การปรับปรุงสมบัติเชิงกลและการดูดซับความชื้นของเทอร์โมพลาสติกที่เตรียมจากแป้งโดยใช้อนุพันธ์ของเอไมด์

สำนักหอสมุดกลาง

โดย
นายไพโรจน์ ใบตาเฮ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์
ภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร
ปีการศึกษา 2555
ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

การปรับปรุงสมบัติเชิงกลและการดูดซับความชื้นของเทอร์โมพลาสติกที่เตรียมจากแป้งโดยใช้อนุพันธ์ของเอไมด์

สำนักหอสมุดกลาง

โดย
นายไพโรจน์ ใบตาเฮ

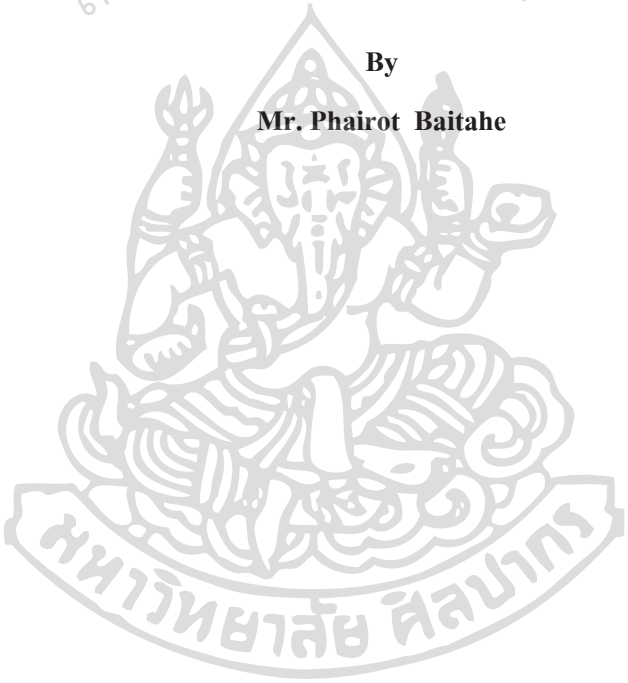
วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์
ภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร
ปีการศึกษา 2555
ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

IMPROVEMENT OF MECHANICAL PROPERTIES AND MOISTURE ADSORPTION OF THERMOPLASTIC STARCH USING AMIDE DERIVATIVES

สำนักหอสมุดกลาง

By

Mr. Phairot Baitahe



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree

Master of Engineering Program in Polymer Science and Engineering

Department of Materials Science and Engineering

Graduate School, Silpakorn University

Academic Year 2012

Copyright of Graduate School, Silpakorn University

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร อนุมัติให้วิทยานิพนธ์เรื่อง “ การปรับปรุงสมบัติเชิงกลและการดูดซับความชื้นของเทอร์โมพลาสติกที่เตรียมจากแป้งโดยใช้อนุพันธ์ของเอไมด์ ” เสนอโดย นายไพโรจน์ ใบตาเฮ เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์

……..
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปานใจ ธารทัศนวงศ์)
คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย
วันที่.....เดือน..... พ.ศ.....

สำนักหอสมุดกลาง

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

1. อาจารย์ ดร.อำนาจ สิทธัตตระกูล
2. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วันชัย เลิศวิจิตรจรัส

คณะกรรมการตรวจสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐกาญจน์ หงส์ศรีพันธ์)
...../...../.....

..... กรรมการ
(อาจารย์ ดร.สุมนมาลย์ เนียมหลาง)
...../...../.....

..... กรรมการ
(อาจารย์ ดร.อำนาจ สิทธัตตระกูล)
...../...../.....

..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วันชัย เลิศวิจิตรจรัส)
...../...../.....

53402216 : สาขาวิชาวิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์
คำสำคัญ : เทอร์โมพลาสติกที่เตรียมจากแป้ง/อนุพันธ์ของเอไมด์/การดูดซับความชื้น

ไพโรจน์ ใบตาเฮ : การปรับปรุงสมบัติเชิงกลและการดูดซับความชื้นของเทอร์โมพลาสติกที่เตรียมจากแป้งโดยใช้อนุพันธ์ของเอไมด์. อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ : อ.ดร.อำนาจ สิทธัตตระกูล และ ผศ.ดร.วันชัย เลิศวิจิตรจรัส. 98 หน้า.

การศึกษาวิจัยในครั้งนี้มีจุดประสงค์เพื่อปรับปรุงสมบัติเชิงกลและการดูดซับความชื้นของเทอร์โมพลาสติกที่เตรียมจากแป้งโดยใช้พลาสติไซเซอร์จากอนุพันธ์ของเอไมด์และสารเคลือบผิวจากอนุพันธ์ของอีเธอร์ ในการทดลองได้ทำการสังเคราะห์พลาสติไซเซอร์ 3 ชนิดคือ N,N-bis(2-hydroxyethyl)formamide (BHF), N,N-bis(2-hydroxyethyl)acetamide (BHA) และ N,N-bis(2-hydroxyethyl)benzamide (BHB) รวมทั้งสารเคลือบผิว 3 ชนิดคือ N,N-bis(2-(benzyloxy)ethyl) formamide (BBF), N,N-bis(2-(benzyloxy)ethyl)acetamide (BBA) และ N,N-bis(2-(benzyloxy) ethyl)benzamide (BBB) ผลการพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิค FT-IR และ ^{1}H-NMR ยืนยันได้ว่าสามารถสังเคราะห์สารดังกล่าวได้สำเร็จ จากการทดสอบด้วยเทคนิค SEM พบว่าผิวชิ้นงาน TPS ที่เกิดการแตกหักมีความเป็นเนื้อเดียวกันและมีความเรียบมากขึ้น เมื่อใช้ BHF หรือ BHA เป็นพลาสติไซเซอร์ ค่า tensile modulus และค่า tensile strength ของชิ้นงาน TPS จะสูงกว่ากรณีที่ใช้ glycerol เป็นพลาสติไซเซอร์ เนื่องจาก BHA และ BHF สามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนกับโมเลกุลของแป้งได้แข็งแรงกว่า glycerol เมื่อได้รับแรงดึงสามารถขัดขวางการเคลื่อนที่ของสายโซ่โมเลกุลของแป้งได้ดีกว่า เมื่อมีการเติม BHB ลงไปเพื่อใช้เป็นพลาสติไซเซอร์ผสมพบว่าค่า tensile modulus และ tensile strength มีค่าสูงขึ้น สำหรับชิ้นงานที่ใช้อนุพันธ์ของเอไมด์เป็นพลาสติไซเซอร์มีค่าการดูดซับความชื้นต่ำกว่ากรณีที่ใช้ glycerol เป็นพลาสติไซเซอร์ สำหรับชิ้นงานที่ผ่านการเคลือบผิวจะมีค่าการดูดซับความชื้นที่ต่ำกว่าชิ้นงานที่ไม่ผ่านการเคลือบผิว จากการทดสอบด้วยเทคนิค DMA พบว่าเมื่อใช้อนุพันธ์ของเอไมด์เป็นพลาสติไซเซอร์ทำให้อุณหภูมิ T_g ของแป้งสูงกว่ากรณีที่ใช้ glycerol เป็นพลาสติไซเซอร์

ภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร ปีการศึกษา 2555
ลายมือชื่อนักศึกษา.....
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ 1. ..... 2. .....

53402216 : MAJOR : POLYMER SCIENCE AND ENGINEERING
KEY WORD : THERMOPLASTIC STARCH/AMIDE DERIVATIVES/MOISTURE ADSORPTION
PHAIROT BAITAHE : IMPROVEMENT OF MECHANICAL PROPERTIES AND MOISTURE ADSORPTION OF THERMOPLASTIC STARCH USING AMIDE DERIVATIVES. THESIS ADVISORS : AMNARD SITTATTRAKUL, Ph.D., AND ASST. PROF. WANCHAI LERDWIJITJARUD, Ph.D. 98 pp.

The purpose of this research is to improve mechanical properties and moisture adsorption of thermoplastic starch (TPS) using amide derivatives as plasticizers and coating with ether derivatives. In this study researchers have synthesized N,N-bis(2-hydroxyethyl)formamide (BHF), N,N-bis(2-hydroxyethyl)acetamide (BHA) N,N-bis(2-hydroxyethyl)benzamide (BHB) as plasticizers and N,N-bis(2-(benzyloxy)ethyl)formamide (BBF), N,N-bis(2-(benzyloxy)ethyl)acetamide (BBA) and N,N-bis(2-(benzyloxy)ethyl) benzamide (BBB) as coating materials. The chemical structures of the synthesized plasticizers were confirmed by fourier-transform infrared spectrophotometer (FT-IR) and proton nuclear magnetic resonance spectroscopy (^{1}H-NMR). The SEM micrographs of the specimens indicated that the native starch granules were completely disrupted and a continuous phase was obtained in each specimen. The tensile modulus and tensile strength of the thermoplastic starch sample plasticized by BHF or BHA were higher than those of the thermoplastic starch sample that was plasticized by glycerol. This is probably BHF and BHA can formed stronger hydrogen bond with tapioca starch than glycerol. When BHB was used as a mixed plasticizer the tensile modulus and tensile strength of TPS samples were increased. The moisture adsorption of thermoplastic starch plasticized by amide derivatives were lower than that of thermoplastic starch plasticized by glycerol. The moisture adsorption of coated sample is less than that of un-coated sample. The glass transition temperature of thermoplastic starch plasticized by the amide derivatives are higher than that of the starch sample that is plasticized by glycerol.

Department of Materials Science and Engineering Graduate School, Silpakorn University Academic Year 2012
Student's signature .....
Thesis Advisors' signature 1. ..... 2. .....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นงานวิจัยที่เกี่ยวกับการสังเคราะห์พลาสติไซเซอร์และสารเคลือบผิวรวมทั้งทดสอบสมบัติด้านต่างๆ ซึ่งการที่งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ก็เนื่องมาจากผู้จัดทำได้รับความช่วยเหลือจากบุคคลหลายๆท่าน โดยเฉพาะอย่างยิ่ง อาจารย์ ดร.อำนาจ สิทธัตตระกูล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วันชัย เลิศวิจิตรจรัส อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วมที่กรุณาให้คำปรึกษา ให้ความรู้และให้ข้อชี้แนะช่วยเหลือในการทำงานวิจัยมาโดยตลอด จึงขอขอบพระคุณอาจารย์ทั้งสองท่านเป็นอย่างสูง ขอขอบคุณภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร ที่สนับสนุนงบประมาณวัสดุและอุปกรณ์ในการทำงานวิจัย และค่าใช้จ่ายในการนำเสนอผลงานในงาน PACCON 2012 ณ ประเทศไทย ขอขอบคุณศูนย์ความเป็นเลิศแห่งชาติด้านปิโตรเลียม ปิโตรเคมีและวัสดุขั้นสูง จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย สำหรับการสนับสนุนเงินทุนวิจัย วัสดุในการทำวิจัย ขอขอบคุณพี่พินิจ เจียรระลึก ที่ช่วยจัดหาเครื่องมือและสารเคมีในการทำงานวิจัย ขอขอบคุณพี่ๆทุกคนที่ทำงานในภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุที่ให้ความสะดวกในการทำงานวิจัย ขอขอบคุณพี่พงศ์พล เอกบุตร และ พี่ปิยะวิทย์ สดสุชาติ ที่ให้คำแนะนำและแนวทางการทำงานวิจัย ขอขอบคุณพี่ๆและเพื่อนๆ ในห้องพักวิจัยและในกลุ่มวิจัยที่คอยช่วยเหลือและเป็นกำลังใจ สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณ คุณพ่อและคุณแม่ที่คอยให้กำลังใจและดูแลข้าพเจ้ามาตลอดชีวิต และพี่น้องในครอบครัวที่คอยเป็นกำลังใจเสมอมา

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยศิลปากร

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ..... ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... จ

กิตติกรรมประกาศ ..... ฉ

สารบัญตาราง ..... ฎ

สารบัญภาพ ..... ฏ

บทที่

1 บทนำ 1

ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา 1

วัตถุประสงค์ของงานวิจัย 2

แนวคิดงานวิจัย 3

ขอบเขตของงานวิจัย 3

ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย 4

ผลที่คาดว่าจะได้รับ 4

2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 5

ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับแป้ง 5

องค์ประกอบทางเคมีของแป้ง 5

โครงสร้างเม็ดแป้ง 6

สมบัติของแป้ง 7

การดูดซึมน้ำ และการละลาย 7

การเกิดเจลาติไนเซชัน 8

การคืนตัวของแป้งสุก 9

ความหนืด 10

แป้งมันสำปะหลัง 11

ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับมันสำปะหลัง 11

กระบวนการแปรรูปมันสำปะหลัง 12

การใช้แป้งมันสำปะหลังในอุตสาหกรรมอื่นๆ 14

ผลิตภัณฑ์ใหม่จากแป้งมันสำปะหลัง 14

บทที่ หน้า

เทอร์โมพลาสติกที่เตรียมจากแป้ง 15

งานวิจัยที่ใช้พลาสติไซเซอร์ชนิดต่างๆในการเตรียม TPS..... 16

3 วิธีการดำเนินงานวิจัย 19

สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง 19

อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง 19

เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง 20

ดัชนีอักษรย่อ..... 21

ขั้นตอนในการดำเนินงานวิจัย 21

การสังเคราะห์พลาสติไซเซอร์..... 21

การสังเคราะห์ N,N-bis(2-hydroxyethyl)formamide (BHF)..... 21

การสังเคราะห์ N,N-bis(2-hydroxyethyl)acetamide (BHA) 22

การสังเคราะห์ N,N-bis(2-hydroxyethyl)benzamide (BHB) 22

การสังเคราะห์สารเคลือบผิว..... 23

การสังเคราะห์ N,N-bis(2-(benzyloxy)ethyl)formamide (BBF)..... 23

การสังเคราะห์ N,N-bis(2-(benzyloxy)ethyl)acetamide (BBA) 23

การสังเคราะห์ N,N-bis(2-(benzyloxy)ethyl)benzamide (BBB)..... 23

การผสมและการเตรียมชิ้นงาน TPS..... 24

การผสมแป้งมันสำปะหลังกับพลาสติไซเซอร์ 24

การผสมในเครื่อง Internal mixer..... 26

การขึ้นรูปชิ้นงาน TPS..... 26

การเคลือบผิวหน้าชิ้นงาน TPS..... 28

การศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยา..... 28

การศึกษาสมบัติ Impact test (Izod) ทำตามมาตรฐาน ASTM D256-04 . 28

การศึกษาสมบัติ Tensile testing ทำตามมาตรฐาน ASTM D638-03 29

การศึกษาปริมาณการดูดความชื้นของชิ้นงาน TPS..... 29

การวิเคราะห์หาปริมาณผลึกและรูปแบบของผลึกในชิ้นงาน TPS..... 30

การวิเคราะห์ค่าเฉลี่ยของผลการทดสอบด้วยสถิติ 32

4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง..... 33

บทที่ หน้า

การพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิค FT-IR และ ^{1}H-NMR 33
การสังเคราะห์พลาสติไซเซอร์ 33
การสังเคราะห์ N,N-bis(2-hydroxyethyl)formamide (BHF)..... 33
การสังเคราะห์ N,N-bis(2-hydroxyethyl)acetamide (BHA) 35
การสังเคราะห์ N,N-bis(2-hydroxyethyl)benzamide (BHB) 37
การสังเคราะห์สารเคลือบผิว 39
การสังเคราะห์ N,N-bis(2-(benzyloxy)ethyl)formamide (BBF)..... 39
การสังเคราะห์ N,N-bis(2-(benzyloxy)ethyl)acetamide (BBA) 42
การสังเคราะห์ N,N-bis(2-(benzyloxy)ethyl)benzamide (BBB)..... 44
การผสมแป้งมันสำปะหลังกับพลาสติไซเซอร์ที่สังเคราะห์ได้ 47
การศึกษาลักษณะการผสมแป้งมันสำปะหลังกับพลาสติไซเซอร์ 48
การขึ้นรูปชิ้นงาน TPS 51
การศึกษาลักษณะกราฟ FT-IR ของแป้งมันสำปะหลังและชิ้นงาน TPS..... 53
การศึกษาโครงสร้างสัณฐานวิทยาของชิ้นงาน TPS ด้วยเทคนิค SEM..... 55
การศึกษาสมบัติเชิงกลของชิ้นงาน TPS 60
การศึกษาสมบัติความต้านทานต่อแรงดึงยืด (tensile properties) ของชิ้นงาน TPS ก่อนการดูดซับความชื้น 60
การศึกษาสมบัติความต้านทานต่อแรงดึงยืด (tensile properties) ของชิ้นงาน TPS เมื่อเก็บในสภาวะความชื้นสัมพัทธ์ 53% เป็นเวลา 15 วัน 61
การศึกษาสมบัติความต้านทานต่อแรงกระแทก (impact properties) ของชิ้นงาน TPS ก่อนการดูดซับความชื้น 65
การศึกษาสมบัติความต้านทานต่อแรงกระแทก (impact properties) ของชิ้นงาน TPS เมื่อเก็บในสภาวะความชื้นสัมพัทธ์ 53% เป็นเวลา 15 วัน 65
การศึกษาการเคลือบผิวหน้าชิ้นงาน TPS 67
การศึกษาสมบัติการดูดซับความชื้นของชิ้นงาน TPS 70
สมบัติการดูดซับความชื้นของชิ้นงาน TPS เมื่อใช้พลาสติไซเซอร์เดี่ยว.. 70

บทที่ หน้า

สมบัติการดูดซับความชื้นของชิ้นงาน TPS เมื่อใช้พลาสติไซเซอร์ผสม.. 72

สมบัติการดูดซับความชื้นของชิ้นงาน TPS เมื่อมีการเคลือบผิว 74

การศึกษาปริมาณผลึกและรูปแบบผลึกของชิ้นงาน TPS 75

การศึกษาปริมาณผลึกของชิ้นงาน TPS ที่ระยะเวลาต่างๆ

ในสภาวะความชื้นสัมพัทธ์ 53% 75

การศึกษารูปแบบผลึกของชิ้นงาน TPS ที่ระยะเวลาต่างๆ

ในสภาวะความชื้นสัมพัทธ์ 53% 77

การศึกษาอุณหภูมิ glass transition (T_g) ของชิ้นงาน TPS ด้วยเทคนิค DMA 83

การศึกษาเสถียรภาพทางความร้อนของชิ้นงานโดยใช้เทคนิค TGA 87

5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ 91

สรุปผลการทดลอง 91

ข้อเสนอแนะ 93

บรรณานุกรม 94

ประวัติผู้วิจัย 98

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	แสดงปริมาณของแป้งมันสำปะหลังกับพลาสติไซเซอร์ที่ใช้ในการผสม	25
2	แสดงค่า torque คงที่และค่าพลังงานในการผสมของแต่ละสูตร	50
3	ค่าเฉลี่ยสมบัติเชิงกลของชิ้นงาน TPS ก่อนและหลังการดูดซับความชื้น	64
4	ค่า Impact strength ของชิ้นงาน TPS การและหลังการดูดซับความชื้น	67
5	ผลต่างของน้ำหนักชิ้นงาน TPS ก่อนและหลังการเคลือบผิว	68
6	แสดงปริมาณผลึกของชิ้นงาน TPS ที่ระยะเวลาต่างๆ ในสภาวะความชื้นสัมพัทธ์ 53 %	76
7	ค่าต่างๆที่ได้จากการทดสอบด้วยเทคนิค DMA	86
8	ค่าอุณหภูมิการสลายตัวและอุณหภูมิการสลายตัวที่ 60 % weight loss ของชิ้นงาน TPS	90

สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญภาพ

ภาพที่ หน้า

1	โครงสร้างทางเคมีของอะไมโลส	6
2	โครงสร้างทางเคมีของอะไมโลเพกติน	6
3	โครงสร้างผลึกแบบ A และ B	7
4	แสดงระดับโครงสร้างภายในเม็ดแป้ง	7
5	ภาพจำลองการบวมตัวและการละลายของเม็ดแป้งเมื่อได้รับความร้อน	8
6	การคืนตัวของแป้งสุก	10
7	การเปลี่ยนแปลงความหนืดของแป้งเมื่อให้ความร้อน	11
8	ต้นและรากมันสำปะหลัง	12
9	การอบแป้งมันสำปะหลังในตู้อบสุญญากาศ	24
10	การเก็บแป้งมันสำปะหลังที่ผสมกับพลาสติไซเซอร์แล้วไว้ในเดซิเคเตอร์	25
11	เครื่อง Internal mixer	26
12	TPS ที่ได้จากเครื่อง Internal mixer จะถูกนำมาบดให้เป็นผง	27
13	ลักษณะของ TPS ที่ผ่านการบดด้วยเครื่องบด	27
14	ลักษณะการเท TPS ที่ผ่านการบดแล้วใส่ในแม่พิมพ์	27
15	การขึ้นรูปชิ้นงานด้วยเครื่อง Compression	28
16	การเขียนรายละเอียดของชิ้นงานก่อนเก็บไว้ใน chamber	30
17	ชิ้นงานจะถูกเก็บไว้ใน chamber ที่ควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ 53%	30
18	กระจกสไลด์สำหรับใช้ทดสอบชิ้นงานที่มีลักษณะเป็นผง	31
19	การเตรียมชิ้นงาน TPS สำหรับทดสอบด้วยเครื่อง XRD	31
20	ปฏิกิริยาในการสังเคราะห์ N,N-bis(2-hydroxyethyl)formamide	34
21	FT-IR spectrum ของ N,N-bis(2-hydroxyethyl)formamide	34
22	^{1}H-NMR spectrum ของ N,N-bis(2-hydroxyethyl)formamide ใน D_2O	35
23	ปฏิกิริยาในการสังเคราะห์ N,N-bis(2-hydroxyethyl)acetamide	36
24	FT-IR spectrum ของ N,N-bis(2-hydroxyethyl)acetamide	36
25	^{1}H-NMR spectrum ของ N,N-bis(2-hydroxyethyl)acetamide ใน D_2O	37
26	ปฏิกิริยาในการสังเคราะห์ N,N-bis(2-hydroxyethyl)benzamide	38

ภาพที่ หน้า

27 FT-IR spectrum ของ N,N-bis(2-hydroxyethyl)benzamide 38

28 ^{1}H-NMR spectrum ของ N,N-bis(2-hydroxyethyl)benzamide ใน $CDCl_3$ 39

39 ปฏิกิริยาในการสังเคราะห์ N,N-bis(2-(benzyloxy)ethyl)formamide 40

30 FT-IR spectrum ของ N,N-bis(2-(benzyloxy)ethyl)formamide 41

31 ^{1}H-NMR spectrum ของ N,N-bis(2-(benzyloxy)ethyl)formamide ใน $CDCl_3$ 41

32 ปฏิกิริยาในการสังเคราะห์ N,N-bis(2-(benzyloxy)ethyl)acetamide 43

33 FT-IR spectrum ของ N,N-bis(2-(benzyloxy)ethyl)acetamide 43

34 ^{1}H-NMR spectrum ของ N,N-bis(2-(benzyloxy)ethyl)acetamide ใน $CDCl_3$ 44

35 ปฏิกิริยาในการสังเคราะห์ N,N-bis(2-(benzyloxy)ethyl)benzamide 45

36 FT-IR spectrum ของ N,N-bis(2-(benzyloxy)ethyl)benzamide 46

37 ^{1}H-NMR spectrum ของ N,N-bis(2-(benzyloxy)ethyl)benzamide ใน $CDCl_3$ 46

38 ลักษณะของ TPS ที่ออกจากเครื่อง Internal mixer 47

39 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Torque และเวลาของ TPS
เมื่อใช้พลาสติไซเซอร์ 25 % โดยน้ำหนัก 48

40 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Torque และเวลาของ TPS
เมื่อใช้พลาสติไซเซอร์ 30 % โดยน้ำหนัก 49

41 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Torque และเวลาของ TPS
เมื่อใช้พลาสติไซเซอร์ 35 % โดยน้ำหนัก 49

42 ลักษณะชิ้นงาน Impact ของ TPS สูตรต่างๆ 52

43 ลักษณะชิ้นงาน Tensile ของ TPS สูตรต่างๆ 52

44 กราฟ FT-IR ของแป้งมันสำปะหลัง และชิ้นงาน TPS เมื่อใช้ BHA
เป็นพลาสติไซเซอร์ ในปริมาณ 25, 30 และ 35 % โดยน้ำหนัก 54

45 กราฟ FT-IR ของแป้งมันสำปะหลัง และชิ้นงาน TPS เมื่อเติมพลาสติไซเซอร์
ในปริมาณ 30 % โดยน้ำหนัก 54

46 ภาพถ่ายจากเทคนิค SEM ของเม็ดแป้งมันสำปะหลังและชิ้นงาน TPS
เมื่อใช้ glycerol เป็นพลาสติไซเซอร์ที่กำลังขยาย 1000 เท่า 55

47 ภาพถ่ายจากเทคนิค SEM ของชิ้นงาน TPS เมื่อใช้ glycerol
เป็นพลาสติไซเซอร์ที่กำลังขยาย 1000 เท่า 56

ภาพที่ หน้า

48 ภาพถ่ายจากเทคนิค SEM ของชิ้นงาน TPS เมื่อใช้ BHF
เป็นพลาสติไซเซอร์ที่กำลังขยาย 1000 เท่า 57
49 ภาพถ่ายจากเทคนิค SEM ของชิ้นงาน TPS เมื่อใช้ BHA
เป็นพลาสติไซเซอร์ที่กำลังขยาย 1000 เท่า 58
50 ภาพถ่ายจากเทคนิค SEM ของชิ้นงาน TPS เมื่อใช้พลาสติไซเซอร์ผสม
ที่กำลังขยาย 1000 เท่า..... 59
51 ค่า tensile modulus ของชิ้นงาน TPS ก่อนและหลังการดูดซับความชื้น 62
52 ค่า tensile strength ของชิ้นงาน TPS ก่อนและหลังการดูดซับความชื้น 62
53 ค่า strain at break (%) ของชิ้นงาน TPS ก่อนและหลังการดูดซับความชื้น 63
54 ค่า Impact strength ของชิ้นงาน TPS ก่อนและหลังการดูดซับความชื้น 66
55 ลักษณะของชิ้นงานสูตร BHA-TPS-30 เมื่อมีการเคลือบผิว
ด้วยสารเคลือบผิวชนิดต่างๆ..... 68
56 แสดงลักษณะการเกิด H-bonding ระหว่างโมเลกุลของแป้งกับ BBF 69
57 แสดงลักษณะการเกิด H-bonding ระหว่างโมเลกุลของแป้งกับ BBA 69
58 แสดงลักษณะการเกิด H-bonding ระหว่างโมเลกุลของแป้งกับ BBB..... 70
59 การดูดซับความชื้นของชิ้นงาน TPS กรณีที่ใช้พลาสติไซเซอร์เดี่ยว
เมื่อเก็บในสภาวะความชื้นสัมพัทธ์ 53% เป็นเวลา 15 วัน 71
60 การดูดซับความชื้นของชิ้นงาน TPS กรณีที่ใช้พลาสติไซเซอร์ผสม
เมื่อเก็บในสภาวะความชื้นสัมพัทธ์ 53% เป็นเวลา 15 วัน 73
61 การดูดซับความชื้นของชิ้นงาน TPS เมื่อเก็บในสภาวะความชื้นสัมพัทธ์ 53%
เป็นเวลา 7 และ15 วัน 73
62 การดูดซับความชื้นของชิ้นงาน TPS กรณีที่มีการเคลือบผิวด้วยสารเคลือบผิว
เมื่อเก็บในสภาวะความชื้นสัมพัทธ์ 53% เป็นเวลา 15 วัน 75
63 XRD diffractogram ของ native starch ที่ระยะเวลา 0 วัน..... 77
64 XRD diffractograms ของชิ้นงานสูตร G-TPS-30
เมื่อเก็บในสภาวะความชื้นสัมพัทธ์ 53 % ในระยะเวลาที่แตกต่างกัน..... 78
65 XRD diffractograms ของชิ้นงานสูตร BHF-TPS-30
เมื่อเก็บในสภาวะความชื้นสัมพัทธ์ 53 % ในระยะเวลาที่แตกต่างกัน..... 79

ภาพที่ หน้า

66 XRD diffractograms ของชิ้นงานสูตร BHA-TPS-30
เมื่อเก็บในสภาวะความชื้นสัมพัทธ์ 53 % ในระยะเวลาที่แตกต่างกัน..... 80
67 XRD diffractograms ของชิ้นงานสูตร BHA-TPS-30-BBF
เมื่อเก็บในสภาวะความชื้นสัมพัทธ์ 53 % ในระยะเวลาที่แตกต่างกัน..... 81
68 XRD diffractograms ของชิ้นงานสูตร BHA-TPS-30-BBA
เมื่อเก็บในสภาวะความชื้นสัมพัทธ์ 53 % ในระยะเวลาที่แตกต่างกัน..... 82
69 XRD diffractograms ของชิ้นงานสูตร BHA-TPS-30-BBB
เมื่อเก็บในสภาวะความชื้นสัมพัทธ์ 53 % ในระยะเวลาที่แตกต่างกัน..... 82
70 ผลการทดสอบด้วยเทคนิค DMA ของชิ้นงาน TPS เมื่อใช้ BHA
เป็นพลาสติไซเซอร์ 84
71 ผลการทดสอบด้วยเทคนิค DMA ของชิ้นงาน TPS เมื่อใช้กลีเซอรอล
และอนุพันธ์ของเอไมด์ เป็นพลาสติไซเซอร์ 85
72 TGA thermogram ของแป้งและชิ้นงาน TPS ที่มีการเติมพลาสติไซเซอร์ลงไป
25 % โดยน้ำหนัก 88
73 TGA thermogram ของแป้งและชิ้นงาน TPS ที่มีการเติมพลาสติไซเซอร์ลงไป
30 % โดยน้ำหนัก 88
74 TGA thermogram ของแป้งและชิ้นงาน TPS ที่มีการเติมพลาสติไซเซอร์ลงไป
35 % โดยน้ำหนัก 89

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

เนื่องจากในปัจจุบันจำนวนประชากรของโลกมีปริมาณเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จึงมีความต้องการในการใช้บรรจุภัณฑ์ต่างๆมากขึ้นเช่น ถุงใส่ของ ฟิล์ม ถาด ถ้วยและชามบรรจุอาหาร ซึ่งบรรจุภัณฑ์เหล่านี้โดยส่วนมากผลิตมาจากปิโตรเลียม (petroleum-based packaging) ซึ่งเป็นทรัพยากรที่ใช้แล้วหมดสิ้นไปไม่สามารถเกิดขึ้นใหม่ในระยะเวลาอันสั้น และก่อให้เกิดปัญหาต่างๆต่อสิ่งแวดล้อมเป็นอย่างมาก

จากปัญหาต่างๆเหล่านี้ทำให้ในระยะหลังผลิตภัณฑ์พลาสติกที่มาจากธรรมชาติ (bio-based plastics) ได้รับความนิยมมากขึ้นเนื่องจากสามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ (biodegradable) โดยเฉพาะพอลิเมอร์ที่มีแป้งเป็นองค์ประกอบหลักหรือเทอร์โมพลาสติกที่เตรียมขึ้นจากแป้ง (thermoplastic starch) นั้นได้รับความนิยมนำมาใช้งานมากขึ้นเรื่อยๆ เพราะว่าเป็นวัตถุดิบที่มีราคาถูกและสามารถเกิดได้ใหม่ตามธรรมชาติในระยะเวลาอันสั้นและสามารถขึ้นรูปเป็นบรรจุภัณฑ์ต่างๆ เช่น ถุงใส่ของ ฟิล์ม ถาด ถ้วยและชามบรรจุอาหาร

แป้งเป็นคาร์โบไฮเดรตที่สะสมอยู่ในพืชชั้นสูง พบในคลอโรพลาสต์ และแหล่งเก็บอาหารของพืช เช่น เมล็ด หัว และราก โมเลกุลของแป้งประกอบด้วยธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจน และออกซิเจน โดยมีสูตรเคมีทั่วไปคือ $(C_6H_{10}O_5)_n$ องค์ประกอบที่สำคัญของแป้งสามารถจำแนกเป็นพอลิแซคคาไรด์ได้ 2 ชนิดได้แก่ อะไมโลส (amylose) ซึ่งมีโครงสร้างเป็นสายโซ่ตรง ประกอบขึ้นด้วยหน่วยย่อยกลูโคสที่เชื่อมเข้าด้วยกันด้วยการเชื่อมแบบอัลฟา 1,4-ไกลโคซิดิก (α-1,4-glycosidic linkage) ซึ่งวงแหวนเชื่อมต่อกันที่ตำแหน่งคาร์บอน 1 และ 4 ส่วนอะไมโลเพคติน (amylopectin) ซึ่งมีโครงสร้างเป็นสายโซ่กิ่งที่ประกอบขึ้นด้วยหน่วยย่อยกลูโคสที่เชื่อมเข้าด้วยกันด้วยการเชื่อมแบบอัลฟา 1,4-ไกลโคซิดิก ซึ่งวงแหวนเชื่อมต่อกันที่ตำแหน่งคาร์บอน 1 และ 4 และ ตำแหน่งคาร์บอน 1 และ 6 โดยความยาวของสายโซ่พอลิเมอร์ขึ้นอยู่กับชนิดของพืช [1]

เมื่อพิจารณาโครงสร้างโมเลกุลของแป้งแล้ว แป้งน่าจะมีสมบัติเป็นพอลิเมอร์แบบเทอร์โมพลาสติก (thermoplastic polymer) แต่เนื่องด้วยใน อะไมโลส (amylose) และอะไมโลเพคติน (amylopectin) แต่ละหน่วยของวงแหวน anhydroglucose ประกอบด้วยหมู่ hydroxyl (-OH) ถึงสามหมู่ โดยหมู่ hydroxyl ดังกล่าวสามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนกับหมู่ข้างเคียงได้ ทำให้แรงยึด

เหนี่ยวระหว่างสายโซ่โมเลกุลมีค่าสูง ส่งผลให้พลังงานที่ใช้ทำลายแรงยึดเหนี่ยวระหว่างสายโซ่โมเลกุลมีค่าสูงกว่าพลังงานที่ใช้ทำลายแรงยึดเหนี่ยวในสายโซ่หลัก เมื่อให้ความร้อนกับแป้งเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ แทนที่จะทำให้โมเลกุลของแป้งเคลื่อนที่ผ่านกันได้ แต่กลับทำให้โมเลกุลของแป้งเกิดการสลายตัว (degradation) ซึ่งทำให้แป้งมีสมบัติแบบเทอร์โมเซ็ต (thermoset polymer) [2]

การแก้ปัญหาในการขึ้นรูปแป้งจะใช้วิธีการเติมพลาสติไซเซอร์ลงไปซึ่งพลาสติไซเซอร์ที่ใส่ลงไปจะไปลดแรงยึดเหนียวระหว่างสายโซ่โมเลกุลของแป้งจึงทำให้แป้งสามารถหลอมขึ้นรูปได้โดยพลาสติไซเซอร์ที่นิยมใช้กันคือ glycerol [3] เนื่องจากมีราคาไม่สูงมากนักแต่การใช้ glycerol เป็นพลาสติไซเซอร์จะมีข้อด้อยคือมีความว่องไวต่อความชื้น เมื่อนำชิ้นงาน TPS ที่ใช้ glycerol เป็นพลาสติไซเซอร์มาเก็บไว้ในสภาวะที่มีความชื้นสัมพัทธ์สูงเป็นเวลานาน (50 % RH, 37 °C) [4] โมเลกุลของแป้งสามารถเคลื่อนที่มาสร้างพันธะไฮโดรเจนกันได้อีกแล้วเกิดเป็นผลึก (retrogradation) [5] จึงทำให้ชิ้นงานมีความเปราะมากขึ้น เนื่องจากความแข็งแรงของพันธะไฮโดรเจนที่เกิดระหว่าง glycerol กับโมเลกุลของแป้งนั้นไม่สูงมากนัก นอกจากนี้ยังมีการใช้พลาสติไซเซอร์ชนิดอื่นด้วย เช่น ethylenebisformamide, ethanolamine, urea และ N,N,N',N'-Tetrakis(2-hydroxyethyl)ethylenediamine [6, 7, 8, 9]

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นการปรับปรุงสมบัติในการดูดซับความชื้นของ thermoplastic starch โดยการใช้พลาสติไซเซอร์และสารเคลือบผิวและในงานวิจัยได้ทำการศึกษาสมบัติด้านต่างๆเช่น สมบัติเชิงกล สมบัติการดูดซับความชื้น สมบัติด้านความร้อน

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 เพื่อทำการสังเคราะห์พลาสติไซเซอร์และสารเคลือบผิวสำหรับ thermoplastic starch

1.2.2 เพื่อศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาของ thermoplastic starch โดยใช้เทคนิค SEM

1.2.3 เพื่อศึกษาสมบัติเชิงกลของ thermoplastic starch

1.2.4 เพื่อศึกษาพฤติกรรมการดูดซับความชื้นของ thermoplastic starch เมื่อใช้พลาสติไซเซอร์และสารเคลือบผิวต่างชนิดกันที่สภาวะความชื้นสัมพัทธ์ 53% เป็นระยะเวลา 15 วัน

1.2.5 เพื่อศึกษาปริมาณผลึกและรูปแบบผลึกของ thermoplastic starch

1.3 แนวคิดงานวิจัย

ในงานวิจัยนี้ต้องการที่จะพัฒนาสมบัติการดูดซับความชื้นของ thermoplastic starch เนื่องจากโครงสร้าง anhydroglucose unit ซึ่งเป็นหน่วยซ้ำของโมเลกุลของแป้งประกอบด้วยหมู่ hydroxyl ถึง 3 หมู่ซึ่งสามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนกับโมเลกุลของน้ำได้จึงทำให้ต้านทานต่อความชื้นได้ไม่ดีและสมบัติเชิงกลของ thermoplastic starch ก็ต่ำลงด้วย โดยในงานวิจัยจะใช้ N,N-bis(2-hydroxyethyl)formamide (BHF), N,N-bis(2-hydroxyethyl)acetamide (BHA) และ N,N-bis(2-hydroxyethyl)benzamide (BHB) เป็นพลาสติไซเซอร์ซึ่งเป็นอนุพันธ์ของเอไมด์ โดยพลาสติไซเซอร์ที่ใส่ลงไปจะไปเกิดพันธะไฮโดรเจนที่แข็งแรงกับโมเลกุลของแป้งซึ่งจะไปต้านทานโมเลกุลของน้ำที่จะมาสร้างพันธะไฮโดรเจนกับหมู่ hydroxyl ของแป้ง และในงานวิจัยจะทำการเคลือบผิวชิ้นงาน TPS ด้วยวิธีการจุ่ม (solution dipping) โดยใช้อนุพันธ์ของเอไมด์ที่มีการแทนที่ตำแหน่งไฮโดรเจนของหมู่ไฮดรอกซิลที่ปลายสายโซ่ด้วยหมู่ benzyl ซึ่งหมู่ benzyl เป็นหมู่ที่ไม่ชอบน้ำ (hydrophobic) จึงสามารถช่วยป้องกันการดูดซับความชื้นของ thermoplastic starch ได้

1.4 ขอบเขตของงานวิจัย

1.4.1 งานวิจัยนี้จะทำการสังเคราะห์และพิสูจน์เอกลักษณ์พลาสติไซเซอร์และสารเคลือบผิวสำหรับ thermoplastic starch ดังนี้

1.4.1.1 พลาสติไซเซอร์ 3 ชนิดคือ N,N-bis(2-hydroxyethyl)formamide, N,N-bis(2-hydroxyethyl)acetamide และ N,N-bis(2-hydroxyethyl)benzamide

1.4.1.2 สารเคลือบผิว 3 ตัวคือ N,N-bis(2-(benzyloxy)ethyl)formamide, N,N-bis(2-(benzyloxy)ethyl)acetamide และ N,N-bis(2-(benzyloxy)ethyl)benzamide

1.4.2 นำ glycerol, N,N-bis(2-hydroxyethyl)formamide, N,N-bis(2-hydroxyethyl) acetamide และ N,N-bis(2-hydroxyethyl)benzamide ผสมกับแป้งมันสำปะหลังในอัตราส่วน 25, 30 และ 35 % โดยน้ำหนัก แล้วขึ้นรูปโดยเทคนิค compression molding

1.4.3 ศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาของ thermoplastic starch โดยใช้เทคนิค SEM

1.4.4 ศึกษาสมบัติเชิงกลของ thermoplastic starch โดยทำการขึ้นรูปชิ้นงาน micro tensile ตามมาตรฐาน ASTM D 638-03 และชิ้นงาน impact testing ตามมาตรฐาน ASTM D 256 หลังจากนั้นจะวิเคราะห์ความแตกต่างของค่าเฉลี่ยโดยใช้โปรแกรมทางสถิติ (SPSS : one way ANOVA TEST) ที่ระดับความเชื่อมั่น 99 %

1.4.5 ศึกษาพฤติกรรมการดูดซับความชื้นของ thermoplastic starch เมื่อใช้พลาสติไซเซอร์และสารเคลือบผิวต่างชนิดกันที่สภาวะความชื้นสัมพัทธ์ 53% เป็นระยะเวลา 15 วัน

1.4.6 ศึกษาพฤติกรรมการเกิด retrogradation ของ thermoplastic starch โดยใช้เทคนิค XRD ในช่วงมุม 2θ = 10-30° ซึ่งชิ้นงานที่ถูกทดสอบจะถูกเก็บไว้ในสภาวะความชื้นสัมพัทธ์ 53% ในระยะเวลาที่แตกต่างกัน

1.5 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

1.5.1 ศึกษาและเก็บรวบรวมข้อมูลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1.5.2 ออกแบบวิธีการทดลอง และวางแผนการทดลอง

1.5.3 จัดหาอุปกรณ์และสารเคมี

1.5.4 ดำเนินงานวิจัย

1.5.4.1 สังเคราะห์พลาสติไซเซอร์และสารเคลือบผิว

1.5.4.2 ผสมพลาสติไซเซอร์กับแป้งมันสำปะหลัง

1.5.4.3 ขึ้นรูปชิ้นงานสำหรับทดสอบสมบัติเชิงกล

1.5.4.4 ศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยา

1.5.4.5 ทดสอบสมบัติเชิงกล

1.5.4.6 ทดสอบการดูดซับความชื้นของชิ้นงานเมื่อใช้พลาสติไซเซอร์และสารเคลือบผิวต่างชนิดกัน

1.5.4.7 การศึกษาปริมาณผลึกและรูปแบบผลึก

1.5.4.8 การศึกษาอุณหภูมิ glass transition (T_g)

1.5.4.9 การศึกษาเสถียรภาพทางความร้อน

1.5.5 วิเคราะห์ผลงานวิจัยที่ได้

1.5.6 สรุปผลงานวิจัย

1.5.7 รายงานผลงานวิจัย

1.6 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

1.6.1 สามารถสังเคราะห์พลาสติไซเซอร์และสารเคลือบผิวได้

1.6.2 สามารถขึ้นรูปชิ้นงานเมื่อใช้พลาสติไซเซอร์ชนิดต่างๆได้

1.6.3 สามารถปรับปรุงสมบัติเชิงกลและการดูดซับความชื้นของ thermoplastic starch โดยใช้พลาสติไซเซอร์และสารเคลือบผิว

สำนักหอสมุดกลาง มหาวิทยาลัย สงขลานครินทร์

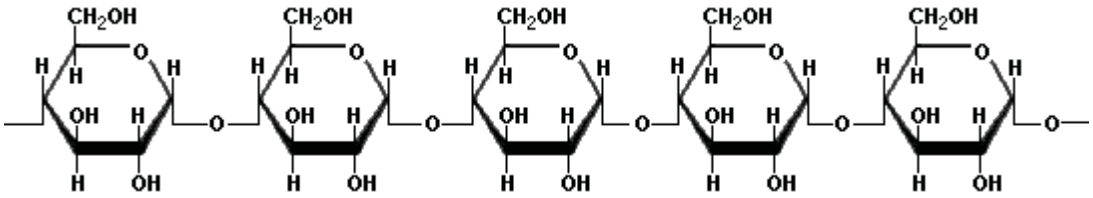
บทที่ 2
เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับแป้ง

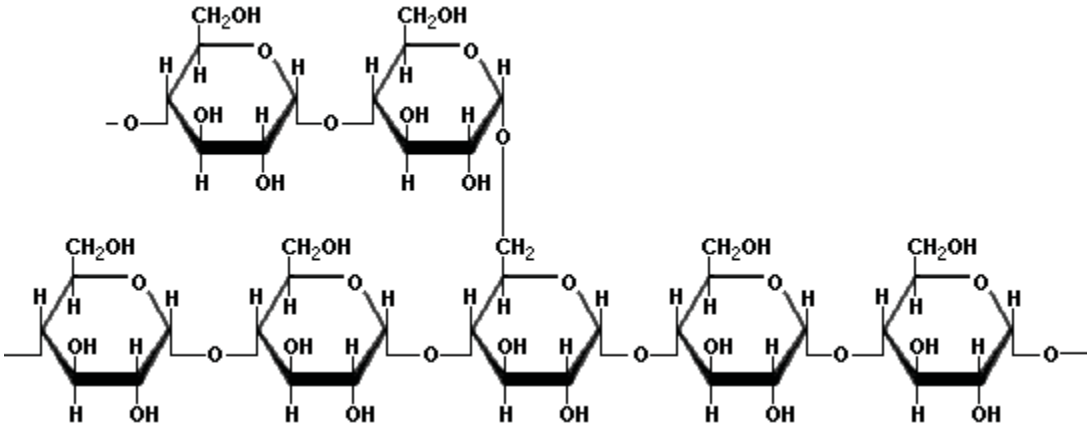
แป้งเป็นคาร์โบไฮเดรตที่สะสมอยู่ในพืชชั้นสูง พบในคลอโรพลาสต์ และแหล่งเก็บอาหารของพืช เช่น เมล็ด หัว และราก แป้งที่ผลิตในแต่ละภูมิภาคของโลกอาจใช้วัตถุดิบที่แตกต่างกันทวีปอเมริกาเหนือส่วนใหญ่ใช้ข้าวโพด และข้าวสาลี ทวีปยุโรปนิยมใช้มันฝรั่ง ส่วนทวีปเอเชีย และแอฟริกาจะใช้ข้าวและมันสำปะหลังเป็นวัตถุดิบหลัก ซึ่งแป้งที่ผลิตจำหน่ายทั่วไปมีสองประเภท ได้แก่ แป้งที่มีองค์ประกอบอื่นเจือปน เช่น โปรตีน ไขมัน เกลือแร่อยู่ค่อนข้างมาก จะเรียกว่า ฟลาวร์ (flour) ส่วนแป้งที่มีการสกัดสิ่งเจือปนออกไปจนเหลือแป้งบริสุทธิ์เป็นส่วนใหญ่นั้นเรียกว่า สตาร์ช (starch) และเนื่องจากแป้งสตาร์ชมีความบริสุทธิ์สูง แป้งสตาร์ชที่ยังไม่ได้ทำการดัดแปรหรือแปรรูปนิยมเรียกว่า แป้งดิบ (raw starch หรือ native starch) ซึ่งจะตรงข้ามกับแป้งที่ถูกดัดแปรหรือแปรรูปแล้วจะเรียกว่า โมดิไฟด์สตาร์ช (modified starch) [1]

2.2 องค์ประกอบทางเคมีของแป้ง (Chemical composition of starch)

โมเลกุลของแป้งประกอบด้วยธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจน และออกซิเจน โดยมีสูตรเคมีทั่วไปคือ $(C_6H_{10}O_5)_n$ องค์ประกอบที่สำคัญของแป้งสามารถจำแนกเป็นพอลิแซคคาไรด์ได้ 2 ชนิด ได้แก่ อะไมโลส (amylose) ซึ่งมีโครงสร้างเป็นสายโซ่ตรง ประกอบขึ้นด้วยหน่วยย่อยกลูโคสที่เชื่อมกันด้วยการเชื่อมแบบอัลฟา 1,4-ไกลโคซิดิก (α-1,4-glycosidic linkage) โดยวงแหวนจะเชื่อมต่อกันที่ตำแหน่งคาร์บอน 1 และ 4 ส่วนอะไมโลเพคติน (amylopectin) ซึ่งมีโครงสร้างเป็นสายโซ่กิ่งที่ประกอบขึ้นด้วยหน่วยย่อยกลูโคสที่เชื่อมกันด้วยการเชื่อมแบบอัลฟา 1,4-ไกลโคซิดิก โดยวงแหวนเชื่อมต่อกันที่ตำแหน่งคาร์บอน 1 และ 4 และ ที่ตำแหน่งคาร์บอน 1 และ 6 โดยความยาวของสายโซ่พอลิเมอร์ขึ้นอยู่กับชนิดของพืช ซึ่งโดยทั่วไปอะไมโลสจะประกอบด้วยจำนวนวงแหวนเฉลี่ยระหว่าง 500 และ 2,000 หน่วยย่อยกลูโคสและมีน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ย 150,000-600,000 ส่วนอะไมโลเพคตินมีน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ย 1,000,000-6,000,000 [1] แป้งแต่ละชนิดมีสัดส่วนปริมาณของอะไมโลสกับอะไมโลเพคตินที่แตกต่างกันไป แต่โดยทั่วไปแล้วแป้งจะมีอัตราส่วนอะไมโลส 10-20% และอะไมโลเพคติน 80-90% [2]



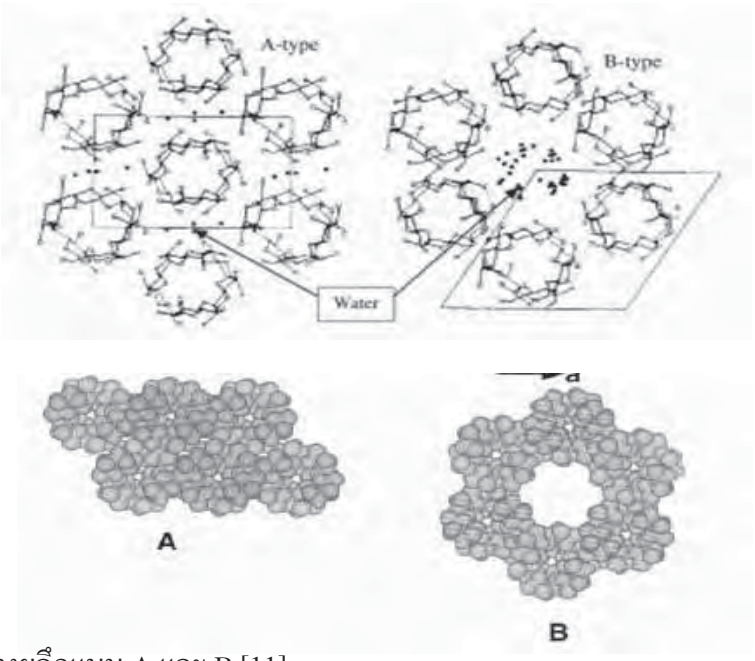
ภาพที่ 1 โครงสร้างทางเคมีของอะไมโลส [10]



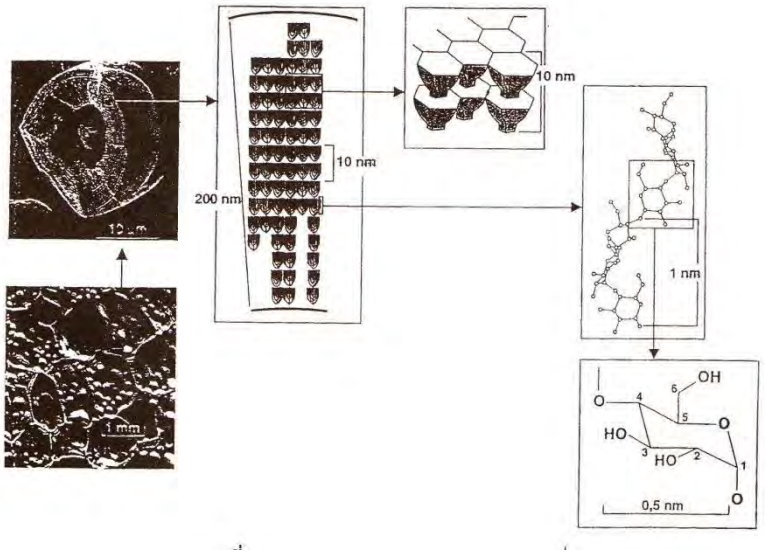
ภาพที่ 2 โครงสร้างทางเคมีของอะไมโลเพกติน [10]

2.3 โครงสร้างเม็ดแป้ง (Granule organization)

เม็ดแป้งมีลักษณะโครงสร้างผลึก 3 แบบขึ้นอยู่กับลักษณะในการจัดเรียงตัวของเกลียวคู่ ถ้ามีการเรียงตัวหนาแน่นมากและมีปริมาณน้ำต่ำจะจัดเป็นผลึกแบบ A (แป้งจากธัญพืชต่างๆ) ถ้ามีการเรียงตัวกันหลวมๆ และมีปริมาณน้ำสูงจะจัดเป็นผลึกแบบ B (แป้งจากพืชหัว) ถ้ามีการเรียงตัวทั้งแบบ A และ B รวมกันจัดเป็นผลึกแบบ C (แป้งจากพืชตระกูลถั่ว) สารประกอบเชิงซ้อนของอะไมโลสกับโมเลกุลของสารอินทรีย์ที่มีขั้วมีรูปแบบผลึกเป็นแบบ V



ภาพที่ 3 โครงสร้างผลึกแบบ A และ B [11]



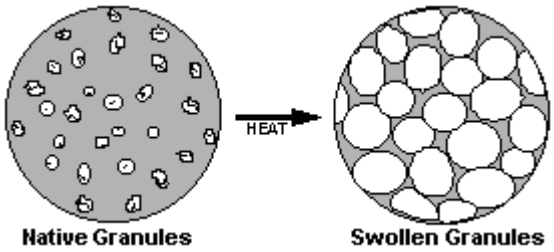
ภาพที่ 4 แสดงระดับโครงสร้างภายในเม็ดแป้ง [11]

2.4 สมบัติของแป้ง (Starch properties)

2.4.1 การดูดซึมน้ำ และการละลาย (Water absorption and dissolution)

แป้งมีโครงสร้างที่เป็นเม็ดซึ่งมีรูพรุน ประกอบกับโมเลกุลที่มีหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) จำนวนมาก ทำให้น้ำสามารถแพร่เข้าไปในเม็ดแป้งได้อย่างรวดเร็ว อย่างไรก็ตามที่อุณหภูมิต่ำโมเลกุลของแป้งจะไม่ละลายน้ำ เนื่องจากพันธะไฮโดรเจนระหว่างสายโซ่ของโมเลกุลแป้งนั้นยึดกัน

อย่างหนาแน่นมาก แต่เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นความสามารถในการละลายน้ำของแป้งนั้นเพิ่มมากขึ้น ทั้งนี้เพราะความร้อนช่วยลดแรงยึดเหนี่ยวของพันธะไฮโดรเจนลง โมเลกุลน้ำจะเข้ามาจับกับหมู่ไฮดรอกซิลที่เป็นอิสระ เม็ดแป้งจึงเกิดการบวมตัวและเกิดการละลาย (ดังแสดงในภาพที่ 5) ทำให้มีความใสเพิ่มขึ้นและการบิดระนาบแสงโพลาไรซ์ (birefringence) หมดไป ซึ่งปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซึมและการละลายน้ำ ได้แก่ ชนิดและโครงสร้างภายในเม็ดแป้ง สิ่งเจือปนภายในเม็ดแป้ง ความชื้นในอากาศ อุณหภูมิ และการดัดแปรทางเคมีของแป้ง [1]



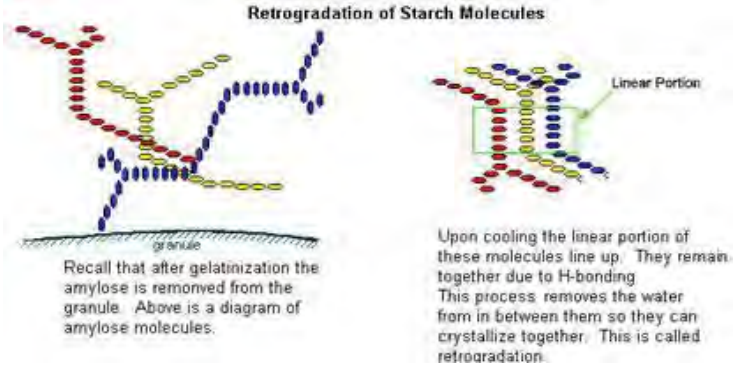
ภาพที่ 5 ภาพจำลองการบวมตัวและการละลายของเม็ดแป้งเมื่อได้รับความร้อน [11]

2.4.2 การเกิดเจลาติไนเซชัน (Gelatinization)

เมื่อนำแป้งใส่ในน้ำเย็น เม็ดแป้งดูดซับน้ำได้ในปริมาณจำกัดปริมาณหนึ่ง แต่จะยังไม่บวมตัวหรือบวมตัวได้จำกัดมากและสังเกตได้ยาก สังเกตการบวมตัวของเม็ดแป้งสาลีในน้ำที่อุณหภูมิห้องพบว่าแป้งที่บวมตัวมีเส้นผ่าศูนย์กลางเพิ่มขึ้น 10% และปรากฏการณ์นี้สามารถผันกลับได้ (reversible) โดยเมื่อนำไปอบแห้งก็จะได้แป้งที่มีลักษณะและคุณสมบัติดังเดิม ทั้งนี้เนื่องจากโมเลกุลอะไมโลสและอะไมโลเพคตินในส่วนที่เป็น crystallite จับตัวกันอย่างหนาแน่นแข็งแรงจึงไม่ละลายในน้ำเย็น แต่น้ำอาจจะซึมเข้าไปในส่วนของเม็ดแป้งซึ่งไม่เป็นระเบียบและมีกลุ่มไฮดรอกซีอิสระได้บ้าง แต่เมื่อให้ความร้อนจนถึงอุณหภูมิหนึ่งประมาณ 60-75°C เช่นให้ความร้อน 60°C แก่แป้งสาลีจะมีผลทำให้การจับยึดกันระหว่างโมเลกุลของแป้งในส่วน crystallite ลดลง เกิดปฏิกิริยาการรับน้ำและการบวมตัวของเม็ดแป้งซึ่งไม่สามารถผันกลับได้ (irreversible) และทำให้สารละลายแป้งมีความหนืดและความใสเพิ่มขึ้น กระบวนการนี้เรียกว่า “เจลาติไนเซชัน” [1]

2.4.3 การคืนตัวของแป้งสุก (Retrogradation)

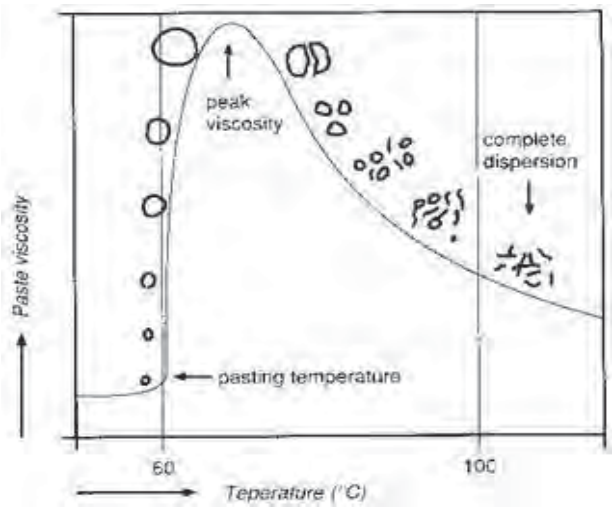
การคืนตัวของแป้งสุกเป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นเมื่อน้ำแป้งสุกซึ่งร้อนมีอุณหภูมิลดต่ำลง ขณะที่อุณหภูมิลดลง โมเลกุลอิสระของอะไมโลสซึ่งอยู่ใกล้กันจะเคลื่อนที่เข้ามาใกล้กันและจับตัวกันด้วยพันธะไฮโดรเจน ทำให้เกิดสภาพการจัดเรียงตัวของโมเลกุลขึ้นใหม่ โดยเปลี่ยนจากลักษณะการกระจายตัวของโมเลกุลมาเป็นส่วนที่เป็น crystallite ซึ่งสามารถตรวจสอบได้โดยใช้ X-ray diffraction ถ้าน้ำแป้งสุกมีความเข้มข้นต่ำ การจัดเรียงตัวของโมเลกุลเหล่านี้จะทำให้เกิดลักษณะตะกอนขุ่นขาว แต่ถ้าน้ำแป้งสุกมีความเข้มข้นสูง เช่น แป้งข้าวโพดความเข้มข้น 7% โดยน้ำหนัก จำนวนโมเลกุลที่มาจัดเรียงตัวกันใหม่มีมากและระหว่างเคลื่อนที่เข้ามาจับกันจะสามารถเก็บกักน้ำไว้ได้ ทำให้ความหนืดเพิ่มขึ้น และในที่สุดเกิดลักษณะเป็นเจลที่อ่อนนุ่ม การคืนตัวของน้ำแป้งโดยทั่วไปจะเกิดได้ดีเมื่อน้ำแป้งมีความเข้มข้นสูง และทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิต่ำ แป้งแต่ละชนิดมีอัตราการคืนตัวของน้ำแป้งสุกแตกต่างกัน โดยทั่วไปแป้งที่ได้จากรากหรือหัวจะมีอัตราการคืนตัวช้ากว่าแป้งจากธัญพืช ทั้งนี้เป็นเพราะแป้งจากราก หัว เมื่อได้รับความร้อนจะบวมตัวมากและเร็ว รวมทั้งเม็ดแป้งจะแตกง่ายทำให้โมเลกุลแป้งทั้งหมดกระจายอยู่ทั่วไปในน้ำแป้งยากที่โมเลกุลอะไมโลสจะมาจัดเรียงตัวกันได้ใหม่ แต่แป้งที่ได้จากธัญพืชเมื่อได้รับความร้อนจะบวมตัวน้อยกว่าและเม็ดแป้งแตกน้อย โมเลกุลที่คลายตัวยังอยู่ใกล้ชิดกันจึงเคลื่อนที่จับกันใหม่ได้ง่าย ซึ่งอาจจับตัวกันระหว่างเม็ดแป้งที่บวมตัวซึ่งอยู่ใกล้กัน หรือระหว่างชิ้นส่วนของเม็ดแป้งหรือโมเลกุลอะไมโลสอิสระที่หลุดออกมาทำให้เกิดสภาพเป็น matrix ซึ่งยึดกันอยู่ด้วยพันธะไฮโดรเจนและสามารถเก็บกักน้ำไว้ได้การมีอะไมโลเพคตินอยู่ด้วยทำให้อัตราการคืนตัวของน้ำแป้งสุกช้าลง เนื่องจากโมเลกุลของอะไมโลเพคตินมีกิ่งก้านสาขาทำให้เกะกะ ยากที่โมเลกุลจะเคลื่อนที่เข้ามาจับกันใหม่ได้ ขนาดโมเลกุลของอะไมโลสในแป้งแต่ละชนิดมีผลในการเกิดการคืนตัวของน้ำแป้งสุกด้วย โมเลกุลอะไมโลสที่มีขนาดพอเหมาะในการเคลื่อนที่มาจับกัน คือ ในช่วง 100-200 หน่วยกลูโคส ถ้าโมเลกุลใหญ่ เช่น แป้งมันฝรั่งมีอะไมโลสขนาดใหญ่ประมาณ 1,000-6,000 หน่วยกลูโคสจะเคลื่อนที่เข้ามาจับกันได้ยาก และถ้าโมเลกุลสั้นเกินไปจะเคลื่อนไหวอยู่ตลอดเวลา (Brownian movement) ก็ทำให้จับกันยากเช่นกัน [12]



ภาพที่ 6 การคืนตัวของแป้งสุก [12]

2.4.4 ความหนืด (Viscosity)

ความหนืดเป็นคุณสมบัติที่สำคัญและเป็นประโยชน์มากที่สุดของแป้ง เมื่อให้ความร้อนกับน้ำแป้งทำให้เม็ดแป้งเกิดการบวมตัวและมีความหนืดมากขึ้น (ภาพที่ 7) พฤติกรรมความหนืดเป็นสมบัติเฉพาะตัวและแตกต่างกันไปตามชนิดและสายพันธุ์ของแป้ง เมื่อเม็ดแป้งซึ่งแขวนลอยในน้ำได้รับความร้อนจนถึงระดับหนึ่งจะบวมตัวได้อย่างรวดเร็ว ทำให้ความหนืดเพิ่มขึ้นเร็วมาก อุณหภูมิที่ความหนืดของน้ำแป้งเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วนี้เรียกว่า pasting temperature ความหนืดจะเพิ่มขึ้นจนถึงความหนืดสูงสุด (peak viscosity) จากนั้นอาจลดลงหรือคงที่ขึ้นกับชนิดของแป้ง การที่แป้งมีความหนืดสูงสุดเนื่องจากเมื่อเม็ดแป้งมีการบวมตัวมากขึ้นและมีชิ้นส่วนของเม็ดแป้ง และหรือโมเลกุลของอะไมโลสและอะไมโลเพคตินบางส่วนที่แตกสลายออกมาอยู่ในสารละลาย เมื่อส่วนที่แตกสลายและละลายออกมามีมากกว่าการบวมตัวที่เพิ่มขึ้นความหนืดจะเริ่มลดลง ซึ่งจะเห็นได้ชัดเมื่ออยู่ในช่วงการหุงต้มที่ 95 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ดังนั้นค่าความหนืดของน้ำแป้งสุกจะเป็นผลมาจากการบวมตัวของเม็ดแป้ง และการแตกหักของเม็ดแป้งร่วมกับการละลายออกมาของโมเลกุลแป้ง



ภาพที่ 7 การเปลี่ยนแปลงความหนืดของแป้งเมื่อให้ความร้อน [12]

2.5 แป้งมันสำปะหลัง (Cassava starch)

2.5.1 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับมันสำปะหลัง

มันสำปะหลังจัดเป็นพืชหัวชนิดหนึ่งมีชื่อวิทยาศาสตร์คือ Manihot esculenta Crantz มีชื่อสามัญเรียกหลายชื่อตามแต่ละภาษาแต่ที่ได้ยินกันมากได้แก่ Cassava, Yuca, Mandioa และ Tapioca มันสำปะหลังมีแหล่งกำเนิดแถบที่ลุ่มเขตร้อน (Lowland tropics) มีหลักฐานแสดงว่าปลูกกันในโคลัมเบียและเวเนซูเอลามานานกว่า 3,000 – 7,000 ปีมาแล้ว ในทวีปเอเชียมีการนำมันสำปะหลังมาปลูกครั้งแรกที่ประเทศฟิลิปปินส์ในคริสต์ศตวรรษที่ 17 โดยชาวสเปนได้นำมาจากเม็กซิโกและในเวลาต่อมาก็มีการปลูกที่อินโดนีเซีย สำหรับในประเทศไทยไม่มีหลักฐานที่แน่นอนว่ามีการนำมันสำปะหลังเข้ามาปลูกเมื่อใดโดยคาดว่าคงเข้ามาในระยะเดียวกันกับการเข้าสู่ศรีลังกาและฟิลิปปินส์คือ ประมาณ พ.ศ. 2329–2383 มันสำปะหลังเดิมเรียกกันว่ามันสำโรง มันไม้ ทางภาคตะวันออกเฉียงเหนือเรียกว่ามันต้นเตี้ย ทางภาคใต้เรียกว่ามันเทศ [13]

(ก)

(ข)

ภาพที่ 8 ต้นและรากมันสำปะหลัง

(ก) ต้นมันสำปะหลัง (ข) รากแป้งมันสำปะหลัง

2.5.2 กระบวนการแปรรูปมันสำปะหลัง

2.5.2.1 การผลิตมันเส้น

การผลิตมันเส้นทำได้โดยการแปรรูปหัวมันสดโดยใช้เครื่องตีหัวมันเป็นเส้นเล็ก แล้วนำไปตากบนลานซีเมนต์ประมาณ 2-3 วัน ซึ่งตามปกติแล้วการผลิตมันเส้น 1 กิโลกรัมต้องใช้หัวมันสด (มีปริมาณแป้งร้อยละ 25) 2-2.5 กิโลกรัม เมื่อแห้งดีแล้วจะต้องได้มาตรฐานความชื้นที่มีในมันเส้นประมาณร้อยละ 14 แล้วจึงทำการเก็บเพื่อส่งขายเป็นวัตถุดิบให้กับอุตสาหกรรมอาหารสัตว์ และอุตสาหกรรมมันอัดเม็ดต่อไป

2.5.2.2 การผลิตมันอัดเม็ด

สำหรับการผลิตมันสำปะหลังอัดเม็ดทุกแห่งจะมีกรรมวิธีการผลิตเหมือนกัน กล่าวคือ ก่อนทำการอัดมันเส้นจะต้องนำมาร่อนแยกสิ่งเจือปนต่างๆ ออกไป หลังจากนั้นแยกมันเส้นที่มีขนาดใหญ่มาตรฐานเข้าเครื่องบดแฮมเมอร์ทิลล์ ต่อจากนั้นมันเส้นที่ได้ขนาดและเกินขนาดที่ถูกบดแล้วจะถูกลำเลียงไปยังถังใส่บนเครื่องอัดก่อนส่งเข้าเครื่องอัด มันอัดเม็ดจะถูกพ่นน้ำเพื่อให้มีความชื้นในระดับที่เหมาะสม เมื่อออกจากเครื่องใหม่ๆ มันอัดเม็ดจะยังอุ่น และอ่อนนุ่ม เราต้องส่งเข้าเครื่องระบายความร้อนเพื่อลดอุณหภูมิและความชื้น หลังจากนั้นมันอัดเม็ดจะมีความแข็ง การระบายความร้อนโดยทั่วไปจะใช้รางเลื่อนทั้งแบบตั้งและแบบนอนโดยการเป่าพัดลม เมื่อมันอัดเม็ดเย็นตัวจะถูกส่งผ่านตะแกรงร่อน เพื่อคัดมันอัดเม็ดที่ใหญ่เกินขนาดก่อน ส่วนมันอัดเม็ดที่เล็กเกินไปจะถูกส่งเข้าไปอัดใหม่ ลมจากพัดลมที่ใช้เป่ามันอัดเม็ดจะมีกำลัง

แรงมาก เมื่อเวลาพัดผ่านมันอัดเม็ดจะทำให้มันอัดเม็ดพุ่งเข้าไปกองในถังใบใหญ่ ส่วนผงมันที่ปลิวไปกับลมจะถูกส่งเข้าสู่เครื่องป้อนอีกครั้ง

2.5.2.3 การผลิตแป้งมันสำปะหลัง

กระบวนการผลิตแป้งมันสำปะหลังแบบสลัดแห้งนั้นเป็นกระบวนการผลิตแบบใหม่ที่โรงงานโดยทั่วไปใช้กันอยู่ในปัจจุบัน มีขั้นตอนการผลิต ดังนี้

1.การเตรียมวัตถุดิบ หัวมันสำปะหลังจะถูกล้างให้สะอาดโดยผ่านเครื่องล้างหัวมันเพื่อล้างเอาเศษดินที่ยังติดอยู่กับหัวมันออกไปกับน้ำ

2. การโม่หัวมันสำปะหลัง มันสำปะหลังจะถูกลำเลียงเข้าสู่เครื่องสับหัวมันให้หัวมันมีขนาดเล็กลง ในระหว่างการโม่มีการเติมน้ำเพื่อให้สามารถโม่หัวมันได้ง่าย ในขั้นตอนนี้จะได้ของเหลวข้นที่มีส่วนผสมของแป้ง น้ำ กากมัน และสิ่งเจือปนต่างๆ

3. การสกัดแป้ง ของเหลวข้นจากเครื่องโม่จะถูกปั๊มเข้าสู่เครื่องแยกน้ำทิ้งที่มีโปรตีนและไขมันออกจากเนื้อแป้ง แล้วน้ำแป้งที่ได้จะเข้าสู่หน่วยสกัดแป้งโดยจะถูกปั๊มเข้าสู่เครื่องสกัดแป้งซึ่งเป็นเครื่องแยกน้ำแป้งออกจากเส้นใยและกาก โดยเครื่องนี้จะแบ่งหน้าที่ตามการกรองออกเป็น 2 ชุด คือ ชุดสกัดหยาบ และชุดสกัดละเอียด ซึ่งน้ำแป้งจะผ่านชุดสกัดหยาบก่อนเพื่อแยกกากหยาบออก แล้วจึงเข้าสู่ชุดสกัดละเอียดเพื่อทำให้บริสุทธิ์ขึ้นโดยผ่านผ้ากรองที่มีขนาดเล็กลงของเครื่องสกัดละเอียด จากนั้นน้ำแป้งที่มีความบริสุทธิ์สูงจะถูกสูบจากถังพักมายังเครื่องสลัดแห้ง ซึ่งจะเหวี่ยงแยกน้ำออกจากน้ำแป้งทำให้ได้แป้งหมาดที่มีความชื้นประมาณร้อยละ 35-40

4. การอบแห้ง แป้งหมาดจะถูกเป่าด้วยลมร้อนอุณหภูมิ 180-200 องศาเซลเซียสจากเตาเผาขึ้นไปบนปล่องอบแห้ง แล้วตกลงมาเข้าสู่ไซโคลนความร้อนทำให้ความชื้นหายไปบางส่วน

5. การบรรจุ และเก็บรักษา ทำได้โดยการบรรจุแป้งที่ได้ในกระสอบ แล้วเรียงกระสอบบนที่รองรับเป็นชั้นๆ โดยพยายามหลีกเลี่ยงการทับซ้อนกันถึง 4-5 เมตร [14]

2.5.3 การใช้แป้งมันสำปะหลังในอุตสาหกรรมอื่นๆ

2.5.3.1 อุตสาหกรรมทอผ้า โดยด้ายที่ใช้ในอุตสาหกรรมทอผ้านั้นจะต้องผ่านการชุบแป้งเสียก่อน ด้ายจึงจะเรียบไม่มีขน

2.5.3.2 อุตสาหกรรมกระดาษ การทำกระดาษต้องใช้เยื่อกระดาษที่ทำจากไม้ต่างๆ เช่น ไม้ไผ่ ไม้สน ไม้ยูคาลิปตัส เป็นต้น ทำให้เป็นเยื่อเล็กๆ แล้วนำเยื่อกระดาษเหล่านั้นมาเรียงเป็นแผ่น อย่างไรก็ตามแผ่นกระดาษจะไม่เรียบ จะต้องมีการฉาบผิวด้วยกาวจากแป้งทำให้กระดาษเรียบ ช่วยทำให้กระดาษไม่ซึมหมึกเวลาเขียนด้วยน้ำหมึก หรือพิมพ์สี

2.5.3.3 อุตสาหกรรมไม้อัด แป้งมันสำปะหลังมีคุณสมบัติเป็นกาวจึงถูกนำไปใช้ในอุตสาหกรรมไม้อัด เนื่องจากในการผลิตไม้อัด ต้องประกอบไม้ให้ติดกันโดยใช้กาว

2.5.3.4 อุตสาหกรรมกาว แป้งมันสำปะหลังยังมีคุณสมบัติพิเศษ เมื่อถูกความร้อนหรือถูกสารเคมีจะมีความเหนียว และมีคุณสมบัติสามารถรักษาความเหนียวได้เหมือนเดิมไม่มีการคืนตัว แป้งมันที่จะใช้ทำกาวจะต้องเป็นแป้งบริสุทธิ์

2.5.3.5 อุตสาหกรรมอาหารและเครื่องดื่ม

2.5.3.6 ผลิตภัณฑ์บะหมี่กึ่งสำเร็จรูป ก๋วยเตี๋ยว วุ้นเส้น สาคู ใช้แป้งมันเป็นส่วนผสม

2.5.3.7 ซอสต่างๆ เช่น ซอสมะเขือเทศ อาหารกระป๋อง ใช้แป้งเพื่อเพิ่มความเข้มข้น [13]

2.5.4 ผลิตภัณฑ์ใหม่จากแป้งมันสำปะหลัง

2.5.4.1 สารดูดน้ำ การใช้งานของพอลิเมอร์ดูดซึมน้ำมากมีหลายด้าน เช่น ใช้งานด้านอนามัยทางการแพทย์ ปริมาณที่ใช้มากที่สุด ได้แก่ ผ้าอ้อมสำหรับเด็กและผู้ใหญ่ เพื่อดูดซึมของเหลวในร่างกายจาก การขับถ่ายที่ใช้ครั้งเดียวแล้วทิ้ง ใช้ทางอุตสาหกรรมเป็นสารข้นสำหรับหมึกสกรีนระบบน้ำ วัสดุดูดน้ำออกจากเชื้อเพลิง

2.5.4.2 พลาสติกที่สลายได้ทางชีวภาพ

2.5.4.3 การผลิตแอลกอฮอล์จากมันสำปะหลัง หัวมันสำปะหลังส่วนใหญ่ประกอบด้วยแป้ง ซึ่งแป้งสามารถเปลี่ยนเป็น แอลกอฮอล์ที่เรียกว่า เอทานอล (ethanol) แอลกอฮอล์ที่ได้นี้เมื่อนำไปผสมน้ำมันเบนซินในอัตรา 10-20 : 90-80 ส่วน สามารถใช้เป็นน้ำมันเชื้อเพลิงสำหรับรถยนต์ที่เรียกว่า ก๊าซโซฮอล์ (gasohol) การใช้มันสำปะหลังเพื่อผลิตเป็นแอลกอฮอล์ เพื่อใช้เป็นพลังงานทดแทน กำลังได้รับความสนใจเพิ่มขึ้นเป็นอย่างมาก [13]

2.6 เทอร์โมพลาสติกที่เตรียมจากแป้ง (Thermoplastic starch หรือ TPS)

เมื่อพิจารณาจากโครงสร้างโมเลกุลของพอลิเมอร์องค์ประกอบของแป้งแล้ว แป้งน่าจะมีสมบัติเป็นพอลิเมอร์แบบเทอร์โมพลาสติก (thermoplastic polymer) แต่เนื่องจากในแต่ละ anhydroglucose unit ซึ่งเป็นหน่วยซ้ำ (repeating unit) ของโมเลกุลอะไมโลสและอะไมโลเพกตินประกอบไปด้วยหมู่ hydroxyl ถึง 3 หมู่ ทำให้หมู่ hydroxyl ดังกล่าวสามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนกับหมู่ hydroxyl ข้างเคียง จึงทำให้แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลมีค่าสูงมาก ดังนั้นในการขึ้นรูปแป้งถ้าหากไม่มีการเติมสารพลาสติไซเซอร์จะพบว่าเมื่อมีการให้ความร้อนเพิ่มมากขึ้นเรื่อยๆ แทนที่จะทำให้โมเลกุลพอลิเมอร์องค์ประกอบในแป้งสามารถเคลื่อนที่ผ่านซึ่งกันและกันได้แต่กลับทำให้โมเลกุลของพอลิเมอร์ในแป้งเกิดการสลายตัวแทน ซึ่งเป็นการแสดงสมบัติของพอลิเมอร์แบบเทอร์โมเซ็ต (thermoset polymer) [15]

การเปลี่ยนแป้งให้มีสมบัติเป็นเทอร์โมพลาสติกนั้นสามารถทำได้โดยการเติมสารประเภทพลาสติไซเซอร์เพื่อทำหน้าที่ลดแรงยึดเหนี่ยวระหว่างสายโซ่โมเลกุลของแป้ง ซึ่งโมเลกุลของพลาสติไซเซอร์จะไปสร้างพันธะไฮโดรเจนกับหมู่ hydroxyl ของโมเลกุลแป้งเป็นผลทำให้พันธะที่เกิดขึ้นระหว่างสายโซ่โมเลกุลของแป้งลดน้อยลง ดังนั้นสายโซ่โมเลกุลของแป้งจึงสามารถเคลื่อนที่ผ่านกันได้ง่ายขึ้นโดยใช้พลังงานลดลง [15]

พลาสติไซเซอร์ที่นิยมนำมาใช้ในการเตรียม thermoplastic starch มากที่สุดคือ glycerol แต่การใช้ glycerol เป็นพลาสติไซเซอร์ก็มีข้อด้อยอยู่บ้าง เช่น เมื่อนำ thermoplastic starch มาใช้งานในสภาวะที่มีความชื้นสูงเป็นระยะเวลานาน จะเกิดปรากฏการ retrogradation ขึ้น เนื่องมาจากความแข็งแรงของพันธะไฮโดรเจนระหว่าง glycerol กับโมเลกุลของแป้งนั้นไม่สูงมากนัก และยังต้านทานต่อความชื้นได้น้อย อย่างไรก็ดีการใช้ glycerol ก็มีข้อดีต่อการเตรียม thermoplastic starch เช่น ราคาไม่สูงมากนัก และยังมีความปลอดภัยสูงเมื่อเทียบพลาสติไซเซอร์ชนิดอื่นๆ สารในกลุ่ม polyols นอกจาก glycerol แล้วก็มีการใช้สารตัวอื่นเป็นพลาสติไซเซอร์ด้วย เช่น xylitol, sorbitol และ maltitol [3] พลาสติไซเซอร์ตัวอื่นที่มีการนำมาใช้เตรียม thermoplastic

starch เช่น ethylenebisformamide, ethanolamine, urea และ N,N,N',N'-Tetrakis(2-hydroxyethyl) ethylenediamine [6, 7, 8, 9] ขณะเดียวกัน thermoplastic starch ที่เตรียมจากแป้งนั้นก็มีข้อจำกัดที่สำคัญ คือ thermoplastic starch สามารถดูดซับความชื้นได้ง่ายและรวดเร็ว ซึ่งจากการดูดซับความชื้นของ thermoplastic starch ก็ยังส่งผลทำให้สมบัติเชิงกลลดลงตามไปด้วย ทั้งนี้เนื่องจากแป้งเป็นพอลิเมอร์ที่ชอบน้ำ เพราะมีหมู่ hydroxyl อยู่มาก จึงมีความเป็น hydrophilic สูง ดังนั้นจึงเป็นข้อจำกัดในการนำชิ้นงาน thermoplastic starch ไปใช้งานจริง อย่างไรก็ตามก็ได้มีการศึกษาการปรับปรุงสมบัติดังกล่าว ในหลากหลายวิธี เช่น ทำการปรับปรุงโครงสร้างของ thermoplastic starch ให้มีความเป็น hydrophobic มากขึ้น หรือ การใช้พลาสติไซเซอร์ที่ทำให้ thermoplastic starch ต้านทานความชื้นได้มากขึ้น หรือ ทำการปรับปรุง thermoplastic starch โดยการเคลือบสารบางอย่างที่มีความเป็น hydrophobic

นอกจากการปรับปรุงสมบัติด้านความชื้นของ thermoplastic starch แล้วยังนิยมปรับปรุงสมบัติเชิงกลด้วย โดยวิธีปรับปรุงสมบัติเชิงกลที่นิยมทำมากที่สุดคือการเติมสารในกลุ่ม reinforcing filler โดย reinforcing filler ที่นำมาใช้มีหลายประเภท เช่น สารตัวเติมในกลุ่ม inorganic filler ได้แก่ kaolin [16,17] สารตัวเติมอีกประเภทหนึ่งที่นิยมนำมาใช้ในการปรับปรุงสมบัติเชิงกลของ thermoplastic starch คือสารตัวเติมจำพวกเส้นใยที่มาจากธรรมชาติหรือพอลิเมอร์ เช่น cellulose [18], jute fiber [19,20], ramie [21] และยางธรรมชาติ [22,23] เป็นต้น การปรับปรุงสมบัติเชิงกลของ thermoplastic starch อีกวิธีที่นิยมใช้เช่นกันคือเตรียมให้อยู่ในรูปวัสดุเสริมองค์ประกอบระดับนาโน (nanocomposite) เช่น การเติม montmorillonite [24, 25, 26]

2.7 งานวิจัยที่ใช้พลาสติไซเซอร์ชนิดต่างๆในการเตรียม TPS

2.7.1 Xiuying Qiao และคณะได้ศึกษาการใช้พลาสติไซเซอร์ผสมของสารกลุ่ม polyol สำหรับแป้งข้าวโพด พบว่าเมื่อผสม glycerol กับสารในกลุ่ม polyol ที่มีมวลโมเลกุลสูงเช่น xylitol, sorbitol และ maltitol จะทำให้เสถียรภาพทางความร้อนและสมบัติเชิงกลดีขึ้นแต่จะทำให้ค่าทอร์กในการผสมสูงขึ้น [3]

2.7.2 Jin-Hui Yang และคณะได้ศึกษาการเตรียมและสมบัติของ thermoplastic starch จากแป้งมันฝรั่งโดยใช้ ethylenebisformamide เป็นพลาสติไซเซอร์ พบว่าการใช้ ethylenebisformamide ทำให้ค่าความต้านทานต่อความชื้น ค่าความสามารถในการยืดตัว เสถียรภาพทางความร้อนดีกว่าการใช้ glycerol เป็นพลาสติไซเซอร์ เนื่องจากเกิดพันธะไฮโดรเจนที่แข็งแรงและมีความเสถียรระหว่าง ethylenebisformamide และโมเลกุลของแป้ง [6]

2.7.3 Mingfu Huang และคณะได้ศึกษาการใช้ ethanolamine เป็นพลาสติไซเซอร์สำหรับ thermoplastic starch พบว่าจะให้สมบัติเชิงกลและค่าความต้านทานต่อความชื้นดีกว่าการใช้ glycerol เป็นพลาสติไซเซอร์ [7]

2.7.4 K. Majdzadeh-Ardakani และคณะได้ศึกษาการการใช้ N,N,N',N'-Tetrakis(2-hydroxyethyl)ethylenediamine (THEED) เป็นพลาสติไซเซอร์สำหรับ thermoplastic starch พบว่าการใช้ THEED เป็นพลาสติไซเซอร์สามารถป้องกันการเกิด re-crystallization ได้ดีกว่าการใช้ glycerol หรือน้ำเป็นพลาสติไซเซอร์ [9]

2.7.5 Xiaofei Ma และคณะได้ศึกษาการใช้ N-(2-Hydroxypropyl)formamide (HPF) และ N-(2-hydroxy ethyl)-N-methylformamide (HMF) เป็นพลาสติไซเซอร์ชนิดใหม่สำหรับ thermoplastic starch พบว่าการใช้ HPF เป็นพลาสติไซเซอร์จะมีค่าความต้านทานต่อความชื้น ค่าความต้านทานต่อแรงดึง ค่าความสามารถในการยืดตัวดีกว่าการใช้ HMF เป็นพลาสติไซเซอร์ [27]

2.7.6 Hongguang Dai และคณะได้ศึกษาการเตรียมและสมบัติของฟิล์มจากแป้งโดยใช้ N,N-bis(2-hydroxyethyl)formamide เป็นพลาสติไซเซอร์ พบว่าการใช้ N,N-bis(2-hydroxyethyl)formamide เป็นพลาสติไซเซอร์จะให้ค่าความต้านทานต่อความชื้นและค่าความต้านทานต่อแรงดึงดีกว่าการใช้ glycerol เป็นพลาสติไซเซอร์ [28]

2.7.7 X.F. Ma และคณะ ได้ศึกษาการใช้พลาสติไซเซอร์ที่มีหมู่เอไมด์ พบว่าหมู่เอไมด์เป็นตัวช่วยการยับยั้งการคืนตัว (retrogradation) ของ thermoplastic starch และลำดับความสามารถในการเกิดพันธะไฮโดรเจนกับแป้งเป็นดังนี้ urea > formamide > acetamide > polyols [29]

2.7.8 Peter R. Chang และคณะได้ศึกษาการใช้พลาสติไซเซอร์ผสมระหว่าง Formamide (FM) และ 2-hydroxy-N-[2-(2-hydroxy-propionylamino)-ethyl] propionamide (HPEP) สำหรับ thermoplastic starch พบว่า พลาสติไซเซอร์ผสมดังกล่าวจะเกิดแรงยึดเหนี่ยวกับ หมู่ C-O ซึ่งอัตราส่วนที่ทำให้ได้ชิ้นงานเรียบที่สุดคือ FM : HPEP: น้ำ เท่ากับ 20 : 10 : 10 พลาสติไซเซอร์จะไปยับยั้งการคืนตัวของแป้งทำให้เก็บรักษาได้นาน ทั้งนี้ปริมาณ HPEP ยิ่งมากจะทำให้มีการดูดซึมน้ำน้อยลง มีค่าความต้านทานต่อแรงดึงเพิ่มขึ้น แต่ความสามารถในการดึงยืดลดลง [30]

2.7.9 X.F. Ma และคณะได้ศึกษาการใช้พลาสติไซเซอร์ผสมระหว่าง urea และ formamide สำหรับ thermoplastic starch ที่ได้จากข้าวสาลี พบว่าเมื่อใช้พลาสติไซเซอร์ผสมระหว่าง

urea และ formamide ปริมาณ 50% จะให้ค่าความต้านทานต่อความชื้น ความสามารถในการยืดมากกว่ากรณีที่เติมลงไป 30% และ 40% แต่จะมีค่าความต้านทานต่อแรงดึงน้อยที่สุด [31]

2.7.10 Jian She Zhang และคณะได้ศึกษาการใช้พลาสติไซเซอร์ผสมระหว่าง aliphatic amidediol กับ glycerol สำหรับ thermoplastic starch พบว่าจะให้ค่า stress และ strain สูงกว่าการใช้ glycerol อย่างเดียว [32]

2.7.11 X.F. Ma และคณะได้ศึกษาการใช้พลาสติไซเซอร์ผสมระหว่าง urea และ ethanolamine สำหรับ thermoplastic starc ที่ได้จากแป้งข้าวโพด พบว่าเมื่อใช้พลาสติไซเซอร์ผสมระหว่าง urea และ ethanolamine ทำให้ thermoplastic starch มีเสถียรภาพทางความร้อน สมบัติเชิงกล การการยับยั้งการคืนตัว (retrogradation) ดีกว่าการใช้ glycerol เป็นพลาสติไซเซอร์ [33]

บทที่ 3
วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

1. Cassava starch (Thaitum industry compony , Thailand)
2. Benzyl chloride (SIGMA-ALDRICH, reagent grade, 99.0%)
3. Diethanolamine (SIGMA-ALDRICH, reagent grade, $\geq$ 98.0%)
4. Ethyl acetate (MERCK, analytical reagent)
5. Ethyl benzoate (SIGMA-ALDRICH, 99.0%)
6. Ethyl formate (SIGMA-ALDRICH, reagent grade, 97.0%)
7. Glycerol (Ajax Finechem Pty Ltd, analytical reagent, 99.5%)
8. Magnesium nitrate (Scharlau, reagent grade)
9. Sodium hydride (Fluka)
10. Zinc chloride (Ajax Finechem Pty Ltd, 99.5%)

3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

1. 1-Necked round bottom flask
2. 3-Necked round bottom flask
3. 3-ways valve
4. Beaker
5. Clamp/Clamp holder
6. Condenser
7. Conical flask
8. Cylinder
9. Dropper
10. Evaporator
11. Forceps
12. Glass funnel

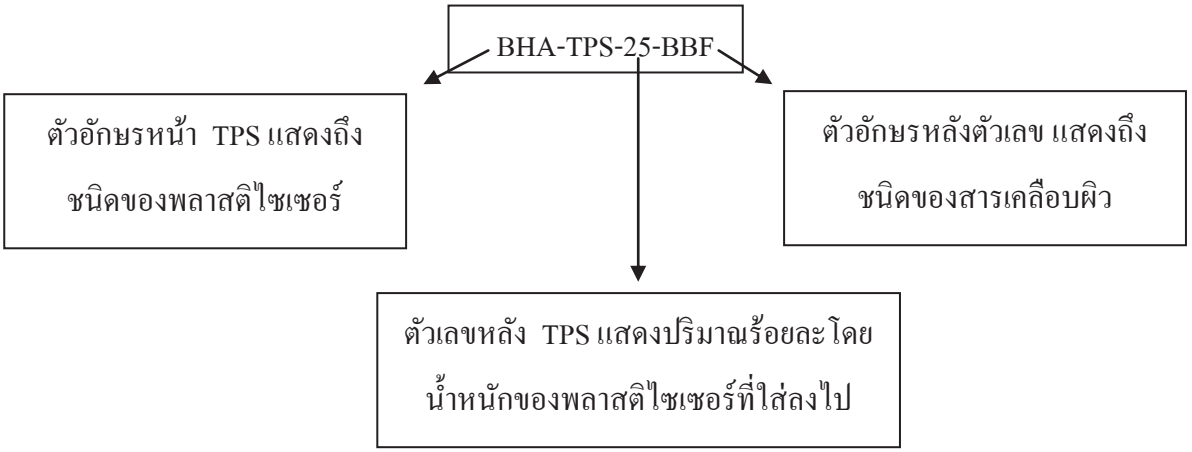
13. Hot plate
14. Magnetic bar
15. Oil bath
16. Pipette
17. Spatula
18. Stopper
19. Temperature controller
20. Thermometer
21. Vial tube
22. Volumetric flask

3.3 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

1. เครื่องอบสุญญากาศ (EYELA, VOS – 301SD)
2. เครื่องผสมภายใน (BRABENDER, 30/50 EHT)
3. เครื่องขึ้นรูปแบบอัด (CARVER Model 2518 S/N2518-317)
4. Chamber ควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ด้วยเกลือ magnesium nitrate ($Mg(NO_3)_2.6H_2O$)
5. เครื่องปั่นเหวี่ยง
6. เครื่อง Instron universal testing instrument (model 5965)
7. เครื่อง Impact testing (Zwick B5102.202, Izod Pendulum 4 J)
8. เครื่อง Fourier transform infrared spectrophotometer (Bruker Optik GmbH: Vertex70, Germany)
9. เครื่อง Proton nuclear magnetic resonance spectrometer (Bruker: 300 Ultrasheild, Germany)
10. เครื่อง Scanning Electron Microscope (Bruker, UK)
11. เครื่อง Thermogravimetric analyzer (Mettler TGA, Mettler Toledo)
12. เครื่อง X-ray diffractometer (MiniFlex II, Rigaku, Japan)
13. เครื่อง Dynamic mechanical analyzer (Mettler Toledo DMA/SDTA 861^e)

3.4 ดัชนีอักษรย่อ

เนื่องจากการผสมพลาสติไซเซอร์กับแป้งมันสำปะหลังเพื่อขึ้นรูปเป็นชิ้นงาน TPS มีการใช้อักษรย่อ ดังนั้นเพื่อให้ผู้อ่านเข้าใจความหมายของสูตรผสม จึงขอแสดงรายละเอียดเกี่ยวกับอักษรย่อที่ใช้ดังต่อไปนี้



เช่น G-TPS-25 หมายถึงชิ้นงาน TPS ที่ใช้ glycerol เป็นพลาสติไซเซอร์ในสัดส่วน 25% โดยน้ำหนัก

BHA 75+BHB 25-TPS-35 หมายถึงชิ้นงาน TPS ที่ใช้ BHA ผสมกับ BHB เป็นพลาสติไซเซอร์ในสัดส่วน 35% โดยน้ำหนัก ซึ่งใน 35% ของพลาสติไซเซอร์ที่ใส่ลงไปจะประกอบไปด้วย BHA เท่ากับ 75% กับ BHB เท่ากับ 25%

BHA-TPS-30-BBF หมายถึงชิ้นงาน TPS ที่ใช้ BHA เป็นพลาสติไซเซอร์ในสัดส่วน 30% โดยน้ำหนัก และมีการเคลือบผิวด้วย BBF

3.5 ขั้นตอนในการดำเนินงานวิจัย

3.5.1 การสังเคราะห์พลาสติไซเซอร์

3.5.1.1 การสังเคราะห์ N,N-bis(2-hydroxyethyl)formamide (BHF)

เติม diethanolamine จำนวน 1 โมล (105 g) ลงไปในขวดสามคอขนาด 500 ml ซึ่งตั้งอยู่ใน water bath ที่อุณหภูมิ 27 °C มีการต่อ reflux condenser, dropping funnel, thermometer และทำการกวนตลอดเวลาด้วยแท่งกวนแม่เหล็ก แล้วหยด ethyl formate

จำนวน 1 mol (74 g) ลงไป หลังจากนั้นทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 60 °C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง แล้วทำการระเหย ethanol ซึ่งเป็น by-product ที่อุณหภูมิ 100 °C ในสภาวะที่ลดความดัน นำของผสมที่เหลือมาลดอุณหภูมิจนถึง 27 °C ใน water bath หลังจากนั้นเติม ethyl formate จำนวน 0.05 mol (3.7 g) และทำปฏิกิริยาต่อที่อุณหภูมิ 60 °C อีก 1 ชั่วโมง หลังจากนั้นทำการระเหย ethanol ซึ่งเป็น by-product ที่อุณหภูมิ 100 °C ในสภาวะลดความดัน แล้วนำของผสมมาลดอุณหภูมิจนถึง 27 °C ใน water bath โดยขั้นตอนในการเติม ethyl formate จำนวน 0.05 mol จะทำซ้ำ 2 ครั้ง ผลการพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิค FT-IR, ^{1}H-NMR, ร้อยละผลผลิต และลักษณะทางกายภาพของ BHF ที่ได้ แสดงไว้ในหัวข้อ 4.1.1.1

3.5.1.2 การสังเคราะห์ N,N-bis(2-hydroxyethyl)acetamide (BHA)

เติม diethanolamine จำนวน 1 โมล (105 g) ลงไปในขวดสามคอขนาด 500 ml ซึ่งตั้งอยู่ใน water bath ที่อุณหภูมิ 27 °C มีการต่อ reflux condenser, dropping funnel, thermometer และทำการกวนตลอดเวลาด้วยแท่งกวนแม่เหล็ก แล้วหยด ethyl acetate จำนวน 1 mol (88 g) ลงไป หลังจากนั้นทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 70 °C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง แล้วทำการระเหย ethanol ซึ่งเป็น by-product ที่อุณหภูมิ 100 °C ในสภาวะที่ลดความดัน นำของผสมที่เหลือมาลดอุณหภูมิจนถึง 27 °C ใน water bath หลังจากนั้นเติม ethyl acetate จำนวน 0.05 mol (4.4 g) และทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 70 °C ต่ออีก 4 ชั่วโมง หลังจากนั้นทำการระเหย ethanol ซึ่งเป็น by-product ที่อุณหภูมิ 100 °C ในสภาวะลดความดัน แล้วนำของผสมมาลดอุณหภูมิจนถึง 27 °C ใน water bath โดยขั้นตอนในการเติม ethyl acetate จำนวน 0.05 mol จะทำซ้ำ 2 ครั้ง ผลการพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิค FT-IR, ^{1}H-NMR, ร้อยละผลผลิต และลักษณะทางกายภาพของ BHA ที่ได้ แสดงไว้ในหัวข้อ 4.1.1.2

3.5.1.3 การสังเคราะห์ N,N-bis(2-hydroxyethyl)benzamide (BHB)

เติม diethanolamine จำนวน 1 โมล (105 g) ลงไปในขวดสามคอขนาด 500 ml ซึ่งตั้งอยู่ใน water bath ที่อุณหภูมิ 27 °C มีการต่อ reflux condenser, dropping funnel, thermometer และทำการกวนตลอดเวลาด้วยแท่งกวนแม่เหล็ก หยด ethyl benzoate จำนวน 1 mol (150 g) แล้วเติม zinc chloride จำนวน 0.15 mol (20 g) หลังจากนั้นทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 110 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วทำการระเหย ethanol ซึ่งเป็น by-product ที่อุณหภูมิ 100 °C ในสภาวะที่ลดความดัน นำของผสมที่เหลือมาลดอุณหภูมิจนถึง 27 °C ใน water bath หลังจากนั้นเติม ethyl benzoate จำนวน 0.05 mol (7.5 g) และทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 100 °C ต่ออีก 4 ชั่วโมง หลังจากนั้นทำการระเหย ethanol ซึ่งเป็น by-product ที่อุณหภูมิ 100 °C ในสภาวะลดความดัน แล้วนำของ

ผสมมาลดอุณหภูมิจนถึง 27 °C ใน water bath โดยขั้นตอนในการเติม ethyl benzoate จำนวน 0.05 mol จะทำซ้ำ 2 ครั้ง ผลการพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิค FT-IR และ ^{1}H-NMR, ร้อยละผลผลิต และลักษณะทางกายภาพของ BHB ที่ได้ แสดงไว้ในหัวข้อ 4.1.1.3

3.5.2 การสังเคราะห์สารเคลือบผิว

3.5.2.1 การสังเคราะห์ N,N-bis(2-(benzyloxy)ethyl)formamide (BBF)

เติม N,N-bis(2-hydroxyethyl)formamide จำนวน 0.05 โมล (6.65 g) ใส่ลงไปในขวดสามคอขนาด 100 ml ซึ่งอยู่ใน water bath ที่อุณหภูมิ 27 °C แล้วค่อยๆเติม sodium hydride จำนวน 0.125 mol (3.0 g) และทำการกวนที่อุณหภูมิ 27 °C เป็นเวลา 3 นาที หลังจากนั้นค่อยๆหยด benzyl chloride 0.125 mol (15.81 g) โดยทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 60 °C เป็นเวลา 18 ชั่วโมง หลังจากนั้นทำการระเหย benzyl chloride ที่เหลือออกที่อุณหภูมิ 120 °C ในสภาวะที่ลดความดัน แล้วนำไปตกตะกอนใน ethanol หลังจากนั้นนำไปเข้าเครื่องปั่นเหวี่ยงเพื่อแยกตะกอนของ NaCl ซึ่งอยู่ชั้นล่างออกไป แล้วนำสารละลายชั้นบนไประเหย ethanol ออกที่อุณหภูมิ 80 °C ในสภาวะที่ลดความดัน ผลการพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิค FT-IR, ^{1}H-NMR, ร้อยละผลผลิต และลักษณะทางกายภาพของ BBF ที่ได้ แสดงไว้ในหัวข้อ 4.1.2.1

3.5.2.2 การสังเคราะห์ N,N-bis(2-(benzyloxy)ethyl)acetamide (BBA)

เติม N,N-bis(2-hydroxyethyl)acetamide จำนวน 0.05 โมล (7.35 g) ลงไปในขวดสามคอขนาด 100 ml ซึ่งอยู่ใน water bath ที่อุณหภูมิ 27 °C แล้วค่อยๆเติม sodium hydride จำนวน 0.125 mol (3.0 g) และทำการกวนที่อุณหภูมิ 27 °C เป็นเวลา 3 นาที หลังจากนั้นค่อยๆหยด benzyl chloride 0.125 mol (15.81 g) โดยทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 60 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง หลังจากนั้นทำการระเหย benzyl chloride ที่เหลือออกที่อุณหภูมิ 120 °C ในสภาวะที่ลดความดัน แล้วนำไปตกตะกอนใน ethanol หลังจากนั้นนำไปเข้าเครื่องปั่นเหวี่ยงเพื่อแยกตะกอนของ NaCl ซึ่งอยู่ชั้นล่างออกไป แล้วนำสารละลายชั้นบนไประเหย ethanol ออกที่อุณหภูมิ 80 °C ในสภาวะที่ลดความดัน ผลการพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิค FT-IR, ^{1}H-NMR, ร้อยละผลผลิต และลักษณะทางกายภาพของ BBA ที่ได้ แสดงไว้ในหัวข้อ 4.1.2.2

3.5.2.3 การสังเคราะห์ N,N-bis(2-(benzyloxy)ethyl)benzamide (BBB)

เติม N,N-bis(2-hydroxyethyl)benzamide จำนวน 0.05 โมล (10.45 g) ลงไปในขวดสามคอขนาด 100 ml ซึ่งอยู่ใน water bath ที่อุณหภูมิ 27 °C แล้วค่อยๆเติม sodium hydride จำนวน 0.125 mol (3.0 g) และทำการกวนที่อุณหภูมิ 27 °C เป็นเวลา 3 นาที

หลังจากนั้นค่อยๆหยด benzyl chloride 0.125 mol (15.81 g) โดยทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 60 °C เป็นเวลา 30 ชั่วโมง หลังจากนั้นทำการระเหย benzyl chloride ที่เหลือที่อุณหภูมิ 120 °C ในสภาวะที่ลดความดัน แล้วนำไปตกตะกอนใน ethanol หลังจากนั้นนำไปเข้าเครื่องปั่นเหวี่ยงเพื่อแยกตะกอนของ NaCl ซึ่งอยู่ชั้นล่างออกไป แล้วนำสารละลายชั้นบนไประเหย ethanol ออกที่อุณหภูมิ 80 °C ในสภาวะลดความดัน ผลการพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิค FT-IR, ^{1}H-NMR, ร้อยละผลผลิต และลักษณะทางกายภาพของ BBB ที่ได้ แสดงไว้ในหัวข้อ 4.1.2.3

3.5.3 การผสมและการเตรียมชิ้นงาน TPS

3.5.3.1 การผสมแป้งมันสำปะหลังกับพลาสติไซเซอร์

อบแป้งในตู้อบสุญญากาศที่อุณหภูมิ 60 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำมาผสมกับพลาสติไซเซอร์ในถุงพอลิเอทธิลีน โดยจะทำการผสมพลาสติไซเซอร์ลงไปในอัตราส่วน 25, 30 และ 35% โดยน้ำหนัก โดยแสดงไว้ในตารางที่ 1 จากนั้นจะทำการเขย่าถุงพอลิเอทธิลีนเป็นเวลา 10 นาที เพื่อให้พลาสติไซเซอร์กระจายตัวและซึมเข้าสู่เม็ดแป้ง หลังจากนั้นนำไปเก็บไว้ในเดซิเคเตอร์เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

ภาพที่ 9 การอบแป้งมันสำปะหลังในตู้อบสุญญากาศ

ภาพที่ 10 การเก็บแป้งมันสำปะหลังที่ผสมกับพลาสติไซเซอร์แล้วไว้ในเดซิเคเตอร์

ตารางที่ 1 แสดงปริมาณของแป้งมันสำปะหลังกับพลาสติไซเซอร์ที่ใช้ในการผสม

สูตร	น้ำหนักของสารในสูตรผสม	
	แป้งมันสำปะหลัง	พลาสติไซเซอร์
G-TPS-25	37.50 กรัม	glycerol 12.50 กรัม
G-TPS-30	35.00 กรัม	glycerol 15.00 กรัม
G-TPS-35	32.50 กรัม	glycerol 17.50 กรัม
BHF-TPS-25	37.50 กรัม	BHF 12.50 กรัม
BHF-TPS-30	35.00 กรัม	BHF 15.00 กรัม
BHF-TPS-35	32.50 กรัม	BHF 17.50 กรัม
BHA-TPS-25	37.50 กรัม	BHA 12.50 กรัม
BHA-TPS-30	35.00 กรัม	BHA 15.00 กรัม
BHA-TPS-35	32.50 กรัม	BHA 17.50 กรัม
BHF75+BHB25-TPS-35	32.50 กรัม	BHF 13.13 กรัม + BHB 4.37 กรัม
BHA80+BHB20-TPS-35	32.50 กรัม	BHA 14.00 กรัม + BHB 3.50 กรัม
BHA90+BHB10-TPS-30	35.00 กรัม	BHA 13.50 กรัม + BHB 1.50 กรัม

3.5.3.2 การผสมในเครื่อง Internal mixer

นำแป้งที่ผสมพลาสติไซเซอร์ที่เตรียมทิ้งไว้ นำมาผสมอีกครั้งในเครื่อง internal mixer ซึ่งแสดงดังภาพที่ 11 โดยอุณหภูมิที่ใช้ในการผสมเท่ากับ 160°C และใช้ความเร็วรอบของสกรูในการผสมเท่ากับ 60 รอบต่อนาที เป็นเวลา 12 นาที แป้งที่ผ่านการผสมในเครื่อง internal mixer แล้วจะนำไปขึ้นรูปด้วยเทคนิค compression molding

3.5.3.3 การขึ้นรูปชิ้นงาน TPS

นำ TPS ที่ผ่านการผสมในเครื่อง internal mixer มาบดด้วยเครื่องบด ซึ่งแสดงดังภาพที่ 12 หลังจากนั้นนำไปเทใส่ในแม่พิมพ์ที่มีรูปร่างเป็นชิ้นงานสำหรับทดสอบ tensile และชิ้นงานสำหรับทดสอบ impact โดยจะต้องนำแผ่นเทฟลอนมาวางระหว่างแม่พิมพ์แผ่นที่ 1 และแผ่นที่ 2 เพื่อให้สามารถแกะชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์ได้ง่ายขึ้น

การขึ้นรูปชิ้นงาน TPS จะใช้เทคนิค compression molding ซึ่งแสดงดังภาพที่ 15 โดยตั้งอุณหภูมิ plate ด้านบนและด้านล่างเท่ากับ 170°C โดยใช้เวลาและความดันในการอัดเข้าแม่พิมพ์ดังนี้

ขั้นที่ 1: ใช้แรงอัด 0 pounds เป็นเวลา 15 นาที
ขั้นที่ 2: ใช้แรงอัด 15000 pounds เป็นเวลา 2 นาที
ขั้นที่ 3: ใช้แรงอัด 25000 pounds เป็นเวลา 3 นาที
ขั้นที่ 4: ทำการหล่อเย็นเป็นเวลา 1 นาที

ภาพที่ 11 เครื่อง Internal mixer

ภาพที่ 12 TPS ที่ได้จากเครื่อง Internal mixer จะถูกนำมาบดให้เป็นผง

ภาพที่ 13 ลักษณะของ TPS ที่ผ่านการบดด้วยเครื่องบด

ภาพที่ 14 ลักษณะการเท TPS ที่ผ่านการบดแล้วใส่ในแม่พิมพ์

ภาพที่ 15 การขึ้นรูปชิ้นงานด้วยเครื่อง Compression

3.5.4 การเคลือบผิวหน้าชิ้นงาน TPS

เริ่มจากนำชิ้นงานไปอบในตู้อบสุญญากาศที่อุณหภูมิ 60 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วทำการชั่งน้ำหนักชิ้นงาน TPS ก่อนการเคลือบผิว หลังจากนั้นนำสารเคลือบผิวที่สังเคราะห์ได้ 3 ชนิดคือ BBF, BBA และ BBB โดยใช้สารเคลือบผิว 5 กรัมละลายใน ethanol 15 กรัม แล้วทำการกวนจนได้สารละลายเนื้อเดียวกัน แล้วนำชิ้นงานจุ่มลงในสารละลายที่เตรียมไว้เป็นเวลา 2 นาที จากนั้นนำไปตากเป็นเวลา 15 นาที แล้วนำมาจุ่มซ้ำเป็นครั้งที่สองอีก 2 นาที หลังจากนั้นนำชิ้นงานไปอบในตู้อบสุญญากาศภายใต้อุณหภูมิ 60 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง แล้วทำการชั่งน้ำหนักชิ้นงานหลังการเคลือบผิว

3.5.5 การศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยา

การศึกษาลักษณะพื้นผิวรอยแตกหักของชิ้นงาน TPS โดยจะนำชิ้นงาน TPS ที่ทำให้เกิดการแตกหักด้วยเครื่อง impact testing ไปทดสอบ โดยจะนำชิ้นงานติดลงบน slit สำหรับทดสอบด้วยเทคนิค SEM หลังจากนั้นนำชิ้นงานไปเคลือบด้วยทองคำก่อนทำการทดสอบ โดยในการวิเคราะห์ผลจะทำการศึกษาที่กำลังขยาย 1000 เท่า

3.5.6 การศึกษาสมบัติ Impact test (Izod) ทำตามมาตรฐาน ASTM D256-04

3.5.6.1 วัดขนาดความกว้างและความหนาของชิ้นงาน impact specimens ที่นำมาทดสอบโดยจะทำการวัดค่า 3 ครั้ง แล้วหาค่าเฉลี่ย

3.5.6.2 นำชิ้นงานไปทดสอบโดยทำการยึดชิ้นงานกับฐานของเครื่องทดสอบให้แน่น หลังจากนั้นก็ทำการทดสอบชิ้นงานโดยการปล่อยให้ pendulum (ขนาด 4 Jules) ตกลงมากระแทกชิ้นงาน

3.5.6.3 บันทึกค่าพลังงานที่ได้ (J) และทำการทดสอบเช่นเดียวกันนี้ ในทุกๆ ชิ้นงาน

3.5.6.4 คำนวณค่าพลังงานเฉลี่ยต่อหน่วยพื้นที่ (kJ/mm^2)

3.5.6.5 หาค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของชุดข้อมูลดังกล่าว

3.5.7 การศึกษาสมบัติ Tensile testing ทำตามมาตรฐาน ASTM D638-03

3.5.7.1 วัดขนาดความกว้างและความหนาของชิ้นงาน tensile specimens ที่นำมาทดสอบโดยจะทำการวัดค่า 3 ครั้ง แล้วหาค่าเฉลี่ย

3.5.7.2 นำชิ้นงานที่เตรียมไว้ไปทดสอบแรงดึง โดยใช้ความเร็วในการดึงยืด 1 mm/min และใช้ load cell ขนาด 5 kN

3.5.7.3 บันทึกผลข้อมูลของค่า young's modulus, tensile strength และ percentage strain at break และทำการทดสอบเช่นเดียวกันนี้กับทุกชิ้นงาน

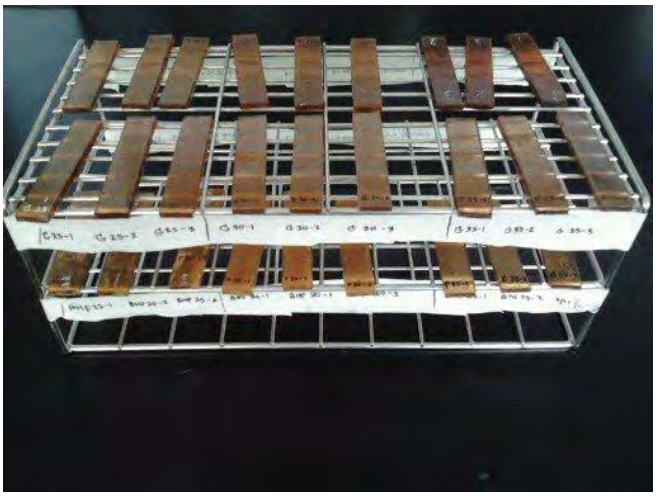
3.5.7.4 หาค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของข้อมูลที่ได้

3.5.8 การศึกษาปริมาณการดูดซับความชื้นของชิ้นงาน TPS

3.5.8.1 เตรียมสารละลาย magnesium nitrate ($Mg(NO_3)_2.6H_2O$) โดยนำ magnesium nitrate มาละลายน้ำกลั่นในบีกเกอร์ที่มีการให้ความร้อนเล็กน้อยทำให้อิ่มตัวยิ่งยวด จากนั้นเทสารละลายอิ่มตัวยิ่งยวดดังกล่าวลงใน chamber พร้อมทั้งปิดฝา ก็จะได้ chamber ที่มีความชื้นสัมพัทธ์ 53% ซึ่งจะแสดงดังภาพที่ 17

3.5.8.2 นำชิ้นงานที่ผ่านการอบแล้ว มาเขียนรายละเอียดของชิ้นงานดังภาพที่ 16 แล้วนำมาวางลงบนตะแกรงลวดแล้วนำไปใส่ไว้ในภาชนะ ที่มีสารละลายอิ่มตัวยิ่งยวดของ magnesium nitrate ($Mg(NO_3)_2.6H_2O$)

3.5.8.3 นำชิ้นงานที่อยู่ใน chamber ออกมาชั่งน้ำหนักทุกวันตลอดระยะเวลา 15 วัน เพื่อศึกษาการดูดซับความชื้นของชิ้นงาน TPS ที่เตรียมได้



ภาพที่ 16 การเขียนรายละเอียดของชิ้นงานก่อนเก็บไว้ใน chamber

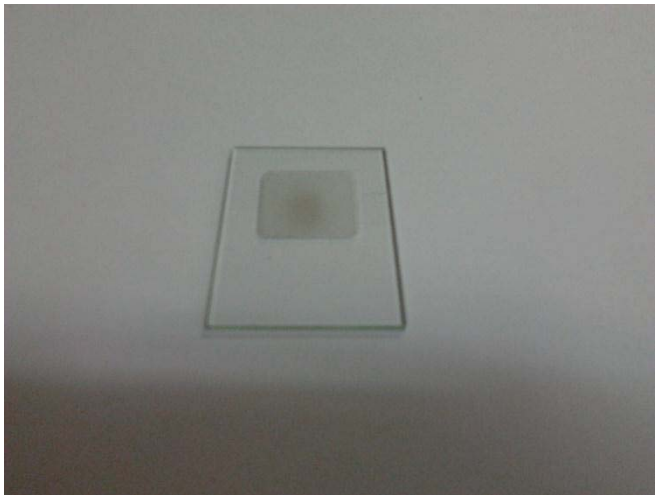
ภาพที่ 17 ชิ้นงานจะถูกเก็บไว้ใน chamber ที่ควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ 53%

3.5.9 การวิเคราะห์หาปริมาณผลึกและรูปแบบของผลึกในชิ้นงาน TPS

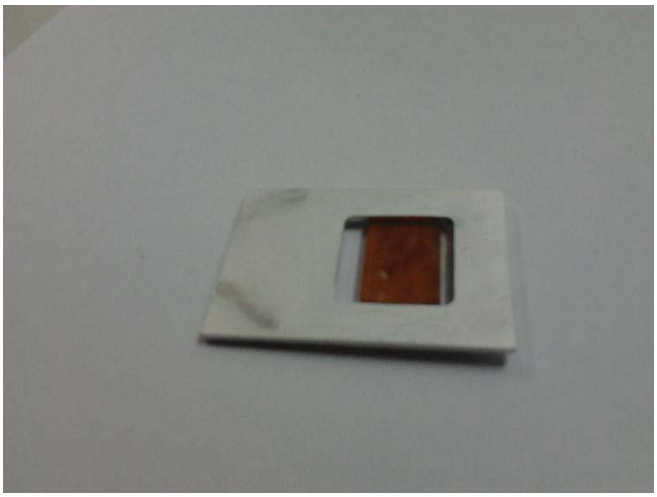
3.5.9.1 ชิ้นงานสำหรับทดสอบ XRD จะใช้ชิ้นงาน impact แต่จะตัดให้มีขนาด 2 x 2 cm^2 และต้องมีผิวเรียบ เพื่อจะได้ใส่ในที่วางชิ้นงานของเครื่อง XRD ได้ โดยชิ้นงานที่นำมาทดสอบจะถูกเก็บไว้ใน chamber ที่ควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ 53 % โดยจะนำมาวิเคราะห์ XRD เมื่อเวลาผ่านไป 0, 15, 30 และ 60 วัน

3.5.9.2 สภาวะที่ใช้ในการวิเคราะห์ด้วย XRD คือใช้ CuK_{α} (λ=1.5418 A°) และ voltage เท่ากับ 30 kV ใช้กระแสไฟฟ้าในการวิเคราะห์ 30 mA มุมที่ทำการศึกษา 2θ = 10-30° ความละเอียดในการกวาดมุม 1.2 องศาต่อนาที

3.5.9.3 หลังจากนั้นทำการวิเคราะห์ผลโดยใช้โปรแกรม JID Jade 6



ภาพที่ 18 กระจกสไลด์สำหรับใช้ทดสอบชิ้นงานที่มีลักษณะเป็นผง



ภาพที่ 19 การเตรียมชิ้นงาน TPS สำหรับทดสอบด้วยเครื่อง XRD

3.5.10 การวิเคราะห์ค่าเฉลี่ยของผลการทดสอบด้วยสถิติ

นำข้อมูลผลการทดสอบต่างๆที่ได้มาวิเคราะห์ความแตกต่างของค่าเฉลี่ย โดยใช้สถิติ One way ANOVA ที่ระดับความเชื่อมั่น 99 % ซึ่งใช้โปรแกรม SPSS version 12 ในการคำนวณ หลังจากนั้นการแสดงผลทางสถิติจะทำการแทนด้วยสัญลักษณ์ภาษาอังกฤษเป็นตัวยกสูงขนาดเล็ก ซึ่งอักษรที่เหมือนกันแสดงว่ามีค่าเฉลี่ยไม่แตกต่างกัน

บทที่ 4
ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

4.1 การพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิค FT-IR และ ^{1}H-NMR

4.1.1 การสังเคราะห์พลาสติไซเซอร์

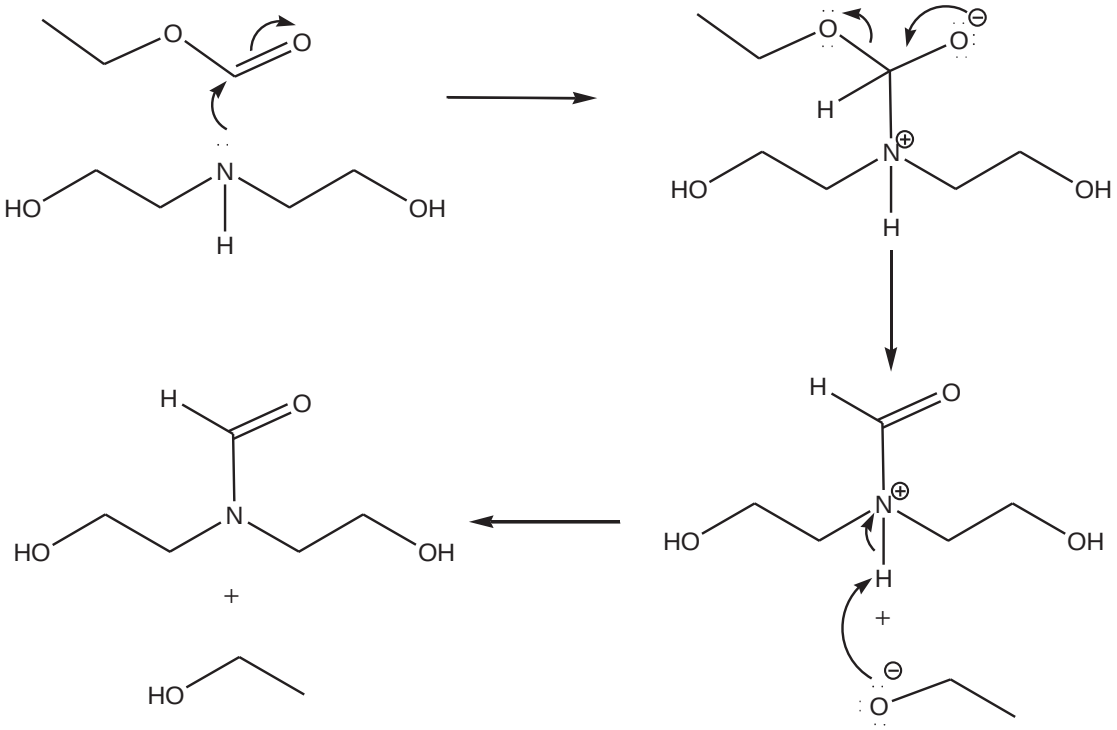
ในการสังเคราะห์พลาสติไซเซอร์ 3 ชนิดคือ N,N-bis(2-hydroxyethyl)formamide (BHF), N,N-bis(2-hydroxyethyl)acetamide (BHA) และ N,N-bis(2-hydroxyethyl)benzamide (BHB) จากสารตั้งต้นคือ diethanolamine ทำปฏิกิริยากับ ethyl formate, ethyl acetate และ ethyl benzoate ตามลำดับ จากการพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิค FT-IR และ ^{1}H-NMR ได้ผลการวิเคราะห์ ดังนี้

4.1.1.1 การสังเคราะห์ N,N-bis(2-hydroxyethyl)formamide (BHF)

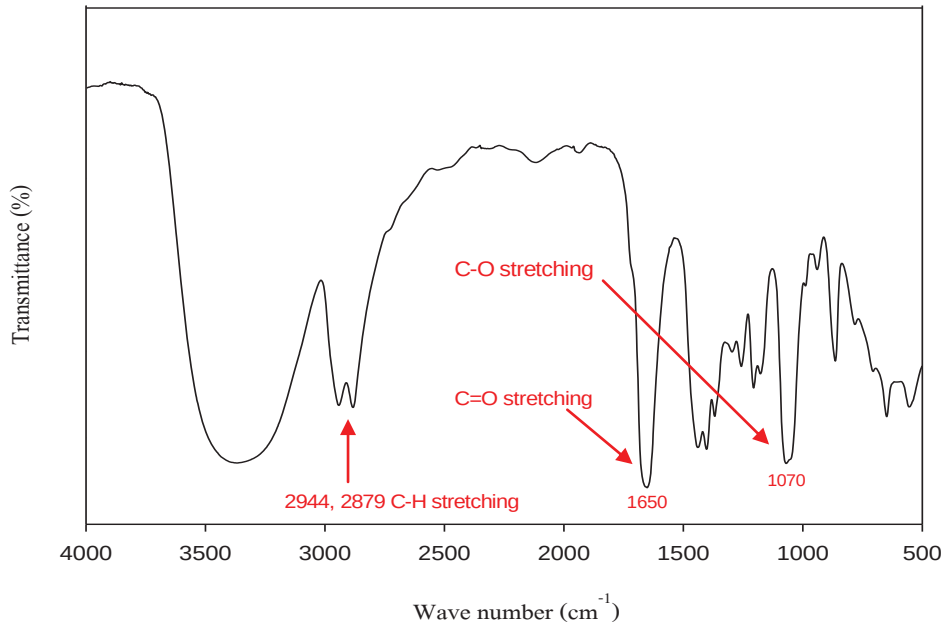
การสังเคราะห์ BHF ได้ใช้สารตั้งต้น 2 ชนิดคือ diethanolamine ทำปฏิกิริยากับ ethyl formate ที่อุณหภูมิ 60 °C แล้วมีการระเหย ethanol ซึ่งเป็น by-product ออก ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์เป็นของเหลว ใส หนืดเล็กน้อย มีร้อยละผลผลิต (% yield) เท่ากับ 96.32 % โดยปฏิกิริยาในการสังเคราะห์ของ BHF แสดงได้ ดังภาพที่ 20

จากการทดสอบด้วยเทคนิค FT-IR พบว่า BHF ที่ได้จากการสังเคราะห์นั้น จะมีเส้นสเปกตรัมเด่นชัดของ C-H stretching ที่ 2944, 2879 cm^{-1} C-O stretching ที่ 1070 cm^{-1} C-O bending ที่ 1440, 1400 cm^{-1} และจะมีลักษณะเฉพาะของสารประกอบเอไมด์คือหมู่ C=O stretching ที่ 1650 cm^{-1} [28] ดังแสดงในภาพที่ 21

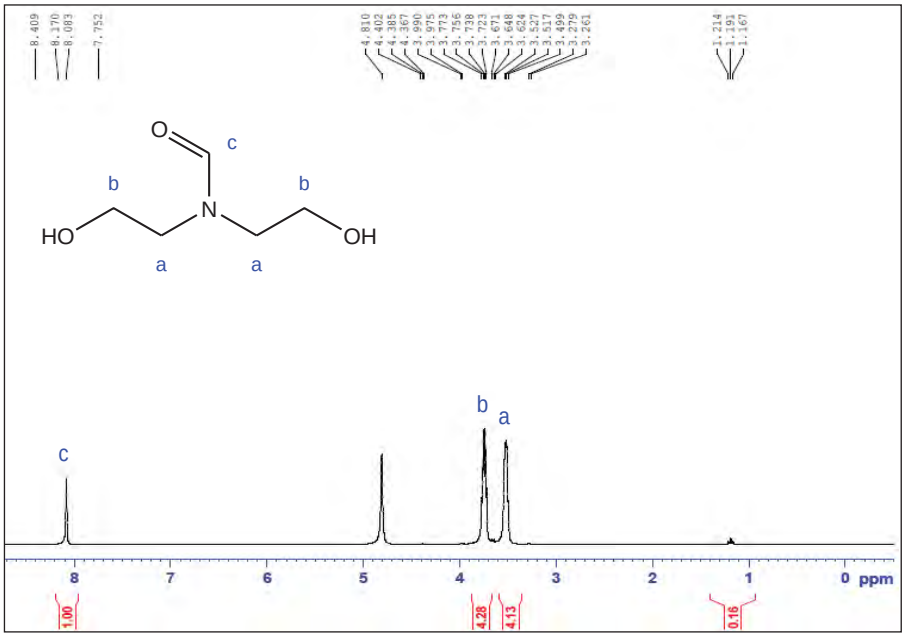
จากการทดสอบด้วยเทคนิค ^{1}H-NMR พบว่า BHF ที่ได้จากการสังเคราะห์นั้น จะเกิดสเปกตรัมขึ้นที่ตำแหน่งสัญญาณ 8.08 ppm (ตำแหน่ง c ในภาพที่ 22) เป็นโปรตอนที่เกาะอยู่กับอะตอมของคาร์บอนซึ่งต่อด้วยพันธะคู่อยู่กับอะตอมของออกซิเจน นอกจากนี้จะมีเส้นสเปกตรัมของโปรตอนของหมู่ CH_2 ที่ต่อกับอะตอมของไนโตรเจนจะปรากฏที่ตำแหน่ง 3.52 ppm (ตำแหน่ง a ในภาพที่ 22) และโปรตอนของหมู่ CH_2 ที่ต่อกับหมู่ hydroxyl จะปรากฏที่ตำแหน่ง 3.73 ppm (ตำแหน่ง b ในภาพที่ 22)



ภาพที่ 20 ปฏิกิริยาในการสังเคราะห์ N,N-bis(2-hydroxyethyl)formamide



ภาพที่ 21 FT-IR spectrum ของ N,N-bis(2-hydroxyethyl)formamide



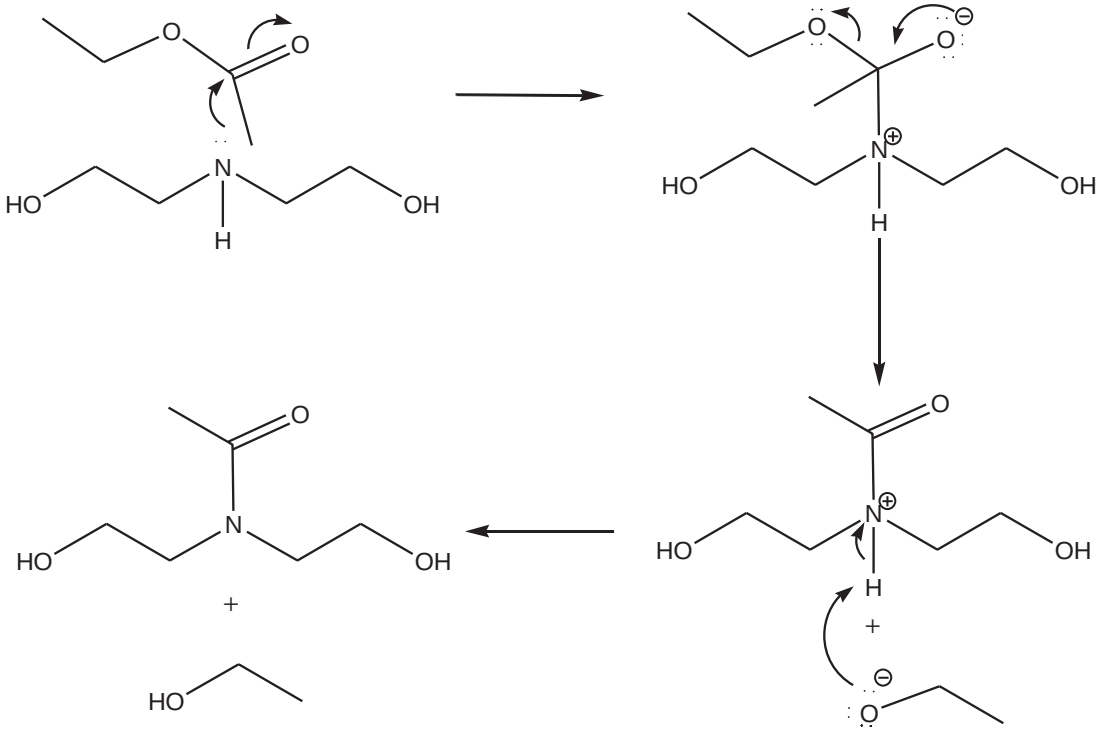
ภาพที่ 22 ^{1}H-NMR spectrum ของ N,N-bis(2-hydroxyethyl)formamide ใน D_2O

4.1.1.2 การสังเคราะห์ N,N-bis(2-hydroxyethyl)acetamide (BHA)

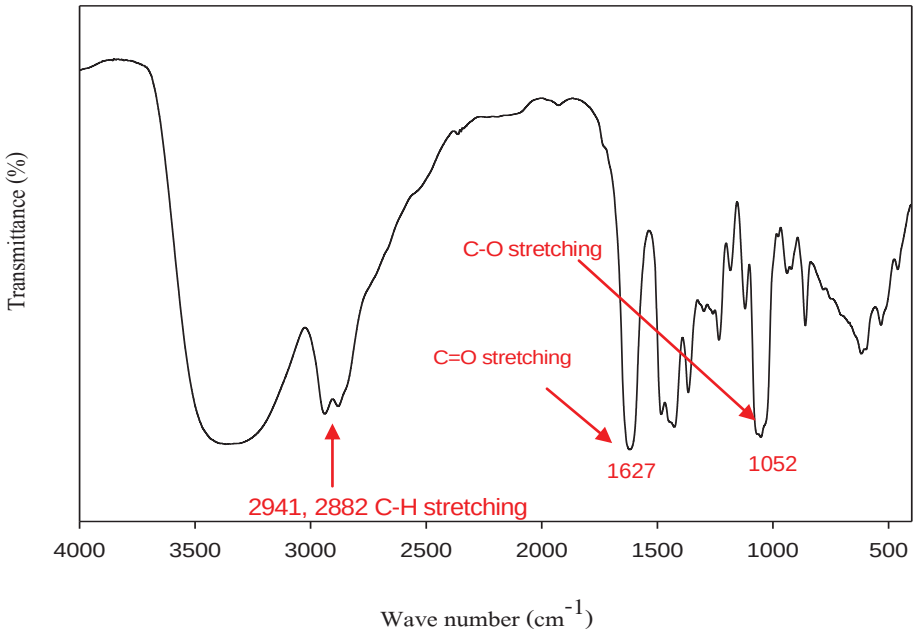
การสังเคราะห์ BHA ได้ใช้สารตั้งต้น 2 ชนิดคือ diethanolamine ทำปฏิกิริยากับ ethyl acetate ที่อุณหภูมิ 70 °C แล้วมีการระเหย ethanol ซึ่งเป็น by-product ออก ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์เป็นของเหลว ใส หนืดเล็กน้อย มีร้อยละผลผลิต (% yield) เท่ากับ 94.13 % โดยปฏิกิริยาในการสังเคราะห์ของ BHA แสดงได้ ดังภาพที่ 23

จากการทดสอบด้วยเทคนิค FT-IR พบว่า BHA ที่ได้จากการสังเคราะห์นั้น จะมีเส้นสเปกตรัมเด่นชัดของ C-H stretching ที่ 2941, 2882 cm^{-1} C-O stretching ที่ 1052 cm^{-1} C-O bending ที่ 1484, 1427 cm^{-1} และจะมีลักษณะเฉพาะของสารประกอบเอไมด์คือ หมู่ C=O stretching ที่ 1627 cm^{-1} ดังแสดงในภาพที่ 24

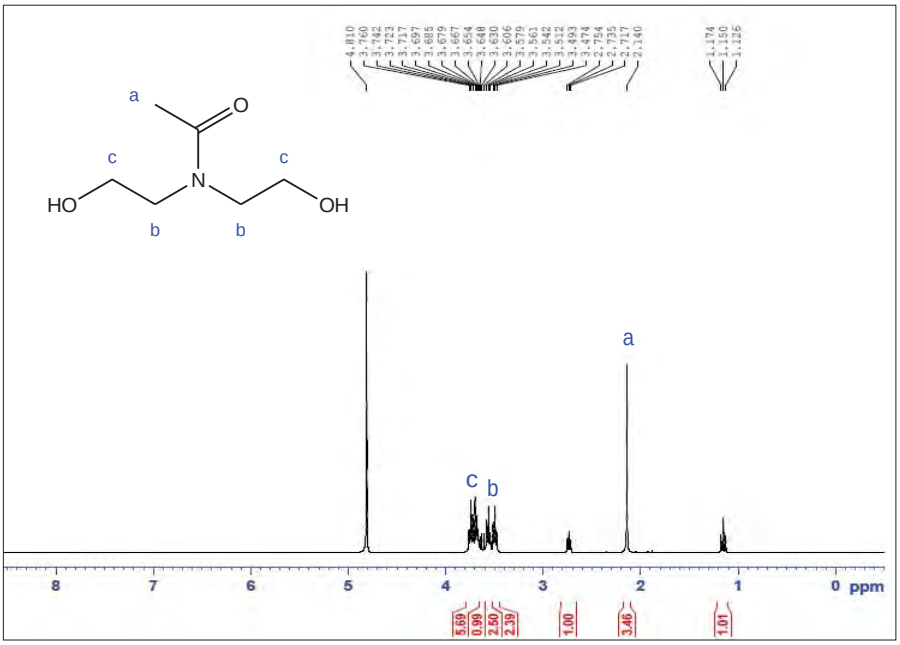
จากการทดสอบด้วยเทคนิค ^{1}H-NMR พบว่า BHA ที่ได้จากการสังเคราะห์นั้น จะมีเส้นสเปกตรัมของโปรตอนของหมู่ CH_2 ที่ต่อกับอะตอมของไนโตรเจนที่ตำแหน่ง 3.52 ppm (ตำแหน่ง b ในภาพที่ 25) และโปรตอนของหมู่ CH_2 ที่ต่อกับหมู่ hydroxyl ที่ตำแหน่ง 3.73 ppm (ตำแหน่ง c ในภาพที่ 25) นอกจากนี้จะมีเส้นสเปกตรัมเด่นชัดของโปรตอนของหมู่ CH_3 ที่ตำแหน่ง 2.21 (ตำแหน่ง a ในภาพที่ 25)



ภาพที่ 23 ปฏิกิริยาในการสังเคราะห์ N,N-bis(2-hydroxyethyl)acetamide



ภาพที่ 24 FT-IR spectrum ของ N,N-bis(2-hydroxyethyl)acetamide



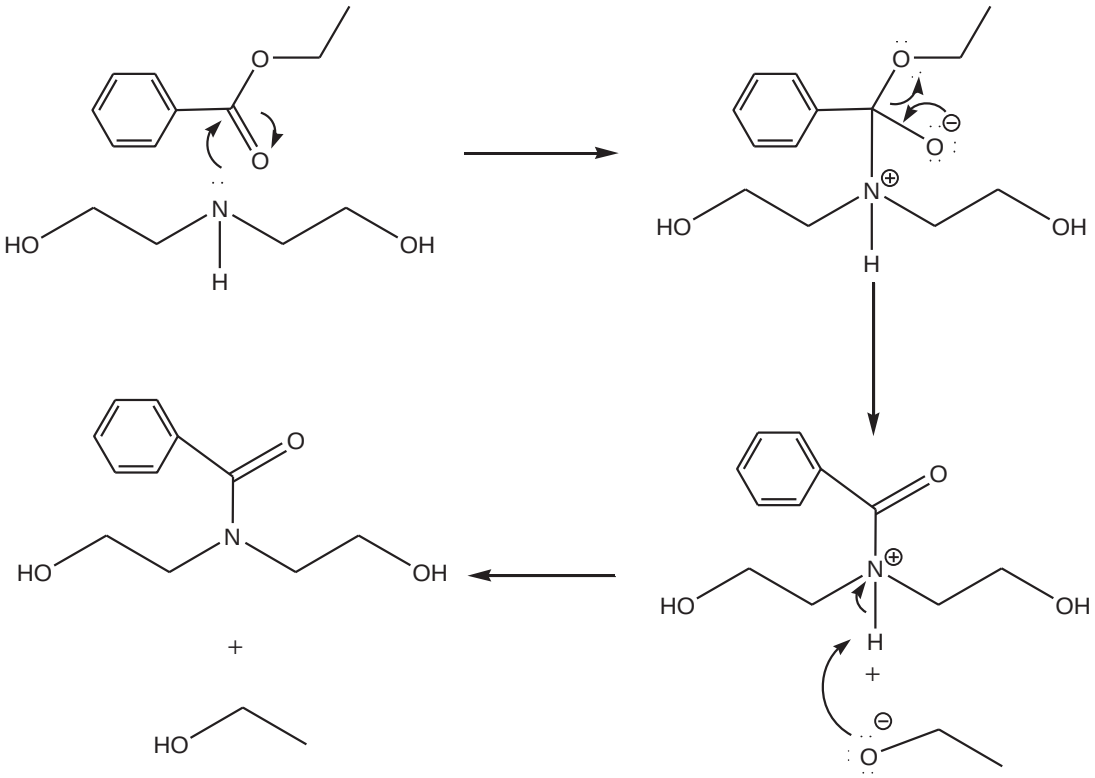
ภาพที่ 25 ^{1}H-NMR spectrum ของ N,N-bis(2-hydroxyethyl)acetamide ใน D_2O

4.1.1.3 การสังเคราะห์ N,N-bis(2-hydroxyethyl)benzamide (BHB)

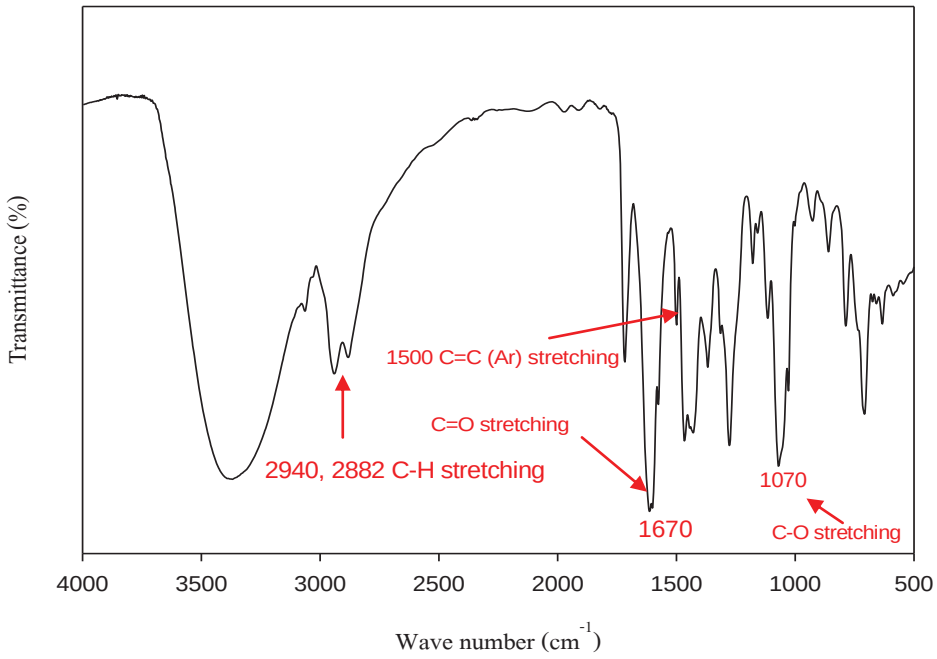
การสังเคราะห์ BHB ได้ใช้สารตั้งต้น 2 ชนิดคือ diethanolamine ทำปฏิกิริยากับ ethyl benzoate ที่อุณหภูมิ 110 °C แล้วมีการระเหย ethanol ซึ่งเป็น by-product ออก ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์เป็นของเหลว ใส หนืดเล็กน้อย มีร้อยละผลผลิต (% yield) เท่ากับ 87.92 % โดยปฏิกิริยาในการสังเคราะห์ของ BHB แสดงได้ ดังภาพที่ 26

จากการทดสอบด้วยเทคนิค FT-IR พบว่า BHB ที่ได้จากการสังเคราะห์นั้น จะมีเส้นสเปกตรัมที่เด่นชัดของ C-H stretching ที่ 2940, 2882 cm^{-1} C-O stretching ที่ 1070 cm^{-1} C-O bending ที่ 1466, 1429 cm^{-1} รวมทั้งมี C=C stretching (Ar) ที่ 1500 cm^{-1}และจะมีลักษณะเฉพาะของสารประกอบเอไมด์คือหมู่ C=O stretching ที่ 1670 cm^{-1} ดังแสดงในภาพที่ 27

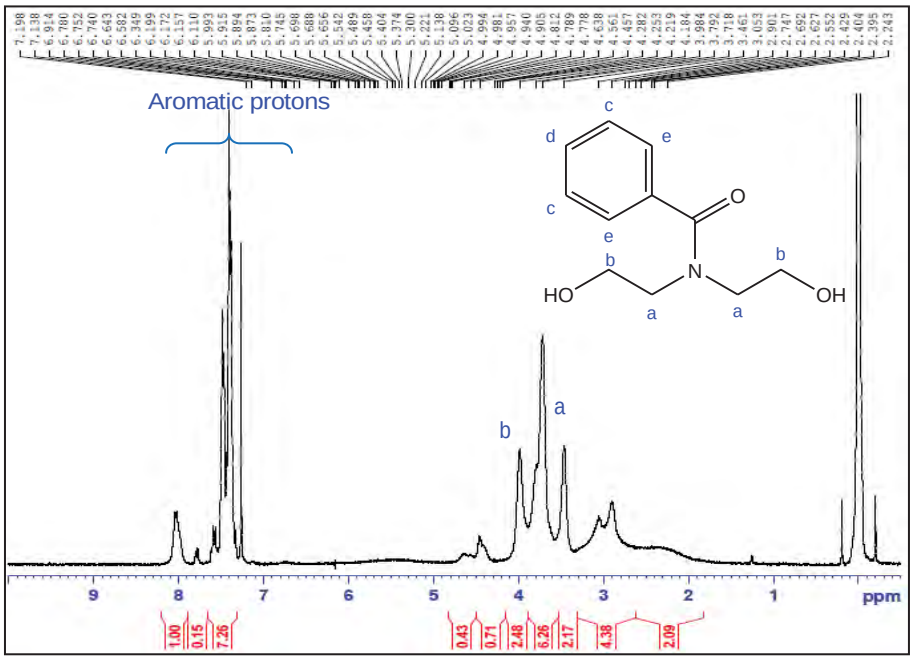
จากการทดสอบด้วยเทคนิค ^{1}H-NMR พบว่า BHB ที่ได้จากการสังเคราะห์นั้น จะมีเส้นสเปกตรัมของโปรตอนของหมู่ CH_2 ที่ต่อกับอะตอมของไนโตรเจน ที่ตำแหน่ง 3.40 ppm (ตำแหน่ง a ในภาพที่ 28) และโปรตอนของหมู่ CH_2 ที่ต่อกับหมู่ hydroxyl ที่ตำแหน่ง 3.90 ppm (ตำแหน่ง b ในภาพที่ 28) นอกจากนี้ยังมีสเปกตรัมของโปรตอนบนวงแหวนอะโรมาติกอยู่ในช่วง 7.4-8.0 ppm ดังภาพที่ 28



ภาพที่ 26 ปฏิกิริยาในการสังเคราะห์ N,N-bis(2-hydroxyethyl)benzamide



ภาพที่ 27 FT-IR spectrum ของ N,N-bis(2-hydroxyethyl)benzamide



ภาพที่ 28 ^{1}H-NMR spectrum ของ N,N-bis(2-hydroxyethyl)benzamide ใน $CDCl_3$

4.1.2 การสังเคราะห์สารเคลือบผิว

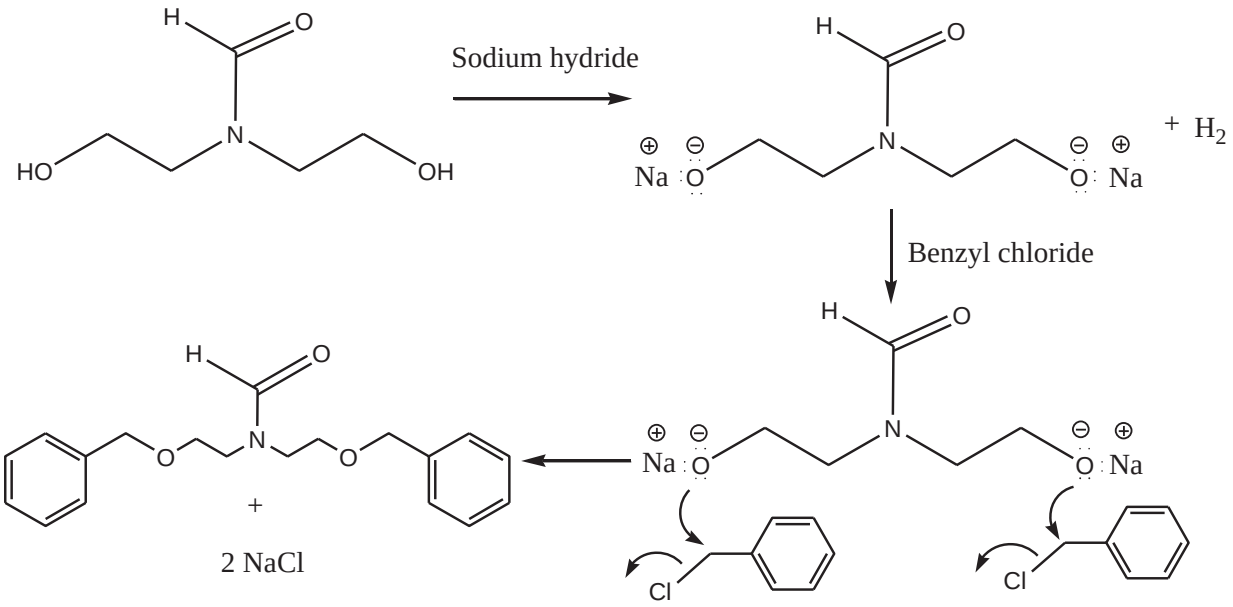
4.1.2.1 การสังเคราะห์ N,N-bis(2-(benzyloxy)ethyl)formamide (BBF)

การสังเคราะห์ BBF ทำได้โดยใส่ NaH ลงไปใน BHF ที่ได้จากการสังเคราะห์ในตอนแรก แล้วเติม benzyl chloride ลงไปโดยทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 60 °C หลังจากนั้นนำไปตกตะกอนใน ethanol เพื่อแยกเกลือ NaCl ออก จะได้ BBF เป็นของเหลวหนืด สีเหลือง มีร้อยละผลผลิต (% yield) เท่ากับ 81.03 % โดยปฏิกิริยาในการสังเคราะห์ของ BBF แสดงได้ ดังภาพที่ 29

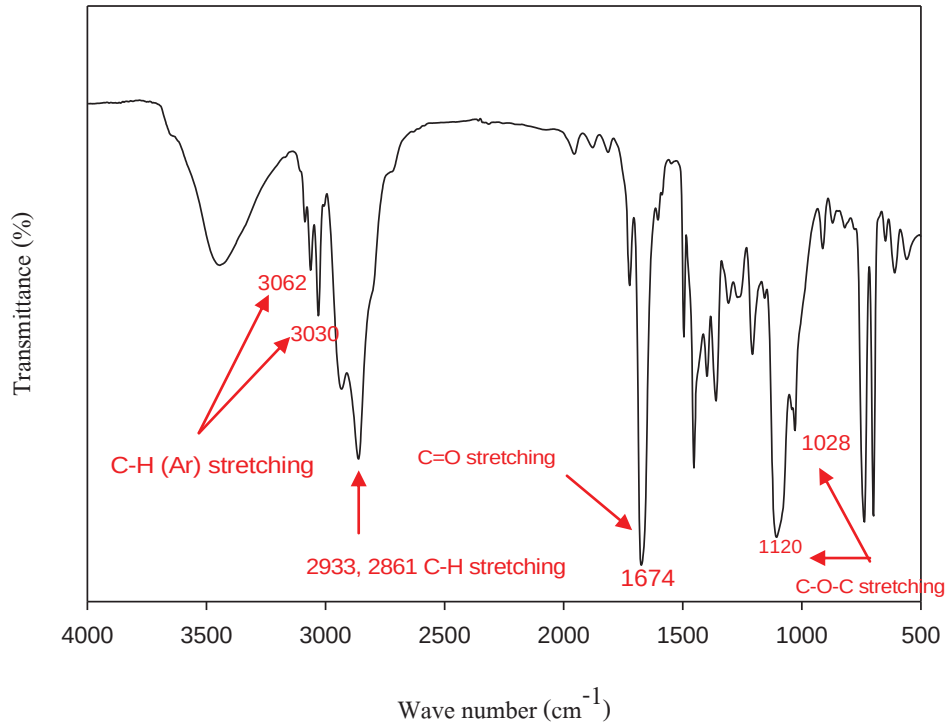
จากการทดสอบด้วยเทคนิค FT-IR พบว่า BBF ที่ได้จากการสังเคราะห์นั้น จะปรากฏเส้นสเปกตรัมเด่นชัดของ C-H stretching ที่ 2933, 2861 cm^{-1} C=O stretching ที่ 1674 cm^{-1} นอกจากนี้จะมีเส้นสเปกตรัมที่เด่นชัดที่เพิ่มขึ้นมาซึ่งจะไม่พบในกรณี BHF คือ C-O-C stretching ของหมู่อีเทอร์ในช่วง 1050-1250 cm^{-1} และ C=C stretching (Ar) ที่ 1453, 1495 cm^{-1} C-H stretching (Ar) ที่ 3062, 3030 cm^{-1} C-H bending (Ar) ที่ 734, 699 cm^{-1} ซึ่งแสดงถึง benzene ที่มีหมู่แทนที่หมู่เดียว [34] ดังภาพที่ 30

จากการทดสอบด้วยเทคนิค ^{1}H-NMR พบว่า BBF ที่ได้จากการสังเคราะห์นั้น จะเกิดสเปกตรัมขึ้นที่ตำแหน่งสัญญาณ 3.23 ppm (ตำแหน่ง a ในภาพที่ 31) เป็น

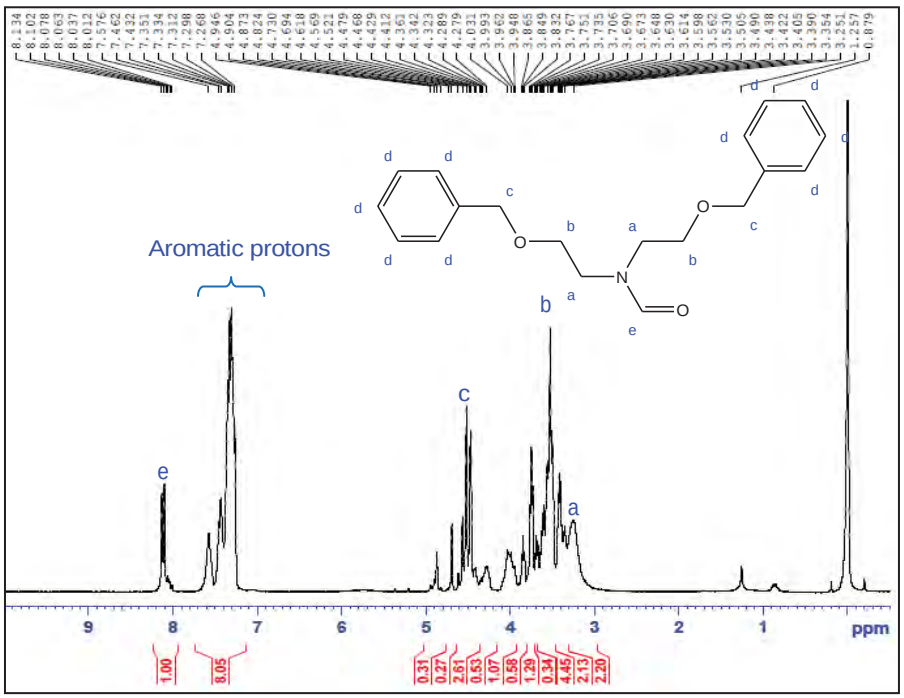
โปรตอนที่เกาะอยู่กับอะตอมของคาร์บอนซึ่งต่ออยู่กับอะตอมของไนโตรเจน ส่วนสเปกตรัมที่ตำแหน่งสัญญาณ 8.08 ppm (ตำแหน่ง e ในภาพที่ 31) เป็นโปรตอนที่เกาะอยู่กับคาร์บอนซึ่งต่อด้วยพันธะคู่อยู่กับอะตอมของออกซิเจน นอกจากนี้ยังมีสเปกตรัมของโปรตอนบนวงแหวนอะโรมาติกที่เด่นชัดเพิ่มขึ้นมาซึ่งจะไม่พบในกรณี BHF อยู่ในช่วง 7.2-7.6 ppm ดังภาพที่ 31



ภาพที่ 29 ปฏิกิริยาในการสังเคราะห์ N,N-bis(2-(benzyloxy)ethyl)formamide



ภาพที่ 30 FT-IR spectrum ของ N,N-bis(2-(benzyloxy)ethyl)formamide



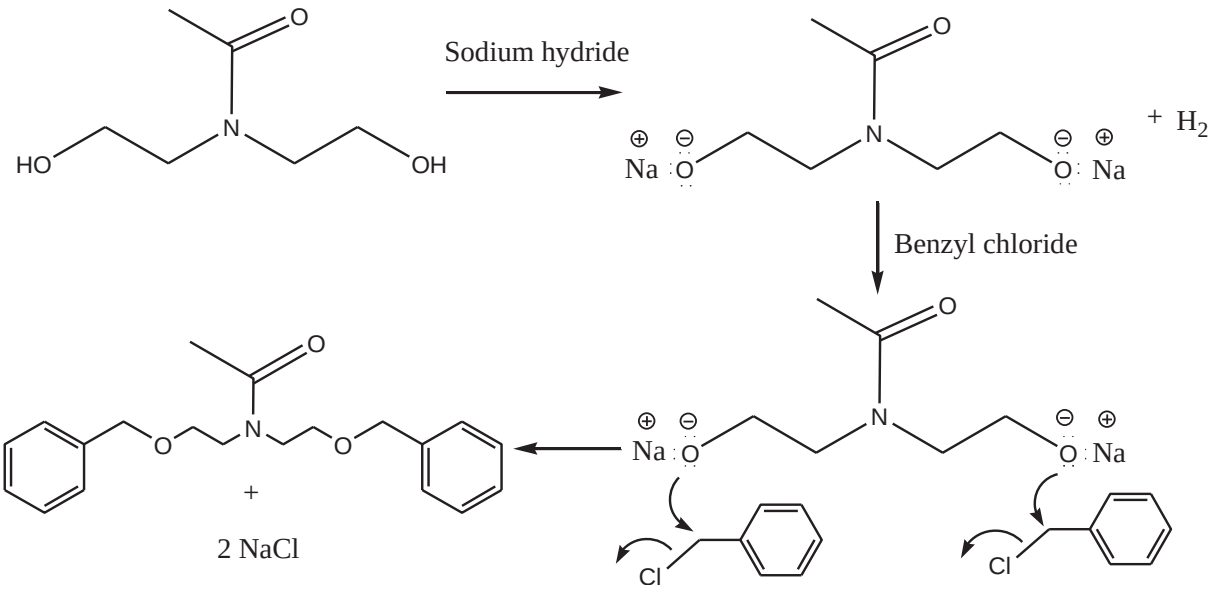
ภาพที่ 31 ^{1}H-NMR spectrum ของ N,N-bis(2-(benzyloxy)ethyl)formamide ใน $CDCl_3$

4.1.2.2 การสังเคราะห์ N,N-bis(2-(benzyloxy)ethyl)acetamide (BBA)

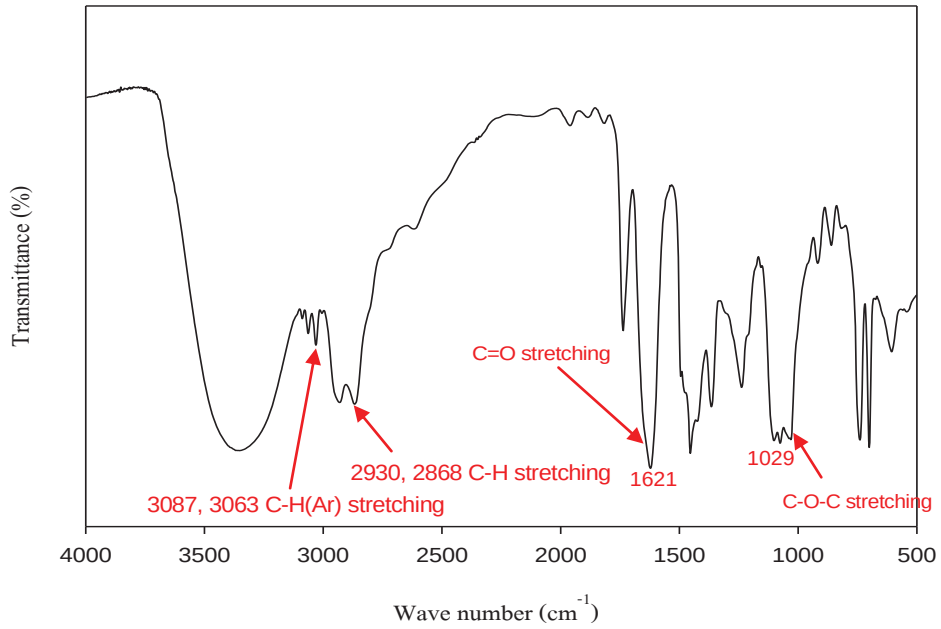
การสังเคราะห์ BBA ทำได้โดยใส่ NaH ลงไปใน BHA ที่ได้จากการสังเคราะห์ในตอนแรก แล้วเติม benzyl chloride ลงไปโดยทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 60 °C หลังจากนั้นนำไปตกตะกอนใน ethanol เพื่อแยกเกลือ NaCl ออก จะได้ BBA เป็นของเหลวหนืด สีเหลือง มีร้อยละผลผลิต (% yield) เท่ากับ 77.14 % โดยปฏิกิริยาในการสังเคราะห์ของ BBA แสดงได้ ดังภาพที่ 32

จากการทดสอบด้วยเทคนิค FT-IR พบว่า BBA ที่ได้จากการสังเคราะห์นั้น จะปรากฏเส้นสเปกตรัมเด่นชัดของ C-H stretching ที่ 2930, 2868 cm^{-1} C=O stretching ที่ 1621 cm^{-1} นอกจากนี้จะมีเส้นสเปกตรัมที่เด่นชัดที่เพิ่มขึ้นมาซึ่งจะไม่พบในกรณี BHA คือ C-O-C stretching ของหมู่อีเทอร์ในช่วง 1050-1250 cm^{-1} และ C=C stretching (Ar) ที่ 1454 cm^{-1} C-H stretching (Ar) ที่ 3087, 3063 cm^{-1} C-H bending (Ar) ที่ 700, 740 cm^{-1} ซึ่งแสดงถึง benzene ที่มีหมู่แทนที่หมู่เดียวดังภาพที่ 33

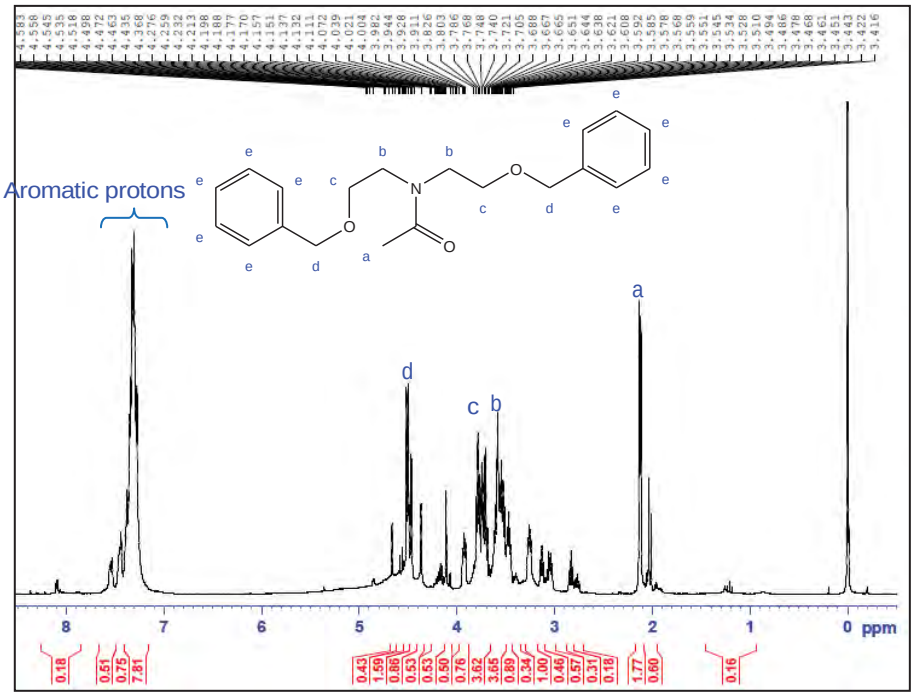
จากการทดสอบด้วยเทคนิค ^{1}H-NMR พบว่า BBA ที่ได้จากการสังเคราะห์นั้น จะเกิดสเปกตรัมขึ้นที่ตำแหน่งสัญญาณ 3.48 ppm (ตำแหน่ง b ในภาพที่ 34) เป็นโปรตอนที่เกาะอยู่กับอะตอมของคาร์บอนซึ่งต่ออยู่กับอะตอมของไนโตรเจน ส่วนสเปกตรัมที่ตำแหน่งสัญญาณ 2.10 ppm (ตำแหน่ง a ในภาพที่ 34) เป็นโปรตอนของหมู่ CH_3 นอกจากนี้ยังมีสเปกตรัมของโปรตอนบนวงแหวนอะโรมาติกที่เด่นชัดเพิ่มขึ้นมาซึ่งจะไม่พบในกรณี BHA อยู่ในช่วง 7.2-7.6 ppm ดังภาพที่ 34



ภาพที่ 32 ปฏิกิริยาในการสังเคราะห์ N,N-bis(2-(benzyloxy)ethyl)acetamide



ภาพที่ 33 FT-IR spectrum ของ N,N-bis(2-(benzyloxy)ethyl)acetamide



ภาพที่ 34 ^{1}H-NMR spectrum ของ N,N-bis(2-(benzyloxy)ethyl)acetamide ใน $CDCl_3$

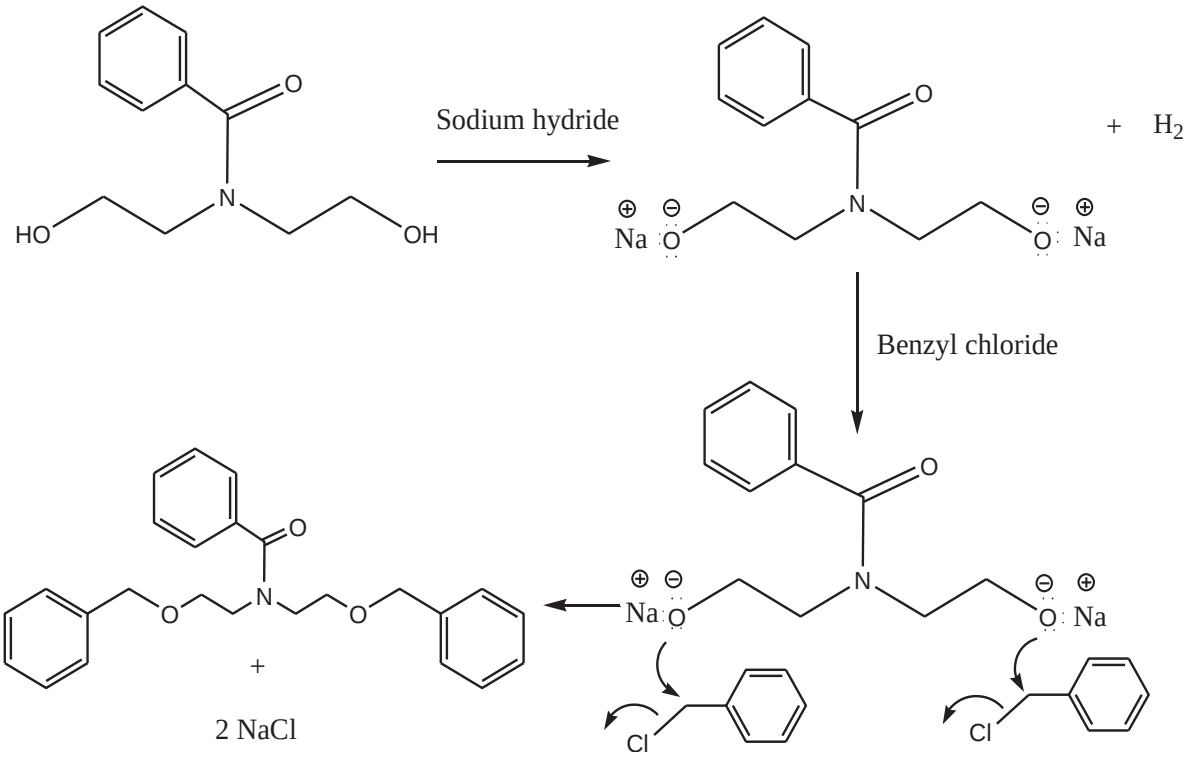
4.1.2.3 การสังเคราะห์ N,N-bis(2-(benzyloxy)ethyl)benzamide (BBB)

การสังเคราะห์ BBB ทำได้โดยใส่ NaH ลงไปใน BHB ที่ได้จากการสังเคราะห์ในตอนแรก แล้วเติม benzyl chloride ลงไปโดยทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 60 °C หลังจากนั้นนำไปตกตะกอนใน ethanol เพื่อแยกเกลือ NaCl ออก จะได้ BBB เป็นของเหลวหนืด สีเหลือง มีร้อยละผลผลิต (% yield) เท่ากับ 72.34 % โดยปฏิกิริยาในการสังเคราะห์ของ BBB แสดงได้ ดังภาพที่ 35

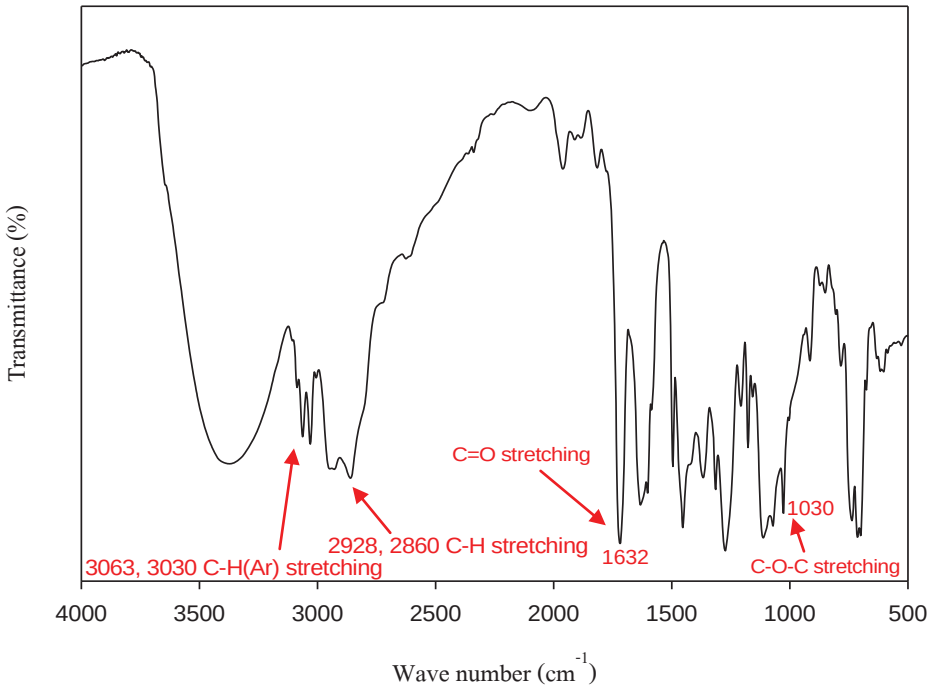
จากการทดสอบด้วยเทคนิค FT-IR พบว่า BBB ที่ได้จากการสังเคราะห์นั้น จะปรากฏเส้นสเปกตรัมเด่นชัดของ C-H stretching ที่ 2928, 2860 cm^{-1} C=O stretching ที่ 1632 cm^{-1} C=C stretching (Ar) ที่ 1453 cm^{-1} C-H stretching (Ar) ที่ 3063, 3030 cm^{-1} C-H bending (Ar) ที่ 737, 713 cm^{-1} ซึ่งแสดงถึง benzene ที่มีหมู่แทนที่หมู่เดียว นอกจากนี้จะมีเส้นสเปกตรัมที่เด่นชัดที่เพิ่มขึ้นมาซึ่งจะไม่พบในกรณี BHB คือ C-O-C stretching ของหมู่อีเทอร์ที่ตำแหน่ง 1027 cm^{-1} ดังภาพที่ 36

จากการทดสอบด้วยเทคนิค ^{1}H-NMR พบว่า BBB ที่ได้จากการสังเคราะห์นั้น จะเกิดสเปกตรัมขึ้นที่ตำแหน่งสัญญาณ 3.47 ppm (ตำแหน่ง a ในภาพที่ 37) เป็น

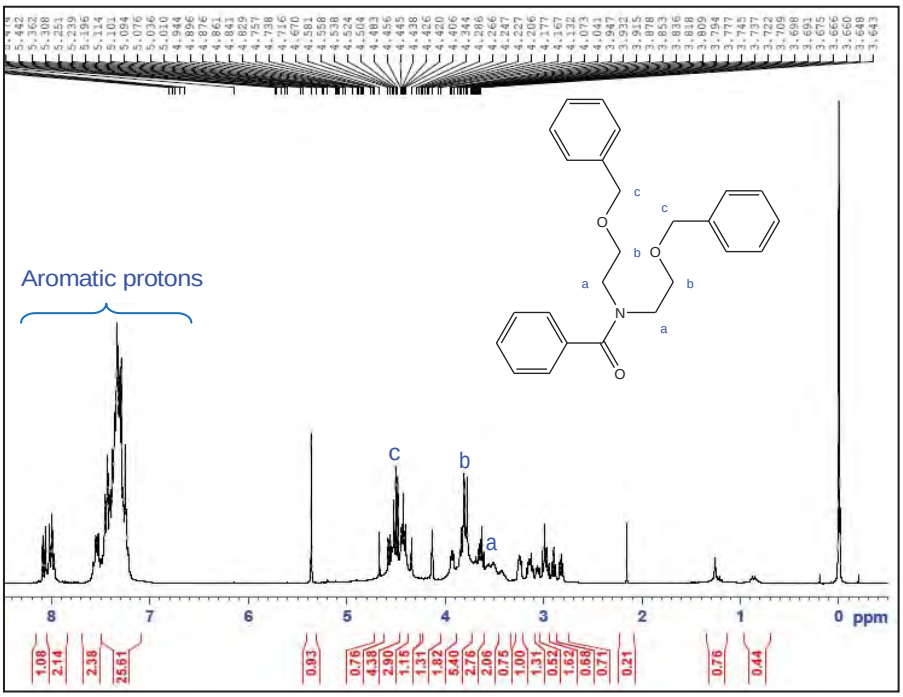
โปรตอนที่ติดอยู่กับอะตอมของคาร์บอนซึ่งต่ออยู่กับอะตอมของไนโตรเจน ส่วนสเปกตรัมที่ตำแหน่งสัญญาณ 7.2-8.2 ppm เป็นโปรตอนบนวงแหวนอะโรมาติกดังภาพที่ 37 นอกจากนี้ยังมีสเปกตรัมของโปรตอนที่เกาะอยู่กับคาร์บอนซึ่งอยู่ระหว่างอะตอมของออกซิเจนกับวงแหวนอะโรมาติกที่ตำแหน่งสัญญาณ 4.63 ppm (ตำแหน่ง c ในภาพที่ 37) ซึ่งจะไม่พบในกรณีของ BHB



ภาพที่ 35 ปฏิกิริยาในการสังเคราะห์ N,N-bis(2-(benzyloxy)ethyl)benzamide



ภาพที่ 36 FT-IR spectrum ของ N,N-bis(2-(benzyloxy)ethyl)benzamide

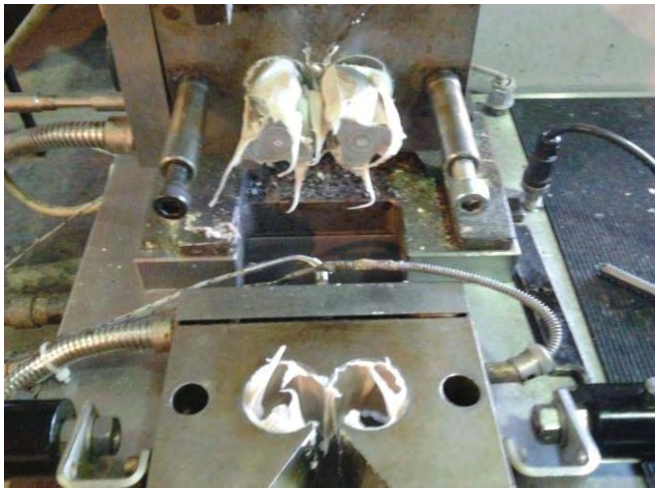


ภาพที่ 37 ^{1}H-NMR spectrum ของ N,N-bis(2-(benzyloxy)ethyl)benzamide ใน $CDCl_3$

4.2 การผสมแป้งมันสำปะหลังกับพลาสติไซเซอร์ที่สังเคราะห์ได้

ก่อนที่จะผสมแป้งมันสำปะหลังกับพลาสติไซเซอร์จะนำแป้งมันสำปะหลังไปอบในตู้อบสุญญากาศที่อุณหภูมิ 60 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมงเพื่อไล่ความชื้นออกหลังจากนั้นจะทำการผสมแป้งมันสำปะหลังกับพลาสติไซเซอร์ (premixing) ทิ้งไว้เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อให้ starch granule เกิดการบวมตัว [7] ทำให้พลาสติไซเซอร์แพร่เข้าไปใน starch granule ได้อย่างทั่วถึง ซึ่งจะส่งผลให้เกิดการ plasticization ได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น

การผสมด้วยเครื่อง internal mixer จะใช้อุณหภูมิในการผสม 160 °C ความเร็วรอบในการหมุน roller blade 60 รอบต่อนาที เป็นเวลา 12 นาที โดยในการผสมพบว่าเมื่อใช้ glycerol, BHF และ BHA เป็นพลาสติไซเซอร์ในอัตราส่วน 25, 30 และ 35% โดยน้ำหนัก แป้งสามารถหลอมเข้ากับพลาสติไซเซอร์ที่ใส่ลงไปได้ แต่เมื่อเปลี่ยนพลาสติไซเซอร์เป็น BHB ในอัตราส่วน 25, 30 และ 35% โดยน้ำหนัก พบว่าแป้งไม่เกิดการหลอม จึงได้ลองเพิ่มเวลาในการ premixing จาก 24 ชั่วโมง เป็น 72 ชั่วโมง แป้งก็ยังไม่เกิดการหลอม ซึ่งการที่แป้งไม่สามารหลอมเข้ากับ BHB ในขณะทำการผสมน่าจะเกิดจากโครงสร้างของ BHB ที่มีขนาดใหญ่กว่าพลาสติไซเซอร์ตัวอื่นรวมทั้งยังมีวงแหวน benzene ในโครงสร้างจึงขัดขวางการเกิด plasticization ดังนั้นจึงใช้พลาสติไซเซอร์ผสมระหว่าง BHF กับ BHB และ BHA กับ BHB แทนการใช้ BHB เป็นพลาสติไซเซอร์เพียงอย่างเดียว

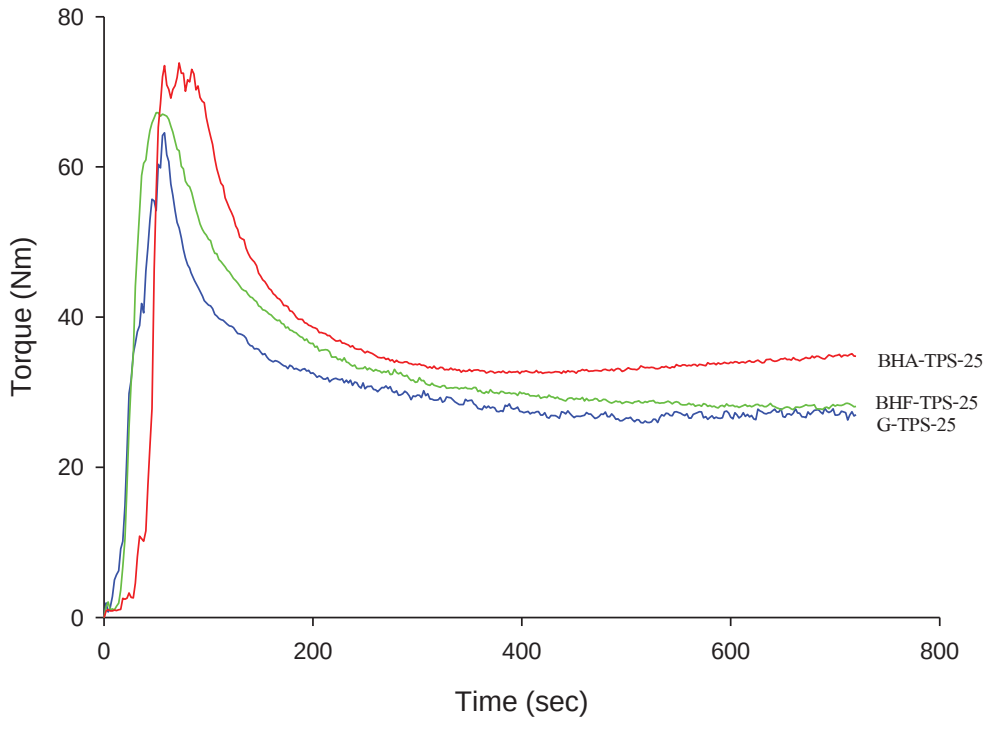


ภาพที่ 38 ลักษณะของ TPS ที่ออกจากเครื่อง Internal mixer

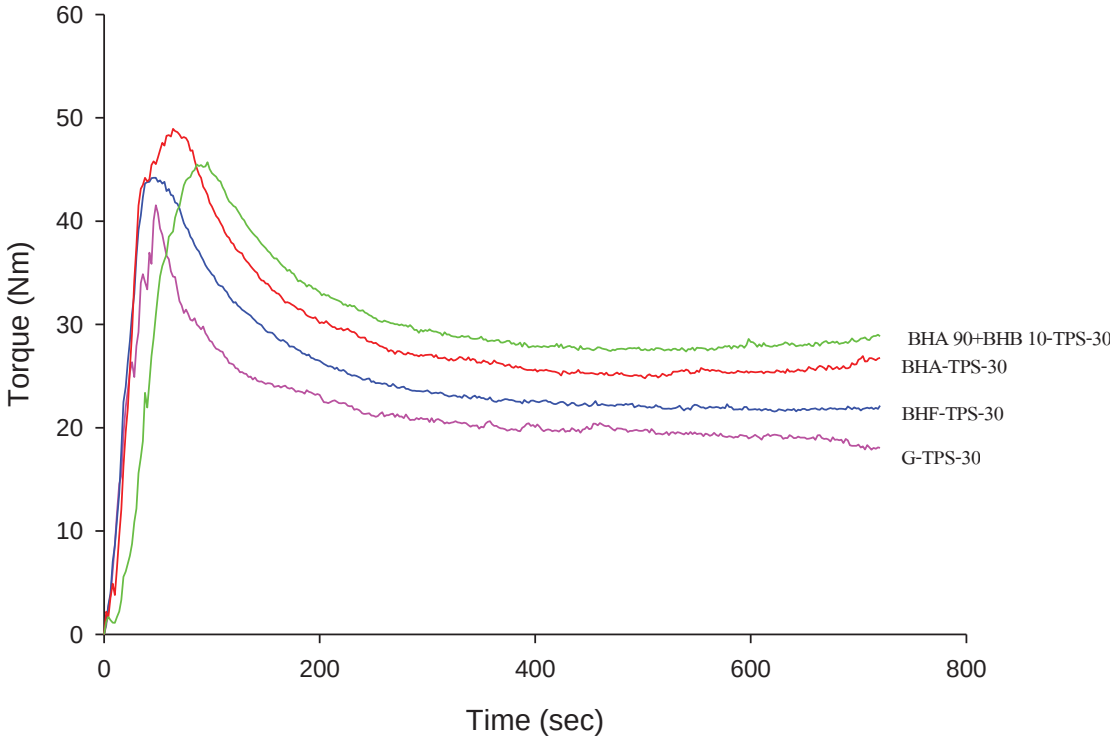
4.3 การศึกษาลักษณะการผสมแป้งมันสำปะหลังกับพลาสติไซเซอร์

การศึกษาพฤติกรรมการผสมและความหนืดขณะหลอมเหลวโดยใช้เครื่อง internal mixer โดยจะนำแป้งที่ผสมกับพลาสติไซเซอร์ในอัตราส่วนต่างๆ ดังตารางที่ 1 โดยอุณหภูมิที่ใช้ในการผสม 160°C และใช้ความเร็วรอบของ roller blade ในการผสมเท่ากับ 60 รอบต่อนาที เป็นเวลา 12 นาที โดยเครื่องจะรายงานค่า torque (Nm) บนแกน x และเวลาในการผสม (sec) บนแกน y ดังภาพที่ 39-41

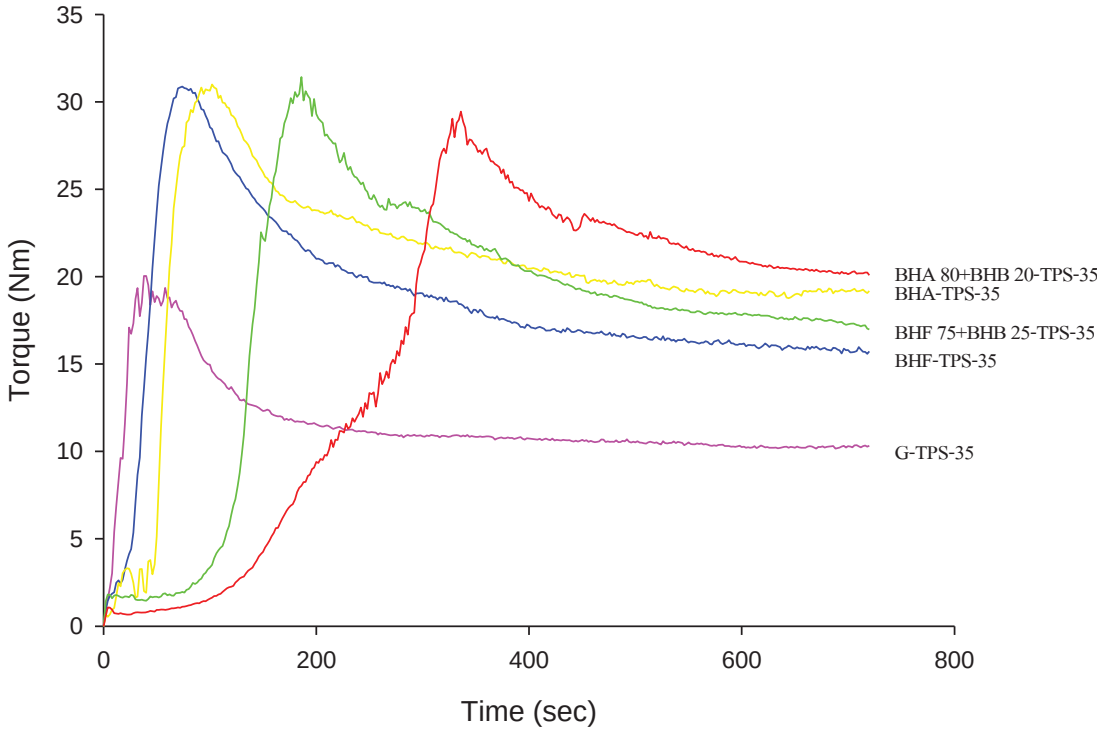
ส่วนค่าพลังงานในการผสม plasticization energy สามารถหาได้จากพื้นที่ใต้กราฟระหว่างค่า torque และเวลาในการผสม โดยเริ่มวัดจากค่า torque ที่เริ่มมีค่าสูงขึ้นจนถึงค่า torque สูงสุด (ส่วนผสมเริ่มเกิดการหลอมเป็นเนื้อเดียวกัน) ส่วนค่า steady torque จะวัดค่า torque ที่คงที่โดยจะเกิดหลังค่า torque สูงสุด ซึ่งผลจากการศึกษาแสดงไว้ในตารางที่ 2



ภาพที่ 39 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Torque และเวลาของ TPS เมื่อใช้พลาสติไซเซอร์ 25% โดยน้ำหนัก



ภาพที่ 40 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Torque และเวลาของ TPS เมื่อใช้พลาสติไซเซอร์ 30% โดยน้ำหนัก



ภาพที่ 41 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Torque และเวลาของ TPS เมื่อใช้พลาสติไซเซอร์ 35% โดยน้ำหนัก

ตารางที่ 2 แสดงค่า torque คงที่และค่าพลังงานในการผสมของแต่ละสูตร

สูตรของชิ้นงาน	ค่า Torque คงที่ (Nm) (steady torque)	ค่าพลังงานในการผสม (Nm.min) (plasticization energy)
G-TPS-25	27.0	29.9
G-TPS-30	14.2	17.1
G-TPS-35	10.3	7.3
BHF-TPS-25	28.1	29.1
BHF-TPS-30	21.9	16.8
BHF-TPS-35	13.9	16.5
BHA-TPS-25	38.2	43.8
BHA-TPS-30	26.8	27.2
BHA-TPS-35	19.2	24.3
BHF 75+BHB 25-TPS-35	17.0	26.9
BHA 80+BHB 20-TPS-35	20.1	45.9
BHA 90+BHB 10-TPS-30	28.8	34.5

จากภาพที่ 39-41 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า torque และเวลาของ TPS เมื่อใช้พลาสติไซเซอร์ในปริมาณต่างๆ โดยกราฟที่ได้จะมีลักษณะคล้ายๆกันคือ ค่า torque จะมีค่าเริ่มสูงขึ้นในช่วงแรก เนื่องจาก starch granule บางส่วนเริ่มแตกออกจากนั้นโมเลกุลของพลาสติไซเซอร์จะแพร่เข้าสู่ starch granule ทำให้โมเลกุลขยายออกและเกิดการดูดซึมพลาสติไซเซอร์ ช่วงนี้ค่า torque จะมีค่าสูงสุดหรือที่เรียกว่า “ pseudo solid state ” หลังจากนั้นค่า torque จะมีค่าลดลง เนื่องจาก starch granule เริ่มแตกออกมากขึ้นและบางส่วนก็หลอมกลายเป็นของเหลวหนืด การที่ starch granule แตกออกได้นั้นเนื่องจากเมื่อเราให้ความร้อนและแรงเฉือน พลาสติไซเซอร์จะแทรกตัวอยู่ระหว่างสายโซ่โมเลกุลของแป้งและช่วยลดพันธะไฮโดรเจนระหว่างสายโซ่โมเลกุลของแป้งทำให้เกิดการหลอมได้ดีมากขึ้นซึ่งจะพบว่ากราฟเริ่มมีค่า torque ลดลง (torque decrease) จนกระทั้งถึงจุดที่ค่า torque มีค่าคงที่ (steady state torque) นั้นแสดงได้ว่า starch granule ได้แตกออกและหลอมเป็นเนื้อเดียวกัน [36]

ในการเปรียบเทียบความหนืดของพอลิเมอร์หลอมเหลว สามารถใช้ความสัมพันธ์ของสมการ Power law model ได้ดังนี้

$\tau = C_1T$, $\gamma = C_2N$

$\eta = \tau/\gamma = (C_1T/C_2N) = A(T/N)$

โดย τ คือค่า shear stress, η คือ ค่าความหนืด, γ คือ strain rate, T คือค่า torque, N คือความเร็วรอบในการหมุน roller blade และ C_1, C_2 คือ complex geometry ของ blade ดังนั้นค่า torque ที่วัดได้จะแปรผันตรงกับความหนืดของพอลิเมอร์

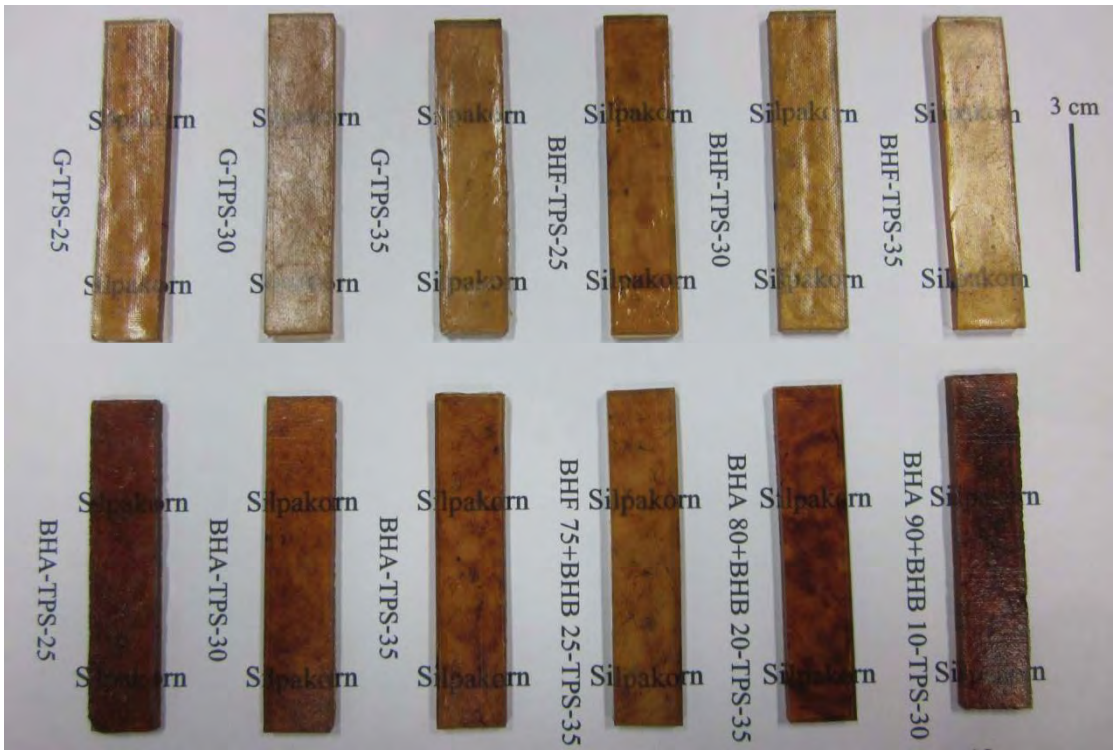
จากภาพที่ 39-41 แสดงให้เห็นพฤติกรรมการผสมของ TPS แต่ละสูตรซึ่งให้ค่า steady torque ที่แตกต่างกันโดยพบว่าเมื่อใช้เปอร์เซ็นต์พลาสติไซเซอร์ที่เท่ากัน การใช้ BHF หรือ BHA เป็นพลาสติไซเซอร์จะมีค่า steady torque และค่าพลังงานในการผสม มากกว่า glycerol เนื่องจาก BHF และ BHA มีความสามารถในการสร้างพันธะไฮโดรเจนที่แข็งแรงกับโมเลกุลของแป้งมากกว่า glycerol ทำให้โมเลกุลของแป้งเคลื่อนที่ผ่านกันได้ยาก ส่งผลให้ความหนืดขณะหลอมเหลวสูงขึ้น จึงทำให้ค่า steady torque สูงขึ้น สำหรับการใช้ BHA เป็นพลาสติไซเซอร์จะพบว่ามีค่า steady torque ที่สูงกว่า กรณีใช้ BHF เนื่องจากว่า BHA มีโครงสร้างที่ใหญ่กว่าสามารถขัดขวางการเคลื่อนที่ของสายโซ่โมเลกุลของแป้งได้ดีกว่าจึงทำให้มีค่า steady torque และค่าพลังงานในการผสมที่สูงกว่า

เมื่อมีการเติม BHB ลงไปเพื่อใช้เป็นพลาสติไซเซอร์ผสมพบว่า steady torque และค่าพลังงานในการผสม มีค่าสูงขึ้นกว่ากรณีที่ใช้ BHF หรือ BHA เป็นพลาสติไซเซอร์อย่างเดียว เนื่องจากว่า BHB มีโครงสร้างที่ใหญ่รวมทั้งยังมีหมู่ benzene จึงขัดขวางการเคลื่อนที่ของสายโซ่โมเลกุลของแป้งจึงทำให้มีค่า steady torque ที่สูงกว่า

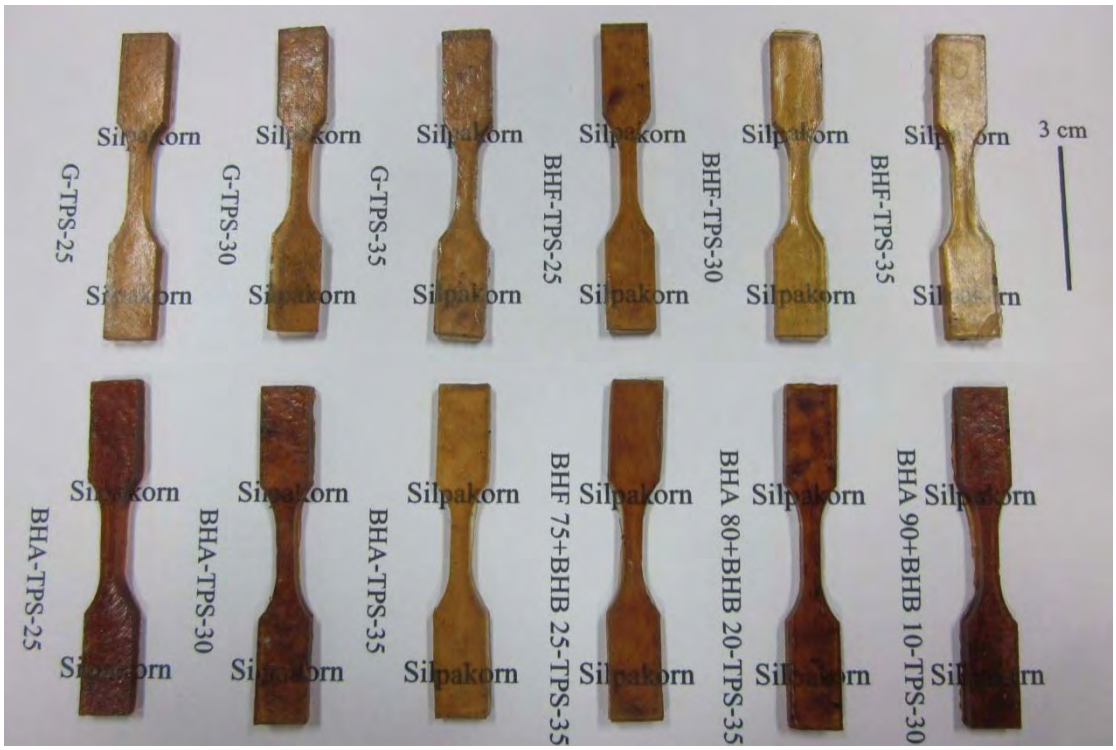
และพบว่าเมื่อทำการเพิ่มปริมาณของพลาสติไซเซอร์มากขึ้นค่า steady torque และ ค่าพลังงานในการผสมมีค่าลดลง เนื่องจากปริมาณของพลาสติไซเซอร์ที่มากขึ้นจะไปทำลายพันธะไฮโดรเจนระหว่างสายโซ่โมเลกุลของแป้งได้มากขึ้น จึงทำให้สายโซ่โมเลกุลของแป้งเคลื่อนที่ได้ง่ายขึ้นเมื่อได้รับแรงเฉือน

4.4 การขึ้นรูปชิ้นงาน TPS

นำ TPS ที่ผ่านการผสมด้วยเครื่อง internal mixer แล้วมาบดให้เป็นผง แล้วนำไปขึ้นรูปด้วยเทคนิค compression molding ที่อุณหภูมิ 170 $^{\circ}$C ซึ่งจะทำการขึ้นรูปเป็นชิ้นงานสำหรับทดสอบความต้านทานต่อแรงกระแทกและความต้านทานต่อแรงดึงยืด โดยลักษณะของชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูปจะแสดงในภาพที่ 42-43



ภาพที่ 42 ลักษณะชิ้นงาน Impact ของ TPS สูตรต่างๆ

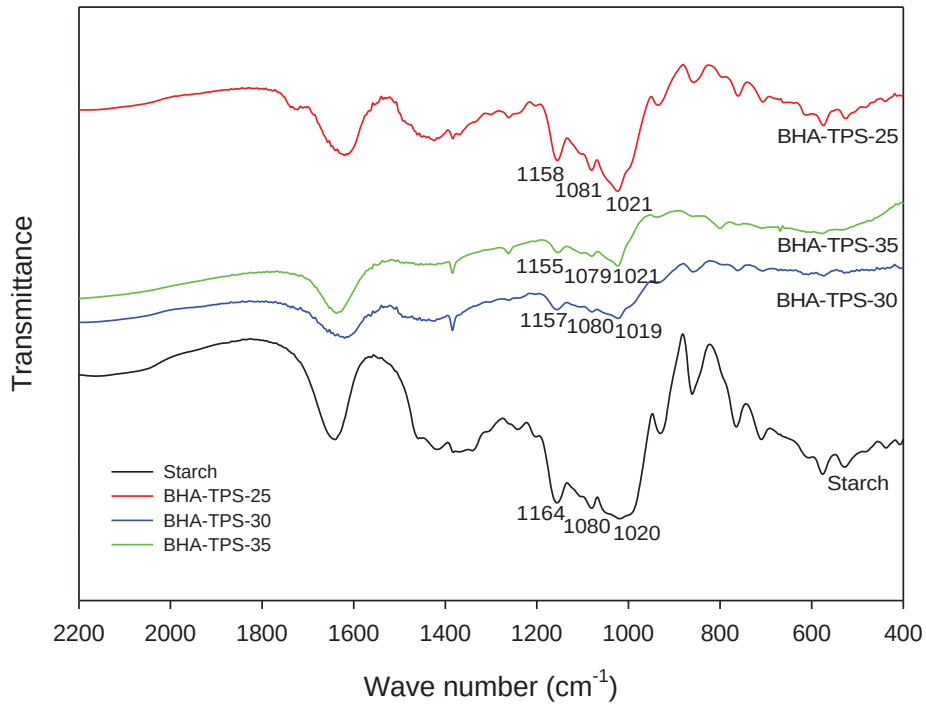


ภาพที่ 43 ลักษณะชิ้นงาน Tensile ของ TPS สูตรต่างๆ

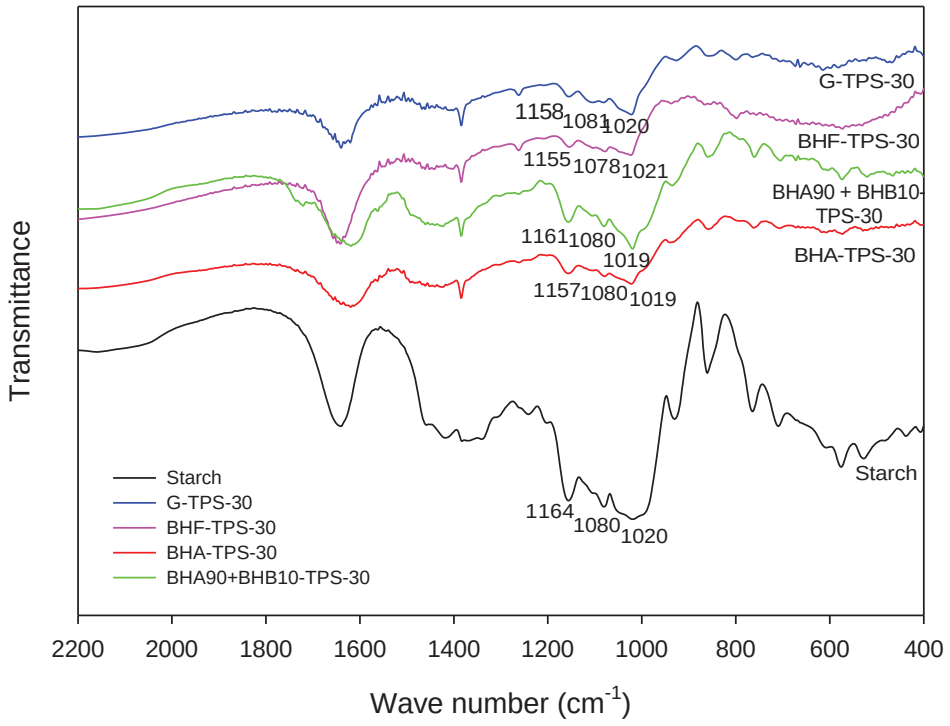
4.5 การศึกษาลักษณะกราฟ FT-IR ของแป้งมันสำปะหลังและชิ้นงาน TPS

เมื่อนำแป้งมันสำปะหลังมาทดสอบด้วยเทคนิค FT-IR จะพบพีคที่ตำแหน่ง 1080, 1164 cm^{-1} ซึ่งแสดงถึง C–O stretching ของหมู่ C–O–H ส่วนพีคที่ตำแหน่ง 1020 cm^{-1} แสดงถึงC–O stretching ของหมู่ C–O–C และเมื่อนำชิ้นงาน TPS มาทดสอบด้วยเทคนิค FT-IR จะพบว่าพีค C–O stretching ของหมู่ C–O–H และพีค C–O stretching ของหมู่ C–O–C มีการ shift เนื่องจากเกิด interaction ระหว่างพลาสติไซเซอร์กับโมเลกุลของแป้งโดยอะตอมไฮโดรเจนของหมู่ C–O–H และอะตอมออกซิเจนของหมู่ C–O–C มีส่วนร่วมในการเกิดพันธะไฮโดรเจน [6] โดยเฉพาะพีคที่ตำแหน่ง 1164 cm^{-1} เกิดการ shift ไปอยู่ในช่วง 1155-1161 cm^{-1} เมื่อพิจารณาพีคที่ตำแหน่ง 1164 cm^{-1} ของชิ้นงาน TPS สูตร G-TPS-30, BHF-TPS-30 และ BHA-TPS-30 มีค่า 1158 cm^{-1}, 1155 cm^{-1} และ 1157 cm^{-1} ตามลำดับ ซึ่งพบว่าเมื่อใช้ BHF เป็นพลาสติไซเซอร์ทำให้พีคที่ตำแหน่ง 1164 cm^{-1} เกิดการ shift ไปยังเลขคลื่นที่ต่ำกว่ากรณีที่ใช้ BHA และ glycerol เป็นพลาสติไซเซอร์ เนื่องจาก BHF สามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนกับโมเลกุลของแป้งแข็งแรงกว่า BHA และ glycerol ตามลำดับ เมื่อมีการเติม BHB ลงไปเพื่อใช้เป็นพลาสติไซเซอร์ผสมพบว่าพีคที่ตำแหน่ง 1164 cm^{-1} เกิดการ shift น้อยกว่ากรณีที่ไม่ผสม BHB ลงไป เนื่องจาก BHB มีหมู่ Benzene ซึ่งเป็นหมู่ที่ใหญ่จึงอาจไปขัดขวางการเกิดพันธะไฮโดรเจนกับโมเลกุลของแป้งได้

เมื่อพิจารณาพีคที่ตำแหน่ง 1164 cm^{-1} ของชิ้นงาน TPS สูตร BHA-TPS-25, BHA-TPS-30 และ BHA-TPS-35 มีค่า 1158 cm^{-1}, 1157 cm^{-1} และ 1155 cm^{-1} ตามลำดับ ซึ่งพบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณพลาสติไซเซอร์ทำให้พีคที่ตำแหน่ง 1164 cm^{-1} เกิดการ shift มากขึ้น เนื่องจากเมื่อปริมาณพลาสติไซเซอร์มากขึ้นอาจทำให้พลาสติไซเซอร์แทรกเข้าไประหว่างสายโซ่โมเลกุลของแป้งได้ทั่วถึงขึ้นจึงทำให้เกิดพันธะไฮโดรเจนกับโมเลกุลของแป้งได้ดีขึ้น



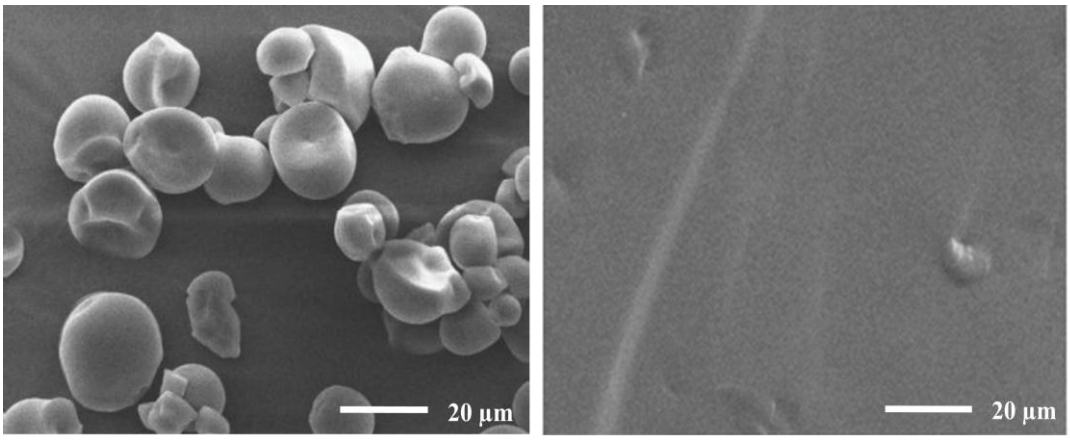
ภาพที่ 44 กราฟ FT-IR ของแป้งมันสำปะหลัง และชิ้นงาน TPS เมื่อใช้ BHA เป็นพลาสติไซเซอร์ในปริมาณ 25, 30 และ 35% โดยน้ำหนัก



ภาพที่ 45 กราฟ FT-IR ของแป้งมันสำปะหลัง และชิ้นงาน TPS เมื่อเติมพลาสติไซเซอร์ในปริมาณ 30% โดยน้ำหนัก

4.6 การศึกษาโครงสร้างสัณฐานวิทยาของชิ้นงาน TPS ด้วยเทคนิค SEM

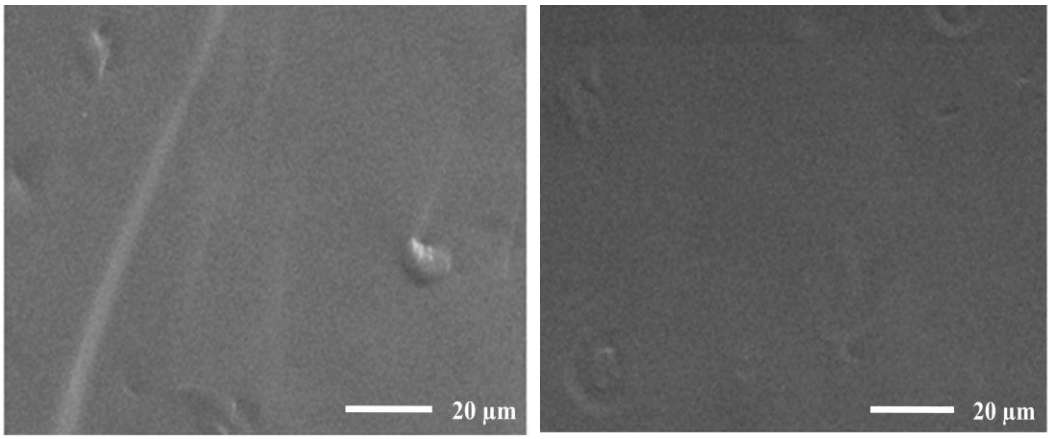
จากการทดสอบด้วยเทคนิค SEM พบว่าโดยปกติเม็ดแป้งมีขนาดอนุภาคเฉลี่ยประมาณ 17.5 micron ดังภาพที่ 46 (ก) ในกระบวนการ plasticization จะทำภายใต้สภาวะความร้อนและแรงเฉือน โดยพลาสติไซเซอร์ที่ใส่เข้าไปจะไปทำลายพันธะไฮโดรเจนระหว่างสายโซ่โมเลกุลของแป้ง แล้วพลาสติไซเซอร์จะไปเกิดพันธะไฮโดรเจนกับโมเลกุลของแป้ง [10] ทำให้ TPS มีความเป็น amorphous มากขึ้น เมื่อทดสอบด้วยเทคนิค SEM พบว่าผิวชิ้นงานที่เกิดการแตกหักจะมีความเป็นเนื้อเดียวกันมากขึ้น ดังภาพที่ 46 (ข) และจากผลการทดสอบด้วย XRD พบว่าการใส่พลาสติไซเซอร์จะทำให้ปริมาณ % X_c ของแป้งลดลง



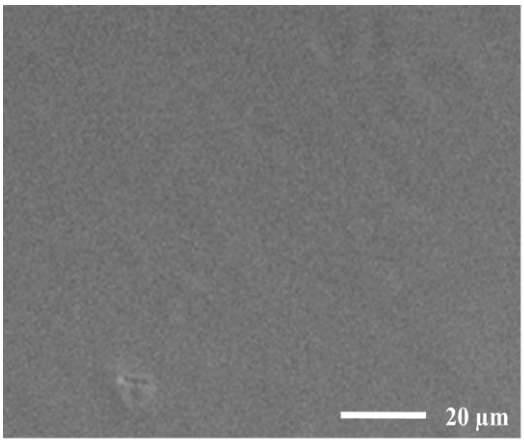
(ก) (ข)

ภาพที่ 46 ภาพถ่ายจากเทคนิค SEM ของเม็ดแป้งมันสำปะหลังและชิ้นงาน TPS เมื่อใช้ glycerol เป็นพลาสติไซเซอร์ที่กำลังขยาย 1000 เท่า

(ก) เม็ดแป้งมันสำปะหลัง (ข) ชิ้นงานสูตร G-TPS-25



(ก) (ข)

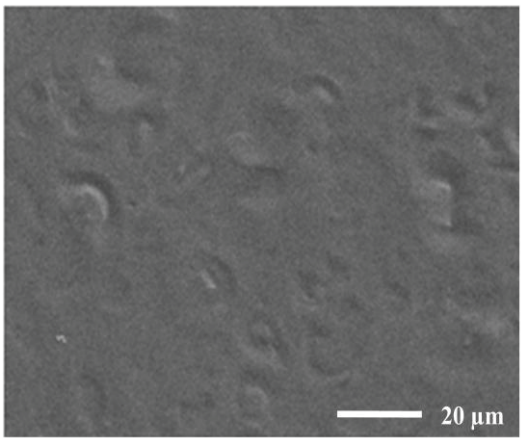


(ค)

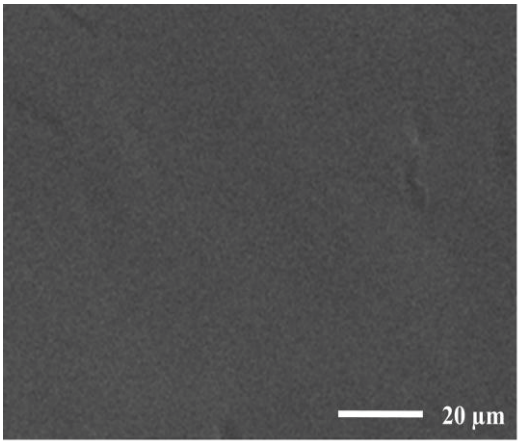
ภาพที่ 47 ภาพถ่ายจากเทคนิค SEM ของชิ้นงาน TPS เมื่อใช้ glycerol เป็นพลาสติไซเซอร์ที่กำลังขยาย 1000 เท่า

(ก) ชิ้นงานสูตร G-TPS-25 (ข) ชิ้นงานสูตร G-TPS-30

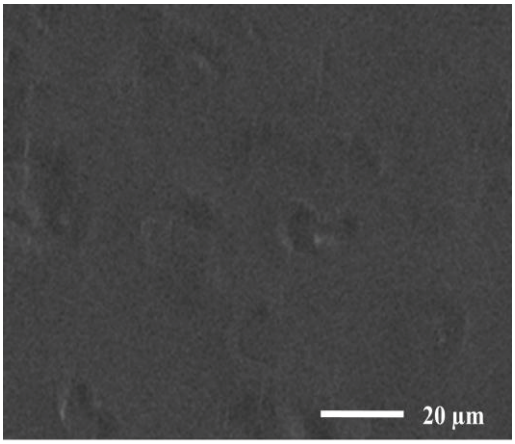
(ค) ชิ้นงานสูตร G-TPS-35



(ก)



(ข)

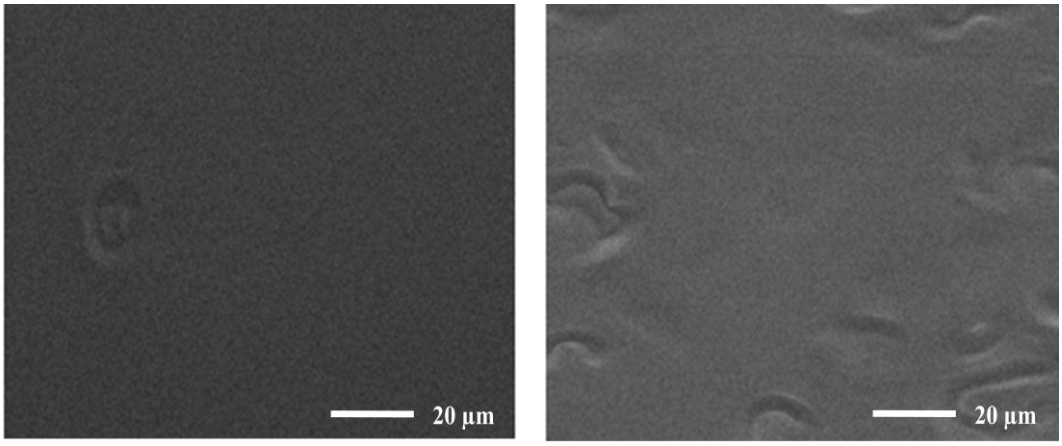


(ค)

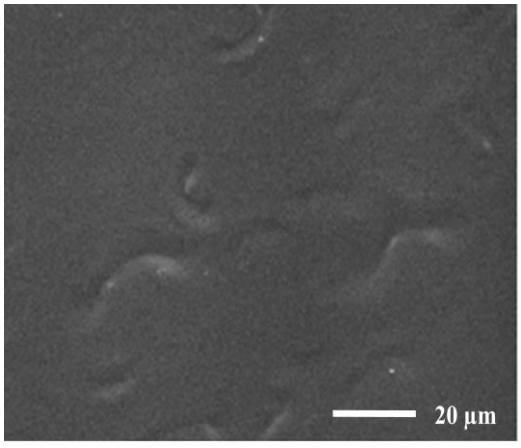
ภาพที่ 48 ภาพถ่ายจากเทคนิค SEM ของชิ้นงาน TPS เมื่อใช้ BHF เป็นพลาสติไซเซอร์ที่กำลังขยาย 1000 เท่า

(ก) ชิ้นงานสูตร BHF-TPS-25 (ข) ชิ้นงานสูตร BHF-TPS-30

(ค) ชิ้นงานสูตร BHF-TPS-35



(ก) (ข)

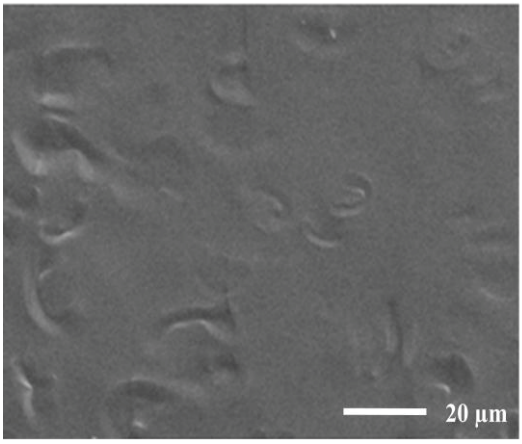


(ค)

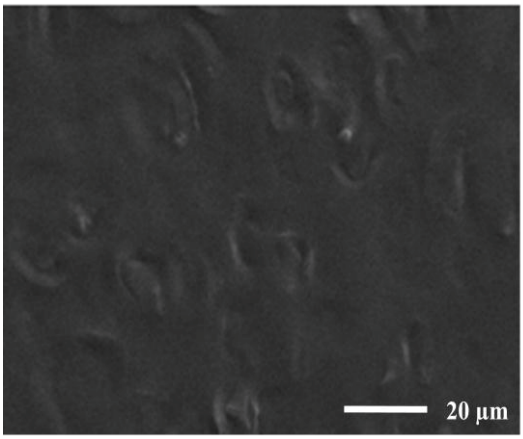
ภาพที่ 49 ภาพถ่ายจากเทคนิค SEM ของชิ้นงาน TPS เมื่อใช้ BHA เป็นพลาสติไซเซอร์ที่กำลังขยาย 1000 เท่า

(ก) ชิ้นงานสูตร BHA-TPS-25 (ข) ชิ้นงานสูตร BHA-TPS-30

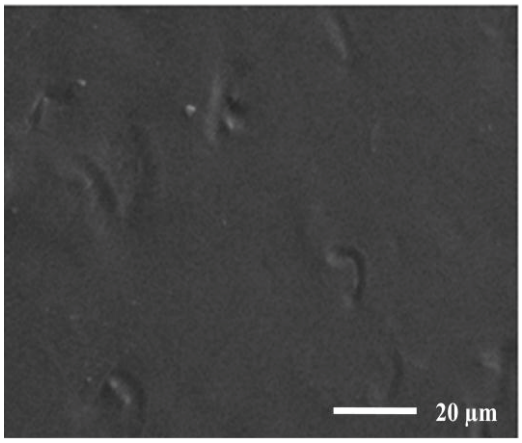
(ค) ชิ้นงานสูตร BHA-TPS-35



(ก)



(ข)



(ค)

ภาพที่ 50 ภาพถ่ายจากเทคนิค SEM ของชิ้นงาน TPS เมื่อใช้พลาสติไซเซอร์ผสมที่กำลังขยาย 1000 เท่า

(ก) ชิ้นงานสูตร BHF 75+BHB 25-TPS-35 (ข) ชิ้นงานสูตร BHA 80+BHB 20-TPS-35

(ค) ชิ้นงานสูตร BHA 90+BHB 10-TPS-30

4.7 การศึกษาสมบัติเชิงกลของชิ้นงาน TPS

4.7.1 การศึกษาสมบัติความต้านทานต่อแรงดึงยืด (tensile properties) ของชิ้นงาน TPS ก่อนการดูดซับความชื้น

เมื่อพิจารณาค่า tensile modulus พบว่าเมื่อใช้เปอร์เซ็นต์พลาสติไซเซอร์ที่เท่ากัน เมื่อใช้ BHA เป็นพลาสติไซเซอร์จะให้ค่า tensile modulus มากที่สุดรองลงมาคือ BHF และ glycerol ตามลำดับเนื่องจาก BHA และ BHF สามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนกับโมเลกุลของแป้งที่แข็งแรงกว่า glycerol รวมทั้งมีโครงสร้างที่ใหญ่กว่าเมื่อได้รับแรงดึงจะไปขัดขวางการเคลื่อนที่ของสายโซ่โมเลกุลของแป้งจึงทำให้ค่า tensile modulus มากกว่า ส่วนการที่ BHA มี tensile modulus ที่สูงกว่า BHF เนื่องจากว่า BHA มีโครงสร้างที่ใหญ่กว่าสามารถขัดขวางการเคลื่อนที่ของสายโซ่โมเลกุลของแป้งได้ดีกว่าจึงทำให้ค่า tensile modulus มากกว่า

เมื่อพิจารณาค่า tensile strength พบว่าเมื่อใช้เปอร์เซ็นต์พลาสติไซเซอร์ที่เท่ากัน เมื่อใช้ BHF หรือ BHA เป็นพลาสติไซเซอร์จะทำให้ค่า tensile strength มีค่าไม่แตกต่างกันมากนัก แต่จะมีค่าสูงกว่า glycerol เล็กน้อยเนื่องจาก BHA และ BHF สามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนกับโมเลกุลของแป้งที่แข็งแรงกว่า glycerol และยังมีโครงสร้างที่ใหญ่ซึ่งจะไปขัดขวางการเคลื่อนที่ของสายโซ่โมเลกุลของแป้งจึงทำให้ค่า tensile strength มาก

เมื่อพิจารณาค่า strain at break (%) พบว่าเมื่อใช้เปอร์เซ็นต์พลาสติไซเซอร์ที่เท่ากัน เมื่อใช้ BHF หรือ glycerol เป็นพลาสติไซเซอร์จะมีค่า strain at break (%) ไม่แตกต่างกันมากนัก แต่จะมีค่าสูงกว่าการใช้ BHA เป็นพลาสติไซเซอร์เล็กน้อยเนื่องจาก BHA มีโครงสร้างโมเลกุลที่ใหญ่ซึ่งจะทำให้สายโซ่โมเลกุลของแป้งเคลื่อนที่ได้ยากส่งผลให้ค่า strain at break (%) ลดลง

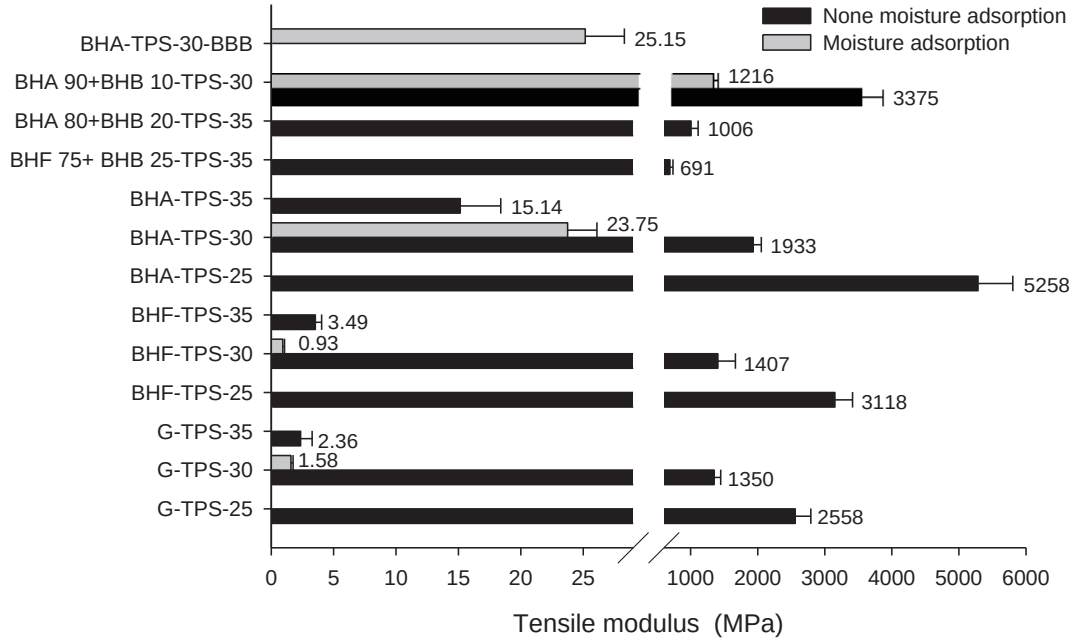
เมื่อมีการเติม BHB ลงไปเพื่อใช้เป็นพลาสติไซเซอร์ผสมพบว่าค่า tensile modulus และ tensile strength มีค่าสูงขึ้นกว่ากรณีที่ใช้ BHF หรือ BHA เป็นพลาสติไซเซอร์เพียงอย่างเดียว เนื่องจากว่า BHB มีโครงสร้างที่ใหญ่รวมทั้งยังมีหมู่ benzene จึงขัดขวางการเคลื่อนที่ของสายโซ่โมเลกุลของแป้งเมื่อได้รับแรงดึงส่งผลให้ค่า tensile modulus และ tensile strength สูงขึ้น ในทางตรงข้ามกันพบว่าค่า strain at break (%) มีค่าลดลงเนื่องจาก BHB มีโครงสร้าง

โมเลกุลที่ใหญ่ซึ่งจะทำให้สายโซ่โมเลกุลของแป้งเคลื่อนที่ได้ยากส่งผลให้ค่า strain at break (%) ลดลง

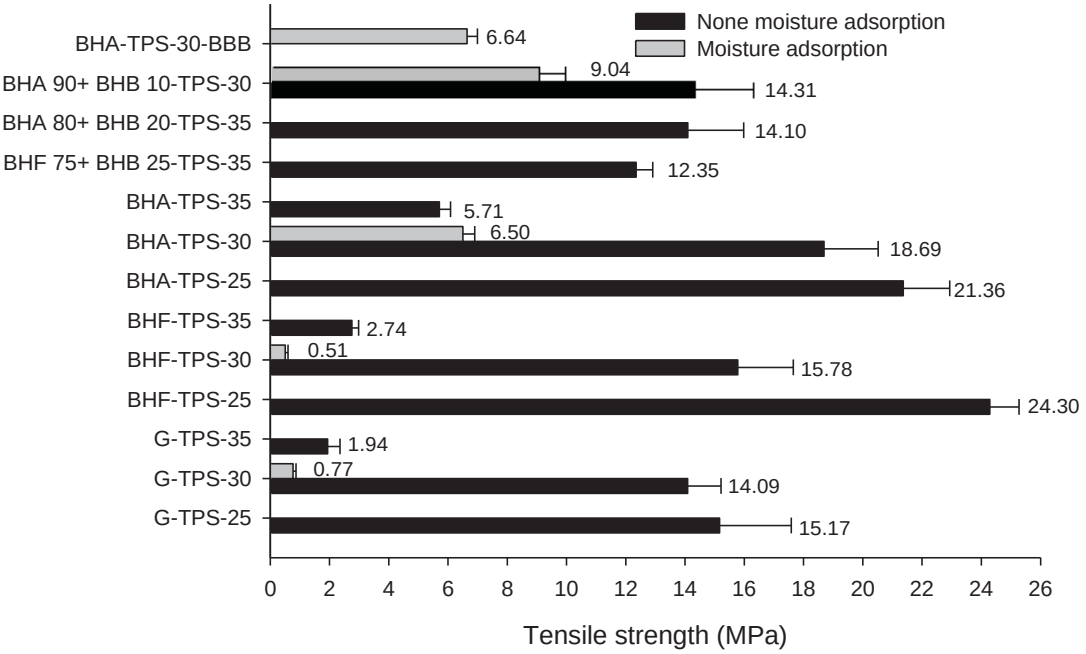
และพบว่าเมื่อทำการเพิ่มปริมาณพลาสติไซเซอร์มากขึ้นค่า tensile modulus และ tensile strength มีค่าลดลงแต่ strain at break (%) มีค่าเพิ่มมากขึ้นเนื่องจากปริมาณของพลาสติไซเซอร์ที่มากขึ้นจะไปทำลายพันธะไฮโดรเจนระหว่างสายโซ่โมเลกุลของแป้งได้มากขึ้น จึงทำให้สายโซ่โมเลกุลเคลื่อนที่ได้ง่ายขึ้นเมื่อได้รับแรงดึง

4.7.2 การศึกษาสมบัติความต้านทานต่อแรงดึงยืด (tensile properties) ของชิ้นงาน TPS เมื่อเก็บในสภาวะความชื้นสัมพัทธ์ 53% เป็นเวลา 15 วัน

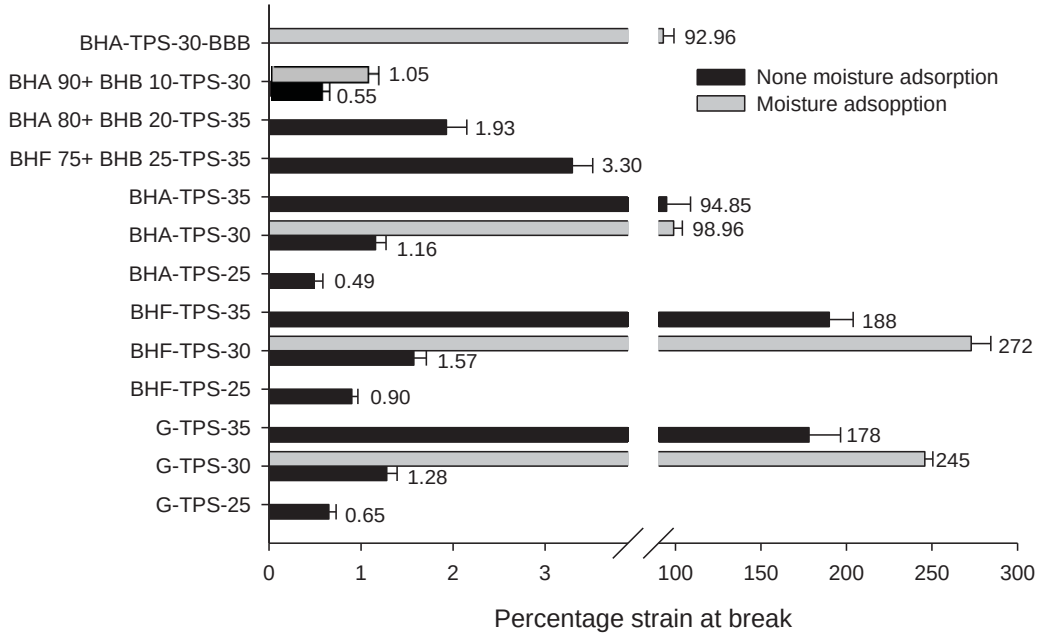
จากผลการทดลองในภาพที่ 51-53 แสดงให้เห็นว่าเมื่อนำชิ้นงาน TPS เก็บใน chamber ที่มีความชื้นสัมพัทธ์ 53% เป็นเวลา 15 วัน ส่งผลให้สมบัติด้าน tensile properties เปลี่ยนไปอย่างเห็นได้ชัด เนื่องจากโมเลกุลของน้ำที่ชิ้นงาน TPS ดูดซับเข้าไปจะทำตัวเป็นพลาสติไซเซอร์ ซึ่งจะไปลดความความแข็งแรงของพันธะไฮโดรเจนระหว่างสายโซ่โมเลกุลของแป้งให้ ทำให้ค่า tensile modulus และ tensile strength ลดลง ส่วนค่า strain at break (%) มีค่าเพิ่มมากขึ้น พบว่ากรณีที่ใช้พลาสติไซเซอร์เดี่ยวชิ้นงานสูตร BHA-TPS-30 มีการเปลี่ยนแปลงค่า tensile modulus และ tensile strength ก่อนและหลังเก็บในเก็บใน chamber ที่มีความชื้นสัมพัทธ์ 53 % มีค่าต่างกันน้อย โดยค่า tensile modulus และ tensile strength หลังการดูดซับความชื้นมีค่า 23.75 MPa และ 6.50 MPa ตามลำดับ เนื่องจากว่า BHA-TPS-30 มีค่าการดูดซับความชื้นน้อยกว่าชิ้นงานสูตร G-TPS-30 และ BHF-TPS-30 ดังการทดลองในหัวข้อที่ 4.9 จึงทำให้โมเลกุลของน้ำที่แทรกเข้าไปทำหน้าที่เป็นพลาสติไซเซอร์เพื่อลดความความแข็งแรงของพันธะไฮโดรเจนระหว่างสายโซ่โมเลกุลของแป้งมีน้อย ชิ้นงานจึงอยู่ในสภาพที่แข็งแรงอยู่ สำหรับชิ้นงานที่มีการเคลือบผิวด้วย BBB จะให้ค่า tensile modulus และ tensile strength หลังการดูดซับความชื้นสูงกว่าชิ้นงานที่ไม่มีการเคลือบผิวส่วนค่า strain at break (%) มีค่าน้อยกว่า เนื่องจากสารเคลือบผิวทำหน้าที่ช่วยป้องกันโมเลกุลของน้ำที่จะแทรกเข้าไปในชิ้นงานได้



ภาพที่ 51 ค่า tensile modulus ของชิ้นงาน TPS ก่อนและหลังการดูดซับความชื้น



ภาพที่ 52 ค่า tensile strength ของชิ้นงาน TPS ก่อนและหลังการดูดซับความชื้น



ภาพที่ 53 ค่า strain at break (%) ของชิ้นงาน TPS ก่อนและหลังการดูดซับความชื้น

ตารางที่ 3 ค่าเฉลี่ยสมบัติเชิงกลของชิ้นงาน TPS ก่อนและหลังการดูดซับความชื้น

ชิ้นงานสูตร	ก่อนการดูดซับความชื้น			หลังการดูดซับความชื้น		
	Tensile modulus (MPa)	Tensile strength (MPa)	Strain at break (%)	Tensile modulus (MPa)	Tensile strength (MPa)	Strain at break (%)
G-TPS-25	$2558 \pm 234^{d,e}$	$15.17 \pm 2.42^{b,c}$	0.65 ± 0.08^{a}	N/A	N/A	N/A
G-TPS-30	$1350 \pm 97^{b,c}$	$14.09 \pm 1.13^{b,c}$	1.28 ± 0.11^{a}	1.58 ± 0.17^{a}	0.77 ± 0.10^{a}	245 ± 4.75^{c}
G-TPS-35	2.36 ± 0.91^{a}	1.94 ± 0.42^{a}	178 ± 18^{c}	N/A	N/A	N/A
BHF-TPS-25	$3118 \pm 239^{e,f}$	24.30 ± 0.86^{e}	0.90 ± 0.07^{a}	N/A	N/A	N/A
BHF-TPS-30	$1407 \pm 260^{b,c}$	$15.78 \pm 1.87^{b,c}$	1.57 ± 0.14^{a}	0.93 ± 0.14^{a}	0.51 ± 0.09^{a}	272 ± 11.46^{d}
BHF-TPS-35	3.49 ± 0.45^{a}	2.74 ± 0.20^{a}	188 ± 13^{c}	N/A	N/A	N/A
BHA-TPS-25	5285 ± 518^{g}	$21.36 \pm 1.57^{d,e}$	0.49 ± 0.09^{a}	N/A	N/A	N/A
BHA-TPS-30	$1933 \pm 121^{c,d}$	$18.69 \pm 1.83^{c,d}$	1.16 ± 0.11^{a}	23.75 ± 2.34^{a}	6.50 ± 0.40^{b}	98.96 ± 5.02^{b}
BHA-TPS-35	15.14 ± 3.25^{a}	5.71 ± 0.38^{a}	94.85 ± 14.0^{b}	N/A	N/A	N/A
BHF 75+BHB 25-TPS-35	$691 \pm 45^{a,b}$	12.35 ± 0.56^{b}	3.30 ± 0.22^{a}	N/A	N/A	N/A
BHA 80+BHB 20-TPS-35	1006 ± 105^{b}	$14.10 \pm 1.88^{b,c}$	1.93 ± 0.22^{a}	N/A	N/A	N/A
BHA 90+BHB 10-TPS-30	3375 ± 306^{f}	$14.31 \pm 2.00^{b,c}$	0.55 ± 0.09^{a}	1216 ± 234^{b}	9.04 ± 0.90^{c}	1.05 ± 0.12^{a}
BHA-TPS-30-BBB	N/A	N/A	N/A	25.15 ± 3.14^{a}	6.64 ± 0.32^{b}	92.92 ± 6.24^{b}

หมายเหตุ ค่าเฉลี่ยที่มีสัญลักษณ์ภาษาอังกฤษเหมือนกันแสดงว่ามีค่าเฉลี่ยไม่แตกต่างกันที่ระดับความเชื่อมั่น 99 %

4.7.3 การศึกษาสมบัติความต้านทานต่อแรงกระแทก (impact properties) ของชิ้นงาน TPS ก่อนการดูดซับความชื้น

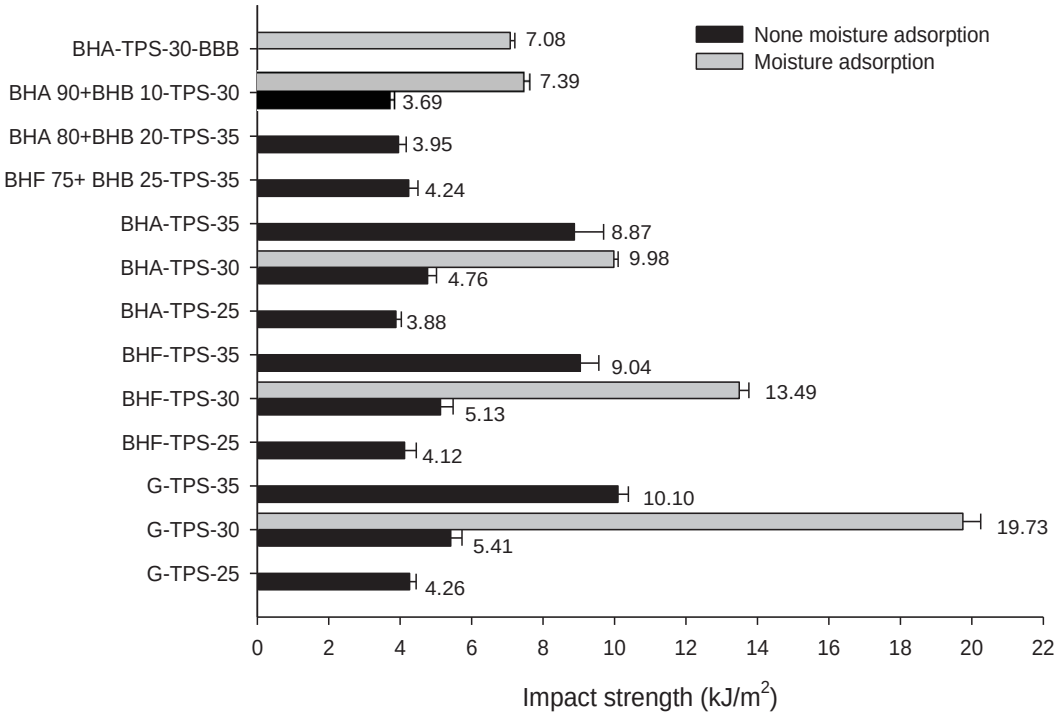
เมื่อพิจารณาค่า impact strength กรณีที่ใช้พลาสติไซเซอร์เดี่ยวแต่ละชนิด พบว่าที่ 35% ของพลาสติไซเซอร์ G-TPS-35, BHF-TPS-35 และ BHA-TPS-35 มีค่า impact strength ไม่แตกต่างกันที่ระดับความเชื่อมั่น 99% ส่วนที่ 30% ของพลาสติไซเซอร์ G-TPS-30 มีค่า impact strength มากกว่า BHF-TPS-30 และ BHA-TPS-30 เล็กน้อย เนื่องจากความแข็งแรงของพันธะไฮโดรเจนที่เกิดระหว่างโมเลกุลของแป้งกับ glycerol น้อยกว่ากรณีของ BHF และ BHA ที่เกิดกับโมเลกุลของแป้ง ดังนั้นขณะมีการทดสอบการทนต่อแรงกระแทก สายโซ่ภายในโมเลกุลเกิดการเคลื่อนไหวได้ง่าย ซึ่งจะทำให้โมเลกุลมีความสามารถดูดซับพลังงานได้มากขึ้น ส่งผลให้ค่า impact strength มากขึ้น ส่วน BHF-TPS-30 มีค่า impact strength มากกว่า BHA-TPS-30 เล็กน้อย เนื่องจาก BHA มีโครงสร้างโมเลกุลที่ใหญ่กว่า BHF จึงขัดขวางการเคลื่อนที่ของสายโซ่ทำให้สายโซ่ภายในโมเลกุลของเกิดการเคลื่อนไหวได้ยากจึงมีความสามารถในการดูดซับพลังงานได้น้อยกว่าขณะรับแรงกระแทก กรณีที่ใช้ 25% ของพลาสติไซเซอร์ G-TPS-25 มีค่า impact strength มากกว่า BHF-TPS-25และ BHA-TPS-25 เล็กน้อย ดังภาพที่ 54

พิจารณาค่า impact strength เมื่อใช้พลาสติไซเซอร์ผสมพบว่าที่เปอร์เซ็นต์พลาสติไซเซอร์เท่ากัน เมื่อมีการผสม BHB ลงไปค่า impact strength ที่ได้จะมีค่าน้อยกว่ากรณีที่ใช้ BHF หรือ BHA เป็นพลาสติไซเซอร์เพียงอย่างเดียวเช่น ที่ 35% ของพลาสติไซเซอร์ BHA-TPS-35 มีค่า impact strength เท่ากับ 8.87 ± 0.82 kJ/m^2 ส่วน BHA 80+BHB 20-TPS-35 มีค่า impact strength เท่ากับ 3.95 ± 0.22 kJ/m^2 เนื่องจาก BHB มีโครงสร้างโมเลกุลที่ใหญ่กว่า ซึ่งจะทำให้สายโซ่โมเลกุลของแป้งเคลื่อนที่ผ่านกันได้ยากขึ้น ส่งผลให้ความสามารถในการดูดซับพลังงานขณะรับแรงกระแทกลดลง

4.7.4 การศึกษาสมบัติความต้านทานต่อแรงกระแทก (Impact properties) เมื่อเก็บในสภาวะความชื้นสัมพัทธ์ 53% เป็นเวลา 15 วัน

จากภาพที่ 54 พบว่าชิ้นงาน TPS ที่เก็บใน chamber ที่มีความชื้นสัมพัทธ์ 53% เป็นเวลา 15 วันจะมีค่า impact strength เพิ่มขึ้น เนื่องจากว่าเมื่อชิ้นงาน TPS มีการดูดซับความชื้นซึ่งโมเลกุลของน้ำที่ถูกดูดซับเข้าไปจะทำหน้าที่เป็นพลาสติไซเซอร์จึงทำให้สายโซ่โมเลกุลของแป้งเกิดการเคลื่อนไหวได้ง่ายขึ้นเมื่อได้รับแรงกระแทก จึงทำให้โมเลกุลมีความสามารถดูดซับพลังงานได้มากขึ้น

เมื่อมีการใช้พลาสติไซเซอร์ 30% โดยน้ำหนักแล้วเก็บชิ้นงาน TPS ไว้ในความชื้นสัมพัทธ์ 53% เป็นเวลา 15 วันพบว่าชิ้นงาน TPS มีค่า impact strength ดังนี้ G-TPS-30 > BHF-TPS-30 > BHA-TPS-30 > BHA 90+BHB 10-TPS-30 > BHA-TPS-30-BBB ซึ่งค่าที่ได้สอดคล้องค่าการดูดซับความชื้นของชิ้นงานที่แสดงผลไว้ในภาพที่ 59-61 โดยชิ้นงาน TPS ที่มีค่าการดูดซับความชื้นที่สูงโมเลกุลของน้ำสามารถแทรกเข้าไปในชิ้นงานได้มาก ส่งผลให้ค่า impact strength เพิ่มมากขึ้นด้วย



ภาพที่ 54 ค่า Impact strength ของชิ้นงาน TPS ก่อนและหลังการดูดซับความชื้น

ตารางที่ 4 ค่า Impact strength ของชิ้นงาน TPS ก่อนและหลังการดูดซับความชื้น

ชิ้นงานสูตร	Impact strength (kJ/m^2)	
	ก่อนการดูดซับความชื้น	หลังการดูดซับความชื้น
G-TPS-25	$4.26 \pm 0.18^{a,b,c}$	N/A
G-TPS-30	5.41 ± 0.32^{c}	19.73 ± 0.50^{d}
G-TPS-35	10.10 ± 0.29^{d}	N/A
BHF-TPS-25	$4.12 \pm 0.33^{a,b}$	N/A
BHF-TPS-30	$5.13 \pm 0.35^{b,c}$	13.49 ± 0.27^{c}
BHF-TPS-35	9.04 ± 0.52^{d}	N/A
BHA-TPS-25	$3.88 \pm 0.15^{a,b}$	N/A
BHA-TPS-30	$4.76 \pm 0.25^{a,b,c}$	9.98 ± 0.12^{b}
BHA-TPS-35	8.87 ± 0.82^{d}	N/A
BHF 75+BHB 25-TPS-35	$4.24 \pm 0.26^{a,b,c}$	N/A
BHA 80+BHB 20-TPS-35	$3.95 \pm 0.22^{a,b}$	N/A
BHA 90+BHB 10-TPS-30	3.69 ± 0.13^{a}	7.39 ± 0.14^{a}
BHA-TPS-30-BBB	N/A	7.08 ± 0.13^{a}

หมายเหตุ ค่าเฉลี่ยที่มีสัญลักษณ์ภาษาอังกฤษเหมือนกันแสดงว่ามีค่าเฉลี่ยไม่แตกต่างกันที่ระดับความเชื่อมั่น 99 %

4.8 การศึกษาการเคลือบผิวหน้าชิ้นงาน TPS

การเคลือบผิวชิ้นงาน TPS ด้วยสารเคลือบผิวที่สังเคราะห์ได้ โดยจะนำสารเคลือบผิวไปละลายใน ethanol หลังจากนั้นจะทำการเคลือบผิวชิ้นงาน TPS แบบวิธี solution dipping โดยจะนำชิ้นงาน TPS มาจุ่มในสารละลายแล้วตากให้แห้ง แล้วนำมาจุ่มซ้ำอีกครั้งหนึ่ง หลังจากนั้นนำไปอบที่อุณหภูมิ 60 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง โดยพบว่าหลังจากการเคลือบผิวแล้ว ผิวชิ้นงาน TPS จะมีความมันวาวเพิ่มขึ้นเล็กน้อยดังภาพที่ 55 และน้ำหนักของชิ้นงาน TPS ก็จะเพิ่มขึ้นดังตารางที่ 5 โดยน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นของชิ้นงาน BHA-TPS-30-BBF, BHA-TPS-30-BBA และ BHA-TPS-30-BBB มีค่าไม่แตกต่างกันที่ระดับความเชื่อมั่น 99% ทั้งนี้เป็นเพราะการควบคุมความเข้มข้นของสาร

เคลือบผิวและการควบคุมเวลาที่ใช้ในการเคลือบผิวชิ้นงาน TPS จึงทำให้น้ำหนักที่เพิ่มขึ้นหลังการเคลือบผิวมีค่าที่ไม่แตกต่างกัน

ตารางที่ 5 ผลต่างของน้ำหนักชิ้นงาน TPS ก่อนและหลังการเคลือบผิว

ชิ้นงาน TPS	ผลต่างของน้ำหนัก (mg)
BHA-TPS-30-BBF	9.1 ± 0.5^{a}
BHA-TPS-30-BBA	8.3 ± 0.1^{a}
BHA-TPS-30-BBB	7.8 ± 0.7^{a}

หมายเหตุ ค่าเฉลี่ยที่มีสัญลักษณ์ภาษาอังกฤษเหมือนกันแสดงว่ามีค่าเฉลี่ยไม่แตกต่างกันที่ระดับความเชื่อมั่น 99%

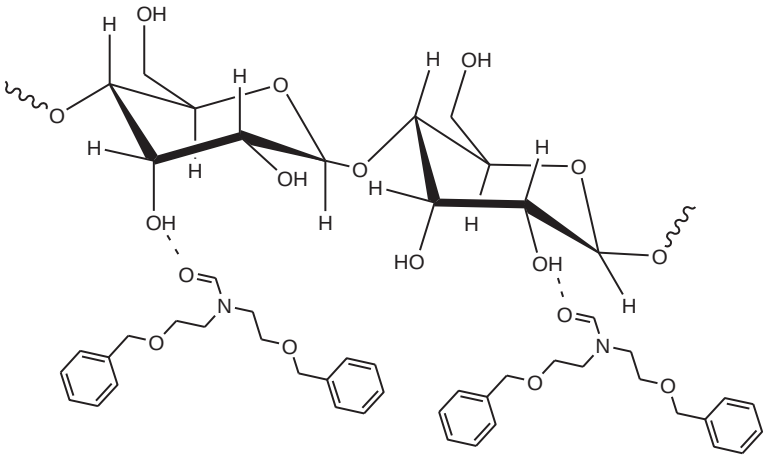
(ก) (ข) (ค) (ง)

ภาพที่ 55 ลักษณะของชิ้นงานสูตร BHA-TPS-30 เมื่อมีการเคลือบผิวด้วยสารเคลือบผิวชนิดต่างๆ

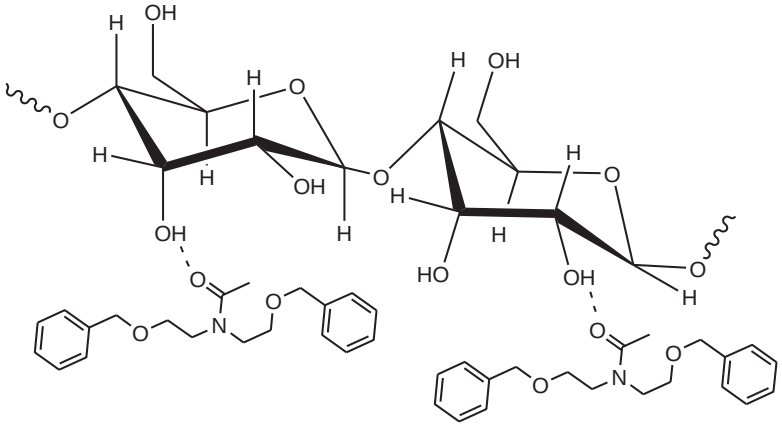
(ก) เคลือบผิวด้วย BBF (ข) เคลือบผิวด้วย BBA

(ค) เคลือบผิวด้วย BBB (ง) ไม่ได้เคลือบผิว

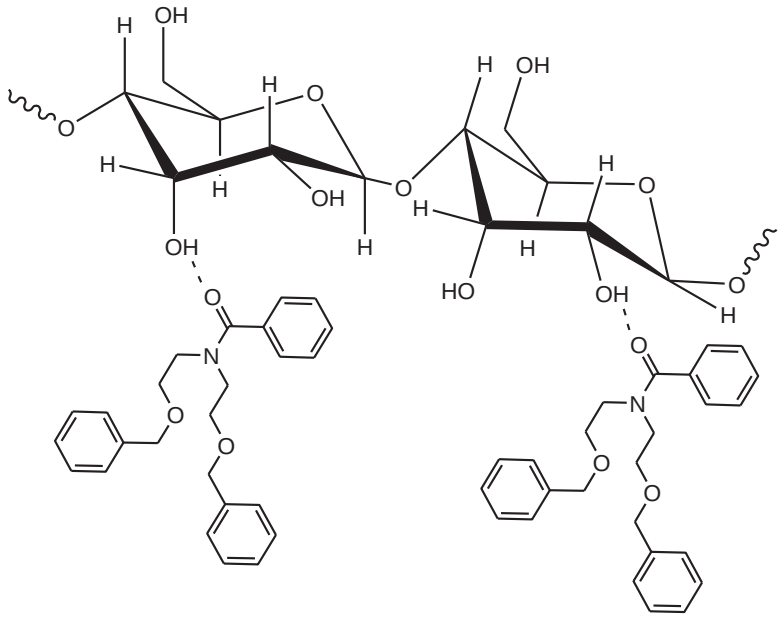
ลักษณะการยึดเกาะพื้นผิวของสารเคลือบผิวที่สังเคราะห์ได้กับพื้นผิวของชิ้นงาน TPS โดยจะเกิดแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลแบบ H-bonding ระหว่างหมู่ carbonyl ของสารเคลือบผิวกับอะตอมไฮโดรเจนของหมู่ hydroxyl ในโมเลกุลของแป้ง [18] ดังภาพที่ 56-58 ขณะเดียวกันสารเคลือบผิวก็จะหันด้านที่มีหมู่ benzene ออกด้านนอกผิวของชิ้นงาน TPS ซึ่งหมู่ benzene เป็นหมู่ที่ไม่ชอบน้ำ (hydrophobic) จึงช่วยป้องกันการดูดซับความชื้นให้กับชิ้นงาน TPS ได้



ภาพที่ 56 แสดงลักษณะการเกิด H-bonding ระหว่างโมเลกุลของแป้งกับ BBF



ภาพที่ 57 แสดงลักษณะการเกิด H-bonding ระหว่างโมเลกุลของแป้งกับ BBA



ภาพที่ 58 แสดงลักษณะการเกิด H-bonding ระหว่างโมเลกุลของแป้งกับ BBB

4.9 การศึกษาสมบัติการดูดซับความชื้นของชิ้นงาน TPS

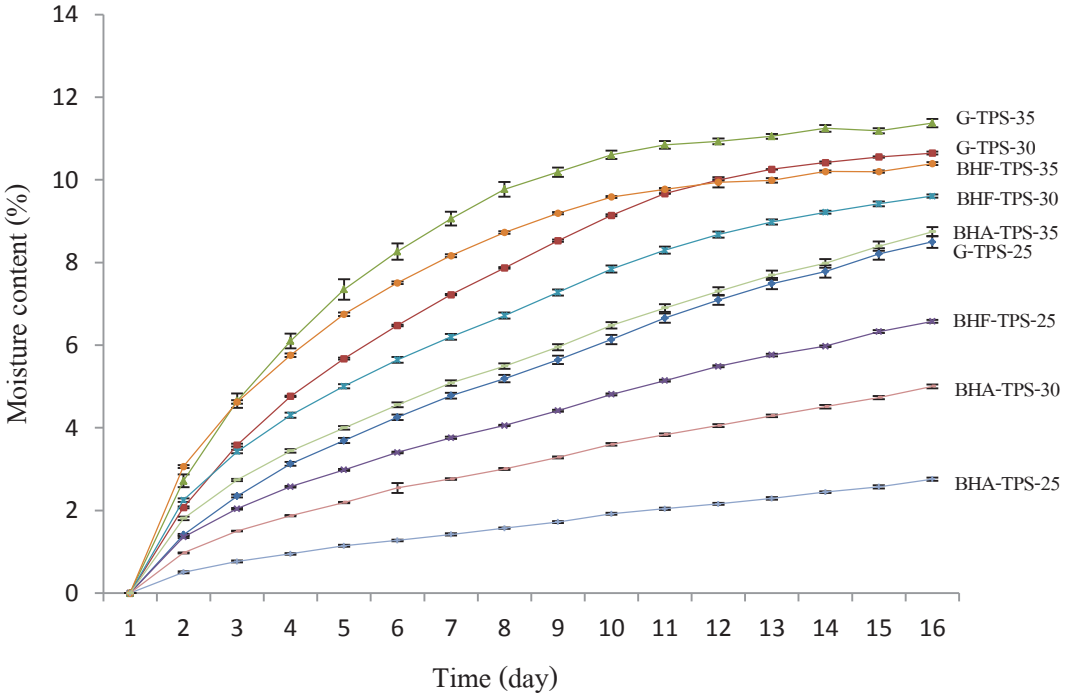
4.9.1 สมบัติการดูดซับความชื้นของชิ้นงาน TPS เมื่อใช้พลาสติไซเซอร์เดี่ยว

การศึกษาสมบัติการดูดซับความชื้นของชิ้นงาน TPS ที่เป็นชิ้นงานสำหรับใช้ทดสอบ impact testing กรณีไม่มีการเคลือบผิวโดยจะเก็บชิ้นงาน TPS สูตรต่างๆ ภายใต้ความชื้นสัมพัทธ์ 53% เป็นเวลา 15 วัน ซึ่งจะพิจารณาน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงไปเพื่อนำมาคำนวณเปอร์เซ็นต์การดูดซับความชื้นของชิ้นงาน TPS โดยสามารถคำนวณเปอร์เซ็นต์การดูดซับความชื้นได้ดังนี้

$$\text{เปอร์เซ็นต์การดูดซับความชื้น} = ((W_t - W_0)/W_t) \times 100$$

โดยตัวแปร W_t และ W_0 คือ น้ำหนักที่ระยะเวลาใดๆ และน้ำหนักเริ่มต้นของชิ้นงาน TPS ตามลำดับ

เนื่องจากโครงสร้างของ anhydroglucose unit ซึ่งเป็นหน่วยซ้ำของโมเลกุลของแป้งประกอบด้วยหมู่ hydroxyl ถึง 3 หมู่ ทำให้ TPS มีความว่องไวต่อความชื้นสูง การใช้ชนิดของพลาสติไซเซอร์ที่แตกต่างกันส่งผลทำให้การดูดซับความชื้นแตกต่างกัน ดังต่อไปนี้



ภาพที่ 59 การดูดซับความชื้นของชิ้นงาน TPS กรณีที่ใช้พลาสติไซเซอร์เดี่ยว เมื่อเก็บในสภาวะความชื้นสัมพัทธ์ 53% เป็นเวลา 15 วัน

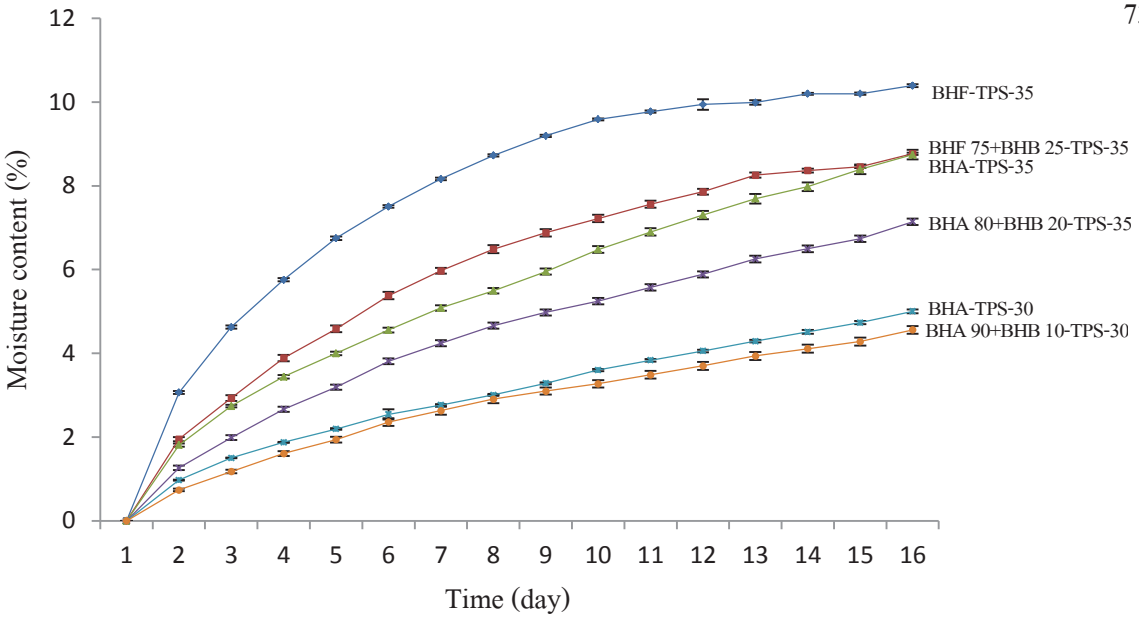
จากภาพที่ 59 เป็นการเปรียบเทียบการดูดซับความชื้นของชิ้นงาน TPS เมื่อใช้พลาสติไซเซอร์เดี่ยวชนิดต่างๆ ในปริมาณ 25, 30 และ 35 % โดยน้ำหนัก เมื่อพิจารณาที่เปอร์เซ็นต์ของพลาสติไซเซอร์เท่ากันพบว่า ค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซับความชื้นของชิ้นงาน TPS ที่ใช้ glycerol เป็นพลาสติไซเซอร์จะมีค่ามากที่สุด รองลงมาคือ BHF และ BHA ตามลำดับ เนื่องจากว่าสารประกอบเอไมด์สามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนที่แข็งแรงกับโมเลกุลของแป้งมากกว่า glycerol [29] จึงสามารถป้องกันโมเลกุลของน้ำที่จะเกิดพันธะไฮโดรเจนกับโมเลกุลของแป้งหรือ พลาสติไซเซอร์ได้ดีกว่า และเมื่อพิจารณาถึงความเป็นขั้ว พบว่า BHF และ BHA มีความเป็น hydrophobic มากกว่า glycerol จึงสามารถป้องกันความชื้นได้ดีกว่า นอกจากนี้ยังพบว่าการใช้ BHA เป็นพลาสติไซเซอร์ จะทำให้ชิ้นงานมีค่าการดูดซับความชื้นน้อยกว่า BHF เนื่องจาก BHA มีความเป็น hydrophobic มากกว่า BHF จึงป้องกันการดูดซับความชื้นได้ดีกว่า เมื่อเรียงลำดับค่าการดูดซับความชื้นจากมากไปหาน้อยจะได้ดังนี้ G-TPS-35 > G-TPS-30 >BHF-TPS-35 > BHF-TPS-30 > BHA-TPS-35 > G-TPS-25 > BHF-TPS-25 > BHA-TPS-30 > BHA-TPS-25

เมื่อพิจารณาปริมาณของพลาสติไซเซอร์ที่ใส่ลงไปพบว่าเมื่อปริมาณของพลาสติไซเซอร์มากขึ้นทำให้ค่าการดูดซับความชื้นของชิ้นงาน TPS มากขึ้นด้วย เนื่องจากว่าปริมาณพลาสติไซเซอร์ที่มากขึ้นจะไปลดพันธะไฮโดรเจนที่เกิดระหว่างสายโซ่โมเลกุลของแป้งทำให้สายโซ่โมเลกุลของแป้งสั่นไหวได้ง่ายขึ้น [28] จึงทำให้โมเลกุลของน้ำมีโอกาสแทรกเข้าไประหว่างสายโซ่ได้ง่ายขึ้น ส่งผลให้ค่าการดูดซับความชื้นของชิ้นงาน TPS มากขึ้นด้วย

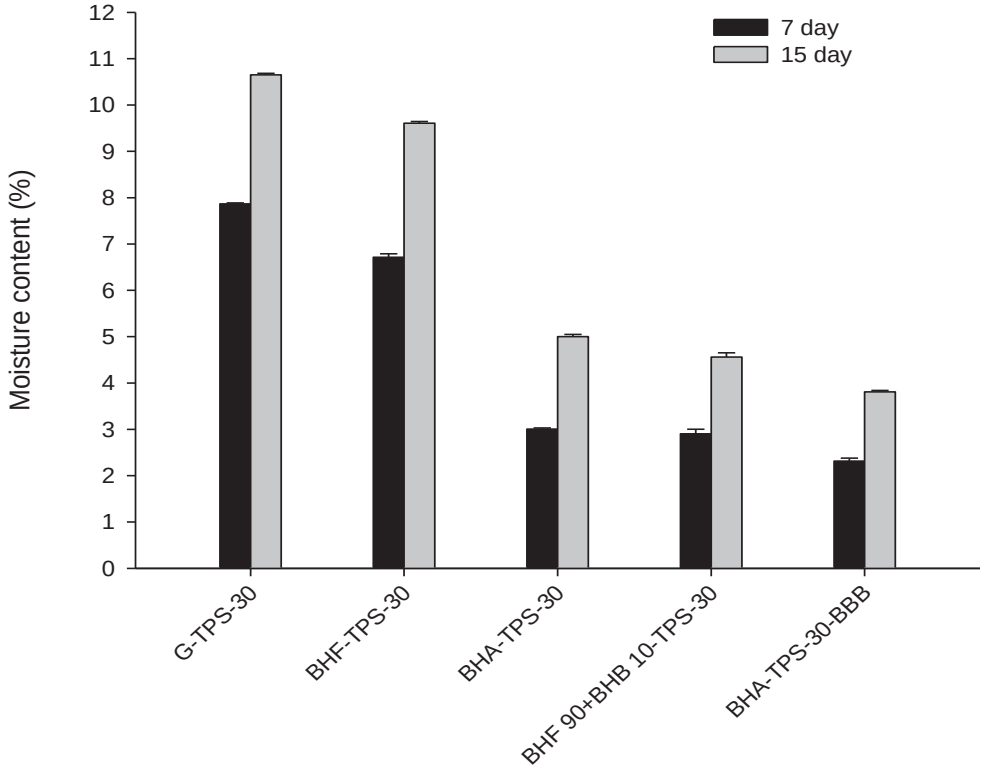
4.9.2 สมบัติการดูดซับความชื้นของชิ้นงาน TPS เมื่อใช้พลาสติไซเซอร์ผสม

จากภาพที่ 60 เป็นการเปรียบเทียบการดูดซับความชื้นของชิ้นงาน TPS เมื่อใช้พลาสติไซเซอร์ผสมโดยจะผสม BHB ที่ได้จากการสังเคราะห์ลงไป พบว่าที่ 35% ของพลาสติไซเซอร์ ชิ้นงานสูตร BHF 75+BHB 25-TPS-35 มีค่าการดูดซับความชื้นต่ำกว่าชิ้นงานสูตร BHF-TPS-35 ส่วนชิ้นงานสูตร BHA 80+BHB 20-TPS-35 ก็มีค่าการดูดซับความชื้นต่ำกว่าชิ้นงานสูตร BHA-TPS-35 และที่ 30% ของพลาสติไซเซอร์ ชิ้นงานสูตร BHA 90+BHB 10-TPS-30 มีค่าการดูดซับความชื้นต่ำกว่าชิ้นงานสูตร BHA-TPS-30 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการผสม BHB ลงไปจะเพิ่มความต้านทานในการดูดซับความชื้นของชิ้นงาน TPS ได้เนื่องจากว่าโครงสร้างของ BHB มีวงแหวน benzene อยู่ทำให้มีความเป็น hydrophobic เพิ่มมากขึ้นจึงป้องกันการดูดซับความชื้นได้ดีกว่ากรณีที่ใช้ BHF หรือ BHA เป็นพลาสติไซเซอร์เพียงอย่างเดียว

จากผลการทดลองข้างต้นสามารถพิสูจน์ได้ว่าการใช้อนุพันธ์ของเอไมด์เป็นพลาสติไซเซอร์ สามารถปรับปรุงสมบัติในการดูดซับความชื้นของชิ้นงาน TPS ได้ดีกว่า เมื่อเทียบกับการใช้ glycerol เป็นพลาสติไซเซอร์



ภาพที่ 60 การดูดซับความชื้นของชิ้นงาน TPS กรณีที่ใช้พลาสติไซเซอร์ผสม เมื่อเก็บในสภาวะความชื้นสัมพัทธ์ 53% เป็นเวลา 15 วัน

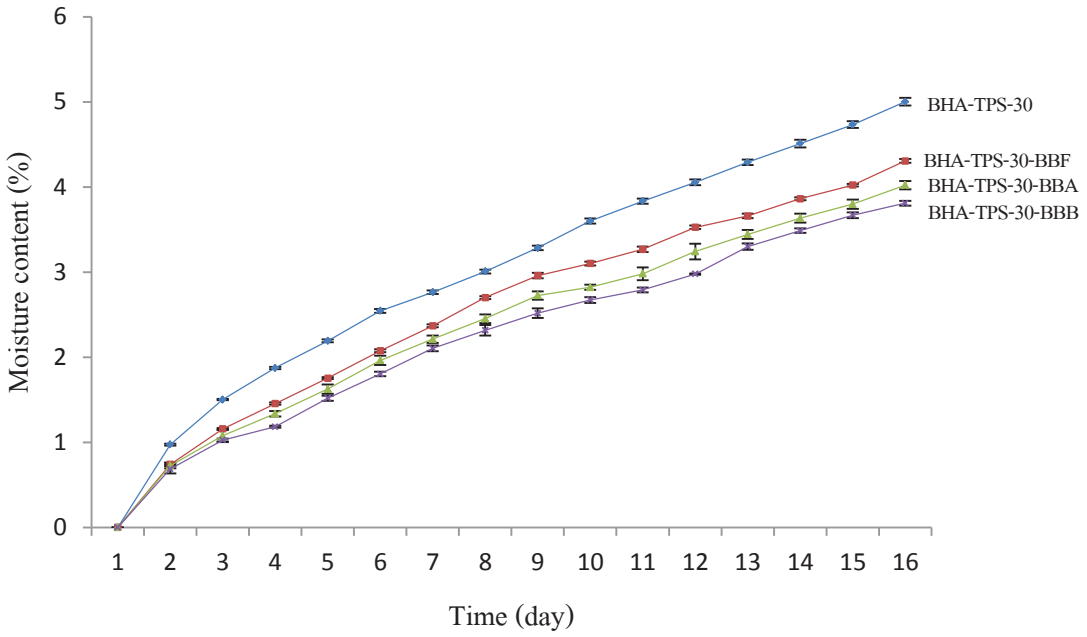


ภาพที่ 61 การดูดซับความชื้นของชิ้นงาน TPS เมื่อเก็บในสภาวะความชื้นสัมพัทธ์ 53% เป็นเวลา 7 และ 15 วัน

4.9.3 สมบัติการดูดซับความชื้นของชิ้นงาน TPS เมื่อมีการเคลือบผิว

ในการศึกษาการเคลือบผิวชิ้นงานได้ทำการเลือกชิ้นงาน TPS มาหนึ่งสูตรเพื่อใช้ในการศึกษาโดยจะเลือกสูตร BHA-TPS-30 เนื่องจากมีสมบัติเชิงกลที่ค่อนข้างดีคือมีค่า tensile modulus และค่า tensile strength ค่อนข้างสูงส่วนค่า strain at break (%) ก็ไม่ต่ำเกินไป โดยนำชิ้นงานมาเคลือบผิวด้วยสารเคลือบผิว 3 ชนิดคือ BBF, BBA และ BBB หลังจากนั้นนำไปทดสอบการดูดซับความชื้นในสภาวะความชื้นสัมพัทธ์ 53% เป็นเวลา 15 วัน จากผลการทดลองพบว่า ชิ้นงานที่ผ่านการเคลือบผิวจะมีค่าการดูดซับความชื้นที่ต่ำกว่าชิ้นงานที่ไม่ผ่านการเคลือบผิวดังภาพที่ 62 เนื่องจากว่าสารเคลือบผิวจะไปยึดเกาะที่ผิวของชิ้นงาน TPS โดยจะเกิดแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลแบบ H-bonding ระหว่างหมู่ carbonyl ของสารเคลือบผิวกับอะตอมไฮโดรเจนของหมู่ hydroxy ในโมเลกุลของแป้ง ขณะเดียวกันสารเคลือบผิวก็จะหันด้านที่มีวงแหวน benzene ออกด้านนอกผิวชิ้นงาน TPS ซึ่งวงแหวน benzene เป็นหมู่ที่ไม่ชอบน้ำ (hydrophobic) จึงทำหน้าที่ช่วยป้องกันโมเลกุลของน้ำที่จะมาเกิด interaction กับโมเลกุลของแป้งหรือพลาสติไซเซอร์ได้

เมื่อพิจารณาผลของสารเคลือบผิวทั้ง 3 ชนิดพบว่าเมื่อใช้ BBB เป็นสารเคลือบผิวจะทำให้ค่าการดูดซับความชื้นต่ำที่สุดรองลงมาคือ BBA และ BBF ตามลำดับ เนื่องจาก BBB มีวงแหวน benzene ถึง 3 วงจึงสามารถป้องกันโมเลกุลของน้ำที่จะมาเกิด interaction กับโมเลกุลของแป้งหรือพลาสติไซเซอร์ได้กว่า BBA และ BBF ที่มีวงแหวน benzene เพียง 2 วง และยังพบอีกว่าเมื่อใช้ BBA เป็นสารเคลือบผิวจะมีค่าการดูดซับความชื้นต่ำกว่า BBF เนื่องจากว่า BBA มีหมู่ methyl ซึ่งสามารถช่วยป้องกันโมเลกุลของน้ำที่จะมาเกิด interaction กับโมเลกุลของแป้งหรือพลาสติไซเซอร์ได้



ภาพที่ 62 การดูดซับความชื้นของชิ้นงาน TPS กรณีที่มีการเคลือบผิวด้วยสารเคลือบผิว เมื่อเก็บในสภาวะความชื้นสัมพัทธ์ 53% เป็นเวลา 15 วัน

4.10 การศึกษาปริมาณผลึกและรูปแบบผลึกของชิ้นงาน TPS

ในการศึกษาปริมาณผลึกและรูปแบบผลึกของชิ้นงาน TPS ซึ่งได้ทดสอบก่อนและหลังเก็บไว้ภายใต้สภาวะความชื้นสัมพัทธ์ 53% เป็นเวลา 15, 30 และ 60 วัน ด้วยเทคนิค XRD โดยมุมที่ทำการศึกษา 2θ อยู่ในช่วง 10-30° ความละเอียดในการกวาดมุม 1.2 องศาต่อนาที

4.10.1 การศึกษาปริมาณผลึกของชิ้นงาน TPS ที่ระยะเวลาต่างๆ ในสภาวะความชื้นสัมพัทธ์ 53%

จากตารางที่ 6 พบว่าปริมาณผลึกของ native starch มีค่ามากที่สุด ส่วนแป้งที่ผ่านการขึ้นรูปเป็นชิ้นงาน TPS จะมีปริมาณผลึกลดลงอย่างมากเมื่อเทียบกับ native starch เนื่องจาก starch granules ถูกทำลายโดยความร้อนและแรงเฉือน [5] รวมทั้งพลาสติไซเซอร์ที่ใส่เข้าไปจะซึมเข้าสู่ starch granules และไปทำลายพันธะไฮโดรเจนที่ยึดโมเลกุลของแป้งไว้ด้วยกัน [27]

ตารางที่ 6 แสดงปริมาณผลึกของชิ้นงาน TPS ที่ระยะเวลาต่างๆ ในสภาวะความชื้นสัมพัทธ์ 53%

ชิ้นงาน	ปริมาณผลึก (% X_C)			
	0 วัน	15 วัน	30 วัน	60 วัน
Native Starch	42.9	-	-	-
G-TPS-30	4.3	6.8	11.5	11.6
BHF-TPS-30	5.0	5.2	6.1	6.5
BHA-TPS-30	14.8	10.0	9.5	8.8
BHA-TPS-30-BBF	14.8	10.0	10.2	9.6
BHA-TPS-30-BBA	14.8	10.6	10.1	9.7
BHA-TPS-30-BBB	14.8	10.9	10.4	10.0

เมื่อพิจารณาปริมาณผลึกวันที่ 0 พบว่า BHA-TPS-30 จะมีปริมาณผลึกมากที่สุดคือ 14.8 % รองลงมาคือ BHF-TPS-30 และ G-TPS-30 ตามลำดับ เมื่อเก็บชิ้นงาน TPS ในสภาวะความชื้นสัมพัทธ์ 53% ในระยะเวลาที่นานขึ้น พบว่าชิ้นงาน TPS สูตร BHF-TPS-30 และ G-TPS-30 มีปริมาณผลึกเพิ่มขึ้นโดยชิ้นงาน TPS สูตร G-TPS-30 มีปริมาณผลึกเพิ่มขึ้นสูงที่สุดโดยในวันที่ 60 ชิ้นงานมีปริมาณผลึกสูงถึง 11.9 % ซึ่งแสดงว่าเกิด retrogradation เนื่องจากพันธะไฮโดรเจนที่ยึดเหนี่ยวระหว่าง glycerol กับโมเลกุลของแป้งเป็นพันธะที่ไม่แข็งแรงมากและเมื่อปล่อยทิ้งไว้โมเลกุลของ glycerol อาจหลุดออกมาสู่ภายนอกของชิ้นงาน TPS ได้ และทำให้โมเลกุลของแป้งเกิดการแนบชิดกันได้เพิ่มขึ้นเนื่องจากโมเลกุลของแป้งสามารถเคลื่อนที่มาสร้างพันธะไฮโดรเจนกันได้อีกส่งผลให้มีปริมาณผลึกเพิ่มขึ้น

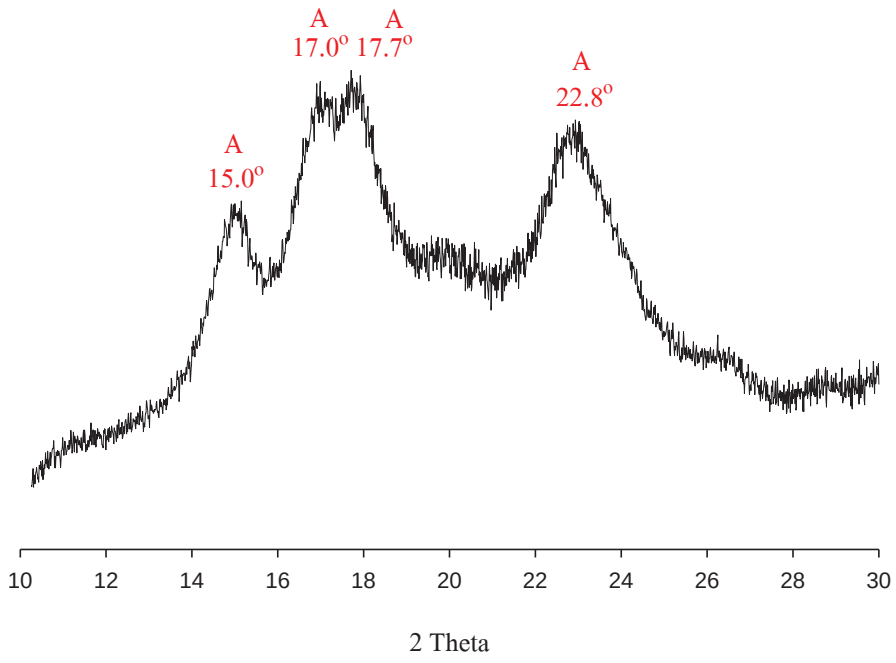
สำหรับชิ้นงาน TPS สูตร BHA-TPS-30 พบว่าเมื่อเก็บในสภาวะความชื้นสัมพัทธ์ 53% ในระยะเวลาที่นานขึ้น ปริมาณผลึกจะลดลงเนื่องจากว่าน้ำที่แทรกเข้าไปในชิ้นงาน TPS จะไปแยก BHA ที่เกาะกลุ่มกันเองทำให้ BHA เกิดการพลาสติไซส์แป้งได้เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ปริมาณผลึกลดลง [29]

เมื่อพิจารณาชิ้นงาน TPS ที่ทำการเคลือบผิว พบว่าเมื่อเก็บชิ้นงาน TPS ในสภาวะความชื้นสัมพัทธ์ 53% ในระยะเวลาที่นานขึ้น ปริมาณผลึกลดลงน้อยกว่ากรณีที่ไม่ได้ทำการเคลือบผิวเนื่องจากสารเคลือบผิวจะทำหน้าที่ป้องกันโมเลกุลของน้ำที่จะแทรกเข้าไปในชิ้นงาน

และชิ้นงานที่เคลือบผิวด้วย BBB จะมีปริมาณผลึกที่มากกว่าการเคลือบผิวด้วย BBA และ BBF เนื่องจาก BBB สามารถป้องกันโมเลกุลของน้ำที่จะแทรกเข้าไปในชิ้นงานได้ดีกว่า

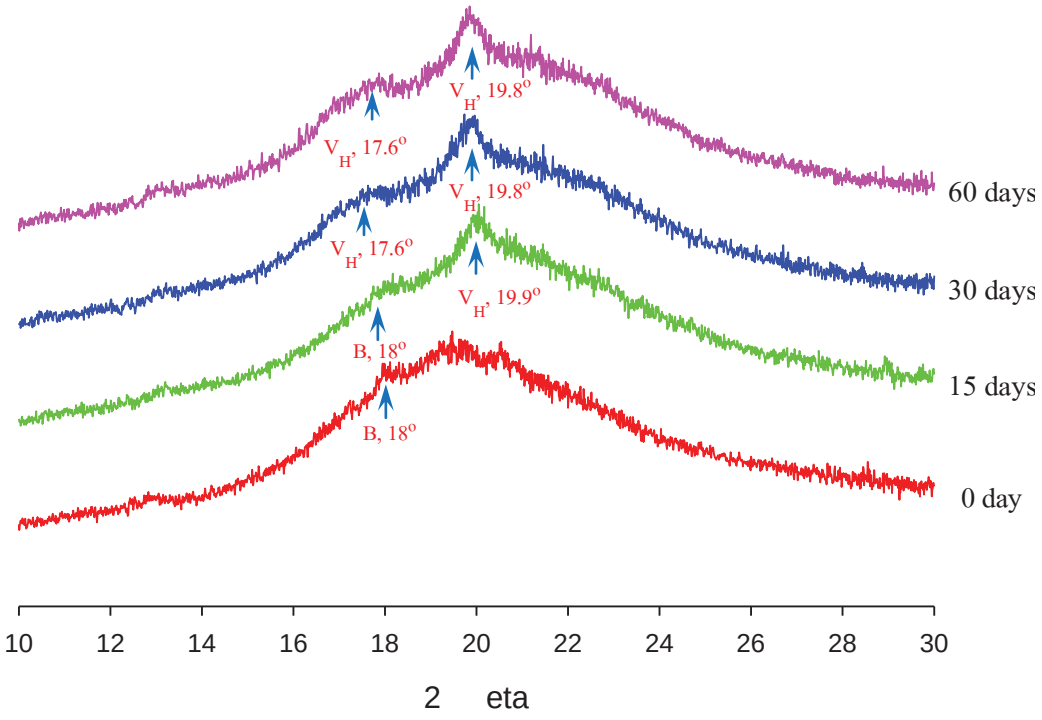
4.10.2 การศึกษารูปแบบผลึกของชิ้นงาน TPS ที่ระยะเวลาต่างๆ ในสภาวะความชื้นสัมพัทธ์ 53%

จากภาพที่ 63 แสดงลักษณะรูปแบบและปริมาณผลึกของแป้งมันสำปะหลังที่ระยะเวลา 0 วัน โดยพบว่าเกิด peak ที่ตำแหน่ง 2θ = 15.0° 17.0° 17.7° 22.8° ซึ่งเป็นลักษณะผลึกแบบ A-type โดยเกิดจากการจัดเรียงตัวของโมเลกุลของแป้งที่เป็นเกลียวคู่ (double helical structure) ในลักษณะที่หนาแน่นมากและมีความชื้นต่ำ [1, 35]



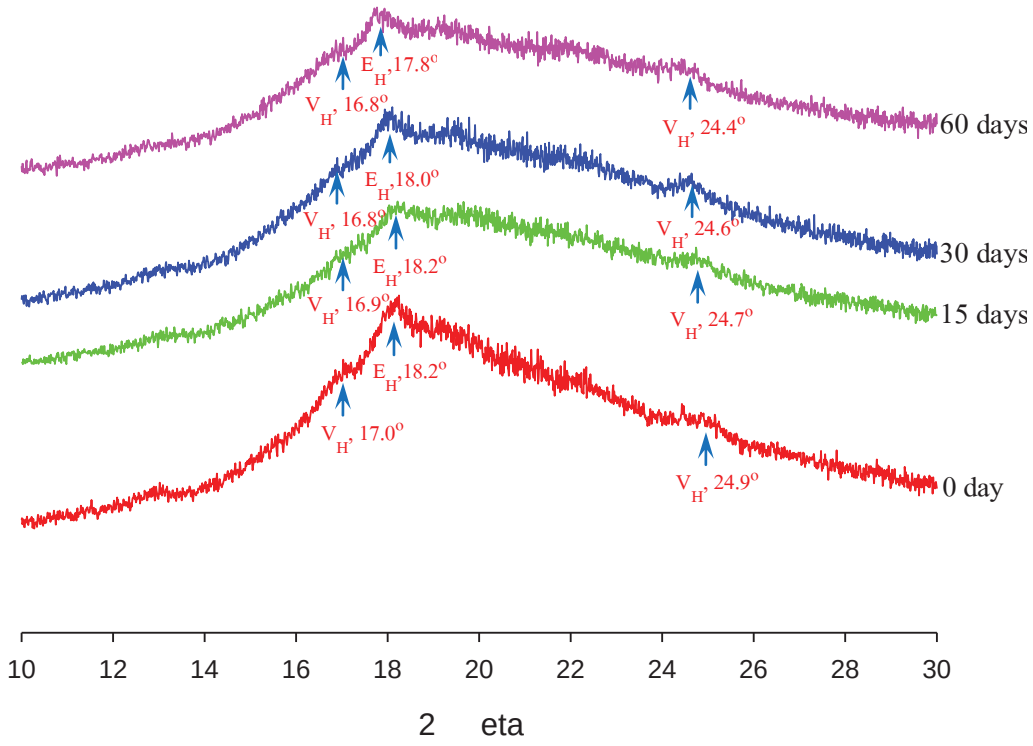
ภาพที่ 63 XRD diffractogram ของ native starch ที่ระยะเวลา 0 วัน

จากภาพที่ 64 แสดงลักษณะรูปแบบและปริมาณผลึกของชิ้นงานสูตร G-TPS-30 โดยพบว่าวันที่ 0 จะเกิด peak ที่ตำแหน่ง 2θ = 18° ซึ่งเป็นลักษณะผลึกแบบ B-type ซึ่งเกิดจากการจัดเรียงตัวโมเลกุลของแป้งที่เป็นเกลียวคู่ (double helical structure) และมีโมเลกุลน้ำแทรกอยู่ [40] สำหรับวันที่ 15 พบลักษณะผลึกแบบ B-type เริ่มเปลี่ยนแปลงไปเป็นแบบ V_H-type โดยเกิด peak ที่ตำแหน่ง 2θ = 19.9° เด่นชัดขึ้นมา สำหรับวันที่ 30 และ 60 จะมีลักษณะผลึกแบบ V_H-type ที่ชัดเจนมากขึ้นและมีปริมาณผลึกมากขึ้น โดยเกิด peak ที่ตำแหน่ง 2θ = 17.6° 19.8° โดยการเกิดผลึกแบบ V_H-type เกิดจากการจัดเรียงตัวของโมเลกุลแป้งที่เป็นเกลียวเดี่ยว (single helical structure)และมีโมเลกุลของน้ำอยู่จำนวนมาก [5]



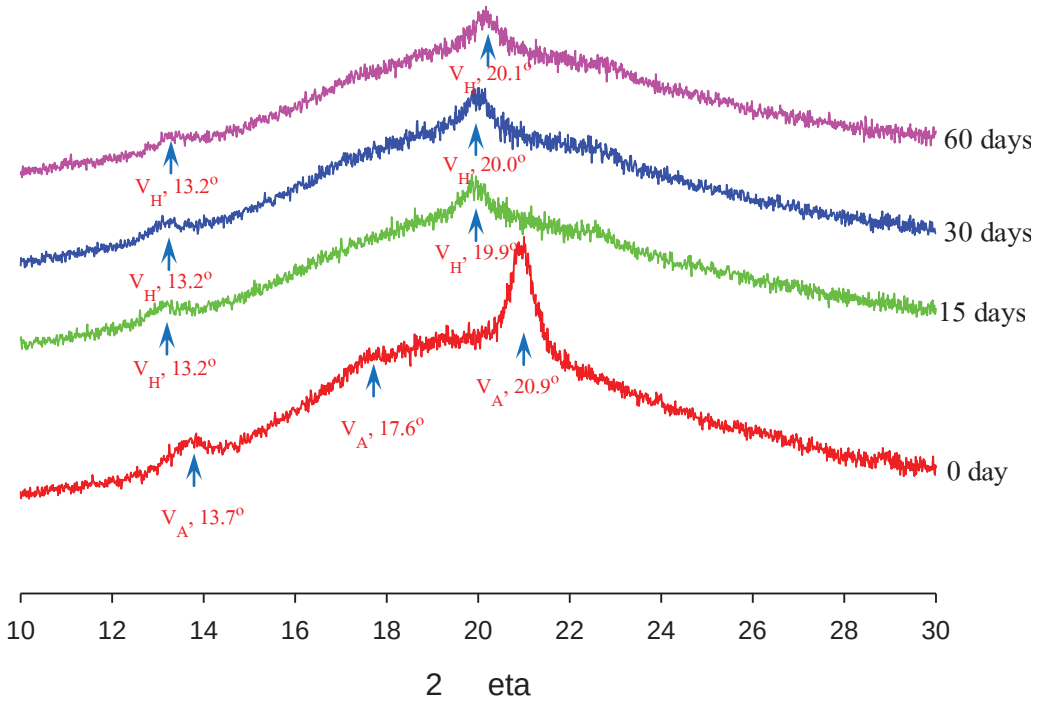
ภาพที่ 64 XRD diffractograms ของชิ้นงานสูตร G-TPS-30 เมื่อเก็บในสภาวะความชื้นสัมพัทธ์ 53 % ในระยะเวลาที่แตกต่างกัน

จากภาพที่ 65 แสดงลักษณะรูปแบบและปริมาณผลึกของชิ้นงานสูตร BHF-TPS-30 โดยพบว่าวันที่ 0 จะเกิด peak ที่ตำแหน่ง 2θ = 18.2° ซึ่งเป็นลักษณะผลึกแบบ E_H-type โดยเกิดจากการจัดเรียงตัวของโมเลกุลของแป้งที่เป็นเกลียวเดี่ยว (single helical structure) [27] และเกิด peak ที่ตำแหน่ง 2θ = 17.0° 24.9 °ซึ่งเป็นลักษณะผลึกแบบ V_H-type สำหรับวันที่ 15, 30 และ 60 พบว่าตำแหน่ง 2θ มีการเปลี่ยนแปลงไปเล็กน้อย โดยที่ลักษณะผลึกยังคงเป็นแบบ V_H-type และ E_H-type



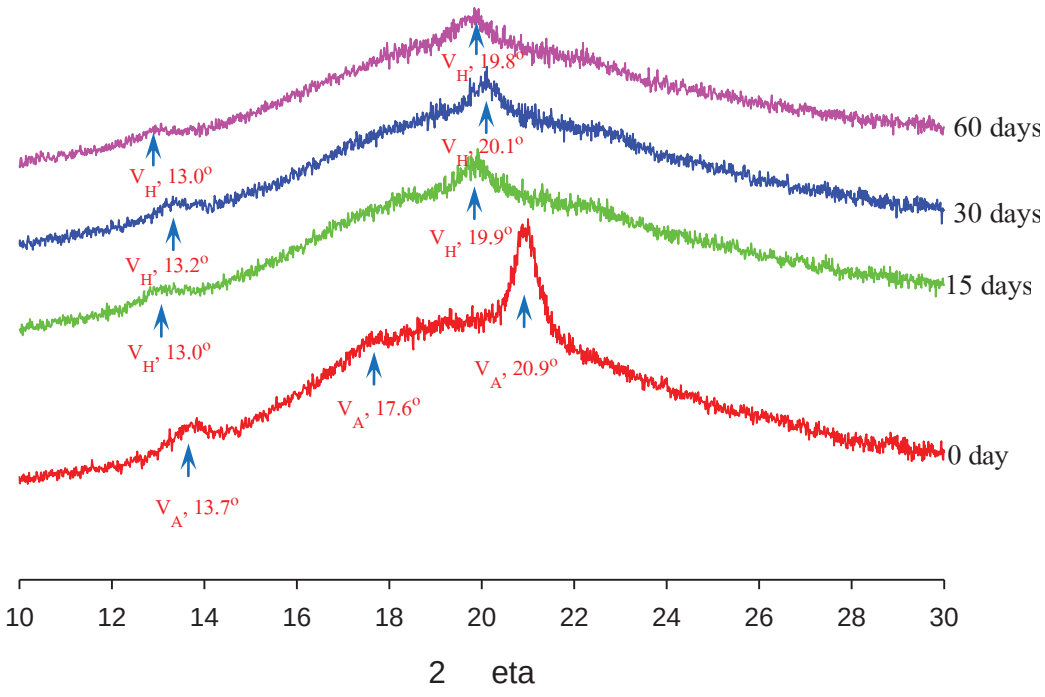
ภาพที่ 65 XRD diffractograms ของชิ้นงานสูตร BHF-TPS-30 เมื่อเก็บในสภาวะความชื้นสัมพัทธ์ 53 % ในระยะเวลาที่แตกต่างกัน

จากภาพที่ 66 แสดงลักษณะรูปแบบและปริมาณผลึกของชิ้นงานสูตร BHA-TPS-30 โดยพบว่าวันที่ 0 เกิด peak ที่ตำแหน่ง 2θ = 13.7° 17.6° 20.9 ° ซึ่งเป็นลักษณะผลึกแบบ V_A-type โดยเกิดจากการจัดเรียงตัวของโมเลกุลของแป้งที่เป็นเกลียวเดี่ยว (single helical structure) แต่มีโมเลกุลของน้ำแทรกตัวอยู่น้อยกว่าผลึกแบบ V_H-type [5] สำหรับวันที่ 15 พบว่ารูปแบบผลึกได้เปลี่ยนเป็นแบบ V_H-type เนื่องจากโมเลกุลของน้ำแทรกตัวเข้าไปมากขึ้น โดยเกิด peak ที่ตำแหน่ง 2θ = 13.2° 19.9° สำหรับวันที่ 30 และ 60 พบว่าตำแหน่ง 2θ มีการเปลี่ยนแปลงไปเล็กน้อย โดยที่ลักษณะผลึกยังคงเป็นแบบ V_H-type

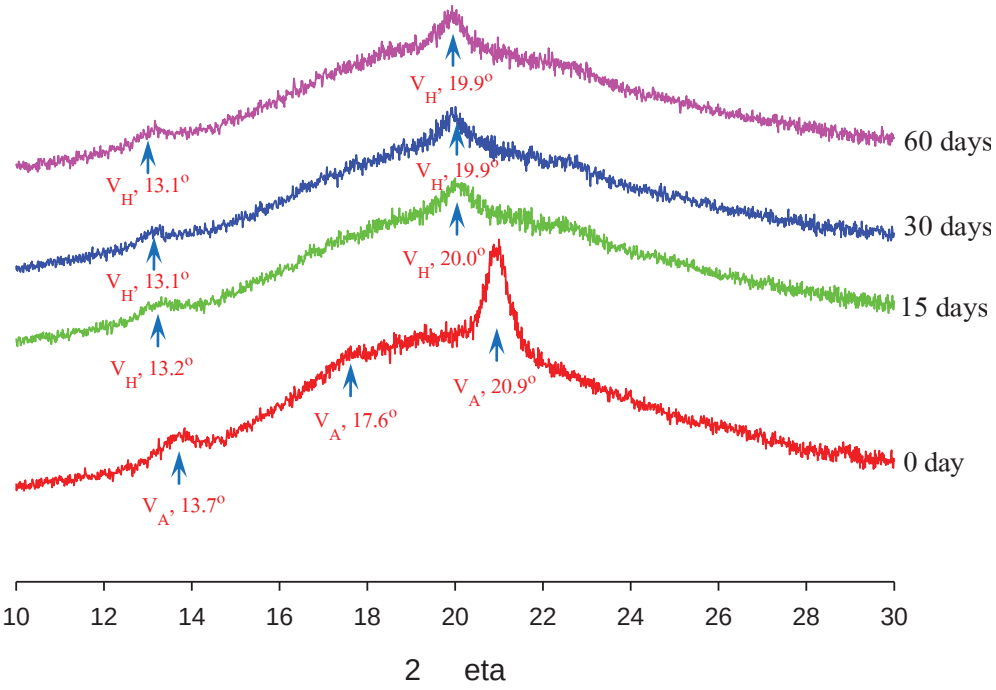


ภาพที่ 66 XRD diffractograms ของชิ้นงานสูตร BHA-TPS-30 เมื่อเก็บในสภาวะความชื้นสัมพัทธ์ 53 % ในระยะเวลาที่แตกต่างกัน

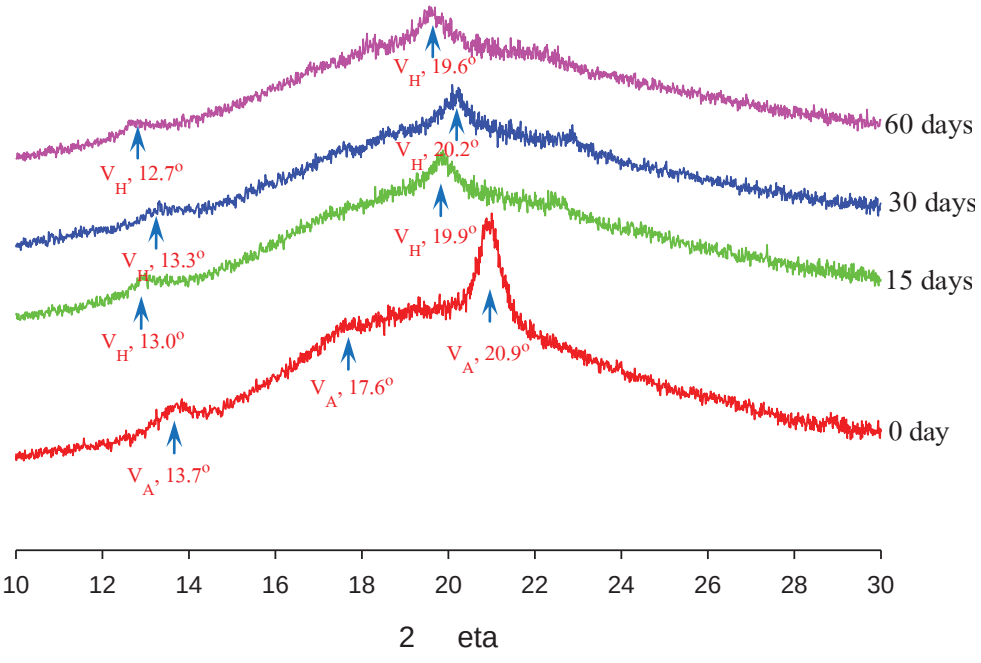
จากภาพที่ 67-69 แสดงลักษณะรูปแบบและปริมาณผลึกของชิ้นงานสูตร BHA-TPS-30-BBF, BHA-TPS-30-BBA และ BHA-TPS-30-BBB ซึ่งลักษณะผลึกที่เกิดขึ้นของชิ้นงานทั้งสามสูตรจะมีลักษณะที่เหมือนกัน โดยพบว่าวันที่ 0 เกิด peak ที่ตำแหน่ง 2θ = 13.7° 17.6° 20.9 ° ซึ่งเป็นลักษณะผลึกแบบ V_A-type สำหรับวันที่ 15 พบว่ารูปแบบผลึกได้เปลี่ยนเป็นแบบ V_H-type เนื่องจากโมเลกุลของน้ำแทรกตัวเข้าไปมากขึ้น และสำหรับวันที่ 30 และ 60 พบว่าตำแหน่ง 2θ มีการเปลี่ยนแปลงจากวันที่ 15 ไปเล็กน้อย โดยที่ลักษณะผลึกยังคงเป็นแบบ V_H-type



ภาพที่ 67 XRD diffractograms ของชิ้นงานสูตร BHA-TPS-30-BBF เมื่อเก็บในสภาวะความชื้นสัมพัทธ์ 53 % ในระยะเวลาที่แตกต่างกัน



ภาพที่ 68 XRD diffractograms ของชิ้นงานสูตร BHA-TPS-30-BBA เมื่อเก็บในสภาวะความชื้นสัมพัทธ์ 53 % ในระยะเวลาที่แตกต่างกัน

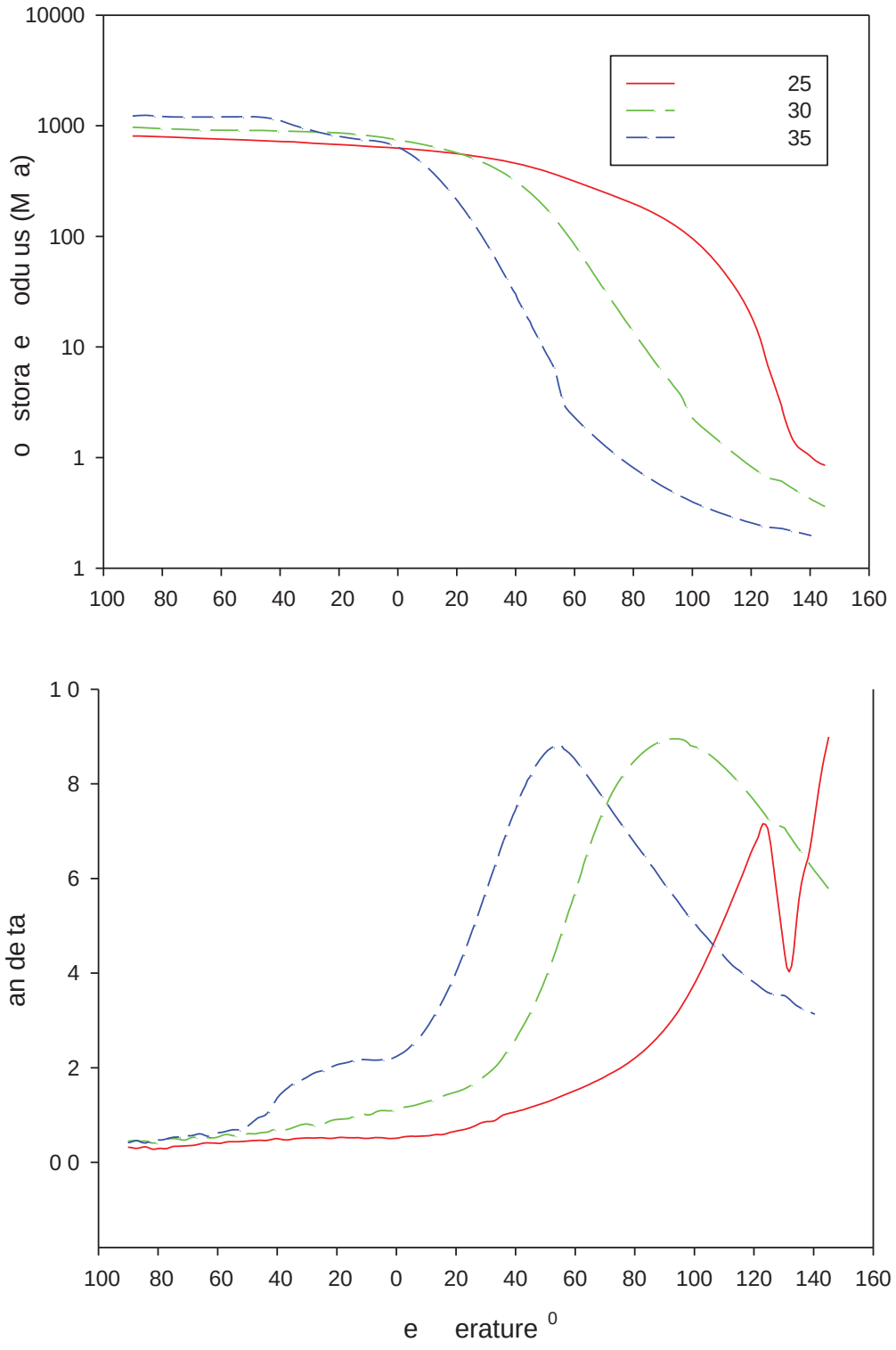


ภาพที่ 69 XRD diffractograms ของชิ้นงานสูตร BHA-TPS-30-BBB เมื่อเก็บในสภาวะความชื้นสัมพัทธ์ 53 % ในระยะเวลาที่แตกต่างกัน

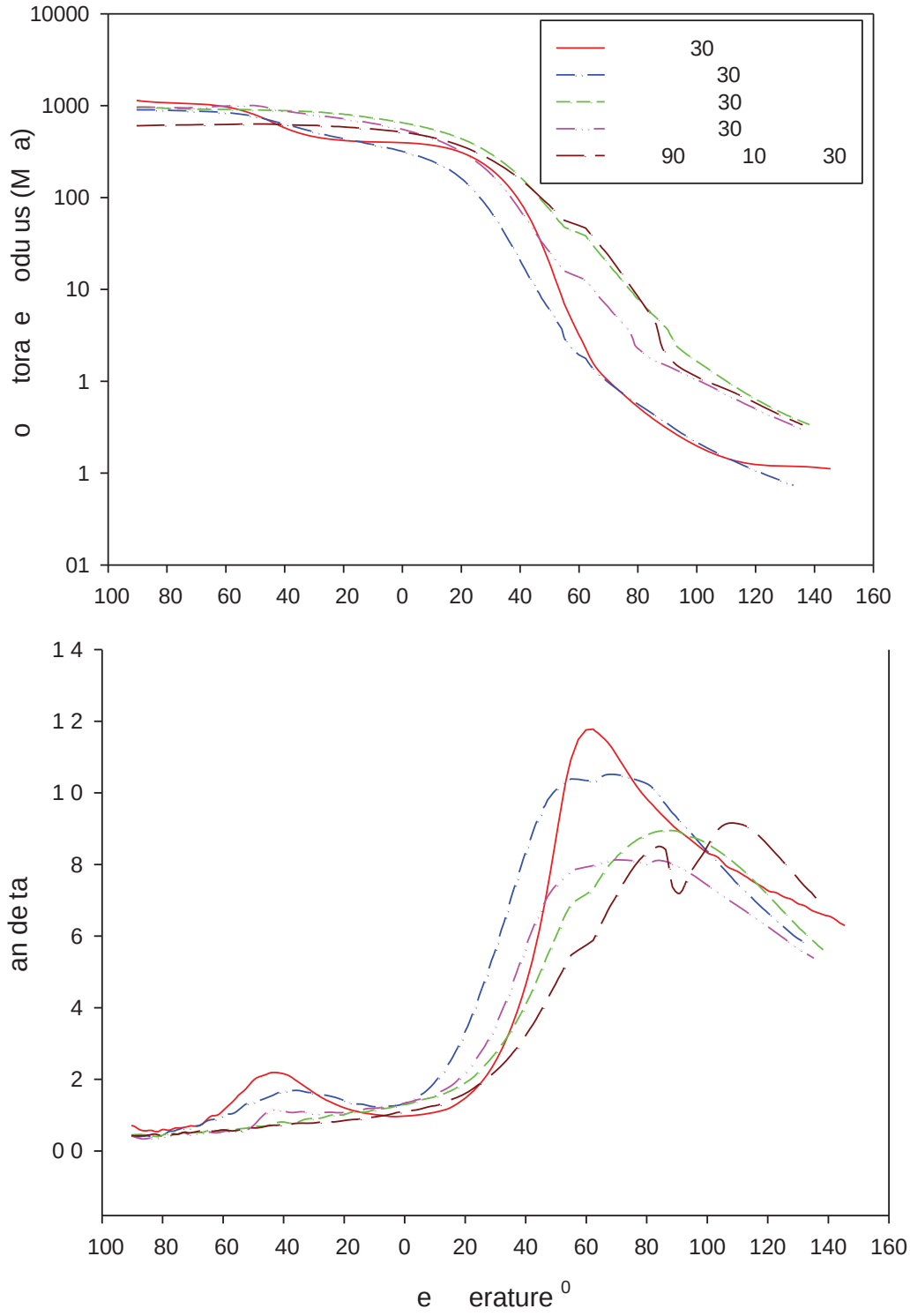
4.11 การศึกษาอุณหภูมิ glass transition (T_g) ของชิ้นงาน TPS ด้วยเทคนิค DMA

ในการศึกษาอุณหภูมิ glass transition (T_g) ของชิ้นงาน TPS ด้วยเทคนิค DMA มีการเพิ่มอุณหภูมิตั้งแต่อุณหภูมิ -100°C ถึง 150 °C ด้วยอัตราการเพิ่มอุณหภูมิเท่ากับ 5 °C/min ที่ความถี่ 1 Hz จากผลการทดลองซึ่งแสดงด้วยกราฟของค่า tan delta และค่า log storage modulus ที่อุณหภูมิต่างๆ ดังแสดงในภาพที่ 70-71 จากกราฟจะพบว่าเมื่อค่า storage modulus มีค่าลดลง ค่า tan delta จะมีค่าสูงขึ้น ซึ่งค่า log storage modulus มีการลดลง 2 ตำแหน่ง โดยช่วงแรกเกิดที่อุณหภูมิประมาณ -50/-30 °C ซึ่งเป็นการเกิด relaxation ของ plasticizer rich phase ส่วนช่วงที่สองจะเกิดที่อุณหภูมิประมาณ 40-100 °C เป็นการเกิด relaxation ของ starch rich phase [38,39] ซึ่งมีค่าไม่เท่ากันขึ้นอยู่กับชนิดและปริมาณของพลาสติไซเซอร์ที่ใช้ จากการพบเฟสทั้งสองที่เกิดขึ้นจึงสรุปได้ว่าระบบการใช้กลีเซอรอลและอนุพันธ์ของเอไมด์เป็นพลาสติไซเซอร์ทำให้เกิดการผสมแบบ partially miscible blend

นอกจากนี้การทดสอบด้วยเทคนิค DMA ยังให้ข้อมูลที่สำคัญของวัสดุดังแสดงในตารางที่ 7 โดยค่า T_p คือ อุณหภูมิการเกิด relaxation ของ plasticizer rich phase, T_s คือ อุณหภูมิการเกิด relaxation ของ starch rich phase ซึ่งถือได้ว่าเป็น glass transition temperature (T_g) ของ thermoplastic starch, T_{deform} เป็นอุณหภูมิที่ชิ้นงานเริ่มเกิดการเสียรูป และเทคนิค DMA ยังให้ข้อมูลค่า storage modulus (G') ของชิ้นงานที่อุณหภูมิต่างๆ



ภาพที่ 70 ผลการทดสอบด้วยเทคนิค DMA ของชิ้นงาน TPS เมื่อใช้ BHA เป็นพลาสติไซเซอร์



ภาพที่ 71 ผลการทดสอบด้วยเทคนิค DMA ของชิ้นงาน TPS เมื่อใช้กลีเซอรอลและอนุพันธ์ของเอไมด์เป็นพลาสติไซเซอร์

ตารางที่ 7 ค่าต่างๆที่ได้จากการทดสอบด้วยเทคนิค DMA

Sample	T_P (°C)	T_g (°C)	T_{deform} (°C)	G´ at T_P (MPa)	G´ at T_g (MPa)	G´ at -50 °C (MPa)	G´ at 25 °C (MPa)
G-TPS-30	-43	61	83	651	2.5	795	255
BHF-TPS-30	-36	69	98	587	1.0	759	110
BHA-TPS-25	N/A	123	128	N/A	12	742	535
BHA-TPS-30	-33	92	120	886	2.4	897	360
BHA-TPS-30-BBB	-42	84	113	895	1.8	999	238
BHA-TPS-35	-21	53	90	808	6.5	1207	133
BHA90+BHB10-TPS-30	N/A	83, 108	123	N/A	6.1, 0.9	631	304

จากภาพที่ 70 พบว่าเมื่อใช้ BHA เป็นพลาสติไซเซอร์ในปริมาณ 25, 30 และ 35% โดยน้ำหนัก ค่า T_g ของชิ้นงาน TPS ที่เติมพลาสติไซเซอร์ลงไป 25% โดยน้ำหนักจะมีค่าสูงสุดรองลงมาคือเมื่อใช้ BHA 30% และ 35% ตามลำดับเนื่องจากว่าปริมาณพลาสติไซเซอร์ที่มากขึ้นจะไปทำลายพันธะไฮโดรเจนระหว่างสายโซ่โมเลกุลของแป้งได้มากขึ้นจึงทำให้สายโซ่โมเลกุลของแป้งเคลื่อนไหวได้ง่ายขึ้น ซึ่งอุณหภูมิ T_g ของชิ้นงานสูตร BHA-TPS-35 เท่ากับ 53 °C ส่วนชิ้นงานสูตร BHA-TPS-30 และ BHA-TPS-25 มีอุณหภูมิ T_g เท่ากับ 93 และ123 °C ตามลำดับ

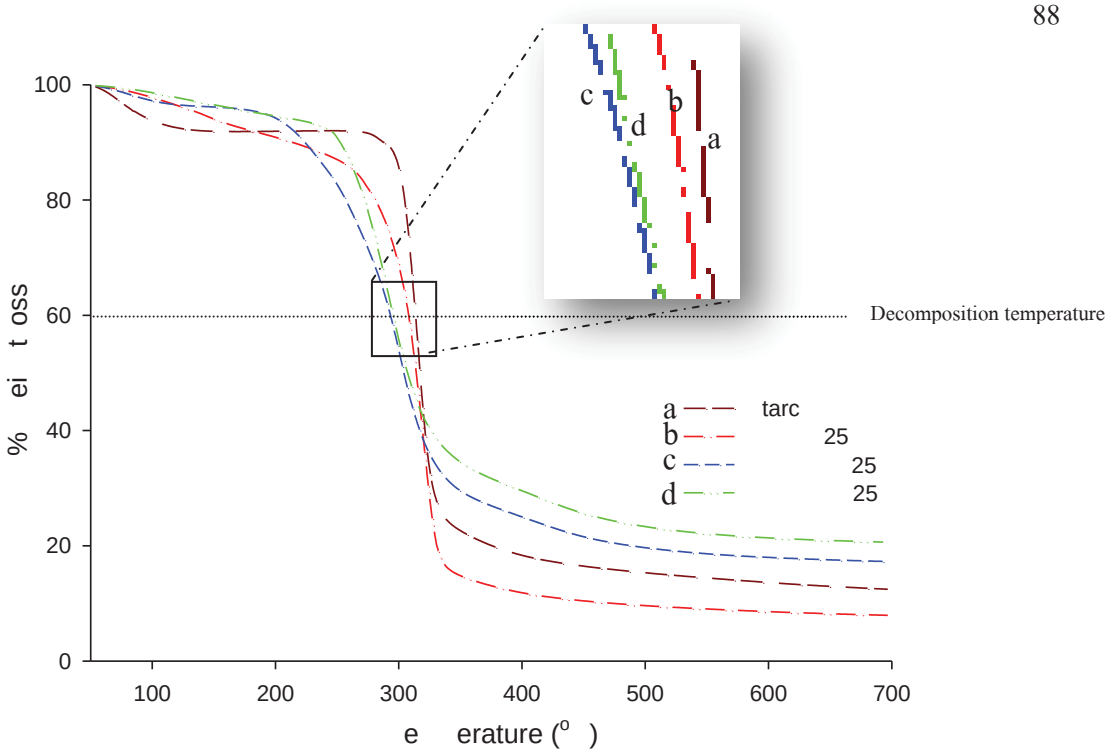
จากภาพที่ 71 พบว่าเมื่อใช้กลีเซอรอลและอนุพันธ์ของเอไมด์เป็นพลาสติไซเซอร์ในปริมาณ 30% โดยน้ำหนัก ชิ้นงานสูตร BHA-TPS-30 มีอุณหภูมิ T_g สูงกว่าชิ้นงานสูตร BHF-TPS-30 และ G-TPS-30 ตามลำดับ เนื่องจาก BHA และ BHF สามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนกับโมเลกุลของแป้งที่แข็งแรงกว่า glycerol รวมทั้งมีโครงสร้างที่ใหญ่กว่าเมื่อได้รับแรงเฉือนที่อุณหภูมิเพิ่มขึ้นจึงทำให้สายโซ่โมเลกุลของแป้งเคลื่อนไหวได้ยากกว่า ส่วนการที่ BHA-TPS-30 มีอุณหภูมิ T_g สูงกว่า BHF-TPS-30 เนื่องจากว่า BHA มีโครงสร้างที่ใหญ่กว่าและสามารถขัดขวางการที่เคลื่อนไหวของสายโซ่โมเลกุลของแป้งได้ดีกว่าจึงทำให้อุณหภูมิ T_g สูงกว่า

สำหรับชิ้นงานสูตร BHA-TPS-30-BBB มีอุณหภูมิ T_g ต่ำกว่าชิ้นงานสูตร BHA-TPS-30 เล็กน้อย อาจเกิดจากขั้นตอนการเคลือบผิวที่มีการจุ่มลงไปในสารเคลือบผิวที่ละลายใน ethanol ซึ่งทำให้โมเลกุลของ ethanol แทรกเข้าไประหว่างสายโซ่โมเลกุลของแป้งทำให้สายโซ่โมเลกุลของแป้งเคลื่อนไหวได้ง่ายขึ้นส่งผลให้อุณหภูมิ T_g ต่ำกว่าชิ้นงานที่ไม่ได้เคลือบผิว

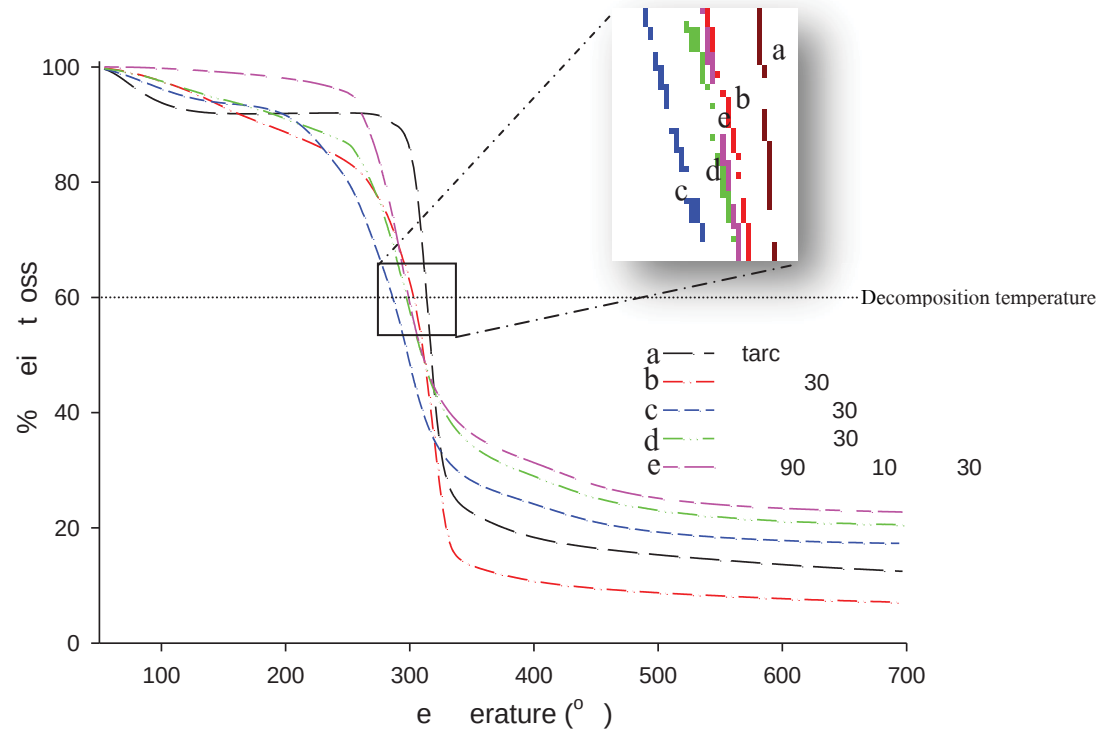
สำหรับชิ้นงานสูตร BHA 90+BHB 10-TPS-30 เป็นการใช้พลาสติไซเซอร์ผสมระหว่าง BHA กับ BHB ซึ่งจะพบว่ามีอุณหภูมิ T_g สองค่า ค่า T_g แรกเกิดที่อุณหภูมิ 83 °C เกิดจากแรงเฉือนและพลังงานความร้อนที่ให้เข้าไปสามารถเอาชนะแรงยึดเหนี่ยวระหว่าง BHA กับโมเลกุลของแป้งจึงทำให้สายโซ่โมเลกุลของแป้งเคลื่อนไหว ส่วน T_g ค่าที่สองเกิดอุณหภูมิ 108 °C เป็นผลมาจาก BHB มีโครงสร้างโมเลกุลที่ใหญ่จึงทำการ plasticize โมเลกุลของแป้งได้ยากทำให้สายโซ่โมเลกุลของแป้งเคลื่อนไหวได้ยากขึ้น

4.12 การศึกษาเสถียรภาพทางความร้อนของชิ้นงานโดยใช้เทคนิค TGA

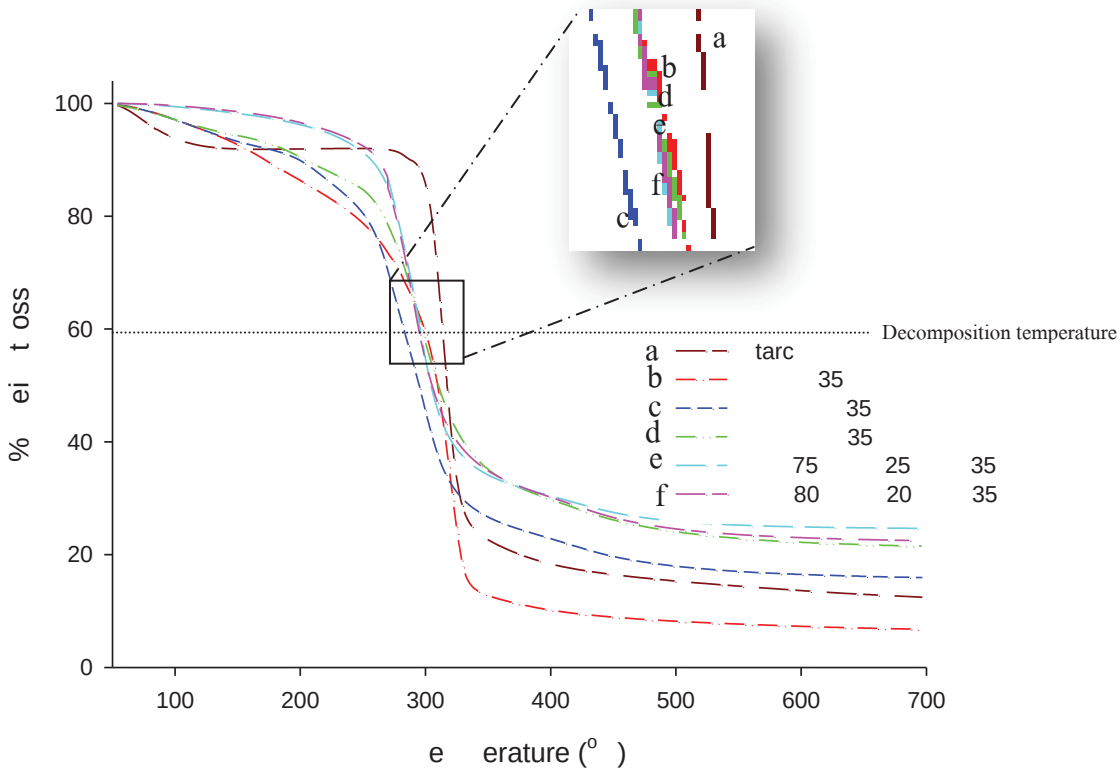
ในการศึกษาเสถียรภาพทางความร้อนโดยใช้เทคนิค TGA มีการให้ความร้อนตั้งแต่อุณหภูมิ 50-700 °C ที่อัตราการให้ความร้อนเท่ากับ 10 °C/min ภายใต้บรรยากาศของไนโตรเจน ซึ่งจากผลการทดลองค่าแกน y คือ ค่าร้อยละของน้ำหนักที่ลดลงเนื่องจากการสลายตัวทางความร้อน ค่าแกน x อุณหภูมิในการสลายตัว โดยในงานวิจัยนี้จะทำการเทียบกับอุณหภูมิการสลายตัวเฉลี่ยของ native starch (313.7°C) ซึ่งที่อุณหภูมิ 313.7°C native starch มี % weight loss ประมาณ 60 % โดยแสดงเป็นลักษณะเส้นประ [37]



ภาพที่ 72 TGA thermogram ของแป้งและชิ้นงาน TPS ที่มีการเติมพลาสติไซเซอร์ลงไป 25 % โดยน้ำหนัก



ภาพที่ 73 TGA thermogram ของแป้งและชิ้นงาน TPS ที่มีการใส่พลาสติไซเซอร์ลงไป 30 % โดยน้ำหนัก



ภาพที่ 74 TGA thermogram ของแป้งและชิ้นงาน TPS ที่มีการใส่พลาสติไซเซอร์ลงไป 35 % โดยน้ำหนัก

จากภาพที่ 72 พบว่าการสลายตัวของ native starch มีสองช่วง โดยช่วงแรกจะเกิดที่อุณหภูมิประมาณ 100 °C ซึ่งเป็นการสูญเสียน้ำ และช่วงที่สองเกิดที่อุณหภูมิประมาณ 314 °C ซึ่งแสดงถึงการเริ่มสลายตัวของโมเลกุลแป้ง จากภาพที่ 72-74 เมื่อมีการเติมพลาสติไซเซอร์เดี่ยวโดยเทียบที่เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักเท่ากันในแต่ละภาพพบว่าอุณหภูมิการสลายตัวที่ 60 % weight loss แตกต่างกันโดยชิ้นงาน TPS ที่ใช้ BHF และ BHA เป็นพลาสติไซเซอร์มีอุณหภูมิการสลายตัวต่ำกว่าการใช้ glycerol เป็นพลาสติไซเซอร์เนื่องจาก BHF สามารถไปลดพันธะไฮโดรเจนที่เกิดระหว่างสายโซ่โมเลกุลของแป้งได้ดีที่สุดรองลงมาคือ BHA และ glycerol ตามลำดับ เมื่อพันธะไฮโดรเจนที่เกิดระหว่างสายโซ่โมเลกุลของแป้งถูกทำลายไปจึงทำให้อุณหภูมิการสลายตัวของแป้งต่ำลง และเมื่อพิจารณาพลาสติไซเซอร์ที่ใช้เป็นชนิดเดียวกันพบว่าเมื่อใช้เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของพลาสติไซเซอร์มากขึ้นทำให้อุณหภูมิการสลายตัวที่ 60 % weight loss ลดลงเนื่องจากเมื่อปริมาณพลาสติไซเซอร์ที่ใช้เพิ่มมากขึ้นสามารถไปลดพันธะไฮโดรเจนที่เกิดระหว่างสายโซ่โมเลกุลของแป้งได้ดีขึ้น

เมื่อมีการใช้พลาสติไซเซอร์ผสมพบว่าชิ้นงาน TPS ที่มีการผสม BHB เพื่อใช้เป็นพลาสติไซเซอร์มี อุณหภูมิการสลายตัวที่ 60 % weight loss สูงกว่ากรณีที่ไม่ผสม BHB ลงไปเนื่องจากเมื่อเติม BHB ลงไปแทน BHF หรือ BHA บางส่วนทำให้ปริมาณของ BHF หรือ BHA ที่ใช้น้อยลง และมีผลทำให้การทำลายพันธะไฮโดรเจนที่เกิดระหว่างสายโซ่โมเลกุลของแป้งลดลง

ตารางที่ 8 ค่าอุณหภูมิการสลายตัวและอุณหภูมิการสลายตัวที่ 60 % weight loss ของชิ้นงาน TPS

สูตร	อุณหภูมิเริ่มสลายตัว (°C)	อุณหภูมิการสลายตัวที่ 60 % weight loss (°C)
Starch	309.1	313.7
G-TPS-35	289.1	299.1
G-TPS-30	290.3	303.2
G-TPS-25	294.6	308.0
BHF-TPS-35	248.3	282.7
BHF-TPS-30	258.1	286.2
BHF-TPS-25	261.8	293.3
BHA-TPS-35	265.2	297.1
BHA-TPS-30	266.3	297.3
BHA-TPS-25	260.2	295.4
BHF 75+BHB 25-TPS-35	262.4	296.5
BHA 80+BHB 20-TPS-35	263.3	296.6
BHA 90+BHB 10-TPS-30	262.2	299.1

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

การศึกษาวิจัยในครั้งนี้มีจุดประสงค์เพื่อปรับปรุงสมบัติเชิงกลและการดูดซับความชื้นของเทอร์โมพลาสติกที่เตรียมจากแป้งโดยใช้พลาสติไซเซอร์และสารเคลือบผิว ในการทดลองได้สังเคราะห์พลาสติไซเซอร์ 3 ชนิดคือ BHF, BHA และ BHB รวมทั้งสารเคลือบผิว 3 ชนิดคือ BBF, BBA และ BBB ซึ่งจากผลการพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิค FT-IR และ ^{1}H-NMR ยืนยันได้ว่าสามารถสังเคราะห์สารดังกล่าวได้สำเร็จ

ในการผสมพบว่าเมื่อใช้ glycerol, BHF และ BHA เป็นพลาสติไซเซอร์ในอัตราส่วน 25, 30 และ 35% โดยน้ำหนัก แป้งสามารถหลอมเข้ากับพลาสติไซเซอร์ที่ใส่ลงไปได้ แต่เมื่อเปลี่ยนพลาสติไซเซอร์เป็น BHB ซึ่งพบว่าแป้งไม่สามารถหลอมเข้ากับ BHB ในขณะทำการผสม น่าจะเกิดจากโครงสร้างของ BHB ที่มีขนาดใหญ่กว่าพลาสติไซเซอร์ชนิดอื่นจึงขัดขวางการเกิด plasticization ดังนั้นจึงใช้พลาสติไซเซอร์ผสมระหว่าง BHF กับ BHB และ BHA กับ BHB แทนการใช้ BHB เป็นพลาสติไซเซอร์เพียงอย่างเดียว

จากการทดสอบด้วยเทคนิค SEM กับผิวชิ้นงาน TPS ที่เกิดการแตกหักพบว่ามีความเป็นเนื้อเดียวและเรียบมากขึ้นเนื่องจากว่ากระบวนการ plasticization จะทำภายใต้สภาวะความร้อนและแรงเฉือน โดยพลาสติไซเซอร์ที่ใส่เข้าไปจะไปทำลายพันธะไฮโดรเจนระหว่างสายโซ่โมเลกุลของแป้ง แล้วพลาสติไซเซอร์จะไปเกิดพันธะไฮโดรเจนกับโมเลกุลของแป้ง

จากการทดสอบสมบัติเชิงกลพบว่าค่า tensile modulus ของชิ้นงาน TPS เมื่อใช้ BHA เป็นพลาสติไซเซอร์มีค่ามากที่สุดรองลงมาคือ BHF และ glycerol ตามลำดับเนื่องจาก BHA และ BHF สามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนกับโมเลกุลของแป้งที่แข็งแรงกว่า glycerol เมื่อได้รับแรงดึงสามารถขัดขวางการเคลื่อนที่ของสายโซ่โมเลกุลของแป้งได้ดีกว่า ส่วนการที่ BHA มี tensile modulus ที่สูงกว่า BHF เนื่องจากว่า BHA มีโครงสร้างที่ใหญ่กว่าสามารถขัดขวางการเคลื่อนที่ของสายโซ่โมเลกุลของแป้งได้ดีกว่า เมื่อใช้ BHF หรือ BHA เป็นพลาสติไซเซอร์พบว่าค่า tensile strength ของชิ้นงาน TPS มีค่าไม่แตกต่างกันมากนัก แต่จะมีค่าสูงกว่าการใช้ glycerol เป็นพลาสติไซเซอร์เล็กน้อย

เมื่อมีการเติม BHB ลงไปเพื่อใช้เป็นพลาสติไซเซอร์ผสมพบว่าค่า tensile modulus และ tensile strength ของชิ้นงาน TPS มีค่าสูงขึ้นแต่ค่า strain at break (%) มีค่าลดลงเนื่องจากว่า BHB มีโครงสร้างที่ใหญ่การเข้าไปพลาสติไซส์แป้งจึงเกิดได้ยาก รวมทั้งยังมีหมู่ benzene จึงขัดขวางการเคลื่อนที่ของสายโซ่โมเลกุลของแป้งเมื่อได้รับแรงดึง

เมื่อนำชิ้นงาน TPS เก็บภายใต้ความชื้นสัมพัทธ์ 53% เป็นเวลา 15 วัน ส่งผลให้สมบัติด้าน tensile properties เปลี่ยนไปอย่างเห็นได้ชัด เนื่องจากโมเลกุลของน้ำที่ชิ้นงาน TPS ดูดซับเข้าไปจะทำตัวเป็นพลาสติไซเซอร์ ซึ่งจะไปลดความความแข็งแรงของพันธะไฮโดรเจนระหว่างสายโซ่โมเลกุลของแป้งให้น้อยลง ทำให้ค่า tensile modulus และ tensile strength ของชิ้นงาน TPS ลดลง ส่วนค่า strain at break (%) มีค่าเพิ่มมากขึ้น

ค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซับความชื้นของชิ้นงาน TPS ที่ใช้ glycerol เป็นพลาสติไซเซอร์จะมีค่ามากที่สุด รองลงมาคือ BHF และ BHA ตามลำดับ เนื่องจากว่าสารประกอบเอไมด์สามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนที่แข็งแรงกับโมเลกุลของแป้งมากกว่า glycerol จึงสามารถป้องกันโมเลกุลของน้ำที่จะเกิดพันธะไฮโดรเจนกับโมเลกุลของแป้งหรือพลาสติไซเซอร์ได้ดีกว่า และยังพบอีกว่าการใช้ BHA เป็นพลาสติไซเซอร์ จะมีค่าการดูดซับความชื้นน้อยกว่า BHF เนื่องจาก BHA มีความเป็น hydrophobic มากกว่า BHF นอกจากนี้ยังพบอีกว่าการผสม BHB ลงไปเป็นพลาสติไซเซอร์ผสมจะเพิ่มความต้านทานในการดูดซับความชื้นของชิ้นงาน TPS ได้ดีขึ้น เนื่องจากว่าโครงสร้างของ BHB มีหมู่ benzene อยู่ทำให้มีความเป็น hydrophobic เพิ่มมากขึ้นจึงป้องกันการดูดซับความชื้นได้ดีขึ้น สำหรับชิ้นงานที่ผ่านการเคลือบผิวจะมีค่าการดูดซับความชื้นที่ต่ำกว่าชิ้นงานที่ไม่ผ่านการเคลือบผิว

อุณหภูมิ T_g (glass transition temperature) ของชิ้นงานเมื่อใช้ BHA เป็นพลาสติไซเซอร์จะสูงกว่ากรณีที่ใช้ BHF และ glycerol เป็นพลาสติไซเซอร์ตามลำดับ เนื่องจาก BHA และ BHF สามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนกับโมเลกุลของแป้งที่แข็งแรงกว่า glycerol รวมทั้ง BHA มีโครงสร้างที่ใหญ่กว่า BHF และ glycerol จึงสามารถขัดขวางการที่เคลื่อนไหวของสายโซ่โมเลกุลของแป้งได้ดีกว่าจึงทำให้อุณหภูมิ T_g สูงกว่า สำหรับชิ้นงานที่ใช้พลาสติไซเซอร์ผสมระหว่าง BHA กับ BHB พบว่ามีอุณหภูมิ T_g สองตำแหน่งตำแหน่งแรก เกิดจากแรงเฉือนและพลังงานความร้อนที่ให้เข้าไปสามารถเอาชนะแรงยึดเหนี่ยวระหว่าง BHA กับโมเลกุลของแป้งจึงทำให้สายโซ่โมเลกุลของแป้งเคลื่อนไหว ส่วนตำแหน่งที่สองเป็นผลมาจาก BHB มีโครงสร้างโมเลกุลที่ใหญ่จึงทำการ plasticize โมเลกุลของแป้งได้ยากทำให้สายโซ่โมเลกุลของแป้งเคลื่อนไหวได้ยากขึ้น

ชิ้นงาน TPS ที่ใช้ BHF หรือ BHA เป็นพลาสติไซเซอร์มีอุณหภูมิการสลายตัวต่ำกว่าการใช้ glycerol เป็นพลาสติไซเซอร์เนื่องจาก BHF สามารถไปลดพันธะไฮโดรเจนที่เกิดระหว่างสายโซ่โมเลกุลของแป้งได้ดีที่สุดรองลงมาคือ BHA และ glycerol ตามลำดับ เมื่อพันธะไฮโดรเจนที่

เกิดระหว่างสายโซ่โมเลกุลของแป้งถูกทำลายไปจึงทำให้อุณหภูมิการสลายตัวของแป้งต่ำลง และเมื่อมีการผสม BHB เพื่อใช้เป็นพลาสติไซเซอร์ผสม พบว่าอุณหภูมิการสลายตัวสูงกว่ากรณีที่ไม่ผสม BHB ลงไปเนื่องจาก เมื่อเติม BHB ลงไปแทน BHF หรือ BHA บางส่วนทำให้ปริมาณของ BHF หรือ BHA ที่ใช้น้อยลง การทำลายพันธะไฮโดรเจนที่เกิดระหว่างสายโซ่โมเลกุลของแป้งจึงลดลง

จากการทดสอบด้วยเทคนิค XRD เมื่อนำชิ้นงาน TPS มาเก็บในสภาวะความชื้นสัมพัทธ์ 53% เป็นเวลา 60 วัน พบว่าเมื่อใช้ glycerol เป็นพลาสติไซเซอร์จะมีปริมาณผลึกเพิ่มขึ้นมากที่สุด แต่เมื่อใช้ BHF เป็นพลาสติไซเซอร์ปริมาณผลึกจะมีการเพิ่มขึ้นเล็กน้อย สำหรับชิ้นงานที่ใช้ BHA เป็นพลาสติไซเซอร์ และชิ้นงานที่มีการเคลือบผิวจะมีปริมาณผลึกลดลง

5.2 ข้อเสนอแนะ

อาจจะใช้พลาสติไซเซอร์ตัวอื่นมาผสมกับพลาสติไซเซอร์ที่สังเคราะห์ได้ในงานวิจัยนี้เพื่อจะปรับปรุงชิ้นงาน TPS ให้มีสมบัติด้านต่างๆดียิ่งขึ้น เช่น อนุพันธ์ของยูเรียเนื่องจากสามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนกับโมเลกุลของแป้งที่แข็งแรง

นอกจากนี้อาจทำการผสมเส้นใยจากธรรมชาติ เช่น เส้นใยกล้วย เส้นใยปอ เป็นต้น ซึ่งอาจทำให้สมบัติด้านต่างๆดีขึ้น

บรรณานุกรม

[1] กล้าณรงค์ ศรีรอต และ เกื้อกูล ปิยะจอมขวัญ. (2546). **เทคโนโลยีของแป้ง**. พิมพ์ครั้งที่ 3. กรุงเทพ: มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

[2] วันชัย เลิศวิจิตรจรัส. (2553). **เอกสารประกอบการสอนวิชาพอลิเมอร์ชีวภาพ**. นครปฐม คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม

[3] Qiao, X., Z. Tang, and K. Sun. "Plasticization of corn starch by polyol mixtures." **Carbohydrate Polymers** 83, 2: 659-664.

[4] Shi, R. et al. (2007). "Aging of soft thermoplastic starch with high glycerol content." **Journal of Applied Polymer Science** 5, 103: 574-586.

[5] van Soest, J. J. G. et al. (1996). "Crystallinity in starch bioplastics." **Industrial Crops and Products** 5, 1: 11-22.

[6] Yang, J.-H., J.-G. Yu, and X.-F. Ma. (2006). "Preparation and properties of ethylenebisformamide plasticized potato starch (EPTPS)." **Carbohydrate Polymers** 63, 2: 218-223.

[7] Huang, M., J. Yu, and X. Ma. (2005). "Ethanolamine as a novel plasticiser for thermoplastic starch." **Polymer Degradation and Stability** 90, 3: 501-507.

[8] Ma, X. F., J. G. Yu, and J. J. Wan. (2006). "Urea and ethanolamine as a mixed plasticizer for thermoplastic starch." **Carbohydrate Polymers** 64, 2: 267-273.

[9] Majdzadeh-Ardakani, K. et al. (2010) "N,N,N',N'-Tetrakis(2-hydroxyethyl)ethylenediamine as a newp lasticizer for thermoplastic starch and its effect on the physical and mechanical properties of starch-based nanocomposites." **Carbohydrate Polymers**

[10] Scientific Psychic. (2009). **Chemical Structure**. Accessed 22 October. Available from http://www.scientificpsychic.com/fitness/carbohydrates1.html.

[11] Tester, R. F., J. Karkalas, and X. Qi. (2004). "Starch-composition, fine structure and architecture." **Journal of Cereal Science** 39, 2: 151-165.

[12] ดุษฎี อุตภาพ. (2554). **ส่วนประกอบของแป้งแป้ง.** เข้าถึงเมื่อ 4 มีนาคม. เข้าได้จาก http://eu.lib.kmutt.ac.th/elearning/Courseware/BCT611/Chap2/chapter2_3.html

[13] กรมวิชาการเกษตร. (2555). **แป้งมันสำปะหลัง.** เข้าถึงเมื่อ 5 มกราคม. เข้าได้จาก http://it.doa.go.th/vichakan/news.php?newsid=14

[14] กรมเจรจาการค้าระหว่างประเทศ. (2555). **แป้งมันสำปะหลัง.** เข้าถึงเมื่อ 5 มกราคม. เข้าได้จาก www.thaifta.com/thaifta/Portals/0/File/ascn_potato1.doc

[15] วันชัย เลิศวิจิตรจรัส, อำนาจ สิทธัตตระกูล และเจกิตาน์ แก้วพารา (2551). " ศักยภาพการผลิตเทอร์โมพลาสติกที่เตรียมจากแป้ง. " **ส่งเสริมเทคโนโลยี** 35, 200 (สิงหาคม-กันยายน)

[16] Kaewtatip, K., and V. Tanrattanakul. "Structure and properties of pregelatinized cassava starch/kaolin composites." **Materials & Design** 37, 0: 423-428.

[17] de Carvalho, A. J. F., A. A. S. Curvelo, and J. A. M. Agnelli. (2001). "A first insight on composites of thermoplastic starch and kaolin." **Carbohydrate Polymers** 45, 2: 189-194.

[18] Curvelo, A. A. S., A. J. F. de Carvalho, and J. A. M. Agnelli. (2001). "Thermoplastic starch-cellulosic fibers composites: preliminary results." **Carbohydrate Polymers** 45, 2: 183-188.

[19] Soykeabkaew, N., P. Supaphol, and R. Rujiravanit. (2004). "Preparation and characterization of jute- and flax-reinforced starch-based composite foams." **Carbohydrate Polymers** 58, 1: 53-63.

[20] Vilaseca, F. et al. (2007). "Composite materials derived from biodegradable starch polymer and jute strands." **Process Biochemistry** 42, 3: 329-334.

[21] Wollerdorfer, M., and H. Bader. (1998). "Influence of natural fibres on the mechanical properties of biodegradable polymers." **Industrial Crops and Products** 8, 2: 105-112.

[22] Carvalho, A. J. F. et al. (2003). "Thermoplastic starch/natural rubber blends." **Carbohydrate Polymers** 53, 1: 95-99.

[23] Wang, Z.-F. et al. (2009). "The impact of esterification on the properties of starch/natural rubber composite." **Composites Science and Technology** 69, 11-12: 1797-1803.

[24] Cyras, V. P. et al. (2008). "Physical and mechanical properties of thermoplastic starch/montmorillonite nanocomposite films." **Carbohydrate Polymers** 73, 1: 55-63.

[25] Huang, M.-F., J.-G. Yu, and X.-F. Ma. (2004). "Studies on the properties of Montmorillonite-reinforced thermoplastic starch composites." **Polymer** 45, 20: 7017-7023.

[26] Majdzadeh-Ardakani, K., A. H. Navarchian, and F. Sadeghi. "Optimization of mechanical properties of thermoplastic starch/clay nanocomposites." **Carbohydrate Polymers** 79, 3: 547-554.

[27] Dai, H. et al. "N-(2-Hydroxypropyl)formamide and N-(2-hydroxyethyl)-N-methylformamide as two new plasticizers for thermoplastic starch." **Carbohydrate Polymers** 80, 1: 139-144.

[28] Dai, H. et al. "Preparation and properties of starch-based film using N,N-bis(2-hydroxyethyl)formamide as a new plasticizer." **Carbohydrate Polymers** 79, 2: 306-311.

[29] Ma, X., and J. Yu. (2004). "The plastcizers containing amide groups for thermoplastic starch." **Carbohydrate Polymers** 57, 2: 197-203.

[30] Zheng, P. et al. (2009). "Formamide and 2-hydroxy-N-[2-(2-hydroxy-propionylamino)-ethyl] propionamide (HPEP) as a mixed plasticizer for thermoplastic starch." **Carbohydrate Polymers** 78, 2: 296-301.

[31] Ma, X. F., J. G. Yu, and Y. B. Ma. (2005). "Urea and formamide as a mixed plasticizer for thermoplastic wheat flour." **Carbohydrate Polymers** 60, 1: 111-116.

[32] Zhang, J. S. et al. (2008). "Synthesis of aliphatic amidediol and used as a novel mixed plasticizer for thermoplastic starch." **Chinese Chemical Letters** 19, 4: 395-398.

[33] Ma, X. F., J. G. Yu, and J. J. Wan. (2006). "Urea and ethanolamine as a mixed plasticizer for thermoplastic starch." **Carbohydrate Polymers** 64, 2: 267-273.

[34] วิชัย ริ้วตระกูล และคณะ (2526). **การประยุกต์สเปคโตรสโคปีในเคมีอินทรีย์.** กรุงเทพฯ : นำอักษรการพิมพ์

[35] Parker, R., and S. G. Ring. (2001). "Aspects of the Physical Chemistry of Starch." **Journal of Cereal Science** 34, 1: 1-17.

[36] Cordoba, A. et al. (2008). "The plasticizing effect of alginate on the thermoplastic starch/glycerin blends." **Carbohydrate Polymers** 73, 3: 409-416.

[37] Yang, J.-h., J.-g. Yu, and X.-f. Ma. (2006). "Study on the properties of ethylenebisformamide and sorbitol plasticized corn starch (ESPTPS)." **Carbohydrate Polymers** 66, 1: 110-116.

[38] Gilfillan, W. N. et al. "Preparation and characterisation of composites from starch and sugar cane fibre." **Industrial Crops and Products** 40, 0: 45-54.

[39] Girones, J. et al. "Natural fiber-reinforced thermoplastic starch composites obtained by melt

processing." **Composites Science and Technology** 72, 7: 858-863.

[40] Hulleman, S. H. D. et al. (1999). "Origins of B-type crystallinity in glycerol-plasticised, compression-moulded potato starches." **Carbohydrate Polymers** 39, 4: 351-360.

ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ-สกุล	นาย ไพโรจน์ ใบตาเฮ
ที่อยู่	78 ม.5 ต.ท่าทองใหม่ อ.กาญจนดิษฐ์ จ.สุราษฎร์ธานี 84290
อีเมลล์	pirote610@hotmail.com

ประวัติการศึกษา

พ.ศ. 2548	สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนต้น-ตอนปลาย โรงเรียนสุราษฎร์พิทยา จังหวัดสุราษฎร์ธานี
พ.ศ. 2552	สำเร็จการศึกษาปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาปิโตรเคมีและวัสดุพอลิเมอร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร จังหวัดนครปฐม
พ.ศ. 2553	ศึกษาต่อระดับปริญญามหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร จังหวัดนครปฐม

ประวัติการฝึกงาน คลังปิโตรเลียมสุราษฎร์ธานี บริษัท ปตท. จำกัด มหาชน

ประวัติการทำงาน

พ.ศ. 2553-2554	ตำแหน่งผู้ช่วยอาจารย์ ภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร จังหวัดนครปฐม