

การพัฒนากรรมวิธีการผลิตหุ่นยนต์นิ่มจากยางธรรมชาติ

DEVELOPMENT OF SOFT ROBOTS FABRICATION PROCESS FROM
NATURAL RUBBER

ปรีดี ปิ่นประดับ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมวัสดุ

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ปีการศึกษา 2562

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

การพัฒนากรรมวิธีการผลิตหุ่นยนต์นึ่งมาจากยางธรรมชาติ

ปรีดี ปิ่นประดับ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมวัสดุ

คณะวิศวกรรมศาสตร์


มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

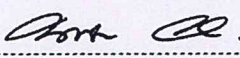
ปีการศึกษา 2562

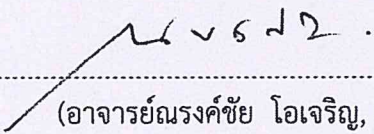
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

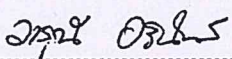
หัวข้อวิทยานิพนธ์ การพัฒนากรรมวิธีการผลิตหุ่นยนต์นุ่มจากยางธรรมชาติ
Development of Soft Robots Fabrication Process from Natural
Rubber
ชื่อ - นามสกุล นายปรีดี ปิ่นประดับ
สาขาวิชา วิศวกรรมวัสดุ
อาจารย์ที่ปรึกษา ผู้ช่วยศาสตราจารย์วารุณี อริยวิริยะนันท์, D.Eng.
ปีการศึกษา 2562

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

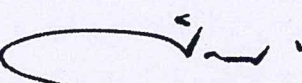

..... ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์สรพงษ์ ภาสุปรีย์, Ph.D.)


..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์นพิตา ทิณชีระนันท์, วท.ด.)


..... กรรมการ
(อาจารย์ณรงค์ชัย โอเจริญ, Ph.D.)


..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์วารุณี อริยวิริยะนันท์, D.Eng.)

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี อนุมัติวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็น
ส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต


..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ศิวกร อ่างทอง, Ph.D.)
วันที่ 10 เดือน ตุลาคม พ.ศ. 2562

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การพัฒนากรรมวิธีการผลิตหุ่นยนต์นึ่งจากยางธรรมชาติ
ชื่อ – นามสกุล	นายปรีดี ปิ่นประดับ
สาขาวิชา	วิศวกรรมวัสดุ
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์วารุณี อริยวิริยะนันท์, D.Eng.
ปีการศึกษา	2562

บทคัดย่อ

แนวโน้มของหุ่นยนต์นึ่งในปัจจุบันได้รับความสนใจโดยกลุ่มของวิศวกรและนักวิจัยทั่วโลก หัวใจหลักของการพัฒนาหุ่นยนต์นึ่ง คือการเลือกใช้วัสดุประเภทอีลาสโตเมอร์ ปัจจุบันหุ่นยนต์นึ่งถูกขึ้นรูปจากยางซิลิโคน

ในงานวิจัยนี้จึงใช้วัสดุทางเลือกน้ำยางธรรมชาติพรีวัลคาไนซ์ ในรูปแบบยางคอมปาวด์ระบบก้ำมะถัน การออกแบบแม่พิมพ์หล่อเข้าจากการพิมพ์ต้นแบบรวดเร็ว ด้วยเทคนิค Fused Deposition Modeling (FDM) โดยใช้วัสดุ Acrylonitrile Butadiene Styrene (ABS) และ Polycarbonate (PC) และใช้วัสดุ High temperature RGD525 สำหรับการพิมพ์แบบ Poly-Jetting (PJ) จากการทดสอบด้วยเทคนิค Differential scanning calorimetry (DSC) พบว่า ABS, PC และ RGD525 มีสมบัติทางความร้อนที่เหมาะสมสำหรับการใช้เป็นแม่พิมพ์ในการขึ้นรูปหุ่นยนต์นึ่งในช่วงอุณหภูมิ -20 ถึง 110 องศาเซลเซียส โดยทั่วไปกระบวนการหล่อยางซิลิโคนจะใช้วิธีการหล่อแบบประกบที่ใช้สมบัติการเซตตัวแบบไม่สมบูรณ์ (Semi-cure) ที่ทำได้ยากในน้ำยางธรรมชาติ

ในการทดลองนี้จึงใช้กระบวนการหล่อแบบหักปลดแกน (Deduction core casting) ซึ่งเป็นวิธีการใหม่ที่เหมาะสมสำหรับการหล่อหุ่นยนต์นึ่งจากน้ำยางธรรมชาติ เมื่อพิจารณา Storage modulus ของยางพรีวัลคาไนซ์จากเทคนิค Dynamic mechanical Analysis (DMA) พบว่ามีค่า Tan delta น้อยกว่า 0.2 บ่งชี้ความเป็นอีลาสติกของหุ่นยนต์นึ่งที่หล่อจากน้ำยางธรรมชาติ จึงทดสอบพฤติกรรมการงอตัว (Bending behavior test) ของหุ่นยนต์นึ่ง โดยการวัดมุมที่โค้งงอจากการอัดอากาศตั้งแต่ 0 ถึง 40 มิลลิลิตร พบว่าหุ่นยนต์นึ่งที่ขึ้นรูปจากน้ำยางธรรมชาติ ให้การโค้งงอตั้งแต่ 0-90 องศา ตามปริมาตรอากาศที่เพิ่มขึ้น ซึ่งให้ผลใกล้เคียงกับหุ่นยนต์นึ่งที่ขึ้นรูปจากยางซิลิโคนแบบทั่วไป

คำสำคัญ : น้ำยางธรรมชาติ หุ่นยนต์นึ่ง การพิมพ์ต้นแบบรวดเร็ว

Thesis Title	Development of Soft Robots Fabrication Process from Natural Rubber
Name - Surname	Mr. Preedee Pinpradup
Program	Material Engineering
Thesis Advisor	Assistant Professor Warunee Ariyawiriyanan, D.Eng.
Academic Year	2019

ABSTRACT

The trend of soft robots has received attention from engineers and researchers around the world. The key of soft robots development is the selection of elastomer materials. Nowadays, soft robots is cast using silicone rubber.

Sulphur pre-vulcanize latex was utilized in this research. Rapid prototyping was used to design molds for the casting process. Acrylonitrile butadiene styrene (ABS) and polycarbonate (PC) were used as materials for the Fused Deposition Modeling (FDM) technique. High temperature RGD525 was used for the Poly-Jetting (PJ) technique. Differential scanning calorimetry (DSC) thermograms indicated that ABS, PC and RGD525 can be utilized to mold prototypes at the heat from -20°C to 110°C . Generally, the molding process of soft robots with silicone rubber is done by semi-cured state layer casting which is not easy to process with natural rubber.

In this experiment, the new deduction core casting, the most appropriate method, is applied to soft robots preparation. Storage modulus was measured by Dynamic Mechanical Analysis (DMA). The results show that the Tan delta value is below 0.2 and demonstrates elastic properties of natural rubber soft robots. Consequently, the bending behavior of the soft robots was tested by measuring the bending angle with an air pressure from 0 to 40 ml. The developed natural rubber soft robots can bend from 0 to 90 degrees when correlating with the air volume applied to casting silicone rubber-soft robots.

Keywords: natural rubber latex, soft robots, rapid prototyping

กิตติกรรมประกาศ

การศึกษาจัดทำวิทยานิพนธ์ ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงอย่างสมบูรณ์แบบได้ด้วยความกรุณา และความอนุเคราะห์ของผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วารุณี อริยวิริยะนันท์ อาจารย์ที่ปรึกษาเสียสละเวลาให้คำปรึกษา คำแนะนำ และให้ข้อเสนอแนะในการปรับปรุงแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ จนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ผู้ทำการศึกษาวิจัยขอกราบขอบพระคุณอย่างสูงมา ณ ที่นี้

ขอขอบพระคุณท่านผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สรพงษ์ ภาวสุปรีย์ ประธานกรรมการสอบอาจารย์ณรงค์ชัย โอเจริญ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และท่านรองศาสตราจารย์ ดร.นพิตา วิทยุธีระนันท์ กรรมการสอบผู้ทรงคุณวุฒิจากจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยที่ได้ให้ความกรุณา ในการแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ ของงานวิจัยตลอดคำแนะนำ รวมทั้งเสียสละเวลาในการเป็นกรรมการสอบในครั้งนี้ และขอขอบพระคุณ ดร.ไพศาล ชันชัยทิศ หัวหน้าห้องปฏิบัติการ และนักวิจัยรวมถึงผู้ช่วยนักวิจัย จากห้องปฏิบัติการระบบอุปกรณ์นาโน ศูนย์นาโนเทคโนโลยีแห่งชาติ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ ที่ให้ความอนุเคราะห์สนับสนุนใช้เครื่องมือ วัสดุและอุปกรณ์ ในการทำงานวิจัย

ขอขอบพระคุณ และมอบความดีทั้งหมดนี้ให้แก่ คุณพ่อ คุณแม่ ครอบครัวและพี่น้อง เพื่อนที่แสนดีและคุณครู-อาจารย์ ที่ให้การสนับสนุนและประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ให้

สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยหวังเป็นอย่างยิ่งว่าวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะเป็นประโยชน์สำหรับผู้สนใจหากวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้ขาดตกบกพร่อง หรือไม่สมบูรณ์ประการใด ผู้วิจัยขอกราบขออภัยมา ณ โอกาสนี้



ปรีดี ปิ่นประดับ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	(3)
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	(4)
กิตติกรรมประกาศ.....	(5)
สารบัญ.....	(6)
สารบัญตาราง.....	(8)
สารบัญรูป.....	(9)
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ.....	(13)
บทที่ 1 บทนำ.....	14
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ.....	14
1.2 วัตถุประสงค์.....	14
1.3 ขอบเขตการศึกษา.....	15
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	15
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	16
2.1 หุ่นยนต์นุ่ม (Soft robotic).....	16
2.2 ยางธรรมชาติ (Natural rubber, NR).....	25
2.3 เทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ (3D printed technology).....	27
2.4 การวิเคราะห์เชิงกลแบบพลวัต ((Dynamic mechanical analysis, DMA).....	34
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	42
3.1 แผนการดำเนินการวิจัย.....	42
3.2 วัสดุและอุปกรณ์.....	43
3.3 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย.....	45
3.4 การเตรียมน้ำยางพรีวัลคาไนซ์ (Pre-vulcanization).....	46
3.5 การออกแบบและขึ้นรูปหุ่นยนต์นุ่ม.....	46
3.6 การออกแบบแม่พิมพ์สำหรับหุ่นยนต์นุ่ม.....	48
3.7 การขึ้นรูปแม่พิมพ์สำหรับหุ่นยนต์นุ่ม.....	48
3.8 การทดสอบพฤติกรรมกลการเคลื่อนไหวของหุ่นยนต์นุ่ม.....	49
3.9 การทดสอบสมบัติของวัสดุ.....	49

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล.....	51
4.1 การเตรียมน้ำยางธรรมชาติ (Natural Rubber, Pre-vulcanization)	51
4.2 การทดสอบการใช้งานวัสดุการพิมพ์ต้นแบบรวดเร็ว เพื่อใช้ในการขึ้นรูปแม่พิมพ์ หุ่นยนต์นี้ม.....	52
4.3 การออกแบบรูปร่างลักษณะของหุ่นยนต์นี้ม.....	59
4.4 การออกแบบแม่พิมพ์และกระบวนการขึ้นรูปแม่พิมพ์สำหรับหุ่นยนต์นี้ม.....	62
4.5 ผลการทดสอบวัสดุสำหรับการนำมาขึ้นรูปหุ่นยนต์นี้ม.....	73
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	84
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	84
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	85
บรรณานุกรม.....	86
ภาคผนวก.....	90
ประวัติผู้เขียน.....	107



สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 3.1 สูตรของน้ำยางคอมปาวด์สำหรับการขึ้นรูปหุ่นยนต์นี้ม.....	42
ตารางที่ 3.2 ตารางแสดงสภาวะการขึ้นรูปของวัสดุสำหรับแม่พิมพ์หุ่นยนต์นี้มยางธรรมชาติ.....	48
ตารางที่ 4.1 สารเคมียางธรรมชาติคอมปาวด์.....	51
ตารางที่ 4.2 ผลการทดสอบการใช้งานแม่พิมพ์ในช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมเพื่อใช้งาน 1 ครั้ง.....	52
ตารางที่ 4.3 ผลการทดลองการจำนวนการใช้งานขึ้นรูปหุ่นยนต์นี้ม ในช่วงอุณหภูมิที่ 110 องศาเซลเซียส.....	53
ตารางที่ 4.4 ผลการทดลองการจำนวนการใช้งานขึ้นรูปหุ่นยนต์นี้ม ในช่วงอุณหภูมิที่ 100 องศาเซลเซียส.....	53
ตารางที่ 4.5 ผลการทดลองการจำนวนการใช้งานขึ้นรูปหุ่นยนต์นี้ม ในช่วงอุณหภูมิที่ 90 องศาเซลเซียส.....	54
ตารางที่ 4.6 ผลการทดลองการจำนวนการใช้งานขึ้นรูปหุ่นยนต์นี้ม ในช่วงอุณหภูมิที่ 70 องศาเซลเซียส.....	54
ตารางที่ 4.7 ผลการทดสอบการขึ้นรูปวัสดุ.....	57
ตารางที่ 4.8 ความเหมาะสมสำหรับการใช้หล่อ อีลาสโตเมอร์ประเภทต่าง ๆ.....	58
ตารางที่ 4.9 ความเหมาะสมสำหรับนำไปขึ้นรูปขึ้นส่วนแม่พิมพ์หล่อเบา.....	59
ตารางที่ 4.10 การทดสอบหาปริมาณการเติม Acetic Acid เข้มข้น 5 % ที่เหมาะสำหรับการทำน้ำยางเป็นก้อน.....	73
ตารางที่ 4.11 ขั้นตอนการนำยางไปทดสอบการคงรูปก่อนนำขึ้นงานมาคอมเพลส.....	74
ตารางที่ 4.12 ขั้นตอนการผสมน้ำยางคอมปาวด์สำหรับทำยางก้อน.....	75

สารบัญรูป

หน้า

ภาพที่ 2.1	หุ่นยนต์นิ่มประเภทต่างๆที่ได้มีการวิจัยในปัจจุบัน.....	16
ภาพที่ 2.2	หลักการทำงานของวัสดุประเภทอีลาสโตเมอร์ที่ใช้สำหรับการสร้างหุ่นยนต์นิ่ม	17
ภาพที่ 2.3	การแบ่งประเภทของหุ่นยนต์นิ่มแบบนิวเมติกส์จากหลักการใช้งาน	18
ภาพที่ 2.4	การออกแบบหุ่นยนต์นิ่มที่มีลักษณะคล้ายกับสัตว์ไม่มีกระดูกสันหลัง.....	19
ภาพที่ 2.5	หุ่นยนต์นิ่มหยิบจับ (Soft Gripper) ซ้าย : หุ่นยนต์ Soft Robotics และหุ่นยนต์หยิบจับจาก Bio Robotics Institute.....	20
ภาพที่ 2.6	หุ่นยนต์นิ่มที่มีลักษณะคล้ายมือมนุษย์ ซ้าย : หุ่นยนต์นิ่มจากการพิมพ์ สามมิติ ขวา : หุ่นยนต์ E-Lab-NYC	20
ภาพที่ 2.7	การหล่อแบบประกอบแม่พิมพ์ ของ(Die casting molds) ในปี 2012 Onel และ Rus....	22
ภาพที่ 2.8	การหล่อขี้ผึ้งหาย (lost wax casting) ทีม Brooklyn โดย Andrew D และ Marchese..	23
ภาพที่ 2.9	การหล่อแบบชั้น (layer casting)	24
ภาพที่ 2.10	การหล่อแบบหมุนเหวี่ยง (Rotational casting).....	25
ภาพที่ 2.11	สูตรโครงสร้างทางเคมีของยางธรรมชาติ (<i>cis</i> -1,4-polyisoprene).....	25
ภาพที่ 2.12	แสดงกรรมวิธีการทำต้นแบบเปรียบเทียบระหว่างขั้นตอนการผลิตต้นแบบโดยวิธีการทั่วไปและการผลิตต้นแบบด้วยกรรมวิธีการใช้การพิมพ์สามมิติ	27
ภาพที่ 2.13	แสดงกรรมวิธีการเตรียมไฟล์สำหรับการพิมพ์สามมิติ	27
ภาพที่ 2.14	แสดงลักษณะของการขึ้นรูป 3D print ประเภท Fused Desposition Modeling.....	28
ภาพที่ 2.15	แสดงลักษณะของการขึ้นรูป 3D print ประเภท Semi 3D print ส่วนใหญ่ใช้เพื่อทดสอบวัสดุที่ใช้ขึ้นรูปและตัวกระตุ้นในการขึ้นรูป.....	29
ภาพที่ 2.16	เทคนิค Two photon lithographyสามารถขึ้นรูปปรอทฟอร์มูล่าวันขนาด 200 ไมโครเมตร	29
ภาพที่ 2.17	ลักษณะการทำงานของ 3D print ประเภท Materials jetting หรือ Poly-jetting	30
ภาพที่ 2.18	ลักษณะชิ้นงาน จาก 3D print ประเภท Poly-jetting หรือ Materials jetting.....	30
ภาพที่ 2.19	กรรมวิธีการขึ้นรูปของ 3D print ประเภท stereolithography หรือ SLA.....	30
ภาพที่ 2.20	กรรมวิธีการขึ้นรูปของ 3D print ประเภท Digital light processing หรือ DLP	31
ภาพที่ 2.21	แสดงความแตกต่างของการฉายแสงระหว่าง SLA และ DLP	31

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

ภาพที่ 2.21 แสดงวิธีการขึ้นรูปของ 3D print ประเภท Selective Laser Sintering (SLS) และ Selective Laser Melting (SLM)	32
ภาพที่ 2.22 ชิ้นงานที่ได้จากกรรมวิธี Selective Laser Sintering (SLS) หรือ Selective Laser Melting (SLM)	32
ภาพที่ 2.23 กรรมวิธีการขึ้นรูป แบบ Electron Beam Melting (EBM)	33
ภาพที่ 2.24 กรรมวิธีการขึ้นรูปแบบ Laminated Object Manufacturing หรือ LOM	33
ภาพที่ 2.25 แสดงกรรมวิธีการขึ้นรูปและชิ้นงาน แบบ Binder Jetting หรือ BJ	34
ภาพที่ 2.26 แสดงความเค้นที่ให้ความเครียดที่ตอบสนองเชิงพลวัตของวัสดุวิสโคอีลาสติก.....	35
ภาพที่ 2.27 แสดงกราฟความเค้น-ความเครียดจากการทดสอบแรงดึงที่อุณหภูมิคงที่.....	35
ภาพที่ 2.28 สมการการหาขนาดของ complex modulus E^* , storage modulus E' , loss modulus E'' และ loss factor $\tan \delta$	37
ภาพที่ 2.29 แสดงการเปรียบเทียบ Modulus กับลูกบอล a) black ball, b) red ball.....	37
ภาพที่ 2.30 กราฟแสดงผลของเทอร์โมพลาสติกที่มีลักษณะโครงสร้างแบบอสัณฐาน.....	38
ภาพที่ 2.31 เครื่องมือวัดที่ให้ภาระกับชิ้นงาน (force) ในแบบต่าง ๆ.....	40
ภาพที่ 2.32 แสดงอุปกรณ์สำหรับการจับยึดแบบต่างของเครื่อง DMA	41
ภาพที่ 3.1 แผนผังขั้นตอนการดำเนินงาน.....	45
ภาพที่ 3.2 ขั้นตอนการเตรียมน้ำยาล้างปริ๊วาลคาไนซ์.....	46
ภาพที่ 3.3 การออกแบบหุ่นยนต์นี้มโดยการจำลองสภาวะจริง.....	46
ภาพที่ 3.4 การออกแบบแม่พิมพ์สำหรับยางธรรมชาติ.....	47
ภาพที่ 3.5 การทดสอบการงอตัวโดยการวัดมุมที่เปลี่ยนไปเมื่อให้แรงดันอากาศเข้าไป.....	49
ภาพที่ 4.1 ผลการทดสอบการคงตัวของวัสดุสำหรับทำแม่พิมพ์ ขึ้นรูปจากวัสดุ ABS โดยเทคนิค FDM.....	55
ภาพที่ 4.2 ผลการทดสอบการคงตัวของวัสดุสำหรับทำแม่พิมพ์ ขึ้นรูปจากวัสดุ PC โดยเทคนิค FDM.....	55
ภาพที่ 4.3 ผลการทดสอบการคงตัวของวัสดุสำหรับทำแม่พิมพ์ ขึ้นรูปจากวัสดุ High-temperature RGD 525 โดยเทคนิค Polyjetting.....	56
ภาพที่ 4.4 รูปร่างการออกแบบกระเปาะสำหรับหุ่นยนต์นี้มทั้งหมด 4 รูปร่าง.....	60

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

ภาพที่ 4.5 แสดงลักษณะที่เหมาะสมสำหรับการใช้งานของหุ่นยนต์ที่มีการผลการออกแบบ.....	61
ภาพที่ 4.6 กรรมวิธีการทำซีฟิ่งสำหรับการขึ้นรูปแม่พิมพ์โดยวิธีการหล่อซีฟิ่งหาย (lost wax cating).65	
ภาพที่ 4.7 ส่วนประกอบของแกนช่องกระเปาะและวิธีการใช้งาน.....	66
ภาพที่ 4.8 แม่พิมพ์ซิลิโคนจากระบวนการฉีดเทียนทางอุตสาหกรรมเครื่องประดับและขึ้นงานตัวอย่าง ของแกนซีฟิ่งที่ผ่านการฉีดเทียน.....	67
ภาพที่ 4.9 แม่พิมพ์ประกบด้านนอกหล่อจากยางซิลิโคน เกรด RTV-P1 และซีฟิ่งจากการฉีด อุตสาหกรรมเครื่องประดับ.....	68
ภาพที่ 4.10 การประกบแม่พิมพ์ซิลิโคน เกรด RTV-P1 โดยใช้ Jig จากการพิมพ์ต้นแบบรวดเร็ว วัสดุ Endur RGD 450.....	68
ภาพที่ 4.11 ลักษณะแม่พิมพ์และวิธีการหล่อประกบแม่พิมพ์ โดยใช้ ซิลิโคนเกรด RTV-M.....	69
ภาพที่ 4.12 แม่พิมพ์สำหรับการขึ้นรูปหุ่นยนต์นึ่งจากซิลิโคน โดยใช้วิธี Split mold casting.....	70
ภาพที่ 4.13 แม่พิมพ์สำหรับการขึ้นรูปหุ่นยนต์นึ่งจากยางธรรมชาติ	71
ภาพที่ 4.14 การทดสอบหาอุณหภูมิและเวลาในการขึ้นรูปหุ่นยนต์นึ่ง จากแม่พิมพ์โลหะ.....	72
ภาพที่ 4.15 แม่พิมพ์สำหรับการขึ้นรูปหุ่นยนต์นึ่งจากยางธรรมชาติด้วยวิธีการกดอัด.....	72
ภาพที่ 4.16 a.) น้ำยาผ่านการบ่มไม่ผสมแป้ง b.) น้ำยาที่ผ่านการบ่มผสมแป้ง 5 และ 15.....	76
ภาพที่ 4.17 กราฟแสดงค่าการทดสอบการวัลคาไนซ์ (Cure Time : tc90) ของเวลาในการบ่มน้ำยา และการผสมแป้ง.....	77
ภาพที่ 4.18 กราฟแสดงผลการทดสอบความแข็งของเวลาในการบ่มน้ำยาและการผสมแป้ง.....	78
ภาพที่ 4.19 กราฟแสดงผลการทดสอบค่า Modulus 300 % (MPa) ของเวลาในการบ่มน้ำยาและการ ผสมแป้ง.....	79
ภาพที่ 4.20 ค่า storage modulus (E') ที่อุณหภูมิห้องและความถี่ 1-100 เฮิรตซ์ ของยางพรีวัลคาไนซ์.....	80
ภาพที่ 4.21 ค่า Tan delta ที่อุณหภูมิห้องและความถี่ 1-100 เฮิรตซ์ ของยางพรีวัลคาไนซ์.....	80
ภาพที่ 4.22 แสดงจุดตำแหน่งของกระเปาะที่ใช้วัดมุมของการทดสอบพฤติกรรมการงอ.....	81
ภาพที่ 4.23 แสดงวิธีการวัดมุมของการทดสอบพฤติกรรมการงอตัวสำหรับหีบจับ.....	81

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

ภาพที่ 4.24 แสดงพฤติกรรมการงอตัวของหุ่นยนต์นิ่มที่ขึ้นรูปจากยางธรรมชาติโดยใช้แรงดันอากาศเป็นตัวกระตุ้น.....	82
ภาพที่ 4.25 (a) แสดงพฤติกรรมการงอตัวของหุ่นยนต์นิ่มทำจากซิลิโคนเกรด RTV-M ใช้แรงดันอากาศเป็นตัวกระตุ้น, (b) แสดงพฤติกรรมการงอตัวของหุ่นยนต์นิ่มที่ทำจากซิลิโคนเกรด RTVT4โดยใช้แรงดันอากาศเป็นตัวกระตุ้น.....	83



คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

°C	องศาเซลเซียส
mm	มิลลิเมตร
µm	ไมโครเมตร
µg/mg	ไมโครกรัมต่อมิลลิกรัม
g/g	กรัมต่อกรัม
%	ร้อยละ
wt%	ร้อยละโดยน้ำหนัก
hr	ชั่วโมง
min	นาที
°C/min	องศาเซลเซียสต่อนาที
rpm	รอบต่อนาที
cm ⁻¹	หนึ่งต่อเซนติเมตร
Hz	เฮิรตซ์
T _m	อุณหภูมิหลอมตัว
T _g	อุณหภูมิสถานะคล้ายแก้ว
o	องศา
MPa	เมกะปาสคาล
N/m ²	นิวตันต่อตารางเมตร
Psi	ปอนด์ต่อตารางนิ้ว
N	นิวตัน

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

ในอนาคตหุ่นยนต์จะมีบทบาทมากขึ้นเป็นเท่าตัวในชีวิตประจำวันของมนุษย์ ทั้งในภาคอุตสาหกรรมและการบริการ ปัจจุบันหุ่นยนต์ในภาคอุตสาหกรรมยังมีลักษณะแข็งกระด้างเนื่องจากวัสดุโลหะและพลาสติก อีกทั้งกลไกการทำงานที่ใช้มอเตอร์หรือลวดสลิง รวมไปถึงระบบสายไฟและซอฟต์แวร์ในการควบคุม ในขณะที่ภาคบริการทางการแพทย์ยังไม่สามารถนำหุ่นยนต์เข้ามาใช้อย่างแพร่หลาย อาจเนื่องมาจากอันตรายที่คาดว่าจะเกิดขึ้น เมื่อหุ่นยนต์เข้าใกล้ชิดกับมนุษย์[1] ดังนั้นหุ่นยนต์นิ่มเป็นทางเลือกหนึ่งที่สามารถนำมาเป็นทางเลือกในการเพิ่มประสิทธิภาพในการการผลิตและการบริการ โดยขึ้นรูปจากวัสดุอ่อนนิ่ม และกลไกการทำงานที่ไม่ซับซ้อน จากระบบปั๊มหรือระบบสุญญากาศในการควบคุมการทำงาน วัสดุที่ใช้ขึ้นรูปหุ่นยนต์นิ่มโดยทั่วไปขึ้นรูปยางซิลิโคน [2] ซึ่งมีราคาสูงเมื่อเทียบกับยางธรรมชาติที่สามารถเป็นทางเลือกในการขึ้นรูปหุ่นยนต์นิ่ม

กรรมวิธีการขึ้นรูปยางธรรมชาติในปัจจุบันใช้วิธีการหล่อเก็บโดยน้ำยางธรรมชาติ หรือกรรมวิธีกดอัดแม่พิมพ์โดยใช้ยางแห้ง[3] รวมทั้งกรรมวิธีการหล่อขึ้นรูปยางธรรมชาติยังมีความซับซ้อนเมื่อนำมาใช้กับกระบวนการขึ้นรูปหุ่นยนต์นิ่มที่ต้องมีช่องอากาศภายในหรือที่เรียกว่ากระเปาะลม (channel-chamber) เมื่อขึ้นรูปด้วยกรรมวิธีเดียวกับซิลิโคนไม่สามารถทำได้ เนื่องจากคุณสมบัติการขึ้นรูปที่แตกต่างกัน โดยทั่วไปหุ่นยนต์นิ่มจากยางซิลิโคน จะสร้างช่องกระเปาะลม จากการใช้วิธีการหล่อแยกออกเป็นสองซีกในขณะที่วัสดุยังเซตตัวไม่สมบูรณ์ (Semi-cure) และนำมาหล่อประกบกันอีกครั้ง[2] ทั้งนี้การหล่อหุ่นยนต์นิ่มจากยางพาราต้องมีการออกแบบและกระบวนการที่ซับซ้อน

ในงานวิจัยนี้จึงพัฒนาการออกแบบรูปร่างหุ่นยนต์นิ่ม การขึ้นรูปแม่พิมพ์ รวมไปถึงกรรมวิธีการหล่อเก็บที่เหมาะสมสำหรับหุ่นยนต์นิ่มจากยางน้ำยางธรรมชาติ พร้อมกับทดสอบคุณสมบัติและการใช้งานของหุ่นยนต์นิ่มจากยางธรรมชาติ เมื่อเปรียบเทียบกับหุ่นยนต์นิ่มจากยางซิลิโคนที่มีการใช้กันอย่างแพร่หลาย เพื่อนำไปเป็นข้อมูลในการขึ้นรูปและผลิตในระดับอุตสาหกรรม

1.2 วัตถุประสงค์

- 1.2.1 เพื่อศึกษาการออกแบบหุ่นยนต์นิ่ม ที่เหมาะสมสำหรับการหล่อเก็บน้ำยางธรรมชาติ
- 1.2.2 เพื่อศึกษาการออกแบบแม่พิมพ์และกระบวนการขึ้นรูปหุ่นยนต์นิ่มจากยางธรรมชาติ
- 1.2.3 เพื่อศึกษาคุณสมบัติและการนำไปใช้ของหุ่นยนต์นิ่มจากยางธรรมชาติ

1.3 ขอบเขตการศึกษา

- 1.3.1 เตรียมยางคอมปาวด์จากน้ำยางธรรมชาติ
 - 1.3.1.1 เตรียมน้ำยางคอมปาวด์
 - 1.3.1.2 เตรียมน้ำยางพรีวัลคาไนซ์ (Pre-Vulcanization)
- 1.3.2 ออกแบบรูปร่างลักษณะและแม่พิมพ์สำหรับหุ่นยนต์นุ่มจากน้ำยางพรีวัลคาไนซ์
 - 1.3.2.1 ออกแบบรูปร่างของหุ่นยนต์นุ่มโดยใช้ซอฟต์แวร์เขียนแบบทางวิศวกรรม
 - 1.3.2.2 ออกแบบแม่พิมพ์สำหรับการขึ้นรูปหุ่นยนต์นุ่ม
 - 1.3.2.3 ออกแบบกรรมวิธีการขึ้นรูปหุ่นยนต์นุ่มด้วยวิธีการหล่อเบ้า
- 1.3.3 ขึ้นรูปแม่พิมพ์สำหรับหุ่นยนต์นุ่มจากน้ำยางพรีวัลคาไนซ์
 - 1.3.3.1 ขึ้นรูปจากกระบวนการพิมพ์สามมิติ Fused Deposition Modeling
 - 1.3.3.2 ขึ้นรูปจากกระบวนการพิมพ์สามมิติ Poly-Jetting
- 1.3.4 ขึ้นรูปหุ่นยนต์นุ่มจากยางซิลิโคน (silicone Soft Robotics)
 - 1.3.4.1 ขึ้นรูปโดยกรรมวิธีหล่อขี้ผึ้งหาย (lost-wax casting)
 - 1.3.4.2 ขึ้นรูปโดยวิธีการหล่อประกอบ (Assembly casting)
- 1.3.5 ขึ้นรูปหุ่นยนต์นุ่มจากน้ำยางธรรมชาติ (NR Soft Robotics)
 - 1.3.5.1 ขึ้นรูปด้วยวิธีการหล่อแบบปลดแกน (split-core casting)
 - 1.3.5.2 ขึ้นรูปด้วยวิธีการกดอัด (Compression molding)
- 1.3.6 ทดสอบประสิทธิภาพการทำงานของหุ่นยนต์นุ่มจากน้ำยางธรรมชาติ
 - 1.3.6.1 ทดสอบพฤติกรรมการทำงานตอบสนองของหุ่นยนต์นุ่มเมื่อได้รับแรงดันอากาศ
 - 1.3.6.2 เปรียบเทียบการใช้งานระหว่างหุ่นยนต์นุ่มจากยางคอมปาวด์และซิลิโคน
 - 1.3.6.3 ทดสอบคุณสมบัติยางธรรมชาติด้วยวิธีการทดสอบสมบัติเชิงกลแบบพลวัต

DMA (Dynamic Mechanical Analysis)

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.4.1 สามารถประยุกต์ใช้กรรมวิธีการหล่อยางธรรมชาติในการขึ้นรูปหุ่นยนต์นุ่ม
- 1.4.2 สามารถเข้าใจองค์ประกอบที่สำคัญของหุ่นยนต์นุ่มในเชิงพลศาสตร์ของวัสดุ
- 1.4.3 สามารถปรับปรุงกรรมวิธีการผลิตหุ่นยนต์นุ่มให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น
- 1.4.4 สามารถเพิ่มมูลค่าของยางธรรมชาติได้มากยิ่งขึ้น

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

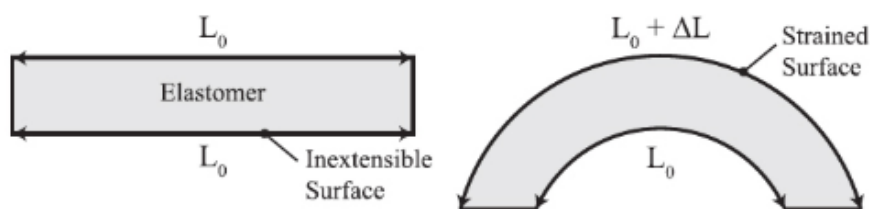
2.1 หุ่นยนต์นิ่ม (Soft robotic)

หุ่นยนต์นิ่มได้เริ่มมีงานวิจัยพัฒนาตั้งแต่ปี 1994 โดยใช้ชื่อว่า Soft Materials Robotics และได้เปลี่ยนชื่อเป็น Soft Robotics ในปี 2004 จนกระทั่งในปี 2018 ได้มีนิตยสารชื่อว่า SORO ขึ้นมา เนื่องจากได้รับความนิยมในการศึกษาและนำไปใช้งานจนถึงปัจจุบัน[2] โดยเป็นหุ่นยนต์ที่ใช้วัสดุประเภทอีลาสโตเมอร์ในการสร้างหรือขึ้นรูป โดยทั่วไปหุ่นยนต์นิ่มได้รับอิทธิพลมาจากรูปร่างของสัตว์ไม่มีกระดูกสันหลังจำพวก หนอน ปลาหมึก(bio-mimicry)[4] อีกทั้งการเลียนแบบมนุษย์ยังเป็นอีกรูปแบบหนึ่งที่มีความสนใจและได้มีการนำไปใช้ในอุตสาหกรรม เช่น หุ่นยนต์นิ่มหยิบจับ (Soft Gripper) [9] ที่นิยมใช้ในการหยิบจับสิ่งของในไลน์การผลิตโดยลักษณะการใช้งานของหุ่นยนต์นิ่มใช้สมบัติของวัสดุที่มีความยืดหดตัวได้ และเมื่อมีแรงมากระทำ เช่น แรงดันอากาศหรือแรงดันของเหลว จะทำให้สามารถขยับเคลื่อนไหวได้ตามการออกแบบรูปร่างช่องกระเปาะ (channel chamber)[5] โดยเราสามารถแบ่งหุ่นยนต์ตามคุณสมบัติของวัสดุอีลาสโตเมอร์ได้หลายชนิด โดยใช้ความสามารถของวัสดุที่มีการตอบสนองต่อสิ่งเร้า เช่น กระแสไฟฟ้า, pH, อุณหภูมิ รวมไปถึง ความดัน[6] โดยทั่วไปการขึ้นรูปหุ่นยนต์นิ่มจะสามารถขึ้นรูปได้หลายวิธี เช่น การขึ้นรูปจากการหล่อซิลิโคน การขึ้นรูปจากการพิมพ์ต้นแบบรวดเร็ว(Rapid prototyping)[7] การขึ้นรูปแบบหล่อเหวี่ยง[8] หรือการขึ้นรูปพลาสติกจากการฉีดพลาสติกขึ้นรูป จากที่กล่าวมาข้างต้นเราสามารถแบ่งหุ่นยนต์นิ่มได้หลายประเภทโดยหลัก จากภาพที่ 2.1[11]จะสามารถแบ่งประเภทได้ดังนี้ จากกรรมวิธีการผลิต วัสดุที่ใช้ในการขึ้นรูป รูปทรงและการใช้งาน



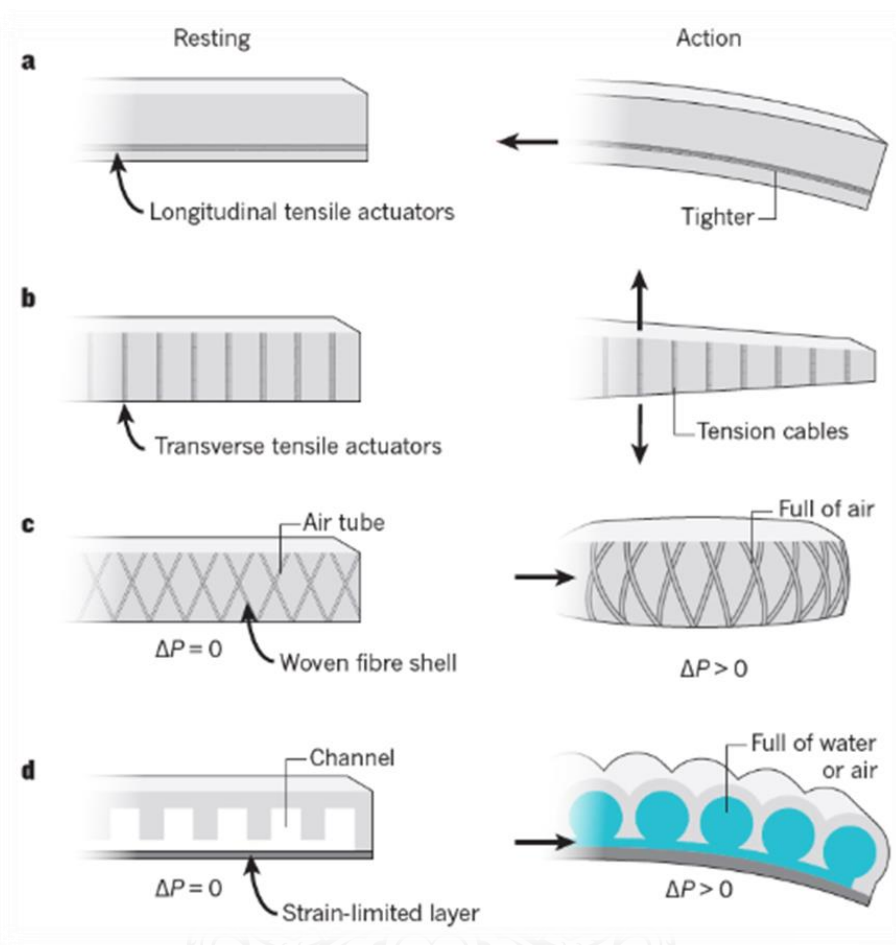
ภาพที่ 2.1 หุ่นยนต์นิ่มประเภทต่าง ๆ ที่ได้มีการวิจัยในปัจจุบัน[11]

โดยการดำเนินการแนวคิดในการนำหุ่นยนต์นุ่มมาใช้ในปัจจุบัน เนื่องจากปัจจุบันหุ่นยนต์ได้เริ่มเข้ามามีบทบาทกับมนุษย์มากยิ่งขึ้น การทำงานใกล้ชิดกับมนุษย์อาจทำให้เกิดอันตรายได้เนื่องจากหุ่นยนต์ทั่วไปเป็นหุ่นยนต์ที่ทำจากวัสดุที่มีความแข็ง มีระบบเฟืองในการขับเคลื่อนรวมไปถึงระบบไฟฟ้าที่เชื่อมต่อเข้าส่วนต่าง ๆ ของหุ่นยนต์[11] ดังนั้นหุ่นยนต์นุ่มจึงเป็นอีกหนึ่งทางเลือกของการนำไปใช้งานร่วมกับมนุษย์ในอนาคต เนื่องจากหุ่นยนต์นุ่มใช้วัสดุอีลาสโตเมอร์ การเคลื่อนไหวที่ไม่ต้องใช้กลไกที่ซับซ้อน โดยในงานวิจัยนี้ได้หุ่นยนต์นุ่มประเภทนิวเมติกส์ (Pneumatic Actuator)[12] จะอธิบายหลักการทำงานของหุ่นยนต์นุ่มประเภทนี้จะใช้ วัสดุประเภทอีลาสโตเมอร์ในการสร้างให้มีลักษณะเป็นรูปร่างที่ต้องการและมีการเว้นช่องว่างภายใน (Channel Chamber) ภาพที่ 2.2 จะอธิบายตัวกำหนดขอบเขตการเคลื่อนไหวจะใช้ลักษณะของพลศาสตร์วัสดุของหุ่นยนต์นุ่มในการขับเคลื่อนและกำหนดทิศทาง



ภาพที่2.2 หลักการทำงานของวัสดุประเภทอีลาสโตเมอร์ที่ใช้สำหรับการสร้างหุ่นยนต์นุ่ม [12]

โดยหุ่นยนต์นุ่มประเภทนิวเมติกส์นั้นสามารถแบ่งออกได้เป็น 4 ประเภทภาพที่2.3 โดยการแบ่งประเภทจะแบ่งตามลักษณะการขึ้นรูปหรือหลักการทำงานของหุ่นยนต์นุ่ม ส่วนประกอบหุ่นยนต์นุ่มโดยหลักจะมี 2 ส่วนคือ ส่วนที่สามารถขยายตัวหรือเคลื่อนไหวตามการกระตุ้น (Inextensible Surface) และส่วนของการจูดยับยั้งการเคลื่อนไหว(Strained limit layer) โดยในการออกแบบหุ่นยนต์นุ่มต้องหาความสัมพันธ์ของทั้งสองส่วนนี้ โดยทิศทางการเคลื่อนไหวจะเป็นทิศทางตรงข้ามกับ จูดยับยั้งการเคลื่อนไหวเสมอ [12]



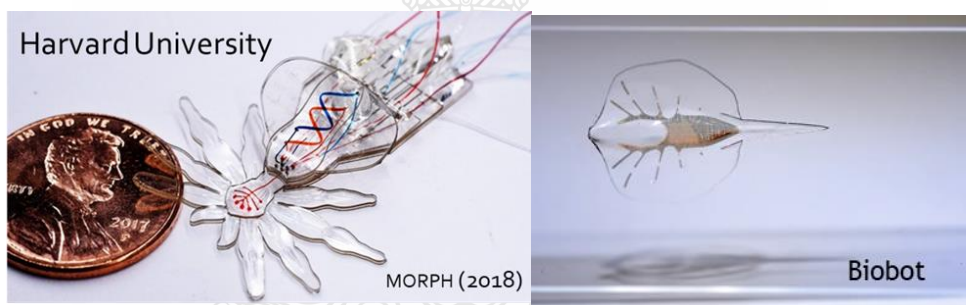
ภาพที่ 2.3 การแบ่งประเภทของหุ่นยนต์นิ่มแบบนิวเมติกส์จากหลักการใช้งาน [12]

การอธิบายประเภทของหุ่นยนต์นิ่มจะแบ่งออกเป็น 2 ช่วง คือรูปร่างขณะเริ่มต้น(resting) และ รูปร่างขณะเคลื่อนไหว(Action) โดยจะสามารถแบ่งประเภทได้ตามวิธีการวางจุดยับยั้ง(Strained limit layer) ภาพที่ 2.3a สร้างจุดยับยั้งไว้ในส่วนล่างของหุ่นยนต์นิ่ม โดยใช้วัสดุที่มีลักษณะเป็นแผ่นหรือเป็นเส้นหล่อฝังไว้ด้านใต้ของหุ่นยนต์นิ่ม เมื่อใส่ตัวกระตุ้นหรือแรงดันเข้าไปจะทำให้เกิดการงอตัวที่มีทิศทางเข้าหาจุดยับยั้งดังรูป ภาพที่ 2.3b สร้างจุดยับยั้งไว้ในแนวขวางของวัสดุอีลาสโตเมอร์ทิศทางการเคลื่อนไหวจะเคลื่อนตัวตามแนวแกนของจุดยับยั้ง ภาพที่ 2.3c ใช้วิธีการพันด้วยเส้นด้ายหรือเส้นเชือกโดยไขว้กันตลอดตัวหุ่นยนต์นิ่ม จะส่งผลให้หุ่นยนต์นิ่มเกิดการพองตัวไปในจุดที่มีการยับยั้งหรือเส้นด้ายมากที่สุดกรรมวิธีการนี้การเคลื่อนไหวมากหรือน้อยจะขึ้นอยู่กับความถี่ของช่องระหว่างเส้นด้าย ภาพที่ 2.3d ใช้วิธีการหล่อสร้างช่องกระเปาะ(Channel Chamber) โดยช่องกระเปาะจะเป็นตัวรับแรงดันภายในทำให้เกิดการพองตัวคล้ายลูกโป่งและดันซึ่งกันและกันทำให้เกิดการโค้งงอ โดยกรรมวิธีการนี้นิยม

ใช้กันอย่างแพร่หลายเนื่องจากสามารถกำหนดขอบเขตของการงอและมีประสิทธิภาพ รวมถึงความสวยงามของหุ่นยนต์นุ่มเมื่อเทียบกับประเภทอื่น[12]

2.1.1 รูปร่างรูปทรงของหุ่นยนต์นุ่มที่มีผลต่อการใช้งาน

การแบ่งประเภทหุ่นยนต์นุ่มจากรูปร่างรูปทรงที่ออกแบบ จะสามารถแบ่งออกได้ 3 ประเภท หุ่นยนต์นุ่มที่มีลักษณะคล้ายกับสัตว์ไม่มีกระดูกสันหลัง[4] โดยนิยมการเลียนแบบรูปร่างลักษณะการเคลื่อนไหวของสัตว์ประเภทต่าง ๆ (bio-mimicry) จุดประสงค์การใช้งานเพื่อให้สามารถเข้าไปในพื้นที่ที่ทำงานเสี่ยงอันตรายหรือใต้น้ำ และสามารถทำงานสำรวจได้ในระยะยาวเนื่องจากใช้พลังงานน้อย เลียนแบบสิ่งที่มีธรรมชาติได้ทำการออกแบบไว้ และนิยมศึกษาลักษณะทางกายภาพของสัตว์ที่ต้องการเลียนแบบนั้นเพื่อออกแบบให้ใกล้เคียง ยกตัวอย่างเช่นไบโอบอท(Biobot)[13] และหุ่นยนต์ MORPH ภาพที่2.4 ที่ออกแบบให้มีลักษณะคล้ายปลากระเบนและแมงมุม ซึ่งใช้การเคลื่อนไหวจากการใช้กลไกของระบบท่อขนาดขนาดไมโคร (Microfluidic) ในการเคลื่อนไหว

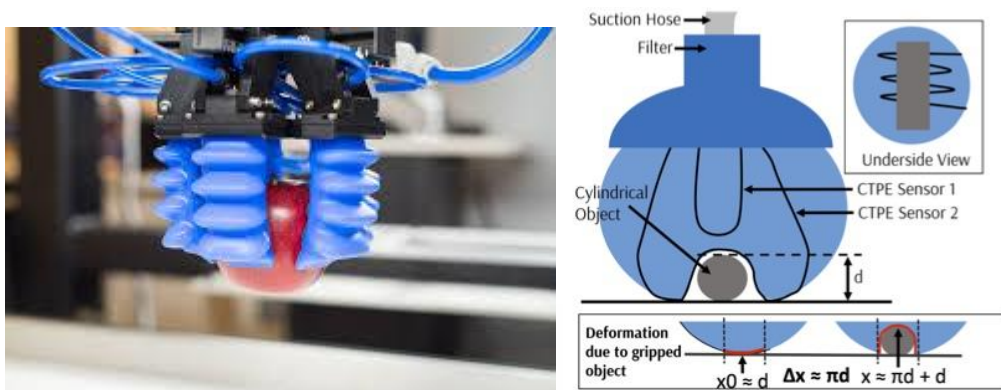


ภาพที่2.4 การออกแบบหุ่นยนต์นุ่มที่มีลักษณะคล้ายกับสัตว์ไม่มีกระดูกสันหลัง โดย

รูปซ้าย : หุ่นยนต์ MORPH จาก Harvard University [14]

รูปขวา : หุ่นยนต์ Biobot [15]

นอกจากนี้หุ่นยนต์นุ่มที่นิยมใช้อุตสาหกรรม หรือที่เรียกกันอีกประเภทคือหุ่นยนต์นุ่มสำหรับหยิบจับโดยจะมีการออกแบบให้คล้ายกับมือมนุษย์หรือสัตว์ที่มีลักษณะใช้งานสำหรับหยิบจับสิ่งของภายในไลน์การผลิตต่าง ๆ ภาพที่2.5 [16, 17] รวมไปถึงหุ่นยนต์ที่มีลักษณะคล้ายมนุษย์ ภาพที่2.6



ภาพที่2.5 หุ่นยนต์นิ่มหยิบจับ (Soft Gripper) ช้าย : หุ่นยนต์ Soft Robotics [16] และหุ่นยนต์หยิบจับจาก Bio Robotics Institute[17]



ภาพที่2.6 หุ่นยนต์นิ่มที่มีลักษณะคล้ายมือมนุษย์ ช้าย : หุ่นยนต์นิ่มจากการพิมพ์ สามมิติ [18] ชาว : หุ่นยนต์ ELabNYC [19]

2.1.2 กรรมวิธีการออกแบบหุ่นยนต์นิ่มที่เหมาะสม

ขั้นตอนในการผลิตหุ่นยนต์นิ่ม แบบใช้แรงดันลมเป็นตัวกระตุ้น จะใช้วิธีการขึ้นรูปแม่พิมพ์หล่อพอลิเมอร์ที่มีสมบัติยืดหยุ่น อาทิ ยางซิลิโคน ยางธรรมชาติ หรือวัสดุจำพวกอีลาสโตเมอร์ หลักการพื้นฐานสำหรับการออกแบบชิ้นงานเกือบทั้งหมดจะมีลักษณะเป็นกระเปาะลม ภายในแบ่งเป็นปล่องหรือช่องเพื่อให้พองตัวเมื่อมีแรงดันลมเป็นตัวกระตุ้นทำให้เกิดการเคลื่อนไหวตามต้องการ กรรมวิธีการหล่อพอลิเมอร์ขึ้นรูปในปัจจุบันยังมีความซับซ้อน เริ่มกรรมวิธีการขึ้นรูปจาก ออกแบบชิ้นงานโดยคำนึงถึงการเคลื่อนไหวตามการใช้งาน, รูปทรงก่อนและหลังจากมีการกระตุ้น, การติดตั้งระบบตัวกระตุ้น ออกแบบโมลจากชิ้นงานโดยคำนึงถึงการไหลตัว, การถอดแบบและประกอบหล่อพอลิเมอร์ และ ประกอบชิ้นงานและติดตั้งเข้ากับระบบควบคุม ด้วยขั้นตอนการขึ้นรูปดังกล่าวผนวกกับการออกแบบที่ค่อนข้างสลับซับซ้อน การทำต้นแบบจากวิธีการใช้แม่พิมพ์หล่อเพื่อทดสอบสมรรถนะของต้นแบบจึงควบคุมได้ยาก และ ไม่สามารถกำหนดสมบัติของต้นแบบได้แม่นยำมากนัก เนื่องจากต้องใช้ทักษะการขึ้นรูปค่อนข้างมาก จึงไม่สามารถสะท้อนความเชื่อมโยงระหว่างการออกแบบและชิ้นส่วนหุ่นยนต์นิ่มได้ดีนัก การหาความสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้างต่าง ๆ กับพฤติกรรมที่เกิดขึ้นจึงไม่เหมาะสมแก่

การขึ้นรูปด้วยเทคนิคดังกล่าว อย่างไรก็ตามวิธีนี้เหมาะแก่การผลิตเป็นจำนวนมาก หากมีรูปร่างหรือรูปทรงเหมาะสมแก่การนำไปใช้งานแล้ว[20] กรรมวิธีการออกแบบแม่พิมพ์เพื่อให้ขั้นตอนการผลิตมีความซับซ้อนน้อยที่สุด และต้องคำนึงถึง แม่พิมพ์ประกอบภายนอก มุมประกอบหล่อพอลิเมอร์สามารถออกแบบได้หลายทิศทาง และแม่พิมพ์สร้างกระเปาะภายใน ต้องคำนึงถึง ส่วนสำคัญ 3 ข้อ

2.1.2.1 มุมที่ไม่สามารถถอดได้ (undercuts) เป็นตัวแปรสำคัญในการการออกแบบแม่พิมพ์ประกอบ นอกจากจะส่งผลต่อการถอดประกอบแล้วยังส่งผลในเรื่องของการไหลของพอลิเมอร์ทำให้เกิดฟองอากาศภายในชิ้นงานส่งผลให้คุณสมบัติของนิ้วมือหุ่นยนต์นิ่มลดลง [21]

2.1.2.2 รูลัน ลักษณะการทำงานคล้ายกับ (runner) ของแม่พิมพ์หล่อโลหะ เป็นส่วนที่ปล่อยให้เนื้อของวัสดุล้นออกมาขณะประกอบหล่อเข้าหากัน จากการทดสอบแบบไม่มีรูลันทำให้แม่พิมพ์ไม่สามารถประกอบได้สนิทส่งผลต่อรูปร่างของนิ้วที่ผิดไป [21]

2.1.2.3 แกนช่องกระเปาะ (core chamber) ส่วนที่สำคัญในการขึ้นรูปของหุ่นยนต์นิ่มเพราะมีความแตกต่างกับการขึ้นรูปชิ้นงานทั่วไป เนื่องจากต้องการให้ภายในนิ้วมือหุ่นยนต์นิ่มมีกระเปาะและช่องลมเพื่อให้สามารถเพิ่มแรงดันเข้าไปในพื้นที่ว่างจากการออกแบบให้สามารถเคลื่อนไหวได้ โดยทั่วไปการประกอบหล่อจะควบคุมปริมาตรของช่องว่างภายในได้ยาก เนื่องจากพอลิเมอร์ที่ยังไม่เซตตัวซึมเข้าไปภายในช่องกระเปาะหลังถอดแม่พิมพ์กระเปาะออก จากกระบวนการที่นิยมใช้กันคือการหล่อประกอบแม่พิมพ์และการหล่อเป็นลักษณะเป็นแผ่นชั้น(layer) ในแต่ละชั้นหล่อให้เป็นช่องที่แตกต่างกันเพื่อให้ได้การขยับตามการออกแบบ [21]

2.1.3 กรรมวิธีการสร้างหุ่นยนต์นิ่มทั่วไป

ในการออกแบบแม่พิมพ์สำหรับนิ้วมือหุ่นยนต์นิ่มสำหรับหยิบจับ จะแตกต่างจากการขึ้นรูปชิ้นงานทั่วไปเนื่องจากรูปร่างลักษณะภายนอกและช่องภายในมีผลต่อพฤติกรรมเคลื่อนไหวตามการออกแบบ รวมไปถึงขั้นตอนในการผลิตจะมากหรือน้อย ขึ้นอยู่กับการออกแบบแม่พิมพ์สำหรับหยิบจับโดยส่วนใหญ่กรรมวิธีการขึ้นรูปนิ้วมือหุ่นยนต์นิ่มนั้นใช้วิธีการขึ้นรูป 4 วิธี คือ

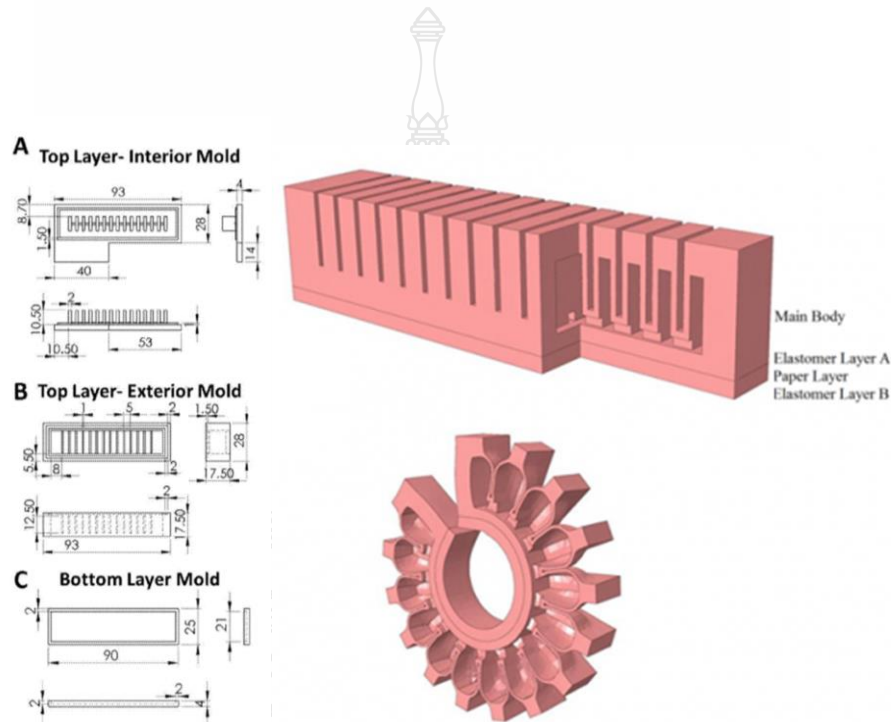
2.1.3.1 การหล่อแบบประกอบแม่พิมพ์ (Die casting molds)[22] การหล่อแบบประกอบแม่พิมพ์นิยมทั่วไปสำหรับการทำหุ่นยนต์นิ่มสำหรับหยิบจับ โดยกรรมวิธีการคือ หล่อเป็น 2 ซีกเพื่อให้สามารถทำให้เกิดช่องว่างภายในหุ่นยนต์นิ่ม จากนั้นอบให้วัสดุและเอาออกมาในขณะที่ยังเซตตัวไม่สมบูรณ์ เพื่อให้สามารถหล่อประกบกันได้ภายหลัง จำนวนของชิ้นส่วนประกอบขึ้นอยู่กับมุมที่ไม่สามารถถอดได้ (undercuts) อธิบายในภาพที่2.7

ในปี 2012 Onel และ Rus สรุปวิธีการขึ้นรูปด้วยวิธีการหล่อประกอบแม่พิมพ์ แบ่งเป็น 3 ขั้นตอนหลักๆ คือ

ขั้นตอนที่ 1 หล่อแยกชิ้น (Molding) เป็นกรรมวิธีการหล่อชิ้นส่วนของหุ่นยนต์นิ่ม โดยส่วนใหญ่แบ่งออกเป็น 2 ส่วนเพื่อให้สามารถสร้างช่องกระเปาะภายในได้โดย คือ ชิ้นส่วนที่เป็นจิบกระเปาะ (silicone plats) และส่วนที่เป็นแผ่นจำกัดทิศทาง(constraint layer)

ขั้นตอนที่ 2 จุ่มหรือทาประกอบ (Dipping) นำส่วนที่ต้องการประกอบกันด้านใดด้านหนึ่งทาหรือจุ่มซิลิโคนที่ยังไม่เซตตัวก่อนทำการประกบกัน

ขั้นตอนที่ 3 นำชิ้นส่วนทั้งสองชิ้นมาประกบกันในด้านที่มีการทาหรือจุ่มประกอบ



ภาพที่ 2.7 การหล่อแบบประกอบแม่พิมพ์ ของ(Die casting molds) ในปี 2012 Onel และ Rus [22]

2.1.3.2 การหล่อซีพิ้งหาย (lost wax casting)[23] เป็นการสร้างแกนซีพิ้งให้มีลักษณะเป็นช่องของกระเปาะขึ้นมาในตอนต้น จากนั้นนำไปใส่ไว้ในแม่พิมพ์ก่อนเทวัสดุ เมื่อวัสดุเซตตัวสามารถหลอมซีพิ้งออกมาเพื่อให้เกิดโพรงได้ในภายหลังอธิบายในภาพที่ 2.8

ในปี 2014 ทีม Brooklyn โดย Andrew D และ Marchese (SORO; SOFT ROBOTIC Volume 2: Mary Ann Liebert, Inc, 2015 17-18) ได้สร้างหุ่นยนต์นิ่มที่มีชื่อว่า The Glaucus ใช้กรรมวิธีการหล่อแบบซีพิ้งหาย โดยขั้นตอนในการขึ้นรูปตั้งแต่เตรียมแกนซีพิ้ง

ขั้นตอนที่ 1 สร้างแม่พิมพ์สำหรับแกนซีพิ้งจากการพิมพ์สามมิติเป็น 2 ชิ้น แม่พิมพ์นอกและแม่พิมพ์ของแกนสำหรับหล่อซีพิ้ง จากนั้นเทซิลิโคนลงในแม่พิมพ์ เพื่อให้มีลักษณะเป็นแม่พิมพ์ของแกนซีพิ้ง

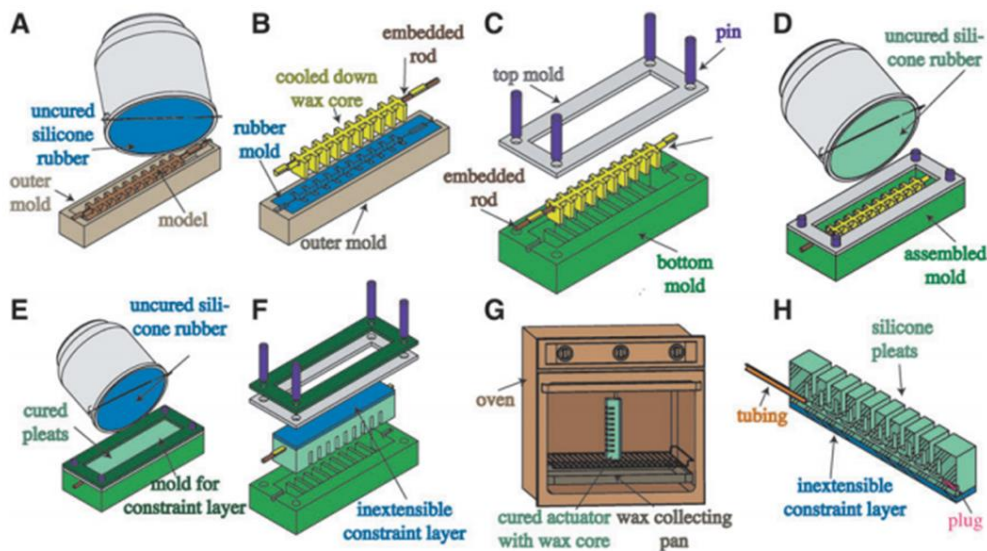
ขั้นตอนที่ 2 เทซีฟี่งหลอมลงเข้าสู่แม่พิมพ์จากขั้นตอนที่ 1 และใช้ก้านที่ขึ้นรูปโดยคาร์บอนไฟเบอร์วางเป็นช่องลมหลัก(tubing) และส่วนปลายอีกด้านทำหน้าที่เป็นจิกฟิกเจอร์ ในขณะที่หล่อและทำหน้าที่เป็นตัวอุดช่องลมส่วนปลาย(plug) หลังจากวัสดุซิลิโคนเซตตัว

ขั้นตอนที่ 3 สร้างแม่พิมพ์รูปร่างภายนอกของหุ่นยนต์นึ่ง นำแกนซีฟี่งจากขั้นที่ 2 วางไว้ที่ตำแหน่ง โดยมีแม่พิมพ์ด้านบนมีช่องที่สามารถเทวัสดุซิลิโคนและด้านล่างที่ออกแบบตามรูปทรงภายนอกของหุ่นยนต์นึ่ง จากนั้นเทซิลิโคนลงในแม่พิมพ์

ขั้นตอนที่ 4 เมื่อซิลิโคนส่วนของรูปร่างภายนอกเซตตัว ทำการเทซิลิโคนอีกชั้นเพื่อให้เป็นชั้นที่ใช้สำหรับจำกัดการงอตัว (constraint layer) ลักษณะเป็นแผ่นบางอีกครั้ง

ขั้นตอนที่ 5 เมื่อซิลิโคนในชั้นจำกัดการงอตัวเซตตัว นำหุ่นยนต์นึ่งออกจากแม่พิมพ์จะมีชั้นของซีฟี่งอยู่ภายใน นำไปอบที่จุดหลอมเหลวของซีฟี่งโดยการคว่ำช่องทางไหลของซีฟี่ง

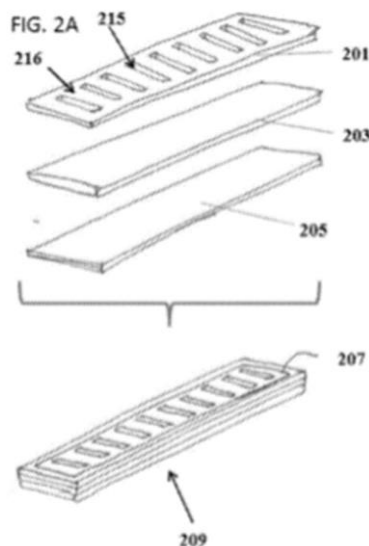
ขั้นตอนที่ 6 ดึงแกนคาร์บอนไฟเบอร์ ส่วนของช่องลมหลักออก เหลือส่วนปลายที่ใช้สำหรับอุดช่องลมทิ้งไว้



ภาพที่ 2.8 การหล่อซีฟี่งหาย (lost wax casting) ทีม Brooklyn โดย Andrew D และ Marchese [23]

2.1.3.3 การหล่อแบบชั้น (layer casting)[24] ลักษณะหล่อเป็นแผ่นบางให้มีช่องภายในเนื่องจากเป็นวิธีการที่ไม่ซับซ้อนทั่วไปจึงนำมาทำเป็นหุ่นยนต์นึ่งขนาดเล็ก เพราะสามารถหล่อเป็นชั้นฟิล์มให้จากนั้นนำมาประกบกันภายหลัง สิทธิบัตรเลขที่ US 20150090113 A1 [24] ประเทศสหรัฐอเมริกา ใช้วิธีการขึ้นรูปหุ่นยนต์นึ่งเป็นลักษณะเป็นชั้นประกบกันโดยใช้วัสดุที่เซตตัวไม่สมบูรณ์

และหาช่วงการเซตตัวเพื่อการหล่อประกอบอีกครั้งชั้นของการหล่อประกอบแบ่งเป็น 3 ส่วนหลักๆ คือ elastomeric layer, constraining layer และ strain limiting layer โดินหน้าที่ของแต่ละชั้นมีความสำคัญแตกต่างกันตามการออกแบบ อธิบายในภาพที่ 2.9



ภาพที่ 2.9 การหล่อแบบชั้น (layer casting) [24]

2.1.2.4 การหล่อแบบหมุนเหวี่ยง (Rotational casting)[25] เป็นการหล่อวัสดุโดยการใช่วิธีการหมุนเหวี่ยงเพื่อให้เกิดช่องกระเปาะภายในโดยไร้ตะเข็บ ความหนาของชั้นงานขึ้นอยู่กับปริมาณของเนื้อวัสดุที่ใส่เข้าไป โดยทั่วไปใช้วัสดุประเภทเทอร์โมพลาสติก ลีทิบัตรเลขที่ US20160250758 A1 Robert และ Huichan 2014 ประเทศสหรัฐอเมริกา ใช้กรรมวิธีการหล่อแบบหมุนเหวี่ยง โดยใช้ความเร็วตามแนวแกน x ถึง y อยู่ที่ 47/36 ความเร็วรอบเฉลี่ยที่ 6 รอบ/นาที ใช้วัสดุในการหล่อชั้นแรกคือเป็นซิลิโคน Ecoflex 00-30: smoothon หมุนเหวี่ยง 45 นาที หลังจากทีชั้นแรกเซตตัว เติมส่วนของชั้นที่ 2 เข้าไปเป็นซิลิโคน ELASTOSIL : M4601 ผสม A:B 15% หมุนเหวี่ยง 3 ชั่วโมง จากนั้นนำไปอบที่อุณหภูมิ 60°C เป็นเวลา 1 ชม. กรรมวิธีการดังกล่าวสามารถใช้ได้กับซิลิโคนทั่วไป ขึ้นอยู่กับความเร็วรอบและอุณหภูมิในการเซตตัวอธิบายในภาพที่ 2.10

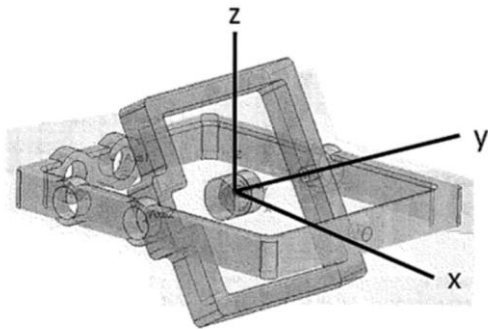


FIG. 7(a)

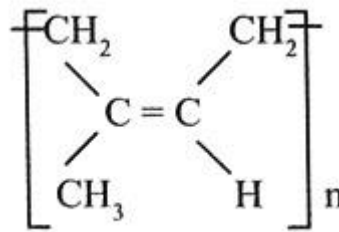


FIG. 7(b)

ภาพที่ 2.10 การหล่อแบบหมุนเหวี่ยง (Rotational casting)[25]

2.2 ยางธรรมชาติ (Natural Rubber, NR)

ยางธรรมชาติ (Natural Rubber, NR) [26] เป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากต้นยางพาราพันธุ์ *Hevea brasiliensis* ซึ่งพบได้ในแถบเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ โดยอยู่ในรูปของน้ำยางสด (Fresh Latex) ที่มีลักษณะเป็นของเหลวสีขาวข้นคล้ายน้ำนม มีองค์ประกอบหลักเป็นพอลิไอโซพรีน (*cis*-1,4-polyisoprene) อธิบายในภาพที่ 2.11 กระจายตัวในแบบคอลลอยด์หรือแขวนลอยอยู่ในตัวกลางที่เป็นน้ำมีค่า pH ประมาณ 6.5 - 7 นอกจากนี้ยังพบโปรตีนในน้ำยางมากกว่า 250 ชนิด ปริมาณโปรตีนประมาณ 1 - 1.8 % ซึ่งแตกต่างกันตามแหล่งที่มาของน้ำยาง ทั้งนี้พบว่าโปรตีน 30 - 60 ชนิด ที่ก่อให้เกิดอาการแพ้



ภาพที่ 2.11 สูตรโครงสร้างทางเคมีของยางธรรมชาติ (*cis*-1,4-polyisoprene)

2.2.1 วิธีการหลักที่ทำให้น้ำยางคงรูปมี 3 วิธี ได้แก่

2.2.1.1 ให้อนุภาคยางทำปฏิกิริยากับกำมะถัน โดยมีสารตัวเร่งหนึ่งหรือสองชนิด ร่วมกับสารตัวกระตุ้นอนินทรีย์ มีการศึกษาความเป็นไปได้ของการทำให้เฟสของอนุภาคยางในน้ำยางธรรมชาติเกิดการคงรูปโดยปราศจากการทำให้สถานะสารแขวนลอยของน้ำยางเปลี่ยนไป เนื่องจากความสนใจที่จะผลิตผลิตภัณฑ์ยางฟองน้ำจากน้ำยาง โดยคาดหวังว่าหากทำให้น้ำยางคงรูปก่อน

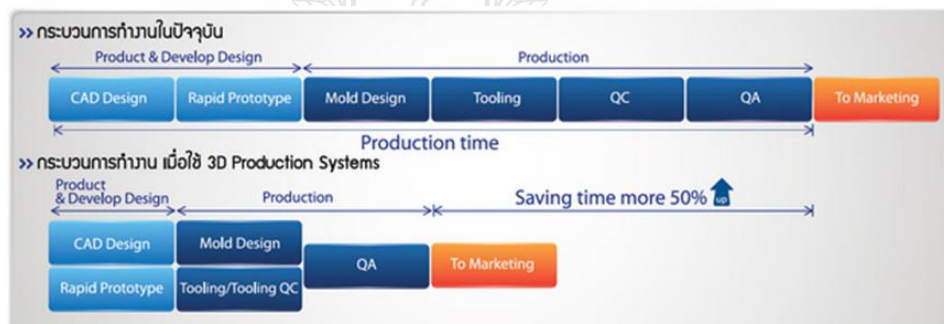
สามารถลดระยะเวลาในการทำยางฟองน้ำลงได้ ต่อมาพบว่าน้ำยางคงรูปไม่เหมาะกับการผลิตยางฟองน้ำ หรือลาเท็กซ์โฟมและไม่เคยมีการใช้งานนี้ การทดลองช่วงแรกให้ความร้อนกับน้ำยางผสม Sodium Polysulphide กำมะถัน และซิงค์ออกไซด์ ที่อุณหภูมิ 140 องศาเซลเซียส นานประมาณ 30-40 นาที ผลของกระบวนการนี้ คือ จำเป็นต้องลดความดันไอน้ำลงช้า ๆ เพื่อป้องกันน้ำยางเดือด และต้องใช้อุณหภูมิสูงมากเพราะในช่วงนั้นไม่มีสารตัวเร่งชนิดอินทรีย์ที่ไวต่อการเกิดปฏิกิริยาคงรูป ต่อมาเมื่อมีสารตัวเร่งชนิดที่ไวต่อการเกิดปฏิกิริยาคงรูปเพื่อใช้ในการทำให้น้ำยางคงรูปโดยกำมะถัน จึงสามารถลดเวลาและอุณหภูมิลงได้ประมาณ 70-80 องศาเซลเซียส ใช้เวลาประมาณ 1 ชั่วโมง

2.2.1.2 ให้ความร้อนกับน้ำยางที่ผสมเพอร์ออกไซด์และไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์ ชนิดอินทรีย์ร่วมกับสารตัวกระตุ้นของสารเพอร์ออกไซด์ และไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์ ในน้ำยางจะมีสารบางตัวที่ทำหน้าที่เป็นตัวกระตุ้นเปอร์ออกไซด์ (Peroxides activators) แต่ในการทำให้ยางคงรูปนี้ก็จะมีการเติมสารกระตุ้นร่วมกับเปอร์ออกไซด์ ทำให้ half life ของเปอร์ออกไซด์ เป็นตัวบ่งชี้อัตราการสลายตัวที่ต่ำที่สุดในระบบของปฏิกิริยาคงรูป สารตัวกระตุ้นทั้งหลายที่ใช้พบว่าฟรุคโตส (Fructose) เหมาะสมที่สุด นอกจากให้ประสิทธิภาพดีแล้ว ยังไม่เป็นพิษและไม่มีผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญต่อสถานะแขวนลอยของน้ำยาง ในการกระตุ้นการแตกตัวของเปอร์ออกไซด์ พบว่าเสริมได้โดยการเติมอีออนในรูปสารเชิงซ้อนลงไปปริมาณเล็กน้อยในส่วนผสมของเปอร์ออกไซด์ ฟรุคโตส เตรียมเปอร์ออกไซด์ในรูปของอิมัลชันที่ใช้น้ำเพียงเล็กน้อย ก่อนเติมผสมกับน้ำยางใช้ non-ionic ethoxylate เป็นอิมัลซิไฟเออร์ ประมาณ 15-20% ของเปอร์ออกไซด์ อุณหภูมิการคงรูปของน้ำยางที่ 90 องศาเซลเซียส เติมโพแตสเซียมโอเลเอต เมื่ออุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส

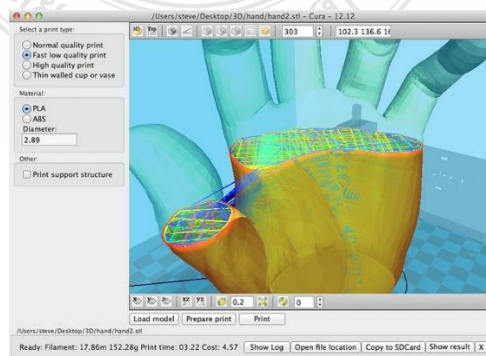
2.2.1.3 ฉายรังสีน้ำยางในรูปของคลื่นอิเล็กตรอนหรืออิเล็กตรอนแม็กเนติก การฉายรังสีน้ำยางธรรมชาติด้วยรังสีแกมมา (gamma rays) ทำให้น้ำยางเกิดพันธะเชื่อมขวางและคงรูปได้ระดับการเกิดพันธะเชื่อมขวางสัมพันธ์กับปริมาณของรังสี และสามารถกระตุ้นเสริมกระบวนการการเกิดพันธะเชื่อมขวางด้วยการใช้ Sensitisers เช่น คลอโรฟอร์ม, คาร์บอนเตตระคลอไรด์ เป็นต้น สมบัติยางคงรูปจากการฉายรังสีคล้ายกับสมบัติการคงรูปโดยเปอร์ออกไซด์ คือ มีค่าความต้านทานแรงดึงปานกลาง ความยืดหยุ่นที่จุดขาดสูง พันธะเชื่อมขวางที่เกิดจากการฉายรังสีอาจจะเป็นพันธะ คาร์บอน-คาร์บอน เช่น กรณีการเกิดพันธะเชื่อมขวางโดยเปอร์ออกไซด์ อย่างไรก็ตามวิธีการฉายรังสียุ่งยากมาก มีค่าใช้จ่ายสูงมาก ไม่สะดวก เพราะมีปัญหาด้านแหล่งที่ฉายรังสี

2.3 เทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ (3D printed technology)

เทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ หรือ Rapid prototyping เป็นหนึ่งกรรมวิธีของ Polymer Processing ที่สามารถแบ่งออกได้ 3 ประเภท คือ Thermoplastics, Thermoset และ Rapid prototyping ในปัจจุบันได้มีการนำมาใช้งานมากขึ้น เรียกว่าการขึ้นรูปต้นแบบสามมิติ 3D printed technology เนื่องจากการทำงานที่รวดเร็วและสะดวกในการใช้งาน นอกจากนั้นราคาของวัสดุที่ใช้ งานสำหรับการขึ้นรูปงานจำนวนน้อยมีราคาถูกกว่ากรรมวิธีการอื่นๆ เพราะจำนวนของผลิตภัณฑ์จากกรรมวิธีการ Rapid prototyping จะขึ้นอยู่กับพื้นที่ในการขึ้นรูปแบบ freeform จึงไม่สามารถขึ้นรูปในลักษณะของ Mass production เหมาะสำหรับผลิตภัณฑ์ต้นแบบเท่านั้น โดยจะช่วยลดขั้นตอนในการดำเนินการออกแบบและขึ้นรูป อธิบายในภาพที่ 2.12 [27] ตัวเครื่องพิมพ์สามมิตินั้นไม่ได้เพิ่งเกิดมาไม่นาน เพราะถูกสร้างมาตั้งแต่ช่วงปี 1984 ด้วยฝีมือของ Chuck Hull ผู้ร่วมก่อตั้งบริษัท 3D Systems Corp ซึ่งได้โอเดียการพิมพ์สามมิติจากผ้าปูโต๊ะที่แข็งจากรังสีอุลตราไวโอเล็ตซึ่งเป็นต้นแบบของการพิมพ์แบบ "stereolithography (SLA)" อันเป็นจุดเริ่มต้นของการพิมพ์สามมิติ แต่ก็ใช้เวลาพอสมควรก่อนจะเริ่มได้รับความนิยมเมื่อไม่กี่ปีที่ผ่านมา



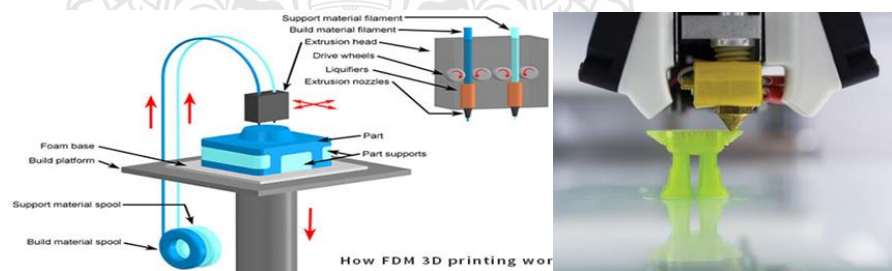
ภาพที่ 2.12 แสดงกรรมวิธีการทำต้นแบบเปรียบเทียบระหว่างขั้นตอนการผลิตต้นแบบโดยวิธีการทั่วไป และการผลิตต้นแบบด้วยกรรมวิธีการใช้การพิมพ์สามมิติ [27]



ภาพที่ 2.13 แสดงกรรมวิธีการเตรียมไฟล์สำหรับการพิมพ์สามมิติ [27]

กรรมวิธีการขึ้นรูปโดยทั่วไปของ 3D printed technology จะมีขั้นตอนคร่าวๆดังนี้ CAD Design , Transfer to .STL file, choose material & technology และ สร้าง (Build) ตามลำดับ โดยการแบ่งประเภทของ Rapid prototyping จะสามารถแบ่งประเภทได้จากกรรมวิธีการของ เทคโนโลยี ในปัจจุบันสามารถแบ่งประเภทได้ 9 ประเภท และในแต่ละประเภทจะสามารถแบ่งออกเป็นหลายระบบ ดังนี้ [28]

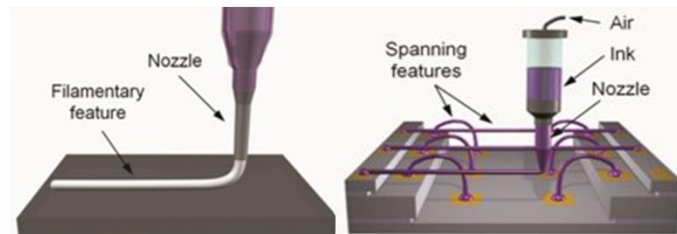
2.3.1 Fused Desposition Modeling (FDM) เป็นกรรมวิธีการคล้ายกับ Extrusion ของ thermoplastics แตกต่างกันที่ขนาดเนื่องจาก Materials Extrusion แบบ Rapid prototyping ไม่จำเป็นต้องมี Mold สามารถขึ้นรูปได้เป็นลักษณะของ freeform โดยจะใช้วิธีการหลอมเหลว thermoplastic ออกมาจากหัวขึ้นรูป (print head) ที่เคลื่อนที่ตามรูปทรงในแต่ละชั้น อธิบายในภาพที่ 2.14 ขึ้นอยู่กับวัสดุที่ใช้ในการขึ้นรูป ส่วนใหญ่จะใช้วัสดุเป็นพอลิแลคติกแอซิด (Polylactic acid, PLA) โดยตั้งอุณหภูมิหัวขึ้นรูปไว้ที่ 215 องศาเซลเซียส และดันของเหลวออกมาเป็นเส้น เคลื่อนที่ตามรูปทรงในแต่ละชั้น จากนั้นปล่อยให้เย็นตัวหรือแข็งตัวโดยเร็วในอากาศ ในการทำให้แข็งตัวสามารถให้แข็งตัวได้โดยปฏิกิริยาการเปลี่ยนเฟสหรือปฏิกิริยาทางเคมี ซึ่งความละเอียดของชิ้นงานจะอยู่ที่ 0.2-0.5 mm ขึ้นอยู่กับขนาดของรูหัวฉีด (Nozzles) นอกจากนั้นยังสามารถขึ้นรูปวัสดุได้หลายชนิดเช่น Poly(Acrylonitrile Butadiene Styrene) (ABS), Nylon, Polycarbonates (PC), Polyphenylsulfone (PPSF or PPSU), Polyethylenimine (PEI), Thermoplastic polyurethane (TPU) ในการขึ้นรูปวัสดุแต่ละชนิดขึ้นอยู่กับความสามารถในการให้ความร้อนของหัวขึ้นรูป โดยใช้ T_m ของวัสดุในการกำหนดสามารถในการขึ้นรูปแต่ละชนิด



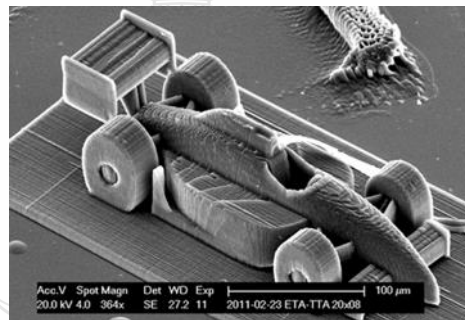
ภาพที่ 2.14 แสดงลักษณะของการขึ้นรูป 3D print ประเภท Fused Desposition Modeling (FDM)[28]

2.3.2 Freeform Reversible Embedding (Semi 3D print) โดยส่วนใหญ่เป็นการขึ้นรูปลักษณะที่ฉีดเป็นเส้นออกมาจากหัวฉีด (Nozzles) อธิบายในภาพที่ 2.15 กรรมวิธีการนี้ส่วนใหญ่ใช้สำหรับทดสอบวัสดุที่นำมาขึ้นรูปด้วยวิธีการให้ตัวกระตุ้น (source) กับวัสดุเพื่อให้แข็งตัว เช่น

อุณหภูมิ, สารเคมี, ลำแสงในช่วงคลื่นๆต่างๆ โดยปัจจุบัน 3D print ความสามารถของกรรมวิธีการนี้ สามารถขึ้นรูปชิ้นงานที่เป็นมีขนาดเล็กดังภาพที่ 2.8 โดยใช้ชื่อว่า two photon lithography ซึ่งสามารถขึ้นรูปชิ้นงานเป็นรูปฟอร์มล่ำว้นขนาด 200 μm ได้ [29]

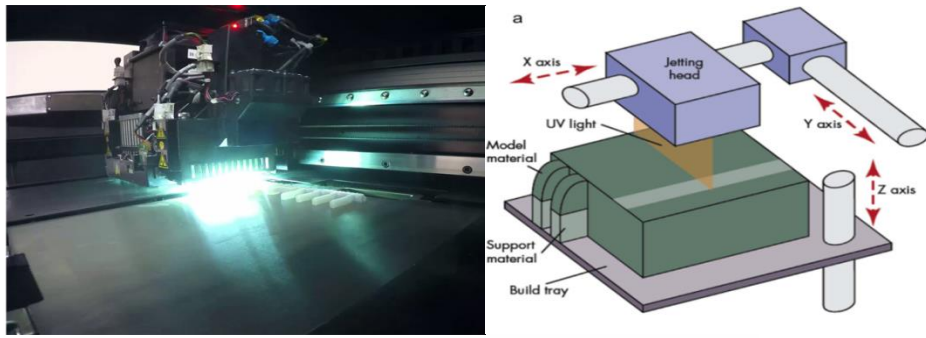


ภาพที่ 2.15 แสดงลักษณะของการขึ้นรูป 3D print ประเภท Semi 3D print ส่วนใหญ่ใช้เพื่อทดสอบวัสดุที่ใช้ขึ้นรูปและตัวกระตุ้นในการขึ้นรูป[30]



ภาพที่ 2.16 เทคนิค Two photon lithography สามารถขึ้นรูปปรตฟอร์มล่ำว้นขนาด 200 ไมโครเมตร [31]

2.3.3 Poly-jetting เป็นกรรมวิธีคล้ายกับการ printer กระดาษทั่วไปแต่ต่างกันว่า 3D printer ประเภทนี้จะขึ้นรูปซ้อนทับกันไปในแต่ละชั้น (layer) อธิบายในภาพที่ 2.17 การใช้แสง UV ในการทำให้ พอลิเมอร์แข็งตัว โดยในแต่ละชั้นจะมีความหนาอยู่ 15 – 50 μm ขึ้นอยู่กับความสามารถเครื่องแต่ละรุ่น โดยวัสดุที่ใช้จะเป็นประเภท photopolymer โดยทั่วไปจะมีวัสดุที่เป็นแบบแข็ง (Rigid) และ แบบยาง (rubber like) กรรมวิธีนี้แตกต่างจากกรรมวิธีอื่นคือ สามารถขึ้นรูปแบบผสมได้ ภาพที่ 2.17 คือการเลือกการผสมสีและเลือกระดับความแข็งอ่อนตัวของวัสดุได้ แต่เนื่องจากวัสดุในการขึ้นรูปมีราคาสูง จึงเหมาะสำหรับการทำต้นแบบเพื่อจำลองการผลิตในระดับอุตสาหกรรม [32]

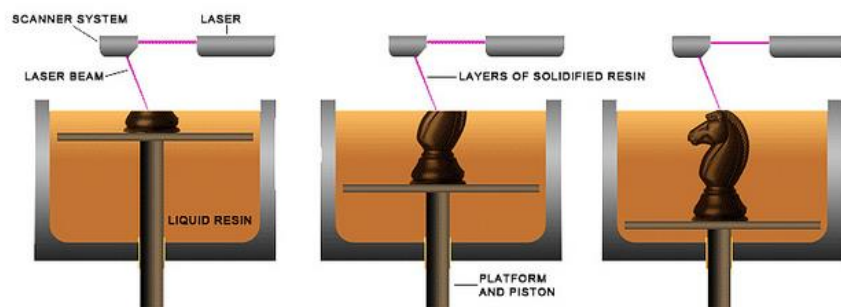


ภาพที่ 2.17 ลักษณะการทำงานของ 3D print ประเภท Materials jetting หรือ Poly-jetting [32]



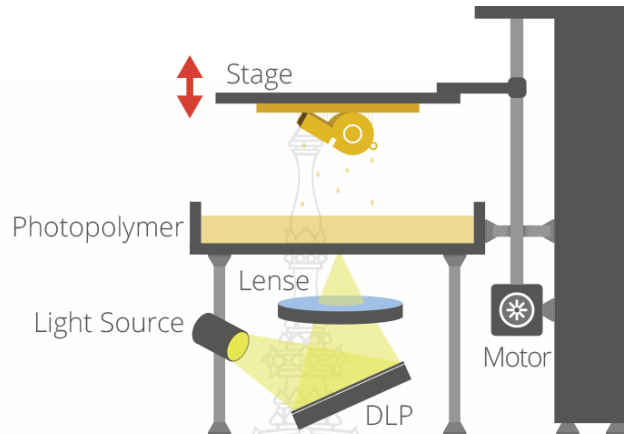
ภาพที่ 2.18 ลักษณะชิ้นงาน จาก 3D print ประเภท Poly-jetting หรือ Materials jetting [33]

2.3.4 Stereolithography (SLA) ใช้หลักการ Vat photo polymerization อธิบายในภาพที่ 2.19 เป็นกระบวนการพิมพ์แบบยิงลำแสงอุลตราไวโอเล็ต (UV) ไปที่ผิวหน้าเรซิน (photopolymer resin) น้ำเรซินจะแข็งตัว และเชื่อมต่อกับเรซินที่แข็งตัวในชั้นก่อนหน้า เกิดเป็นชิ้นงานขึ้นมา โดย SLA พิมพ์ได้บางสุดชั้นละ 50 ไมครอน [32]

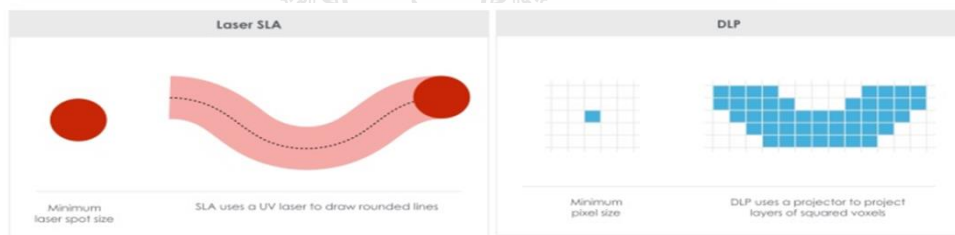


ภาพที่ 2.19 กรรมวิธีการขึ้นรูปของ 3D print ประเภท stereolithography หรือ SLA [32]

2.3.5 Digital light processing (DLP) อธิบายในภาพที่2.20 ใช้หลักการ Vat photo polymerization เช่นเดียวกับ SLA แต่ DLP ใช้ projector light แทน UV และ DLP พิมพ์ได้บางสุด 100 ไมครอน [33]

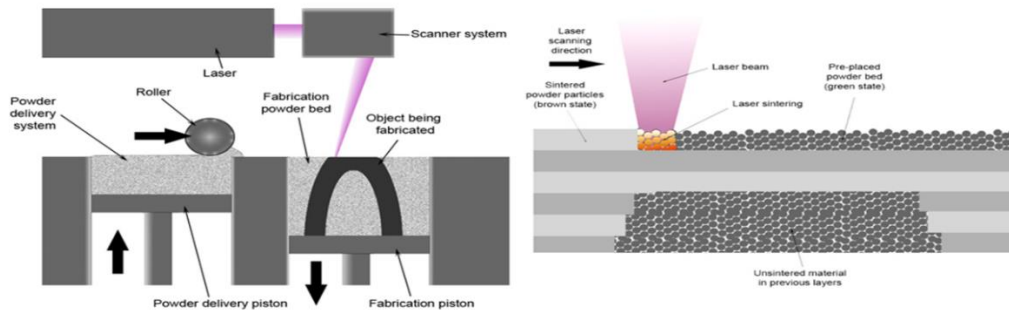


ภาพที่2.20 กรรมวิธีการขึ้นรูปของ 3D print ประเภท Digital light processing หรือ DLP [33]



ภาพที่2.21 แสดงความแตกต่างของการฉายแสงระหว่าง SLA และ DLP [34]

2.3.6 Selective Laser Sintering (SLS) หรือ Selective Laser Melting (SLM) คือกรรมวิธีแบบ Powder bed fusion โดยหลักการทำงานหลักๆของ 3D printer ประเภทนี้คือ จะมีฉายแสง laser ลงไปที่ผิวของผงวัสดุทำให้เกิดการหลอมเหลวและแข็งตัวโดยทันที และ tray ที่รองรับผงวัสดุจะทำหน้าที่เป็นแนวแกน Z อธิบายในภาพที่2.21 โดยเลื่อนลงด้านล่างและมีลูกกลิ้งกวาดวัสดุผงชั้นใหม่ลงมาเพื่อขึ้นรูปชั้นต่อไป วัสดุที่ใช้ในกรรมวิธีนี้มีจะใช้เป็นผงโลหะในการขึ้นรูป เช่น Stainless, nickel, aluminium, และ titanium ภาพที่2.22 [35]



ภาพที่ 2.21 แสดงวิธีการขึ้นรูปของ 3D print ประเภท Selective Laser Sintering (SLS) และ Selective Laser Melting (SLM) [35]



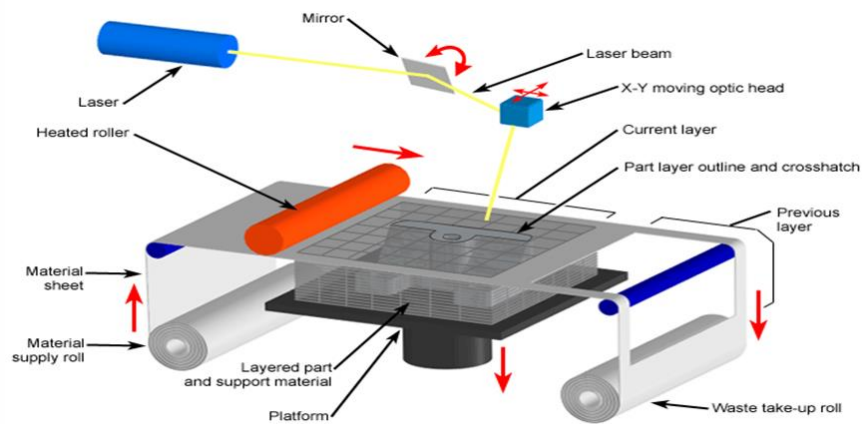
ภาพที่ 2.22 ชิ้นงานที่ได้จากกรรมวิธี Selective Laser Sintering (SLS) หรือ Selective Laser Melting (SLM) [36]

2.3.7 Electron Beam Melting (EBM) เป็นเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติด้วยโลหะที่นิยมใช้ที่สุด มีหลักการทำงานลำแสงอิเล็กตรอน (Electron Beam, EB) เพื่อหลอมละลายโลหะ เนื่องจากโลหะมีจุดหลอมเหลวที่สูงกว่าพลาสติก จึงต้องใช้พลังงานสูงตามไปด้วย การพิมพ์ชิ้นงานโลหะแบบ EBM จำเป็นต้องพิมพ์ support เพื่อยึดชิ้นงานกับฐานพิมพ์และเพื่อช่วยระบายความร้อนจากการหลอมโลหะ เครื่องพิมพ์ชนิดนี้ถูกใช้งานอย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรมเทคโนโลยีขั้นสูง เช่น อวกาศยาน การบิน ยานยนต์ การแพทย์ ทั้งการสร้างชิ้นงานต้นแบบและการสร้างชิ้นงานเพื่อนำไปใช้งานจริง การสร้างชิ้นงานโลหะจากการพิมพ์ 3 มิติสามารถช่วยลดจำนวนชิ้นส่วน ลดความซับซ้อนและลดน้ำหนักของเครื่องจักรต่างๆ อธิบายในภาพที่ 2.22 [37]



ภาพที่ 2.23 กรรมวิธีการขึ้นรูป แบบ Electron Beam Melting (EBM) [37]

2.3.8 Laminated Object Manufacturing (LOM) เป็นการพิมพ์ด้วยการซ้อนแผ่นวัสดุ (Sheet lamination) ใช้เทคนิคเลเซอร์หรือมีดตัดวัสดุที่มีลักษณะเป็นแผ่นบางทีละชั้น และเชื่อมแต่ละชั้นด้วยกาว โดยวัสดุที่ใช้แผ่นกระดาษ ไม้ โลหะ เหมาะสำหรับการสร้างชิ้นงานเพื่อเป็นวัตถุดิบแบบ เพราะจุดเด่นของการพิมพ์แบบ LOM คือความเร็ว แต่ความละเอียดของงานยังต้องอาศัยการเก็บงานที่ดีด้วย ต้นทุนของวัสดุค่อนข้างต่ำเมื่อเทียบกับการพิมพ์แบบอื่นๆ ภาพที่ 2.23 [38]

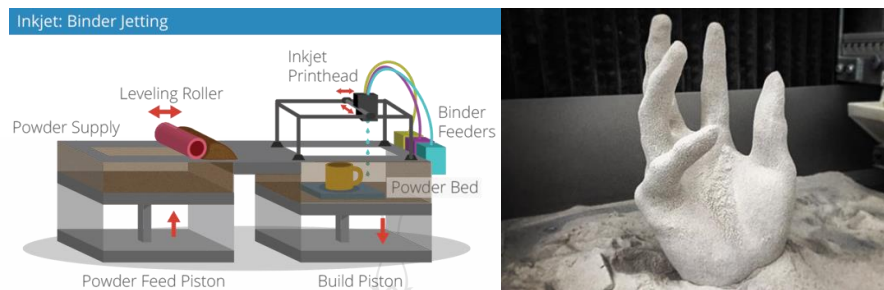


Copyright © 2008 CustomPartNet

ภาพที่ 2.24 กรรมวิธีการขึ้นรูปแบบ Laminated Object Manufacturing หรือ LOM [38]

2.3.9 Binder Jetting ทำงานคล้ายกับระบบ SLS เนื่องจากใช้วัสดุผงในการขึ้นรูปชิ้นงานเหมือนกัน แต่แทนที่จะใช้ laser เชื่อมผงวัสดุ เครื่องพิมพ์จะทำการฉีดวัสดุ Binder ซึ่งทำหน้าที่เหมือนกาวเพื่อเชื่อมผงวัสดุเข้าด้วยกันเป็นรูปร่าง และยังพ่นสีลงไปได้ด้วย ทำให้ได้ชิ้นงานที่มีความละเอียด แถมยังมีสีเหมือนเครื่องพิมพ์ Inkjet ที่พิมพ์บนกระดาษ อย่างไรก็ตาม ชิ้นงานที่ออกจากเครื่องจะแข็งแรงน้อยกว่าชิ้นงานจากเครื่อง SLS ต้องนำชิ้นงานไปเคลือบกาวเพื่อเพิ่มความแข็งแรง นิยมใช้

สำหรับทำโมเดลสถาปัตยกรรม และประติมากรรมต่างๆ เนื่องจากชิ้นงานจะมีสีสันทันที่ดูสมจริง ภาพที่ 2.25 [39]



ภาพที่ 2.25 แสดงกรรมวิธีการขึ้นรูปและชิ้นงาน แบบ Binder Jetting หรือ BJ [39]

2.4 การวิเคราะห์เชิงกลแบบพลวัต (Dynamic mechanical analysis, DMA)

2.4.1 หลักการวิเคราะห์เชิงกลแบบพลวัต [42]

หลักการวิเคราะห์เชิงกลแบบพลวัต หรือมีเรียกทับศัพท์ภาษาอังกฤษว่า (Dynamic mechanical analysis, DMA) เป็นการวิเคราะห์ทางความร้อนของวัสดุวิธีหนึ่ง ใช้วิเคราะห์เชิงกลและสมบัติหยุ่นหนืด (viscoelastic properties) ของวัสดุเป็นพื้นฐานในการวัด โดยเทคนิคนี้มีหลักการคร่าวๆ คือ การให้แรงแบบสั่นกลับไป-กลับมา (oscillatory) ในภาพที่ 2.26 ด้วยความถี่ ω เป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิ เวลา หรือความถี่ และวัดการเสียรูปของวัสดุที่ตอบสนองต่อแรงนั้น หรืออีกวิธีในทางกลับกัน โดยการทำให้วัสดุเสียรูปแบบสั่นกลับไป-กลับมา และวัดแรงที่ตอบสนองต่อการเสียรูปนั้น ๆ ก็ได้ แรงที่ให้หรือขนาดการเสียรูปที่กระทำต่อวัสดุนั้นจะต้องมีค่าน้อยและทำให้การตอบสนองของวัสดุยังคงอยู่ในช่วงหยุ่นหนืดแบบเชิงเส้น (linear viscoelastic region) โดย complex modulus สามารถใช้สัญลักษณ์ได้หลายตัวตามลักษณะการทดสอบตาม ISO 6721-1 คือ E^* , K^* , G^* , L^* ใน ASTM D 4092 จะใช้ E^* จากภาพที่ 2.26 สามารถจำแนกลักษณะได้ดังนี้

δ = phase angle

E = tensile modulus

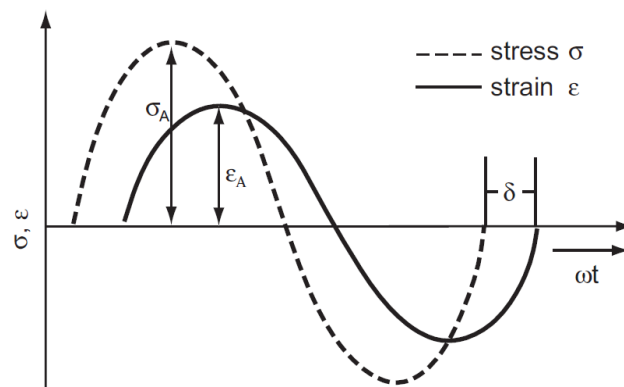
G = shear modulus

K = bulk compression modulus

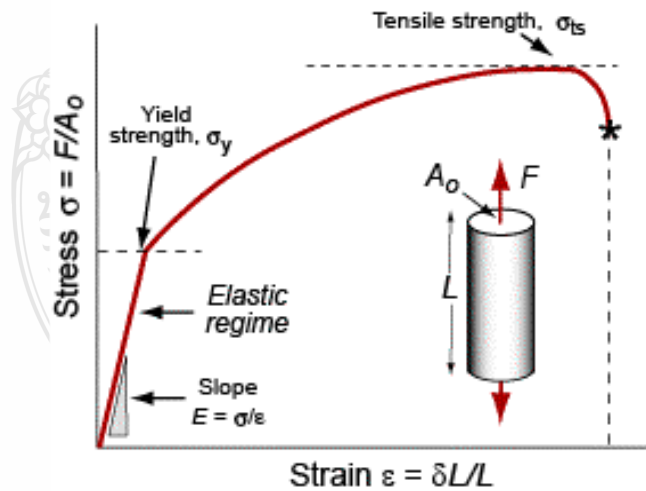
L = uniaxial-strain modulus

โมดูลัสเชิงซ้อน (complex modulus) คืออัตราส่วนระหว่าง แอมพลิจูดของความเค้น (stress amplitude) และ แอมพลิจูดของความเครียด (Strain amplitude) สามารถบอกได้ถึงความแข็งกระด้าง (stiffness) ของวัสดุ โดยขนาดของโมดูลัสเชิงซ้อนสามารถแสดงได้ดังนี้

$$|E^*| = \sigma_A / \varepsilon_A \quad (1)$$



ภาพที่ 2.26 แสดงความเค้นที่ให้และความเครียดที่ตอบสนองเชิงพลวัตของวัสดุวิสโคอีลาสติก



ภาพที่ 2.27 แสดงกราฟความเค้น-ความเครียดจากการทดสอบแรงดึงที่อุณหภูมิคงที่

โดยปกติเมื่อให้แรง (force, F) จะเกิดความเค้น (Stress) ในวัสดุ วัสดุจะเสียรูปไปและเกิดความเครียด (Strain) ความเค้น-ความเครียดที่วิเคราะห์จากการทดสอบแรงดึง (tensile testing) ที่อุณหภูมิคงที่ ค่าความชันเริ่มต้น (initial slope) ของกราฟจะให้ข้อมูลเกี่ยวกับความแข็งกระด้าง

(Stiffness) ของวัสดุ หรือ ค่าโมดูลัสของยังก์ (young's modulus) โดยค่าโมดูลัสนี้จะขึ้นกับอุณหภูมิ และค่าการสั่นแบบซายน์ (sinusoidal sine wave) ทำให้สามารถกวาด (Sweep) เพื่อวิเคราะห์ค่าโมดูลัสที่อุณหภูมิและความถี่ต่าง ๆ ได้อย่างรวดเร็ว

จากภาพที่ 2.27 เมื่อกระตุ้นวัสดุหยุ่นหนืดด้วยแรงแบบพลวัต (dynamic stress) วิถีการการสั่นของความเครียด (strain) ที่ตอบสนองจะช้ากว่าวิถีการการสั่นของความเค้น (stress) ที่กระทำต่อวัสดุเท่ากับมุมวิถีการ (phase angle) δ แบบออกเป็น 2 แบบ

1) วัสดุที่มีความยืดหยุ่นสูง (elastic) สูง ความเครียด (strain) ที่ตอบสนองต่อความเค้น (Stress) จะเกิดขึ้นทันทีนั่นคือมีมุมวิถีการเท่ากับ 0°

2) วัสดุที่มีความเป็นของไหลหนืดสูง (viscous) สูง ความเครียด (strain) จะตอบสนองต่อความเค้น (Stress) ช้าไปเป็นมุมวิถีการเท่ากับ 90°

เมื่อการตอบสนองของวัสดุยังคงอยู่ในช่วงหยุ่นหนืดแบบเชิงเส้น (linear viscoelastic region) ค่าความเค้นหรือความเครียดที่ตอบสนอง (ขึ้นอยู่กับชนิดของเครื่องมือ) จะมีความถี่ ($\omega = 2\pi f$) ค่าเดียวกันกับความเครียดหรือความเค้นที่ให้กับวัสดุ ดังนั้นในการทดลองเชิงพลวัต (dynamic test) ตัวแปรที่วิเคราะห์ ได้แก่

ϵ_0 = ค่าแอมพลิจูดของความเครียด = stress amplitude

σ_0 = ค่าแอมพลิจูดของความเค้น = Strain amplitude

δ = ค่ามุมวิถีการ = tan delta

Ω = ค่าความถี่ที่ใช้วิเคราะห์ = frequency

โมดูลัสจาก DMA, DMTA จะอยู่ในรูปของ

$$\sigma = \sigma_0 \sin \omega t$$

$$\epsilon = \epsilon_0 \sin(\omega t - \delta)$$

$E^* = E' + iE''$ = โมดูลัสเชิงซ้อน (Complex modulus)

$$|E^*| = \sqrt{(E')^2 + (E'')^2} = \frac{\sigma}{\epsilon}$$

$E' = \frac{\sigma}{\epsilon_0} \cos \delta$ = โมดูลัสสะสม (storage modulus)

$E'' = \frac{\sigma}{\epsilon_0} \sin \delta$ = โมดูลัสสูญเสีย (loss modulus)

$$\tan \delta = E''/E' = \text{Loss Factor} \quad (1)$$

เมื่อ σ และ ϵ คือความเค้นและความเครียดที่เวลา t ใดๆ σ_0 และ ϵ_0 คือค่าแอมพลิจูดของความเค้นและแอมพลิจูดความเครียดตามลำดับ ในเบื้องต้นนี้ส่วนที่จำเป็นต่อการวิเคราะห์ จาก

สมการ E^* ประกอบด้วยส่วนที่เป็นจำนวนจริงซึ่งเรียกว่า E' หรือโมดูลัสสะสม (Storage modulus) และส่วนที่เป็นจำนวนจินตภาพ ซึ่งเรียกว่า E'' หรือ โมดูลัสสูญเสีย (loss modulus) นอกจากนี้ยังสามารถหาค่า complex modulus ได้จากภาพที่2.28

$$|E^*| = \frac{\sigma_A}{\epsilon_A}$$

$$|E^*| = \sqrt{[E'(\omega)]^2 + [E''(\omega)]^2}$$

$$E'(\omega) = |E^*| \cdot \cos \delta$$

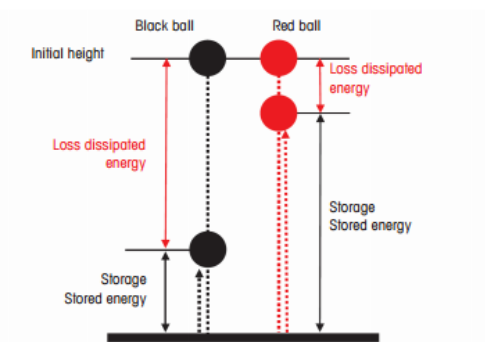
$$E''(\omega) = |E^*| \cdot \sin \delta$$

$$\tan \delta = \frac{E''(\omega)}{E'(\omega)}$$

ภาพที่2.28 สมการการหาขนาดของ complex modulus E^* , storage modulus E' , loss modulus E'' และ loss factor δ

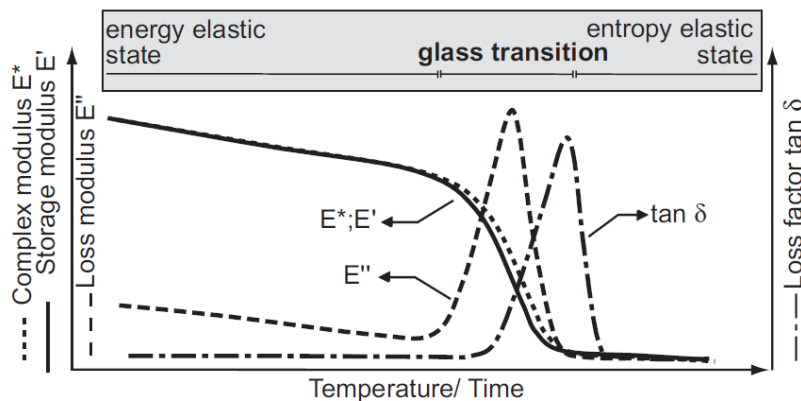
โมดูลัสสะสม (storage modulus) หรือ E' เป็นค่าซึ่งแสดงถึงความแข็งกระด้าง (stiffness) ของวัสดุวิสโคอีลาสติกมีค่าแปรผันตรงกับพลังงานที่สะสม (energy stored) ระหว่างรอบการให้แรง โดยค่า E' สามารถเปรียบเทียบกับ (elastic modulus) ซึ่งสามารถวัดได้จากเส้นกราฟความเค้นความเครียดในจากภาพที่2.29

โมดูลัสสูญเสีย (loss modulus) หรือ E'' เป็นค่าซึ่งขึ้นกับความสามารถในการสลายพลังงาน (energy dissipation) ของวัสดุวิสโคอีลาสติก หรือการสูญเสียพลังงาน โดยค่านี้ แสดงถึงพลังงานที่สูญเสียไปในรูปความร้อนและแสดงการวัดพลังงานการสั่น (vibration energy) ที่ถูกเปลี่ยนไปเป็นพลังงานรูปอื่นและไม่สามารถคือรูป (non-recovery) ได้



ภาพที่2.29 แสดงการเปรียบเทียบ Modulus กับลูกบอล a) black ball , b) red ball

อัตราส่วนของ E'' ต่อ E' เรียกว่า loss factor หรือ $\tan \delta$ ใช้อธิบายความสามารถในการสลาย (dissipate) หรือการเปลี่ยนรูปพลังงานเชิงกลของวัสดุเป็นพลังงานรูปแบบอื่น ขณะที่ค่าอื่นๆ เช่น compliance $J^* = 1/E^*$ และค่าความหนืดยังสามารถคำนวณได้จากค่า DMA เช่นกัน เพื่อให้เข้าใจยิ่งขึ้นให้เปรียบเทียบโมดูลัสสะสมและโมดูลัสสูญเสียกับการปล่อยลูกเทนนิสลงพื้น ลูกเทนนิสจะกระเด็นกลับคืนมาแต่ไม่เท่ากับความเร็วเริ่มต้นการที่ลูกเทนนิสสามารถกระเด็นพื้นขึ้นมาได้นั้นแสดงถึงการตอบสนองแบบยืดหยุ่น (elastic reponse) หรือพลังงานที่ลูกบอลให้กลับมา ถ้าลูกเทนนิสขึ้นสูงมากเท่าไรจะแสดงถึงค่า E' ที่มากเท่านั้น ในขณะที่ระดับความสูงที่ลดลงของลูกเทนนิสหลังกระเด็นแสดงถึงพลังงานที่สูญเสียอันเนื่องมาจากความเสียดทานและการเคลื่อนที่ของอนุภาคภายในของลูกเทนนิส (internal motion) คือ ค่า E'' ดังนั้นโดยสรุปโมดูลัสเชิงซ้อนสามารถมองภาพคร่าวๆ เป็น 2 ส่วน คือ ความยืดหยุ่น (elastic-like) ของวัสดุ จาก E' และความหนืดไหล (viscous-like) ของวัสดุ จาก E'' ค่าโมดูลัสส่วนใหญ่จะอยู่ในหน่วย MPa แต่บางครั้งก็ใช้ N/m^2



ภาพที่ 2.30 กราฟแสดงผลของเทอร์โมพลาสติกที่มีลักษณะโครงสร้างแบบอสัณฐาน

สมบัติวิสโคอีลาสติก (Viscoelasticity) พฤติกรรมวิสโคอีลาสติก เมื่อมีแรงกระทำต่อโซ่โม่เลกุลจะยืดตัวอย่างช้า ๆ จนถึงสภาวะที่โซ่โม่เลกุลทุกโซ่ตอบสนองต่อแรงกระทำอย่างสมบูรณ์ และเมื่อกำจัดแรงกระทำออก โซ่โม่เลกุลจะค่อย ๆ เรียงตัวสู่ช่องว่างและความเครียดจะลดลงสู่สภาวะใกล้เคียงเดิมเท่านั้น แต่จะไม่สามารถกลับคืนอย่างสมบูรณ์เหมือนก่อนที่จะมีแรงมากระทำ ลักษณะนี้เรียกว่า คุณสมบัติวิสโค-อีลาสติก (Viscoelasticity) การคลายความเค้น (Stress Relaxation) การทำนายพฤติกรรมของวิสโคอีลาสติกซึ่งสามารถกำหนดฟังก์ชันโมดูลัสการคลายความเค้นให้อยู่ในรูปสมการอนุกรมพอนี (Prony Series Function)

ลักษณะของกราฟแสดงผลทั่วไปของ (Typical curves) วัสดุที่เป็นเทอร์โมพลาสติกมีลักษณะโครงสร้างแบบอสัณฐาน (amorphous) ในโมเลกุลสามารถไหล (rheology) หรือเคลื่อนที่ได้ในอุณหภูมิ ต่ำ เมื่อมีแรงลักษณะเป็นพลวัตมากกระทำวัสดุประเภทนี้ยังคงรูปอยู่ได้เนื่องจากความแข็งแรงต่างน้อย และการไหลตัวและคืนตัวได้ดี โดยเฉพาะเมื่อมีส่วนประกอบของหมู่ C-C จะส่งผลให้เกิดการ crosslinks ที่ดีขึ้นการเสียรูปน้องลงและความต้านทานแรงดีขึ้นเป็นคุณสมบัติความแข็งแรงต่าง (stiffness) ในทางกลับกันเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงไปของอุณหภูมิประกอบกับให้แรงแบบพลวัต ความสามารถในการคงรูป และคืนตัวจะแปรผันตามแรงและอุณหภูมิขึ้นอยู่กับ T_g และ T_m ของวัสดุ จากภาพที่ 2.30 วัสดุอยู่ในสถานะคล้ายแก้วที่อุณหภูมิต่ำ (glass state or energy elastic state) และวัสดุที่อยู่ในรูปของเอนโทรปีอีลาสติกที่อุณหภูมิสูง โดยจะมีช่วงอุณหภูมิระหว่างสองสถานะนี้เราเรียกว่า glass transition โดยเมื่อมีการให้แรงเชิงกลแบบพลวัตจะส่งผลให้เกิดแรงต้านทางภายในที่เปลี่ยนแปลงไปด้วย เราจะสามารถเห็นค่าของ E'' โมดูลัสสูญเสีย (loss modulus) ในช่วงอุณหภูมินี้ การลดลงของ E' โมดูลัสสะสม (storage modulus) จะสอดคล้องกันและสามารถนำไปวิเคราะห์ค่าได้ในช่วงอุณหภูมินี้

2.4.2 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์

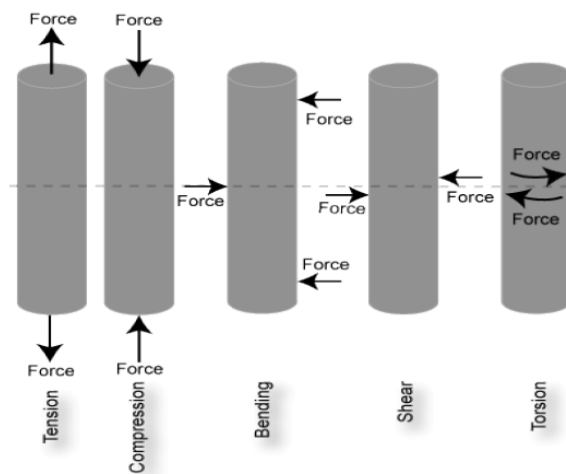
เครื่องมือวัดเชิงกลแบบพลวัตแบ่งได้เป็น 2 ประเภทใหญ่ๆ คือ แบบ DMA การเสียรูปของวัสดุ (displacement – controlled test) และแบบ (force-controlled test) การให้แรงหรือความเครียดและวัดความเค้นที่ตอบสนอง โดยการกระตุ้นเชิงพลวัตทำให้เกิดการสั่นแบบอิสระ (free vibration) และการสั่นแบบต่อเนื่องจากแรง (forced vibration)

2.4.2.1 การสั่นแบบอิสระ (free vibration)

เครื่องมือชนิดที่เกิดการสั่นอิสระมีทั้งแบบมีความหน่วง (damp free vibration) และแบบมีการสั่นพ้อง (resonance free vibration) สำหรับชนิดที่เกิดการสั่นอิสระแบบมีความหน่วงตัวอย่างเช่นเครื่องวัดชนิดลูกตุ้มแบบบิด (torsion pendulum) เครื่องมือวัดชนิดนี้ที่ปลายด้านหนึ่งของชิ้นงานจะถูกยึดให้คงที่ในขณะที่ปลายอีกด้านจะถูกบิดโดยจานหมุนบิด (torsion vibration disc) อย่างอิสระความถี่ที่เกิดขึ้นและค่าแอมพลิจูดของการสั่น ตลอดจนขนาดชิ้นงานจะถูกใช้เพื่อคำนวณหาโมดูลัสเนื่องจากการบิด (torsional modulus) สำหรับเครื่องมือวัดชนิดที่เกิดการสั่นอิสระแบบมีการสั่นพ้อง (resonance free vibration) นั้น การสั่นเกิดในลักษณะเดียวกับการสั่นของายกีตาร์ โดยชิ้นงานจะถูกยึดอยู่ระหว่างแขนสองข้างที่ขนานกัน (parallel oscillation arm) แขนข้างหนึ่งจะทำให้ชิ้นงานเกิดการสั่นตลอดเวลาเพื่อทำให้เกิดการสั่นพ้องหรือเกิดเรโซแนนซ์ด้วยขนาดของแอมพลิจูดเกือบคงที่ ค่าโมดูลัสจะถูกคำนวณจากค่าความถี่พ้อง ค่าแอมพลิจูดที่เกิดขึ้นและขนาดของชิ้นงาน

2.4.2.2 การสั่นต่อเนื่องจากแรง (force vibration)

เครื่องมือวัดชนิดที่การสั่นเกิดเนื่องจากแรงที่ทั้งการสั่นพ้อง และไม่มีการสั่นพ้อง โดยในแบบแรกเป็นการทดสอบแบบให้ภาระชิ้นงาน (load) จนเกิดการสั่นพ้อง ซึ่งผลที่ได้จากการทดสอบจะนำไปหาค่าโมดูลัสเชิงซ้อน ในแบบนี้นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย ซึ่งปกติสามารถเปลี่ยนค่าความถี่ที่ใช้ในการทดสอบได้ในระหว่างการวิเคราะห์สำหรับช่วงความถี่ที่ใช้ทดสอบส่วนใหญ่มักอยู่ในช่วง 0.001 ถึง 300 Hz หรือมากกว่านั้น อาจสูงถึง 1000 Hz ขึ้นกับวัสดุที่นำมาทดสอบ ในกระบวนการเสียรูป (mode of deformation) ที่เลือกและความถี่พ้องของเครื่องวัด



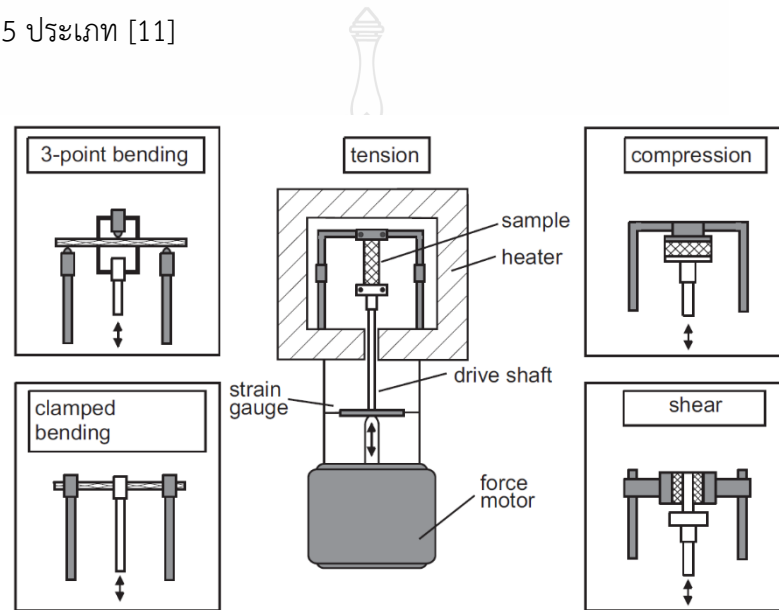
ภาพที่ 2.31 เครื่องมือวัดที่ให้ภาระกับชิ้นงาน (force) ในแบบต่างๆ

2.4.2.3 ชนิดของการให้แรง (Torsion VS. axial)

สำหรับเครื่องมือที่ใช้วัดหรือศึกษาสมบัติเชิงพลวัตแบบที่การสั่นเกิดเนื่องจากแรง (force vibration) นี้การให้ภาระ (load) กับชิ้นงานนั้น ทำได้ทั้งแบบบิด (torsion) และแบบแนวแกน (axial) เครื่องมือวิเคราะห์ที่ให้ภาระกับชิ้นงานแบบบิด (torsion) นั้นสามารถวิเคราะห์ได้ทั้งวัสดุที่เป็นของเหลวที่มีความหนืดต่ำ ๆ ไปจนถึงวัสดุที่เป็นของแข็งเสริมแรง ทั้งที่ขึ้นอยู่กับขนาดของแรงบิดสูงสุดของเครื่องวัด เครื่องมือวิเคราะห์สมบัติเชิงพลวัตแบบนี้ได้แก่ พวงรีโอมิเตอร์ แบบคูเอตต์ (couette) แบบระนาบ (parallel-plate) แบบระนาบ-กรวย (cone and plate) และแบบ beam and braid เป็นต้น โดยค่าโมดูลัสที่วัดได้จะอยู่ในรูปโมดูลัสเนื่องจากการบิด (torsional modulus) หรือโมดูลัสเนื่องจากการเฉือน (shear modulus) DMA ประเภทนี้สามารถวัดแรงเฉือน (shear force) และวัดแรงในแนวแกนปกติ (normal force) ได้แบบต่อเนื่อง

เครื่องมือวิเคราะห์ที่ให้ภาระกับชิ้นงานในแนวแกน tension และ compression นั้นโดยทั่วไปใช้วิเคราะห์วัสดุที่เป็นของแข็งที่มีค่าโมดูลัสต่ำไปจนถึงค่าโมดูลัสที่มีค่าสูง และของเหลวที่มีค่าความหนืดสูงเท่านั้น ไม่เหมาะกับของเหลวที่มีค่าความหนืดต่ำ ๆ DMA ประเภทนี้

สามารถวิเคราะห์สมบัติเชิงกลทางพลวัตซึ่งเกิดจากการเสียรูปของวัสดุได้ทั้งแบบ การงอ (bending) การดิ่ง (torsion) การกดดัน (compression) และการเฉือน (Shear) อธิบายในภาพที่ 2.31 ภายใน DMA เพียงเครื่องเดียว เนื่องจาก DMA ประเภทนี้ถูกออกแบบให้สามารถเปลี่ยนกลไกที่ใช้ยึดจับวัสดุชิ้นงาน (หรือที่เรียกว่า fixture) ให้ตรงกับความต้องการได้ ตัวอย่างกลไกที่ใช้ยึดจับชิ้นงานที่สำคัญได้แก่ three point bending, four point bending, dual cantilever, single cantilever, parallel plate, extension และ sandwiches-shear plate จากภาพที่ 2.25 โดยจะยกตัวอย่างการใช้งานหลักๆ ของชิ้นของแรงทั้งหมด 5 ประเภท [11]



ภาพที่ 2.32 แสดงอุปกรณ์สำหรับการจับยึดแบบต่างๆของเครื่อง DMA

จากการศึกษาข้อมูลสำหรับการดำเนินการงานวิจัยสำหรับการพัฒนากรรมวิธีการขึ้นรูปหุ่นยนต์นิ่มจากยางธรรมชาติ สามารถประยุกต์ใช้กรรมวิธีการทั้งหมด 4 วิธี มาใช้ในการประยุกต์เพื่อให้เหมาะสมกับยางธรรมชาติได้ โดยกรรมวิธีการดำเนินการทดลองจะกล่าวไว้ในบทต่อไป

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

วิธีการดำเนินงานในการศึกษากรรมวิธีการขึ้นรูปหุ่นยนต์นิ่ม จากวัสดุน้ำยางธรรมชาติ (Natural rubber, NR) เริ่มจากการเตรียมวัสดุอุปกรณ์และเครื่องมือในการขึ้นรูปและเครื่องมือในการทดสอบต่าง ๆ โดยดำเนินการตามขั้นตอนดังต่อไปนี้

3.1 แผนการดำเนินการวิจัย

- 3.1.1 ศึกษาค้นคว้าข้อมูลและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
- 3.1.2 วางแผนการดำเนินงาน
- 3.1.3 จัดหาวัสดุและเครื่องมือในการทดลอง
- 3.1.4 เตรียมน้ำยาง HNR ที่ความเข้มข้นร้อยละ 10 %DRC

ตารางที่ 3.1 สูตรของน้ำยางคอมปาวด์สำหรับการขึ้นรูปหุ่นยนต์นิ่ม

ส่วนประกอบ	Phr	กรัม
60% HRC	100	167
10% KOH	0.2	2
10% Teric acid	0.02	0.2
50% Sulfur	0.8	1.6
50% ZDEC	0.4	0.8
50% ZMBT	0.4	0.8
50% wingstay L	1	2.0
50% Zno	1	2.0
น้ำกลั่น	-	170.5

3.1.5 ออกแบบหุ่นยนต์นิ่มด้วย CAD ในรูปแบบต่างๆที่ส่งผลต่อพฤติกรรมเคลื่อนไหวเมื่อให้แรงดันอากาศ

3.1.6 ออกแบบแม่พิมพ์ตามจำนวนความแตกต่าง ที่ส่งผลต่อพฤติกรรมเคลื่อนไหวเมื่อให้แรงดันอากาศ

3.1.7 ขึ้นรูปแม่พิมพ์จากกรรมวิธีการพิมพ์สามมิติ

3.1.8 ทดสอบกรรมวิธีการขึ้นรูปจากแม่พิมพ์ โดยการแบ่งประเภทตามแม่พิมพ์ ตามเทคนิคการขึ้นรูปแบ่งออกเป็น 2 ประเภท

3.1.8.1 ขึ้นรูปจากกรรมวิธีการขึ้นรูปต้นแบบรวดเร็ว (3D print) โดยใช้ 2 เทคนิค คือ เทคนิค Polyjetting (วัสดุ คือ HighTemperature RGD 525 และ Eudur RGD450) และ เทคนิค FDM (วัสดุคือ ABS, PC, PC-ABS, PC, PETG-PC, PETG-Carbon, PVA)

3.1.8.2 ขึ้นรูปจากการกัดโลหะ

3.1.9 การแบ่งประเภทหุ่นยนต์นี้มาตามวัสดุ

3.1.9.1 การหล่อขึ้นรูปหุ่นยนต์นี้มาจาก ยางธรรมชาติ

3.1.9.2 การหล่อขึ้นรูปหุ่นยนต์นี้มาจาก ซิลิโคน เกรด RTV-T4, RTV-M

3.1.10 ทดสอบพฤติกรรมกรรมการเคลื่อนไหวตามการออกแบบของหุ่นยนต์อ่อนนี้

3.1.11 ทดสอบคุณสมบัติเชิงกลแบบพลวัต เพื่อเปรียบเทียบกับพฤติกรรมกรรมการเคลื่อนไหวจากรูปร่างที่แตกต่างกัน

3.1.12 รวบรวมข้อมูลและวิเคราะห์ผลการทดลอง

3.1.13 สรุปผลและจัดรูปเล่มรายงาน

3.2 วัสดุและอุปกรณ์

3.2.1 วัสดุและสารเคมี

3.2.1.1 น้ำยางธรรมชาติชั้นชนิดแอมโมเนียสูง (High ammonia natural rubber, HANR) 60% DRC

3.2.1.2 น้ำกลั่น (Distilled water)

3.2.1.3 สารแอมโมเนีย (Ammonia : Nacalai Tesque Inc., 28%)

3.2.1.4 สารละลายกำมะถัน 50 wt% (Sulfur (S) : Nippon Zeon Co.,Ltd.)

3.2.1.5 สารละลายซิงค์ออกไซด์ 50 wt% (Zinc Oxide (ZnO) : Nippon Zeon Co.,Ltd.)

3.2.1.6 สารละลายซิงค์-ไดบิวทิลไดไทโอคาร์บาเมท 25 wt% (Zinc-dibutyldithiocarbamate (ZDBC) : Nippon Zeon Co.,Ltd.)

3.2.1.7 สารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 25 wt % (Potassium hydroxide (KOH) : Nacalai Tesque Inc.)

3.2.2 เครื่องมือที่ใช้ในการเตรียมชิ้นงาน

3.2.2.1 เครื่องชั่งแบบวิเคราะห์ ชนิดอ่านค่าได้ละเอียด 0.0001 กรัม

3.2.2.2 เตาไฟฟ้า (Hot plate) ขนาด 1500 วัตต์

3.2.2.3 เครื่องหมุนเหวี่ยง (Centrifugation)

3.2.2.4 ขวดกั่นกลม ขนาด 300 มิลลิลิตร

3.2.2.5 กระจกตวงขนาด 100 มิลลิลิตร

3.2.2.6 กรวยหยด 100 มิลลิลิตร

3.2.2.7 จานเพาะเชื้อ

3.2.2.8 ปีกเกอร์

3.2.2.9 ข้อนตักสาร

3.2.3 เครื่องมือที่ใช้ในการออกแบบและขึ้นรูป

3.2.2.1 เครื่องคอมพิวเตอร์ใช้ในการออกแบบด้วยซอฟต์แวร์ CAD/CAM

3.2.2.2 เครื่องพิมพ์สามมิติ ชนิด FDM : Wanhao Duplicator 6

3.2.2.3 เครื่องพิมพ์สามมิติ ชนิด Polyjetting : Objet 260 Stratasys

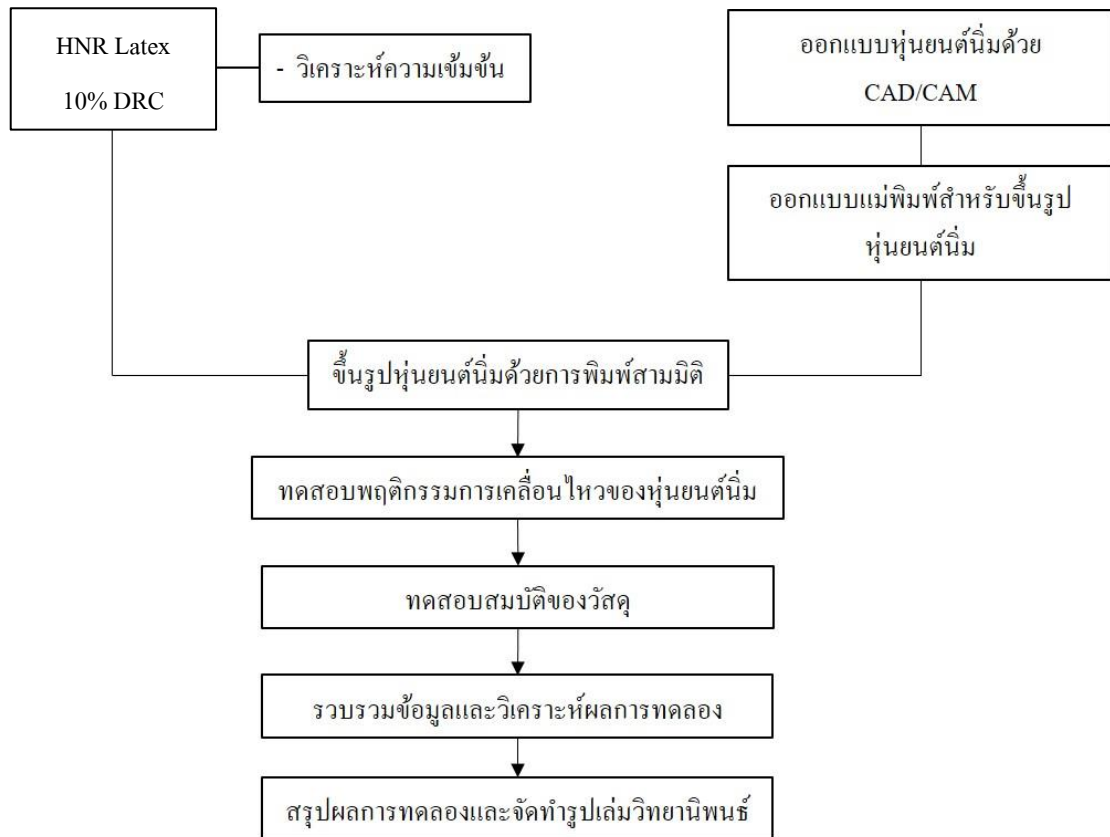
3.2.2.4 เส้น Filament โดยใช้วัสดุ PC, PC-ABS

3.2.4 เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบพฤติกรรมและการเคลื่อนไหวของหุ่นยนต์นี้ม

3.2.4.1 แขนหุ่นยนต์ Dobot : Magician

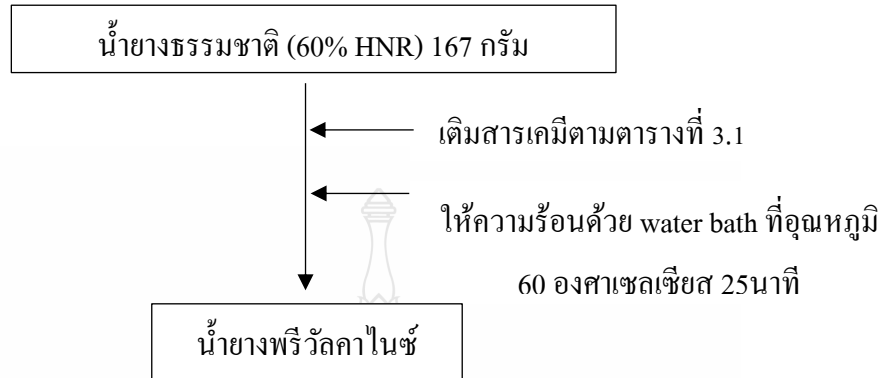
3.2.4.2 ปัมลมโรตารี : Puma ขนาด 370x1000 mm แรงดัน 10 bar

3.3 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย



ภาพที่ 3.1 แผนผังขั้นตอนการดำเนินงาน

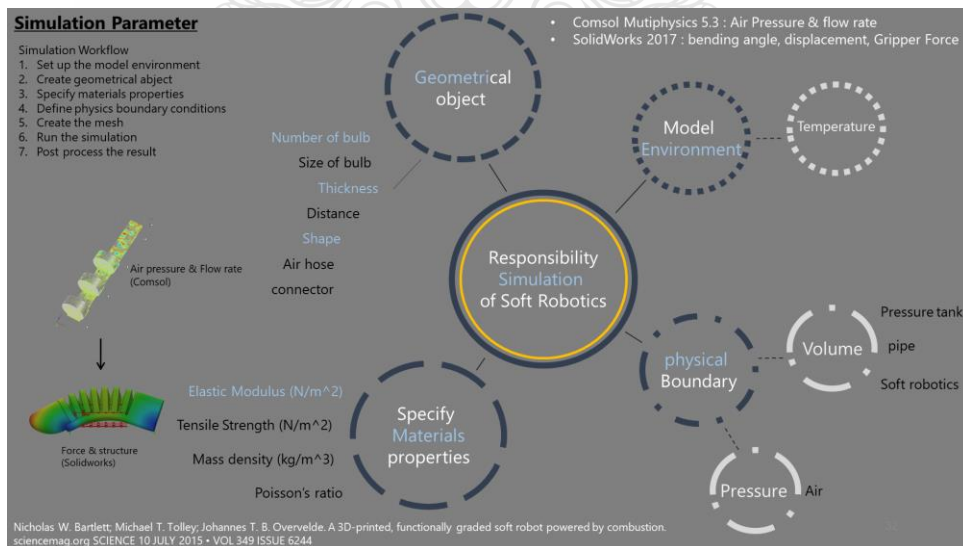
3.4 การเตรียมน้ำยางพรีวัลคาไนซ์ (Pre-vulcanization)



ภาพที่ 3.2 ขั้นตอนการเตรียมน้ำยางพรีวัลคาไนซ์

3.5 การออกแบบและขึ้นรูปหุ่นยนต์นิ่ม

ลักษณะภาพรวมของการพัฒนาหุ่นยนต์นิ่ม เพื่อใช้ในการออกแบบและพัฒนา รวมไปถึงการจำลองสภาวะการใช้งาน โดยหลักจะคำนึงถึง 2 องค์ประกอบ ความเหมาะสมของชิ้นงาน และ กรรมวิธีการขึ้นรูป Software ที่ใช้คือ SolidWorks 2017 : bending angle, displacement, Gripper Force



ภาพที่ 3.3 การออกแบบหุ่นยนต์นิ่มโดยการจำลองสภาวะจริง

Geometrical object คือ รูปร่างลักษณะชิ้นงานของหุ่นยนต์นิ่มที่มีผลต่อพฤติกรรม การเคลื่อนไหว จะประกอบด้วย

3.6.1 Number of bulb (จำนวนของกระเปาะ) จะส่งผลในเรื่องขององศาการงอในขณะที่รับแรงดันอากาศ ยิ่งมีจำนวนกระเปาะมากจะยิ่งงอตัวได้มากขึ้นตาม แต่ถ้าเยอะเกินไปหุ่นยนต์นิ่มจะอ่อนตัวไม่เป็นรูปทรงในขณะที่ไม่มีแรงดัน ในงานวิจัยนี้ใช้จำนวนกระเปาะ 4-7

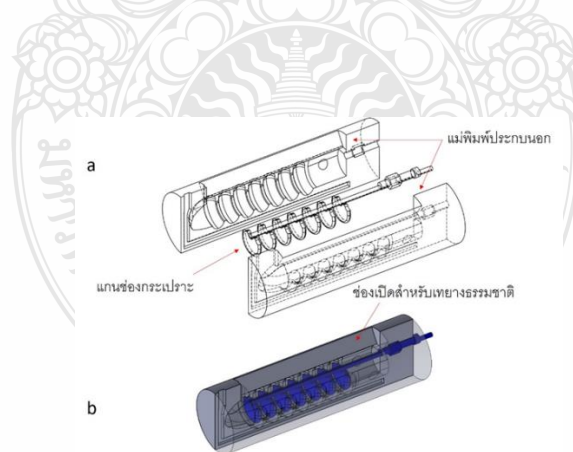
3.6.2 Size of bulb (ขนาดของกระเปาะ) ขนาดของกระเปาะจะส่งผลในเรื่องขององศาการงอ ซึ่งสัมพันธ์กับจำนวนของกระเปาะเพราะยิ่งมีจำนวนกระเปาะเยอะขนาดของกระเปาะจะเล็กลงตาม ในการพิจารณากระเปาะจะคำนึงถึงกรรมวิธีการขึ้นรูปเป็นหลัก ว่ายากหรือง่ายในการขึ้นรูป

3.6.3 Thickness (ความหนาของผนังกระเปาะ) จะส่งผลในการรับแรงดันในการยืดตัว ถ้าบางองศาการงอเยอะ แต่แตกหักเสียหายง่าย ถ้าหนาไปจะทำให้ใช้แรงดันในการทำงานเยอะขึ้น ในงานวิจัยนี้ใช้ 2, 3, 4 mm

3.6.4 Distance (ระยะห่างระหว่างกระเปาะ) จะส่งผลในเรื่องของการดันตัวระหว่างกระเปาะเมื่อได้รับแรงดัน ห่างไปจะใช้แรงดันเยอะในการเคลื่อนไหวของหุ่นยนต์นิ่ม ถ้าแคบไปจะส่งผลเรื่องของการเสียรูปขณะรับแรงดัน ในงานวิจัยนี้ใช้ 2 mm

3.6.5 Shape (รูปร่างของหุ่นยนต์นิ่ม) คำนึงถึงรูปร่างความสวยงามให้เหมาะสมกับการใช้งานในงานนี้เน้นในเรื่องของการนำไปใช้กับการผลิต จึงไม่จำเป็นต้องเน้นมากนัก

3.6.6 Connector (การเชื่อมต่อ) การนำหุ่นยนต์นิ่มไปติดตั้งต้องคำนึงถึงการเชื่อมต่อ สายแรงดันอากาศ



ภาพที่ 3.4 การออกแบบแม่พิมพ์สำหรับยางธรรมชาติ

3.6 การออกแบบแม่พิมพ์สำหรับหุ่นยนต์นิ่ม

กรรมวิธีการหล่อสำหรับยางธรรมชาติ ใช้การหล่อแบบถอดแกน (split core) กรรมวิธีการหล่อและหักแกนเพื่อให้สามารถนำแกนในออกให้เกิดภายในช่องกระเปาะโดยกรรมวิธีที่เหมาะสม กรรมวัสดุที่ไม่สามารถหล่อประกบได้เช่น ยางธรรมชาติ โดยใช้วิธีการหล่อให้ยางธรรมชาติเซตด้วยความร้อนจากนั้นใช้วิธีการหักแกนภายในเพื่อให้เกิดช่องลมภายในหุ่นยนต์นิ่ม จากภาพที่ 3.5

ตารางที่ 3.2 ตารางแสดงสภาวะการขึ้นรูปของวัสดุสำหรับแม่พิมพ์หุ่นยนต์นิ่มยางธรรมชาติ

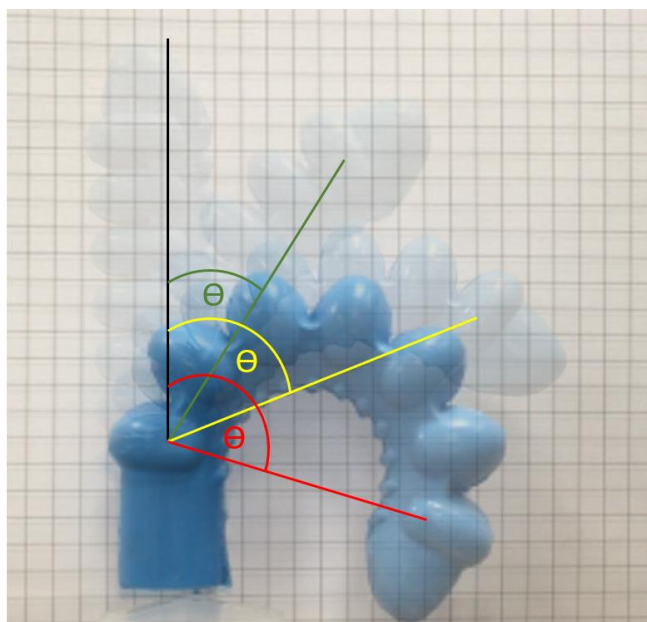
materials	condition	
PC filament : PolyMaker	Nozzle Temperature	245 °C
	Bed Temperature	100 °C
	Printing Speed	100%
	Fan Speed	0%
	Flow Speed	110%
	Adhesive	Hair spray : caring
PC-ABS filament : Syn-inno	Nozzle Temperature	230 °C
	Bed Temperature	95 °C
	Printing Speed	100%
	Fan Speed	0%
	Flow Speed	100%
	Adhesive	Blue tape

3.7 การขึ้นรูปแม่พิมพ์สำหรับหุ่นยนต์นิ่ม

ในการทดลองนี้นักวิจัยคาดหวังในการเลือกใช้วัสดุเพื่อนำไปใช้ในการทำแกนสร้างกระเปาะ เนื่องจากการขึ้นรูปเพื่อนำไปใช้ในระดับอุตสาหกรรมสามารถใช้วิธีการฉีกพลาสติกได้ แต่ในการดำเนินงานวิจัยนักวิจัยต้องการความรวดเร็วในการดำเนินการจึงใช้วัสดุจากเครื่องพิมพ์สามมิติ ซึ่งคุณสมบัติทางกลของวัสดุที่ได้จากการพิมพ์สามมิติ จะลดลงเท่าตัว แต่คุณสมบัติทางด้านอุณหภูมิจะมีค่าใกล้เคียงกัน เพราะการเสียรูปขณะให้อุณหภูมิของแกนกระเปาะส่งผลต่อรูปแบบของช่องภายในตัวกระเปาะที่ผิดเพี้ยนไป ดังนั้นการนำไปใช้ในระดับอุตสาหกรรม นักวิจัยเลือกใช้วัสดุที่ขึ้นรูปจาก PC, PC-ABS เพื่อ

ใช้สำหรับทำแกนกระเปราะและแม่พิมพ์โลหะสำหรับการทำแม่พิมพ์ประกอบนอกโดยวัสดุที่ใช้ในการขึ้นรูปทั้ง 2 ตัว โดยใช้เครื่อง FDM : Wanhao Duplicator 6 ดังตารางที่ 3.2

3.8 การทดสอบพฤติกรรมกรรมการเคลื่อนไหวของหุ่นยนต์นิ่ม



ภาพที่ 3.5 การทดสอบการงอตัวโดยการวัดมุมที่เปลี่ยนไปเมื่อให้แรงดันอากาศเข้าไป

การทดสอบพฤติกรรมกรรมการเคลื่อนไหวของหุ่นยนต์นิ่ม โดยใช้โปรแกรมอิมเมจเจ (ImageJ) เพื่อให้ทราบถึงมุมของหุ่นยนต์นิ่มที่เกิดขึ้นในขณะที่ให้ปริมาณของแรงดันเข้าไป ใช้วิธีการทดสอบโดยให้ลิเนียร์มอเตอร์ติดตั้งเข้ากับหลอดฉีดยาสำหรับโดยใช้ซอฟต์แวร์สำหรับ เอ็มอาร์ คอนฟิกูเรชัน 2 (MR-configuration 2) ในการป้อนคำสั่งระยะ เวลา ความเร็วในการเคลื่อนที่ของกระบอกฉีดยา โดยแบ่งเป็น 2 ชุดคำสั่ง ตามวิธีการทดสอบ การทดสอบพฤติกรรมกรรมการเคลื่อนไหวของหุ่นยนต์นิ่ม โดยให้แรงดันอากาศเข้าภายในที่ปริมาตร 0 – 40 มิลลิลิตรและดูการโค้งงอ

3.9 การทดสอบสมบัติของวัสดุ

3.9.1 การทดสอบค่า T_g ด้วยเครื่อง DSC

การทดสอบค่า T_g ของแผ่นฟิล์มยางตัวอย่าง ดำเนินการโดยใช้เครื่อง SII Nano Technology DSC7020 ด้วยช่วงอุณหภูมิ -120 ถึง 100 °C ที่อัตราการไหลของความร้อน 10 °C/min เตรียมตัวอย่างใสในแคปซูลลูมิเนียม น้ำหนักประมาณ 10 mg ค่า T_g ได้จากกราฟ DSC

3.9.2 ศึกษาสมบัติเชิงพลวัต (Dynamic mechanical analysis, DMA)

ทดสอบสมบัติเชิงพลวัตด้วยเครื่อง Dynamic mechanical analyzer model EPLEXOR® 100 N GABO QUALIMETER นำตัวอย่างมาวางบนเครื่อง DMA ดังแสดงในภาพ 3-2 ข. ซึ่งสภาวะในการทดสอบจะทดสอบที่ อุณหภูมิ 25๐ C ให้ความถี่กับตัวอย่างตั้งแต่ 1 ถึง 100 Hz ค่า Static load ที่ 7.00% โดยให้แรงกระทำ 20.00 N และตั้ง Dynamic load ไว้ที่ 5.00% พร้อมให้แรงกระทำ 10.00 N และการทดสอบตัวอย่างจะทดสอบในโหมดของการบีบอัด



บทที่ 4

ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล

การดำเนินงานวิจัยนี้ ต้องการหาวิธีการขึ้นรูปหุ่นยนต์นึ่งจากยางธรรมชาติ โดยเลือกใช้น้ำยางพรีวัลคาไนซ์ (pre – vulcanized latex ; PVL) ระบบกำมะถัน จากการใช้สารกำมะถันประเภทไทยูแรม (thiuram-type sulfur donor) จะให้ค่าความทนต่อแรงดึงสูงและสมบัติหลังการบ่มเร่งด้วยความร้อนที่ดี เนื่องจากเป็นน้ำยางที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย เหมาะสำหรับการใช้ผลิตในปริมาณน้อย และสะดวกในการจัดหาเพื่อดำเนินงานวิจัย โดยวิธีการเตรียมจะอธิบายในขั้นตอนต่อไป

4.1 การเตรียมน้ำยางพรีวัลคาไนซ์ (Natural Rubber, Pre-vulcanization)

ตารางที่ 4.1 สารเคมียางธรรมชาติคอมปาวด์

ส่วนประกอบ	Phr	กรัม
60% HANR	100	167
10% KOH	0.2	2
10% Teric acid	0.02	0.2
50% Sulfur	0.8	1.6
50% ZDEC	0.4	0.8
50% ZMBT	0.4	0.8
50% wingstay L	1	2.0
50% Zno	1	2.0

การเตรียมน้ำยางพรีวัลคาไนซ์ จะใช้น้ำยางธรรมชาติ HANR 60%DRC นำมาผสม (compounding) ด้วยสารเคมีดังตารางที่ 4.1 เมื่อได้น้ำยางคอมปาวด์ทำการให้ความร้อนด้วย water bath ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส 25 นาที หรือบ่มทิ้งไว้ 12-24 ชั่วโมง จากนั้นนำน้ำยางพรีวัลคาไนซ์ ที่ได้ ทำการทดสอบคุณสมบัติการขึ้นรูปสำหรับหุ่นยนต์นึ่งด้วยกรรมวิธีการขึ้นรูปที่แตกต่างกันโดยจะอธิบายผลการทดสอบภายในขั้นตอน การออกแบบแม่พิมพ์และวิธีการขึ้นรูป ต่อไป

4.2 การทดสอบการใช้งานวัสดุการพิมพ์ต้นแบบรวดเร็ว เพื่อใช้ในการขึ้นรูปแม่พิมพ์หุ่นยนต์นิ่ม

4.2.1 การทดสอบการใช้งานที่อุณหภูมิและเวลา

ในงานวิจัยนี้เลือกใช้การขึ้นรูปแม่พิมพ์จากการพิมพ์ต้นแบบรวดเร็ว 2 ประเภท คือ Poly-Jetting (PJ) และ Fused deposition modeling (FDM) จุดประสงค์เพื่อหาวัสดุจากการพิมพ์ที่เหมาะสมสำหรับการหล่อขึ้นรูปหุ่นยนต์นิ่ม จึงเลือกการทดสอบในอุณหภูมิ-เวลาในการเซตตัวของวัสดุอีลาสโตเมอร์สำหรับการขึ้นรูปหุ่นยนต์นิ่ม ตั้งแต่ 70 – 110 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 60 – 120 นาที โดยผลการทดสอบการทดสอบได้อธิบายไว้ในตาราง ดังนี้

ตารางที่ 4.2 ผลการทดสอบการใช้งานแม่พิมพ์ในช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมเพื่อใช้งาน 1 ครั้ง

ประเภทการขึ้นรูป	วัสดุ	ช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมกับการใช้งาน (ไม่เกิน 120 นาที)
Poly-jetting	Hight-temperature RGD 525	25-80 องศาเซลเซียส
	Endur RGD 450	25-70 องศาเซลเซียส
FDM	PLA	25-50 องศาเซลเซียส
	ABS	25-90 องศาเซลเซียส
	PC-ABS	25-110 องศาเซลเซียส
	PC	25-110 องศาเซลเซียส
	PETG-PC	25-110 องศาเซลเซียส
	PETG-Carbon	25-110 องศาเซลเซียส
	PVA	25-80 องศาเซลเซียส
	TPU	ไม่สามารถใช้งานได้

ตารางที่ 4.3 ผลการทดลองการจำนวนการใช้งานชิ้นรูปหุ่นยนต์นั้ม อุณหภูมิที่ 110 องศาเซลเซียส

ประเภทการขึ้นรูป	วัสดุ	จำนวนการใช้งานที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส	
		จำนวนการใช้ (ครั้ง)	ระยะเวลา (นาที)
Poly-jetting	RGD 525	ไม่สามารถใช้งานได้	
	Endur RGD 450	ไม่สามารถใช้งานได้	
FDM	PLA	ไม่สามารถใช้งานได้	
	ABS	ไม่สามารถใช้งานได้	
	PC-ABS	2	ไม่เกิน 60 นาที/ครั้ง
	PC	5-10	ไม่เกิน 120 นาที/ครั้ง
	PETG-PC	3-5	ไม่เกิน 60 นาที/ครั้ง
	PETG-Carbon	ไม่สามารถใช้งานได้	
	PVA	ไม่สามารถใช้งานได้	
	TPU	ไม่สามารถใช้งานได้	

ตารางที่ 4.4 ผลการทดลองการจำนวนการใช้งานชิ้นรูปหุ่นยนต์นั้ม อุณหภูมิที่ 100 องศาเซลเซียส

ประเภทการขึ้นรูป	วัสดุ	จำนวนการใช้งานที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส	
		จำนวนการใช้ (ครั้ง)	ระยะเวลา (นาที)
Poly-jetting	RGD 525	1	ไม่เกิน 30 นาที/ครั้ง
	Endur RGD 450	ไม่สามารถใช้งานได้	
FDM	PLA	ไม่สามารถใช้งานได้	
	ABS	1	ไม่เกิน 30 นาที/ครั้ง
	PC-ABS	2	ไม่เกิน 60 นาที/ครั้ง
	PC	10-12	ไม่เกิน 120 นาที/ครั้ง
	PETG-PC	3-5	ไม่เกิน 60 นาที/ครั้ง
	PETG-Carbon	1	ไม่เกิน 60 นาที/ครั้ง
	PVA	ไม่สามารถใช้งานได้	
	TPU	ไม่สามารถใช้งานได้	

ตารางที่ 4.5 ผลการทดลองการจำนวนการใช้งานชิ้นรูปหุ่นยนต์นั้ม อุณหภูมิที่ 90 องศาเซลเซียส

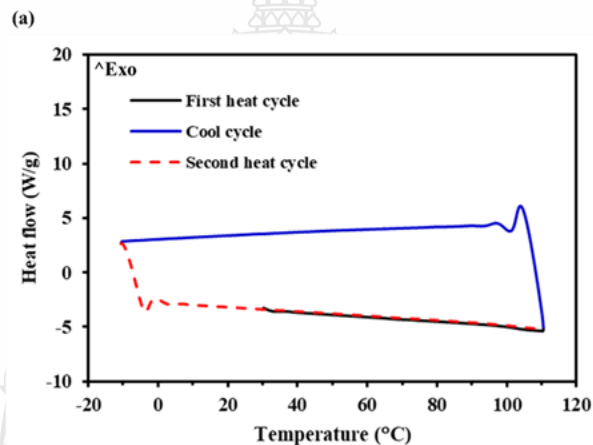
ประเภทการขึ้นรูป	วัสดุ	จำนวนการใช้งานที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส	
		จำนวนการใช้ (ครั้ง)	ระยะเวลา (นาทีก)
Poly-jetting	RGD 525	1-5	ไม่เกิน 60 นาที/ครั้ง
	Endur RGD 450	ไม่สามารถใช้งานได้	
FDM	PLA	ไม่สามารถใช้งานได้	
	ABS	1-5	ไม่เกิน 60 นาที/ครั้ง
	PC-ABS	5-10	ไม่เกิน 60 นาที/ครั้ง
	PC	10-15	ไม่เกิน 120 นาที/ครั้ง
	PETG-PC	5-10	ไม่เกิน 60 นาที/ครั้ง
	PETG-Carbon	5-10	ไม่เกิน 60 นาที/ครั้ง
	PVA	ไม่สามารถใช้งานได้	
	TPU	ไม่สามารถใช้งานได้	

ตารางที่ 4.6 ผลการทดลองการจำนวนการใช้งานชิ้นรูปหุ่นยนต์นั้ม อุณหภูมิที่ 70 องศาเซลเซียส

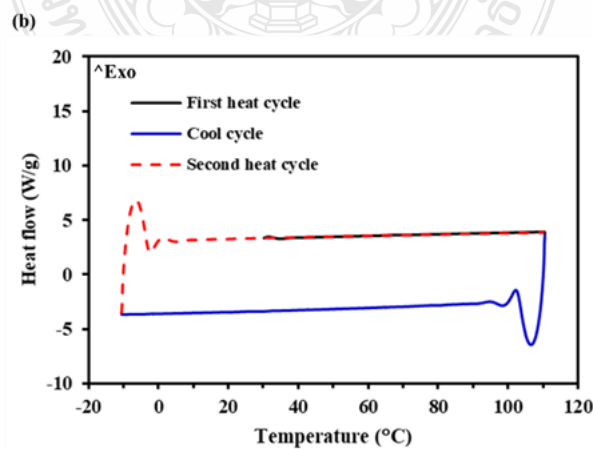
ประเภทการขึ้นรูป	วัสดุ	จำนวนการใช้งานที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส	
		จำนวนการใช้ (ครั้ง)	ระยะเวลา (นาทีก)
Poly-jetting	RGD 525	5-10	ไม่เกิน 60 นาที/ครั้ง
	Endur RGD 450	1-5	ไม่เกิน 60 นาที/ครั้ง
FDM	PLA	ไม่สามารถใช้งานได้	
	ABS	5-10	ไม่เกิน 60 นาที/ครั้ง
	PC-ABS	10-15	ไม่เกิน 60 นาที/ครั้ง
	PC	15-20	ไม่เกิน 120 นาที/ครั้ง
	PETG-PC	10-15	ไม่เกิน 60 นาที/ครั้ง
	PETG-Carbon	10-15	ไม่เกิน 60 นาที/ครั้ง
	PVA	ไม่สามารถใช้งานได้	
	TPU	ไม่สามารถใช้งานได้	

จากการทดสอบอุณหภูมิ-เวลา จากตารางที่ 4.2 – 4.6 ที่ใช้งานสำหรับแม่พิมพ์ขึ้นรูปจากการพิมพ์ต้นแบบรวดเร็วทั้ง 2 ประเภท โดยการนำไปขึ้นรูปหุ่นยนต์นึ่งและใช้แม่พิมพ์ที่มีการออกแบบเดียวกัน ในช่วงของการเซตตัวของน้ำยางธรรมชาติและยางซิลิโคน ตั้งแต่อุณหภูมิ 70-110 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 1-3 ชม. โดยจากผลการทดลองผู้วิจัยเลือกใช้วัสดุ ABS, PC จากประเภท FDM และ High-temperature RGD 525 จากประเภท Poly-Jetting ในการดำเนินงานวิจัย เนื่องจากต้นทุนและกรรมวิธีควบคุมคุณภาพของชิ้นงานที่ง่ายต่อการผลิต และได้มีการนำวัสดุที่เลือกทั้งสามชนิดไปทดสอบ DSC เพื่อหาความคงตัวในช่วงอุณหภูมิที่สามารถใช้งานได้โดยไม่บิดงอ โดยจะอธิบายผลในการทดลองต่อไปนี้

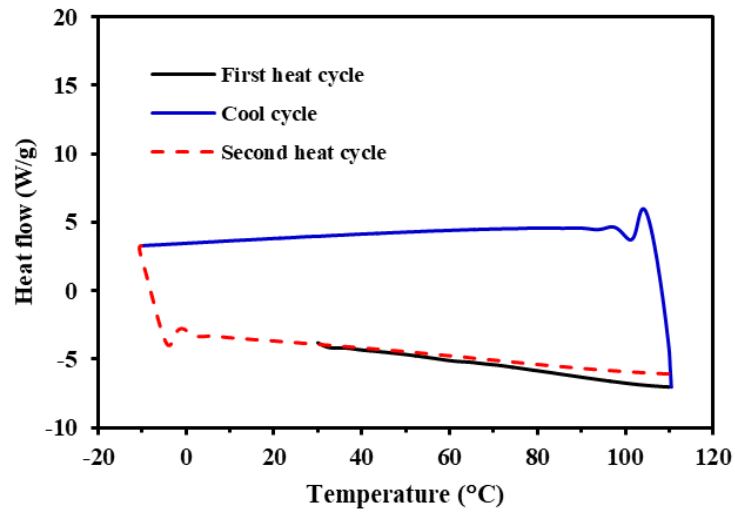
4.2.2 ผลการทดสอบการคงตัวของวัสดุที่ใช้ทำแม่พิมพ์ ที่อุณหภูมิ -20 ถึง 110 องศาเซลเซียส



ภาพที่ 4.1 ผลการทดสอบการคงตัวของวัสดุสำหรับทำแม่พิมพ์ ขึ้นรูปจากวัสดุ ABS โดยเทคนิค FDM



ภาพที่ 4.2 ผลการทดสอบการคงตัวของวัสดุสำหรับทำแม่พิมพ์ ขึ้นรูปจากวัสดุ PC โดยเทคนิค FDM



ภาพที่ 4.3 ผลการทดสอบการคงตัวของวัสดุสำหรับทำแม่พิมพ์ ขึ้นรูปจากวัสดุ High-temperature RGD 525 โดยเทคนิค Polyjetting

จากตารางที่ 4.5 จะเห็นได้ว่าเราสามารถแบ่งวัสดุที่ใช้ในการทำแม่พิมพ์ได้ 2 ประเภท คือ ประเภทแรกสำหรับแม่พิมพ์นอก เพื่อใช้ในการทดสอบทำแม่พิมพ์รูปร่างใหม่ ประเภทที่สองคือแม่พิมพ์แกนใน เพื่อสร้างกระเปาะ วัสดุที่ใช้ในการขึ้นรูปหุ่นยนต์นี้แต่ละชนิดใช้ช่วงอุณหภูมิที่แตกต่างกันในแต่ละวัสดุ แต่ช่วงของอุณหภูมิที่ใช้ในการเซตตัวจะอยู่ที่ 25-110 องศาเซลเซียส โดยจะแบ่งวัสดุเป็น 2 ประเภทในการทดสอบ คือ ประเภทซิลิโคน ใช้อุณหภูมิในการเซตตัวที่ 25-80 องศาเซลเซียส ประเภทยางธรรมชาติจะใช้อุณหภูมิในการเซตตัว 80-110 องศาเซลเซียส จากผลการทดลองการคงรูปในอุณหภูมิดังกล่าวโดยการวัด DSC จากภาพที่ 4.1-4.3 เพื่อให้ครอบคลุมอุณหภูมิที่ใช้ในการขึ้นรูป วัสดุที่เหมาะสมสำหรับการทำแม่พิมพ์ คือ ABS และ PC จากเทคนิค FDM และ High-temperature จากเทคนิค Poly jetting ในการทดลองนี้นักวิจัยคาดหวังในการเลือกใช้วัสดุเพื่อนำไปใช้ในการทำแกนสร้างกระเปาะ เนื่องจากการขึ้นรูปเพื่อนำไปใช้ในระดับอุตสาหกรรมสามารถใช้วิธีการฉีดพลาสติก (injection molding) ได้ ในการดำเนินงานวิจัยนี้จำเป็นต้องการความรวดเร็วในการดำเนินการจึงใช้วัสดุจากเครื่องพิมพ์สามมิติ ซึ่งคุณสมบัติทางกลของวัสดุที่ได้จากการพิมพ์ต้นแบบรวดเร็ว จะลดลงเท่าตัว แต่คุณสมบัติทางด้านอุณหภูมิจะมีค่าใกล้เคียงกัน เพราะการเสียรูปขณะให้อุณหภูมิของแกนกระเปาะส่งผลต่อรูปแบบของช่องภายในตัวกระเปาะที่ผิดเพี้ยนไป ดังนั้นการนำไปใช้ในระดับอุตสาหกรรม นักวิจัยเลือกใช้วัสดุที่ขึ้นรูปจาก PC, PETG, ABS เพื่อใช้สำหรับทำแกนกระเปาะและแม่พิมพ์โลหะสำหรับการทำแม่พิมพ์ประกอบนอก

4.2.3 ผลการทดสอบความเหมาะสมในการเลือกใช้วัสดุจากการพิมพ์ต้นแบบรวดเร็ว

ตารางที่ 4.7 ผลการทดสอบการขึ้นรูปวัสดุ

ประเภทการขึ้นรูป	วัสดุ	ความเหมาะสมสำหรับขึ้นรูปแม่พิมพ์
Poly-jetting	Hight-temperature RGD 525	ขึ้นรูปง่าย มีความละเอียด ประมาณ 0.2 ไมโครเมตร เหมาะสำหรับงานต้นแบบที่ต้องการความใกล้เคียงผลิตภัณฑ์
	Endur RGD 450	ขึ้นรูปง่าย มีความละเอียด ประมาณ 0.2 ไมโครเมตร เหมาะสำหรับงานต้นแบบที่ต้องการความใกล้เคียงผลิตภัณฑ์
FDM	PLA	ขึ้นรูปง่าย รวดเร็ว ราคาถูก ความละเอียดปานกลาง-ต่ำ
	ABS	ขึ้นงานสามารถหดตัวระหว่างการขึ้นรูป ต้องมีการควบคุมสภาพแวดล้อมในการพิมพ์ ความละเอียดปานกลาง-ต่ำ
	PC-ABS	ขึ้นงานสามารถหดตัวระหว่างการขึ้นรูป ต้องมีการควบคุมสภาพแวดล้อมในการพิมพ์ ความละเอียดปานกลาง-ต่ำ
	PC	ขึ้นงานหดตัวสูง ต้องมีการควบคุมสภาพแวดล้อมการพิมพ์ ความละเอียดปานกลาง-ต่ำ
	PETG-PC	ขึ้นงานเซตตัวช้า ต้องมีการควบคุมสภาพแวดล้อมการพิมพ์ในอุณหภูมิห้องที่ 20-23 องศาเซลเซียส เพื่อให้เซตตัวได้รวดเร็ว การหดตัวต่ำ ขึ้นรูปง่าย
	PETG-Carbon	วัสดุไม่สามารถขึ้นซัพพอร์ตได้ สำหรับเครื่องพิมพ์ที่มีหัวฉีดเดียว ทำให้ไม่สามารถขึ้นรูปร่างที่ซับซ้อนได้ ไม่เหมาะกับการใช้ทำแม่พิมพ์
	PVA	ขึ้นรูปง่ายและรวดเร็ว เหมาะสำหรับสร้างแกนกระเปาะ โดยการละลายน้ำ เนื่องจากแข็งเปราะ ชิ้นงานต้องมีพื้นที่หน้าตัดไม่น้อยกว่า 10 มิลลิเมตร
TPU	ขึ้นรูปง่าย ไม่นำมาใช้ในการขึ้นรูปแม่พิมพ์ เนื่องจากวัสดุมีความอ่อนตัวสูง และเซตตัวช้า ต้องคุมสภาพแวดล้อมการขึ้นรูป ที่อุณหภูมิ 20-23 องศาเซลเซียส	

4.2.4 ผลการทดสอบความเหมาะสม

ตารางที่ 4.8 ความเหมาะสมสำหรับการใช้หล่อ อีลาสโตเมอร์ประเภทต่างๆ

ประเภทการขึ้นรูป	วัสดุ	ความเหมาะสมสำหรับขึ้นรูปแม่พิมพ์
Poly-jetting	Hight-temperature RGD 525	เหมาะสำหรับ ซิลิโคน และยางธรรมชาติ (จำนวนครั้งลดลง) ที่สามารถเซตตัวที่อุณหภูมิ 25-80 องศาเซลเซียส ยกเว้น RTV-P1 เนื่องจากหลังจากวัสดุเซตตัวจะติดกับแม่พิมพ์
	Endur RGD 450	เหมาะสำหรับ ซิลิโคน และยางธรรมชาติ (จำนวนครั้งลดลง) ที่สามารถเซตตัวที่อุณหภูมิ 25-70 องศาเซลเซียส ยกเว้น RTV-P1 เนื่องจากหลังจากวัสดุเซตตัวจะติดกับแม่พิมพ์
FDM	PLA	เหมาะสำหรับ ซิลิโคน ที่สามารถเซตตัวได้ในอุณหภูมิห้อง
	ABS	เหมาะสำหรับ ซิลิโคน และยางธรรมชาติที่สามารถเซตตัวที่อุณหภูมิ 25-90 องศาเซลเซียส
	PC-ABS	เหมาะสำหรับ ซิลิโคน และยางธรรมชาติที่สามารถเซตตัวที่อุณหภูมิ 25-100 องศาเซลเซียส
	PC	เหมาะสำหรับ ซิลิโคน และยางธรรมชาติ ที่สามารถเซตตัวที่อุณหภูมิ 25-100 องศาเซลเซียส
	PETG-PC	เหมาะสำหรับ ซิลิโคน และยางธรรมชาติ ที่สามารถเซตตัวที่อุณหภูมิ 25-100 องศาเซลเซียส
	PETG-Carbon	ไม่สามารถขึ้นรูปชิ้นงานที่ซับซ้อนได้
	PVA	เหมาะสำหรับ ซิลิโคน และยางธรรมชาติ ที่สามารถเซตตัวที่อุณหภูมิ 25-80 องศาเซลเซียส
	TPU	ไม่นำมาใช้ในการขึ้นรูปแม่พิมพ์

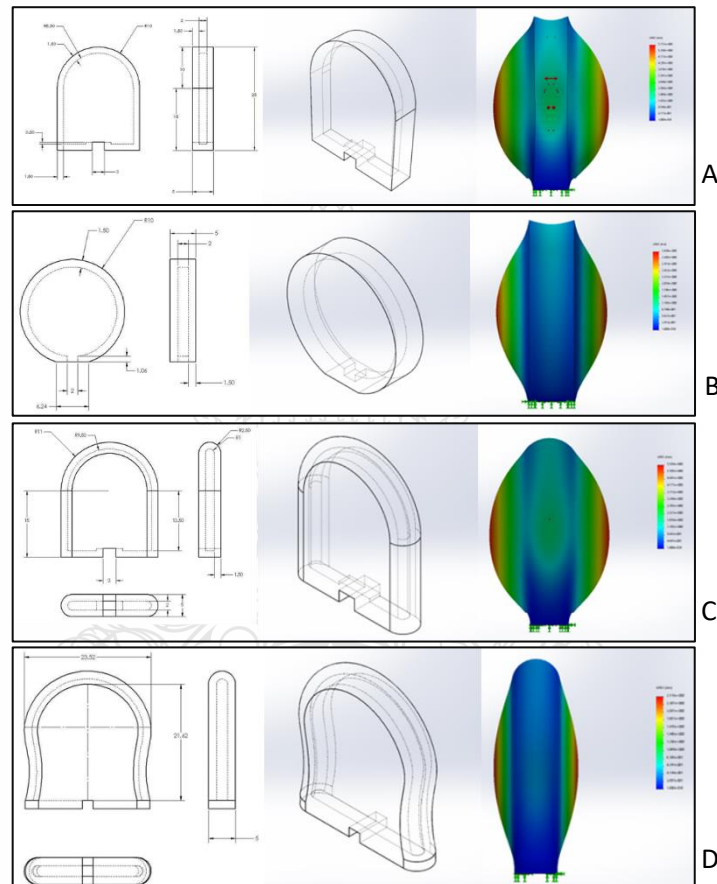
ตารางที่ 4.9 ความเหมาะสมสำหรับนำไปขึ้นรูปชิ้นส่วนแม่พิมพ์หล่อแก้ว

ประเภทการขึ้นรูป	วัสดุ	ความเหมาะสมสำหรับขึ้นรูปแม่พิมพ์
Poly-jetting	Hight-temperature RGD 525	เหมาะสำหรับแม่พิมพ์ประกอบนอกที่มีความหนาตั้งแต่ 10 mm. ขึ้นไป ไม่เหมาะสำหรับแกนช่องกระเปาะด้านใน เนื่องจากการเสีรูปร่างเมื่อได้รับอุณหภูมิ
	Endur RGD 450	เหมาะสำหรับแม่พิมพ์ประกอบนอกที่มีความหนาตั้งแต่ 10 mm. ขึ้นไป ไม่เหมาะสำหรับแกนช่องกระเปาะด้านใน เนื่องจากการเสีรูปร่างเมื่อได้รับอุณหภูมิ
FDM	PLA	เหมาะสำหรับแม่พิมพ์นอกและแกนกระเปาะที่เซตตัวที่อุณหภูมิห้อง
	ABS	เหมาะสำหรับแม่พิมพ์นอกและแกนกระเปาะที่เซตตัวที่อุณหภูมิ 25-90 องศาเซลเซียส
	PC-ABS	เหมาะสำหรับแม่พิมพ์นอกและแกนกระเปาะที่เซตตัวที่อุณหภูมิ 25-100 องศาเซลเซียส
	PC	เหมาะสำหรับแกนกระเปาะ สำหรับหักแกน เนื่องจากแข็งเปราะและไม่เสีรูปร่างเมื่อโดนอุณหภูมิ
	PETG-PC	เหมาะสำหรับแม่พิมพ์ประกอบนอกและแกนกระเปาะ หากมีการควบคุมสภาพแวดล้อมการพิมพ์ที่เหมาะสม
	PETG-Carbon	ไม่สามารถขึ้นรูปชิ้นงานที่ซับซ้อนได้
	PVA	เหมาะสำหรับสร้างแกนกระเปาะเพื่อสร้างช่องกระเปาะจากการละลายน้ำ
TPU	สำหรับขึ้นรูปหุ่นยนต์นิ่มจากการพิมพ์ 3 มิติ	

4.3 การออกแบบรูปร่างลักษณะของหุ่นยนต์นิ่ม

เพื่อดำเนินการออกแบบแม่พิมพ์หล่อแก้ว และนำไปสู่การหาขั้นตอนที่เหมาะสมในการขึ้นรูปหุ่นยนต์นิ่มจากยางธรรมชาติ ผู้วิจัยจึงเริ่มออกแบบรูปร่างของหุ่นยนต์นิ่มที่เหมาะสมในการใช้งานและการตอบสนองแรงดันลม เนื่องจากการพัฒนาหุ่นยนต์นิ่ม ต้องใช้กรรมวิธีการขึ้นรูปค่อนข้างมีความพิเศษแตกต่างจากการออกแบบของกลไกทั่วไป เพราะใช้สมบัติของวัสดุประเภทอีลาสโตเมอร์เป็นตัวตาม และใช้แรงกระตุ้นจากภายนอกเป็นตัวนำ เช่น แรงดันอากาศหรือแรงดันของเหลว ในการขับเคลื่อนหุ่นยนต์

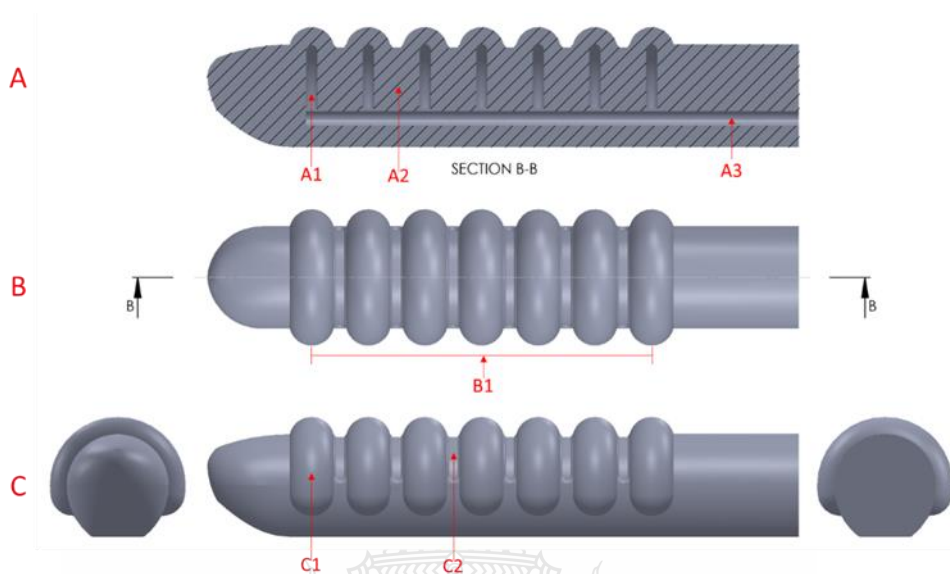
นึ่ง และส่วนที่สำคัญในการขับเคลื่อนคือช่องกระเปาะ (chennal chamber) จากภาพที่ 4.4 เป็นลักษณะของกระเปาะหุ่นยนต์นึ่งที่มีการออกแบบที่ต่างกันซึ่งนอกจากคุณสมบัติของวัสดุจะส่งผลในการพองตัวแล้วปัจจัยที่สำคัญอีกอย่างคือรูปร่างลักษณะของกระเปาะจะส่งผลต่อการทำงานของหุ่นยนต์นึ่งด้วยเช่นเดียวกัน โดยใช้โปรแกรม CAD ในการออกแบบ และจำลองสภาวะการทำงานของกระเปาะ สามารถแบ่งออกเป็น 4 รูปร่างลักษณะ



ภาพที่ 4.4 รูปร่างการออกแบบกระเปาะสำหรับหุ่นยนต์นึ่งทั้งหมด 4 รูปร่าง

จากภาพที่ 4.4 การทดสอบจำลองสภาวะผู้วิจัยเลือกใช้ CAD (Solidworks 2016: Nonlinear) จากการกำหนดให้แรงดันภายในผนังด้านในของกระเปาะที่ 20 psi เพื่อเปรียบเทียบการพองตัวของรูปร่างลักษณะที่ต่างกันทั้ง 4 แบบ เพื่อใช้ในการวิเคราะห์แนวโน้มของปัญหาการแตกหักและแนวโน้มของอัตราการพองตัว เมื่อดูจากผลการจำลองสามารถบอกอัตราการพองตัวจากมากไปน้อยตามลำดับของรูปร่าง ดังนี้ รูปร่างกระเปาะที่ C, A, B และ D ผู้ทดลองจำลองสภาวะจริงจึงเลือกใช้รูปร่างของกระเปาะในรูปร่างที่ C เพื่อนำข้อมูลไปใช้ในการออกแบบหุ่นยนต์นึ่งต่อไป โดยให้กระ

เพราะที่อยู่บนหุ่นยนต์ที่มีจำนวนมากว่าหนึ่ง กระเปาะ เมื่อเกิดการขยายตัวชนกันจะทำให้เกิดการงอตัวของหุ่นยนต์นั้น



ภาพที่ 4.5 แสดงลักษณะที่เหมาะสมสำหรับการใช้งานของหุ่นยนต์ที่มีการผลารออกแบบ

จากการดำเนินการทดลองออกแบบรูปร่างที่แตกต่างกัน โดยทำการเปลี่ยนแปลงลักษณะเฉพาะของหุ่นยนต์ด้วยกัน 6 ส่วน คือจากรูป A1-A3, B1 และ C1-C2 สามารถสรุปรูปร่างลักษณะของหุ่นยนต์นั้น การจำลองนำมาใช้แนวโน้มการงอตัวหุ่นยนต์นั้น เกิดจากการให้แรงดันเข้าไปภายในกระเปาะ ร่วมกับการใช้วัสดุในการขึ้นรูปประเภทอีลาสโตเมอร์ จะทำให้หุ่นยนต์นั้นงอตัวในขณะที่กระเปาะได้รับแรงดันและพองตัว จากภาพที่ 4.5 ในส่วนของภาพตัดขวาง (section view : B-B) ลักษณะของนิ้วมือหุ่นยนต์ A1)ช่องกระเปาะที่ส่งผลต่อการพองตัว A2)ส่วนเนื้อของวัสดุที่ใช้สำหรับขึ้นรูปนิ้วมีคุณสมบัติเป็นยาง โดยชนิดและความหนาของวัสดุส่งผลต่อแรงดันที่ใช้ในการงอตัว A3)ช่องสำหรับแรงดันลมหรือของเหลวที่สามารถเชื่อมต่อกับช่องกระเปาะและท่อส่งแรงดันจากภายนอก B1) จำนวนของกระเปาะส่งผลต่อพฤติกรรมการงอตัวของหุ่นยนต์ที่มีความสัมพันธ์กับแรงดันที่ให้เข้าไป คือ จำนวนกระเปาะน้อย ใช้แรงดันในการงอตัวน้อยและองศาการงอตัวน้อย ในทางกลับกันจำนวนกระเปาะมากใช้แรงดันมากขึ้นและองศาการงอเพิ่มมากขึ้นตาม

การออกแบบจำนวนกระเปาะนั้นขึ้นกับขนาดของหุ่นยนต์นั้นและการใช้งานมีความสัมพันธ์กับขนาดของกระเปาะ(C1) และช่องกระเปาะ(A1),(C2) ความลึกของช่องระหว่างกระเปาะส่งผลต่อการตอบสนองต่อแรงดันในขณะงอตัว ถ้ามีความลึกมากกว่าจะตอบสนองได้รวดเร็วกว่า โดยทั่วไปจะแบ่งเป็น 2 ประเภทคือ Slow Pneu-net และ fast Pneu-net เพราะการออกแบบหุ่นยนต์นั้นนั้นควร

คำนึงถึงสองส่วนหลัก คือ การนำไปใช้งาน และวิธีการขึ้นรูป เนื่องจากการขึ้นรูปหุ่นยนต์นิ่มชิ้นงานที่มีมุมที่ทำให้ไม่สามารถถอดแม่พิมพ์ได้(undercuts) ในหลายจุด อย่างเช่นจุดความลึกของช่องระหว่างกระเปาะ(C2) ช่องกระเปาะ(A1) ดังนั้นจึงต้องมีการออกแบบแม่พิมพ์ที่สามารถถอดได้และใช้กรรมวิธีที่น้อยที่สุดเพื่อการขึ้นรูปในระดับอุตสาหกรรม ดังนั้น กรรมวิธีการออกแบบแม่พิมพ์จำเป็นต้องคำนึงถึงการถอดแม่พิมพ์เป็นหลัก

4.4 การออกแบบแม่พิมพ์และกระบวนการขึ้นรูปแม่พิมพ์สำหรับหุ่นยนต์นิ่ม

จากการออกแบบรูปร่างลักษณะของหุ่นยนต์นิ่ม เพื่อให้สามารถเคลื่อนไหวได้ตามการออกแบบนั้นต้องคำนึงถึงการสร้างโครงสร้างของกระเปาะภายในสำหรับการเคลื่อนไหวเนื่องจากแรงดันอากาศหรือของเหลว และการลดขั้นตอนในการหล่อยางประเภทต่างๆ โดยทั่วไปหุ่นยนต์นิ่มจะใช้วัสดุประเภทยางซิลิโคน เนื่องจากยางซิลิโคนสามารถหล่อประกอบต่อกันได้มากกว่า 1 ชั้น หรือแยกแม่พิมพ์หล่อและหล่อประกบได้ภายหลัง เพื่อใช้ในการสร้างช่องกระเปาะภายใน จากที่กล่าวมาข้างต้น ผู้ทดลองได้เลือกใช้ยางธรรมชาติในการหล่อเนื่องจากราคาต้นทุนที่น้อยกว่าและการเพิ่มมูลค่ายางธรรมชาติ แต่การหล่อประกบของยางธรรมชาติมีความเป็นไปได้น้อย ผู้ทดลองจึงใช้วิธีการออกแบบและทดสอบการขึ้นรูปในวิธีการต่างๆ ทั้งการออกแบบแม่พิมพ์สำหรับซิลิโคน และยางธรรมชาติ เพื่อนำหุ่นยนต์นิ่มจากทั้งสองชนิดทดสอบการใช้งานเปรียบเทียบประสิทธิภาพกัน โดยผู้ทดลองแบ่งการขึ้นรูปตามประเภทของวัสดุและวิธีการที่ใช้ในการขึ้นรูปหุ่นยนต์นิ่มได้ 3 วิธี

4.4.1 การแบ่งประเภทหุ่นยนต์นิ่มตามวัสดุ

4.4.1.1 การหล่อขึ้นรูปหุ่นยนต์นิ่มจาก ยางธรรมชาติโปรตีนต่ำ

4.4.1.2 การหล่อขึ้นรูปหุ่นยนต์นิ่มจาก ซิลิโคน เกรด RTV-T4, RTV-M

4.4.1.3 การขึ้นรูปนี้วจากกรรมวิธีการขึ้นรูปต้นแบบรวดเร็ว (3D printing) โดยใช้ 2

เทคนิค 1) Polyjetting วัสดุคือ TangoBlask Plus FLX 980, 2) FDM วัสดุที่ใช้คือ TPU

4.4.2 การแบ่งประเภทตามแม่พิมพ์ ตามเทคนิคการขึ้นรูปแบ่งออกเป็น 2 ประเภท

4.4.2.1 ขึ้นรูปจากกรรมวิธีการขึ้นรูปต้นแบบรวดเร็ว (3D print) โดยใช้ 2 เทคนิค คือ เทคนิค Polyjetting (วัสดุ คือ HighTemperature RGD 525 และ Eudur RGD450) และ เทคนิค FDM (วัสดุคือ ABS, PC, PC-ABS, PC, PETG-PC, PETG-Carbon, PVA)

4.4.2.2 ขึ้นรูปจากการกัดโลหะ

4.4.3 สรุปวิธีการออกแบบแม่พิมพ์สำหรับหุ่นยนต์นิ่ม

จากผลการทดลองการแบ่งประเภทการขึ้นรูปผู้ทดลองได้ออกแบบแม่พิมพ์ออกเป็น 4 แบบโดยอ้างอิงรูปร่างลักษณะของหุ่นยนต์นิ่มเดียวกันเพื่อใช้ในการเปรียบเทียบผล ในการขึ้นรูปทั่วไป

การออกแบบแม่พิมพ์สำหรับการหล่อหุ่นยนต์นี้ จากผลการทดลองสามารถสรุปได้ว่าความสำคัญในการออกแบบแม่พิมพ์สำหรับหุ่นยนต์นี้ จะคำนึงถึงส่วนสำคัญทั้งหมด 2 ส่วน แม่พิมพ์ประกบภายนอกและแม่พิมพ์สำหรับสร้างช่องกระเปาะ และได้อธิบายผลการทดสอบได้ดังนี้

4.4.3.1 แม่พิมพ์ประกบภายนอก (splitting mold) มุมประกบสามารถออกแบบได้หลายทิศทาง เช่น ประกบซ้าย-ขวาของชิ้นงาน หรือ ประกบบน-ล่างของชิ้นงาน การออกแบบขึ้นอยู่กับ 2 ปัจจัย คือ

1) มุมที่ไม่สามารถถอดได้ (undercuts) เป็นตัวแปรสำคัญในการการออกแบบแม่พิมพ์ประกอบ นอกจากจะส่งผลต่อการถอดประกอบแล้วยังส่งผลในเรื่องของการไหลของน้ำยาง ทำให้เกิดฟองอากาศภายในชิ้นงาน ซึ่งส่งผลให้คุณสมบัติของหุ่นยนต์นี้ลดลง

2) รูสัน ลักษณะการทำงานคล้ายกับ (runner) ของแม่พิมพ์หล่อโลหะ เป็นส่วนที่ปล่อยให้เนื้อของยางล้นออกมาระหว่างการประกบแม่พิมพ์เข้าหากัน จากการทดลองแบบไม่มีรูสันทำให้แม่พิมพ์ไม่สามารถประกบได้สนิทส่งผลต่อรูปร่างของหุ่นยนต์นี้ที่ผิดไป

4.4.3.2 แกนช่องกระเปาะ (core chamber) เนื่องจากต้องการให้ภายในหุ่นยนต์นี้มีกระเปาะเพื่อให้สามารถเพิ่มแรงดันเข้าไปในพื้นที่ว่างจากการออกแบบพฤติกรรมเคลื่อนไหวหรือองตัว รวมไปถึงขั้นตอนในการผลิตจะส่งผลมากหรือน้อย ขึ้นอยู่กับการออกแบบแม่พิมพ์สำหรับการสร้างแกนช่องกระเปาะ

4.4.4 กรรมวิธีการขึ้นรูปหุ่นยนต์นี้ทั่วไปสามารถแบ่งเป็น 5 กระบวนการ

4.4.4.1 การหล่อแบบประกบ (splitting mold casting) การหล่อแบบประกบนิยมทั่วไปสำหรับการทำหุ่นยนต์นี้ โดยกรรมวิธีการคือ หล่อเป็น 2 ซีกเพื่อให้สามารถทำให้เกิดช่องว่างภายในหุ่นยนต์นี้ จากนั้นอบให้วัสดุและเอาออกมาในขณะที่ยังเซตตัวไม่สมบูรณ์ เพื่อให้สามารถหล่อประกบกันได้ภายหลัง เหมาะสำหรับการหล่อชิ้นงานที่มีมุมถอดได้ดี

4.4.4.2 การหล่อขี้ผึ้งหาย (lost wax casting) เป็นการสร้างแกนขี้ผึ้งให้มีลักษณะเป็นช่องของกระเปาะขึ้นมาในตอนต้น จากนั้นนำไปใส่ไว้ในแม่พิมพ์ก่อนวัสดุลงในแม่พิมพ์เมื่อวัสดุเซตตัวสามารถหลอมขี้ผึ้งออกมาเพื่อให้เกิดโพรงได้ในภายหลัง วิธีการนี้ไม่เหมาะสำหรับยางธรรมชาติ เนื่องจากความร้อนในการเซตตัวหลายครั้ง แต่เป็นวิธีที่ง่ายสำหรับการทำหุ่นยนต์นี้ที่มีความซับซ้อน

4.4.4.3 การหล่อแบบชั้น (layer casting) ลักษณะคือหล่อเป็นแผ่นสำหรับบางให้มีช่องภายในเนื่องจากเป็นวิธีการที่ไม่ซับซ้อนทั่วไปจึงนำมาทำเป็นหุ่นยนต์นี้ขนาดเล็กขนาดตั้งแต่ 10 มิลลิเมตรขึ้นไป เพราะสามารถหล่อเป็นชั้นฟิล์มให้จากนั้นนำมาประกบกันภายหลัง

4.4.4.4 การขึ้นรูปจากการพิมพ์ต้นแบบรวดเร็ว (3D printing) ปัจจุบันเทคโนโลยีสำหรับการพิมพ์ได้เข้ามามีบทบาทในการทำหุ่นยนต์นี้มากขึ้นเนื่องจากการพิมพ์ที่ไม่ต้องคำนึงถึงมุมถอดแบบสามารถสร้างช่องกระเปาะได้เลย และยังมีวัสดุที่มีลักษณะยืดหยุ่นคล้ายยาง เช่น TPU ได้รูปทรงที่ซับซ้อนตามความต้องการ แต่เทคโนโลยีในปัจจุบันยังไม่เหมาะแก่การสร้างระดับอุตสาหกรรม

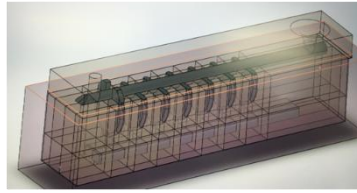
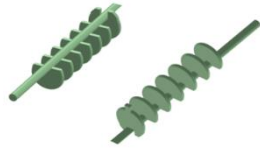
4.4.4.5 การหล่อแบบหมุนเหวี่ยง (Rotational casting) เป็นการหล่อวัสดุโดยการใช่วิธีการหมุนเหวี่ยงเพื่อให้เกิดช่องกระเปาะภายในโดยไร้ตะเข็บ ความหนาของชิ้นงานขึ้นอยู่กับปริมาณของเนื้อวัสดุที่ใส่เข้าไป โดยทั่วไปใช้วัสดุประเภทเทอร์โมพลาสติก

4.4.5 ผลการทดลองการหล่อขึ้นรูปหุ่นยนต์นี้มาจากซิลิโคน

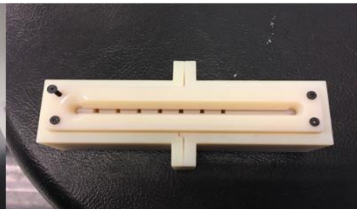
การหล่อขึ้นรูปหุ่นยนต์นี้มาจากซิลิโคนผู้ทดลองได้เลือกใช้ เกรดที่ใช้กันทั่วไปคือ RTV-T4 และ RTV-M เพื่อนำมาเปรียบเทียบการใช้งานกับหุ่นยนต์นี้มาจากยางธรรมชาติ รวมไปถึงการทดสอบกระบวนการและแม่พิมพ์เนื่องจากสูตรการผสมที่ง่ายต่อการใช้งานและใช้อุณหภูมิในการเซตตัวคล้ายกับยางธรรมชาติ ปัจจุบันกรรมวิธีการขึ้นรูปหุ่นยนต์นี้ โดยทั่วไปสามารถแบ่งออกได้ทั้งหมด 4 วิธี จากที่กล่าวข้างต้น ผู้ทดลองจึงปรับใช้กระบวนการดังกล่าวให้เหมาะสมกับการขึ้นรูปยางธรรมชาติ

4.4.5.1 ผลการขึ้นรูปหุ่นยนต์นี้โดยวิธีการ หล่อแบบขึ้นรูปขึ้นหอย ใช้แม่พิมพ์จากการพิมพ์ต้นแบบรวดเร็ว (3D print : polyjetting, วัสดุ : Highttemperature RGD 525)

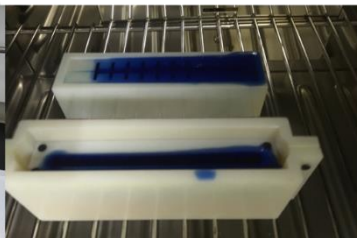
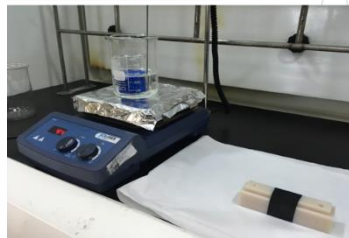
ออกแบบรูปร่างและแม่พิมพ์



ขึ้นรูปและประกอบแม่พิมพ์



หลอมซีเมนต์และเทลงแม่พิมพ์



ภาพที่ 4.6 กรรมวิธีการทำซีเมนต์สำหรับการขึ้นรูปแม่พิมพ์โดยวิธีการหล่อซีเมนต์หาย (lost wax casting)

ในปี 2014 ทีม Brooklyn โดย Andrew D และ Marchese (SORO; SOFT ROBOTIC Volume 2: Mary Ann Liebert, Inc, 2015 17-18) ได้สร้างหุ่นยนต์นุ่มที่มีชื่อว่า The Glaucus ใช้กรรมวิธีการหล่อแบบซีเมนต์หาย โดยขั้นตอนในการขึ้นรูปตั้งแต่เตรียมแกนซีเมนต์

ขั้นตอนที่ 1 สร้างแม่พิมพ์สำหรับแกนซีเมนต์จากการพิมพ์ต้นแบบรวดเร็วเป็น 2 ชั้น แม่พิมพ์นอกและแม่พิมพ์ของแกนสำหรับหล่อซีเมนต์ จากนั้นเทซิลิโคนลงในแม่พิมพ์ เพื่อให้มีลักษณะเป็นแม่พิมพ์ของแกนซีเมนต์

ขั้นตอนที่ 2 เทซีเมนต์หลอมลงเข้าสู่แม่พิมพ์จากขั้นตอนที่ 1 และใช้ก้านที่ขึ้นรูปโดยคาร์บอนไฟเบอร์วางเป็นช่องลมหลัก(tubing) และส่วนปลายอีกด้านทำหน้าที่เป็นจิ๊กฟิกเจอร์ในขณะหล่อและทำหน้าที่เป็นตัวอุดช่องลมส่วนปลาย(plug) หลังจากวัสดุซิลิโคนเซตตัว

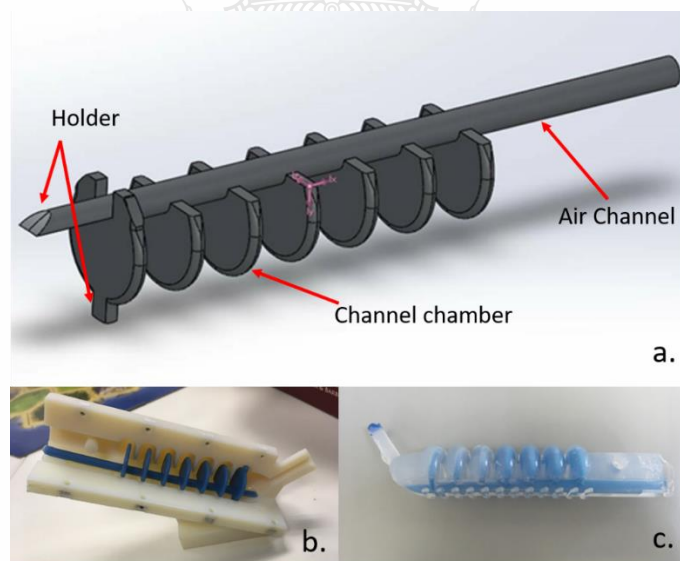
ขั้นตอนที่ 3 สร้างแม่พิมพ์รูปร่างภายนอกของหุ่นยนต์นุ่ม นำแกนซีเมนต์จากขั้นที่ 2 วางไว้ที่ตำแหน่ง โดยมีแม่พิมพ์ด้านบนมีช่องที่สามารถเทวัสดุซิลิโคนและด้านล่างที่ออกแบบตามรูปทรงภายนอกของหุ่นยนต์นุ่ม จากนั้นเทซิลิโคนลงในแม่พิมพ์

ขั้นตอนที่ 4 เมื่อซิลิโคนส่วนของรูปร่างภายนอกเซตตัว ทำการเทซิลิโคนอีกชั้น เพื่อให้เป็นชั้นที่ใช้สำหรับจำกัดการงอตัว (constraint layer) ลักษณะเป็นแผ่นบางอีกครั้ง

ขั้นตอนที่ 5 เมื่อซิลิโคนในชั้นจำกัดการหดตัวเซตตัว นำหุ่นยนต์นี้ม้ออกจากแม่พิมพ์ จะมีชั้นของซีฟิ่งอยู่ภายใน นำไปอบที่จุดหลอมเหลวของซีฟิ่งโดยทำการคว่ำช่องทางไหลของซีฟิ่งลง

ขั้นตอนที่ 6 ดึงแกนคาร์บอนไฟเบอร์ ส่วนของช่องลมหลักออก เหลือส่วนปลายที่ใช้สำหรับอุดช่องลมทิ้งไว้ จากกรรมวิธีนี้ทำให้สามารถขึ้นรูปหุ่นยนต์นี้ที่มีความซับซ้อนของระบบการเคลื่อนไหวได้

การขึ้นรูปหุ่นยนต์นี้มาจากกรรมวิธีหล่อซีฟิ่งหาย เพื่อนำซีฟิ่งสำหรับสร้างช่องกระเปาะและช่องทางเดินอากาศ(Core Wax) โดยนำไปติดตั้งไว้ด้านในของหุ่นยนต์นี้และให้อุณหภูมิเพื่อหลอมออกหลังจากซิลิโคนเซตตัว โดยขั้นตอนการดำเนินการจากภาพที่ 4.7 1.) ออกแบบรูปร่างของช่องกระเปาะและช่องทางเดินอากาศภายในหุ่นยนต์นี้ 2.) ออกแบบแม่พิมพ์สำหรับการหล่อโดยซีฟิ่งจากอุตสาหกรรมเครื่องประดับ 3.) ขึ้นรูปและประกอบแม่พิมพ์จากการพิมพ์ต้นแบบรวดเร็ว โดยใช้วัสดุ High Temperature RGD 525 4.) หลอมซีฟิ่งที่อุณหภูมิ 90 องศา เป็นเวลา 30 นาที 5.) เทซีฟิ่งเหลวเข้าสู่แม่พิมพ์



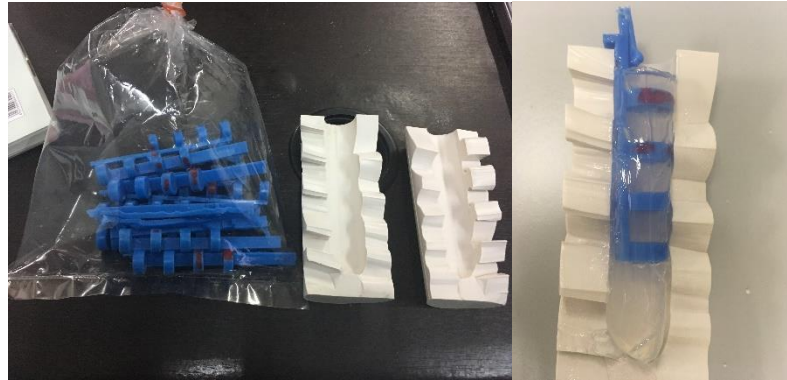
ภาพที่ 4.7 ส่วนประกอบของแกนช่องกระเปาะและวิธีการใช้งาน

ผลจากการทดลองขั้นตอนการหล่อซีฟิ่งสำหรับทำแม่พิมพ์ช่องกระเปาะ โดยใช้ซีฟิ่งจากอุตสาหกรรมเครื่องประดับ อุณหภูมิที่ใช้ในการหลอมซีฟิ่งที่ 70 องศาเซลเซียส ระยะเวลาในการหลอม 30 นาที เทลงแม่พิมพ์จากการพิมพ์ต้นแบบรวดเร็ว ในขณะที่อบแม่พิมพ์ที่ 90 องศาเซลเซียส ขณะอบทิ้งไว้ก่อนหน้า 30 นาที เมื่อได้ซีฟิ่งรูปทรงกระเปาะ สามารถนำแม่พิมพ์กระเปาะเข้าไปติดตั้งไว้ในแม่พิมพ์นอกเพื่อทำการฉีดซิลิโคนโดยในภาพที่ 4.7 โดยส่วนประกอบที่สำคัญสำหรับการออกแบบ

แม่พิมพ์ แกนในจะประกอบด้วยกัน 3 ส่วนภาพที่ 4.7a ส่วนของรูปร่างกระเปาะ(Channel chamber) ส่วนของการยึดหรือค้ำยันกับแม่พิมพ์นอก (Holder) ส่วนของช่องทางเดินอากาศ(Air Chennel) การนำไปใช้งานเมื่อติดตั้งเข้าสู่แม่พิมพ์หุ่นยนต์ยนต์นึ่งและฉีดซิลิโคนเพื่อทำการหล่อ ด้วยกระบวนการในการหลอมซีฟู้งออกหลังจากวัสดุยางเซตตัวจะส่งผลต่อคุณสมบัติของยางที่เปลี่ยนไปเนื่องจากยางธรรมชาติหรือซิลิโคนเมื่อให้ความร้อนหลังจากการเซตตัวทำให้วัสดุโดยเฉพาะยางธรรมชาติ ทำให้หุ่นยนต์นึ่งแข็งเปราะส่งผลให้อายุการใช้งานและจำนวนครั้งลดลง กรรมวิธีนี้จึงไม่เหมาะแก่การนำไปใช้สำหรับขึ้นรูปหุ่นยนต์นึ่งจากยางธรรมชาติ รวมไปถึงขั้นตอนการวางซีฟู้งภายในแม่พิมพ์ยังต้องมีส่วนค้ำยัน ทำให้ต้องมีการหล่อเติมเนื้อเพื่ออุดรูภายในหลังส่งให้มีขั้นตอนที่ซับซ้อนมากยิ่งขึ้น เมื่อนำหุ่นยนต์นึ่งทดสอบการใช้งานมีอัตราส่วนในการงอตัวได้สำเร็จประมาณ 20 เปอร์เซ็นต์ โดยปัญหาที่พบส่วนใหญ่มาพองอากาศที่เกิดขึ้นหลังการเติมเนื้อซิลิโคนเหลว, การวางแนวแกนกระเปาะไม่ตรงส่งผลให้ผนังชิ้นงานไม่เท่ากัน, การเติมเนื้อซิลิโคนในส่วนของการค้ำมีโอกาสน้อย เป็นต้น กระบวนการในการทำแม่พิมพ์ซีฟู้งภายใต้วิธีการฉีดแม่พิมพ์จากเครื่องฉีดซีฟู้งในอุตสาหกรรมเครื่องประดับ จะได้ชิ้นงานที่รวดเร็วแล้วความเที่ยงตรงสูงกว่าการหล่อเทียบภาพที่ 4.8 ลักษณะของแม่พิมพ์ฉีดซีฟู้งในอุตสาหกรรม



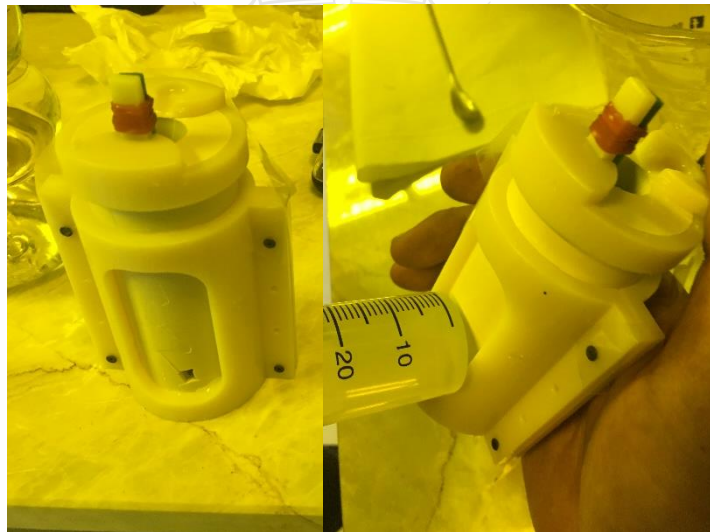
ภาพที่ 4.8 แม่พิมพ์ซิลิโคนจากกระบวนการฉีดเทียบทางอุตสาหกรรมเครื่องประดับและชิ้นงานตัวอย่างของแกนซีฟู้งที่ผ่านการฉีดเทียบ



ภาพที่ 4.9 แม่พิมพ์ประกบด้านนอกหล่อจากยางซิลิโคนเกรด RTV-P1 และขึ้นผึ้งจากการฉีดอุตสาหกรรมเครื่องประดับ

4.4.5.2 ผลการขึ้นรูปหุ่นยนต์นมโดยวิธีการ หล่อแบบขึ้นผึ้งหาย โดยใช้แม่พิมพ์ซิลิโคน

(dowcornig : RTV – P1)

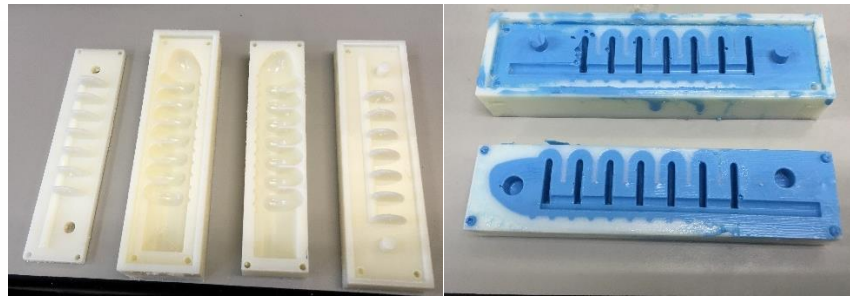


ภาพที่ 4.10 การประกบแม่พิมพ์ซิลิโคนเกรด RTV-P1 โดยใช้ jig จากการพิมพ์ต้นแบบรวดเร็ว วัสดุ Endur RGD 450

จากภาพที่ 4.10-4.11 การทดสอบแม่พิมพ์ที่ทำจากซิลิโคนเกรด RTV-P1 โดยใช้รูปลักษณ์ของหุ่นยนต์นมคล้ายนิ้วมือมนุษย์ และมี jig-fixer จากการพิมพ์ต้นแบบรวดเร็วทำจากวัสดุ Endur RGD 450 ในการล็อคตำแหน่งของแกนขึ้นผึ้งกระเปราะ และป้องกันการรั่วซึมของซิลิโคนจากการฉีดเข้าด้านล่าง เนื่องจากการออกแกนกระเปราะที่กว้างเกินไปส่งผลต่อจุดเทซิลิโคนจากด้านบนไม่มีพื้นที่มาก

พอในการซึมผ่าน ผลของการใช้วัสดุที่ขึ้นรูปจากซิลิโคนที่เป็นฉนวนกันความร้อนส่งผลให้ใช้อุณหภูมิสูง และระยะเวลาในการเซตตัวนานกว่ากรรมวิธีการอื่น

4.4.5.3 ผลการขึ้นรูปหุ่นยนต์นิ่มโดยวิธีการหล่อประกอบแม่พิมพ์ แม่พิมพ์จากการพิมพ์ต้นแบบรวดเร็ว (3D printing : PolyJetting, วัสดุ : Highttemperature RGD 525)



ภาพที่ 4.11 ลักษณะแม่พิมพ์และวิธีการหล่อประกอบแม่พิมพ์ โดยใช้ ซิลิโคนเกรด RTV-M

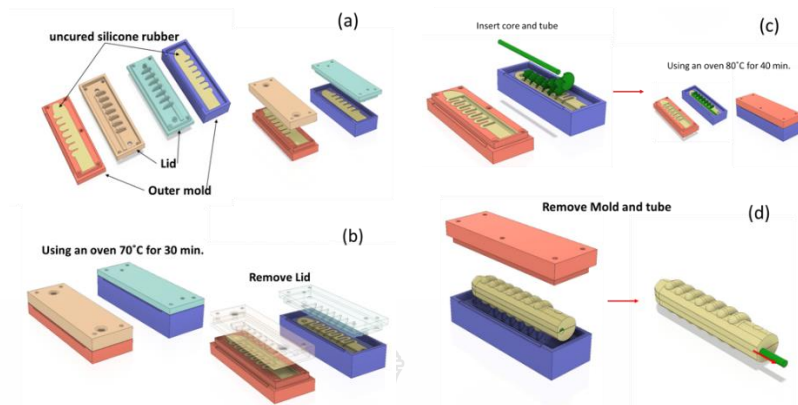
การหล่อแบบประกอบแม่พิมพ์ (Die casting molds) การหล่อแบบประกอบแม่พิมพ์นิยมทั่วไปสำหรับการทำหุ่นยนต์นิ่มสำหรับหยิบจับ โดยกรรมวิธีการคือ หล่อเป็น 2 ซีกเพื่อให้สามารถทำให้เกิดช่องว่างภายในหุ่นยนต์นิ่ม จากนั้นอบให้วัสดุและเอาออกมาในขณะที่ยังเซตตัวไม่สมบูรณ์ เพื่อให้สามารถหล่อประกบกันได้ภายหลัง จำนวนของชิ้นส่วนประกอบขึ้นอยู่กับมุมที่ไม่สามารถถอดได้

ในปี 2012 Onel และ Rus สร้างวิธีการขึ้นรูปด้วยวิธีการหล่อประกอบแม่พิมพ์ แบ่งเป็น 3 ขั้นตอน

ขั้นตอนที่ 1 หล่อแยกชิ้น (Molding) เป็นกรรมวิธีการหล่อชิ้นส่วนของหุ่นยนต์นิ่ม โดยส่วนใหญ่แบ่งออกเป็น 2 ส่วนเพื่อให้สามารถสร้างช่องกระเปาะภายในได้โดยชิ้นส่วนที่เป็นจิบกระเปาะ (silicone plats) และส่วนที่เป็นแผ่นจำกัดทิศทาง(constraint layer)

ขั้นตอนที่ 2 จุ่มหรือทาประกอบ (Dipping) นำส่วนที่ต้องการประกบกันด้านใดด้านหนึ่งทาหรือจุ่มซิลิโคนที่ยังไม่เซตตัวก่อนทำการประกบกัน

ขั้นตอนที่ 3 นำชิ้นส่วนทั้งสองชิ้นมาประกบกันในด้านที่มีการทาหรือจุ่มประกอบ

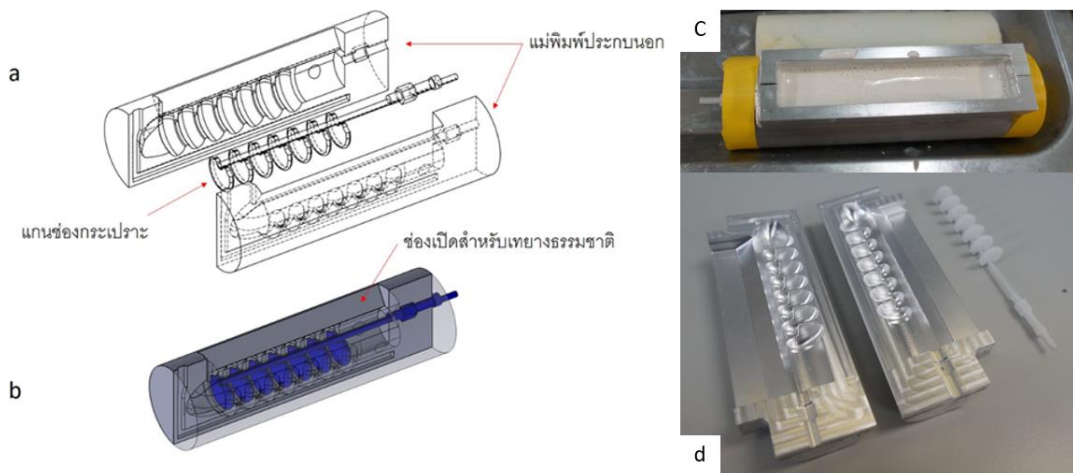


ภาพที่ 4.12 แม่พิมพ์สำหรับการขึ้นรูปหุ่นยนต์นุ่มจากซิลิโคน โดยใช้วิธี Split mold casting

อธิบายในภาพที่ 4.12 เป็นกรรมวิธีการแยกหล่อเป็น 2 ชั้น จากนั้นหล่อประกบอีกครั้ง เพื่อสร้างช่องกระเปาะและช่องเดินอากาศด้านใน โดยส่วนประกอบที่สำคัญสำหรับการออกแบบแม่พิมพ์ กรรมวิธีการนี้ แบ่งออกเป็น 2 ชุด รูป(a) แม่พิมพ์แบ่งออกเป็น 4 ชั้น และแบ่งเป็น 2 ชุด คือ ชุดซีกซ้าย และซีกขวาของหุ่นยนต์นุ่ม ขั้นตอนแรกให้ผสมซิลิโคน ตามสูตรของ RTV-T4 และ RTV-M และเทลงในแม่พิมพ์ ทั้งสองซีกและประกบฝาปิด รูป(b) นำแม่พิมพ์ทั้ง 2 ชุด เข้าเตาอบที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 30 นาที โดยที่ซิลิโคนทั้ง 2 ซีก ยังเซตตัวไม่สมบูรณ์ และนำฝาปิดออก รูป(c) นำแกนช่องกระเปาะและแท่งแกนกลางใส่เข้าไปช่องว่าง โดยขึ้นส่วนดังกล่าวทำหน้าที่ป้องกันการแนบปิดของช่องกระเปาะขณะประกบและช่วยให้ช่องกระเปาะมีปริมาตรใกล้เคียงกัน จากนั้นประกบทั้งสองซีกเข้าหากัน อบที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 40 นาที รูป(d) ถอดแม่พิมพ์ออกและดึงแกนกลางออกจากด้านโคนหุ่นยนต์นุ่มเพื่อสร้างช่องทางเดินอากาศ จากการทดสอบในกรรมวิธีดังกล่าวเหมาะสมกับยางซิลิโคนแต่ไม่เหมาะสมกับยางธรรมชาติเนื่องจากต้องใช้วิธีการหล่อประกบและให้ความร้อนหลายครั้ง

4.4.6 ผลการทดลองการหล่อขึ้นรูปหุ่นยนต์นุ่มจากยางธรรมชาติ

4.4.6.1 การหล่อขึ้นรูปหุ่นยนต์นุ่มจากยางธรรมชาติ โดยใช้วิธีการปลดแกน แม่พิมพ์จากการพิมพ์ต้นแบบรวดเร็ว (3D printing : polyjetting, Highttemperature RGD525 และ แม่พิมพ์โลหะ)



ภาพที่ 4.13 แม่พิมพ์สำหรับการขึ้นรูปหุ่นยนต์น้ำจางธรรมชาติ

จากภาพที่ 4.13 แม่พิมพ์สำหรับการขึ้นรูปหุ่นยนต์น้ำจางธรรมชาติโดยส่วนประกอบที่สำคัญของแม่พิมพ์แบ่งออกเป็นทั้งหมด 3 ส่วน ภาพที่ 4.13 a) แม่พิมพ์ประกบนอก ซ้าย-ขวา และแกนช่องกระเปาะ กรรมวิธีการในหล่อหุ่นยนต์น้ำจางธรรมชาติ b-c) ลักษณะการประกอบแม่พิมพ์เพื่อใช้งาน d) แกนกระเปาะขึ้นรูปจากการพิมพ์ต้นแบบรวดเร็ว โดยวัสดุ PC

กรรมวิธีการหล่อนี้สำหรับยางธรรมชาติ โดยใช้แม่พิมพ์แบบปลดแกน
ขั้นตอนที่ 1 เตรียมยางธรรมชาติ DPNR และบ่มทิ้งไว้ 12-24 ชม. และนำไปคอมปาวด์ตามสูตรใน ตารางที่ 4.2

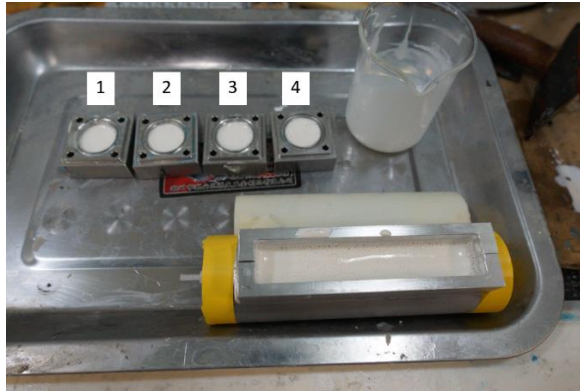
ขั้นตอนที่ 2 การประกอบและเตรียมแม่พิมพ์ โคนแกนภายในขึ้นรูปจากการพิมพ์ต้นแบบรวดเร็ว โดยวัสดุ ABS หรือ PC

ขั้นตอนที่ 3 เทน้ำยางที่เตรียมไว้ลงแม่พิมพ์ และทิ้งไว้เพื่อไล่ฟองอากาศ 15 นาที

ขั้นตอนที่ 4 อบที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 3 ชม. และวางทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเพื่อให้เย็นตัว 30 นาที

ขั้นตอนที่ 5 นำชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์และหักกระเปาะปลดแกน

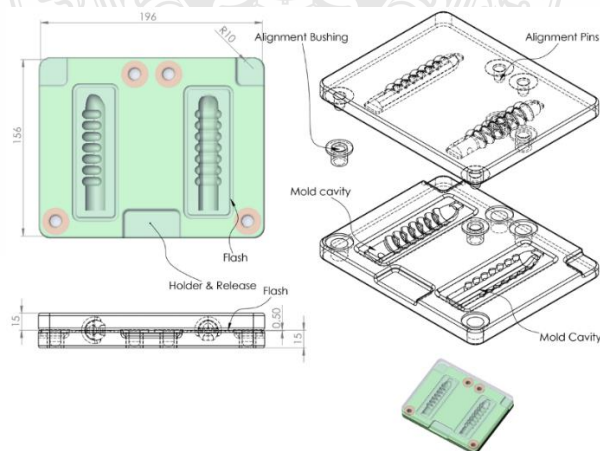
ขั้นตอนที่ 6 นำหุ่นยนต์น้ำจางที่ได้จากการหล่อ อบให้แห้งที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 60 นาที ความสำคัญในกรรมวิธีนี้คือการไล่ฟองอากาศให้หมดจากน้ำยางก่อนทำการอบ



ภาพที่ 4.14 การทดสอบหาอุณหภูมิและเวลาในการขึ้นรูปหุ่นยนต์นึ่ง จากแม่พิมพ์โลหะ

ผลการทดสอบกรรมวิธีนี้เหมาะสมในการขึ้นรูปหุ่นยนต์นึ่งจากยางธรรมชาติได้ดี การทดสอบการใช้งานแม่พิมพ์จากการหาเวลาในการอบน้ำยาง โดยการนำน้ำยางที่ผ่านการบ่มที่อุณหภูมิห้อง มาเทใส่แม่พิมพ์โลหะที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส แบ่งเป็น 4 แม่พิมพ์ ภาพที่ 4.14 จาก 1-4 ตามลำดับ แม่พิมพ์ หมายเลข 1. เรอบ่มเป็นเวลา 1 ชม. แม่พิมพ์หมายเลข 2. บ่มเป็นเวลา 2 ชม. แม่พิมพ์หมายเลข 3. บ่มเป็นเวลา 3 ชม. แม่พิมพ์หมายเลข 4 บ่มเป็นเวลา 4 ชม. เมื่อผ่านไป 3 ชม. ยางจับตัวกันเป็นก้อน และเมื่อครบ 4 ชม. ยางไม่มีการเปลี่ยนแปลง เราจึงเลือกเวลาที่ 3 ชม. เป็นเวลาที่เหมาะสม รวมถึงผลการหาเวลาในการอบหลังจากอบผ่านแม่พิมพ์ โดยนำชิ้นงานทั้ง 4 ชิ้นออกจากแม่พิมพ์มาอบด้วยอุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20, 30, 40, 50 นาทีซึ่งเวลาที่เหมาะสมนั้นคือ 40 นาที เป็นเวลาที่ชิ้นงานแห้งและไม่แข็งเกินไป

4.4.6.2 ผลการหล่อขึ้นรูปหุ่นยนต์นึ่งจากยางธรรมชาติ โดยวิธีการกดอัด (compression molding)



ภาพที่ 4.15 แม่พิมพ์สำหรับการขึ้นรูปหุ่นยนต์นึ่งจากยางธรรมชาติด้วยวิธีการกดอัด

ภาพที่ 4.15 ในส่วนของแม่พิมพ์แบบกดอัดนี้ประกอบด้วยแม่พิมพ์ 2 ส่วน คือ แม่พิมพ์ส่วนบน (lid) และแม่พิมพ์ส่วนล่าง (base) โดยแม่พิมพ์ส่วนล่างจะมีช่องเป็นรูปร่างของผลิตภัณฑ์ เรียกว่า เบ้าพิมพ์ (cavity) สำหรับใส่ยางคอมพาวด์ที่จะขึ้นรูป จากนั้นนำแม่พิมพ์ส่วนบนมา ปิดทับ สลัก (pin) ที่ติดอยู่กับแม่พิมพ์ส่วนบนจะช่วย ล็อกไม่ให้เกิดการเคลื่อนตัวในแนวระนาบขณะที่ ได้รับแรงกดอัด เมื่อให้แรงดันแก่แม่พิมพ์ ยางคอมพาวด์จะถูกบังคับให้ไหลจนเต็มเบ้าพิมพ์ และความ ร้อนจากแม่พิมพ์จะทำให้ยางเกิดการคงรูป ผลการทดสอบกรรมวิธีนี้ไม่สามารถขึ้นรูปหุ่นยนต์นี้ได้ เนื่องจากปัญหาการไล่ฟองอากาศ รวมไปถึงการแตกหักของแกนกระเปาะภายในเนื่องจากการกดอัด

กรรมวิธีการขึ้นรูปหุ่นยนต์นี้แบบกดอัด

ขั้นตอนที่ 1 นำน้ำยางที่บ่มไว้ 1-2 วัน ผสมน้ำแป้งแล้วกวน 1 นาที

ขั้นตอนที่ 2 ใส่กรด 3 กรัม ในน้ำยางที่ใส่แป้งและไม่ใส่แป้ง

ขั้นตอนที่ 3 กวนน้ำยางจนเป็นก้อน

ขั้นตอนที่ 4 นำก้อนยางและแกนกลางไปใส่โม่ลคอมเพลส

ขั้นตอนที่ 5 ตั้งเครื่องคอมเพลสที่อุณหภูมิ 150 Co

ขั้นตอนที่ 6 กดอัดด้วยน้ำหนัก 10 kg

ขั้นตอนที่ 7 ยกแม่พิมพ์ 2 ครั้งเพื่อเป็นการไล่อากาศ

ขั้นตอนที่ 8 ใช้เวลากดหลังจากไล่อากาศ 3 นาที

โดยวิธีการทดสอบใช้ยางธรรมชาติผสมกับกรด้าเพื่อให้มีลักษณะเป็นก้อน สำหรับการกดอัดดังนี้ การหา Condition ใส่กรดในน้ำยางเพื่อทำยางก้อน ผสมตามสูตรน้ำยางคอมพาวด์ บ่มทิ้งไว้ 24 ชม.

4.5 ผลการทดสอบวัสดุสำหรับการนำมาขึ้นรูปหุ่นยนต์นี้

4.5.1 ทดสอบการจับตัวเป็นก้อน ของน้ำยางเมื่อผสมกับ 5% Acetic acid

ตารางที่ 4.10 การทดสอบหาปริมาณการเติม Acetic Acid เข้มข้น 5 % ที่เหมาะสำหรับการทำน้ำยางเป็นก้อน

การทดลอง	ปริมาณน้ำยาง : Acetic Acid (g.)	เวลาในการจับตัวเป็นก้อนยาง (min.)
1	10 : 10	5
2	10 : 3	30
3	10 : 2	45
4	10 : 1	50

จากตารางที่ 4.10 การทดสอบปริมาณ Actic Acid ที่ผสมในน้ำยางคอมพาวด์ เพื่อหาระยะเวลาที่เหมาะสมในการทำยางก้อน เพื่อนำไปขึ้นรูปด้วยวิธีการกดอัด พบว่ายางสามารถจับตัวเป็นก้อนในเวลา 5-50 นาที เมื่อทำการผสมกรด Acidic Acid ลงไป

4.5.2 การหา Condition นำน้ำยางบ่ม 1 วันใส่น้ำแข็งแบบปิดฝา

นำน้ำยางที่บ่มไว้ 1 วัน มาผสมกับน้ำแข็งในอัตราส่วน 5, 10, 15, 40 กรัม กวนให้เข้ากันแล้วนำไปเทใส่แม่พิมพ์โลหะแบ่งเป็น 4 แม่พิมพ์ ซึ่งแม่พิมพ์แรกผสมแข็ง 5 กรัม แม่พิมพ์ที่สองอบที่ 10 กรัม แม่พิมพ์ที่สามอบที่ 15 กรัม แม่พิมพ์ที่สี่อบที่ 40 กรัม ปิดฝาให้สนิท ใช้เวลาอบ 40 นาที ผลที่ได้ นั่นคือ ใสแข็งตั้งแต่ 5, 10, 15 กรัม ยางมีความนิ่มขึ้นตามจำนวนการใส่น้ำแข็งแต่เมื่อเย็นลงยางทุกตัวไม่ต่างกัน ส่วนยางที่ใสแข็งไป 40 กรัม ยางไม่จับกันเป็นชิ้นเดียวกันทั้งหมดมีการฉีกขาด

4.5.3 การหา Condition นำน้ำยางบ่ม 1 วันใส่น้ำแข็งแบบเปิดฝา

นำน้ำยางที่บ่มไว้ 1 วัน มาผสมกับน้ำแข็งในอัตราส่วน 5, 10, 15, 40 กรัม กวนให้เข้ากันแล้วนำไปเทใส่แม่พิมพ์โลหะแบ่งเป็น 4 แม่พิมพ์ ซึ่งแม่พิมพ์แรกผสมแข็ง 5 กรัม แม่พิมพ์ที่สองอบที่ 10 กรัม แม่พิมพ์ที่สามอบที่ 15 กรัม แม่พิมพ์ที่สี่อบที่ 40 กรัม เปิดฝา ใช้เวลาอบ 40 นาที ผลที่ได้คือ เหมือนกับการทดสอบเปิดฝา

4.5.4 การหา Condition นำน้ำยางบ่ม 1 วันใส่น้ำแข็งแบบเปิดฝา

นำน้ำยางที่บ่มไว้ 1 วัน มาผสมกับน้ำแข็งในอัตราส่วน 5, 10, 15, 40 กรัม กวนให้เข้ากันแล้วนำไปเทใส่แม่พิมพ์โลหะแบ่งเป็น 4 แม่พิมพ์ ซึ่งแม่พิมพ์แรกผสมแข็ง 5 กรัม แม่พิมพ์ที่สองอบที่ 10 กรัม แม่พิมพ์ที่สามอบที่ 15 กรัม แม่พิมพ์ที่สี่อบที่ 40 กรัม เปิดฝา ใช้เวลาอบ 40 นาที ผลที่ได้คือ เหมือนกับการทดสอบเปิดฝา

ตารางที่ 4.11 ขั้นตอนการนำยางไปทดสอบการคงรูปก่อนนำขึ้นงานมาคอมเพลส

ยางคอมพาวด์	เวลาที่ควรใช้ขึ้นรูป ที่อุณหภูมิ 150 C° (hr)
น้ำยาง 1 วัน	2.05
น้ำยาง 1 วัน ผสมแข็ง 5 กรัม	2.36
น้ำยาง 1 วัน ผสมแข็ง 15 กรัม	3.15
น้ำยาง 2 วัน	1.30
น้ำยาง 2 วัน ผสมแข็ง 5 กรัม	1.45
น้ำยาง 2 วัน ผสมแข็ง 5 กรัม	2.10

4.5.5 การหา Condition การยกเพื่อไร้อากาศในแม่พิมพ์

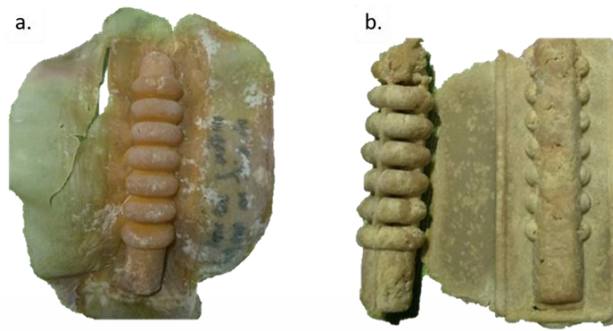
นำแม่พิมพ์คอมเพลสไปวางมีเครื่องคอมเพลสตั้งอุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส นำยางก้อนที่เตรียมไว้วางบนแม่พิมพ์ใช้แรงกดที่ 10 kg เมื่อกดถึงทำการยกเพื่อไล่อากาศ 1,2,3,4 ครั้ง ซึ่งจำนวนการยกเพื่อไล่อากาศนั้นจำนวนที่ยกแล้วทำให้ชิ้นงานไม่มีอากาศกดชิ้นงานและชิ้นงานจับกันเป็นชิ้นเดียวกันนั้นคือยก 2 ครั้ง เพราะยก 1 ครั้ง ยังมีอากาศกดทับที่ชิ้นงาน ส่วนยกตั้งแต่ 3 ครั้งขึ้นไปชิ้นงานมีรอยแตก

4.5.6 ผลการหา condition ของการเติมน้ำแข็งเพื่อให้ก้อนยางมีค่าความแข็งลดลง ให้เหมาะสมสำหรับการขึ้นรูปด้วยวิธีการกดอัด

จากผลการทดลองที่ 4.5.1 – 4.5.5 เพื่อหาปริมาณของ Acetic Aid ที่ผสมเพื่อต้องการให้น้ำยางจับตัวเป็นก้อนสำหรับการขึ้นรูปด้วยวิธีการกดอัด ผู้ทดลองเลือกใช้ความเข้มข้นที่ 5% และ 30 phr และปริมาณน้ำแข็งที่ 5 กับ 15 ในการทดสอบการขึ้นรูป

ตารางที่ 4.12 ขั้นตอนการผสมน้ำยางคอมปาวด์สำหรับทำยางก้อน

สูตรผสมน้ำยาง	สมบัติของสาร	ปริมาณที่ใช้ (phr)
60% HANR(น้ำยางเข้มข้น)	สารตั้งต้น	200
30%กำมะถัน (Sulphur)	สารทำให้ยางคงรูปหรือ สารวัลคาไนซิง	1.6
50% ZnO(ซิงค์ออกไซด์)	Activator หรือสารกระตุ้น	2
50%ซิงก์ไดเอทิลไดไทโอคาร์บาเมต (ZDEC)	สารเร่งปฏิกิริยายางคงรูป	0.8
50%แซดเอ็มบีที (ZMBT)	สารเร่งปฏิกิริยายางคงรูป	0.8
50%(Wingstay L, WSL)	สารป้องกันยางเสื่อม	2
10%โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH)	สารที่ช่วยเพิ่มความเสถียร	0.4
10%Teric acid	สารที่ช่วยเพิ่มความเสถียร	0.04
5% Acetic acid	สารทำให้ยางจับตัว	3
น้ำแข็ง	สารลดความแข็งในยาง	5,15



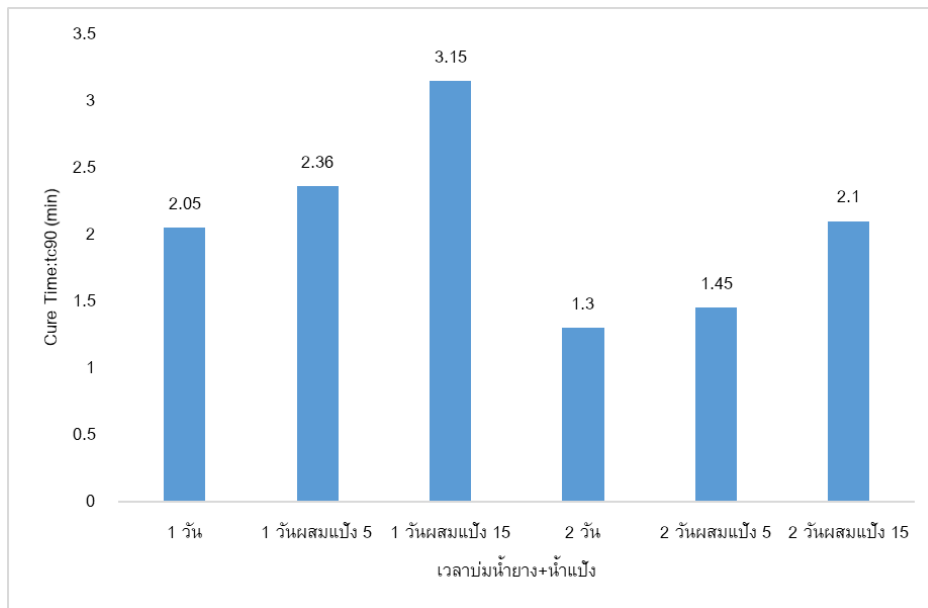
ภาพที่ 4.16 a.) น้ำยางผ่านการบ่มไม่ผสมแป้ง b.) น้ำยางที่ผ่านการบ่มผสมแป้ง 5 และ 15

จากการทดลองคอมเพลสโดยการบ่มน้ำยางทิ้งไว้โดยไม่ผสมแป้ง ดังแสดงในภาพที่ 4.16 a.) จะเห็นว่าเนื้อยางมีการยึดกันดี ส่วนผลการใส่แกนลงไปในนั้นแกนไม่สามารถทนแรงกดอัดได้ทำให้แกนกลางหักอยู่ในเนื้อยาง น้ำยางที่ทำการผสมแป้งนั้นซึ่งผ่านการบ่มเป็นเวลาเท่ากัน จากการทดลองคอมเพลสจะเป็น ดังภาพที่ 4.16 b.) เนื้อยางที่ออกมามีการฉีกขาดไม่ยึดติดกันเหมือนน้ำยางที่ไม่ผสมแป้ง การใส่แกนลงไปในนั้นไม่ต่างจากการไม่ผสมแป้ง คือแกนไม่สามารถทนการกดอัดได้ แม้จะยกยั้งก่อนมีค่าความแข็งลดลง

จากตารางที่ 4.12 การทำการผสมน้ำยางกับสารเคมี แล้วผ่านการบ่มและผ่านการผสมแป้ง Rubber Compression Molding ที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส และมาทำการทดสอบสมบัติต่าง ๆ ได้ผลดังต่อไปนี้

4.5.7 ผลทดสอบการวัลคาไนซ์ของยาง

จากการผสมสารเคมีในน้ำยาง และผสมแป้งไปในสูตรต่างๆแล้วนำไปทดสอบการวัลคาไนซ์ของยางโดยใช้มาตรฐาน ASTM D2084-01 ที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส โดยจะใช้ค่าของ Cure Time : tc90 ซึ่งนำไปใช้ในการขึ้นรูปชิ้นงาน ซึ่งได้ผลออกมาดังนี้

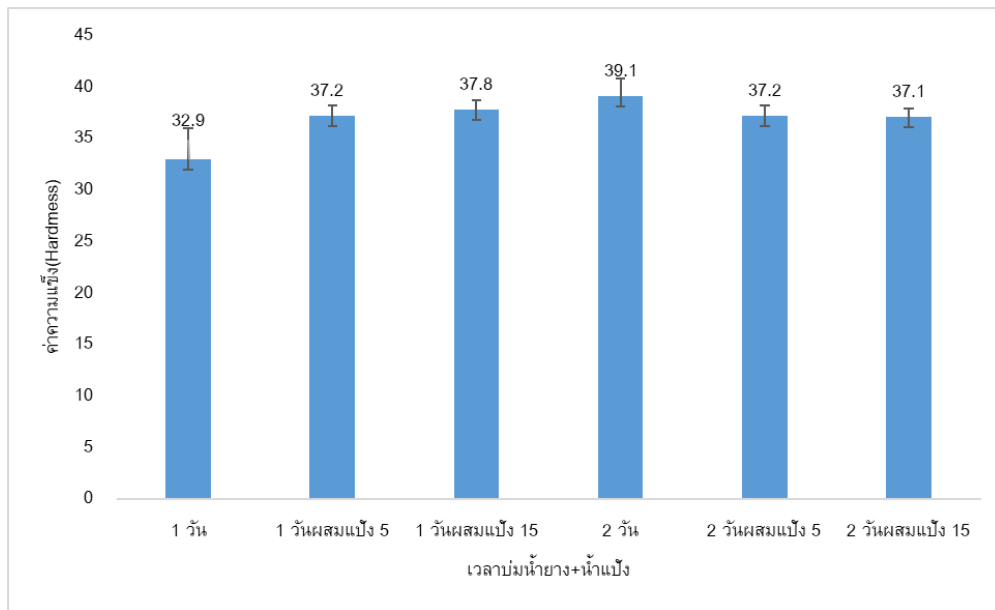


ภาพที่ 4.17 กราฟแสดงค่าการทดสอบการวัลคาไนซ์ (Cure Time : tc90) ของเวลาในการบ่มน้ำยางและการผสมแป้ง

ภาพที่ 4.17 แสดงพฤติกรรมการคงรูปของเวลาในการบ่มน้ำยางและการผสมแป้งโดยแสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่าง เวลาในการคงรูป (Cure time; tc90) จากผลการทดลองเวลาในการบ่มน้ำยางและการผสมแป้งมีแนวโน้มในการเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมการคงรูปของยาง ซึ่งเวลาในการบ่มมีผลให้เวลาในการคงรูปลดลง ส่วนการเติมน้ำแป้งลงไปนั้นมีผลทำให้เวลาในการคงรูปเพิ่มมากขึ้นตามจำนวนการเติมน้ำแป้ง

4.5.8 ผลการทดสอบความแข็งของยาง (Hardness)

จากการผสมสารเคมีในน้ำยาง และผสมแป้งไปในสูตรต่างๆจากนั้นนำมาทำเป็นยางก้อนแล้วนำไปขึ้นรูปเป็นแผ่นโดยใช้เครื่อง Rubber Compression Molding ที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส แล้วนำไปทดสอบความแข็ง โดยใช้มาตรฐาน ASTM D224 ซึ่งได้ผลออกมาดังนี้

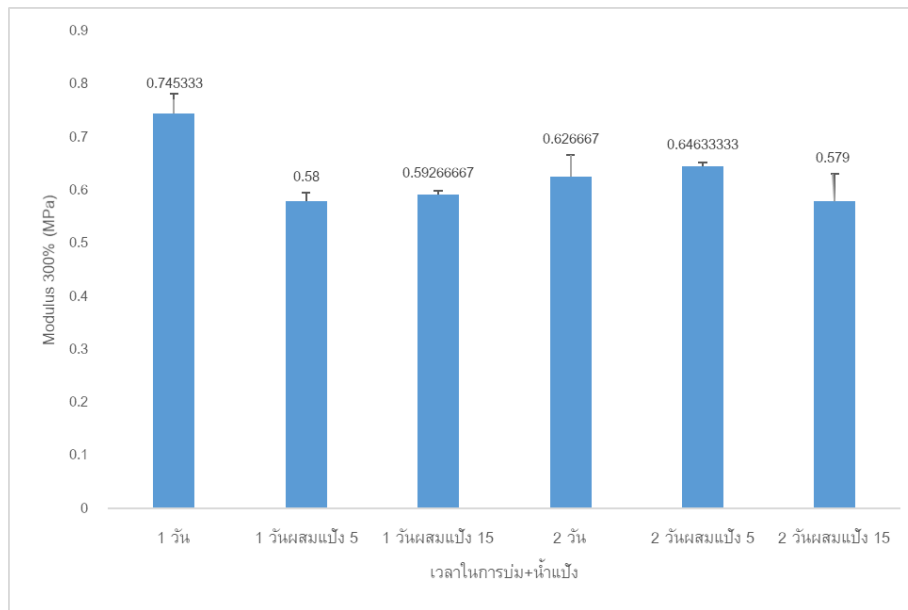


ภาพที่ 4.18 กราฟแสดงผลการทดสอบความแข็งของเวลาในการบ่มน้ำยางและการผสมแป้ง

จากภาพที่ 4.18 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความแข็ง (Hardness) ของเวลาในการบ่มน้ำยางและการผสมแป้งจากผลการทดลองพบว่า เวลาในการบ่มและการผสมน้ำแป้งที่มากขึ้นและที่ผ่านเครื่อง Rubber Compression Molding ที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียสให้ความแข็งของยางวัลคาไนซ์มีค่าเพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย ซึ่งน้ำแป้งมีลักษณะเป็นของเหลวหนืด ซึ่งแทรกตัวอยู่ในน้ำยางเข้ากับยางได้ดี ขึ้นงานที่ได้มีความแข็งใกล้เคียงกัน น่าจะเป็นสาเหตุที่ทำยางวัลคาไนซ์มีความแข็งที่เพิ่มมากขึ้น เมื่อเติมน้ำแป้งลงไปปริมาณมาก

4.5.9 ผลการทดสอบความทนต่อแรงดึง (Tensile Strength)

จากการผสมสารเคมีในน้ำยาง และผสมแป้งไปในสูตรต่างๆจากนั้นนำมาทำเป็นยางก้อนแล้วนำไปขึ้นรูปเป็นแผ่นโดยใช้เครื่อง Rubber Compression Molding ที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส แล้วนำไปทดสอบความทนต่อแรงดึงโดยใช้มาตรฐาน ASTM D412 ซึ่งได้ผลออกมาดังนี้

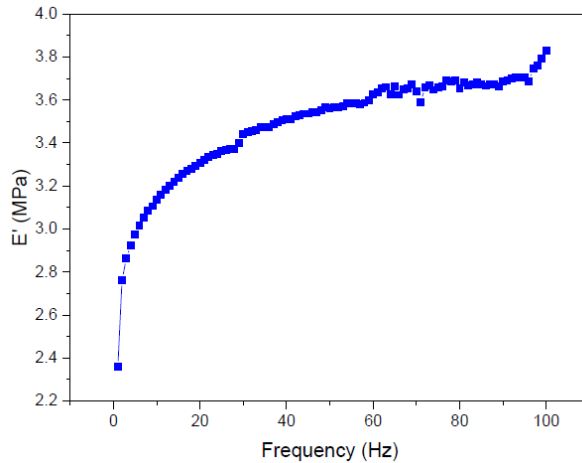


ภาพที่ 4.19 กราฟแสดงผลการทดสอบค่า Modulus 300 % (MPa) ของเวลาในการบ่มน้ำยาล้างและการผสมเบ้ง

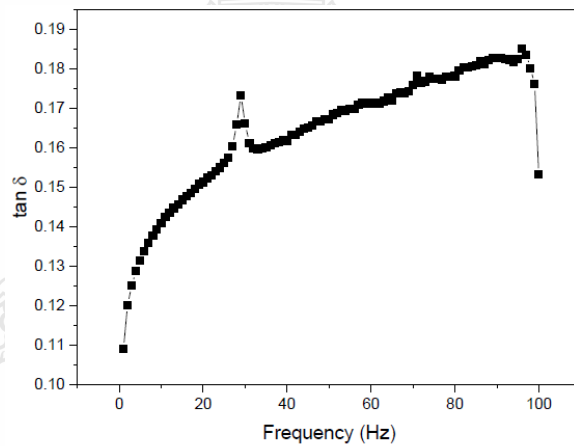
ภาพที่ 4.19 แสดงสมบัติความทนต่อแรงดึง (Tensile properties) ของเวลาในการบ่มน้ำยาล้างและการผสมเบ้งจากผลการทดลองพบว่าค่า 300% มอดูลัส (300% Modulus) มีแนวโน้มลดลงเมื่อเติมน้ำเบ้งและเวลาบ่มนานขึ้น

4.5.10 ผลการทดสอบสมบัติทางกลเชิงพลวัต

สมบัติเชิงกลพลวัตของวัสดุที่นำมาใช้ขึ้นรูปเป็นปัจจัยที่สำคัญมากที่สุดในการออกแบบและสร้างมือหุ่นยนต์อ่อนนุ่มสำหรับหยิบจับ เนื่องจากเป็นสมบัติที่บ่งบอกถึงการตอบสนองระหว่างสิ่งเร้า (แรงดันอากาศ) รูปร่างและโครงสร้าง actuator ต่อสมรรถนะและรูปแบบการหยิบจับ ทั้งนี้จากลักษณะกลไกการทำงานของนิ้วมือหุ่นยนต์อ่อนนุ่ม ตัวแปรสำคัญที่จะใช้เป็นสมบัติอ้างอิงในการออกแบบก็คือค่า มอดูลัสของวัสดุซึ่งเป็นค่าความต้านทานการแปลงรูปของวัสดุภายใต้ภาระต่าง ๆ และเนื่องจากการทำงานของนิ้วมือเป็นไปในรูปแบบของการเคลื่อนที่เชิงพลวัต



ภาพที่ 4.20 ค่า storage modulus (E') ที่อุณหภูมิห้องและความถี่ 1-100 เฮิรตซ์ ของยางพรีวัลคาไนซ์

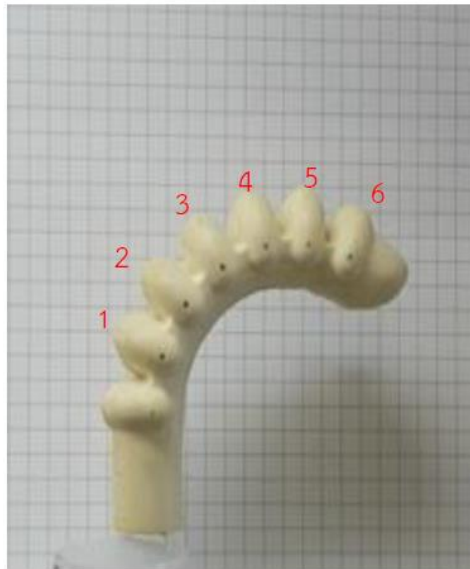


ภาพที่ 4.21 ค่า Tan delta ที่อุณหภูมิห้องและความถี่ 1-100 เฮิรตซ์ ของยางพรีวัลคาไนซ์

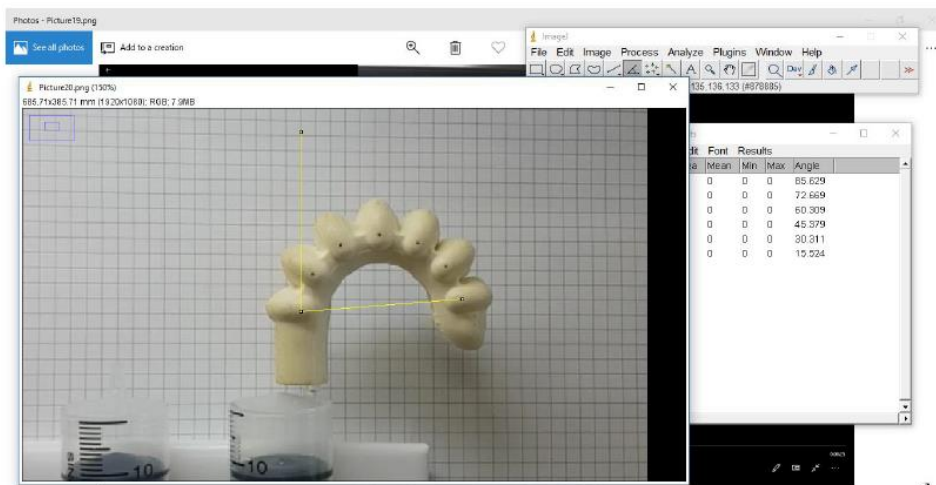
ค่า Storage modulus บ่งชี้ความเป็นอีลาสติกของวัสดุ จากผลการวิเคราะห์พบว่า ยางพรีวัลคาไนซ์มีค่า Storage modulus อยู่ในช่วง 2.3-2.4 MPa และเห็นได้ว่าคุณค่า Storage modulus ของยางพรีวัลคาไนซ์มีค่าสูงขึ้นตามการเปลี่ยนแปลงค่าความถี่ ความถี่ยิ่งสูงมากขึ้น ค่า Storage modulus ยิ่งสูงมากขึ้น

ยางพรีวัลคาไนซ์มีค่า Tan delta มีค่าน้อยกว่า 0.2 แสดงว่าวัสดุสามารถเปลี่ยนแปลงรูปได้ง่าย อีกทั้งยังพบว่าค่า Tan delta มีค่าสูงขึ้นตามการเปลี่ยนแปลงค่าความถี่ และเมื่อความถี่สูงขึ้นถึง 90 Hz ค่า Tan delta ของวัสดุจะตกลงอย่างเห็นได้ชัด

4.5.11 ผลการทดสอบพฤติกรรมการงอตัวของหุ่นยนต์นิ่มเมื่อใช้แรงดันเป็นตัวกระตุ้น
 การทดสอบพฤติกรรมการงอตัวของหุ่นยนต์นิ่ม โดยใช้โปรแกรมอิมเมจเจ (ImageJ) เพื่อให้ทราบถึงมุมของนิ้วมือที่เกิดขึ้นในขณะที่ให้ปริมาณของแรงดันเข้าไป ดังแสดงในภาพที่ 4.23

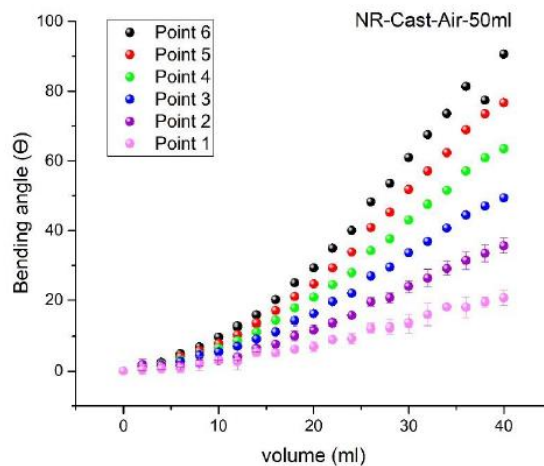


ภาพที่ 4.22 แสดงจุดตำแหน่งของกระเปาะที่ใช้วัดมุมของการทดสอบพฤติกรรมการงอ



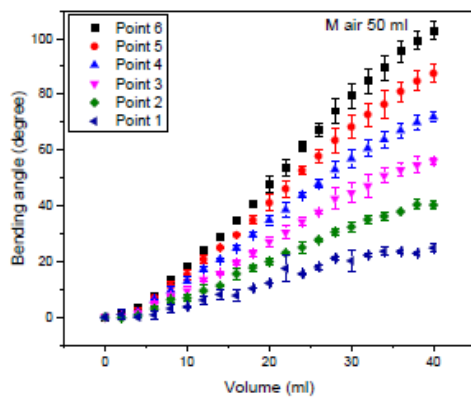
ภาพที่ 4.23 แสดงวิธีการวัดมุมของการทดสอบพฤติกรรมการงอตัวสำหรับหีบจับ

การทดสอบพฤติกรรมการงอตัวของหุ่นยนต์นี้มาจากการใส่แรงดันของเหลวและแรงดันอากาศ เพื่อดูความสามารถในการงอตัวของนิวياجธรรมชาติ การใช้งานโดยแรงดันอากาศ(Air) โดยใช้ linear motor ในการควบคุมหลอดเข็มฉีดยาขนาด 50 ml เพื่อสร้างให้เกิดแรงดันภายในกระเปาะหุ่นยนต์นี้ส่งผลให้เกิดการงอตัวที่สัมพันธ์กับปริมาตรที่ให้เพิ่มเข้าไป

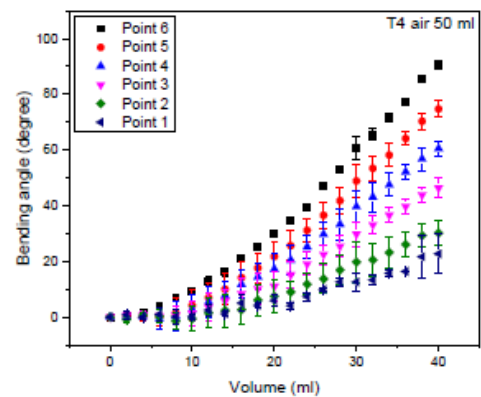


ภาพที่ 4.24 แสดงพฤติกรรมการงอตัวของหุ่นยนต์นี้ที่ขึ้นรูปจากยางธรรมชาติโดยใช้แรงดันอากาศเป็นตัวกระตุ้น

จากภาพที่ 4.24 แสดงพฤติกรรมการงอตัวของหุ่นยนต์นี้ที่ขึ้นรูปจากยางธรรมชาติในแต่ละจุดโดยใช้แรงดันอากาศเป็นตัวกระตุ้น จะเห็นได้ว่าในแต่ละจุดเลยลักษณะการงอตัวในแต่ละกระเปาะต่างกัน จุดที่ 1 จะมีการงอตัวค่อนข้างน้อยสังเกตจากการใช้แรงดันตั้งแต่ 0-20 mL การงอตัวของจุดที่ 1 อยู่ที่ 0-10 องศา จุดที่ 2 มีการงอตัวมากกว่า จุดที่ 1 เพียงเล็กน้อยในช่วงเริ่มต้นที่ใช้แรงดันอากาศ 0-20 mL แต่เมื่อแรงดันเพิ่มขึ้นการงอตัวเพิ่มมากขึ้น จุดที่ 3 มีการงอตัวประมาณ 10 องศา ที่แรงดันอากาศ 10 mL และมีการงอเพิ่มมากขึ้นตามแรงดันอากาศที่มากขึ้น การงอตัวของจุดที่ 4, 5 และ 6 นั้น มีการงอตัวอย่างชัดเจน สังเกตจากกราฟที่มีค่าการงอตัวที่สูงขึ้นอย่างชัดเจนตามแรงดันอากาศที่ใช้ จากการทดสอบการทดสอบพฤติกรรมการงอตัวของหุ่นยนต์นี้มาจากการใส่แรงดันแรงดันอากาศเพื่อดูความสามารถในการงอตัวของนิวياجธรรมชาติ จะเห็นได้ว่าจำนวนกระเปาะของนี้มีส่งผลต่อการงอตัวของนิวياجกระเปาะมากขึ้น การงอตัวของนิวياجสูงขึ้นด้วย เมื่อเพิ่มกระเปาะองศาในการงอตัวของนิวياجเพิ่มมากขึ้น



(a)



(b)

ภาพที่ 4.25 (a) แสดงพฤติกรรมการงอตัวของหุ่นยนต์นี้มหาจากซิลิโคนเกรด RTV-M ใช้แรงดันอากาศเป็นตัวกระตุ้น, (b) แสดงพฤติกรรมการงอตัวของหุ่นยนต์นี้มหาจากซิลิโคนเกรด RTV-T4 โดยใช้แรงดันอากาศเป็นตัวกระตุ้น

จากภาพที่ 4.25 แสดงถึงพฤติกรรมการงอตัวของหุ่นยนต์นี้มหาจากซิลิโคนเกรด RTV-M, RTV-T4 ที่มีรูปทรงเดียวกันจากแรงดันอากาศ จะเห็นได้ว่าเมื่อเพิ่มแรงดันเข้าไปกริปเปอร์มีการเคลื่อนไหวที่ค่อนข้างเร็ว เนื่องจากวัสดุมีความอ่อนตัวสูง สังเกตจากกราฟที่แสดง เมื่อเพิ่มอากาศเข้าไป 10 mL กริปเปอร์จะสามารถโค้งงอถึง 20 องศาผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่าวัสดุที่ใช้ส่งผลให้การทดสอบต่างกันทดสอบให้ผลต่างกันเมื่อเรียงลำดับการตอบสนองของต่อปริมาตรแรงดันอากาศ จากที่เรียงจากการตอบสนองต่อแรงดันในการงอตัวได้ดีได้ดังนี้ RTV-M, RTV-T4 และยางธรรมชาติ ใช้ตัวกระตุ้นที่ทำให้เกิดแรงดันจากการเพิ่มปริมาตรของอากาศ (Air) เข้าไป เมื่อให้ปริมาตรของตัวกระตุ้นพฤติกรรมการงอตัวของนิ้วจากอากาศมีความแตกต่างกัน เมื่อใช้อากาศปริมาตร 35-40 mL นิ้วที่ทำจาก RTV-M, RTV-T4 สามารถโค้งงอได้ 90-100 องศา นิ้วที่ขึ้นรูปจากยางธรรมชาติสามารถโค้งงอได้ 80-90 องศา นั่นคือนิ้วที่ขึ้นรูปจากยางธรรมชาติมีความแข็งมากกว่านิ้วที่ซิลิโคนเกรด RTV-M, RTV-T4 จากกราฟการโค้งงอของนิ้วที่ขึ้นรูปจากยางธรรมชาติเป็นแบบคงที่ ทำให้ง่ายในการควบคุมการโค้งงอของนิ้วมือหุ่นยนต์และการใช้ยางธรรมชาติโปรตีนต่ำในการขึ้นรูปกริปเปอร์สำหรับหุ่นยนต์จะช่วยให้ลดอาการแพ้โปรตีนในน้ำ

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

การทดลองการหาวิธีขึ้นรูปหุ่นยนต์นิ่มโดยใช้ยางธรรมชาติที่มีความแตกต่างจากกรรมวิธีการขึ้นรูปหุ่นยนต์นิ่มจากวัสดุอื่น เพราะวัสดุประเภทยางทั่วไปสามารถใช้กรรมวิธีหล่อประกบได้เนื่องจากยังสามารถอยู่ในสถานะเซตตัวไม่สมบูรณ์ (semi-cure) ได้ เป็นสิ่งที่ทำได้ยากสำหรับยางธรรมชาติ ผู้ทดลองได้ดำเนินการทดสอบวิธีการ ทั้งหมด 4 กระบวนการ คือ การหล่อแบบซีฟิ่งหาย การหล่อแบบประกบ การหล่อแบบกดอัด และการหล่อแบบปลดแกน ซึ่งกรรมวิธีสุดท้ายเป็นการหล่อยางธรรมชาติที่เหมาะสมที่สุด เพราะใช้วิธีการหล่อแบบครั้งเดียวและปลดแกนเพื่อสร้างช่องกระเปาะภายในอีกครั้ง

การขึ้นรูปนี้วยางด้วยการหล่อยางธรรมชาตินั้นเราควรบ่มน้ำยางไว้อย่างน้อย 1 วัน เพื่อให้สารเคมีเข้ากับน้ำยางและมีความหนืดขึ้นเพื่อให้ฟองอากาศลดลงน้อยที่สุด การขึ้นรูปนี้วยางด้วยการกดอัด (Compression molding) ใช้ยางก้อนไม่ควรต่ำกว่า 50 กรัมเมื่อเอายางก้อนมากดอัดควรยกแม่พิมพ์ 2 ครั้ง เพื่อเป็นการไล่อากาศให้ออกจากแม่พิมพ์ใช้น้ำหนักในการกดอัด 10 kg ใช้เวลาในการกดอัด 2-3 นาที เนื่องจากการทดสอบ MDR ช่วงเวลาที่ยางมีความสมบูรณ์ 90% อยู่ในช่วงเวลานั้น ส่วนการใส่แกน 3D Printer แกนไม่สามารถทนต่อแรงอัดได้ทำให้ไม่สามารถดึงแกนกลางออกมาได้หมด

การทดลองหาวัสดุที่เหมาะสมสำหรับขึ้นแม่พิมพ์ด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติ ดำเนินการทดสอบทั้งหมด 9 ชนิด 2 เทคนิค คือ เทคนิค FDM เลือกใช้วัสดุ ABS, PC, PC-ABS, PC, PETG-PC, PETG-Carbon, PVA และ Poly-jetting เลือกใช้วัสดุ High temperature RGD 525 และ Endur RGD 450

โดยการทดสอบความเหมาะสมจากการใช้งานในช่วงอุณหภูมิที่ยางเซตตัว จำนวนครั้งสำหรับใช้งาน รวมไปถึงความยากง่ายในการขึ้นรูป ซึ่งจากการทดลองจึงสรุปได้ว่าวัสดุประเภท ABS, PC และ High temperature เหมาะสำหรับการใช้งานที่อุณหภูมิช่วงที่ยางธรรมชาติและยางซิลิโคนเซตตัว โดยสอดคล้องกับผลการทดสอบ DSC เพื่อหาความคงตัวของวัสดุที่ อุณหภูมิ -20 ถึง 110 องศาเซลเซียสยังสามารถคงตัวอยู่ได้

จากการทดลองการขึ้นรูปหุ่นยนต์จากน้ำยางธรรมชาติ พบว่าการออกแบบรูปทรงของนิ้วทั้งรูปทรงภายนอกและช่องกระเปาะภายใน ที่ส่งผลต่อการงอตัวของหุ่นยนต์นิ่มขณะให้แรงดันภายในกระเปาะ

เมื่อนำหุ่นยนต์นี้มาจากยางธรรมชาติมาทำการทดสอบสมบัติทางกลเชิงพลวัต พบว่ายางพรีวัลคาไนซ์มีค่า Storage modulus อยู่ในช่วง 2.3-2.4 MPa และมีค่า Tan delta มีค่าน้อยกว่า 0.2 แสดงว่าวัสดุมีความเป็นอีลาสติกของวัสดุ สามารถเปลี่ยนแปลงรูปได้ง่าย

การทดสอบพฤติกรรมการงอตัวของหุ่นยนต์นี้ทั้งยางธรรมชาติ และยางซิลิโคน RTV-T4 และ RTV-M โดยใช้โปรแกรมอิมเมจจ (ImageJ) เพื่อให้ทราบถึงมุมของนิ้วมือที่เกิดขึ้นในขณะที่ให้ปริมาตรของแรงดันเข้าไปที่ 2-40 ml จะต้องศกการงอตัวที่ใกล้เคียงกันที่ 0-90 องศา ใกล้เคียงกันทำให้สามารถสรุปได้ว่าประสิทธิภาพการใช้งานของวัสดุทั้ง 2 ชนิดมีความใกล้เคียงกัน ในขณะที่ยางธรรมชาติมีราคาต้นทุนที่น้อยกว่ายางซิลิโคนหลายเท่าตัว

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 การวิเคราะห์ด้วยเทคนิค ^{13}C NMR spectroscopy เปรียบเทียบที่อุณหภูมิต่าง ๆ ในสภาวะน้ำยาง

5.2.2 ศึกษาและปรับปรุงสภาวะของกระบวนการพรีวัลคาไนซ์ในสภาวะน้ำยางให้เหมาะสมกับน้ำยาง HNR เพื่อใช้ขึ้นรูปหุ่นยนต์นี้ให้เหมาะสม

5.2.3 ศึกษาผลกระทบจากจำนวนการใช้งานและอายุการใช้งานของหุ่นยนต์นี้มาจากยางธรรมชาติเมื่อเปรียบเทียบกับซิลิโคนทั่วไป

5.2.4 การทดสอบการใช้งานสำหรับหุ่นยนต์นี้ โดยใช้กระบวนการ FEA (finite element) ของหุ่นยนต์นี้เพื่อนำไปทดสอบรูปทรงที่ซับซ้อนยิ่งขึ้นสำหรับการสร้างผลิตภัณฑ์ในอนาคต

บรรณานุกรม

- ธีระยุทธ ไทยธูระไพศาล. (กันยายน 2559). หุ่นยนต์ไทย...ความท้าทายใหม่ที่นำจับตามอง. **Economic Intelligence Center ธนาคารไทยพาณิชย์ จำกัด (มหาชน)**, สืบค้นจาก <https://www.scbeic.com/th/>
- Kim, S., Laschi, C., & Trimmer, B. (2013). Soft robotics: a bioinspired evolution in robotics. **Trends in Biotechnology**, 31, 287-294.
- Galloway, K.C. (2015). *US 201500901 13A1*, Cambridge, MA: U.S.
- Mosadegh, B., Shepherd, R. E., & Whitesides, G. M. (2015). *US 20150266 186A1*, Cambridge, MA: U.S.
- Lessing, J., Knoop, R., Alcedo, K., Harburg, D., & Singh, S. P. (2017). *US 20170203443A1*, Brookline, MA: U.S.
- Shahid, T., Gouwanda, D., Nurzaman S. G., & Gopalai, A. A. (2018). Moving toward Soft Robotics: A Decade Review of the Design of Hand Exoskeletons. **Biomimetics**, 3, 17.
- เสาวนีย์ ก่อวุฒิกุลรังษี. (2546). **การผลิตยางธรรมชาติ**. ปัตตานี: มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- วารสารณ์ ขจรไชยกูล. (2552). **ผลิตภัณฑ์ยาง: กระบวนการผลิตและเทคโนโลยี**. กรุงเทพฯ: สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.),
- พงษ์ธร แซ่อูย. (2547). **ยาง ชนิด สมบัติ และการใช้งาน**. กรุงเทพฯ: ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (เอ็มเทค).
- Ramya, A., & Vanapalli, S. (2016). 3D printing technologies in various applications. **International Journal of Mechanical Engineering and Technology**, 7, 396-409.
- รศ.แมน อมรสิทธิ์. (2552). **หลักการและเทคนิคการวิเคราะห์เชิงเครื่องมือ เล่ม 1**. กรุงเทพฯ: จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- Li, J., Godaba, H., Zhang, Z. Q., Foo, C. C., & Zhu, J. (2018). A soft active origami robot. **Extreme Mechanics Letters**, 24, 30-37.

บรรณานุกรม (ต่อ)

- Zolfaghariana, A., Kouzania, A. Z., Khooa, S., Moghadamb, A. A. A., Gibsona, I., & Kaynaka, A. (2016). Evolution of 3D printed soft actuators. **Sensors and Actuators A: Physical**, *250*, 258-272.
- Elgeneidy, K., Lohse, N., & Jackson, M. (2018). Bending angle prediction and control of soft pneumatic actuators with embedded flex sensors – A data-driven approach. **Mechatronics**, *50*, 234-247.
- Zagzoog, N., & Yang, V. X. D. (2018). State of Robotic Mastoidectomy: Literature Review. **World Neurosurgery**, *116*, 347-351.
- Manna, M., Morales, J., & Frohn, P. (2018). Additive manufacturing of silicon based PneuNets as soft robotic actuators. **Procedia CIRP**, *72*, 328-333.
- Coyle, S., Majidi, C., LeDuc, P., & Hsia, K. J. (2018). Bio-inspired soft robotics: Material selection, actuation, and design. **Extreme Mechanics Letters**, *22*, 51-59.
- Gul, J. Z., Sajid, M., Rehman, M. M., Siddiqui, G. U., Shah, I., Kim, K. H., Lee, J. W., & Choi, K. H. (2018). 3D printing for soft robotics – a review. **Science and Technology of Advanced Materials**, *19*, 243-262.
- Lucas Mearian. (May 2016). How 4D printing is now saving lives. **Computerworld from IDG**, สืบค้นจาก <https://home.liebertpub.com/publications/softrobotics/616/overview>
- Klinklai, W., Saito, T., Kawahara, S., Tashiro, K., Suzuki, Y., Sakdapipanich, J. T., & Isono, Y. (2004). Hyper deproteinized natural rubber prepared with urea. **Journal of Applied Polymer Science**, *93*, 555-559.
- Ariyawiriyanan, W., Nuinu, J., Sae-heng, K., & Kawahara, S. (2013). The Mechanical Properties of Vulcanized Deproteinized Natural Rubber. **Energy Procedia**, *34*, 728-733
- Upadhyay, M., Sivarupan, T., & El Mansori, M. (2017). 3D printing for rapid sand casting— A review. **Journal of Manufacturing Processes**, *29*, 211-220.

บรรณานุกรม (ต่อ)

- Yan, Q., Dong, H., Su, J., Han, J. Song, B., Wei, Q., & Shi, Y. (2018). A Review of 3D Printing Technology for Medical Applications. **Engineering**, *In Press, Accepted Manuscript*
doi: <https://doi.org/10.1016/j.eng.2018.07.021>
- Dizona, J. R. C., Espera Jr., A. H., Chen, Q., & Advincula, R. C. (2018). Mechanical characterization of 3D-printed polymers. **Additive Manufacturing**, *30*, 44-67.
- Haghashtiani, G., Habtour, E., Park, S. H., Gardea, F., & McAlpine, M. C. (2018). 3D printed electrically-driven soft actuators. **Extreme Mechanics Letters**, *21*, 1-8
- Belter, J. T., Segil, J. L., Dollar, A. M. & Weir, R. F. (2013). Mechanical design and performance specifications of anthropomorphic prosthetic hands: A review. **Journal of Rehabilitation Research & Development**, *50*, 599-618.
- Li, C., Cui, Y. L., Tian, G. L., Shu, Y., Wang, X. F., Tian, H., Yang, Y., Wei, F., & Rena, T. L. (2015). Flexible CNT-array double helices Strain Sensor with high stretchability for Motion Capture. **Scientific Report**, *5*, 15554.
- Zagzoog, N., & Yang, V. X. D. (2018). State of Robotic Mastoidectomy: Literature Review. **World Neurosurgery**, *116*, 347-351.
- Manna, M., Morales, J., & Frohn, P. (2018). Additive manufacturing of silicon based PneuNets as soft robotic actuators. **Procedia CIRP**, *72*, 328-333.
- R.V.Martinez, J. L.Branch, C.R.Fish, L.Jin, R. F.Shepherd, R.M.D.Nunes, Z.Suo,G. M.Whitesides, **Adv.Mater.**
- R.V.Martinez, C.R.Fish, X.Chen, G.M.Whitesides. (2012) **Adv.Funct.Mater.**
- R.F.Shepherd, F.Ilievski, W.Choi, S.a.Morin, A.a.Stokes, A.D.Mazzeo, X.Chen, M.Wang, G.M.Whitesides,(2011) **Proc.Natl.Acad.Sci. USA**, *4*.
- K.Suzumori, S.Endo, T.Kanda, (2007) **IEEE Int. Conf. Robot.**, 4975 .
- K.Suzumori, T.Maeda, H.Watanabe, T.Hisada, (1997) **IEEE/ASME T. Mechatron.**, *2* , 281
- H.A.Baldwin, in *Proceedings of the Furdt Rock Biomechanics Symposium(1969)*, 139 .
- H.Schulte, **Natl.Acad. Sci.1961**, H, 94 .
- M.Gavrilovic, M.R.Maric, (1969) **Med.Biol.Eng.**,

บรรณานุกรม (ต่อ)

- S.C.Obiajulu, E. T.Roche,F.A. Pigula,C. J.Walsh ,(2013) in **Proc. ASME IDETC 2013**
- Y.-L.Park, B.Chen, D. Young, L.Stirling, R.J.Wood, E.Goldfi eld , R.Nagpal,(2011) **IEEE Int. Conf. Robot.** 4488 .
- E.Nagel, M.Stuber, B.Burkhard, S.E.Fischer, M.B.Scheidegger , P.Boesiger, O.M.Hess, Eur.Heart J. (2000), 21, 582 .
- C. H.Lorenz, J. S.Pastorek, J. M.Bundy, J.Cardiovasc.Magn.R.(2000), 2, 97 .
- S.Nakatani, J.Cardiovasc. **Ultrasound** (2011), 19 , 1 .
- S.Göktepe, O. J.Abilez, K.K.Parker, E.Kuhl , **J.Theor. Biol.** (2010) , 265 , 433 .
- Zolfaghariana, A., Kouzania, A. Z., Khooa, S., Moghadamb, A. A. A., Gibsona, I., & Kaynaka, A. (2016). Evolution of 3D printed soft actuators. **Sensors and Actuators A: Physical**, 250, 258-272.
- Elgeneidy, K., Lohse, N., & Jackson, M. (2018). Bending angle prediction and control of soft pneumatic actuators with embedded flex sensors – A data-driven approach. **Mechatronics**, 50, 234-247.



ภาคผนวก





OSAKA
JAPAN
MAY 7-9, 2019

ICEAI
International Congress on Engineering and Information

ICCBES
International Congress on Chemical, Biological and Environmental Sciences

Welcome Message



Local Host

Dr. Hiroshi Uechi

**Faculty of Commerce,
Osaka Gakuin University**

Welcome Message

Dear delegates and colleagues,

It is my great pleasure to welcome you to the joint conference of the International Congress on Engineering and Information (ICEAI), International Congress on Chemical, Biological and Environmental Sciences (ICCBES), International Conference on Social Science and Management (ICSSAM) and International Symposium on Education, Psychology and Society (ISEPST) in Osaka, Japan, which promotes exchanges of information, communications and collaborations among researchers worldwide.

We are living in the 21st century by succeeding cultural, economic, technological and scientific progress as a legacy for the prosperity of humanity in the present day. Although we have prospered and enjoyed the seed of advanced culture of current society, we still have serious and delicate unsolved problems in ecology, environment, energy resources, economy, and education system. We need active and constructive communications and collaborations in all expertise in order to resolve them and sustain our societies, environmental and ecological systems, energy resources, etc. The international conferences such as ICEAI, ICCBES, ICSSAM, and ISEPST would help mutual understandings and play more important and valuable roles in due course.

In addition to researchers' mutual communications, we would like to welcome all of you to the above conferences and hope that every participant and accompanying family member will enjoy cultural explorations in Osaka, Kyoto, and Nara. Thank you.

International Committees of Natural Sciences

Abhishek Shukla	R.D. Engineering College Technical Campus	India
Ahmad Salihin Bin Samsudin	Universiti Malaysia Pahang	Malaysia
Ahmad Zahedi	James Cook University	Australia
Akshaya Kumar Rout	KIIT University	India
Alexander M. Korsunsky	Trinity College, Oxford	UK
Almacen	Philippine Association of Maritime Training Centers	Philippines
Amel L. Magallanes	Capiz State University	Philippines
Amimul Ahsan	Universiti Putra Malaysia	Malaysia
Amran Bin Ahmed	University Malaysia Perlis	Malaysia
Anthony D. Johnson	Seoul National University of Science & Technology	UK
Ashley Love	A.T. Still University	USA
Asif Mahmood	King Saud University, Riyadh	Saudi Arabia
Asmida Ismail	University Technology Mara	Malaysia
Baolin Wang	University of Western Sydney	
Chang Ping-Chuan	Kun Shan University	Taiwan
Chee Fah Wong	Universiti Pendidikan Sultan Idris	Malaysia
Chee-Ming Chan	Universiti Tun Hussein Onn Malaysia	Malaysia
Cheng-I Chen	National Central University	Taiwan
Cheng-Min Feng	National Chiao Tung University	Taiwan
Cheuk-Ming Mak	The Hong Kong Polytechnic University	Hong Kong
Chia-Ray Lin	Academia Sinica	Taiwan
Chih-Wei Chiu	National Taiwan University of Science and Technology	Taiwan
Chi-Ming Lai	National Cheng-Kung University	Taiwan
Ching-An Peng	University of Idaho	USA
Chin-Tung Cheng	National Kaohsiung University of Science and Technology	Taiwan
Christoph Lindenberger	Friedrich-Alexander University	Germany
Daniel W. M. Chan	The Hong Kong Polytechnic University	Hong Kong
Din Yuen Chan	National Chiayi University	Taiwan
Don Liu	Louisiana University	USA
Edward J. Smaglik	Northern Arizona University	USA
Farhad Memarzadeh	National Institutes of Health	USA
Fatchiyah M.Kes.	Universitas Brawijaya	Indonesia
Gwo-Jiun Horng	Southern Taiwan University of Science and Technology	Taiwan
Hairul Azman Roslan	Universiti Malaysia Sarawak	
Hamed M El-Shora	Mansoura University	Egypt
Hanmin Jung	Convergence Technology Research Planning	South Korea

Hasmawi Bin Khalid	University Teknologi Mara	Malaysia
Hedayat Omidvar	National Iranian Gas Company (NIGC)	Iran
Hikyoo Koh	Lamar University	USA
Hiroshi Uechi	Osaka Gakuin University	Japan
Hsien Hua Lee	National Sun Yat-Sen University	Taiwan
Hung-Yuan Chung	National Central University	Taiwan
Hyoungseop Kim	Kyushu Insititute of Techonogy	Japan
Ivica Veza	University of Split	Croatia
Jeril Kuriakose	Manipal University	India
Jieh-Shian Young	National Changhua University of Education	Taiwan
Jivika Govil	Zion Bancorporation	India
Kazuaki Maeda	Chubu Univeristy	Japan
TaeSoo Kim	Hanbat National University	South Korea
Kuang-Hui Peng	National Taipei University of Technology	Taiwan
Kun-Li Wen	Chienkuo Technology University	Taiwan
Lai Mun Kou	SEGi University	Malaysia
M. Chandra Sekhar	National Institute of Technology	India
Mahadev Sakri	College of Engineering and Technology	India
Michael Pillay	Vaal University of Technology	South Africa
Michiko Miyamoto	Akita Prefectural University	Japan
Milan Dordevic	College of Engineering and Technology	Kuwait
Norizzah Abd Rashid	Universiti Teknologi MARA	Malaysia
Onder Turan	Anadolu University	Turkey
Osman Adiguzel	Firat University	Turkey
P. Sivaprakash	A.S.L. Pauls College of Engineering & Technology	India
P.Sanjeevikumar	University of Bologna	India
Panayotis S. Tremante M.	Universidad Central de Venezuela	Venezuela
Patrick S.K. Chua	Singapore Institute of Technology	Singapore
Pei-Jeng Kuo	National Chengchi University	Taiwan
Phongsak Phakamach	North Eastern University	Thailand
Rainer Buchholz	Friedrich-Alexander University	Germany
Rajeev Kaula	Missouri State University	USA
Ransinchung R.N.	Indian Institute of Technology	India
Roslan Zainal Abidin	Infrastructure University Kuala Lumpur	Malaysia
S. Ahmed John	Jamal Mohamed College	India
Saji Baby	Kuwait University	Kuwait
Seok Kim	Pusan National University	South Korea
Seong Min Kim	Chonbuk National University	South Korea

Sergei Gorlatch	University of Muenster	Germany
Shen-Long Tsai	National Taiwan University of Science and Technology	Taiwan
Sittisak Uparivong	Khon Kaen University	Thailand
Sudhir C.V.	Caledonian College of Engineering	Oman
Suresh. B. Gholse.	Rtm Nagpur University	India
Tan Lit Ken	Universiti Teknologi Malaysia	Malaysia
Teerapot Wessapan	Eastern Asia University	Thailand
The Nan Chang	Tatung University	Taiwan
Thippayarat Chahomchuen	Kasetsart University	Thailand
Vivian Louis Forbes	Wuhan University	China
Wei Gao	IXIA Inc.	USA
Wen-Hua Tarng	National Tsing Hua University	Taiwan
William L. Baker	Indiana State University	USA
Wong Hai Ming	The University of Hong Kong	Hong Kong
Wong Tsun Tat	The Hong Kong Polytechnic University	Hong Kong
Yasuhiko Koike	Tokyo University of Agriculture	Japan
Yee-Wen Yen	National Taiwan University of Science and Technology	Taiwan

International Committees of Social Sciences

Adeeb Jarrah	United Arab Emirates University	UAE
Ahrar Husain	Jamia Millia Islamia	Indian
Alex Yao Tang	National Cheng Kung University	Taiwan
Amol Gore		Thailand
Ashish Pareek	Maharshi Dayanand Saraswati University, Ajmer	India
Atefeh Ferdosipour	Azad University	Iran
Azidah Abu Ziden	Universiti Sains Malaysia	Malaysia
Azilawati	Nanyang Technological University	Singapore
Aziz Bin Ahmsd	University Malaysia Terengganu	Malaysia
B. Suresh Lal	Kakatiya University	India
Badar Alam Iqbal	Aligarh Muslim University	India
Bayram Akarsu	Erciyes University	Turkey
Bor-Tyng Wang	Feng Chia University	Taiwan
Brian Hunt	Mahidol University	Thailand
Cathine G. Scott	Morris College in Sumter	USA
Chen-Yi Lin	National Taichung University of Science and Technology	Taiwan
Chia-Hwan Chen	National Taipei University of Education	Taiwan
Chia-Ming Chang	National Chia-Yi University	Taiwan
Chib	Datta Meghe Institute of Management Studies	India
Chih-Wei Peng	Taipei Medical University and Hospital	Taiwan
Ching-Yi Tien	I-Shou University	Taiwan
Chi-Ying Chen	Asia University	Taiwan
Concepcion C. Libuit	City University of Pasay	Philippines
Darshan kaur Narang	University of Rajasthan, Jaipur	India
David Yoon	Universitaire Léonard de Vinci	France
Dharam Vir Mahajan	CCS university, Meerut	India
Donald L. Amoroso	Auburn University at Montgomery	USA
Donghun Lee	Sungkyunkwan University	South Korea
Eddy K.W. Li	The Chinese University of Hong Kong	Hong Kong
Edward Hwang	Chung Hua University	Taiwan
Eric Santos Parilla	University of Asia and the Pacific	Philippines
Frank S.C. Tseng	National Kaohsiung First University of Science and Technology	Taiwan
Funda Varnaci Uzun	Aksaray University	Turkey
Gajendra Singh	Satyawati College, University of Delhi	India
Hamzeh Dodeen	United Arab Emirates University	UAE
Intan Soliha Binti Ibrahim	Universiti Malaysia Sabah	Malaysia

Irene Guatno Toribio	Philippine Christian University	Philippines
Jalil Safaei	University of Northern British Columbia	Canada
Jamie Halsall	University of Huddersfield	UK
Jeffrey Trambley	Musashino Gakuin University	Japan
Jian-Horng Chen	Chung Shan Medical University	Taiwan
John Christian S. Jardin	Palawan State University	Philippines
John Erinorio Perez	University of the Philippines Los Baños	Philippines
Jonas Chao-Pen Yu	Takming University of Science and Technology	Taiwan
Joseph Lau	The University of Hong Kong	Hong Kong
Joyce Zhou	Emporia State University	USA
Junaid M. Shaikh	Curtin University Sarawak Malaysia	Malaysia
Kaedsiri Jaroenwisan	Silpakorn Univesity	Thailand
Kanokphon Chantanarungpak	Srinakharinwirot University	Thailand
Karen Miranda Fernandez	Imus Institute	Philippines
Karendra Devroop	University of South Africa	South Africa
Kyung Hee Kim	Mokpo National University	South Korea
Kim Sangho	Ritsumeikan Asia Pacific University	Japan
Deok Man Kim	Baekseok University	South Korea
Krishna Govender	AAA School of Advertising	South Africa
Hsiao-Tseng Lin	Meiho University	Taiwan
Linda Oshita	University of Hawaii	USA
Margaret Sanapo	Ritsumeikan University	Japan
Maria Cristina M. De los Santos	Kyungdong University-Global Campus	South Korea
Marie Paz E. Morales	Philippine Normal University	Philippines
Mehryar Nooriafshar	University of Southern Queensland	Australia
Michael Kao	Chang Gung University	Taiwan
Micheal Kon	Aletheia University	Taiwan
Michelle M. Mukherjee	Queensland University of Technology	Australia
Mindy Suzanne Andino	Bloomsburg University	USA
Ming-Chang Chih	National Chung Hsing University	Taiwan
Mingchu Luo	Emporia State University	USA
Mohamad Hafis Amat Simin	University Sultan Zainal Abdin	Malaysia
Mohamed Ahmed El Khouli	Sadat Academy for Management Science	Egypt
Mohamed Hammad Hendy	Beni-Suef University	Egypt
N. S. Ravishankar	Axis Bank	India

Nadir Memmedli		Azerbaijan
Naim Uzun	Aksaray University	Turkey
Nezaket Memmedli	Azerbaijan National Academy of Sciences	Azerbaijan
Ng Woon Lam	Nanyang Technological University	Singapore
Nukshi Esther Imsong	Institution of Psychology Counselling and Educational Research	India
Obydullah Al Marjuk	Independent University, Bangladesh	Bangladesh
Ozgul Keles	Aksaray University	Turkey
Prasong Tanpichai	Kasetsart University	Thailand
Ramayah Thurasamy	Universiti Sains Malaysia	Malaysia
Reem Abed Almotaleb Abuiyada	Dhofar University	Palestine
Ricky Ng	Vocational Training Council	Hong Kong
Ronald Griffin	Florida Agricultural & Mechanical University	USA
Rotaru Ioan-Gheorghe	Timotheus Brethren Theological Insittute of Bucharest	Romania
Ruby Ann L. Ayo	Bicol University	Philippines
Sadiq Abdulwahed Ahmed Ismail	United Arab Emirates University	UAE
Sally dhruva' Stephenson	Frosterburg State University	USA
Shaik. Feroz	Caledonian College of Engineering	Oman
Shiv Prasad	Maharshi Dayanand Saraswati University	India
Shujen Lee	Asia University	Taiwan
Shun-Hsing Chen	Oriental Institute of Technology	Taiwan
Soon SONG	Wonkwang University	South Korea
Stacey Jocoy	Texas Tech University	USA
Sunil Kumar	Alliance University	India
T.S.Devaraja	University of Mysore, Hemangothri Campus	India
Tan Khay Boon	SIM Global Education	Singapore
Theeraphab Phetmalaikul	Srinakharinwirot University	Thailand
Vijayaletchumy Subramaniam	Universitas Putra Malaysia	Malaysia
Wang Yu-Shan	National Kaohsiung First University of Science and Technology	Taiwan
Wei-Cheng Mau	Wichita State University	USA
Yong-Ho Kim	Pukyong National University	South Korea
Yong-Taek Rhim	Namseoul University	South Korea

Special Thanks to Session Chairs

Hiroshi Uechi	<i>Osaka Gakuin University</i>
Yoshiro Miyata	<i>Chukyo University</i>
Simona Vasilache	<i>University of Tsukuba</i>
In-Soung, Chang	<i>Hoseo University</i>
Donald Louis Amoroso	<i>Auburn University Montgomery</i>
Vitaly Brazhkin	<i>Western Illinois University</i>
Christine Lovelle A. Mahinay	<i>Mindanao State University - Iligan Institute of Technology</i>
Suchanphin Suwanaphan	<i>Chiang Mai University</i>
I-Shian Ivan Suen	<i>Virginia Commonwealth University</i>
Myungryun Yoo	<i>Tokyo City University</i>
Wei-Ping Huang	<i>National Changhua University of Education</i>
Yan Yan Chan	<i>The University of Hong Kong</i>
Nantachai Kantanantha	<i>Kasetsart University</i>
Ka Hou Chu	<i>The Chinese University of Hong Kong</i>
Lourdes M. Ferrer	<i>University of Guam</i>
Yung-Chih Kuo	<i>National Chung Cheng University</i>
Cesario Jr Bacosa	<i>Western Philippines University</i>
Yi-Chen Hsu	<i>National Taipei University of Education</i>

Industrial Engineering (2) /Electrical Engineering (1)

Thursday, May 09, 2019

10:45-12:15

Room B, 2F

Session Chair: *Prof. Nantachai Kantanantha*

ICEAI-0244

Chemical Inventory Management Improvement

Nantachai Kantanantha | *Kasetsart University*

Nichakul Chaonam | *Kasetsart University*

ICEAI-0189

Development of Multivariate Control Chart Using Spatial Signs and Ranks for Monitoring Process Mean: A Case of Gamma Distribution

Thidathip Haanchumpol | *Kasetsart University*

Prapai Sri Sudasna-na-Ayudhya | *Kasetsart University*

Chansiri Singhtaun | *Kasetsart University*

ICEAI-0229

A Casting Process for Fabricating Natural Rubber Soft Robotics

Preedee Pinradup | *Rajamangala University of Technology Thanyaburi*

Waratsara Chauymee | *Rajamangala University of Technology Thanyaburi*

Warunee Ariyawiriyanan | *Rajamangala University of Technology Thanyaburi*

ICEAI-0214

Development of a Disk-Type High-Order Circumferential Ridge-Wave Ultrasonic Motor

Tai-Ho Yu | *National United University*

Tung-Che Lu | *National United University*

ICEAI-0217

A Blood Oxygen Sensor with Adaptive Current Scaling for Pulse Oximeter

Xiaoqin Wang | *Chongqing University*

Zhou Shu | *Chongqing University*

Fang Tang | *Chongqing University*

Wenting Zhang | *Chongqing University*

ICEAI-0229

A Casting Process for Fabricating Natural Rubber Soft Robotics

Preedee Pinradup, Waratsara Chauyee, Warunee Ariyawiriyanan*

Department of Materials and Metallurgical Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala

University of Technology Thanyaburi, Thailand

* E-mail: Warunee.a@en.rmut.ac.th

Abstract

The trend of soft robotics has stimulated the interest of engineers and researchers around the world to investigate various applications. One of the major lessons learned from these soft-robotics is the casting process for creating soft robotic parts with internal channels. This study aims to improve the casting process in order to simplify fabrication of soft-robotics using outer molds and the releasing internal core. The internal core was created using 3D printed method (FDM types) by polycarbonate (PC) or acrylonitrile-butadiene-styrene (ABS). This study was mainly focused on materials and process design that compatible with the curing process of natural rubber latex.

Keywords: soft-robotics, natural rubber, process of soft-robotics

1. Objectives and Goals

Soft-robotics refers to robots that are built from flexible materials such as silicone rubber. Various approaches have been explored for fabricating soft robotics: lamination-based casting, retractable-pin-based casting, lost-wax-casting and rotational casting. These methods are useful for creating channels or bulb morphologies which can then be actuated by applying pressure to the fluid entrapped within these channels. In general, the casting process for creating soft robotic parts with internal channels requires multiple steps. In the process introduced here, the fabrication process has been simplified. First, internal bulbs which maintain pressure are filled with a rigid core and added to the mold. After, natural rubber is poured to the mold to encapsulate the core. After fabrication, the internal core is removed, while the bulb structure remains. We envision this process can increase efficiency in industrial applications because the process is simple and only requires two steps.

2. Methods

2.1. Materials

High Ammonia Natural rubber (HANR) latex, zinc oxide (ZnO), oil, benzothiazyl disulfide (MBTS), diphenyl guanidine (DPG), antioxidant, Wingstay L, Terric acid, sulfur. 3D printed materials filament polycarbonate (PC), acrylonitrile-butadiene-styrene (ABS).

2.2. Preparation of Natural Rubber Compounding (NR)

The rubber latex was prepared by compounding of rubber with additives according to formulations shown in table 1.

Table 1. Formulation of rubber compound latex

Component ^o	Content (phr) ^o
HANR ^o	100 ^o
KOH ^o	0.2 ^o
Terric acid ^o	0.2 ^o
Sulfur ^o	0.8 ^o
ZDEC ^o	0.4 ^o
ZMBT ^o	0.4 ^o
Wingstay L ^o	1 ^o
ZnO ^o	1 ^o
DPG ^o	0.5 ^o

2.3. Preparation of Outer Molds and Internal Core.

Outer molds and internal core was created using 3D print method (Wanhao duplicator 6: FDM types) by polycarbonate (PC) or acrylonitrile-butadiene-styrene (ABS). Design was show in Fig.1

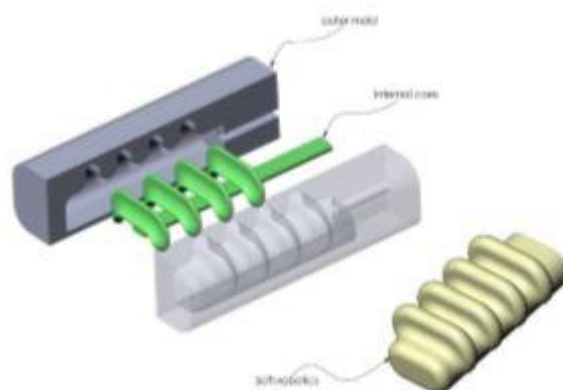


Fig 1: Design of Soft-robotics outer molds and internal core

2.4. Thermal Analysis

Differential scanning calorimetry (DSC) was carried out to study the phase behavior of

3D-printed materials (ABS and PC). Typically, a heat/cool/reheat profile is used. The samples were scanned in the -10°C to 110°C domain under a nitrogen atmosphere, with 10°C/min cooling/heating rate (NETZSCH DSC 214).

3. Results

Molds created in this study are divided into two parts: outer molds and the internal core. The first step is designing both molds. Each component requires specific geometry and design. The internal core mold component is used to form the channels which provide volume for actuation. A section connecting the bulbs with a volume making up 10% of the channel, which is required for releasing the rigid molding structure. The outer molds are designed to control the exterior nominal shape of the actuator. Metal was used to create the outer molds. The internal core was created using 3D printed method (FDM types) by using materials from polycarbonate (PC) or acrylonitrile-butadiene-styrene (ABS) because these plastics are compatible with the curing process of natural rubber. DSC thermograms of 3D-printed materials (ABS and PC) were performed in the temperature range of -10°C to 110°C due to HANR latex curing temperature (70°C to 100°C). Fig 2. was indicated that, no thermal effect occurred in the temperature range used for measurement for both ABS (Fig 2a) and PC (Fig 2b). The glass transition temperatures of ABS and PC are 105°C and 145°C, respectively. Therefore, the casting process of HANR latex can be achieved by using ABS and PC as an internal core and outer mold. In preparation for the natural rubber casting step, natural rubber latex was mixed, incubated for 12 hours, then poured to form the molds and allowed to cure by exposed to heat at 90° C for 3 hours. After cured, the sections connecting the internal core was fractured and pulled to leave the soft robotic actuator. The experimental characterization was carried out by means of controlled volumetric displacements and measuring the internal pressure. The neutral axis bending angle was measured using a constant curvature assumption.

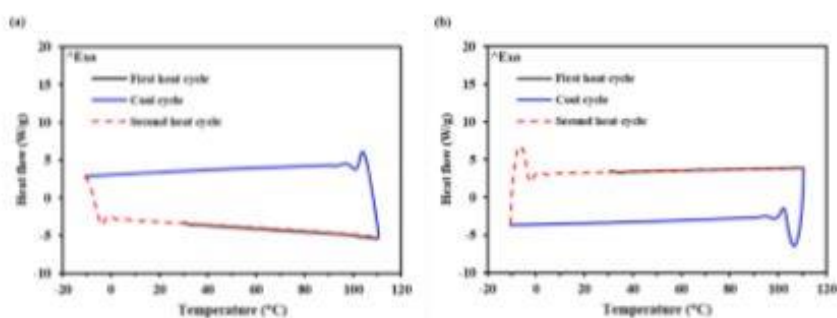


Fig 2: DSC thermograms of ABS (a) and PC (b).

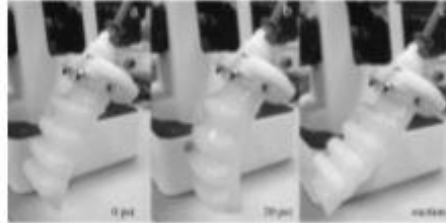


Fig 3: Bending behavior of a soft robotic actuator: (a) Before pressure was applied; internal pressure = 0 psi; (b) when internal pressure = 20 psi was applied; (c) during suction of the internal pressure = 2 psi (20 kPa)

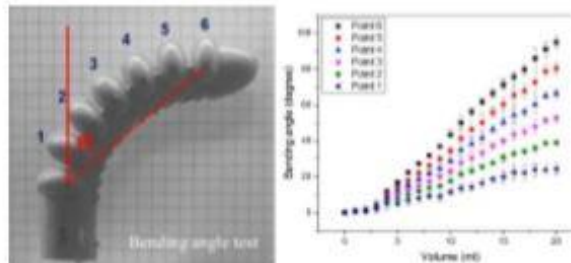


Fig 4: Bending angle test by using volume of air from a syringe when increasing the number of channels

4. Conclusion

In this work, the flexure behavior of a soft robotics actuator was tested. Fig 4. by measuring the bending angle as a function of internal pressure. The developed actuators can bend up to 90 degrees when supplied with an air volume of 40 ml. The fabrication method requires only two steps during the casting process of the natural rubber soft robotic actuator; pour the natural rubber into the mold with a solid core, then after curing remove the core. This process is also applicable towards industrial fabrication due to its simplicity and reduction in total processing steps.

5. Acknowledgments

The authors are grateful to Department of Materials and Metallurgical Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Thanyaburi for financial support this research project.

6. References

Kim, S., Laschi, C., & Trimmer, B. (2013). Soft robotics: a bioinspired evolution in robotics. *Trends in Biotechnology*, 31, 287-294.

- Shahid, T., Gouwanda, D., Nurzaman S. G., & Gopalai, A. A. (2018). Moving toward Soft Robotics: A Decade Review of the Design of Hand Exoskeletons. *Biomimetics*, 3, 17.
- Li, J., Godaba, H., Zhang, Z. Q., Foo, C. C., & Zhu, J. (2018). A soft active origami robot. *Extreme Mechanics Letters*, 24, 30-37.
- Zolfaghariana, A., Kouzania, A. Z., Khooa, S., Moghadamb, A. A. A., Gibsona, I., & Kaynaka, A. (2016). Evolution of 3D printed soft actuators. *Sensors and Actuators A: Physical*, 250, 258-272.
- Elgeneidy, K., Lohse, N., & Jackson, M. (2018). Bending angle prediction and control of soft pneumatic actuators with embedded flex sensors – A data-driven approach. *Mechatronics*, 50, 234-247.
- Manna, M., Morales, J., & Frohn, P. (2018). Additive manufacturing of silicon based PneuNets as soft robotic actuators. *Procedia CIRP*, 72, 328-333.
- Klinklai, W., Saito, T., Kawahara, S., Tashiro, K., Suzuki, Y., Sakdapipanich, J. T., & Isono, Y. (2004). Hyper deproteinized natural rubber prepared with urea. *Journal of Applied Polymer Science*, 93, 555-559.
- Ariyawiriyanan, W., Nuiuu, J., Sae-heng, K., & Kawahara, S. (2013). The Mechanical Properties of Vulcanized Deproteinized Natural Rubber. *Energy Procedia*, 34, 728-733.
- Upadhyay, M., Sivarupan, T., & El Mansori, M. 3D printing for rapid sand casting—A review. *Journal of Manufacturing Processes*, 29, 211-220.



CERTIFICATE OF ATTENDANCE **-[PCI-7]_n**

This is to certify that

Sirichon Buaboon

has presented the paper (poster) titled

*Analysis on Epoxidation Reaction of Deprotonized Natural Rubber
using Latex-state NMR spectroscopy
at the*

The International Polymer Conference of Thailand (PCI-7)

June 1st - 2nd, 2017

Amari Watergate Hotel, Bangkok, Thailand

Pranee Phinyocheep

*Associate Professor Pranee Phinyocheep
Chairperson*

T. Amornsakchai

*Associate Professor Taweechai Amornsakchai
Scientific Committee Chair*

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล นายปรีดี ปิ่นประดับ
วัน เดือน ปีเกิด 10 ธันวาคม 2530
ที่อยู่ 129/129 หมู่ที่ 2 ตำบลพิมลราช อำเภอบางบัวทอง
จังหวัดนนทบุรี 11110
การศึกษา ปริญญาตรี คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
ประสบการณ์การทำงาน วิศวกร ประจำห้องปฏิบัติการระบบอุปกรณ์นำโน
ศูนย์นาโนเทคโนโลยีแห่งชาติ
สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.)
พ.ศ. 2555 ถึงปัจจุบัน
เบอร์โทรศัพท์ 08-9036-3435
อีเมล preedee_p@mail.rmutt.ac.th

