เครื่อง Fourier Transform Infrared.....	33
18 เครื่อง Impact testing.....	34
19 เครื่อง universal testing machine.....	35
20 กลไกปฏิกิริยาการเตรียม octadecenyl bromide.....	38
21 การพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิค FTIR ของกรดสเตียริก.....	39
22 การพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิค FTIR (a) กรดโอเลอิก (b) กรดไขมัน จากน้ำมันดอกทานตะวัน (c) กรดไขมันจากน้ำมันดอกคาโนล่า.....	40
23 การพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิค FTIR (a) chitosan (b) N-butyl chitosan (c) N-undecyl chitosan (d) N-undecenyl chitosan.....	43

ภาพที่	หน้า
24 การพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิค FTIR (a) oleic acid (b) oleyl acid chloride (c) oleyl alcohol (d) oleyl bromide.....	44
25 การพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิค FTIR (a) (N,N,N)-tributyl chitosan (b) N-butyl,(N,N)-diundecyl chitosan (c) N-butyl,(N,N)-dioctadecenyl chitosan.....	45
26 การเกิด H-bonding ระหว่างแป้งกับกรดสเตียริก.....	50
27 การเกิด H-bonding ระหว่างแป้งกับกรดโอเลอิก.....	51
28 การเกิด H-bonding ระหว่างแป้งกับกรดไขมันที่ได้จากน้ำมันดอกทานตะวัน.....	51
29 การเกิด H-bonding ระหว่างแป้งกับกรดไขมันที่ได้ จากน้ำมันดอกคาโนล่า.....	52
30 การเกิด crosslink และการเกิดแรงยึดเหนี่ยวแบบ Dipole-Dipole moment ระหว่างโมเลกุลระหว่างแป้งกับกรดไขมันที่ไม่มีอิ่มตัว.....	52
31 การเกิด H-bonding ระหว่างแป้งกับ N-butyl chitosan.....	54
32 การเกิด H-bonding ระหว่างแป้งกับ N-undecyl chitosan.....	55
33 การเกิด H-bonding ระหว่างแป้งกับ N-undecenyl chitosan.....	55
34 การเกิด crosslink ระหว่างโมเลกุลของ N-undecenyl chitosan.....	56
35 การเกิด H-bonding ระหว่างแป้งกับ (N,N,N)-tributyl chitosan.....	58
36 การเกิด H-bonding ระหว่างแป้งกับ N-butyl,(N,N)-dioctadecenyl chitosan.....	58
37 การเกิด H-bonding ระหว่างแป้งกับ N-butyl,(N,N)-dioctadecenyl chitosan.....	59
38 การเกิด crosslink ระหว่างโมเลกุลของ N-butyl,(N,N)-dioctadecenyl chitosan.....	60
39 การดูความชื้นของชิ้นงาน TPS ที่มีการเคลือบด้วยกรดไขมันชนิดต่างๆ โดยเทียบกับชิ้นงาน TPS ที่ไม่มีการเคลือบที่สภาวะ 53%RH เป็นเวลา 15 วัน สำหรับชิ้นงาน impact testing.....	63
40 การดูความชื้นของชิ้นงาน TPS ที่มีการเคลือบด้วยอนุพันธ์ไคโตซานชนิดต่างๆ โดยเทียบกับชิ้นงาน TPS ที่ไม่มีการเคลือบที่สภาวะ 53%RH เป็นเวลา 15 วันสำหรับชิ้นงาน impact testing.....	64

ภาพที่	หน้า
41 การดูความชื้นของชิ้นงาน TPS ที่มีการเคลือบด้วยกรดไขมันชนิดต่างๆ โดยเทียบกับชิ้นงานที่ TPS ไม่มีการเคลือบที่สภาวะ 53%RH เป็นเวลา 15 วัน สำหรับชิ้นงาน tensile testing.....	65
42 การดูความชื้นของชิ้นงาน TPS ที่มีการเคลือบด้วยอนุพันธ์โคโคซานชนิดต่างๆ โดยเทียบกับชิ้นงาน TPS ที่ไม่มีการเคลือบที่สภาวะ 53%RH เป็นเวลา 15 วันสำหรับชิ้นงาน tensile testing.....	66
43 สมบัติการทนแรงกระแทกก่อนการทดสอบการดูความชื้นเปรียบเทียบกับ หลังการทดสอบดูความชื้นของเทอร์โมพลาสติกสตาซที่มีการเคลือบผิว ด้วยสารเคลือบต่างชนิดกัน.....	69
44 เปอร์เซนต์การเพิ่มขึ้นของค่า impact strength หลังการทดสอบการดูความชื้น เปรียบเทียบกับก่อนการดูความชื้นของชิ้นงานเทอร์โมพลาสติกสตาซที่ไม่ มีการเคลือบกับชิ้นงาน TPS ที่มีการเคลือบด้วยสารเคลือบต่างชนิดกัน.....	71
45 การทดสอบการดึงยึดก่อนการทดสอบการดูความชื้นของชิ้นงาน เทอร์โมพลาสติกสตาซที่มีการเคลือบผิวด้วยสารเคลือบต่างชนิดกัน.....	75
46 การทดสอบการดึงยึดภายหลังการทดสอบการดูความชื้นสัมพัทธ์ที่ 53% เป็นเวลา 15 วัน ของชิ้นงานเทอร์โมพลาสติกสตาซที่มีการเคลือบผิว ด้วยสารเคลือบต่างชนิดกัน.....	76
47 สมบัติการดึงยึดก่อนการทดสอบการดูความชื้นเปรียบเทียบกับหลังการทดสอบ ดูความชื้น ของเทอร์โมพลาสติกสตาซที่มีการเคลือบผิวด้วยสารเคลือบต่าง ชนิดกันในส่วนค่า Young's Modulus.....	77
48 สมบัติการดึงยึดก่อนการทดสอบการดูความชื้นเปรียบเทียบกับหลังการทดสอบ ดูความชื้นของชิ้นงาน TPS ที่มีการเคลือบผิวด้วยสารเคลือบต่างชนิดกัน ในส่วนค่า tensile strength.....	78
49 สมบัติการดึงยึดก่อนการทดสอบการดูความชื้นเปรียบเทียบกับหลังการทดสอบ ดูความชื้นของชิ้นงาน TPS ที่มีการเคลือบผิวด้วยสารเคลือบต่างชนิดกัน ในส่วนค่า Percentage Strain at break.....	79

ภาพที่	หน้า
50	
เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงค่า Young's Modulus ค่า tensile strength และ	
ค่า percentage strain at break ภายหลังจากทดสอบการดูดความชื้น	
เปรียบเทียบกับก่อนการดูดความชื้นของชิ้นงานเทอร์โมพลาสติกสตาซที่	
เคลือบสารเคลือบต่างชนิดกัน.....	82
51	
การวิเคราะห์จุดคุ้มทุนของสารเคลือบผิวชิ้นงานเทอร์โมพลาสติกสตาซ.....	85

## บทที่ 1

### บทนำ

#### ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันมีการนำผลิตภัณฑ์และบรรจุภัณฑ์จากพลาสติกมาใช้กันอย่างแพร่หลาย แต่เมื่อพิจารณาถึงแหล่งที่มาของพลาสติกที่ใช้กัน โดยทั่วไปนั้น จะพบว่าส่วนใหญ่มีแหล่งมาจากวัตถุดิบที่เป็นสารตั้งต้นจากอุตสาหกรรมปิโตรเลียม ซึ่งสารตั้งต้นที่นำมาแปรรูปเป็นพลาสติกนั้นนับวันจะมีปริมาณที่น้อยลงและมีราคาต้นทุนที่สูงขึ้น ทั้งนี้เป็นผลสืบเนื่องมาจากวัสดุปิโตรเลียมเป็นทรัพยากรที่ใช้แล้วหมดไปและไม่สามารถเกิดขึ้นใหม่ได้ในเวลาอันสั้น ขณะเดียวกันการใช้ผลิตภัณฑ์พลาสติกดังกล่าว ก็ยังส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมด้วยและเมื่อนำไปทำลายจะก่อให้เกิดมลพิษเนื่องจากพลาสติกเหล่านี้ไม่สามารถเกิดการย่อยสลายได้ด้วยกระบวนการทางชีวภาพ ถึงแม้ปัจจุบันจะมีการนำพลาสติกที่ใช้แล้วมาแปรรูปเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ก็ตาม แต่สมบัติของพลาสติกที่ได้จะมีสมบัติที่ต่ำลง

จากปัญหาที่เกิดขึ้นดังกล่าวจึงได้มีการพยายามในการศึกษาค้นคว้าหาวัตถุดิบอื่นเพื่อใช้ทดแทนพลาสติกสังเคราะห์ที่ผลิตจากปิโตรเลียม โดยวัสดุที่จะนำมาใช้ทดแทนนั้นจะต้องเป็นวัสดุที่มาจากธรรมชาติ และสามารถปลูกทดแทนได้ในเวลาอันสั้น รวมทั้งควรมีราคาถูกและสามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ ทั้งนี้เนื่องจากประเทศของเราเป็นประเทศเกษตรกรรม ดังนั้นจะเห็นได้ว่ามีงานวิจัยจำนวนมาก มีจุดประสงค์ที่จะพัฒนาวัตถุดิบจากธรรมชาติเพื่อใช้เป็นวัสดุทดแทน ซึ่งวัตถุดิบที่พบบ่อยก็คือ แป้งและเซลลูโลส โดยที่ทั้งแป้งและเซลลูโลสต่างก็เป็น polysaccharide ที่มีองค์ประกอบเป็น monomer ชนิดเดียว คือ กลูโคส (glucose) แต่มีลักษณะของการเชื่อมต่อของหน่วยซ้ำที่แตกต่างกัน จึงทำให้โครงสร้างของโมเลกุลแตกต่างกัน โดยที่เซลลูโลสจะมีโมเลกุลที่มีโครงสร้างค่อนข้างเป็นเส้นตรงทำให้โมเลกุลของเซลลูโลสสามารถจัดเรียงตัวชิดกันได้มากกว่าแป้ง ดังนั้นเซลลูโลสจึงมีสมบัติที่แข็งแรงและไม่สามารถนำมาขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ได้ง่ายเพราะการให้ความร้อนในระหว่างการขึ้นรูปจะทำให้โมเลกุลของเซลลูโลสเกิดการแตกสลาย ขณะที่แป้งจะมีโมเลกุลที่มีโครงสร้างขดกันเป็นเกลียว (helix) จึงมีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลน้อยกว่า ดังนั้นแป้งจึงมีความเป็นไปได้ที่จะนำมาผ่านกระบวนการขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์เพื่อใช้แทนพลาสติกสังเคราะห์ได้ ซึ่งแป้งสามารถพบได้ตามส่วนประกอบต่างๆของพืช เช่น ส่วนหัว และราก เป็นต้น

ขณะที่พืชเศรษฐกิจที่สำคัญแก่การส่งออกของไทย ได้แก่ ข้าว ยางพารา มันสำปะหลัง แต่อย่างไรก็ตามจากปัญหาวิกฤตเศรษฐกิจโลก(Hamburger crisis: ค.ศ.2006-2008) ก็ยังส่งผลกระทบต่อการส่งออกพืชผลทางการเกษตรของไทย ทั้งนี้จึงจะเห็นได้จากมูลค่าของผลิตภัณฑ์มวลรวมของภาคเกษตรในไตรมาสแรกของปี พ.ศ. 2552 มีการขยายตัวเพียง 1.5% ซึ่งชะลอลดตัวลงเมื่อเทียบกับช่วงเดียวกันของปี 2551 ซึ่งขยายตัวถึง 3.1% เนื่องจากประเทศคู่ค้าต่างก็ประสบปัญหาทางด้านเศรษฐกิจเช่นเดียวกับประเทศไทยจึงทำให้เศรษฐกิจชะลอลด การใช้จ่ายเพื่อบริโภคลดการลงทุนก็ชะลอลดตัวตามไปด้วย ขณะที่การส่งออกสินค้าเกษตรและอาหารลดลงอย่างต่อเนื่องจึงทำให้ราคาสินค้าเกษตรและอาหารมีราคาที่ตกต่ำ และจากการเปิดเผยข้อมูลของนายอภิชาติ จงสกุล เลขาธิการสำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร (สศก.) กล่าวว่าในเดือนมกราคม-กุมภาพันธ์ พ.ศ.2552 การส่งออกสินค้าเกษตรมีมูลค่าลดลงค่อนข้างมาก โดยเฉพาะข้าว ผลิตภัณฑ์มันสำปะหลัง และยางพารา มีมูลค่าส่งออกลดลง 5.8%, 46.3%, และ 42.7% ตามลำดับ [1]

ตารางที่ 1 มูลค่าการส่งออกพืชเศรษฐกิจระหว่างปี พ.ศ. 2546 ถึง ปีพ.ศ. 2552

(หน่วย:ล้านบาท) [2]

ปี พ.ศ.	ไตรมาสที่	ข้าว	ยางพารา	มันปะหลัง
2546	1	15,620	33,090	4,142
	2	16,144	24,034	3,761
	3	18,598	26,548	3,352
	4	26,337	32,155	3,721
	รวม	76,699	115,827	14,976
2547	1	19,792	34,920	3,972
	2	26,709	30,484	4,319
	3	30,594	30,961	4,600
	4	31,233	41,089	5,083
	รวม	108,328	137,453	17,973
2548	1	22,838	33,609	4,232
	2	23,227	28,054	5,021
	3	22,688	42,311	5,182
	4	24,241	44,706	5,594
	รวม	92,994	148,680	20,029

ตารางที่ 1 มูลค่าการส่งออกพืชเศรษฐกิจระหว่างปี พ.ศ. 2546 ถึง ปี พ.ศ. 2552 (ต่อ)  
(หน่วย:ล้านบาท)

ปี พ.ศ.	ไตรมาสที่	ข้าว	ยางพารา	มันปะหลัง
2549	1	22,163	49,592	6,164
	2	21,595	45,207	5,634
	3	25,188	59,174	5,925
	4	29,232	51,498	6,936
	รวม	98,179	205,470	24,658
2550	1	22,643	46,848	6,500
	2	27,331	42,048	6,275
	3	26,468	49,739	6,365
	4	42,773	55,703	7,772
	รวม	119,215	194,338	26,912
2551	1	43,414	57,743	7,941
	2	63,642	49,882	7,409
	3	60,705	71,808	8,452
	4	35,458	44,195	5,993
	รวม	203,219	223,628	29,794
2552	1	39,587	33,144	5,610
	2	45,407	26,050	7,018
	3	N/A	N/A	N/A
	4	N/A	N/A	N/A
	รวม	84,994	59,194	12,628

ขณะเดียวกันก็ได้มีการคาดการณ์ถึงผลผลิตของมันสำปะหลังในฤดูกาลผลิตปี พ.ศ. 2552 ถึงปี พ.ศ. 2553 โดยหน่วยงานราชการ และภาคเอกชน พบว่าพื้นที่ปลูกมันสำปะหลังคาดว่าจะลดลงจาก 8.2 ล้านไร่ในฤดูกาลผลิตปี พ.ศ. 2551 ถึงปี พ.ศ. 2552 เป็น 7.7 ล้านไร่ในฤดูกาลผลิตปี พ.ศ. 2552 ถึงปี พ.ศ. 2553 และในส่วนของผลผลิตมันสำปะหลังทางคณะสำรวจได้คาดการณ์ว่าจะมีปริมาณลดลงจาก 30 ล้านตัน ในฤดูกาลผลิตปี พ.ศ. 2551 ถึงปี พ.ศ. 2552 เหลือประมาณ 27 ล้านตัน ในฤดูกาลผลิตปี พ.ศ. 2552 ถึงปี พ.ศ. 2553 ซึ่งสาเหตุสำคัญที่ทำให้พื้นที่เพาะปลูก และ

ผลผลิตมีแนวโน้มลดลง เพราะราคาผลผลิตมีราคาตกต่ำ ซึ่งเป็นผลมาจากการมีมันสำปะหลังจากประเทศเพื่อนบ้านส่งเข้ามาขายในประเทศ [3]

จากวิกฤตที่เกิดขึ้นกับมันสำปะหลังไทยและถ้าปล่อยให้เกิดขึ้นอย่างเช่นนี้เรื่อยไป ก็อาจทำให้เกษตรกรของไทยประสบภาวะขาดทุนรวมทั้งอาจจำเป็นต้องเลิกกิจการลง อย่างไรก็ตามจากการที่ไทยเป็นประเทศที่มีต้นทุนทางทรัพยากรทางธรรมชาติที่สูง จึงสามารถเพาะปลูกและส่งออกแป้งมันสำปะหลังเป็นอันดับหนึ่งของโลก เพียงแต่มูลค่าการส่งออกยังไม่เป็นที่น่าพอใจนัก ซึ่งทำให้ผู้วิจัยเห็นความสำคัญที่จะนำแป้งมันสำปะหลังมาเป็นวัตถุดิบหลักในการทำการวิจัยและพัฒนาเพื่อเพิ่มมูลค่าให้กับแป้งมันสำปะหลังและยังส่งผลให้เกษตรกรมีชีวิตความเป็นอยู่ที่ดีขึ้น

ตารางที่ 2 ราคามันสำปะหลังเฉลี่ยรายเดือน ระหว่างปี พ.ศ. 2550 ถึง ปี พ.ศ. 2552 [4]

(หน่วย:บาท/กิโลกรัม)

เดือน	ปี พ.ศ.2550	ปี พ.ศ.2551	ปี พ.ศ.2552
มกราคม	3.55	5.11	3.17
กุมภาพันธ์	3.60	5.19	3.24
มีนาคม	3.62	5.33	3.62
เมษายน	3.65	5.53	N/A
พฤษภาคม	3.83	5.46	N/A
มิถุนายน	4.12	5.39	N/A
กรกฎาคม	4.29	5.62	N/A
สิงหาคม	4.32	5.60	N/A
กันยายน	4.62	5.18	N/A
ตุลาคม	4.89	4.25	N/A
พฤศจิกายน	4.79	4.00	N/A
ธันวาคม	5.01	3.61	N/A

มันสำปะหลังจะประกอบไปด้วยแป้งอยู่เป็นจำนวนมาก โดยจะพบอยู่ตามส่วนประกอบต่างๆ เช่น หัว ราก ซึ่งแป้งจัดเป็นพอลิเมอร์จากธรรมชาติที่สามารถสร้างขึ้นใหม่ได้โดยไม่ทำลายสิ่งแวดล้อม และเมื่อนำแป้งไปผ่านกระบวนการปรับสภาพก็จะได้ Thermoplastic starch (TPS) ที่สามารถใช้ทดแทนพลาสติกที่ผลิตจากปิโตรเลียมได้ ขณะเดียวกันสมบัติของ Thermoplastic starch

(TPS) ที่ได้ ยังสามารถย่อยสลายได้โดยกระบวนการทางชีวภาพ อีกทั้งยังมีสมบัติเชิงกลที่ไม่ค่อยไปกว่าพลาสติกที่ผลิตจากปิโตรเลียมมากนัก [5]

แต่ปัญหาที่มักเกิดขึ้นกับการนำแป้งมาแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ Thermoplastic starch ก็คือ โมเลกุลของแป้งมีความว่องไวต่อความชื้น เนื่องจากภายในโมเลกุลของแป้งมีหมู่ฟังก์ชันที่เป็นหมู่ไฮดรอกซิลอยู่เป็นจำนวนมาก จึงทำให้แป้งดูดความชื้นสูง ซึ่งผลของการดูดความชื้นของ Thermoplastic starch นี้จะส่งผลกระทบต่อสมบัติเชิงกลของผลิตภัณฑ์ด้วย เช่น เมื่อมีการนำ Thermoplastic starch ไปใช้งานในบริเวณที่มีความชื้นสูง ก็จะทำให้สมบัติเชิงกลของ Thermoplastic starch นั้นต่ำลง อีกทั้งแป้งยังเป็นแหล่งเจริญเติบโตของเชื้อราและจุลินทรีย์ได้ง่าย ซึ่งจากปัญหาดังกล่าวทำให้ผู้วิจัยได้เห็นถึงความจำเป็นที่จะต้องแก้ปัญหา เพื่อปรับลดสมบัติการดูดความชื้นของ Thermoplastic starch (TPS) โดยการนำ กรดไขมัน และ อนุพันธ์ของไคโตซานมาทำการเคลือบผิวของ Thermoplastic starch ซึ่งเหตุผลที่นำสารเหล่านี้มาทำการเคลือบผิว เนื่องจากเมื่อพิจารณาถึงโครงสร้างทางเคมีของกรดไขมัน และอนุพันธ์ของไคโตซาน จะเห็นได้ว่าสามารถเกิด interaction กับแป้งได้ดีและยังสามารถช่วยลดอัตราการดูดความชื้น นอกจากนี้ ammonium salt ของไคโตซานยังสามารถยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อราและจุลินทรีย์เพราะประจุบวกบนหมู่ ammonium สามารถเกิด interaction กับประจุลบบนผิวของผนังเซลล์ของจุลินทรีย์ ทำให้จุลินทรีย์ไม่สามารถสร้างผนังเซลล์ใหม่ได้ [2]

#### วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1 เพื่อศึกษาการเตรียม Thermoplastic starch ที่มีการเคลือบผิวด้วยกรดไขมัน และที่เคลือบผิวด้วยอนุพันธ์ของไคโตซาน
- 2 เพื่อศึกษาและเปรียบเทียบสมบัติด้านการดูดความชื้นของ Thermoplastic starch ที่ไม่มีการเคลือบผิวด้วยสารใดๆเลยกับที่มีการเคลือบผิวด้วยกรดไขมันและที่เคลือบผิวด้วยอนุพันธ์ของไคโตซาน
- 3 เพื่อศึกษาและเปรียบเทียบสมบัติเชิงกลของ Thermoplastic starch ที่ไม่มีการเคลือบผิวด้วยสารใดๆเลยกับที่มีการเคลือบผิวด้วยกรดไขมันและที่เคลือบผิวด้วยอนุพันธ์ของไคโตซาน

## แนวคิดงานวิจัย

เนื่องจาก Thermoplastic starch ที่เตรียมได้มีความว่องไวต่อความชื้นสูง และเมื่อนำมาใช้ในงานในสถานะที่มีความชื้นสูง จะทำให้สมบัติเชิงกลมีค่าลดลง และยังเป็นแหล่งเจริญเติบโตของเชื้อราและแบคทีเรีย ดังนั้นผู้วิจัยจึงสนใจที่จะศึกษาหาวิธีในการปรับปรุงสมบัติด้านการดูดความชื้นของ Thermoplastic starch ซึ่งก็มีหลายวิธี แต่ผู้วิจัยมีความสนใจที่จะปรับปรุงสมบัติการดูดความชื้นด้วยวิธีการเคลือบผิวชิ้นงาน Thermoplastic starch ด้วยสารเคลือบที่มีโครงสร้างเป็น amphiphile structure เนื่องจากการเคลือบผิวชิ้นงานสามารถทำได้โดยง่ายและมีต้นทุนการผลิตที่ต่ำ โดยที่ส่วนบริเวณที่มีขี้ผึ้งสามารถสร้างพันธะไฮโดรเจนกับ Thermoplastic starch แล้วทำให้การยึดติดกันระหว่างพื้นผิวเกิดได้ดีขึ้น และส่วนบริเวณที่ไม่มีขี้ผึ้งจะหันออกมาสู่ด้านนอก ทำให้สามารถช่วยป้องกันการดูดความชื้นของ Thermoplastic starch ได้ ซึ่งสารที่ใช้เคลือบผิวของชิ้นงาน Thermoplastic starch ได้แก่ กรดไขมัน และอนุพันธ์ของไคโตซาน โดยที่อนุพันธ์ของไคโตซานที่ทำการวิจัยมี 2 ประเภท คือ N-alkyl chitosan และ quaternized chitosan ซึ่งอนุพันธ์ของไคโตซานดังกล่าวสามารถเตรียมได้จากปฏิกิริยา nucleophilic substitution ของ chitosan และปฏิกิริยา Schiff's bases ตามลำดับ

## ขอบเขตของงานวิจัย

1. แป้งที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นแป้งมันสำปะหลัง
2. พลาสติไซเซอร์(plasticizer) ที่ใช้คือ กลีเซอรอล
3. ศึกษาสมบัติการดูดความชื้นของ Thermoplastic starch ที่มีการเคลือบผิวด้วย กรดไขมันและอนุพันธ์ของไคโตซาน
4. ศึกษาสมบัติเชิงกลด้วย impact testing machine และ universal testing machine

## ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

1. ศึกษาและเก็บข้อมูลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
2. ออกแบบวิธีการทดลองและวางแผนการทดลอง
3. จัดหาอุปกรณ์และสารเคมี
4. ดำเนินการวิจัย
  - 4.1 เตรียม Thermoplastic starch ได้จากการผสมระหว่างแป้งกับกลีเซอรอล พร้อมทำการขึ้นรูปชิ้นงาน
  - 4.2 เตรียมและทำการสังเคราะห์สารเคลือบ
  - 4.3 เคลือบชิ้นงานด้วยสารเคลือบที่เตรียมไว้
  - 4.4 ศึกษาสมบัติการดูดความชื้นและสมบัติเชิงกล

5 วิเคราะห์ผลการวิจัยที่ได้

6 สรุปผลงานวิจัย

7 รายงานผลงานวิจัย

#### ผลที่คาดว่าจะได้รับ

- 1 สามารถเตรียม Thermoplastic starch ที่มีการเคลือบผิวด้วยกรดไขมันและที่มีการเคลือบผิวด้วยอนุพันธ์ของไคโตซาน
- 2 สามารถปรับปรุงสมบัติด้านการลดการดูดความชื้นของ Thermoplastic starch ให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น โดยการเคลือบผิวชั้นงาน Thermoplastic starch ด้วยกรดไขมันและที่มีการเคลือบผิวด้วยอนุพันธ์ของไคโตซาน
- 3 สามารถเปรียบเทียบข้อมูลสมบัติด้านการดูดความชื้นและสมบัติเชิงกลของ Thermoplastic starch ที่ไม่มีการเคลือบผิวด้วยสารใดๆ กับที่มีการเคลือบผิวด้วยกรดไขมันและที่มีการเคลือบผิวด้วยอนุพันธ์ของไคโตซาน

## บทที่ 2

### เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับแป้ง

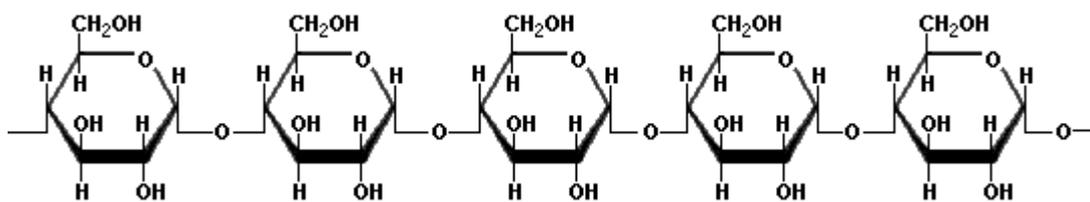
แป้งเป็น homo-polysaccharide ชนิดหนึ่งที่พบมากในพืชและแป้งเป็น polymer ของน้ำตาล glucose ที่ได้จากการบวนการสังเคราะห์แสงของพืช ซึ่งพืชจะเก็บสะสมแป้งไว้ตามส่วนต่าง ๆ เช่น หัว ราก เมล็ด ลำต้นและผล โดยที่แป้งจะรวมตัวกันอยู่ในรูปของเม็ดแป้ง (starch granule) ซึ่งส่วนใหญ่จะพบแป้งจากส่วนที่เป็นเมล็ดของธัญพืช เช่น ข้าวเจ้า ข้าวโพด ข้าวสาลี ข้าวฟ่างและบางส่วนได้มาจากหัวและรากของพืช เช่น มันฝรั่ง มันเทศและมันสำปะหลัง แป้งที่ได้จากพืชแต่ละชนิดจะมีลักษณะเฉพาะตัว โดยจะมีส่วนประกอบของอะไมโลสและอะไมโลเพกตินรวมทั้งขนาดและรูปร่างของ starch granule ที่แตกต่างกัน

แป้งเป็นสารประเภทคาร์โบไฮเดรตที่มีองค์ประกอบของคาร์บอน ไฮโดรเจนและออกซิเจนเป็นส่วนใหญ่ อาจมีสิ่งอื่นเจือปนบ้าง เช่น โปรตีน ไขมันและเกลือแร่ แต่มีอยู่ในปริมาณที่น้อยมาก ส่วนแป้งที่ผลิตโดยทั่วไปจะยังคงมีส่วนประกอบอื่น ๆ อยู่มากซึ่งจะเรียกว่า Flour เช่น แป้งข้าวโพด แป้งสาลี แป้งข้าวเจ้า แต่เมื่อสิ่งเจือปนอื่น ๆ ถูกสกัดออกไปจนเหลือแป้งบริสุทธิ์เป็นส่วนใหญ่ เรียกว่า starch ซึ่งมีความบริสุทธิ์สูง จึงถูกนำมาใช้เป็นวัตถุดิบในรูปของสารเคมีในการทำปฏิกิริยาต่าง ๆ มากมาย แป้งที่มีการนำมาใช้มากที่สุดในโลกคือ แป้งข้าวเจ้า แป้งสาลีและแป้งมันฝรั่ง [6]

#### องค์ประกอบและสมบัติของแป้ง

แป้งเป็นพอลิเมอร์ของกลูโคส ซึ่งประกอบด้วย anhydroglucose unit เชื่อมต่อกันด้วยพันธะ glucosidic linkage ที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 1 ซึ่งแป้งประกอบด้วยพอลิเมอร์ 2 ชนิด คือ

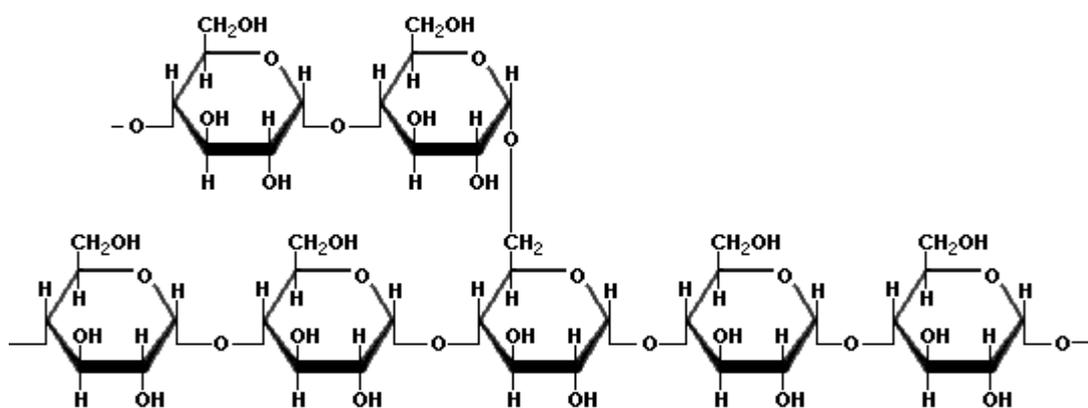
ก) อะไมโลส เป็นพอลิเมอร์เชิงเส้นที่ประกอบด้วยกลูโคสประมาณ 2,000 หน่วย โดยมีการเชื่อมต่อกันด้วยพันธะ glucosidic linkage ชนิด  $\alpha$ -1,4- glucosidic bond อะไมโลสสามารถรวมตัวเป็นสารประกอบเชิงซ้อนกับไอโอดีน และสารประกอบอินทรีย์อื่น เช่น บิวทานอล กรดไขมัน สารลดแรงตึงผิว ฟีนอล และไฮโดรคาร์บอน โดยสารประกอบเชิงซ้อนเหล่านี้จะไม่ละลายน้ำ นอกจากนี้อะไมโลส ที่รวมตัวกับไอโอดีนจะให้สีน้ำเงิน ซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะที่บ่งบอกถึงแป้งที่มีองค์ประกอบของอะไมโลส



ภาพที่ 1 โครงสร้างทางเคมีของอะไมโลส [7]

แป้งจากธัญพืช เช่น แป้งข้าวโพด แป้งสาลี แป้งข้างฟาง มีปริมาณอะไมโลสสูงประมาณ 28% ส่วนแป้งที่ได้จากส่วนรากและหัวของพืช เช่น แป้งมันสำปะหลัง แป้งมันฝรั่ง แป้งสาธู จะมีปริมาณอะไมโลสประมาณ 20% ขณะที่แป้งข้าวเหนียวจะมีส่วนของอะไมโลสอยู่ในจำนวนน้อย โดยที่น้ำหนักโมเลกุลของอะไมโลสจะอยู่ในช่วง  $10^5$  ถึง  $10^6$  คาลตัน อย่างไรก็ตามอะไมโลสในแป้งแต่ละชนิดจะมีน้ำหนักโมเลกุลที่แตกต่างกัน ซึ่งแป้งมันฝรั่งและแป้งมันสำปะหลังจะมีน้ำหนักโมเลกุลและขนาดโมเลกุล (Degree of polymerization) ที่สูงกว่าแป้งข้าวโพดและแป้งสาลี โดยที่แป้งที่มีโมเลกุลของอะไมโลสยาวจะมีแนวโน้มในการเกิด retrogradation ที่ลดลง

ข) อะไมโลเพกติน เป็นพอลิเมอร์เชิงกิ่งของกลูโคส โดยมีส่วนที่เป็นเส้นตรงของกลูโคสที่เชื่อมต่อกันด้วยพันธะ glucosidic linkage ชนิด  $\alpha$ -1,4- glucosidic bond และส่วนที่เป็นกิ่งสาขาที่เป็นพอลิเมอร์กลูโคสสายสั้นมีขนาดโมเลกุลอยู่ในช่วง 10 ถึง 60 หน่วยเชื่อมต่อกันด้วยพันธะ glucosidic linkage ชนิด  $\alpha$ -1,6- glucosidic bond [8]



ภาพที่ 2 โครงสร้างทางเคมีของอะไมโลเพกติน [9]

หน่วยกลูโคสที่มีพันธะ glucosidic linkage ชนิด แอลฟา-1,6 มีอยู่ประมาณ 5% ของปริมาณหน่วยกลูโคสในอะไมโลเพกตินทั้งหมด ขนาดโมเลกุลของอะไมโลเพกตินในแป้งแต่ละชนิดจะมีหน่วยกลูโคสประมาณ 2 ล้านหน่วย ขณะเดียวกันอะไมโลเพกตินมี

น้ำหนักโมเลกุลประมาณ 1000 เท่า ของอะไมโลสและมีอัตราการคืนตัวต่ำ เนื่องจากอะไมโลเพกตินมีลักษณะโครงสร้างเป็นกิ่ง

ตารางที่ 3 ปริมาณองค์ประกอบต่างๆ ที่พบในแป้งแต่ละชนิด

ชนิดของแป้ง	อะไมโลส		อะไมโลเพกติน	
	ปริมาณ(%)	ขนาดโมเลกุล	ปริมาณ(%)	ขนาดโมเลกุล
แป้งสาลี	28	1,300	72	4,800
แป้งข้าวโพด	28	930	72	8,200
แป้งข้าวเจ้า	17	-	83	-
แป้งมันฝรั่ง	21	4,900	79	9,800
แป้งข้าวเหนียว	0-2	-	98-100	18,500
แป้งมันสำปะหลัง	17	2,600	83	-

### ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับมันสำปะหลังไทย

มันสำปะหลังมีชื่อเรียกที่หลากหลาย เช่น ในอังกฤษจะเรียกว่า Cassava ขณะที่ในแถบประเทศอเมริกาใต้ จะเรียกว่า Madioca ส่วนประเทศที่พูดภาษาสเปนในอเมริกาใต้จะเรียก Yuca และสำหรับในทวีปเอเชียจะเรียกว่า Tapioca ซึ่งการเพาะปลูกมันสำปะหลังได้มีมากกว่า 3,000-7,000 ปีมาแล้ว โดยมันสำปะหลังมีองค์ประกอบสำคัญที่มนุษย์ได้นำไปใช้ประโยชน์ คือ แป้ง (starch) ซึ่งเป็น polymeric carbohydrate ของ glucose unit จึงเหมาะที่จะนำไปเป็นวัตถุดิบตั้งต้นในกระบวนการดำรงชีวิตได้อย่างมากมายและเป็นแหล่งอาหารพื้นฐานที่สำคัญของมนุษย์และสัตว์ [10]

มันสำปะหลังที่เพาะปลูกในประเทศไทย มีถิ่นกำเนิดเดิมที่แถบอเมริกากลางและอเมริกาใต้ แต่อย่างไรก็ตามก็ไม่ปรากฏหลักฐานแน่ชัดว่าถูกนำเข้ามาเพาะปลูกในประเทศไทยเมื่อใด แต่คาดกันว่ามันสำปะหลังได้เข้าสู่ประเทศไทยจากทางประเทศมาเลเซีย เมื่อประมาณปี พ.ศ. 2329 ซึ่งเดิมคนไทยเรียกว่า มันไม้ มันสำโรง และมันต้นเตี้ย ซึ่งในระยะแรกมีการเพาะปลูกเพื่อการบริโภค และเนื่องจากมันสำปะหลังเป็นพืชที่มีคุณสมบัติเด่นคือ ปลูกง่าย ทนแล้ง ดูแลรักษาง่าย และปลูกได้ตลอดทั้งปี สำหรับการปลูกมันสำปะหลังเพื่อการค้าในประเทศไทยนั้นได้เริ่มจากทางภาคใต้ ซึ่งมีการเพาะปลูกระหว่างแถวของดงยางพารา ซึ่งมีการปลูกกันมากในจังหวัดสงขลา จนมีการตั้งโรงงานผลิตแป้งมันสำปะหลังและเมล็ดสา구 เพื่อการส่งออกไปยังประเทศสิงคโปร์และประเทศมาเลเซีย อย่างไรก็ตามการปลูกมันสำปะหลังในภาคใต้ก็มีปริมาณที่ลดลง เนื่องจากดงยางพาราเติบโตคลุมพื้นที่ทั้งหมด ดังนั้นจึงมีการส่งเสริมให้เพาะปลูกในพื้นที่ที่ค่อนข้างแห้งแล้ง หรือพื้นที่ที่

ไม่เหมาะกับการปลูกพืชชนิดอื่น เช่น ทางชายฝั่งทะเลภาคตะวันออกที่มีลักษณะภูมิประเทศเป็นดินทรายและภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ที่ายที่สุดก็เป็นที่นิยมแพร่หลายอย่างรวดเร็วควบคู่กับการเติบโตของอุตสาหกรรมมันเส้น อุตสาหกรรมมันอัดเม็ด และอุตสาหกรรมแป้งมันสำปะหลัง

มันสำปะหลังที่ปลูกในประเทศไทยรวมทั้งจากแหล่งต่างๆทั่วโลกนั้น แบ่งได้เป็น 2 ชนิด คือ

1. มันสำปะหลังชนิดหวาน เป็นมันที่ใช้เพื่อการบริโภคของคน โดยมีทั้งชนิดเนื้อแน่น เหนียว และเนื้อร่วนนุ่ม รสชาติไม่ขม และมีปริมาณกรดไฮโดรไซยานิกต่ำ ซึ่งมันชนิดหวานนี้ทั่วโลกปลูกกันมาก ขณะที่ประเทศไทยจะเพาะปลูกเพื่อการบริโภคในครัวเรือนมากกว่าการเพาะปลูกเพื่อการค้า เนื่องจากไม่มีตลาดขนาดใหญ่รองรับ

2. มันสำปะหลังชนิดขม เป็นมันสำปะหลังที่มีรสขมและเป็นพิษเนื่องจากมีปริมาณกรดไฮโดรไซยานิกสูง จึงไม่เหมาะสำหรับการบริโภคของมนุษย์ แต่เหมาะสำหรับอุตสาหกรรมแปรรูป เช่น ใช้ผลิตมันสำปะหลังอัดเม็ด แป้งมัน และแอลกอฮอล์

#### กระบวนการผลิตแป้งมันสำปะหลัง

กระบวนการผลิตแป้งมันสำปะหลังในไทย สามารถแบ่งกรรมวิธีได้ 2 แบบ

ก) Tapioca Flour จะพบในโรงงานผลิตแป้งมันขนาดเล็ก โดยมีการแยกแป้งออกจากหัวมันสดด้วยวิธีการตกตะกอนด้วยน้ำ ทำให้ได้แป้งที่มีคุณภาพที่ไม่ดีนัก ซึ่งกระบวนการผลิตดังกล่าวมีขั้นตอนการผลิต 9 ขั้นตอน คือ

- 1) ทำการชั่งน้ำหนักและวัดเปอร์เซ็นต์แป้ง
- 2) ตัดเหง้าและส่วนของลำต้นที่มากับหัวมันสดทิ้ง ก่อนส่งเข้าเครื่องปอกเปลือก
- 3) ปอกเปลือกชั้นนอกของหัวมันสดออก แล้วแช่หัวมันสดในบ่อ เพื่อล้างหัวมันให้สะอาด
- 4) นำหัวมันที่ล้างสะอาดแล้วเข้าเครื่องสับและโม่ให้ละเอียด แล้วปล่อยให้เนื้อเยื่อที่ได้ตกตะกอนในน้ำ ในขั้นนี้จะได้เป็นของเหลวซึ่งประกอบไปด้วยน้ำแป้งและกากมันปนอยู่บ้าง
- 5) กรองของเหลวที่ได้ เพื่อแยกน้ำแป้งและกากมันออกจากกัน ซึ่งกากมันที่ได้ยังมีเปอร์เซ็นต์แป้งอยู่บ้างจึงสามารถนำไปทำอาหารสัตว์ได้
- 6) ทำให้แป้งตกตะกอน ซึ่งอาจใช้วิธีการตกตะกอนในถังไม้ เมื่อปล่อยให้ น้ำแป้งไหลอย่างช้าๆ จากตอนบน เม็ดแป้งก็จะ

ตกตะกอนไปเรื่อยๆ

- 7) แป้งชั้นที่ได้จะถูกผึ่งแดดให้แห้ง
- 8) นำแป้งที่แห้งสนิทมาบดให้ละเอียด
- 9) บรรจุถุงจำหน่าย

ข) Tapioca starch เป็นกรรมวิธีการผลิตแป้งมันสำปะหลังที่โรงงานขนาดใหญ่และโรงงานขนาดกลางใช้กันอยู่ โดยใช้ระบบแรงเหวี่ยง และทำการแยกโปรตีนด้วยเครื่อง Decanter เสร็จแล้วทำการแยกน้ำแป้งด้วยเครื่อง Centrifuge แล้วทำการอบแห้งด้วยเตาน้ำมัน จึงทำให้ได้แป้งบริสุทธิ์ คุณภาพดี และใช้เวลาในการผลิตที่น้อย ซึ่งกระบวนการผลิตดังกล่าวมีขั้นตอนการผลิต 9 ขั้นตอน คือ

- 1) ชั่งน้ำหนักและวัดเปอร์เซ็นต์แป้ง
- 2) ส่งเข้าเครื่องร่อน เพื่อทำการร่อนดินทรายออก
- 3) ส่งเข้าเครื่องปอกเปลือกและล้างในเครื่องเดียวกัน
- 4) นำหัวมันสดที่ล้างสะอาดแล้วเข้าเครื่อง मोละเอียด จากนั้นส่งเข้าเครื่องแยกกากออกจากน้ำแป้ง ซึ่งกากของหัวมันที่ได้จะถูกส่งไปยังลานตาก
- 5) นำน้ำแป้งที่ได้มาฟอกด้วยกำมะถัน เพื่อฟอกและขจัดยางมันให้แป้งบริสุทธิ์ยิ่งขึ้น
- 6) แยกน้ำแป้งออกจากแป้งโดยเครื่องสลัดแห้งระบบแรงเหวี่ยง
- 7) อบให้แห้งด้วยความร้อนโดยใช้ท่อลมร้อน
- 8) แป้งที่อบแห้งแล้วจะถูกนำมาตีให้แตกตัวเป็นผง
- 9) นำแป้งที่แห้งสนิทและแตกตัวเป็นผงแล้วเข้าเครื่องร่อนเอาส่วนที่หยาบออกไปและบรรจุถุงจำหน่าย [11]

#### อุตสาหกรรมที่ใช้แป้งมันสำปะหลังเป็นวัตถุดิบ

การนำแป้งมันสำปะหลังไปใช้ประโยชน์พอจำแนกได้เป็น 2 ประเภท [12]

ก) แป้งมันที่ใช้ในอุตสาหกรรมบริโภค ส่วนใหญ่อยู่ในรูปอาหารสำเร็จรูป เนื่องจากแป้งมันมีคุณสมบัติพิเศษ ในการช่วยทำให้เกิดความเข้มข้น การแข็งตัว การยึดเกาะ รวมทั้งมีความสามารถในการรักษาคุณภาพของน้ำในการทำอาหารต่างๆ ได้เป็นอย่างดี ซึ่งอุตสาหกรรมอาหารที่สามารถนำแป้งมันไปใช้ได้แก่ อุตสาหกรรมทำซุ๊ป ลูกกวาด ขนมพุดดิ้ง ใส้กรอก ทำขนมปัง ไอศกรีม อุตสาหกรรมเส้นก๋วยเตี๋ยว วุ้นเส้น และยังใช้เป็นส่วนผสมในการทำยา

นอกจากนี้ ยังสามารถนำไปใช้ในอุตสาหกรรมผลิตผงชูรสและอุตสาหกรรมกลูโคส ฟรุคโตส ซึ่งนำไปใช้ในการผลิต น้ำอัดลม และอาหารกระป๋อง เป็นต้น

บ) แป้งที่ใช้ในอุตสาหกรรมอุปโภค แป้งมันสำปะหลังที่ส่งออกของไทย ส่วนใหญ่เป็นแป้งที่ใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น อุตสาหกรรมกระดาษ อุตสาหกรรมสิ่งทอ อุตสาหกรรมการทำกาว อุตสาหกรรมไม้อัด อุตสาหกรรมผลิตแอลกอฮอล์ เป็นต้น

#### อนาคตผลิตภัณฑ์แป้งมันสำปะหลัง

เป็นที่ทราบกันดีแป้งที่มาจากสายพันธุ์ที่ต่างกันก็จะมีสมบัติที่แตกต่างกันไป ดังนั้นจึงมีการปรับปรุงพันธุ์ โดยกรรมวิธีต่างๆ เช่น การใช้วิธีทางพันธุวิศวกรรม รวมทั้งการตัดแปรโดยใช้กระบวนการกายภาพและเคมี เพื่อปรับเปลี่ยนสมบัติของแป้งดิบให้เหมาะสมต่อการใช้งาน เช่น crosslinked starch, waxy maize starch และ amylo maize starch รวมถึงการพัฒนาให้ได้ผลิตภัณฑ์ชนิดใหม่ เช่น maltodextrin, cyclodextrin และ thermoplastic starch เป็นต้น นอกจากนี้ช่วยแก้ปัญหาการใช้ประโยชน์ของแป้งดิบแล้ว ยังช่วยเพิ่มแนวทางในการใช้ประโยชน์ของแป้ง โดยทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณสมบัติที่หลากหลายมากขึ้น และอาจใช้ทดแทนสารชนิดอื่นๆ ที่มีราคาแพงกว่าได้ เช่น gum และ carboxy methyl cellulose เป็นต้น ขณะเดียวกันการใช้ประโยชน์ของแป้งตัดแปร สำหรับใช้เป็นส่วนผสมในอาหารผงสำเร็จรูป เพื่อเป็นตัวเพิ่มเนื้อสัมผัสและความหนืด เช่น แป้งพรีเจลาติไนซ์ และยังมีการผสมในเครื่องคั้นเพื่อทำหน้าที่เป็นสารอิมัลซิไฟเออร์ เช่น capsul และ N-lok ของบริษัท National Starch & Chemical Co. ซึ่งนั่นเป็นการใช้สารปรุงแต่งรสผสมกับแป้งที่มีหมู่ lipophilic นอกจากนี้แป้ง lipophilic ยังใช้เป็นสาร encapsulation เพื่อเป็นตัวจับกลืนรสต่างๆ ได้ [13]

สำหรับอุตสาหกรรมยา การผลิตแป้งตัดแปรส่วนใหญ่มุ่งนำไปใช้เป็น filler/binder ในการผลิตยาเม็ดโดยวิธี Direct compression โดยวิธีการตัดแปรแป้งมีทั้งวิธีการกายภาพ เช่น การคัดขนาดโดย wet sieving technique หรือใช้ air classification technique การบด การใช้ความร้อน ส่วนวิธีการเคมี เช่น esterification หรือ etherification ได้แก่ การผลิต polyacryl starch, hydroxyethyl starch, sodium carboxymethyl starch รวมทั้งการทำ crosslinked starch derivative เพื่อใช้เป็น disintegrant ในการผลิตยาเม็ดและแคปซูล

สำหรับอุตสาหกรรมพลาสติก ยังมีการนำแป้งมาทำเป็นพลาสติกที่ย่อยสลายง่ายเนื่องจากแป้งสามารถย่อยสลายได้เร็วและมีราคาถูกเมื่อเทียบกับวัสดุสังเคราะห์โดยทั่วไป แต่ในช่วงแรกแป้งมักถูกนำมาใช้เป็นสารตัวเติม โดยจะทำการผสมกับพอลิเมอร์สังเคราะห์เพื่อวัตถุประสงค์ในการเพิ่มความสามารถในการย่อยสลายได้ทางชีวภาพ โดยมีอัตราส่วนในการเติมแป้งอยู่ที่ประมาณ 5-30% โดยน้ำหนัก ซึ่งส่วนใหญ่ในการเตรียมผลิตภัณฑ์พลาสติกดังกล่าวมัก

ต้องมีการใส่สาร compatibilizer เพื่อช่วยทำให้แป้งกระจายตัวและผสมเข้ากับพอลิเมอร์สังเคราะห์ ได้ดียิ่งขึ้น แต่อย่างไรก็ตามพลาสติกที่เตรียมขึ้นโดยวิธีนี้ยังมีอัตราการย่อยสลายทางชีวภาพที่ไม่สูงนัก ซึ่งต่อมามีความพยายามที่จะเตรียมพลาสติกที่มีแป้งเป็นองค์ประกอบหลัก โดยพลาสติกดังกล่าวจะต้องมีแป้งเป็นส่วนผสมอยู่ไม่น้อยกว่าร้อยละ 60 เพื่อให้มีความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพที่สูง โดยอาจมีองค์ประกอบอื่นๆ เช่น พลาสติกไซเซออร์ สารตัวเติม สารเสริมแรง หรือพอลิเมอร์ชนิดอื่น เช่น polycaprolactone polylactic acid polyvinyl alcohol เป็นต้น ทั้งนี้เพื่อช่วยทำให้การขึ้นรูปและสมบัติของผลิตภัณฑ์พลาสติกที่ได้เป็นไปตามที่ความต้องการมากขึ้น ซึ่งผลิตภัณฑ์จากพลาสติกกลุ่มนี้มีความสามารถในการย่อยสลายได้ทางชีวภาพที่สูงกว่าพลาสติกในกลุ่มแรก นอกจากนั้นผลิตภัณฑ์ที่มีแป้งเป็นพอลิเมอร์องค์ประกอบหลัก เมื่อทำการศึกษาประเมินวงจรชีวิต (Life Cycle Assessment, LCA) และการศึกษาการปลดปล่อย green house gas (GHG emission) พบว่า resin ของ thermoplastic starch และพอลิเมอร์ผสมของ thermoplastic starch จะมีปริมาณการใช้พลังงานและการปลดปล่อย green house gas ที่น้อยลงเมื่อเทียบกับพอลิเมอร์ที่เตรียมจากปิโตรเลียม [14]

เมื่อพิจารณาถึงการผลิตผลิตภัณฑ์พลาสติกจากแป้งในประเทศไทย พบว่าใน ส่วนภาครัฐ ได้มีการผลิตภัณฑ์ในชื่อ KU-Green ซึ่งเป็นการพัฒนาจากนักวิจัยของ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ และยังได้รับการรับรองสิทธิบัตรของผลิตภัณฑ์จากประเทศ สหรัฐอเมริกา ส่วนทางภาคเอกชน ได้แก่ บริษัท BIOFORM Jassy Creation และบริษัท Biodegradation Package เป็นต้น โดยที่ทั้งสองบริษัทมุ่งเน้นการผลิตภาชนะบรรจุอาหารแบบใช้ครั้งเดียว เช่น จาน ชาม ถาด และแก้วน้ำ โดยใช้วัตถุดิบหลักเป็นแป้งมันสำปะหลัง

#### การเตรียม thermoplastic starch

เมื่อพิจารณาจากโครงสร้างโมเลกุลของพอลิเมอร์องค์ประกอบของแป้งแล้ว แป้งน่าจะมีสมบัติเป็นพอลิเมอร์แบบเทอร์โมพลาสติก แต่เนื่องจากในแต่ละ anhydroglucose unit ซึ่งเป็นหน่วยซ้ำของโมเลกุลอะไมโลสและอะไมโลเพกติน ก็ประกอบไปด้วยหมู่ hydroxyl ถึง 3 หมู่ ทำให้หมู่ hydroxyl ดังกล่าวสามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนกับหมู่ hydroxyl ข้างเคียง จึงทำให้แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลอะไมโลสและอะไมโลเพกตินมีค่าสูงมาก ดังนั้นในการขึ้นรูปแป้งถ้าหากไม่มีการเติมสาร plasticizer จะพบว่าเมื่อมีการให้ความร้อนเพิ่มมากขึ้นเรื่อยๆ แทนที่จะทำให้โมเลกุลพอลิเมอร์องค์ประกอบในแป้งสามารถเคลื่อนที่ผ่านซึ่งกันและกันได้แต่กลับทำให้โมเลกุลของพอลิเมอร์ในแป้งเกิดการสลายตัวแทน ซึ่งเป็นการแสดงสมบัติของพอลิเมอร์แบบเทอร์โมเซต

การเปลี่ยนแปลงให้มีสมบัติเป็นเทอร์โมพลาสติกนั้นสามารถทำได้โดยการเติมสารประเภท plasticizer เพื่อทำหน้าที่ลดแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุล ซึ่งโมเลกุลของ plasticizer จะไปสร้างพันธะไฮโดรเจนกับหมู่ hydroxyl ของโมเลกุลอะไมโลสและอะไมโลเพกตินเป็นผลทำให้พันธะที่เกิดขึ้นระหว่างโมเลกุลอะไมโลสและอะไมโลเพกตินลดน้อยลง ดังนั้นโมเลกุลของอะไมโลส หรืออะไมโลเพกติน จึงสามารถเคลื่อนที่ผ่านกันได้ง่ายขึ้นโดยใช้พลังงานลดลง [15]

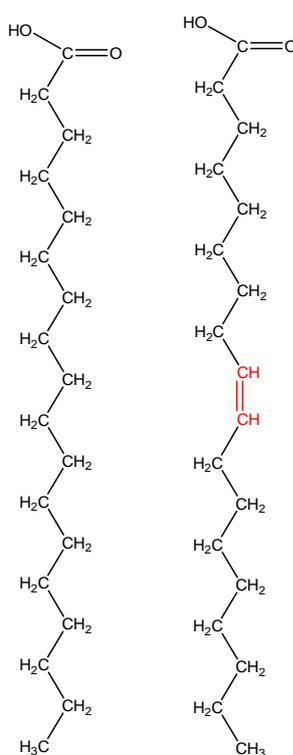
Plasticizer ที่นิยมนำมาใช้ในการเตรียม thermoplastic starch มากที่สุดคือ กลีเซอรอล แต่การใช้กลีเซอรอลเป็น plasticizer ก็มีข้อด้อยอยู่บ้าง เช่น เมื่อนำ thermoplastic starch มาใช้งานในสถานะที่มีความชื้นสูงเป็นระยะเวลานาน จะเกิดปรากฏการณ์ retrogradation ขึ้นเนื่องจากความแข็งแรงของพันธะไฮโดรเจนระหว่างกลีเซอรอลกับโมเลกุลของแป้งนั้นไม่สูงมากนัก อย่างไรก็ตามการใช้กลีเซอรอลก็มีข้อดีต่อการเตรียม bioplastic materials เช่น ราคาไม่สูงมากนัก และยังมีความปลอดภัยสูงเมื่อเทียบกับ plasticizer ชนิดอื่นๆ และยังมีส่วนช่วยในการขึ้นรูปขณะเดียวกัน Thermoplastic starch ที่เตรียมจากแป้งนั้นก็ยังมีข้อจำกัดที่สำคัญคือ Thermoplastic starch สามารถดูดซับความชื้นได้ง่ายและรวดเร็ว ซึ่งจากการดูดซับความชื้นของ Thermoplastic starch ก็ยังส่งผลทำให้สมบัติเชิงกลลดลงตามไปด้วย ทั้งนี้เนื่องจากแป้งเป็นพอลิเมอร์ที่ชอบน้ำ เพราะมี hydroxyl groups อยู่มาก จึงมีความเป็น hydrophilic สูง ดังนั้นจึงเป็นข้อจำกัดในการนำขึ้นงาน Thermoplastic starch ไปใช้งานจริง อย่างไรก็ตามก็ได้มีการศึกษาการปรับปรุงสมบัติดังกล่าว ในหลากหลายวิธี เช่น ทำการปรับปรุงโครงสร้างของ Thermoplastic starch ให้มีความเป็น hydrophobic มากขึ้น หรือ ทำการปรับปรุง Thermoplastic starch โดยการเคลือบสารบางอย่างที่มีความเป็น hydrophobic ที่มาก ทั้งนี้เมื่อพิจารณาถึงกระบวนการปรับปรุงสมบัติดังกล่าวโดยทั่วไปแล้วจะมีความนิยมการปรับปรุงด้วยการเคลือบสารลงบน Thermoplastic starch เนื่องจากเป็นกระบวนการที่ง่าย สะดวก ค่าใช้จ่ายไม่แพง สำหรับวัตถุดิบที่ใช้ ก็หาง่าย เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม และสามารถย่อยสลายได้ด้วยกระบวนการทางชีวภาพ ซึ่งจัดได้ว่ากระบวนการปรับปรุงดังกล่าวมีความคุ้มค่าทางเศรษฐกิจและไม่ก่อให้เกิดปัญหาให้กับสิ่งแวดล้อม

#### ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับกรดไขมัน

กรดไขมันเป็นกรดที่มีจำนวนคาร์บอนในสายโซ่โมเลกุลตั้งแต่ 4-24 อะตอม โดยที่ปลายอีกด้านหนึ่งจะมีหมู่คาร์บอกซิล (carboxyl group หรือ COOH) อยู่ด้วย กรดไขมันที่พบในลิพิดของพืชและสัตว์ชั้นสูงมีจำนวนคาร์บอนอะตอมเป็นเลขคู่อยู่ระหว่าง 14-22 คาร์บอนอะตอม โดยเฉพาะกรดไขมันที่มีความยาวคาร์บอนอะตอม 16 และ 18 อะตอม จะพบมากที่สุด ซึ่งอาจเป็นกรดไขมันที่อิ่มตัว หรือเป็นโครงสร้างของไฮโดรคาร์บอนที่ไม่มีพันธะคู่ (saturated fatty acid) สำหรับกรดไขมันที่ไม่อิ่มตัวมีหลายชนิด เช่น กรดไขมันที่ไม่อิ่มตัวที่มีพันธะคู่ 1 พันธะ

(monounsaturated fatty acid) และกรดไขมันที่ไม่อิ่มตัวที่มีพันธะคู่มากกว่า 1 พันธะ (polyunsaturated fatty acid) ซึ่งกรดไขมันแต่ละชนิดที่พบในเซลล์จะไม่อยู่ในรูปอิสระแต่จะพบอยู่รวมกันเป็นลิพิดที่ยึดเหนี่ยวกันด้วยพันธะโควาเลนต์ซึ่งสามารถถูกสลายได้ด้วยเอนไซม์หรือปฏิกิริยาทางเคมี กรดไขมันสามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภท [16]

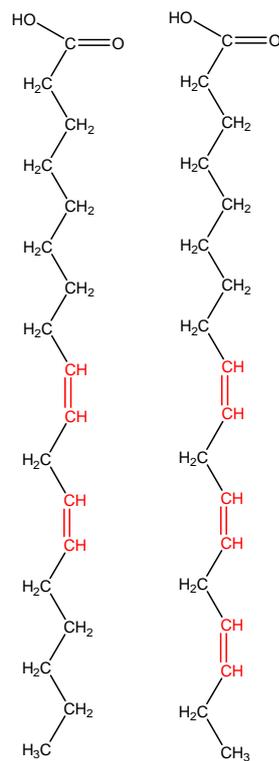
ก) กรดไขมันที่ไม่จำเป็น (nonessential fatty acid) คือกรดไขมันที่ร่างกายมนุษย์และสัตว์สามารถสังเคราะห์ขึ้นได้เอง เช่น กรดปาล์มิโตเลอิก (palmitoleic acid) และกรดโอเลอิก (oleic acid) พบมากที่สุดไขมันสัตว์โดยสังเคราะห์จาก CoA เอสเตอร์ของกรดไขมันอิ่มตัวที่ดับและเนื้อเยื่อไขมัน



Stearic acid      Oleic acid

ภาพที่ 3 ตัวอย่างกรดไขมันที่ไม่จำเป็น

ข) กรดไขมันจำเป็น (essential fatty acid, EFA) คือ กรดไขมันที่ร่างกายมนุษย์ไม่สามารถสังเคราะห์ขึ้นได้เอง โดยที่กรดไขมันดังกล่าวมีความสำคัญต่อระบบเมตาบอลิซึมซึ่งได้แก่ กรดลิโนเลอิก (linoleic acid) กรดลิโนเลนิก (linolenic acid) และกรดอะราคิโดนิก (arachidonic acid) โดยส่วนใหญ่จะเป็นกรดไขมันในกลุ่มโอเมกา-3 หรือ โอเมกา-6 และพบมากในน้ำมันปลาและในน้ำมันพืชยกเว้นน้ำมันมะพร้าว



Linoleic acid      Linolenic acid

ภาพที่ 4 ตัวอย่างกรดไขมันที่จำเป็นต่อร่างกาย

ตารางที่ 4 ชนิดและปริมาณของกรดไขมันที่มีอยู่ในน้ำมันประเภทต่างๆ [17]

Fatty acid	Plam oil %	Soybean oil%	Sunflower oil%	Canola oil % <sup>1</sup>
Palmitic acid	39	12	6	-
Stearic acid	5	4	4	7
Oleic acid	45	24	42	61
Linoleic acid	9	53	47	21
Linolenic acid	-	7	1	11
Other	2	-	-	-

หมายเหตุ<sup>1</sup> จากบริษัท POS pilot plant corporation ประเทศแคนาดา

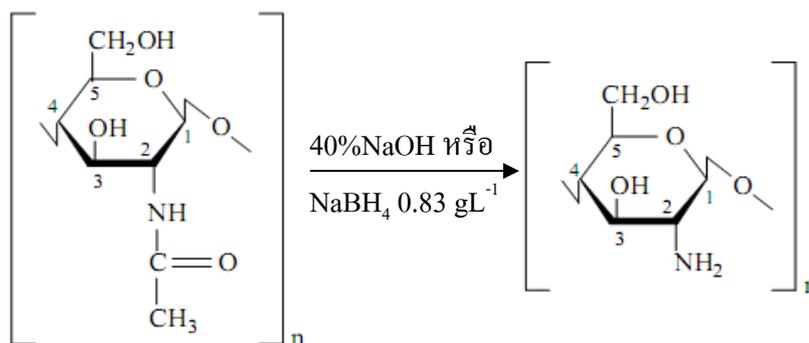
### คุณสมบัติของกรดไขมัน

- 1) กรดไขมันในสัตว์ ยกเว้นปลาจะมีความอิ่มตัวสูงและมีโคเลสเตอรอล ส่วนกรดไขมันในพืชยกเว้นน้ำมันมะพร้าว มีความอิ่มตัวต่ำและไม่มีโคเลสเตอรอล
- 2) พันธะคู่ในกรดไขมันไม่อิ่มตัวจะอยู่ในคอนฟิเจอร์ชันแบบซิส ถ้ามีตั้งแต่สองพันธะขึ้นไปจะเป็นแบบนอนคอนจูเกต (nonconjugated double bond,  $-\text{CH}=\text{CH}-\text{CH}_2-\text{CH}=\text{CH}-$ ) ซึ่งมีหมู่เมธิลีน ( $\text{CH}_2$ ) คั่นกลาง
- 3) กรดไขมันไม่อิ่มตัวมีจุดหลอมเหลวต่ำกว่ากรดไขมันอิ่มตัว ซึ่งจุดหลอมเหลวของกรดไขมันสูงขึ้นเมื่อความยาวสายโซ่เพิ่มขึ้น
- 4) กรดไขมันอิ่มตัวที่มีเฉพาะพันธะเดี่ยวจะมีการหมุนอย่างอิสระ (freedom of rotation) ทำให้มีโครงสร้างแบบซิกแซกในแนวตรง ส่วนกรดไขมันไม่อิ่มตัวมีพันธะคู่ที่หมุนไม่ได้ทำให้สายโซ่แข็งเกร็งและมีคอนฟิเจอร์ชันแบบซิส
- 5) กรดไขมันที่มีสายโซ่ยาว  $\text{C}_{16}-\text{C}_{18}$  ไม่สามารถละลายน้ำได้
- 6) กรดไขมันไม่สามารถดูดแสงในช่วง visible light และ near ultraviolet light ได้แต่ถ้าใช้โปแทสเซียมไฮดรอกไซด์ และให้ความร้อนกับกรดไขมันไม่อิ่มตัวที่มีพันธะคู่มากกว่า 1 พันธะสามารถเปลี่ยนพันธะคู่ให้เป็นแบบconjugated double bond ( $-\text{CH}=\text{CH}-\text{CH}=\text{CH}-$ ) ซึ่งสามารถดูดกลืนแสงได้ในช่วงคลื่นแสง 230-260 nm จึงใช้เป็นวิธีหาปริมาณของกรดไขมันไม่อิ่มตัวที่มีพันธะคู่มากกว่า 1 พันธะได้
- 7) ฮาโลเจน (halogen) เช่น ไอโอดีน หรือ คลอรีน สามารถเติมลงในพันธะคู่ของกรดไขมันไม่อิ่มตัวได้ จึงใช้วิธีนี้หาจำนวนพันธะคู่ในกรดไขมันหรือลิพิดได้

### ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับไลโคซาน

ไลโคซานเป็นสารจากธรรมชาติที่มีลักษณะโดดเด่นเฉพาะตัวคือเป็นวัสดุที่สามารถถูกย่อยสลายได้ด้วยกระบวนการทางชีวภาพ (Biodegradable materials) จึงมีความปลอดภัยในการนำมาใช้กับมนุษย์และเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม ขณะเดียวกันไลโคซานเป็นอนุพันธ์ชนิดหนึ่งของไคติน ซึ่งสามารถพบได้ในสัตว์จำพวก กุ้ง ปู แมลงและเชื้อรา โดยจะพบสารเหล่านี้บริเวณเปลือกกระดองแข็งและส่วนขาที่เป็นปล้องๆ [18]

ไลโคซานได้จากปฏิกิริยาการดึงหมู่ acetyl group ของไคตินออกไป เรียกว่า ปฏิกิริยา Deacetylation ทำให้โมเลกุลเดี่ยวของไคตินที่เคยเป็น N-acetyl glucosamine ถูกเปลี่ยนเป็นหมู่ glucosamine การหายไปของหมู่ acetyl จึงทำให้ไลโคซานมีส่วนของโมเลกุลที่มีความว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยา คือ หมู่ amino ( $-\text{NH}_2$ ) ที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 2



ภาพที่ 5 ปฏิกิริยา deacetylation [19]

### คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของไคโตซาน

1) การละลาย (solubility) ไคโตซานไม่ละลายน้ำ ต่างและตัวทำละลายอินทรีย์ แต่สามารถละลายได้ในสารละลายที่เป็นกรดอินทรีย์

2) ความหนืด (viscosity) โดยที่ค่าความหนืดจะขึ้นอยู่กับชนิดของตัวทำละลาย และ pH ที่เปลี่ยนแปลง เช่น ความหนืดของไคโตซานในกรดอะซิติกจะเพิ่มขึ้นเมื่อสารละลายมีค่า pH ลดลงในขณะความหนืดของไคโตซานในกรดไฮโดรคลอริกจะเพิ่มขึ้นเมื่อ pH ของสารละลายเพิ่มขึ้น

3) ไคโตซานสามารถยับยั้งการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ได้ ซึ่งมีการยับยั้งการเจริญเติบโตมีอยู่หลายกลไก กลไกแรกไคโตซานจะทำหน้าที่ในการจับไอออนโลหะ และแทรกตัวผ่านเข้าไปในเซลล์ของจุลินทรีย์ ซึ่งขัดขวางการดูดซับและการสร้างอาหาร (โปรตีน) ของจุลินทรีย์ ส่วนกลไกที่สอง จะอาศัยประจุบวกบนสายโซ่ของไคโตซาน ซึ่งจะเข้าไปจับกับผนังเซลล์ของจุลินทรีย์ทำให้เกิดช่องหรือโพรงที่ผนังเซลล์รั่ว จึงทำให้เซลล์เกิดการสูญเสียน้ำ โปรตีนและสารประกอบที่สำคัญ ท้ายที่สุดเซลล์ก็จะตาย ส่วนกลไกสุดท้ายไคโตซานจะทำให้เกิดการตกตะกอน ของจุลินทรีย์ ดังนั้นจุลินทรีย์จะไม่สามารถกระจายตัวแล้วแพร่ออกไปได้

### ลักษณะการเสื่อมสลายของไคโตซาน

ไคโตซานก็เหมือนกับพอลิเมอร์หรือพอลิแซ็กคาไรด์อื่นทั่วไป คือ เมื่อเกิดการเสื่อมสลายจะให้สายโซ่โมเลกุลที่สั้นลงเป็น โอลิโกเมอร์ หรือโอลิโกแซ็กคาไรด์ และจะเป็นหน่วยย่อยที่เล็กที่สุดที่เรียกว่า โมโนเมอร์ หรือ โมโนแซ็กคาไรด์

โอลิโกเมอร์หรือโอลิโกแซ็กคาไรด์ของไคตินและไคโตซาน คือ N-acetylchitooligosaccharide และ chitooligosaccharide ตามลำดับ ส่วน โมโนเมอร์ หรือ โมโนแซ็กคาไรด์ของไคตินและไคโตซาน คือ N-acetyl-D-glucosamine และ D-glucosamine ตามลำดับ ซึ่งการเสื่อมสลายของไคโตซานสามารถเสื่อมสลายได้ดังนี้ [20]

ก) การสลายด้วยกรด ซึ่งการเสื่อมสลายของสายโซ่โพลีเมอร์ของไคโตซานด้วยกรดจะเป็นแบบสุ่ม (random) ซึ่งผลิตภัณฑ์ที่ได้คือ โอลิโกเมอร์ขนาดต่างๆ รวมทั้งมอนอเมอร์ด้วย โดยที่ผลิตภัณฑ์ที่ได้ขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ เป็นสำคัญ ได้แก่ ชนิดของกรด เวลา อุณหภูมิ ชนิดของพันธะในสายโซ่โพลีเมอร์ ชนิดของพอลิเมอร์ โดยไคตินจะสามารถต้านทานต่อการเสื่อมสลายโดยกรดได้ดีกว่าไคโตซาน

ข) การสลายด้วยด่าง ซึ่งการเสื่อมสลายของสายโซ่โพลีเมอร์ของไคโตซานในด่างจะเริ่มจากปลายสุดของสายโซ่โพลีเมอร์ และการสลายแบบนี้เรียกอีกอย่างหนึ่งว่า peeling reaction

ค) การสลายด้วยการใช้เอนไซม์ จะมีข้อดีกว่าการใช้สารเคมี คือ มีความจำเพาะเจาะจงมากกว่าการใช้สารเคมี ซึ่งเอนไซม์ที่ใช้ในการย่อยสลายไคโตซาน ได้แก่ chitinase สามารถย่อยสลายสายโซ่โพลีเมอร์ของไคโตซาน ตรงตำแหน่งพันธะ 1,4 linkage และมีเอนไซม์ที่ทำหน้าที่คล้ายกับ Chitinase ได้แก่ N-acetyl-chitooligosaccharidase และ N-acetylhexosaminidase ที่ทำหน้าที่ย่อยสลาย N-acetyl-D-glucosamine ของไคติน โดยเริ่มจากปลายสายโซ่โพลีเมอร์

#### การนำไปใช้ประโยชน์ของไคโตซาน

ในด้านการแพทย์เนื่องจากไคตินและไคโตซานเป็นสารธรรมชาติ ดังนั้นร่างกายมนุษย์มักจะไม่มีต่อต้านและยังช่วยป้องกันการติดเชื้อ ซึ่งข้อดีต่างๆนี้เองจึงสามารถนำไคตินและไคโตซานมาใช้ในทางการแพทย์กันอย่างแพร่หลาย ได้แก่ วัสดุตกแต่งแผล ไคตินใช้ผสมในกาวติดเนื้อเยื่อ ไคโตซานใช้ในการปลดปล่อยยา และผิวหนังเทียม

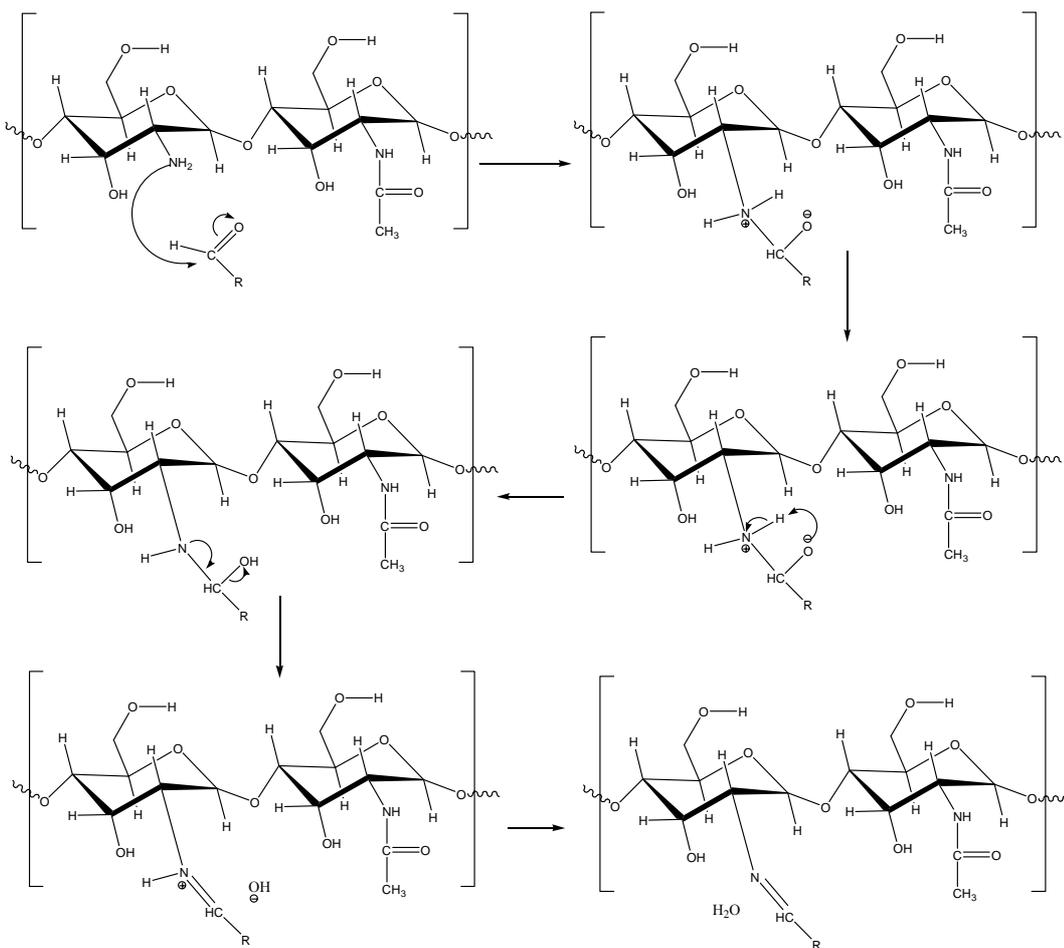
ขณะเดียวกัน ไคตินและไคโตซานเป็นอาหารเสริมที่ไม่ให้พลังงานและไม่มีการดูดซับในร่างกายเนื่องจากในร่างกายคนไม่มีเอนไซม์ที่ใช้สามารถย่อยสลายได้ ดังนั้นไคตินและไคโตซานจึงนิยมนำไปใช้ในอาหารสำหรับการควบคุมน้ำหนัก อีกทั้งไคตินและไคโตซานยังมีสมบัติเป็น barrier จึงมีการนำมาใช้ในเรื่องที่เกี่ยวข้องกับอาหาร เช่น สารช่วยเสถียรอาหาร (food stabilizer) สารตกแต่งในอาหาร อาหารเสริมควบคุมน้ำหนัก การถนอมรักษาอาหาร บรรจุภัณฑ์สำหรับอาหาร

สำหรับการใช้งานทางด้านเกษตรกรรมจะใช้ไคโตซานในการยับยั้งการเจริญเติบโตของแบคทีเรียและเชื้อรา เช่น การเคลือบเมล็ดพันธุ์ ส่วนผสมในอาหารสัตว์ ยาฆ่าแมลง ยาฆ่าไส้เดือน

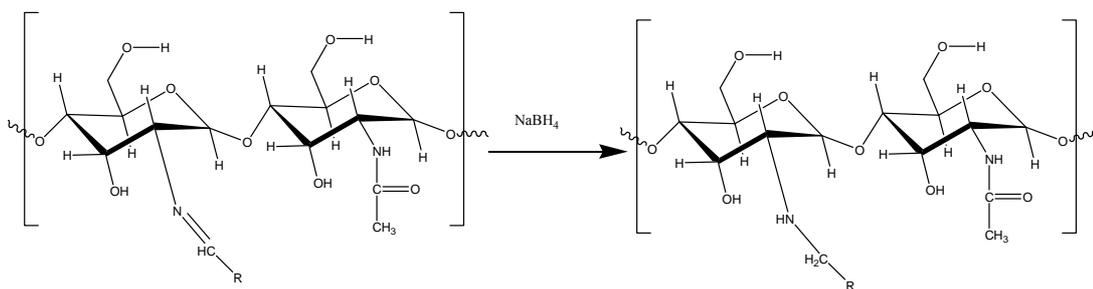
จากสมบัติการเป็นโพลีอิเล็กโทรไลต์และความสามารถในการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนของไคโตซานกับโลหะหนัก จึงถูกใช้ประโยชน์ในกระบวนการทำน้ำดื่ม เช่น การ recoveries ของโลหะหนัก การบำบัดน้ำเสียในสระว่ายน้ำในโรงงานอุตสาหกรรม

### การเตรียม N-alkyl chitosan และ quaternized chitosan [21]

การเตรียม N-alkyl chitosan สามารถเตรียมโดยผ่านปฏิกิริยา 2 ขั้นตอน โดยขั้นตอนแรกเป็นปฏิกิริยาการเติมของนิวคลีโอไฟล์ ซึ่งเป็นปฏิกิริยาระหว่างหมู่เอมีนของไคโตซานกับสารประกอบแอลดีไฮด์ได้เป็นสารประกอบอิมีน (imine) จากนั้นในขั้นตอนที่สองจะเป็นปฏิกิริยาระหว่าง imine หรือ Schiff's base กับ  $\text{NaBH}_4$  แล้วจะได้ผลิตภัณฑ์เป็นสาร N-alkyl chitosan โดยกลไกการเกิดปฏิกิริยามีดังนี้



ภาพที่ 6 กลไกขั้นแรกเป็นการทำปฏิกิริยาระหว่างไคโตซานกับสารประกอบแอลดีไฮด์

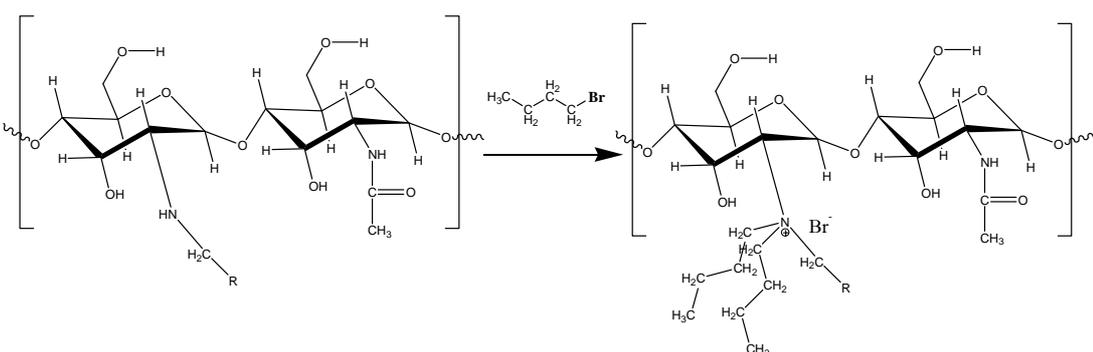


ภาพที่ 7 กลไกขั้นที่ 2 เป็นการเกิดปฏิกิริยาของ Schiff's base หรือ imine กับ  $\text{NaBH}_4$

การเตรียม quaternized chitosan สามารถเตรียมโดยผ่านปฏิกิริยาการแทนที่ไฮโดรเจนของหมู่เอมีน ซึ่งเป็นการทำปฏิกิริยาระหว่างหมู่เอมีนของ N-alkyl chitosan กับสารประกอบจำพวก alkyl halide ซึ่ง alkyl halide สามารถเรียงลำดับความว่องไวการเกิดปฏิกิริยาได้ดังนี้

alkyl iodide > alkyl bromide > alkyl chloride > alkyl fluoride

อย่างไรก็ตาม การเกิดปฏิกิริยา quaternization chitosan จะเกิดได้ดีหรือไม่นั้น นอกจากความว่องไวของ leaving group แล้วยังขึ้นอยู่กับความยาวของสายโซ่ (alkyl chain) หรือความกะกะของหมู่แทนที่ เช่น ถ้าหากหมู่แทนที่มีความกะกะสูง การเกิดปฏิกิริยาแทนที่ก็จะเกิดไม่สมบูรณ์หรือเกิดไม่ทุกตำแหน่งและในทำนองเดียวกัน ถ้าหากหมู่แทนที่มีความกะกะน้อย การเกิดปฏิกิริยาแทนที่ก็จะเกิดได้สมบูรณ์หรือเกิดได้ทุกตำแหน่ง โดยปฏิกิริยา quaternization ของ chitosan เป็นดังนี้



ภาพที่ 8 กลไกเกิดปฏิกิริยา quaternization ระหว่าง N-alkyl chitosan กับ n-butyl bromide

### บทที่ 3

#### วิธีการดำเนินงานวิจัย

##### สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

1. Acetic acid (LAB-SCAN: analytical reagent)
2. Anhydrous sodium sulfate (Fluka: purum, anhydrous,  $\geq 99.0\%$ )
3. 1-Bromobutane (Fluka: purum :  $\geq 98.0\%$ (GC))
4. 1-Bromoundecane (ALDRICH: 98%(GC))
5. 1-Butanol (Scharlau: reagent grade)
6. 1-Butyraldehyde (Fluka: purum :  $\geq 99.0\%$ (GC))
7. Cassava starch(Thaitum industry compony ,Thailand)
8. Canola oil (Sime darby edible products limited, Singapore)
9. Chitosan(Molecular weigth 700,000 g/mol,95%DD : seafresh chitosan company limited)
10. Ethanol (Union Intraco Co. ,Ltd: commercial grade)
11. Ether (J.T.Baker : Actual analytical)
12. Glycerol (UNIVAR Ajax Finechem: analytical reagent)
13. Hydrochloric acid (LAB-SCAN: 37% analytical reagent grade)
14. Hydrogen bromide (Fluka: purum :  $\geq 48.0\%$ )
15. Lithium aluminium hydride (Fluka: analytical reagent grade)
16. Magnesium nitrate (Scharlau: hexahydrate, reagent grade)
17. Methanol (Union Intraco Co. ,Ltd: commercial grade)
18. 1-Methyl-2-pyrrolidone (Fluka purum : 99% (GC))
19. Oleic acid (CASTO ERBA : analytical reagent grade)
20. Sodium borohydride (Fluka :analytical reagent grade)
21. Sodium chloride (LAB-SCAN: analytical reagent)
22. Sodium hydroxide (LAB-SCAN: analytical reagent)
23. Stearic acid (Fluka purum: 97.0% (GC))
24. Sulfuric acid (Merck puriss :51%)
25. Sun flower oil (Thai vegetable oil public company limited, Thailand)

26. Thionyl chloride (Merck puriss :  $\geq 99.0\%$ (GC))

27. Undecanal (ALDRICH: 97%(GC))

28. Undecylenic aldehyde (ALDRICH: 95%(GC))

### อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

1. เครื่องอบสุญญากาศ (BYBLE Vacuum oven VOS – 300SD)

2. เครื่องผสมภายใน (BRABENDER)

3. เครื่องขึ้นรูปแบบอัด (CARVER Model 2518 S/N2518-317)

4. Chamber ควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ด้วยเกลือ magnesium nitrate ( $Mg(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$ )

5. Universal testing machine (Loyd Instrument LR, load cell ขนาด 1 kN)

6. Impact testing (Zwick B5102.202, Izod Pendulum 4 J)

7. Fourier transform infrared spectrophotometer (Burker optic mbH: Vertex70, Germany)

8. Cross cut tester (Phynix cross cut tester)

### วิธีการดำเนินการวิจัย

#### การเตรียมแป้ง

1. อบแป้งในตู้อบสุญญากาศที่อุณหภูมิ  $60^{\circ}C$  เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

2. นำแป้งที่ผ่านการอบแล้วมาผสมกับกลีเซอรอลในถุงพอลิเอทิลีน โดยจะทำการผสมในอัตราส่วนของแป้งต่อกลีเซอรอล 75:25 ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้เตรียมแป้งและกลีเซอรอลที่มีน้ำหนักรวมกัน 50 กรัม โดยแบ่งเป็นแป้งที่มีน้ำหนัก 37.5 กรัมและกลีเซอรอล 12.5 กรัม จากนั้นจะทำการเขย่าถุงพอลิเอทิลีน ที่มีแป้งและกลีเซอรอลผสมเป็นเวลา 30 นาที เพื่อให้กลีเซอรอลกระจายตัวได้ดีในเนื้อแป้ง หลังจากนั้นจึงนำถุงพอลิเอทิลีนที่มีแป้งและกลีเซอรอลที่ผ่านการเขย่าแล้ว เก็บไว้ในเดซิเคเตอร์เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

#### การผสมแป้งที่เตรียมได้ในเครื่อง Internal mixer

1. นำแป้งกับกลีเซอรอลที่เตรียมทิ้งไว้ นำมาผสมอีกครั้งในเครื่อง internal mixer ซึ่งแสดงดังภาพที่ 9 โดยอุณหภูมิที่ใช้ในการผสม  $160^{\circ}C$  และใช้ความเร็วรอบสกรูในการผสม 60 รอบต่อนาที เป็นเวลา 6 นาที

2. แป้งที่ผ่านการผสมในเครื่อง internal mixer แล้ว จึงจะสามารถนำไปขึ้นรูปต่อได้



ภาพที่ 9 เครื่อง Internal mixer

### การขึ้นรูปชิ้นงานเทอร์โมพลาสติกสตาซ

1. นำแป้งที่ผ่านการผสมใน internal mixer มาบดด้วยเครื่องบด ซึ่งแสดงดังภาพที่ 10

2. การเตรียมชิ้นงานเทอร์โมพลาสติกสตาซ จะต้องนำแป้งที่ผ่านการบดแล้ว ซึ่งแสดงดังภาพที่ 11 มาใส่ในแม่พิมพ์ โดยจะต้องนำแผ่นใสชนิดทนความร้อนมาวางระหว่างแม่พิมพ์แผ่นที่ 1 และแผ่นที่ 2 เพื่อให้สามารถแกะชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์ได้ง่ายขึ้น จากนั้นทำการเติมแป้งที่ผ่านการบดแล้วลงในแม่พิมพ์จนเต็ม จากนั้นก็ปิดประกบด้วยแผ่นใสทนความร้อนและแม่พิมพ์แผ่นที่ 3 ตามลำดับ ซึ่งแสดงดังภาพที่ 12

3. การขึ้นรูปชิ้นงานเทอร์โมพลาสติกสตาซ จะใช้เครื่อง Compression molding ในการอัดเข้าแม่พิมพ์ ซึ่งแสดงดังภาพที่ 13 โดยในการอัดเข้าแม่พิมพ์จะมี 3 stage คือ

Stage 1; อุณหภูมิ 160°C แรงอัด 5000 psi เป็นเวลา 20 นาที

Stage 2; อุณหภูมิ 160°C แรงอัด 15000 psi เป็นเวลา 10 นาที

Stage 3; อุณหภูมิ 160°C แรงอัด 25000 psi เป็นเวลา 5 นาที

ขณะเดียวกันในการเก็บชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์ จะปล่อยให้แม่พิมพ์เย็นตัวลงเป็นเวลา 15 นาที



ภาพที่ 10 เครื่องบดเทอร์โมพลาสติกสตาซ



ภาพที่ 11 แป้งที่ผ่านการบดด้วยเครื่องบด



ภาพที่ 12 การเติมแป้งใสในแม่พิมพ์



ภาพที่ 13 เครื่อง Compression molding

### การสังเคราะห์สารเคลือบ

#### ก. การสกัดกรดไขมันจากน้ำมันพืช

- 1) เติมน้ำมันพืช 200 กรัม ลงในขวด three necked round bottom flask ขนาด 500 มิลลิลิตร จากนั้นนำน้ำมันพืชไปให้ความร้อนจนอุณหภูมิถึง 80 °C พร้อมทั้งทำการ feed gas N<sub>2</sub> และเติม 75 มิลลิลิตร 1 mol/L NaOH พร้อมทั้งกวนอย่างสม่ำเสมอเป็นเวลา 90 นาที
- 2) นำสารละลายดังกล่าวเทลงใน separatory funnel ขนาด 500 มิลลิลิตร จากนั้นทำการล้างด้วยน้ำอุ่น 2 ครั้ง ครั้งละ 200 มิลลิลิตร โดยทำการเขย่าเบาๆ จนเกิด emulsion จากนั้นทำการไขชั้นล่างทิ้ง
- 3) นำสารละลายชั้นบนมาเติม anhydrous sodium sulfate พร้อมทั้งเขย่า ประมาณ 5 นาที จากนั้นทำการกรอง แล้วทำการเก็บสารละลายไว้ในภาชนะที่เตรียมไว้
- 4) นำสารละลายเกลือของกรดไขมัน 200 กรัม เทลงในขวด three necked round bottom flask ขนาด 500 มิลลิลิตร
- 5) นำน้ำมันพืชไปให้ความร้อนจนอุณหภูมิถึง 80 °C พร้อมทั้งทำการ feed gas N<sub>2</sub> จากนั้นทำการเติม 1 mol/L HCl ปริมาตร 75 มิลลิลิตร พร้อมทั้งกวนอย่างสม่ำเสมอเป็นเวลา 90 นาที
- 6) ทำการกรอง แล้วทำการเก็บสารละลายไว้ในภาชนะที่เตรียมไว้

#### ข. การสังเคราะห์ N-alkyl chitosan [22]

- 1) ชั่งไคโตซาน 95%DD (700,000 g/mol) ปริมาณ 2 กรัม
- 2) เตรียมสารละลาย 1.0 %v/v acetic acid ปริมาตร 250 มิลลิลิตร ในขวด 500 มิลลิลิตร นำไคโตซานที่เตรียมไว้ใส่ในสารละลายกรด พร้อมทั้งทำการกวนจนละลายเป็นเนื้อเดียวกัน
- 3) เติมสารละลาย 9 ml ( 0.1 mol Aldehyde) พร้อมทั้งทำการกวนจนละลายเป็นเนื้อเดียวกันเป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นเติมสารละลาย 1 mol/L (ประมาณ 1 มิลลิลิตร) NaOH เพื่อปรับ pH ให้ได้ pH 4.5 จากนั้นทำการกวนจนละลายเป็นเนื้อเดียวกันเป็นเวลา 15 นาที
- 4) เติมสารละลาย 1.0 %w/v ( 25 มิลลิลิตร) NaBH<sub>4</sub> พร้อมทั้งทำการกวนเป็นเวลา 90 นาที จากนั้นทำการตกตะกอนตัวอย่างโดยการปรับ pH ให้ได้ pH 10 ด้วยสารละลาย 1 mol/L (ประมาณ 40 มิลลิลิตร) NaOH
- 5) นำตัวอย่างที่ตกตะกอนไปกรองและนำไปอบที่อุณหภูมิ 60°C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง จากนั้นนำไปทำการพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิค FTIR

### ก. การสังเคราะห์ Oleyl acid chloride จาก Oleic acid [23]

- 1) นำ 100 มิลลิลิตร oleic acid (0.32 mol) ใส่ลงใน three necked round bottom flask พร้อมทั้งทำการ feed gas  $N_2$  จากนั้นค่อยๆ เติม 3.5 มิลลิลิตร  $SOCl_2$  (0.48 mol) และทำการกวน ภายใต้อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 ชั่วโมง
- 2) ขณะเดียวกันจะต้องทำการป้องกันการปลดปล่อยก๊าซ  $HCl(g)$ ,  $SO_2(g)$  โดยต่อท่อระบายก๊าซที่ reflux condenser เพื่อให้ก๊าซไหลผ่านลงในปีกเกอร์ที่บรรจุสารละลาย 1.0 mol NaOH (ภายใต้อุณหภูมิ  $<10^\circ C$ )
- 3) เมื่อสิ้นสุดปฏิกิริยา นำสารผสมที่ได้ไปทำการกลั่น ภายใต้อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เพื่อกำจัด  $SOCl_2$  ที่เหลือจากการทำปฏิกิริยา

### ง. การสังเคราะห์ Octadecen-1-ol จาก Oleyl acid chloride [24]

- 1) ละลาย 0.569 กรัม  $LiAlH_4$  (0.015 mol) ใน ether 200 มิลลิลิตร เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นทำการเติม 10 มิลลิลิตร (Oleyl acid chloride) 0.030 mol ลงไปพร้อมทั้งทำการกวน ภายใต้อุณหภูมิต่ำเป็นเวลา 24 ชั่วโมง และเมื่อปฏิกิริยาสิ้นสุดลง ทำการเติม 0.1 mol NaOH ปริมาตร 100 มิลลิลิตร และเติม NaCl ลงไปเล็กน้อย
- 2) นำสารละลายผสมใส่ลงในกรวยแยก พร้อมทั้งเขย่าแล้วไขชั้นน้ำทิ้ง (เกลือโซเดียมโอเลอเตตและ โซเดียมครอไรด์) แล้วทำการล้างด้วยน้ำกลั่น 2 ครั้ง
- 3) เติม anhydrous  $Na_2SO_4$  ทิ้งไว้ เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
- 4) นำสารผสม (Octadecen-1-ol + anhydrous  $Na_2SO_4$ ) ไปทำการกรอง แล้วทำให้บริสุทธิ์อีกครั้งด้วยการกลั่นภายใต้อุณหภูมิ  $60^\circ C$  เพื่อทำการระเหยตัวทำละลายทิ้ง

### จ. การสังเคราะห์ Oleyl bromide จาก Octadecen-1-ol [25]

- 1) เติม HBr ปริมาตร 30 มิลลิลิตร ลงใน three necked round bottom flask พร้อมทั้งทำการ feed gas  $N_2$  จากนั้นค่อยๆ เติม Octadecen-1-ol 10 มิลลิลิตร และทำการกวน ภายใต้ อุณหภูมิ  $120^\circ C$  เป็นเวลา 4 ชั่วโมง
- 2) เติม 1.0%v/v  $H_2SO_4$  ปริมาตร 5 มิลลิลิตร จากนั้นทำปฏิกิริยาอีก 2 ชั่วโมง จากนั้นนำสารละลายผสมใส่ลงในกรวยแยก แล้วทำการล้างด้วยน้ำกลั่น 2 ครั้ง พร้อมทั้งเขย่าแล้วไขชั้นน้ำทิ้ง

### ฉ. การสังเคราะห์ Quaternized chitosan [26]

1) นำ N-Alkyl Chitosan ที่เตรียมได้ 2 กรัม ละลายในสารละลาย N-Methyl-2-pyrrolidone (NMP) 250 มิลลิลิตร พร้อมทั้งทำการกวนจนละลายเป็นเนื้อเดียวกัน ภายใต้ อุณหภูมิ 50 °C เป็นเวลา 48 ชั่วโมง

2) เติม alkyl bromide (bromobutane ปริมาตร 10 มิลลิลิตร) และเติม 1.0 M NaOH (ปริมาตร 9 มิลลิลิตร) และทำการกวน ภายใต้ อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

3) ทำการตกตะกอนตัวอย่างด้วย Acetone และนำไปอบที่อุณหภูมิ 60°C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง จากนั้นนำไปทำการพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิค FTIR

#### การเคลือบผิวหน้าชิ้นงาน

1. ทำการวัดขนาดชิ้นงานทั้งความกว้างและความหนาอย่างละ 3 ตำแหน่งแล้ว หาค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน โดยทำการเก็บข้อมูลขนาดของชิ้นงานทั้งก่อนและหลังการเคลือบ โดยแบ่งเป็นชิ้นงานที่ไม่ต้องทดสอบการดูดความชื้นและชิ้นงานที่ทำการทดสอบการดูดความชื้น

2. ทำการชั่งน้ำหนักชิ้นงานทั้งก่อนและหลังการเคลือบ โดยแบ่งเป็นชิ้นงานที่ไม่ต้องทดสอบความชื้นและชิ้นงานที่ทำการทดสอบการดูดความชื้น

3. การเคลือบผิวชิ้นงานเทอร์โมพลาสติกสตาซ จะสามารถแบ่งกลุ่มสารเคลือบผิวออกเป็น 2 กลุ่มได้แก่ สารเคลือบจากกรดไขมัน และสารเคลือบจากอนุพันธ์ของโคโนซาน เป็นต้น โดยสารเคลือบในแต่ละกลุ่มก็จะต้องใช้สภาวะการเคลือบที่แตกต่างกัน ซึ่งขึ้นอยู่กับสมบัติเฉพาะตัวของสารเคลือบ

#### ก. การเคลือบผิวหน้าชิ้นงานด้วยกรดสเตียริก

1) ทำการละลายกรดสเตียริก 10 กรัมในสารละลายเอทานอล 100 มิลลิลิตร ภายใต้ อุณหภูมิประมาณ 50 °C พร้อมกับมีทำการกวนอยู่ตลอดเวลา จนกระทั่งกรดสเตียริกละลายเป็นเนื้อเดียวกัน

2) นำชิ้นงานเทอร์โมพลาสติกสตาซจุ่มลงในสารละลายกรดสเตียริกเป็นเวลา 2 นาที จากนั้นนำชิ้นงานที่ได้ไปตากเป็นเวลา 15 นาที ซึ่งแสดงดังภาพที่ 14 จากนั้นนำชิ้นงานมาอบให้แห้งด้วยเครื่องอบสุญญากาศ ซึ่งจะแสดงดังภาพที่ 15 ภายใต้ อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

ข. การเคลือบผิวหน้าชิ้นงานด้วยกรดโอเลอิก

1) ทำการละลายกรดโอเลอิก 10 มิลลิลิตรในสารละลายเอทานอล 100 มิลลิลิตร ภายใต้อุณหภูมิประมาณ 50 °C พร้อมทั้งทำการกวนอยู่ตลอดเวลา จนกระทั่งกรดโอเลอิกละลายเป็นเนื้อเดียวกัน

2) นำชิ้นงานเทอร์โมพลาสติกสตาซุ่มลงในสารละลายกรดโอเลอิกเป็นเวลา 2 นาที แล้วนำชิ้นงานที่ได้ไปตากเป็นเวลา 15 นาที จากนั้น นำชิ้นงานมาอบให้แห้งด้วยเครื่องอบสูญญากาศภายใต้อุณหภูมิ 60 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

ค. การเคลือบผิวหน้าชิ้นงาน ด้วยสารเคลือบที่ได้จากกรดไขมันที่เตรียมจากน้ำมันดอกทานตะวัน ซึ่งจะมีสัดส่วนของกรดไขมันไม่อิ่มตัวอยู่ 90 %

1) ทำการละลายกรดไขมันที่เตรียมจากน้ำมันดอกทานตะวัน 10 มิลลิลิตรในสารละลายเอทานอล 100 มิลลิลิตร ภายใต้อุณหภูมิประมาณ 50 °C พร้อมทั้งทำการกวนอยู่ตลอดเวลา จนกระทั่งกรดไขมันละลายเป็นเนื้อเดียวกัน

2) นำชิ้นงานเทอร์โมพลาสติกสตาซุ่มลงในสารละลายกรดไขมันเป็นเวลา 2 นาที แล้วนำชิ้นงานที่ได้ไปตากเป็นเวลา 15 นาที จากนั้นนำชิ้นงานมาอบให้แห้งด้วยเครื่องอบสูญญากาศภายใต้อุณหภูมิ 60 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

ง. การเคลือบผิวหน้าชิ้นงาน ด้วยสารเคลือบที่ได้จากกรดไขมันที่เตรียมจากน้ำมันดอกคาโนล่าห์ ซึ่งจะมีสัดส่วนของกรดไขมันไม่อิ่มตัวอยู่ 93 %

1) ทำการละลายกรดไขมันที่เตรียมจากน้ำมันดอกคาโนล่าห์ 10 มิลลิลิตร ในสารละลายเอทานอล 100 มิลลิลิตร ภายใต้อุณหภูมิประมาณ 50 °C พร้อมทั้งทำการกวนอยู่ตลอดเวลา จนกระทั่งกรดไขมันละลายเป็นเนื้อเดียวกัน

2) นำชิ้นงานเทอร์โมพลาสติกสตาซุ่มลงในสารละลายกรดไขมันเป็นเวลา 2 นาที แล้วนำชิ้นงานที่ได้ไปตากเป็นเวลา 15 นาที จากนั้นนำชิ้นงานมาอบให้แห้งด้วยเครื่องอบสูญญากาศภายใต้อุณหภูมิ 60 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

จ. การเคลือบผิวหน้าชิ้นงาน ด้วย N-alkyl chitosan

1) ทำการละลาย N-alkyl chitosan 2 กรัมในสารละลายอีทานอล 100 มิลลิลิตร ภายใต้อุณหภูมิประมาณ 50 °C พร้อมทั้งทำการกวนอยู่ตลอดเวลา จนกระทั่งสารละลายเป็นเนื้อเดียวกัน

2) นำชิ้นงานเทอร์โมพลาสติกสตาซุ่มลงในสารละลายที่เตรียมได้เป็นเวลา 2 นาที แล้วนำชิ้นงานที่ได้ไปตากเป็นเวลา 15 นาที จากนั้นนำชิ้นงานมาอบให้แห้งด้วยเครื่องอบสูญญากาศภายใต้อุณหภูมิ 60 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

### ฉ. การเคลือบผิวหน้าชิ้นงาน ด้วย Quaternized chitosan

1) ทำการละลาย Quaternized chitosan 2 กรัมในสารละลายผสมระหว่างเมทานอลกับเอทานอลในสัดส่วน 150:100 มิลลิลิตร ภายใต้อุณหภูมิประมาณ 50 °C พร้อมกับทำการกวนอยู่ตลอดเวลา จนกระทั่งสารละลายเป็นเนื้อเดียวกัน

2) นำชิ้นงานเทอร์โมพลาสติกสตาซุ่มลงในสารละลายที่เตรียมได้เป็นเวลา 2 นาที แล้วนำชิ้นงานที่ได้ไปตากเป็นเวลา 15 นาที จากนั้นนำชิ้นงานมาอบให้แห้งด้วยเครื่องอบสุญญากาศภายใต้อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง



ภาพที่ 14 แสดงที่ตากชิ้นงาน



ภาพที่ 15 เครื่องอบสุญญากาศ

### การศึกษาการยึดติดของสารเคลือบ

1. ชั่งน้ำหนักและวัดความหนาของชิ้นงานเทอร์โมพลาสติกสตาซที่ยังไม่ผ่านการเคลือบผิว โดยจะทำการวัดค่า 3 ครั้ง แล้วหาค่าเฉลี่ย
2. นำชิ้นงานเทอร์โมพลาสติกสตาซไปเคลือบผิวด้วยสารเคลือบชนิดต่างๆ
3. ทำการชั่งน้ำหนักและวัดความหนาของชิ้นงานเทอร์โมพลาสติกสตาซที่ผ่านการเคลือบผิว โดยจะทำการวัดค่า 3 ครั้ง แล้วหาค่าเฉลี่ย
4. นำชิ้นงานเทอร์โมพลาสติกสตาซไปทดสอบการยึดติดของสารเคลือบ ตามมาตรฐาน ASTM D3359 โดยใช้เครื่องมือ cross cut tester กรีดบนพื้นผิวของชิ้นงานเทอร์โมพลาสติกสตาซ จากนั้นนำ adhesive tape ติดบริเวณที่กรีดให้แน่น จากนั้นจึงลอก adhesive tape ออก
5. นำชิ้นงานเทอร์โมพลาสติกสตาซที่ผ่านการทดสอบการยึดติดแล้วทำการชั่งน้ำหนักเพื่อเปรียบเทียบสมบัติการยึดติดของสารเคลือบผิว

### การเก็บชิ้นงานไว้ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 53%

1. เตรียมสารละลายของ Magnesium nitrate ( $Mg(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$ ) โดยนำ magnesium nitrate มาละลายน้ำกลั่นในบีกเกอร์จนอิ่มตัวยิ่งยวด จากนั้นเทสารละลายอิ่มตัวยิ่งยวดดังกล่าวลงใน Chamber พร้อมทั้งปิดฝา ก็จะได้ Chamber ที่มีความชื้นสัมพัทธ์ 53% ซึ่งจะแสดงดังภาพที่ 16
2. นำชิ้นงานที่เตรียมได้ข้างต้นวางลงบนตะแกรงลวดแล้วนำไปใส่ไว้ในภาชนะที่มีสารละลายอิ่มตัวยิ่งยวดของ Magnesium nitrate ( $Mg(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$ )
3. นำชิ้นงานที่อยู่ใน Chamber ออกมาชั่งน้ำหนักทุกวันตลอดระยะเวลา 15 วัน เพื่อศึกษา water sensibility ของชิ้นงาน TPS ที่เตรียมได้



ภาพที่ 16 ตู้ควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ 53%

### การพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิค Fourier Transform Infrared

สารเคลือบที่เตรียมได้จะต้องทำการพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิค Fourier Transform Infrared Spectroscopy (Burker optic mbH:Vertex70,Germany) ซึ่งเครื่อง FTIR ได้แสดงดังภาพที่ 17 เพื่อศึกษาหมู่ฟังก์ชันของสารเคลือบที่เคลือบบนผิวชิ้นงาน



ภาพที่ 17 แสดงเครื่อง Fourier Transform Infrared

### การศึกษสมบัติเชิงกลของชิ้นงาน TPS ที่เตรียมได้

#### ก. การศึกษสมบัติการทนแรงกระแทก แบบ Izod

1. ทำการวัดความกว้างและความหนาของชิ้นงาน
2. นำชิ้นงานไปทดสอบโดยทำการยึดชิ้นงานกับฐานของเครื่องทดสอบให้แน่น หลังจากนั้นทำการทดสอบชิ้นงาน โดยการปล่อยให้ pendulum ตกลงมากระแทกชิ้นงาน
3. บันทึกค่าพลังงานที่ได้ (mJ) และทำการทดสอบเช่นเดียวกันนี้ในทุกๆ ชิ้นงาน

4. คำนวณค่าพลังงานเฉลี่ยต่อพื้นที่ ( $\text{kJ/mm}^2$ )
5. หาค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของชุดข้อมูลดังกล่าว
6. เปรียบเทียบค่า impact strength ของชิ้นงานที่ไม่มีการเคลือบผิวด้วยสารใดๆ เปรียบเทียบกับที่มีการเคลือบผิวด้วยกรดไขมันและที่เคลือบผิวด้วย N-alkyl chitosan และที่เคลือบผิวด้วย quaternized chitosan ขณะเดียวกันก็จะทำการเปรียบเทียบค่า impact strength กับชิ้นงานที่ผ่านทดสอบการดูดความชื้นและชิ้นงานที่ไม่ผ่านการทดสอบดูดความชื้น ซึ่งเครื่อง Impact testing ได้แสดงดังภาพที่ 18



ภาพที่ 18 เครื่อง Impact testing

#### ข. การศึกษาสมบัติการทนทานต่อการดึงยืด

1. วัดขนาดความกว้างและความหนาของชิ้นงาน tensile specimens ที่นำมาทดสอบโดยจะทำการวัดค่า 3 ครั้ง แล้วหาค่าเฉลี่ย
2. นำชิ้นงานที่เตรียมไว้ไปทดสอบแรงดึง โดยใช้ความเร็วในการดึงยืด 1 mm/min และใช้ load cell ขนาด 1 kN
3. บันทึกผลข้อมูลของค่า Young's modulus, tensile strength และ percentage strain at break และทำการทดสอบเช่นเดียวกันนี้กับทุกชิ้นงาน
4. หาค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของข้อมูลที่ได้
5. นำข้อมูลที่ได้มาศึกษาและเปรียบเทียบค่า Young's modulus, tensile strength และ percentage strain at break ของชิ้นงานเทอร์โมพลาสติกสตาซที่ไม่มีการเคลือบผิวด้วยสารใดๆเลย กับชิ้นงานเทอร์โมพลาสติกสตาซที่มีการเคลือบผิวด้วยกรดไขมันและชิ้นงานเทอร์โมพลาสติกสตาซที่เคลือบผิวด้วย N-alkyl chitosan และชิ้นงานเทอร์โมพลาสติกสตาซที่เคลือบผิวด้วย quaternized chitosan ขณะเดียวกันจะต้องทำการเปรียบเทียบค่า Young's modulus, tensile strength และ percentage strain at break กับชิ้นงานเทอร์โมพลาสติกสตาซที่ผ่านทดสอบการดูดความชื้นและชิ้นงานเทอร์โมพลาสติกสตาซที่ไม่ผ่านการทดสอบดูดความชื้น ซึ่งในการทดลองได้ใช้เครื่อง universal testing machine ซึ่งแสดงดังภาพที่ 19



ภาพที่ 19 เครื่อง universal testing machine

#### การศึกษาจุดคุ้มทุน [27]

การวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์ในส่วนการศึกษาจุดคุ้มทุนของการใช้สารเคลือบผิวชิ้นงานเทอร์โมพลาสติกสตาซ จะเป็นปัจจัยหนึ่งที่ใช้ในการตัดสินใจในการเลือกสารเคลือบผิวที่มีประสิทธิภาพและคุ้มค่าในการลงทุน เพื่อเป็นผลต่อการจงใจให้เกิดการพัฒนาอย่างต่อเนื่องทั้งในระดับห้องปฏิบัติการและในระดับอุตสาหกรรม ซึ่งการศึกษาดังกล่าวได้ทำการกำหนดตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์ อาทิเช่น

ต้นทุนคงที่ ได้แก่ ต้นทุนเกี่ยวกับการใช้งานเครื่องจักรซึ่งเป็นเครื่องจักรประจำภาควิชาฯ ดังนั้นต้นทุนคงที่ดังกล่าวก็คือ ค่าการใช้งานเครื่องบดผสม (Internal Mixer) และค่าการใช้งานเครื่องอัดขึ้นรูปพลาสติก (Compression molding)

ต้นทุนแปรผัน ได้แก่ ค่าใช้จ่ายที่เป็นส่วนของสารเคมีที่ใช้ในการผลิตเป็นชิ้นงานเทอร์โมพลาสติกสตาซ เช่น แป้ง กลิเซอรอล รวมทั้งค่าใช้จ่ายในส่วนที่เป็นการเตรียมสารเคลือบและตัวทำละลาย

ต้นทุนรวม ได้แก่ ค่าใช้จ่ายที่รวมส่วนที่เป็นต้นทุนคงที่และต้นทุนแปรผัน

ราคาขาย คือ ราคาสินค้าที่ถูกกำหนดขึ้นโดยผู้ขาย ถ้าหากลูกค้ามีความพึงพอใจในราคาก็จะมีการซื้อขายเกิดขึ้น ดังนั้นราคาขายจึงเป็นส่วนสำคัญมากในการจงใจลูกค้า ขณะเดียวกันราคาขายสินค้า ก็คือส่วนที่เป็นรายรับส่วนเดียวที่ผู้ขายจะได้รับจากการขายสินค้านั้นเอง

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

#### การเคลือบผิวชิ้นงานเทอร์โมพลาสติกสตาซ

##### การเคลือบผิวชิ้นงานเทอร์โมพลาสติกสตาซ ด้วยกรดไขมัน

การศึกษาการเคลือบผิวชิ้นงานเทอร์โมพลาสติกสตาซ ด้วยกรดไขมันชนิดต่างๆ โดยที่กรดไขมันที่นำมาทำการเคลือบผิวชิ้นงาน จะมีจำนวนคาร์บอนอะตอมที่เท่ากันคือ 18 อะตอม แต่อย่างไรก็ตาม กรดไขมันดังกล่าวก็มีความอึดตัวที่ไม่เท่ากัน ดังนั้นจะสามารถแบ่งกรดไขมันที่นำมาทำการศึกษาได้เป็น 2 ชนิด คือ กรดไขมันอึดตัว ได้แก่ กรดไขมันสเตียริก ส่วนกรดไขมันอีกชนิดหนึ่งคือ กรดไขมันไม่อึดตัว ได้แก่ กรดไขมันโอเลอิก จะมีจำนวนพันธะคู่หนึ่งตำแหน่ง สำหรับกรดไขมันที่ได้จากน้ำมันดอกทานตะวันจะมีปริมาณกรดไขมันที่ไม่อึดตัวสูงถึง 90 % โดยจะมีส่วนของกรดไขมันลิโนเลอิกประมาณ 47 % ซึ่งกรดไขมันลิโนเลอิกจะมีจำนวนพันธะคู่สองตำแหน่ง และ ขณะที่กรดไขมันที่ได้จากน้ำมันดอกคาโนล่าจะมีปริมาณกรดไขมันที่ไม่อึดตัวสูงถึง 93 % โดยจะมีส่วนของกรดไขมันลิโนเลนิกประมาณ 11 % ซึ่งกรดไขมันลิโนเลนิก จะมีจำนวนพันธะคู่สามตำแหน่ง [28]

ขณะเดียวกันการเคลือบชิ้นงานจะต้องทำการละลายกรดไขมันดังกล่าวด้วยตัวทำละลายเสียก่อน ซึ่งพบว่า กรดไขมันสเตียริกเป็นของแข็งที่อุณหภูมิห้อง ส่วนกรดไขมันโอเลอิก กรดไขมันจากน้ำมันดอกทานตะวันและกรดไขมันจากน้ำมันดอกคาโนล่า มีสถานะเป็นของเหลวที่อุณหภูมิห้อง ซึ่งกรดไขมันทั้งสี่ชนิดต่างก็สามารถละลายได้ในตัวทำละลายเอทานอล ภายใต้ อุณหภูมิ 50 °C เนื่องจากกรดไขมันทั้งสี่ชนิด มีสภาพขี้และค่าการละลายที่ไม่แตกต่างกันมากนัก ขณะเดียวกันก็มีสภาพขี้และค่าการละลายที่ใกล้เคียงกับตัวทำละลายเอทานอล จึงทำให้กรดไขมันทั้งสี่ชนิดสามารถละลายในตัวทำละลายเอทานอลได้ อย่างไรก็ตามจะเห็นได้ว่าจะต้องมีการให้อุณหภูมิในระหว่างการละลายด้วยทั้งนี้ก็เป็นเพราะกรดไขมันทั้งสี่ชนิดเป็นสารที่มีน้ำหนักโมเลกุลมาก ซึ่งการให้อุณหภูมิเสมือนเป็นการเพิ่มพลังงานจลน์ให้กับระบบและยังทำให้โมเลกุลสามารถเคลื่อนที่ได้เร็วขึ้น ดังนั้นการละลายของกรดไขมันก็จะเกิดได้เร็วขึ้น

### การเคลือบผิวชิ้นงานเทอร์โมพลาสติกสตาซด้วย N-alkyl chitosan

การศึกษาการเคลือบผิวชิ้นงานเทอร์โมพลาสติกสตาซ ด้วย N-alkyl chitosan โดยที่ N-alkyl chitosan ที่นำมาทำการเคลือบผิวชิ้นงานก็มีความแตกต่างกันของหมู่ alkyl group โดย alkyl group ที่มีจำนวนคาร์บอนอะตอมน้อยที่สุด คือ N-butyl chitosan ซึ่งจะมีจำนวนคาร์บอนอะตอม 4 อะตอม ส่วนหมู่ alkyl group ที่มีจำนวนคาร์บอนอะตอมมากและเป็นหมู่ alkyl group ที่มีความอึดตัว คือ N-undecyl chitosan ซึ่งจะมีจำนวนคาร์บอนอะตอม 11 อะตอม ส่วนหมู่ alkyl group ที่มีจำนวนคาร์บอนอะตอมมากและเป็นหมู่ alkyl group ที่มีความไม่อึดตัว คือ N-undecenyl chitosan ซึ่งจะมีจำนวนคาร์บอนอะตอม 11 อะตอม และมีจำนวนคาร์บอนที่เป็นพันธะคู่ 1 ตำแหน่ง

การสังเคราะห์ N-alkyl chitosan เป็นสารเคลือบผิวชิ้นงานเทอร์โมพลาสติกสตาซ สามารถสังเคราะห์ได้โดยผ่านปฏิกิริยาสองขั้นตอน คือ ขั้นตอนแรกเป็นปฏิกิริยาแทนที่ของนิวคลีโอไฟล์ ซึ่งเป็นปฏิกิริยาระหว่างหมู่เอมีนของไคโตซานกับสารประกอบแอลดีไฮด์ ได้แก่ butyl aldehyde undecyl aldehyde และ undecenyl aldehyde ได้สารประกอบอิมีน (imine) จากนั้นในขั้นตอนที่สองจะเป็นปฏิกิริยาระหว่าง  $\text{NaBH}_4$  กับสารประกอบอิมีน (imine) ก็จะได้ผลิตภัณฑ์เป็น N-butyl chitosan, N-undecyl chitosan และ N-undecenyl chitosan ตามลำดับ โดยที่ N-alkyl chitosan ทั้งสามชนิดจะมีสถานะเป็นของแข็งที่อุณหภูมิห้อง

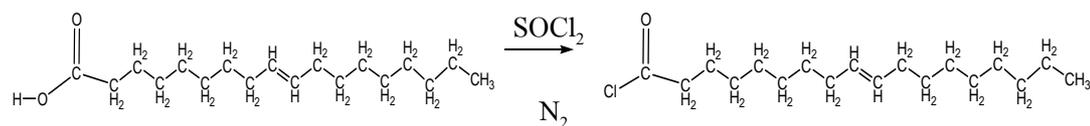
การเคลือบผิวชิ้นงานเทอร์โมพลาสติกสตาซด้วย N-alkyl chitosan จะต้องทำการละลายสาร N-alkyl chitosan ด้วยตัวทำละลาย 1-บิวทานอลที่อุณหภูมิ  $50^\circ\text{C}$  ทั้งนี้การใช้ตัวทำละลาย 1-บิวทานอล เพราะมีสมบัติที่สำคัญหลายประการ คือ ตัวทำละลาย 1-บิวทานอลสามารถละลายสาร N-alkyl chitosan ได้ดี อีกทั้งตัวทำละลาย 1-บิวทานอลมีราคาและจุดเดือดที่ไม่สูงมาก ดังนั้นเมื่อทำการระเหยตัวทำละลาย ภายหลังการเคลือบแล้วก็จะใช้เวลาไม่นาน

### การเคลือบผิวชิ้นงานเทอร์โมพลาสติกสตาซด้วย quaternized chitosan

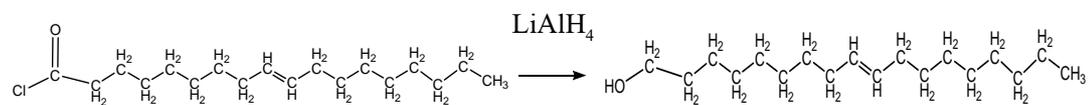
การศึกษาการเคลือบผิวชิ้นงานเทอร์โมพลาสติกสตาซด้วยสาร quaternized chitosan ทั้งนี้สารเคลือบ quaternized chitosan ที่ใช้ในการเคลือบผิวชิ้นงานจะมีความแตกต่างกันของหมู่ alkyl group ซึ่งสารเคลือบ quaternized chitosan ที่ใช้ในการเคลือบผิวชิ้นงานเทอร์โมพลาสติกสตาซ ได้แก่ (N,N,N)-tributyl chitosan, N-butyl,(N,N)-diundecyl chitosan และ N-butyl,(N,N)-dioctadecenyl chitosan ซึ่งจะมีจำนวนคาร์บอนอะตอม 4, 11 และ 18 อะตอมตามลำดับ แต่อย่างไรก็ตาม N-butyl,(N,N)-dioctadecenyl chitosan จะมีหมู่ alkyl group ที่มีจำนวนคาร์บอนที่เป็นพันธะคู่หนึ่งตำแหน่ง

การใช้ quaternized chitosan เป็นสารเคลือบจะต้องทำการเตรียมจาก N-butyl chitosan โดยสามารถเตรียมผ่านปฏิกิริยาการแทนที่ไฮโดรเจนของหมู่เอมีนที่อยู่ในไคโตซานกับสารประกอบ alkyl bromide ได้แก่ butyl bromide undecyl bromide และ octadecenyl bromide โดยที่ quaternized chitosan ทั้งสามชนิดจะมีสถานะเป็นของแข็งที่อุณหภูมิห้อง อย่างไรก็ตาม octadecenyl bromide จะต้องทำการเตรียมจากกรดโอเลอิก ซึ่งจะต้องเตรียมจากปฏิกิริยาหลายขั้นตอน โดยขั้นตอนแรกเป็นปฏิกิริยาระหว่างกรดโอเลอิกกับ  $\text{SOCl}_2$  ซึ่งจะได้เป็น oleyl acid chloride จากนั้นในขั้นตอนที่สองจะเป็นการทำปฏิกิริยารีดักชันของ oleyl acid chloride ด้วย  $\text{LiAlH}_4$  ซึ่งจะได้ผลิตภัณฑ์เป็น oleyl alcohol จากนั้นในขั้นตอนสุดท้ายจะเป็นแทนที่หมู่ living group ของ oleyl alcohol ด้วย  $\text{HBr}$  ซึ่งจะได้ผลิตภัณฑ์เป็น octadecenyl bromide ซึ่งกลไกการเกิดปฏิกิริยาดังภาพที่ 20

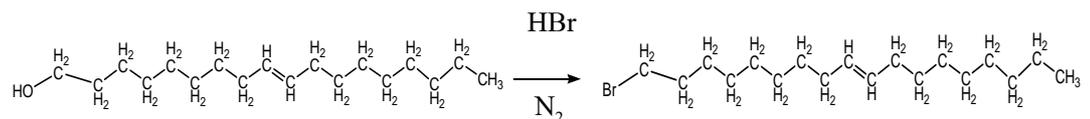
ขั้นตอนที่ 1



ขั้นตอนที่ 2



ขั้นตอนที่ 3



ภาพที่ 20 กลไกปฏิกิริยาการเตรียม octadecenyl bromide

การเคลือบชิ้นงานเทอร์โมพลาสติกสตาซด้วยสาร quaternized chitosan จะต้องทำการละลาย quaternized chitosan ด้วยตัวทำละลายผสมระหว่างเมทานอลกับเอทานอลที่อุณหภูมิ  $50^\circ\text{C}$  ทั้งนี้เพราะตัวทำละลายผสมระหว่างเมทานอลกับเอทานอลสามารถละลาย quaternized chitosan ได้ดี อีกทั้งตัวทำละลายผสมมีราคาและจุดเดือดที่ไม่สูงมากนัก ดังนั้นเมื่อทำการระเหยตัวทำละลาย ภายหลังจากเคลือบแล้วก็จะใช้เวลาไม่นาน

การพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิค FT-IR [29]

การพิสูจน์เอกลักษณ์กรดไขมัน

ก) Saturated fatty acid

การพิสูจน์เอกลักษณ์ของ Saturated fatty acid (กรดสเตียริก) ด้วยเทคนิค FTIR ดังภาพที่ 21 ซึ่งได้ทำการศึกษาใน mode liquid phase โดยใช้ผลึก KBr disk เป็นเซลล์ที่ใช้ในการทดสอบ พบว่ากรดสเตียริกมีการดูดกลืนแสงอินฟราเรดที่ย่านความถี่ที่สำคัญ คือ

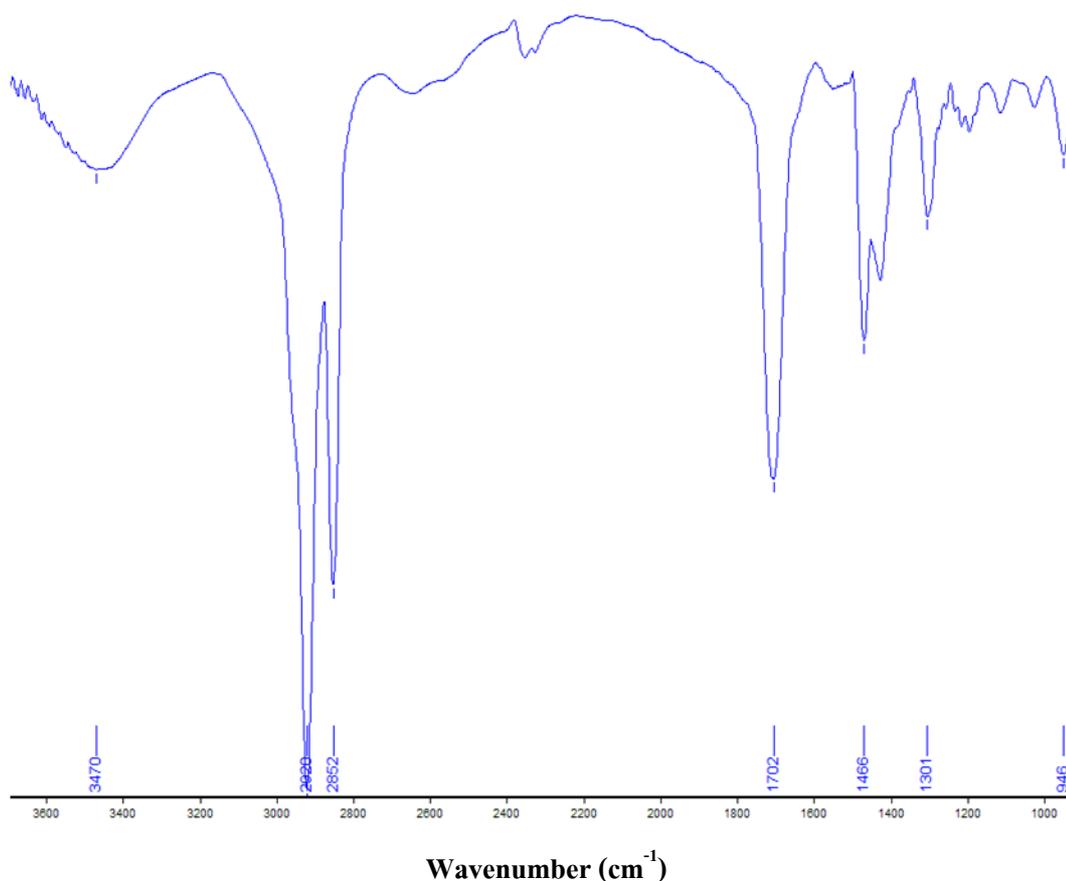
ที่ความถี่  $3500-3300\text{ cm}^{-1}$  เป็นย่านความถี่ที่แสดง OH stretching

ที่ความถี่  $2978-2855\text{ cm}^{-1}$  เป็นย่านความถี่ที่แสดง  $\text{CH}_2$  &  $\text{CH}_3$  stretching

ที่ความถี่  $1702\text{ cm}^{-1}$  เป็นย่านความถี่ที่แสดง C=O stretching

ที่ความถี่  $1453\text{ cm}^{-1}$  เป็นย่านความถี่ที่แสดง  $\text{CH}_2$  &  $\text{CH}_3$  bending

ที่ความถี่  $1301\text{ cm}^{-1}$  เป็นย่านความถี่ที่แสดง C-O stretching



ภาพที่ 21 แสดงการพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิค FTIR ของกรดสเตียริก

### ข) Unsaturated fatty acid

การพิสูจน์เอกลักษณ์ของ Unsaturated fatty acid ได้แก่ กรดโอเลอิก กรดไขมันจากน้ำมันดอกทานตะวัน และกรดไขมันจากน้ำมันดอกคาโนล่าห์ ด้วยเทคนิค FTIR ดังภาพที่ 22 ซึ่งได้ทำการศึกษาใน mode liquid phase โดยใช้ผลึก KBr disk เป็นเซลล์ที่ใช้ในการทดสอบพบว่า unsaturated fatty acid เหล่านี้มีการดูดกลืนแสงอินฟราเรดที่ย่านความถี่ที่สำคัญ คือ

ที่ความถี่  $3500-3300\text{ cm}^{-1}$  เป็นย่านความถี่ที่แสดง OH stretching

ที่ความถี่  $2978-2855\text{ cm}^{-1}$  เป็นย่านความถี่ที่แสดง  $\text{CH}_2$  &  $\text{CH}_3$  stretching

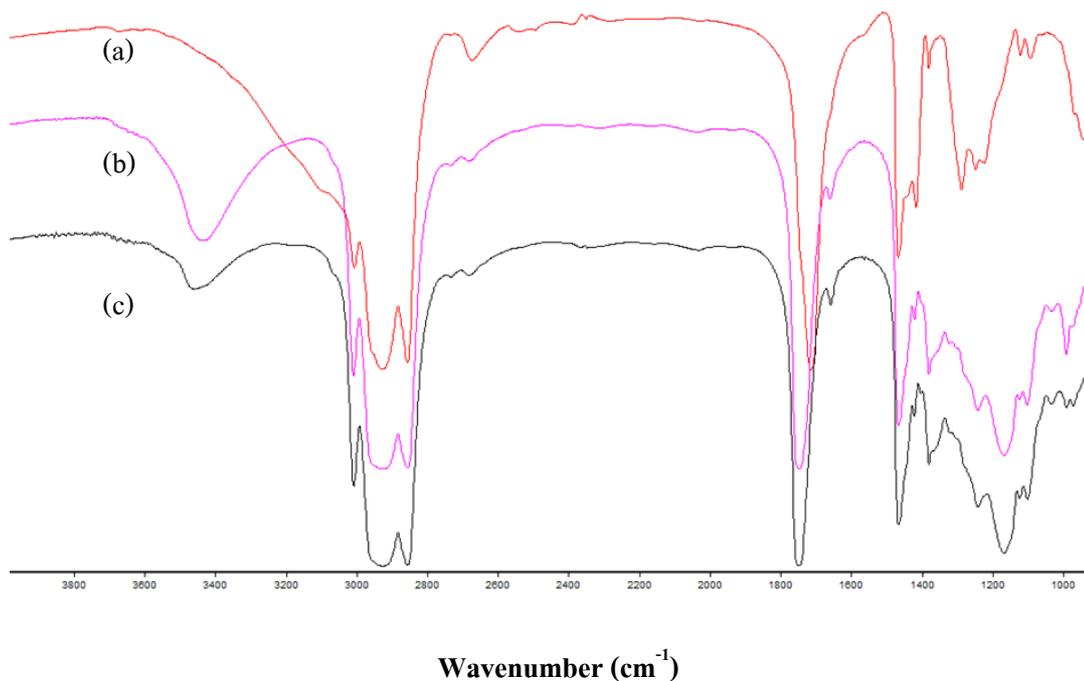
ที่ความถี่  $1702\text{ cm}^{-1}$  เป็นย่านความถี่ที่แสดง C=O stretching

ที่ความถี่  $1654\text{ cm}^{-1}$  เป็นย่านความถี่ที่แสดง C=C stretching

ที่ความถี่  $1453\text{ cm}^{-1}$  เป็นย่านความถี่ที่แสดง  $\text{CH}_2$  &  $\text{CH}_3$  bending

ที่ความถี่  $1295\text{ cm}^{-1}$  เป็นย่านความถี่ที่แสดง C-O stretching

จะเห็นได้ว่าการพิสูจน์เอกลักษณ์ของ Unsaturated fatty acid ที่ใช้ในการเคลือบผิวชิ้นงานเทอร์โมพลาสติกสตาซจะมีการดูดกลืนแสงอินฟราเรดที่ความถี่เดียวกัน แต่อย่างไรก็ตาม ที่ความถี่  $1654\text{ cm}^{-1}$  ของ fatty acid แต่ละชนิดจะมีระดับ intensity ที่ต่างกัน ทั้งนี้เพราะที่ความถี่ดังกล่าวเป็นส่วนที่บอกความไม่อิ่มตัวในโครงสร้าง ยิ่งถ้า Unsaturated fatty acid ที่นำมาทำการทดสอบมีความไม่อิ่มตัวมาก ที่ความถี่  $1654\text{ cm}^{-1}$  ก็จะมีระดับ intensity ที่สูงขึ้นตามไปด้วย



ภาพที่ 22 แสดงการพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิค FTIR (a)กรดโอเลอิก (b)กรดไขมันจากน้ำมันดอกทานตะวัน (c)กรดไขมันจากน้ำมันดอกคาโนล่าห์

สำหรับการศึกษาเชิงปริมาณของการเปลี่ยนแปลงหมู่ฟังก์ชันของสารเคลือบที่เป็นกรดไขมันชนิดต่างๆ ด้วยเทคนิค FTIR ดังตารางที่ 5 ซึ่งได้ทำการทดสอบภายใต้สภาวะความชื้นสัมพัทธ์ 53% จะพบว่าสารเคลือบที่เป็นกรดไขมันอิ่มตัว ซึ่งได้แก่ กรดสเตียริกเมื่อพิจารณาถึงอัตราส่วน  $A_{C=C}/A_{C=O}$  และอัตราส่วน  $A_{C-O}/A_{C=O}$  จะไม่พบการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนดังกล่าว ทั้งนี้เป็นเพราะกรดสเตียริกไม่มีหมู่ฟังก์ชันที่เป็นพันธะคู่อยู่ในโมเลกุล อีกทั้งกรดสเตียริกก็ไม่มีหมู่ฟังก์ชันที่มีความว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยา oxidation กับออกซิเจนในบรรยากาศ ที่ทำให้เกิดการเชื่อมขวาง(crosslink) ระหว่างสายโซ่ ซึ่งผลของการเกิด oxidation กับออกซิเจนในบรรยากาศจะมีผลต่อพฤติกรรมการดูดความชื้นของเทอร์โมพลาสติกสตาซ

ตารางที่ 5 แสดงการเปรียบเทียบอัตราส่วน  $A_{C=C}/A_{C=O}$  และอัตราส่วน  $A_{C-O}/A_{C=O}$  ของสารเคลือบที่เป็นกรดไขมันต่างชนิดกัน

ชนิดของกรดไขมัน	อัตราส่วน ( $A_{C=C}/A_{C=O}$ )			อัตราส่วน ( $A_{C-O}/A_{C=O}$ )		
	วันที่ 1	วันที่ 7	วันที่ 15	วันที่ 1	วันที่ 7	วันที่ 15
กรดสเตียริก	N/A	N/A	N/A	0.26	0.26	0.26
กรดโอเลอิก	N/A	N/A	N/A	0.09	0.09	0.10
กรดไขมันจากน้ำมันดอกทานตะวัน	0.09	0.07	0.05	0.09	0.10	0.11
กรดไขมันจากน้ำมันดอกคาโนล่าห์	0.22	0.19	0.08	0.02	0.03	0.04

สำหรับสารเคลือบที่เป็นกรดไขมันไม่อิ่มตัว ได้แก่ กรดโอเลอิก กรดไขมันจากน้ำมันดอกทานตะวัน และกรดไขมันจากน้ำมันดอกคาโนล่าห์ เมื่อพิจารณาถึงอัตราส่วน  $A_{C=C}/A_{C=O}$  และอัตราส่วน  $A_{C-O}/A_{C=O}$  จะมีการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนเกิดขึ้น และเมื่อพิจารณาสารเคลือบที่เป็นกรดโอเลอิก จะพบว่า อัตราส่วน  $A_{C=C}/A_{C=O}$  ของกรดโอเลอิกปรากฏสัญญาณที่ไม่ชัดเจนดังภาพที่ 22(a) ทั้งนี้เพราะการซ้อนทับกันระหว่างสัญญาณของหมู่ฟังก์ชันคาร์บอนิลและหมู่ฟังก์ชันพันธะคู่ ซึ่งทำให้การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนดังกล่าวไม่สามารถทำได้ แต่อย่างไรก็ตามที่อัตราส่วน  $A_{C-O}/A_{C=O}$  ของกรดโอเลอิกสามารถศึกษาการเปลี่ยนแปลงได้ ซึ่งเมื่อปล่อยให้สารเคลือบกรดโอเลอิกทำปฏิกิริยากับออกซิเจนในอากาศที่สภาวะควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ที่ 53 % จะพบว่าอัตราส่วน  $A_{C-O}/A_{C=O}$  มีการเพิ่มขึ้น นั่นแสดงว่าพันธะคู่ที่มีอยู่ในโครงสร้างของกรดโอเลอิกสามารถเกิดปฏิกิริยากับออกซิเจนที่อยู่ในบรรยากาศแล้วทำให้เกิดการเชื่อมขวาง(crosslink) ระหว่างสายโซ่ของกรดโอเลอิกเอง ซึ่งผลจากตรงนี้ก็จะเป็นการเคลือบชั้นงานด้วยกรดโอเลอิกมีประสิทธิภาพในการป้องกันการดูดความชื้นของชิ้นงานได้ดียิ่งขึ้น

ขณะที่สารเคลือบที่เป็นกรดไขมันจากน้ำมันดอกทานตะวัน และกรดไขมันจากน้ำมันดอกคาโนล่าห์ ซึ่งก็เป็นกรดไขมันที่ไม่อิ่มตัวเช่นเดียวกับกรดโอเลอิก เพียงแต่มีความไม่อิ่มตัวทางโครงสร้างมากกว่ากรดโอเลอิก ซึ่งเมื่อพิจารณาถึงอัตราส่วน  $A_{C=C}/A_{C=O}$  จะพบว่าสารเคลือบทั้ง 2 ชนิดมีอัตราการลดลงของหมู่ฟังก์ชันพันธะคู่เหมือนกันและเมื่อพิจารณาอัตราส่วน  $A_{C=O}/A_{C=O}$  ก็พบว่าสารเคลือบทั้ง 2 ชนิดก็มีอัตราการเพิ่มขึ้นของหมู่ฟังก์ชัน C-O นั่นก็แสดงว่าพันธะคู่ที่มีอยู่ในโครงสร้างของสารเคลือบทั้งสองสามารถเกิดปฏิกิริยาเชื่อมขวาง(crosslink)กับออกซิเจนที่อยู่ในบรรยากาศแล้วก่อให้เกิดการเชื่อมขวาง(crosslink) ระหว่างสายโซ่ภายในโมเลกุลของสารเคลือบ

จากการศึกษาอัตราส่วน  $A_{C=C}/A_{C=O}$  และอัตราส่วน  $A_{C=O}/A_{C=O}$  สามารถเรียงลำดับการเกิดการเชื่อมขวาง(crosslink)ระหว่างสายโซ่ภายในโมเลกุลของสารเคลือบได้ดังนี้

กรดไขมันจากน้ำมันดอกคาโนล่าห์ > กรดไขมันจากน้ำมันดอก

ทานตะวัน .> กรดโอเลอิก

ซึ่งประสิทธิภาพการป้องกันการดูดความชื้นก็จะแปรผันตรงกับความสามารถในการเกิดการเชื่อมขวาง(crosslink)ระหว่างสายโซ่ภายในโมเลกุลของสารเคลือบ

#### การพิสูจน์เอกลักษณ์ N-alkyl chitosan

การพิสูจน์เอกลักษณ์ของ chitosan และ N-alkyl chitosan ด้วยเทคนิค FTIR ดังภาพที่ 23 ซึ่งได้ทำการศึกษาใน mode liquid phase โดยใช้ผลึก KBr disk เป็นเซลล์ที่ใช้ในการทดสอบพบว่า chitosan, N-butyl chitosan, N-undecyl chitosan และ N-undecenyl chitosan เหล่านี้มีการดูดกลืนแสงอินฟราเรดที่ย่านความถี่ที่สำคัญ คือ

ที่ความถี่ 3400-3200  $cm^{-1}$  เป็นย่านความถี่ที่แสดง NH stretching

ที่ความถี่ 3500-3100  $cm^{-1}$  เป็นย่านความถี่ที่แสดง OH stretching

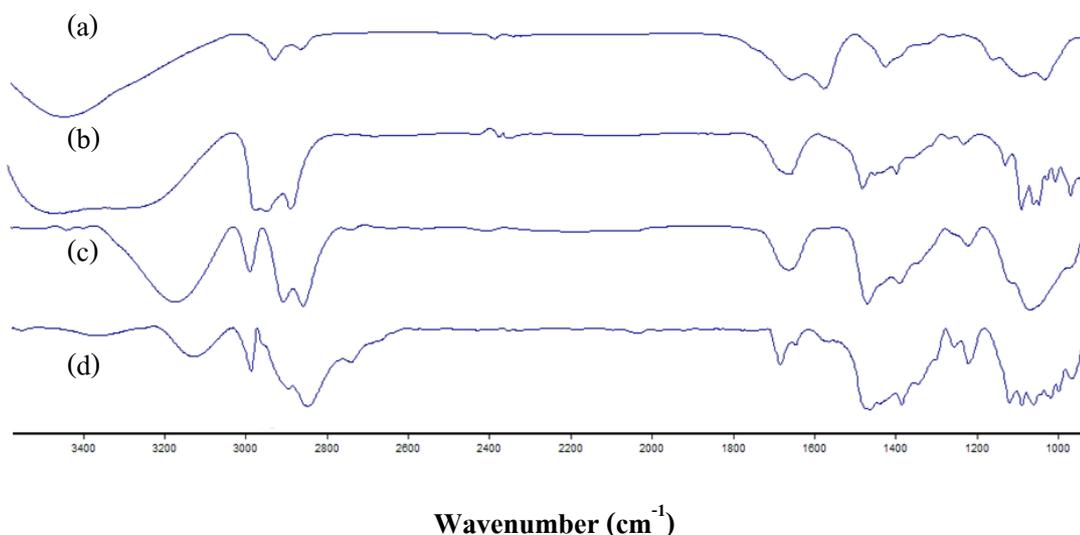
ที่ความถี่ 2978-2855  $cm^{-1}$  เป็นย่านความถี่ที่แสดง  $CH_2$  &  $CH_3$  stretching

ที่ความถี่ 1675  $cm^{-1}$  เป็นย่านความถี่ที่แสดง C=O stretching (ส่วนของ chitin)

ที่ความถี่ 1441  $cm^{-1}$  เป็นย่านความถี่ที่แสดง  $CH_2$  &  $CH_3$  bending

ที่ความถี่ 1295  $cm^{-1}$  เป็นย่านความถี่ที่แสดง C-O stretching

จะเห็นได้ว่าการพิสูจน์เอกลักษณ์ของ chitosan และ N-alkyl chitosan จะมีการดูดกลืนแสงอินฟราเรดที่ความถี่เดียวกัน ส่วน N-undecenyl chitosan จะต้องปรากฏสัญญาณอินฟราเรดของ C=C stretching และ C=C bending เพิ่มจาก N-alkyl chitosan ชนิดอื่นๆ ที่ความถี่ 1640  $cm^{-1}$  และ 1075  $cm^{-1}$  ตามลำดับ



ภาพที่ 23 แสดงการพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิค FTIR (a) chitosan (b) N-butyl chitosan  
(c) N-undecyl chitosan (d) N-undecenyl chitosan

### การพิสูจน์เอกลักษณ์ Quaternized chitosan

#### ก) สารตั้งต้นที่ใช้ในการเตรียม N-butyl,(N,N)-octadecenyl chitosan

การพิสูจน์เอกลักษณ์สารตั้งต้นที่ใช้ในการเตรียม N-butyl, (N,N)-octadecenyl chitosan ด้วยเทคนิค FTIR ดังภาพที่ 24 ซึ่งได้ทำการศึกษาใน mode liquid phase โดยใช้ผลึก KBr disk เป็นเซลล์ที่ใช้ในการทดสอบ พบว่า oleic acid มีการดูดกลืนแสงอินฟราเรดที่ ย่านความถี่ที่สำคัญ คือ

ที่ความถี่  $3500-3100\text{ cm}^{-1}$  เป็นย่านความถี่ที่แสดง OH stretching

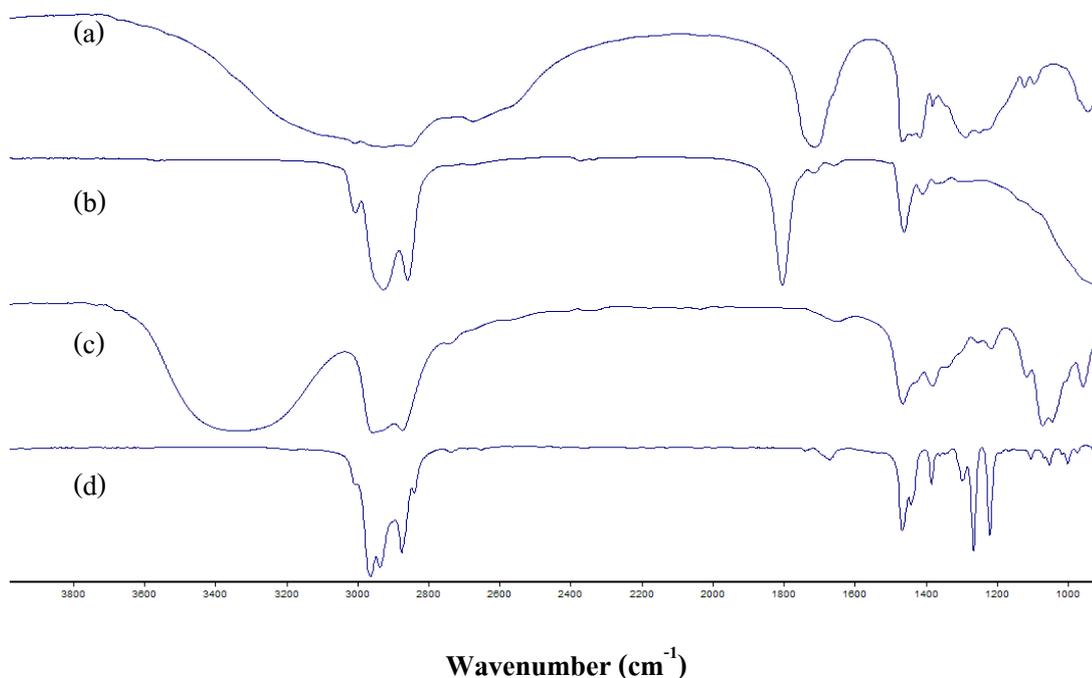
ที่ความถี่  $2978-2855\text{ cm}^{-1}$  เป็นย่านความถี่ที่แสดง  $\text{CH}_2$  &  $\text{CH}_3$  stretching

ที่ความถี่  $1785\text{ cm}^{-1}$  เป็นย่านความถี่ที่แสดง C=O stretching

(ส่วนของ chitin)

อย่างไรก็ตาม การพิสูจน์เอกลักษณ์ของ oleic acid ก็เกิดการซ้อนทับกัน ระหว่างสัญญาณ C=O stretching และ C=C stretching จึงไม่สามารถพบสัญญาณ C=C stretching ได้อย่างชัดเจน แต่เมื่อมีการนำ oleic acid มาทำปฏิกิริยากับ  $\text{SOCl}_2$  ได้ผลิตภัณฑ์เป็น oleyl acid chloride จะเห็นได้ว่าสัญญาณของ OH stretching นั้นหายไป ขณะเดียวกันก็เกิดการเลื่อนของสัญญาณ C=O stretching จึงทำให้เห็นสัญญาณ C=C stretching ได้อย่างชัดเจนมากขึ้น จากนั้นเมื่อนำ oleyl acid chloride ทำปฏิกิริยา Reduction จะได้ผลิตภัณฑ์เป็น oleyl alcohol และเมื่อเทียบสัญญาณกับ oleyl acid chloride พบว่า จะเห็นสัญญาณของ OH stretching นั้นปรากฏขึ้นอีก แต่สัญญาณของ C=O stretching จะหายไป จากนั้นเมื่อนำ oleyl alcohol มาทำปฏิกิริยาแทนที่ด้วย HBr

จะได้ผลิตภัณฑ์เป็น oleyl bromide และเมื่อเทียบกับสัญญาณกับ oleyl alcohol พบว่า สัญญาณของ OH stretching นั้นหายไป



ภาพที่ 24 แสดงการพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิค FTIR (a) oleic acid (b) oleyl acid chloride (c) oleyl alcohol (d) oleyl bromide

### ข) Quaternized chitosan

การพิสูจน์เอกลักษณ์ของ Quaternized chitosan ด้วยเทคนิค FTIR ดังภาพที่ 25 ซึ่งได้ทำการศึกษาใน mode liquid phase โดยใช้ผลึก KBr disk เป็นเซลล์ที่ใช้ในการทดสอบ พบว่า (N,N,N)-tributyl chitosan, N-butyl,(N,N)-undecyl chitosan และ N-butyl,(N,N)-octadecenyl chitosan เหล่านี้มีการดูดกลืนแสงอินฟราเรดที่ย่านความถี่ที่สำคัญ คือ

ที่ความถี่ 3400-3200  $\text{cm}^{-1}$  เป็นย่านความถี่ที่แสดง NH stretching

ที่ความถี่ 3500-3100  $\text{cm}^{-1}$  เป็นย่านความถี่ที่แสดง OH stretching

ที่ความถี่ 2978-2855  $\text{cm}^{-1}$  เป็นย่านความถี่ที่แสดง  $\text{CH}_2$  &  $\text{CH}_3$  stretching

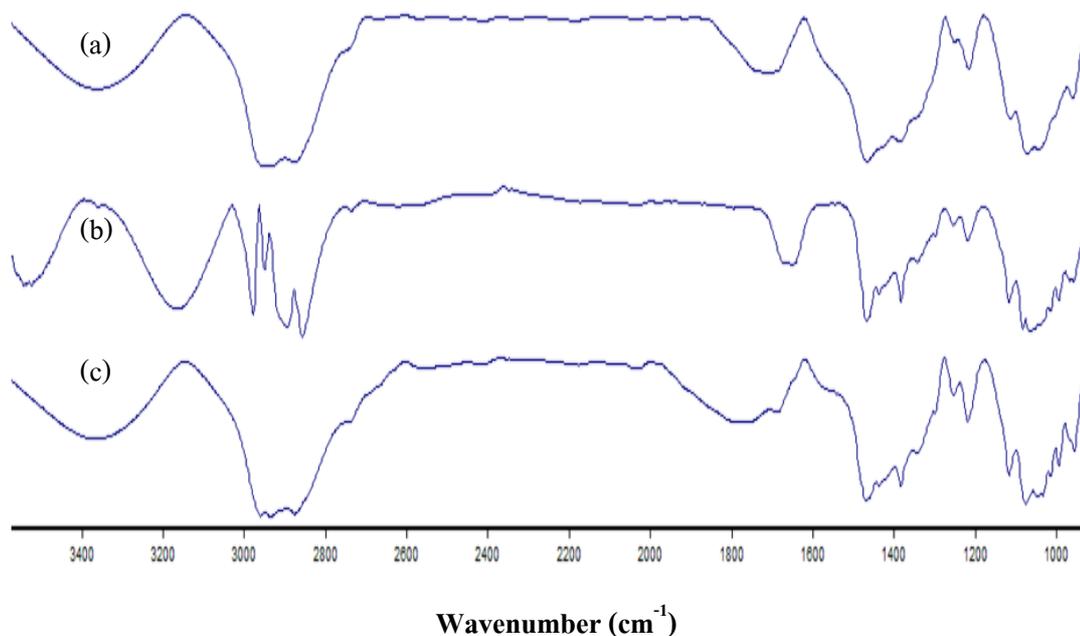
ที่ความถี่ 1675  $\text{cm}^{-1}$  เป็นย่านความถี่ที่แสดง C=O stretching

(ส่วนของ chitin)

ที่ความถี่ 1441  $\text{cm}^{-1}$  เป็นย่านความถี่ที่แสดง  $\text{CH}_2$  &  $\text{CH}_3$  bending

ที่ความถี่ 1295  $\text{cm}^{-1}$  เป็นย่านความถี่ที่แสดง C-O stretching

จะเห็นได้ว่าการพิสูจน์เอกลักษณ์ของ quaternized chitosan จะมีการดูดกลืนแสงอินฟราเรดที่ความถี่เดียวกัน ยกเว้น N-butyl,(N,N)-octadecenyl chitosan จะเห็นการปรากฏสัญญาณอินฟราเรดของ C=C stretching เพิ่มจาก quaternized chitosan ชนิดอื่นๆ ที่ความถี่  $1640\text{ cm}^{-1}$



ภาพที่ 25 แสดงการพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิค FTIR (a) (N,N,N)-tributyl chitosan  
(b) N-butyl,(N,N)-diundecyl chitosan (c) N-butyl,(N,N)-dioctadecenyl chitosan

ขณะเดียวกันการศึกษาเชิงปริมาณด้วยเทคนิค FTIR จะมีส่วนช่วยในการศึกษาการสังเคราะห์สารเคลือบอนุพันธ์ของไคโตซานชนิดต่างๆ ได้ ซึ่งแสดงดังตารางที่ 6 ทั้งนี้ การศึกษาการพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิค FTIR เพียงอย่างเดียว ไม่สามารถจำแนกการสังเคราะห์อนุพันธ์ของไคโตซานชนิดต่างๆ เพราะอนุพันธ์ของไคโตซานชนิดต่างๆ เหล่านี้ ต่างก็มีหมู่ฟังก์ชันที่เป็นองค์ประกอบที่เหมือนกัน ซึ่งการศึกษาเชิงปริมาณจะสามารถบอกถึงความสัมพันธ์ของหมู่ alkyl ที่ติดกับหมู่ amine ในไคโตซานได้ โดยที่อนุพันธ์ของไคโตซานที่มีหมู่ alkyl ที่มีความยาวของคาร์บอนอะตอมที่ยาว และมี alkyl หลายหมู่ ก็จะพบว่าม้อัตราส่วน  $A_{\text{CH}_2}/A_{\text{C=O}}$  ที่มากตามไปด้วย เช่น ในกลุ่มสารเคลือบที่เป็น N-alkyl chitosan จะเห็นได้ว่า N-undecyl chitosan และ N-undecenyl chitosan มีอัตราส่วน  $A_{\text{CH}_2}/A_{\text{C=O}}$  ที่มากที่สุด ขณะเดียวกันสารเคลือบในกลุ่ม quaternized chitosan จะพบว่า N-butyl ,(N,N)-dioctadecenyl chitosan มีอัตราส่วน  $A_{\text{CH}_2}/A_{\text{C=O}}$  ที่มากที่สุด

ตารางที่ 6 แสดงการเปรียบเทียบอัตราส่วน  $A_{CH_2}/A_{C=O}$  หรือ  $A_{1414}/A_{1641}$  ของอนุพันธ์ไคโตซาน

อนุพันธ์ไคโตซาน	อัตราส่วน $A_{CH_2}/A_{C=O}$
chitosan	0.38
N-butyl chitosan	0.50
N-undecyl chitosan	0.80
N-undecenyl chitosan	0.78
(N,N,N)-tributyl chitosan	0.84
N-butyl ,(N,N)-diundecyl chitosan	0.85
N-butyl ,(N,N)-dioctadecenyl chitosan	0.86

#### การศึกษาการเคลือบผิวชิ้นงานเทอร์โมพลาสติกสตาซ

การศึกษาการเคลือบผิวชิ้นงานเทอร์โมพลาสติกสตาซในส่วนเปอร์เซ็นต์การเคลือบผิวชิ้นงานเทอร์โมพลาสติกสตาซของ adhesion specimens, impact specimens และ tensile specimens ซึ่งได้แสดงดังตารางที่ 7 โดยที่เปอร์เซ็นต์การเคลือบผิวชิ้นงานได้ผ่านการทดสอบโปรแกรมทางสถิติ(SPSS : one way ANOVA TEST)[30] ซึ่งจะพบว่าเปอร์เซ็นต์การเคลือบผิวชิ้นงานทั้ง impact specimens และ tensile specimens มีค่าไม่แตกต่างกันที่ระดับนัยสำคัญทางสถิติ 0.01 โดยสามารถพิจารณาได้จาก การใส่ตัว subscript เป็นตัวเดียวกันทั้งหมด ทั้งในส่วนเปอร์เซ็นต์การเคลือบผิวชิ้นงานที่เป็น impact specimens และ tensile specimens ทั้งนี้เป็นเพราะการควบคุมความเข้มข้นของสารเคลือบ และการควบคุมเวลาที่ใช้ในการเคลือบชิ้นงานเทอร์โมพลาสติกสตาซ จึงทำให้น้ำหนักของสารเคลือบรวมทั้งเปอร์เซ็นต์การเคลือบผิวชิ้นงานจึงมีค่าที่ไม่แตกต่างกัน

ตารางที่ 7 เปอร์เซ็นต์การเคลือบของ adhesion specimens impact specimens และ tensile specimens

ชนิดสารเคลือบ	เปอร์เซ็นต์การเคลือบ		
	adhesion specimens <sup>1</sup>	impact specimens <sup>1</sup>	tensile specimens <sup>1</sup>
	Mean±SD	Mean±SD	Mean±SD
กรดสเตียริก	1.67±0.017 <sup>a</sup>	1.19±0.195 <sup>a</sup>	1.51±0.152 <sup>a</sup>
กรดโอเลอิก	1.64±0.020 <sup>a</sup>	1.25±0.249 <sup>a</sup>	1.52±0.122 <sup>a</sup>
กรดไขมันจากน้ำมันดอกทานตะวัน	1.66±0.009 <sup>a</sup>	1.25±0.094 <sup>a</sup>	1.52±0.113 <sup>a</sup>
กรดไขมันจากน้ำมันดอกคาโนล่า	1.66±0.005 <sup>a</sup>	1.26±0.083 <sup>a</sup>	1.51±0.118 <sup>a</sup>
N-butyl chitosan	1.65±0.001 <sup>a</sup>	1.22±0.044 <sup>a</sup>	1.52±0.039 <sup>a</sup>
N-undecyl chitosan	1.66±0.002 <sup>a</sup>	1.23±0.044 <sup>a</sup>	1.51±0.023 <sup>a</sup>
N-undecenyl chitosan	1.65±0.016 <sup>a</sup>	1.24±0.029 <sup>a</sup>	1.52±0.033 <sup>a</sup>
(N,N,N)-tributyl chitosan	1.64±0.010 <sup>a</sup>	1.23±0.025 <sup>a</sup>	1.52±0.027 <sup>a</sup>
N-butyl,(N,N)-diundecyl chitosan	1.66±0.017 <sup>a</sup>	1.23±0.027 <sup>a</sup>	1.52±0.031 <sup>a</sup>
N-butyl,(N,N)-dioctadecenyl chitosan	1.65±0.012 <sup>a</sup>	1.23±0.020 <sup>a</sup>	1.52±0.042 <sup>a</sup>

หมายเหตุ <sup>1</sup> one way ANOVA test ด้วยวิธีของ Scheffe's ที่ระดับนัยสำคัญ 0.01

### ลักษณะของชิ้นงานเทอร์โมพลาสติกสตาซ

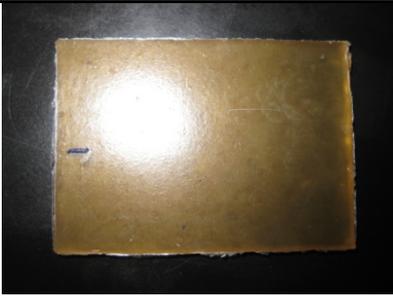
#### การเคลือบผิวชิ้นงานเทอร์โมพลาสติกสตาซ ด้วยกรดไขมัน

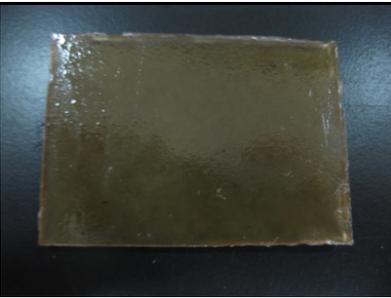
การศึกษาลักษณะทางกายภาพของชิ้นงานเทอร์โมพลาสติกสตาซที่ไม่มีการเคลือบและที่มีการเคลือบด้วยกรดไขมันต่างชนิดกัน ดังตารางที่ 8 ซึ่งแสดงลักษณะทางกายภาพทั้งชิ้นงาน Impact testing และชิ้นงาน Tensile testing พบว่า การเคลือบผิวชิ้นงานด้วยกรดสเตียริก จะทำให้ชิ้นงานมีลักษณะของพื้นผิวที่มีสีขาวขุ่นและยังสามารถหลุดลอกออกได้ง่ายกว่าการเคลือบด้วยกรดไขมันชนิดอื่น ทั้งนี้ก่อนการเคลือบชิ้นงาน กรดสเตียริกมีลักษณะเป็นของแข็งสีขาวที่อุณหภูมิห้อง ดังนั้นเมื่อมีการเคลือบชิ้นงานแบบวิธี solution dipping ก็จะทำให้เกิดการยึดติดที่ผิวของชิ้นงานทันที แต่อย่างไรก็ตามการเคลือบชิ้นงานไม่ได้เกิดการเคลือบเพียงชั้นเดียวเสมอไป เพราะอาจจะเกิดการเคลือบซ้ำๆกัน ได้ในบางบริเวณ ซึ่งปรากฏการณ์ดังกล่าวก็จะทำให้การเคลือบมีความไม่สม่ำเสมอและสามารถหลุดลอกได้โดยง่าย ขณะที่กรดไขมันชนิดอื่นๆ ก่อนการเคลือบจะมีลักษณะเป็นของเหลวหนืดที่อุณหภูมิห้อง อีกทั้งมีความไม่อึดตัวที่มากกว่ากรดไขมันสเตียริก เนื่องจากความไม่อึดตัวก็คือส่วนของพันธะคู่ที่อยู่ในโครงสร้างของกรดไขมัน ซึ่งจะมีแรงยึด

เหนียวระหว่างกันที่แข็งแรงกว่าพันธะเดียวในกรดไขมันอิ่มตัว(กรดสเตียริก) ดังนั้นการยึดติดของกรดไขมันไม่อิ่มตัวจะมีแรงยึดเหนี่ยวที่สูงขึ้นถ้าภายในโมเลกุลยังมีความไม่อิ่มตัวมากขึ้น ขณะเดียวกันก็ทำให้พื้นผิวของชิ้นงานมีความเรียบและสม่ำเสมอมากขึ้นตามไปด้วย

จากศึกษาการทดสอบการยึดติดตามมาตรฐาน ASTM D3359 ซึ่งการเคลือบชิ้นงานเทอร์โมพลาสติกสตาซที่มีสารเคลือบที่เป็นกรดไขมัน พบว่าการเคลือบผิวชิ้นงานเทอร์โมพลาสติกสตาซด้วยกรดสเตียริกจะมีเปอร์เซ็นต์การหลุดลอกของสารเคลือบภายหลังการทดสอบการยึดติดมากที่สุดประมาณ 283% ทั้งนี้สิ่งที่ทำให้การหลุดลอกของการเคลือบผิวชิ้นงานด้วยกรดสเตียริกมีปริมาณการหลุดลอกมากกว่า 100 % เพราะขณะทำการศึกษการหลุดลอกของสารเคลือบนั้นมีการหลุดลอกของสารเคลือบนอกเหนือบริเวณที่ทำการทดสอบ ดังนั้นเมื่อทำการหาปริมาณการหลุดลอกจึงมีค่ามากกว่า 100 % ขณะเดียวกันสาเหตุที่ทำให้เกิดการหลุดลอกที่มากที่สุดเพราะแรงยึดเหนี่ยวระหว่าง layer ของการเคลือบผิวด้วยกรดสเตียริกนั้นมีแรงยึดเหนี่ยวแบบ van der waals ซึ่งเป็นแรงยึดเหนี่ยวที่น้อยที่สุดเมื่อเทียบกับสารเคลือบผิวทั้งหมด ขณะที่สารเคลือบผิวอื่นๆ จะมีแรงยึดเหนี่ยวอื่นๆ ร่วมด้วย เช่น แรงระหว่างขั้ว ดังนั้นเมื่อพิจารณาการหลุดลอกของสารเคลือบผิวด้วยกรดสเตียริกตามมาตรฐานการทดสอบหลุดลอก คือ 2B ดังตารางที่ 8

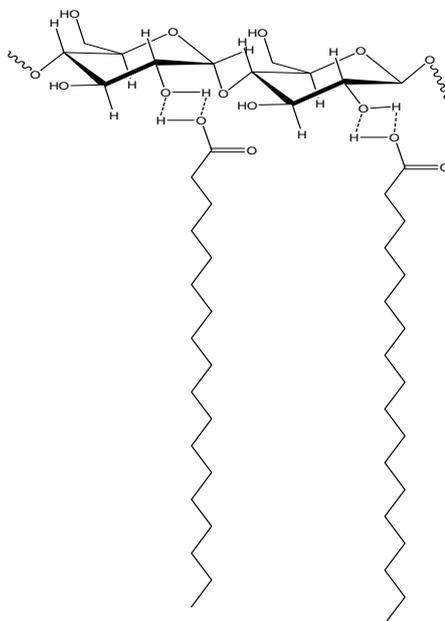
ตารางที่ 8 แสดงลักษณะทางกายภาพของชิ้นงานเทอร์โมพลาสติกสตาซที่ไม่มีการเคลือบ และที่มีการเคลือบด้วยกรดไขมันต่างชนิดกัน

ชนิดของสารเคลือบผิว	ตัวอย่างชิ้นงาน	เปอร์เซ็นต์การหลุดลอก	ลักษณะการยึดติดกับชิ้นงาน
ชิ้นงานที่ไม่มีการเคลือบ		-	-

กรดสเตียริก		283	3B
ชนิดของสารเคลือบผิว	ตัวอย่างชิ้นงาน	เปอร์เซ็นต์ การ หลุดลอก	ลักษณะการ ยึดติด กับชิ้นงาน
กรดโอเลอิก		33	5B
กรดไขมันที่ได้ จากน้ำมันดอกทานตะวัน		24	5B
กรดไขมันที่ได้ จากน้ำมันดอกคาโนล่าห์		24	5B

ลักษณะการยึดติดของชิ้นงานเทอร์โมพลาสติกสตาซกับกรดไขมันอิ่มตัว การยึดเกาะพื้นผิวของกรดสเตียริกกับพื้นผิวของชิ้นงานเทอร์โมพลาสติกสตาซ ดังภาพที่ 26 โดยจะเกิดแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลที่เป็น H-bonding ระหว่างส่วนที่มีขั้วของกรดสเตียริกกับเทอร์โมพลาสติกสตาซ ขณะที่ส่วนที่ไม่มีขั้วของกรดสเตียริก จะ

หันออกด้านนอกของซิงงานเทอร์โมพลาสติกสตาซ จึงทำให้บริเวณดังกล่าวทำหน้าที่ป้องกันการดูดความชื้นให้กับซิงงานเทอร์โมพลาสติกสตาซได้



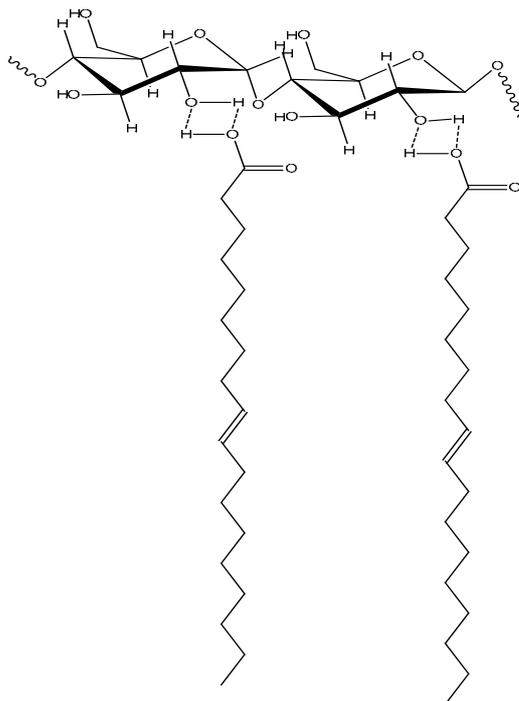
ภาพที่ 26 แสดงการเกิด H-bonding ระหว่างแป้งกับกรดสเตียริก

### ลักษณะการยึดติดของซิงงานเทอร์โมพลาสติกสตาซกับ กรดไขมันไม่อิ่มตัว

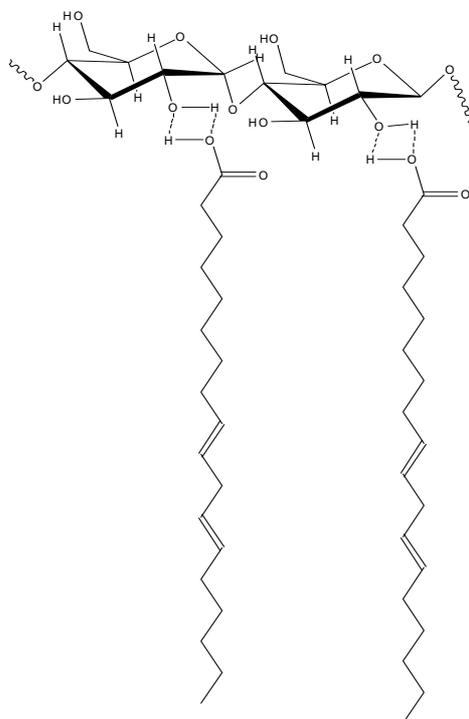
การยึดเกาะพื้นผิวของกรดไขมันที่ไม่อิ่มตัวได้แก่ กรดไขมัน โอเลอิก กรดไขมันที่ได้จากน้ำมันดอกทานตะวัน และกรดไขมันที่ได้จากน้ำมันดอกคาโนล่าห์ กับพื้นผิวของซิงงานเทอร์โมพลาสติกสตาซ ดังภาพที่ 27 ถึงภาพที่ 29 โดยการยึดเกาะพื้นผิวของกรดไขมันที่ไม่อิ่มตัวจะเกิดแรงยึดเหนี่ยวระหว่าง โมเลกุลที่เป็น H-bonding ระหว่างส่วนที่มีขั้วของกรดไขมันที่ไม่อิ่มตัวกับเทอร์โมพลาสติกสตาซ ขณะที่ส่วนที่ไม่มีขั้วของกรดไขมันที่ไม่อิ่มตัวจะหันออกด้านนอกของซิงงานเทอร์โมพลาสติกสตาซ จึงทำให้บริเวณดังกล่าวทำหน้าที่ป้องกันการดูดความชื้นให้กับซิงงานเทอร์โมพลาสติกสตาซได้

เมื่อพิจารณาถึงความไม่อิ่มตัวของกรดไขมันไม่อิ่มตัวที่นำมาทำการเคลือบซิงงานเทอร์โมพลาสติกสตาซ ซึ่งจะสามารถเรียงลำดับความไม่อิ่มตัวจากมากไปน้อยได้ดังนี้

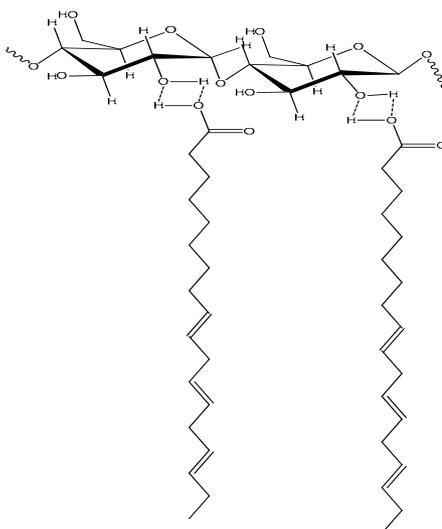
กรดไขมันที่ได้จากน้ำมันดอกคาโนล่าห์ > กรดไขมันที่ได้จากน้ำมันดอกทานตะวัน > กรดไขมันโอเลอิก



ภาพที่ 27 แสดงการเกิด H-bonding ระหว่างแป้งกับกรดโอเลอิก

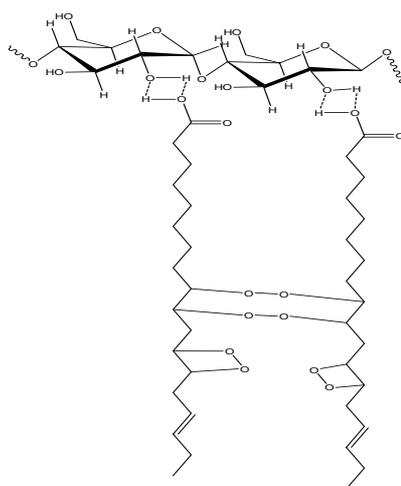


ภาพที่ 28 แสดงการเกิด H-bonding ระหว่างแป้งกับกรดไขมันที่ได้  
จากน้ำมันดอกทานตะวัน



ภาพที่ 29 แสดงการเกิด H-bonding ระหว่างแป้งกับกรดไขมันที่ได้  
จากน้ำมันดอกคาโนล่าห์

สำหรับความไม่อึดตัวในโครงสร้างก็จะมีส่วนช่วยทำให้การป้องกันการดูดความชื้นของเทอร์โมพลาสติกสตาซมีประสิทธิภาพมากขึ้นและยังมีความไม่อึดตัวมาก การดูดความชื้นของชิ้นงานก็จะน้อยลง ทั้งนี้เนื่องจากความไม่อึดตัวในโครงสร้างก็หมายถึงการมี carbon double bond อยู่ในโครงสร้าง ซึ่งสามารถเกิดการ crosslink ระหว่างโมเลกุลภายหลังจากการเกิดปฏิกิริยา oxidation กับออกซิเจนในบรรยากาศ ขณะเดียวกันยังสามารถเกิดแรงยึดเหนี่ยวแบบ Dipole-Dipole moment ระหว่างโมเลกุลได้อีกด้วย [31],[32],[33]ดังภาพที่ 30



ภาพที่ 30 การเกิด crosslink และการเกิดแรงยึดเหนี่ยวแบบ Dipole-Dipole moment ระหว่าง  
โมเลกุลระหว่างแป้งกับกรดไขมันที่ไม่อึดตัว

### การเคลือบผิวชิ้นงานเทอร์โมพลาสติกสตาซด้วย N-alkyl chitosan

การศึกษาลักษณะทางกายภาพของชิ้นงานเทอร์โมพลาสติกสตาซที่มีการเคลือบด้วย N-alkyl chitosan ต่างชนิดกัน ดังตารางที่ 9 ซึ่งแสดงลักษณะทางกายภาพทั้งชิ้นงาน impact testing และชิ้นงาน tensile testing พบว่า การเคลือบผิวชิ้นงานเทอร์โมพลาสติกสตาซด้วย N-alkyl chitosan ชนิดต่างๆ มีการยึดติดที่ดีกับผิวของชิ้นงานจากเทอร์โมพลาสติกสตาซ และมีลักษณะของผิวที่เรียบ

จากศึกษาการทดสอบการยึดติดตามมาตรฐาน ASTM D3359 ซึ่งการเคลือบชิ้นงานเทอร์โมพลาสติกสตาซที่มีสารเคลือบที่เป็น N-alkyl chitosan ต่างชนิดกันพบว่าการเคลือบผิวชิ้นงานเทอร์โมพลาสติกสตาซด้วย N-alkyl chitosan ชนิดต่างๆ จะมีเปอร์เซ็นต์การหลุดลอกของสารเคลือบที่ใกล้เคียงกันอยู่ระหว่าง 21-23 % ซึ่งเมื่อเทียบกับมาตรฐานการหลุดลอก คือ 5B ดังตารางที่ 9 ซึ่งการยึดติดระหว่างผิวชิ้นงานเทอร์โมพลาสติกสตาซกับสารเคลือบที่เป็น N-alkyl chitosan จะมีแรงยึดเหนี่ยวเป็น H-bonding แต่การยึดติดของ N-undecenyl chitosan จะมีการยึดติดระหว่าง layer ที่ดีกว่าเล็กน้อยทั้งนี้เพราะภายในโมเลกุลมีพันธะคู่

ตารางที่ 9 ลักษณะทางกายภาพของชิ้นงานเทอร์โมพลาสติกสตาซที่มีการเคลือบด้วย N-alkyl chitosan ต่างชนิดกัน

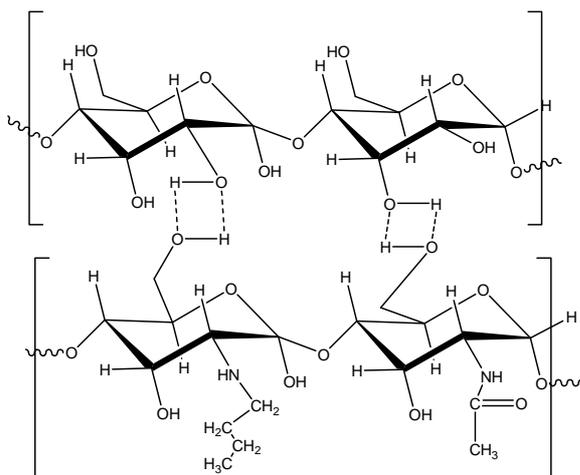
ชนิดของสารเคลือบผิว	ตัวอย่างชิ้นงาน	เปอร์เซ็นต์การหลุดลอก	ลักษณะการยึดติดกับชิ้นงาน
N-butyl chitosan		23	5B
N-undecyl chitosan		22	5B

ชนิดของสารเคลือบผิว	ตัวอย่างชิ้นงาน	เปอร์เซ็นต์การหลุดลอก	ลักษณะการยึดติดกับชิ้นงาน
N-undecenyl chitosan		21.00	5B

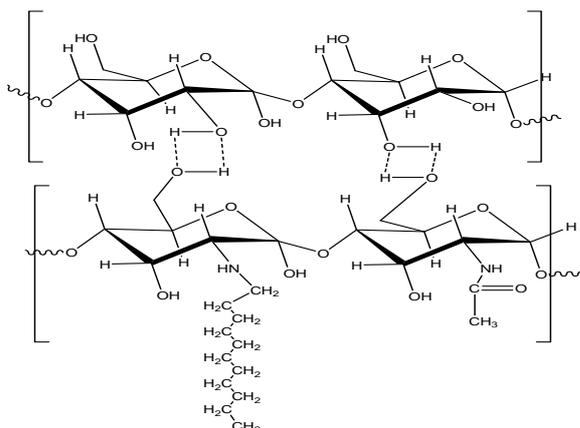
### ลักษณะการยึดติดของชิ้นงานเทอร์โมพลาสติกสตาซกับ

#### saturated N-alkyl chitosan

การยึดเกาะพื้นผิวของ saturated N-alkyl chitosan ได้แก่ N-butyl chitosan และ N-undecyl chitosan กับพื้นผิวของชิ้นงานเทอร์โมพลาสติกสตาซ ดังภาพที่ 31 ถึงภาพที่ 32 จะแสดงการเกิดแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลที่เป็น H-bonding ระหว่างส่วนที่มีขั้วของ saturated N-alkyl chitosan กับเทอร์โมพลาสติกสตาซ ขณะที่ส่วนที่ไม่มีขั้วของ saturated N-alkyl chitosan จะหันออกด้านนอกของชิ้นงานเทอร์โมพลาสติกสตาซ ซึ่งจะเห็นได้ว่าส่วนที่ไม่มีขั้วของ N-alkyl chitosan เป็นส่วนที่สำคัญอย่างยิ่งในการป้องกันการดูดความชื้น เพราะถ้าหากส่วนที่ไม่มีขั้วของ N-alkyl chitosan มีความยาวของสายโซ่มากก็จะสามารถป้องกันความชื้นได้มากขึ้น



ภาพที่ 31 แสดงการเกิด H-bonding ระหว่างแป้งกับ N-butyl chitosan

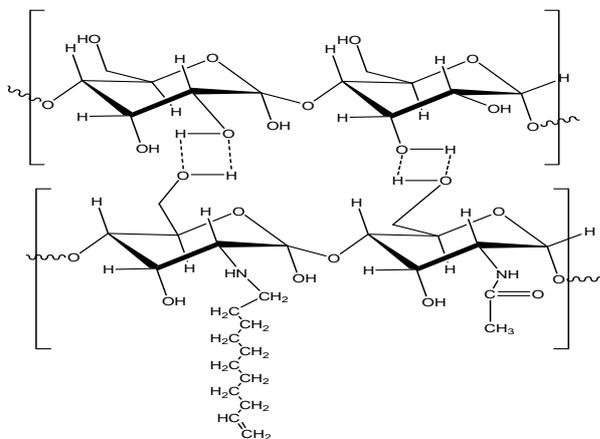


ภาพที่ 32 แสดงการเกิด H-bonding ระหว่างแป้งกับ N-undecyl chitosan

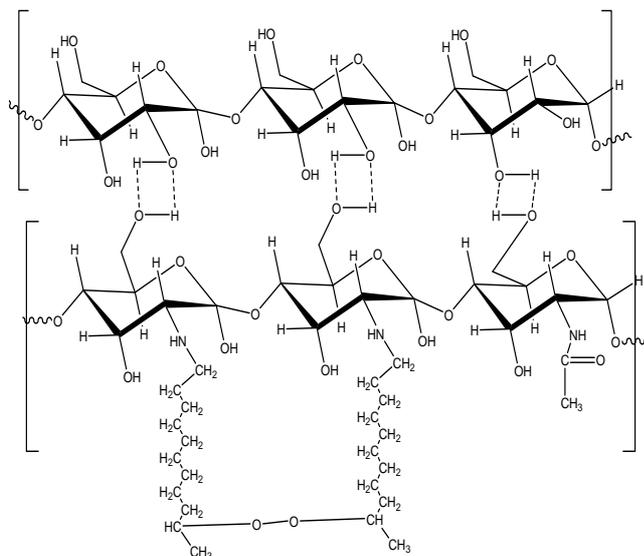
### ลักษณะการยึดติดของชิ้นงานเทอร์โมพลาสติกสตาซกับ

#### unsaturated N-alkyl chitosan

การยึดเกาะพื้นผิวของ unsaturated N-alkyl chitosan ได้แก่ N-undecenyl chitosan กับพื้นผิวของชิ้นงานเทอร์โมพลาสติกสตาซ ดังภาพที่ 33 จะแสดงการเกิดแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลที่เป็น H-bonding ระหว่างส่วนที่มีขั้วของ N-undecenyl chitosan กับเทอร์โมพลาสติกสตาซ ขณะที่ส่วนที่ไม่มีขั้วของ N-undecenyl chitosan จะหันออกด้านนอกของชิ้นงานเทอร์โมพลาสติกสตาซ ซึ่งความไม่อึดตัวในโครงสร้างก็จะมีส่วนในการป้องกันการดูดความชื้นของชิ้นงานเทอร์โมพลาสติกสตาซได้มากขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากการมี carbon carbon double bond อยู่ในโครงสร้างซึ่งสามารถเกิดการ crosslink ระหว่างโมเลกุลภายหลังจากการเกิดปฏิกิริยา oxidation กับบรรยากาศ ดังภาพที่ 34



ภาพที่ 33 แสดงการเกิด H-bonding ระหว่างแป้งกับ N-undecenyl chitosan



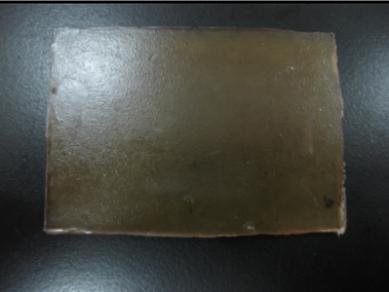
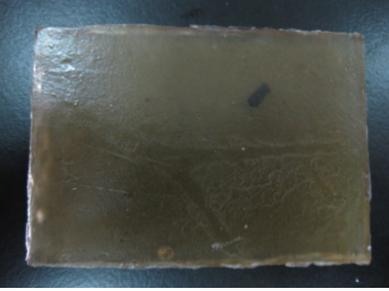
ภาพที่ 34 การเกิด crosslink ระหว่างโมเลกุลของ N-decanyl chitosan

#### การเคลือบผิวชิ้นงานเทอร์โมพลาสติกสตาซด้วย quaternized chitosan

การศึกษาลักษณะทางกายภาพของชิ้นงานเทอร์โมพลาสติกสตาซที่มีการเคลือบด้วย quaternized chitosan ต่างชนิดกัน ดังตารางที่ 10 ซึ่งแสดงลักษณะทางกายภาพทั้งชิ้นงาน impact testing และชิ้นงาน tensile testing พบว่า การเคลือบผิวชิ้นงานเทอร์โมพลาสติกสตาซด้วย quaternized chitosan ชนิดต่างๆ มีการยึดติดที่ดีกับผิวของชิ้นงานจากเทอร์โมพลาสติกสตาซ และมีลักษณะของผิวที่เรียบ

จากศึกษาการทดสอบการยึดติดตามมาตรฐาน ASTM D3359 ซึ่งการเคลือบชิ้นงานเทอร์โมพลาสติกสตาซที่มีสารเคลือบที่เป็น quaternized chitosan ต่างชนิดกัน พบว่าการเคลือบผิวชิ้นงานเทอร์โมพลาสติกสตาซด้วย quaternized chitosan ชนิดต่างๆ จะมีเปอร์เซ็นต์การหลุดลอกของสารเคลือบที่ใกล้เคียงกันอยู่ระหว่าง 14-21 % ซึ่งเมื่อเทียบกับมาตรฐานการหลุดลอกคือ 5B ดังตารางที่ 10 ซึ่งการยึดติดระหว่างผิวชิ้นงานเทอร์โมพลาสติกสตาซกับสารเคลือบที่เป็น quaternized chitosan จะมีแรงยึดเหนี่ยวเป็น H-bonding แต่การยึดติดของ N-butyl,(N,N)-dioctadecenyl chitosan จะมีการยึดติดระหว่าง layer ที่ดีกว่าเล็กน้อยทั้งนี้เพราะภายในโมเลกุลมีพันธะคู่

ตารางที่ 10 ลักษณะทางกายภาพของชิ้นงานเทอร์โมพลาสติกสตาซที่มีการเคลือบด้วย quaternized chitosan ต่างชนิดกัน

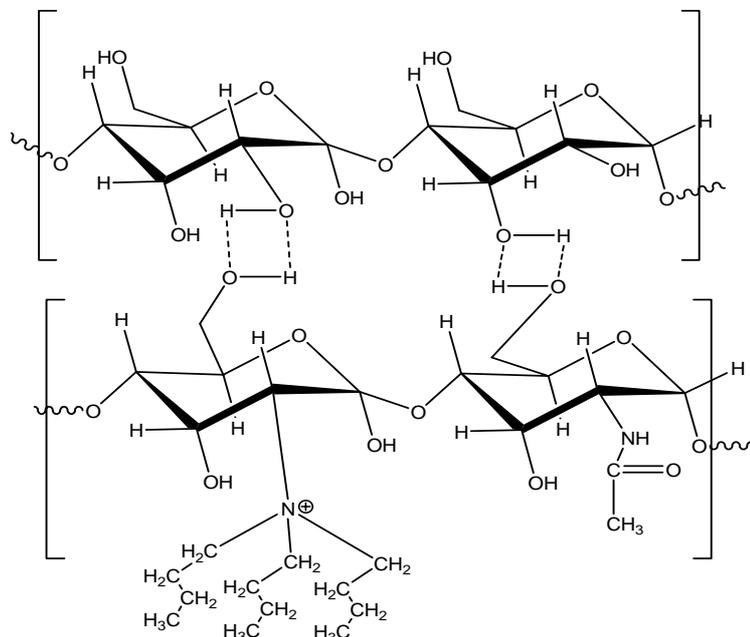
ชนิดของสารเคลือบผิว	ตัวอย่างชิ้นงาน	เปอร์เซ็นต์การหลุดลอก	ลักษณะการยึดติดกับชิ้นงาน
(N,N,N)-tributyl chitosan		21	5B
N-butyl,(N,N)-diundecyl chitosan		18	5B
N-butyl,(N,N)-dioctadecenyl chitosan		14	5B

### ลักษณะการยึดติดของชิ้นงานเทอร์โมพลาสติกสตาซกับ

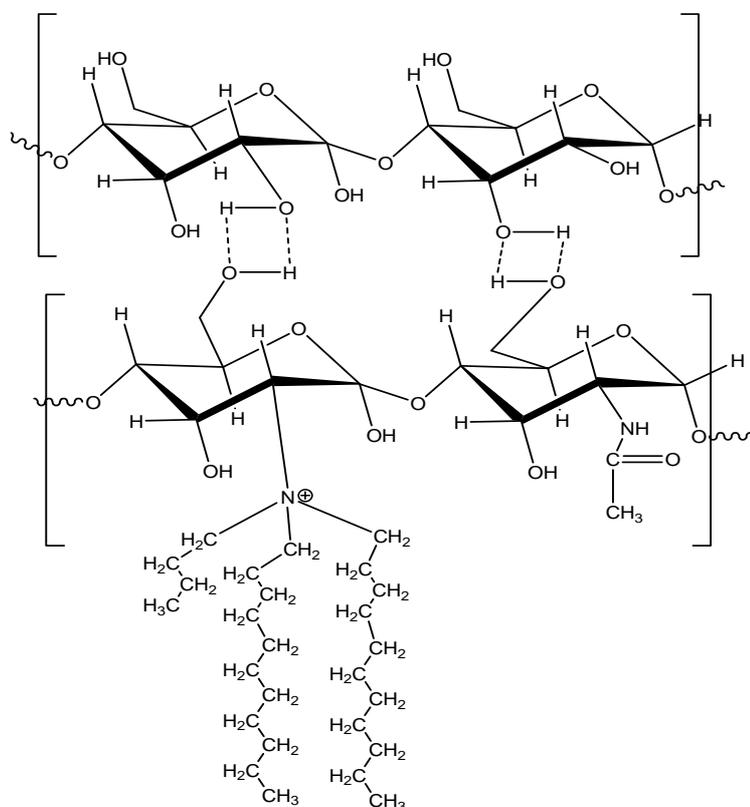
#### saturated quaternized chitosan

การยึดเกาะพื้นผิวของ saturated quaternized chitosan ได้แก่ (N,N,N)-tributyl chitosan และ N-butyl,(N,N)-diundecyl chitosan กับพื้นผิวของชิ้นงานเทอร์โมพลาสติกสตาซ ดังจากภาพที่ 35 ถึงภาพที่ 36 จะแสดงการเกิดแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลที่เป็น H-bonding ระหว่างส่วนที่มีขั้วของ saturated quaternized chitosan กับเทอร์โมพลาสติกสตาซ ขณะที่ส่วนที่ไม่มีขั้วของ saturated quaternized chitosan จะหันออกด้านนอกของชิ้นงานเทอร์โมพลาสติกสตาซ ซึ่งจะเห็นได้ว่าส่วนที่ไม่มีขั้วของ saturated quaternized chitosan เป็นส่วนที่สำคัญ

อย่างยิ่งในการป้องกันการดูดความชื้น เพราะถ้าหากส่วนที่ไม่มีขั้วของ saturated quaternized chitosan มีความยาวของสายโซ่มากก็ยังสามารถป้องกันการดูดความชื้นได้มากขึ้น



ภาพที่ 35 แสดงการเกิด H-bonding ระหว่างแป้งกับ (N,N,N)-tributyl chitosan

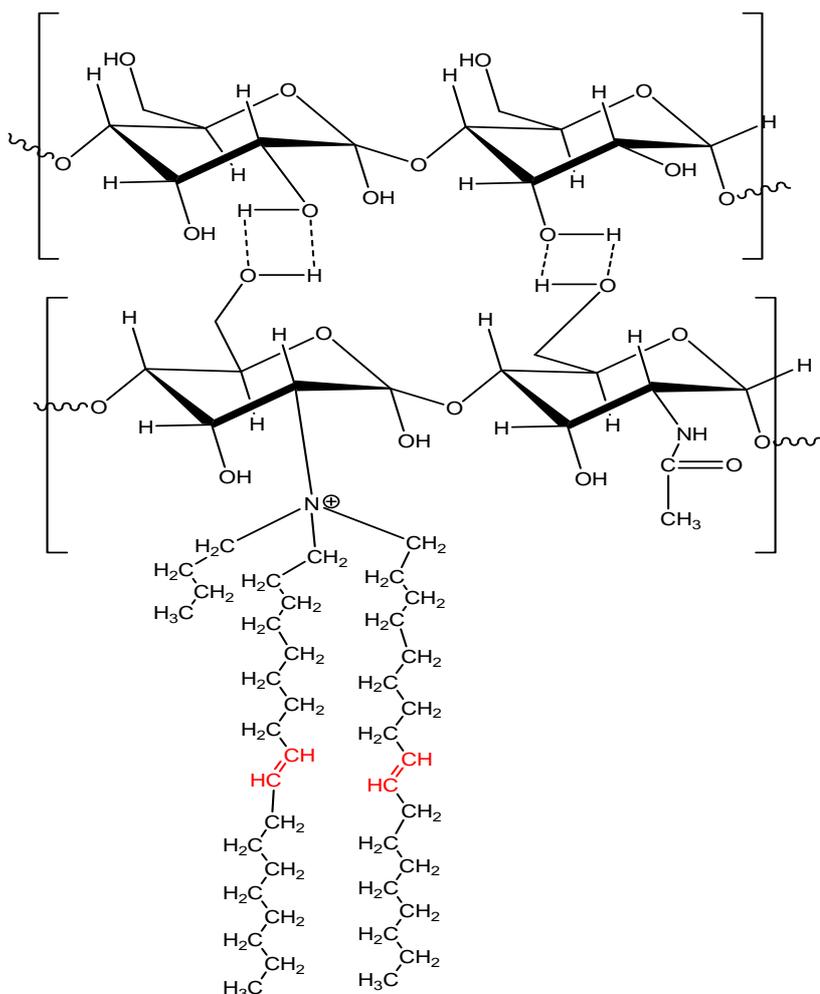


ภาพที่ 36 แสดงการเกิด H-bonding ระหว่างแป้งกับ N-butyl,(N,N)-diundecyl chitosan

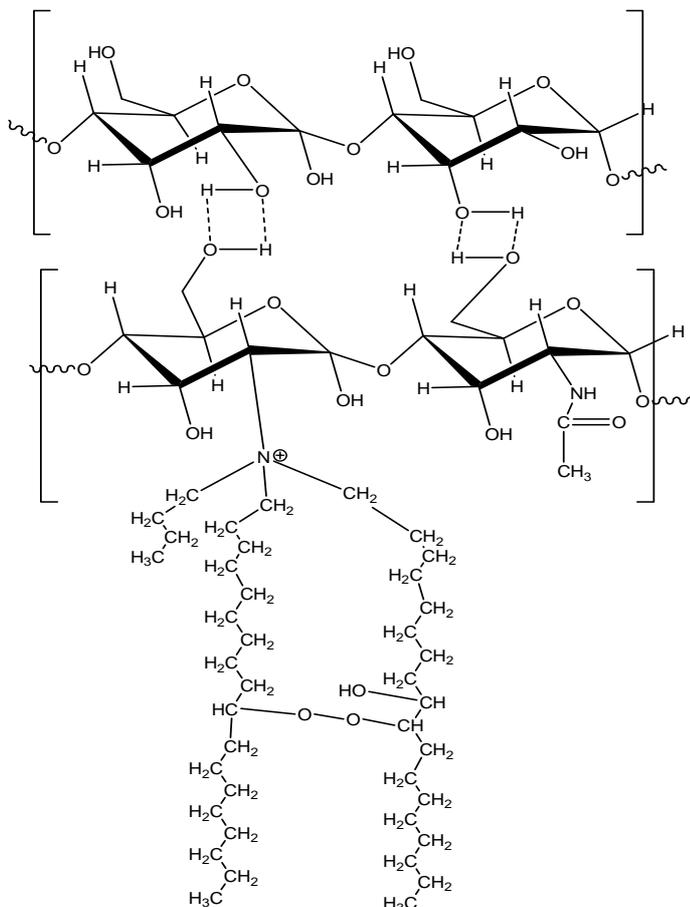
ลักษณะการยึดติดของชิ้นงานเทอร์โมพลาสติกสตาซกับ

### unsaturated quaternized chitosan

การยึดเกาะพื้นผิวของ unsaturated quaternized chitosan ได้แก่ N-butyl,(N,N)-dioctadecenyl chitosan กับพื้นผิวของชิ้นงานเทอร์โมพลาสติกสตาซ ดังภาพที่ 37 จะแสดงการเกิดแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลที่เป็น H-bonding ระหว่างส่วนที่มีขั้วของ N-butyl,(N,N)-dioctadecenyl chitosan กับเทอร์โมพลาสติกสตาซ ขณะที่ส่วนที่ไม่มีขั้วของ N-butyl,(N,N)-dioctadecenyl chitosan จะหันออกด้านนอกของชิ้นงานเทอร์โมพลาสติกสตาซ ซึ่งความไม่อึดตัวในโครงสร้างก็จะมีส่วนในการป้องกันการดูดความชื้น ชิ้นงานเทอร์โมพลาสติกสตาซได้มากขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากการมี carbon carbon double bond อยู่ในโครงสร้างซึ่งมันสามารถเกิดการ crosslink ระหว่างโมเลกุลหลังจากการเกิดปฏิกิริยา oxidation กับบรรยากาศ ดังภาพที่ 38



ภาพที่ 37 แสดงการเกิด H-bonding ระหว่างเบ็งกับ N-butyl,(N,N)-dioctadecenyl chitosan



ภาพที่ 38 การเกิด crosslink ระหว่างโมเลกุลของ N-butyl,(N,N)-dioctadecenyl chitosan

### การศึกษาสมบัติการดูดความชื้น

การศึกษาสมบัติการดูดความชื้นของชิ้นงานเทอร์โมพลาสติกสตาซที่เป็นชิ้นงาน impact testing และชิ้นงาน tensile testing ได้แสดงดังตารางที่ 11 และภาพที่ 39 ถึงภาพที่ 42 ซึ่งได้ศึกษาสมบัติการดูดความชื้นของชิ้นงานเทอร์โมพลาสติกสตาซที่ไม่มีการเคลือบและที่มีการเคลือบด้วยสารเคลือบต่างชนิดกัน ภายใต้ความชื้นสัมพัทธ์ 53% เป็นเวลา 15 วัน ซึ่งเมื่อพิจารณาน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงไป จึงทำการคำนวณเปอร์เซ็นต์การดูดความชื้น เพื่อเปรียบเทียบการดูดความชื้นของชิ้นงานที่นำมาทดสอบ ซึ่งสามารถคำนวณเปอร์เซ็นต์การดูดความชื้นได้ดังนี้

เปอร์เซ็นต์การดูดความชื้น =

เมื่อทำการคำนวณหาเปอร์เซ็นต์การดูดความชื้นของชิ้นงานเทอร์โมพลาสติกสตาซที่ทำ การทดสอบความชื้นสัมพัทธ์ 53% เป็นเวลา 15 วัน พบว่าชิ้นงานเทอร์โมพลาสติกสตาซทั้งที่เป็น

ชิ้นงาน impact testing และชิ้นงาน tensile testing โดยเฉพาะที่มีการเคลือบผิวชิ้นงานด้วยสารเคลือบชนิดต่างๆ จะมีเปอร์เซ็นต์การดูดความชื้นที่น้อยกว่าชิ้นงานเทอร์โมพลาสติกสตาซที่ไม่มี การเคลือบผิวทั้งนี้เพราะชิ้นงานเทอร์โมพลาสติกสตาซที่มีการเคลือบผิวมีส่วนที่เป็น hydrophobic ซึ่งเป็นส่วนที่ไม่มีขั้วจึงสามารถป้องกันการดูดความชื้นได้ ขณะที่ชิ้นงานเทอร์โมพลาสติกสตาซที่ไม่มี การเคลือบผิวมีส่วน hydrophilic เพียงส่วนเดียวซึ่งเป็นส่วนที่มีขั้วจึงทำให้มี interaction กับ ความชื้น ได้ดี ดังนั้นเมื่อเรียงลำดับเปอร์เซ็นต์การดูดความชื้นของชิ้นงานเทอร์โมพลาสติกสตาซที่ มีการเคลือบด้วยสารเคลือบชนิดต่างๆกับชิ้นงานที่ไม่มีเคลือบได้ดังนี้

ชิ้นงานที่ไม่มีเคลือบ > ชิ้นงานที่เคลือบด้วยกรดสเตียริก > ชิ้นงานที่เคลือบด้วย N-butyl chitosan > ชิ้นงานที่เคลือบด้วย N-undecyl chitosan > ชิ้นงานที่เคลือบด้วย (N,N,N)-tributyl chitosan > ชิ้นงานที่เคลือบด้วย N-undecenyl chitosan > ชิ้นงานที่เคลือบด้วยกรดโอเลอิก > ชิ้นงานที่เคลือบด้วยกรดไขมันจากน้ำมันดอกทานตะวัน > ชิ้นงานที่เคลือบด้วย N-butyl,(N,N)-diundecyl chitosan > ชิ้นงานที่เคลือบด้วย N-butyl,(N,N)-dioctadecenyl chitosan > ชิ้นงานที่เคลือบด้วยกรดไขมันจากน้ำมันดอกคาโนล่าห์

ทั้งนี้จะเห็นได้ว่าชิ้นงานที่มีการเคลือบด้วยกรดไขมันที่มีความไม่อิ่มตัวสูง ได้แก่กรดไขมันจากน้ำมันดอกคาโนล่าห์ซึ่งมีปริมาณกรดไขมันไม่อิ่มตัวสูงถึง 93% จะมีเปอร์เซ็นต์การดูดความชื้นที่ต่ำที่สุดเนื่องจากการมี carbon carbon double bond อยู่ในโครงสร้างจึงสามารถเกิดปฏิกิริยา Oxidation กับออกซิเจนในบรรยากาศ ซึ่งนำไปสู่การเกิด crosslink ระหว่างโมเลกุลได้ และขณะเดียวกันสามารถเกิดแรงยึดเหนี่ยวแบบ Dipole-Dipole interaction ระหว่างโมเลกุลที่แข็งแรง ดังภาพที่ 30 ดังนั้น จึงทำให้การเคลือบผิวด้วยกรดไขมันจากน้ำมันดอกคาโนล่าห์มีประสิทธิภาพในการป้องกันความชื้นที่สูงที่สุด

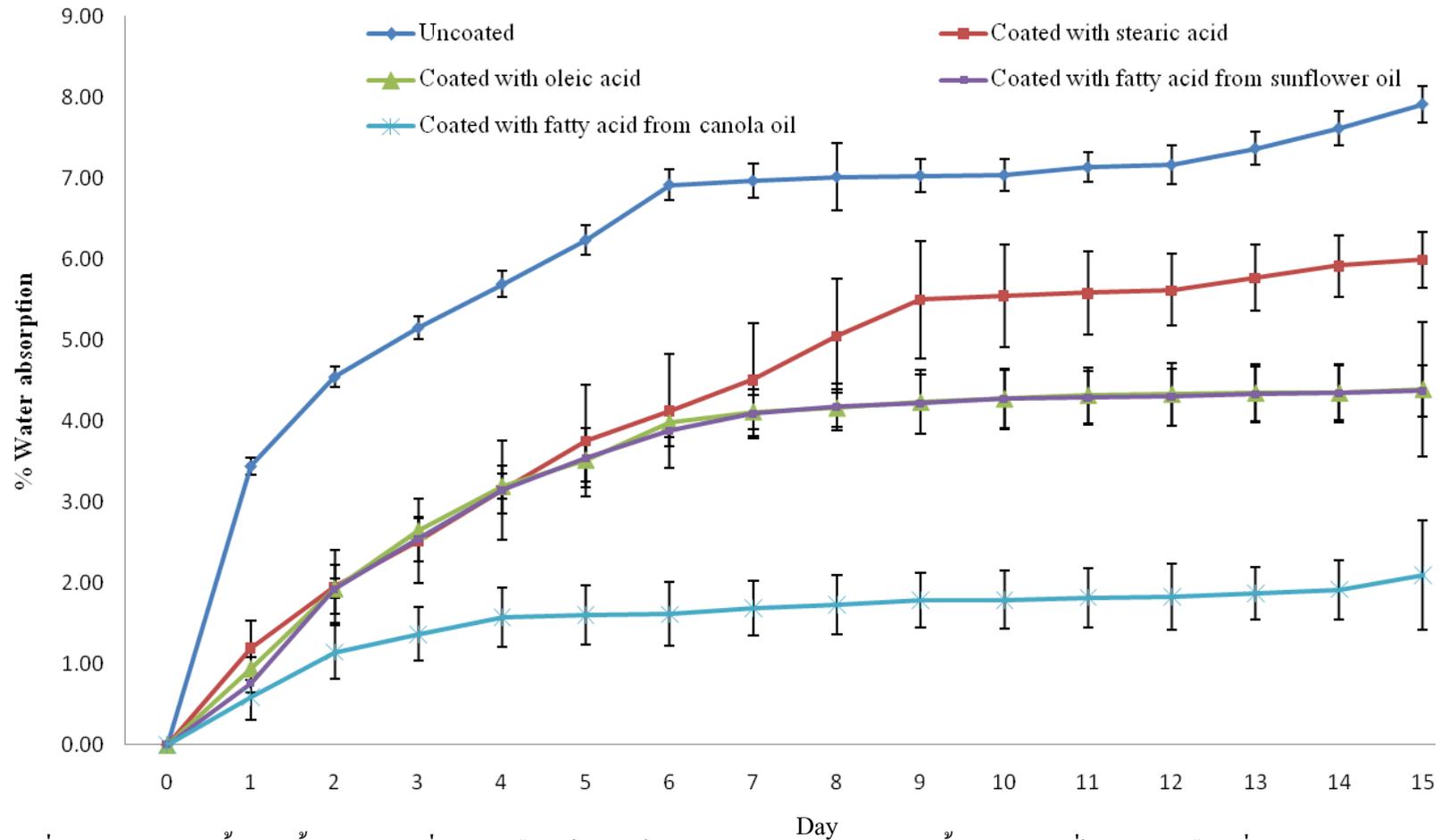
ขณะเดียวกันได้ทำการทดสอบค่าเปอร์เซ็นต์การดูดความชื้นด้วยโปรแกรมทางสถิติ (SPSS : one way ANOVA test) ซึ่งจะพบว่าเปอร์เซ็นต์การเคลือบผิวชิ้นงานทั้ง impact specimens และ tensile specimens มีค่าแตกต่างกันที่ระดับนัยสำคัญทางสถิติ 0.05 นั้นหมายความว่า การเคลือบผิวด้วยสารเคลือบชนิดต่างๆ มีผลต่อการดูดความชื้นของชิ้นงานเทอร์โมพลาสติกสตาซ ซึ่งผลการทดสอบยังสามารถจำแนกประสิทธิภาพของสารเคลือบได้โดยสามารถพิจารณาได้จาก การใส่ตัว subscript ที่จัดจำแนกแบ่งกลุ่มสารเคลือบที่มีประสิทธิภาพใกล้เคียงกัน(สำหรับชิ้นงาน impact testing) เช่น สารเคลือบจากกรดสเตียริก สารเคลือบจาก N-butyl chitosan สารเคลือบจาก N-undecyl chitosan และสารเคลือบจาก(N,N,N)-tributyl chitosan เป็นสารเคลือบที่มีประสิทธิภาพในการป้องกันการความชื้นที่ใกล้เคียงกัน ส่วนสารเคลือบจากกรดโอเลอิก สารเคลือบ

จากกรดไขมันจากน้ำมันดอกทานตะวัน และสารเคลือบจาก N-butyl,(N,N)-diundecyl chitosan ก็เป็นสารเคลือบที่มีประสิทธิภาพในการป้องกันการความชื้นที่ใกล้เคียงกันอีกกลุ่มหนึ่ง เป็นต้น

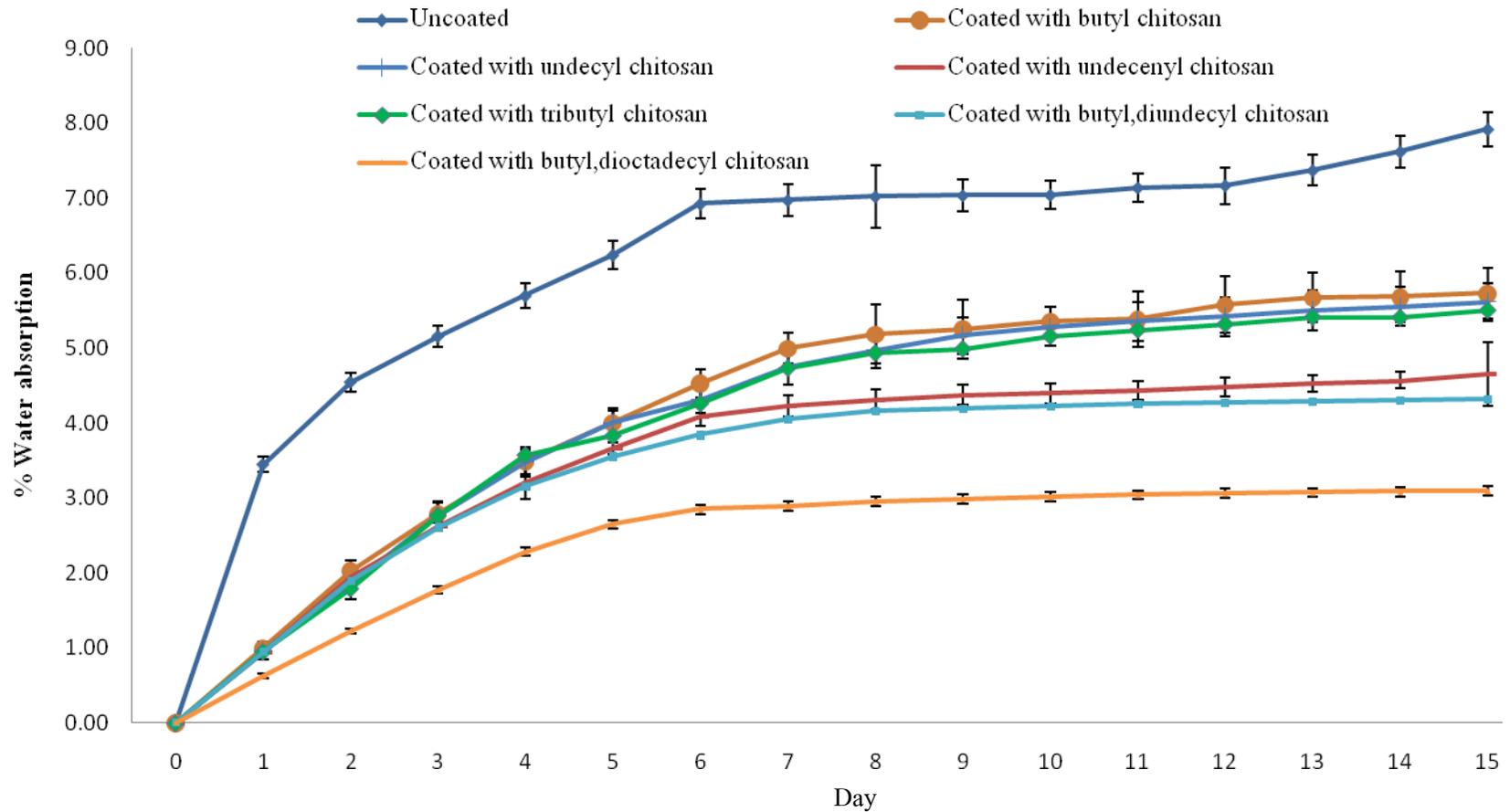
ตารางที่ 11 การดูดความชื้นของชิ้นงาน TPS ที่มีการเคลือบด้วยสารเคลือบต่างชนิดกัน  
เทียบกับชิ้นงาน TPS ที่ไม่มีการเคลือบ ที่สภาวะ 53%RH เป็นเวลา 15 วัน

ชนิดสารเคลือบ	เปอร์เซ็นต์การดูดความชื้น	
	impact specimens <sup>1</sup>	tensile specimens <sup>1</sup>
	Mean±SD	Mean±SD
ชิ้นงานที่ไม่มีการเคลือบ	7.92±0.231 <sup>a</sup>	7.46±0.175 <sup>a</sup>
กรดสเตียริก	5.99±0.357 <sup>b</sup>	5.47±0.908 <sup>b</sup>
กรดโอเลอิก	4.39±0.861 <sup>c</sup>	3.24±0.234 <sup>c</sup>
กรดไขมันจากน้ำมันดอกทานตะวัน	4.37±0.322 <sup>c</sup>	2.97±0.099 <sup>c</sup>
กรดไขมันจากน้ำมันดอกคาโนล่าห์	2.10±0.705 <sup>e</sup>	1.71±0.291 <sup>f</sup>
N-butyl chitosan	5.73±0.344 <sup>b</sup>	5.25±0.391 <sup>b,c</sup>
N-undecyl chitosan	5.61±0.253 <sup>b</sup>	5.03±0.178 <sup>b,c</sup>
N-undecenyl chitosan	4.65±0.427 <sup>c</sup>	4.15±0.173 <sup>d</sup>
(N,N,N)-tributyl chitosan	5.50±0.588 <sup>b</sup>	4.84±0.557 <sup>c</sup>
N-butyl,(N,N)-diundecyl chitosan	4.32±0.013 <sup>c</sup>	2.83±0.017 <sup>c</sup>
N-butyl,(N,N)-dioctadecenyl chitosan	3.09±0.061 <sup>d</sup>	2.09±0.079 <sup>f</sup>

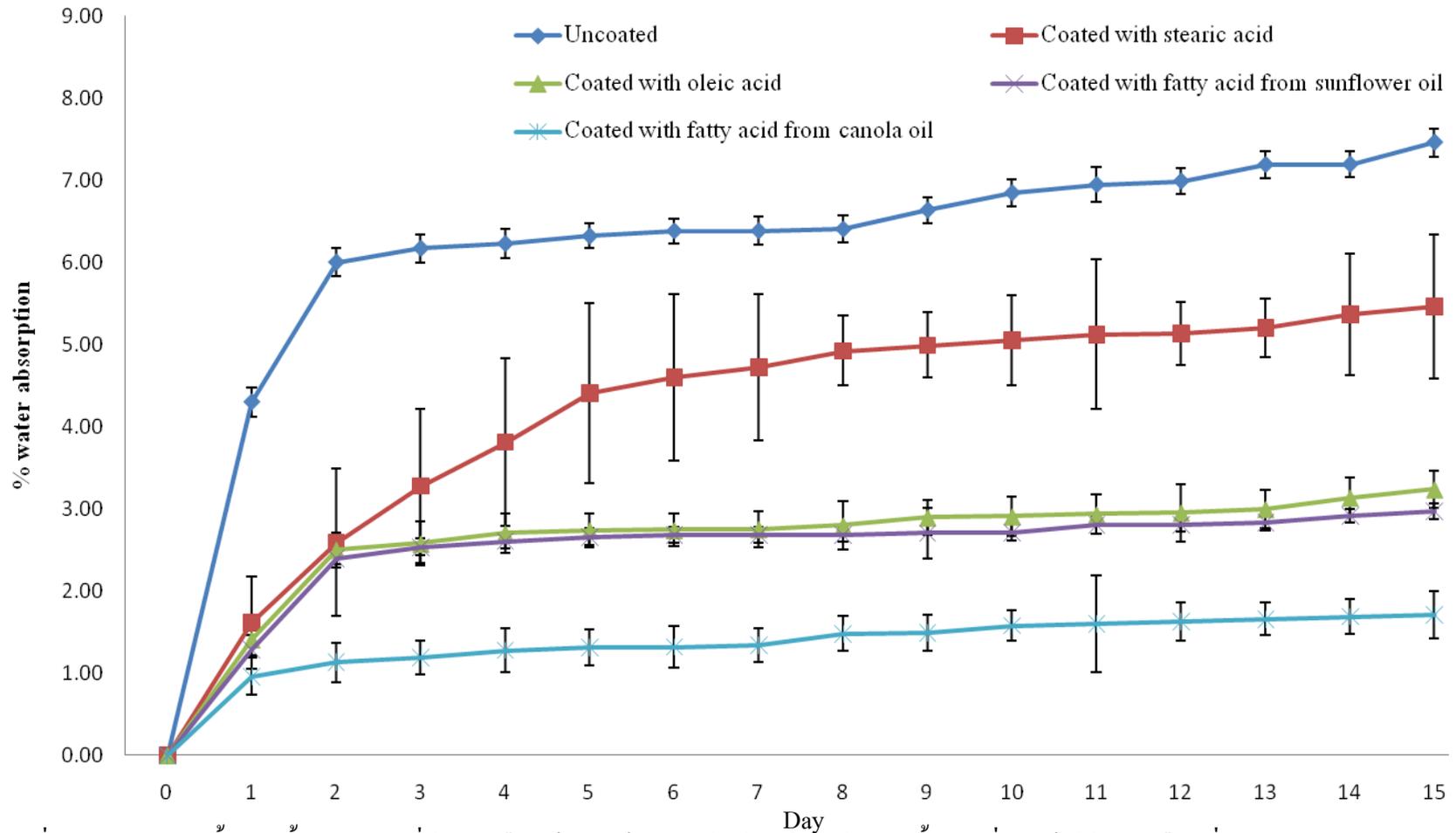
หมายเหตุ<sup>1</sup> one way ANOVA test ด้วยวิธีของ Scheffe's ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05



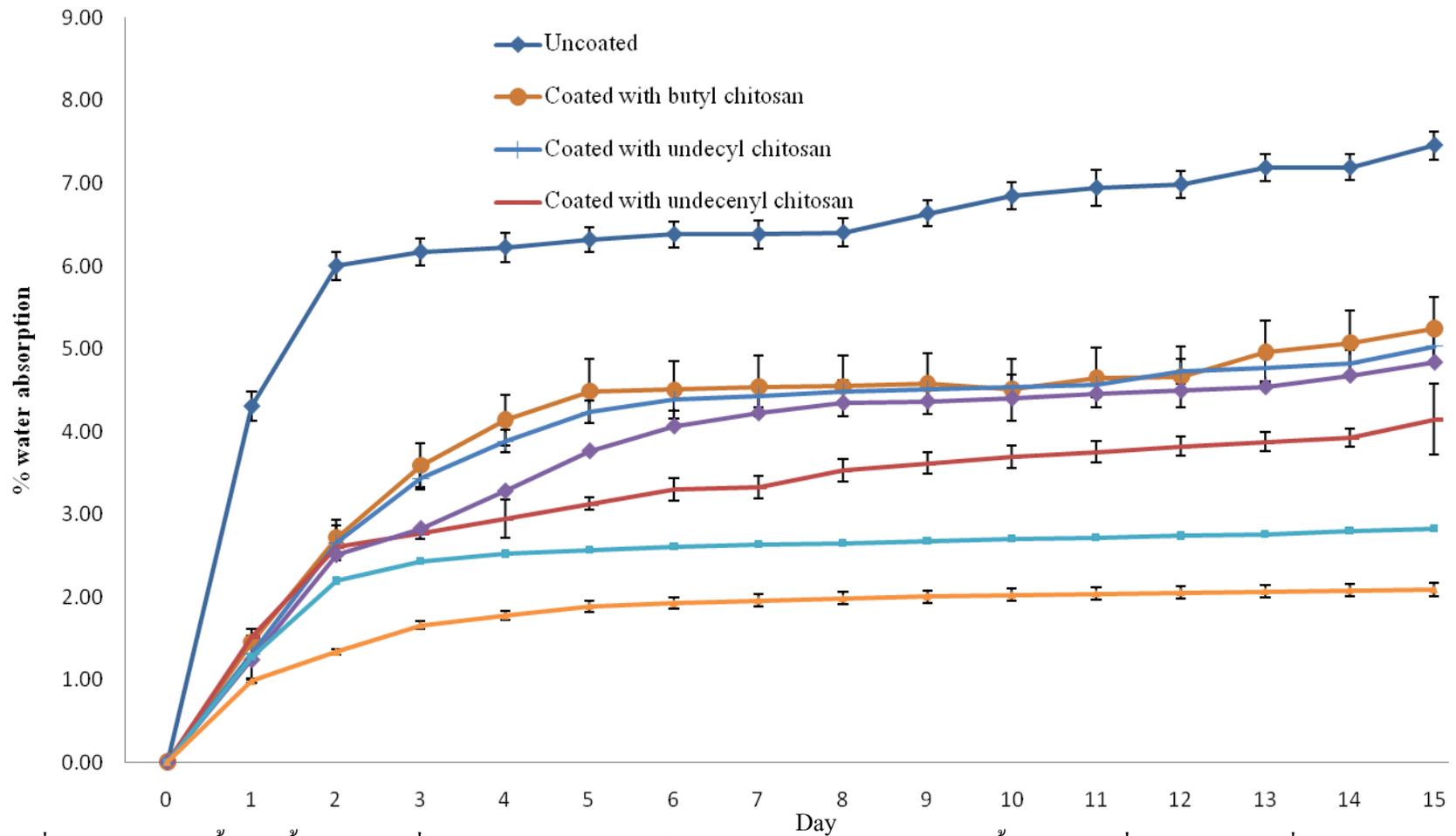
ภาพที่ 39 การดูความชื้นของชิ้นงาน TPS ที่มีการเคลือบด้วยกรดไขมันชนิดต่างๆ โดยเทียบกับชิ้นงาน TPS ที่ไม่มีการเคลือบที่สภาวะ 53%RH เป็นเวลา 15 วัน สำหรับชิ้นงาน impact testing



ภาพที่ 40 การดูดความชื้นของชิ้นงาน TPS ที่มีการเคลือบด้วยอนุพันธ์ไคโตซานชนิดต่างๆ โดยเทียบกับชิ้นงาน TPS ที่ไม่มีการเคลือบที่สภาวะ 53%RH เป็นเวลา 15 วัน สำหรับชิ้นงาน impact testing



ภาพที่ 41 การดูดความชื้นของชิ้นงาน TPS ที่มีการเคลือบด้วยกรดไขมันชนิดต่างๆ โดยเทียบกับชิ้นงานที่ TPS ไม่มีการเคลือบที่สภาวะ 53%RH เป็นเวลา 15 วัน สำหรับชิ้นงาน tensile testing



ภาพที่ 42 การดูดความชื้นของชิ้นงาน TPS ที่มีการเคลือบด้วยอนุพันธ์ไคโตซานชนิดต่างๆ โดยเทียบกับชิ้นงาน TPS ที่ไม่มีการเคลือบที่สภาวะ 53%RH เป็นเวลา 15 วัน สำหรับชิ้นงาน tensile testing

### การวิเคราะห์คุณสมบัติการทนทานต่อแรงกระแทก (impact properties)

การศึกษาสมบัติการทนทานต่อแรงกระแทก ของชิ้นงานเทอร์โมพลาสติกสตาซที่ไม่ได้เคลือบผิวและที่เคลือบผิวด้วยสารเคลือบต่างชนิดกัน ดังตารางที่ 12 และภาพที่ 43 ซึ่งเมื่อพิจารณา ค่า impact strength ของชิ้นงานที่ยังไม่ผ่านทดสอบการดูดความชื้น จะมีค่าอยู่ในช่วง 6.61-5.79 kJ/m<sup>2</sup> ซึ่งเมื่อทำการทดสอบ impact strength ดังกล่าวด้วยโปรแกรมทางสถิติ(SPSS : one way ANOVA test) จะพบว่า การศึกษาสมบัติการทนแรงกระแทกมีความแตกต่างกันน้อยที่ระดับนัยสำคัญทางสถิติ 0.01 ทั้งนี้เมื่อพิจารณาจากการใส่ตัว subscript ที่เป็นการจำแนกข้อมูลออกเป็นกลุ่ม ซึ่งจะเห็นค่า impact strength สามารถจัดเป็นกลุ่มได้ 4 กลุ่ม ได้แก่ a, b, c และ (b,c)

ขณะที่การศึกษาชิ้นงานเทอร์โมพลาสติกสตาซที่ผ่านการทดสอบการดูดความชื้นสัมพัทธ์ 53 %RH จะสามารถเรียงลำดับค่าสมบัติการทนแรงกระแทกได้ดังนี้

ชิ้นงานที่ไม่มีการเคลือบ > ชิ้นงานที่เคลือบด้วยกรดสเตียริก > ชิ้นงานที่เคลือบด้วย N-butyl chitosan > ชิ้นงานที่เคลือบด้วย N-undecyl chitosan > ชิ้นงานที่เคลือบด้วย (N,N,N)-tributyl chitosan > ชิ้นงานที่เคลือบด้วย N-undecenyl chitosan > ชิ้นงานที่เคลือบด้วยกรดโอเลอิก > ชิ้นงานที่เคลือบด้วยกรดไขมันจากน้ำมันดอกทานตะวัน > ชิ้นงานที่เคลือบด้วย N-butyl,(N,N)-diundecyl chitosan > ชิ้นงานที่เคลือบด้วย N-butyl,(N,N)-dioctadecenyl chitosan > ชิ้นงานที่เคลือบด้วยกรดไขมันจากน้ำมันดอกคาโนล่าห์

เมื่อทดสอบด้วยโปรแกรมทางสถิติ(SPSS : one way ANOVA test)จะพบว่า ชิ้นงานเทอร์โมพลาสติกสตาซที่ผ่านการทดสอบการดูดความชื้นสัมพัทธ์53 % จะมีค่า impact strength ที่มีความแตกต่างกันที่ระดับนัยสำคัญทางสถิติ 0.05 นั่นหมายความว่า การเคลือบชิ้นงานเทอร์โมพลาสติกสตาซด้วยสารเคลือบต่างชนิดกัน จะให้ค่าการทนแรงกระแทกที่ต่างกัน ตามประสิทธิภาพของสารเคลือบ

ซึ่งสาเหตุที่ทำให้ชิ้นงานที่ไม่ได้รับการเคลือบผิวมีค่าการทนแรงกระแทกสูงที่สุดเป็นเพราะชิ้นงานดังกล่าวสามารถดูดความชื้นได้มากที่สุด ซึ่งความชื้นหรือโมเลกุลของน้ำนี้เอง จะทำหน้าที่เป็นPlasticizer จึงทำให้ชิ้นงานมีความยืดหยุ่นสูง ดังนั้นขณะที่มีการทดสอบการทนแรงกระแทก สายโซ่ภายในโมเลกุลของชิ้นงานจะสามารถเกิดการเคลื่อนไหวได้ง่าย ซึ่งจะทำให้โมเลกุลมีความสามารถดูดซับพลังงานได้มากขึ้น

ขณะที่ชิ้นงานที่มีการเคลือบผิวด้วยสารเคลือบชนิดต่างๆจะมีค่าการทนแรงกระแทกที่น้อยกว่าชิ้นงานที่ไม่ได้ผ่านการเคลือบ เนื่องจากสารที่เคลือบผิวชิ้นงานเทอร์โมพลาสติก สตาซจะ

ทำหน้าที่ป้องกันการซึมผ่านของความชื้นหรือน้ำ จึงส่งผลให้โมเลกุลของน้ำแทรกซึมผ่านเข้าไปในชิ้นงานได้น้อยลง จึงทำให้ชิ้นงานมีความยืดหยุ่นที่ต่ำและมีการเคลื่อนไหวภายในโมเลกุลที่น้อย ดังนั้นความสามารถดูดซับพลังงานก็จะน้อยตามไปด้วย

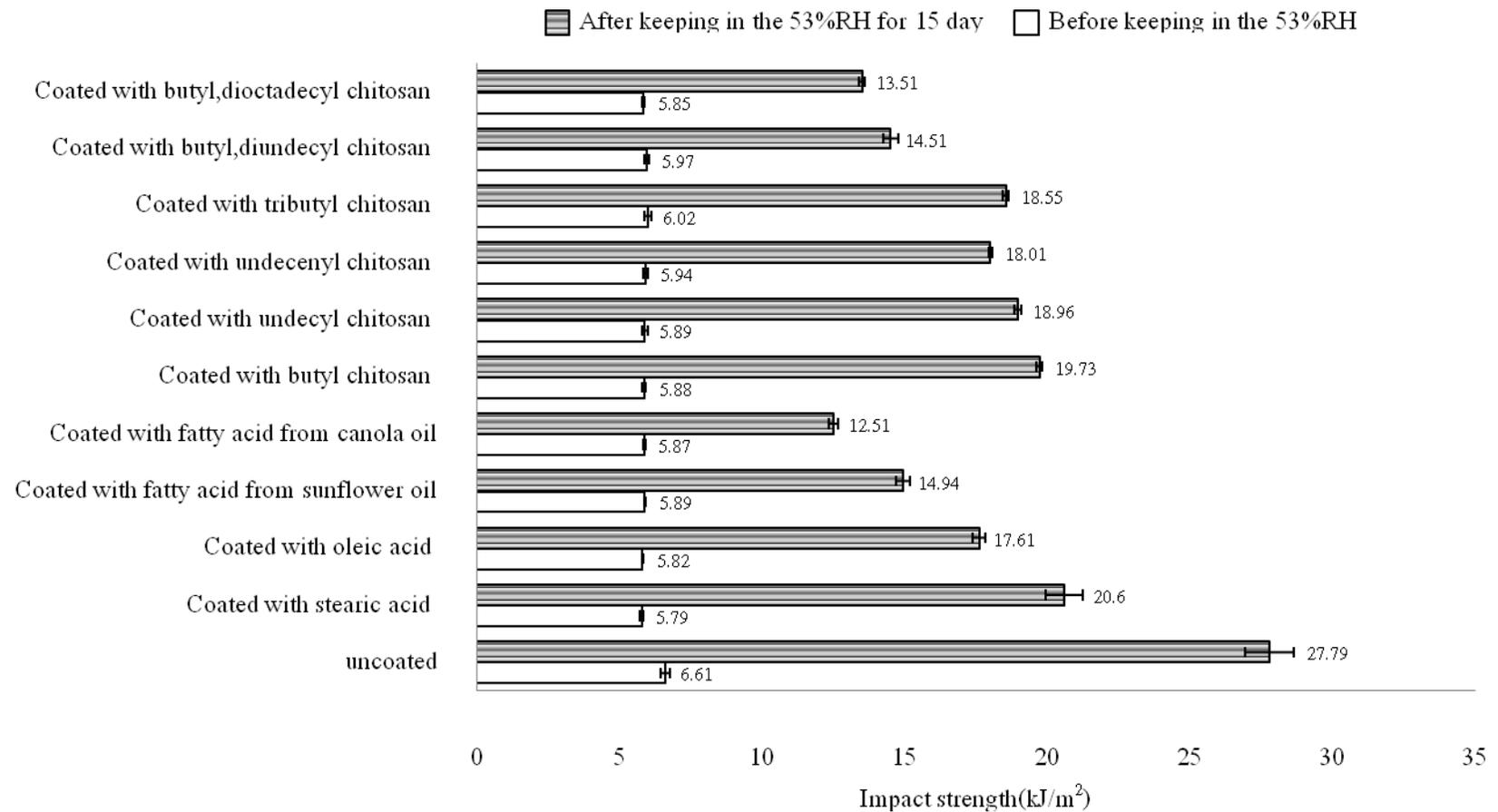
และเมื่อพิจารณาสารเคลือบที่ให้ค่าการทดสอบการทนแรงกระแทกที่ต่ำที่สุด ได้แก่ การเคลือบผิวชิ้นงานเทอร์โมพลาสติกสตาซด้วยกรดไขมันจากน้ำมันดอกคาโนล่าห์ ทั้งนี้เนื่องจากการเคลือบผิวชิ้นงานด้วยกรดไขมันจากน้ำมันดอกคาโนล่าห์มีการดูดซึมความชื้นได้น้อยที่สุดเมื่อเทียบกับชิ้นงานที่เคลือบผิวด้วยสารเคลือบชนิดอื่นๆ

ตารางที่ 12 สมบัติการทนต่อแรงกระแทกของเทอร์โมพลาสติกสตาซ ที่มีการเคลือบผิวด้วยสารเคลือบต่างชนิดกัน โดยทำการทดสอบก่อนทำการควบคุมความชื้น และหลังควบคุมความชื้น

ชนิดสารเคลือบ	Impact Strength (kJ/m <sup>2</sup> )	
	ก่อนการทดสอบ	หลังการทดสอบ
	การดูดความชื้น <sup>1</sup>	การดูดความชื้น <sup>2</sup>
	Mean±SD	Mean±SD
ชิ้นงานที่ไม่มีการเคลือบ	6.61±0.154 <sup>a</sup>	27.79±0.921 <sup>a</sup>
กรดสเตียริก	5.79±0.062 <sup>c</sup>	20.60±0.677 <sup>b</sup>
กรดโอเลอิก	5.81±0.031 <sup>c</sup>	17.61±0.248 <sup>f</sup>
กรดไขมันจากน้ำมันดอกทานตะวัน	5.89±0.019 <sup>b,c</sup>	14.95±0.252 <sup>g</sup>
กรดไขมันจากน้ำมันดอกคาโนล่าห์	5.87±0.048 <sup>b,c</sup>	12.51±0.167 <sup>i</sup>
N-butyl chitosan	5.88±0.069 <sup>b,c</sup>	19.73±0.122 <sup>c</sup>
N-undecyl chitosan	5.89±0.103 <sup>b,c</sup>	18.96±0.141 <sup>d</sup>
N-undecenyl chitosan	5.94±0.080 <sup>b,c</sup>	18.01±0.048 <sup>e,f</sup>
(N,N,N)-tributyl chitosan	6.02±0.131 <sup>b</sup>	18.56±0.109 <sup>d,e</sup>
N-butyl,(N,N)-diundecyl chitosan	5.97±0.07 <sup>b,c</sup>	14.51±0.288 <sup>g</sup>
N-butyl,(N,N)-dioctadecenyl chitosan	5.85±0.049 <sup>b,c</sup>	13.51±0.09 <sup>h</sup>

หมายเหตุ <sup>1</sup> one way ANOVA test ด้วยวิธีของ Scheffe's ที่ระดับนัยสำคัญ 0.01

<sup>2</sup> one way ANOVA test ด้วยวิธีของ Scheffe's ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05



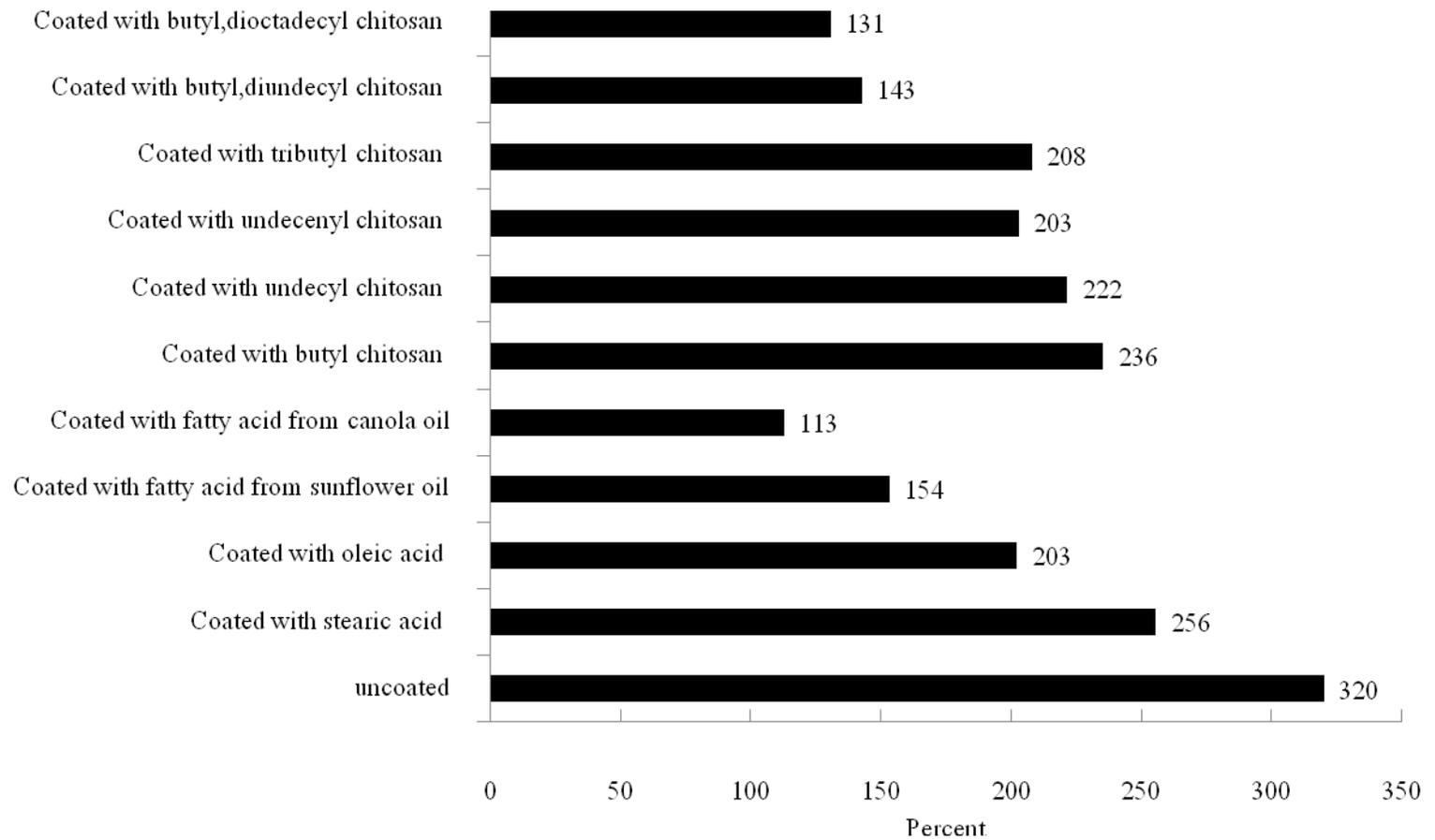
ภาพที่ 43 สมบัติการทนแรงกระแทกก่อนการทดสอบการดูดความชื้นเปรียบเทียบกับหลังการทดสอบดูดความชื้นของเทอร์โมพลาสติกสตาซที่มีเคลือบผิวด้วยสารเคลือบต่างชนิดกัน

การศึกษาสมบัติการทนแรงกระทำของชิ้นงานเทอร์โมพลาสติกสตาซที่มีการเคลือบผิวด้วยสารเคลือบต่างชนิดกัน ให้เข้าใจถึงพฤติกรรมการดูดความชื้นของชิ้นงานเทอร์โมพลาสติกสตาซ ซึ่งจะต้องพิจารณาการเปรียบเทียบค่า impact strength ของชิ้นงานเทอร์โมพลาสติกสตาซ ระหว่างก่อนและหลังการทดสอบการดูดความชื้น เนื่องจากภายหลังการทดสอบการดูดความชื้นสัมพัทธ์ 53% ชิ้นงานเทอร์โมพลาสติกสตาซจะมีการดูดความชื้นที่สูงขึ้น ไม่ว่าจะมีการเคลือบด้วยสารเคลือบชนิดใดก็ตาม จึงทำให้ค่า impact strength มีค่าเพิ่มขึ้นภายหลังการทดสอบการดูดความชื้นเสมอ

การเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การเพิ่มขึ้นของค่า impact strength ของชิ้นงานเทอร์โมพลาสติกสตาซที่ไม่มีการเคลือบผิวกับชิ้นงานเทอร์โมพลาสติกสตาซที่มีการเคลือบผิวด้วยสารเคลือบต่างชนิดกัน ดังภาพที่ 44 ซึ่งเปอร์เซ็นต์การเพิ่มขึ้นของค่า impact strength สามารถหาได้จากการเปรียบเทียบระหว่างค่า impact strength ของชิ้นงานก่อนการทดสอบการดูดความชื้นเทียบกับค่า impact strength ของชิ้นงานภายหลังการทดสอบการดูดความชื้น ซึ่งสามารถเรียงลำดับเปอร์เซ็นต์การเพิ่มขึ้นของค่า impact strength ของชิ้นงานเทอร์โมพลาสติกสตาซได้ดังนี้

ชิ้นงานที่ไม่มีการเคลือบ > ชิ้นงานที่เคลือบด้วยกรดสเตียริก > ชิ้นงานที่เคลือบด้วย N-butyl chitosan > ชิ้นงานที่เคลือบด้วย N-undecyl chitosan > ชิ้นงานที่เคลือบด้วย (N,N,N)-tributyl chitosan > ชิ้นงานที่เคลือบด้วย N-undecenyl chitosan > ชิ้นงานที่เคลือบด้วยกรดโอเลอิก > ชิ้นงานที่เคลือบด้วยกรดไขมันจากน้ำมันดอกทานตะวัน > ชิ้นงานที่เคลือบด้วย N-butyl,(N,N)-diundecyl chitosan > ชิ้นงานที่เคลือบด้วย N-butyl,(N,N)-dioctadecenyl chitosan > ชิ้นงานที่เคลือบด้วยกรดไขมันจากน้ำมันดอกคาโนล่าห์

จะเห็นว่าชิ้นงานที่ไม่มีการเคลือบผิวจะมีเปอร์เซ็นต์การเพิ่มขึ้นของค่าการทนแรงกระทำที่มากที่สุด เนื่องจากดังที่ได้กล่าวมาแล้วในตอนต้น ซึ่งสมบัติการดูดความชื้นจะมีความสัมพันธ์กับสมบัติการทนแรงกระทำกล่าวคือสมบัติการดูดความชื้นจะแปรผันตรงกับสมบัติการทนแรงกระทำของชิ้นงาน เช่น ชิ้นงานที่มีที่มีดูดความชื้นมาก จะมีค่าการทนแรงกระทำที่เพิ่มขึ้นมาก ภายหลังการทดสอบสมบัติการดูดความชื้นสัมพัทธ์ 53 %



ภาพที่ 44 เปอร์เซ็นต์การเพิ่มขึ้นของค่า impact strength หลังการทดสอบการดูความชื้นเปรียบเทียบกับก่อนการดูความชื้นของชิ้นงานเทอร์โมพลาสติก  
 สตาซที่ไม่มีเคลือบกับชิ้นงานเทอร์โมพลาสติกสตาซที่มีการเคลือบด้วยสารเคลือบต่างชนิดกัน

### การศึกษาสมบัติความต้านทานต่อแรงดึงยืด (tensile properties)

การศึกษาสมบัติความต้านทานต่อแรงดึงยืดของชิ้นงานเทอร์โมพลาสติกสตาซที่ไม่ได้เคลือบผิวและที่เคลือบผิวด้วยสารเคลือบต่างชนิดกัน ดังตารางที่ 13 และภาพที่ 45 ถึงภาพที่ 49 ซึ่งเมื่อพิจารณาค่า Young's modulus ค่า tensile strength และค่า percent strain at break ของชิ้นงานที่ยังไม่ได้ทดสอบการดูดความชื้น จะมีค่าอยู่ในช่วง 757.50-796.47 MPa, 17.23-18.09 MPa, และ 2.87-3.30% ตามลำดับ และเมื่อทำการทดสอบค่าต่างๆ ด้วยโปรแกรมทางสถิติ (SPSS : one way ANOVA test) จะพบว่า การศึกษาค่า Young's modulus มีความแตกต่างกันน้อยที่ระดับนัยสำคัญทางสถิติ 0.01 ทั้งนี้เมื่อพิจารณาจากการใส่ตัว subscript ที่เป็นการจำแนกข้อมูลออกเป็นกลุ่ม ซึ่งจะเห็นค่า Young's modulus สามารถจัดเป็นกลุ่มได้ 5 กลุ่ม ได้แก่ a, c, (a,b), (b,c), และ (a,b,c) เช่นเดียวกันกับการศึกษาค่า tensile strength และค่า percent strain at break ซึ่งให้ผลการทดสอบที่มีความไม่แตกต่างกันที่ระดับนัยสำคัญทางสถิติ 0.01 ทั้งนี้เมื่อพิจารณาจากการใส่ตัว subscript ที่เป็นการจำแนกข้อมูลออกเป็นกลุ่ม ซึ่งจะเห็นค่า tensile strength และค่า percent strain at break สามารถจัดเป็นกลุ่มได้เพียงกลุ่มเดียว ได้แก่ a

ขณะที่การศึกษาสมบัติการดึงยืดของชิ้นงานเทอร์โมพลาสติกสตาซ ภายหลังจากทดสอบในสภาวะความชื้นสัมพัทธ์ที่ 53% เป็นเวลา 15 วัน จะสามารถเรียงลำดับค่า Young's modulus และค่า tensile strength ได้ดังนี้

ชิ้นงานที่ไม่มีการเคลือบ < ชิ้นงานที่เคลือบด้วยกรดสเตียริก < ชิ้นงานที่เคลือบด้วย N-butyl chitosan < ชิ้นงานที่เคลือบด้วย N-undecyl chitosan < ชิ้นงานที่เคลือบด้วย (N,N,N)-tributyl chitosan < ชิ้นงานที่เคลือบด้วย N-undecenyl chitosan < ชิ้นงานที่เคลือบด้วยกรดโอเลอิก < ชิ้นงานที่เคลือบด้วยกรดไขมันจากน้ำมันดอกทานตะวัน < ชิ้นงานที่เคลือบด้วย N-butyl,(N,N)-diundecyl chitosan < ชิ้นงานที่เคลือบด้วย N-butyl,(N,N)-dioctadecenyl chitosan < ชิ้นงานที่เคลือบด้วยกรดไขมันจากน้ำมันดอกคาโนล่าห์

สำหรับการศึกษาสมบัติการดึงยืดของชิ้นงานเทอร์โมพลาสติกสตาซของค่า percent strain at break ภายหลังจากทดสอบในสภาวะความชื้นสัมพัทธ์ที่ 53% เป็นเวลา 15 วัน ก็สามารถเรียงลำดับได้ดังนี้

ชิ้นงานที่ไม่มีการเคลือบ > ชิ้นงานที่เคลือบด้วยกรดสเตียริก > ชิ้นงานที่เคลือบด้วย N-butyl chitosan > ชิ้นงานที่เคลือบด้วย N-undecyl chitosan > ชิ้นงานที่เคลือบด้วย (N,N,N)-tributyl chitosan > ชิ้นงานที่เคลือบด้วย N-undecenyl chitosan > ชิ้นงานที่

เคลือบด้วยกรดโอเลอิก > ชีงงานที่เคลือบด้วยกรดไขมันจากน้ำมันดอกทานตะวัน

> ชีงงานที่เคลือบด้วย N-butyl,(N,N)-diundecyl chitosan> ชีงงานที่เคลือบด้วย N-butyl,(N,N)-dioctadecenyl chitosan > ชีงงานที่เคลือบด้วยกรดไขมันจากน้ำมันดอกคาโนล่าห์

เมื่อทดสอบค่า Young's modulus ค่า tensile strength และค่า percent strain at break ด้วยโปรแกรมทางสถิติ(SPSS : one way ANOVA test) จะพบว่า ชีงงานเทอร์โมพลาสติกสตาซที่ผ่านการทดสอบการดูดความชื้นสัมพัทธ์ 53 % จะมีค่า Young's modulus ค่า tensile strength และค่า percent strain at break ที่มีความแตกต่างกันที่ระดับนัยสำคัญทางสถิติ 0.05 นั้นหมายความว่า การเคลือบชีงงานเทอร์โมพลาสติกสตาซด้วยสารเคลือบต่างชนิดกัน จะให้ค่า Young's modulus ค่า tensile strength และค่า percent strain at break ที่ต่างกัน ตามประสิทธิ ภาพของสารเคลือบ

สาเหตุที่ทำให้ชีงงานที่ไม่ได้รับการเคลือบผิวมีค่า Young's modulus และค่า tensile strength ต่ำที่สุดและมีค่า percent strain at break สูงที่สุดเป็นเพราะชีงงานดังกล่าวสามารถดูดความชื้นได้มากที่สุด ซึ่งความชื้นหรือโมเลกุลของน้ำนี้เอง จะทำหน้าที่เป็นPlasticizer จึงทำให้ชีงงานมีความยืดหยุ่นสูง นอกจากนั้นความชื้นที่เข้าสู่ชีงงานยังจะส่งผลให้ความแข็งแรงของแรงยึดเหนี่ยวภายในโมเลกุลแบบพันธะไฮโดรเจนบอน มีความแข็งแรงที่ลดลงตามไปด้วย

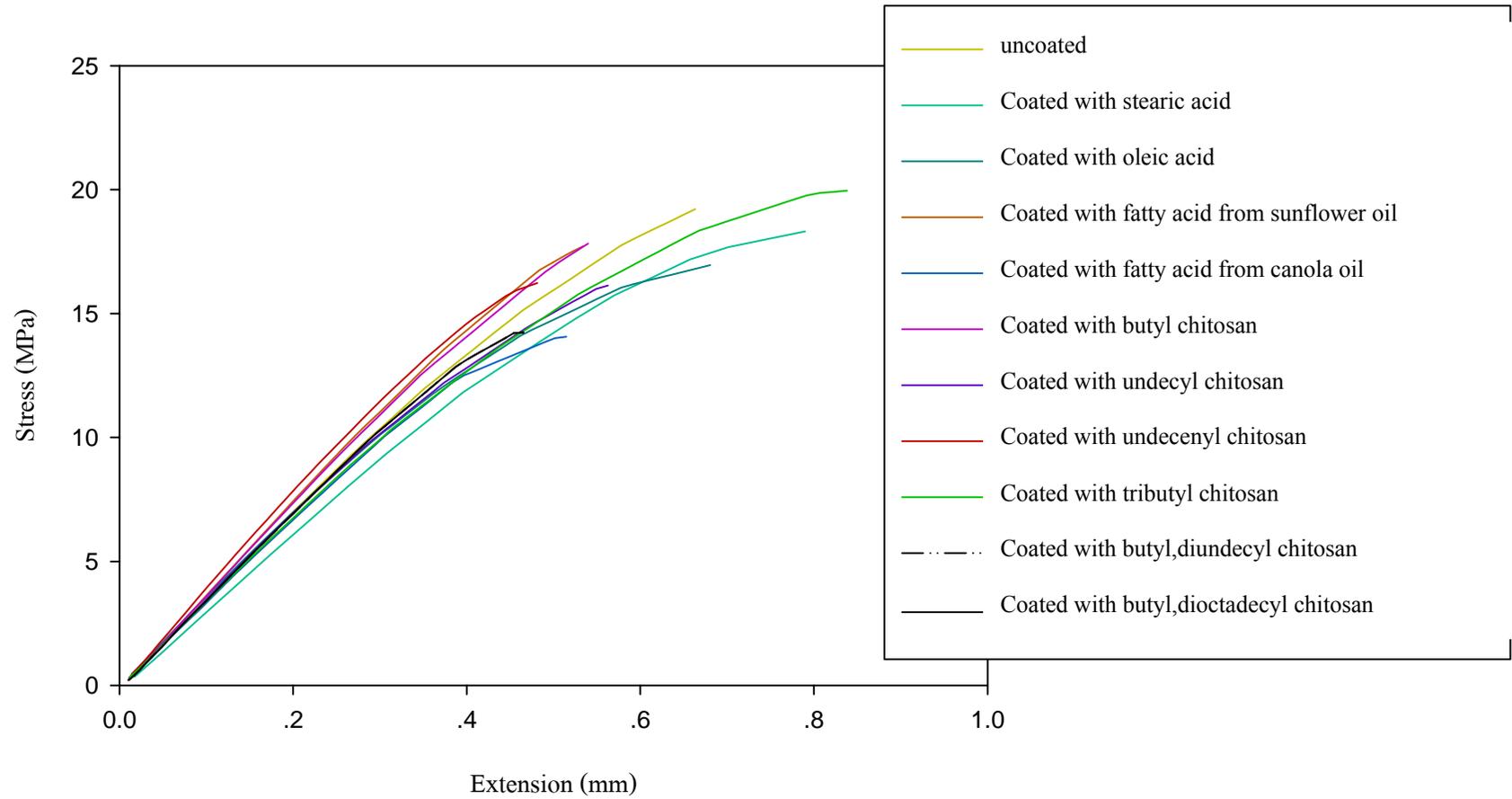
ขณะที่ชีงงานที่มีการเคลือบผิวด้วยสารเคลือบชนิดต่างๆจะมีค่า Young's Modulus และค่า tensile strength ที่มากกว่าชีงงานที่ไม่ได้ผ่านการเคลือบ และมีค่า percent strain at break ที่น้อยกว่าชีงงานที่ไม่ได้ผ่านการเคลือบ เนื่องจากสารที่เคลือบผิวชีงงานเทอร์โมพลาสติกสตาซจะทำหน้าที่ป้องกันการซึมผ่านของความชื้นหรือไอน้ำ จึงส่งผลให้โมเลกุลของไอน้ำแทรกซึมผ่านเข้าไปในชีงงานได้น้อยลง จึงทำให้ชีงงานมีความยืดหยุ่นที่ต่ำและมีการเคลื่อนไหวภายในโมเลกุลที่น้อย

และเมื่อพิจารณาสารเคลือบที่ให้ค่า Young's modulus และค่า tensile strength ที่สูงที่สุด และสารเคลือบที่ให้ค่า percent strain at break ต่ำที่สุดได้แก่ การเคลือบผิวชีงงานเทอร์โมพลาสติกสตาซด้วยกรดไขมันจากน้ำมันดอกคาโนล่าห์ ทั้งนี้เนื่องจากการเคลือบผิวชีงงานด้วยกรดไขมันจากน้ำมันดอกคาโนล่าห์มีการดูดซึมความชื้นได้น้อยที่สุดเมื่อเทียบกับชีงงานที่เคลือบผิวด้วยสารเคลือบชนิดอื่นๆ

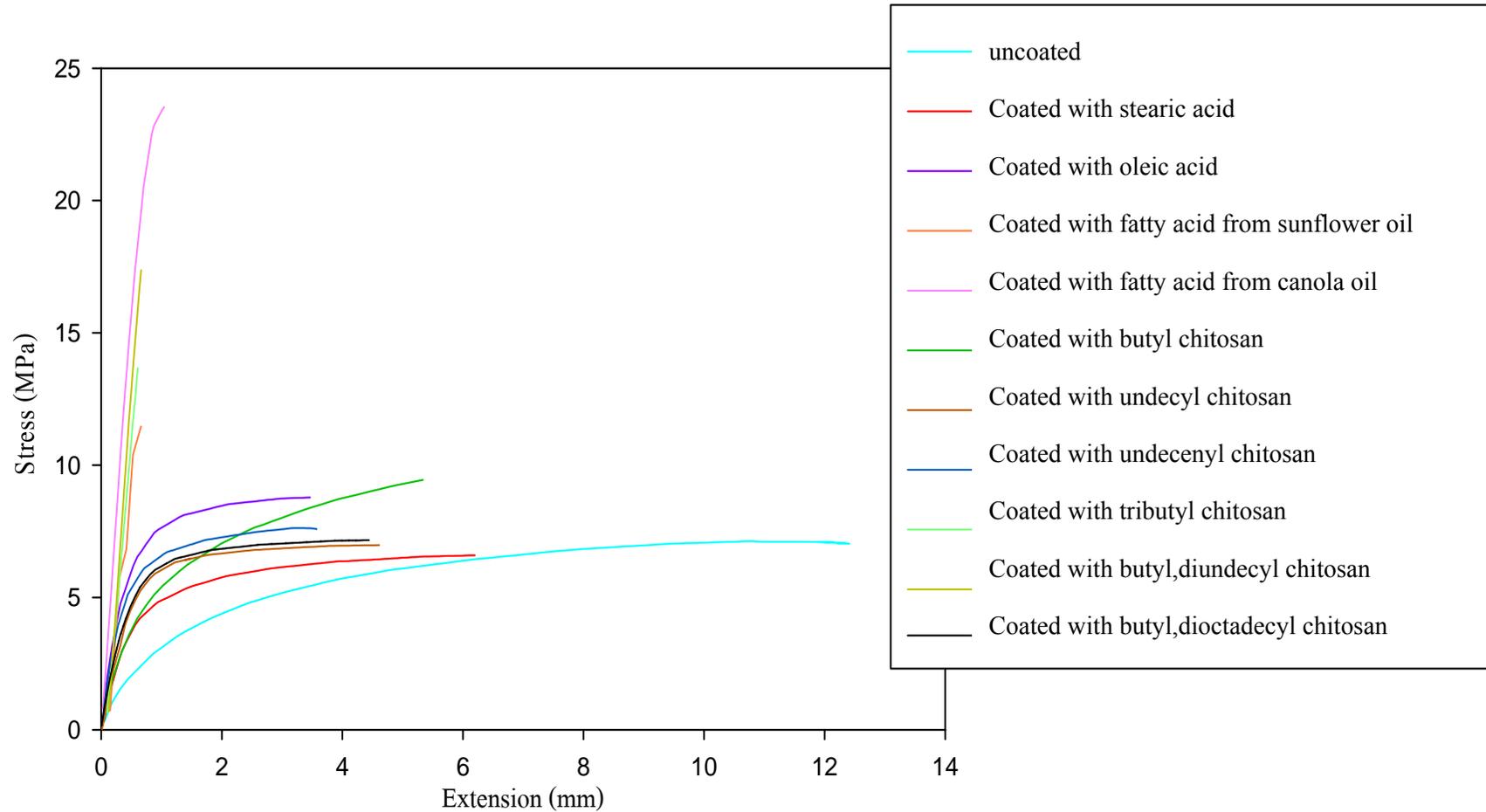
ตารางที่ 13 สมบัติการดึงยืดของ TPS ที่มีการเคลือบผิวด้วยสารเคลือบต่างชนิดกัน โดยทำการทดสอบชิ้นงานก่อนและหลังการควบคุมความชื้น

ชนิดของสารเคลือบผิว	ก่อนการทดสอบการดูดความชื้น			หลังการทดสอบการดูดความชื้น 53% เป็นเวลา 15 วัน		
	Young's	Tensile	Percent	Young's	Tensile	Percent
	Modulus <sup>1</sup>	Strength <sup>1</sup>	Strain <sup>1</sup>	Modulus <sup>2</sup>	Strength <sup>2</sup>	Strain <sup>2</sup>
	(MPa)	(MPa)	at break	(MPa)	(MPa)	at break
	Mean±SD	Mean±SD	Mean±SD	Mean±SD	Mean±SD	Mean±SD
ชิ้นงานที่ไม่มีการเคลือบ	757.50±32.20 <sup>a</sup>	18.09±1.50 <sup>a</sup>	3.30±0.95 <sup>a</sup>	120.85±9.04 <sup>a</sup>	6.78±0.10 <sup>a</sup>	60.73±3.13 <sup>a</sup>
กรดสเตียริก	758.49±9.24 <sup>a</sup>	17.48±0.35 <sup>a</sup>	2.93±0.20 <sup>a</sup>	183.39±5.95 <sup>b</sup>	7.18±0.37 <sup>b</sup>	49.61±5.51 <sup>b</sup>
กรดโอเลอิก	760.76±7.69 <sup>a</sup>	17.50±0.26 <sup>a</sup>	2.89±0.13 <sup>a</sup>	267.35±9.01 <sup>f</sup>	7.46±0.11 <sup>b</sup>	41.42±2.68 <sup>d</sup>
กรดไขมันจากน้ำมันดอกทานตะวัน	796.47±17.34 <sup>b,c</sup>	17.52±0.77 <sup>a</sup>	2.94±0.20 <sup>a</sup>	359.38±6.96 <sup>g</sup>	8.60±0.12 <sup>c</sup>	36.07±0.59 <sup>c</sup>
กรดไขมันจากน้ำมันดอกคาโนล่าห์	792.73±25.87 <sup>c</sup>	17.23±1.06 <sup>a</sup>	2.87±0.22 <sup>a</sup>	550.37±8.10 <sup>j</sup>	11.14±0.24 <sup>f</sup>	26.97±0.49 <sup>g</sup>
N-butyl chitosan	763.61±2.08 <sup>a,b</sup>	17.54±0.03 <sup>a</sup>	2.95±0.03 <sup>a</sup>	196.38±1.59 <sup>c</sup>	7.23±0.14 <sup>b</sup>	47.43±1.11 <sup>b,c</sup>
N-undecyl chitosan	764.71±1.95 <sup>a,b,c</sup>	17.54±0.02 <sup>a</sup>	2.96±0.03 <sup>a</sup>	210.87±1.06 <sup>d</sup>	7.29±0.04 <sup>b</sup>	44.47±0.74 <sup>c,d</sup>
N-undecenyl chitosan	766.09±1.40 <sup>a,b,c</sup>	17.56±0.02 <sup>a</sup>	2.95±0.02 <sup>a</sup>	250.55±2.65 <sup>e</sup>	7.39±0.02 <sup>b</sup>	41.78±1.72 <sup>d</sup>
(N,N,N)-tributyl chitosan	766.62±1.91 <sup>a,b,c</sup>	17.56±0.02 <sup>a</sup>	2.95±0.02 <sup>a</sup>	215.17±0.83 <sup>d</sup>	7.31±0.02 <sup>b</sup>	43.13±0.61 <sup>d</sup>
N-butyl,(N,N)-diundecyl chitosan	767.06±2.80 <sup>a,b,c</sup>	17.56±0.03 <sup>a</sup>	2.95±0.03 <sup>a</sup>	381.62±6.05 <sup>h</sup>	9.25±0.20 <sup>d</sup>	33.34±0.38 <sup>e,f</sup>
N-butyl,(N,N)-dioctadecenyl chitosan	769.29±1.91 <sup>a,b,c</sup>	17.55±0.04 <sup>a</sup>	2.92±0.02 <sup>a</sup>	434.33±3.26 <sup>i</sup>	10.50±0.03 <sup>e</sup>	30.14±0.03 <sup>f,g</sup>

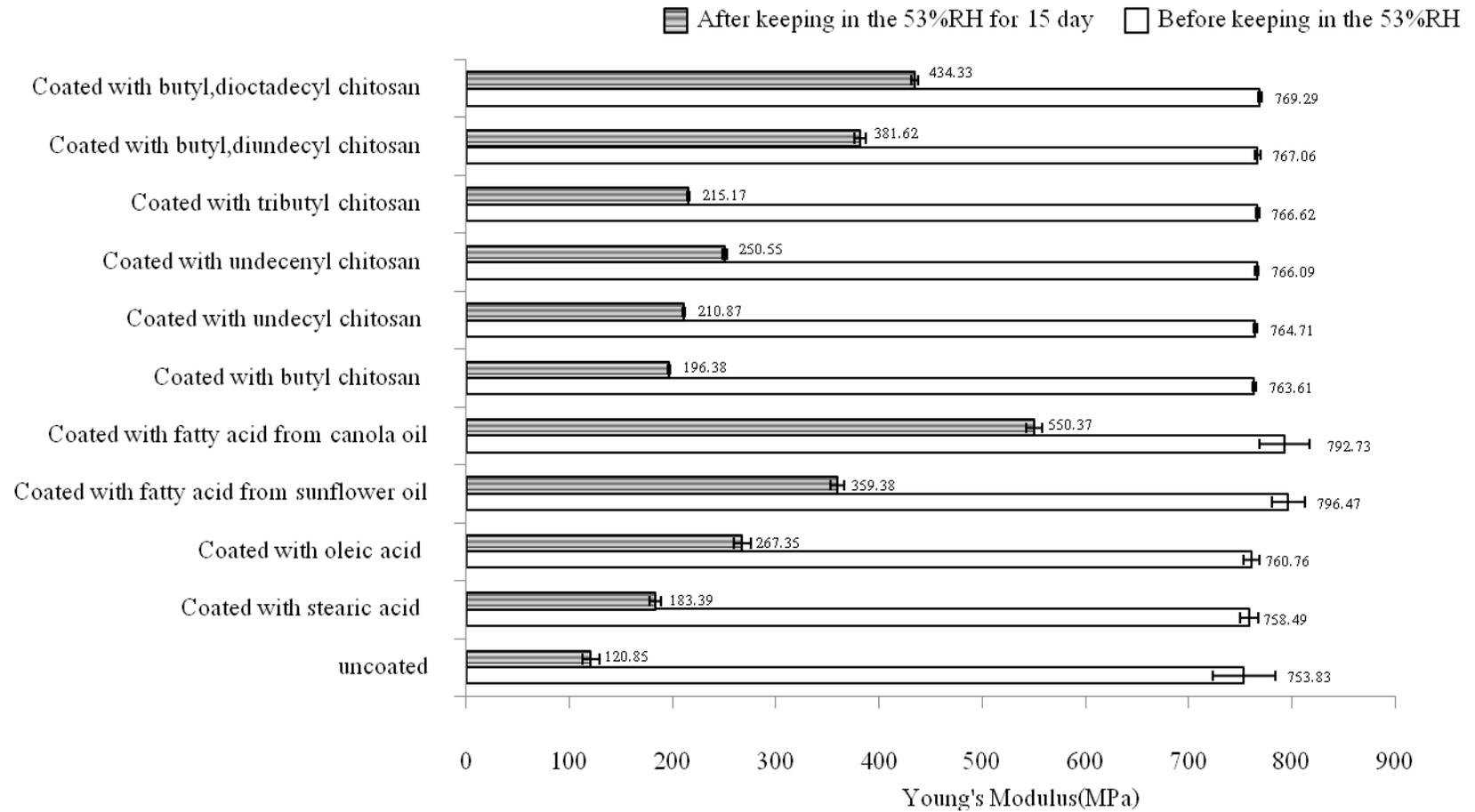
หมายเหตุ<sup>1</sup> one way ANOVA test ด้วยวิธีของ Scheffe's ที่ระดับนัยสำคัญ 0.01 <sup>2</sup> one way ANOVA test ด้วยวิธีของ Scheffe's ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05



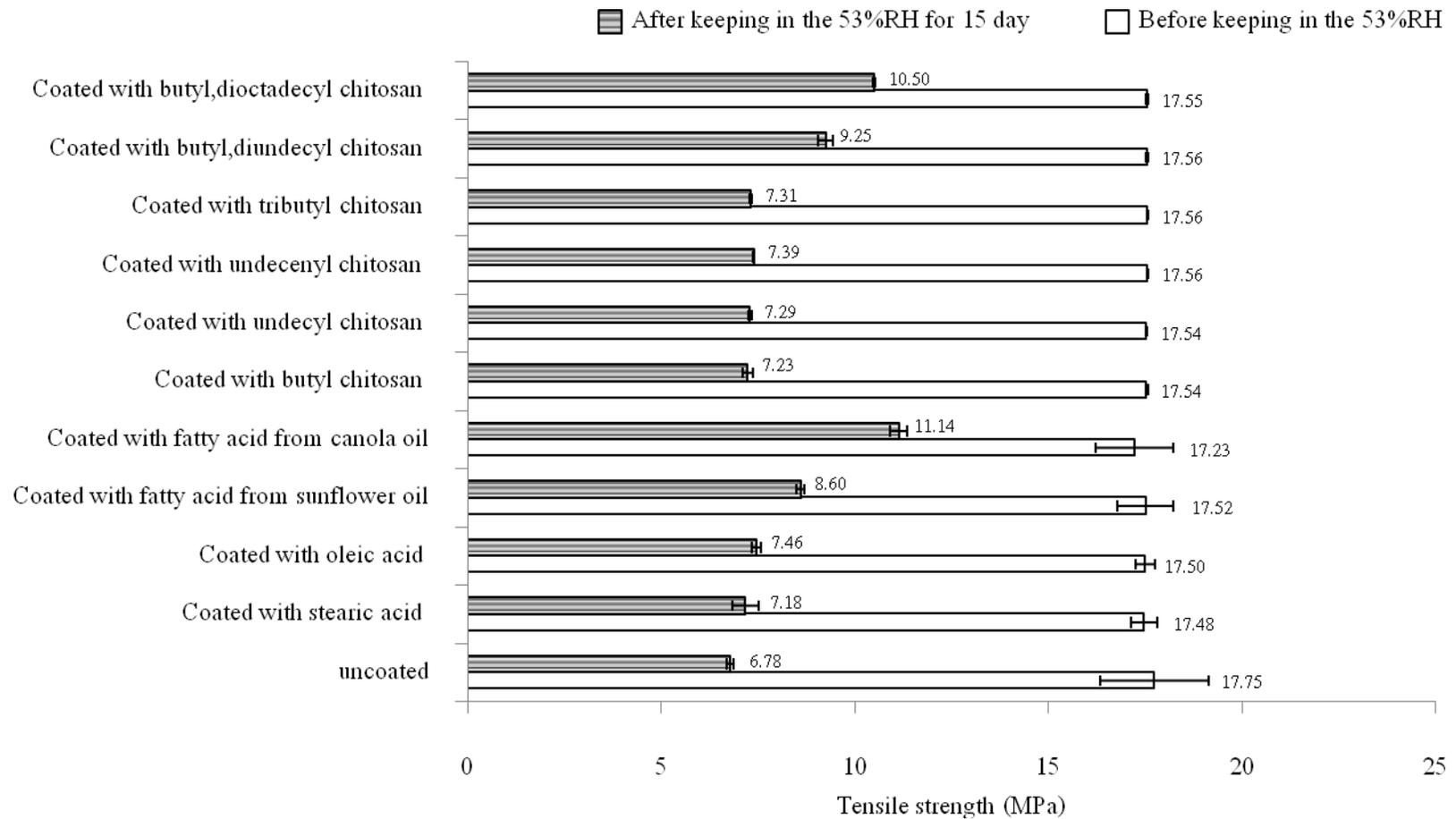
ภาพที่ 45 การทดสอบการดึงยืดก่อนการทดสอบการดูความชื้นของชิ้นงานเทอร์โมพลาสติกสตาซที่มีเคลือบผิวด้วยสารเคลือบต่างชนิดกัน



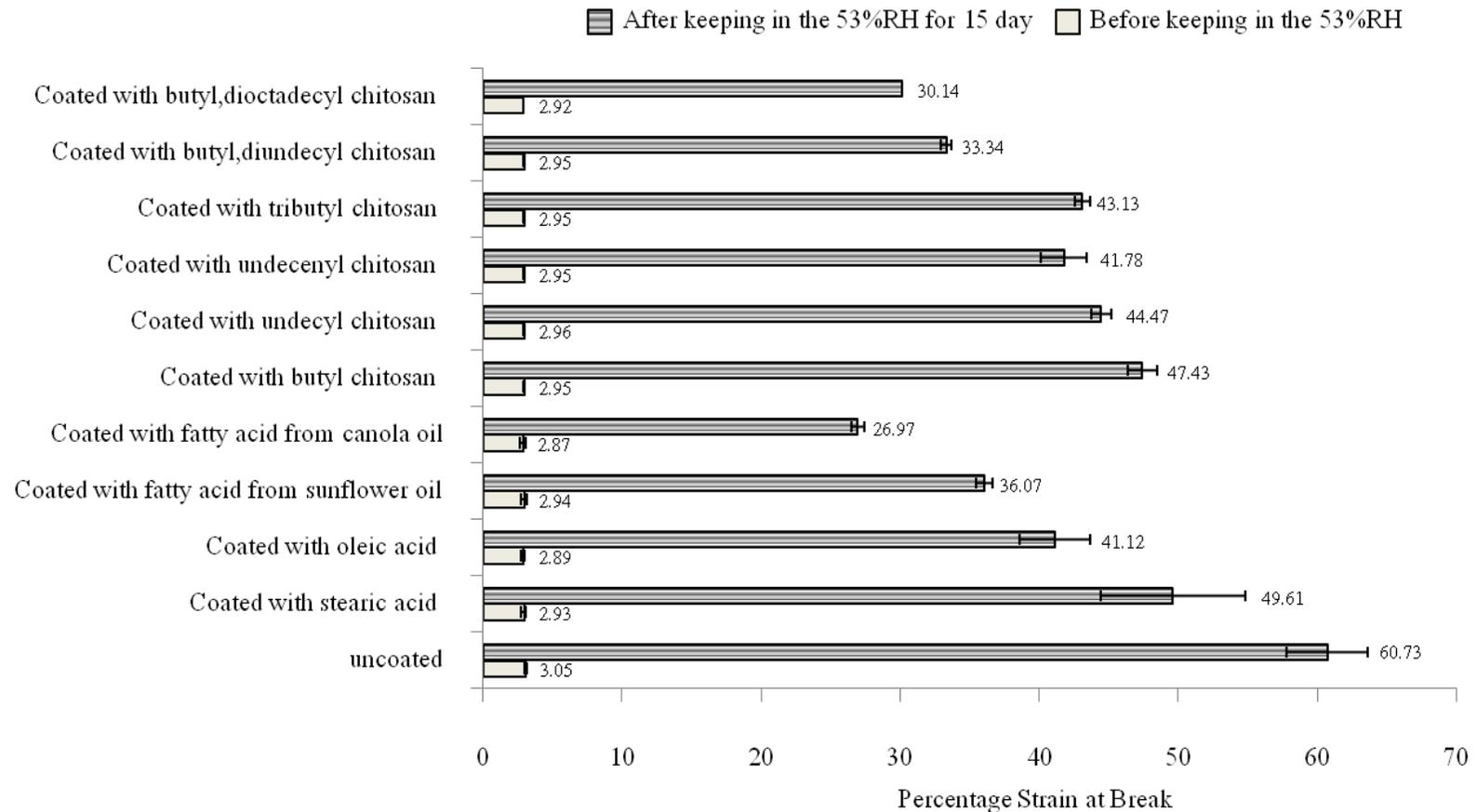
ภาพที่ 46 การทดสอบการดึงยืดภายหลังจากการทดสอบการดูดความชื้นสัมพัทธ์ที่ 53% เป็นเวลา 15 วัน ของชิ้นงานเทอร์โมพลาสติกสตาซที่มีเคลือบผิวด้วยสารเคลือบต่างชนิดกัน



ภาพที่ 47 สมบัติการดึงยืดก่อนการทดสอบการดูดความชื้นเปรียบเทียบกับหลังการทดสอบดูดความชื้น ของเทอร์โมพลาสติกสตาซที่มีเคลือบผิวด้วยสารเคลือบต่างชนิดกันในส่วนค่า Young's Modulus



ภาพที่ 48 สมบัติการดึงยึดก่อนการทดสอบการดูดความชื้นเปรียบเทียบกับหลังการทดสอบดูดความชื้น ของเทอร์โมพลาสติกสตาซที่มีเคลือบผิวด้วยสารเคลือบต่างชนิดกันในส่วนค่า tensile strength



ภาพที่ 49 สมบัติการดึงยืดก่อนการทดสอบการดูดความชื้นเปรียบเทียบกับหลังการทดสอบดูดความชื้น ของเทอร์โมพลาสติกสตาซที่มีเคลือบผิวด้วยสารเคลือบต่างชนิดกันในส่วนค่า Percentage Strain at break

การศึกษาสมบัติการดึงยึดของชิ้นงานเทอร์โมพลาสติกสตาซที่มีการเคลือบผิวด้วยสารเคลือบต่างชนิดกัน ให้เข้าใจถึงพฤติกรรมการดูดความชื้นของชิ้นงานเทอร์โมพลาสติกสตาซ ซึ่งจะต้องพิจารณาการเปรียบเทียบค่า Young's modulus ค่า tensile strength และค่า percent strain at break ของชิ้นงานเทอร์โมพลาสติกสตาซระหว่างก่อนและหลังการทดสอบการดูดความชื้น เนื่องจากภายหลังการทดสอบการดูดความชื้นสัมพัทธ์ 53%RH ชิ้นงานเทอร์โมพลาสติกสตาซจะมีการดูดความชื้นที่สูงขึ้น ไม่ว่าจะมีการเคลือบด้วยสารเคลือบชนิดใดก็ตาม จึงทำให้ค่า Young's Modulus และ ค่า tensile strength มีค่าลดลงหลังจากการทดสอบการดูดความชื้นเสมอส่วนค่า percent strain at break จะมีค่าเพิ่มขึ้นหลังจากการทดสอบการดูดความชื้น

การเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การลดลงของค่า Young's Modulus และ ค่า tensile strength และการเพิ่มขึ้นของค่า percent strain at break ของชิ้นงานเทอร์โมพลาสติกสตาซที่ไม่มีการเคลือบผิวกับชิ้นงานเทอร์โมพลาสติกสตาซที่มีการเคลือบผิวด้วยสารเคลือบต่างชนิดกัน ดังภาพที่ 50 ซึ่งการลดลงของค่า Young's modulus และ ค่า tensile strength และการเพิ่มขึ้นของค่า percentage strain at break สามารถหาได้จากการเปรียบเทียบระหว่างค่า Young's Modulus ค่า tensile strength และค่า percent strain at break ของชิ้นงานก่อนการทดสอบการดูดความชื้นเทียบกับค่า Young's modulus ค่า tensile strength และค่า percent strain at break ของชิ้นงานภายหลังทดสอบการดูดความชื้น ซึ่งสามารถเรียงลำดับเปอร์เซ็นต์การลดลงของ Young's Modulus และ ค่า tensile strength ของชิ้นงานเทอร์โมพลาสติกสตาซได้ดังนี้

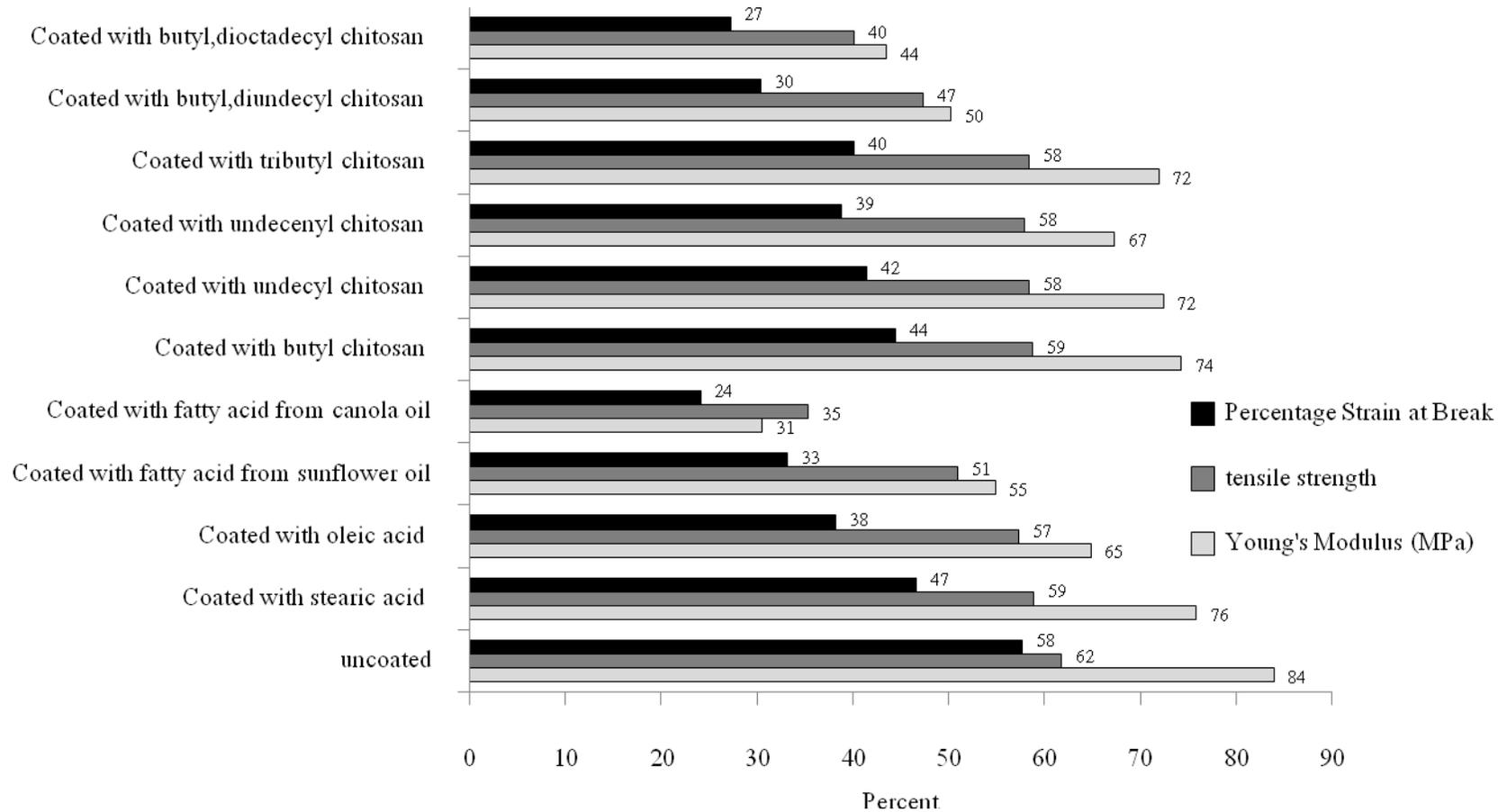
ชิ้นงานที่ไม่มีการเคลือบ > ชิ้นงานที่เคลือบด้วยกรดสเตียริก > ชิ้นงานที่เคลือบด้วย N-butyl chitosan > ชิ้นงานที่เคลือบด้วย N-undecyl chitosan > ชิ้นงานที่เคลือบด้วย (N,N,N)-tributyl chitosan > ชิ้นงานที่เคลือบด้วย N-undecenyl chitosan > ชิ้นงานที่เคลือบด้วยกรดโอเลอิก > ชิ้นงานที่เคลือบด้วยกรดไขมันจากน้ำมันดอกทานตะวัน > ชิ้นงานที่เคลือบด้วย N-butyl,(N,N)-diundecyl chitosan > ชิ้นงานที่เคลือบด้วย N-butyl,(N,N)-dioctadecenyl chitosan > ชิ้นงานที่เคลือบด้วยกรดไขมันจากน้ำมันดอกคาโนล่าห์

สำหรับค่า percent strain at break ของชิ้นงานเทอร์โมพลาสติกสตาซ ซึ่งสามารถเรียงลำดับเปอร์เซ็นต์การเพิ่มขึ้นของค่า percent strain at break ได้ดังนี้

ชิ้นงานที่ไม่มีการเคลือบ < ชิ้นงานที่เคลือบด้วยกรดสเตียริก < ชิ้นงานที่เคลือบด้วย N-butyl chitosan < ชิ้นงานที่เคลือบด้วย N-undecyl chitosan < ชิ้นงานที่เคลือบด้วย (N,N,N)-tributyl chitosan < ชิ้นงานที่เคลือบด้วย N-undecenyl chitosan < ชิ้นงานที่

เคลือบด้วยกรดโอเลอิก < ชั้นงานที่เคลือบด้วยกรดไขมันจากน้ำมันดอกทานตะวัน  
 < ชั้นงานที่เคลือบด้วย N-butyl,(N,N)-diundecyl chitosan < ชั้นงานที่เคลือบด้วย  
 N-butyl,(N,N)-dioctadecenyl chitosan < ชั้นงานที่เคลือบด้วยกรดไขมันจากน้ำมัน  
 ดอกคาโนล่าห์

จะเห็นได้ว่าชั้นงานที่ไม่มีการเคลือบผิวจะมีเปอร์เซ็นต์การลดลงค่า Young's modulus และ ค่า tensile strength มากที่สุด ขณะเดียวกันเปอร์เซ็นต์การเพิ่มขึ้นของค่า percent strain at break มากที่สุด เนื่องจากดังที่ได้กล่าวมาแล้วในตอนต้นว่าสมบัติการดูดความชื้นจะมีความสัมพันธ์กับ Young's modulus และ ค่า tensile strength ภายหลังการทดสอบการดูดความชื้น 53% คือสมบัติการดูดความชื้นจะแปรผกผันกับค่า Young's modulus และ ค่า tensile strength และมีความสัมพันธ์แบบแปรผันตรงกับค่า percent strain at break เช่น ชั้นงานที่มีการดูดความชื้นมาก จะมีค่า Young's modulus และ ค่า tensile strength ที่ลดลง ขณะที่ค่า percent strain at break จะมีค่าเพิ่มขึ้น



ภาพที่ 50 เปรี่เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงค่า Young's modulus ค่า tensile strength และค่า percentage strain at break ภายหลังการทดสอบการดูดความชื้น เปรียบเทียบกับก่อนการดูดความชื้นของชิ้นงานเทอร์โมพลาสติกสตาซที่เคลือบสารเคลือบต่างชนิดกัน

### การวิเคราะห์จุดคุ้มทุน

การวิเคราะห์จุดคุ้มทุนของชิ้นงานเทอร์โมพลาสติกสตาซที่ทำการเคลือบผิวด้วยสารเคลือบชนิดต่างๆ ได้ทำการศึกษากับสารเคลือบผิวชิ้นงานเทอร์โมพลาสติกสตาซทั้งสามชนิด ได้แก่ สารเคลือบผิวจากกรดไขมัน สารเคลือบผิวจาก N-alkyl chitosan และสารเคลือบผิวจาก quaternized chitosan โดยจะเลือกศึกษาเฉพาะสารเคลือบผิวที่มีประสิทธิภาพในการป้องกันการดูดความชื้นที่ดีที่สุดในแต่ละชนิดของสารเคลือบ ได้แก่ สารเคลือบผิวจากกรดไขมันที่ได้จากน้ำมันดอกคาโนล่าห์ สารเคลือบจาก N-undecenyl chitosan และ สารเคลือบจาก N-butyl, (N,N)-dioctadecenyl chitosan ซึ่งเมื่อพิจารณาถึงต้นทุนคงที่ของชิ้นงานเทอร์โมพลาสติกสตาซ จะพบว่าต้นทุนคงที่ของสารเคลือบทั้งสามชนิดจะมีมูลค่าเท่ากันที่ 1.58 บาท/ชิ้น

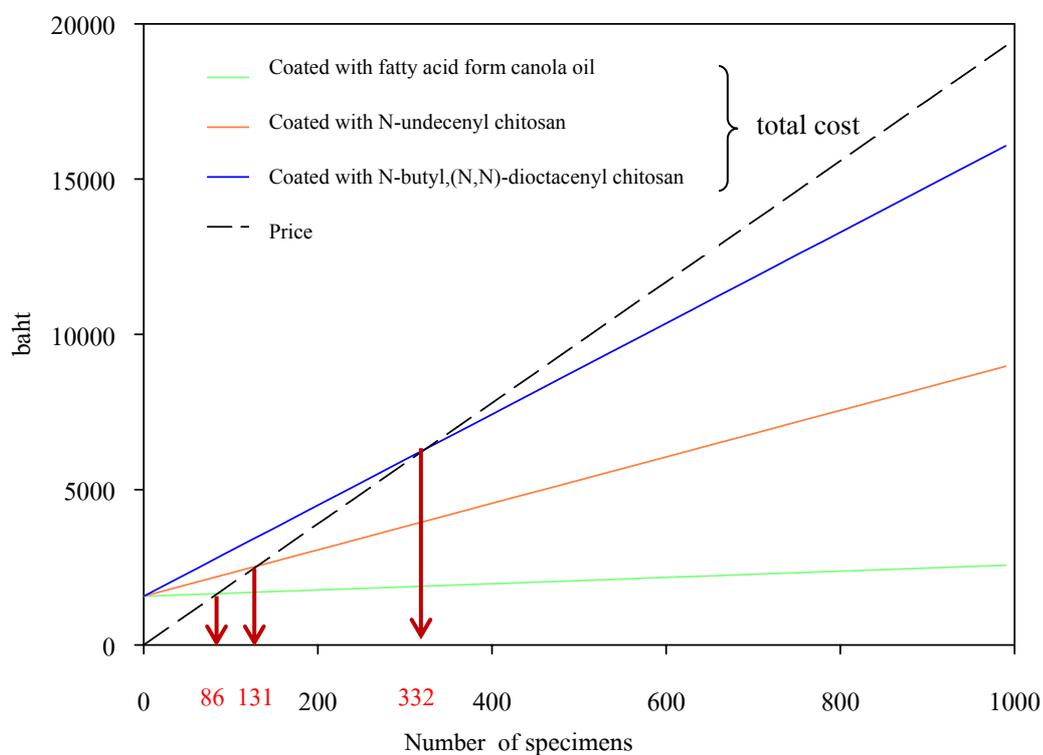
ขณะที่ต้นทุนแปรผันของสารเคลือบผิวแต่ละชนิดจะมีมูลค่าต่างกัน ทั้งนี้เป็นเพราะในการเตรียมสารเคลือบแต่ละชนิดจะมีค่าใช้จ่ายในส่วนของตัวทำละลายและ reagent ที่แตกต่างกัน เช่น การเตรียมสารเคลือบจากกรดไขมันที่ได้จากน้ำมันดอกคาโนล่าห์ จะต้องใช้สารเคมีต่างๆ ได้แก่ น้ำมันพืชจากดอกคาโนล่าห์ ตัวทำละลายเอทานอล โซเดียมไฮดรอกไซด์ กรดไฮโดรคลอริก กลีเซอรอล และแป้งมันสำปะหลัง เป็นต้น ซึ่งมูลค่าของต้นทุนแปรผันของสารเคลือบแต่ละชนิด จะมีมูลค่าดังนี้ คือ 1.01 บาท/ชิ้น 7.49 บาท/ชิ้น และ 14.65 บาท/ชิ้น ตามลำดับดังตารางที่ 14 ดังนั้นต้นทุนรวมของสารเคลือบผิวแต่ละชนิดก็จะมีมูลค่าต่างกันตามไปด้วย ซึ่งจะพบว่าสารเคลือบผิวจาก N-butyl, (N,N)-dioctadecenyl chitosan จะมีต้นทุนรวมที่สูงที่สุดทั้งนี้ เนื่องจากการเตรียมสารเคลือบดังกล่าวได้เตรียมจาก oleic acid ซึ่งการจะได้มาของสารเคลือบดังกล่าวจะต้องทำการสังเคราะห์หลายขั้นตอน จึงมีค่าใช้จ่ายในส่วน reagent ที่สูงตามไปด้วย

สำหรับการหาจุดคุ้มทุนของสารเคลือบแต่ละชนิดจะต้องมีการกำหนดราคาขายขึ้น ซึ่งผู้วิจัยได้มีเกณฑ์ในการกำหนดราคาขายของชิ้นงานเทอร์โมพลาสติกสตาซที่เคลือบผิวทุกชนิด จะต้องมียอดขายเท่ากับ 120% ของต้นทุนรวมของสารเคลือบ N-butyl, (N,N)-dioctadecenyl chitosan ทั้งนี้เพราะต้นทุนรวมของสารเคลือบดังกล่าวมีมูลค่าสูงที่สุด ดังนั้น ถ้ากำหนดราคาขายที่ต่ำกว่าต้นทุนรวมของสารเคลือบ N-butyl, (N, N)-dioctadecenyl chitosan ก็จะทำให้ผลการประเมินอยู่ในภาวะขาดทุน ขณะที่สารเคลือบอีกสองชนิดนั้นสามารถตั้งราคาขายที่ต่ำกว่าราคาที่ได้กล่าวมาได้ แต่เมื่อพิจารณาตามหลักเศรษฐศาสตร์และกลไกตลาด ซึ่งจะเห็นได้ว่าสารเคลือบ N-butyl, (N, N)-dioctadecenyl chitosan เป็นส่วนกำหนดราคานั่นเอง อีกทั้งหลักการขายก็มีความต้องการที่จะขายสินค้าให้คุ้มทุนโดยเร็ว ดังนั้นการกำหนดราคาขายให้เท่ากับหรือต่ำกว่าเล็กน้อยจากราคาขายตลาดก็จะมีส่วนทำให้สินค้าดังกล่าวขายได้กำไรนั่นเอง

ตารางที่ 14 ค่าใช้จ่ายและราคาขายของสารเคลือบผิวชิ้นงานเทอร์โมพลาสติกสตาซ

ชนิดของ ต้นทุน	ชนิดสารเคลือบผิวชิ้นงานเทอร์โมพลาสติกสตาซ					
	กรดไขมันที่ได้จากน้ำมันดอกคาโนล่าห์		N-undecenyl chitosan		N-butyl, (N, N)-dioctadecenyl chitosan	
	รายการ	มูลค่า	รายการ	มูลค่า	รายการ	มูลค่า
ต้นทุนคงที่	-internal mixer -compression molding	1.58 บาท/ชิ้น	-internal mixer -compression molding	1.58 บาท/ชิ้น	-internal mixer -compression molding	1.58 บาท/ชิ้น
ต้นทุนแปรผัน	-cassava starch -glycerol -canola oil -ethanol -sodium hydroxide -hydrochloric acid	1.01 บาท/ชิ้น	-cassava starch -glycerol -undecenly aldehyde -chitosan -butanol -sodium hydroxide -acetic acid -sodium borohydride	7.49 บาท/ชิ้น	-cassava starch -glycerol/-chitosan -oleic acid -butyl aldehyde -methanol /-ethanol/-ether -1-methyl-2-pyrrolidone -sodium hydroxide -acetic acid/-sulfuric acid -sodium borohydride -hydrogen bromide -thionyl chloride	14.65 บาท/ชิ้น
ต้นทุนรวม	ต้นทุนคงที่+ต้นทุนแปรผัน	2.59 บาท/ชิ้น	ต้นทุนคงที่+ต้นทุนแปรผัน	9.07 บาท/ชิ้น	ต้นทุนคงที่+ต้นทุนแปรผัน	16.23บาท/ชิ้น
ราคาขาย	752% ของต้นทุน	19.48 บาท/ชิ้น	215% ของต้นทุน	19.48 บาท/ชิ้น	120% ของต้นทุน	19.48 บาท/ชิ้น

สำหรับการวิเคราะห์จุดคุ้มทุนดังภาพที่ 51 พบว่าการเคลือบชิ้นงานเทอร์โมพลาสติก  
 สตาซด้วยสารเคลือบทั้งสามชนิดจะมีจุดคุ้มทุนดังนี้ สารเคลือบผิวจากกรดไขมันที่ได้น้ำมันดอกคา  
 โนล่าห์ จะคุ้มทุนเมื่อขายได้ 86 ชิ้น ขณะที่สารเคลือบผิวจาก N-undecenyl chitosan จะคุ้มทุนเมื่อ  
 ขายได้ 131 ชิ้น ส่วนสารเคลือบผิวจาก N-butyl, (N, N)-dioctadecenyl chitosan จะคุ้มทุนเมื่อขายได้  
 332 ชิ้น ดังนั้นเมื่อพิจารณาถึงจุดคุ้มทุน พบว่าการขายชิ้นงานเทอร์โมพลาสติกสตาซที่มีการเคลือบ  
 ผิวด้วยกรดไขมันที่ได้น้ำมันดอกคาโนล่าห์จะทำให้ขายได้กำไรมากที่สุด



ภาพที่ 51 การวิเคราะห์จุดคุ้มทุนของสารเคลือบผิวชิ้นงานเทอร์โมพลาสติกสตาซ

## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

#### สรุปผลการทดลอง

การศึกษาและปรับปรุงสมบัติการดูดความชื้นของชิ้นงานเทอร์โมพลาสติกสตาซ ที่มีสารเคลือบผิวชิ้นงานด้วยสารเคลือบชนิดต่างๆ สามารถแบ่งกระบวนการศึกษาออกเป็น 6 ส่วน โดยส่วนแรกจะเป็นขั้นตอนในการเตรียมชิ้นงานเทอร์โมพลาสติกสตาซ โดยใช้กลีเซอรอลเป็น Plasticizer ผสมกับแป้งมันสำปะหลังแล้วจึงทำการขึ้นรูปเป็นชิ้นงานด้วยเครื่อง compression molding

สำหรับส่วนที่สองจะเป็นการเตรียมสารเคลือบซึ่งก็สามารถแบ่งสารเคลือบที่นำมาทำการศึกษาออกเป็นสามกลุ่มใหญ่ โดยกลุ่มที่หนึ่ง จะเป็นสารเคลือบที่ได้จากกรดไขมัน ซึ่งได้แก่ กรดสเตียริก กรดโอเลอิก กรดไขมันจากน้ำมันดอกทานตะวัน และกรดไขมันจากน้ำมันดอกคาโนล่าห์ ขณะที่กลุ่มที่สองจะเป็นสารสังเคราะห์จากไคโตซาน ซึ่งเป็นสารจำพวก N-alkyl chitosan ได้แก่ N-butyl chitosan, N-undecyl chitosan, และ N-undecenyl chitosan ส่วนกลุ่มที่สามก็เป็นสารสังเคราะห์จากไคโตซานแต่เป็นสารจำพวก quaternized chitosan ได้แก่ (N,N,N)-butyl chitosan, N-butyl,(N,N)-undecyl chitosan และ N-butyl,(N,N)-octadecenyl chitosan ซึ่งการเคลือบชิ้นงานเทอร์โมพลาสติกสตาซจะใช้กระบวนการเคลือบด้วย solution dipping โดยตัวทำละลายที่ใช้ได้แก่ เอทานอล, บิวทานอล และสารละลายผสมระหว่างเมทานอลกับเอทานอล ซึ่งจะใช้กับสารเคลือบที่เป็นกรดไขมัน N-alkyl chitosan และ quaternized chitosan ตามลำดับ

สำหรับส่วนที่สามจะเป็นการศึกษาการยึดติดพื้นผิวตามมาตรฐาน ASTM D3359 :ซึ่งพบว่าเปอร์เซ็นต์การหลุดลอกของสารเคลือบผิวจากอนุพันธ์ไคโตซาน ได้แก่ N-alkyl chitosan และ quaternized chitosan จะมีเปอร์เซ็นต์การหลุดลอกที่น้อยกว่าการเคลือบผิวด้วยกรดไขมันเล็กน้อย โดยสารเคลือบผิวจาก N-butyl,(N,N)-octadecenyl chitosan จะมีเปอร์เซ็นต์การหลุดลอกที่น้อยที่สุดเพียง 2%

สำหรับส่วนที่สี่จะเป็นการศึกษาสมบัติการดูดความชื้นของชิ้นงานเทอร์โมพลาสติกสตาซ ด้วยการเคลือบผิวชิ้นงานด้วยสารเคลือบชนิดต่างๆ ภายใต้ความชื้นสัมพัทธ์ 53%RH เป็นเวลา 15 วัน ซึ่งหากพิจารณาตามชนิดของสารเคลือบจะ พบว่าสารเคลือบจากกรดไขมันดอกคาโนล่าห์ สารเคลือบจาก N-undecenyl chitosan และสารเคลือบจาก N-butyl,(N,N)-octadecenyl chitosan จะ

เป็นสารเคลือบที่มีการดูดความชื้นที่น้อยที่สุดในแต่ละชนิดของสารเคลือบ แต่อย่างไรก็ตาม สารเคลือบที่ดูดความชื้นน้อยที่สุดจากสารเคลือบที่นำมาทำการศึกษาได้แก่ สารเคลือบจากกรดไขมันดอกคาโนล่าห์ ซึ่งมีการดูดความชื้นเพียง 2. % โดยสามารถลดการดูดความชื้นของชิ้นงานเทอร์โมพลาสติกสตาซ ได้ถึง 74 %

สำหรับส่วนที่ห้าจะเป็นการศึกษาสมบัติเชิงกลของ ชิ้นงานเทอร์โมพลาสติกสตาซ ที่มีการเคลือบผิวชิ้นงานด้วยสารเคลือบชนิดต่างๆ ซึ่งการศึกษาการเปรียบเทียบสมบัติการทนแรงกระแทกของชิ้นงานก่อนการทดสอบกับหลังการทดสอบสมบัติการศึกษาการดูดความชื้นสัมพัทธ์ที่ 53% เป็นเวลา 15 วันจะพบว่า ชิ้นงานเทอร์โมพลาสติกสตาซที่มีการเคลือบผิวชิ้นงานด้วยสารเคลือบต่างชนิดกัน ต่างก็มีค่า impact strength ที่เพิ่มสูงขึ้นตามการดูดความชื้นที่สูง ซึ่งการเคลือบชิ้นงานเทอร์โมพลาสติกสตาซด้วยกรดไขมันจากน้ำมันดอกคาโนล่าห์ จะมีค่า impact strength ที่เพิ่มขึ้นน้อยที่สุด เพียง 113 %

ขณะที่การเปรียบเทียบสมบัติการดึงยึดของชิ้นงานเทอร์โมพลาสติกสตาซก่อนการทดสอบกับหลังการทดสอบสมบัติการดูดความชื้นสัมพัทธ์ที่ 53% เป็นเวลา 15 วันจะพบว่า ชิ้นงานเทอร์โมพลาสติกสตาซ ที่มีการเคลือบผิวชิ้นงานด้วยสารเคลือบต่างชนิดกัน ต่างก็มีค่า Young's modulus และ ค่า tensile strength ที่ลดต่ำลง และมีค่า percent strain at break ที่เพิ่มสูงขึ้นตามการดูดความชื้นของชิ้นงานที่เคลือบสารเคลือบต่างๆ ซึ่งการเคลือบชิ้นงานเทอร์โมพลาสติกสตาซด้วยกรดไขมันจากน้ำมันดอกคาโนล่าห์ จะมีค่า Young's modulus และ ค่า tensile strength ที่ลดลงที่น้อยที่สุด เพียง 31 % และ 35%ตามลำดับ ขณะที่ก็มีค่า percent strain at break ที่เพิ่มขึ้นน้อยที่สุดเพียง 24%

สำหรับส่วนที่หกจะเป็นการวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์ในแง่การศึกษาจุดคุ้มทุนของการใช้สารเคลือบผิวชิ้นงานเทอร์โมพลาสติกสตาซ ซึ่งจะเป็นปัจจัยหนึ่งที่ใช้ในการตัดสินใจในการเลือกสารเคลือบผิว พบว่าสารเคลือบจากกรดไขมันที่ได้จากน้ำมันดอกคาโนล่าห์ ตลอดกระบวนการมีค่าใช้จ่ายต่างๆที่ต่ำที่สุดเมื่อเทียบกับสารเคลือบชนิดอื่นๆ ดังนั้นเมื่อพิจารณาถึงจุดคุ้มทุน พบว่าการขายชิ้นงานเทอร์โมพลาสติกสตาซที่มีการเคลือบผิวด้วยกรดไขมันที่ได้จากน้ำมันดอกคาโนล่าห์จะทำให้ขายผลิตภัณฑ์ได้กำไรมากที่สุด

**ข้อเสนอแนะ**

1. เมื่อทำการสังเคราะห์ alkyl chitosan และ quaternized chitosan แล้วควรทำการคำนวณหา degree of substitution
2. ในการสังเคราะห์ quaternized chitosan สามารถเตรียมจากสารตั้งต้นจาก unsaturated fatty acid ได้
3. ควรทำการศึกษาสมบัติการย่อยสลายเพิ่มเติม
4. ควรทำการศึกษากระบวนการ oxypolymerization เพิ่มเติม เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการป้องกันการดูดความชื้นของชั้นงานเทอร์โมพลาสติกอสตาซ

### บรรณานุกรม

1. สำนักข่าวเจ้าพระยา. ไตรมาสแรกส่งออกสินค้าเกษตรลดลง [Online]. Accessed 20 October 2009. Available from <http://www.chaoprayanews.com/2009/04/16/ไตรมาสแรกส่งออกสินค้า>.
2. ฟาร์มเกษตร. สถานการณ์ และแนวโน้มราคามันสำปะหลังฤดูกาลผลิต 2552/53 [Online]. Accessed 20 October 2009. Available from <http://farmkaset.org/contents/default.aspx?content=00217>.
3. สมาคมการค้ามันสำปะหลังไทย. งบประมาณในโครงการแทรกแซงราคาสินค้าเกษตร กรณีมันสำปะหลัง : ใครได้ใครเสีย? [Online]. Accessed 20 October 2009. Available from [http://www.ttta-tapioca.org/web2/news\\_01.html](http://www.ttta-tapioca.org/web2/news_01.html).
4. สำนักงานคณะกรรมการกฤษฎีกา. การซื้อขายสินค้าเกษตรล่วงหน้า. ความสัมพันธ์ระหว่างราคา Cash Price กับ Futures Price ของมันสำปะหลัง [Online]. Accessed 20 October 2009. Available from [http://www.afc.or.th/itc/products\\_analyze.php?id=109&fgrp\\_id=6&fmnu\\_id=16](http://www.afc.or.th/itc/products_analyze.php?id=109&fgrp_id=6&fmnu_id=16).
5. กฤษณะ คีนคลีป และคณะ. การพัฒนาเทอร์โมพลาสติกที่เตรียมจากแป้ง : การปรับปรุงคุณสมบัติการดูดความชื้น. ปรินูญานิพนธ์ สาขาวิชาปิโตรเคมีและวัสดุพอลิเมอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร, 2550.
6. กาญจนา อุทัยฉาย และคณะ. การศึกษาการพัฒนาเทอร์โมพลาสติกที่เตรียมจากแป้ง. ปรินูญานิพนธ์ สาขาวิชาปิโตรเคมีและวัสดุพอลิเมอร์ ภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร, 2547.
7. Scientific Psychic. Carbohydrates - Chemical Structure[Online]. Accessed 21 October 2009. Available from <http://www.scientificpsychic.com/fitness/carbohydrates1.html>.
8. กล้าณรงค์ ศรีรอด และเกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ. เทคโนโลยีของแป้ง. พิมพ์ครั้งที่ 3. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2546.
9. Scientific Psychic. Carbohydrates - Chemical Structure[Online]. Accessed 22 October 2009. Available from <http://www.scientificpsychic.com/fitness/carbohydrates1.html>.

10. พิทักษ์ บุญพจนสุนทร. “การพัฒนาแป้งมันสำปะหลังในรอบ 30ปี.” 30ปี สมาคมการค้ามันสำปะหลังไทย. 28 (มิถุนายน 2536): 36-37.
11. “สารพันชื่อ...สารพัดประโยชน์ กับมันสำปะหลัง.” 24ปี สมาคมการค้าอุตสาหกรรมแป้งมันสำปะหลังไทย ร่วมพัฒนาชาติไทย...ถวายจอมราชันย์. 30(เมษายน 2543): 76-77.
12. “อุตสาหกรรมมันสำปะหลังไทย”.สมาคมการค้าอุตสาหกรรมมันสำปะหลังไทย. 30(เมษายน 2530): 20-26.
13. “อนาคตผลิตภัณฑ์แป้งมันสำปะหลัง.” 24ปี สมาคมการค้าอุตสาหกรรมแป้งมันสำปะหลังไทย ร่วมพัฒนาชาติไทย...ถวายจอมราชันย์. 30(เมษายน 2543): 102-104.
14. วันชัย เลิศวิจิตรจรัส. เอกสารประกอบการสอนรายวิชา 622 542 Biopolymer. คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร, 2551.
15. วันชัย เลิศวิจิตรจรัส, อำนวย สิทธิตระกูล และเจกิดาน แก้วพารา. “ศักยภาพการผลิตเทอร์โมพลาสติกที่เตรียมจากแป้ง.” ส่งเสริมเทคโนโลยี.(สิงหาคม-กันยายน 2551).
16. ชีระพงษ์ บัวศรี และคณะ. เทอร์โมพลาสติกสตาซ์:การปรับปรุงการดูดความชื้นด้วยกรดไขมันและอนุพันธ์โคโคซาน, ปรินญาณิพนธ์ สาขาวิชาปิโตรเคมีและวัสดุพอลิเมอร์ ภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร, 2550.
17. F.S. Guner, Y.Yagci, and A.T. Erciyas. “Polymers from triglyceride oils” Progress in Polymer Science. 31 (July 2006): 633–670.
18. ลาวัลย์ จีระพงษ์. “โคโคซาน.” สำนักพัฒนาคุณภาพสินค้าเกษตรเกษตร [Online]. Accessed 26 October 2009.Available from <http://www.doae.go.th/library/html/detail/ditosan.htm>.
19. A.T. Paulino et al. “Characterization of chitosan and chitin produced from silkworm Chrysalides.” Carbohydrate Polymers. 64 (January 2006): 98–103.
20. ภาวดี เมษะดำนนท์. “ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับไคติน-โคโคซาน.” ศูนย์เทคโนโลยีและวัสดุแห่งชาติ. (มิถุนายน 2543): 69-75.
21. สุนันทา วิบูลย์จันทร์. “เคมีอินทรีย์.” โครงการเอกสารวิชาการ ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล. (2539): 267.

22. Z.Guo, and R.Xing et al. "The influence of molecular weight of quaternized chitosan on antifungal activity." Carbohydrate Polymers. 71 (August 2008) : 694–697.
23. G.K. Prakash, and K.M. Mahadevan. "Enhancing the properties of wood through chemical modification with palmitoyl chloride." Applied Surface Science. 254 (July 2008): 1751–1756.
24. D.V. Kuklev, and W.L. Smith. "Chemical C2-elongation of polyunsaturated fatty acids." Chemistry and Physics of Lipids. 144 (October 2006): 172–177.
25. S.M. Klein, C.Zhang , and Y.L.Jiang. "Simple synthesis of fresh alkyl iodides using alcohols and hydriodic acid." Tetrahedron Letters. 49 (March 2008) : 2638–2641.
26. Z. Jia, D. shen, and W. Xu. "Synthesis and antibacterial activities of quaternary ammonium salt of chitosan." Carbohydrate Research. 333 (April 2001) :1–6.
27. พิชิต สุขเจริญพงษ์. การจัดการวิศวกรรมการผลิต. พิมพ์ครั้งที่ 1.กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์ ซีเอ็ดยูเคชั่น. 2549.
28. T.W.G. Solomons. Organic Chemistry. 6<sup>th</sup> Edition. New York: John Wiley&Sons.Inc. 1996:1079-1083.
29. J. Mohan. Organic Analytical Chemistry. India: Alpha science international Ltd. 2003. 212-231.
- 30.ชานินทร์ ศิลปะจารุ การวิจัยและวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติด้วย SPSS. พิมพ์ครั้งที่ 10กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์ซีเอ็ดยูเคชั่น. 2552.
31. A.I. Vogel. Practical Organic Chemistry. 3<sup>rd</sup> Edition . London: Loghman group limited, 1971:445.
32. M. Wibraham and Staley. Introduction to Organic and Biological Chemistry. Canada: D.C.Heath and Company.520.
33. M. Press. Surface coatings. London:chapman and hall, 20-44.

## ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ-สกุล	นายปิยะวิทย์ สดสุขชาติ
วันเกิด	28 กันยายน พ.ศ. 2526
ประวัติการศึกษา	
พ.ศ. 2533	ระดับประถมศึกษา โรงเรียนชุมชนบ้านน้ำฝ่อง (โรงเรียนอนุบาลกุมภวาปี) จังหวัดอุดรธานี
พ.ศ. 2539	ระดับมัธยมศึกษาตอนต้น โรงเรียนอุดรพิทยานุกูล จังหวัดอุดรธานี
พ.ศ. 2542	ระดับมัธยมศึกษาตอนปลาย โรงเรียนอุดรพิทยานุกูล จังหวัดอุดรธานี
พ.ศ. 2546	ระดับปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาปิโตรเคมีและวัสดุพอลิเมอร์ ภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร จังหวัดนครปฐม
พ.ศ. 2550	ศึกษาต่อระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตร มหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์ บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร
ประวัติการฝึกงาน	บริษัท ไทยคอมโพสิท จำกัด อำเภอบ้านบึง จังหวัดชลบุรี
ที่อยู่ติดต่อได้	บ้านเลขที่ 62 หมู่ 1 ถนนอุ่มจาน ตำบลกุมภวาปี อำเภอกุมภวาปี จังหวัดอุดรธานี 41110
โทรศัพท์	0-4220-0101, 086-7090379
E-mail address	sater_100@hotmail.com piyawits100@gmail.com