

การศึกษากระบวนการลากขึ้นรูปภาບหมากสง



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมวัสดุ
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2565

STUDY OF DRAWING PROCESS OF BETEL PALM SHEATH



CHAYALOP CHOONAMCHAI

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the
Degree of Master of Engineering in Materials Engineering
Suranaree University of Technology
Academic Year 2022


การศึกษากระบวนการลากขึ้นรูปกาบหมากสง

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นักวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตาม
หลักสูตรปริญญาโทบริหารธุรกิจ

คณะกรรมการสอนวิทยานิพนธ์


.....
(ผศ. ดร.ฐาปนีย์ พิชรวิชญ์)

ประธานกรรมการ


.....
(ผศ. ดร.ภูษิต มิตรสมหวัง)


กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)


.....
(ผศ. ดร.เสกสรร ไชยจิตต์)

กรรมการ


.....
(รศ. ดร.ตติยา ตรงสถิตกุล)

กรรมการ


.....
(ผศ. ดร.ปัญญา บัวสมบุรา)

กรรมการ


.....
(รศ. ดร.ฉัตรชัย โชติษฐยางกูร)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและประกันคุณภาพ


.....
(รศ. ดร.พรศิริ จงกล)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

ชยารพ ชูนามชัย : การศึกษากระบวนการลากขึ้นรูปกาบหมากสง (STUDY OF DRAWING PROCESS OF BETEL PALM SHEATH) อาจารย์ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ภูษิต มิตรสมหวัง, 81 หน้า.

คำสำคัญ: บรรจุภัณฑ์จากธรรมชาติ กาบหมากสง สมบัติทางกล การลากขึ้นรูป ไฟไนต์เอลิเมนต์

เนื่องจากปัญหาขยะพลาสติกจากบรรจุภัณฑ์ที่มีความรุนแรงอย่างมาก ปัจจุบัน จึงมีการนำวัสดุจากธรรมชาติที่สามารถย่อยสลายทางชีวภาพได้ เช่น ใบบัว ใบตอง กาบหมากสง มาผลิตเป็นบรรจุภัณฑ์ทดแทนบรรจุภัณฑ์จากพลาสติก กาบหมากสงเป็นวัสดุธรรมชาติชนิดหนึ่งที่เหมาะสมต่อการนำมาผลิตเป็นบรรจุภัณฑ์ใส่อาหาร เนื่องจากมีความแข็งแรงสูง มีความเสถียรขณะใช้งาน ไม่มีกลิ่นไม่พึงประสงค์ และยังมีลักษณะเป็นแผ่น ทำให้สามารถขึ้นรูปได้ด้วยกระบวนการขึ้นรูปวัสดุแผ่นทั่วไป งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาสมบัติทางกายภาพ สมบัติทางกล ของกาบหมากสง และการขึ้นรูปบรรจุภัณฑ์กาบหมากสงด้วยกระบวนการลากขึ้นรูป ในการศึกษาสมบัติทางกายภาพ ผู้วิจัยได้ทำการเตรียมชิ้นงานกาบหมากสงและวัดความหนาเพื่อตรวจสอบการกระจายตัวของค่าความหนาภายในกาบหมาก โดยจากผลการวัดพบว่ากาบหมากสงมีความหนาที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญในแต่ละบริเวณภายในกาบ สำหรับการศึกษาสมบัติทางกลของกาบหมากสงถูกศึกษาผ่านการทดสอบแรงดึง ค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดและค่าการยืดตัวสูงสุดของกาบหมากสงขึ้นอยู่กับทิศทางการรับแรงดึงของกาบหมากสง นอกจากนี้ยังพบว่ากาบหมากสงมีพฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงรูปร่างแบบยืดหยุ่นและแบบถาวร เพื่อศึกษาการลากขึ้นรูปกาบหมากสง ผู้วิจัยได้ออกแบบ ผลิตชุดแม่พิมพ์ลากขึ้นรูป และทำการทดสอบการลากขึ้นรูปกาบหมากสงโดยสังเกตผลของตัวแปรการขึ้นรูป ได้แก่ ความชื้นของกาบหมากสง ความเร็วการลากขึ้นรูป อุณหภูมิแม่พิมพ์ และแรงกดยึดกาบหมากสง ในขณะที่ลากขึ้นรูป ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าตัวแปรการขึ้นรูปดังกล่าวส่งผลต่อพฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของกาบหมากสง แรงต้านการลากขึ้นรูป และข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นบนชิ้นงานหลังการขึ้นรูป ข้อบกพร่องที่พบในชิ้นงานลากขึ้นรูปคือการฉีกขาดของชิ้นงาน ณ บริเวณด้านล่างหรือด้านข้าง ซึ่งจากผลการทดลองและการจำลองกระบวนการลากขึ้นรูปด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ชี้ให้เห็นว่า การฉีกขาดของกาบหมากสงน่าจะมีความสัมพันธ์กับความชื้นของกาบหมากสงขณะขึ้นรูป และความเค้นแรงดึงภายในกาบหมากสงเนื่องจากการลากขึ้นรูป

สาขาวิชา วิศวกรรมโลหการ

ปีการศึกษา 2565

ลายมือชื่อนักศึกษา.....

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....

ชยารพ ชูนามชัย

๑๐๓ ๒๕๖๕

CHAYALOP CHOONAMCHAI : STUDY OF DRAWING PROCESS OF BETEL PALM SHEATH. THESIS ADVISOR : ASST. PROF. PUSIT MITSOMWANG, Ph.D., 81 PP.

Keyword: PACKAGING/BETELPALM/MACHANICAL PROPERTIES/DRAWING PROCESS/
FINITE ELEMENT

Due to severe problems of plastic packaging waste, recently, natural biodegradable materials such as lotus leaf, banana leaf and betel palm sheath are applied for making packaging instead of plastic packaging. The betel palm sheath is one of suitable materials for making food packaging because of its high strength, stable at service conditions and no undesirable smell. Moreover, it has a sheet form. Thus, it can be formed by typical sheet material forming processes. This research was carried out aiming to study physical, mechanical properties of betel palm sheath and its forming by drawing process. For the physical property study, betel palm sheaths were prepared and subjected to thickness measurement. The results showed that there was a significant variation of the thickness in a palm sheath. The tensile testing was conducted to investigate mechanical properties of the betel palm sheath. It was found that the mechanical properties, i.e., the maximum load resistance and the elongation at break strongly depended on the direction of the applied load. The deformation behavior of the palm sheath consisted of the elastic and the plastic deformation. For the study of the drawing, a drawing die set was designed, manufactured, and used for the palm sheath drawing test. The drawing parameter, moisture content of palm sheath, drawing speed, die temperature and palm sheath holding force were varied and investigated. Drawing results revealed that the parameters affected deformation characteristics of the palm sheath, drawing load resistance and workpiece defects. The main defect found is tearing at the bottom or the wall of workpieces. Experimental and finite element method simulation results indicated that the tearing seemed to depend on the moisture content of the palm sheath and the tensile stress occurred in the palm sheath due to the drawing.

School of Metallurgical
Academic Year 2022

Student's Signature.....ชยาพล ชูอนามชัย
Advisor's Signature.....ปฐม มิตสมwang

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี อันเนื่องมาจากการได้รับความช่วยเหลือเป็นอย่างดีทั้งในด้านวิชาการ และในส่วนของการทำงานจากบุคคลต่าง ๆ ซึ่งผู้วิจัยขอขอบพระคุณบุคคลต่าง ๆ ซึ่งได้แก่

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ภูษิต มิตรสมหวัง ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ผู้ให้โอกาสทางการศึกษา และเป็นผู้ให้คำแนะนำรวมถึงคำปรึกษาที่มีประโยชน์ยิ่งในงานวิจัยตลอดจนการทำวิทยานิพนธ์เล่มนี้จนเสร็จสมบูรณ์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รัตน์ บริสุทธิ์กุล ผู้ซึ่งให้คำแนะนำปรึกษาความรู้ทางวิชาการอันเป็นประโยชน์ต่อการท้าวิจัย

สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ผู้จัดทำขอมอบให้กับบิดา มารดา ซึ่งเป็นที่รักและเคารพยิ่ง ตลอดจนครูอาจารย์ที่เคารพทุกท่าน ที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้และถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดีให้แก่ผู้จัดทำตลอดมา จนทำให้ประสบความสำเร็จในชีวิต

ชยารพ ชูนามชัย

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูป.....	ซ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ.....	ฎ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย.....	6
1.3 สมมุติฐานการวิจัย.....	7
1.4 ขอบเขตการศึกษา.....	7
2 ปรัชญ่วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	8
2.1 หมากสง และกาบหมาก.....	8
2.2 กระบวนการลากขึ้นรูป.....	9
2.2.1 พื้นฐานกระบวนการลากขึ้นรูป.....	9
2.2.2 ชนิดของฮีตเตอร์และระบบควบคุมอุณหภูมิ.....	13
2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	16
3 วิธีการทดลอง.....	26
3.1 วัสดุ อุปกรณ์ และเครื่องมือ.....	26
3.1.1 วัสดุที่ใช้ในการศึกษา.....	26
3.1.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการศึกษา.....	26
3.2 การเตรียมชิ้นงานตรวจสอบสมบัติทางกายภาพ ทดสอบสมบัติทางกล และการทดสอบลากขึ้นรูป.....	29
3.2.1 การเตรียมชิ้นงานตรวจสอบสมบัติทางกายภาพ.....	29

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.2.2 การเตรียมชิ้นงานทดสอบสมบัติทางกล	29
3.2.3 การเตรียมชิ้นงานทดสอบการลากขึ้นรูป.....	30
3.3 การสร้างชุดแม่พิมพ์ลากขึ้นรูป	31
3.4 การตรวจสอบสมบัติทางกายภาพ ทดสอบสมบัติทางกล และ การลากขึ้นรูป.....	34
3.4.1 การตรวจสอบสมบัติทางกายภาพ	34
3.4.2 การทดสอบสมบัติทางกล.....	34
3.4.3 การลากขึ้นรูปกาบหมากสง	35
4 สมบัติทางกายภาพและสมบัติทางกลของกาบหมากสง	36
4.1 ความหนาและโครงสร้างภายในกาบหมากสง.....	36
4.1.1 ความหนาของกาบหมากสง	36
4.1.2 โครงสร้างภายในของกาบหมากสง.....	39
4.2 สมบัติทางกลของกาบหมากสง.....	40
4.2.1 สมบัติทางกลในทิศทางต่าง ๆ ของกาบหมากสง	40
4.2.2 สมบัติทางกลของกาบหมากสงต่างกบ.....	42
4.2.3 พฤติกรรมการเปลี่ยนรูปของกาบหมากสง	44
5 สมบัติการลากขึ้นรูป.....	46
5.1 การให้ความร้อนแก่แม่พิมพ์.....	46
5.2 อิทธิพลตัวแปรการลากขึ้นรูป	48
5.2.1 ผลของความขึ้นเริ่มต้นของกาบหมากสง	48
5.2.2 ผลของความเร็วกการลากขึ้นรูป.....	51
5.2.3 ผลของอุณหภูมิแม่พิมพ์ลากขึ้นรูป	55
5.2.4 ผลของแรงกดยึดของกาบหมากสง.....	59
6 การจำลองด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์	63
6.1 โปรแกรมและโมเดลไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับการจำลอง	63
6.2 โมเดลวัสดุสำหรับกาบหมากสง.....	64
6.3 ผลการจำลองความเค้นด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์.....	67
7 สรุป.....	70

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

รายการอ้างอิง.....	71
ภาคผนวก.....	73
ประวัติผู้เขียน.....	81



สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1	ตัวแปรสำหรับการศึกษากระบวนการลากขึ้นรูปกระดาษโดยการทดลองและการจำลอง..... 20
3.1	รายการอุปกรณ์ที่ใช้ในการสร้างชุดควบคุมอุณหภูมิ 33
3.2	ตัวแปรการลากขึ้นรูปกาบหมากสง..... 35
6.1	สมบัติในช่วงการเปลี่ยนแปลงรูปร่างแบบยืดหยุ่นของกาบหมาก 66



สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1	อัตราการย่อยขยะแต่ละชนิด1
1.2	ปริมาณขยะพลาสติกแต่ละประเภทในแต่ละปีตั้งแต่ปี 1950 ถึง 20152
1.3	ผลิตภัณฑ์จากพลาสติกที่จะถูกยกเลิกใช้งานในประเทศไทยและนโยบาย การห้ามใช้พลาสติกแบบครั้งเดียวทิ้งในประเทศแคนาดา.....2
1.4	บรรจุภัณฑ์จากธรรมชาติ (a) ใบตอง, (b) ใบส้ก, (c) ใบจาก, (d) กาบหมาก.....3
1.5	กระบวนการผลิตบรรจุภัณฑ์จากหมากสง6
1.6	ข้อบกพร่องจากกระบวนการลากขึ้นรูป6
2.1	ตัวอย่างหมากสายพันธุ์ต่าง ๆ ในประเทศไทย.....8
2.2	โครงสร้างของพีชใบเลี้ยงเดี่ยว9
2.3	ส่วนประกอบของชุดแม่พิมพ์ลากขึ้นรูปวัสดุแผ่น 10
2.4	ลำดับขั้นตอนการลากขึ้นรูปวัสดุแผ่น..... 10
2.5	แรงกดแม่พิมพ์บนในกระบวนการลากขึ้นรูป..... 11
2.6	ความเค้นในวัสดุแผ่นที่กำลังถูกลากขึ้นรูป..... 12
2.7	ข้อบกพร่องบนบรรจุภัณฑ์กาบหมากสง..... 12
2.8	Cartridge Heater แบบ High Density 14
2.9	Cartridge Heater แบบ Low Density 14
2.10	หัววัดอุณหภูมิ Type k..... 15
2.11	เครื่องควบคุมอุณหภูมิ 16
2.12	(a) แรง ณ จุดแตกหักและระยะตัดสูงสุดของชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบภาพ (b) ภายโครงสร้างวัสดุเชิงประกอบหลังการทดสอบแรงดึงแสดง 17
2.13	กราฟการทดสอบแรงดึงชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบ 17
2.14	ผลการทดสอบแรงดึงสำหรับชิ้นงานทดสอบที่ผ่านการแช่น้ำด้วยระยะเวลาต่าง (a) ที่มุม 0 องศา (b) ที่มุม 90 องศา และ (c) ที่มุม 45 องศา ที่ทำมุมกับแรงดึง 18
2.15	กราฟเปรียบเทียบแรงกระทำกับปริมาณไฟเบอร์..... 19
2.16	กราฟเปรียบเทียบการตัด กับปริมาณไฟเบอร์..... 19
2.17	กราฟเปรียบเทียบความแข็งแรงดึงกับปริมาณไฟเบอร์ 20

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.18 แรงต้านการขึ้นรูปชิ้นงานกระดาษเมื่อ (a) เปลี่ยนแปลงแรงกดยึดชิ้นงาน (b) เปลี่ยนแปลงอุณหภูมิชิ้นงาน (c) แรงต้านการลากขึ้นรูป เมื่อเปลี่ยนแปลง ความหนา	21
2.19 (a) แผนภาพแม่พิมพ์ที่ใช้ในการทดลองลากขึ้นรูป (b) แผนผังระบบแรงดัน แม่พิมพ์ล่าง	22
2.20 แรงต้านการขึ้นรูปและระยะกดลึกที่ความดันของแรงดันลมที่ 1 4 และ 10 เมกะปาสคาล	23
2.21 แรงต้านการขึ้นรูปและระยะกดลึกที่ รัศมีแม่พิมพ์ 0.1 และ 0.2 มิลลิเมตร (a) 1 เมกะปาสคาล (b) 4 เมกะปาสคาล และ (c) 10 เมกะปาสคาล	23
2.22 แรงต้านการขึ้นรูปกับระยะการขึ้นรูปที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ 90 100 130 170 องศาเซลเซียส.....	24
2.23 รอยย่นในชิ้นงานที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส	25
3.1 ตัวอย่างกาบหมากสงที่นำมาเป็นวัสดุในการทดลอง	26
3.2 ขนาดและแบบสำหรับตัดชิ้นงานทดสอบแรงดึง	27
3.3 แบบสำหรับตัดชิ้นงานทดสอบลากขึ้นรูปขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มิลลิเมตร.....	27
3.4 ชิ้นงานทดสอบความหนาทั้งหมด 3 ชิ้น	29
3.5 ตัวอย่างชิ้นงานทดสอบแรงดึง.....	30
3.6 ตัวอย่างชิ้นงานทดสอบการลากขึ้นรูป.....	30
3.7 แสดงตัวอย่างชุดแม่พิมพ์สำหรับทดสอบการลากขึ้นรูป.....	31
3.8 ตำแหน่งของอุปกรณ์ให้ความร้อน.....	32
3.9 ตำแหน่งเทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple) และขนาดของแม่พิมพ์บน และแม่พิมพ์ล่าง.....	32
3.10 แสดงระยะห่างระหว่างแม่พิมพ์บนและแม่พิมพ์ล่างหลังจากลากขึ้นรูปเสร็จ	33
3.11 แผนภาพวงจรไฟฟ้าภายในกล่องควบคุมอุณหภูมิ	34
3.12 ชุดอุปกรณ์การทดสอบสมบัติทางกลกาบหมากสง	35
4.1 ตัวอย่างและวิธีการกำหนดจุดวัดความหนาชิ้นงาน.....	36
4.2 ความหนาของกาบหมากสงกบที่ 1.....	37

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.3 ความหนาของกาบหมากสงกบที่ 2.....	38
4.4 ความหนาของกาบหมากสงกบที่ 3.....	38
4.5 ภาพถ่ายแนวตัดขวางกาบหมากสงโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบ ส่องกราด.....	39
4.6 ภาพถ่ายที่กำล้งสูงโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (a) ภาพถ่าย บริเวณด้านบนของกาบหมากสง.....	39
4.7 ภาพตัวอย่างการตัดทดสอบแรงดึงในทิศทาง 0 45 90 องศาในโซนติดก้านใบ โซนกลางกาบหมากสง และโซนติดลำต้น.....	40
4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงต้านการดึงและระยะยึดตัวของกาบหมากสงในแต่ละโซน.....	41
4.9 ขอบของรอยแตกจากการทดสอบแรงดึงในบริเวณติดก้านใบ กลางใบ และติดลำต้น ที่มุม 0 45 90 องศา.....	42
4.10 ตำแหน่งในการตัดชิ้นงานทดสอบแรงดึงต่างกบ.....	43
4.11 แรงดึงต่างกบในแต่ละโซน.....	43
4.12 กราฟแรงดึงที่ระยะยึด 0.2 – 1.6 มิลลิเมตร.....	45
4.13 ภาพถ่ายชิ้นงานหลังทดสอบแรงดึงที่ระยะยึด 0.2 – 1.6 มิลลิเมตร.....	45
5.1 เส้นอุณหภูมิจของแม่พิมพ์เทียบกับเวลาที่อุณหภูมิ 140 องศาเซลเซียส.....	46
5.2 เส้นอุณหภูมิจของแม่พิมพ์เทียบกับเวลาที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส.....	47
5.3 แรงต้านการลากขึ้นรูปกับระยะกดล็กชิ้นงานที่ความขึ้น 25% 47% และ 75%.....	48
5.4 แรงต้านการลากขึ้นรูปกับระยะกดล็กชิ้นงานที่ความขึ้น 25% 47% และ 75%.....	49
5.5 ข้อบกพร่องของชิ้นงานที่ความขึ้น 28% (a) 47%และ 75% (b).....	50
5.6 แสดงข้อบกพร่องของชิ้นงานที่บริเวณด้านหน้าของชิ้นงานที่ความขึ้น 28% 47% 75%	50
5.7 แสดงข้อบกพร่องของชิ้นงานที่บริเวณข้างล่างของชิ้นงานที่ความขึ้น 28% 47% 75%	51
5.8 กราฟแรงต้านการลากขึ้นรูปกับระยะกดล็กชิ้นงานที่ความเร็ว 100 200 300 มิลลิเมตรต่อนาที.....	53
5.9 แรงต้านการลากขึ้นรูปกับระยะกดล็กชิ้นงานที่ความเร็วหัวกด 100 200 300 มิลลิเมตรต่อนาทีความหนาของกาบหมากสงกบที่ 2.....	53
5.10 แสดงข้อบกพร่องของชิ้นงานที่บริเวณด้านล่างของชิ้นงานที่ความเร็วหัวกด 100 200 300 มิลลิเมตรต่อนาทีความหนาของกาบหมากสงกบที่ 2.....	54

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.12 แสดงข้อบกพร่องของชิ้นงานที่บริเวณด้านข้างของชิ้นงานที่ความเร็วหัวกด 100 200 300 มิลลิเมตรต่อหน้าที่ความหนาของกาบหมากสงกาบที่ 2	55
5.13 กราฟแรงต้านการลากขึ้นรูปกับระยะกดลึกลงงานที่อุณหภูมิ 140 180 220 องศาเซลเซียส.....	56
5.14 แรงต้านการลากขึ้นรูปกับระยะกดลึกลงงานที่อุณหภูมิ 140 180 220 องศาเซลเซียส.....	57
5.15 ข้อบกพร่องของชิ้นงานที่บริเวณด้านล่างของชิ้นงานที่อุณหภูมิ 140 180 และ 220 องศาเซลเซียส	57
5.16 ข้อบกพร่องของชิ้นงานที่บริเวณด้านหน้าของชิ้นงานที่อุณหภูมิ 180 และ 220 องศาเซลเซียส.....	58
5.17 ข้อบกพร่องของชิ้นงานที่บริเวณด้านข้างของชิ้นงานที่อุณหภูมิ 140 180 และ 220 องศาเซลเซียส.....	58
5.18 กราฟแรงต้านการลากขึ้นรูปกับระยะกดลึกลงงานที่แรงกดสปริง 1.75 2.00 และ 2.34 นิวตันต่อมิลลิเมตร	60
5.19 กราฟแรงกดสูงสุดที่แรงกดสปริง 1.75 2.00 และ 2.34 นิวตันต่อมิลลิเมตร	60
5.20 แผนภาพแสดงทิศทางการไหลตัวของกาบหมากสง	61
5.21 แสดงข้อบกพร่องของชิ้นงานที่บริเวณด้านล่างของชิ้นงานที่แรงกดสปริง 1.75 2.00 2.34 นิวตันต่อมิลลิเมตร	61
5.22 แสดงข้อบกพร่องของชิ้นงานที่บริเวณด้านหน้าของชิ้นงานที่แรงกดสปริง 1.75 2.00 2.34 นิวตันต่อมิลลิเมตร	62
5.23 แสดงข้อบกพร่องของชิ้นงานที่บริเวณด้านข้างของชิ้นงานที่แรงกดสปริง 1.75 2.00 2.34 นิวตันต่อมิลลิเมตร	62
6.1 โมเดล 3 มิติสำหรับการจำลองกระบวนการลากขึ้นรูป.....	64
6.2 ภาพจำลองการระบุทิศทางในแกน xyz.....	64
6.3 สมบัติกาบหมากสงช่วงที่มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างแบบถาวร	66
6.4 การกระจายตัวของความเค้นหลักสูงสุดที่ระยะกดแม่พิมพ์บนเท่ากับ 1.2 มิลลิเมตร	67
6.5 การกระจายตัวของความเค้นหลักสูงสุดที่ระยะกดแม่พิมพ์บนเท่ากับ 1.8 มิลลิเมตร	67
6.6 การกระจายตัวของความเค้นหลักสูงสุดที่ระยะกดแม่พิมพ์บนเท่ากับ 2.4 มิลลิเมตร	68
6.7 การกระจายตัวของความเค้นหลักสูงสุดที่ระยะกดแม่พิมพ์บนเท่ากับ 3 มิลลิเมตร	68

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

Punch	=	แม่พิมพ์บน
Die	=	แม่พิมพ์ล่าง
Blank Holder	=	แป้นกดยึดชิ้นงาน
F_p	=	แรงที่ใช้กดแม่พิมพ์บนของกระบวนการลากขึ้นรูป
d	=	เส้นผ่าศูนย์กลางแม่พิมพ์บน
T	=	ความหนาของแผ่นชิ้นงานในการขึ้นรูป
UTS	=	ความเค้นแรงดึงของวัสดุ
D	=	เส้นผ่านศูนย์กลางของชิ้นงานเริ่มต้น
F_R	=	แรงกดยึดชิ้นงาน
D	=	เส้นผ่านศูนย์กลางแม่พิมพ์บน(mm.)
p	=	ความดันแป้นกดยึดชิ้นงาน (N/mm ² .)
(σ_n)	=	ความเค้นในแนวตั้งฉากทิศทางการลากขึ้นรูป
(σ_t)	=	ความเค้นในแนวเส้นรอบวงของผลิตภัณฑ์
(σ_r)	=	ความเค้นในแนวรัศมีของผลิตภัณฑ์

บทที่ 1

บทนำ

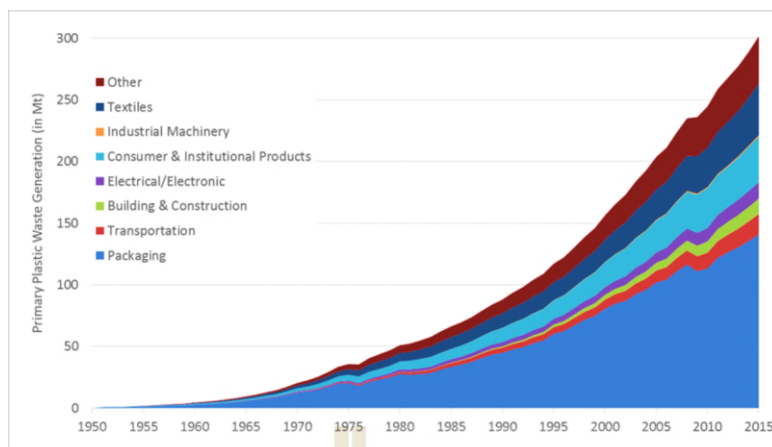
1.1 ที่มาและความสำคัญ

เนื่องจากในปัจจุบันมีการใช้พลาสติกเพิ่มขึ้นเป็นจำนวนมากและพลาสติกที่ใช้เป็นบรรจุภัณฑ์ได้กลายเป็นขยะพลาสติกซึ่งขยะพลาสติกเหล่านั้นต้องใช้ระยะเวลาในการย่อยสลายนานมาก โดยอาจนานมากกว่า 500 ปี หรือไม่มีวันย่อยสลาย ซึ่งต่างจากกระป๋องน้ำอัดลมใช้เวลาย่อยสลายมากกว่า 80 ปี และกล่องนมเคลือบพลาสติกใช้ระยะเวลาในการย่อยสลาย 5 ปี และไปไม้ใช้เวลาในการย่อยสลาย 1 ปี ดังแสดงในรูปที่ 1.1 [1]



รูปที่ 1.1 อัตราการย่อยสลายขยะแต่ละชนิด [1]

เนื่องจากระยะเวลาในการย่อยสลายของขยะพลาสติกนานมากจึงทำให้ปริมาณขยะเพิ่มขึ้นในทุกปีจะเห็นได้ในรูปที่ 1.2 จากรูปเห็นได้ว่าปริมาณขยะทุกชนิดที่สะสมในปี 1980 มีปริมาณขยะสะสมอยู่ที่ 50 ล้านเมตริกตัน และในปี 2015 มีปริมาณขยะทุกชนิดสะสมถึง 300 ล้านเมตริกตัน เมื่อพิจารณาปริมาณขยะพลาสติกตามประเภทการใช้งานจะเห็นว่าขยะบรรจุภัณฑ์ มีปริมาณประมาณ 140 ล้านเมตริกตันซึ่งมีปริมาณมากที่สุดด้วยเหตุนี้ขยะบรรจุภัณฑ์จึงก่อให้เกิดปัญหาขยะพลาสติกตกค้าง โดยเฉพาะอย่างยิ่งส่งผลกระทบต่อระบบนิเวศทางทะเลและสัตว์น้ำ



รูปที่ 1.2 ปริมาณขยะพลาสติกแต่ละประเภทในแต่ละปีตั้งแต่ปี 1950 ถึง 2015 [2]

จากปัญหาดังกล่าว ผู้มีส่วนเกี่ยวข้องในหลายประเทศทั่วโลกได้ออกนโยบายเพื่อจัดการปัญหาจากขยะพลาสติก โดยมีประเทศแคนาดา ยุโรป อังกฤษ อินเดีย จีน และไทย สำหรับประเทศไทย คณะอนุกรรมการบริหารจัดการขยะพลาสติกได้ร่างนโยบายการยกเลิกใช้พลาสติก ดังแสดงในรูปที่ 1.3 กล่าวคือ ในปีพุทธศักราช 2562 จะให้ยกเลิกการใช้พลาสติกหุ้มฝาขวดน้ำ ผลิตภัณฑ์พลาสติกที่มีส่วนผสมของสารประเภทอ็อกโซ่ และไม่โครบีดจากพลาสติก จากนั้นในปีพุทธศักราช 2565 จะให้ยกเลิกการใช้ถุงพลาสติกหูหิ้วและกล่องโฟมบรรจุอาหาร และในปีพุทธศักราช 2568 จะให้ยกเลิกการใช้หลอดพลาสติกและแก้วพลาสติกแบบใช้ครั้งเดียว



รูปที่ 1.3 ผลิตภัณฑ์จากพลาสติกที่จะถูกยกเลิกใช้งานในประเทศไทยและนโยบายการห้ามใช้พลาสติกแบบครั้งเดียวทิ้งในประเทศแคนาดา [3,4]

จากนโยบายการยกเลิกการใช้บรรจุภัณฑ์จากพลาสติกดังกล่าว ส่งผลให้จำเป็นต้องหาวัสดุชนิดอื่น ๆ มาผลิตเป็นบรรจุภัณฑ์ทดแทนพลาสติก โดยวัสดุที่นำมาผลิตเป็นบรรจุภัณฑ์ต้องสามารถขึ้นรูปได้ ความเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ย่อยสลายง่าย และมีราคาที่ไม่สูงเกินไป จากความจำเป็นดังกล่าว จึงมีผู้เริ่มให้ความสนใจ พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ (Biodegradable plastics) ซึ่งเป็นพลาสติกที่ย่อยสลายได้ที่ผลิตจากวัตถุดิบมวลชีวภาพ เช่น แป้งมันสำปะหลัง ข้าว ข้าวโพด โฮลวีท เนื่องจากวัตถุดิบเหล่านี้มีโครงสร้างทางเคมีคล้ายพอลิเมอร์ซึ่งต้องผ่านกระบวนการหมักด้วยจุลินทรีย์ เพื่อจะได้กรดแลคติกออกมาแล้วจึงนำกรดแลคติกมาสังเคราะห์เป็นพอลิเมอร์จะเห็นได้ว่า พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพนั้นใช้เวลาย่อยสลาย 6-12 เดือนแต่มีข้อเสียคือ ในกระบวนการผลิตนั้นจำเป็นต้องใช้สารเคมีจึงทำให้เกิดมลพิษต่อสิ่งแวดล้อมอีกทางหนึ่งนอกจากพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ จึงมีบุคคลกลุ่มหนึ่งให้ความสนใจวัสดุธรรมชาติ (Natural materials) ที่สามารถขึ้นรูปเป็นบรรจุภัณฑ์ได้โดยไม่ผ่านกระบวนการหมักหรือสังเคราะห์ อาทิเช่น ใบตอง ใบบัว เปลือกข้าวโพด ใบสัก กาบหมากสด เป็นต้น ดังแสดงในรูปที่ 1.4 ซึ่งในบรรดาวัสดุธรรมชาติที่กล่าวมา ผู้วิจัยเห็นว่า กาบหมากสดเป็นวัสดุธรรมชาติที่น่าจะมีศักยภาพสำหรับการผลิตเป็นบรรจุภัณฑ์และใช้ทดแทน พลาสติก กล่าวคือ กาบหมากสดมีลักษณะเป็นแผ่นค่อนข้างบาง สะดวกต่อการนำมาขึ้นรูป มีความ แข็งแรงดี สามารถหาได้ง่ายในประเทศไทย

(a) ใบตอง



(b) ใบสัก



(c) ใบจาก



(d) กาบหมากสด



รูปที่ 1.4 บรรจุภัณฑ์จากธรรมชาติ (a) ใบตอง, (b) ใบสัก, (c) ใบจาก, (d) กาบหมาก [5-8]

มูลค่าตลาดบรรจุภัณฑ์รวมของสหรัฐฯ คิดเป็นประมาณ 170 พันล้านเหรียญสหรัฐฯ ในปี 2563 หรือคิดเป็นประมาณร้อยละ 19 ของตลาดบรรจุภัณฑ์ของโลก ในขณะที่บรรจุภัณฑ์เพื่อความยั่งยืน (Sustainable Packaging) หรืออาจจะเรียกอีกชื่อหนึ่งว่าบรรจุภัณฑ์สีเขียว (Green Packaging) ซึ่งเป็นบรรจุภัณฑ์กลุ่มย่อยที่กำลังเป็นเทรนด์ที่มาแรงในตลาดสหรัฐฯ บรรจุภัณฑ์เพื่อความยั่งยืนมีมูลค่าตลาด ในปี 2563 จำนวน 25.75 พันล้านเหรียญสหรัฐฯ ตลาดขยายตัวเพิ่มขึ้นร้อยละ

ละ 5.63 มูลค่าตลาดคิดเป็นเพียงร้อยละ 15 ของตลาดบรรจุภัณฑ์รวมของสหรัฐฯ หรือคิดเป็นร้อยละ 10 ของตลาดบรรจุภัณฑ์เพื่อความยั่งยืนของโลก และคาดว่า บรรจุภัณฑ์เพื่อความยั่งยืนของสหรัฐฯ จะขยายตัวเพิ่มขึ้นเป็น 39.24 พันล้านเหรียญสหรัฐฯ ในปี 2571 บรรจุภัณฑ์เพื่อความยั่งยืนในสหรัฐฯ แยกเป็น 4 กลุ่มใหญ่ คือ บรรจุภัณฑ์อาหาร และ เครื่องดื่มซึ่งมีสัดส่วนตลาดมากกว่าครึ่งหนึ่งของตลาดบรรจุภัณฑ์เพื่อความยั่งยืน ตามด้วยบรรจุภัณฑ์ Healthcare บรรจุภัณฑ์ Personal Care และ บรรจุภัณฑ์อื่น ๆ (ได้แก่ บรรจุภัณฑ์ที่ใช้ใน Office Supplies, Electronic Appliance & Home Care)

1. บรรจุภัณฑ์อาหารและเครื่องดื่ม 15.40 พันล้านเหรียญสหรัฐฯ ร้อยละ 60
2. บรรจุภัณฑ์ Healthcare 4.90 พันล้านเหรียญสหรัฐฯ ร้อยละ 19
3. บรรจุภัณฑ์ Personal Care 2.57 พันล้านเหรียญสหรัฐฯ ร้อยละ 10
4. บรรจุภัณฑ์อื่น ๆ 2.83 พันล้านเหรียญสหรัฐฯ ร้อยละ 11

เนื่องด้วยการลากขึ้นรูปจัดเป็นการขึ้นรูปวัสดุด้วยแรงทางกลชนิดหนึ่ง ฉะนั้น พฤติกรรมการขึ้นรูปและผลการขึ้นรูปของกาบหมากจึงขึ้นอยู่กับสมบัติทางกลของกาบหมากและตัวแปรที่ใช้ในการขึ้นรูป ซึ่งผู้ผลิตในปัจจุบันยังคงขาดองค์ความรู้ดังกล่าวเป็นอย่างมาก ฉะนั้น เพื่อให้เกิดองค์ความรู้เกี่ยวกับสมบัติทางกลของกาบหมากสูงและเข้าใจถึงพฤติกรรมการตอบสนองต่อการขึ้นรูปด้วยแรงทางกล ผู้วิจัยจึงมีความสนใจและจากนั้นจึงทำการศึกษาสมบัติทางกายภาพและสมบัติทางกลพื้นฐานของกาบหมากสูง นอกจากนี้ จะทำการศึกษารากขึ้นรูปกาบหมากสูง โดยมุ่งเน้นไปที่การศึกษาตัวแปรการขึ้นรูป เริ่มจากสมบัติของกาบหมาก ได้แก่ ความชื้นของกาบหมากก่อนการลากขึ้นรูป จากนั้นทำการศึกษาผลของตัวแปรการลากขึ้นรูป ได้แก่ แรงกดยึดกาบหมากขณะลากขึ้นรูป และการให้ความร้อนแก่แม่พิมพ์ลากขึ้นรูป

บรรจุภัณฑ์อาหารและเครื่องดื่มเพื่อความยั่งยืนเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีสัดส่วนการใช้และบริโภคมากที่สุดในการบรรจุภัณฑ์เพื่อความยั่งยืน คิดเป็นร้อยละ 60 หรือมูลค่าตลาดประมาณ 15.40 พันล้านเหรียญสหรัฐฯ ในปี 2563 ตามรายงานของ Nielsen เมื่อเดือนมกราคม 2562 ระบุว่า ผู้บริโภคร้อยละ 73 มีแนวโน้มเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมการบริโภคเพื่อลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและเพื่อความยั่งยืนในอนาคต ซึ่งเป็นการนำเสนอช่องทางและโอกาสให้แก่อุตสาหกรรมอาหาร ดังนั้นบรรจุภัณฑ์อาหารที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมและเพื่อความยั่งยืน จึงเป็นเมกะเทรนด์และเป็นคำตอบสำหรับอุตสาหกรรมอาหารในการสนองตอบความต้องการบรรจุภัณฑ์เพื่อสนับสนุนสิ่งแวดล้อม เทรนด์ของบรรจุภัณฑ์เพื่อความยั่งยืนแยกได้เป็น 6 ประการ ดังนี้

1. บรรจุภัณฑ์อาหารที่ย่อยสลายได้ทำจากพืช (Plant-based Compostable Food Packaging) เป็นแบบ Non-toxic ซึ่งบรรจุภัณฑ์จะต้องย่อยสลายเป็นขยะอินทรีย์โดยสมบูรณ์ โดยไม่มีสารตกค้างที่เป็นอันตรายต่อการเจริญเติบโตของดินและพืช ปัจจุบันบริษัทอาหารและเครื่องดื่มและร้านอาหารจำนวนมากได้สมัครใจเปลี่ยนเป็นมาใช้บรรจุภัณฑ์ชนิดนี้เพื่อความยั่งยืน และบรรจุภัณฑ์

ควรได้รับการรับรอง (Certification) จากองค์กร/สมาคมด้านผลิตภัณฑ์จากพืช หรือได้มาตรฐานตาม ASTM (American Society for Testing and Materials)

2. บรรจุภัณฑ์อาหารพลาสติกชีวภาพ (Bioplastic Packaging) หมายถึง บรรจุภัณฑ์พลาสติกชนิดนี้ผลิต (ทั้งหมดหรือบางส่วน) จากชีวมวล หรือวัสดุที่มีแหล่งกำเนิดทางชีวภาพมากกว่าจากน้ำมันฟอสซิล ตัวอย่าง ได้แก่ PLA, PBS และจากแป้ง (มันสำปะหลัง ข้าวโพด) อุตสาหกรรมอาหารหันมาใช้บรรจุภัณฑ์อาหารไบโอพลาสติกเนื่องจากช่วยเสริมสร้างความยั่งยืน และช่วยลดก๊าซเรือนกระจกได้ถึง ร้อยละ 80 ในกระบวนการผลิต

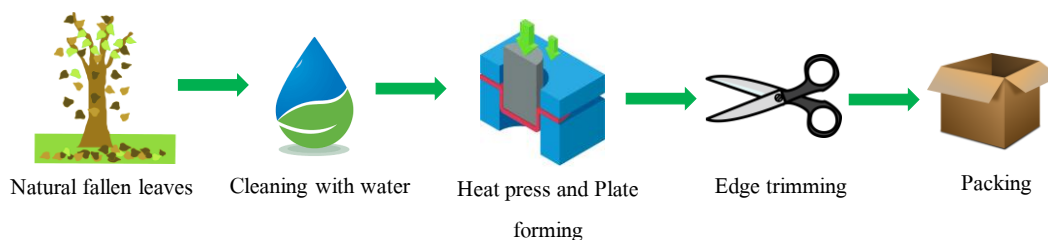
3. บรรจุภัณฑ์อาหารที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ (Biodegradable Packaging) การย่อยสลายได้ทางชีวภาพ หมายถึง พลาสติกที่สามารถย่อยสลายได้แบบอินทรีย์ หมายถึงจุลินทรีย์ที่กินเข้าไป และกลายเป็นสารชีวมวล ก๊าซ หรือ น้ำ บรรจุภัณฑ์ประเภทนี้จะแตกต่างกับบรรจุภัณฑ์ประเภท Compostable สองประการ คือ วัสดุที่นำมาผลิตไม่ใช่พืชแต่อาจจะเป็นฟอสซิล และเมื่อย่อยสลายทางชีวภาพแล้วอาจจะเป็นอันตรายต่อพืชหรือดิน

4. บรรจุภัณฑ์อาหารที่น่ากลับมาใช้ได้ หรือ 3R (Recycle, Reduce, Reuse) ซึ่งเป็นที่รู้จักและปลูกฝังในเรื่องการปกป้องสิ่งแวดล้อม แปรนัยต่าง ๆ หันมาให้ความสำคัญกับบรรจุภัณฑ์เพื่อความยั่งยืนแบบ 3R มากขึ้น

5. สินค้าบรรจุภัณฑ์อาหารแบบใช้หนเดียว (Single-Use Packaging) ได้แก่ Single use cups และ To-go box

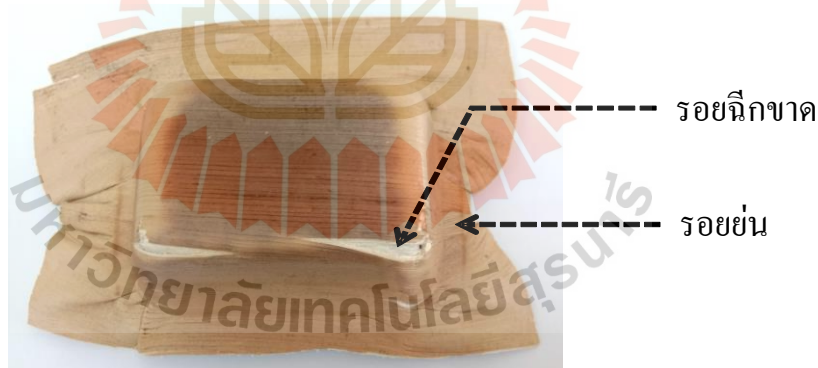
6. ฉลากสะอาด (Clean Label): บรรจุภัณฑ์สินค้าควรได้รับการออกแบบให้สื่อข้อความที่ชัดเจนและเหมาะสม มีข้อมูลไม่น้อยหรือมากเกินไปและไม่สับสน ซึ่งจะช่วยให้ผู้บริโภคในการตัดสินใจซื้อสินค้า และต้องสื่อและให้ข้อมูลคำแนะนำที่เป็นประโยชน์ให้ผู้บริโภคได้รับทราบ

สำหรับการผลิตบรรจุภัณฑ์จากกาบหมากสง ในปัจจุบันยังคงถูกกระทำอยู่ในระดับธุรกิจครัวเรือนเท่านั้น โดยขั้นตอนการผลิตเริ่มจากการเก็บเกี่ยวกาบหมากสง จากนั้นกาบหมากสงจะถูกนำไปล้างทำความสะอาดและผึ่งให้มีความชื้นพอสมควร หลังจากที่ได้กาบหมากสงที่มีความชื้นพอเหมาะแล้วจะถูกนำไปตากขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์จนกระทั่งได้บรรจุภัณฑ์ที่มีรูปร่างตามต้องการ หลังจากการตากขึ้นรูป จะมีส่วนเกินของกาบหมากสงบริเวณขอบของผลิตภัณฑ์ ส่วนนี้จะถูกนำไปตัดออกด้วยวิธีการตัดเฉือน สุดท้ายกาบหมากสงจะถูกนำไปบรรจุลงหีบห่อต่อไป ดังแสดงในรูปที่ 1.5



รูปที่ 1.5 กระบวนการผลิตบรรจุภัณฑ์จากหมาก [13]

จากรูปที่ 1.5 การลากขึ้นรูป (Drawing) จัดเป็นขั้นตอนสำคัญที่สุดขั้นตอนหนึ่งในกระบวนการผลิต เนื่องจากเป็นขั้นตอนที่ทำให้กากหมากเปลี่ยนแปลงไปเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีรูปร่างตามต้องการ อย่างไรก็ตาม จากการออกสำรวจกระบวนการผลิตบรรจุภัณฑ์จากกากหมากพบว่า กากหมากสงมักเกิดการฉีกขาดจากการขึ้นรูปและมักพบรอยย่นที่ขอบของผลิตภัณฑ์ ดังแสดงในรูปที่ 1.6 ซึ่งชิ้นงานที่เกิดการฉีกขาดมีปริมาณค่อนข้างสูง กล่าวคือ อาจสูงถึง 40 เปอร์เซ็นต์ ของจำนวนบรรจุภัณฑ์ทั้งหมดที่ผลิตออกมา ส่งผลให้ต้นทุนการผลิตบรรจุภัณฑ์จากกากหมากสงต่อชิ้นยังคงสูงมาก สุดท้ายจึงทำให้ในปัจจุบันบรรจุภัณฑ์จากกากหมากไม่สามารถนำไปใช้ทดแทนบรรจุภัณฑ์จากพลาสติกได้อย่างแพร่หลาย



รูปที่ 1.6 ขอบกพร่องจากกระบวนการลากขึ้นรูป

1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาสมบัติทางกายภาพและสมบัติทางกลพื้นฐานของกากหมากสง ได้แก่ ความหนาของกากหมาก ความต้านทานแรงดึง และความสามารถในการยึดตัวของกากหมากสง

1.2.2 เพื่อศึกษาอิทธิพลของตัวแปรในการลากขึ้นรูปกากหมากสง ได้แก่ ความชื้นของกากหมาก แรงกดยึดกากหมาก และอุณหภูมิแม่พิมพ์การลากขึ้นรูป

1.3 สมมุติฐานการวิจัย

1.3.1 ความหนาของกาบหมากสงน่าจะมีการแปรปรวนอย่างมากทั้งภายในกาบเดียวกัน และเมื่อเปรียบเทียบกับกาบอื่น ๆ

1.3.2 บริเวณต่าง ๆ ภายในกาบหมากสงเดียวกันน่าจะมีการต้านทานแรงดึงสูงสุด และความเหนียวที่แตกต่างกัน

1.3.3 ความต้านทานแรงดึงสูงสุดและความเหนียวของกาบหมากสงน่าจะมีการแตกต่างกันเมื่อทำการทดสอบแรงดึงในทิศทางที่ต่างกัน

1.3.4 ตัวแปรการลากขึ้นรูป เช่น ความชื้นของกาบหมากสง แรงกดยืดกาบหมาก และ อุณหภูมิแม่พิมพ์ลากขึ้นรูป น่าจะส่งผลต่อการลากขึ้นรูปกาบหมากสง รวมไปถึงการเกิดข้อบกพร่องหลังการลากขึ้นรูป

1.4 ขอบเขตการศึกษา

1.4.1 วัสดุที่ใช้ในการศึกษาคือกาบหมากสงเท่านั้น

1.4.2 การศึกษาสมบัติทางกลของกาบหมากจะกระทำโดยอาศัยการทดสอบแรงดึงในแนวแกนเดียว และทำการทดสอบที่อุณหภูมิห้องเท่านั้น

1.4.3 แม่พิมพ์ที่จะถูกใช้ในการขึ้นรูปจะถูกผลิตจากเหล็กกล้าโรสนิม โดยภายในแม่พิมพ์จะมีการติดตั้งอุปกรณ์ให้ความร้อน

1.4.4 ตัวแปรในการลากขึ้นรูปพื้นฐานที่จะทำการศึกษา ได้แก่ ความชื้นกาบหมากสง แรงกดยืดกาบหมากสง และอุณหภูมิ ของแม่พิมพ์ลากขึ้นรูป

บทที่ 2

ปรีทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 หมากสง และกาบหมาก

หมากในประเทศไทยมีหลายสายพันธุ์ด้วยกันเช่นหมากแดง หมากเหลือง หมากเขียว และหมากสงดังแสดงในรูปที่ 2.1 “หมากสง” มีชื่อทางวิทยาศาสตร์คือ *Areca Catechu L.* และมีชื่อสามัญที่เรียกกันหลายชื่อ อาทิเช่น *Areca*, *Betel Palm*, *Areca Nut* หมากสงเป็นพืชเศรษฐกิจชนิดหนึ่งซึ่งเกือบทุกส่วนของต้นหมากสงสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ เช่น ผลของหมากสงสามารถนำมาเคี้ยวได้ กาบหมากสงสามารถใช้เป็นอาหารสัตว์และเชื้อเพลิงสำหรับการประกอบอาหารได้ โดยปกติหมากสงหนึ่งต้นสามารถให้กาบได้ประมาณ 6 – 10 กาบต่อปี (Adam R.Winstock, 2014)



หมากแดง

หมากเหลือง

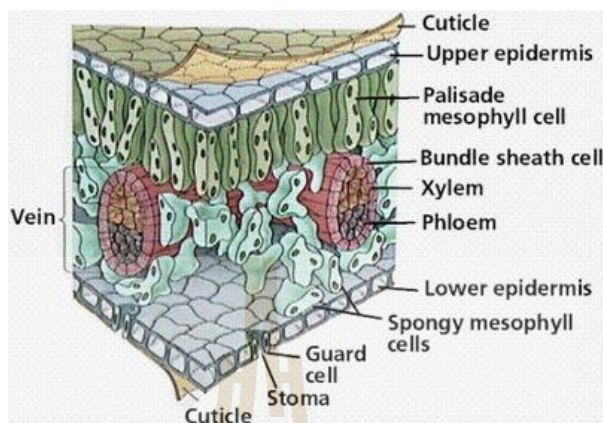
หมากเขียว

หมากสง

รูปที่ 2.1 ตัวอย่างหมากสายพันธุ์ต่าง ๆ ในประเทศไทย

หมากสงเป็นพืชใบเลี้ยงเดี่ยว ในพืชใบเลี้ยงเดี่ยวมักมีกาบใบหรือโคนก้านแผ่ออกเป็นกาบหุ้มรอบข้อเรียกว่า กาบใบ (Leaf sheath) มักพบใน หลู่ข้าว โปด ข้าว และต้นหมาก โครงสร้างของพืชใบเลี้ยงเดี่ยวจะประกอบไปด้วย สปันจิมิโซฟิลล์ (Spongy Mesophyll cell) เป็นชั้นเนื้อเยื่อพื้นที่อยู่ระหว่างชั้นเนื้อเยื่อผิวด้านบน (Upper epidermis) และเนื้อเยื่อผิวด้านล่าง (Lower epidermis) โดยเนื้อเยื่อผิวจะมีเพียงชั้นเดียว ผนังเซลล์ด้านนอกมักมีสาร Cuticle เพื่อป้องกันการคายน้ำ ส่วนเนื้อเยื่อท่อลำเลียง (Vascular tissue) ประกอบไปด้วยท่อลำเลียงน้ำ (Xylem) ที่มี Vessel ขนาดใหญ่ 2-3 เซลล์ และอยู่ด้านบน ของท่อลำเลียงอาหาร (Phloem) และมี Bundle sheath หุ้มรอบ ๆ

มัดท่อลำเลียง จะเห็นว่ามัดท่อลำเลียงแทรกอยู่ตลอดกาบใบในชั้นสปีนจิมิโซฟิลล์ (Spongy Mesophyll) มีขนาดใกล้เคียงกัน ดังแสดงในรูปที่ 2.2



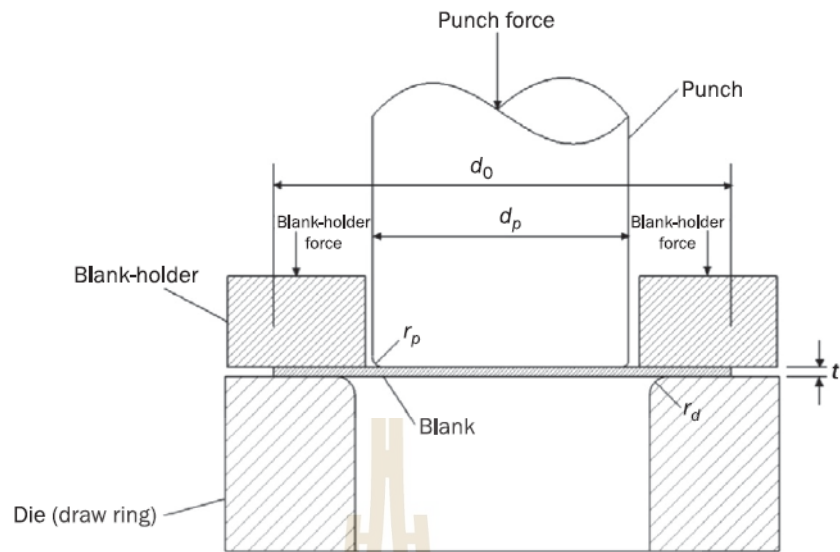
รูปที่ 2.2 โครงสร้างของพืชใบเลี้ยงเดี่ยว (Shmoop University , 2020)

2.2 กระบวนการลากขึ้นรูป

2.2.1 พื้นฐานกระบวนการลากขึ้นรูป

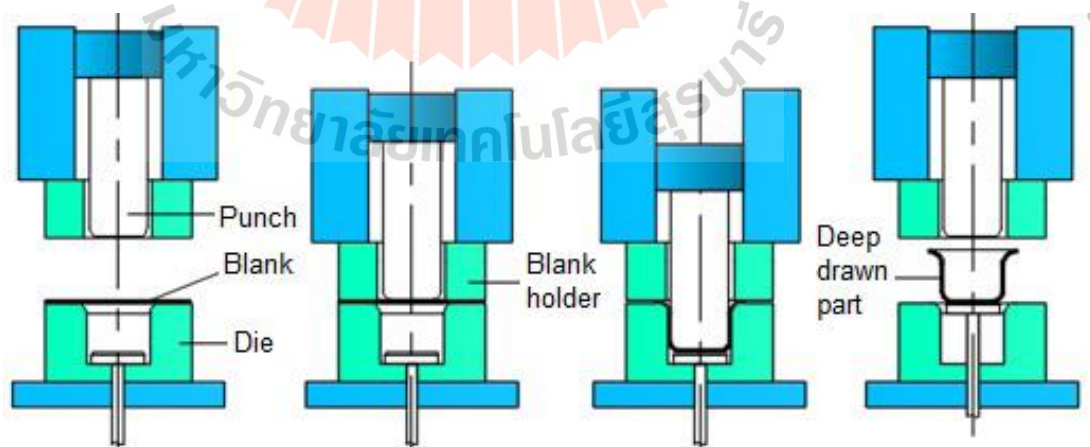
กระบวนการผลิตกาบหมากสงเป็นภาชนะในงานวิจัยมีขั้นตอนดังนี้ เริ่มจากการเก็บเกี่ยวกาบหมากสงหลังจากนั้นกาบหมากสงถูกนำไปล้างทำความสะอาดและผึ่งให้มีความชื้นพอสมควร หลังจากที่ถูกหมากสงมีความชื้นพอเหมาะแล้วจะถูกนำไปลากขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์จนกระทั่งได้บรรจุภัณฑ์ที่มีรูปร่างตามต้องการ หลังจากการลากขึ้นรูป จะมีส่วนเกินของกาบหมากสง บริเวณขอบของผลิตภัณฑ์ ส่วนนี้จะถูกนำไปตัดออกด้วยวิธีการตัดเฉือน สุดท้ายกาบหมากสงจะถูกนำไปบรรจุลงหีบห่อ

การลากขึ้นรูป (Drawing) เป็นกระบวนการที่ใช้ในการขึ้นรูปชิ้นงานทรงก้นลึกจากวัสดุแผ่น โดยกระบวนการลากขึ้นรูปมักถูกใช้ในหลายอุตสาหกรรม เช่น อุตสาหกรรมการขึ้นรูปโลหะแผ่น พลาสติกแผ่น และกระดาษ การลากขึ้นรูปมีจุดเด่นหลายประการ เช่น มีกำลังการผลิตสูง ชิ้นงานที่ผ่านการลากขึ้นรูปมีขนาดที่เท่ากันทุกชิ้น ก่อให้เกิดมลภาวะต่อสิ่งแวดล้อมต่ำกว่ากระบวนการอื่นๆ ในการลากขึ้นรูปมักมีความจำเป็นต้องใช้แม่พิมพ์ โดยองค์ประกอบพื้นฐานของแม่พิมพ์ลากขึ้นรูปแสดงดังรูปที่ 2.3 ประกอบไปด้วย 1) แม่พิมพ์บน (Punch) โดยปกติจะถูกกดลงในขณะขึ้นรูปเพื่อลากแผ่นวัสดุลงมายังช่องว่างของแม่พิมพ์ล่าง 2) แม่พิมพ์ล่าง (Die) โดยปกติจะถูกยึดไว้กับที่ในขณะที่ลากขึ้นรูปวัสดุแผ่น แม่พิมพ์ล่างมีลักษณะเป็นช่องว่างตามรูปร่างที่ต้องการ และ 3) แผ่นกดยึดชิ้นงาน (Blank Holder) ทำหน้าที่กดบริเวณขอบของแผ่นวัสดุขณะลากขึ้นรูป



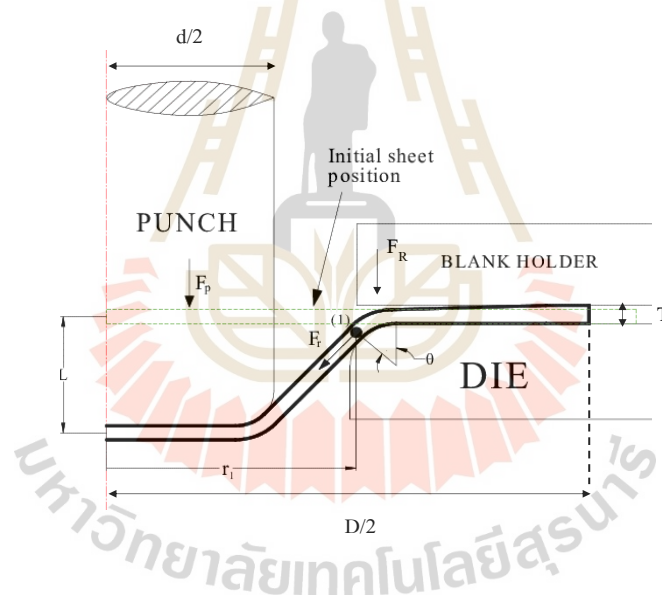
รูปที่ 2.3 ส่วนประกอบของชุดแม่พิมพ์ลากขึ้นรูปวัสดุแผ่น (Maziar Ramezani, 2012)

ขั้นตอนการลากขึ้นรูปนั้นเริ่มจากการนำวัสดุเริ่มต้น (Blank) ไปวางบนแม่พิมพ์ล่าง ให้ตรงตำแหน่งที่ต้องการ จากนั้นแผ่นกดยึดชิ้นงานจะเคลื่อนที่มากดชิ้นงานเป็นอันดับแรกเพื่อไม่ให้ชิ้นงานขยับ หลังจากนั้นแม่พิมพ์บน ก็จะเคลื่อนที่ลงมาสัมผัสกับชิ้นงานหลังจกสัมผัสแล้วแม่พิมพ์บนก็เคลื่อนที่ต่อเพื่อทำการลากชิ้นงานลงในแม่พิมพ์และเมื่อทำการลากขึ้นรูปเสร็จแล้วยกทั้งแม่พิมพ์บนและแผ่นกดยึดชิ้นงานดังแสดงในรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 ลำดับขั้นตอนการลากขึ้นรูปวัสดุแผ่น (Journal of Mechanical Engineering 61, 2015)

แรงกระทำที่เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการลากขึ้นรูป เกิดจากแม่พิมพ์บน กระทำต่อชิ้นงาน ดังแสดงในรูปที่ 2.5 F_p คือแรงที่ใช้กดแม่พิมพ์บนของกระบวนการลากขึ้นรูป โดยแรงกดของแม่พิมพ์บน เป็นแรงกดในอุดมคติ ซึ่งไม่มีการพิจารณาแรงเสียดทาน ในขณะที่ทำการลากขึ้นรูป ในการลากขึ้นรูปแบบปกติ สามารถคำนวณแรงกดในอุดมคติที่ใช้ในการลากขึ้นรูปได้จากสมการที่ 2.1 โดยมีการพิจารณา d คือเส้นผ่านศูนย์กลางแม่พิมพ์บน T คือความหนาของแผ่นชิ้นงานในการขึ้นรูป UTS คือความเค้นแรงดึงของวัสดุ และ D คือเส้นผ่านศูนย์กลางของชิ้นงานเริ่มต้น (SHEET METAL FORMING PROCESSES AND DIE DESIGN, 2004) และเนื่องจากการขึ้นรูปชิ้นงานต้องใช้แผ่นกดยึดชิ้นงาน (Blank holder) ดังนั้นสามารถหาแรงกดยึดชิ้นงาน (F_R) ได้จากสมการที่ 2.2 เมื่อ D คือเส้นผ่านศูนย์กลางของชิ้นงานเริ่มต้น (mm.) d คือเส้นผ่านศูนย์กลางแม่พิมพ์บน(mm.) และ p คือความดันแผ่นกดยึดชิ้นงาน (N/mm^2). (Sheet metal Forming processes, KSU - College of Engineering – IE)

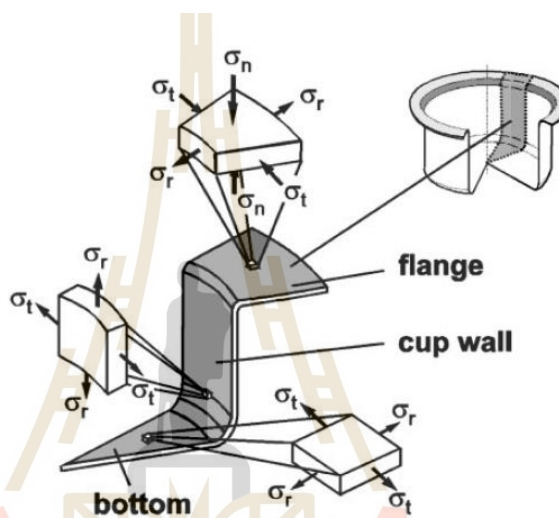


รูปที่ 2.5 แรงกดแม่พิมพ์บนในกระบวนการลากขึ้นรูป (ธัญญพัฒน์ เจียรละม่อม , 2556)

$$F_p = \pi d T (UTS) \left[\left(\frac{D}{d} \right) - 0.7 \right] \quad (2.1)$$

$$F_R = \frac{\pi}{4} [D^2 - d^2] p \quad (2.2)$$

ในขณะที่ลากขึ้นรูปวัสดุแผ่นปรากฏมีความเค้นทั้งหมด 3 องค์ประกอบ ได้แก่ 1) ความเค้นในแนวตั้งฉากทิศทางการลากขึ้นรูป (σ_n) 2) ความเค้นในแนวเส้นรอบวงของผลิตภัณฑ์ (σ_t) และ 3) ความเค้นในแนวรัศมีของผลิตภัณฑ์ (σ_r) รูปที่ 2.6 แสดงความเค้นในวัสดุแผ่นที่กำลังถูกลากขึ้นรูปจากรูป วัสดุแผ่นที่ยังไม่ถูกลากลงช่องว่างของแม่พิมพ์ล่าง (Flange) มีความเค้นกดในแนวตั้งฉากและความเค้นกดในแนวเส้นรอบวง ส่วนบริเวณผนังของผลิตภัณฑ์ (Cup wall) มีความเค้นแรงดึงในแนวตั้งฉากกับทิศทางการลากขึ้นรูป สำหรับบริเวณก้นของผลิตภัณฑ์ (Punch region) จะเกิดความเค้นดึงในแนวรัศมีและในแนวเส้นรอบวงขึ้น



รูปที่ 2.6 ความเค้นในวัสดุแผ่นที่กำลังถูกลากขึ้นรูป (E. Doege, T. Hallfeld, 2001)

โดยความเค้นที่เกิดขึ้นในส่วนต่าง ๆ มีผลโดยตรงต่อการเกิดข้อบกพร่องบนชิ้นงาน การเกิดรอยยับบนขอบของผลิตภัณฑ์ดังแสดงในรูปที่ 2.7 (a) เกิดขึ้นจากความเค้นแรงอัด การเกิดรอยฉีกขาดบริเวณผนังหรือก้นของผลิตภัณฑ์ดังแสดงในรูปที่ 2.7 (b) เกิดขึ้นจากความเค้นแรงดึง



(a) รอยยับบนขอบ (b) รอยฉีกขาดบริเวณผนังหรือก้น

รูปที่ 2.7 ข้อบกพร่องบนบรรจุภัณฑ์กาทหามากสง

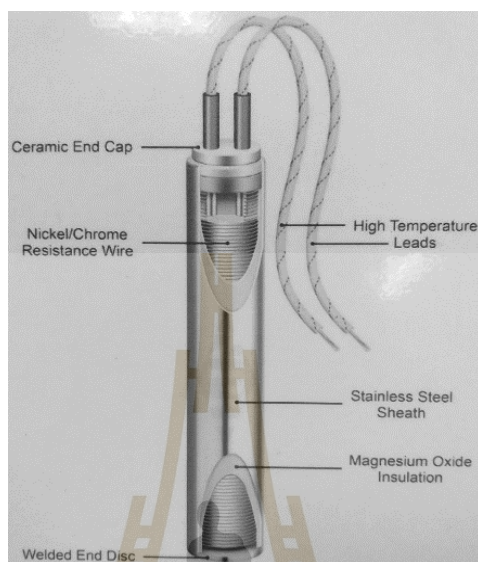
ความสามารถในการลากขึ้นรูปชิ้นงานแผ่นสามารถแสดงได้โดยใช้สมการ Limiting Drawing ratio (LDR) จากสมการที่ 2.3 เมื่อ D_0 คือ เส้นผ่านศูนย์กลางสูงสุดของวัสดุเริ่มต้นที่สามารถลากขึ้นรูปได้โดยไม่เกิดการฉีกขาด และ d_p คือเส้นผ่านศูนย์กลางของแม่พิมพ์บน ค่า LDR ยิ่งสูงความสามารถในการลากขึ้นรูปยิ่งสูงแต่ถ้า LDR ยิ่งต่ำความสามารถในการลากขึ้นรูปยิ่งต่ำ เช่นการลากขึ้นรูปของอลูมิเนียมจะมีค่า LDR เท่ากับ 1.8 ถ้าค่า LDR มากกว่า 1.8 จะทำให้ชิ้นงานเกิดการฉีกขาดได้

$$LDR = \frac{\text{Maximum blank diameter}}{\text{Punch diameter}} = \frac{D_0}{d_p} \quad (2.3)$$

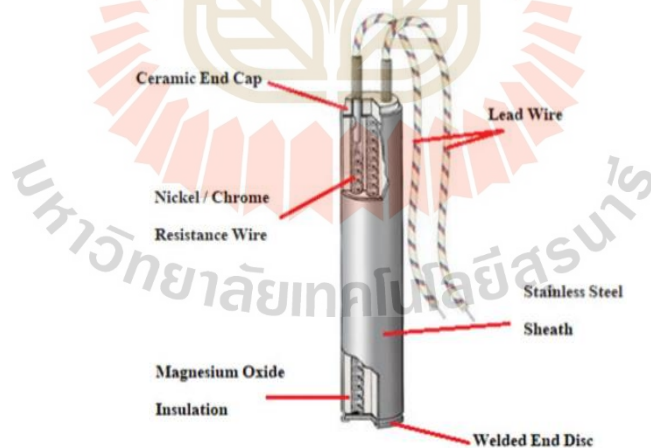
2.2.2 ชนิดของฮีตเตอร์และระบบควบคุมอุณหภูมิ

การลากขึ้นรูปกาบหมากเป็นการขึ้นรูปร้อนโดยในแม่พิมพ์ลากขึ้นรูปร้อนถูกออกแบบให้มีฮีตเตอร์ติดตั้งอยู่ภายใน ฮีตเตอร์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นฮีตเตอร์ชนิดแท่งหรือที่เรียกว่า คาร์ทริดจ์ฮีตเตอร์ (Cartridge Heater) เป็นฮีตเตอร์สำหรับให้ความร้อนกับวัตถุโดยตรง เช่น ให้ความร้อนกับแม่พิมพ์ หัวพ่นกาว แผ่นเพลท เครื่องพิมพ์ทอง หัวปั๊ม ชิ้นงานเหล็ก เครื่องรีดถุงพลาสติก เครื่องท่อของพลาสติกใส่อาหารและขนม เป็นต้น ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 ชนิดด้วยกันคือ คาร์ทริดจ์ฮีตเตอร์ แบบ High Density และ แบบ Low Density คาร์ทริดจ์ฮีตเตอร์แบบ High Density มีขั้นตอนการผลิตดังนี้ นำลวดฮีตเตอร์ (R80) พันรอบแท่งแกนแมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) แล้วใส่ในท่อ ในระหว่างท่อทับกับแกน MgO ที่พันลวดฮีตเตอร์แล้วจะมีช่องว่างอากาศอยู่ จากนั้นทำการใส่ผง MgO เพื่อเป็นฉนวนลงไปท่อฮีตเตอร์ แล้วนำไปสู่กระบวนการขึ้นผง MgO ในท่อฮีตเตอร์ เพื่อไม่ให้เกิดช่องว่างของอากาศ จากนั้นจึงนำไปทำการบีบอัดผง MgO ให้ได้ตามขนาดที่ต้องการ ซึ่งในกระบวนการบีบอัดนี้ทำให้ผง MgO ที่อยู่ภายในท่อฮีตเตอร์อัดแน่นยิ่งขึ้นและไม่มีช่องว่างอากาศภายในท่อฮีตเตอร์อีกเลย ส่งผลทำให้ฮีตเตอร์ระบายความร้อนได้ดี ไม่ขาดเสียหายได้ง่าย ทำให้ทนอุณหภูมิได้สูงและมีกำลังวัตต์ต่อพื้นที่ สูงขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 2.8 ข้อดีของ Cartridge Heater แบบ High Density คือ เป็นฮีตเตอร์ (Heater) ที่มีกำลังวัตต์สูง (High Watt) ให้ความร้อนได้ดี มีความทนทาน ใช้งานได้ยาวนานกว่า เหมาะกับงานที่ต้องการอุณหภูมิสูง และ แบบ Low Density มีขั้นตอนในการผลิตคล้ายคาร์ทริดจ์ฮีตเตอร์ แบบ High Density คือ นำลวดฮีตเตอร์ (R80) พันรอบแท่งแกน MgO แล้วใส่ในท่อ ในระหว่างท่อทับกับแกน MgO ที่พันลวดฮีตเตอร์แล้วจะมีช่องว่างอากาศอยู่ จากนั้นทำการใส่ผง MgO เพื่อเป็นฉนวนลงไปท่อฮีตเตอร์แล้วนำไปสู่กระบวนการขึ้นผง MgO ในท่อฮีตเตอร์ เพื่อไม่ให้เกิดช่องว่างของอากาศ แต่จะไม่ถูกบีบอัดให้แน่นเหมือนคาร์ทริดจ์ฮีตเตอร์ แบบ High Density จึงทำให้กำลังวัตต์ที่ทำได้ไม่สูงวัตต์ต่อพื้นที่ ไม่สูง ดังแสดงในรูปที่ 2.9 คาร์ทริดจ์ฮีตเตอร์

แบบ High Density นิยมใช้ในเครื่องรีดถุงพลาสติก, เครื่องแพ็ค, งานแม่พิมพ์/โมลด์ โลหะต่าง ๆ (บริษัท ไพรมัส จำกัด, 2020)



รูปที่ 2.8 Cartridge Heater แบบ High Density



รูปที่ 2.9 Cartridge Heater แบบ Low Density

เทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple) หรือเซนเซอร์วัดอุณหภูมิ คือ เซนเซอร์สำหรับวัดอุณหภูมิ เทอร์โมคัปเปิลทำงานโดยอาศัยคุณสมบัติทางฟิสิกส์ของโลหะที่ว่า เมื่อปลายลวดโลหะหรืออัลลอยด์ 2 ชนิดที่แตกต่างกันเชื่อมติดกัน ถ้าอุณหภูมิที่ปลายลวดด้านที่เชื่อมกัน แตกต่างกับปลายลวดอีกด้าน

จะเกิด Voltage เกิดขึ้น เรียกว่า Seebeck Voltage (มักจะมีค่าเป็น ไมโครโวลต์ μV) และเรียกปรากฏการณ์นี้ว่า Seebeck Effect เทอร์โมคัปเปิล (T/C หรือ Thermocouple) มีหลายชนิด เช่น Type K, Type J, Type R ฯลฯ แต่ละชนิดทำจากลวดโลหะคนละประเภท ต่างกันจึงมีช่วงวัดอุณหภูมิที่แตกต่างกัน เทอร์โมคัปเปิล แบ่งออกเป็น 8 ชนิดประเภท โดยเรียกว่า type ตัวอย่างเช่น เทอร์โมคัปเปิล type k, เทอร์โมคัปเปิล type J, type N เป็นต้น ซึ่งในงานวิจัยใช้เทอร์โมคัปเปิล Type k ชนิดลวดที่ใช้คือนิกเกิลโครเมียม - นิกเกิลอลูมิเนียม ระดับ 1 ซึ่งมีค่าความคลาดเคลื่อน ± 1.5 องศาเซลเซียส ตัวอย่างรูปที่ 2.10 หัววัดอุณหภูมิ Type k



รูปที่ 2.10 หัววัดอุณหภูมิ Type k

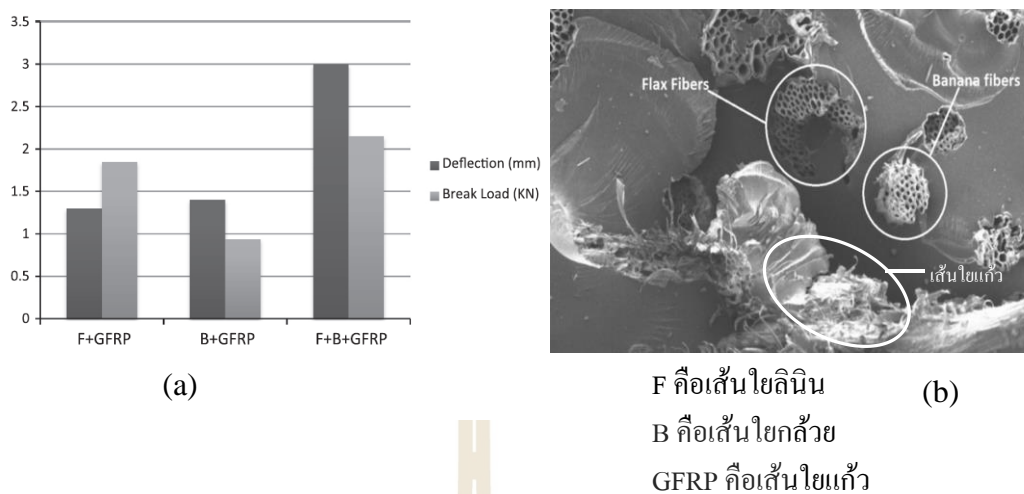
เครื่องควบคุมอุณหภูมิ หรือ Temperature Controller เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการตรวจวัดค่าอุณหภูมิแบบอัตโนมัติ โดยจะแสดงค่าอุณหภูมิผ่านหน้าจอของเครื่องควบคุมอุณหภูมิ มีทั้งแบบเป็นตัวเลขและแบบเข็มนาฬิกา ซึ่งจะมีระบบควบคุมอุณหภูมิอยู่ 2 แบบ คือ แบบอนาล็อก และแบบดิจิตอล แต่ละแบบจะมีโหมดฟังก์ชันการทำงาน ความละเอียดในการวัดอุณหภูมิ และขนาดตัวเครื่องที่แตกต่างกัน ดังแสดงในรูปที่ 2.11 เครื่องควบคุมอุณหภูมิที่ดีต้องมีคุณสมบัติทนต่อแรงสั่นสะเทือน มีระบบระบายความร้อนที่ดี สะดวกต่อการเดินสายไฟและการซ่อมบำรุง เครื่องควบคุมอุณหภูมิสามารถนำมาใช้งานในโรงงานอุตสาหกรรมทุกประเภท เช่น อุตสาหกรรมเครื่องเย็บ อุตสาหกรรมผลิตอาหารอุตสาหกรรมพลาสติก เป็นต้น (MISUMI Corporation, 2020)



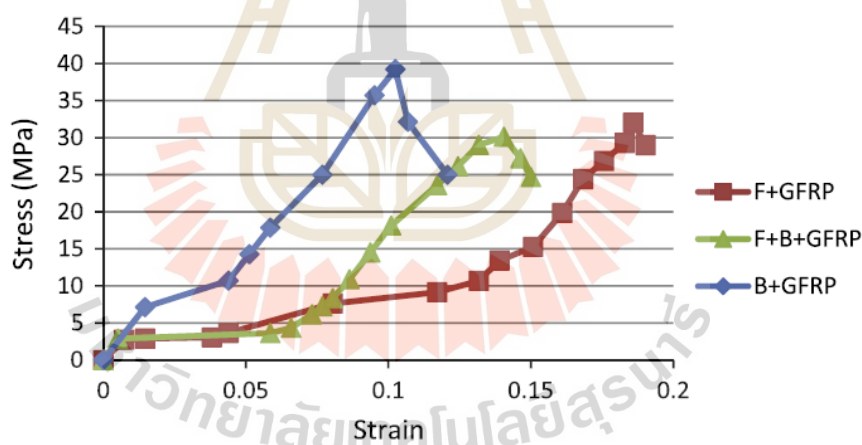
รูปที่ 2.11 เครื่องควบคุมอุณหภูมิ

2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในการศึกษา งานวิจัยที่เกี่ยวข้องนี้ผู้วิจัยได้สังเกตว่ากาบหมากสดมีลักษณะเป็นวัสดุเชิงประกอบจึงได้ทำการค้นคว้างานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาวัสดุเชิงประกอบโดยได้ศึกษา งานวิจัยของ Srinivasan และคณะได้ทำการศึกษาการประเมินสมบัติเชิงกลและสมบัติทางความร้อนของคอมโพสิตผสมเส้นใยธรรมชาติจากกล้วย – เส้นใยลินิน Srinivasan และคณะทำการเตรียมชิ้นงานพอลิเมอร์เสริมแรงด้วยเส้นใยแก้วร่วมกับเส้นใยชนิดอื่น ๆ จากนั้นทำการทดสอบการดัด (Bending test) ผลการทดลองในรูปที่ 2.12 (a) แสดงให้เห็นว่า แรง ณ จุดแตกหักและระยะการดัดสูงสุดของชิ้นงานที่เสริมแรงด้วยเส้นใยกล้วยและเส้นใยลินินมีค่าสูงกว่าชิ้นงานที่เสริมแรงด้วยเส้นใยกล้วยหรือใยลินินเพียงอย่างเดียวอย่างหนึ่ง และในรูปที่ 2.13 วัสดุที่เสริมเส้นใยกล้วย ค่าความเครียดน้อยกว่าจึงทำให้ชิ้นงานเปราะมากกว่า แต่วัสดุที่เสริมใยลินิน ซึ่งเป็นวัสดุไฮบริดทำให้วัสดุมีความเหนียวมากขึ้น ผลการทดสอบแรงดึงสรุปได้ว่าชิ้นงานที่เสริมแรงด้วยเส้นใยลินิน มีค่าความต้านทานแรงดึงสูงกว่ามากกว่าชิ้นงานที่เสริมแรงด้วยเส้นใยลินิน-เส้นใยกล้วยและเส้นใยกล้วยเพียงอย่างเดียว และในรูป 2.12 (b) แสดงถึงโครงสร้างที่กระจายตัวของเส้นใยกล้วย เส้นใยลินินและเส้นใยแก้วหลังจากการทดสอบแรงดึง จะเห็นว่าเส้นใยนั้นจะแตกออกก่อนแล้วตามด้วยเรซิน งานวิจัยที่เกี่ยวข้องนี้สรุปได้ว่าการเรียงเส้นใย แบบเส้นใยแก้ว เส้นใยลินิน เส้นใยกล้วย เส้นใยลินิน และเส้นใยแก้วนั้นทำให้ชิ้นงานต้านทานแรงดัดได้สูงที่สุดคือ 13.54 เมกะปาสคาล



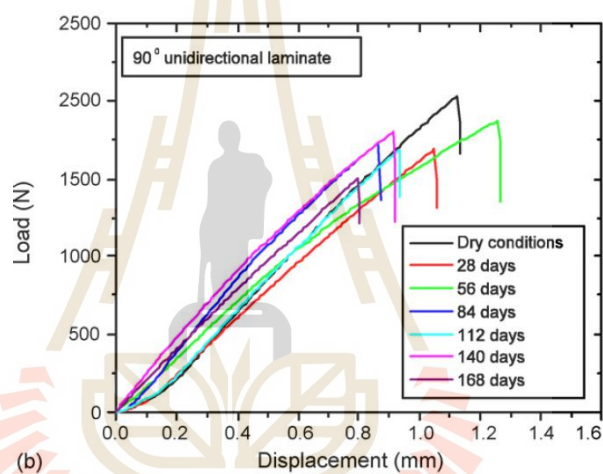
รูปที่ 2.12 (a) แรง ณ จุดแตกหักและระยะตัดสูงสุดของชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบภาพ (b) ภายใต้โครงสร้างวัสดุเชิงประกอบหลังการทดสอบแรงดึง (Srinivasan, Rajendra Boopathy. 2014)



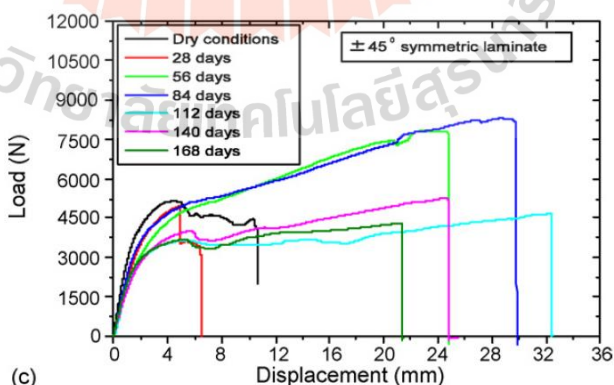
รูปที่ 2.13 กราฟการทดสอบแรงดึงชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบ

Kumar และคณะ ทำการศึกษาอิทธิพลของความชื้นในวัสดุเชิงประกอบเสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอนพวกเขาเตรียมและนำชิ้นงานตัวอย่างไปแช่น้ำด้วยระยะเวลาที่ต่างกันจากนั้นนำชิ้นงานไปทำการทดสอบแรงดึงโดยทำมุมกับทิศทางแรงดึงที่มุม 0 90 และ 45 องศา ผลการทดสอบแรงดึงแสดงดังรูปที่ 2.14 ทำให้ได้ข้อสรุปว่า ในการทดสอบแรงดึงที่มุม 0 องศาทิศทางแรงดึงพบว่ากราฟแรงดึงแสดงเป็นลักษณะเชิงเส้นจนถึงแตกหักและลักษณะการแตกหักเป็นลักษณะการแตกหักแบบเปราะและความแข็งแรงลดลง 28 เปอร์เซ็นต์หลังจากแช่ 28 วัน และหลังจาก 28 วัน ความแข็งแรงดึง

คงที่ และในการทดสอบแรงดึงที่มุม 90 องศาทิศทางแรงดึงพบว่ากราฟแรงดึงมีลักษณะไม่เป็นเชิงเส้นเล็กน้อยเกิดขึ้นเพราะอิทธิพลของเนื้อเมทริกซ์เนื่องจากคุณสมบัติตามขวางส่วนใหญ่ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของเมทริกซ์และความแข็งแรงดึงลดลง 16 เปอร์เซ็นต์หลังจากแช่ 168 วัน และในการทดสอบแรงดึงที่มุม 45 องศาทิศทางแรงดึงพบว่ากราฟแรงดึงมีลักษณะไม่เป็นเชิงเส้นเนื่องจากแรงดึงไม่สมมาตรกับทิศทางแรงดึงและเป็นผลมาจากอิทธิพลของเรซินและไฟเบอร์เมทริกซ์ของคอมโพสิต และวัสดุเมทริกซ์เส้นใยคาร์บอนน้ำไม่สามารถซึมผ่านได้และเมทริกซ์อีพอกซีน้ำสามารถซึมผ่านได้และการดูดซับความชื้นสามารถนำไปสู่การเสื่อมของคุณสมบัติแรงดึงเนื่องจากการลดลงของอินเทอร์เฟซระหว่างคาร์บอนไฟเบอร์และอีพอกซีเมทริกซ์การดูดซับความชื้นสามารถนำไปสู่การเสื่อมของคุณสมบัติแรงดึงเนื่องจากการลดลงของอินเทอร์เฟซระหว่างคาร์บอนไฟเบอร์และอีพอกซีเมทริกซ์



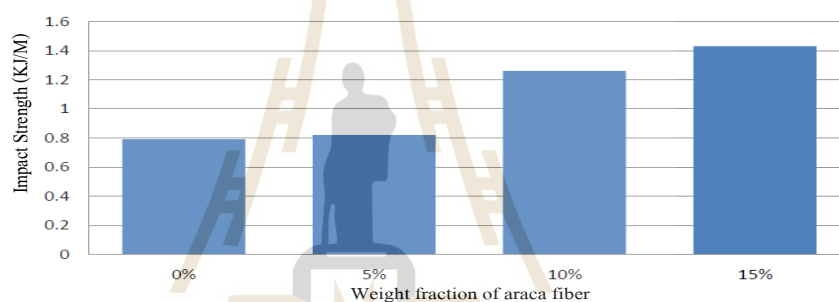
(b)



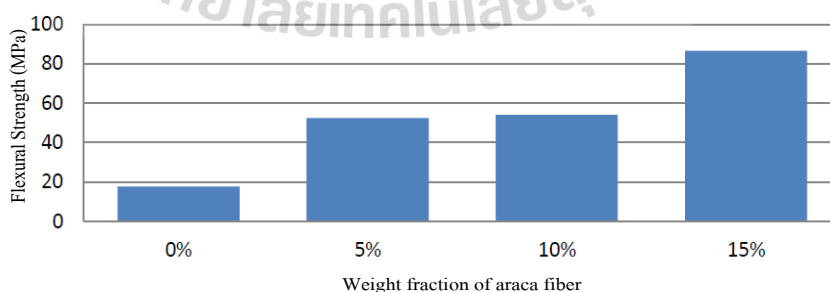
(c)

รูปที่ 2.14 ผลการทดสอบแรงดึงสำหรับชิ้นงานทดสอบที่ผ่านการแช่น้ำด้วยระยะเวลาต่าง ๆ (a) ที่มุม 0 องศา (b) ที่มุม 90 องศา และ (c) ที่มุม 45 องศา ที่ทำมุมกับแรงดึง (Kumar, Sridhar. 2008)

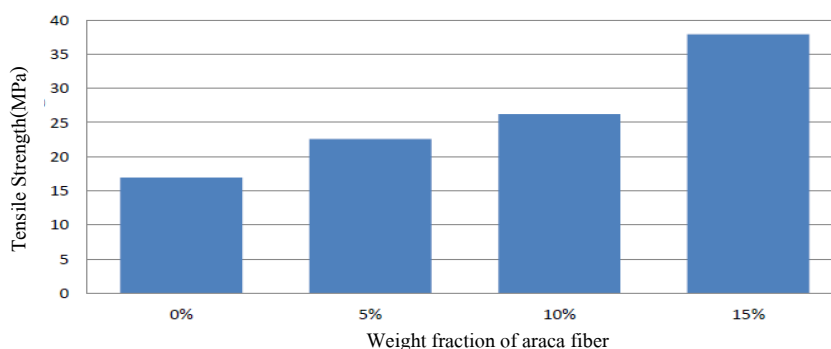
Vinayraj K G และคณะได้ศึกษาพฤติกรรมทางกลวัสดุเชิงประกอบเรซินกับเส้นใยกาบหมากสงและพวกเขาได้เตรียมชิ้นงานโดยที่ชิ้นงานมีส่วนผสมระหว่างเรซินกับเส้นใยกาบหมากสงที่มีส่วนผสมของเส้นใยกาบหมากสงที่ 0 5 10 และ 15% โดยน้ำหนัก และได้ทำการทดสอบแรงกระแทกทดสอบแรงดัด และทดสอบแรงดึง ในรูปที่ 2.15 กราฟเปรียบเทียบความแข็งแรงกระแทกกับปริมาณไฟเบอร์ รูปที่ 2.16 กราฟเปรียบเทียบความแข็งแรงดัด กับปริมาณไฟเบอร์ และรูปที่ 2.17 กราฟเปรียบเทียบความแข็งแรงดึงกับปริมาณไฟเบอร์ พบว่าเมื่อเติมเส้นใยกาบหมากที่ 15% ให้ความแข็งแรงดึง ความต้านทานแรงกระแทก และความต้านทานการดัดสูงสุด และเมื่อลดปริมาณเส้นใยลงค่าที่ทดสอบนั้นมีค่าลดลง จึงสรุปได้ว่าเส้นใยกาบหมากสงที่ถูกเติมเข้าไปนั้นสามารถเพิ่มสมบัติทางกลให้แก่ชิ้นงานทั้งในด้านความต้านทานแรงกระแทกความต้านทานแรงดึงและความต้านทานการดัด (Vinayraj K G, Dr.Ashock B C. 2016)



รูปที่ 2.15 กราฟเปรียบเทียบแรงกระแทกกับปริมาณไฟเบอร์ (Vinayraj K G, Dr.Ashock B C. 2016) รูปที่ 2.16 กราฟเปรียบเทียบการดัด กับปริมาณไฟเบอร์ (Vinayraj K G, Dr.Ashock B C. 2016)



รูปที่ 2.16 กราฟเปรียบเทียบการดัด กับปริมาณไฟเบอร์ (Vinayraj K G, Dr.Ashock B C. 2016)



รูปที่ 2.17 กราฟเปรียบเทียบความแข็งแรงตึงกับปริมาณไฟเบอร์ (Vinayraj K G, Dr.Ashock B C. 2016)

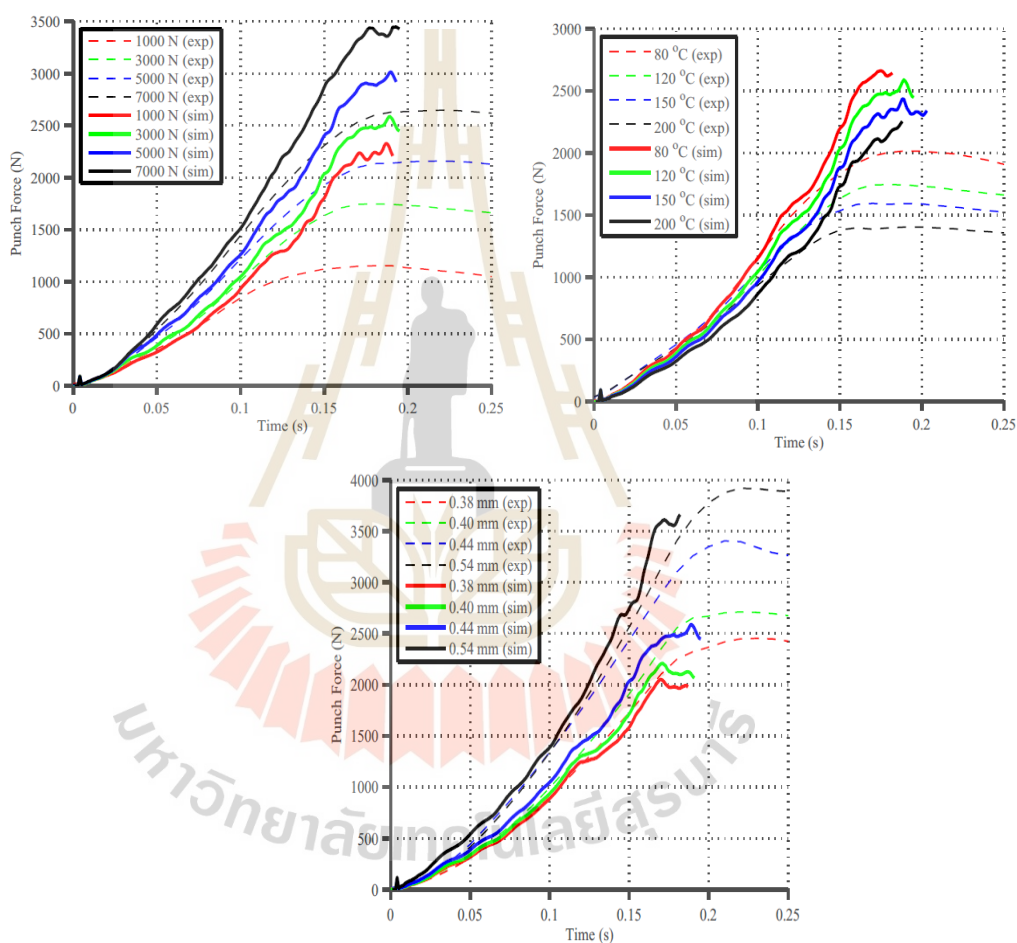
จากการสำรวจงานวิจัยเกี่ยวกับสมบัติทางกลของวัสดุเชิงประกอบดังกล่าวอย่างข้างต้นแสดงให้เห็นว่าในปัจจุบันมีงานวิจัยต่างๆหลายชิ้นที่มุ่งศึกษาและทำความเข้าใจสมบัติทางกลของวัสดุเชิงประกอบที่มนุษย์สร้างขึ้นค่อนข้างดี ในขณะที่ผู้วิจัยไม่พบงานผลงานวิจัยหรือรายงานใดที่อธิบายเกี่ยวกับสมบัติทางกลของกาบหมากสงซึ่งเป็นวัสดุจากธรรมชาติโดยตรง ในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยจึงทำการศึกษาสมบัติทางกลของกาบหมากสงด้วย

สำหรับการลากขึ้นรูปวัสดุแผ่น ผู้วิจัยพบผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการลากขึ้นรูปวัสดุที่มีโครงสร้างค่อนข้างซับซ้อน Malte Wallemeier และคณะศึกษากระบวนการลากขึ้นรูปกระดาษโดยการทดลองและการจำลองด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method Program) ในการศึกษาสนใจผลของตัวแปรการขึ้นรูป ได้แก่ แรงกดแผ่นกระดาษสูงสุด อุณหภูมิแม่พิมพ์บนและล่าง ความหนาของกระดาษ โดยเงื่อนไขการศึกษาแสดงดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ตัวแปรสำหรับการศึกษากระบวนการลากขึ้นรูปกระดาษโดยการทดลองและการจำลอง

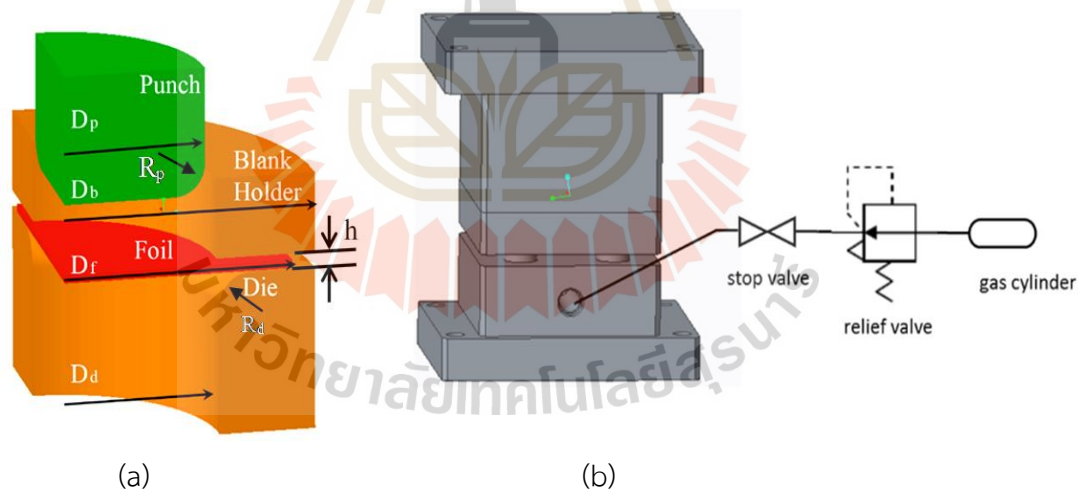
Number	Maximum blankholder force (N)	Die temperature (°C)	Punch temperature (°C)	Blank thickness (mm)
1	1000	120	80	0.44
2	3000	120	80	0.44
3	5000	120	80	0.44
4	7000	120	80	0.44
5	3000	80	80	0.44
6	3000	150	80	0.44
7	3000	200	80	0.44
8	3000	120	80	0.38
9	3000	120	80	0.40
10	3000	120	80	0.54

พิจารณาผลการทดลองในรูปที่ 2.18 (a) (b) และ (c) พบว่า แรงต้านการลากขึ้นรูปกระดาศขึ้นอยู่กัตัวแปรการขึ้นรูป ดังนี้ 1) แรงกดยึดแผ่นกระดาศโดยเมื่อใช้แรงกดยึดแผ่นกระดาศมากขึ้น แรงต้านการลากขึ้นรูปมีแนวโน้มสูงขึ้น 2) อุณหภูมิแม่พิมพ์มีผลต่อแรงต้านการลากขึ้นรูป แผ่นกระดาศ แม่พิมพ์ที่มีอุณหภูมิสูงกว่าส่งผลให้แรงที่ต้องใช้ในการลากขึ้นรูปลดลง และ 3) ความหนาของแผ่นกระดาศ กล่าวคือ กระดาศที่มีความหนามากกว่าต้องใช้แรงในการลากขึ้นรูปสูงกว่า แผ่นกระดาศบาง

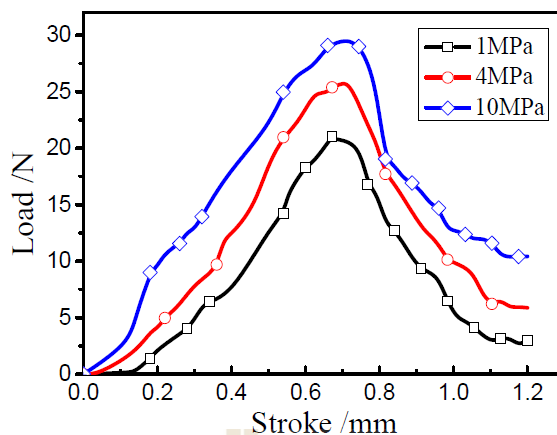


รูปที่ 2.18 แรงต้านการขึ้นรูปขึ้นงานกระดาศเมื่อ (a) เปลี่ยนแปลงแรงกดยึดขึ้นงาน (b) เปลี่ยนแปลงอุณหภูมิขึ้นงาน (c) แรงต้านการลากขึ้นรูป เมื่อเปลี่ยนแปลงความหนา (Malte Wallmeier, Eric Linvill. 2015)

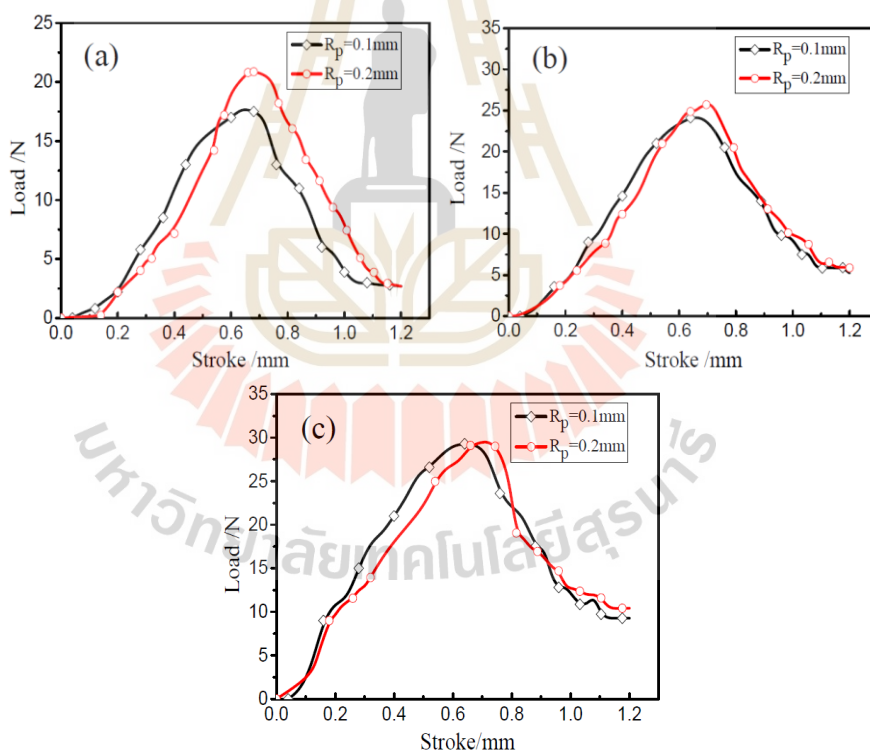
งานวิจัยของ Zicheng Zhang และคณะ ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมการเสียรูปของพอยล์โลหะในกระบวนการลากขึ้นรูปขนาดเล็กด้วยระบบลม ในการทดลองนี้ทำการขึ้นรูปไททาเนียมพอยล์หนา 50 ไมโครเมตร โดยเปลี่ยนแรงดันลมที่ใส่เข้าไปทางฝั่งแม่พิมพ์ล่างดังรูปที่ 2.18 (b) และทำการลากขึ้นรูปชิ้นงานที่ 1 4 และ 10 เมกะปาสคาล ดังในรูปที่ 2.19 และขึ้นรูปที่อุณหภูมิห้อง จากการทดลองลากขึ้นรูปเห็นว่าเมื่อความดันภายในแม่พิมพ์ล่างสูงขึ้นจะทำให้แรงต้านการขึ้นรูปสูงขึ้นและสูงที่สุดที่ระยะกดลึก 0.692 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 2.20 และลดลงเมื่อระยะกดมากกว่า 0.692 มิลลิเมตร และในการทดสอบลากขึ้นรูปชิ้นงานที่ 1 4 และ 10 เมกะปาสคาล และเปลี่ยนรัศมีของแม่พิมพ์ 0.1 และ 0.2 มิลลิเมตร (R_d) ดังแสดงในรูปที่ 2.21 ได้ข้อสรุปดังต่อไปนี้ (1) สำหรับสภาวะความดันที่แน่นอนความดันมีอิทธิพลอย่างมากต่อแรงกดแม่พิมพ์บนและการเปลี่ยนแปลงของความหนาชิ้นงานในกระบวนการขึ้นรูป แรงกดแม่พิมพ์บนเพิ่มขึ้นตามแรงดันที่เพิ่มขึ้น แรงกดแม่พิมพ์บนจะเพิ่มขึ้นก่อนแล้วจึงลดลงในระหว่างกระบวนการขึ้นรูป ค่าเฉลี่ยของความหนาลดลงเมื่อความดันเพิ่มขึ้น (2) รัศมีของแม่พิมพ์บนมีอิทธิพลต่ออัตราการทำให้บางสูงสุดและรอยย่นที่ขอบของไมโครคัพไททาเนียมบริสุทธิ์ที่ผลิตโดยกระบวนการขึ้นรูปลึกนี้ อัตราการทำให้บางสูงสุดจะสูงขึ้นเมื่อรัศมีแม่พิมพ์บนเท่ากับ 0.1 มม. อย่างไรก็ตาม เมื่อรัศมีแม่พิมพ์บนเป็น 0.2 มม. รอยย่นจะใหญ่ขึ้น



รูปที่ 2.19 (a) แผนภาพแม่พิมพ์ที่ใช้ในการทดลองลากขึ้นรูป (b) แผนผังระบบแรงดันแม่พิมพ์ล่าง (Zicheng Zhang et al. 2018)

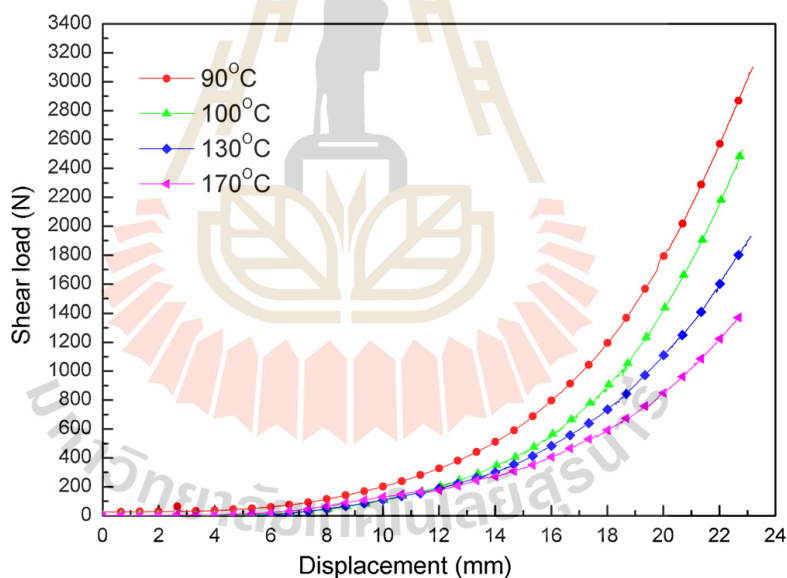


รูปที่ 2.20 แรงต้านการขึ้นรูปและระยะกดลึกที่ความดันของแรงดันลมที่ 1 4 และ 10 เมกะปาสคาล (Zicheng Zhang et al. 2018)

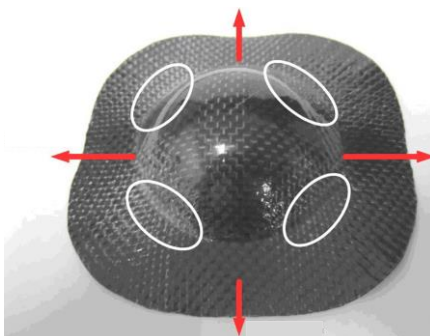


รูปที่ 2.21 แรงต้านการขึ้นรูปและระยะกดลึกที่ รัศมีแม่พิมพ์ 0.1 และ 0.2 มิลลิเมตร (a) 1 เมกะปาสคาล (b) 4 เมกะปาสคาล และ (c) 10 เมกะปาสคาล (Zicheng Zhang et al. 2018)

งานวิจัยของ Q. Zhang, J. Cai, Q. Gao ได้ทำเกี่ยวกับการจำลองและทำการทดลองเกี่ยวกับอุณหภูมิการลากขึ้นรูปของวัสดุผสมที่ทอด้วยคาร์บอนไฟเบอร์ โดยวัสดุที่ใช้เป็นโพลีโพรพิลีนกับเส้นใยทอด้วยคาร์บอนไฟเบอร์โดยใช้กระบวนการป้อนขึ้นรูปโดยให้เส้นใยคาร์บอนไฟเบอร์อยู่ตรงกลางของความหนาขึ้นงานหลังจากนั้นจึงนำวัสดุมาทำการทดสอบลากขึ้นรูปโดยเก็บค่าแรงต้านการกดกับระยะกด ในรูปที่ 2.22 แสดงแรงต้านการขึ้นรูปกับระยะกดลึกของขึ้นงานที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส 100 องศาเซลเซียส 130 องศาเซลเซียส 170 องศาเซลเซียส จะเห็นว่าแรงต้านการลากขึ้นรูปลึกเพิ่มขึ้นตามความลึกในการลากขึ้นรูป และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิแรงต้านในการขึ้นรูปในช่วง 16-23 มิลลิเมตร นั้นลดลงตามลำดับเนื่องจากอุณหภูมิในการขึ้นรูปมีผลต่อการอ่อนตัวของโพลีโพรพิลีนและเส้นใยเสริมแรงสามารถเคลื่อนได้อย่างอิสระเพื่อปรับรูปให้เข้ากับแม่พิมพ์จึงช่วยลดแรงต้านการลากขึ้นรูปได้ จากแรงต้านการลากขึ้นรูปกับระยะทางสามารถเห็นข้อบกพร่องได้เมื่ออุณหภูมิต่ำกว่า 130 องศาเซลเซียส ในรูปที่ 2.23 เพราะเกิดจากแรงเฉือนที่มากจึงทำให้เกิดรอยแตกได้ง่าย ดังนั้นอุณหภูมิที่เหมาะสมในการขึ้นรูปคือ 170 องศาเซลเซียส



รูปที่ 2.22 แรงต้านการขึ้นรูปกับระยะการขึ้นรูปที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ 90 100 130 170 องศาเซลเซียส (Q. Zhang, J. Cai, Q. Gao 2014)



รูปที่ 2.23 รอยย่นในชิ้นงานที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส

จากการสำรวจงานวิจัยที่เกี่ยวกับการลากขึ้นรูปวัสดุเชิงประกอบที่มนุษย์สร้างขึ้นพบว่า มีตัวแปรการขึ้นรูปจำนวนมากส่งผลกระทบต่อผลการลากขึ้นรูปชิ้นงาน อย่างไรก็ตาม ในกรณีของกาบหมากสงซึ่งเป็นวัสดุธรรมชาติโดยตรง ผู้วิจัยยังไม่พบการรายงานหรือผลการวิจัยเกี่ยวกับการลากขึ้นรูปสักแต่อย่างใด ด้วยเหตุนี้ หลังจากการศึกษาสมบัติทางกลของกาบหมากสงแล้ว จึงทำการศึกษากระบวนการลากขึ้นรูปด้วย โดยงานวิจัยเข้าไปที่การศึกษาผลของแปรการลากขึ้นรูป ได้แก่ แรงกดยึดแผ่นชิ้นงาน อุณหภูมิ และความชื้นก่อนการขึ้นรูปของกาบหมากสง

บทที่ 3

วัสดุ อุปกรณ์ เครื่องมือ และวิธีการทดลอง

3.1 วัสดุ อุปกรณ์ และเครื่องมือ

3.1.1 วัสดุที่ใช้ในการศึกษา

วัสดุที่ใช้ในการศึกษานี้คือกาบหมากสงที่หลุดร่วงออกจากลำต้นมีลักษณะเป็นสีน้ำตาลมีขนาดกว้างประมาณ 30-42 เซนติเมตร และยาวประมาณ 66-75 เซนติเมตรดังแสดงในรูปที่ 3.1 กาบหมากสงที่นำมาใช้เป็นกาบที่หลุดออกจากลำต้นเองตามธรรมชาติโดยกาบหมากสงที่นำมาใช้ในการศึกษานี้นำมาจากจังหวัดระยอง โดยเก็บเกี่ยวในช่วงเดือนเมษายนถึงเดือนมิถุนายน กาบหมากสงที่ใช้ในการวิจัยนี้ใช้ทั้งหมด 14 กาบ โดยใช้ในการทดสอบสมบัติทางกายภาพ 3 กาบ ทดสอบอบแรงดึง 7 กาบ และใช้ในการทดสอบการลากขึ้นรูป 4 กาบ



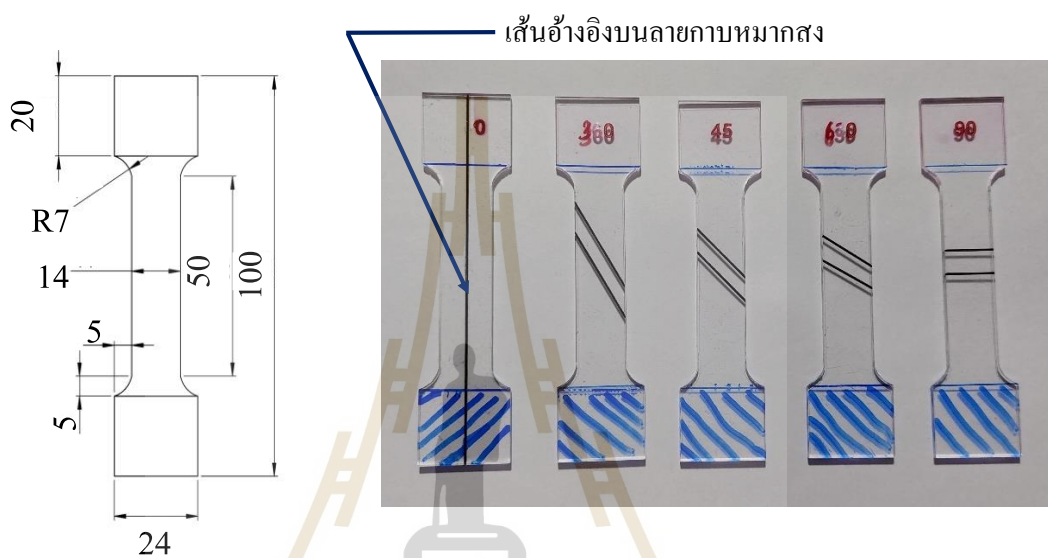
รูปที่ 3.1 ตัวอย่างกาบหมากสงที่นำมาเป็นวัสดุในการทดลอง

3.1.2 อุปกรณ์ และเครื่องมือที่ใช้ในการศึกษา

อุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัยแบ่งออกเป็นประเภทด้วยกันดังนี้

- ก . อุปกรณ์สำหรับเตรียมชิ้นงานทดสอบแรงดึงและทดสอบการลากขึ้นรูป
- แผ่นรองตัดชิ้นงานสำหรับรองการตัดด้วยคัตเตอร์
 - คัตเตอร์ปลายมุม 45 องศา
 - แบบสำหรับตัดชิ้นงานทดสอบแรงดึงทำจากอะคริลิกแผ่นหนา 3 มิลลิเมตร
- แสดงดังรูปที่ 3.2 (a) หลังจากตัดแบบทำการขีดเส้นดังแสดงในรูปที่ 3.2 (b) อ้างอิงกับลายกาบหมากสงในลักษณะที่ทำมุม 0 30 45 60 และ 90 องศา ใช้เพื่อตัดชิ้นงานทดสอบแรงดึงในทิศทางต่าง ๆ

- แบบสำหรับตัดชิ้นงานทดสอบการลากขึ้นรูปทำจากอะคริลิกแผ่นหนา 3 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 3.3
- ถังใส่น้ำไว้ใช้สำหรับแช่กาบหมากสง
- กาว UHU hart สำหรับติดเสริมชิ้นงานทดสอบแรงดึง ณ บริเวณจับยึดชิ้นงานเพื่อป้องกันชิ้นงานฉีกขาดบริเวณจับยึดขณะดึง

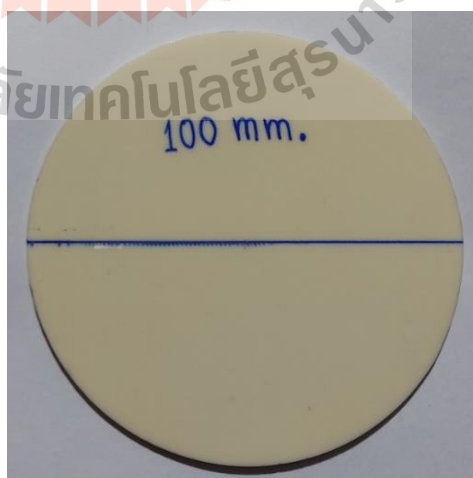


(a) ขนาดชิ้นงานทดสอบแรงดึง

(b) แบบสำหรับตัดชิ้นงานทดสอบแรงดึง

รูปที่ 3.2 ขนาดและแบบสำหรับตัดชิ้นงานทดสอบแรงดึง

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



รูปที่ 3.3 แบบสำหรับตัดชิ้นงานทดสอบการลากขึ้นรูปขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มิลลิเมตร

ข . อุปกรณ์สำหรับการทดสอบแรงดึง

- เครื่องทดสอบ (Universal Testing Machine) ยี่ห้อ Instron รุ่น 5565 พร้อมโหลดเซลล์ขนาด 5 กิโลนิวตัน ใช้สำหรับทดสอบแรงดึงกาบหมากสง
- เครื่องทดสอบความชื้นกาบหมาก (Moisture Analyzer) รุ่น Milton ใช้สำหรับทดสอบความชื้นกาบหมาก

ค . อุปกรณ์สำหรับการทดสอบการลากขึ้นรูปกาบหมากสง

- ชุดแม่พิมพ์ทำจากเหล็กกล้าไร้สนิม เกรด 316 ประกอบไปด้วยแม่พิมพ์บน (Punch) แม่พิมพ์ล่าง (Die) และแป้นยึดวัสดุ (Blank Holder) ใช้สำหรับลากขึ้นรูปขึ้นงาน
- ชุดสปริงสำหรับแป้นยึดขึ้นงานที่มีค่าแรงกดที่ 1.75 2.00 และ 2.34 นิวตันต่อมิลลิเมตร
- เครื่องทดสอบ (Universal Testing Machine) ยี่ห้อ Instron รุ่น 5565 พร้อมโหลดเซลล์ขนาด 100 กิโลนิวตัน สำหรับใช้ในการกดชุดแม่พิมพ์ลากขึ้นรูป
- ชุดอุปกรณ์ให้ความร้อนประกอบด้วย ตู้ควบคุมอุณหภูมิ เทอร์โมมิเตอร์แบบสาย อุปกรณ์ให้ความร้อน (Heater) ใช้สำหรับให้ความร้อนแก่แม่พิมพ์และควบคุมอุณหภูมิ
- ชุดระบายความร้อนทำจากทองแดงและใช้ระบบน้ำในการหล่อเย็นทองแดง

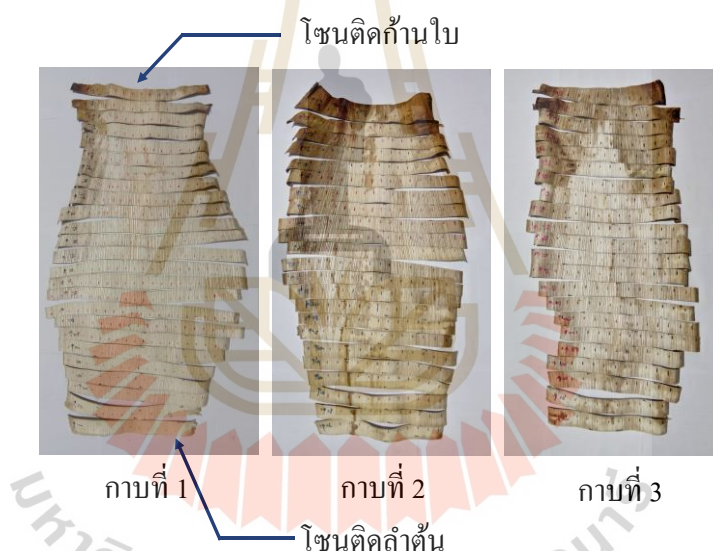
ง . อุปกรณ์ที่ใช้ในการตรวจสอบขนาด ขึ้นงาน ระยะห่างระหว่างแม่พิมพ์ ขึ้นงาน หลังการขึ้นรูป และตรวจสอบรอยแตก

- เวอร์เนียคาลิเปอร์ (Vernier Caliper) ใช้วัดขนาดขึ้นงานทดสอบและอุปกรณ์อื่น ๆ ที่มีความเกี่ยวข้อง
- ไมโครมิเตอร์ (Micrometer) ใช้สำหรับวัดความหนาของกาบหมากสง
- แผ่นโลหะทดสอบระยะห่างขึ้นงาน (Feeler Gauge) ความหนา 0.03 – 1.0 มิลลิเมตร ใช้วัดระยะช่องว่างในการปรับตั้งค่าระยะห่างระหว่างแม่พิมพ์
- กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) รุ่น Zeiss AURIGA ใช้สำหรับตรวจรอยฉีกขาดของกาบหมากสง
- กล้องดิจิทัล ใช้ในการบันทึกภาพวัสดุ อุปกรณ์ และขึ้นงานหลังการทดสอบสมบัติทางกายภาพ สมบัติทางกล และการลากขึ้นรูป และใช้สำหรับบันทึกวิดีโอขณะทำการทดสอบแรงดึง และการลากขึ้นรูปกาบหมากสงเพื่อสังเกตพฤติกรรมของการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของกาบหมากสง

3.2 การเตรียมชิ้นงานตรวจสอบสมบัติทางกายภาพ ทดสอบสมบัติทางกล และทดสอบลากขึ้นรูป

3.2.1 การเตรียมชิ้นงานตรวจสอบสมบัติทางกายภาพ

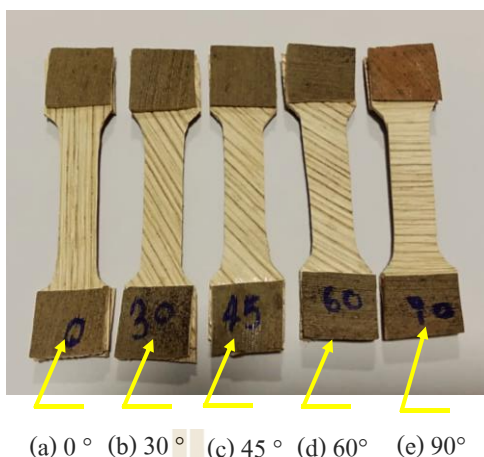
ชิ้นงานทดสอบในงานวิจัยนี้ประกอบด้วย ชิ้นงานในการทดสอบทางกายภาพ โดยทำการทดสอบการวัดความหนาของกาบหมากสงจำนวน 3 กาบ โดยทำการนำกาบหมากสงไปแช่น้ำเป็นเวลา 2 ชั่วโมง เพื่อให้กาบหมากสงนั้นมีความอ่อนตัวและ ทำให้สามารถตัดชิ้นงานได้ง่าย หลังจากนั้นตัดกาบหมากสงออกเป็นชิ้นตามขวางขึ้นละ 30 มิลลิเมตร โดยตัดส่วนที่ติดลำต้นและก้านใบออกประมาณด้านละ 90 มิลลิเมตรเนื่องจากเป็นบริเวณที่ไม่สามารถนำมาขึ้นรูปได้ หลังจากตัดได้ชิ้นงานตรวจสอบ ดังแสดงในรูปที่ 3.4 หลังจากวัดทำการบันทึกความหนา และนำข้อมูลไปสร้างแผนภาพแสดงความหนาของกาบหมากสง



รูปที่ 3.4 ชิ้นงานทดสอบความหนาทั้งหมด 3 ชิ้น

3.2.2 การเตรียมชิ้นงานทดสอบสมบัติทางกล

การเตรียมชิ้นงานทดสอบสมบัติทางกล ทำโดยการนำกาบหมากสงไปแช่น้ำเป็นเวลา 2 ชั่วโมง เพื่อให้กาบหมากสงนั้นมีความอ่อนตัวเพื่อทำให้สามารถตัดชิ้นงานได้ง่าย หลังจากนั้นทำการตัดชิ้นงาน โดยมีความกว้าง 14 มิลลิเมตร ความกว้างบริเวณที่จับชิ้นงานกว้าง 24 มิลลิเมตร ความยาวชิ้นงานทั้งหมด 100 มิลลิเมตร และมีรัศมีอยู่ที่ 7 มิลลิเมตร ตามแบบอะคริลิก และทำการตัดกาบหมากสงเพื่อเสริมบริเวณที่จับชิ้นงาน กว้าง 24 มิลลิเมตร ยาว 20 มิลลิเมตร จากนั้นทำการทากาว UHU hart ที่ชิ้นงานกับตัวเสริมบริเวณที่จับชิ้นงานดังแสดงในรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 ตัวอย่างชิ้นงานทดสอบแรงดึง

3.2.3 การเตรียมชิ้นงานทดสอบการลากขึ้นรูป

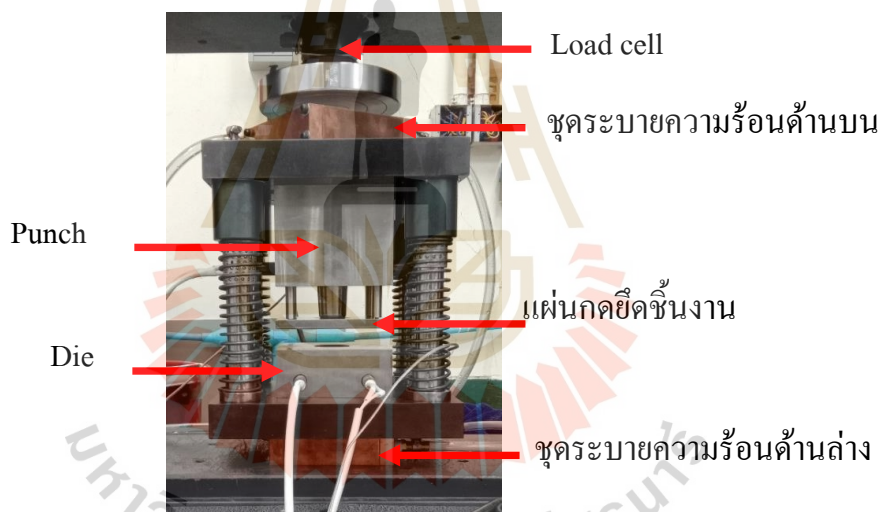
การเตรียมชิ้นงานทดสอบการลากขึ้นรูปโดยนำกาบหมากสองไปแช่น้ำเป็นเวลา 2 ชั่วโมง เพื่อให้กาบหมากสองนั้นมีความอ่อนตัวเพื่อทำให้สามารถตัดชิ้นงานได้ง่าย และยังป้องกันการแตกหักของชิ้นงานในระหว่างการตัด หลังจากนั้นทำการตัดชิ้นงานเป็นรูปวงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 100 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 3.6 ก่อนทำการทดสอบการลากขึ้นรูปนั้นต้องนำชิ้นงานไปแช่น้ำเป็นเวลา 1 นาที 10 นาที และ 70 นาที เพื่อให้ได้ความชื้นเฉลี่ยที่ 28% 47% และ 75% ตามเงื่อนไขการศึกษาที่ได้กำหนดไว้เพื่อศึกษาผลของความชื้นต่อการลากขึ้นรูป



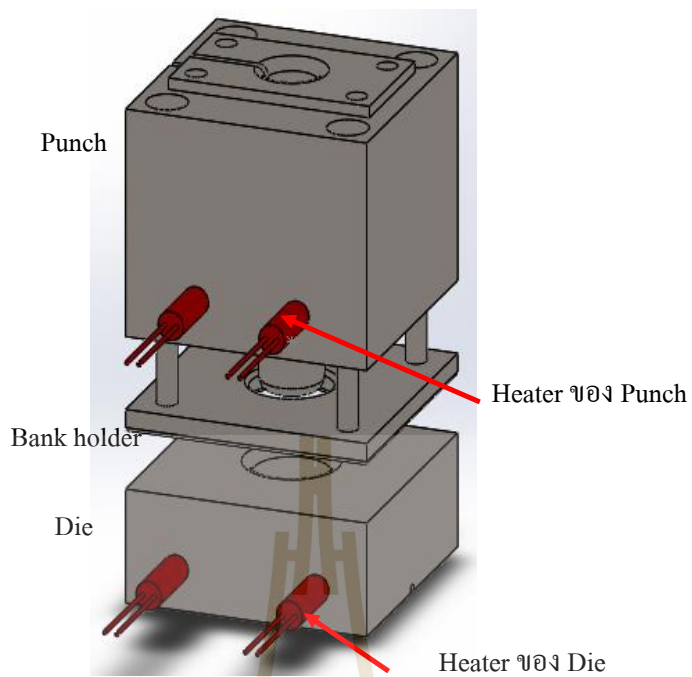
รูปที่ 3.6 ตัวอย่างชิ้นงานทดสอบการลากขึ้นรูป

3.3 การสร้างชุดแม่พิมพ์ลากขึ้นรูป

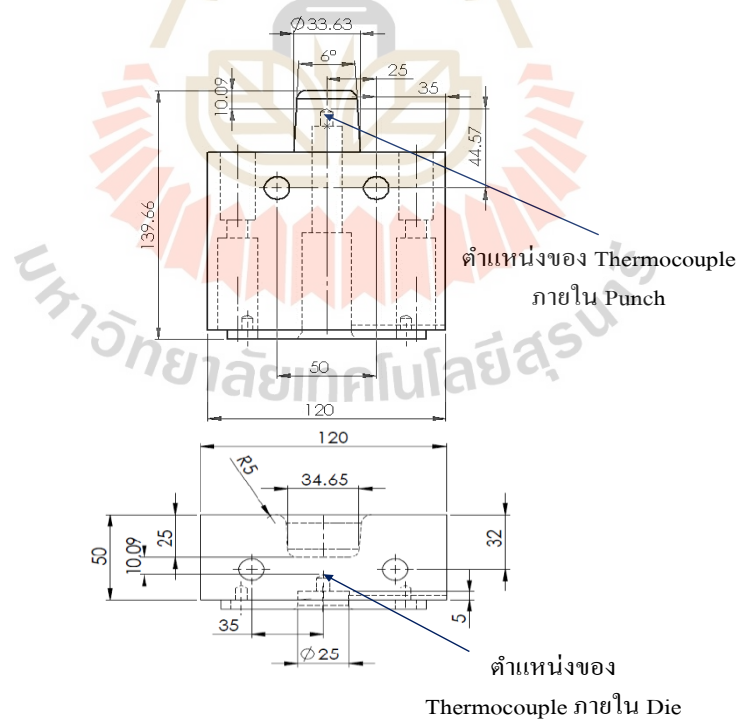
ในการทดสอบลากขึ้นรูปภาชนะรูปทรงกลมใช้แม่พิมพ์ที่ทำจากเหล็กกล้าไร้สนิม เกรด 316 ติดตั้งเป็นแบบชุดในหนึ่งชุดจะประกอบไปด้วย แม่พิมพ์บน (Punch) แม่พิมพ์ล่าง (Die) แผ่นกดยึดชิ้นงาน (Blank Holder) ชุดระบายความร้อนด้านบน และด้านล่างเพื่อป้องกันความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นกับ โหลดเซลล์และเครื่องทดสอบดังแสดงในรูปที่ 3.7 โดยค่าระยะห่างระหว่างแม่พิมพ์บนและแม่พิมพ์ล่างก่อนการลากขึ้นรูป 47 มิลลิเมตร ในรูปที่ 3.8 แสดงตำแหน่งของอุปกรณ์ให้ความร้อน และรูปที่ 3.9 แสดงตำแหน่งของเทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple) และขนาดของแม่พิมพ์บนและแม่พิมพ์ล่าง ในการทดสอบลากขึ้นรูปภาชนะรูปทรงกลมใช้เครื่องทดสอบ (Universal Testing Machine) ยี่ห้อ Instron รุ่น 5565 พร้อมโหลดเซลล์ขนาด 100 กิโลนิวตัน หลังจากนั้นทำการตั้งค่าระยะห่างระหว่างแม่พิมพ์บนและแม่พิมพ์ล่างด้วยแผ่นโลหะทดสอบระยะห่างชิ้นงาน (Feeler Gauge) หนา 5 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 3.10



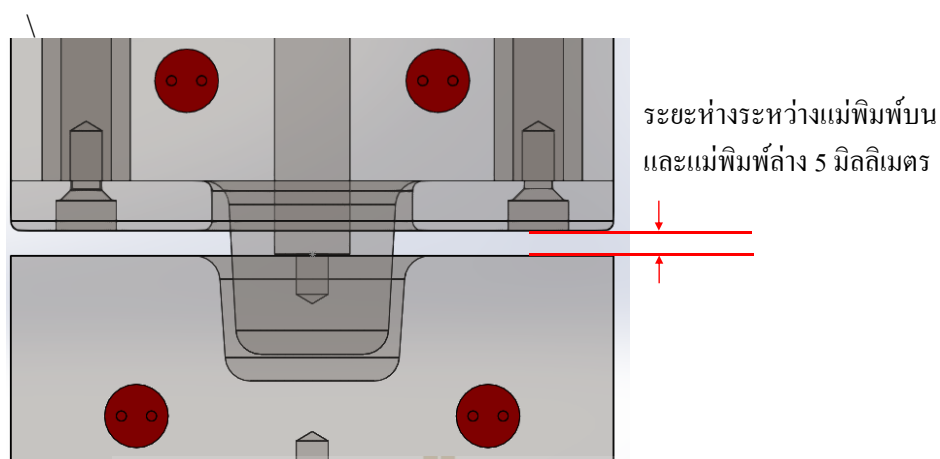
รูปที่ 3.7 แสดงตัวอย่างชุดแม่พิมพ์สำหรับทดสอบการลากขึ้นรูป



รูปที่ 3.8 ตำแหน่งของอุปกรณ์ให้ความร้อน



รูปที่ 3.9 ตำแหน่งเทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple) และขนาดของแม่พิมพ์บนและแม่พิมพ์ล่าง

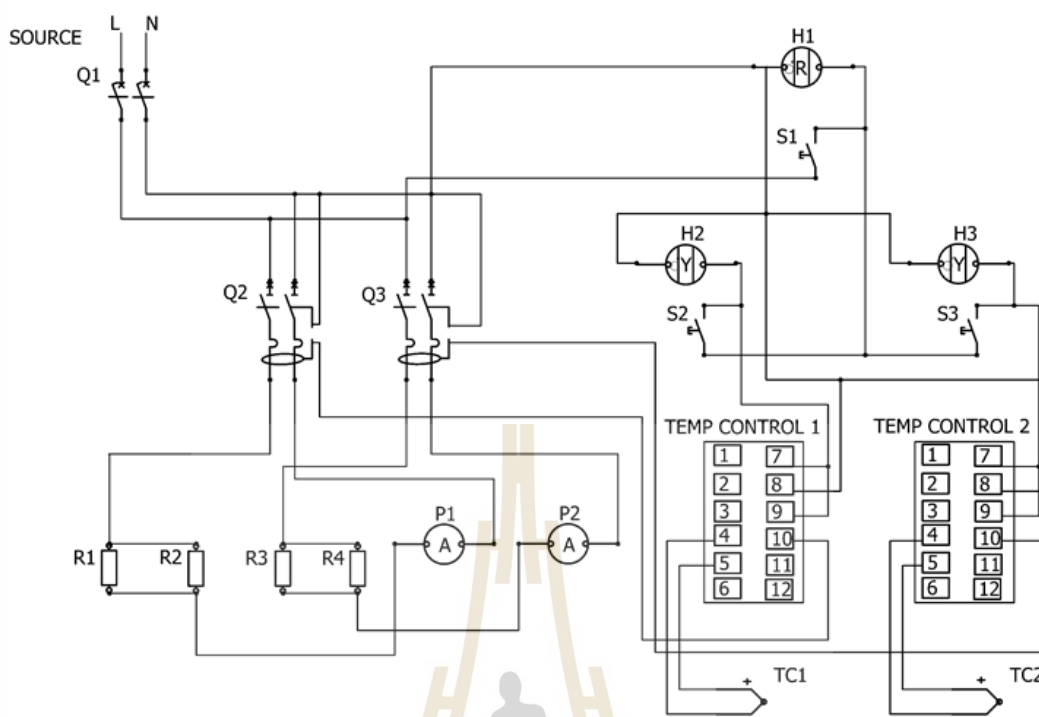


รูปที่ 3.10 แสดงระยะห่างระหว่างแม่พิมพ์บนและแม่พิมพ์ล่างหลังจากลากขึ้นรูปเสร็จ

อุปกรณ์ที่ใช้ในการสร้างตู้ควบคุมอุณหภูมิมีรายการดังแสดงในตารางที่ 3.1 มีด้วยกันทั้งหมด 17 ชิ้นด้วยกัน จากนั้นทำการต่อวงจรตามรูปที่ 3.11 ตัวย่อในแผนภาพ Q1 คือ เบรกเกอร์ (Circuit Breaker), Q2 และ Q3 คือ Magnetic Contactor, R1 R2 R3 และ R4 คือ ฮีตเตอร์, P1 และ P2 คือ แอมมิเตอร์ (Ammeter), H1 คือ หลอดไฟแสดงสถานะหน้าตู้ควบคุม Pilot Indicator Lamp LED สีแดง, H2 และ H3 คือ หลอดไฟแสดงสถานะหน้าตู้ควบคุม Pilot Indicator Lamp LED สีเหลือง, S1 S2 และ S3 คือ ซีเลคเตอร์สวิตช์ Selector switch, TC1 และ TC2 คือเทอร์โมคัปเปิล

ตารางที่ 3.1 รายการอุปกรณ์ที่ใช้ในการสร้างชุดควบคุมอุณหภูมิแม่พิมพ์

รายการอุปกรณ์	จำนวน
1. Digital control รุ่น SEIMAX MAC5SERIES	2 ตัว
2. แมกเนติก มิตซูบิชิ s-t35	2 ตัว
3. แอมป์มิเตอร์ 30 แอมป์	2 ตัว
4. เทอร์โมคัปเปิล K-Type 0-800 องศาเซลเซียส สายยาว 3 เมตร	2 ตัว
5. เบรกเกอร์ 40 แอมป์	1 ตัว
6. หลอดไฟ	3 ตัว
7. Selector switch 2 ทาง	3 ตัว
8. บล็อกต่อสายไฟ 12 ช่อง	1 ตัว
9. ตู้ใส่อุปกรณ์	1 ใบ
10. สายไฟ	1 ม้วน



รูปที่ 3.11 แผนภาพวงจรไฟฟ้าภายในกล่องควบคุมอุณหภูมิ

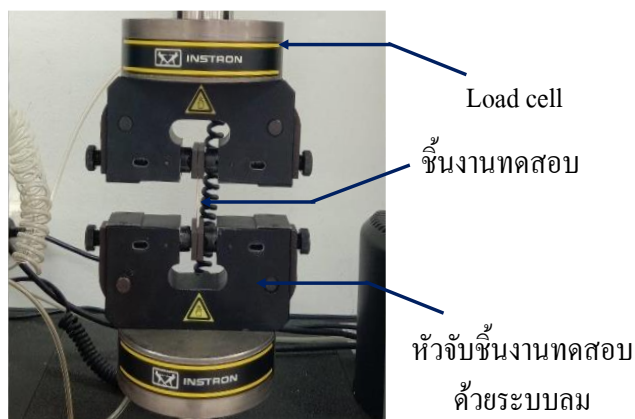
3.4 การตรวจสอบสมบัติทางกายภาพ ทดสอบสมบัติทางกล และการลากชิ้นรูป

3.4.1 การตรวจสอบสมบัติทางกายภาพ

ในการตรวจสอบสมบัติทางกายภาพใช้การตรวจสอบโดยวัดความหนาของกาบหมากงในแต่ละจุดโดยใช้ไมโครมิเตอร์วัดความหนา กาบหมากง ทำการวัดจากกลางกาบหมากง ออกสู่ด้านข้างทั้งสองโดยให้แต่ละจุดมีระยะห่างกัน 20 มิลลิเมตรและทำการวัดด้วยวิธีนี้บนกาบหมากงทั้งสิ้นจำนวน 3 กาบ

3.4.2 การทดสอบสมบัติทางกล

ในการตรวจสอบสมบัติทางกลทางผู้วิจัยเลือกใช้การทดสอบแรงดึงโดยใช้เครื่องทดสอบ (Universal Testing Machine) ยี่ห้อ Instron รุ่น 5565 พร้อมโหลดเซลล์ขนาด 5 กิโลนิวตัน และใช้อุปกรณ์จับชิ้นงานด้วยระบบลมดังแสดงในรูปที่ 3.12 โดยทดสอบที่อุณหภูมิห้อง และทำการตรวจสอบความชื้นของชิ้นงานก่อนทำการทดสอบแรงดึง ในการทดสอบแรงดึงใช้ความเร็วการดึงคงที่เท่ากับ 2 มิลลิเมตรต่อนาที และหยุดดึงเมื่อแรงดึงลดลงมาที่ 95% ของแรงดึงสูงสุด



รูปที่ 3.12 ชุดอุปกรณ์การทดสอบสมบัติทางกลกาบหมากสง

โดยในการศึกษามีเงื่อนไขในการทดลองดังนี้ ในการการทดสอบแรงดึงผู้วิจัยทำการทดสอบเพื่อเปรียบเทียบสมบัติทางกลของกาบหมากสงต่างกาบ จากนั้นทำการศึกษาอิทธิพลของทิศทางการดึงต่อสมบัติทางกลโดยทำการทดสอบแรงดึงที่มุม 0 30 45 60 และ 90 องศาเทียบกับเส้นลายบนกาบหมากสงนอกจากนี้ยังทำการทดสอบแรงดึงที่ความเร็ว 100 200 และ 300 มิลลิเมตร

3.4.3 การลากชิ้นรูปกาบหมากสง

ในการลากชิ้นรูปผู้เขียนปรับเปลี่ยนตัวแปรการขึ้นรูปดังรายละเอียดแสดงในตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 ตัวแปรการลากชิ้นรูปกาบหมากสง

ตัวแปรศึกษา	รายละเอียดตัวแปร
ความขึ้นกาบหมากสง	28% 47% 75%
อุณหภูมิแม่พิมพ์บนและแม่พิมพ์ล่าง	140 180 220 องศาเซลเซียส
ความเร็วในการเคลื่อนที่ของแม่พิมพ์บน	100 200 300 มิลลิเมตรต่อนาที
แรงกดยึดกาบหมากสง	1.75 2.00 2.35 นิวตันต่อมิลลิเมตร

บทที่ 4

สมบัติทางกายภาพและสมบัติทางกลของกาบหมากสง

4.1 ความหนาและโครงสร้างภายในกาบหมากสง

4.1.1 ความหนาของกาบหมากสง

วิทยานิพนธ์ในส่วนนี้อธิบายถึงผลการวัดความหนาของกาบหมากสงเพื่อให้ทราบว่า กาบหมากสงบริเวณที่สามารถนำมาทำการลากขึ้นรูปได้มีพื้นที่ประมาณกี่เปอร์เซ็นต์ เพราะความหนาเป็นตัวแปรหนึ่งในการลากขึ้นรูปโดยการนำกาบหมากสงไปแช่น้ำเป็นเวลา 2 ชั่วโมงจากนั้นกาบหมากสงมาตัดส่วนที่ติดลำต้นออก 9 เซนติเมตร และตัดชิ้นงานเป็นเส้นกว้าง 3 เซนติเมตร ตลอดความกว้างของกาบหมากหลังจากนั้นทำการกำหนดจุดขึ้นงานโดยให้แต่ละจุดห่างกัน 2 เซนติเมตร โดยเริ่มจากกลางกาบหมากสงดังแสดงในรูปที่ 4.1 เสร็จแล้วทิ้งไว้ให้แห้งและทำการวัดความหนาของกาบหมากสงด้วยไมโครมิเตอร์ กาบหมากสงที่ใช้ในการทดสอบมี 3 ขนาดด้วยกัน กาบแรก 42 เซนติเมตร ยาว 75 เซนติเมตร กาบที่ 2 กว้าง 35 เซนติเมตร ยาว 69 เซนติเมตร กาบที่ 3 กว้าง 30 เซนติเมตร ยาว 66 เซนติเมตร



รูปที่ 4.1 ตัวอย่างและวิธีการกำหนดจุดวัดความหนาชิ้นงาน

โดยในการวัดความหนานี้แบ่งช่วงความหนาออกเป็น 10 ช่วงด้วยกันโดยแบ่งช่วง ๆ ละ 0.499 มิลลิเมตร เริ่มต้นที่ 0.500 มิลลิเมตร จนถึง 5.999 มิลลิเมตรเพราะเนื่องจากการแบ่งโซน

ของกาบหมากสง และในการทดลองนี้จะเห็นได้ว่าบริเวณติดก้านใบและ กลางกาบหมากสงนั้นมีความหนา มาก และในส่วนของขอบกาบหมากสงนั้นมีความหนาน้อยเมื่อเทียบกับตรงกลางกาบหมากสง และบริเวณที่ติดกับกลางกาบหมากสงนั้นจะมีความหนาไล่ระดับลงมาจนถึงขอบกาบหมากสงและดัง แสดงในรูปที่ 4.2, 4.3 และ 4.4 โดยแสดงเป็นแถบสีแสดงถึงความหนาของกาบหมากสงโดยสีเทานั้นไม่มี ข้อมูลเนื่องจากอยู่นอกกาบหมากสงจึงทำให้ไม่มีค่าในช่องนี้และสีแดงแสดงช่วงความหนาสูงสุดของ กาบหมากสง และจากในรูปทำให้ทราบว่าความหนาของกาบหมากสงมีความหนาที่ไม่สม่ำเสมอกัน และความหนาของกาบหมากสงที่อยู่ในช่วง 2.00 มิลลิเมตรถึง 4.00 มิลลิเมตรซึ่งเป็นช่วงความหนา ทั่วไปในการขึ้นรูปบรรจุภัณฑ์คิดเป็น 60 ถึง 75% ของพื้นที่กาบหมากสงทั้งหมด

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	กลางก	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
1	no	no	no	no	2.44	2.784	3.102	3.337	3.303	3.424	3.178	3.089	3.229	2.985	2.633	2.871	2.401	no	no	no	no
2	no	no	no	no	2.528	2.67	3.177	3.365	3.316	3.453	3.379	3.285	3.291	3.001	2.621	2.777	2.583	no	no	no	no
3	no	no	no	2.201	2.435	2.684	2.892	3.176	3.149	3.473	3.466	3.233	3.046	3.115	2.69	2.662	2.749	2.31	no	no	no
4	no	no	2.018	2.284	2.501	2.63	2.901	3.239	3.139	3.429	3.936	3.207	3.141	3	2.598	2.493	2.6	2.283	no	no	no
5	no	no	2.018	2.284	2.51	2.749	2.978	3.264	3.465	3.551	3.26	3.264	2.976	2.848	2.521	2.58	2.683	2.189	2.149	no	no
6	no	no	1.893	2.186	2.474	2.888	3.018	3.259	3.006	3.317	3.248	3.184	2.806	2.519	2.567	2.488	2.486	2.427	2.306	no	no
7	no	1.854	1.987	2.172	2.399	2.731	3.117	3.151	3.119	3.162	3.172	3.179	2.692	2.545	2.517	2.51	2.306	2.437	2.202	1.97	no
8	no	1.834	1.855	2.082	2.451	2.674	3.033	3.03	3.069	3.083	3.073	3.194	2.735	2.667	2.516	2.406	2.326	2.317	2.278	2.031	no
9	1.756	1.859	2.104	2.146	2.511	2.844	2.891	2.921	3.177	3.085	3.028	3.043	2.435	2.475	2.391	2.37	2.229	2.318	2.106	1.928	1.729
10	1.641	1.789	1.659	1.915	2.492	2.684	3.037	2.941	3.179	3.183	3.142	3.085	2.763	2.63	2.409	2.48	2.158	2.17	2.129	1.977	1.778
11	1.506	1.623	1.543	1.875	2.338	2.616	2.988	2.841	3.146	3.111	3.214	3.037	2.555	2.432	2.477	2.244	2.235	2.206	2.204	1.947	1.743
12	1.462	1.635	1.618	1.823	2.057	2.523	2.888	2.963	2.922	3.422	3.201	2.99	2.769	2.452	2.239	2.332	2.167	2.027	2.157	2.061	1.798
13	1.452	1.678	1.553	1.616	1.636	1.84	2.821	3.01	3.055	3.594	3.212	3.099	2.894	2.532	2.321	2.251	2.05	2.044	2.06	1.871	1.571
14	1.543	1.563	1.582	1.83	1.974	2.413	2.816	2.923	2.936	3.538	3.113	3.023	2.745	2.387	2.354	2.243	2.042	2.039	2.058	2.008	1.781
15	1.472	1.551	1.544	1.714	2.269	2.758	2.813	3.072	3.68	3.508	3.394	2.695	2.33	2.233	1.987	1.962	1.965	1.88	1.635	no	no
16	no	1.586	1.486	1.48	1.69	1.934	2.653	2.923	3.103	3.454	3.649	3.395	2.685	2.37	2.297	2.133	2.048	1.986	1.913	1.488	no
17	no	no	1.457	1.561	1.523	1.718	2.316	2.831	2.917	3.452	3.753	3.525	2.68	2.298	2.27	2.134	1.925	1.904	1.667	no	no
18	no	no	no	1.415	1.503	1.627	2.002	2.689	3.01	3.39	3.84	3.579	2.965	2.555	2.116	1.945	2.064	1.779	no	no	no
19	no	no	no	1.279	1.367	1.729	2.258	2.595	2.889	3.398	3.696	3.391	2.438	2.16	2.087	2.057	1.823	1.444	no	no	no
20	no	no	no	no	1.453	1.413	2.176	2.624	3.262	3.685	4.083	3.973	2.891	2.337	2.029	2.177	1.799	no	no	no	no
21	no	no	no	no	1.431	1.448	2.024	2.817	3.529	3.936	4.254	4.086	2.914	2.239	2.132	2.124	1.636	no	no	no	no
22	no	no	no	no	1.307	1.322	2.147	2.823	3.48	4.015	4.319	4.009	2.827	2.307	2.173	1.977	1.437	no	no	no	no
23	no	no	no	no	1.264	1.451	1.935	2.876	3.606	3.897	4.497	4.087	2.851	2.425	2.137	1.994	1.153	no	no	no	no
24	no	no	no	no	1.269	1.336	1.502	2.034	2.965	3.979	4.52	4.986	4.091	3.202	2.636	2.299	1.943	1.539	1.144	no	no
25	no	no	no	no	1.147	1.323	1.5	2.467	3.16	4.077	4.889	5.524	4.544	3.03	2.772	2.349	1.986	1.376	1.226	no	no

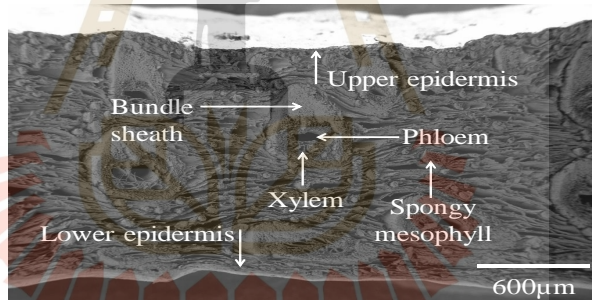
ช่วงความหนา	no	0.500	1.000	1.500	2.000	2.500	3.000	3.500	4.000	4.500	5.000	5.500
		0.999	1.499	1.999	2.499	2.999	3.499	3.999	4.499	4.999	5.499	5.999

รูปที่ 4.2 ความหนาของกาบหมากสงกาบที่ 1

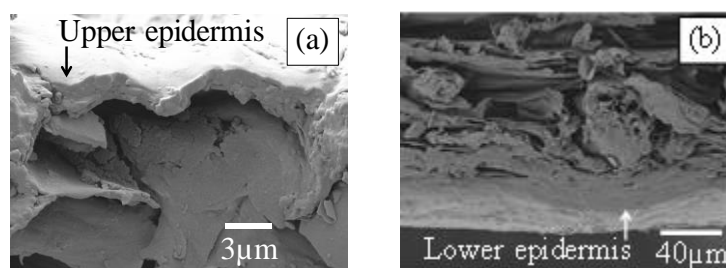
จากข้อมูลความหนาของกาบหมากสงนี้สรุปได้ว่ากาบหมากสงนั้นมีค่าความหนาสูงสุดที่ 5-6 มิลลิเมตรอยู่ในบริเวณติดก้านใบและค่าความหนาต่ำสุดอยู่ที่ 0.5-1.5 มิลลิเมตรอยู่ในบริเวณขอบของ กาบหมากสงและกาบหมากสงนั้นมีความหนาที่ไม่สม่ำเสมอและการกระจายตัวของความหนาทั้ง 3 กาบมีลักษณะที่ใกล้เคียงกัน

4.1.2 โครงสร้างภายในของกาบหมากสง

จากรูปที่ 4.5 เป็นรูปถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดโดยถ่ายภาพตัดขวางของกาบหมากสงจากรูปสามารถเห็นบริเวณที่แตกต่างกันชัดเจนได้เป็น 6 บริเวณด้วยกันคือ สปันจิมีโซฟิลล์ (Spongy Mesophyll) เนื้อเยื่อผิวด้านบน (Upper epidermis) เนื้อเยื่อผิวด้านล่าง (Lower epidermis) เนื้อเยื่อท่อลำเลียง (Vascular tissue) ท่อลำเลียงน้ำ (Xylem) ท่อลำเลียงอาหาร (Phloem) และ Bundle sheath รูปที่ 4.6 แสดงภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่กำลังขยายสูงที่บริเวณผิวด้านบนและด้านล่างของกาบหมากสง รูปภาพเหล่านี้แสดงให้เห็นว่าเนื้อเยื่อผิวด้านบนบางลงกว่าเนื้อเยื่อผิวด้านล่าง กล่าวคือเนื้อเยื่อผิวด้านบนมีความหนาประมาณ 2.5 ไมโครเมตร ในขณะที่เนื้อเยื่อผิวด้านล่างมีความหนาประมาณ 20 ไมโครเมตร



รูปที่ 4.5 ภาพถ่ายแนวตัดขวางกาบหมากสงโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

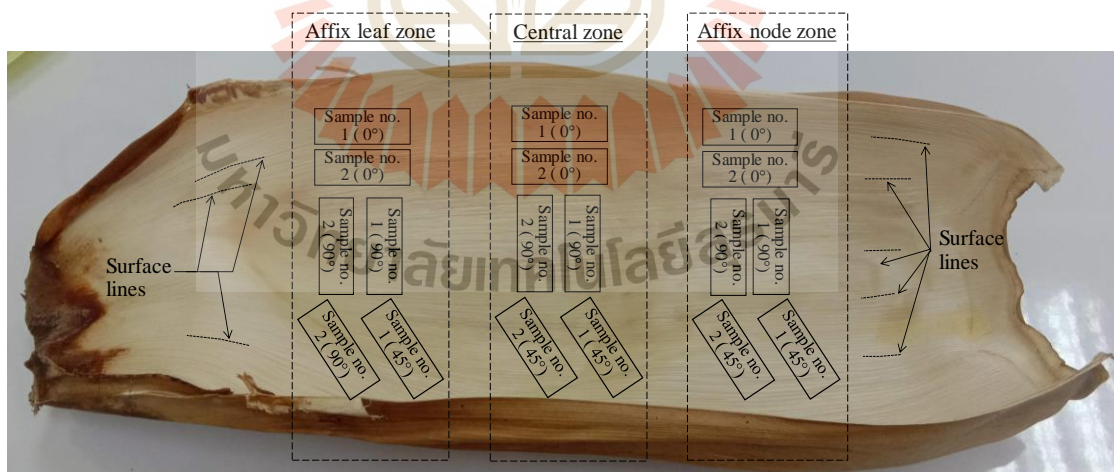


รูปที่ 4.6 ภาพถ่ายที่กำลังสูงโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (a) ภาพถ่ายบริเวณด้านบนของกาบหมากสง (b) ภาพถ่ายด้านล่างของกาบหมากสง

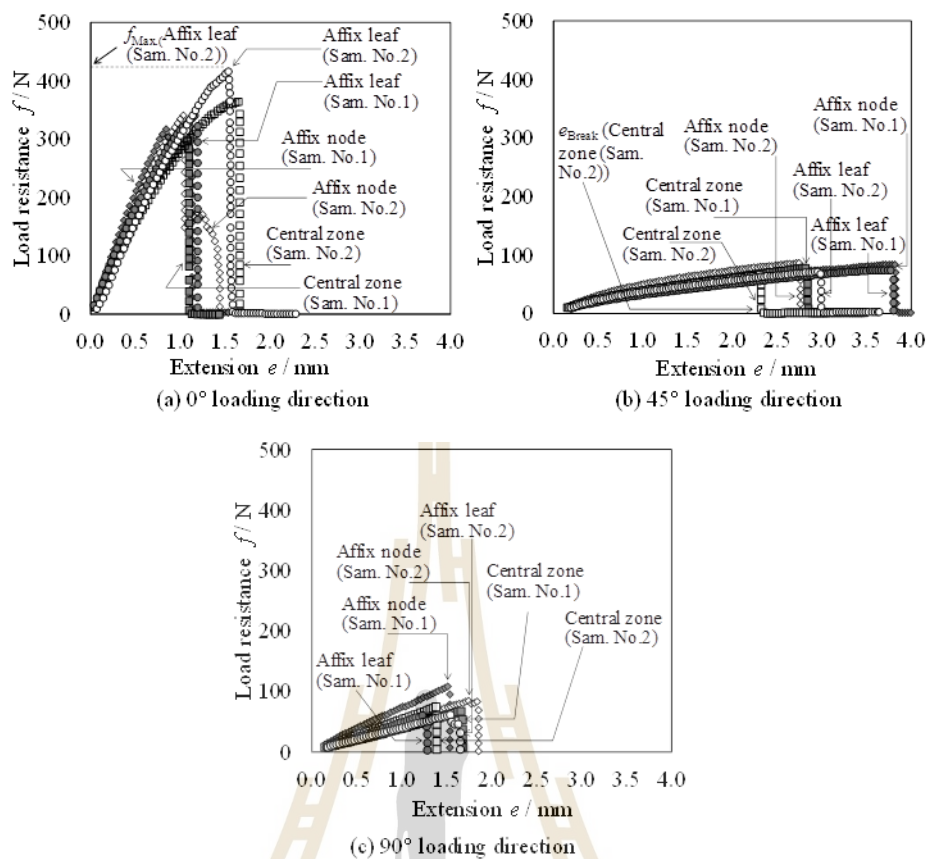
4.2 สมบัติทางกลกาบหมากสง

4.2.1 สมบัติทางกลในทิศทางต่างๆของกาบหมากสง

ในการทดสอบแรงดึงกาบหมากสงโดยตัดตัวอย่างในโซนติดก้านใบ (Affix leaf) โซนกลางกาบหมากสง (Central zone) และโซนติดลำต้น (Affix node) ดังแสดงในรูปที่ 4.7 และทดสอบแรงดึงหลังจากการทดสอบแรงดึงได้ทำการสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดึงกับระยะทางได้ตามรูปที่ 4.8 แสดงเส้นแรงต้านการดึงและระยะยืดตัวในทิศทางที่ 0° 45° และ 90° ในแต่ละโซน จากกราฟกำหนดให้ (f_{Max}) คือโหลดสูงสุดเกิดขึ้นเมื่อทิศทางแรงดึงขนานกับเส้นลายบนพื้นผิว 0 องศา ค่าแรงดึงเฉลี่ยอยู่ที่ 379.80 นิวตัน ในขณะที่มุม 45 องศา ค่าแรงดึงเฉลี่ยอยู่ที่ 71.93 นิวตัน และที่ 90 องศา ค่าแรงดึงเฉลี่ยอยู่ที่ 82.42 นิวตัน แต่เมื่อทำการเปลี่ยนโซนของกาบหมากสงที่ทำมุม 0 องศาจะสังเกตว่าค่าแรงดึงในโซนติดก้านใบ โซนกลางกาบหมากสง และโซนติดลำต้น นั้นมีค่าใกล้เคียงกันอยู่ที่ $337-367$ นิวตัน แต่การยืดตัวของกาบหมากสงขึ้นอยู่กับทิศทางของลายบนผิว ที่ 0 องศา มีค่าการยืดตัวเฉลี่ยอยู่ที่ 1.36 มิลลิเมตร และที่ 90 องศา ระยะการยืดตัวเฉลี่ยมีค่าอยู่ที่ 1.62 มิลลิเมตร แต่ที่มุม 45° มีระยะยืดเฉลี่ยมีค่าอยู่ที่ 3.07 มิลลิเมตร จากการทดสอบแรงดึงกาบหมากสงพบว่ากาบหมากสงนั้นมีสมบัติแรงดึงแบบแอนไอโซทรอปิกสูงคือกาบหมากสงนั้นมีคุณสมบัติแรงดึงในแต่ละทิศทางไม่เหมือนกันและพบว่าแรงดึงที่ขนานกับเส้นลายพื้นผิว 0 นั้นมีค่าแรงดึงสูงที่สุด และระยะการยืดตัวสูงที่สุดคือ มุม 45 องศา กับลายบนพื้นผิว

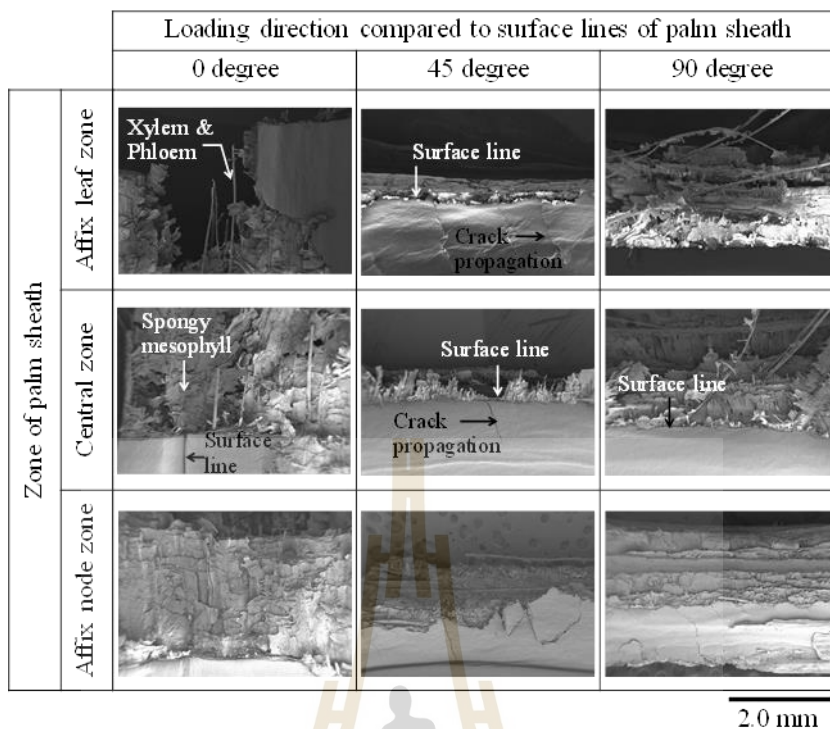


รูปที่ 4.7 ภาพตัวอย่างการตัดทดสอบแรงดึงในทิศทาง 0 45 90 องศาในโซนติดก้านใบ โซนกลางกาบหมากสง และโซนติดลำต้น



รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงต้านการดึงและระยะยืดตัวของกาบหมากสงในแต่ละโซน

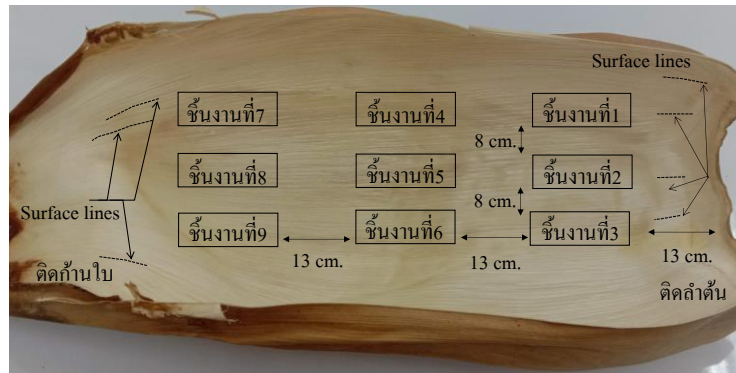
หลังจากการทดสอบแรงดึงบริเวณรอยแตกของชิ้นงานถูกนำมาตรวจสอบด้วยกล้องส่องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่งกราดในรูปที่ 4.9 แสดงขอบของรอยแตกหักหลังจากการทดสอบแรงดึงโดยเส้นลายบนพื้นผิวทำมุมกับแรงดึงที่ 0 45 90 องศาทิศทางแรงดึงที่โซนติดลำต้น โซนกลาง และโซนติดก้านใบกาบหมากสงพบว่า สำหรับทุกโซนของกาบหมากสงในกรณี 0 องศา พบว่า ท่อน้ำเลี้ยงและท่อลำเลียงอาหารมีการแตกหัก แต่ที่มุม 45 90 องศา พบว่าท่อน้ำเลี้ยงกับท่อลำเลียงอาหารนั้นถูกดึงออกมาจากสปันจิมิโซฟิลล์ และที่โซนต่างของกาบหมากสงที่ 0 องศา นั้นไม่พบรอยแตกร้าบบนพื้นผิวของกาบหมากสง แต่ที่มุม 45 และ 90 องศาพบรอยแตกร้าบบนพื้นผิวของกาบหมากสง และผลการศึกษาพบว่าการตอบสนองต่อแรงดึงของสปันจิมิโซฟิลล์ที่เป็นรูพรุนนั้นเหมือนกันในทุกโซนของกาบหมากสงและทุกทิศทางการรับแรง เพราะฉะนั้นจึงสรุปได้ว่าหลังจากการทดสอบแรงดึงเมื่อนำชิ้นงานที่ทดสอบไปตรวจสอบรอยแตกพบว่ากาบหมากสงในโซนต่างกันนั้นมีรอยแตกที่ไม่ต่างกันแต่เมื่อเปลี่ยนมุมแรงดึงที่ทำกับลายบน



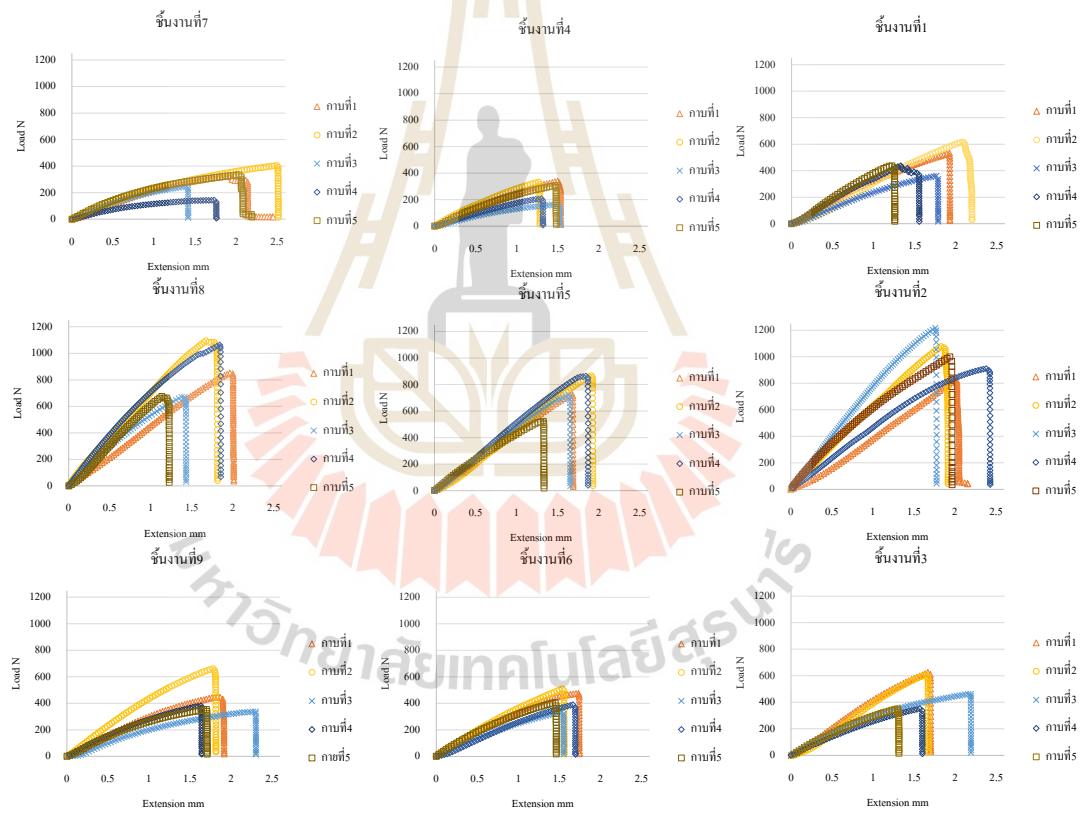
รูปที่ 4.9 ขอบของรอยแตกจากการทดสอบแรงดึงในบริเวณติดก้านใบ กลางใบ และติดลำต้นที่มุม 0 45 90 องศา

4.2.2 สมบัติทางกลของกาบหมากงต่างกาบ

ในการทดสอบแรงดึงต่างกาบจะใช้กาบหมากงทั้งหมด 5 กาบด้วยกันโดยกำหนดจุดตัดกาบหมากงแต่ละกาบในจุดเดียวกันโดยเริ่มจากการหาถึงกลางกาบหมากงในโซนติดลำต้นและวัดห่างออกไป 13 เซนติเมตร ในชิ้นงานที่ 2 5 และ 8 และวัดในแนวกว้างออกไป 8 เซนติเมตรทั้งสองข้างหลังจากนั้นจึงทำการตัด โดยจุดในการตัดชิ้นงานดูได้จากรูปที่ 4.9 แสดงตำแหน่งในการตัดชิ้นงานทดสอบแรงดึงต่างกาบ จากรูปที่ 4.10 พบว่าแรงดึงในแต่ละกาบหมากงนั้นให้ค่าแรงดึงสูงสุดที่ไม่เท่ากันและระยะยืดตัวของแต่ละกาบหมากงไม่เท่ากันและค่าความชันของกราฟทดสอบแรงดึงที่ไม่เท่ากันพบว่ากราฟนั้นในตอนช่วง เริ่มต้นทดสอบแรงดึงที่ระยะยืดที่ 0 ถึง 0.5 มิลลิเมตรพบว่าลักษณะของกราฟนั้นทับซ้อนกันเกือบทั้งหมดและเมื่อระยะยืดเกิน 0.5 มิลลิเมตรจะให้เห็นความแตกต่างของกราฟจึงทำให้ทราบว่าสมบัติแรงดึงของกาบหมากงแต่ละกาบนั้นไม่สม่ำเสมอ แต่ในการทดสอบนี้ทำให้ทราบช่วงค่าแรงดึงและระยะยืดของกาบหมากงโดยในชิ้นงานที่ 1 3 4 6 7 และ 8 นั้นมีค่าแรงดึง 300-600 นิวตัน และระยะยืดอยู่ในช่วง 1.2-2.3 มิลลิเมตร และในชิ้นที่ 2 5 และ 8 นั้นมีค่าแรงดึงอยู่ในช่วง 600-1200 นิวตัน และระยะยืดอยู่ในช่วง 1.2-2.5 มิลลิเมตร



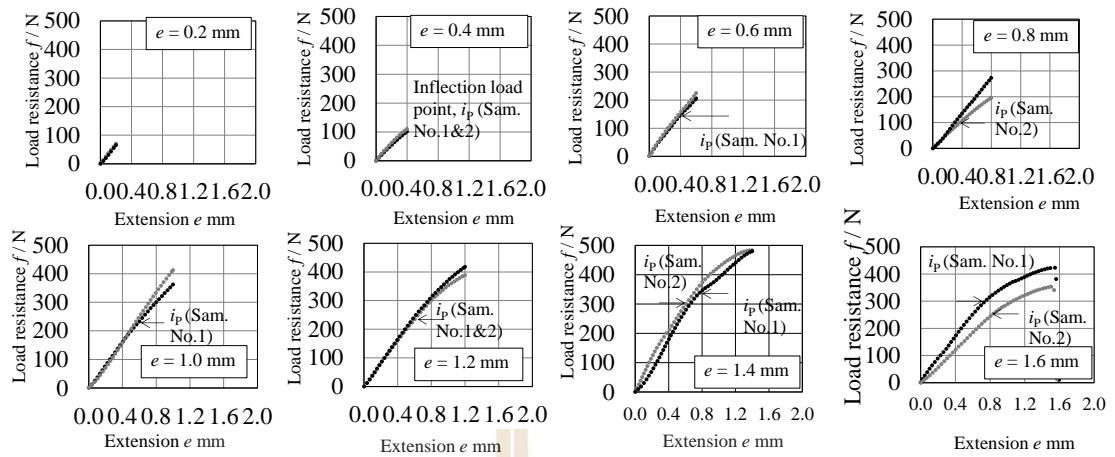
รูปที่ 4.10 ตำแหน่งในการตัดชิ้นงานทดสอบแรงดึงต่างกวาง



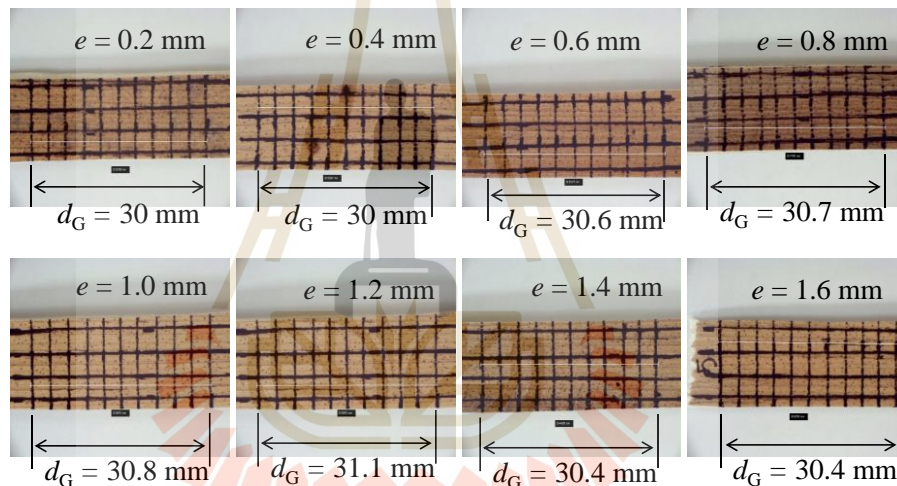
รูปที่ 4.11 แรงดึงต่างกวางในแต่ละโซน

4.2.3 พฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของกาบหมากสง

นอกเหนือจากการตรวจสอบโครงสร้างและการทดสอบแรงดึงแล้วยังได้ทำการศึกษาพฤติกรรมการเปลี่ยนรูปของกาบหมากสงการทดลองนี้มีความสำคัญเพราะจะทำให้ทราบถึงพฤติกรรมการเสียรูปของกาบหมากสงเพื่อนำมาใช้ในการวิเคราะห์พฤติกรรมการเสียรูปของกาบหมากสงในกระบวนการขึ้นรูปและเพื่อให้ทราบถึงพฤติกรรมการเปลี่ยนรูปของกาบหมากสงและเพื่อให้ทราบถึงขีดจำกัดของวัสดุเมื่อนำวัสดุมาใช้ในการขึ้นรูปตลอดจนมีประโยชน์ต่อการนำไปสร้างโมเดลวัสดุในกรณีที่ต้องการจำลองกระบวนการขึ้นรูปด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ในรูปที่ 4.11 กราฟแสดงความต้านทานแรงดึงกับระยะยืดจากรูประยะยืด (e) 0 ถึง 0.2 มิลลิเมตร ค่าความต้านทานแรงดึงที่เพิ่มขึ้นโดยที่ความชันของกราฟไม่มีการเปลี่ยนแปลงและเมื่อเพิ่มระยะยืดจาก 0 ถึง 0.4 มิลลิเมตร พบว่ากราฟมีจุดเปลี่ยนความชัน (i_p) เกิดขึ้นแต่ยังไม่ชัดเจนและเมื่อทำการตรวจวัดความยาวของกริต (d_G) นั้นยังคงไม่เปลี่ยนแปลงจากรูปที่ 4.12 แต่เมื่อเพิ่มระยะยืดจาก 0 ถึง 0.6 มิลลิเมตร พบว่ากราฟมีจุดเปลี่ยนความชัน (i_p) เกิดขึ้นอย่างชัดเจนและเมื่อทำการตรวจวัดความยาวกริตพบว่าความยาวกริต (d_G) มีการเปลี่ยนแปลงจาก 30.0 เป็น 30.6 มิลลิเมตร และเมื่อทำการเพิ่มระยะยืดจาก 0 ถึง 0.8 มิลลิเมตรพบกราฟมีจุดเปลี่ยนความชัน (i_p) ที่ 0.4 มิลลิเมตร และเมื่อทำการตรวจวัดความยาวกริตพบว่าความยาวกริต (d_G) มีการเปลี่ยนแปลงจาก 30.0 เป็น 30.7 มิลลิเมตร และเมื่อทำการเพิ่มระยะยืดจาก 0 ถึง 1.0 มิลลิเมตรพบว่ากราฟมีจุดเปลี่ยนความชัน (i_p) ที่ 0.5 มิลลิเมตร และเมื่อทำการตรวจวัดความยาวกริตพบว่าความยาวกริต (d_G) มีการเปลี่ยนแปลงจาก 30.0 เป็น 30.8 มิลลิเมตร และเมื่อทำการเพิ่มระยะยืดจาก 0 ถึง 1.2 มิลลิเมตรพบว่ากราฟมีจุดเปลี่ยนความชัน (i_p) ที่ 0.5 มิลลิเมตร และเมื่อทำการตรวจวัดความยาวกริตพบว่าความยาวกริต (d_G) มีการเปลี่ยนแปลงจาก 30.0 เป็น 31.1 มิลลิเมตร และเมื่อทำการเพิ่มระยะยืดจาก 0 ถึง 1.4 มิลลิเมตรพบว่ากราฟมีจุดเปลี่ยนความชัน (i_p) ของตัวอย่างที่ 1 มีค่า 0.5 มิลลิเมตร แต่กราฟจุดเปลี่ยนความชัน (i_p) ของตัวอย่างที่ 2 มีค่า 0.8 มิลลิเมตร และเมื่อทำการตรวจวัดความยาวกริต (d_G) พบว่าความยาวกริตมีการเปลี่ยนแปลงจาก 30.0 เป็น 30.4 มิลลิเมตร และเมื่อทำการเพิ่มระยะยืดจาก 0 ถึง 1.6 มิลลิเมตรพบว่ากราฟมีจุดเปลี่ยนความชัน (i_p) ของตัวอย่างที่ 1 มีค่า 0.6 มิลลิเมตร แต่กราฟจุดเปลี่ยนความชัน (i_p) ของตัวอย่างที่ 2 มีค่า 0.8 มิลลิเมตร และเมื่อทำการตรวจวัดความยาวกริต (d_G) พบว่าความยาวกริตมีการเปลี่ยนแปลงจาก 30.0 เป็น 30.4 มิลลิเมตร ทำให้ยืนยันได้ว่าภายใต้แรงดึง กาบหมากสงจะประกอบไปด้วยการเสียรูปแบบยืดหยุ่นในช่วง 0 ถึง 0.4 มิลลิเมตรและการเสียรูปแบบถาวรอยู่ในช่วงที่มากกว่า 0.4 มิลลิเมตรเป็นต้นไป



รูปที่ 4.12 กราฟแรงดึงที่ระยะยึด 0.2-1.6 มิลลิเมตร



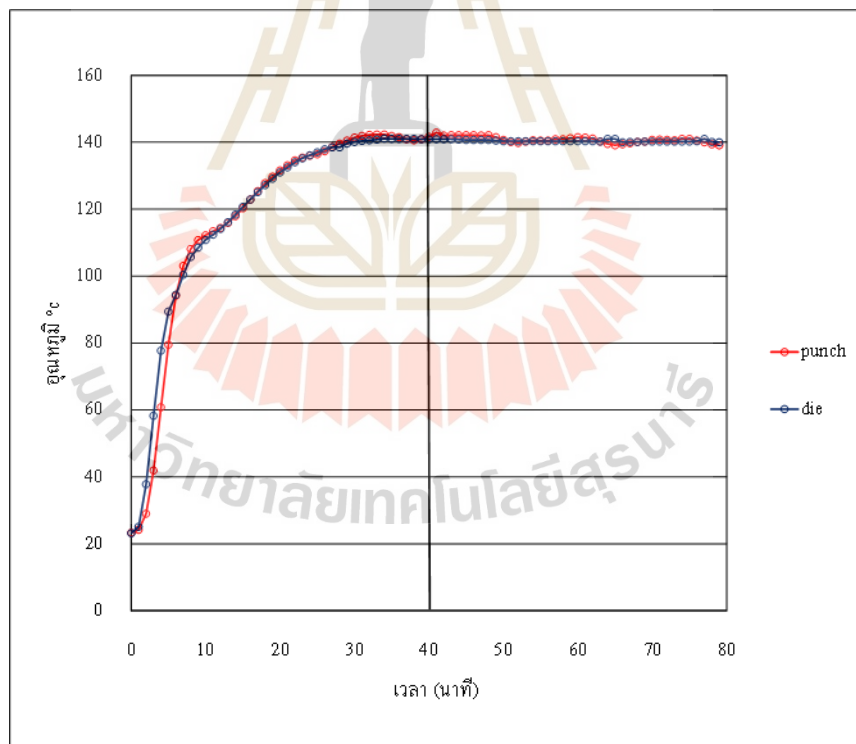
รูปที่ 4.13 ภาพถ่ายชิ้นงานหลังทดสอบแรงดึงที่ระยะยึด 0.2-1.6 มิลลิเมตร

บทที่ 5

สมบัติการลากขึ้นรูป

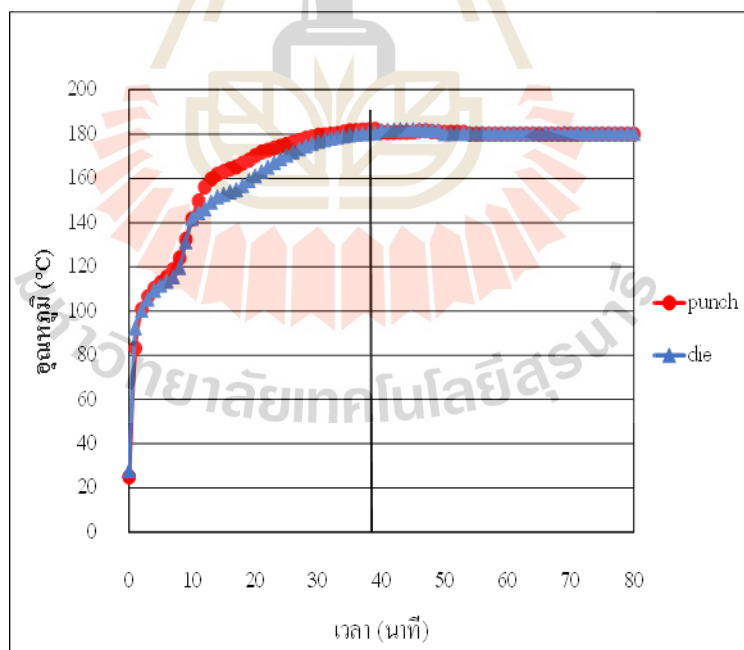
5.1 การให้ความร้อนแม่พิมพ์

แม่พิมพ์และชุดทำความร้อนที่ถูกผลิตเสร็จแล้วนั้นควรทำการทดสอบเพื่อหาเวลาที่สามารถเริ่มทำงานได้ จึงทำการทดลองการใช้อุปกรณ์ทำความร้อนกับแม่พิมพ์บนและแม่พิมพ์ล่าง โดยทำการตั้งอุณหภูมิไว้ที่ 140 และ 180 องศาเซลเซียสเนื่องจากการทดสอบลากขึ้นรูปที่หลายอุณหภูมิและเพื่อให้ทราบว่าชุดควบคุมและชุดทำความร้อนใช้เวลาเท่าใดในการอุ่นแม่พิมพ์เพื่อให้อุณหภูมิถึงตามที่กำหนด ในการทดสอบนี้ทดสอบที่อุณหภูมิ 140 และ 180 องศาเซลเซียส ในการทดสอบนี้ทำการจับเวลาและจดบันทึกอุณหภูมิของแม่พิมพ์บนและแม่พิมพ์ล่างดูได้จากรูปที่ 5.1 และรูปที่ 5.2



รูปที่ 5.1 เส้นอุณหภูมิของแม่พิมพ์เทียบกับเวลาที่อุณหภูมิ 140 องศาเซลเซียส

จากรูปเห็นได้ว่าที่อุณหภูมิ 140 และ 180 องศาเซลเซียส นั้นในช่วง 0-10 นาทีแรก อุปกรณ์ทำความร้อนทำงาน 100 เปอร์เซ็นต์เต็มจำนวนวัตต์ของชุดอุปกรณ์ให้ความร้อนโดยจ่ายกระแสไฟฟ้าเข้ามาที่อุปกรณ์ทำความร้อนจึงทำให้อุณหภูมิของแม่พิมพ์เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจากอุณหภูมิห้องเป็น 100 องศาเซลเซียสโดยประมาณ หลังจากเวลาผ่านไปประมาณ 5 นาทีแรกหลังจากนั้นอุปกรณ์ทำความร้อนจะลดการทำงานลงโดยจ่ายกระแสไฟฟ้าแบบเปิดปิดเพื่อป้องกันไม่ให้อุณหภูมิสูงเกินค่าที่กำหนดแต่ที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส นั้นจะมีลักษณะกราฟที่แตกต่างกันในช่วงอุณหภูมิ 120-140 องศาเซลเซียสความชันกราฟมีการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากชุดอุปกรณ์ทำความร้อนเพิ่มระยะเวลาการเปิดการจ่ายกระแสไฟฟ้าและลดเวลาการปิดการจ่ายกระแสไฟฟ้าจึงทำให้อุณหภูมิเพิ่มขึ้น และหลังจากนาที่ที่ 10-15 นาที อุปกรณ์ทำความร้อนจะลดการทำงานลงโดยการปิดเพื่อปิดการจ่ายกระแสไฟฟ้า และอุปกรณ์จะเปิดการจ่ายกระแสไฟฟ้า และปิดการจ่ายกระแสไฟฟ้าเพื่อรักษาอุณหภูมิของแม่พิมพ์ไว้ตามที่กำหนด ทำให้สรุปได้ว่าการอุ่นแม่พิมพ์นั้นใช้เวลาในการอุ่นแม่พิมพ์บนและแม่พิมพ์ล่างประมาณ 40 นาที ก่อนเริ่มทำการลากขึ้นรูปและค่าอุณหภูมิที่ตั้งไว้ที่ 140 องศาเซลเซียสค่าที่วัดได้อยู่ในช่วง 139-141 องศาเซลเซียส ค่าอุณหภูมิที่ตั้งไว้ที่ 180 องศาเซลเซียสค่าที่วัดได้อยู่ในช่วงและ 179-181 องศาเซลเซียส

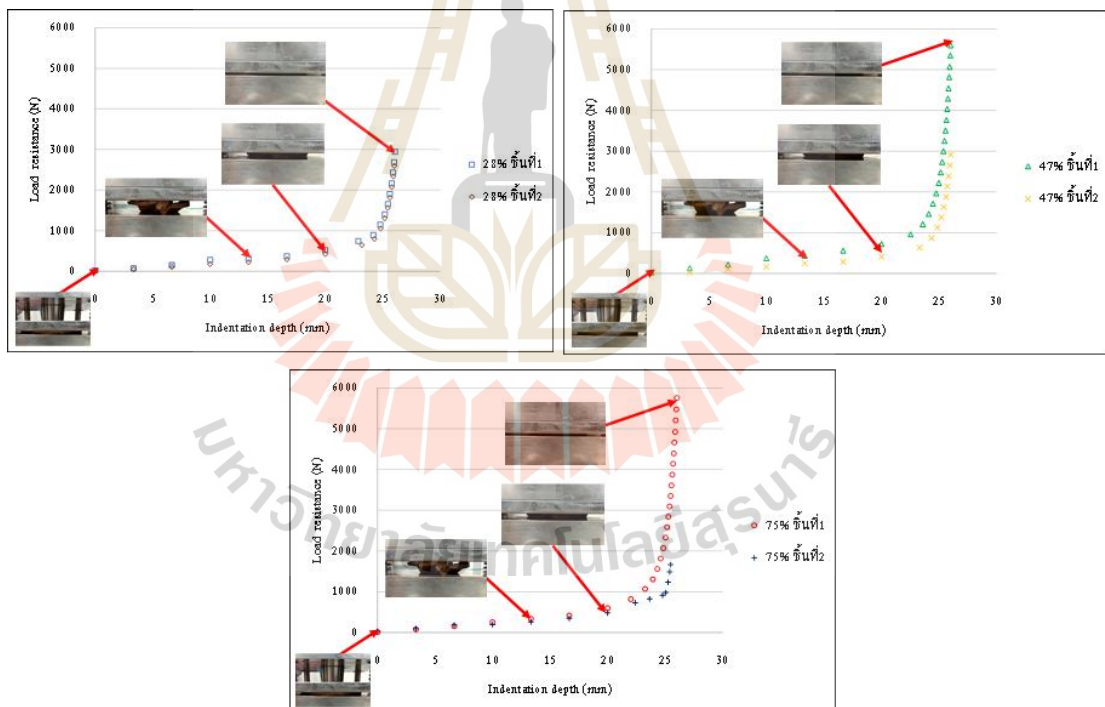


รูปที่ 5.2 เส้นอุณหภูมิของแม่พิมพ์เทียบกับเวลาที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส

5.2 อิทธิพลของตัวแปรการลากขึ้นรูปต่อผลการลากขึ้นรูป

5.2.1 ผลของความชื้นเริ่มต้นของกาบหมากสง

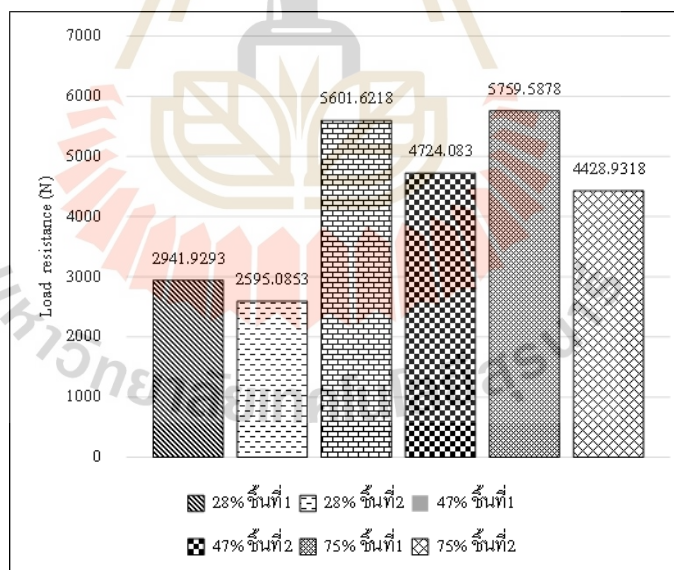
ในการศึกษานี้เป็นการศึกษาผลของความชื้นที่มีผลต่อการลากขึ้นรูป โดยใช้ความชื้นที่ 23-28% 42-47% 70-75% และควบคุมอุณหภูมิแม่พิมพ์ที่ 180 องศาเซลเซียส ควบคุมความเร็วแม่พิมพ์บน 100 มิลลิเมตรต่อนาที และกดแม่พิมพ์แช่เป็นเวลา 5 นาที เพื่อให้ชิ้นงานแห้ง และไม่มี การใส่สปริงกดยึดแผ่นกาบหมากสง การหาความชื้นชิ้นงานนั้นทราบได้โดยการใช้เครื่องทดสอบ ความชื้นและวิธีการเตรียมตัวอย่างทดสอบความชื้นโดยการเตรียมตัวอย่างชิ้นงานขนาดกว้าง 50 มิลลิเมตร และยาว 50 มิลลิเมตร ทำการทดสอบความชื้นชิ้นงานไปพร้อมกับการลากขึ้นรูปเพื่อยืนยัน ว่าความชื้นนั้นอยู่ในค่าที่กำหนด และได้ทำการทำการลากขึ้นรูปกาบหมากสงที่ความชื้นตามที่กำหนดไว้และนำค่าแรงต้านการลากขึ้นรูปมาสร้างเป็นกราฟ ดังแสดงในรูปที่ 5.3 กราฟแสดงแรงต้านการ ลากขึ้นรูปกับระยะกดลึกชิ้นงาน



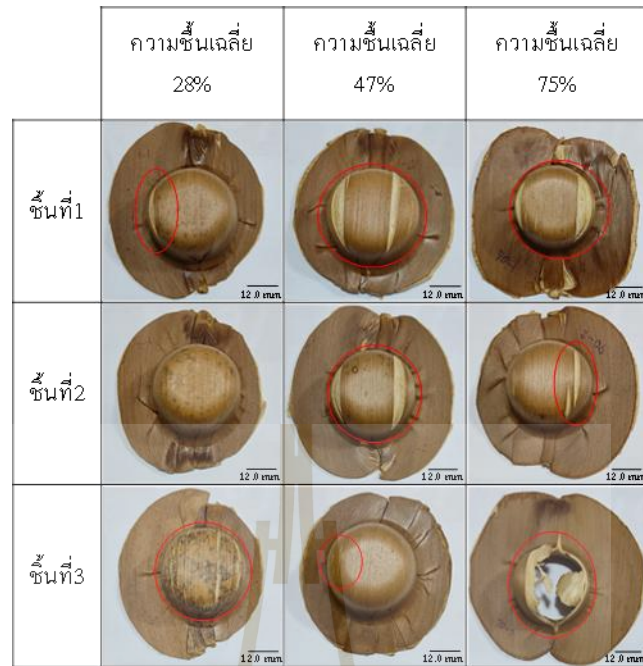
รูปที่ 5.3 แรงต้านการลากขึ้นรูปกับระยะกดลึกชิ้นงานที่ความชื้น 25% 47% และ 75

เมื่อทำการตรวจสอบแรงต้านการกดในช่วงที่ 1 นั้นพบว่าแรงต้านการลากขึ้นรูปนั้นยังมีค่าน้อยเนื่องจากการลากขึ้นรูปนั้นแม่พิมพ์เริ่มสัมผัสกับชิ้นงาน และเกิดการเสีयरูบในปริมาณที่น้อย และจากการสังเกตการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของกาบหมากขณะลากขึ้นรูปพบว่าในกรณีที่กาบหมากสงมี

ความชื้นมากกาบหมากจะอ่อนตัวและเกิดการย่นมาซ้อนเกยกันบริเวณด้านบนของแม่พิมพ์มากกว่า ในช่วงที่สองนี้ คือช่วงที่ลากขึ้นรูปนั้นในช่วงนี้ค่าแรงต้านการลากขึ้นรูปนั้นได้เพิ่มขึ้นเป็นแบบเส้นตรง จะสังเกตเห็นได้ว่ากาบหมากนั้นมีการยกตัว และดันแป้นกดยึดชิ้นงานให้ยกตัวขึ้นดังแสดงในรูปที่ 5.3 ที่ระยะกดเท่ากับศูนย์นั้นตัวกดยึดแผ่นชิ้นงานจะห่างจากแม่พิมพ์ล่างเท่ากับควมหนาชิ้นงานแต่เมื่อเพิ่มระยะกดจาก 0-13 มิลลิเมตรตัวกดยึดแผ่นชิ้นงานเคลื่อนที่ติดแม่พิมพ์บนจึงทำให้ชิ้นงานเกิดการพับซ้อนเกยกันและถูกลากลงไปในช่วงที่ 2 นี้มีความสำคัญมากเพราะชิ้นงานนั้นเกิดการเปลี่ยนรูปใน ปริมาณที่มากเนื่องจากชิ้นงานถูกลากลงในแม่พิมพ์ และในช่วงที่ 3 นั้นค่าแรงต้านการลากขึ้นรูปได้ เพิ่มขึ้นเป็นอย่างมากเนื่องจากกาบหมากสองที่เกิดการพับกันนั้นได้ทำให้ขอบด้านบนของชิ้นงานเกย ซ้อนกัน และพบว่ากราฟมีลักษณะคล้ายกันแต่ที่แตกต่างกันคือค่าแรงกดสูงสุดดังแสดงในรูปที่ 5.4 พบว่าความชื้นที่ 75% มีค่าความต้านทานการลากขึ้นรูปสูงสุดเท่ากับ 5759.58 นิวตัน ที่ความชื้นที่ 47% มีค่าแรงต้านทานการลากขึ้นรูปสูงสุดเท่ากับ 5601.62 นิวตันและที่ความชื้น 28% ค่าความ ต้านทานการลากขึ้นรูปสูงสุดเท่ากับ 2941.92 นิวตันกาบหมากสองมีความชื้นน้อยกว่าและส่วนของ กาบหมากที่ซ้อนเกยกันอยู่ในช่วงการกดแม่พิมพ์บนจึงทำให้พบว่าแรงต้านการขึ้นรูปโดยเฉพาะในช่วง ท้ายมีค่าสูงกว่ากรณีกาบหมากสองที่มีความชื้นต่ำกว่า



รูปที่ 5.4 แรงต้านการลากขึ้นรูปกับระยะกดลึกชิ้นงานที่ความชื้น 25% 47% และ 75



รูปที่ 5.5 ข้อบกพร่องของชิ้นงานที่ความชื้น 28% 47% และ 75%



รูปที่ 5.6 ข้อบกพร่องของชิ้นงานที่บริเวณด้านหน้าของชิ้นงานที่ความชื้น 28% 47% 75%



รูปที่ 5.7 ซ็อกบพร่องของชั้นงานที่บริเวณข้างล่างของชั้นงานที่ความชื้น 28% 47% 75%

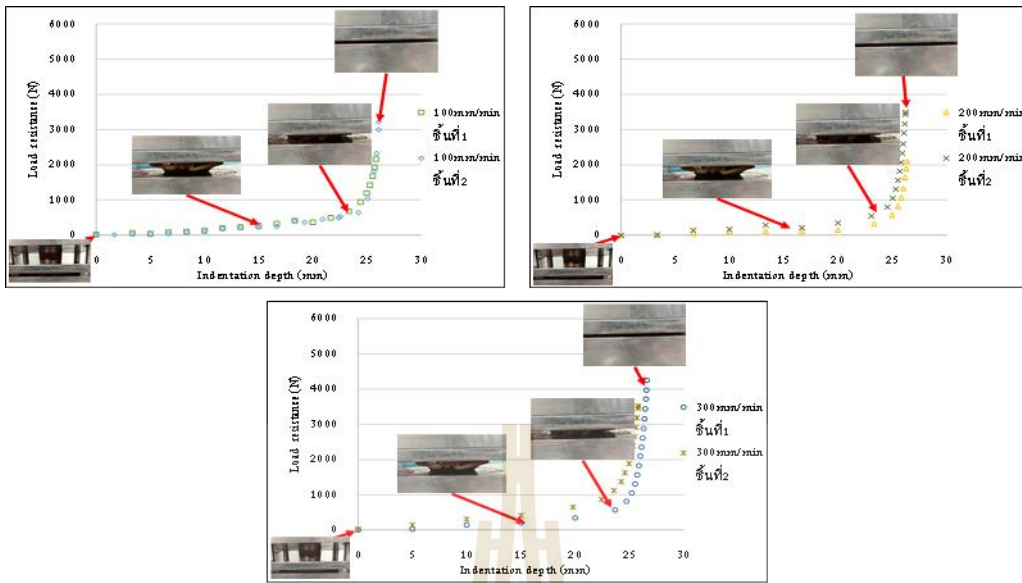
และเมื่อพิจารณาผลิตภัณฑ์หลังจากการลวกชั้น รูปในรูปที่ 5.5 พบว่าที่ความชื้น 75% นั้นจะเกิดปัญหาการฉีกขาดที่รุนแรงที่สุด รองลงมาที่ความชื้น 47% และ 28% และในรูปที่ 5.6 พบว่าชั้นงานเกิดการฉีกขาดที่บริเวณรัศมีของแม่พิมพ์บนซึ่งขาดตามลายบนผิวของกาบหมากและในจุดนี้จะเกิดความเค้นแรงดึงภายในสูงจึงทำให้เกิดการฉีกขาดที่บริเวณรัศมีของแม่พิมพ์บนโดยผู้วิจัยได้แสดงผลการจำลองความเค้นขณะลวกชั้นรูปและอธิบายไว้ในบทที่ 6 ในรูปที่ 5.7 พบว่าเกิดปัญหารอยย่นที่บริเวณขอบของชั้นงาน และการฉีกขาดที่บริเวณก้นของชั้นงานและพบว่าที่บริเวณก้นของผลิตภัณฑ์นั้นเกิดการฉีกขาดโดยรอยฉีกขาดนั้นเกิดขึ้นขนานกับเส้นลายบนผิวของกาบหมาก จากการทดลองพบว่ากาบหมากสูงที่มีความชื้นสูงเกิดการฉีกขาดที่รุนแรงกว่ากาบหมากสูงที่มีความชื้นต่ำกว่าทำให้เกิดความเข้าใจได้ว่าเมื่อกาบหมากสูงมีความชื้นมากถึงจุดหนึ่ง กาบหมากจะเกิดการฉีกขาดได้ง่ายเมื่อมีแรงจากการขึ้นรูปมากกระทำถึงแม่พิมพ์ขึ้นรูปจะมีอุณหภูมิสูงก็ไม่สามารถทำให้ความชื้นในกาบหมากสูงลดลงได้ เนื่องจากความเค้นดึงที่เกิดขึ้นสูงเกิดขึ้นในกาบหมากสูงตั้งแต่ช่วงเริ่มต้นของการลวกชั้น ดังแสดงโดยผลการจำลองด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ในรูปที่ 6

5.2.2 ผลของความเร็วจการลวกชั้นรูป

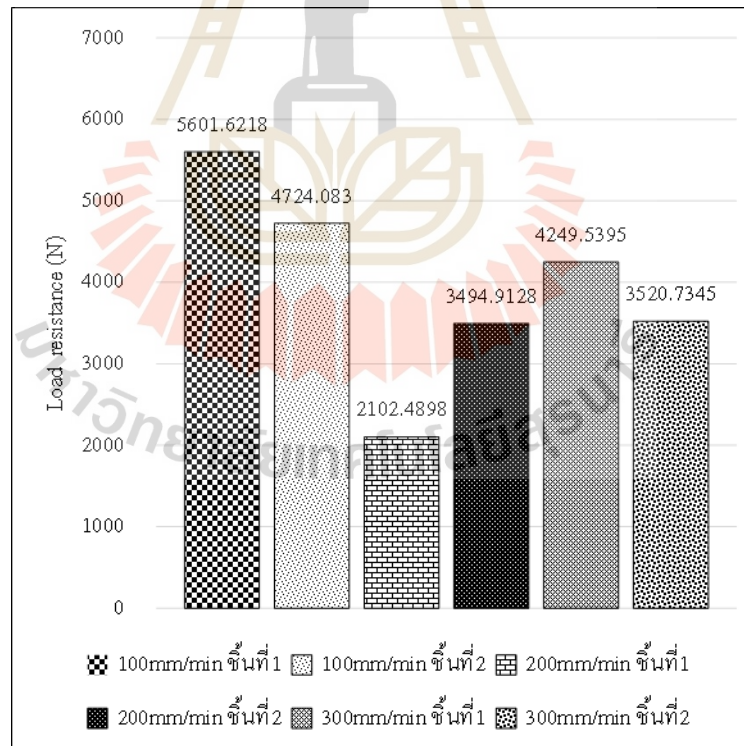
ในการศึกษาเป็นการศึกษาอิทธิพลของความเร็วในการเคลื่อนที่ของแม่พิมพ์บน โดยใช้ความเร็วในการเคลื่อนที่ 100 200 300 มิลลิเมตรต่อนาที และควบคุมอุณหภูมิที่ 180 องศาเซลเซียสและควบคุมความชื้นที่ 47% ไม่มีการใส่สปริงกดยึดแผ่นกาบหมากสูงและกดยึดชั้นงานเข้าไว้แม่พิมพ์เป็นเวลา 5 นาที เพื่อให้ชั้นงานกาบหมากสูงคงรูป ในรูปที่ 5.8 กราฟแรงต้านการลวกชั้นรูปกับระยะกดล็กที่ความเร็ว 100 200 และ 300 มิลลิเมตรต่อนาทีพบว่าความชันกราฟแบ่งออกได้เป็น 3 ช่วง ในช่วงที่ 1 พบว่าแรงต้านการลวกชั้นรูปนั้นยังมีค่าความชันที่ ต่ำค่าความชันที่ต่ำนี้อยู่ในช่วง

ระยะกดลึกที่ 0–15 มิลลิเมตร เนื่องจากในช่วงแรกนี้การลากขึ้นรูปยังคงใช้แรงในการลากขึ้นรูปที่ต่ำ เมื่อสังเกตจากในรูปภาพในจุดที่ 0 มิลลิเมตร และในจุดที่ 15 มิลลิเมตรพบว่าแป้นกดยึดแผ่นชิ้นงาน กาบหมากสงถูกยกขึ้นโดยบริเวณขอบของกาบหมากสงถูกยกตัวขึ้นด้วยการเคลื่อนที่ของแม่พิมพ์บน และทำให้กาบหมากสงเกิดการยุบตัวของกาบหมากสงและในช่วงที่ 2 พบว่ากราฟในช่วงที่ 15 มิลลิเมตร ถึง 25 มิลลิเมตรนั้นมีค่าความชันที่เพิ่มมากกว่าในช่วงที่ 1 เนื่องจากในช่วงนี้การลากขึ้นรูป มีการใช้แรงในการลากขึ้นรูปที่สูงขึ้นเพราะชิ้นงานถูกลากลงไปแม่พิมพ์ล่างจึงทำให้กราฟมีค่าความชันที่เพิ่มขึ้นและในช่วงที่ 3 นี้พบว่ากราฟในช่วงที่ 25 มิลลิเมตร ถึง 27 มิลลิเมตร นั้นมีค่าความชันที่เพิ่มขึ้นอย่างมากเมื่อเทียบกับระยะกดลึกชิ้นงานเนื่องจากเกิดการกดอัดของขอบของกาบหมากสงที่ยกตัวขึ้นในช่วงแรกและเมื่อเปรียบเทียบกราฟแรงต้านการลากขึ้นรูปที่ความเร็ว 100 มิลลิเมตรต่อนาที ค่าแรงต้านการลากขึ้นรูปสูงสุดอยู่ที่ 5,601 นิวตันและที่ความเร็ว 200 มิลลิเมตรต่อนาที ค่าแรงต้านการลากขึ้นรูปสูงสุดอยู่ที่ 3,494 นิวตัน และที่ความเร็ว 300 มิลลิเมตรต่อนาที ค่าแรงต้านการลากขึ้นรูปสูงสุดอยู่ที่ 4,249 นิวตัน ดังแสดงในรูปที่ 5.9 เห็นได้ว่าที่ความเร็ว 100 มิลลิเมตรต่อนาที ทำให้แรงต้านการลากขึ้นรูปสูงสุด

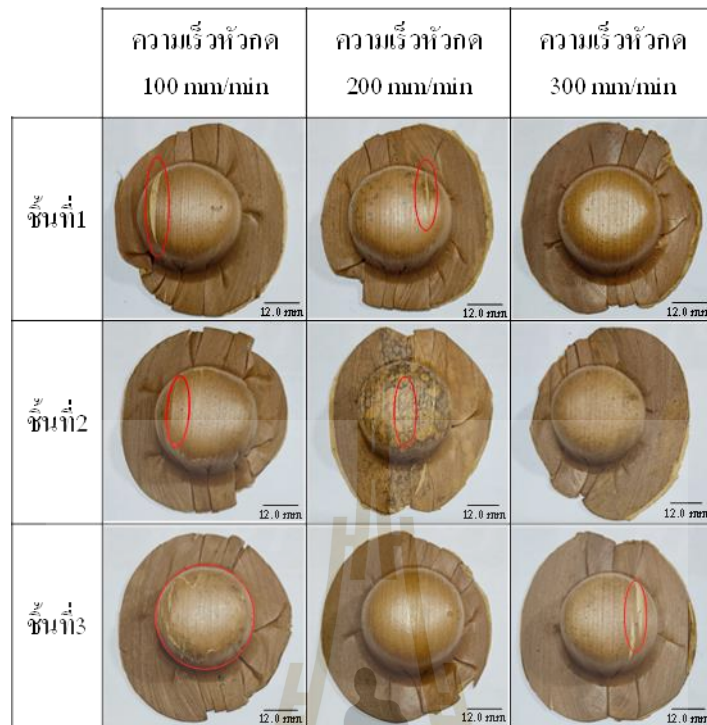
เมื่อชิ้นงานถูกลากขึ้นรูปจนเสร็จจึงนำชิ้นงานมาตรวจสอบด้วยสายตาแสดงในรูปที่ 5.10 เป็นรูปบริเวณกันของชิ้นงาน พบว่าที่ความเร็ว 100 มิลลิเมตรต่อนาที เกิดรอยแตกทั้ง 3 ชั้นมีรอยแตกตามขวางกับเส้นลายบนพื้นผิวของกาบหมากสงและรอยแตกขนานกับเส้นลายบนพื้นผิวของกาบหมากสงและเกิดรอยยุบบริเวณขอบของชิ้นงานทั้ง 3 ชั้น และที่ความเร็ว 200 มิลลิเมตรต่อนาที พบว่าชิ้นงานเกิดการฉีกขาดที่ขนานตามเส้นลายบนพื้นผิวของกาบหมากสงทั้งชั้นที่ 1 และ 2 แต่ไม่พบในชั้นที่ 3 และเกิดรอยยุบบริเวณขอบของกาบหมากสง และที่ความเร็ว 300 มิลลิเมตรต่อนาที พบว่าในชิ้นงานที่ 1 และ 2 ไม่พบรอยฉีกขาดที่บริเวณด้านล่างของชิ้นงาน แต่พบรอยฉีกขาดบริเวณด้านล่างในชั้นที่ 3 แต่เมื่อทำการตรวจสอบชิ้นงานด้านข้างและด้านหน้าแสดงในรูปที่ 5.11 และ 5.12 ที่ความเร็ว 100 และ 200 มิลลิเมตรต่อนาทีพบรอยแตกและรอยยุบที่บริเวณขอบของชิ้นงาน แต่ที่ความเร็ว 100 จะพบรอยแตกตามขวางของเส้นลายบนพื้นผิวของกาบหมากสงและที่ความเร็ว 300 มิลลิเมตรต่อนาที รอยแตกที่ชิ้นงานมีขนาดเล็กกว่าที่ความเร็ว 100 และ 200 มิลลิเมตรต่อนาที และในรูปที่ 5.11 พบว่าชิ้นงานเกิดการแตกในชั้นที่ 2 และ 3 จากการตรวจสอบค่าแรงต้านการขึ้นรูปสูงสุดแสดงให้เห็นว่า การขึ้นรูปด้วยความเร็วต่ำน่าจะส่งผลให้ชิ้นงานแห้งมากกว่า เนื่องจากเวลาที่ชิ้นงานสัมผัสกับแม่พิมพ์ร้อนนานกว่าและส่งผลต่อเนื่องให้ชิ้นงานมีความแข็งแรงสูง นอกจากนี้การพบการฉีกขาดของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยความเร็วต่ำที่รุนแรง ทำให้เกิดความเข้าใจเพิ่มเติมคือ การขึ้นรูปที่ช้ามากส่งผลให้กาบหมากสงแห้งซึ่งก็ทำให้กาบหมากสงเกิดการฉีกขาดได้เช่นกัน



รูปที่ 5.8 กราฟแรงต้านการลากขึ้นรูปกับระยะกดลึกขึ้นงานที่ความเร็ว 100 200 300 มิลลิเมตรต่อนาที



รูปที่ 5.9 แรงต้านการลากขึ้นรูปกับระยะกดลึกขึ้นงานที่ความเร็วหัวกด 100 200 300 มิลลิเมตรต่อนาที



รูปที่ 5.10 ข้อบกพร่องของชิ้นงานที่บริเวณด้านล่างของชิ้นงานที่ความเร็วหัวกัด 100 200 300 มิลลิเมตรต่อนาที



รูปที่ 5.11 ข้อบกพร่องของชิ้นงานที่บริเวณด้านหน้าของชิ้นงานที่ความเร็วหัวกัด 100 200 300 มิลลิเมตรต่อนาที

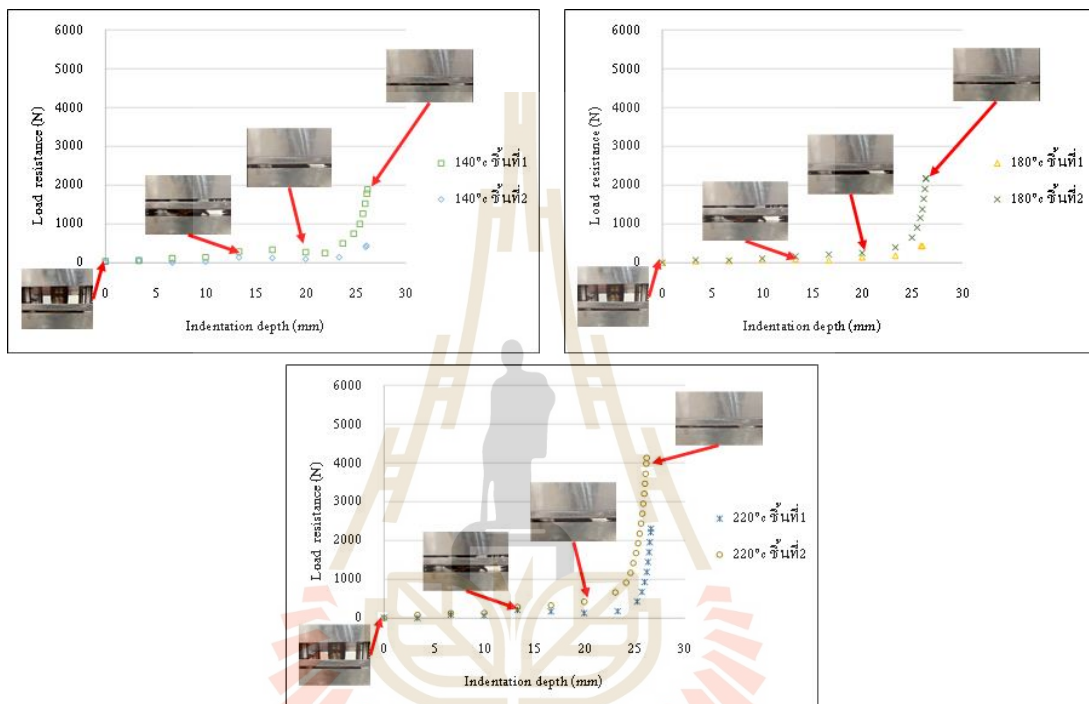


รูปที่ 5.12 ข้อบกพร่องของชิ้นงานที่บริเวณด้านข้างของชิ้นงานที่ความเร็วหัวกด 100 200 300 มิลลิเมตรต่อนาที

5.2.3 ผลของอุณหภูมิแม่พิมพ์ลากลากขึ้นรูป

ในการศึกษานี้เป็นการศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิของแม่พิมพ์ที่ 140 180 และ 220 องศาเซลเซียสโดยใช้ความเร็วในการเคลื่อนที่ 200 มิลลิเมตรต่อนาที ควบคุมความชื้นของกาบหมากสงที่ 47% และไม่มีการใส่สปริงกดยึดแผ่นกาบหมากสงและกดชิ้นงานแช่ไว้ในแม่พิมพ์เป็นเวลา 5 นาที เพื่อให้ชิ้นงานกาบหมากสงคงรูปและได้นำผลของแรงต้านการลากลากขึ้นรูปเทียบกับระยะลึก ดังแสดงในรูปที่ 5.13 กราฟแรงต้านการลากลากขึ้นรูปกับระยะกดลึกที่อุณหภูมิ 140 180 และ 220 องศาเซลเซียสพบว่าความชันกราฟแบ่งออกได้เป็น 3 ช่วง ในช่วงที่ 1 พบว่าแรงต้านการลากลากขึ้นรูปนั้นยังมีค่าความชันที่ต่ำค่าความชันที่ต่ำอยู่ในช่วงระยะกดลึกที่ 0-15 มิลลิเมตร เนื่องจากในช่วงแรกนี้การลากลากขึ้นรูปยังคงใช้แรงในการลากลากขึ้นรูปที่ต่ำเมื่อสังเกตจากในรูปภาพในจุดที่ 0 มิลลิเมตร และในจุดที่ 15 มิลลิเมตรพบว่าแป้นกดยึดแผ่นชิ้นงานกาบหมากสงถูกยกขึ้นโดยบริเวณขอบของกาบหมากสงถูกยกตัวขึ้นด้วยการเคลื่อนที่ของแม่พิมพ์บนและทำให้กาบหมากสงเกิดการย่นตัวของกาบหมากสงและในช่วงที่ 2 พบว่ากราฟในช่วงที่ 15 มิลลิเมตร ถึง 25 มิลลิเมตรนั้นมีค่าความชันที่เพิ่มมากกว่าในช่วงที่ 1 เนื่องจากในช่วงนี้การลากลากขึ้นรูปมีการใช้แรงในการลากลากขึ้นรูปที่สูงขึ้นเพราะชิ้นงานถูกลากลงไปแม่พิมพ์ล่างจึงทำให้กราฟมีค่าความชันที่เพิ่มขึ้น ในช่วงที่ 3 นี้พบว่ากราฟในช่วงที่ 25 มิลลิเมตร ถึง 27 มิลลิเมตร นั้นมีค่าความชันที่เพิ่มขึ้นอย่างมากเมื่อเทียบกับระยะกดลึกชิ้นงานเนื่องจากเกิดการกดอัดของขอบของกาบหมากสงที่ยกตัวขึ้นในช่วงแรกและเมื่อเปรียบเทียบกราฟแรงต้านการลากลากขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 140 องศาเซลเซียส ค่าแรงต้านการลากลากขึ้นรูปสูงสุดอยู่ที่ 1,887 นิวตันและที่อุณหภูมิ 180

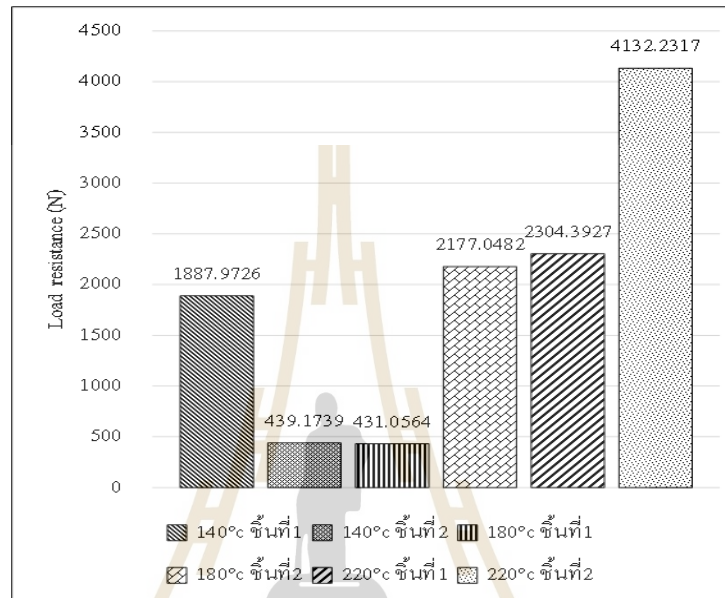
องศาเซลเซียส ค่าแรงต้านการลากขึ้นรูปสูงสุดอยู่ที่ 2,177 นิวตัน และที่อุณหภูมิ 220 องศาเซลเซียส ค่าแรงต้านการลากขึ้นรูปสูงสุดอยู่ที่ 4,132 นิวตัน ดังแสดงในรูปที่ 5.14 เห็นได้ว่าที่อุณหภูมิ 220 องศาเซลเซียส แรงต้านการลากขึ้นรูปสูงสุดการที่พบแรงต้านการขึ้นรูปสูงสุดมากในกรณีใช้อุณหภูมิแม่พิมพ์สูงอาจเป็นเพราะชิ้นงานแห้งในระหว่างเกิดการไหลตัวเข้าไปในแม่พิมพ์จึงทำให้แรงต้านการลากขึ้นรูปสูง



รูปที่ 5.13 กราฟแรงต้านการลากขึ้นรูปกับระยะกดลึกชิ้นงานที่อุณหภูมิ 140 180 220 องศาเซลเซียส

เมื่อชิ้นงานถูกลากขึ้นรูปจนเสร็จจึงนำชิ้นงานมาตรวจสอบด้วยสายตาแสดงในรูปที่ 5.15 เป็นรูปบริเวณกันของชิ้นงานจะพบว่าที่อุณหภูมิ 220 องศาเซลเซียส เกิดรอยแตกทั้งหมด 2 ชั้นที่มีรอยแตกขนานกับเส้นลายบนพื้นผิวของกาบหมากสงที่บริเวณขอบและเกิดรอยย่นบริเวณขอบของชิ้นงานทั้ง 3 ชั้น และที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส พบว่าชิ้นงานเกิดการฉีกขาดที่ขนานตามเส้นลายพื้นผิวของกาบหมากสงในชั้นที่ 3 ไม่พบในชั้นที่ 1 และ 2 และเกิดรอยย่นบริเวณขอบของกาบหมากสงทั้ง 3 ชั้น และที่อุณหภูมิ 140 องศาเซลเซียส พบว่าในชิ้นงานที่ 1 2 และ 3 ไม่พบรอยฉีกขาดที่บริเวณด้านล่างของชิ้นงาน แต่พบรอยย่นบริเวณขอบของกาบหมากสง เมื่อทำการตรวจสอบชิ้นงานด้านข้างและด้านหน้าแสดงในรูปที่ 5.15 5.16 และ 5.17 ที่อุณหภูมิ 140 180 และ 220 องศาเซลเซียส พบรอยแตกและรอยย่นที่บริเวณขอบของชิ้นงาน แต่ที่อุณหภูมิ 220 พบรอยแตกขนานกับเส้นลายบน

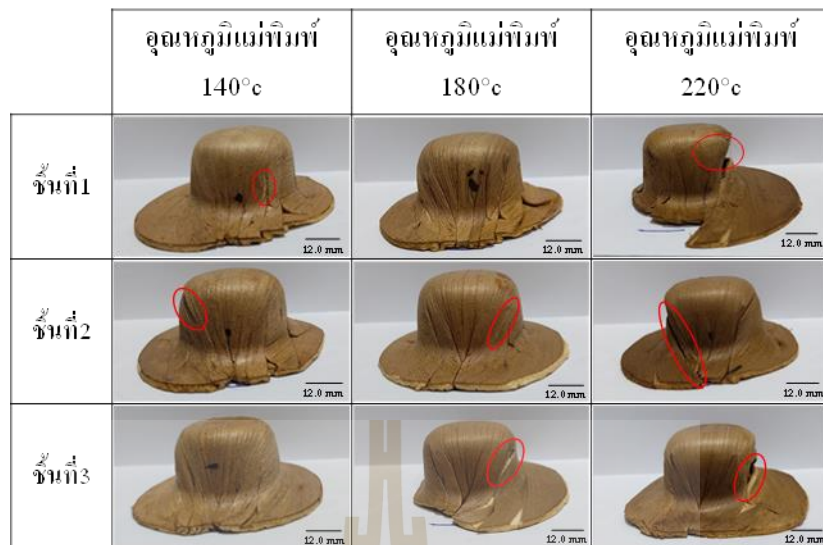
พื้นผิวกาบหมากสกรอยแตกนี้ทะลุผนังชิ้นงานและมีขนาดใหญ่จากการฉีกขาดที่รุนแรงที่พบในกรณีการขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์อุณหภูมิ 220 องศาเซลเซียส การขึ้นรูปโดยใช้แม่พิมพ์อุณหภูมิสูงอาจส่งผลให้กาบหมากแห้งและมีความเปราะแตกหรือฉีกขาดได้ง่ายในขณะที่ขึ้นรูป นอกจากนี้ยังพบว่าการใช้แม่พิมพ์ที่อุณหภูมิสูงไม่ได้เป็นผลดีต่อทั้งด้านความสามารถในการขึ้นรูปและลักษณะของบรรจุภัณฑ์ที่ได้



รูปที่ 5.14 แรงต้านการลากขึ้นรูปกับระยะกดลึกชิ้นงานที่อุณหภูมิ 140 180 220 องศาเซลเซียส



รูปที่ 5.15 ข้อบกพร่องของชิ้นงานที่บริเวณด้านล่างของชิ้นงานที่อุณหภูมิ 140 180 และ 220 องศาเซลเซียส



รูปที่ 5.16 ข้อบกพร่องของชิ้นงานที่บริเวณด้านหน้าของชิ้นงานที่อุณหภูมิ 140 180 และ 220 องศาเซลเซียส

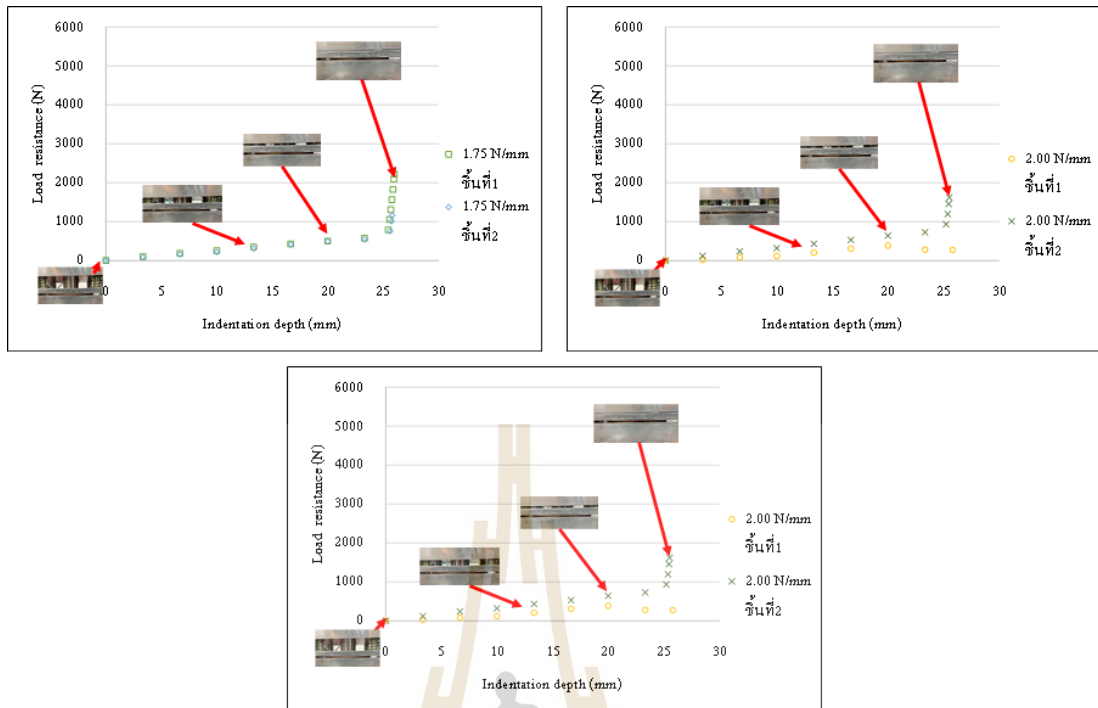


รูปที่ 5.17 ข้อบกพร่องของชิ้นงานที่บริเวณด้านข้างของชิ้นงานที่อุณหภูมิ 140 180 และ 220 องศาเซลเซียส

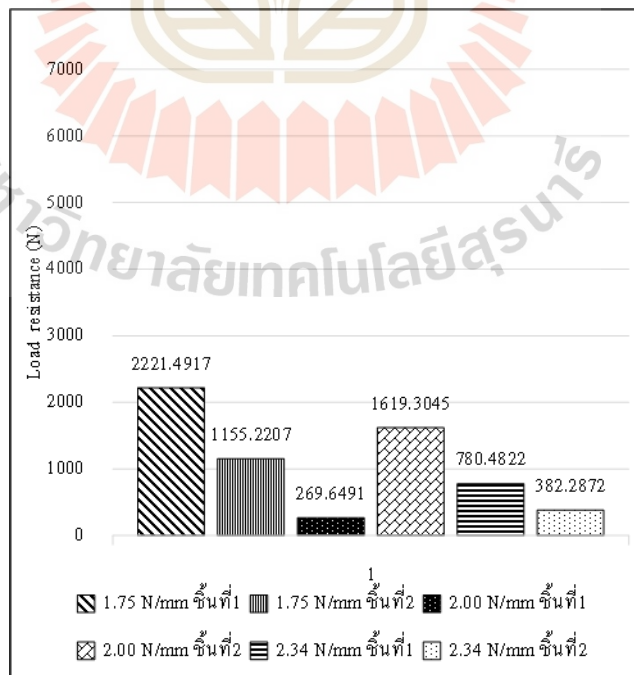
5.2.4 ผลของแรงกดยึดของกาบหมากสง

ในการศึกษานี้เป็นการศึกษาอิทธิพลของแรงกดยึดแผ่นกาบหมากสงโดยใช้สปริงที่มีค่าคงตัวสปริงแตกต่างกันที่ 1.75 2.00 และ 2.34 นิวตันต่อมิลลิเมตร แม่พิมพ์บนเคลื่อนที่ 200 มิลลิเมตรต่อนาที ควบคุมความชื้นของกาบหมากสงที่ 47% ใช้อุณหภูมิแม่พิมพ์ที่ 180 องศาเซลเซียส และกดขึ้นงานแช่ไว้เป็นเวลา 5 นาที เพื่อให้ขึ้นงานกาบหมากสงคงรูปหลังจากการขึ้นรูป และได้ทำการทดลองโดยนำผลของแรงด้านการลากขึ้นรูปเทียบกับระยะลึก ดังแสดงในรูปที่ 5.18 กราฟแสดงแรงด้านการลากขึ้นรูปกับระยะกดลึกขึ้นงาน และที่ค่าคงตัวสปริง 1.75 นิวตันต่อมิลลิเมตร ค่าแรงด้านการลากขึ้นรูปสูงสุดอยู่ที่ 2221 นิวตัน และที่ค่าคงตัวสปริงสปริง 2.00 นิวตันต่อมิลลิเมตร ค่าแรงด้านการลากขึ้นรูปสูงสุดอยู่ที่ 2221 นิวตัน และที่ค่าคงตัวสปริง 2.34 นิวตันต่อมิลลิเมตร ค่าแรงด้านการลากขึ้นรูปสูงสุดอยู่ที่ 1,619 นิวตันต่อมิลลิเมตรดังแสดงในรูปที่ 5.19 เมื่อทำการตรวจสอบแรงด้านการกด พบว่ามีค่าแรงดึงแบ่งออกได้เป็น 3 ในช่วงที่ 1 พบว่าแรงด้านการลากขึ้นรูปนั้นยังมีค่าความชื้นที่ต่ำกว่าความชื้นที่ต่ำอยู่ในช่วงระยะกดลึกที่ 0–15 มิลลิเมตร เนื่องจากในช่วงแรกนี้การลากขึ้นรูปยังคงใช้แรงในการลากขึ้นรูปที่ต่ำเมื่อสังเกตจากในรูปภาพในจุดที่ 0 มิลลิเมตร และในจุดที่ 15 มิลลิเมตรพบว่าแป้นกดยึดแผ่นขึ้นงานกาบหมากสงถูกกดด้วยแรงกดสปริง จึงทำให้กาบหมากสงไม่ยกตัวขึ้นในระหว่างการลากขึ้นรูปและในช่วงที่ 2 พบว่ากราฟในช่วงที่ 15 มิลลิเมตร ถึง 25 มิลลิเมตรนั้นมีค่าความชื้นน้อยกว่าในช่วงที่ 1 และในช่วงที่ 3 นี้พบว่ากราฟในช่วงที่ 25 ถึง 27 มิลลิเมตร นั้นมีค่าความชื้นที่เพิ่มขึ้นเฉพาะค่าคงตัวสปริง 1.75 นิวตันต่อมิลลิเมตร แต่ที่ค่าคงตัวสปริง 2.00 2.34 นิวตันต่อมิลลิเมตรที่แรงด้านการลากขึ้นรูปลดลงเนื่องจากขึ้นงานเกิดการฉีกขาด จึงทำให้ค่าแรงด้านการลากขึ้นรูปลดลงจึงทำให้เห็นว่าความแข็งของสปริงสามารถควบคุมการไหลตัวของกาบหมากสงดังแสดงในรูปที่ 5.20

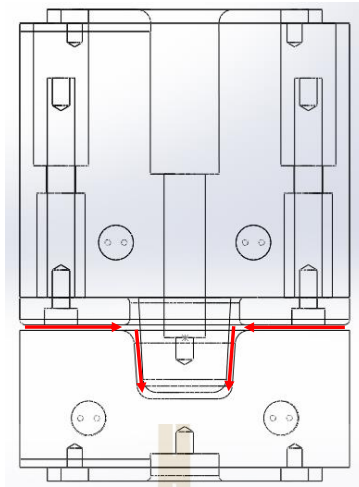
เมื่อขึ้นงานถูกลากขึ้นรูปจนเสร็จจึงนำขึ้นงานมาตรวจสอบด้วยสายตาดังแสดงในรูปที่ 5.21 เป็นรูปบริเวณกันของขึ้นงานพบว่ากรณีใช้สปริงที่มีค่าคงตัวสปริง 2.00 นิวตันต่อมิลลิเมตร มีรอยแตกบริเวณกันเพียงขึ้นเดียวที่มีรอยแตกขนานกับเส้นลายบนพื้นผิวของกาบหมากสงและที่บริเวณขอบเกิดรอยย่นทั้งหมด แต่เมื่อทำการตรวจสอบขึ้นงานด้านข้างและด้านหน้าแสดงในรูปที่ 5.22 และ 5.23 ที่ค่าคงตัวสปริง 2.00 และ 2.75 นิวตันต่อมิลลิเมตร พบรอยแตกและรอยย่นที่บริเวณขอบของขึ้นงาน แต่ที่ค่าคงตัวสปริง 1.75 นิวตันต่อมิลลิเมตรพบรอยแตกขนานกับเส้นลายบนพื้นผิวกาบหมากสงโดยรอยแตกนี้มีขนาดเล็ก และที่ค่าคงตัวสปริง 2.00 และ 2.75 นิวตันต่อมิลลิเมตรมีรอยฉีกขาดอย่างรุนแรง และเกิดรอยย่น ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าที่ค่าคงตัวสปริง 2.00 2.75 นิวตันต่อมิลลิเมตร เกิดการฉีกขาดเพราะค่าคงตัวสปริงที่สูงขึ้นทำให้แรงกดยึดกาบหมากสงสูงขึ้นจึงทำให้ขึ้นงานไม่ไหลตัวเข้าสู่แม่พิมพ์จึงทำให้เกิดการฉีกขาดอย่างรุนแรงเพราะเกิดความเค้นแรงดึงในขึ้นงานสูงกว่าที่กาบหมากสงจะรับได้



รูปที่ 5.18 กราฟแรงต้านการลากขึ้นรูปกับระยะกดลึกขึ้นงานที่แรงกดสปริง 1.75 2.00 และ 2.34 นิวตันต่อมิลลิเมตร

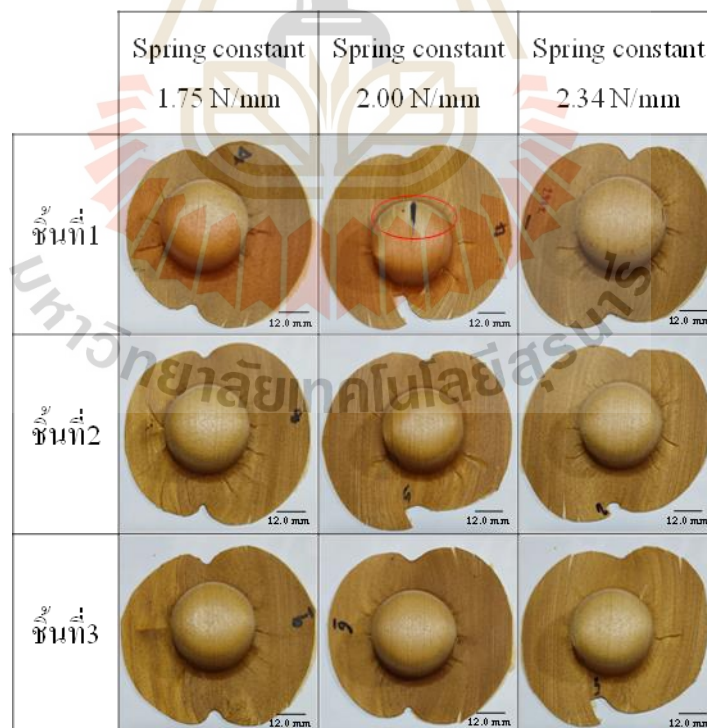


รูปที่ 5.19 กราฟแรงกดสูงสุดที่แรงกดสปริง 1.75 2.00 และ 2.34 นิวตันต่อมิลลิเมตร

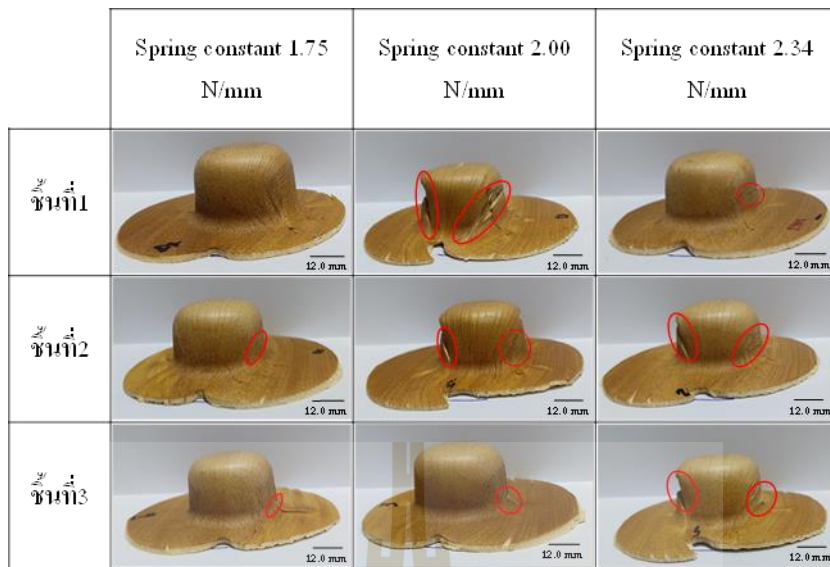


รูปที่ 5.20 แผนภาพแสดงทิศทางการไหลตัวของกาบหมากสง

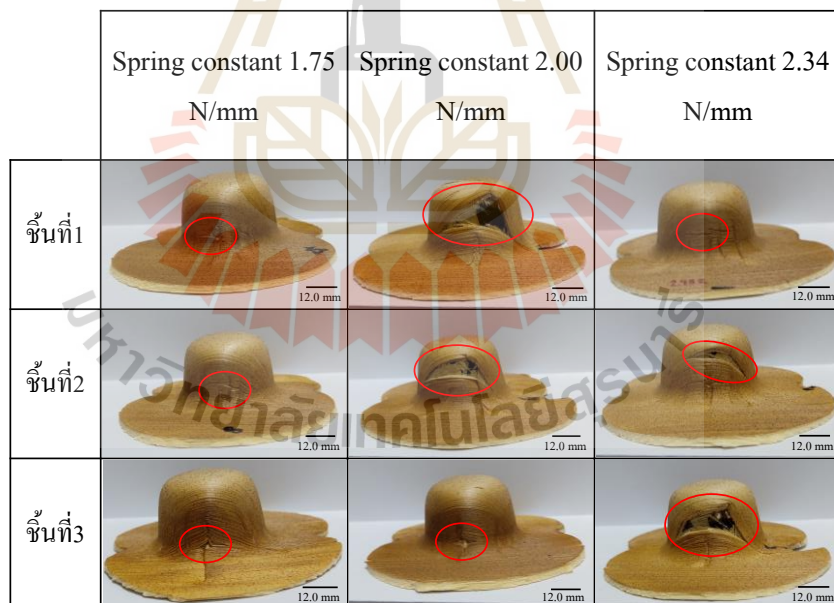
เนื่องจากชิ้นงานไม่สามารถไหลตัวเข้าไปในแม่พิมพ์ช่วงสุดท้ายได้ดังแสดงในรูปที่ 5.20 แสดงทิศทางการไหลตัวของกาบหมากสงทำให้แรงต้านการลากขึ้นรูปสูง



รูปที่ 5.21 ข้อบกพร่องของชิ้นงานที่บริเวณด้านล่างของชิ้นงานที่แรงกดสปริง 1.75 2.00 2.34 นิวตันต่อมิลลิเมตร



รูปที่ 5.22 ข้อบกพร่องของชิ้นงานที่บริเวณด้านหน้าของชิ้นงานที่แรงกดสปริง 1.75 2.00 2.34 นิวตัน ต่อมิลลิเมตร



รูปที่ 5.23 ข้อบกพร่องของชิ้นงานที่บริเวณด้านข้างของชิ้นงานที่แรงกดสปริง 1.75 2.00 2.34 นิวตัน ต่อมิลลิเมตร

บทที่ 6

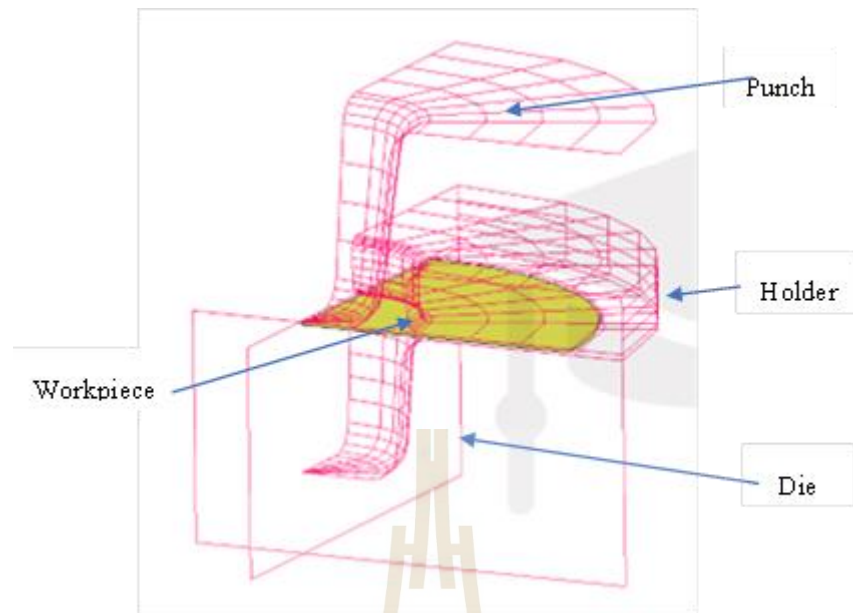
การจำลองด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

จากการทดลองลากขึ้นรูปกาบหมากสงพบว่าข้อบกพร่องที่ทำให้ไม่สามารถนำชิ้นงานไปใช้การได้คือการเกิดรอยฉีกขาดหรือรอยแตกขึ้นบริเวณก้นของผลิตภัณฑ์ ในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยได้ประยุกต์ใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อจำลองกระบวนการลากขึ้นรูปกาบหมากสง โดยมีวัตถุประสงค์หลักเพื่อวิเคราะห์การฉีกขาดของกาบหมากสงขณะลากขึ้นรูป

6.1 โปรแกรมและโมเดลไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับการจำลอง

การจำลองกระบวนการลากขึ้นรูปกาบหมากสงทำโดยใช้โปรแกรม MARC/MENTAT version 2022.4 โมเดลการลากขึ้นรูปถูกสร้างในรูปแบบ 3 มิติ โดยทำการจำลองทำเพียง 1 ใน 4 ส่วนของรูปร่างชุดแม่พิมพ์ลากขึ้นรูปจริง ดังแสดงในรูปที่ 6.1 จากรูป แม่พิมพ์บน แผ่นกดยืดชิ้นงานแม่พิมพ์ล่างถูกสมมติให้เป็นวัตถุแข็งเกร็ง (Rigid body) ในขณะที่ชิ้นงานถูกสมมติให้เป็นวัตถุที่เสียรูปได้ (Deformable body) ส่วนของชิ้นงานกาบหมากถูกแบ่งเป็นเอลิเมนต์ทั้งหมด 5,760 เอลิเมนต์ โดยเอลิเมนต์ที่ใช้ในการจำลองนี้เป็นแบบชนิด shell element (Element Type 75) มีจำนวนโหนด 4 โหนดต่อหนึ่งเอลิเมนต์ ในการจำลองการลากขึ้นรูป แม่พิมพ์บนถูกกำหนดให้กดลงด้วยระยะลึกเท่ากับ 24 มิลลิเมตรนับจากผิวด้านบนของชิ้นงาน

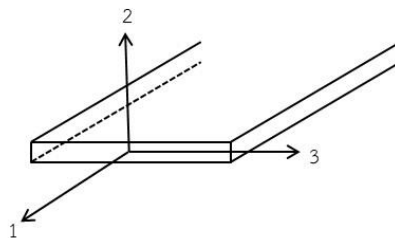
สภาวะการสัมผัสกันของส่วนต่าง ๆ ในโมเดลจำลองถูกกำหนดให้เป็นแบบสัมผัส (Touching) โดยกำหนดค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานระหว่างพื้นผิวเท่ากับ 0.02 ขณะจำลองการลากขึ้นรูป เอลิเมนต์มีโอกาสเกิดการบิดเบี้ยวหรือจม (Penetration) ลงในส่วนใดส่วนหนึ่งของแม่พิมพ์แล้วทำให้การจำลองหยุดลง เพื่อปรับรูปร่างของเอลิเมนต์ที่มีการบิดเบี้ยวและแก้ปัญหาเรื่องการจมของเอลิเมนต์ ผู้วิจัยได้ประยุกต์ใช้การสร้างเอลิเมนต์ใหม่แบบอัตโนมัติ (Auto-remeshing) ร่วมด้วย



รูปที่ 6.1 โมเดล 3 มิติ สำหรับการจำลองกระบวนการลากขึ้นรูป

6.2 โมเดลวัสดุสำหรับกาบหมากง

โมเดลวัสดุเป็นหนึ่งในตัวแปรที่สำคัญและต้องทำการกำหนดให้กับโมเดลการจำลอง โดยในการจำลองครั้งนี้ นำค่าโมเดลวัสดุมาจากการทดสอบสมบัติทางกลของชิ้นงานกาบหมากง โดยใช้ผลทดสอบแรงดึงในทิศทาง 0 องศา หรือทิศทางที่ขนานกับการวางตัวของเส้นใย โดยสมการที่ใช้คำนวณค่าอัตราส่วนปัวซอง (Poisson's ratio) โมดูลัสของยัง (Young Modulus) และโมดูลัสของแรงเฉือน (Shear Modulus) จากสมการที่ 6.1 6.2 และ 6.3 ตามลำดับ โดยรูปที่ 6.2 จะแสดงทิศทางในแต่ละแกน เพื่อใช้ในการคำนวณ ในขั้นตอนสุดท้ายนำค่าที่ได้ไปใส่ในโมเดลวัสดุ (Elastic-Plastic Orthotropic) ในโปรแกรมวิเคราะห์ที่ไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อทำการวิเคราะห์ผลต่อไป



รูปที่ 6.2 ภาพจำลองการระบุทิศทางในแกน xyz

$$v_{12} = -\varepsilon_2/\varepsilon_1 \text{ หรือ } v_{21} = -\varepsilon_1/\varepsilon_2 \quad (6.1)$$

โดยที่	ν	คือ อัตราส่วนปัวซอง
	ϵ	คือ ความเครียดจริง(True strain)

$$E = \frac{FL_0}{A\Delta L} \quad (6.2)$$

โดยที่	E	คือ โมดูลัสของยัง
	F	คือ แรงดึง
	L_0	คือ ความยาวเริ่มต้นของวัสดุทดสอบ
	ΔL	คือ ผลต่างของการเปลี่ยนแปลงความยาว
	A	คือ พื้นที่หน้าตัด

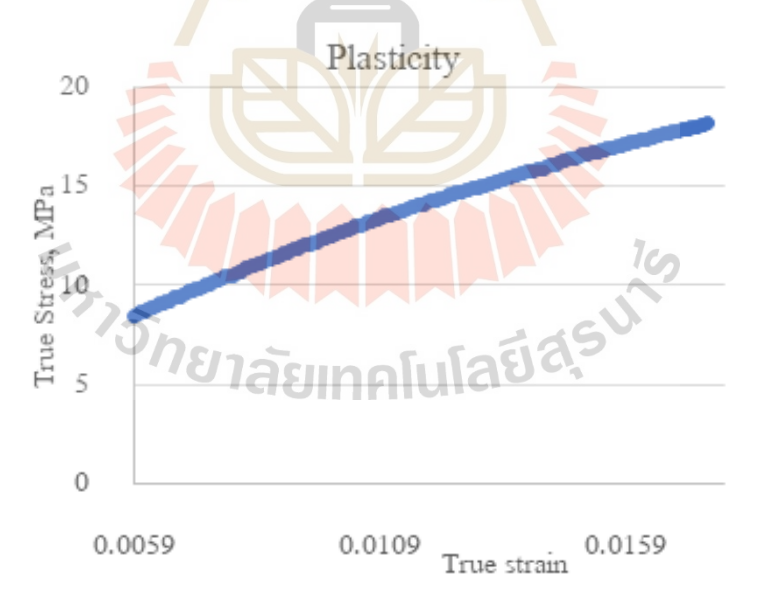
$$\frac{1}{G_{12}} = \frac{1+\nu_{12}}{E_1} + \frac{1+\nu_{21}}{E_2} \quad (6.3)$$

โดยที่	E	คือ โมดูลัสของยัง
	ν	คือ อัตราส่วนปัวซอง
	G	คือ โมดูลัสของแรงเฉือน

จากการนำผลการทดสอบทางกลมาคำนวณตามสมการข้างต้น ได้ตัวแปรแสดงสมบัติในช่วงการเปลี่ยนแปลงรูปร่างแบบยืดหยุ่นดังแสดงในตารางที่ 6.1 สำหรับสมบัติในช่วงที่กาบหมากเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างอย่างถาวร ได้มาจากการนำผลการทดสอบแรงดึงในทิศทางเดียวกับทิศทางการเรียงตัวของเส้นใยบนผิวกาบหมากสงมาคำนวณเป็นความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด และกำหนดเข้าสู่โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ดังแสดงในรูปที่ 6.3

ตารางที่ 6.1 สมบัติในช่วงการเปลี่ยนแปลงรูปร่างแบบยืดหยุ่นของกาบหมาก

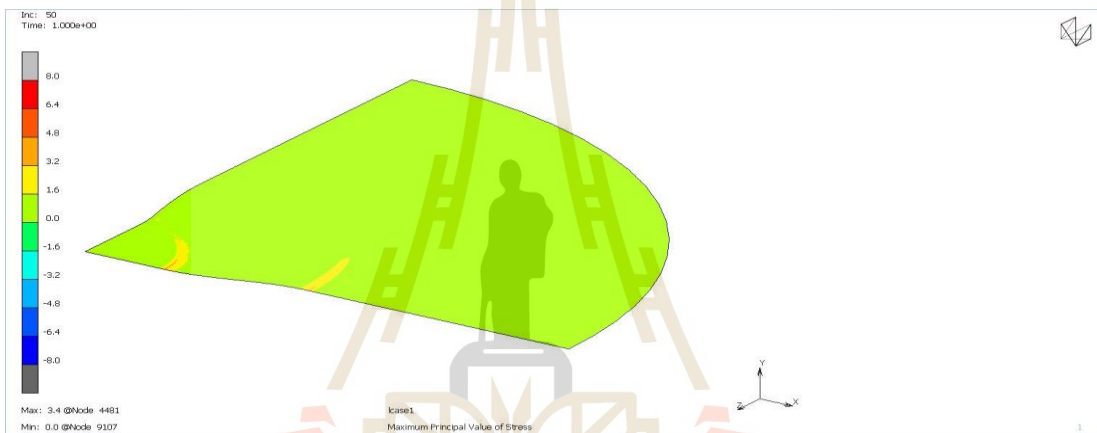
Properties	Values
ν_{12}	0.08
ν_{23}	0.07
ν_{31}	0.095
E_1	1530 [MPa]
E_2	11 [MPa]
E_3	1849 [MPa]
G_{12}	9.42 [MPa]
G_{23}	9.43 [MPa]
G_{31}	770 [MPa]



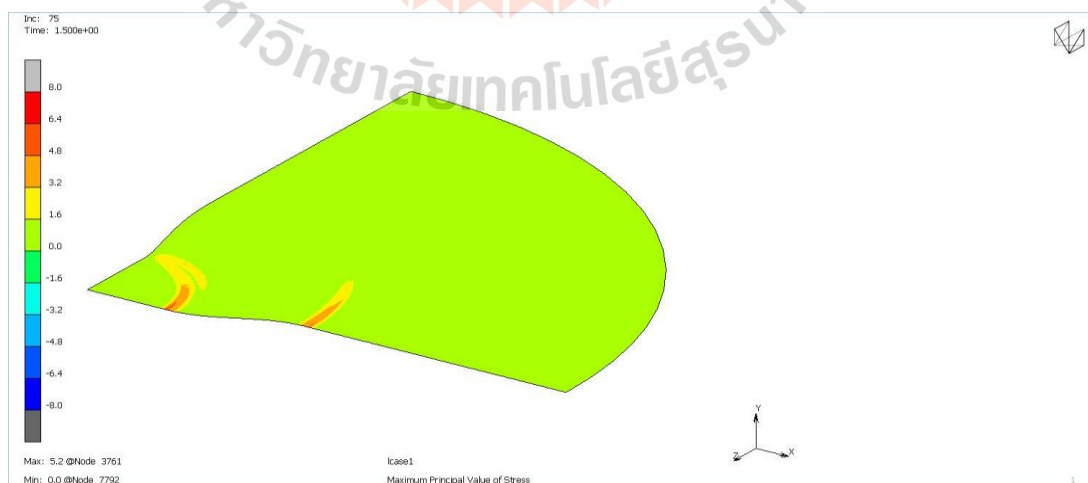
รูปที่ 6.3 สมบัติกาบหมากสองช่วงที่มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างแบบถาวร

6.3 ผลการจำลองความเค้นด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์

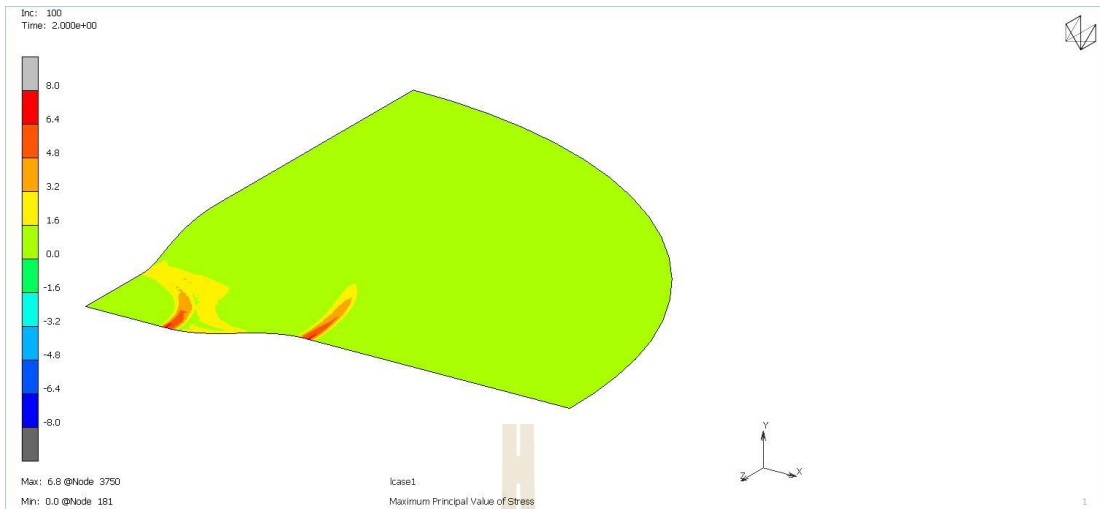
เนื่องจากการเกิดรอยแตกหรือรอยฉีกขาดบนวัสดุมีความสัมพันธ์กับความเค้นแรงดึง กล่าวคือ ส่วนของวัสดุที่ปรากฏมีความเค้นเป็นความเค้นดึง (Tensile stress) และมีค่าสูง บริเวณนั้นมักเกิดรอยฉีกขาดขึ้น ด้วยเหตุนี้ ผู้วิจัยจึงเน้นตรวจสอบผลค่าความเค้นหลักสูงสุด (Maximum principal stress) บนส่วนของชิ้นงานขณะจำลองการลากขึ้นรูป รูปที่ 6.4 6.5 6.6 และ 6.7 แสดงการกระจายตัวของค่าความเค้นหลักสูงสุดบนชิ้นงานกาบหมางขณะถูกลากลงแม่พิมพ์ด้วยระยะกดลึกของแม่พิมพ์พบเท่ากับ 1.2 1.8 2.4 และ 3 มิลลิเมตร ตามลำดับ



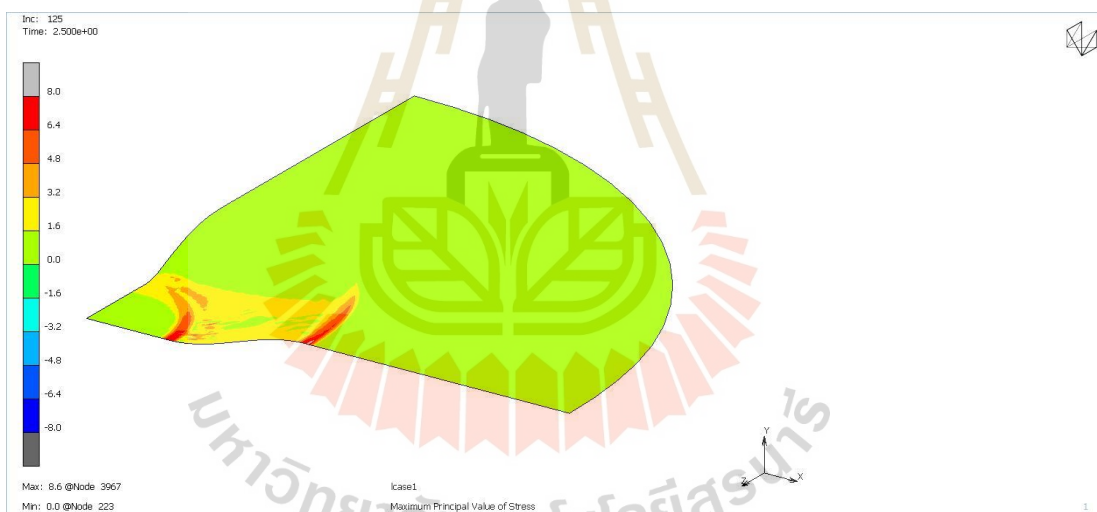
รูปที่ 6.4 การกระจายตัวของความเค้นหลักสูงสุดที่ระยะกดแม่พิมพ์บนเท่ากับ 1.2 มิลลิเมตร



รูปที่ 6.5 การกระจายตัวของความเค้นหลักสูงสุดที่ระยะกดแม่พิมพ์บนเท่ากับ 1.8 มิลลิเมตร



รูปที่ 6.6 การกระจายตัวของความเค้นหลักสูงสุดที่ระยะกดแม่พิมพ์บนเท่ากับ 2.4 มิลลิเมตร



รูปที่ 6.7 การกระจายตัวของความเค้นหลักสูงสุดที่ระยะกดแม่พิมพ์บนเท่ากับ 3 มิลลิเมตร

จากรูปพบว่า เมื่อแม่พิมพ์บนเริ่มสัมผัสกับผิวด้านบนของชิ้นงาน ทำให้เกิดความเค้นหลักสูงสุดซึ่งเป็นความเค้นดึงกระจายอยู่ในชิ้นงานส่วนที่ถูกกลางในแม่พิมพ์ล่าง เมื่อพิจารณาบริเวณที่ค่าความเค้นมีค่าสูงพบว่า ชิ้นงานที่สัมผัสกับส่วนโค้งของทั้งแม่พิมพ์บนและแม่พิมพ์ล่างมีความเค้นแรงดึงสูงกว่าบริเวณอื่นๆ โดยค่าความเค้นแรงดึงบริเวณนี้มีค่าสูงขึ้นเรื่อย ๆ เมื่อระยะกดแม่พิมพ์บนเพิ่มขึ้น จากผลการจำลองนี้ทำให้สามารถอธิบายการฉีกขาดบริเวณด้านล่างของชิ้นงานลากขึ้นรูป

ได้ กล่าวคือ การฉีกขาดที่เกิดขึ้นคาดว่าจะเกิดขึ้นในชิ้นงานบริเวณที่สัมผัสกับมุมของแม่พิมพ์เนื่องจากเป็นบริเวณที่เกิดความเค้นแรงดึงสูงกว่าบริเวณอื่นๆ ขณะลากขึ้นรูป

นอกจากนี้ จากผลการจำลองนี้ยังให้ข้อมูลที่เป็นประโยชน์ต่อการลดรอยฉีกขาดบนชิ้นงาน กาบหมากสองขณะลากขึ้นรูป กล่าวคือ หากออกแบบแม่พิมพ์ให้มีรัศมีบริเวณมุมที่โตขึ้น ความเค้นแรงดึงที่เกิดขึ้นในขณะลากขึ้นรูปน่าจะมีค่าลดลง และส่งผลให้การฉีกขาดของกาบหมากสองขณะลากขึ้นรูปน้อยลงได้



บทที่ 5

สรุป

งานวิจัยนี้จัดทำขึ้นเพื่อศึกษาสมบัติทางกายภาพ สมบัติทางกลของกาบหมากสง และศึกษาการลากขึ้นรูปกาบหมากสงเป็นบรรจุภัณฑ์โดยการทดลองและการจำลองด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ ผลการวัดความหนาของกาบหมากสงแสดงให้เห็นว่า ความหนาของกาบหมากสงมีความแตกต่างกันในบริเวณต่างๆ ภายในกาบเดียวกัน โดยส่วนที่หนาที่สุดคือส่วนที่ติดก้านใบและส่วนที่บางที่สุดคือบริเวณขอบของกาบ มีความหนาช่วง 5 ถึง 6 มิลลิเมตร และ 0.5 ถึง 1.5 มิลลิเมตรตามลำดับ จากการศึกษาสมบัติทางกลของกาบหมากสงโดยการทดสอบแรงดึงชี้ให้เห็นว่ากาบหมากสงมีความสามารถในการต้านทานแรงดึงสูงสุดขึ้นอยู่กับทิศทางการให้แรงดึง โดยเมื่อให้แรงดึงในทิศทางเดียวกับทิศทางของเส้นใยบนผิวกาบหมาก กาบหมากสงต้านทานแรงดึงได้สูงกว่าทิศทางอื่น ๆ ในขณะที่การยึดตัวของกาบหมากสงก่อนการฉีกขาดสูงสุดเมื่อออกแรงดึงในทิศทางทำมุม 90 องศา กับทิศทางของเส้นใยบนผิวกาบหมาก นอกจากนี้ยังพบว่า กาบหมากสงมีพฤติกรรมเปลี่ยนแปลงรูปร่างประกอบไปด้วยการเปลี่ยนแปลงรูปร่างแบบยืดหยุ่นและการเปลี่ยนแปลงรูปร่างแบบถาวร ผู้วิจัยทำการทดลองลากขึ้นรูปกาบหมากสงด้วยชุดแม่พิมพ์ที่พัฒนาขึ้นได้ข้อมูลที่ยืนยันว่าตัวแปรการขึ้นรูป ได้แก่ ความชื้นเริ่มต้นของกาบหมากสง ความเร็วการลากขึ้นรูป อุณหภูมิแม่พิมพ์ขึ้นรูป และแรงกดยึดกาบหมากสงขณะขึ้นรูป ส่งผลอย่างมากต่อผลการขึ้นรูปในแง่พฤติกรรมเปลี่ยนแปลงรูปร่างขณะขึ้นรูป แรงต้านการขึ้นรูปสูงสุด และการฉีกขาดของผลิตภัณฑ์หลังการขึ้นรูป จากการตรวจสอบชิ้นงานหลังการขึ้นรูปพบว่า ชิ้นงานเกิดข้อบกพร่องที่สำคัญคือการเกิดรอยแตกหรือรอยฉีกขาดบริเวณด้านล่างและด้านข้างของ จากการเปรียบเทียบผลการทดลองลากขึ้นรูปทำให้พอคาดคะเนได้ว่าการฉีกขาดของชิ้นงานขึ้นอยู่กับความชื้นภายในกาบหมากสง โดยความชื้นที่สูงเกินไปมีแนวโน้มทำให้กาบหมากสงอ่อนและเกิดการฉีกขาดได้ง่ายและเมื่อความชื้นต่ำเกินไปกาบหมากสงอาจมีสมบัติเปราะทำให้เกิดการฉีกขาดได้ง่ายเช่นกันในขณะลากขึ้นรูป เพื่อวิเคราะห์การฉีกขาดของชิ้นงานอย่างละเอียดยิ่งขึ้น ผู้วิจัยทำการพัฒนาโมเดลจำลองกระบวนการลากขึ้นรูปและทำการจำลองความเค้นภายในการหมากสงขณะลากขึ้นรูป ผลการจำลองแสดงให้เห็นว่า เมื่อแม่พิมพ์บนเริ่มลากกาบหมากสงลงสู่แม่พิมพ์ล่าง ปรากฏมีความเค้นหลักสูงสุดเป็นความเค้นแรงดึง และเกิดขึ้นในชิ้นงานบริเวณที่สัมผัสกับส่วนโค้งของแม่พิมพ์บนและแม่พิมพ์ล่าง ซึ่งจากลักษณะของความเค้นนี้ ทำให้สามารถทำนายได้ว่า การฉีกขาดของกาบหมากสงในขณะลากขึ้นรูปน่าจะเกิดขึ้นในชิ้นงานบริเวณที่สัมผัสกับผิวโค้งของแม่พิมพ์

เอกสารอ้างอิง

CREATIVITY. ART & DESIGN CAN CHANGE THE WORLD 2013. **infographic**; นานเท่าไร กว่าจะย่อยสลาย.

GEYER, JAMBECK, LAW. (2017). **SCIENCE ADVANCES**.

อนุชิต ไกรวิจิตร. 2019. รู้จักพลาสติก 7 ชนิดที่ไทยกำลังจะแบน ส่งโมเดลจัดการขยะ 20 ปี ช่วยลดขยะได้แค่.

Waste360. 2019. Canada to Ban Single-use Plastics Hold Companies Responsible.

มงคลเชาวราช. 2560. ผลิตงานใบตองใส่ผ้าไท ผีมือคนไทยชาวบ้านห้วยไผ่ อ.วังทอง.

Chillwithadi. 2560. เทียบตลาดไทยย้อนยุคบ้านระจัน เมืองสิงห์บุรี.

ผศ. ดร. เจษฎา ชัยโฉม. 2018. เครื่องขึ้นรูปผลิตงานใบไม้ รักษาโลก ลดขยะพิษพลาสติก สร้างงานดีไซน์ เพิ่มรายได้จากการส่งออก.

บริษัท ภิญญวานิช จำกัด. สินค้างานกาบหมากวีรษา.

พลังเกษตร. 10 ต้นโตแตกกอดีมาก-สีแดงเข้มสวย.

VASIN NGERN-A-NEK. 2019. ต้นหมากเหลือง.

Biogang Database. Bio Diversity (พืช). หมากเขียว.

พันธุ์ไม้ในโรงเรียนเกาะยาววิทยา. 2561. ต้นหมากสง.

Thinai group , used in manufacturing.

Adam R.Winstock. 2014. Chapter 87 - Areca Nut, Betel Quids, and Associated Products. **Principles of Addiction Comprehensive Addictive Behaviors and Disorders**, Volume 1 2013, Pages 863-872.

Shmoop University, 2 0 2 0 , <https://www.shmoop.com/study-guides/biology/plant-biology/leaf-structure>.

Maziar Ramezani, Zaidi M. Ripin, Rubber-Pad Forming Processes, 2012. Deep drawing of sheet metals using the friction-actuated blank-holding technique.

Hakan Gürün* – Ibrahim Karaagaç, The Experimental Investigation of Effects of Multiple Parameters on the Formability of the DC01 Sheet Metal, 2015. **Journal of Mechanical Engineering**. All rights reserved. 10.5545/sv-jme.2015.2562.

KSU - College of Engineering – IE, Chapter 8: Sheet Metal Forming.

VUKOTA BOLJANOVIC, Ph.D., 2004. SHEET METAL FORMING PROCESSES AND DIE DESIGN.

ชัยวัฒน์ เจริญระม่อม. 2556. อิทธิพลในการลากขึ้นรูปสีกโลหะนอกกลุ่มเหล็กด้วยกระบวนการไฮโดรไดนามิกส์ (รายงานการวิจัย, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี) Doege, Hallfeld, 2001, Metal Working: Stretching of Sheets.

บริษัท ไพรมัส จำกัด, 2020, <https://www.primusthai.com/primus/Knowledge/info?ID=182#>.

MISUMI Corporation, 2020, https://th.misumi-ec.com/th/pr/recommend_category/temperature_control201905/.

Srinivasan, Rajendra Boopathy. 2014. Evaluation of mechanical and thermal properties of banana-flax based natural fibre composite. **Materials and Design**, 60: 620–627.

Kumar, Sridhar. 2008. Influence of humid environment on the performance of high strength structural carbon fiber composites. **Materials Science and Engineering A** 498: 174–178.

Vinayraj K G, Dr.Ashock B C. 2016. Mechanical Behavior of Areca Fiber Reinforced Epoxy Composite. *International Journal of Mechanical and Industrial Technology* Vol. 4, Issue 1, 66-71.

Malte Wallmeier , Eric Linvill. 2015. Explicit FEM analysis of the deep drawing of paperboard. **Mechanics of Materials**. 89: 202–215.

Zicheng Zhang, Ning Chen, Tsuyoshi Furushima, Bin Li. 2018. Deformation behavior of metal foil in micro pneumatic deep drawing process. **Procedia Manufacturing**. 15 (2018). 1422-1428.

Q. Zhang, J. Cai, Q. Gao. 2014. Simulation and experimental study on thermal deep drawing of carbon fiber woven composites. **Journal of material Processing Technology**. 214 (2014). 802-810.



รายชื่อบทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา

Choonamchai, C., Panwised, D., Mitsomwang, P., Borrisutthekul, R., (2019), Investigation of Structure and Tensile Properties of Betel Palm Sheath, 2019 3rd International Conference on Materials and Intelligent Manufacturing (ICMIM 2019), Inha University, South Korea, August 19-22, 2019.



Investigation of Structure and Tensile Properties of Betel Palm Sheath

C Choonamchai¹, D Panwised¹, P Mitsomwang¹ and R Borrisutthekul¹

¹School of Metallurgical Engineering, Suranaree University of Technology, 111 University avenue, Muang, Nakhon Ratchasima, 30000, Thailand

pusit@sut.ac.th

Abstract. Betel palm sheath is a kind of natural material which is increasingly used as a raw material for producing food packaging. To form packaging such as food plates, a raw palm sheath is drawn using drawing dies. Then, the excess edge of the drawn part is cut off with trimming dies. Due to the lack of understanding of the palm sheath structure and its mechanical properties, a lot of defective parts still occur during the production. In this work, the authors aim to investigate the internal structure of the palm sheath. The raw palm sheath was sectioned and subjected to a scanning electron microscope (SEM). In addition, the mechanical properties of the palm sheath were examined by the uni-axial tensile test. Based on the experimental results, the internal structure of the palm sheath was clearly revealed. The tensile properties of the palm sheath were highly anisotropic, namely the maximum load resistance and the elongation at break remarkably varied with the loading direction. Moreover, the deformation of the palm sheath appeared to consist of the elastic and the permanent deformation.

1. Introduction

Betel palm shown in Figure 1 is a kind of plants in the Arecaceae family which is widely found in South east Asia such as India, Myanmar, Thailand etc. Parts such as nut, husk and sheath of the betel palm can be used in different proposed. For example, its wet sheath is used as animal feed, while the dry palm sheath can be used as a fuel for cooking and water heating [1-3].



Figure 1. Betel palm.

According to the plastic packaging waste issue, the production of food packaging from natural material is now intensively considered. The betel palm sheath is a kind of natural materials which has

potential to be used for producing the food packaging because it has sheet form, suitable thickness and sufficiently strength. In Thailand, Veerasa company utilises the palm sheath to produce various packaging such as food plate, banana-cake cup, soap box, etc [4]. The production starts from the preparation of raw palm sheath by washing, drying and cutting into designed size. Then, the palm sheath is drawn using stainless steel drawing dies at elevated temperature. After drawing, the edge of the drawn part is trimmed to obtain finishing products. However, a lot of defective parts still occur during the production. This seems to be caused by the lack of understand of the structure and the mechanical properties of the palm sheath.

There are researchers studying mechanical properties of natural materials-based composites. Srinivasan et al., studied the mechanical and thermal properties of banana-flax based natural fibre composite. They applied the hand layup method for preparing the composite laminates. The results showed that the difference lamination strongly affected the ultimate tensile strength, the tensile elongation, the energy absorption and fire resistance of the composite [5]. Fernandes et al., prepared the natural composite structures between the flax fiber, the agglomerated cork and the bio-resin. They found that the composite had higher load resistance when the density of the fiber in the composite increased [6]. In addition, Chethan et al., prepared the betel palm leaf reinforced resin composite and investigated its tensile properties. Their composite consisted of 70% Epoxy resin and 30% short palm sheath fiber (by volume). They revealed that the ultimate tensile strength and the modulus of the composite was 16.15 MPa and 3345.16 MPa, respectively [7].

From the literature survey, the authors found that there are not any study or report explaining the structure and the mechanical properties of the betel palm sheet. To promote the production of the palm sheath packaging from the household level to the industrial scale, the fundamental knowledge concerning the structure and the mechanical properties of the palm sheet is highly required. Therefore, in this study, the betel palm sheath was collected, sectioned and subjected to the SEM in order to investigate the internal structure of the palm sheath. Also, the palm sheath tensile specimens were prepared from different zones and directions in a palm sheath. Through the experimental results, the structure, the tensile properties and the deformation behavior of the palm sheath were discussed and summarized.

2. Material and experimental conditions

Betel palm sheath used in this study was harvested from Buriram prefecture, Thailand. For all of the investigation, only one palm sheath which had the width and the length of 300 and 400 mm was used. The moisture content of the palm sheath was 16.15%. The entire palm sheath was cut off using a keen knife to prepare the SEM and the uni-axial tensile specimens based on ASTM D828-16.



Figure 2. Layout of tensile specimens.

Before testing, the thickness of the cut samples was measured by a micrometre. At the affix leaf zone, the thickness of the palm sheath varied ranging from 1.972 to 2.526 mm (Avg. = 2.354 mm). For the central zone, the thickness was varied from 1.429 to 2.000 mm (Avg. = 1.718 mm), while at the affix node zone, the thickness was varied between 1.318 mm and 2.255 mm (Avg. = 1.818 mm). Based on the variation of the thickness, the tensile testing samples were formed into three groups for those three zones. In each zone, the tensile specimens were prepared in three directions with respect to the surface lines of the palm sheath. The first direction was parallel to the surface line (They were called "0° specimens"). The second and the third directions were diagonal and perpendicular to the surface lines (They were called "45° and 90° specimens, respectively"). Figure 2 shows the layout of the tensile specimens. For the tensile test, the speed of the moving cross head was fixed as 2 mm·min⁻¹. The load cell (Capacity: ± 5 kN) was installed to record the load resistance of the palm sheath. After testing, the fracture edges of the specimens were investigated with the SEM.

Apart from the tensile test mentioned above, additional specimens were prepared for studying the deformation behavior of the palm sheath. For this test, the specimens were cut from the affix node zone, prepared to have the dimension based on the same standard as that used for tensile test. Then, small grids were drawn on the surface of the specimens using a small-head permanent pen. After that the specimens were subjected to the uni-axial tensile load. The displacement of the cross head was varied from 0.2 to 1.6 mm. After testing, the displacement-load resistance curve and the geometry of the grids were examined.

3. Results and discussions

3.1. Structure of betel palm sheath

Figure 3 shows the cross-sectional SEM images of the palm sheath. From this image, six different components of the palm sheath, i.e. spongy mesophyll, phloem, xylem, bundle sheath, upper and lower epidermis were clearly observed. Figure 4 represents the high magnification SEM images at the upper and the lower surface of the palm sheath. These revealed that the upper epidermis was thinner than the lower epidermis. Namely, the upper one had the thickness of about 2.5 μm, while the thickness of the lower one was approximately 20 μm.

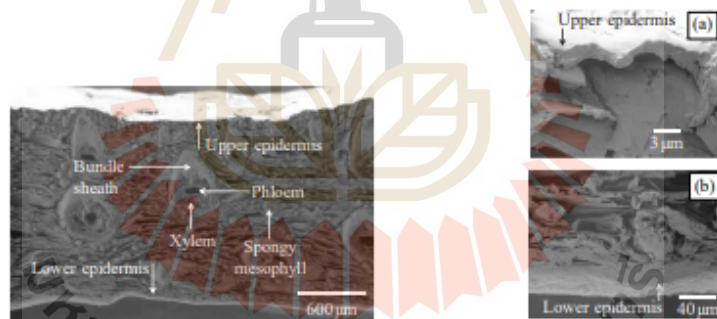


Figure 3. Cross-sectional image of palm sheath. Figure 4. High magnification images (a) at upper and (b) at lower surfaces.

3.2. Tensile properties of betel palm sheath

After carrying out the tensile test, the relationship between the load resistance of the palm sheath and the extension was plotted. Figure 5 represents the load resistance curves for all the tensile specimens. The load resistance characteristics were revealed as follows: (i) the highest maximum load resistance (f_{Max}) occurred when loading direction was parallel to the surface line of the palm sheath, 0° direction. Its value was ranging from 309 to 405 N, while the highest f_{Max} was varied between 62 and 106 for the

45 and 90° loading directions. (ii) There was a variation of the highest f_{Max} , when varying the investigation zone of the palm sheath. However, the tendency of this variation could not be observed. (iii) The elongation at break (e_{Break}) remarkably depended on the loading direction rather than the investigation zone of the betel palm sheath. In the cases of 0 and 90° loading directions, the e_{Break} appeared to be low (between 1.0 to 1.9 mm), while the e_{Break} was higher in the case of 45° loading direction. From the above tensile testing results, it was revealed that tensile properties of the palm sheath were highly anisotropic.

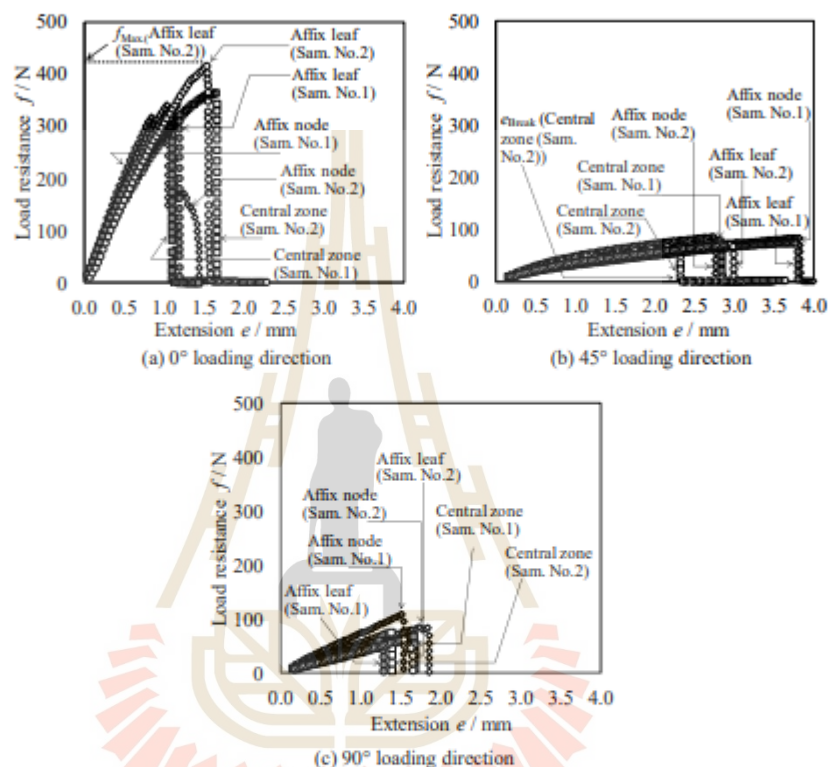


Figure 5. Relationship between load resistance and extension of palm sheath from tensile test.

3.3. Fracture edges of tensile specimens

After tensile testing, the fractured edges of the specimens were investigated with the SEM. Figure 6 shows the SEM images of the fractured edges which were loaded under 0, 45 and 90° at the affix leaf, the central and the affix node zones. This figure revealed that (i) For all zones of the palm sheath, in the case of 0°, the xylem and phloem appeared to be broken. But, they tended to be pulled out from the spongy mesophyll without the breakage in the cases of 45 and 90°. (ii) For all the investigation zones of the palm sheath, there was no crack propagation to the upper surface in the case of 0°, while in the cases of 45 and 90°, the crack propagation was observed. (iv) the fracture of the spongy mesophyll was similar for all specimens. It was indicated that the tensile load response of the spongy mesophyll was similar for all zones of the palm sheath and the loading directions. (v) Applying the tensile load in the 45 and 90°, the fracture of the specimens seemed to be initiated at the surface line. Considering this fracture initiation position and the load resistance curve in Figure 5, the surface line became a

weak point for the fracture, especially when the maximum principal tensile stress occurred in 45 and 90° against the surface line. (vi) Seeing the high e_{break} in figure 5(b), although the surface line caused the fracture under the low load resistance, it did not result in the low elongation of the palm sheath.

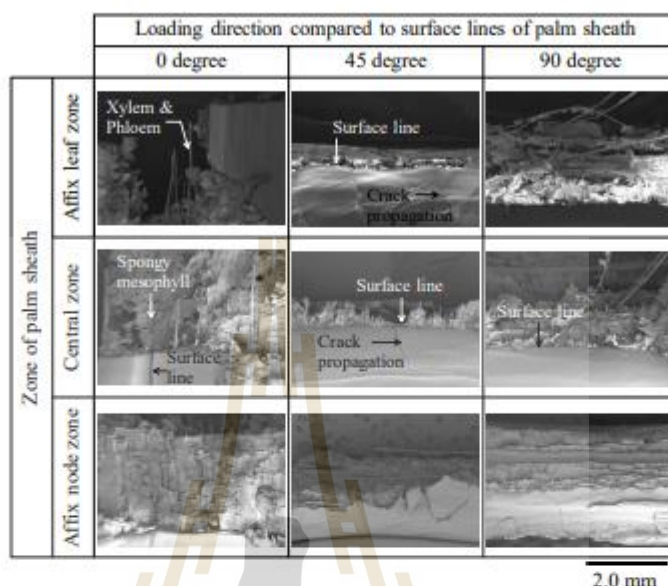


Figure 6. Fracture edge of tensile specimens.

3.4. Deformation behavior of betel palm sheath

Apart from the internal structure investigation and the tensile testing, the deformation behavior of the palm sheath was studied. This understanding is crucial, especially for analyzing the deformation of the palm sheath using numerical method such as finite element method (FEM). Typically, when assigning a material model to a simulation software, two types of the deformation modes, i.e. the elastic deformation and the plastic deformation must be assumed, separately [8].

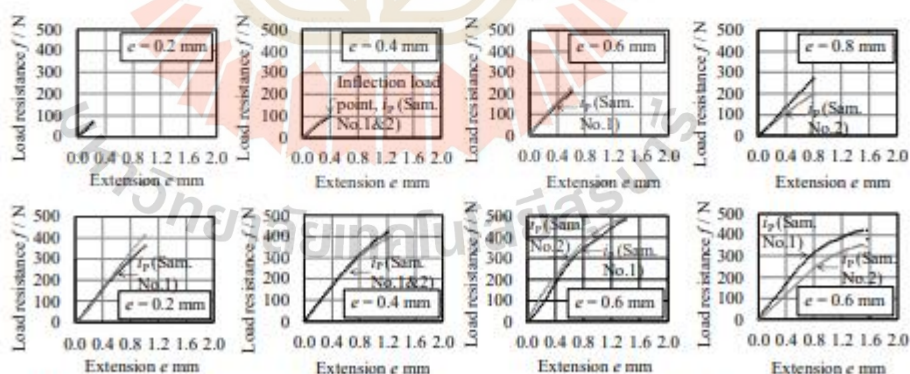


Figure 7. Relationship between load resistance and extension for extension from 0.2 to 1.6 mm.

Figure 7 shows the load resistance curves after pulling the palm sheath specimens to the specified extension. From this figure, at the small extension, $0 < e < 0.4$, the load resistance tended to be increased without changing the slope of the relationship. When the extension increased, the inflection point of the load resistance (i_p) was detected. Here, the i_p occurred at the extension between 0.4 and 0.8 mm. After pulling under the large extension, $e > 0.8$ the slope of the load resistance curve changed, noticeably. This seemed to indicate that the deformation behavior of the palm sheet was changed with increasing the extension.

Figure 8 shows the grids on the palm sheath specimens after pulling. Here, it could be seen that the grids did not deform largely in all extension cases. However, measuring the grid distance (d_G) after pulling the samples, the d_G did not change for $0.2 < e \leq 0.4$. But, for $e \geq 0.6$, the d_G tended to be extended, compared to the original d_G . This confirmed that, under the tensile loading, the betel palm sheath consisted of the elastic deformation and the permanent deformation.

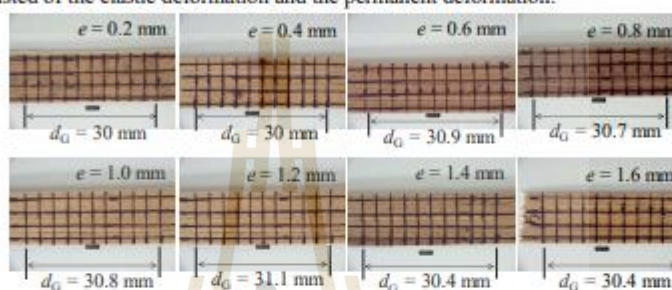


Figure 8. Palm sheath specimens after pulling at various extension

4. Conclusions

From the experimental investigation of the betel palm sheath, the following conclusions were obtained: (i) the internal structure of the palm sheath was clearly observed. It consisted of bundle sheath, phloem, xylem, spongy mesophyll, upper and lower epidermis. (ii) the tensile properties of the palm sheath were highly anisotropic. The highest maximum load resistance occurred when loading direction was perpendicular with the surface line of the palm sheath. (iii) The fracture initiation seemed to be occurred at the surface line of the palm sheath. (iv) The load resistance of the palm sheath was very low, when the maximum principal stress occurred in the 45 and 90° against the surface line of the palm sheath. (v) The palm sheath showed both the elastic deformation and the permanent deformation under the tensile loading.

5. References

- [1] Shashikumar, Shrinivasa D.J., Manjunatha K. and Anantachar, M. 2016 *Int. J. of Agriculture Sciences* **8**(6) 701
- [2] Bhattarai, BN. *Climate-smart Agriculture (CSA)* 1, 1
- [3] Nikhil R., Raahul N., Sateesh N., Shivpriyan M., Tiffany C., Anita T. and Pramod R. 2018 *Materials Today : Proceedings* **5** 24541
- [4] Veerasa palm sheath packaging. (2019) Available: <http://www.veerasa.com/th>
- [5] Srinivasan V.S., Boopathy R., Sangeetha D. and Ramnath B.B. 2014 *Materials and Design* **60** 620
- [6] Fernandes F.A.O., Tavares J.P., Alves de Sousa R.J., Perira A.B. and Esteves J.L. 2017 *Procedia Manufacturing* **13** 227
- [7] Chethan M.R., Gopala Krishna Dr.S.G., Chennakeshava R. and Mahesh D. 2016 *Int. J. of Engineering Research and Advanced Technology* **2**(1) 388
- [8] Mitsomwang P. and Nagasawa S. 2015 *J. of Materials Processing Technology* **220** 46

ประวัติผู้เขียน

นายชยารพ ชูนามชัย เกิดเมื่อวันที่ 31 พฤษภาคม พุทธศักราช 2533 สำเร็จการศึกษา ระดับชั้นมัธยมศึกษาจากโรงเรียนบอสโกพิทักษ์ จังหวัดนครปฐม เมื่อปีพุทธศักราช 2553 และสำเร็จ การศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิชาวิศวกรรมโลหการ สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัย เทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา เมื่อปีพุทธศักราช 2559 หลังจากสำเร็จการศึกษาในระดับ ปริญญาตรี และได้เข้าทำงานที่ บริษัท สแตมฟอร์ด สปอร์ต วิลส์ จำกัด และบริษัท ยูนิฟาวเดรี จำกัด และได้เข้าศึกษาต่อระดับปริญญาโท หลักสูตรวิศวกรรมวัสดุ สังกัดสาขาวิชาวิศวกรรมโลหการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา เมื่อปีพุทธศักราช 2560 โดยขณะศึกษาได้ ทุนการศึกษาแก่นักศึกษาระดับบัณฑิตศึกษาที่คณาจารย์ได้รับทุนวิจัยจากแหล่งทุนภายนอกจาก กองทุนสนับสนุนการวิจัยและพัฒนา (ทุนOROG) เข้าศึกษาระดับบัณฑิตศึกษา และในระหว่าง การศึกษาได้รับมอบหมายหน้าที่เป็นผู้ช่วยสอนในรายวิชาดังต่อไปนี้

- ปฏิบัติการกระบวนการผลิตทางโลหการ 1 (METAL PROCESSING LABORATORY I)
 - ปฏิบัติการกระบวนการผลิตทางโลหการ 2 (METAL PROCESSING LABORATORY II)
- การกัดขึ้นรูปโลหะโดยเครื่องจักรควบคุมเชิงตัวเลขด้วยคอมพิวเตอร์ (MACHINING OF METALS WITH COMPUTER NUMERICAL CONTROL MACHINES)

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี