

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ทุนวิจัย

กองทุนรัชดาภิเษกสมโภช

รายงานผลการวิจัย

ผลของสารเชื่อมขวางในสารเคลือบผิวโคโตนสำหรับกระดาษ

โดย

ศิริวรรณ พัฒนาฤดี

มิถุนายน พ.ศ. 2555

## กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนทุนวิจัยจากกองทุนรัชดาภิเษกสมโภชประจำปีงบประมาณ 2553

## บทคัดย่อภาษาไทย

ชื่อโครงการวิจัย                      ผลของสารเชื่อมขวางในสารเคลือบผิวโคโตนสำหรับกระดาษ  
 ชื่อผู้วิจัย                                อาจารย์ ดร. สิริวรรณ พัฒนาฤดี  
 เดือนและปีที่ทำวิจัยเสร็จ            มิถุนายน พ.ศ. 2555

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาการเตรียมสารเคลือบจากโคโตนผสมสารเชื่อมขวาง 3 ชนิดคือ กรดกลูตาริก กรดซิตริก และกรดกรดบิวเทนเตตระคาร์บอกซิลิก เติมที่ปริมาณร้อยละ 50, 100, 150 เทียบกับน้ำหนักของโคโตน ผลพบว่าสารเคลือบผิวโคโตนผสมสารเชื่อมขวางสามารถปรับปรุงสมบัติกระดาษให้ดีขึ้น การเคลือบผิวผสมสารเชื่อมขวางที่ร้อยละ 50 ส่งผลให้กระดาษมีความมันวาวและความเรียบเพิ่มขึ้นสูงสุด กรดกลูตาริกให้ความเรียบสูงสุดและกรดบิวเทนเตตระคาร์บอกซิลิกให้ความมันวาวสูงสุด กระดาษหลังเคลือบผิวผสมสารเชื่อมขวางมีสมบัติเชิงกายภาพที่ดีขึ้น คือ การดูดซึมน้ำต่ำลง ความพรุนของกระดาษต่ำลง ความต้านทานต่อแรงดึงและแรงฉีกทะลุสูงขึ้น โดยปริมาณการเติมที่ร้อยละ 50 ของกรดบิวเทนเตตระคาร์บอกซิลิกให้การดูดซึมน้ำต่ำสุด กรดซิตริกให้ความต้านทานต่อแรงดึงสูงสุด กรดกลูตาริกที่ปริมาณร้อยละ 100 ส่งผลให้ได้ความต้านทานต่อแรงฉีกทะลุสูงสุด สมบัติผิวหน้าของสารเคลือบผิวผสมสารเชื่อมขวางมีความชอบน้ำ

**บทคัดย่อภาษาอังกฤษ**

**Project Title**                      Effect of Cross-linking Agents on Chitosan Coating for Paper  
**Name of the Investigators**        Dr. Siriwan Phattandarudee  
**Year**                                      June 2012

**Abstract**

This study focused on preparation of chitosan coating crosslinked with 3 kinds of cross-linking agents, i.e. glutaric acid, citric acid, and butanetetracarboxylic acid. The concentrations were varied at 50%, 100%, and 150%wt based on chitosan weight. The results showed that the properties of coated papers were improved. The highest gloss and smoothness were obtained at 50%wt of butanetetracarboxylic acid and glutaric acid, respectively. Physical properties of the coated paper were also elevated, such as decreased water absorption, lower air permeability, higher tensile and bursting strength. At 50%wt, it was found that butanetetracarboxylic acid yielded the lowest water absorption, whereas citric acid gave the highest tensile strength. The highest bursting strength was obtained with glutaric acid at 100%wt. Surface property of the crosslinked coating was hydrophilic.

## สารบัญ

	หน้า
หน้าปก	
กิตติกรรมประกาศ	ii
บทคัดย่อภาษาไทย	iii
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	iv
สารบัญ	v
รายการตารางประกอบ	vii
รายการรูปประกอบ	viii
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย	2
1.4 ไคติน (Chitin)	2
บทที่ 2 การสำรวจแนวความคิดและการวิจัยที่เกี่ยวข้อง	12
บทที่ 3 วิธีการวิจัย	14
3.1 วัสดุและสารเคมี	14
3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์	15
3.3 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินการวิจัย	16
บทที่ 4 ผลการวิจัยและการอภิปรายผล	21
4.1 น้ำหนักของสารเคลือบผิว	21
4.2 ลักษณะทางกายภาพของกระดาษหลังเคลือบผิว	23
4.3 ความขาวสว่าง (Brightness)	31
4.4 ความเรียบ (Smoothness)	32
4.5 ความมันวาว (Gloss)	32
4.6 หมู่ฟังก์ชันของสารเคลือบผิว	34
4.7 การดูดซึมน้ำ (Water absorption)	42
4.8 ความพรุนของกระดาษ (Air permeability)	45
4.9 ความต้านทานต่อแรงดึง (Tensile strength)	46
4.10 ความต้านทานต่อแรงดันทะลุ (Bursting strength)	48

4.11 มุมสัมผัสของน้ำบนสารเคลือบผิว (Water contact angle)	49
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย	57
ข้อเสนอแนะ	58
เอกสารอ้างอิง	59

## รายการตารางประกอบ

	หน้า
ตารางที่ 1 น้ำหนักโมเลกุลและโครงสร้างทางเคมีของสารเชื่อมขวางชนิดต่างๆ	14
ตารางที่ 2 คำย่อและความหมายของสารเคลือบผิวผสมสารเชื่อมขวาง	22
ตารางที่ 3 น้ำหนักของสารเคลือบกระดาดหลังเคลือบผิวด้วยสารเคลือบจาก ไคโตซานและไคโตซานผสมสารเชื่อมขวางที่อัตราส่วนต่างๆ กัน	22
ตารางที่ 4 ความหนืดของสารเคลือบผิวไคโตซานและไคโตซานผสมสารเชื่อมขวาง ชนิดต่างๆ ที่ที่อัตราส่วนร้อยละ 50 และ 150 (ทดสอบที่อุณหภูมิ 25°C และที่ความเร็วรอบ 70 rpm)	23
ตารางที่ 5 ตำแหน่งของพิกและหมู่ฟังก์ชันที่พบในกระดาดที่ไม่เคลือบผิว	40
ตารางที่ 6 ตำแหน่งของพิกและหมู่ฟังก์ชันที่พบในกระดาดที่เคลือบผิวด้วย สารเคลือบไคโตซาน	40
ตารางที่ 7 ตำแหน่งของพิกและหมู่ฟังก์ชันที่พบในกระดาดที่เคลือบผิวด้วย สารเคลือบไคโตซานผสมสารเชื่อมขวางชนิดต่างๆ ที่อัตราส่วนต่างๆ	41
ตารางที่ 8 อัตราส่วนของหมู่ฟังก์ชันที่พบในกระดาดที่เคลือบผิวด้วยสารเคลือบ ไคโตซานผสมสารเชื่อมขวางชนิดต่างๆ ที่อัตราส่วนต่างๆ	42
ตารางที่ 9 ความพรุนของกระดาดก่อนและหลังเคลือบผิวด้วยสารเคลือบ ไคโตซานและไคโตซานผสมสารเชื่อมขวางชนิดต่างๆ ที่อัตราส่วนต่างๆ	45
ตารางที่ 10 มุมสัมผัสของน้ำบนกระดาดที่เคลือบผิวด้วยสารเคลือบไคโตซานและ ไคโตซานผสมสารเชื่อมขวางชนิดต่างๆ ที่อัตราส่วนต่างๆ (ที่เวลา 60 วินาที)	54

## รายการรูปประกอบ

	หน้า
รูปที่ 1 การเตรียมโคโตะซานจากกระบวนการกำจัดหมู่อะซิติลของโคติน	3
รูปที่ 2 ปฏิกริยาการเชื่อมขวางของพอลิเมอร์ที่มีหมู่ฟังก์ชันหลายหมู่	8
รูปที่ 3 การเกิดโครงร่างตาข่ายของพอลิเมอร์เมื่อมีการใช้สารช่วยในการเกิด ปฏิกริยาแบบเชื่อมโยง	9
รูปที่ 4 การเกิดโครงร่างตาข่ายขณะเกิดพอลิเมอร์เซชันด้วยการใช้ polyfunctional monomer	10
รูปที่ 5 ภาพถ่าย SEM ของผิวหน้ากระดาษก่อนเคลือบผิว (กำลังขยาย 100 เท่า)	24
รูปที่ 6 ภาพถ่าย SEM ของผิวหน้ากระดาษเคลือบผิวโคโตะซาน (กำลังขยาย 100 เท่า)	25
รูปที่ 7 ภาพถ่าย SEM ของผิวหน้าของกระดาษหลังเคลือบด้วยสารเคลือบโคโตะซาน ผสมสารเชื่อมขวางชนิดต่างๆ ที่อัตราส่วนต่างๆ (1) GA-0.5 (2) GA-1 (3) CA-0.5 (4) CA-1 (5) BTCA-0.5 (6) BTCA-1 (7) GA-1.5 (8) CA-1.5 (9) BTCA-1.5 (กำลังขยาย 100 เท่า)	27
รูปที่ 8 ภาพถ่าย SEM (ตัดขวาง) ของกระดาษเคลือบผิวโคโตะซาน (กำลังขยาย 2,000 เท่า)	28
รูปที่ 9 ภาพถ่าย SEM (ตัดขวาง) ของผิวหน้าของกระดาษหลังเคลือบด้วยสารเคลือบ โคโตะซานผสมสารเชื่อมขวางชนิดต่างๆ ที่อัตราส่วนต่างๆ (1) GA-0.5 (2) GA-1 (3) CA-0.5 (4) CA-1 (5) BTCA-0.5 (6) BTCA-1 (7) GA-1.5 (8) CA-1.5 (9) BTCA-1.5 (กำลังขยาย 2,000 เท่า)	30
รูปที่ 10 ความขาวสว่างของกระดาษก่อนและหลังเคลือบผิวด้วยสารเคลือบโคโตะซาน และสารเคลือบโคโตะซานผสมสารเชื่อมขวางชนิดต่างๆ และอัตราส่วนต่างๆ	31
รูปที่ 11 ความเรียบของกระดาษก่อนและหลังเคลือบผิวด้วยสารเคลือบโคโตะซานและ สารเคลือบโคโตะซานผสมสารเชื่อมขวางชนิดต่างๆ และอัตราส่วนต่างๆ	33
รูปที่ 12 ความมันวาวของกระดาษก่อนและหลังเคลือบผิวด้วยสารเคลือบโคโตะซาน และสารเคลือบโคโตะซานผสมสารเชื่อมขวางชนิดต่างๆ และอัตราส่วนต่างๆ	33
รูปที่ 13 กลไกการเกิดปฏิกริยาเชื่อมขวางระหว่างโคโตะซานและสารเชื่อมขวาง ชนิดต่างๆ (1) กรดกลูตาริก (2) กรดซิตริก (3) กรด BTCA 36	35
รูปที่ 14 FTIR สเปกตรัมของกระดาษที่ไม่มีการเคลือบผิว	36
รูปที่ 15 FTIR สเปกตรัมของกระดาษที่มีการเคลือบผิวด้วย (1) โคโตะซาน (2) GA-0.5 (3) GA-1 (4) GA-1.5	37



	หน้า
รูปที่ 16 FTIR สเปกตรัมของกระดาษที่มีการเคลือบผิวด้วย (1) ไคโตซาน (2) CA-0.5 (3) CA-1 (4) CA-1.5	38
รูปที่ 17 FTIR สเปกตรัมของกระดาษที่มีการเคลือบผิวด้วย (1) ไคโตซาน (2) BTCA-0.5 (3) BTCA-1 (4) BTCA-1.5	39
รูปที่ 18 การดูดซึมน้ำของกระดาษหลังเคลือบผิวด้วยสารเคลือบไคโตซานและสารเคลือบไคโตซานผสมสารเชื่อมขวางชนิดต่างๆ และอัตราส่วนต่างๆ	44
รูปที่ 19 ความต้านทานต่อแรงดึงของกระดาษก่อนและหลังเคลือบผิวด้วยสารเคลือบไคโตซานและสารเคลือบไคโตซานผสมสารเชื่อมขวางชนิดต่างๆ และอัตราส่วนต่างๆ	47
รูปที่ 20 ความต้านทานต่อแรงดันทะลุของกระดาษก่อนและหลังเคลือบผิวด้วยสารเคลือบไคโตซานและสารเคลือบไคโตซานผสมสารเชื่อมขวางชนิดต่างๆ และอัตราส่วนต่างๆ	48
รูปที่ 21 มุมสัมผัสของน้ำบนกระดาษที่ไม่เคลือบผิว	50
รูปที่ 22 มุมสัมผัสของน้ำบนกระดาษที่เคลือบผิวด้วยสารเคลือบไคโตซานผสมสารเชื่อมขวางชนิด GA ที่อัตราส่วนต่างๆ	51
รูปที่ 23 มุมสัมผัสของน้ำบนกระดาษที่เคลือบผิวด้วยสารเคลือบไคโตซานผสมสารเชื่อมขวางชนิด CA ที่อัตราส่วนต่างๆ	52
รูปที่ 24 มุมสัมผัสของน้ำบนกระดาษที่เคลือบผิวด้วยสารเคลือบไคโตซานผสมสารเชื่อมขวางชนิด BTCA ที่อัตราส่วนต่างๆ	53
รูปที่ 25 ภาพถ่ายของมุมสัมผัสของน้ำบนผิวหน้าของกระดาษที่ไม่เคลือบผิว (1) ที่ 1 วินาที (2) ที่ 10 วินาที และกระดาษที่เคลือบผิวด้วยสารเคลือบไคโตซาน (3) ที่ 10 วินาที (4) ที่ 60 วินาที	55
รูปที่ 26 ภาพถ่ายของมุมสัมผัสของน้ำบนผิวหน้าของกระดาษที่เคลือบผิวด้วยสารเคลือบไคโตซานผสมสารเชื่อมขวาง (1) GA-0.5 ที่ 10 วินาที (2) GA-0.5 ที่ 60 วินาที (3) CA-0.5 ที่ 10 วินาที (4) CA-0.5 ที่ 60 วินาที (5) BTCA-0.5 ที่ 10 วินาที (6) BTCA-0.5 ที่ 60 วินาที	56

## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การใช้พลาสติกหรืออะลูมิเนียมฟอยล์ร่วมกับกระดาษ เพื่อปรับปรุงสมบัติการกันขวาง ความชื้น และแก๊ส เป็นวิธีที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในงานด้านบรรจุภัณฑ์ แต่ข้อด้อยที่สำคัญของบรรจุภัณฑ์ประเภทนี้คือการสลายตัวตามธรรมชาติใช้เวลานาน ดังนั้นการใช้วัสดุจากธรรมชาติมาผลิตเป็นสารเคลือบผิวกระดาษ เพื่อปรับปรุงสมบัติการกันขวางของกระดาษ จึงเป็นแนวทางที่น่าสนใจ ซึ่งนอกจากจะเป็นการปรับปรุงสมบัติกระดาษเพื่อให้เหมาะสมกับการนำไปใช้งานแล้ว ยังเป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับกระดาษอีกด้วย ไคโตซานซึ่งเป็นอนุพันธ์ของไคติน จัดเป็นพอลิเมอร์จากธรรมชาติที่มีปริมาณมากเป็นอันดับสองรองจากเซลลูโลส ได้จากเปลือกนอกของสัตว์จำพวก กุ้ง ปู ปลาหมึก และแมลง ในอุตสาหกรรมการผลิตกระดาษมีการใช้ไคตินและไคโตซานเป็นสารเติมแต่ง (additive) เพื่อเพิ่มความแข็งแรงให้กระดาษทั้งในขณะเปียกและแห้ง (wet and dry strength) ไคโตซานสามารถใช้เป็นสารเพิ่มความเหนียว (thickener) และ fixing agent เพื่อใช้ในงานพิมพ์กระดาษ ไคโตซานจะทำให้กระดาษมีผิวเรียบ ดีขึ้นและมีความทนต่อการขูดขีด (wear resistance) ดีขึ้น ไคตินและไคโตซานยังมีการนำไปใช้ในการผลิตกระดาษที่ใช้ในงานซึ่งต้องการความสะอาด เช่น กระดาษชำระ กระดาษเช็ดปาก ผ้าอนามัย และผ้าอ้อมเด็ก เป็นต้น นอกจากนี้ยังใช้ในการผลิตกระดาษที่นำกลับมาใช้ใหม่ (recycle paper) และกระดาษเพื่อการบรรจุ ส่วนน้ำเสียที่เกิดขึ้นในอุตสาหกรรมนี้ยังสามารถบำบัดได้ด้วยการใช้ไคตินและไคโตซานเป็นสารช่วยในการตกตะกอน

ในงานวิจัยนี้สนใจนำไคโตซานมาประยุกต์ใช้งานร่วมกับสารเชื่อมขวาง เกิดเป็นโครงร่างตาข่ายในสารเคลือบไคโตซานสำหรับกระดาษชานอ้อย การเลือกใช้กระดาษชานอ้อยเนื่องจากเป็นวัสดุที่ผลิตจากกากชานอ้อยที่ทิ้งจากโรงงานผลิตน้ำตาล เป็นการนำวัสดุกลับมาใช้ใหม่ และในปัจจุบันมีการประยุกต์ใช้งานกระดาษชานอ้อยในด้านบรรจุภัณฑ์สำหรับอาหารมากขึ้น เช่น บรรจุภัณฑ์โฟมทดแทนโฟมพลาสติก เนื่องจากมีความปลอดภัย และเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม แต่เนื่องโครงสร้างของกระดาษชานอ้อยยังมีรูพรุนระหว่างเส้นใยและผิวหนังก็ยังมีรูพรุนเหลืออยู่ จึงส่งผลต่อการบรรจุผลิตภัณฑ์หรืออาหารที่มีลักษณะเป็นของเหลวทำได้ไม่ดีนัก ทางคณะผู้วิจัยจึงมีความสนใจในการปรับปรุงสมบัติการกันขวางและสมบัติทางกายภาพของกระดาษชานอ้อยด้วยสารเคลือบไคโตซานผสมสารเชื่อมขวาง เพื่อประโยชน์ใช้งานเป็นบรรจุภัณฑ์ที่มีความแข็งแรงและมีความต้านทานน้ำได้ดีขึ้น

## 1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

1. ศึกษาชนิดของสารเชื่อมขวางที่เหมาะสม สำหรับสารเคลือบผิวโคโตซาน
2. ศึกษาผลของชนิดและปริมาณของสารเชื่อมขวางในสารเคลือบผิวโคโตซานต่อสมบัติของกระดาษหลังเคลือบผิว

## 1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย

งานวิจัยนี้เตรียมสารเคลือบผิวกระดาษจากโคโตซานผสมสารเชื่อมขวางชนิดแตกต่างกัน คือ กรดกลูตาริก (glutaric acid; GA) กรดซิตริก (citric acid; CA) และกรดบิวเทนเตตระคาร์บอกซิลิก (butanetetracarboxylic acid; BTCA) ที่ปริมาณแตกต่างกัน ทำการเคลือบผิวกระดาษด้วยแท่งเคลือบแบบขดลวด ศึกษาสมบัติของกระดาษหลังเคลือบผิว เช่น น้ำหนักของสารเคลือบผิว ความมันวาว ความขาวสว่าง ความเรียบ ความพรุน การดูดซึมน้ำ มุมสัมผัสของน้ำบนผิวกระดาษ ความต้านทานต่อแรงดึง ความต้านทานต่อแรงดันทะลุ ตรวจวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิค FTIR

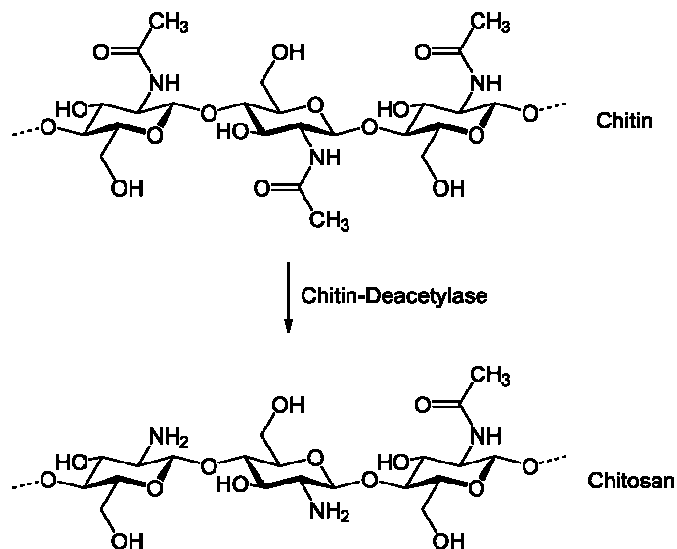
## 1.4 ไคติน (Chitin)

ไคตินเป็นสารพอลิเมอร์ธรรมชาติจำพวกคาร์โบไฮเดรตที่มีโมเลกุลยาวมากโดยไม่มี การแตกแขนง มีชื่อทางเคมีว่า poly-β-(1,4)-2-acetamido-2-deoxy-D-glucose หรือ poly *N*-acetyl-D-glucosamine มีโครงสร้างคล้ายเซลลูโลส แตกต่างกันที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 2 ของ ไคตินจะมี acetamide group (-NHCOCH<sub>3</sub>) เกาะอยู่ แต่เซลลูโลสจะเป็น hydroxyl group (-OH) ไคตินเป็นส่วนประกอบสำคัญของโครงสร้างเปลือกนอกของสัตว์จำพวก กุ้ง ปู ปลาหมึก และแมลงนอกจากนี้ยังพบใน เห็ด รา และสาหร่ายบางชนิด [1]

## โคโตซาน (Chitosan)

โคโตซานเป็นอนุพันธ์ของไคติน มีชื่อทางเคมีว่า poly-β-(1-4)-2-Amino-2-deoxy-β-D-glucose ได้จากการนำไคตินไปผ่านกระบวนการ deacetylation หรือกำจัดหมู่อะซิทิล ทำให้ acetamide group ของไคตินถูกเปลี่ยนเป็น amino group (-NH<sub>2</sub>) [2] โดยทั่วไปมักจะพบไคติน และโคโตซานอยู่ด้วยกันในลักษณะเป็นโคพอลิเมอร์ ดังรูปที่ 1 ไคโตซานไม่ละลายน้ำแต่สามารถละลายได้ในกรดอินทรีย์ มีสมบัติที่โดดเด่นเฉพาะตัว จึงมีการนำมาประยุกต์ใช้งานได้ในหลายด้าน เช่น ทางด้านการแพทย์และเภสัชกรรม เพราะสามารถเข้ากันได้ดีกับธรรมชาติ (biocompatible) และย่อยสลายได้เองตามธรรมชาติ (biodegradable) ไคโตซานเป็นพอลิเมอร์ที่

มีประจุบวกซึ่งสามารถจับกับเชื้อหุ้มเซลล์ของจุลินทรีย์ที่มีประจุลบจึงนำไปใช้เป็นสารกันบูด ในอาหาร ใช้เป็นสารเคลือบอาหาร ผัก และผลไม้ ช่วยในการบำบัดน้ำเสีย สามารถจับกับ โปรตีนและไขมันได้ดี (flocculent) สามารถดูดซับไอออนของโลหะหนัก (chelating agent) และจับสี (dye) นอกจากนี้ยังมีการใช้งานในด้านการเกษตร เครื่องสำอาง อุตสาหกรรม เส้นใย และสิ่งทอ



รูปที่ 1 การเตรียมไคโตซานจากกระบวนการกำจัดหมู่อะซิทธิลของไคติน [3]

#### การปรับปรุงสมบัติของไคโตซาน

ไคโตซานสามารถนำไปใช้ประโยชน์ในงานหลายด้าน ซึ่งในบางกรณีไคโตซานอาจมีสมบัติบางอย่างที่ไม่เป็นไปตามต้องการ เช่น ความทนต่อแรงดึง (tensile Strength) ความยืดหยุ่น (flexibility) ความเปราะ (brittleness) และความสามารถในการซึมผ่าน (permeability) เป็นต้น ดังนั้นจึงมีการปรับปรุงสมบัติของไคโตซานเพื่อให้เหมาะสมกับการนำไปใช้งาน สามารถทำได้โดยการเติมสารเติมแต่งหรือพลาสติกไซเซอร์ นอกจากนี้ยังมีการดัดแปรโครงสร้างทางเคมีของไคโตซาน เช่น การทำกราฟต์โคพอลิเมอร์ไรเซชัน (graft copolymerization) บล็อกโคพอลิเมอร์ไรเซชัน (block Copolymerization) และการทำให้เกิดการเชื่อมขวาง (cross-linking) เป็นต้น [4]

## สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของไคตินและไคโตซาน

### 1. การละลาย (Solubility)

ไคตินไม่ละลายในน้ำ กรดเจือจาง ต่างทั้งเจือจางและเข้มข้น แอลกอฮอล์ และตัวทำละลายอินทรีย์ชนิดอื่นๆ แต่สามารถละลายในกรดไฮโดรคลอริก (กรดเกลือ) เข้มข้น กรดซัลฟูริก (กรดกำมะถัน) เข้มข้น กรดฟอสฟอริก (ร้อยละ 78-97) กรดฟอร์มิก (anhydrous formic acid) ความยากในการละลายของไคตินในตัวทำละลายต่างๆ เป็นผลมาจากสายโซ่โมเลกุลที่อยู่กันอย่างหนาแน่น มีพันธะที่เกิดขึ้นทั้งภายในและระหว่างโมเลกุล เนื่องจากหมู่ฟังก์ชันที่ต่างกัน (หมู่ไฮดรอกซิลและหมู่อะซีตามิโด) ไคโตซานไม่ละลายน้ำ ต่าง และตัวทำละลายอินทรีย์ (organic solvent) แต่สามารถละลายได้ในสารละลายที่เป็นกรดอินทรีย์เกือบทุกชนิดที่มีค่าความเป็นกรด-ด่างน้อยกว่า 6 กรดแอสติกและกรดฟอร์มิก เป็นกรดที่นิยมใช้ในการละลายไคโตซาน กรดอินทรีย์บางชนิด เช่น กรดไนตริก กรดไฮโดรคลอริก กรดเปอร์คลอริก

สารละลายไคโตซานมีความเหนียว ใส มีพฤติกรรมแบบนอน-นิวโตเนียน (Non-newtonian) ในสารละลายหมู่อะมิโนของไคโตซานจะแตกตัว โดยมีค่าสัมประสิทธิ์การแตกตัว ( $pK_a$ ) ขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของประจุของพอลิเมอร์โดย  $pK_a$  ของไคโตซานมีค่าอยู่ในช่วง 6.2 ถึง 6.8 [5]

### 2. น้ำหนักโมเลกุล (Molecular weight)

ไคตินในธรรมชาติจะมีน้ำหนักโมเลกุลสูงมากกว่า  $1 \times 10^6$  ดาลตัน ในขณะที่ไคโตซานจะมีน้ำหนักโมเลกุลอยู่ในช่วง  $1 \times 10^5$  ถึง  $1.2 \times 10^6$  ดาลตัน ขึ้นอยู่กับขั้นตอนในการผลิต [5]

### 3. ระดับการกำจัดหมู่เอซิติล (Degree of deacetylation)

เป็นตัวบ่งชี้ความเป็นของไคติน-ไคโตซาน เนื่องจากไคติน-ไคโตซานเป็นโคพอลิเมอร์ระหว่างสองโมโนเมอร์ของ *N*-acetyl-D-glucosamine และ D-glucosamine ถ้าสัดส่วนที่อยู่ร่วมกันของโมโนเมอร์แรกมากกว่า คือมีระดับการกำจัดหมู่เอซิติลต่ำ จะแสดงสมบัติเด่นของไคติน แต่ถ้าสัดส่วนของโมโนเมอร์ที่สองมากกว่า คือมีค่าระดับการกำจัดหมู่เอซิติลสูงจะแสดงสมบัติเด่นของไคโตซาน [5]

### 4. ความหนืด (Viscosity)

ความหนืดของสารละลายไคโตซานขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่าง เช่น ระดับการกำจัดหมู่เอซิติล น้ำหนักโมเลกุล ความเข้มข้นของไอออน ความเป็นกรด-ด่าง และอุณหภูมิ โดยทั่วไปแล้วความหนืดของสารละลายพอลิเมอร์จะลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น แต่ชนิดของกรดที่ใช้และการเปลี่ยนแปลงความเป็นกรด-ด่างของสารละลายพอลิเมอร์จะให้ผลความหนืดที่แตกต่างกัน เช่น ความหนืดของไคโตซานในกรดแอสติกจะเพิ่มขึ้นเมื่อสารละลายมีค่าความเป็นกรด-ด่าง

ลดลง ในขณะที่ความหนืดของไคโตซานในกรดไฮโดรคลอริกจะเพิ่มขึ้นเมื่อความเป็นกรด-ด่างของสารละลายเพิ่มขึ้น [5]

#### 5. การเสื่อมสลาย (Degradation)

ไคติน-ไคโตซานเมื่อเกิดการเสื่อมสลายจะให้สายโซ่โมเลกุลที่สั้นลงเป็น โอลิโกเมอร์ (oligomer) หรือโอลิโกแซคคาไรด์ (oligosaccharide) และเป็นหน่วยย่อยที่เล็กที่สุดที่เรียกว่า โมโนเมอร์ (monomer) หรือโมโนแซคคาไรด์ (monosaccharide) โอลิโกเมอร์/โอลิโกแซคคาไรด์ของไคตินและไคโตซาน คือ *N*-acetyl-chitooligosaccharide และ chitooligosaccharide ตามลำดับ ส่วนโมโนเมอร์/โมโนแซคคาไรด์ของไคตินและไคโตซานคือ *N*-acetyl-D-glucosamine และ D-glucosamine ตามลำดับ [5]

#### 6. ความสามารถในการเกิดปฏิกิริยา

ไคโตซานประกอบด้วย 3 หมู่ฟังก์ชันที่มีความไวต่อการเกิดปฏิกิริยา คือ หมู่อะมิโน ( $-NH_2$ ) และหมู่อะเซตาไมด์ ( $-NHCOCH_3$ ) ที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 2 หมู่ primary alcohol ( $-CH_2OH$ ) ที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 6 และหมู่ secondary alcohol ( $-CHOH$ ) ที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 3 [5] จากโครงสร้างของไคโตซานจะเห็นว่าหน่วยย่อยกลูโคซามีนบนสายโซ่ไคโตซานประกอบด้วยหมู่ฟังก์ชันเป็นหมู่อะมิโน (amino group) หมู่ไฮดรอกซี (hydroxyl group) ซึ่งเป็นตำแหน่งที่จะทำปฏิกิริยาได้หลายลักษณะ จึงสามารถทำการปรับปรุงโครงสร้างทางเคมีของไคโตซานได้โดยทำปฏิกิริยาที่หมู่ฟังก์ชันดังกล่าว ดังนั้นไคโตซานสามารถเกิดปฏิกิริยา esterification และ etherification การเชื่อมขวาง (crosslinking) และปฏิกิริยากราฟต์โคพอลิ-เมอไรเซชัน (graft copolymerization) การปรับปรุงโครงสร้างทางเคมี (chemical modification) ของหมู่ฟังก์ชันนี้สามารถก่อให้เกิดวัสดุต่างๆ ในการใช้งานที่แตกต่างกันมากมาย [6]

การประยุกต์ใช้สารไคติน-ไคโตซาน

#### 1. อุตสาหกรรมกระดาษ

ในอุตสาหกรรมการผลิตกระดาษมีการใช้ไคตินและไคโตซานเป็นสารเติมแต่ง (additive) เพื่อเพิ่มความแข็งแรงให้กระดาษทั้งในขณะเปียกและแห้ง (wet and dry strength) ไคโตซานสามารถใช้เป็นสารเพิ่มความหนืด (thickener) และ fixing agent เพื่อใช้ในงานพิมพ์กระดาษ ไคโตซานจะทำให้กระดาษมีผิวเรียบดีขึ้นและมีความทนต่อการขีดขูด (wear resistance) ดีขึ้น ไคตินและไคโตซานยังมีการนำไปใช้ในการผลิตกระดาษที่ใช้ในงานซึ่งต้องการความสะอาด เช่น กระดาษชำระ กระดาษเช็ดปาก ผ้าอนามัย และผ้าอ้อมเด็ก เป็นต้น

นอกจากนี้ยังใช้ในการผลิตกระดาษที่นำกลับมาใช้ใหม่ (recycle paper) และกระดาษเพื่อการบรรจุ ส่วนน้ำเสียที่เกิดขึ้นในอุตสาหกรรมนี้ยังสามารถบำบัดได้ด้วยการใช้ไคตินและไคโตซานเป็นสารช่วยในการตกตะกอน [4]

## 2. อุตสาหกรรมสิ่งทอ

ในอุตสาหกรรมสิ่งทอมีการใช้ไคตินและไคโตซานในเส้นใยสิ่งทอที่มีการย้อมติดสีได้ยาก เช่น เส้นใยสังเคราะห์ เส้นใยแก้ว และเส้นใยโพลีฟิน โดยการนำเส้นใยนั้นมาผสมหรือเคลือบผิวด้วยไคตินและไคโตซาน จะทำให้เส้นใยสามารถที่จะรับสีย้อมได้ง่ายขึ้น และช่วยเพิ่มความคงทนของสี (dye fastness) นอกจากนี้ยังช่วยปรับปรุงความแข็งแรงของเส้นใยและช่วยลดการเกิดไฟฟ้าสถิตย์ในเส้นใยสังเคราะห์ ในการปรับสภาพผิวผ้าด้วยเกลือไคโตซานจะทำให้ได้สีที่ความเหนียว และปรับปรุงลักษณะปรากฏของสีผ้าโดยทำให้เกิดความขาวสว่าง (brightening) เงามัน (luster) ของสี นอกจากนี้ยังใช้เป็นสารเพิ่มความเหนียวในงานพิมพ์ผ้าที่ใช้สีย้อมประเภทแอซิดและเบสิก และใช้แทนจีฟิ่งในงานพิมพ์ผ้าบาติก [4]

## 3. งานด้านบำบัดน้ำ

สิ่งเจือปนที่แขวนลอยอยู่ในน้ำส่วนมากเป็นประจุลบ ส่วนไคโตซานจะมีประจุบวกที่มีหมู่อะมิโนอยู่ จึงสามารถใช้เป็นสารช่วยในการตกตะกอน โดยไคโตซานจะไปจับกับสิ่งเจือปนทำให้มีขนาดอนุภาคใหญ่ขึ้นและตกตะกอนลงมา นอกจากนี้ไคโตซานยังสามารถใช้จับกับไอออนของโลหะหนักและโลหะที่มีพิษได้ ในการบำบัดน้ำเสีย เมื่อใช้ไคโตซาน 5 ppm จะสามารถลดค่า Biological Oxygen Demand (BOD) ได้ถึงร้อยละ 80-85 ลดปริมาณฟอสเฟตให้เหลือน้อยกว่า 0.5 ppm และกำจัดสิ่งสกปรกที่แขวนลอยอยู่ในน้ำได้ดี [4]

## 4. การเกษตร

ไคตินและไคโตซานจะประกอบไปด้วยธาตุไนโตรเจนเช่นเดียวกับโปรตีนและยูเรีย ไนโตรเจนจากไคตินและไคโตซานสามารถสลายตัว ซึ่งมีผลทำให้ธาตุอาหารในดิน ได้แก่ ธาตุไนโตรเจนเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังสามารถตรึงไนโตรเจนและคาร์บอนไดออกไซด์ทั้งในดินและในอากาศ ทำให้พืชได้รับไนโตรเจนได้อย่างสมบูรณ์ ไคตินและไคโตซานเป็นไบโอพอลิเมอร์ที่มีประจุ สามารถยึดติดกับผิวดินได้ดี ทำให้ช่วยลดการชะล้างธาตุอาหารในดิน และช่วยให้การใช้น้ำมีประสิทธิภาพดี ไคตินและไคโตซานสามารถจับกับไอออนต่างๆ ได้ แล้วปลดปล่อยสารอาหารให้แก่พืช การประยุกต์ไคโตซานในการเคลือบผลิตผลทางการเกษตร เพื่อยืดอายุการเก็บหรือควบคุมความสุกของผลไม้ อนุพันธ์ไคตินและไคโตซานมีประสิทธิภาพในการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อรา และกระตุ้นกระบวนการต่างๆ ในเนื้อเยื่อพืชให้เกิดภูมิคุ้มกันเชื้อรา ทำให้มีการนำสารดังกล่าวมา เคลือบผลผลิตทางการเกษตร การเก็บรักษามะม่วงที่เคลือบ

ด้วยอนุพันธ์ไคตินและไคโตซานที่ภาวะบรรยากาศ อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส สามารถเก็บได้เกินกว่า 15 วัน สำหรับมังคุดเก็บรักษาได้ 25 วัน ทั้งนี้เนื่องจากอนุพันธ์ไคตินและไคโตซานเป็นสารป้องกันการเกิดเชื้อราที่ผิว เมื่อทำการเคลือบแล้วจะได้แผ่นฟิล์มบางๆ ใส ปราศจากสีและกลิ่น ทำให้ช่วยลดการหายใจและลดการผลิตแก๊สเอทิลีน ทำให้ผลไม้ไม่สุกเร็ว และฟิล์มเป็นตัวกั้นการไหลออกก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ทำให้ผลไม้คงความกรอบ ผิวไม่เหี่ยวแห้งและสีผิวไม่เปลี่ยนแปลงเนื่องจากลดการสูญเสียน้ำจากการคายน้ำ [7]

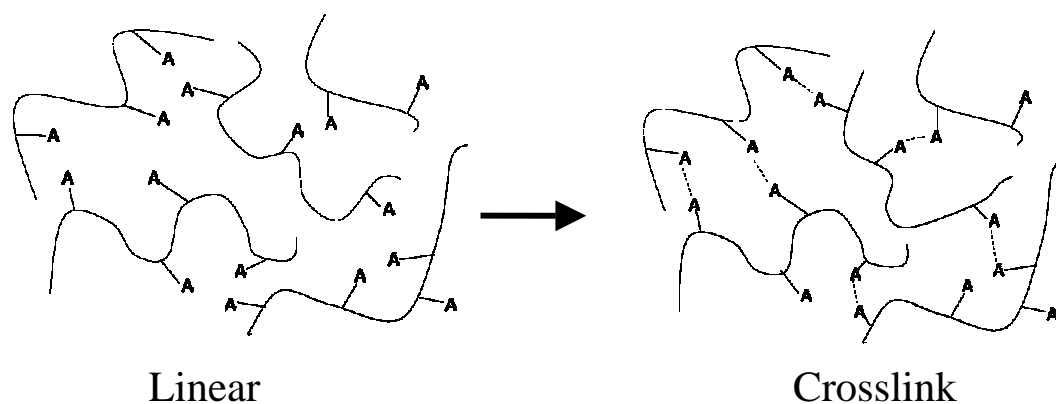
การปรับปรุงสมบัติของไคโตซาน

การเชื่อมขวาง

ปฏิกิริยาการเชื่อมขวาง (crosslinking) เกิดขึ้นเนื่องจากการเกิดพันธะเคมีระหว่างสายโซ่โพลีเมอร์ ซึ่งพอลิเมอร์จะมีสายโซ่เชื่อมโยกันด้วยพันธะโควาเลนต์หรือพันธะไอออนิก เกิดโครงสร้างแบบโครงร่างสามมิติ (three-dimensional network) ลักษณะของการเกิดการเชื่อมขวางแบ่งออกได้ดังนี้

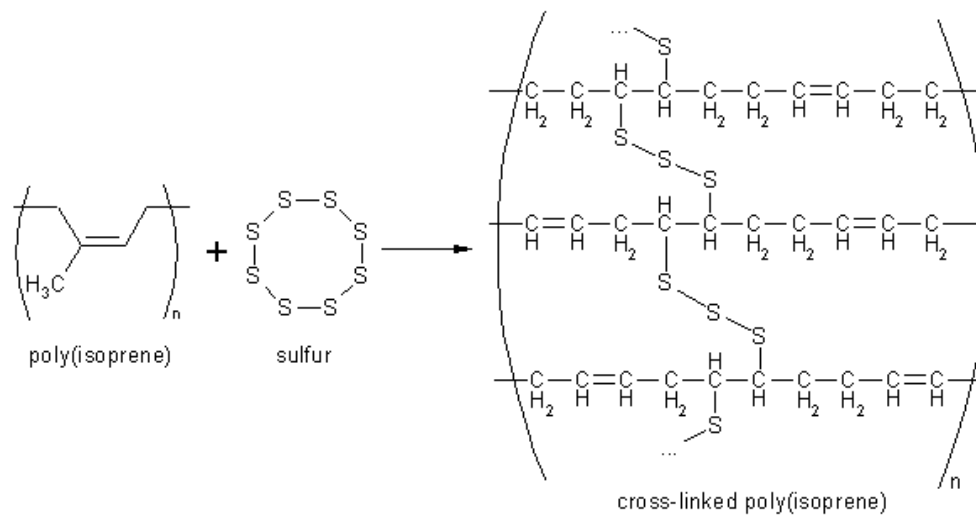
1. การเกิดการเชื่อมขวางเมื่อพอลิเมอร์สายโซ่ตรง (linear polymer) หรือพอลิเมอร์กิ่งก้าน (branched polymer) นั้นมีหมู่ที่สามารถเกิดปฏิกิริยาได้หลายหมู่ ถ้าให้ A แทนหมู่ฟังก์ชันที่สามารถเกิดปฏิกิริยาได้ด้วยตัวเองและเกิดพันธะ A-A เมื่อพอลิเมอร์เหล่านี้อยู่ในสถานะที่ทำให้หมู่ฟังก์ชัน เกิดปฏิกิริยาได้ จะทำให้สายโซ่ทั้งหมดทำปฏิกิริยากันและเกิดการเชื่อมโยงกันด้วยพันธะ A-A ดังรูปที่ 2 ดังนั้นเมื่อโพลีเมอร์เหล่านี้เกิดโครงร่างตาข่ายจะทำให้ได้โพลีเมอร์ที่มีขนาดใหญ่ [4]





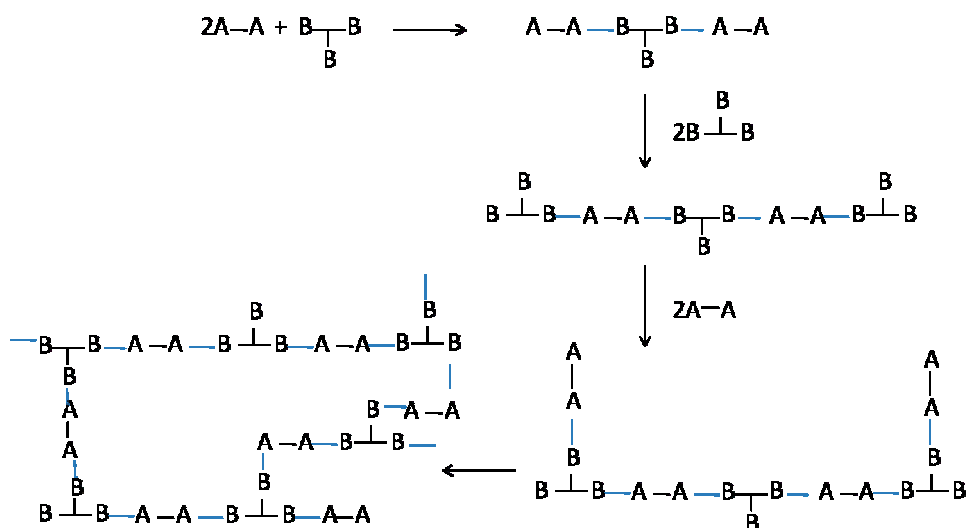
รูปที่ 2 ปฏิบัติการเชื่อมขวางของพอลิเมอร์ที่มีหมู่ฟังก์ชันหลายหมู่ [3]

2. การเกิดการเชื่อมขวางด้วยการใช้สารเชื่อมขวาง (crosslinking agent) การเกิดปฏิบัติการเชื่อมขวางในข้อ 1 นั้นเกิดขึ้นเนื่องจากโมเลกุลพอลิเมอร์ทำปฏิกิริยาด้วยตัวเอง แต่ปฏิกิริยาดังกล่าวนี้ไม่สามารถทำให้เกิดโครงสร้างเป็นแบบโครงร่างสามมิติได้ ดังนั้นจึงมีการใช้สารเชื่อมขวาง ซึ่งสมบัติของสารเชื่อมขวาง คือเป็นโมเลกุลที่มีหมู่ที่สามารถทำปฏิกิริยากับหมู่ฟังก์ชันที่อยู่บนสายโซ่พอลิเมอร์ได้อย่างน้อย 2 หมู่ขึ้นไป สารที่ทำให้เกิดการเชื่อมโยงอาจเป็นโมเลกุลที่เชื่อมระหว่างพอลิเมอร์ 2 โมเลกุล (รูปที่ 3) หรือโมเลกุลที่กระตุ้นให้เกิดปฏิบัติการเชื่อมขวาง หรือเป็นตัวเร่งให้เกิดปฏิบัติการเชื่อมขวาง หรือเป็นสารที่เข้าไปดึงโมเลกุลของพอลิเมอร์เพื่อให้เกิดตำแหน่งที่ว่องไวต่อการเชื่อมโยง [4]



รูปที่ 3 การเกิด โครงร่างตาข่ายของพอลิเมอร์เมื่อมีการใช้สารช่วยในการเกิดปฏิกิริยาแบบเชื่อมโยง [8]

3. การเกิด โครงร่างตาข่ายในระหว่างการพอลิเมอไรเซชันด้วยการใช้มอนอเมอร์ที่มีหมู่ฟังก์ชันเฉลี่ยมากกว่า 2 (polyfunctional monomer) แทนการใช้มอนอเมอร์ที่มี 2 หมู่ฟังก์ชัน (difunctional monomer) ปฏิกิริยานี้มักจะเกิดในปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแบบควบแน่น (condensation polymerization) การเกิดพอลิเมอไรเซชันของ difunctional monomer กับ trifunctional monomer เช่น ปฏิกิริยาของ diol กับ triisocyanate ดังแสดงในรูปที่ 4 ในช่วงแรก ของปฏิกิริยานั้นพอลิเมอร์ยังมีน้ำหนักโมเลกุลต่ำซึ่งมีหลายหมู่ฟังก์ชันและเกิดกิ่งก้านมาก แต่ยังไม่เกิดการเชื่อมขวาง แต่ในช่วงหลังปฏิกิริยาถึงจุดหนึ่ง โมเลกุลจะเกิดการเชื่อมขวางได้พอลิเมอร์ที่มีโครงร่างตาข่าย ซึ่งทำให้ความหนืดของสารเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว สารที่มีความหนืดมากนี้เรียกว่า เจล (gel) [4]



รูปที่ 4 การเกิดโครงร่างตาข่ายขณะเกิดพอลิเมอร์ไซโซชันด้วยการใช้ polyfunctional monomer [4]

การเกิดการเชื่อมขวาง ใน โครงสร้างของ โมเลกุลส่งผลต่อสมบัติของพอลิเมอร์ดังต่อไปนี้

#### 1. สมบัติเชิงความร้อน

การเกิดการเชื่อมขวางขึ้นระหว่างสายที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ จะทำให้มีผลต่อสมบัติเชิงความร้อนของวัสดุคือ ในภาวะปกติพอลิเมอร์ที่ไม่เกิดการเชื่อมขวางจะเกิดการหลอมและไหลได้ที่อุณหภูมิสูง แต่ในทางตรงกันข้ามพอลิเมอร์ที่เกิดการเชื่อมขวางจะไม่สามารถเกิดการหลอมเหลวได้และสูญเสียสมบัติการไหล เนื่องจากสายโซ่โมเลกุลถูกจำกัดการเคลื่อนไหวจากการเชื่อมขวางและเมื่อได้รับอุณหภูมิสูงๆ พอลิเมอร์จะไม่หลอมแต่เกิดการสลายตัว [4]

#### 2. สมบัติเชิงเคมี

การเกิดการเชื่อมขวางของสายโซ่โมเลกุลมีผลต่อสมบัติการละลายของพอลิเมอร์ ซึ่งขึ้นอยู่กับธรรมชาติและปริมาณของพันธะโควาเลนต์ที่เกิดขึ้นระหว่างสายโซ่โมเลกุล โดยปกติพอลิเมอร์ที่ไม่เกิดการเชื่อมขวางจะเกิดการละลายได้ในตัวทำละลายที่เหมาะสม เนื่องจากโมเลกุลของพอลิเมอร์และตัวทำละลายสามารถผสมกันได้เป็นอย่างดี โดยแรงกระทำระหว่างตัวทำละลายกับพอลิเมอร์มากกว่าแรงดึงดูดระหว่างสายโซ่โมเลกุล แต่พอลิเมอร์ที่เกิดการเชื่อมขวางนั้นจะไม่สามารถละลายได้ในตัวทำละลาย แต่จะเกิดการพองตัว เนื่องจากตัวทำละลายไม่สามารถเข้าไปอยู่ในโครงสร้างของพอลิเมอร์ได้ ทำให้ตัวทำละลายไม่เข้าไปเกิดผลกระทบต่อพันธะโควาเลนต์ระหว่างโมเลกุลขนาดใหญ่ได้ อย่างไรก็ตามความหนาแน่นของการเชื่อมขวาง (crosslinking density) จะมีผลต่อการยอมรับตัวทำละลาย ถ้าพอลิเมอร์เกิดการเชื่อมขวางน้อยจะทำให้ตัวทำละลายสามารถเข้าไปในโครงสร้างได้ทำให้เกิดการพองตัวมาก แต่พอลิเมอร์ที่

เกิดการเชื่อมขวางอย่างแท้จริง ตัวทำละลายจะไม่สามารถเข้าไปในโครงสร้างได้ทำให้ไม่เกิดการพองตัว [4]

### 3.สมบัติเชิงกล

การเกิดการเชื่อมขวางส่งผลต่อสมบัติของวัสดุ โดยจะขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของการเชื่อมขวาง (crosslink density) ที่มีอยู่ในโครงสร้างนั้น พอลิเมอร์ที่ไม่เกิดการเชื่อมขวางหรือเกิดน้อยจะมีความหนาแน่นของการเชื่อมขวางต่ำ ทำให้วัสดุนั้นมีสมบัติคล้ายยาง (elastomer) คือมีความอ่อนนุ่ม (soft) และยืดหยุ่นได้ (flexible) แต่พอลิเมอร์ที่เกิดการเชื่อมขวางที่ความหนาแน่นของการเชื่อมขวางสูง จะทำให้พอลิเมอร์มีลักษณะแข็ง (rigid) และเปราะ (brittle) เนื่องจากพอลิเมอร์มีโครงร่างสามมิติของพันธะโควาเลนต์ ทำให้การเคลื่อนไหวอย่างอิสระของสายโซ่โมเลกุลถูกจำกัด [4]

## บทที่ 2

### การสำรวจแนวความคิดและการวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Kjellgren และคณะ [9] ศึกษาสมบัติของกระดาษกันไฟที่เคลือบผิวด้วยไคโตซาน พบว่า การเคลือบผิวด้วยไคโตซานสามารถปรับปรุงสมบัติการกั้นขวางแก๊ส ได้แก่ คาร์บอนไดออกไซด์ ออกซิเจน ไนโตรเจน และการกั้นขวางไอน้ำ และการเคลือบผิวกระดาษด้วยไคโตซานไม่มีผลต่อความทนแรงดึงของกระดาษ

Kuusipalo และคณะ [10] ทดลองเคลือบไคโตซานความเข้มข้น 0.1%, 0.25%, 0.5% และ 0.75% โดยน้ำหนัก ลงบนกระดาษขนาด A4 พบว่าความต้านทานแรงดัดโค้ง (bending strength) มีค่าเพิ่มขึ้น แต่ความทนต่อแรงฉีกขาดและความทนต่อแรงดึงเพิ่มขึ้นเล็กน้อย

Kjellgren และ Engstrom [11] ศึกษาผลของชนิดกระดาษที่มีต่อสมบัติการขวางกั้นหลังเคลือบผิวกระดาษด้วยไคโตซาน โดยนำน้ำหนักสารเคลือบเท่ากับ 3.4 และ 6.0 กรัมต่อตารางเมตร ซึ่งกระดาษที่ใช้ในการทดลอง ได้แก่ กระดาษคราฟต์และกระดาษกันไฟ พบว่าหลังเคลือบผิวด้วยไคโตซาน กระดาษทั้งสองชนิดสามารถกั้นขวางแก๊สออกซิเจนและไอน้ำได้

Caulfield [12] ทดลองใช้ 1,2,3,4-butanetetracarboxylic acid (BTCA) และกรดซิตริก ทำหน้าที่เป็นสารเชื่อมขวางระหว่างหมู่ไฮดรอกซิลในโครงสร้างเซลลูโลสของเส้นใย โดยอบกระดาษที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 90 วินาที เพื่อปรับปรุงความแข็งแรงขณะเปียกของกระดาษแข็ง เพื่อให้เกิดการเชื่อมโยง พบว่า BTCA และกรดซิตริกสามารถปรับปรุงความแข็งแรงของกระดาษในขณะเปียกได้ เช่น ความทนต่อแรงดึง โมดูลัสยืดหยุ่น (modulus of elasticity) พลังงานที่กระดาษสามารถรับได้ (tensile energy absorption: TEA) และความต้านทานแรงกดวงแหวน (ring crush) มีค่าเพิ่มขึ้น

Coma และคณะ [13] ศึกษาสมบัติของฟิล์ม HPMC (hydroxy propyl methyl cellulose) ซึ่งเป็นอนุพันธ์ของเซลลูโลสที่มีการเชื่อมขวางด้วยกรดซิตริก โดยอบฟิล์มเพื่อให้เกิดการเชื่อมขวางที่อุณหภูมิ 190 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 วินาที พบว่าการเชื่อมขวางที่เกิดขึ้นทำให้ฟิล์มละลายน้ำลดลงและเพิ่มสมบัติการกั้นขวางไอน้ำได้ 34% และเมื่อใช้กรดซิตริกปริมาณมากขึ้น สมบัติการกั้นขวางไอน้ำดีขึ้นตามไปด้วย

Teruo และคณะ [14] ศึกษาสมบัติเชิงกลและลักษณะการย่อยสลายของฟิล์มไคตินและไคโตซาน พบว่าความทนต่อแรงดึงของฟิล์มไคตินมีค่าต่ำกว่าฟิล์มไคโตซานประมาณ 30-40% ฟิล์มไคตินมีปริมาณผลึกสูงกว่าฟิล์มไคโตซาน เมื่อทดสอบการย่อยสลายของฟิล์มด้วย

*Sphingobacterium multivorum* ซึ่งเป็นแบคทีเรียชนิดหนึ่งที่พบในดิน พบว่าอัตราการย่อยสลายของฟิล์มไคตินสูงกว่าฟิล์มไคโตซาน อัตราการย่อยสลายของฟิล์มไคโตซานที่เตรียมด้วยกรดแอสซิติคสูงกว่าฟิล์มที่เตรียมด้วยกรดโพธิโอนิก กรดฟอร์มิคและกรดบิวทิริก

จากการสำรวจงานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่า การใช้งานไคโตซานเป็นสารเคลือบผิวกระดาษ ส่งผลให้กระดาษหลังเคลือบมีสมบัติการกั้นขวางแก๊สได้ดีขึ้น ได้แก่ คาร์บอนไดออกไซด์ ออกซิเจน ไนโตรเจน และการกั้นขวางไขมัน และเมื่อเตรียมสารเคลือบไคโตซานผสมสารเชื่อมขวาง สามารถปรับปรุงความแข็งแรงขณะเปียกของกระดาษแข็งได้ และผลการเชื่อมขวางเกิดเป็นโครงร่างตาข่ายสามารถเพิ่มสมบัติการกั้นขวางไอน้ำได้

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงสนใจนำไคโตซานมาประยุกต์ใช้งานร่วมกับสารเชื่อมขวาง 3 ชนิดที่มีจำนวนหมู่ฟังก์ชันแตกต่างกัน เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการเกิดการเชื่อมขวางและโครงร่างตาข่ายในสารเคลือบไคโตซานที่มีผลต่อสมบัติทางกายภาพของกระดาษชานอ้อย โดยมุ่งเน้นปรับปรุงสมบัติการกั้นขวางน้ำและการกั้นขวางอากาศของกระดาษชานอ้อยให้ดีขึ้นกว่าการใช้สารเคลือบไคโตซานที่ไม่ได้ผสมสารเชื่อมขวาง เพื่อประโยชน์ใช้งานเป็นบรรจุภัณฑ์ที่มีความแข็งแรงและมีความต้านทานน้ำได้ดีขึ้น

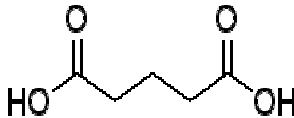
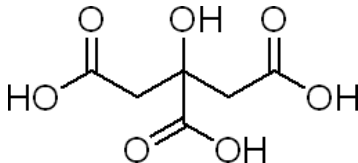
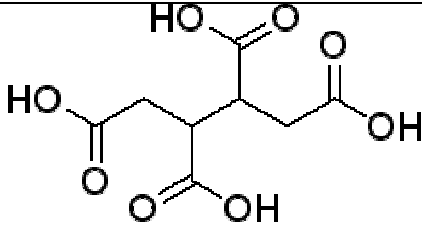
### บทที่ 3

#### วิธีการวิจัย

#### 3.1 วัสดุและสารเคมี

1. กระดาษชานอ้อย (จากบริษัทอุดมพานิช จำกัด)
2. ไกลโตซาน น้ำหนักโมเลกุล  $8.5 \times 10^5$  ดาลตัน ระดับการกำจัดหมู่เอซิดิล 88% (จากบริษัท โคโยเคมีคอล จำกัด ประเทศญี่ปุ่น)
3. กรดอะซิติค (เกรดห้องปฏิบัติการ จาก Merck)
4. กรดกลูตาริก (glutaric acid จาก Sigma-Aldrich)
5. กรดซิตริก (citric acid จาก Sigma-Aldrich)
6. กรดบิวเทนเตตระคาร์บอกซิลิก (butanetetracarboxylic acid จาก Sigma-Aldrich)
7. โซเดียมไฮโปฟอสไฟต์โมโนไฮเดรต (sodium hypophosphite monohydrate (99%) จาก Fluka)

ตารางที่ 1 น้ำหนักโมเลกุลและโครงสร้างทางเคมีของสารเชื่อมขวางชนิดต่างๆ

Crosslinking agents	Molecular weight (g/mol)	Chemical structure
glutaric acid (GA)	132.11	
citric acid (CA)	192.12	
butanetetracarboxylic acid (BTCA)	234.16	

### 3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์

1. แผงขดลวดเคลือบผิว (K bar Coater) เบอร์ 7 (RK Print Coat Instruments Ltd, UK) ที่ให้ความหนาขณะเปียก 80 ไมครอน
2. เครื่องวัดความขาวสว่าง (Elrepho 2000) (Lorentzen & Wettre, Sweden)
3. เครื่องวัดความมันวาว (Gloss meter, Micro-gloss 75°) (BYK-Gardner, GMBH, Germany)
4. เครื่องวัดความเรียบ (Bekk Smoothness tester) (Toyoseiki Seisaku LTD, Japan)
5. เครื่องวัดการดูดซึมน้ำ (cobb tester) (OSASCO-SP, Regmed Industria Tecnica de Frecisao, Brazil)
6. เครื่องวัดความแข็งแรงต่อแรงดึง (tensile tester) (Lorentzen & Wettre, Sweden)
7. เครื่องวัดความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุ (burst tester) (Lorentzen & Wettre, Sweden)
8. เครื่องวัดความพรุน (air permeability) (Gurley type densometer model B, No. 158, Toyoseiki, Seisaku-SHO, LTD, Japan)
9. ฟูเรียร์ทรานสฟอร์ม อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (Fourier Transform Infrared Spectroscopy: FTIR)(PerkinElmer precisely, model Spectrum One)
10. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM) (JSM-5410LV, JEOL, Japan)
11. เครื่องวัดความหนืด (Viscometer) (Brookfield Model DV III, USA)
12. เครื่องวัดมุมสัมผัสของเหลว (Contact angle goniometer, PG-3, Fibro System, AB, Sweden)



### 3.3 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินการวิจัย

#### 1. การเตรียมสารเคลือบกระดาษ

##### 1.1 การเตรียมสารเคลือบกระดาษจากไคโตซาน (ไม่เติมสารเชื่อมขวาง)

1. ทำการละลายไคโตซานด้วยกรดแอซิดิกความเข้มข้น 1% v/v โดยใช้อัตราส่วนไคโตซานที่น้ำหนักร้อยละ 3 ปั่นกวนสารละลายด้วยเครื่องกวนสารจนสารละลายเป็นเนื้อเดียวกัน

##### 1.2 การเตรียมสารเคลือบกระดาษจากไคโตซาน (เติมสารเชื่อมขวาง)

1. ทำการละลายไคโตซาน ด้วยกรดแอซิดิกความเข้มข้น 1% v/v โดยใช้อัตราส่วนไคโตซานที่น้ำหนักร้อยละ 3 ปั่นกวนสารละลายด้วยเครื่องกวนสารจนสารละลายเป็นเนื้อเดียวกัน
2. ทำการละลายกรดกลูตาริก (GA) กรดซิตริก (CA) และกรดบิวเทนเตตระคาร์บอกซิลิก (BTCA) ที่อัตราส่วนร้อยละ 50, 100, 150 โดยน้ำหนัก (เทียบกับน้ำหนักของไคโตซาน) และโซเดียมไฮโปฟอสไฟต์โมโนไฮเดรต (SHP) ที่อัตราส่วนร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก (เทียบกับน้ำหนักกรด) ในกรดแอซิดิกความเข้มข้น 1% v/v ปั่นกวนสารละลายด้วยเครื่องกวนสารจนสารละลายเป็นเนื้อเดียวกัน
3. ผสมสารละลายไคโตซานจากข้อที่ 1 และสารละลายสารเชื่อมขวางจากข้อที่ 2 ปั่นกวนสารละลายด้วยเครื่องกวนสารจนสารละลายเป็นเนื้อเดียวกัน

#### 2. การเคลือบกระดาษ

##### 2.1 การเคลือบกระดาษด้วยสารเคลือบไคโตซาน (ไม่ผสมสารเชื่อมขวาง)

1. นำสารเคลือบที่เตรียมได้จากข้อ 1.1 เคลือบกระดาษชานอ้อยด้วยแท่งเคลือบแบบขดลวด (ความหนาขณะเป็ยก 80 ไมครอน)
2. ทำการเคลือบซ้ำ 3 ครั้งเพื่อให้ได้น้ำหนักสารเคลือบที่คงที่ (หลังการเคลือบผิวแต่ละครั้ง นำกระดาษไปอบที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 20 นาที)

##### 2.2 การเคลือบกระดาษด้วยสารเคลือบไคโตซาน (ผสมสารเชื่อมขวาง)

1. นำสารเคลือบที่เตรียมได้จากข้อ 1.2 เคลือบกระดาษชานอ้อยด้วยแท่งเคลือบแบบขดลวด (ความหนาขณะเป็ยก 80 ไมครอน)
2. ทำการเคลือบซ้ำ 3 ครั้งเพื่อให้ได้น้ำหนักสารเคลือบที่คงที่ (หลังการเคลือบผิวแต่ละครั้ง นำกระดาษไปอบที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 20 นาที)
3. นำกระดาษหลังเคลือบผิวไปบ่ม (curing) ที่อุณหภูมิ 180°C เป็นระยะเวลา 5 นาที

### 3. การทดสอบสมบัติต่าง ๆ ของกระดาษก่อนและหลังเคลือบผิว

1. ความมันวาว (gloss) ตามมาตรฐาน TAPPI T480 om-99
2. ความขาวสว่าง (brightness) ตามมาตรฐาน ISO 2470
3. ความเรียบ (smoothness) ตามมาตรฐาน TAPPI T479 om-99
4. ความแข็งแรงต่อแรงดึง (tensile strength) ตามมาตรฐาน ISO 1924
5. ความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุ (burst strength) ตามมาตรฐาน ISO 2759
6. การดูดซึมน้ำ (cobb test) ตามมาตรฐาน TAPPI T441 om-98
7. ลักษณะพื้นผิวและภาคตัดขวางของกระดาษด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning Electron Microscope: SEM)
8. ความพรุนของกระดาษ (air permeability) ตามมาตรฐาน TAPPI T460 om-02
9. มุมสัมผัสของน้ำบนกระดาษ (contact angle) ตามมาตรฐาน TAPPI T458 om-94
10. หมู่ฟังก์ชันของสารเคลือบผิว ด้วยเทคนิค FTIR

### 4. วิธีการทดสอบกระดาษ

ก่อนทำการทดสอบ กระดาษถูกเก็บภายใต้ภาวะ ที่อุณหภูมิ  $27 \pm 1$  และความชื้นสัมพัทธ์ที่ร้อยละ  $65 \pm 2$  และการทดสอบกระดาษทำซ้ำ 5 แผ่นและคำนวณเป็นค่าเฉลี่ย

#### 1. การทดสอบความขาวสว่าง (Brightness)

การกระเจิงของแสง (light scattering) เป็นสมบัติของแสงที่สำคัญอันหนึ่งที่มีผลต่อความขาวสว่างของกระดาษ การกระเจิงของแสงที่เกิดขึ้นนี้ เป็นผลจากการสะท้อนและหักเหของแสงที่ตกกระทบบนเส้นใยเซลลูโลสและสารเติมแต่ง ความขาวสว่างของกระดาษวัดได้จากค่าการสะท้อนแสงโดยรวม (total reflectance of light) ที่ตกลงบนกระดาษ ในอุตสาหกรรมกระดาษตรวจค่าความสว่างจากการสะท้อนแสงแบบกระจายที่มุม 45 องศา ณ ความยาวคลื่น 457 นาโนเมตร [15]

#### 2. การทดสอบความมันวาว (Gloss)

ความมันวาวของกระดาษ (paper gloss) สามารถวัดได้จากสมบัติการสะท้อนแสงของพื้นผิวกระดาษ ซึ่งเกิดจากการสะท้อนแสงแบบกระจก (specular reflection) และการสะท้อนแสงแบบกระจาย (diffuse reflection) วัตถุใดที่มีการสะท้อนแสงแบบกระจกมาก วัตถุนั้นมีความมันวาวสูง ความมันวาวของกระดาษขึ้นอยู่กับความเรียบของพื้นผิว การขัดผิว และการ

เคลือบผิว การปิดผิวไม่สมบูรณ์ทำให้เห็นเส้นใย ส่งผลให้ความมันวาวลดลงได้ ความมันวาวของกระดาษวัดด้วยเครื่องวัดความมันวาวที่มุม 75 องศา ซึ่งเป็นมุมสำหรับวัดความมันวาวของกระดาษ [15]

### 3. การทดสอบความเรียบของกระดาษ (Smoothness)

กระดาษที่มีความเรียบมากจะส่งผลต่อความละเอียดของงานพิมพ์ที่สูงขึ้น ดังนั้นกระดาษชนิดความมันวาวสูงจะมีความเรียบสูง แต่กระดาษที่มีความเรียบสูงไม่จำเป็นต้องมีความมันวาวสูง ความเรียบของกระดาษสามารถวัดได้โดยใช้เครื่องวัดความเรียบ โดยนำด้านที่เคลือบสารเคลือบคว่ำลง จากนั้นทำการจับเวลาให้อากาศปริมาตร 10 ml ไหลผ่านผิวหน้ากระดาษ โดยให้ความดันจาก 380 จนถึง 360 mm Hg [15]

### 4. การทดสอบความแข็งแรงต่อแรงดึง (Tensile strength)

ความแข็งแรงต่อแรงดึง คือ ค่าแรงดึงสูงสุดที่กระดาษสามารถทนได้ก่อนที่จะขาดออกจากกันภายใต้ภาวะในการทดสอบที่กำหนดไว้ ความแข็งแรงต่อแรงดึง (tensile strength) เป็นค่าที่แสดงถึงความแข็งแรงของกระดาษที่เกี่ยวข้องกับความแข็งแรงของเส้นใย ความยาวของเส้นใย พันธะของเส้นใย ความชื้นของกระดาษและความมีทิศทางของกระดาษ (MD/CD) เป็นแรงต่อหน่วยความกว้างของแผ่นทดสอบ ค่าความแข็งแรงต่อแรงดึงมีความสำคัญต่อการนำไปใช้งานที่ต้องทนทานต่อความเค้นดึง (tensile stress) หรือต้องการความเหนียว เช่น การพิมพ์แบบป้อนม้วน (web press) และการทำถุงกระดาษ กระดาษเทปขาว เป็นต้น [15]

### 5. การทดสอบความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุ (Bursting strength)

การวัดความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุเป็นการวัดความสามารถของกระดาษที่จะทนแรงดันได้สูงสุด เมื่อมีแรงดันกระทำในทิศทางตั้งฉากกับผิวหน้ากระดาษ กระดาษที่จำเป็นต้องตรวจสอบความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุมักเกี่ยวข้องกับบรรจุภัณฑ์ ได้แก่ กระดาษทำกล่องกระดาษฝีก่อหรือกล่องที่ใช้เพื่อการขนส่ง [15]

#### 6. การทดสอบความพรุน (Air permeability)

การวัดความพรุนของกระดาษ เป็นค่าที่แสดงความสามารถในการต้านอากาศของกระดาษที่มีพื้นที่ในการวัดเป็นวงกลมขนาด 1 ตารางนิ้ว ซึ่งอากาศจะมีแรงดัน 1.22 kPa ทำการจับเวลาตั้งแต่กระบอกอ่านค่าได้ 0 ลูกบาศก์เซนติเมตร จนถึง 100 ลูกบาศก์เซนติเมตร ทำการสุ่มวัด 3 ตำแหน่ง [15]

#### 7. การทดสอบการดูดซึมน้ำของกระดาษ (Water absorptions)

การดูดซึมน้ำของกระดาษ เป็นค่าที่บอกความสามารถในการดูดซึมน้ำของกระดาษ (water absorption) เป็นการหาปริมาณของน้ำเป็นกรัมที่กระดาษดูดซึมน้ำไว้ต่อพื้นที่ 1 ตารางเมตร ภายในระยะเวลาตามที่กำหนด วัดการดูดซึมน้ำด้วยวิธี Cobb Test method ทำโดยตัดชิ้นทดสอบให้มีขนาด  $12.5 \times 12.5$  เซนติเมตร เหน็บปริมาณ 100 มิลลิลิตร อย่างรวดเร็วลงบนตัวอย่างที่จะทดสอบที่วางอยู่ในชุดทดสอบ เริ่มจับเวลาหลังจากเวลาที่  $10 \pm 2$  วินาที โดยเวลาที่ใช้ในการทดสอบ 60 วินาที เมื่อครบเวลาให้เทน้ำออกและนำกระดาษตัวอย่างที่ทดสอบมาทำการซับน้ำส่วนเกินออกด้วยกระดาษ blotting paper ริดน้ำออกด้วยลูกกลิ้งเหล็กจำนวน 1 ครั้ง นำกระดาษตัวอย่างที่ซับน้ำแล้วไปชั่งน้ำหนักและบันทึกผล มีหน่วยเป็นกรัมต่อตารางเมตร สามารถคำนวณได้ดังนี้ [15]

$$\text{Weight of water (g/m}^2\text{)} = [\text{Final weight (g)} - \text{Conditioned weight (g)}] \times 100 \quad (1)$$

#### 8. การทดสอบมุมสัมผัสของน้ำบนกระดาษ (Water contact angle)

มุมสัมผัสของน้ำบนกระดาษ เป็นค่าที่บอกความสามารถในการเปียกผิวของกระดาษ และการซึมน้ำของกระดาษ (surface wettability and absorptiveness) โดยทำการวัดมุมสัมผัสของหยดน้ำ เป็นฟังก์ชันกับเวลา [15]

#### 9. วิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิค Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR)

FTIR spectroscopy เป็นเทคนิควิเคราะห์โดยใช้รังสีอินฟราเรด ในช่วงความยาวคลื่นกลาง (mid-IR) หรืออยู่ในช่วงความยาวคลื่น  $400 - 4000 \text{ cm}^{-1}$  เทคนิคนี้เป็นการวัด การดูดซับรังสีอินฟราเรดที่ทำให้เกิดการสั่น (vibration) และการหมุน (rotation) ของพันธะภายในโมเลกุลของตัวอย่าง โดยทำการบดผสมสารเคลือบที่ต้องการทดสอบกับโพแทสเซียมโบรไมด์

(KBr) และอัดเป็นแผ่นแล้วนำไปทดสอบด้วยเครื่อง FTIR [16] จำนวนรอบที่ใช้วัดคือ 16 รอบ และความสามารถในการแยกพีค (resolution) เท่ากับ  $4\text{ cm}^{-1}$

#### 10. การทดสอบความหนืด

การทดสอบความหนืดของสารเคลือบผิวที่เตรียมได้ด้วยเครื่องวัดความหนืดแบบหมุน ซึ่งในงานวิจัยในครั้งนี้ทำการทดสอบที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส เจ็มเบอร์ 25 การวัดความหนืดของสารเคลือบผิวด้วยวิธีนี้เป็นการวัดความต้านทานการไหลของสารเคลือบผิว เครื่องวัดความหนืดสามารถวัดค่าความหนืดได้โดยอาศัยการวัดค่าทอร์กที่ต้องการใช้ในการหมุนเจ็มที่จุ่มอยู่ในของเหลว ซึ่งเจ็มจะถูกขับเคลื่อนโดยมอเตอร์ผ่านสปริงที่ผ่านการปรับตั้งตำแหน่งแล้ว การม้วนตัวของสปริงจะแปรผันโดยตรงกับความเร็วในการหมุนเจ็ม และมีความสัมพันธ์กับขนาดและรูปทรงของเจ็ม โดยแรงต้านจะเพิ่มขึ้นถ้าใช้เจ็มขนาดใหญ่ และใช้ความเร็วในการหมุนสูงขึ้น [17]

## บทที่ 4

### ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

#### 4.1 น้ำหนักของสารเคลือบผิว

คำย่อและความหมายของสารเคลือบผิวผสมสารเชื่อมขวางชนิดต่างๆ ที่ใช้ในงานวิจัยนี้แสดงในตารางที่ 2 ในงานวิจัยนี้เลือกใช้กระดาษชานอ้อยที่มีน้ำหนักมาตรฐานที่  $487.4 \pm 11.1$  กรัม/ตร.ม. ทำการเคลือบผิวกระดาษด้วยสารเคลือบไคโตซานและไคโตซานผสมสารเชื่อมขวางชนิดต่างๆ ที่อัตราส่วนแตกต่างกัน ทำการเคลือบผิวซ้ำเป็นจำนวน 3 ครั้งเพื่อให้ได้น้ำหนักสารเคลือบผิวที่คงที่ด้วยแท่งเคลือบแบบขดลวด ผลของน้ำหนักของสารเคลือบแสดงในตารางที่ 3 จากผลพบว่าน้ำหนักของสารเคลือบกระดาษจากไคโตซานที่น้ำหนักโมเลกุล  $8.5 \times 10^5$  ดาลตัน ได้น้ำหนักสารเคลือบที่ประมาณ 7 กรัม/ตร.ม. ในขณะที่สารเคลือบผสมสารเชื่อมขวางชนิดต่างๆ ส่งผลให้ได้น้ำหนักสารเคลือบสูงขึ้น เมื่อผสมกรดกลูตาริกที่ร้อยละ 50, 100, 150 ได้น้ำหนักสารเคลือบที่ประมาณ 14, 19, 28 กรัม/ตร.ม. ตามลำดับ สารเคลือบผสมกรดซิตริกได้น้ำหนักสารเคลือบที่ประมาณ 28, 30, 26 กรัม/ตร.ม. และสารเคลือบผสมกรด BTCA ได้น้ำหนักสารเคลือบที่ประมาณ 37, 39, 44 กรัม/ตร.ม. จะสังเกตได้ว่าสารเคลือบผิวไคโตซานมีน้ำหนักต่ำสุด ทั้งนี้เนื่องจากสารเคลือบผิวไคโตซานมีความหนืดสูงสุดที่ 6.7 Pa.s เมื่อตรวจวัดด้วยเครื่องวัดความหนืดที่ความเร็วรอบ 70 รอบ/นาที (ตารางที่ 4) ส่งผลให้สารเคลือบผิวซึมเข้าไปในรูพรุนในกระดาษได้ต่ำและได้น้ำหนักสารเคลือบผิวต่ำเช่นกัน ในขณะที่สารเคลือบผสมสารเชื่อมขวางชนิดต่างๆ อาจมีการเกิด acid hydrolysis ในสารเคลือบผิวส่งผลให้น้ำหนักโมเลกุลของไคโตซานลดต่ำลง [18] และสารเคลือบผิวมีความหนืดต่ำ จึงสามารถซึมเข้าไปในรูพรุนในกระดาษได้มากกว่า ดังนั้นจึงได้น้ำหนักสารเคลือบผิวที่สูงกว่า โดยสารเคลือบผสมสารเชื่อมขวางกรด BTCA มีความหนืดต่ำสุด จึงส่งผลให้ได้น้ำหนักสารเคลือบผิวสูงสุด การเติมสารเชื่อมขวางในปริมาณเพิ่มขึ้น ส่งผลให้น้ำหนักสารเคลือบผิวมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามเช่นกัน

ตารางที่ 2 คำย่อและความหมายของสารเคลือบผิวผสมสารเชื่อมขวาง

คำย่อของสารเคลือบ ผิวผสมสารเชื่อมขวาง	ความหมาย
GA-0.5	สารเคลือบผิวไคโตซานผสมกรดกลูตาริกที่อัตราส่วนร้อยละ 50
GA-1	สารเคลือบผิวไคโตซานผสมกรดกลูตาริกที่อัตราส่วนร้อยละ 100
GA-1.5	สารเคลือบผิวไคโตซานผสมกรดกลูตาริกที่อัตราส่วนร้อยละ 150
CA-0.5	สารเคลือบผิวไคโตซานผสมกรดซิตริกที่อัตราส่วนร้อยละ 50
CA-1	สารเคลือบผิวไคโตซานผสมกรดซิตริกที่อัตราส่วนร้อยละ 100
CA-1.5	สารเคลือบผิวไคโตซานผสมกรดซิตริกที่อัตราส่วนร้อยละ 150
BTCA-0.5	สารเคลือบผิวไคโตซานผสม BTCA ที่อัตราส่วนร้อยละ 50
BTCA-1	สารเคลือบผิวไคโตซานผสม BTCA ที่อัตราส่วนร้อยละ 100
BTCA-1.5	สารเคลือบผิวไคโตซานผสม BTCA ที่อัตราส่วนร้อยละ 150

ตารางที่ 3 น้ำหนักของสารเคลือบกระดาษหลังเคลือบผิวด้วยสารเคลือบจากไคโตซานและไคโตซานผสมสารเชื่อมขวางที่อัตราส่วนต่างๆ กัน

สารเคลือบผิวผสมสารเชื่อมขวาง		น้ำหนักสารเคลือบผิว ( $\text{g}/\text{m}^2$ )
Chitosan		$7.1 \pm 0.8$
GA	0.5	$13.6 \pm 2.6$
	1	$18.8 \pm 3.2$
	1.5	$27.5 \pm 1.1$
CA	0.5	$27.8 \pm 1.6$
	1	$29.5 \pm 4.1$
	1.5	$26.1 \pm 0.8$
BTCA	0.5	$36.8 \pm 1.3$
	1	$38.7 \pm 1.8$
	1.5	$43.9 \pm 3.0$

ตารางที่ 4 ความหนืดของสารเคลือบผิวไคโตซานและไคโตซานผสมสารเชื่อมขวางชนิดต่างๆ ที่อัตราส่วนร้อยละ 50 และ 150 (ทดสอบที่อุณหภูมิ 25°C และที่ความเร็วรอบ 70 rpm)

สารเคลือบ	ความหนืด (Pa.s)
Chitosan	6.7
GA-0.5	3.1
GA-1.5	2.8
CA-0.5	5.8
CA-1.5	5.2
BTCA-0.5	2.1
BTCA-1.5	3.6

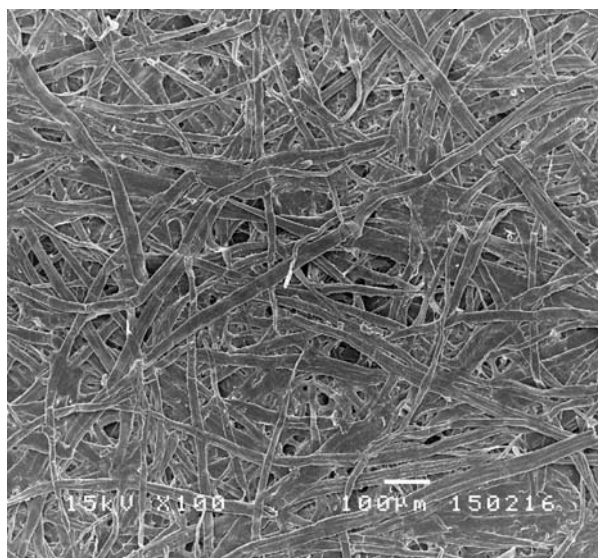
#### 4.2 ลักษณะทางกายภาพของกระดาษหลังเคลือบผิว

เมื่อนำกระดาษก่อนและหลังเคลือบไปตรวจสอบลักษณะของผิวหน้าและความหนาของชั้นสารเคลือบ โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ถ่ายภาพผิวหน้ากระดาษที่กำลังขยาย 100 เท่าและภาพตัดขวางที่ 2000 เท่า ภาพผิวหน้าของกระดาษก่อนเคลือบผิวแสดงในรูปที่ 5 พบว่ากระดาษขานอ้อยก่อนเคลือบผิว ที่ผิวหน้ามีรูพรุนจำนวนมากกระจายอยู่ทั่วไป มีขนาดใหญ่บ้างเล็กบ้าง เมื่อทำการเคลือบผิวด้วยสารเคลือบผิวไคโตซานและสารเคลือบผิวผสมสารเชื่อมขวางชนิดต่างๆ พบว่าสารเคลือบผิวสามารถปิดผิวกระดาษได้ดีมาก และสามารถลดจำนวนรูพรุนที่ผิวหน้ากระดาษได้ดีมากเช่นกัน ดังแสดงในรูปที่ 6 และรูปที่ 7

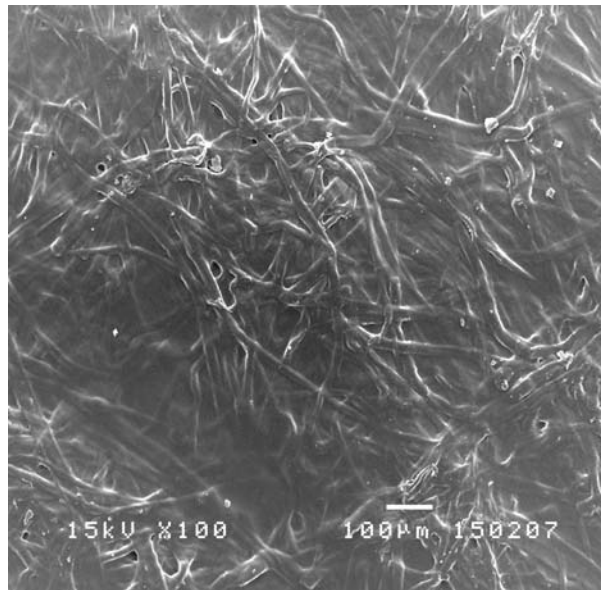
จากภาพตัดขวางของกระดาษหลังเคลือบผิวที่กำลังขยาย 2000 เท่า จะสังเกตเห็นชั้นของสารเคลือบบนผิวกระดาษได้อย่างชัดเจน และกระดาษหลังเคลือบผิวมีความเรียบดีขึ้นมาก ดังรูปที่ 8 และรูปที่ 9 ผลพบว่าสารเคลือบผิวไคโตซานได้ชั้นความหนาที่ต่ำสุดที่ประมาณ 3 ไมครอนสอดคล้องกับน้ำหนักสารเคลือบปริมาณต่ำสุด เมื่อเคลือบผิวด้วยสารเคลือบผสมสารเชื่อมขวางส่งผลให้ได้ความหนาของชั้นสารเคลือบอย่างชัดเจน ซึ่งความหนาของชั้นสารเคลือบเพิ่มขึ้นตามปริมาณของสารเชื่อมขวางและชนิดของสารเชื่อมขวางตามลำดับดังนี้คือ กรดกลูตาริก กรดซิตริก และกรด BTCA จากผลจะสังเกตเห็นว่าสารเคลือบผสมกรดกลูตาริกที่ร้อยละ 50 ได้ความหนาที่ประมาณ 5 ไมครอน สารเคลือบผสมกรดซิตริกได้ความหนาที่ประมาณ 10 ไมครอน และสารเคลือบผสมกรด BTCA ได้ความหนาที่ประมาณ 10-15 ไมครอน เมื่อเพิ่มปริมาณของสารเชื่อมขวางเป็นร้อยละ 100 ส่งผลให้ได้ชั้นความหนาเพิ่มขึ้น



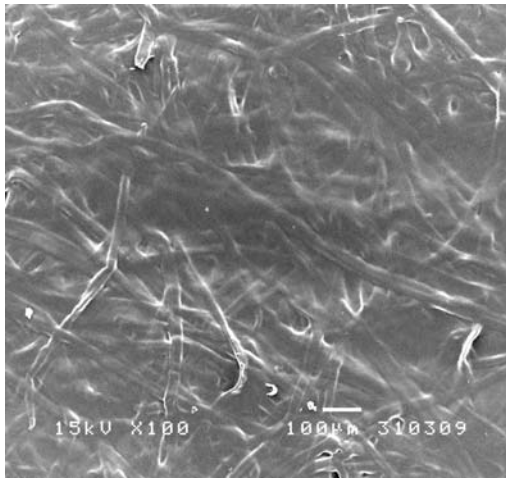
อยู่ในช่วง 10-15 ไมครอน และที่ปริมาณสารเชื่อมขวางที่ร้อยละ 150 ได้ความหนาสูงสุดพบอยู่ในช่วง 10-15 ไมครอน จากผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าการเติมสารเชื่อมขวาง ส่งผลให้ไคโตซานเกิดเป็นร่างแหสามมิติและไม่ซึมเข้าสู่เนื้อกระดูก และเกิดเป็นชั้นสารเคลือบบนผิวกระดูกที่มีความหนามากกว่าสารเคลือบที่ไม่ผสมสารเชื่อมขวาง ผลจากการวิจัยสอดคล้องกับผลการทดลองของ Bégin และ Calsteren [19] พบว่าฟิล์มไคโตซานที่ไม่ผสมสารเชื่อมขวางมีความหนาของชั้นฟิล์มต่ำกว่าฟิล์มที่เตรียมจากกรดซิตริก



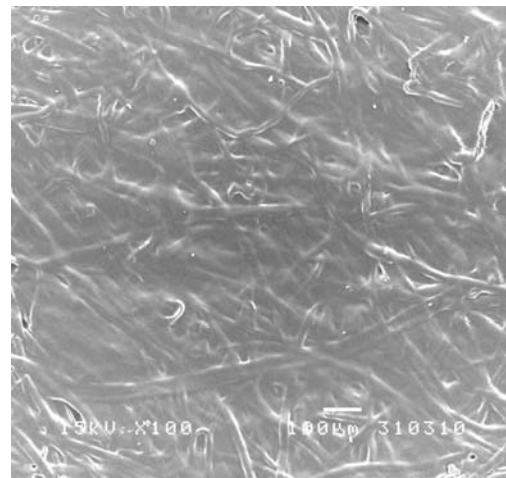
รูปที่ 5 ภาพถ่าย SEM ของผิวหนังกระดูกก่อนเคลือบผิว (กำลังขยาย 100 เท่า)



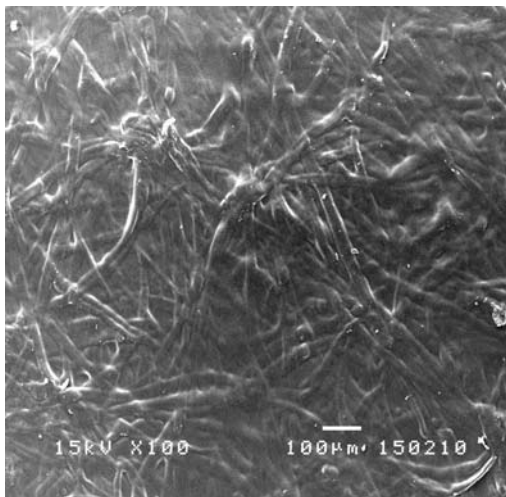
รูปที่ 6 ภาพถ่าย SEM ของผิวหนังกระดาษเคลือบฟิวไลโดซาน (ไม่ผสมสารเชื่อมขวาง)  
(กำลังขยาย 100 เท่า)



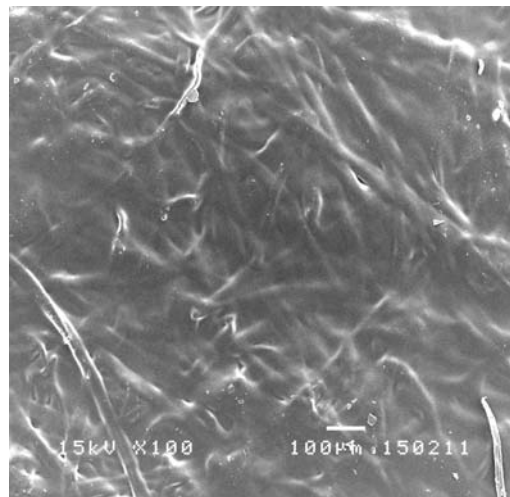
(1)



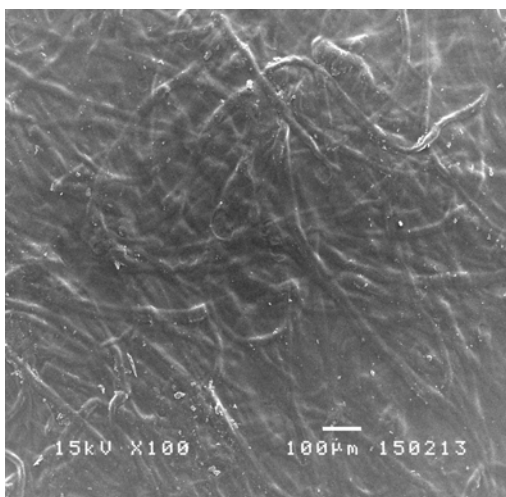
(2)



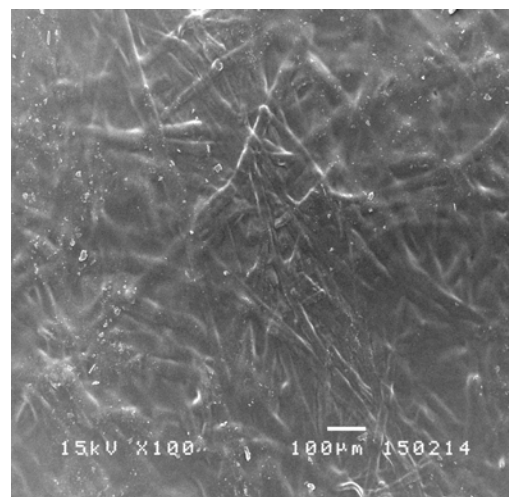
(3)



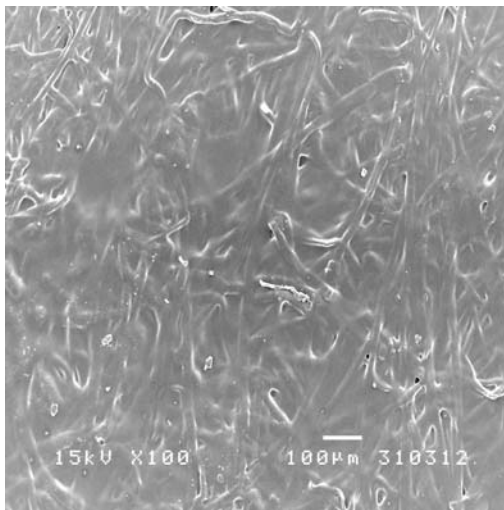
(4)



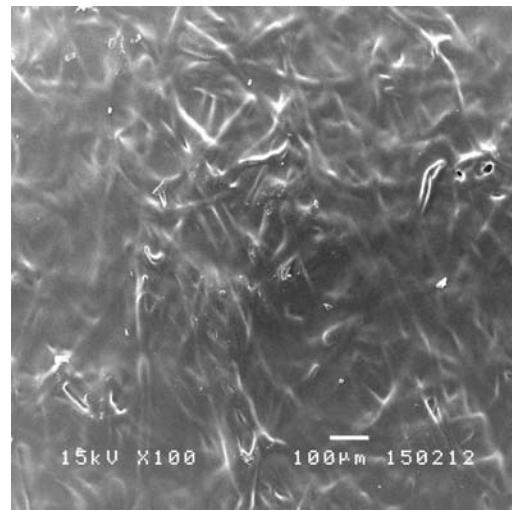
(5)



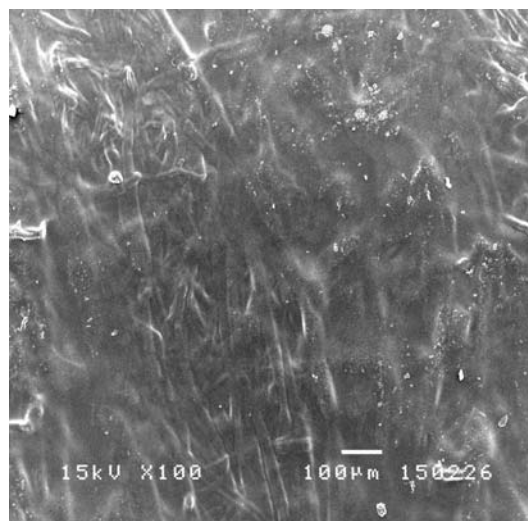
(6)



(7)

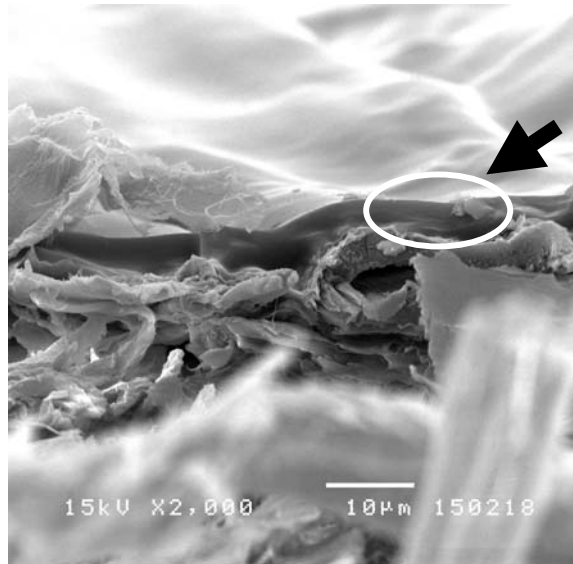


(8)

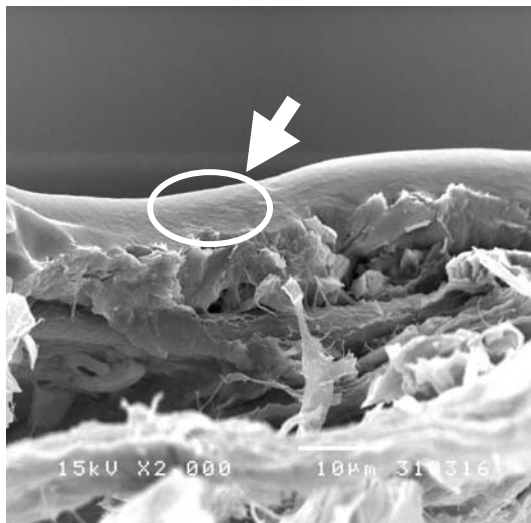


(9)

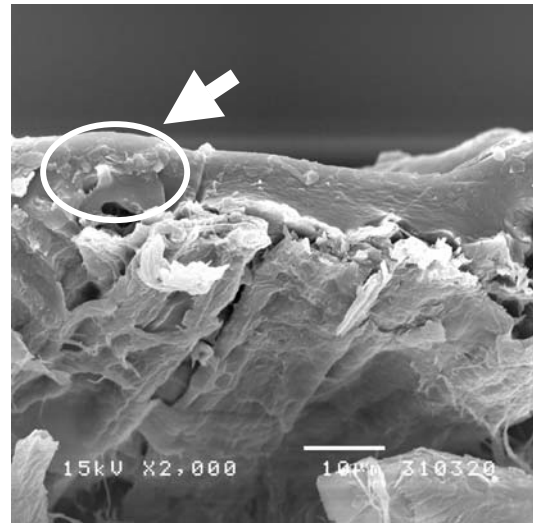
รูปที่ 7 ภาพถ่าย SEM ของผิวหน้าของกระดาษหลังเคลือบด้วยสารเคลือบไคโตซานผสมสารเชื่อมขวางชนิดต่างๆ ที่อัตราส่วนต่างๆ (1) GA-0.5 (2) GA-1 (3) CA-0.5 (4) CA-1 (5) BTCA-0.5 (6) BTCA-1 (7) GA-1.5 (8) CA-1.5 (9) BTCA-1.5 (กำลังขยาย 100 เท่า)



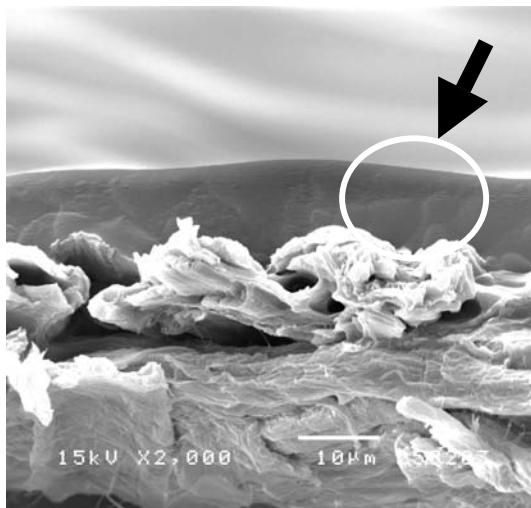
รูปที่ 8 ภาพถ่าย SEM (ตัดขวาง) ของกระดาษเคลือบผิวไฟโตะซาน (ไม่ผสมสารเชื่อมขวาง)  
(กำลังขยาย 2,000 เท่า)



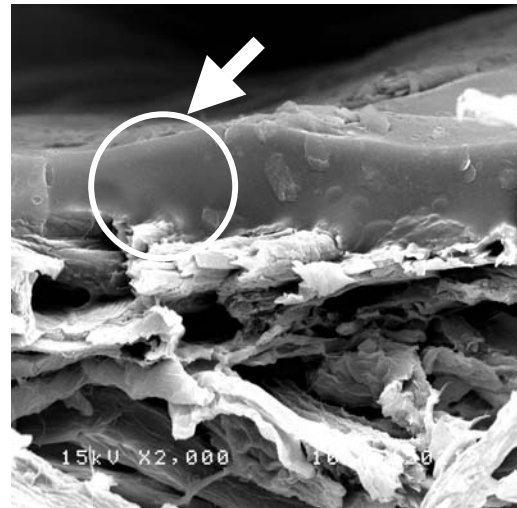
(1)



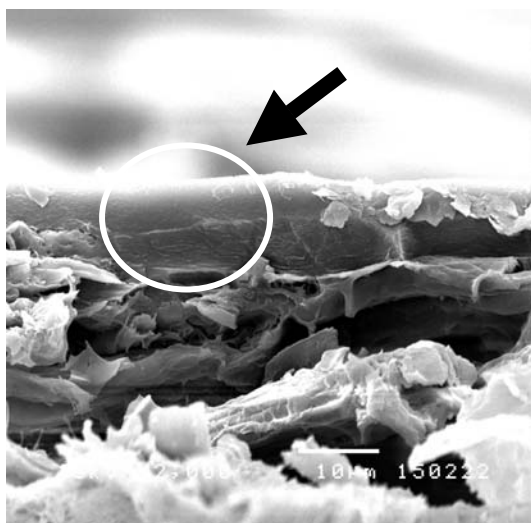
(2)



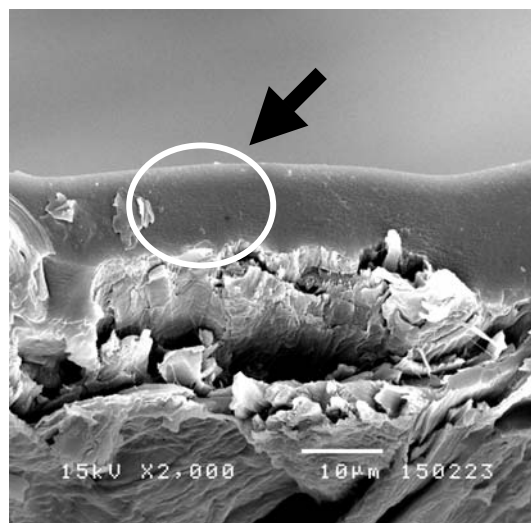
(3)



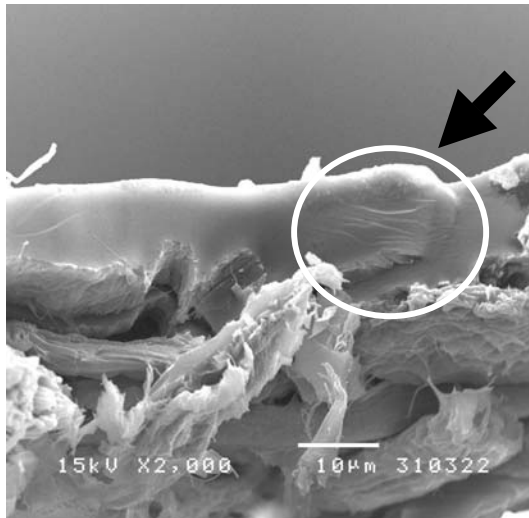
(4)



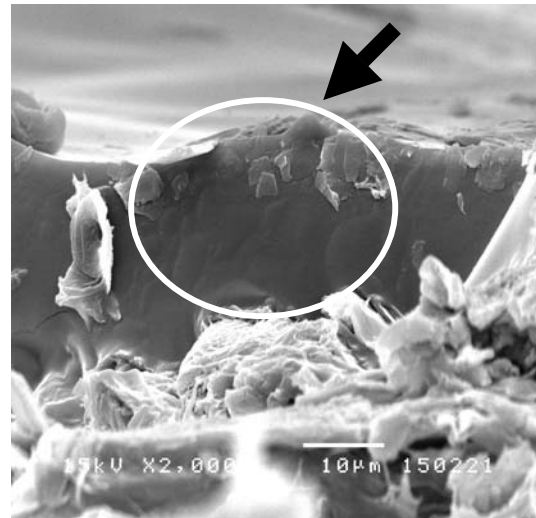
(5)



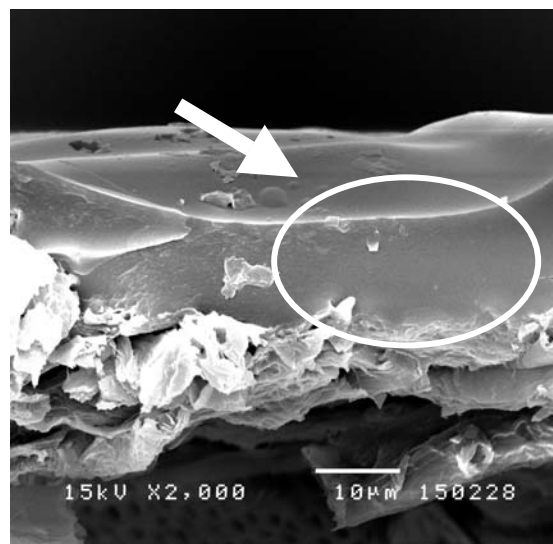
(6)



(7)



(8)

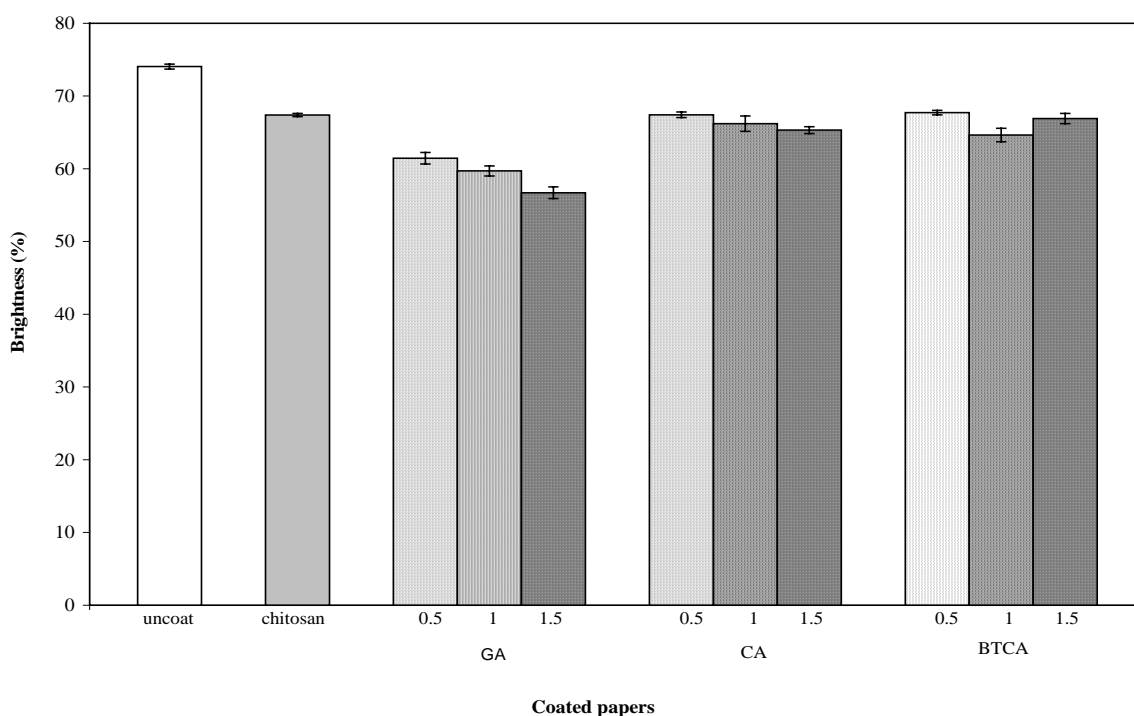


(9)

รูปที่ 9 ภาพถ่าย SEM (ตัดขวาง) ของผิวหน้าของกระดาษหลังเคลือบด้วยสารเคลือบไคโตซานผสมสารเชื่อมขวางชนิดต่างๆ ที่อัตราส่วนต่างๆ (1) GA-0.5 (2) GA-1 (3) CA-0.5 (4) CA-1 (5) BTCA-0.5 (6) BTCA-1 (7) GA-1.5 (8) CA-1.5 (9) BTCA-1.5 (กำลังขยาย 2,000 เท่า)

### 4.3 ความขาวสว่าง (Brightness)

ผลความขาวสว่างของกระดาษชานอ้อยก่อนและหลังเคลือบผิวแสดงในรูปที่ 10 พบว่ากระดาษชานอ้อยก่อนเคลือบผิวมีค่าความขาวสว่างที่ 74% เนื่องจากกระดาษชานอ้อยมีสีเหลืองนวลอ่อน เมื่อเคลือบผิวด้วยสารเคลือบไคโตซาน ส่งผลให้ค่าความขาวสว่างของกระดาษมีค่าต่ำลงที่ 67.4% เนื่องจากสารเคลือบผิวไคโตซานเป็นสารละลายที่มีสีเหลืองอ่อนใส เมื่อนำไปเคลือบผิวจึงส่งผลให้ค่าความขาวสว่างลดต่ำลง เมื่อผสมสารเชื่อมขวาง พบว่ากรดกลูตาริกส่งผลให้ค่าความขาวสว่างของกระดาษลดต่ำลงสุด มีค่า 61.5% (ที่ปริมาณการเติมที่ร้อยละ 50) และลดต่ำลงอย่างต่อเนื่องที่ปริมาณการเติมเพิ่มขึ้นที่ร้อยละ 150 มีค่า 56.7% ทั้งนี้อาจเนื่องจากสารเคลือบผิวผสมกรดกลูตาริกมีสีเหลืองเข้มใส จึงส่งผลให้ค่าความขาวสว่างลดต่ำสุด ในขณะที่สารเคลือบผิวผสมกรดซิตริกให้ค่าความขาวสว่างที่ใกล้เคียงกับสารเคลือบผิวผสมกรด BTCA ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วง 65-68% ซึ่งเป็นค่าที่ใกล้เคียงกับสารเคลือบผิวไคโตซาน และเมื่อปริมาณของกรดเพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าความขาวสว่างลดลงเล็กน้อย



รูปที่ 10 ความขาวสว่างของกระดาษก่อนและหลังเคลือบผิวด้วยสารเคลือบไคโตซานและสารเคลือบไคโตซานผสมสารเชื่อมขวางชนิดต่างๆ และอัตราส่วนต่างๆ

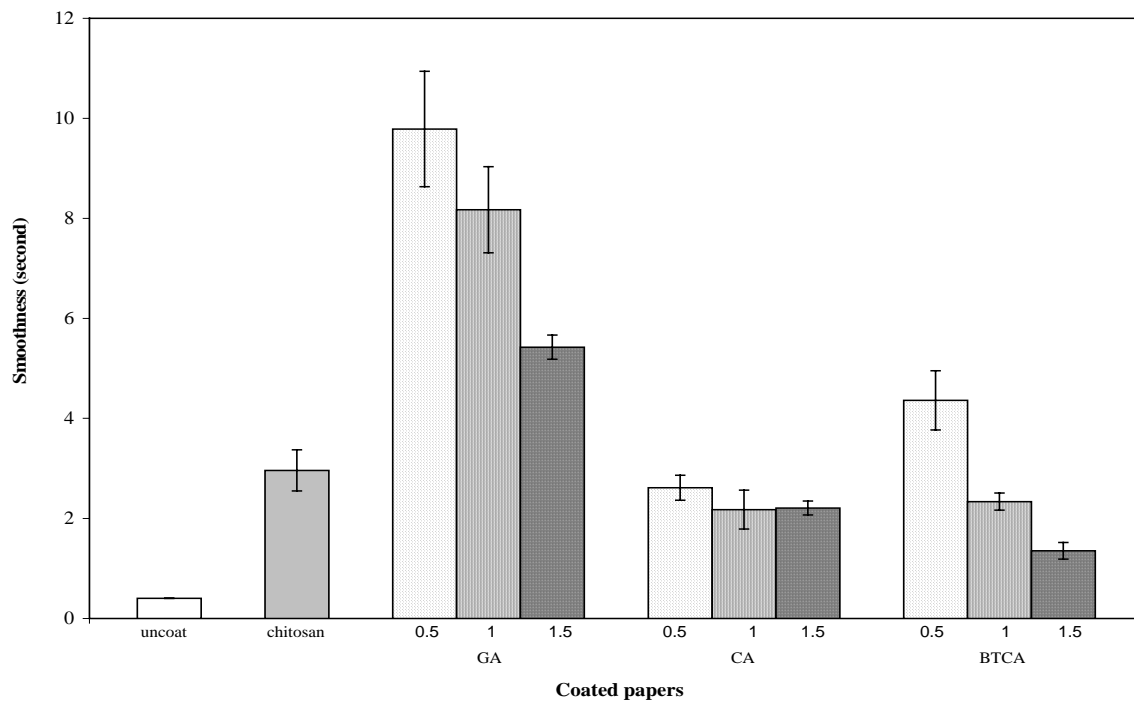


#### 4.4 ความเรียบ (Smoothness)

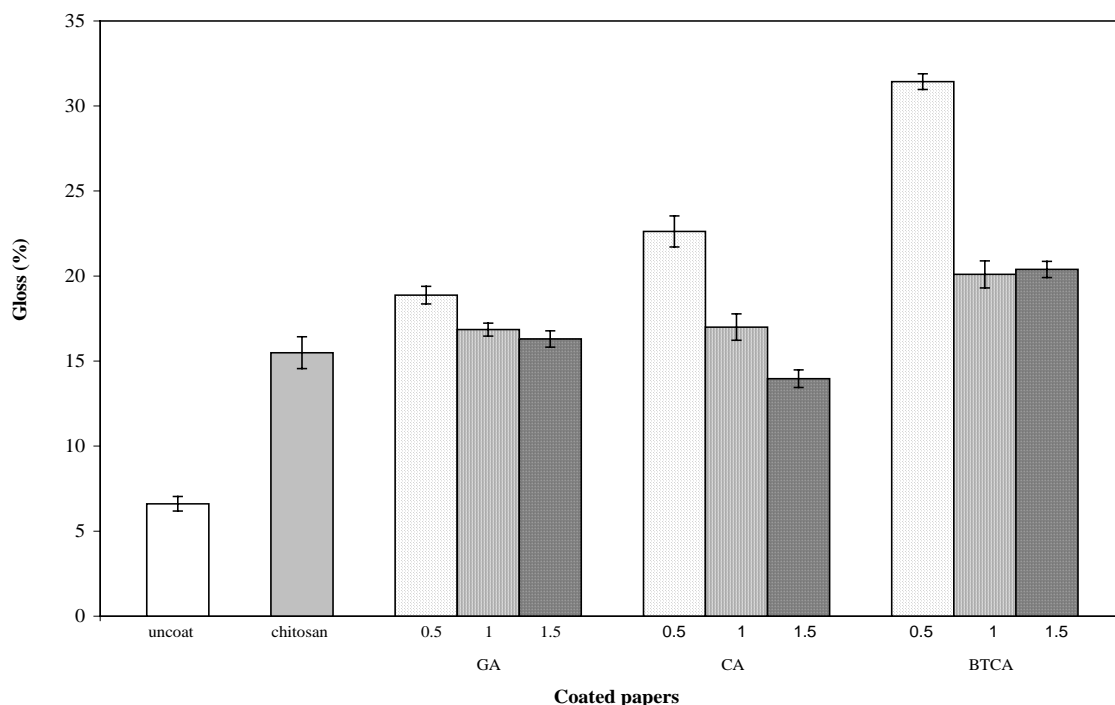
ความเรียบของกระดาษสามารถตรวจวัดได้โดยใช้เครื่องวัดความเรียบ โดยนำด้านที่เคลือบสารเคลือบคว่ำลง จากนั้นทำการจับเวลาให้อากาศปริมาตร 10 ml ไหลผ่านผิวหน้ากระดาษ โดยให้ความดันจาก 380 จนถึง 360 mm Hg ดังนั้นกระดาษที่ใช้เวลานานในการไหลผ่านของอากาศ แสดงว่ากระดาษมีความเรียบดี จากผลการทดลองแสดงในรูปที่ 11 พบว่ากระดาษหลังเคลือบผิวมีความเรียบดีขึ้นมากเมื่อเปรียบเทียบกับกระดาษก่อนเคลือบผิว ซึ่งผลดังกล่าวสอดคล้องกับภาพถ่าย SEM แสดงก่อนหน้านี้ สารเคลือบผสมกรดกลูตาริก ส่งผลให้ได้ความเรียบสูงสุด รองลงมาคือสารเคลือบผสมกรด BTCA และกรดซิตริกเป็นลำดับสุดท้าย ทั้งนี้อาจเนื่องจากสารเคลือบผสมกรดกลูตาริกมีค่าความหนืดอยู่ในช่วงปานกลางจึงส่งผลให้ได้น้ำหนักสารเคลือบผิวที่ไม่สูงมากนัก และได้ชั้นความหนาในระดับปานกลาง จึงส่งผลให้ได้ความเรียบสูงสุด ในขณะที่สารเคลือบผิวที่มีความหนืดสูงกว่า เช่น สารเคลือบผิวไคโตซาน และสารเคลือบผิวผสมสารเชื่อมขวางกรดซิตริก ส่งผลให้ได้สารเคลือบผิวที่มีความเรียบต่ำกว่า และในกรณีที่ชั้นสารเคลือบมีความหนาสูงซึ่งพบในสารเคลือบผิวผสมกรด BTCA ส่งผลต่อความเรียบของผิวหน้ากระดาษเช่นกัน เมื่อเพิ่มปริมาณของสารเชื่อมขวาง ส่งผลให้ค่าความเรียบลดต่ำลง ทั้งนี้อาจเนื่องจากความหนาของชั้นสารเคลือบที่เพิ่มขึ้นด้วย จึงส่งผลให้ความเรียบมีค่าต่ำลง

#### 4.5 ความมันวาว (Gloss)

ผลการตรวจวัดความมันวาวของกระดาษก่อนและหลังเคลือบ ตรวจวัดที่มุม 75 องศา แสดงในรูปที่ 12 พบว่าการเคลือบผิวกระดาษด้วยสารเคลือบจากไคโตซานสามารถปรับปรุงความมันวาวของกระดาษได้ ซึ่งเป็นผลจากสารเคลือบเข้าไปปิดผิวและรูพรุนของเส้นใย ทำให้ผิวกระดาษเรียบขึ้น ความมันวาวของกระดาษหลังเคลือบจึงเพิ่มขึ้น ชนิดของสารเชื่อมขวางส่งผลต่อความมันวาวของกระดาษหลังเคลือบผิว ที่ร้อยละ 50 สารเคลือบผิวผสมกรด BTCA ส่งผลให้ได้ความมันวาวสูงสุด รองลงมาคือ กรดซิตริก และกรดกลูตาริกได้ค่าความมันวาวต่ำสุด ผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าชั้นสารเคลือบผสมกรด BTCA สามารถสะท้อนแสงได้ดีกว่า แต่อย่างไรก็ตามสารเคลือบผสมสารเชื่อมขวางส่งผลให้ได้ค่าความมันวาวสูงกว่าสารเคลือบผิวไคโตซาน และเมื่อเพิ่มปริมาณของสารเชื่อมขวางส่งผลให้ความมันวาวของกระดาษลดต่ำลง ทั้งนี้อาจเนื่องจากชั้นความหนาที่เพิ่มขึ้นอาจส่งผลให้ความเรียบของผิวหน้ากระดาษลดลง ดังนั้นความมันวาวจึงลดลง



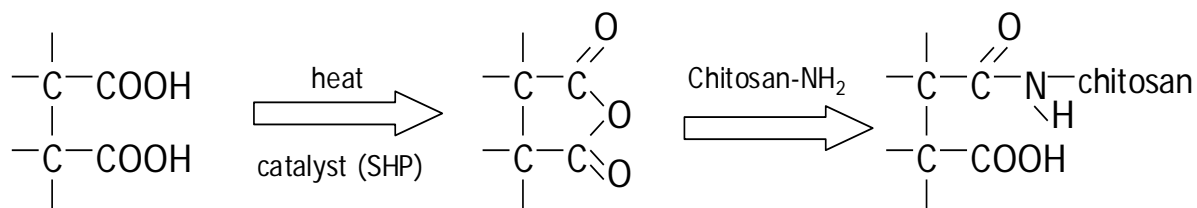
รูปที่ 11 ความเรียบของกระดาษก่อนและหลังเคลือบผิวด้วยสารเคลือบไคโตซานและสารเคลือบไคโตซานผสมสารเชื่อมขวางชนิดต่างๆ และอัตราส่วนต่างๆ



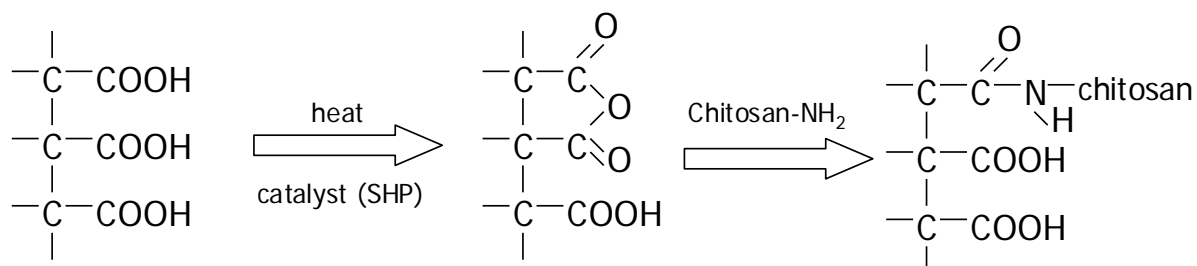
รูปที่ 12 ความมันวาวของกระดาษก่อนและหลังเคลือบผิวด้วยสารเคลือบไคโตซานและสารเคลือบไคโตซานผสมสารเชื่อมขวางชนิดต่างๆ และอัตราส่วนต่างๆ

#### 4.6 หมู่ฟังก์ชันของสารเคลือบผิว

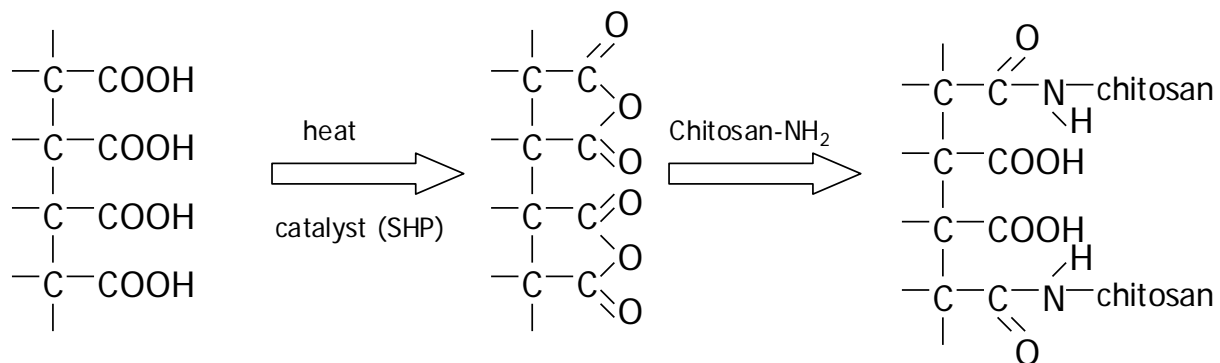
กลไกการเกิดปฏิกิริยาการเชื่อมขวางของโคโตซานกับสารเชื่อมขวางชนิดต่างๆ แสดงในรูปที่ 13 [20] โดยเริ่มจากหมู่คาร์บอกซิลิกในสารเชื่อมขวางเมื่ออยู่ในภาวะที่มีตัวเร่งปฏิกิริยา (SHP) และความร้อนจะเกิดเป็นหมู่แอนไฮไดรด์ซึ่งเข้าทำปฏิกิริยากับหมู่อะมิโนในโคโตซาน เกิดเป็นพันธะเอไมด์เชื่อมขวางระหว่างโคโตซานและสารเชื่อมขวาง ผลการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของกระดาษก่อนเคลือบผิวแสดงในรูปที่ 14 และตารางที่ 5 แสดงพิกที่สำคัญของโครงสร้างเซลลูโลส [21] ได้แก่ O-H stretching ที่ตำแหน่ง  $3427\text{ cm}^{-1}$  C-H stretching ที่ตำแหน่ง  $2901\text{ cm}^{-1}$  asymmetric bridge oxygen stretching ที่ตำแหน่ง  $1164\text{ cm}^{-1}$  และ C-O stretching ที่ตำแหน่ง  $1059\text{ cm}^{-1}$  หมู่ฟังก์ชันในสารเคลือบผิวโคโตซานแสดงพิกที่สำคัญ ได้แก่ O-H stretching ที่ตำแหน่ง  $3432\text{ cm}^{-1}$  C-H stretching ที่ตำแหน่ง  $2898\text{ cm}^{-1}$  amide I ที่ตำแหน่ง  $1639\text{ cm}^{-1}$  amide II ที่ตำแหน่ง  $1571\text{ cm}^{-1}$  asymmetric bridge oxygen stretching ที่ตำแหน่ง  $1160\text{ cm}^{-1}$  และ C-O stretching ที่ตำแหน่ง  $1051\text{ cm}^{-1}$  (รูปที่ 15 (1)) และตารางที่ 6 ซึ่งพิกดังกล่าวสอดคล้องกับพิกที่พบในผงโคโตซาน [22] ผลการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันที่พบในสารเคลือบผิวโคโตซานผสมสารเชื่อมขวางชนิดต่างๆ ที่อัตราส่วนต่างๆ แสดงในรูปที่ 15-17 และตารางที่ 7 พบพิกที่สำคัญ ได้แก่ O-H stretching ที่ตำแหน่งในช่วง  $3420\text{-}3435\text{ cm}^{-1}$  C-H stretching ที่ตำแหน่งในช่วง  $2895\text{-}2921\text{ cm}^{-1}$  carboxyl carbonyl stretching ที่ตำแหน่งในช่วง  $1711\text{-}1724\text{ cm}^{-1}$  มาจากกรดที่ใช้เป็นสารเชื่อมขวาง และ amide I ที่ตำแหน่งในช่วง  $1630\text{-}1644\text{ cm}^{-1}$  ซึ่งแสดงถึงพันธะเอไมด์ที่คาดว่าเกิดจากการทำปฏิกิริยากันระหว่างหมู่  $\text{-COOH}$  ของสารเชื่อมขวางและหมู่  $\text{-NH}_2$  ของโคโตซาน [20, 23] จากตารางที่ 8 แสดงสัดส่วนของพื้นที่ใต้กราฟที่  $1630\text{-}1644\text{ cm}^{-1}$  (B) และ  $2895\text{-}2921\text{ cm}^{-1}$  (C) ซึ่งแสดงถึงปริมาณของหมู่ฟังก์ชันเอไมด์ที่พบในชั้นฟิล์มของสารเคลือบผิวที่มีการเชื่อมขวาง ผลสัดส่วนของพื้นที่ใต้กราฟของพันธะเอไมด์แสดงให้เห็นว่าปริมาณของพันธะเอไมด์มีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาณของสารเชื่อมขวางเพิ่มขึ้น การเชื่อมขวางด้วยกรดซิตริกได้ปริมาณพันธะเอไมด์สูงกว่าชนิดกลูตาริกและ BTCA



(1)



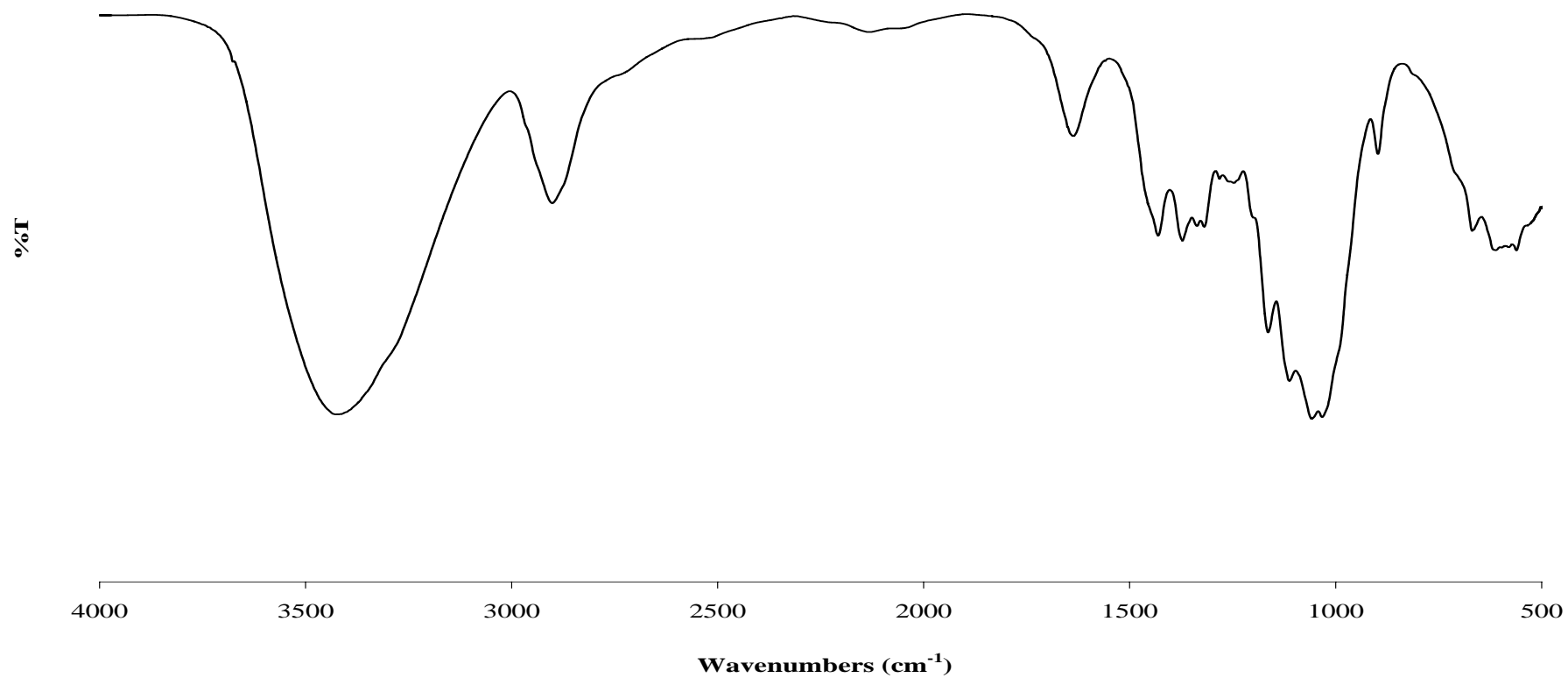
(2)



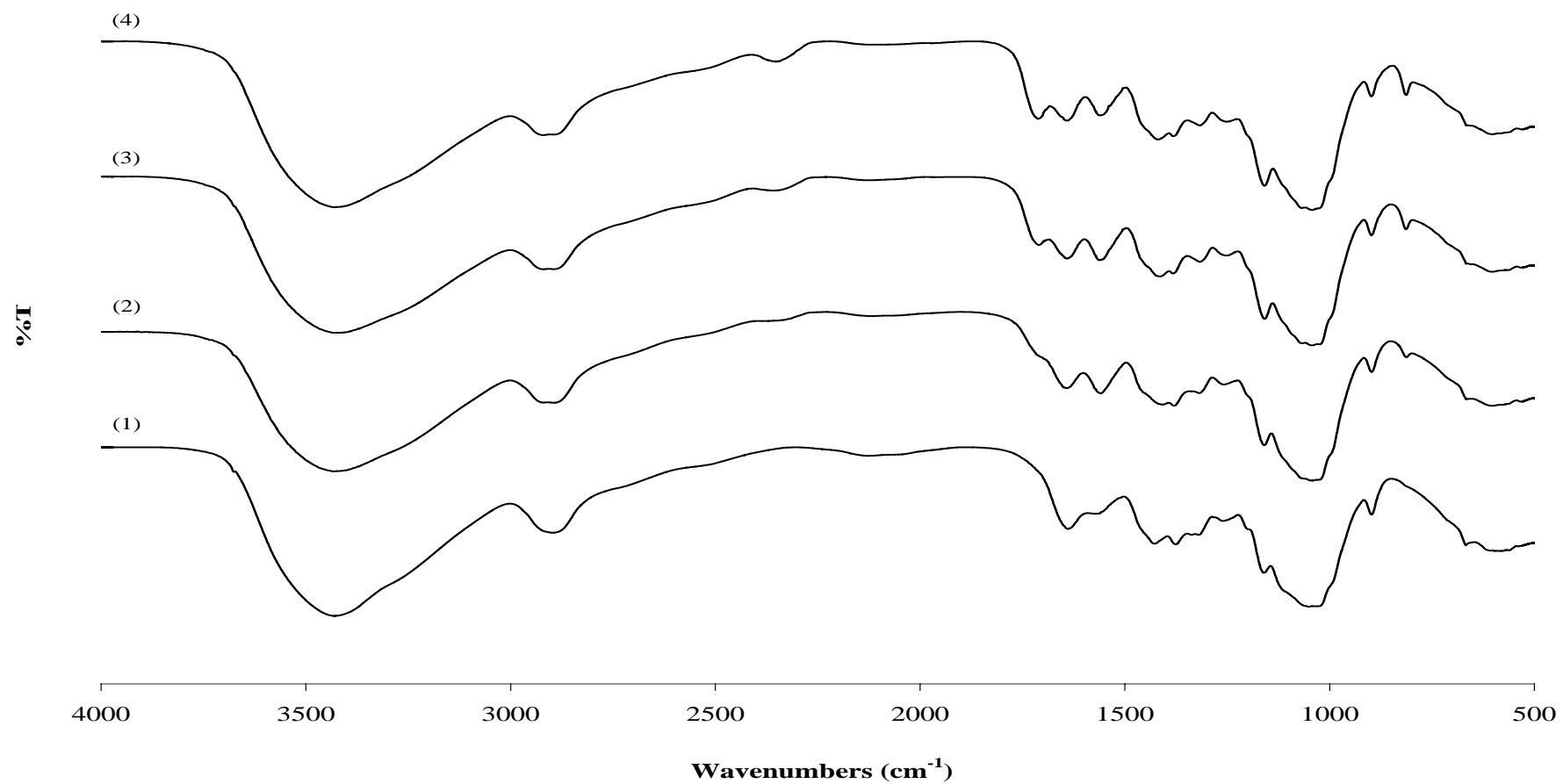
(3)

รูปที่ 13 กลไกการเกิดปฏิกิริยาเชื่อมขวางระหว่างไคโตซานและสารเชื่อมขวางชนิดต่างๆ

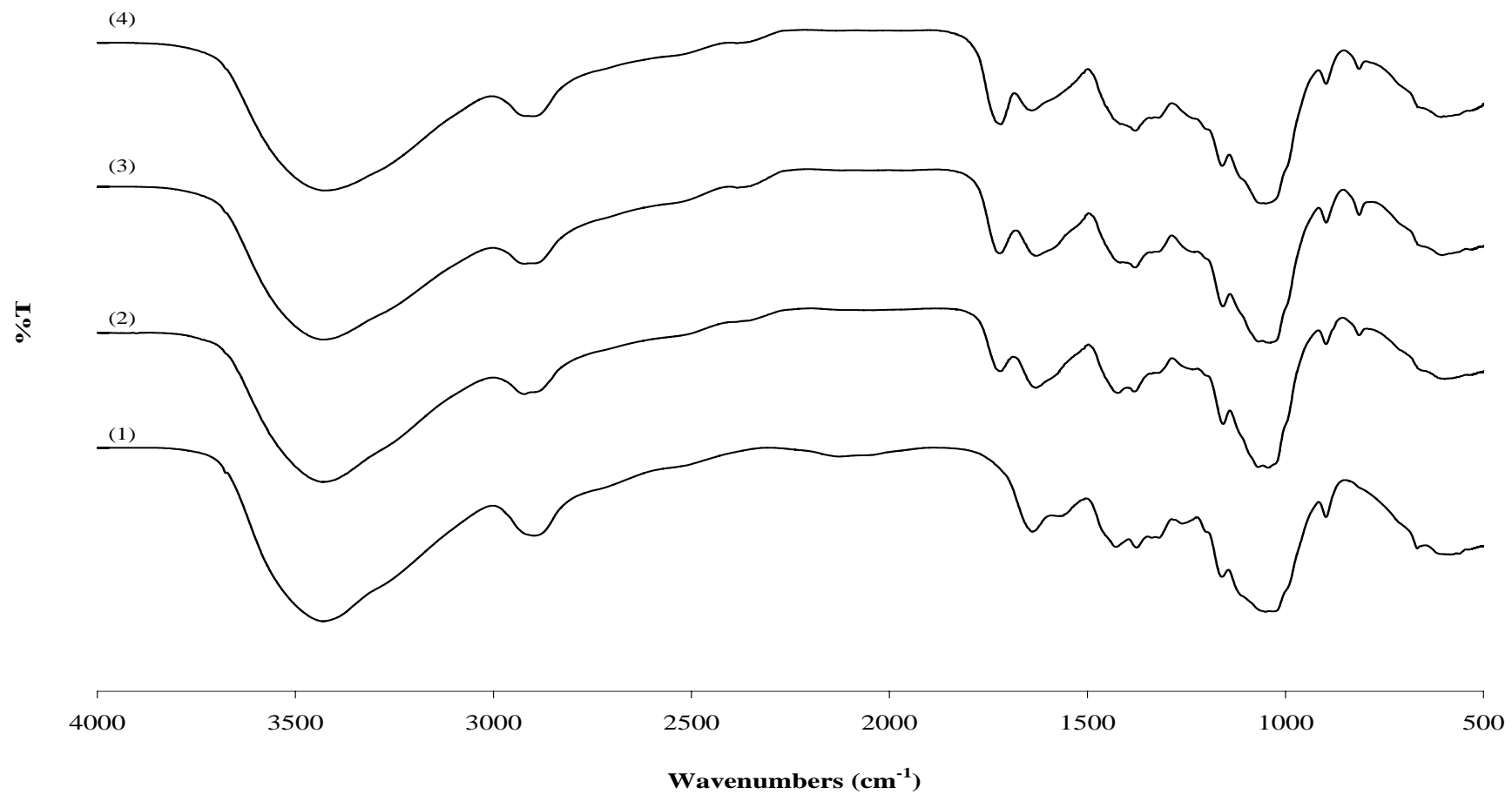
(1) กรดกลูตาริก (2) กรดซิตริก (3) กรด BTCA



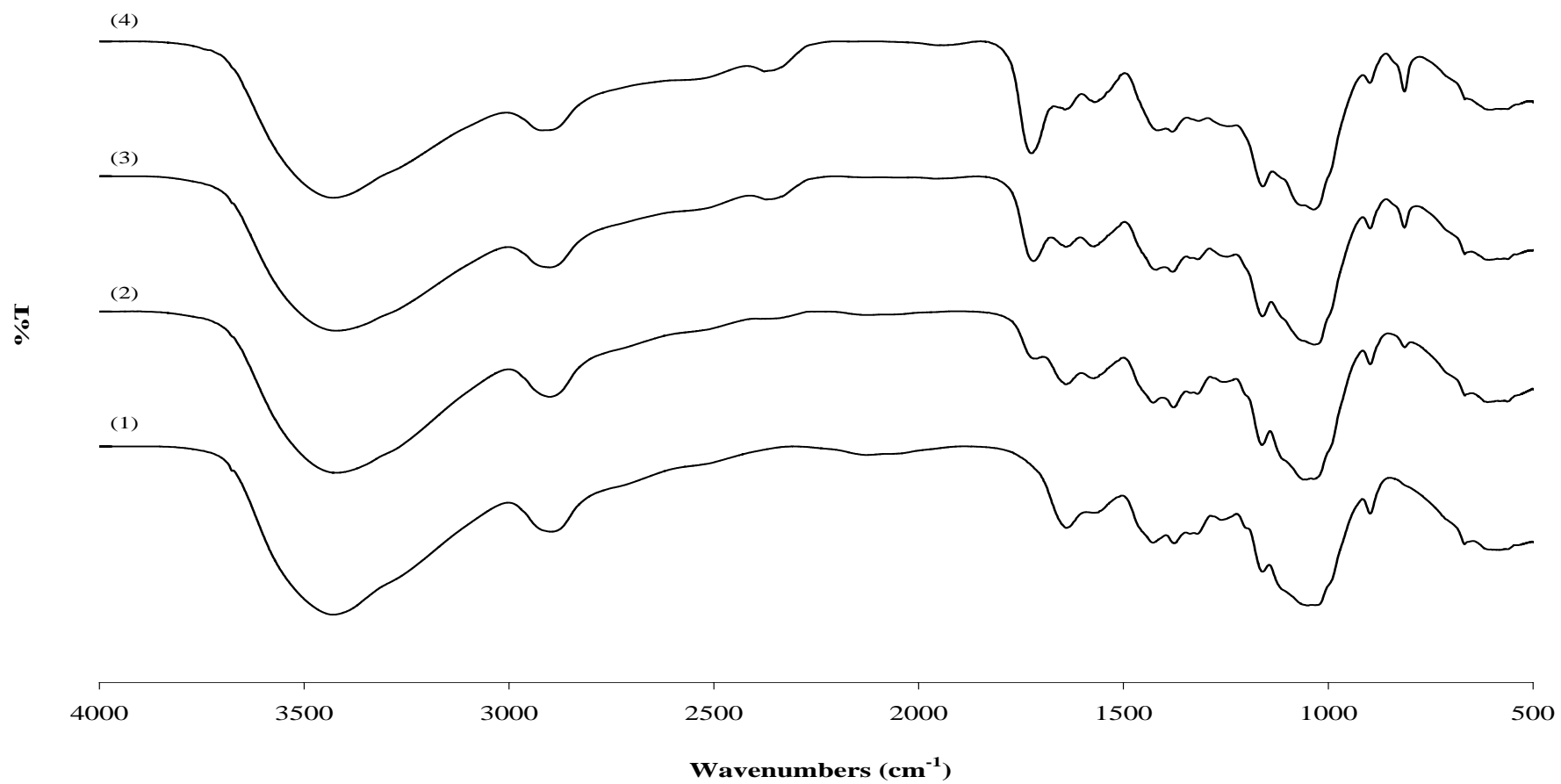
รูปที่ 14 FTIR สเปกตรัมของกระดาษที่ไม่มีการเคลือบผิว



รูปที่ 15 FTIR สเปกตรัมของกระดาษที่มีการเคลือบผิวด้วย (1) โคลิโดซาน (2) GA-0.5 (3) GA-1 (4) GA-1.5



รูปที่ 16 FTIR สเปกตรัมของกระดาษที่มีการเคลือบผิวด้วย (1) ไคโตซาน (2) CA-0.5 (3) CA-1 (4) CA-1.5



รูปที่ 17 FTIR สเปกตรัมของกระดาษที่มีการเคลือบผิวด้วย (1) ไคโตซาน (2) BTCA-0.5 (3) BTCA-1 (4) BTCA-1.5



ตารางที่ 5 ตำแหน่งของพีคและหมู่ฟังก์ชันที่พบในกระดาษที่ไม่เคลือบผิว

Peak position of uncoated paper (cm <sup>-1</sup> )	Peak assignment
3427	O-H stretching
2901	C-H stretching
1638	O-H bending of adsorbed water
1431	HCH, OCH bending
1372	CH bending, CH <sub>3</sub> bending
1164	Asymmetric bridge oxygen stretching
1113	Asymmetric in-plane ring stretching
1059	C-O stretching
1033	C-O stretching
897	Ring stretching
669	COH bending

ตารางที่ 6 ตำแหน่งของพีคและหมู่ฟังก์ชันที่พบในกระดาษที่เคลือบผิวด้วยสารเคลือบไคโตซาน

Peak position of chitosan coated paper (cm <sup>-1</sup> )	Peak assignment
3432	O-H stretching
2898	C-H stretching
1639	Amide I band
1571	Amide II band
1428	CH <sub>2</sub> bending, CH <sub>3</sub> deformation
1376	CH bending, symmetric CH <sub>3</sub> deformation
1160	Asymmetric bridge oxygen stretching
1051	C-O stretching
898	Ring stretching

ตารางที่ 7 ตำแหน่งของพีคและหมู่ฟังก์ชันที่พบในกระดาษที่เคลือบผิวด้วยสารเคลือบไคโตซานผสมสารเชื่อมขวางชนิดต่างๆ ที่อัตราส่วนต่างๆ

Peak position of coated paper (cm <sup>-1</sup> )									Peak assignment
GA-0.5	GA-1	GA-1.5	CA-0.5	CA-1	CA-1.5	BTCA-0.5	BTCA-1	BTCA-1.5	
3435	3428	3429	3429	3429	3428	3426	3420	3428	O-H stretching
2895	2921	2920	2922	2921	2900	2901	2901	2919	C-H stretching
-	1711	1712	1721	1722	1718	1712	1719	1724	Carboxyl carbonyl stretching
1644	1641	1641	1630	1631	1643	1640	1640	1642	-CONH- contraction
1558	1563	1560	-	-	-	1573	1572	1571	Amide II band
1407	1415	1419	1424	1417	-	1427	1420	1416	CH <sub>2</sub> bending, CH <sub>3</sub> deformation
1380	1383	1382	1382	1380	1379	1378	1380	1380	CH bending, symmetric CH <sub>3</sub> deformation
1160	1159	1159	1158	1158	1160	1162	1160	1160	Asymmetric bridge oxygen stretching
-	1068	1068	1068	1068	-	1060	-	-	C-O stretching
1044	1043	1043	1044	1040	1051	1035	1035	1035	C-O stretching
897	898	898	898	897	898	897	898	899	Ring stretching

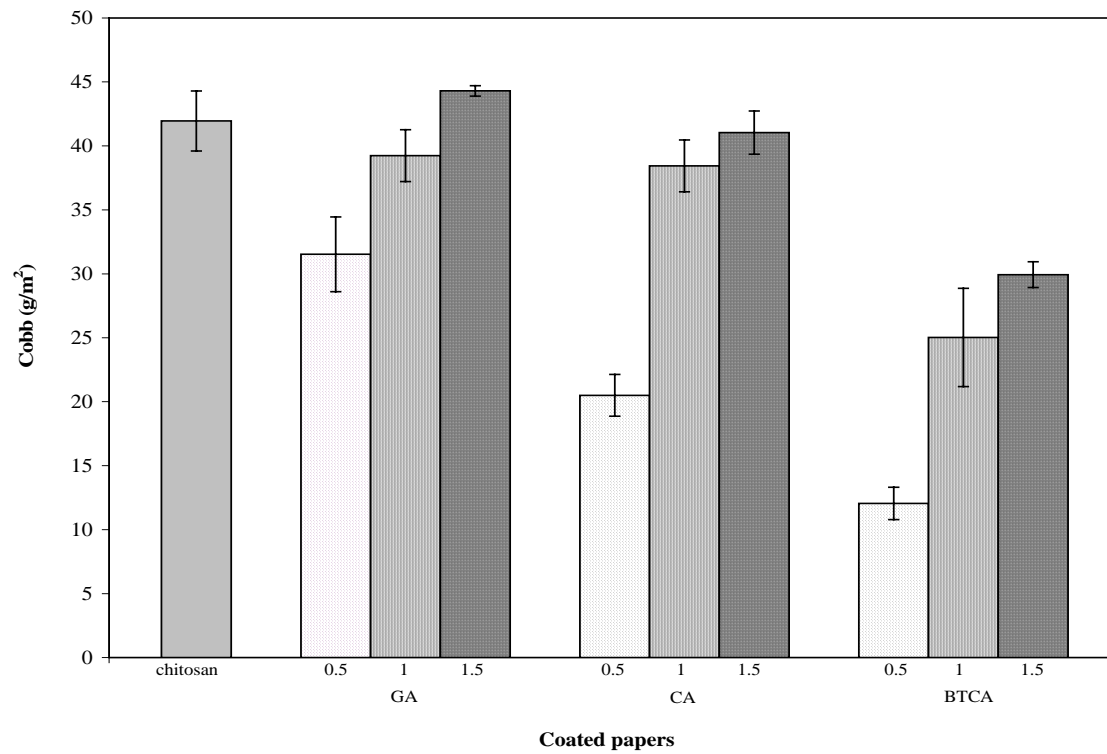
ตารางที่ 8 อัตราส่วนของหมู่ฟังก์ชันที่พบในกระดาษที่เคลือบผิวด้วยสารเคลือบไคโตซาน ผสมสารเชื่อมขวางชนิดต่างๆ ที่อัตราส่วนต่างๆ

Coated paper	B/C ratio (-CONH-)
GA-0.5	0.27
GA-1	0.25
GA-1.5	0.24
CA-0.5	1.15
CA-1	1.02
CA-1.5	0.73
BTCA-0.5	0.19
BTCA-1	0.1
BTCA-1.5	0.09

#### 4.7 การดูดซึมน้ำ (Water absorption)

ผลการทดสอบการดูดซึมน้ำของกระดาษด้วยวิธี Cobb test โดยใช้เวลาในการทดสอบ 60 วินาที พบว่ากระดาษก่อนเคลือบผิวมีค่าการดูดซึมน้ำ  $716.5 \pm 15.6$  กรัม/ตร.ม. (รูปที่ 18) เมื่อทำการเคลือบผิวกระดาษด้วยสารเคลือบไคโตซาน พบว่าชั้นฟิล์มของสารเคลือบผิวช่วยปรับปรุงสมบัติความต้านทานการดูดซึมน้ำอย่างมีประสิทธิภาพ การดูดซึมน้ำของสารเคลือบผิวไคโตซานมีค่า 42 กรัม/ตร.ม. ซึ่งเป็นค่าที่ลดลงประมาณ 17 เท่าเมื่อเปรียบเทียบกับค่าการดูดซึมน้ำของกระดาษก่อนเคลือบผิว ทั้งนี้เนื่องจากชั้นฟิล์มไคโตซานสามารถปิดผิวกระดาษได้ดีมาก ปริมาณรูพรุนที่ผิวหน้ากระดาษลดลง ซึ่งผลที่ได้มีความสอดคล้องกับงานวิจัยของ Reis และคณะ [24] ซึ่งทำการเคลือบผิวกระดาษกราฟต์ด้วยไคโตซานที่น้ำหนัก 3-4% โดยน้ำหนัก หลังเคลือบผิว ค่าการดูดซึมน้ำของกระดาษกราฟต์ก่อนเคลือบผิวคือ 39 กรัม/ตร.ม. หลังการเคลือบผิวมีค่าลดลงเป็น 24.7-30.1 กรัม/ตร.ม. และงานวิจัยของ Kuusipalo และคณะทำการเคลือบผิวกระดาษที่ผ่านการฟอก (90 กรัม/ตร.ม.) [10] พบว่าหลังการเคลือบผิวด้วยไคโตซานที่น้ำหนักในช่วง 0.1-0.75% โดยน้ำหนัก การดูดซึมน้ำของกระดาษมีค่าลดลงเป็น 20-22 กรัม/ตร.ม. เมื่อเทียบกับกระดาษก่อนเคลือบผิวซึ่งมีค่าประมาณ 26 กรัม/ตร.ม.

เมื่อผสมสารเชื่อมขวางในสารเคลือบไคโตซาน ปฏิบัติการเชื่อมขวางส่งผลให้เกิดเป็นโครงร่างตาข่าย (network structure) ดังแสดงในรูปที่ 13 ทำให้สามารถต้านทานการดูดซึมน้ำเข้าในกระดาษได้ดีขึ้นมาก โดยเฉพาะที่ปริมาณการเติมสารเชื่อมขวางที่ร้อยละ 50 ของสารเชื่อมขวางทุกชนิด ส่งผลให้กระดาษมีการดูดซึมน้ำลดต่ำลงมาก โดยสารเคลือบผสมกรด BTCA ได้ค่าการดูดซึมน้ำต่ำที่สุด (12.1 กรัม/ตร.ม.) ซึ่งแสดงถึงระดับการเกิดโครงร่างตาข่าย (degree of crosslink) ที่อาจมีสูงกว่าระดับการเกิดโครงร่างตาข่ายของสารเคลือบผิวที่ผสมกรดซิตริกและกรดกลูตาริก ดังนั้นสารเคลือบผิวผสม BTCA จึงมีสมบัติการกั้นขวางน้ำที่ดีกว่าค่าการดูดซึมน้ำของสารเคลือบผสมกรดซิตริกและกรดกลูตาริกพบที่ 20.5 และ 31.5 กรัม/ตร.ม. ตามลำดับ เมื่อเพิ่มปริมาณของสารเชื่อมขวางที่ร้อยละ 100 และ 150 ส่งผลให้การดูดซึมน้ำของกระดาษหลังเคลือบผิวมีเพิ่มขึ้น ซึ่งอาจเนื่องมาจากปริมาณของหมู่คาร์บอกซิลิกที่มีเพิ่มขึ้นตามด้วย ซึ่งบางส่วนอาจไม่เกิดปฏิบัติการเชื่อมขวางกับไคโตซาน จึงส่งผลให้สารเคลือบผิวมีความชอบน้ำ และทำให้สารเคลือบผิวดูดซึมน้ำได้เพิ่มขึ้น สารเคลือบผิวไคโตซานที่ผสมสารเชื่อมขวางชนิด BTCA ที่ทุกอัตราส่วนส่งผลให้ค่าการดูดซึมน้ำต่ำสุด



รูปที่ 18 การดูดซึมน้ำของกระดาษหลังเคลือบผิวด้วยสารเคลือบไคโตซานและสารเคลือบไคโตซานผสมสารเชื่อมขวางชนิดต่างๆ และอัตราส่วนต่างๆ

#### 4.8 ความพรุนของกระดาษ (Air permeability)

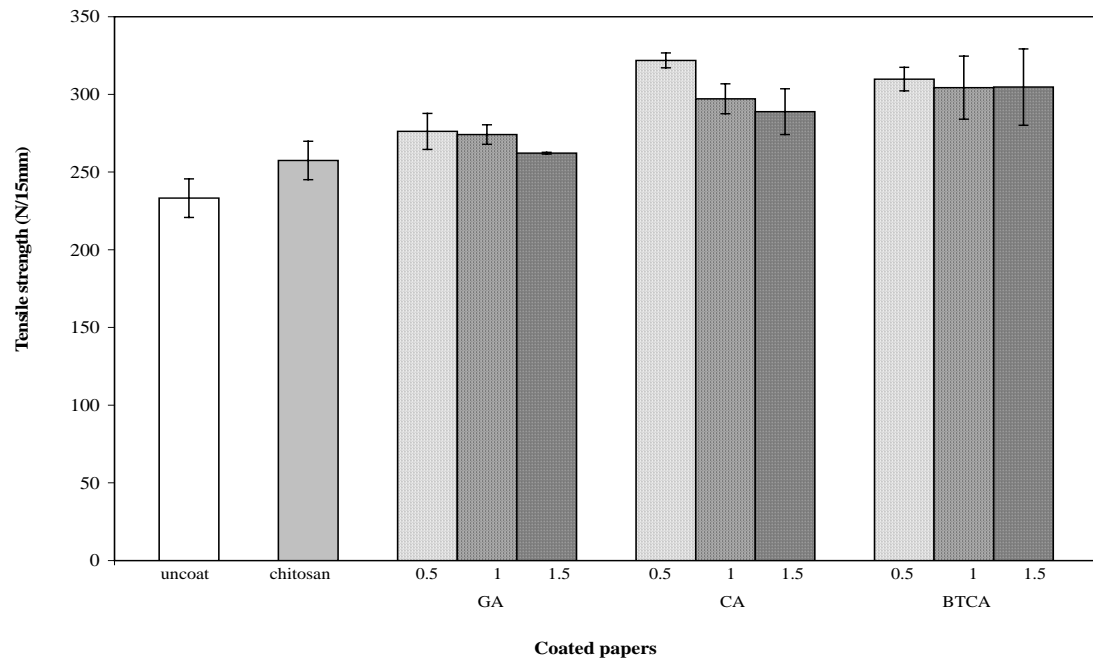
ผลการวัดความพรุนของกระดาษก่อนและหลังเคลือบผิวแสดงในตารางที่ 9 พบว่ากระดาษก่อนเคลือบผิวอากาศปริมาตร 100 ลูกบาศก์เซนติเมตรใช้เวลาในการซึมผ่านกระดาษประมาณ 18 วินาที ซึ่งเป็นระยะเวลาที่สั้นแสดงถึงสภาพความพรุนในกระดาษก่อนเคลือบผิว เมื่อทำการเคลือบผิวกระดาษด้วยสารเคลือบจากไคโตซานและผสมสารเชื่อมขวางชนิดต่างๆ และที่อัตราส่วนต่างๆ จะเห็นว่าสามารถปรับปรุงสภาพให้อากาศซึมผ่านได้ในระดับดีมาก เนื่องจากสารเคลือบผิวช่วยลดความพรุนและปิดช่องว่างบนผิวกระดาษดังภาพถ่ายจาก SEM (รูปที่ 6 และรูปที่ 7) และเวลาที่ใช้ในการทดสอบความพรุนของกระดาษหลังเคลือบผิวมีระยเวลานานกว่า 24 ชั่วโมง ซึ่งเป็นระยะเวลาที่นานกว่าตามมาตรฐาน TAPPI T460 ที่กำหนด คือ 3 ชั่วโมง

ตารางที่ 9 ความพรุนของกระดาษก่อนและหลังเคลือบผิวด้วยสารเคลือบไคโตซานและไคโตซานผสมสารเชื่อมขวางชนิดต่างๆ ที่อัตราส่วนต่างๆ

กระดาษก่อนและหลังเคลือบผิว		เวลา
Uncoated		18 second
Chitosan		> 24 hr
GA	0.5	> 24 hr
	1	> 24 hr
	1.5	> 24 hr
CA	0.5	> 24 hr
	1	> 24 hr
	1.5	> 24 hr
BTCA	0.5	> 24 hr
	1	> 24 hr
	1.5	> 24 hr

#### 4.9 ความต้านทานต่อแรงดึง (Tensile strength)

จากการทดสอบความต้านทานต่อแรงดึงของกระดาษก่อนและหลังเคลือบผิว พบว่ากระดาษหลังเคลือบผิวมีความต้านทานต่อแรงดึงเพิ่มขึ้น ดังรูปที่ 19 การเคลือบผิวไคโตซานส่งผลให้ได้ความต้านทานต่อแรงดึงเพิ่มขึ้นเป็น 258 N/15mm เมื่อเปรียบเทียบกับกระดาษก่อนเคลือบที่มีค่า 233 N/15mm สารเคลือบผิวผสมสารเชื่อมขวางกรดซิตริกและกรด BTCA ที่ทุกอัตราส่วนส่งผลให้กระดาษหลังเคลือบผิวมีความแข็งแรงต่อแรงดึงเพิ่มขึ้นกว่าชนิดกรดกลูตาริกและสารเคลือบไคโตซาน โดยค่าความต้านทานต่อแรงดึงสูงสุดพบในสารเชื่อมขวางชนิดซิตริกที่ร้อยละ 50 ซึ่งมีค่าที่ 322 N/15mm รองลงมาคือพบในสารเชื่อมขวางชนิด BTCA ที่ร้อยละ 50 ซึ่งมีค่า 310 N/15mm ซึ่งผลดังกล่าวแสดงให้เห็นถึงความแข็งแรงของโครงสร้างตาข่ายที่ได้จากกรดที่มีหมู่คาร์บอกซิลิกจำนวนมาก ส่งผลให้ปริมาณพันธะระหว่างหมู่ฟังก์ชันในเส้นใยและสารเคลือบผิวมีมากขึ้น เมื่อเติมปริมาณสารเชื่อมขวางสูงขึ้นที่ร้อยละ 100 และ 150 ส่งผลให้ความแข็งแรงต่อแรงดึงลดลงเล็กน้อย การเคลือบผิวกระดาษด้วยสารเคลือบผิวผสมสารเชื่อมขวางที่ปริมาณต่างๆ ส่งผลให้กระดาษมีความแข็งแรงต่อแรงดึงเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับกระดาษที่เคลือบผิวด้วยไคโตซาน ซึ่งผลดังกล่าวสอดคล้องกับผลการวิจัยอื่นที่พบว่า พอลิไคโตซานที่มีการเชื่อมขวางด้วยอัลดีไฮด์ในภาวะกรด มีสมบัติความต้านทานต่อแรงดึงสูงกว่า (93.8 MPa) พอลิไคโตซาน (70.3 MPa) ในขณะที่ร้อยละการยืด (elongation) ของฟิล์มที่มีการเชื่อมขวางลดลง (5.1%) เมื่อเทียบกับฟิล์มไคโตซาน (6.2%) [25] งานวิจัยของ Caulfield ที่ศึกษาการปรับปรุงสมบัติของกระดาษขณะเปียกด้วยการทำการเชื่อมขวางโดยใช้กรดคาร์บอกซิลิกที่มีหลายหมู่ฟังก์ชัน [12] คือ กรดซิตริกและกรด BTCA เติมที่ปริมาณ 4-10% ผลพบว่าการเชื่อมขวางส่งผลให้กระดาษมีสมบัติเชิงกลสูงขึ้น ความทนทานต่อแรงดึงเพิ่มขึ้นที่ 4% ทั้งในภาวะแห้ง (dry) และเปียก (wet) โดยมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 6.39 kN/m สำหรับกรด BTCA และ 5.26 kN/m สำหรับกรดซิตริกในภาวะแห้ง เมื่อเปรียบเทียบกับกระดาษก่อนเคลือบผิว 5.13 kN/m และในภาวะเปียกพบค่าที่ 2.84 kN/m (BTCA) และ 1.20 kN/m (ซิตริก) เมื่อเปรียบเทียบกับ 0.294 kN/m

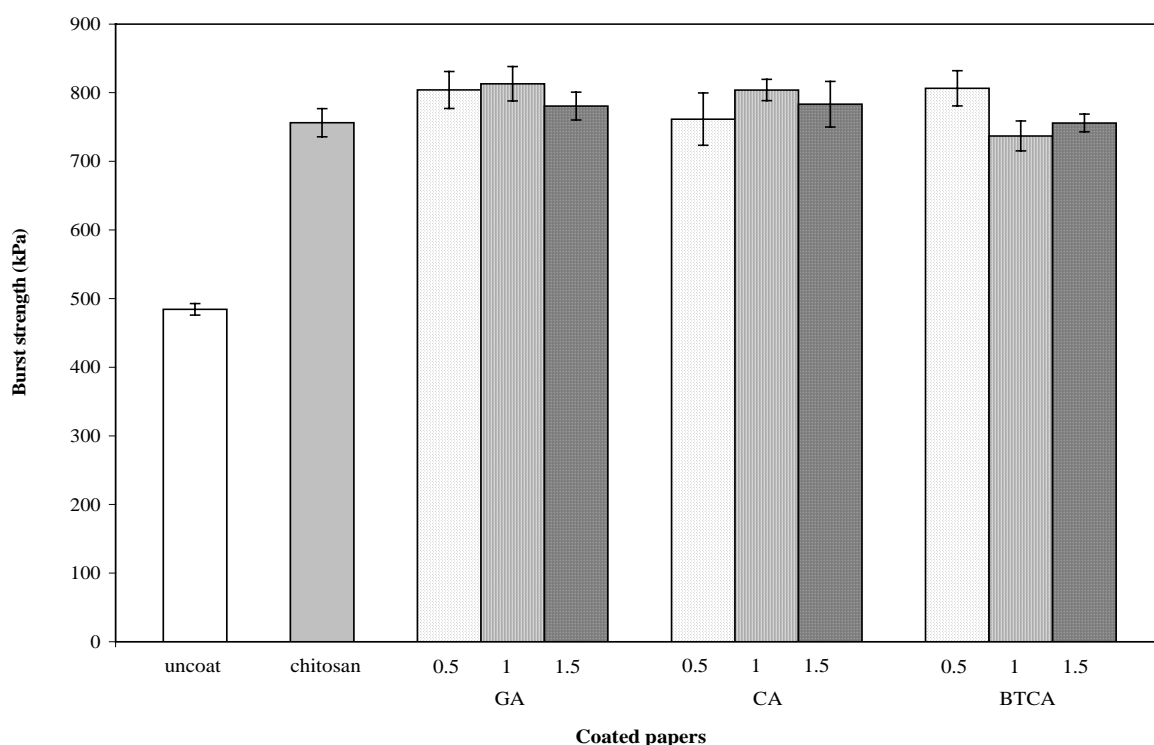


รูปที่ 19 ความต้านทานต่อแรงดึงของกระดาษก่อนและหลังเคลือบผิวด้วยสารเคลือบไคโตซาน และสารเคลือบไคโตซานผสมสารเชื่อมขวางชนิดต่างๆ และอัตราส่วนต่างๆ



#### 4.10 ความต้านทานต่อแรงดันทะลุ (Bursting strength)

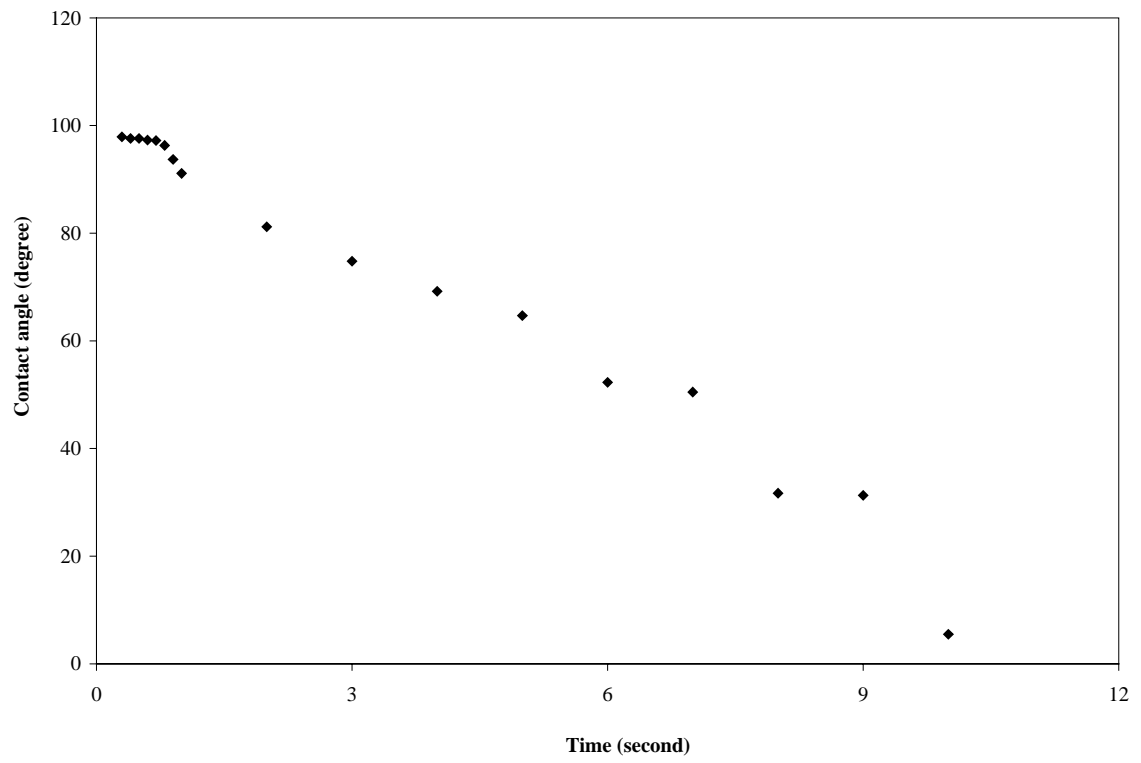
ผลการทดสอบความต้านทานต่อแรงดันทะลุของกระดาษก่อนและหลังเคลือบผิวแสดงในรูปที่ 20 พบว่าการเคลือบผิวส่งผลให้กระดาษมีความต้านทานต่อแรงดันทะลุเพิ่มขึ้น เมื่อเคลือบผิวด้วยไคโตซาน ค่าความต้านทานต่อแรงดันทะลุเพิ่มขึ้นประมาณ 1.6 เท่า (เพิ่มขึ้นจาก 484 kPa เป็น 756 kPa) เมื่อผสมสารเชื่อมขวางชนิดกลูตาริกและซิตริกส่งผลให้กระดาษเคลือบผิวมีความต้านทานต่อแรงดันทะลุเพิ่มสูงขึ้นในทุกอัตราส่วนเมื่อเทียบกับสารเคลือบไคโตซาน โดยค่าสูงสุดคือ 813 kPa (กรดกลูตาริก) และ 804 kPa (กรดซิตริก) ที่ร้อยละ 100 สารเชื่อมขวางชนิด BTCA ส่งผลให้ได้ความต้านทานต่อแรงดันทะลุสูงสุดที่ร้อยละ 50 ซึ่งมีค่า 806 kPa เมื่อเติม BTCA ในปริมาณสูงขึ้นส่งผลให้ความต้านทานต่อแรงดันทะลุลดต่ำลง ซึ่งผลดังกล่าวแสดงให้เห็นถึงชั้นฟิล์มสารเคลือบที่ได้จากสารเชื่อมขวางที่มีจำนวนหมู่คาร์บอกซิลิกต่ำกว่า (กรดกลูตาริกและกรดซิตริก) อาจมีระดับการเกิดการเชื่อมขวาง (degree of crosslink) ต่ำกว่าสารเชื่อมขวาง BTCA จึงส่งผลให้ได้ฟิล์มสารเคลือบมีความยืดหยุ่นดีกว่า จึงสามารถต้านทานต่อแรงดันทะลุได้ดีกว่า



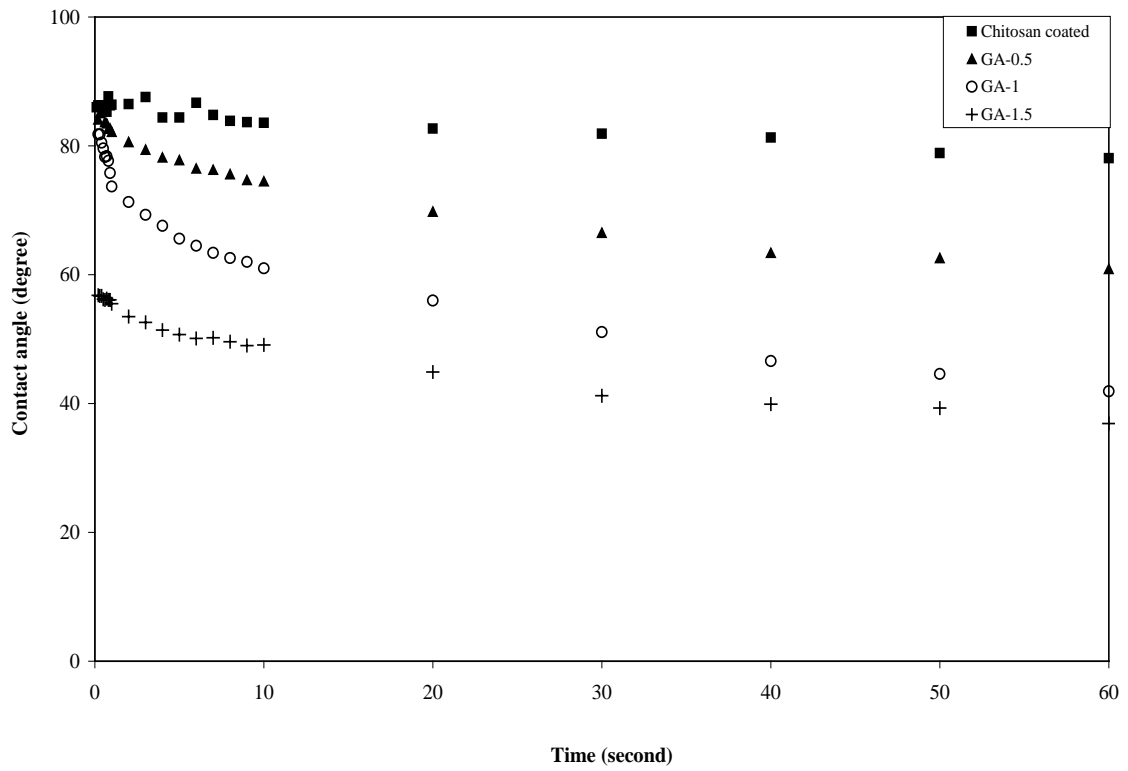
รูปที่ 20 ความต้านทานต่อแรงดันทะลุของกระดาษก่อนและหลังเคลือบผิวด้วยสารเคลือบไคโตซานและสารเคลือบไคโตซานผสมสารเชื่อมขวางชนิดต่างๆ และอัตราส่วนต่างๆ

#### 4.11 มุมสัมผัสของน้ำบนสารเคลือบผิว (Water contact angle)

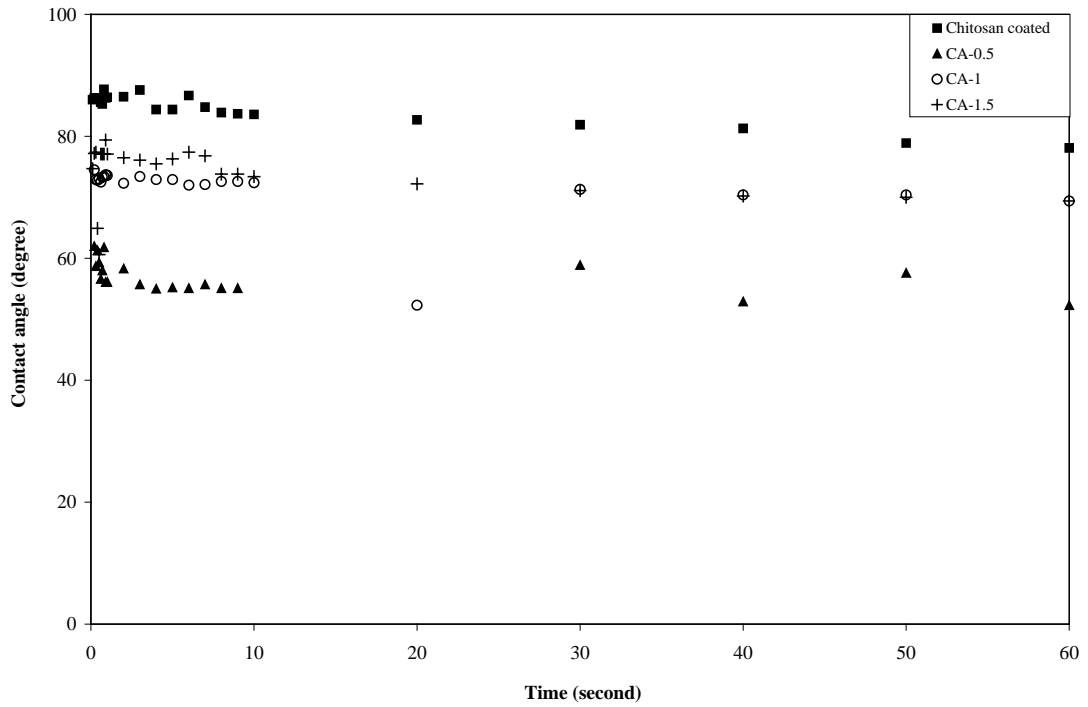
จากการทดสอบวัดมุมสัมผัสของน้ำบนกระดาษก่อนและหลังเคลือบผิว ทำการวัดมุมสัมผัสของหยดน้ำเป็นระยะเวลา 60 วินาที จากตารางที่ 10 กระดาษก่อนเคลือบผิวมีค่ามุมสัมผัสประมาณ 95 องศา และหยดน้ำซึมเข้าในกระดาษอย่างสมบูรณ์ภายใน 10 วินาที ดังรูปที่ 21 ซึ่งแสดงให้เห็นถึงสภาพความพรุนของกระดาษก่อนเคลือบผิว เมื่อเคลือบกระดาษด้วยไคโตซาน มุมสัมผัสมีค่าอยู่ในช่วง 86-78 องศา (รูปที่ 22) แสดงถึงสมบัติความไม่ชอบน้ำ (hydrophobic) ของไคโตซาน นอกจากนี้การเคลือบผิวส่งผลให้สามารถต้านทานการซึมของหยดน้ำเข้าในกระดาษ จะสังเกตได้จากค่ามุมสัมผัสที่มีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยภายใต้ระยะเวลาการทดสอบ 60 วินาที เมื่อเคลือบผิวด้วยไคโตซานผสมสารเชื่อมขวางชนิดต่างๆ ที่อัตราส่วนต่างๆ ผลที่ได้แสดงในรูปที่ 22-24 จะสังเกตเห็นว่าสารเชื่อมขวางให้ค่ามุมสัมผัสของน้ำบนผิวสารเคลือบมีค่าต่ำกว่าสารเคลือบไคโตซาน แสดงให้เห็นถึงสมบัติความชอบน้ำของสารเคลือบผิวผสมสารเชื่อมขวาง และค่ามุมสัมผัสมีแนวโน้มต่ำลงเมื่อปริมาณสารเชื่อมขวางมีเพิ่มขึ้น (พบในกรดกลูตาริก และกรด BTCA) ค่ามุมสัมผัสของสารเคลือบผสมกรดกลูตาริกพบอยู่ในช่วง 35-63 องศา (ตารางที่ 10) สารเคลือบผสมกรดซิตริกพบอยู่ในช่วง 50-71 องศา สารเคลือบผสมกรด BTCA พบอยู่ในช่วง 18-54 องศา ซึ่งเป็นค่ามุมสัมผัสต่ำสุด ภาพถ่ายของหยดน้ำบนผิวกระดาษก่อนและหลังเคลือบผิวที่เวลา 10 และ 60 วินาที แสดงในรูปที่ 25 และรูปที่ 26 ซึ่งแสดงถึงความสามารถในการกันซึมของกระดาษหลังเคลือบผิวโดยหยดน้ำยังปรากฏอยู่เมื่อเวลาผ่านไป 60 วินาที เมื่อเปรียบเทียบกับกระดาษที่ไม่มีการเคลือบผิว ซึ่งหยดน้ำจะซึมเข้าในเนื้อกระดาษอย่างสมบูรณ์ในระยะเวลาสั้น ซึ่งค่ามุมสัมผัสของกระดาษเคลือบที่มีค่าลดลง อาจเป็นผลเนื่องมาจากความชอบน้ำของโครงร่างตาข่ายในชั้นสารเคลือบ ส่งผลให้ผิวกระดาษมีความชอบน้ำเพิ่มขึ้น ค่ามุมสัมผัสของน้ำจึงต่ำลง ผลสอดคล้องกับผลงานวิจัยของ Tsai และ Wang [26] ที่ศึกษาสมบัติความชอบน้ำของเมมเบรนไคโตซานที่มีโครงร่างตาข่ายด้วยการเชื่อมขวางด้วยสารเชื่อมขวางที่มีหมู่ฟังก์ชัน 2 หมู่ คือ sulfosuccinic acid และ glutaraldehyde โดยค่ามุมสัมผัสลดลงจาก 84.54° เป็น 69.83°



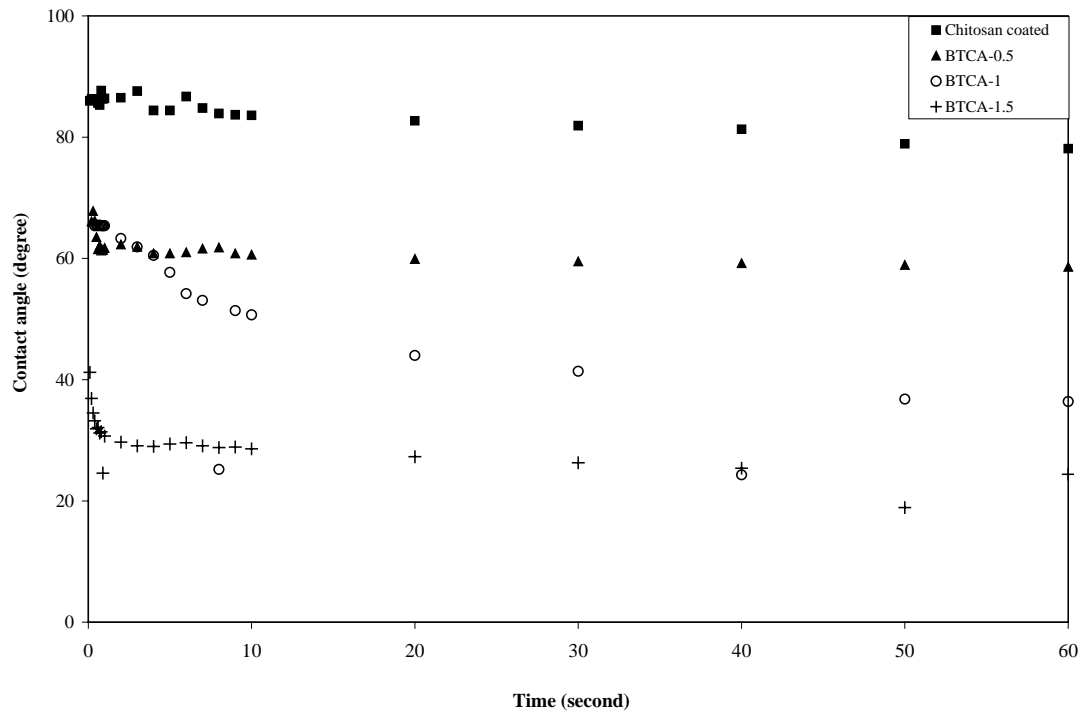
รูปที่ 21 มุมสัมผัสของน้ำบนกระดาษที่ไม่เคลือบผิว



รูปที่ 22 มุมสัมผัสของน้ำบนกระดาษที่เคลือบผิวด้วยสารเคลือบไคโตซานผสมสารเชื่อมขวางชนิด GA ที่อัตราส่วนต่างๆ



รูปที่ 23 มุมสัมผัสของน้ำบนกระดาษที่เคลือบผิวด้วยสารเคลือบไคโตซานผสมสารเชื่อมขวาง ชนิด CA ที่อัตราส่วนต่างๆ



รูปที่ 24 มุมสัมผัสของน้ำบนกระดาษที่เคลือบผิวด้วยสารเคลือบไคโตซานผสมสารเชื่อมขวางชนิด BTCA ที่อัตราส่วนต่างๆ

ตารางที่ 10 มุมสัมพัทธ์ของน้ำบนกระดาษที่เคลือบผิวด้วยสารเคลือบไคโตซานและไคโตซานผสมสารเชื่อมขวางชนิดต่างๆ ที่อัตราส่วนต่างๆ (ที่เวลา 60 วินาที)

สารเคลือบผิวผสมสารเชื่อมขวาง		มุมสัมพัทธ์ของน้ำ (องศา) ที่เวลา 60 วินาที
Chitosan		$78.3 \pm 3.0$
GA	0.5	$62.7 \pm 2.7$
	1	$45.8 \pm 2.6$
	1.5	$35.4 \pm 2.3$
CA	0.5	$49.7 \pm 3.7$
	1	$58.6 \pm 1.6$
	1.5	$70.7 \pm 3.1$
BTCA	0.5	$54.2 \pm 3.3$
	1	$34.4 \pm 1.5$
	1.5	$18.4 \pm 5.5$



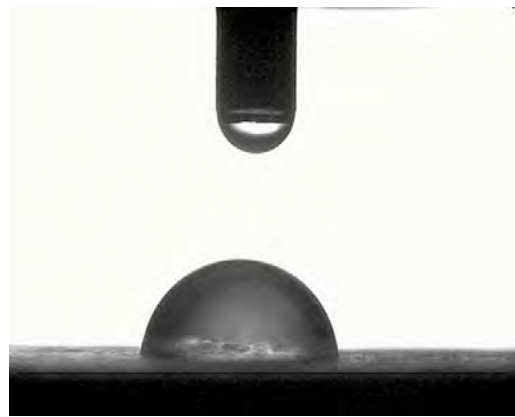
(1)



(2)



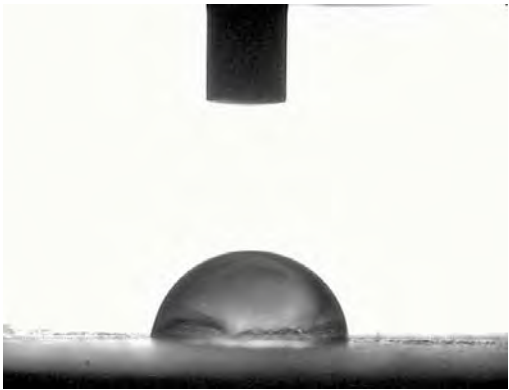
(3)



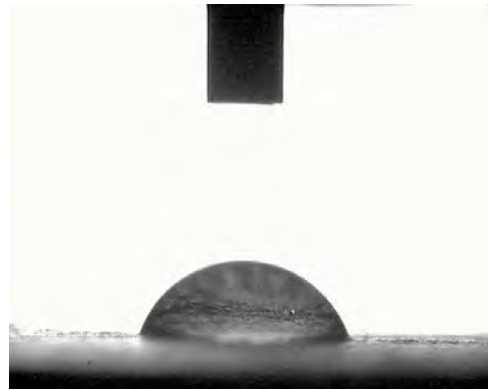
(4)

รูปที่ 25 ภาพถ่ายของมุมสัมผัสของน้ำบนผิวหน้าของกระดาษที่ไม่เคลือบผิว (1) ที่ 1 วินาที (2) ที่ 10 วินาที และกระดาษที่เคลือบผิวด้วยสารเคลือบไคโตซาน (3) ที่ 10 วินาที (4) ที่ 60 วินาที





(1)



(2)



(3)



(4)



(5)



(6)

รูปที่ 26 ภาพถ่ายของมุมสัมผัสของน้ำบนผิวหน้าของกระดาษที่เคลือบผิวด้วยสารเคลือบ  
ไคโตซานผสมสารเชื่อมขวาง (1) GA-0.5 ที่ 10 วินาที (2) GA-0.5 ที่ 60 วินาที (3) CA-0.5 ที่ 10  
วินาที (4) CA-0.5 ที่ 60 วินาที (5) BTCA-0.5 ที่ 10 วินาที (6) BTCA-0.5 ที่ 60 วินาที

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัย

การเคลือบผิวด้วยไคโตซานได้นำน้ำหนักสารเคลือบ 7 กรัม/ตร.ม. ในขณะที่สารเคลือบผสมสารเชื่อมขวางชนิดต่างๆ ที่ปริมาณร้อยละ 50, 100, 150 ส่งผลให้ได้น้ำหนักสารเคลือบสูงขึ้นได้น้ำหนักสารเคลือบอยู่ในช่วงประมาณ 14 -28 กรัม/ตร.ม. (กรดกลูตาริก) 28-30 กรัม/ตร.ม. (กรดซิตริก) และ 37-44 กรัม/ตร.ม. (กรด BTCA) เมื่อเคลือบผิวด้วยสารเคลือบผสมสารเชื่อมขวางส่งผลให้ได้รับความหนาของชั้นสารเคลือบเพิ่มขึ้น ซึ่งความหนาของชั้นสารเคลือบเพิ่มขึ้นตามปริมาณของสารเชื่อมขวางและชนิดของสารเชื่อมขวาง สารเคลือบผสมกรดกลูตาริกได้รับความหนาอยู่ในช่วงประมาณ 5-15 ไมครอน สารเคลือบผสมกรดซิตริกได้รับความหนาอยู่ในช่วงประมาณ 10-20 ไมครอน และสารเคลือบผสมกรด BTCA ได้รับความหนาอยู่ในช่วงประมาณ 10-15 ไมครอน เมื่อเคลือบผิวด้วยสารเคลือบไคโตซาน ส่งผลให้ค่าความขาวสว่างของกระดาษมีค่าต่ำลง เมื่อผสมสารเชื่อมขวาง พบว่ากรดกลูตาริกส่งผลให้ค่าความขาวสว่างของกระดาษลดต่ำลงสุดโดยมีค่าต่ำสุดที่ปริมาณการเติมที่ร้อยละ 150 ในขณะที่ความเรียบของกระดาษเคลือบผสมกรดกลูตาริกมีความเรียบสูงกว่าชนิดซิตริกและ BTCA กระดาษหลังเคลือบผิวมีความมันวาวสูงขึ้น โดยค่าความมันวาวสูงสุดของกระดาษได้จากการเคลือบผิวผสมกรด BTCA การดูดซึมน้ำของสารเคลือบผสมสารเชื่อมขวางส่งผลให้ความต้านทานการดูดซึมน้ำเข้าในกระดาษได้ดีขึ้นมาก โดยเฉพาะที่ปริมาณการเติมสารเชื่อมขวางที่ร้อยละ 50 ของสารเชื่อมขวางทุกชนิด ส่งผลให้กระดาษมีการดูดซึมน้ำลดต่ำลงสุด โดยสารเคลือบผสมกรด BTCA ได้ค่าการดูดซึมน้ำต่ำที่สุด เมื่อเพิ่มปริมาณของสารเชื่อมขวางสูงขึ้นที่ร้อยละ 100 และ 150 ส่งผลให้การดูดซึมน้ำของกระดาษหลังเคลือบผิวมีเพิ่มขึ้น สารเคลือบผิวสามารถกั้นขวางการซึมผ่านของอากาศได้ในระดับดีมาก สารเคลือบผิวผสมสารเชื่อมขวางกรดซิตริกและกรด BTCA ที่ทุกอัตราส่วนส่งผลให้กระดาษหลังเคลือบผิวมีความแข็งแรงต่อแรงดึงเพิ่มขึ้น โดยค่าความต้านทานต่อแรงดึงสูงสุดพบในสารเชื่อมขวางชนิดซิตริกที่ร้อยละ 50 กระดาษหลังเคลือบผิวมีความต้านทานต่อแรงดันทะลุเพิ่มขึ้นที่ปริมาณการเติมที่ร้อยละ 50 และ 100 โดยค่าสูงสุดได้จากสารเคลือบผิวผสมกรดกลูตาริก สมบัติผิวหน้าของสารเคลือบผิวผสมสารเชื่อมขวางมีความชอบน้ำมากขึ้น ค่ามุมสัมผัสของน้ำที่มีค่าลดลงตามปริมาณของสารเชื่อมขวางที่เพิ่มขึ้น สารเชื่อมขวางชนิด BTCA ส่งผลให้ค่ามุมสัมผัสลดลงต่ำสุด

### ข้อเสนอแนะ

1. ศึกษาสมบัติการยึดติดของสารเคลือบบนผิวกระดาษ
2. ศึกษาคุณภาพการพิมพ์กระดาษหลังเคลือบผิว

### เอกสารอ้างอิง

1. “ไคติน-ไคโตซาน”, available from: <http://www.gpo.or.th> [September 4, 2008].
2. “Chitosan”, available from: <http://www.ecovett.com>, [September 4, 2008].
3. “Chitosan Synthese”, available from: <http://commons.wikimedia.org>, [September 4, 2008].
4. รัตเกล้า ภูติวรรณถ. การทำให้เกิดโครงร่างตาข่ายของแผ่นฟิล์มไคโตแซนโดยการใส่กลูตารัลดีไฮด์เป็นสารช่วยในการเกิดโครงร่างตาข่าย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวัสดุศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2539
5. ภาวดี เมธะคานนท์, อสิรา เฟื่องฟูชาติ และกิ่งเกียรติ คงสุวรรณ. ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับไคติน-ไคโตซาน. ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ. 2544
6. สมเจตน์ โสวัจจิสตาทกุล. การดัดแปรไคติน/ไคโตซานเพื่อควบคุมความชอบน้ำและไม่ชอบน้ำ. โครงการการเรียนการสอนเพื่อเสริมประสบการณ์ ภาควิชาเคมี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2545.
7. ชมรมไคติน-ไคโตซาน และศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ. เกษตรยุคใหม่กับไคติน-ไคโตซาน. 2543
8. “Vulcanization” available from: <http://www.physicsdaily.com> [April 7, 2010].
9. Kjellgren H., Gallstedt M., Engstrom G., Jarnstrom L., Barrier and surface properties of chitosan-coated greaseproof paper, Carbohyd Polym (2006) 65: 453-460.
10. Kuusipalo J., Kaunisto M., Laine A., and Kellomaki M., Chitosan as a coating additive in paper and paperboard, Tappi J (2005) 4(8): 17-21.
11. Kjellgren H. and Engstrom G., Influence of base paper on the barrier properties of chitosan-coated papers, Nord Pulp Pap Res J (2006) 21(5): 685-689.
12. Caulfield D.F., Ester crosslinking to improve wet performance of paper using multifunctional carboxylic acids, butanetetracarboxylic and citric acid, Tappi J (1994) 77 (3): 205-212.
13. Coma V., Sebti I., Pardon P., F.H. and Deschamps A., Film properties from crosslinking of cellulosic derivatives with a polyfunctional carboxylic acid, Carbohyd Polym (2003) 51: 265-271.
14. Teruo N., Yumiko N., Yuezhen B., Masaru M., Biodegradation characteristics of chitin and chitosan films, Journal of Home Economics of Japan (2005) 56: 889-897.
15. Scott E. W., Properties of paper, Atlanta: Tappi press, 2000.

16. อัจฉรา เติมโชค และ สอนงเอกสิทธิ์. Sampling Techniques. [Online]. Available from: <http://www.gjr.at-website.com> [April 1, 2010]
17. ปิยะพร ความภิรภาพพันธ์. การเตรียมฟิล์มนาโนคอมโพสิตของแป้งมันสำหรั่ง/มอนต์มอริลไลต์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท สาขาวิชาวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ประยุกต์และเทคโนโลยีสิ่งทอ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2546
18. Vårum K.M., Ottøy M.H., Smidsrød O., Acid hydrolysis of chitosans, *Carbohydr Polym* (2001) 46: 89-98.
19. Bégin A., and Calsteren M.R, Antimicrobial films produced from chitosan, *Int J Biol Macromol* (1999) 26: 63-67.
20. Hsieh S-H., Huang Z.K., Huang Z.Z., and Tseng Z.S., Antimicrobial and physical properties of woolen fabrics cured with citric acid and chitosan, *J Appl Polym Sci* (2004) 94: 1999-2007.
21. Oh S.Y., Yoo D.I., Shin Y., and Seo G., FTIR analysis of cellulose treated with sodium hydroxide and carbon dioxide, *Carbohydr Res* (2005) 340: 417-428.
22. Dong Y., Xu C., Wang J., Wang M., Wu Y., and Ruan Y., Determination of degree of substitution for N-acylated chitosan using IR spectra, *Sci China Ser B* (2001) 44: 216-224.
23. Hsieh S.H., Lin E.S., and Wei H.C., Effect of chitosan addition to BTCA/CA processed cotton fabrics for adsorbing metallic ions from waste water, *J Appl Polym Sci* (2006) 101: 3264-3269.
24. Reis A.B., Yoshida C.M.P., Reis A.P.C., and Franco T.T., Application of chitosan emulsion as a coating on Kraft paper, *Polym Int* (2011) 60: 963-969.
25. Kittur F.S., Kumar K.R., Tharanathan R.N., Functional packaging properties of chitosan films, *Z lebensm Unters Forsch A* (1998) 206: 44-47.
26. Tsai, H-S, and Wang, Y-Z. Properties of hydrophilic chitosan network membranes by introducing binary crosslinking agents, *Polym Bull* (2008) 60: 103-113.