

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

**สมบัติของฟิล์มเตรียมจากแป้งมันสำปะหลังผสมกับ
ซีเอ็มซีและนาโนซิงค์ออกไซด์**

**Properties of films prepared from cassava starch blend with
carboxymethyl cellulose and nano ZnO**



T117348

จิราพร เกรือยังยืน
ณัฐชา กลั่นทรัพย์
วิลาสินี ปลาทอง

เลขที่.....
เลขทะเบียน 117348
ในเดือน,ปี 20 ก.ค. 2554

b. 12340601
i.

**โครงการนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต
สาขาเคมีอุตสาหกรรม
คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2553**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**Properties of films prepared from cassava starch blend with
carboxymethyl cellulose and nano ZnO**



**A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF BACHELOR OF SCIENCE
IN INDUSTRIAL CHEMISTRY
FACULTY OF SCIENCE
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
ACADEMIC YEAR 2010**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ สมบัติของฟิล์มเตรียมจากแป้งมันสำปะหลังผสมซีเอ็มซีและนาโนซิงค์ออกไซด์
ชื่อนักศึกษา นางสาวจิราพร เครือยั้งยืน
นางสาวณัฐชา กลั่นทรัพย์
นางสาววิลาสินี ปลาทอง
ปริญญา วิทยาศาสตร์บัณฑิต
สาขาวิชา เคมีอุตสาหกรรม
อาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร.มาลินี ชัยศุกกิจสินธุ์

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อนุมัติให้โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาเคมีอุตสาหกรรม ประจำปีการศึกษา 2553

คณะกรรมการสอบ	ลายมือชื่อ
ดร.อำนาจ เพิ่มทรัพย์สกุล	
ดร.ปานไพลิน สีหาราช	
รศ.ดร.มาลินี ชัยศุกกิจสินธุ์	

ลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ สมบัติของฟิล์มเตรียมจากแป้งมันสำปะหลังผสมซีเอ็มซี และนาโนซิงค์ออกไซด์

ชื่อนักศึกษา นางสาวจิราพร เครือยั่งยืน
นางสาวณัฐชา กลั่นทรัพย์
นางสาววิลาสินี ปลาทอง

ปริญญา วิทยาศาสตร์บัณฑิต

สาขาวิชา เคมีอุตสาหกรรม

อาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร.มาลินี ชัยศุกกิจสินธุ์

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เตรียมไฮโดรเจลฟิล์มจากแป้งมันสำปะหลัง คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส (CMC) และ นาโนซิงค์ออกไซด์ใช้กอลลีเซอรินเป็นพลาสติกไซเซออร์ ศึกษาอัตราส่วนของแป้งมันสำปะหลัง:CMC (5:5 และ 3:7) และปริมาณ nano ZnO (0.5 และ 1กรัม) ขึ้นรูปฟิล์มด้วยเครื่องอัดขึ้นรูป ที่อุณหภูมิ 140 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 นาที จาก XRD พบว่า nano ZnO ครอบคลุมการเกิดผลึกของแป้ง และ CMC ทำหน้าที่เสริมแรง ความแข็งแรงและความทนแรงดึงสูงขึ้น สันฐานวิทยาวิเคราะห์ด้วย SEM พบว่า nano ZnO 0.5 กรัม กระจายตัวในฟิล์มได้ดีทำให้ฟิล์มมีผิวเรียบ จากการศึกษาพบว่า อัตราส่วน แป้ง:CMC:nano ZnO ที่ 5:5:0.5 ให้ฟิล์มสมบัติเชิงกล และกายภาพดีที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Title	Properties of films prepared form cassava starch blend with carboxymethylcellulose and nano ZnO
Students	Miss Jiraporn Kruayangyuen Miss Nuttacha Klunsap Miss Wilasinee Platong
Degree	Bachelor of Science
Major Program	Industrial Chemistry
Academic Year	2010
Advisor	Assoc.Prof.Dr. Malinee Chaisupakitsin

ABSTRACT

This research aims to make a hydrogel film from cassava starch, carboxymethylcellulose (CMC) and nano ZnO particle. Glycerol was used as a plasticizer. The effect of cassava starch to CMC ratios, (5:5 and 3:7) and the amount of nano ZnO (0.5 and 1g) were studied. The mixtures were compressed in the mold at 140 °C for 5 min. by using compression molding. XRD patterns showed that nano ZnO distributed the crystallinity of starch and CMC as well as reinforced the film. Hardness and Tensile strength were increased. Morphology analysis by SEM found that nano ZnO 0.5g provided well distributed in the film leading to smooth surface. Film contained starch: CMC: ZnO 5:5:0.5 provided both the best mechanical and physical properties.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษฉบับนี้สามารถสำเร็จได้นั้นมาจากการสนับสนุนทางด้านต่างๆจากหลายๆ ส่วน ขอขอบพระคุณ รศ.ดร.มาลินี ชัยศุกกิจสินธุ์ อาจารย์ที่ปรึกษา และดร.อำนาจ เพิ่มทรัพย์สกุล ดร.ปานไพลิน สีหาราช ที่คอยแนะนำให้คำปรึกษาในเรื่องต่างๆ ตลอดจนอาจารย์ทุกท่านที่ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ซึ่งทำให้พวกเราสามารถทำงานจนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

นอกจากนี้ขอขอบพระคุณ พี่นักวิทยาศาสตร์ที่คอยอำนวยความสะดวกเกี่ยวกับอุปกรณ์ และเครื่องมือวัดภายในห้องปฏิบัติการ ตลอดจนเจ้าหน้าที่ทุกๆฝ่ายที่เกี่ยวข้อง ขอขอบคุณ ผองเพื่อนทุกคนที่เป็นกำลังใจและให้คำปรึกษา

ท้ายที่สุดนี้ บุคคลที่สำคัญที่สุดที่มีอาจลืมได้ก็คือ บิดามารดาที่ให้กำเนิด เลี้ยงดูและอุปถัมภ์ มาโดยตลอด จนทำให้โครงการพิเศษนี้สำเร็จลุล่วงได้ ต้องกราบขอบพระคุณท่านด้วยความเคารพ สูงสุด

คณะผู้จัดทำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อโครงการพิเศษภาษาไทย	I
บทคัดย่อโครงการพิเศษภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	VI
สารบัญรูปภาพ	VII
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความเป็นมาของโครงการ	1
1.2 วัตถุประสงค์	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ	
2.1 แป้ง	3
2.2 แป้งมันสำปะหลัง	12
2.3 การย่อยสลายของแป้ง	15
2.4 การนำแป้งมาทำเป็นเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช	16
2.5 ก्लीเซอรอล	18
2.6 คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส	23
2.7 สังกะสี	24
2.8 ซิงค์ออกไซด์	39
2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	50
บทที่ 3 การดำเนินงานวิจัย	
3.1 เครื่องมือ อุปกรณ์ และสารเคมี	54
3.2 วิธีการทดลอง	55
3.2.1 การเตรียมแผ่นฟิล์ม	56
3.3 การทดสอบสมบัติของแผ่นฟิล์ม	56
3.3.1 การตรวจสอบห่มฟังก์ชัน	56
3.3.2 การตรวจสอบความเป็นผลึก	56

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีเหตุดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.3.3 การทดสอบสมบัติเชิงกล	57
3.3.4 การทดสอบสมบัติทางกายภาพ	58
3.3.5 สมบัติทางความร้อน	58
3.3.6 การทดสอบสมบัติทางสัณฐานวิทยา	58
บทที่ 4 ผลการทดลอง	
4.1 การตรวจสอบหมู่ฟังก์ชัน	59
4.2 การตรวจสอบความเป็นผลึก	68
4.3 สมบัติเชิงกล	70
4.2.1 การทดสอบความแข็งกด	70
4.2.2 การทดสอบความแข็งแรงดึง	72
4.4 สมบัติทางกายภาพ	73
4.4.1 การทดสอบการบวมน้ำ	73
4.4.2 การทดสอบความคงตัวในกรดและด่าง	76
4.5 สมบัติทางความร้อน	82
4.5.1 Thermogravimetric Analysis (TGA)	82
4.6 สัณฐานวิทยา	84
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	
5.1 สรุปผลการทดลอง	86
5.2 ข้อเสนอแนะ	87
เอกสารอ้างอิง	89
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก	92
ภาคผนวก ข	95
ภาคผนวก ค	100
ภาคผนวก ง	102
ภาคผนวก จ	103
ภาคผนวก ฉ	109
ภาคผนวก ช	116

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 ปริมาณของอะไมโลสในแป้งชนิดต่างๆ	5
ตารางที่ 2.2 สมบัติที่แตกต่างกันของอะไมโลสและอะไมโลเพคติน	6
ตารางที่ 2.3 องค์ประกอบทางเคมีของหัวมันสำปะหลังสดและแห้ง	12
ตารางที่ 2.4 สมบัติทางกายภาพของแป้งมันสำปะหลัง	14
ตารางที่ 2.5 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันไอกับอุณหภูมิของกลีเซอรอล	20
ตารางที่ 2.6 สมบัติทางกายภาพของกลีเซอรอล	21
ตารางที่ 2.7 สมบัติทางฟิสิกส์และเคมีของซิงค์ออกไซด์ในอุตสาหกรรม (JIS K 1410-1962)	42
ตารางที่ 3.1 การเตรียมเทอร์โมพลาสติกสตาบิลไรเซอร์จากแป้งมันสำปะหลังสูตรต่างๆ	55
ตารางที่ 3.2 มาตรฐานที่ใช้ในการทดสอบสมบัติเชิงกลของ เทอร์โมพลาสติกสตาบิลไรเซอร์ที่เตรียมได้	57
ตารางที่ 4.1 อัตราส่วนผสมของฟิล์มจากแป้งมันสำปะหลัง และ CMC	59
ตารางที่ 4.2 ค่าอุณหภูมิเริ่มสลายตัวของผงแป้งมันสำปะหลังและผง CMC ตามลำดับ	82
ตารางที่ 4.3 แสดงค่าอุณหภูมิเริ่มการสลายตัวของแผ่นฟิล์มตัวอย่าง	82
ตาราง แสดงสมบัติเชิงกลของฟิล์มแป้งมันสำปะหลัง และ CMC	102
ตาราง แสดงการคงตัวในน้ำ	103
ตาราง แสดงการคงตัวในกรดและด่าง	104
ตาราง แสดงการละลายน้ำ, กรดและด่าง	106
ตาราง แสดงค่าอุณหภูมิการสลายตัวของแผ่นฟิล์มตัวอย่าง	109

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพ

	หน้า
รูปที่ 2.1 โครงสร้างของอะไมโลส	4
รูปที่ 2.2 โครงสร้างของอะไมโลเพคติน	5
รูปที่ 2.3 การพองตัวของเม็ดแป้ง	7
รูปที่ 2.4 (ก) การคั่นตัวของแป้ง	9
รูปที่ 2.4 (ข) การคั่นตัวของแป้ง	10
รูปที่ 2.5 การเปลี่ยนแปลงความหนืดของแป้งเมื่อให้ความร้อน	11
รูปที่ 2.6 โครงสร้างกลีเซอรอล	18
รูปที่ 2.7 โครงสร้างเคมีของ Carboxymethylcellulose (CMC)	23
รูปที่ 4.1 แสดงสเปกตรัม IR ของแป้งมันสำปะหลัง	61
รูปที่ 4.2 แสดงสเปกตรัม IR ของ CMC	61
รูปที่ 4.3 แสดงสเปกตรัม IR ของกลีเซอรอล	62
รูปที่ 4.4 แสดงสเปกตรัม IR ของ nano ZnO	62
รูปที่ 4.5 แสดงสเปกตรัม IR ของฟิล์มแป้งมันสำปะหลัง:CMC (5:5) ผสมน้ำร้อน กลีเซอรอล และ nano ZnO ที่อัตราส่วนต่างๆ โดยสูตรที่ 7, สูตรที่ 8 และสูตรที่ 9	64
รูปที่ 4.6 แสดงสเปกตรัม IR ของฟิล์มแป้งมันสำปะหลัง:CMC (3:7) ผสมน้ำร้อน กลีเซอรอล และ nano ZnO ที่อัตราส่วนต่างๆ โดยสูตรที่ 10, สูตรที่ 11 และสูตรที่ 12	65
รูปที่ 4.7 แสดงสเปกตรัม IR ของฟิล์มแป้งมันสำปะหลัง:CMC (0:10) ผสมน้ำร้อน กลีเซอรอล และ nano ZnO ที่อัตราส่วนต่างๆ โดยสูตรที่ 13, สูตรที่ 14 และสูตรที่ 15	66
รูปที่ 4.8 แสดง pattern ของแป้งมันสำปะหลัง ที่มุม 2-Theta 10-70 องศา	68
รูปที่ 4.9 แสดง pattern ของ CMC ที่มุม 2-Theta 5-70 องศา	68
รูปที่ 4.10 แสดง pattern ของ nano ZnO ที่มุม 2-Theta 5-80 องศา	68
รูปที่ 4.11 แสดง pattern แป้งมันสำปะหลังผสม CMC ในอัตราส่วน 1:1 กรัม ที่มุม 2-Theta 5-80 องศา	69
รูปที่ 4.12 แสดง pattern ของแผ่นฟิล์มแป้งมันสำปะหลัง:CMC เป็น 5:5 มี nano ZnO เป็น 0.5 กรัม ซึ่งเป็นสูตรที่มีสมบัติเชิงกลและกายภาพโดยรวมดีที่สุด	69
รูปที่ 4.13 กราฟแสดงค่าความแข็งกดของแผ่นฟิล์มสูตร 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14 และ 15	70

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.14 กราฟแสดงค่าความแข็งแรงดึงของแผ่นฟิล์มสูตร 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14 และ 15	72
รูปที่ 4.15 กราฟแสดงค่าการบวมน้ำของฟิล์มสูตร 7, 8 และ 9 กับเวลาที่แช่น้ำตั้งแต่ 1-6 ชั่วโมง	73
รูปที่ 4.16 กราฟแสดงค่าการบวมน้ำของฟิล์มสูตร 10, 11 และ 12 กับเวลาที่แช่น้ำตั้งแต่ 1-6 ชั่วโมง	74
รูปที่ 4.17 กราฟแสดงค่าการบวมน้ำของฟิล์มสูตร 13, 14 และ 15 กับเวลาที่แช่น้ำตั้งแต่ 1-6 ชั่วโมง	75
รูปที่ 4.18 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการทดสอบค่าการบวมตัวในกรดของฟิล์มสูตร 7, 8 และ 9 กับเวลาที่แช่ตั้งแต่ 1-6 ชั่วโมง	76
รูปที่ 4.19 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการทดสอบค่าการบวมตัวในกรดของฟิล์มสูตร 10, 11 และ 12 กับเวลาที่แช่ตั้งแต่ 1-6 ชั่วโมง	77
รูปที่ 4.20 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการทดสอบค่าการบวมตัวในกรดของฟิล์มสูตร 13, 14 และ 15 กับเวลาที่แช่ตั้งแต่ 1-6 ชั่วโมง	78
รูปที่ 4.21 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการทดสอบค่าการบวมตัวในด่างของฟิล์มสูตร 7, 8 และ 9 กับเวลาที่แช่น้ำตั้งแต่ 1-6 ชั่วโมง	79
รูปที่ 4.22 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการทดสอบค่าการบวมตัวในด่างของฟิล์มสูตร 10, 11 และ 12 กับเวลาที่แช่น้ำตั้งแต่ 1-6 ชั่วโมง	80
รูปที่ 4.23 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการทดสอบค่าการบวมตัวในด่างของฟิล์มสูตร 13, 14 และ 15 กับเวลาที่แช่น้ำตั้งแต่ 1-6 ชั่วโมง	81
รูปที่ 4.24 แสดงสัณฐานวิทยาของฟิล์มแป้งมันสำปะหลัง:CMC (5:5) ด้วยกำลังขยาย 300 เท่า (ก) สูตร 7 (ข) สูตร 8 และ (ค) สูตร 9	84
รูปแสดงสัณนิษฐานการเชื่อมโยง	88
รูปแสดงลักษณะชิ้นงานที่ได้ แป้งมันสำปะหลัง CMC และ nano ZnO ในอัตราส่วนต่างๆ	92
รูปแสดงการวิเคราะห์ด้วยอินฟราเรดสเปกโทรสโกปีของสูตรต่างๆ	95
รูปแสดง pattern ของผงแป้งมันสำปะหลัง ที่มุม 2-Theta 10-70 องศา	100
รูปแสดง pattern ของ nano ZnO ที่มุม 2-Theta 5-80 องศา นั้น ไม่นูนญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ 100% การค้า	100
ไม่ว่า รูปแสดง pattern ของ CMC ที่มุม 2-Theta 5-70 องศา ซึ่งอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการน 100% ใช้	100

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

	หน้า
รูปแสดง pattern แป้งมันสำปะหลังผสม CMC อัตราส่วน 1:1 กรัม ที่มุม 2-Theta 5-80 องศา	101
รูปแสดง pattern ของแผ่นฟิล์มแป้งมันสำปะหลัง ผสม CMC และ nano ZnO ที่มุม 2-Theta 5-80 องศา (สูตรที่ 8)	101
รูปแสดงการละลายน้ำ กรด และเบส	107
รูปการทดสอบสมบัติทางความร้อน แป้งมันสำปะหลัง	109
รูปการทดสอบสมบัติทางความร้อน CMC	110
รูปการทดสอบสมบัติทางความร้อนของแป้งมันสำปะหลังผสม nano ZnO	110
รูปการทดสอบสมบัติทางความร้อน สูตร 7	111
รูปการทดสอบสมบัติทางความร้อน สูตร 8	111
รูปการทดสอบสมบัติทางความร้อน สูตร 9	112
รูปการทดสอบสมบัติทางความร้อน สูตร 10	112
รูปการทดสอบสมบัติทางความร้อน สูตร 11	113
รูปการทดสอบสมบัติทางความร้อน สูตร 12	113
รูปการทดสอบสมบัติทางความร้อน สูตร 13	114
รูปการทดสอบสมบัติทางความร้อน สูตร 14	114
รูปการทดสอบสมบัติทางความร้อน สูตร 15	115
รูปแสดงสัณฐานวิทยา (พื้นผิวด้านหน้า) ของฟิล์มสูตร 7 ที่กำลังขยาย 300 เท่า	116
รูปแสดงสัณฐานวิทยา (พื้นผิวด้านหน้า) ของฟิล์มสูตร 8 ที่กำลังขยาย 300 เท่า	116
รูปแสดงสัณฐานวิทยา (พื้นผิวด้านหน้า) ของฟิล์มสูตร 9 ที่กำลังขยาย 300 เท่า	116

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาของโครงการพิเศษ

ในปัจจุบันปัญหาสภาวะโลกร้อนเริ่มส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมอย่างรุนแรงยิ่งขึ้น ปัญหาส่วนหนึ่งเป็นผลจาก บรรจุภัณฑ์พลาสติกมีปริมาณการใช้งานเพิ่มขึ้นในอัตราสูงกว่าบรรจุภัณฑ์ที่ทำจากวัสดุอื่น เช่น กระดาษ โลหะ และแก้ว ทั้งนี้เนื่องจากพลาสติกมีความทนทาน ทนการกัดกร่อนต่อสารเคมี และน้ำมัน ได้ ทำให้ปริมาณขยะที่เกิดจากพลาสติกจึงสูงขึ้น การลดภาระการจัดการของเสียที่เป็นพลาสติก หรือขยะพลาสติกที่ย่อยสลายได้ยาก โดยการนำมาใช้ซ้ำ (Reuse) การหมุนเวียนกลับมาใช้ใหม่ (Recycle) หรือการลดปริมาณการใช้ (Reduce) ดังนั้นการนำวัสดุที่สามารถย่อยสลายได้ง่ายเข้ามาทดแทนสามารถลดปัญหาได้ในระดับหนึ่ง

ความสนใจในการพัฒนาผลิตภัณฑ์พลาสติกที่สามารถย่อยสลายได้เกิดขึ้นมาอย่างต่อเนื่อง ผลิตภัณฑ์หนึ่งที่ได้รับ ความสนใจเป็นอย่างมาก คือ แป้ง (Starch) ซึ่งแป้งเป็นพอลิแซคคาไรด์ที่ได้มาจากผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรที่มีความสำคัญ และมีจำนวนการใช้งานมากในอุตสาหกรรม เช่น เป็นสารเพิ่มเนื้อ และกาว เนื่องจากแป้งเป็นวัสดุที่ราคาถูก หาง่าย และย่อยสลายได้ตามธรรมชาติ

ประเทศไทยเป็นประเทศที่ส่งออกผลิตภัณฑ์มันสำปะหลังมากที่สุดในโลก แป้งมันสำปะหลังเป็นผลิตภัณฑ์แรกที่มีสถิติการส่งออกตั้งแต่ พ.ศ. 2493 ในปัจจุบันในแต่ละปีประเทศไทยผลิตแป้งมันสำปะหลังประมาณ 2 ล้านตัน โดยใช้หัวมันสำปะหลังสดประมาณ 9-10 ล้านตัน ประมาณครึ่งหนึ่งของแป้งมันสำปะหลังที่ผลิตใช้ในประเทศไทย และที่เหลือสำหรับส่งออก การใช้แป้งมันสำปะหลังที่มากที่สุดคือ การบริโภคในครัวเรือน กล่าวคือ คนไทยบริโภคแป้งมันสำปะหลังประมาณ 7 กิโลกรัมต่อปี [3] ซึ่งแป้งมันสำปะหลังมีคุณสมบัติที่พิเศษคือ มีความขาวมันวาว เมื่อผสมน้ำและให้ความร้อนจะเหนียวเป็นกาวใส ไม่มีสี จึงเหมาะสมมากเมื่อนำไปใช้ประโยชน์

ในโครงการวิจัยนี้จึงเลือกที่จะศึกษาเกี่ยวกับสมบัติของฟิล์มที่เตรียมได้จากแป้งมันสำปะหลังผสมกับ CMC และ nano ZnO เนื่องจากแป้งเป็นพอลิเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง ซึ่งประกอบด้วยส่วนที่มีโครงสร้างโซ่เชิงเส้น เรียกว่า Amylose และส่วนที่เป็นกิ่งสาขา เรียกว่า Amylopectin แป้งที่มาจากแหล่งต่างกัันมี Amylose/ Amylopectin ต่างกัน ฟิล์มจากแป้งมันสำปะหลังมีสมบัติโค้งงอได้ดี ฟิล์มจากแป้งจะกรอบแตกต่างจากฟิล์มของพอลิเมอร์สังเคราะห์ ซึ่งต้องการพลาสติกไซเซอร์ ซึ่งคาดว่าชิ้นงานที่เตรียมได้จะมีสมบัติเชิงกลใกล้เคียงกับพอลิเมอร์สังเคราะห์ และสามารถย่อยสลายได้ตามธรรมชาติ

1.2 วัตถุประสงค์

- 1.2.1 ศึกษาผลของปริมาณ CMC ที่มีต่อสมบัติเชิงกล และสมบัติทางกายภาพของฟิล์ม
- 1.2.2 ศึกษาผลของปริมาณ nano ZnO ที่มีต่อสมบัติของฟิล์ม เพื่อใช้เป็นฟิล์มบรรจุอาหาร
- 1.2.3 ขึ้นรูปแผ่นฟิล์ม ได้จากแป้งมันสำปะหลังผสมกับ CMC และใช้กลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซอร์ขึ้นรูปด้วยการกดอัดและศึกษาสมบัติต่างๆ

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1.3.1 ศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะสมระหว่างแป้งมันสำปะหลัง CMC กลีเซอรอล nano ZnO และน้ำร้อนที่ใช้ในการขึ้นรูปฟิล์ม
- 1.3.2 ศึกษาสภาวะของเครื่องที่เหมาะสมสำหรับการขึ้นรูปด้วยการกดอัด (Compression)
- 1.3.3 ทดสอบสมบัติทางกายภาพ และสมบัติเชิงกลของชิ้นงานที่ได้

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

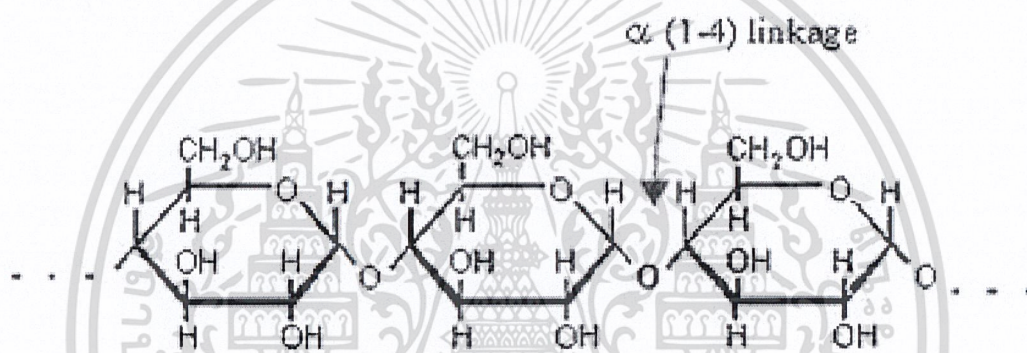
- 1.4.1 ได้พลาสติกชีวภาพได้ช่วยลดปัญหาสภาวะโลกร้อนในปัจจุบัน และอนาคต
- 1.4.2 ได้พลาสติกที่มีสมบัติเชิงกลและสมบัติทางกายภาพใกล้เคียงกับพลาสติกสังเคราะห์
- 1.4.3 ได้อัตราส่วนที่เหมาะสมระหว่างแป้งมันสำปะหลัง และ additive ที่สามารถขึ้นรูปฟิล์มโดยการกดอัดได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อะไมโลเพคติน (Amylopectin) ซึ่งมีขนาดใหญ่และมีกิ่งก้านสาขามากมาย นอกจากนี้ยังพบโมเลกุล แป้งอีกชนิดหนึ่ง ซึ่งมีขนาดใหญ่กว่าอะไมโลสแต่เล็กกว่าอะไมโลเพคติน เรียกว่า “Intermediate material” แต่พบในปริมาณไม่มากนัก

แป้งประกอบด้วยพอลิเมอร์ของกลูโคส 2 ชนิด คือ อะไมโลส (Amylose) และ อะไมโลเพคติน (Amylopectin) ดังนี้

- อะไมโลส (Amylose) เป็นพอลิเมอร์เชิงเส้นที่ประกอบด้วยกลูโคสประมาณ 1,000 – 6,000 หน่วย เชื่อมต่อกันด้วยพันธะ α -1, 4-glycosidic linkage ดังรูปที่ 2.1 อาจพบกิ่งก้านสาขาใน โมเลกุลของอะไมโลสได้บ้างในปริมาณเล็กน้อย



รูปที่ 2.1 โครงสร้างของอะไมโลส [4]

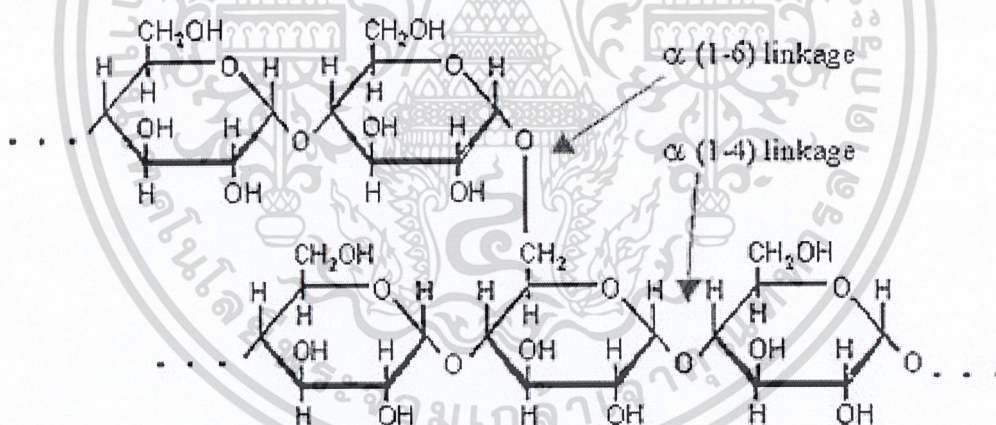
โดยทั่วไปแป้งจากธัญพืช เช่น แป้งข้าวโพด แป้งสาลี แป้งข้าวฟ่าง มีปริมาณอะไมโลสสูง ประมาณ 22-30 เปอร์เซ็นต์ ส่วนแป้งจากรากและหัว เช่น แป้งมันสำปะหลัง แป้งมันฝรั่ง แป้งสาธู จะมีปริมาณอะไมโลสต่ำกว่าคืออยู่ในช่วง 18-24 เปอร์เซ็นต์ น้ำหนักโมเลกุลอะไมโลสอยู่ในช่วง 105 ถึง 106 คาลตัน โดย อะไมโลสในแป้งแต่ละชนิดจะมีน้ำหนักโมเลกุลที่แตกต่างกันไป เนื่องจากแป้งแต่ละชนิดมี Degree of polymerization (DP) ของ อะไมโลสแตกต่างกัน แป้งมันฝรั่ง และแป้งมันสำปะหลังมี DP ของ อะไมโลส อยู่ในช่วง 1,000 ถึง 6,000 สูงกว่าแป้งข้าวโพดและแป้ง สาลีซึ่งมี DP ของอะไมโลสในช่วง 200 ถึง 1,200 แป้งที่มีสายของอะไมโลส ยาวมากจะมีแนวโน้ม ในการเกิดรีโทรเกรเดชัน (Retrogradation) ลดลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.1 ปริมาณของอะไมโลสในแป้งชนิดต่างๆ [4]

แป้ง	ปริมาณอะไมโลส (% น.น. แห้ง)	ปริมาณอะไมโลส (% น.น. แห้ง)
	Apparent	Absolute
ข้าวสาลี	28.8	25.8
ข้าวโพด	29.4	22.5
ข้าวเจ้า	25.0	20.5
ข้าวบาร์เลย์	25.5	23.6
มันฝรั่ง	36.0	16.9
มันสำปะหลัง	23.5	17.8

- อะไมโลเพคติน (Amylopectin) เป็นพอลิเมอร์เชิงกิ่งของกลูโคส ส่วนที่เป็นเส้นตรงของกลูโคสเชื่อมต่อกันด้วย พันธะ α -1, 4-glycosidic linkage และส่วนที่เป็นกิ่งสาขาที่เป็นพอลิเมอร์กลูโคสสายสั้นมี DP อยู่ในช่วง 10 ถึง 60 หน่วย เชื่อมต่อกันด้วยพันธะ α -1, 6-glycosidic linkage ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 โครงสร้างของอะไมโลเพคติน [4]

หน่วยกลูโคสที่มีพันธะ α -1, 6-glycosidic linkage มีอยู่ประมาณ 5 เปอร์เซ็นต์ ของปริมาณหน่วยกลูโคสใน อะไมโลเพคตินทั้งหมด อะไมโลเพคตินมีน้ำหนักโมเลกุลประมาณ 1,000 เท่าของอะไมโลสคือ ประมาณ 107 ถึง 109 คาลตัน และมีการคั่นตัวต่ำ เนื่องจากอะไมโลเพคตินมีลักษณะโครงสร้างเป็นกิ่ง อะไมโลเพคตินทำหน้าที่เป็นโครงสร้างหลักของเม็ดแป้ง ดังนั้นเมื่อมีอะไมโลเพคตินเพียงอย่างเดียว จึงยังสามารถรวมตัวเป็นเม็ดแป้งได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.2 สมบัติที่แตกต่างกันของอะไมโลสและอะไมโลเพคติน [4]

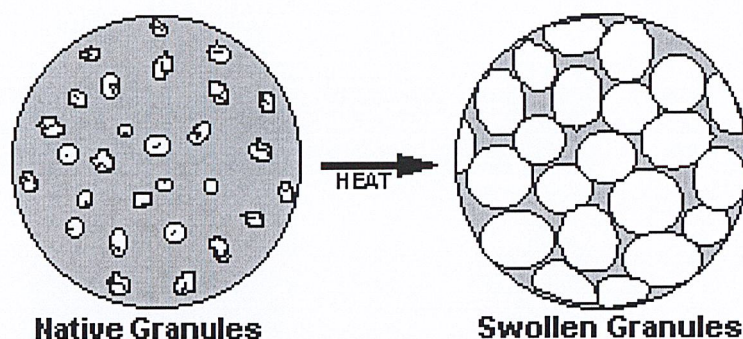
อะไมโลส	อะไมโลเพคติน
1. ประกอบด้วยโมเลกุลกลูโคสที่ต่อกันเป็นเส้นตรงด้วยพันธะ α -1,4-glycosidic linkage	1. โมเลกุลกลูโคสที่ต่อกันด้วยพันธะ α -1,4-glycosidic linkage และมี การแตกกิ่งด้วยพันธะ α -1,6-glycosidic linkage
2. ประกอบด้วยกลูโคส 200-6000 หน่วย	2. แต่ละกิ่งมีกลูโคส 20-25 หน่วย
3. ละลายน้ำได้น้อยกว่า	3. ละลายน้ำได้ดีกว่า
4. เมื่อต้มในน้ำจะมีความข้นหนืดน้อย	4. ข้นหนืดมากและใส
5. ให้สีน้ำเงินกับสารละลายไอโอดีน	5. ให้สีม่วงแดงหรือสีน้ำตาลแดงกับสารละลายไอโอดีน
6. ต้มแล้วทิ้งไว้จะจับตัวเป็นวุ้นและแผ่นแข็งได้	6. ไม่จับตัวเป็นวุ้นและแผ่นแข็ง

2.1.3 สมบัติของแป้ง

- การพองตัวและการละลาย (Swelling and solubility)

แป้งไม่ละลายในน้ำเย็นแต่จะดูดซึมน้ำไว้ และพองตัวน้อยมากจนไม่สามารถสังเกตเห็นได้ ทั้งนี้เนื่องจากการจัดเรียงตัวกันระหว่าง โมเลกุลของอะไมโลสและอะไมโลเพคติน (Intermixed) ภายในเม็ดแป้ง ในส่วน Crystallite โมเลกุลอยู่กันอย่างหนาแน่นและเป็นระเบียบ ช่วยป้องกันการกระจายตัวและทำให้ไม่ละลายในน้ำเย็น ส่วนของ Amorphous ซึ่งเป็นส่วนที่เกาะเกี่ยวกันอย่างหลวมๆ ไม่เป็นระเบียบและมีหมู่ไฮดรอกซิลอิสระมาก สามารถเกิดปฏิกิริยาการรับน้ำ (Hydration) ได้แม้ในน้ำเย็น เมื่อให้ความร้อนกับ น้ำแป้งจะมีอุณหภูมิสูงขึ้นประมาณ 60 องศาเซลเซียสขึ้นไป ส่วน Amorphous จับกับน้ำได้มากขึ้น และการจับกันของโมเลกุลในส่วน Crystallite เริ่มคลายความหนาแน่นลง โมเลกุลส่วนที่เริ่มคลายตัวจับกับน้ำ ทำให้เม็ดแป้งพองตัวเพิ่มขึ้น (รูปที่ 2.3) โมเลกุลในส่วน Crystallite ที่เหลืออยู่เกิดสภาพคล้ายร่างแห เรียกว่า Micelle network ซึ่งยึดเหนี่ยวกันไว้ทำให้เม็ดแป้งยังคงสภาพอยู่ได้ แต่อาจมีโมเลกุลของอะไมโลสและอะไมโลเพคติน ซึ่งมีขนาดเล็กและอิสระจากเม็ดแป้ง เมื่อทำให้อุณหภูมิน้ำแป้งสูงขึ้นอีก ส่วน Crystallite ที่เหลืออยู่จะคลายตัว ทำให้เม็ดแป้งพองมากขึ้นและ โมเลกุลแป้งอยู่ในสภาพละลายมากขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นไว้สำหรับการศึกษาเท่านั้น ไม่สามารถให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.3 การพองตัวของเม็ดแป้ง [4]

ลำดับการเปลี่ยนแปลงเป็นดังนี้

1. เริ่มมีการพองตัวในส่วนที่เป็นระเบียบน้อยที่สุดคือในส่วน Amorphous
2. การพองตัวจะทำให้เกิด Tension ต่อ Crystallites ที่อยู่ข้างเคียงทำให้โครงสร้างเสียหาย
3. การให้ความร้อนต่อไปจะเกิด Uncoiling หรือการแตกตัวของ Double helical region เกิด Break up ของโครงสร้างผลึก Side chain ของอะไมโลเพคตินที่แยกตัวออกมาจะถูก Hydrate และมีการพองตัวไปในแนวรอบๆ ดังนั้นจะเกิด Stress ต่อโครงสร้างผลึกที่ยังเหลืออยู่
4. การเกิด Hydration ต่อไปจะเพิ่ม Mobility ของ โมเลกุลทำให้เกิดการกระจายตัวของ โมเลกุล
5. โมเลกุลของอะไมโลสซึ่งมีขนาดเล็กจะแพร่ออกจาก Swollen granule
6. การให้ความร้อนต่อไปจะทำให้ Granule แตกออกมากขึ้นจนในที่สุดได้เป็นสารละลาย

- การเกิดเจลาตินในเซชัน (Gelatinization)

โมเลกุลของแป้งประกอบด้วยหมู่ไฮดรอกซิล (Hydroxyl groups) จำนวนมาก ยึดเกาะกันด้วยพันธะไฮโดรเจน มีสมบัติชอบน้ำ (Hydrophilic) แต่เนื่องจากเม็ดแป้งอยู่ในรูปของร่างแห ดังนั้นการจัดเรียงตัวในลักษณะนี้จะทำให้แป้งละลายในน้ำเย็นได้ยาก ดังนั้นขณะที่แป้งอยู่ในน้ำเย็นเม็ดแป้งจะดูดซึมน้ำและพองตัวได้เล็กน้อย แต่เมื่อให้ความร้อนกับสารละลายน้ำแป้ง พันธะไฮโดรเจนจะคลายตัวลง เม็ดแป้งจะดูดซึมน้ำและพองตัว ส่วนผสมของน้ำแป้งจะมีความหนืดมากขึ้นและใสขึ้น เนื่องจากโมเลกุลของน้ำอิสระที่เหลืออยู่รอบๆ เม็ดแป้งเหลือน้อยลง เม็ดแป้งเคลื่อนไหวได้ยากขึ้น ทำให้เกิดความหนืด ปฏิกิริยานี้เรียกว่าการเกิดเจลาตินในเซชัน (Gelatinization) และอุณหภูมิเริ่มของการเกิดเจลาตินในเซชันมักเรียกจุดนี้ว่า อุณหภูมิที่เริ่มเปลี่ยนแปลงความหนืด หรือเวลาที่เริ่มเปลี่ยนแปลงความหนืด ซึ่งจะแตกต่างกันในแป้งแต่ละชนิด

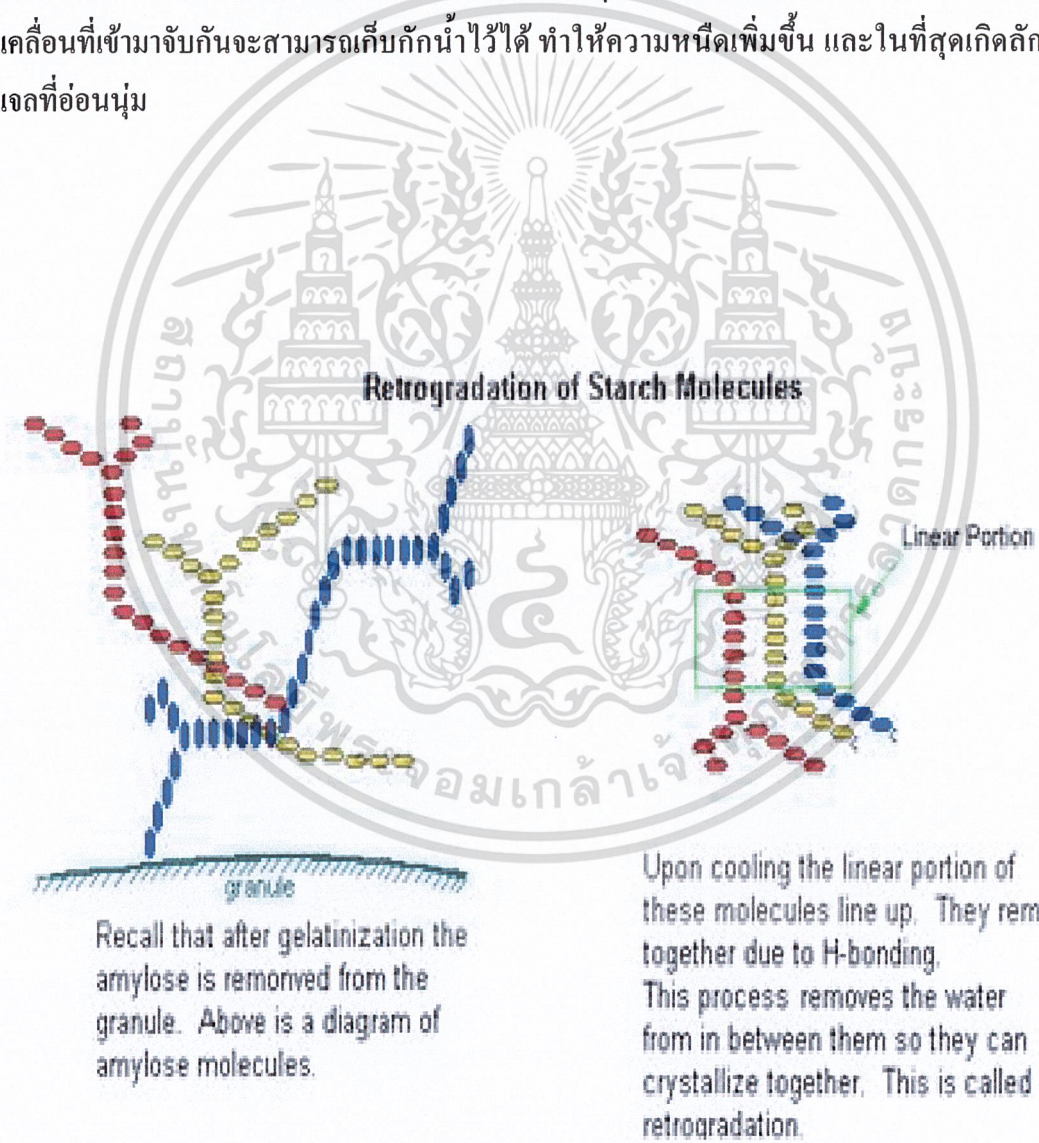
ปฏิกิริยาเคมี และการเปลี่ยนแปลงทางเคมีของแป้งที่สำคัญ ได้แก่

1. **การเกิดเจลาติไนซ์ (Gelatinization)** โมเลกุลของแป้งประกอบด้วยหมู่ที่ชอบน้ำอยู่ ดังนั้นมันจึงสามารถรับน้ำเข้าไปในโมเลกุลได้ตามสัดส่วนของความชื้นสัมพัทธ์ ของบรรยากาศ ซึ่งภายใต้สภาวะปกติแป้งจะมีปริมาณความชื้นร้อยละ 12-14 แต่เมื่อเติมน้ำลงไปน้ำจะซึมผ่านเข้าไปใน เม็ดแป้งโดยไม่รบกวนอนุภาคของเม็ดแป้ง และปริมาณน้ำที่เม็ดแป้งรับได้สูงสุดคือ ปริมาณร้อยละ 30 การพองตัวของเม็ดแป้งนี้จะไม่สังเกตเห็นการเปลี่ยนแปลงของโมเลกุล จนกระทั่งของผสมนั้นได้รับความร้อนสูงพอที่จะทำให้ลายพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุล จากนั้นเม็ดแป้งจึงจะแสดงการเปลี่ยนแปลงของลักษณะปรากฏให้เห็น อุณหภูมิที่เม็ดแป้งเกิดการเปลี่ยนแปลงนี้ประมาณ 60-70 องศาเซลเซียส เรียกว่าช่วงอุณหภูมิการเกิดเจลาติไนซ์ ช่วงนี้เม็ดแป้งยังคงมีสภาพอยู่ได้โดยไม่แตกออก แต่ถ้าอุณหภูมิสูงถึง 100 องศาเซลเซียส หรือมีการกวนอย่างรุนแรงจนเม็ดแป้งแตกออก โมเลกุลของแป้งก็จะรวมเข้ากับตัวกลางที่ล้อมรอบอยู่ทำให้เกิดลักษณะของเหลวข้นของแป้ง (Starch Paste)
2. **การเกิดเจล** เมื่อตั้งส่วนผสมของแป้งซึ่งเป็นของเหลวข้นไว้ โดยปราศจากการรบกวน จะทำให้เกิดพันธะระหว่างโมเลกุลของแป้ง และสร้างร่างแหสามมิติขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งโมเลกุลของ อะไมโลสซึ่ง โมเลกุลเหล่านี้จะมีแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลผ่านพันธะไฮโดรเจนกับ โมเลกุลของน้ำ ไกลโคเจน ซึ่งเป็นคาร์โบไฮเดรต และ โครงสร้างมีสาขามาก จะไม่เกิดเจล ส่วน โมเลกุลของอะไมโลเพกตินจะเกิดพันธะระหว่างโมเลกุลได้ยาก ยกเว้นเมื่อแป้งมีความชื้นเกินร้อยละ 30 จึงจะทำให้โมเลกุลซึ่งมีสาขาของอะไมโลเพกตินนั้นรวมยึดเข้ากันได้ แต่แป้งโดยทั่วไปมีอะไมโลสเป็นส่วนประกอบอยู่ ก็จะสามารถเกิดเจลได้ดี แม้จะมีอะไมโลสที่ความเข้มข้นต่ำ
3. **การเกิดรีโทรเกรเดชัน (Retrogradation)** สามารถเกิดได้ทั้งในเจลและสารแขวนลอยซึ่งจะมีความชื้นหนืดสูง เมื่อถูกทำให้เย็นอย่างรวดเร็วจะเกิดเป็นการรวมกลุ่มของโมเลกุลแป้งที่แน่นมากขึ้น เกิดเป็นผลึกเล็กๆ และตกตะกอนทำให้สมบัติของเจลเปลี่ยนแปลงไป โดยปัจจัยสำคัญที่สุดที่มีผลต่อการเกิดรีโทรเกรเดชัน คืออุณหภูมิกับขนาด และรูปร่างโมเลกุลของแป้ง ซึ่งอุณหภูมิที่รีโทรเกรเดชันได้เร็วมากที่สุดจะอยู่ช่วง 0 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

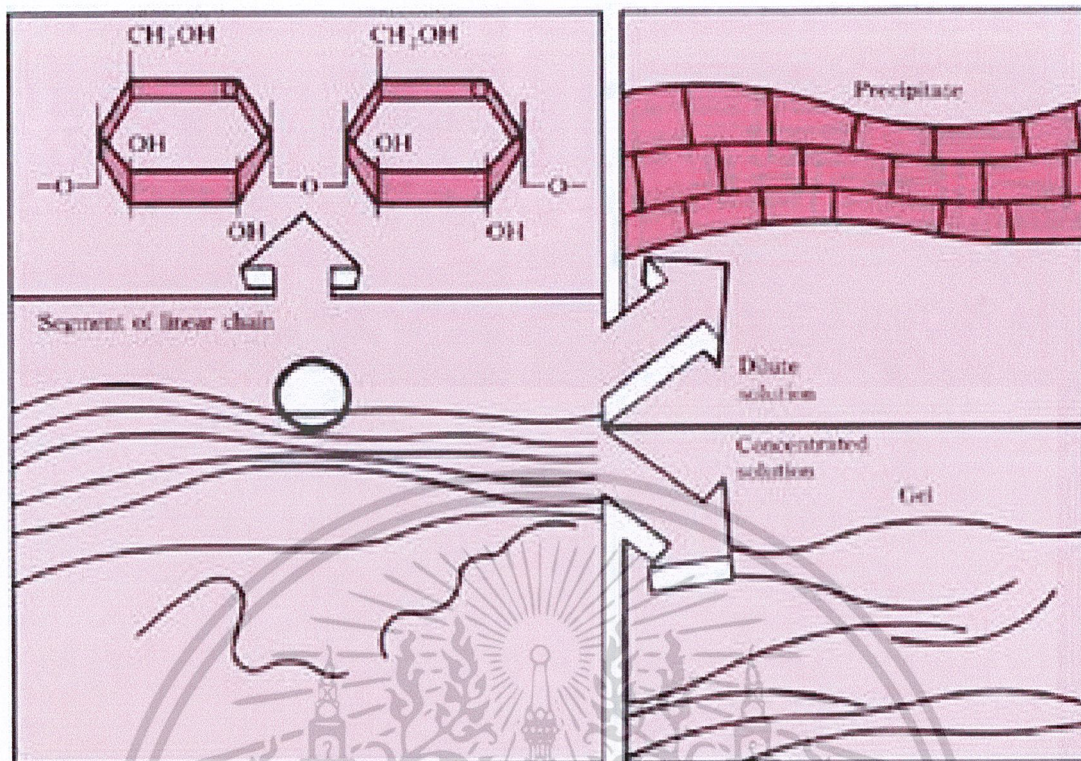
- การคืนตัวของแป้งสุก (Retrogradation)

การคืนตัวของแป้งสุกเป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นเมื่อน้ำแป้งสุกซึ่งร้อนมีอุณหภูมิลดต่ำลงขณะที่อุณหภูมิลดลง โมเลกุลอิสระของอะไมโลสซึ่งอยู่ใกล้กันจะเคลื่อนที่เข้ามาใกล้กันและจับตัวกันด้วยพันธะไฮโดรเจน (ดังรูปที่ 2.4 (ก) และ 2.4 (ข)) ทำให้เกิดสภาพการจัดเรียงตัวของโมเลกุลขึ้นใหม่โดยเปลี่ยนจากลักษณะการกระจายตัวของโมเลกุลมาเป็นส่วนที่เป็น Crystallite ซึ่งสามารถตรวจสอบได้โดยใช้ X-ray diffraction ถ้าน้ำแป้งสุกมีความเข้มข้นต่ำ การจัดเรียงตัวของโมเลกุลเหล่านี้จะทำให้เกิดลักษณะตะกอนขุ่นขาว แต่ถ้าน้ำแป้งสุกมีความเข้มข้นสูง เช่น แป้งข้าวโพด ความเข้มข้น 7 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จำนวนโมเลกุลที่มาจัดเรียงตัวกันใหม่มีมากและระหว่างเคลื่อนที่เข้ามาจับกันจะสามารถเก็บกักน้ำไว้ได้ ทำให้ความหนืดเพิ่มขึ้น และในที่สุดเกิดลักษณะเจลที่อ่อนนุ่ม



รูปที่ 2.4 (ก) การคืนตัวของแป้ง [4]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

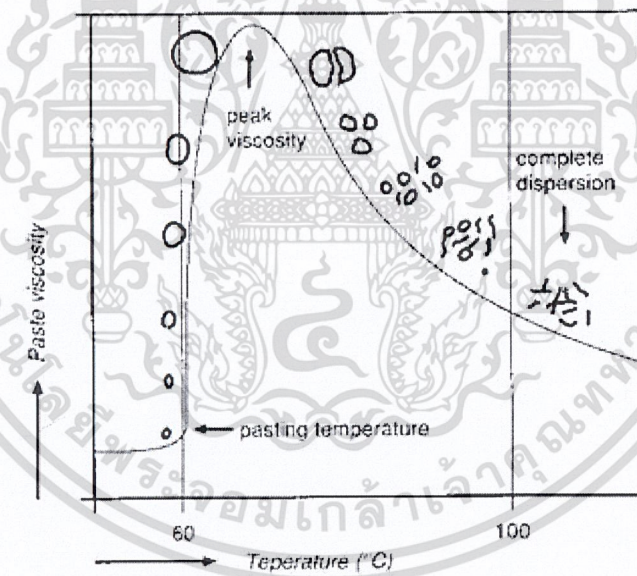


รูปที่ 2.4 (ข) การคั่นตัวของแป้ง [4]

การคั่นตัวของน้ำแป้ง โดยทั่วไปจะเกิดได้ดี เมื่อน้ำแป้งมีความเข้มข้นสูง และทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิต่ำ แป้งแต่ละชนิดมีอัตราการคั่นตัวของน้ำแป้งแตกต่างกัน โดยทั่วไปแป้งจากรากและหัวมีอัตราการคั่นตัวช้ากว่าแป้งจากธัญพืช ทั้งนี้เป็นเพราะแป้งจากรากและหัว เมื่อได้รับความร้อนจะพองตัวมากและเร็ว ซึ่งเม็ดแป้งแตกง่าย ทำให้โมเลกุลแป้งทั้งหมดกระจายอยู่ทั่วไปในน้ำแป้ง ยกที่โมเลกุลอะไมโลสจะมาจัดเรียงตัวกันได้ใหม่ แต่แป้งจากธัญพืช เมื่อได้รับความร้อนจะพองตัวน้อยกว่า เม็ดแป้งแตกน้อย โมเลกุลที่คลายตัวยังอยู่ใกล้ชิดกันจึงเคลื่อนที่จับกันใหม่ได้ง่าย ซึ่งอาจจับตัวกันระหว่างเม็ดแป้งที่พองตัวซึ่งอยู่ใกล้กัน หรือระหว่างชิ้นส่วนของเม็ดแป้งหรือโมเลกุลอะไมโลสอิสระที่หลุดออกมา ทำให้เกิดสภาพเป็น Matrix ซึ่งยึดอยู่ด้วยกันด้วยพันธะไฮโดรเจน และสามารถเก็บกักน้ำไว้ได้ การมีอะไมโลเพคตินอยู่ด้วยทำให้อัตราการคั่นตัวของน้ำแป้งช้าลง เนื่องจากโมเลกุลของอะไมโลเพคตินมีกิ่งก้านสาขาทำให้เกาะ ยากที่โมเลกุลจะเคลื่อนที่เข้ามาจับกันใหม่ได้ จึงพบว่าแป้งประเภท Waxy มีอัตราการคั่นตัวของน้ำแป้งน้อยกว่าแป้งชนิดอื่น ขนาดโมเลกุลของอะไมโลสในแป้งแต่ละชนิดมีผลในการเกิดการคั่นตัวของน้ำแป้งอีกด้วย โมเลกุลอะไมโลสที่มีขนาดพอเหมาะในการเคลื่อนที่มาจับกัน คือ ในช่วง 100-200 หน่วยกลูโคส ถ้าโมเลกุลใหญ่ เช่น แป้งมันฝรั่งมีอะไมโลสขนาดใหญ่ประมาณ 1,000-6,000 หน่วยกลูโคสจะเคลื่อนที่เข้ามาจับกันได้ยาก และถ้าโมเลกุลสั้นเกินไปจะเคลื่อนไหวอยู่ตลอดเวลา (Brownian movement) ทำให้จับกันยากเช่นกัน

- ความหนืด (Viscosity)

เป็นคุณสมบัติที่สำคัญและเป็นประโยชน์มากที่สุดของแป้ง เมื่อให้ความร้อนกับน้ำแป้งทำให้เม็ดแป้งเกิดการพองตัวและมีความหนืดมากขึ้น (รูปที่ 2.5) พฤติกรรมความหนืดเป็นคุณสมบัติเฉพาะตัวและแตกต่างกันไปตามชนิดและสายพันธุ์ของแป้ง เมื่อเม็ดแป้งซึ่งแขวนลอยในน้ำได้รับความร้อนจนถึงระดับหนึ่งจะพองตัวได้ อย่างรวดเร็ว ทำให้ความหนืดเพิ่มขึ้นเร็วมาก อุณหภูมิที่ความหนืดเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วนี้เรียกว่า Pasting temperature ความหนืดจะเพิ่มขึ้นจนถึงความหนืดสูงสุด (Peak viscosity) จากนั้นอาจลดลงหรือคงที่ขึ้นกับชนิดของแป้ง การที่แป้งมีความหนืดสูงที่สุดเนื่องจากเมื่อเม็ดแป้งมีการพองตัวมากขึ้น และมีชิ้นส่วนของเม็ดแป้งหรือโมเลกุลของอะไมโลสและอะไมโลเพคตินบางส่วนที่แตกสลายออกมาอยู่ในสารละลาย เมื่อส่วนที่แตกสลายและละลายออกมามีมากกว่าการพองตัวที่เพิ่มความหนืดจะเริ่มลดลง ซึ่งจะเห็นได้ชัดเมื่ออยู่ในช่วงอุณหภูมิที่ 95 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ดังนั้นค่าความหนืดของน้ำแป้งสูงจะเป็นผลมาจากการพองตัวของเม็ดแป้ง และการแตกหักของเม็ดแป้งร่วมกับการละลายออกมาของ โมเลกุลแป้ง



รูปที่ 2.5 การเปลี่ยนแปลงความหนืดของแป้งเมื่อให้ความร้อน [4]

เมื่อลดอุณหภูมิลง โมเลกุลอิสระที่กระจัดกระจายออกมา (โดยเฉพาะส่วนของอะไมโลส) ถ้ามีขนาดโมเลกุลที่เหมาะสมคือ ไม่สั้นและยาวเกินไปก็จะสามารถเคลื่อนที่เข้ามาจับกัน และกักน้ำไว้ได้ทำให้ความหนืดสูงขึ้นอีก ความหนืดที่กลับสูงขึ้นนี้อีกนี้เรียกว่า Setback และปรากฏการณ์นี้ก็คือการคืนตัวของแป้ง (Retrogradation) ปัจจัยที่มีผลต่อความหนืดได้แก่ ชนิดของแป้ง ขนาดอนุภาค สัดส่วนของอะไมโลสต่ออะไมโลเพคติน อุณหภูมิ Shear rate ฯลฯ แต่ที่มีผลมากที่สุดคืออุณหภูมิ [4]

2.2 แป้งมันสำปะหลัง

แป้งมันสำปะหลังผลิตได้จากรากที่มีลักษณะคล้ายหัวของต้นมันสำปะหลัง มีชื่อเรียกทางวิทยาศาสตร์ว่า *Manihot utilisima* ในภาษาอังกฤษมักจะเรียกแป้งมันสำปะหลังว่า *Topioca starch*, *Cassava starch* หรือ *Monioc starch*

2.2.1 องค์ประกอบทางเคมีของแป้งมันสำปะหลัง

หัวมันสำปะหลังเป็นส่วนของรากที่โตขึ้นสำหรับสะสมแป้ง หัวมันสำปะหลังสดมีน้ำอยู่ประมาณ 60-65 เปอร์เซ็นต์ และส่วนประกอบส่วนใหญ่คือแป้งหรือคาร์โบไฮเดรต ประมาณ 20-35 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้นหัวมันสำปะหลังจึงเป็นแหล่งคาร์โบไฮเดรตที่ให้พลังงานในอาหารของคน และสัตว์ แต่มีปริมาณ โปรตีนและไขมันน้อยมากไม่เหมาะที่จะใช้เป็นแหล่งของโปรตีนและ ไขมัน การนำหัวมันสำปะหลังไปใช้มักจะ ทำให้แห้ง เพื่อลดความชื้นลงเสียก่อน เช่น มันเส้น มันอัดเม็ดหรือสกัดเฉพาะส่วนของแป้งออกจากหัวมันสำปะหลัง ส่วนประกอบทางเคมีของหัวมันสำปะหลังสดมันสำปะหลังแห้งและแป้งมันสำปะหลัง (ตารางที่ 2.2) จะเห็นได้ว่าเมื่อทำให้หัวมันสำปะหลังแห้งมีความชื้นประมาณ 10 เปอร์เซ็นต์ จะมี คาร์โบไฮเดรต 70 เปอร์เซ็นต์ โปรตีน 2.63 เปอร์เซ็นต์ และไขมัน 0.51 เปอร์เซ็นต์

ตารางที่ 2.3 องค์ประกอบทางเคมีของหัวมันสำปะหลังสดและแห้ง [5]

องค์ประกอบ	หัวมันสด	หัวมันแห้ง
ความชื้น (%)	63.25	10.63
คาร์โบไฮเดรต (%)	29.73	70.63
โปรตีน (%)	1.18	2.63
ไขมัน (%)	0.08	0.51
เถ้า (%)	0.85	2.20
เยื่อใย (%)	0.99	1.73
โปตัสเซียม (mg/kg)	0.26	0.43
ฟอสฟอรัส (mg/kg)	0.04	0.08
กรดไฮโดรไซยานิก (mg/kg)	173.00	100.00

2.2.2 สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของแป้งมันสำปะหลัง

เม็ดแป้งมันสำปะหลังมีลักษณะคล้ายถ้วยมีความยาวเส้นผ่านศูนย์กลาง 4-35 ไมครอน เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยโดยจำนวน (Number average diameter) เท่ากับ 20 ไมครอน เมื่อตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงโพลาไรซ์จะเห็นลักษณะกากบาทสีดำเรียกว่า Birefringence ภายในเม็ดแป้งประกอบด้วยอะไมโลสและอะไมโลเพกติน ซึ่งมีการจัดเรียงตัวต่างกันแบ่งได้เป็น 2 แบบ คือ

แบบแรก สายพอลิเมอร์ของอะไมโลสเรียงตัวขนานกันอย่างเป็นระเบียบ มีอะไมโลสบางส่วน เรียงขนานกับส่วนที่เป็นสายตรง ส่วนนอกของอะไมโลเพกตินและยึดติดกันด้วยพันธะไฮโดรเจน ทำให้โมเลกุลบริเวณนี้จับกันอย่างหนาแน่น และมีแรงยึดเหนี่ยวสูง บริเวณนี้เรียกว่า Crystalline regions หรือ Micelles ซึ่งเป็นส่วนสำคัญที่ทำให้เกิดลักษณะ Birefringence ของเม็ดแป้ง Crystalline regions นี้มีความสามารถในการดูดน้ำและพองตัวต่ำมาก และแบบที่สอง โมเลกุลเรียงตัวกันอย่างไม่เป็นระเบียบแรงดึงดูดระหว่างสายพอลิเมอร์ของอะไมโลสและอะไมโลเพกตินต่ำกว่าแบบแรก บริเวณที่มีการจัดเรียงตัวของโมเลกุลแบบนี้เรียกว่า Amorphous regions เป็นส่วนที่ดูดน้ำได้ดีและพองตัวได้ง่าย แป้งมันสำปะหลัง เป็นแป้งที่ได้จากมันสำปะหลัง ลักษณะของแป้งมีสีขาว เนื้อเนียน ลื่นเป็นมัน เมื่อทำให้สุกและกวนกับน้ำ แป้งจะละลายง่าย สุกง่าย หนืดขึ้นเรื่อยๆ ไม่มีการรวมตัวเป็นก้อน เหนียวเป็นใยติดกันหมด เนื้อแป้งใสเป็นเงา พอเย็นตัวแล้วจะติดกันเป็นก้อนเหนียวติดภาชนะ และแป้งมันสำปะหลังมีคุณสมบัติที่พิเศษคือ มีความขาวมันวาว เมื่อผสมน้ำ และให้ความร้อนจะเหนียวเป็นกาวใส ไม่มีสี จึงเหมาะสมมากเมื่อนำไปใช้ประโยชน์ [5]

2.2.3 การใช้แป้งในอุตสาหกรรม

1. เพื่อเป็นตัวเพิ่มความข้นหนืดให้กับผลิตภัณฑ์ (Thickening agent) แต่เดิมนิยมใช้แป้งจากธรรมชาติ ซึ่งมีข้อด้อยคือ เมื่อเก็บไว้จะเกิดตะกอน หรือเจลาจากการคั่งตัวของแป้งสุก แป้งดัดแปลงที่มีความสำคัญและใช้กันมากที่สุดคือ แป้ง Crosslink การดัดแปรแบบนี้ใช้ได้กับแป้ง Waxy ซึ่งมีอะไมโลสน้อยมาก ทำให้พองตัวได้ดีแต่ความหนืดจะไม่คงที่ เนื่องจากเม็ดแป้งแตกออกได้ง่าย การทำ Crosslinking จะช่วยให้แป้งมีความแข็งแรงและมีความหนืดที่คงตัวมากขึ้น
2. เพื่อเพิ่มความคงตัวของคอลลอยด์ (Colloid stabilizer)
3. เพื่อรักษาความชื้นของผลิตภัณฑ์ (Moisture retention)
4. เพื่อให้เกิดลักษณะที่เป็นเจล (Gel-forming agent)

เอกสารนี้ 5. เพื่อเป็นตัวเชื่อมส่วนผสมในผลิตภัณฑ์ (Binder) เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 6. เพื่อเป็นสารเคลือบและให้ความเป็นมันเงา (Coating & Glazing agent) ทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.4 สมบัติทางกายภาพของแป้งมันสำปะหลัง [6]

Property	Value
<u>Chemical composition (%dry basis)</u>	
-Protein	0.15-0.30
-Fat	0-0.01
-Ash	0.10-0.15
Granule size (μm by image analysis)	3.00-340
Amylose content (%by high performance size exclusion chromatography)	17-23
Amylose size (DPn, by high performance size exclusion chromatography)	2040-4640
Swelling power at 85°C (0.1 g. starch in 15 ml. of distilled water)	40-62
Solubility (%) at 85 °C (0.1 g. starch in 15 ml. of distilled water)	22-42
<u>Paste viscosity Zby Rapid Visco Analyzer using 3 g. starch at 14% moisture content in 25 ml. of distilled water)</u>	
-Pasting temperature (°C)	67-74
-Peak viscosity (RVU)	350-490
-Trough viscosity (RVU)	110-210
-Final viscosity (RVU)	180-290
-Breakdown (RVU)	160-340
-Setback (RVU)	50-110
<u>Thermal analysis (by Differential Scanning Calorimeter using 30% starch)</u>	
Onset temperature (°C)	60-65
Peak temperature (°C)	67-74
Conclusion temperature (°C)	79-87
Enthalpy (J/g)	14-17
Retrogradation (% by thermal analysis of starch del kept at 4 °C for 7 days usihg Differential Scanning Calorimeter)	28
Degree of hydrolysis (% using 1% each of α -amylase and glucoamylase at 37 °C, 48 hrs)	25-60

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- การใช้แป้งในอุตสาหกรรมอื่นๆ

สำหรับการใช้ประโยชน์จากแป้งในอุตสาหกรรมที่ไม่ใช่อาหารนั้นมีมากมาย นับตั้งแต่การใช้ใน อุตสาหกรรมกระดาษ อุตสาหกรรมเส้นใยผ้า เป็นสารจับฝุ่นละอองในการผลิตถ่านหิน เซรามิก และโลหะต่างๆ ใช้เป็นส่วนประกอบในการสังเคราะห์สารพอลิเมอร์เพื่อใช้ในผลิตภัณฑ์ผงซักฟอก เป็นกาวในอุตสาหกรรมทอพรหม ใช้เคลือบกระดาษ การใช้แป้งในลักษณะเป็นสารย่อยสลายทางชีวภาพ ความพยายามในการผลิตผลิตภัณฑ์จากแป้งให้คล้ายพลาสติก ซึ่งทนความร้อนได้ เพื่อให้ทำเป็น ภาชนะบรรจุ การใช้แป้งในเครื่องสำอาง เช่น แชมพู และครีมนวดผม การใช้ในอุตสาหกรรมยา เช่น เป็นส่วนผสมเม็ดยา เป็นต้น การใช้แป้งเป็นแหล่งคาร์บอนในอุตสาหกรรมการหมัก เพื่อผลิตผลิตภัณฑ์ต่างๆ สำหรับแนวโน้มในการใช้ประโยชน์ของแป้งในอุตสาหกรรมที่ไม่ใช่อาหารนี้เน้นในด้านที่เกี่ยวข้องกับสภาพแวดล้อมมากขึ้น เช่น การใช้ในอุตสาหกรรมผงซักฟอก เครื่องสำอาง ยา อุตสาหกรรมการหมัก โดยเฉพาะภาชนะบรรจุที่สลายตัวได้เอง [5]

2.3 การย่อยสลายของแป้ง

แป้งเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมสามารถย่อยสลายได้ง่าย โดยการนำเชื้อราเข้าทำลาย หรือสร้างความเสียหายให้แก่วัสดุ ซึ่งมี 3 วิธี คือทางกายภาพ ทางเคมี และการก่อให้เกิดรอยด่าง

1. การทำลายทางกายภาพ (Mechanical damage)

การทำลายนี้เกิดขึ้นเมื่อจุลินทรีย์สามารถทำลายวัสดุในทางกายภาพ เช่น การกัดแทะของเปลือกไม้โดยมด และการเจาะผิวของแผ่นพลาสติกบางๆ โดยปลวก ซึ่งเป็นที่รู้จักกันดีในทางอายุศาสตร์ของพืช เชื้อราสามารถเจาะผิวหนังและผนังเซลล์ได้

2. การทำลายทางเคมี (Chemical damage)

การทำลายทางเคมีเกิดขึ้นได้โดยตัวการทางเคมี ซึ่งเชื้อราเป็นสาเหตุหลักที่เข้าทำลายวัสดุ โดยการปลดปล่อยสารเคมีเข้าไปยังวัสดุ ตัวอย่างเช่น ผลิตภัณฑ์ของ Mycotoxin โดยเชื้อราที่เจริญเติบโตบนอาหาร Aflatoxin ที่ผลิตมาจาก *Aspergillus flavus* หรือรอยด่างดำซึ่งเกิดขึ้นบนสิ่งทอ

3. การเกิดรอยด่าง (Soiling)

ความเสียหายสุดท้ายคือการเกิดรอยด่างดำ ซึ่งเป็นผลมาจากเส้นใยของเชื้อราเอง และเชื้อราจะก่อให้เกิดสปอร์ที่มีสีได้ตั้งแต่โปร่งแสงจนทึบ หรือสีน้ำตาลแก่เกือบดำ รอยด่างดำเช่นนี้มักเกิดขึ้นในสถานะซึ่งไม่มีการแข่งขันจากสิ่งมีชีวิตอื่นๆ เช่น แบคทีเรีย ดังนั้นการเกิดรอยด่างดำของเครื่องมือทางไฟฟ้าหรือผิวหนังของแก้ว โดยการเจริญของเส้นใยเชื้อรา

สืบเนื่องมาจากการที่เชื้อราสามารถผลิตเส้นใยเฉพาะ จากที่ได้รับจากอาหารเลี้ยงเชื้อตาม ชนิดต่างๆ และโดยความสามารถของเส้นใยที่จะเชื่อมต่อกันในช่องว่างของอากาศ [4]

2.4 การนำแป้งมาทำเป็นเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช (Thermoplastic starch)

แป้งที่นิยมใช้ทำ Thermoplastic starch มีหลายชนิด ซึ่งเป็นแป้งที่ได้จากพืช เช่น แป้งข้าว บาลี แป้งข้าวโพด และแป้งสาลี เนื่องจากแป้งเป็นพอลิแซคคาไรด์ที่มีกลูโคสเป็นมอนอเมอร์ ซึ่ง ในปัจจุบันได้มีการศึกษาและผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ที่ย่อยสลายได้จากแป้งหลากหลายชนิด เนื่องจาก แป้งเป็นวัตถุดิบที่สามารถทดแทนได้ง่าย มีอยู่มากในธรรมชาติ ย่อยสลายได้ง่าย เป็นมิตรต่อ สิ่งแวดล้อม และมีราคาถูก เมื่อเปรียบเทียบกับเม็ดพลาสติก ทั้งนี้ในระยะเริ่มต้นมีการใช้แป้งเป็น สารเพิ่มเนื้อ (Filler) ใน Polyolefins ต่อมาได้มีการปรับปรุงโครงสร้างของแป้งให้สามารถขึ้นรูปได้ ด้วยกระบวนการอัดรีดเป็นแผ่นฟิล์มที่มีคุณสมบัติคล้ายคลึงกับ Low density polyethylene

โดยทั่วไปเราไม่สามารถนำแป้งมาขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ ได้ตามวิธีการขึ้นรูป Thermoplastic ทั่วๆ ไป เพราะแป้งจะไม่เกิดการไหลขึ้นเมื่อเราให้ความร้อนในกระบวนการขึ้นรูป ดังนั้นการจะนำแป้งมาทำเป็น Thermoplastic starch จำเป็นที่จะต้องเติม Plasticizer เช่น Glycerol, Ethanolamine, พอร์มาไมด์ และซอร์บิทอลลงไป ซึ่งภายใต้อุณหภูมิสูงประมาณ 90-180 องศา เซลเซียส และได้รับแรงเฉือนอย่างเพียงพอจะทำให้แป้งสามารถหลอมและไหลได้สามารถนำมาขึ้น รูปขึ้นงานด้วยกระบวนการต่างๆ ได้ เช่น Single screw extrusion, Twin screw extrusion, compression molding เป็นต้น

-เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช (Thermoplastic starch) หมายถึง วัสดุที่สามารถหลอมตัวและนำ ขึ้นรูปเป็นแบบต่างๆ ได้ โดยการใช้ความร้อนและความดัน จากสมบัติของแป้งที่กล่าวข้างต้นจะ เห็นว่า โดยธรรมชาติแล้ว แป้งไม่มีคุณสมบัติเป็นเทอร์โมพลาสติกเลย ซึ่งเราสามารถทำให้แป้งมี สมบัติเป็นเทอร์โมพลาสติกได้โดยการใช้สารเติมแต่ง (Additive) คือ พลาสติกไซเซอร์ (Plasticizers) ช่วยทำให้โครงสร้างของเม็ดแป้งเกิดการหลอมตัวที่อุณหภูมิต่ำลง ซึ่งจะทำให้โมเลกุลของอะ โม่โลส และอะโมโลเพกตินเป็นอิสระมากขึ้น ดังนั้นเราจึงนำแป้งมาขึ้นรูปเป็นแบบต่างๆ ได้ ซึ่ง พลาสติกที่ผลิตได้โดยวิธีนี้จึงเรียกว่า เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช (Thermoplastic starch, TPS)

2.5 พลาสติไซเซอร์ (Plasticizer)

สารเสริมสภาพพลาสติกหรือที่รู้จักกันในนาม พลาสติไซเซอร์ (Plasticizer) เป็นสารเคมีที่เติมลงในพลาสติกและยาง เพื่อให้พลาสติกอ่อนตัวและดัดโค้งได้ ทำให้สามารถขึ้นรูปผลิตภัณฑ์พลาสติกที่อุณหภูมิต่ำกว่าเดิม สารเคมีประเภทนี้พบว่าถูกนำมาใช้ในอุตสาหกรรมพลาสติกตั้งแต่สมัย Alexander parkers ผลิต Parkesine โดยใช้กำมะถันเป็นพลาสติไซเซอร์ ซึ่งต่อมา Hyatt ใช้กำมะถันผสมในเซลลูโลสในเตรต เพื่อช่วยให้พลาสติกขึ้นรูปง่าย และสมบัติการระเบิดลดลง

สารเคมีที่ใช้เป็นพลาสติไซเซอร์ควรมีสมบัติดังนี้

1. เป็นสารประกอบอินทรีย์ ส่วนมากเป็นของเหลวที่มีจุดเดือดสูงควรมีน้ำหนักโมเลกุลอย่างต่ำประมาณ 300 ด้วยเหตุนี้ที่อุณหภูมิห้อง จึงมีอัตราการละลายในเนื้อพอลิเมอร์ช้า
2. ควรมีพารามิเตอร์การละลายใกล้เคียงกับพลาสติกหรือยางที่จะผสม
3. พลาสติไซเซอร์ไม่ควรตกผลึกในช่วงอุณหภูมิขณะใช้งาน เว้นเสียแต่จะสามารถเกิดแรงดึงดูดจำเพาะกับพอลิเมอร์ได้

หน้าที่เบื้องต้นของพลาสติไซเซอร์คือช่วยให้เกิดช่องว่างระหว่างโมเลกุล พลังงานในการหมุนของพันธะ (Bond rotation) จึงลดลงทำให้พอลิเมอร์ไหลได้ที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิการสลายตัว (Decomposition temperature) ทั้งนี้เพราะสารประเภทนี้เมื่อผสมกับพลาสติกจะแทรกอยู่ระหว่างโมเลกุลของพอลิเมอร์จึงเท่ากับลดความแข็งแรงของพอลิเมอร์ สรุปหน้าที่สำคัญของพลาสติไซเซอร์ ได้แก่

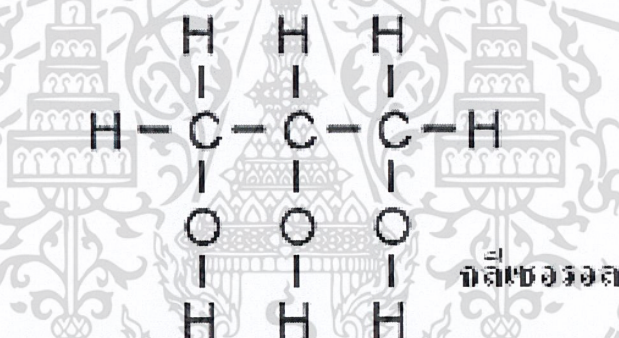
1. ลดความหนืด ทำตัวคล้ายตัวทำละลายและสารหล่อลื่นลดแรง Van der waals ระหว่างโซ่พอลิเมอร์ แต่แตกต่างจากตัวทำละลายจริงๆ ตรงที่ว่าต้องมีน้ำหนักโมเลกุลสูงประมาณ 300 เพื่อที่จะได้ไม่ระเหยออกจากผลิตภัณฑ์พลาสติกและยางระหว่างใช้งาน
2. ต้องทำหน้าที่เปลี่ยนแปลงสมบัติทางกายภาพของผลิตภัณฑ์ เช่น เพิ่มความอ่อนตัว ทำให้ดัดโค้งง่าย โดยลดอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (Tg) ของพอลิเมอร์ ทำให้สภาพดัดโค้งหยุ่นตัวเพิ่มขึ้น และเมื่อปริมาณของพลาสติไซเซอร์เพิ่มขึ้น ทำให้ความต้านทานแรงดึงของพอลิเมอร์ลดลง แต่ความยาว ณ จุดขาดของพอลิเมอร์เพิ่มขึ้น รวมทั้งความทนแรงกระแทกดีขึ้นด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวอย่างพลาสติกไซเซอร์ที่นำมาใช้กับพลาสติกจากแป้ง เช่น

- **พอลิโออล (Polyols)** พอลิไฮดรอลิกแอลกอฮอล์เป็นอนุพันธ์ของน้ำตาลซึ่งมีหมู่คีโตนหรืออัลดีไฮด์ถูกแทนที่ด้วยหมู่ไฮดรอกซิล พอลิโออลบางชนิดพบในน้ำผลไม้ โดยเฉพาะพวกที่มีคาร์บอน 6 อะตอม เช่น ซอร์บิทอล หรือสามารถผลิตจากปฏิกิริยาเติมไฮโดรเจนให้กับน้ำตาล (Hydrogenation) พอลิโออลมีสมบัติคงทนต่อสารเคมีและความร้อนได้ดีจึงไม่สลายตัวง่าย ดูดซับน้ำและเก็บความชื้นได้ดี ละลายน้ำได้ดี มีรสหวานน้อยกว่าน้ำตาล เนื่องจากดูดซับน้ำได้ช้ำมาก จึงสามารถใช้กับผู้ที่ เป็นโรคเบาหวานได้

- **กลีเซอรอล (Glycerol)** หรือที่เรียกว่า กลีเซอริน (Glycerine หรือ Glycerin) หมายถึง สารจำพวกโพลีไฮดรอลิกแอลกอฮอล์ (Polyhydric alcohol) ที่มีหมู่ไฮดรอกซิล 3 หมู่ มีสูตรเคมี $C_3H_8O_3$ มีชื่อทางเคมีว่า 1,2,3-Propantriol และมีสูตรโครงสร้าง ดังรูป 2.6 มีน้ำหนักโมเลกุล 92 เป็นผลพลอยได้จากการผลิตสบู่และกรดไขมัน



รูปที่ 2.6 โครงสร้างกลีเซอรอล [7]

กลีเซอรอลถูกค้นพบครั้งแรกในปี ค.ศ. 1779 โดย Scheele ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ร่วมที่ได้จากปฏิกิริยาการผลิตสบู่ (Saponification) ระหว่างน้ำมันมะกอกกับ Lead oxide ต่อมาในปี ค.ศ. 1813 Chevreul ได้พบว่ากลีเซอรอลเป็นส่วนประกอบของไขมัน โดยอยู่ในรูปของกลีเซอรอลเอสเทอร์ (Glycerol ester) ของกรดไขมัน (Fatty acids) และได้ชื่อว่า “กลีเซอรอล” ซึ่งมาจากภาษากรีกที่มีความหมายว่า “มีรสหวาน” กลีเซอรอลถูกนำมาใช้ในอุตสาหกรรมครั้งแรกในปี ค.ศ. 1866 เมื่อ Nobel ได้ทำการผลิตระเบิดไดนาไมต์ในรูปไตรไนเตรตของกลีเซอรอลหรือไนโตรกลีเซอรอล (Nitroglycerin) และในปี ค.ศ. 1949 สามารถสังเคราะห์กลีเซอรอล โดยใช้โพรฟินเป็นสารตั้งต้น ซึ่งเป็นอุตสาหกรรมการสังเคราะห์กลีเซอรอลที่มีความสำคัญมาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในปัจจุบันกลีเซอรอลถูกนำมาไปใช้งานอย่างกว้างขวาง เนื่องจากคุณสมบัติทางกายภาพ และคุณสมบัติทางเคมีที่ไม่เป็นอันตราย โดยในปี ค.ศ. 1986 มีปริมาณการผลิตโดยรวมประมาณ 550,000 ตัน/ปี โดยเป็นการผลิตจากการแตกตัว (Splitting) น้ำมันที่ได้จากธรรมชาติ 75% และการสังเคราะห์จากโพर्फิน 25 %

2.5.1 สมบัติของกลีเซอรอล

- สมบัติทางกายภาพ

กลีเซอรอลบริสุทธิ์เป็นของเหลว ไม่มีสี ไม่มีกลิ่น ไม่มีพิษ และมีโครงสร้างที่คล้ายน้ำตาล จึงทำให้กลีเซอรอลมีรสหวาน (มีรสหวานเป็น 6 เท่าของน้ำตาล) และเนื่องจากในโมเลกุลมีพันธะไฮโดรเจนจึง ทำให้กลีเซอรอลเป็นของเหลวที่มีความหนืด สามารถผสมเป็นเนื้อเดียวกับน้ำและแอลกอฮอล์ได้ดีมาก เป็นสารที่ละลายน้ำมันได้ดีพอสมควร กลีเซอรอลมีจุดเดือด 290 องศาเซลเซียสที่ความดันบรรยากาศ (101.3 kPa) และจุดเดือดของกลีเซอรอลจะลดลงตามความดันที่ลดลง ดังแสดงในตารางที่ 2.3 และมีคุณสมบัติทางกายภาพอื่นๆ ที่สำคัญดังตารางที่ 2.4

กลีเซอรอลสามารถละลายได้ดีในตัวทำละลายจำพวกน้ำ เมทานอล เอทานอล และไอโซเมอร์ของโพรพานอล บิวทานอล และเพนทานอล รวมทั้งฟีนอล โกลคอล โพรเพนไดออล เอมีน และสารประกอบที่เป็นเฮทเทอโรไซคลิกที่ประกอบด้วยอะตอมของไนโตรเจนในวงแหวน (เช่น ไพรีดีน, ควิโนลีน) กลีเซอรอลไม่สามารถละลายได้ในไฮโดรคาร์บอนเกือบทั้งหมด แอลกอฮอล์ที่มีโซ่ยาว น้ำมันพืชและสัตว์ และตัวทำละลายจำพวกฮาโลเจน เช่น คลอโรฟอร์ม ดังนั้นกลีเซอรอลจึงเป็นตัวทำละลายที่มีประโยชน์ต่อสารหลายชนิด ทั้งสารอินทรีย์และอนินทรีย์ ซึ่งมีความสำคัญต่ออุตสาหกรรมหลายชนิด เช่น อุตสาหกรรมยา อุตสาหกรรมอาหาร เป็นต้น

- สมบัติทางเคมี

กลีเซอรอลสามารถเกิดปฏิกิริยาได้เหมือนกับแอลกอฮอล์ทั่วไป โดยที่หมู่ไฮดรอกซิลด้านนอกจะ มีความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยามากกว่าหมู่ไฮดรอกซิลตรงกลาง ภายใต้สภาวะที่เป็นกลางหรือด่าง กลีเซอรอลสามารถทนความร้อนได้ถึง 275 องศาเซลเซียส โดยไม่เกิดเป็นอะโครลีน ในทางตรงกันข้ามในสภาวะกรดเล็กน้อยพบว่า ที่อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส จะมีกลิ่นของอะโครลีน (อยู่ในช่วง 0.2-0.4 ppm) โดยที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส อะโครลีนจะเกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว ดังนั้น ปฏิกิริยาของกลีเซอรอล จึงควรทำในสภาวะที่เป็นกลางหรือด่าง และที่อุณหภูมิห้องกลีเซอรอลจะดูดความชื้นได้อย่างรวดเร็ว นอกจากนี้ กลีเซอรอลยังถูก

เอกสารนี้เป็นเอกสารของบริษัทฯ ไม่สามารถเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต หากมีข้อสงสัย กรุณาติดต่อฝ่ายขาย
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ออกซิไดซ์ได้ง่าย โดยที่อะตอมคาร์บอนด้านนอก จะถูกออกซิไดซ์เป็นหมู่คาร์บอกซิล และอะตอมคาร์บอนตรงกลางจะเกิดเป็นหมู่คาร์บอนิล

ตารางที่ 2.5 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันไอกับอุณหภูมิของกลีเซอรอล [7]

อุณหภูมิ (°C)	ความดันไอ (KPa)
290	101.30
266	53.30
222	13.30
204	6.67
175	2.00
152	0.67
130	0.18
100	0.03
20	<0.0001

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.6 สมบัติทางกายภาพของกลีเซอรอล [7]

Property	Value
Molecular weight	92.09
Melting point	18.0 °C
Boiling point (101.3 kPa)	290.0 °C
Density (20°C)	1.261 g/cm ³
Refractive index, n _D ²⁰	1.474
Dynamic viscosity (20°C)	1.410 Pa.s
Compressibility (28.5°C)	2.1 x 10 ⁻⁴ MPa ⁻¹
Gravity coefficient of thermal expansion (15-20°C)	0.000615 K ⁻¹
Surface tension (20°C)	63.4 mN/m
Heat of formation	669 kJ/mol
Heat of combustion	1662 kJ/mol
Heat of vaporization (55°C)	88.2 kJ/mol
(195°C)	76.1 kJ/mol
Heat of fusion (18°C)	18.3 kJ/mol
Heat of solution (Infinite dilution)	5.8 kJ/mol
Heat capacity (26°C)	2.41 kJ.kg ⁻¹ K ⁻¹
(-80°C)	1.91 kJ.kg ⁻¹ K ⁻¹
(-108°C)	0.91 kJ.kg ⁻¹ K ⁻¹
Thermal conductivity (0°C)	0.29 kJ.kg ⁻¹ K ⁻¹
Diffusion coefficient of water into glycerol (20°C)	1.336 x 10 ⁻¹¹ m ² /s
Specific electrical conductivity (20°C)	0.1 μS/cm
Relative dielectric constant (25°C)	42.48
Flash point	177 °C
Fire point	204 °C
Auto ignition temperature	429 °C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.2 กลิเซอไรด์ (Glyceride)

กลิเซอไรด์เป็นเอสเทอร์ระหว่างกลิเซอรอลกับกรดไขมัน โดยหมู่ไฮดรอกซิลของกลิเซอรอลที่มีอยู่ 3 หมู่ จะรวมตัวกับกรดไขมัน โดยปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน เกิดเป็น โมโนกลิเซอไรด์ ไดกลิเซอไรด์ หรือไตรกลิเซอไรด์

ในธรรมชาติพบไตรกลิเซอไรด์มากกว่าโมโนกลิเซอไรด์หรือไตรกลิเซอไรด์ โดยหมู่ของกรดไขมันที่ต่อกับกลิเซอรอลอาจจะเป็นชนิดเดียวกันหรือต่างชนิดกันก็ได้ และจะเป็นกรดไขมันที่อิ่มตัวหรือไม่อิ่มตัวก็ได้ ถ้านำไตรกลิเซอไรด์ไปทำปฏิกิริยาสะปอนนิฟิเคชัน (Saponification) ซึ่งเป็นการย่อยสลายพันธะของเอสเทอร์ด้วยด่าง จะให้ผลิตภัณฑ์เป็นกลิเซอรอลและเกลือของกรดไขมันที่อุณหภูมิห้อง ไตรกลิเซอไรด์จะมีสถานะเป็นของเหลวหรือของแข็งขึ้นอยู่กับชนิดและธรรมชาติของกรดไขมันที่เป็นองค์ประกอบ

ส่วนโมโนกลิเซอไรด์และไดกลิเซอไรด์สามารถละลายได้ทั้งในสารที่มีขั้วและไม่ขั้ว ด้านที่มีขั้วจะมีหมู่ไฮดรอกซิล ส่วนด้านที่ไม่มีขั้วจะจับกับโมเลกุลของไขมัน จึงจัดเป็นอิมัลซิไฟเออร์ชนิดหนึ่ง

2.5.3 ประโยชน์ของกลิเซอรอล

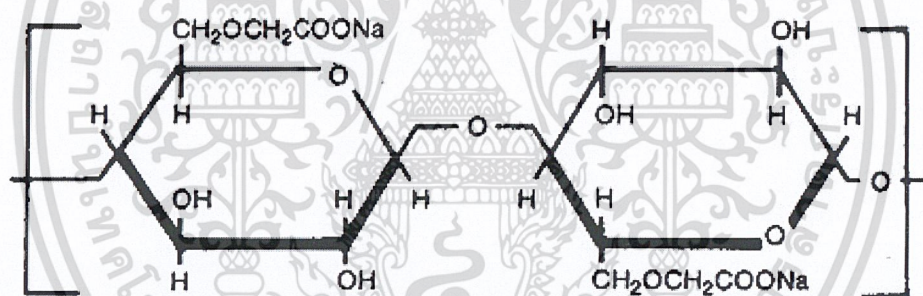
เนื่องจากคุณสมบัติทางกายภาพ และเคมีที่หลากหลาย จึงทำให้กลิเซอรอลเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีการใช้งานอย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรม คุณสมบัติที่สำคัญประการหนึ่งคือ เป็นสารที่ไม่เป็นพิษ ไม่มีสี และไม่มีกลิ่น การใช้กลิเซอรอลมีความสำคัญต่ออุตสาหกรรมยา เครื่องสำอาง และอาหาร เนื่องจากไม่เป็นพิษและมีคุณสมบัติเป็นตัวทำละลายที่ดีต่อสารประกอบหลายชนิด ทั้งสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ นอกจากนี้ กลิเซอรอลยังเป็นสารฮิวเมคแทนท์ ประเภทอินทรีย์ (Organic humectants) จำพวกพอลิไฮดรริกแอลกอฮอล์ คือสามารถดูดเก็บความชื้นจากบรรยากาศมาเก็บไว้ได้ ภายใต้อุณหภูมิและความชื้นปกติของบรรยากาศและมีความหนืด ทำให้สารละลายมีลักษณะเป็นไซรัป

2.6 คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส (Carboxymethyl cellulose, CMC)

คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส (Carboxymethyl cellulose, CMC) หรือ โซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส (Sodium carboxymethylcellulose) เป็นอนุพันธ์ของเซลลูโลสประเภทหนึ่ง ที่เกิดจากการแปรรูปหรือปรับปรุงคุณสมบัติของเซลลูโลส ให้เกิดการแทนที่โครงสร้างเดิมด้วยหมู่เมทิลและหมู่คาร์บอกซีเมทิล โดยการดึง Cellulose ออกจากไม้ หรือสำลี ด้วยด่าง เช่น โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) แล้วทำปฏิกิริยาต่อด้วย Methyl chloride ผลลัพธ์สุดท้ายจะได้สารประกอบที่มีลักษณะเป็นของแข็งสีขาว [8]

2.6.1 สมบัติของคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส

อนุพันธ์ของเซลลูโลสในรูปของเกลือ Sodium carboxymethylcellulose อาจเรียกว่า Cellulose gum CMC เป็นพอลิเมอร์ของชนิดที่มีประจุลบ และละลายได้ในน้ำ



รูปที่ 2.7 โครงสร้างเคมีของ Carboxymethylcellulose (CMC) [9]

CMC ที่ใช้ในอุตสาหกรรมอาหารมี DS ประมาณ 0.9 CMC จะละลายได้ทั้งในน้ำร้อนและน้ำเย็น สารละลาย CMC มีความคงตัวในช่วงพีเอชกว้าง ประมาณ 4-10 ในช่วงพีเอช 7-9 จะมีความหนืดสูงสุด ความหนืดของสารละลาย CMC จะลดลงเมื่อพีเอชลดลงและอุณหภูมิเพิ่มขึ้น ถ้าพีเอชต่ำกว่า 3 อาจทำให้ CMC อยู่ในรูปกรดอิสระตกตะกอน เมื่อพีเอชสูงกว่า 10 มีผลทำให้ความหนืดเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยเท่านั้น

เนื่องจาก CMC หรือ Carboxymethyl Cellulose มีลักษณะเป็นของแข็งสีขาวไม่มีกลิ่น ไม่มีรส ไม่เป็นอันตราย ไม่มีผลเสียต่อสิ่งแวดล้อม สามารถละลายน้ำได้ดีทั้งในน้ำเย็นหรือน้ำที่

อุณหภูมิห้อง โดยไม่ต้องต้ม มีคุณสมบัติเป็นสารเพิ่มความหนืดที่ช่วยในการยึดเกาะ และเป็นสาร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับครูผู้ทรงคุณวุฒิเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรรมใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6.2 ประโยชน์ของคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส

สำหรับการใช้ประโยชน์คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส สามารถใช้ประโยชน์ได้หลากหลาย อาทิ ใช้เป็นสารให้ความหนืดในอุตสาหกรรมกรรมอาหาร เช่น

- ไอศกรีม ช่วยให้ไอศกรีมมีความชุ่มน้ำ ลดการเคลื่อนตัวของ โมเลกุลน้ำ ไอศกรีมเนื้อนุ่มเนียน ไม่เกิดผลึกน้ำแข็งขนาดใหญ่

- ใช้เป็น Bulking agent เพื่อลดพลังงานในอาหาร

- ใช้ทำให้ฟิล์มมีลักษณะใสแข็งแรง ไม่ละลายในน้ำมันและตัวทำละลายอินทรีย์

- ใช้เป็นสารเคลือบผิวแคปซูลยา หรือ สารก่อให้เกิดการเป็นเจลทางด้านเภสัชกรรม

- ใช้เติมใน Natural gums ใช้เป็นสารป้องกันการตกตะกอนในสารแขวนลอย เช่น การเติม CMC ลงในกาว หรือสารยึดติด เพื่อเพิ่มความแกร่ง ความยืดหยุ่น และแรงยึดเกาะให้กาว เป็นต้น

2.7 สังกะสี (Zinc)

2.7.1 ข้อมูลทั่วไป

สังกะสีเป็นโลหะที่อยู่ในหมู่เดียวกับปรอทและแคดเมียม มีเลขมวล 65.38 เลขอะตอม 30 ความถ่วงจำเพาะ 7.14 จุดหลอมเหลว 419 องศาเซลเซียส มีจุดเดือด 907 องศาเซลเซียส หลอมง่าย กลิ้งใส่เข้ารูปง่าย สีขาว ทนทานต่อการเกิดสนิม ปกติเป็นโลหะที่มีความแข็งแต่เปราะจึงไม่สามารถตัดให้โค้งตามรูปร่างที่ต้องการได้ [10]

2.7.2 ประวัติของสังกะสี

ก่อนปี ค.ศ. 1500 ประเทศจีนและอินเดียได้รู้จักโลหะสังกะสี ถึงแม้ว่าจะยังไม่เป็นที่รู้จักอย่างชัดเจน โดยผลิตภัณฑ์แรกที่น่าสังกะสีมาใช้ก็คือ การทำเหรียญซึ่งจะประกอบด้วยสังกะสีถึง 99 % ในช่วงราชวงศ์หมิง (พ.ศ. 1368–1644) และได้ตีพิมพ์ลงในหนังสือในปี ค.ศ. 1637 ซึ่งบรรยายถึงการผลิตที่มีการควบคุมการหลอมเหลวและการเชื่อมพนักภาชนะบรรจุ ส่วนในประเทศอินเดียก็ยังคงมีการค้นพบการเดินระบบโดยควบคุมการหลอมเหลวของสังกะสี ในเมือง Sawai Madhopur (Rajasthan) ได้ยืนยันว่ามีผลิตภัณฑ์ของสังกะสีมาก่อน ปี ค.ศ. 1300 โรมัน, กรีก และฝั่งตะวันตกของโลก จะรู้จักเกี่ยวกับผลิตภัณฑ์ที่ทำมาจากทองเหลือง ซึ่งมีการใช้มาก่อน ปี ค.ศ. 800 โดยนำมาใช้ทำเป็นเครื่องประดับ แต่ก็ยังไม่มีใครรู้จักโลหะสังกะสีอย่างชัดเจน ในขณะที่ผลิตภัณฑ์ที่ทำมาจากทองเหลืองจะทำโดยการหลอมแร่ทองแดงหรือโลหะทองแดงกับสินแร่

สังกะสีที่ชื่อว่า สมิทโซไนต์ (Smithsonite) ซึ่งวิธีได้ใช้กันมาจนกระทั่งปี ค.ศ. 1800 จึงได้มีการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พัฒนาการหลอมทองเหลืองขึ้นซึ่งได้ค้นพบแหล่งพื้นที่ของการสะสมแร่สมิทโซไนต์ในหลาย ๆ พื้นที่ เช่น ในเมือง Luttich, Aachen และ Carinthia ในประเทศเยอรมันตะวันตก

คำว่า “สังกะสี” ได้ปรากฏการเขียนในครั้งแรกเมื่อปี ค.ศ. 1500 อย่างไรก็ตาม รากศัพท์ของคำนี้ก็ไม่มีความชัดเจน ซึ่งส่วนใหญ่ได้สันนิษฐานกันว่าน่าจะมาจากภาษาของโรมันที่ชื่อว่า Zinke (แปลว่า ชีของหวี) ซึ่งได้มาจาก Zacke (แปลว่า เหลี่ยมแหลมของยอดเขา) โดยสังเกตจากการปรากฏเหลี่ยมแหลมของแร่หรือการสะสมในเตาหลอม นอกจากนี้อาจสันนิษฐานมาจากภาษาของชาวเปอร์เซียที่ชื่อว่า seng (แปลว่า ก้อนหิน) ในช่วงปี ค.ศ. 1495–1555 GEORGIUS AGRICOLA ได้บรรยายเกี่ยวกับการค้นพบวัตถุที่มีปริมาณมากในทางตะวันออกของเทือกเขาแอลป์ เรียกว่า ซิงค์ (Zinc) โดยเรียกตามคนในพื้นที่และเขาได้ตั้งชื่อว่า Conterfey ซึ่งเป็นวัตถุที่มีสีขาวและจะมีการสะสมในเตาหลอมระหว่างการหลอมของแร่ Rammelsberg โดยประกอบด้วยโลหะสังกะสี

สมบัติของโลหะผสมสังกะสี มีรายละเอียดที่บันทึกปรากฏชัดเจนครั้งแรกในทวีปยุโรป และเมื่อมีสังกะสีปรากฏขึ้นในอินเดียและจีน ก็ได้มีการสร้างความสัมพันธ์ทางการค้ากับหลาย ๆ ประเทศในทวีปเอเชียตะวันออก ในปี ค.ศ. 1595 LIBAVIUS ได้ค้นพบตัวอย่างของสังกะสีในตะวันออกของประเทศอินเดีย โดยได้มีการนำเข้ามาจากประเทศฮอลแลนด์ และได้เรียกว่า Calaem แต่อย่างไรก็ตามสังกะสีกับเงินจะไม่สามารถแยกแยะได้เนื่องจากเป็นวัตถุที่คล้ายกันในชื่อ Cadmia โดยได้จากการชูดจากผนังของเตาเผา เมื่อมีการหลอมแร่ Rammelsberg ในเทือกเขาฮาร์ซ (Harz) อีกทั้งยังมีส่วนประกอบของทองแดงและเงิน

ในปี ค.ศ. 1617 LOHNEYSS ได้อธิบายถึงกระบวนการและได้จำแนกโลหะสังกะสีหรือ Conterfey ชนิดนี้ไว้อย่างละเอียดโดย AGRICOLA ใช้วิธีเดียวกับโลหะทอง ส่วนในปี ค.ศ. 1700 และปี ค.ศ. 1718 KUNKEL และ STAHL ได้พิจารณาถึงแร่สมิทโซไนต์ที่เติมเข้าไปในโลหะผสมของทองแดงระหว่างการทำผลิตภัณฑ์ทองเหลือง ในปี ค.ศ. 1721 HENKEL ได้ทำผลิตภัณฑ์สังกะสีจากแร่สมิทโซไนต์ ทางตอนเหนือของเมือง Silesia โดยใช้กระบวนการหนึ่ง ซึ่งเขาได้เก็บเป็นความลับ ในปี ค.ศ. 1746 ที่กรุง Berlin ประเทศเยอรมัน MARGGRAF ได้ทำการผลิตสังกะสีจากการถลุงแร่สมิทโซไนต์ ใน Sealed vessel ซึ่งเขาได้อธิบายถึงกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์ของเขาไว้อย่างละเอียด เหตุนี้จึงมีการสร้างทฤษฎีพื้นฐานของการผลิตสังกะสี

ก่อนปี ค.ศ. 1720 อุตสาหกรรมการผลิตสังกะสีครั้งแรกเกิดขึ้นในประเทศอังกฤษ โดยใช้กระบวนการนำร่องขนาดใหญ่ ซึ่งพื้นฐานเหล่านี้นำมาใช้เป็นความรู้ในวิธีการผลิตสังกะสี และได้แพร่กระจายมายังทวีปเอเชียตะวันออก ต่อมาในปี ค.ศ. 1743 CHAMPION ได้นำกระบวนการเหล่านี้มาปรับใช้จากการผลิตทองเหลืองไปเป็นการผลิตสังกะสีโดยการถลุงและเพื่อนำมาใช้ในไม่ช้ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งหาข้อให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้ การปลอมสังกะสีครั้งแรกที่เมือง Bristol โดยมีองค์ประกอบของสังกะสีมากกว่า 200 ตัน และยังนำ

กระบวนการนี้ไปผลิตสังกะสีจากสินแร่ซัลไฟด์ (Sulfide) หลังจากการอบในขั้นต้น โดยในปัจจุบันอุตสาหกรรมผลิตสังกะสีในประเทศอังกฤษอยู่ในเมือง Bristol และเมือง Swansea ในปี ค.ศ. 1746 ยุโรปได้ทำซิงค์ซัลไฟด์ให้บริสุทธิ์เพื่อผลิตโลหะสังกะสี และระหว่างปี ค.ศ. 1750-1850 ดร. Raulin ชาวฝรั่งเศส พบธาตุสังกะสีในร่างกายสิ่งมีชีวิต และพบว่าร่างกายของมนุษย์ต้องการธาตุสังกะสี จากการค้นพบครั้งแรกนั้นทำให้เราทราบว่าธาตุสังกะสีเป็นสารที่จำเป็นต่อร่างกายมนุษย์ ซึ่งภายหลังจากในปี ค.ศ. 1965-1990 ได้มีรายงานทางการแพทย์ยืนยันถึงการเป็นโรคขาดธาตุสังกะสี และบ่งชี้ว่าสังกะสีเป็นหนึ่งในสารอาหารที่จำเป็นต่อร่างกายโดยสังกะสีมีความสำคัญต่อร่างกายมนุษย์ คือ

1. เป็นองค์ประกอบสำคัญในเอนไซม์หลายชนิดในร่างกายมนุษย์
2. ช่วยในการเจริญเติบโต และระบบต่างๆ ของร่างกาย
3. สำคัญมากต่อการพัฒนาเซลล์สมอง
4. ถ้าขาดสังกะสีจะทำให้การรับรสและความอยากอาหารลดลง
5. มีผลต่ออวัยวะเพศและการทำงานของระบบสืบพันธุ์
6. ส่งเสริมสุขภาพผิวและช่วยในการรักษาความผิดปกติของผิวหนัง
7. ส่งเสริมการทำงานของระบบคุ้มกันของร่างกาย

สังกะสีเป็นครั้งแรกในปี ค.ศ. 1798 โดยใช้กระบวนการ Horizontal retort ซึ่งเขาได้พัฒนาขึ้นมาเองและสร้างที่ Wessolia ทางตอนเหนือของเมือง Silesia ซึ่งวัตถุดิบเริ่มแรกที่ถูกนำมาใช้คือ Zincalmei ซึ่งเป็นผลพลอยได้จากการผลิตตะกั่วและเงิน ต่อมาภายหลังได้กลายมาเป็นการผลิตสังกะสีโดยตรงจากสินแร่สมิทโซไนต์ โดยใช้การหลอมแร่แบบง่าย ๆ แต่ถ้าจะใช้กระบวนการที่ทันสมัย จะใช้สินแร่ซิงค์เบลนด์ (Zinc blende) ซึ่งขั้นแรกจะเปลี่ยนไปเป็นสารประกอบออกซิเจน โดยการอบหลังจากการพัฒนานี้เกิดขึ้น ทำให้มีกระบวนการหลอมในรูปแบบใหม่ ๆ ขึ้นมาในเมือง Silesia ซึ่งเป็นสถานที่ที่ใกล้แหล่งสะสมของตะกอนแร่และในพื้นที่รอบ ๆ ของเมือง Luttich ประเทศเบลเยียมและเมือง Aachen ประเทศเยอรมัน ในปี ค.ศ. 1840 ประเทศสหรัฐอเมริกาได้ค้นพบตะกอนแร่ที่มีความอุดมสมบูรณ์ จึงทำให้มีอุตสาหกรรมผลิตสังกะสีเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว และในปี ค.ศ. 1907 ประเทศเยอรมัน ซึ่งได้มีการผลิตตะกั่วมาเป็นระยะเวลายาวนานของโลกนั้นก็ได้หันมาผลิตสังกะสีแทน โดยที่แร่เริ่มมีคุณภาพที่ดีขึ้นอันเนื่องมาจากได้มีการนำการแยกประเภทของแร่ และนำวิธีการลอยตัวมาใช้ในปี ค.ศ. 1920 ในปัจจุบัน มีการผลิตสังกะสีโดยวิธีการแยกด้วยไฟฟ้า ซึ่งพัฒนาขึ้นโดยบริษัท Consolidated Mining & Smelting ในเมือง Trail ประเทศแคนาดา และบริษัท Anaconda Copper ในเมือง Montana ประเทศสหรัฐอเมริกาซึ่งเป็นการนำแร่มาละลายด้วยกรดซัลฟิวริก ทำให้สามารถแยกโลหะสังกะสีออกมาได้สังกะสีมีความบริสุทธิ์สูง

การพัฒนาที่สำคัญในการผลิตสังกะสีเกิดขึ้นในปี ค.ศ. 1930 บริษัท New Jersey ในเมือง Palmerton ประเทศอังกฤษได้ใช้ Singer vertical retort แทนการใช้ Horizontal retort ซึ่งเป็นวิธีที่ทำให้ง่าย สามารถกระทำได้อย่างต่อเนื่องและได้สังกะสีที่บริสุทธิ์สูงประมาณ 99.5 % จากข้อมูลทางสถิติของการผลิตสังกะสีทั่วโลกเมื่อย้อนกลับไป 100 ปี พบว่า การผลิตสังกะสีสามารถผลิตได้ 472,000 ตัน และในปี ค.ศ. 1913 สามารถผลิตสังกะสีได้ 1,000,000 ตัน ซึ่งในยุคแรกจะใช้สังกะสีในการผลิตทองเหลืองเพื่อใช้ในการทำเครื่องประดับ เครื่องใช้ในครัวเรือนและเหรียญ การแยกสังกะสีเป็นกระบวนการแรกในอุตสาหกรรมนำร่อง ในปี ค.ศ. 1800 โดย GEISS และต่อมาในช่วงปี ค.ศ. 1805-1875 เขาก็ได้สร้างเตาหลอมสังกะสีขึ้น ประโยชน์ของสังกะสีจัดเป็นตัวต้านทานการกัดกร่อนที่ดี โดยจะใช้ในการเคลือบผลิตภัณฑ์พวกเหล็กกล้า การบดสังกะสีจะทำที่อุณหภูมิ 100-150 องศาเซลเซียส ซึ่งถูกค้นพบในปี ค.ศ. 1805 และโรงบดสังกะสีถูกสร้างครั้งแรกในประเทศเบลเยียม และถูกสร้างในเมือง Silesia ในปี ค.ศ. 1812 โดย DONY [11]

2.7.3 แร่สังกะสี

แร่สังกะสี (Zinc Mineral) เป็นแร่โลหะชนิดหนึ่งที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติ ประกอบด้วยธาตุต่าง ๆ โดยมีธาตุสังกะสีเป็นหลัก ธาตุสังกะสีมีความจำเป็นอย่างยิ่งต่อการเจริญเติบโตของสิ่งมีชีวิตทั้งคน สัตว์ และพืช เมื่อนำแร่สังกะสีมาถลุงจะได้โลหะที่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมต่าง ๆ มากมาย จึงนับเป็นแร่ที่คุณค่าทางเศรษฐกิจที่สำคัญชนิดหนึ่ง

2.7.4 การกำเนิดของสังกะสี

การกำเนิดของแหล่งแร่สังกะสี มักจะมีแคดเมียมอยู่ด้วย และมักจะมีแร่ตะกั่วซึ่งเป็นแร่มีค่าทางเศรษฐกิจเกิดร่วมด้วย ลักษณะการกำเนิดของแร่สามารถแบ่งออกได้เป็น 7 ประเภท คือ

1. การกระจายของแร่สฟาเลอไรต์ในชั้นแผ่นหิน (Disseminated sphalerite in shales) มักเกิดร่วมกับทองแดงในหินดินดานที่เรียกว่า Kupferschiefer type แต่ส่วนมากการกำเนิดแบบนี้มักไม่ค่อยมีคุณค่าทางเศรษฐกิจ
2. การกระจาย การรวมกลุ่ม และการแข็งตัวของแร่สฟาเลอไรต์ในหินทราย, หินควอทซ์ และชั้นแผ่น (Dissemination, knots, and concretion of sphalerite in sandstone, quartzite and shale) ในหิน แหล่งกำเนิดแบบนี้มักมีแร่กาไลนา ทองแดง และเหล็กซัลไฟด์เกิดร่วมอยู่ด้วย
3. ช่วงของการแพร่กระจาย การแทนที่ตะกอน เส้นทางการแทนที่ตะกอนของแร่สฟาเลอไรต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่สามารถนำไปใช้
ไม่ว่ากรณีใด (Zone of disseminated sphalerite, veins of sphalerite, replacement deposit of sphalerite)

etc. carbonate rocks which often show the effects of dolomitization and silicification) การกำเนิดแบบนี้รู้จักกันในแบบของ “Mississippi Valley type” มักจะมีปริมาณของแร่ตะกั่ว-ทองแดงมากพอสมควร และแร่เงินเป็นปริมาณน้อย

4. การแปรสภาพโดยการแทนที่ (SKarn-type Zine deposits) ในแหล่งกำเนิดแบบนี้มักมีแร่ตะกั่ว ทองแดง เงิน และทองคำ เกิดร่วมอยู่ด้วย
5. การสะสมของแร่แฟรงคลิไนต์ วิลเลไมต์ และซิงไคต์ (Franklinite-Willemite-Zincite deposits) การกำเนิดของกลุ่มแร่นี้ อาจมีกำเนิดตามแบบที่ 4 คือ แบบ Skarn-type deposits ซึ่งเดิมที่คิดว่ามีกำเนิดแบบ Pyrometasmatic deposits แร่ที่มักเกิดร่วมอยู่ด้วย นอกเหนือจากแร่ 3 ชนิดที่กล่าวมาแล้ว คือพวก Zinc-Silicates, Manganese - Silicates, Axinite, scapolite, Calcite, Garnet, Rhodochrosite, Fluorite, Sphalerite, Galena, Arsenopyrite, Chacopyrite and Loellingite. การกำเนิดแบบที่ Franklin Furnance และ Sterling Hill, New Jersey เกิดอยู่ใน Crystalline limestone และหินหยาบของ Precambrian (Grenville)
6. การแทนที่และการสะสมของสายแร่สฟาเลอไรต์ในชั้นของหินชนิดต่าง ๆ (Vein and replacement deposits of sphalerite in various type of rocks) แร่ที่มักเกิดร่วมอยู่ในแหล่งกำเนิดนี้มักประกอบด้วยแร่กาสินา เหล็ก ทองแดง และเงินซัลไฟด์ อาจมีแร่แบไรต์เป็นกากแร่ (gangue mineral)
7. การทับถมของแร่ซัลไฟด์เป็นส่วนใหญ่ (Massive sulfide deposits) ประกอบด้วยแร่สฟาเลอไรต์ (sphalerite) เหล็ก ทองแดง และเงินซัลไฟด์ ในบางแห่งอาจมีแร่แบไรต์เป็นแร่ที่มีค่าด้วย

แร่สังกะสีที่พบมากที่สุดในโลก ได้แก่ แร่สฟาเลอไรต์ (ZnS) ส่วนในประเทศไทยจะพบแร่สังกะสีในภาคเหนือและภาคตะวันตก ซึ่งเป็นแร่สังกะสีชนิดซิติลิต คาร์บอนเนตและออกไซด์ ในรูปของ แร่เฮมิโมไฟต์ ($Zn_4(Si_2O_7)(OH)_2H_2O$)₃ สมิทโซไนต์ ($ZnCO_3$) และซิงไคต์ (ZnO) ตามลำดับ

- การแพร่กระจายของสังกะสีบนเปลือกโลก

1) สังกะสีในหินอัคนี (Igneous Rock)

สังกะสีที่เกิดอยู่ในหินอัคนีจะมีอยู่ในรูปของซิงค์ซัลไฟด์ (ZnS) นอกจากนี้ สังกะสียังสามารถเกิดร่วมกับแร่จำพวกเหล็ก-แมกนีเซียม (Ferro-Magnesium) โดยสังกะสีจะไปแทนที่ไอออนของ Fe^{2+} และ Mg^{2+} ในแร่เหล่านั้น แร่ที่สำคัญที่สุดของสังกะสี คือ ซิงค์ซัลไฟด์ (ZnS) แร่พวกนี้จะเกิดอยู่เป็นเม็ดเล็ก ๆ ซึ่งเป็นผลจากกระบวนการลำดับส่วนหนืด (Magmatic differentiation) ในขณะที่

หินหนืด (Magma) ยังร้อนและหลอมเหลวอยู่โดยการแยกเอาช่วงของซัลไฟด์ (Sulfide phase) ออกจากช่วงของซิลิเกต (Silicate phase) ในระยะแรกเริ่มแรกของการแยกตัวนี้ ปริมาณของสังกะสีในหินหนืด (Magma) มีอยู่น้อยมาก บางส่วนของสังกะสีจะแยกตัวออกมาพร้อมกับพวกซัลไฟด์ (Sulfide) และรวมตัวเป็นซิงค์ซัลไฟด์ (ZnS) ในระยะหลังของการแยกตัวปริมาณของสังกะสีในหินหนืดนี้มีค่าระหว่าง 30-130 ppm ซึ่งขึ้นอยู่กับหินชนิดต่าง ๆ คือ ใน Ultrabasic rock ประมาณ 50 ppm Basic rock ประมาณ 105 ppm ในแกรนิตประมาณ 60 ppm และใน Syenite ประมาณ 130 ppm

2) สังกะสีในหินชั้น (Sedimentary rock)

การแพร่กระจายของสังกะสีในหินชั้นมีค่าแตกต่างกันมากตามลักษณะของหิน ปริมาณของสังกะสีในหินดินดานและหินทราย มีค่าใกล้เคียงกับในหินอัคนีในแผ่นหิน (Shale) และในดินเหนียว (Clay) บางแห่งมีค่าของสังกะสีอยู่สูงมาก เนื่องจากสังกะสีจะถูกดูดเอาไว้ด้วยดินเหนียว (Clay) เข้าไปอยู่ในโครงสร้างของแร่จำพวกดินเหนียว (Clay) ปริมาณของสังกะสีในหินดินดานเฉลี่ยประมาณ 95 ppm ในหินทรายประมาณ 16 ppm และในหินพวกคาร์บอเนต (Carbonate) ประมาณ 20 ppm ส่วนในดินตะกอนในท้องทะเลลึก จะมีปริมาณของสังกะสีสูงประมาณ 165 ppm โดยสังกะสีจะถูกดูดด้วยแร่ ดินเหนียว (Clay) และบางที่ก็ตกตะกอนรวมอยู่กับแร่พวกลิโมนิต (Limonite) ส่วนในดินทั่ว ๆ ไปจะมีสังกะสีอยู่ตั้งแต่ 10-300 ppm โดยเฉลี่ยประมาณ 50 ppm

3) สังกะสีในหินแปร (Metamorphic rock)

ในขณะที่หินเปลี่ยนสภาพเป็นหินแปรโดยวิธีการใด ๆ ก็ตาม ซึ่งทำให้เกิดกระบวนการผันกลับ (Retegrressive Metarmorphic Transformation) ทำให้เกิดแร่พวกไบโอไทต์ (Biotite) และฮอร์นเบลนด์ (Hornblend) ซึ่งจะทำให้สังกะสี (Zn), ตะกั่ว (Pb), และแมงกานีส (Mn), เหล็ก (Fe) และไททาเนียม (Ti) แยกตัวออกมาจากหินเดิมและจะรวมตัวเป็นแร่ใหม่เกิดแร่จำพวกเฮเทอร์โรไทต์ (Heterotite), กาไนท์ (Gahnite) และแฟรงกลินิต (Franklinite) ขึ้น

4) สังกะสีในน้ำทะเล

สังกะสีจะละลายปนอยู่ในน้ำในลักษณะของซิงค์ไอออน (Zn^{2+}) ซิงค์ซัลเฟต ($ZnSO_4$) และซิงค์คลอไรด์ ($ZnCl_2$) ในขณะที่เกิดผุกร่อนของหิน สารประกอบเหล่านี้จะถูกพัดพาไปทั้งน้ำบนผิวโลกและน้ำใต้ดินบางส่วนจะพัดพาไปสู่ทะเล ซึ่งสังกะสีที่อยู่ในทะเลจะอยู่ในลักษณะของซิงค์ไอออน (Zn^{2+}) หรือ ซิงค์ซัลเฟต ($ZnSO_4$) นี้จะเกิดการรวมตัวกับคาร์บอเนต (Carbonate) เกิดเป็นแร่สมิทโซไนต์ขึ้น ส่วนในบริเวณทะเลลึก ๆ ซึ่งมีซัลไฟด์ไอออน (S^{2-}) อยู่สูงก็จะเกิดเป็นซิงค์ซัลไฟด์ (ZnS) นอกจากนี้ ปริมาณของสังกะสีจะมีอยู่ค่อนข้างสูงในบริเวณแหล่งฟอสเฟต ซึ่งมีต้น

กำเนิดจากกระบวนการอินทรีย์ (Organic process) ปริมาณของสังกะสีในน้ำทะเลเฉลี่ยประมาณ 0.10 ppm ในน้ำจืดจะมีค่าประมาณ 0.001-0.2 ppm ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5) ชีวเคมีของสังกะสี (Biochemistry of Zinc)

สังกะสีผสมอยู่ในพืช เนื่องจากพืชต่าง ๆ ดูดเอาแร่ธาตุจากดินขึ้นไป สังกะสีเป็นตัวช่วยกระตุ้นการเจริญเติบโตของพืช แต่ถ้ามีปริมาณมากก็จะเป็นพิษต่อพืช ในบางครั้งพืชจะรวบรวมเอาสังกะสีเอาไว้เป็นจำนวนมากซึ่งมีพืชชนิดหนึ่งเรียกว่า Thaspi Calaminata นอกจากนี้ยังพบสังกะสีอยู่เป็นจำนวนมากในสัตว์ได้แก่ หอยนางรม (Oyster)

- ปริมาณการใช้สังกะสีในโลก

จากการประชุมกลุ่มศึกษาตะกั่วและสังกะสีระหว่างประเทศ (International Lead and Zinc Study Group: ILZSG) ซึ่งไทยเป็นสมาชิก ณ กรุงลอนดอน สหราชอาณาจักร ระหว่างวันที่ 26-28 ตุลาคม 2548 สำหรับการใช้สังกะสีในช่วง 4-5 ปีที่ผ่านมาเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ปี 2548 มีการใช้ประมาณ 10.5 ล้านตัน เพิ่มขึ้นร้อยละ 5 โดยเป็นผลสืบเนื่องจากจีนซึ่งเป็นผู้บริโภคหลัก มีโครงการก่อสร้างและสาธารณูปโภคขนาดใหญ่ รวมทั้งการใช้เพิ่มขึ้นในอินเดียและเกาหลีในปี 2549 ผลผลิตทั้งโลหะตะกั่วและโลหะสังกะสีจะเพิ่มขึ้นอีกประมาณร้อยละ 3.5 โดยเกิดจากการขยายการผลิตของจีน อินเดีย และแคนาดา [12]

2.7.5 สังกะสีในประเทศไทย

- แหล่งแร่สังกะสีในประเทศไทย

ประเทศไทยพบแหล่งแร่สังกะสีมากที่อำเภอแม่สอด จังหวัดตาก ได้แก่เหมืองแร่บริษัท ตากไมนิ่ง จำกัด และบริษัท ผาแดงอินดัสทรี จำกัด (มหาชน) นอกจากนี้ยังพบแร่สังกะสีที่อำเภอองหระ จังหวัดพัทลุง จังหวัดกาญจนบุรี แพร่ สงขลา และลำพูน เป็นต้น

- การผลิตแร่สังกะสีในประเทศไทย

การทำเหมืองแร่สังกะสีในปัจจุบันที่สำคัญคือ บริเวณผาแดง อำเภอแม่สอด จังหวัดตาก ของบริษัทผาแดงอินดัสทรี จำกัด ก่อนการทำเหมืองได้ประเมินปริมาณสำรองแร่สังกะสีไว้ประมาณ 4.5 ล้านเมตริกตัน และได้ทำการก่อสร้างโรงถลุงแร่สังกะสีตั้งแต่ปี 2527 ในระยะแรกทำการผลิตเฉพาะโลหะสังกะสีแท่ง (Zinc Ingot) ในระยะต่อมาได้เพิ่มการผลิตโลหะสังกะสีผสม (Zinc alloy) การถลุงแร่สังกะสีเป็นกระบวนการถลุงแร่สังกะสีชนิดซีลิกเตมาจากแหล่งแร่แม่สอด จังหวัดตาก เหมืองแม่สอดได้เปิดเหมืองมาเป็นปีที่ 15 ผลิตแร่สังกะสีได้ทั้งสิ้นประมาณ 4.4 ล้านเมตริกตันที่มีเนื้อโลหะสังกะสีเฉลี่ยร้อยละ 22 ปัจจุบันความสมบูรณ์ของแร่ลดลงมีเนื้อโลหะในแร่ประมาณร้อยละ 10 ปริมาณแร่สำรองลดลงเหลือประมาณ 370,000-400,000 ตัน ด้วยเหตุนี้จึงต้องมี

เอกสา ไม้ว การนำเข้าแร่จากต่างประเทศ มีทั้งแร่ซีลิกเตและแร่ซีลิกซ์ไฟด์ บริษัทฯ ได้ปรับเปลี่ยนใช้

กระบวนการถลุงแร่ใหม่ให้เหมาะสมกับวัตถุดิบ โดยลงทุนสร้างโรงย่างแร่หรือโรงงานแคลไซน์ในบริเวณนิคมอุตสาหกรรมผาแดง ตำบลมาบตาพุด อำเภอเมือง จังหวัดระยอง ด้วยกำลังการผลิตสังกะสีแคลไซน์ 150,000 ตันต่อปี และได้ปรับเปลี่ยนกระบวนการถลุงแร่ในบางขั้นตอนของโรงถลุงสังกะสี จังหวัดตากด้วย

โรงงานผลิตแคลไซน์ ใช้แร่ซิงค์ซัลไฟด์ที่นำเข้ามาจากต่างประเทศมาผ่านกระบวนการย่างแร่ ทำให้แร่ซิงค์ซัลไฟด์เปลี่ยนไป ได้ผลิตภัณฑ์เป็นแคลไซน์ (ZnO และ $ZnO.Fe_2O_3$) ซึ่งจะถูกส่งไปเป็นวัตถุดิบในกระบวนการถลุงโลหะที่โรงงานในจังหวัดตาก นอกจากนี้ยังได้ก๊าซเป็นผลิตภัณฑ์พลอยได้จากกระบวนการ สามารถนำไปผลิตกรดกำมะถันต่อไป

การผลิตแร่สังกะสีในประเทศไทยในปี พ.ศ. 2540 มีปริมาณการผลิต 91,132 เมตริกตัน และในปี พ.ศ. 2541 ปริมาณการผลิตเพิ่มขึ้นร้อยละ 114.1 เป็นปริมาณ 195,122 เมตริกตัน มูลค่า 1,508 ล้านบาท

จากข้อมูลค่าผลผลิตแร่ของประเทศไทยปี 2548 และ 2549

- ในปี 2548 มีการผลิตแร่จำนวน 39 ชนิด มีมูลค่าทั้งสิ้น 35,355,708.094 บาท
- ในปี 2549 มีการผลิตแร่จำนวน 41 ชนิด มีมูลค่าทั้งสิ้น 39,479,972.865 บาท

ซึ่งพบว่าแร่สังกะสีมีมูลค่าผลผลิตแร่เป็นอันดับ 3 รองจากหินปูนและลิกไนต์ โดยมีมูลค่าและสัดส่วนร้อยละของผลผลิตแร่ในประเทศไทย

- การผลิตโลหะสังกะสีในประเทศไทย

ในปี 2547 บริษัท ผาแดงอินดัสทรี จำกัด (มหาชน) ผู้ผลิตโลหะสังกะสีรายเดียวของประเทศ มีการผลิตโลหะสังกะสี 115,500 ตัน แบ่งเป็นโลหะสังกะสีแท่งบริสุทธิ์ 68,800 ตัน และโลหะสังกะสีผสม 46,700 ตัน รวมมูลค่าการผลิต 4,620 ล้านบาท ปริมาณการผลิตลดลงจากปี 2546 ซึ่งมีการผลิต 116,400 ตัน เพียงเล็กน้อยเท่านั้น แต่สัดส่วนของการผลิตโลหะสังกะสีผสมเพิ่มขึ้นเนื่องจากราคาดีกว่า บริษัท ฯ จึงมีนโยบายมุ่งเน้นเป็นการจำหน่ายผลิตภัณฑ์มูลค่าเพิ่ม บริษัทผาแดงอินดัสทรี จำกัด (มหาชน) ทำการถลุงโลหะจากสินแร่โดยใช้แร่ซิงค์ซัลไฟด์ (ความบริสุทธิ์ประมาณร้อยละ 21-23) จากเหมืองของบริษัทฯ จากเหมืองอื่นในประเทศ และจากการนำเข้าผสมกับแร่เปอร์เซนต์ต่ำที่ผ่านกระบวนการลอยแร่ (ปรับความบริสุทธิ์จากร้อยละ 7 เป็นร้อยละ 32) และสังกะสีแคลไซน์ที่เกิดจากนำหัวแร่ซิงค์ซัลไฟด์ (ความบริสุทธิ์ประมาณร้อยละ 60) มาผ่านความร้อนที่อุณหภูมิสูง เพื่อเปลี่ยนให้เป็นซิงค์ออกไซด์โดยโรงงานซึ่งตั้งอยู่ที่จังหวัดระยอง สัดส่วนแร่นำเข้าต่อแร่ในประเทศเป็น 54:46 โดยนำเข้าแร่ซิงค์ซัลไฟด์จากเวียดนามและลาว และหัวแร่เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งکشต์ไฟด์จากออสเตรเลียและอเมริกาใต้ นอกจากนี้ยังมีการนำเข้าโลหะจากจีนมาหลอมใหม่ในการผลิตโลหะสังกะสีผสมอีกด้วย

- ปริมาณการใช้สังกะสีในประเทศไทย

โลหะที่ผลิตได้ในประเทศจำหน่ายในประเทศร้อยละ 71 ของผลผลิตทั้งหมด ส่วนที่เหลือส่งออกไปจำหน่ายยังต่างประเทศ อย่างไรก็ตาม ความต้องการใช้โลหะสังกะสีในประเทศเพิ่มขึ้นทุกปี ตามการขยายตัวของอุตสาหกรรมต่อเนื่อง ได้แก่ อุตสาหกรรมเหล็กชุบสังกะสี อุตสาหกรรมหล่อขึ้นรูปชิ้นงาน อุตสาหกรรมผลิตทองเหลือง และอุตสาหกรรมแบตเตอรี่ เป็นต้น ในปี 2547 มีปริมาณการบริโภคในประเทศ 141,000 ตัน เพิ่มขึ้นจากปี 2546 ซึ่งมีปริมาณการบริโภค 126,000 ตัน คิดเป็นอัตราการเพิ่มขึ้น ร้อยละ 12 จึงมีการนำเข้าโลหะสังกะสีจากต่างประเทศ ส่วนปริมาณการใช้สังกะสีในประเทศไทยในอุตสาหกรรมอื่น ๆ

- การนำเข้าโลหะสังกะสีในประเทศไทย

มีการนำเข้าโลหะสังกะสีและผลิตภัณฑ์โลหะผสมสังกะสีชนิดที่ไม่มีการผลิตในประเทศเนื่องจากปริมาณความต้องการใช้มีไม่มากนัก ส่วนใหญ่นำเข้าในรูปแบบโลหะสังกะสีและสังกะสีผสมสังกะสีผงและเกล็ดลวดสังกะสี สังกะสีแผ่น สังกะสีเปลว ลวด หลอดท่อและอุปกรณ์ข้อต่อ มีการนำเข้าโลหะสังกะสีจากประเทศต่าง ๆ เช่น ออสเตรเลีย เบลเยียม จีน เกาหลีใต้ ญี่ปุ่น และประเทศในกลุ่มอาเซียน ปริมาณการนำเข้าในปี 2547 ประเทศไทยมีการนำเข้าโลหะสังกะสี 43,000 ตัน คิดเป็นมูลค่า 2,000 ล้านบาท เพิ่มขึ้นจากปี 2546 ที่มีการนำเข้า 34,000 ตัน มูลค่า 1,220 ล้านบาท หรือเพิ่มขึ้นร้อยละ 25 และ 54 ตามลำดับ ส่วนมากนำเข้าจากประเทศจีน ออสเตรเลีย และเกาหลีใต้ ในสัดส่วนร้อยละ 48, 13 และ 11 ของปริมาณการนำเข้าทั้งหมด

- การส่งออกโลหะสังกะสีในประเทศไทย

การส่งออกในปี 2547 มีการส่งออก 17,000 ตัน คิดเป็นมูลค่า 767 ล้านบาท ลดลงจากปี 2546 ซึ่งมีการส่งออก 24,000 ตัน มูลค่า 897 ล้านบาท หรือลดลงร้อยละ 29 และ 14 ตามลำดับ เนื่องจากปริมาณความต้องการใช้โลหะสังกะสีในประเทศสูงขึ้น ผลิตภัณฑ์ที่ผลิตได้ในประเทศจึงจำหน่ายให้ผู้ใช้ในประเทศเพิ่มขึ้น ตลาดส่งออกที่สำคัญได้แก่ ฮองกง ไต้หวัน จีน อินโดนีเซีย และเวียดนาม นอกจากการส่งออกในรูปแบบผลิตภัณฑ์โลหะสังกะสีและโลหะผสมสังกะสีแล้วยังส่งออกในรูปแบบสังกะสีผงและเกล็ด สังกะสีแผ่น หลอดท่อและอุปกรณ์ข้อต่อ เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ปัญหาและอุปสรรคของการผลิตสังกะสีของประเทศไทย

ปัญหาที่สำคัญของการผลิตสังกะสีของประเทศไทย คือ แหล่งแร่ซิงค์ซิติลิกเกตที่เหมืองแม่สอด มีปริมาณแร่ลดลงและปริมาณแร่ที่มีคุณภาพเนื้อโลหะสังกะสีมีเพียงร้อยละ 5-10 ส่งผลกระทบต่อต้นทุนการผลิตที่สูงขึ้นตามลำดับ ต้องมีการนำเข้าสินแร่จากต่างประเทศ และต้องมีการปรับปรุงกระบวนการผลิตเพื่อสามารถใช้แร่ซิงค์ซิติลิกเกตและซิงค์ซัลไฟด์ร่วมกันในการผลิต

- แนวโน้มการผลิตโลหะสังกะสีในประเทศไทย

ถึงแม้ว่าในปี 2547 บริษัทฯ ผาแดงอินดัสทรี จำกัด (มหาชน) ผู้ผลิตโลหะสังกะสีของประเทศไทยได้รายงานผลการดำเนินงานที่ดีขึ้นมาก โดยมีรายได้และกำไรจากการดำเนินงานเพิ่มขึ้นจากปี 2546 ซึ่งเป็นผลจากราคาโลหะสังกะสีโลกที่ได้ปรับสูงขึ้นประกอบกับปริมาณความต้องการใช้โลหะสังกะสีภายในประเทศมีการขยายตัวเพิ่มขึ้น โดยเฉพาะอุตสาหกรรมเหล็กชุบสังกะสีและอุตสาหกรรมชิ้นส่วนยานยนต์ อีกทั้ง โครงการ โรงลอยแร่ที่เหมืองแม่สอดของบริษัทฯ ได้ดำเนินการแล้วเสร็จและมีการผลิตเต็มที ส่งผลให้บริษัทฯ สามารถนำแร่สังกะสีที่มีคุณภาพต่ำที่มีอยู่มาใช้ให้เกิดคุณค่าเชิงพาณิชย์และลดสัดส่วนการนำเข้าแร่จากต่างประเทศ อย่างไรก็ตามบริษัท ผาแดงอินดัสทรี จำกัด (มหาชน) ประสบปัญหาและอุปสรรคจากปัจจัยต่าง ๆ และจะยังส่งผลกระทบต่อเนื่องในปี 2548 อาทิการขาดแคลนแหล่งแร่ทั้งในประเทศและต่างประเทศ โดยเฉพาะหัวแร่ซิงค์ซัลไฟด์ บริษัทฯ จึงต้องลดปริมาณการผลิตสังกะสีแคสไนต์ลง นอกจากนี้ยังมีผลกระทบจากต้นทุนค่าขนส่งทั้งทางเรือและทางบกที่เพิ่มสูงขึ้น ต้นทุนค่าไฟฟ้าที่ปรับราคาสูงขึ้น รวมทั้งการลดอัตราภาษีนำเข้าโลหะสังกะสีตามนโยบายการค้าเสรีของภาครัฐซึ่งเป็นปัจจัยภายในประเทศที่ส่งผลกระทบต่อความสามารถในการแข่งขัน

แนวโน้มการบริโภคโลหะสังกะสีของประเทศไทยสูงขึ้นตามอัตราการขยายตัวของอุตสาหกรรมต่อเนื่อง ในขณะที่ผู้ผลิตดำเนินการผลิตเต็มกำลังของเครื่องจักรและอุปกรณ์แล้ว ประกอบกับมีข้อจำกัดอันเนื่องมาจากปัญหาและอุปสรรคหลายประการดังที่ได้กล่าวไปแล้ว ผลผลิตจึงไม่เพียงพอต่อความต้องการของประเทศ ส่งผลให้ยังคงต้องพึ่งพาการนำเข้า อย่างไรก็ตามผู้ผลิตโลหะสังกะสี ได้ดำเนินการเจาะสำรวจแร่เพิ่มเติมในบริเวณใกล้เคียง และพื้นที่เดิม แต่มีระดับความลึกเพิ่มขึ้น พบสินแร่สังกะสีที่มีศักยภาพและคุณภาพเนื้อโลหะสังกะสีในแร่สูงมีการยื่นขอประทานบัตรเพื่อทำเหมืองเพิ่มขึ้นพร้อมกับได้ทำการสำรวจแร่ในต่างประเทศ เช่น การสำรวจแร่ที่สาธารณรัฐประชาธิปไตยประชาชนลาว สหภาพเมียนมาร์พบปริมาณและศักยภาพแร่สูงพร้อมที่จะลงทุนดำเนินการทำเหมืองแร่ในโอกาสต่อไป สำหรับแนวทางกลยุทธ์ทางการตลาด ผู้ผลิตมี

เอกสา นโยบายที่จะผลิตโลหะสังกะสีผสมเพิ่มขึ้น เนื่องจากมีมูลค่าเพิ่มสูงกว่า ส่วนการส่งออกคาดว่าจะมี
ไม่พอ ปริมาณลดลงเนื่องจากผลิตภัณฑ์ที่ผลิตได้จะถูกใช้ภายในประเทศมากขึ้น [13] รทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

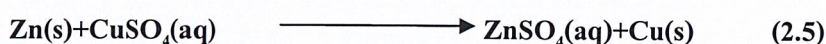
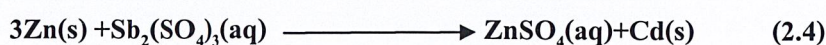
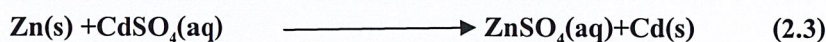
2.7.6 สิ้นแร่และกรรมวิธีถลุงแร่สังกะสี

แร่สังกะสีที่มีความสำคัญทางอุตสาหกรรม ได้แก่ ซิงค์ซัลไฟด์หรือที่เรียกกันว่าแร่ซิงค์เบลนด์ (Zinc blende) หรือแร่สฟาเลอไรต์ (Sphalerite) เป็นแร่ที่มีหลายสี คือ เหลือง น้ำตาล หรือดำ นอกจากนี้มีแร่ซิงค์ออกไซด์ (ZnO) หรือที่เรียกว่า แร่ซิงค์ไคต์ (Zincite) และแร่ซิงค์คาร์บอเนต หรือที่เรียกว่า แร่สมิทโซไนต์ (Smithsonite) แต่แร่สองชนิดหลังนี้พบน้อยจึงไม่ค่อยนำมาใช้

การถลุงแร่ซิงค์เบลนด์ (Zinc blende) จะเริ่มโดยนำแร่มาแยกเพื่อเอาแร่ที่ไม่ต้องการออกไป จากนั้นนำเอาแร่ไปบดให้เป็นก้อนเล็ก ๆ และนำไปเผาในเตา Reverberatory Furnace เพื่อเปลี่ยนแร่ซิงค์ซัลไฟด์ให้เป็นซิงค์ออกไซด์หรือที่เรียกว่ากระบวนการย่างแร่ (Roasting) แล้วจึงนำไปเผาเพื่อไล่ออกซิเจนออกอีกครั้งโดยใช้ถ่านหินหรือถ่านโค้กเป็นตัวดึงออกซิเจน (Reducer) การเผาเพื่อไล่ออกซิเจนนี้จะต้องใช้อุณหภูมิสูงเกินกว่า 930 องศาเซลเซียส ซึ่งจะได้โลหะสังกะสีที่เป็นไอผสมกับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ จากนั้นแยกเอาโลหะสังกะสีออกได้โดยผ่านไอของสังกะสีกับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เข้าห้องเย็น (Cooling chambers) ซึ่งสังกะสีจะกลั่นตัวเป็นของเหลว ส่วนแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จะไม่กลั่นตัวเป็นแก๊ส ซึ่งสามารถแยกตัวออกต่างหากได้ ดังสมการ 2.1

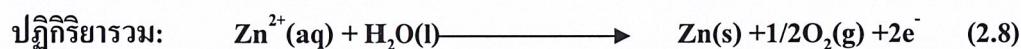
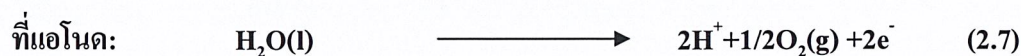
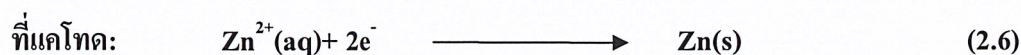


สังกะสีที่ได้นี้จะเทลงในแบบทำเป็นแท่งเรียกว่าแท่งสังกะสี ซึ่งมีความบริสุทธิ์ 98 % เมื่อต้องการทำสังกะสีให้บริสุทธิ์มากขึ้นไปอีกจะต้องนำเอาแท่งสังกะสีไปกลั่นใหม่อีกครั้งโดยการควบคุมอุณหภูมิให้แน่นอนก็จะได้สังกะสีที่มีความบริสุทธิ์มากยิ่งขึ้นอาจทำได้ถึง 99.99 % การทำสังกะสีบริสุทธิ์โดยใช้การแยกด้วยกระแสไฟฟ้าก็ทำได้เช่นกัน โดยเริ่มตั้งแต่เอาแร่ซิงค์ออกไซด์ที่ได้จากกระบวนการย่างแร่ (Roasting) มาละลายในกรดกำมะถันจะได้สารละลายซิงค์ซัลเฟต (Zinc Sulfate) ซึ่งจะใช้เป็น electrolyte จากนั้นปรับใช้เป็นกลางด้วยหินปูนหรือปูนขาว แล็กกรองแยกกากแร่ออกจะได้สารละลายซิงค์ซัลเฟต (ZnSO_4) และโลหะแคดเมียม (Cd), พลวง (Sb) และทองแดง (Cu) จะตกตะกอนอยู่ที่ก้นภาชนะปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นดังนี้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อผ่านกระแสไฟฟ้าลงในสารละลายซิงค์ซัลเฟต ($ZnSO_4$) จะเกิดปฏิกิริยาดังนี้



จากปฏิกิริยาพบว่าโลหะสังกะสีเกาะอยู่ที่ขั้วแคโทดและแก๊สออกซิเจนเกิดขึ้นที่ขั้วแอโนด ส่วนในสารละลายจะมีกรดซัลฟิวริกเกิดขึ้น ซึ่งสามารถนำกลับไปใช้ทำปฏิกิริยากับแร่สังกะสีได้อีก และความบริสุทธิ์ของสังกะสีที่จะได้ขึ้นอยู่กับความบริสุทธิ์ของซิงค์ซัลเฟต ($ZnSO_4$)

2.7.7 ประโยชน์ของสังกะสี

- ประโยชน์สังกะสีต่อร่างกาย

สังกะสีสมบัติช่วยสร้างระบบภูมิคุ้มกันของร่างกายให้อยู่ในระดับปกติ สร้างเซลล์ผิวหนังที่ตายแล้วให้เกิดขึ้นใหม่ ช่วยป้องกันแสงอัลตราไวโอเล็ต และลดอนุมูลอิสระให้หายง่ายขึ้น ทำให้แผลหายเร็ว และช่วยกระตุ้นสมองให้ทำงานดีขึ้น เด็กที่ได้รับธาตุสังกะสีอย่างพอเพียง จะช่วยให้มีความจำดี โตเร็ว สุขภาพแข็งแรง ธาตุสังกะสีพบมากในอาหารประเภทเนื้อสัตว์ ปลา ข้าว เมล็ดธัญพืช เนยและผักสีเขียว

- ประโยชน์สังกะสีทางด้านอุตสาหกรรม

1) ด้านการก่อสร้าง

ตลาดใหญ่ของวัสดุเหล็กชุบสังกะสีคือ ด้านการก่อสร้าง ในการชุบเหล็กด้วยสังกะสีใช้สังกะสีมากถึง 90 % ของสังกะสีทั้งหมดที่ใช้เพื่อป้องกันเหล็กกล้าโครงสร้าง รางน้ำ ฯลฯ แผ่นเหล็กชุบสังกะสีใช้ทำมาตรฐานสำหรับระบบปรับอากาศ ระบายอากาศ และระบบให้ความร้อน ใช้เป็นรางและท่อในงานสายไฟฟ้าและท่อสายโทรศัพท์ในตึกขนาดใหญ่

2) สีฝุ่น

สังกะสีเติมโตเพิ่มขึ้น เป็นส่วนสำคัญเป็นสีพื้นและป้องกันเหล็กกล้าโครงสร้างอย่างสมบูรณ์ ปริมาณซิงค์ออกไซด์เพียงเล็กน้อยใช้ในการผลิตสีน้ำมัน ทองเหลืองและบรอนซ์ และโลหะที่มีสังกะสีเป็นส่วนผสมก็ใช้กันมากในด้านก่อสร้างสถาปัตยกรรม ทำประตู หน้าต่าง กรอบรางและประตูน้ำ สังกะสีรีดเป็นแผ่นบางใช้ทำรางน้ำฝน ท่อน้ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3) ด้านอุตสาหกรรมขนส่ง

ใช้สังกะสีในรูปของแผ่นเหล็กชุบสังกะสี โลหะผสมหล่อแบบแม่พิมพ์ทองเหลืองและซิงค์ออกไซด์สำหรับหล่อแบบแม่พิมพ์ใช้ในส่วนของประกอบของรถยนต์ เช่น คาร์บูเรเตอร์ กลอนมือจับ และอื่น ๆ ซิงค์ออกไซด์ใช้ในการผลิตยาง ซึ่งปรากฏว่ายางรถยนต์ใช้ยางมากที่สุด เครื่องบินเรือใหญ่ เรือเล็ก รถประจำทาง รถบรรทุก รถลาก รถจักรยาน ตู้รถ ไฟบรรทุกทุกสินค้า และการขนส่งสายพานใช้สังกะสีประมาณ 12 % ของสังกะสีที่ใช้ในการขนส่งในสภาพเคลือบผิวแผ่นเหล็กหล่อแบบแม่พิมพ์ และ ประเภทยาง

4) ด้านไฟฟ้า

อุปกรณ์ไฟฟ้าที่เป็นเครื่องใช้ในบ้าน สำนักงาน คิดเป็น 11 % ของการใช้สังกะสีทั้งหมด โดยใช้ในรูปผลิตภัณฑ์หล่อชุบด้วยสังกะสี ชิ้นส่วนสังกะสีหล่อแบบแม่พิมพ์ สังกะสีแผ่นบาง และซิงค์ออกไซด์

5) ด้านเครื่องจักรกล

ครอบคลุมถึงเครื่องจักรกลทางการเกษตร การสร้างทางเครื่องชุด เครื่องบรรจุและอุปกรณ์กลโรงงาน โดยใช้สังกะสี 9 % ของทั้งหมด

- ด้านอื่น ๆ

1) การชุบสังกะสี

มีการใช้สังกะสีชุบผิวเหล็กในผลิตภัณฑ์หลายอย่างเช่น แผ่นเหล็กชุบสังกะสี ท่อ ลวดและลวดสลิง อุปกรณ์ข้อต่อ และอื่น ๆ สาเหตุที่นิยมใช้สังกะสีเคลือบเพราะว่าสังกะสีมีสมบัติด้านกัลวานิกเป็นแอนโอดมากกว่าเหล็ก จึงผุกร่อนง่ายกว่า ดังนั้น เหล็กและเหล็กกล้าที่มีประโยชน์มากมายใช้ในการก่อสร้างเมื่อชุบผิวด้วยสังกะสี แม้จะเกิดช่องว่างจากการชุบ แต่สังกะสีจะผุกร่อนไปก่อน จึงช่วยชะลอเหล็กให้มีอายุการใช้งานยาวนานออกไป นอกจากนี้การชุบผิวเหล็กด้วยสังกะสีเป็นวิธีสิ้นเปลืองน้อยกว่าวิธีอื่นในการป้องกันสนิม

2) การหล่อแบบแม่พิมพ์

ทุกหนแห่งไม่ว่าจะมองไปทางใดในบ้าน ที่ทำงาน โรงงาน แม้กระทั่งถนนหนทางจะพบการใช้ประโยชน์จากสังกะสีหล่อแม่พิมพ์เพราะสังกะสีมีความจุในการหลอมตัวที่ต่ำทำให้ค่าใช้จ่ายต่อการกลึงไส ตกแต่งง่ายและสะดวกอีกด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3) การผลิตทองเหลือง

ในระหว่างสงครามโลกครั้งที่ 2 ปริมาณการใช้สังกะสีแท่งเพื่อผลิตทองเหลืองสำหรับปลอกกระสุนปืนเล็กเพิ่มสูงขึ้นเป็นอันดับหนึ่ง ปัจจุบันผลิตสังกะสีแท่งเพื่อผลิตทองเหลืองเป็นอันดับสาม ส่วนใหญ่ใช้เป็นส่วนประกอบยานยนต์

4) สังกะสีรีด

สังกะสีรีดมีสังกะสี 99.80 % หรือมากกว่า ถ้ามีเหล็กสูงสุดถึง 0.014 % จะให้สมบัติดึงเย็นที่ดี ผลกระทบสำเร็จที่ใช้สังกะสีรีดได้แก่ ปลอกแบตเตอรี่ งานสะท้อนแสงไฟแฟลช ตลับเครื่องสำอาง เป็นต้น สังกะสีพืดที่มีความบริสุทธิ์น้อยคือ มีตะกั่ว แคดเมียมและเหล็กสูง ใช้ทำด้านข้างและส่วนล่างของแบตเตอรี่แห้ง ป้ายเลขที่บ้านและป้ายชื่อ สังกะสีแผ่นทางการค้า ใช้ทำบล็อกพิมพ์ ท่อออร์แกน ปลอกแบตเตอรี่แห้ง และแผ่นพิมพ์ออฟเซต โดยมีสมบัติด้านแรงดึงเพียงพอ ไม่บิด เหนียว

5) สังกะสีฝุ่น

สังกะสีฝุ่นใช้ในการผลิตสารเคมีที่ใช้ในการพิมพ์และย้อมสิ่งทอ เป็นตัวตกตะกอนทองแดง แคดเมียม ตะกั่ว เงิน ทองคำ และอื่น ๆ จากสารละลายทำไม้ขีดไฟ ก๊าซน้ำมันเตา สีกันสนิม สังกะสีฝุ่นผสมกับอะลูมิเนียมผงใช้แก่น้ำกระด้าง ใช้เป็นสารผลิตคอนกรีตทำให้ได้รูปทรงใช้ในอุตสาหกรรมปิโตรเลียม โดยเป็นสารเร่งในการเร่งการเกิดสารไฮโดรคาร์บอน นอกจากนี้สังกะสีผงยังใช้ทำดอกไม้ไฟ ทำน้ำตาลให้บริสุทธิ์และรักษาผิวกระดาษ

6) สารเคมี

6.1) ซิงค์คลอไรด์ : สามารถละลายออกซิเจนได้ออกซิคลอไรด์ จึงใช้ในการผลิตซีเมนต์และการเตรียมสารอุดฟันในทางทันตกรรมเป็นสารเชื้อ (flux) ทางโลหะกรรมและการบัดกรีใช้ผลิตแบตเตอรี่แห้ง ยาฆ่าเชื้อรา ชุบสังกะสี และกลั่นน้ำมัน

6.2) ซิงค์ออกไซด์ : ทำแม่สี เซรามิก เครื่องสำอาง และยา เมื่อใช้ซิงค์ออกไซด์เป็นแม่สีทำให้ได้แม่สีมีคุณภาพดีกว่าที่ทำจากตะกั่ว รวมทั้งไม่เป็นพิษ ไม่เปลี่ยนสี เพราะไม่เกิดปฏิกิริยากับสารประกอบซัลไฟด์

6.3) ซิงค์ซัลเฟต : ใช้ในการผลิตเส้นใยเรยอน ทางการเกษตรใช้เพิ่มปริมาณสังกะสีในดินให้พืช

6.4) ซิงค์ซัลไฟด์ : มีดัชนีหักเหสูงและเรืองแสง ใช้ทำสีลิโทโป (60 % ZnS + 40 % BaSO₄) ซึ่งเป็นแม่สีมีคุณภาพดีกว่าซิงค์ออกไซด์ และตะกั่วขาวไม่เป็นอันตรายและเปลี่ยนสี แม้จะมี

เอกสารไฮโดรเจนซัลไฟด์ จากการที่ซิงค์ซัลไฟด์เรืองแสงจึงใช้ในจอภาพเอกซเรย์และหน้าปัดนาฬิกา
ไม่ นอกจากนี้โลหะสังกะสี 11 % ใช้ในกิจการจิปาถะที่สำคัญ คือ ใช้เป็นแท่งแอโนดเพื่อป้องกันตัวใช้

เรือท่อ และ โครงเหล็กที่อยู่ใต้น้ำจากการกัดกร่อน ปริมาณสังกะสีน้อย ๆ ใช้ในโลหะอะลูมิเนียม และแมกนีเซียมผสมในกรรมวิธีแยกเงินจากตะกั่ว แยกทองคำ และทำให้สังกะสีอิเล็กโทรไลต์ บริสุทธิ์ยังใช้สังกะสีทำโลหะบัดกรีเพราะสังกะสีแทรกซึมเข้าไปตามขอบเกรน จึงให้กำลังยึดดี ลวดสังกะสีใช้ในระบบห้ามล้อ เนื่องจากต้านการสึกหรอสูงทำให้ลูกห้ามล้อสึกน้อยลง และเพิ่มอายุการใช้งานลวดสังกะสีมีการนำความร้อนดีเยี่ยม จึงกระจายความร้อนจากผิวหน้าเสียดทานได้ เร็ว [14]

2.7.8 พิษของสังกะสี สังกะสีสามารถเข้าสู่ร่างกายได้ 3 ทาง ได้แก่

1. ทางเดินหายใจ สังกะสีที่เข้าสู่ทางเดินหายใจมักอยู่ในรูปพุ่มซิงค์ออกไซด์ ซึ่งเกิดขึ้นจากงานเชื่อม บัดกรีโลหะ ตัดโลหะที่เคลือบด้วยสังกะสี เป็นต้น และพุ่มของซิงค์คลอไรด์
2. การสัมผัสทางผิวหนัง
3. ทางเดินอาหาร

สาเหตุและปัจจัยที่เสี่ยงต่อการเกิดโรค

บุคคลที่เสี่ยงต่อการเกิดโรค ได้แก่ ผู้ที่ประกอบอาชีพที่เกี่ยวข้องกับการผลิต งานโลหะ งานเชื่อมบัดกรีโลหะ ตัดโลหะที่เคลือบด้วยสังกะสี งานหลอมและหล่อทองแดง และงานสังกะสีดังกล่าวย่อมเสี่ยงต่อการแพ้พิษสังกะสีได้

อาการ

โรคจากการแพ้พิษสังกะสี ที่พบบ่อย ๆ มี 3 ประเภท ได้แก่

1. การแพ้พิษซิงค์ออกไซด์

อาการเฉพาะที่ เมื่อผิวหนังสัมผัสกับซิงค์ออกไซด์จะทำให้รูขุมขนของต่อมไขมันถูกอุดตัน ทำให้กลายเป็นตุ่มใส ๆ ขึ้นมา มีอาการคันมาก เมื่อเกาจะอักเสบ และกลายเป็นตุ่มหนองได้ อาการทั่วไป การสูดหายใจเอาพุ่มของสังกะสีเข้าไป ทำให้เกิดอาการแบบไข้หวัดใหญ่เริ่มด้วยอาการคลื่นไส้ ปวดศีรษะ ไอ เหนื่อย เหนือออก รุ้สึกของโลหะ ซึ่งมักเกิดขึ้น 4-12 ชั่วโมง หลังการสัมผัส ตามมาด้วยการมีไข้สูง เหนือออกและหนาวสั่น อาการดังกล่าวจะหายปกติภายใน 1-2 วัน เมื่อเริ่มกลับมาทำงานก็จะเป็นอีก แต่อาการจะไม่รุนแรงเท่ากับครั้งแรกที่สัมผัส ผู้ปฏิบัติงานจะมีความต้านทานต่อโรคนี้เป็นช่วงระยะสั้น ๆ ผู้ปฏิบัติงานที่หยุดงานไป 1-2 วัน ในวันสุดท้ายสุดสัปดาห์ แล้วกลับมาทำงานใหม่ในวันจันทร์ ก็จะเกิดอาการอีกแต่ความรุนแรงจะลดลงเรื่อย ๆ จึงเรียกชื่อโรคนี้ว่า “โรคไข้วันจันทร์” (Monday fever) หรือ “โรคไข้พิษโลหะ” (Metal fume fever)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. การแพ้พิษซิงค์คลอไรด์

อาการเฉพาะที่ ซิงค์คลอไรด์มีฤทธิ์กัดกร่อนอย่างรุนแรง การสัมผัสทางผิวหนัง ทำให้ผิวหนังเกิดบาดแผลได้ การสัมผัสซิงค์คลอไรด์บริเวณตา เชื้อบุผิวจุก คอ หลอดลม ปอด ทำให้เกิดอาการกัดกร่อน และระคายเคืองในความรุนแรงต่างกัน ในรายที่เป็นรุนแรงทำให้ปอดบวมมีน้ำคั่งในปอดถึงแก่ความตายได้ การกินเข้าไปจะกัดกร่อนบริเวณทางเดินอาหารส่วนต้น ได้แก่ หลอดอาหารและกระเพาะอาหาร ทำให้มีอาการอักเสบและปวดอย่างรุนแรง เมื่อหายแล้วทำให้ทางเดินอาหารตีบตันได้ อาการทั่วไป มีอาการคล้ายเป็นหวัด ไข้สูง ปวดเมื่อยตามกล้ามเนื้อ อาการดังกล่าวมักหายไปได้ง่าย โดยเฉพาะอย่างยิ่งถ้าหยุดการสัมผัสสังกะสี

3. การแพ้พิษซิงค์โครเมต

เชื่อว่าซิงค์โครเมตเป็นสารก่อมะเร็งในคน การรักษาโดยทั่วไปไม่มีการรักษาเฉพาะ ส่วนใหญ่ใช้วิธีการรักษาแบบประคับประคองตามอาการเท่านั้น

การป้องกัน

บริเวณที่มีสังกะสีเปลี่ยนสภาพเป็นฟุ้ง ควรจะได้รับการดูแลเอาใจใส่เรื่องการถ่ายเทอากาศ หรือการดูดฟุ้งของสังกะสี ณ แหล่งกำเนิดออกไปยังที่กำจัด บุคคลที่สัมผัสควรจะได้รับการอบรมให้ความรู้เกี่ยวกับโรคแพ้พิษโลหะ หรือสวมใส่อุปกรณ์ที่มีอากาศหายใจหรือหน้ากากป้องกันการสูดหายใจเอาฟุ้งเข้าสู่ร่างกาย นอกจากนี้บุคคลที่สัมผัสฟุ้งของซิงค์คลอไรด์ ควรสวมใส่อุปกรณ์ป้องกันอันตรายอื่น ๆ ด้วย เช่น เสื้อผ้า แวนตา และที่ครอบหน้ากันสารเคมีอุปกรณ์ป้องกันอันตรายจากการหายใจเอาซิงค์คลอไรด์เข้าสู่ร่างกาย [15]

2.8 ซิงค์ออกไซด์ (ZnO)

2.8.1 ข้อมูลทั่วไป

ซิงค์ออกไซด์ (ZnO) เป็นสารเคมีชนิดหนึ่งที่มีลักษณะเป็นผงละเอียดสีขาวนวล ละลายน้ำได้น้อยมาก มีความเป็นเบสเล็กน้อยมีลักษณะ โครงสร้างเป็นรูปหกเหลี่ยม เมื่อนำมาเผาที่อุณหภูมิถึง 500 องศาเซลเซียส สีจะเปลี่ยนเป็นสีเหลืองและจะกลับเป็นสีเดิมอีกเมื่อเย็นลง ซิงค์ออกไซด์มีสมบัติที่ตีหลายประการ คือ มีขนาดอนุภาคที่เล็กมากประมาณ 0.1-0.3 ไมครอนอนุภาคเรียงตัวหนาแน่นจึงทึบแสง สามารถป้องกันแสงอัลตราไวโอเลต (UV) ได้มีความจุความร้อนสูง จุดหลอมเหลวสูง สัมประสิทธิ์การขยายตัวต่ำ การนำความร้อนสูง สามารถกระทำให้ความร้อนต้านทานต่อไฟฟ้าได้ จากสมบัติข้อนี้จึงได้มีการนำเอาซิงค์ออกไซด์มาผลิตเป็นสารกึ่งตัวนำนอกจากนี้ยังเป็นสารแอมโฟเทอริก (Amphoteric) คือ สามารถละลายได้ทั้งในกรดและเบสทำปฏิกิริยาได้ทั้งไม่จำกัดทุกด้าน ทั้งสน ออกทงห้ามหมเหตุดแปลงเนอหาและตองอององถงเจาของเอกสารทุกคร้งหมการนาไปเซ

สารอินทรีย์และอนินทรีย์ ดังนั้น ซิงค์ออกไซด์จึงเหมาะที่จะใช้เป็นตัวควบคุมความเป็นกรดและเบส

2.8.2 ประวัติของซิงค์ออกไซด์

ซิงค์ออกไซด์ (ZnO) เป็นที่รู้จักในนาม คาลาไมล์ (Calamile) ซึ่งเป็นภาษาอียิปต์โบราณ โดยเป็นแร่ธาตุจากสินแร่สมิทโซไนต์ (Smithsonite) ซึ่งมีองค์ประกอบ คือ ZnO_3 มนุษย์รู้จักใช้ซิงค์ออกไซด์มายาวนาน โดยใช้ในการรักษาโรคตั้งแต่ในยุคอียิปต์โบราณในประเทศจีนเริ่มมีการใช้ในปี ค.ศ. 1596 พบว่ามีหนังสือยาจีนชื่อ เป็น เซา กัง มู เขียนโดย ชิน เซ็น ลี ได้บันทึกถึงการใช้ดินลูกรัง โดยเมื่อผ่านกระบวนการแปรรูปจะกลายเป็นซิงค์ออกไซด์ถูกนำมาใช้รักษาโรคผิวหนัง โรคตา และโรคฟัน ในปี ค.ศ.1750 – 1850 ซิงค์ออกไซด์เริ่มนำมาใช้เป็นยารักษาโรคในประเทศที่เจริญแล้ว เช่น ยุโรป จากนั้นจึงมีงานวิจัยและการศึกษาเกี่ยวกับซิงค์ออกไซด์เพิ่มมากขึ้น

จนกระทั่งในปี ค.ศ.1774 Paracelsus ได้ค้นพบประวัติศาสตร์สมัยใหม่ของซิงค์ออกไซด์ที่เริ่มปรากฏอย่างชัดเจนมากขึ้น โดยเฉพาะราวกลางคริสต์ศตวรรษที่ 18 แต่การผลิตในสมัยนั้นยังคงเป็นแค่ในระดับห้องทดลอง ต่อมาปี ค.ศ.1840 Leclair ชาวฝรั่งเศสเริ่มผลิตซิงค์ออกไซด์ในระดับอุตสาหกรรม เป็นคนแรก ผลิตโดยการเผาสังกะสีในสภาวะที่มีออกซิเจน ซึ่งเรียกกระบวนการนี้ว่า กระบวนการผลิตแบบฝรั่งเศส (French Process) ในปี ค.ศ.1852 บริษัท The New Jersey Zinc Company ประเทศสหรัฐอเมริกาได้ผลิตซิงค์ออกไซด์ขึ้นบ้างแต่ได้พัฒนากระบวนการผลิตขึ้นมาใหม่ โดยการหลอมแร่สังกะสีกับถ่านหินในเตาพิเศษโดยเฉพาะซึ่งเรียกกระบวนการนี้ว่ากระบวนการผลิตแบบอเมริกัน (American Process) ต่อมาในปี ค.ศ.1893 บริษัทนี้ได้ผลิตซิงค์ออกไซด์จากโลหะสังกะสีโดยตรงบ้าง โดยใช้ความรู้พื้นฐานทั้งกระบวนการผลิตแบบฝรั่งเศส (French Process) และกระบวนการผลิตแบบอเมริกัน (American Process) จากการพัฒนากระบวนการผลิตใหม่นี้ ทำให้สามารถผลิตซิงค์ออกไซด์ที่มีหลายขนาดหลายรูปร่าง และมีการเคลือบผิว (Surface treatment และ Fatty acid เช่น Stearic acid) เพื่อเพิ่มสมบัติในการกระจายให้ดีขึ้น [16]

2.8.3 กระบวนการผลิตซิงค์ออกไซด์

ซิงค์ออกไซด์แบ่งการผลิตเป็นวิธีใหญ่ ๆ ได้ 3 วิธี คือ

1. กระบวนการผลิตแบบอเมริกัน (American Process) เป็นกระบวนการผลิตจากแร่สังกะสีโดยตรง (Direct type) โดยการนำแร่สังกะสี (Zinc ore) มาทำการรีดิวซ์และออกซิเดชัน

เอกสารด้วยถ่านหิน ปฏิบัติการนี้มีมติงานการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



2. กระบวนการผลิตแบบฝรั่งเศส (French Process) เป็นกระบวนการผลิตโดยทางอ้อม (indirect type) โดยการนำโลหะสังกะสี (Metallic zinc) ที่มีความบริสุทธิ์มากกว่าร้อยละ 99.99 มาผ่านกระบวนการหลอม ดังนั้น ซิงค์ออกไซด์ที่ผลิตได้จากกระบวนการนี้จึงมีความบริสุทธิ์สูงปฏิกิริยาเกิด ดังนี้



3. กระบวนการผลิตแบบขั้นที่สอง (Secondary Zinc Oxide Type)

3.1 ผลิตจากปฏิกิริยาเคมี ซิงค์ออกไซด์อาจเป็นผลิตภัณฑ์พลอยได้จากการผลิตสารเคมีตัวอื่น ๆ ดังนั้นสมบัติทางเคมีและฟิสิกส์จึงแตกต่างกันไปบ้างตามแหล่งของวัตถุดิบและ ชนิดของปฏิกิริยา

3.2 ผลิตจากการถลุงเศษโลหะสังกะสีที่มีความบริสุทธิ์น้อย ความบริสุทธิ์ของซิงค์ออกไซด์ที่ได้จึงขึ้นอยู่กับความบริสุทธิ์ของวัตถุดิบที่ใช้ประเภทและเกรดของซิงค์ออกไซด์แบ่งตามกระบวนการผลิตและขนาดอนุภาคได้ 3 ประเภท ซิงค์ออกไซด์ที่ผลิตได้จากกระบวนการผลิตแบบฝรั่งเศส (French Process) ยังแบ่งตามความขาวสว่างและความหนาแน่นหรือที่เรียกว่าซีล (Seal) ได้ 3 เกรด คือ

1. White Seal ซิงค์ออกไซด์เกรดนี้จะมีความขาวสว่างมากที่สุด ความหนาแน่นต่ำสุด
2. Green Seal ซิงค์ออกไซด์เกรดนี้จะมีความขาวสว่างรองลงมา ความหนาแน่นปานกลาง
3. Red Seal ซิงค์ออกไซด์เกรดนี้จะมีความขาวสว่างน้อยที่สุด ความหนาแน่นสูงสุด

2.8.4 สมบัติของซิงค์ออกไซด์ในอุตสาหกรรม (มอก. 221-2541)

ซิงค์ออกไซด์ในอุตสาหกรรมแบ่งออกเป็น 2 ชั้นคุณภาพ คือ

- ชั้นคุณภาพ 1 ซึ่งเหมาะกับอุตสาหกรรมสีและเซรามิก
- ชั้นคุณภาพ 2 ซึ่งเหมาะกับอุตสาหกรรมยาง

ลักษณะทั่วไป ต้องเป็นผงละเอียดสีขาว ปราศจากสิ่งแปลกปลอมที่มองเห็นได้ การ

ทดสอบให้ทำโดยการตรวจพินิจ ส่วนสมบัติทางฟิสิกส์และเคมี ต้องเป็นไปตามตารางที่ 2.5 (ตาม JIS K 1410-1962)

ตารางที่ 2.7 สมบัติทางฟิสิกส์และเคมีของซิงค์ออกไซด์ในอุตสาหกรรม (JIS K 1410-1962) [16]

สมบัติของซิงค์ออกไซด์ (ZnO)	เกณฑ์ที่กำหนด (%)	
	ชั้นคุณภาพที่ 1	ชั้นคุณภาพที่ 2
ซิงค์ออกไซด์ไม่น้อยกว่า	99.05	99.00
ความชื้น ไม่เกิน	0.10	0.10
สารที่ละลายน้ำ ไม่เกิน	0.10	0.10
ตะกั่ว ไม่เกิน	0.01	0.10
แคดเมียม ไม่เกิน	0.002	0.01
ส่วนที่ค้างบนร่ง 45 ไมโครเมตร ไม่เกิน	0.10	0.10

2.8.5 ประโยชน์ของซิงค์ออกไซด์

1) ด้านอุตสาหกรรม

1.1 ยาง

การผลิตยางจะต้องนำเอายางมาทำปฏิกิริยากับกำมะถัน (Vulcanization) เพื่อให้ยางแข็งและเหนียวขึ้น มีความทนทานมากยิ่งขึ้น ปฏิกิริยาเกิดขึ้นยากหรือเกิดไม่สมบูรณ์ถ้าหากไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยาซิงค์ออกไซด์เป็นตัวเร่งที่ดีสำหรับปฏิกิริยานี้ โดยการเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อน Zn-accelerator เร่งให้เกิด Sulfur Crosslinks ในโมเลกุลยางเร็วขึ้นจนปฏิกิริยาเกิดสมบูรณ์ใช้เป็นตัวเติม (Filler) อีก เพื่อปรับปรุงการนำความร้อนและการทนทานต่อแสงแดดได้ดีขึ้น นอกจากนี้ผลิตภัณฑ์ที่ผ่านกระบวนการวัลคาไนซ์ (Vulcanize process) เมื่อทิ้งไว้นานจะมีการสลายตัว ปล่อยกรออกมาเรียกว่า aging ทำให้อายุการใช้งานสั้นลง ซิงค์ออกไซด์สามารถช่วยยืดอายุการใช้งานให้นานขึ้น โดยการทำปฏิกิริยากับกรดที่ปล่อยออกมา

อุตสาหกรรมยางเป็นอุตสาหกรรมที่ใช้ซิงค์ออกไซด์มากที่สุด คือ ประมาณร้อยละ 50 ของ ซิงค์ออกไซด์ทั้งหมด ปริมาณที่ใช้จะอยู่ระหว่าง 3-5 ส่วนต่อยางร้อยละ ในอนาคตคาดว่าจะมีการใช้งานมากขึ้นตามปริมาณการผลิตรถยนต์ที่เพิ่มขึ้นทุกปี

1.2 สี

ในการผลิตสีจะใช้ปริมาณซิงค์ออกไซด์มากรองลงมาจากอุตสาหกรรมยาง โดยทำหน้าที่เป็น รงควัตถุสีขาว (White pigment) ปรับปรุงลักษณะการไหลให้ดีขึ้น คือ ตื่นและเรียบไวต่อแสง ยืดอายุการเคลือบให้นานขึ้น โดยป้องกันแสงอัลตราไวโวลเลตและทำปฏิกิริยากับกรดที่

เกิดจากการสลายตัวของวัตถุประสาน (Binder) ให้เป็นกลาง ซิงค์ออกไซด์ชนิดที่มีตะกั่วปนอยู่ด้วย จะทำให้สีทนต่อ ลม ฟ้า อากาศได้ดีกว่า แต่ไม่ไวต่อแสงและสีจะเปลี่ยนเป็นสีเทาเร็ว นอกจากนี้ ซิงค์ออกไซด์ยังสามารถฆ่าเชื้อรา ได้อีกด้วยอุตสาหกรรมสีแบ่งออกเป็นสีเคลือบภายนอก สีรองพื้น โลหะ สีเคลือบภายใน ล้วนแต่ใช้ซิงค์ออกไซด์เป็นส่วนผสมทั้งสิ้น ปริมาณที่ใช้อาจแตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ของการใช้ ต้องการให้ทำหน้าที่อะไร ตัวอย่างเช่น ใช้เป็นส่วนผสมของสารเคลือบโลหะเพื่อป้องกันการกัดกร่อนและเพิ่มความเสถียร ทำหน้าที่เป็นตัวควบคุมความเป็นกรด-เบส ปริมาณที่ใช้ประมาณร้อยละ 0.5-4.0 โดยน้ำหนัก ผสมในสีเคลือบโลหะที่มีการดูกลืนรังสีต่ำและแผ่รังสีออกมาสูงปริมาณที่ใช้ประมาณร้อยละ 50-90 โดยน้ำหนัก

1.3 เซรามิกและแก้ว

จัดเป็นตลาดที่สำคัญของซิงค์ออกไซด์ โดยอยู่อันดับ 3 รองจากอุตสาหกรรมยางและอุตสาหกรรมสี ผลิตภัณฑ์เซรามิกต่าง ๆ และแก้ว ได้แก่

1.3.1 แก้ว ในการผลิตแก้ว ซิงค์ออกไซด์ช่วยลดเวลาหลอมให้สั้นลง ลดความหนืด เพิ่มความต้านทานต่อสารเคมีและดัชนีหักเห ลดอุณหภูมิจุดอ่อนตัว เพิ่มความยืดหยุ่น ลดสัมประสิทธิ์การขยายตัว ลดการแตกร้าวเนื่องจากเครื่องจักรและการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างรวดเร็ว ปริมาณการใช้ขึ้นอยู่กับชนิดของแก้ว เช่น แก้วสำหรับผลิตเป็นอุปกรณ์หรือเครื่องมือแก้ว ทนความร้อน ซิงค์ออกไซด์ประมาณร้อยละ 15 โดยน้ำหนัก ส่วนแก้วที่ทนต่อการกัดแก้ว (HF) ใช้ซิงค์ออกไซด์ร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก

1.3.2 สารเคลือบ สารเคลือบที่ใช้ในผลิตภัณฑ์เซรามิกประเภทเครื่องดินเผา นั้น มักจะมี ซิงค์ออกไซด์ผสมอยู่ด้วย ซิงค์ออกไซด์ช่วยเพิ่มการหลอมละลาย (Fluxing agent) ลดการขยายตัว เพิ่มความเป็นมันเงา ความขาว ความยืดหยุ่น ช่วยให้สีสุกสียิ่งขึ้น ป้องกันการเกิดรอยร้าวเป็นขั้น ๆ ซิงค์ออกไซด์จะเกิดเป็นซิงค์ซิลิเกตในเคลือบผลึก ทำให้เกิดลวดลายผลึกขณะเย็นตัวลง ผลิตภัณฑ์เครื่อง ดินเผาชนิดนี้จะมีลวดลายสวยงาม ราคาแพง ได้แก่ แจกัน เครื่องประดับของตกแต่งต่าง ๆ เป็นต้น

1.3.3 โลหะเคลือบ ซิงค์ออกไซด์ในผลิตภัณฑ์เซรามิกประเภทโลหะเคลือบ ทำหน้าที่เหมือนกับในสารเคลือบ โลหะที่ใช้จะเป็นพวกเหล็กและอะลูมิเนียม ตัวอย่างเช่น เครื่องสุขภัณฑ์ อ่างอาบน้ำ เครื่องซักผ้า ตู้เย็น เป็นต้น

1.4 สิ่งทอ

ได้มีการใช้ประโยชน์ของซิงค์ออกไซด์มานานแล้ว เพราะความขาวโดยธรรมชาติและความสามารถเข้ากันได้กับเส้นใย ไม่ว่าจะเป็นเส้นใยธรรมชาติหรือเส้นใยสังเคราะห์ใช้ใน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า กระบวนการปั่นด้วย การย้อมสี และการขัดผิวขั้นสุดท้าย หน้าที่ของซิงค์ออกไซด์ คือ

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.4.1 เป็น Fixing agent โดยรวมตัวกับ Surface-active agent เกิดเป็น Zn-acetate หรือ Zn-formate ช่วยให้สีติดเส้นใยดีขึ้น

1.4.2 อนุพันธ์ของซิงค์ออกไซด์โดยเฉพาะซิงค์คลอไรด์ใช้เติมลงไปในผ้า เพื่อป้องกันการเกิดเชื้อราเป็นจุดต่าง ๆ และการเนาเสียซึ่งเกิดจากเชื้อราและแบคทีเรีย

1.4.3 ทำหน้าที่เป็นตัวเพิ่มน้ำหนัก หรือตัวเติม ทำให้ผ้านุ่มมีน้ำหนักและทนต่อน้ำ

1.4.4 เป็นส่วนผสมสำคัญของสารกันน้ำ (Water proofing agent) สารกันไฟ (Flame proofing agent) โดยผสมกับ Chlorinated wax หรือ Resin เมื่อถูกเผาซิงค์ออกไซด์จะแตกออกเกิดปฏิกิริยากับคลอรีนเกิดเป็นซิงค์ออกไซด์ที่สามารถป้องกันไฟได้

1.5 สารหล่อลื่น

ใช้น้ำมันหล่อลื่น (Lubricating oil) และจาระบี (Grease) ทำหน้าที่เป็นรงควัตถุ ตัวเติม และสารเคมี เพื่อปรับปรุงการหล่อลื่นให้ดีขึ้น ป้องกันการกัดกร่อน ยับยั้งการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของจาระบีและเป็นตัวทำลายกรด

1.6 เคมี

ตลาดของซิงค์ออกไซด์ในอุตสาหกรรมเคมีกำลังเพิ่มขึ้น เพราะซิงค์ออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst) ในกระบวนการผลิตสารเคมีหลายปฏิกิริยา เช่น Alkylation, Oxidation, trogenation และ Hydrogenation เป็นต้น การผลิตเมทานอลก็เป็นกระบวนการหนึ่งที่ใช้ซิงค์ออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ซิงค์ออกไซด์นอกจากจะมีประโยชน์มากมายในตัวเองแล้วยังเป็นสารเริ่มต้นในการผลิตสารประกอบสังกะสีตัวอื่น เช่น $ZnCrO_4$, $AnSO_4$, $ZnCl_2$, $Zn_3(PO_4)_2$, $4H_2O$ และ Zinc stearate เป็นต้น

2) ด้านเกษตรกรรม

สังกะสีเป็นธาตุที่สำคัญสำหรับสิ่งมีชีวิตทุกชนิดไม่ว่า คน สัตว์ หรือพืช สังกะสีจะก่อตัวกับเอนไซม์เป็น Metallo-enzyme ซึ่งเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเมนาบอลิซึมของร่างกายหลายชนิด เช่น เร่งปฏิกิริยาสร้างเซลล์ใหม่ ควบคุมการเปลี่ยนแปลงระดับฮอร์โมนในร่างกาย ถ้าขาดสังกะสีจะมีอาการผิดปกติมากมายหลายประการ ทำให้เจริญเติบโตช้า ตัวเล็ก ระบบการทำงานของตับและม้ามผิดปกติ ไม่มีการพัฒนาทางเพศ เกิดโรคผิวหนังง่าย แผลหายช้า เมื่ออาหาร

คนที่ขาดสังกะสีต้องกินอาหารที่มีธาตุสังกะสีสูง เช่น อาหารทะเล พืชสีเขียว ถ้าหากยังไม่เพียงพอ ต้องกินธาตุสังกะสีเสริม องค์การอนามัยโลก (WHO) ได้ประกาศว่า ในผู้ใหญ่ปกติต้องการ

ธาตุสังกะสี 15 มิลลิกรัมต่อวัน สำหรับผู้หญิงที่กำลังตั้งครรภ์ต้องการเพิ่มอีกเท่าตัวซิงค์ออกไซด์ใช้ไม่เติมในอาหารเสริมสุขภาพ เพื่อเป็นแหล่งธาตุสังกะสีอย่างถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซิงค์ออกไซด์ใช้เติมลงในอาหารสัตว์เพื่อป้องกันการขาดธาตุสังกะสี นอกจากนี้ซิงค์ออกไซด์ยังมีบทบาทสำคัญในการเพิ่มผลผลิตทางการเกษตร เนื่องจากซิงค์ออกไซด์ทำหน้าที่เป็นแหล่งให้ธาตุสังกะสีแก่พืช พืชที่ขาดธาตุสังกะสีจะมีลักษณะผิดปกติ คือ มีใบน้อย ใบเป็นจุดต่าง ๆ โตช้า และให้ผลผลิตน้อย ลักษณะการนำไปใช้จะทำให้อยู่ในรูปสารละลายแล้วพ่นไปบนใบ ต่อปัจจุบันได้พัฒนาลักษณะการใช้ให้ได้ผลมากยิ่งขึ้นโดยการเติมลงในปุ๋ย

3) ด้านเภสัชกรรม

การนำเอาซิงค์ออกไซด์มาใช้ประโยชน์ทางด้านนี้ยังมีน้อย แต่พอสรุปหน้าที่ได้ดังนี้

3.1 เป็นสารดับกลิ่นตัว (Mild deodorant) โดยทำปฏิกิริยากับเหงื่อที่ออกมาหลังจากที่ผ่านกระบวนการเปลี่ยนอนุภาคซิงค์ออกไซด์ให้เป็นระดับนาโน ซึ่งอยู่ในช่วง 1-100 นาโนเมตร พบว่า นาโนซิงค์ออกไซด์สามารถระงับกลิ่นตัวด้วยกลไกต่อไปนี้

- นาโนซิงค์ออกไซด์สามารถเร่งปฏิกิริยาได้ทั้งกับสารที่เป็นกรดและเบส สามารถกำจัดกลิ่นที่ไม่พึงประสงค์โดยการทำปฏิกิริยาอย่างรวดเร็วกับโมเลกุลของแอมโมเนียจากร่างกาย หรือสิ่งแวดลอม

- ป้องกันการก่อตัวของสารที่ทำให้เกิดกลิ่นที่ไม่พึงประสงค์ โดยนาโนซิงค์ออกไซด์ จะทำปฏิกิริยากับ โมเลกุลไทออล ซึ่งเป็นสาเหตุของกลิ่นเหม็นกลายเป็นซิงค์ซัลไฟด์

- ป้องกันการหมักของโปรตีนซึ่งเป็นอีกสาเหตุหนึ่งของกลิ่นเหม็นที่เกิดขึ้น

3.2 เป็นส่วนผสมของน้ำยาแก้ผดผื่นคัน (Calamine lotion) และในยาหลายชนิด โดยที่ซิงค์ออกไซด์เป็นยาสมานแผล ลดการอักเสบ และยับยั้งแบคทีเรียได้ดี นำมาใช้เป็นยาสมานผิวและรักษาโรคติดเชื้อที่ผิวหนังบางชนิด เช่น โรคเรื้อนคาง โรคผิวหนังเป็นตุ่มพุพองจากเชื้อแบคทีเรีย โรคกลากเกลื้อน ผื่น อากา คันตามผิวหนัง และผื่นระคายเคือง โดยเส้นผ่านศูนย์กลางของนาโนซิงค์ออกไซด์ที่ใช้จะอยู่ระหว่าง 10-20 นาโนเมตร และจากการสังเกตภายใต้กล้องกำลังขยายสูงพบว่า มีลักษณะเป็นผงอนุภาคละเอียด มีความบริสุทธิ์สูง มีสีขาว และไม่เปลี่ยนสี

3.3 เป็นส่วนผสมของสารต่อต้านเชื้อจุลินทรีย์ (Antimicrobial) ซึ่งสามารถทนต่อความร้อนและลมฟ้าอากาศได้ในช่วงอุณหภูมิ 100-500 องศาเซลเซียส

3.4 ทำหน้าที่เป็นสารฆ่าเชื้อรา (Fungicide) ในสารสำหรับเคลือบอุปกรณ์เก็บอากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4) ด้านเครื่องสำอาง

ด้วยสมบัติพิเศษที่ดีหลายประการของซิงค์ออกไซด์ จึงได้มีการนำมาใช้ประโยชน์ในการผลิตเครื่องสำอางชนิดต่าง ๆ เช่น แป้งฝุ่นทาหน้า แป้งน้ำ ลิปสติก นัยยาทาเล็บ เป็นต้น โดยทำหน้าที่เป็นตัวช่วยให้แป้งติดหน้า เรียบเนียนสวย ทำให้กลิ่นหอมของน้ำหอมติดทนนานเป็นตัวเติมในเครื่องสำอางแต่งหน้า ปริมาณที่ใช้ร้อยละ 13-15 โดยน้ำหนัก นอกจากนี้ ซิงค์ออกไซด์ยังใช้เป็นส่วนผสมของรงควัตถุป้องกันแสงอัลตราไวโอเล็ตที่นำมาผลิตเป็นเครื่องสำอาง โดยเคลือบที่ผิวของอนุภาคนาโนทรีซ์ตัวอื่น ทำหน้าที่ป้องกันแสง UV ซึ่งมีความปลอดภัยและอ่อนโยนต่อร่างกาย โดยได้รับการยืนยันจาก Food and Drug Administration (FDA) ว่าเป็น 1 ใน 2 ชนิดของสารกันแดดที่เป็นส่วนผสมในประเภทผลิตภัณฑ์ดูแลผิว ซึ่งสามารถป้องกันได้ทั้ง UVA และ UVB แต่อนุภาคปกติของซิงค์ออกไซด์จะมีสีขาวเมื่อนำมาทาลงบนผิว ดังนั้น ซิงค์ออกไซด์จึงไม่นิยมนำมาใช้ในการเป็นครีมหรือผลิตภัณฑ์กันแดดสำหรับผิว อย่างไรก็ตาม นาโนซิงค์ออกไซด์ได้รับการทดสอบโดย Australia Commonwealth Science & Industrial Research Organization (CSIRO) พบว่า นาโนซิงค์ออกไซด์เมื่อนำมาใช้เป็นส่วนผสมของครีมหรือโลชันกันแดดจะให้สัมผัสนุ่มลื่น โปร่งใส และไม่มีสีหลังจากที่ทาลงผิว นาโนซิงค์ออกไซด์จึงเหมาะสมที่จะนำมาผสมเป็นสารกันแดดในเครื่องสำอาง นอกจากนี้ ซิงค์ออกไซด์ยังควบคุมความเป็นกรด-เบสของผลิตภัณฑ์ให้เป็นกลาง คือ จากพีเอช 9-11 มาเป็นพีเอช 5-5-7.5 ซึ่งมีความเป็นกรด-เบส ช่วงนี้เหมาะสมสำหรับผิวหนัง ซิงค์ออกไซด์ใช้สำหรับเครื่องสำอางนี้ต้องเป็นผงละเอียดมาก ความบริสุทธิ์สูง ไม่มีโลหะหนักที่เป็นพิษ เจือปน เช่น ตะกั่ว แคดเมียม สารหนู แมงกานีส เป็นต้น

5) ด้านสิ่งแวดล้อม

ปัจจุบันปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมเป็นพิษ กำลังเป็นปัญหาที่เป็นตัวบ่อนทำลายสุขภาพจิตของคนในสังคมเมือง เนื่องจากความเจริญก้าวหน้าด้านอุตสาหกรรมมีมากขึ้น จำนวนโรงงานมีมากขึ้น ปริมาณของเสียที่เป็นพิษจึงเพิ่มมากขึ้นทุกวัน ดังนั้น เราจำเป็นต้องหาทางกำจัดสารพิษเหล่านี้ให้ลดน้อยลงไป

มลภาวะทางอากาศเกิดจากในอากาศมีแก๊สพิษปนอยู่มากเกินกว่าค่ามาตรฐานกำหนด แก๊สพิษเหล่านี้ ได้แก่ แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) แก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO₂) และแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H₂S) เป็นต้น ซิงค์ออกไซด์ได้เข้ามามีส่วนช่วยกำจัดแก๊สพิษเหล่านี้ โดยทำหน้าที่เป็นตัวดูดซับด้วยปฏิกิริยา ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



นอกจากนี้ ซิงค์ออกไซด์ยังทำหน้าที่เป็น Solid oxidation catalyst ในกระบวนการกำจัดน้ำเสียได้อีกด้วย

2.9 กระบวนการหลอมสังกะสี

2.9.1 สังกะสีที่ใช้หลอม (Grades of Zinc)

สังกะสีที่มีความเหมาะสมที่จะใช้ คือ Prime Western ซึ่งมีสังกะสี 98% เป็นอย่างน้อยการใช้สังกะสีให้มีประสิทธิภาพขึ้นอยู่กับสมบัติของสังกะสี ดังแสดงในตารางที่ 2.11

2.9.2 อุณหภูมิของเตาหลอมสังกะสี

อุณหภูมิของเตาหลอมสังกะสีควรอยู่ระหว่าง 435-465 องศาเซลเซียส และที่ใช้งานกันเป็นส่วนใหญ่คือ 450 องศาเซลเซียส

2.9.3 ของเสียจากกระบวนการหลอมสังกะสี

ของเสียจากกระบวนการหลอมสังกะสีจะเป็นเถ้าที่ได้จากเครื่องดักฝุ่นเหนือเตาหลอมสังกะสีและเถ้าที่ลอยเป็นฟุ้งบริเวณผิวหน้าของเตาหลอมสังกะสี ซึ่งส่วนประกอบของเถ้าจะประกอบด้วยสังกะสี 60-85% และสารประกอบอื่น ๆ 15-40% ดังนั้นการที่จะนำของเสียจากกระบวนการหลอมสังกะสีมาใช้ให้เป็นประโยชน์โดยเตรียมเป็นซิงค์ออกไซด์จึงจำเป็นต้องกำจัดสารประกอบอื่น ๆ ที่ปนเปื้อนอยู่ในกากของเสีย ซึ่งในที่นี้จะใช้วิธีตกตะกอนทางเคมีและสมบัติการละลายของสารที่จะต้องควบคุมสภาวะให้เหมาะสม เพื่อที่จะได้ผลิตภัณฑ์ที่ออกมาเป็นสังกะสีเพียงอย่างเดียว

2.10 ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับการละลาย

การคงสภาพของโลหะในตะกอนพิจารณาได้จากการละลายของตะกอนภายหลังการตกตะกอนแล้ว ถ้าโลหะสามารถละลายได้ใหม่จำนวนมากถือว่าตะกอนของโลหะนั้นมีความเสถียรน้อย ตะกอนที่เป็นสารไอออนิกเมื่อละลายเป็นสารละลายแล้ว ตะกอนส่วนที่ละลายอยู่ในสารละลายพบว่าส่วนใหญ่จะแตกตัวเป็นแคทไอออนและแอนไอออนหมด ไม่อยู่ในรูปของโมเลกุล

ตะกอนของสารไอออนิกน้อยชนิดที่ไม่เป็นไปตามนี้ แคทไอออนและแอนไอออนที่เกิดจาก
 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่...
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การละลายตะกอนในสารละลายอิ่มตัวจะอยู่ในสมดุลกับตะกอนที่เป็นของแข็งซึ่งสัมผัสกับสารละลายตลอดเวลา

การละลายของตะกอนนั้นขึ้นอยู่กับค่าคงที่ผลคูณของการละลาย (K_{sp}) ของตะกอน ค่านี้เป็นผลคูณของความเข้มข้นเป็น โมลาร์ของไอออนทั้งสองที่เป็นองค์ประกอบของตะกอน ณ ที่สารละลายอยู่ในสภาวะอิ่มตัวด้วยตะกอนนั้น ๆ ค่านี้จะแปรผันไปตามอุณหภูมิ ค่าคงที่ของการละลาย (K_{sp}) ของเกลือโลหะไฮดรอกไซด์และโลหะซัลไฟด์

สำหรับตะกอนที่มีสูตร $A_m B_n$ เมื่อละลายเป็นสารละลายอิ่มตัว เกิดขึ้นระหว่างสารละลายและของแข็งจะเป็น



$$K_{sp} = [A^{n+}]^m [B^{m-}]^n$$

เมื่อ $[A^{n+}]$, $[B^{m-}]$ เป็นความเข้มข้นที่อิ่มตัวของ A^{n+} และ B^{m-} ในสารละลายตามลำดับ เช่น ในกรณีของเฟอร์ริกไฮดรอกไซด์ ($Fe(OH)_3$) ละลายในน้ำจนเป็นสารละลายอิ่มตัว ไม่สามารถละลาย $Fe(OH)_3$ ได้เพิ่มขึ้น จะเกิดตามสมการ



$$K_{sp} = [Fe^{3+}][OH^-]^3$$

ที่อุณหภูมิคงที่ ถ้าสารละลายอยู่ในสภาวะอิ่มตัว คือ ในสารละลายมีไอออนทั้งสองนี้ละลายอยู่และอยู่ในสมดุลกับตะกอนของ $Fe(OH)_3$ โดยไม่คำนึงว่าในสารละลายนั้นมีไอออนอื่นๆ ละลายรวมอยู่หรือไม่ก็ตามจะได้

$$K_{sp} = [Fe^{3+}][OH^-]^3 = K_{sp} = \text{ค่าคงที่}$$

จะเห็นได้ว่า ค่าคงที่ผลคูณระหว่างการละลายของ $Fe(OH)_3$ มีค่าเท่ากับ 4.0×10^{-38} โมลาร์ ซึ่งหมายความว่าความเข้มข้นของ Fe^{3+} และ OH^- ในสารละลายคูณกันมีค่า 4.0×10^{-38} โมลาร์ ถ้าผลคูณความเข้มข้นของไอออนสารละลายมีค่าเกินกว่าค่าคงที่ผลคูณการละลาย (K_{sp}) Fe^{3+} จะรวมตัวกับ OH^- ตกตะกอนเป็น $Fe(OH)_3$ ถ้ามีการเติมสารประกอบที่แตกตัวให้ OH^- เช่น แอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (NH_4OH) ลงไปจะทำให้ความเข้มข้นของ OH^- เพิ่มมากขึ้น สมดุลจะมีการปรับตัวเลื่อนมาทางซ้าย เกิด $Fe(OH)_3$ มากขึ้น ทำให้ความเข้มข้นของ $Fe(OH)_3$ ในสารละลายลดต่ำลง มีประโยชน์ในการตกตะกอน เพื่อกำจัดเหล็กออกไปได้

ไม่ว่ากรรมใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.11 การวิเคราะห์หาปริมาณสังกะสีโดยการไทเทรตกับสารละลายอีดีทีเอ (EDTA)

อีดีทีเอ (EDTA) มีชื่อเต็มว่า เอทิลีน ไดเอมีน เตตระอะซิติกแอซิด (Ethylene Diamine Tetraacetic Acid) เป็นสารประกอบอินทรีย์ประเภทกรดอะมิโน โพลีคาร์บอกซิลิกที่มีคุณภาพเป็นกรดอ่อน

โดยทั่วไป เรามักจะเขียน อีดีทีเอ แทนด้วยสูตร H_4Y ซึ่งสามารถให้โปรตอนได้ 4 ตัว H_4Y มีค่าคงที่ของการแตกตัวดังนี้ $pK_1 = 2.0$, $pK_2 = 2.7$ $pK_3 = 6.2$ และ $pK_4 = 10.3$ ดังนั้น โปรตอน 2 ตัวแรกจะหลุดได้ง่ายกว่าโปรตอนที่เหลือ 2 ตัว อีดีทีเอจึงมักแสดงความเป็นกรดแบบไดเบสิก (dibasic acid)

อีดีทีเอสามารถใช้เป็นไทเทรนต์ในการไทเทรตโลหะหลายตัวได้ดีเพราะ

1. เมื่ออีดีทีเอแตกตัวให้คาร์บอนไปทั้งหมด 4 ตัวจะทำให้ อีดีทีเอ เกิดมีคู่อิเล็กตรอนอิสระ 6 คู่ สามารถเกิดพันธะชนิดโคออร์ดิเนตกับโลหะได้ดี ได้อิเล็กตรอน 2 คู่ มาจากไนโตรเจน และอีก 4 คู่ มาจากออกซิเจน เราจึงถือว่า อีดีทีเอ เป็นลิแกนด์ชนิดเฮกซะเดนเตลิกแอนด์ (Hexadentateligand) ที่สามารถเกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับโลหะหลายตัวในอัตราส่วน 1:1 ซึ่งโครงสร้างของสารเชิงซ้อนของโลหะ M^{2+} กับ EDTA ที่เกิดขึ้น จะมีรูปร่างเป็นออกตะฮีดรัล (octahedral) และเป็นวง
2. ค่าคงที่ของการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างโลหะกับอีดีทีเอ มีค่าสูงมากค่าคงที่ของการเกิดสาร เชิงซ้อนสำหรับอีดีทีเอหรือค่าคงที่เสถียรของสารประกอบ คือ K_{MY} ของไอออนของโลหะต่างๆ ที่มีอีดีทีเอเป็นลิแกนด์
3. ค่านี้เกี่ยวกับความเข้มข้นของ Y^{4-} ดังนี้



$$K_{MY} = \frac{[MY^{(n-4)+}]}{[M^{n+}][Y^{4-}]}$$

ดังนั้นการไทเทรตไอออนของโลหะกับอีดีทีเอ นอกจากขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารละลายและค่า K_f และยังขึ้นอยู่กับพีเอชของสารละลายและความเข้มข้นของตัวเกิดคอมเพลกซ์ช่วยอีกด้วย [16]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Franciele M. Pelissari และคณะ [17] จากงานวิจัยได้มีการนำแป้งมันสำปะหลังนำมาใส่ไคโตซาน (Chitosan) และออร์กาโน - เอสเซนเชียล ออยล์ (Organo essential oil ;OEO) ลงไป เพื่อยับยั้งเชื้อราที่จะเกิดบนแผ่นแป้ง โดยใช้เทคนิคดิสอินฮิบิชั่น โซน (Disk inhibition zone) นอกจากนี้ยังมีการทดสอบสมบัติเชิงกล (Mechanical properties), การซึมผ่านของไอน้ำ (Water vapor permeability ;WVP), เทคนิคฟูเรียทรานส์ฟอร์ม - อินฟราเรดสเปกตรัม (Fourier transform infrared spectra ;FTIR) และการวิเคราะห์ทางความร้อน (Thermogravimetric; TG) จากผลการทดลองพบว่าประสิทธิภาพของแผ่นฟิล์มหลังจากการเติม OEO ลงไป พบว่าสามารถยับยั้งเชื้อราได้ และการเติมไคโตซานพบว่า ไคโตซานไม่มีประสิทธิภาพด้านเชื้อรา แต่ทำให้แผ่นฟิล์มมีความโค้งงอได้มากขึ้น และการซึมผ่านของไอน้ำลดลง จากการตรวจวิเคราะห์ทางความร้อนพบว่า การเติม OEO และไคโตซาน ไม่มีผลต่อเสถียรภาพทางความร้อนของแผ่นฟิล์ม

Thawein Bourtoom [18] ศึกษาปัจจัยในการขึ้นรูปแผ่นฟิล์มที่ทำมาจากแป้งสาธุ (Sago starch), แป้งมันสำปะหลัง (Cassava starch), แป้งข้าวโพด (Corn starch), แป้งข้าว (Rice starch) โดยให้อุณหภูมิความร้อน (Heating temperature) ที่ 90, 95, 90 และ 85 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 10, 5, 10 และ 15 นาที ตามลำดับ ผลการทดลองพบว่า อุณหภูมิความร้อนและเวลาการให้ความร้อนที่เหมาะสมของแป้งสาธุ, แป้งมันสำปะหลัง, แป้งข้าวโพด, แป้งข้าว ให้สมบัติแรงดึง (Tensile strength) ที่สูง แต่แรงดึง ณ จุดขาด (Elongation at break) และการซึมผ่านของไอน้ำที่ลดลง แต่เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของพลาสติกไซเซอร์ (Plasticizer) ให้สมบัติแรงดึง, แรงดึง ณ จุดขาด การซึมผ่านของไอน้ำ และ ความสามารถในการละลายฟิล์ม (Film solubility; FS) ที่เพิ่มขึ้น จากการทดลองพบว่าเมื่อใช้ซอร์บิทอล (Sorbital) พลาสติกไซเซอร์ จะส่งผลให้ฟิล์มเปราะ (Brittle) แต่มีแรงดึงที่สูงเมื่อเทียบกับ กลีเซอรอล (Glycerol)

D. Phan และคณะ [19] จากงานวิจัยนี้กล่าวถึงปัจจัยที่ส่งผลต่อการเก็บรักษาคุณภาพอาหารของฟิล์มบิโกลได้ที่ทำจาก วุ้นที่ทำจากสาหร่ายทะเล (Agar; AG), แป้ง-มันสำปะหลัง (Cassava starch; CAS), แป้งข้าว (Normal rice starch ;NRS) และแป้งข้าวเหนียว (Waxy rice starch; WRS) ที่สามารถนำไปใช้เป็นบรรจุภัณฑ์อาหารได้ แผ่นฟิล์มที่เตรียมจะถูกทดสอบการซึมผ่านของไอน้ำ (Water vapor-permeabilities; WVP) พบว่าขึ้นอยู่กับความชื้นความดันของสิ่งแวดล้อม เปรียบเทียบกับความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศ (Humidity) ต้องน้อยกว่า 84% สมดุลของการดูดซับจะถูกวัดออกมาเป็นไอโซเทอม (Isotherm) โดยใช้แบบจำลอง (Model) ของ Guggenheim Andersonde Boer (GAB)

ในระหว่างแผ่นฟิล์ม AG และ CAS มีสิ่งที่น่าสนใจเกี่ยวกับสมบัติเชิงกล พบว่า แผ่นฟิล์มแต่ละชนิดมีความโปร่งใส (Transparent), เป็นเนื้อเดียวกัน (Homogeneous), และ โค้งงอได้ (Flexible) แต่ใช้

แผ่นฟิล์ม NRS และ WRS มีความเปราะมากกว่า และทนแรงดึง (Tensile) ที่น้อยกว่า สรุปผลได้ว่า แผ่นฟิล์ม AG และ CAS มีสมบัติที่ดีกว่าและเหมาะนำมาใช้เป็นบรรจุภัณฑ์อาหาร

Klanarong Sriroth และคณะ [20] งานวิจัยนี้กล่าวถึงบทบาทของแป้ง และการผลิตพลาสติกที่ย่อยสลาย (biodegradable plastics) ได้ในประเทศไทย ซึ่งเน้นความเป็นไปได้ในการผลิตผลิตภัณฑ์จากแป้งมันสำปะหลัง (cassava starch) ส่วนประกอบหลักในพลาสติกย่อยสลายได้ คือ แป้ง จากการนำแป้งมาผสมกับพอลิเมอร์ (polymer) เช่น พอลิคาร์โพลแลคโตน (polycaprolactone; PCL), พอลิแลคติกแอซิด (polylactic acid; PLA), พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (polyvinyl alcohol; PVA) และ พอลิไฮดรอกซีแอลคาโนเอต (polyhydroxyalkanoate; PHA)

Hanguo Xiong และคณะ [21] งานวิจัยนี้กล่าวถึงแผ่นฟิล์มย่อยสลายได้เมื่อเติมนานาซิลิกอนไดออกไซด์ (Nano silicon dioxide) สามารถเตรียมได้จากวิธีการเคลือบบนกระดาษ (Coating method) โดยศึกษาทางกายภาพถึงการย่อยสลายตัวได้เองตามธรรมชาติ (Biodegradable) ลักษณะโครงสร้าง อธิบายได้โดยใช้เทคนิคฟูเรียรทรานส์ฟอร์มอินฟราเรด สเปกตรัม (Fourier transform infrared spectra; FTIR), เอ็กซ์เรย์โฟโตอิเล็กตรอนสเปกโตรสโคปี (X-ray photoelectron spectroscopy; XPS), เอ็กซ์เรย์-ดิฟแฟรคชัน (X-ray diffraction; XRD), ดิฟเฟอเรนเชียล สแกนนิ่ง แคลลอรี่มิเตอร์ (Differential scanning calorimeter; DSC) และสแกนนิ่ง อิเล็กตรอนไมโครสโคปี (Scanning electron microscopy; SEM) เพื่อใช้เปรียบเทียบ ฟิล์มที่ไม่ได้ เติมนานาซิลิกอนไดออกไซด์, การเกิดผลึกของแผ่นฟิล์มที่มีการลดลง 41.2-32.9 เปอร์เซ็นต์ (%), แรงดึง (Tensile) และ แรงดึง ณ จุดขาด (Elongation at break) เพิ่มขึ้น 79.8 % และ 18 % ตามลำดับ การดูดซับน้ำ (Water absorption) ได้ลดลง 70 % พันธะไฮโดรเจน (Hydrogen bond) สร้างพันธะกับนาโน ซิลิกอนไดออกไซด์ และแป้ง (starch) ที่ผสมพอลิไวนิล แอลกอฮอล์ (Polyvinyl alcohol; PVA) พลังงานพันธะระหว่างโมเลกุลไฮโดรเจนกับแป้ง จะมีค่าลดลงเมื่อเติมนานาซิลิกอนไดออกไซด์ ในขณะที่พันธะเคมี C-O-Si จะสร้างพันธะกับนาโน ซิลิกอนไดออกไซด์/แป้ง/PVA กลายเป็นวัสดุประกอบ ดังนั้นแป้งและ PVA สามารถผสมรวมกันได้จากผลการทดลองข้างต้น

Xiaofei Ma และคณะ [22] จากงานวิจัยนี้กล่าวถึง วัสดุประกอบไบโอนานา (Bionanocomposite) ถูกเตรียมขึ้นจาก อนุภาคนาโน ซิงค์ออกไซด์ (ZnO nanoparticles) ผสมกับ แป้งถั่ว (Pea starch) โดยมีกลีเซอรอล (Glycerol) ทำหน้าที่เป็น พลาสติกไซเซอร์ (Plasticizer) ลักษณะโครงสร้างของแผ่นฟิล์มที่เตรียมได้ อธิบายโดยใช้ เทคนิคฟูเรียรทรานส์ฟอร์มอินฟราเรด สเปกตรัม (Fourier transform infrared spectra; FTIR), การวิเคราะห์ทางความร้อน (Thermogravimetric analysis; TGA) และทรานส์มิสชัน อิเล็กตรอน ไมโครสโคปี (Transmission electron microscopy; TEM) จากการทดลองใช้อนุภาคนาโน ซิงค์ออกไซด์ ที่มีอนุภาค 10

นาโนเมตร 70 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และแบ่ง 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จากผลการทดลองพบว่า เมื่อ ทำการใส่อนุภาคนาโน ซิงค์ออกไซด์ ลงไปในปริมาณเล็กน้อย พบว่าสารละลายแบ่งมีความหนืด, โมดูลัสสะสม(Storage modulus), TG (Transition temperature), และการดูดซับแสงยูวี (UV absorbance) มีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อใส่ อนุภาคนาโน ซิงค์ออกไซด์ เพิ่มจาก 0-4 wt% พบว่า แรงดึงสูงสุดที่จุดขาด (Tensile yield strength) และ ยังโมดูลัส(Young's modulus) มีค่าเพิ่มขึ้นจาก 3.94 เป็น 10.80 MPa และจาก 49.80 เป็น 137.00 MPa ตามลำดับการซึมผ่านของไอน้ำ (water vapor permeabilities; WVP) ลดลงจาก $4.76 \times 10^{10} \text{ gm}^1 \text{ s}^1 \text{ Pa}^1$ เป็น $2.18 \times 10^{10} \text{ gm}^1 \text{ s}^1 \text{ Pa}^1$

ศุภชัย อมรกันทรารกร และเพ็ญศิริ สรบุรี [23] ศึกษาผลการให้ความร้อนต่อสมบัติทางเคมี ฟิสิกส์ของแป้งมันสำปะหลังและแป้งมันฝรั่ง โดยนำแป้งมันสำปะหลังและแป้งมันฝรั่งที่ความเข้มข้น 10% โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ไปให้ความร้อนโดยวิธีแตกต่างกัน 3 วิธี คือ 1.ต้มที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส 2.ให้ความร้อนโดยใช้หม้อนึ่งอัดไอ (Autoclave) ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส 3.ให้ความร้อนโดยใช้หม้อนึ่งอัดไอที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส นาน 15 นาที พบว่าสมบัติของแป้งมันสำปะหลังและแป้งมันฝรั่งเมื่อทำให้แห้งแล้วจะแตกต่างกัน โดยการให้ความร้อนโดยวิธีการต้มและกวนจะทำให้แป้งเกิดเจลลิตในเซชันได้ดีที่สุด โดยสังเกตได้จากสารละลายที่เกิดเจลได้ทั่วทั้งสารละลาย ซึ่งแตกต่างจากวิธีใช้หม้อนึ่งอัดไอที่อุณหภูมิ 100 และ 121 องศาเซลเซียส โดยจะให้เจลมีลักษณะแยกออกเป็น 2 ชั้นจากสารละลาย และจากการให้ความร้อนทั้ง 3 วิธี สามารถทำให้ลักษณะอนุภาคของเม็ดแป้งเปลี่ยนแปลงไป โดยเม็ดแป้งสูญเสียส่วนที่เป็นไบรฟรินเจนไป นอกจากนี้ยังพบว่าความร้อนที่ให้ทั้ง 3 วิธีมีผลต่อความสามารถในการดูดซึมน้ำ (Water absorption index ,WAI) และความสามารถในการละลาย (Water solubility index ,WSI) ที่วิเคราะห์ตามวิธีของ Sriburi & Hill (2000) ของแป้งทั้งสองชนิด จะพบว่าแป้งมันสำปะหลังมีการเปลี่ยนแปลงของค่า WAI มากกว่าแป้งมันฝรั่ง ทั้งนี้เนื่องจากแป้งมันสำปะหลังมีปริมาณอะไมโลสค่อนข้างต่ำ การดูดซึมน้ำจึงเกิดได้ดี นอกจากนี้วิธีการให้ความร้อนแก่แป้งยังมีผลต่อค่า WSI ของแป้งด้วย โดยจะมีผลต่อค่า WSI ของมันฝรั่งมากกว่าแป้งมันสำปะหลัง ซึ่งเพิ่มขึ้นประมาณ 4-6 เท่า ในขณะที่ค่า WSI ของแป้งมันสำปะหลังเพิ่มขึ้นประมาณ 1 เท่า

Shangwen Tang และคณะ [24] ศึกษาผลกระทบของนาโนซิลิกอนไดออกไซด์ที่มีต่อประสิทธิภาพของแผ่นฟิล์มของแป้งและพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ โดยการนำแป้ง พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ และนาโนซิลิกอนไดออกไซด์มาผสมเป็นแผ่นฟิล์มที่สามารถย่อยสลายได้ โดยวิธีการหล่อแบบ และศึกษาคุณสมบัติเชิงกล คุณสมบัติทางกายภาพ และการย่อยสลายได้ทางชีวภาพของแผ่นฟิล์ม จากผลการทดลอง พบว่า SPS5 มีค่าความแข็งแรงดึง (Tensile strength) สูงสุดที่ประมาณ 15 เมกะปาสคาล์ และค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัวก่อนขาด (Elongation at break) เท่ากับ 120 % ซึ่งการเพิ่ม SPS5 จะทำให้เห็นลักษณะการ โปร่งแสงของแผ่นฟิล์มทั้งหมด ได้ดีที่สุดในระหว่างการเพิ่ม

ของนาโนซิลิกอนไดออกไซด์จะทำให้ความต้านทานน้ำของแผ่นฟิล์มเพิ่มขึ้นเช่นกัน การทดสอบโดยการฝังลงในดินแสดงให้เห็นว่า นาโนซิลิกอนไดออกไซด์ที่เพิ่มขึ้น ไม่มีผลต่อการย่อยสลายทางชีวภาพของแผ่นฟิล์ม นอกจากนี้ จากผลการทดสอบจะแสดงให้เห็นถึงการไม่เข้ากันของพันธะไฮโดรเจน และพันธะ C-O-Si (nano-SiO₂) ซึ่งเป็นสัญญาณในนาโนซิลิกอน แป้ง และพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ ดังนั้น ความสามารถในการผสมเข้ากันระหว่างแป้ง และพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่เพิ่มขึ้น และคุณสมบัติเชิงกลของนาโนซิลิกอนที่เพิ่มขึ้นก็จะดีขึ้น

Pirkko M. Forssell และคณะ [25] ศึกษาผลของปริมาณกลีเซอรอล และน้ำต่อการเปลี่ยนแปลงทางความร้อนของแป้งบาร์เลย์พลาสติกไซเซออร์ ทดสอบโดยใช้ DSC ปริมาณกลีเซอรอลที่ใช้ศึกษาที่ 14, 20, 29 และ 39% ปริมาณน้ำโดยการปรับสภาพความชื้นที่ต่างกัน จะแตกต่างกันในช่วง 1-28 % จากการสังเกตที่ Calorimetric glass transition temperature และเหมือนกับความร้อนที่เพิ่มขึ้นได้ Inferred เป็นเฟสเดียวกัน เกิดขึ้นในระบบที่น้ำและปริมาณกลีเซอรอลต่ำ ในขณะที่กรณีเฟสเกิดการแยกกันขึ้น โดยระบบจะประกอบด้วยเฟสที่อุดมไปด้วยแป้งและเฟสที่ขาดแคลนแป้ง การวิเคราะห์ Dynamic mechanical thermal บนเฟสที่เกิดการแยกกัน ตัวอย่างที่แสดงสมบัติเชิงกลที่สูงสูญเสียพิกตรงกับ glass transition ของทั้ง 2 เฟส Amylopectin ที่เป็นสัญญาณ(ผลึก)จะไม่เกิดขึ้นใน 1 สัปดาห์ของการเก็บรักษาในของผสมมีน้ำน้อยกว่า 20% กลีเซอรอลจะสัมพันธ์กับแป้งและยับยั้งการเกิดเป็นผลึกของ Amylopectin

Paivi Myllarinen และคณะ [26] ศึกษาผลของน้ำและกลีเซอรอลต่อการดูดซับ และ Calorimetric Tg ของอะไมโลสและอะไมโลเพคตินฟิล์ม เมื่อตรวจสอบสมบัติเชิงกลของฟิล์ม การวิเคราะห์กลีเซอรอลที่แตกต่างกันภายใต้ที่ RH และอุณหภูมิคงที่ ขึ้นอยู่กับการเปลี่ยนแปลงที่สังเกตจากประสิทธิภาพที่มีมากขึ้นกว่ากลีเซอรอลพลาสติกไซเซออร์ กลีเซอรอลยังส่งผลต่อ Tg แม้ว่าจะมีการลดลงของ Tg ที่ภายใต้ความแปรปรวนปริมาณกลีเซอรอลของฟิล์มจะต่ำลงตามการยืดตัว การเพิ่มขึ้นของความแปรปรวนของพอลิเมอร์ทั้ง 2 สอดคล้องกับพฤติกรรมที่เกิดขึ้นจริง ที่ประมาณ 20% ของกลีเซอรอลมีการเปลี่ยนแปลงอย่างมากในสมบัติของ Rheological ที่เกิดขึ้น สูงกว่า 20% พบว่ากลีเซอรอลอะไมโลสฟิล์มยืดได้มากกว่าฟิล์มที่มีกลีเซอรอลต่ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. กลีเซอรอล (Glycerol) (บริษัท Fluka biochemika 49781, Glycerol hydrate, EINECS:2002895)
4. นาโนซิงค์ออกไซด์ (nano ZnO) (บริษัท นาโนเมทีเรียลส์ เทคโนโลยี จำกัด, “Zonop” \approx 40 nm)
5. น้ำกลั่น
6. สารละลายอิ่มตัว NaCl
7. สารละลายต่าง NaOH 0.1 mol/L
8. สารละลายกรด HCl 0.1mol/L

3.2 วิธีการทดลอง

นำแป้งมันสำปะหลัง, น้ำร้อน, CMC, กลีเซอรอล และ nano ZnO มาผสมตามสูตรดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 การเตรียมเทอร์โมพลาสติกสไตร์ชจากแป้งมันสำปะหลังสูตรต่างๆ

สูตร	แป้งมัน (กรัม)	น้ำร้อน (มล.)	CMC (กรัม)	กลีเซอรอล (กรัม)	nano ZnO (กรัม)
1	10	15	-	3	-
2	10	15	-	3	0.5
3	10	15	-	3	1.0
4	7	15	3	3	-
5	7	15	3	3	0.5
6	7	15	3	3	1.0
7	5	15	5	3	-
8	5	15	5	3	0.5
9	5	15	5	3	1.0
10	3	15	7	3	-
11	3	15	7	3	0.5
12	3	15	7	3	1.0
13	-	15	10	3	-
14	15	15	10	3	0.5

เอกสารนี้เป็นสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มี 1.0 นำไปใช้

3.2.1 วิธีเตรียมแผ่นฟิล์มผสมระหว่างแป้งมันสำปะหลังกับ CMC

3.2.1.1 เเทน้ำ 5 มิลลิลิตร ผสมกับแป้งมันสำปะหลัง (Cassava Starch) แล้ววนคพอให้เข้ากัน

3.2.1.2 ผสม CMC กับน้ำ 10 มิลลิลิตรให้ละลายและเทส่วนผสมลงในข้อ 3.2.1.1 จากนั้นเติมกลีเซอรอล และ nano ZnO น้ำหนักตามสูตร แล้วใช้มือนวดเพื่อให้ส่วนผสมเข้ากันพักไว้ 1 คืน ในถุงพลาสติก

3.2.1.3 นำมาทำการขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดขึ้นรูป (compression molding) โดยใช้แม่พิมพ์ที่มีความหนา 2 มิลลิเมตร

3.2.1.4 ทำความสะอาดแม่พิมพ์ ใช้แผ่นใสถ่ายเอกสารรองแม่พิมพ์ป้องกันชิ้นงานติดแม่พิมพ์

3.2.1.5 วางของผสมที่ได้แต่ละสูตรลงในแม่พิมพ์ และเกลี่ยเพื่อให้แผ่นบางให้มีความหนาเท่าๆกัน วางแผ่นใสถ่ายเอกสารปิดทับ และวางแผ่นเหล็กปิดเป็นชั้นสุดท้าย

3.2.1.6 นำไปเข้าเครื่องอัดขึ้นรูป ทำการอัดขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 140°C เป็นเวลา 5 นาที จากนั้นหล่อเย็นอีก 5 นาที ที่ความดันในช่วง 1300 psi

3.2.1.7 นำชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์ เก็บไว้ในภาชนะปิดเพื่อทำการทดสอบสมบัติต่อไป

3.3 การทดสอบ

3.3.1 การตรวจสอบหมู่ฟังก์ชัน

ศึกษาหมู่ฟังก์ชันโดยใช้เครื่อง Fourier Transform Infrared Spectrophotometer (FTIR) โดยนำเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งบริสุทธิ และเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งผสมที่จะวิเคราะห์มาบดรวมกับ KBr อัดด้วยเครื่องอัดให้เป็นแผ่น ทำการสแกน 4 ครั้งต่อตัวอย่างที่ความยาวคลื่น $4,000 - 600\text{ cm}^{-1}$ ความละเอียดที่ 4 cm^{-1}

3.3.2 การตรวจสอบความเป็นผลึก

ทำการวิเคราะห์ความเป็นผลึกของชิ้นงานโดยใช้เครื่อง X-ray diffractometer (XRD) วัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ที่ตกกระทบหน้าผลึก ของสารตัวอย่างที่มุมต่างๆกัน โดยใช้ $\text{CuK}\alpha$ ($\lambda = 1.542\text{ \AA}$) ทำการวัดมุมของการกระเจิง ในช่วง $3-33^{\circ}$ โดยสแกนด้วยอัตรา 1 องศาต่อนาทีและสถานะของเครื่องกำหนดไว้ที่ 40 kV และ 30 mA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.3 การทดสอบสมบัติเชิงกล

- การทดสอบความแข็งกด

โดยนำแผ่นฟิล์มตัวอย่างไปวัดค่าความแข็งแรงกด ด้วยเครื่อง Durometer แบบ Shore A วัดตัวอย่างละ 10 จุด และหาค่าเฉลี่ย

- การทดสอบความแข็งแรงดึง

ทำการทดสอบสมบัติต่างๆ ตามมาตรฐาน ดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 มาตรฐานที่ใช้ในการทดสอบสมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกสไตร์ชที่เตรียมได้

สมบัติ	มาตรฐานที่ใช้ทดสอบ	หน่วยที่รายงาน
ความแข็งแรงดึง (Tensile Strength)	ASTM D882 - 88	MPa
มอดุลัส (Young's Modulus)	ASTM D882 - 88	MPa
เปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาด (%Elongation at break)	ASTM D882 - 88	%

ทำการทดสอบด้วยเครื่องทดสอบสมบัติเชิงกล (Universal Testing Machine) ทดสอบด้วยมาตรฐาน ASTM D882-88 ชิ้นงานที่ใช้ทดสอบมีลักษณะเป็นรูปดัมเบลล์ จำนวนมากกว่า 5 ชิ้น ตัวอย่างก่อนดึงต้องเก็บไว้ในสารละลายอิ่มตัว NaCl ในแต่ละสูตร โดยควบคุมสถานะในการทดสอบดังนี้

Temperature : 25 °C

Relative humidity: 75%

Test speed : 5 mm. /min

Gauge length : 25 mm.

Load cell : 100 N

สามารถคำนวณได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$\text{ความแข็งแรงดึง (Tensile strength)} = \frac{F}{A}$$

$$\text{มอดุลัส (Young's Modulus)} = \frac{\left(\frac{F}{A}\right)}{[(L-L_0)/L_0]} \times 100$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับ [L-L₀]/L₀] ศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้าง (L-L₀) ของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\text{เปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาด (%Elongation at break)} = \frac{(L-L_0)}{L_0} \times 100$$

เมื่อ	F	คือ แรงที่ใช้ดึงชิ้นงานตัวอย่าง (N)
	A	คือ พื้นที่หน้าตัดของชิ้นงานตัวอย่าง (mm. ²)
	L	คือ ระยะห่างระหว่างจุดสองจุดหลังจากทำการดึงยึดชิ้นงานตัวอย่าง (mm.)
	L ₀	คือ ระยะที่ชิ้นงานตัวอย่างแถบที่สุกและมีพื้นที่หน้าตัดขนานกัน (mm.)

3.3.4 การทดสอบสมบัติทางกายภาพ

- การทดสอบการบวมน้ำ

ทำการศึกษาการบวมน้ำโดยนำชิ้นงานมาแช่ในน้ำกลั่นที่มีปริมาตร 50 มิลลิลิตร ปิดฝาปิ๊งเกอร์ให้แน่น และแช่เป็นเวลา 24 ชั่วโมง นำชิ้นมาชั่งน้ำหนักส่วนเกิน แล้วชั่งน้ำหนัก

$$\% \text{ การบวมน้ำ} = [(M_t - M_o) \times 100] / M_o$$

เมื่อ M_t คือ น้ำหนักเปียกหลังแช่

M_o คือ น้ำหนักแห้งก่อนแช่

- การทดสอบความคงตัวในกรดต่าง

ทำโดยการนำชิ้นงานมาตัดให้มีขนาด 40×40 มิลลิเมตร นำมาแช่ในสารละลายต่าง 0.1 mol/L NaOH และ 0.1 mol/L HCl ปิดฝาภาชนะให้สนิท ตั้งไว้ที่อุณหภูมิ 25 °C สังเกตสีที่เปลี่ยนแปลงไป ตามเวลาที่กำหนด

3.3.5 การทดสอบสมบัติทางความร้อน

ศึกษาอุณหภูมิเริ่มต้นของการสลายตัว (Onset degradation temperature) และเปอร์เซ็นต์การลดลงของน้ำหนักที่อุณหภูมิเริ่มต้นการสลายตัว (%weight loss at onset degradation temperature) ของเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์ด้วยเทอร์โมกราวิคเมตริกแอนาไลเซอร์ (Thermogravimetric analyzer, TGA) โดยชั่งตัวอย่างประมาณ 16 มิลลิกรัมแล้วนำมาวิเคราะห์ด้วยเครื่อง TGA ภายใต้สภาวะบรรยากาศของไนโตรเจน อุณหภูมิที่ให้อยู่ในช่วง 50-600 °C และอัตราการเพิ่มอุณหภูมิ (Heating rate) ที่ 10 °C ต่อนาที

3.3.6 การทดสอบสมบัติทางสัณฐานวิทยา

ศึกษาสัณฐานวิทยา โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) ใช้ลำแสงอิเล็กตรอน ฉายหรือส่องกราดไปบนผิวของตัวอย่าง เตรียมโดยหักชิ้นงานหลังจากแช่ใน โตรเจนเหลว ฉาบผิวด้วยทองคำแล้วนำไปทดสอบ เพื่อศึกษาพื้นผิวและสภาพตัดขวางของเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์ในสูตรต่างๆ อย่างอ้างถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการทดลอง

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเตรียมฟิล์มย่อยสลายจากแป้งมันสำปะหลังผสมกับ CMC และใช้กลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซอร์ ขึ้นรูปด้วยการอัด (Compression) โดยทำการศึกษาอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมในการเตรียมฟิล์มย่อยสลาย โดยศึกษาสมบัติทางกายภาพ สัณฐานวิทยา สมบัติเชิงกล และสมบัติทางความร้อน จากการศึกษารายละเอียดต่างๆ ของฟิล์มย่อยสลายจากแป้งมันสำปะหลังที่เตรียมได้ ให้ผลดังนี้

4.1 การเตรียมส่วนผสมที่เหมาะสมของฟิล์มย่อยสลายจากแป้งมันสำปะหลังผสมกับ CMC และกลีเซอรอล ที่สามารถขึ้นรูปด้วยการอัด (Compression) โดยวิธีการหล่อแบบได้

ตารางที่ 4.1 อัตราส่วนผสมของฟิล์มจากแป้งมันสำปะหลัง และ CMC

สูตร	แป้งมัน (กรัม)	น้ำร้อน (มล.)	CMC (กรัม)	กลีเซอรอล (กรัม)	nano ZnO (กรัม)
1	10	15	-	3	-
2	10	15	-	3	0.5
3	10	15	-	3	1.0
4	7	15	3	3	-
5	7	15	3	3	0.5
6	7	15	3	3	1.0
7	5	15	5	3	-
8	5	15	5	3	0.5
9	5	15	5	3	1.0
10	3	15	7	3	-
11	3	15	7	3	0.5
12	3	15	7	3	1.0
13	-	15	10	3	-
14	-	15	10	3	0.5
15	-	15	10	3	1.0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับศึกษาใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 4.1 พบว่า สูตรที่ 1-6 ไม่สามารถขึ้นรูปเป็นแผ่นฟิล์มได้ แสดงว่าอัตราส่วน แป้งเมื่อเทียบกับ CMC เป็น 10:0 และ 7:3 ทำให้ของผสมเป็นของเหลวไหลได้

จากสูตรที่ 7-15 พบว่าสามารถขึ้นรูปเป็นแผ่นฟิล์มได้ เนื่องจาก CMC มีคุณสมบัติในการเพิ่มความหนืด ช่วยในการยึดเกาะ และเป็นสารให้ความคงตัว อาจนำตัวอย่างที่ขึ้นรูปได้มาศึกษาสมบัติต่างๆ โดยแบ่งเป็น 2 กลุ่ม ดังนี้

กลุ่มที่ 1 คือ สูตรที่ 7, 10, 13 เป็นสูตรที่ไม่มี nano ZnO

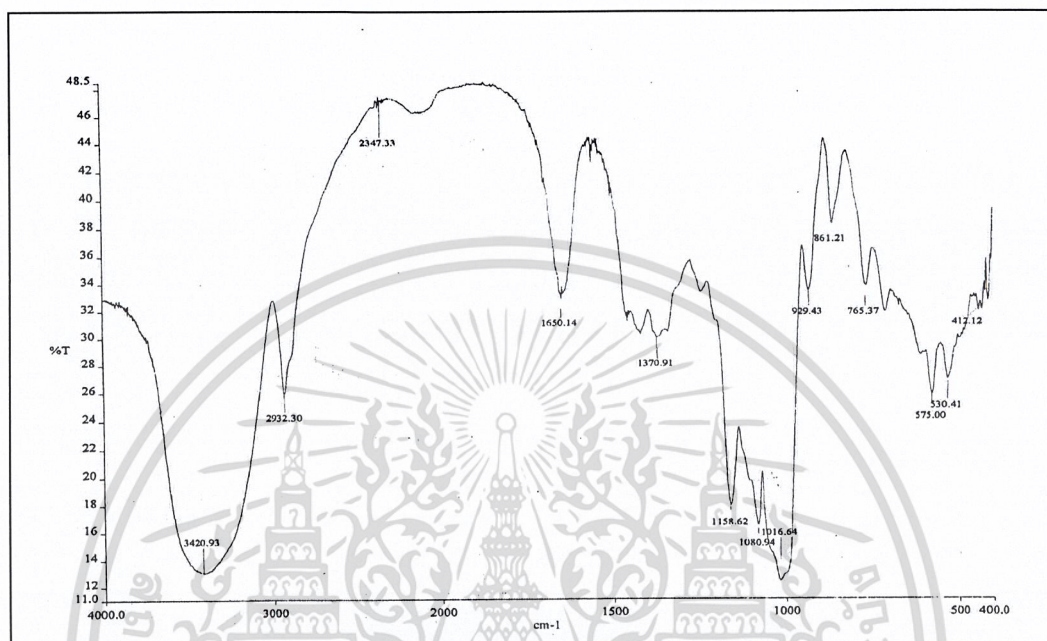
กลุ่มที่ 2 คือ สูตรที่ 8, 9, 11, 12, 14, 15 เป็นสูตรที่มีการเติม nano ZnO



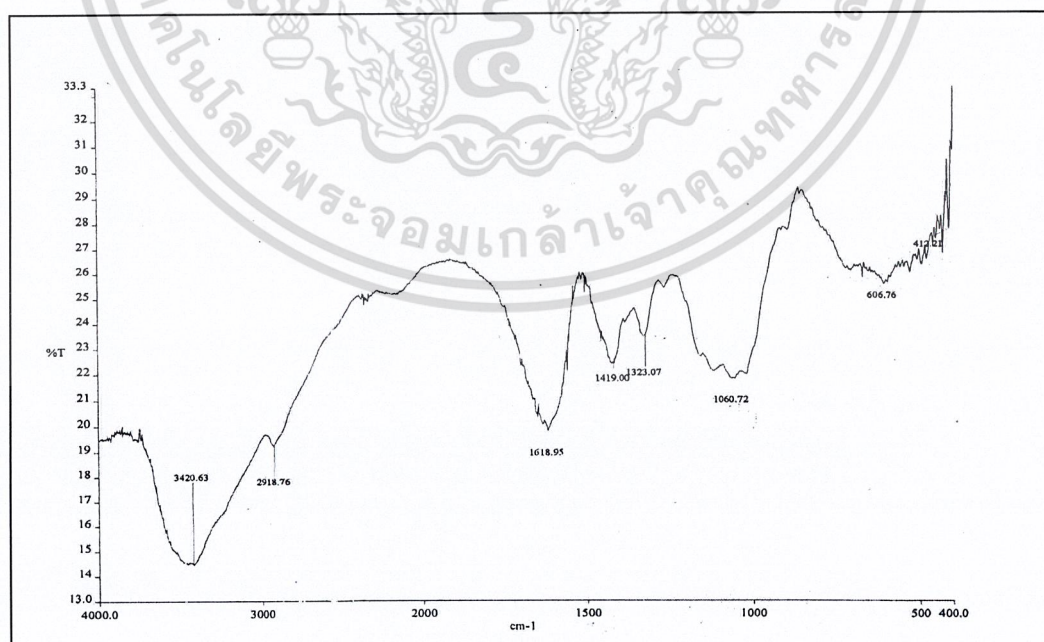
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 การตรวจสอบหมู่ฟังก์ชัน

ผลจากการศึกษาโดยเทคนิค Fourier-transform Infrared Spectroscopy (FT-IR) ของฟิล์มย่อยสลายที่เตรียมจากแป้งมันสำปะหลัง

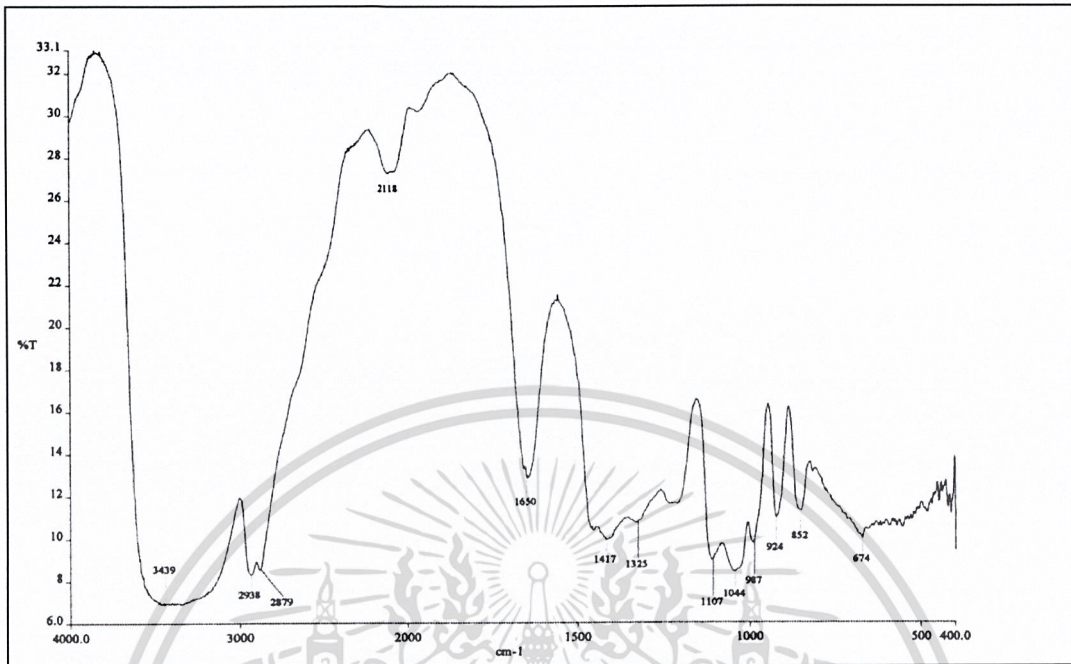


รูปที่ 4.1 แสดงสเปกตรัม IR ของแป้งมันสำปะหลัง

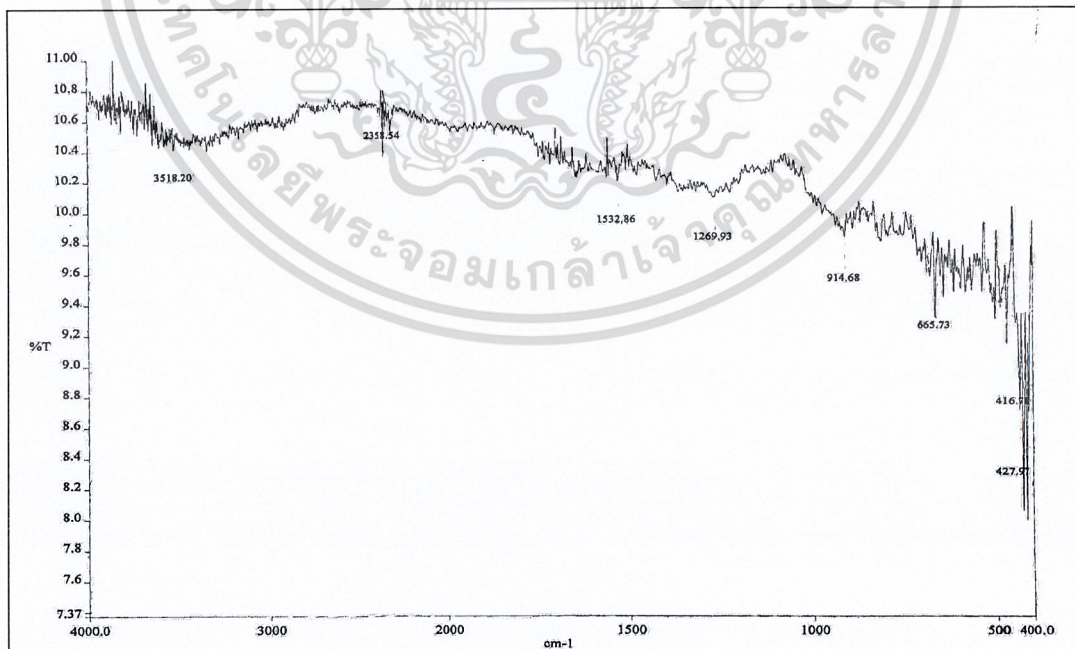


รูปที่ 4.2 แสดงสเปกตรัม IR ของ CMC

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในห้องปฏิบัติการเท่านั้น ไม่ควรนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.3 แสดงสเปกตรัม IR ของกาลีเซอรอล



รูปที่ 4.4 แสดงสเปกตรัม IR ของ nano ZnO

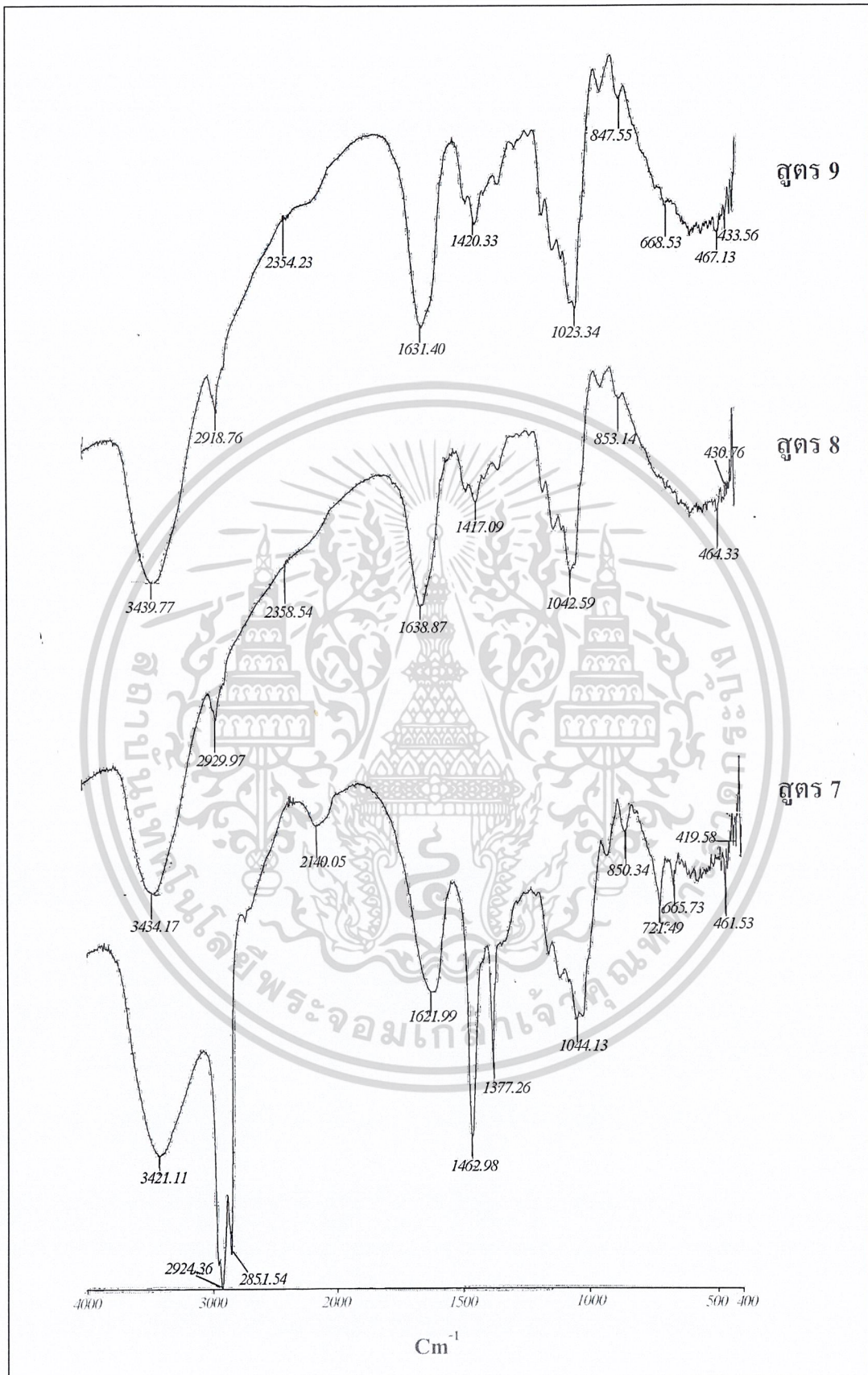
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.1 แสดงสเปกตรัม IR ของแป้งมันสำปะหลัง โดยพิจารณาที่เลขคลื่นในช่วง 400-4000 cm^{-1} พบว่าที่เลขคลื่นประมาณ 3420 cm^{-1} คือหมู่ไฮดรอกซิล เลขคลื่นที่ 2932 cm^{-1} เกิดจากหมู่ C-H stretching ซึ่งสอดคล้องกับ Ring methane hydrogen เลขคลื่นที่ 1650 cm^{-1} คือหมู่ O-H stretching ที่อยู่ในโมเลกุลของแป้ง เลขคลื่นประมาณ 1370 cm^{-1} คือ หมู่ C-H bending และเลขคลื่นประมาณ 1016-1158 cm^{-1} คือ หมู่ C-O-C ที่เกิดจาก Anhydroglucose ring [26]

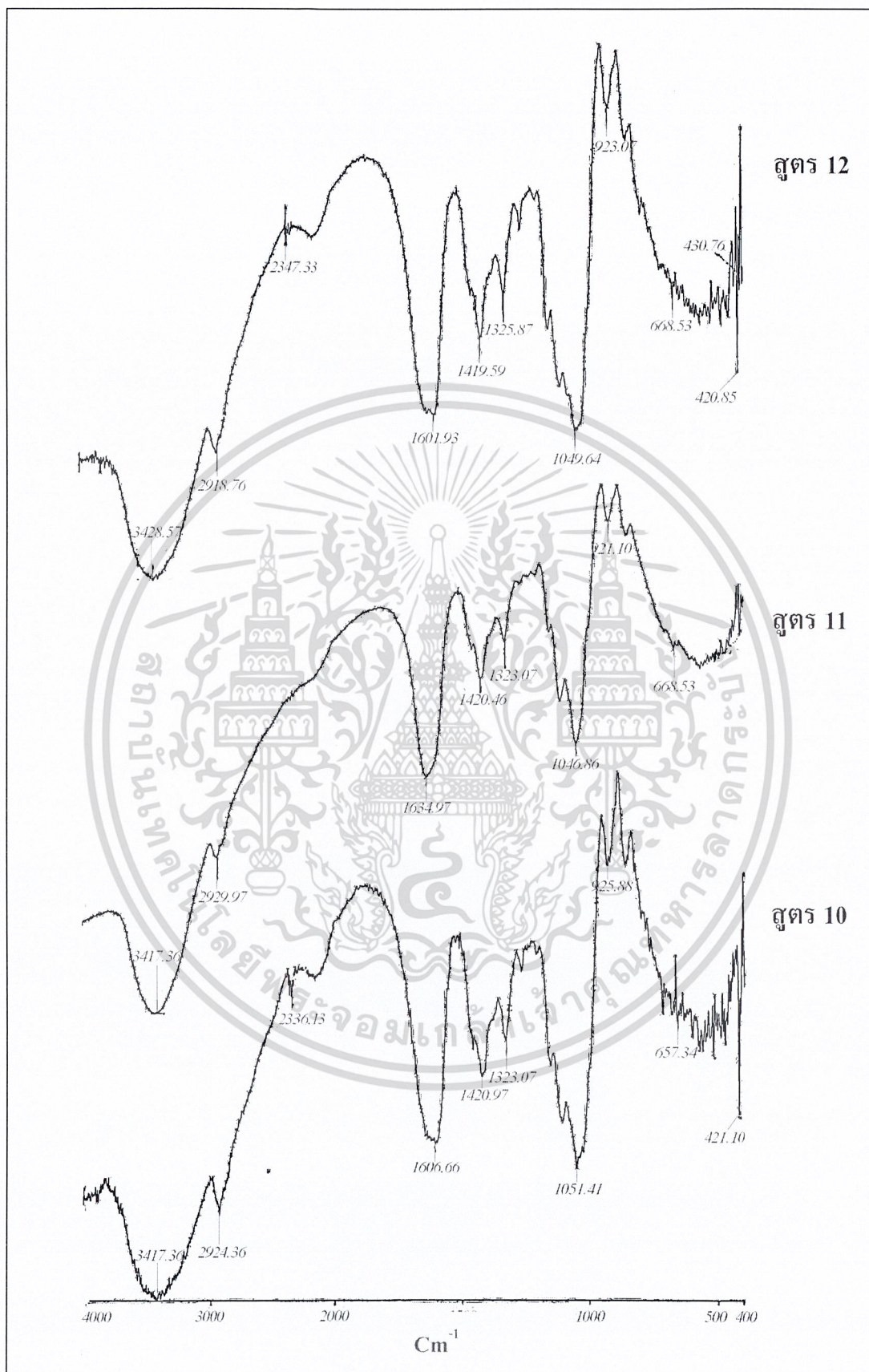
จากรูปที่ 4.2 แสดงสเปกตรัม IR ของ CMC โดยพิจารณาที่เลขคลื่นในช่วง 400-4000 cm^{-1} พบว่าที่เลขคลื่นประมาณ 3420 cm^{-1} คือหมู่ O-H stretching เลขคลื่นประมาณ 2918 cm^{-1} คือ หมู่ C-H stretching เลขคลื่นประมาณ 1618 cm^{-1} คือหมู่ C=O stretching เลขคลื่นประมาณ 1323, 1419 cm^{-1} คือ หมู่ Asymmetric stretching และเลขคลื่นประมาณ 1060 cm^{-1} คือ หมู่ C-O stretching

จากรูปที่ 4.3 แสดงสเปกตรัม IR ของกลีเซอรอล โดยพิจารณาที่เลขคลื่นในช่วง 400-4000 cm^{-1} พบว่าที่เลขคลื่นประมาณ 3439 cm^{-1} คือหมู่ไฮดรอกซิล เลขคลื่นประมาณ 2879-2938 cm^{-1} คือ หมู่ C-H stretching ของ อะลิฟาติก เลขคลื่นที่ 1417 cm^{-1} คือหมู่ CH_2 bending และเลขคลื่นประมาณ 1044-1107 cm^{-1} คือ หมู่ C-O stretching

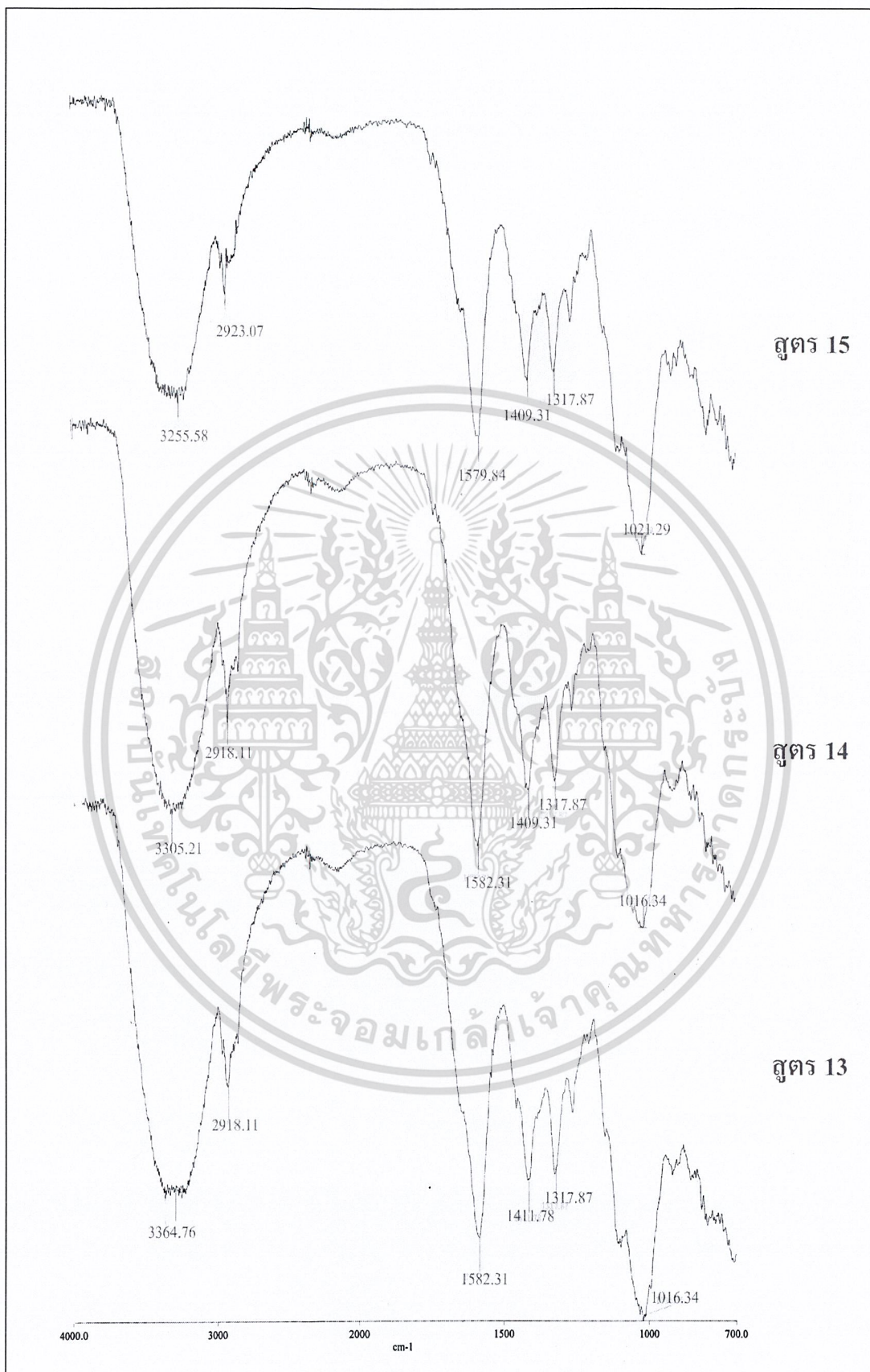
จากรูปที่ 4.4 แสดงสเปกตรัม IR ของ nano ZnO โดยพิจารณาที่เลขคลื่นในช่วง 400-4000 cm^{-1} พบว่าที่เลขคลื่นประมาณ 3518 cm^{-1} คือหมู่ O-H stretching เลขคลื่นที่ 1269 cm^{-1} คือหมู่ C-O stretching และเลขคลื่นประมาณ 416-427 cm^{-1} คือ หมู่ Zn-O [27]



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้สอนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้แก้ไขหรือใช้ประโยชน์ด้านการค้า
รูปที่ 4.5 แสดงสเปกตรัม IR ของฟิล์มแป้งมันสำปะหลัง:CMC (5:5) ผสมน้ำร้อน กิลิเซอร์อล
 ไม่วากรัมใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งทาน้ำให้ข้อเปลี่ยนแปลงสีและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
 และ nano ZnO ที่อัตราส่วนต่างๆ โดยสูตรที่ 7, สูตรที่ 8 และสูตรที่ 9



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ภายในเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
รูปที่ 4.6 แสดงสเปกตรัม IR ของฟิล์มแป้งสำปะหลัง:CMC (3:7) ผสมน้ำร้อน กลิเซอรอล
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
 และ nano ZnO ที่อัตราส่วนต่างๆ โดยสูตรที่ 10, สูตรที่ 11 และสูตรที่ 12



รูปที่ 4.7 แสดงสเปกตรัม IR ของฟิล์มแป้งลำปะหลัง:CMC (0:10) ผสมน้ำร้อน กลีเซอรอล และ nano ZnO ที่อัตราส่วนต่างๆ โดยสูตรที่ 13, สูตรที่ 14 และสูตรที่ 15

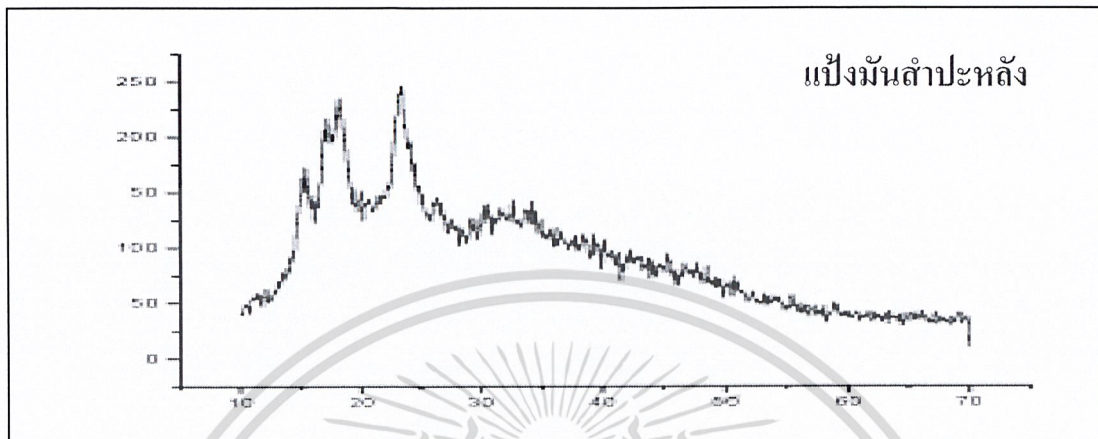
จากรูปที่ 4.5 แสดงสเปกตรัม IR ของฟิล์มแป้งมันสำปะหลัง:CMC (5:5) สูตรที่ 7, 8 และ 9 ที่ไม่มี และมี nano ZnO 0.5 และ 1 กรัม ตามลำดับ พบว่าที่เลขคลื่นประมาณ $2851-2929\text{ cm}^{-1}$ คือ หมู่ C-H stretching และเลขคลื่นประมาณ $1417-1462\text{ cm}^{-1}$ คือหมู่ Asymmetric stretching [27] ซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงเมื่อเพิ่มปริมาณ nano ZnO โดยมีความเข้มของพีคลดลง แสดงให้เห็นว่า เกิดการเปลี่ยนแปลงของพันธะไฮโดรเจนในโมเลกุลของแป้ง นอกจากนี้ที่เลขคลื่นประมาณ $3421-3439\text{ cm}^{-1}$ ยังพบหมู่ O-H stretching ที่เกิดการเคลื่อน (Shift) ไปเลขคลื่นที่เพิ่มขึ้น แสดงว่าเกิดพันธะไฮโดรเจนขึ้นใหม่ระหว่างโมเลกุลของแป้งและกรดคาร์บอกซิลิก และพบหมู่ C=O stretching ที่เลขคลื่นประมาณ $1621-1638\text{ cm}^{-1}$ ที่เลขคลื่นประมาณ $1023-1044\text{ cm}^{-1}$ พบหมู่ C-O stretching และที่สูตรที่ 8, 9 ซึ่งมี nano ZnO พบความเข้มของพีคที่เลขคลื่นประมาณ $430-433\text{ cm}^{-1}$ ซึ่งเป็นผลมาจากพันธะของสังกะสีและออกซิเจน [28]

จากรูปที่ 4.6 เป็นสเปกตรัม IR ของฟิล์มแป้งมันสำปะหลัง:CMC (3:7) สูตรที่ 10, 11 และ 12 ที่ไม่มี และมี nano ZnO 0.5 และ 1 กรัม ตามลำดับ พบว่าที่เลขคลื่นประมาณ $3417-3428\text{ cm}^{-1}$ คือหมู่ O-H stretching เลขคลื่นประมาณ $2918-2929\text{ cm}^{-1}$ คือหมู่ C-H stretching ที่เลขคลื่นประมาณ $1601-1634\text{ cm}^{-1}$ คือ หมู่ C=O stretching เลขคลื่นประมาณ $1323, 1420\text{ cm}^{-1}$ คือ Asymmetric stretching หมู่ และที่เลขคลื่นประมาณ $1046-1051\text{ cm}^{-1}$ พบหมู่ C-O stretching

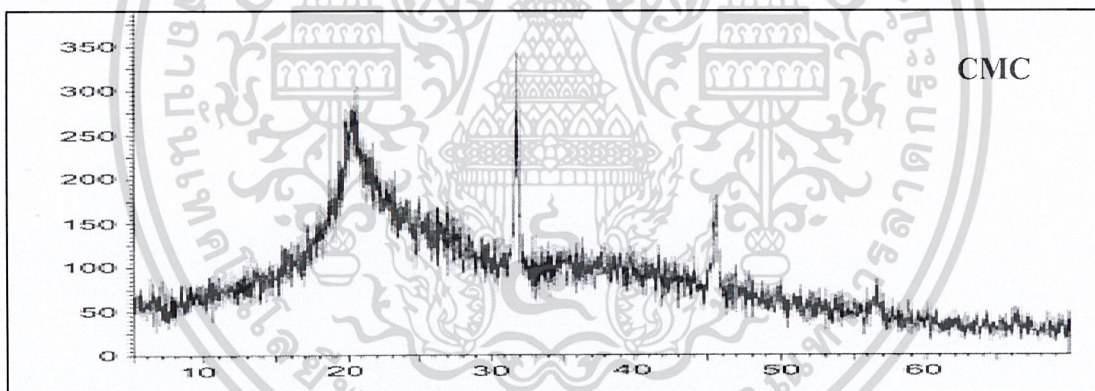
จากรูปที่ 4.7 แสดงสเปกตรัม IR ของฟิล์มแป้งมันสำปะหลัง:CMC (0:10) สูตรที่ 13, 14 และ 15 ที่ไม่มี และมี nano ZnO 0.5 และ 1 กรัม ตามลำดับ พบว่าที่เลขคลื่นประมาณ $3255-3364\text{ cm}^{-1}$ คือ หมู่ O-H stretching ซึ่งเกิดการเคลื่อน (Shift) ไปเลขคลื่นที่ลดลง เมื่อปริมาณ nano ZnO เพิ่มขึ้นเป็น 0.5 และ 1 กรัม โดยเปลี่ยนจาก 3305.21 cm^{-1} เป็น 3255.58 cm^{-1} แสดงให้เห็นว่าเกิดปฏิกิริยาระหว่าง CMC และ nano ZnO พบเลขคลื่นประมาณ $2918-2923\text{ cm}^{-1}$ คือหมู่ C-H stretching ที่เลขคลื่นประมาณ $1579-1582\text{ cm}^{-1}$ คือ หมู่ C-C stretching เลขคลื่นประมาณ $1317, 1409\text{ cm}^{-1}$ คือ หมู่ Asymmetric stretching ที่เลขคลื่นประมาณ $1016-1021\text{ cm}^{-1}$ พบหมู่ C-O stretching

4.3 การตรวจสอบความเป็นผลึก

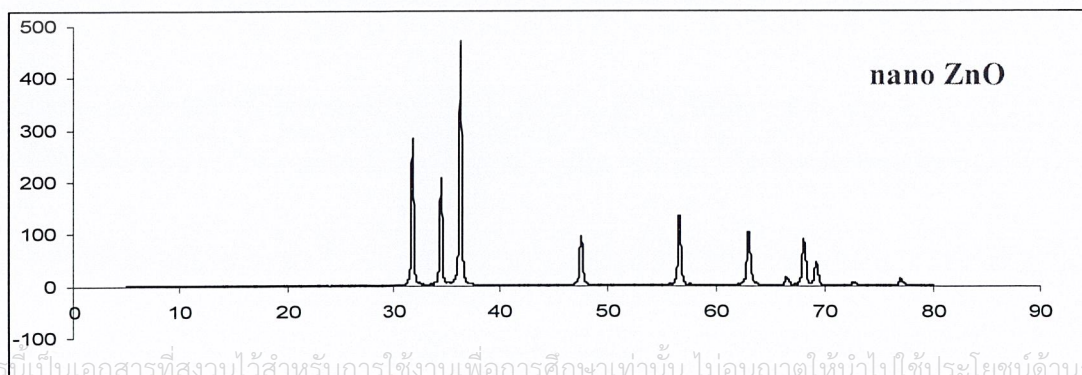
นำแป้งมันสำปะหลัง ผง CMC และ nano ZnO นำมาศึกษาหาความเป็นผลึกในโครงสร้าง โดยเทคนิค X-ray diffraction pattern



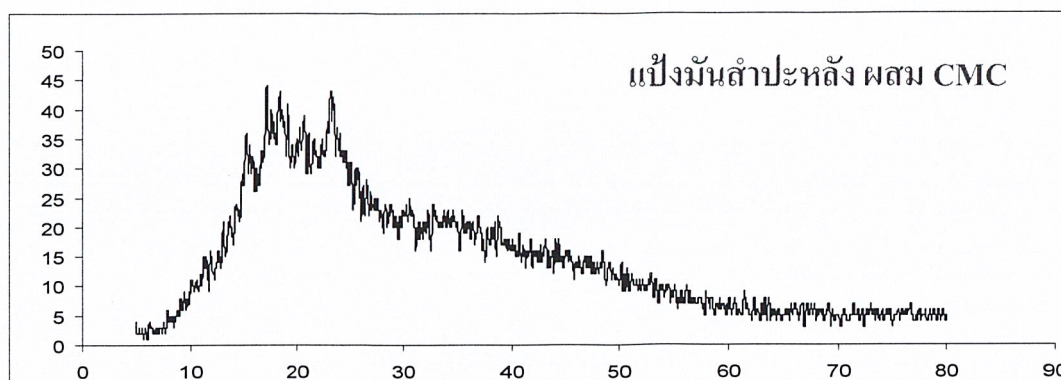
รูปที่ 4.8 แสดง pattern ของแป้งมันสำปะหลัง ที่มุม 2-Theta 10-70 องศา



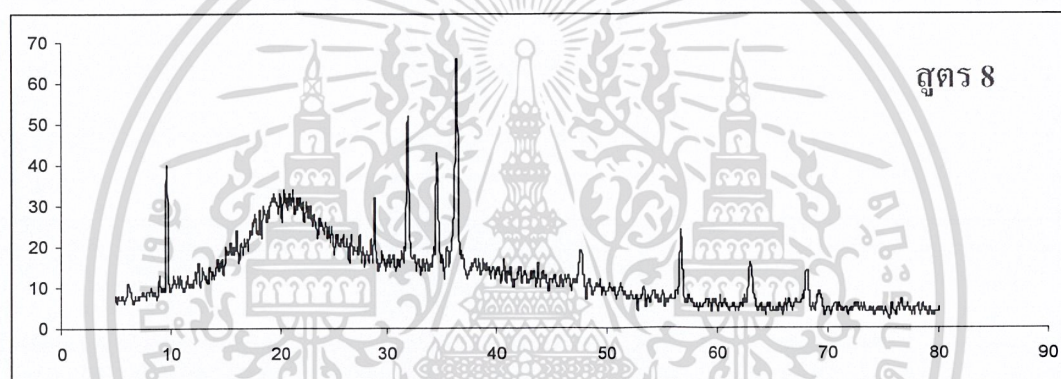
รูปที่ 4.9 แสดง pattern ของ CMC ที่มุม 2-Theta 5-70 องศา



รูปที่ 4.10 แสดง pattern ของ nano ZnO ที่มุม 2-Theta 5-80 องศา



รูปที่ 4.11 แสดง pattern แป้งมันสำปะหลังผสม CMC อัตราส่วน 1:1 กรัม
ที่มุม 2-Theta 5-80 องศา



รูปที่ 4.12 แสดง pattern ของแผ่นฟิล์มแป้งมันสำปะหลัง:CMC เป็น 5:5 มี nano ZnO
เป็น 0.5 กรัม ซึ่งเป็นสูตรที่มีสมบัติเชิงกลและกายภาพโดยรวมดีที่สุด

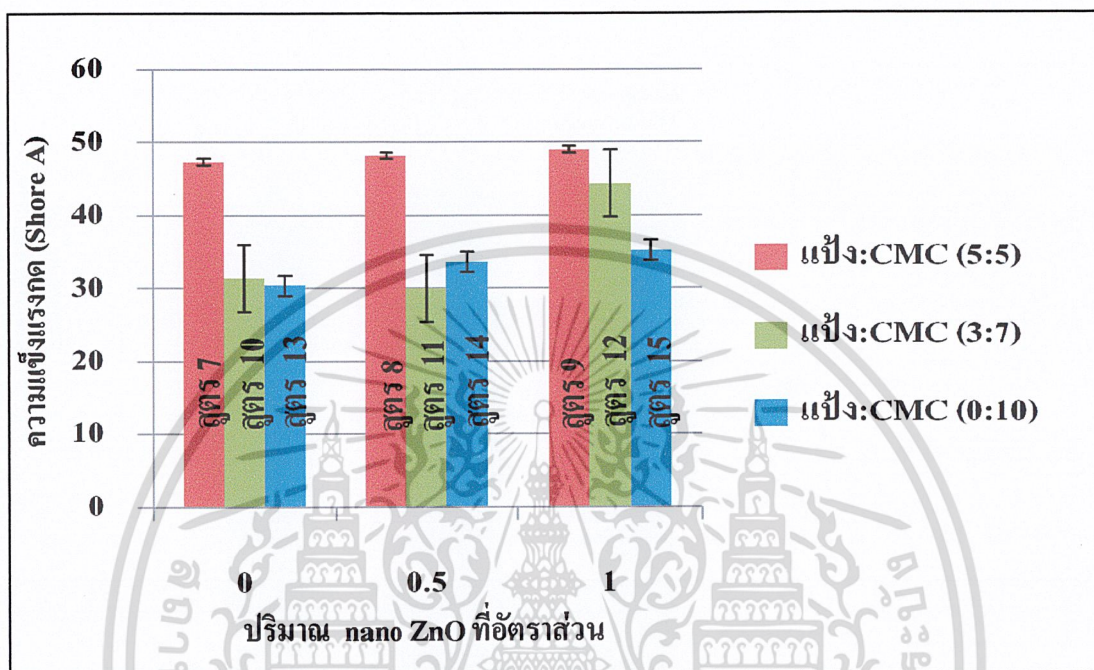
- จากรูป 4.8 พบว่าแป้งมันสำปะหลังมีพีคขึ้นที่ตำแหน่ง 18, 21 และ 23 องศาตามลำดับ
- จากรูป 4.9 พบว่า CMC มีพีคขึ้นที่ตำแหน่ง 21, 32 และ 45 องศาตามลำดับ
- จากรูป 4.10 พบว่า nano ZnO มีพีคขึ้นที่ตำแหน่ง 32, 36, 38, 48, 57, 62, 68, 69 และ 70 องศาตามลำดับ
- จากรูป 4.11 พบว่าแป้งมันสำปะหลัง และ CMC เกิดปฏิกิริยากัน โดย ตำแหน่งของพีคผสมของทั้งแป้งมันสำปะหลังและ CMC แต่ความสูงของพีคที่แสดงความเป็นผลึกลดลงมาเมื่อเทียบกับรูป 4.8 และ 4.9
- จากรูป 4.12 การใส่ nano ZnO ทำให้ความเป็นผลึกของแป้งและ CMC ลดลง โดยพีคแสดงความเป็นผลึกของแป้งและ CMC หายไป โดยที่ผลึกของ nano ZnO ไม่เปลี่ยนแปลง พีคยังคงปรากฏอยู่ที่

เอกสาดำเนินการที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4 การทดสอบสมบัติเชิงกล

สมบัติเชิงกลที่ทำการศึกษา ได้แก่ ความแข็งกด และความแข็งแรงดึง

4.4.1 การทดสอบความแข็งกด



รูปที่ 4.13 กราฟแสดงค่าความแข็งกดของแผ่นฟิล์มที่อัตราส่วนเปรียบเทียบ:CMC ที่ปริมาณ nano ZnO ต่างๆ

จากรูป 4.13 จากการทดสอบค่าความแข็งแรงกด โดยเครื่อง Durometer แบบ Shore A ของแผ่นฟิล์มที่อัตราส่วนเปรียบเทียบ:CMC ที่ปริมาณ nano ZnO ต่างๆ พบว่า

ที่อัตราส่วนเปรียบเทียบ:CMC 5:5 ที่ไม่มีและมี nano ZnO 0.5 และ 1 กรัม ตามลำดับ พบว่า เมื่อปริมาณ nano ZnO เพิ่มขึ้น 0.5 และ 1 กรัม ค่าความแข็งกดเพิ่มขึ้น เนื่องจาก nano ZnO ทำหน้าที่เป็นสารเสริมแรง และอนุภาค nano ZnO แข็งกว่าเปรียบเทียบ และ CMC จากการทดสอบสัณฐานวิทยาในรูปที่ 4.24 (ข), (ค) ที่มีปริมาณ nano ZnO 0.5 และ 1 กรัม ตามลำดับ พบว่าแผ่นฟิล์มมีลักษณะพื้นผิวเรียบ จำนวนรูพรุนลดลง แสดงถึงการผสมเข้ากันได้ดีของส่วนผสม ทำให้ส่วนผสมมีการยึดเกาะกันได้ดี ชิ้นงานสามารถรับแรงกดได้ดี

ที่อัตราส่วนเปรียบเทียบ:CMC 3:7 ที่ไม่มีและมี nano ZnO 0.5 และ 1 กรัม ตามลำดับ พบว่า เมื่อปริมาณ nano ZnO เพิ่มขึ้น 0.5 กรัม ค่าความแข็งกดใกล้เคียงกับเมื่อไม่มี nano ZnO แต่เมื่อปริมาณ nano ZnO เพิ่มขึ้น 1 กรัม ค่าความแข็งกดเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด เนื่องจาก nano ZnO เป็นอนุภาค

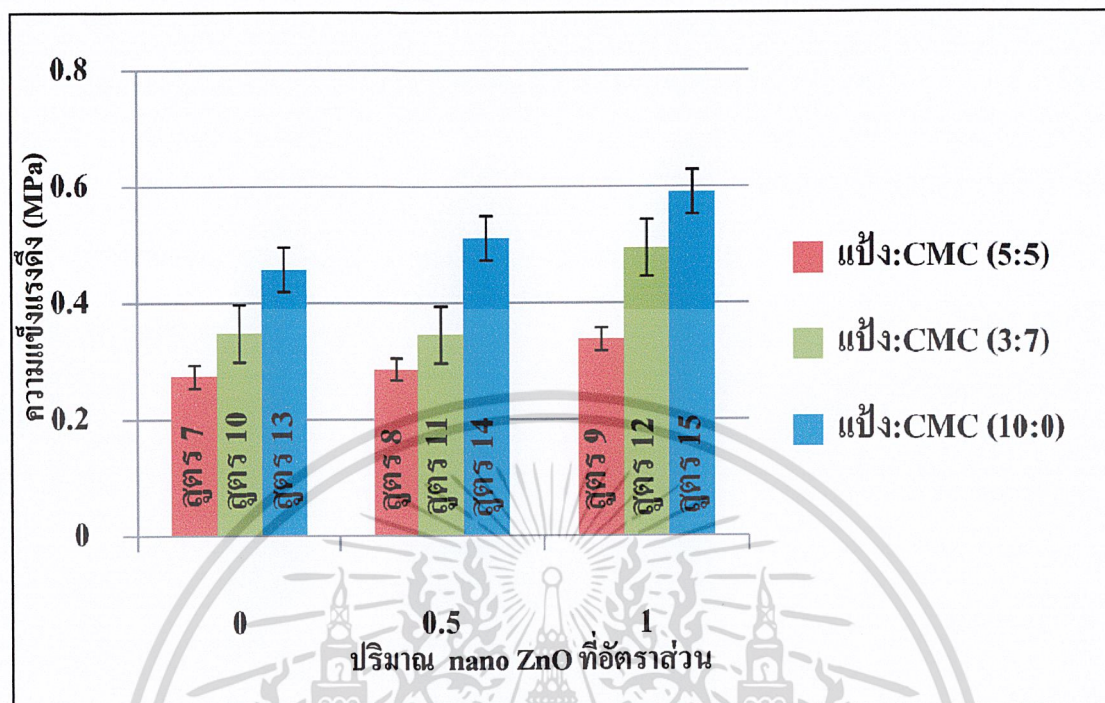
แข็งแต่สามารถกระจายตัวได้ดี และสามารถทำปฏิกิริยากับกรดคาร์บอกซิลิกในโครงสร้างของ CMC ได้ทำให้เกิดลักษณะคล้ายพันธะเชื่อมโยง

ที่อัตราส่วนแบ่ง:CMC 0:10 ที่ไม่มีและมี nano ZnO 0.5 และ 1 กรัม ตามลำดับ พบว่าเมื่อ ปริมาณ nano ZnO เพิ่มขึ้น 0.5 และ 1 กรัม ค่าความแข็งกตเพิ่มขึ้น เนื่องจาก nano ZnO สามารถทำ ปฏิกิริยากับกรดคาร์บอกซิลิกในโครงสร้างของ CMC ซึ่งสอดคล้องกับรูปที่ 4.7 พบว่า หมู่ O-H stretching เกิดการเคลื่อน (Shift) ไปเลขคลื่นที่ลดลง จาก 3305.21 cm^{-1} เป็น 3255.58 cm^{-1} แสดงให้เห็นถึงการเกิดปฏิกิริยาระหว่าง CMC และ nano ZnO



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4.2 การทดสอบความแข็งแรงดึง (Tensile strength)

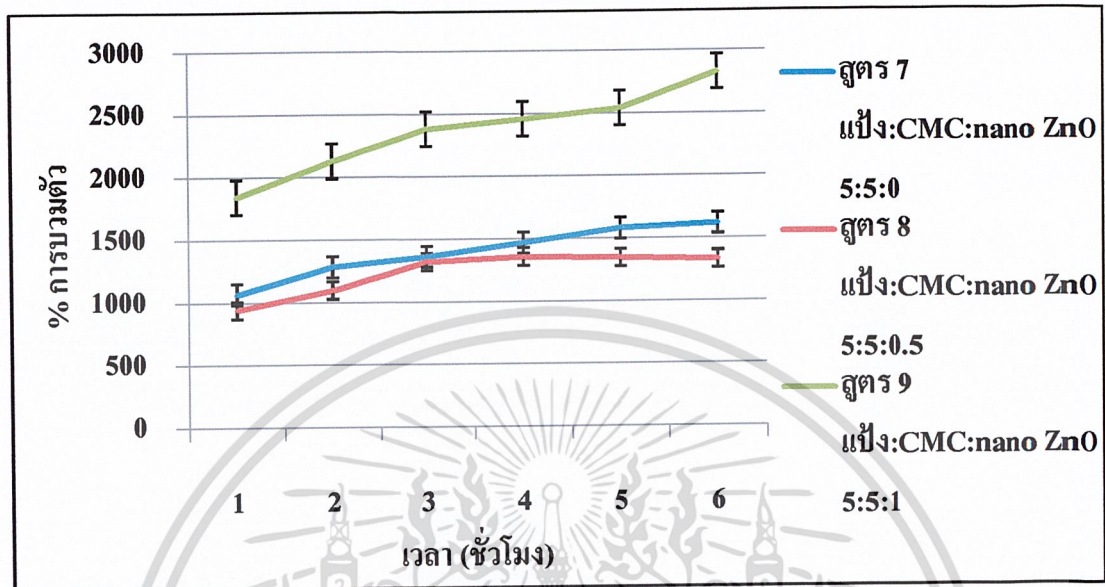


รูปที่ 4.14 กราฟแสดงค่าความแข็งแรงดึงของแผ่นฟิล์มที่อัตราส่วนแป้ง:CMC ที่ปริมาณ nano ZnO ต่างๆ

จากรูป 4.14 จากการทดสอบค่าความแข็งแรงดึงของแผ่นฟิล์มที่อัตราส่วนแป้ง:CMC ที่ปริมาณ nano ZnO เป็น 0, 0.5 และ 1 กรัมพบว่า ไม่ว่าอัตราส่วนของแป้งมันสำปะหลัง:CMC จะเป็น 5:5 3:7 หรือ 10:0 เมื่อเติม nano ZnO ลงไป จะมีค่าความแข็งแรงดึงเพิ่มขึ้น ตามปริมาณ nano ZnO ที่เพิ่มขึ้นจาก 0.5 และ 1 กรัม แสดงว่า nano ZnO ทำหน้าที่เสริมแรง และเกิดแรงกระทำที่ผิวระหว่างโมเลกุลของ nano ZnO กับ วัฏภาคของแป้งมันสำปะหลังและ CMC พบว่ายังมีปริมาณ CMC มาก ค่าความแข็งแรงดึงยิ่งเพิ่มขึ้น เช่น ในสูตร 15 มีแค่ CMC มีค่าความแข็งแรงดึงสูงสุดคือ 0.06 MPa แสดงว่า หมู่คาร์บอกซิลิกของ CMC สามารถเกิดแรงกระทำกับ nano ZnO ทำให้ สายโซ่ของ CMC อยู่ใกล้กัน ปริมาตรอิสระลดลง สำหรับในสูตรที่มี CMC ผสมอยู่มาก ความแข็งแรงดึงมีแนวโน้มไปทาง CMC ด้วยเหตุผลเดียวกัน

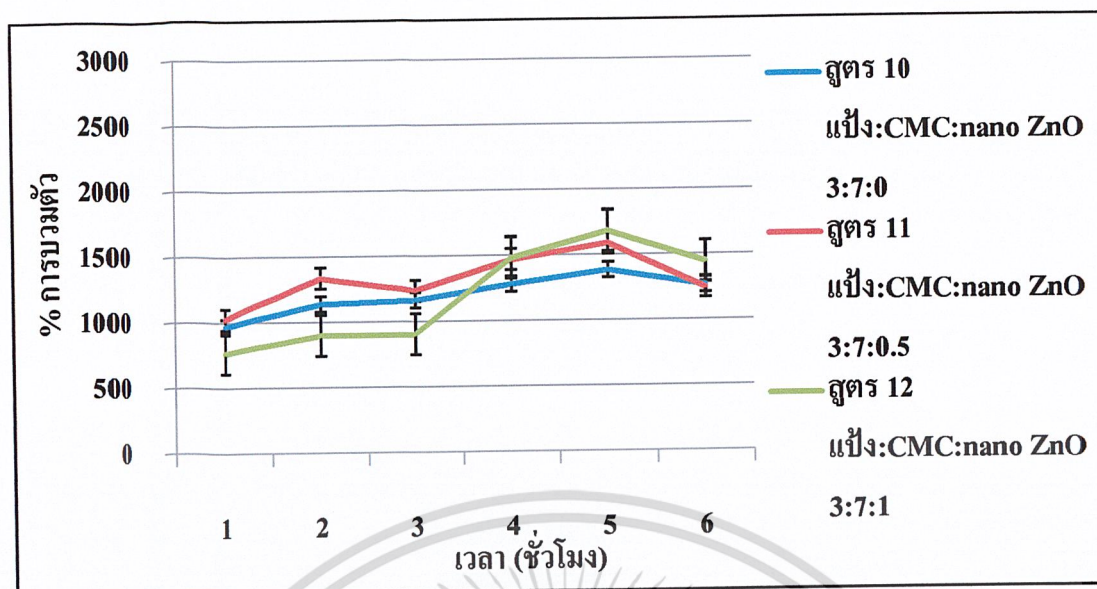
4.5 การทดสอบสมบัติทางกายภาพ

4.5.1 การทดสอบการบวมน้ำ



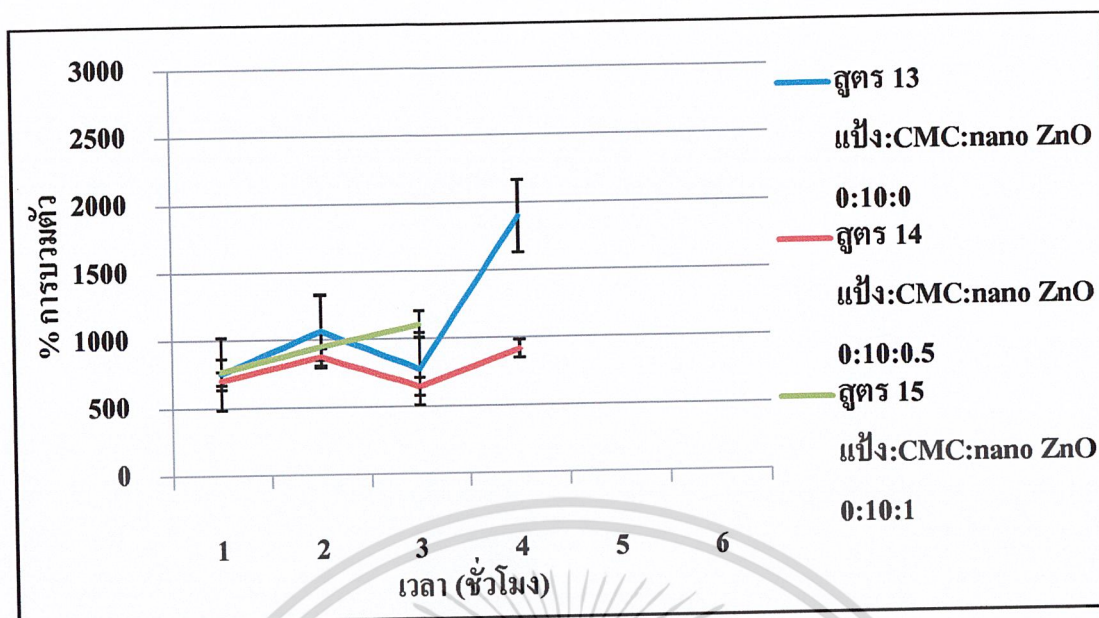
รูปที่ 4.15 กราฟแสดงค่าการบวมน้ำของฟิล์มสูตร 7, 8 และ 9 กับเวลาที่แช่น้ำตั้งแต่ 1-6 ชั่วโมง

พิจารณาสูตร 7, 8 และ 9 ที่ไม่มีและมี nano ZnO 0.5 และ 1 กรัมตามลำดับ พบว่าสูตร 7 ที่มีอัตราส่วนแป้งมันสำปะหลัง:CMC เป็น 5:5 พบว่า ชั่วโมง 1 มีการบวมน้ำประมาณ 1050%w/w แต่เมื่อเติม nano ZnO ลงไป 0.5 กรัม จะทำให้แป้งผสมเข้ากันได้ดีจากผลของ XRD คือ แป้งมันสำปะหลัง:CMC เกิดแรงดึงดูดระหว่างกัน หมู่ชอบน้ำลดลงไป การบวมน้ำจึงลดลงเหลือ 900%w/w แต่เมื่อเพิ่ม nano ZnO เป็น 1 กรัม พบว่าการบวมน้ำจะสูงขึ้นเป็น 1800%w/w อาจเนื่องจาก nano ZnO ชอบทำปฏิกิริยากับหมู่คาร์บอกซิลิกของ CMC มากกว่าจะทำให้มีหมู่ไฮดรอกซิลอิสระมากขึ้น จึงดูดน้ำมากขึ้น



รูปที่ 4.16 กราฟแสดงค่าการบวมตัวของฟิล์มสูตร 10, 11 และ 12 กับเวลาที่แช่น้ำตั้งแต่ 1-6 ชั่วโมง

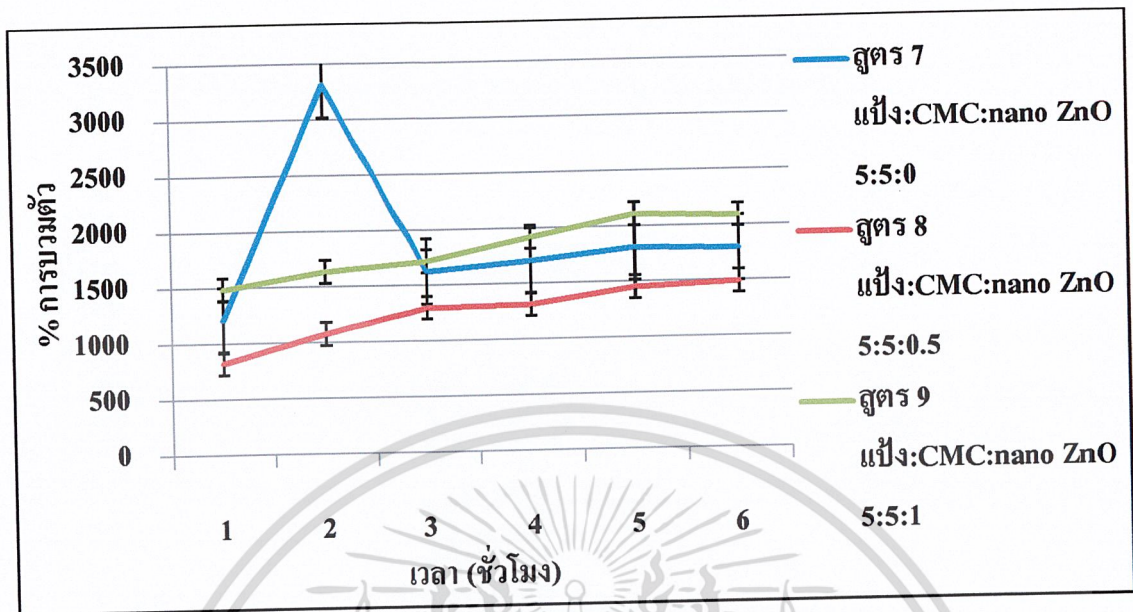
พิจารณาสูตร 10, 11 และ 12 ที่ไม่มีและมี nano ZnO พบว่า ฟิล์มผสมทุกสูตรมีลักษณะการบวมตัวที่เพิ่มขึ้น เมื่อเวลาผ่านไป 5 ชั่วโมงแล้ว การบวมตัวลดลง ทั้งนี้เนื่องจาก CMC เริ่มละลายเมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์มที่มี nano ZnO 0.5 และ 1 กรัม พบว่าสูตรที่ 12 บวมตัวได้สูงกว่าสูตรที่ 11 แสดงว่าสูตรที่ 11 เกิดพันธะเชื่อมโยงของหมู่คาร์บอกซิลิกกับ nano ZnO น้อยกว่าสูตรที่ 12 สอดคล้องกับสมบัติเชิงกลในรูป 4.13



รูปที่ 4.17 กราฟแสดงค่าการบวมตัวของฟิล์มสูตร 13, 14 และ 15 กับเวลาที่แช่น้ำตั้งแต่ 1-6 ชั่วโมง

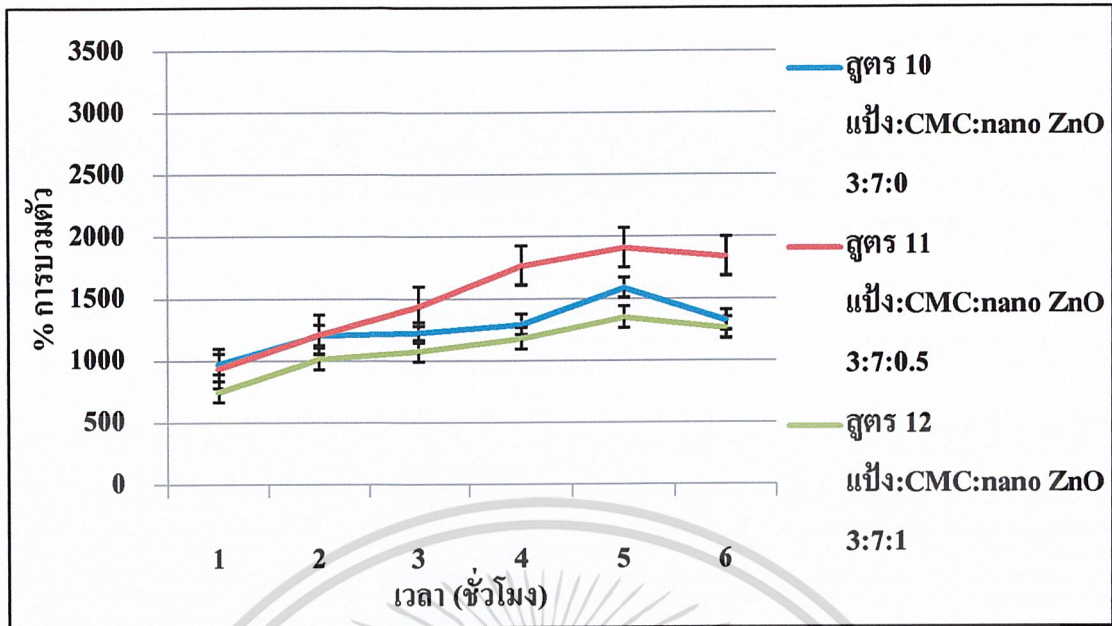
พิจารณาชั่วโมงที่ 1 พบว่าการบวมตัวของฟิล์มทุกสูตรไม่ต่างกัน อาจเนื่องจาก หมู่คาร์บอกซิลิกของ CMC เกิดพันธะไฮโดรเจนได้ดี ในสูตรที่ 13 และหมู่คาร์บอกซิลิก ดึงดูดกับ nano ZnO ได้ดี สูตรที่ 14 และ 15 แต่เมื่อเวลาผ่านไป 4 ชั่วโมง สูตรที่ 13 บวมน้ำได้สูงสุด แสดงว่า น้ำไปทำลายพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลของ CMC ทำให้เกิดหมู่คาร์บอกซิลิก อิสระเกิดดึงดูด น้ำได้ดีขึ้น สำหรับสูตรที่ 15 พบว่าแผ่นฟิล์มละลายหมดตั้งแต่ ชั่วโมงที่ 5 แสดงว่า nano ZnO จะไป เกิดพันธะไอออนิกกับ CMC

4.5.2 การทดสอบความคงตัวในกรด



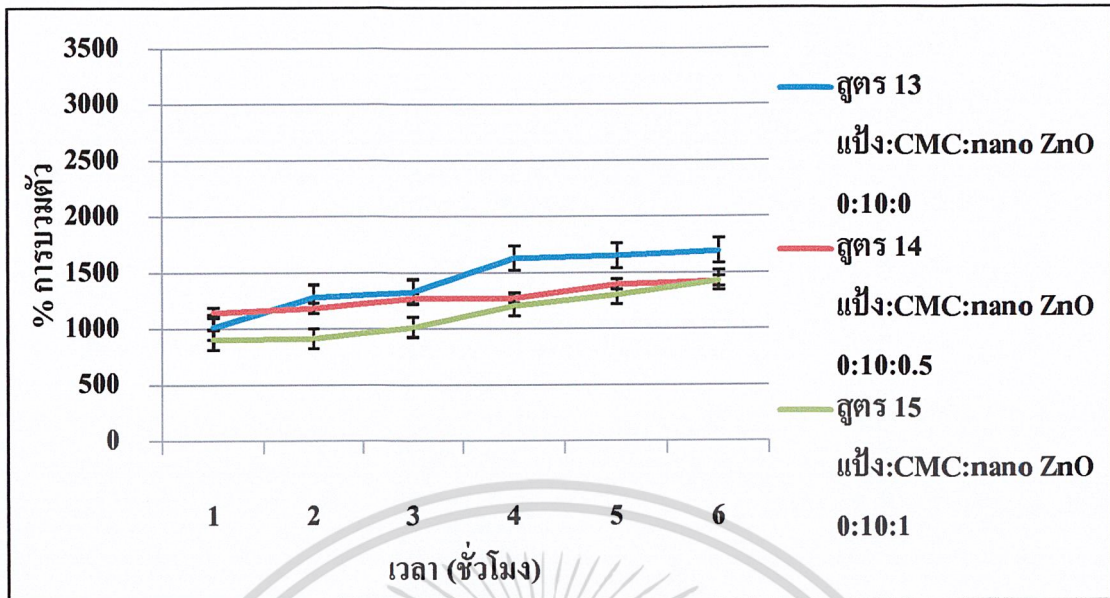
รูปที่ 4.18 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการทดสอบค่าการบวมตัวในกรดของฟิล์มสูตร 7, 8 และ 9 กับเวลาที่แช่ตั้งแต่ 1-6 ชั่วโมง

พิจารณาสูตร 7, 8 และ 9 เป็นสูตรที่มีอัตราส่วนแป้ง:CMC: nano ZnO 5:5 ที่ไม่มีและมี nano ZnO 0.5 และ 1 กรัม ตามลำดับ จากระยะเวลาตั้งแต่ 1-6 ชั่วโมง พบว่า สูตร 7 เมื่อแช่ในสารละลายกรด HCl เข้มข้น 0.1 โมลาร์ พบว่า เมื่อระยะเวลาการแช่ในกรดเพิ่มขึ้นจะทำให้แผ่นฟิล์มมีค่าการบวมตัวในกรดเพิ่มขึ้น และเริ่มคงที่ในชั่วโมงที่ 5 เนื่องจากไม่มีการเติม nano ZnO จึงไม่เกิดปฏิกิริยากับ CMC ไม่เกิดแรงยึดเหนี่ยว ปฐมภูมิหรือพันธะไฮดรอกซิล ส่วนสูตร 8 และสูตร 9 มีการเติม nano ZnO 0.5 และ 1 กรัม ตามลำดับ เนื่องจาก CMC ชอบที่จะเกิดปฏิกิริยากับแป้งมันสำปะหลังมากกว่า nano ZnO ส่งผลให้ nano ZnO ไปแทรกอยู่ระหว่างสายโซ่ของแป้งเกิดเป็นพันธะไฮโดรเจน และ CMC ที่เหลือจากการทำปฏิกิริยากับแป้ง ทำปฏิกิริยากับ nano ZnO เกิดเป็นพันธะไฮดรอกซิล ทำให้ฟิล์มมีค่าการบวมตัวในกรดเพิ่มขึ้น และคงที่ในชั่วโมงถัดมา



รูปที่ 4.19 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการทดสอบค่าการบวมตัวในกรดของฟิล์มสูตร 10, 11 และ 12 กับเวลาที่แช่ตั้งแต่ 1-6 ชั่วโมง

พิจารณาสสูตร 10, 11 และ 12 ที่มีอัตราส่วนแบ่ง:CMC:3:7 ที่ไม่มีและมี nano ZnO 0.5 และ 1 กรัม ตามลำดับ จากระยะเวลาตั้งแต่ 1-6 ชั่วโมง พบว่า สูตร 10 ปริมาณ CMC ที่เพิ่มขึ้น แต่ไม่มีการเติม nano ZnO ลงไป จึงไม่มีการเกิดพันธะไฮดรอกซิล ทำให้น้ำหนักที่เพิ่มขึ้นค่อนข้างคงที่ เมื่อระยะเวลาเพิ่มขึ้น สูตร 11 มีการเติม nano ZnO 0.5 กรัม พบว่า พันธะไฮดรอกซิลมีจำนวนเพิ่มขึ้นเนื่องจากปริมาณ CMC ที่เพิ่มขึ้น จึงมีน้ำหนักเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง และสูตร 12 มีการเติม nano ZnO 1 กรัม พบว่า CMC เกิดการรบกวนแบ่ง และพบว่า ในชั่วโมงที่ 6 ค่าการบวมตัวในกรดของสูตรต่างๆ มีค่าลดลง เนื่องจากปริมาณ แป้งมันสำปะหลัง:CMC มีค่าลดลง จำนวนพันธะไฮดรอกซิลลดลง และ CMC เกิดพันธะไฮดรอกซิลกับ nano ZnO ได้มากกว่า อัตราส่วนแป้งมันสำปะหลัง:CMC 5:5 แต่พันธะไฮดรอกซิลที่ลดลงทำให้ละลายน้ำได้ลดลง แม้จะมีพันธะไฮดรอกซิลเพิ่มขึ้นก็ตาม

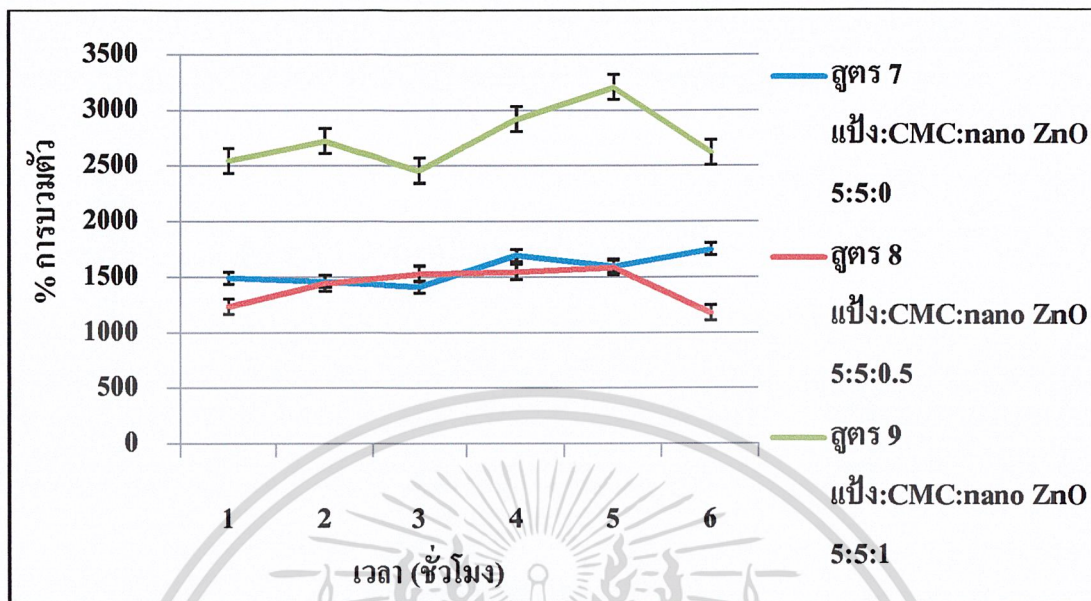


รูปที่ 4.20 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการทดสอบค่าการบวมตัวในกรดของฟิล์มสูตร 13, 14 และ 15 กับเวลาที่แช่ตั้งแต่ 1-6 ชั่วโมง

พิจารณาสูตร 13, 14 และ 15 ที่มีอัตราส่วนแป้ง:CMC 0:10 ที่ไม่มีและมี nano ZnO 0.5 และ 1 กรัม ตามลำดับ จากระยะเวลาตั้งแต่ 1-6 ชั่วโมง พบว่า อัตราส่วนของแป้งมันสำปะหลัง:CMC มีค่าลดลง ทำให้จำนวนพันธะไฮโดรเจนลดลง น้ำหนักมีค่าลดลง เมื่อเทียบกับอัตราส่วนแป้งมันสำปะหลัง:CMC ที่ 5:5 และ 3:7 ตามลำดับ แต่เนื่องจาก CMC ในส่วนผสมทำปฏิกิริยากับ nano ZnO ทำให้เกิดพันธะไอออนิก ค่าการบวมตัวในกรดจึงเพิ่มขึ้นและคงที่ในเวลาต่อมา ซึ่งทำให้ทราบว่าฟิล์มสามารถคงตัวในกรดได้ และจากการทดสอบสัญญาณวิทยาพบว่าแผ่นฟิล์มที่ได้มีรูพรุน ทำให้กรดสามารถเข้าไปแทรกตัวอยู่ระหว่างรูพรุน ทำให้มีค่าการบวมตัวในกรดเพิ่มขึ้นจนถึงจุดอิ่มตัว ฟิล์มไม่สามารถละลายได้ในกรด ค่าความคงตัวในกรดจึงคงที่

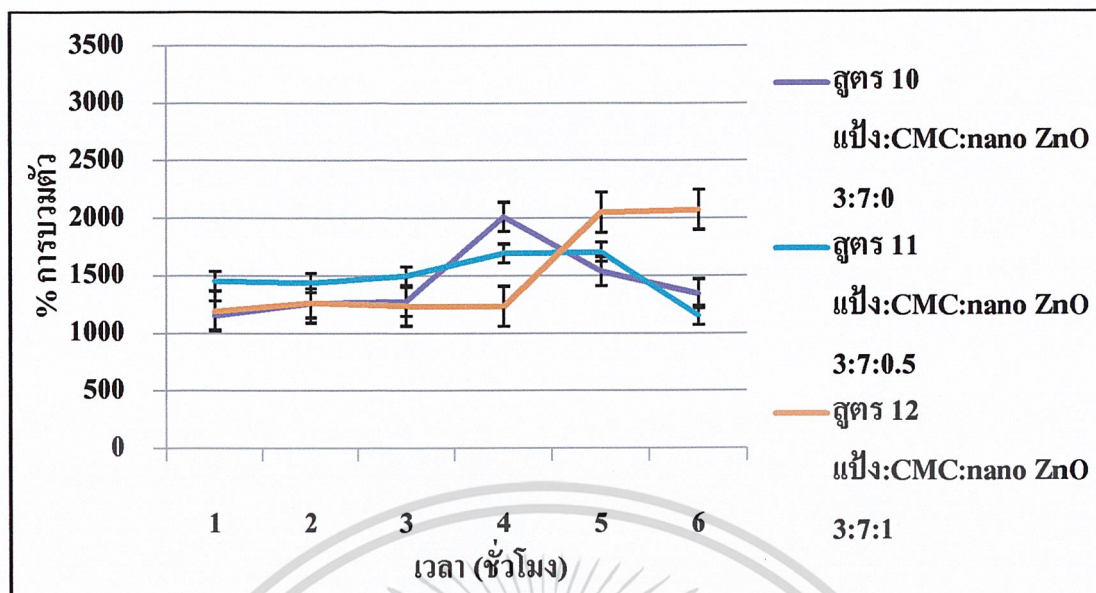
เมื่อพิจารณารูปที่ 4.18, 4.19 และ 4.20 พบว่าฟิล์มทุกสูตรมีความเสถียรในกรด การบวมตัวในกรดมีแนวโน้มเช่นเดียวกับการบวมตัวในน้ำ และจากสูตรที่ 13, 14 และ 15 มีความเสถียรในกรดมากกว่าน้ำ เนื่องจาก CMC กับ nano ZnO เกิดพันธะเชื่อมโยงกันได้ดี ทำให้ฟิล์มเกิดการบวมตัวแต่ไม่ละลาย

4.5.3 การทดสอบความคงตัวในต่าง



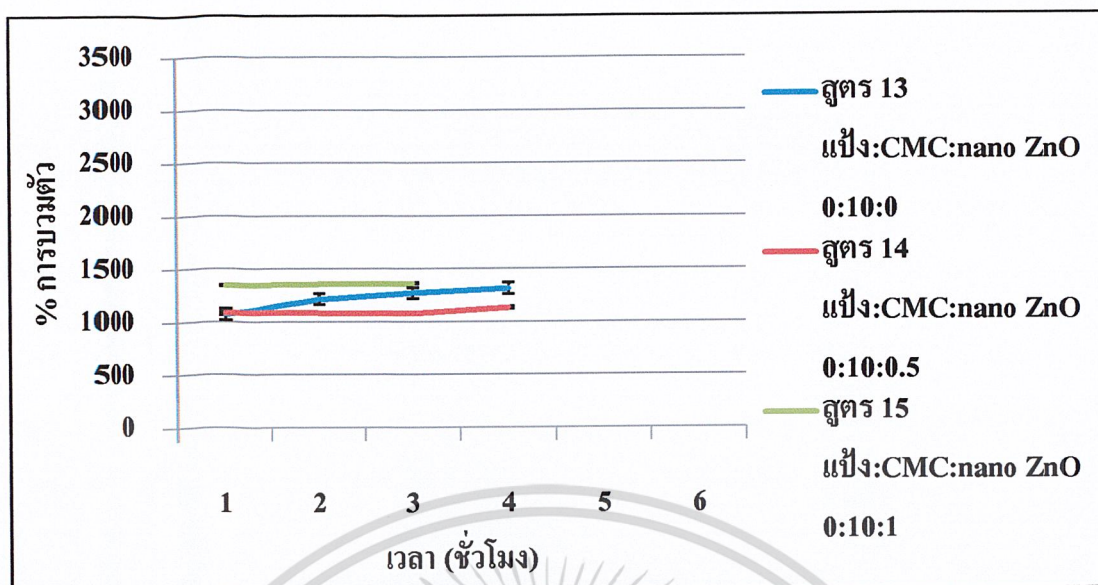
รูปที่ 4.21 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการทดสอบค่าการบวมตัวในต่างของฟิล์มสูตร 7, 8 และ 9 กับเวลาที่แช่ตั้งแต่ 1-6 ชั่วโมง

พิจารณาสูตร 7, 8 และ 9 เป็นสูตรที่มีอัตราส่วนแป้ง:CMC 5:5 ที่ไม่มีและมี nano ZnO 0.5 และ 1 กรัม ตามลำดับ จากระยะเวลาตั้งแต่ 1-6 ชั่วโมง พบว่า เมื่อระยะเวลาการแช่ในต่างมากขึ้นจะทำให้แผ่นฟิล์มมีค่าการบวมตัวในต่างเพิ่มขึ้น แต่ค่าความคงตัวในต่างลดลง ทำให้ฟิล์มไม่สามารถคงสภาพเดิม เมื่อปริมาณ nano ZnO เพิ่มขึ้น 0.5 กรัม (สูตร 8) พบว่าค่าการบวมตัวในต่างลดลง เนื่องจากปริมาณ nano ZnO ที่เหมาะสม สามารถก่อกั้นระเชื่อมโยงได้ แสดงดังรูปที่ 4.24 (ข) ที่มีลักษณะพื้นผิวเรียบ และจำนวนรูพรุนลดลง เมื่อเทียบกับรูปที่ 4.24 (ก) ที่ไม่มีปริมาณ nano ZnO เมื่อปริมาณ nano ZnO เพิ่มขึ้น 1 กรัม (สูตร 9) พบว่า มีค่าการบวมตัวในต่างมากที่สุด เนื่องจาก nano ZnO ทำปฏิกิริยากับกรดคาร์บอกซิลิกในโครงสร้างของ CMC ทำให้หมู่ -OH group ของแป้งเป็นอิสระมากขึ้น ทำให้ชิ้นงานมีค่าความคงตัวในต่างลดลง



รูปที่ 4.22 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการทดสอบค่าการบวมตัวในต่างของฟิล์มสูตร 10, 11 และ 12 กับเวลาที่แช่ตั้งแต่ 1-6 ชั่วโมง

พิจารณาสูตร 10, 11 และ 12 เป็นสูตรที่มีอัตราส่วนแบ่ง:CMC 3:7 ที่ไม่มีและมี nano ZnO 0.5 และ 1 กรัม ตามลำดับ จากระยะเวลาตั้งแต่ 1-6 ชั่วโมง พบว่าเมื่อปริมาณ nano ZnO เพิ่มขึ้น 0.5 กรัม (สูตร 11) มีค่าการบวมตัวในต่างเพิ่มขึ้น จนถึงชั่วโมงที่ 6 จะมีค่าการบวมตัวในต่างลดลง เนื่องจาก nano ZnO สามารถทำปฏิกิริยากับ CMC ทำให้แบ่งเหลือหมู่ -OH group อิสระ สามารถดูดซับน้ำที่แช่ ส่งผลต่ออัตราการไหล ทำให้โมเลกุลของแบ่งบางส่วนถูกชะออก นอกจากนั้นยังพบว่า ค่าการบวมตัวในต่างของสูตรที่มีอัตราส่วนแบ่ง:CMC 3:7 มีค่าน้อยกว่าค่าการบวมตัวในต่างของสูตรที่มีอัตราส่วนแบ่ง:CMC 5:5 เนื่องจากมีอัตราส่วนของแบ่งน้อยกว่า ทำให้เหลือหมู่ -OH group อิสระน้อยกว่า จึงมีค่าความคงตัวในต่างมากกว่า



รูปที่ 4.23 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการทดสอบค่าการบวมตัวในต่างของฟิล์มสูตร 13, 14 และ 15 กับเวลาที่แช่น้ำตั้งแต่ 1-6 ชั่วโมง

พิจารณาสูตร 13, 14 และ 15 เป็นสูตรที่มีอัตราส่วนแป้ง:CMC 0:10 ที่ไม่มีและมี nano ZnO 0.5 และ 1 กรัม ตามลำดับ กับเวลาที่แช่น้ำตั้งแต่ 1-6 ชั่วโมง พบว่า เมื่อปริมาณ nano ZnO เพิ่มขึ้น 0.5 และ 1 กรัม ค่าการบวมตัวในต่างเพิ่มขึ้น และเมื่อเวลาผ่านไป 4 ชั่วโมง สูตร 15 เกิดการละลาย และสูตร 13 และ 14 ได้ละลายในชั่วโมงต่อมา เนื่องจาก nano ZnO ทำปฏิกิริยากับกรดคาร์บอกซิลิกเกิดเป็นพันธะไอออนิกของ nano ZnO และ CMC ซึ่งเป็นพันธะที่ไม่แข็งแรง นอกจากนี้ยังพบว่า ค่าการบวมตัวในต่างของสูตรที่มีอัตราส่วนแป้ง:CMC 0:10 มีค่าน้อยกว่าสูตรที่มีอัตราส่วนแป้ง:CMC 3:7 และ 5:5 เนื่องจากเป็นสูตรที่มีเพียง CMC ไม่มีส่วนผสมของแป้ง ทำให้ไม่มีส่วนที่เป็นผลึกอยู่ในโครงสร้าง แผ่นฟิล์มจึงไม่สามารถทนทานต่อต่างได้

4.6 การทดสอบสมบัติทางความร้อน

4.6.1 Thermogravimetric Analysis (TGA)

การทดสอบสมบัติทางความร้อน โดยการศึกษาค่าอุณหภูมิเริ่มสลายตัวทางความร้อน (Onset degradation temperature) ของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังผสม CMC และ nano ZnO ด้วยเครื่องเทอร์โมกราวิเมตริกแอนาไลซิส (Thermogravimetric Analysis, TGA)

ตารางที่ 4.2 ค่าอุณหภูมิเริ่มสลายตัวของผงแป้งมันสำปะหลังและผง CMC ตามลำดับ

สาร	อุณหภูมิเริ่มสลายตัว (T_0 , °C)
ผงแป้งมันสำปะหลัง	279.572
ผง CMC	244.033 และ 337.958

ตารางที่ 4.3 แสดงค่าอุณหภูมิเริ่มการสลายตัวของแผ่นฟิล์มตัวอย่าง

สูตร	แป้งมันสำปะหลัง:CMC	nano ZnO	อุณหภูมิเริ่มสลายตัว (T_0 , °C)
7	5:5	0	263.358
8	5:5	0.5	265.360
9	5:5	1	263.066
10	7:3	0	248.474
11	7:3	0.5	248.140
12	7:3	1	242.232
13	10:0	0	259.109
14	10:0	0.5	250.109
15	10:0	1	234.354

จากตารางที่ 4.3 แสดงค่าอุณหภูมิเริ่มการสลายตัวของแผ่นฟิล์มตัวอย่างสูตรต่างๆ พบว่า

จากสูตร 7, 8 และ 9 ที่ไม่มีและมี nano ZnO ปริมาณ 0.5 และ 1 กรัมตามลำดับพบว่า มีอุณหภูมิเริ่มสลายตัวใกล้เคียงกับอุณหภูมิเริ่มสลายตัวของผงแป้งมันสำปะหลังและ CMC เนื่องจากมีองค์ประกอบของแป้งมันสำปะหลัง:CMC ในปริมาณที่เท่ากัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสูตร 10, 11 และ 12 ที่ไม่มีและมี nano ZnO ปริมาณ 0.5 และ 1 กรัมตามลำดับพบว่า มีอุณหภูมิเริ่มสลายตัวใกล้เคียงกับอุณหภูมิเริ่มสลายตัวของ CMC ในชั้นที่ 1 เนื่องจากมีปริมาณ CMC มากกว่าปริมาณแป้งมันสำปะหลัง

จากสูตร 13, 14 และ 15 12 ที่ไม่มีและมี nano ZnO ปริมาณ 0.5 และ 1 กรัมตามลำดับพบว่า มีอุณหภูมิเริ่มสลายตัวใกล้เคียงกับอุณหภูมิเริ่มสลายตัวของ CMC ในชั้นที่ 1 เนื่องจากมีปริมาณ CMC มากกว่าปริมาณแป้งมันสำปะหลัง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

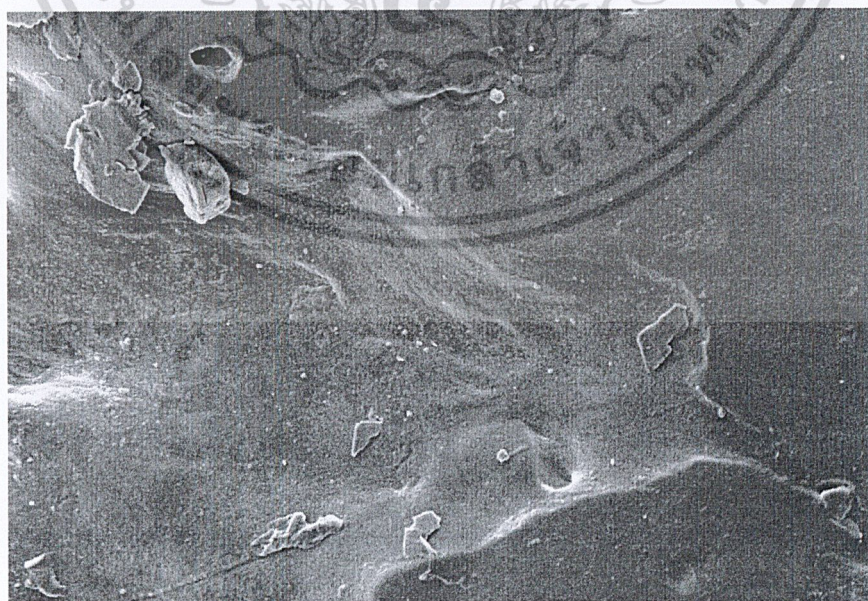
4.7 สมบัติทางสัณฐานวิทยา

เทคนิคการใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM) เพื่อศึกษาลักษณะพื้นผิวของฟิล์มแข็งที่ปริมาณ nano ZnO ต่างๆ



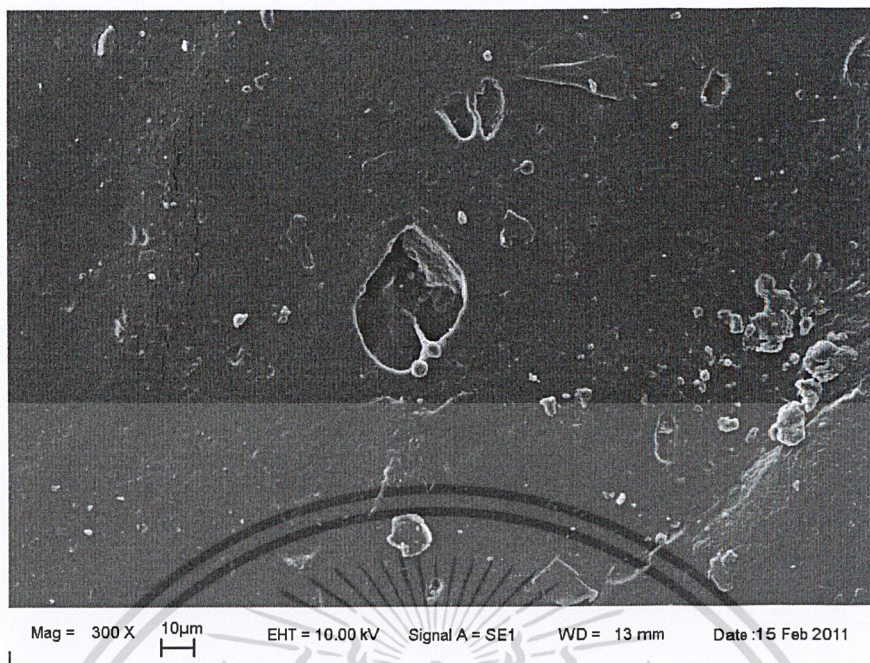
Mag = 300 X 10µm EHT = 10.00 kV Signal A = SE1 WD = 13 mm Date :15 Feb 2011

(ก)



Mag = 300 X 10µm EHT = 10.00 kV Signal A = SE1 WD = 13 mm Date :15 Feb 2011

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้บริการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตเห็นเว็บไซต์ประกอบโครงการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาแต่อย่างใด (ข)



(ค)

รูปที่ 4.24 แสดงลักษณะวิทยาของฟิล์มแป้งมันสำปะหลัง:CMC (5:5)

ด้วยกำลังขยาย 300 เท่า (ก) สูตร 7 (ข) สูตร 8 (ค) สูตร 9

พิจารณาลักษณะพื้นผิวของฟิล์มแป้งมันสำปะหลัง:CMC 5:5 ของสูตร 7, 8 และ 9 ที่ไม่มี และมี nano ZnO 0.5 และ 1 กรัม ตามลำดับ ที่กำลังขยาย 300 เท่า พบว่า nano ZnO ปริมาณ 0.5 กรัม มีผลทำให้แป้ง และ CMC ผสมเข้ากันได้ดี ความเป็นผลึกลดลง และเมื่อปริมาณ nano ZnO 1 กรัม พบว่า nano ZnO เกิดการรวมตัวเป็นก้อน ทำให้เกิดจุดบกพร่อง และรอยแตกบนชิ้นงานขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

1. จากการศึกษาอัตราส่วนระหว่างแป้งมันสำปะหลัง และ CMC ที่เหมาะสมในการเตรียมแผ่นฟิล์มโดยมีการเติมสารก่อก้อนระเชื่อมโยง คือ nano ZnO ลงไปเพื่อปรับปรุงสมบัติให้ดีขึ้น มีอัตราส่วนระหว่างแป้งมันสำปะหลัง:CMC โดยไม่มี และมีการเติม nano ZnO

สูตร	แป้งมัน (กรัม)	น้ำร้อน (มล.)	CMC (กรัม)	กลีเซอรอล (กรัม)	nano ZnO (กรัม)
1	10	15	-	3	-
2	10	15	-	3	0.5
3	10	15	-	3	1.0
4	7	15	3	3	-
5	7	15	3	3	0.5
6	7	15	3	3	1.0
7	5	15	5	3	-
8	5	15	5	3	0.5
9	5	15	5	3	1.0
10	3	15	7	3	-
11	3	15	7	3	0.5
12	3	15	7	3	1.0
13	-	15	10	3	-
14	-	15	10	3	0.5
15	-	15	10	3	1.0

จากอัตราส่วนตามตาราง ทำการผสมขึ้นรูปด้วยวิธีหล่อแบบ และขึ้นรูปด้วยวิธีการกดอัด โดยใช้แม่พิมพ์ที่มีความหนา 2 มิลลิเมตร โดยใช้อุณหภูมิความร้อนที่ 140 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 นาที และอุณหภูมิความเย็น 0 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พบว่าสูตร 1-6 ไม่สามารถขึ้นรูปเป็นแผ่นฟิล์มได้เนื่องจากปริมาณของ CMC เมื่อเทียบกับปริมาณของแป้งมันสำปะหลังมีน้อยมาก ส่งผลให้วัฏภาคของแป้งมันสำปะหลังและวัฏภาคของน้ำแยกกันอย่างชัดเจน

การผสม CMC เข้าไปในแป้งมันสำปะหลังทำให้แผ่นฟิล์มทุกสูตรมีสมบัติการดูดน้ำดีขึ้น จาก XRD พบว่า โครงผลึกของ CMC และแป้งมันสำปะหลังมีลักษณะเหมือนเดิมแสดงว่า แป้งมันสำปะหลังกับ CMC ไม่เกิดแรงดึงดูดระหว่างกัน แต่เมื่อเติม nano ZnO ลงไปพบว่า nano ZnO ทำให้ความเป็นผลึกของแป้งมันสำปะหลังกับ CMC ลดลง จึงทำให้แป้งมันสำปะหลังและ CMC ผสมเข้ากันได้ดี เมื่อปริมาณ CMC เพิ่มขึ้น การดูดน้ำของแผ่นฟิล์มจึงมากขึ้น และเมื่อปริมาณ nano ZnO เพิ่มขึ้น จะทำให้แผ่นฟิล์มมีความแข็งแรงดึงสูงขึ้น

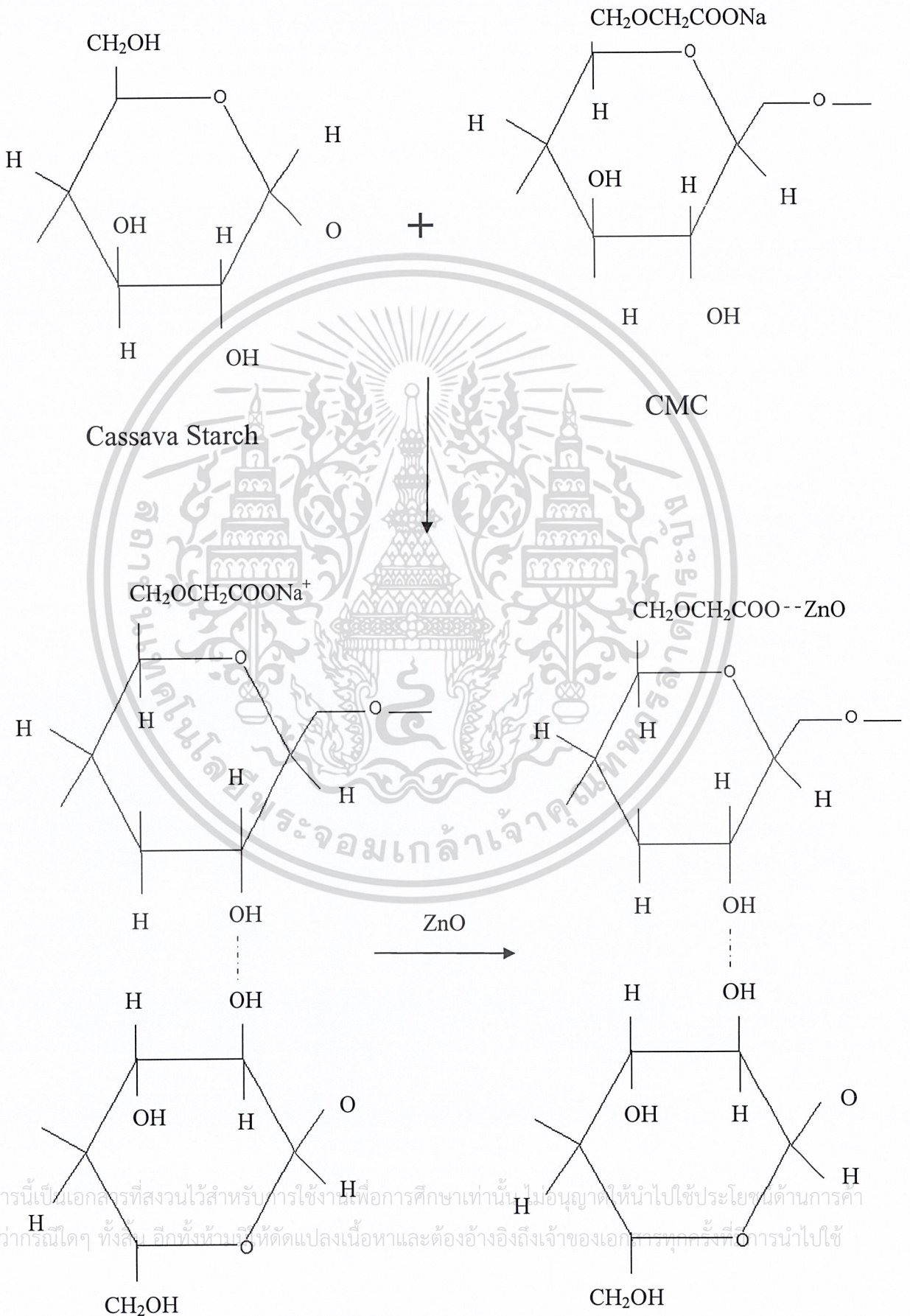
จากผลการทดลองพบว่า แผ่นฟิล์มที่มีอัตราส่วน แป้ง:CMC เป็น 5:5 มี nano ZnO เป็น 0.5 กรัม ให้สมบัติเชิงกลและสมบัติทางกายภาพ โดยรวมดีที่สุด นอกจากนี้แผ่นฟิล์มทุกสูตรมีเสถียรภาพในกรด เมื่อแช่แผ่นฟิล์มเป็นเวลา 6 ชั่วโมง แผ่นฟิล์มไม่ละลาย

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ในขั้นตอนการผสมควรเปลี่ยนวิธีการผสมวิธีอื่นแทนวิธี Casting เพื่อให้ส่วนผสมต่างๆ ผสมเข้ากันได้ดี เช่น Internal mixer เพื่อให้สมบัติเชิงกลที่ดีและการวิเคราะห์ผลทั้งหมดมีความถูกต้องมากขึ้น
2. ในขั้นตอนการขึ้นรูปควรทำการกดไล่อากาศออกก่อน 1 ครั้ง และควรกดอัดขึ้นรูปตามปกติ เพื่อให้ชิ้นงานมีฟองอากาศ และให้สมบัติเชิงกลที่ดีด้วย
3. ในขั้นตอนการขึ้นรูปควรทำให้ชิ้นงานมีความหนาที่สม่ำเสมอ เพื่อให้สมบัติเชิงกลที่ดี
4. ควรใช้ปริมาณ CMC ให้มากกว่าปริมาณแป้งมันสำปะหลังในการขึ้นรูปเป็นแผ่นฟิล์ม เนื่องจาก CMC มีหน้าที่ในการเพิ่มความหนืด ช่วยในการขึ้นรูป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สันนิษฐานการเชื่อมโยง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามใช้ให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

1. M. Thunwall, et al. **“Film blowing of thermoplastic starch”**. Journal of Carbohydrate polymers 2008, vol. 71, p. 583-590.
2. Z. Liu, et al. **“Starch film formation mechanism annual meeting”**. P. 12-16. Las Vegas. 2004
3. หน่วยปฏิบัติการเทคโนโลยีแปรรูปมันสำปะหลัง มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. **“การแปรรูปและการใช้ประโยชน์จากมันสำปะหลัง”**. วิธีสืบค้นวัสดุสารสนเทศ. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก <http://www.thailandtapiocastarch.net>. (วันที่ค้นข้อมูล: 17 กันยายน 2553).
4. รศ.ดร.คุณฤ ฤตภาพ. **“เคมีและสมบัติของแป้ง”**. วิธีสืบค้นข้อมูลวัสดุสารสนเทศ. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก: <http://eu.lib.kmutt.ac.th/elearning/Courseware/BCT611/chapter2.html>. (วันที่สืบค้นข้อมูล: 3 ตุลาคม 2553).
5. วัฒนะ วัฒนานนท์. **“การผลิต การใช้ประโยชน์ งานวิจัยและพัฒนา มันสำปะหลังในประเทศไทย”**. วิธีสืบค้นวัสดุสารสนเทศ. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก: http://www.aftc.or.th/itc/products_analyze.php?id=86&fgrp_id=6&fmnu_id=31. (วันที่ค้นข้อมูล 24 ตุลาคม 2553).
6. Cassava and Starch Technology Research Unit (CSTRU). **“Thai cassava starch : A new choice for industrial uses”**. วิธีสืบค้นวัสดุสารสนเทศ. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก: <http://www.cassava.org>. (วันที่ค้นข้อมูล 8 ตุลาคม 2553).
7. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล. **“กรดไขมันอิ่มตัวและไม่อิ่มตัวแตกต่างกันอย่างไร”**. วิธีสืบค้นข้อมูลวัสดุสารสนเทศ. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก: http://www.rmutphysics.com/CHARUD/scibook/bio1/Chapter2/Part4_2.html. (วันที่สืบค้นข้อมูล 3 ตุลาคม 2553).
8. สุพัฒน์ คำไทย. **“โครงการวิจัยการผลิตฟิล์มคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสจากเยื่อฟางข้าวแบบโซดาแอนทราควิโนน”**. วิธีสืบค้นข้อมูลวัสดุสารสนเทศ. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก: http://www.prcmu.cmu.ac.th/perin_detail.php?perin_id=32. (วันที่สืบค้นข้อมูล 3 ตุลาคม 2553).
9. บริษัท อินเกรเดียน เซ็นต์เตอร์ จำกัด. **“CMC (carboxymethylcellulose)”**. วิธีสืบค้นข้อมูลวัสดุสารสนเทศ. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก: http://www.click2idc.com/index.php?option=other_detail&lang=th&id=34&sub=24. (วันที่สืบค้นข้อมูล 3 ตุลาคม 2553).

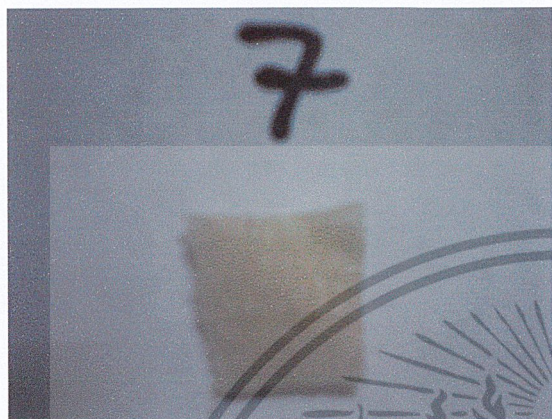
10. กัมพล กุศลเพิ่มพูน. “การกำจัดสังกะสีในน้ำผิวดินโดยกระบวนการตกตะกอนทางเคมีด้วยปูนขาวและแมกนีเซียมคาร์บอเนต”. หน้า 22-25. ประเทศไทย. 2549.
 11. A. Gupta, et al. “Nano and bulk crystal of ZnO : Synthesis and characterization”. Journal of Nanomaterials and Biostructuers 2006, vol. 1, p. 1-9.
 12. พัฒนเดช. “ครบเครื่องเรื่องสังกะสี”. วิธีสืบค้นข้อมูลวัสดุสารสนเทศ. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก: <http://www.mme.eng.psu.ac.th/knowledge/student/Zinc1/index.html>. (วันที่สืบค้นข้อมูล 24 ตุลาคม 2553).
 13. กรมทรัพยากรธรณี. “ทรัพยากรแร่ตะกั่วสังกะสี”. วิธีสืบค้นข้อมูลวัสดุสารสนเทศ. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก: http://www.dmr.go.th/knowledge/Thai_mineral/min_5_1_3.html. (วันที่สืบค้นข้อมูล 24 ตุลาคม 2553).
 14. กัปนาท แผ้วชำนาญ ,จักรพันธ์ โคมัยกุล. “อุตสาหกรรมแร่สังกะสีและแคดเมียม”. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก: http://www.kkw.ac.th/stuweb/6_9/group1/zinc&cadmium.html. (วันที่สืบค้นข้อมูล 3 ตุลาคม 2554).
 15. สำนักงานป้องกันควบคุมโรคที่ 9 จังหวัดพิษณุโลก. “เอกสารโรคจากการประกอบอาชีพและสิ่งแวดล้อม”. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก: [http://203.157.45.69/group/noc/EnvOcc \(dpc9\)](http://203.157.45.69/group/noc/EnvOcc (dpc9)). (วันที่สืบค้นข้อมูล 8 ตุลาคม 2554).
 16. สะอึ้ง จักขุศิลา. “ประโยชน์ของสังกะสีออกไซด์”. วารสารกรมวิทยาศาสตร์บริการ. 139: 6-10: 2543.
 17. M. Franciele, et al. “Antimicrobial mechanism and barrier properties of cassava starch-chitosan films incorporated with organo essential oil”. Journal of Agriculture and Food Chemistry. 57. 7499-7504. 2009.
 18. T. Bourtoom. “Effect of Some Process Parameter on the Properties of Edible Film prepared from Starches”. P. 8-11. Thailand. 2007.
 19. D. Phan, et al. “Functional Properties of Edible Agar-based and starch-based films for food Quality preservation”. Journal of Agriculture and Food Chemistry. 53. 973-981. 2500.
 20. K. Sriroth, et al. “Biodegradable Plastics From Cassava Starch in Thailand”. P. 29-35. Thailand. 2550.
 21. H. Xiong, et al. “The structure and properties of starch-based biodegradable film”. Journal of Carbohydrate Polymers. 71. 263-268. 2800.
- เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

22. ศุภชัย อมรกันทรากกร และเพ็ญศิริ ศรีบุรี. “ผลการให้ความร้อนต่อสมบัติทางเคมีฟิสิกส์ของแป้งมันสำปะหลังและแป้งมันฝรั่ง”. หน้า 1-8. ประเทศไทย. 2546.
23. S. Tang, et al. “Effect of nano-SiO₂ on the performance of starch/polyvinyl alcohol blend films”. Journal of Carbohydrate Polymers. 72. 521-526. 2008.
24. P.M. Forssell, et al. “Phase and glass transition behavior of concentrated barley starch-glycerol-water mixtures, a model for thermoplastic starch”. Journal of Carbohydrate Polymers. 34. 275-282. 1997.
25. P. Myllarinen, et al. “Effect of glycerol on behavior of amylose and amylopectin films”. Journal of Carbohydrate Polymers. 50. 355-361. 2002.
26. J.N. Bemiller and R.L. Whistler. “Starch chemistry and technology”. P. 87-92. New York. 2009.
27. X. Ma, et al. “Preparation and properties of glycerol plasticized-pea starch/zinc oxide starch bionanocomposites”. Journal of Carbohydrate Polymers. 75. 472-478. 2009.
28. A. Pourjaradi, Sh. Barzegar, and G.R. Mahdavinia. “ MBA-crosslinked Na-Alg/CMC as a smart full-polysaccharide superabsorbent hydrogels ”. Journal of Carbohydrate Polymers 2006. Vol 66 p. 386-395.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

ลักษณะชิ้นงานที่ได้ แป้งมันสำปะหลัง ผสม CMC และ nano ZnO ในอัตราส่วนต่างๆ



สูตร 7

แป้งมันสำปะหลัง:CMC: nano ZnO

5:5:0



สูตร 8

แป้งมันสำปะหลัง: CMC: nano ZnO

5:5:0.5

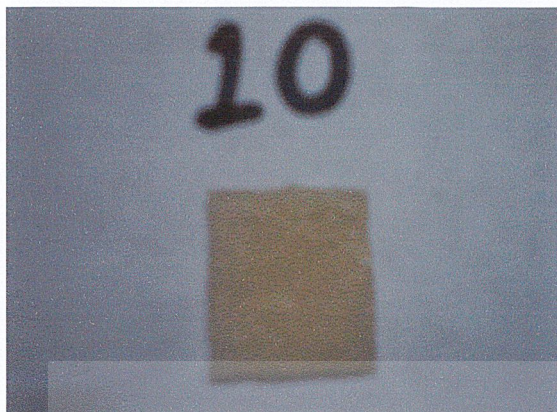


สูตร 9

แป้งมันสำปะหลัง: CMC: nano ZnO

5:5:1

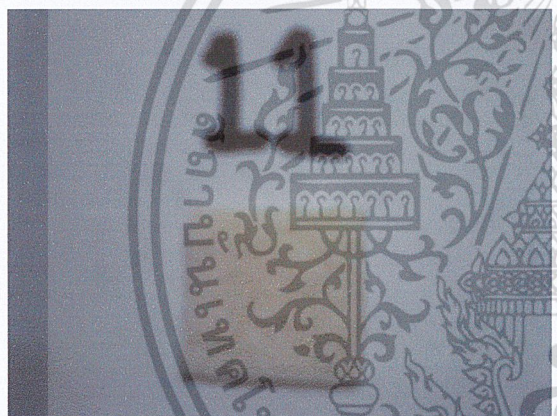
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่สงวนลิขสิทธิ์ ห้ามนำไปเผยแพร่หรือดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



สูตร 10

แป้งมันสำปะหลัง: CMC: nano ZnO

3:7:0



สูตร 11

แป้งมันสำปะหลัง: CMC: nano ZnO

3:7:0.5



สูตร 12

แป้งมันสำปะหลัง: CMC: nano ZnO

3:7:1

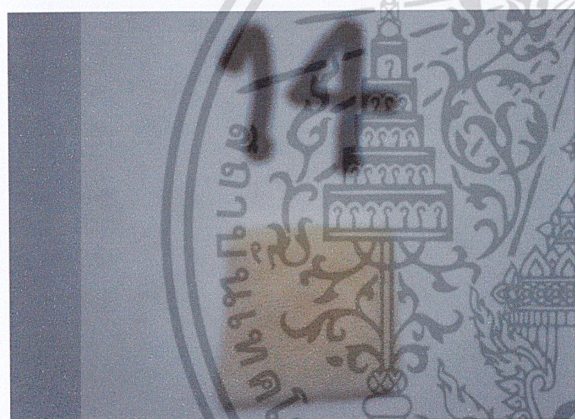
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



สูตร 13

แป้งมันสำปะหลัง: CMC: nano ZnO

0:10:0



สูตร 14

แป้งมันสำปะหลัง: CMC: nano ZnO

0:10:0.5



สูตร 15

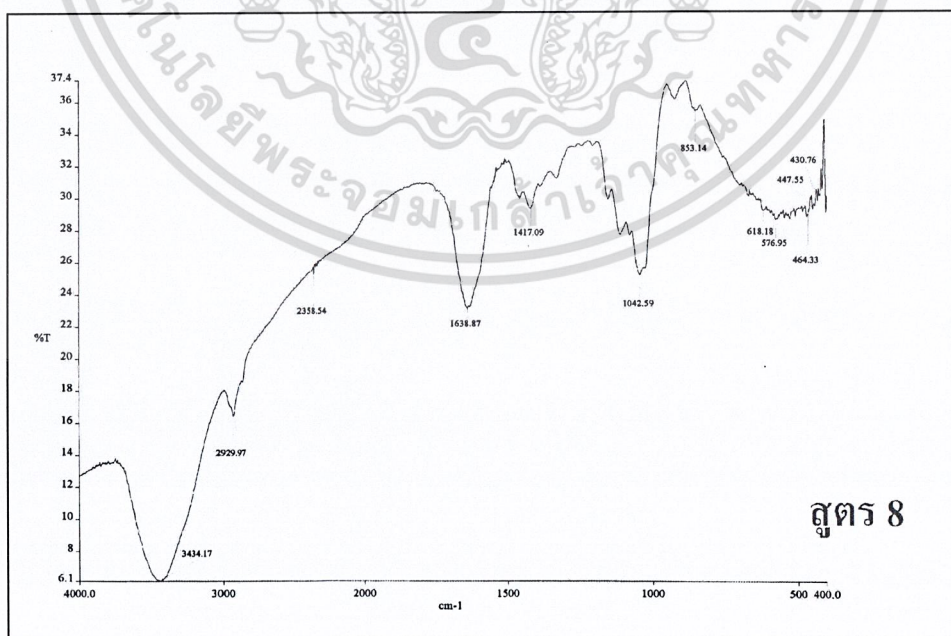
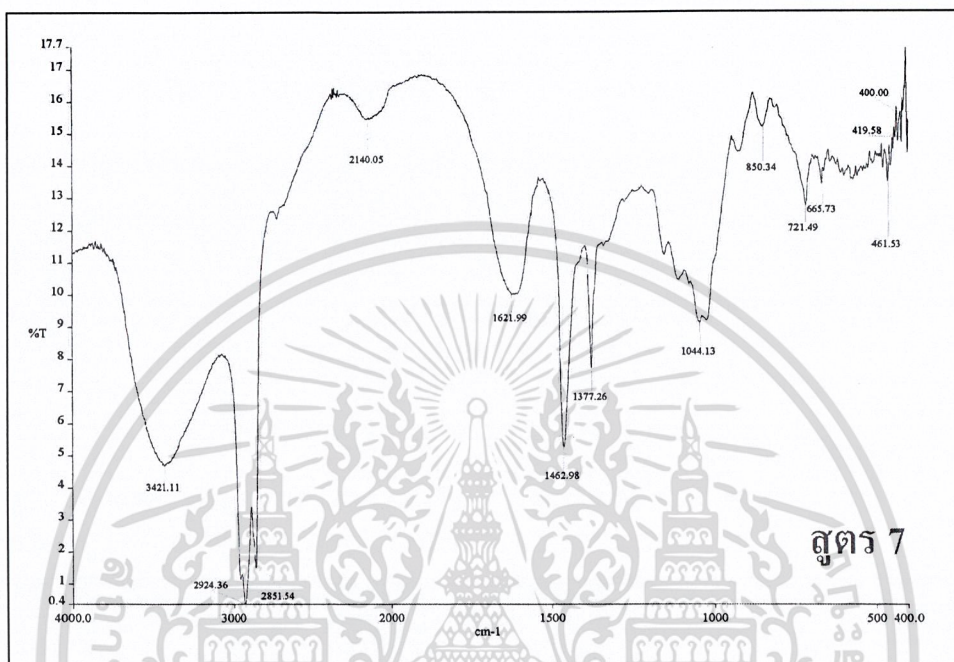
แป้งมันสำปะหลัง: CMC: nano ZnO

0:10:1

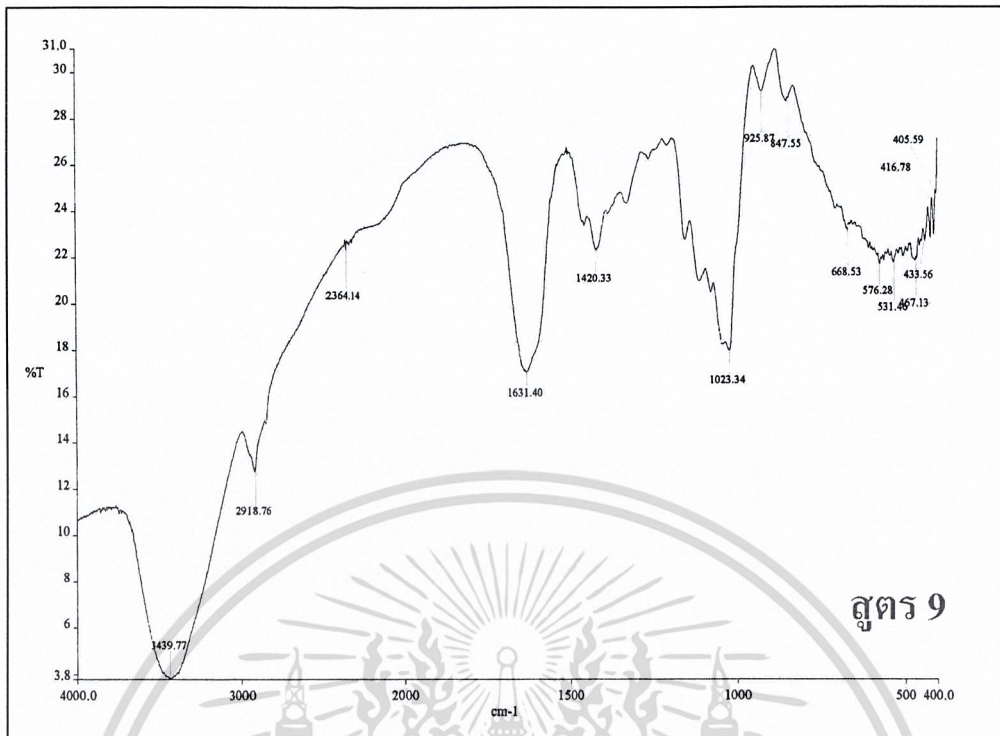
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ห้ามการนำออกเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

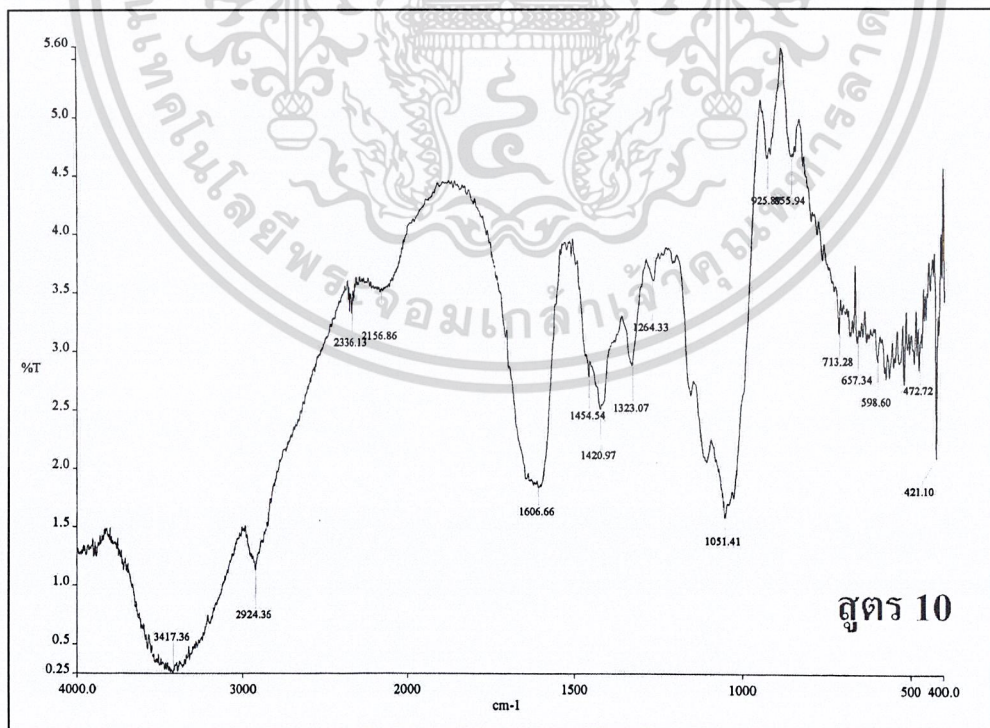
การวิเคราะห์ด้วยอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

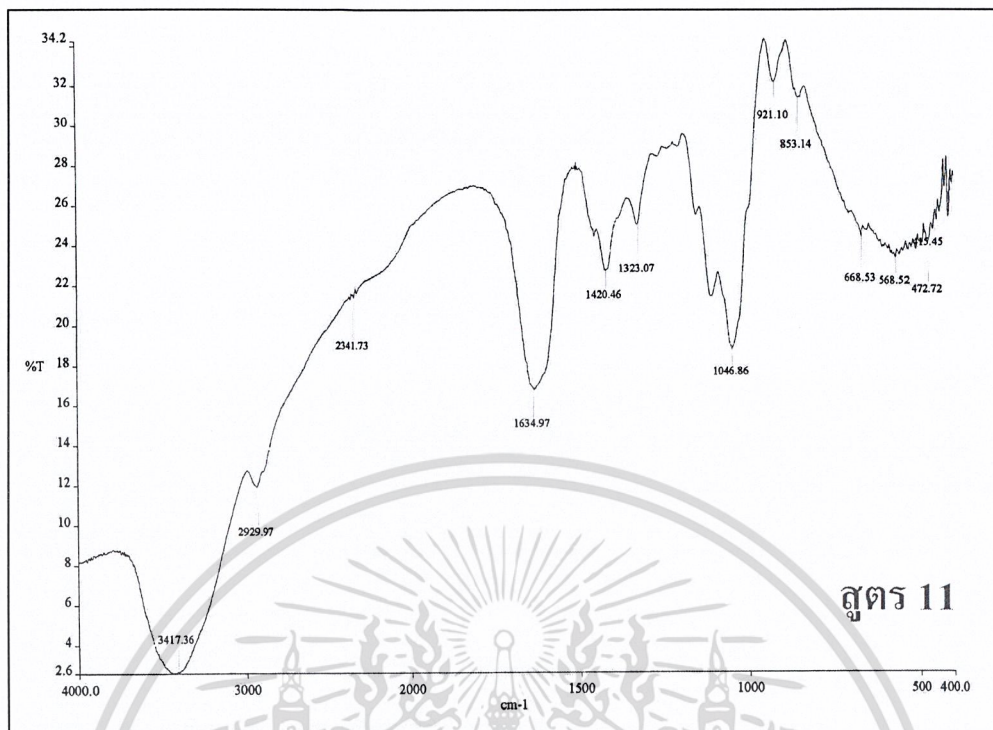


สูตร 9

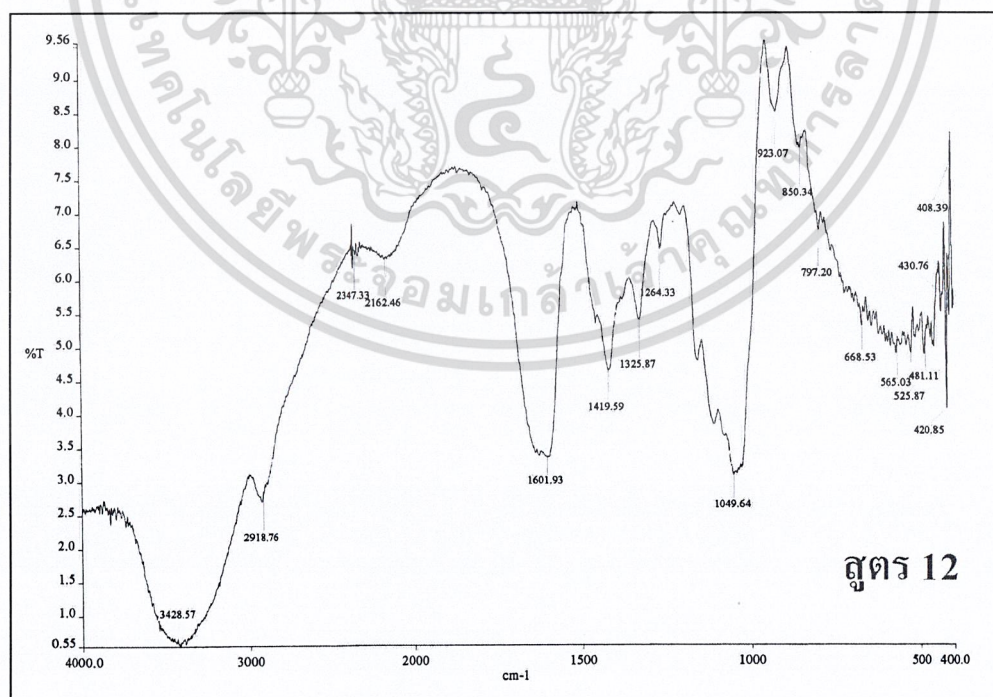


สูตร 10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

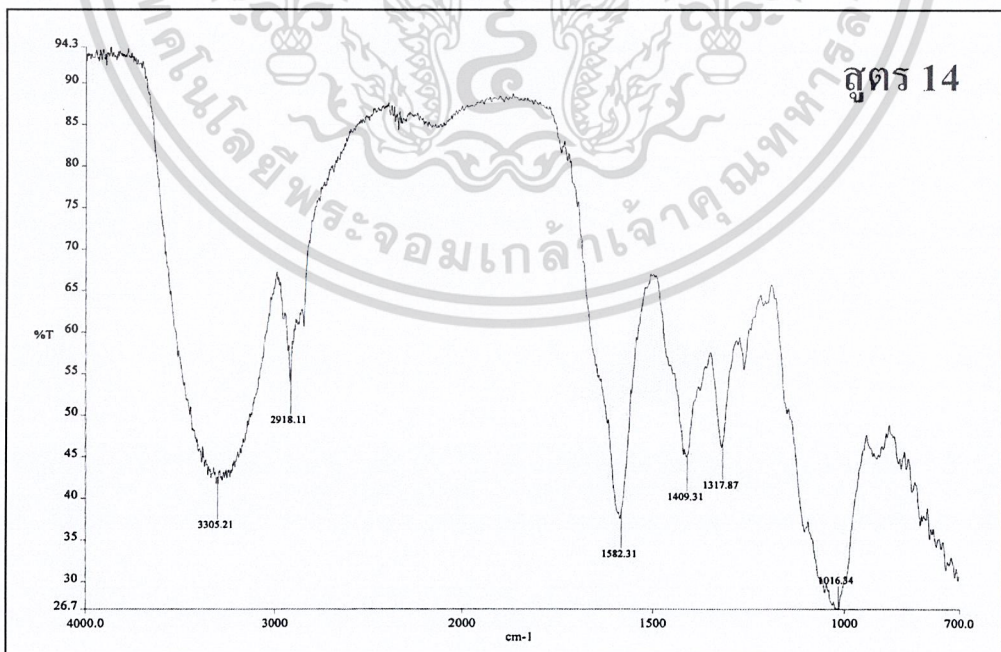
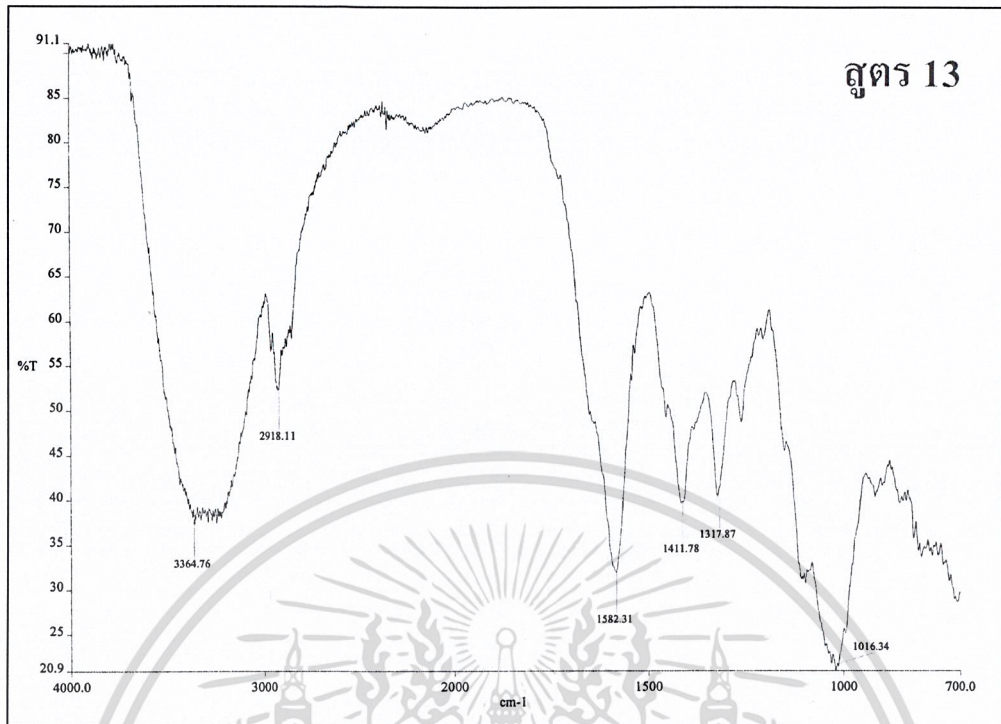


สูตร 11

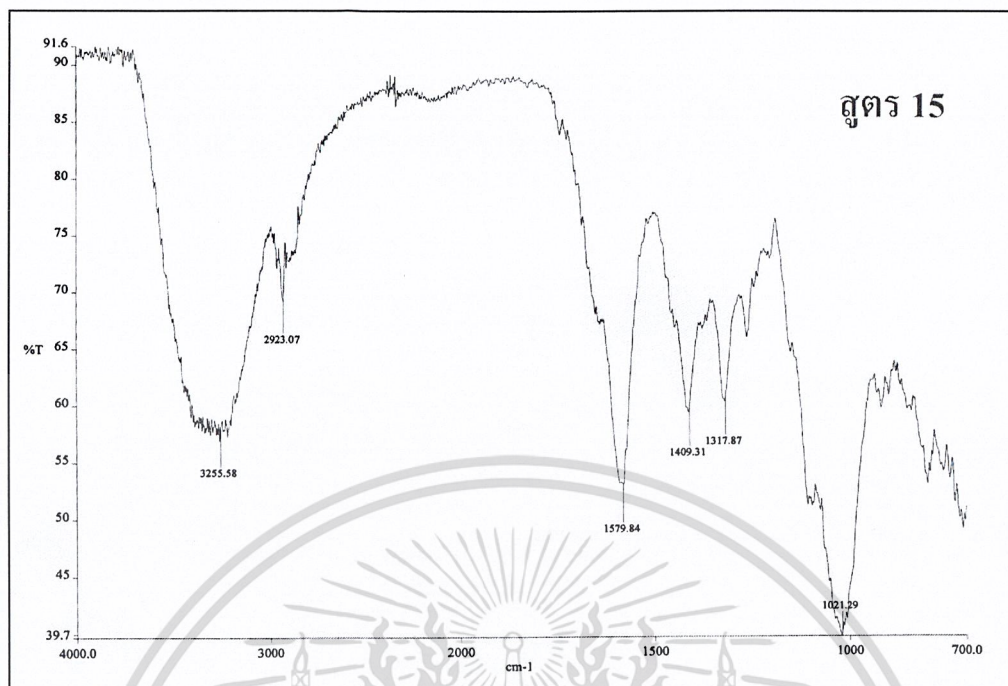


สูตร 12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



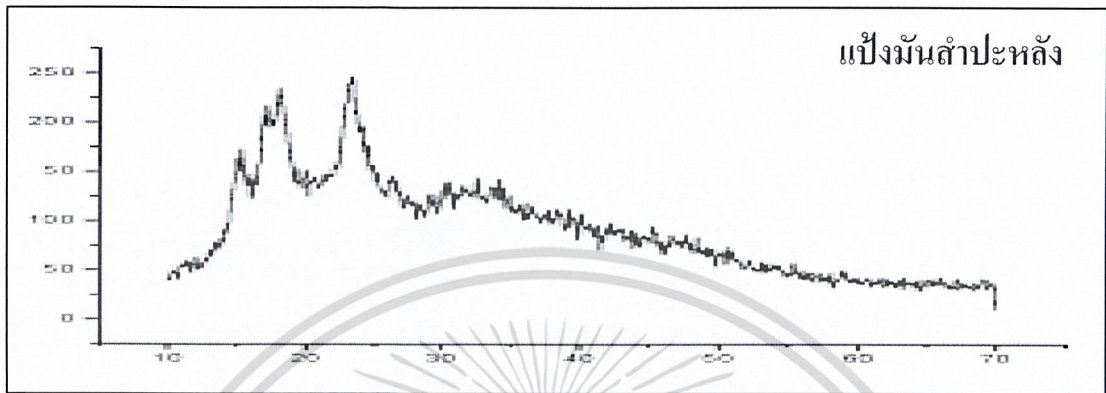
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



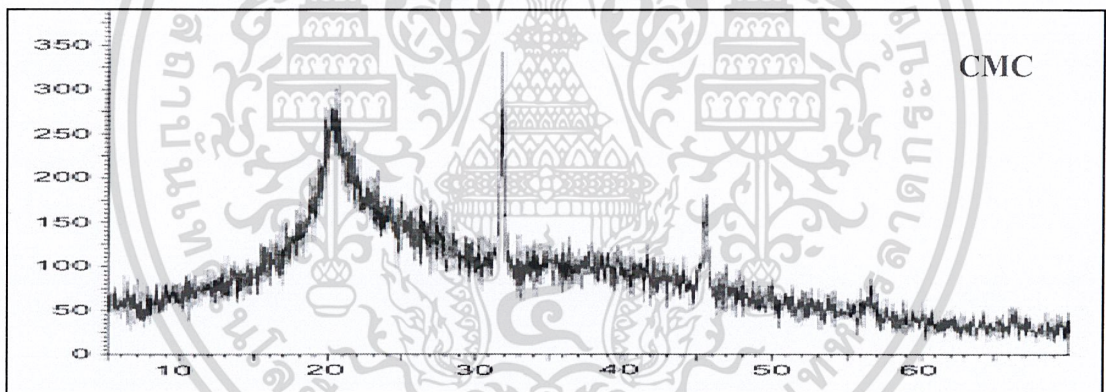
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค

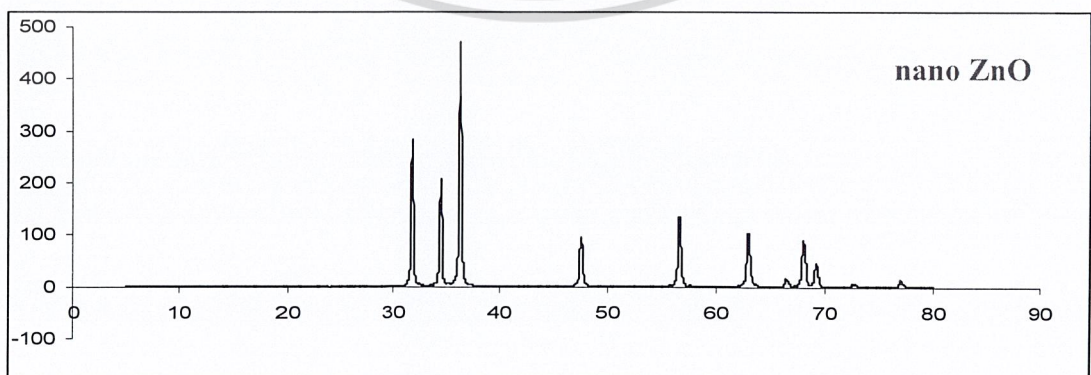
การตรวจสอบความเป็นผลึก



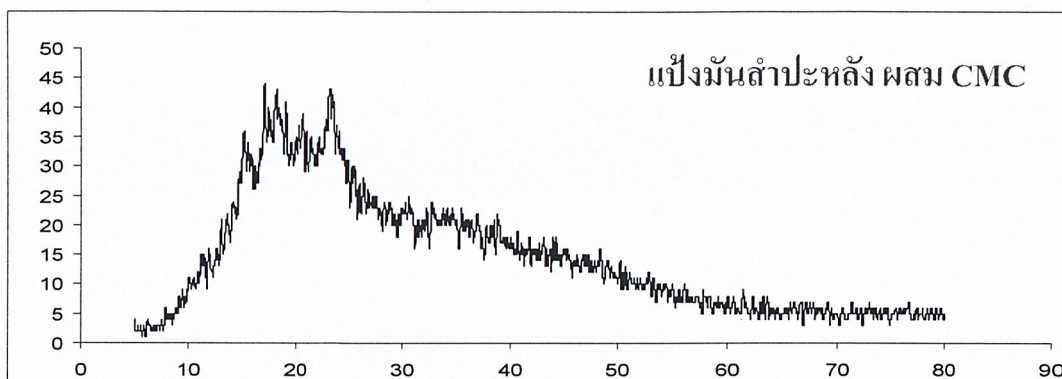
แสดง pattern ของน้ำมันลำปะหลัง ที่มุม 2-Theta 10-70 องศา



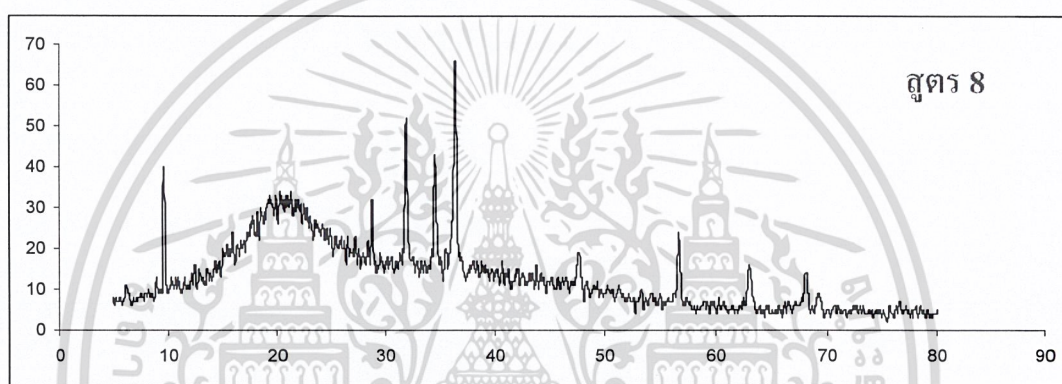
แสดง pattern ของ CMC ที่มุม 2-Theta 5-70 องศา



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งแสดง pattern ของ nano ZnO ที่มุม 2-Theta 5-80 องศา ทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



แสดง pattern แป้งมันสำปะหลังผสม CMC อัตราส่วน 1:1 กรั้มที่มุม 2-Theta 5-80 องศา



แสดง pattern ของแผ่นฟิล์มแป้งมันสำปะหลังผสม CMC และ nano ZnO ที่มุม 2-Theta 5-80 องศา โดยมีอัตราส่วน 5:5:0.5 ซึ่งเป็นอัตราส่วนที่มีสมบัติเชิงกล และกายภาพโดยภาพรวมดีที่สุดใน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ง

สมบัติเชิงกล

ตาราง แสดงสมบัติเชิงกลของฟิล์มแป้งมันสำปะหลัง และ CMC

สูตร	แป้งมัน (กรัม)	CMC (กรัม)	nano ZnO (กรัม)	Tensile strength(MPa)	Hardness (Shore A)
7	5	5	-	0.286	33.6
8	5	5	0.5	0.3377	35.2
9	5	5	1	0.274	30.4
10	3	7	-	0.348	31.4
11	3	7	0.5	0.2452	30
12	3	7	1	0.4947	44.4
13	-	10	-	0.4582	47.4
14	-	10	0.5	0.5118	48.2
15	-	10	1	0.591	49

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก จ

สมบัติทางกายภาพ

1. การคงตัวในน้ำ

สูตร	ชั่วโมงที่1	ชั่วโมงที่2	ชั่วโมงที่3	ชั่วโมงที่4	ชั่วโมงที่5	ชั่วโมงที่6
	น้ำหนัก(%)	น้ำหนัก(%)	น้ำหนัก(%)	น้ำหนัก(%)	น้ำหนัก(%)	น้ำหนัก(%)
7	1067.035	1284.5	1363.029	1468.579	1582.6	1618.74
8	940.0887	1097.75	1320.017	1357.239	1345.921	1330.86
9	1845.443	2130.64	2382.131	2459.203	2543.201	2829.96
10	967.4818	1135.41	1162.236	1280.507	1383.236	1263.92
11	1023.096	1334.97	1234.595	1467.94	1587.636	1247.47
12	765.2899	899.047	900.2701	1482.351	1682.955	1682.95
13	751.8681	1061.96	774.8651	1896.19		
14	701.8038	871.162	644.4786	915.002		
15	766.048	948.465	1105.268			

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. การคงตัวในกรดและด่าง

ในสารละลายกรด HCI เข้มข้น 0.01 โมลาร์

สูตร	ชั่วโมงที่1	ชั่วโมงที่2	ชั่วโมงที่3	ชั่วโมงที่4	ชั่วโมงที่5	ชั่วโมงที่6
	น้ำหนัก(%)	น้ำหนัก(%)	น้ำหนัก(%)	น้ำหนัก(%)	น้ำหนัก(%)	น้ำหนัก(%)
7	1207.48	3306.09	1620.602	1702.979	1804.279	1787.99
8	823.1897	1075.91	1297.134	1309.604	1449.661	1489.28
9	1486.046	1632.99	1714.227	1916.159	2104.596	2085.16
10	970.1432	1202.16	1224.514	1289.677	1585.061	1322.8
11	934.0295	1209.19	1435.004	1765.163	1906.683	1837.59
12	746.6546	1012.9	1073.665	1176.154	1345.979	1261.24
13	1012.332	1281.15	1327.188	1628.702	1650.216	1695.19
14	1141.2	1183.3	1267.481	1276.206	1395.391	1424.01
15	901.864	911.8	1012.326	1204.15	1305.256	1432.05

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในสารละลายต่าง NaOH เข้มข้น 0.01 โมลาร์

สูตร	ชั่วโมงที่1	ชั่วโมงที่2	ชั่วโมงที่3	ชั่วโมงที่4	ชั่วโมงที่5	ชั่วโมงที่6
	น้ำหนัก(%)	น้ำหนัก(%)	น้ำหนัก(%)	น้ำหนัก(%)	น้ำหนัก(%)	น้ำหนัก(%)
7	1491.921	1461.71	1411.266	1693.086	1596.342	1748.7
8	1234.497	1442.9	1528.773	1544.809	1588.672	1175.96
9	2545.985	2723.16	2456.215	2919.194	3207.364	2621.02
10	1153.225	1258.18	1271.631	2007.805	1534.38	1338.89
11	1451.498	1436.61	1494.122	1690.036	1701.929	1148.68
12	1190.232	1261.84	1234.189	1229.932	2045.85	2070.13
13	1074.503	1215.96	1272.516	1315.986		
14	1083.945	1086.8	1082.275	1134.79		
15	1348	1358.36	1364			

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. การละลายน้ำ กรด และด่าง

ทดสอบโดยการแช่แผ่นฟิล์มทิ้งในน้ำ เป็นเวลา 24 ชั่วโมง และทดสอบโดยการแช่แผ่นฟิล์มทิ้งในสารละลาย กรด HCl และ ด่าง NaOH ที่ความเข้มข้น 0.01 โมลาร์ เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

สูตร	แป้งมัน (กรัม)	CMC (กรัม)	nano ZnO (กรัม)	การละลายในน้ำ	การละลายในกรด	การละลายในด่าง
7	5	5	-	ไม่ละลาย, เจล	ไม่ละลาย	ไม่ละลาย, เจล
8	5	5	0.5	ไม่ละลาย, เจล	ไม่ละลาย	ไม่ละลาย, เจล
9	5	5	1	ไม่ละลาย, เจล	ไม่ละลาย	ไม่ละลาย, เจล
10	3	7	-	ไม่ละลาย, เจล	ไม่ละลาย	ไม่ละลาย, เจล
11	3	7	0.5	ไม่ละลาย, เจล	ไม่ละลาย	ไม่ละลาย, เจล
12	3	7	1	ละลาย	ไม่ละลาย	ละลาย
13	-	10	-	ละลาย	ไม่ละลาย	ละลาย
14	-	10	0.5	ละลาย	ไม่ละลาย	ละลาย
15	-	10	1	ไม่ละลาย, ชุ่ม	ไม่ละลาย	ไม่ละลาย, ชุ่ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



7:แซ่ในน้ำ



7:แซ่ในกรด



7:แซ่ในต่าง



8:แซ่ในน้ำ



8:แซ่ในกรด



8:แซ่ในต่าง



9:แซ่ในน้ำ



9:แซ่ในกรด



9:แซ่ในต่าง



10:แซ่ในน้ำ



10:แซ่ในกรด



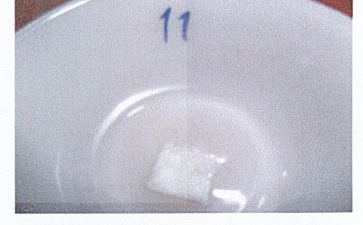
10:แซ่ในต่าง



11:แซ่ในน้ำ



11:แซ่ในกรด



11:แซ่ในต่าง



12:แซ่ในน้ำ



12:แซ่ในกรด



12:แซ่ในต่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่า 12:แซ่ในน้ำ สิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อ 12:แซ่ในกรด ่างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้ง 12:แซ่ในต่าง ใช้



13: แขน้ำ



13: แขนกรด



13: แขนด่าง



14: แขน้ำ



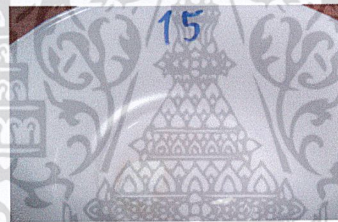
14: แขนกรด



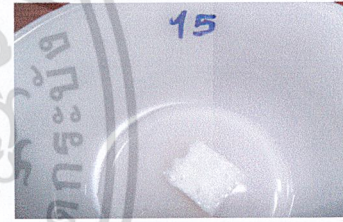
14: แขนด่าง



15: แขน้ำ



15: แขนกรด



15: แขนด่าง

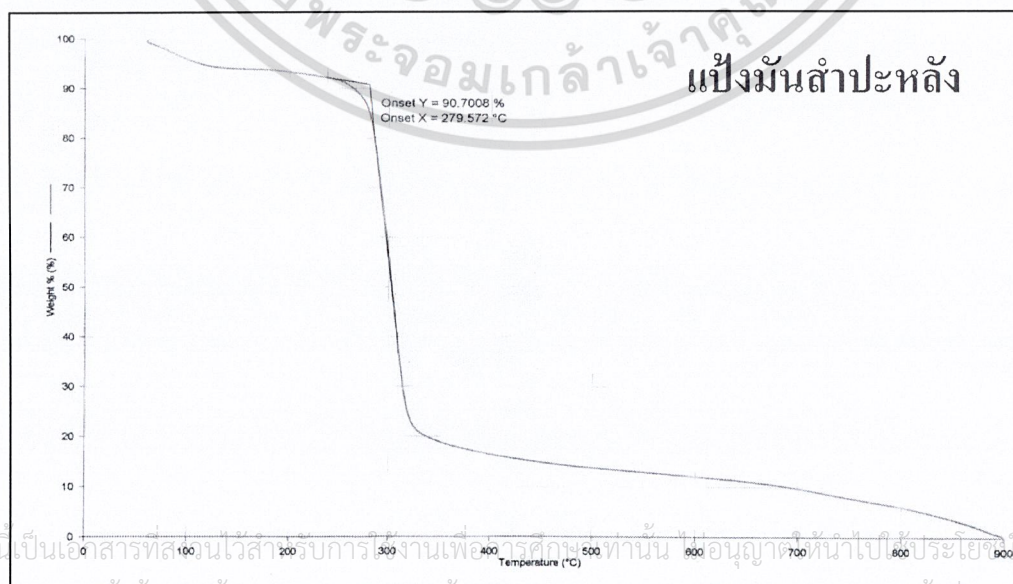
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ฉ

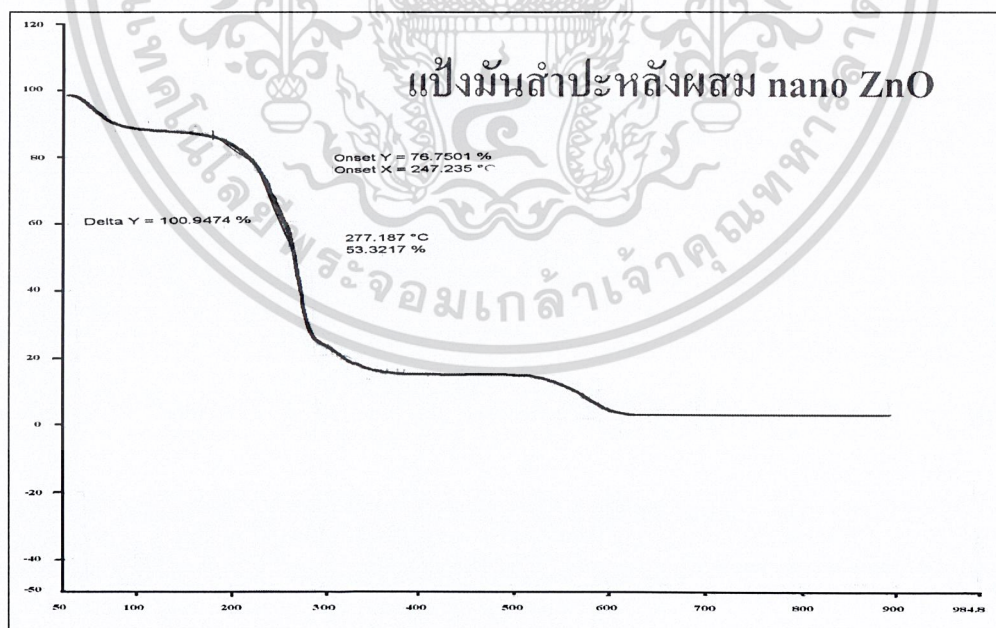
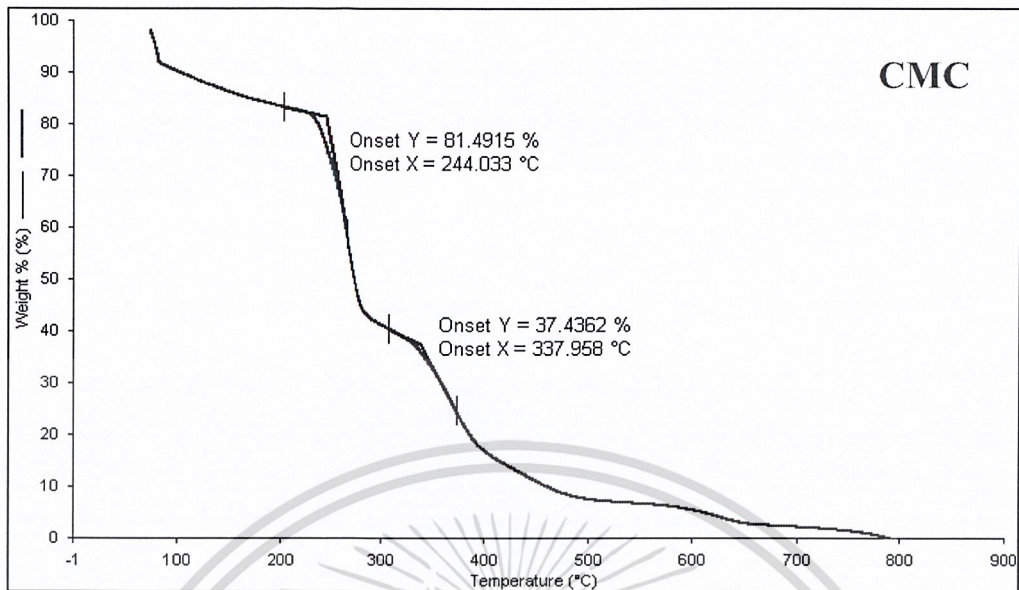
สมบัติทางความร้อน

ตาราง แสดงค่าอุณหภูมิการสลายตัวของแผ่นฟิล์มตัวอย่าง

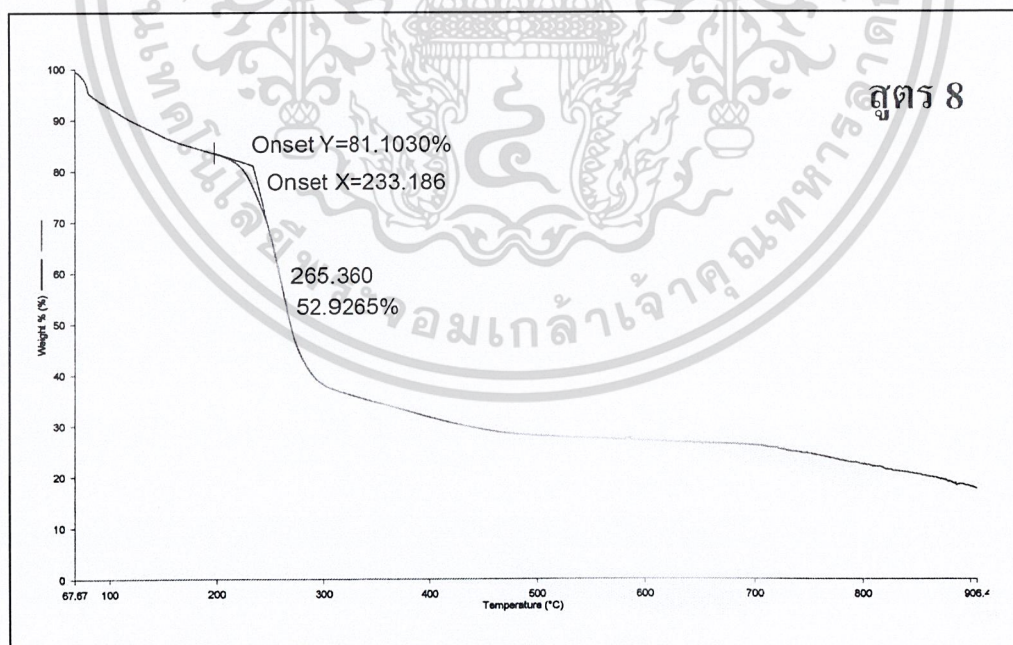
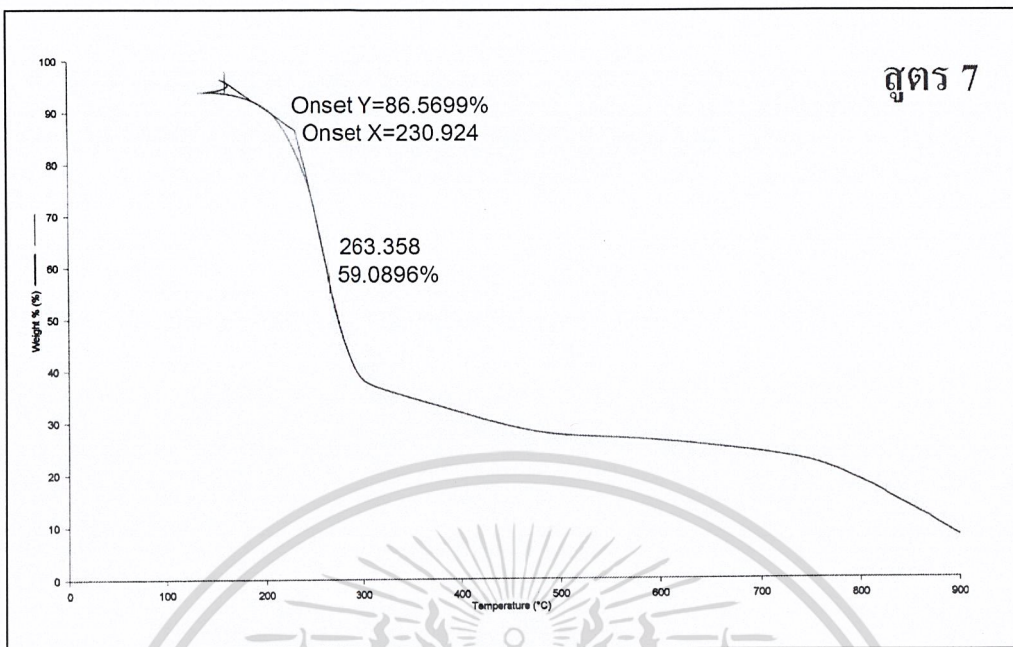
สูตร	แป้งมัน (กรัม)	CMC (กรัม)	nano ZnO (กรัม)	อุณหภูมิเริ่มการสลายตัว (T ₀ , °C)
7	5	5	-	263.358
8	5	5	0.5	265.36
9	5	5	1	263.066
10	3	7	-	248.474
11	3	7	0.5	248.14
12	3	7	1	242.232
13	-	10	-	259.109
14	-	10	0.5	250.109
15	-	10	1	234.354



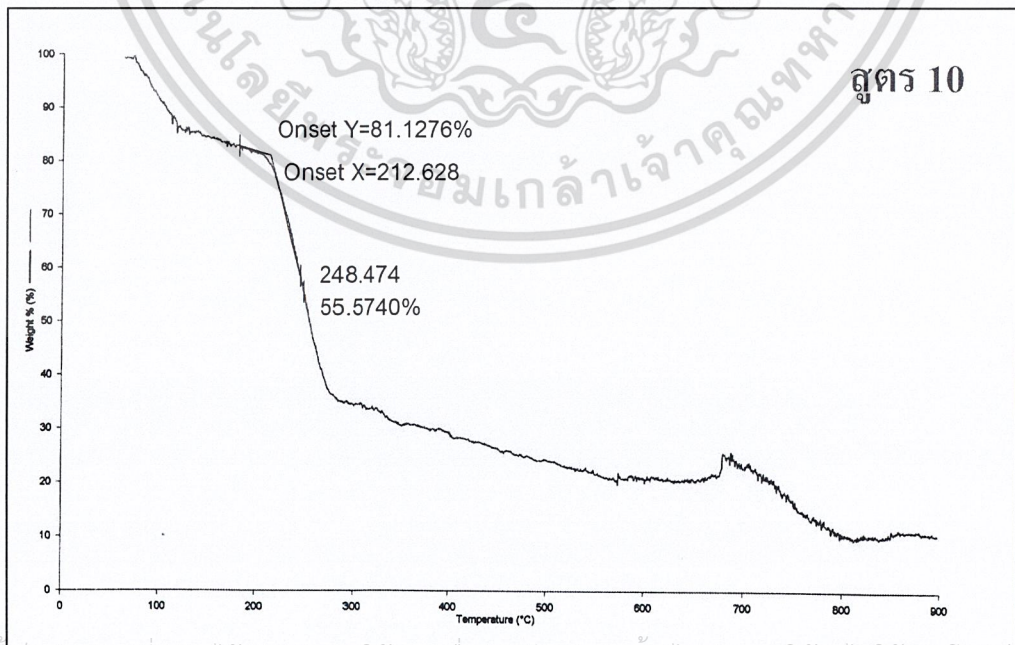
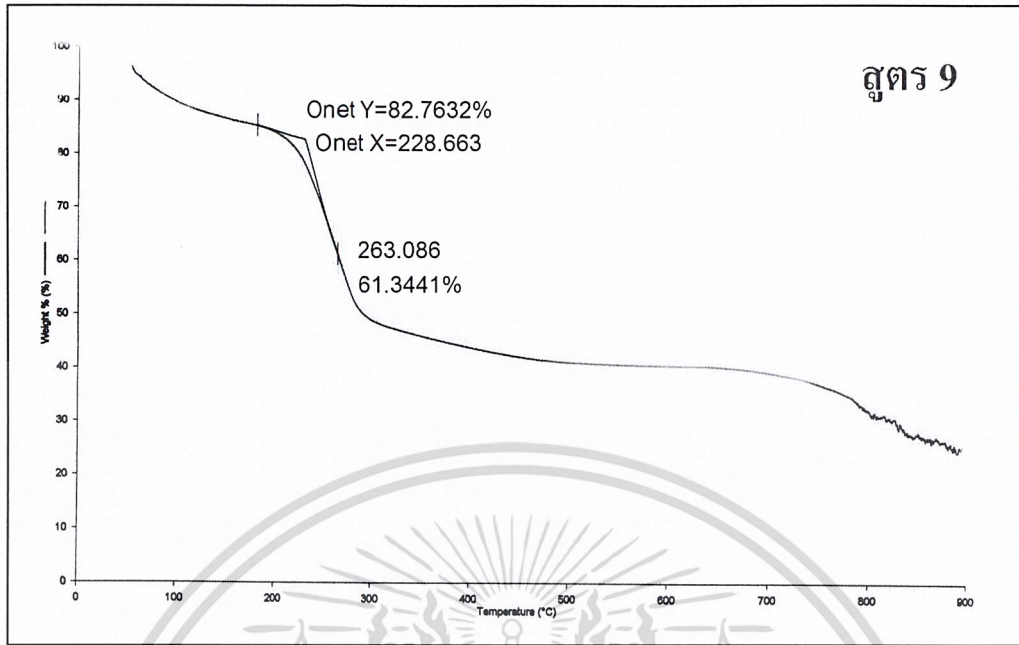
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ผลิตขึ้นเพื่อใช้ในการเรียนการสอนเพื่อวัตถุประสงค์เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามเผยแพร่ข้อมูลและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



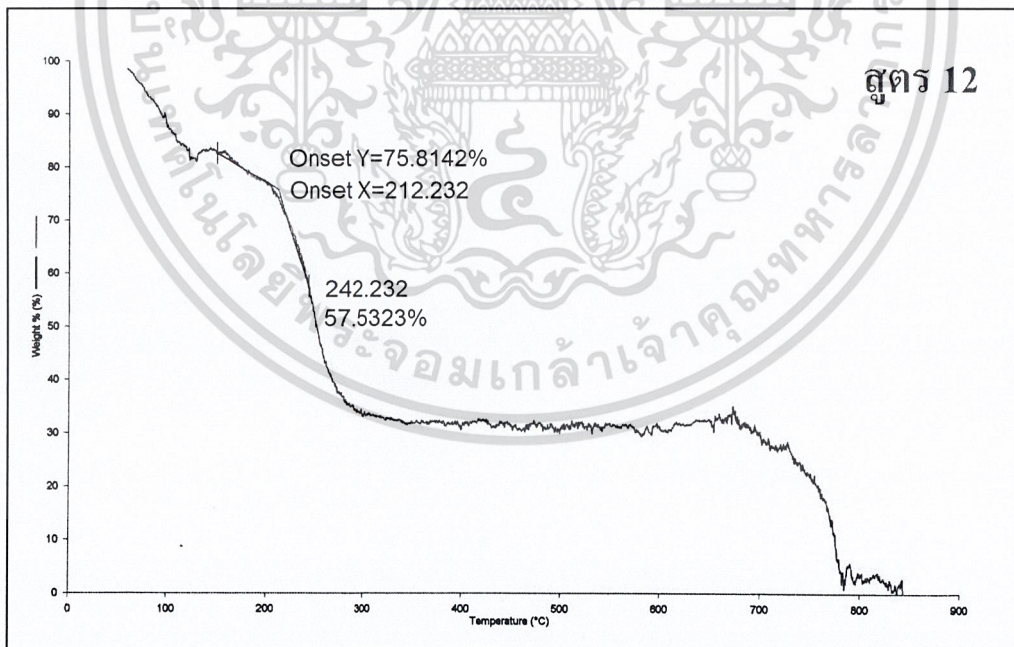
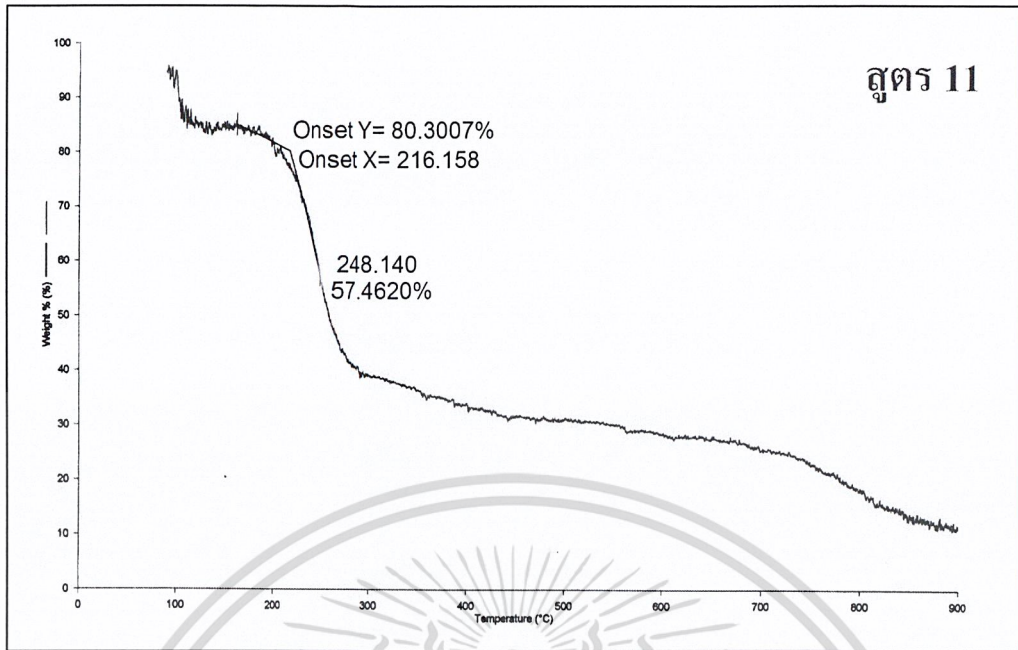
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



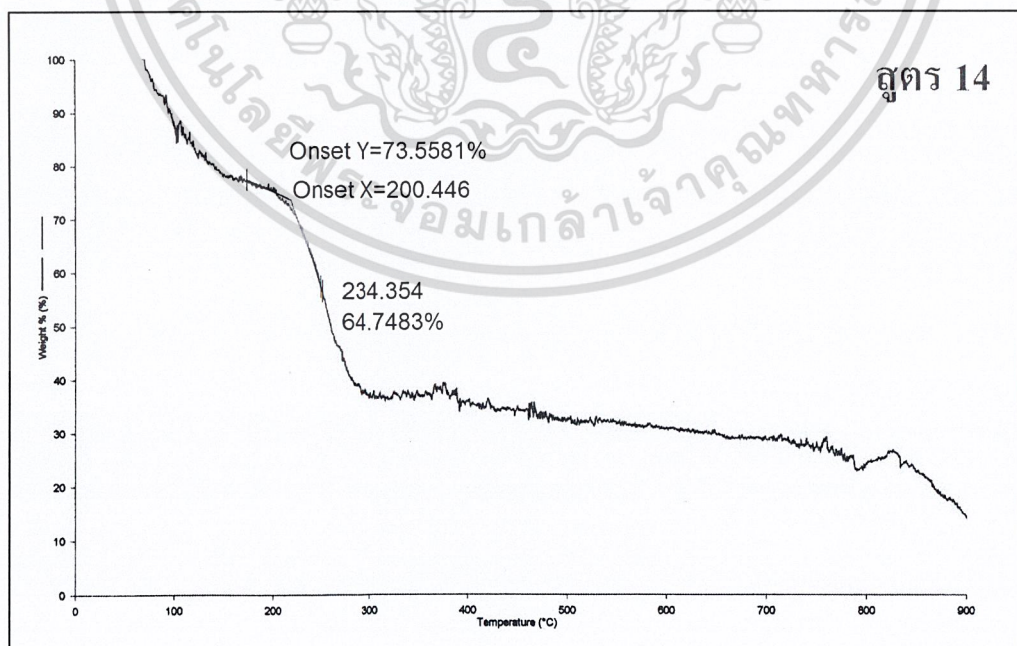
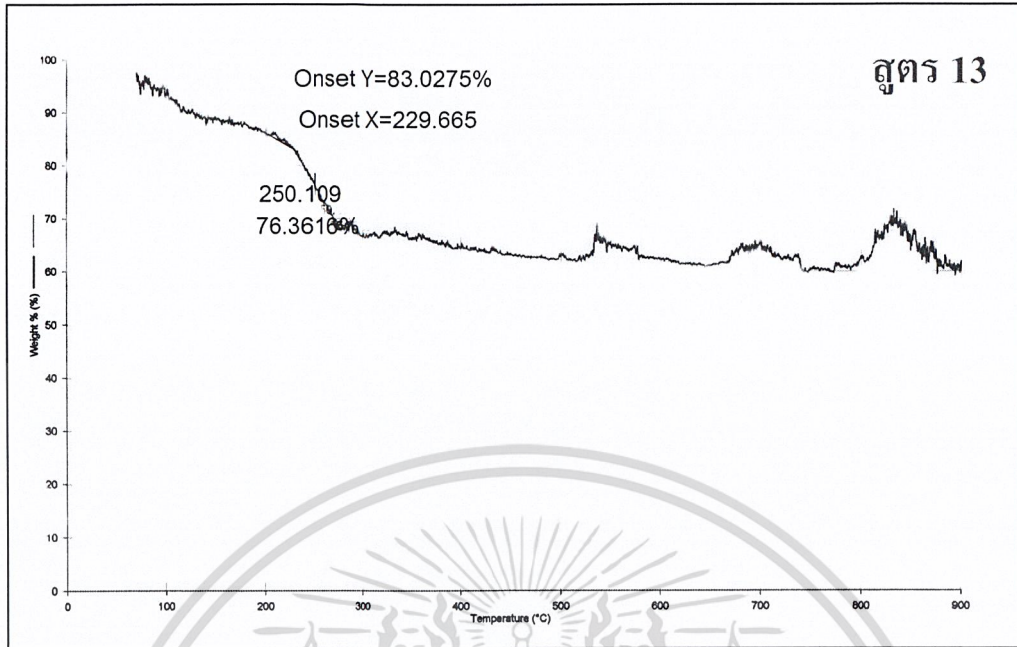
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



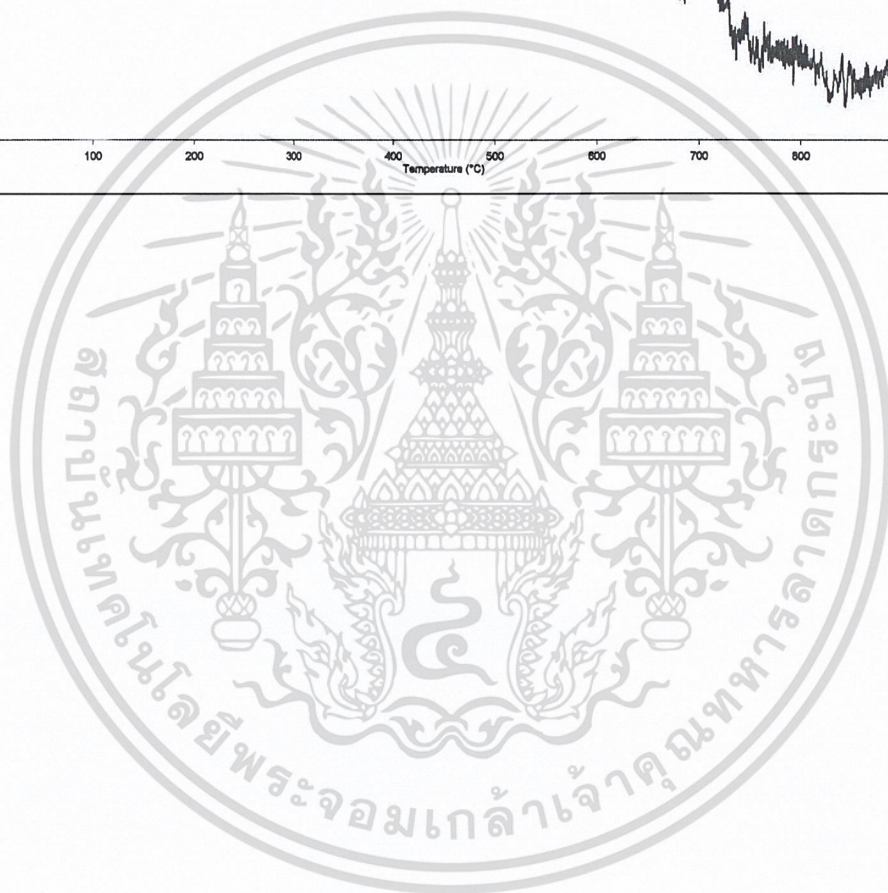
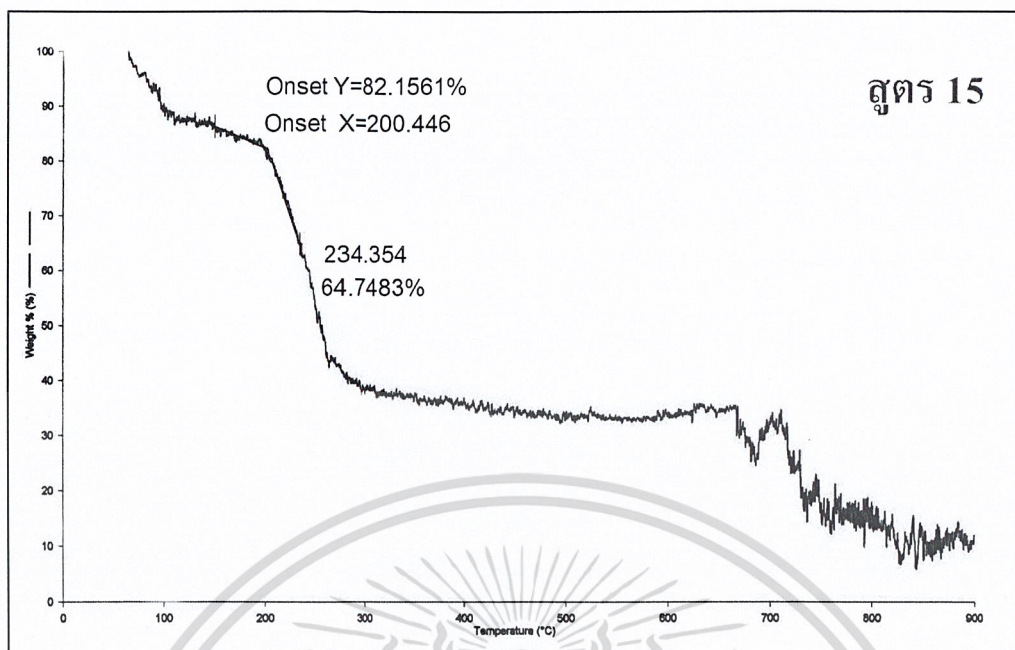
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



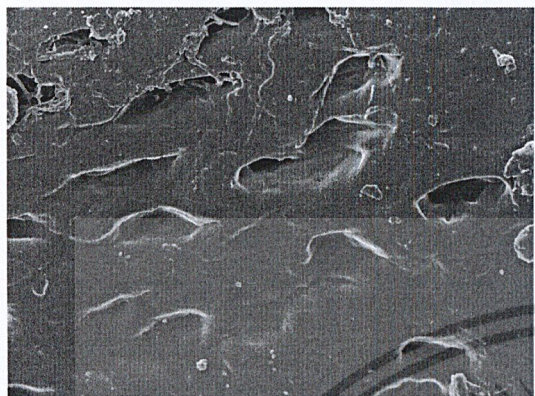
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



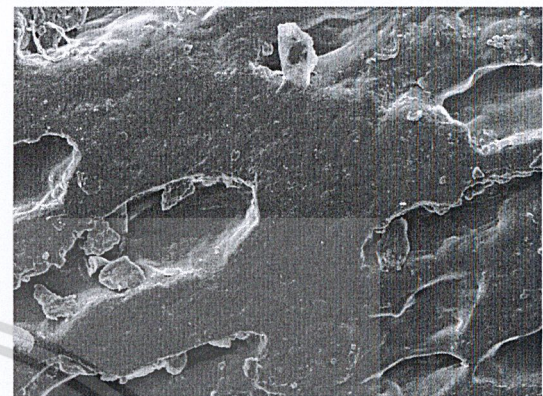
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

หลักฐานวิทยา

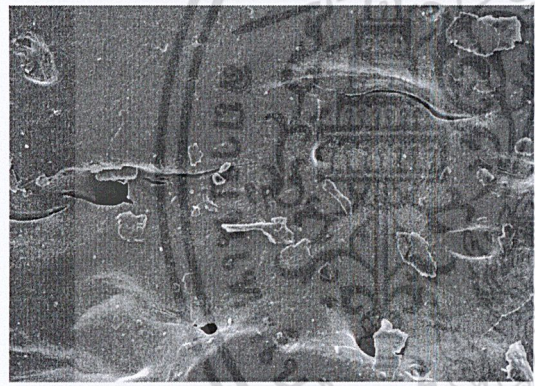


(ก)

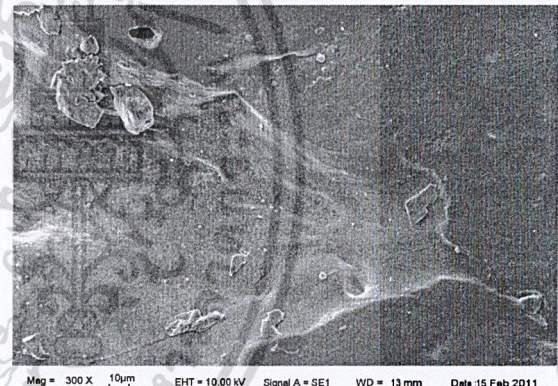


(ข)

รูปแสดงหลักฐานวิทยา (พื้นผิวด้านหน้า) ของฟิล์มสูตร 7 ที่กำลังขยาย 300 เท่า

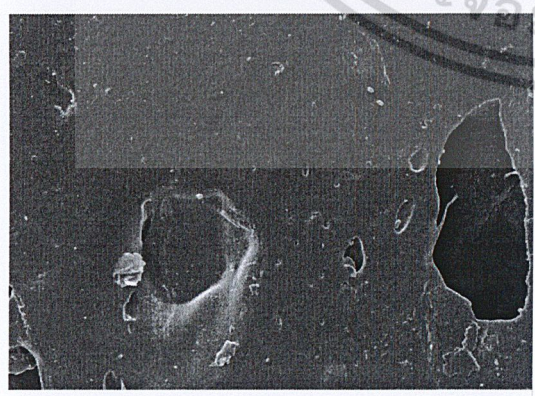


(ค)

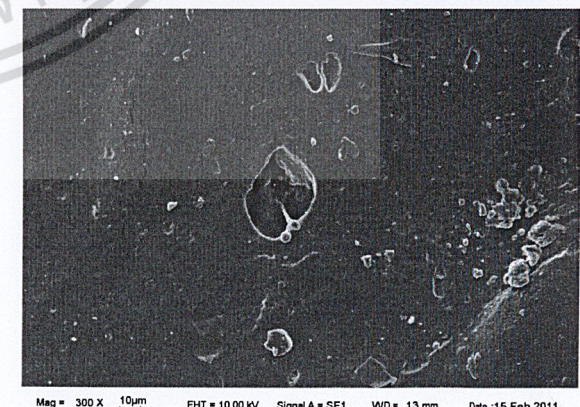


(ง)

รูปแสดงหลักฐานวิทยา (พื้นผิวด้านหน้า) ของฟิล์มสูตร 8 ที่กำลังขยาย 300 เท่า



(ฉ)



(ฉ)

รูปแสดงหลักฐานวิทยา (พื้นผิวด้านหน้า) ของฟิล์มสูตร 9 ที่กำลังขยาย 300 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ปรากฏหลักฐานวิทยา (พื้นผิวด้านหน้า) ของฟิล์มสูตร 9 ที่กำลังขยาย 300 เท่า
 ไม่สามารถได้ หงสน อักทิงห้ามมเหตุดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้