

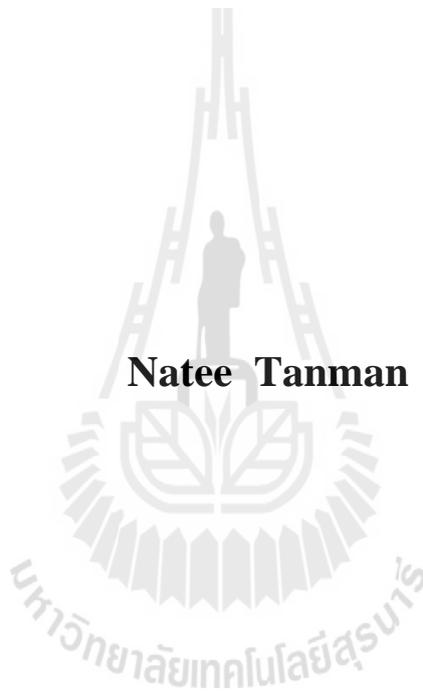
การพัฒนาภาชนะย่อยสลายได้ทางชีวภาพจากลำต้นมันสำปะหลัง



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2557

**DEVELOPMENT OF BIODEGRADABLE PACKAGING
FROM CASSAVA STALK**

Natee Tanman



**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the
Degree of Master of Engineering in Mechanical Engineering**

Suranaree University of Technology

Academic Year 2014

การพัฒนาภาชนะย่อยสลายได้ทางชีวภาพจากลำต้นมันสำปะหลัง

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยรับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

(ผศ. ดร. กิรติ สุลักษณ์)

ประธานกรรมการ

(รศ. ดร. ทวีช จิตรสมบูรณ์)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)

(ผศ. ดร. สุรลักษณ์ รอดทอง)

กรรมการ

(ผศ. ดร. ปราณีย์ ชุมสำโรง)

กรรมการ

(อ. ดร. สมศักดิ์ ศิวดำรงพงศ์)

กรรมการ

(ศ. ดร. ชูกิจ ลิ้มปิจำนงค์)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและนวัตกรรม

(รศ. ร.อ. ดร. กนต์ธร ชำนิประศาสน์)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

นที ฐานมั่น : การพัฒนาภาชนะย่อยสลายได้ทางชีวภาพจากลำต้นมันสำปะหลัง

(DEVELOPMENT OF BIODEGRADABLE PACKAGING FROM CASSAVA STALK)

อาจารย์ที่ปรึกษา : รองศาสตราจารย์ ดร.ทวิช จิตรสมบูรณ์, 186 หน้า.

ปัจจุบันนี้มนุษย์มีความห่วงใยสิ่งแวดล้อมมากขึ้น และเริ่มให้ความสนใจกับภาชนะบรรจุที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพซึ่งมักนิยมผลิตจากวัตถุดิบทางการเกษตร เนื่องจากวัตถุดิบเหล่านี้ราคาถูกและหาได้ง่าย ในงานวิจัยนี้ทำการศึกษาวิจัยเพื่อผลิตภาชนะบรรจุย่อยสลายได้ทางชีวภาพจากลำต้นมันสำปะหลังด้วยกระบวนการอัดขึ้นรูปร้อน โดยปราศจากการใช้สารเติมแต่งทางเคมี ซึ่งสภาวะที่เหมาะสมที่ได้จากการออกแบบการทดลองในกระบวนการอัดขึ้นรูปขึ้นงานจากลำต้นมันสำปะหลังและสารยึดเกาะจากหัวมันสำปะหลังสด คือ อุณหภูมิเท่ากับ 150°C ความดันเท่ากับ 55 bar และเวลาเท่ากับ 15 นาที นอกจากนี้ยังศึกษาอิทธิพลของปริมาณเส้นใยและขนาดเส้นใยต้นมันสำปะหลังต่อสมบัติทางกายภาพ สมบัติทางความร้อน และสมบัติทางกลของชิ้นทดสอบ ซึ่งประกอบไปด้วย การทดสอบความหนา การทดสอบความหนาแน่น การทดสอบการดูดซึมน้ำ การศึกษาลักษณะพื้นฐานวิทยา การทดสอบทางความร้อน การทดสอบแรงดึง การทดสอบแรงดัดโค้ง และการทดสอบแรงกระแทก ผลการทดสอบสมบัติของชิ้นทดสอบพบว่า การใช้เส้นใยต้นมันสำปะหลังขนาดเล็กและการมีอยู่ของสารยึดเกาะจากหัวมันสำปะหลังสดจะเป็นการปรับปรุงสมบัติของภาชนะย่อยสลายได้ โดยชิ้นงานที่มีสมบัติทางกลและสมบัติทางกายภาพเหมาะสมที่สุด คือ ชิ้นทดสอบที่มีขนาดเส้นใยต้นมันสำปะหลังเป็น 0.60-0.85 mm และปริมาณของลำต้นมันสำปะหลังต่อหัวมันสำปะหลังสดในสัดส่วน 70:30 โดยน้ำหนัก ราคาต้นทุนการผลิตระดับห้องปฏิบัติการของภาชนะย่อยสลายได้ที่ขนาดประมาณ 12 cm เท่ากับ 1.613 บาท/ใบ ถึงแม้ว่าภาชนะย่อยสลายได้จากลำต้นมันสำปะหลังและหัวมันสำปะหลังสดยังมีข้อจำกัดอยู่บ้างด้านการต้านทานน้ำ แต่ก็มีสมบัติทางกลที่ดี ดังนั้นผลสำเร็จที่ได้จากการศึกษานี้ มีโอกาสที่จะนำไปใช้แทนโพลีเอทิลีนได้

สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล

ปีการศึกษา 2557

ลายมือชื่อนักศึกษา _____

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา _____

NATEE TANMAN : DEVELOPMENT OF BIODEGRADABLE
PACKAGING FROM CASSAVA STALK. THESIS ADVISOR :
ASSOC. PROF. TAWIT CHITSOMBOON, Ph.D., 186 PP.

BIODEGRADABLE FOOD CONTAINERS/BIO-BASED MATERIALS/CASSAVA
STALK/BINDER/MECHANICAL PROPERTIES/PHYSICAL PROPERTIES

Human has recently expressed more concerns for the environment and thus is searching for biodegradable food containers, made from agricultural material obtained from abundant and low cost sources. The objective of this work was to produce biodegradable food containers from cassava stalk by a compression process without using any chemical additives. The optimum conditions of the experimental design in the compression process to develop the cassava stalk and binder from fresh cassava root samples, baking temperature of 150°C, pressure of 55 bar and holding for 15 min. In addition, the influence of fiber content and fiber size on physical properties, thermal properties and mechanical properties were studied. The results show the small fiber and the presence of binder improved the properties of the finished materials. The specimen produced from cassava fiber size of 0.60-0.85 mm and the ratio of cassava stalk and cassava roots is 70:30 by weight has a good properties. A production costs of biodegradable packaging is 1.613 Baht/piece. Although the resulted materials were poor water resistance but have good mechanical properties. These materials represent an alternative to the expanded polystyrene.

School of Mechanical Engineering

Academic Year 2014

Student's Signature _____

Advisor's Signature _____

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะสำเร็จลุล่วงมิได้ หากไม่ได้รับความกรุณาจาก รองศาสตราจารย์ ดร. ทวิช จิตรสมบูรณ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ผู้ประสิทธิ์ประสาทความรู้ทางวิชาการ ให้คำแนะนำ แนวคิดในการดำเนินงานวิจัย และช่วยเหลือในทุก ๆ ด้าน จนงานสำเร็จลุล่วงได้เป็นอย่างดี ตลอดจนยังเป็นแบบอย่างที่ดีให้แก่ผู้วิจัย รวมถึงให้ข้อคิดและแนวทางในการดำเนินชีวิต ตลอดช่วงระยะเวลาในการศึกษา ณ มหาวิทยาลัยแห่งนี้ ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณท่านเป็นอย่างสูง มา ณ โอกาสนี้

ขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุรสิทธิ์ รอดทอง ผู้เปรียบเสมือนอาจารย์ ที่ปรึกษาท่านที่สองของผู้วิจัย ที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ คอยให้คำปรึกษา แนะนำ และสนับสนุนทุนวิจัยตลอดจนอุปการะสำหรับการทดลอง

ขอขอบคุณบุคคลดังต่อไปนี้ ที่ได้ให้ความช่วยเหลือผู้วิจัยในด้านต่าง ๆ เป็นอย่างดี จนกระทั่งวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์ ซึ่งผู้วิจัยขอระลึกไว้ตลอดไป

- คุณสุนทร โอบอุษาม คุณธนรัชต์ อุ่นศิริ ผู้เป็นทั้งเพื่อนร่วมสาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล และเป็นทั้งปรึกษาเกี่ยวกับงานวิจัย รวมถึงคอยให้กำลังใจและให้ข้อคิดในการดำเนินชีวิตเสมอมา และจะขาดมิได้ ขอขอบคุณ คุณอภิญา แจ่มใส ที่เป็นทั้งกำลังใจ กำลังใจ เป็นทั้งเพื่อนคู่คิดให้แก่ผู้วิจัยในทุก ๆ เรื่อง

- อาจารย์พรสวรรค์ ทองใบ คุณจารุวรรณ ตั้งต้นสกุลวงศ์ คุณชัยฤกษ์ เชื้อประสาท คุณวิกันดา ศรีเดช คุณสุพิชฌาย์ มีสุขเจ้าสำราญ อาจารย์วิฑูรย์ เข็มสุวรรณ คุณวิโรจน์ แบบพิมาย คุณธีรวัฒน์ คลับคล้าย และคุณมลสุดา ลิ่วไชสง ซึ่งเป็นรุ่นพี่ในกลุ่มวิจัยเดียวกัน ที่คอยให้กำลังใจ และคำแนะนำดี ๆ เกี่ยวกับงานวิจัยและการดำเนินชีวิต

- คุณจิรทีปต์ สุทธิลักษณ์ และคุณศรันย์ ดอกไม้กุล เจ้าหน้าที่ประจำห้องปฏิบัติการ วิศวกรรมพอลิเมอร์และวิศวกรรมเคมี ที่อำนวยความสะดวกเกี่ยวกับการใช้เครื่องมือในงานวิจัย

- คุณจริยาพร ศรีวิไลลักษณ์ เจ้าหน้าที่บริหารงานทั่วไปของสาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ที่ช่วยอำนวยความสะดวกเกี่ยวกับงานเอกสารมาโดยตลอด

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อธีระศักดิ์ และ คุณแม่มยุรี ฐานมั่น ที่อบรมเลี้ยงดู ให้โอกาสทางการศึกษา ผลักดัน และคอยให้กำลังใจแก่ข้าพเจ้าจนประสบความสำเร็จในทุกวันนี้ ตลอดจนครุบาอาจารย์ทุกท่านที่ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ตั้งแต่เล็กจนเติบโตใหญ่

นที ฐานมั่น

สารบัญ

หน้า

| | |
|---|----------|
| บทคัดย่อ (ภาษาไทย)..... | ก |
| บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ)..... | ข |
| กิตติกรรมประกาศ..... | ค |
| สารบัญ..... | ง |
| สารบัญตาราง..... | ฉ |
| สารบัญรูป..... | ญ |
| คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ..... | ต |
| บทที่ | |
| 1 บทนำ..... | 1 |
| 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา..... | 1 |
| 1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย..... | 3 |
| 1.3 ขอบเขตของการวิจัย..... | 3 |
| 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ..... | 3 |
| 2 ปรีทัศน์วรรณกรรมและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง..... | 4 |
| 2.1 ปรีทัศน์วรรณกรรม..... | 4 |
| 2.2 พลาสติกย่อยสลายได้..... | 8 |
| 2.2.1 วัตถุประสงค์..... | 8 |
| 2.2.2 ประเภทของพลาสติกย่อยสลายได้..... | 9 |
| 2.3 มันสำปะหลัง..... | 11 |
| 2.3.1 ชนิดของมันสำปะหลัง..... | 13 |
| 2.3.2 องค์ประกอบของลำต้นและหัวมันสำปะหลัง..... | 14 |
| 2.4 พอลิเมอร์ที่ได้จากธรรมชาติ..... | 15 |
| 2.4.1 แป้ง (Starch)..... | 15 |
| 2.4.2 เส้นใย (Fiber)..... | 17 |
| 2.4.3 สารยึดเกาะ (Binder)..... | 20 |

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

| | | |
|-------|---|----|
| 2.5 | กระบวนการขึ้นรูป..... | 20 |
| 2.5.1 | การอัดขึ้นรูป (Compression molding)..... | 20 |
| 2.5.2 | การฉีดขึ้นรูป (Injection molding)..... | 25 |
| 2.5.3 | การอัดรีด (Extrusion process) | 26 |
| 2.5.4 | การอบในแม่แบบที่ให้ความร้อน (Baking in hot mold) | 26 |
| 2.6 | การทดสอบสมบัติของภาชนะบรรจุ..... | 27 |
| 2.6.1 | สมบัติทางกายภาพและการทดสอบ | 27 |
| 2.6.2 | สมบัติทางความร้อนและการทดสอบ | 29 |
| 2.6.3 | สมบัติทางกลและการทดสอบ..... | 30 |
| 2.7 | การออกแบบการทดลอง (Design of experiment) | 47 |
| 2.7.1 | ขั้นตอนในการออกแบบการทดลอง | 48 |
| 2.8 | การทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบสองระดับ (2^k Factorial design) | 49 |
| 2.8.1 | แบบจำลองถดถอย (Regression model)..... | 51 |
| 2.9 | การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ | 53 |
| 2.9.1 | การใช้ P-value ในการทดสอบสมมติฐาน..... | 53 |
| 2.9.2 | การวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of variance, ANOVA)..... | 54 |
| 3 | เครื่องอัดขึ้นรูปร้อนและแม่พิมพ์ | 58 |
| 3.1 | รายละเอียดเบื้องต้น..... | 58 |
| 3.2 | โครงสร้างหลักของเครื่องอัดขึ้นรูป..... | 59 |
| 3.3 | ระบบให้ความร้อนแก่เครื่องอัด..... | 62 |
| 3.4 | การเลือกขนาดของแม่แรง..... | 63 |
| 3.5 | แม่พิมพ์สำหรับขึ้นรูปขึ้นทดสอบ | 65 |
| 3.6 | แม่พิมพ์สำหรับขึ้นรูปภาชนะ..... | 66 |
| 4 | วิธีดำเนินการวิจัย | 70 |
| 4.1 | วัสดุ | 70 |
| 4.2 | เครื่องมือและอุปกรณ์ | 70 |

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

| | | |
|--------|--|----|
| 4.3 | แผนผังแสดงกระบวนการทำงาน | 72 |
| 4.4 | วิธีดำเนินการทดลอง | 73 |
| 4.4.1 | การเตรียมเส้นใยต้นมันสำปะหลัง | 73 |
| 4.4.2 | การเตรียมสารยึคเกาะ | 77 |
| 4.4.3 | การเตรียมและการผลิตขึ้นทดสอบด้วยกระบวนการอัดขึ้นรูปร้อน | 77 |
| 4.4.4 | การวัดความหนาของขึ้นทดสอบ (Thickness) | 79 |
| 4.4.5 | การทดสอบความหนาแน่นของขึ้นทดสอบ (Density)..... | 79 |
| 4.4.6 | การทดสอบการดูดซึมน้ำ (Water absorption test) | 79 |
| 4.4.7 | การศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยา (Morphology studies)..... | 80 |
| 4.4.8 | การทดสอบสมบัติทางความร้อน (Thermal properties)..... | 81 |
| 4.4.9 | การทดสอบแรงดึง (Tensile test) | 82 |
| 4.4.10 | การทดสอบแรงดัดโค้ง (Flexural test)..... | 83 |
| 4.4.11 | การทดสอบแรงกระแทก (Impact test) | 84 |
| 4.5 | การหาสถานะที่เหมาะสมในกระบวนการอัดขึ้นรูป ด้วยวิธีออกแบบการทดลอง | 85 |
| 4.5.1 | ตัวแปรอิสระ (Independent variable)..... | 85 |
| 4.5.2 | ตัวแปรตาม (Response)..... | 85 |
| 4.6 | การเลือกสูตรที่เหมาะสมที่สุดด้วยเทคนิคการวิเคราะห์แบบหลายปัจจัย | 87 |
| 5 | ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล | 89 |
| 5.1 | สถานะการอัดขึ้นรูปที่เหมาะสม | 89 |
| 5.1.1 | ระดับปัจจัยในการทดลอง | 90 |
| 5.1.2 | ผลการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบสองระดับ (2^k Factorial design) | 95 |
| 5.1.3 | การตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบการทดลอง (Model adequacy checking) | 96 |
| 5.1.4 | การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ของค่าการต้านทาน แรงดัดโค้งของขึ้นทดสอบจากลำต้นมันสำปะหลังและสารยึคเกาะ | 98 |

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

| | | |
|-------|--|-----|
| 5.1.5 | การวิเคราะห์จุดเหมาะสมของปัจจัย..... | 104 |
| 5.1.6 | การตรวจสอบผลการทดลอง..... | 109 |
| 5.2 | ผลการทดสอบสมบัติทางกายภาพ..... | 110 |
| 5.2.1 | การวัดความหนาของชั้นทดสอบ (Thickness) | 110 |
| 5.2.2 | การทดสอบความหนาแน่นของชั้นทดสอบ (Density)..... | 112 |
| 5.2.3 | การทดสอบการดูดซึมน้ำ (Water absorption test) | 116 |
| 5.2.4 | การศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยา (Morphology studies)..... | 121 |
| 5.3 | ผลการทดสอบสมบัติทางความร้อน..... | 129 |
| 5.3.1 | สมบัติทางความร้อนของลำต้นมันสำปะหลัง และหัวมันสำปะหลังสด | 129 |
| 5.3.2 | สมบัติทางความร้อนของชั้นทดสอบในแต่ละอัตราส่วนผสม..... | 131 |
| 5.4 | ผลการทดสอบสมบัติทางกล | 132 |
| 5.4.1 | การทดสอบแรงดึง (Tensile test) | 132 |
| 5.4.2 | การทดสอบแรงดัดโค้ง (Flexural test)..... | 140 |
| 5.4.3 | การทดสอบแรงกระแทก (Impact test) | 147 |
| 5.5 | ผลการเลือกสูตรที่เหมาะสมที่สุด | 152 |
| 5.6 | ผลการอัดขึ้นรูปภาชนะจากลำต้นมันสำปะหลัง..... | 154 |
| 5.7 | การประมาณค่าต้นทุนการผลิต..... | 157 |
| 5.7.1 | การประมาณค่าพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในกระบวนการผลิต ภาชนะย่อยสลายได้..... | 158 |
| 5.7.2 | การประมาณค่าวัตถุดิบที่ใช้ในกระบวนการผลิต ภาชนะย่อยสลายได้..... | 160 |
| 6 | บทสรุป..... | 162 |
| 6.1 | สรุปผลการวิจัย..... | 162 |
| 6.2 | ข้อเสนอแนะ..... | 164 |
| | รายการอ้างอิง | 165 |

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

ภาคผนวก

| | |
|---|-----|
| ภาคผนวก ก. ระดับคะแนนของสมบัติของชิ้นทดสอบ..... | 170 |
| ภาคผนวก ข. การทดสอบการย่อยสลายได้ด้วยการฝังดินเบื้องต้น (Burial test) | 172 |
| ภาคผนวก ค. บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ | 175 |
| ประวัติผู้เขียน | 186 |



สารบัญตาราง

| ตารางที่ | หน้า |
|----------|---|
| 2.1 | องค์ประกอบทางเคมีของลำต้นมันสำปะหลัง..... 14 |
| 2.2 | ส่วนประกอบหลักในหัวมันสำปะหลัง..... 15 |
| 2.3 | อุณหภูมิเจลาติไนซ์ของแป้งชนิดต่าง ๆ 17 |
| 2.4 | การวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียว (One-way ANOVA) 56 |
| 2.5 | การวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบสองทาง (Two-way ANOVA) 57 |
| 4.1 | แสดงมวลผลของต้นมันสำปะหลังบดที่ร้อนผ่านตะแกรงมาตรฐาน 75 |
| 4.2 | ส่วนประกอบที่ใช้เตรียมวัสดุย่อยสลายได้จากเส้นใยต้นมันสำปะหลัง และหัวมันสำปะหลังสด 78 |
| 4.3 | ปัจจัยและระดับของปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง 85 |
| 4.4 | แสดงตารางบันทึกผลค่าการตอบสนองของขึ้นทดสอบจากลำต้นมันสำปะหลัง และสารสกัดจากการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบสองระดับ 86 |
| 4.5 | คะแนนความสำคัญของสมบัติของขึ้นทดสอบจากลำต้นมันสำปะหลัง ในการเลือกสูตรที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการนำไปใช้งานแบบใช้ครั้งเดียวแล้วทิ้ง..... 87 |
| 5.1 | แสดงค่าการต้านทานแรงดัดโค้งของขึ้นทดสอบจากลำต้นมันสำปะหลัง และสารสกัดจากการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบสองระดับ 95 |
| 5.2 | แสดงการเปรียบเทียบค่าการต้านทานแรงดัดโค้งของขึ้นทดสอบ ที่ได้จากแบบจำลองถดถอยและการทดลองจริง 109 |
| 5.3 | แสดงความหนา และความหนาแน่นของขึ้นทดสอบในแต่ละสูตร จากลำต้นมันสำปะหลังและหัวมันสำปะหลังสด 110 |
| 5.4 | ผลการคำนวณทางสถิติด้วยการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบสองทาง (Two-way ANOVA) ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ของค่าความหนาของขึ้นทดสอบ 112 |
| 5.5 | ผลการคำนวณทางสถิติด้วยการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบสองทาง (Two-way ANOVA) ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ของค่าความหนาแน่นของขึ้นทดสอบ 115 |
| 5.6 | แสดงค่าการดูดซึมน้ำของขึ้นทดสอบในแต่ละสูตรจากลำต้นมันสำปะหลัง และหัวมันสำปะหลังสด 117 |

สารบัญตาราง (ต่อ)

| ตารางที่ | หน้า |
|----------|---|
| 5.7 | ผลการคำนวณทางสถิติด้วยการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบสองทาง (Two-way ANOVA) ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ของค่าการดูดซึมน้ำของชั้นทดสอบ 121 |
| 5.8 | ข้อมูลทางความร้อนจากการวิเคราะห์ด้วยวิธีเทอร์โมกราวิเมทรี ของลำต้นมันสำปะหลัง หัวมันสำปะหลังสด และชั้นทดสอบแต่ละสูตร 130 |
| 5.9 | แสดงค่าการต้านทานแรงดึง ค่ามอดูลัสของยัง และค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัวของชั้นทดสอบในแต่ละสูตรจากลำต้นมันสำปะหลังและหัวมันสำปะหลังสด 133 |
| 5.10 | ผลการคำนวณทางสถิติด้วยการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบสองทาง (Two-way ANOVA) ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ของค่าการต้านทานแรงดึงของชั้นทดสอบ 138 |
| 5.11 | ผลการคำนวณทางสถิติด้วยการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบสองทาง (Two-way ANOVA) ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ของค่ามอดูลัสของยังของชั้นทดสอบ 138 |
| 5.12 | ผลการคำนวณทางสถิติด้วยการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบสองทาง (Two-way ANOVA) ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ของค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัวของชั้นทดสอบ 139 |
| 5.13 | แสดงค่าการต้านทานแรงดัดโค้ง และค่ามอดูลัสแรงดัดโค้งของชั้นทดสอบ ในแต่ละสูตรจากลำต้นมันสำปะหลังและหัวมันสำปะหลังสด 141 |
| 5.14 | ผลการคำนวณทางสถิติด้วยการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบสองทาง (Two-way ANOVA) ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ของค่าการต้านทานแรงดัดโค้งของชั้นทดสอบ 146 |
| 5.15 | ผลการคำนวณทางสถิติด้วยการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบสองทาง (Two-way ANOVA) ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ของค่ามอดูลัสแรงดัดโค้งของชั้นทดสอบ 146 |
| 5.16 | แสดงค่าการต้านทานแรงกระทำของชั้นทดสอบในแต่ละสูตร จากลำต้นมันสำปะหลังและหัวมันสำปะหลังสด 148 |

สารบัญตาราง (ต่อ)

| ตารางที่ | หน้า |
|---|------|
| 5.17 ผลการคำนวณทางสถิติด้วยการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบสองทาง (Two-way ANOVA) ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ของค่าการต้านทานแรงกระแทกของชิ้นทดสอบ | 151 |
| 5.18 คะแนนรวมของสมบัติชิ้นทดสอบจากลำต้นมันสำปะหลัง | 153 |
| 5.19 ส่วนประกอบที่ใช้เตรียมภาชนะย่อยสลายได้จากลำต้นมันสำปะหลัง และหัวมันสำปะหลังสด | 155 |
| 5.20 แสดงการคำนวณอัตราการใช้ไฟฟ้าในกระบวนการผลิตภาชนะย่อยสลายได้..... | 158 |
| 5.21 อัตราค่าไฟฟ้าแบบปกติประเภทกิจการขนาดเล็กพิจารณาที่แรงดันต่ำกว่า 22 kV | 159 |
| 5.22 แสดงการคำนวณค่าวัตถุดิบที่ใช้ในกระบวนการผลิตภาชนะย่อยสลายได้..... | 160 |
| ก.1 ระดับคะแนนของสมบัติทางกายภาพของชิ้นทดสอบจากลำต้นมันสำปะหลัง | 171 |
| ก.2 ระดับคะแนนของสมบัติทางกลของชิ้นทดสอบจากลำต้นมันสำปะหลัง..... | 171 |
| ข.1 ผลของการนำภาชนะย่อยสลายได้ในแต่ละสูตรฝังดินเป็นเวลา 7 วัน | 173 |

สารบัญรูป

| รูปที่ | หน้า |
|--------|---|
| 2.1 | พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพจากแหล่งวัตถุดิบที่ปลูกทดแทนใหม่ได้ และแหล่งวัตถุดิบปิโตรเคมี 9 |
| 2.2 | ต้นมันสำปะหลัง 12 |
| 2.3 | หัวมันสำปะหลัง 13 |
| 2.4 | โครงสร้างทางเคมีของเซลลูโลส 18 |
| 2.5 | โครงสร้างทางเคมีของเฮมิเซลลูโลส 19 |
| 2.6 | โครงสร้างทางเคมีของลิกนิน 19 |
| 2.7 | แสดงขั้นตอนการอัดจนครบรอบการทำงาน 21 |
| 2.8 | เครื่องอัดอัด โนมัตที่ใช้ในการอัดขึ้นงานทรงแบน 22 |
| 2.9 | แม่พิมพ์อัดขึ้นงานแบบมีครีป 23 |
| 2.10 | แม่พิมพ์อัดขึ้นงานแบบปิดหมด 23 |
| 2.11 | แม่พิมพ์อัดขึ้นงานแบบกึ่งเปิด 24 |
| 2.12 | ลักษณะของเครื่องฉีดแบ่งตามทิศทางการฉีด 25 |
| 2.13 | เครื่องอัดรีด (Extruder) 26 |
| 2.14 | ลักษณะของเทอร์โมแกรมอย่างง่ายของสารตัวอย่างที่สลายตัวเพียงขั้นตอนเดียว 30 |
| 2.15 | พฤติกรรมของวัสดุเมื่อมี (ก) ความเค้นดึง (ข) ความเค้นอัด และ (ค) ความเค้นเฉือน มากระทำ 31 |
| 2.16 | ลักษณะชั้นทดสอบการดึงของพลาสติกแผ่นและพลาสติกที่ขึ้นรูปจากแม่พิมพ์ 34 |
| 2.17 | การเกิดคอคอดของชั้นทดสอบจากวัสดุเหนียวทั่วไป 35 |
| 2.18 | ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของวัสดุเปราะและวัสดุเหนียว 36 |
| 2.19 | กานภายใต้ภาระกรรมแบบดัดโค้ง 37 |
| 2.20 | แผนภาพการทดสอบแรงดัดโค้งแบบจุดรองรับ 3 จุด 39 |
| 2.21 | แผนภาพการทดสอบแรงดัดโค้งแบบจุดรองรับ 4 จุด 41 |
| 2.22 | ลักษณะของเครื่องมือทดสอบแรงกระแทกแบบเพนดูลัม 43 |
| 2.23 | การจับยึดชั้นทดสอบแรงกระแทก (ก) แบบชาร์ปี และ (ข) แบบไอซอด 44 |

สารบัญรูป (ต่อ)

| รูปที่ | หน้า | |
|--------|---|----|
| 2.24 | ขนาดของชิ้นทดสอบแรงกระแทกแบบชาร์ปี..... | 45 |
| 2.25 | ขนาดของชิ้นทดสอบแรงกระแทกแบบไอซอด..... | 46 |
| 2.26 | (ก) อิทธิพลของปัจจัยหลักที่ไม่มีผลต่อค่าการตอบสนอง และ (ข) อิทธิพลของปัจจัยหลักที่มีผลต่อค่าการตอบสนอง | 47 |
| 2.27 | (ก) อิทธิพลของปัจจัยร่วมที่ไม่มีผลต่อค่าการตอบสนอง และ (ข) อิทธิพลของปัจจัยร่วมที่มีผลต่อค่าการตอบสนอง | 50 |
| 3.1 | แบบเครื่องอัดขึ้นรูปร้อนในงานวิจัย..... | 59 |
| 3.2 | เครื่องอัดขึ้นรูปร้อนในงานวิจัย..... | 60 |
| 3.3 | ปลอกทองเหลืองติดตั้งเข้ากับแท่นรองแม่พิมพ์ตัวล่าง | 61 |
| 3.4 | หน้าปัดวัดความดัน (Pressure gauge)..... | 61 |
| 3.5 | (ก) ฮีทเตอร์แห้ง และ (ข) ฮีทเตอร์โมคัปเปิล..... | 62 |
| 3.6 | ตู้ควบคุมระบบไฟฟ้าของเครื่องอัดขึ้นรูปร้อนในงานวิจัย | 63 |
| 3.7 | แบบแม่พิมพ์ขึ้นรูปชิ้นทดสอบ | 65 |
| 3.8 | แม่พิมพ์ขึ้นรูปชิ้นทดสอบ | 66 |
| 3.9 | แบบแม่พิมพ์ตัวผู้ (Core)..... | 67 |
| 3.10 | แบบแม่พิมพ์ตัวเมีย (Cavity)..... | 68 |
| 3.11 | แม่พิมพ์ตัวผู้..... | 69 |
| 3.12 | แม่พิมพ์ตัวเมีย..... | 69 |
| 4.1 | แสดงแผนผังกระบวนการทำงานโดยสังเขป | 72 |
| 4.2 | ลำต้นมันสำปะหลังช่วงกลาง พันธุ์ห้วยบง 60 | 73 |
| 4.3 | ลำต้นมันสำปะหลังบดหยาบ | 74 |
| 4.4 | ต้นมันสำปะหลังบดที่มีขนาดเส้นใย (ก) ประมาณ 0.60-0.85 mm (ข) ประมาณ 1.00-1.40 mm และ (ค) ประมาณ 1.40-2.36 mm..... | 76 |
| 4.5 | ตัวอย่างลักษณะของชิ้นทดสอบสมบัติการดูดซึมน้ำ | 80 |
| 4.6 | ตัวอย่างลักษณะของชิ้นทดสอบจากการทดสอบการดูดซึมน้ำเป็นเวลา 60 วินาที..... | 80 |
| 4.7 | กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงชนิดสเตอริโอ (OLYMPUS, model SZX16-DP21)..... | 81 |

สารบัญรูป (ต่อ)

| รูปที่ | หน้า |
|--|------|
| 4.8 เครื่อง Simultaneous TGA-DTA analyzer | 81 |
| 4.9 ตัวอย่างลักษณะของขั้นตอนทดสอบสมบัติการต้านทานแรงดึง | 82 |
| 4.10 การติดตั้งขั้นตอนทดสอบสมบัติการต้านทานแรงดึง | 82 |
| 4.11 ตัวอย่างลักษณะของขั้นตอนทดสอบสมบัติการต้านทานแรงดัดโค้ง | 83 |
| 4.12 การทดสอบแรงดัดโค้งของขั้นตอนทดสอบ | 83 |
| 4.13 ตัวอย่างลักษณะของขั้นตอนทดสอบสมบัติการต้านทานแรงกระแทก | 84 |
| 4.14 การจับยึดขั้นตอนทดสอบสมบัติการต้านทานแรงกระแทก | 84 |
| 5.1 ตัวอย่างลักษณะของชิ้นงานที่ได้จากกระบวนการอัดขึ้นรูปที่อุณหภูมิต่ำ ความดันต่ำ และเวลาน้อยเกินไป | 91 |
| 5.2 ตัวอย่างลักษณะของชิ้นงานที่ได้จากกระบวนการอัดขึ้นรูปที่อุณหภูมิสูง และเวลาน้อยเกินไป | 93 |
| 5.3 ขั้นตอนที่แตกต่างจากการระเหยไอน้ำส่วนเกินขณะเปิดแม่พิมพ์ | 93 |
| 5.4 ตัวอย่างลักษณะของชิ้นงานที่ได้จากกระบวนการอัดขึ้นรูปที่ความดันสูง และเวลาน้อยเกินไป | 94 |
| 5.5 แสดงการกระจายแบบปกติของค่าส่วนตกค้าง (Residuals) | 97 |
| 5.6 แสดงการกระจายตัวของค่าส่วนตกค้าง (Residuals) เทียบกับลำดับการทดลอง (Observation order) | 97 |
| 5.7 แสดงการกระจายตัวของค่าส่วนตกค้าง (Residuals) เทียบกับค่าตัวแปรตอบสนองที่ได้จากการทดลอง (Fitted value) | 98 |
| 5.8 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูลการทดลองเชิงแฟกทอเรียล แบบสองระดับด้วยโปรแกรม Minitab 16 | 99 |
| 5.9 อิทธิพลของปัจจัยหลัก 4 ปัจจัย | 101 |
| 5.10 อิทธิพลของปัจจัยร่วมแบบ 2 ปัจจัย | 103 |
| 5.11 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูลการทดลอง เมื่อตัดปัจจัยที่ไม่มีผลต่อค่าการตอบสนองออก | 105 |
| 5.12 ผลการวิเคราะห์ระดับที่เหมาะสมของปัจจัยที่ให้ค่าการต้านทานแรงดัดโค้งสูงสุด | 107 |

สารบัญรูป (ต่อ)

| รูปที่ | หน้า |
|---|------|
| 5.13 ผลการวิเคราะห์ระดับที่เหมาะสมของปัจจัยที่ให้ค่าการต้านทานแรงคัด โคง์สูงสุด เมื่อปรับลดขอบเขตของอุณหภูมิลง..... | 108 |
| 5.14 อิทธิพลของขนาดเส้นใยและปริมาณเส้นใยต้นมันสำปะหลัง ต่อความหนาของชั้นทดสอบ | 111 |
| 5.15 อิทธิพลของขนาดเส้นใยและปริมาณเส้นใยต้นมันสำปะหลัง ต่อความหนาแน่นของชั้นทดสอบ | 113 |
| 5.16 อิทธิพลของขนาดเส้นใยและปริมาณเส้นใยต้นมันสำปะหลัง ต่อค่าการดูดซึมน้ำของชั้นทดสอบ | 118 |
| 5.17 การแตกออกหลังการทดสอบการดูดซึมน้ำของชั้นทดสอบ จากต้นมันสำปะหลังล้วน | 120 |
| 5.18 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์แบบสเตอริโอที่กำลังขยาย 1x ของ (ก) ต้นมันสำปะหลังบดหยาบ และ (ข) หัวมันสำปะหลังบด..... | 122 |
| 5.19 ลักษณะพื้นผิวและรอยแตกหักของชั้นทดสอบที่กำลังขยาย 1x โดยมีขนาดเส้นใย ประมาณ 0.60-0.85 mm และมีปริมาณของต้นมันสำปะหลังและหัวมันสำปะหลังสด เท่ากับ (ก) และ (ข) 50:50; (ค) และ (ง) 70:30; (จ) และ (ฉ) 90:10 และ (ช) และ (ซ) 100:0 โดยน้ำหนัก | 125 |
| 5.20 ลักษณะพื้นผิวและรอยแตกหักของชั้นทดสอบที่กำลังขยาย 1x โดยมีขนาดเส้นใย ประมาณ 1.00-1.40 mm และมีปริมาณของต้นมันสำปะหลังและหัวมันสำปะหลังสด เท่ากับ (ก) และ (ข) 50:50; (ค) และ (ง) 70:30; (จ) และ (ฉ) 90:10 และ (ช) และ (ซ) 100:0 โดยน้ำหนัก..... | 126 |
| 5.21 ลักษณะพื้นผิวและรอยแตกหักของชั้นทดสอบที่กำลังขยาย 1x โดยมีขนาดเส้นใย ประมาณ 1.40-2.36 mm และมีปริมาณของต้นมันสำปะหลังและหัวมันสำปะหลังสด เท่ากับ (ก) และ (ข) 50:50; (ค) และ (ง) 70:30; (จ) และ (ฉ) 90:10 และ (ช) และ (ซ) 100:0 โดยน้ำหนัก..... | 127 |

สารบัญรูป (ต่อ)

| รูปที่ | หน้า |
|--|------|
| 5.22 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์สเตอริโอของชิ้นทดสอบจากหัวมันสำปะหลังล้วน (ก) ลักษณะพื้นผิวที่กำลังขยาย 10x และ (ข) รอยแตกหักจากการทดสอบแรงดึง ที่กำลังขยาย 1x | 128 |
| 5.23 ลักษณะพื้นผิวของชิ้นทดสอบที่กำลังขยาย 10x ของ (ก) ชิ้นทดสอบที่มีขนาดเส้นใย ประมาณ 0.60-0.85 mm และมีปริมาณต้นมันสำปะหลังและหัวมันสำปะหลังสด เท่ากับ 50:50 โดยน้ำหนัก; ชิ้นทดสอบจากต้นมันสำปะหลังล้วนที่มีขนาดเส้นใย ประมาณ (ข) 0.60-0.85 mm; (ค) 1.00-1.40 mm และ (ง) 1.40-2.36 mm | 128 |
| 5.24 การเปลี่ยนแปลงมวลภายใต้บรรยากาศในโตรเจน เทียบกับอุณหภูมิของลำต้นมันสำปะหลังและหัวมันสำปะหลังสด | 131 |
| 5.25 การเปลี่ยนแปลงมวลภายใต้บรรยากาศในโตรเจน เทียบกับอุณหภูมิของชิ้นทดสอบในแต่ละอัตราส่วนผสม | 132 |
| 5.26 อิทธิพลของขนาดเส้นใยและปริมาณเส้นใยต้นมันสำปะหลัง ต่อค่าการต้านทานแรงดึงของชิ้นทดสอบ | 134 |
| 5.27 อิทธิพลของขนาดเส้นใยและปริมาณเส้นใยต้นมันสำปะหลัง ต่อค่ามอดูลัสของยังของชิ้นทดสอบ | 135 |
| 5.28 อิทธิพลของขนาดเส้นใยและปริมาณเส้นใยต้นมันสำปะหลัง ต่อค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัวของชิ้นทดสอบ | 135 |
| 5.29 อิทธิพลของขนาดเส้นใยและปริมาณเส้นใยต้นมันสำปะหลัง ต่อค่าการต้านทานแรงดัดโค้งของชิ้นทดสอบ | 142 |
| 5.30 อิทธิพลของขนาดเส้นใยและปริมาณเส้นใยต้นมันสำปะหลัง ต่อค่ามอดูลัสแรงดัดโค้งของชิ้นทดสอบ | 144 |
| 5.31 อิทธิพลของขนาดเส้นใยและปริมาณเส้นใยต้นมันสำปะหลัง ต่อค่าการต้านทานแรงกระแทกของชิ้นทดสอบ | 149 |
| 5.32 ภาพขณะย่อยสลายได้ที่มีขนาดเส้นใยประมาณ 0.60-0.85 mm และมีปริมาณต้นมันสำปะหลังและหัวมันสำปะหลังสดเท่ากับ (ก) 50:50; (ข) 70:30; (ค) 90:10 และ (ง) 100:0 โดยน้ำหนัก | 154 |

สารบัญรูป (ต่อ)

| รูปที่ | หน้า |
|--|------|
| 5.33 ภาชนะย่อยสลายได้ที่มีขนาดเส้นใยประมาณ 1.00-1.40 mm และมีปริมาณต้นมันสำปะหลังและหัวมันสำปะหลังสดเท่ากับ (ก) 50:50; (ข) 70:30; (ค) 90:10 และ (ง) 100:0 โดยน้ำหนัก | 155 |
| 5.34 ภาชนะย่อยสลายได้ที่มีขนาดเส้นใยประมาณ 1.40-2.36 mm และมีปริมาณต้นมันสำปะหลังและหัวมันสำปะหลังสดเท่ากับ (ก) 50:50; (ข) 70:30; (ค) 90:10 และ (ง) 100:0 โดยน้ำหนัก | 156 |



คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

| | |
|----------|---|
| A | = พื้นที่หน้าตัดของชิ้นทดสอบบริเวณหลังรอยบาก (cm^2) |
| A_0 | = พื้นที่หน้าตัดเริ่มต้นของชิ้นทดสอบ (m^2) |
| b | = ความกว้างของชิ้นทดสอบ (mm) |
| C | = ค่าพลังงานไฟฟ้าต่อหน่วย (บาท/หน่วย) |
| $Cost$ | = ค่าพลังงานไฟฟ้ารวม (บาท) |
| d | = ความหนาของชิ้นทดสอบ (mm) |
| D | = ระยะยวบตัวสูงสุดที่จุดกึ่งกลางของชิ้นทดสอบ (mm) |
| E | = โมดูลัสของความยืดหยุ่น หรือโมดูลัสของยัง (MPa) |
| E | = พลังงานที่ได้จากการปล่อยหัวค้อน (J) |
| E_f | = ค่าโมดูลัสแรงดัด โค้ง (MPa) |
| F | = แรงกระทำกับพื้นที่หน้าตัดชิ้นทดสอบ (N) |
| F_M | = แรงกระทำสูงสุด (N, kN) |
| g | = อัตราเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก (9.81 m/s^2) |
| h, h' | = ความสูงของหัวค้อนก่อนและหลังการกระแทกตามลำดับ (m) |
| H_0 | = สมมติฐานหลัก |
| l | = ความยาวสุดท้ายเมื่อได้รับแรงกระทำ (mm) |
| l_0 | = ความยาวเริ่มต้น หรือความยาวเกจของวัสดุ (mm) |
| l_f | = ความยาวของชิ้นทดสอบหลังจากแตกหัก (mm) |
| L | = ระยะห่างระหว่างแท่นวางชิ้นทดสอบ (mm) |
| L_i | = ระยะห่างระหว่างระหว่างหัวค้อน ($L/3$ หรือ $L/2$, mm) |
| m | = มวลของหัวค้อน (kg) |
| m | = ความชันของเส้นตรงที่ลากผ่านกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและระยะยวบตัวในช่วงยืดหยุ่นเชิงเส้นตรง (N/mm) |
| P | = แรงกระทำที่บริเวณกึ่งกลางของชิ้นทดสอบ (N) |
| r_{ij} | = ระดับคะแนน |
| R | = ความเร็วที่ใช้ในการกดชิ้นทดสอบ (Rate of crosshead motion, mm/min) |
| w_i | = คะแนนความสำคัญ |

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

| | |
|--------------------|--|
| W | = หน่วยการใช้ไฟฟ้า (kW-h) |
| W_0 | = น้ำหนักชิ้นทดสอบก่อนแช่น้ำ (g) |
| W_1 | = น้ำหนักชิ้นทดสอบหลังแช่น้ำ (g) |
| W_{Sieve} | = น้ำหนักของดินมันสำปะหลังบดที่ค้างบนตะแกรง (g) |
| W_{Total} | = น้ำหนักของดินมันสำปะหลังบดทั้งหมด (g) |
| x_1 | = อุณหภูมิในกระบวนการอัดขึ้นรูป (Temp., °C) |
| x_2 | = ความดันในกระบวนการอัดขึ้นรูป (Press., bar) |
| x_3 | = เวลาในกระบวนการอัดขึ้นรูป (Time, นาที) |
| x_4 | = สารเกาะยึดที่ใช้ในการทดลอง (Binder) |
| x_i, x_j | = อิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัย x_i และ x_j |
| x_j | = ปัจจัยหลักในกระบวนการ |
| \hat{y} | = ค่าการตอบสนอง หรือค่าการต้านทานแรงดัดโค้ง (Flexural strength, MPa) |
| Z | = อัตราความเครียด (Rate of straining, mm/mm/min) |
| % EL | = เปอร์เซ็นต์การยืดตัวของชิ้นทดสอบ (%) |
| % $Retained$ | = น้ำหนักของดินมันสำปะหลังบดที่ค้างบนตะแกรง (%) |
| α | = ค่าระดับนัยสำคัญ |
| $\hat{\beta}_0$ | = ค่าเฉลี่ยของค่าการตอบสนองทั้งหมด |
| $\hat{\beta}_{ij}$ | = ค่าสัมประสิทธิ์ของอิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัย |
| $\hat{\beta}_j$ | = ค่าสัมประสิทธิ์ของแบบจำลองถดถอย |
| ε | = ความเครียดเชิงเส้น (mm/mm) |
| ε | = องค์ประกอบของความผิดพลาดแบบสุ่ม |
| ε_f | = ความเครียดที่ผิวล่างของชิ้นทดสอบ (mm/mm) |
| γ | = ความเครียดเฉือน (radian) |
| μ | = ค่าเฉลี่ยของชุดข้อมูลการทดลอง |
| θ | = มุมที่เปลี่ยนไป (radian) |
| σ | = ความเค้นทางวิศวกรรม (N/m ²) |
| σ_f | = ค่าการต้านทานแรงดัดโค้งของชิ้นทดสอบ (MPa) |
| $\sigma_{f,4P}$ | = ค่าการต้านทานแรงดัดโค้งของชิ้นทดสอบจากการทดสอบแบบ 4 จุด (MPa) |

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

| | |
|------------------|--|
| σ_M | = การต้านทานแรงดึงสูงสุด (N/mm ²) |
| τ | = ความเค้นเฉือน (N/m ²) |
| ASTM | = American Society for Testing and Materials |
| CS | = น้ำแป้งมันสำปะหลัง (Cassava starch batter) |
| DF | = ระดับความเป็นอิสระ (Degree of freedom) |
| EPS | = โฟมพอลิสไตรีน (Expanded polystyrene) |
| F | = ค่าสถิติ F |
| F_A | = ค่าสถิติ F ของตัวแปรอิสระตัวที่ 1 |
| F_{AB} | = ค่าสถิติ F ของอิทธิพลร่วมระหว่างตัวแปรอิสระ |
| F_B | = ค่าสถิติ F ของตัวแปรอิสระตัวที่ 2 |
| ISO | = International Organization for Standardization |
| MS | = ค่าเฉลี่ยกำลังสองของค่าเบี่ยงเบน (Mean square) |
| MS_A | = ค่าเฉลี่ยกำลังสองของค่าเบี่ยงเบนจากตัวแปรอิสระตัวที่ 1 |
| MS_{AB} | = ค่าเฉลี่ยกำลังสองของค่าเบี่ยงเบนของอิทธิพลร่วมระหว่างตัวแปรอิสระ |
| MS_B | = ค่าเฉลี่ยกำลังสองของค่าเบี่ยงเบนจากตัวแปรอิสระตัวที่ 2 |
| MS_{Error} | = ค่าเฉลี่ยกำลังสองของค่าเบี่ยงเบนจากความผิดพลาด |
| $MS_{Treatment}$ | = ค่าเฉลี่ยกำลังสองของค่าเบี่ยงเบนระหว่างระดับ |
| P | = P-value |
| PA | = พอลิเอไมด์ (Polyamide) |
| PCL | = พอล리카โพรแลคโตน (Polycaprolactone) |
| PET | = พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต (Polyethylene terephthalate) |
| PHA | = พอลิไฮดรอกซีอัลคาโนเอต (Polyhydroxyalkanoate) |
| PHB | = พอลิไฮดรอกซีบิวไทเรต (Polyhydroxybutyrate) |
| PLA | = พอลิแลคติกแอซิด (Polylactic acid) |
| PU | = พอลิยูรีเทน (Polyurethane) |
| PVA | = พอลิไวนิล แอลกอฮอล์ (Polyvinyl alcohol) |
| R | = หัวมันสำปะหลังสด (Cassava root) |
| R-Sq | = ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R-squared, R ²) |

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

| | |
|-------------------------|--|
| R-Sq (adj) | = สัมประสิทธิ์การตัดสินใจที่ปรับแล้ว (Adjusted R-squared, Adj-R ²) |
| R-Sq (pred) | = ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจการทำนาย (Predicted R-squared, Pred-R ²) |
| SS | = ค่าผลรวมของค่าเบี่ยงเบนกำลังสอง (Sum of square) |
| SS _A | = ค่าผลรวมของค่าเบี่ยงเบนกำลังสองจากตัวแปรอิสระตัวที่ 1 |
| SS _{AB} | = ค่าผลรวมของค่าเบี่ยงเบนกำลังสองของอิทธิพลร่วมระหว่างตัวแปรอิสระ |
| SS _B | = ค่าผลรวมของค่าเบี่ยงเบนกำลังสองจากตัวแปรอิสระตัวที่ 2 |
| SS _{Error} | = ค่าผลรวมของค่าเบี่ยงเบนกำลังสองที่เกิดเนื่องจากความผิดพลาด |
| SS _T | = ค่าผลรวมของค่าเบี่ยงเบนกำลังสองรวมทั้งหมด |
| SS _{Treatment} | = ค่าผลรวมของค่าเบี่ยงเบนกำลังสองที่เกิดเนื่องจากระดับ |
| TPS | = แป้งเทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic starch) |
| T _{on} | = อุณหภูมิเริ่มต้นของการสลายตัวของสารตัวอย่าง (Onset temperature) |
| T _{max} | = จุดที่สารตัวอย่างเสื่อมสลายมากที่สุด (Maximum degradation temperature) |



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันประชากรโลกได้เพิ่มมากขึ้น ปริมาณการใช้งานผลิตภัณฑ์ที่ทำจากพลาสติกและโฟมเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน ผลิตภัณฑ์จากพลาสติกและโฟมมีการผลิตขึ้นเป็นจำนวนมากเพื่อให้เพียงพอต่อความต้องการที่หลากหลาย เนื่องจากผลิตภัณฑ์จากพลาสติกและโฟมนั้นมีน้ำหนักเบา มีสมบัติทางกลที่ดี ทนต่อความชื้น และง่ายต่อการขึ้นรูปเมื่อเทียบกับวัสดุอื่น ๆ โดยบรรจุภัณฑ์ที่ได้จากพลาสติกและโฟมส่วนใหญ่จะถูกใช้งานครั้งเดียวแล้วทิ้ง จนปริมาณขยะเหล่านั้นส่งผลกระทบต่อมนุษย์และสิ่งแวดล้อมเป็นอย่างมาก เพียงแค่ในประเทศไทยปริมาณขยะประเภทพลาสติกและโฟมสูงกว่าปีละ 3 ล้านตัน ซึ่งพลาสติกและโฟมที่ได้จากอุตสาหกรรมปิโตรเคมีเหล่านี้ต้องใช้เวลาในการย่อยสลายนานหลายชั่วอายุคน ขยะพลาสติกหลายประเภทไม่นิยมนำกลับมารีไซเคิลใช้ใหม่ เนื่องจากไม่คุ้มค่าต่อการลงทุน จึงจำเป็นต้องกำจัดขยะเหล่านี้ด้วยการเผาทำลายหรือฝังกลบ และหากนำขยะพลาสติกและโฟมไปเผาทำลายก็จะก่อให้เกิดปรากฏการณ์เรือนกระจก นำไปสู่ปัญหาภาวะโลกร้อนหากนำไปฝังกลบจะทำให้ดินเสื่อมคุณภาพ ปัญหาเหล่านี้ล้วนแต่เป็นสิ่งที่ต้องเร่งแก้ไขโดยด่วน

ในหลายประเทศเริ่มตระหนักถึงผลกระทบดังกล่าวจึงรณรงค์ให้มีการนำพลาสติกกลับมาใช้ใหม่ แต่ปริมาณขยะที่เกิดขึ้นยังคงสูงอยู่ อีกหนึ่งทางออก คือการหันมาใช้พลาสติกที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ (Biodegradable plastics) ซึ่งเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม โดยเฉพาะในสหภาพยุโรป และสหรัฐอเมริกาต่างรณรงค์ทั้งเชิงนโยบาย การวิจัยและพัฒนาการสร้างผลิตภัณฑ์จากพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพออกมาทดแทนพลาสติกที่ย่อยสลายไม่ได้ พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพนั้นมีทั้งที่ผลิตจากปิโตรเคมี และผลิตจากชีวมวล โดยพลาสติกที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพที่ได้รับความนิยมเป็นอย่างมาก คือ แป้งเทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic starch, TPS) พอลิคาโพรแลคโตน (Polycaprolactone, PCL) พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (Polyvinyl alcohol, PVA) พอลิไฮดรอกซีอัลคาโนเอต (Polyhydroxyalkanoate, PHA) และพอลิแลคติกแอซิด (Polylactic acid, PLA) เป็นต้น แต่พลาสติกสังเคราะห์เหล่านี้มีข้อจำกัดในการใช้งาน เนื่องจากราคาที่ค่อนข้างสูงเมื่อเทียบกับพลาสติกทั่วไป และต้องนำเข้าจากต่างประเทศ ดังนั้นจึงมีการศึกษาถึงการนำพอลิเมอร์จากธรรมชาติ เช่น

แป้ง (Starch) เส้นใย หรือสารเติมแต่งต่าง ๆ ที่สามารถย่อยสลายได้ ซึ่งเป็นวัตถุดิบทางการเกษตรที่หาได้ง่าย และราคาถูกเหมาะสม หรือนำมาใช้ในกระบวนการผลิตภาชนะบรรจุ

วัตถุดิบจากภาคการเกษตรที่ได้รับความสนใจอย่างมากในการนำมาทำวัสดุย่อยสลายได้ทางชีวภาพ คือ ข้าวสาลี ข้าวโพด และมันสำปะหลัง แป้งที่สกัดได้จากวัตถุดิบเหล่านี้ต้องผ่านกระบวนการต่าง ๆ มากมาย ทั้งนำวัตถุดิบไปล้างทำความสะอาด บดเพื่อลดขนาด และนำไปกรองเพื่อสกัดแป้งออกจากเซลล์ูโลส กระบวนการมากมายเหล่านี้ต้องสูญเสียทั้งเวลา และพลังงานมากกว่าจะได้ออกมาเป็นแป้ง โดยแป้งที่นักวิจัยของไทยนิยมนำมาศึกษาวิจัยเกี่ยวกับภาชนะบรรจุย่อยสลายได้ทางชีวภาพนั้น คือ แป้งจากมันสำปะหลัง เนื่องจากเป็นวัสดุทางการเกษตรที่ราคาถูก หาได้ง่าย และเป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญของประเทศไทย มีปริมาณการผลิตและส่งออกคิด 1 ใน 5 ของโลก โดยที่จังหวัดนครราชสีมาเป็นศูนย์กลางหลักในการผลิตมันสำปะหลังของประเทศ ซึ่งเกษตรกรมักจะขยายการเพาะปลูกโดยใช้ท่อนพันธุ์จากลำต้น ทำให้มีเศษลำต้นเหลือทิ้งจำนวนมาก

กรรมวิธีการผลิตภาชนะบรรจุจากแป้งที่สลายตัวได้ทางชีวภาพนั้นมีหลักการที่คล้ายกับกรรมวิธีการผลิตพลาสติกจากปิโตรเคมี (Glenn et al., 1997) สามารถทำได้หลายวิธี เช่น กระบวนการอัดรีด (Extrusion process) การฉีดขึ้นรูป (Injection molding) และการอัดขึ้นรูป (Compression molding) ซึ่งกระบวนการอัดขึ้นรูปนั้นมีหลักการในการขึ้นรูปที่ง่ายและไม่ซับซ้อนที่สุด นิยมใช้ในการผลิตภาชนะในเชิงพาณิชย์ทั่วไป แต่ภาชนะบรรจุย่อยสลายได้ทางชีวภาพที่ใช้แต่แป้งเพียงอย่างเดียวนั้นเปราะ แตกหักง่าย และมีข้อจำกัดอย่างมากด้านการต้านทานน้ำหรือความชื้น (Shogren et al., 2002) นักวิจัยหลายท่านได้พยายามหาทางปรับปรุงสมบัติต่าง ๆ ของภาชนะบรรจุจากแป้งนี้ทั้งสมบัติทางกายภาพและสมบัติทางกล โดยการเติมเส้นใย และสารเติมแต่งต่าง ๆ ให้กับภาชนะบรรจุ

แม้ว่าในปัจจุบันจะมีการพัฒนาและปรับปรุงสมบัติของภาชนะบรรจุได้ใกล้เคียงกับภาชนะบรรจุพลาสติกจากปิโตรเคมีแล้ว แต่ภาชนะบรรจุดังกล่าวมีส่วนผสมของแป้งในปริมาณมากยังผลให้มีต้นทุนที่ค่อนข้างสูงในการผลิตในระดับอุตสาหกรรม นอกจากนี้ยังใช้สารเติมแต่งที่สังเคราะห์จากกระบวนการทางเคมีอีกด้วย ดังนั้น ในงานศึกษาวิจัยครั้งนี้จึงมุ่งเน้นการผลิตภาชนะบรรจุย่อยสลายได้ทางชีวภาพจากลำต้นมันสำปะหลังสดเป็นหลักด้วยกระบวนการอัดขึ้นรูปร้อน เพื่อให้ได้ภาชนะบรรจุที่สามารถใช้งานได้จริง และเป็นอีกทางเลือกหนึ่งสำหรับผู้บริโภคในการใช้ทดแทนภาชนะบรรจุที่ไม่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพอีกด้วย อย่างไรก็ตามการใช้ลำต้นมันสำปะหลังสดเป็นวัตถุดิบหลักในการทำภาชนะบรรจุย่อยสลายได้ทางชีวภาพนั้น ยังเป็นแนวความรู้ใหม่ที่ต้องมีการศึกษาวิจัยอีกมาก

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อออกแบบและผลิตเครื่องอัดขึ้นรูปรีออน และแม่พิมพ์สำหรับใช้ในการผลิตภาชนะย่อยสลายได้ทางชีวภาพ

1.2.2 เพื่อศึกษากรรมวิธีการผลิตภาชนะบรรจุย่อยสลายได้ทางชีวภาพโดยใช้ลำต้นมันสำปะหลังเป็นหลัก

1.2.3 เพื่อศึกษาอิทธิพลของขนาดเส้นใยต้นมันสำปะหลัง และอัตราส่วนของต้นมันสำปะหลังและสารยึดเกาะ ต่อสมบัติทางกายภาพและสมบัติทางกลของภาชนะย่อยสลายได้ทางชีวภาพ

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1.3.1 ใช้ลำต้นมันสำปะหลังเป็นวัตถุดิบหลัก และใช้สารยึดเกาะจากหัวมันสำปะหลังสดที่ยังไม่ผลิตเป็นแป้ง

1.3.2 วัสดุที่ใช้เป็นวัสดุที่สามารถย่อยสลายทางชีวภาพได้ 100%

1.3.3 วิเคราะห์ความแปรปรวนแบบสองทางของสมบัติทางกายภาพและสมบัติทางกลด้วยโปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติ (Minitab 16)

1.3.4 ขึ้นรูปภาชนะบรรจุย่อยสลายได้ด้วยกระบวนการอัดขึ้นรูปรีออน (Compression molding) โดยผลิตภาชนะขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 12 cm

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ได้กรรมวิธีการผลิตภาชนะย่อยสลายได้ทางชีวภาพจากลำต้นมันสำปะหลัง และสามารถนำไปพัฒนาต่อยอดในระดับอุตสาหกรรมได้

1.4.2 เป็นแนวทางในการลดปัญหาสิ่งแวดล้อม และลดปัญหามลพิษจากการฝังกลบหรือเผาทำลายขยะพลาสติกและโฟมที่ไม่สามารถย่อยสลายได้เองตามธรรมชาติ

1.4.3 ประเทศประหยัดพลังงาน และงบประมาณที่ใช้ในการกำจัดขยะบรรจุภัณฑ์ต่าง ๆ

1.4.4 นำมันสำปะหลังซึ่งเป็นวัตถุดิบจากภาคการเกษตรกรรมมาเพิ่มมูลค่า และนำไปใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุด

1.4.5 เป็นแรงกระตุ้นให้ผู้บริโภคภายในประเทศตื่นตัว และใส่ใจต่อการอนุรักษ์สิ่งแวดล้อมมากขึ้น โดยการหันมาใช้ผลิตภัณฑ์ที่ไม่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม

บทที่ 2

ปรีทัศน์วรรณกรรมและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

เนื้อหาในบทนี้จะแบ่งออกเป็นสองส่วน ในส่วนแรกกล่าวถึงปรีทัศน์วรรณกรรม งานวิจัย เอกสาร รวมทั้งวิทยานิพนธ์ต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยฉบับนี้ ซึ่งเป็นการศึกษาเกี่ยวกับการนำพอลิเมอร์จากธรรมชาติที่สามารถย่อยสลายได้มาใช้เป็นวัตถุดิบหลักในการผลิตเป็นวัสดุที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ รวมไปถึงการปรับปรุงสมบัติของวัสดุเหล่านั้นด้วยการเติมเส้นใยจากธรรมชาติ หรือสารเติมแต่งอื่น ๆ สำหรับส่วนที่สองจะเป็นการกล่าวถึงทฤษฎีต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย ประกอบไปด้วยหัวข้อหลัก ๆ ดังนี้ คือ พลาสติกย่อยสลายได้ มันสำปะหลัง พอลิเมอร์จากธรรมชาติ กระบวนการขึ้นรูปชิ้นงานแบบต่าง ๆ การทดสอบสมบัติของวัสดุ การออกแบบการทดลอง และการวิเคราะห์ข้อมูลด้วยวิธีทางสถิติ

2.1 ปรีทัศน์วรรณกรรม

ในช่วงเวลาหลายปีที่ผ่านมา มนุษยชาติเริ่มตระหนักถึงผลกระทบของขยะพลาสติก และโฟมที่ใช้บรรจุอาหารต่อสิ่งแวดล้อม มลพิษมากมายที่เกิดขึ้นจากการฝังกลบและเผาทำลายขยะที่ไม่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพนั้นส่งผลกระทบต่อมนุษย์ ในหลายประเทศจึงเริ่มรณรงค์ให้ประชาชนหันมาใช้วัสดุที่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ มีงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวัสดุที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพอยู่หลายด้าน ทั้งในด้านการพัฒนาวัสดุที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ การปรับปรุงสมบัติต่าง ๆ ทั้งสมบัติทางกายภาพและสมบัติทางกล ตลอดจนการนำเสนอแนวทางการขึ้นรูปบรรจุภัณฑ์แบบใหม่ เพื่อเป็นอีกหนึ่งทางเลือกแก่ผู้บริโภค

สำหรับงานวิจัยเกี่ยวกับวัสดุที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพภายในประเทศไทยนั้นยังถือว่าเป็นสิ่งใหม่สำหรับนักวิจัยอยู่มาก แต่ในปี พ.ศ. 2538 สายสนม ประดิษฐ์ดวง และงามทิพย์ ภู่วโรดม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ได้เริ่มวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีการแปรรูปแป้งมันสำปะหลังเป็นภาชนะที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพได้สำเร็จ จากนั้นได้จัดสิทธิบัตรผลงานการประดิษฐ์ ในปี พ.ศ. 2541 ในชื่อภาชนะบรรจุจากองค์ประกอบที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพจากแป้ง หรือ KU-GREEN ใช้วิธีการอัดร้อน ในการขึ้นรูปภาชนะบรรจุดังกล่าว มีชุดความร้อนฝังในแม่พิมพ์ ตั้งค่าอุณหภูมิของแม่พิมพ์ตัวผู้ที่ 180°C แม่พิมพ์ตัวเมีย 200°C ใช้เวลาในการอัด 2 นาที โดยสูตรที่วิจัยจะเน้นแป้ง

เป็นหลักเพื่อให้สามารถบริโภคได้ จึงทำให้มีข้อจำกัดด้านความแข็งแรง และความทนทานน้ำร้อน น้ำเย็นที่ต่ำ จึงต้องมีการพัฒนาต่อไป

Glenn and Hsu (1997) ได้นำเสนอวิธีการแบบใหม่ในการอัดขึ้นรูปพลาสติกจากแป้ง สาธิตที่สามารถเข้าเตาอบได้โดยไม่ใช้ความร้อนในการอัด โดยใช้โฟมแป้ง (Starch foam) แทนผง แป้ง (Starch powder) มาอัดขึ้นเป็นพลาสติกสตาร์ช (Starch-based plastic) ซึ่งพลาสติกนี้ในตอน แรกนั้นจะมีค่าการต้านทานแรงดึง (Tensile strength) และค่ามอดูลัสของความยืดหยุ่น (Modulus of elasticity) ที่ใกล้เคียงกับพอลิโพรพิลีน (Polypropylene) แต่เมื่อเวลาผ่านไปพลาสติก สตาร์ชที่ได้จะมีคุณสมบัติที่อ่อนลง โดยเฉพาะที่อุณหภูมิต่ำ ๆ และยังไม่เหมาะต่อการทำถาด สำหรับเตาอบเพราะมีการพองตัวเป็นฟองเมื่อโดนความร้อนจากเตา ควรจะปรับปรุงสมบัติต่างๆ ก่อน

รังสิมา ชลคุป และ คณะ (2541) ได้ศึกษาสมบัติทางกล และสมบัติการย่อยสลายของ ขึ้นทดสอบที่นำแป้งมันสำปะหลัง ไปผสมกับพอลิคาโพรแลคโตน (Polycaprolactone, PCL) เพื่อลด ค่าใช้จ่าย ได้นำแป้งมันสำปะหลังปริมาณต่าง ๆ มาผสมกับ PCL ด้วยเครื่องผสม (Single-screw extruder) และถูกนำไปทำเป็นแผ่นเพื่อทดสอบด้วยเครื่องอัดร้อน จากการศึกษาพบว่าสูตรที่มี ค่าการต้านแรงดึง (Tensile strength) และค่าการยืดตัว (Elongation) ใกล้เคียงกับพอลิเอทิลีน (Polyethylene) คือผสมแป้งมันสำปะหลังใน PCL เท่ากับ 25% หากผสมปริมาณแป้งมันสำปะหลัง เพิ่มขึ้นจะทำให้สมบัติทางกลลดลง แต่มีแนวโน้มในการย่อยสลายทางชีวภาพที่เร็วกว่า PCL

Glenn and Orts (2001) ได้นำเสนอวิธีการใหม่ในการขึ้นรูปโฟมแป้ง คือ กระบวนการ กดอัดและการระเบิดพองตัวขึ้นรูป (Compression/explosion process) ซึ่งวิธีการนี้ถูกพัฒนาต่อยอด มาจากวิธีการขึ้นรูปโฟมแป้งทั่วไป คือ การอบด้วยแม่แบบที่ให้ความร้อน (Baking in hot mold) โดย กระบวนการกดอัดและการระเบิดพองตัวขึ้นรูปนี้ ต้องการปริมาณความชื้น และเวลาที่น้อยกว่ามาก ปริมาณ โฟมที่เกิดขึ้นภายในแม่พิมพ์จะขึ้นอยู่กับปริมาณความชื้นของวัตถุดิบ

Lawton et al. (2004) ได้ศึกษาการปรับปรุงสมบัติทางกลของถาดโฟมแป้งข้าวโพดโดยการ เติมเส้นใยแอสเพน (Aspen fiber) ด้วยการขึ้นรูปแบบการอบในแม่แบบปิด พบว่าปริมาณความชื้น สัมพัทธ์มีผลต่อความแข็งแรงของถาดโฟมอย่างไม่เป็นเชิงเส้น โดยถาดโฟมจะมีความแข็งแรงมาก ที่สุด เมื่อปริมาณความชื้นสัมพัทธ์ 50% เสมอในทุกกรณีของการเติมเส้นใย นอกจากนี้ถาดโฟมจะมี ความแข็งแรงเพิ่มมากขึ้นเมื่อเติมเส้นใยเพิ่มขึ้น โดยการเติมเส้นใยแอสเพน 15% ถาดโฟมจะมีความ แข็งแรงสูงที่สุด และความแข็งแรงจะลดต่ำลงหากเติมเส้นใยเกิน 30%

Shey et al. (2006) ได้ศึกษาสมบัติของโฟมแป้ง 3 ชนิด คือ โฟมแป้งสาธิต โฟมแป้งมันฝรั่ง และโฟมแป้งข้าวโพดข้าวเหนียว โดยเติมน้ำยารธรรมชาติเพื่อปรับปรุงสมบัติของโฟมแป้ง พบว่า โฟมแป้งมีความยืดหยุ่น และการต้านทานความชื้นเพิ่มมากขึ้น

Carr et al. (2006) ได้ศึกษาความแตกต่างของขนาดเส้นใย 2 ชนิด ต่อสมบัติทางกลของโพลีเอทิลีนสปีดสูง คือ เส้นใยคากมันสปีดสูง (เส้นใยขนาดเล็ก) และเส้นใยข้าวสาลี (เส้นใยผอม) พบว่าชนิดของเส้นใยไม่ส่งผลต่อด้านความแข็งแรง ความยืดหยุ่น และความหนาแน่นของโพลีเอทิลีนสปีดสูง ซึ่งจะมีเพียงปริมาณของเส้นใยที่เติมเข้าไปเท่านั้นที่จะมีความสำคัญ โดยเส้นใยทั้ง 2 ชนิดนี้จะมีขอบเขตของการปรับปรุงการเสริมแรงของโพลีเอทิลีนสปีดสูงอยู่ที่ 1%

พรทิพย์ ทูลจินดา (2550) ได้ศึกษาสมบัติทางกายภาพและสมบัติทางกลของโพลีเอทิลีนสปีดสูงที่มีการเติมไคติน อนุพันธ์ไคติน และน้ำยางพารา ซึ่งขึ้นรูปด้วยการอัดขึ้นรูป จากการศึกษาพบว่า โพลีเอทิลีนสปีดสูงที่สมบัติทางกลสูงที่สุด คือ โพลีเอทิลีนสปีดสูงที่มีอัตราส่วนของน้ำต่อเบตา-ไคติน เท่ากับ 140 และ 10 โดยน้ำหนักแห้ง ซึ่งการเติมน้ำยางพารา 5-30% ของน้ำหนักแห้ง จะทำให้ความแข็งแรงลดลง แต่จะต้านทานน้ำได้ดีขึ้น และการเพิ่มอัลฟา-ไคติน 10-30% ทำให้โพลีเอทิลีนสปีดสูงมีความแข็งแรงมากขึ้น

Salgado et al. (2008) ได้ศึกษาสมบัติทางกายภาพของถาดโพลีเอทิลีนสปีดสูงที่เติมโปรตีนดอกทานตะวัน และเส้นใยเซลลูโลส ด้วยกระบวนการอัดขึ้นรูป พบว่าการเติมโปรตีนลงในถาดโพลีเอทิลีนสปีดสูงนั้น นำไปสู่การลดลงของการดูดซึมน้ำ และปริมาณความชื้นของถาดโพลีเอทิลีนสปีดสูง โดยไม่ส่งผลต่อสมบัติทางกลอื่น ๆ ซึ่งสูตรที่ดีที่สุด คือ เติมเส้นใยเซลลูโลส 20% และเติมโปรตีนดอกทานตะวัน 10%

ฉัตรฐพล ไช้แสงศรี (2552) ได้ศึกษาอิทธิพลของเส้นใยต่อสมบัติทางกลและการต้านทานน้ำของถาดโพลีเอทิลีนสปีดสูง ด้วยวิธีการอบขึ้นรูปในแม่แบบร้อน ที่อุณหภูมิ 250°C เป็นเวลา 3 นาที พบว่าถาดโพลีเอทิลีนสปีดสูงที่เติมเส้นใยจากตะไคร้ และเยื่อกราฟท์จะมีค่าการต้านทานแรงดึงและค่าการยืดตัวสูงขึ้น แต่เมื่อเติมเส้นใยมากเกินไป จะทำให้ค่าการต้านทานแรงดึงและการยืดตัวลดลง สำหรับการทดสอบการดูดซึมน้ำ และการละลายน้ำของถาดโพลีเอทิลีนสปีดสูงนั้น เมื่อผสมเส้นใยเพิ่มมากขึ้น จะทำให้ค่าการดูดซึมน้ำ และการละลายน้ำลดลง โดยสูตรที่ดีที่สุด คือ โพลีเอทิลีนสปีดสูงที่ผสมเส้นใยจากตะไคร้ 20% และเยื่อกราฟท์ 20-30% โพลีเอทิลีนสปีดสูงจะมีค่าการต้านทานแรงดึงและการยืดตัวสูงที่สุด ค่าการดูดซึมน้ำและค่าการละลายน้ำต่ำที่สุด

หลังจากนั้นฉัตรฐพล ไช้แสงศรี และ คณะ (2553) ได้ทำการทดสอบนำถาดโพลีเอทิลีนสปีดสูงมาบรรจุส้มโอตัดแต่งสด จากการศึกษาพบว่า โพลีเอทิลีนสปีดสูงที่ผสมเยื่อกราฟท์ 30% และเติมไคโตแซนความเข้มข้น 4% จะมีสมบัติด้านความแข็งแรงใกล้เคียงกับถาดโพลีเอทิลีนสปีดสูง แต่การดูดซึมน้ำและการละลายน้ำของโพลีเอทิลีนสปีดสูงมีค่าสูงกว่าโพลีเอทิลีนสปีดสูงจากพอลิโพรพิลีน แต่การดูดซึมน้ำและการละลายน้ำของโพลีเอทิลีนสปีดสูงมีค่าสูงกว่าโพลีเอทิลีนสปีดสูงจากพอลิโพรพิลีน เมื่อเติมน้ำมันถั่วเหลือง 10% จะไม่มีผลต่อการต้านทานแรงดึง และการยืดตัวของโพลีเอทิลีนสปีดสูง แต่ทำให้การดูดซึมน้ำและการละลายน้ำลดลง เมื่อนำมาบรรจุส้มโอตัดแต่งสด พบว่าโพลีเอทิลีนสปีดสูงที่ใช้น้ำมัน

ถั่วเหลืองเป็นสารเติมแต่งมีสมบัติด้านการต้านทานแรงดึง และการยึดตัวที่ดีกว่าใช้ PVA ปริมาณ 10% เป็นสารเติมแต่ง

Shawaphun and Manangan (2010) ได้ศึกษาสมบัติการต้านทานอากาศ น้ำ และน้ำมันของ กระจกาศที่เคลือบผิวจากพอลิไฮดรอกซีบิวไตรเรท (Poly-3-hydroxybutyrate, PHB) และพอลิแลคไทด์ (Polylactide, PLA) เพื่อนำไปทำเป็นภาชนะบรรจุ จากการศึกษพบว่าทั้งกระจกาศที่เคลือบ PHB และ PLA มีสมบัติด้านการต้านทานอากาศที่ใกล้เคียงกัน กระจกาศที่เคลือบ PHB จะมีสมบัติด้านการต้านทานน้ำได้ดีกว่ากระจกาศที่เคลือบ PLA และกระจกาศที่เคลือบ PLA นั้น จะมีสมบัติด้านการต้านทานน้ำมันได้ดีกว่า PHB เล็กน้อย

Teixeira et al. (2012) ได้ศึกษาผลของการใช้กากมันสำปะหลังเป็นวัตถุดิบในการสร้างวัสดุ เสริมแรงในแป้งเทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic starch, TPS) พบว่า กากมันสำปะหลังซึ่งเป็นวัสดุ เหลือทิ้งนั้น สามารถนำมาใช้ทำเป็น TPS ได้ และราคาถูกกว่า TPS ที่ได้จากแป้งมันสำปะหลังเสียอีก โดยที่ TPS ที่ได้จากกากมันสำปะหลังนั้นมีค่าการต้านทานแรงดึงที่ใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากแป้ง มันสำปะหลัง เพียงแต่มีค่ามอดูลัสของความยืดหยุ่นที่สูงกว่า และการยึดตัวที่ต่ำกว่า นอกจากนี้ ยังสามารถนำ TPS ไปผสมกับ PLA เพื่อลดต้นทุนได้ ถึงแม้จะได้ค่าการต้านแรงดึง และค่ามอดูลัส ของความยืดหยุ่นที่ลดลงก็ตาม

Wattanakornsiri et al. (2012) ได้ศึกษาสมบัติการต้านทานน้ำของ TPS จากแป้ง มันสำปะหลังที่เติมเส้นใยจากกระดาษหนังสือพิมพ์ และเส้นใยจากกระดาษสำนักงานใช้แล้ว พบว่า การเติมเส้นใยเซลลูโลสจะทำให้สมบัติของ TPS ดีขึ้น ซึ่งการเติมเส้นใยกระดาษสำนักงานและ เส้นใยหนังสือพิมพ์ลงในสูตรในปริมาณ 8% ทำให้ค่าการต้านทานแรงดึงสูงสุดเพิ่มขึ้นจาก TPS ที่ ยังไม่ได้เติมสารเติมแต่ง 76% และ 213% ตามลำดับ และค่ามอดูลัสของความยืดหยุ่นเพิ่มขึ้น 128% และ 405% ตามลำดับ ซึ่งการเพิ่มขึ้นของสมบัติทางกลเป็นที่ยืนยันได้ว่า เส้นใยดังกล่าวมี ปฏิสัมพันธ์ที่ดีกับเมทริกซ์ ซึ่งเส้นใยที่เล็กกว่าจะปรับปรุงสมบัติทางกลได้ดีกว่าเส้นใยขนาดใหญ่ นอกจากนี้การเติมเส้นใยเซลลูโลสจะลดปริมาณน้ำที่ดูดซึมจากสภาพแวดล้อม ซึ่งการมีอยู่ของ ปริมาณเส้นใย ทำให้ค่าความชื้นของวัสดุคอมโพสิตนั้นลดลงจาก 7.6% ของ TPS ที่ยังไม่ได้เติม สารเติมแต่ง เหลือปริมาณความชื้นเท่ากับ 6.3% สำหรับ TPS ผสมเส้นใยกระดาษสำนักงาน 8% และความชื้นเท่ากับ 5.9% สำหรับ TPS ผสมเส้นใยกระดาษหนังสือพิมพ์ที่ปริมาณเดียวกัน เนื่องจากการมีอยู่ของเส้นใยเซลลูโลสที่กระจายตัวอยู่ใน TPS จะลดปฏิสัมพันธ์ของ TPS กับน้ำลง

Prachayawarakorn et al. (2013) ได้ศึกษาสมบัติของ TPS จากแป้งมันสำปะหลัง ผสม เส้นใยปอกระเจา (Jute fiber) และเส้นใยหนุ่ย (Kapok fiber) พบว่าการมีอยู่ของเส้นใยทำให้ TPS มีความเหนียวที่การกระกรรมสูงสุดและค่ามอดูลัสความยืดหยุ่นที่เพิ่มสูงขึ้นอย่างชัดเจน

จากการศึกษาเอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้องข้างต้น ทำให้ทราบว่า การผลิตวัสดุและภาชนะย่อยสลายได้ทางชีวภาพจากวัตถุดิบทางการเกษตรต่าง ๆ กำลังได้รับความนิยม และเข้ามาจับบทบาทในชีวิตประจำวัน ซึ่งจากรายงานพบว่าชิ้นงานที่ได้จะมีค่าสมบัติที่แตกต่างกันออกไปตามแหล่งที่มา และชนิดของวัตถุดิบ รวมไปถึงอัตราส่วนผสมและกรรมวิธีการผลิตในแต่ละงานวิจัยด้วย ดังนั้นจึงจำเป็นต้องศึกษาทฤษฎีเบื้องต้นเกี่ยวกับ มันสำปะหลัง พอลิเมอร์จากธรรมชาติ กระบวนการขึ้นรูปชิ้นงาน และการทดสอบสมบัติของวัสดุต่อไป

2.2 พลาสติกย่อยสลายได้

พลาสติกย่อยสลายได้ หรือพลาสติกสลายตัวได้ (Degradable plastics) เป็นพลาสติกที่ถูกออกแบบมาเพื่อใช้ทดแทนพลาสติกทั่วไปที่ใช้เวลาในการย่อยสลายหลายชั่วอายุคน พลาสติกย่อยสลายได้นั้นจะสามารถเกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมี ภายใต้อุณหภูมิและความชื้นที่เหมาะสม ซึ่งก่อให้เกิดการสูญเสียสมบัติบางประการ สามารถทดสอบการย่อยสลายตามมาตรฐานที่เหมาะสมได้ เช่น มาตรฐาน ISO (International Organization for Standardization) มาตรฐาน ASTM (American Society for Testing and Materials) และมาตรฐาน DIN (Deutsches Institut für Normung หรือ German Institute for Standardization) ก็ได้ อย่างไรก็ตามมาตรฐานเหล่านี้ต่างก็มีหลักการที่คล้ายคลึงกัน เช่น การวัดความสามารถในการย่อยสลายได้ทางชีวภาพ (Biodegradability) การวัดความสามารถการแตกเป็นชิ้นเล็ก ๆ (Disintegration) ของวัสดุทดสอบในสภาวะหมักปุ๋ย (Compost) การประเมินการย่อยสลายเบื้องต้น รวมถึงปริมาณโลหะหนัก และความเป็นพิษต่อระบบนิเวศของปุ๋ยที่ได้จากการหมัก (Ecotoxicity of the compost) เป็นต้น

2.2.1 วัตถุดิบ

วัตถุดิบที่ใช้ในการทำพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพสามารถแบ่งได้ตามรูปที่ 2.1

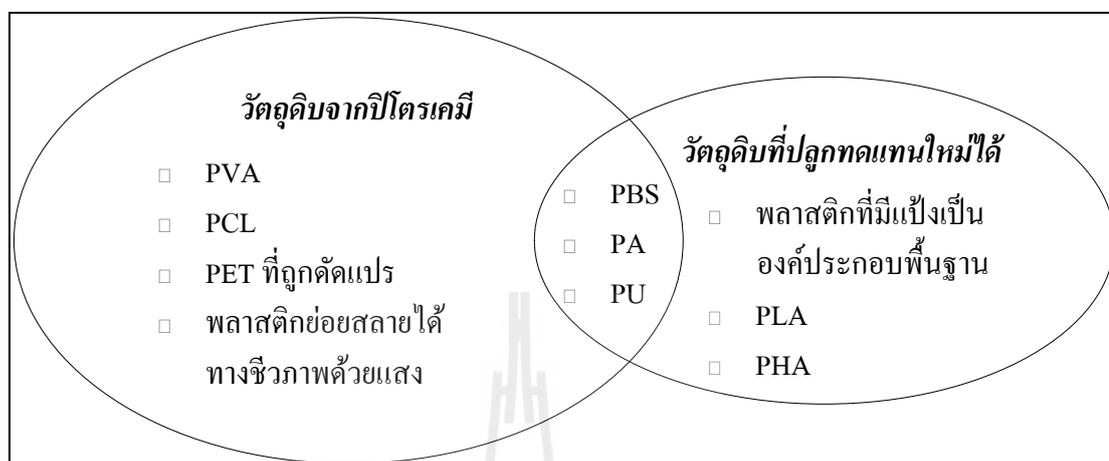
1. แหล่งวัตถุดิบจากปิโตรเคมี

วัตถุดิบจากปิโตรเคมีนั้นไม่สามารถหามาทดแทนได้ เป็นแหล่งวัตถุดิบและพลังงานที่ใช้แล้วหมดไป เช่น น้ำมันดิบ ก๊าซธรรมชาติ และถ่านหิน ในกระบวนการผลิตและผลิตภัณฑ์พลาสติกที่ได้ยังก่อให้เกิดผลกระทบต่อสภาวะแวดล้อมอีกด้วย

2. แหล่งวัตถุดิบที่สามารถปลูกทดแทนใหม่ได้

ได้แก่พืชผลทางการเกษตรจำพวกแป้งและน้ำตาล เช่น ข้าวโพด ข้าวสาลี มันสำปะหลัง อ้อยและปาล์ม นอกจากพืชผลทางการเกษตรแล้ว ยังมีการนำผลิตภัณฑ์จากอุตสาหกรรมโคนม เช่น หางนม (Whey permeate) มาเป็นวัตถุดิบในการผลิตมอนอเมอร์ เนื่องจาก

ความต้องการในการลดต้นทุนการผลิตย่อยสลายได้ทางชีวภาพ จึงมีการแสวงหามวลชีวภาพประเภทอื่นที่มีศักยภาพและราคาต่ำมาเป็นวัตถุดิบอีกด้วย



รูปที่ 2.1 พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพจากแหล่งวัตถุดิบที่ปลูกทดแทนใหม่ได้ และแหล่งวัตถุดิบปิโตรเคมี (สำนักงานนวัตกรรมแห่งชาติ, 2551)

2.2.2 ประเภทของพลาสติกย่อยสลายได้

พลาสติกที่ย่อยสลายได้สามารถจำแนกได้ตามกลไกของการย่อยสลายได้ดังต่อไปนี้ (ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ, 2550)

1. พลาสติกย่อยสลายทางกล (Mechanical degradation plastics)

ย่อยสลายโดยการให้แรงกระทำแก่ชิ้นงานพลาสติก ทำให้ส่วนพลาสติกแตกออกเป็นชิ้น ซึ่งเป็นวิธีที่ใช้กันทั่วไปในการทำให้พลาสติกแตก เช่น บด หรือตัดให้เป็นชิ้นเล็ก ๆ เป็นต้น

2. พลาสติกย่อยสลายได้ด้วยแสง (Photodegradable plastics)

พลาสติกที่ย่อยสลายได้ด้วยแสงนั้นจำเป็นต้องมีแสงอาทิตย์ หรือรังสีอัลตราไวโอเล็ต (UV) เป็นตัวทำปฏิกิริยา พลาสติกชนิดนี้จะไม่สามารถย่อยสลายได้ภายในบ่อฝังกลบขยะ หรือในสถานะแวดล้อมที่ปิด ตลอดจนพลาสติกที่เคลือบผิวที่หนาจนเกินไปจนทำให้ตัวพลาสติกนั้นไม่ได้สัมผัสกับรังสียูวีโดยตรง ในการย่อยสลายได้ด้วยแสงนั้นจำเป็นต้องเติมสารที่มีความไวต่อแสงลงในพลาสติกเพื่อให้หมู่ฟังก์ชันหรือพันธะเคมีไม่แข็งแรง แตกหักได้ง่ายเมื่อสัมผัสกับรังสียูวี ข้อจำกัดของพลาสติกย่อยสลายประเภทนี้ คือ ต้องใช้ในภูมิประเทศที่มีแสงแดดสม่ำเสมอ เพื่อให้สลายตัวได้อย่างต่อเนื่อง

3. พลาสติกย่อยสลายผ่านปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidative degradation plastics)

ในบางครั้งเรียกว่า พลาสติกที่สลายตัวได้โดยไม่ต้องพึ่งพาจุลินทรีย์ (Bioerodable plastics) การย่อยสลายพลาสติกประเภทนี้จะค่อย ๆ เป็นไปตามธรรมชาติอย่างช้า ๆ จากการเติมออกซิเจนเข้าไปในโมเลกุลของพอลิเมอร์ โดยมีความร้อน และแสงแดด หรือแรงทางกลกระทำด้วย จนกลายเป็นสารประกอบไฮโดรเปอร์ออกไซด์ (Hydroperoxide, ROOH) ซึ่งการแตกตัวของสารประกอบไฮโดรเปอร์ออกไซด์ จะกลายเป็นอนุมูลอิสระ (Free radical) ทำให้สายโซ่พอลิเมอร์เกิดการแตกหัก และเสถียรสมบัติทางกลอย่างรวดเร็ว

4. พลาสติกย่อยสลายผ่านปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (Hydrolytic degradation plastics)

โดยทั่วไปปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ ประเภทที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst hydrolysis) และไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา (Non-catalytic hydrolysis) โดยที่ประเภทที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานั้นแบ่งย่อยได้อีก 2 แบบ คือ แบบที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจากภายนอกโมเลกุลของพอลิเมอร์ (External catalytic degradation) และแบบที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจากภายในโมเลกุลของพอลิเมอร์ในการเร่งให้เกิดการย่อยสลาย (Internal catalytic degradation) โดยตัวเร่งปฏิกิริยาจากภายนอกมี 2 ชนิด คือ ไซเอนไซม์ต่าง ๆ (Enzyme) ในการเร่งปฏิกิริยา ซึ่งจัดเป็นการย่อยสลายทางชีวภาพ ส่วนอีกชนิดไม่ใช่เอนไซม์ในการเร่งปฏิกิริยาซึ่งจัดเป็นการย่อยสลายทางเคมี

5. พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ (Biodegradable plastics)

เป็นพลาสติกที่มีสมบัติการใช้งานเช่นเดียวกับพลาสติกโดยทั่วไป แต่สามารถย่อยสลายได้ด้วยจุลินทรีย์ เอนไซม์ และแบคทีเรียในธรรมชาติ เมื่อย่อยสลายหมดแล้วจะได้ผลิตภัณฑ์เป็นน้ำ มวลชีวภาพ ก๊าซมีเทน และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งเป็นสิ่งจำเป็นในการเจริญเติบโตและดำรงชีวิตของพืชรวมถึง มนสัตว์ป่า และข้าวโพด ที่เป็นวัตถุดิบสำหรับผลิตเป็นพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ

ภาชนะบรรจุพลาสติกที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพที่กำลังได้รับความนิยมในปัจจุบันถูกผลิตขึ้นจากโพลิเมอร์ชีวภาพ เช่น พอลิคาโพรแลคโตน (Polycaprolactone, PCL) พอลิแลคติกแอซิด (Polylactic acid, PLA) และพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (Polyvinyl alcohol, PVA) เป็นต้น

- พอลิคาโพรแลคโตน (Polycaprolactone, PCL)

เป็นพลาสติกที่ได้จากการสังเคราะห์น้ำมันดิบ นิยมนำมาผลิตเป็นบรรจุภัณฑ์ย่อยสลายได้ในธรรมชาติโดยผสมกับแป้ง เพื่อลดต้นทุนและเพิ่มความสามารถในการย่อยสลาย ข้อดีของ PCL คือมีจุดหลอมเหลวต่ำ ไม่มีพิษ และสามารถต้านทานน้ำหรือน้ำมันได้ดี

- พอลิแลคติกแอซิด (Polylactic acid, PLA)

เป็นพลาสติกที่ทำจากกระบวนการหมักพืชจำพวกแป้ง เช่น ข้าวโพด ในปัจจุบันกำลังได้รับความนิยมอย่างมาก เป็นอีกทางเลือกที่จะมาทดแทนพลาสติกที่ได้จากปิโตรเคมี PLA นี้สามารถย่อยสลายเป็นคาร์บอนไดออกไซด์ และน้ำ ในเวลา 3 เดือน ในสภาวะแวดล้อมตามธรรมชาติ ในทางอุตสาหกรรมสามารถย่อยสลายในความร้อน และสามารถเป็นอาหารของเชื้อจุลินทรีย์ที่ย่อยสลายในถังขยะ หรือหลุมขยะได้ ข้อดีของ PLA คือ มีลักษณะใส มีความแวววาวสูง ขึ้นอยู่กับสารเติมแต่ง สามารถดัดกลืนและรสชาติได้ดี มีความต้านทานต่อน้ำมัน และไขมันสูง ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และน้ำสามารถแพร่ผ่านได้ดี

- พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (Polyvinyl alcohol, PVA)

เป็นพลาสติกสังเคราะห์ที่มักใช้ในอุตสาหกรรมกาว อุตสาหกรรมสิ่งทอ อุตสาหกรรมกระดาษ และงานเคลือบผิวต่าง ๆ เนื่องจาก PVA นี้มีข้อดีที่มีความเหนียว ทนต่อการเกิดรอยขีด หรือฉีกขาด มีความสามารถต่อการต้านทานแรงดึงได้สูงใกล้เคียงกับพลาสติกทั่วไป

2.3 มันสำปะหลัง

มันสำปะหลังจัดเป็นพืชหัวชนิดหนึ่ง มีชื่อวิทยาศาสตร์ คือ *Manihot esculenta* (L.) Crantz จัดอยู่ในวงศ์ Euphorbiaceae มีชื่อสามัญ คือ Cassava, Tapioca ในประเทศไทยจะเรียกแตกต่างกันบ้างตามแต่ละท้องที่ เช่น ภาคเหนือเรียก ต้าวน้อย หรือต้าวบ้าน ภาคใต้เรียกมันตัน หรือมันเทศ เป็นต้น มันสำปะหลังมีถิ่นกำเนิดในแถบที่ลุ่มเขตร้อนแควอเมริกาใต้ เช่น ประเทศเปรู เม็กซิโก กัวเตมาลา ฮอนดูรัส และบราซิล โดยมีหลักฐานการปลูกมากกว่า 3,000 ถึง 7,000 ปีแล้ว ต่อมาได้ขยายไปสู่แหล่งอื่น ๆ ของโลกในยุคสมัยที่มีการล่าอาณานิคมในคริสต์ศตวรรษที่ 15 โดยพวกนักค้าทาสได้นำมันสำปะหลังจากประเทศบราซิลไปปลูกในทวีปแอฟริกา การนำมันสำปะหลังมาปลูกในทวีปเอเชียครั้งแรกที่ประเทศฟิลิปปินส์ในคริสต์ศตวรรษที่ 17 โดยชาวสเปนนำมาจากประเทศเม็กซิโก และในเวลาต่อมามีการปลูกที่ประเทศอินโดนีเซีย สำหรับในประเทศไทยนั้นไม่มีหลักฐานที่แน่นอนว่ามีการนำมันสำปะหลังมาปลูกเมื่อใด คาดกันว่าน่าจะเข้ามาในระยะเดียวกันกับการนำเข้าประเทศศรีลังกาและฟิลิปปินส์

ในตอนแรกประเทศไทยมีการปลูกมันสำปะหลังเพื่อใช้ทำแป้งและสาकुในภาคใต้ โดยปลูกระหว่างต้นยางพารามากกว่า 70 ปีแล้ว โดยเฉพาะที่จังหวัดสงขลามีอุตสาหกรรมทำแป้งและสาकुจำหน่ายออกต่างประเทศ แต่การปลูกมันสำปะหลังของภาคใต้เริ่มลดลงเรื่อย ๆ จากการขยายพื้นที่เพาะปลูกยางพารา ในเวลาต่อมาจึงได้มีการปลูกมันสำปะหลังในภาคตะวันออก คือ จังหวัดชลบุรี จังหวัดระยอง และจังหวัดใกล้เคียง และเมื่อความต้องการของตลาดในด้านผลิตภัณฑ์จาก

มันสำปะหลังเพื่อใช้ในการเลี้ยงสัตว์และอุตสาหกรรมมีเพิ่มมากขึ้นทำให้พื้นที่ในภาคตะวันออกเฉียงเหนือผลิตได้ไม่เพียงพอ จึงมีการขยายไปยังจังหวัดอื่น ๆ โดยเฉพาะภาคตะวันออกเฉียงเหนือ จนในปัจจุบันนี้ภาคตะวันออกเฉียงเหนือมีพื้นที่ในการเพาะปลูกมันสำปะหลังมากที่สุด โดยเฉพาะอย่างยิ่งในจังหวัดนครราชสีมา

มันสำปะหลังเป็นไม้พุ่มยืนต้นมีอายุอยู่ได้หลายปี การปลูกมันสำปะหลังจะใช้ส่วนของลำต้นตัดเป็นท่อนปักลงในดิน ตรงบริเวณรอยตัดที่ปักในดินนั้นจะแตกออกเป็นรากฝอย หลังจากปลูกได้ประมาณ 2 เดือน รากจะค่อย ๆ สะสมแป้ง และมีขนาดใหญ่ขึ้น เรียกว่าหัวมันสำปะหลัง และจะสามารถเก็บเกี่ยวหัวมันสำปะหลังหลังจาก 6 เดือนถึง 16 เดือน โดยส่วนตาที่อยู่ด้านข้างท่อนมันสำปะหลังจะเจริญเติบโตออกมาเป็นลำต้นต่อไป

มันสำปะหลังเป็นพืชอาหารสำคัญเป็นอันดับ 5 ของโลก รองจากข้าวสาลี ข้าวโพด ข้าว และมันฝรั่ง พื้นที่สำคัญอยู่บริเวณแถบร้อน โดยเฉพาะแอฟริกา ละตินอเมริกาและแคริบเบียน รวมทั้งบางส่วนของเอเชีย ปริมาณผลผลิตของมันสำปะหลังนอกจากใช้บริโภคแล้วยังสามารถทำเป็นอาหารสัตว์และแปรรูปเป็นสินค้าอื่น ๆ ได้ มันสำปะหลังเป็นสินค้าส่งออกสร้างรายได้แก่ประเทศเป็นจำนวนมาก โดยมันสำปะหลังที่ส่งออกนั้นมีหลายรูปแบบ เช่น มันเส้น มันอัดเม็ด และแป้งมันสำปะหลัง



รูปที่ 2.2 ต้นมันสำปะหลัง



รูปที่ 2.3 หัวมันสำปะหลัง

2.3.1 ชนิดของมันสำปะหลัง

สามารถแบ่งมันสำปะหลังตามปริมาณกรดไฮโดรไซยานิก (HCN) ในหัวได้ 2 ชนิด คือ

1. ชนิดหวาน (Sweet type)

เป็นมันสำปะหลังที่มีปริมาณกรดไฮโดรไซยานิกต่ำ ไม่มีรสขม ใช้เพื่อบริโภค สามารถใช้หัวสดทำอาหารได้โดยตรง เช่น นำไปนึ่ง เชื่อม ทอด มีทั้งชนิดเนื้อร่วนนุ่ม และชนิดเนื้อแน่นเหนียว ซึ่งได้แก่ พันธุ์ 5 นาที และพันธุ์ระยอง (มูลนิธิสถาบันพัฒนามันสำปะหลังแห่งประเทศไทย, 2543)

2. ชนิดขม (Bitter type)

เป็นมันสำปะหลังที่มีปริมาณกรดไฮโดรไซยานิกสูง เป็นพิษ มีรสขมและไม่เหมาะสำหรับการบริโภคของมนุษย์ หรือนำหัวมันสำปะหลังสดไปเลี้ยงสัตว์โดยตรง แต่จะใช้สำหรับอุตสาหกรรมแปรรูปต่าง ๆ เช่น แป้งมัน มันอัดเม็ด และแอลกอฮอล์ เนื่องจากมีปริมาณแป้งสูง มันสำปะหลังที่ปลูกในประเทศไทยส่วนใหญ่เป็นชนิดขมที่ใช้ในงานอุตสาหกรรม ได้แก่ พันธุ์ระยอง 1 พันธุ์ระยอง 3 พันธุ์ระยอง 5 พันธุ์ระยอง 60 พันธุ์ระยอง 90 และเกษตรศาสตร์ 50 เป็นต้น (มูลนิธิสถาบันพัฒนามันสำปะหลังแห่งประเทศไทย, 2543)

2.3.2 องค์ประกอบของลำต้นและหัวมันสำปะหลัง

จากตารางที่ 2.1 พบว่าองค์ประกอบส่วนใหญ่ของลำต้นมันสำปะหลังคือเซลลูโลส ซึ่งเป็นส่วนหลักของผนังเซลล์ที่สร้างความแข็งแรงแก่เส้นใย และมีโครงสร้างที่ทนทานต่อการย่อยสลายด้วยเอนไซม์และกรด และไม่สลายตัวเมื่ออยู่ในน้ำ สำหรับเฮมิเซลลูโลสเป็นส่วนที่เชื่อมโยงระหว่างลิกนินและเซลลูโลส ซึ่งลิกนินจะพบมากในส่วนของเนื้อเยื่อลำเลียง และจากตารางที่ 2.2 พบว่าองค์ประกอบส่วนใหญ่ในรากนั้นนอกจากน้ำแล้ว คือ แป้ง ซึ่งมีสูงถึง 70-80% จึงถือว่ามันสำปะหลังเป็นพืชที่เป็นแหล่งของคาร์โบไฮเดรตที่ให้พลังงานกับคนและสัตว์ได้อย่างดี โดยปกติหัวมันสำปะหลังที่ปริมาณแป้งสูง น้ำจะน้อย และความหนาแน่นของหัวจะมีสูง การตรวจสอบความหนาแน่นของหัวมันสำปะหลังที่นิยมทำ คือ การชั่งน้ำหนักหัวมันสำปะหลังในน้ำ ถ้าน้ำหนักหัวมันสำปะหลังในน้ำน้อยแสดงว่าหัวมันสำปะหลังมีปริมาณน้ำมาก มีแป้งในปริมาณที่น้อย ในทางกลับกันถ้าน้ำหนักหัวมันสำปะหลังในน้ำมาก แสดงว่าหัวมันสำปะหลังมีปริมาณน้ำน้อยและมีแป้งมาก (มูลนิธิสถาบันพัฒนามันสำปะหลังแห่งประเทศไทย, 2543)

กรดไฮโดรไซยานิกที่อยู่ในหัวมันสำปะหลังมีปริมาณที่แตกต่างกันตั้งแต่ 2.85-39.27 mg ต่อกิโลกรัมของหัวมันสำปะหลังตามแต่ชนิดของมันสำปะหลัง ซึ่งกรดไฮโดรไซยานิกนี้เป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิต จะมีอยู่ในหัวมันสำปะหลังสดที่เพิ่งเก็บมา และปริมาณกรดไฮโดรไซยานิกในหัวมันสำปะหลังจะเริ่มลดลงและแตกตัวหมดไปถ้าได้รับความร้อน ทั้งการตากแดด การเผา หรือการต้ม

ตารางที่ 2.1 องค์ประกอบทางเคมีของลำต้นมันสำปะหลัง

| องค์ประกอบ | ปริมาณ (% โดยน้ำหนัก) |
|-----------------|-----------------------|
| เซลลูโลส | 56.4 |
| เฮมิเซลลูโลส | 20.2 |
| ลิกนิน | 17.4 |
| สารประกอบอื่น ๆ | 6.0 |

ที่มา : Magesh et al. (2011)

ตารางที่ 2.2 ส่วนประกอบหลักในหัวมันสำปะหลัง

| องค์ประกอบในหัวมันสำปะหลัง | ปริมาณ (ต่อ 100 กรัมน้ำหนักหัวมัน) |
|------------------------------|--|
| น้ำ | 60.21-75.32 |
| เปลือก | 4.08-14.08 |
| เนื้อ (แป้ง) | 25.87-41.88 |
| กรดไฮโดรไซยานิก (PPM) | 2.85-39.27 |
| องค์ประกอบในเนื้อมันสำปะหลัง | ปริมาณ (ต่อ 100 กรัมน้ำหนักแห้งเนื้อมัน) |
| แป้ง | 71.9-85.0 |
| โปรตีน | 1.57-5.78 |
| เส้นใย | 1.77-3.95 |
| เถ้า | 1.20-2.80 |
| ไขมัน | 0.06-0.43 |
| คาร์โบไฮเดรตที่ไม่ใช่แป้ง | 3.59-8.66 |

ที่มา : มุลินธิสถาบันพัฒนามันสำปะหลังแห่งประเทศไทย (2543)

2.4 พอลิเมอร์ที่ได้จากธรรมชาติ

พอลิเมอร์ที่ได้จากธรรมชาติไม่ว่าจะเป็น พืช สัตว์ หรือจุลินทรีย์ เช่น แป้ง ยางธรรมชาติ เซลลูโลส ไคติน และวุ้น โดยมากอยู่ในจำพวกพอลิแซ็กคาไรด์และโปรตีน ซึ่งพอลิเมอร์ที่ได้จากธรรมชาติเหล่านี้จะชอบความชื้น

2.4.1 แป้ง (Starch)

แป้งเป็นพอลิเมอร์ที่ได้จากธรรมชาติ ย่อยสลายได้ง่าย มีลักษณะเป็นเม็ดเล็ก ๆ สีขาว ไม่มีรส ไม่มีกลิ่น และไม่ละลายในน้ำเย็นที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิเจลาติไนซ์ (Gelatinization temperature) แต่เมื่อละลายในน้ำที่อุณหภูมิเกินแล้ว แป้งจะกลายเป็นเด็กซ์ตริน (Dextrin) ซึ่งเป็นสารที่มีรสหวานเล็กน้อย และเหนียวแบบกาว แป้งเป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากวัตถุดิบทางการเกษตร เช่น ข้าวโพด ข้าวสาลี ข้าว มันฝรั่ง และมันสำปะหลัง แป้งที่ขายตามท้องตลาดทั่วไป เรียกว่า แป้งฟลาวัวร์ (Flour) เป็นแป้งที่ยังมีสิ่งเจือปนอยู่ เช่น โปรตีน ไขมัน และเกลือแร่ หากสกัดเอาสิ่งเจือปน โปรตีน ไขมัน และเกลือแร่อื่น ๆ ออก จนมีความบริสุทธิ์สูง จะเรียกว่า แป้งสตาร์ช (Starch) (อังสุมา บุญไชยสุริยา, 2554) ซึ่งในแป้งแต่ละชนิดมีส่วนประกอบที่แตกต่างกัน ทำให้มีคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีที่แตกต่างกันด้วย (พรทิพย์ ทูลจินดา, 2550)

สูตรโมเลกุลทั่วไปของแป้ง คือ $(C_6H_{10}O_5)_n$ ประกอบไปด้วยโมเลกุลของกลูโคส 2 ชนิด คือ อะไมโลส (Amylose) ที่เป็นพอลิเมอร์เชิงเส้น และอะไมโลเพคติน (Amylopectin) ที่เป็นพอลิเมอร์เชิงกิ่ง

1. สมบัติของแป้ง

แป้งแต่ละชนิดมีสมบัติที่แตกต่างกันออกไป ได้แก่ การพองตัว การละลาย ความหนืด การเกิดเจล และการคืนตัวของแป้ง เป็นต้น

- การพองตัว (Swelling) และการละลาย (Solubility)

แป้งดิบจะไม่สามารถละลายในน้ำที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิเจลาตินไนซ์ (Gelatinization temperature) ได้ เนื่องจากมีพันธะไฮโดรเจนซึ่งเกิดจากหมู่ไฮดรอกซิลของโมเลกุลแป้งที่อยู่ใกล้ ๆ กันเชื่อมอยู่ แต่เมื่ออุณหภูมิของสารผสมน้ำแป้งสูงกว่าช่วงอุณหภูมิเจลาตินไนซ์แล้ว พันธะไฮโดรเจนจะถูกทำลาย โมเลกุลของน้ำจะเข้ามาจับกับหมู่ไฮดรอกซิลที่เป็นอิสระ เม็ดแป้งเกิดการพองตัวทำให้ละลาย ความหนืดและความใสเพิ่มมากขึ้น ปัจจัยที่มีผลต่อการพองตัวและความสามารถในการละลาย คือ ชนิดของแป้ง ความแข็งแรง และลักษณะร่างแหภายในเม็ดแป้ง สิ่งเจือปนในเม็ดแป้งที่ไม่ใช่คาร์โบไฮเดรต สมบัติหลังตัดแปรทางเคมี ปริมาณน้ำที่มีอยู่ในสภาวะที่เกิดการพองตัว เป็นต้น (พรทิพย์ ทูลจินดา, 2550; อังศุมา บุญไชยสุริยา, 2554)

- ความหนืด (Viscosity)

ความหนืดเป็นสมบัติที่เฉพาะตัวที่สำคัญของแป้ง เกิดจากการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ ปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อความหนืดของแป้ง ได้แก่ ชนิดของแป้งและการตัดแปรทางกายภาพ (อังศุมา บุญไชยสุริยา, 2554)

- การเกิดเจลาติน (Gelatinization)

โมเลกุลของแป้งประกอบด้วยหมู่ไฮดรอกซิล (Hydroxyl groups) จำนวนมากยึดเกาะกันด้วยพันธะไฮโดรเจน มีคุณสมบัติชอบน้ำ (Hydrophilic) แต่เนื่องจากเม็ดแป้งอยู่ในรูปของร่างแห (Micelles) ดังนั้นการจัดเรียงตัวลักษณะนี้ทำให้เม็ดแป้งละลายในน้ำเย็นได้ยาก ในขณะที่แป้งอยู่ในน้ำเย็นเม็ดแป้งจะดูดซึมน้ำและพองตัวได้เล็กน้อย แต่เมื่อให้ความร้อนกับสารละลายแป้ง พันธะไฮโดรเจนจะคลายตัวลง เม็ดแป้งจะคูดน้ำแล้วพองตัว ส่วนผสมของน้ำแป้งมีความหนืดมากขึ้น เนื่องจากโมเลกุลของน้ำอิสระที่เหลืออยู่รอบ ๆ เม็ดแป้งเหลือน้อยลง เม็ดแป้งเคลื่อนไหวได้ยากขึ้น ทำให้เกิดความหนืด จนกลายเป็นเจล เรียกว่า การเกิดเจลาติน (Gelatinization) (ฉัตติฐพล ไขแสงศรี, 2552; อังศุมา บุญไชยสุริยา, 2554) อุณหภูมิที่สารละลายเริ่มเกิดความหนืด เรียกว่า อุณหภูมิเจลาตินไนซ์ แสดงในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 อุณหภูมิเจลลิตไนซ์ของแป้งชนิดต่าง ๆ

| ชนิดแป้ง | อุณหภูมิ (°C) |
|-------------------|---------------|
| มันฝรั่ง | 56-66 |
| มันสำปะหลัง | 58.5-70 |
| ข้าวโพด | 62-72 |
| ข้าวโพดข้าวเหนียว | 63-72 |
| ข้าวฟ่าง | 68.5-75 |
| ข้าวสาลี | 52-63 |
| ข้าวเจ้า | 61-77.5 |

ที่มา : อังศุมา บุญไชยสุริยา (2554)

- การคืนตัวของแป้ง (Retrogradation)

หลังจากที่เมล็ดแป้งได้รับความร้อนอย่างต่อเนื่องจนเกินอุณหภูมิเจลลิตไนซ์ ความร้อนจะทำให้เมล็ดแป้งนั้นพองตัว และแตกออก โมเลกุลของอะไมโลสขนาดเล็กระบายออกมาทำให้ความหนืดลดลง เมื่อหยุดให้ความร้อนและปล่อยให้เย็นตัวลง พันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลจะทำการจัดเรียงโมเลกุลที่อยู่ใกล้ ๆ กัน จนกลายเป็นร่างแหสามมิติ มีลักษณะเจลเหนียวคล้ายฟิล์มหรือฟลิก ซึ่งโครงสร้างใหม่ที่ได้สามารถอุ้มน้ำ และไม่ดูดน้ำเข้ามาอีก มีความหนืดมากขึ้น เรียกปรากฏการณ์เหล่านี้ว่า การคืนตัว หากลดอุณหภูมิให้ต่ำลงไปอีก โมเลกุลอิสระของน้ำภายในจะถูกบีบออกมานอกเจลเป็นโครงสร้างที่แน่นมากขึ้น ซึ่งปรากฏการณ์ทั้งสองนี้ เจลจะมีลักษณะขาวขุ่น และมีความหนืดมากขึ้น (อังศุมา บุญไชยสุริยา, 2554)

2.4.2 เส้นใย (Fiber)

เส้นใย หมายถึง วัสดุที่มีมิติตามความยาวมากกว่ามิติตามภาคตัดขวาง (Aspect ratio) ซึ่งเส้นใยในปัจจุบันนี้มีทั้งเส้นใยจากธรรมชาติ และเส้นใยที่สังเคราะห์ขึ้น (วีระศักดิ์ อุดมกิจเดชา, 2542)

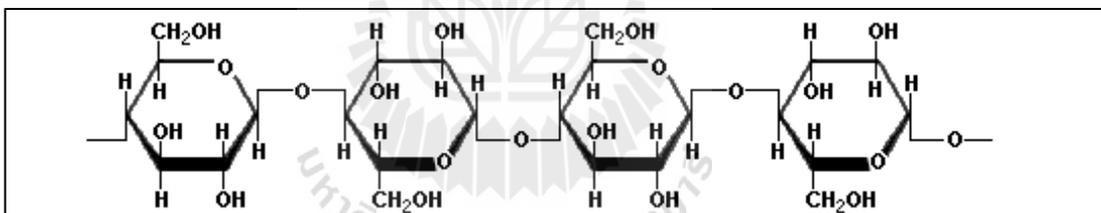
1. เส้นใยธรรมชาติ (Natural fiber)

เส้นใยธรรมชาตินั้นได้จากอินทรีย์วัตถุที่หาได้ง่ายตามธรรมชาติ ทั้งจากพืช สัตว์ รวมไปถึงสินแร่ต่าง ๆ เพราะมีปริมาณมาก สามารถเกิดขึ้นใหม่ได้เรื่อย ๆ และมีราคาถูกกว่าเส้นใยสังเคราะห์ มีการนำเส้นใยธรรมชาติจากพืชมาใช้ในการเสริมความแข็งแรงให้กับวัสดุผสมหรือวัสดุคอมโพสิต (Composite) อาทิเช่น เส้นใยปอ เส้นใยสับปะรด เส้นใยปาล์ม เส้นใยมะพร้าว

เป็นต้น (รังสิมา ชลกุล, 2554) องค์ประกอบทางเคมีของเส้นใยนั้นมี 4 ชนิด คือ เซลลูโลส (Cellulose) เฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose) ลิกนิน (Lignin) และสารประกอบอื่น ๆ (Extractive) องค์ประกอบเหล่านี้จะปะปนอยู่ในเยื่อบาง ๆ ของไม้ โดยมีปริมาณเซลลูโลสเป็นองค์ประกอบประมาณ 40% เฮมิเซลลูโลสประมาณ 30-35% มีลิกนินประมาณ 25-30% และสารประกอบอื่น ๆ ประมาณ 5% (ณัฏฐพล ไช้แสงศรี, 2552)

- เซลลูโลส (Cellulose)

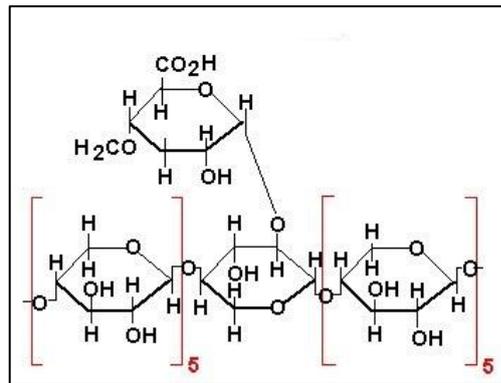
เส้นใยธรรมชาติจากพืชทุกชนิดจัดเป็นเส้นใยประเภทเซลลูโลสที่มีโครงสร้างประกอบด้วยหน่วยขั้นพื้นฐานเรียกว่า Anhydro-d-glucose ($C_6H_{10}O_5$) ต่อกันเป็นลูกโซ่โมเลกุลยาว ดังแสดงในรูปที่ 2.4 แต่ละหน่วยของกลูโคสประกอบด้วยหมู่ไฮดรอกซิลทั้งหมด 3 หมู่ด้วยกัน ซึ่งเหมือนกับโครงสร้างของน้ำตาลทั่วไป แต่เนื่องจากโมเลกุลต่อกันยาวเป็นลูกโซ่ทำให้ไม่ละลายน้ำเหมือนกับน้ำตาล หมู่ไฮดรอกซิล (-OH) จะเป็นตัวดึงดูดน้ำทำให้มีความสามารถในการดูดซึมความชื้นได้ดี อีกทั้งเป็นจุดที่ก่อให้เกิดปฏิกิริยากับกรดแอซิดิกได้เป็นเซลลูโลสแอซิดหรือเส้นใยประดิษฐ์แอซิดตนเอง ซึ่งลักษณะการเรียงตัวเป็นลูกโซ่โมเลกุลยาวทำให้มีความแข็งแรงสูงตามไปด้วย (วิระศักดิ์ อุดมกิจเดชา, 2542)



รูปที่ 2.4 โครงสร้างทางเคมีของเซลลูโลส (Campbell et al., 2009)

- เฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose)

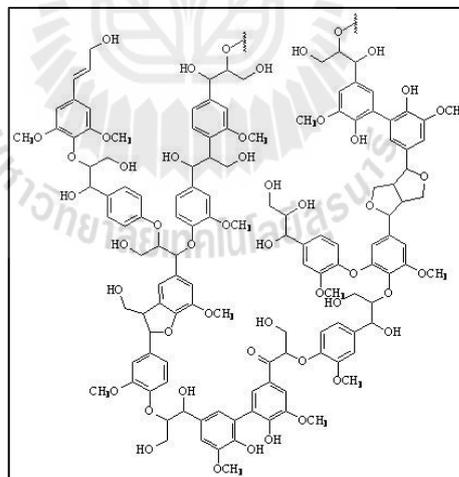
เฮมิเซลลูโลสเป็นสารประกอบพอลิแซคคาไรด์คล้ายกับเซลลูโลส มีสูตรทางเคมี คือ $(C_6H_{10}O_5)_n$ มีโครงสร้างเป็นกิ่ง ดังแสดงในรูปที่ 2.5 เฮมิเซลลูโลสพบในเนื้อเยื่อของพืชโดยรวมอยู่กับสารประกอบอื่น ๆ เช่น ลิกนินและเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลสจะมีโครงสร้างเป็นแบบอสัณฐานซึ่งมีความแข็งแรงน้อย ถูกไฮโดรไลซิสได้ง่ายในกรดเจือจาง ปริมาณเฮมิเซลลูโลสในเนื้อไม้อ่อนและเนื้อไม้แข็งจะไม่เท่ากัน ซึ่งเฮมิเซลลูโลสที่เป็นองค์ประกอบในไม้เนื้อแข็งมีประมาณ 30-35% ส่วนในไม้เนื้ออ่อนจะมีประมาณ 25-30% (ณัฏฐพล ไช้แสงศรี, 2552; อังศุมา บุญไชยสุริยา, 2554)



รูปที่ 2.5 โครงสร้างทางเคมีของเฮมิเซลลูโลส (Campbell et al., 2009)

- ลิกนิน (Lignin)

ลิกนินสารประเภทอะโรมาติก (Aromatic) มีกลุ่มฟังก์ชันต่าง ๆ รวมอยู่ด้วย ดังแสดงในรูปที่ 2.6 ลิกนินเป็นองค์ประกอบในไม้เนื้อแข็งมีประมาณ 17-25% ส่วนในไม้เนื้ออ่อนมีประมาณ 24-32% ทำหน้าที่เป็นตัวยึดเกาะระหว่างผนังเซลล์ให้รวมกันเป็น โครงสร้างของเนื้อไม้



รูปที่ 2.6 โครงสร้างทางเคมีของลิกนิน (Campbell et al., 2009)

2.4.3 สารยึดเกาะ (Binder)

สารยึดเกาะ คือ วัสดุหรือสารใด ๆ ที่อาจจะเป็นของเหลว หรือของผสมกึ่งเหลวที่ใช้ในการประสานวัสดุให้ติดกัน ซึ่งอาจจะยึดติดกันด้วยแรงยึดเหนี่ยวทางกลหรือทางเคมีก็ได้ โดยสารยึดเกาะมีทั้งที่เป็นผลผลิตจากธรรมชาติ และผลิตจากกระบวนการทางเคมี ตัวอย่างสารยึดเกาะที่สังเคราะห์ขึ้นด้วยกระบวนการทางเคมี เช่น อีพอกซี (Epoxy) พอลิยูรีเทน (Polyurethane) เป็นต้น และตัวอย่างสารยึดเกาะที่ได้จากธรรมชาติ เช่น กาวจากน้ำยางพารา และสารยึดเกาะจากน้ำแป้ง หรือในบางครั้งอาจจะเรียกว่า กาวแป้ง เป็นต้น

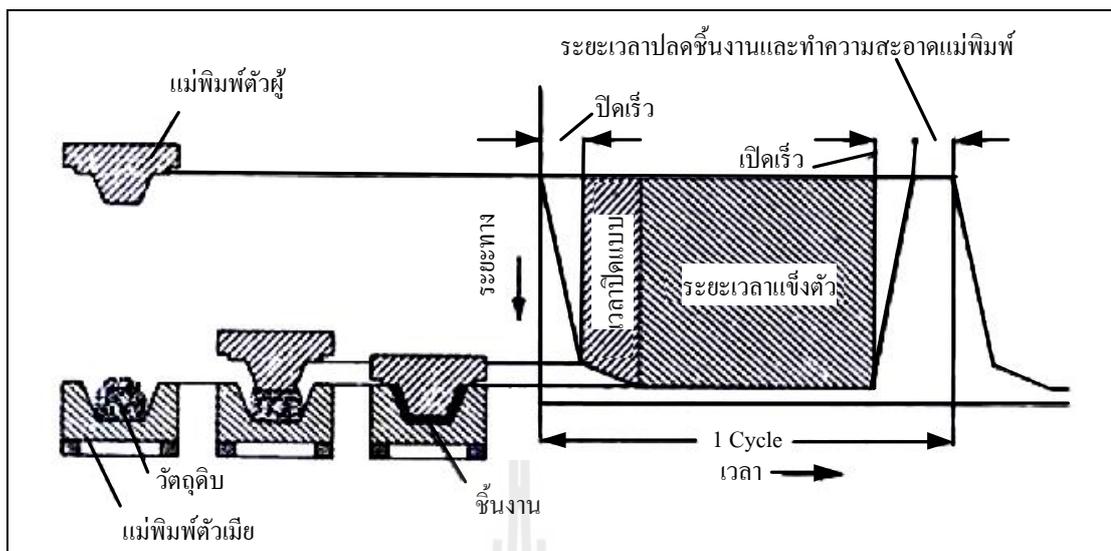
2.5 กระบวนการขึ้นรูป

ในกระบวนการผลิตภาชนะบรรจุย่อยสลายได้ทางชีวภาพจากพอลิเมอร์ทางธรรมชาตินั้นมีวิธีการขึ้นรูปที่คล้ายกับการผลิตภาชนะบรรจุพลาสติกจากปิโตรเคมี (Glenn et al., 1997) สามารถทำได้หลายวิธีด้วยกัน อาทิเช่น การอัดขึ้นรูป (Compression molding) การฉีดขึ้นรูป (Injection molding) การอัดรีด (Extrusion) การอบในแม่แบบที่ให้ความร้อน (Baking in hot mold) เป็นต้น

2.5.1 การอัดขึ้นรูป (Compression molding)

เป็นวิธีการผลิตที่ง่ายและไม่ซับซ้อนที่สุด ผลิตได้ไม่เร็วนัก ทำได้โดยเติมวัตถุดิบลงในแม่พิมพ์เปิด แล้วใช้ความดันอัดแม่พิมพ์พร้อมทั้งให้ความร้อนที่เหมาะสม ให้วัตถุดิบกระจายแทนที่ช่องว่างจนเต็มแม่พิมพ์จนได้ตามรูปทรงที่ต้องการ ซึ่งปริมาณของวัตถุดิบที่ใช้ในการอัดแต่ละครั้ง ควรจะต้องมีปริมาณที่พอดี จึงจะได้ชิ้นงานที่มีคุณภาพ และคุณสมบัติที่ดี ไม่ต้องแก้ไขเพิ่มเติม ถ้าใช้ปริมาณวัตถุดิบน้อยเกินไปชิ้นงานที่ได้จะไม่เต็มแบบ มีส่วนที่เปราะอยู่ หากใช้ปริมาณวัตถุดิบมากเกินไปชิ้นงานที่ได้จะมีครีบ (Flash) ส่วนที่เหลื่อมมากต้องทำการตัดแต่งเพิ่มเติมอีก วิธีการกะเกณฑ์วัตถุดิบมีอยู่ 2 วิธี คือ การกะเกณฑ์โดยปริมาตร ซึ่งจะวัดด้วยกระบอกลง และการกะเกณฑ์โดยน้ำหนัก

การอัดขึ้นรูปภาชนะบรรจุนั้นต้องอัดในพิมพ์ภายใต้ความดันและอุณหภูมิที่เหมาะสม ในรูปที่ 2.7 แสดงขั้นตอนการทำงานการอัดจนครบรอบการทำงาน เริ่มจากตอนแรกแม่พิมพ์ตัวผู้ (Core) และแม่พิมพ์ตัวเมีย (Cavity) อยู่ห่างกันมากที่สุดเพื่อง่ายต่อการใส่วัตถุดิบ และเป็นระยะเดียวกันกับตอนเอาชิ้นงานออก



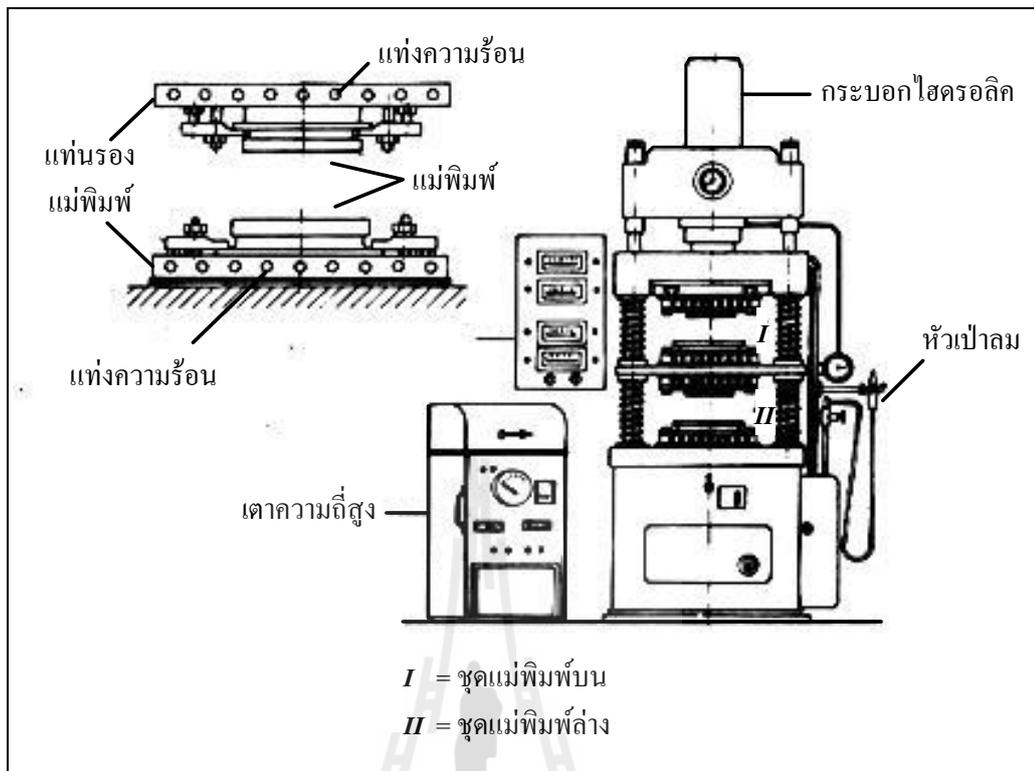
รูปที่ 2.7 แสดงขั้นตอนการอัดจนครบรอบการทำงาน (บรรเลง ศรีนิล, 2547)

การเคลื่อนที่ของแม่พิมพ์ตัวผู้จะเร็วในช่วงแรก และจะเริ่มช้าลงเมื่อแม่พิมพ์ปิด และเริ่มอัดวัสดุคืบไปตามช่องว่างเพื่อให้วัสดุคืบได้รับความร้อนอย่างทั่วถึง เมื่อแม่พิมพ์ตัวผู้มาถึงตำแหน่งต่ำสุด จะเป็นเวลาที่วัสดุคืบนั้นเริ่มแข็งตัวกลายเป็นรูปทรงตามที่ต้องการ ระยะการแข็งตัวนั้นควรจะมีช่วงเวลาที่เหมาะสมเพื่อให้ได้ชิ้นงานที่สมบูรณ์ที่สุด ในช่วงสุดท้ายจะเปิดแม่พิมพ์ออกเพื่อปลดชิ้นงาน โดยที่ควรจะมีเวลาที่ไม่ไม่นานนักเพื่อลดระยะเวลาต่อรอบการทำงานสามารถทำงานรอบต่อไปได้เร็วขึ้น

การอัดขึ้นรูปนั้นจะเกิดก๊าซหรือไอน้ำหลงเหลืออยู่ อาจจะทำให้เกิดการฟุ้งตัวของก๊าซจนชิ้นงานเกิดรอยปูดพองได้ ในแม่พิมพ์นั้นควรจะมีรูระบายอากาศ หรือในการอัดแต่ละครั้ง อาจจะต้องมีจังหวะยกแม่พิมพ์เพื่อระบายก๊าซดังกล่าวออกมา เมื่อระบายออกแล้วจึงค่อยอัดต่อไปจนเสร็จกระบวนการ

1. ลักษณะของแท่นอัด

แท่นอัดในปัจจุบันมีอยู่มากมายหลายแบบ มีทั้งอัดด้วยแม่แรงธรรมดา ไปจนถึงระบบอัดโนมัติซึ่งทำงานด้วยระบบไฮดรอลิกส่งกำลัง จากรูปที่ 2.8 เป็นแท่นอัดอัดโนมัติสำหรับอัดขึ้นรูปชิ้นงานทรงแบนที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางค่อนข้างใหญ่ เช่น จาน ชาม หรือที่เขี่ยบุหรี่ เป็นต้น ให้ความร้อนด้วยแท่งความร้อน (Heater) ที่ถูกสอดไว้ภายในแม่พิมพ์ตัวผู้และแม่พิมพ์ตัวเมีย แท่นอัดนี้มีปั๊มไฮดรอลิกในตัว มีเครื่องมือวัดและควบคุมอุณหภูมิของแม่พิมพ์ และมีหัวเป่าลมอัดสำหรับทำความสะอาดหัวพิมพ์อีกด้วย



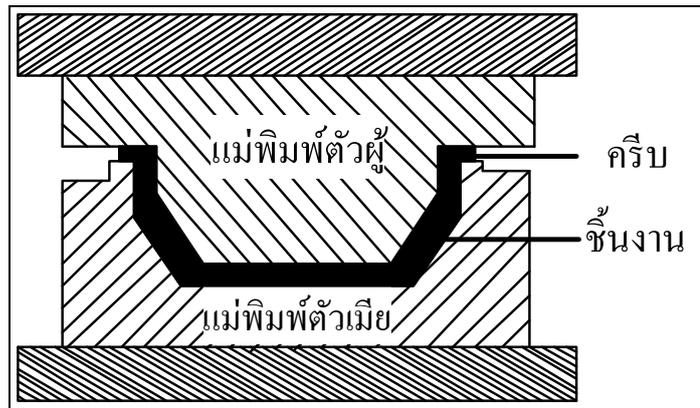
รูปที่ 2.8 เครื่องอัดอัตโนมัติที่ใช้ในการอัดขึ้นงานทรงแบน (บรรเลง ศรีนิล, 2547)

2. แม่พิมพ์

แม่พิมพ์ที่ใช้ในงานอัดมีมากมายหลายลักษณะ สามารถแบ่งตามลักษณะของโครงสร้างได้ดังนี้

- แม่พิมพ์อัดแบบมีครีบ (Flash mold)

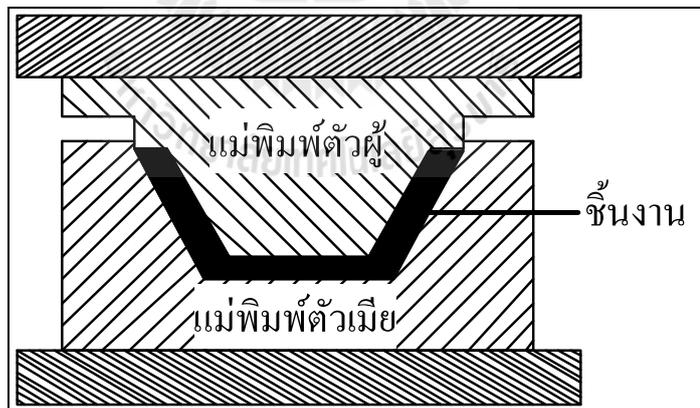
เป็นแม่พิมพ์สำหรับอัดขึ้นงานทรงแบน ซึ่งเป็นแบบที่ง่ายและมีความยุ่งยากน้อยที่สุด นิยมใช้ในการอัดขึ้นรูปภาชนะแบน เช่น จาน ชามต่าง ๆ วัสดุที่เปราะจะไหลออกได้เมื่อกดแม่พิมพ์ตัวผู้ลงมา ไม่ต้องใช้แรงในการอัดมาก แต่ข้อเสียของแม่พิมพ์นี้คือ มีครีบมากต้องตัดแต่งเพิ่มเติมอีก ชิ้นงานที่ได้เนื้อไม่แน่น ขนาดความหนาไม่ค่อยคงที่ และมีความแข็งแรงน้อยกว่าแบบอื่น ๆ เพราะฉะนั้นงานที่จะขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์ชนิดนี้ควรมีลักษณะที่บางและตื้น ดังแสดงในรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 แม่พิมพ์อัดชิ้นงานแบบมีค้ำ (พิชิต เลี่ยมพิพัฒน์, 2536)

- แม่พิมพ์อัดชิ้นงานแบบปิดหมด (Fully positive mold)

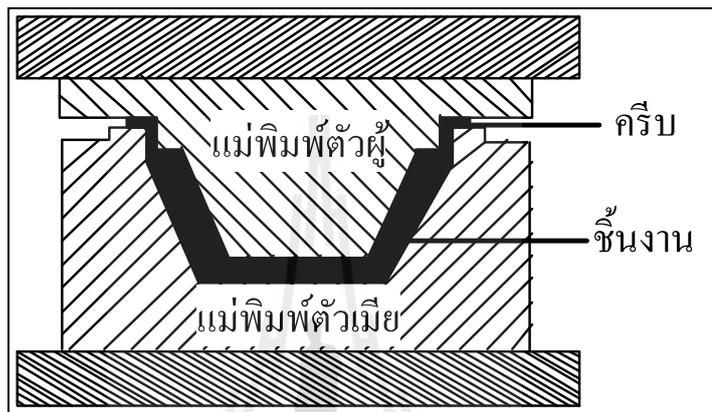
เป็นแม่พิมพ์อัดที่ได้รับความนิยมมาก วัสดุที่เติมในแม่พิมพ์จะถูกขังอยู่ภายในไม่สามารถเล็ดลอดออกมาได้จากการปิดช่องทางของแม่พิมพ์อย่างสนิท สามารถอัดได้ด้วย ความดันสูงทำให้ชิ้นงานที่ได้ แน่นและแข็งแรงมากขึ้น แต่ข้อเสียของแม่พิมพ์นี้ คือ หากใส่ วัสดุดิบในปริมาณที่มากเกินไปแรงอัดจะทำให้แม่พิมพ์แตกร้าวได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 แม่พิมพ์อัดชิ้นงานแบบปิดหมด (พิชิต เลี่ยมพิพัฒน์, 2536)

- แม่พิมพ์อัดขึ้นงานแบบกึ่งเปิด (Semi-positive mold)

เป็นแม่พิมพ์ที่ผสมผสานระหว่างแม่พิมพ์อัดแบบมีครีบกับแบบปิดหมด เหมาะสำหรับขึ้นงานทั่วไป ชิ้นงานที่ได้มีความแข็งแรงพอสมควร ในช่วงแรกที่แม่พิมพ์ตัวผู้เริ่มอัด วัสดุชิ้นส่วนเกินจะสามารถเล็ดลอดออกมาได้ แต่พอถึงระยะหนึ่งบ่าของแม่พิมพ์ตัวผู้จะปิดไม่ให้ วัสดุชิ้นส่วนเกินสามารถเล็ดลอดออกมาแล้วอัดแน่น ดังแสดงในรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 แม่พิมพ์อัดขึ้นงานแบบกึ่งเปิด (พิชิต เลี่ยมพิพัฒน์, 2536)

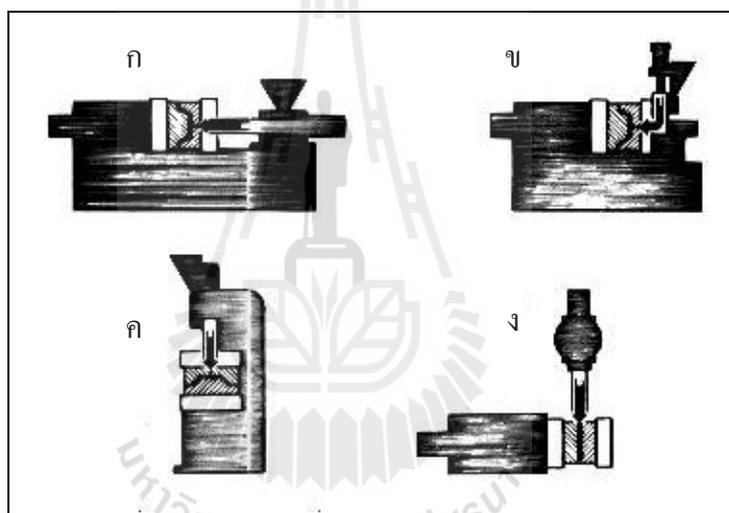
3. ความดันและอุณหภูมิในการอัด

ในการอัดขึ้นรูปภาชนะบรรจุนั้นจะต้องใช้ความดันและอุณหภูมิที่เหมาะสมกับ วัสดุและรูปทรงนั้น ๆ โดยความดันในการอัดจะขึ้นกับความหนาและรูปทรงของชิ้นงาน ตลอดจนความเรียบของแม่พิมพ์อีกด้วย หากชิ้นงานที่มีความหนามากขึ้นจะต้องใช้ความดัน ในการอัดมากขึ้น และการเปลี่ยนแปลงรูปทรงนั้นส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงความดัน กล่าวคือหาก รูปทรงของภาชนะบรรจุนั้นมีเหลี่ยมหรือมุม จะทำให้วัสดุไหลเข้าไปแทนที่ในช่องว่างยากขึ้น ต้องใช้ความดันในการอัดสูงขึ้น ดังนั้นในการออกแบบควรจะให้มุมที่โค้งมนช่วยให้วัสดุเติมเต็มช่องว่างได้ง่ายขึ้น นอกจากนี้ความเรียบผิวของแม่พิมพ์ก็มีผลต่อความดันในการอัด หากผิว ของแม่พิมพ์มีความขรุขระก็จะต้องใช้ความดันที่สูงขึ้น

อุณหภูมิที่ใช้ในการอัดขึ้นรูปเป็นอีกปัจจัยที่สำคัญในกระบวนการ หากใช้ อุณหภูมิที่สูงเกินไปอาจทำให้ภาชนะบรรจุใหม่หรือเสียรูปได้ หากใช้อุณหภูมิต่ำเกินไปอาจทำให้ ชิ้นงานมีความหนาที่ไม่สม่ำเสมอได้ ดังนั้นความดันและอุณหภูมิที่เหมาะสมนั้นเป็นสิ่งจำเป็น ในกระบวนการอัดขึ้นรูปเช่นกัน ควรจะต้องศึกษาให้เหมาะสมตามแต่ละสูตรในการผลิต

2.5.2 การฉีดขึ้นรูป (Injection molding)

ในการฉีดขึ้นรูปนั้น มีบริษัทผลิตเครื่องฉีดออกมาหลายรูปแบบ ขนาดของเครื่องฉีดจะแยกตามขนาดของชุดเปิด-ปิดแม่พิมพ์ (Clamping unit) และขนาดประสิทธิภาพของการฉีดแรงกระทำในการปิดแม่พิมพ์เอาไว้ ในการฉีดวัสดุที่แข็งจะวัดในหน่วยตัน มีอยู่หลายขนาด ตั้งแต่แรงขนาด 5 ตัน เป็นเครื่องขนาดเล็กสามารถวางตั้งโต๊ะได้ ไปจนถึงแรงขนาด 10,000 ตัน ที่ใช้ในโรงงานขนาดใหญ่ ส่วนประสิทธิภาพในการฉีดเข้าแม่พิมพ์ที่ปิดไว้ จะใช้แรงที่ค่อนข้างสูงมาก อยู่ระหว่าง 500 ถึง 3,000 psi โดยหลักการแล้วเครื่องฉีดขึ้นรูปทั้งหลายนั้นจะแตกต่างกันเฉพาะ ภาพแบบ วัสดุที่ใช้ และระบบส่งกำลัง ส่วนหลักการในการนำมาใช้จะคล้ายคลึงกันมาก เครื่องฉีดพลาสติกสามารถแบ่งตามลักษณะทิศทางการฉีดตามรูปที่ 2.12



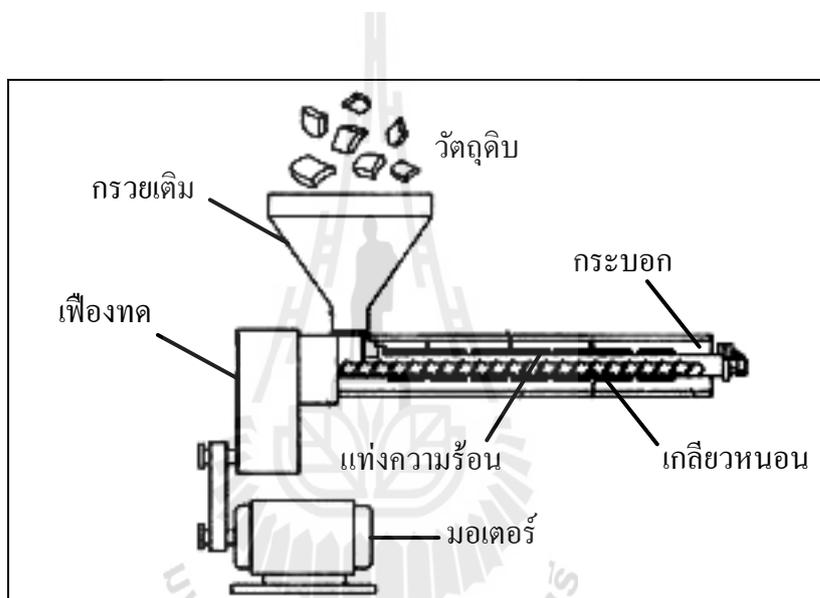
รูปที่ 2.12 ลักษณะของเครื่องฉีดแบ่งตามทิศทางการฉีด (บรรณเลข ศรนิล, 2547)

แบบที่นิยมใช้กันมากที่สุด คือ แบบ 2.12(ก) เป็นแบบทำงานตามแนวนอน โดยชุดฉีดและหน่วยเปิด-ปิดแบบอยู่ในทิศทางเดียวกัน วัสดุฉีดจะไหลเข้าเป็นเส้นตรงตามแนวนอนตั้งจากกับระนาบของแม่แบบ สำหรับแบบ 2.12(ข) จะมีหัวฉีดอยู่ในแนวตั้ง แต่วัสดุฉีดจะไหลเข้าแบบในแนวนอน โดยวัสดุฉีดที่ออกจากกระบอกสูบในแนวตั้งจะเปลี่ยนทิศทาง 90° ไปในแนวนอน เช่นเดียวกับแบบที่ 2.12(ก) ซึ่งเป็นการออกแบบพิเศษสำหรับกรณีที่อยู่ในสภาพการทำงานที่ไม่สะดวก หรือมีพื้นที่จำกัด สำหรับแบบ 2.12(ค) แบบทำงานในแนวตั้ง โดยวัสดุฉีดจะถูกฉีดลงในแนวตั้งเข้าไปในแม่แบบในแนวตั้งจากกับระนาบเปิด-ปิดแบบ ส่วนแบบสุดท้าย คือ แบบ 2.12(ง) ซึ่งเป็นแบบหัวฉีดอยู่ในแนวตั้ง วัสดุฉีดจะไหลเข้าแบบในแนวตั้งจากกับทิศทางเปิด-ปิดแบบ หรือ

อยู่ในแนวเดียวกับระนาบของแม่แบบ โดยปกติจะออกแบบไว้สำหรับการฉีดขึ้นรูปชิ้นที่เป็นโลหะ เช่น ด้ามมีด ด้ามไขควง เป็นต้น

2.5.3 การอัดรีด (Extrusion process)

เป็นการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ที่ยาวต่อเนื่อง จากวัตถุดิบที่เป็นผง เม็ด น้ำ หรือเส้นใย โดยการอัดรีดผ่านหัวพิมพ์ (Die head) ที่มีการผสมวัตถุดิบต่าง ๆ ด้วยเกลียวหนอน (Screw) ที่อยู่ในเรือนกระบอกรอบ (Barrel) สามารถเติมส่วนผสมได้ผ่านกรวยเติม (Hopper) โดยที่เครื่องอัดรีดนั้นมีตั้งแต่เกลียวหนอนเดี่ยวไปจนถึงเกลียวหนอนหลายตัวบรรจุอยู่ในกระบอกรอบเดียวกันอีกด้วย



รูปที่ 2.13 เครื่องอัดรีด (Extruder) (พิชิต เลี่ยมพิพัฒน์, 2536)

2.5.4 การอบในแม่แบบที่ให้ความร้อน (Baking in hot mold)

การขึ้นรูปด้วยวิธีนี้คล้ายกับวิธีการอบขนมปัง ซึ่งวัตถุดิบที่ใช้ขึ้นรูปจะมีลักษณะคล้ายกับแป้งเปียก ซึ่งมีความชื้นในปริมาณที่สูง เมื่อวัตถุดิบนั้นโดนความร้อนแล้ว จะเกิดไอน้ำขึ้น ซึ่งไอน้ำนั้นจะทำหน้าที่เป็นสารที่ทำให้พองตัว (Blowing agent) ที่เป็นตัวก่อให้เกิดลักษณะของโฟม การขึ้นรูปขึ้นงานด้วยวิธีนี้จะไม่ทำให้แรงดันในขณะทำแห้งวัสดุ

2.6 การทดสอบสมบัติของภาชนะบรรจุ

2.6.1 สมบัติทางกายภาพและการทดสอบ

1. สมบัติทางกายภาพ (Physical properties)

สมบัติทางกายภาพ หมายถึง สมบัติของชิ้นทดสอบที่สามารถสังเกตได้จากลักษณะภายนอก หรือจากการตรวจสอบด้วยเครื่องมือวัดที่ไม่เกี่ยวข้องกับการเกิดปฏิกิริยาเคมี เช่น ขนาด รูปร่าง พื้นที่ผิว สี ความหนาแน่น ความพรุน การดูดซึมน้ำ เป็นต้น

2. การทดสอบสมบัติทางกายภาพ

• การวัดความหนา (Thickness)

ความหนา คือ ระยะตั้งฉากระหว่างผิวหน้าทั้งสองของชิ้นทดสอบ โดยทั่วไปจะวัดออกมาในหน่วยมิลลิเมตร (mm) สามารถตรวจสอบได้โดยเวอร์เนียคาลิเปอร์ ซึ่งความหนาจะมีความสัมพันธ์กับสมบัติอื่น ๆ เช่น ความหนาแน่น การต้านทานแรงดึง การต้านทานแรงดัดโค้ง การต้านแรงกระแทก เป็นต้น (ฉัตริฐพล ไช้แสงศรี, 2552)

• การวัดความหนาแน่น (Density)

ความหนาแน่นของสารเป็นสมบัติเฉพาะของสารแต่ละชนิดและเป็นปริมาณที่บ่งบอกค่ามวลสารต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร สามารถวัดออกมาในหน่วยกรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร (g/cm^3) โดยวัตถุที่มีความหนาแน่นมากขึ้น หมายถึง วัตถุที่มีมวลต่อปริมาตรมากขึ้น กล่าวคือ วัตถุที่มีความหนาแน่นสูงจะมีปริมาตรน้อยกว่าวัตถุที่มีความหนาแน่นต่ำกว่าเมื่อมีมวลที่เท่ากัน สำหรับวัตถุที่เป็นเนื้อเดียวกันความหนาแน่นจะเท่ากับมวลรวมของวัตถุหารด้วยปริมาตรรวมของวัตถุนั้น ซึ่งปกติแล้วมวลรวมสามารถตรวจสอบได้จากตาชั่งได้โดยตรง และปริมาตรอาจจะตรวจสอบได้จากการวัดขนาดโดยตรง หรือการนำวัตถุไปแทนที่ในของไหล เช่น น้ำ เพื่อดูปริมาตรก็ได้เช่นกัน สำหรับความหนาแน่นของโฟมพอลิสไตรีน (Expanded polystyrene, EPS) จะมีค่าประมาณ $0.05\text{-}0.09 \text{ g/cm}^3$ (ฉัตริฐพล ไช้แสงศรี, 2552) ค่าความหนาแน่นคำนวณได้ตามสมการที่ 2.1

$$\text{Density} = \frac{\text{Mass}}{\text{Volume}} \quad (2.1)$$

เมื่อ Density = ความหนาแน่นของชิ้นทดสอบ (g/cm^3)
 Mass = น้ำหนักของชิ้นทดสอบ (g)
 Volume = ปริมาตรของชิ้นทดสอบ (cm^3)

- การทดสอบการดูดซึมน้ำ (Water absorption test)

การดูดซึม หมายถึง ปรากฏการณ์หรือกระบวนการที่พลังงานหรือมวลปริมาณหนึ่ง ๆ เข้าแทรกหรือละลายเข้าไปอยู่ภายในปริมาตรของพลังงานหรือมวลในอีกปริมาณหนึ่ง โดยสสารที่ถูกดูดซึมไป จะเรียกว่า สารถูกดูดซึม (Absorbate) ส่วนสสารที่ทำหน้าที่เป็นตัวดูดซึมจะเรียกว่า สารดูดซึม (Absorbent) เช่น การดูดซึมน้ำของกระดาษชำระ การละลายคลอรีนในน้ำ เป็นต้น สำหรับภาชนะที่ผลิตจากแป้งเป็นหลัก (Bio-based materials) จะมีข้อด้อยที่สำคัญ คือ สามารถดูดซึมน้ำจากสิ่งแวดล้อมได้เป็นจำนวนมาก ซึ่งจะส่งผลให้สมบัติทางกลตกลง จึงจำเป็นต้องศึกษาการดูดซึมน้ำของวัสดุและพัฒนาต่อไป โดยค่าปริมาณการดูดซึมน้ำสามารถคำนวณได้จากมวลของน้ำที่ขึ้นทดสอบดูดซึมไว้หารด้วยน้ำหนักของชิ้นทดสอบก่อนแช่น้ำ ตามมาตรฐาน ISO 535 (1991) สำหรับค่าการดูดซึมน้ำของโพลีเอทิลีนจะมีค่าประมาณ 0.03-0.10% ค่าปริมาณการดูดซึมน้ำคำนวณได้ตามสมการที่ 2.2

$$\text{Water absorption} = \frac{W_1 - W_0}{W_0} \quad (2.2)$$

เมื่อ Water absorption = ค่าการดูดซึมน้ำ (g H₂O/g)
 W_0 = น้ำหนักชิ้นทดสอบก่อนแช่น้ำ (g)
 W_1 = น้ำหนักชิ้นทดสอบหลังแช่น้ำ (g)

- การศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยา (Morphology studies)

ลักษณะทางสัณฐานวิทยาเป็นการศึกษาถึงรูปแบบ โครงสร้างของชิ้นทดสอบ ซึ่งอาจนำไปสู่การทำนายสมบัติทางกลของชิ้นทดสอบ โดยทั่วไปจะศึกษาลักษณะของพื้นผิวของชิ้นทดสอบ และ โครงสร้างภายในของชิ้นทดสอบ การสังเกตโครงสร้างภายในของชิ้นทดสอบอาจพิจารณาจากบริเวณรอยแตกหัก (Fracture surface) ของชิ้นทดสอบจากการทดสอบแรงดึง หรือแรงกระแทก เพื่อนำไปสู่การวิเคราะห์สมบัติทางกล เช่น หากรอยแตกหักของชิ้นทดสอบมีลักษณะที่ค่อนข้างราบเรียบ เนื่องจากเป็นการแตกหักอย่างฉับพลัน สามารถอธิบายได้ว่าชิ้นทดสอบนั้นมีการแตกหักแบบเปราะ (Brittle) และหากรอยแตกหักของชิ้นทดสอบมีลักษณะที่ค่อนข้างขรุขระ เนื่องจากมีแรงยึดเหนี่ยวกันภายในเนื้อวัสดุที่ต้านการแตกหัก สามารถอธิบายได้ว่าชิ้นทดสอบนั้นมีการแตกหักแบบเหนียว (Ductile) ทั้งนี้การพิจารณาโครงสร้างภายใน

อาจบ่งชี้ถึงความเข้ากันได้ (Compatibility) ภายในเนื้อวัสดุผสม รวมไปถึงสามารถบ่งบอกถึงลักษณะโครงสร้างของเซลล์ และรูปแบบการจัดเรียงตัวของเส้นใยภายในเมทริกซ์ (Matrix) อีกด้วย

2.6.2 สมบัติทางความร้อนและการทดสอบ

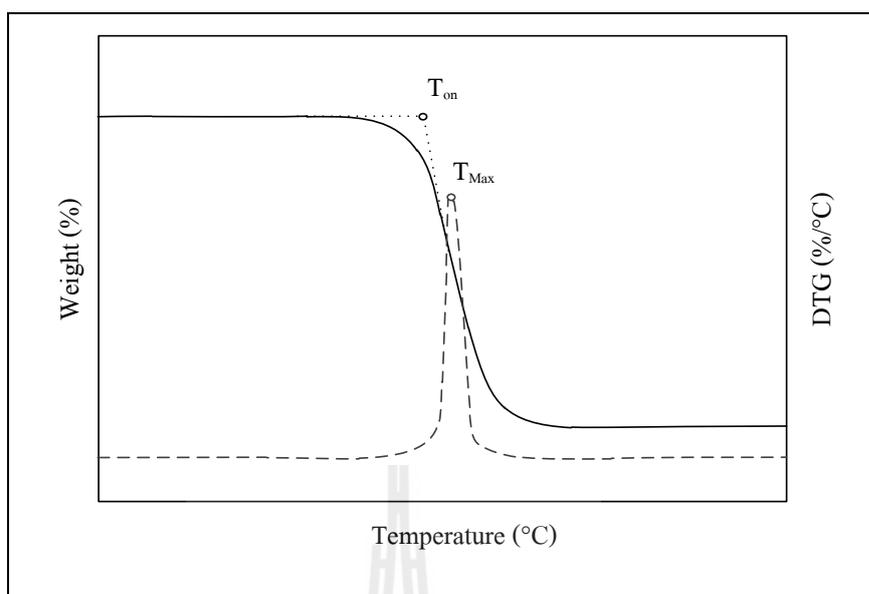
1. สมบัติทางความร้อน (Thermal properties)

เมื่อให้ความร้อนในปริมาณหนึ่งกับสารตัวอย่าง สารนั้นอาจเกิดการเปลี่ยนแปลงทั้งทางกายภาพหรือทางเคมี เนื่องจากการดูดหรือคายพลังงานในรูปของความร้อน เช่น เกิดการเปลี่ยนสถานะ เกิดการสลายตัว เกิดการเปลี่ยนสมบัติทางกล เป็นต้น ดังนั้นในการศึกษาสมบัติทางความร้อนจึงมีความสำคัญต่อการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงสมบัติของสารตัวอย่างที่อุณหภูมิต่าง ๆ

2. การทดสอบสมบัติทางความร้อนวิธีเทอร์โมกราวิเมทรี

(Thermogravimetric analysis, TGA)

สมบัติทางความร้อนของสารตัวอย่างสามารถตรวจสอบได้ด้วยวิธีเทอร์โมกราวิเมทรี (Thermogravimetric analysis, TGA) โดยจะพิจารณาการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสารตัวอย่างเมื่อเพิ่มอุณหภูมิด้วยอัตราเร็วคงที่ภายใต้บรรยากาศที่ถูกควบคุม ข้อมูลที่ได้จะถูกบันทึกออกมาในรูปกราฟความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสารตัวอย่างเทียบกับอุณหภูมิ กราฟดังกล่าวเรียกว่า เทอร์โมแกรม (TGA thermogram) หรือกราฟการสลายตัวทางความร้อน (Thermal decomposition curve) จากรูปที่ 2.14 แสดงเทอร์โมแกรมอย่างง่ายของสารที่สลายตัวเพียงขั้นตอนเดียว เมื่อ T_{on} หมายถึง อุณหภูมิเริ่มต้นของการสลายตัวของสารตัวอย่าง (Onset temperature) โดยจะพิจารณาที่จุดร่วมจากการลากความชันกราฟทั้งสองเส้นมาตัดกัน นอกจากนี้การหาอนุพันธ์อันดับที่หนึ่ง (Derivative thermogravimetry, DTG) ของการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสารตัวอย่างเทียบกับอุณหภูมินั้นจะสามารถใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูลการเสื่อมสลายที่ซับซ้อน ไม่สามารถพิจารณาได้จากเทอร์โมแกรม TGA ได้โดยง่าย จากกราฟ DTG สามารถหาจุดที่สารตัวอย่างเสื่อมสลายมากที่สุด (Maximum degradation temperature, T_{max}) ได้ โดยจะพิจารณาที่จุดสูงสุดของพิก (Peak maximum temperature) ในกราฟ DTG ซึ่งจะเป็นจุดที่มีความชันมากที่สุด ในเทอร์โมแกรม TGA



รูปที่ 2.14 ลักษณะของเทอร์โมแกรมอย่างง่ายของสารตัวอย่างที่สลายตัวเพียงขั้นตอนเดียว

โดยทั่วไปการทดสอบด้วยวิธีเทอร์โมกราวิเมทรีนี้จะใช้ในการศึกษาพฤติกรรมของสารตัวอย่างเมื่อได้รับความร้อน เช่น ปริมาณของสารระเหย (Volatile) ปริมาณของเถ้า (Ash) ที่เหลือในกระบวนการการเสียดสภาพ (Decomposition) หรือความเสถียร (Stability) ของสารตัวอย่าง ซึ่งการเปลี่ยนแปลงมวลของสารตัวอย่างนี้จะขึ้นอยู่กับสถานะที่ใช้ในการทดลอง น้ำหนักเริ่มต้น ปริมาตร และลักษณะทางกายภาพของสารตัวอย่าง รูปร่างและธรรมชาติของวัสดุที่ใช้เป็นภาชนะบรรจุสารตัวอย่าง ความดันและอัตราเร็วของการเพิ่มอุณหภูมิ

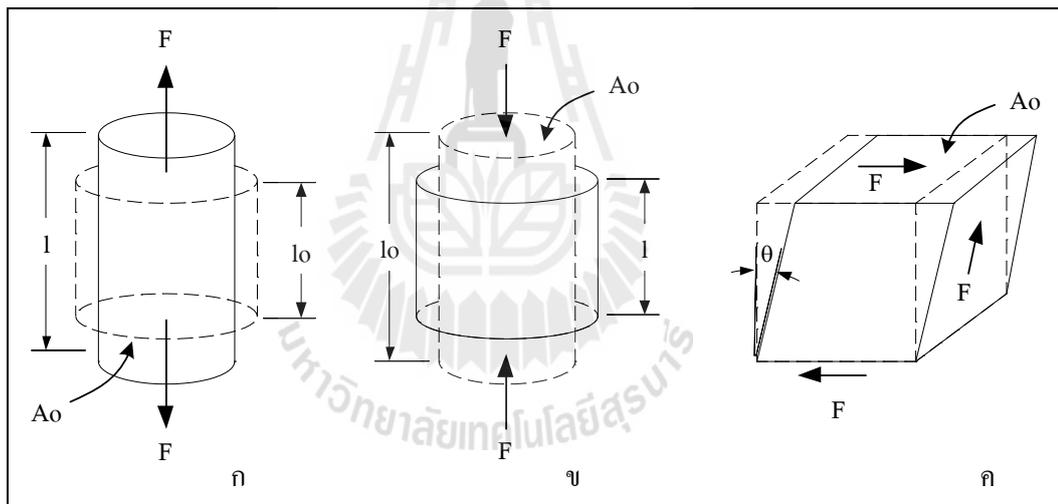
2.6.3 สมบัติทางกลและการทดสอบ

1. สมบัติทางกล (Mechanical properties)

สมบัติทางกล หมายถึง พฤติกรรมที่วัสดุแสดงออกมาเมื่อมีแรงภายนอกมากระทำ เช่น ความแข็งแรง ความแข็ง ความยืดหยุ่น ความเหนียว เป็นต้น ซึ่งสมบัติทางกลนั้นเป็นสมบัติที่มีความสำคัญที่สุดในการเลือกใช้วัสดุในงานวิศวกรรม กล่าวคือหากออกแบบเครื่องจักรหรือโครงสร้างใด ๆ จะต้องเลือกใช้วัสดุที่มีความแข็งแรง (Strength) ที่สามารถต้านทานต่อแรงกระทำ (Load) ต่าง ๆ ได้โดยไม่เกิดการวิบัติ (Failure) เช่น ไม่เกิดการแตกร้าวของโครงสร้าง เป็นต้น นอกจากนี้เครื่องจักรหรือโครงสร้างที่ออกแบบจะต้องมีความแกร่ง (Stiffness) ที่เพียงพอภายใต้แรงกระทำ โดยที่ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างมากนักจนทำให้เครื่องจักรหรือโครงสร้างเสียความสามารถในการปฏิบัติหน้าที่ตามวัตถุประสงค์การออกแบบ

- การเปลี่ยนแปลงรูปร่าง (Deformation)

เมื่อมีแรงภายนอกมากระทำกับวัสดุ จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างหรือการเสียรูปขึ้น สำหรับวัสดุพอลิเมอร์ จะแบ่งออกเป็น 2 แบบ คือ การเปลี่ยนแปลงรูปร่างแบบยืดหยุ่น (Elastic deformation) และการเปลี่ยนแปลงรูปร่างแบบถาวร (Plastic deformation) ซึ่งในการเปลี่ยนแปลงรูปร่างแบบยืดหยุ่น จะเกิดขึ้นกับวัสดุที่เมื่อให้แรงกระทำจนวัสดุนั้นเปลี่ยนแปลงรูปร่างหรือเสียรูปไป แต่จากนั้นเมื่อปล่อยแรงกระทำดังกล่าวออก วัสดุจะกลับสู่สภาพเดิมเหมือนก่อนที่จะมีแรงมากระทำ เช่น พฤติกรรมของยางวงเมื่อมีให้แรงและปล่อยแรงกระทำ ในทางตรงกันข้ามสำหรับการเปลี่ยนแปลงรูปร่างแบบถาวร (Plastic deformation) จะเกิดขึ้นกับวัสดุเมื่อมีแรงมากระทำจนเปลี่ยนแปลงรูปร่างไปจากเดิมแล้ว แต่เมื่อปล่อยแรงกระทำดังกล่าวออก วัสดุนั้นจะไม่กลับสู่สภาพเดิม หรือกลับสู่สภาพเดิมไม่ครบ 100% เช่น การงอหรือตัดลวดโลหะเป็นรูปร่างต่าง ๆ (ณรงค์ศักดิ์ ธรรมโชติ, 2549)



รูปที่ 2.15 พฤติกรรมของวัสดุเมื่อมี (ก) ความเค้นดึง (ข) ความเค้นอัด และ (ค) ความเค้นเฉือน มากระทำ

- ความเค้น (Stress)

ความเค้น หมายถึง แรงต้านทานภายในเนื้อวัสดุที่พยายามต้านทานแรงภายนอกที่มากระทำ เพื่อไม่ให้เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างไปจากเดิม แรงที่มากระทำจะถูกกระจายไปอย่างสม่ำเสมอตลอดพื้นที่หน้าตัดของวัสดุ หากแบ่งตามลักษณะของแรงที่มากระทำกับวัสดุแล้ว สามารถแบ่งออกได้เป็น 5 แบบ คือ ความเค้นดึง (Tensile stress) ความเค้นอัด

(Compressive stress) ความเค้นเฉือน (Shear stress) ความเค้นบิด (Torsion stress) และความเค้นดัดโค้ง (Flexural stress) จากรูปที่ 2.15 แสดงทิศทางของหน่วยแรงที่มากระทำต่อวัสดุโดยความเค้นดึงและความเค้นอัดจะรับแรงที่มากระทำในทิศทางตั้งฉากกับพื้นที่หน้าตัด ส่วนความเค้นเฉือนจะรับแรงที่มากระทำในทิศทางขนานกับพื้นที่หน้าตัด (ณรงค์ศักดิ์ ชรรณโชติ, 2549)

จากลักษณะของแรงดึงและแรงอัดที่มากระทำกับวัสดุ สามารถหาค่าความเค้นที่เกิดขึ้นได้จากความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำต่อพื้นที่หน้าตัด ดังแสดงในสมการที่ 2.3

$$\sigma = \frac{F}{A_0} \quad (2.3)$$

เมื่อ σ = ความเค้นทางวิศวกรรม (N/m^2)
 F = แรงกระทำตั้งฉากกับพื้นที่หน้าตัด (N)
 A_0 = พื้นที่หน้าตัด (m^2)

สำหรับกรณีที่ได้รับแรงเฉือน ความเค้นที่เกิดขึ้นจะหาได้จากแรงที่กระทำต่อพื้นที่หน้าตัดที่ขนานกับแนวแรง แสดงในสมการที่ 2.4

$$\tau = \frac{F}{A_0} \quad (2.4)$$

เมื่อ τ = ความเค้นเฉือน (N/m^2)
 F = แรงที่กระทำขนานกับพื้นที่หน้าตัด (N)

- ความเครียด (Strain)

ความเครียด หมายถึง การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของวัสดุเมื่อมีแรงมากระทำ แบ่งออกเป็นความเครียดแบบยืดหยุ่น (Elastic strain) และความเครียดแบบถาวร (Plastic strain) ซึ่งความเครียดแบบยืดหยุ่นเป็นการเปลี่ยนแปลงรูปร่างในลักษณะที่เมื่อลดแรงกระทำแล้ววัสดุจะกลับสู่สภาพเดิมเหมือนก่อนที่จะรับแรงกระทำ ส่วนความเครียดแบบถาวรจะเป็นลักษณะที่เมื่อปล่อยแรงกระทำแล้ววัสดุไม่กลับสู่ขนาดเดิม (ณรงค์ศักดิ์ ชรรณโชติ, 2549)

การหาความเครียดทางวิศวกรรม (Engineering strain) จากอัตราส่วนของขนาดที่เปลี่ยนแปลงไปต่อขนาดเดิม ซึ่งความเครียดเชิงเส้น (Linear strain) จะเกิดขึ้นเมื่อวัสดุรับแรงดึงหรือแรงอัด สามารถคำนวณได้ตามสมการที่ 2.5

$$\varepsilon = \frac{l - l_0}{l_0} \quad (2.5)$$

เมื่อ ε = ความเครียดเชิงเส้น (mm/mm)
 l_0 = ความยาวเริ่มต้น หรือความยาวเกจของวัสดุ (mm)
 l = ความยาวสุดท้ายเมื่อได้รับแรงกระทำ (mm)

สำหรับกรณีที่วัสดุได้รับแรงเฉือนมากกว่า สามารถคำนวณหาความเครียดเฉือนได้ตามสมการที่ 2.6

$$\gamma = \tan \theta \quad (2.6)$$

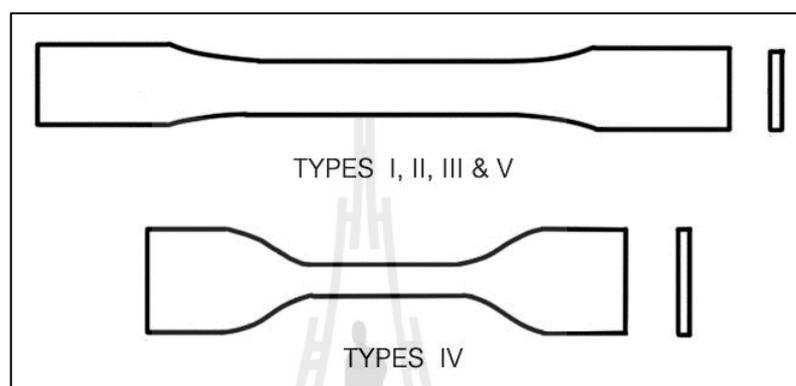
เมื่อ γ = ความเครียดเฉือน (radian)
 θ = มุมที่เปลี่ยนไป (radian)

2. การทดสอบสมบัติทางกล

- การทดสอบแรงดึง (Tensile test)

การทดสอบแรงดึงเป็นการทดสอบสมบัติทางกลที่สำคัญอย่างหนึ่ง ซึ่งมีประโยชน์ในการเลือกวัสดุสำหรับนำไปใช้งาน รวมทั้งการออกแบบเครื่องจักรและโครงสร้างในงานวิศวกรรม โดยทั่วไปสมบัติการดึงจะทำโดยการวัดแรงกระทำ หรือความเค้นที่เกิดขึ้นเมื่อดึงวัสดุด้วยความเร็วคงที่ (Constant speed) หรืออัตราความเครียดคงที่ (Constant strain rate) ซึ่งวัสดุที่ต่างกันจะแสดงสมบัติการดึงที่ต่างกัน ทั้งนี้สมบัติการดึงของวัสดุจะขึ้นอยู่กับปัจจัยอื่น ๆ เช่น ลักษณะของชิ้นทดสอบ วิธีการเตรียมชิ้นทดสอบ อุณหภูมิ ความชื้น และความเร็วของการดึง เป็นต้น ดังนั้นเพื่อความถูกต้องและน่าเชื่อถือของการทดสอบจึงจำเป็นต้องมีการระบุรายละเอียดที่เกี่ยวข้องกับชิ้นทดสอบ และสถานะต่าง ๆ ที่ใช้ในการทดสอบ ซึ่งวิธีการทดสอบสมบัติการดึงของวัสดุนั้นสามารถทำได้หลายวิธีขึ้นกับมาตรฐานที่เลือกใช้ เช่น มาตรฐาน ASTM D638-10 ใช้

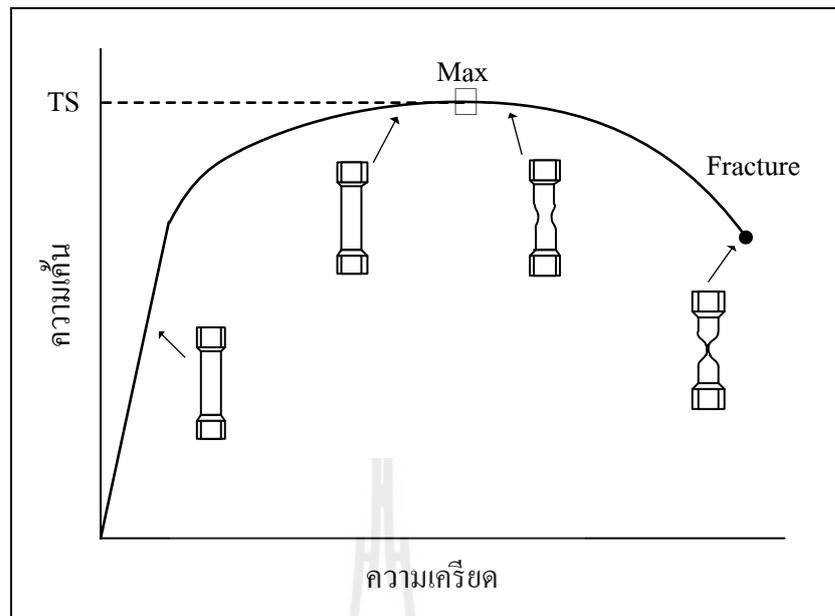
ทดสอบสมบัติการดึงของพลาสติกทั้งที่เสริมแรงและไม่ได้เสริมแรง มาตรฐาน ASTM D882-12 ใช้ทดสอบสมบัติการดึงของพลาสติกแผ่นบางและฟิล์มที่มีความหนาน้อยกว่า 1.0 mm มาตรฐาน ASTM D828- 97 ใช้ทดสอบสมบัติการดึงของกระดาษและบอร์ดโดยใช้อัตราการยืดตัวที่คงที่ (Constant-Rate-of-Elongation) และมาตรฐาน ASTM D3039/D3039M-08 ใช้ทดสอบสมบัติการดึงของวัสดุเชิงประกอบเสริมแรงด้วยเส้นใยมอดูลัสสูง เป็นต้น



รูปที่ 2.16 ลักษณะชิ้นทดสอบการดึงของพลาสติกแผ่น และพลาสติกที่ขึ้นรูปจากแม่พิมพ์ (ASTM D638-10)

ในการทดสอบแรงดึง เมื่อติดตั้งชิ้นทดสอบเข้ากับเครื่องมือทดสอบแล้ว จะให้แรงดึง หรือแรงกระทำแก่ชิ้นทดสอบ โดยมีเครื่องมือวัดการยืดตัว (Strain gage หรือ Extensometer) ติดตั้งไว้เพื่อวัดความยาวที่เปลี่ยนไปของระยะทดสอบ (Gage length) จากนั้นทำการบันทึกค่าของแรงที่เพิ่มขึ้นอย่างสม่ำเสมอและความยาวของชิ้นทดสอบที่เปลี่ยนไปในช่วงของแรงต่าง ๆ จนกระทั่งชิ้นงานเสียหาย ซึ่งค่าของแรงและความยาวที่เปลี่ยนไปนั้นสามารถนำมาคำนวณและนำไปสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดได้ (Stress-strain curve)

สมบัติที่ได้จากการทดสอบแรงดึงที่สำคัญ คือ การต้านทานแรงดึง (Tensile strength) ซึ่งเป็นค่าความเค้นสูงสุดที่วัสดุรับได้ ในการทดสอบหาความแข็งแรงของวัสดุนั้น จะสามารถกระทำได้โดยค่อย ๆ เพิ่มแรงกระทำต่อวัสดุไปจนกระทั่งวัสดุนั้นเกิดการแตกหัก พิจารณาจากรูปที่ 2.17 จุดที่มีแรงกระทำต่อชิ้นทดสอบสูงสุด คือ จุด Max หรือในบางครั้งอาจเรียกค่าความเค้นที่จุดนี้ว่า การต้านทานแรงดึงสูงสุด (Ultimate tensile strength, UTS) ซึ่งในจุดนี้สำหรับชิ้นทดสอบจากวัสดุเหนียวทั่วไปนั้นจะเริ่มเกิดคอคอด (Necking) ขึ้นที่บริเวณระยะทดสอบของชิ้นทดสอบ และหลังจากจุดนี้ชิ้นทดสอบจะมีพื้นที่หน้าตัดลดลงเรื่อย ๆ จนกระทั่งเกิดการแตกหัก



รูปที่ 2.17 การเกิดคอคอดของขึ้นทดสอบจากวัสดุเหนียวทั่วไป

โดยค่าการต้านทานแรงดึงสูงสุดสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.7

$$\sigma_M = \frac{F_M}{A_0} \quad (2.7)$$

เมื่อ σ_M = การต้านทานแรงดึงสูงสุด (N/mm²)
 F_M = แรงกระทำสูงสุด (N)

ในการศึกษาพฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของวัสดุในช่วงยืดหยุ่นนั้น จะพิจารณาที่ค่า มอดูลัสของความยืดหยุ่น (Modulus of elasticity, E) หรือมอดูลัสของยัง (Young's modulus) ซึ่งหาได้จากความชันของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดในช่วงยืดหยุ่น เป็นไปตามกฎของฮุก (Hooke's law) อาจกล่าวได้ว่าการเปลี่ยนแปลงขนาดและความเค้นของวัสดุในช่วงที่มีสภาวะยืดหยุ่นจะเป็นสัดส่วนโดยตรงต่อกัน แสดงดังสมการที่ 2.8

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (2.8)$$

เมื่อ E = มอดูลัสของความยืดหยุ่น หรือมอดูลัสของยัง (MPa)

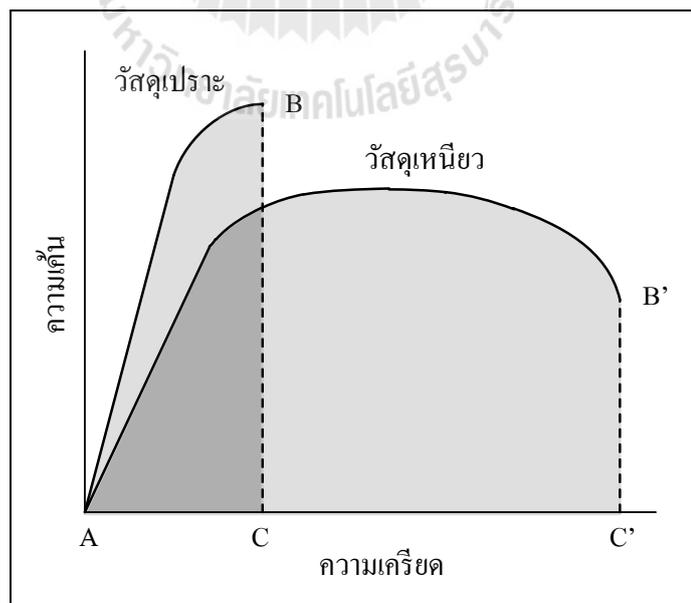
สำหรับการวัดความเหนียว (Ductility) ของวัสดุ เป็นการวัดขนาดของการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของวัสดุเมื่อมีแรงกระทำ จะพิจารณาที่ค่าความเครียดของวัสดุที่จุดแตกหัก โดยวัสดุที่เปลี่ยนแปลงรูปร่างได้มาก สามารถบ่งชี้ได้ว่า วัสดุนั้นมีความเหนียวมาก ค่าความเหนียวของวัสดุที่นิยมใช้จากการทดสอบแรงดึง คือ ค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัว (% Elongation, % EL) คำนวณได้จากสมการที่ 2.9

$$\% EL = \frac{l_f - l_0}{l_0} \times 100 \quad (2.9)$$

เมื่อ % EL = เปอร์เซ็นต์การยืดตัวของชิ้นทดสอบ (%)

l_0 = ความยาวเริ่มต้นของระยะทดสอบ (mm)

l_f = ความยาวของชิ้นทดสอบหลังจากแตกหัก (mm)

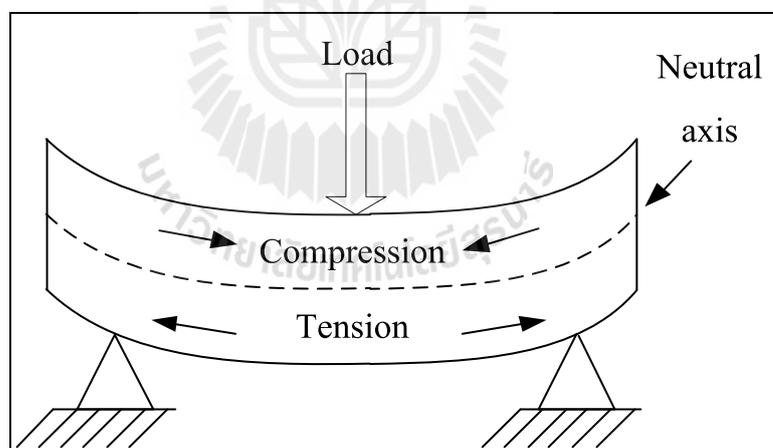


รูปที่ 2.18 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของวัสดุเปราะและวัสดุเหนียว

วัสดุเหนียวกับวัสดุเปราะนั้นจะมีพฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงรูปร่างแบบถาวร (Plastic deformation) ที่แตกต่างกัน โดยวัสดุที่มีความเปราะมากกว่าจะเปลี่ยนแปลงรูปร่างอย่างถาวรได้น้อยกว่าวัสดุเหนียว จากรูปที่ 2.18 แสดงถึงลักษณะของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดที่แตกต่างกันของวัสดุเหนียวและวัสดุเปราะ การจำแนกประเภทของวัสดุเหนียวและวัสดุจะใช้เปอร์เซ็นต์การยืดตัวในการจำแนก ซึ่งวัสดุที่มีเปอร์เซ็นต์การยืดตัวที่น้อยกว่า 5% จะจัดว่าเป็นวัสดุเปราะ (Brittle material) (ณรงค์ศักดิ์ ธรรมโชติ, 2549)

- การทดสอบแรงดัดโค้ง (Flexural test)

การทดสอบแรงดัดโค้งเป็นการทดสอบสมบัติทางกลที่นิยมใช้กับวัสดุพอลิเมอร์ต่าง ๆ เช่นพลาสติกทั้งแบบเสริมแรงและไม่เสริมแรง รวมไปถึงวัสดุคอมโพสิตชนิดสูง ซึ่งขั้นตอนทดสอบอาจจะขึ้นรูปจากแม่พิมพ์รูปสี่เหลี่ยมโดยตรง หรือตัดจากชิ้นงานที่เป็นแผ่น หรือมีรูปร่างต่าง ๆ ก็ได้ อาจจะมีหน้าตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยมหรือทรงกลมได้ตามแต่ละมาตรฐานที่ใช้ ในการทดสอบแรงดัดโค้งจะมีอัตราการให้แรงกระทำต่อชิ้นทดสอบคงที่อย่างช้า ๆ จนกระทั่งอัตราการให้แรงกระทำไม่มีผลต่อการทดสอบ ในบางครั้งอาจจะใช้ในการประมาณค่าแรงดึงสำหรับวัสดุเปราะ เช่น คอนกรีต ที่จะเกิดการแตกหักที่จุดจับยึดตัวอย่างในการทดสอบแรงดึงได้ง่าย



รูปที่ 2.19 คานภายใต้การกระทำแบบดัดโค้ง

เมื่อให้แรงกระทำกับชิ้นทดสอบบริเวณตรงกลาง โดยมีฐานรองรับสองจุดแล้ว ผิวด้านบนของชิ้นทดสอบจะถูกทำให้หดตัวลงเนื่องจากถูกกระทำด้วยหน่วยแรงกดอัด (Compressive strength) และผิวหน้าของชิ้นทดสอบที่อยู่ด้านล่างจะถูกทำให้ยืดออกเนื่องจากถูกกระทำด้วยหน่วยแรงดึง (Tensile strength) และมีเส้นแบ่ง หรือแกนสะเทิน (Neutral axis) อยู่บริเวณ

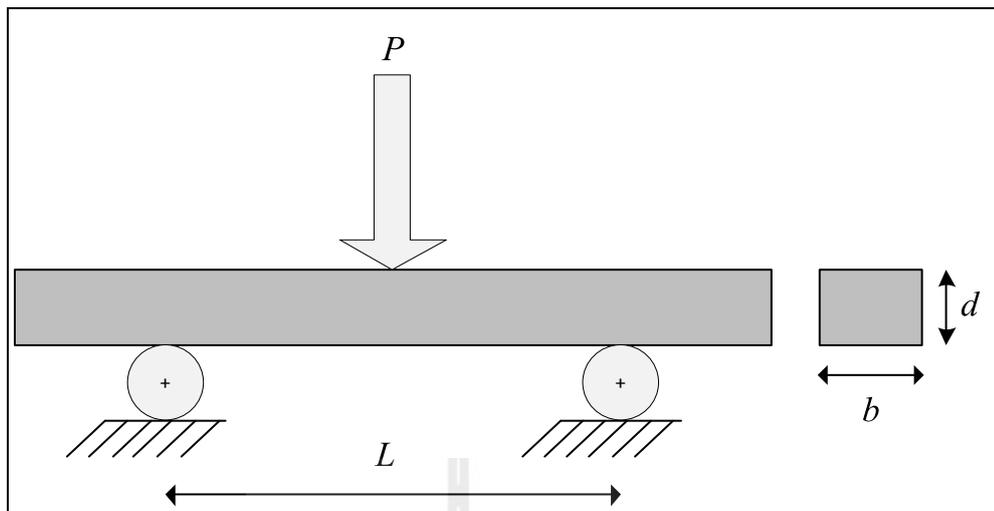
กึ่งกลางของชิ้นทดสอบ อย่างไรก็ตามสมบัติการต้านทานแรงดัดโค้งจะไม่สามารถหาจากวัสดุที่มีความอ่อนตัวโดยที่สามารถเปลี่ยนแปลงรูปร่างภายใต้แรงกระทำได้มาก หรือวัสดุดังกล่าวไม่เกิดการเสียหายภายใต้ขอบเขตความเครียด 5% เนื่องจากสมการที่ใช้ในการคำนวณสมบัติของการทดสอบแรงดัดโค้งนี้จะถูกต้องในกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างวัสดุในระดับที่ต่ำ ตามความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดแบบเชิงเส้น

โดยทั่วไปการทดสอบแรงดัดโค้งจะแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ การทดสอบแรงดัดโค้งแบบจุดรองรับ 3 จุด (Three-point bending) และการทดสอบแรงดัดโค้งแบบจุดรองรับ 4 จุด (Four-point bending)

1. การทดสอบแรงดัดโค้งแบบจุดรองรับ 3 จุด (Three-point bending) เหมาะสำหรับชิ้นทดสอบที่มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างได้น้อย จะติดตั้งชิ้นทดสอบเข้ากับฐานรองรับสองจุดและให้แรงกระทำที่จุดกึ่งกลางของชิ้นทดสอบ หัวกดและจุดรองรับที่ใช้จะมีลักษณะเป็นหัวมน (Round edge) หรือเพลลาโลหะแข็งก็ได้ เพื่อลดความเข้มของความเค้น (Stress concentration) ที่กระทำกับจุดสัมผัสดังกล่าวจะนำไปสู่การแตกหักบริเวณจุดสัมผัสนั้น ตามมาตรฐาน ASTM D790-10 สามารถหาระยะห่างแท่นวางชิ้นทดสอบ (Support span length) ได้จากอัตราส่วนของระยะห่างแท่นวางชิ้นทดสอบต่อความหนาของชิ้นทดสอบ (Support span-to-depth ratio) โดยมีค่าตั้งแต่ 16:1 ไปจนถึง 60:1 ขึ้นอยู่กับประเภทและความแข็งแรงของชิ้นทดสอบ สำหรับค่าการต้านทานแรงดัดโค้ง (Flexural strength, σ_f) ที่ได้จากการทดสอบจะเป็นค่าความเค้นแรงดัดโค้งสูงสุด (Maximum flexural stress) ของชิ้นทดสอบในขณะที่เสียหาย สามารถคำนวณได้ตามสมการที่ 2.10 (ASTM D790-10)

$$\sigma_f = \frac{3PL}{2bd^2} \quad (2.10)$$

| | | |
|-------|------------|---|
| เมื่อ | σ_f | = ค่าการต้านทานแรงดัดโค้งของชิ้นทดสอบ (MPa) |
| | P | = แรงกระทำที่บริเวณกึ่งกลางของชิ้นทดสอบ (N) |
| | L | = ระยะห่างระหว่างแท่นวางชิ้นทดสอบ (mm) |
| | b | = ความกว้างของชิ้นทดสอบ (mm) |
| | d | = ความหนาของชิ้นทดสอบ (mm) |



รูปที่ 2.20 แผนภาพการทดสอบแรงดัดโค้งแบบจุดรองรับ 3 จุด

ค่าความเครียดแรงดัดโค้ง (Flexural strain, ε_f) เป็นสัดส่วนของการเปลี่ยนแปลงความยาวของผิวด้านล่างที่บริเวณกึ่งกลางของชิ้นทดสอบ สามารถคำนวณค่าความเครียดสูงสุดได้ตามสมการที่ 2.11 (ASTM D790-10)

$$\varepsilon_f = \frac{6Dd}{L^2} \quad (2.11)$$

เมื่อ ε_f = ความเครียดที่ผิวล่างของชิ้นทดสอบ (mm/mm)
 D = ระยะยวบตัวสูงสุดที่จุดกึ่งกลางของชิ้นทดสอบ (mm)

ค่ามอดูลัสแรงดัดโค้ง (Flexural modulus หรือ Flexural modulus of elasticity, E_f) เป็นค่าที่นิยมใช้บอกความแกร่ง (Stiffness) ของวัสดุจากการทดสอบแรงดัดโค้ง ซึ่งเป็นการศึกษาพฤติกรรมของอัตราส่วนระหว่างความเค้นต่อความเครียดในช่วงยืดหยุ่นเชิงเส้นตรง สามารถคำนวณได้จากความชันของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและระยะยวบตัว (Load-deflection curve) ตามสมการที่ 2.12 (ASTM D790-10)

$$E_f = \frac{mL^3}{4bd^3} \quad (2.12)$$

เมื่อ E_f = ค่ามอดูลัสแรงคดโค้ง (MPa)
 m = ความชันของเส้นตรงที่ลากผ่านกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำ และระยะยวบตัวในช่วงยืดหยุ่นเชิงเส้นตรง (N/mm)

การบันทึกข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับขึ้นทดสอบ แรงกระทำ และพฤติกรรมการคดโค้งที่เกิดขึ้น ตลอดจนความเร็วที่ใช้ในการกดขึ้นทดสอบเป็นสิ่งสำคัญ ซึ่งความเร็วในการกดขึ้นทดสอบไม่ควรจะให้ขึ้นทดสอบแตกหักเร็วเกินไป โดยสามารถคำนวณได้ตามสมการที่ 2.13 (ASTM D790-10)

$$R = \frac{ZL^2}{6d} \quad (2.13)$$

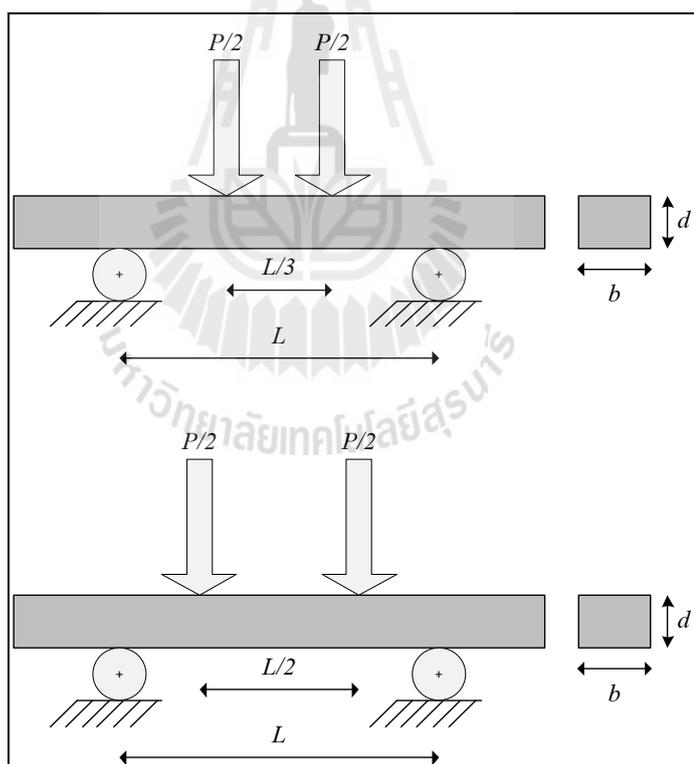
เมื่อ R = ความเร็วที่ใช้ในการกดขึ้นทดสอบ (Rate of crosshead motion, mm/min)
 Z = อัตราความเครียด (Rate of straining, mm/mm/min)

ซึ่งตามมาตรฐานแล้วกำหนดให้ค่า $Z = 0.01$ mm/mm/min และในงานวิจัยนี้ใช้ค่าอัตราส่วนระยะห่างแทนวางขึ้นทดสอบต่อความหนาเป็น 16:1 ตามประเภทของขึ้นทดสอบ โดยที่ค่าระยะห่างระหว่างแทนวางขึ้นทดสอบสำหรับขึ้นทดสอบที่มีความหนาประมาณ 3 mm จะได้ $L = 48$ mm ดังนั้นจากสมการที่ 2.13 สามารถคำนวณค่าความเร็วในการกดขึ้นทดสอบได้ประมาณ

$$R = 1.28 \text{ mm/min} \quad (2.14)$$

แต่อย่างไรก็ตาม เพื่อให้ง่ายต่อการปรับค่าการทดลองจะใช้ความเร็วในการกดขึ้นทดสอบเท่ากับ $R = 1.3$ mm/min แทนค่าที่คำนวณได้จากสมการที่ 2.13

2. การทดสอบแรงดัดโค้งแบบจุดรองรับ 4 จุด (Four-point bending) ใช้สำหรับชิ้นทดสอบที่มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างได้มากและไม่เกิดการเสียหายภายใต้ความเครียดสูงสุดที่กำหนดตามมาตรฐานของการทดสอบแรงดัดโค้งแบบ 3 จุด อ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM D6272-10 จะติดตั้งชิ้นทดสอบกับแท่นรองและให้แรงกระทำ 2 จุดที่ผิวบนของชิ้นทดสอบ หัวกดและจุดรองรับที่ใช้จะมีลักษณะเป็นหัวมนหรือเพลาลอยแข็งเช่นเดียวกับการทดสอบแรงดัดโค้งแบบ 3 จุด ซึ่งระยะห่างของหัวกดจะแบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ 1. แบบ 1/3 และ 2. แบบ 1/4 สำหรับระยะห่างของหัวกดแบบ 1/3 นั้น หมายความว่าระยะห่างระหว่างหัวกดกับจุดรองรับจะแบ่งระยะที่เท่ากันคือ 1/3 ของระยะห่างของแท่นวางชิ้นทดสอบ ($L/3$) ในขณะที่ระยะห่างของหัวกดที่แบบ 1/4 นั้น หมายความว่าระยะห่างระหว่างหัวกดกับจุดรองรับจะแบ่งระยะเท่ากับ 1/4 ของระยะห่างของแท่นวางชิ้นทดสอบ ($L/2$) ทั้งนี้ระยะห่างของแท่นวางชิ้นงานสามารถกำหนดได้จากมาตรฐานการทดสอบที่ใช้อ้างอิง



รูปที่ 2.21 แผนภาพการทดสอบแรงดัดโค้งแบบจุดรองรับ 4 จุด

สำหรับค่าการต้านทานแรงดัดโค้งจากการทดสอบแบบ 4 จุดที่สามารถคำนวณได้ตามสมการที่ 2.15

$$\sigma_{f,4P} = \frac{3P(L-L_i)}{2bd^2} \quad (2.15)$$

เมื่อ $\sigma_{f,4P}$ = ค่าการต้านทานแรงดัดโค้งของชิ้นทดสอบจากการทดสอบแบบ 4 จุด (MPa)
 L_i = ระยะห่างระหว่างระหว่างหัวกด ($L/3$ หรือ $L/2$, mm)

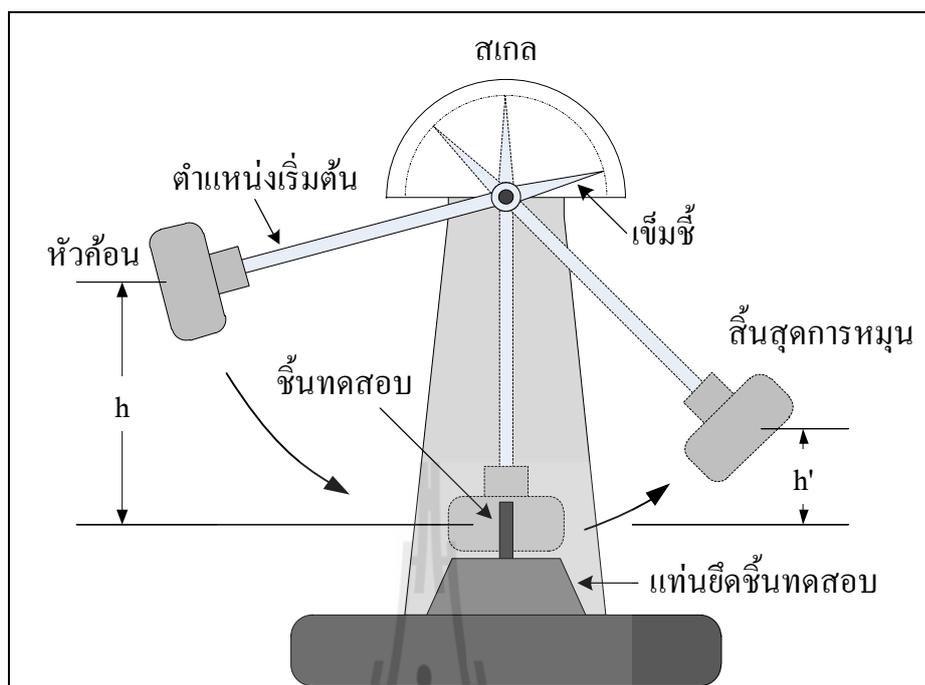
- การทดสอบแรงกระแทก (Impact test)

การทดสอบแรงกระแทกเป็นการทดสอบเพื่อหาความสามารถของวัสดุพอลิเมอร์ในการรับแรงที่มากกระทำด้วยความรวดเร็ว (Dynamic load) ค่าการต้านทานแรงกระแทก (Impact strength) ของวัสดุ เป็นสมบัติที่สำคัญอย่างหนึ่งที่น่าสนใจในการพิจารณาในการออกแบบชิ้นส่วนโครงสร้างหรือเครื่องจักรต่าง ๆ ให้เหมาะสมกับประเภทและอายุการใช้งาน ซึ่งความสามารถในการรับแรงกระแทกของวัสดุจะประเมินจากปริมาณพลังงาน (Impact energy) ของชิ้นทดสอบที่ดูดซับไว้ก่อนที่จะเกิดการแตกหัก (Fracture) หรือปริมาณพลังงานที่ทำให้ชิ้นทดสอบเกิดการแตกหัก แสดงผลในรูปของพลังงานต่อหน่วยพื้นที่หน้าตัดที่เกิดการแตกหัก ในหน่วยจูลต่อตารางเมตร (J/m^2) หรือพลังงานต่อหน่วยความยาวของบริเวณที่เกิดการแตกหัก ในหน่วยจูลต่อเมตร (J/m)

ค่าการต้านทานแรงกระแทกนั้นสามารถบ่งชี้ถึงลักษณะของวัสดุได้ว่าเป็นวัสดุเปราะ (Brittle) หรือเป็นวัสดุเหนียว (Toughness) โดยวัสดุที่มีความเหนียวจะสามารถดูดซับพลังงานก่อนเกิดการแตกหักได้มากและมีค่าการต้านทานแรงกระแทกสูง นอกจากนี้ค่าความเปราะหรือค่าความเหนียวของวัสดุนี้จะสอดคล้องกับขนาดพื้นที่ใต้กราฟของความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด (Stress-strain curve) ที่ได้จากการทดสอบสมบัติแรงดึงขาด กล่าวคือวัสดุที่มีความเหนียวกว่าจะมีพื้นที่ใต้กราฟมากกว่าวัสดุที่มีความเปราะกว่า

การทดสอบการต้านทานแรงกระแทกสำหรับวัสดุพอลิเมอร์แบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ การทดสอบแบบใช้เพนดูลัม (Pendulum impact test) และการทดสอบแบบใช้น้ำหนัก (Falling weight test) โดยในงานวิจัยนี้จะกล่าวถึงรายละเอียดเฉพาะของการทดสอบแบบเพนดูลัมเท่านั้น

การทดสอบแบบเพนดูลัมแบ่งออกเป็น การทดสอบแบบชาร์ปี (Charpy test) และการทดสอบแบบไอซอด (Izod test) โดยเครื่องมือทดสอบแบบเพนดูลัมแบบพื้นฐานจะมีลักษณะดังแสดงไว้ในรูปที่ 2.22 ซึ่งประกอบด้วยหัวค้อนตี (Pendulum hammer) ลักษณะการเหวี่ยงคล้ายกับลูกตุ้มนาฬิกา สามารถอ่านค่าพลังงานได้จากหน้าปัดของเครื่องทดสอบได้โดยตรงในหน่วยจูล (J) และมีฐานสำหรับติดตั้งชิ้นทดสอบ (Anvil)



รูปที่ 2.22 ลักษณะของเครื่องมือทดสอบแรงกระแทกแบบเพนดูลัม

ในการคำนวณปริมาณพลังงานที่ใช้ในการตีชิ้นทดสอบจนเกิดการแตกหัก (Impact energy หรือ Absorbed energy) สำหรับการทดสอบแบบเพนดูลัมจะคำนวณจากผลต่างของระดับพลังงานศักย์ที่ความสูงของหัวค้อนในตำแหน่งเริ่มต้นและในตำแหน่งเส้นสุดการหมุนหลังการกระแทกดังสมการที่ 2.16 (ASTM D256-10)

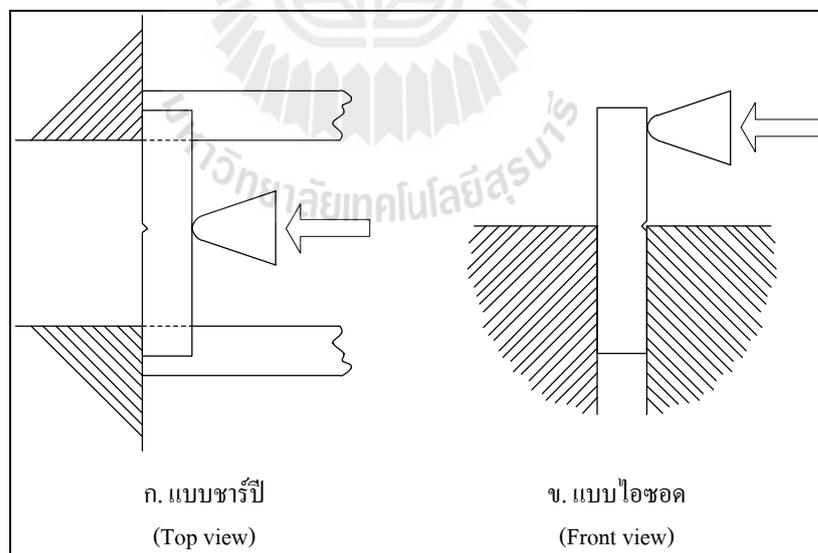
$$E = mg(h - h') \quad (2.16)$$

เมื่อ E = พลังงานที่ได้จากการปล่อยหัวค้อน (J)
 m = มวลของหัวค้อน (kg)
 g = อัตราเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก (9.81 m/s^2)
 h, h' = ความสูงของหัวค้อนก่อนและหลังการกระแทกตามลำดับ (m)

ขนาดพลังงานของเพนดูลัมที่ใช้มีหลายขนาดขึ้นอยู่กับน้ำหนักของหัวค้อนที่ใส่ให้กับเพนดูลัม สำหรับขนาดพลังงานพื้นฐานที่เครื่องมือทดสอบใช้จะอยู่ที่ $2.7 \pm 0.14 \text{ J}$ ซึ่งในการทดสอบควรจะใช้ขนาดของเพนดูลัมให้เหมาะสมกับชิ้นทดสอบ โดยควรเลือกใช้เพนดูลัม

ที่สามารถทำให้ชิ้นทดสอบเกิดการแตกหักด้วยพลังงานที่อยู่ในช่วงไม่เกิน 85% ของขนาดพลังงานเพนดูลัม หากชิ้นทดสอบไม่เกิดการแตกหักหลังจากตีแล้ว ต้องเปลี่ยนขนาดของหัวค้อนที่มีพลังงานในการตีเยาะขึ้นเป็น 5.4 10.8 หรือ 21.7 J แทน

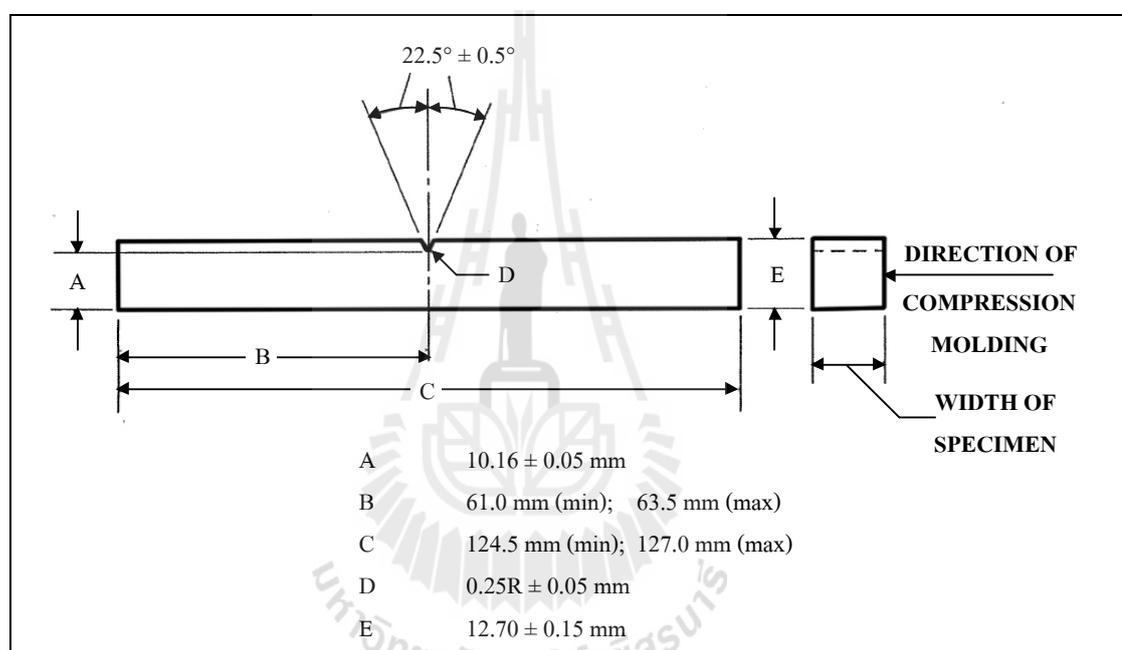
วัสดุพอลิเมอร์จะดูดซับพลังงานได้มากหรือน้อยขึ้นอยู่กับ การกระจายตัว (Dissipate) ของพลังงานที่ถูกดูดซับไปในการเสียรูป (Deformation) แบบต่าง ๆ ก่อนการแตกหัก โดยปกติแล้วจะแบ่งการเสียรูปของวัสดุพอลิเมอร์ออกเป็น การเสียรูปแบบยืดหยุ่น (Elastic deformation) และการเสียรูปแบบถาวร (Plastic deformation) การกระจายตัวของพลังงานจะทำให้วัสดุมีการเสียหายลดลง ดังนั้นชิ้นทดสอบสำหรับการทดสอบแบบเพนดูลัมปกติแล้วจะทำรอยบาก (Notch) บริเวณตรงกลาง ซึ่งรอยบากจะทำหน้าที่เป็นจุดรวมแรง (Stress concentration) เพื่อลดพฤติกรรมการเสียรูปแบบถาวร และลดการกระจายพลังงานเพื่อเหนี่ยวนำให้เกิดการแตกหักที่บริเวณหลังรอยบาก ถ้าไม่มีการบาก แรงเค้นจะกระจายไปทั่วชิ้นทดสอบ ทำให้ชิ้นทดสอบดังกล่าวเกิดการเสียรูปแบบถาวรจากการค้ำองมากกว่าที่เกิดขึ้นจากการแตกหัก ซึ่งจะทำให้ผลการทดสอบที่ได้ไม่สามารถนำไปใช้งานได้ เนื่องจากวัตถุประสงค์ของการทดสอบแรงกระแทกเป็นการวัดปริมาณพลังงานที่ต้องการในการตีชิ้นทดสอบจนแตกหัก การทำรอยบากนั้นจะแตกต่างกันขึ้นกับวัสดุที่นำมาทดสอบ เนื่องจากวัสดุแต่ละประเภทนั้นจะมีสมบัติในช่วงยืดหยุ่นที่แตกต่างกัน



รูปที่ 2.23 การจับยึดชิ้นทดสอบแรงกระแทก (ก) แบบชาร์ปี และ (ข) แบบไอซอด

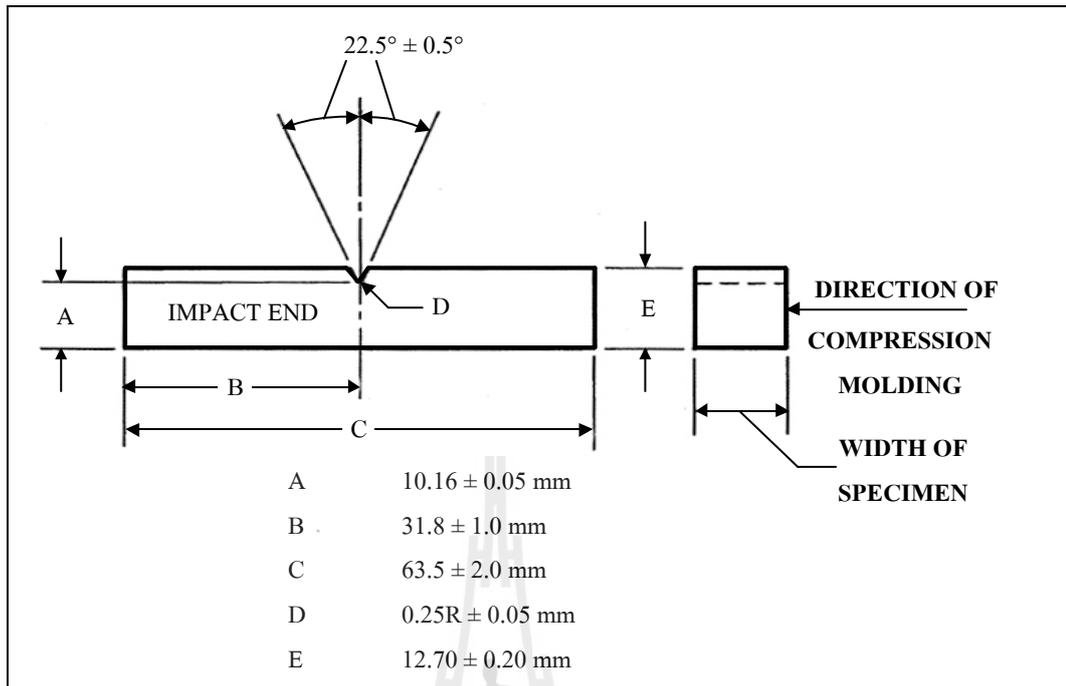
การทดสอบแรงกระแทกแบบชาร์ปีและแบบไอซอดแตกต่างกันตรงลักษณะของการจับชิ้นงาน

1. การทดสอบแรงกระแทกแบบชาร์ปี อ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM D6110-04 โดยการทดสอบนี้จะวางชิ้นทดสอบในแนวนอน (Horizontal beam) บนแท่นรองโดยไม่มีการยึดและหัวค้อนเข้ากระแทกทางด้านหลังรอยบากที่จุดกึ่งกลางของชิ้นทดสอบ ดังแสดงใน รูปที่ 2.23(ก) ความหนาของชิ้นทดสอบอยู่ระหว่าง 3.00-12.70 mm สำหรับขนาดความยาว ความกว้าง และรอยบากของชิ้นทดสอบตามมาตรฐานแสดงดังรูปที่ 2.24



รูปที่ 2.24 ขนาดของชิ้นทดสอบแรงกระแทกแบบชาร์ปี (ASTM D6110-04)

2. การทดสอบแรงกระแทกแบบไอซอด อ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM D256-10 โดยการทดสอบนี้จะยึดชิ้นทดสอบไว้ในแนวตั้ง (Vertical beam) ตำแหน่งของการติดตั้งชิ้นทดสอบจะยึดบริเวณกึ่งกลางของรอยบาก หรือในกรณีที่ชิ้นทดสอบไม่ได้ทำรอยบากไว้จะจับยึดชิ้นทดสอบที่ตำแหน่งกึ่งกลาง สำหรับการทดสอบหัวค้อนจะเข้ากระแทกทางด้านที่มีรอยบากหรือด้านตรงข้ามกับรอยบากก็ได้ตามรูปแบบที่ใช้ในมาตรฐาน ดังแสดงในรูปที่ 2.23(ข) ความหนาของชิ้นทดสอบอยู่ระหว่าง 3.00-12.70 mm เช่นเดียวกับการทดสอบแรงกระแทกแบบชาร์ปี สำหรับขนาดความยาว ความกว้าง และรอยบากของชิ้นทดสอบตามมาตรฐานแสดงดังรูปที่ 2.25



รูปที่ 2.25 ขนาดของชิ้นทดสอบแรงกระแทกแบบไอซอด (ASTM D256-10)

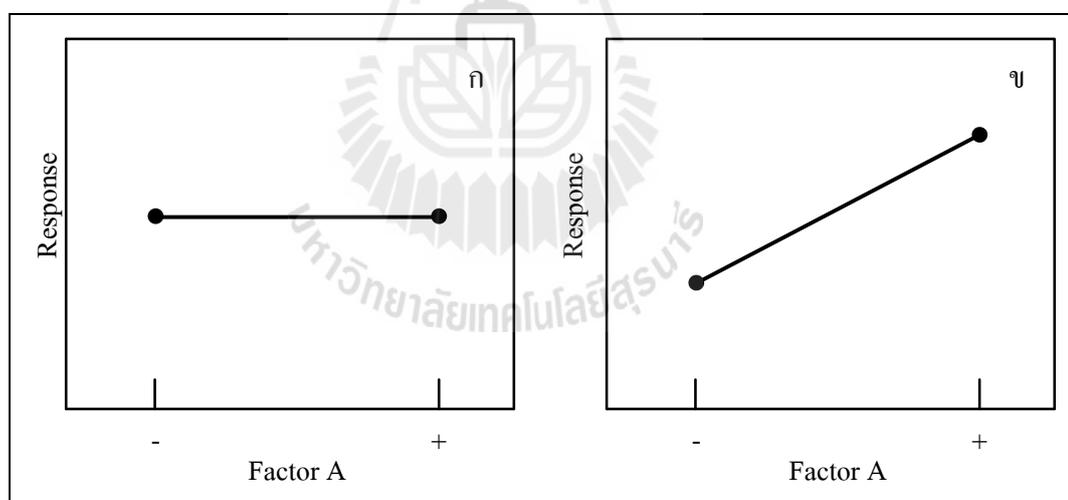
จากการทดสอบแรงกระแทกทั้ง 2 แบบ จะสามารถอ่านค่าพลังงานที่ใช้ในการกระแทกจนวนวัสดุแตกหัก (Impact energy) ซึ่งเป็นค่าพลังงานที่ชิ้นทดสอบดูดซับไว้ (Absorbed energy) จากหน้าปัดของเครื่องทดสอบได้โดยตรง ค่าการต้านทานแรงกระแทกสามารถคำนวณได้ตามสมการที่ 2.17

$$\text{Impact strength} = \frac{E}{A} \quad (2.17)$$

เมื่อ E = พลังงานที่ชิ้นทดสอบดูดซับไว้ (J)
 A = พื้นที่หน้าตัดของชิ้นทดสอบบริเวณหลังรอยบาก (cm^2)

2.7 การออกแบบการทดลอง (Design of experiment)

การออกแบบการทดลอง (Design of experiment, DOE) เป็นเทคนิคทางสถิติขั้นสูงที่ใช้ในการปรับค่าสภาวะของกระบวนการให้เป็นไปตามที่ต้องการ เพื่อตรวจสอบว่า ปัจจัย (Factor) หรือตัวแปร (Variable) ไດ ที่มีผลต่อค่าการตอบสนอง (Response) ของสิ่งที่ให้ความสนใจ โดยวิธีการออกแบบการทดลองนั้นมีข้อได้เปรียบอย่างเห็นได้ชัดเมื่อเทียบกับวิธีการทดลองทั่วไป ซึ่งมักจะใช้วิธีการทดลองแบบลองผิดลองถูก หรือใช้วิธีการทดลองแบบลองปรับตั้งค่าทีละค่า (One-factor-at-a-time) กล่าวคือ มีผลการทดลองที่มีความแม่นยำและมีความถูกต้องในการวิเคราะห์ข้อมูลที่สูงมากกว่า ทั้งยังสามารถระบุออกมาเป็นค่าตัวเลขทางสถิติที่แสดงถึงค่าระดับความสำคัญของตัวแปรที่ส่งผลกระทบต่อกระบวนการ นอกจากนี้ยังมีความรวดเร็วในการดำเนินการทดลองอีกด้วย โดยทั่วไปนั้นวิธีการทดลองแบบลองปรับตั้งค่าทีละค่า จะสามารถหาคำตอบที่ต้องการเข้ามา และสิ้นเปลืองทรัพยากรในการวิเคราะห์ รวมถึงต้องเก็บข้อมูลเป็นจำนวนมาก และยังไม่เหมาะสมอย่างยิ่งสำหรับกระบวนการที่มีผลของอิทธิพลร่วมหรือมีอันตรกิริยา (Interaction effect) ระหว่างตัวแปรของกระบวนการ



รูปที่ 2.26 (ก) อิทธิพลของปัจจัยหลักที่ไม่มีผลต่อค่าการตอบสนอง
และ (ข) อิทธิพลของปัจจัยหลักที่มีผลต่อค่าการตอบสนอง

ในการออกแบบการทดลองเพื่อวิเคราะห์ว่าปัจจัยใดที่มีอิทธิพลต่อค่าการตอบสนองที่สนใจนั้น ต้องทำการเปลี่ยนแปลงระดับปัจจัยในการทดลองอย่างน้อย 2 ระดับ จึงจะสามารถวิเคราะห์ผลได้ จากรูปที่ 2.26(ก) แสดงอิทธิพลของปัจจัยหลักที่ไม่มีผลต่อค่าการตอบสนองที่สนใจ กล่าวคือ

เมื่อขนาดของปัจจัย A เปลี่ยนแปลงไปนั้น ไม่ได้ทำให้ค่าการตอบสนองเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย และในทางตรงกันข้ามจากรูปที่ 2.26(ข) แสดงอิทธิพลของปัจจัยหลักที่มีผลต่อค่าการตอบสนองที่สนใจ กล่าวคือ เมื่อเปลี่ยนแปลงขนาดของปัจจัย A ทำให้ค่าการตอบสนองเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย

หลักการพื้นฐานที่สำคัญในการออกแบบการทดลอง คือ การทำการทดลองซ้ำ (Replication) การทำการทดลองแบบสุ่ม (Randomization) และการทำการทดลองแบบจัดกลุ่ม (Blocking) ซึ่งการทำการทดลองซ้ำนั้น ทำให้สามารถหาค่าประมาณของความผิดพลาดจากการทดลองได้ เพื่อใช้พิจารณาถึงความแตกต่างของข้อมูลตามวิธีทางสถิติ นอกจากนี้การทำการทดลองซ้ำยังสามารถหาค่าเฉลี่ยของค่าการตอบสนองที่แม่นยำได้มากยิ่งขึ้น สำหรับการทำการทดลองแบบสุ่มนั้น เป็นวิธีการเชิงสถิติกำหนดว่าข้อมูลหรือความผิดพลาด จะต้องเป็นตัวแปรสุ่มที่มีการกระจายแบบอิสระ โดยการทำการทดลองแบบสุ่มจะสามารถลดผลของปัจจัยภายนอกที่ไม่สามารถควบคุมได้ในการทดลอง และการทำการทดลองแบบจัดกลุ่ม เป็นเทคนิคที่ใช้สำหรับเพิ่มความเที่ยงตรง (Precision) ในการทดลองได้

2.7.1 ขั้นตอนในการออกแบบการทดลอง

ในการออกแบบและวิเคราะห์ผลที่ได้จากการทดลอง มีขั้นตอนในการดำเนินงานดังต่อไปนี้ (ปารเมศ ชุตินา, 2555)

1. ทำความเข้าใจถึงปัญหา

ขั้นตอนแรกในการออกแบบการทดลอง จำเป็นต้องศึกษา และทำความเข้าใจในกระบวนการก่อน เพื่อกำหนดปัญหา และวัตถุประสงค์ของการออกแบบการทดลองได้อย่างชัดเจน

2. เลือกปัจจัย ระดับ และขอบเขตที่เหมาะสม

ปัจจัยที่เลือกมาออกแบบการทดลองอาจจะได้มาจากความรู้ทางทฤษฎี หรือประสบการณ์ของผู้ทดลองเอง เพื่อตรวจสอบว่าปัจจัยที่เลือกมานั้นมีความสำคัญต่อการเปลี่ยนแปลงผลการตอบสนองหรือไม่ สำหรับการทดลองเพื่อกรองปัจจัย (Screening) ควรจะกำหนดให้ระดับของปัจจัยมีจำนวนที่น้อย ๆ ส่วนการเลือกขอบเขตของการทดลองนั้น ควรกำหนดช่วงให้กว้างในตอนแรก และเมื่อเรียนรู้เพิ่มเติมแล้วว่า ปัจจัยใดที่มีความสำคัญ และระดับใดที่ทำให้เกิดผลลัพธ์ที่ดีที่สุด อาจจะลดขอบเขตให้แคบลงได้

3. เลือกปัจจัยตอบสนอง

ปัจจัยตอบสนอง หรือตัวแปรตาม (Response) ซึ่งเป็นตัวแปรที่ใช้ในการวัดผลของกระบวนการ โดยจะเลือกตัวแปรตอบสนองที่ให้ข้อมูลเกี่ยวกับกระบวนการที่ทำการทดลอง

ซึ่งอาจจะเป็นค่าเฉลี่ยหรือส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของกระบวนการก็ได้ และในการทดลองหนึ่ง อาจจะมีปัจจัยตอบสนองหลายตัวก็เป็นได้

4. เลือกวิธีการออกแบบการทดลอง

ในการเลือกวิธีการออกแบบการทดลองจำเป็นจะต้องคำนึงถึงวัตถุประสงค์ของการทดลองอยู่ตลอดเวลา เนื่องจากวิธีการออกแบบการทดลองนั้นมีอยู่หลายรูปแบบ ซึ่งล้วนแล้วแต่มีความเหมาะสมกับชุดข้อมูลที่แตกต่างกันไป นอกจากนี้ในการออกแบบการทดลองจะต้องคำนึงถึงขนาดของตัวอย่าง (จำนวนการทดลองซ้ำ) รวมไปถึงลำดับของการทดลองหรือการจัดกลุ่มการทดลอง

5. ทำการทดลอง

เมื่อทำการทดลองจะต้องติดตามดูกระบวนการอย่างระมัดระวัง เพื่อให้แน่ใจว่าดำเนินการทุกอย่างไปตามแผน เพราะหากเกิดข้อผิดพลาดขึ้นเกี่ยวกับวิธีการทดลอง จะทำให้การทดลองนั้นใช้ไม่ได้ ดังนั้นการวางแผนในขั้นตอนแรกจะมีความสำคัญอย่างมากต่อความสำเร็จที่จะเกิดขึ้น

6. วิเคราะห์ข้อมูลโดยใช้หลักการทางสถิติ

เป็นขั้นตอนที่นำเอาวิธีการทางสถิติมาใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูล เพื่อหาข้อสรุปว่าเป็นไปตามวัตถุประสงค์ของการทดลองหรือไม่ ซึ่งข้อได้เปรียบของการใช้วิธีทางสถิตินี้จะทำให้ข้อสรุปที่ได้ออกมานั้นมีเหตุผลสนับสนุนและมีความน่าเชื่อถือเพิ่มมากขึ้น

7. สรุปผลการทดลอง

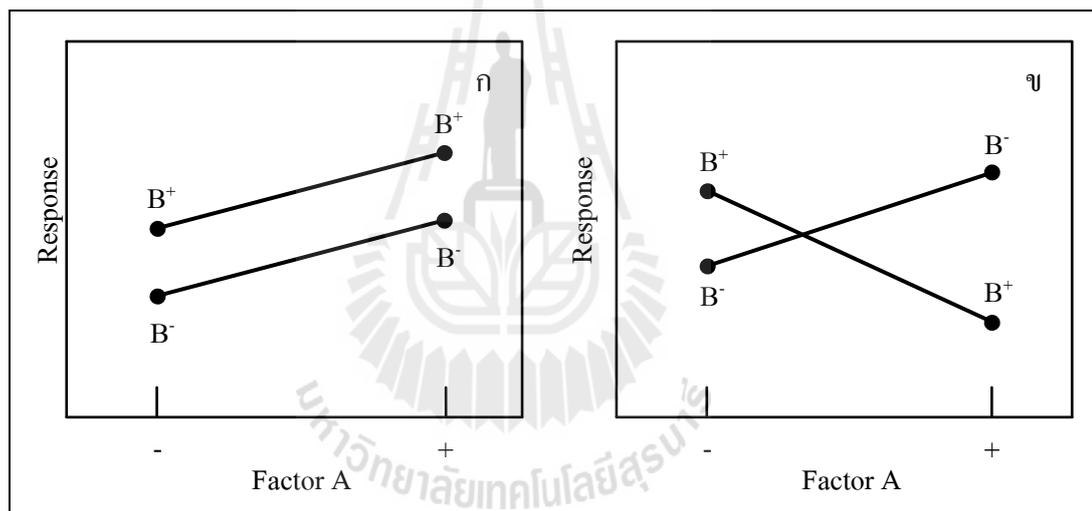
หลังจากการวิเคราะห์ข้อมูลเรียบร้อยแล้วนั้น จะต้องหาข้อสรุปและทำข้อเสนอแนะเพื่อเป็นแนวทางในการนำไปใช้กระบวนการต่อ ๆ ไป นอกจากนี้ควรจะทำ การทดลองเพื่อยืนยันผล (Confirmation testing) เพื่อตรวจสอบข้อสรุปที่เกิดขึ้นอีกด้วย

2.8 การทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบสองระดับ (2^k Factorial design)

การทดลองเชิงแฟกทอเรียลส่วนมากในทางปฏิบัตินั้น เป็นการทดลองเพื่อทดสอบอิทธิพลของปัจจัย (Factor) ตั้งแต่ 2 สิ่งขึ้นไป ซึ่งในแต่ละปัจจัยอาจจะพิจารณาถึงผลที่เกิดขึ้นจากการรวมตัวของระดับ (Level) ของปัจจัยทั้งหมดที่เป็นไปได้ในการทดลองนั้น สำหรับในการทดลองที่มี 2 ปัจจัย ถ้าปัจจัย A ประกอบด้วย a ระดับ และปัจจัย B ประกอบด้วย b ระดับ ในการทดลองที่มีจำนวน 1 ซ้ำ จะประกอบด้วย การทดลองทั้งหมด ab การทดลอง

การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นกับค่าการตอบสนอง (Response) ที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงระดับของปัจจัยนั้น ๆ เรียกว่าเป็นอิทธิพลของปัจจัยหลัก (Main effect) ซึ่งเป็นปัจจัยเบื้องต้นของการ

ทดลอง แต่ในบางการทดลองอาจพบความแตกต่างของค่าการตอบสนองที่เกิดขึ้นบนระดับต่าง ๆ ของปัจจัยหนึ่ง หรือกล่าวได้ว่า ค่าการตอบสนองของปัจจัยหนึ่งนั้นจะขึ้นกับระดับปัจจัยอื่น ๆ นั้นเอง เรียกว่า การมีอิทธิพลร่วมหรือมีอันตรกิริยา (Interaction effect) ระหว่างปัจจัยที่เกี่ยวข้อง จากรูปที่ 2.27 เป็นการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2 ปัจจัย โดยที่แต่ละปัจจัยประกอบด้วย 2 ระดับ คือ ระดับ “ต่ำ” และ “สูง” ซึ่งแทนด้วยเครื่องหมาย “-” และ “+” ตามลำดับ พิจารณารูปที่ 2.27(ก) เป็นกราฟระหว่างค่าการตอบสนองของปัจจัย A ที่ระดับทั้งสองของปัจจัย B จะเห็นว่าเส้นของ B^- และ B^+ จะประมาณได้ว่าขนานกัน ซึ่งลักษณะของกราฟเช่นนี้จะบ่งบอกถึงการไม่มีอันตรกิริยาซึ่งกันและกันของปัจจัยทั้งสอง ในทางกลับกัน รูปที่ 2.27(ข) แสดงเส้นกราฟของ B^- และ B^+ ที่ไม่ขนานกัน ซึ่งสามารถกล่าวได้ว่าปัจจัยทั้งสองมีอันตรกิริยาต่อกัน บ่อยครั้งที่กราฟลักษณะนี้จะถูกนำมาใช้เพื่อแสดงถึงการมีนัยสำคัญ (Significant) ของอันตรกิริยา



รูปที่ 2.27 (ก) อิทธิพลของปัจจัยร่วมที่ไม่มีผลต่อค่าการตอบสนอง
และ (ข) อิทธิพลของปัจจัยร่วมที่มีผลต่อค่าการตอบสนอง

การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลชนิดพิเศษมีอยู่หลายชนิด โดยการทดลองเชิงแฟกทอเรียลที่มีความสำคัญมากที่สุด คือ กรณีที่มีปัจจัย k ปัจจัย ซึ่งแต่ละปัจจัยประกอบไปด้วย 2 ระดับ โดยที่ระดับเหล่านี้ อาจเกิดจากข้อมูลเชิงปริมาณ (Quantitative) เช่น อุณหภูมิ ความดัน หรือเวลา เป็นต้น หรืออาจเกิดจากข้อมูลเชิงคุณภาพ (Qualitative) ก็ได้ เช่น เครื่องจักร หรือคนงาน เป็นต้น ระดับที่กล่าวถึงนี้อาจแทนระดับ “ต่ำ” และ “สูง” ของปัจจัยหนึ่ง ๆ หรือการ “มี” และ “ไม่มี” ของปัจจัยนั้น ๆ ก็ได้ ในการทดลองจำนวน 1 ซ้ำจะประกอบไปด้วยข้อมูลทั้งสิ้น

$2 \times 2 \times 2 \times \dots \times 2 = 2^k$ ข้อมูล สามารถเรียกการออกแบบการทดลองลักษณะนี้ได้ว่า การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบสองระดับ (2^k Factorial design)

การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบสองระดับ (2^k Factorial design) จะมีประโยชน์มากในช่วงเริ่มแรก เมื่อมีปัจจัยจำนวนมากที่เราต้องการจะตรวจสอบ การออกแบบเช่นนี้จะทำให้เกิดการทดลองจำนวนน้อยที่สุดที่สามารถกระทำได้เพื่อศึกษาถึงผลของปัจจัยทั้ง k ชนิดได้อย่างบริบูรณ์โดยใช้การออกแบบเชิงแฟกทอเรียล และเนื่องจากการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลชนิดนี้นั้น แต่ละปัจจัยจะประกอบด้วยระดับ 2 ระดับ ทำให้การตอบสนองที่ได้จะมีลักษณะเป็นเส้นตรงตลอดช่วงของปัจจัยที่เลือกขึ้นมาทำการทดลอง ซึ่งสมมติฐานนี้เป็นสิ่งที่ยอมรับได้สำหรับการทดลองเพื่อกรองปัจจัยในขั้นตอนเริ่มต้นของการศึกษากระบวนการ

2.8.1 แบบจำลองถดถอย (Regression model)

ในการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบสองระดับ (2^k Factorial design) จะได้ผลการตอบสนองที่เกิดจากปัจจัยต่าง ๆ เป็นเชิงเส้น (Linearity) ซึ่งสามารถเขียนแบบจำลองถดถอย (Regression model) ได้ดังสมการที่ 2.18

$$\hat{y} = \hat{\beta}_0 + \sum_{j=1}^k \hat{\beta}_j x_j + \varepsilon \quad (2.18)$$

| | | |
|-------|-----------------|-------------------------------------|
| เมื่อ | \hat{y} | = ค่าการตอบสนอง (Response) |
| | x_j | = ปัจจัยหลักในกระบวนการ |
| | $\hat{\beta}_0$ | = ค่าเฉลี่ยของค่าการตอบสนองทั้งหมด |
| | $\hat{\beta}_j$ | = ค่าสัมประสิทธิ์ของแบบจำลองถดถอย |
| | ε | = องค์กรประกอบของความผิดพลาดแบบสุ่ม |

สำหรับ x_j จะเป็นตัวแปรที่ถูกเข้ารหัส (Code scale) โดยจะมีการเปลี่ยนแปลงจากต่ำไปสูง หรือเปลี่ยนแปลงจาก -1 เป็น +1 และค่าการตอบสนองของแบบจำลองถดถอยในกระบวนการจะต้องเป็นข้อมูลเชิงปริมาณ (Quantitative) เท่านั้น

ในการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบสองระดับนั้น ความเป็นเชิงเส้นอย่างสมบูรณ์ไม่ได้เป็นสิ่งจำเป็นมากมายนัก และระบบของ 2^k ยังคงทำงานได้อย่างค่อนข้างดีแม้ในกรณีที่สมมติฐานเกี่ยวกับความเป็นเชิงเส้นจะเป็นได้เพียงโดยประมาณเท่านั้น หากเติมพจน์

อิทธิพลของปัจจัยร่วมหรือพจน์อันตรกิริยาลงไปในแบบจำลองขั้นแรก (First-order model) จะทำให้ได้แบบจำลองที่สามารถแสดงส่วนโค้งได้บางประการในฟังก์ชันของค่าการตอบสนอง ซึ่งส่วนโค้งนี้เกิดขึ้นจากการบิดเบี้ยวของระนาบ (Plane) จากการมีอยู่ของพจน์อิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัยนั่นเอง สามารถสร้างแบบจำลองถดถอยที่รวมพจน์ของอิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัยในรูปทั่วไปได้ตามสมการที่ 2.19

$$\hat{y} = \hat{\beta}_0 + \sum_{j=1}^k \hat{\beta}_j x_j + \sum_{i < j} \hat{\beta}_{ij} x_i x_j + \varepsilon \quad (2.19)$$

เมื่อ $x_i x_j$ = อิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัย x_i และ x_j
 $\hat{\beta}_{ij}$ = ค่าสัมประสิทธิ์ของอิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัย

ในปัจจุบันมีการนำโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำเร็จรูปทางสถิติมาใช้คำนวณและวิเคราะห์การทดลองเชิงแฟกทอเรียลอย่างแพร่หลาย ผลลัพธ์ที่ได้จากโปรแกรมส่วนมากจะอยู่ในรูปของแบบจำลองเต็มรูปแบบ (Full model) ซึ่งเป็นการวิเคราะห์ที่รวมปัจจัยหลัก (Main effect) และอิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัย (Interaction effect) ทุกตัว แต่สำหรับแบบจำลองถดถอยที่จะนำไปใช้ในการจำลองเพื่อหาระดับที่เหมาะสมของแต่ละปัจจัยในกระบวนการนั้น จะต้องตัดพจน์ที่ไม่มีนัยสำคัญทางสถิติออกไป เรียกว่าแบบจำลองลดรูป (Reduced model) ซึ่งค่าความผิดพลาด (Error) หรือส่วนตกค้างของผลรวมของค่าเบี่ยงเบนกำลังสอง (Residual sum of square) ที่เกิดขึ้นในกระบวนการเมื่อใช้แบบจำลองลดรูปจะประกอบไปด้วยค่าความผิดพลาดจริง (Pure error) ในกระบวนการ และค่าความเหมาะสมของแบบจำลองถดถอย (Lack of fit) ที่ประกอบไปด้วยค่าผลรวมของค่าเบี่ยงเบนกำลังสองของปัจจัยที่ตัดออกจากแบบจำลอง

ในการประเมินความเหมาะสมของแบบจำลองว่ามีประสิทธิภาพเพียงพอที่จะนำไปใช้งานหรือไม่ โดยส่วนมากมักจะพิจารณาที่ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R-squared, R^2) หากค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจมีค่าที่สูง ๆ หมายความว่าแบบจำลองนั้นมีความเหมาะสมกับข้อมูลนั่นเอง แต่อย่างไรก็ตามมีบางเงื่อนไขที่ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจก็ไม่อาจให้คำตอบที่ดีได้ และค่าสถิตินี้อาจจะเพิ่มมากขึ้นเมื่อเพิ่มปัจจัยเข้าไปในแบบจำลอง จึงจำเป็นต้องปรับค่าขนาดของแบบจำลองเพื่อให้ได้ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจที่แท้จริง ซึ่งค่าสถิตินี้สามารถลดลงได้ถ้ามีการเพิ่มพจน์ที่ไม่มีนัยสำคัญลงไปในแบบจำลอง เรียกค่าสถิติใหม่ที่ได้อีกว่าค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ

ที่ปรับแล้ว (Adjusted R-squared, Adj-R²) สำหรับค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจการทำนาย (Predicted R-squared, Pred-R²) เป็นค่าสถิติที่ใช้บ่งบอกถึงความสามารถของแบบจำลองในการทำนายข้อมูลใหม่ ถึงแม้ว่าการตัดพจน์ที่ไม่มีนัยสำคัญออกไปของแบบจำลองลดรูป กระทำเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของแบบจำลองนั้น แต่ในบางครั้งจะพบว่าแบบจำลองดังกล่าวมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจที่น้อยกว่าแบบจำลองเต็มรูป อย่างไรก็ตามค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจที่ปรับแล้วของแบบจำลองลดรูปจะมีค่าที่มากกว่าค่าของแบบจำลองเต็มรูปอยู่เล็กน้อย นอกจากนี้ยังเป็นการเพิ่มค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจการทำนายอีกด้วย และเป็นที่แน่นอนว่าการตัดพจน์ที่ไม่มีนัยสำคัญออกไปจากแบบจำลองเต็มรูป ทำให้ได้แบบจำลองสุดท้ายที่มีประสิทธิภาพมากพอที่จะเป็นตัวทำนายข้อมูลใหม่ที่ดียิ่งได้ รวมไปถึงได้แบบจำลองที่สั้นกว่าแบบจำลองเต็มรูปอีกด้วย

2.9 การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

วิธีการทางสถิติเป็นเครื่องมือที่สำคัญและนิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในงานวิจัย โดยวิธีการทางสถิติจะประกอบด้วยการรวบรวมข้อมูล การวิเคราะห์ข้อมูล และการสรุปข้อมูลเพื่อนำไปตัดสินใจใช้ในด้านต่าง ๆ สามารถใช้วิธีการทางสถิติสรุปลักษณะที่สำคัญของกลุ่มตัวอย่าง เช่น การหาค่าเฉลี่ย การหาค่ากลาง การหาค่าความแปรปรวน การหาค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน รวมไปถึงการสร้างรูปกราฟต่าง ๆ เป็นต้น นอกจากนี้ยังสามารถใช้วิธีการทางสถิติในการหาความสัมพันธ์ต่าง ๆ เช่น การทดสอบ t (t-test) การวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of variance, ANOVA) และการวิเคราะห์ความถดถอยและความสัมพันธ์ (Regression and correlation) เป็นต้น

2.9.1 การใช้ P-value ในการทดสอบสมมติฐาน

วิธีการรายงานผลของการทดสอบสมมติฐานวิธีหนึ่ง คือ การแสดงว่าสมมติฐานหลักจะถูกปฏิเสธหรือไม่ที่ระดับความเชื่อมั่น หรือระดับนัยสำคัญที่กำหนด (α) โดยค่า P-value นี้จะแสดงถึงน้ำหนักของหลักฐานที่จะใช้ในการปฏิเสธสมมติฐานหลักที่ว่าค่าเฉลี่ยของข้อมูลมีค่าเท่ากันในทุกกรณีแม้จะเปลี่ยนแปลงตัวแปรต้นก็ตาม ($H_0 : \mu_1 = \mu_2$) นอกจากนี้ยังสามารถนิยามค่า P-value เป็นค่าที่น้อยที่สุดของระดับนัยสำคัญซึ่งนำไปสู่การปฏิเสธสมมติฐานหลัก (H_0) ก็ได้โดยปกติจะสามารถบอกได้ว่าค่าการทดสอบทางสถิตินั้นมีนัยสำคัญต่อเมื่อสมมติฐานหลักถูกปฏิเสธ กล่าวได้ว่าอาจจะพิจารณาค่า P-value ว่าเป็นค่า α ที่น้อยที่สุดซึ่งทำให้ชุดข้อมูลนั้นมีนัยสำคัญ

2.9.2 การวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of variance, ANOVA)

ความแปรปรวน (Variance) เป็นวิธีการวัดการกระจายของข้อมูลซึ่งมีความสัมพันธ์กับส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน เนื่องจากความแปรปรวนสามารถคำนวณได้จากค่าผลรวมของค่าเบี่ยงเบนกำลังสอง (Sum of square, SS) สำหรับการวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of variance) หรือ ANOVA เป็นวิธีหนึ่งที่ใช้ในการทดสอบสมมติฐานเพื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของกลุ่มตัวอย่างมากกว่าสองกลุ่มขึ้นไป โดยความแตกต่างระหว่างกลุ่มจะถูกวัดในรูปของส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานหรือความแปรปรวน ซึ่งในที่นี้คือค่าเฉลี่ยของความแปรผัน ในการทดสอบสมมติฐานโดยใช้วิธีวิเคราะห์ความแปรปรวน ตัวแปรที่ศึกษาอาจมีเพียงตัวเดียวหรือหลายตัวแปรก็ได้ ซึ่งในแต่ละตัวแปรอาจจะแบ่งได้หลายระดับขึ้นอยู่กับแต่ละกระบวนการ โดยที่ตัวแปรอิสระ (Independent variable) หรือปัจจัยหลัก (Main effect) นั้น อาจจะเป็นข้อมูลเชิงปริมาณหรือเชิงคุณภาพก็ได้ แต่ตัวแปรตามหรือปัจจัยตอบสนอง (Response) นั้นจะต้องเป็นตัวแปรเชิงปริมาณ

ก่อนการนำข้อมูลที่ได้จากการทดลองไปวิเคราะห์ความแปรปรวนจำเป็นต้องตรวจสอบความเหมาะสมและความถูกต้องของข้อมูลที่ได้จากการทดลอง ด้วยวิธีการตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบการทดลอง (Model adequacy checking) โดยทดสอบตามสมมติฐานรูปแบบของค่าส่วนตกค้าง (Residuals) ที่ได้จากข้อมูลการทดลองต้องมีการแจกแจงแบบปกติ (Normal distribution) และเป็นอิสระด้วยค่าเฉลี่ยใกล้เคียง 0 (Independently distributed) และค่าความแปรปรวนมีเสถียรภาพ (Constant variance, σ^2) จึงจะทำให้ข้อมูลจากการทดลองมีความถูกต้องและเชื่อถือได้

1. การวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียว (One-way ANOVA)

การวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียวเป็นการทดสอบเพื่อวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระตัวเดียวกับตัวแปรตามตัวเดียว โดยที่ตัวแปรอิสระอาจจะมีลักษณะเป็นตัวแปรเชิงปริมาณหรือเชิงคุณภาพก็ได้ ส่วนตัวแปรตามจะมีลักษณะเป็นตัวแปรเชิงปริมาณ ความสัมพันธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดี่ยวนี้อาจบอกได้ว่าตัวแปรอิสระที่ใช้ส่งผลอย่างไรต่อตัวแปรตามที่กำหนดไว้ตามสมมติฐาน สามารถหาค่าผลรวมของค่าเบี่ยงเบนกำลังสองรวมทั้งหมด (Total corrected sum of square) ได้ตามสมการที่ 2.20

$$SS_T = SS_{\text{Treatment}} + SS_{\text{Error}} \quad (2.20)$$

$$\begin{aligned}
 \text{เมื่อ } SS_T &= \text{ค่าผลรวมของค่าเบี่ยงเบนกำลังสองรวมทั้งหมด} \\
 SS_{\text{Treatment}} &= \text{ค่าผลรวมของค่าเบี่ยงเบนกำลังสองที่เกิดเนื่องจากระดับ} \\
 SS_{\text{Error}} &= \text{ค่าผลรวมของค่าเบี่ยงเบนกำลังสองที่เกิดเนื่องจากความผิดพลาด}
 \end{aligned}$$

ในการวิเคราะห์เอกลักษณ์ความแปรปรวนตามสมการที่ 2.20 ทำให้ได้ค่าประมาณของความแปรปรวน 2 ตัว คือ ค่าความแปรผันระหว่างระหว่างระดับ และค่าความแปรผันภายในระดับ (ความผิดพลาดสุ่ม) หากไม่มีความแตกต่างกันในค่าเฉลี่ยของระดับ ค่าประมาณทั้ง 2 ค่าจะคล้ายคลึงกันมาก เพราะฉะนั้นในการเปรียบเทียบข้อมูลจึงใช้ค่าเฉลี่ยของค่าผลรวมของค่าเบี่ยงเบนกำลังสอง หรือเรียกว่าค่าเฉลี่ยกำลังสองของค่าเบี่ยงเบน (Mean square, MS) ในการอธิบาย ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ระหว่างค่าผลรวมของค่าเบี่ยงเบนกำลังสองและระดับความเป็นอิสระ เมื่อในกระบวนการนั้นมีจำนวนข้อมูลทั้งหมด N ค่า และมีปัจจัยที่กำลังพิจารณาอยู่ a ระดับ สามารถคำนวณค่าเฉลี่ยกำลังสองของค่าเบี่ยงเบนได้ตามสมการที่ 2.21

$$MS = \frac{SS}{DF} \quad (2.21)$$

$$\begin{aligned}
 \text{เมื่อ } MS &= \text{ค่าเฉลี่ยกำลังสองของค่าเบี่ยงเบน} \\
 DF &= \text{ระดับความเป็นอิสระ (Degree of freedom)}
 \end{aligned}$$

สำหรับสูตรที่ใช้ในการทดสอบความแปรปรวนคือ ค่าสถิติ F โดยคำนวณจากอัตราส่วนระหว่างค่าความแปรปรวนระหว่างระดับและค่าความแปรปรวนภายในระดับ จากนั้นจึงนำค่าสถิติ F ที่คำนวณได้ไปเทียบกับค่าสถิติ F ในตารางค่าวิกฤต เพื่อสรุปผลการวิเคราะห์ข้อมูลสามารถคำนวณค่าสถิติ F ได้ตามสมการที่ 2.22

$$F = \frac{MS_{\text{Treatment}}}{MS_{\text{Error}}} \quad (2.22)$$

$$\begin{aligned}
 \text{เมื่อ } F &= \text{ค่าสถิติ } F \\
 MS_{\text{Treatment}} &= \text{ค่าเฉลี่ยกำลังสองของค่าเบี่ยงเบนระหว่างระดับ} \\
 MS_{\text{Error}} &= \text{ค่าเฉลี่ยกำลังสองของค่าเบี่ยงเบนจากความผิดพลาด}
 \end{aligned}$$

อาจกล่าวได้ว่าค่าสถิติ F นี้เป็นตัวชี้วัดว่าปัจจัยหรือตัวแปรที่ศึกษานั้น ส่งผลกระทบต่อค่าการตอบสนองมากกว่าปัจจัยที่ไม่ได้ควบคุม หรือควบคุมไม่ได้ (Error) อยู่กี่เท่า หากค่าสถิติ F มีค่ามาก ๆ จะเป็นการปฏิเสธสมมติฐานหลัก (H_0) หรือค่าเฉลี่ยของข้อมูลในการทดลองแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ และหากค่าสถิติ F มีค่าน้อย ๆ บอกได้ว่าปัจจัยหรือตัวแปรที่ศึกษานั้นมีค่าที่เข้าใกล้ความผิดพลาดมากขึ้น ซึ่งอาจจะเกิดได้จาก 2 สาเหตุหลัก คือ ในกระบวนการทดลองนั้นมีค่าความผิดพลาดจริง (Pure error) ที่มากเกินไป และปัจจัยที่ศึกษานั้นส่งผลต่อค่าการตอบสนองน้อยเกินไป ซึ่งขั้นตอนในการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียวสรุปได้ตามตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 การวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียว (One-way ANOVA)

| Source | Degree of freedom (DF) | Sum of square (SS) | Mean square (MS) | F |
|--------------------|------------------------|-------------------------|-------------------------|---|
| Between treatments | a-1 | $SS_{\text{Treatment}}$ | $MS_{\text{Treatment}}$ | $F = \frac{MS_{\text{Treatment}}}{MS_{\text{Error}}}$ |
| Error | N-a | SS_{Error} | MS_{Error} | - |
| Total | N-1 | SS_T | - | - |

2. การวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบสองทาง (Two-way ANOVA)

การวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบสองทางมีลักษณะที่คล้ายคลึงกับการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียว ซึ่งแตกต่างกันที่ในการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบสองทางนี้ เป็นการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระ 2 ตัว กับตัวแปรตามเพียงตัวเดียว โดยที่ตัวแปรอิสระอาจจะมีลักษณะเป็นตัวแปรเชิงปริมาณหรือเชิงคุณภาพก็ได้ ส่วนตัวแปรตามจะมีลักษณะเป็นตัวแปรเชิงปริมาณ ความสัมพันธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบสองทางนี้สามารถบอกได้ว่าตัวแปรอิสระที่ใช้ส่งผลอย่างไรต่อตัวแปรตามที่กำหนดไว้ตามสมมติฐาน ในการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบสองทาง สามารถศึกษาผลของตัวแปรอิสระทั้ง 2 ตัว ไปพร้อมกันได้ โดยที่สามารถศึกษาถึงผลของอิทธิพลร่วมหรืออันตรกิริยา (Interaction effect) ระหว่างตัวแปรอิสระทั้ง 2 ตัว ได้อีกด้วย

ในการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบสองทางมีหลักการเบื้องต้นที่คล้ายคลึงกับการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียว ซึ่งในการคำนวณต่าง ๆ จะเพิ่มพจน์ของอิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัยเข้าไปด้วย สามารถหาค่าผลรวมของค่าเบี่ยงเบนกำลังสองรวมทั้งหมด (Total corrected sum of square) ได้ตามสมการที่ 2.23

$$SS_T = SS_A + SS_B + SS_{AB} + SS_{Error} \quad (2.23)$$

เมื่อ SS_A = ค่าผลรวมของค่าเบี่ยงเบนกำลังสองจากตัวแปรอิสระตัวที่ 1
 SS_B = ค่าผลรวมของค่าเบี่ยงเบนกำลังสองจากตัวแปรอิสระตัวที่ 2
 SS_{AB} = ค่าผลรวมของค่าเบี่ยงเบนกำลังสองของอิทธิพลร่วมระหว่างตัวแปรอิสระ

หากในกระบวนการนั้นมีจำนวนข้อมูลทั้งหมด N ค่า และระดับปัจจัยของตัวแปรอิสระตัวที่ 1 และ 2 เท่ากับ a และ b ระดับตามลำดับ สามารถวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบสองทางได้ในทำนองเดียวกันกับการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียว ซึ่งคำนวณค่าต่าง ๆ ได้ตามตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 การวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบสองทาง (Two-way ANOVA)

| Source | Degree of freedom (DF) | Sum of square (SS) | Mean square (MS) | F |
|--------------|---------------------------|-----------------------|---------------------|---------------------------------------|
| A treatments | a-1 | SS_A | MS_A | $F_A = \frac{MS_A}{MS_{Error}}$ |
| B treatments | b-1 | SS_B | MS_B | $F_B = \frac{MS_B}{MS_{Error}}$ |
| Interaction | (a-1)(b-1) | SS_{AB} | MS_{AB} | $F_{AB} = \frac{MS_{AB}}{MS_{Error}}$ |
| Error | ab(N-1) | SS_{Error} | MS_{Error} | - |
| Total | abN-1 | SS_T | - | - |

บทที่ 3

เครื่องอัดขึ้นรูปรีออนและแม่พิมพ์

เนื้อหาในบทนี้จะกล่าวถึงการออกแบบเครื่องอัดขึ้นรูปรีออนและแม่พิมพ์ที่ใช้ในงานวิจัย โดยจะเริ่มจากรายละเอียดเบื้องต้นของเครื่องอัดขึ้นรูปรีออน โครงสร้างหลักของเครื่องอัด ระบบให้ความร้อนแก่แม่พิมพ์ รวมไปถึงการเลือกขนาดของแม่แรงไฮดรอลิก สำหรับแม่พิมพ์ที่ใช้ในงานวิจัยมีอยู่ 2 ชุด คือ แม่พิมพ์สำหรับขึ้นรูปชิ้นทดสอบ และแม่พิมพ์สำหรับขึ้นรูปภาชนะ

3.1 รายละเอียดเบื้องต้น

ตามแนวความคิดของท่านอาจารย์ที่ปรึกษานั้น ให้จัดทำเครื่องอัดขึ้นรูปพร้อมแม่พิมพ์เพื่อใช้ในการวิจัย โดยมีหลักการที่ต้องเป็น “การอัดขึ้นรูปและอบแห้งไปในตัว” เพื่อลดระยะเวลาและต้นทุนในการผลิตภาชนะย่อยสลายได้ หลังจากทีคณะผู้วิจัยได้ออกแบบเชิงแนวคิดของลักษณะและหลักการทำงานที่ต้องการแล้ว จึงเริ่มต้นเขียนแบบ โครงสร้างหลักของเครื่องอัดขึ้นรูปและแม่พิมพ์ เมื่อเริ่มจัดทำพบปัญหาบางประการ เช่น การปรับเปลี่ยนรูปแบบการให้ความร้อนแก่แม่พิมพ์ ราคาต้นทุนที่สูงเกินกว่างบประมาณที่ตั้งไว้ รวมไปถึงความยุ่งยากในกระบวนการผลิต จึงมีการเปลี่ยนแปลงการออกแบบในรายละเอียดให้เหมาะสมและง่ายต่อการผลิต

เนื่องจากวัตถุดิบเริ่มต้นที่ใช้ในการผลิตภาชนะย่อยสลายได้นั้นมีปริมาณความชื้นสูง เพื่อให้ลดระยะเวลาและต้นทุนในกระบวนการผลิต คณะผู้วิจัยจึงเลือกใช้กระบวนการอัดขึ้นรูปรีออน แทนการอัดขึ้นรูปเย็นแล้วค่อยนำมาอบแห้งภายหลัง ในเบื้องต้นได้เลือกใช้ระบบให้ความร้อนแก่แม่พิมพ์เป็นปืนเป่าลมร้อน (Hot air gun) เพื่อให้แม่พิมพ์ได้รับความร้อนที่สม่ำเสมอและมีความเป็นเอกรูป (Uniform) โดยจะให้ความร้อนที่แม่พิมพ์ตัวล่างเพียงตัวเดียวเพื่อให้ไอน้ำส่วนเกินระเหยขึ้นด้านบน ส่วนชุดที่ขยับได้จะเป็นแม่พิมพ์ด้านบนซึ่งจะติดตั้งเข้ากับแม่แรงไฮดรอลิก (แม่แรงกระปุก) แต่เมื่อพิจารณาในรายละเอียด ได้ตระหนักว่าในการใช้งานจริงการให้ความร้อนจากปืนเป่าลมร้อนไปยังแม่พิมพ์นั้นเป็นการพาความร้อน (Convection) โดยมีตัวกลางเป็นอากาศซึ่งอาจจะมีการสูญเสียความร้อนสู่บรรยากาศมาก และยังใช้เวลาในการอุ่นแม่พิมพ์ที่นาน ส่งผลให้อายุการใช้งานของปืนลมร้อนสั้นลงเนื่องจากการทำงานที่ติดต่อกันเป็นเวลานาน ทั้งนี้การใช้แม่แรงไฮดรอลิกติดตั้งข้างบนนั้นเป็นการจัดวางตำแหน่งที่ไม่ถูกหลักการใช้งานนัก ดังนั้นคณะผู้วิจัยจึงตัดสินใจแก้ไขแบบโครงสร้างหลักเครื่องอัดขึ้นรูปรีออนมาใช้ระบบให้ความร้อนแบบฮีทเตอร์แท่ง (Cartridge

โครงสร้างหลักของเครื่องอัดขึ้นรูปร้อนจะใช้เสาสนเตนเลส จำนวน 4 เสา เพื่อให้แท่นรองแม่พิมพ์ตัวล่างซึ่งเป็นส่วนเคลื่อนที่นั้น สามารถเคลื่อนที่ขึ้นลงได้อย่างเป็นระนาบ โดยทำการกลึงปลอกทองเหลืองสวมอัดระหว่างแท่นรองหลักกับเสาทั้ง 4 เสา สาเหตุที่เลือกเสาสนเตนเลสและใช้ปลอกทองเหลืองเนื่องจากป้องกันการเกิดสนิมในส่วนที่ต้องเคลื่อนที่ตลอดเวลา เครื่องอัดขึ้นรูปร้อนใช้แม่แรงไฮดรอลิกขนาด 20 ตัน โดยติดตั้งหน้าปัดวัดความดัน (Pressure gauge) เข้ากับแม่แรงไฮดรอลิกเพื่อที่จะได้ทราบความดันภายในกระบอกสูบที่ใช้ในกระบวนการอัด เลือกใช้หน้าปัดแบบหน้าน้ำมันเพื่อลดการสั่นของเข็มชี้วัด สามารถอ่านค่าได้ในหน่วย bar ทั้งนี้แม่พิมพ์ไม่ได้ถูกยึดติดกับแท่นรองเพื่อให้สามารถประยุกต์ใช้ได้หลายแม่พิมพ์ แท่นรองแม่พิมพ์เลือกใช้เหล็ก SS400 ซึ่งเป็นเหล็กโครงสร้างทั่วไป ระยะห่างเริ่มต้นระหว่างแท่นรองแม่พิมพ์ด้านบนและตัวล่างเท่ากับ 8.5 cm



รูปที่ 3.2 เครื่องอัดขึ้นรูปร้อนในงานวิจัย



รูปที่ 3.3 ปลอกทองเหลืองติดตั้งเข้ากับแท่นรองแม่พิมพ์ตัวล่าง



รูปที่ 3.4 หน้าปัดวัดความดัน (Pressure gauge)

3.3 ระบบให้ความร้อนแก่เครื่องอัด

ใช้ระบบให้ความร้อนเป็นฮีตเตอร์แท่ง (Cartridge heater) ขนาด 8×80 mm กำลังไฟฟ้า 250 Watt ติดตั้งเข้ากับแท่นรองแม่พิมพ์ทั้งด้านบนและด้านล่างแท่นละ 4 ตัว ให้ความร้อนได้สูงถึง 200°C เพื่อเป็นการป้องกันการสูญเสียความร้อนจากแท่นรองแม่พิมพ์ไปยังโครงสร้างหลัก ตรงรอยต่อระหว่างแท่นรองแม่พิมพ์และโครงสร้างหลักจึงรองด้วยฉนวนกันความร้อนหนา 2 cm เลือกใช้เครื่องมือวัดอุณหภูมิเป็นชีทเทอร์โมคัปเปิล (Sheath thermocouple) ชนิด K ขนาด 2.3×50 mm ติดตั้งที่กึ่งกลางของแท่นรองแม่พิมพ์ ส่งสัญญาณให้กับระบบควบคุมอุณหภูมิแบบ PID สามารถปรับตั้งค่าอุณหภูมิแยกกันได้ที่ทั้งแท่นรองแม่พิมพ์ด้านบนและด้านล่าง ที่ตู้ควบคุมมีไฟแสดงสถานะของเครื่อง และไฟแสดงสถานะพร้อมใช้งาน และสามารถตัดวงจรได้หากอุณหภูมิมีค่าสูงเกินกว่าที่กำหนดไว้ นอกจากนี้ยังมีปุ่มหยุดเครื่องอัตโนมัติในกรณีที่เกิดอุบัติเหตุ



รูปที่ 3.5 (ก) ฮีตเตอร์แท่ง และ (ข) ชีทเทอร์โมคัปเปิล



รูปที่ 3.6 ตู้ควบคุมระบบไฟฟ้าของเครื่องอัดขึ้นรูปร้อนในงานวิจัย

3.4 การเลือกขนาดของแม่แรง

จากการศึกษากระบวนการอัดขึ้นรูปเบื้องต้นด้วยเครื่องอัดขึ้นรูปร้อน (GOTECH, model GT-7014-A30, GOTECH Testing Machines Inc.) ที่ประจำอยู่ห้องปฏิบัติการวิศวกรรมพอลิเมอร์ อาคารเครื่องมือ 4 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี พบว่าในการขึ้นรูปขึ้นทดสอบในเบื้องต้นนั้นจะ ใช้ความดันภายในกระบอกสูบของเครื่องอัดไม่เกิน 1,000 psi-g สามารถคำนวณย้อนกลับหาค่าแรงที่แม่แรงใช้กดชิ้นงานได้ดังสมการที่ 3.1

$$P = \frac{F}{A} \quad (3.1)$$

เมื่อ P = ความดันภายในกระบอกสูบ (Pa)
 F = แรงกระทำตั้งฉากที่กระบอกสูบใช้กดชิ้นงาน (N)
 A = พื้นที่หน้าตัดของกระบอกสูบ (m^2)

สามารถจัดรูปสมการใหม่ได้ดังสมการ 3.2

$$F = P \times A \quad (3.2)$$

แปลงค่าความดันภายในกระบอกสูบให้อยู่ในหน่วย SI กล่าวคือ 1,000 psi-g เท่ากับ 6.895×10^6 Pa นอกจากนี้สามารถคำนวณพื้นที่หน้าตัดของกระบอกสูบได้ตามสมการที่ 3.3 เมื่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของกระบอกสูบมีค่าเท่ากับ 17.2 cm

$$A = \frac{\pi}{4} d^2 \quad (3.3)$$

เมื่อ π = 3.14159
 d = เส้นผ่านศูนย์กลางกระบอกสูบ (m)

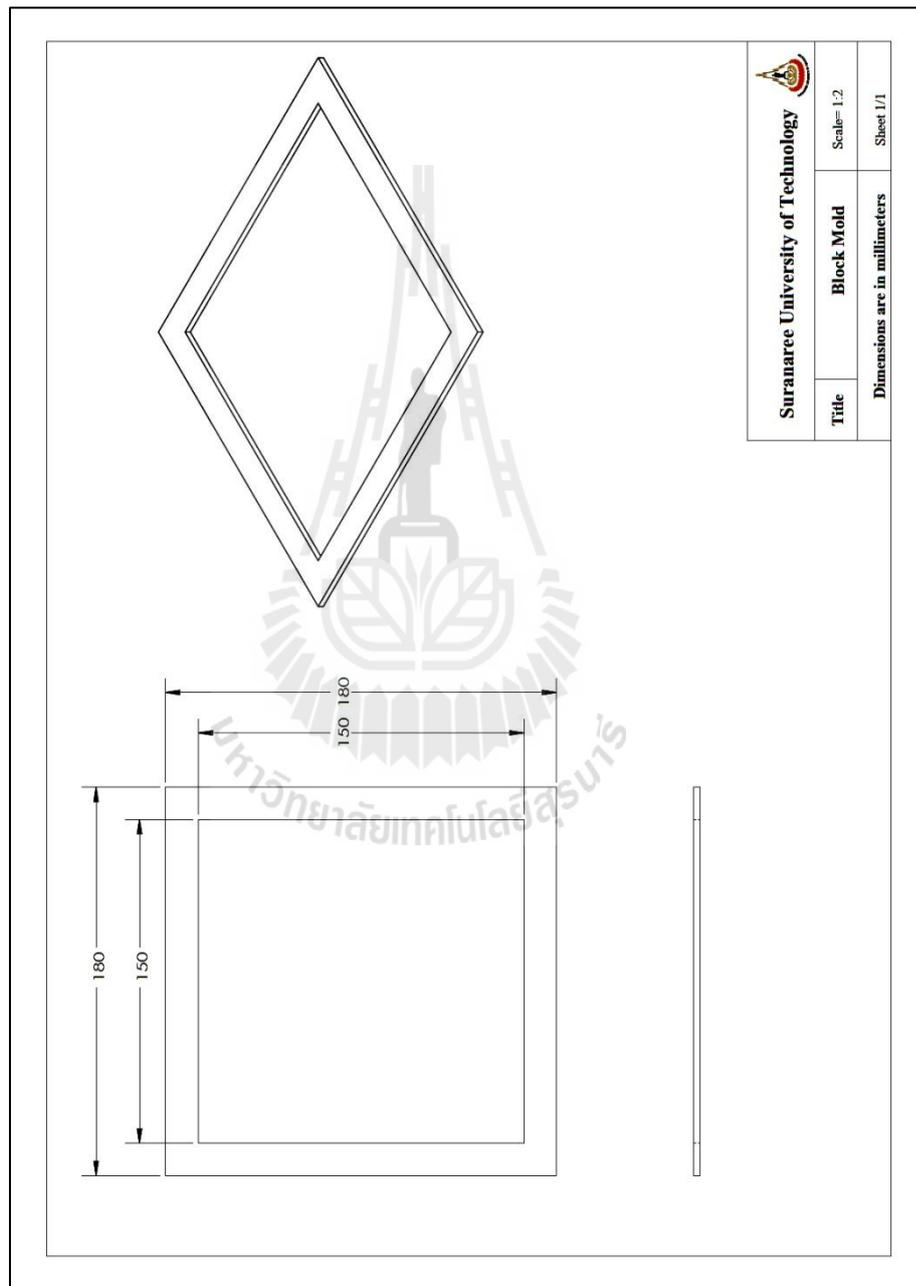
จากการคำนวณตามสมการที่ 3.2 และ 3.3 จะได้ค่าแรงที่ใช้ในการกดชิ้นงาน เท่ากับ 1.602×10^5 N โดยสามารถแปลงหน่วยให้อยู่ในรูปของ kilogram-force (kgf) ซึ่งเป็นหน่วยของแรงในระบบเมตริกได้ด้วยความสัมพันธ์ตามสมการที่ 3.4

$$1 \text{ N} = 0.1019716 \text{ kgf} \quad (3.4)$$

ดังนั้นแรงที่ใช้ในการกดชิ้นงานจะเท่ากับ 13,069.238 kgf หรือเท่ากับ 13.069 ตัน (ในระบบ Metric) กล่าวคือความจุของแม่แรงที่ใช้ในงานวิจัยนี้จะต้องเลือกให้ความจุอย่างน้อย 15 ตัน จึงจะได้ตามแบบที่ต้องการ แต่เนื่องจากข้อจำกัดของการจัดซื้อแม่แรงขนาดตามต้องการภายในตัว อ.เมือง จ.นครราชสีมา ทำให้ได้แม่แรงไฮดรอลิกที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีความจุเท่ากับ 20 ตัน มาแทน

3.5 แม่พิมพ์สำหรับขึ้นรูปชิ้นทดสอบ

แม่พิมพ์ที่ใช้อัดขึ้นรูปชิ้นทดสอบนั้นใช้เหล็ก SS400 มีรูปร่างเป็นกรอบสี่เหลี่ยมขนาด 150×150 mm ความหนาประมาณ 3 mm ชิ้นงานที่ได้จะถูกนำไปตัดแต่งให้มีรูปร่างต่าง ๆ ตามมาตรฐานทดสอบด้วยเครื่องเลื่อยสายพานต่อไป



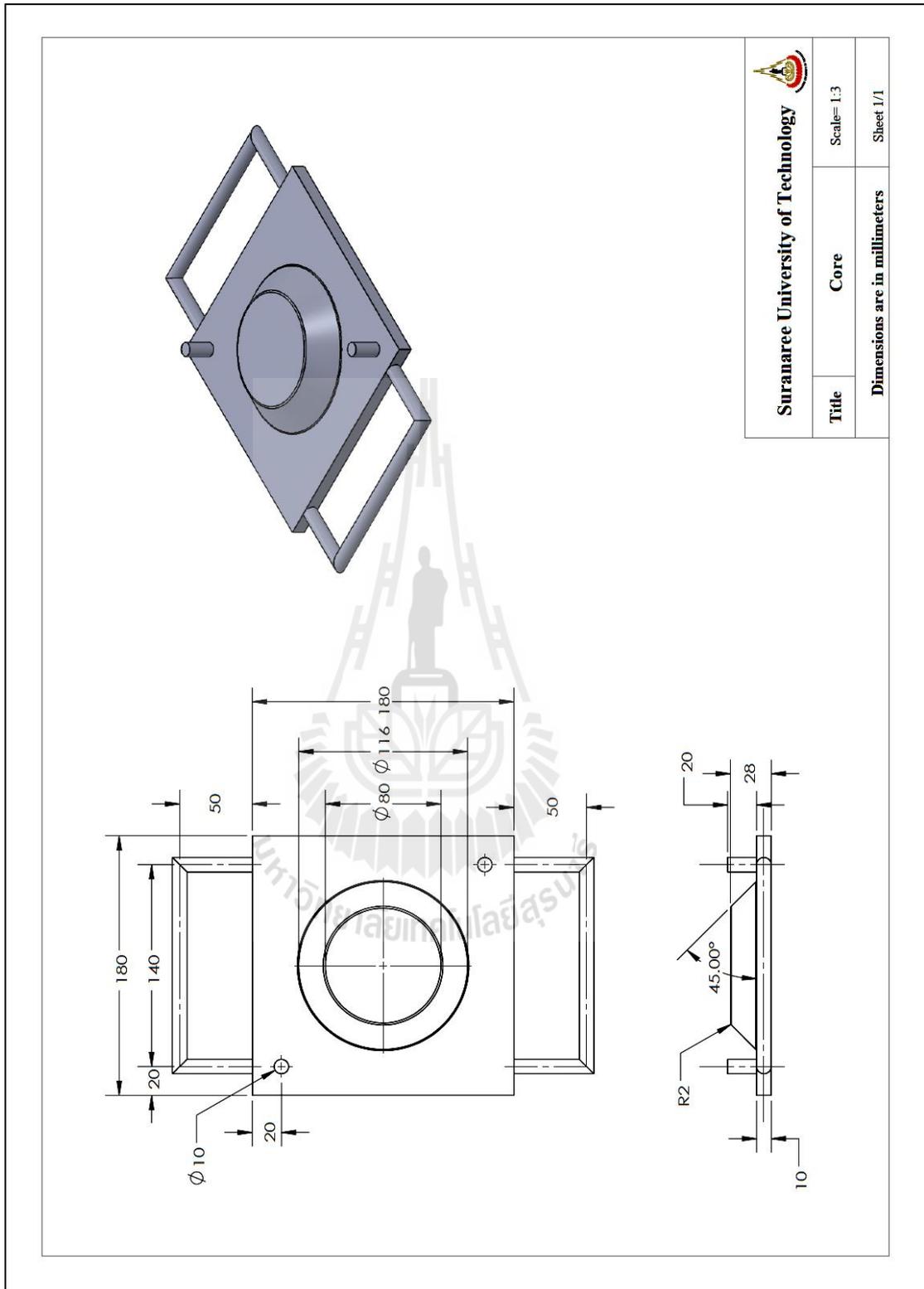
รูปที่ 3.7 แบบแม่พิมพ์ขึ้นรูปชิ้นทดสอบ



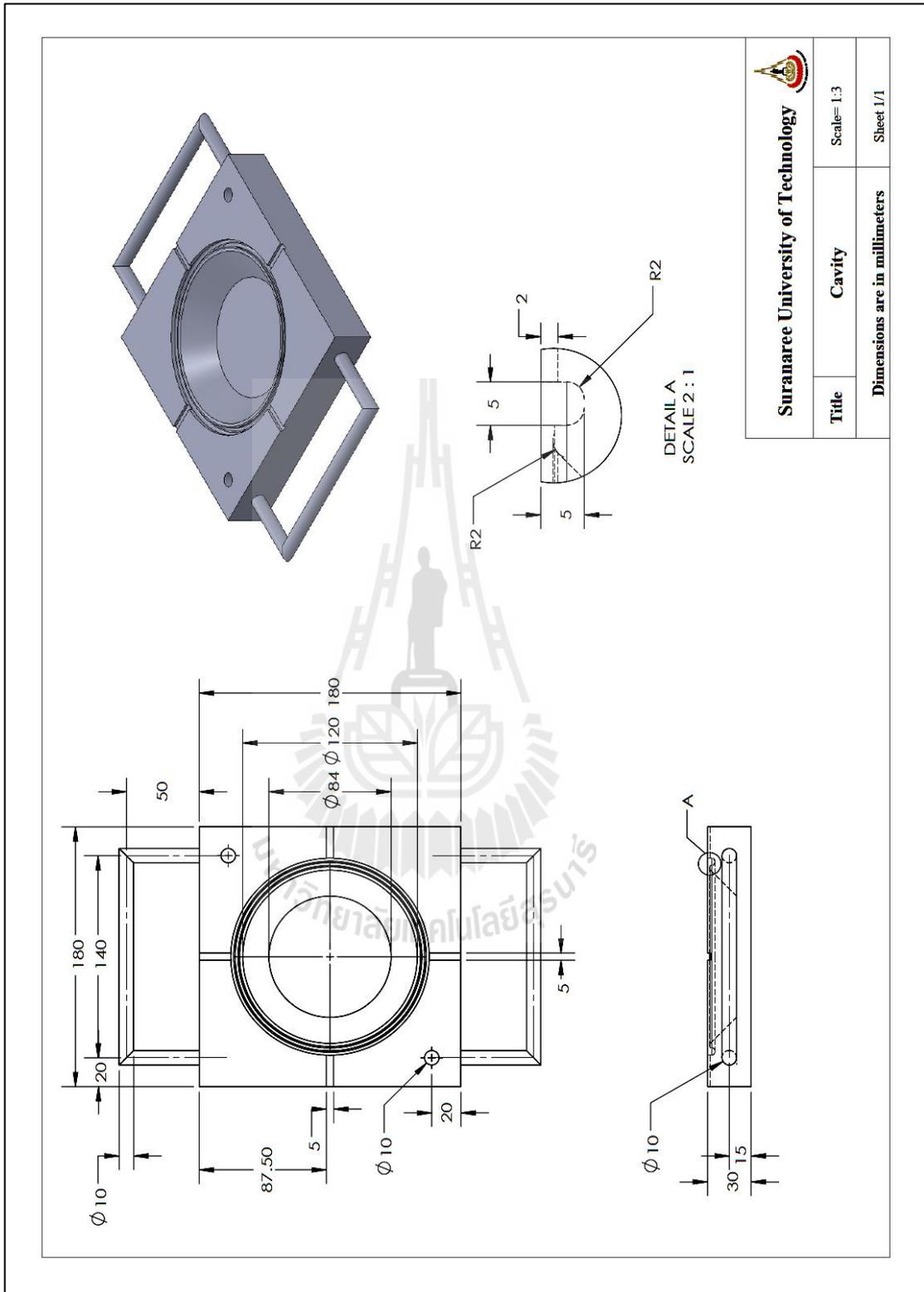
รูปที่ 3.8 แม่พิมพ์ขึ้นรูปขึ้นทดสอบ

3.6 แม่พิมพ์สำหรับขึ้นรูปภาชนะ

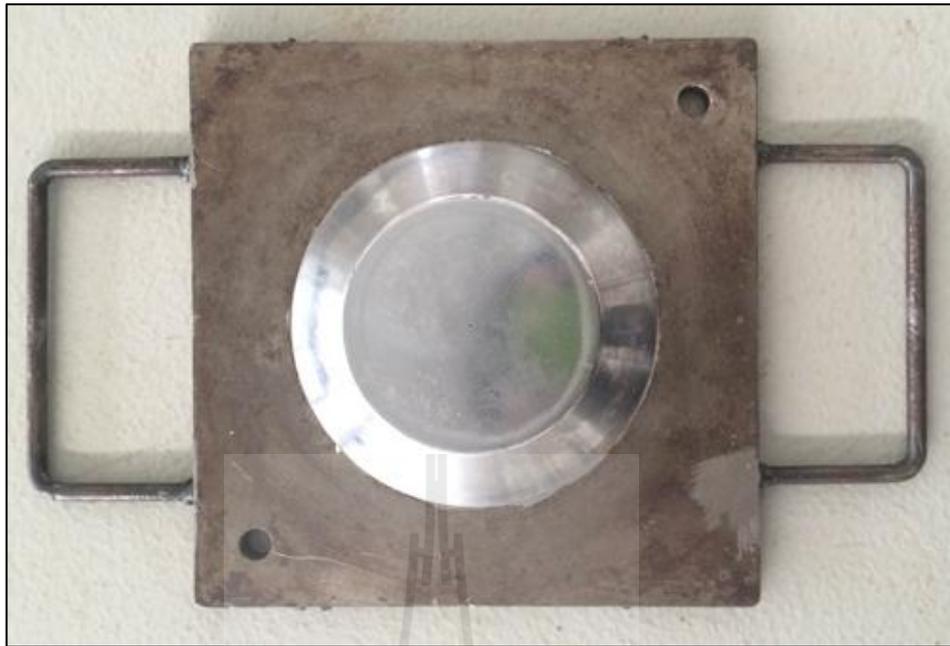
แม่พิมพ์ที่ใช้อัดขึ้นรูปภาชนะย่อยสลายได้นั้นใช้เหล็ก S45C (เหล็กหัวแดง) ซึ่งเป็นเหล็กที่นิยมนำมาใช้ทำแม่พิมพ์กันทั่วไป ออกแบบเป็นแม่พิมพ์แบบกึ่งเปิดที่ใช้มากในการอัดขึ้นงานทั่วไป และชิ้นงานที่ได้มีความแข็งแรงพอควร สำหรับผิวหน้าของแม่พิมพ์ตัวผู้ (Core) และแม่พิมพ์ตัวเมีย (Cavity) ทำการชุบฮาร์ดโครเมียม เพื่อให้สามารถแกะชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์ได้โดยง่าย เนื่องจากผิวหน้าที่ผ่านการชุบฮาร์ดโครเมียมนั้นจะเรียบ ลื่น และเป็นมันเงา ทั้งยังปราศจากการเป็นสนิมอีกด้วย แม่พิมพ์ตัวเมียเป็นรูปจานกลมมิติด้านนอกมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางด้านบนเท่ากับ 12 cm และด้านล่างเท่ากับ 8.4 cm ความสูงเท่ากับ 2 cm โดยมีระยะห่างระหว่างแม่พิมพ์ผู้และตัวเมียเท่ากับ 2 mm ที่แม่พิมพ์ตัวเมียมีร่องรูเส้นขนาด 5×5 mm อยู่โดยรอบรูปทรงจานเพื่อให้วัสดุที่เติมมากเกินไปสามารถเล็ดลอดออกมาเป็นครีบ (Flash) ได้บ้าง และเนื่องจากวัสดุตั้งต้นที่ใช้ในการผลิตภาชนะย่อยสลายได้นั้นมีความชื้นสูงจึงทำร่องระบายไอน้ำส่วนเกิน (Vent) ขนาด 2×5 mm จำนวน 4 ช่อง อยู่รอบแม่พิมพ์ตัวเมีย เพื่อให้สามารถลดระยะเวลาในกระบวนการผลิตภาชนะย่อยสลายได้ลงมาอีก ในการประกบแม่พิมพ์ตัวผู้และตัวเมียเข้าหากันนั้นจะมีสลักนำ (Guide pin) เพื่อให้แม่พิมพ์ทั้งสองตัวได้ศูนย์ในขณะอัดขึ้นรูป ทั้งนี้ได้ติดตั้งหูจับชิ้นงานที่ด้านข้างของแม่พิมพ์ตัวผู้และตัวเมีย เพื่อความสะดวกในการทำงาน



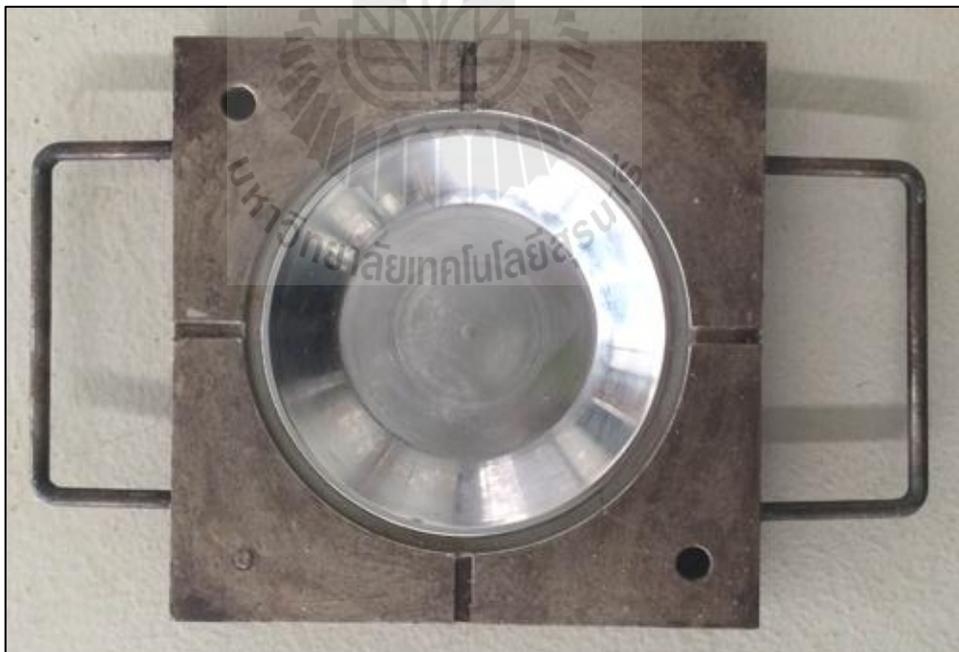
รูปที่ 3.9 แบบแม่พิมพ์ตัวผู้ (Core)



รูปที่ 3.10 แบบแม่พิมพ์ตัวเมีย (Cavity)



รูปที่ 3.11 แม่พิมพ์ตัวผู้



รูปที่ 3.12 แม่พิมพ์ตัวเมีย

บทที่ 4

วิธีดำเนินการวิจัย

ในงานศึกษาวิจัยครั้งนี้มุ่งเน้นการผลิตภาชนะบรรจุย่อยสลายได้ทางชีวภาพจากลำต้นมันสำปะหลังสดเป็นหลักด้วยกระบวนการอัดขึ้นรูปร้อน เพื่อให้ได้ภาชนะบรรจุที่สามารถใช้งานได้จริง ซึ่งสาระสำคัญในบทนี้จะกล่าวถึงกระบวนการดำเนินงานทั้งหมด เริ่มด้วยวัสดุ เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย การเตรียมวัตถุดิบตั้งแต่การบด การร่อนเพื่อคัดแยกขนาด และการผสมวัตถุดิบ อธิบายเกี่ยวกับการหาสภาวะที่เหมาะสม และวิธีการทดสอบสมบัติต่าง ๆ ตามมาตรฐาน

4.1 วัสดุ

4.1.1 มันสำปะหลัง พันธุ์ห้วยบง 60 อายุประมาณ 10 เดือน และพันธุ์เกษตรศาสตร์ 50 อายุประมาณ 10 เดือน เก็บเกี่ยวจากอำเภอขามทะเลสอ จังหวัดนครราชสีมา เลือกใช้ช่วงกลางของลำต้น โดยวัดขึ้นมาจากพื้นดินประมาณ 20 cm ยาวประมาณ 100-120 cm ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 2.0-3.5 cm

4.1.2 แป้งมันสำปะหลัง ผลิตโดยบริษัทสงวนวงษ์อุตสาหกรรม จำกัด ซึ่งเป็นแป้งแบบไม่ดัดแปร ใช้ในการทำเป็นสารยึดเกาะ

4.1.3 น้ำปราศจากไอออน (Deionized water, DI) ใช้ในการทดสอบการดูดซึมน้ำ

4.1.4 น้ำที่ผ่านการกรองด้วยระบบรีเวอร์สออสโมซิส (Reverse osmosis water, RO) ใช้ในการเตรียมสารยึดเกาะในการผสมกับแป้งมันสำปะหลัง

4.2 เครื่องมือและอุปกรณ์

4.2.1 เครื่องอัดขึ้นรูปร้อน (Compression molding) ขนาด 20 ตัน

4.2.2 เครื่องบดหยาบสแตนเลส ใบมีดขนาด 7" กำลัง 1.5 แรงม้า ผลิตโดยบริษัท สี่หีบโสมพานิช จำกัด ประเทศไทย

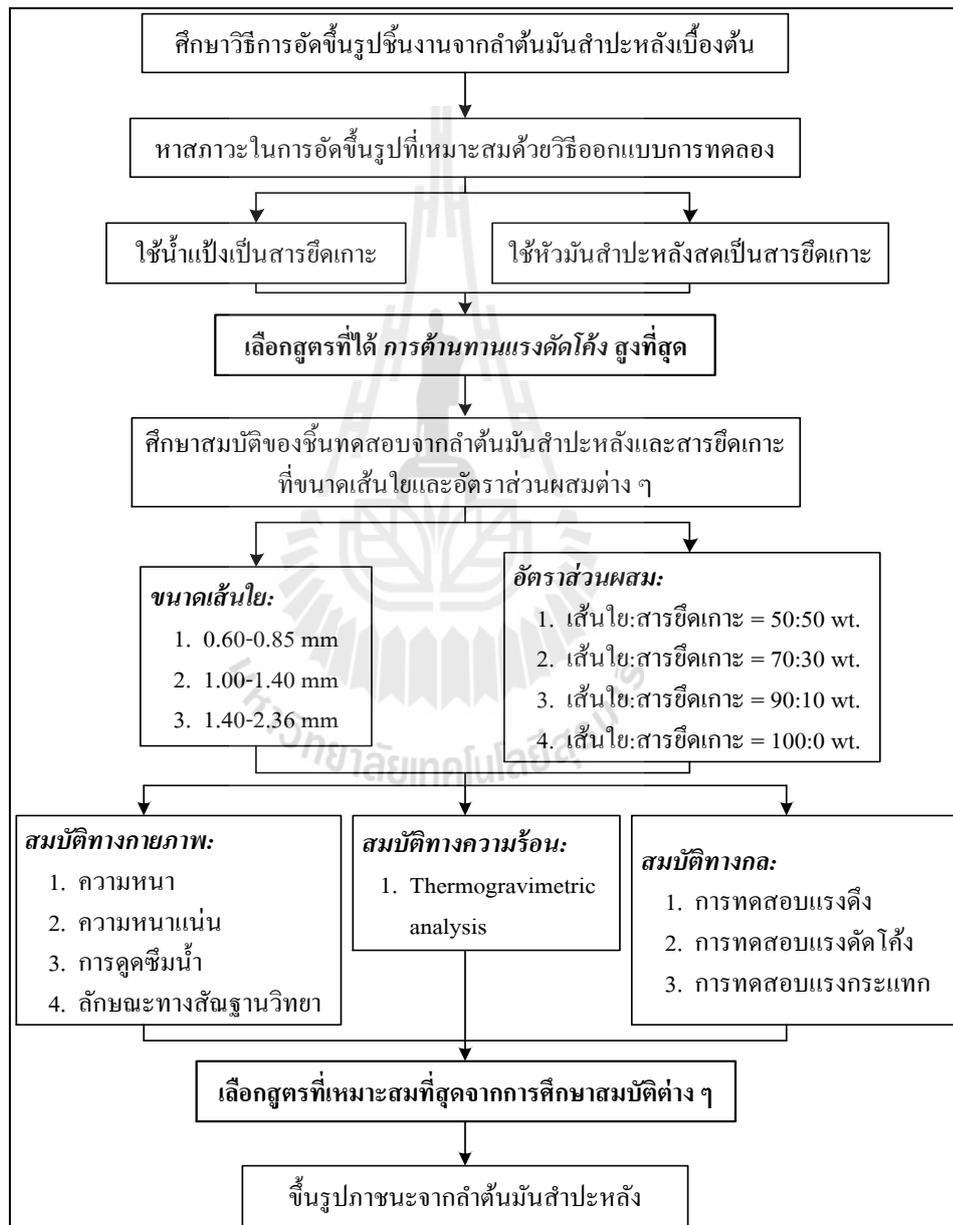
4.2.3 เครื่องผสมอาหาร ขนาด 2.8 L ผลิตโดยบริษัท House worth ประเทศจีน

4.2.4 เครื่องชั่งหยาบ (Weight balance) แบบดิจิทัล 2 ตำแหน่ง ชั่งน้ำหนักได้สูงสุด 1,100 g ผลิตโดยบริษัท Denver Instrument รุ่น TP-1102 ประเทศเยอรมนี

- 4.2.5 เครื่องชั่งละเอียด (Analytical balance) แบบดิจิทัล 4 ตำแหน่ง ชั่งน้ำหนักได้สูงสุด 230 g ผลิตโดยบริษัท Denver Instrument รุ่น SI-234 ประเทศเยอรมนี
- 4.2.6 ตู้อบลมร้อน (Hot air oven) ผลิตโดยบริษัท Memmert รุ่น Model 100-800 ประเทศสหรัฐอเมริกา
- 4.2.7 เครื่องร่อนตะแกรง Vibratory Sieve Shaker ANALYSETTE 3 PRO และตะแกรงร่อน Retsch test sieve ASTM E11 (1995) 8" diameter x 2" ขนาด Mesh No. 8, 14, 18, 20 และ 30
- 4.2.8 เครื่องทดสอบเอนกประสงค์ (Universal testing machine) ภาระกรรมสูงสุด 5 kN ผลิตโดยบริษัท INSTRON รุ่น Model 5565 ประเทศสหรัฐอเมริกา
- 4.2.9 เครื่องทดสอบแรงกระแทกแบบไอซอด (Basic pendulum impact tester) ผลิตโดยบริษัท Atlas polymer evaluation product รุ่น Model BPI ประเทศสหรัฐอเมริกา
- 4.2.10 กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงชนิดสเตอริโอ (Stereo microscope) ผลิตโดยบริษัท OLYMPUS รุ่น Model SZX16-DP21 ประเทศญี่ปุ่น
- 4.2.11 เครื่องทดสอบสมบัติทางความร้อน (Simultaneous TGA-DTA analyzer) ผลิตโดยบริษัท TA Instrument รุ่น SDT 2960
- 4.2.12 โถดูดความชื้น (Desiccator)
- 4.2.13 เวอร์เนียคาลิเปอร์ แบบดิจิทัล 2 ตำแหน่ง ผลิตโดยบริษัท Mitutoyo ประเทศญี่ปุ่น
- 4.2.14 แม่พิมพ์สำหรับอัดขึ้นรูปชิ้นทดสอบรูปสี่เหลี่ยมขนาด 150×150 mm หนา 3 mm และแผ่นประกบแม่พิมพ์
- 4.2.15 แม่พิมพ์สำหรับอัดขึ้นรูปภาชนะย่อยสลายได้ทางชีวภาพ
- 4.2.16 แผ่นเทฟลอน (Teflon sheet) ใช้รองระหว่างแม่พิมพ์และแผ่นประกบเพื่อป้องกันชิ้นทดสอบติดแม่พิมพ์
- 4.2.17 อุปกรณ์สำหรับการเตรียมวัตถุดิบ เช่น มีด ปีกเกอร์ กระจบกดวง ถาดอะลูมิเนียม เป็นต้น
- 4.2.18 อุปกรณ์สำหรับกระบวนการอัดขึ้นรูป เช่น ถังมือกั้นความร้อน เกรียงและแปรงทองเหลือง เครื่องเป่าลม เป็นต้น
- 4.2.19 อุปกรณ์อื่น ๆ เช่น ถังมือยาง ถังชิปลึค ที่คิบสาร เพลทอะคริลิก แปรงทาสี ผ้า เป็นต้น

4.3 แผนผังแสดงกระบวนการทำงาน

การผลิตภาชนะย่อยสลายได้จากลำต้นมันสำปะหลังในงานวิจัยนี้แบ่งออกเป็น 3 ส่วนหลัก คือ หาสภาวะในการอัดขึ้นรูปที่เหมาะสมด้วยวิธีการออกแบบการทดลอง จากนั้นเมื่อได้สภาวะที่เหมาะสมแล้วจึงนำไปทำชิ้นทดสอบเพื่อทดสอบสมบัติต่าง ๆ และส่วนสุดท้ายจะเป็นกระบวนการอัดขึ้นรูปภาชนะสำหรับใช้งานจริง



รูปที่ 4.1 แสดงแผนผังกระบวนการทำงานโดยสังเขป

4.4 วิธีดำเนินการทดลอง

4.4.1 การเตรียมเส้นใยต้นมันสำปะหลัง

ในการเตรียมเส้นใยต้นมันสำปะหลัง จะแบ่งออกเป็น 2 ส่วนหลัก คือ การเตรียมเส้นใยต้นมันสำปะหลังด้วยการบดหยาบ ใช้สำหรับเตรียมขึ้นทดสอบในการทดลองการหาสภาวะในการอัดที่เหมาะสม และการเตรียมเส้นใยต้นมันสำปะหลังที่ผ่านการร่อนตะแกรงเพื่อขนาดเส้นใย ใช้ในการศึกษาอิทธิพลของเส้นใย ต่อสมบัติต่าง ๆ ของขึ้นทดสอบ

1. เส้นใยต้นมันสำปะหลังแบบบดหยาบ

ต้นมันสำปะหลังพันธุ์หัวยวง 60 อายุประมาณ 10 เดือน แสดงดังรูปที่ 4.2 เลือกใช้ช่วงกลางของลำต้น โดยวัดขึ้นมาจากพื้นดินประมาณ 20 cm ยาวประมาณ 100-120 cm ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 2.0-3.5 cm



รูปที่ 4.2 ลำต้นมันสำปะหลังช่วงกลาง พันธุ์หัวยวง 60

นำลำต้นมันสำปะหลังมาเช็ดทำความสะอาด และบดหยาบลดขนาดด้วยเครื่องบดหยาบสแตนเลส จะได้เส้นใยต้นมันสำปะหลังในลักษณะ เส้นใยผง และเพื่อความสะดวกและรวดเร็วต่อการทดลองหาสภาวะในการอัดขึ้นรูปที่เหมาะสม จึงนำเส้นใยต้นมันสำปะหลังชนิดนี้ไปใช้ก่อนสำหรับการศึกษาเบื้องต้น จากนั้นเมื่อได้สภาวะการอัดที่เหมาะสมแล้วจึงค่อยดำเนินการร่อนตะแกรงเพื่อคัดแยกขนาดเส้นใยต้นมันสำปะหลังในการทดสอบอิทธิพลของขนาดเส้นใยต่อไป



รูปที่ 4.3 ลำต้นมันสำปะหลังบดหยาบ

2. เส้นใยต้นมันสำปะหลังที่ร้อนตะแกรงเพื่อคัดขนาด

ต้นมันสำปะหลังบดที่ใช้ในงานวิจัยนี้ผ่านการบดด้วยเครื่องบดหยาบ ซึ่งต้นมันสำปะหลังบดที่ได้มีหลายลักษณะทั้งเป็นผงเนื้อไม้ เส้นใยจากลำต้น ก้อนเนื้อเยื่อของส่วนลำเลียง น้ำและอาหาร รวมไปถึงเปลือกของต้นมันสำปะหลัง โดยในการศึกษาเบื้องต้นจากการนำต้นมันสำปะหลังมาบดหยาบผสมกับสารยึดเกาะแล้วนำไปอัดขึ้นรูปนั้นมีความเป็นไปได้ แต่การนำต้นมันสำปะหลังบดหยาบไปอัดขึ้นรูปโดยตรง อาจจะได้ชิ้นงานที่มีความเป็นเนื้อเดียวกันน้อยส่งผลให้สมบัติต่าง ๆ ลดน้อยลง ทั้งนี้ในงานวิจัยของท่านอื่นได้มีการศึกษาเกี่ยวกับขนาดเส้นใยธรรมชาติว่าส่งผลกระทบต่อสมบัติของชิ้นงานทั้งทางกลและทางกายภาพ แต่เนื่องจากข้อจำกัดทางเทคนิคของเครื่องบดหยาบที่ไม่สามารถตั้งระยะใบมีดเพื่อที่จะสามารถลดขนาดของลำต้นมันสำปะหลังได้ตามขนาดที่ต้องการได้ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องนำต้นมันสำปะหลังบดหยาบที่ได้ไปร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐานที่มีขนาดของช่องเปิดที่แตกต่างกัน เพื่อศึกษาอิทธิพลของขนาดเส้นใยมันสำปะหลังที่บดมาได้ต่อสมบัติทางกลและสมบัติทางกายภาพ

การตรวจสอบหาขนาดของเส้นใยต้นมันสำปะหลังกระทำได้โดยนำต้นมันสำปะหลังบดหยาบใส่ลงป้อนในตะแกรงมาตรฐาน ในงานวิจัยนี้ใช้ตะแกรงร้อนชื่อทางการค้า Retsch ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8” สูง 2” ตรงตามมาตรฐาน ASTM E11 (1995) ซึ่งตะแกรงที่ใช้ร้อนจะมีขนาดของช่องเปิดแตกต่างกันออกไป ดังแสดงในตารางที่ 4.1 โดยในการทดสอบจะจัดให้ตะแกรงที่มีช่องเปิดใหญ่ที่สุดอยู่ด้านบนและไล่ระดับลงมาให้ช่องเปิดเล็กที่สุด

อยู่ด้านล่าง ต้นมันสำปะหลังบดที่เล็กกว่าช่องเปิดของตะแกรงจะหล่นลงมาในชั้นต่อไป ต้นมันสำปะหลังบดที่ใหญ่กว่าจะค้างอยู่บนตะแกรง เมื่อทำการร่อนผ่านตะแกรงเสร็จแล้วจะนำมาชั่งเพื่อคำนวณหาปริมาณของต้นมันสำปะหลังบดที่ค้างตะแกรงที่ขนาดต่าง ๆ ตามสมการที่ 4.1

$$\% \text{ Retained} = \frac{W_{\text{Sieve}}}{W_{\text{Total}}} \times 100\% \quad (4.1)$$

เมื่อ $\% \text{ Retained}$ = น้ำหนักของต้นมันสำปะหลังบดที่ค้างบนตะแกรง (%)
 W_{Sieve} = น้ำหนักของต้นมันสำปะหลังบดที่ค้างบนตะแกรง (g)
 W_{Total} = น้ำหนักของต้นมันสำปะหลังบดทั้งหมด (g)

ตารางที่ 4.1 แสดงมวลผลของต้นมันสำปะหลังบดที่ร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐาน

| เบอร์ตะแกรง | ช่องเปิดของตะแกรง (mm) | น้ำหนักของตะแกรง (g) | $\% \text{ Retained}$ (%) |
|--------------|---------------------------|-------------------------|------------------------------|
| No. 8 | 2.36 | 350.56 | 8.01 ± 1.13 |
| No. 14 | 1.40 | 331.18 | 15.33 ± 0.61 |
| No. 18 | 1.00 | 327.80 | 19.79 ± 0.91 |
| No. 20 | 0.85 | 321.48 | 8.28 ± 1.32 |
| No. 30 | 0.60 | 296.98 | 40.73 ± 1.24 |
| ถาดรอง (Pan) | - | 355.71 | 7.87 ± 0.88 |

หมายเหตุ : ข้อมูลแสดงในรูปของ ค่าเฉลี่ย ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

ปริมาณของต้นมันสำปะหลังบดหยาบที่ใช้ในการร่อนตะแกรงแต่ละครั้งไม่ควรใต่มากเกินไป ในที่นี้จะใต้ประมาณครึ่งหนึ่งของตะแกรงชั้นบนสุด (No. 8) น้ำหนักที่ใช้ในการร่อนแต่ละครั้งจะอยู่ที่ประมาณ 100-125 g เครื่องเขย่าตะแกรงที่ใช้มีชื่อทางการค้า ANALYSETTE 3 PRO ในการร่อนจะตั้งค่าช่วงของการสั่น (Amplitude) เท่ากับ 1.5 mm ใช้เวลาแต่ละครั้งเท่ากับ 15 นาที จากตารางที่ 4.1 พบว่าค่าเปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักต้นมันสำปะหลังบดที่ค้างบนตะแกรงมีค่าสูงที่สุด คือ ค้างที่ตะแกรง No. 30 รongลงมาเป็นตะแกรง No.18 และตะแกรง No. 14 ตามลำดับ มีความเป็นไปได้ว่าหากนำชิ้นงานที่ได้จากการผสมต้นมันสำปะหลังบดหยาบและสารยึดเกาะไปทดสอบ ค่าสมบัติต่าง ๆ ที่ได้ทั้งทางกลและทางกายภาพน่าจะมีอิทธิพลหลักจากเส้นใยที่มี

อยู่มากหลังจากการบดหยาบมา ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเลือกขนาดเส้นใย 3 ขนาด ที่ค้างอยู่บนตะแกรง No. 14 No. 18 และ No. 30 ไปทดสอบสมบัติต่าง ๆ ซึ่งต้นมันสำปะหลังบดที่ค้างอยู่บนตะแกรง No. 14 จะมีขนาดเส้นใยประมาณ 1.40-2.36 mm ต้นมันสำปะหลังบดที่ค้างอยู่บนตะแกรง No. 18 จะมีขนาดเส้นใยประมาณ 1.00-1.40 mm และต้นมันสำปะหลังบดที่ค้างอยู่บนตะแกรง No. 30 จะมีขนาดเส้นใยประมาณ 0.60-0.85 mm เมื่อสังเกตด้วยตาเปล่าพบว่าต้นมันสำปะหลังบดที่มีขนาดเส้นใยประมาณ 1.40-2.36 mm โดยส่วนมากจะเป็นส่วนของเปลือกและก้อนเนื้อเยื่อลำเลียงน้ำและอาหารขนาดใหญ่ สำหรับต้นมันสำปะหลังบดที่มีขนาดเส้นใยประมาณ 1.00-1.40 mm โดยส่วนมากจะเป็นผนังเนื้อไม้และก้อนเนื้อเยื่อลำเลียงน้ำและอาหารขนาดเล็กและสุดท้ายต้นมันสำปะหลังบดที่มีขนาดเส้นใยประมาณ 0.60-0.85 mm โดยส่วนมากจะเป็นผนังเนื้อไม้ ดังแสดงในรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 ต้นมันสำปะหลังบดที่มีขนาดเส้นใย (ก) ประมาณ 0.60-0.85 mm
(ข) ประมาณ 1.00-1.40 mm และ (ค) ประมาณ 1.40-2.36 mm

4.4.2 การเตรียมสารยึดเกาะ

สารยึดเกาะที่ใช้ในงานวิจัยนี้ คือ น้ำแป้งมันสำปะหลัง (Cassava starch batter, CS) และหัวมันสำปะหลังสด (Cassava root, R) ซึ่งน้ำแป้งที่ใช้ในงานวิจัยนี้ จะมีอัตราส่วนของน้ำที่ผ่านการกรองด้วยระบบรีเวอร์สออสโมซิส (RO) ต่อแป้งมันสำปะหลังเป็น 4:1 ซึ่งเป็นอัตราส่วนที่ดีที่สุดจากการทดสอบความหนืดของกาวแป้งจากธรรมชาติในงานวิจัยก่อนหน้านี้ (กฤตณุ อัมพรพิทักษ์ และ คณะ, 2555) สำหรับสารยึดเกาะจากหัวมันสำปะหลังสดจะเตรียมด้วยการนำหัวมันสำปะหลังไปแช่ทำความสะอาด และบดทั้งหัว (ไม่ได้ปอกเปลือก) ด้วยเครื่องบดหยาบในลักษณะเดียวกับการบดหยาบต้นมันสำปะหลัง

4.4.3 การเตรียมและการผลิตชิ้นทดสอบด้วยกระบวนการอัดขึ้นรูปร้อน

การเตรียมชิ้นทดสอบสำหรับการหาสภาวะที่เหมาะสม และขึ้นทดสอบสำหรับการศึกษาอิทธิพลของขนาดเส้นใยและอัตราส่วนส่วนผสม มีลักษณะที่คล้ายกัน แต่ต่างแค่เพียงเงื่อนไขในกระบวนการอัด คือ อุณหภูมิ ความดัน และเวลาที่ใช้ในกระบวนการ และอัตราส่วนผสมเท่านั้น ซึ่งมีวิธีการเตรียมและการผลิตชิ้นทดสอบสำหรับการหาสภาวะที่เหมาะสมมีดังนี้

1. นำเส้นใยต้นมันสำปะหลังบดหยาบที่เตรียมไว้มาผสมเข้ากับสารยึดเกาะจากน้ำแป้งมันสำปะหลัง และสารยึดเกาะจากหัวมันสำปะหลังสด ด้วยเครื่องผสมอาหารในอัตราส่วนเส้นใยต้นมันสำปะหลังและสารยึดเกาะเท่ากับ 50:50 โดยน้ำหนัก เป็นเวลา 10 นาที
2. เตรียมแม่พิมพ์สำหรับทำชิ้นทดสอบรูปสี่เหลี่ยมขนาด 150×150 mm หนา 3 mm และแผ่นประกบแม่พิมพ์ ที่รองด้วยแผ่นเทฟลอนเพื่อป้องกันชิ้นงานติดแม่พิมพ์ นำชุดแม่พิมพ์เปล่าไปอุ่นในเครื่องอัดขึ้นรูปร้อนจนอุณหภูมิคงที่ (ประมาณ 10 นาที) ซึ่งการปรับตั้งค่าอุณหภูมิจะเป็นไปตามตารางที่ 4.3
3. หลังจากอุ่นแม่พิมพ์เปล่าเสร็จแล้ว นำของผสมใส่ลงในแม่พิมพ์ สำหรับสูตรที่ใช้แป้งมันสำปะหลังเป็นสารยึดเกาะจะใช้ของผสมปริมาณ 115 g และสูตรที่ใช้หัวมันสำปะหลังสดเป็นสารยึดเกาะจะใช้ของผสมปริมาณ 125 g ซึ่งปริมาณของของผสมที่เติมลงในแม่พิมพ์จะเป็นปริมาณที่น้อยที่สุดที่ได้ขึ้นงานที่รูปร่างสมบูรณ์พอดี เมื่อใส่ของผสมเสร็จแล้ว จากนั้นกดไล่อากาศ 10 ครั้ง จากนั้นจึงเพิ่มความดันอย่างช้า ๆ จนถึงค่าความดันที่กำหนดไว้ตามตารางที่ 4.3 และคงไว้ที่อุณหภูมิและความดันดังกล่าวตามระยะเวลาที่กำหนดไว้ตามตารางที่ 4.3
4. เมื่อเสร็จสิ้นกระบวนการอัด ชุดแม่พิมพ์จะถูกปล่อยให้เย็นตัวภายใต้อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 5 นาที ก่อนทำการแกะชิ้นทดสอบ เพื่อป้องกันชิ้นงานบิดงอ

5. ชิ้นทดสอบจะถูกเก็บไว้ในถุงซิปล็อคที่อุณหภูมิประมาณ 25°C เป็นเวลาอย่างน้อย 48 ชั่วโมง เพื่อปรับสภาพให้สมดุล ก่อนการนำไปทดสอบสมบัติต่าง ๆ

ตารางที่ 4.2 ส่วนประกอบที่ใช้เตรียมวัสดุย่อยสลายได้ จากเส้นใยต้นมันสำปะหลัง และหัวมันสำปะหลังสด

| ขนาดเส้นใย ต้นมันสำปะหลัง (mm) | ปริมาณเส้นใย ต้นมันสำปะหลัง (wt%) | ปริมาณสารยึดเกาะ จากหัวมันสำปะหลังสด (wt%) |
|--------------------------------------|---|--|
| 0.60-0.85 | 50 | 50 |
| | 70 | 30 |
| | 90 | 10 |
| | 100 | 0 |
| 1.00-1.40 | 50 | 50 |
| | 70 | 30 |
| | 90 | 10 |
| | 100 | 0 |
| 1.40-2.36 | 50 | 50 |
| | 70 | 30 |
| | 90 | 10 |
| | 100 | 0 |

สำหรับการเตรียมชิ้นทดสอบสำหรับการศึกษาอิทธิพลของขนาดเส้นใยและอัตราส่วนของผสมมีวิธีการดังนี้

1. ผสมเส้นใยต้นมันสำปะหลังขนาดต่าง ๆ กับสารยึดเกาะจากหัวมันสำปะหลังตามอัตราส่วนที่แสดงดังตารางที่ 4.2 ด้วยเครื่องผสมอาหารเป็นเวลา 10 นาที

2. อุ่นแม่พิมพ์เปลา่ในลักษณะเดียวกันกับการทำชิ้นทดสอบเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสม โดยให้ความร้อนแก่แม่พิมพ์เปลา่ที่อุณหภูมิ 150°C

3. หลังจากอุ่นแม่พิมพ์เปลา่เสร็จแล้ว นำของผสมปริมาณ 85-125 g ใสลงในแม่พิมพ์ ซึ่งปริมาณของของผสมที่เติมลงในแม่พิมพ์จะเป็นปริมาณที่น้อยสุดที่ได้ชิ้นงานที่รูปร่างสมบูรณ์พอดี โดยที่ของผสมจะมีปริมาณมากขึ้นตามปริมาณของหัวมันสำปะหลังสดที่เพิ่มขึ้น

เมื่อใส่ของผสมเสร็จแล้ว จากนั้นกดไล่อากาศ 10 ครั้ง จากนั้นจึงเพิ่มความดันอย่างช้า ๆ จนถึง 55 bar และคงไว้ที่อุณหภูมิและความดันดังกล่าวเป็นเวลา 15 นาที

4. เมื่อเสร็จสิ้นกระบวนการอัด ชุดแม่พิมพ์จะถูกปล่อยให้เย็นตัวภายใต้ อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 5 นาที ก่อนทำการแกะชิ้นทดสอบ เพื่อป้องกันชิ้นงานบิดงอ

5. ชิ้นทดสอบจะถูกเก็บไว้ในถุงซิปล็อคที่อุณหภูมิประมาณ 25°C เป็นเวลาอย่างน้อย 48 ชั่วโมง เพื่อปรับสภาพให้สมดุล ก่อนการนำไปทดสอบสมบัติต่าง ๆ

4.4.4 การวัดความหนาของชิ้นทดสอบ (Thickness)

ชิ้นทดสอบจะถูกตรวจสอบด้วยดิจิตอลเวอร์เนียร์คาลิปเปอร์ (Digimatic, Mitutoyo, Japan) ความละเอียด $d = 0.01 \text{ mm}$ โดยทำการวัดความหนาและหาค่าเฉลี่ยตัวอย่างละ 3 ตำแหน่งจาก 10 ชิ้นทดสอบในแต่ละสูตรผสมที่ทดลอง

4.4.5 การทดสอบความหนาแน่นของชิ้นทดสอบ (Density)

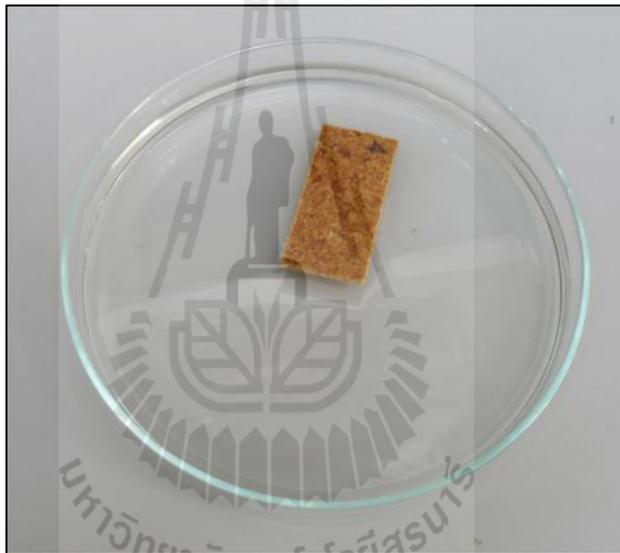
การทดสอบความหนาแน่นจะคำนวณจากความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักและ ปริมาตร สามารถตรวจสอบน้ำหนักของชิ้นทดสอบได้จากเครื่องชั่งละเอียด 4 ตำแหน่ง และปริมาตรสามารถคำนวณได้จากผลคูณของขนาดความกว้าง ความยาว และความหนาของ ชิ้นทดสอบ (Shogren et al., 1997) โดยทำการหาค่าเฉลี่ยจาก 10 ชิ้นทดสอบในแต่ละสูตรผสม

4.4.6 การทดสอบการดูดซึมน้ำ (Water absorption test)

เตรียมชิ้นทดสอบขนาด $2.5 \times 5 \text{ cm}$ ความหนาประมาณ 3 mm ชั่งน้ำหนัก ชิ้นทดสอบก่อนนำไปแช่ในน้ำปราศจากไอออนเป็นเวลา 60 วินาที โดยให้น้ำท่วมชิ้นทดสอบ ในขณะที่ทำการทดสอบ หลังจากนั้นชั่งน้ำหนักส่วนเกินด้วยกระดาษชำระและชั่งน้ำหนักอีกครั้ง ค่าปริมาณการดูดซึมน้ำจะคำนวณจากมวลของน้ำที่ชิ้นทดสอบดูดซึมไว้หารด้วยน้ำหนักของ ชิ้นทดสอบก่อนแช่น้ำ ตามมาตรฐาน ISO 535 (1991) ซึ่งใช้สำหรับทดสอบการดูดซึมน้ำของ กระดาษและบอร์ด โดยทำการหาค่าเฉลี่ยจาก 5 ชิ้นทดสอบในแต่ละสูตร



รูปที่ 4.5 ตัวอย่างลักษณะของชิ้นทดสอบสมบัติการดูดซึมน้ำ



รูปที่ 4.6 ตัวอย่างลักษณะของชิ้นทดสอบจากการทดสอบการดูดซึมน้ำเป็นเวลา 60 วินาที

4.4.7 การศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยา (Morphology studies)

การศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาของชิ้นทดสอบจะตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงชนิดสเตอริโอ (OLYMPUS, model SZX16-DP21) ในการศึกษาลักษณะพื้นผิวของชิ้นทดสอบจะเตรียมชิ้นทดสอบขนาด 2×5 cm และการศึกษาโครงสร้างภายในจะถ่ายภาพรอยแตกหักของชิ้นทดสอบจากการทดสอบแรงดึง ทัดตั้งชิ้นทดสอบบนแท่นวางชิ้นงาน ปรับกำลังขยายอยู่ในช่วง 1x-10x



รูปที่ 4.7 กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงชนิดสเตอริโอ (OLYMPUS, model SZX16-DP21)

4.4.8 การทดสอบสมบัติทางความร้อน (Thermal properties)

สมบัติทางความร้อนของชิ้นทดสอบต่าง ๆ ตรวจสอบโดยเครื่องมือ Simultaneous TGA-DTA analyzer (SDT 2960, TA Instrument) เตรียมชิ้นทดสอบน้ำหนักประมาณ 8-15 mg บรรจุลงในถ้วยอะลูมินา ทำการทดสอบภายใต้สภาวะบรรยากาศของไนโตรเจนด้วยอัตราการไหล 100 mL/min เพื่อป้องกันการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันหรือปฏิกิริยาที่ไม่พึงประสงค์ของชิ้นทดสอบ โดยเพิ่มอุณหภูมิให้แก่ชิ้นทดสอบที่อัตราเร็ว 10°C/min ช่วงอุณหภูมิที่ใช้ในการทดสอบประมาณ 30-600°C การหาอุณหภูมิการสลายตัวและปริมาณเถ้าที่เหลือหลังการทดลอง (Residue) สามารถพิจารณาได้จากกราฟเทอร์โมแกรม



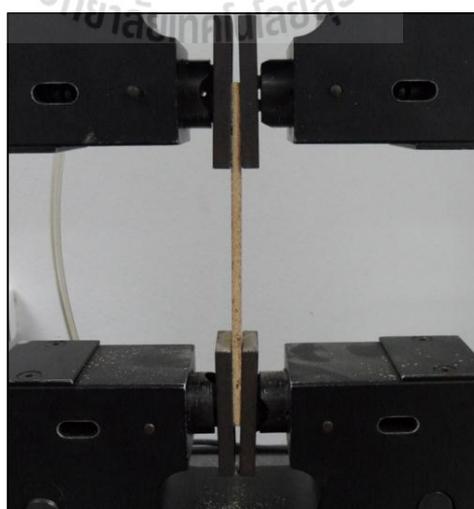
รูปที่ 4.8 เครื่อง Simultaneous TGA-DTA analyzer (SDT 2960, TA Instrument)

4.4.9 การทดสอบแรงดึง (Tensile test)

เตรียมชิ้นทดสอบเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า โดยตัดแต่งให้มีขนาดประมาณ 125×25.4 mm ความหนาประมาณ 3 mm ด้วยเครื่องเลื่อยสายพาน จากนั้นจัดผิวชิ้นทดสอบที่ผ่านการตัดด้วยกระดาษทรายที่มีค่าความละเอียดระดับต่าง ๆ กันเพื่อลดความเค้นสะสมบนชิ้นทดสอบ ขนาดของชิ้นทดสอบและวิธีการตัดแปลงมาจากมาตรฐาน ASTM D828-97 ซึ่งใช้สำหรับทดสอบสมบัติการดึงของกระดาษและบอร์ด โดยใช้อัตราการยึดตัวที่คงที่ ทำการทดสอบสมบัติแรงดึงด้วยเครื่องทดสอบเอนกประสงค์ (Universal Testing Machine, INSTRON, model 5565) ภาระกรรมสูงสุด 5 kN กำหนดระยะห่างระหว่างที่จับยึดชิ้นทดสอบ (Separated grip) เท่ากับ 80 mm ความเร็วที่ใช้ในการดึงชิ้นทดสอบ (Rate of grip separation) เท่ากับ 5 mm/min ที่อุณหภูมิห้อง ทดสอบสมบัติแรงดึงเพื่อหาค่าการต้านทานแรงดึง (Tensile strength) ค่ามอดูลัสของยัง (Young's modulus) และค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัว (% Elongation) โดยทำการหาค่าเฉลี่ยอย่างน้อย 5 ชิ้นทดสอบในแต่ละสูตร



รูปที่ 4.9 ตัวอย่างลักษณะของชิ้นทดสอบสมบัติการต้านทานแรงดึง



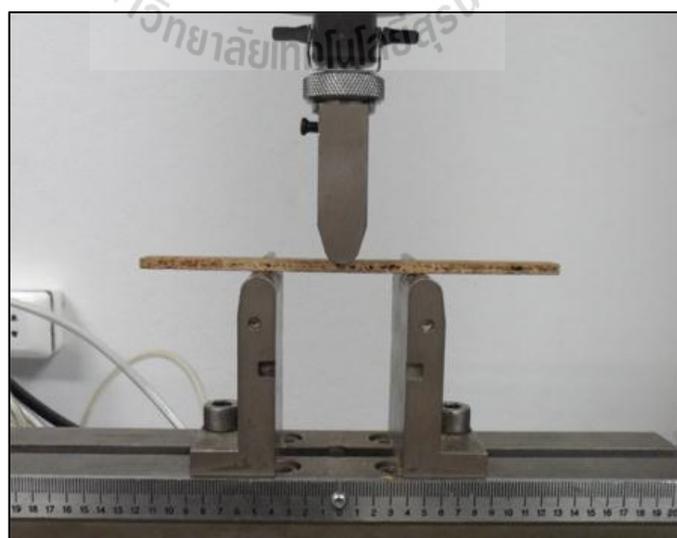
รูปที่ 4.10 การติดตั้งชิ้นทดสอบสมบัติการต้านทานแรงดึง

4.4.10 การทดสอบแรงดัดโค้ง (Flexural test)

เตรียมชิ้นทดสอบเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า โดยตัดแต่งให้มีขนาดประมาณ 127×12.7 mm ความหนาประมาณ 3 mm ด้วยเครื่องเลื่อยสายพาน จากนั้นขัดผิวชิ้นทดสอบที่ผ่านการตัดด้วยกระดาษทรายที่มีค่าความละเอียดระดับต่าง ๆ กันเพื่อลดความเค้นสะสมบนชิ้นทดสอบ ขนาดของชิ้นทดสอบและวิธีการทดสอบอ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM D790-10 ทำการทดสอบแรงดัดโค้งแบบจุดรองรับ 3 จุด (Three-point bending) ด้วยเครื่องทดสอบเอนกประสงค์ (Universal Testing Machine, INSTRON, model 5565) ภาระกรรมสูงสุด 5 kN กำหนดระยะห่างแท่นวางชิ้นทดสอบ (Support span length) เท่ากับ 48 mm ความเร็วที่ใช้ในการกดชิ้นงาน (Crosshead speed) เท่ากับ 1.3 mm/min ที่อุณหภูมิห้อง ทดสอบหาค่าการต้านทานแรงดัดโค้ง (Flexural strength) และค่ามอดูลัสแรงดัดโค้ง (Flexural modulus) ของชิ้นทดสอบ โดยทำการหาค่าเฉลี่ยอย่างน้อย 10 ชิ้นทดสอบในแต่ละสูตร



รูปที่ 4.11 ตัวอย่างลักษณะของชิ้นทดสอบสมบัติการต้านทานแรงดัดโค้ง



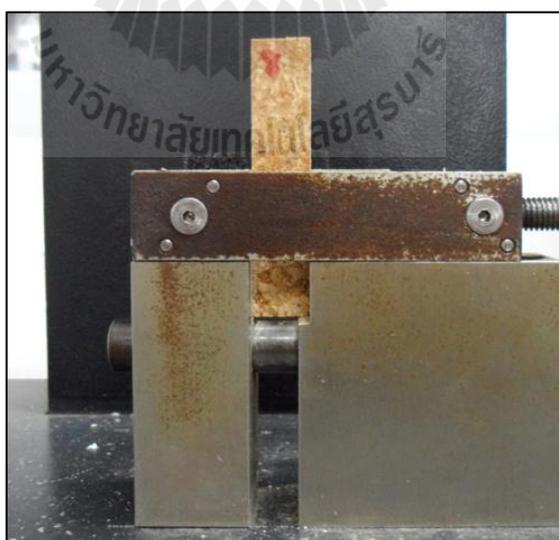
รูปที่ 4.12 การทดสอบแรงดัดโค้งของชิ้นทดสอบ

4.4.11 การทดสอบแรงกระแทก (Impact test)

เตรียมชิ้นทดสอบเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า โดยตัดแต่งให้มีขนาดประมาณ 63.5×12.7 mm ความหนาประมาณ 3 mm ด้วยเครื่องเลื่อยสายพาน จากนั้นขัดผิวชิ้นทดสอบที่ผ่านการตัดด้วยกระดาษทรายที่มีค่าความละเอียดระดับต่าง ๆ กัน ขนาดของชิ้นทดสอบและวิธีการทดสอบอ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM D256-10 ทำการทดสอบหาค่าการต้านทานแรงกระแทก (Impact strength) ของชิ้นทดสอบด้วยวิธีการทดสอบแรงกระแทกแบบไอซอด (Izod test) โดยเครื่องทดสอบแรงกระแทก (Basic pendulum impact tester, Atlas polymer evaluation product, model BPI, USA) ทดสอบแบบไม่ทำรอยบาก (Unnotched) ที่อุณหภูมิห้อง ตีด้วยหัวค้อน (Hammer) ขนาด 2.7 J หาค่าเฉลี่ยการต้านทานแรงกระแทก (J/cm^2) อย่างน้อย 8 ชิ้นทดสอบในแต่ละสูตร



รูปที่ 4.13 ตัวอย่างลักษณะของชิ้นทดสอบสมบัติการต้านทานแรงกระแทก



รูปที่ 4.14 การจับยึดชิ้นทดสอบสมบัติการต้านทานแรงกระแทก

4.5 การหาสถานะที่เหมาะสมในกระบวนการอัดขึ้นรูปด้วยวิธีออกแบบการทดลอง

ในการหาสถานะที่เหมาะสมในงานวิจัย จะใช้หลักการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบสองระดับ (2^k Factorial design) ที่สามารถใช้กรองปัจจัย (Screening factor) ที่ไม่มีนัยสำคัญออกไป และนำปัจจัยหลักที่เหลือไปวิเคราะห์เพื่อหาสถานะที่เหมาะสมต่อไป โดยจะแบ่งตัวแปรการทดสอบออกเป็น 2 ตัวแปร ได้แก่ ตัวแปรอิสระ และตัวแปรตามซึ่งมีรายละเอียด ดังนี้

4.5.1 ตัวแปรอิสระ (Independent variable)

ตัวแปรอิสระ หรือปัจจัยหลัก (Main effect) ที่จะศึกษาจะต้องเป็นปัจจัยที่สามารถควบคุมได้ โดยในส่วนของปัจจัยจากวิธีการจะเป็นสถานะในการอัดขึ้นรูปที่เหมาะสมโดยเลือกพิจารณาจากเงื่อนไขในการอัดขึ้นรูปภาชนะโดยทั่วไป คือ อุณหภูมิ ความดัน และเวลาที่ใช้ในกระบวนการอัด และชนิดของสารยึดเกาะที่ใช้ในการทดลอง ระดับของปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง แสดงดังตารางที่ 4.3 ซึ่งขอบเขตเงื่อนไขของการทดลองได้มาจากการลองผิดลองถูกจนสามารถระบุช่วงของการทดลองที่นำไปออกแบบการทดลองได้โดยที่สามารถผลิตชิ้นทดสอบได้ครบทุกกรณี

ตารางที่ 4.3 ปัจจัยและระดับของปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง

| ปัจจัย (Parameter) | ระดับต่ำ (-1) (Low level) | ระดับสูง (+1) (High level) | หน่วย (Unit) |
|--|------------------------------|-------------------------------|-----------------|
| อุณหภูมิในการอัดขึ้นรูป (Temperature) | 150 | 180 | °C |
| ความดันในการอัดขึ้นรูป (Pressure) | 20 | 55 | bar |
| เวลาในการอัดขึ้นรูป (Time) | 10 | 15 | min |
| สารยึดเกาะ (Binder) | น้ำแป้งมันสำปะหลัง (CS) | หัวมันสำปะหลัง (R) | - |

4.5.2 ตัวแปรตาม (Response)

ตัวแปรตาม หรือปัจจัยตอบสนอง (Response) ซึ่งปัจจัยตอบสนองที่ใช้ในการทดลองนี้ คือ ค่าการต้านทานแรงดัดโค้ง (Flexural strength) ของชิ้นทดสอบ เนื่องจากเป็นค่าสมบัติทางกลที่มีความสำคัญที่สุดสำหรับภาชนะในการใช้งานจริง และมีความง่ายในการทดสอบ

ทั้งนี้สำหรับการคำนวณทางสถิติด้วยโปรแกรมสำเร็จรูปจำเป็นต้องมีค่าตอบสนองเป็นข้อมูลเชิงปริมาณ (Quantitative) โดยในงานวิจัยนี้จะใช้วิธีการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2^4 โดยทำซ้ำทั้งหมด 5 ครั้ง เนื่องจากมีข้อจำกัดด้านวัตถุดิบในการทดลอง และเพื่อตัดปัญหาการปรับเปลี่ยนค่าอุณหภูมิในการทดลอง ซึ่งจะใช้เวลาานมากหากจัดลำดับการทดลองแบบสุ่ม (Random) ดังนั้นจึงจัดลำดับของการทดลองเป็นไปตามตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 แสดงตารางบันทึกผลค่าการตอบสนองของชั้นทดสอบจากลำต้นมันสำปะหลัง และสารยึดเกาะจากการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบสองระดับ

| ลำดับการทดลอง | อุณหภูมิ (°C) | ความดัน (bar) | เวลา (นาที) | สารยึดเกาะ | ผลการตอบสนอง |
|---------------|---------------|---------------|-------------|------------|-------------------------------|
| 1 | 150 | 20 | 10 | CS | ค่าการต้านทานแรงดัดโค้ง (MPa) |
| 2 | 150 | 20 | 15 | CS | |
| 3 | 150 | 55 | 10 | CS | |
| 4 | 150 | 55 | 15 | CS | |
| 5 | 180 | 20 | 10 | CS | |
| 6 | 180 | 20 | 15 | CS | |
| 7 | 180 | 55 | 10 | CS | |
| 8 | 180 | 55 | 15 | CS | |
| 9 | 150 | 20 | 10 | R | |
| 10 | 150 | 20 | 15 | R | |
| 11 | 150 | 55 | 10 | R | |
| 12 | 150 | 55 | 15 | R | |
| 13 | 180 | 20 | 10 | R | |
| 14 | 180 | 20 | 15 | R | |
| 15 | 180 | 55 | 10 | R | |
| 16 | 180 | 55 | 15 | R | |

4.6 การเลือกสูตรที่เหมาะสมที่สุดด้วยเทคนิคการวิเคราะห์แบบหลายปัจจัย

จากการศึกษาสมบัติทางกายภาพ และสมบัติทางกลของชิ้นงานจากลำต้นมันสำปะหลัง พบว่าในแต่ละสูตรผสมนั้นมีข้อเด่น และข้อด้อยแตกต่างกันไป ดังนั้นจึงจำเป็นต้องเลือกสูตรที่เหมาะสมที่สุดในการนำไปประยุกต์ใช้งานต่อไป ด้วยเทคนิคการวิเคราะห์แบบหลายปัจจัย (Multi-criteria decision analysis, MCDA) โดยจะเลือกจากสมบัติที่มีความสำคัญสำหรับการใช้งาน เช่น ความหนาแน่น การดูดซึมน้ำ การต้านทานแรงดัดโค้ง การต้านทานแรงดึง มอดูลัสของยัง เปอร์เซ็นต์การยืดตัว และการต้านทานแรงกระแทก เป็นต้น ซึ่งคะแนนรวม (Criteria score) ของปัจจัยต่าง ๆ นั้น สามารถคำนวณได้จากระดับคะแนน (Rating score) ที่ได้จากการทดลอง โดยจะแบ่งได้ 10 ระดับ จากข้อมูลค่าต่ำสุดถึงค่าสูงสุด นำมาคูณกับคะแนนความสำคัญ (Weighting score) ที่พิจารณาตามความเหมาะสมในการนำไปใช้งานจริง สามารถคำนวณหาค่าคะแนนรวมได้ตามสมการที่ 4.2

$$\text{Criteria score} = w_1 r_{i1} + w_2 r_{i2} + \dots + w_n r_{in} = \sum_{i,j=1}^n w_i r_{ij} \quad (4.2)$$

เมื่อ Criteria score = คะแนนรวม

w_i = คะแนนความสำคัญ

r_{ij} = ระดับคะแนน

ตารางที่ 4.5 คะแนนความสำคัญของสมบัติของชิ้นทดสอบจากลำต้นมันสำปะหลัง

ในการเลือกสูตรที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการนำไปใช้งานแบบใช้ครั้งเดียวแล้วทิ้ง

| ปัจจัย | คะแนน |
|----------------------|-------|
| ความหนาแน่น | 5% |
| การดูดซึมน้ำ | 25% |
| การต้านทานแรงดัดโค้ง | 25% |
| การต้านทานแรงดึง | 15% |
| มอดูลัสของยัง | 10% |
| เปอร์เซ็นต์การยืดตัว | 10% |
| การต้านทานแรงกระแทก | 10% |
| รวม | 100% |

เมื่อพิจารณาถึงความเหมาะสมในการนำภาชนะย่อยสลายได้จากลำต้นมันสำปะหลังไปใช้งานจริง โดยจุดประสงค์ของการผลิตภาชนะในงานวิจัยนี้เพื่อใช้สำหรับใส่อาหารจานด่วนแบบใช้ครั้งเดียวแล้วทิ้ง เช่น ขนมหครก มันฝรั่งทอด เป็นต้น ค่าคะแนนความสำคัญของสมบัติของชั้นทดสอบแสดงในตารางที่ 4.5 โดยจะให้ความสำคัญมากที่สุด คือ ค่าการดูดซึมน้ำ และค่าการต้านทานแรงคัด โค้ง ซึ่งเป็นลักษณะเด่นสำหรับสมบัติทางกายภาพและสมบัติทางกล ระดับคะแนนของสมบัติทางกายภาพและสมบัติทางกลแสดงในตารางที่ ก.1 และ ก.2 (แสดงในภาคผนวก) ตามลำดับ ในการจัดระดับคะแนนของสมบัติทางกายภาพ ทั้งค่าความหนาแน่นและค่าการดูดซึมน้ำนั้น หากมีค่าน้อยจะถือว่าชั้นทดสอบนั้นมีคะแนนที่สูง กล่าวคือหากเป็นภาชนะที่เบาและดูดซึมน้ำได้น้อย จะยังเป็นภาชนะที่ดี และสำหรับการจัดระดับคะแนนของสมบัติทางกลนั้น หากมีค่ามากจะถือว่าชั้นทดสอบนั้นมีคะแนนที่สูง อาทิเช่น หากเป็นภาชนะที่มีค่าการต้านทานแรงคัด โค้งมาก จะยังเป็นภาชนะที่ดี เป็นต้น



ได้ศึกษาเทคนิควิธีการใช้งานเครื่องอัดขึ้นรูปจนชำนาญเพื่อลดความผิดพลาดจากคนและเครื่องจักร สำหรับปัจจัยที่ส่งผลต่อคุณภาพผลิตภัณฑ์จากวัตถุดิบและวิธีการนั้น จะเป็นปัจจัยที่เลือกใช้ในการออกแบบการทดลอง โดยที่งานวิจัยนี้เลือกปัจจัยของวัตถุดิบเป็น ชนิดของสารยึดเกาะที่ใช้ในการทดลอง คือ สารยึดเกาะจากน้ำแป้งมันสำปะหลัง และสารยึดเกาะจากหัวมันสำปะหลัง และในส่วน ของปัจจัยจากวิธีการจะเป็นสภาวะในการอัดขึ้นรูปที่เหมาะสมโดยเลือกพิจารณาจากเงื่อนไขในการอัดขึ้นรูปภาชนะ โดยทั่วไป คือ อุณหภูมิ ความดัน และเวลาที่ใช้ในกระบวนการอัด ซึ่งขอบเขต เงื่อนไขของสภาวะในการอัดขึ้นรูปได้มาจากการลองผิดลองถูกจนสามารถระบุช่วงของการทดลอง ที่จะนำไปออกแบบการทดลองได้ โดยที่สามารถผลิตชิ้นทดสอบได้ครบทุกกรณี เพื่อตัดปัญหาใน ส่วนของการคำนวณทางสถิติด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป (Minitab 16) อุณหภูมิที่ใช้ในกระบวนการอัด ขึ้นรูปอยู่ในช่วง 150-180°C ความดันที่ใช้ในกระบวนการอัดขึ้นรูปอยู่ในช่วง 20-55 bar และเวลาที่ใช้ในกระบวนการอัดขึ้นรูปอยู่ในช่วง 10-15 นาที แต่อย่างไรก็ดี มีบางปัจจัยที่ไม่ได้เลือกนำมาศึกษา ในการออกแบบการทดลอง แต่จำเป็นต้องควบคุมให้ดีเพื่อลดข้อผิดพลาดจากการทดลอง เช่น ต้นมันสำปะหลังและหัวมันสำปะหลังควรเตรียมจากแหล่งเพาะปลูกบริเวณเดียวกันเพื่อลดปัญหา ด้านคุณภาพของวัตถุดิบ ทั้งด้านปริมาณความชื้นและองค์ประกอบภายในที่อาจจะแตกต่างกัน ออกไปตามวิธีเพาะปลูก และเนื่องจากวัตถุดิบหลักที่ใช้ในการอัดขึ้นรูปในงานวิจัยนี้มีปริมาณ ความชื้นที่ค่อนข้างสูง เพื่อที่จะระเหยน้ำส่วนเกินออกจากกระบวนการได้อย่างมีคุณภาพที่ไม่ แตกต่างกันนัก จึงจำเป็นต้องเลือกทำการทดลองในวันที่มีสภาพอากาศปลอดโปร่ง เนื่องจากเครื่อง อัดขึ้นรูปร้อนที่ใช้ในงานวิจัยนี้ไม่ได้อยู่ในสถานที่ปิดที่สามารถควบคุมสภาพแวดล้อมได้ตาม ต้องการ ซึ่งจะเลือกทำการทดลองในวันที่มีช่วงอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ประมาณ 28-35°C และ 40-60% ตามลำดับ โดยค่าตอบสนองที่ใช้ในการทดลองนี้ คือ ค่าการต้านทานแรงดัดโค้ง (Flexural strength) ของชิ้นทดสอบ เนื่องจากเป็นค่าสมบัติทางกลที่มีความสำคัญที่สุดสำหรับ ภาชนะในการใช้งานจริง และมีความง่ายในการทดสอบ ทั้งนี้สำหรับการคำนวณทางสถิติด้วย โปรแกรมสำเร็จรูปจำเป็นต้องมีค่าตอบสนองเป็นข้อมูลเชิงปริมาณ (Quantitative)

5.1.1 ระดับปัจจัยในการทดลอง

1. อุณหภูมิในกระบวนการผลิตชิ้นทดสอบจากลำต้นมันสำปะหลัง

อุณหภูมิเป็นปัจจัยที่สำคัญสำหรับระเหยน้ำส่วนเกินจากกระบวนการอัดขึ้นรูป ร้อนชิ้นทดสอบย่อยสลายได้จากลำต้นมันสำปะหลังและสารยึดเกาะ ซึ่งสารยึดเกาะที่แทรกซึมอยู่ใน เนื้อวัสดุจะพองตัวและระเหยออกเมื่อถูกความร้อน และไอน้ำที่เกิดขึ้นจะมีพฤติกรรมเป็นสาร พองตัว (Blowing agent) ก่อให้เกิดรูพรุนภายในชิ้นทดสอบซึ่งเป็นลักษณะของโฟม ในเบื้องต้นได้

ทำการทดลองหาขอบเขตของอุณหภูมิจากการลองปรับเปลี่ยนค่าอุณหภูมิภายในความดันและเวลาที่กำหนด พบว่าที่อุณหภูมิต่ำกว่า 120°C ซึ่งานที่ได้ยังมีความชื้นอยู่มาก และไม่สามารถนำไปทำเป็นชิ้นทดสอบได้สำหรับในกระบวนการอัดที่ใช้เวลาน้อย ๆ ดังแสดงในรูปที่ 5.1 ถึงแม้ว่าจะเป็นอุณหภูมิที่เป้่งในสารยึดเกาะก่อตัวเกิดเป็นเจล (Gelatinization) ได้ แต่เนื่องจากอุณหภูมิต่ำเกินไปไปทำให้ระเหยน้ำส่วนเกินได้ช้า ไม่สามารถระเหยไอน้ำส่วนเกินได้หมดในเวลาดังกล่าว จากการศึกษาสมบัติทางความร้อนในเบื้องต้นของต้นมันสำปะหลังและหัวมันสำปะหลังสดด้วยวิธีเทอร์โมกราวิเมตรี (อยู่ในหัวข้อที่ 5.3.1) พบว่าอุณหภูมิการเริ่มสลายตัว (Onset temperature) ของวัตถุดิบอยู่ที่ประมาณ 270°C ดังนั้นในกระบวนการผลิตไม่ควรใช้อุณหภูมิที่สูงเกินค่าดังกล่าว ในการทดลองที่อุณหภูมิสูง ๆ จะสามารถระเหยไอน้ำส่วนเกินได้อย่างรวดเร็ว ผิวหน้าของชิ้นงานแห้งและไหม้ แต่ภายในเนื้อวัสดุยังมีความชื้นอยู่ เมื่อเปิดแม่พิมพ์ไอน้ำส่วนเกินนั้นเองจะทำลายชิ้นงาน ดังแสดงในรูปที่ 5.2 และ 5.3 ดังนั้นขอบเขตของอุณหภูมิที่ใช้ในการออกแบบการทดลองสำหรับอัดขึ้นรูปชิ้นทดสอบจากต้นมันสำปะหลังและสารยึดเกาะที่สามารถใช้อัดขึ้นรูปชิ้นทดสอบได้ในทุกกรณีจะเท่ากับ 150-180°C



รูปที่ 5.1 ตัวอย่างลักษณะของชิ้นงานที่ได้จากกระบวนการอัดขึ้นรูปที่อุณหภูมิต่ำ ความดันต่ำ และเวลาน้อยเกินไป

2. ความดันในกระบวนการผลิตขึ้นทดสอบจากลำต้นมันสำปะหลัง

ความดันเป็นอีกปัจจัยที่สำคัญในกระบวนการอัดขึ้นรูป โดยความดันในกระบวนการอัดจะขึ้นกับความหนาและรูปร่างของชิ้นงาน ตลอดจนความเรียบของแม่พิมพ์อีกด้วย หากชิ้นงานมีความหนาหรือผิวหน้าของแม่พิมพ์มีความขรุขระจะต้องใช้ความดันในกระบวนการอัดที่สูงขึ้น ทั้งนี้ในการอัดขึ้นรูปขึ้นทดสอบจากลำต้นมันสำปะหลัง ความดันที่ใช้จะมีผลต่อการกระจายตัวของของผสม เนื่องจากการใส่ของผสมนั้นจะใส่บริเวณตรงกลางของแม่พิมพ์ เมื่อให้แรงดันที่น้อยเกินไปของผสมจะไหลไปไม่ถึงขอบของแม่พิมพ์ และเกิดช่องว่างภายในชิ้นงานจากการที่เนื้อวัสดุไม่เกาะตัวกัน ซึ่งจะได้ชิ้นงานที่ไม่เป็นแผ่นสมบูรณ์ ถึงแม้ว่าการให้ความดันแก่ของผสมน้อย ๆ จะสามารถระเหยไอน้ำส่วนเกินออกจากของผสมภายในแม่พิมพ์ได้ง่าย แต่ถ้าความดันที่ใช้ไม่สัมพันธ์กับอุณหภูมิและเวลาในกระบวนการอัด จะได้ชิ้นงานที่ไม่แห้งและไม่เป็นแผ่นสมบูรณ์ ดังแสดงในรูปที่ 5.1 เมื่อให้ความดันแก่ระบบที่สูงมากเกินไปจะส่งผลเกิดการสูญเสียเนื้อของของผสมในขณะปิดแม่พิมพ์เป็นจำนวนมาก ทำให้เนื้อของขึ้นทดสอบที่ได้ความหนาแน่นต่ำ มีรูพรุนมากขึ้น นำไปสู่การลดค่าลงของสมบัติทางกลนอกจากนี้ความดันที่สูงเกินไปทำให้ไอน้ำส่วนเกินระเหยออกตามขอบแม่พิมพ์ได้ยาก และหากใช้อุณหภูมิและเวลาในกระบวนการอัดน้อยเกินไปในขณะที่อัดขึ้นรูปด้วยความดันสูง ของผสมจะยังไม่แห้งสนิท เมื่อเปิดแม่พิมพ์ ไอน้ำส่วนเกินนั้นจะทำลายชิ้นงาน ดังแสดงในรูปที่ 5.4 ดังนั้นขอบเขตของความดันที่ใช้ในการออกแบบการทดลองสำหรับอัดขึ้นรูปขึ้นทดสอบจากต้นมันสำปะหลังและสารยึดเกาะที่สามารถใช้อัดขึ้นรูปขึ้นทดสอบได้ในทุกกรณีจะเท่ากับ 20-55 bar

3. เวลาในกระบวนการผลิตขึ้นทดสอบจากลำต้นมันสำปะหลัง

ระยะเวลาในกระบวนการอัดที่เหมาะสมมีผลต่อการเกิดเจลของโมเลกุลแป้งที่อุณหภูมิสูง และส่งผลโดยตรงต่อการทำแห้งของผสมจากลำต้นมันสำปะหลังและสารยึดเกาะซึ่งมีปริมาณความชื้นค่อนข้างสูง ในเบื้องต้นได้ทำการทดลองหาขอบเขตของเวลาจากการลองปรับเปลี่ยนค่าเวลา พบว่าที่การทดลองเมื่อใช้เวลาที่ต่ำกว่า 10 นาที น้ำส่วนเกินที่อยู่ในของผสมยังระเหยออกได้ไม่หมด จึงทำให้แป้งที่เป็นเจลนั้นแห้งไม่สนิท สุดท้ายจะได้ชิ้นงานที่ไม่แห้งและเป็นชิ้นงานที่ไม่สมบูรณ์ ดังแสดงในรูปที่ 5.1 5.2 และ 5.4 กล่าวคือการทำที่ได้ชิ้นงานที่เป็นแผ่นสมบูรณ์ควรจะใช้เวลาที่มีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิและความดันในกระบวนการอัด ทั้งนี้หากใช้เวลาในกระบวนการอัดที่มากจนเกินไป ถึงแม้ว่าจะได้ขึ้นทดสอบที่แห้ง แต่ขึ้นทดสอบนั้นจะเกิดรอยไหม้บนผิวหน้า และขึ้นทดสอบจะสูญเสียสมบัติทางกลจนมีความเปราะมากขึ้น ยิ่งไปกว่านี้ในกระบวนการอัดขึ้นรูปภาชนะที่ใช้เวลาเกินกว่า 15 นาที อาจส่งผลต่อต้นทุนในกระบวนการผลิตที่สูงขึ้นตามไปด้วย ดังนั้นขอบเขตของเวลาที่ใช้ในการออกแบบการทดลองสำหรับอัดขึ้นรูป

ชั้นทดสอบจากต้นมันสำปะหลังและสารยึดเกาะที่สามารถใช้อัดขึ้นรูปชั้นทดสอบได้ในทุกกรณีจะเท่ากับ 10-15 นาที



รูปที่ 5.2 ตัวอย่างลักษณะของชิ้นงานที่ได้จากกระบวนการอัดขึ้นรูปที่อุณหภูมิสูง และเวลาน้อยเกินไป



รูปที่ 5.3 ชั้นทดสอบที่แตกออกจากการระเหยไอน้ำส่วนเกินขณะเปิดแม่พิมพ์



รูปที่ 5.4 ตัวอย่างลักษณะของชิ้นงานที่ได้จากกระบวนการอัดขึ้นรูป
ที่ความดันสูง และเวลาน้อยจนเกินไป

4. สารยึดเกาะในกระบวนการผลิตขึ้นทดสอบจากลำต้นมันสำปะหลัง

ตามรายงานของ Kinoshita et al. (2009) กล่าวว่าวัสดุคอมโพสิตที่อัดขึ้นรูปจากเศษไม้เพียงอย่างเดียวโดยปราศจากสารยึดเกาะ (Binder) จะมีความแข็งแรงต่ำ มีความเปราะ และต้านทานน้ำได้ต่ำ ดังนั้นในการอัดขึ้นรูปขึ้นทดสอบจากลำต้นมันสำปะหลังอาจจำเป็นต้องเติมสารยึดเกาะลงไปในสูตรเพื่อปรับปรุงข้อด้อยเหล่านั้น ในงานวิจัยนี้จะทำการศึกษายึดเกาะ 2 ชนิด คือ น้ำแป้งมันสำปะหลัง (Cassava starch batter, CS) และหัวมันสำปะหลังสด (Cassava root, R) ซึ่งน้ำแป้งที่ใช้ในงานวิจัยนี้ จะมีอัตราส่วนของน้ำที่ผ่านการกรองด้วยระบบรีเวอร์สออสโมซิส (RO) ต่อแป้งมันสำปะหลังเป็น 4:1 โดยน้ำหนัก ซึ่งเป็นอัตราส่วนที่ดีที่สุดจากการทดสอบความเหนียวของกาวแป้งจากธรรมชาติในงานวิจัยก่อนหน้านี้ (กฤตณุ อัมพรพิทักษ์ และ คณะ, 2555) โดยในเบื้องต้นจะเตรียมของผสมจากลำต้นมันสำปะหลังบดที่ยังไม่ได้ผ่านการร่อนตะแกรง เพื่อคัดขนาดและสารยึดเกาะในอัตราส่วนเท่ากับ 50:50 โดยน้ำหนัก

5.1.2 ผลการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบสองระดับ (2^k Factorial design)

ในการหาสภาวะที่เหมาะสมในกระบวนการอัดขึ้นรูป จะใช้หลักการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบสองระดับ (2^k Factorial design) เนื่องจากเป็นวิธีที่ง่ายและใช้เวลาในการทดลองที่สั้น อีกทั้งยังสามารถกรองปัจจัยที่ไม่มีนัยสำคัญออกไปได้ โดยค่าตอบสนองในการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบสองระดับด้านการต้านทานแรงคัดโค้ง แสดงดังตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 แสดงค่าการต้านทานแรงคัดโค้งของชิ้นทดสอบจากลำต้นมันสำปะหลัง

และสารยึดเกาะจากการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบสองระดับ

| ลำดับการทดลอง | อุณหภูมิ (°C) | ความดัน (bar) | เวลา (นาที) | สารยึดเกาะ | ค่าการต้านทานแรงคัดโค้ง (MPa)/ซ้ำที่ | | | | |
|---------------|---------------|---------------|-------------|------------|--------------------------------------|-------|--------|-------|--------|
| | | | | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| 1 | 150 | 20 | 10 | CS | 4.206 | 4.153 | 4.117 | 4.226 | 3.583 |
| 2 | 150 | 20 | 15 | CS | 4.058 | 4.078 | 3.801 | 3.663 | 3.866 |
| 3 | 150 | 55 | 10 | CS | 3.930 | 3.751 | 3.783 | 4.250 | 4.310 |
| 4 | 150 | 55 | 15 | CS | 4.782 | 4.966 | 5.099 | 5.007 | 4.235 |
| 5 | 180 | 20 | 10 | CS | 2.933 | 2.654 | 3.013 | 2.821 | 2.759 |
| 6 | 180 | 20 | 15 | CS | 3.559 | 3.324 | 3.662 | 3.276 | 3.369 |
| 7 | 180 | 55 | 10 | CS | 3.662 | 3.197 | 3.589 | 3.679 | 3.713 |
| 8 | 180 | 55 | 15 | CS | 3.334 | 3.623 | 3.120 | 2.979 | 2.649 |
| 9 | 150 | 20 | 10 | R | 7.198 | 7.172 | 7.633 | 7.870 | 7.142 |
| 10 | 150 | 20 | 15 | R | 7.296 | 8.798 | 8.387 | 9.154 | 8.411 |
| 11 | 150 | 55 | 10 | R | 8.351 | 8.118 | 8.304 | 8.333 | 9.494 |
| 12 | 150 | 55 | 15 | R | 8.368 | 8.876 | 8.352 | 9.371 | 10.385 |
| 13 | 180 | 20 | 10 | R | 9.002 | 9.213 | 7.844 | 9.333 | 7.203 |
| 14 | 180 | 20 | 15 | R | 8.088 | 8.541 | 8.284 | 7.932 | 7.790 |
| 15 | 180 | 55 | 10 | R | 7.695 | 8.614 | 9.333 | 8.101 | 7.736 |
| 16 | 180 | 55 | 15 | R | 9.607 | 8.773 | 10.091 | 7.953 | 10.323 |

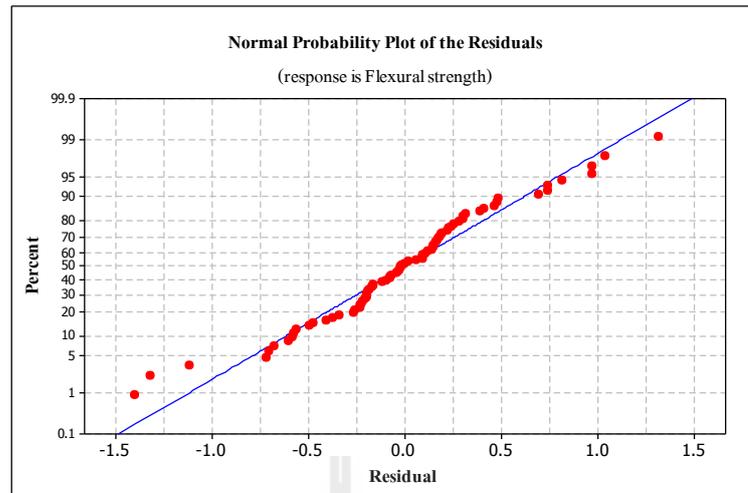
ในการวิเคราะห์ความแปรปรวนเพื่อหาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อค่าการต้านทานแรงคดโค้งของชิ้นทดสอบอย่างมีนัยสำคัญ โดยกำหนดระดับความเชื่อมั่นที่ 95% ($\alpha = 0.05$) ในการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ จะประยุกต์ใช้โปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติ (Minitab 16) นอกจากนี้ภายในโปรแกรมดังกล่าวยังสามารถคำนวณหาระดับปัจจัยที่เหมาะสมสำหรับสภาวะการอัดขึ้นรูปชิ้นทดสอบที่มีค่าความต้านทานแรงคดโค้งสูงที่สุดได้อีกด้วย ทั้งนี้ตามรายงานของ ปารเมศ ชูติมา (2545) กล่าวว่าก่อนการวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูล ควรจะต้องตรวจสอบความเหมาะสมและความถูกต้องของข้อมูลที่ได้จากการทดลองก่อน ซึ่งการวิเคราะห์ผลการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบสองระดับนี้แบ่งออกเป็น 4 ส่วน คือ

1. การตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบการทดลอง
2. การวิเคราะห์ความแปรปรวน
3. การวิเคราะห์จุดเหมาะสมของปัจจัย
4. การตรวจสอบผลการทดลอง

5.1.3 การตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบการทดลอง (Model adequacy checking)

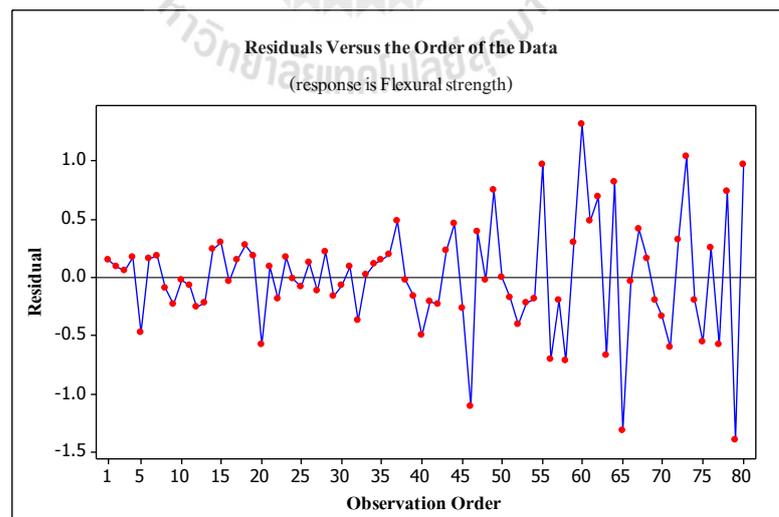
ก่อนการนำข้อมูลที่ได้จากการทดลองไปวิเคราะห์ความแปรปรวนจำเป็นต้องตรวจสอบความเหมาะสมและความถูกต้องของข้อมูลที่ได้จากการทดลอง ด้วยการตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบการทดลอง (Model adequacy checking) ซึ่งผลการตรวจสอบแสดงดังรูปที่ 5.5 5.6 และ 5.7 โดยมีสมมติฐานว่า รูปแบบของค่าส่วนตกค้าง (Residuals) ที่ได้จากข้อมูลการทดลอง ต้องมีการแจกแจงแบบปกติ (Normal distribution) และเป็นอิสระด้วยค่าเฉลี่ยใกล้เคียง 0 (Independently distributed) และค่าความแปรปรวนมีเสถียรภาพ (Constant variance, σ^2) จึงจะทำให้ข้อมูลจากการทดลองมีความถูกต้องและเชื่อถือได้

1. การตรวจสอบการกระจายตัวแบบปกติ (Normal distribution) ของค่าส่วนตกค้าง (Residuals) ซึ่งใช้ในการทดสอบการแจกแจงแบบปกติ (Normal probability plot) โดยการนำข้อมูลจากตารางที่ 5.1 มาสร้างเป็นกราฟดังแสดงในรูปที่ 5.5 พบว่าค่าส่วนตกค้างมีการกระจายตัวตามแนวเส้นตรง ทำให้สรุปได้ว่าค่าส่วนตกค้างนี้มีการแจกแจงแบบปกติ



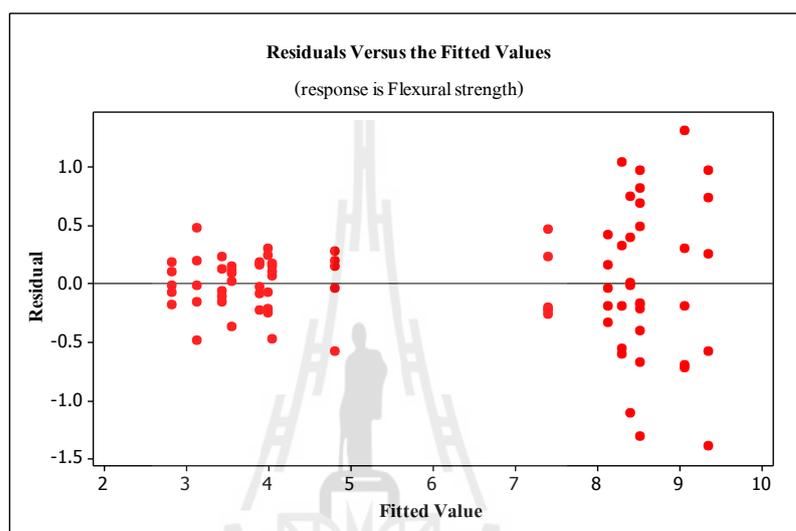
รูปที่ 5.5 แสดงการกระจายแบบปกติของค่าส่วนตกค้าง (Residuals)

2. การตรวจสอบความเป็นอิสระ (Independence) ของค่าส่วนตกค้าง (Residuals) โดยการนำข้อมูลในตารางที่ 5.1 มาสร้างเป็นกราฟดังแสดงในรูปที่ 5.6 เมื่อพิจารณาการกระจายตัวของค่าส่วนตกค้างเทียบกับลำดับการทดลอง (Observation order) พบว่าการกระจายตัวไม่มีลักษณะที่เป็นแนวโน้ม กล่าวคือมีรูปแบบที่เป็นอิสระ ไม่มีรูปแบบที่แน่นอนหรือสามารถประมาณรูปแบบที่แน่นอนได้ ทำให้สรุปได้ว่าค่าส่วนตกค้างมีความเป็นอิสระต่อกัน



รูปที่ 5.6 แสดงการกระจายตัวของค่าส่วนตกค้าง (Residuals) เทียบกับลำดับการทดลอง (Observation order)

3. การตรวจสอบความเสถียรของค่าความแปรปรวน (Variance, σ^2) โดยการนำข้อมูลในตารางที่ 5.1 มาสร้างเป็นกราฟดังแสดงในรูปที่ 5.7 เมื่อพิจารณาการกระจายตัวของค่าส่วนตกค้างเทียบกับค่าตัวแปรตอบสนองที่ได้จากการทดลอง (Fitted value) พบว่าค่าส่วนตกค้างมีค่าใกล้เคียงกันในแต่ละตำแหน่ง และมีการกระจายตัวที่ไม่มีลักษณะที่ผิดปกติ ข้อมูลมีความอิสระ และมีความผันแปรคงที่ ทำให้สรุปได้ว่าข้อมูลมีความเสถียรของค่าความแปรปรวน



รูปที่ 5.7 แสดงการกระจายตัวของค่าส่วนตกค้าง (Residuals) เทียบกับค่าตัวแปรตอบสนองที่ได้จากการทดลอง (Fitted value)

จากการตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบการทดลอง พบว่าค่าส่วนตกค้างที่ได้จากการทดลองเป็นไปตามสมมติฐานทั้ง 3 ข้อ ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าข้อมูลที่ได้จากการทดลองชุดนี้มีความถูกต้องและเหมาะสม สามารถนำข้อมูลดังกล่าวไปวิเคราะห์ความแปรปรวนในขั้นตอนต่อไปได้

5.1.4 การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ของค่าการต้านทานแรงดัดโค้งของชิ้นทดสอบจากลำต้นมันสำปะหลังและสารยึดเกาะ

จากผลการตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบการทดลองแล้วพบว่า ข้อมูลที่ได้จากการทดลองมีความถูกต้องเหมาะสม และมีความน่าเชื่อถือ จึงนำข้อมูลในตารางที่ 5.1 มาทำการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) เพื่อศึกษาอิทธิพลของปัจจัยทั้งหมด กำหนดระดับความเชื่อมั่นที่ 95% ($\alpha = 0.05$) โดยประยุกต์ใช้โปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติ (Minitab 16)

Factorial Fit: Flexural strength versus Temp, Press, Time, Binder

Estimated Effects and Coefficients for Flexural strength (coded units)

| Term | Effect | Coef | SE Coef | T | P |
|------------------------|---------|---------|---------|--------|-------|
| Constant | | 6.0906 | 0.05960 | 102.20 | 0.000 |
| Temp | -0.3627 | -0.1813 | 0.05960 | -3.04 | 0.003 |
| Press | 0.5106 | 0.2553 | 0.05960 | 4.28 | 0.000 |
| Time | 0.3803 | 0.1902 | 0.05960 | 3.19 | 0.002 |
| Binder | 4.7423 | 2.3711 | 0.05960 | 39.79 | 0.000 |
| Temp*Press | -0.1521 | -0.0760 | 0.05960 | -1.28 | 0.207 |
| Temp*Time | -0.1712 | -0.0856 | 0.05960 | -1.44 | 0.156 |
| Temp*Binder | 0.5848 | 0.2924 | 0.05960 | 4.91 | 0.000 |
| Press*Time | 0.1172 | 0.0586 | 0.05960 | 0.98 | 0.329 |
| Press*Binder | 0.1838 | 0.0919 | 0.05960 | 1.54 | 0.128 |
| Time*Binder | 0.1742 | 0.0871 | 0.05960 | 1.46 | 0.149 |
| Temp*Press*Time | -0.0131 | -0.0065 | 0.05960 | -0.11 | 0.913 |
| Temp*Press*Binder | -0.0427 | -0.0214 | 0.05960 | -0.36 | 0.721 |
| Temp*Time*Binder | -0.0526 | -0.0263 | 0.05960 | -0.44 | 0.660 |
| Press*Time*Binder | 0.1302 | 0.0651 | 0.05960 | 1.09 | 0.279 |
| Temp*Press*Time*Binder | 0.4884 | 0.2442 | 0.05960 | 4.10 | 0.000 |

S = 0.533059 PRESS = 28.4151
R-Sq = 96.31% R-Sq(pred) = 94.24% R-Sq(adj) = 95.45%

Analysis of Variance for Flexural strength (coded units)

| Source | DF | Seq SS | Adj SS | Adj MS | F | P |
|------------------------|----|---------|---------|---------|---------|-------|
| Main Effects | 4 | 460.516 | 460.516 | 115.129 | 405.17 | 0.000 |
| Temp | 1 | 2.630 | 2.630 | 2.630 | 9.26 | 0.003 |
| Press | 1 | 5.214 | 5.214 | 5.214 | 18.35 | 0.000 |
| Time | 1 | 2.893 | 2.893 | 2.893 | 10.18 | 0.002 |
| Binder | 1 | 449.779 | 449.779 | 449.779 | 1582.88 | 0.000 |
| 2-Way Interactions | 6 | 9.445 | 9.445 | 1.574 | 5.54 | 0.000 |
| Temp*Press | 1 | 0.462 | 0.462 | 0.462 | 1.63 | 0.207 |
| Temp*Time | 1 | 0.586 | 0.586 | 0.586 | 2.06 | 0.156 |
| Temp*Binder | 1 | 6.840 | 6.840 | 6.840 | 24.07 | 0.000 |
| Press*Time | 1 | 0.275 | 0.275 | 0.275 | 0.97 | 0.329 |
| Press*Binder | 1 | 0.675 | 0.675 | 0.675 | 2.38 | 0.128 |
| Time*Binder | 1 | 0.607 | 0.607 | 0.607 | 2.14 | 0.149 |
| 3-Way Interactions | 4 | 0.435 | 0.435 | 0.109 | 0.38 | 0.821 |
| Temp*Press*Time | 1 | 0.003 | 0.003 | 0.003 | 0.01 | 0.913 |
| Temp*Press*Binder | 1 | 0.036 | 0.036 | 0.036 | 0.13 | 0.721 |
| Temp*Time*Binder | 1 | 0.055 | 0.055 | 0.055 | 0.19 | 0.660 |
| Press*Time*Binder | 1 | 0.339 | 0.339 | 0.339 | 1.19 | 0.279 |
| 4-Way Interactions | 1 | 4.771 | 4.771 | 4.771 | 16.79 | 0.000 |
| Temp*Press*Time*Binder | 1 | 4.771 | 4.771 | 4.771 | 16.79 | 0.000 |
| Residual Error | 64 | 18.186 | 18.186 | 0.284 | | |
| Pure Error | 64 | 18.186 | 18.186 | 0.284 | | |
| Total | 79 | 493.352 | | | | |

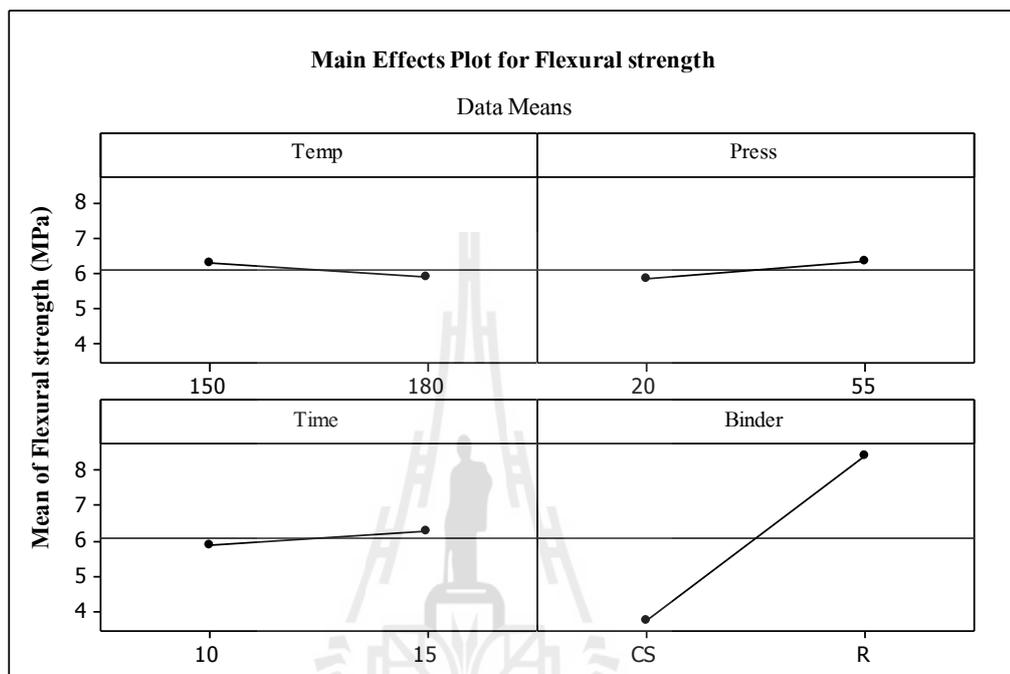
รูปที่ 5.8 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูลการทดลองเชิงแฟกทอเรียล
แบบสองระดับด้วยโปรแกรม Minitab 16

ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ของค่าการต้านทานแรงดัดโค้งของชิ้นทดสอบจากลำต้นมันสำปะหลังและสารยึดเกาะจากการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบสองระดับ (2^k Factorial design) ด้วยโปรแกรม Minitab 16 ดังแสดงในรูปที่ 5.8 ซึ่งตามรูปแบบของวิธีการทางสถิติ เมื่อเปรียบเทียบค่า P-value ที่ได้จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนและค่านัยสำคัญ (α) ที่กำหนดไว้ใน การทดสอบ หากพบว่าค่า P-value ของปัจจัยนั้น ๆ มีค่าน้อยกว่านัยสำคัญ ($P\text{-value} < \alpha$) จะถือว่าปัจจัยดังกล่าวมีอิทธิพลต่อค่าการทดสอบอย่างมีนัยสำคัญ และผลจากการวิเคราะห์ความแปรปรวนในการทดสอบค่าการต้านทานแรงดัดโค้งของชิ้นทดสอบจากลำต้นมันสำปะหลังและสารยึดเกาะ พบว่าปัจจัยหลัก (Main effect) คือ อุณหภูมิ (Temperature) ความดัน (Pressure) และเวลา (Time) ในกระบวนการอัดขึ้นรูป และสารยึดเกาะ (Binder) ที่ใช้ในการทดลอง มีผลต่อค่าการต้านทานแรงดัดโค้งของชิ้นทดสอบอย่างมีนัยสำคัญ ($P\text{-value} < 0.05$) สำหรับความสัมพันธ์ของอิทธิพลร่วม (Interaction effect) ระหว่างปัจจัย พบว่าจะมีผลต่อค่าการต้านทานแรงดัดโค้งของชิ้นทดสอบอย่างมีนัยสำคัญ ($P\text{-value} < 0.05$) เพียง 2 ปัจจัย คือ อิทธิพลร่วมของ 2 ปัจจัยระหว่างอุณหภูมิในกระบวนการอัดและสารยึดเกาะที่ใช้ในการทดลอง และอิทธิพลร่วมของ 4 ปัจจัยระหว่างอุณหภูมิ ความดัน และเวลาในกระบวนการอัดขึ้นรูป และสารยึดเกาะที่ใช้ในการทดลอง เมื่อพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจที่ปรับแล้ว (Adjusted R-squared, Adj-R²) ที่เท่ากับ 95.45% หมายถึงมีผลของตัวแปรที่ไม่ได้ควบคุมหรือควบคุมไม่ได้ (Error) ที่ส่งผลต่อค่าการต้านทานแรงดัดโค้งเท่ากับ 4.55% กล่าวคือการเปลี่ยนแปลงที่เกิดกับค่าการต้านทานแรงดัดโค้งของชิ้นทดสอบอยู่ 95.45% เกิดจากสาเหตุของการเปลี่ยนแปลงการควบคุมปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง

จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูลจากการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบสองระดับนี้ สามารถแสดงเป็นกราฟของอิทธิพลจากปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อค่าการต้านทานแรงดัดโค้งของชิ้นทดสอบจากลำต้นมันสำปะหลังและสารยึดเกาะได้ โดยกราฟอิทธิพลของปัจจัยหลัก (Main effect) แสดงในรูปที่ 5.9 และกราฟอิทธิพลของปัจจัยร่วม (Interaction effect) แสดงในรูปที่ 5.10

เมื่อพิจารณาอิทธิพลของปัจจัยหลักด้านอุณหภูมิที่ใช้ในกระบวนการอัดขึ้นรูปต่อค่าการต้านทานแรงดัดโค้งของชิ้นทดสอบจากลำต้นมันสำปะหลังและสารยึดเกาะ ดังแสดงในรูปที่ 5.9 พบว่าเมื่ออุณหภูมิที่ใช้ในกระบวนการอัดเพิ่มสูงขึ้นจาก 150°C เป็น 180°C ส่งผลให้ค่าเฉลี่ยของการต้านทานแรงดัดโค้งของชิ้นทดสอบลดต่ำลงเล็กน้อยจากประมาณ 6.272 MPa เหลือ 5.909 MPa ซึ่งมีความเป็นไปได้ว่าเมื่ออุณหภูมิที่สูงขึ้นจะสามารถระเหยไอน้ำออกจากเนื้อของของผสมได้มากขึ้น ชิ้นทดสอบที่ได้มีโครงสร้างรูพรุน และความหนาแน่นที่ต่ำกว่า นำไปสู่การลดลงของค่าการต้านทานแรงดัดโค้ง จากการพิจารณาค่าสถิติ F พบว่าปัจจัยหลักของอุณหภูมิที่ใช้ในกระบวนการอัดจะมีอิทธิพลต่อค่าการต้านทานแรงดัดโค้งของชิ้นทดสอบน้อยที่สุดในกลุ่มของปัจจัยหลัก

ซึ่งค่าสถิติ F ที่เท่ากับ 9.26 นั้น หมายความว่าปัจจัยหลักที่สนใจอยู่นี้ ส่งผลต่อค่าการต้านทานแรงคด โค้งของชิ้นทดสอบจากลำดับมันสำปะหลังและสารยึดเกาะมากกว่าปัจจัยที่ไม่สนใจหรือปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้ (Error) อยู่ถึง 9.26 เท่า



รูปที่ 5.9 อิทธิพลของปัจจัยหลัก 4 ปัจจัย

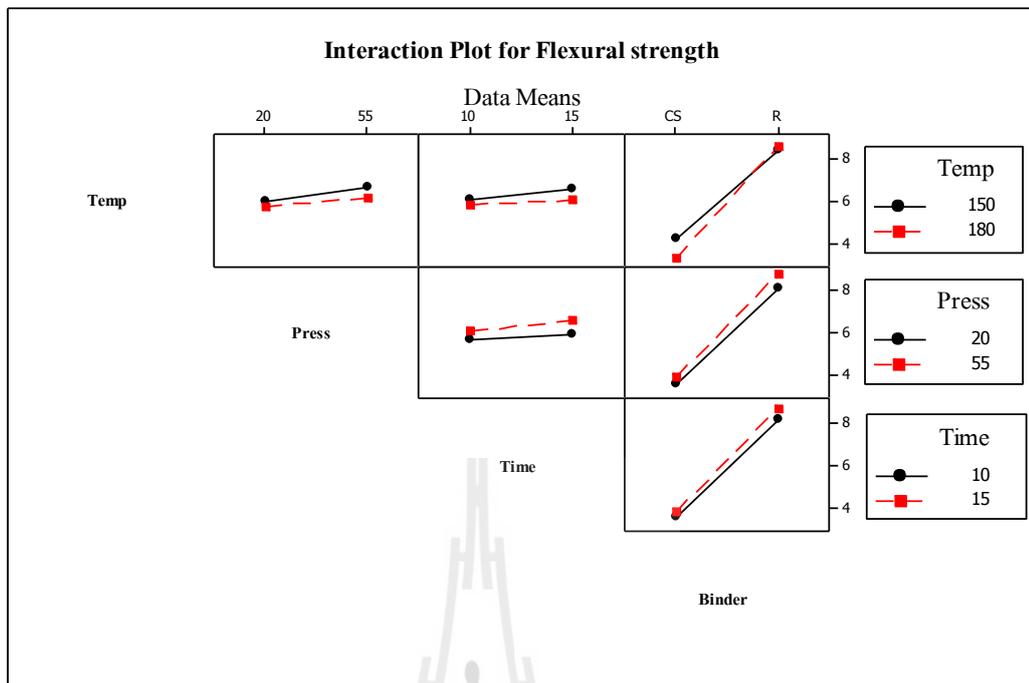
เมื่อพิจารณาอิทธิพลของปัจจัยหลักด้านความดันที่ใช้ในกระบวนการอัดขึ้นรูปต่อค่าการต้านทานแรงคด โค้งของชิ้นทดสอบจากลำดับมันสำปะหลังและสารยึดเกาะ ดังแสดงในรูปที่ 5.9 พบว่าเมื่อความดันที่ใช้ในกระบวนการอัดเพิ่มสูงขึ้นจาก 20 bar เป็น 55 bar ส่งผลให้ค่าเฉลี่ยของการต้านทานแรงคด โค้งของชิ้นทดสอบเพิ่มสูงขึ้นจากประมาณ 5.835 MPa เป็น 6.346 MPa อาจเป็นไปได้ว่าที่ความดันที่สูงกว่า จะทำให้เส้นใยต้นมันสำปะหลังอัดตัวได้แน่นและมีความเข้ากันได้มากกว่าที่ความดันต่ำ ๆ ส่งผลให้ชิ้นทดสอบมีสมบัติทางกลที่ดีขึ้น จากการพิจารณาค่าสถิติ F พบว่าปัจจัยหลักของความดันที่ใช้ในกระบวนการอัด จะมีอิทธิพลต่อค่าการต้านทานแรงคด โค้งของชิ้นทดสอบมากที่สุดเมื่อเทียบกับปัจจัยหลักในกระบวนการอัดขึ้นรูปที่เหลือ (อุณหภูมิและเวลา) โดยมีค่าสถิติ F เท่ากับ 18.35

เมื่อพิจารณาอิทธิพลของปัจจัยหลักด้านเวลาที่ใช้ในกระบวนการอัดขึ้นรูปต่อค่าการต้านทานแรงคด โค้งของชิ้นทดสอบจากลำดับมันสำปะหลังและสารยึดเกาะ ดังแสดงในรูปที่ 5.9

พบว่าเมื่อเวลาที่ใช้ในกระบวนการอัดเพิ่มสูงขึ้นจาก 10 นาที เป็น 15 นาที ส่งผลให้ค่าเฉลี่ยของการต้านทานแรงดัดโค้งของชิ้นทดสอบเพิ่มสูงขึ้นเล็กน้อยจากประมาณ 6.091 MPa เป็น 6.281 MPa กล่าวคือเมื่อเวลาที่ใช้ในกระบวนการอัดขึ้นรูปที่นานขึ้น จะสามารถระเหยไอน้ำส่วนเกินออกจากของผสมได้มากกว่า ส่งผลให้ชิ้นทดสอบที่ได้มีปริมาณความชื้นที่ต่ำกว่า และมีความต้านทานที่มากกว่า จากการพิจารณาค่าสถิติ F พบว่าปัจจัยหลักของเวลาที่ใช้ในกระบวนการอัดจะมีค่าที่ใกล้เคียงกับค่าสถิติ F ของอุณหภูมิที่ใช้ในกระบวนการอัด โดยมีค่าเท่ากับ 10.18

เมื่อพิจารณาอิทธิพลของปัจจัยหลักด้าน สารยึดเกาะที่ใช้ในการทดลองต่อค่าการต้านทานแรงดัดโค้งของชิ้นทดสอบจากลำต้นมันสำปะหลังและสารยึดเกาะ ดังแสดงในรูปที่ 5.9 พบว่าค่าเฉลี่ยของการต้านทานแรงดัดโค้งของชิ้นทดสอบเพิ่มสูงขึ้นอย่างเห็นได้ชัดจากประมาณ 3.719 MPa เป็น 8.462 MPa เมื่อเปลี่ยนสารยึดเกาะที่ใช้ในการทดลองจากน้ำแป้งมันสำปะหลังเป็นหัวมันสำปะหลังสด มีความเป็นไปได้ว่าค่าความหนาแน่นของชิ้นทดสอบที่ใช้หัวมันสำปะหลังสดเป็นสารยึดเกาะจะมีค่าที่มากกว่าค่าความหนาแน่นของชิ้นทดสอบเมื่อใช้น้ำแป้งมันสำปะหลังเป็นสารยึดเกาะ โดยที่หลังจากระเหยน้ำส่วนเกินออกจากของผสมแล้วนั้น ชิ้นทดสอบที่ใช้หัวมันสำปะหลังสดเป็นสารยึดเกาะจะยังคงเหลือก้อนเจลที่เติมเต็มช่องว่างได้มากกว่าการใช้น้ำแป้งมันสำปะหลังเป็นสารยึดเกาะ จากการพิจารณาค่าสถิติ F พบว่าปัจจัยหลักของสารยึดเกาะที่ใช้ในการทดลอง จะมีอิทธิพลต่อค่าการต้านทานแรงดัดโค้งของชิ้นทดสอบมากที่สุดในกลุ่มอิทธิพลของปัจจัยหลัก ซึ่งค่าสถิติ F ที่เท่ากับ 1,582.88 นั้น หมายความว่าปัจจัยหลักที่สนใจอยู่นี้ส่งผลต่อค่าการต้านทานแรงดัดโค้งของชิ้นทดสอบจากลำต้นมันสำปะหลังและสารยึดเกาะมากกว่าปัจจัยที่ไม่สนใจหรือปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้ (Error) อยู่ถึง 1,582.88 เท่า

จากผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนพบว่าอิทธิพลร่วมระหว่าง 2 ปัจจัย ที่ส่งผลต่อค่าการต้านทานแรงดัดโค้งของชิ้นทดสอบจากลำต้นมันสำปะหลังและสารยึดเกาะอย่างมีนัยสำคัญ ($P\text{-value} < 0.05$) มีเพียงอิทธิพลร่วมระหว่างอุณหภูมิในกระบวนการอัดขึ้นรูปและสารยึดเกาะที่ใช้ในการทดลองเท่านั้น ซึ่งอิทธิพลร่วมระหว่างอุณหภูมิและความดันในกระบวนการอัด อิทธิพลร่วมระหว่างอุณหภูมิและเวลาในกระบวนการอัด อิทธิพลร่วมระหว่างความดันและเวลาในกระบวนการอัด อิทธิพลร่วมระหว่างเวลาในกระบวนการอัดและสารยึดเกาะนั้น ไม่มีผลต่อค่าการต้านทานแรงดัดโค้งของชิ้นทดสอบอย่างมีนัยสำคัญ ($P\text{-value} > 0.05$) ในรูปที่ 5.10 แสดงกราฟอิทธิพลของปัจจัยร่วมแบบ 2 ปัจจัย พบว่าเส้นกราฟของค่าตอบสนองสำหรับปัจจัยที่ไม่มีอิทธิพลร่วมกันอย่างมีนัยสำคัญนั้น สามารถประมาณได้ว่าขนานกัน บ่งชี้ได้ว่าปัจจัยเหล่านี้ไม่มีอันตรกิริยา (Interaction effect) ซึ่งกันและกันในทางกลับกันเส้นกราฟของอิทธิพลร่วมระหว่างอุณหภูมิในกระบวนการอัดขึ้นรูปและสารยึดเกาะที่ใช้ในการทดลองนั้น ไม่ขนานกัน หรือกล่าวได้ว่าปัจจัยทั้ง 2 ปัจจัยนี้มีอันตรกิริยาต่อกัน



รูปที่ 5.10 อิทธิพลของปัจจัยร่วมแบบ 2 ปัจจัย

เมื่อพิจารณาอิทธิพลร่วมระหว่างอุณหภูมิในกระบวนการอัดขึ้นรูปและสารยึดเกาะที่ใช้ในการทดลอง สำหรับชั้นทดสอบจากถ้ำต้นมันสำปะหลังที่ใช้น้ำแป้งเป็นสารยึดเกาะจะมีค่าเฉลี่ยของการต้านทานแรงดัดโค้งที่ลดลงจากประมาณ 4.193 MPa เป็น 3.246 MPa เมื่ออุณหภูมิในกระบวนการอัดขึ้นรูปเพิ่มสูงขึ้นจาก 150°C เป็น 180°C แต่ในทางกลับกัน เมื่อใช้สารยึดเกาะจากหัวมันสำปะหลังสด จะมีค่าเฉลี่ยของการต้านทานแรงดัดโค้งที่มากขึ้นเล็กน้อยจากประมาณ 8.351 MPa เป็น 8.573 MPa เมื่อใช้อุณหภูมิในกระบวนการอัดขึ้นรูปที่สูงขึ้น กล่าวคือชั้นทดสอบที่ใช้น้ำแป้งมันสำปะหลังเป็นสารยึดเกาะสามารถระเหยไอน้ำส่วนเกินได้โดยใช้อุณหภูมิเพียง 150°C สำหรับช่วงของความดันและเวลาที่ใช้ในการทดลอง ทั้งนี้สำหรับอุณหภูมิที่สูงขึ้นทำให้ระเหยไอน้ำออกจากของผสมในปริมาณมากจนชั้นทดสอบที่ได้มีความเปราะ และสมบัติทางกลที่ต่ำลง แต่ชั้นทดสอบที่ใช้หัวมันสำปะหลังสดเป็นสารยึดเกาะอาจจำเป็นต้องใช้อุณหภูมิในการอัดที่สูงกว่าเพื่อระเหยไอน้ำส่วนเกินออกจากของผสม อาจเป็นเพราะหัวมันสำปะหลังมีความหนืดมากกว่าจึงต้องใช้อุณหภูมิที่สูงกว่าในการสลายสารโมเลกุลเล็กออกจากระบบ ค่าสถิติ F ของอิทธิพลร่วมระหว่างอุณหภูมิในกระบวนการอัดขึ้นรูปและสารยึดเกาะที่ใช้ในการทดลองมีค่าเท่ากับ 24.07 ซึ่งมีค่ามากกว่าค่าสถิติ F ของสภาวะในการอัดทั้งหมด หมายความว่าหากทำการทดลองหาสภาวะในกระบวนการอัดที่เหมาะสมของชั้นทดสอบจากถ้ำต้นมันสำปะหลังและสารยึดเกาะ ด้วยวิธีการ

ทดลองแบบลองปรับค่าทดลองทีละค่า (One-factor-at-a-time) นั้น จะมีความไม่เหมาะสมอย่างยิ่งจากการมีอยู่ของอิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัยหรืออันตรกิริยา (Interaction effect) ซึ่งอาจนำไปสู่ข้อสรุปที่ผิดพลาดก็เป็นได้

การทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบสองระดับ (2^k Factorial design) ในเบื้องต้นจะสามารถทดลองเพื่อกรองปัจจัย (Screening experiment) ที่ไม่มีผลต่อค่าการตอบสนองได้ แต่จากการทดลองพบว่าปัจจัยหลัก (Main effect) ที่นำมาศึกษานั้นมีอิทธิพลต่อค่าการต้านทานแรงคดโค้งของชิ้นทดสอบจากลำต้นมันสำปะหลังและสารยึดเกาะทั้งสิ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งหากใช้สารยึดเกาะจากหัวมันสำปะหลังสดจะมีค่าการต้านทานแรงคดโค้งของชิ้นทดสอบที่สูงกว่าชิ้นทดสอบที่ใช้ น้ำแป้งมันสำปะหลังเป็นสารยึดเกาะอย่างเห็นได้ชัด ดังนั้นสามารถหาสถานะในการอัดขึ้นรูปชิ้นทดสอบจากลำต้นมันสำปะหลังและสารยึดเกาะจากหัวมันสำปะหลังสดที่เหมาะสมได้จากโปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติ (Minitab 16) ซึ่งแสดงในหัวข้อถัดไป

5.1.5 การวิเคราะห์จุดเหมาะสมของปัจจัย

ในการหาระดับของปัจจัยที่เหมาะสมจะนำผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนมาสร้างเป็นแบบจำลองถดถอย (Regression model) โดยหลังจากที่วิเคราะห์ความแปรปรวนในเบื้องต้นได้ผลการคำนวณด้วยโปรแกรม Minitab 16 ดังแสดงในรูปที่ 5.8 ซึ่งเป็นการวิเคราะห์ที่รวมปัจจัยหลัก (Main effect) และอิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัย (Interaction effect) ทุกตัว เรียกว่าแบบจำลองเต็มรูปแบบ (Full model) แต่สำหรับแบบจำลองถดถอยที่จะใช้จำลองเพื่อหาระดับที่เหมาะสมของปัจจัยนั้น จะต้องตัดปัจจัยที่ไม่มีนัยสำคัญ ($P\text{-value} > 0.05$) ออกไป เรียกว่าแบบจำลองลดรูป (Reduced model) ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูลการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบสองระดับเมื่อตัดปัจจัยที่ไม่มีนัยสำคัญออก แสดงดังรูปที่ 5.11

จากผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูลสำหรับแบบจำลองลดรูป พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ ($R\text{-squared}$, R^2) และค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจที่ปรับแล้ว (Adjusted $R\text{-squared}$, $\text{Adj-}R^2$) จะลดลงเล็กน้อย แต่ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจการทำนาย (Predicted $R\text{-squared}$, $\text{Pred-}R^2$) จะเพิ่มสูงขึ้นเล็กน้อย ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจการทำนายที่มีค่าสูง ๆ หมายความว่าแบบจำลองนั้นน่าจะเป็นตัวทำนายข้อมูลใหม่ที่ดี ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจการทำนายที่เพิ่มสูงขึ้นมีสาเหตุมาจากการนำปัจจัยที่ไม่มีนัยสำคัญ ($P\text{-value} > 0.05$) ออกจากแบบจำลองแบบเต็มรูปแบบ ทำให้ได้แบบจำลองถดถอยที่มีประสิทธิภาพ และมีจำนวนพจน์น้อยกว่าแบบจำลองถดถอยที่ได้จากแบบจำลองแบบเต็มรูปแบบ

| Factorial Fit: Flexural strength versus Temp, Press, Time, Binder | | | | | | |
|--|---------|---------|---------|---------|---------|-------|
| Estimated Effects and Coefficients for Flexural strength (coded units) | | | | | | |
| Term | Effect | Coef | SE Coef | T | P | |
| Constant | | 6.0906 | 0.06029 | 101.03 | 0.000 | |
| Temp | -0.3627 | -0.1813 | 0.06029 | -3.01 | 0.004 | |
| Press | 0.5106 | 0.2553 | 0.06029 | 4.23 | 0.000 | |
| Time | 0.3803 | 0.1902 | 0.06029 | 3.15 | 0.002 | |
| Binder | 4.7423 | 2.3711 | 0.06029 | 39.33 | 0.000 | |
| Temp*Binder | 0.5848 | 0.2924 | 0.06029 | 4.85 | 0.000 | |
| Temp*Press*Time*Binder | 0.4884 | 0.2442 | 0.06029 | 4.05 | 0.000 | |
| S = 0.539224 PRESS = 25.4915 | | | | | | |
| R-Sq = 95.70% R-Sq(pred) = 94.83% R-Sq(adj) = 95.34% | | | | | | |
| Analysis of Variance for Flexural strength (coded units) | | | | | | |
| Source | DF | Seq SS | Adj SS | Adj MS | F | P |
| Main Effects | 4 | 460.516 | 460.516 | 115.129 | 395.95 | 0.000 |
| Temp | 1 | 2.630 | 2.630 | 2.630 | 9.05 | 0.004 |
| Press | 1 | 5.214 | 5.214 | 5.214 | 17.93 | 0.000 |
| Time | 1 | 2.893 | 2.893 | 2.893 | 9.95 | 0.002 |
| Binder | 1 | 449.779 | 449.779 | 449.779 | 1546.89 | 0.000 |
| 2-Way Interactions | 1 | 6.840 | 6.840 | 6.840 | 23.52 | 0.000 |
| Temp*Binder | 1 | 6.840 | 6.840 | 6.840 | 23.52 | 0.000 |
| 4-Way Interactions | 1 | 4.771 | 4.771 | 4.771 | 16.41 | 0.000 |
| Temp*Press*Time*Binder | 1 | 4.771 | 4.771 | 4.771 | 16.41 | 0.000 |
| Residual Error | 73 | 21.226 | 21.226 | 0.291 | | |
| Lack of Fit | 9 | 3.040 | 3.040 | 0.338 | 1.19 | 0.318 |
| Pure Error | 64 | 18.186 | 18.186 | 0.284 | | |
| Total | 79 | 493.352 | | | | |

รูปที่ 5.11 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูลการทดลอง
เมื่อตัดปัจจัยที่ไม่มีผลต่อค่าการตอบสนองออก

สามารถสร้างแบบจำลองถดถอยเชิงเส้นตรง (Linear interaction) ได้ตามสมการที่ 5.1

$$\hat{y} = \hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 x_1 + \hat{\beta}_2 x_2 + \hat{\beta}_3 x_3 + \hat{\beta}_4 x_4 + \hat{\beta}_{14} x_1 x_4 + \hat{\beta}_{1234} x_1 x_2 x_3 x_4 \quad (5.1)$$

- เมื่อ
- \hat{y} = ค่าการตอบสนอง หรือค่าการต้านทานแรงดัดโค้ง (Flexural strength, MPa)
 - x_1 = อุณหภูมิในกระบวนการอัดขึ้นรูป (Temp., °C)
 - x_2 = ความดันในกระบวนการอัดขึ้นรูป (Press., bar)
 - x_3 = เวลาในกระบวนการอัดขึ้นรูป (Time, นาที)
 - x_4 = สารยึดเกาะที่ใช้ในการทดลอง (Binder)
 - $\hat{\beta}_j$ = ค่าสัมประสิทธิ์ของแบบจำลองถดถอย

แทนค่าสัมประสิทธิ์ของแบบจำลองถดถอยลงในสมการที่ 5.1 จะได้

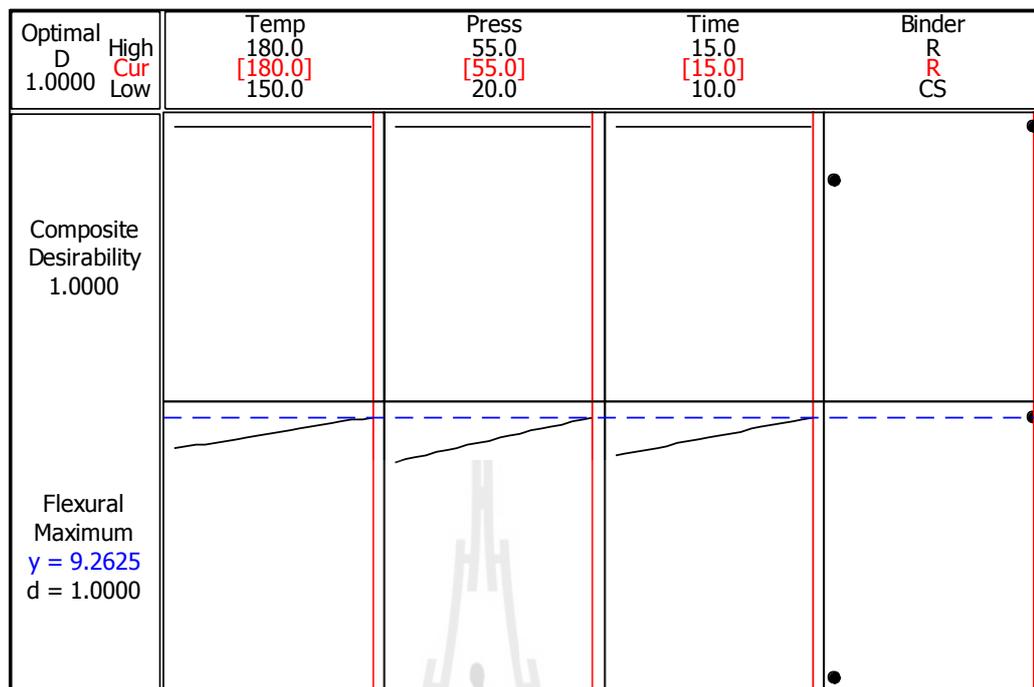
$$\hat{y} = 6.0906 - 0.1813x_1 + 0.2553x_2 + 0.1902x_3 + 2.3711x_4 + 0.2924x_1x_4 + 0.2442x_1x_2x_3x_4 \quad (5.2)$$

หรือสามารถจัดรูปใหม่สำหรับการแทนค่าปัจจัยในรูปของรหัส (Code units) ได้ตามสมการที่ 5.3

$$\hat{y} = 6.0906 - 0.1813Temp + 0.2553Press + 0.1902Time + 2.3711Binder + 0.2924Temp * Binder + 0.2442Temp * Press * Time * Binder \quad (5.3)$$

การทดสอบทางสถิติเพื่อทดสอบความเหมาะสมของแบบจำลองถดถอย (Lack of fit) จะใช้ในการพิจารณาว่ารูปแบบของแบบจำลองถดถอย (Regression model) ที่ได้นั้น มีความเหมาะสมกับข้อมูลการทดลองที่ระดับความเชื่อมั่นที่ 95% ($\alpha = 0.05$) หรือไม่ หากแบบจำลองถดถอยที่ได้ไม่มีความเหมาะสมกับข้อมูลการทดลอง จะมีค่า P-value ของ Lack of fit ที่น้อยกว่าระดับนัยสำคัญ (0.05) ซึ่งจำเป็นต้องสร้างแบบจำลองถดถอยด้วยความสัมพันธ์แบบอื่นในการวิเคราะห์ความแปรปรวนแทน ค่า Lack of fit จะประกอบไปด้วยค่าผลรวมของค่าเบี่ยงเบนกำลังสอง (Sum of square, SS) ของปัจจัยที่คัดออกไปจากแบบจำลอง (ปัจจัยที่ไม่มีนัยสำคัญ) จากรูปที่ 5.11 พบว่าค่า P-value ของ Lack of fit มีค่ามากกว่าระดับนัยสำคัญ (P-value > 0.05) หมายความว่ารูปแบบของแบบจำลองถดถอยดังกล่าวมีความเหมาะสมกับข้อมูลการทดลอง ดังนั้นจึงนำสมการดังกล่าวไปวิเคราะห์หาระดับที่เหมาะสมของปัจจัยโดยใช้ฟังก์ชัน Response optimizer ภายในโปรแกรม Minitab 16 ได้ผลการวิเคราะห์ดังแสดงในรูปที่ 5.12

ในการวิเคราะห์ระดับที่เหมาะสมของปัจจัยกำหนดเป้าหมาย (Goal) ให้มีค่าสูงที่สุด (Maximize) โดยกำหนดช่วงต่ำสุดของการวิเคราะห์ (Lower) ที่เท่ากับ 1.3 MPa เนื่องจากเป็นค่าการต้านทานแรงดัดโค้งของโฟมพอลิสไตรีน (Expanded polystyrene, EPS) (อังศุมมา บุญไชยสุริยา, 2554) และกำหนดค่าเป้าหมาย (Target) ไว้อย่างน้อย 4 MPa ซึ่งเป็นค่าการต้านทานแรงดัดโค้งของชิ้นทดสอบจากหัวมันสำปะหลังล้วน (100%) ที่ได้จากการทดลอง กล่าวคือต้องการให้ชิ้นทดสอบจากลำต้นมันสำปะหลังและสารยึดเกาะมีค่าการต้านทานแรงดัดโค้งที่สูงที่สุด โดยต้องมีค่าที่มากกว่าโฟมพอลิสไตรีนและมีค่าอย่างน้อยเท่ากับค่าการต้านทานแรงดัดโค้งของชิ้นทดสอบจากหัวมันสำปะหลังล้วนที่ยังไม่ได้มีการเสริมแรง



รูปที่ 5.12 ผลการวิเคราะห์ระดับที่เหมาะสมของปัจจัยที่ให้ค่าการต้านทานแรงดัดโค้งสูงสุด

จากผลการวิเคราะห์ระดับที่เหมาะสมของปัจจัยดังแสดงในรูปที่ 5.12 พบว่าการตั้งค่าอุณหภูมิในกระบวนการอัดขึ้นรูปเท่ากับ 180°C ความดันในกระบวนการอัดขึ้นรูปเท่ากับ 55 bar ระยะเวลาในกระบวนการอัดขึ้นรูปเท่ากับ 15 นาที และสารยึดเกาะที่ใช้ในการทดลองเป็นหัวมันสำปะหลังสด จะทำให้ชิ้นทดสอบจากลำต้นมันสำปะหลังและสารยึดเกาะมีค่าการต้านทานแรงดัดโค้งสูงสุด โดยมีค่าประมาณ 9.263 MPa ซึ่งเป็นไปตามเป้าหมายที่ตั้งไว้ คือ มีค่าที่มากกว่าโพลีเอทิลีนไตรีนและมีค่ามากกว่าชิ้นทดสอบจากหัวมันสำปะหลังล้วนที่ยังไม่ได้ทำการเสริมแรงเป็นที่น่าสนใจว่าการใช้หัวมันสำปะหลังสดเป็นสารยึดเกาะแทนที่การใช้น้ำแป้งมันสำปะหลังเป็นสารยึดเกาะนั้นจะสามารถลดเวลาและต้นทุนในกระบวนการผลิตลงไปได้อีกมาก เนื่องจากไม่ต้องสิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายไปกับกระบวนการผลิตหัวมันสำปะหลังสดเป็นแป้ง นอกจากนี้ในหัวมันสำปะหลังสดจะมีเส้นใยเป็นองค์ประกอบ ซึ่งอาจจะเสริมแรงให้กับภาชนะได้ดีกว่าน้ำแป้งก็เป็นได้

| New D | High Cur | Temp | Press | Time | Binder |
|------------------------|----------|---------------------------|------------------------|------------------------|--------------|
| 1.0000 | Low | 180.0 [150.0] 150.0 | 55.0 [55.0] 20.0 | 15.0 [15.0] 10.0 | R R CS |
| Composite Desirability | | | | | |
| 1.0000 | | | | | |
| Flexural Maximum | | | | | |
| $y = 8.5519$ | | | | | |
| $d = 1.0000$ | | | | | |

รูปที่ 5.13 ผลการวิเคราะห์ระดับที่เหมาะสมของปัจจัยที่ให้ค่าการต้านทานแรงดัดโค้งสูงที่สุด เมื่อปรับลดขอบเขตของอุณหภูมิลง

แต่เนื่องจากข้อจำกัดด้านงบประมาณในการจัดซื้อชุดให้ความร้อนแบบฮีทเตอร์แท่ง (Cartridge heater) ทำให้ได้ของที่มีคุณภาพจำกัด ไม่สามารถใช้งานฮีทเตอร์แท่งที่จัดซื้อมาใหม่ที่อุณหภูมิสูงได้เป็นเวลาดิติดต่อกันนาน ๆ จึงจำเป็นต้องปรับค่าอุณหภูมิที่ใช้ในกระบวนการอัดลงเหลือ 150°C ซึ่งชิ้นทดสอบจะมีค่าการต้านทานแรงดัดโค้งลดลงเล็กน้อย คือ มีค่าประมาณ 8.552 MPa โดยที่การปรับค่าอุณหภูมิลดลงจะส่งอิทธิพลต่อค่าการตอบสนองไม่มากนัก สังเกตได้จากค่าความพึงพอใจ (Desirability, d) และค่าความพึงพอใจรวม (Composite desirability, D) นั้นเท่ากับ 1 ซึ่งหมายความว่า การปรับตั้งค่าครั้งใหม่นี้ยังคงมีค่าการตอบสนองที่ตรงตามเป้าหมายที่ตั้งไว้ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จะทำการศึกษาสมบัติของชิ้นทดสอบจากลำต้นมันสำปะหลังผสมสารยึดเกาะจากหัวมันสำปะหลังสดที่อัตราส่วนต่าง ๆ ในสภาวะการอัดขึ้นรูปร้อนที่เหมาะสม โดยมีอุณหภูมิเท่ากับ 150°C ความดันเท่ากับ 55 bar และระยะเวลาเท่ากับ 15 นาที

5.1.6 การตรวจสอบผลการทดลอง

จากการหาสภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการอัดขึ้นรูปขึ้นทดสอบจากลำต้นมันสำปะหลังและสารยึดเกาะจากหัวมันสำปะหลังสด ด้วยวิธีออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบสองระดับ (2^k Factorial design) พบว่าสภาวะการอัดขึ้นรูปขึ้นทดสอบที่เหมาะสมซึ่งให้ค่าการต้านทานแรงคัดโค้งสูงสุด คือปรับตั้งอุณหภูมิเท่ากับ 150°C ความดันเท่ากับ 55 bar และระยะเวลาเท่ากับ 15 นาที เพื่อเป็นยืนยันผลการหาสภาวะในกระบวนการอัดที่เหมาะสมจึงจำเป็นต้องทดสอบค่าการต้านทานแรงคัดโค้งของขึ้นทดสอบจากลำต้นมันสำปะหลังและหัวมันสำปะหลังในอัตราส่วนเท่ากับ 50:50 โดยน้ำหนัก ที่อัดขึ้นรูปด้วยสภาวะดังกล่าว มาเปรียบเทียบกับผลการคำนวณด้วยแบบจำลองถดถอย ซึ่งผลการทดสอบแสดงดังตารางที่ 5.2

ตารางที่ 5.2 แสดงการเปรียบเทียบค่าการต้านทานแรงคัดโค้งของขึ้นทดสอบที่ได้จากแบบจำลองถดถอยและการทดลองจริง

| อุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}$) | ความดัน (bar) | เวลา (นาที) | ค่าการต้านทานแรงคัดโค้ง (MPa) | | | | | |
|------------------------------------|------------------|----------------|----------------------------------|-------------------|-------|-------|-------|-------|
| | | | จาก แบบจำลอง ถดถอย | จากการทดลองซ้ำที่ | | | | |
| | | | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| 150 | 55 | 15 | 8.552 | 8.714 | 9.135 | 8.341 | 9.054 | 9.970 |

ค่าเฉลี่ยของการต้านทานแรงคัดโค้งของขึ้นทดสอบจากลำต้นมันสำปะหลังและหัวมันสำปะหลังสดในอัตราส่วนเท่ากับ 50:50 โดยน้ำหนัก จากการอัดขึ้นรูปด้วยสภาวะที่เหมาะสม มีค่าประมาณ 9.043 MPa สามารถคำนวณค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์ (Percent relative error) ได้เท่ากับ 5.7% ดังนั้นแบบจำลองถดถอยที่คำนวณได้นั้น (สมการที่ 5.2 และ 5.3) มีความถูกต้องและแม่นยำเพียงพอสำหรับการนำไปใช้เป็นสภาวะการอัดขึ้นรูปที่เหมาะสมของขึ้นทดสอบจากลำต้นมันสำปะหลังและหัวมันสำปะหลังสดที่อัตราส่วนต่าง ๆ

5.2 ผลการทดสอบสมบัติทางกายภาพ

5.2.1 การวัดความหนาของชั้นทดสอบ (Thickness)

ความหนาแสดงในตารางที่ 5.3 พบว่าความหนาของชั้นทดสอบจะมีค่าประมาณ 3.10-3.70 mm ซึ่งในแต่ละสูตรที่ขึ้นรูปมาได้ นั้นจะมีความหนามากกว่าแม่พิมพ์ที่ใช้ในการขึ้นรูป (3 mm) อาจเป็นไปได้ว่าชั้นทดสอบที่ขึ้นรูปมานั้นมีการพองตัว ซึ่งเป็นไปในแนวทางเดียวกันกับงานวิจัยของท่านอื่น (Salgado et al., 2008; Mutsuda et al., 2012; Vercelheze et al., 2012; Vercelheze et al., 2013)

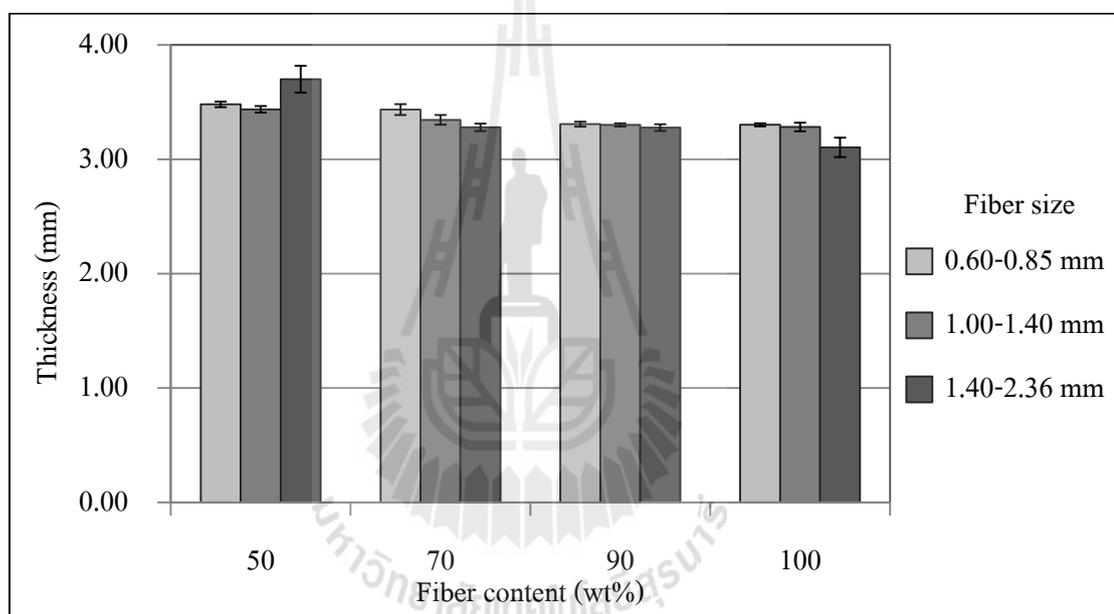
ตารางที่ 5.3 แสดงความหนา และความหนาแน่นของชั้นทดสอบในแต่ละสูตร จากลำต้นมันสำปะหลังและหัวมันสำปะหลังสด

| ขนาดเส้นใย (mm) | ปริมาณเส้นใย (wt%) | ปริมาณสารยัดเกาะ (wt%) | ความหนา (mm) | ความหนาแน่น (g/cm ³) |
|-----------------|--------------------|------------------------|--------------|----------------------------------|
| 0.60-0.85 | 50 | 50 | 3.48 ± 0.01 | 0.629 ± 0.018 |
| | 70 | 30 | 3.44 ± 0.02 | 0.547 ± 0.023 |
| | 90 | 10 | 3.31 ± 0.05 | 0.471 ± 0.024 |
| | 100 | 0 | 3.30 ± 0.02 | 0.420 ± 0.024 |
| 1.00-1.40 | 50 | 50 | 3.44 ± 0.04 | 0.618 ± 0.016 |
| | 70 | 30 | 3.34 ± 0.01 | 0.521 ± 0.040 |
| | 90 | 10 | 3.30 ± 0.04 | 0.426 ± 0.030 |
| | 100 | 0 | 3.28 ± 0.03 | 0.380 ± 0.030 |
| 1.40-2.36 | 50 | 50 | 3.70 ± 0.08 | 0.572 ± 0.032 |
| | 70 | 30 | 3.28 ± 0.03 | 0.528 ± 0.018 |
| | 90 | 10 | 3.28 ± 0.03 | 0.448 ± 0.029 |
| | 100 | 0 | 3.10 ± 0.12 | 0.392 ± 0.032 |

หมายเหตุ : ข้อมูลแสดงในรูปของค่าเฉลี่ย ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

เมื่อเพิ่มปริมาณของสารยัดเกาะ (หัวมันสำปะหลังสด) ความหนาของชั้นทดสอบจะเพิ่มขึ้นเล็กน้อย (ตารางที่ 5.3 และรูปที่ 5.14) เนื่องจากภายในหัวมันสำปะหลังสดที่มีแป้งเป็นส่วนประกอบจะเกิดการพองตัวเมื่อให้ความร้อนจนมีความหนาเพิ่มขึ้น สอดคล้องกับงานวิจัย

ของฉัตรกุล ไช้แสงศรี (2552) ซึ่งพบว่าโฟมแป้งมันสำปะหลังที่มีปริมาณของแป้งสูงกว่าจะมีความหนามากกว่าโฟมแป้งที่มีปริมาณของแป้งน้อย เมื่อพิจารณาที่ขนาดของเส้นใยต้นมันสำปะหลัง พบว่าชั้นทดสอบที่มีเส้นใยที่ขนาดเล็กกว่าจะมีความหนาที่มากกว่าชั้นทดสอบที่ได้จากเส้นใยขนาดใหญ่กว่าอยู่เล็กน้อย ยกเว้นชั้นทดสอบที่มีขนาดเส้นใยต้นมันสำปะหลังเป็น 1.40-2.36 mm และปริมาณของลำต้นมันสำปะหลังและหัวมันสำปะหลังเท่ากับ 50:50 โดยน้ำหนัก ที่จะมีความหนามากที่สุด อาจเป็นเพราะการมีอยู่ของสารยึดเกาะในปริมาณที่มากส่งผลให้ชั้นทดสอบเกิดการพองตัวได้มากเมื่อถูกให้ความร้อน ประกอบกับใช้เส้นใยขนาดใหญ่ทำให้เห็นผลของขนาดเส้นใยได้ชัดเจนขึ้น



รูปที่ 5.14 อิทธิพลของขนาดเส้นใยและปริมาณเส้นใยต้นมันสำปะหลังต่อความหนาของชั้นทดสอบ

ในการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ จะประยุกต์ใช้โปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติ (Minitab 16) โดยกำหนดระดับความเชื่อมั่นที่ 95% ($\alpha = 0.05$) ซึ่งตามรูปแบบของวิธีการทางสถิติ เมื่อเปรียบเทียบค่า P-value ที่ได้จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนและค่านัยสำคัญ (α) ที่กำหนดได้ในการทดสอบ หากพบว่าค่า P-value ของปัจจัยนั้น ๆ มีค่าน้อยกว่านัยสำคัญ ($P\text{-value} < \alpha$) จะถือว่าปัจจัยดังกล่าวมีอิทธิพลต่อการทดสอบอย่างมีนัยสำคัญ และผลจากการวิเคราะห์ความแปรปรวนในการทดสอบอิทธิพลของขนาดเส้นใยต้นมันสำปะหลังและปริมาณของเส้นใยต้นมันสำปะหลังต่อ

สมบัติทางกายภาพด้านความหนาของขึ้นทดสอบ พบว่าปัจจัยหลัก (Main effect) คือ ขนาดเส้นใย และปริมาณเส้นใยนั้นมีอิทธิพลต่อความหนาของขึ้นทดสอบอย่างมีนัยสำคัญ ($P\text{-value} < 0.05$) สำหรับความสัมพันธ์ของอิทธิพลร่วม (Interaction effect) ของ 2 ปัจจัย พบว่ามีผลต่อความหนาของขึ้นทดสอบอย่างมีนัยสำคัญ ($P\text{-value} < 0.05$) เช่นกัน จะสังเกตได้ชัดในกรณีที่ขึ้นทดสอบที่มีปริมาณต้นมันสำปะหลังและหัวมันสำปะหลังสดเท่ากับ 50:50 โดยน้ำหนัก จากการพิจารณาค่าสถิติ F พบว่าปัจจัยหลักที่มีผลต่อค่าความหนาของขึ้นทดสอบเป็นอย่างมาก คือ ปริมาณของเส้นใย (อัตราส่วนผสม) ที่ใช้ในแต่ละสูตร เนื่องจากมีค่าสถิติ F ที่สูงมากถึง 125.54 กล่าวคือ ปัจจัยหลักที่สนใจอยู่นี้ส่งผลต่อความหนาของขึ้นทดสอบมากกว่าปัจจัยที่ไม่สนใจหรือปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้ (Error) อยู่ถึง 125.54 เท่า

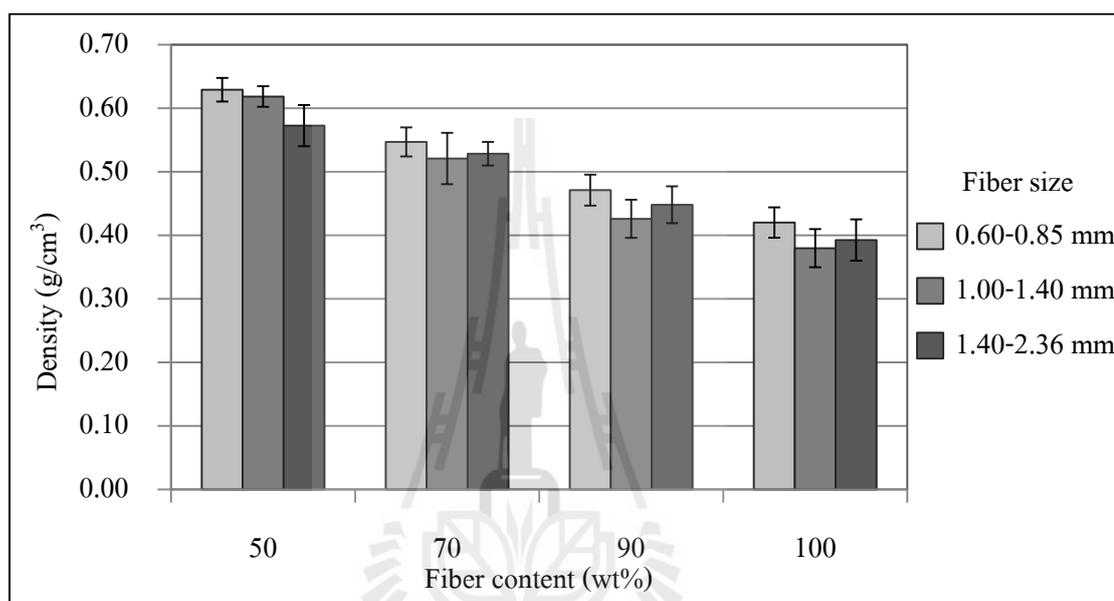
ตารางที่ 5.4 ผลการคำนวณทางสถิติด้วยการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบสองทาง (Two-way ANOVA) ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ของค่าความหนาของขึ้นทดสอบ

| Source | DF | SS | MS | F | P |
|---------------|-----|---------------|----------|---------------------|-------|
| Fiber size | 2 | 0.03296 | 0.016480 | 4.56 | 0.013 |
| Fiber content | 3 | 1.36128 | 0.453761 | 125.54 | 0.000 |
| Interaction | 6 | 0.53933 | 0.089888 | 24.87 | 0.000 |
| Error | 108 | 0.39036 | 0.003614 | - | - |
| Total | 119 | 2.32393 | - | - | - |
| S = 0.06012 | | R-Sq = 83.20% | | R-Sq (adj) = 81.49% | |

5.2.2 การทดสอบความหนาแน่นของขึ้นทดสอบ (Density)

ค่าความหนาแน่นของขึ้นทดสอบจากหัวมันสำปะหลังสดล้วน (100%) มีค่าประมาณ 0.415 g/cm^3 ซึ่งมีค่าสูงกว่าค่าความหนาแน่นของโฟมจากแป้งที่ยังไม่เติมสารเติมแต่ง (Pure starch foam) ในงานวิจัยท่านอื่น ๆ โดยที่ค่าความหนาแน่นของโฟมแป้งมันสำปะหลังมีค่าประมาณ $0.214\text{-}0.281 \text{ g/cm}^3$ (Soykabkeaw et al., 2006; Carr et al., 2006; Matsuda et al., 2013) นอกจากนี้ค่าความหนาแน่นของขึ้นทดสอบจากหัวมันสำปะหลังสดล้วนยังมีค่ามากกว่าค่าความหนาแน่นของถาดโฟมแป้งมันฝรั่งที่ยังไม่เติมสารเติมแต่งอีกด้วย คือ 0.110 g/cm^3 (Cinelli et al., 2006) และสำหรับค่าความหนาแน่นของถาดโฟมแป้งข้าวโพดที่ยังไม่ได้เติมสารเติมแต่งมีค่าเท่ากับ 0.440 g/cm^3 (Usla and Polat, 2012) ซึ่งจากรายงานการวิจัยเหล่านี้บ่งชี้ได้ว่า ค่าความหนาแน่นของโฟมแป้งนั้นจะมีค่าที่แตกต่างกันออกไปตามแหล่งที่มาและชนิดของวัตถุดิบที่นำมาทำเป็นแป้ง

การตัดแปรหรือปรับเปลี่ยนโครงสร้างของแป้ง ปริมาณของอะไมโลสในแป้ง รวมไปถึงอัตราส่วนผสม และกรรมวิธีการผลิตในแต่ละงานวิจัยด้วย จากการพิจารณาค่าความหนาแน่นของชิ้นทดสอบจากหัวมันสำปะหลังล้วนที่มีค่ามากกว่าโพมแป้งจากแป้งมันสำปะหลังกับน้ำเพียงอย่างเดียว นั้น มีความเป็นไปได้ว่าหลังจากที่ระเหยน้ำส่วนเกินออกจากหัวมันสำปะหลังสดล้วน ชิ้นทดสอบจะยังคงเหลือก้อนเจลแป้ง เยื่อใย และเปลือกของหัวมันสำปะหลังสดอยู่จึงทำให้มีค่าความหนาแน่นที่มากกว่า



รูปที่ 5.15 อิทธิพลของขนาดเส้นใยและปริมาณเส้นใยต้นมันสำปะหลัง ต่อความหนาแน่นของชิ้นทดสอบ

ค่าความหนาแน่นของชิ้นทดสอบจากลำต้นมันสำปะหลังและหัวมันสำปะหลังสด แต่ละสูตรแสดงในตารางที่ 5.3 และรูปที่ 5.15 พบว่าค่าความหนาแน่นของชิ้นทดสอบมีค่าประมาณ 0.380-0.629 g/cm³ เมื่อเปรียบเทียบค่าความหนาแน่นของชิ้นทดสอบจากลำต้นมันสำปะหลังผสม หัวมันสำปะหลังสดกับค่าความหนาแน่นของชิ้นทดสอบจากหัวมันสำปะหลังล้วน บ่งชี้ได้ว่าการเติมเส้นใยลงไปในสูตรจะทำให้ค่าความหนาแน่นของชิ้นทดสอบเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากการมีอยู่ของเส้นใยในสูตรผสมจะทำให้ความหนืดของของผสมเพิ่มขึ้น ซึ่งส่งผลให้การพองตัวของของผสมลดลง จำนวนเซลล์เฉลี่ยขนาดเล็กเพิ่มขึ้น ผนังเซลล์หนาขึ้น และความหนาแน่นมากขึ้น (Soykabkeaw et al., 2004; Carr et al., 2006; Cinelli et al., 2006; Benezet et al., 2012) อย่างไรก็ตามในงานวิจัยดังกล่าวเป็นชิ้นทดสอบที่เน้นใช้แป้งเป็นหลัก (Starch-based composites) โดยจะเติมเส้นใย

เพียงเล็กน้อยเพื่อเป็นส่วนเสริมแรงให้กับชิ้นงานเท่านั้น ต่างจากในงานวิจัยนี้ที่จะเน้นเส้นใยจากต้นมันสำปะหลังเป็นหลักและเติมสารยึดเกาะไม่เกิน 50% โดยน้ำหนักของของผสม ทำให้ในงานวิจัยนี้ไม่มีการศึกษาค่าความหนาแน่นของชิ้นทดสอบที่มีปริมาณหัวมันสำปะหลังสดสูง ๆ และเติมเส้นใยมันสำปะหลังเป็นส่วนเสริมแรงเพื่อนำมาเปรียบเทียบกับข้อมูลดังกล่าว

เมื่อพิจารณาที่ขนาดเส้นใยเดียวกันพบว่าปริมาณของสารยึดเกาะจากหัวมันสำปะหลังที่เพิ่มขึ้น (ปริมาณต้นมันสำปะหลังลดลง) จะทำให้ค่าความหนาแน่นเพิ่มขึ้นเช่นกัน เนื่องจากหัวมันสำปะหลังสดจะเข้าไปเติมเต็มช่องว่างระหว่างเส้นใย สอดคล้องกับผลการศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาของชิ้นทดสอบ (อยู่ในหัวข้อที่ 5.2.4) ทั้งนี้ตามรายงานของ Shogren et al. (1998) กล่าวว่า ค่าความหนาแน่นของกรดโพลีเมอริกแป้งข้าวโพดมีค่าเพิ่มมากขึ้น จากการเพิ่มปริมาณของแป้งที่เติมลงไปในส่วนผสมแต่ละสูตร เนื่องจากการเพิ่มปริมาณของแป้งที่ใช้จะทำให้ค่าความหนืดของน้ำแป้งขึ้น (Starch paste) เพิ่มขึ้น ซึ่งจะทำให้อัตราการพองตัวของไอน้ำลดลงนำไปสู่ความหนาแน่นที่เพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Schmidt and Laurindo (2010) ที่กล่าวว่า การเพิ่มขึ้นของเส้นใยเซลลูโลสและลดปริมาณแป้งมันสำปะหลังลง ทำให้กรดโพลีเมอริกแป้งมีความหนาแน่นที่ลดลง

เมื่อพิจารณาอิทธิพลของขนาดเส้นใยต้นมันสำปะหลังต่อค่าความหนาแน่นของชิ้นทดสอบในอัตราส่วนผสมเดียวกัน พบว่าเส้นใยต้นมันสำปะหลังที่ขนาดเล็กกว่า จะทำให้ค่าความหนาแน่นของชิ้นทดสอบมีค่าสูงกว่าเส้นใยที่ขนาดใหญ่กว่าเมื่อใช้หัวมันสำปะหลังสดเป็นสารยึดเกาะ เนื่องจากหัวมันสำปะหลังสามารถเข้าไปเติมเต็มช่องว่างระหว่างเส้นใยและมีความเข้ากันได้ดีกว่าชิ้นทดสอบจากเส้นใยต้นมันสำปะหลังที่ขนาดใหญ่กว่า สอดคล้องกับผลการศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาของชิ้นทดสอบเช่นกัน สำหรับชิ้นทดสอบจากเส้นใยต้นมันสำปะหลังขนาดประมาณ 1.00-1.40 mm และขนาดประมาณ 1.40-2.36 mm มีค่าความหนาแน่นที่ใกล้เคียงกัน โดยที่หากปริมาณของเส้นใยสูง ๆ ชิ้นทดสอบที่มีขนาดเส้นใยประมาณ 1.40-2.36 mm จะมีค่าความหนาแน่นที่สูงกว่า และความหนาแน่นจะตกลงเมื่อปริมาณของต้นมันสำปะหลังและหัวมันสำปะหลังสดเท่ากับ 50:50 โดยน้ำหนัก เนื่องจากชิ้นทดสอบสูตรนี้มีค่าความหนาแน่นสูงสุดเมื่อเทียบกับสูตรอื่น ตามรายงานของ Carr et al. (2006) การศึกษาอิทธิพลของการเติมเส้นใยจากมันสำปะหลัง (ยาวประมาณ 2 mm) และเส้นใยข้าวสาลี (ยาวประมาณ 0.25 mm) ลงในโพลีเมอริกแป้งในปริมาณที่ไม่เกิน 3% โดยน้ำหนักของของผสม พบว่าชนิดของเส้นใยไม่ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติต่อความหนาแน่นของโพลีเมอริกแป้งเมื่อใช้ส่วนเสริมแรงในปริมาณที่ต่ำ แต่ขนาดของเส้นใยจะส่งผลต่อความหนาแน่นอย่างเห็นได้ชัดหากขนาดเส้นใยที่นำมาศึกษามีขนาดที่แตกต่างกันมากและเติมลงในโพลีเมอริกแป้งประมาณ 10% โดยน้ำหนักของของผสม (Soykabkeaw et al., 2004)

ค่าความหนาแน่นในงานวิจัยนี้สูงกว่าค่าความหนาแน่นของโฟมพอลิสไตรีน (Expanded polystyrene, EPS) คือ 0.05-0.09 g/cm³ (Kaisangsri et al., 2012) เนื่องจากการมีอยู่ของ เส้นใยต้นมันสำปะหลังจะป้องกันการฟองตัวและขยายตัวของสารยึดเกาะดั่งที่ได้อธิบายไว้ ก่อนหน้านี้ นอกจากนี้ยังมีค่าความหนาแน่นที่มากกว่าโฟมแป้งมันสำปะหลังที่ผสมแร่ดินเหนียว (Montmorillonite) คือ 0.281-0.308 g/cm³ (Matsuda et al., 2013) อีกด้วย อย่างไรก็ตามค่าความ หนาแน่นที่ได้มีค่าใกล้เคียงกับถาดโฟมแป้งมันสำปะหลังที่ผสมโปรตีนดอกทานตะวันและเส้นใย เซลลูโลส คือ 0.456-0.587 g/cm³ (Salgado et al., 2008)

ในการประยุกต์ใช้งานจริงของภาชนะย่อยสลายได้สำหรับใช้ครั้งเดียวแล้วทิ้ง ควรจะมีความหนาแน่นที่ต่ำ เพราะนอกจากจะได้ภาชนะที่มีน้ำหนักเบากว่าหากมีขนาดที่เท่า ๆ กันแล้ว ยังจะสามารถลดราคาต้นทุนได้จากการที่ใช้วัตถุดิบตั้งต้นน้อยกว่าอีกด้วย

ตารางที่ 5.5 ผลการคำนวณทางสถิติด้วยการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบสองทาง (Two-way ANOVA) ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ของค่าความหนาแน่นของชิ้นทดสอบ

| Source | DF | SS | MS | F | P |
|---------------|-----|---------------|----------|---------------------|-------|
| Fiber size | 2 | 0.031133 | 0.015566 | 19.53 | 0.000 |
| Fiber content | 3 | 0.809748 | 0.269916 | 338.61 | 0.000 |
| Interaction | 6 | 0.014480 | 0.002413 | 3.03 | 0.009 |
| Error | 108 | 0.086089 | 0.000797 | - | - |
| Total | 119 | 0.941451 | - | - | - |
| S = 0.02823 | | R-Sq = 90.86% | | R-Sq (adj) = 89.92% | |

ผลจากการวิเคราะห์ความแปรปรวนในการทดสอบอิทธิพลของขนาดเส้นใยต้น มันสำปะหลังและปริมาณของเส้นใยต้นมันสำปะหลังต่อสมบัติทางกายภาพด้านความหนาแน่นของ ชิ้นทดสอบแสดงในตารางที่ 5.5 พบว่าปัจจัยหลัก (Main effect) คือ ขนาดเส้นใยและปริมาณเส้นใย นั้นมีอิทธิพลต่อความหนาแน่นของชิ้นทดสอบอย่างมีนัยสำคัญ (P-value < 0.05) สำหรับ ความสัมพันธ์ของอิทธิพลร่วม (Interaction effect) ของ 2 ปัจจัย พบว่ามีผลต่อความหนาแน่นของ ชิ้นทดสอบอย่างมีนัยสำคัญ (P-value < 0.05) เช่นกัน ซึ่งจะเป็นไปในแนวทางเดียวกันกับการ วิเคราะห์ความแปรปรวนของความหนาแน่นชิ้นทดสอบ จากการพิจารณาค่าสถิติ F พบว่าปัจจัยหลักของ ปริมาณเส้นใย (อัตราส่วนผสม) ที่ใช้มีอิทธิพลต่อค่าความหนาแน่นของชิ้นทดสอบมากกว่าขนาด ของเส้นใยที่ใช้และอิทธิพลร่วมของ 2 ปัจจัย เนื่องจากมีค่าสถิติ F ที่สูงมากถึง 338.61 กล่าวคือ

ปัจจัยหลักที่สนใจอยู่นี้ส่งผลต่อความหนาแน่นของขึ้นทดสอบมากกว่าปัจจัยที่ไม่สนใจหรือปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้ (Error) อยู่ถึง 338.61 เท่า

5.2.3 การทดสอบการดูดซึมน้ำ (Water absorption test)

สมบัติการดูดซึมน้ำเป็นสมบัติทางกายภาพที่สำคัญที่สุดอย่างหนึ่งสำหรับภาชนะย่อยสลายได้ทางชีวภาพประเภทใช้ครั้งเดียวแล้วทิ้ง ซึ่งภาชนะที่ดูดซึมน้ำได้น้อยนั้นหมายความว่ามีความต้านทานน้ำได้มาก กล่าวคือภาชนะนั้นอาจจะสามารถทนทานต่ออาหารที่มีความชื้นได้ดีในทางตรงกันข้ามภาชนะที่ดูดซึมน้ำได้มากอาจจะทำให้ภาชนะดังกล่าวมีสมบัติที่ตกลงจนเกิดการเสีรูปร่างก็เป็นได้ (ลักษณะเดียวกับจานกระดาษ) สำหรับค่าการดูดซึมน้ำของขึ้นทดสอบจากหัวมันสำปะหลังสดล้วน (100%) หลังจากการแช่ในน้ำเป็นเวลา 1 นาที จะมีค่าประมาณ 0.4826 g H₂O/g หรือกล่าวได้ว่ามีค่าการดูดซึมน้ำประมาณ 48% ซึ่งมีค่าที่ต่ำกว่าค่าการดูดซึมน้ำของโฟมแป้งที่ยังไม่เติมสารเติมแต่ง (Pure starch foam) ในงานวิจัยท่านอื่น ๆ โดยที่ค่าการดูดซึมน้ำของถาดโฟมแป้งมันสำปะหลัง หลังจากแช่ในน้ำเป็นเวลา 1 นาที จะมีค่าประมาณ 50% (Vercelheze et al., 2012) ซึ่งมีค่าการดูดซึมน้ำที่ใกล้เคียงกับถาดโฟมแป้งมันสำปะหลังของ Matsuda et al. (2013) ที่มีค่าประมาณ 57% และสำหรับค่าการดูดซึมน้ำของถาดโฟมแป้งข้าวโพดที่ยังไม่ได้เติมสารเติมแต่ง หลังจากการแช่ในน้ำเป็นเวลา 1 นาที มีค่าประมาณ 95% (Uslu and Polat, 2012) ซึ่งจากรายงานการวิจัยเหล่านี้บ่งชี้ได้ว่า ค่าการดูดซึมน้ำของโฟมแป้งนั้นจะมีค่าที่แตกต่างกันออกไปตามแหล่งที่มาและชนิดของวัตถุดิบที่นำมาทำเป็นแป้ง การตัดแปรหรือปรับเปลี่ยนโครงสร้างของแป้ง รวมไปถึงอัตราส่วนผสมและกรรมวิธีการผลิตในแต่ละงานวิจัยด้วยตามที่ได้อธิบายไว้แล้วก่อนหน้านี้ จากการพิจารณาค่าการดูดซึมน้ำของขึ้นทดสอบที่มีค่าน้อยกว่าขึ้นทดสอบจากโฟมแป้งกับน้ำเพียงอย่างเดียว นั้น มีความเป็นไปได้ว่าโครงสร้างของถาดโฟมแป้งจะมีรูพรุนจากการระเหยน้ำส่วนเกินที่มากกว่าโครงสร้างของขึ้นทดสอบจากหัวมันสำปะหลังสดล้วน เนื่องจากในกระบวนการเกิดเนื้อโฟมของขึ้นทดสอบจากการระเหยไอน้ำที่มีสมบัติเป็นสารพองตัว (Blowing agent) นั้น จะก่อให้เกิดโครงสร้างที่เป็นรูพรุน ทำให้ค่าความหนาแน่นลดต่ำลง ส่งผลให้โฟมแป้งสามารถดูดซึมน้ำเข้าไปในโครงสร้างได้มากกว่าขึ้นทดสอบจากหัวมันสำปะหลังสดล้วน (Vercelheze et al., 2012; Matsuda et al., 2013) ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาความหนาแน่นของขึ้นทดสอบ (อยู่ในหัวข้อที่ 5.2.2)

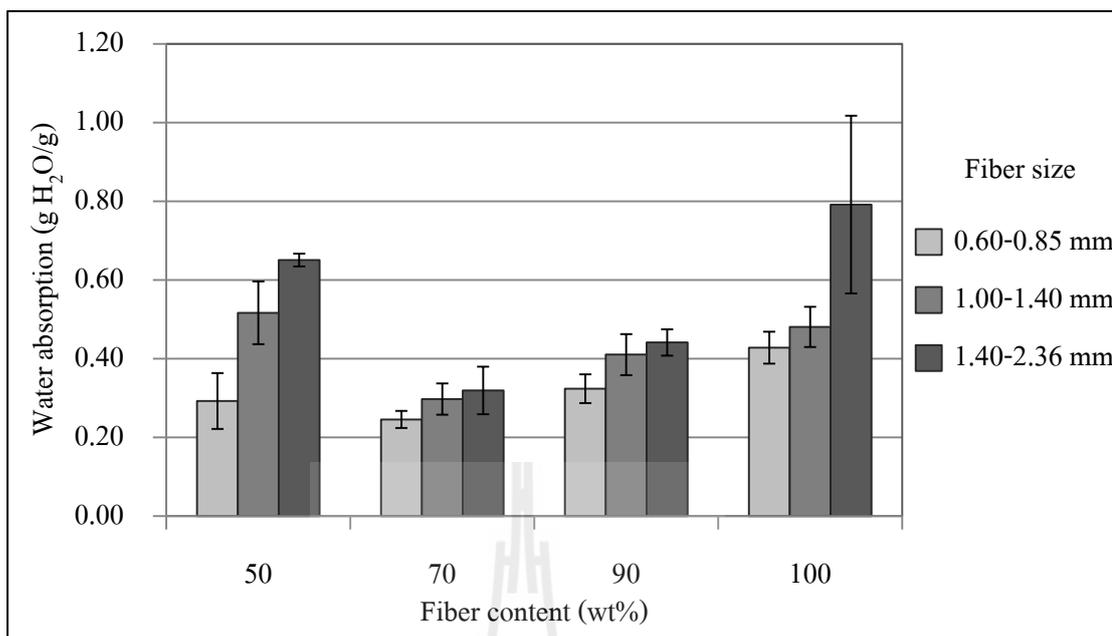
ค่าการดูดซึมน้ำของขึ้นทดสอบจากลำต้นมันสำปะหลังและหัวมันสำปะหลังสดแต่ละสูตรหลังจากการแช่ในน้ำเป็นเวลา 1 นาที แสดงในตารางที่ 5.6 และรูปที่ 5.16 พบว่าค่าการดูดซึมน้ำของขึ้นทดสอบมีค่าประมาณ 0.2454-0.7915 g H₂O/g หรือกล่าวได้ว่ามีค่าการดูดซึมน้ำประมาณ 24-79% เมื่อเปรียบเทียบกับค่าการดูดซึมน้ำของขึ้นทดสอบจากลำต้นมันสำปะหลังและหัว

มันสำปะหลังสดกับค่าการดูดซึมน้ำของชิ้นทดสอบจากหัวมันสำปะหลังสดล้วน บ่งชี้ได้ว่าการเติมเส้นใยลงไปในสูตรจะทำให้ค่าการดูดซึมน้ำของชิ้นทดสอบลดลง ซึ่งธรรมชาติของแป้งจะมีสมบัติที่ชอบน้ำ (Hydrophilic) เนื่องจากพันธะไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นระหว่างหมู่ไฮดรอกซิลในสายโซ่ของแป้งกับหมู่ไฮดรอกซิลของน้ำ ดังนั้นการมีปริมาณของหัวมันสำปะหลังสด (หรือแป้ง) ที่มากขึ้น จะทำให้ความสามารถในการดูดซึมน้ำมีมากขึ้น แต่ทั้งนี้แป้งจะมีความชอบน้ำที่มากกว่าเส้นใยเซลลูโลส กล่าวได้ว่าการมีอยู่ของเส้นใยนั้นจะลดความสามารถในการดูดซึมน้ำของชิ้นทดสอบ (Benezet et al., 2012; Wattanakornsiri et al., 2012; Prachayawarakorn et al., 2013) นอกจากนี้ในบางงานวิจัยได้กล่าวว่าการมีอยู่ของเส้นใยจะทำให้โครงสร้างของชิ้นทดสอบมีลักษณะเป็นโครงข่ายซึ่งจะเป็นอุปสรรคแก่การแทรกซึมของน้ำเข้าไปในเมทริกซ์อีกด้วย (Ramirez et al., 2011; Kaisangri et al., 2012) โดยในงานวิจัยนี้ไม่มีการศึกษาค่าการดูดซึมน้ำของชิ้นทดสอบสำหรับในกรณีที่มีปริมาณหัวมันสำปะหลังสดสูง ๆ ตามเหตุผลที่ได้อธิบายไว้แล้วก่อนหน้านี้

ตารางที่ 5.6 แสดงค่าการดูดซึมน้ำของชิ้นทดสอบในแต่ละสูตรจากลำต้นมันสำปะหลังและหัวมันสำปะหลังสด

| ขนาดเส้นใย (mm) | ปริมาณเส้นใย (wt%) | ปริมาณสารยึดเกาะ (wt%) | การดูดซึมน้ำ (g H ₂ O/g) |
|-----------------|--------------------|------------------------|-------------------------------------|
| 0.60-0.85 | 50 | 50 | 0.2925 ± 0.0709 |
| | 70 | 30 | 0.2454 ± 0.0217 |
| | 90 | 10 | 0.3237 ± 0.0367 |
| | 100 | 0 | 0.4278 ± 0.0405 |
| 1.00-1.40 | 50 | 50 | 0.5165 ± 0.0797 |
| | 70 | 30 | 0.2975 ± 0.0398 |
| | 90 | 10 | 0.4104 ± 0.0521 |
| | 100 | 0 | 0.4807 ± 0.0512 |
| 1.40-2.36 | 50 | 50 | 0.6506 ± 0.0163 |
| | 70 | 30 | 0.3191 ± 0.0605 |
| | 90 | 10 | 0.4411 ± 0.0336 |
| | 100 | 0 | 0.7915 ± 0.2257 |

หมายเหตุ : ข้อมูลแสดงในรูปของค่าเฉลี่ย ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน



รูปที่ 5.16 อิทธิพลของขนาดเส้นใยและปริมาณเส้นใยต้นมันสำปะหลัง ต่อค่าการดูดซึมน้ำของชั้นทดสอบ

เมื่อพิจารณาอิทธิพลของปริมาณสารยึดเกาะจากหัวมันสำปะหลังสดต่อค่าการดูดซึมน้ำของชั้นทดสอบในขนาดเส้นใยเดียวกัน พบว่าชั้นทดสอบจากต้นมันสำปะหลังล้วน (ไม่ได้เติมสารยึดเกาะจากหัวมันสำปะหลังสด) จะมีค่าการดูดซึมน้ำที่สูงที่สุด โดยเฉพาะในกรณีที่มีขนาดเส้นใยประมาณ 1.40-2.36 mm กล่าวคือเมื่อไม่มีสารยึดเกาะ ชั้นทดสอบจากลำต้นมันสำปะหลังล้วนจะเริ่มแตกออกทำให้น้ำสามารถแทรกซึมเข้าไปภายในชั้นทดสอบได้มากขึ้น และเมื่อปรับสูตรผสมโดยการลดปริมาณเส้นใยจากต้นมันสำปะหลังและเพิ่มปริมาณของสารยึดเกาะทำให้ได้ค่าการดูดซึมน้ำที่ลดลง เนื่องจากสารยึดเกาะจากหัวมันสำปะหลังสดจะเข้าไปเติมเต็มช่องว่างระหว่างเส้นใย ทำให้มีความหนาแน่นที่มากขึ้น และแรงยึดเกาะที่แข็งแรงระหว่างเส้นใยและเมทริกซ์จะนำไปสู่การแทรกซึมของน้ำเข้าสู่ชั้นทดสอบได้ยากขึ้น (Prachayawarakorn et al., 2013) สอดคล้องกับผลการศึกษาความหนาแน่นและลักษณะทางสัณฐานวิทยาของชั้นทดสอบ แต่ค่าการดูดซึมน้ำจะเพิ่มสูงอีกครั้งอย่างเห็นได้ชัดเมื่อชั้นทดสอบมีปริมาณของลำต้นมันสำปะหลังและหัวมันสำปะหลังเท่ากับ 50:50 โดยน้ำหนัก ถึงแม้ว่าการมีอยู่ของสารยึดเกาะทำให้ชั้นทดสอบมีพันธะที่แข็งแรงขึ้นส่งผลให้น้ำแทรกซึมเข้าไปในชั้นทดสอบได้น้อย แต่การที่มีปริมาณของสารยึดเกาะจากหัวมันสำปะหลังสดที่มากเกินไปจะทำให้ชั้นทดสอบดูดซึมน้ำได้มากขึ้นจากสมบัติความชอบน้ำของแป้งที่มากกว่าของเส้นใยตามที่ได้อธิบายไว้แล้วข้างต้น

เมื่อพิจารณาอิทธิพลของขนาดเส้นใยต้นมันสำปะหลังต่อการดูดซึมน้ำของ ชื้นทดสอบในอัตราส่วนผสมเดียวกัน พบว่าเส้นใยต้นมันสำปะหลังที่ขนาดเล็กกว่า จะทำให้ค่าการดูดซึมน้ำของชื้นทดสอบมีค่าที่ต่ำกว่าเส้นใยที่ขนาดใหญ่กว่า จากรูปที่ 5.16 เห็นได้ชัดว่าชื้นทดสอบจากเส้นใยต้นมันสำปะหลังขนาดประมาณ 1.40-2.36 mm จะมีค่าการดูดซึมน้ำที่สูงมาก โดยเฉพาะในกรณีชื้นทดสอบจากลำต้นมันสำปะหลังล้วน และชื้นทดสอบจากลำต้นมันสำปะหลังและหัวมันสำปะหลังสดเท่ากับ 50:50 โดยน้ำหนัก เนื่องจากในช่วงขนาดเส้นใยนี้จะมีส่วนของเปลือกไม้ และเนื้อเยื่อลำเลียงน้ำและอาหารอยู่ในปริมาณที่มาก ซึ่งโดยธรรมชาติแล้วส่วนประกอบเหล่านี้จะมีรูพรุนที่มากกว่ากว่าส่วนของเนื้อไม้ ส่งผลให้สามารถแทรกซึมและกักเก็บน้ำได้ในปริมาณที่มากกว่า (Prachayawarakorn et al., 2013) ตามรายงานของ Lee and Mariatti (2008) ซึ่งทำการทดสอบค่าการดูดซึมน้ำของพอลิเอสเตอร์แบบไม่อิ่มตัว (Unsaturated polyester, USP) โดยการเติมเส้นใยชานอ้อย 2 ชนิด ในปริมาณ 15% โดยน้ำหนัก เส้นใยชานอ้อยที่นำมาศึกษา คือ เส้นใยในส่วนเปลือกนอกของต้นอ้อย (Rind) และเส้นใยในส่วนแกนกลางของต้นอ้อย (Pith) ที่ผ่านการคั้นน้ำออกแล้ว โดยค่าความหนาแน่นของแกนกลางอ้อยจะมีความหนาแน่นที่ต่ำกว่าเนื่องจากมีโครงสร้างของรูพรุนจากลูเมน (Lumen) ที่มากกว่า และตามรายงานนี้บ่งชี้ว่าแกนกลางของต้นอ้อยนั้น จะมีโครงสร้างโดยทั่วไปแบบรูพรุน (Spongy structure) และมีเส้นใยเซลลูโลสขนาดเล็กที่น้อยกว่าเส้นใยจากเปลือกนอกของต้นอ้อย ทำให้ชื้นทดสอบจากพอลิเอสเตอร์แบบไม่อิ่มตัวผสมเส้นใยในส่วนแกนกลางของต้นอ้อยมีค่าการดูดซึมน้ำที่มากกว่าชื้นทดสอบจากพอลิเอสเตอร์แบบไม่อิ่มตัวผสมเส้นใยในส่วนเปลือกนอกของต้นอ้อย

ในงานวิจัยนี้ไม่ได้ทำการศึกษาผลกระทบจากการเพิ่มเวลาในการแช่น้ำของชื้นทดสอบ แต่ตามธรรมชาติหากแช่น้ำในเวลาที่นานขึ้นจะทำให้ค่าการดูดซึมน้ำมากขึ้นตามไปด้วย ซึ่งตามรายงานของ Vercelheze et al. (2012) ซึ่งทำการศึกษาค่าการดูดซึมน้ำของถาด โฟมแข็งมันสำปะหลังผสมเส้นใยชานอ้อย พบว่าค่าการดูดซึมน้ำของถาด โฟมแข็งหลังจากการแช่น้ำเป็นเวลา 1 นาที จนถึงเวลา 30 นาที เพิ่มขึ้นจาก 80 g H₂O/g เป็น 408 g H₂O/g ซึ่งผลการทดสอบเป็นไปในทำนองเดียวกันกับ Matsuda et al. (2013) ที่นำถาด โฟมแข็งมันสำปะหลังแช่น้ำเพิ่มจาก 1 นาที เป็น 30 นาที พบว่าค่าการดูดซึมน้ำของถาด โฟมแข็งจะเพิ่มขึ้นจาก 57% เป็น 247% ทั้งนี้ในบางรายงานได้ทำการศึกษาผลกระทบของระยะเวลาการเก็บรักษาชื้นทดสอบที่นานขึ้น และสภาวะการเก็บรักษามีความชื้นสัมพัทธ์ (Relative humidity) ที่มากขึ้น จะทำให้ชื้นทดสอบดูดความชื้นจากสิ่งแวดล้อมได้มากขึ้น หรือมีปริมาณความชื้นสมดุล (Equilibrium moisture content, EMC) ที่สูงขึ้น (Salgado et al., 2008; Benezet et al., 2012; Prachayawarakorn et al., 2013)

ค่าการดูดซึมน้ำในงานวิจัยนี้สูงกว่าค่าการดูดซึมน้ำของโฟมพอลิสไตรีน (Expanded polystyrene, EPS) คือ ประมาณ 3-10% ขึ้นอยู่กับคุณภาพของแต่ละผลิตภัณฑ์ ซึ่งถือว่าขึ้นทดสอบจากต้นมันสำปะหลังและหัวมันสำปะหลังสดยังมีข้อดีเรื่องการต้านทานน้ำอยู่บ้าง เมื่อเทียบกับโฟมพอลิสไตรีน ทั้งนี้ค่าการดูดซึมน้ำของกระดาษ A4 จะมีค่าอยู่ประมาณ 150% อย่างไรก็ตามค่าการดูดซึมน้ำที่ได้จากการทดสอบในงานวิจัยนี้มีค่าใกล้เคียงกับงานวิจัยของ Salgado et al. (2008) กล่าวคือถาดโฟมแป้งมันสำปะหลังที่ผสมโปรตีนคอกทานตะวันและเส้นใยเซลลูโลส คือ ประมาณ 27-51%

ถึงแม้ว่าภาชนะจากต้นมันสำปะหลังและหัวมันสำปะหลังสดนี้จะมีข้อดีเรื่องสมบัติการต้านทานน้ำสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้งานจริง แต่ก็ยังสามารถใช้ได้ดีในการบรรจุอาหารแห้ง เช่น อาหารทอด ปิ้งย่าง หรือผักไทย เป็นต้น หากต้องการนำไปใช้กับอาหารที่ชุ่มน้ำหรือเป็นน้ำ เช่น กระจ่างปลา ราดหน้า หรือก๋วยเตี๋ยว เป็นต้น อาจจำเป็นต้องปรับปรุงสมบัติด้วยการเคลือบผิวชั้นงานด้วยพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ เช่น PLA หรือ PHA เป็นต้น นอกจากนี้สามารถเติมสารเติมแต่งอื่น ๆ ที่มีความไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic) ลงไป เช่น แร่ดินเหนียว โปรตีนคอกทานตะวัน น้ำมันพืช น้ำมันธรรมชาติ เป็นต้น (Shey et al., 2006; Salgado et al., 2008; Matsuda et al., 2013) เพื่อเพิ่มสมบัติการต้านทานน้ำให้แก่ภาชนะย่อยสลายได้ทางชีวภาพจากต้นมันสำปะหลัง



รูปที่ 5.17 การแตกออกหลังการทดสอบการดูดซึมน้ำ
ของชิ้นทดสอบจากต้นมันสำปะหลังล้วน

ผลจากการวิเคราะห์ความแปรปรวนในการทดสอบอทธิพลของขนาดเส้นใยต้นมันสำปะหลังและปริมาณของเส้นใยต้นมันสำปะหลังต่อสมบัติทางกายภาพด้านการดูดซึมน้ำของชิ้นทดสอบแสดงในตารางที่ 5.7 พบว่าปัจจัยหลัก (Main effect) คือ ขนาดเส้นใยและปริมาณ

เส้นใยนั้นมีอิทธิพลต่อค่าการดูดซึมน้ำของชั้นทดสอบอย่างมีนัยสำคัญ ($P\text{-value} < 0.05$) สำหรับความสัมพันธ์ของอิทธิพลร่วม (Interaction effect) ของ 2 ปัจจัย พบว่ามีผลต่อค่าการดูดซึมน้ำของชั้นทดสอบอย่างมีนัยสำคัญ ($P\text{-value} < 0.05$) เช่นกัน จากการพิจารณาค่าสถิติ F พบว่าปัจจัยหลักมีอิทธิพลต่อค่าการดูดซึมน้ำที่ใกล้เคียงกัน โดยที่ขนาดของเส้นใยมีอิทธิพลมากกว่าอัตราส่วนผสมเล็กน้อย และมีค่ามากกว่าอิทธิพลร่วมระหว่าง 2 ปัจจัย เนื่องจากข้อมูลเป็นไปในทิศทางเดียวกัน โดยในทุกอัตราส่วนผสม เส้นใยต้นมันสำปะหลังที่ขนาดเล็กกว่าจะมีค่าการดูดซึมน้ำของชั้นทดสอบที่น้อยกว่าเส้นใยขนาดใหญ่

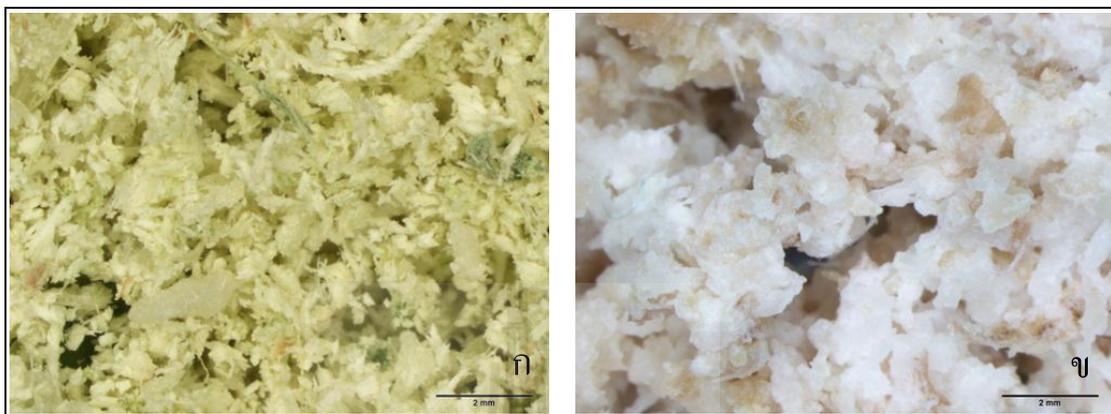
ตารางที่ 5.7 ผลการคำนวณทางสถิติด้วยการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบสองทาง (Two-way ANOVA) ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ของค่าการดูดซึมน้ำของชั้นทดสอบ

| Source | DF | SS | MS | F | P |
|---------------|----|---------------|----------|---------------------|-------|
| Fiber size | 2 | 0.52228 | 0.261139 | 40.32 | 0.000 |
| Fiber content | 3 | 0.65478 | 0.218261 | 33.70 | 0.000 |
| Interaction | 6 | 0.24257 | 0.040429 | 6.24 | 0.000 |
| Error | 48 | 0.31091 | 0.006477 | - | - |
| Total | 59 | 1.73055 | - | - | - |
| S = 0.08048 | | R-Sq = 82.03% | | R-Sq (adj) = 77.92% | |

5.2.4 การศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยา (Morphology studies)

ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์แบบสเตอริโอที่กำลังขยาย 1x แสดงลักษณะของต้นมันสำปะหลังบดและหัวมันสำปะหลังบดในรูปที่ 5.18 สำหรับต้นมันสำปะหลังบดหยาบที่ยังไม่ได้ผ่านการร่อนตะแกรง สังเกตได้ว่ามีต้นมันสำปะหลังบดอยู่หลายลักษณะ อาทิเช่น ต้นมันสำปะหลังในลักษณะเส้นใยยาวมากกว่า 2 mm ต้นมันสำปะหลังในลักษณะเส้นใยขนาดเล็ก เปลือกไม้ และเนื้อเยื่อลำเลียงน้ำและอาหาร เป็นต้น ซึ่งลักษณะของต้นมันสำปะหลังบดหยาบอาจจะมีลักษณะที่แตกต่างออกไปได้ หากมีวิธีการเตรียมหรือลดขนาดต้นมันสำปะหลังในแบบอื่น ทั้งนี้ในงานวิจัยนี้ไม่ได้ทำการศึกษาผลของการเตรียมเส้นใยจากต้นมันสำปะหลังในแบบต่าง ๆ เนื่องจากข้อจำกัดของอุปกรณ์บดหยาบ ในรูปที่ 5.18(ข) แสดงถึงหัวมันสำปะหลังสดที่ผ่านการบดหยาบมาด้วยเครื่องบดหยาบเช่นเดียวกันกับต้นมันสำปะหลังบด หัวมันสำปะหลังบดมีลักษณะคล้ายก้อนแป้งขึ้น (Starch paste) จับกลุ่มกันเป็นก้อนเล็ก ๆ จำนวนมาก เนื่องจากในงานวิจัยนี้เลือกใช้

ห้วมันสำปะหลังสดทั้งหัว โดยไม่ได้ผ่านการปอกเปลือกออกทำให้สามารถพบกลุ่มสีน้ำตาลจากเปลือกมันสำปะหลังที่แทรกอยู่ภายในเนื้อแป้งดิบสีขาวนั้นได้ทั่วไป



รูปที่ 5.18 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์แบบสเตอริโอที่กำลังขยาย 1x ของ
(ก) ต้นมันสำปะหลังบดหยาบ และ (ข) ห้วมันสำปะหลังบด

ขั้นตอนสอบแต่ละสูตรในงานวิจัยนี้จะถูกการตรวจสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบสเตอริโอ โดยทำการศึกษาลักษณะทั่วไปของพื้นผิวขั้นตอนสอบและโครงสร้างภายในของขั้นตอนสอบบริเวณรอยแตกหัก (Fracture surface) จากการทดสอบแรงดึงเพื่อตรวจสอบรอยโหว่ (Voids) และรูปแบบของโครงสร้าง นำไปสู่การวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและสมบัติทางกลได้ ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์แบบสเตอริโอของพื้นผิวขั้นตอนสอบและรอยแตกหักของขั้นตอนสอบแต่ละสูตรที่กำลังขยายต่าง ๆ แสดงในรูปที่ 5.19-5.23

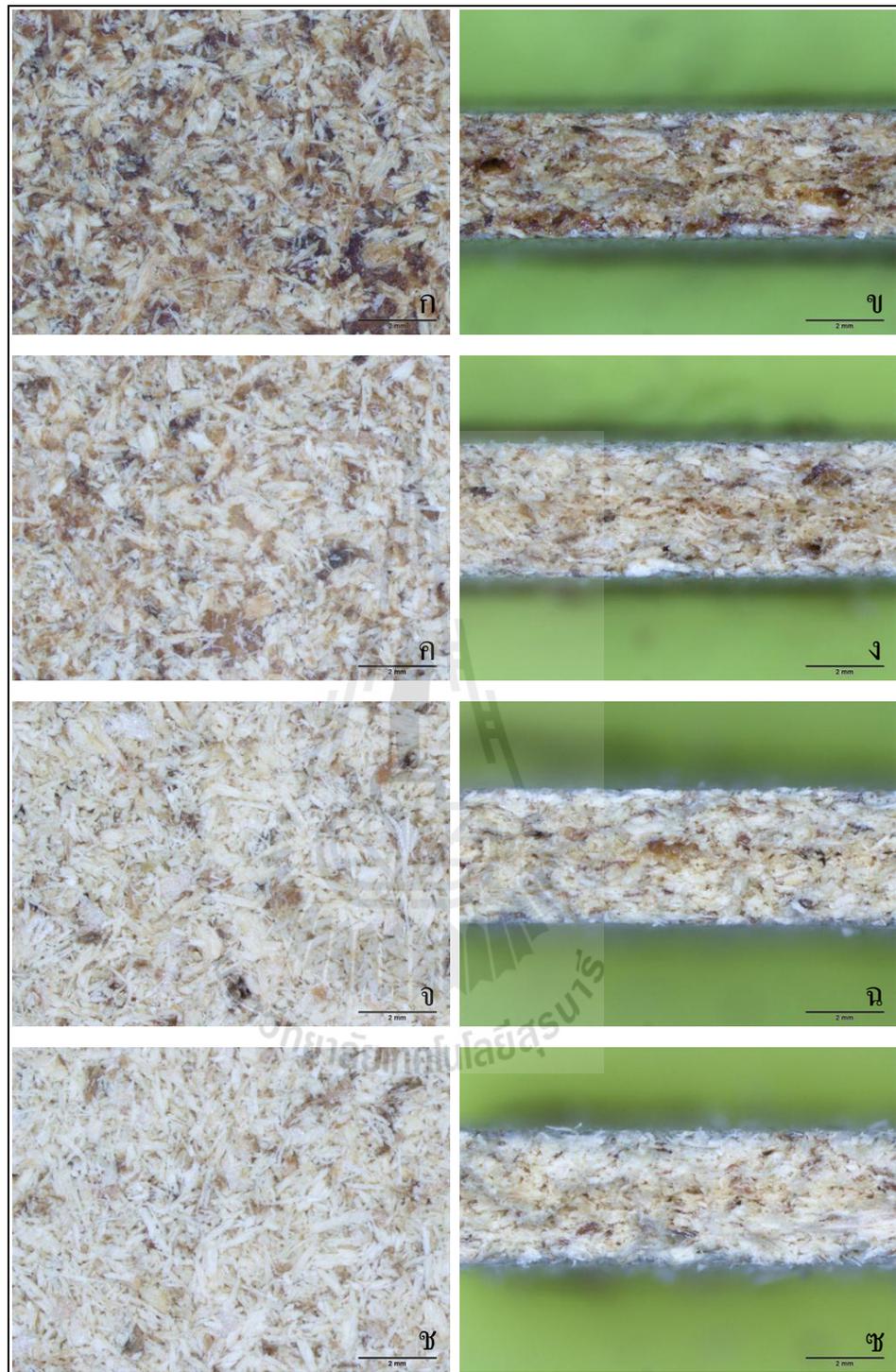
เมื่อพิจารณาพื้นผิวของขั้นตอนสอบจากต้นมันสำปะหลังในแต่ละสูตร พบว่าเส้นใยต้นมันสำปะหลังกระจายตัวอยู่ทั่วขั้นตอนสอบ ซึ่งบางจุดบนขั้นตอนสอบอาจจะมีเส้นใยอยู่น้อยเนื่องจากเป็นธรรมชาติของกระบวนการอัดขึ้นรูปเอง กล่าวคือไม่มีทิศทางการไหลที่แน่นอนภายในกระบวนการอัด ทำให้การจัดเรียงตัวของเส้นใยจะเป็นแบบสุ่ม (Random) ตามทิศทางการไหลสอดคล้องกับงานวิจัยของ Lawton et al. (2004) ที่รายงานว่า เส้นใยแอสเพน (Aspen fiber) ที่เติมเพื่อเสริมแรงให้กับโฟมแป้งข้าวโพดนั้นไม่มีการจัดเรียงตัวของเส้นใยในโฟมแป้งเช่นกัน ที่ผิวหน้าของขั้นตอนสอบจะพบว่าหลุมขนาดเล็กเกิดขึ้นในทุกสูตรเนื่องจากน้ำส่วนเกินจะทำลายผิวหน้าของขั้นตอนสอบขณะเปิดแม่พิมพ์ (Lawton et al., 2004) จากรูปที่ 5.22 สามารถบ่งชี้ได้อย่างชัดเจนว่าขั้นตอนสอบจากห้วมันสำปะหลังล้วนทั้งภาพถ่ายผิวหน้าขั้นตอนสอบและภาพถ่ายรอยแตกหัก (Fractographic) นั้น มีรูพรุนเกิดขึ้นทั่วทั้งขั้นตอนสอบ เมื่อกระบวนการอัดขึ้นรูปร้อนเริ่มต้นขึ้น แป้งที่อยู่

ภายในหัวมันสำปะหลังสดจะเริ่มกลายเป็นเจล (Gelatinized) น้ำส่วนเกินที่แทรกซึมอยู่ภายในเนื้อวัตถุนั้นจะพองตัวและระเหยออก และไอน้ำที่เกิดขึ้นจะมีพฤติกรรมเป็นสารพองตัว (Blowing agent) ก่อให้เกิดรูพรุนภายในขึ้นทดสอบซึ่งเป็นลักษณะของโฟม (Salgado et al., 2008; Guimares et al., 2010; Schmidt and Laurindo, 2010; Kaisangsri et al., 2012) โดยปกติแล้วโครงสร้างภายในของชิ้นงานที่มีแป้งในปริมาณที่มากจะมีความหนาแน่นต่ำ คล้ายกับโฟม ซึ่งมีเซลล์แบบเปิด (Open cell foam) ที่เกิดจากการระเหยไอน้ำออกจากแม่พิมพ์ส่งผลให้เกิดการแตกของเซลล์ (Glenn et al., 2001; Shogren et al., 2002; Cinelli et al., 2006., Salgado et al., 2008) จากการศึกษาผิวหน้าของชิ้นทดสอบในรูปที่ 5.19-5.23 พบว่าปริมาณของสารยึดเกาะจากหัวมันสำปะหลังที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ชิ้นทดสอบมีสีน้ำตาลที่เข้มขึ้น (Browning reaction) ชิ้นทดสอบที่มีปริมาณต้นมันสำปะหลังขนาดประมาณ 0.60-0.85 mm แสดงถึงเส้นใยขนาดเล็กจำนวนมากและมีสีที่อ่อนกว่าเส้นใยขนาดอื่น เนื่องจากเส้นใยอีก 2 ขนาดนั้นจะมีเปลือกไม้ขนาดต่าง ๆ ปะปนมาด้วย ยิ่งไปกว่านี้ชิ้นทดสอบจากต้นมันสำปะหลังที่มีขนาดประมาณ 1.40-2.36 mm นอกจากจะมีส่วนของเส้นใยขนาดยาวแล้วยังมีส่วนของเปลือกไม้ขนาดใหญ่และเนื้อเยื่อลำเลียงน้ำและอาหารจำนวนมากซึ่งอาจจะส่งผลต่อความต่อเนื่องของชิ้นทดสอบ ยังผลให้สมบัติทางกลนั้นตกลง หากมีการศึกษาวิธีการเตรียมเส้นใยมันสำปะหลังอาจจะได้ชิ้นทดสอบที่มีสมบัติทางกลที่ดีขึ้นก็เป็นได้

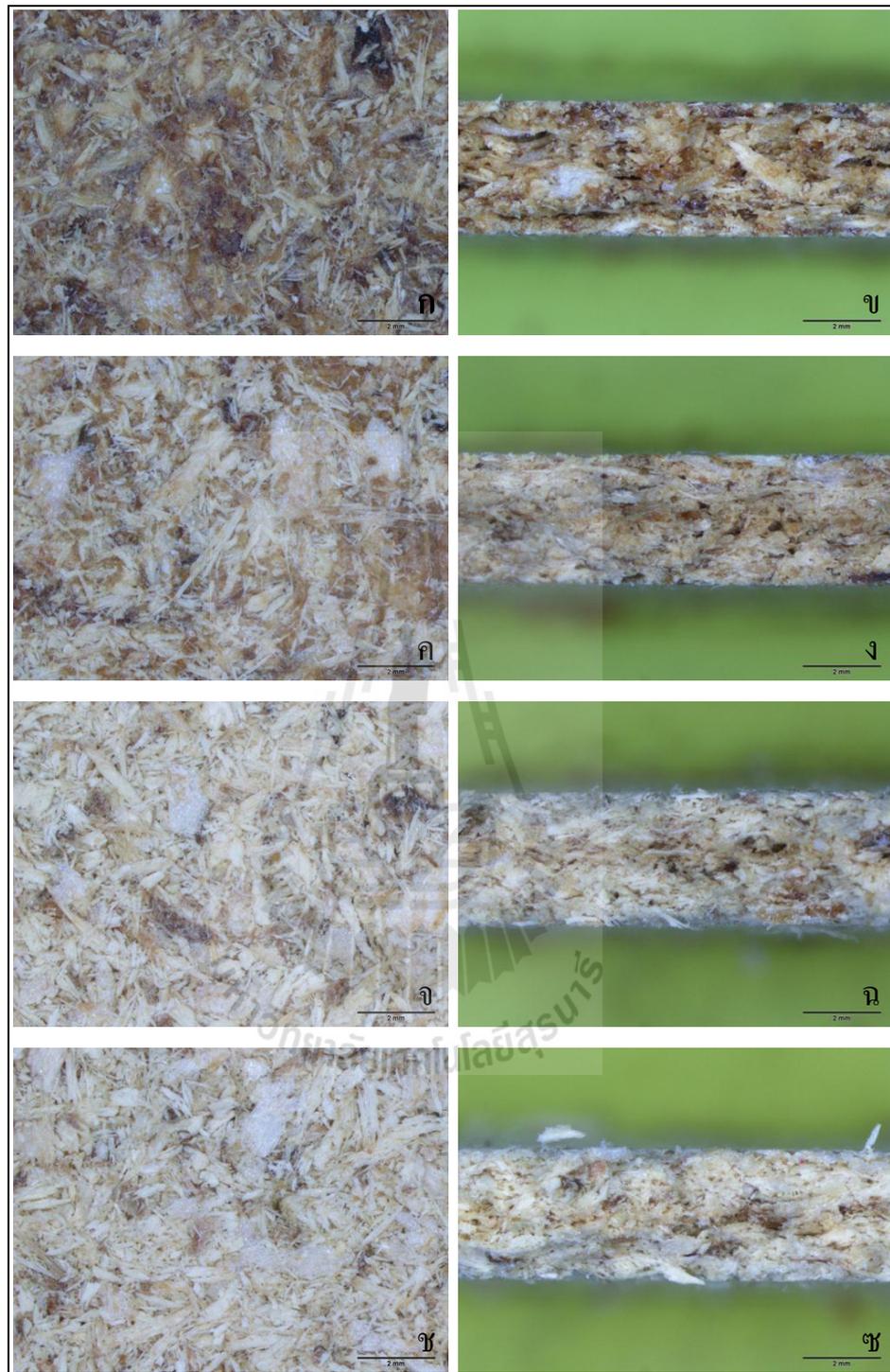
จากการศึกษาภาพถ่ายรอยแตกหักจากการทดสอบแรงดึงของชิ้นทดสอบในแต่ละสูตรชี้ให้เห็นถึงโครงสร้างแบบแซนด์วิช (Sandwich type structure) ที่มีผิวหนาแน่น และประกอไปด้วยเซลล์ขนาดเล็กที่พื้นผิวชิ้นทดสอบ เป็นผลมาจากการทำแห้งของเนื้อวัสดุส่วนที่ติดกับแม่พิมพ์ร้อนอย่างรวดเร็ว ซึ่งโครงสร้างในลักษณะนี้คล้ายกับงานวิจัยของท่านอื่น ๆ (Lawton et al., 2004; Carr et al., 2006; Cinelli et al., 2006; Salgado et al., 2008; Vercelheze et al., 2012) เมื่อพิจารณารอยแตกของชิ้นทดสอบจากหัวมันสำปะหลังล้วน (รูปที่ 5.22(ข)) พบว่ามีเซลล์ขนาดใหญ่กว่าชิ้นทดสอบจากต้นมันสำปะหลังในแต่ละสูตร เนื่องจากการมีอยู่ของเส้นใยภายในสารยึดเกาะที่ใช้ นั้นจะทำให้ของผสมขยายตัวได้น้อย และความหนืดของของผสมเพิ่มขึ้น ทำให้เซลล์ขนาดเล็กเพิ่มขึ้น และความหนาแน่นมากขึ้น (Soykabkeaw et al., 2004) เมื่อพิจารณาภาพหน้าตัดของชิ้นทดสอบพบว่า ชิ้นทดสอบที่ได้จากต้นมันสำปะหลังล้วนจะมีมองเห็นเส้นใยหลุดยื่นออกมาจากพื้นผิว เนื้อวัสดุไม่แน่น และมีรูพรุนชัดเจนในทุกขนาดเส้นใย ซึ่งการเกิดขึ้นของชิ้นทดสอบในลักษณะนี้ส่งผลให้สูญเสียความแข็งแรงกับชิ้นทดสอบ (Guimares et al., 2010) รอยแตกหักจะดูราบเรียบขึ้นเมื่อปริมาณของหัวมันสำปะหลังที่เติมลงไปในแต่ละสูตรเพิ่มขึ้น บ่งบอกถึงการแตกหักอย่างฉับพลันในการดึงขาด กล่าวคือชิ้นทดสอบที่มีหัวมันสำปะหลังในปริมาณที่สูงขึ้นจะแสดงลักษณะการเสียหายแบบเปราะ (Brittle) สอดคล้องกับผลการทดสอบแรงดึง ซึ่งชิ้นทดสอบที่มีปริมาณต้นมันสำปะหลังและหัวมันสำปะหลังสดเท่ากับ 50:50 โดยน้ำหนัก จะมีค่ามอดูลัสของยัง

ในปริมาณที่สูง บ่งชี้ถึงความแกร่ง (Stiffness) ของชั้นทดสอบที่ได้ ภาพถ่ายรอยแตกหักของชั้นทดสอบจากลำต้นมันสำปะหลังที่มีเส้นใยขนาด 1.40-2.36 mm (รูปที่ 5.21) จะมีลักษณะการแตกหักที่ราบเรียบน้อยกว่า น่าจะเป็นผลมาจากความเป็นเนื้อเดียวกันที่น้อยกว่าของชั้นทดสอบจากการที่มีเปลือกอยู่เป็นจำนวนมาก รอยโหว่ (Voids) ที่เกิดขึ้นมีทั้งลักษณะที่เกิดจากกระบวนการอัดเอง (การพองตัวจากไอน้ำส่วนเกิน) และรอยโหว่จากการหลุดของเส้นใยและเปลือก รอยโหว่ดังกล่าวไม่ได้เกิดจากการทำลายเส้นใยแต่แสดงให้เห็นถึงปฏิสัมพันธ์ที่ไม่ดีระหว่างเส้นใยและเมทริกซ์ ส่งผลให้การถ่ายโอนความเค้นจากเมทริกซ์ไปยังส่วนเสริมแรงทำได้ไม่ดี ทำให้สมบัติทางกลลดลง (Soykabkeaw et al., 2004; Ramires et al., 2011; Zainuddin et al., 2013)

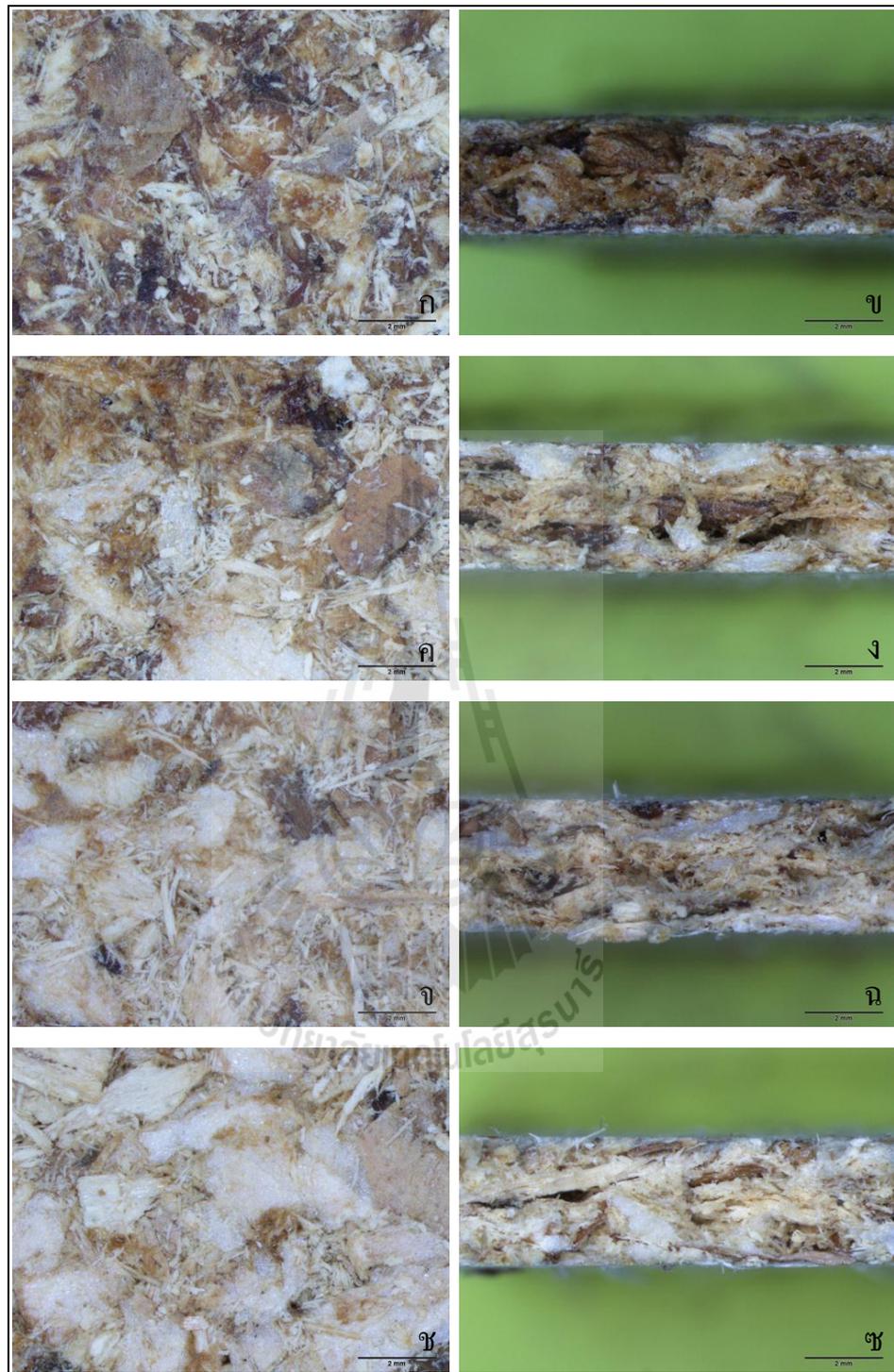
จากรูปถ่ายลักษณะพื้นผิวชั้นทดสอบที่กำลังขยาย 10x ของชั้นทดสอบที่มีขนาดเส้นใยประมาณ 0.60-0.85 mm และมีปริมาณต้นมันสำปะหลังและหัวมันสำปะหลังสดเท่ากับ 50:50 โดยน้ำหนัก (รูป 5.23(ก)) และชั้นทดสอบจากต้นมันสำปะหลังล้วน ที่มีขนาดเส้นใยเดียวกัน (รูป 5.23(ข)) พบว่าการมีอยู่ของสารยึดเกาะจากหัวมันสำปะหลังสดจะเข้าไปเติมเต็มช่องว่างระหว่างเส้นใย ส่งผลให้ชั้นทดสอบมีความหนาแน่นมากขึ้นเมื่อเติมหัวมันสำปะหลังสดในแต่ละสูตร ตามรายงานของ Kinoshita et al. (2009) ที่พัฒนาวัสดุคอมโพสิต (Green composite) จากเศษไม้และตัวประสานย่อยสลายได้ (Biodegradable adhesive) จากการเปรียบเทียบชั้นทดสอบที่อัดขึ้นรูปร้อนจากเศษไม้เพียงอย่างเดียว (100%) และชั้นทดสอบจากเศษไม้ผสมตัวประสาน พบว่าการใส่ตัวประสานนั้นทำให้ช่องว่างระหว่างเศษไม้ลดลงมาก และน่าจะเป็นสาเหตุที่ให้แรงยึดเกาะภายในชั้นงานดีขึ้นจากการเติมตัวประสานดังกล่าว นอกจากนี้รูปที่ 5.23(ก) ยังแสดงปฏิสัมพันธ์ที่ดีระหว่างเส้นใยและสารยึดเกาะ นำไปสู่พื้นผิวที่ต่อเนื่องของชั้นทดสอบ การกระจายตัวที่ดีของสารยึดเกาะภายในพอลิเมอร์เมทริกซ์จะส่งผลให้เกิดการปรับปรุงสมบัติทางกลของชั้นทดสอบ (Ramires et al., 2011; Zainuddin et al., 2013) จากรูปที่ 5.23(ข) 5.23(ค) และ 5.23(ง) แสดงผิวหน้าของชั้นทดสอบจากต้นมันสำปะหลังล้วน ที่มีขนาดเส้นใยประมาณ 0.60-0.85 mm 1.00-1.40 mm และ 1.40-2.36 mm ตามลำดับ พบว่าเส้นใยต้นมันสำปะหลังขนาดเล็กกว่า (รูปที่ 5.23(ข)) จะมีช่องว่างภายในชั้นทดสอบนำไปสู่การมีความหนาแน่นที่สูงกว่า จากรูปที่ 5.23(ค) เป็นชั้นทดสอบที่มีเส้นใยต้นมันสำปะหลังที่ยาวกว่าจะแสดงให้เห็นช่องว่างจากการซ้อนทับกันได้มากกว่าเส้นใยขนาดเล็กส่งผลให้ความหนาแน่นน้อยกว่าสูตรอื่น ๆ ในขณะที่รูปที่ 5.23(ง) มีขนาดของต้นมันสำปะหลังขนาดใหญ่กว่าแต่สังเกตเห็นช่องว่างได้น้อยกว่ารูปที่ 5.23(ค) เนื่องจากเส้นใยต้นมันสำปะหลังขนาดประมาณ 1.40-2.36 mm มีเนื้อเยื่อลำเลียงน้ำและอาหารเป็นส่วนประกอบในกระบวนการอัดขึ้นรูปร้อนจึงทำให้เนื้อเยื่อดังกล่าวเข้าไปเติมเต็มช่องว่างได้ในระดับหนึ่ง ซึ่งผลจากการศึกษาภาพถ่ายผิวหน้าชั้นทดสอบจากกล้องจุลทรรศน์แบบสเตอริโอที่กำลังขยาย 10x นี้ สอดคล้องกับผลการทดสอบด้านความหนาแน่น



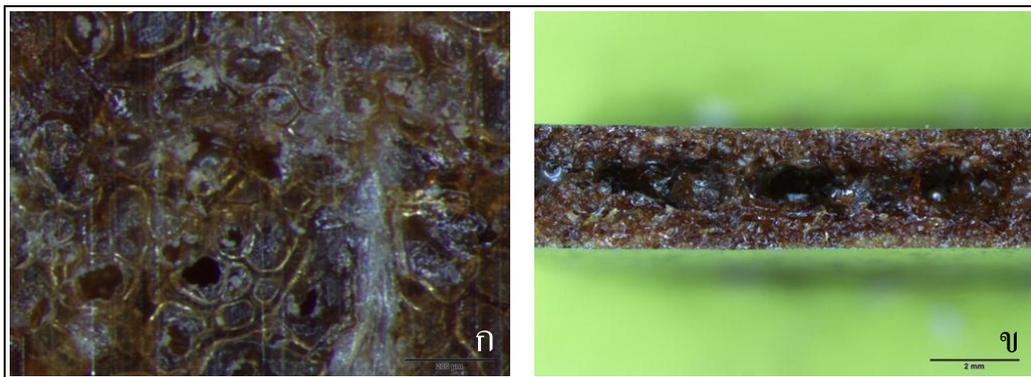
รูปที่ 5.19 ลักษณะพื้นผิวและรอยแตกหักของชิ้นทดสอบที่กำลังขยาย 1x โดยมีขนาดเส้นใย ประมาณ 0.60-0.85 mm และมีปริมาณของต้นมันสำปะหลังและหัวมันสำปะหลังสด เท่ากับ (ก) และ (ข) 50:50; (ค) และ (ง) 70:30; (จ) และ (ฉ) 90:10 และ (ช) และ (ซ) 100:0 โดยน้ำหนัก



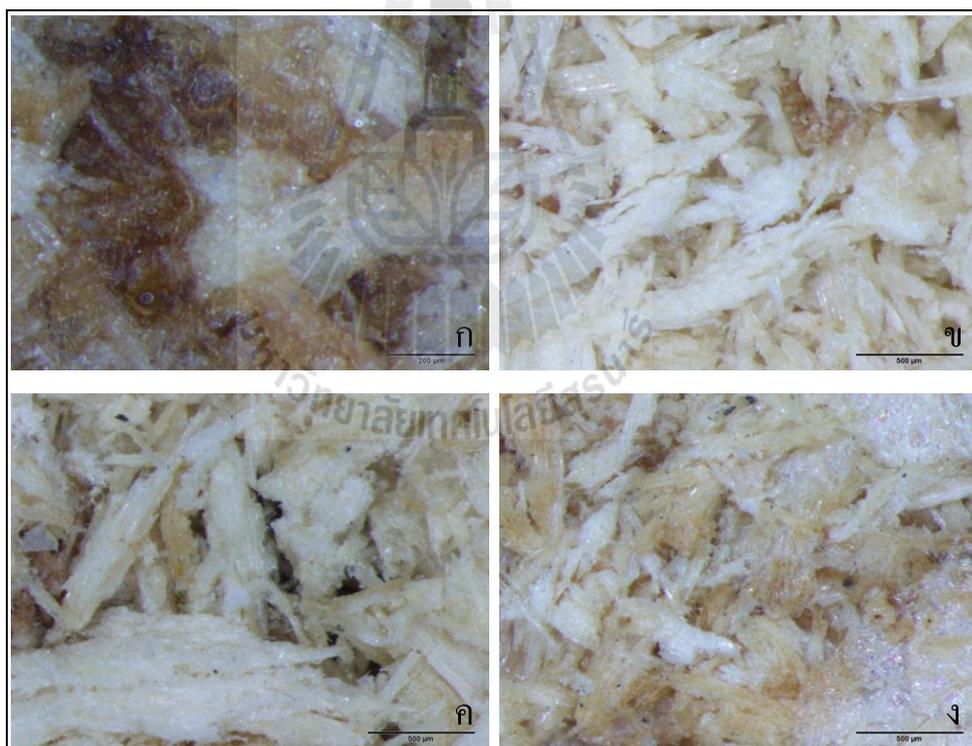
รูปที่ 5.20 ลักษณะพื้นผิวและรอยแตกหักของชิ้นทดสอบที่กำลังขยาย 1x โดยมีขนาดเส้นใย ประมาณ 1.00-1.40 mm และมีปริมาณของต้นมันสำปะหลังและหัวมันสำปะหลังสด เท่ากับ (ก) และ (ข) 50:50; (ค) และ (ง) 70:30; (จ) และ (ฉ) 90:10 และ (ช) และ (ซ) 100:0 โดยน้ำหนัก



รูปที่ 5.21 ลักษณะพื้นผิวและรอยแตกหักของชิ้นทดสอบที่กำลังขยาย 1x โดยมีขนาดเส้นใยประมาณ 1.40-2.36 mm และมีปริมาณของต้นมันสำปะหลังและหัวมันสำปะหลังสดเท่ากับ (ก) และ (ข) 50:50; (ค) และ (ง) 70:30; (จ) และ (ฉ) 90:10 และ (ช) และ (ซ) 100:0 โดยน้ำหนัก



รูปที่ 5.22 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์สเตอริโอของชิ้นทดสอบจากหัวมันสำปะหลังล้วน
(ก) ลักษณะพื้นผิวที่กำลังขยาย 10x และ (ข) รอยแตกหักจากการทดสอบ
แรงดึงที่กำลังขยาย 1x



รูปที่ 5.23 ลักษณะพื้นผิวของชิ้นทดสอบที่กำลังขยาย 10x ของ (ก) ชิ้นทดสอบที่มีขนาดเส้นใย
ประมาณ 0.60-0.85 mm และมีปริมาณต้นมันสำปะหลังและหัวมันสำปะหลังสด
เท่ากับ 50:50 โดยน้ำหนัก; ชิ้นทดสอบจากต้นมันสำปะหลังล้วนที่มีขนาดเส้นใย
ประมาณ (ข) 0.60-0.85 mm; (ค) 1.00-1.40 mm และ (ง) 1.40-2.36 mm

ผลจากการศึกษาสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบสเตรอิโอที่กำลังขยายต่าง ๆ พบว่าการสร้างพันธะที่แข็งแรงระหว่างเมทริกซ์และส่วนเสริมแรงจะเป็นการปรับปรุงสมบัติทางกลให้ดีขึ้น และการมีอยู่ของรอยโหว่จะทำให้สมบัติของชั้นทดสอบตกลง ทั้งนี้รอยโหว่ดังกล่าวอาจจะเกิดจากการทดสอบ และธรรมชาติของการดูดความชื้นของต้นมันสำปะหลังและหัวมันสำปะหลังเป็นได้ ดังนั้นหากสามารถลดความชื้นเริ่มต้นและใช้สภาวะที่เหมาะสมต่อการขึ้นรูปวัตถุดิบดังกล่าวอาจเป็นการลดรอยโหว่ให้กับชั้นทดสอบได้

5.3 ผลการทดสอบสมบัติทางความร้อน

5.3.1 สมบัติทางความร้อนของลำต้นมันสำปะหลังและหัวมันสำปะหลังสด

การเตรียมชั้นทดสอบจากลำต้นมันสำปะหลังและหัวมันสำปะหลังสดในแต่ละสูตรนั้นใช้กระบวนการอัดขึ้นรูปร้อน เพื่อทำการระเหยน้ำส่วนเกินที่มีอยู่ในวัตถุดิบและเพื่อให้หัวมันสำปะหลังสดที่ใช้เป็นสารยึดเกาะเกิดการกลายเป็นเจล (Gelatinized) ดังนั้นจึงจำเป็นต้องศึกษาถึงพฤติกรรมของการสลายตัวของอุณหภูมิต่าง ๆ ของเส้นใย โดยเครื่องมือที่ใช้ในการศึกษาพฤติกรรมดังกล่าวคือ Simultaneous TGA-DTA analyzer (SDT 2960, TA Instrument) ทำการทดลองภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน รูปที่ 5.24 แสดงการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของตัวอย่างจากลำต้นมันสำปะหลังสดและหัวมันสำปะหลังสด โดยที่ Vercelheze et al. (2013) กล่าวว่า ในการทดสอบการสลายตัวของสารตัวอย่างนั้นจะมีการสลายตัว 2 ขั้นตอน โดยในการสลายตัวครั้งแรกเป็นการสลายตัวของสารระเหยจำพวกน้ำ และในขั้นตอนที่สองจะเป็นการสลายตัวของสารจำพวกเส้นใยและแป้ง

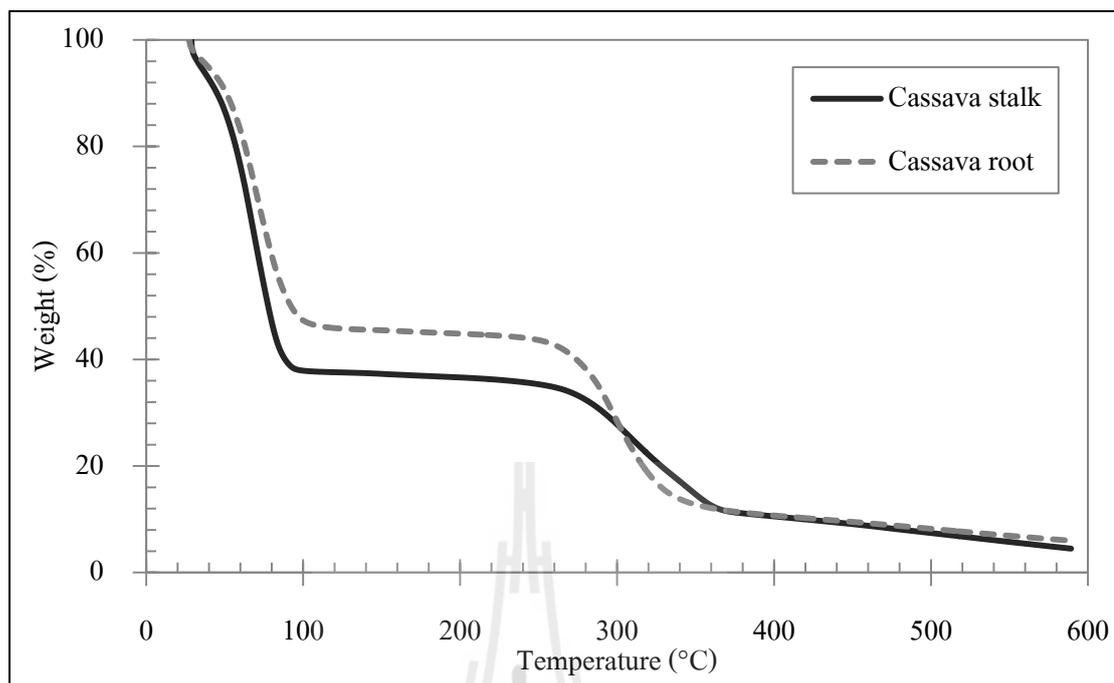
พิจารณาพฤติกรรมของการสลายตัวของลำต้นมันสำปะหลังและหัวมันสำปะหลังสดช่วงอุณหภูมิ 30-100°C เป็นการสลายสารระเหย เช่น ความชื้น ลำต้นมันสำปะหลังมีความชื้นอยู่ประมาณ 62% และหัวมันสำปะหลังมีความชื้นอยู่ประมาณ 53% ดังแสดงในตารางที่ 5.8 อุณหภูมิเริ่มสลายตัว (Onset temperature) ของตัวอย่างทั้งสองมีค่าใกล้เคียงกันที่ประมาณ 270°C กล่าวคือในการขึ้นรูปชิ้นงานโดยมีลำต้นมันสำปะหลังและหัวมันสำปะหลังสดเป็นวัตถุดิบนั้นจะต้องใช้อุณหภูมิในกระบวนการไม่เกิน 270°C ในงานวิจัยนี้ใช้อุณหภูมิในกระบวนการอัดขึ้นรูปอยู่ที่ประมาณ 150-180°C ซึ่งอุณหภูมิดังกล่าวอยู่ในช่วงที่ตัวอย่างมีเสถียรภาพทางความร้อน (Thermal stability) เนื่องจากมีการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักน้อยมาก เป็นช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการขึ้นรูปชิ้นงาน สำหรับอุณหภูมิเริ่มสลายตัวของเส้นใยข้าวโพดอยู่ที่ประมาณ 260°C และอุณหภูมิเริ่มสลายตัวของแป้งมันฝรั่งอยู่ที่ประมาณ 290°C (Cinelli et al., 2006) จากตารางที่ 5.8 บ่งชี้ว่าอุณหภูมิ

ที่ตัวอย่างสลายตัวมากที่สุด (Maximum degradation temperature, T_{max}) ของลำต้นมันสำปะหลัง มีค่ามากกว่าหัวมันสำปะหลังสดเล็กน้อย ซึ่งอุณหภูมิที่หัวมันสำปะหลังสดสลายตัวสูงสุดนั้นมีความใกล้เคียงกับงานวิจัยของ Xu et al. (2005) อุณหภูมิการสลายตัวสูงสุดของแป้งดิบ (Native starch) ที่ใช้ในงานวิจัยดังกล่าวอยู่ที่ประมาณ 297°C ซึ่งสาเหตุที่อุณหภูมิของการสลายตัวสูงสุดมีความใกล้เคียงกันนั้นเนื่องจากว่า ภายในหัวมันสำปะหลังสดนั้นหากเอาน้ำออกและจะมีแป้งเป็นส่วนประกอบหลักซึ่งมีปริมาณสูงถึง 70-85% (มูลนิธิสถาบันพัฒนามันสำปะหลังแห่งประเทศไทย, 2543) พิจารณาในช่วงอุณหภูมิการสลายตัวของน้ำในวัตถุดิบ น้ำหนักของหัวมันสำปะหลังสดจะมีการเปลี่ยนแปลงน้อยกว่าน้ำหนักของลำต้นมันสำปะหลัง เนื่องจากหัวมันสำปะหลังสดมีความหนืดเพิ่มขึ้นเนื่องจากความร้อน ทำให้สารโมเลกุลเล็กที่เกิดจากการสลายตัวระเหยออกจากระบบได้ยากขึ้น ดังนั้นในกระบวนการขึ้นรูปชิ้นงานที่เติมหัวมันสำปะหลังสดในปริมาณที่มากขึ้น อาจจำเป็นต้องลดไล่ความชื้นส่วนเกินมากขึ้นด้วย ในส่วนของปริมาณเถ้า (Ash) ที่เหลือจากกระบวนการอยู่ที่ประมาณ 5% พบว่ามีค่าสูงกว่า ตารางที่ 2.3 เล็กน้อย ทั้งนี้ปริมาณเถ้าคงเหลือจะขึ้นอยู่กับปริมาณของสารตั้งต้นที่ใช้ในการทดลอง นอกจากนี้ปริมาณเถ้าอาจจะลดลงได้อีกเล็กน้อยหากเพิ่มอุณหภูมิที่ใช้เผาสารตัวอย่างอีกด้วย

ตารางที่ 5.8 ข้อมูลทางความร้อนจากการวิเคราะห์ด้วยวิธีเทอร์โมกราวิเมตรี

ของลำต้นมันสำปะหลัง หัวมันสำปะหลังสด และขึ้นทดสอบแต่ละสูตร

| ตัวอย่าง | สารระเหย (%) | T_{on} ($^{\circ}\text{C}$) | การสลายตัวที่ T_{on} (%) | T_{max} ($^{\circ}\text{C}$) | การสลายตัวที่ 302°C (%) | เถ้า (%) |
|-----------------|--------------|---------------------------------|----------------------------|----------------------------------|---|----------|
| ต้นมัน (S) | 62.08 | 269.84 | 64.50 | 308.48 | 72.75 | 4.49 |
| หัวมัน (R) | 52.61 | 272.37 | 56.12 | 298.25 | 72.73 | 5.97 |
| S:R = 0:100 wt. | 2.74 | 271.62 | 13.15 | 297.10 | 41.38 | 19.77 |
| S:R = 50:50 wt. | 3.18 | 269.37 | 12.23 | 297.90 | 36.46 | 18.35 |
| S:R = 70:30 wt. | 3.68 | 268.26 | 12.36 | 300.32 | 33.08 | 20.40 |
| S:R = 90:10 wt. | 5.35 | 270.03 | 13.70 | 305.27 | 32.04 | 19.53 |
| S:R = 100:0 wt. | 4.59 | 268.54 | 12.56 | 309.08 | 28.71 | 17.64 |

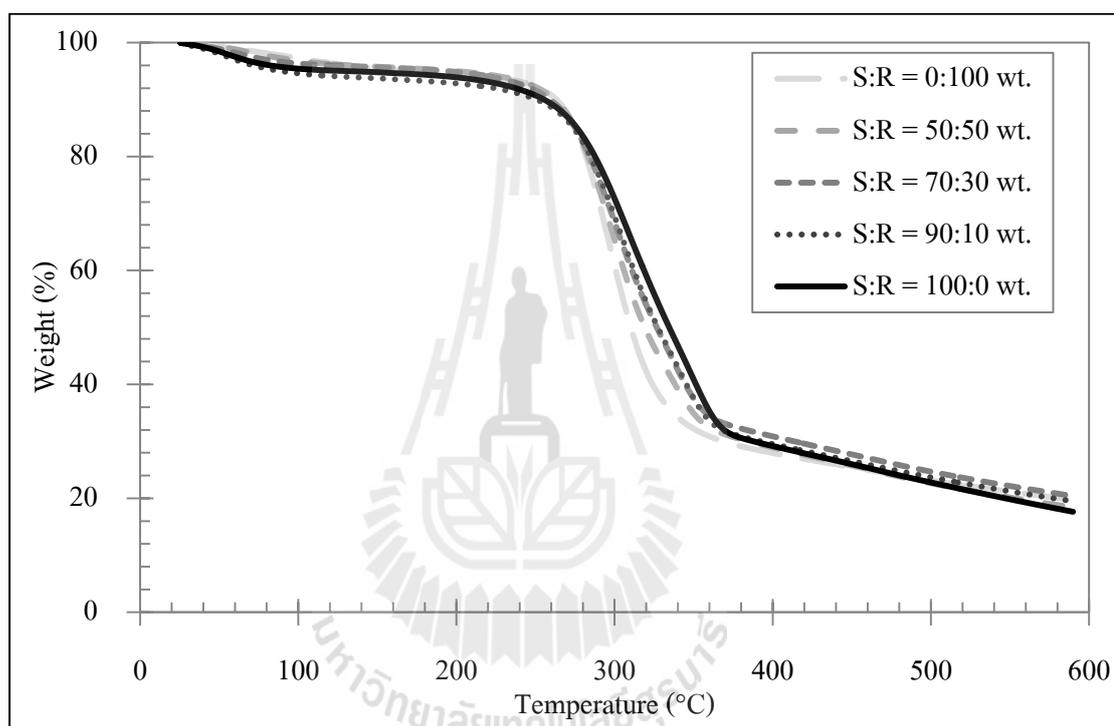


รูปที่ 5.24 การเปลี่ยนแปลงมวลภายใต้บรรยากาศไนโตรเจนเทียบกับอุณหภูมิของลำต้นมันสำปะหลังและหัวมันสำปะหลังสด

5.3.2 สมบัติทางความร้อนของชั้นทดสอบในแต่ละอัตราส่วนผสม

จากรูปที่ 5.25 แสดงพฤติกรรมทางความร้อนที่เป็นไปในแนวทางเดียวกัน ทั้งชั้นทดสอบที่ได้จากวัตถุดิบตั้งต้นล้วน (ชั้นทดสอบจากสูตรลำต้นมันสำปะหลัง (S) และหัวมันสำปะหลังสด (R) เท่ากับ 100:0 และ 0:100 โดยน้ำหนัก) และชั้นทดสอบที่ผสมในอัตราส่วนต่างๆ กัน กล่าวคือ หลังจากการสลายตัวในขั้นตอนแรกแล้วชั้นทดสอบยังมีความชื้นในตัวประมาณ 3-5% ดังแสดงในตารางที่ 5.8 ชั้นทดสอบแต่ละสูตรนั้นมีเสถียรภาพทางความร้อนในช่วงอุณหภูมิเดียวกันกับวัตถุดิบตั้งต้นจากลำต้นมันสำปะหลังและหัวมันสำปะหลังสด อุณหภูมิเริ่มสลายตัวของชั้นทดสอบแต่ละสูตรอยู่ที่ประมาณ 270°C อุณหภูมิการสลายตัวสูงสุดของชั้นทดสอบจะเพิ่มสูงขึ้นเมื่อปริมาณลำต้นมันสำปะหลังในชั้นทดสอบเพิ่มขึ้น โดยที่อุณหภูมิของการสลายตัวสูงสุดชั้นทดสอบที่ผสมมาจะอยู่ระหว่างค่าของชั้นทดสอบจากลำต้นมันสำปะหลังล้วน (S:R = 100:0 wt.) และค่าของชั้นทดสอบจากหัวมันสำปะหลังสดล้วน (S:R = 0:100 wt.) ซึ่งอาจจะเป็นการเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อนให้สูงขึ้นจากการเติมเส้นใยจากลำต้นมันสำปะหลัง สอดคล้องกับงานวิจัยท่านอื่น (Cinelli et al., 2006; Wattanakornsiri et al., 2012) อุณหภูมิการสลายตัวสูงสุดของชั้นทดสอบเข้าใกล้ 302°C ซึ่งค่าการสูญเสียน้ำหนักที่อุณหภูมิดังกล่าวแสดงในตารางที่ 5.8

การสูญเสียน้ำหนักของชิ้นทดสอบจะลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณของลำดับมันสำปะหลัง บ่งชี้ได้ว่าเป็นการปรับปรุงสมบัติทางความร้อนให้ชิ้นงานได้ (Vallejos et al., 2011; Wattanakornsiri et al., 2012; Prachayawarakorn et al., 2013) ปริมาณเถ้าที่เหลือจากกระบวนการอยู่ที่ประมาณ 20% ซึ่งอาจจะลดลงไปได้อีกหากทดสอบที่อุณหภูมิสูงขึ้น ทั้งนี้อุณหภูมิของการเสื่อมสลายของชิ้นทดสอบต่างๆ อยู่ในช่วงอุณหภูมิที่สูงมาก มีความเป็นไปได้ที่จะนำไปใช้ใส่ของทอด อาหารจานด่วน เช่น ขนมครก มันฝรั่งทอด เป็นต้น



รูปที่ 5.25 การเปลี่ยนแปลงมวลภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน
เทียบกับอุณหภูมิของชิ้นทดสอบในแต่ละอัตราส่วนผสม

5.4 ผลการทดสอบสมบัติทางกล

5.4.1 การทดสอบแรงดึง (Tensile test)

การทดสอบแรงดึงเป็นการทดสอบสมบัติทางกลที่สำคัญอย่างหนึ่ง ค่าสมบัติจากการทดสอบแรงดึงมีความสำคัญในการเลือกวัสดุไปใช้งาน รวมไปถึงการออกแบบเครื่องจักรและโครงสร้างสำหรับงานวิศวกรรม ในการทดสอบแรงดึงจะมีอัตราการให้แรงกระทำต่อชิ้นทดสอบ

คงที่อย่างช้า ๆ จนกระทั่งขึ้นทดสอบเกิดการแตกหัก ค่าสมบัติจากการทดสอบแรงดึงที่ศึกษาในงานวิจัยนี้ ได้แก่ ค่าการต้านทานแรงดึง (Tensile strength) ค่ามอดูลัสของความยืดหยุ่น (Modulus of elasticity) หรือค่ามอดูลัสของยัง (Young's modulus) และค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัว (% Elongation)

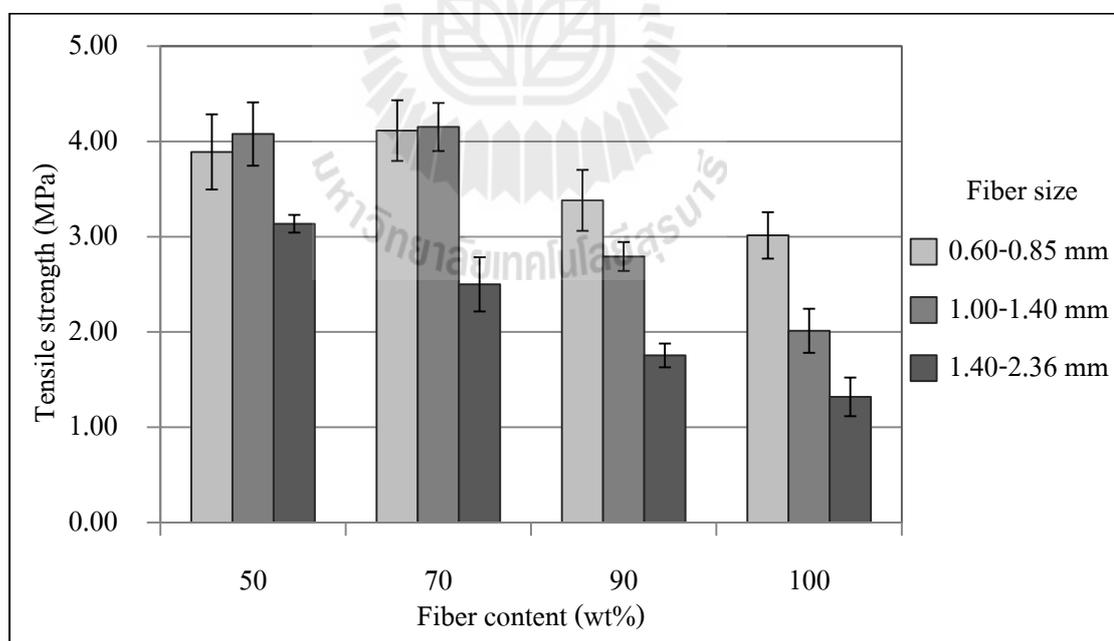
ตารางที่ 5.9 แสดงค่าการต้านทานแรงดึง ค่ามอดูลัสของยัง และค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัวของขึ้นทดสอบในแต่ละสูตรจากลำต้นมันสำปะหลังและหัวมันสำปะหลังสด

| ขนาดเส้นใย (mm) | ปริมาณเส้นใย (wt%) | ปริมาณสารยึดเกาะ (wt%) | การต้านทานแรงดึง (MPa) | มอดูลัสของยัง (MPa) | เปอร์เซ็นต์การยืดตัว (%) |
|-----------------|--------------------|------------------------|------------------------|---------------------|--------------------------|
| 0.60-0.85 | 50 | 50 | 3.89 ± 0.40 | 1,108 ± 32 | 0.50 ± 0.03 |
| | 70 | 30 | 4.11 ± 0.32 | 918 ± 48 | 0.56 ± 0.01 |
| | 90 | 10 | 3.38 ± 0.32 | 683 ± 20 | 0.59 ± 0.05 |
| | 100 | 0 | 3.01 ± 0.24 | 515 ± 87 | 0.60 ± 0.10 |
| 1.00-1.40 | 50 | 50 | 4.08 ± 0.33 | 1,039 ± 21 | 0.52 ± 0.06 |
| | 70 | 30 | 4.15 ± 0.25 | 929 ± 48 | 0.58 ± 0.05 |
| | 90 | 10 | 2.79 ± 0.15 | 592 ± 50 | 0.62 ± 0.23 |
| | 100 | 0 | 2.01 ± 0.23 | 499 ± 16 | 0.66 ± 0.08 |
| 1.40-2.36 | 50 | 50 | 3.14 ± 0.09 | 909 ± 46 | 0.50 ± 0.03 |
| | 70 | 30 | 2.50 ± 0.28 | 660 ± 41 | 0.51 ± 0.03 |
| | 90 | 10 | 1.75 ± 0.12 | 508 ± 51 | 0.57 ± 0.15 |
| | 100 | 0 | 1.32 ± 0.20 | 346 ± 25 | 0.66 ± 0.14 |

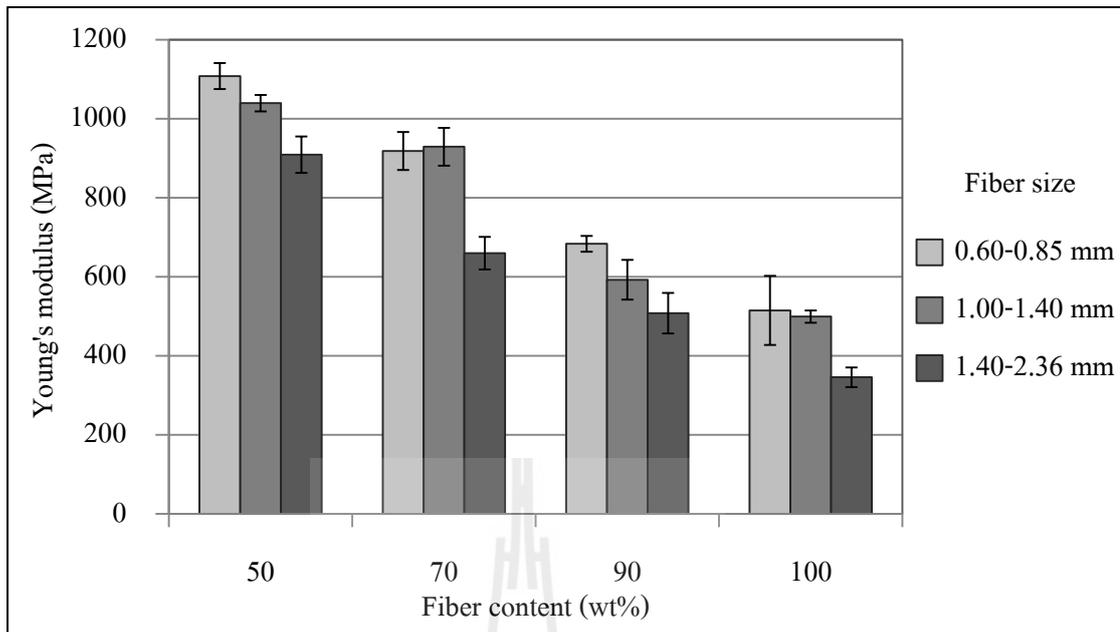
หมายเหตุ : ข้อมูลแสดงในรูปของค่าเฉลี่ย ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

ค่าการต้านทานแรงดึงของขึ้นทดสอบจากหัวมันสำปะหลังสดล้วน (100%) จะมีค่าประมาณ 1.34 MPa ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับค่าการต้านทานแรงดึงของโฟมแป้งข้าวโพดที่ไม่ได้เติมสารเติมแต่ง (Pure starch foam) คือ ประมาณ 1.54 MPa (Usla and Polat, 2012) และมีค่ามากกว่าถาดโฟมแป้งมันสำปะหลังที่ยังไม่ได้เติมเส้นใยกราฟท์ (Kraft fiber) ที่มีค่าประมาณ 302 kPa (Kaisangsri et al., 2012) แต่อย่างไรก็ดีค่าการต้านทานแรงดึงของขึ้นทดสอบจากหัวมันสำปะหลังสดล้วนมีค่าน้อยกว่าเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช (Thermoplastic starch, TPS) จากแป้งมันสำปะหลังและแป้งข้าวโพด ซึ่งมีค่าการต้านทานแรงดึงประมาณ 2.2 MPa และ 2.6 MPa ตามลำดับ (Vallejos

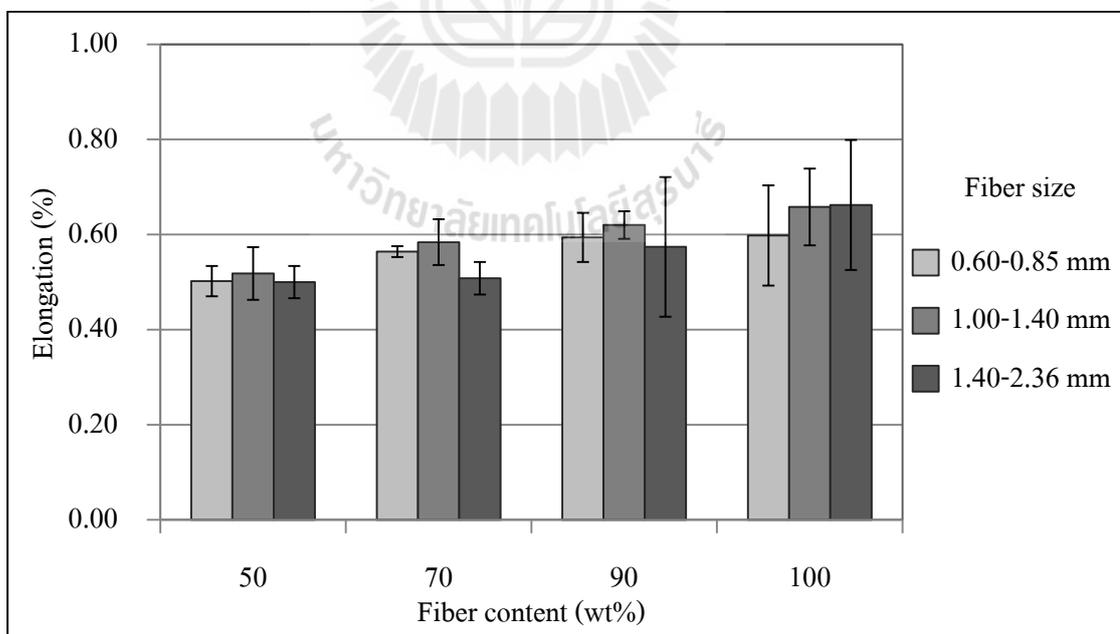
et al., 2011) สำหรับค่ามอดูลัสของยังของชิ้นทดสอบจากหัวมันสำปะหลังสดล้วนมีค่าประมาณ 930 MPa ซึ่งมีค่าที่มากกว่าค่ามอดูลัสของยังของโฟมแป้งข้าวโพดที่มีค่าประมาณ 378.1 MPa (Usla and Polat, 2012) กล่าวคือชิ้นทดสอบจากหัวมันสำปะหลังสดล้วนมีความแกร่งที่มากกว่าเมื่อมีการต้านทานแรงดึงที่ใกล้เคียงกัน ในส่วนของค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัวของชิ้นทดสอบจากหัวมันสำปะหลังสดล้วนมีค่าประมาณ 0.30% ซึ่งมีค่าน้อยกว่าค่าของโฟมแป้งข้าวโพดที่มีค่าประมาณ 0.87% (Usla and Polat, 2012) สอดคล้องกับผลการทดสอบค่ามอดูลัสของยังที่ชิ้นทดสอบจากหัวมันสำปะหลังสดล้วนมีความแกร่งมากกว่า จึงมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างได้น้อยกว่าโฟมแป้งข้าวโพดที่ไม่ได้เติมสารเติมแต่ง อย่างไรก็ตามค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัวมีค่าที่ใกล้เคียงกับค่าของถาดโฟมแป้งมันสำปะหลังที่ยังไม่ได้เติมเส้นใยคาร์พท์ ที่มีค่าประมาณ 0.22% จากการศึกษาค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัวของทั้งชิ้นทดสอบจากหัวมันสำปะหลังสดล้วนและถาดโฟมแป้งที่ไม่ได้เติมสารเติมแต่งมีค่าที่ต่ำกว่า 5% ดังนั้นจึงจัดว่าเป็นวัสดุเปราะ (Brittle) แต่เพื่อให้สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานจริงได้หลากหลายยิ่งขึ้นนั้น อาจจำเป็นต้องปรับปรุงสมบัติตัวนี้ขึ้น ทั้งนี้ค่าสมบัติแรงดึงที่มีความแตกต่างกันอยู่บ้างในแต่ละรายงานการวิจัยเป็นไปตามเหตุผลที่ได้อธิบายไว้แล้วก่อนหน้านี้



รูปที่ 5.26 อิทธิพลของขนาดเส้นใยและปริมาณเส้นใยต้นมันสำปะหลัง ต่อค่าการต้านทานแรงดึงของชิ้นทดสอบ



รูปที่ 5.27 อิทธิพลของขนาดเส้นใยและปริมาณเส้นใยต้นมันสำปะหลัง
ต่อค่ามอดุลัสของยังของชิ้นทดสอบ



รูปที่ 5.28 อิทธิพลของขนาดเส้นใยและปริมาณเส้นใยต้นมันสำปะหลัง
ต่อค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัวของชิ้นทดสอบ

ค่าการต้านทานแรงดึง ค่ามอดูลัสของยัง และค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัวของ ชี้นทดสอบจากลำต้นมันสำปะหลังและหัวมันสำปะหลังสดแต่ละสูตร แสดงในตารางที่ 5.9 และ รูปที่ 5.26 5.27 และ 5.28 พบว่าค่าการต้านทานแรงดึงของชี้นทดสอบมีค่าประมาณ 1.32-4.15 MPa เมื่อเปรียบเทียบกับค่าการต้านทานแรงดึงของชี้นทดสอบจากลำต้นมันสำปะหลังและหัวมันสำปะหลังสด กับค่าการต้านทานแรงดึงของชี้นทดสอบจากหัวมันสำปะหลังสดล้วน บ่งชี้ได้ว่าการเติมเส้นใยลง ไปในสูตรจะทำให้ค่าการต้านทานแรงดึงของชี้นทดสอบเพิ่มขึ้น ซึ่งการเพิ่มขึ้นของสมบัติทางกล เป็นที่ยืนยันได้ว่าเส้นใยต้นมันสำปะหลังที่ใช้ในการเสริมแรงมีปฏิสัมพันธ์ที่ดีกับเมทริกซ์จากการที่มี หมู่ฟังก์ชันทางเคมีที่คล้ายกัน (Vallejos et al., 2011; Wattanakornsiri et al., 2012; Prachayawarakorn et al., 2013) สำหรับค่ามอดูลัสของยังของชี้นทดสอบมีค่าประมาณ 346-1,108 MPa ซึ่งค่ามอดูลัส ของยังของชี้นทดสอบจากหัวมันสำปะหลังสดล้วนจะมีค่าที่น้อยกว่าชี้นทดสอบที่ใช้สารยึดเกาะ จากหัวมันสำปะหลังสดในปริมาณสูง ๆ (50%) กล่าวคือการมีอยู่ของเส้นใยทำให้ชี้นทดสอบมี ความแกร่งเพิ่มขึ้น แต่ถ้าปริมาณของเส้นใยที่มากจนเกินไปทำให้ชี้นทดสอบมีความแกร่งลดน้อยลง สอดคล้องกับผลการศึกษาเปอร์เซ็นต์การยืดตัวของชี้นทดสอบ โดยการมีอยู่ของเส้นใยทำให้ ชี้นทดสอบสามารถยืดตัวจากการทดสอบแรงดึงได้เพิ่มขึ้นเล็กน้อย

เมื่อพิจารณาอิทธิพลของปริมาณ สารยึดเกาะจากหัวมันสำปะหลังสดต่อสมบัติ แรงดึงของชี้นทดสอบในขนาดเส้นใยเดียวกัน พบว่าชี้นทดสอบจะมีค่าการต้านทานแรงดึง และค่า มอดูลัสของยังที่สูงขึ้น ในขณะที่ค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัวลดลงเล็กน้อยเมื่อปริมาณของสารยึดเกาะ จากหัวมันสำปะหลังเพิ่มขึ้น เนื่องจากหัวมันสำปะหลังสดจะเข้าไปเติมเต็มช่องว่างระหว่างเส้นใย สอดคล้องกับผลการศึกษาความหนาแน่นและลักษณะทางสัณฐานวิทยาของชี้นทดสอบ (อยู่ใน หัวข้อที่ 5.2.2 และ 5.2.4) ยิ่งไปกว่านั้นแนวโน้มของค่าสมบัติแรงดึงยังมีความใกล้เคียงกับสมบัติ แรงดัดโค้งอีกด้วย อย่างไรก็ตามการเติมสารยึดเกาะจากหัวมันสำปะหลังสดในปริมาณมากจะนำไปสู่ การลดลงของค่าการต้านทานแรงดึง เนื่องจากสารยึดเกาะจากหัวมันสำปะหลังสดนั้นมีแปงเป็น องค์ประกอบหลักซึ่งจะมีสมบัติทางกลที่เปราะและแตกหักง่าย สอดคล้องตามรายงานของ Shogren et al. (2002) ที่กล่าวว่า โฟมที่มีแต่แปงเพียงอย่างเดียวนั้นเปราะ แตกหักง่าย และมีความไวต่อน้ำ ทั้งนี้ตามรายงานของ Lawton et al. (2004) ที่ทดสอบความแข็งแรงของถาดโฟมแปงข้าวโพดที่เติม เส้นใยแอสเพน (Aspen fiber) ในปริมาณ 2.5-45% เพื่อเป็นการเสริมแรง พบว่าความแข็งแรงของ ถาดโฟมแปงข้าวโพดจะเพิ่มขึ้นเมื่อเติมเส้นใยจนถึง 15% และก็จะคงที่จนถึง 30% แล้วค่าเริ่มตกลง เมื่อปริมาณเส้นใยมากกว่านี้ เนื่องจากถาดโฟมแปงจะขาดความสม่ำเสมอในการจัดเรียงเส้นใยเมื่อมี ปริมาณที่สูง

เมื่อพิจารณาอิทธิพลของขนาดเส้นใยต้นมันสำปะหลังต่อค่าสมบัติแรงดึงของ ชื้นทดสอบในอัตราส่วนผสมเดียวกัน พบว่าเส้นใยต้นมันสำปะหลังที่มีขนาดเล็กกว่า จะทำให้ค่า การต้านทานแรงดึงและค่ามอดูลัสของยังของชื้นทดสอบมีค่าสูงกว่าเส้นใยที่ขนาดใหญ่กว่าเมื่อใช้ หัวมันสำปะหลังเป็นสารยึดเกาะ เนื่องจากการใช้เส้นใยที่ขนาดเล็กกว่าจะทำให้ช่องว่าง หรือ รอยโหว่ (Voids) ในชื้นทดสอบลดน้อยลง มีความหนาแน่นมากขึ้น ส่งผลให้ชื้นทดสอบที่ได้มีความ แข็งแรงมากกว่า (Wattanakornsiriet al., 2012; Prachayawarakorn et al., 2013) ตามรายงานของ Salgado et al. (2008) กล่าวว่า การต้านทานแรงดึงมีความสัมพันธ์กันอย่างมากกับความหนาแน่นของ ภาดโพนเป็ง โดยที่ภาดโพนเป็งที่มีความหนาแน่นสูงที่สุดจะแสดงการต้านทานที่สูงที่สุดเช่นกัน สำหรับชื้นทดสอบที่ใช้เส้นใยต้นมันสำปะหลังขนาดประมาณ 1.40-2.36 mm จะมีค่าการต้านทาน แรงดึงต่ำกว่าชื้นทดสอบจากเส้นใยอีก 2 ขนาด เนื่องจากที่ในช่วงของเส้นใยขนาดนี้ นอกจากจะมี เส้นใยเป็นส่วนประกอบแล้วยังมีส่วนของเปลือกไม้ และเนื้อเยื่อลำเลียงน้ำและอาหารเป็น ส่วนประกอบอีกด้วย แต่ในทางตรงข้ามขนาดของเส้นใยกลับไม่ส่งผลต่อค่าเปอร์เซ็นต์การยึด ตัวอย่างมีนัยสำคัญ (แสดงผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนตามตารางที่ 5.12) หากศึกษาวิธีการ เตรียมเส้นใยต้นมันสำปะหลังให้มีขนาดที่ยาวขึ้นอาจจะเห็นผลของขนาดเส้นใยต่อการยึดตัว ก็เป็นไปได้

ในงานวิจัยนี้ไม่ได้ทำการศึกษาอิทธิพลของความชื้นสัมพัทธ์ในระหว่างการเก็บ รักษาต่อสมบัติแรงดึง ซึ่งตามรายงานของ Verdelheze et al. (2012) กล่าวว่าที่ความชื้นสัมพัทธ์สูง ๆ จะส่งผลให้ภาดโพนเป็งมันสำปะหลังผสมเส้นใยชานอ้อยและแร่ดินเหนียว (Montmorillonite) มีค่า ความเค้นที่จุดแตกหักลดต่ำลง และค่าความเครียดที่จุดแตกหักเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งการลดลงของ พฤติกรรมความเปราะนี้เป็ผลมาจากการเคลื่อนที่ได้ง่ายขึ้นของสายโซ่พอลิเมอร์ ทำให้มีช่องว่าง มากขึ้นจนน้ำสามารถแพร่ผ่านเข้าไปในเมทริกซ์ได้มากขึ้น ส่งผลให้วัสดุนี้มีความต้านทานที่ต่ำลง และอ่อนตัวมากขึ้นที่ความชื้นสัมพัทธ์สูง ๆ เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า Plasticizing effect ในบาง รายงานได้ศึกษาถึงผลกระทบจากการนำภาดโพนเป็งมันสำปะหลังผสมเส้นใยเซลลูโลสและแร่ หินปูนโดโลมิติก (Dolomitic limestone) ไปใช้งานจริงด้วยการสัมผัสและไม่ได้สัมผัสกับอาหาร โดยตรง พบว่าการใช้งานภาดโพนเป็งกับแฮมโดยที่ไม่ได้สัมผัสโดยตรง จะไม่มีปัญหาในการใช้ งาน ค่าสมบัติทางกลไม่ตกลงอย่างมีนัยสำคัญ แต่เมื่อทดสอบกับการสัมผัสกับอาหาร โดยตรงจะ เป็นสาเหตุให้ภาดโพนเป็งอ่อนตัวลง บ่งชี้ว่าภาดโพนเป็งมีความไวต่อการสัมผัสโดยตรงกับ ความชื้นในอาหาร

ค่าสมบัติแรงดึงของโพนพอลิสไตรีน (Expanded polystyrene, EPS) มีค่าดังนี้ ค่าการต้านทานแรงดึงมีค่าประมาณ 1.1 MPa ค่ามอดูลัสของยังมีค่าประมาณ 38 MPa และค่า เปอร์เซ็นต์การยึดตัวมีค่าประมาณ 5.4% (Uslu and Polat., 2012) ซึ่งค่าสมบัติของแรงดึงในงานวิจัย

นี้จะมีค่าการต้านทานแรงดึงและค่ามอดูลัสของยังที่มากกว่าค่าของโพลีเอสเตอร์มาก แต่ขั้นตอนทดสอบในงานวิจัยนี้มีความแปรปรวนมากกว่าของโพลีเอสเตอร์เนื่องจากมีการยึดตัวได้น้อยกว่า ถึงแม้ว่าค่าการต้านทานแรงดึงและค่ามอดูลัสของยังในงานวิจัยนี้จะมากกว่าค่าของโพลีเอสเตอร์อยู่มาก แต่หากจะนำไปประยุกต์ใช้งานจริงให้มีความหลากหลายมากขึ้นอาจจำเป็นต้องเพิ่มความสามารถในการยึดตัวขึ้นอีกด้วยการเติมสารเติมแต่งอื่น ๆ เช่น ไคโตแซน (Kaisangsri et al., 2012)

ตารางที่ 5.10 ผลการคำนวณทางสถิติด้วยการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบสองทาง (Two-way ANOVA) ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ของค่าการต้านทานแรงดึงของชั้นทดสอบ

| Source | DF | SS | MS | F | P |
|---------------|----|---------------|---------|---------------------|-------|
| Fiber size | 2 | 22.0746 | 11.0373 | 162.26 | 0.000 |
| Fiber content | 3 | 26.2401 | 8.7467 | 128.58 | 0.000 |
| Interaction | 6 | 3.3666 | 0.5611 | 8.25 | 0.000 |
| Error | 48 | 3.2652 | 0.0680 | - | - |
| Total | 59 | 54.9465 | - | - | - |
| S = 0.2608 | | R-Sq = 94.06% | | R-Sq (adj) = 92.70% | |

ตารางที่ 5.11 ผลการคำนวณทางสถิติด้วยการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบสองทาง (Two-way ANOVA) ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ของค่ามอดูลัสของยังของชั้นทดสอบ

| Source | DF | SS | MS | F | P |
|---------------|----|---------------|--------|---------------------|-------|
| Fiber size | 2 | 448652 | 224326 | 112.21 | 0.000 |
| Fiber content | 3 | 2842682 | 947561 | 474.00 | 0.000 |
| Interaction | 6 | 50316 | 8386 | 4.19 | 0.002 |
| Error | 48 | 95956 | 1999 | - | - |
| Total | 59 | 3437606 | - | - | - |
| S = 44.71 | | R-Sq = 97.21% | | R-Sq (adj) = 96.57% | |

ตารางที่ 5.12 ผลการคำนวณทางสถิติด้วยการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบสองทาง (Two-way ANOVA) ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ของค่าเปอร์เซ็นต์การยึดตัวของชี้นทดสอบ

| Source | DF | SS | MS | F | P |
|---------------|----|---------------|-----------|---------------------|-------|
| Fiber size | 2 | 0.013990 | 0.0069950 | 1.20 | 0.312 |
| Fiber content | 3 | 0.146538 | 0.0488461 | 8.35 | 0.000 |
| Interaction | 6 | 0.020677 | 0.0034461 | 0.59 | 0.738 |
| Error | 48 | 0.290960 | 0.0058533 | - | - |
| Total | 59 | 0.462165 | - | - | - |
| S = 0.07651 | | R-Sq = 39.21% | | R-Sq (adj) = 25.28% | |

ผลจากการวิเคราะห์ความแปรปรวนในการทดสอบอิทธิพลของขนาดเส้นใย ต้นมันสำปะหลังและปริมาณของเส้นใยต้นมันสำปะหลังต่อค่าการต้านทานแรงดึงของชี้นทดสอบ แสดงในตารางที่ 5.10 พบว่าปัจจัยหลัก (Main effect) คือ ขนาดเส้นใยและปริมาณเส้นใยนั้นมีอิทธิพลต่อการต้านทานแรงดึงของชี้นทดสอบอย่างมีนัยสำคัญ (P-value < 0.05) สำหรับความสัมพันธ์ของอิทธิพลร่วม (Interaction effect) ของ 2 ปัจจัย พบว่ามีผลต่อการต้านทานแรงดึงของชี้นทดสอบอย่างมีนัยสำคัญ (P-value < 0.05) เช่นกัน จากการพิจารณาค่าสถิติ F พบว่าปัจจัยหลักมีอิทธิพลต่อค่าการต้านทานแรงดึงที่ใกล้เคียงกัน โดยที่ขนาดของเส้นใยมีอิทธิพลมากกว่าอัตราส่วนผสมเล็กน้อย และมีค่ามากกว่าอิทธิพลร่วมระหว่าง 2 ปัจจัย เนื่องจากข้อมูลเป็นไปในทิศทางเดียวกัน โดยในทุกอัตราส่วนผสม เส้นใยต้นมันสำปะหลังที่ขนาดเล็กกว่าจะมีค่าการต้านทานแรงดึงของชี้นทดสอบที่มากกว่าเส้นใยขนาดใหญ่

ผลจากการวิเคราะห์ความแปรปรวนในการทดสอบอิทธิพลของขนาดเส้นใย ต้นมันสำปะหลังและปริมาณของเส้นใยต้นมันสำปะหลังต่อค่ามอดูลัสของยังของชี้นทดสอบแสดงในตารางที่ 5.11 พบว่าปัจจัยหลัก (Main effect) คือ ขนาดเส้นใยและปริมาณเส้นใยนั้นมีอิทธิพลต่อค่ามอดูลัสของยังของชี้นทดสอบอย่างมีนัยสำคัญ (P-value < 0.05) สำหรับความสัมพันธ์ของอิทธิพลร่วม (Interaction effect) ของ 2 ปัจจัย พบว่ามีผลต่อค่ามอดูลัสของยังของชี้นทดสอบอย่างมีนัยสำคัญ (P-value < 0.05) เช่นกัน เป็นที่ทราบกันดีว่านอกจากรูปร่างของเส้นใยแล้ว การจัดเรียงตัวและปริมาณของเส้นใยที่เติมลงไปในสูตรต่างก็ส่งอิทธิพลต่อสมบัติทางกลของคอมโพสิต โดยเฉพาะปริมาณเส้นใยอาจจะเป็นปัจจัยที่สำคัญที่สุดต่อการปรับปรุงสมบัติทางกล จากการพิจารณาค่าสถิติ F พบว่าปัจจัยหลักของปริมาณเส้นใย (อัตราส่วนผสม) ที่ใช้มีอิทธิพลต่อค่ามอดูลัส

ของยังของขึ้นทดสอบมากกว่าขนาดของเส้นใยที่ใช้และอิทธิพลร่วมของ 2 ปัจจัย เนื่องจากมีค่าสถิติ F ที่สูงมากถึง 474.00 โดยผลการคำนวณทางสถิตินี้เป็นไปในแนวทางเดียวกันกับผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของความหนาแน่นของขึ้นทดสอบ

ผลจากการวิเคราะห์ความแปรปรวนในการทดสอบอิทธิพลของขนาดเส้นใย ต้นมันสำปะหลังและปริมาณของเส้นใยต้นมันสำปะหลังต่อค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัวของขึ้นทดสอบ แสดงในตารางที่ 5.12 พบว่ามีเพียงปัจจัยหลัก (Main effect) ของปริมาณเส้นใยเท่านั้นที่มีอิทธิพลต่อค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัวของขึ้นทดสอบอย่างมีนัยสำคัญ ($P\text{-value} < 0.05$) แต่ปัจจัยหลักของขนาดเส้นใยและสำหรับความสัมพันธ์ของอิทธิพลร่วม (Interaction effect) ของ 2 ปัจจัย พบว่าไม่มีผลต่อค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัวของขึ้นทดสอบอย่างมีนัยสำคัญ ($P\text{-value} > 0.05$) สำหรับขนาดเส้นใยต้นมันสำปะหลังที่ผ่านการเตรียมด้วยวิธีนี้อาจจะทำให้เห็นผลของการยืดตัวที่ต่ำ ส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจที่ปรับแล้ว (Adjusted R-squared, Adj-R^2) เท่ากับ 25.28% หมายถึงมีผลของตัวแปรที่ไม่ได้ควบคุมหรือควบคุมไม่ได้ (Error) ที่ส่งผลต่อค่าการยืดตัวเท่ากับ 74.72% สาเหตุที่การประมาณค่า Adj-R^2 มีค่าน้อยเนื่องจากขึ้นทดสอบจากต้นมันสำปะหลังและหัวมันสำปะหลังแสดงพฤติกรรมแบบวัสดุเปราะ มีการยืดตัวที่ต่ำ ทำให้เห็นอิทธิพลของการปรับเปลี่ยนปัจจัยได้น้อย

5.4.2 การทดสอบแรงดัดโค้ง (Flexural test)

การทดสอบแรงดัดโค้งเป็นการทดสอบสมบัติทางกลที่มีความสำคัญที่สุดอย่างหนึ่งสำหรับการทดสอบวัสดุจำพวกพอลิเมอร์ ค่าสมบัติจากการทดสอบแรงดัดโค้งมีความสำคัญในการพิจารณาสำหรับการออกแบบโครงสร้าง เครื่องจักร หรือผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ ในการทดสอบแรงดัดโค้งจะมีอัตราการให้แรงกระทำต่อขึ้นทดสอบคงที่อย่างช้า ๆ จนกระทั่งเกิดการแตกหัก เช่นเดียวกับการทดสอบสมบัติแรงดึง ในงานวิจัยนี้ใช้การทดสอบแรงดัดโค้งแบบจุกรองรับ 3 จุด (Three-point bending) เนื่องจากขึ้นทดสอบจากลำต้นมันสำปะหลังและหัวมันสำปะหลังแสดงพฤติกรรมแบบวัสดุเปราะ (Brittle) ขึ้นทดสอบมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างจากแรงดัดโค้งที่มากกระทำได้น้อยและสามารถเสียหายภายใต้ความเครียดสูงสุดไม่เกิน 5% ตามมาตรฐานการทดสอบ

ค่าการต้านทานแรงดัดโค้งของขึ้นทดสอบจากหัวมันสำปะหลังสดล้วน (100%) จะมีค่าประมาณ 3.88 MPa ซึ่งมีค่าที่ใกล้เคียงกับค่าการต้านทานแรงดัดโค้งของโฟมแป้งมันสำปะหลังแบบไม่ดัดแปรและไม่เติมสารเติมแต่ง (Pure starch foam) ที่ค่าปริมาณความชื้นของโฟมแป้งเท่ากับ 3.6-16.6% คือ โฟมแป้งมีค่าการต้านทานแรงดัดโค้งประมาณ 2.5-5.5 MPa (Soykabkeaw et al., 2004) แต่ค่าการต้านทานแรงดัดโค้งของขึ้นทดสอบจากหัวมันสำปะหลังสดล้วนมีค่าน้อยกว่าโฟมแป้งข้าวโพดที่ยังไม่ได้เติมสารเติมแต่ง คือ 7.21 MPa (Usla and Polat, 2012)

อย่างไรก็ดีในงานวิจัยนี้มีค่าการต้านทานแรงดัดโค้งที่มากกว่าโฟมแข็งข้าวโพดที่ยังไม่ได้เติมสารเติมแต่งในสภาวะการเก็บรักษาที่ความชื้นสัมพัทธ์เท่ากับ 33-75% โดยที่โฟมแข็งข้าวโพดนั้นมีค่าการต้านทานแรงดัดโค้งประมาณ 2.10-2.81 MPa (Benezet et al., 2012) ซึ่งค่าการต้านทานแรงดัดโค้งที่แตกต่างกันอยู่บ้างในแต่ละรายงานการวิจัยเป็นไปตามเหตุผลที่ได้อธิบายไว้แล้วก่อนหน้านี้

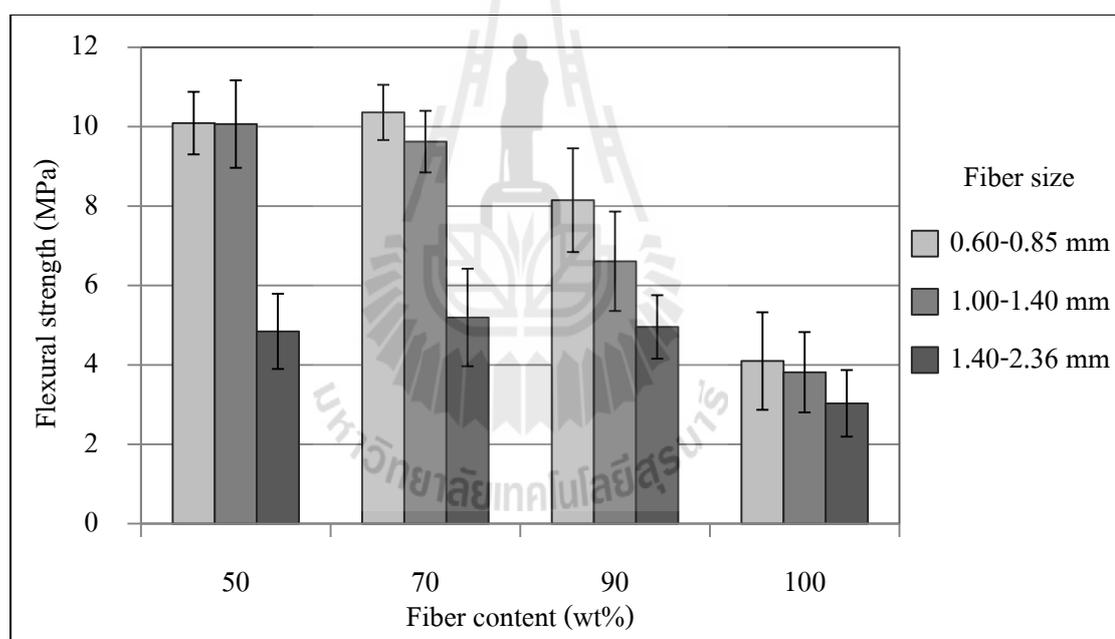
ตารางที่ 5.13 แสดงค่าการต้านทานแรงดัดโค้ง และค่ามอดูลัสแรงดัดโค้งของชีนทดสอบในแต่ละสูตรจากลำต้นมันสำปะหลังและหัวมันสำปะหลังสด

| ขนาดเส้นใย (mm) | ปริมาณเส้นใย (wt%) | ปริมาณสารยึดเกาะ (wt%) | การต้านทานแรงดัดโค้ง (MPa) | มอดูลัสแรงดัดโค้ง (MPa) |
|-----------------|--------------------|------------------------|----------------------------|-------------------------|
| 0.60-0.85 | 50 | 50 | 10.09 ± 0.79 | 1,661 ± 91 |
| | 70 | 30 | 10.35 ± 0.70 | 1,495 ± 75 |
| | 90 | 10 | 8.15 ± 1.30 | 1,096 ± 134 |
| | 100 | 0 | 4.10 ± 1.22 | 616 ± 96 |
| 1.00-1.40 | 50 | 50 | 10.06 ± 1.10 | 1,600 ± 143 |
| | 70 | 30 | 9.62 ± 0.77 | 1,459 ± 69 |
| | 90 | 10 | 6.61 ± 1.25 | 1,014 ± 169 |
| | 100 | 0 | 3.81 ± 1.01 | 570 ± 131 |
| 1.40-2.36 | 50 | 50 | 4.84 ± 0.95 | 1,224 ± 132 |
| | 70 | 30 | 5.19 ± 1.22 | 1,258 ± 134 |
| | 90 | 10 | 4.96 ± 0.80 | 979 ± 229 |
| | 100 | 0 | 3.03 ± 0.84 | 473 ± 132 |

หมายเหตุ : ข้อมูลแสดงในรูปของค่าเฉลี่ย ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

ค่าการต้านทานแรงดัดโค้งของชีนทดสอบจากลำต้นมันสำปะหลังและหัวมันสำปะหลังสดแต่ละสูตร แสดงในตารางที่ 5.13 และรูปที่ 5.29 พบว่าค่าการต้านทานแรงดัดโค้งของชีนทดสอบมีค่าประมาณ 3.03-10.09 MPa เมื่อเปรียบเทียบค่าการต้านทานแรงดัดโค้งของชีนทดสอบจากลำต้นมันสำปะหลังและหัวมันสำปะหลังสดกับค่าการต้านทานแรงดัดโค้งของชีนทดสอบจากหัวมันสำปะหลังสดล้วนบ่งชี้ได้ว่า การเติมเส้นใยลงไปในสูตรจะทำให้ค่า

การต้านทานแรงดัดโค้งของชิ้นทดสอบเพิ่มขึ้น เนื่องจากการมีอยู่ของเส้นใยในสูตรผสมจะทำให้ความหนืดของของผสมเพิ่มขึ้น ส่งผลให้การฟองตัวของของผสมลดลง จำนวนเซลล์เฉลี่ยขนาดเล็กเพิ่มขึ้น ผนังเซลล์หนาขึ้น และความหนาแน่นมากขึ้น (Soykabkeaw et al., 2004; Carr et al., 2006; Cinelli et al., 2006; Benezet et al., 2012) ซึ่งปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นนี้ล้วนแต่เป็นส่วนปรับปรุงสมบัติทางกลของชิ้นทดสอบ ทั้งนี้เส้นใยต้นมันสำปะหลังที่ใช้ในการเสริมแรงมีปฏิสัมพันธ์ที่ดีกับเมทริกซ์ เนื่องจากมีหมู่ฟังก์ชันทางเคมีที่คล้ายกัน ส่งผลให้ความสามารถในการถ่ายเทความเค้นที่กระทำกับเมทริกซ์ไปยังเส้นใยได้ดียิ่งขึ้น (Soykabkeaw et al., 2004) แต่ทั้งนี้ก็มีรายงานว่า การเติมเส้นใยข้าวโพดขนาดเล็กในปริมาณมากกว่า 30% (เส้นใยผงขนาดประมาณ 0.188 mm) ลงในภาคโพลีเมอริกแบบไม่ดัดแปรนั้น ไม่ได้เป็นการเสริมแรงแต่อย่างใด ซึ่งการจะให้เส้นใยข้าวโพดเสริมแรงได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้นนั้นจำเป็นต้องมีโครงสร้างที่ยาวมากขึ้น (Cinelli et al., 2006)



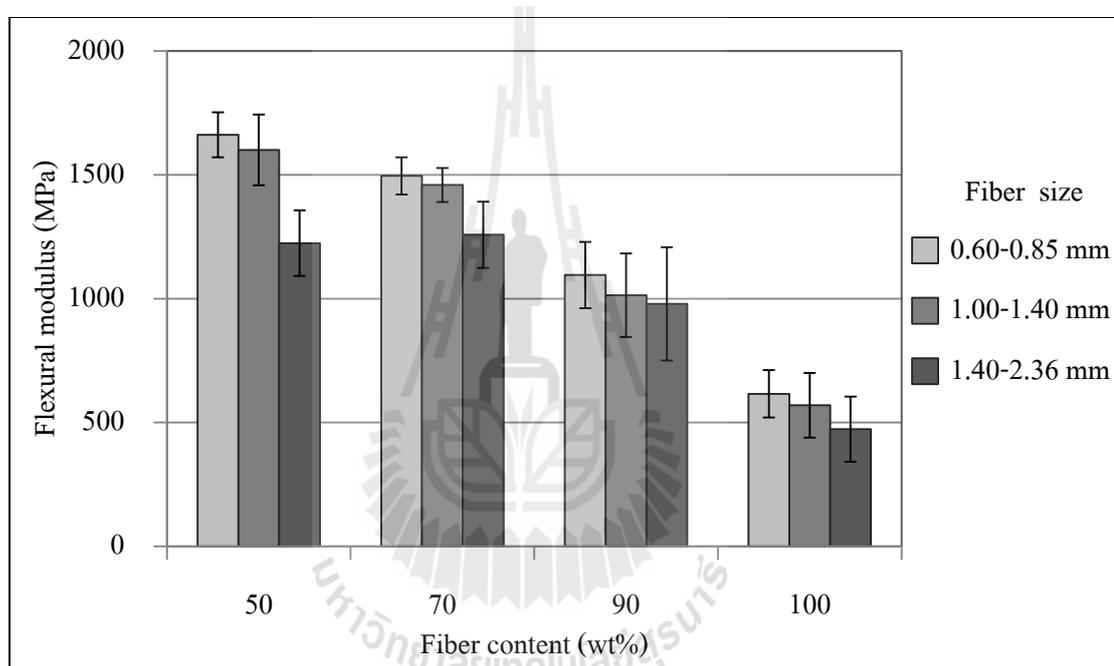
รูปที่ 5.29 อิทธิพลของขนาดเส้นใยและปริมาณเส้นใยต้นมันสำปะหลังต่อค่าการต้านทานแรงดัดโค้งของชิ้นทดสอบ

เมื่อพิจารณาอิทธิพลของปริมาณสารยึดเกาะจากหัวมันสำปะหลังสดต่อค่าการต้านทานแรงดัดโค้งของชิ้นทดสอบในขนาดเส้นใยเดียวกัน พบว่าชิ้นทดสอบจากลำต้นมันสำปะหลังล้วน (ไม่ได้เติมสารยึดเกาะจากหัวมันสำปะหลังสด) จะมีค่าการต้านทานแรงดัดโค้งที่ต่ำที่สุด เนื่องจากชิ้นทดสอบที่มีปริมาณเส้นใยสูง ๆ จะเกิดการขาดหายไปของการเกิดโพลีเมอร์ภายใน

และขาดความสม่ำเสมอในการจัดเรียงเส้นใยในปริมาณที่สูง นำไปสู่การลดลงของความแข็งแรง (Lawton et al., 2004; Cinelli et al., 2006) และเมื่อเพิ่มปริมาณของสารยึดเกาะจากหัวมันสำปะหลังลงไปในสูตร ค่าการต้านทานแรงดัดโค้งจะเพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากหัวมันสำปะหลังสดจะเข้าไปเติมเต็มช่องว่างระหว่างเส้นใย สอดคล้องกับผลการศึกษาความหนาแน่นและลักษณะทางสัณฐานวิทยาของชั้นทดสอบ (อยู่ในหัวข้อที่ 5.3.2 และ 5.3.4) นอกจากนี้ยังสอดคล้องกับรายงานการวิจัยของ Kinoshita et al. (2009) ที่ศึกษาสมบัติแรงดัดโค้งของวัสดุคอมโพสิตจากเศษไม้ (Woodchip) พบว่าค่าการต้านทานแรงดัดโค้งของชั้นทดสอบที่อัดขึ้นรูปจากเศษไม้เพียงอย่างเดียว (100%) จะเพิ่มสูงขึ้นอย่างเห็นได้ชัดเมื่อเติมตัวประสานย่อยสลายได้ (Biodegradable adhesive) ลงไปในสูตร อย่างไรก็ตาม การเติมสารยึดเกาะจากหัวมันสำปะหลังสดในปริมาณมากจะนำไปสู่การลดลงของค่าการต้านทานแรงดัดโค้ง เนื่องจากสารยึดเกาะจากหัวมันสำปะหลังสดนั้นมีเป็งเป็นองค์ประกอบหลักซึ่งจะมีสมบัติทางกลที่เปราะและแตกหักง่าย ตามที่ได้อธิบายไว้แล้วก่อนหน้านี้ โดยที่ค่าการต้านทานแรงดัดโค้งจะมีค่าสูงสุดที่ปริมาณเส้นใยต้นมันสำปะหลังต่อหัวมันสำปะหลังสดเท่ากับ 70:30 โดยน้ำหนัก

เมื่อพิจารณาอิทธิพลของขนาดเส้นใยต้นมันสำปะหลังต่อค่าการต้านทานแรงดัดโค้งของชั้นทดสอบในอัตราส่วนผสมเดียวกัน พบว่าเส้นใยต้นมันสำปะหลังที่มีขนาดเล็กกว่าจะทำให้ค่าการต้านทานแรงดัดโค้งของชั้นทดสอบมีค่าสูงกว่าเส้นใยที่ขนาดใหญ่กว่าเมื่อใช้หัวมันสำปะหลังเป็นสารยึดเกาะ เนื่องจากการใช้เส้นใยที่ขนาดเล็กกว่าจะทำให้ช่องว่าง หรือรอยโหว่ (Voids) ในชั้นทดสอบลดน้อยลง มีความหนาแน่นมากขึ้น และเส้นใยขนาดเล็กจะมีพื้นที่ผิวสัมผัสที่มากกว่า สามารถถ่ายเทความเค้นจากเมทริกซ์ไปยังเส้นใยได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น (Soykabkeaw et al., 2004; Kinoshita et al., 2009) ชั้นทดสอบที่ใช้เส้นใยต้นมันสำปะหลังขนาดประมาณ 1.40-2.36 mm จะมีค่าการต้านทานแรงดัดโค้งต่ำกว่าชั้นทดสอบจากเส้นใยขนาดอื่นอย่างมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งชั้นทดสอบที่มีปริมาณสารยึดเกาะสูง ๆ เนื่องจากช่วงของเส้นใยขนาดนี้ นอกจากจะมีเส้นใยเป็นส่วนประกอบแล้วยังมีส่วนของเปลือกไม้ และเนื้อเยื่อลำเลียงน้ำและอาหารเป็นส่วนประกอบอีกด้วย โดยที่ส่วนของเนื้อเยื่อลำเลียงเหล่านี้จะมีความหนาแน่นที่ต่ำกว่าส่วนที่เป็นเนื้อไม้ การมีอยู่ของเนื้อเยื่อลำเลียงน้ำและอาหารนั้น เห็นได้ชัดว่าทำให้ชั้นทดสอบมีความหนาแน่นที่ลดลง (อยู่ในหัวข้อที่ 5.2.2) ทั้งนี้ในงานวิจัยของ Lee and Mariatti (2008) ที่ทำการทดสอบสมบัติแรงดัดโค้งของพอลิเอสเตอร์แบบไม่อิ่มตัว (Unsaturated polyester, USP) พบว่าค่าการต้านทานแรงดัดโค้งของชั้นทดสอบพอลิเอสเตอร์แบบไม่อิ่มตัวที่เติมเส้นใยชานอ้อยในส่วนเปลือกนอก (Rind) จะมีค่าที่มากกว่าพอลิเอสเตอร์แบบไม่อิ่มตัวที่เติมเส้นใยชานอ้อยในส่วนแกนกลาง (Pith) เนื่องจากเส้นใยชานอ้อยในส่วนแกนกลางจะมีความหนาแน่นที่ต่ำกว่า มีโครงสร้างรูพรุนจากลูเมน (Lumen) ที่มากกว่า ส่งผลให้ชั้นทดสอบมีความแข็งแรงที่ต่ำกว่า นอกจากนี้ตามรายงานการวิจัยของ

Soykabkeaw et al. (2004) ที่ศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วนความยาวของเส้นใยต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใย (Aspect ratio) ต่อสมบัติทางกลของโฟมแข็งมันสำปะหลัง พบว่าเมื่ออัตราส่วนความยาวของเส้นใยต่อเส้นผ่านศูนย์กลางเส้นใยมีค่าเพิ่มขึ้น ส่งผลให้โฟมแข็งมีค่าการต้านทานแรงดัดโค้งที่สูงขึ้น นอกจากนี้ค่าการต้านทานแรงดัดโค้งของวัสดุคอมโพสิตจากเศษไม้และเส้นใยไม้ไผ่จะมีค่าสูงขึ้นตามความยาวและปริมาณของเส้นใยไม้ไผ่ที่เพิ่มขึ้น (Kinoshita et al., 2009) แต่อย่างไรก็ดีการเติมเส้นใยที่ต่างชนิดกันลงในโฟมแข็งข้าวโพดในปริมาณที่เท่ากันเพื่อเสริมแรง การต้านทานแรงดัดโค้งจะเพิ่มขึ้นเพียงบางชนิดเท่านั้น (Benezet et al., 2012)



รูปที่ 5.30 อิทธิพลของขนาดเส้นใยและปริมาณเส้นใยต้นมันสำปะหลัง ต่อค่ามอดูลัสแรงดัดโค้งของชิ้นทดสอบ

ค่ามอดูลัสแรงดัดโค้งเป็นค่าที่นิยมใช้บอกความแข็งแรงของวัสดุจากการทดสอบแรงดัดโค้ง โดยค่ามอดูลัสแรงดัดโค้งของชิ้นทดสอบจากหัวมันสำปะหลังสดล้วน (100%) มีค่าประมาณ 1,100 MPa ซึ่งมีค่ามากกว่าค่ามอดูลัสแรงดัดโค้งของโฟมแข็งข้าวโพดที่ยังไม่ได้เติมสารเติมแต่ง คือ 147.76 MPa (Usla and Polat, 2012) นอกจากนี้ยังมีค่าที่มากกว่าถาดโฟมแข็งมันฝรั่งแบบไม่ตัดแปรและไม่เติมสารเติมแต่ง คือ 85 MPa (Cinelli et al., 2006) จากรายงานสามารถบ่งชี้ได้ว่าการใช้หัวมันสำปะหลังเป็นสารยึดเกาะจะได้ชิ้นทดสอบที่มีความแข็งแรงที่มากกว่า

ขึ้นทดสอบที่ใช้ น้ำแข็งเป็นสารยึดเกาะ เนื่องจากการใช้หัวมันสำปะหลังสดเป็นสารยึดเกาะจะมีความหนาแน่นที่มากกว่า

ค่ามอดูลัสแรงดัดโค้งของขึ้นทดสอบจากถ้ำต้นมันสำปะหลังและหัวมันสำปะหลังสดแต่ละสูตร แสดงในตารางที่ 5.13 และรูปที่ 5.30 พบว่าค่ามอดูลัสแรงดัดโค้งของขึ้นทดสอบมีค่าประมาณ 473-1,661 MPa เมื่อเปรียบเทียบกับค่ามอดูลัสแรงดัดโค้งของขึ้นทดสอบจากถ้ำต้นมันสำปะหลังและหัวมันสำปะหลังสดกับค่ามอดูลัสแรงดัดโค้งของขึ้นทดสอบจากหัวมันสำปะหลังสดล้วนบ่งชี้ได้ว่า การเติมเส้นใยลงไปในสูตรจะทำให้ค่ามอดูลัสแรงดัดโค้งของขึ้นทดสอบเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกับผลการทดสอบการต้านทานแรงดัดโค้ง สาเหตุของค่าที่เพิ่มขึ้นเนื่องมาจากขึ้นทดสอบจะมีความหนาแน่นมากขึ้น ส่งผลให้วัสดุที่มีความแกร่งมากขึ้น

ผลการทดสอบค่ามอดูลัสแรงดัดโค้งมีแนวโน้มเดียวกันกับผลการทดสอบค่าการต้านทานแรงดัดโค้ง กล่าวคือเมื่อปริมาณเส้นใยของขึ้นทดสอบเพิ่มมากขึ้น (ปริมาณสารยึดเกาะจากหัวมันสำปะหลังสดลดลง) จะมีค่ามอดูลัสแรงดัดโค้งลดต่ำลง เนื่องจากการขาดหายไปของเนื้อโฟมภายใน และเมื่อพิจารณาถึงขนาดเส้นใยที่อัตราส่วนผสมเดียวกันพบว่าเส้นใยต้นมันสำปะหลังที่มีขนาดเล็กกว่า จะทำให้ค่ามอดูลัสแรงดัดโค้งของขึ้นทดสอบมีค่าสูงกว่าเส้นใยที่ขนาดใหญ่กว่า เนื่องจากการใช้เส้นใยที่ขนาดเล็กกว่าจะทำให้ช่องว่างในขึ้นทดสอบลดน้อยลงดังที่ได้อธิบายไว้แล้วข้างต้น

ในงานวิจัยนี้ไม่ได้ทำการศึกษาอิทธิพลของความชื้นสัมพัทธ์ในระหว่างการเก็บรักษา ซึ่งตามรายงานของ Benezet et al. (2012) กล่าวว่า การเพิ่มขึ้นของความชื้นสัมพัทธ์ทำให้โฟมแข็งตัว โปดมีสมบัติทางกลที่ตกลง แต่โฟมแข็งที่เติมเส้นใยสมบัติทางกลจะตกลงเล็กน้อย เพราะตามธรรมชาติแล้วเส้นใยจะมีความไวต่อน้ำที่น้อยกว่าแข็ง สำหรับค่าการต้านทานแรงดัดโค้งในงานวิจัยนี้สูงกว่าค่าการต้านทานแรงดัดโค้งของโฟมพอลิสไตรีน (Expanded polystyrene, EPS) ที่มีค่าประมาณ 1.3 MPa (อังศุมา บุญไชยสุริยา, 2554) และมีค่าการต้านทานแรงดัดโค้งที่มากกว่าโฟมแข็งตัว โปดที่เติมเส้นใยชนิดต่าง ๆ เพื่อเสริมแรง ซึ่งมีค่าอยู่ประมาณ 1.77-4.14 MPa (Benezet et al., 2012) และค่ามอดูลัสแรงดัดโค้งในงานวิจัยนี้ยังสูงกว่าค่ามอดูลัสแรงดัดโค้งของโฟมพอลิสไตรีนที่มีค่าประมาณ 105 MPa (Usia and Polat, 2012) อีกด้วย ดังนั้นภาชนะจากถ้ำต้นมันสำปะหลังและหัวมันสำปะหลังสดที่ผลิตได้นั้นมีโอกาสนำไปใช้แทนโฟมพอลิสไตรีนได้ในกรณีที่ต้องการแรงดัดโค้งสูง และเป็นอาหารที่แห้งพอควร

ถึงแม้ว่าค่าการต้านทานแรงดัดโค้งของขึ้นทดสอบจากถ้ำต้นมันสำปะหลังและหัวมันสำปะหลังสดจะมีค่าที่สูงกว่าโฟมพอลิสไตรีนในทุกสูตร แต่หากจะนำไปใช้งานจริงอาจจะมีข้อจำกัดในด้านการดูดซึมน้ำ อาจจำเป็นต้องปรับปรุงข้อด้อยส่วนนี้เพื่อสามารถให้ใช้งานจริงได้หลากหลายมากยิ่งขึ้น

ตารางที่ 5.14 ผลการคำนวณทางสถิติด้วยการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบสองทาง (Two-way ANOVA) ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ของค่าการต้านทานแรงดัดโค้งของชิ้นทดสอบ

| Source | DF | SS | MS | F | P |
|---------------|-----|---------------|---------|---------------------|-------|
| Fiber size | 2 | 306.700 | 153.350 | 147.63 | 0.000 |
| Fiber content | 3 | 445.841 | 148.614 | 143.07 | 0.000 |
| Interaction | 6 | 89.162 | 14.860 | 14.31 | 0.000 |
| Error | 108 | 112.185 | 1.039 | - | - |
| Total | 119 | 953.888 | - | - | - |
| S = 1.019 | | R-Sq = 88.24% | | R-Sq (adj) = 87.04% | |

ตารางที่ 5.15 ผลการคำนวณทางสถิติด้วยการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบสองทาง (Two-way ANOVA) ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ของค่ามอดูลัสแรงดัดโค้งของชิ้นทดสอบ

| Source | DF | SS | MS | F | P |
|---------------|-----|---------------|---------|---------------------|-------|
| Fiber size | 2 | 1189792 | 594896 | 32.91 | 0.000 |
| Fiber content | 3 | 16548750 | 5516250 | 305.12 | 0.000 |
| Interaction | 6 | 439239 | 73207 | 4.05 | 0.001 |
| Error | 108 | 1952520 | 18079 | - | - |
| Total | 119 | 20130300 | - | - | - |
| S = 134.5 | | R-Sq = 90.30% | | R-Sq (adj) = 89.31% | |

ผลจากการวิเคราะห์ความแปรปรวนในการทดสอบอิทธิพลของขนาดเส้นใย ต้นมันสำปะหลังและปริมาณของเส้นใยต้นมันสำปะหลังต่อค่าการต้านทานแรงดัดโค้งของชิ้นทดสอบแสดงในตารางที่ 5.14 พบว่าปัจจัยหลัก (Main effect) คือ ขนาดเส้นใยและปริมาณเส้นใยนั้นมีอิทธิพลต่อการต้านทานแรงดัดโค้งของชิ้นทดสอบอย่างมีนัยสำคัญ ($P\text{-value} < 0.05$) สำหรับความสัมพันธ์ของอิทธิพลร่วม (Interaction effect) ของ 2 ปัจจัย พบว่ามีผลต่อค่าการต้านทานแรงดัดโค้งของชิ้นทดสอบอย่างมีนัยสำคัญ ($P\text{-value} < 0.05$) เช่นกัน จากการพิจารณาค่าสถิติ F พบว่าปัจจัยหลักมีอิทธิพลต่อค่าการต้านทานแรงดัดโค้งที่ใกล้เคียงกัน โดยที่ขนาดของ

เส้นใยมีอิทธิพลมากกว่าอัตราส่วนผสมเล็กน้อย และมีค่ามากกว่าอิทธิพลร่วมระหว่าง 2 ปัจจัย ซึ่งผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนเป็นไปในทิศทางเดียวกับการวิเคราะห์การต้านทานแรงดึง กล่าวคือขึ้นทดสอบจากเส้นใยต้นมันสำปะหลังขนาดเล็กกว่าจะมีค่าการต้านทานแรงดัดโค้งมากกว่าเส้นใยขนาดใหญ่และค่าการต้านทานแรงดัดโค้งของขึ้นทดสอบจะเริ่มตกลงเมื่อปริมาณเส้นใยที่เพิ่มมากขึ้น

ผลจากการวิเคราะห์ความแปรปรวนในการทดสอบอิทธิพลของขนาดเส้นใย ต้นมันสำปะหลังและปริมาณของเส้นใยต้นมันสำปะหลังต่อค่ามอดูลัสแรงดัดโค้งของขึ้นทดสอบ แสดงในตารางที่ 5.15 พบว่าปัจจัยหลัก (Main effect) คือ ขนาดเส้นใยและปริมาณเส้นใยนั้นมีอิทธิพลต่อค่ามอดูลัสแรงดัดโค้งของขึ้นทดสอบอย่างมีนัยสำคัญ ($P\text{-value} < 0.05$) สำหรับความสัมพันธ์ของอิทธิพลร่วม (Interaction effect) ของ 2 ปัจจัย พบว่ามีผลต่อค่ามอดูลัสแรงดัดโค้งของขึ้นทดสอบอย่างมีนัยสำคัญ ($P\text{-value} < 0.05$) เช่นกัน จากการพิจารณาค่าสถิติ F พบว่าปัจจัยหลักของปริมาณเส้นใย (อัตราส่วนผสม) ที่ใช้ มีอิทธิพลต่อค่ามอดูลัสแรงดัดโค้งของขึ้นทดสอบมากกว่าขนาดของเส้นใยที่ใช้และอิทธิพลร่วมของ 2 ปัจจัย เนื่องจากมีค่าสถิติ F ที่สูงมากถึง 305.12 โดยผลการคำนวณทางสถิตินี้เป็นไปในแนวทางเดียวกันกับผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของความหนาแน่นของขึ้นทดสอบ

5.4.3 การทดสอบแรงกระแทก (Impact test)

ค่าการต้านทานแรงกระแทกบอถึงความสามารถในการดูดซับปริมาณพลังงานที่กระทำต่อขึ้นทดสอบด้วยแรงที่ตกกระทบใส่ขึ้นทดสอบอย่างรวดเร็ว สมบัติการต้านทานแรงกระแทกนี้นับเป็นอีกหนึ่งสมบัติทางกลที่สำคัญในการพิจารณาสำหรับเครื่องจักรหรือชิ้นงานที่มีการใช้งานเกี่ยวกับการรับแรง จากผลการศึกษาการทดสอบแรงดึงพบว่าขึ้นทดสอบในงานวิจัยนี้แสดงพฤติกรรมเป็นวัสดุเปราะ (Brittle) ดังนั้นในการทดสอบแรงกระแทกจึงไม่ได้ทำรอยบากให้แก่ขึ้นทดสอบ ทั้งนี้การทำรอยบากให้แก่ขึ้นทดสอบนั้นจะทำหน้าที่เป็นจุดรวมแรง (Stress concentration) เพื่อลดพฤติกรรมการเสียรูปแบบถาวร และลดการกระจายพลังงาน เพื่อเหนี่ยวนำให้เกิดการแตกหักที่บริเวณหลังรอยบาก พลังงานที่วัสดุเปราะดูดซับไว้จากการทำลายขึ้นทดสอบนั้นจะเป็นผลรวมของ พลังงานที่เริ่มทำให้ขึ้นทดสอบแตกหัก พลังงานที่เพิ่มการแตกหักไปยังอีกฝั่งของขึ้นทดสอบ และพลังงานที่ใช้ในการตีขึ้นทดสอบส่วนที่แตกหักออกไป โดยในที่นี้จะไม่คิดผลกระทบจากการสูญเสียพลังงานในการกระแทกไปกับแรงเสียดทานต่าง ๆ ของเครื่องมือทดสอบ

ตารางที่ 5.16 แสดงค่าการต้านทานแรงกระแทกของขึ้นทดสอบในแต่ละสูตร
จากลำต้นมันสำปะหลังและหัวมันสำปะหลังสด

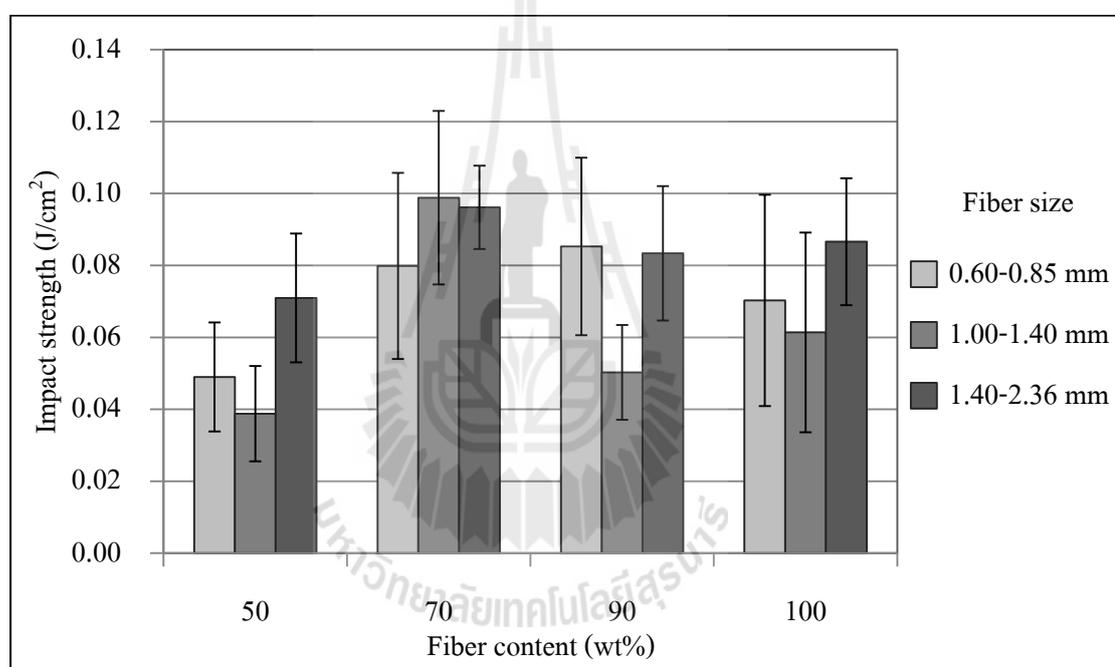
| ขนาดเส้นใย (mm) | ปริมาณเส้นใย (wt%) | ปริมาณสารยึดเกาะ (wt%) | การต้านทานแรงกระแทก (J/cm ²) |
|--------------------|-----------------------|---------------------------|---|
| 0.60-0.85 | 50 | 50 | 0.05 ± 0.02 |
| | 70 | 30 | 0.08 ± 0.03 |
| | 90 | 10 | 0.09 ± 0.02 |
| | 100 | 0 | 0.07 ± 0.03 |
| 1.00-1.40 | 50 | 50 | 0.04 ± 0.01 |
| | 70 | 30 | 0.10 ± 0.02 |
| | 90 | 10 | 0.05 ± 0.01 |
| | 100 | 0 | 0.06 ± 0.03 |
| 1.40-2.36 | 50 | 50 | 0.07 ± 0.02 |
| | 70 | 30 | 0.10 ± 0.01 |
| | 90 | 10 | 0.08 ± 0.02 |
| | 100 | 0 | 0.09 ± 0.02 |

หมายเหตุ : ข้อมูลแสดงในรูปของค่าเฉลี่ย ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

จากการทดสอบแรงกระแทกพบว่ารูปแบบความเสียหายของขึ้นทดสอบเป็นแตกหักอย่างสมบูรณ์ (Complete break) กล่าวคือ ขึ้นทดสอบจะแตกหักแยกออกจากกันเป็น 2 ชิ้นหรือมากกว่า ซึ่งหากขึ้นทดสอบไม่เกิดการแตกหัก (Non-break) จำเป็นต้องเพิ่มความจุของเพนดูลัมสำหรับค่าการต้านทานแรงกระแทกของขึ้นทดสอบจากหัวมันสำปะหลังสดล้วน (100%) จะมีค่าประมาณ 0.03 J/cm² แต่ในงานวิจัยเกี่ยวกับภาชนะย่อยสลายได้โดยใช้แป้งเป็นหลักนั้นไม่นิยมทดสอบการต้านทานแรงกระแทก ดังนั้นจึงไม่มีการเปรียบเทียบค่าการต้านทานแรงกระแทกของโพมแป้งที่ยังไม่ได้เติมสารเติมแต่งกับขึ้นทดสอบจากหัวมันสำปะหลังสดล้วน

ค่าการต้านทานแรงกระแทกของขึ้นทดสอบจากลำต้นมันสำปะหลังและหัวมันสำปะหลังสดแต่ละสูตร แสดงในตารางที่ 5.16 และรูปที่ 5.31 พบว่าค่าการต้านทานแรงกระแทกของขึ้นทดสอบมีค่าประมาณ 0.04-0.10 J/cm² เมื่อเปรียบเทียบค่าการต้านทานแรงกระแทกของขึ้นทดสอบจากลำต้นมันสำปะหลังและหัวมันสำปะหลังสดกับค่าการต้านทานแรงกระแทกของขึ้นทดสอบจากหัวมันสำปะหลังสดล้วนบ่งชี้ได้ว่า การเติมเส้นใยต้นมันสำปะหลังลงไปในสูตรจะ

ทำให้ค่าการต้านทานแรงกระแทกของชิ้นทดสอบเพิ่มขึ้นเล็กน้อย มีความเป็นไปได้ว่าชิ้นทดสอบที่เติมเส้นใยขนาดเล็กจะต้านทานต่อแรงกระแทกได้น้อย ซึ่งผลการทดสอบสอดคล้องกับงานวิจัยของ Kinoshita et al. (2009) ที่ทำการเปรียบเทียบค่าการต้านทานแรงกระแทกของวัสดุคอมโพสิตจากเศษไม้ (Woodchip) เพียงอย่างเดียวโดยที่ไม่ได้เติมตัวประสาน (เศษไม้ 100%) กับวัสดุคอมโพสิตจากเศษไม้ที่เติมตัวประสานย่อยสลายได้ (Biodegradable adhesive) ลงไปในสูตร พบว่าการเติมตัวประสานนี้ลงไปวัสดุคอมโพสิตจากเศษไม้ 100% ทำให้ค่าการต้านทานแรงกระแทกเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยเท่านั้น แต่เมื่อเติมเส้นใยไม้ไผ่ลงไปในสูตร ค่าการต้านทานแรงกระแทกจะเพิ่มขึ้นตามความยาวและปริมาณของเส้นใยไม้ไผ่ให้เห็นได้ชัด



รูปที่ 5.31 อิทธิพลของขนาดเส้นใยและปริมาณเส้นใยต้นมันสำปะหลัง ต่อค่าการต้านทานแรงกระแทกของชิ้นทดสอบ

เมื่อพิจารณาอิทธิพลของปริมาณสารยึดเกาะจากหัวมันสำปะหลังสดต่อค่าการต้านทานแรงกระแทกของชิ้นทดสอบในขนาดเส้นใยเดียวกัน พบว่าชิ้นทดสอบจากลำต้นมันสำปะหลังและหัวมันสำปะหลังสดเท่ากับ 50:50 โดยน้ำหนัก จะมีค่าการต้านทานแรงกระแทกที่ต่ำที่สุด ซึ่งมีค่าที่ใกล้เคียงกับชิ้นทดสอบจากหัวมันสำปะหลังสดล้วน จากการที่เติมเส้นใยต้นมันสำปะหลังในปริมาณ 50% โดยน้ำหนัก และทำให้ค่าการต้านทานแรงกระแทกปรับปรุงขึ้น

เล็กน้อยนั้น อาจบอกได้ว่าชั้นทดสอบที่มีปริมาณเส้นใยต่ำ ๆ สำหรับเส้นใยขนาดเล็กอาจจะแสดงตัวเป็นจุดบกพร่อง (Defect) ที่จะส่งเสริมให้เกิดรอยร้าวระหว่างชั้นทดสอบ แทนที่จะเป็นการเสริมแรงจากการถ่ายเทแรงกระทำจากพอลิเมอร์เมทริกซ์มายังเส้นใย ค่าการต้านทานแรงกระทำจะเพิ่มสูงขึ้นเมื่อปริมาณเส้นใยต้นมันสำปะหลังเป็น 70% โดยน้ำหนัก และเริ่มลดลงเล็กน้อยเมื่อมีปริมาณเส้นใยต้นมันสำปะหลังเป็น 90% และ 100% โดยน้ำหนัก ตามลำดับ ซึ่งค่าการต้านทานแรงกระทำที่เริ่มลดลงนี้ มีสาเหตุจากการไม่มีอยู่ของสารยึดเกาะ ทำให้ความแข็งแรงของชั้นทดสอบลดลง ตามเหตุผลที่ได้อธิบายไปแล้วก่อนหน้านี้

เมื่อพิจารณาอิทธิพลของขนาดเส้นใยต้นมันสำปะหลังต่อค่าการต้านทานแรงกระทำของชั้นทดสอบในอัตราส่วนผสมเดียวกัน พบว่าเส้นใยต้นมันสำปะหลังที่มีขนาดประมาณ 1.40-2.36 mm จะมีค่าการต้านทานแรงกระทำของชั้นทดสอบที่มากที่สุด รองลงมาจะเป็นชั้นทดสอบที่ใช้เส้นใยขนาดประมาณ 0.60-0.85 mm และ 1.00-1.40 mm ตามลำดับ ซึ่งผลการศึกษานี้เป็นไปในแนวทางเดียวกันกับงานวิจัยของ Kinoshita et al. (2009) ที่กล่าวว่าชั้นทดสอบจากเศษไม้ที่มีขนาดใหญ่กว่าจะมีค่าการต้านทานแรงกระทำที่มากกว่าชั้นทดสอบจากเศษไม้ที่มีขนาดเล็กกว่า ในทางตรงข้ามกันชั้นทดสอบจากเศษไม้ที่มีขนาดเล็กกว่าจะมีค่าการต้านทานแรงดัดโค้งที่มากกว่า ซึ่งในกรณีของการทดสอบแรงดัดโค้ง ชั้นทดสอบจะแตกหักจากการขยายตัวของรอยแตกของเมทริกซ์พอลิเมอร์ตามความเค้นแรงดึงที่เพิ่มขึ้น จึงถือได้ว่าผลกระทบของการมีอยู่ของสารยึดเกาะระหว่างช่องว่างภายในชั้นทดสอบส่งผลมากกว่าอิทธิพลของเส้นใยยาว ในทางกลับกันถึงแม้ว่าชั้นทดสอบแรงกระทำจะแตกหักจากการขยายของรอยแตกเมื่อความเค้นแรงดึงที่เพิ่มขึ้นเช่นกัน แต่เส้นใยที่ยาว ๆ จะส่งผลกระทบแก่ชั้นทดสอบก่อนการแตกหัก โดยค่าความต้านทานในการดึงเส้นใยยาวกว่าให้ออกมาจากชั้นทดสอบนั้นจะมีค่ามากกว่าการดึงเส้นใยขนาดเล็กกว่า

ค่าการต้านทานแรงกระทำในงานวิจัยนี้ใกล้เคียงกับค่าการต้านทานแรงกระทำของโฟมพอลิสไตรีน (Expanded polystyrene, EPS) ด้วยการทดสอบแบบมีรอยบาก คือ ประมาณ 0.2-0.5 J/cm² นอกจากนี้ยังมีค่าใกล้เคียงกับคอมโพสิตจากเศษไม้เพียงอย่างเดียว คือ ประมาณ 0.2-0.4 J/cm² (Kinoshita et al., 2009) ทั้งนี้ไม่ได้ทำการเปรียบเทียบกับค่าการต้านทานแรงกระทำกับถาดโฟมแข็งย่อยสลายได้กับงานวิจัยอื่น ๆ ตามเหตุผลที่ได้ชี้แจงไว้แล้วข้างต้น และค่าการต้านทานแรงกระทำในงานวิจัยนี้มีค่าที่ต่ำกว่าเมื่อเทียบกับการทดสอบแรงกระทำกับพลาสติกอื่น ๆ (Lee and Mariatti, 2008) ซึ่งค่าจากการทดสอบที่ต่ำนี้อาจจะวัดค่าพลังงานของการดูดซับได้ยากจากข้อจำกัดของเครื่องมือทดลอง อาจจะแก้ไขด้วยการปรับเปลี่ยนขนาดความจุของเพนดูลัมที่รองรับได้ หรือการเปลี่ยนวิธีการทดสอบใหม่ตามมาตรฐานกำหนด (ASTM D256-10 Test Method C)

จากผลการศึกษาค่าการต้านทานแรงกระแทกที่ต่ำนี้ อาจจะเพิ่มขึ้นได้จากการปรับเปลี่ยนขนาดของชั้นทดสอบ เช่น เพิ่มความหนาของชั้นทดสอบ หรือการเติมเส้นใยยาวลงในสูตร แต่อย่างไรก็ดีเมื่อภาชนะย่อยสลายได้ประเภทใช้ครั้งเดียวแล้วทิ้งนั้นถูกแรงกระแทกมากระทำ เช่น การทำภาชนะดังกล่าวตกพื้น เป็นต้น ซึ่งในการใช้งานจริงอาจจะไม่ได้สนใจว่าภาชนะนั้นจะเกิดการเปลี่ยนแปลงหรือเสียรูปเท่าใดนัก เนื่องจากมีวัตถุประสงค์การใช้งานที่แตกต่างจากภาชนะจำพวกพลาสติก

ตารางที่ 5.17 ผลการคำนวณทางสถิติด้วยการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบสองทาง (Two-way ANOVA) ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ของค่าการต้านทานแรงกระแทกของชั้นทดสอบ

| Source | DF | SS | MS | F | P |
|---------------|-----|---------------|-----------|---------------------|-------|
| Fiber size | 2 | 0.0088000 | 0.0044000 | 10.18 | 0.000 |
| Fiber content | 3 | 0.0202337 | 0.0067446 | 15.60 | 0.000 |
| Interaction | 6 | 0.0078935 | 0.0013156 | 3.04 | 0.009 |
| Error | 96 | 0.0415084 | 0.0004324 | - | - |
| Total | 107 | 0.0784357 | - | - | - |
| S = 0.02079 | | R-Sq = 47.08% | | R-Sq (adj) = 41.02% | |

ผลจากการวิเคราะห์ความแปรปรวนในการทดสอบอิทธิพลของขนาดเส้นใยต้นมันสำปะหลังและปริมาณของเส้นใยต้นมันสำปะหลังต่อสมบัติการต้านทานแรงกระแทกของชั้นทดสอบแสดงในตารางที่ 5.17 พบว่าปัจจัยหลัก (Main effect) คือ ขนาดเส้นใยและปริมาณเส้นใยนั้นมีอิทธิพลต่อการต้านทานแรงกระแทกของชั้นทดสอบอย่างมีนัยสำคัญ ($P\text{-value} < 0.05$) สำหรับความสัมพันธ์ของอิทธิพลร่วม (Interaction effect) ของ 2 ปัจจัย พบว่ามีผลต่อการต้านทานแรงกระแทกของชั้นทดสอบอย่างมีนัยสำคัญ ($P\text{-value} < 0.05$) เช่นกัน จากการพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจที่ปรับแล้ว (Adjusted R-Squared, Adj-R^2) เท่ากับ 41.02% หมายความว่าตัวแปรอิสระที่มีอยู่ทั้งปัจจัยหลัก และปัจจัยร่วมนั้นมีผลต่อค่าการต้านทานแรงกระแทกเพียง 41.02% และยังมีผลของตัวแปรที่ไม่ได้ควบคุมหรือควบคุมไม่ได้ (Error) ที่มีผลต่อค่าการต้านทานแรงกระแทกเท่ากับ 58.98% ทั้งนี้ตามปกติค่า Adj-R^2 ที่จะบ่งชี้ได้ว่าสมการถดถอยที่ได้มานั้นมีความเหมาะสมกับข้อมูลควรมีค่าน้อยกว่า 75% สาเหตุที่การประมาณค่า Adj-R^2 ได้ค่านี้น้อยเนื่องจากผลการทดลองมีค่าความผิดพลาดอยู่พอควร สังเกตได้จากแถบค่าผิดพลาด (Error bar) ดังแสดงใน

รูปที่ 5.31 ซึ่งในการทดสอบแรงกระแทกนี้เป็นการให้แรงกระทำแบบจับปล้น (Dynamic test) แก่ชิ้นทดสอบที่มีความเป็นเนื้อเดียวกันน้อยกว่าชิ้นทดสอบจำพวกพลาสติก ทำให้มีพฤติกรรมของการแตกหักที่แตกต่างกันอยู่บ้างในการทดสอบกรณีเดียวกัน

5.5 ผลการเลือกสูตรที่เหมาะสมที่สุด

ชิ้นทดสอบที่ผลิตออกมาในแต่ละสูตรนั้นมีข้อเด่น ข้อด้อยที่แตกต่างกันออกไป บางสูตรรับแรงกระแทกได้ดีแต่ดูดซึมน้ำได้มากเกินไป บางสูตรมีสมบัติทางกลที่ดีแต่มีความหนาแน่นมากเกินไป ทั้งนี้เพื่อให้ง่ายต่อการเลือกสูตรที่เหมาะสมที่สุดในการนำไปประยุกต์ใช้งานจริงต่อไปนั้น จำเป็นต้องเลือกใช้เทคนิคการวิเคราะห์แบบหลายปัจจัย (Multi-criteria decision analysis, MCDA) โดยจะเลือกชิ้นงานที่มีคะแนนรวมสูงที่สุด ซึ่งค่าคะแนนรวมคำนวณได้ตามสมการที่ 4.2 ปัจจัยที่เลือกมาใช้ในการวิเคราะห์ คือ ความหนาแน่น การดูดซึมน้ำ การต้านทานแรงดัดโค้ง การต้านทานแรงดึง โมดูลัสของยัง เปอร์เซ็นต์การยืดตัว และการต้านทานแรงกระแทก หากพิจารณาค่าคะแนนความสำคัญสำหรับลักษณะที่จะนำไปประยุกต์ใช้สำหรับใช้ครั้งเดียวแล้วทั้งนั้น จะให้น้ำหนักมากไปที่การดูดซึมน้ำและการต้านทานแรงดัดโค้ง เนื่องจากลักษณะที่ดีควรจะต้านทานความน้ำได้ในระดับหนึ่งก่อนที่จะทิ้ง และในการถือลักษณะที่ชอบด้านใดด้านหนึ่งนั้นเปรียบเสมือนการเพิ่มภาระกรรมแบบดัดโค้ง ในส่วนของสมบัติอื่น ๆ จะให้คะแนนความสำคัญที่ลดหลั่นกันไป ตามตารางที่ 4.5 หากเลือกตามความเหมาะสมจะได้ลักษณะย่อยสลายได้ที่มีความหนาแน่นต่ำ ค่าการดูดซึมน้ำต่ำ ค่าการต้านทานแรงดัดโค้งสูง ค่าการต้านทานแรงดึงขาดสูง ค่าโมดูลัสของยังสูง ค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัวสูง และค่าการต้านทานแรงกระแทกสูง

ค่าคะแนนรวมของสมบัติชิ้นทดสอบจากลำดับมันสำปะหลังแสดงในตารางที่ 5.18 พบว่า สูตรที่ได้คะแนนรวมสูงสุด คือ ชิ้นทดสอบที่มีขนาดเส้นใยต้นมันสำปะหลังเป็น 0.60-0.85 mm และปริมาณของลำดับมันสำปะหลังและหัวมันสำปะหลังสดเท่ากับ 70:30 โดยน้ำหนัก ได้คะแนนเท่ากับ 84 คะแนน จากคะแนนเต็ม 100 คะแนน สูตรที่รองลงมา คือ ชิ้นทดสอบที่มีขนาดเส้นใยต้นมันสำปะหลังเป็น 1.00-1.40 mm และมีอัตราส่วนผสมเดียวกัน ได้คะแนนเท่ากับ 83 คะแนน สำหรับสูตรที่ได้คะแนนรวมน้อยที่สุดคือ ชิ้นทดสอบที่มีขนาดเส้นใยต้นมันสำปะหลังเป็น 1.40-2.36 mm และปริมาณของลำดับมันสำปะหลังและหัวมันสำปะหลังสดกับ 100:0 โดยน้ำหนัก ได้คะแนนเท่ากับ 32.5 คะแนน

ชิ้นทดสอบที่ไม่ได้เติมสารยึดเกาะจากหัวมันสำปะหลังสด (ชิ้นทดสอบจากลำดับมันสำปะหลังล้วน) จะมีค่าคะแนนรวมที่ต่ำกว่าสูตรที่เติมสารยึดเกาะในขนาดเส้นใยเดียวกัน แต่เมื่อเติมสารยึดเกาะมากจนเกินไปจะทำให้ค่าคะแนนรวมนั้นลดน้อยลง เนื่องจากสารยึดเกาะจากหัว

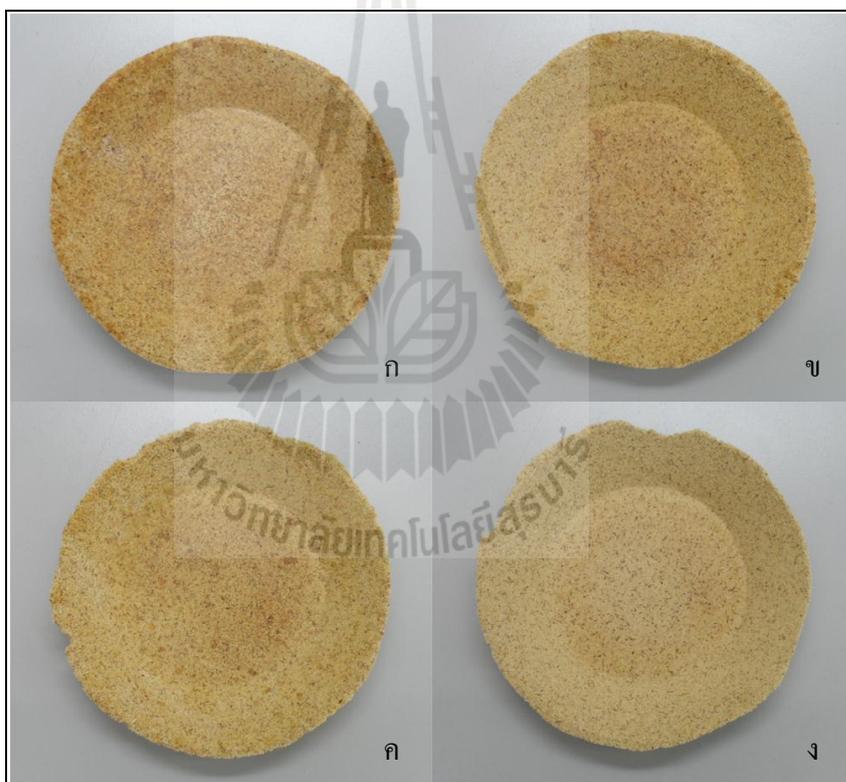
มันสำปะหลังสดนั้นจะส่งผลให้ชั้นทดสอบมีความเปราะและมีความชอบน้ำ (Hydrophilic) มากยิ่งขึ้น อัตราส่วนผสมที่มีปริมาณของลำต้นมันสำปะหลังและหัวมันสำปะหลังสดเท่ากับ 70:30 โดยน้ำหนัก นั้นเป็นอัตราส่วนค่ากลาง ๆ ที่ใช้ในการทดลองจึงมีความเหมาะสมและได้ลักษณะเด่นจากการทดสอบสมบัติทั้งทางกายภาพและทางกล และเมื่อพิจารณาที่อัตราส่วนผสมเดียวกัน ชั้นทดสอบที่มีขนาดของเส้นใยขนาดเล็กกว่าจะได้คะแนนรวมมากกว่าชั้นทดสอบที่มีขนาดเส้นใยใหญ่กว่าในทุกสูตร เนื่องจากเส้นใยขนาดเล็กกว่านั้นมีความเข้ากันได้ และเป็นเนื้อเดียวกันกับสารยึดเกาะจากหัวมันสำปะหลังสดมากกว่า ส่งผลให้ค่าการทดสอบสมบัติทางกายภาพและสมบัติทางกลนั้นมีค่าที่ดีกว่า สำหรับชั้นทดสอบที่มีเส้นใยขนาดประมาณ 1.40-2.36 mm นั้นจะมีค่าคะแนนรวมที่ต่ำกว่าใช้เส้นใยขนาดอื่น ๆ เนื่องจากในสูตรนี้จะมีส่วนที่เป็นเปลือกและเนื้อเยื่อลำเลียงน้ำและอาหารของต้นมันสำปะหลังเป็นจำนวนมาก มีความเข้ากันได้น้อยกว่าสารยึดเกาะจากหัวมันสำปะหลังสดน้อยกว่าสูตรที่ใช้เส้นใยขนาดเล็กกว่า

ตารางที่ 5.18 คะแนนรวมของสมบัติชั้นทดสอบจากลำต้นมันสำปะหลัง

| ขนาดเส้นใย | ปริมาณเส้นใย | ความหนาแน่น | การดูดซึมน้ำ | การต้านทานแรงดึง | การต้านทานแรงดึง | มอดูลัสของยัง | เปอร์เซ็นต์การยืดตัว | การต้านทานแรงกระแทก | รวม (100) |
|--------------|--------------|-------------|--------------|------------------|------------------|---------------|----------------------|---------------------|-----------|
| 0.60-0.85 mm | 50% | 10 | 90 | 90 | 90 | 100 | 30 | 30 | 75.0 |
| | 70% | 30 | 100 | 100 | 90 | 80 | 50 | 60 | 84.0 |
| | 90% | 50 | 90 | 70 | 70 | 50 | 50 | 70 | 70.0 |
| | 100% | 60 | 80 | 30 | 60 | 30 | 50 | 60 | 53.5 |
| 1.00-1.40 mm | 50% | 10 | 70 | 90 | 90 | 100 | 30 | 20 | 69.0 |
| | 70% | 40 | 90 | 90 | 100 | 80 | 50 | 80 | 83.0 |
| | 90% | 60 | 80 | 60 | 60 | 40 | 60 | 40 | 61.0 |
| | 100% | 70 | 70 | 30 | 30 | 30 | 70 | 50 | 48.0 |
| 1.40-2.36 mm | 50% | 20 | 50 | 40 | 70 | 80 | 30 | 60 | 51.0 |
| | 70% | 40 | 90 | 40 | 50 | 50 | 30 | 80 | 58.0 |
| | 90% | 60 | 70 | 40 | 30 | 30 | 50 | 70 | 50.0 |
| | 100% | 70 | 30 | 20 | 10 | 10 | 70 | 70 | 32.5 |

5.6 ผลการอัดขึ้นรูปภาชนะจากลำต้นมันสำปะหลัง

ในการอัดขึ้นรูปร่อนต้นมันสำปะหลังและหัวมันสำปะหลังสดเป็นรูปร่างภาชนะนั้น จะใช้แม่พิมพ์ที่แสดงในรูปที่ 3.11 และ 3.12 โดยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางวัดจากขอบของภาชนะประมาณ 12 cm ความลึกของภาชนะประมาณ 2 cm ความหนาของภาชนะประมาณ 2 mm สำหรับแม่พิมพ์ดังกล่าวได้ทำการชุบฮาร์ดโครเมียมไว้เพื่อให้สามารถแกะชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์ได้โดยง่าย จึงไม่จำเป็นต้องรองแม่พิมพ์ด้วยแผ่นเทฟลอนเหมือนกับการอัดขึ้นรูปขึ้นทดสอบแม่พิมพ์ที่ถูกออกแบบมาไว้ให้มีรูสันขนาดประมาณ 5×5 mm อยู่โดยรอบรูปทรงของภาชนะเพื่อไว้สำหรับให้วัสดุที่เติมไปมากนั้นล้นออกมาเป็นครีบ (Flash) จากนั้นจึงค่อยตัดขอบเหลือนั้นทิ้งไปก่อนนำไปใช้งานจริง



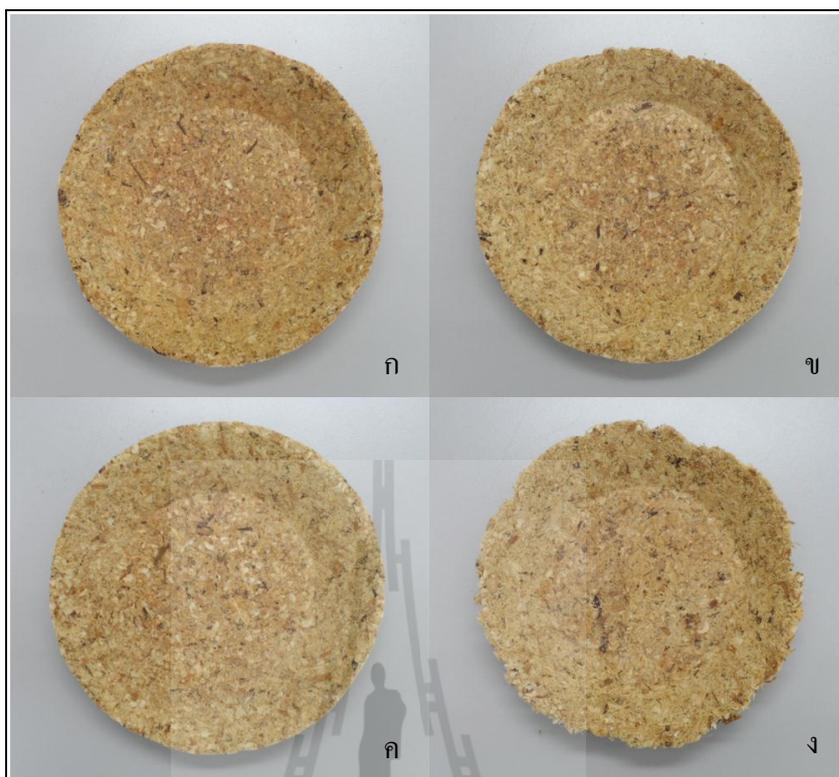
รูปที่ 5.32 ภาชนะย่อยสลายได้ที่มีขนาดเส้นใยประมาณ 0.60-0.85 mm และมีปริมาณต้นมันสำปะหลังและหัวมันสำปะหลังสดเท่ากับ (ก) 50:50; (ข) 70:30; (ค) 90:10 และ (ง) 100:0 โดยน้ำหนัก

ตารางที่ 5.19 ส่วนประกอบที่ใช้เตรียมภาชนะย่อยสลายได้จากลำต้นมันสำปะหลัง
และหัวมันสำปะหลังสด

| สูตร | ต้นมันสำปะหลัง (g) | หัวมันสำปะหลังสด (g) | ปริมาณวัตถุดิบที่ใช้ (g) |
|-----------------|-----------------------|-------------------------|-----------------------------|
| S:R = 50:50 wt. | 28.5 | 28.5 | 57 |
| S:R = 70:30 wt. | 35.0 | 15.0 | 50 |
| S:R = 90:10 wt. | 39.6 | 4.4 | 44 |
| S:R = 100:0 wt. | 40.0 | - | 40 |



รูปที่ 5.33 ภาชนะย่อยสลายได้ที่มีขนาดเส้นใยประมาณ 1.00-1.40 mm และมีปริมาณ
ต้นมันสำปะหลังและหัวมันสำปะหลังสดเท่ากับ (ก) 50:50; (ข) 70:30; (ค) 90:10
และ (ง) 100:0 โดยน้ำหนัก



รูปที่ 5.34 ภาพขณะย่อยสลายได้ที่มีขนาดเส้นใยประมาณ 1.40-2.36 mm และมีปริมาณ
ไขมันสำปะหลังและหัวมันสำปะหลังสดเท่ากับ (ก) 50:50; (ข) 70:30; (ค) 90:10
และ (ง) 100:0 โดยน้ำหนัก

หลังจากที่เตรียมวัตถุดิบในส่วนต่าง ๆ เรียบร้อยแล้วนั้น ปริมาณของผสมที่เติมลงในแม่พิมพ์และได้เป็นภาพขณะที่มีรูปร่างที่สมบูรณ์ คือ ประมาณ 40-57 g สำหรับปริมาณที่ใช้สำหรับสูตรต้นมันสำปะหลังล้วน คือ ประมาณ 40 g และปริมาณของส่วนผสมที่ใช้จะเพิ่มมากขึ้นตามปริมาณของสารยึดเกาะจากหัวมันสำปะหลังสดที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากการเติมหัวมันสำปะหลังสดที่มีความชื้นสูง ส่งผลให้ความหนาแน่นรวม (Bulk density) ของของผสมมีค่าน้อยกว่าสูตรที่ใช้ต้นมันสำปะหลังล้วน จึงจำเป็นต้องเพิ่มปริมาณของของผสมเพื่อเติมลงในแม่พิมพ์ให้สามารถขึ้นรูปได้เต็มขอบแม่พิมพ์พอดี ซึ่งการเพิ่มปริมาณของของผสมที่เติมลงในแม่พิมพ์นั้นสอดคล้องกับงานวิจัยของ Lawton et al. (2004) ที่เติมเส้นใยแอสเพน (Aspen fiber) ลงในถาดโฟมแข็งข้าวโพด โดยปริมาณของของผสมจะเพิ่มมากขึ้นตามปริมาณเส้นใยแอสเพนที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากการมีอยู่ของเส้นใยแอสเพนทำให้ของผสมนั้นมีความหนาแน่นรวมที่ลดลงเช่นกัน ทั้งนี้หากของผสมที่เติมลงในแม่พิมพ์มีปริมาณที่น้อยจนเกินไป พบว่านอกจากจะได้ภาพขณะที่มีรูปร่างไม่สมบูรณ์แล้ว พื้นผิว

บริเวณขอบของภาชนะจะไม่เรียบอีกด้วย เนื่องจากการใส่ของผสมนั้นจะใส่บริเวณตรงกลางของแม่พิมพ์ตัวเมีย เมื่อให้แรงดันแก่แม่พิมพ์ของผสมดังกล่าวจะไหลไปไม่ถึงขอบของแม่พิมพ์ แรงดันที่ให้แก่ของผสมจะเกิดแค่บริเวณตรงกลาง ที่บริเวณขอบของภาชนะจึงมีเนื้อที่ไม่แน่น และหากปริมาณของผสมที่เติมลงในแม่พิมพ์มีปริมาณที่มากจนเกินไป พบว่าจะมีปริมาณของครีบเหลือทิ้งและน้ำที่ต้องระเหยออกจากกระบวนการเป็นจำนวนมาก

กระบวนการอัดขึ้นรูปจะให้ความร้อนแก่แม่พิมพ์เปล่าที่อุณหภูมิ 150°C จนอุณหภูมิคงที่เต็มของผสมที่เตรียมไว้ลงในแม่พิมพ์ กดไล่อากาศและน้ำส่วนเกินออกจากของผสมประมาณ 3 ครั้ง และเพิ่มความดันอย่างช้า ๆ จนถึง 55 bar และคงไว้ที่อุณหภูมิและความดันดังกล่าวเป็นเวลา 15 นาที เมื่อเสร็จสิ้นกระบวนการอัด ชุดแม่พิมพ์จะถูกลှอนให้เย็นตัวภายใต้อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 5 นาที เพื่อป้องกันงานที่ได้บิดงอและแตกหัก ก่อนทำการแกะชิ้นงานที่ได้ออกจากแม่พิมพ์ด้วยเครื่องเป่าลม (Blower) เพื่อป้องกันงานที่ได้บิดงอและแตกหัก

ภาชนะย่อยสลายได้จากลำต้นมันสำปะหลังและหัวมันสำปะหลังสดที่มีขนาดเส้นใยและอัตราส่วนผสมที่แตกต่างกันแสดงในรูปที่ 5.32 5.33 และ 5.34 ภาชนะที่มีขนาดเส้นใยที่ใหญ่กว่า (รูปที่ 5.34) จะมีพื้นผิวที่ขรุขระกว่าภาชนะที่มีขนาดเส้นใยเล็กกว่าที่อัตราส่วนผสมเดียวกัน เนื่องจากมีส่วนประกอบของเปลือกไม้และเนื้อเยื่อลำเลียงน้ำและอาหารเป็นจำนวนมาก ภาชนะที่มีเพียงต้นมันสำปะหลังล้วน (รูปที่ 5.32(ง) 5.33(ง) และ 5.34(ง)) ขอบของภาชนะจะเสียหายได้ง่ายเนื่องจากการไม่มีอยู่ของสารยึดเกาะทำให้สมบัติทางกลไม่ดีเท่าที่ควร เมื่อสังเกตด้วยตาเปล่า สีของภาชนะจากลำต้นมันสำปะหลังจะมีสีที่เข้มขึ้นเมื่อปริมาณของสารยึดเกาะในแต่ละสูตรที่เพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากการมีอยู่ของหัวมันสำปะหลังนั้นเมื่อโดนความร้อนจะเกิดการกลายเป็นเจลและไหม้

5.7 การประมาณค่าต้นทุนการผลิต

ในการผลิตสินค้าต่าง ๆ นั้น จะต้องมีค่าใช้จ่ายที่ทางผู้ผลิตจ่ายออกไปเพื่อให้ได้จำนวนสินค้าตามที่กำหนด เรียกว่า ต้นทุนการผลิต ในการวิเคราะห์ราคาต้นทุนการผลิตระดับห้องปฏิบัติการนั้น โดยมากจะพิจารณาจาก ต้นทุนทางตรง ซึ่งเป็นค่าใช้จ่ายที่จ่ายออกไปจริง ๆ สำหรับใช้ในกระบวนการผลิตทั้งหมด เช่น ค่าวัตถุดิบ ค่าไฟฟ้า ค่าแรง เป็นต้น และมักจะไม่นำต้นทุนทางอ้อม หรือต้นทุนอื่น ๆ ที่เป็นส่วนประกอบในการผลิต (ค่าเสียหาย) เช่น ค่าเสื่อมราคา ค่าซ่อมแซม และค่าบำรุงรักษาอุปกรณ์ เป็นต้น นำมาพิจารณาด้วย

สำหรับการประมาณค่าต้นทุนการผลิตภาชนะย่อยสลายได้จากลำต้นมันสำปะหลังในระดับห้องปฏิบัติการนั้น จะพิจารณาเพียงแต่ค่าไฟฟ้าที่ใช้ในกระบวนการผลิต และค่าวัตถุดิบทางตรงเท่านั้น เลือกสูตรผสมที่เหมาะสมที่สุดนำมาใช้ในการประมาณค่าต้นทุน กล่าวคือเลือกใช้ภาชนะที่

ได้จากสูตรขนาดเส้นใยต้นมันสำปะหลังเป็น 0.60-0.85 mm และปริมาณของลำต้นมันสำปะหลัง และหัวมันสำปะหลังสดเท่ากับ 70:30 โดยน้ำหนัก

5.7.1 การประมาณค่าพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในกระบวนการผลิตภาชนะย่อยสลายได้

ในการประมาณค่าการใช้พลังงานไฟฟ้าในกระบวนการผลิตภาชนะย่อยสลายได้จากลำต้นมันสำปะหลังนั้นจะพิจารณาจากเครื่องใช้ไฟฟ้าหลัก ๆ ที่ใช้ในกระบวนการผลิต ประกอบด้วย เครื่องบดหยาบ เครื่องร้อนตะแกรง เครื่องผสมอาหาร และเครื่องอัดขึ้นรูปรีออน แสดงรายละเอียดการใช้งานตามตารางที่ 5.20

ตารางที่ 5.20 แสดงการคำนวณอัตราการใช้ไฟฟ้าในกระบวนการผลิตภาชนะย่อยสลายได้

| อุปกรณ์ไฟฟ้า | กำลังไฟฟ้า (kW) | ระยะเวลาในการใช้งาน (h) | หน่วยการใช้งาน (kW-h) |
|-------------------------|--------------------|----------------------------|--------------------------|
| เครื่องบดหยาบ | 1.125 | 0.1167 | 0.131 |
| เครื่องร้อนตะแกรง | 0.050 | 1.0000 | 0.050 |
| เครื่องผสมอาหาร | 0.250 | 0.1667 | 0.042 |
| เครื่องอัดขึ้นรูปรีออน | 2.000 | 1.2500 | 2.500 |
| อัตราการใช้ไฟฟ้าทั้งหมด | 2.723 หน่วย | | |

ลำต้นมันสำปะหลังที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีความยาวประมาณ 100-120 cm ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 2.0-3.5 cm ใช้ลำต้นมันสำปะหลัง 1 ลำ มีน้ำหนักประมาณ 500 g นำไปบดลดขนาดด้วยเครื่องบดหยาบประมาณ 5 นาที พร้อมทั้งบดลดขนาดหัวมันสำปะหลังสดน้ำหนักประมาณ 100 g ประมาณ 2 นาที จากนั้นนำต้นมันสำปะหลังที่บดหยาบเรียบร้อยแล้วนั้นไปร้อนตะแกรงเพื่อคัดแยกขนาดที่ต้องการ โดยจะร้อนตะแกรงครั้งละประมาณ 125 g เป็นเวลา 15 นาที ร้อนทั้งหมด 4 ครั้ง ในการร้อนตะแกรงแต่ละครั้งต้นมันสำปะหลังบดจะติดอยู่ที่ตะแกรงร้อน No. 30 อยู่ประมาณ 40% กล่าวคือจากลำต้นมันสำปะหลัง 1 ลำ เมื่อร้อนตะแกรงเรียบร้อยแล้วจะได้ต้นมันสำปะหลังบดขนาดที่ต้องการประมาณ 200 g และในส่วนของขั้นตอนการผสมต้นมันสำปะหลังสดและหัวมันสำปะหลังสดในอัตราส่วน 70:30 โดยน้ำหนัก ทำการผสมวัสดุด้วยเครื่องผสมอาหารเป็นเวลา 10 นาที สุดท้ายจะได้วัสดุผสมของต้นมันสำปะหลังสดและหัวมันสำปะหลังสดน้ำหนัก

ประมาณ 280 g ซึ่งในการขึ้นรูปภาชนะย่อยสลายได้ด้วยสูตรนี้จำนวน 1 ใบ จะใช้วัสดุผสมประมาณ 50 g ดังนั้นหากจะขึ้นรูปภาชนะด้วยสูตรผสมที่มีขนาดเส้นใยต้นมันสำปะหลังเป็น 0.60-0.85 mm และปริมาณของลำต้นมันสำปะหลังและหัวมันสำปะหลังสดเท่ากับ 70:30 โดยน้ำหนัก ด้วยลำต้นมันสำปะหลัง 1 ลำ จะได้ภาชนะย่อยสลายได้ทั้งสิ้น 5 ใบ

จากตารางที่ 5.20 พบว่าค่าการคำนวณอัตราการใช้ไฟฟ้าในการผลิตภาชนะย่อยสลายได้จากลำต้นมันสำปะหลังนั้นเท่ากับ 2.723 หน่วย ต่อการผลิตภาชนะทั้งสิ้นจำนวน 5 ใบ หากคิดอัตราการใช้ไฟฟ้าต่อการผลิตภาชนะย่อยสลายได้ 1 ใบ จะใช้ไฟฟ้าเท่ากับ 0.545 หน่วย สำหรับการคำนวณอัตราค่าไฟฟ้าในระดับห้องปฏิบัติการตามข้อมูลการใช้ไฟฟ้าของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค (2555) นั้น ตรงตามลักษณะการใช้งานแบบกิจการขนาดเล็กที่มีความต้องการพลังงานไฟฟ้าเฉลี่ยใน 15 นาที สูงสุดต่ำกว่า 30 kW โดยต่อผ่านเครื่องวัดหน่วยไฟฟ้าเครื่องเดียว และคำนวณอัตราค่าไฟฟ้าด้วยอัตราปกติ พิจารณาที่แรงดันต่ำกว่า 22 kV แสดงดังตารางที่ 5.21

ตารางที่ 5.21 อัตราค่าไฟฟ้าแบบปกติประเภทกิจการขนาดเล็กพิจารณาที่แรงดันต่ำกว่า 22 kV

| อัตราการใช้พลังงานไฟฟ้า | ค่าพลังงานไฟฟ้า (บาท/หน่วย) |
|---|-----------------------------|
| 150 หน่วยแรก (หน่วยที่ 0-150) | 2.7628 |
| 250 หน่วยต่อไป (หน่วยที่ 151-400) | 3.7362 |
| เกิน 400 หน่วยขึ้นไป (หน่วยที่ 401 เป็นต้นไป) | 3.9361 |

ที่มา : การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค (2555)

สามารถคำนวณค่าพลังงานไฟฟ้ารวมในกระบวนการผลิตภาชนะย่อยสลายได้ตามสมการที่ 5.4

$$Cost = W \times C \quad (5.4)$$

เมื่อ $Cost$ = ค่าพลังงานไฟฟ้ารวม (บาท)
 W = หน่วยการใช้ไฟฟ้า (kW-h)
 C = ค่าพลังงานไฟฟ้าต่อหน่วย (บาท/หน่วย)

ในการผลิตภาชนะย่อยสลายได้ 1 ใบ จะใช้อัตราการใช้พลังงานไฟฟ้าเท่ากับ 0.545 หน่วย เมื่อพิจารณาอัตราค่าไฟฟ้าประเภทกิจการขนาดเล็กที่แสดงดังตารางที่ 5.21 นั้น จะใช้อัตราการใช้พลังงานไฟฟ้าอยู่ในเงื่อนไขแรก คือ ใช้ไฟฟ้าไม่เกิน 150 หน่วย มีค่าพลังงานไฟฟ้าต่อหน่วยเท่ากับ 2.7628 บาท/หน่วย เมื่อคำนวณค่าพลังงานไฟฟ้ารวมตามสมการที่ 5.4 พบว่าในการผลิตภาชนะย่อยสลายได้จากลำต้นมันสำปะหลัง 1 ใบ นั้นจะต้องเสียค่าไฟฟ้าในการผลิตเท่ากับ 1.505 บาท (ในกรณีนี้ไม่ได้รวมถึงค่าบริการรายเดือน ค่าไฟฟ้าผันแปร (Ft) และค่าภาษีมูลค่าเพิ่ม)

5.7.2 การประมาณค่าวัตถุดิบที่ใช้ในกระบวนการผลิตภาชนะย่อยสลายได้

ในการประมาณค่าวัตถุดิบหลักในกระบวนการผลิตภาชนะย่อยสลายได้จากลำต้นมันสำปะหลังนั้น จะพิจารณาแก่วัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตภาชนะโดยตรงเท่านั้น เช่น ค่าลำต้นมันสำปะหลัง และค่าหัวมันสำปะหลังสด ซึ่งลำต้นมันสำปะหลังพันธุ์ห้วยบง 60 นั้นจะมีการแบ่งขายลำท่อนพันธุ์หลายราคาขึ้นอยู่กับแหล่งเพาะปลูก และคุณภาพของท่อนพันธุ์ มีตั้งแต่ 0.80-4 บาท โดยลำต้นมันสำปะหลังที่ใช้ในงานวิจัยราคาอยู่ที่ลำละประมาณ 1 บาท ที่ความยาวของท่อนประมาณ 100-120 cm สำหรับราคาของหัวมันสำปะหลังสดตามราคาหน้าโรงงานแปง ภายในอำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา อยู่ที่ประมาณ 2.50 บาท/กิโลกรัม (สมาคมโรงงานผู้ผลิตมันสำปะหลัง, 2557) การคำนวณค่าวัตถุดิบแสดงดังตารางที่ 5.22

ตารางที่ 5.22 แสดงการคำนวณค่าวัตถุดิบที่ใช้ในกระบวนการผลิตภาชนะย่อยสลายได้

| วัตถุดิบ | ราคา (บาท/กิโลกรัม) | ปริมาณที่ใช้ (g) | จำนวนเงิน (บาท) |
|-------------------------------------|------------------------|---------------------|--------------------|
| ลำต้นมันสำปะหลัง พันธุ์ห้วยบง 60 | 2.00 | 35 | 0.070 |
| หัวมันสำปะหลังสด พันธุ์ห้วยบง 60 | 2.50 | 15 | 0.0375 |
| ราคาค่าต้นทุนวัตถุดิบ | 0.108 บาท | | |

บทที่ 5

ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล

ในบทนี้จะกล่าวถึงการนำเสนอผลการทดลองทั้งหมดที่ได้ศึกษาในงานวิจัยนี้ โดยจะเริ่มจากผลการหาสภาวะที่เหมาะสมในกระบวนการอัดขึ้นรูป คือ หาอุณหภูมิ ความดัน และระยะเวลาที่ใช้ในกระบวนการอัด และชนิดสารยึดเกาะที่ใช้ในการทดลอง เพื่อให้ได้ชิ้นทดสอบที่มีค่าการต้านทานแรงดัดโค้งสูงที่สุด หลังจากที่ได้สภาวะต่าง ๆ ที่เหมาะสมแล้วนั้น จะนำค่าเงื่อนไขเหล่านั้น ใช้เป็นสภาวะในกระบวนการอัดขึ้นรูป เพื่อศึกษาอิทธิพลของขนาดเส้นใยต้นมันสำปะหลัง และอิทธิพลของอัตราส่วนผสมต่อสมบัติต่าง ๆ ของชิ้นทดสอบ ประกอบไปด้วย การวัดความหนา การทดสอบความหนาแน่น การทดสอบการดูดซึมน้ำ การศึกษาลักษณะพื้นฐานวิทยา การทดสอบสมบัติทางความร้อน การทดสอบแรงดึง การทดสอบแรงดัดโค้ง และการทดสอบแรงกระแทก จากค่าสมบัติต่าง ๆ ที่ทดสอบมาได้ นำไปสู่การเลือกสูตรที่เหมาะสมที่สุดและการอัดขึ้นรูปภาชนะในการใช้งานจริง ทั้งนี้ได้นำเสนอการประมาณค่าต้นทุนในการผลิตระดับห้องปฏิบัติการไว้ในท้ายบท

5.1 สภาวะการอัดขึ้นรูปที่เหมาะสม

กรรมวิธีการผลิตวัสดุย่อยสลายได้ทางชีวภาพจากแป้งนั้นมีหลักการที่คล้ายกับการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์พลาสติกจากปิโตรเคมี สามารถทำได้หลายวิธี เช่น กระบวนการอัดขึ้นรูป (Compression molding) กระบวนการฉีดขึ้นรูป (Injection molding) หรือกระบวนการอัดรีด (Extrusion process) เป็นต้น นอกจากนี้ในงานวิจัยเกี่ยวกับการผลิตวัสดุชีวฐาน (Bio-based materials) จากแป้งจะใช้กรรมวิธีการผลิตด้วยการอบด้วยแม่แบบร้อน (Baking in hot mold) ซึ่งเหมาะกับการผลิตโฟมแป้งความหนาแน่นต่ำ สำหรับในงานวิจัยนี้เลือกใช้กระบวนการอัดขึ้นรูปร้อนในการผลิตชิ้นทดสอบและภาชนะย่อยสลายได้ทางชีวภาพจากลำต้นมันสำปะหลัง เนื่องจากมีหลักการในการผลิตเครื่องอัดขึ้นรูปที่ง่าย และเป็นที่ยอมรับสำหรับกระบวนการผลิตงานเมลามีนทางการค้าทั่วไป

สำหรับการควบคุมคุณภาพของผลิตภัณฑ์ในกระบวนการผลิตให้ได้คุณภาพตามต้องการนั้น โดยทั่วไปสาเหตุที่ทำให้เกิดความแตกต่างกันในกระบวนการผลิตมาจาก 4 ปัจจัย คือ คน เครื่องจักร วัตถุดิบ และวิธีการ ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ผลิตชิ้นทดสอบและภาชนะย่อยสลายได้ทางชีวภาพจากลำต้นมันสำปะหลังด้วยเครื่องอัดขึ้นรูปร้อนที่จัดทำขึ้นเพียงเครื่องเดียวตลอดการทดลอง และผู้วิจัย

ผลการคำนวณการประมาณค่าต้นทุนในกระบวนการผลิตภาชนะย่อยสลายได้ทางชีวภาพจากลำต้นมันสำปะหลังสดด้วยสูตรผสมที่มีขนาดเส้นใยต้นมันสำปะหลังเป็น 0.60-0.85 mm และมีปริมาณของลำต้นมันสำปะหลังและหัวมันสำปะหลังสดเท่ากับ 70:30 โดยน้ำหนัก ซึ่งจะพิจารณาเฉพาะค่าไฟฟ้าที่ใช้ และค่าวัตถุดิบหลักเท่านั้น จะได้ว่าราคาในการผลิตภาชนะ 1 ใบ เท่ากับ 1.613 บาท

ซึ่งราคาดังกล่าวเป็นราคาสำหรับภาชนะทรงกลมขนาดประมาณ 12 cm และความหนาประมาณ 2 mm หากการออกแบบและผลิตแม่พิมพ์ในการอัดขึ้นรูปในอนาคตสามารถผลิตภาชนะที่ขนาดบางลง จะส่งผลให้ใช้ปริมาณของวัตถุดิบที่น้อยลง สามารถลดต้นทุนในกระบวนการผลิตลงได้อีก นอกจากนี้หากออกแบบให้สามารถขึ้นรูปภาชนะได้ทีละหลาย ๆ ใบต่อการอัดขึ้นรูปหนึ่งครั้งจะส่งผลให้ลดเวลา และลดต้นทุนของค่าไฟฟ้าได้อีกมาก



บทที่ 6

บทสรุป

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นการผลิตภาชนะบรรจุอาหารย่อยสลายได้ทางชีวภาพประเภทใช้ครั้งเดียวแล้วทิ้ง ซึ่งใช้วัตถุดิบหลักเป็นลำต้นมันสำปะหลังสดด้วยกระบวนการอัดขึ้นรูปร้อน โดยศึกษาสภาวะที่เหมาะสมทั้ง อุณหภูมิ ความดัน และเวลาที่ใช้ในกระบวนการอัดขึ้นรูปด้วยวิธีการออกแบบการทดลอง จากการศึกษาเบื้องต้นพบว่าการใช้สารยึดเกาะจากหัวมันสำปะหลังสดมีสมบัติทางกลที่ดีกว่าสารยึดเกาะจากน้ำแป้งมันสำปะหลัง นอกจากนี้ยังศึกษาอิทธิพลของปริมาณเส้นใยและขนาดเส้นใยต้นมันสำปะหลังต่อสมบัติทางกายภาพ สมบัติทางความร้อน และสมบัติทางกลของชิ้นทดสอบ ซึ่งประกอบไปด้วย การทดสอบความหนา การทดสอบความหนาแน่น การทดสอบการดูดซึมน้ำ การศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยา การทดสอบทางความร้อน การทดสอบแรงดึง การทดสอบแรงดัดโค้ง และการทดสอบแรงกระแทก ผลสำเร็จที่ได้จากงานวิจัยนี้จะช่วยเพิ่มมูลค่าให้กับผลผลิตทางการเกษตรในประเทศ และช่วยลดต้นทุนในการผลิตภาชนะบรรจุย่อยสลายได้ทางชีวภาพ รวมไปถึงการต่อยอดงานวิจัยต่อไปในอนาคต

6.1 สรุปผลการวิจัย

6.1.1 เครื่องอัดขึ้นรูปร้อนที่จัดทำขึ้น มีขนาดความจุของแม่แรงไฮดรอลิก 20 ตัน ที่ติดตั้งหน้าปัดเพื่อวัดความดันภายในกระบอกสูบในหน่วย bar ระบบให้ความร้อนเป็นฮีทเตอร์แท่งติดตั้งเข้ากับแท่นรองแม่พิมพ์ทั้งด้านบนและด้านล่าง ปรับค่าความร้อนได้สูงสุด 200°C ระยะห่างเริ่มต้นของแท่นรองแม่พิมพ์เท่ากับ 8.5 cm สำหรับแม่พิมพ์ที่จัดทำขึ้นเป็นรูปถ้วยกลม ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางด้านบนเท่ากับ 12 cm และด้านล่างเท่ากับ 8.4 cm ความสูงเท่ากับ 2 cm โดยมีระยะห่างระหว่างแม่พิมพ์ผู้และตัวเมียเท่ากับ 2 mm

6.1.2 จากการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบสองระดับ (2^k Factorial design) เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในกระบวนการอัดขึ้นรูป พบว่าการปรับตั้งค่าอุณหภูมิเท่ากับ 150°C ความดันเท่ากับ 55 bar และระยะเวลาในกระบวนการอัดขึ้นรูปเท่ากับ 15 นาที จะได้ชิ้นทดสอบจากลำต้นมันสำปะหลังและหัวมันสำปะหลังสดที่มีค่าการต้านทานแรงดัดโค้งสูงสุดเท่ากับ 8.552 MPa

6.1.3 ชิ้นทดสอบจากลำต้นมันสำปะหลังล้วน (ไม่ได้เติมสารยึดเกาะจากหัวมันสำปะหลังสด) มีสมบัติทางกลและการต้านทานน้ำที่ต่ำ แต่เมื่อเพิ่มปริมาณสารยึดเกาะลงไป

สูตรจะเป็นการปรับปรุงสมบัติให้มีค่าการต้านทานแรงดึง ค่ามอดูลัสของยัง ค่าการต้านทานแรงคดโค้ง ค่ามอดูลัสการคดโค้ง ค่าความหนา และค่าความหนาแน่นที่เพิ่มสูงขึ้น นอกจากนี้ยังส่งผลให้ค่าเปอร์เซ็นต์การยึดตัวและค่าการดูดซึมน้ำต่ำลง และการเติมสารยึดเกาะไม่ได้เป็นการปรับปรุงค่าการต้านทานแรงกระแทก อย่างไรก็ตามการเติมสารยึดเกาะในปริมาณที่สูงถึง 50% โดยน้ำหนัก ส่งผลให้สมบัติทางกลและการต้านทานน้ำมีแนวโน้มที่ลดต่ำลง

6.1.4 ขึ้นทดสอบจากเส้นใยต้นมันสำปะหลังที่ขนาดเล็กกว่า จะมีค่าการต้านทานแรงดึง ค่ามอดูลัสของยัง ค่าการต้านทานแรงคดโค้ง ค่ามอดูลัสการคดโค้ง และค่าความหนาที่สูงกว่า ขึ้นทดสอบจากเส้นใยที่ขนาดใหญ่กว่า เนื่องจากขึ้นทดสอบจะมีความหนาแน่นที่มากกว่า ส่งผลให้มอดูลัสการคดโค้งที่ต่ำกว่า แต่ขึ้นทดสอบที่มีขนาดเส้นใยที่ใหญ่กว่าจะสามารถรับแรงกระแทกได้มากกว่า อย่างไรก็ตามขนาดของเส้นใยต้นมันสำปะหลังไม่ส่งผลต่อค่าการยึดตัวอย่างมีนัยสำคัญ

6.1.5 จากการศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาของขึ้นทดสอบแต่ละสูตร พบว่ามีโครงสร้างภายในแบบแซนด์วิชที่มีฟิวเจอร์หนาแน่น และจากภาพถ่ายพื้นผิวขึ้นทดสอบพบว่ามีรูพรุนขนาดเล็กเกิดขึ้น เนื่องจากไอน้ำส่วนเกินจะทำให้ลายผิวหน้าของขึ้นทดสอบขณะเปิดแม่พิมพ์ และการมีอยู่ของสารยึดเกาะจากหัวมันสำปะหลังสดจะเข้าไปเติมเต็มช่องว่างระหว่างเส้นใย ขึ้นทดสอบมีสมบัติที่ดีขึ้น ซึ่งเป็นการสนับสนุนผลการทดสอบที่กล่าวมาได้เป็นอย่างดี และจากการศึกษาสมบัติทางความร้อนของขึ้นทดสอบพบว่าอุณหภูมิเริ่มสลายตัวอยู่ในช่วงอุณหภูมิที่สูงมาก ซึ่งมีความเป็นไปได้ที่จะนำไปใส่ของทอด หรืออาหารจานด่วน

6.1.6 จากการเลือกสูตรที่เหมาะสมที่สุดด้วยเทคนิคการวิเคราะห์แบบหลายปัจจัย พบว่าสูตรที่มีค่าคะแนนรวมสูงที่สุด คือ ขึ้นทดสอบที่มีขนาดเส้นใยต้นมันสำปะหลังเป็น 0.60-0.85 mm และมีปริมาณของลำต้นมันสำปะหลังและหัวมันสำปะหลังสดเท่ากับ 70:30 โดยน้ำหนัก ซึ่งได้คะแนนเท่ากับ 84 คะแนน จากคะแนนเต็ม 100 คะแนน

6.1.7 ปริมาณของผสมที่เติมลงในแม่พิมพ์ให้ได้เป็นภาชนะที่มีรูปร่างสมบูรณ์ คือ ประมาณ 40-57 g โดยปริมาณของผสมที่เติมจะเพิ่มขึ้นตามปริมาณของสารยึดเกาะจากหัวมันสำปะหลังที่เพิ่มขึ้น และภาชนะที่มีขนาดเส้นใยที่ใหญ่กว่าจะมีพื้นผิวขรุขระมากกว่าภาชนะจากเส้นใยขนาดเล็กกว่าที่อัตราส่วนผสมเดียวกัน ภาชนะที่มีปริมาณสารยึดเกาะที่น้อยกว่าจะมีโอกาสที่จะเสียหายจากกระบวนการแกะออกจากแม่พิมพ์ได้มากกว่า

6.1.8 การประมาณค่าต้นทุนการผลิตระดับห้องปฏิบัติการของภาชนะย่อยสลายได้ทางชีวภาพจากลำต้นมันสำปะหลังสดที่มีขนาดเส้นใยต้นมันสำปะหลังเป็น 0.60-0.85 mm และปริมาณของลำต้นมันสำปะหลังและหัวมันสำปะหลังสดเท่ากับ 70:30 โดยน้ำหนัก มีราคาในการผลิตภาชนะ 1 ใบ เท่ากับ 1.613 บาท

6.2 ข้อเสนอแนะ

6.2.1 ถึงแม้ว่าภาชนะย่อยสลายได้ทางชีวภาพจากลำต้นมันสำปะหลังและหัวมันสำปะหลังสดจะมีสมบัติทางกลที่ดี แต่ก็ยังมีข้อจำกัดอย่างมากด้านการต้านทานความชื้น อาจจำเป็นต้องศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับสารเติมแต่งต่าง ๆ หรือศึกษาเกี่ยวกับการเคลือบผิวภาชนะด้วยพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ เพื่อปรับปรุงสมบัติด้านการต้านทานน้ำให้สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานจริงได้หลากหลายยิ่งขึ้น

6.2.2 ศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับการทดสอบสมบัติด้านอื่น ๆ เพื่อรองรับตามมาตรฐานของภาชนะบรรจุ อาทิเช่น การทดสอบแรงกดอัด การทดสอบความแข็งแรงผิว และการทดสอบการต้านทานน้ำมัน เป็นต้น

6.2.3 ในงานวิจัยนี้มีการศึกษาสมบัติของภาชนะย่อยสลายได้ทางชีวภาพจากมันสำปะหลังเพียงสายพันธุ์เดียว อาจจำเป็นต้องศึกษาเพิ่มเติมเพื่อค้นหาสายพันธุ์มันสำปะหลังที่จะให้สมบัติที่ดีที่สุด เช่น มันสำปะหลัง พันธุ์ข้าวเหนียว

6.2.4 ศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับกระบวนการเตรียมเส้นใยจากต้นมันสำปะหลัง เพื่อให้ได้เส้นใยที่ยาวขึ้น หรือการเติมเส้นใยชนิดอื่น ๆ เพื่อเป็นการเสริมแรงให้แก่ภาชนะย่อยสลายได้

6.2.5 ระยะเวลาในกระบวนการผลิตภาชนะย่อยสลายได้ทางชีวภาพในงานวิจัยนี้ค่อนข้างสูง คือ 15 นาที ซึ่งไม่เหมาะสมในเชิงพาณิชย์ อาจจะต้องศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับกระบวนการอัดขึ้นรูปวิธีใหม่ รวมไปถึงการออกแบบแม่พิมพ์ใหม่ให้มีรูระบายไอน้ำส่วนเกินเพิ่มขึ้น ออกแบบแม่พิมพ์ให้สามารถผลิตภาชนะที่ขนาดบางลง หรือออกแบบแม่พิมพ์ให้สามารถผลิตภาชนะต่อครั้งได้จำนวนมากขึ้นเพื่อลดราคาต้นทุนในการผลิต

รายการอ้างอิง

- การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค (2555). อัตราค่าไฟฟ้า [ออนไลน์]. สืบค้นจาก : <https://www.pea.co.th/peawiki/Documents/Rate2012.pdf> [25 สิงหาคม 2557].
- กฤตณุ อัมพรพิทักษ์, สิริภา ศิริระแสง และ ทวิช จิตรสมบุรณ์ (2555). การทำงานจากกบแก้ว. **โครงการปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.**
- ณรงค์ศักดิ์ ธรรมโชติ (2549). วัสดุวิศวกรรม. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ: ซีเอ็ดดูเคชั่น.
- ณัฏฐพล ไช้แสงศรี (2552). การพัฒนาบรรจุภัณฑ์ย่อยสลายได้จากโคโตนร่วมกับพอลิเมอร์จากธรรมชาติสำหรับทดแทนโฟม. **วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.**
- ณัฏฐพล ไช้แสงศรี, อรพิน เกิดชูชื่น, ณัฏฐา เล่าหกุลจิตต์ และ สุพจน์ ประทีปถิ่นทอง (2553). การพัฒนาถาดโฟมจากแป้งมันสำปะหลังในการบรรจุส้มโอตัดแต่งสด. **วารสารวิทยาศาสตร์เกษตร, ปีที่ 41, ฉบับที่ 3/1 (พิเศษ), หน้า 669-672.**
- บรรเลง ศรีนิล (2547). **เทคโนโลยีพลาสติก.** พิมพ์ครั้งที่ 16. กรุงเทพฯ: สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น).
- ปารเมศ ชูติมา (2545). การออกแบบการทดลองทางวิศวกรรม. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- พรทิพย์ ทูลจินดา (2550). การศึกษาสมบัติของคอมพอสิตโฟมที่มีแป้งมันสำปะหลัง โคลดินอนุพันธ์โคลดิน และน้ำยางพาราเป็นส่วนประกอบ. **วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.**
- พิชิต เลี่ยมพิพัฒน์ (2536). **พลาสติก.** พิมพ์ครั้งที่ 13. กรุงเทพฯ: โรงพิมพ์ ป. สัมพันธ์พาณิชย์.
- มลสุดา ลิ่วไชสง (2556). การผลิตภาชนะย่อยสลายได้ทางชีวภาพจากกบแก้ว. **วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.**
- มูลนิธิสถาบันพัฒนามันสำปะหลังแห่งประเทศไทย. (2543). **องค์ประกอบหัวมันสำปะหลัง** [ออนไลน์]. สืบค้นจาก : <http://www.tapiocathai.org/D.html> [25 กรกฎาคม 2555].
- รังสิมา ชลคุป, ชลธิชา นุ่มหอม และ กล้าณรงค์ ศรีรอด (2541). ผลของปริมาณแป้งมันสำปะหลังต่อสมบัติทางกายภาพและสมบัติการย่อยสลายได้ของแป้ง/polycaprolactone เบลนด์. **การประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 36, กรุงเทพฯ, หน้า 247.**

- วีระศักดิ์ อุดมกิจเดชา (2542). **วิทยาศาสตร์เส้นใย**. กรุงเทพฯ: โรงพิมพ์ แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (2550). **ประเภทของพลาสติกย่อยสลายได้** [ออนไลน์]. สืบค้นจาก : http://www2.mtec.or.th/th/special/biodegradable_plastic/type_de_plas.html [25 กรกฎาคม 2555].
- สมาคมโรงงานผู้ผลิตมันสำปะหลัง ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ (2557). **ราคาหัวมันสำปะหลังสด-มันเส้น** [ออนไลน์]. สืบค้นจาก : <http://www.nettathai.org/index.php/2012-01-18-08-26-04> [25 สิงหาคม 2557].
- สำนักงานนวัตกรรมแห่งชาติ (2551). **บทที่ 3 เทคโนโลยีของประเทศผู้นำด้านพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ** [ออนไลน์]. สืบค้นจาก : <http://www.nia.or.th/download/document/chapter3.pdf> [25 กรกฎาคม 2555].
- อังศุมา บุญไชยสุริยา (2554). การผลิตโฟมย่อยสลายได้ทางชีวภาพจากแป้งมันสำปะหลังเสริมแรงด้วยเส้นใยปาล์มน้ำมัน. **วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์**.
- ASTM D256-10 (2010). Standard Test Methods for Determining the Izod Pendulum Impact Resistance of Plastics. **In Annual Book of ASTM Standards.**
- ASTM D790-10 (2010). Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials. **In Annual Book of ASTM Standards.**
- ASTM D828-97 (2002). Standard Test Method for Tensile Properties of Paper and Paperboard Using Constant-Rate-of-Elongation Apparatus. **In Annual Book of ASTM Standards.**
- Benezet, J.C., Davidovic, A.S., Bergeret, A., Ferry, L., and Crespy, A. (2012). Mechanical and physical properties of expanded starch, reinforced by natural fibres. **Industrial Crops and Products**, Vol. 37, pp. 435-440.
- Campbell, N.A., Reece, J.B., Urry, L.A., Cain, M.L., Wasserman, S.A., Minorsky, P.V., and Jackson, R.B. (2009). **Biology**. 8th Edition. New York: Pearson, Benjamin Cummings.
- Carr, L.G., Parra, D.F., Ponce, P., Lugao, A.B., and Buchler, P.M. (2006). Influence of fibers on the mechanical properties of cassava starch foams. **Journal of Polymers and the Environment**, Vol. 14, pp. 179-183.

- Cinelli, P., Chiellini, E., Lawton, J.W., and Imam, S.H. (2006). Foamed articles based on potato starch, corn fibers and poly(vinyl alcohol). **Polymer Degradation and Stability**, Vol. 91, pp. 1147-1155.
- Glenn, G.M., and Hsu, J. (1997). Compression-foamed starch-based plastic. **Industrial Crops and Products**, Vol. 7, pp. 37-44.
- Guimaraes, J.L., Wypych, F., Saul, C.K., Ramos, L.P., and Satyanarayana, K.G. (2010). Studies of the processing and characterization of corn starch and its composites with banana and sugarcane fibers from Brazil. **Carbohydrate Polymers**, Vol. 80, pp. 130-138.
- ISO 535 (1991). **Paper and board - Determination of water absorptiveness - Cobb method.**
- Kaisangsri, N., Kerdchoechuen, O., Laohakunjit, N. (2012). Biodegradable foam tray from cassava starch blended with natural fiber and chitosan. **Industrial Crops and Products**, Vol. 37, pp. 542-546.
- Kinoshita, H., Kaizu, K., Fukuda, M., Tokunaga, H., Koga, K., and Ikeda, K. (2009). Development of green composite consists of woodchips, bamboo fibers and biodegradable adhesive. **Composites: Part B**, Vol. 40, pp. 607-612.
- Lawton, J.W., Shogren, R.L., and Tiefenbacher, K.F. (2004). Aspen fiber addition improves the mechanical properties of baked cornstarch foams. **Industrial Crops and Products**, Vol. 19, pp. 41-48.
- Lee, S.C., and Mariatti, M. (2008). The effect of bagasse fibers obtained (from rind and pith component) on the properties of unsaturated polyester composites. **Materials Letters**, Vol. 62. pp. 2253-2256.
- Magesh, A., Preetha, B., and Viruthagiri, T. (2011). Simultaneous Saccharification and Fermentation of Tapioca Stem var. 226 White Rose to Ethanol by Cellulase Enzyme and *Saccharomyces cerevisiae*. **International Journal of ChemTech Research**, Vol. 3, No. 4, pp. 1821-1829.
- Matsuda, D.K.M., Vercelheze, A.E.S., Carvalho, G.M., Yamashita, F., and Mali, S. (2013). Baked foams of cassava starch and organically modified nanoclays. **Industrial Crops and Products**, Vol. 44, pp. 705-711.

- Prachayawarakorn, J., Chaiwatyothin, S., Mueangta, S., and Hanchana, A. (2013). Effect of jute and kapok fibers on properties of thermoplastic cassava starch composites. **Materials and Design**, Vol. 47, pp. 309-315.
- Ramirez, M.G.L., Satyanarayana, K.G., Iwakiri, S., Muniz, G.B., Tanobe, V., and Flores-Sahagun, T.S. (2012). Study of the properties of biocomposites. Part I. Cassava starch-green coir fibers from Brazil. **Carbohydrate Polymers**, Vol. 86, pp. 1712-1722.
- Salgado, P.R., Schmidt, V.C., Ortiz, S.E.M., Mauri, A.N., and Laurindo, J.B. (2008). Biodegradable foams based on cassava starch, sunflower proteins and cellulose fibers obtained by a baking process. **Journal of Food Engineering**, Vol. 85, pp. 435-443.
- Schmidt, V.C.R., and Laurindo, J.B. (2010). Characterization of Foams Obtained from Cassava Starch, Cellulose Fibres and Dolomitic Limestone by a Thermopressing Process. **Brazilian Archives of Biology and Technology**, Vol.53, pp. 185-192.
- Shawaphun, S., and Manangan, T. (2010). Paper coating with biodegradable polymer for food packaging. **Science Journal Ubonratchathani University**, Vol. 1, No. 1, pp. 51-57.
- Shey, J., Imam, S.H., Glenn, G.M., and Orts, W.J. (2006). Properties of baked starch foam with natural rubber latex. **Industrial Crops and Products**, Vol. 24, pp. 34-40.
- Shogren, R.L., Lawton, J.W., Doane, W.M., Tiefenbacher, K.F. (1998). Structure and morphology of baked starch foams. **Polymer**, Vol. 39(25), pp. 6649-6655.
- Shogren, R.L., Lawton, J.W., and Tiefenbacher, K.F. (2002). Baked starch foams: starch modifications and additives improve process parameters, structure and properties. **Industrial Crops and Products**, Vol. 16, pp. 69-79.
- Soykeabkaew, N., Supaphol, P., and Rujiravanit, R. (2004). Preparation and characterization of jute- and flax-reinforced starch-based composite foams. **Carbohydrate Polymers**, Vol. 58, pp. 53-63.
- Teixeira, E.M., Curvelo, A.A.S., Correa, A.C., Marconcini, J.M., Glenn, G.M., and Mattoso, L.H.C. (2012). Properties of thermoplastic starch from cassava bagasse and cassava starch and their blends with poly (lactic acid). **Industrial Crops and Products**, Vol. 37, pp. 61-68.
- Usla, M.K., and Polat, S. (2012). Effects of glyoxal cross-linking on baked starch foam. **Carbohydrate Polymers**. Vol. 87, pp. 1994-1999.

- Vallejos, M.E., Curvelo, A.A.S., Teixeira, E.M., Mendes, F.M., Carvalho, A.J.F., Felissia, F.E., and Area, M.C. (2011). Composite materials of thermoplastic starch and fibers from the ethanol–water fractionation of bagasse. **Industrial Crops and Products**, Vol. 33, pp. 739-746.
- Vercelheze, A.E.S., Fakhouri, F.M., Antonia, L.H.D., Urbano, A., Youssef, E.Y., Yamashita, F., and Mali, S. (2012). Properties of baked foams based on cassava starch, sugarcane bagasse fibers and montmorillonite. **Carbohydrate Polymers**, Vol. 87, pp. 1302– 1310.
- Vercelheze, A.E.S., Oliveira, A.L.M., Rezende, M.I., Muller, C.M.O., Yamashita, F., and Mali, S. (2013). Physical Properties, Photo- and Bio-degradation of Baked Foams Based on Cassava Starch, Sugarcane Bagasse Fibers and Montmorillonite. **Journal of Polymers and the Environment**, Vol. 21, pp. 266-274.
- Wattanakornsiri, A., Pachana, K., Kaewpirom, S., Traina, M., and Migliaresi, C. (2012). Preparation and Properties of Green Composites Based on Tapioca Starch and Differently Recycled Paper Cellulose Fibers. **Journal of Polymers and the Environment**, Vol. 20, pp. 801-809.
- Zainuddin, S.Y.Z., Ahmad, I., Kargarzadeh, H., Abdullah, I., and Dufresne, A. (2013). Potential of using multiscale kenaf fibers as reinforcing filler in cassava starch-kenaf biocomposites. **Carbohydrate Polymers**, Vol. 92, pp. 2299-2305.



ภาคผนวก ก

ระดับคะแนนของสมบัติของชิ้นทดสอบ

ตารางที่ ก.1 ระดับคะแนนของสมบัติทางกายภาพของชั้นทดสอบจากลำต้นมันสำปะหลัง

| ระดับคะแนน | ความหนาแน่น (g/cm ³) | การดูดซึมน้ำ (g H ₂ O/g) |
|------------|-------------------------------------|--|
| 10 | 0.650-0.611 | 1.000-0.921 |
| 20 | 0.610-0.571 | 0.920-0.841 |
| 30 | 0.570-0.531 | 0.840-0.761 |
| 40 | 0.530-0.491 | 0.760-0.681 |
| 50 | 0.490-0.451 | 0.680-0.601 |
| 60 | 0.450-0.411 | 0.600-0.521 |
| 70 | 0.410-0.371 | 0.520-0.441 |
| 80 | 0.370-0.331 | 0.440-0.361 |
| 90 | 0.330-0.291 | 0.360-0.281 |
| 100 | < 0.290 | < 0.280 |

ตารางที่ ก.2 ระดับคะแนนของสมบัติทางกลของชั้นทดสอบจากลำต้นมันสำปะหลัง

| ระดับ คะแนน | การต้านทาน แรงดัดโค้ง (MPa) | การต้านทาน แรงดึง (MPa) | มอดูลัส ของยัง (MPa) | เปอร์เซ็นต์ การยืดตัว (%) | การต้านทาน แรงกระแทก (J/cm ²) |
|----------------|-----------------------------------|-------------------------------|----------------------------|---------------------------------|---|
| 10 | 2.000-2.899 | 1.000-1.349 | 300-379 | 0.400-0.439 | 0.0200-0.0299 |
| 20 | 2.900-3.799 | 1.350-1.699 | 380-459 | 0.440-0.479 | 0.0300-0.0399 |
| 30 | 3.800-4.699 | 1.700-2.049 | 460-539 | 0.480-0.519 | 0.0400-0.0499 |
| 40 | 4.700-5.599 | 2.050-2.399 | 540-619 | 0.520-0.559 | 0.0500-0.0599 |
| 50 | 5.600-6.499 | 2.400-2.749 | 620-699 | 0.560-0.599 | 0.0600-0.0699 |
| 60 | 6.500-7.399 | 2.750-3.099 | 700-779 | 0.600-0.639 | 0.0700-0.0799 |
| 70 | 7.400-8.299 | 3.100-3.449 | 780-859 | 0.640-0.679 | 0.0800-0.0899 |
| 80 | 8.300-9.199 | 3.450-3.799 | 960-939 | 0.680-0.719 | 0.0900-0.0999 |
| 90 | 9.200-10.099 | 3.800-4.149 | 940-1019 | 0.720-0.759 | 0.1000-0.1099 |
| 100 | >10.100 | > 4.150 | > 1020 | > 0.760 | > 0.1100 |



ภาคผนวก ข
การทดสอบการย่อยสลายได้ด้วยการฝังดินเบื้องต้น
(Burial test)

ตารางที่ ข.1 ผลของการนำภาชนะย่อยสลายได้ในแต่ละสูตรฝังดินเป็นเวลา 7 วัน

| สูตร | ก่อนฝังดิน | หลังจากฝังดินเป็นเวลา 7 วัน |
|--|---|--|
| ต้นมัน สำปะหลัง: หัวมันสำปะหลัง พันธุ์ห้วยบง 60 = 50:50 โดย น้ำหนัก |  |  |
| ต้นมัน สำปะหลัง: หัวมันสำปะหลัง พันธุ์ เกษตรศาสตร์ 50 = 50:50 โดยน้ำหนัก |  |  |
| หัวมันสำปะหลัง ล้วน (100%) พันธุ์ห้วยบง 60 |  |  |

การทดสอบด้วยการฝังดินนั้นจะดัดแปลงวิธีของรังสิมา ชลกุล และ คณะ (2541) ภาชนะทั้ง 3 สูตร จะวางไว้ในตะกร้าพลาสติกก่อนนำไปฝังดินที่ระดับต่ำกว่าผิวดินประมาณ 10-15 cm พร้อมทั้งจัดเรียงให้อยู่ในแนวเดียว ทำการทดสอบการย่อยสลายบริเวณหน้าศูนย์วิจัยมันสำปะหลัง และผลิตภัณฑ์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี แปลงดินที่ทดสอบเป็นดินร่วนปนดินเหนียว (Clay loam) ทดสอบภายใต้สภาวะธรรมชาติ จำนวนการทดลอง 1 ซ้ำ โดยทำการฝังภาชนะวันที่ 3-9

มิถุนายน 2557 ทั้งนี้เนื่องจากการทดสอบถึงการย่อยสลายในเบื้องต้นจึงไม่ได้ทำการเก็บข้อมูลเกี่ยวกับสภาพอากาศและข้อมูลของดินบริเวณที่ทดสอบในช่วงเวลาดังกล่าว

ภาชนะตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบการย่อยสลายด้วยการฝังดินนั้นมี 3 สูตร คือ ภาชนะที่มีปริมาณดินมันสำปะหลังสด พันธุ์ห้วยบง 60 และหัวมันสำปะหลังสด พันธุ์ห้วยบง 60 เท่ากับ 50:50 โดยน้ำหนัก ภาชนะที่มีปริมาณดินมันสำปะหลังสด พันธุ์เกษตรศาสตร์ 50 และหัวมันสำปะหลังสด พันธุ์เกษตรศาสตร์ 50 เท่ากับ 50:50 โดยน้ำหนัก และภาชนะที่เป็นหัวมันสำปะหลังล้วน พันธุ์ห้วยบง 60 (ดินมันสำปะหลังสดที่ใช้ผลิตภาชนะย่อยสลายได้ในครั้งนี้ ไม่ได้นำไปร่อนตะแกรงเพื่อคัดแยกขนาดก่อน เนื่องจากจะดูเพียงแนวโน้มความเป็นไปได้ในการทดสอบการย่อยสลายได้ในเบื้องต้นเท่านั้น) ผลของการทดสอบการย่อยสลายด้วยการฝังดินแสดงในตารางที่ ข.1 จากการสังเกตด้วยตาเปล่าภาชนะก่อนการฝังดินสำหรับสูตรที่ใช้ดินและหัวมันสำปะหลัง พันธุ์เกษตรศาสตร์ 50 จะมีสีเหลืองเข้มกว่าสูตรที่ใช้ดินและหัวมันสำปะหลัง พันธุ์ห้วยบง 60 สำหรับสูตรที่เป็นหัวมันสำปะหลังล้วน พันธุ์ห้วยบง 60 จะมีลักษณะสีน้ำตาลเข้มจากการโดนความร้อนจนกลายเป็นเจล และเนื่องจากเป็นภาชนะที่มีเพียงหัวมันสำปะหลังเพียงอย่างเดียวจึงเป็นภาชนะที่มีสมบัติทางกลต่ำ มีความเปราะ และแตกหักง่าย จึงมีโอกาที่จะเสียหายตั้งแต่กระบวนการแกะชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์ หลังจากฝังภาชนะในดินเป็นเวลา 7 วัน พบว่าภาชนะที่เป็นหัวมันสำปะหลังล้วนจะมีการแตกหักมากที่สุด เนื่องจากภาชนะสูตรนี้มีแป้งในปริมาณมากกระจายตัวอยู่ทั่ว โครงสร้างจึงถูกย่อยสลายได้ง่ายกว่า ทำให้โครงสร้างหลักมีรูพรุน และง่ายต่อการย่อยสลายด้วยจุลินทรีย์ เอนไซม์ และกระบวนการทางไฮโดรไลซิสต่อไป (รังสิมา ชลคุป และ คณะ, 2541) พิจารณาภาชนะสูตรที่เป็นดินมันสำปะหลังผสมกับหัวมันสำปะหลังเท่ากับ 50:50 โดยน้ำหนักนั้น ภาชนะที่ได้จากมันสำปะหลัง พันธุ์เกษตรศาสตร์ 50 จะมีการแตกหักที่มากกว่าภาชนะที่ได้จากมันสำปะหลัง พันธุ์ห้วยบง 60 อาจจะบอกได้ในเบื้องต้นว่าภาชนะที่ได้จากมันสำปะหลัง พันธุ์เกษตรศาสตร์ 50 มีสมบัติทางกลที่ด้อยกว่าจึงทำให้ย่อยสลายได้ง่ายกว่า จากการศึกษาของมลสุดา ลิวไชสง (2556) พบว่าแป้งที่สกัดได้จากมันสำปะหลัง พันธุ์ห้วยบง 60 จะมีความหนืดที่มากกว่าแป้งที่สกัดได้จากมันสำปะหลัง พันธุ์เกษตรศาสตร์ 50 เนื่องจากมันสำปะหลัง พันธุ์ห้วยบง 60 นี้ จะมีคาร์โบไฮเดรตที่นอกเหนือจากแป้งและไม่ละลายน้ำ เช่น น้ำตาล อยู่ในปริมาณที่ต่ำ ทำให้ได้ปริมาณของแป้งต่อหัวมากและแป้งที่สกัดได้มีความหนืดที่สูงกว่า ส่งผลให้ภาชนะที่ได้จากมันสำปะหลัง พันธุ์ห้วยบง 60 มีสมบัติทางกลที่ดีกว่า ทั้งนี้ในการทดสอบการย่อยสลายได้ด้วยการฝังดินนั้น ไม่ได้ทำการศึกษาในจำนวนวันที่มากกว่านี้ เนื่องจากข้อจำกัดในการทำการทดลอง

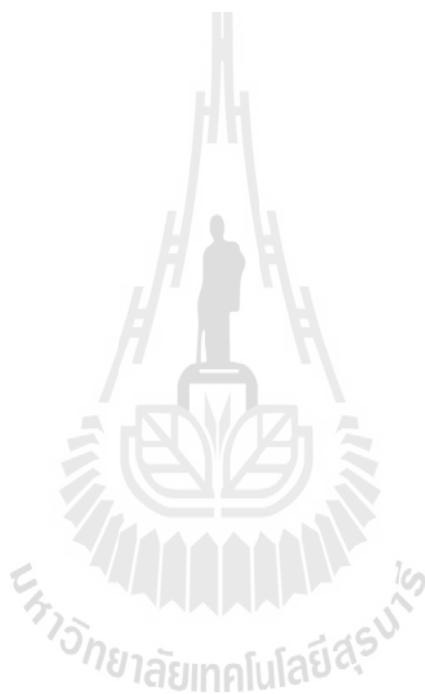


ภาคผนวก ค

บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

นที ฐานมั่น และ ทวิช จิตรสมบูรณ์ (2556). การผลิตภาชนะบรรจุจากลำต้นมันสำปะหลัง.
การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 27 (ME-NETT 27).
16-18 ตุลาคม 2556 พัทยา จังหวัดชลบุรี



AMM-2012

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 27
16-18 ตุลาคม 2556 พัทยา จังหวัดชลบุรี

 ME-NETT
2013

การผลิตภาชนะบรรจุจากลำต้นมันสำปะหลัง
Production of food container from cassava stalk

นที ฮานมัน และ ทวีช จิตรสมบูรณ์*

สาขาวิศวกรรมเครื่องกล สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
111 ถนนมหาวิทยาลัย ต.สุรนารี อ.เมือง จ.นครราชสีมา 30000

*ติดต่อ: E-mail: tewit.boon@gmail.com, เบอร์โทรศัพท์ 0-4422-4414, เบอร์โทรสาร 0-4422-4613

บทคัดย่อ

ปัจจุบันนี้มนุษย์มีความห่วงใยสิ่งแวดล้อมมากขึ้น และเริ่มให้ความสนใจกับภาชนะบรรจุที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพซึ่งมักนิยมผลิตจากวัตถุดิบทางการเกษตร ในงานวิจัยนี้ทำการศึกษาวิจัยเพื่อผลิตภาชนะบรรจุย่อยสลายได้ทางชีวภาพจากลำต้นมันสำปะหลังสดด้วยกระบวนการอัดขึ้นรูป โดยการนำต้นมันสำปะหลังสดมาบดละเอียด และเติมสารเกาะยึด เช่น หัวมันสำปะหลังสด และแป้งมันสำปะหลัง เพื่อปรับสมบัติให้ใช้งานได้ในการบรรจุอาหาร แบ่งกระบวนการอัดขึ้นรูปเป็น 2 จังหวะ คือ อุ่นวัตถุดิบในแม่พิมพ์ที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส โดยไม่ให้ความดันเป็นเวลา 5 นาที และอัดด้วยความดัน 500 psi-g ที่อุณหภูมิเดียวกันเป็นเวลา 15 นาที ผลการทดสอบสมบัติต่าง ๆ พบว่า ปริมาณของสารเกาะยึดที่เพิ่มขึ้นไม่ส่งผลต่อความหนาของชิ้นทดสอบ เมื่อปริมาณของน้ำแป้งเพิ่มสูงขึ้น ความหนาแน่นของชิ้นทดสอบจะลดลงและการดูดซึมน้ำจะเพิ่มขึ้น ในขณะที่การเพิ่มขึ้นของปริมาณหัวมันสำปะหลังนั้น ส่งผลให้ความหนาแน่นของชิ้นทดสอบเพิ่มสูงขึ้นและการดูดซึมน้ำลดต่ำลงเล็กน้อย ในทุกสูตรผสมล้วนแต่มีค่าการต้านทานแรงดัดโค้งและค่ามอดูลัสการดัดโค้งที่สูงพอควร ผลสำเร็จที่ได้จากการศึกษานี้มีโอกาสนำไปใช้แทนโฟมพอลิสไตรีนได้

คำหลัก: ภาชนะบรรจุย่อยสลายได้ทางชีวภาพ, วัสดุชีวฐาน, ลำต้นมันสำปะหลัง, สารเกาะยึด

Abstract

Human has recently expressed more concerns for the environment and thus is searching for biodegradable food containers, made from agricultural material. The objective of this work was to produce biodegradable food containers from fresh cassava stalk by a compression process without using any chemical additives. Fresh cassava stalk was grinded and blended with binders, such as grinded fresh cassava tuber and cassava starch before being hot-pressed into a container. A pre-pressing was initially performed at 150 °C for 5 min in order to eliminate water by evaporation, followed by a pressing step of 15 min at 500 psig at the same temperature. The results showed the addition of binder did not affect the thickness of resulting samples. The addition of starch batter decreased the density and increased the water absorption capacity of samples. While increasing in the amount of fresh cassava root with increased the density and slightly decreased the water absorption capacity. All formulations showed high flexural strength and flexural modulus, these materials represent an alternative to the expanded polystyrene foam.

Keywords: Biodegradable food container, Bio-based material, Cassava stalk, Binder.

AMM-2012

1. บทนำ

ในปัจจุบันนี้ปฏิเสธไม่ได้ว่าผลิตภัณฑ์จำพวก พลาสติกและโฟมได้ถูกใช้งานอย่างกว้างขวาง เนื่องจากผลิตภัณฑ์เหล่านี้มีน้ำหนักเบา มีสมบัติทางกลที่ดี ทนต่อความชื้น และง่ายต่อการขึ้นรูป [7] แต่ขยะพลาสติกและโฟมเหล่านี้ใช้เวลาในการย่อยสลายหลายชั่วอายุคน ในหลายประเทศจึงรณรงค์ให้หันมาใช้พลาสติกที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพซึ่งเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม แต่พลาสติกชีวภาพยังมีราคาที่สูงกว่าพลาสติกปกติ ดังนั้นจึงมีการศึกษาถึงการนำพอลิเมอร์จากธรรมชาติที่สามารถย่อยสลายได้มาผสมลงในพลาสติกสังเคราะห์เหล่านั้น [2, 12, 17] เพื่อลดต้นทุนในการผลิต และต่อมาจึงมีการนำพอลิเมอร์จากธรรมชาติมาใช้เป็นวัสดุหลักในการผลิตเป็นภาชนะบรรจุย่อยสลายได้ทางชีวภาพโดยตรง [8, 9, 10, 13]

แป้งที่สกัดได้จากวัตถุดิบจากภาคการเกษตร เช่น มันสำปะหลัง จะถูกนำไปขึ้นรูปเป็นวัสดุชีวฐาน (Bio-based materials) ที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ โดยกรรมวิธีการผลิตวัสดุย่อยสลายได้จากแป้งนั้นมีหลักการที่คล้ายกับการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์พลาสติกจากปิโตรเคมี [6] สามารถทำได้หลายวิธี เช่น กระบวนการอัดขึ้นรูป (Compression molding) กระบวนการอัดรีด (Extrusion process) กระบวนการฉีดขึ้นรูป (Injection molding) หรืออบด้วยแม่แบบร้อน (Baking in hot mold) [2, 5, 9, 10, 12, 14] แต่ภาชนะบรรจุย่อยสลายได้แบบชีวฐานที่ใช้แป้งเพียงอย่างเดียวนั้นมีสมบัติทางกลที่เปราะ แตกหักง่าย และมีข้อจำกัดอย่างมากด้านการต้านทานน้ำ [16] นักวิจัยหลายท่านจึงได้เติมเส้นใย หรือสารเติมแต่งต่าง ๆ เพื่อปรับปรุงสมบัติของภาชนะบรรจุ

การปรับปรุงสมบัติทางกลทั้งความแข็งแรงและความยืดหยุ่น กระทำโดยการเติมเส้นใยจากธรรมชาติต่าง ๆ เช่น เส้นใยแอสเพน (Aspen fiber) เส้นใยเซลลูโลส และเยื่อคราฟท์ เป็นต้น โดยที่ Lawton et al. (2004) กล่าวว่า ภาชนะบรรจุชีวภาพจะมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น เมื่อ

เติมเส้นใยแอสเพนเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ Kaisangeri et al. (2012) พบว่าการเติมเยื่อคราฟท์ร้อยละ 30 และความเข้มข้นของโคโคแซนร้อยละ 4 ทำให้ได้โฟมแข็งมันสำปะหลังที่มีสมบัติใกล้เคียงกับโฟมพอลิโพรพิลีนที่สุด และในบางงานวิจัยได้กล่าวถึงอิทธิพลของขนาดเส้นใยต่อสมบัติทางกลของโฟมแข็งอีกด้วย [5]

มันสำปะหลังเป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญของประเทศไทย มีปริมาณการผลิตคิด 1 ใน 5 ของโลก โดยที่จังหวัดนครราชสีมาเป็นศูนย์กลางหลักในการผลิตมันสำปะหลังของประเทศ [3] เกษตรกรมักจะขยายการเพาะปลูกโดยใช้ท่อนพันธุ์จากลำต้น ทำให้มีเศษลำต้นเหลือทิ้งจำนวนมาก นอกจากนี้ลำต้นมันสำปะหลังนั้นมีส่วนประกอบของเซลลูโลส 58.4% เฮมิเซลลูโลส 20.2% ลิกนิน 17.4% และอื่น ๆ อีก 6.0% [11] ซึ่งเซลลูโลสที่เป็นส่วนประกอบหลักนั้นทำหน้าที่สร้างความแข็งแรงแก่เส้นใย

ในหัวมันสำปะหลังนั้นนอกจากน้ำแล้วจะมีแป้งเป็นส่วนประกอบหลักที่มีปริมาณสูงถึง 70-85% [1] จึงมีความเป็นไปได้ที่จะนำมาทำเป็นสารเกาะยึดแทนแป้งมัน ซึ่งหากทำได้จะทำให้ต้นทุนในกระบวนการผลิตลงไปได้อีกมาก อย่างไรก็ตามการใช้หัวมันสำปะหลังสดนั้นเป็นแนวความคิดใหม่ที่ยังไม่มีนักวิจัยท่านใดได้ทดลองใช้มาก่อนเนื่องจากงานวิจัยจำพวกนี้จะใช้แป้งมันเป็นส่วนประกอบหลัก

แม้ว่าในปัจจุบันจะมีการพัฒนาและปรับปรุงสมบัติของภาชนะบรรจุได้ใกล้เคียงกับภาชนะบรรจุพลาสติกจากปิโตรเคมีแล้ว แต่ภาชนะบรรจุดังกล่าวมีส่วนผสมของแป้งในปริมาณมาก ยังผลให้มีต้นทุนค่อนข้างสูงในการผลิตระดับอุตสาหกรรม นอกจากนี้ยังใช้สารเติมแต่งที่สังเคราะห์จากกระบวนการทางเคมีอีกด้วย ดังนั้น ในงานศึกษานี้จึงมุ่งเน้นการผลิตภาชนะบรรจุย่อยสลายได้ทางชีวภาพจากลำต้นมันสำปะหลังสดด้วยกระบวนการอัดขึ้นรูปร้อน โดยมีแป้งมันสำปะหลังและหัวมันสำปะหลังสดเป็นสารเกาะยึดอย่างผสมผสานกัน

AMM-2012

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 27
16-18 ตุลาคม 2556 พัทยา จังหวัดชลบุรี

ME-NETT
2013

2. วัสดุและวิธีการทดสอบ

2.1 วัสดุ

มันสำปะหลัง (พันธุ์ห้วยบง 60 อายุประมาณ 9 เดือน) ได้จากแปลงทดลองของฟาร์มมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี เลือกใช้ช่วงกลางของลำต้นโดยวัดขึ้นมาจากพื้นประมาณ 20 เซนติเมตร ยาวประมาณ 100-120 เซนติเมตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 2.0-3.5 เซนติเมตร นำไปเช็ดทำความสะอาดและบดลดขนาดจนได้ขนาดอนุภาคน้อยกว่า 2 มิลลิเมตร ส่วนหัวมันสำปะหลังจะใช้ทั้งหัวโดยนำไปเช็ดทำความสะอาดและบดละเอียด สำหรับแป้งมันสำปะหลังผลิตโดย บริษัท สงวนวงษ์อุตสาหกรรม จำกัด



รูปที่ 1 ลำต้นมันสำปะหลังบด

2.2 การเตรียมและการผลิตชิ้นทดสอบด้วยกระบวนการอัดขึ้นรูป

สารเกาะยึดที่ใช้ในงานวิจัยนี้ คือ น้ำแป้งมันสำปะหลัง (Cassava starch batter, CS) และหัวมันสำปะหลังสด (Cassava root CR) ซึ่งน้ำแป้งที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ใช้ที่อัตราส่วนของน้ำที่ผ่านการกรองด้วยระบบรีเวอร์สออสโมซิส (RO) ต่อแป้งมันสำปะหลังเป็น 4:1 ซึ่งเป็นอัตราส่วนที่ดีที่สุดจากการทดสอบความหนืดของกาวแป้งจากธรรมชาติในงานวิจัยก่อนหน้านี้ (งานวิจัยของนักศึกษาระดับปริญญาตรีวิศวกรรมเครื่องกล มทส.)

สารเกาะยึดปริมาณต่าง ๆ (ตามตารางที่ 1) จะถูกผสมเข้ากับต้นมันสำปะหลัง 500 กรัม เป็นเวลา

ตารางที่ 1 ส่วนประกอบที่ใช้เตรียมวัสดุย่อยสลายได้จากลำต้นมันสำปะหลังสด หัวมันสำปะหลังสด และแป้งมันสำปะหลัง

| สูตร | ต้นมัน สำปะ หลังสด (กรัม) | หัวมัน สำปะ หลังสด (กรัม) | แป้งมัน สำปะ หลัง (กรัม) | น้ำ RO (กรัม) |
|---------|------------------------------------|------------------------------------|-----------------------------------|------------------|
| CONTROL | 500 | - | - | - |
| CS25 | 500 | - | 25 | 100 |
| CS50 | 500 | - | 50 | 200 |
| CS75 | 500 | - | 75 | 300 |
| CS100 | 500 | - | 100 | 400 |
| CR125 | 500 | 125 | - | - |
| CR250 | 500 | 250 | - | - |
| CR375 | 500 | 375 | - | - |
| CR500 | 500 | 500 | - | - |

5 นาที หลังจากนั้นซึ่งส่วนผสมที่ได้แต่ละสูตรประมาณ 150-175 กรัม นำมาขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดขึ้นรูปร้อน (GOTECH, model GT-7014-A30, GOTECH Testing Machines Inc.) ในแม่พิมพ์ขนาด 190 x 190 x 3 มิลลิเมตร

แผ่นประกอบแม่พิมพ์ทั้งด้านบนและล่างจะรองด้วยแผ่นเทฟลอนเพื่อป้องกันการยึดติดระหว่างชิ้นทดสอบและแผ่นประกอบ การเริ่มต้นของกระบวนการอัดจะให้ความร้อนแก่แม่พิมพ์เปล่าที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส จนอุณหภูมิคงที่ จากนั้นจึงนำของผสมมาอุ่นภายในแม่พิมพ์โดยไม่ให้ความดันเป็นเวลา 5 นาที เพื่อทำการระเหยน้ำออกจากของผสม จากนั้นเพิ่มความดันอย่างช้าๆ จนถึง 500 psi-g และคงไว้ที่อุณหภูมิและความดันดังกล่าวเป็นเวลา 15 นาที เมื่อเสร็จสิ้นกระบวนการอัด ชุดแม่พิมพ์จะถูกปล่อยให้เย็นตัวภายใต้อุณหภูมิต้อง ก่อนทำการแกะชิ้นทดสอบออกจากแม่พิมพ์เป็นเวลา 1 นาที เพื่อป้องกันชิ้นทดสอบบิดงอ จากนั้นชิ้นทดสอบที่ได้จะถูกเก็บไว้ที่อุณหภูมิประมาณ 25 องศาเซลเซียส เป็นเวลาอย่าง

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 27
16-18 ตุลาคม 2556 พัทยา จังหวัดชลบุรี

สมาคมวิศวกรรมเครื่องกล
ME-NETT
2013

AMM-2012

น้อย 24 ชั่วโมง ก่อนนำไปทดสอบสมบัติทั้งทาง
กายภาพและทางกล



รูปที่ 2 ชั้นทดสอบ

2.3 การศึกษาสมบัติของชั้นทดสอบ

2.3.1 การทดสอบความหนา

ชั้นทดสอบจะถูกตรวจวัดด้วยเวอร์เนียร์
คาลิเปอร์ (Digimatic, Mitutoyo, Japan) โดยทำการ
วัดความหนาและหาค่าเฉลี่ยตัวอย่างละ 3 ตำแหน่ง
จาก 10 ชั้นทดสอบในแต่ละสูตรผสมที่ทดลอง

2.3.2 การทดสอบความหนาแน่น

การทดสอบหาความหนาแน่นจะคำนวณจาก
ความสัมพัทธ์ระหว่างมวลและปริมาตร [15] โดยทำ
การหาค่าเฉลี่ยจาก 10 ชั้นทดสอบในแต่ละสูตรผสม

2.3.3 การทดสอบการดูดซึมน้ำ

เตรียมชั้นทดสอบขนาด 2.5 x 5 เซนติเมตร
ซึ่งน้ำหนักชั้นทดสอบก่อนนำไปแช่ในน้ำปราศจาก
ไอออนเป็นเวลา 80 วินาที หลังจากนั้นชั่งน้ำหนัก
ด้วยกระดาษชั่งและชั่งน้ำหนักอีกครั้ง ค่าปริมาตร
การดูดซึมน้ำจะคำนวณจากมวลของน้ำที่ชั้นทดสอบ
ดูดซึมไว้หารด้วยน้ำหนักของชั้นทดสอบก่อนแช่น้ำ [8]
โดยทำการหาค่าเฉลี่ยจาก 3 ชั้นทดสอบในแต่ละสูตร

2.3.4 การทดสอบแรงดัดโค้ง

เตรียมชั้นทดสอบเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าโดยตัด
แต่งขนาดตามมาตรฐาน ASTM D790-10 ด้วยเครื่อง
เลื่อยสายพาน แล้วขัดผิวชั้นทดสอบที่ผ่านการตัดด้วย
กระดาษทรายที่มีค่าความละเอียดระดับต่าง ๆ กัน
ทำการทดสอบแรงดัดโค้งด้วยเครื่องทดสอบ
เอนกประสงค์ (Universal Testing Machine,

INSTRON, model 5565) ภาระกรรมสูงสุด 5 kN
ระยะห่างแท่งวางชั้นทดสอบ 48 มิลลิเมตร ความเร็ว
ที่ใช้ในการกดขึ้นงาน 1.3 mm/min โดยทำการหา
ค่าเฉลี่ยอย่างน้อย 5 ชั้นทดสอบในแต่ละสูตร

3. ผลการทดสอบและการวิเคราะห์ผล

3.1 ผลการศึกษากระบวนการอัดขึ้นรูป

ปริมาณของผสมที่เติมลงในแม่พิมพ์และได้เป็น
ชิ้นงานที่รูปร่างสมบูรณ์ คือ ประมาณ 150-175 กรัม
ซึ่งสำหรับปริมาณที่ใช้ดินมันสำปะหลังล้วน คือ
150 กรัม และปริมาณของผสมที่จะเพิ่มมากขึ้นตาม
ปริมาณของสารเกาะยึดที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากสารเกาะ
ยึดนั้นมีความข้นสูง ความหนาแน่นของผสมจึงมี
มากกว่าสูตรที่ใช้ดินมันสำปะหลังล้วน [10] ถ้าของ
ผสมที่เติมในแม่พิมพ์มีปริมาณที่น้อยเกินไปจะพบว่า
นอกจากชิ้นงานจะไม่เป็นแผ่นสมบูรณ์แล้วผิวหน้าของ
ชิ้นงานบริเวณขอบจะไม่เป็นผิวเรียบอีกด้วย เนื่องจากการ
ใส่ของผสมนั้นจะใส่บริเวณตรงกลางของแม่พิมพ์
เมื่อให้แรงดัน ของผสมจะไหลไปไม่ถึงขอบแม่พิมพ์
แรงดันที่ให้แก่วัสดุจะเกิดแค่บริเวณตรงกลางเท่านั้น
ถ้าหากปริมาณของผสมที่เติมในแม่พิมพ์มีปริมาณที่
มากจนเกินไป จะมีปริมาณของครีบเหลือทิ้งและน้ำที่
ต้องระเหยออกจากกระบวนการเป็นจำนวนมาก ส่งผล
ให้กระบวนการอัดร้อนจะใช้เวลานานมากขึ้น
นอกจากนี้ น้ำส่วนเกินนั้นจะทำลายชิ้นงานในขณะที่เปิด
แม่พิมพ์ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Lawton
et al. (2004)

กระบวนการอัดที่ใช้ในงานวิจัยนี้แบ่งออกเป็น
2 จังหวะ คือ อุณหภูมิของผสมในแม่พิมพ์ที่อุณหภูมิ
ประมาณ 150 องศาเซลเซียส โดยไม่ให้ความดันเป็น
เวลา 5 นาที และอัดด้วยความดัน 500 psi-g ที่
อุณหภูมิเดียวกันนั้นเป็นเวลา 15 นาที ในกระบวนการ
อัดที่แบ่งเป็น 2 จังหวะนั้นสอดคล้องกับงานวิจัยของ
Salgado et al. (2008) โดยสาเหตุที่แบ่งออกเป็น
2 จังหวะ เนื่องจากของผสมมีปริมาณของน้ำที่ต้อง
ระเหยสูง และขณะที่ให้ความดันแก่แม่พิมพ์นั้นจะไม่มี
ระบายไอน้ำซึ่งจะส่งผลให้น้ำส่วนเกินจะทำลาย

AMM-2012

ชิ้นงานในขณะเปิดแม่พิมพ์ตั้งที่กล่าวไว้แล้วข้างต้น จึงจำเป็นต้องระเหยน้ำส่วนเกินจากการอุ่นในแม่พิมพ์ ก่อนเป็นเวลา 5 นาที หากเกินกว่านี้จะทำให้ผิวหน้าของชิ้นงานใหม่และแข็ง และของผสมที่อยู่บริเวณกลางแผ่นที่ยังคงมีความชื้นอยู่นั้นระเหยออกมาไม่ได้ จนกลายเป็นชิ้นงานที่ไม่เป็นแผ่นสมบูรณ์ได้

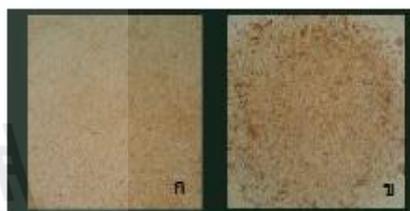
สำหรับเวลาที่ใช้ในกระบวนการอัดของงานวิจัยนี้ คือ 15 นาที ถือว่าสูงมากเมื่อเทียบกับงานวิจัยของนักวิจัยท่านอื่นที่ใช้เวลาในการอัด 1-7 นาที [5, 8, 13, 14] เนื่องจากงานวิจัยเหล่านั้นใช้อุณหภูมิที่สูงประมาณ 200-250 องศาเซลเซียส และแม่พิมพ์มีรูระบายไอน้ำ ตลอดเวลาคล้ายกับที่อบขนมปังจึงทำให้สามารถกำจัดไอน้ำส่วนเกินได้ในเวลาอันสั้น สำหรับอุณหภูมิที่ใช้ในงานวิจัยนี้ (ประมาณ 150 องศาเซลเซียส) เป็นอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการอัดชิ้นงานให้เป็นแผ่นสมบูรณ์เนื่องจากมีอุณหภูมิที่สูงเกินอุณหภูมิเจลาตินในซีซีของแป้งแล้ว คือ ประมาณ 70 องศาเซลเซียส ทำให้น้ำแป้งเกิดเป็นเจลแป้งและกลายเป็นสารเกาะยึดแก่ชิ้นงานได้ ซึ่งหากใช้อุณหภูมิที่ต่ำกว่า 150 องศาเซลเซียส ชิ้นงานที่เป็นต้นมันสำปะหลังล้วน จะไม่สามารถเกาะเป็นแผ่นได้ และจะใช้เวลาที่นานขึ้นในกระบวนการอัด แต่หากใช้อุณหภูมิที่สูงกว่านี้ จะต้องใช้เวลาในการอุ่นแม่พิมพ์เปล่าจนกว่าอุณหภูมิจะคงที่ที่นานยิ่งขึ้น และผิวหน้าของชิ้นงานที่ได้จะใหม่ทั้งนี้กระบวนการอัดที่อุณหภูมิสูง ๆ ยังเป็นข้อจำกัดของเครื่องมือที่มีอยู่อีกด้วย

3.2 การวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวของชิ้นทดสอบ

เส้นใยจากลำต้นมันสำปะหลังในชิ้นทดสอบกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ บางจุดบนชิ้นงานอาจจะมีความชื้นอยู่เล็กน้อยเนื่องจากเป็นธรรมชาติของกระบวนการอัด กล่าวคือไม่มีทิศทางไหลที่แน่นอนในเครื่องอัด ทำให้การจัดเรียงตัวของเส้นใยจะเป็นแบบสุ่ม (Random) ตามทิศทางไหล [10] ที่ผิวหน้าของชิ้นทดสอบที่ใช้แป้งเป็นสารเกาะยึด (รูปที่ 3ก) จะมีความเข้ากันได้มากกว่าชิ้นทดสอบที่ใช้หัวมันสำปะหลังเป็นสารเกาะยึด (รูปที่ 3ข) เนื่องจากน้ำแป้งสามารถแทรกซึมไปทั่วทั้งแม่พิมพ์ได้ดีกว่า

แต่ผิวหน้าของชิ้นทดสอบที่มีปริมาณของน้ำแป้งสูง ๆ จะมีผิวหน้าที่ราบเรียบน้อยกว่าที่ปริมาณน้ำแป้งต่ำกว่า เนื่องจากการกำจัดน้ำส่วนเกินนั้นจะทำให้ลายผิวหน้าของชิ้นงาน

รูปที่ 3ข แสดงจุดสีน้ำตาลเข้มบนผิวหน้าของชิ้นทดสอบซึ่งเป็นจุดที่หัวมันสำปะหลังจับกลุ่มเป็นก้อนเมื่อโดนความร้อนจึงเกิดเป็นเจลและไหม้ ซึ่งอาจจะเกิดจากเวลาที่ใช้ในกระบวนการผสมของผสมเพียง 5 นาที นั้นยังไม่เพียงพอที่จะทำให้หัวมันสำปะหลังแทรกซึมเข้าไปในเส้นใยต้นมันสำปะหลังได้อย่างทั่วถึง



รูปที่ 3 ชิ้นทดสอบที่มี (ก) น้ำแป้ง และ (ข) หัวมันสำปะหลัง เป็นสารเกาะยึด

3.3 การวิเคราะห์ความหนาและความหนาแน่น

ความหนาและความหนาแน่นของชิ้นทดสอบแสดงในตารางที่ 2 ซึ่งเห็นว่าความหนาของชิ้นทดสอบมีค่าประมาณ 3.16-3.40 มม. โดยที่การเปลี่ยนแปลงในแต่ละสูตรผสมนั้นไม่ส่งผลต่อความหนาของชิ้นงานในทางสถิติ ส่วนความหนาแน่นของชิ้นทดสอบมีค่าประมาณ 0.4595-0.6453 g/cm³ เมื่อปริมาณน้ำแป้งเพิ่มสูงขึ้น ความหนาแน่นของชิ้นทดสอบจะลดต่ำลงเนื่องจากน้ำแป้งที่แทรกซึมอยู่ในเนื้อวัสดุนั้นจะพองตัวและระเหยออกเมื่อถูกความร้อนและไอน้ำที่เกิดขึ้นจะมีพฤติกรรมเป็นสารพองตัว (Blowing agent) ก่อให้เกิดรูพรุนภายในชิ้นทดสอบซึ่งเป็นลักษณะของโฟม [9] แต่เมื่อเพิ่มปริมาณของหัวมันสำปะหลังพบว่าความหนาแน่นจะเพิ่มสูงขึ้นจากการที่หัวมันสำปะหลังนั้นเข้าไปเติมเต็มช่องว่างระหว่างอนุภาคของเส้นใยต้นมันสำปะหลังได้ดีขึ้นโดยไม่เกิดการพองตัว

AMM-2012

ตารางที่ 2 แสดงความหนา และความหนาแน่นในแต่ละสูตรของชั้นทดสอบจากลำต้นมันสำปะหลังสด น้ำแป้งมันสำปะหลัง และหัวมันสำปะหลังสด

| สูตร | ความหนา (mm) | ความหนาแน่น (g/cm^3) |
|---------|-----------------|--------------------------|
| CONTROL | 3.16 ± 0.11 | 0.5138 ± 0.0645 |
| CS25 | 3.30 ± 0.09 | 0.6068 ± 0.0250 |
| CS50 | 3.19 ± 0.08 | 0.4712 ± 0.0118 |
| CS75 | 3.19 ± 0.06 | 0.4978 ± 0.0122 |
| CS100 | 3.40 ± 0.07 | 0.4595 ± 0.0107 |
| CR125 | 3.25 ± 0.06 | 0.5530 ± 0.0245 |
| CR250 | 3.32 ± 0.05 | 0.5867 ± 0.0200 |
| CR375 | 3.26 ± 0.06 | 0.6175 ± 0.0162 |
| CR500 | 3.16 ± 0.09 | 0.6453 ± 0.0260 |

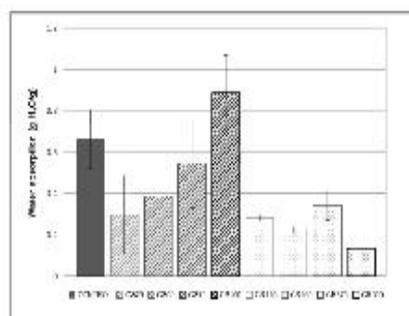
หมายเหตุ ข้อมูลแสดงในรูปของค่าเฉลี่ย \pm ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

ค่าความหนาแน่นในงานวิจัยนี้สูงกว่าค่าความหนาแน่นของโฟมพอลิสไตรีน (EPS) คือ 0.05-0.09 g/cm^3 [9] เนื่องจากปริมาณของต้นมันสำปะหลังจำนวนมากจะป้องกันการฟองตัวและขยายตัวของน้ำแป้ง นอกจากนี้ความหนาแน่นในงานวิจัยนี้ยังสูงกว่าค่าความหนาแน่นของภาคโฟมแป้งมันสำปะหลังที่ผสมน้ำยางธรรมชาติและโคโคแซน คือ 0.13-0.15 g/cm^3 [9] อีกด้วย แต่อย่างไรก็ตาม ค่าความหนาแน่นที่ได้นี้มีความใกล้เคียงกับภาคโฟมแป้งมันสำปะหลังที่ผสมโปรตีนคอกาทันตะวันและเส้นใยเซลลูโลส คือ 0.458-0.587 g/cm^3 [13]

3.4 การวิเคราะห์การดูดซึมน้ำ

ค่าการดูดซึมน้ำของชั้นทดสอบมีค่าประมาณ 14-88% หลังการแช่น้ำเป็นเวลา 1 นาที ดังแสดงในรูปที่ 4 โดยที่ชั้นทดสอบจากต้นมันสำปะหลังล้วนมีค่าการดูดซึมน้ำที่ประมาณ 66% และจะลดต่ำลงเมื่อเติมสารเกาะยึดเข้าไปในส่วนประกอบ ยกเว้นสูตรผสมที่ใช้ต้นมันสำปะหลังต่อน้ำแป้งเป็น 1:1 (CS100) และจากรูปที่ 4 พบว่าเมื่อเติมน้ำแป้งในปริมาณที่เพิ่ม

สูงขึ้น จะทำให้ค่าการดูดซึมน้ำเพิ่มมากขึ้นด้วย เนื่องจากแป้งมีสมบัติที่ชอบน้ำ (Hydrophilic) [16] และชั้นทดสอบมีความหนาแน่นที่ต่ำกว่า น้ำจึงแทรกซึมเข้าไปในช่องว่างภายในชั้นทดสอบได้มากกว่า



รูปที่ 4 การดูดซึมน้ำของชั้นทดสอบที่เตรียมจากต้นมันสำปะหลัง น้ำแป้งมันสำปะหลัง และหัวมันสำปะหลัง

แต่ในทางตรงกันข้าม ชั้นทดสอบที่ใช้หัวมันสำปะหลังเป็นสารเกาะยึดโดยเฉพาะสูตรผสม CR125, CR250 และ CR375 นั้นมีค่าการดูดซึมน้ำที่ไม่แตกต่างกัน คือ ประมาณ 22-34% และมีค่าการดูดซึมน้ำต่ำที่สุดคือ ที่อัตราส่วนของต้นมันสำปะหลังต่อหัวมันสำปะหลังเป็น 1:1 (CR500) ทั้งนี้เนื่องจากการใช้หัวมันสำปะหลังเป็นสารเกาะยึดนั้นจะมีความหนาแน่นที่สูงกว่าการใช้แป้ง ช่องว่างภายในชั้นทดสอบจะมีน้อยกว่า จึงทำให้ค่าการดูดซึมน้ำมีค่าต่ำกว่า หากพิจารณาที่อัตราส่วนเดียวกัน การใช้หัวมันสำปะหลังเป็นสารเกาะยึดจะมีค่าการดูดซึมน้ำที่น้อยกว่าใช้น้ำแป้ง

สำหรับการทดสอบค่าการดูดซึมน้ำในงานวิจัยนี้จะทดสอบด้วยการแช่น้ำเพียง 1 นาที แต่ค่าการดูดซึมน้ำที่ได้ถือว่าสูงพอควร แม้วัสดุนี้จะมีข้อดีเรื่องการซึมน้ำ แต่ก็ยังสามารถใช้ได้ดีในการบรรจุอาหารแห้ง (เช่น อาหารทอด ปิ้ง ย่าง ผักไทย) แต่หากต้องการใช้กับอาหารที่ชุ่มน้ำ หรือเป็นน้ำ (เช่น กระเพาะปลา ราดหน้า หรือ ก๋วยเตี๋ยว) คงจำเป็นต้องปรับปรุงสมบัติด้วยการเคลือบผิวชั้นงานหรือการเติม

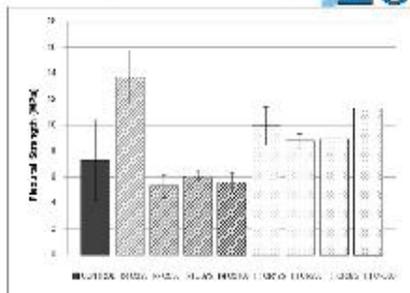
AMM-2012

สารเติมแต่งอื่น ๆ ที่มีความไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic) ลงไป เช่น น้ำยางธรรมชาติ หรือน้ำมัน เป็นต้น [14] อย่างไรก็ตามการดูดซึมน้ำที่ได้จากการทดสอบในงานวิจัยนี้มีความใกล้เคียงกับงานวิจัยของ Salgado et al. (2008) กล่าวคือภาคโพลิเอมีนสำปะหลังที่ผสมโปรตีนดอกทานตะวันและเส้นใยเซลลูโลส คือ ประมาณ 28-40%

3.5 การวิเคราะห์การทดสอบแรงดัดโค้ง

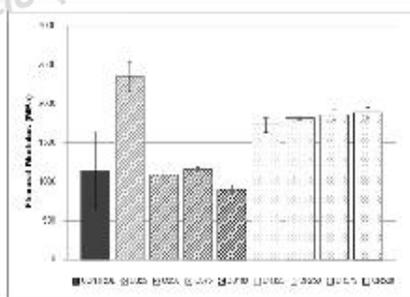
การต้านทานแรงดัดโค้ง (Flexural strength) และค่ามอดูลัสแรงดัดโค้ง (Flexural modulus) ของชิ้นทดสอบแสดงดังรูปที่ 5 และ 6 ตามลำดับ ซึ่งค่าการต้านทานแรงดัดโค้งมีค่าประมาณ 5.31-13.72 MPa ชิ้นทดสอบที่เป็นต้นมันสำปะหลังล้วนมีค่าเฉลี่ยที่ประมาณ 7.31 MPa แต่มีช่วงของความผิดพลาดสูงมากเนื่องจากว่าไม่มีสารเกาะยึดเนื้อวัสดุ ส่งผลให้ชิ้นทดสอบไม่เป็นเนื้อเดียวกันแบบลุ่มได้มาก สมบัติของชิ้นทดสอบจึงมีความไม่สม่ำเสมอ และชิ้นทดสอบที่ใช้น้ำแป้งสุรผสม CS25 จะมีค่าการต้านทานแรงดัดโค้งสูงที่สุดที่ 13.72 MPa ส่วนอัตราส่วนที่เหลือนั้นไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติโดยมีค่าประมาณ 5.31-8.06 MPa และชิ้นทดสอบที่ใช้หัวมันสำปะหลังเป็นสารเกาะยึดมีค่าการต้านทานแรงดัดโค้งที่ไม่แตกต่างกัน โดยมีค่าประมาณ 8.98-11.31 MPa อย่างไรก็ตามการต้านทานแรงดัดโค้งของชิ้นทดสอบในงานวิจัยนี้ล้วนมีค่าที่สูงกว่าโพลิโพรพิลีนที่มีค่าประมาณ 1.3 MPa เท่านั้น ดังนั้นชิ้นงานที่ผลิตได้นั้นมีโอกาสที่จะนำไปใช้แทนโพลิโพรพิลีนได้ในกรณีที่ต้องการแรงดัดโค้งสูง และเป็นอาหารแห้ง เช่น กรณีคนวัยรุ่นนิยมซื้อผักไทยรับประทานขณะขับรถจักรยานยนต์ที่มีลมพัดตัวรุนแรง ซึ่งอาจทำให้จานโพลิเอมีนบีบอัดแบบโค้งงอจนเกิดการเสียหายได้ และก่อให้เกิดอุบัติเหตุการจราจร

ค่ามอดูลัสการดัดโค้งมีค่าประมาณ 900-2350 MPa (รูปที่ 6) ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับพลาสติกสตาร์ช (Starch plastic) ที่ได้จากการอัดขึ้นรูปเย็นของโพลิ



รูปที่ 5 การต้านทานแรงดัดโค้งของชิ้นทดสอบที่เตรียมจากต้นมันสำปะหลัง น้ำแป้งมันสำปะหลัง และหัวมันสำปะหลัง

ข้าวสาลี คือ 1032 MPa [6] สำหรับชิ้นทดสอบที่ได้จากต้นมันสำปะหลังล้วนมีค่าประมาณ 1143 MPa แต่มีช่วงความผิดพลาดที่สูงมากเช่นเดียวกับค่าการต้านทานแรงดัดโค้ง สำหรับชิ้นทดสอบที่ใช้น้ำแป้งเป็นสารเกาะยึดจะมีค่ามอดูลัสการดัดโค้งสูงที่สุดที่สุรผสม CS25 คือประมาณ 2350 MPa ส่วนอัตราส่วนที่เหลือนั้นไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญโดยมีค่าประมาณ 900-1160 MPa แต่ชิ้นทดสอบที่ใช้หัวมันสำปะหลังเป็นสารเกาะยึดนั้นมีความไม่แตกต่างกันในทางสถิติ และมีค่าที่สูงกว่าเมื่อเทียบกับการใช้น้ำแป้งในอัตราส่วนเดียวกันโดยมีค่าประมาณ 1730-1890 MPa



รูปที่ 6 ค่ามอดูลัสการดัดโค้งของชิ้นทดสอบที่เตรียมจากต้นมันสำปะหลัง น้ำแป้งมันสำปะหลัง และหัวมันสำปะหลัง

AMM-2012

หากพิจารณาแค่การต้านทานแรงดัดโค้งสำหรับชิ้นงานที่จะนำไปใช้งานจริงสามารถเลือกใช้ได้ในทุกอัตราส่วน กล่าวคือมีค่าที่สูงกว่าโฟมพอลิस्टิโรนอยู่พอควร แต่ถ้าพิจารณาถึงการคงรูปต่อชิ้นงานแล้วนั้น จะพิจารณาถึงค่ามอดูลัสซึ่งเป็นค่าที่บ่งบอกถึงความแข็งแกร่งของวัสดุ โดยที่ใช้น้ำแข็งสูตรผสม CS25 จะคงรูปได้ดีที่สุด รองลงมาจะเป็นการใช้หัวมันสำปะหลังเป็นสารเกาะยึดโดยสามารถเลือกใช้ได้ในทุกอัตราส่วน ข้อจำกัดในงานวิจัยนี้ไม่ได้ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติทางกลและปริมาณความชื้นต่อชิ้นทดสอบ

4. บทสรุป

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นการผลิตภาชนะบรรจุอาหารที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพซึ่งใช้วัตถุดิบหลักเป็นลำต้นมันสำปะหลังสดด้วยกระบวนการอัดขึ้นรูปร้อน โดยมีน้ำแข็งมันสำปะหลังและหัวมันสำปะหลังสดเป็นสารเกาะยึดเพื่อให้ได้ชิ้นงานที่เป็นแผ่นสมบูรณ์

ผิวหน้าของชิ้นทดสอบที่ใช้ น้ำแข็งเป็นสารเกาะยึดในปริมาณที่มากกว่ามีผิวหน้าเรียบน้อยกว่าจากการระเหยน้ำส่วนเกิน ส่วนชิ้นทดสอบที่ใช้หัวมันสำปะหลังสดเป็นสารเกาะยึดอาจมีรอยไหม้เป็นจุดจากการจับกลุ่มเป็นก้อนเจลซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อความไม่สม่ำเสมอของสมบัติของชิ้นทดสอบ

การเพิ่มขึ้นของปริมาณสารเกาะยึดไม่ส่งผลต่อความหนาของชิ้นทดสอบ แต่ความหนาแน่นจะลดต่ำลงและการดูดซึมน้ำจะเพิ่มขึ้นหากเพิ่มปริมาณน้ำแข็ง ในขณะที่การเพิ่มขึ้นของปริมาณหัวมันสำปะหลังสดนั้นส่งผลให้ความหนาแน่นสูงขึ้นและการดูดซึมน้ำลดต่ำลงเล็กน้อย และเมื่อเทียบกับอัตราส่วนเดียวกันพบว่าที่ปริมาณสารเกาะยึดสูง ๆ ค่าการต้านทานแรงดัดโค้งและค่ามอดูลัสการดัดโค้งของชิ้นทดสอบที่ใช้หัวมันสำปะหลังสดเป็นสารเกาะยึดจะมีค่าสูงกว่าการใช้ น้ำแข็ง

สรุปว่าวัสดุเหล่านี้สามารถเป็นอีกหนึ่งทางเลือกที่จะทดแทนโฟมพอลิस्टิโรน โดยเฉพาะอย่างยิ่งสูตร CR500 ที่มีค่าการต้านทานแรงดัดโค้งสูงและค่าการ

ดูดซึมน้ำต่ำที่สุด สามารถลดเวลาและค่าใช้จ่ายในการเปลี่ยนหัวมันสำปะหลังเป็นแข็งได้มาก เหมาะกับการใช้งานสำหรับอาหารที่ค่อนข้างแห้งน้ำ และมีความต้องการแรงดัดโค้งสูง ทั้งนี้เวลาที่ใช้ในกระบวนการอัดยังนับว่านานพอควรสำหรับการผลิตในเชิงพาณิชย์ อาจจำเป็นต้องปรับเปลี่ยนรูปแบบของแม่พิมพ์ให้มีรูระบายไอน้ำส่วนเกินเพื่อลดเวลาในกระบวนการอัดต่อไป

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่สนับสนุนสถานที่ อุปกรณ์ และสาธารณูปโภคที่ใช้ในการวิจัยเพื่อการวิทยานิพนธ์ระดับปริญญาโทของผู้แต่งลำดับที่ 1 โดยมีได้คิดมูลค่า

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] มูลนิธิสถาบันพัฒนาหัวมันสำปะหลังแห่งประเทศไทย. (2543). *องค์ประกอบหัวมันสำปะหลัง*. [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา : <http://www.tapiocathai.org/D.html>, เข้าดูเมื่อวันที่ 15 พฤษภาคม 2556.
- [2] รังสิมา ชลคุป, ชลธิชา นุ่มหอม และ กล้าณรงค์ ศรีรอด. (2541). *ผลของปริมาณน้ำมันสำปะหลังต่อสมบัติทางกายภาพและสมบัติการย่อยสลายได้ของแป้ง/polycaprolactone เบลนด์*. ในการประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 36, กรุงเทพฯ, หน้า 247.
- [3] สมาคมการค้ามันสำปะหลังแห่งประเทศไทย. (2553). *ปริมาณผลผลิตหัวมันสำปะหลังฤดูกาลผลิตปี 2553/54*. [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา : <http://www.thailandtapiocastarch.net/download/download-th-33.pdf>, เข้าดูเมื่อวันที่ 15 พฤษภาคม 2556.
- [4] ASTM D790-10. (2010). *Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials*. In Annual Book of ASTM Standards.
- [5] Carr, L.G., Parra, D.F., Ponce, P., Lugao, A.B., Buchler, P.M. (2006). *Influence of fibers on*

AMM-2012

the mechanical properties of cassava starch foams. Journal of Polymers and the Environment, Vol. 14, pp. 179-183.

[6] Glenn, G.M., Hsu, J. (1997). *Compression-formed starch-based plastic.* Industrial Crops and Products, Vol. 7, pp. 37-44.

[7] Glenn, G.M., Orts, W.J. (2001). *Properties of starch-based foam formed by compression/explosion processing.* Industrial Crops and products, Vol. 13, pp. 135-143.

[8] ISO 535. (1991). *Paper and board - Determination of water absorptiveness - Cobb method.*

[9] Kaisangsri, N., Kerdchoechuen, O., Laohakunjit, N. (2012). *Biodegradable foam tray from cassava starch blended with natural fiber and chitosan.* Industrial Crops and Products, Vol. 37, pp. 542-546.

[10] Lawton, J.W., Shogren, R.L., Tiefenbacher, K.F. (2004). *Aspen fiber addition improves the mechanical properties of baked cornstarch foams.* Industrial Crops and Products, Vol. 19, pp. 41-48.

[11] Magesh, A., Preetha, B., Viruthagiri, T. (2011). *Simultaneous saccharification and fermentation of tapioca stem var.226 White Rose to ethanol by cellulose enzyme and Saccharomyces cerevisiae.* International Journal of Chemtech Research, Vol. 3, pp. 1821-1829.

[12] Petnamsin, C., Termvejsayanon, N., Sriroth, K. (2000). *Effect of particle size on physical properties and biodegradability of cassava starch/polymer blend.* Kasetsart Journal: Natural Science, Vol. 34, Issue 2, pp. 254-261.

[13] Salgado, P.R., Schmidt, V.C., Ortiz, S.E.M., Mauri, A.N., Laurindo, J.B. (2008). *Biodegradable foam based on cassava starch*

sunflower proteins and cellulose fibers obtained by a baking process. Journal of Food Engineering, Vol. 85, pp. 435-443.

[14] Shey, J., Imam, S.H., Glenn, G.M., Orts, W.J. (2006). *Properties of baked starch foam with natural rubber latex.* Industrial Crops and Products, Vol. 24, pp. 34-40.

[15] Shogren, R.L., Lawton, J.W., Doane, W.M., Tiefenbacher, K.F. (1998). *Structure and morphology of baked starch foams.* Polymer, Vol. 39(25), pp. 6649-6655.

[16] Shogren, R.L., Lawton, J.W., Tiefenbacher, K.F. (2002). *Baked starch foams: starch modifications and additives improve process parameters, structure and properties.* Industrial Crops and Products, Vol. 16, pp. 69-79.

[17] Teixeira, E.M., Curvelo, A.A.S., Correa, A.C., Marconcini, J.M., Glenn, G.M., Mattoso, L.H.C. (2012). *Properties of thermoplastic starch from cassava bagasse and cassava starch and their blends with poly (lactic acid).* Industrial Crops and Products, Vol. 37, pp. 61-68.

ประวัติผู้เขียน

นายณที ฐานมัน เกิดเมื่อวันที่ 8 มกราคม พ.ศ. 2532 ที่อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา บิดาชื่อ นายธีระศักดิ์ ฐานมัน มารดาชื่อ นางมยุรี ฐานมัน เริ่มการศึกษาระดับประถมศึกษาชั้นปีที่ 1-6 ที่โรงเรียนสุภวิทย์ จังหวัดสระแก้ว ระดับมัธยมศึกษาชั้นปีที่ 1-6 ที่โรงเรียนวังน้ำเย็นวิทยาคม จังหวัดสระแก้ว และสำเร็จการศึกษาปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมอากาศยาน) “เกียรตินิยมอันดับหนึ่ง” จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา เมื่อปี พ.ศ. 2553 จากนั้นได้ศึกษาต่อระดับวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ณ สถาบันการศึกษาเดิม ในปี พ.ศ. 2554 โดยได้รับทุนการศึกษา “ทุนสำหรับผู้มีผลการเรียนดีเด่นที่สมัครเข้าศึกษาในระดับบัณฑิตศึกษา” จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ประสบการณ์การทำงาน :

ระดับปริญญาตรี

- สหกิจศึกษาในตำแหน่งช่างอากาศยานที่สมาคมกีฬาการบิน (ประเทศไทย) จังหวัดสระบุรี (เมษายน-สิงหาคม พ.ศ. 2553)

ระดับปริญญาโท (พ.ศ. 2554-2556)

- เป็นผู้สอนปฏิบัติการของสาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล จำนวน 6 รายวิชา
 - วิชาการเขียนแบบวิศวกรรม 2
 - วิชาปฏิบัติการวิศวกรรมเครื่องกล 1, 2 และ 3
 - วิชาปฏิบัติการวิศวกรรมยานยนต์ 2
 - วิชาปฏิบัติการวิศวกรรมอากาศยาน 1
- เป็นผู้ช่วยนักวิจัยที่อาคารศูนย์วิจัยมันสำปะหลังและผลิตภัณฑ์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี (พ.ศ. 2556-ปัจจุบัน)

ผลงานวิจัย : นำเสนอบทความในหัวข้อ “การผลิตภาชนะบรรจุจากลำต้นมันสำปะหลัง” ในการประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 27 (ME-NETT 27) ระหว่างวันที่ 16-18 ตุลาคม พ.ศ. 2556 ณ จังหวัดชลบุรี รายละเอียดดังแสดงในภาคผนวก ก.