



การศึกษาคุณสมบัติของภาชนะบรรจุอาหารจากไบโทองกวาวและการศึกษาเชิงตัวเลขของ  
การกระจายอุณหภูมิในกระบวนการขึ้นรูปภาชนะบรรจุอาหารจากไบโทองกวาว



เสาวรส จงจิตรวัฒนกุล

วิทยานิพนธ์เสนอบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยนเรศวร  
เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี  
ปีการศึกษา 2563  
ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยนเรศวร

การศึกษาคุณสมบัติของภาชนะบรรจุอาหารจากไบโทองกวาวและการศึกษาเชิงตัวเลขของ  
การกระจายอุณหภูมิในกระบวนการขึ้นรูปภาชนะบรรจุอาหารจากไบโทองกวาว



วิทยานิพนธ์เสนอบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยนเรศวร  
เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี  
ปีการศึกษา 2563  
ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยนเรศวร

วิทยานิพนธ์ เรื่อง "การศึกษาคุณสมบัติของภาชนะบรรจุอาหารจากไบโทองกวาวและการศึกษาเชิง  
ตัวเลขของการกระจายอุณหภูมิในกระบวนการขึ้นรูปภาชนะบรรจุอาหารจากไบโทองกวาว"

ของ เสาวรส จงจิตรวัฒนกุล

ได้รับการพิจารณาให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี

### คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์  
(ศาสตราจารย์ ดร.จันทพร ผลากรกุล)

..... ประธานที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์  
(รองศาสตราจารย์ ดร.สมร หิรัญประดิษฐกุล)

..... กรรมการที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ขวัญชัย ไกรทอง)

..... กรรมการผู้ทรงคุณวุฒิภายใน  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปณัฐพงศ์ บุญนวล)

..... กรรมการผู้ทรงคุณวุฒิภายนอก  
(รองศาสตราจารย์ ดร.อนุรักษ์ ปีติรักษ์สกุล)

อนุมัติ

.....  
(ศาสตราจารย์ ดร.ไพศาล มุณีสว่าง)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

<b>ชื่อเรื่อง</b>	การศึกษาคุณสมบัติของภาชนะบรรจุอาหารจากไบโทองกวาวและ การศึกษาเชิงตัวเลขของการกระจายอุณหภูมิในกระบวนการขึ้นรูป ภาชนะบรรจุอาหารจากไบโทองกวาว
<b>ผู้วิจัย</b>	เสาวรส จงจิตรวัฒนกุล
<b>ประธานที่ปรึกษา</b>	รองศาสตราจารย์ ดร. สมร ทิรัญประดิษฐ์กุล
<b>กรรมการที่ปรึกษา</b>	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ขวัญชัย ไกรทอง
<b>ประเภทสารนิพนธ์</b>	วิทยานิพนธ์ วศ.ม. สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี, มหาวิทยาลัยนเรศวร, 2563
<b>คำสำคัญ</b>	วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์, ไบโทองกวาว, ภาชนะบรรจุอาหารจากไบ โทองกวาว

### บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีจุดมุ่งหมายเพื่อศึกษาวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของไบโทองกวาวและภาชนะบรรจุอาหารจากไบโทองกวาว โดยทำการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยวิธีการเชิงตัวเลขสำหรับภาชนะบรรจุอาหารจากไบโทองกวาวที่ย่อยสลายได้ เพื่อวิเคราะห์การกระจายอุณหภูมิในระหว่างการขึ้นรูปโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method; FEM) รวมถึงศึกษาความสามารถในการนำไปใช้งานด้วยการใช้ไมโครเวฟ การศึกษาคุณลักษณะต่าง ๆ ของไบโทองกวาวดำเนินการโดย วิเคราะห์คุณสมบัติของไบโทองกวาวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope; SEM) วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วยเทคนิคเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ (X-ray Fluorescence Spectroscopy; XRF) วิเคราะห์ค่าความร้อน (Gross Heating Value; GHV) ด้วยเครื่องบอมบ์แคลอริมิเตอร์ (Bomb calorimeter) วิเคราะห์ความเค้นแรงดึง (Tensile strength) ด้วยเครื่องวัดแรงดึง (Universal testing machine) หลังจากนั้นทำการออกแบบการทดลองโดยใช้วิธีพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Method; RSM) สำหรับกระบวนการขึ้นรูปจากคาร์บอนที่ที่เหมาะสม และเปรียบเทียบผลของการกระจายอุณหภูมิระหว่างการหุ้มฉนวนและไม่หุ้มฉนวนความร้อนที่แม่พิมพ์ รวมถึงข้อมูลที่คำนวณการกระจายอุณหภูมิการขึ้นรูปจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยวิธี FEM จากโปรแกรมแมตแล็บ (MATLAB)

ผลการศึกษาคุณสมบัติของไบโทองกวาวพบว่า โครงสร้างภายในจากการวิเคราะห์ด้วย SEM สามารถนำมาอธิบายปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นในระหว่างการขึ้นรูป ผลการวิเคราะห์ทางเคมีพบว่า

องค์ประกอบส่วนใหญ่เป็นเซลลูโลสโดยมีปริมาณสูงถึงร้อยละ 32.58 ผลการวิเคราะห์ค่าความร้อนพบว่า ปริมาณค่าความร้อนของไบโทองกวาวมีค่าสูงกว่าภาชนะบรรจุอาหารจากไบโทองกวาว คือ  $5.48 \pm 0.06$  และ  $4.88 \pm 0.08$  กิโลแคลอรีต่อกรัม ตามลำดับ ในทางตรงกันข้ามปริมาณค่าความเค้นแรงดึงของไบโทองกวาวมีค่าต่ำกว่าภาชนะบรรจุอาหารจากไบโทองกวาว คือ  $2.29 \pm 0.79$  และ  $3.00 \pm 0.08$  เมกะปาสคาล ตามลำดับ ผลจากการออกแบบการทดลองโดยวิธี RSM จะได้สภาวะอุณหภูมิที่ใช้ขึ้นรูปคือ 161 165 175 185 และ 189 องศาเซลเซียส และเวลาที่ใช้ขึ้นรูป 48 60 90 120 และ 132 วินาที โดยสภาวะดังกล่าว พบว่าที่อุณหภูมิ 175 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 120 วินาที มีปริมาณร้อยละความชื้นเท่ากับ  $8.72 \pm 0.23$  ซึ่งเป็นค่าที่มีความเหมาะสมสำหรับการขึ้นรูปและการเพิ่มความสามารถในการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์ อีกทั้งลดการก่อโรคจากเชื้อจุลินทรีย์ นอกจากนี้เมื่อทดสอบอุณหภูมิภาชนะบรรจุอาหารที่ขึ้นรูปจากไบโทองกวาวในไมโครเวฟที่กำลังไฟ 1,100 วัตต์ เป็นเวลา 2 4 และ 6 นาที ตามลำดับ พบว่าภาชนะบรรจุอาหารจากไบโทองกวาวยังคงสภาพรูปร่างเดิมไม่มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง และสามารถทนความร้อนได้ โดยไม่มีการรั่วซึม จากสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการขึ้นรูปดังกล่าว ผลการเปรียบเทียบการหุ้มฉนวนความร้อนที่แม่พิมพ์ พบว่าสามารถลดการสูญเสียความร้อนออกสู่ภายนอกได้ดี เนื่องจากอุณหภูมิเฉลี่ยระหว่างการขึ้นรูปของแต่ละตำแหน่งมีค่าใกล้เคียงกันทุกจุด และการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์พบว่า มีแนวโน้มใกล้เคียงกับการทดลองและสามารถทำนายการกระจายอุณหภูมิในการขึ้นรูปภาชนะบรรจุอาหารจากไบโทองกวาวในระดับยอมรับได้ร้อยละ 80

จากการที่ภาชนะบรรจุอาหารจากไบโทองกวาวสามารถย่อยสลายได้ตามธรรมชาติปราศจากสารเคมี เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม และมีสรรพคุณที่ดีในการออกฤทธิ์ทางยา ดังนั้นในการศึกษานี้จึงน่าจะเป็นไปได้ในการนำไปประยุกต์ใช้งานในด้านการพัฒนาออกแบบการขึ้นรูปจากวัสดุที่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพในอนาคต เพื่อช่วยลดค่าใช้จ่ายและลดปัญหาด้านสิ่งแวดล้อม

<b>Title</b>	CHARACTERIZING PROPERTIES OF BASTARD TEAK LEAF DISHES AND NUMERICAL ANALYSIS ON TEMPERATURE DISTRIBUTION DURING THE FORMING PROCESS OF BASTARD TEAK LEAF DISHES
<b>Author</b>	SAOWAROT CHONGCHITWATTHANAKUN
<b>Advisor</b>	Associate Professor Dr. Samorn Hirunpraditkoon
<b>Co-Advisor</b>	Assistant Professor Dr. Kwanchai Kraitong
<b>Academic Paper</b>	Thesis M.Eng. in Chemical Engineering - (Type A 2), Naresuan University, 2020
<b>Keywords</b>	Finite Element Method, Bastard Teak Leaf, Bastard Teak Leaf Dishes

### ABSTRACT

This study aimed to analyze the physical and chemical properties of bastard teak leaf along with biodegradable bastard teak leaf dishes. The mathematical model for biodegradable bastard teak leaf dishes was developed using one of numerical methods called the Finite Element Method (FEM) to evaluate temperature distributions during the forming process. In addition, the capability of the dishes to be used in a microwave oven was also carried out. The characterizing properties of the dishes were performed with a Scanning Electron Microscope (SEM) to examine the physical structure of bastard teak leaf, X-ray Fluorescence Spectroscopy (XRF) for the chemical compositions, a bomb calorimeter for the Gross Heating Value (GHV), and a universal testing machine for the tensile strength. The Response Surface Method (RSM) using the particular controlled moisture content was used to design experiments during the forming process. Temperature distributions obtained from non-insulated mold and insulated mold were compared. The mathematical model by FEM from MATLAB program was used to compute the temperature distributions of the forming process.

The structure of the leaf and leaf dishes was explained by the results from the SEM. Results showed that cellulose was the major chemical component in the compositions of bastard teak leaf at 32.58 %. The bastard teak leaf heating value tended to be higher than the bastard teak leaf dishes, which were  $5.48 \pm 0.06$  and  $4.88 \pm 0.08$  kcal g<sup>-1</sup>, respectively. However, the tensile strength of bastard teak leaf was lower than bastard teak leaf dishes, which were  $2.29 \pm 0.79$  and  $3.00 \pm 0.08$  MPa, respectively. The RSM performed that the temperature and time conditions during formation were at 161, 165, 175, 185 and 189 °C for 48, 60, 90, 120 and 132 s, respectively. The optimum condition was found to be equal to  $8.72 \pm 0.23$  % moisture content at a temperature of 175 °C for 120 s. This moisture content suggests that the product life is extended and the microbes was reduced. Moreover, the implementation of the bastard teak leaf dishes was tested by heating in a microwave at 1,100 W for 2, 4 and 6 min. The result obtained that the product was capable of holding hot water without deformation and led to heat resistant and watertight products. A comparison of the non-insulated mold and the insulated mold proved that the insulated mold reduced heat loss to the surrounding atmosphere. These can be observed from the adjacent temperature data along the time study. The mathematical model results showed similar trends to the experimental results and the model was established with a degree of agreement of 80% regarding the temperature data.

The results suggested that the mathematical model can be applied to the development of mold design for new alternative biodegradable products, which will be advantageous in reducing expenses and environmental problems, as the bastard teak leaf product was biodegradable, chemical-free, eco-friendly and medicinal plant properties.



## ประกาศคุณูปการ

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงที่ได้รับความช่วยเหลือจากหลายๆ ฝ่ายโดยเฉพาะ รองศาสตราจารย์ ดร.สมร หิรัญประดิษฐกุล ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ขวัญชัย ไกรทอง กรรมการที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้ให้ความรู้ คำปรึกษา แนะนำวิธีแก้ปัญหา รวมถึงเทคนิค ต่าง ๆ ในการทำวิทยานิพนธ์ตลอดจนให้การสนับสนุนและความเอาใจใส่ในทุกขั้นตอนเพื่อให้ วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้อย่างสมบูรณ์

กราบขอบพระคุณ ศาสตราจารย์ ดร.จันทพร ผลากรกุล ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร.อนุรักษ์ ปีติรักษ์สกุล กรรมการผู้ทรงคุณวุฒิภายนอก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปณัฐพงศ์ บุญนวล และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วราภรณ์ รัตตนงพิสัยต์ กรรมการผู้ทรงคุณวุฒิภายใน ในการสอบวิทยานิพนธ์ และได้กรุณาให้คำแนะนำและชี้แนะแนวทางในการแก้ไขข้อบกพร่องของงาน วิทยานิพนธ์ให้สำเร็จลุล่วงและมีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

กราบขอบพระคุณ นักวิทยาศาสตร์ ครูช่าง อันประกอบไปด้วย ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ ภาควิชาวิทยาศาสตร์ฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ และ ภาควิชาอุตสาหกรรมเกษตร คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์สถานที่ ปฏิบัติการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

สุดท้ายนี้ผู้วิจัยใคร่ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา รวมทั้งพี่น้อง และเพื่อน ๆ ที่ได้ให้การ ดูแลและสนับสนุนทั้งในด้านการเรียนและชีวิตความเป็นอยู่มาโดยตลอดการดำเนินงานวิทยานิพนธ์จน สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

เสาวรส จงจิตรวัฒนกุล



## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
ประกาศคุุณุปการ.....	ช
สารบัญ.....	ซ
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ.....	ฎ
คำอธิบายสัญลักษณ์.....	1
บทที่ 1 บทนำ.....	3
1.1 ความเป็นมาของปัญหา.....	3
1.2 จุดมุ่งหมายของการศึกษา.....	4
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	5
1.4 ประโยชน์ของงานวิจัย.....	5
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	6
2.1 ทฤษฎีของใบไม้.....	6
2.2 กระบวนการขึ้นรูป.....	12
2.3 การออกแบบการทดลอง.....	17
2.4 การถ่ายเทความร้อน.....	19
2.5 การวิเคราะห์โดยวิธีเชิงตัวเลข.....	23
2.6 เอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	25

บทที่ 3 ขั้นตอนและการดำเนินงานวิจัย .....	33
3.1 การศึกษาสมบัติต่าง ๆ ของไบโทองกวาวที่ใช้ในกระบวนการขึ้นรูป .....	33
3.2 การขึ้นรูปภาชนะบรรจุอาหารจากไบโทองกวาว .....	34
3.3 การทดสอบคุณสมบัติต่าง ๆ ของภาชนะบรรจุอาหารจากไบโทองกวาว .....	38
3.4 การศึกษาการถ่ายเทความร้อนของชุดอุปกรณ์ที่ส่งผลต่อการขึ้นรูป .....	38
3.5 การทดสอบประสิทธิภาพของการนำภาชนะบรรจุอาหารจากไบโทองกวาวไปใช้งาน .....	46
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง .....	47
4.1 สมบัติต่าง ๆ ของไบโทองกวาวและภาชนะบรรจุอาหารจากไบโทองกวาว .....	47
4.2 ผลการศึกษากระบวนการขึ้นรูป .....	54
4.3 ผลการศึกษาการถ่ายเทความร้อนของชุดอุปกรณ์ที่ส่งผลต่อการขึ้นรูป .....	60
4.4 ผลการทดสอบประสิทธิภาพภาชนะบรรจุอาหารที่ขึ้นรูปจากไบโทองกวาว .....	70
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง .....	70
5.1 สรุปผลการทดลอง .....	70
5.2 ข้อเสนอแนะ .....	71
บรรณานุกรม .....	72
ภาคผนวก .....	77
ประวัติผู้วิจัย .....	116

## สารบัญตาราง

	หน้า
ตาราง 1 ความหนาใบทองกวาวและภาชนะบรรจุอาหารจากใบทองกวาว.....	49
ตาราง 2 องค์ประกอบต่าง ๆ ของใบทองกวาว.....	51
ตาราง 3 เปรียบเทียบชนิดธาตุของใบทองกวาว ใบกล้วย และใบสัก.....	52
ตาราง 4 สมบัติทางพลังงานความร้อนของใบทองกวาวและภาชนะบรรจุอาหารจากใบทองกวาว.....	53
ตาราง 5 เปรียบเทียบสมบัติทางกลของใบไม้จากงานวิจัยนี้กับงานวิจัยของ Abou-Zeid..	54



## สารบัญภาพ

	หน้า
ภาพ 1 ลักษณะของไผ่ไม้แต่ละชนิด.....	6
ภาพ 2 ส่วนประกอบโครงสร้างของไผ่ไม้โดยทั่วไป.....	8
ภาพ 3 โครงสร้างขององค์ประกอบภายในพีชโดยทั่วไป .....	10
ภาพ 4 ลักษณะทั่วไปของทองกวาว.....	11
ภาพ 5 วิธีการขึ้นรูปของกระดาษ.....	13
ภาพ 6 ขั้นตอนของกระบวนการลากขึ้นรูปลิก .....	14
ภาพ 7 ขั้นตอนกระบวนการกดอัดขึ้นรูป.....	15
ภาพ 8 ขั้นตอนกระบวนการขึ้นรูปไฮโดรฟอรั่มมิ่ง.....	16
ภาพ 9 ตัวอย่างของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการขึ้นรูป.....	16
ภาพ 10 การออกแบบส่วนประสมกลาง.....	18
ภาพ 11 การออกแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน.....	18
ภาพ 12 ประเภทของการถ่ายเทความร้อน.....	19
ภาพ 13 การกระจายอุณหภูมิแบบวิธี Semi-infinite solid.....	23
ภาพ 14 โครงสร้างของรูปแบบช่องขนาดเล็กภายในท่อลำเสียงของไผ่ไม้ทั้ง 3 ชนิด.....	26
ภาพ 15 แบบจำลองของโครงสร้างและผลการจำลองทดสอบคุณสมบัติทางกลใบรูปทฤษี27	
ภาพ 16 การทำแห้งของขึ้นมะม่วงแบบ 2 มิติ.....	30
ภาพ 17 กระบวนการถ่ายเทความร้อนและการคายน้ำของใบการบูร.....	31
ภาพ 18 ใบทองกวาวที่ใช้ในการขึ้นรูปและตำแหน่งวัดความหนาใบทองกวาว .....	34
ภาพ 19 ชุดอุปกรณ์การขึ้นรูปและตำแหน่งวัดอุณหภูมิ.....	35

ภาพ 20 ขั้นตอนการศึกษากระบวนการขึ้นรูปของไบโทองกวาวจากการออกแบบการทดลองโดยใช้วิธี RSM.....	37
ภาพ 21 ขั้นตอนการศึกษาปัญหาการถ่ายเทความร้อนของภาชนะบรรจุอาหารจากไบโทองกวาว.....	40
ภาพ 22 การจำลองปัญหาการถ่ายเทความร้อนใน 1 มิติ ของแม่พิมพ์ที่ใช้ในกระบวนการขึ้นรูป.....	41
ภาพ 23 การจำลองปัญหาการถ่ายเทความร้อนของเอลิเมนต์ที่ 1 และ 9 .....	42
ภาพ 24 การจำลองปัญหาการถ่ายเทความร้อนของเอลิเมนต์ที่ 2 และ 6.....	43
ภาพ 25 การจำลองปัญหาการถ่ายเทความร้อนของเอลิเมนต์ที่ 3 และ 7.....	43
ภาพ 26 การจำลองปัญหาการถ่ายเทความร้อนของเอลิเมนต์ที่ 4 และ 8 .....	43
ภาพ 27 ขั้นตอนการแก้สมการการกระจายอุณหภูมิโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ สำหรับการขึ้นรูปภาชนะบรรจุอาหารจากไบโทองกวาว.....	45
ภาพ 28 ขั้นตอนการทำนายการกระจายอุณหภูมิโดยการเปรียบเทียบการทดลองกับแบบจำลอง ทางคณิตศาสตร์ สำหรับการขึ้นรูปภาชนะบรรจุอาหารจากไบโทองกวาว .....	46
ภาพ 29 ภาพขยายจาก SEM ไบโทองกวาวและภาชนะบรรจุอาหารที่ขึ้นรูปจากไบโทองกวาว.....	49
ภาพ 30 แผนภาพแสดงผลของค่าร้อยละความชื้นระหว่างอุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการขึ้นรูป .....	57
ภาพ 31 ผลการวิเคราะห์สภาวะที่เหมาะสมของปัจจัยที่ใช้ในการขึ้นรูป .....	58
ภาพ 32 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าร้อยละความชื้นและอุณหภูมิในการขึ้นรูป.....	58
ภาพ 33 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นและเวลาในการขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 175 องศาเซลเซียส.....	59
ภาพ 34 ตัวอย่างการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพของภาชนะบรรจุอาหารที่ขึ้นรูปจากไบโทองกวาว.....	59

ภาพ 35 การกระจายอุณหภูมิในแต่ละตำแหน่งบนเครื่องขึ้นรูปไม้หุ้มฉนวนขณะให้ความร้อน.....62

ภาพ 36 การกระจายอุณหภูมิในแต่ละตำแหน่งบนเครื่องขึ้นรูปหุ้มฉนวนขณะให้ความร้อน.....63

ภาพ 37 ความสัมพันธ์ของอุณหภูมิและเวลาของการให้ความร้อนโดยเฉลี่ยของเครื่องขึ้นรูป.....63

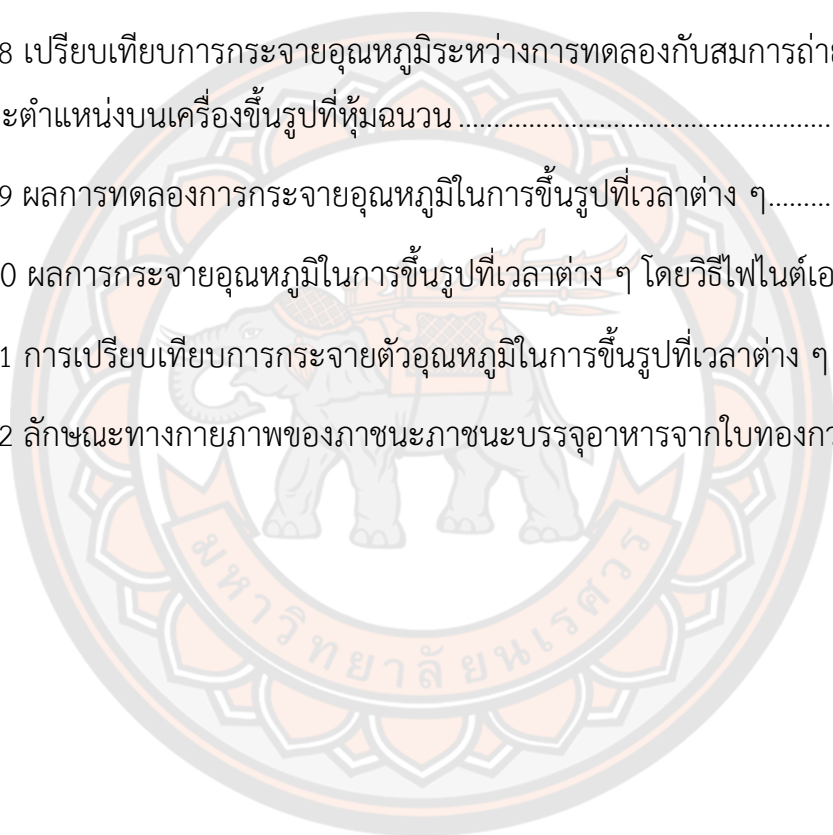
ภาพ 38 เปรียบเทียบการกระจายอุณหภูมิระหว่างการทดลองกับสมการถ่ายเทความร้อนในแต่ละตำแหน่งบนเครื่องขึ้นรูปที่หุ้มฉนวน.....64

ภาพ 39 ผลการทดลองการกระจายอุณหภูมิในการขึ้นรูปที่เวลาต่าง ๆ.....65

ภาพ 40 ผลการกระจายอุณหภูมิในการขึ้นรูปที่เวลาต่าง ๆ โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์.....66

ภาพ 41 การเปรียบเทียบการกระจายตัวอุณหภูมิในการขึ้นรูปที่เวลาต่าง ๆ.....69

ภาพ 42 ลักษณะทางกายภาพของภาชนะภาชนะบรรจุอาหารจากไบโทองกวาว.....70



## คำอธิบายสัญลักษณ์

$A$	พื้นที่การถ่ายเทความร้อน (Area of heat transfer), [ $\text{m}^2$ ]
$[C]$	เมทริกซ์ค่าความจุความร้อนจำเพาะ
$c_p$	ความจุความร้อนจำเพาะ (Specific heat capacity), [ $\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$ ]
$c_{p,leaf}$	ความจุความร้อนจำเพาะของใบไม้ [ $\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$ ]
$G_{sol}$	ค่ารังสีจากดวงอาทิตย์ (Solar radiation) [ $\text{W m}^{-2}$ ]
$h$	สัมประสิทธิ์การพาความร้อน (Convective heat transfer coefficient), [ $\text{W m}^{-2} \text{K}^{-1}$ ]
$k$	สัมประสิทธิ์การนำความร้อน (Thermal conductivity), [ $\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$ ]
$[K]$	เมทริกซ์ค่าคงที่การนำความร้อน
$L$	ระยะทางระหว่างเอลิเมนต์ [m]
$L_v$	ความร้อนแฝงของน้ำ (Latent heat of water), [ $\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$ ]
$M_{initial}$	น้ำหนักของใบไม้เริ่มต้นหรือใบไม้สดธรรมชาติ (Mass of initial or natural leaf), [g]
$M_{dry}$	น้ำหนักของใบไม้ในสภาพแห้ง (Mass of dried leaf), [g]
$q_{cond}$	อัตราการถ่ายเทความร้อนโดยการนำความร้อนในทิศตั้งฉากกับพื้นที่ [ $\text{W or J s}^{-1}$ ]
$q_{conv}$	อัตราการถ่ายเทความร้อนโดยการพาความร้อนต่อหน่วยพื้นที่ [ $\text{W or J s}^{-1}$ ]
$q_{rad}$	อัตราการถ่ายเทความร้อนโดยการแผ่รังสีความร้อน [ $\text{W or J s}^{-1}$ ]
$q_{loss}$	พลังงานความร้อนที่สูญเสียไปเนื่องจากมวลของน้ำ [ $\text{W or J s}^{-1}$ ]
$Q_{rad}$	การแผ่รังสีความร้อนระหว่างผิวด้านบนของใบไม้สู่สิ่งแวดล้อม [ $\text{MJ m}^{-2}$ ]
$Q'_{rad}$	การแผ่รังสีความร้อนระหว่างผิวด้านล่างของใบไม้สู่สิ่งแวดล้อม [ $\text{MJ m}^{-2}$ ]
$Q_{conv}$	การพาความร้อนของอากาศระหว่างผิวด้านบนของใบไม้ [ $\text{MJ m}^{-2}$ ]
$Q'_{conv}$	การพาความร้อนของอากาศระหว่างผิวด้านล่างของใบไม้ [ $\text{MJ m}^{-2}$ ]
$Q_{evap}$	ค่าความร้อนแฝงของการคายน้ำ [ $\text{MJ m}^{-2}$ ]
$\{Q(t)\}$	เวกเตอร์ของทิศทางไหลที่เวลาต่าง ๆ
$t$	เวลา (Time), [s or min]
$t(U)$	เวลาของการทดลองที่แม่พิมพ์บน [s or min]
$t(B)$	เวลาของการทดลองที่แม่พิมพ์ล่าง [s or min]
$t^*(U)$	เวลาของแบบจำลองที่แม่พิมพ์บน [s or min]
$t^*(B)$	เวลาของแบบจำลองที่แม่พิมพ์ล่าง [s or min]
$T$	อุณหภูมิหุ้มฉนวน (Insulated temperature), [ $\text{K or } ^\circ\text{C}$ ]



$T^*$	อุณหภูมิไม่หุ้มฉนวน (Non-insulated temperature), [K or °C]
$T_{air}$	อุณหภูมิของอากาศ (Air temperature), [K or °C]
$T_i$	อุณหภูมิเริ่มต้น (Initial temperature), [K or °C]
$T_s$	อุณหภูมิพื้นผิว (Surface temperature), [K or °C]
$\{T(t)\}$	เวกเตอร์ของอุณหภูมิที่เวลาต่าง ๆ
$x$	ระยะทางที่ตั้งฉากกับพื้นที่การถ่ายเทความร้อน (Thickness), [m]

### อักษรกรีก (Greek letters)

$\alpha$	ความสามารถการแพร่ความร้อน (Thermal diffusivity), [ $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$ ]
$\alpha_s$	ค่าความดูดกลืนแสงของใบไม้ [ $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$ ]
$\varepsilon$	สัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนของวัสดุ (Actual emissivity), [-]
$\sigma$	ค่าคงที่ของสเตฟาน-โบลซ์มานน์ (Stefan-Boltzmann constant), [ $5.67 \times 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$ ]
$\rho$	ความหนาแน่นของวัสดุ (Density), [ $\text{kg m}^{-3}$ ]
$\rho_{leaf}$	ความหนาแน่นของใบไม้ [ $\text{kg m}^{-3}$ ]
$\delta_{leaf}$	ความหนาของใบไม้ [cm]

## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ความเป็นมาของปัญหา

ปัจจุบันทุก ๆ สังคมมีการใช้ภาชนะบรรจุอาหารเป็นปริมาณเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ เนื่องจากปัจจัยทางสังคม และเทคโนโลยีที่ก้าวหน้า รูปแบบของการบริโภคของสังคมได้เปลี่ยนไปมากในช่วง 2 ถึง 3 ทศวรรษที่ผ่านมา [1] มนุษย์ต้องการความสะดวกสบายเพิ่มขึ้นจึงมีปริมาณการใช้ภาชนะบรรจุอาหารประเภทพอลิเมอร์สังเคราะห์เพื่อห่อหุ้ม และรักษาคุณภาพของอาหารเพิ่มมากขึ้น [2] อีกทั้งยังมีการออกแบบรูปร่างขนาดที่หลากหลายมีสีสันสวยงามตัวอย่างเช่น โฟม โดยโฟมผลิตมาจากเม็ดพลาสติกที่เกิดจากการพอลิเมอร์สังเคราะห์ [3] ซึ่งการใช้ภาชนะบรรจุอาหารประเภทนี้อาจส่งผลให้มีสารอันตรายปนเปื้อนในอาหารรวมทั้งส่งผลต่อร่างกายเมื่อมีการสะสมในปริมาณมาก และอันตรายที่ตามมาคือปัญหาด้านสิ่งแวดล้อม ประเทศไทยในช่วง 5 ปีที่ผ่านมาตั้งแต่ปี 2555-2559 พบว่าปริมาณขยะประเภทโฟมเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องจาก 56 ล้านใบต่อวันเป็น 61 ล้านใบต่อวัน [4] กล่าวคือถ้าสามารถกำจัดภาชนะบรรจุอาหารหลังจากใช้แล้วได้รวดเร็วและไม่ทำลายสิ่งแวดล้อมก็จะสามารถลดปัญหาได้ หรืออีกวิธีคือ การเลือกวัสดุที่สามารถใช้เวลาในการย่อยสลายได้เร็วและทำมาจากวัสดุทางธรรมชาติ ซึ่งในด้านของอุตสาหกรรมการผลิตภาชนะบรรจุอาหาร สำหรับอาหารส่วนใหญ่ยังคงเป็นภาชนะจากโฟม อย่างไรก็ตามโฟมที่ใช้บรรจุอาหารประกอบด้วยสารเคมีหลายชนิด และโฟมทุกชนิดก่อให้เกิดปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมตามมา ในกระบวนการผลิตมีการปล่อยสารที่มีความเป็นพิษเข้าสู่อากาศและน้ำทำให้เกิดภาวะมลพิษ นอกจากนี้ภาชนะบรรจุอาหารประเภทโฟม จะไม่สามารถกลับมาใส่อาหารได้อีก [5] [6] และยังส่งผลกระทบต่อสุขภาพคือ สารเคมีสามารถปนเปื้อนลงในอาหาร ทำให้เกิดอันตรายต่อร่างกายหรือเพิ่มปริมาณการสะสมในร่างกายทำให้เกิดความผิดปกติของระบบต่าง ๆ ในร่างกาย [7] ดังนั้นอีกหนึ่งทางเลือกที่ดีที่สุดเพื่อลดปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมและผลกระทบต่อร่างกายก็คือ วัสดุจากธรรมชาติ ซึ่งวัสดุจากธรรมชาติใช้เวลาน้อยในการย่อยสลาย เมื่อเทียบกับวัสดุที่มาจากพอลิเมอร์สังเคราะห์ และเมื่อใช้แล้วสามารถนำไปใช้ประโยชน์ทางด้านพลังงานชีวมวลต่อไปได้อีก

เมื่อนึกถึงวัสดุจากธรรมชาติที่สามารถนำมาขึ้นรูปเป็นภาชนะบรรจุอาหารได้และยังสามารถออกฤทธิ์ทางยาได้ มีสีสันสวยงามคงทนไม่พ่น “ไบไม้” ด้วยสีสังเคราะห์ที่ธรรมชาติ [8] ไบไม้จึงถูกเลือกให้เป็นวัสดุจากธรรมชาติที่นำมาใช้ทดแทนภาชนะบรรจุอาหารประเภทโฟม ไบไม้ที่มีคุณสมบัติออกฤทธิ์ทางยา คือไบทองกวาว ซึ่งมีลักษณะของไบที่ใหญ่ หนา มีโครงสร้างของไบชัดเจน แข็งแรง [9] และคุณสมบัติออกฤทธิ์ทางยาอาทิเช่น แก้ท้องอืด แก่ริดสีดวงทวาร แก้ผื่นคัน แก้ปวด

และสามารถนำมาใช้เป็นยาบำรุงกำลัง [10] ด้วยประโยชน์เหล่านี้ของใบทองกวาวจึงเป็นที่น่าสนใจอย่างมากในการศึกษาการขึ้นรูปภาชนะบรรจุอาหารที่สามารถย่อยสลายได้

อย่างไรก็ตามจากการศึกษาโครงสร้างใบไม้ของ Liu และคณะ [11] โดยมีการเปรียบเทียบของโครงสร้างใบไม้ของใบรูปฤๅษีกับแบบจำลองเพื่อสามารถนำไปพัฒนาในการออกแบบโครงสร้างไบโอนิก (Bionic) มีส่วนประกอบคือ ผนังที่กั้น (Partition) และแผ่นสายใยหรือแผ่นช่องรับแสง (Diaphragm) ซึ่งช่วยเสริมความแข็งแรงและทนต่อแรงกระแทกได้ ในส่วนการศึกษาการถ่ายเทความร้อนและความร้อนของใบการบูร (Camphor leaf) ของ Hong และคณะ [12] พบว่าการถ่ายเทความร้อนและมวลของใบการบูรทำให้อุณหภูมิของใบเย็นลง และสามารถกระจายอุณหภูมิได้ประมาณร้อยละ 32.9 จากการดูดซึมพลังงานแสงอาทิตย์ การศึกษากระบวนการขึ้นรูปของภาชนะบรรจุอาหารหลากหลายประเภท โดยส่วนมากยังคงเป็นการศึกษาการขึ้นรูปภาชนะจากกระดาษหรือไม้ขานอ้อย เช่น การศึกษาองค์ประกอบของกระบวนการขึ้นรูปกระดาษแข็งและศึกษาผลกระทบของรอยพับที่ได้จากการขึ้นรูปโดยการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method; FEM) ของ Awais และคณะ [13] พบว่าในการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของภาชนะบรรจุอาหารจากกระดาษแข็งเป็นวิธีที่เหมาะสมสามารถแก้ไขปัญหาคัดข้อในเรื่องของรูปร่างและยังแสดงถึงผลกระทบของรอยยับที่มุมต่าง ๆ ในกระบวนการขึ้นรูปได้ แต่ยังไม่มีการวิจัยใดที่ทำการศึกษาระบบการขึ้นรูปของภาชนะบรรจุอาหารจากใบทองกวาวโดยใช้หลักการของการถ่ายเทความร้อนในการขึ้นรูปใบทองกวาวที่ส่งผลกระทบต่อกระบวนการขึ้นรูปและต่อคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของใบทองกวาว ผลกระทบเหล่านี้มีหลายปัจจัยได้แก่ การเปลี่ยนแปลงทางด้านอุณหภูมิ ความชื้น และเวลา เพื่อเป็นการลดผลกระทบและปรับปรุงกระบวนการให้ดีขึ้น ในงานวิจัยนี้จึงใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์มาใช้ในการคำนวณผลและเปรียบเทียบกับกรณีทดลองจริง ซึ่งจะสามารถทำนายการเปลี่ยนแปลงได้เหมาะสม เพื่อใช้ในการอธิบายปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นจริง รวมทั้งทำการศึกษาวิเคราะห์คุณสมบัติและวิธีการเชิงตัวเลขของภาชนะบรรจุอาหารที่ย่อยสลายได้จาก ใบทองกวาว

## 1.2 จุดมุ่งหมายของการศึกษา

1.2.1 ศึกษาสมบัติต่าง ๆ ทางกายภาพและเคมีของใบทองกวาวและภาชนะบรรจุอาหารจากใบทองกวาว

1.2.2 พัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการขึ้นรูปภาชนะบรรจุอาหาร โดยใช้หลักการของระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ด้านการกระจายความร้อนของใบทองกวาวระหว่างการขึ้นรูปมาวิเคราะห์ในกระบวนการขึ้นรูปภาชนะบรรจุอาหารเพื่ออธิบายปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้น

1.2.3 ศึกษาความสามารถในการนำไปใช้งานของภาชนะบรรจุอาหารจากใบทองกวาวได้จริง

### 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1.3.1 ศึกษาทฤษฎีและข้อมูลจากวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับคุณสมบัติต่าง ๆ ของใบไม้ ความเหมาะสมในการนำมาใช้งานของใบทองกวาว กระบวนการขึ้นรูปภาชนะบรรจุอาหารที่มีอยู่ในปัจจุบัน รวมทั้งการถ่ายเทความร้อนของชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการขึ้นรูปภาชนะบรรจุอาหาร การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ซึ่งข้อมูลเหล่านี้จะนำมาใช้ในการออกแบบและพัฒนากระบวนการขึ้นรูป

1.3.2 ศึกษาสมบัติต่าง ๆ ของใบทองกวาวและภาชนะบรรจุอาหารจากใบทองกวาว

1.3.3 ศึกษากระบวนการขึ้นรูปโดยการออกแบบการทดลองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสม

1.3.4 ทดสอบการนำไปใช้งานของภาชนะบรรจุอาหารจากใบทองกวาว

1.3.5 ศึกษาการถ่ายเทความร้อนของชุดอุปกรณ์ที่ส่งผลต่อการขึ้นรูป ได้แก่

1.3.5.1 เปรียบเทียบการกระจายอุณหภูมิของแม่พิมพ์ที่เปลี่ยนแปลงไป ในระหว่างการให้ความร้อนของชุดแม่พิมพ์จากการหุ้มฉนวนและไม่หุ้มฉนวน

1.3.5.2 สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้เป็นการแสดงผลของอุณหภูมิที่แม่พิมพ์กระจายเข้าสู่ใบทองกวาว

1.3.5.3 เปรียบเทียบการกระจายอุณหภูมิมะหว่างการทดลองและการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ในขณะขึ้นรูปภาชนะบรรจุอาหาร

### 1.4 ประโยชน์ของงานวิจัย

1.4.1 ผลที่ได้จากงานวิจัยในครั้งนี้ สามารถนำมาใช้เป็นแนวทางในการจำลองของกระบวนการขึ้นรูปของภาชนะบรรจุอาหารที่มาจากใบไม้ตามธรรมชาติและสามารถอธิบายถึงปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นได้

1.4.2 เพื่อนำมาพัฒนาการออกแบบแม่พิมพ์และภาชนะบรรจุอาหารที่มาจากธรรมชาติ

1.4.3 เป็นการนำวัสดุจากธรรมชาติมาใช้ให้เกิดประโยชน์ ในรูปแบบที่แตกต่างไปจากเดิม

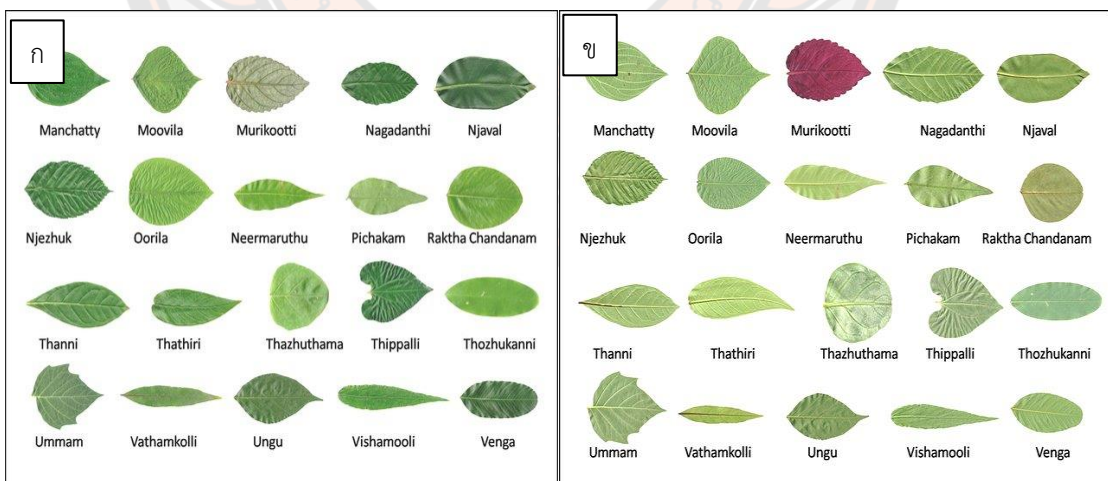
## บทที่ 2

### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ทฤษฎีและวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องของงานวิจัยนี้สามารถแบ่งออกได้เป็น ทฤษฎีของใบไม้ โดยทั่วไปจะประกอบด้วย โครงสร้างของใบไม้ องค์ประกอบของใบไม้ และใบทองกวาว ในส่วนของกระบวนการขึ้นรูปจะใช้ทฤษฎีของกระบวนการขึ้นรูปของโลหะและกระบวนการขึ้นรูปกระดาษ เพื่อนำมาประยุกต์ใช้ในการพัฒนาการขึ้นรูปของใบไม้ รวมถึงทฤษฎีการถ่ายเทความร้อนที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการขึ้นรูป ซึ่งสามารถนำมาวิเคราะห์โดยวิธีเชิงตัวเลขที่เป็นประโยชน์ต่อการทำงานวิจัยนี้

#### 2.1 ทฤษฎีของใบไม้

ใบไม้เป็นส่วนประกอบของพืชที่เจริญเติบโตออกไปบริเวณด้านข้าง มีตำแหน่งอยู่ที่ด้านข้างของข้อปล้องลำต้น (Node) และกิ่ง (Branch) ซึ่งหน้าที่หลักของใบไม้คือการสังเคราะห์แสง (Photosynthesis) การหายใจ (Transpiration) และการคายน้ำ (Evaporation) ลักษณะใบไม้แต่ละชนิดจะมีรูปร่าง และขนาดของใบแตกต่างกันไปตามชนิดของพันธุ์พืชดังแสดงในภาพที่ 1 [14] การจำแนกลักษณะโครงสร้างของใบไม้โดยทั่วไปแบ่งออกเป็นสองส่วนคือ โครงสร้างภายนอกของใบ และโครงสร้างภายในของใบ



ภาพ 1 ลักษณะของใบไม้แต่ละชนิด  
(ก) ด้านหน้าใบ (ข) ด้านหลังใบ [14]



### 2.1.1 โครงสร้างโดยทั่วไปของใบไม้

โครงสร้างโดยทั่วไปของใบไม้โดยจะแบ่งเป็น 2 ส่วนคือ โครงสร้างภายนอกของใบไม้ และโครงสร้างภายในของใบไม้ หรือที่เรียกว่า โครงสร้างภาคตัดขวางของใบไม้ ดังแสดงในภาพที่ 2

#### 2.1.1.1 โครงสร้างภายนอกของใบไม้

ส่วนใหญ่ประกอบด้วยส่วนแบน ๆ ที่แผ่ขยายออกไปเรียกว่า แผ่นใบ (Blade) และมีก้านใบ (Petiole) เชื่อมติดอยู่กับลำต้นหรือกิ่งทางด้านข้าง และอาจมีหูใบ (Stipule) ที่โคนก้านใบ ใบพืชมีลักษณะแบนมีประโยชน์ช่วยเพิ่มพื้นที่ผิวในการรับแสงเพื่อให้ได้พลังงานไปใช้ในการตรึงคาร์บอนไดออกไซด์ และช่วยในการระบายความร้อน ในพืชใบเลี้ยงคู่จะมีเส้นใบ (Vein) แตกแขนงออกมาจากเส้นกลางใบ (Midrib) เพื่อให้การลำเลียงสารต่าง ๆ จากท่อลำเลียงไปสู่ทุก ๆ เซลล์ของใบได้ทั่วทั้งก้านใบของพืช พืชใบเลี้ยงเดี่ยวอาจเป็นกาบที่มีเส้นใบขนาดใหญ่เรียงขนานกันจนถึงปลายใบ พืชบางชนิดเส้นใบย่อยแตกแขนงตั้งฉากกับเส้นใบใหญ่ เช่น ใบกล้วย และเส้นใบย่อย ก็ยังเรียงขนานกันเองอีกด้วย [14]

#### 2.1.1.2 โครงสร้างภายในของใบไม้ หรือ โครงสร้างภาคตัดขวางของใบไม้

โครงสร้างภาคตัดขวางของใบไม้ จะประกอบด้วย 2 ส่วนด้วยกันคือ ชั้นเอพิเดอร์มิส (Epidermis layer) และชั้นมีโซฟิลล์ (Mesophyll layer) [14] ดังนี้

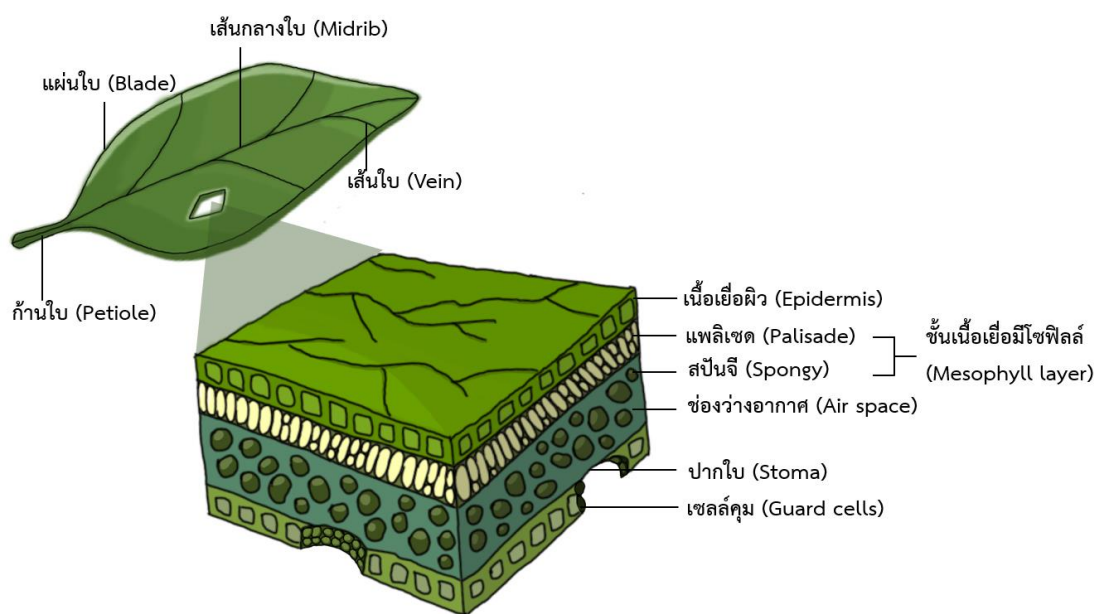
1) ชั้นเอพิเดอร์มิส (Epidermis layer) เป็นเนื้อเยื่อผิวที่อยู่ด้านบนและด้านล่างของใบไม้ จะประกอบด้วย ผนังเซลล์ (Cell wall) และเซลล์คุม (Guard cell) โดยผนังเซลล์ของใบไม้เป็นโครงสร้างที่ซับซ้อนส่วนมากประกอบด้วย ลิกโนเซลลูโลส (Lignocellulose) ซึ่งเป็นสารอินทรีย์ที่มีอยู่มากที่สุดในโลกและเมทริกซ์ (Matrix) ที่เชื่อมโยงข้ามกันระหว่าง โพลีแซคคาไรด์ (Polysaccharide) ไกลโคโปรตีน (Glycoprotein) และลิกนิน (Lignin) ในส่วนของเซลล์คุมมีหน้าที่ควบคุมการแลกเปลี่ยนแก๊สและการระเหยของน้ำออกจากใบ โดยลักษณะเซลล์ผิวมีรูปร่างคล้ายไตหรือเมล็ดถั่ว 2 เซลล์ประกบเข้าด้วยกัน เมื่อเซลล์คุมมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างทำให้เกิดเป็นช่องเปิดตรงกลาง ซึ่งจะเรียกว่าปากใบ (Stoma)

2) ชั้นมีโซฟิลล์ (Mesophyll layer) เป็นเนื้อเยื่อที่อยู่ด้านในถัดเข้ามาจากเอพิเดอร์มิสทั้งบนและล่าง เซลล์ส่วนใหญ่เป็นเซลล์พาราเรโนไคมา (Parenchyma) ภายในมีคลอโรฟิลล์ (Chlorophyll) โดยเรียกว่า คลอเรนไคมา (Chlorenchyma) ซึ่งมีหน้าที่สังเคราะห์ด้วยแสง ดังนั้นโครงสร้างภายในแบ่งเป็น 3 ส่วนดังนี้

2.1) แพลลิเซดมีโซฟิลล์ (Palisade mesophyll) มักพบอยู่ใต้ชั้นของเอพิเดอร์มิสด้านบน ประกอบด้วยเซลล์รูปร่างยาว เรียงตัวเป็นแถวตั้งฉากกับผิวใบคล้ายรั้ว เพื่อให้ทุกเซลล์มีโอกาสได้สัมผัสกับแสง แพลลิเซดเซลล์มีคลอโรพลาสต์ (Chloroplast) จำนวนมาก จึงส่งผลให้เซลล์มีสีเขียวเข้มและเหมาะในการสังเคราะห์ด้วยแสงมากกว่าเซลล์ชนิดอื่น ๆ

2.2) สปันจิมีโซฟิลล์ (Spongy mesophyll) เป็นชั้นของเซลล์ที่อยู่ระหว่างเซลล์แพลลิดกับเอพิเตอร์มิสด้านล่างเซลล์ชั้นนี้รูปร่างไม่แน่นอน เรียงตัวกันไม่หนาแน่น ทำให้มีช่องว่างอากาศ (Air space) ระหว่างเซลล์มาก เซลล์สปันจิมีโซฟิลล์จะมีปริมาณคลอโรฟิลล์น้อยกว่าเซลล์แพลลิดมีโซฟิลล์ส่งผลให้สังเคราะห์แสงได้น้อย จึงทำหน้าที่เป็นที่เก็บอาหารชั่วคราวและช่วยในการและเปลี่ยนก๊าซระหว่างภายในและภายนอกใบ

2.3) มัดท่อลำเลียง (Vascular bundle) เป็นส่วนของเส้นใบ (Vein) ที่แทรกอยู่ภายในใบประกอบด้วย ท่อน้ำ หรือ ไซเลม (Xylem) อยู่ด้านบน และท่ออาหาร หรือ โพลเอม (Phloem) อยู่ด้านล่างทำหน้าที่ในการลำเลียงน้ำเข้าสู่ส่วนต่าง ๆ ของใบ และลำเลียงอาหารที่สร้างได้ที่ใบออกไปยังส่วนต่าง ๆ ทั่วต้นพืชมัดท่อลำเลียงของพืชจะล้อมรอบด้วยกลุ่มเซลล์ที่เรียกว่าบันเดิลชีท (Bundle sheath) มัดท่อลำเลียงโดยส่วนใหญ่จะอยู่ในชั้นสปันจิมีโซฟิลล์



ภาพ 2 ส่วนประกอบโครงสร้างของใบไม้โดยทั่วไป

ประกอบไปด้วยโครงสร้างภายใน หรือเรียกว่าโครงสร้างภาคตัดขวางของใบไม้ [14]

### 2.1.2 องค์ประกอบภายในของใบไม้

ภายในโครงสร้างของใบไม้มีองค์ประกอบของเส้นใยพอลิเมอร์ 3 ชนิด คือ เฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose) เซลลูโลส (Cellulose) และลิกนิน (Lignin) ดังแสดงในภาพที่ 3 [15]

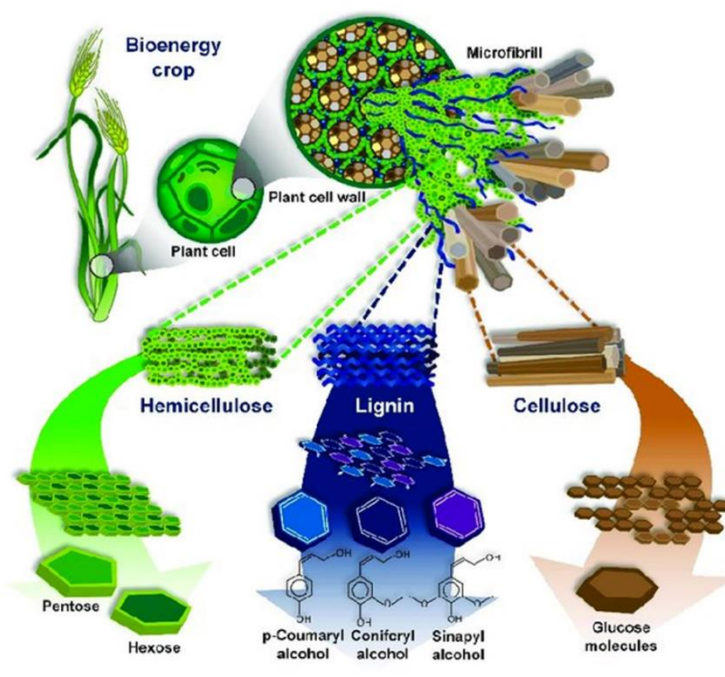


2.1.2.1 เฮมิเซลลูโลสเป็นคาร์โบไฮเดรต (Carbohydrate) ประเภทพอลิแซ็กคาไรด์ (Polysaccharide) โมโนเมอร์ของเฮมิเซลลูโลสเป็นพอลิแซ็กคาไรด์แบบวิวิธพันธุ์ (Heterogenous polysaccharide) โดยทั่วไปจะประกอบด้วย กลุ่มน้ำตาลต่าง ๆ เช่น กลูโคส (Glucose) แมนโนส (Mannose) ไชโลส (Xylose) และอะราบินโนส (Arabinose) มักพบอยู่ในรูปโพลิเมอร์ไซแลน (Polymer xylan) แมนแนน (Mannan) กาแลกแตน (Galactan) และอะราบินัน (Arabinan) กลุ่มน้ำตาลจะขึ้นอยู่กับชนิดของใบไม้ เฮมิเซลลูโลสประกอบด้วย 500 ถึง 3,000 หน่วยน้ำตาล ดังนั้นกลุ่มน้ำตาลต่าง ๆ ในเฮมิเซลลูโลส เช่นกลูคูโรโนไซแลน (Glucuronoxylan) นำมาผลิตไซลิตอล (Xylitol) ถูกนำมาใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมอาหาร หรือ กลูโคแมนแนน (Glucomannan) สามารถหมักด้วยจุลินทรีย์เพื่อผลิตเป็นเอทานอลต่อไปได้

2.1.2.2 เซลลูโลสเป็นสารประกอบอินทรีย์ที่พบมากที่สุดโดยมีปริมาณถึงร้อยละ 45 ของสารอินทรีย์ในธรรมชาติ ซึ่งเซลลูโลสเป็นคาร์โบไฮเดรตประเภทพอลิแซ็กคาไรด์แบบเอกพันธุ์ (Homogeneous polysaccharide) ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง ประกอบด้วยน้ำตาลกลูโคส (Glucose) มาต่อกันด้วยพันธะไกลโคไซด์ (Glycoside bond) เซลลูโลสรวมตัวกันเป็นกลุ่มของผลึกที่มีความต้านทานแรงดึงสูงและทนต่อการย่อยสลายน้ำตาลกลูโคส เซลลูโลสจะพบอยู่ร่วมกับเฮมิเซลลูโลสและเพกทิน (Pectin) โดยเซลลูโลสจัดเป็นเส้นใยอาหาร (Dietary fiber) ชนิดที่ไม่ละลายในน้ำ และไม่สามารถย่อยได้ด้วยเอนไซม์ในระบบทางเดินอาหารของมนุษย์และสัตว์กระเพาะเดี่ยว จึงมีความสำคัญ เนื่องจากเส้นใยอาหารที่ไม่ละลายในน้ำ มีคุณสมบัติทนต่อปฏิกิริยาของเอนไซม์กรด และเบสที่เจือจาง มีกลไกที่พองตัวในน้ำเหมือนฟองน้ำไม่ให้ความหนืด ทำให้เพิ่มปริมาตรน้ำในกระเพาะอาหาร แบททีเรียในลำไส้ใหญ่ไม่สามารถย่อยเซลลูโลสได้ จึงช่วยเพิ่มเนื้ออุจจาระ ลดปัญหาท้องผูกได้ และลดความเสี่ยงของมะเร็งลำไส้ใหญ่

2.1.2.3 ลิกนินเป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง ประกอบไปด้วย คาร์บอน ไฮโดรเจน และออกซิเจนรวมกันเป็นสารอะโรมาติก โดยลิกนินเป็นคาร์โบไฮเดรตประเภทเส้นใยอาหารที่ไม่ให้พลังงาน โครงสร้างโมเลกุลของลิกนินเป็นพอลิแซ็กคาไรด์ที่มีขนาดโมเลกุลใหญ่ อีกทั้งลิกนินยังเป็นส่วนประกอบที่สำคัญของเนื้อเยื่อพืช สามารถพบได้ในส่วนระหว่างผนังเซลล์ เซลลูโลส และเฮมิเซลลูโลส ส่งผลให้ผนังเซลล์พืชมีความแข็งแรง เนื่องจากลิกนินมีคุณสมบัติที่ไม่ละลายน้ำ ไม่มีการยืดหยุ่น แต่มีความแข็งแรงสูง ดังนั้นลิกนินจึงช่วยเพิ่มความแข็งแรงให้กับผนังเซลล์ และความต้านทานต่อแมลง

พืชหรือใบไม้แต่ละชนิดมีอัตราส่วนระหว่างเฮมิเซลลูโลส เซลลูโลส และลิกนินไม่เท่ากัน ขึ้นอยู่กับชนิดและอายุของพืช พืชที่มีลิกนินมากจะมีความแข็งแรงสูงและในพืชชนิดเดียวกันที่มีอายุมากกว่าจะพบว่ามีปริมาณลิกนินมากเช่นเดียวกัน [15]



ภาพ 3 โครงสร้างขององค์ประกอบภายในพืชโดยทั่วไป ประกอบไปด้วยเฮมิเซลลูโลส ลิกนิน และเซลลูโลส [15]

### 2.1.3 ใบทองกวาว

ใบทองกวาว, ทอง หรือ ทองธรรมชาติ (Bastard Teak Leaf) พบขึ้นกระจายทั่วไปตามที่ราบลุ่มในป่าเบญจพรรณตามภาคต่าง ๆ ที่อยู่สูงจากระดับน้ำทะเล 80-300 เมตร ทองกวาวเป็นไม้ยืนต้นขนาดกลางในวงศ์ถั่ว มีถิ่นกำเนิดในเอเชียใต้ มีชื่อทางวิทยาศาสตร์ (Scientific name) คือ *Butea monosperma* (Lam.) Taub. อยู่ในวงศ์ (Family) Fabaceae สกุล (Genus) *Butea* และสปีชีส์ (Species) *B. monosperma* [10]

#### 2.1.3.1 ลักษณะโดยทั่วไปจำแนกได้เป็น

1) ลำต้น เป็นไม้ต้นขนาดกลาง มีความสูงประมาณ 10-15 เมตร โดยลักษณะของเปลือกต้นเป็นปมเป็นปุ่ม ไม่เรียบเกลี้ยง เปลือกต้นสีน้ำตาลอ่อนหรือน้ำตาลเทา แตกเป็นร่องตื้นและเป็นปุ่มปม ในส่วนของลำต้นและกิ่งคดงอ ปลายกิ่งห้อยลง เปลือกมีน้ำยางในสีแดง หากทิ้งไว้จะแข็งเป็นก้อนสีแดง เปราะ เป็นไม้ผลัดใบ เรือนยอดรูปทรงไม่แน่นอน ส่วนใหญ่เป็นทรงกระบอกหรือทรงกลม ดังภาพ 4 (ก)

2) ใบ เป็นใบประกอบ มี 3 ใบย่อย โดยลักษณะก้านใบมีความยาว 8 ถึง 10 เซนติเมตร ใบกลางมีลักษณะใบรูปมนกว้างเกือบกลมมีความกว้าง 8 ถึง 10 เซนติเมตรและความยาวประมาณ 10 ถึง 12 เซนติเมตร ใบด้านข้างทั้งสองลักษณะใบรูปไข่ กว้าง 6 ถึง 8 เซนติเมตร

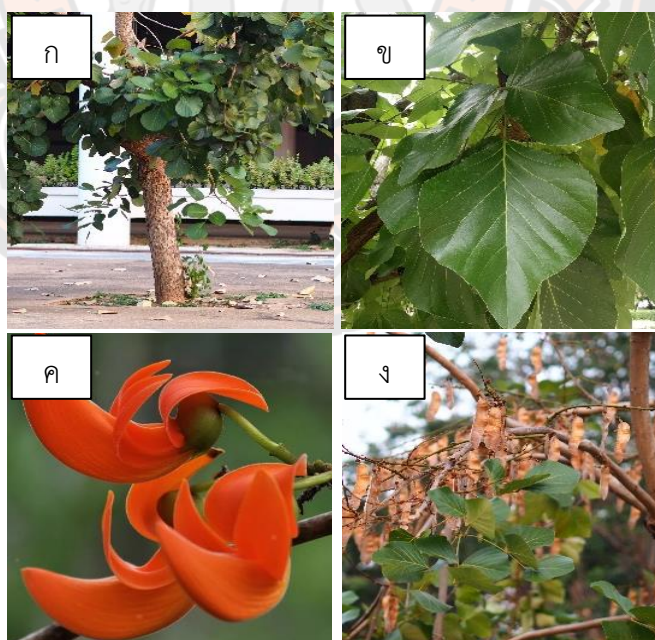
ยาว 8 ถึง 10 เซนติเมตร ซึ่งลักษณะใบเป็นปลายใบมนที่โคนใบแหลมมีสีเขียวเข้มและใต้ใบมีสีเขียวอมเทา มีขนทั้งสองด้าน ดังภาพ 4 (ข)

3) ดอก ออกดอกเป็นช่อแบบช่อกระจุกที่ปลายกิ่งหรือกิ่งข้าง ดอกลักษณะรูปดอกถั่ว ฐานรองดอกโคนเชื่อมติดกันเป็นรูปถ้วย กลีบเลี้ยงสีเขียวเข้ม มีขนนุ่มคล้ายกำมะหยี่ กลีบดอก 5 กลีบ ลักษณะโค้งยาว ประมาณ 5 ถึง 8 เซนติเมตร สีแดงสด หรือสีเหลือง มีขนเกสรตัวผู้ 10 อัน แยกเป็นอิสระ 1 อัน อีก 9 อัน โคนเชื่อมติดกันเป็นหลอด ออกดอกช่วงเดือนธันวาคมถึงมีนาคมของทุกปี ดังภาพ 4 (ค)

4) ผล ลักษณะผลเป็นฝักแบน กว้าง 3 ถึง 4 เซนติเมตร ยาวประมาณ 10 ถึง 15 เซนติเมตร มีขนนุ่ม เมล็ด มีเมล็ดลักษณะแบน 1 เมล็ด อยู่ที่ปลายฝัก ดังภาพ 4 (ง)

#### 2.1.3.2 ประโยชน์ของใบทองกวาว

ประโยชน์ของใบทองกวาว ถ้านำใบทองกวาวมาสกัดจะสามารถนำไปใช้ในงานด้านเภสัชกรรม เช่น เป็นส่วนผสมในน้ำยาบ้วนปาก หรือใช้ทำยารักษาอาการแก้เจ็บคอ หรือถ้านำใบทองกวาวมาต้มดื่มเป็นประจำก็จะสามารถรักษาโรคต่าง ๆ อาทิเช่น โรคประสาท โรคเบาหวาน แก้ปวดเมื่อย ขับพยาธิ ท้องอืด ริดสีดวงทวาร แก้ผื่นคัน หรือแม้กระทั่งสามารถนำมาใช้เป็น ยาบำรุงธาตุ หรือเครื่องดื่มชูกำลังได้ [5-7]



ภาพ 4 ลักษณะทั่วไปของทองกวาว

(ก) ลำต้นทองกวาว (ข) ใบทองกวาว (ค) ดอกทองกวาว (ง) ผลหรือเมล็ดทองกวาว

## 2.2 กระบวนการขึ้นรูป

กระบวนการขึ้นรูปหรือกรรมวิธีการขึ้นรูป (Forming) คือ กระบวนการผลิตประเภทหนึ่งที่เปลี่ยนแปลงรูปร่างของวัตถุดิบ (Raw material) ให้เป็นผลิตภัณฑ์ (Product) เครื่องมือสำคัญที่ใช้ในการขึ้นรูปประกอบด้วยแม่พิมพ์ (Die หรือ Mold) ซึ่งแม่พิมพ์จะได้รับการออกแบบให้เหมาะสมกับงานในการขึ้นรูปนั้น ๆ เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่ต้องการมีรูปร่างและขนาดที่หลากหลาย ตามลักษณะการใช้งานที่แตกต่างกัน

### 2.2.1 กระบวนการขึ้นรูปของโลหะ

โลหะถือเป็นวัสดุที่นิยมใช้ในงานอุตสาหกรรมหลากหลายประเภท เนื่องจากโลหะเป็นวัสดุที่แข็งแรง ทนทาน จึงถูกนำมาขึ้นรูปเป็นวัสดุรูปทรงต่าง ๆ โดยกระบวนการขึ้นรูปโลหะเมื่อพิจารณาจากวัสดุเริ่มต้น จะแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท คือ กระบวนการขึ้นรูปโลหะแผ่น (Sheet metal forming process) และกระบวนการขึ้นรูปโลหะก้อน (Bulk metal forming process) ซึ่งการขึ้นรูปของโลหะมี 2 วิธีใหญ่ ๆ คือการขึ้นรูปแบบร้อน (Hot working) และการขึ้นรูปแบบเย็น (Cold working) [16]

2.2.1.1 การขึ้นรูปแบบร้อน เป็นกระบวนการที่ทำให้โลหะได้รับแรงกลที่อุณหภูมิสูง ข้อดีของกระบวนการขึ้นรูปนี้คือ สารมลทิน (Impurity) จะมีการแตกตัวอย่างกระจายทำให้สามารถกำจัดรูพรุน (Porosity) ได้ดียิ่งขึ้นและมีความละเอียดของเกรน (Grain) ที่มากขึ้น อีกทั้งยังช่วยปรับปรุงคุณสมบัติทางกล นอกจากนี้ข้อเสียของกระบวนการขึ้นรูปแบบร้อนจะส่งผลให้เกิดออกไซด์และสนิมที่บริเวณผิวชิ้นงาน ทำให้ผิวชิ้นงานออกมาไม่สวย และไม่สามารถควบคุมขนาดของชิ้นงานได้ สาเหตุอันเนื่องมาจากการขยายตัวและการหดตัวของโลหะเมื่อได้รับความร้อน [16]

2.2.1.2 การขึ้นรูปแบบเย็น เป็นกระบวนการขึ้นรูปเพื่อให้โลหะเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างที่อุณหภูมิต่ำ ข้อดีของการขึ้นรูปแบบเย็นคือ สามารถทำการขึ้นรูปในสภาวะอุณหภูมิห้องปกติ มีความสวยที่ผิวเรียบ สะอาด เงางาม ชิ้นงานแข็งแรง และยังมีขนาดที่แน่นอน ส่วนข้อเสียคือ จะเกิดความเค้นและความเครียด (Stress and strain) ลักษณะเกรนของโลหะเกิดการแตกหักได้ง่าย อีกทั้งยังต้องลงทุนมากในการติดตั้งเครื่องจักรที่มีกำลังสูงและขนาดใหญ่ [16]

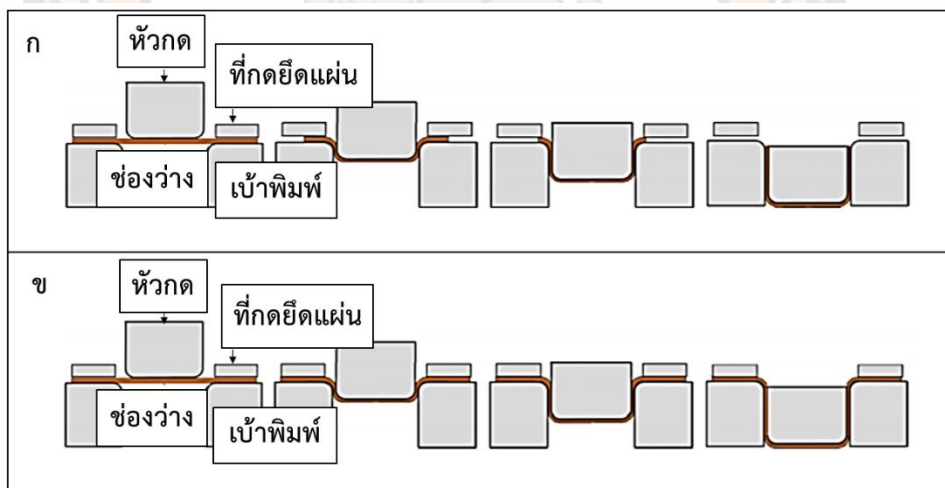
### 2.2.2 กระบวนการขึ้นรูปของกระดาษ

ในการพัฒนากระบวนการขึ้นรูปสำหรับกระดาษแข็งและปรับปรุงลักษณะการเปลี่ยนรูปของกระดาษ กระบวนการเหล่านี้มีวัตถุประสงค์เพื่อผลิตภาชนะบรรจุอาหารแบบใช้แล้วทิ้ง เพื่อทดแทนภาชนะบรรจุอาหารประเภทโฟม กระบวนการขึ้นรูปสำหรับกระดาษแบ่งเป็น 2 วิธี คือวิธีการเลื่อนเข้าช่องว่าง (Sliding blank method) และวิธีการช่องว่างคงที่ (Fixed blank method) ดังแสดงภาพ 5 ซึ่งเป็นเทคโนโลยีที่เกิดขึ้นใหม่ในการขึ้นรูปกระดาษของอุตสาหกรรมปัจจุบัน [17, 18]



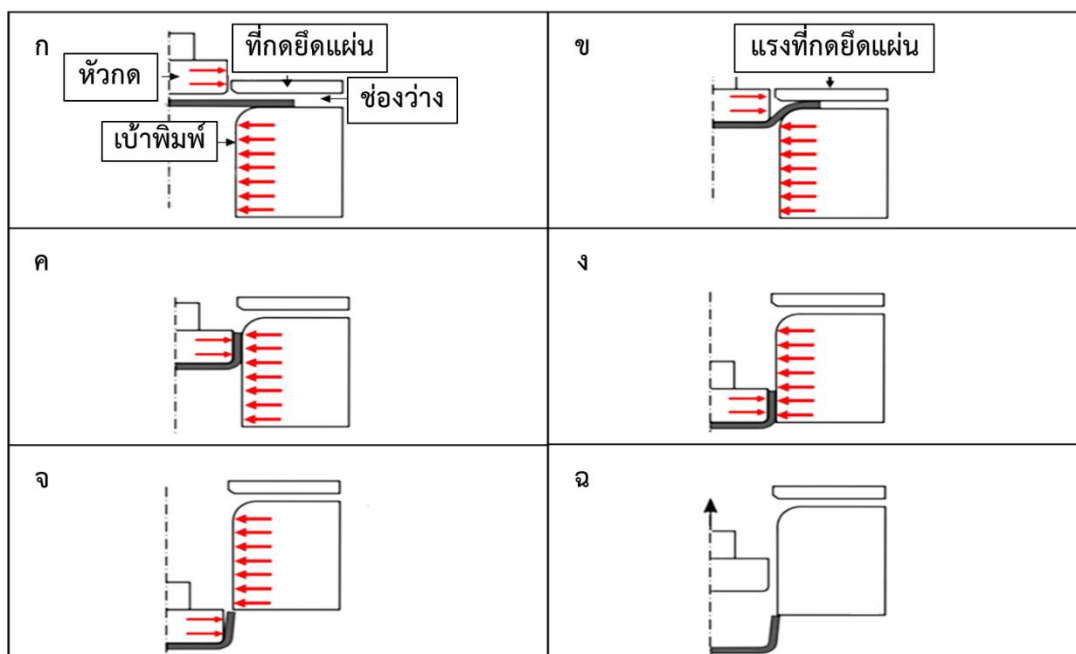
2.2.2.1 วิธีการเลื่อนเข้าช่องว่าง มีลักษณะคือ วัสดุแบบแผ่น หรือกระดาษเคลื่อนที่ไปยังช่องว่าง (Blank) ที่อยู่ระหว่างเบ้าพิมพ์ (Cavity) จากนั้นถูกกดอัดด้วยหัวกด (Punch) ทำให้ด้านข้างของกระดาษมีการหดตัวเข้ามาภายในช่องว่างดังแสดงภาพ (ก) ส่งผลให้เกิดรอยพับที่บริเวณขอบของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการขึ้นรูปด้วยวิธีนี้ การขึ้นรูปจากวิธีนี้มีอยู่ 2 ประเภทดังนี้

1) การลากขึ้นรูปลึก (Deep drawing) เป็นกระบวนการที่ใช้กระดาษที่มีความเหนียวและสามารถยืดตัวได้ดี เนื่องจากถูกแรงกระทำจากหัวกดลงไปเ็นช่องว่างที่ลึก โดยมีขั้นตอนขึ้นรูปดังแสดงในภาพ 6 ขั้นตอนแรกจากภาพ 6 (ก) กระดาษจะถูกกดทับด้วยที่กดยึดแผ่น ภายในหัวกดและเบ้าพิมพ์จะมีความร้อน (ลูกศรสีแดง) ภาพ 6 (ข) เคลื่อนที่หัวกดลงมาด้วยความเร็วคงที่และแรงที่สม่ำเสมอ ในส่วนนี้จะเป็นการหดตัวของกระดาษ เนื่องจากมีแรงกดทับจากที่กดยึดแผ่นและหัวกด ภาพ 6 (ค) หลังจากกระดาษหดตัวจะถูกบีบอัดทันที ภาพ 6 (ง) และกระดาษจะเรียบแบนระหว่างหัวกดกับเบ้าพิมพ์ ภาพ 6 (จ) เมื่อมาถึงตำแหน่งสุดท้ายโครงสร้างจะถูกทำให้แห้ง โดยเวลาและอุณหภูมิ และขั้นตอนสุดท้ายภาพ 6 (ฉ) เมื่อถึงเวลาที่กำหนดหัวกดจะยกขึ้นเป็นอันเสร็จการลากขึ้นรูปลึก ข้อดีคือ เหมาะสำหรับงานที่ต้องการขึ้นงานรูปทรงกระบอกและไร้รอยต่อ ข้อเสียคือสามารถผลิตชิ้นงานได้ปริมาณน้อยและเป็นกระบวนการที่มีค่าใช้จ่ายของราคาแม่พิมพ์สูง



ภาพ 5 วิธีการขึ้นรูปของกระดาษ

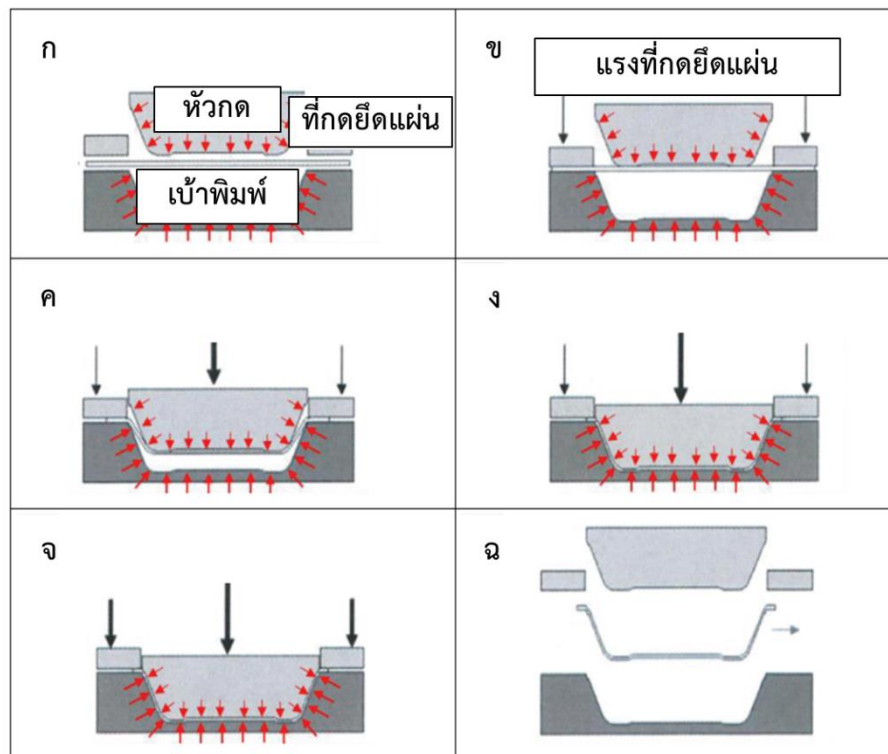
(ก) วิธีการเลื่อนเข้าช่องว่าง (ข) วิธีการช่องว่างคงที่ [17, 18]



ภาพ 6 ขั้นตอนของกระบวนการลากขึ้นรูปลิก

[17]

2) การกดอัดขึ้นรูป (Press forming) เป็นกระบวนการที่นำกระดาษมาขึ้นรูป เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีขอบที่ไม่สูง โดยมีขั้นตอนขึ้นรูปดังแสดงในภาพ 7 ขั้นตอนแรกจากภาพ 7 (ก) กระดาษวางอยู่ระหว่างหัวกดและเข้าพิมพ์ โดยจะมีความร้อน (ลูกศรสีแดง) กระจายอยู่ทั่วบริเวณที่ขึ้นรูป จะถูกกดทับด้วยที่กดยึดแผ่น ภาพ 7 (ข) กระดาษจะถูกกดทับด้วยแรงจากที่กดยึดแผ่นและหัวกดเคลื่อนที่ลงมาด้วยความเร็วคงที่และแรงที่สม่ำเสมอ ภาพ 7 (ค) ในส่วนนี้จะเป็นการหดตัวของขอบกระดาษ เนื่องจากมีแรงกดทับจากที่กดยึดแผ่นและหัวกด ภาพ 7 (ง) เมื่อมาถึงตำแหน่งสุดท้าย โครงสร้างกระดาษจะถูกทำให้เรียบแบนและแห้ง โดยแรงระหว่างหัวกดกับเข้าพิมพ์ สภาวะเวลาและอุณหภูมิ ภาพ 7 (จ) ทำให้ขอบเรียบแบนด้วยการใช้แรงกดยึดแผ่น และขั้นตอนสุดท้ายภาพ 7 (ฉ) เมื่อถึงเวลาที่กำหนดหัวกดจะยกขึ้นเป็นอันเสร็จการขึ้นรูปโดยการกดอัด ข้อดีคือ สามารถทำได้ง่าย ประหยัดเวลา และทำงานได้โดยใช้ความเร็วสูงจึงเหมาะสมสำหรับใช้เป็นการขึ้นรูปของภาชนะบรรจุอาหาร ข้อเสียคือ มีความแข็งแรงของผลิตภัณฑ์น้อยกว่าแบบการลากขึ้นรูปลิก



ภาพ 7 ขั้นตอนกระบวนการกดอัดขึ้นรูป

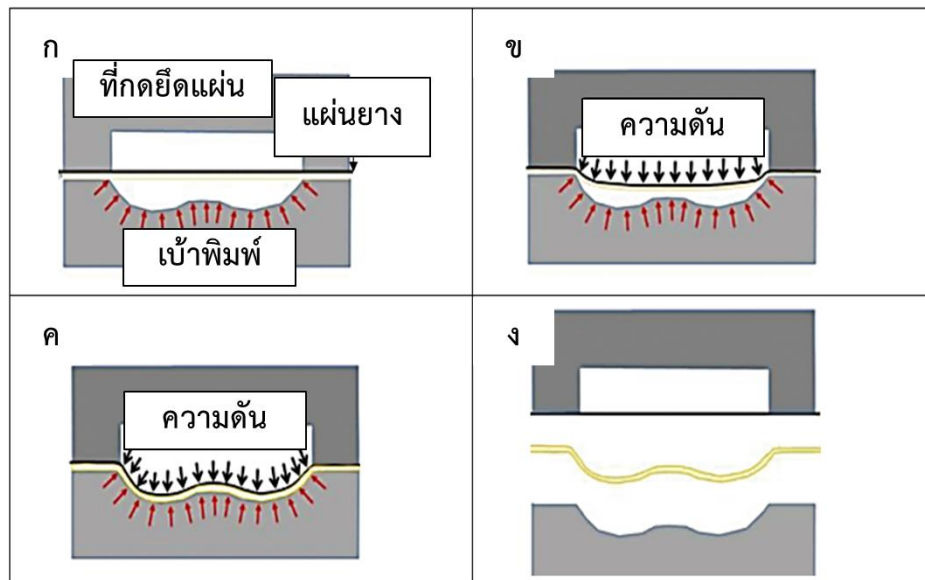
[17]

2.2.2.2. วิธีการช่องว่างคงที่ มีลักษณะการขึ้นรูปที่คล้ายกับวิธีการเลื่อนเข้าช่องว่างแต่ต่างกันตรงที่วัสดุแบบแผ่น หรือกระดาษจะยึดเข้าสู่ช่องว่างแทนการหดตัวดังแสดงภาพ (ข) ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้นี้มีคุณสมบัติทนต่อแรงดึง การขึ้นรูปจากวิธีนี้คือ การขึ้นรูปไฮโดรฟอร์มมิ่ง (Hydroforming) เป็นกระบวนการที่ใช้การขยายของแผ่นยาง (Rubber membrane) และความดันจากไฮดรอลิก ซึ่งจะมีขั้นตอนการขึ้นรูปดังแสดงภาพ 8 ขั้นตอนแรกจากภาพ 8 (ก) กระดาษจะถูกกดทับด้วยที่กดยึดแผ่นให้ติดกับแผ่นยาง และภายในเข้าพิมพ์จะมีความร้อน (ลูกศรสีแดง) ภาพ 8 (ข) ใช้แรงจากความดันจากไฮดรอลิกดันแผ่นยาง ให้กดทับกระดาษ ภาพ 8 (ค) สำหรับช่องว่างในเข้าพิมพ์นั้นเป็นช่องขึ้นรูปกระดาษ ไม่มีการหดตัวของขอบกระดาษ และขั้นตอนสุดท้ายภาพ 8 (ง) แผ่นยางคืนตัวและที่กดยึดแผ่นยกขึ้นเป็นอันเสร็จการขึ้นรูปไฮโดรฟอร์มมิ่ง ข้อดีคือ สามารถการกระจายแรงได้ดีและลดรอยย่นของผลิตภัณฑ์จากการขึ้นรูป ข้อเสียคือสามารถผลิตชิ้นงานได้ปริมาณน้อยและเป็นกระบวนการที่มีการทดลองเพียงระดับห้องปฏิบัติการเท่านั้น

ตัวอย่างของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการขึ้นรูปประกอบด้วย การลากขึ้นรูปปลีกแสดงดังภาพ 9 (ก) การกดอัดขึ้นรูปแสดงดังภาพ 9 (ข) และการขึ้นรูปไฮโดรฟอร์มมิ่งแสดงดังภาพ 9 (ค)



ดังนั้นการพิจารณาในการออกแบบกระบวนการผลิตเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีความเหมาะสมและมีคุณภาพสูง นั้น จะต้องพิจารณาจากปริมาณและรูปร่างต่าง ๆ ของผลิตภัณฑ์ รวมถึงการขึ้นรูปที่ส่งผลให้กลไกการเสียรูปและความเสียหายแตกต่างกันตามวิธีขึ้นรูป



ภาพ 8 ขั้นตอนกระบวนการขึ้นรูปไฮโดรฟอร์มมิ่ง

[17]



ภาพ 9 ตัวอย่างของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการขึ้นรูป

ประกอบด้วย (ก) การลากขึ้นรูป (ข) การกดอัดขึ้นรูป และ (ค) การขึ้นรูปไฮโดรฟอร์มมิ่ง

[17,18]

## 2.3 การออกแบบการทดลอง

การออกแบบการทดลอง (Design of experiments; DOE) [19] เป็นการออกแบบสำหรับการทดลองเพื่อหาค่าที่เหมาะสมที่สุด (Optimization) โดยอาศัยแบบจำลอง หรือสมการทางคณิตศาสตร์ มาอธิบายความสัมพันธ์ของปัจจัย (Factor) ที่ส่งผลต่อตัวแปรผลตอบ (Response) ที่เกิดขึ้น อีกทั้งสามารถศึกษาปัจจัยหลาย ๆ ในเวลาเดียวกัน เมื่อเปรียบเทียบระหว่างวิธีการทดลองผิดลองถูก หรือใช้เทคนิคในการปรับตั้งค่าในกระบวนการทีละค่า (One Factor at Time; OFAT) จะทำให้ผลตอบสนองเข้าสู่จุดมุ่งหมายได้ช้า เนื่องจากต้องการเก็บข้อมูลที่มากขึ้น และสิ้นเปลืองทรัพยากรในการทำการทดลองวิเคราะห์ ดังนั้นการออกแบบการทดลองจึงเป็นวิธีการเก็บข้อมูลที่มีประสิทธิภาพ ช่วยให้ทำการทดลองได้รวดเร็ว และสามารถทำนายผลของตัวแปรผลตอบ [19]

### 2.3.1 แบบจำลองของผลตอบที่เหมาะสม

ในการแก้ปัญหาค่าความสัมพันธ์ระหว่างผลตอบและตัวแปรอิสระ ( $\beta$ ) ซึ่งตามปกติจะใช้ฟังก์ชันพหุนามที่มีกำลังต่ำ ๆ ที่อยู่ภายใต้ตัวแปรอิสระที่มีความสัมพันธ์แบบเชิงเส้น และถ้าแบบจำลองมีส่วนโค้งมาเกี่ยวข้องในระบบจะใช้ฟังก์ชันพหุนามที่มีกำลังสูงขึ้น คือพหุนามกำลังสองดังสมการนี้ [20, 21]

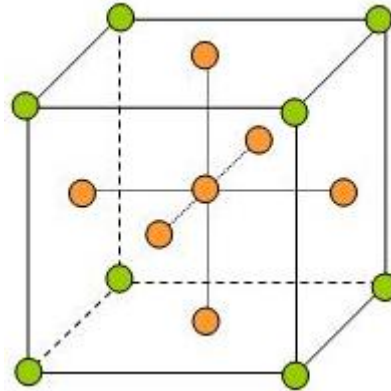
$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_{12} x_1 x_2 + \beta_{11} x_1^2 + \beta_{22} x_2^2 + \varepsilon \quad 2.1$$

เมื่อพิจารณาถึงสมการความสัมพันธ์ (Regression equation) [20, 21] ที่ได้จากการออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียลเต็มรูปแบบ สำหรับการศึกษปัจจัยที่สองระดับ จะพบว่าสมการความสัมพันธ์ที่ได้เป็นเพียงสมการเชิงเส้นตรงเท่านั้น ดังนั้นในกรณีที่ค่า P-Value ของจุดศูนย์กลาง (Center point) มีค่าน้อยกว่า 0.05 แสดงว่าสมการความสัมพันธ์ที่เหมาะสมเป็นสมการเส้นโค้ง หรือสมการกำลังสอง จึงจำเป็นต้องออกแบบการทดลองแบบวิธีพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Methodology; RSM)

### 2.3.2 การทดลองแบบวิธีพื้นผิวตอบสนอง

เป็นวิธีที่รวมความรู้ทางคณิตศาสตร์และสถิติ ซึ่งมีประโยชน์อย่างมากต่อการสร้างแบบจำลองและการวิเคราะห์ปัญหาที่สามารถหาค่าที่ดีที่สุดของผลตอบ โดยผลตอบที่สนใจขึ้นอยู่กับหลายตัวแปรและปัจจัยที่กำหนดขึ้น การออกแบบพื้นผิวผลตอบมีวิธีการที่นำมาใช้ในการหาค่าที่ดีที่สุดของผลตอบแบ่งเป็น 2 วิธี คือ การออกแบบส่วนประสมกลาง (Central Composite design, CCD) และการออกแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน (Box-Behnken design)

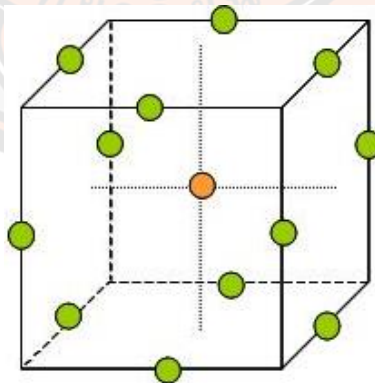
2.3.2.1 การออกแบบส่วนประสมกลาง [20] เป็นวิธีการหาพื้นผิวผลตอบที่นิยมใช้เพื่อหากระบวนการที่เหมาะสม โดยทั่วไปส่วนประสมกลางจะประกอบด้วย  $2^k$  แฟกทอเรียล ซึ่ง  $2^k$  อยู่ในแนวแกน (Start points) และจุดศูนย์กลาง เมื่อ  $k$  คือ จำนวนของตัวแปร ดังภาพ 10



ภาพ 10 การออกแบบส่วนประสมกลาง

[20]

2.3.2.2 การออกแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน [20] เป็นการออกแบบสามระดับ  $3^k$  สำหรับกำหนดพื้นผิวผลตอบ การออกแบบนี้ถูกสร้างขึ้นจากการรวมการออกแบบแฟกทอเรียล  $2^k$  เป็นการออกแบบบล็อกที่ไม่สมบูรณ์ ผลของการออกแบบมีประสิทธิภาพในด้านจำนวนของการแสดงผลที่ต้องการ และการออกแบบนี้ยังสามารถในการหมุนหรือเกือบหมุนได้อีกด้วย เนื่องจากการออกแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน เป็นการออกแบบรูปทรงกลมที่ทุกจุดวางอยู่บนรูปทรงกลม โดยทั่วไปการเลือกค่าของระยะปัจจัย ( $\alpha$ ) จาก  $\alpha = \sqrt{k}$  สำหรับรูปทรงกลมจะแสดงดังภาพ 11

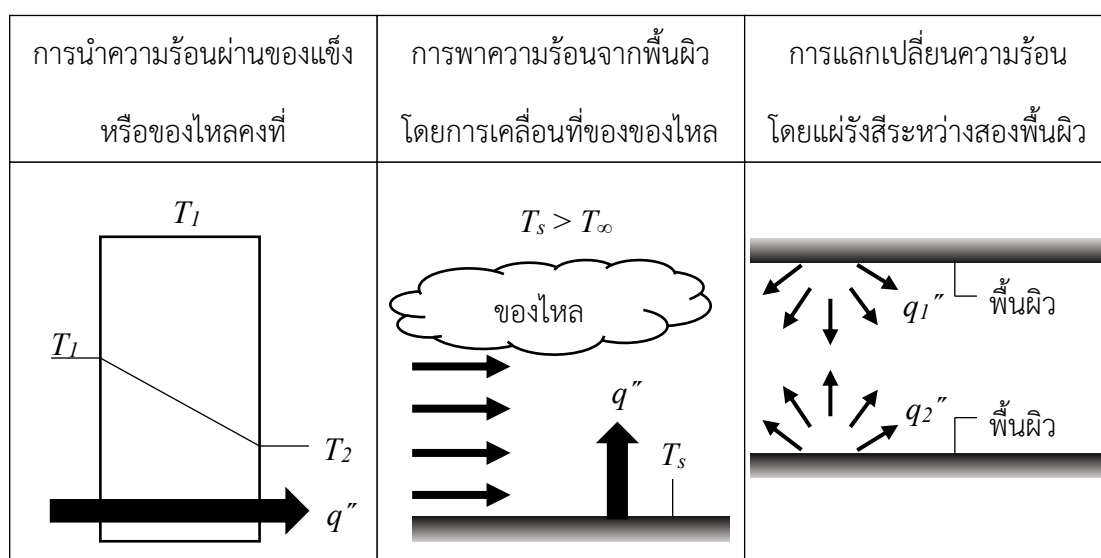


ภาพ 11 การออกแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน

[20]

## 2.4 การถ่ายเทความร้อน

สำหรับการถ่ายเทพลังงานในรูปความร้อนนั้น (Heat transfer) จะเกิดขึ้นก็ต่อเมื่อมีความแตกต่างของอุณหภูมิที่เกิดขึ้นในระบบ ตามกฎข้อที่สองของเทอร์โมไดนามิกส์ [22] ทั้งนี้สามารถจำแนกการถ่ายเทความร้อนออกเป็น 3 ประเภทใหญ่ ๆ ได้ดังนี้คือการนำความร้อน (Heat conduction) การพาความร้อน (Heat convection) และการแผ่รังสีความร้อน (Heat radiation) ดังแสดงในภาพ 12



ภาพ 12 ประเภทของการถ่ายเทความร้อน

[22]

### 2.4.1 การนำความร้อน

การนำความร้อนเป็นการถ่ายเทความร้อนผ่านตัวกลางโดยที่ตัวกลางไม่เคลื่อนที่ การนำความร้อนบริเวณด้านหนึ่งของระบบไปยังอีกด้านที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า ความร้อนจะส่งผ่านในระดับโมเลกุลของตัวกลางเอง เช่นองค์ประกอบของไบทอกราวที่เป็นของแข็งและน้ำในไบทอกราวก็นำความร้อนได้ การนำความร้อนเป็นปรากฏการณ์ระดับอนุภาคเมื่ออนุภาคมีการแลกเปลี่ยนพลังงานระหว่างกันโดยอนุภาคที่มีพลังงานสูงกว่าจะถ่ายเทไปยังพลังงานที่ต่ำกว่า การนำความร้อนจึงเกิดขึ้นได้ในสสารทุกสถานะทั้งของแข็ง ของเหลว และก๊าซ และสามารถอธิบายได้ด้วยกฎการนำความร้อนของฟูรีเยร์ (Fourier's law of heat conduction) ซึ่งได้กล่าวว่า อัตราการถ่ายเทความร้อนแปรผันตรงกับเกรเดียนต์ของอุณหภูมิและพื้นที่ [23] ดังสมการต่อไปนี้

$$q_{cond} = -kA \frac{dT}{dx} \quad 2.2$$

โดยที่  $q_{cond}$  คือ อัตราการถ่ายเทความร้อนโดยการนำความร้อนในทิศตั้งฉากกับพื้นที่ ( $W$  or  $J s^{-1}$ )

$k$  คือ สัมประสิทธิ์การนำความร้อน ( $W m^{-1} K^{-1}$ )

$A$  คือ พื้นที่การถ่ายเทความร้อน ( $m^2$ )

$T$  คือ อุณหภูมิ ( $K$  or  $^{\circ}C$ )

$x$  คือ ระยะทางที่ตั้งฉากกับพื้นที่การถ่ายเทความร้อน ( $m$ )

#### 2.4.2 การพาความร้อน

การพาความร้อนเป็นการถ่ายเทพลังงานด้วยการพัดพาของไหล ปริมาณของพลังงานที่ถูกของไหล (Fluid) พาไปหรือถ่ายเทเข้ามานั้นจะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของของไหล เช่น ค่าความจุความร้อน ความหนาแน่น อุณหภูมิของของไหล และรูปแบบการไหล การพาความร้อนมี 2 ลักษณะ คือ การพาความร้อนแบบอิสระ (Free convection) กับการพาความร้อนแบบบังคับ (Force convection) การพาความร้อนส่วนมากจึงเกิดขึ้นเฉพาะกับของเหลวหรือก๊าซเท่านั้น ความสามารถในการพาความร้อนขึ้นอยู่กับค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน (Convection heat transfer coefficient;  $h$ ) อุณหภูมิสิ่งแวดล้อมและขนาดพื้นที่ผิวของวัตถุที่มีการพาความร้อน โดยทั่วไปค่า  $h$  ขึ้นอยู่กับสมบัติของตัวกลาง สมการสำหรับหาอัตราการพาความร้อนที่ไบทองกวาวจะเป็นไปตามกฎการเย็นตัวของนิวตัน (Newton's law of cooling) [22-24] ดังนี้

$$q_{conv} = hA(T - T_{\infty}) \quad 2.3$$

โดยที่  $q_{conv}$  คือ อัตราการถ่ายเทความร้อนโดยการพาความร้อนต่อหน่วยพื้นที่ ( $W$  or  $J s^{-1}$ )

$h$  คือ สัมประสิทธิ์การพาความร้อน ( $W m^{-2} K^{-1}$ )

$A$  คือ พื้นที่การถ่ายเทความร้อน ( $m^2$ )

$T$  คือ อุณหภูมิที่สูง ( $K$  or  $^{\circ}C$ )

$T_{\infty}$  คือ อุณหภูมิที่ต่ำ ( $K$  or  $^{\circ}C$ )

#### 2.4.3 การแผ่รังสีความร้อน

การแผ่รังสีความร้อนเป็นการถ่ายเทพลังงานในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ทำให้ไม่จำเป็นต้องอาศัยตัวกลางในการถ่ายเทพลังงาน การแผ่รังสีนั้นยังคงขึ้นกับผลต่างของอุณหภูมิ

เช่นเดียวกันกับการถ่ายเทความร้อนในรูปแบบอื่น ๆ กล่าวคือ การแผ่รังสีจะเกิดขึ้นก็ต่อเมื่อบริเวณที่เปล่งรังสีมีอุณหภูมิสูงกว่าบริเวณที่รับรังสี หลักการถ่ายเทความร้อนด้วยการแผ่รังสีอธิบายได้ด้วยกฎของ สเตฟาน-โบลซ์มานน์ (Stefan-Boltzmann law) [22-24] ดังนี้

$$q_{rad} = \varepsilon \sigma AT^4 \quad 2.4$$

โดยที่  $q_{rad}$  คือ อัตราการถ่ายเทความร้อนโดยการแผ่รังสีความร้อน (W or J s<sup>-1</sup>)

$\varepsilon$  คือ สัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนของวัสดุ (-)

$A$  คือ พื้นที่การถ่ายเทความร้อน (m<sup>2</sup>)

$\sigma$  คือ ค่าคงที่ของสเตฟาน-โบลซ์มานน์ มีค่าเท่ากับ  $5.67 \times 10^{-8}$  (W m<sup>-2</sup> K<sup>-4</sup>)

$T$  คือ อุณหภูมิ (K or °C)

โดยที่วัตถุแต่ละชนิดสามารถดูดกลืนความร้อนจากการแผ่รังสีได้ไม่เท่ากัน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับสีของวัตถุ วัตถุสีดำหรือสีเข้มดูดกลืนความร้อนได้ดีกว่าวัตถุสีขาวหรือสีอ่อน และลักษณะของผิววัตถุ วัตถุที่มีลักษณะผิวขรุขระจะสามารถดูดกลืนความร้อนได้ดีกว่าวัตถุผิวเรียบและมันวาว

#### 2.4.4 การพิจารณาการถ่ายเทความร้อนสำหรับกระบวนการขึ้นรูป

การวิเคราะห์เกี่ยวกับการนำความร้อนภายในกระบวนการขึ้นรูปภาชนะบรรจุภัณฑ์ เป็นการหาอุณหภูมิที่จุดตำแหน่งต่าง ๆ ในแต่ละตำแหน่งของแม่พิมพ์ที่ใช้ขึ้นรูป หรือการกระจายตัวของอุณหภูมิ (Temperature distribution) ซึ่งเมื่อทราบสภาวะขอบเขต (Boundary Condition; BC) ก็จะสามารถคำนวณหาอัตราการถ่ายเทความร้อนของกระบวนการขึ้นรูปภาชนะบรรจุภัณฑ์ได้และสามารถทราบอุณหภูมิที่จุดตำแหน่งต่าง ๆ ได้เช่นกัน โดยพิจารณาเฉพาะกรณีการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่ไม่คงตัว (Unsteady state) ใช้หลักการถ่ายเทความร้อนแบบวิธี Semi-infinite solid

เป็นการวิเคราะห์ปัญหาทางความร้อน สำหรับของแข็งที่ทุกด้านของระบบมีขอบเขตที่ยาวมาก ยกเว้นด้านหนึ่งของระบบที่สามารถกำหนดเป็นพื้นที่ได้ (พื้นที่ผิวความร้อน) นำมาใช้ในการประเมินผลกระทบการถ่ายเทความร้อนไม่ขึ้นกับเวลา หรือเรียกว่าสภาวะไม่คงตัว (Transient heat transfer) ที่ใกล้เคียงกับพื้นผิวของโลกหรือการตอบสนองสภาวะไม่คงตัวของแข็ง เช่นแผ่นวัสดุใด ๆ ในช่วงส่วนต้นอุณหภูมิภายในแผ่นยังไม่ได้รับผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงสภาวะในพื้นที่ผิว [12, 25-27]

##### 2.4.4.1 สมการที่เหมาะสมสำหรับการนำความร้อนที่สภาวะไม่คงตัวดังนี้



$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \quad 2.5$$

สมการ 2.5 ในช่วง  $0 < x < \infty$  เพื่อแก้สมการจำเป็นต้องระบุเงื่อนไขขอบเขตการกระจายอุณหภูมิ และกำหนดให้มีการถ่ายเทความร้อนในระนาบแกน  $x$  เพียงระนาบเดียว

#### 2.4.4.2 การกำหนดสภาวะขอบเขต

1) การกำหนดอุณหภูมิสำหรับสภาวะขอบเขตที่เวลาเริ่มต้น จะพิจารณาจากเวลาเริ่มต้น หรือ  $t = 0$  วินาที ดังนั้นเขียนสภาวะขอบเขตได้ดังนี้

$$\text{BC1. ที่เวลา } t = 0, T = T_i \text{ สำหรับ } x \geq 0$$

2) การกำหนดอุณหภูมิสำหรับสภาวะขอบเขตที่เวลาไม่คงที่ จะพิจารณาจากตำแหน่งเริ่มต้น  $x = 0$  ไปจนตำแหน่ง  $x \rightarrow \infty$  ดังนั้นเขียนสภาวะขอบเขตได้ดังนี้

$$\text{BC2. ที่ตำแหน่ง } x = 0, T = T_s \text{ สำหรับ } t > 0$$

$$\text{BC3. ที่ตำแหน่ง } x \rightarrow \infty, T = T_i \text{ สำหรับ } t \geq 0$$

2.4.4.3 สมการที่เหมาะสมสำหรับการนำความร้อนที่สภาวะไม่คงตัวในกึ่งของแข็งอนันต์ โดยส่วนใหญ่สามารถพิจารณาได้เป็น 3 กรณีดังแสดงในภาพ 13

จากภาพ 13 (ก) เป็นกรณีอุณหภูมิผิวคงที่ (Constant surface temperature) เมื่อ  $T(x=0, t) = T_s$  จะได้สมการแก้ไขปัญหาดังสมการ 2.6 ในการประยุกต์ใช้กรณีอุณหภูมิพื้นผิวคงที่ จะพิจารณาอุณหภูมิพื้นผิววัสดุจะมีค่าไม่เท่ากับของอุณหภูมิเริ่มต้น  $T_s \neq T_i$  ดังนั้นจึงได้สมการดังแสดงในสมการที่ 2.7

$$\frac{T_{(x,t)} - T_s}{T_i - T_s} = \text{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{\alpha t}}\right) \quad 2.6$$

$$q_s''(t) = \frac{k(T_s - T_i)}{\sqrt{\pi \alpha t}} \quad 2.7$$

จากภาพ 13 (ข) เป็นกรณีอัตราการถ่ายเทความร้อนที่ผิวคงที่ (Constant surface heat flux) เมื่อ  $q_s'' = q_0''$  จะได้สมการแก้ไขปัญหาดังสมการ 2.8

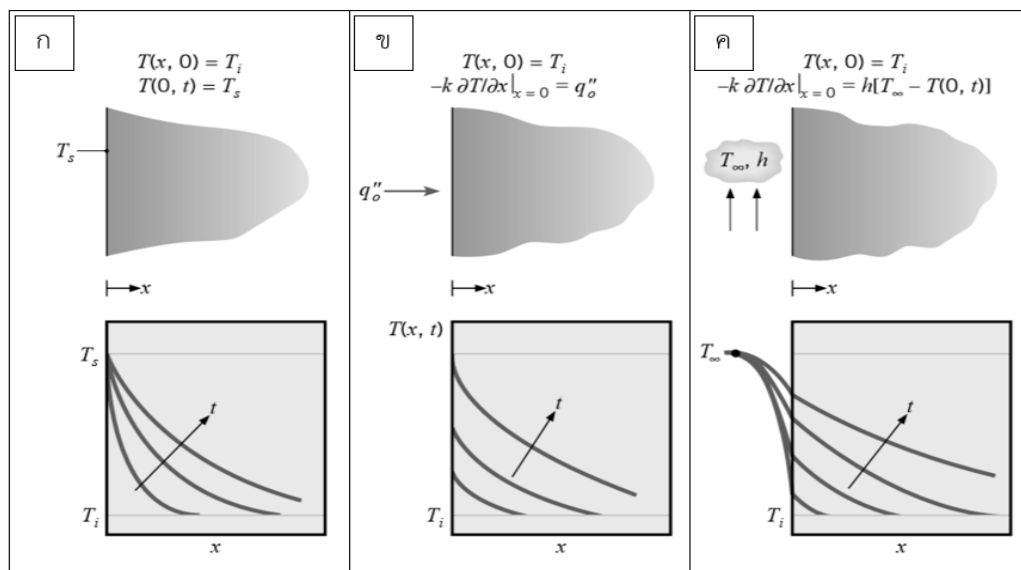
$$T_{(x,t)} - T_i = \frac{2q_0''(\alpha t / \pi)^{1/2}}{k} \exp\left(-\frac{x^2}{4\alpha t}\right) - \frac{q_0'' x}{k} \text{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{\alpha t}}\right) \quad 2.8$$



จากภาพ 13 (ค) เป็นกรณีการพาความร้อนที่พื้นผิว (Surface convection) เมื่อ  $T(x \rightarrow \infty, t) = T_i$  และสมการการพาความร้อน 2.9 ในการประยุกต์ใช้กรณีเกิดการพาความร้อนที่พื้นผิว จะพิจารณาอุณหภูมิที่สัมผัสผิวจะมีค่าไม่เท่ากับของอุณหภูมิเริ่มต้น  $T_\infty \neq T_i$  และจะมีสัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่ขึ้นอยู่กับสมบัติของตัวกลาง ดังนั้นจะได้สมการแก้ไขปัญหาคณิตศาสตร์การพาความร้อนที่พื้นผิว ดังสมการ 2.10

$$-k \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=0} = h[T_\infty - T(0, t)] \quad 2.9$$

$$\frac{T(x, t) - T_i}{T_\infty - T_i} = \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{\alpha t}}\right) - \left[ \exp\left(\frac{hx}{k} + \frac{h^2 \alpha t}{k^2}\right) \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{\alpha t}} + \frac{h\sqrt{\alpha t}}{k}\right) \right] \quad 2.10$$



ภาพ 13 การกระจายอุณหภูมิแบบวิธี Semi-infinite solid

(ก) อุณหภูมิผิวคงที่ (ข) อัตราการถ่ายเทความร้อนที่ผิวคงที่

และ (ค) เกิดการพาความร้อนที่พื้นผิว [25]

## 2.5 การวิเคราะห์โดยวิธีเชิงตัวเลข

การวิเคราะห์โดยวิธีเชิงตัวเลข (Numerical method) ถูกนำมาใช้ในการวิเคราะห์สมการถ่ายเทความร้อน [25] ซึ่งมีหลายวิธีในการหาผลเฉลยเช่น กรณีที่มีการวิเคราะห์หลายมิติการหาผลเฉลยโดยระเบียบวิธีแยกตัวแปร (Method of separation) และระเบียบวิธีทางภาพ (Method of image)

แต่วิธีการดังกล่าวมีความยุ่งยากซับซ้อน ดังนั้นระเบียบวิธีเชิงตัวเลขจึงเป็นทางเลือกที่ดีในการหาผลเฉลย และประยุกต์ใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method; FEM) เพื่อวิเคราะห์และคำนวณหาการกระจายของความร้อนของแม่พิมพ์สื่อบทองกวาวระหว่างกระบวนการขึ้นรูปภาชนะบรรจุอาหาร

### 2.5.1 ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เป็นการวิเคราะห์โดยใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขเพื่อคำนวณหาผลเฉลยโดยประมาณของปัญหาที่กำหนดให้มา โดยการแบ่งรูปร่างขอบเขตของปัญหาออกเป็นชิ้นส่วนย่อย ๆ ที่เรียกว่าเอลิเมนต์ (Element) แล้วมีการสร้างสมการของแต่ละเอลิเมนต์ให้สอดคล้องกับปัญหานั้น เอลิเมนต์ต่าง ๆ เหล่านี้เชื่อมกันที่จุดต่อหรือโหนด (Node) ซึ่งเป็นตำแหน่งที่จะคำนวณค่าตัวแปรตามที่ต้องการ ทำให้ผู้วิเคราะห์ทราบถึงปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นในผลิตภัณฑ์ที่ได้ออกแบบโดยละเอียด และยังก่อให้เกิดแนวความคิดในการแก้ไขปรับปรุงรูปร่างลักษณะของต้นแบบอันนำไปสู่รูปแบบใหม่ที่มีประสิทธิภาพสูงขึ้นไปอีก อีกทั้งยังสามารถหลีกเลี่ยงการทดลองหรือการลองผิดลองถูก ซึ่งจะช่วยให้ประหยัดเวลาและลดค่าใช้จ่ายไปได้เป็นอย่างมาก [28]

### 2.5.2 ลักษณะขั้นตอนที่สำคัญของระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

ขั้นตอนพื้นฐานของการคำนวณหาผลเฉลยโดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จะประกอบด้วยขั้นตอนใหญ่ ๆ ทั้งหมด 6 ขั้นตอนดังต่อไปนี้ [28]

2.5.2.1 ขั้นตอนที่ 1 ขั้นตอนการเตรียมแบบจำลองจะมีการแบ่งขอบเขตรูปร่างของปัญหาที่ต้องการผลลัพธ์ออกเป็นเอลิเมนต์ย่อย ๆ เช่น ปัญหาการเสีรูปร่างและความเค้นที่เกิดขึ้นในของแข็งและปัญหาการถ่ายเทความร้อนในของแข็งหรือของไหล เป็นต้น

2.5.2.2 ขั้นตอนที่ 2 การเลือกฟังก์ชันการประมาณภายในเอลิเมนต์

2.5.2.3 ขั้นตอนที่ 3 การสร้างสมการของเอลิเมนต์

2.5.2.4 ขั้นตอนที่ 4 การนำสมการที่ได้สร้างขึ้นจากทุก ๆ เอลิเมนต์มาประกอบรวมกันเข้าทำให้เกิดระบบสมการขนาดใหญ่ขึ้น

2.5.2.5 ขั้นตอนที่ 5 การประยุกต์เงื่อนไขขอบเขตลงในระบบสมการที่ได้สร้างขึ้นในขั้นตอนที่ 4

2.5.2.6 ขั้นตอนที่ 6 การคำนวณค่าคงที่ต่อเนื่อง หลังจากคำนวณค่าที่จุดต่อจากขั้นตอนที่ 5 มาได้แล้วจึงทำการคำนวณค่าคงที่ต่อเนื่อง

จากขั้นตอนทั้ง 6 ขั้นตอนจะเห็นได้ว่าระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เป็นระเบียบวิธีที่มีแบบแผนอย่างเป็นขั้นเป็นตอน โดยสิ่งสำคัญจะอยู่ที่ขั้นตอนที่ 3 ในการสร้างสมการเอลิเมนต์ให้สอดคล้องกับสมการเชิงอนุพันธ์ของปัญหาที่กำหนดมาให้นั้น

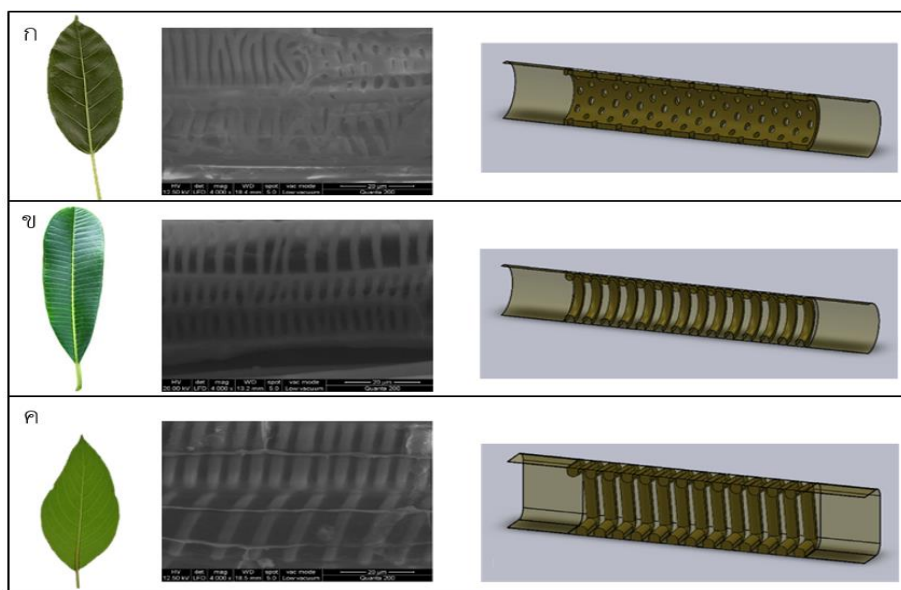
## 2.6 เอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.6.1 ทฤษฎีของใบไม้

ปี ค.ศ. 2015 Musa และ Nuruddin [29] ได้ทำการศึกษาค่าความร้อนของใบไม้วงศ์สกุลต่าง ๆ ในเขตป่าสงวน ประกอบด้วยใบไม้ 5 ชนิด คือ วงศ์สกุลชั้นหอย วงศ์สกุลสยาเหลือง วงศ์สกุลสยาแดง วงศ์สกุลตะเคียน และวงศ์สกุลยาง ผลการทดลองพบว่า ค่าพลังงานความร้อนจากใบไม้วงศ์สกุลต่าง ๆ อยู่ในช่วง 4.041 ถึง 4.821 กิโลแคลอรีต่อกรัม ซึ่งโดยทั่วไปค่าความร้อนของใบไม้วงศ์สกุลชั้นหอย สยาเหลือง สยาแดงและตะเคียน ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ แต่ใบไม้วงศ์สกุลยางมีค่าความร้อนที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญกับอีกสี่สายพันธุ์ของใบไม้ เพื่อนำมาวิเคราะห์เป็นพลังงานเชื้อเพลิง ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงน่าจะมีประโยชน์ในการจัดการไฟไหม้ป่าไม้ได้ในอนาคต

ปี ค.ศ. 2016 Poddar และคณะ [49] ได้ทำการศึกษาคูณสมบัติทางกลและความร้อนของเส้นใยกาบหมากที่เสริมแรงด้วยโพลิโพรพิลีน (Polypropylene) โดยการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีและทดสอบความต้านทานแรงดึงของเส้นใยกาบหมาก ผลการศึกษาพบว่า องค์ประกอบทางเคมีของเส้นใยกาบหมากประกอบด้วย เซลลูโลสร้อยละ 66 เฮมิเซลลูโลสร้อยละ 7 และลิกนินร้อยละ 20 ในส่วนของคุณสมบัติทางกลพบว่า เมื่อผสมเส้นใยกาบหมากในอัตราส่วนร้อยละ 10 ของวัสดุคอมโพสิต มีค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดเท่ากับ 28.7 เมกะปาสคาล ส่งผลทำให้คุณสมบัติทางกลสูงขึ้นในทางตรงกันข้ามการเพิ่มเส้นใยกาบหมาก จะส่งผลให้คุณสมบัติทางกลลดลง คุณสมบัติการสลายตัวทางความร้อนพบว่า เส้นใยกาบหมากเริ่มสลายตัวที่อุณหภูมิ 380 ถึง 500 องศาเซลเซียส ย่อยสลายได้ทั้งหมดร้อยละ 98 และวัสดุคอมโพสิตเริ่มสลายตัวที่อุณหภูมิ 280 ถึง 500 องศาเซลเซียส ย่อยสลายได้ทั้งหมดร้อยละ 88 ทำให้วัสดุคอมโพสิตมีการย่อยสลายที่น้อยกว่า แต่ยังคงอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ ทั้งนี้เป็นผลมาจากการยึดเกาะที่ไม่ดีและมีการยึดตัวของเส้นใยน้อยลง

ปี ค.ศ. 2016 Luo และคณะ [31] ได้ทำการศึกษาระบบการถ่ายเทความร้อนและมวลของโครงสร้างภายในเส้นกลางใบ (Midribs) ของใบไม้ธรรมชาติ โดยจะทำการศึกษาใบไม้ต่างชนิดกัน 3 ชนิดคือ (ก) โพธิ์ไกร (*F. virens*) (ข) ลีลาวดี (*P. rubra*) และ (ค) ประทัดใต้หวัน (*H. patens*) และทำการเลียนแบบโครงสร้างของใบไม้ทั้งสามชนิด ดังแสดงในภาพ 14 พบว่าโครงสร้างภายในของเส้นกลางใบไม้เป็นกลุ่มท่อลำเลียงไซเลม (Xylem) และมีรูปแบบของช่องขนาดเล็ก (Micro channel) ที่แตกต่างกันทั้งสามชนิด โครงสร้างที่เลียนแบบของใบโพธิ์ไกรที่มีผนังเป็นหลุมหนา จะมีลักษณะการถ่ายเทความร้อนและการถ่ายเทมวลดีที่สุดใใบไม้ทั้งสามชนิด ดังนั้นโครงสร้างของใบไม้มีประโยชน์ในด้านการออกแบบ และยังช่วยเพิ่มความสามารถในการระบายความร้อนในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ โดยความร้อนจะไหลผ่านช่องขนาดเล็ก ซึ่งเป็นวิธีการออกแบบการระบายความร้อนสำหรับอุปกรณ์กระจายความร้อนบางอย่างเช่น ท่อไอน้ำและอื่น ๆ เป็นต้น



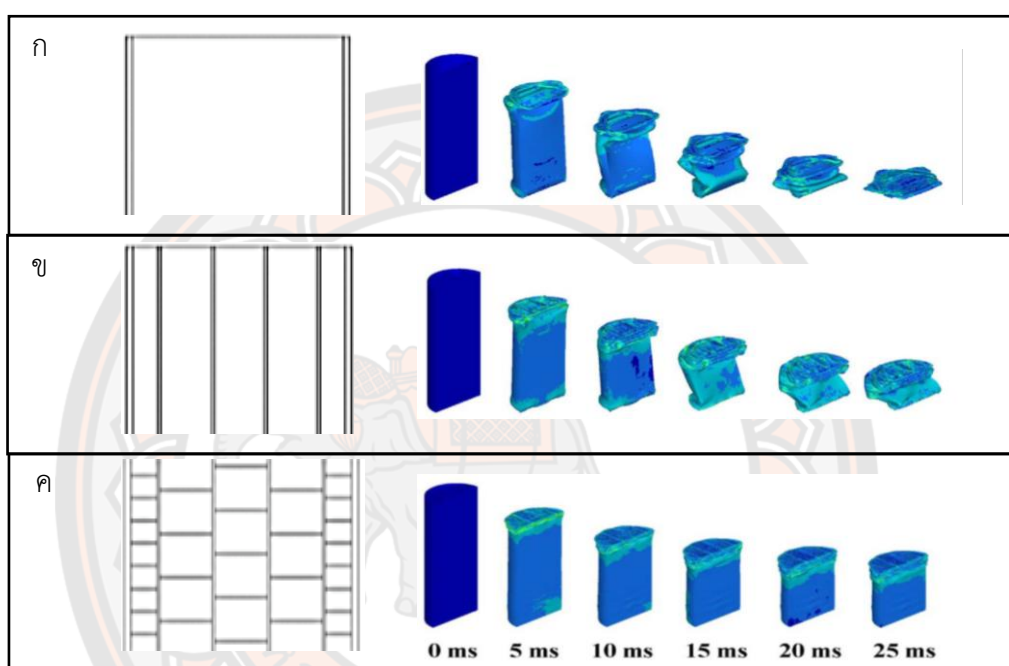
ภาพ 14 โครงสร้างของรูปแบบช่องขนาดเล็กลงภายในท่อลำเลียงของใบไม้ทั้ง 3 ชนิด

[31]

ปี ค.ศ. 2017 Waghmare และ คณะ [32] ได้ทำการศึกษาคุณสมบัติทางกลของเส้นใยจากต้นกล้วย โดยการวิเคราะห์ห่อหุ้มประกอบทางเคมีและทดสอบความต้านทานแรงดึงของเส้นใยจากต้นกล้วย เมื่อนำเส้นใยจากต้นกล้วยมาผสมกับเส้นใยแก้วเป็นวัสดุผสมชีวภาพ ผลการศึกษาพบว่า องค์ประกอบทางเคมีของเส้นใยกล้วยประกอบไปด้วย เซลลูโลสร้อยละ 60 ถึง 65 เฮมิเซลลูโลสร้อยละ 5 ถึง 19 และลิกนินร้อยละ 5 ถึง 10 ส่วนผลของความต้านทานแรงดึงเส้นใยกล้วยมีค่าเท่ากับ 54 เมกะปาสคาล และวัสดุผสมชีวภาพจากส่วนผสมเส้นใยต้นกล้วยแรงดึงมีค่า 39.5 เมกะปาสคาล ในทางกลับกันวัสดุผสมชีวภาพของเส้นใยแก้วผสมกับเส้นใยปอมีค่า 28 เมกะปาสคาล ดังนั้นเส้นใยจากต้นกล้วยสามารถช่วยเพิ่มความต้านทานแรงดึงของวัสดุผสมชีวภาพและสามารถนำมาเป็นวัสดุทดแทน เนื่องจากเส้นใยจากต้นกล้วยมีความเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม สามารถย่อยสลายได้เองตามธรรมชาติ และมีราคาถูก

ปี ค.ศ. 2018 Liu และคณะ [11] ได้ทำการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้างและคุณสมบัติทางกลที่สังเกตได้จากทางกล้องจุลทรรศน์แบบสามมิติของใบรูปทรงแฉก ซึ่งใช้เป็นต้นแบบสำหรับการออกแบบวัสดุที่มีน้ำหนักเบา โดยทำการสร้างแบบจำลองของโครงสร้างภายในใบรูปทรงแฉกตามลักษณะรูปร่าง (Morphology) ออกมาสามชนิดดังภาพ 15 มีความแตกต่างกันคือ แบบ (ก) เป็นโครงสร้างว่างเปล่าไม่มีผนังกัน และแผ่นช่องรับแสง (Diaphragm) แบบ (ข) เป็นโครงสร้างที่มีผนังกัน และ แบบ (ค) เป็นโครงสร้างที่มีผนังกันและแผ่นช่องรับแสง นำแบบจำลองของโครงสร้างมา

ทดสอบสมบัติทางกล โดยแบ่งเป็นการบีบอัดตามแนวแกนและการตัดด้านข้างของใบตามลำดับ ผลการทดลองที่ได้พบว่า โครงสร้างแบบ (ค) ที่มีผนังกันและแผ่นช่องรับแสง จะสามารถช่วยเพิ่มการรับแรงโหลดของการบีบอัดตามแนวแกนและการตัดด้านข้าง ทำให้เกิดความเสียหายจากการบีบอัดและตัดได้น้อย ดังนั้นจึงมีประโยชน์สำหรับสร้างแนวคิดการใช้วัสดุโครงสร้างแบบไบโอนิคในการออกแบบโครงสร้างผนังที่มีน้ำหนักเบา



ภาพ 15 แบบจำลองของโครงสร้างและผลการจำลองทดสอบคุณสมบัติทางกลในรูปถ่าย

[11]

### 2.6.2 กระบวนการขึ้นรูป

ปี ค.ศ. 2014 Vishtal และคณะ [33] ได้ทำการศึกษาอิทธิพลของคุณสมบัติกระดาษแข็งที่มีต่อความสามารถในการขึ้นรูปแบบ 3 มิติ ด้วยวิธีการขึ้นรูปทั้ง 3 ชนิด คือ การขึ้นรูปแบบ 2 มิติ (2D Formability) การขึ้นรูปทรงกลม 3 มิติ (3D Spherical forming) และการลากขึ้นรูปลึก 3 มิติ (3D Deep drawing) ซึ่งมีหลักการขึ้นรูปที่ต่างกันกล่าวคือ การขึ้นรูปแบบ 2 มิติ จะเป็นการขึ้นรูปโดยวิธีวัสดุเคลื่อนที่ เช่นเดียวกับกับการขึ้นรูปทรงกลม 3 มิติ ในทางตรงกันข้ามกับการลากขึ้นรูปลึก 3 มิติ จะใช้การขึ้นรูปโดยวิธีวัสดุคงที่ ผลการศึกษาพบว่า ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อ การขึ้นรูปทั้ง 3 ชนิดประกอบด้วย คุณสมบัติทางกายภาพของกระดาษแข็ง ความชื้นของกระดาษแข็ง อุณหภูมิของแม่พิมพ์ และแรงเสียดทานของกระดาษกับโลหะ ซึ่งการลากขึ้นรูปลึก 3 มิติ จะทำให้กระดาษแข็งมี



ความแข็งแรงกว่าทั้งสามแบบ เนื่องจากแรงเสียดทานของกระดาษกับโลหะเป็นแบบเคลื่อนที่ กระดาษจึงมีการยึดตัวได้ดีกว่า ดังนั้นการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์จะต้องพิจารณาขนาดและรูปร่าง โดยเลือกใช้อุปกรณ์ในการขึ้นรูปให้เหมาะสม เช่น ถ้าต้องการผลิตภัณฑ์ที่มีความลึกสูง จะต้องใช้วิธีการขึ้นรูปแบบลากขึ้นรูปจะดีที่สุด เพื่อลดความเสียหายจากการแตกหักของผลิตภัณฑ์

ปี ค.ศ. 2017 Awais และคณะ [13] ได้ทำการศึกษากระบวนการขึ้นรูปและวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยการนำตัวอย่างของกระดาษแข็งมาขึ้นรูป ใช้วิธีกดอัดและให้อุณหภูมิของแม่พิมพ์ต่างกันคือ แม่พิมพ์ด้านล่างใช้อุณหภูมิสูงกว่าแม่พิมพ์ด้านบน จากนั้นเปรียบเทียบจำนวนรอยพับที่ขอบมุมของภาชนะบรรจุอาหารสามชนิดคือ ไม่มีรอยพับ 15 รอยพับ และ 25 รอยพับ ตามลำดับ ผลการทดลองพบว่า แม่พิมพ์บนที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าจะช่วยป้องกันการหลอมละลายที่ผิวหน้าภาชนะบรรจุอาหารและยังคงความสวยงามของภาชนะบรรจุอาหาร การเพิ่มรอยพับที่ขอบมุมของภาชนะบรรจุอาหาร สามารถลดการฉีกขาดของมุมที่ขอบจากการขึ้นรูปได้ แบบจำลองจากการคำนวณโดยใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แสดงให้เห็นว่า มีความแม่นยำเพียงพอในการทำนายรูปแบบและจำนวนรอยพับที่เหมาะสมสำหรับการขึ้นรูปกระดาษแข็ง ในทางกลับกันค่าความเครียดที่ได้จากแบบจำลองมีค่าสูงกว่าการทดลอง อย่างไรก็ตามในระหว่างการขึ้นรูปจะเกิดการเสียรูปอย่างมากที่ขอบมุมลาด ซึ่งอาจทำให้เกิดรอยแตกและความเสียหายอื่น ๆ ดังนั้นจำเป็นต้องมีการศึกษาพัฒนาเพิ่มเติมที่คำนึงถึงอุณหภูมิที่ใช้ในการขึ้นรูป

ปี ค.ศ. 2019 Leminen และคณะ [34] ได้ทำการศึกษาผลกระทบเชิงกลต่อการเจาะรูกระดาษแข็งในการขึ้นรูป ดำเนินการทดลองการขึ้นรูปโดยใช้วิธีกดอัดขึ้นรูปที่ความชื้นเริ่มต้นของกระดาษแข็งเท่ากับร้อยละ 7.1 อุณหภูมิของแม่พิมพ์บน 22 องศาเซลเซียส อุณหภูมิของแม่พิมพ์ล่าง 170 องศาเซลเซียส แรงกดอัด 150 กิโลนิวตัน เป็นเวลา 0.6 วินาที และทำการเจาะรูที่กระดาษแข็งที่มีความหนาแน่นของรูเจาะและการเจาะที่ต่างกัน เพื่อปรับการซึมผ่านของอากาศไปยังวัสดุ ผลการทดลองพบว่า การเจาะรูที่กระดาษแข็งส่งผลให้ประสิทธิภาพการซึมผ่านของอากาศภายในผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการขึ้นรูปดีขึ้น รวมถึงคุณภาพของผลิตภัณฑ์มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ และมีความทนทานมากขึ้นร้อยละ 75 ของผลิตภัณฑ์ที่ได้ไม่เจาะรู เนื่องจากเมื่อได้รับการเจาะรูทำให้กระดาษแข็งมีรูพรุนเพิ่มมากขึ้น ดังนั้นผลการทดลองนี้จึงมีประโยชน์ในการนำไปเป็นแนวทางการเพิ่มประสิทธิภาพของวัสดุในการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์

### 2.6.3 สมการถ่ายเทความร้อนและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

ปี ค.ศ. 2010 Villa และคณะ [35] ได้ทำการศึกษาโดยวิธีการเชิงตัวเลขของกระบวนการอบแห้งมะม่วง โดยทำการศึกษาที่ความหนาของชิ้นมะม่วง อุณหภูมิของอากาศอบแห้งและความสุขของมะม่วงที่แตกต่างกัน ซึ่งมีการทำแบบจำลองการแพร่กระจายอุณหภูมิและความชื้นภายในชิ้น



มะม่วงแบบ 2 มิติดังภาพ 16 ใช้หลักการถ่ายเทความร้อนจากสมการ ที่ได้พัฒนามาจากทฤษฎีกฎของฟูรีเยร์ (Fourier's law) ดังสมการ 2.11 และกฎของฟิกส์ (Fick's law) ดังสมการ 2.12

$$\frac{\partial(T)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{k}{\rho c_p} \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{k}{\rho c_p} \frac{\partial T}{\partial y} \right) \quad 2.11$$

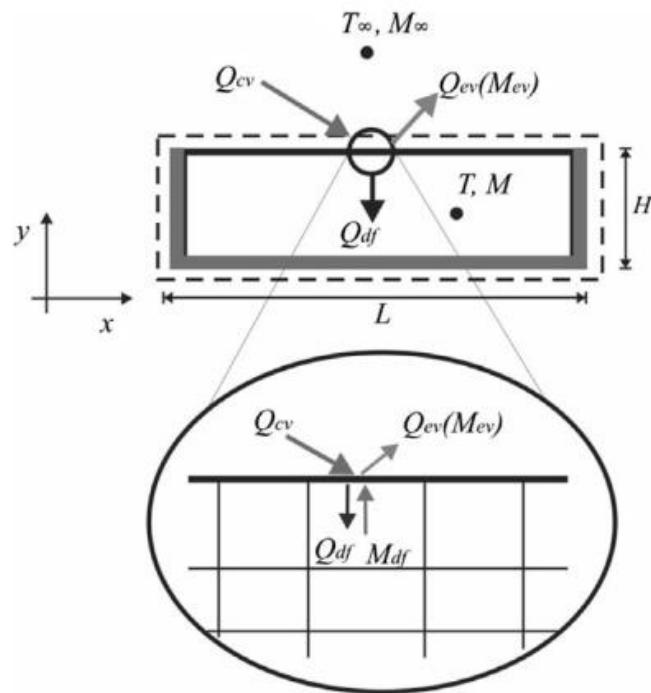
$$\frac{\partial(M)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( D \frac{\partial M}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( D \frac{\partial M}{\partial y} \right) \quad 2.12$$

โดยมีขอบเขตของสมการคือ

1. อุณหภูมิของอากาศในการอบแห้งมีค่าคงที่ด้วยการอบแห้งแบบการพาความร้อน
2. อุณหภูมิและความชื้นเริ่มต้นเป็นของชิ้นมะม่วง
3. ความชื้นสัมพัทธ์ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ
4. การถ่ายเทความร้อนและมวลเป็นแบบสองทิศทาง
5. ไม่มีการหดตัวของชิ้นมะม่วง
6. ไม่มีการสร้างพลังงานความร้อนได้เองภายในชิ้นมะม่วง
7. การระเหยของความชื้นเกิดที่ผิวด้านบนเท่านั้น
8. ไม่มีผลของการแผ่รังสีความร้อนและการถ่ายเทความชื้นภายในชิ้นมะม่วงเกิดขึ้นแบบ

การแพร่กระจายเท่านั้น

ดำเนินการทดลองในช่วงอุณหภูมิของการอบแห้งในอากาศตั้งแต่อุณหภูมิ 50 ถึง 70 องศาเซลเซียส และมีความหนาของชิ้นมะม่วงอยู่ที่ 2 ถึง 5 มิลลิเมตร และระดับความสุกของชิ้นมะม่วงบันทึกจากค่าความหวานในช่วง 13.2 ถึง 22 บริกซ์ (Brix) ผลการทดลองพบว่า อุณหภูมิของการอบแห้งในอากาศที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้เวลาในการอบแห้งลดลง เมื่ออัตราการอบแห้งลดลงร้อยละ 4.5 ทำให้ความหนาของชิ้นมะม่วงมีค่าเพิ่มขึ้น 1 มิลลิเมตร เนื่องจากมีการแพร่กระจายของความชื้นไปสู่พื้นผิวที่แห้ง และระดับสุกของชิ้นมะม่วงมีค่าความหวานเพิ่มขึ้นในอัตราร้อยละ 8 ดังนั้นผลของการถ่ายเทความชื้นของกระบวนการอบแห้งมะม่วง ถูกควบคุมจากปัจจัยการเจริญเติบโตตามธรรมชาติ



ภาพ 16 การทำแห้งของชิ้นมะม่วงแบบ 2 มิติ

[35]

ปี ค.ศ. 2013 Hong และคณะ [12] ได้ทำการศึกษากระบวนการถ่ายเทความร้อนและมวลของใบการบูร โดยจะเน้นไปที่กระบวนการคายน้ำของใบการบูรเป็นหลัก ทำการทดลองโดยสร้างแบบจำลองการถ่ายเทความร้อนและมวล โดยใช้สมการการถ่ายเทความร้อนและมวลที่เกิดจากการคายน้ำของใบการบูรตั้งสมการ 2.13 แสดงดังภาพ 17 การทดสอบการถ่ายเทความร้อนโดยวัดค่าความต้านทานและอุณหภูมิที่บริเวณปากใบการบูร ผลการทดลองของงานวิจัยนี้พบว่า แบบจำลองที่สร้างขึ้นจากสมการ แสดงให้เห็นว่าการระเหยของน้ำมีผลมาจากการคายน้ำที่ปากใบในเวลากลางวัน การดูดกลืนการแผ่รังสีของดวงอาทิตย์ และอุณหภูมิเฉลี่ยของสิ่งแวดล้อมตลอดทั้งวัน ดังนั้นผลของการคายน้ำจะมีบทบาทสำคัญอย่างยิ่ง ในการทำให้อุณหภูมิของใบไม้มีอุณหภูมิลดลงและยังสามารถกระจายอุณหภูมิได้ประมาณร้อยละ 32.9 จากจุดศูนย์กลางแสงอาทิตย์ รวมไปถึงการจำลองแบบใบไม้เพื่อนเลียนแบบให้มีคุณสมบัติที่คล้ายคลึงกับใบไม้จริง เพื่อใช้ในการเป็นต้นแบบของตัวดูดซับที่มาจากธรรมชาติได้

$$\rho_{leaf} c_{p,leaf} \delta_{leaf} \frac{\partial T_{leaf}}{\partial t} = \alpha_s G_{sol} + Q_{rad} - Q'_{rad} - Q_{conv} - Q'_{conv} - Q_{evap} \quad 2.13$$

$$Q_{rad} = \varepsilon \sigma (T_{sky}^4 - T_{leaf}^4) \quad 2.14$$

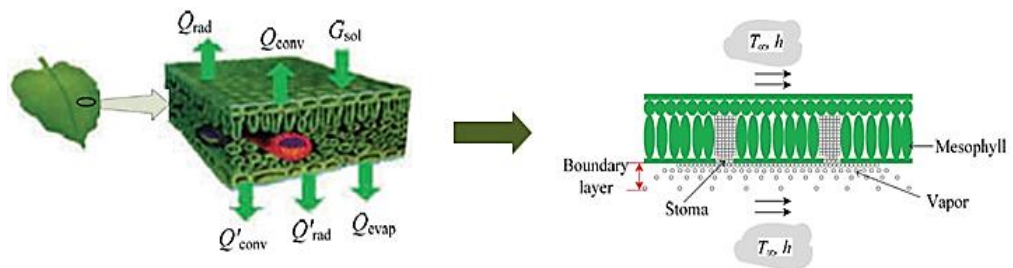
$$Q'_{rad} = \varepsilon \sigma (T_{ground}^4 - T_{leaf}^4) \quad 2.15$$

$$Q_{conv} = h(T_{\infty} - T_{leaf}) \quad 2.16$$

$$Q'_{conv} = h(T_{\infty} - T_{leaf}) \quad 2.17$$

$$Q_{evap} = E_c L_v \quad 2.18$$

เมื่อ	$Q_{rad}$	คือการแผ่รังสีความร้อนระหว่างผิวด้านบนของใบไม้สู่สิ่งแวดล้อม (MJ m <sup>-2</sup> )
	$Q'_{rad}$	คือการแผ่รังสีความร้อนระหว่างผิวด้านล่างของใบไม้สู่สิ่งแวดล้อม (MJ m <sup>-2</sup> )
	$Q_{conv}$	คือการพาความร้อนของอากาศระหว่างผิวด้านบนของใบไม้ (MJ m <sup>-2</sup> )
	$Q'_{conv}$	คือการพาความร้อนของอากาศระหว่างผิวด้านล่างของใบไม้ (MJ m <sup>-2</sup> )
	$Q_{evap}$	คือค่าความร้อนแฝงของการคายน้ำ (MJ m <sup>-2</sup> )
	$G_{sol}$	คือค่ารังสีจากดวงอาทิตย์ (Solar radiation) (W m <sup>-2</sup> )
	$\rho_{leaf}$	คือความหนาแน่นของใบไม้ (kg m <sup>-3</sup> )
	$c_{p,leaf}$	คือความร้อนจำเพาะของใบไม้ (J kg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> )
	$\delta_{leaf}$	คือความหนาของใบไม้ (cm)
	$\alpha_s$	คือค่าความดูดกลืนแสงของใบไม้ (m <sup>2</sup> s <sup>-1</sup> )



ภาพ 17 กระบวนการถ่ายเทความร้อนและการคายน้ำของใบการบูร

ปี ค.ศ. 2015 Aprajeeta และคณะ [36] ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมการหดตัวของการอบแห้งของมันฝรั่งและรูพรุนที่เกิดจากการอบแห้ง โดยใช้หลักการการถ่ายเทความร้อนและมวลมาอธิบายผลกระทบที่เกิดขึ้น ดำเนินการทดลองโดยการคำนวณจากแบบจำลองโดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จากโปรแกรมคอมซอล (Comsol) มาแก้สมการเชิงอนุพันธ์ของการถ่ายเทความร้อนและมวล โดยแบบจำลองนี้การคำนวณจากการเปลี่ยนโครงสร้างพร้อมกับจำลองการถ่ายเทความร้อนและการถ่ายเทมวลภายในชิ้นตัวอย่างมันฝรั่ง จึงต้องมีการสร้างขอบเขตขึ้นมาดังนี้คือ การอบแห้งเป็นแบบระบบไม่มีการถ่ายเทความร้อนเข้าและออกจากระบบ มีการหุ้มฉนวนของเครื่องอบแห้ง จึงสามารถผลของการแผ่รังสีความร้อน ความเร็วของอากาศในการอบแห้งมีค่าสม่ำเสมอ การถ่ายเทมวลเกิดแบบการแพร่กระจายเท่านั้น ทุก ๆ รูพรุนในตัวอย่างเต็มไปด้วยน้ำในสภาวะอิ่มตัว และการถ่ายเทความร้อนภายในตัวอย่างเป็นการนำความร้อนเพียงอย่างเดียว ซึ่งสมการการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้น โดยการนำความร้อนภายในรูพรุน พัฒนาจากทฤษฎีของกฎของฟูเรียร์ เมื่อค่าจากสมการการถ่ายเทมวลที่เกิดขึ้นจากการแพร่กระจาย (Diffusion) ซึ่งพัฒนาจากทฤษฎีของกฎของฟิกส์ ดังนั้นจากการศึกษาพบว่า พฤติกรรมการหดตัวตามแนวแกนรัศมีของการอบแห้งของมันฝรั่ง มีการหดตัวอย่างสม่ำเสมอที่ร้อยละ 35 และความชื้นที่ลดลงจะส่งผลให้มีปริมาณรูพรุนเพิ่มมากขึ้น สามารถบ่งชี้ได้ว่ารูพรุนของแผ่นชิ้นมันฝรั่งมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อการถ่ายเทมวลของแผ่นชิ้นมันฝรั่ง

## บทที่ 3

### ขั้นตอนและการดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาคูณสมบัติของไบโทองกวาวและภาชนะบรรจุอาหารที่ขึ้นรูปจากไบโทองกวาว รวมทั้งศึกษาการนำภาชนะบรรจุอาหารที่ขึ้นรูปจากไบโทองกวาวไปใช้งาน ทำการศึกษาสถานะที่เหมาะสมต่อการขึ้นรูป โดยใช้ผลของร้อยละความชื้นเป็นตัวบ่งชี้ และการเปรียบเทียบการทำทดลองกับสมการถ่ายเทความร้อน ด้านการกระจายความร้อนของการหุ้มฉนวนที่แม่พิมพ์สำหรับกระบวนการขึ้นรูป จากนั้นศึกษาการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลอง การศึกษาในครั้งนี้เป็นการทดลองในระดับห้องปฏิบัติการ (Laboratory scale) โดยแบ่งการศึกษาได้ดังนี้ การศึกษาคูณสมบัติเบื้องต้นของไบโทองกวาวที่ใช้ในกระบวนการขึ้นรูป การขึ้นรูปภาชนะบรรจุอาหารจากไบโทองกวาว การทดสอบคูณสมบัติของภาชนะบรรจุอาหารที่ขึ้นรูปจากไบโทองกวาว การทดสอบประสิทธิภาพโดยการนำไปใช้งานของภาชนะบรรจุอาหารที่ขึ้นรูปจากไบโทองกวาว และการศึกษาการถ่ายเทความร้อนของชุดอุปกรณ์ที่ส่งผลต่อการขึ้นรูป

#### 3.1 การศึกษาสมบัติต่าง ๆ ของไบโทองกวาวที่ใช้ในกระบวนการขึ้นรูป

ไบโทองกวาวที่ใช้ในการขึ้นรูปจะถูกนำไปทดสอบคูณสมบัติต่าง ๆ ดังนี้

3.1.1 วิเคราะห์องค์ประกอบต่าง ๆ (Proximate analysis) ด้วยเครื่อง Thermogravimetric analyzer ตามมาตรฐาน ASTM D 3172-15 โดยการเตรียมตัวอย่างไบโทองกวาวให้อยู่ในรูปของผงละเอียด แล้วนำไปวิเคราะห์ค่าความชื้น ปริมาณสารระเหย ปริมาณเถ้า และคำนวณปริมาณคาร์บอนคงที่ของไบโทองกวาว

3.1.2 วิเคราะห์ธาตุ (Ultimate analysis) ด้วยเครื่อง C H N elemental analyzer ตามมาตรฐาน ASTM D 3176-15 โดยการเตรียมตัวอย่างไบโทองกวาวให้อยู่ในรูปของผงละเอียด แล้วนำไปวิเคราะห์อัตราส่วนของปริมาณคาร์บอน ไฮโดรเจน และไนโตรเจนในไบโทองกวาว

3.1.3 วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี (Chemical compositions) วิเคราะห์ตามมาตรฐาน ASTM D 3173-15 โดยการเตรียมตัวอย่างไบโทองกวาวให้อยู่ในรูปของผงละเอียด แล้วนำไปวิเคราะห์ค่าความชื้น ปริมาณเฮมิเซลลูโลส ปริมาณเซลลูโลส และปริมาณลิกนินในไบโทองกวาว

3.1.4 วิเคราะห์โครงสร้างภายนอกและภายในของไบโทองกวาว โดยการเตรียมตัวอย่างให้มีขนาด 1x1 มิลลิเมตร โดยการนำไปทดสอบด้วยเครื่องมือกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope; SEM) รุ่น Leo-1455VP ของบริษัท ZEISS ที่กำลังขยาย 100 และ 1000 เท่า

3.1.5 วิเคราะห์ชนิดของธาตุ โดยการเตรียมตัวอย่างคือ นำใบทองกวาวอบที่เตาอบที่อุณหภูมิ 107 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง จากนั้นนำมาตัดให้ได้ขนาด  $2 \times 2$  เซนติเมตร นำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่องเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ (X-ray Fluorescence Spectroscopy; XRF)

3.1.6 ทดสอบค่าความร้อน (Gross Heating Value; GHV) โดยเตรียมตัวอย่างใบทองกวาวให้อยู่ในรูปของผงละเอียด จากนั้นตรวจสอบตามมาตรฐานการทดสอบด้วยเครื่องบอมบ์แคลอริมิเตอร์ (Bomb calorimeter) รุ่น 6200 ยี่ห้อ Parr

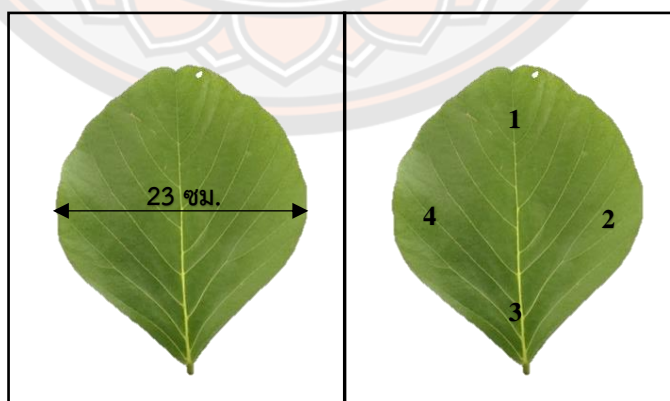
3.1.7 ทดสอบแรงดึง (Tensile strength) ด้วยเครื่องวัดแรงดึง (Universal testing machine) รุ่น 4411 ยี่ห้อ Instron เพื่อศึกษาพฤติกรรมเชิงกลของใบทองกวาว โดยการทดสอบแรงดึงของวัสดุภายใต้แรงดึงหรือการยืดในแนวแกน และทดสอบแรงตัด ดำเนินการทดสอบโดยการเตรียมขนาดตัวอย่าง  $2 \times 1$  เซนติเมตร โหลดเซลล์ 500 นิวตัน ที่ความเร็ว 100 มิลลิเมตรต่อวินาที

### 3.2 การขึ้นรูปภาชนะบรรจุอาหารจากใบทองกวาว

กระบวนการขึ้นรูปภาชนะบรรจุอาหารจากใบทองกวาว โดยจะมีขั้นตอนดังนี้คือ การเตรียมวัตถุดิบ เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการขึ้นรูป และวิธีการขึ้นรูปภาชนะบรรจุอาหาร

#### 3.2.1 วัตถุดิบ

วัตถุดิบที่ใช้ในการทดลองครั้งนี้คือ ใบทองกวาว ซึ่งได้รับความอนุเคราะห์จากคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร จังหวัดพิษณุโลก โดยคัดเลือกใบทองกวาวสีเขียวสด ไม่มีโรคหรือราที่ใบ และมีเส้นผ่านศูนย์กลางโดยประมาณ 23 เซนติเมตร ความหนาของใบทองกวาวโดยเฉลี่ยทั้ง 4 ตำแหน่งเท่ากับ  $0.29 \pm 0.05$  มิลลิเมตร แสดงดังภาพ 18



ภาพ 18 ใบทองกวาวที่ใช้ในการขึ้นรูปและตำแหน่งวัดความหนาใบทองกวาว



### 3.2.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการขึ้นรูป

3.2.2.1 เครื่องมือวัดอุณหภูมิคือ เทอร์โมคัปเปิลประเภท K (Type K thermocouple)

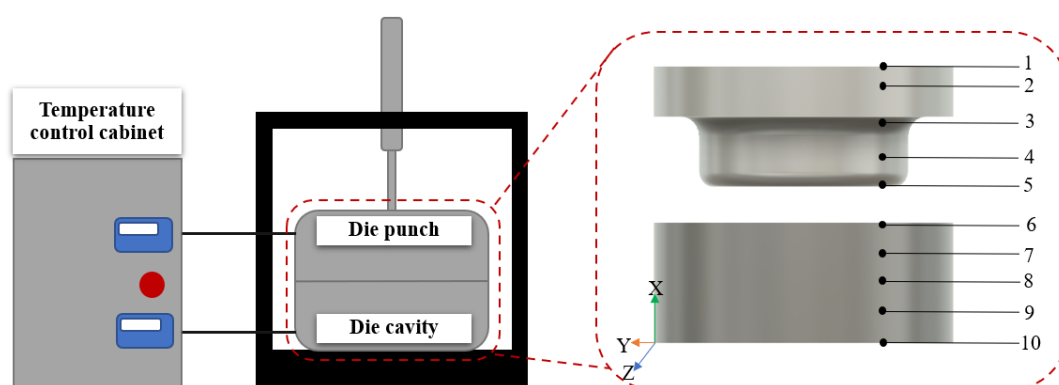
3.2.2.2 เครื่องมือการวัดค่าความหนา โดยใช้เครื่องดิจิตอลเวอร์เนียคาลิเปอร์ (Digital caliper operating instruction)

3.2.2.3 เครื่องมือบันทึกผลอุณหภูมิโดย Data logger รุ่น Wisco analog input module AI210 ตั้งค่าบันทึกทุก ๆ 10 วินาที

3.2.2.4 ฉนวนกันความร้อนเป็นแบบใยแก้ว (Fiber Glass) ที่ถูกหุ้มด้วยอลูมิเนียมฟอยล์ที่มีความหนาอยู่ที่ 20 มิลลิเมตรภายนอกอีกชั้น เพื่อป้องกันการฟุ้งกระจายของใยแก้ว ที่อาจส่งผลกระทบต่อระบบการหายใจและสัมผัส ที่ทำให้เกิดการคันหรือระคายเคืองของผิวหนัง

3.2.2.5 เครื่องวัดความชื้นแบบดิจิตอล รุ่น PMB 202 เครื่องจะทำการบันทึกผล และสรุปค่าความชื้นให้อัตโนมัติ ทำการวัดความชื้นทั่วทั้งภาชนะผลิตภัณฑ์จากไบโทองกวาว

3.2.2.6 ชุดอุปกรณ์ในการขึ้นรูป เป็นชุดอุปกรณ์การขึ้นรูปโดยอ้างอิงจากการขอจดสิทธิบัตรจากกลุ่มวิจัยของรองศาสตราจารย์ ดร.สมร หิรัญประดิษฐกุล จะประกอบด้วยองค์ประกอบสำคัญ 2 ส่วน คือ ตู้ควบคุมอุณหภูมิ (Temperature control cabinet) จะทำหน้าที่ให้ความร้อนแก่แม่พิมพ์โดยผ่านแหล่งให้ความร้อนคือ ฮีตเตอร์ (Heater) และควบคุมอุณหภูมิด้วยเทอร์โมคัปเปิล ตำแหน่งการวัดอุณหภูมิด้วยเทอร์โมคัปเปิล ดำเนินการติดตั้งอยู่ภายในแม่พิมพ์ลึกเข้าไปในแม่พิมพ์ 15 มิลลิเมตร และแม่พิมพ์ (Die) ขนาดของแม่พิมพ์แสดงในภาคผนวก ภาพ ง-1 โดยจะแบ่งออกเป็นแม่พิมพ์บน (Die punch) และแม่พิมพ์ล่าง (Die cavity) ดังแสดงในภาพ 19



ภาพ 19 ชุดอุปกรณ์การขึ้นรูปและตำแหน่งวัดอุณหภูมิ

### 3.2.3 วิธีการขึ้นรูปภาชนะบรรจุอาหาร

การขึ้นรูปภาชนะบรรจุอาหารจะใช้วิธีการกดอัด (Press forming) เนื่องจากวิธีการขึ้นรูปนี้สามารถทำได้ง่ายและขึ้นรูปวัสดุชิ้นงานที่มีความหนาแน่น การขึ้นรูปภาชนะบรรจุอาหารเพื่อศึกษาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการขึ้นรูป โดยการควบคุมค่าร้อยละความชื้นให้อยู่ในช่วงเหมาะสมต่อการเก็บรักษาและคงสภาพรูปร่างลักษณะของผลิตภัณฑ์ ดำเนินการโดยให้อุณหภูมิในขณะขึ้นรูปซึ่งจะช่วยในด้านการฆ่าเชื้อ ดังนั้นจึงเหมาะสำหรับการขึ้นรูปภาชนะบรรจุอาหารที่ทำจากวัสดุชีวมวล แผนภาพการทดลองสำหรับขั้นตอนการศึกษากระบวนการทดสอบการขึ้นรูปของไบโทองกวาว แสดงดังภาพ 20

#### 3.2.3.1 ขั้นตอนการเตรียมวัตถุดิบ

นำไบโทองกวาวมาทำความสะอาดด้วยการล้างน้ำ จากนั้นนำไบโทองกวาวมาเช็ดและตากเพื่อควบคุมความชื้นของไบโทองกวาว ที่อุณหภูมิห้องประมาณ 30 องศาเซลเซียส นาน 4 ชั่วโมง จากนั้นเก็บพักไว้ในตะกร้า เพื่อรอนำมาขึ้นรูปในขั้นตอนต่อไป

#### 3.2.3.2 ขั้นตอนการขึ้นรูป

ขั้นตอนที่ 1 วัดความหนา น้ำหนัก และวัดความชื้นของไบโทองกวาว นำมาใส่ในแม่พิมพ์และทำการกดอัดขึ้นรูป

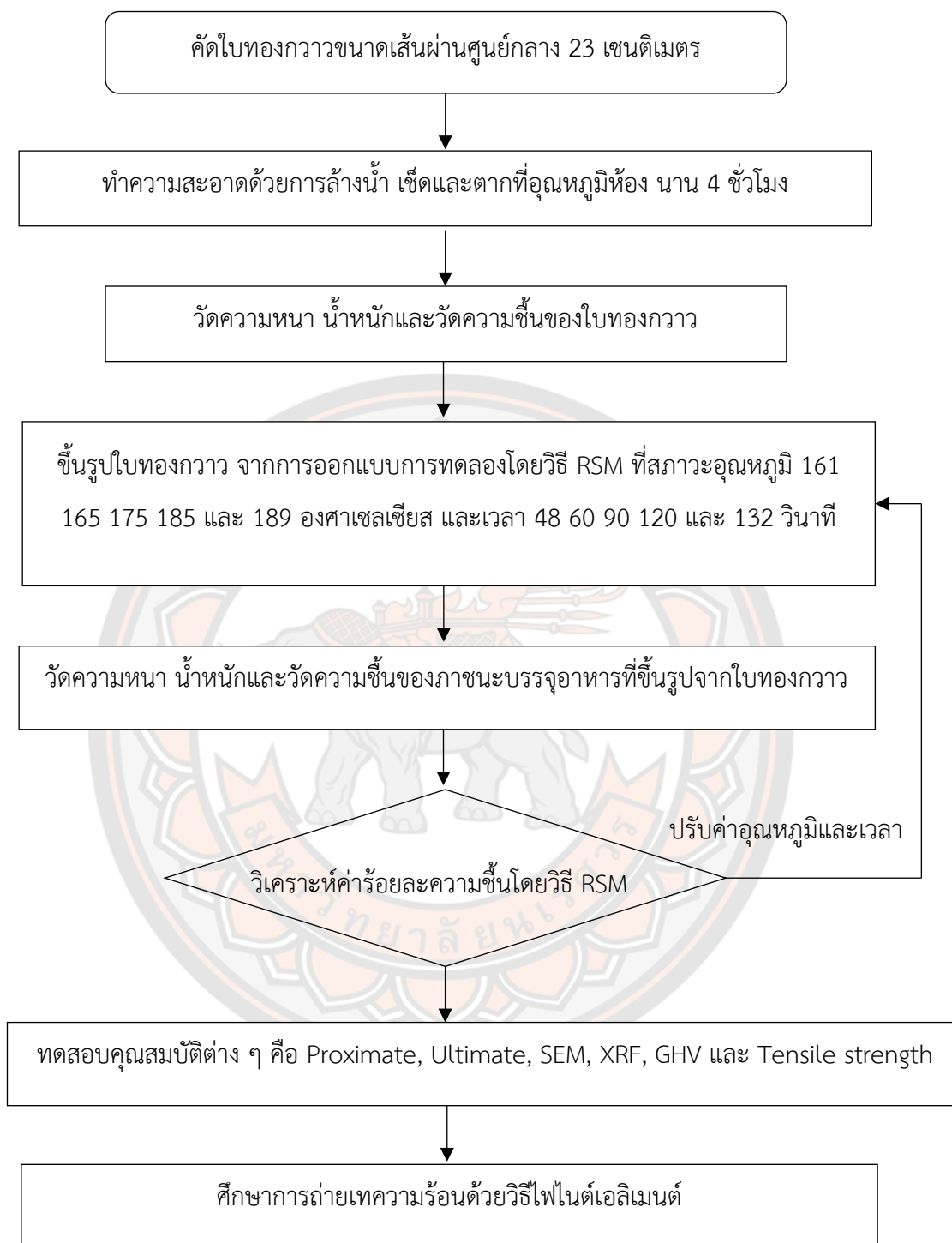
ขั้นตอนที่ 2 ทำการกดอัดขึ้นรูปหลังจากให้ความร้อนที่แม่พิมพ์เป็นเวลา 40 นาที ซึ่งจะทำให้อุณหภูมิของแม่พิมพ์มีค่าคงที่จากอุณหภูมิที่ได้ตั้งค่าไว้ แล้วจึงทำการกดอัดขึ้นรูปจากสภาวะการขึ้นรูปที่ได้จากการออกแบบการทดลอง เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการขึ้นรูปจากการออกแบบทางสถิติด้วยวิธีพื้นผิวตอบสนอง ดังแสดงในภาคผนวก ตาราง ค-1 สภาวะการขึ้นรูปใช้ 2 ปัจจัย คือ อุณหภูมิและเวลา ส่วนตัวแปรของผลตอบสนองคือ ค่าร้อยละความชื้น ดังนั้นจะได้อุณหภูมิที่ใช้ขึ้นรูป 5 ค่า คือ 161 165 175 185 และ 189 องศาเซลเซียส และเวลาที่ใช้ขึ้นรูป 5 ค่า คือ 48 60 90 120 และ 132 วินาที โดยกำหนดค่าของระยะปัจจัยมีค่าเท่ากับ 1.72

ขั้นตอนที่ 3 หลังจากขึ้นรูปไบโทองกวาวเป็นภาชนะบรรจุอาหาร ทำการวัดความหนา น้ำหนัก และวัดความชื้นของภาชนะบรรจุอาหาร

ขั้นตอนที่ 4 แต่ละสภาวะจะทำการทดลองซ้ำทั้งหมด 5 ครั้ง ตามขั้นตอนที่ 1 ถึงขั้นตอนที่ 3 โดยเปลี่ยนตัวแปรอุณหภูมิและเวลา

ขั้นตอนที่ 5 นำภาชนะบรรจุอาหารไปวิเคราะห์ค่าร้อยละความชื้น เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในกระบวนการขึ้นรูปภาชนะบรรจุอาหาร

ขั้นตอนที่ 6 เพื่อยืนยันผลการออกแบบสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการขึ้นรูป จึงทำการทดลองซ้ำที่อุณหภูมิ 165 175 และ 185 องศาเซลเซียส และเวลาที่ 90 120 และ 180 วินาที



ภาพ 20 ขั้นตอนการศึกษากระบวนการขึ้นรูปของใบบองกาวจากการออกแบบการทดลองโดยใช้วิธี RSM

### 3.3 การทดสอบคุณสมบัติต่าง ๆ ของภาชนะบรรจุอาหารจากไบโทองกาว

ภาชนะบรรจุอาหารจากไบโทองกาวที่ใช้ในการขึ้นรูป จะถูกนำไปทดสอบคุณสมบัติต่าง ๆ โดยจะทำการทดสอบ 3 ข้อ ในทุก ๆ การวิเคราะห์คุณสมบัติต่าง ๆ ดังนี้

3.3.1 วิเคราะห์โครงสร้างภายนอกและภายในของไบโทองกาว โดยการเตรียมตัวอย่างให้มีขนาด  $1 \times 1$  มิลลิเมตร โดยการนำไปทดสอบด้วยเครื่องมือกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope; SEM) รุ่น Leo-1455VP ของบริษัท ZEISS ที่กำลังขยาย 100 และ 1000 เท่า

3.3.2 ทดสอบค่าความร้อน (Gross Heating Value; GHV) โดยเตรียมตัวอย่างไบโทองกาวให้อยู่ในรูปของผงละเอียด จากนั้นตรวจสอบตามมาตรฐานการทดสอบด้วยเครื่องบอมบ์แคลอริมิเตอร์ (Bomb calorimeter) รุ่น 6200 ยี่ห้อ Parr

3.3.3 ทดสอบแรงดึง (Tensile strength) ด้วยเครื่องวัดแรงดึง (Universal testing machine) รุ่น 4411 ยี่ห้อ Instron เพื่อศึกษาพฤติกรรมเชิงกลของไบโทองกาว โดยการทดสอบแรงดึงของวัสดุภายใต้แรงดึงหรือการยืดในแนวแกน และทดสอบแรงตัด ดำเนินการทดสอบโดยการเตรียมขนาดตัวอย่าง  $2 \times 1$  เซนติเมตร โพลดเซลล์ 500 นิวตัน ที่ความเร็ว 100 มิลลิเมตรต่อวินาที

### 3.4 การศึกษาการถ่ายเทความร้อนของชุดอุปกรณ์ที่ส่งผลต่อการขึ้นรูป

3.4.1 ขั้นตอนการศึกษาการกระจายอุณหภูมิของแม่พิมพ์ระหว่างการให้ความร้อน

การศึกษารอบอุณหภูมิของแม่พิมพ์ที่เปลี่ยนแปลงไปในระหว่างการให้ความร้อนของชุดแม่พิมพ์โดยแบ่งช่วงการศึกษาออกเป็น 2 รูปแบบ คือ แม่พิมพ์ที่มีการหุ้มฉนวนและไม่หุ้มฉนวน โดยมีขั้นตอนการศึกษาการกระจายอุณหภูมิของแม่พิมพ์ระหว่างการให้ความร้อน แสดงภาพดัง 21

3.4.1.1 บันทึกอุณหภูมิและเวลาการให้ความร้อนของแม่พิมพ์ที่หุ้มฉนวนเป็นเวลา 60 นาที โดยใช้อุปกรณ์บันทึกข้อมูล ทำการทดลองซ้ำจำนวน 5 ครั้ง

3.4.1.2 บันทึกอุณหภูมิและเวลาการให้ความร้อนของแม่พิมพ์ที่ไม่หุ้มฉนวนเป็นเวลา 60 นาที โดยใช้อุปกรณ์บันทึกข้อมูล ทำการทดลองซ้ำจำนวน 5 ครั้ง

3.4.1.3 เปรียบเทียบผลอุณหภูมิของแม่พิมพ์จากการหุ้มฉนวนและไม่หุ้มฉนวน

3.4.1.4 เปรียบเทียบผลการทดลองการกระจายความร้อนของแม่พิมพ์ที่หุ้มฉนวนขณะให้ความร้อนและสมการถ่ายเทความร้อนจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เมื่อพิจารณาผลการให้อัตราความร้อนคงที่หรือไม่มีการเปลี่ยนแปลงตามเวลา โดยใช้สมการถ่ายเทความร้อนโดยการนำความร้อนแบบกึ่งของแข็งอันดับที่ 1 กรณีสภาวะที่ จะแสดงดังสมการที่ 3.1

$$T_{(x,t)} = T_s + (T_i - T_s) \operatorname{erf}\left(\frac{x}{4\alpha t}\right) \quad 3.1$$

โดยมีสภาวะขอบเขตดังนี้

สภาวะเริ่มต้น (IC) ที่เวลา  $t = 0$ ,  $T = T_i = 30 \text{ }^{\circ}\text{C}$  สำหรับ  $x \geq 0$

สภาวะขอบเขต 1 (BC1) ที่ตำแหน่ง  $x = 0$ ,  $T = T_s = 200 \text{ }^{\circ}\text{C}$  สำหรับ  $t > 0$

สภาวะขอบเขต 2 (BC2) ที่ตำแหน่ง  $x \rightarrow \infty$ ,  $T = T_i$  สำหรับ  $t = 0$

เมื่อ  $T_i$  คืออุณหภูมิเริ่มต้น (องศาเซลเซียส)

$T_s$  คืออุณหภูมิผิว (องศาเซลเซียส)

$x$  คือระยะทาง (มิลลิเมตร)

$t$  คือเวลา (นาที่ หรือ วินาที)

$\alpha$  คือความสามารถการแพร่ความร้อน ( $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$ )

### 3.4.2 ขั้นตอนการศึกษาการกระจายอุณหภูมิของแม่พิมพ์ระหว่างการขึ้นรูป

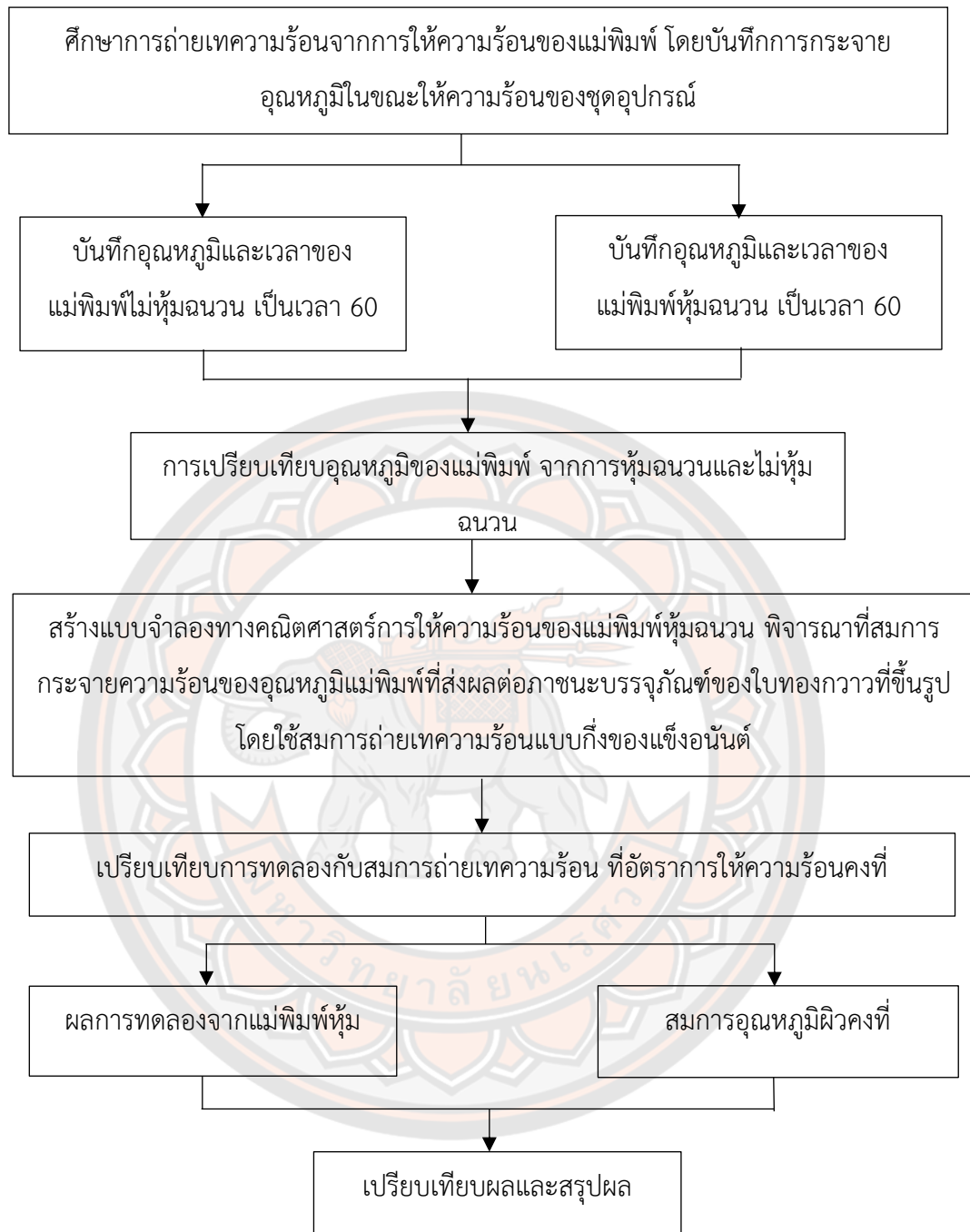
การศึกษาอุณหภูมิของแม่พิมพ์ที่เปลี่ยนแปลงไปในระหว่างการขึ้นรูปของชุดแม่พิมพ์จากการหุ้มฉนวน ดำเนินการทดลองดังนี้

3.4.2.1 อุณหภูมิและเวลาในการขึ้นรูป ที่ได้จากสภาวะการขึ้นรูปที่เหมาะสมในการทดลองวิเคราะห์ผลของค่าร้อยละความชื้น และลักษณะทางกายภาพของใบทองกวาวหลังขึ้นรูปที่สภาวะต่าง ๆ

3.4.2.2 อุณหภูมิที่ใช้ในการทดลองการศึกษาการกระจายอุณหภูมิ คืออุณหภูมิ 175 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 นาที

3.4.2.3 บันทึกอุณหภูมิและเวลา โดยใช้อุปกรณ์บันทึกข้อมูล โดยตำแหน่งการวัดอุณหภูมิแสดงดังภาพ 22

3.4.2.4 ทำการทดลองซ้ำจำนวน 5 ครั้ง เพื่อศึกษาการกระจายความร้อนของแม่พิมพ์ที่หุ้มฉนวนในระหว่างการขึ้นรูปภาชนะบรรจุอาหาร



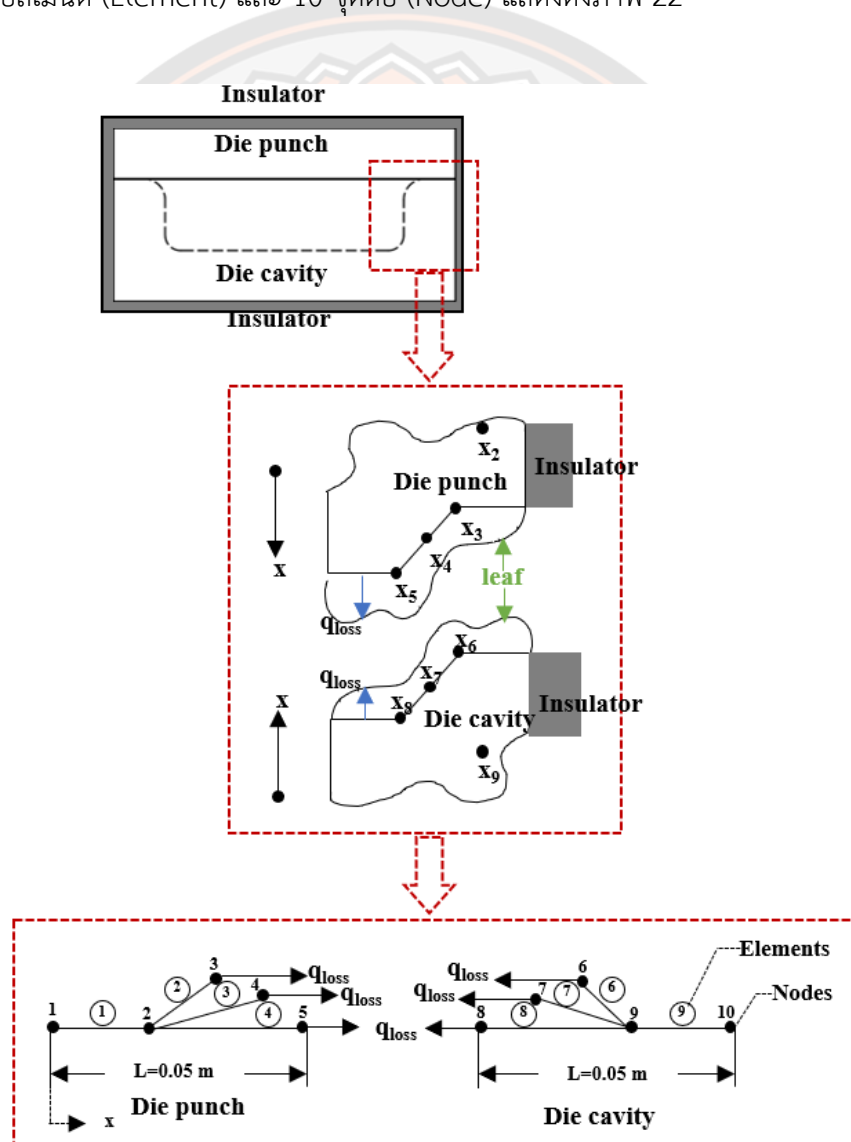
ภาพ 21 ขั้นตอนการศึกษาปัญหาการถ่ายเทความร้อนของภาชนะบรรจุอาหารจากใบทองกวาว



### 3.4.3 ขั้นตอนการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ นำมาเปรียบเทียบกับผลการทดลอง เพื่อวิเคราะห์ทำนายการกระจายความร้อนได้เหมาะสมและแม่นยำ ซึ่งจะเป็นการช่วยลดผลกระทบต่าง ๆ เพื่อปรับปรุงกระบวนการขึ้นรูปให้ดีขึ้น เช่น การลดระยะเวลาขึ้นรูปและลดจำนวนความเสียหายของผลิตภัณฑ์ เป็นต้น

3.4.3.1 ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขที่เลือกมาใช้ในแก้สมการคือ วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์โดยทำการวิเคราะห์จากภาพตัดขวางของแม่พิมพ์ที่ใช้ในการขึ้นรูปในระบบพิกัดฉาก 1 มิติ สามารถแบ่งออกได้เป็น 9 เอลิเมนต์ (Element) และ 10 จุดต่อ (Node) แสดงดังภาพ 22



ภาพ 22 การจำลองปัญหาการถ่ายเทความร้อนใน 1 มิติ ของแม่พิมพ์ที่ใช้ในกระบวนการขึ้นรูป

3.4.3.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยพิจารณาที่สมการการกระจายความร้อน สำหรับการนำความร้อน ที่สภาวะไม่คงตัวหรือไม่ขึ้นกับเวลาของแม่พิมพ์ส่งผลต่อการขึ้นรูปภาชนะบรรจุอาหารจากใบทองกวาว โดยใช้สมการถ่ายเทความร้อนจากกฎอนุรักษ์พลังงานดังสมการต่อไปนี้

$$\text{IN} - \text{OUT} + \text{GENERATED} = \text{ACCOMULATION} \quad 3.2$$

1) การกำหนดสมมติฐาน (Assumptions)

1.1) การขึ้นรูปภาชนะบรรจุอาหารจากใบทองกวาวโดยการนำความร้อนของแม่พิมพ์ที่สภาวะไม่คงตัว 1 มิติ ในแกน x

1.2) ไม่มีการสร้างความร้อนเองได้ ไม่มีการพาความร้อน และการแผ่รังสีของแม่พิมพ์

1.3) คุณสมบัติทางกายภาพของแม่พิมพ์คงที่

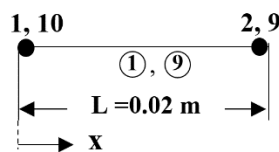
1.4) ความชื้นของใบทองกวาวมีการกระจายออกไปทั่วทั้งผิวบนและผิวล่าง

1.5) ใบทองกวาวมีความหนาน้อยมาก

1.6) มวลของน้ำที่หายไปหาได้จากค่าความชื้นของใบทองกวาว โดยจะแปรผันตรงกับอุณหภูมิและเวลา

2) สมการควบคุม (Partial Differential Equation; PDE) โดยพิจารณาในแต่ละเอลิเมนต์ดังต่อไปนี้

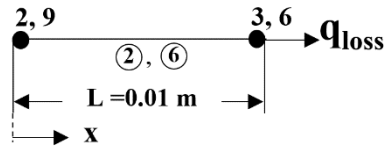
จากภาพที่ 23 จะได้สมการของเอลิเมนต์ที่ 1 และ 9 ดังสมการ 3.3



ภาพ 23 การจำลองปัญหาการถ่ายเทความร้อนของเอลิเมนต์ที่ 1 และ 9

$$k \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad 3.3$$

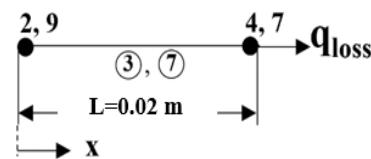
จากภาพที่ 24 จะได้สมการของเอลิเมนต์ที่ 2 และ 6 ดังสมการ 3.4



ภาพ 24 การจำลองปัญหาการถ่ายเทความร้อนของเอลิเมนต์ที่ 2 และ 6

$$k \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} - q_{loss,1} = \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad 3.4$$

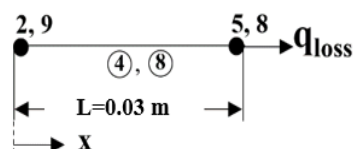
จากภาพที่ 25 จะได้สมการของเอลิเมนต์ที่ 3 และ 7 ดังสมการ 3.5



ภาพ 25 การจำลองปัญหาการถ่ายเทความร้อนของเอลิเมนต์ที่ 3 และ 7

$$k \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} - q_{loss,2} = \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad 3.5$$

จากภาพที่ 26 จะได้สมการของเอลิเมนต์ที่ 4 และ 8 ดังสมการ 3.6



ภาพ 26 การจำลองปัญหาการถ่ายเทความร้อนของเอลิเมนต์ที่ 4 และ 8

$$k \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} - q_{loss,3} = \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad 3.6$$

เมื่อ  $q_{loss}$  คือ พลังงานความร้อนที่สูญเสียไปเนื่องจากมวลของน้ำที่เหลืออยู่ในเวลาต่าง ๆ ซึ่งคำนวณได้จากค่าความชื้นของใบทองกวาว ดังแสดงในภาคผนวก ง ในภาพที่ ง.1 จากนั้นนำค่าความชื้นมาคูณกับค่าความร้อนแฝงของน้ำ (Latent heat of water)

### 3) สภาวะเริ่มต้นและสภาวะขอบเขต

#### 3.1) สภาวะเริ่มต้น (IC)

ที่  $t = 0$  และ  $x = 0$ ,  $T = T_i = 175 \text{ }^\circ\text{C}$

#### 3.2) สภาวะขอบเขต (BC)

ที่  $t \rightarrow \infty$  และ  $x \rightarrow \infty$ ,  $T = T_i$  สำหรับเวลาทั้งหมด  $t > 0$

### 4) แก๊สมการโดยจัดรูปให้อยู่ในรูปของวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ดังสมการ

ต่อไปนี้เป็น

$$[K]\{T(t)\} + [C]\{T^*(t)\} = \{Q(t)\} \quad 3.7$$

เมื่อ  $[K]$  คือ เมทริกซ์ค่าคงที่การนำความร้อน

$[C]$  คือ เมทริกซ์ค่าความจุความร้อนจำเพาะ

$\{T(t)\}$  คือ เวกเตอร์ของอุณหภูมิที่เวลาต่าง ๆ

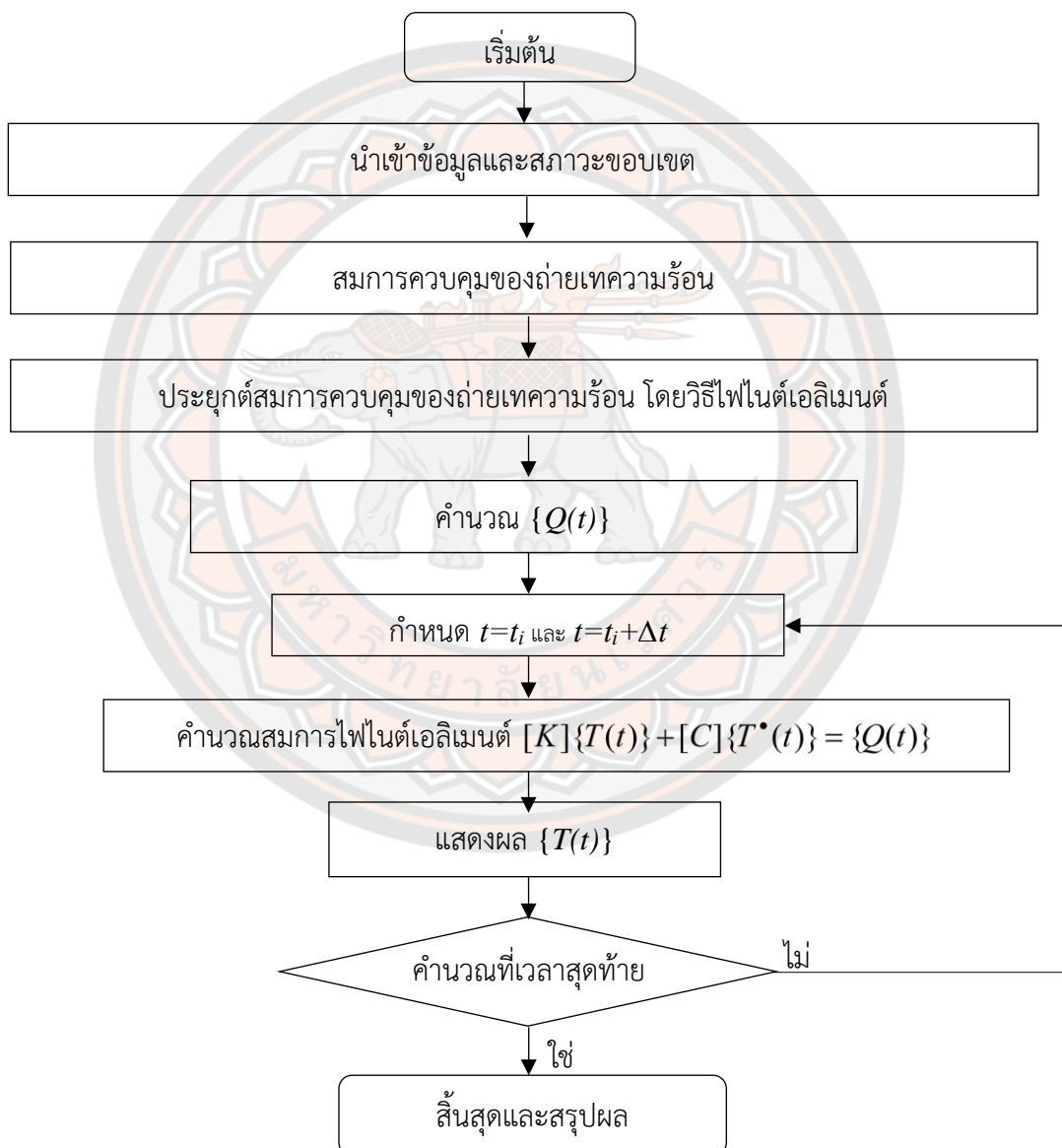
$\{Q(t)\}$  คือ เวกเตอร์ของทิศทางโหนดที่เวลาต่าง ๆ

จากสมการถ่ายเทความร้อนที่อยู่ในรูปของวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ สมการที่นิยมใช้คือความสัมพันธ์บังเวียนเกิด (Recurrence relations) กล่าวคือ ที่ช่วงเวลาใด ๆ (Time step;  $\Delta t$ ) ถูกนำมาคำนวณหาอุณหภูมิในช่วงเวลานั้น ๆ การเลือกช่วงเวลานั้นมีผลอย่างมากต่อการคำนวณ การใช้ค่าช่วงเวลาที่ยาวเกินไปจะใช้เวลาในการคำนวณมาก แต่มีความแม่นยำสูง ซึ่งต้องคำนึงถึงเอลิเมนต์และจำนวนจุดต่อที่มาก ในทางตรงข้ามการใช้ช่วงเวลาที่สูงจะส่งผลให้เกิดความคลาดเคลื่อนไปจากความจริง ในงานวิจัยนี้ประกอบด้วยเอลิเมนต์และจำนวนจุดต่อที่น้อยจึงสามารถใช้ช่วงเวลาที่ยาวได้ คือ  $\Delta t = 1$  เพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่แม่นยำมากขึ้น [37]

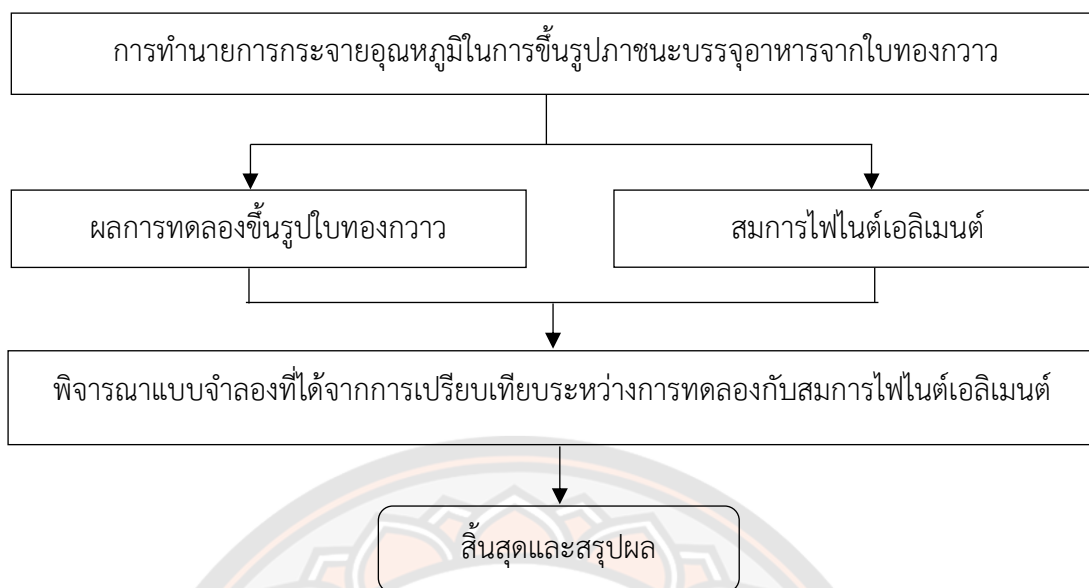
3.4.3.3 ขั้นตอนการแก้สมการวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป คือ โปรแกรม MATLAB R2019a ซึ่งเป็นซอฟต์แวร์ที่ช่วยออกแบบในการจำลองการขึ้นรูปและการ

คำนวณการกระจายอุณหภูมิ เพื่อใช้อธิบายกระบวนการขึ้นรูปของไบโทองกวาว สำหรับการพัฒนาแบบจำลองกระบวนการขึ้นรูปภาชนะบรรจุอาหาร โดยมีขั้นตอนการทำงานดังภาพที่ 27

3.4.3.4 เปรียบเทียบผลของการกระจายอุณหภูมิในการขึ้นรูประหว่างการทดลองและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยการทดลองเลือกจากการออกแบบการทดลองที่สภาวะการขึ้นรูปที่เหมาะสม แผนภาพขั้นตอนการเปรียบเทียบการทดลองกับการสร้างแบบจำลองการถ่ายเทความร้อนของภาชนะบรรจุอาหารจากไบโทองกวาว แสดงดังภาพ 28



ภาพ 27 ขั้นตอนการแก้สมการการกระจายอุณหภูมิโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ สำหรับการขึ้นรูปภาชนะบรรจุอาหารจากไบโทองกวาว



ภาพ 28 ขั้นตอนการทำการกระจายอุณหภูมิโดยการเปรียบเทียบการทดลองกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ สำหรับการขึ้นรูปภาชนะบรรจุอาหารจากใบทองกวาว

### 3.5 การทดสอบประสิทธิภาพของการนำภาชนะบรรจุอาหารจากใบทองกวาวไปใช้งาน

เพื่อศึกษาการทนความร้อนของภาชนะบรรจุอาหารที่ขึ้นรูปจากใบทองกวาว โดยพิจารณาจากการทดสอบโดยการอุ่นในเตาไมโครเวฟที่กำลังไฟสูงสุด เนื่องจากเวลาโดยเฉลี่ยของการอุ่นอาหารทั่วไปโดยใช้ไมโครเวฟใช้เวลาเฉลี่ยไม่เกิน 10 นาที

#### 3.5.1 อุปกรณ์

3.5.1.1 เตาไมโครเวฟ รุ่น R-390I ยี่ห้อ Sharp

3.5.1.2 กล้องบันทึกภาพ รุ่น P10 ยี่ห้อ Huawei

#### 3.5.2 วิธีการทดสอบ

3.5.2.1 นำน้ำเปล่าอุณหภูมิห้อง ปริมาตร 50 มิลลิลิตร ใส่ภาชนะบรรจุอาหารที่ขึ้นรูปจากใบทองกวาว แล้วจากนั้นนำเข้าเตาไมโครเวฟ

3.5.2.2 ทำการทดสอบอุ่นภาชนะบรรจุอาหารที่ขึ้นรูปจากใบทองกวาว โดยใช้เตาไมโครเวฟที่กำลังไฟ 1,100 วัตต์ เป็นเวลา 2 4 และ 6 นาที ตามลำดับ

3.5.2.3 บันทึกผลการเปลี่ยนแปลงตัวอย่าง ด้วยการถ่ายภาพ



## บทที่ 4

### ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาสมบัติไบโทองกวาวและภาชนะบรรจุอาหารจากไบโทองกวาว ทำการออกแบบการทดลองภายใต้สภาวะการการขึ้นรูปที่เหมาะสม เพื่อนำไปใช้เป็นภาชนะบรรจุอาหารที่มีความปลอดภัยต่อผู้บริโภคจึงทำการศึกษาการทนความร้อนด้วยการนำไปใช้งานในไมโครเวฟ รวมทั้งศึกษาการถ่ายเทความร้อนของชุดอุปกรณ์ที่ส่งผลต่อการขึ้นรูป เปรียบเทียบผลการทดลองและการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ภายใต้วัตถุประสงค์ของงานวิจัยเพื่อพัฒนาการขึ้นรูปภาชนะบรรจุอาหารจากไบโทองกวาว เช่น ผลของคาร์บอนที่เพิ่มขึ้นที่เหมาะสมสำหรับภาชนะบรรจุอาหารที่ขึ้นรูปจากไบโทองกวาว เพื่อลดปัญหาการก่อเชื้อราและเชื้อจุลินทรีย์ เป็นต้น ซึ่งการเลือกใช้ไบโทองกวาวเป็นการนำวัสดุจากธรรมชาติมาใช้ประโยชน์ และช่วยลดปัญหาขยะจากโฟมที่ไม่สามารถย่อยสลายได้ ผลการทดลองที่ได้ในงานวิจัยมีดังต่อไปนี้

#### 4.1 สมบัติต่าง ๆ ของไบโทองกวาวและภาชนะบรรจุอาหารจากไบโทองกวาว

การศึกษาสมบัติต่าง ๆ ในทางกายภาพและทางเคมี ซึ่งประกอบด้วยการวิเคราะห์โครงสร้างจาก SEM การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีและชนิดของธาตุของไบโทองกวาวจากเทคนิค XRF การวิเคราะห์สมบัติทางพลังงานความร้อน และการวิเคราะห์สมบัติทางกล

##### 4.1.1 โครงสร้างของไบโทองกวาวและภาชนะบรรจุอาหารจากไบโทองกวาว

การศึกษาวินิจฉัยโครงสร้างของไบโทองกวาวและภาชนะบรรจุอาหารจากไบโทองกวาวจาก SEM เพื่อศึกษาโครงสร้างทั้งภายนอก และภายในของไบโทองกวาว และภาชนะบรรจุอาหารจากไบโทองกวาวในระดับจุลภาคของวัสดุจากภาพถ่ายที่กำลังขยายสูง ผลที่ได้แสดงดังภาพ 30 โดยแบ่งออกเป็นโครงสร้างภายนอกคือ พื้นที่ผิวด้านบน (Top sectional area) พื้นที่ผิวด้านล่าง (Bottom sectional area) และ โครงสร้างภายในคือ ภาคตัดขวาง (Cross sectional area)

จากภาพ 29 แสดงถึงโครงสร้างภายนอกของไบโทองกวาวและภาชนะบรรจุอาหารจากไบโทองกวาว จะเห็นความแตกต่างทั้งของผิวด้านบนและผิวด้านล่างอย่างชัดเจน โดยภาพ 29 (ก) ผิวด้านบนของไบโทองกวาวจะมีลักษณะขรุขระเห็นเส้นก้านใบชัดเจน แต่ภาพ 29 (ข) ผิวด้านบนของภาชนะบรรจุอาหารจากไบโทองกวาวจะมีลักษณะผิวที่เรียบ และภาพ 29 (ค) ผิวด้านล่างของไบโทองกวาวที่ประกอบไปด้วยเส้นก้านใบพบว่า เส้นก้านใบมีลักษณะขรุขระและขนที่ก้านใบมีลักษณะโค้งงอเล็กน้อย กระจัดกระจายกัน หลังจากขึ้นรูปพบว่า ในภาพ 29 (ง) ผิวด้านล่างของภาชนะบรรจุ

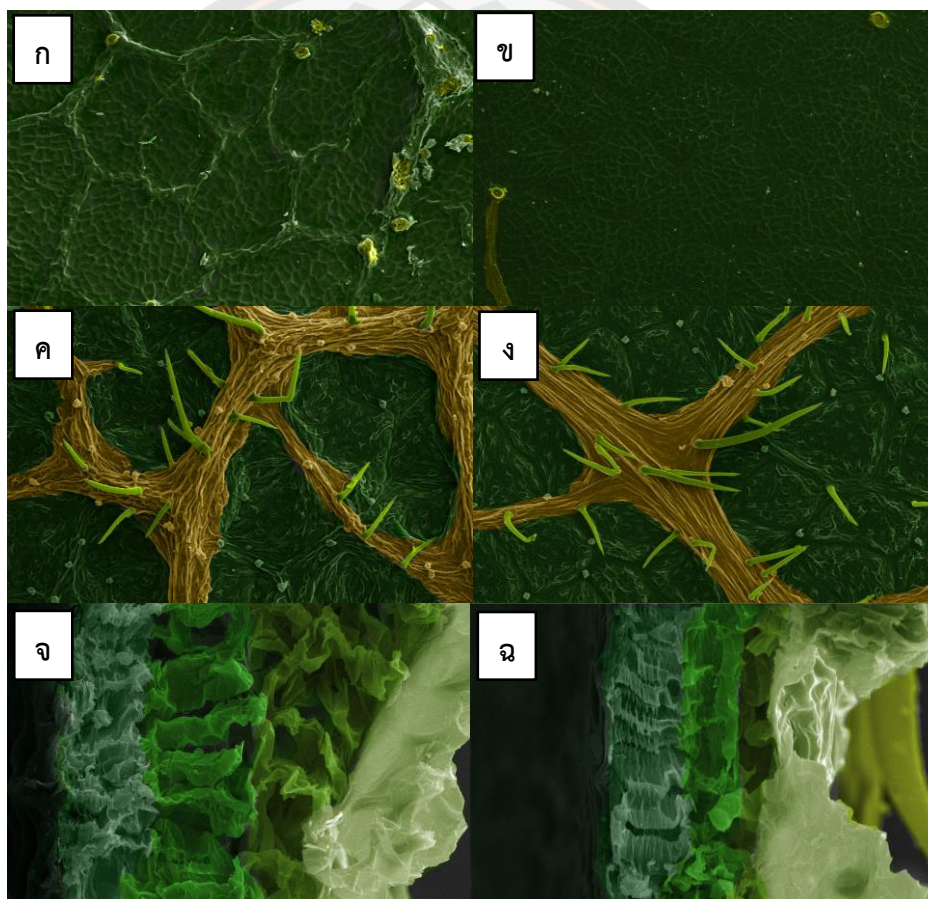
อาหารจากใบทองกวาวที่เส้นก้านใบ และขนก้านใบจะมีลักษณะราบเรียบไปกับพื้นผิวของใบ อีกทั้งจากภาพ 29 (จ) และภาพ 29 (ฉ) ของด้านตัดขวางแสดงให้เห็นว่า โครงสร้างภายในของใบทองกวาวจะประกอบไปด้วย ผิวใบ และชั้นของมีโซฟิลล์ 3 ชั้นที่เรียงกันอย่างเป็นระเบียบ ภายในมีช่องว่างที่มีน้ำและอากาศอยู่ภายใน เมื่อดำเนินการทดลองขึ้นรูปที่สภาวะที่เหมาะสมจะเห็นได้ว่า ชั้นมีโซฟิลล์ของภาชนะบรรจุอาหารจากใบทองกวาวเมื่อถูกบีบอัดจะเกิดการยุบตัวและหดตัวเข้าหากัน ส่งผลให้เกิดการเรียงตัวกันอย่างเป็นระเบียบจึงไม่มีช่องว่างภายในชั้นมีโซฟิลล์และความหนาของใบก็ลดลง แสดงดังตาราง 1 ความหนาโดยเฉลี่ยของใบทองกวาวและภาชนะบรรจุอาหารจากใบทองกวาวที่ตำแหน่งทั้ง 4 โดยอ้างอิงตำแหน่งการวัดค่าความหนาจากภาพที่ 18 พบว่าความหนานั้นมีค่าไม่แตกต่างกันมาก โดยที่ใบทองกวาวมีค่าความหนาคือ อยู่ในช่วงระหว่าง  $0.28 \pm 0.05$  ถึง  $0.28 \pm 0.05$  มิลลิเมตร และภาชนะบรรจุอาหารจากใบทองกวาวมีค่าความหนาลดลงอยู่ในช่วง  $0.12 \pm 0.04$  ถึง  $0.13 \pm 0.04$  มิลลิเมตร แสดงดังในภาคผนวก ก จากตาราง ก-1 ทำให้ความหนาของใบลดลงโดยเฉลี่ย  $0.16 \pm 0.03$  มิลลิเมตร

ทั้งนี้จากการศึกษางานวิจัยของ Govaerts และคณะ (1996) [37] ที่ได้อธิบายโครงสร้างของใบไม้จำพวกพืชที่มีดอก (Angiosperm leaves) จะประกอบด้วย ชั้นเนื้อเยื่อผิวและเนื้อเยื่อชั้นมีโซฟิลล์ โดยภายในชั้นเนื้อเยื่อผิวจะมีคิวติน (Cutin) ทำหน้าที่เป็นสารเคลือบใบ ส่งผลให้ใบมีลักษณะมันเงา ส่วนเนื้อเยื่อชั้นมีโซฟิลล์ประกอบด้วย แพลซิเดมีโซฟิลล์และสปีนจีมีโซฟิลล์ โดยทั้งสองนี้มีลักษณะเซลล์และหลักการทำงานที่แตกต่างกัน กล่าวคือ ภายในแพลซิเดมีโซฟิลล์บรรจุด้วยคลอโรพลาสต์ ซึ่งจะทำให้ใบไม่มีสีเขียวและยังช่วยเพิ่มความสามารถในการสังเคราะห์แสง ส่วนภายในของสปีนจีมีโซฟิลล์จะแยกกันโดยช่องว่างอากาศ ภายในช่องว่างนั้นจะมีคาร์บอนไดออกไซด์ (Carbon dioxide; CO<sub>2</sub>) และน้ำ มีส่วนช่วยในการสังเคราะห์แสงอีกด้วย และงานวิจัยของ Gerber และคณะ (2011) [38] ได้กล่าวถึง โครงสร้างและเนื้อเยื่อภายในของใบไม้ที่ส่งผลต่อคุณสมบัติการสะท้อนกลับของแสง โดยมีองค์ประกอบภายในโครงสร้างคือ เนื้อเยื่อผิวและเนื้อเยื่อชั้นมีโซฟิลล์ที่มีรูพรุน ซึ่งเนื้อเยื่อผิวมีลักษณะขรุขระทำให้เกิดการสะท้อนกลับของแสง ที่ภายในรูพรุนของเนื้อเยื่อชั้นมีโซฟิลล์จะประกอบไปด้วยน้ำและคลอโรฟิลล์ โดยคลอโรฟิลล์มีหน้าที่ช่วยในการหักเหและดูดซึมของแสง จึงมีประโยชน์ในด้านการพัฒนาเป็นต้นแบบของตัวดูดซึมแสง จากงานวิจัยดังกล่าวแสดงให้เห็นถึงโครงสร้างภายในของใบไม้ที่ประกอบด้วยเนื้อเยื่อต่าง ๆ ที่มีความสอดคล้องกับการวิเคราะห์ที่ได้จากผลการทดลองในงานวิจัยนี้

ตาราง 1 ความหนาใบทองกวาวและภาชนะบรรจุอาหารจากใบทองกวาว

ชนิด	ตำแหน่ง (มิลลิเมตร)			
	1	2	3	4
ใบทองกวาว	0.30±0.05	0.29±0.05	0.29±0.05	0.28±0.05
ภาชนะบรรจุอาหารจากใบทองกวาว	0.12±0.04	0.13±0.03	0.13±0.04	0.13±0.04

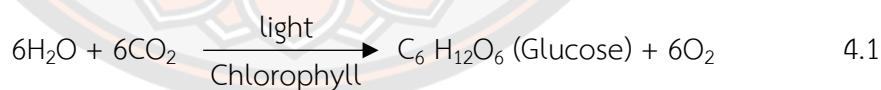
หมายเหตุ : ค่าที่ได้เป็นค่าเฉลี่ยจากการทำซ้ำ 3 ครั้งโดยมีส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน และตำแหน่งการวัดค่าความหนาอ้างอิงจากภาพที่ 18



ภาพ 29 ภาพขยายจาก SEM ใบทองกวาวและภาชนะบรรจุอาหารที่ขึ้นรูปจากใบทองกวาว  
 (ก) พื้นผิวด้านบนใบทองกวาว (ข) พื้นผิวด้านบนภาชนะบรรจุอาหารจากใบทองกวาว  
 (ค) พื้นผิวด้านล่างใบทองกวาว (ง) พื้นผิวด้านล่างภาชนะบรรจุอาหารจากใบทองกวาว  
 (จ) ภาคตัดขวางใบทองกวาว (ฉ) ภาคตัดขวางภาชนะบรรจุอาหารจากใบทองกวาว

#### 4.1.2 องค์ประกอบทางเคมีและชนิดของธาตุของใบทองกวาว

การศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของใบทองกวาว โดยการวิเคราะห์องค์ประกอบของใบทองกวาว ผลที่ได้แสดงดังตาราง 2 ประกอบด้วย การวิเคราะห์โดยประมาณ การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ และองค์ประกอบทางเคมี พบว่าเซลลูโลสมีปริมาณสูงถึงร้อยละ 32.58 เนื่องจากเซลลูโลสเป็นเส้นใยที่มีความสามารถช่วยรับแรงกระแทกได้ดีและยังช่วยลดการฉีกขาดของใบไม้ได้ โดยทั้งเซลลูโลส ลิกนิน และเฮมิเซลลูโลส ซึ่งทั้งสามองค์ประกอบเป็นโครงสร้างหลักของผนังเซลล์ที่อยู่ร่วมกัน มีส่วนช่วยให้ผนังเซลล์มีความแข็งแรง และจัดเป็นเส้นใยอาหารที่ไม่ละลายในน้ำ ดังนั้นเซลลูโลส ลิกนิน และเฮมิเซลลูโลส มีสมบัติทางกายภาพที่สำคัญคือ สามารถอุ้มน้ำ สามารถดูดซับน้ำดี สามารถลดปัญหาท้องผูกได้ และลดความเสี่ยงของมะเร็งลำไส้ใหญ่ [14] อีกทั้งยังพบองค์ประกอบธาตุที่สำคัญคือ ออกซิเจน คาร์บอน ไฮโดรเจน ไนโตรเจน และกำมะถัน เนื่องจากองค์ประกอบธาตุดังกล่าวเป็นผลมาจากการสังเคราะห์แสงของพืชดังสมการ 4.1 [14] ซึ่งกระบวนการสังเคราะห์แสงของพืชเป็นการเปลี่ยนพลังงานแสงจากดวงอาทิตย์เป็นพลังงานเคมี โดยสารตั้งต้นมาจากการดูดซับสารประกอบคาร์บอนไดออกไซด์ น้ำ และแสงจากดวงอาทิตย์ถูกดูดซึมโดยคลอโรฟิลล์ของพืช เกิดเป็นผลิตภัณฑ์คือ น้ำตาลกลูโคส และออกซิเจน ส่งผลให้ออกซิเจนและคาร์บอนในใบทองกวาวมีค่าใกล้เคียงกันคือ ร้อยละ 43.01 และร้อยละ 46.87 ตามลำดับ ดังนั้นกระบวนการสังเคราะห์แสงของพืชนี้มีประโยชน์อาทิเช่น ช่วยลดปริมาณสารประกอบคาร์บอนไดออกไซด์ ผลิตภัณฑ์ที่ได้เป็นแหล่งพลังงานของสิ่งมีชีวิต นอกจากนี้ยังมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อการดำรงอยู่ของสิ่งมีชีวิต [14]



การวิเคราะห์ชนิดธาตุด้วยเทคนิคเอ็กซ์เรย์ฟลูออเรสเซนซ์ของใบทองกวาว สามารถบ่งชี้ถึงชนิดและปริมาณของธาตุ จากตารางที่ 3 แสดงการเปรียบเทียบชนิดธาตุของใบทองกวาว ใบกล้วย [47] และใบสัก [48] เนื่องจากทั้งใบสักและใบทองกวาวอยู่ในวงศ์สกุลเดียวกัน รวมถึงใบกล้วยยังถูกนำมาใช้เป็นภาชนะบรรจุอาหารอย่างแพร่หลายในประเทศไทย ธาตุที่พบในใบไม้ส่วนใหญ่เป็นธาตุอาหารของพืชที่ได้จากการดูดซึมน้ำ แร่ธาตุจากดิน และการสังเคราะห์แสง โดยสามารถจำแนกออกเป็น 3 ชนิด ได้แก่ ธาตุอาหารหลัก ประกอบด้วย ไนโตรเจน (Nitrogen; N) ฟอสฟอรัส (Phosphorus; P) และ โพแทสเซียม (Potassium; K) ธาตุอาหารรอง ประกอบด้วย แคลเซียม (Calcium; Ca) แมกนีเซียม (Magnesium; Mg) และ ซัลเฟอร์ (Sulfur; S) และธาตุอาหารเสริม



ประกอบด้วย ซิลิคอน (Silicon; Si) ทองแดง (Copper; Cu) สังกะสี (Zinc; Zn) อะลูมิเนียม (Aluminium; Al) เหล็ก (Iron or Ferrous; Fe) และคลอรีน (Chlorine; Cl) ซึ่งธาตุของอาหารพืชแต่ละชนิดมีความสำคัญต่อการเจริญเติบโตของพืชที่แตกต่างกันไป [45] จากการเปรียบเทียบชนิดธาตุของใบไม้ทั้ง 3 ชนิดพบว่า ธาตุส่วนใหญ่ที่พบคือ โปแทสเซียม โดยพบในใบทองกวาวปริมาณ  $49.91 \pm 11.48\%$  โดยน้ำหนัก ในใบกล้วยปริมาณ  $62.73 \pm 3.39\%$  โดยน้ำหนัก และในใบสักปริมาณ  $62.69\%$  โดยน้ำหนัก ซึ่งธาตุดังกล่าวเป็นธาตุอาหารหลัก โดยโปแทสเซียมมีสมบัติที่ช่วยในการสังเคราะห์น้ำตาล แป้ง และโปรตีน ส่งเสริมให้พืชแข็งแรง ด้านทานต่อโรคและแมลงบางชนิด ทั้งนี้ชนิดของธาตุที่พบในใบไม้จะขึ้นอยู่กับสภาพแวดล้อมในการเจริญเติบโตของพืช [45] กล่าวคือ ในอนาคตหากการพัฒนาใบทองกวาวให้มีความแข็งแรงเหมาะสมต่อการนำมาใช้เป็นภาชนะบรรจุอาหาร จำเป็นต้องพิจารณาสภาพแวดล้อมในการปลูกให้มีความอุดมสมบูรณ์ซึ่งจะช่วยส่งเสริมการเจริญเติบโตของพืชที่ดี

ตาราง 2 องค์ประกอบต่าง ๆ ของใบทองกวาว

การวิเคราะห์องค์ประกอบต่าง ๆ (%) (Proximate analysis)	ค่าปริมาณความชื้น	4.19
	ปริมาณสารระเหย	66.58
	คาร์บอน*	22.10
	เถ้า	7.13
การวิเคราะห์ธาตุ (%) (Ultimate analysis)	คาร์บอน	46.87
	ไฮโดรเจน	7.47
	ไนโตรเจน	2.65
	ออกซิเจน	43.01
องค์ประกอบทางเคมี (%) (Chemical composition)	ค่าปริมาณความชื้น	6.56
	เฮมิเซลลูโลส	18.84
	เซลลูโลส	32.58
	ลิกนิน	18.62

หมายเหตุ : \* คาร์บอนจากค่าผลต่าง

**ตาราง 3 เปรียบเทียบชนิดธาตุของใบทองกวาว ใบกล้วย และใบสัก**

ชนิดธาตุ	ชนิดใบไม้ (% โดยน้ำหนัก)		
	ใบทองกวาว	ใบกล้วย*	ใบสัก**
K	49.91±11.48	62.73±3.39	62.69
P	3.69±0.69	2.50±0.54	6.58
Ca	23.95±3.99	10.30±0.01	14.86
Mg	2.80±0.41	3.17±1.45	4.21
S	4.13±0.56	0.15±0.07	3.26
Si	21.12±2.14	0.79±0.17	-
Cu	0.83±0.16	-	-
Zn	0.69±0.11	-	-
Al	0.08±0.11	-	-
Fe	0.26±0.10	-	-
Cl	-	26.33±4.87	8.41

หมายเหตุ : \* อ้างอิงจากงานวิจัยของ Pereira [47]

\*\* อ้างอิงจากงานวิจัยของ Gracelet [48]

#### 4.1.3 สมบัติทางพลังงานความร้อนของใบทองกวาวและภาชนะบรรจุอาหารจากใบทองกวาว

การวิเคราะห์สมบัติทางพลังงานความร้อน เป็นการศึกษาปริมาณค่าความร้อนที่ปลดปล่อยมาจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงที่สภาวะอุณหภูมิเริ่มต้น 25 องศาเซลเซียส ได้สารผลิตภัณฑ์แล้วเย็นตัวลงมาที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส [46] ปริมาณค่าความร้อนที่ได้มีประโยชน์ในด้านการประเมินเชื้อเพลิง โดยเฉพาะอย่างยิ่งในการเพิ่มประสิทธิภาพของการจัดการพลังงานชีวภาพจากใบไม้ [29] การวิเคราะห์ค่าพลังงานความร้อนด้วยเครื่องบอมบ์แคลอรีมิเตอร์พบว่า ค่าพลังงานความร้อนของใบทองกวาวและภาชนะบรรจุอาหารจากใบทองกวาวมีค่าเท่ากับ  $5.484 \pm 0.06$  และ  $4.882 \pm 0.08$  กิโลแคลอรีต่อกรัมตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 4 เมื่อเปรียบเทียบค่าพลังงานความร้อนพบว่า ใบทองกวาวมีค่าพลังงานความร้อนที่มากกว่าภาชนะบรรจุอาหารจากใบทองกวาว

จากงานวิจัยของ Musa (2015) และคณะ [29] ได้ศึกษาค่าพลังงานความร้อนจากใบไม้วงศ์สกุล ต่าง ๆ เพื่อนำมาวิเคราะห์ความเป็นพลังงานเชื้อเพลิง ซึ่งสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้ใน



อนาคตในด้านพลังงานทางเลือกชีวมวล ผลที่ได้จากงานวิจัยพบว่าค่าพลังงานความร้อนจากไบโไม่งค์ สกูลต่าง ๆ อยู่ในช่วง 4.041 ถึง 4.821 กิโลแคลอรีต่อกรัม เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับไบทองกวาวและ ภาชนะบรรจุอาหารจากไบทองกวาวพบว่า ไบทองกวาวมีค่าพลังงานความร้อนสูงสุด ซึ่งสอดคล้องกับ ผลการวิเคราะห์ห้องค์ประกอบต่าง ๆ ของไบทองกวาว จากตารางที่ 2 ซึ่งพบว่า ปริมาณสารระเหยมี ปริมาณสูงถึงร้อยละ 66.58 และมีปริมาณคาร์บอนสูงถึงร้อยละ 46.87 เป็นส่วนสำคัญที่ทำให้เกิด พลังงานความร้อน

**ตาราง 4 สมบัติทางพลังงานความร้อนของไบทองกวาวและภาชนะบรรจุอาหารจากไบทองกวาว**

ชนิด	GHV (กิโลแคลอรีต่อกรัม)
ไบทองกวาวสด	5.484±0.06
ภาชนะบรรจุอาหารจากไบทองกวาว	4.882±0.08

#### 4.1.4 สมบัติทางกลของไบทองกวาวและภาชนะบรรจุอาหารจากไบทองกวาว

สมบัติทางกลของไบทองกวาวและภาชนะบรรจุอาหารจากไบทองกวาว แสดงดังตารางที่ 5 โดยวิเคราะห์คุณสมบัติความเค้นแรงดึงที่กระทำต่อไบทองกวาวและภาชนะบรรจุอาหารจาก ไบทองกวาว ผลการทดสอบค่าความเค้นแรงดึงพบว่า ภาชนะบรรจุอาหารจากไบทองกวาวที่ผ่าน กระบวนการขึ้นรูปมีค่าความเค้นแรงดึงที่สูงขึ้นเมื่อเทียบกับไบทองกวาว โดยไบทองกวาวมีค่าความ เค้นแรงดึงเท่ากับ  $2.29 \pm 0.79$  กิโลปาสคาล เมื่อนำภาชนะบรรจุอาหารจากไบทองกวาวที่ผ่าน กระบวนการขึ้นรูปที่เวลา 2 นาที มาทำการตรวจวัดค่าความเค้นแรงดึงพบว่า มีค่าเท่ากับ  $3.00 \pm 0.08$  กิโลปาสคาล การเพิ่มขึ้นของค่าความเค้นแรงดึงเกี่ยวข้องกับโครงสร้างภายในของไบทองกวาวที่ เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการขึ้นรูป โดยภายในโครงสร้างของไบทองกวาวปรากฏชั้นของมิโซฟิลล์ที่ เรียงกันเป็นระเบียบ และเส้นใบที่แตกแขนงออกของไบทองกวาวมีลักษณะที่เรียบมากขึ้น จากการ วิเคราะห์โครงสร้างด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด โครงสร้างเหล่านี้อาจจะทำให้ ภาชนะบรรจุอาหารจากไบทองกวาวแข็งแรงจึงส่งผลให้มีค่าความเค้นแรงดึงที่สูงขึ้น

จากงานวิจัยของ Abou-Zeid และคณะ (2018) [44] ที่ได้ศึกษาคุณสมบัติทางกล ประกอบด้วย ไบกล้วย ชานอ้อย และกระดาศ ผลที่ได้พบว่า ชานอ้อยจะมีค่าความเค้นแรงดึงที่สูง เนื่องจากชานอ้อยมีเส้นใยภายในที่มากและผสมกันอย่างเป็นระเบียบ รองลงมาคือกระดาศ เป็นผลมาจากกระดาศได้ผ่านกระบวนการทางกลและทางเคมี และสุดท้ายคือไบกล้วย เมื่อนำไบ

กล้วยเปรียบเทียบกับใบทองกวาวและภาชนะบรรจุอาหารจากใบทองกวาว ผลที่ได้แสดงดังตารางที่ 5 พบว่า ใบทองกวาวมีค่าความเค้นแรงดึงที่มากกว่าใบกล้วย เป็นผลมาจากความแตกต่างของโครงสร้างภายในใบไม้แต่ละชนิด ปริมาณของเส้นใยของใบ และองค์ประกอบของพอลิเมอร์ [14,15] เนื่องจากใบกล้วยเป็นใบเลี้ยงเดี่ยว ใบจึงมีลักษณะที่ฉีกขาดง่ายตามเส้นใย โดยงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อนำใบทองกวาวมาผ่านกระบวนการขึ้นรูปเป็นภาชนะบรรจุอาหารจากใบทองกวาว เพื่อให้ภาชนะบรรจุอาหารจากใบทองกวาวมีโครงสร้างที่แข็งแรงสมบูรณ์มากขึ้น จึงชี้ให้เห็นว่าในการทดลองครั้งนี้มีผลสอดคล้องและเหมาะสมที่จะนำไปใช้งานด้านผลิตภัณฑ์บรรจุอาหาร ทั้งนี้คุณสมบัติทางกลจากค่าความเค้นแรงดึงอาจยังไม่เพียงพอ แต่สามารถเพิ่มสมบัติได้ด้วยการศึกษาคูณสมบัติทางกลด้านอื่น ๆ เพิ่มเติมต่อไปในอนาคตได้

ตาราง 5 เปรียบเทียบสมบัติทางกลของใบไม้จากงานวิจัยนี้กับงานวิจัยของ Abou-Zeid

ชนิด	ความเค้น (กิโลปาสกาล)
ใบทองกวาวสด	2.29±0.79
ภาชนะบรรจุอาหารจากใบทองกวาว	3.00±0.08
ใบกล้วย*	2.00±0.70
ชานอ้อย*	426.00±335
กระดาษ*	30.00±2.11

หมายเหตุ : \* อ้างอิงจากงานวิจัยของ Abou-Zeid [44]

## 4.2 ผลการศึกษากระบวนการขึ้นรูป

การศึกษากกระบวนการขึ้นรูปของภาชนะบรรจุอาหารจากใบทองกวาว จากการออกแบบสภาวะที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการขึ้นรูปด้วยวิธีพื้นผิวตอบสนอง โดยใช้ผลของค่าร้อยละความชื้นในช่วงร้อยละ 6 ถึง 12 เป็นค่าชี้วัด ซึ่งค่าความชื้นเป็นค่าที่แสดงปริมาณน้ำที่มีอยู่ในใบไม้ โดยจะส่งผลกระทบต่อสมบัติทางกายภาพและทางเคมีที่จะทำให้เชื้อแบคทีเรียหรือเชื้อรา และเชื้อจุลินทรีย์ต่าง ๆ ไม่สามารถเจริญเติบโตได้ [46]

### 4.2.1 ผลการออกแบบสภาวะที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการขึ้นรูป

การออกแบบสภาวะที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการขึ้นรูปด้วยวิธีพื้นผิวตอบสนองแสดงดังภาพ 30 เป็นผลของพื้นผิวตอบสนองและกราฟโครงสร้างของค่าร้อยละความชื้น ระหว่างอุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการขึ้นรูป โดยจะแสดงเกณฑ์ตามผลตอบสนองของค่าร้อยละความชื้น สีอ่อนจะแสดง

ว่ามีค่าร้อยละความชื้นสูง ในทางตรงกันข้าม สีเข้มจะแสดงว่ามีค่าร้อยละความชื้นต่ำ การพิจารณาปัจจัยที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการขึ้นรูปคือ การพิจารณาจากค่าความชื้น โดยใช้ฟังก์ชัน Response optimizer ในโปรแกรม Minitab 17 ซึ่งเป็นโปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติ มีฟังก์ชันที่ใช้หาค่าที่เหมาะสมที่สุดของปัจจัยและใช้วัดความพึงพอใจโดยรวมของผลตอบสนอง (Desirability; D) ซึ่งค่าความพึงพอใจของผลตอบสนองพื้นผิวนี้ มีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1 ถ้าค่า D มีค่าใกล้เคียงหรือเท่ากับ 1 หมายถึง ผลตอบสนองพื้นผิวนั้นมีความเหมาะสม และได้รับความพึงพอใจอย่างสมบูรณ์ในระดับยอมรับได้ร้อยละ 95 [39] โดยผลการออกแบบการทดลองแสดงดังภาคผนวก ค ดังนั้นจากการออกแบบการทดลองเพื่อหาสภาวะปัจจัยที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการขึ้นรูป โดยกำหนดค่าร้อยละความชื้นที่เหมาะสมจากการชี้วัดให้อยู่ในช่วงร้อยละ 6 ถึง 12 โดยการกำหนดค่า  $y$  ในช่วงค่าร้อยละความชื้นที่ต่ำที่สุดของช่วงการชี้วัดคือ ร้อยละ 6 ผลที่ได้พบว่า สภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการขึ้นรูปคือ อุณหภูมิ 175 องศาเซลเซียส ที่เวลา 120 วินาที และค่าความพึงพอใจของผลตอบสนองพื้นผิวมีค่าเป็น 0.92 ซึ่งมีค่าใกล้เคียง 1 แสดงดังภาพ 31 ทั้งนี้เพื่อยืนยันผลการออกแบบการทดลองจึงทำการทดลองวัดค่าร้อยละความชื้นที่สภาวะการทดลองอุณหภูมิและเวลาที่เปลี่ยนแปลง ภายใต้การดำเนินการทดลองโดยใช้การเปรียบเทียบระหว่างผลของเวลาและอุณหภูมิที่ใช้ในการขึ้นรูป

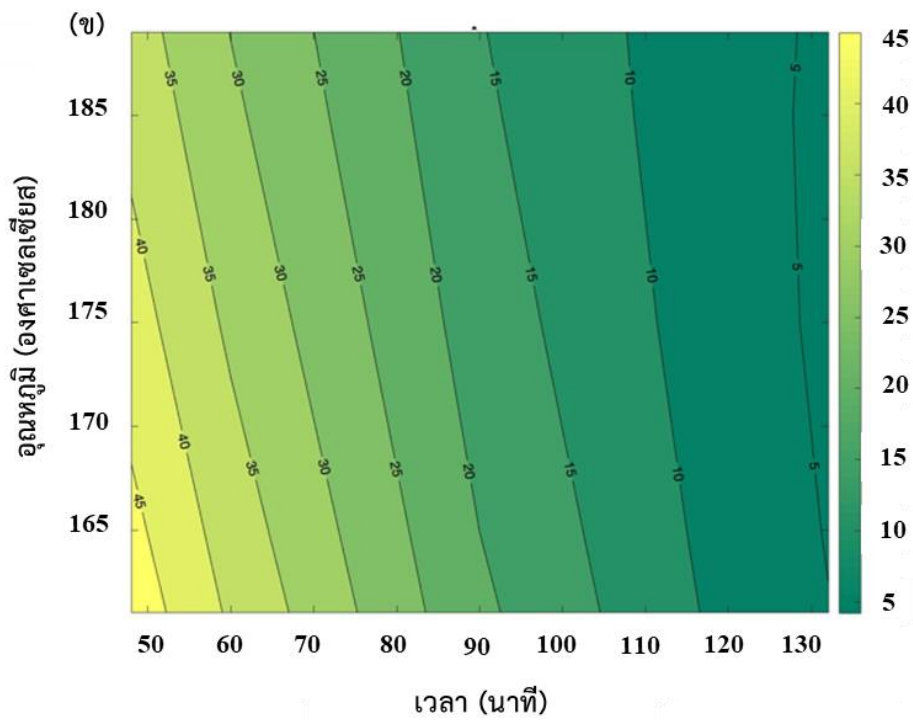
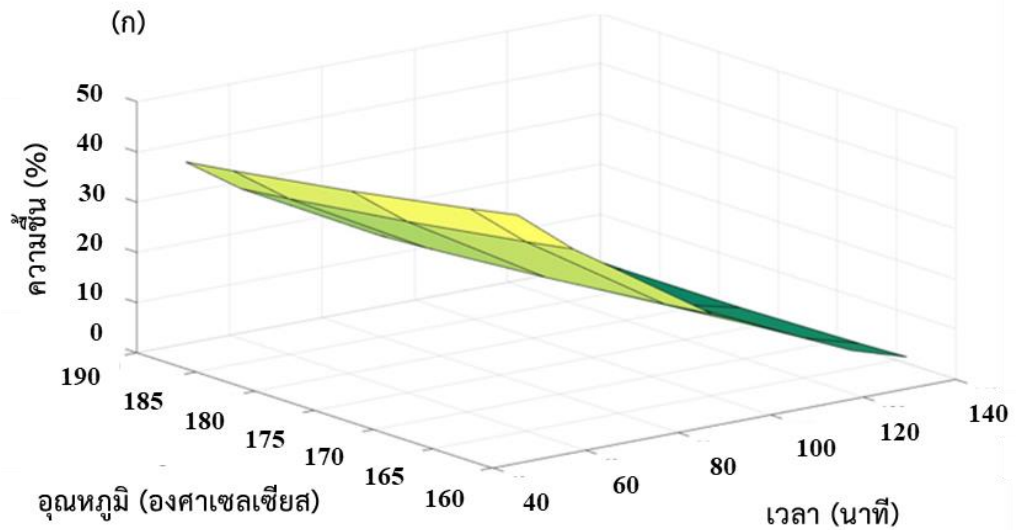
#### 4.2.2 การตรวจสอบผลการออกแบบการทดลอง

การตรวจสอบผลการออกแบบการทดลอง เพื่อยืนยันผลการออกแบบการทดลองโดยทำการทดลองซ้ำดังนี้

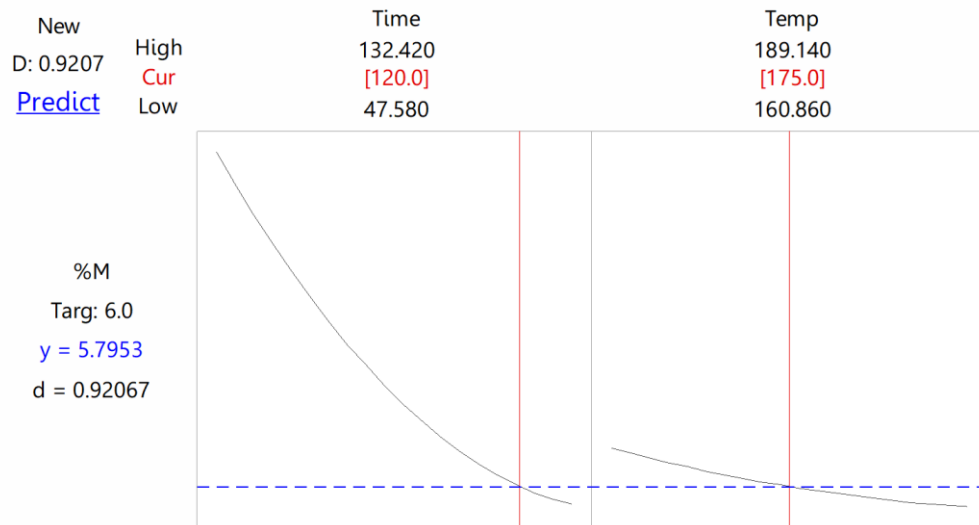
4.2.2.1 สภาวะการทดลองอุณหภูมิและเวลาที่เปลี่ยนแปลง ดำเนินการทดลองโดยใช้การเปรียบเทียบระหว่างผลของเวลาและอุณหภูมิที่ใช้ในการขึ้นรูป ได้แก่ อุณหภูมิที่ใช้ในการขึ้นรูป 165 175 และ 185 องศาเซลเซียส ที่เวลา 90 120 และ 180 วินาทีตามลำดับ จากภาพ 32 สามารถอธิบายได้ว่า ค่าร้อยละความชื้นอยู่ในช่วงร้อยละ  $31.09 \pm 3.23$  ถึง  $3.08 \pm 0.15$  โดยค่าร้อยละความชื้นที่สูงสุดจะแสดงค่าของอุณหภูมิที่ใช้ในการขึ้นรูปภาชนะบรรจุอาหารจากไบโทองกวาวที่อุณหภูมิ 165 องศาเซลเซียส และเวลา 90 วินาที ส่วนค่าร้อยละความชื้นที่ต่ำสุด แสดงค่าของอุณหภูมิที่ใช้ในการขึ้นรูปภาชนะบรรจุอาหารจากไบโทองกวาวที่อุณหภูมิ 185 องศาเซลเซียส และเวลา 180 วินาที กล่าวคือ ถ้าเพิ่มเวลาและอุณหภูมิในการขึ้นรูป ส่งผลให้ค่าร้อยละความชื้นให้มีค่าลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ดังนั้นจากค่าชี้วัดของค่าร้อยละความชื้นในช่วงร้อยละ 6 ถึง 12 อุณหภูมิและเวลาขึ้นรูปที่เหมาะสมคือ 175 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 120 วินาที พบค่าร้อยละความชื้นเท่ากับ  $8.72 \pm 0.23$  เพื่อ

ยืนยันผลของสภาวะต่าง ๆ ของการขึ้นรูปที่เหมาะสม จึงได้ทำการตรวจวัดเมื่อเวลาเปลี่ยนแปลงเพิ่มมากขึ้นในหัวข้อที่ 4.2.2.2 ต่อไป

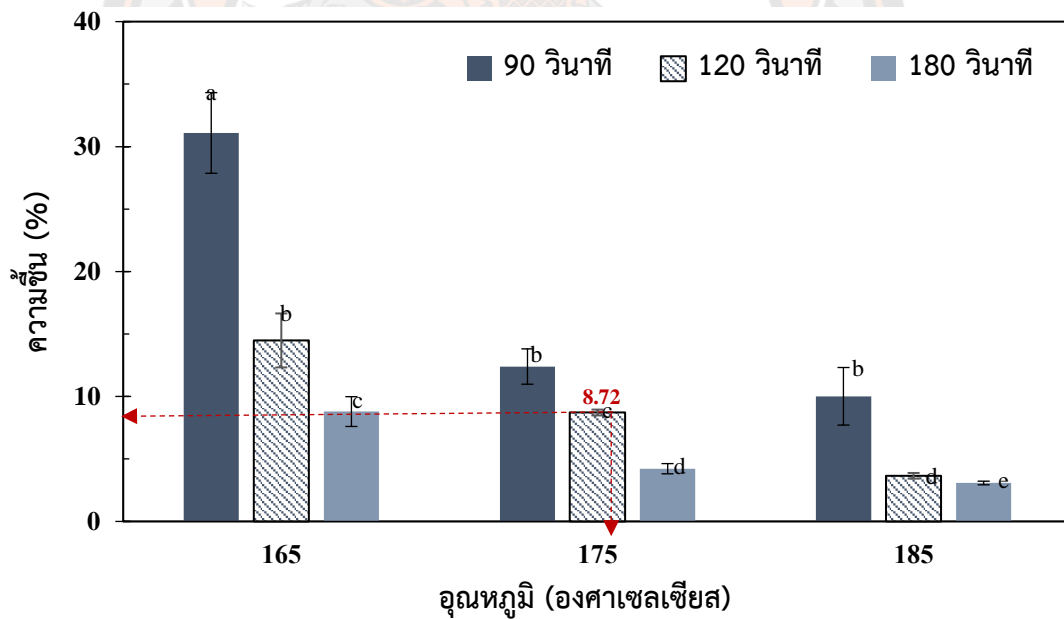
4.2.2.2 สภาวะการทดลองโดยการเพิ่มเวลาการขึ้นรูป ดำเนินการทดลองโดยใช้การเปรียบเทียบระหว่างผลของเวลาและอุณหภูมิที่ใช้ในการขึ้นรูป โดยช่วงอุณหภูมิมาจากการทดลองก่อนหน้านี้และช่วงเวลาใช้ระยะเวลาที่ 0 ถึง 300 วินาที อุณหภูมิขึ้นรูป 175 องศาเซลเซียส ผลการทดลองแสดงดังภาพ 33 ค่าร้อยละความชื้นมีแนวโน้มลดลงเมื่อเวลาที่เพิ่มขึ้น แต่เมื่อถึงเวลาที่ 180 วินาที มีแนวโน้มของค่าร้อยละความชื้นคงที่ แสดงให้เห็นถึงการมีอยู่ของน้ำภายในโครงสร้างของใบไม้ เมื่อใบไม้ได้รับความร้อนที่อุณหภูมิสูงเป็นเวลานาน ทำให้เกิดการสะสมความร้อนมากขึ้น ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนสีของภาชนะบรรจุอาหารจากสีเขียวเป็นสีเขียวซีดลงและหากความร้อนสะสมมากเกินไปสีเขียวจะค่อย ๆ สูดุสลายไปจนเป็นสีน้ำตาล ซึ่งสอดคล้องกับลักษณะทางกายภาพที่บันทึกได้จากการถ่ายรูปดังภาพ 34 แสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงของใบทองกวาว สามารถสังเกตได้ว่า สีของใบทองกวาวเปลี่ยนแปลงไปเมื่อเวลาในการขึ้นรูปมากขึ้น สีของภาชนะบรรจุอาหารจากใบทองกวาวเปลี่ยนแปลงและที่ขอบใบทองกวาวก็จะมีรอยไหม้ให้เห็นได้ชัด จากงานวิจัยก่อนหน้าของ Hong และคณะ (2013) [12] ได้อธิบายไว้ว่าเมื่อใบไม้ได้รับความร้อนจากอุณหภูมิสูงขึ้นเป็นระยะเวลาเวลานาน และเกิดปฏิกิริยาทางเคมีขององค์ประกอบในใบทองกวาว ซึ่งจะส่งผลให้เกิดจากการคายน้ำภายในเซลล์ของใบไม้ออกจากปากใบ ดังนั้นในการทดลองการขึ้นรูปเมื่ออุณหภูมิที่ขึ้นรูปสูงขึ้น ส่งผลทำให้ค่าร้อยละความชื้นมีค่าลดลง แต่ในทางตรงกันข้ามเมื่ออุณหภูมิที่ขึ้นรูปต่ำก็ทำให้เกิดการสะสมของความชื้นภายในภาชนะบรรจุอาหารสูงและจะส่งผลโดยตรงต่อการเก็บรักษา เนื่องจากความชื้นที่สูงขึ้นจะเป็นสภาวะที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรีย เชื้อรา และเชื้อจุลินทรีย์ต่าง ๆ ได้ดียิ่งขึ้น



ภาพ 30 แผนภาพแสดงผลของค่าร้อยละความชื้นระหว่างอุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการขึ้นรูป  
(ก) พื้นผิวผลตอบสนอง และ (ข) กราฟโครงร่าง

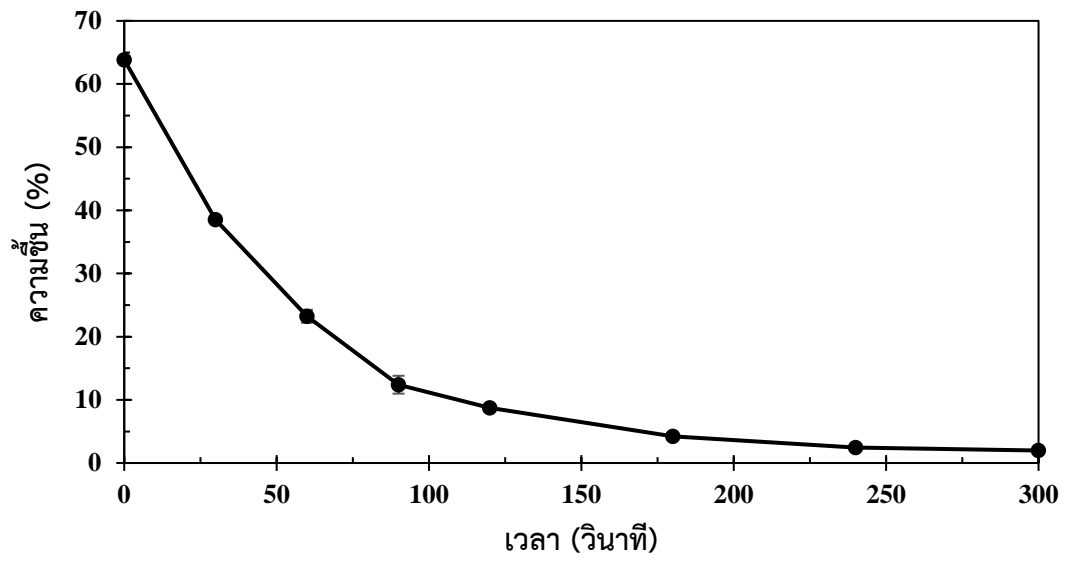


ภาพ 31 ผลการวิเคราะห์สภาวะที่เหมาะสมของปัจจัยที่ใช้ในการขึ้นรูป

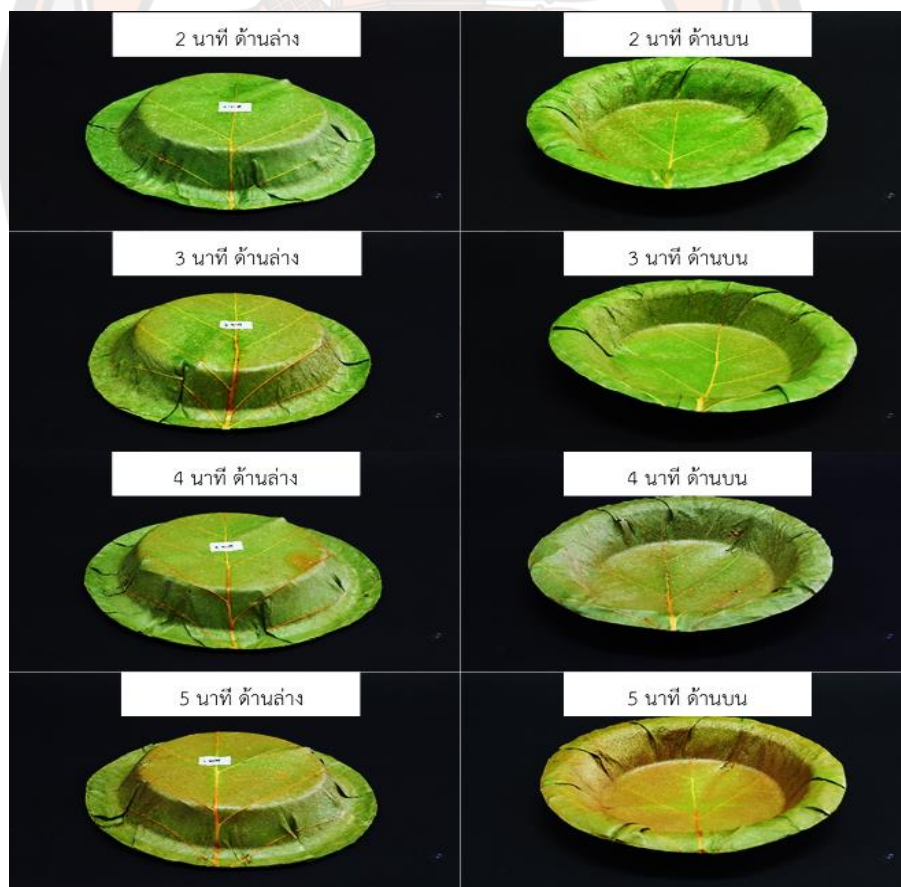


ภาพ 32 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าร้อยละความชื้นและอุณหภูมิในการขึ้นรูป  
ที่เวลา 90 120 และ 180 วินาทีตามลำดับ





ภาพ 33 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นและเวลาในการขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 175 องศาเซลเซียส



ภาพ 34 ตัวอย่างการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพของภาชนะบรรจุอาหารที่ขึ้นรูปจากใบทองกวาว

### 4.3 ผลการศึกษาการถ่ายเทความร้อนของชุดอุปกรณ์ที่ส่งผลการขึ้นรูป

4.3.1 ผลการศึกษาการเปรียบเทียบการกระจายอุณหภูมิของแม่พิมพ์ที่มีการหุ้มฉนวนและไม่หุ้มฉนวนความร้อน

การศึกษาโดยเปรียบเทียบการกระจายอุณหภูมิของแม่พิมพ์ที่มีการหุ้มฉนวนและไม่หุ้มฉนวนความร้อน ภาพ 35 แสดงการกระจายความร้อนในแต่ละตำแหน่งบนเครื่องขึ้นรูปไม่หุ้มฉนวนขณะให้ความร้อนแสดงดังตารางภาคผนวก ก-8 ถึง ก-9 เมื่อ  $t(U)$  คือ เวลาของการทดลองแม่พิมพ์บน  $t(B)$  คือ เวลาของการทดลองแม่พิมพ์ล่าง โดยแบ่งการพิจารณาออกเป็น 2 ช่วงดังนี้ ช่วงที่ 1 เป็นการวัดอุณหภูมิของแม่พิมพ์ด้านบน ส่วนช่วงที่ 2 เป็นการวัดอุณหภูมิของแม่พิมพ์ด้านล่าง ผลการทดลองพบว่า ระยะทางเริ่มต้นและระยะทางสุดท้าย ซึ่งเป็นตำแหน่งที่ติดกับแผ่นฮีตเตอร์ มีเส้นแนวโน้มใกล้เคียงกันคือ มีอุณหภูมิสูงสุดในเวลาใด ๆ เนื่องจากเป็นตำแหน่งของแหล่งให้ความร้อนเมื่อถึงระยะทาง 0.02 เมตร อุณหภูมิจึงลดลง เช่นเดียวกับระยะทางที่ 0.06 เมตร และมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นในระยะทาง 0.03 เมตร ไปถึงระยะทาง 0.05 เมตร ทั้งนี้ที่ระยะทาง 0.02 เมตร และ 0.06 เมตรเป็นตำแหน่ง X2 และ X9 กล่าวคือเป็นตำแหน่งที่เจาะรูบนแม่พิมพ์ลึกเข้าไปยาว 15 มิลลิเมตร มีแนวโน้มของการกระจายความร้อนไม่ดี เกิดการสูญเสียความร้อนออกสู่ภายนอกแม่พิมพ์ ดังนั้นเพื่อลดการสูญเสียความร้อนและยังช่วยในการกระจายความร้อน จึงได้ทำการหุ้มฉนวนแม่พิมพ์ดังแสดงในภาคผนวก ข ภาพ ข-3

ภาพ 36 แสดงการกระจายความร้อนในแต่ละตำแหน่งบนเครื่องขึ้นรูปหุ้มฉนวนขณะให้ความร้อน แสดงดังตารางภาคผนวก ก-10 ถึง ก-11 โดยพิจารณาออกเป็น 2 ช่วงเช่นเดียวกันกับการกระจายความร้อนในแต่ละตำแหน่งบนเครื่องขึ้นรูปไม่หุ้มฉนวน ผลการวัดค่าอุณหภูมิพบว่า การให้ความร้อนของเครื่องขึ้นรูปที่มีการหุ้มฉนวนความร้อนนั้นจะมีการกระจายความร้อนแต่ละตำแหน่งของแม่พิมพ์ที่ใช้ในการขึ้นรูปทั้งบนและล่าง ในอัตราการกระจายความร้อนคงที่ สม่ำเสมอ และอุณหภูมิจึงใกล้เคียงกันมาก

เมื่อพิจารณาโดยให้อุณหภูมิเฉลี่ยที่ตำแหน่งเดียวกันของแม่พิมพ์บนและล่าง จากข้อมูลตารางภาคผนวก ก-12 และ ก-13 เมื่อ T คือ อุณหภูมิหุ้มฉนวน และ  $T^*$  คือ อุณหภูมิไม่หุ้มฉนวน แสดงดังภาพ 37 โดยที่

- T1 เป็นเส้นแนวโน้มของตำแหน่ง X2 กับ X9 โดยมีระยะห่างจากฮีตเตอร์คือ 0.02 เมตร
- T2 เป็นเส้นแนวโน้มของตำแหน่ง X3 กับ X8 โดยมีระยะห่างจากฮีตเตอร์คือ 0.03 เมตร
- T3 เป็นเส้นแนวโน้มของตำแหน่ง X4 กับ X7 โดยมีระยะห่างจากฮีตเตอร์คือ 0.04 เมตร

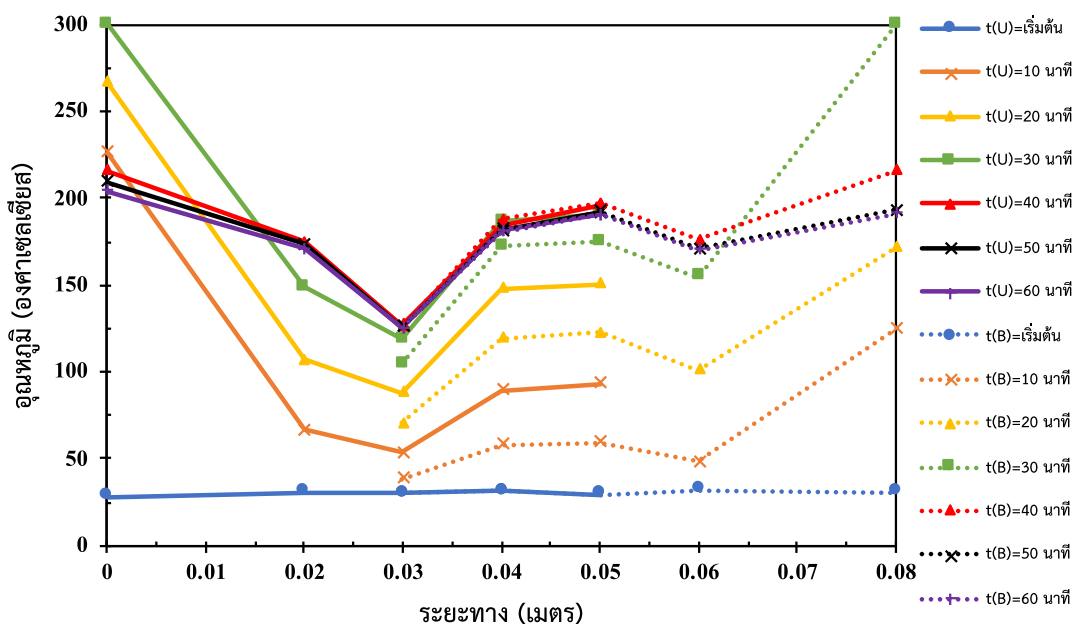
- T4 เป็นเส้นแนวโน้มของตำแหน่ง X5 กับ X6 โดยมีระยะห่างจากฮีตเตอร์คือ 0.05 เมตร

ผลที่ได้เป็นความสัมพันธ์ของอุณหภูมิและเวลาของการให้ความร้อนโดยเฉลี่ยของเครื่องขึ้นรูประหว่างไม่หุ้มฉนวนและหุ้มฉนวนพบว่า แสดงเส้นแนวโน้ม T1 ของแม่พิมพ์ที่ไม่หุ้มฉนวนมีค่าอุณหภูมิที่ต่ำกว่าเส้นแนวโน้มอื่น ๆ รวมทั้งเส้นแนวโน้ม T2 T3 และ T4 มีค่าอุณหภูมิห่างจากเส้นแนวโน้มอื่น ๆ อย่างชัดเจน ส่งผลให้แม่พิมพ์ที่ไม่หุ้มฉนวนจะมีการกระจายความร้อนไม่สม่ำเสมอเมื่อถึงเวลา 40 นาที เส้นแนวโน้มอุณหภูมิจะเข้าสู่สมดุลของทุกตำแหน่งบนแม่พิมพ์ โดยมีอุณหภูมิอยู่ในช่วง 176.1 ถึง 183.3 องศาเซลเซียส มีส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation; SD) เท่ากับ 2.34 ในทางตรงกันข้ามแม่พิมพ์ที่ไม่หุ้มฉนวนที่เวลา 40 นาที จะมีอุณหภูมิอยู่ในช่วง 156.2 ถึง 196.5 องศาเซลเซียส มีส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 13.92 แสดงให้เห็นว่า การไม่หุ้มฉนวนแม่พิมพ์มีการกระจายข้อมูลที่มาก เมื่อเปรียบเทียบกับแม่พิมพ์หุ้มฉนวน ดังนั้นการหุ้มฉนวนความร้อนจะทำให้เครื่องขึ้นรูปมีประสิทธิภาพในการทำงานและประหยัดการใช้ไฟฟ้าได้ เนื่องจากการถ่ายเทความร้อนมีความสม่ำเสมอตลอดทั้งแม่พิมพ์บนและล่าง ส่งผลให้ลดระยะเวลาของอัตราการให้ความร้อน เกิดการสูญเสียความร้อนออกภายนอกน้อยลง และทำให้การให้ความร้อนในแต่ละตำแหน่งมีอุณหภูมิคงที่สม่ำเสมอ

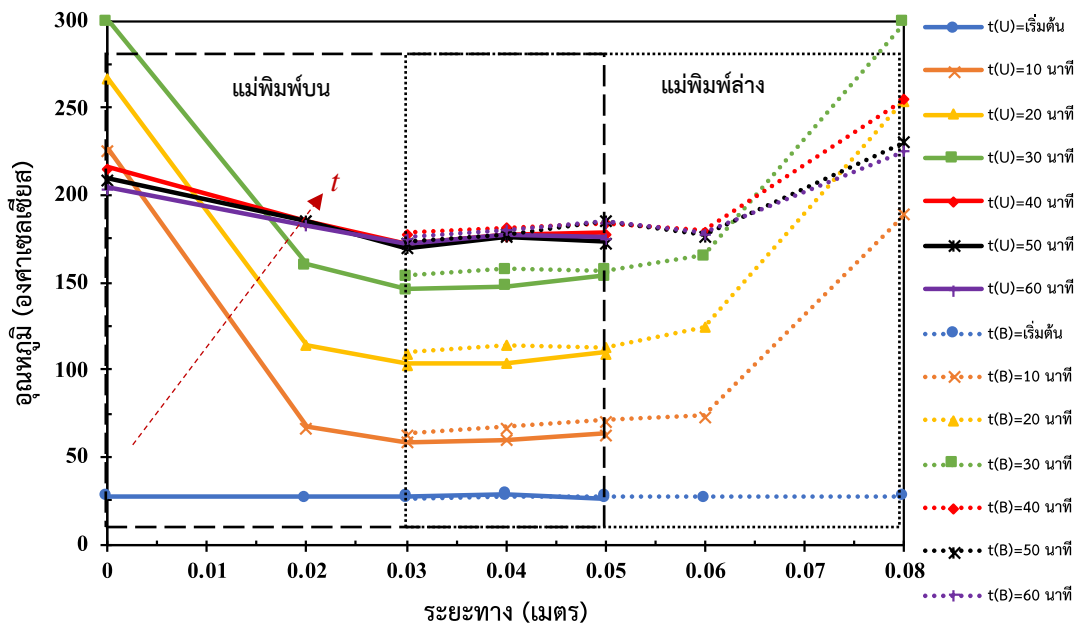
งานวิจัยก่อนหน้านี้ของ Zhou และคณะ (2012) [27] ได้ศึกษาปัญหาการนำความร้อนแบบวิธีกึ่งอนันต์ที่ขึ้นกับเวลา โดยการพิจารณาผลภายใต้สภาวะขอบเขตที่เป็นพื้นผิวเดียวกัน วิเคราะห์แบบระบบปิด ผลการทดลองพบว่า การแก้ไขปัญหาการนำความร้อน สามารถนำไปใช้กับปัญหาที่มีขอบเขตสภาวะเดียวกัน นอกจากนี้งานวิจัยของ Aderghal และคณะ (2011) [41] ได้ศึกษาวิธีวิเคราะห์การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ ณ จุดใด ๆ เนื่องจากการกระจายความร้อนของแหล่งให้ความร้อนที่ให้ความร้อนอย่างสม่ำเสมอและคงที่ โดยไม่อาศัยความร้อนจากภายนอกพื้นที่ผิวระบบ ผลการทดลองพบว่าการศึกษาดังกล่าวสามารถแก้ไขปัญหาเชิงตัวเลขที่ได้พัฒนาขึ้นได้ และสามารถลดระยะเวลาในการนำความร้อนอย่างมีนัยสำคัญในบริเวณพื้นที่ผิวระบบ ผลการทดลองดังกล่าวสอดคล้องกับงานวิจัยของ Cheng และคณะ (2012) [43] ได้ศึกษาวิธีเชิงตัวเลขโดยใช้หลักการและทฤษฎีของการนำความร้อนแบบวิธีกึ่งอนันต์ภายในวัสดุของแข็งที่เป็นโลหะ พบว่าการถ่ายเทความร้อนแบบการนำความร้อนบนพื้นผิว ส่งผลอย่างมากต่อการกระจายอุณหภูมิภายในชิ้นงาน ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้เลือกใช้สมการถ่ายเทความร้อนภายใต้สภาวะอุณหภูมิคงที่ เพื่อเปรียบเทียบกับการ

ทดลองในการขึ้นรูปภาชนะบรรจุอาหารจากใบทองกวาว เพื่ออธิบายปรากฏการณ์ต่าง ๆ ที่เกิดขึ้น และอธิบายแนวโน้มการกระจายความร้อนที่ใกล้เคียงกับค่าจริง

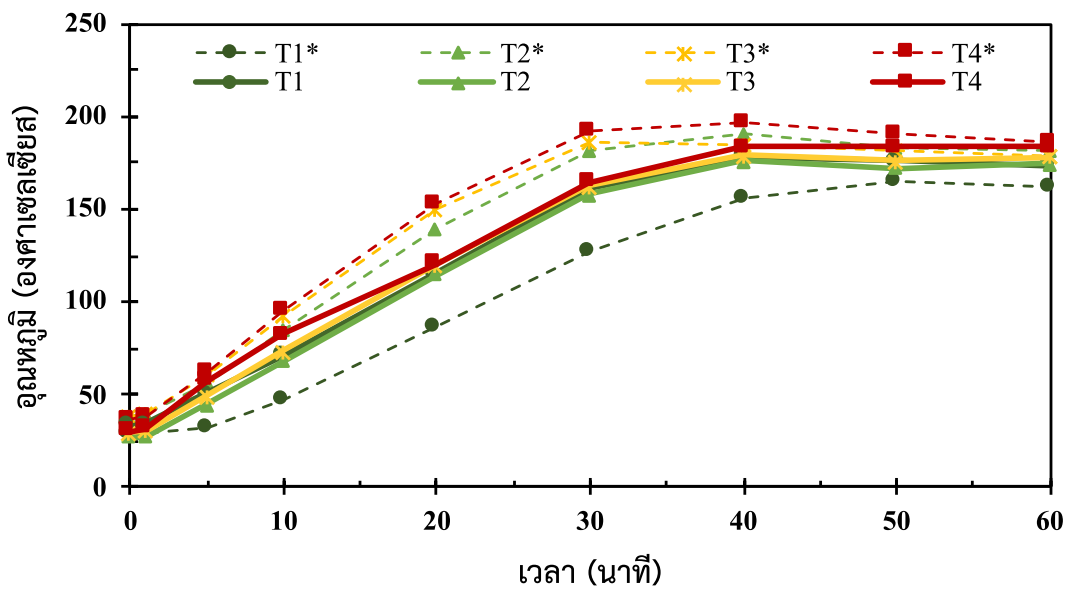
เมื่อได้ผลการทดลองของการให้ความร้อนจากแหล่งให้ความร้อนสู่แม่พิมพ์ พิจารณา อุณหภูมิที่เข้าสู่สภาวะคงที่ของสภาวะที่ได้กำหนดไว้คือที่เวลา 40 นาที เนื่องจากอุณหภูมิจะเข้าสู่ สมดุลที่เวลา 40 นาที แสดงดังภาพ 38 โดยนำผลการวัดค่าการทดลองมาเปรียบเทียบสมการถ่ายเท ความร้อนแบบวิธีของแข็งกึ่งอนันต์ โดยใช้เงื่อนไขการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิแต่ละตำแหน่งที่สภาวะ เงื่อนไขอุณหภูมิผิวคงที่ ผลการเปรียบเทียบที่เวลา 40 60 และ 90 นาที จะเห็นได้ว่าที่ระยะทาง 0.02 และ 0.06 เมตร จะมีค่าร้อยละความคลาดเคลื่อนที่มากที่สุดคือ 7.8 และ 8.1 ตามลำดับ ซึ่งเป็นค่า ร้อยละความคลาดเคลื่อนที่อยู่ในช่วงยอมรับได้ที่ร้อยละ 75 แสดงดังตารางภาคผนวก ก-16 คาดว่า เป็นผลมาจากที่ระยะดังกล่าวเป็นตำแหน่งที่ทำการเจาะรูจากผิวแม่พิมพ์โดยมีความลึกเข้าไปในผิว แม่พิมพ์ 0.015 เมตร ทำให้มีอุณหภูมิใกล้เคียงกับตำแหน่งกึ่งกลางของแม่พิมพ์ที่ระยะทาง 0.05 เมตร ส่งผลให้ความหนาของแม่พิมพ์ส่งผลต่อการกระจายอุณหภูมิ ดังนั้นเมื่อเปรียบเทียบการทดลอง กับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบวิธีของแข็งกึ่งอนันต์ พบว่ามีแนวโน้มของอุณหภูมิลดลงเมื่อ ระยะทางเพิ่มขึ้นทั้งของแม่พิมพ์บนและล่าง



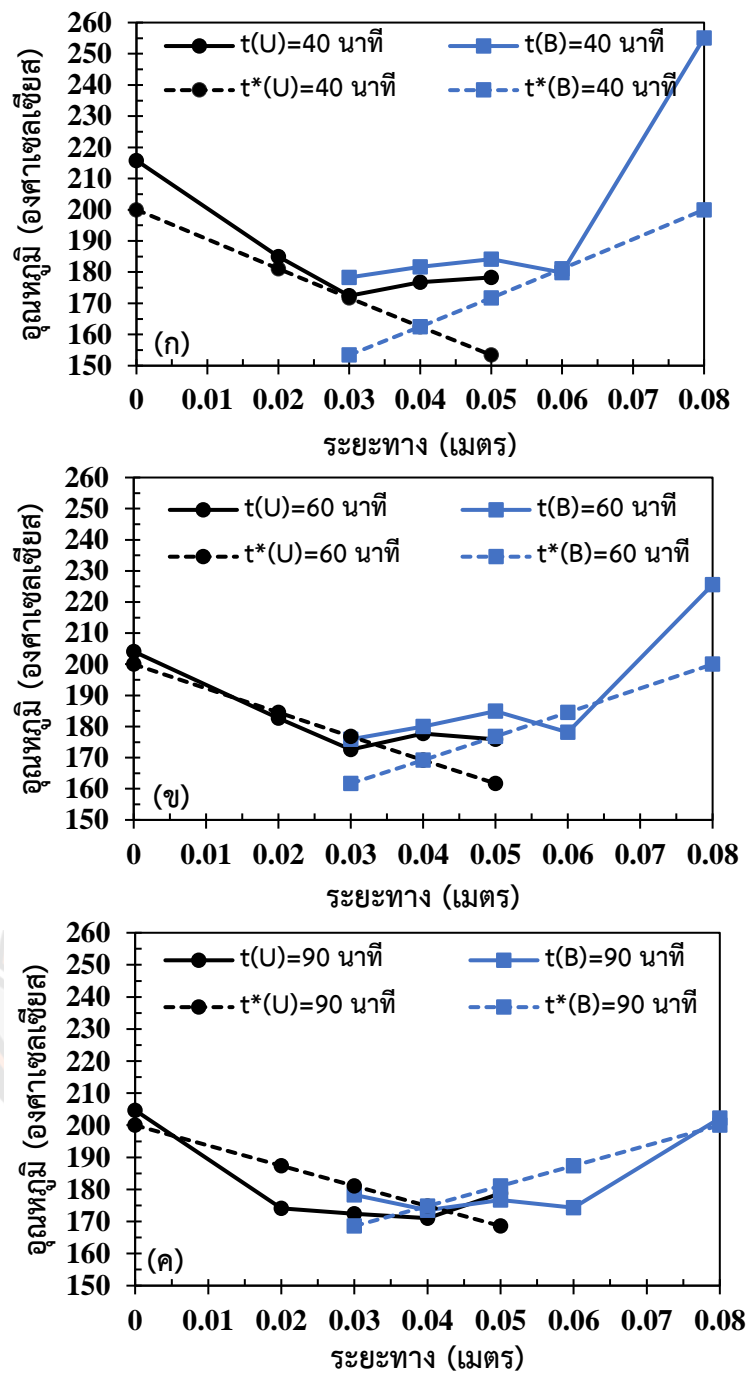
ภาพ 35 การกระจายอุณหภูมิในแต่ละตำแหน่งบนเครื่องขึ้นรูปไม่หุ้มฉนวนขณะให้ความร้อน



ภาพ 36 การกระจายอุณหภูมิในแต่ละตำแหน่งบนเครื่องขึ้นรูปหุ้มฉนวนขณะให้ความร้อน



ภาพ 37 ความสัมพันธ์ของอุณหภูมิและเวลาของการให้ความร้อนโดยเฉลี่ยของเครื่องขึ้นรูประหว่างหุ้มฉนวนและไม่หุ้มฉนวน

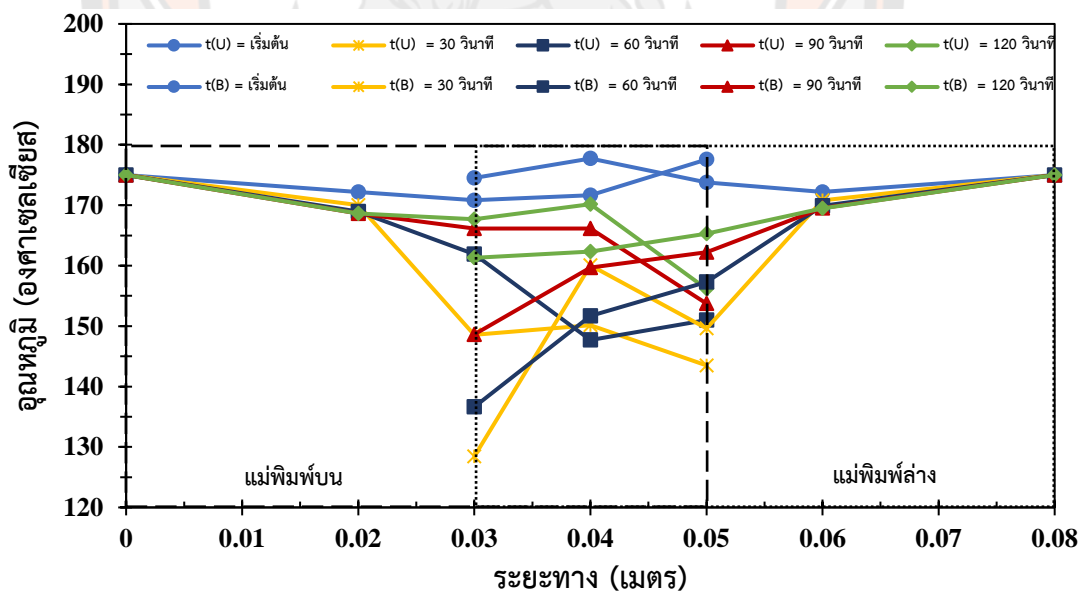


ภาพ 38 เปรียบเทียบการกระจายอุณหภูมิระหว่างการทดลองกับสมการถ่ายเทความร้อน  
ในแต่ละตำแหน่งบนเครื่องขึ้นรูปที่หุ้มฉนวน  
(ก) 40 นาที (ข) 60 นาที และ (ค) 90 นาที  
หมายเหตุ : เส้นทึบ (—) หมายถึง จากการทดลอง  
เส้นปะ (-----) หมายถึง จากแบบจำลอง



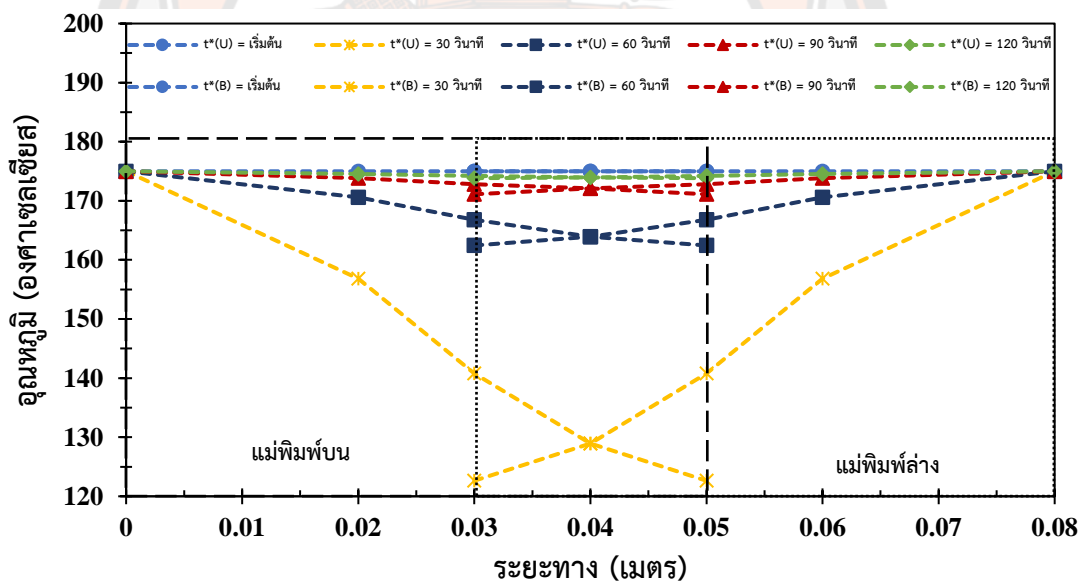
#### 4.3.2 ผลการศึกษาการกระจายอุณหภูมิของแม่พิมพ์หุ้มฉนวนในระหว่างกระบวนการขึ้นรูป

ภาพ 39 แสดงความสัมพันธ์ของอุณหภูมิและเวลาที่ตำแหน่งต่าง ๆ ของแม่พิมพ์บนและล่าง ในระหว่างกระบวนการขึ้นรูปภาชนะบรรจุอาหารเป็นเวลา 2 นาที แสดงดังตารางภาคผนวก ก-17 ถึง ก-18 จากผลการทดลองพบว่าในช่วงอุณหภูมิเริ่มต้น ( $t=0$  วินาที) อุณหภูมิจะเป็นอุณหภูมิของสถานะที่ได้ตั้งค่าไว้ หรือเป็นอุณหภูมิที่ผิวของแม่พิมพ์ คือ 175 องศาเซลเซียส แต่เมื่อมีการนำไบทองกวาวมาทำการขึ้นรูปเป็นภาชนะบรรจุอาหาร ทำให้อุณหภูมิที่ได้จากการวัดค่ามีแนวโน้มของอุณหภูมิลดลงในทุก ๆ ตำแหน่งของแม่พิมพ์ทั้งแม่พิมพ์บนและล่าง เนื่องจากความชื้นในไบทองกวาวส่งผลให้อุณหภูมิทุกตำแหน่งลดลงอย่างรวดเร็ว และเมื่อเกิดการระเหยของน้ำภายในโครงสร้างของไบทองกวาวนั้นแล้ว ส่งผลให้อุณหภูมิที่ขึ้นรูปมีค่าเพิ่มขึ้นและค่าความชื้นมีค่าลดลงที่เวลา 120 วินาที จนเข้าสู่สมดุลหรือมีอุณหภูมิที่ใกล้เคียงกับอุณหภูมิเริ่มต้นของการขึ้นรูปไบทองกวาว ซึ่งจะสอดคล้องกับผลการทดลองหาสภาวะที่เหมาะสมจากค่าความชื้นของไบทองกวาวที่ได้ขึ้นรูปเป็นภาชนะ ที่มีค่าความชื้นลดลงจากความชื้นเริ่มต้นคือ ร้อยละ  $63.84 \pm 0.46$  เป็นร้อยละ  $8.72 \pm 0.23$  ที่เวลา 120 วินาที ซึ่งมีค่าร้อยละความชื้นอยู่ในช่วงที่สามารถยอมรับได้คือ ช่วงร้อยละ 6 ถึง 12 [46]



ภาพ 39 ผลการทดลองการกระจายอุณหภูมิในการขึ้นรูปที่เวลาต่าง ๆ

ภาพ 40 แสดงความสัมพันธ์ของอุณหภูมิและเวลาที่ตำแหน่งต่าง ๆ ของแม่พิมพ์บนและล่าง โดยการจำลองด้วยสมการการนำความร้อนวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ในระหว่างกระบวนการขึ้นรูปภาชนะบรรจุอาหารเป็นเวลา 2 นาที แสดงดังตารางภาคผนวก ก-19 ผลของแบบจำลองพบว่า การกระจายอุณหภูมิที่เวลาขึ้นรูป 30 วินาที ของระยะทาง 0.05 เมตร จะได้อุณหภูมิที่ลดลงจาก อุณหภูมิ 175 องศาเซลเซียส เป็นอุณหภูมิ 122.6 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นอุณหภูมิต่ำสุด เนื่องจากระยะทางดังกล่าวเป็นระยะของตำแหน่งบริเวณกึ่งกลางแม่พิมพ์ ซึ่งสอดคล้องกับการทำการทดลอง กล่าวคือที่ตำแหน่งบริเวณดังกล่าวนี้ น้ำจากความชื้นภายในใบทองกวาวมีการถ่ายเทออกในปริมาณที่น้อยกว่า เมื่อเทียบกับที่ตำแหน่งบริเวณขอบของภาชนะบรรจุอาหาร เมื่อเวลาผ่านไปน้ำภายในใบทองกวาวเกิดการระเหยออกไป เป็นผลมาจากอุณหภูมิที่ใช้ในการขึ้นรูปที่สูงกว่าจุดเดือดน้ำ ทำให้น้ำเปลี่ยนสถานะกลายเป็นไอ ส่งผลให้อุณหภูมิที่เวลา 120 วินาที ใกล้เคียงกับอุณหภูมิที่เวลาเริ่มต้น



ภาพ 40 ผลการกระจายอุณหภูมิในการขึ้นรูปที่เวลาต่าง ๆ โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

4.3.3 ผลการศึกษาเปรียบเทียบอุณหภูมิของแม่พิมพ์ที่หุ้มฉนวน ในกระบวนการขึ้นรูปจากค่าจากการทดลองและค่าจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

นำผลการกระจายอุณหภูมิของการทดลองขึ้นรูปใบทองกวาวเป็นภาชนะบรรจุอาหารมาเปรียบเทียบกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เมื่อ  $t(U)$  คือ เวลาของการทดลอง

แม่พิมพ์บน  $t(B)$  คือ เวลาของการทดลองแม่พิมพ์ล่าง  $t^*(U)$  คือ เวลาของแบบจำลองแม่พิมพ์บน และ  $t^*(B)$  คือ เวลาของแบบจำลองแม่พิมพ์ล่าง ผลที่ได้แสดงดังต่อไปนี้

ภาพที่ 41 (ก) ที่เวลาเริ่มต้น พบว่าเส้นแนวโน้มของการทดลองและแบบจำลองมีแนวโน้มใกล้เคียงกันทั้งของแม่พิมพ์บนและแม่พิมพ์ล่าง โดยมีค่าร้อยละความคลาดเคลื่อนอยู่ในช่วง 0.29 ถึง 2.44 ข้อมูลดังแสดงในตารางภาคผนวก ก-20

ภาพที่ 41 (ข) ที่เวลา 30 วินาที พบว่าเส้นแนวโน้มของการทดลองและแบบจำลองมีแนวโน้มอุณหภูมิลดลงเมื่อระยะทางเพิ่มขึ้น การลดลงของอุณหภูมิตั้งแต่เริ่มต้นเป็นผลมาจากค่าความชื้นของน้ำภายในใบทองกวาว โดยมีค่าร้อยละความคลาดเคลื่อนอยู่ในช่วง 8.68 ถึง 17.83 ดังแสดงในตารางภาคผนวก ก-20

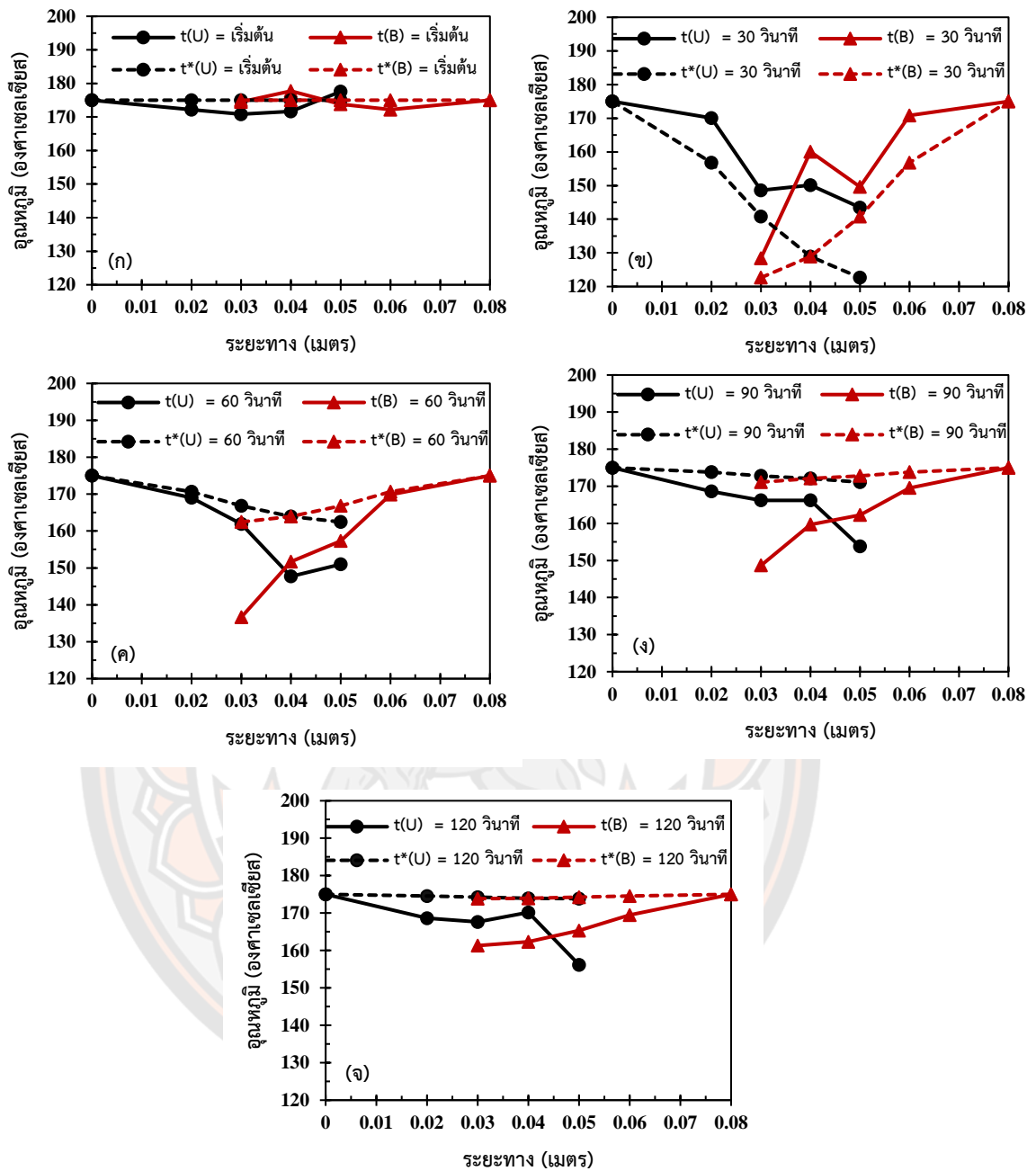
ภาพที่ 41 (ค) ที่เวลา 60 วินาที พบว่าเส้นแนวโน้มของการทดลองและแบบจำลองมีแนวโน้มอุณหภูมิลดลงเมื่อระยะทางเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกันกับที่เวลา 30 วินาที โดยมีค่าร้อยละความคลาดเคลื่อนอยู่ในช่วง 0.34 ถึง 13.19 ดังแสดงในตารางภาคผนวก ก-20

ภาพที่ 41 (ง) ที่เวลา 90 วินาที พบว่าเส้นแนวโน้มของการทดลองและแบบจำลองมีแนวโน้มอุณหภูมิลดลงเมื่อระยะทางเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกันกับที่เวลา 60 วินาที โดยมีค่าร้อยละความคลาดเคลื่อนอยู่ในช่วง 1.88 ถึง 11.36 ดังแสดงในตารางภาคผนวก ก-20

ภาพที่ 41 (จ) ที่เวลา 120 วินาที พบว่า แนวโน้มของการทดลองและแบบจำลองมีแนวโน้มการกระจายอุณหภูมิต่างกันไปในทางเดียวกัน ที่เวลาขึ้นรูปเดียวกันของการทดลองและแบบจำลองในเวลา 120 วินาที ของระยะ 0.05 เมตร ซึ่งจะมีอุณหภูมิต่ำสุดเนื่องจากเป็นตำแหน่งบริเวณกึ่งกลางแม่พิมพ์ และมีร้อยละความคลาดเคลื่อนเท่ากับ ร้อยละ 6.97 เป็นผลมาจากค่าร้อยละความชื้นที่คงเหลืออยู่ภายในภาชนะบรรจุอาหาร ซึ่งสอดคล้องกับผลการวัดค่าร้อยละความชื้นของใบทองกวาวหลังจากการขึ้นรูป สามารถการสังเกตได้จากลักษณะทางกายภาพของภาชนะบรรจุอาหารที่บริเวณใต้ภาชนะบรรจุอาหารจะมีลักษณะของสีใบที่เข้ม สันนิษฐานได้ว่ายังคงมีความชื้นคงเหลืออยู่ภายใน แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองที่ได้จากสมการการนำความร้อนนี้สามารถนำมาใช้งานในการทำนายการกระจายอุณหภูมิจริง และแม่นยำในระดับยอมรับได้ที่ร้อยละ 80 เนื่องจากมีค่าร้อยละความคลาดเคลื่อนระหว่างการทดลองและแบบจำลองสูงที่สุดคือ ร้อยละ 17.83 ที่เวลา 30 วินาที เป็นผลมาจากความแตกต่างของค่าร้อยละความชื้นของการทดลองและแบบจำลอง เนื่องจากความชื้นในแบบจำลองเป็นความชื้นทั่วทั้งภาชนะบรรจุอาหาร [31]

ในงานวิจัยก่อนหน้าของ Haghi (2001) [50] ที่ได้ศึกษาและอธิบายพฤติกรรมการอบแห้งของหนัง โดยใช้แบบจำลองนี้คำนวณอุณหภูมิของหนังที่ไม่ขึ้นกับเวลา และการแปรผันของการกระจายอุณหภูมิและความชื้นนั้น พบว่าสถานะของอุณหภูมิที่ใช้ออบแห้ง ความชื้นในเครื่องอบแห้ง และปริมาณความชื้นเริ่มต้นของหนังส่งผลต่อการอบแห้งของวัสดุหนัง ผลของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่พัฒนาขึ้นสามารถใช้ทำนายการแปรผันของอุณหภูมิและความชื้นของวัสดุหนังได้อย่างถูกต้องเหมาะสม สอดคล้องกับงานวิจัยของ Aprajeeta และคณะ (2018) [36] ได้ศึกษาพฤติกรรมการหดตัว และรูพรุนของแผ่นขึ้นมันฝรั่ง โดยการศึกษามีความสำคัญอย่างยิ่งต่อการถ่ายเทมวลหรือความชื้น เนื่องจากความชื้นลดลงจะส่งผลให้เกิดรูพรุนเพิ่มมากขึ้น ดังนั้นการออกแบบชุดอุปกรณ์โดยการหุ้มฉนวนความร้อนนั้นจะส่งผลได้ดี เพิ่มความสามารถในกระบวนการผลิต และยังเพิ่มความปลอดภัยในการทำงานของผู้ปฏิบัติงานได้เป็นอย่างดี

การเปรียบเทียบผลการศึกษากการกระจายอุณหภูมิในชุดแม่พิมพ์นี้แสดงให้เห็นว่า การหุ้มฉนวนความร้อนส่งผลให้อุณหภูมิระหว่างการขึ้นรูปมีค่าอุณหภูมิเฉลี่ยในแต่ละตำแหน่งใกล้เคียงกันทุกจุด การหุ้มฉนวนที่ชุดอุปกรณ์นี้จึงสามารถช่วยลดระยะเวลาในการให้ความร้อนของชุดอุปกรณ์ได้ อีกทั้งลดการใช้พลังงานไฟฟ้าให้น้อยลงเพื่อเป็นการช่วยลดต้นทุนในการผลิต เนื่องจากการสูญเสียความร้อนสู่ภายนอก รวมถึงมีความปลอดภัยในด้านการใช้งาน จากการวิเคราะห์ปัญหาทางความร้อน โดยการเปรียบเทียบการทดลองและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการขึ้นรูปภาชนะบรรจุอาหารจากใบทองกวาว แสดงให้เห็นว่า การกระจายอุณหภูมิของแม่พิมพ์มีแนวโน้มใกล้เคียงกัน ดังนั้นสามารถบอกได้ว่า แบบจำลองที่ได้จากสมการการนำความร้อนนี้ สามารถนำมาใช้งานในการทำนายการกระจายอุณหภูมิได้จริงและแม่นยำในระดับยอมรับได้ นอกจากนี้ยังสามารถนำไปพัฒนาการออกแบบแม่พิมพ์ที่ใช้ในการขึ้นรูปได้เช่น การลดความหนาของแม่พิมพ์ ลดต้นทุน ปรับเปลี่ยนขนาดหรือลักษณะแบบภาชนะบรรจุอาหาร และลดระยะเวลาในการขึ้นรูป เป็นต้น



ภาพ 41 การเปรียบเทียบการกระจายตัวอนุภาคในการขึ้นรูปที่เวลาต่าง ๆ ระหว่างการทดลองขึ้นรูปและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

(ก) เวลาเริ่มต้น (ข) เวลา 30 วินาที (ค) เวลา 60 วินาที

(ง) เวลา 90 วินาที และ (จ) เวลา 120 วินาที

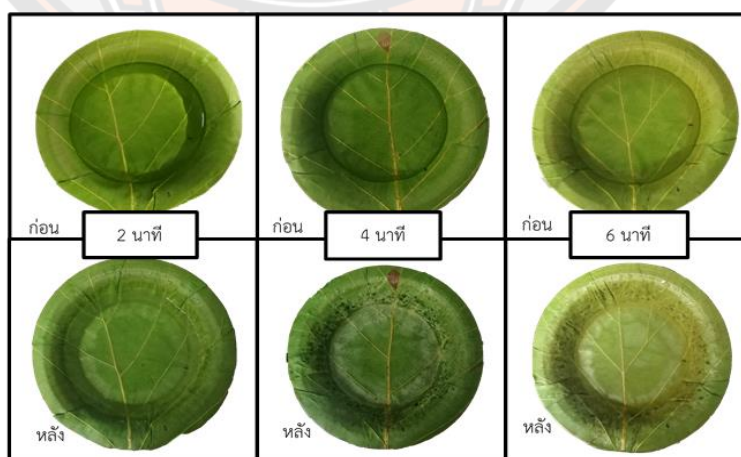
หมายเหตุ : เส้นทึบ (—) หมายถึง จากการทดลอง

เส้นปะ (-----) หมายถึง จากแบบจำลอง

#### 4.4 ผลการทดสอบประสิทธิภาพภาชนะบรรจุอาหารที่ขึ้นรูปจากใบทองกวาว

ผลการทดสอบประสิทธิภาพภาชนะบรรจุอาหารที่ขึ้นรูปจากใบทองกวาว ด้านการนำไปใช้งาน ด้วยการทดสอบการนำไปอุ่นในไมโครเวฟ อ้างอิงการใช้งานเตาไมโครเวฟในชีวิตประจำวัน พบว่าเตาไมโครเวฟส่วนใหญ่จะมีกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ 1,100 วัตต์ และการนำอาหารแช่แข็งมาอุ่นก่อนรับประทานด้วยเตาไมโครเวฟส่วนใหญ่จะใช้เวลาไม่เกิน 2 นาที และกำลังไฟไม่เกิน 1,100 วัตต์ แต่เนื่องจากอาหารจำพวกที่ต้องการละลายน้ำแข็ง หรือการอุ่นของต้มบางชนิดอาจใช้กำลังไฟที่ต่ำกว่า 1,100 วัตต์ และใช้เวลาในการอุ่นนานเกินกว่า 2 นาที แต่ไม่เกิน 10 นาที ดังนั้นจึงได้มีการทำการทดลองที่ กำลังไฟ 1,100 วัตต์ และ เวลาในการอุ่น 2, 4 และ 6 นาทีตามลำดับ ผลการทดลองแสดงดังภาพ 42 พบว่าลักษณะทางกายภาพของภาชนะภาชนะบรรจุอาหารจากใบทองกวาวยังคงมีสภาพปกติ ไม่มีการเปลี่ยนแปลง ไม่มีการรั่วซึม จึงสามารถบอกได้ว่าภาชนะบรรจุอาหารจากใบทองกวาวนี้สามารถทนความร้อนได้ค่อนข้างดี

ทั้งนี้จากการศึกษางานวิจัยของ Aderghal และคณะ (2011) [41] ได้กล่าวถึงหลักการทำงานของไมโครเวฟคือ เป็นการใช้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความถี่สูงในการเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าในลักษณะคลื่นไมโครเวฟเข้าสู่อาหารได้ทุกทิศทาง ส่งผลให้โมเลกุลของอาหารสั่นและชนกัน เกิดเป็นพลังงานความร้อนทำให้อาหารสุกเร็ว ซึ่งคลื่นไมโครเวฟนี้มีหลักการทำงานคือ การสะท้อน การส่งผ่าน และการดูดซึม หลักการเหล่านี้มีประโยชน์คือ ทำให้อาหารสุกได้โดยไม่ทำให้อาหารเสียรูป และคลื่นไมโครเวฟจะสะท้อนกลับเมื่อกระทบกับภาชนะที่เป็นโลหะและทะลุผ่านภาชนะที่ทำจากแก้ว กระจก ไม้ เซรามิก และพลาสติกทนความร้อนได้ ดังนั้นภาชนะบรรจุอาหารจากใบทองกวาวสามารถนำไปต่อ ยอดในการบรรจุอาหารได้หลากหลายชนิดได้ในอนาคต



ภาพ 42 ลักษณะทางกายภาพของภาชนะภาชนะบรรจุอาหารจากใบทองกวาว

โดยการทดสอบการนำไปอุ่นอาหารในไมโครเวฟ ที่เวลา 2 4 และ 6 นาทีตามลำดับ



## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลอง

#### 5.1 สรุปผลการทดลอง

จากผลการทดลองงานวิจัยนี้ได้ศึกษาวิเคราะห์คุณสมบัติและวิธีการเชิงตัวเลขของภาชนะบรรจุอาหารที่ย่อยสลายได้จากไบโทองกวาว โดยการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการขึ้นรูปภาชนะบรรจุอาหาร ใช้หลักการของระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์และทฤษฎีการนำความร้อนแบบกึ่งของแข็งอันดับด้านการกระจายอุณหภูมิของแม่พิมพ์ระหว่างการขึ้นรูปภาชนะบรรจุอาหารจากไบโทองกวาว นำมาวิเคราะห์ในกระบวนการขึ้นรูปภาชนะบรรจุอาหารมาเปรียบเทียบกับผลการทดลองที่วัดค่าได้จริง เพื่ออธิบายปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นและสามารถนำภาชนะบรรจุอาหารจากไบโทองกวาวมาใช้งานได้จริง จากผลการศึกษาสามารถสรุปได้ดังนี้

5.1.1 ผลการศึกษาคุณสมบัติต่าง ๆ ของไบโทองกวาวและภาชนะบรรจุอาหารจากไบโทองกวาวสามารถนำมาอธิบายในปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นได้ในระหว่างการขึ้นรูป จากโครงสร้างภายในของไบโทองกวาว ทำให้ความหนาของใบลดลงโดยเฉลี่ย  $0.16 \pm 0.03$  มิลลิเมตร ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของไบโทองกวาว พบว่าปริมาณเซลลูโลสของไบโทองกวาวมีสูงค่าถึงร้อยละ 32.58 การศึกษาค่าความร้อนของไบโทองกวาวที่ให้พลังงานความร้อนสูงถึง  $5.48 \pm 0.06$  กิโลแคลอรีต่อกรัม และภาชนะบรรจุอาหารจากไบโทองกวาวมีค่า  $4.88 \pm 0.08$  กิโลแคลอรีต่อกรัม เนื่องจากการขึ้นรูปส่งผลโดยตรงต่อโครงสร้างของไบโทองกวาว โดยภาชนะบรรจุอาหารจากไบโทองกวาวมีค่าความเค้นแรงดึงที่สูงขึ้นเมื่อเทียบกับไบโทองกวาว ดังนั้นภาชนะบรรจุอาหารจากไบโทองกวาวจึงมีค่าความเค้นแรงดึงเท่ากับ  $3.00 \pm 0.08$  เมกะปาสคาล และไบโทองกวาวมีค่าความเค้นแรงดึงเท่ากับ  $2.29 \pm 0.79$  เมกะปาสคาล ซึ่งโดยทั่วไปภาชนะบรรจุอาหารจำเป็นต้องมีความแข็งแรง แต่อย่างไรก็ตามคุณสมบัติต่าง ๆ ของไบโทองกวาวสามารถปรับปรุงคุณสมบัติให้ดีขึ้นเพื่อให้เหมาะสมสำหรับการใช้งานบรรจุอาหาร

5.1.2 ผลการศึกษากระบวนการขึ้นรูปของภาชนะบรรจุอาหารจากไบโทองกวาว สภาวะที่เหมาะสมคืออุณหภูมิ 175 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 120 วินาที ซึ่งจะมีค่าความชื้นเท่ากับร้อยละ  $8.72 \pm 0.23$  ค่าความชื้นที่ได้นี้มีความเหมาะสมต่อการเพิ่มความสามารถในการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์และการใช้งานคือ ลดการก่อโรคจากเชื้อจุลินทรีย์ การออกแบบชุดอุปกรณ์การขึ้นรูปภาชนะบรรจุอาหารจากไบโทองกวาว

5.1.3 ผลการศึกษาการกระจายอุณหภูมิในชุดแม่พิมพ์ พบว่าการหุ้มฉนวนความร้อนส่งผลให้อุณหภูมิระหว่างการขึ้นรูปมีค่าอุณหภูมิเฉลี่ยในแต่ละตำแหน่งใกล้เคียงกันทุกจุด การหุ้มฉนวนที่ชุดอุปกรณ์นี้จึงสามารถช่วยลดระยะเวลาในการให้ความร้อนของชุดอุปกรณ์ได้ เมื่อเปรียบเทียบการทดลองและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการขึ้นรูปภาชนะบรรจุอาหารจากไบโทองกวาว ผลที่ได้แสดงให้เห็นว่า การกระจายอุณหภูมิของแม่พิมพ์มีแนวโน้มใกล้เคียงกัน สามารถนำมาใช้งานในการทำนายการกระจายอุณหภูมิได้จริงในระดับยอมรับได้ร้อยละ 80

5.1.4 ผลการศึกษาด้านการนำไปใช้งานโดยการทดสอบการนำไปอุ่นอาหารในไมโครเวฟที่กำลังไฟ 1,100 วัตต์ และเวลาในการอุ่น 2 4 และ 6 นาทีตามลำดับ จากการทดลองพบว่าภาชนะบรรจุอาหารจากไบโทองกวาวยังคงสภาพปกติ ไม่มีการเปลี่ยนแปลง หรือสามารถทนความร้อนได้

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 การศึกษาคุณสมบัติต่าง ๆ ของไบโทองกวาวสามารถบ่งชี้ถึงคุณประโยชน์ที่หลากหลายด้าน แต่คุณสมบัติทางกลจากค่าความเค้นแรงดึงอาจยังไม่เพียงพอต่อการบ่งชี้ประสิทธิภาพของผลิตภัณฑ์ ทั้งนี้จึงสามารถศึกษาเพิ่มเติมในด้านคุณสมบัติทางกลด้านอื่น ๆ เพิ่มเติมต่อไปในอนาคตได้

5.2.2 การศึกษากระบวนการขึ้นรูปของภาชนะภาชนะบรรจุอาหารจากไบโทองกวาวสำหรับการใช้งานด้านบรรจุอาหารที่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพสามารถบ่งชี้ถึงการใช้งาน อย่างไรก็ตามในการศึกษาครั้งต่อไปควรเพิ่มการศึกษาการขึ้นรูปที่มีรูปร่างและขนาดที่หลากหลายเพื่อตอบสนองต่อการใช้งานเพิ่มเติม

5.2.3 การพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการขึ้นรูปภาชนะบรรจุอาหารจากไบโทองกวาวที่ใช้หลักการถ่ายเทความร้อนโดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ใน 1 มิติ ข้อมูลค่าร้อยละความชื้นจากการสูญเสียของน้ำน่าจะไม่เพียงพอและครอบคลุมต่อแบบจำลองการขึ้นรูป ทั้งนี้สามารถเพิ่มการพัฒนาในด้านการถ่ายโอนมวล ประกอบการพิจารณาแบบจำลองใน 2 มิติ หรือ 3 มิติ

5.2.4 ควรศึกษาเพิ่มเติมในด้านการย่อยสลายทางชีวภาพของภาชนะภาชนะบรรจุอาหารจากไบโทองกวาวสำหรับการใช้งานด้านบรรจุอาหาร

## บรรณานุกรม

1. Raheem D. Application of plastics and paper as food packaging materials-An overview. Emirates Journal of Food and Agriculture. 2013;2(1):177-188.
2. Robertson GL. Food packaging: principles and practice. 2016. CRC press Publishers.
3. ประภา สันติ. ความเสี่ยงจากการบริโภคอาหารบรรจุจากโฟม. Journal of KKU Research (Graduate studies). 2560;10(2):39-48.
4. พัชรिता พงษ์ประภัสสร. ขยะระเบิดเวลาสิ่งแวดล้อม. วารสารมูลนิธิสืบนาคะเสถียร. 2561.
5. สำนักงานสาธารณสุข. ลดละ เลิก การใช้ภาชนะโฟมบรรจุอาหาร. วารสารอาหาร. 2556.
6. Heier K and Adams J. The geochemistry of the alkali metals. Journal of Physics and Chemistry of the Earth. 1964;5:253-381.
7. Hidalgo-Ruz V, Gutow L and Thompson R. Microplastics in the marine environment: a review of the methods used for identification and quantification. Environmental science & technology. 2012;46(6):3060-3075.
8. Mauseth JD. Botany: an introduction to plant biology, 2011. Jones & Bartlett Publishers.
9. Rana F and Avijit M. Review on *Butea monosperma*. Journal of Research in Pharmacy and Chemistry. 2012;2(1):1035-1039.
10. Jhade D, Ahirwar D, Sharma NK, Jain R and Gupta S. *Butea monosperma* (Lam.) Taubert: A review. Journal of Pharmacy Research. 2009;2(7):1181-1183.
11. Liu J, Zhang Z, Yu Z, Liang Y, Li X and Ren L. Experimental study and numerical simulation on the structural and mechanical properties of Typha leaves through multimodal microscopy approaches. Journal of Micron. 2018;104(1):37-44.
12. Hong Y, Yuan Z and Zhang S. The heat and mass transfer analysis of a leaf. Journal of Bionic Engineering. 2013;10(2):170-176.
13. Awais M, Sorvari J, Tanninen P and Leppänen T. Finite element analysis of the press forming process. International Journal of Mechanical Sciences. 2017;131(1):767-775.
14. Linda E, Graham J, Lee W and Wilcox M. Plant biology. 2003. Prentice Hall Publishers.

15. Khalil H, Davoudpour Y, Saurabh C, Hossain M, Adnan A, Dungani R, Paridah M, Sarker M, Fazita M, Syakir M and Haafiz M. A review on nanocellulosic fibres as new material for sustainable packaging: Process and applications. *International Journal of Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016;64(1):823-836.
16. สถาบันเหล็กและเหล็กกล้าแห่งประเทศไทย. Hydromechanical deep drawing die design and development for light reflector. 2553.
17. Linvill E. 3-D Forming of paper materials. 2017. Doctor of science, Ph.D., KTH Royal Institute of Technology.
18. Vishtal A. Formability of paper and its improvement. 2015. Doctor of science, Ph.D., Tampere University of Technology.
19. Karimi F. Optimization of an air drying process for *Artemisia absinthium* leaves using response surface and artificial neural network models. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*. 2012;43(1):29-39.
20. Erbay Z and Icier F. Optimization of hot air drying of olive leaves using response surface methodology. *Journal of Food Engineering*. 2009;91(4):533-541.
21. ชนารดี ชารคุณธรรม และอภิญา ถุงเงิน. การสกัดน้ำมันเมล็ดงาอ่อนโดยใช้ไดเมทิลอีเทอร์เหลว Extraction of perilla seed oil by liquefied dimethyl ether. 2559. ปรินูนิพนธ์ วศ.บ., มหาวิทยาลัยนเรศวร, พิษณุโลก.
22. Holman JP. Heat transfer. 2002. Boston: McGraw-Hill Publishers.
23. Mikheyev M. Fundamentals of heat transfer. 1968. Mir Publishers.
24. Bergman TL, Incropera FP, DeWitt DP and Lavine AS. Fundamentals of heat and mass transfer. 2011. New York: John Wiley & Sons Publishers.
25. Kreith F and Bohn MS. Principles of heat transfer, Seventh Edition. 2011. St. Paul: West Company Publishers.
26. Burow P and Weigand B. One-dimensional heat conduction in a semi-infinite solid with the surface temperature a harmonic function of time. *Journal of Heat Transfer*. 2012;112(4):1076-82.
27. Zhou Y. Heat conduction in a semi-infinite body with power-type initial and boundary conditions. *International Journal of Thermophysics*. 2012;33(12):2390-2406.

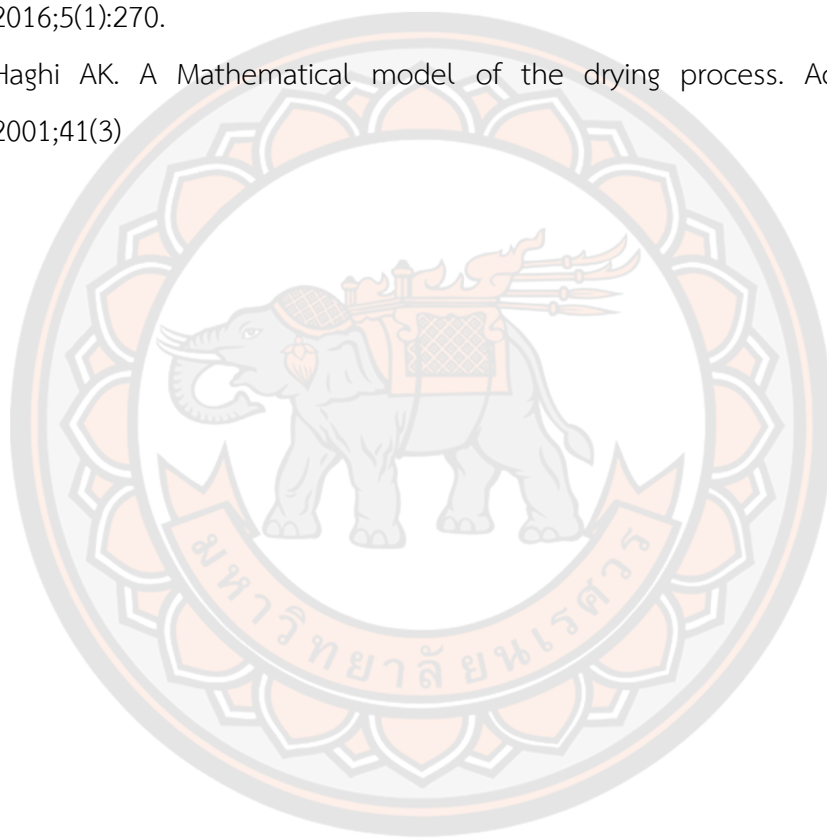
28. ปราโมทย์ เดชะอำไพ. ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในงานวิศวกรรม. 2555. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
29. Musa DN and Nuruddin AA. Calorific value of leaves of selected dipterocarp trees species in piah forest reserve. *Journal of Tropical Resources and Sustainable Science*. 2015;Sci(3):132-134.
30. Indira KN, Parameswaranpillai J and Thomas S. Mechanical properties and failure topography of banana fiber PF aacocomposites fabricated by RTM and CM techniques. *International Journal of Polymer Science*. 2013;2(6):193-199.
31. Luo Y, Liu W, Wang L and Xie W. Heat and mass transfer characteristics of leaf-vein-inspired microchannels with wall thickening patterns. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2016;101(100):1273-1282.
32. Waghmare PM. Review on mechanical properties of banana fiber biocomposite. *International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology*. 2017;Vol(5):847-850.
33. Vishtal A, Hauptmann M, Zelm R, Majschak JP and Retulainen E. 3D Forming of paperboard: The Influence of paperboard properties on formability. *Journal of Packaging Technology and Science*. 2014;27(9):677-691.
34. Leminen V, Tanninen P, Pesonen A and Varis J. Effect of mechanical perforation on the press forming process of paperboard. *Journal of Procedia Manufacturing*. 2019;Vol(38):1402-1408.
35. Villa-Corrales L, Flores-Prieto JJ, Xamán-Villaseñor JP and García-Hernández E. Numerical and experimental analysis of heat and moisture transfer during drying of Ataulfo mango. *Journal of Food Engineering*. 2010.;98(2):198-206.
36. Aprajeeta J, Gopirajah R and Anandharamakrishnan C. Shrinkage and porosity effects on heat and mass transfer during potato drying. *Journal of Food Engineering*. 2015;144(1):119-128.
37. Govaerts YM, Jacquemoud S, Verstraete MM and Ustin SL. Three-dimensional radiation transfer modeling in a dicotyledon leaf. *Journal of Applied Optics*. 1996;35(33): 6585-98.
38. Gerber F, Marion R, Oliosio A, Jacquemoud S, Da Luz BR and Fabre S. Modeling directional-hemispherical reflectance and transmittance of fresh and dry leaves



- from 0.4  $\mu\text{m}$  to 5.7  $\mu\text{m}$  with the PROSPECT-VISIR model. *Journal of Remote Sensing of Environment*. 2011;115(2):404-414.
39. ปรัชญา พลพะพันธุ์. คู่มือวิเคราะห์และจัดการข้อมูลสถิติด้วย Minitab. Vol (1). 2560 กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์บริษัท ไอดีซี พรีเมียร์ จำกัด.
  40. Astuti W, Zulaechah LS and Kristian L. Teak leaf-based activated carbon for phosphate removal. *Journal of Chemistry*. 2019;8(1):52-58.
  41. Aderghal N, Loulou T, Bouchoucha A and Rogeon P. Analytical and numerical calculation of surface temperature and thermal constriction resistance in transient dynamic strip contact. *Journal of Applied Thermal Engineering*. 2011;31(8-9):1527-1535.
  42. Simões N, Simões I, Tadeu A, Vasconcellos C and Mansur W. 3D transient heat conduction in multilayer systems and experimental validation of semi analytical solution. *International Journal of Thermal sciences*. 2013;57(1):192-203.
  43. Cheng ZD, He YL, Cui FQ, Xu RJ and Tao YB. Numerical simulation of a parabolic trough solar collector with nonuniform solar flux conditions by coupling FVM and MCRT method. *Journal of Solar Energy*. 2012;86(6):1770-1784.
  44. Abou-Zeid RE, Diab MA, Mohamed SA, Salama A, Aljohani HA and Shoueir KR. Surfactant-assisted poly (lactic acid)/cellulose nanocrystal bionanocomposite for potential application in paper coating. *Journal of Renewable Materials*. 2018;6(4):394-401.
  45. Guerra MB, Adame A, de Almeida E, De Carvalho GG, Brasil MA, Santos Jr D and Krug FJ. Direct analysis of plant leaves by EDXRF and LIBS: microsampling strategies and cross-validation. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*. 2015;30(7):1646-54.
  46. Lewicki PP. Water as the determinant of food engineering properties. *Journal of Food Engineering*. 2004;61(4):483-95.
  47. Pereira AL, Nascimento DM, Men de Sá Filho MS, Cassales AR, Morais JP, Paula RC, Rosa MF, Feitosa JP. Banana (*Musa sp. cv. Pacovan*) pseudostem fibers are composed of varying lignocellulosic composition throughout the diameter. *BioResources*. 2014;9(4):7749-63.



48. Gracelet J. Drug discovery approach on tectonagrandis linn leaves against apicomplexan plasmodium and wound links its ethno pharmacological validation and pharmacological relevance. 2014. Master of Pharmacy, Tamil Nadu Medical University.
49. Poddar P, Islam MS, Sultana S, Nur HP and Chowdhury AM. Mechanical and thermal properties of short arecanut leaf sheath fiber reinforced polypropylene composites: TGA, DSC and SEM analysis. Journal of Material Science and Engineering. 2016;5(1):270.
50. Haghi AK. A Mathematical model of the drying process. Acta Polytechnica. 2001;41(3)





ภาคผนวก

มหาวิทยาลัยนครพนม



**ภาคผนวก ก**  
**ตารางผลการทดลอง**

**ตาราง ก-1 ความหนาของใบทองกวาวและบรรจุภัณฑ์ที่ขึ้นรูปจากใบทองกวาว**

ใบ ทองกวาว	ความหนาใบทองกวาวก่อนขึ้นรูป (มิลลิเมตร)				ความหนาใบทองกวาวหลังขึ้นรูป (มิลลิเมตร)				ความแตกต่าง โดยเฉลี่ย (มิลลิเมตร)
	ตำแหน่งที่				ตำแหน่งที่				
	1	2	3	4	1	2	3	4	
1	0.42	0.38	0.42	0.3	0.11	0.12	0.12	0.13	0.26
2	0.42	0.38	0.35	0.42	0.14	0.11	0.14	0.14	0.26
3	0.3	0.31	0.34	0.31	0.16	0.16	0.14	0.18	0.16
4	0.34	0.3	0.35	0.29	0.13	0.13	0.1	0.11	0.20
5	0.3	0.36	0.32	0.3	0.14	0.13	0.13	0.13	0.19
6	0.3	0.31	0.29	0.34	0.11	0.11	0.08	0.09	0.21
7	0.3	0.22	0.22	0.26	0.13	0.13	0.1	0.14	0.13
8	0.34	0.33	0.31	0.3	0.17	0.13	0.13	0.13	0.18
9	0.31	0.34	0.37	0.3	0.11	0.12	0.13	0.14	0.21
10	0.34	0.37	0.32	0.33	0.16	0.17	0.14	0.16	0.18
11	0.32	0.32	0.38	0.32	0.13	0.17	0.15	0.15	0.19
12	0.33	0.34	0.33	0.35	0.17	0.14	0.17	0.15	0.18
13	0.38	0.34	0.3	0.33	0.1	0.13	0.1	0.18	0.21
14	0.25	0.25	0.24	0.23	0.07	0.12	0.07	0.04	0.17
15	0.33	0.33	0.32	0.3	0.05	0.12	0.07	0.1	0.24
16	0.26	0.22	0.29	0.27	0.07	0.14	0.13	0.07	0.16
17	0.27	0.22	0.23	0.22	0.11	0.14	0.09	0.1	0.13
18	0.27	0.28	0.27	0.3	0.12	0.12	0.14	0.1	0.16
19	0.31	0.35	0.33	0.31	0.12	0.15	0.18	0.17	0.17
20	0.35	0.32	0.27	0.3	0.15	0.15	0.16	0.16	0.16
21	0.34	0.31	0.34	0.34	0.13	0.14	0.15	0.15	0.19
22	0.27	0.24	0.28	0.27	0.12	0.1	0.11	0.12	0.15
23	0.33	0.25	0.26	0.26	0.17	0.16	0.17	0.1	0.13
24	0.28	0.29	0.26	0.22	0.09	0.12	0.12	0.11	0.15
25	0.32	0.29	0.28	0.31	0.12	0.15	0.16	0.14	0.16

ตาราง ก-1 ความหนาของใบทองกวาวและบรรจุภัณฑ์ที่ขึ้นรูปจากใบทองกวาว (ต่อ)

ใบ ทองกวาว	ความหนาใบทองกวาวก่อนขึ้นรูป (มิลลิเมตร)				ความหนาใบทองกวาวหลังขึ้นรูป (มิลลิเมตร)				ความแตกต่าง โดยเฉลี่ย (มิลลิเมตร)
	ตำแหน่งที่				ตำแหน่งที่				
	1	2	3	4	1	2	3	4	
26	0.38	0.34	0.31	0.36	0.15	0.12	0.17	0.15	0.20
27	0.34	0.28	0.24	0.26	0.02	0.03	0.07	0.05	0.24
28	0.34	0.24	0.33	0.29	0.10	0.14	0.12	0.14	0.18
29	0.32	0.34	0.27	0.25	0.17	0.09	0.13	0.13	0.17
30	0.27	0.21	0.24	0.28	0.11	0.12	0.13	0.10	0.14
31	0.24	0.31	0.21	0.24	0.08	0.09	0.12	0.10	0.15
32	0.28	0.28	0.27	0.27	0.17	0.15	0.17	0.15	0.12
33	0.29	0.29	0.29	0.29	0.17	0.17	0.16	0.20	0.12
34	0.29	0.25	0.26	0.26	0.14	0.12	0.15	0.15	0.13
35	0.30	0.30	0.31	0.31	0.15	0.15	0.15	0.16	0.15
36	0.21	0.24	0.18	0.21	0.10	0.14	0.12	0.15	0.08
37	0.29	0.28	0.33	0.26	0.10	0.13	0.13	0.15	0.16
38	0.28	0.26	0.28	0.27	0.16	0.15	0.15	0.16	0.12
39	0.16	0.20	0.19	0.15	0.13	0.13	0.15	0.15	0.04
40	0.28	0.27	0.24	0.27	0.14	0.13	0.10	0.14	0.14
41	0.22	0.25	0.24	0.24	0.13	0.17	0.16	0.10	0.10
42	0.29	0.28	0.29	0.29	0.15	0.15	0.15	0.14	0.14
43	0.26	0.27	0.31	0.28	0.09	0.06	0.10	0.06	0.20
44	0.25	0.29	0.29	0.28	0.06	0.09	0.06	0.06	0.21
45	0.30	0.34	0.33	0.30	0.06	0.10	0.07	0.06	0.25
46	0.21	0.25	0.20	0.22	0.13	0.10	0.15	0.14	0.09
47	0.29	0.33	0.33	0.27	0.10	0.06	0.10	0.09	0.22
48	0.31	0.26	0.28	0.26	0.05	0.10	0.12	0.11	0.18
49	0.18	0.33	0.26	0.26	0.06	0.07	0.07	0.05	0.20
50	0.26	0.25	0.22	0.20	0.16	0.17	0.18	0.16	0.07
เฉลี่ย	0.29	0.29	0.28	0.28	0.11	0.12	0.12	0.12	0.17

ตาราง ก-2 ผลการวิเคราะห์ชนิดธาตุของใบทองกวาว

ชื่อธาตุ	อัตราส่วนของธาตุ (%)				
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	SD
K	38.63	35.50	42.90	39.01	3.03
Ca	24.17	32.80	24.18	27.05	4.07
Si	24.06	19.40	20.12	21.19	2.05
P	3.91	3.94	2.70	3.52	0.58
Mg	2.91	3.52	2.70	3.04	0.35
S	4.57	3.28	4.51	4.12	0.59
Cu	0.73	0.62	1.14	0.83	0.22
Zn	0.58	0.46	0.76	0.60	0.12
Al	0.21	0.23	0.24	0.23	0.01
Fe	0.20	0.22	0.40	0.27	0.09
Mn	-	-	0.31	0.31	0.00
Norm	100.00	100.00	100.00	100.00	0.00

ตาราง ก-3 ผลการวิเคราะห์ค่าความร้อนของใบทองกวาวและบรรจุภัณฑ์ที่ขึ้นรูปจากใบทองกวาว

ชนิดตัวอย่าง	GHV (กิโลแคลอรีต่อกรัม)				
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	SD
ใบทองกวาวก่อนขึ้นรูป	5.557	5.410	5.484	5.484	0.060
ใบทองกวาวหลังขึ้นรูป	4.982	4.886	4.782	4.882	0.082

ตาราง ก-4 ผลการวิเคราะห์ค่าความเค้นของใบทองกวาวและบรรจุภัณฑ์ที่ขึ้นรูปจากใบทองกวาว

ชนิดตัวอย่าง	ความเค้นแรงดึงสูงสุด (เมกะปาสคาล)				
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	SD
ใบทองกวาวก่อนขึ้นรูป	1.264	2.396	3.199	2.286	0.794
ใบทองกวาวหลังขึ้นรูป	2.900	3.000	3.100	3.000	0.082



**ตาราง ก-5 ผลการทดลองสภาวะการขึ้นรูป**

เวลาในการขึ้นรูป (วินาที)	อุณหภูมิในการขึ้นรูป (องศาเซลเซียส)	ร้อยละความชื้น				
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	SD
90	165	26.73	34.44	32.1	31.09	3.23
	175	13.96	12.69	10.54	12.40	1.41
	185	6.77	11.86	11.42	10.02	2.30
120	165	17.46	12.4	13.6	14.49	2.16
	175	8.39	8.83	8.93	8.72	0.23
	185	3.58	3.42	3.96	3.65	0.23
180	165	7.47	8.55	10.36	8.79	1.19
	175	4.34	4.65	3.67	4.22	0.41
	185	2.9	3.07	3.26	3.08	0.15

**ตาราง ก-6 ผลการทดลองสภาวะการขึ้นรูป**

อุณหภูมิในการขึ้นรูป (องศาเซลเซียส)	เวลาในการขึ้นรูป (วินาที)	ร้อยละความชื้น				
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	SD
175	0	64.48	63.59	63.44	63.84	0.46
	90	13.96	12.69	10.54	12.40	1.41
	120	8.39	8.83	8.93	8.72	0.23
	180	4.34	4.65	3.67	4.22	0.41
	240	2.64	2.65	2.05	2.45	0.28
	300	1.94	1.82	2.17	1.98	0.15

**ตาราง ก-7 ผลการเปรียบเทียบค่าความชื้น**

สภาวะที่เหมาะสม	ค่าจากการทดลอง	ค่าความชื้น (%)	
		ค่าจากวิธีพื้นผิวตอบสนอง	ค่าจาก curve fitting
อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส) 175	8.72±0.23	6.81	9.09
เวลา (วินาที) 120			
ค่าความผิดพลาดสัมพัทธ์ (Relative error)		21.90	4.48

ตาราง ก-8 ผลของการวัดค่าอุณหภูมิที่ระยะทางต่าง ๆ จากตำแหน่งที่ติดกับแผ่นฮีตเตอร์ของแม่พิมพ์แบบไม่หมุนวน

เวลา ( นาที )	อุณหภูมิที่ระยะทางต่าง ๆ ( องศาเซลเซียส )																			
	X1 = 0 ( เมตร )			X2 = 0.02 ( เมตร )			X3 = 0.03 ( เมตร )			X4 = 0.04 ( เมตร )			X5 = 0.05 ( เมตร )							
	ครั้งที่	เฉลี่ย	ครั้งที่	ครั้งที่	เฉลี่ย	ครั้งที่	ครั้งที่	เฉลี่ย	ครั้งที่	ครั้งที่	เฉลี่ย	ครั้งที่	ครั้งที่	เฉลี่ย	ครั้งที่	ครั้งที่	เฉลี่ย			
0	31.2	32.7	27.3	30.4	36.5	28.9	27.7	31.0	35.4	29.1	26.7	30.4	39.0	28.5	27.5	31.7	33.3	28.2	26.9	29.5
1	62.6	75.8	27.8	55.4	56.6	29.5	27.9	38.0	47.0	29.1	27.0	34.4	59.3	29.0	27.6	38.6	57.9	28.4	27.0	37.8
5	160.9	213.6	53.6	142.7	63.9	42.1	37.2	47.7	51.4	34.1	31.0	38.8	77.9	49.5	46.4	57.9	80.6	47.8	49.5	59.3
10	198.3	268.6	70.6	179.2	80.0	62.9	55.9	66.3	64.6	49.1	46.7	53.5	107.4	82.2	78.8	89.5	112.5	81.7	85.5	93.2
15	222.6	308.5	202.0	244.4	98.1	84.2	76.6	86.3	80.1	66.8	65.1	70.7	135.6	112.4	109.5	119.2	140.2	111.2	116.5	122.6
20	244.4	344.1	227.0	271.8	117.1	106.6	98.1	107.3	96.0	84.0	83.3	87.8	162.0	142.6	138.4	147.7	166.1	140.1	145.4	150.5
25	265.7	373.7	249.8	296.4	135.7	128.3	119.1	127.7	111.6	100.9	100.5	104.3	181.8	170.1	165.1	172.3	186.0	167.1	171.0	174.7
30	250.9	401.8	272.0	308.2	154.3	150.9	140.5	148.6	121.5	116.3	117.8	118.5	185.0	188.9	185.6	186.5	192.1	189.2	191.8	191.0
35	235.3	386.8	413.9	345.3	169.8	169.6	161.4	166.9	125.1	125.4	127.4	126.0	183.9	190.6	188.6	187.7	194.7	200.0	196.4	197.0
40	208.5	343.5	495.3	349.1	173.8	177.3	173.8	175.0	125.1	127.3	129.8	127.4	180.0	187.0	186.6	184.5	192.0	201.6	196.0	196.5
45	195.7	292.4	45.1	177.7	170.9	176.8	175.3	174.3	123.6	125.6	129.1	126.1	180.5	182.5	181.7	181.6	190.1	196.4	191.3	192.6
50	195.3	282.9	717.0	398.4	170.1	175.6	174.2	173.3	123.8	125.1	129.0	126.0	181.4	181.4	180.5	181.1	190.3	194.1	189.8	191.4
55	198.3	274.2	34.1	168.9	169.7	172.9	172.4	171.7	124.1	124.3	128.2	125.5	182.2	180.1	179.8	180.7	190.5	191.3	188.6	190.1
60	202.2	277.4	31.2	170.3	169.3	171.9	171.2	170.8	125.4	123.8	127.4	125.5	181.7	181.6	181.3	181.5	189.9	190.9	189.6	190.1

ตาราง ก-9 ผลของการวัดค่าอุณหภูมิที่ระยะทางต่าง ๆ จากตำแหน่งที่ติดกับแผ่นฮีตเตอร์ของแม่พิมพ์ล่างไม่หมุนวน

เวลา (นาที)	อุณหภูมิที่ระยะทางต่าง ๆ (องศาเซลเซียส)																			
	X6 = 0.03 (เมตร)			X7 = 0.04 (เมตร)			X8 = 0.05 (เมตร)			X9 = 0.06 (เมตร)			X10 = 0.08 (เมตร)							
	ครั้งที่ เฉลี่ย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ เฉลี่ย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ เฉลี่ย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ เฉลี่ย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3				
0	34.5	29.1	26.7	30.1	39.0	28.5	27.5	31.7	33.3	28.2	26.9	29.5	38.8	29.1	27.6	31.8	36.0	29.5	27.3	30.9
1	47.0	29.1	27.0	34.4	59.3	29.0	27.6	38.6	57.9	28.4	27.0	37.8	58.7	29.2	27.9	38.6	72.1	52.1	31.7	52.0
5	51.4	34.1	31.0	38.8	77.9	49.5	46.4	57.9	80.6	47.8	49.5	59.3	68.0	40.5	37.2	48.6	141.9	142.8	89.8	124.8
10	64.6	49.1	46.7	53.5	107.4	82.2	78.8	89.5	112.5	81.7	85.5	93.2	91.6	66.6	62.4	73.5	165.8	161.0	114.4	147.1
15	80.1	66.8	65.1	70.7	135.6	112.4	109.5	119.2	140.2	111.2	116.5	122.6	117.6	95.0	90.4	101.0	189.4	186.9	138.3	171.5
20	96.0	84.0	83.3	87.8	162.0	142.6	138.4	147.7	166.1	140.1	145.4	150.5	143.8	123.1	118.3	128.4	210.9	211.6	159.6	194.0
25	111.6	100.9	100.5	104.3	181.8	170.1	165.1	172.3	186.0	167.1	171.0	174.7	166.9	151.0	145.2	154.4	231.9	237.3	180.6	216.6
30	121.5	116.3	117.8	118.5	185.0	188.9	185.6	186.5	192.1	189.2	191.8	191.0	175.2	173.6	169.1	172.6	216.6	245.6	204.3	222.2
35	125.1	125.4	127.4	126.0	183.9	190.6	188.6	187.7	194.7	200.0	196.4	197.0	173.5	178.0	176.5	176.0	214.4	223.6	209.7	215.9
40	125.1	127.3	129.8	127.4	180.0	187.0	186.6	184.5	192.0	201.6	196.0	196.5	169.9	176.3	174.7	173.6	201.0	212.3	208.0	207.1
45	123.6	125.6	129.1	126.1	180.5	182.5	181.7	181.6	190.1	196.4	191.3	192.6	169.3	172.4	170.9	170.9	190.1	194.3	193.7	192.7
50	123.8	125.1	129.0	126.0	181.4	181.4	180.5	181.1	190.3	194.1	189.8	191.4	170.1	171.2	169.7	170.3	193.8	193.1	189.6	192.2
55	124.1	124.3	128.2	125.5	182.2	180.1	179.8	180.7	190.5	191.3	188.6	190.1	171.1	170.9	169.0	170.3	197.4	188.7	187.6	191.2
60	125.4	123.8	127.4	125.5	181.7	181.6	181.3	181.5	189.9	190.9	189.6	190.1	172.2	171.9	169.4	171.2	200.3	196.3	192.3	196.3

ตาราง ก-10 ผลของการวัดค่าอุณหภูมิที่ระยะทางต่าง ๆ จากตำแหน่งที่ติดกับแผ่นฮีตเตอร์ของแม่พิมพ์บนที่อุณหภูมิรวม

เวลา (นาฬิกา)	อุณหภูมิที่ระยะทางต่าง ๆ (องศาเซลเซียส)																			
	X1 = 0 (เมตร)			X2 = 0.02 (เมตร)			X3 = 0.03 (เมตร)			X4 = 0.04 (เมตร)			X5 = 0.05 (เมตร)							
	ครั้งที่ 1	เฉลี่ย	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	เฉลี่ย	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	เฉลี่ย	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	เฉลี่ย	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	เฉลี่ย	ครั้งที่ 3					
0	29.1	27.1	27.6	27.9	27.4	27.3	27.4	27.4	26.2	29.6	28.1	28	26.6	31.8	28.4	28.9	25.1	27.1	27	26.4
1	116.8	125.6	96	112.8	30.4	36.8	28.3	31.8	27.7	29.6	28	28.4	28.1	31.9	28.3	29.4	26.4	27.5	26.7	26.9
5	213.7	196.1	195.6	201.8	37.4	54.8	46.5	46.2	36	43.7	35.7	38.5	37.1	46.1	36.9	40	37.3	44.9	37.7	40
10	237.2	217.3	224	226.2	55.9	75.5	70.2	67.2	56.2	65.4	55.4	59	57	67.6	56.3	60.3	60.3	68.4	60.5	63.1
15	255.8	238.9	243.6	246.1	77.4	100.7	93.1	90.4	78.2	87.6	77.3	81	78.5	89.4	77.7	81.9	83.7	91.5	84.2	86.5
20	274.8	261.9	263.8	266.8	98.2	128.5	116.3	114.3	100.6	110.2	99.6	103.5	100.9	111.9	100	104.3	107.1	114.6	107.6	109.8
25	295.9	294.4	278.2	289.5	121.7	153.3	139.8	138.3	122.6	131	121.4	125	123.5	133.2	122.4	126.4	130	135.9	130.3	132.1
30	316.9	321.7	295	311.2	145.6	171.7	163.2	160.2	142.9	151.8	142.3	145.7	144.8	154.9	144.4	148	151.1	157.7	152.2	153.7
35	324.2	240.6	306	290.3	173.2	181.5	184.2	179.6	162.7	167.5	161.9	164	165.9	171.4	165.7	167.7	170.9	173	172	172
40	216.1	205.9	225.4	215.8	180.1	184.6	190.2	185	172.3	172.2	172.6	172.4	176.4	176.8	177.2	176.8	178.6	176.1	180.2	178.3
45	209.4	204.2	217.6	210.4	184.4	185.8	188.1	186.1	172.2	169.8	172.8	171.6	177.7	176	178.4	177.4	176.6	173	177.8	175.8
50	209.7	203.5	214.9	209.4	185.1	185.3	185.7	185.4	169.9	168.9	170.4	169.7	176.8	175.5	177.3	176.5	173.6	172.1	174.1	173.3
55	209.3	202.3	209.1	206.9	184.7	184.4	183.5	184.2	171.1	171.3	170.8	171.1	177.6	176.7	177.4	177.2	174.9	174.3	174.6	174.6
60	207.6	200.6	204	204.1	183.8	182.5	181.8	182.7	172.7	172.4	172.7	172.6	177.9	177.1	178.2	177.7	176.3	174.9	176.5	175.9
65	202.9	198.4	199.3	200.2	182.5	179.1	180.2	180.6	171.7	169.2	171.8	170.9	177	174.5	177.2	176.2	174.8	171.7	175.1	173.9
70	198.1	194	194.6	195.6	181.1	178.6	177.8	179.2	169.9	169.1	169.4	169.5	175.4	174.2	175.1	174.9	172.7	171.6	172.5	172.3

ตาราง ก-10 ผลของการวัดค่าอุณหภูมิที่ระยะทางต่าง ๆ จากตำแหน่งที่ติดกับแผ่นฮีเตอร์ของแม่พิมพ์บนที่อุณหภูมิ (ต่อ)

เวลา (นาที)	อุณหภูมิที่ระยะทางต่าง ๆ (องศาเซลเซียส)																		
	X1 = 0 (เมตร)			X2 = 0.02 (เมตร)			X3 = 0.03 (เมตร)			X4 = 0.04 (เมตร)			X5 = 0.05 (เมตร)						
	ครั้งที่	เฉลี่ย	ครั้งที่	ครั้งที่	เฉลี่ย	ครั้งที่	ครั้งที่	เฉลี่ย	ครั้งที่	ครั้งที่	เฉลี่ย	ครั้งที่	ครั้งที่	เฉลี่ย	ครั้งที่	ครั้งที่	เฉลี่ย		
75	190.6	190.5	191.6	178.9	177.2	175.4	177.2	169.2	168.6	168.4	168.7	174.1	172.7	173.6	173.5	172	171	171.9	171.6
80	193.9	188.2	190.7	177.1	175.3	173.5	175.3	170	169.1	168.6	169.2	173.9	172.5	173	173.1	172.6	171.1	172.2	172
85	199.3	189.3	193.6	175.3	174.1	172	173.8	168.6	167.9	168.1	168.2	172.3	171.5	172.3	172	171	169.9	171.4	170.8
90	206.4	210	204.7	174.2	174.1	171.7	173.3	167.7	166.9	166.6	167.1	171.5	170.7	170.9	171	170.2	169.1	169.9	169.7
95	215.5	212.7	207.1	174.3	175.3	173	174.2	167.6	168.1	166.9	167.5	171.5	171.8	171.1	171.5	170.5	170.5	170.7	170.6
100	213.7	205.2	207.7	175.3	175.7	174.8	175.3	168.5	169.3	168.3	168.7	172.4	173.2	172.6	172.7	171.5	171.7	172.2	171.8
105	206.6	202.7	200.9	175.6	174.5	175	175	168.3	167.9	168	168.1	172.5	172	172.6	172.4	171.3	170.3	171.8	171.1
110	201.6	202.2	195.7	175.3	174.6	173.4	174.4	167.9	167.3	168	167.7	172.2	171.3	172.6	172	170.9	169.7	171.5	170.7
115	207.1	207.1	196.9	174.6	174.6	172.5	173.9	167.5	168.1	167.8	167.8	171.5	171.8	172.2	171.8	170.5	170.5	171.4	170.8
120	212.3	208.9	201.4	174.9	174.8	172.8	174.2	168	168.4	167.8	168.1	171.9	172.2	172.1	172.1	171	170.9	171.6	171.2

ตาราง ก-11 ผลของการวัดค่าอุณหภูมิที่ระยะทางต่าง ๆ จากตำแหน่งที่ติดกับแผ่นฮีตเตอร์ของแม่พิมพ์ล่างที่อุณหภูมิ

เวลา (นาที)	อุณหภูมิที่ระยะทางต่าง ๆ (องศาเซลเซียส)																			
	X6 = 0.03 (เมตร)			X7 = 0.04 (เมตร)			X8 = 0.05 (เมตร)			X9 = 0.06 (เมตร)			X10 = 0.08 (เมตร)							
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย				
0	25.1	27.1	27	26.4	25.7	29.5	27.6	27.6	25.9	29.9	27.9	27.9	27.3	27.4	27.5	27.4	28.6	27.6	26.9	27.7
1	26.4	27.5	26.7	26.9	27.1	30.3	27.4	28.3	27.6	31.8	27.7	29	30.1	37.8	36.8	34.9	72.1	90.9	49.6	70.9
5	37.3	44.9	37.7	40	40.7	49.3	40.4	43.5	43.6	57.8	39.7	47	38	60.6	54.8	51.1	141.4	167.6	131.3	146.8
10	60.3	68.4	60.5	63.1	64.8	73.3	63.7	67.3	68.7	82.3	61.7	70.9	60.7	84.4	75.5	73.5	180.4	195.9	190.8	189
15	83.7	91.5	84.2	86.5	87.9	96.6	87.6	90.7	90.7	98.2	84	91	85.5	111	100.7	99.1	213	221.9	238.9	224.6
20	107.1	114.6	107.6	109.8	111.3	119.9	111.1	114.1	110.5	121.3	107	112.9	107.7	138.1	128.5	124.8	241.8	246.6	274.7	254.4
25	130	135.9	130.3	132.1	134.2	140.9	133.8	136.3	131.6	142.5	129.9	134.7	130.6	159.4	153.3	147.8	269.9	268.6	301.4	280
30	151.1	157.7	152.2	153.7	155.2	162.4	155.6	157.7	155.5	164.7	152.6	156.9	152	173.3	171.7	165.7	298.9	289.2	324.4	304.2
35	170.9	173	172	172	174.6	176.9	175.4	175.6	174.8	180.4	174.4	176.5	174.2	178.9	181.5	178.2	297.1	261.6	318.7	292.5
40	178.6	176.1	180.2	178.3	181.7	179.3	184.1	181.7	183.6	183.3	185.4	184.1	178.7	176.2	184.6	179.8	256.7	230.2	278.4	255.1
45	176.6	173	177.8	175.8	179.3	176	181.9	179.1	185.4	183.3	186.5	185.1	175.2	171.4	185.8	177.5	239.1	222.5	244.4	235.3
50	173.6	172.1	174.1	173.3	177.1	176.3	179	177.5	185.8	183.6	186.2	185.2	171.6	173.3	185.3	176.7	231.1	216.3	244.9	230.8
55	174.9	174.3	174.6	174.6	179	178.9	180.3	179.4	186.4	183.9	186.2	185.5	173.5	177.1	184.4	178.3	223.6	211.5	261.1	232.1
60	176.3	174.9	176.5	175.9	180.1	178.7	181.3	180	185.6	183.4	185.8	184.9	177.1	174.7	182.5	178.1	217.3	206.8	252.6	225.6
65	174.8	171.7	175.1	173.9	178.4	175.3	179.3	177.7	184.3	181.1	184.4	183.3	175.9	174.4	179.1	176.5	211.6	202.3	233.4	215.8
70	172.7	171.6	172.5	172.3	176.4	175.8	177.1	176.4	183.1	180.9	182.6	182.2	173.2	175	178.6	175.6	207	197.6	235.3	213.3



ตาราง ก-11 ผลของการวัดค่าอุณหภูมิที่ระยะทางต่าง ๆ จากตำแหน่งที่ติดกับแผ่นฮีตเตอร์ของแม่พิมพ์ล่างที่หุ้มฉนวน (ต่อ)

เวลา ( นาที )	อุณหภูมิที่ระยะทางต่าง ๆ ( องศาเซลเซียส )																			
	X6 = 0.03 (เมตร)			X7 = 0.04 (เมตร)			X8 = 0.05 (เมตร)			X9 = 0.06 (เมตร)			X10 = 0.08 (เมตร)							
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย				
75	172	171	171.9	171.6	176.2	175.4	176.5	176	181.1	178.7	180.7	180.2	174.3	176.1	177.2	175.9	201.2	194.2	245.7	213.7
80	172.6	171.1	172.2	172	176.7	175	176	175.9	179.9	177.5	179	178.8	176.2	175.1	175.3	175.5	196.4	193.8	241.9	210.7
85	171	169.9	171.4	170.8	174.7	173.6	175	174.4	177.9	176.7	177.9	177.5	175.4	174.1	174.1	174.5	194.9	196	234	208.3
90	170.2	169.1	169.9	169.7	173.9	173.1	173.6	173.5	177.2	176.2	176.7	176.7	174.1	174.8	174.1	174.3	201.2	203.2	237.2	213.9
95	170.5	171.7	170.7	170.6	174.3	174.6	174.2	174.4	177.4	177.3	177.1	177.3	174.8	175.7	175.3	175.3	207.7	205.2	243	218.6
100	171.5	171.7	172.2	171.8	175.2	175.5	175.9	175.5	178.5	178.7	178.8	178.7	175.6	175.2	175.7	175.5	207.1	200.2	241	216.1
105	171.3	170.3	171.8	171.1	174.8	174	175.3	174.7	178.7	177.7	179	178.5	175.3	174.9	174.5	174.9	203.2	198.4	236.1	212.6
110	170.9	169.7	171.5	170.7	174.4	173.7	175.4	174.5	178.5	177	179	178.2	174.5	175	174.6	174.7	199.8	197.6	237.1	211.5
115	170.5	170.5	171.4	170.8	174.2	174.5	175.2	174.6	177.5	177.3	178.3	177.7	174.9	175.5	174.6	175	202	200.9	241.4	214.8
120	171	170.9	171.6	171.2	174.6	174.7	175.2	174.8	177.8	177.7	177.9	177.8	175.4	175.2	174.8	175.1	205.7	202.4	240.1	216.1

ตาราง ก.12 ข้อมูลการให้ความร้อนของแม่พิมพ์ไม่หุ้มฉนวน จากวัดค่าการทดลองของอุณหภูมิ  
โดยเฉลี่ย

เวลา (นาที)	อุณหภูมิที่ตำแหน่งต่าง ๆ (องศาเซลเซียส)					ค่าเฉลี่ย	SD
	T1	T2	T3	T4			
0	28.4	38.9	38.3	36.1		35.4	3.7
1	28.4	39.3	39.1	38.4		36.3	4.1
5	31.6	56.4	60.9	62.6		52.9	11.2
10	47.1	85.5	92.3	96.1		80.2	17.4
20	87	139.8	150.3	153.1		132.5	23.9
30	127.7	182.4	186.8	191.8		172.2	23.2
40	156.2	191.4	184.4	196.5		182.1	13.9
50	165.8	183.4	181.5	190.3		180.3	8
60	161.5	182.5	179	186.1		177.3	8.4

ตาราง ก-13 ข้อมูลการให้ความร้อนของแม่พิมพ์หุ้มฉนวนจากวัดค่าการทดลองของอุณหภูมิโดย  
เฉลี่ย

เวลา (นาที)	อุณหภูมิที่ตำแหน่งต่าง ๆ (องศาเซลเซียส)					ค่าเฉลี่ย	SD
	T1	T2	T3	T4			
0	33.6	29.5	27.1	29.9		30	2.1
1	34.2	30.3	27.5	31.8		31	2.2
5	50.4	49.3	44.9	57.8		50.6	4.1
10	71.4	73.3	68.4	82.3		73.9	4.6
20	115.7	119.9	114.6	121.3		117.9	2.5
30	161.2	162.4	157.7	164.7		161.5	2.3
40	178.2	179.3	176.1	183.3		179.2	2.3
50	176.4	176.3	172.1	183.6		177.1	3.7
60	173.9	178.7	174.9	183.4		177.7	3.3

**ตาราง ก-14 ข้อมูลการให้ความร้อนของแม่พิมพ์หุ้มฉนวนจากวัดค่าการทดลองของอุณหภูมิโดยเฉลี่ย**

เวลา (นาที)	อุณหภูมิที่ตำแหน่งต่าง ๆ (องศาเซลเซียส)									
	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	X9	X10
0	27.6	27.3	28.1	28.4	28.4	27	27.6	27.9	27.5	26.9
1	125.6	34.2	29.6	31.9	33.9	31.8	30.3	27.5	28.2	90.9
5	196.1	50.4	43.7	46.1	48.4	57.8	49.3	44.9	45.7	167.6
10	217.3	71.4	65.4	67.6	70.6	82.3	73.3	68.4	68.4	195.9
20	261.9	115.7	110.2	111.9	117.2	121.3	119.9	114.6	113	246.6
30	299.8	161.2	151.8	154.9	162.2	164.7	162.4	157.7	154.4	289.2
40	205.9	178.2	172.2	176.8	183.9	183.3	179.3	176.1	170.8	230.2
50	203.5	176.4	168.9	175.5	183.6	183.6	176.3	172.1	165.7	216.3
60	200.6	173.9	172.4	177.1	184.9	183.4	178.7	174.9	170.6	206.8

**ตาราง ก-15 ข้อมูลการให้ความร้อนของแม่พิมพ์หุ้มฉนวน จากสมการถ่ายเทความร้อนโดยการนำความร้อนของวิธีกิ่งของแข็งอนันต์ กรณีอุณหภูมิคงที่**

เวลา (นาที)	อุณหภูมิที่ตำแหน่งต่าง ๆ (องศาเซลเซียส)									
	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	X9	X10
0	200	27.3	28.1	28.4	28.4	27	27.6	27.9	27.5	200
1	199.4	143.1	118	54	36.4	46.6	78.4	96.2	170.9	199.4
5	199.7	173.9	161.2	114.9	79.7	105	136.9	148.8	186.9	199.7
10	199.8	181.5	172.3	137.5	107.1	129.4	154.5	163.3	190.7	199.8
20	199.9	186.9	180.4	154.9	131.2	148.8	167.5	173.9	193.4	199.9
30	199.9	189.3	184	163	142.9	157.8	173.4	178.6	194.6	199.9
40	199.9	190.7	186.1	167.8	150.2	163.3	176.9	181.5	195.4	199.9
50	199.9	191.7	187.6	171.2	155.2	167.1	179.3	183.4	195.8	199.9
60	199.9	192.4	188.6	173.6	159	169.9	181.1	184.9	196.2	199.9

ตาราง ก-16 ตารางการเปรียบเทียบการให้ความร้อนของแม่พิมพ์หุ้มฉนวนระหว่างการทดลองกับ  
สมการถ่ายเทความร้อนโดยการนำความร้อนของวิธีกึ่งของแข็งอนันต์ กรณีอุณหภูมิคงที่ เมื่อ  
อัตราการให้ความร้อนมีค่าคงที่

การกระจาย อุณหภูมิ	เวลา (นาที)	อุณหภูมิที่ตำแหน่งต่าง ๆ (องศาเซลเซียส)									
		X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	X9	X10
ผลการทดลอง	40	215.8	185.0	172.4	176.8	178.3	178.3	181.7	184.1	179.8	255.1
	60	204.1	182.7	172.6	177.7	175.9	175.9	180.0	184.9	178.1	225.6
	90	204.7	174.1	172.4	171.0	178.8	178.3	173.5	176.7	174.3	202.2
	120	207.5	174.8	172.6	172.1	180.0	175.9	174.8	177.8	175.3	204.1
สมการถ่ายเท ความร้อน	40	200.0	181.0	171.7	162.5	153.4	153.4	162.5	171.7	181.0	200.0
	60	200.0	184.5	176.8	169.2	161.7	161.7	169.2	176.8	184.5	200.0
	90	200.0	187.3	181.0	174.8	168.6	168.6	174.8	181.0	187.3	200.0
	120	200.0	189.0	183.6	178.1	172.7	172.7	178.1	183.6	189.0	200.0
ค่าความ ผิดพลาด สัมพัทธ์ (Relative error)	40	7.32	2.14	0.41	8.11	13.95	13.95	10.59	6.74	0.69	21.60
	60	2.01	0.99	2.45	4.77	8.07	8.07	5.99	4.37	3.60	11.35
	90	2.28	7.59	5.02	2.20	5.69	5.44	0.73	2.46	7.50	1.09
	120	3.63	8.14	6.36	3.53	4.01	1.80	1.89	3.25	7.81	1.98

ตาราง ก-17 ผลของการวัดค่าอุณหภูมิของแม่พิมพ์บนที่พัฒนา สำหรับการใช้งานระบบบรรจุอาหารจากใบของกาวา

เวลา (วินาที)	อุณหภูมิที่ระยะทางต่าง ๆ (องศาเซลเซียส)																		
	X1 = 0 (เมตร)			X2 = 0.02 (เมตร)			X3 = 0.03 (เมตร)			X4 = 0.04 (เมตร)			X5 = 0.05 (เมตร)						
	ครั้งที่ เฉลี่ย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ เฉลี่ย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ เฉลี่ย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ เฉลี่ย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			
0	175.0	175.0	175.0	171.2	173.5	171.9	172.2	170.8	171.4	170.3	170.8	171.7	172.3	171.0	171.7	177.7	178.3	176.7	177.6
10	175.0	175.0	175.0	171.1	173.5	171.8	172.1	158.2	147.7	154.5	153.5	164.4	158.4	161.0	161.3	167.2	141.3	166.1	158.2
20	175.0	175.0	175.0	171.0	172.9	171.8	171.9	143.1	139.9	139.8	140.9	149.1	153.4	145.6	149.4	146.3	137.7	137.8	140.6
30	175.0	175.0	175.0	170.6	172.3	171.5	171.5	149.1	146.7	149.9	148.6	153.0	151.1	151.4	151.8	148.4	141.6	140.5	143.5
40	175.0	175.0	175.0	170.3	171.6	171.0	171.0	154.3	151.4	155.0	153.6	147.2	130.7	152.1	143.3	150.8	144.5	144.7	146.7
50	175.0	175.0	175.0	169.8	171.1	170.8	170.6	158.8	155.6	159.7	158.0	143.6	140.9	142.6	142.4	153.3	146.8	147.6	149.2
60	175.0	175.0	175.0	169.6	170.6	170.5	170.2	162.7	160.8	162.2	161.9	141.3	145.8	144.9	144.0	154.9	148.7	149.4	151.0
70	175.0	175.0	175.0	169.3	170.3	170.3	170.0	165.2	163.4	164.2	164.3	152.8	153.6	152.5	153.0	155.9	150.2	150.5	152.2
80	175.0	175.0	175.0	169.2	169.8	170.2	169.7	166.3	164.4	165.4	165.4	160.6	162.3	159.1	160.7	156.6	151.3	151.5	153.1
90	175.0	175.0	175.0	169.0	169.4	170.1	169.5	166.8	165.4	166.3	166.2	166.2	167.4	164.9	166.2	157.0	152.0	152.2	153.7
100	175.0	175.0	175.0	168.9	169.4	170.1	169.5	167.2	166.1	166.9	166.7	168.4	169.8	168.0	168.7	157.4	152.6	152.9	154.3
110	175.0	175.0	175.0	168.8	169.4	170.2	169.5	167.4	166.8	167.5	167.2	169.1	170.6	169.3	169.7	157.8	153.4	154.0	155.1
120	175.0	175.0	175.0	168.8	169.3	170.3	169.5	167.8	167.2	168.0	167.7	169.5	171.1	169.9	170.2	158.5	154.8	155.2	156.2

**ตาราง ก-18 ผลของการวัดค่าอุณหภูมิของแม่พิมพ์ต่าง ๆ ที่อุณหภูมิชั้นรูปภาชนะบรรจุอาหารจากใบของกวาง**

เวลา (วินาที)	X6 = 0.03 (เมตร)			X7 = 0.04 (เมตร)			X8 = 0.05 (เมตร)			X9 = 0.06 (เมตร)			X10 = 0.08 (เมตร)							
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย				
0	173.1	176.2	174.2	174.5	178.0	173.0	182.2	177.7	174.2	173.2	173.9	173.8	177.0	173.5	177.7	176.1	175.0	175.0	175.0	
10	155.6	124.4	132.2	137.4	169.0	168.4	171.3	169.6	162.7	169.1	159.3	163.7	176.9	173.5	177.9	176.1	175.0	175.0	175.0	175.0
20	142.9	114.9	109.9	122.6	165.7	163.8	167.5	165.7	130.8	164.7	149.6	148.4	177.0	170.9	178.2	175.4	175.0	175.0	175.0	175.0
30	148.0	121.8	113.0	127.6	156.3	155.6	168.3	160.1	143.0	162.4	143.4	149.6	176.9	170.4	178.3	175.2	175.0	175.0	175.0	175.0
40	152.5	127.7	117.5	132.6	145.4	145.6	159.9	150.3	151.0	150.2	149.1	150.1	176.5	169.9	177.9	174.8	175.0	175.0	175.0	175.0
50	155.3	133.8	121.9	137.0	146.1	140.9	155.1	147.4	157.4	148.8	155.5	153.9	175.9	169.8	177.7	174.5	175.0	175.0	175.0	175.0
60	157.7	140.4	124.9	141.0	148.0	146.6	155.5	150.0	162.5	149.1	160.3	157.3	175.7	169.6	177.4	174.2	175.0	175.0	175.0	175.0
70	160.2	148.0	127.7	145.3	149.3	158.7	156.5	154.8	165.2	149.8	163.2	159.4	175.3	169.5	177.3	174.0	175.0	175.0	175.0	175.0
80	162.2	153.5	131.3	149.0	150.5	162.5	157.8	156.9	167.2	150.5	165.5	161.1	175.3	169.4	177.3	174.0	175.0	175.0	175.0	175.0
90	163.4	157.6	137.0	152.7	151.5	163.5	159.0	158.0	167.8	151.2	167.7	162.2	175.2	169.5	177.4	174.0	175.0	175.0	175.0	175.0
100	165.0	159.9	143.6	156.2	152.5	164.1	160.2	158.9	168.2	152.4	170.0	163.5	175.1	169.4	177.4	174.0	175.0	175.0	175.0	175.0
110	166.2	161.4	150.5	159.4	153.4	164.5	161.4	159.8	168.5	153.6	171.4	164.5	175.1	169.4	177.7	174.1	175.0	175.0	175.0	175.0
120	166.9	162.6	157.3	162.3	154.5	164.9	162.6	160.7	169.0	154.8	172.1	165.3	175.2	169.3	177.9	174.1	175.0	175.0	175.0	175.0

อุณหภูมิที่ระยะทางต่าง ๆ (องศาเซลเซียส)



ตาราง ก-19 ผลอุณหภูมิจากสมการถ่ายเทความร้อนโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับการขึ้นรูป

ภาชนะบรรจุอาหารจากไบโทองกาว

เวลา (นาที)	อุณหภูมิที่ตำแหน่งต่าง ๆ (องศาเซลเซียส)									
	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	X9	X10
0	175.0	175.0	175.0	175.0	175.0	175.0	175.0	175.0	175.0	175.0
10	175.0	146.8	121.9	103.5	93.7	93.7	103.5	121.9	146.8	175.0
20	175.0	152.9	133.4	119.0	111.3	111.3	119.0	133.4	152.9	175.0
30	175.0	153.5	134.6	120.6	113.1	113.1	120.6	134.6	153.5	175.0
40	175.0	163.7	153.7	146.4	142.5	142.5	146.4	153.7	163.7	175.0
50	175.0	168.0	161.8	157.3	154.9	154.9	157.3	161.8	168.0	175.0
60	175.0	168.9	163.5	159.5	157.4	157.4	159.5	163.5	168.9	175.0
70	175.0	172.2	169.8	168.0	167.1	167.1	168.0	169.8	172.2	175.0
80	175.0	173.2	171.7	170.6	170.0	170.0	170.6	171.7	173.2	175.0
90	175.0	173.3	171.8	170.6	170.0	170.0	170.6	171.8	173.3	175.0
100	175.0	174.2	173.5	173.0	172.8	172.8	173.0	173.5	174.2	175.0
110	175.0	174.4	174.0	173.6	173.4	173.4	173.6	174.0	174.4	175.0
120	175.0	174.5	174.1	173.8	173.6	173.6	173.8	174.1	174.5	175.0

ตาราง ก-20 ผลร้อยละความคลาดเคลื่อนจากสมการถ่ายเทความร้อนโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์  
สำหรับการขึ้นรูปภาชนะบรรจุอาหารจากไบโทองกาว

เวลา (นาที)	ร้อยละความคลาดเคลื่อน									
	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	X9	X10
0	0.00	1.63	2.44	1.94	0.29	0.29	0.75	1.57	1.90	0.00
10	0.00	14.75	20.56	35.83	31.82	31.82	34.03	28.16	14.58	0.00
20	0.00	11.06	3.05	12.46	9.17	9.17	17.66	19.62	11.03	0.00
30	0.00	10.47	8.68	14.53	11.37	11.37	17.83	16.91	10.63	0.00
40	0.00	4.27	0.68	3.62	7.47	7.47	2.69	5.00	4.45	0.00
50	0.00	1.52	2.92	12.93	13.03	13.03	1.20	1.14	1.67	0.00
60	0.00	0.79	1.71	13.19	11.63	11.63	0.34	1.65	0.96	0.00
70	0.00	1.33	3.87	12.50	15.00	15.00	2.49	4.91	1.15	0.00
80	0.00	2.05	3.90	8.98	14.06	14.06	2.56	5.37	1.83	0.00
90	0.00	2.23	3.36	5.04	11.36	11.36	1.88	4.79	1.93	0.00
100	0.00	2.81	4.03	3.99	10.63	10.63	2.63	5.14	2.48	0.00
110	0.00	2.93	4.00	3.03	8.83	8.83	2.53	4.71	2.54	0.00
120	0.00	2.97	3.82	2.57	6.97	6.97	2.31	4.05	2.51	0.00

ตาราง ก-21 การวัดค่าอุณหภูมิห้องจากเทอร์โมคัปเปิ้ล (TC = Thermocouple)

เวลา (นาที)	อุณหภูมิที่ตำแหน่งต่าง ๆ (องศาเซลเซียส)													
	TC1	TC2	TC3	TC4	TC5	TC6	TC7	TC8	TC9	TC10	TC11	TC12	TC13	TC14
0	23.4	23.3	23	22.9	23.1	23	22.3	24.9	25.1	25	25.4	24.7	24.7	24.8
5	22.1	22.1	21.6	21.5	21.6	21.4	20.5	25	25.1	25.1	25.5	24.8	24.9	25
10	22.8	22.7	22.1	22	22	21.8	21	24.7	24.8	24.7	25.1	24.6	24.7	24.8
15	22.4	22.3	21.7	21.5	21.6	21.4	20.6	24.4	24.5	24.4	24.8	24.3	24.4	24.5
20	22.1	22	21.4	21.2	21.3	21.1	20.2	24.2	24.2	24.1	24.5	24	24.2	24.3
25	22.6	22.5	21.9	21.7	21.7	21.5	20.7	24.2	24.2	24.1	24.5	24	24.1	24.3
30	22.2	22.2	21.6	21.3	21.3	21.2	20.4	24.2	24.1	24.1	24.4	24	24.1	24.3

ตาราง ก-22 การวัดค่าอุณหภูมิน้ำเย็นจากเทอร์โมคัปเปิ้ล (TC = Thermocouple)

เวลา (นาที)	อุณหภูมิที่ตำแหน่งต่าง ๆ (องศาเซลเซียส)													
	TC1	TC2	TC3	TC4	TC5	TC6	TC7	TC8	TC9	TC10	TC11	TC12	TC13	TC14
0	83.9	83.8	83.1	82.7	82.8	82.5	80.9	84.8	85.3	85.3	85.2	85.3	85.4	85.6
5	80	79.8	79.2	79	78.8	78.7	77	80.8	81.3	81.3	81.2	81.1	81.2	81.4
10	76.2	76	75.5	75.3	74.7	74.9	73.5	77.1	77.5	77.8	77.5	77.5	77.8	77.9
15	72	71.9	71.5	71.1	71.1	70.7	69.3	73	73.4	73.5	73.4	73.5	73.6	73.7
20	70.3	70.1	69.7	69.4	69.3	68.8	67.4	69.7	70.2	70.3	70.1	70.2	70.3	70.4
25	68.2	68	67.6	67.6	67.5	67	65.8	66.5	66.8	66.7	66.9	66.7	66.8	66.7
30	65.8	65.6	65.2	64.9	64.9	64.4	63.2	63.9	64.3	64.3	64.2	64.3	64.3	64.3

ตาราง ก-23 การวัดค่าอุณหภูมิน้ำร้อนจากเทอร์โมคัปเปิ้ล (TC = Thermocouple)

เวลา (นาที)	อุณหภูมิที่ตำแหน่งต่าง ๆ (องศาเซลเซียส)													
	TC1	TC2	TC3	TC4	TC5	TC6	TC7	TC8	TC9	TC10	TC11	TC12	TC13	TC14
0	8.9	8.7	8.3	8	7.9	7.5	7.5	8.3	8.4	8.3	8.4	8.1	8	8
5	8.4	8.3	7.8	7.5	7.4	7	7	8.3	7.8	7.9	8	8.1	8.1	8.1
10	7.2	7.3	6.6	6.2	6.3	6.4	6.4	7	6.4	6.6	6.7	7.1	7	7.1
15	6.8	6.7	6.2	5.9	5.8	5.6	5.7	6.7	6.3	6.3	6.4	6.7	6.7	6.7
20	6.8	6.7	6.2	5.9	5.8	5.6	5.7	6.6	6.2	6.2	6.1	6.4	6.4	6.5
25	6.6	6.5	6	5.7	5.7	5.4	5.4	6.5	6.1	6.1	6.1	6.3	6.4	6.4
30	6.7	6.6	6.2	5.9	5.8	5.6	5.6	6.8	6.3	6.3	6.2	6.5	6.6	6.6

ตาราง ก-24 การวัดค่าอัตราความร้อนของชุดอุปกรณ์ขึ้นรูป

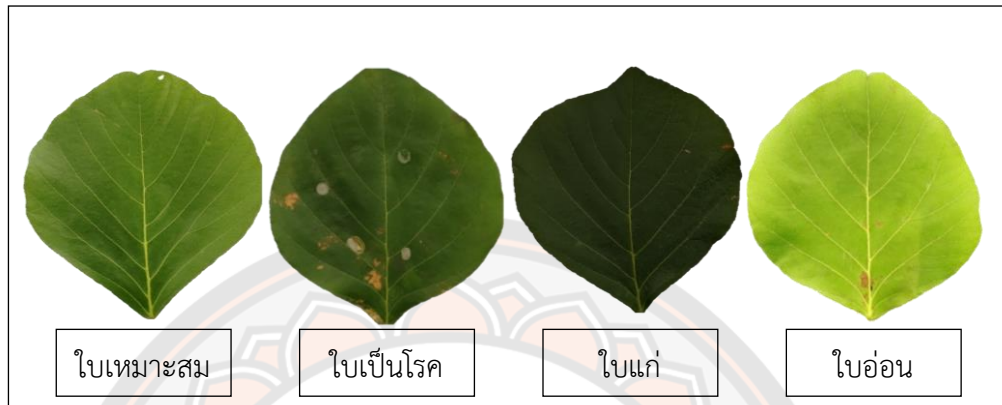
เวลา (นาที)	กระแสไฟฟ้า (แอมป์)	อัตราความร้อน (วัตต์)	อุณหภูมิตำแหน่ง X2 (ระยะทาง 0.02)	อุณหภูมิตำแหน่ง X9 (ระยะทาง 0.02)
0	0.0	0.0	32.3	32.5
1	5.2	1146.8	33.4	33.2
5	5.2	1146.8	44.5	44.4
10	5.2	1152.8	60.3	60.8
15	5.3	1161.1	79.6	83.2
20	5.3	1165.5	104.0	108.2
25	5.3	1164.9	126.5	139.8
30	5.3	1161.1	147.3	149.3
35	3.8	834.9	165.2	165.1
40	1.3	282.7	178.1	176.9
45	0.3	63.3	181.2	177.3
50	2.0	435.6	182.1	173.3
55	2.3	511.0	181.6	172.7
60	1.8	397.7	180.8	176.2
65	1.4	302.0	179.9	176.6
70	2.0	430.7	178.4	174.0
75	2.2	473.0	176.5	173.6
80	1.9	421.3	175.0	175.1
85	2.1	459.8	173.9	175.1
90	2.4	520.3	173.2	173.7
95	2.3	511.0	173.2	173.3
100	2.0	439.5	173.8	174.4
105	1.7	368.5	174.2	175.1
110	1.9	410.3	175.1	175.4
115	2.2	493.4	175.1	175.2
120	2.3	503.3	175.2	175.4



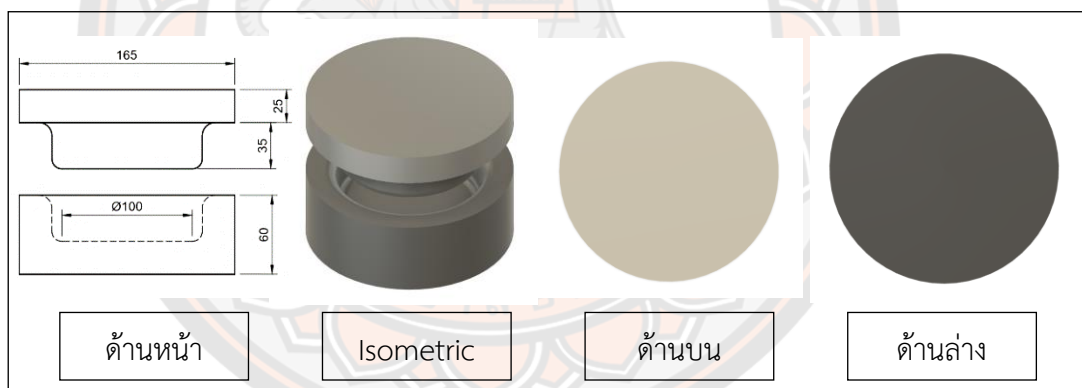
ภาคผนวก ข  
วัสดุและเครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย

มหาวิทยาลัยสุรินทร์

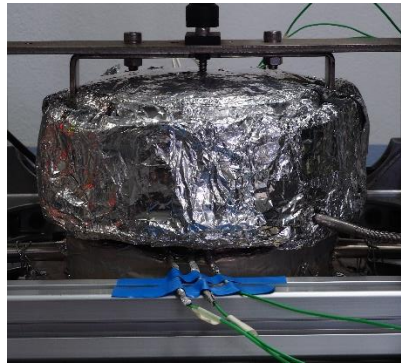
ภาคผนวก ข  
วัสดุและเครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย



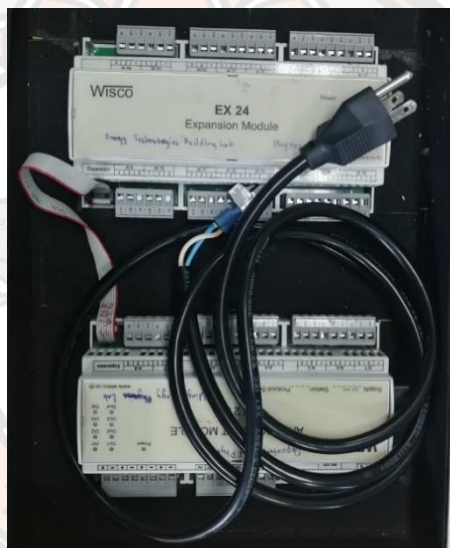
ภาพ ข-1 ใบของกวาวประเภทต่าง ๆ



ภาพ ข-2 ขนาดของแม่พิมพ์ที่ใช้ในการขึ้นรูป



ภาพ ข-3 แม่พิมพ์หุ้มฉนวนที่ใช้ในการขึ้นรูป



ภาพ ข-4 เครื่องมือบันทึกผลอุณหภูมิโดย Data Logger รุ่น Wisco Analog Input Module  
AI210



ภาพ ข-5 เทอร์โมคัปเปิ้ลชนิด K





ภาพ ข-6 เครื่องดิจิตอลเวอร์เนียคาลิปเปอร์



ภาพ ข-7 เครื่องวัดความชื้นแบบดิจิตอล รุ่น PMB 202



ภาพ ข-8 เตาไมโครเวฟ รุ่น R-3901 ยี่ห้อ Sharp



ภาพ ข-9 เครื่องวัดแรงดึง รุ่น 4411 ยี่ห้อ Instron



ภาพ ข-10 เครื่องบอมป์แคลอริมิเตอร์ รุ่น 6200 ยี่ห้อ Parr



ภาพ ข-11 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด รุ่น Leo-1455VP ของบริษัท ZEISS



ภาคผนวก ค

การออกแบบการทดลองและรหัสโปรแกรม

มหาวิทยาลัยพระนคร

## ภาคผนวก ค

## 1) การออกแบบการทดลองโดยใช้วิธีพินผิวผลตอบ

ตาราง ค-1 ตารางการออกแบบการทดลองโดยกำหนดระดับปัจจัยสองระดับ

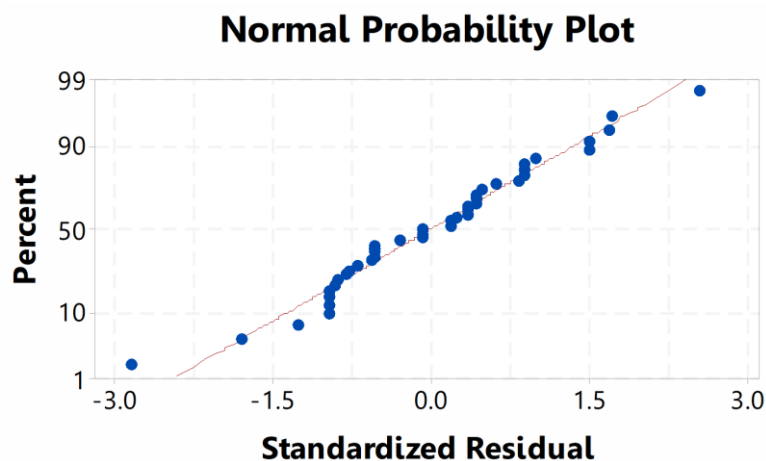
ระดับปัจจัย	รหัส	ตัวแปร				
		-1.41	-1.00	0.00	1.00	1.41
อุณหภูมิ (Temp)	X1	161	165	175	185	189
เวลา (Time)	X2	48	60	90	120	132

ผลการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง

เมื่อทำการทดลองขึ้นรูปภาชนะบรรจุอาหารทั้ง 42 หน่วยการทดลองแล้วจึงนำผลการทดลองที่ได้มาตรวจสอบข้อมูลว่ามีความเหมาะสมหรือไม่ด้วยการวิเคราะห์ความถูกต้องของแบบจำลอง แล้วหากข้อมูลมีความเหมาะสม สามารถนำมาวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจ (R-Square;  $R^2$ ) โดยการตรวจสอบคุณภาพข้อมูลมี 3 ขั้นตอน คือ การตรวจสอบส่วนตกค้างมีการแจกแจงแบบปกติ (Normal probability plot) การตรวจสอบค่าส่วนตกค้างมีความเป็นอิสระต่อกัน (Residuals versus) และ การตรวจสอบค่าความแปรปรวนมีเสถียรภาพ

## 1.1) การตรวจสอบส่วนตกค้างมีการแจกแจงแบบปกติ

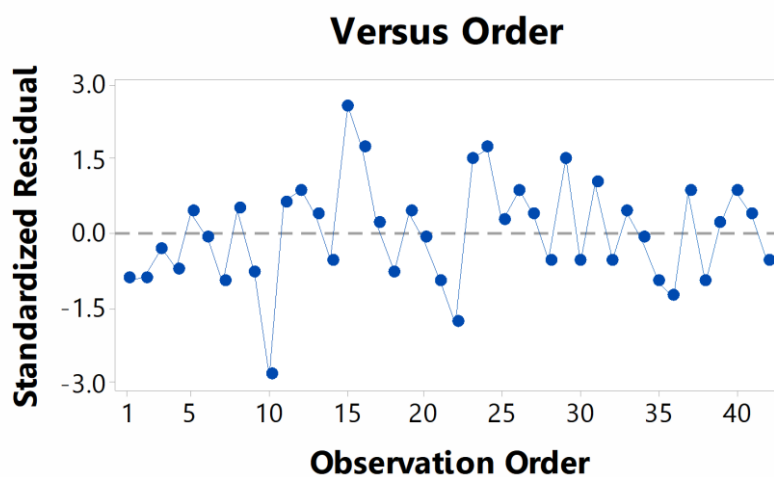
เป็นการตรวจสอบส่วนตกค้างของข้อมูลว่ามีการกระจายแบบแจกแจงปกติหรือไม่ จากการพิจารณาการกระจายของค่าส่วนตกค้างในภาพ ค-1 พบว่า มีการกระจายตัวตามแนวเส้นตรงแสดงให้เห็นว่าส่วนตกค้างจากผลการทดลองของการขึ้นรูปไม่แสดงสิ่งผิดปกติให้เห็นจึงสรุปได้ว่าค่าส่วนตกค้างมีการแจกแจงแบบปกติ



ภาพ ค-1 การกระจายของค่าส่วนตกค้าง

#### 1.2) การตรวจสอบค่าส่วนตกค้างมีความเป็นอิสระต่อกัน

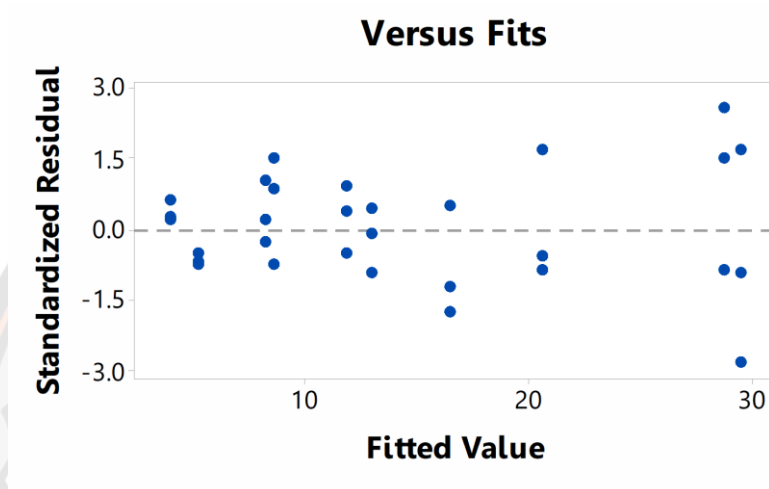
การตรวจสอบความเป็นอิสระของค่าส่วนตกค้างโดยใช้แผนภูมิการกระจายเพื่อสังเกตลักษณะ การกระจายของจุดที่แทนข้อมูลบนแผนภูมิว่ามีรูปแบบอิสระหรือไม่ จากการพิจารณาภาพ ค-2 พบว่าส่วนตกค้างของผลการทดลองของการขึ้นรูปไม่มีรูปแบบที่แน่นอน หรือไม่สามารถประมาณรูปแบบที่แน่นอนได้ มีการกระจายอย่างสม่ำเสมอ แสดงว่าข้อมูลมีความเป็นอิสระ



ภาพ ค-2 การกระจายค่าส่วนตกค้างมีความเป็นอิสระต่อกัน

### 1.3) การตรวจสอบค่าความแปรปรวนมีเสถียรภาพ

การตรวจสอบความเสถียรของความแปรปรวนโดยใช้แผนภูมิการกระจายของส่วนตกค้างในแต่ละระดับของปัจจัย จากการพิจารณาภาพ ค-3 พบว่า ส่วนตกค้างของผลการทดลองของการขึ้นรูปอย่างสม่ำเสมอทั้งทางบวกและทางลบ แสดงว่าข้อมูลมีความเสถียรของความแปรปรวน



ภาพ ค-3 การกระจายส่วนตกค้างในแต่ละระดับของปัจจัย

จากการตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบการทดลองพบว่า ค่าส่วนตกค้างของข้อมูลที่ได้จากการทดลองเป็นไปตามสมมติฐานทั้ง 3 ข้อ คือ ส่วนตกค้างมีการแจกแจงแบบปกติ ค่าส่วนตกค้างมีความเป็นอิสระต่อกัน และค่าความแปรปรวนมีเสถียรภาพ จึงสรุปได้ว่า ข้อมูลที่ได้จากการทดลองชุดนี้มีความถูกต้องและเหมาะสมสำหรับการนำไปวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสลิบและวิเคราะห์ความแปรปรวน

### 1.4) ค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสลิบ

ค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสลิบ เป็นค่าที่ใช้บอกร้อยละการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรตามที่สามารถอธิบายได้ด้วยตัวแปรอิสระในสมการถดถอย จากผลการวิเคราะห์พบว่า ค่า  $R^2$  มีค่าเท่ากับร้อยละ 91.11 แสดงว่าแบบจำลองสามารถนำไปสร้างสมการทำนายเพื่อหาค่าผลตอบสนองได้อย่างถูกต้องและเหมาะสม เมื่อพิจารณาการขาดความเหมาะสมของสมการ (Lack of fit) ในตาราง ค-2 พบว่าค่า P-value ของ Lack of fit มีค่าเท่ากับ 0.031 ซึ่งมีค่าใกล้เคียง 0.05 สามารถสรุปได้ว่าแบบจำลองนี้มีความพอเพียงของตัวแปรในสมการ



ตาราง ค-2 การวิเคราะห์ความแปรปรวน

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	6	2304.64	384.11	59.79	0
Blocks	1	12.29	12.29	1.91	0.175
Linear	2	2141.59	1070.8	166.67	0
Square	2	131.02	65.51	10.2	0
2-Way Interaction	1	19.74	19.74	3.07	0.088
Lack-of-Fit	3	53.85	17.95	3.36	0.031
Pure Error	32	171.01	5.34		
Total	41	2529.51			
R <sup>2</sup>	0.91				
Adjust R <sup>2</sup>	0.9				

5) การสร้างสมการทำนายค่าความชื้นที่ได้จากการขึ้นรูป  
 การสร้างสมการทำนายค่าความชื้นที่ได้จากการขึ้นรูป โดยนำค่าของปัจจัยที่ได้จากการวิเคราะห์สัมประสิทธิ์ของสมการถดถอยของค่าความชื้นที่ได้จากตาราง ง-2 มาเขียนในรูปของสมการดังนี้

$$\% \text{ MC} = 270 - 1.77X_1 - 1.535X_2 + 0.0031X_1^2 + 0.0026X_2^2 + 0.00427X_1X_2 \quad \text{ค.1}$$

ดังนั้นจึงสามารถนำสมการข้างต้นมาใช้ในการทำนายค่าร้อยละความชื้นที่ได้จากการขึ้นรูปได้

**ตาราง ค-4 ผลของค่าร้อยละความชื้นจากการทดลองและการออกแบบการทดลอง**

Run	time (s), $X_1$	Temperature ( $^{\circ}\text{C}$ ), $X_2$	%MC of sample		
			Experimental data	Predicted data	Relative error
1	60	165	26.73	29.06	8.72
2	120	165	7.47	8.49	13.65
3	60	185	18.67	21.2	13.55
4	120	185	3.58	5.77	61.17
5	48	175	23.14	30.97	33.84
6	132	175	5.31	5.51	3.77
7	90	161	17.46	17.76	1.72
8	90	189	6.77	10.28	51.85
9	90	175	13.96	13.38	4.15
10	60	165	34.44	29.06	15.62
11	120	165	8.55	8.49	0.70
12	60	185	24.43	21.2	13.22
13	120	185	3.42	5.77	68.71
14	48	175	33.23	30.97	6.80
15	132	175	4.48	5.51	22.99
16	90	161	12.4	17.76	43.23
17	90	189	11.86	10.28	13.32
18	90	175	12.69	13.38	5.44
19	60	165	32.1	29.06	9.47
20	120	165	10.36	8.49	18.05
21	60	185	19.36	21.2	9.50
22	120	185	3.96	5.77	45.71
23	48	175	27.31	30.97	13.40
24	132	175	4.37	5.51	26.09
15	90	161	13.6	17.76	30.59
26	90	189	10.42	10.28	1.34
27	90	175	14.78	13.38	8.73

## 2) รหัสโปรแกรมจากโปรแกรมสำเร็จรูป

### 2.1) รหัสโปรแกรมแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยวิธีกึ่งของแข็งอนันต์

```

% Programming the Model in MATLAB
% The transient heat conduction using semi-
infinite solid in heat transfer method
% BY SAOWAROT
CHONGCHITWATTHANAKUN
%Physical properties of stainless steel 304A at
200 °C
cp = 530.33 ; % heat capacity (J/kg/K)
rho = 7900 ; % density (kg/m^3)
k = 17.768 ; % bulk thermal conductivity
(W/m/K)
alpha = k/(cp*rho); % thermal diffusivity
(m^2/s)
Ti=30;
Ts=200;
x=[0 :0.01:0.05]; % length of die punch (m)
%define time (sec)
t1=600; %time= 10 min
t2=1200;%time= 20 min
t3=1800;%time= 30 min
t4=2400;%time= 40 min
t5=3000;%time= 50 min
t6=3600;%time= 60 min
%calculated equations
N1=4*alpha*t1;
N2=4*alpha*t2;
N3=4*alpha*t3;
N4=4*alpha*t4;
N5=4*alpha*t5;
N6=4*alpha*t6;
M1=x/sqrt(N1);
M2=x/sqrt(N2);
M3=x/sqrt(N3);
M4=x/sqrt(N4);
M5=x/sqrt(N5);
M6=x/sqrt(N6);
Q1=erf(M1)
Q2=erf(M2)
Q3=erf(M3)
Q4=erf(M4)
Q5=erf(M5)
Q6=erf(M6)
T1=Ts+((Ti-Ts)*Q1);
T2=Ts+((Ti-Ts)*Q2);
T3=Ts+((Ti-Ts)*Q3);
T4=Ts+((Ti-Ts)*Q4);
T5=Ts+((Ti-Ts)*Q5);
T6=Ts+((Ti-Ts)*Q6);
T=[T1;T2;T3;T4;T5;T6];
%Shown temperature value
disp(T)
%plot graph
plot(x,T1, x,T2, x,T3, x,T4,x, T5, x,T6)
title('Temperature distribution of semi-infinite
solid heat equation ')
xlabel('Length (m)')
ylabel('Temperature [°C]')

```

### 2.2) รหัสโปรแกรมแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ของการขึ้นรูปภาชนะบรรจุ

#### อาหารจากใบทองกวาว

```

%Programming the FEM in MATLAB
%The transient heat conduction using finite
element method
%for Characteristics and Numerical Analyses
of Biodegradable Bastard Teak Leaf Bowls
%BY SAOWAROT
CHONGCHITWATTHANAKUN
%including
%Preprocessor involving parameter definition
and initial condition
%Solution involving element integration,
assembly and solution
%Postprocessor involving calculation (based
on solution) and visualization of results
%%1. Preprocessor%%
clear % clear memory from current workspace
clc
%1.1) physical properties of stainless steel
304A at 175 °C
lx = 0.1; % length of spatial domain (m)
cp = 525.08; % heat capacity (J/kg/K)
rho = 7900; % density (kg/m^3)
k = 17.368; % bulk thermal conductivity
(W/m/K)
kappa = k/(cp*rho); % thermal diffusivity
(m^2/s)
L=2257; % latent heat term (J/g)
Ti = 175 ; % temperatures at boundaries (°C)

```

```

%1.2) numerical parameters
%at time range (0 to 30 sec)
dt=0.001; % time step (s)
ntime = 30 ; % number of time steps
nels = 9 ; % total number of elements
nod = 0.9 ; % number of nodes per element
nn = nels+1 % total number of nodes
dx = lx/nels ; % element size
g_coord = [0:dx:lx] ; % spatial domain (1-D
mesh)
%mass loss of water
t1=[0:30:120];
for i=0
    ti=0;
    t1=30;
Mi=(0.156*(0.0038*(ti.^2)-
0.9089*(ti)+63.438))/6; %mass of water at
initial time (g)
M1=(0.156*(0.0038*(t1.^2)-
0.9089*(t1)+63.438))/6; %mass of water at
time range (g)
Q1=(Mi-M1)*L; % heat loss from water and
latent heat term (W)
end

%1.3) define boundary conditions
bcdof = [ 1 nn ] ; % boundary nodes
bcval = [Ti Ti]; % boudary values

%1.4) define connectivity and equation
numbering
g_num(1,:) = [1:nn-1] ;
g_num(2,:) = [2:nn] ;

%1.5) initialise matrices and vectors
ff = zeros(nn,1); % system load vector
b = zeros(nn,1); % system rhs vector
lhs = sparse(nn,nn); % system left hand
side(lhs) matrix
rhs = sparse(nn,nn); % system right hand
side(rhs) matrix
displ1 = zeros(nn,1); % initial temperature (C)

%%2. Solution%%
%2.1) matrix assembly
for iel=1:nels % loop over all elements
    num = g_num(:,iel) ; % retrieve equation
number
    dx = abs(diff(g_coord(num))) ; % length of
element
    seta=((1/0.5)-1);
    MM = (rho*cp*dx/6*dt*seta)*[2 1; 1 2] ;%
mass matrix
    KM = (k/dx)*[1 -1; -1 1];%diffn matrix
    F = (dx*Q1*nn).*[1; 1] ; % load vector

    lhs(num,num) = lhs(num,num) + MM/dt +
KM*5 ; % assemble lhs
    rhs(num,num) = rhs(num,num) + MM/dt -
KM*5 ; % assemble rhs
    ff(num) = ff(num) + (F) ; % assemble load
end % end of element loop
%2.2) time loop
t1=[0:30:120]; % time
for n=0:ntime
    n
    t1 = t1 + dt ; % compute time
    b = (rhs*displ1)+ff; % form rhs vector
%2.3 impose boundary conditions
lhs(bcdof,:) = 0 ; % zero the relevant equations
tmp = spdiags(lhs,0) ; % store diagonal
tmp(bcdof)=1 ; % place 1 on stored-diagonal
lhs=spdiags(tmp,0,lhs) ; % reinsert diagonal
b(bcdof) = bcval ; % set rhs vector
displ1 = lhs\b; % solve system of equations

%%3 Postprocessor%%
%3.1) show T value
T1=displ1

%3.2) plotting
plot(g_coord,displ1)
drawnow
end % end of time loop
%-----%
%at time range (30 to 60 sec)
dt=0.001; % time step (s)
ntime = 60 ; % number of time steps
nels = 9 ; % total number of elements
nod = 0.9 ; % number of nodes per element
nn = nels+1 % total number of nodes
dx = lx/nels ; % element size
g_coord = [0:dx:lx] ; % spatial domain (1-D
mesh)
%mass loss of water
t1=[0:30:120];
for i=0
    t1=30;
    t2=60;
M1=(0.156*(0.0038*(t1.^2)-
0.9089*(t1)+63.438))/6; %mass of water at
time range (g)
M2=(0.156*(0.0038*(t2.^2)-
0.9089*(t2)+63.438))/6; %mass of water at
time range (g)
Q2=(M1-M2)*L; % heat loss from water and
latent heat term (W)
end

%1.3) define boundary conditions
bcdof = [ 1 nn ] ; % boundary nodes
bcval = [Ti Ti]; % boudary values

```

```

%1.4 define connectivity and equation
numbering
g_num(1,:) = [1:nn-1] ;
g_num(2,:) = [2:nn] ;

%1.5 initialise matrices and vectors
ff = zeros(nn,1); % system load vector
b = zeros(nn,1); % system rhs vector
lhs = sparse(nn,nn); % system left hand
side(lhs) matrix
rhs = sparse(nn,nn); % system right hand
side(rhs) matrix
displ2 = zeros(nn,1); % initial temperature (C)

%%2. Solution%%
%2.1 matrix assembly
for iel=1:nels % loop over all elements
    num = g_num(:,iel) ; % retrieve equation
    number
    dx = abs(diff(g_coord(num))) ; % length of
    element
    seta=((1/0.5)-1);
    MM = (rho*cp*dx/6*dt*seta)*[2 1; 1 2] ;%
    mass matrix
    KM = (k/dx)*[1 -1; -1 1];%diffn matrix
    F = (dx*Q2*nn).*[1; 1] ; % load vector
    lhs(num,num) = lhs(num,num) + MM/dt +
    KM*5 ; % assemble lhs
    rhs(num,num) = rhs(num,num) + MM/dt -
    KM*5 ; % assemble rhs
    ff(num) = ff(num) + (F) ; % assemble load
end % end of element loop
%2.2 time loop
t1=[0:30:120]; % time
for n=0:ntime
    n
    t2 = t2 + dt ; % compute time
    b = (rhs*displ2)+ff; % form rhs vector
%2.3 impose boundary conditions
lhs(bcdof,:) = 0 ; % zero the relevant equations
tmp = spdiags(lhs,0) ; % store diagonal
tmp(bcdof)=1 ; % place 1 on stored-diagonal
lhs=spdiags(tmp,0,lhs); % reinsert diagonal
b(bcdof) = bval ; % set rhs vector
displ2 = lhs\b; % solve system of equations

%%3 Postprocessor%%
%3.1 show T value
T2=displ2

%3.2 plotting
plot(g_coord,displ2)
drawnow
end % end of time loop
%-----%
%at time range (60 to 90 sec)

dt=0.001; % time step (s)
ntime = 90 ; % number of time steps
nels = 9 ; % total number of elements
nod = 0.9 ; % number of nodes per element
nn = nels+1 % total number of nodes
dx = lx/nels ; % element size
g_coord = [0:dx:lx] ; % spatial domain (1-D
mesh)
%mass loss of water
t1=[0:30:120];
for i=0
    t2=60;
    t3=90;
M2=(0.156*(0.0038*(t2.^2)-
0.9089*(t2)+63.438))/6;%mass of water at
time range (g)
M3=(0.156*(0.0038*(t3.^2)-
0.9089*(t3)+63.438))/6; %mass of water at
time range (g)
Q3=(M2-M3)*L; % heat loss from water and
latent heat term (W)
end

%1.3 define boundary conditions
bcdof = [ 1 nn ] ; % boundary nodes
bval = [Ti Ti]; % boudary values

%1.4 define connectivity and equation
numbering
g_num(1,:) = [1:nn-1] ;
g_num(2,:) = [2:nn] ;

%1.5 initialise matrices and vectors
ff = zeros(nn,1); % system load vector
b = zeros(nn,1); % system rhs vector
lhs = sparse(nn,nn); % system left hand
side(lhs) matrix
rhs = sparse(nn,nn); % system right hand
side(rhs) matrix
displ3 = zeros(nn,1); % initial temperature (C)

%%2. Solution%%
%2.1 matrix assembly
for iel=1:nels % loop over all elements
    num = g_num(:,iel) ; % retrieve equation
    number
    dx = abs(diff(g_coord(num))) ; % length of
    element
    seta=((1/0.5)-1);
    MM = (rho*cp*dx/6*dt*seta)*[2 1; 1 2] ;%
    mass matrix
    KM = (k/dx)*[1 -1; -1 1];%diffn matrix
    F = (dx*Q3*nn).*[1; 1] ; % load vector
    lhs(num,num) = lhs(num,num) + MM/dt +
    KM*5 ; % assemble lhs

```



```

    rhs(num,num) = rhs(num,num) + MM/dt -
    KM*5 ; % assemble rhs
    ff(num) = ff(num) + (F) ; % assemble load
end % end of element loop
%2.2) time loop
t1=[0:30:120]; % time
for n=0:ntime
    n
    t2 = t2 + dt ; % compute time
    b = (rhs*displ3)+ff; % form rhs vector
%2.3 impose boundary conditions
lhs(bcdof,:) = 0 ; % zero the relevant equations
tmp = spdiags(lhs,0) ; % store diagonal
tmp(bcdof)=1 ; % place 1 on stored-diagonal
lhs=spdiags(tmp,0,lhs); % reinsert diagonal
b(bcdof) = bcval ; % set rhs vector
displ3 = lhs\b; % solve system of equations

%%3 Postprocessor%%
%3.1) show T value
T3=displ3

%3.2) plotting
plot(g_coord,displ3)
drawnow
end % end of time loop
%-----%
%at time range (90 to 120 sec)
dt=0.001; % time step (s)
ntime = 120 ; % number of time steps
nels = 9 ; % total number of elements
nod = 0.9 ; % number of nodes per element
nn = nels+1 % total number of nodes
dx = lx/nels ; % element size
g_coord = [0:dx:lx] ; % spatial domain (1-D
mesh)
%mass loss of water
t1=[0:30:120];
for i=0
    t3=90;
    t4=120;
M3=(0.156*(0.0038*(t3.^2)-
0.9089*(t3)+63.438))/6;
M4=(0.156*(0.0038*(t4.^2)-
0.9089*(t4)+63.438))/6;
Q4=(M3-M4)*L; % heat loss from water and
latent heat term (W)
end

%1.3) define boundary conditions
bcdof = [ 1 nn ] ; % boundary nodes
bcval = [Ti Ti]; % boudary values

%1.4) define connectivity and equation
numbering

    g_num(1,:) = [1:nn-1] ;
    g_num(2,:) = [2:nn] ;

%1.5) initialise matrices and vectors
ff = zeros(nn,1); % system load vector
b = zeros(nn,1); % system rhs vector
lhs = sparse(nn,nn); % system left hand
side(lhs) matrix
rhs = sparse(nn,nn); % system right hand
side(rhs) matrix
displ4 = zeros(nn,1); % initial temperature (C)

%%2. Solution%%
%2.1) matrix assembly
for iel=1:nels % loop over all elements
    num = g_num(:,iel) ; % retrieve equation
number
    dx = abs(diff(g_coord(num))) ; % length of
element
    seta=((1/0.5)-1);
    MM = (rho*cp*dx/6*dt*seta)*[2 1; 1 2] ;%
mass matrix
    KM = (k/dx)*[1 -1; -1 1];%diffn matrix
    F = (dx*Q4*nn).*[1; 1] ; % load vector
    lhs(num,num) = lhs(num,num) + MM/dt +
    KM*5 ; % assemble lhs
    rhs(num,num) = rhs(num,num) + MM/dt -
    KM*5 ; % assemble rhs
    ff(num) = ff(num) + (F) ; % assemble load
end % end of element loop
%2.2) time loop
t1=[0:30:120]; % time
for n=0:ntime
    n
    t2 = t2 + dt ; % compute time
    b = (rhs*displ4)+ff; % form rhs vector
%2.3 impose boundary conditions
lhs(bcdof,:) = 0 ; % zero the relevant equations
tmp = spdiags(lhs,0) ; % store diagonal
tmp(bcdof)=1 ; % place 1 on stored-diagonal
lhs=spdiags(tmp,0,lhs); % reinsert diagonal
b(bcdof) = bcval ; % set rhs vector
displ4= lhs\b; % solve system of equations

%%3 Postprocessor%%
%3.1) show T value
T4=displ4

%3.2) plotting
plot(g_coord,displ4)
drawnow
end % end of time loop
%-----%

```





ภาคผนวก ง  
การคำนวณที่เกี่ยวข้อง

มหาวิทยาลัยสุรินทร์

ภาคผนวก ง  
การคำนวณที่เกี่ยวข้อง

- 1) สมการคำนวณค่าความผิดพลาดสัมพัทธ์ หรือ ร้อยละความคลาดเคลื่อน

$$\% \text{Relative error} = \left[ \frac{T_{eq} - T_{exp}}{T_{exp}} \right] \times 100 \quad \text{ง.1}$$

เมื่อ  $T_{exp}$  คือ อุณหภูมิที่ได้จากการวัดโดยการทดลอง ( $^{\circ}\text{C}$ )

$T_{eq}$  คือ อุณหภูมิที่ได้จากสมการนำความร้อน ( $^{\circ}\text{C}$ )

- 2) สมการคำนวณค่าความชื้น (Moisture content; MC)

$$\% \text{MC} = \frac{(M_{initial} - M_{dry})}{M_{initial}} \times 100 \quad \text{ง.2}$$

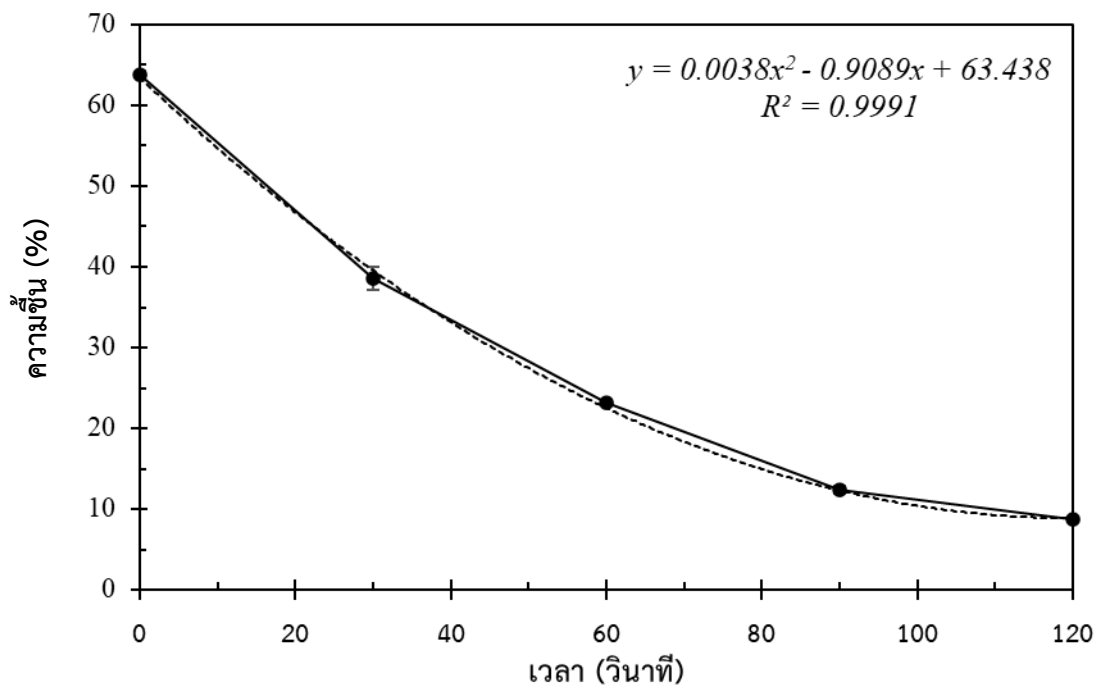
เมื่อ  $MC$  คือ ค่าปริมาณความชื้นของใบไม้ (%)

$M_{initial}$  คือ ค่าน้ำหนักของใบไม้เริ่มต้นหรือใบไม้สดธรรมชาติ (g)

$M_{dry}$  คือ ค่าน้ำหนักของใบไม้ในสภาพแห้ง (g)

- 3) สมการคำนวณปริมาณน้ำที่คงเหลือจากค่าความชื้นของใบทองกวาวในการขึ้นรูป

$$M = 0.156 (0.038x^2 - 0.9089x + 63.438) \quad \text{ง.3}$$



ภาพที่ ง.1 ปริมาณค่าร้อยละความชื้นจากการขึ้นรูปของใบทองกวาว

4) คุณสมบัติทางกายภาพของแม่พิมพ์ชนิดสแตนเลส สตีล 304A

อุณหภูมิ (°C)	ค่าคงที่		
	k (W m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> )	cp (J kg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> )	ρ (kg m <sup>-3</sup> )
113	16.32	507.09	7900
175	17.368	525.08	7900
200	17.768	530.33	7900

5) คุณสมบัติการกลายเป็นไอของน้ำ จากความร้อนแฝงน้ำมีค่าเท่ากับ 2257 [J kg<sup>-1</sup>K<sup>-1</sup>]