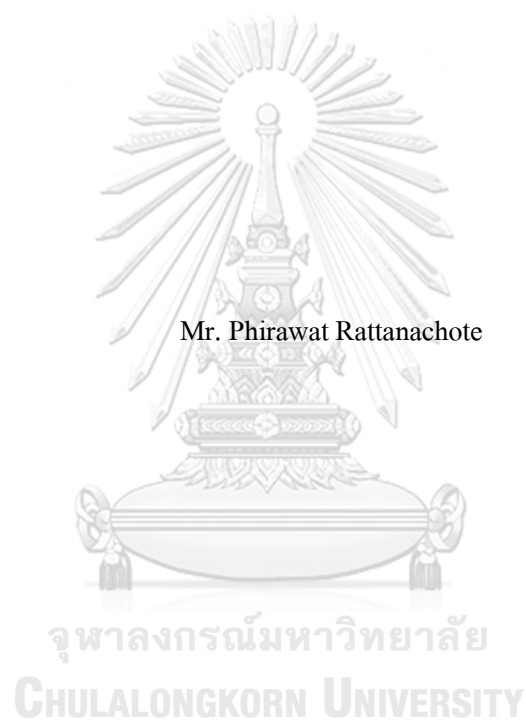


การออกแบบและพัฒนาอุปกรณ์หยิบจับสำหรับผลิตภัณฑ์ยางแปรรูป



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิทยาศาสตร์เพื่ออุตสาหกรรม ไม่สังกัดภาควิชา/เทียบเท่า  
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
ปีการศึกษา 2564  
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

DESIGN AND DEVELOPMENT OF GRIPPERS FOR GRASPING RUBBER PRODUCTS



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Science in Science for Industry

Common Course

FACULTY OF SCIENCE

Chulalongkorn University

Academic Year 2021

Copyright of Chulalongkorn University

|                                 |   |
|---------------------------------|---|
| หัวข้อวิทยานิพนธ์               | การออกแบบและพัฒนาอุปกรณ์หยิบจับสำหรับผลิตภัณฑ์<br>ยางแปรรูป |
| โดย                             | นายพีรวัส รัตนโชติ  |
| สาขาวิชา                        | วิทยาศาสตร์เพื่ออุตสาหกรรม                                  |
| อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก | รองศาสตราจารย์ ดร.ต้นพงศ์ แก้วคงคา                          |
| อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม | ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พงษ์ศักดิ์ นิ่มคำ                     |

---

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยเป็นส่วนหนึ่ง  
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

|   |                                 |
|---|---------------------------------|
| .....                                     | คณบดีคณะวิทยาศาสตร์             |
| (ศาสตราจารย์ ดร.พลกฤษณ์ แสงวณิช)          |                                 |
| คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์                  | ประธานกรรมการ                   |
| .....                                     |                                 |
| (รองศาสตราจารย์ ดร.จิราวัฒน์ อนันตกุล)    |                                 |
| .....                                     | อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก |
| (รองศาสตราจารย์ ดร.ต้นพงศ์ แก้วคงคา)      |                                 |
| .....                                     | อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม |
| (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พงษ์ศักดิ์ นิ่มคำ) |                                 |
| .....                                     | กรรมการ                         |
| (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุกฤษณ์ ตุงคะสมิต) |                                 |
| .....                                     | กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย        |
| (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อนุสรณ์ ศรีสุวรรณ) |                                 |

พิรวัสส์ รัตนโชติ : การออกแบบและพัฒนาอุปกรณ์หยิบจับสำหรับผลิตภัณฑ์ยางแปรรูป. ( DESIGN AND DEVELOPMENT OF GRIPPERS FOR GRASPING RUBBER PRODUCTS) อ.ที่ปรึกษาหลัก : รศ. ดร.ต้นพงศ์ แก้วคงคา, อ.ที่ปรึกษาร่วม : ผศ. ดร. พงษ์ศักดิ์ นิ่มคำ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เสนอแนวทางการเลือกใช้และพัฒนาอุปกรณ์หยิบจับ (Gripper) สำหรับผลิตภัณฑ์ยางแปรรูปให้เหมาะสมกับรูปร่าง ขนาด และคุณสมบัติทางกลของยางแปรรูป ซึ่งอุปกรณ์หยิบจับนี้ถูกนำมาใช้เพื่อนำผลิตภัณฑ์ยางที่ผ่านกระบวนการขึ้นรูปขึ้นงานด้วยแม่พิมพ์โดยการให้ความร้อนออกจากแม่พิมพ์ออกจากแม่พิมพ์โลหะ ซึ่งจำเป็นที่ต้องทราบถึงแรงที่ใช้ดึงงานออกจากแม่พิมพ์โดยแรงนี้ถูกเรียกว่า Demolding force และโดยปกติแรงนี้จะประกอบไปด้วยแรงเสียดทาน (Friction Force) และแรงยึดติด (Adhesion force) ดังนั้นวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงมุ่งเน้นไปที่ปัจจัยที่ส่งผลต่อ Demolding force ได้แก่ รูปทรง พื้นที่สัมผัส ความแข็งแรงของยาง และความหยาบผิวของแม่พิมพ์ โดยได้มีการออกแบบการทดลองโดยใช้ Full factorial design และใช้การวิเคราะห์ถดถอยพหุคูณ (Multiple regression analysis) เพื่อใช้ในการพยากรณ์ นอกจากนี้ยังได้พัฒนาซอฟต์แวร์มาเพื่อนำการออกแบบและพัฒนาอุปกรณ์หยิบจับ และสุดท้ายได้มีการพัฒนาอุปกรณ์หยิบจับตัวต้นเพื่อทดสอบประสิทธิภาพของซอฟต์แวร์นี้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

|            |                            |                                  |
|------------|----------------------------|----------------------------------|
| สาขาวิชา   | วิทยาศาสตร์เพื่ออุตสาหกรรม | ลายมือชื่อนิติกร .....           |
| ปีการศึกษา | 2564                       | ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก ..... |
|            |                            | ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาร่วม ..... |

## 6370208823 : MAJOR SCIENCE FOR INDUSTRY

KEYWORD: Gripper, Full factorial design of experiment, Multiple regression, Demolding force, Rubber

Phirawat Rattanachote : DESIGN AND DEVELOPMENT OF GRIPPERS FOR GRASPING RUBBER PRODUCTS. Advisor: Assoc. Prof. TONPHONG KAEWKONGKA, Ph.D. Co-advisor: Asst. Prof. Pongsak Nimdum, Dr.

This thesis presents a guideline for the selection and development of gripper equipment for processed rubber products to suit the shape, size, and mechanical properties of processed rubber. This gripping device is used to remove rubber products from the heated metal mold. It is necessary to know the force which is used to remove the products from the mold. This force is called the demolding force. Usually, the demolding force is comprised of the friction force and the adhesion force. Therefore, this thesis focuses on factors that affect demolding force (shape, contact area, rubber hardness, and surface roughness of the mold). The experiments were designed by using a full factorial design and using multiple regression analysis for forecasting. Moreover, software development comes to guide the design and development of grippers. Finally, the prototype grippers were developed to test the effectiveness of this software.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

Field of Study: Science for Industry

Academic Year: 2021

Student's Signature .....

Advisor's Signature .....

Co-advisor's Signature .....

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของโครงการแพลตฟอร์มการศึกษาครบวงจรเพื่อการพัฒนา นักศึกษาปริญญาโท และการวิจัยพัฒนานวัตกรรมของภาคอุตสาหกรรม (Triple helix master degree integrated platform for research, development and innovation in industry) ซึ่งได้รับ การสนับสนุนงบประมาณจากหน่วย บริหารและจัดการทุน - หน่วยบริหารและจัดการทุนด้านการพัฒนา กำลังคน และทุนด้านการพัฒนา สถาบันอุดมศึกษา การวิจัยและการสร้างนวัตกรรม (บพค.) สำนักงานสภานโยบายการอุดมศึกษา วิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรมแห่งชาติ (สอวช.) นอกจากนี้ ข้าพเจ้าขอขอบคุณความช่วยเหลือและการให้คำปรึกษาจาก รศ.ดร.ต้นพงศ์ แก้วคงคา ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาหลัก และ ผศ.ดร. พงษ์ศักดิ์ นิมดำ ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาร่วม สุดท้ายขอขอบคุณบริษัท ไทยรับเทค จำกัด ที่ให้การสนับสนุนงานวิจัยนี้

พีรวัส รัตนโชติ



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

## สารบัญ

|   | หน้า |
|---|------|
| .....   | ก    |
| บทคัดย่อภาษาไทย .....                                   | ก    |
| .....   | ง    |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .....                                | ง    |
| กิตติกรรมประกาศ.....                                    | จ    |
| สารบัญ .....  | ฉ    |
| สารบัญตาราง .....                                       | ฉ    |
| สารบัญภาพ .....   | ญ    |
| บทนำ.....   | 1    |
| ที่มาและความสำคัญ .....                                 | 1    |
| วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์ .....                        | 2    |
| ขอบเขตของวิทยานิพนธ์ .....                              | 2    |
| ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....                          | 3    |
| ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....                      | 4    |
| บทนำ.....   | 4    |
| 2.1 กระบวนการผสมยาง (Rubber mixing) .....               | 4    |
| 2.1.1 เครื่องผสมยางแบบต่อเนื่อง (Continuous mixer)..... | 4    |
| 2.1.2 เครื่องผสมยางแบบไม่ต่อเนื่อง (Batch mixer).....   | 5    |
| 2.1.2.1 ระบบเปิด.....                                   | 5    |
| 2.1.2.2 ระบบปิด.....                                    | 6    |
| 2.2 กระบวนการเตรียมยาง (Rubber preform) .....           | 7    |

|   |    |
|---|----|
| 2.2.1 Ribbon rubber cutting .....   | 7  |
| 2.2.2 Rubber cutting.....   | 8  |
| 2.2.3 Rubber performer .....  | 9  |
| 2.3 กระบวนการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ยาง (Rubber manufacturing).....                      | 9  |
| 2.3.1 การขึ้นรูปโดยใช้แม่พิมพ์ (Moulding) .....                                   | 10 |
| 2.3.1.1 การขึ้นรูปด้วยการอัด (Compression moulding).....                          | 10 |
| 2.3.1.2 การขึ้นรูปด้วยการอัดส่ง (Transfer moulding).....                          | 10 |
| 2.3.1.3 การขึ้นรูปด้วยการฉีด (Injection moulding) .....                           | 11 |
| 2.3.2 การขึ้นรูปโดยอัดผ่านหัวตาย (Extrusion).....                                 | 12 |
| 2.3.3 การขึ้นรูปโดยเครื่องคาลเอนเดอร์ (Calendering).....                          | 12 |
| 2.4 การนำยางแปรรูปออกจากแม่พิมพ์และการบรรจุภัณฑ์ (Rubber Demolding and Packaging) |    |
| .....   | 13 |
| 2.4.1 การนำชิ้นงานออกโดยใช้แรงคน.....   | 13 |
| 2.4.2 การนำชิ้นงานออกโดยเครื่องจักร .....   | 15 |
| 2.5 การออกแบบแม่พิมพ์ยาง (Rubber mold design).....                                | 15 |
| 2.6 ทฤษฎี.....  | 16 |
| 2.6.1 แรงที่ใช้ นำยางแปรรูปออกจากแม่พิมพ์ (Demolding force).....                  | 16 |
| 2.6.2 การออกแบบการทดลอง (Design of experiment: DOE).....                          | 19 |
| 2.6.3 การวิเคราะห์ถดถอย (Regression analysis) .....                               | 21 |
| 2.6.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....  | 27 |
| วิธีการดำเนินงานวิจัย .....   | 29 |
| บทนำ.....   | 29 |
| 3.1 ระเบียบวิจัย.....   | 29 |
| 3.2 การออกแบบการทดลอง.....  | 30 |



|   |    |
|---|----|
| 3.3 การออกแบบและผลิตแม่พิมพ์.....   | 33 |
| 3.4 การออกแบบและผลิตชุดทดลอง.....   | 34 |
| 3.5 การทดลองแรง Demolding force .....   | 36 |
| 3.5.1 ผลการทดลองแรง Demolding force .....   | 37 |
| 3.6 การออกแบบและพัฒนาซอฟต์แวร์แนะนำการออกแบบและพัฒนาอุปกรณ์หีบจับเบื้องต้น<br>..... | 40 |
| 3.6.3 ผลลัพธ์จากการวิเคราะห์การถดถอยพหุคูณ (Multiple Regression Analysis) .....     | 49 |
| 3.7 การพัฒนาอุปกรณ์หีบจับต้นแบบ.....  | 49 |
| สรุปผลและข้อเสนอแนะ.....  | 55 |
| 4.1 สรุปผล.....   | 55 |
| 4.2 ข้อเสนอแนะ .....  | 57 |
| ภาคผนวก .....   | 58 |
| บรรณานุกรม.....   | 60 |
| ประวัติผู้เขียน .....   | 63 |

## สารบัญตาราง

|   | หน้า |
|---|------|
| ตารางที่ 1 ตารางเปรียบเทียบข้อดีข้อเสียของแบบฟูลแฟคทอเรียล .....  | 20   |
| ตารางที่ 2 ตารางการออกแบบการทดลองแบบ Full factorial design (พื้นที่สัมผัส, ความแข็ง ,<br>รูปร่างของชิ้นงาน) ..... | 32   |
| ตารางที่ 3 ตารางการออกแบบการทดลองแบบ Full factorial design (ความหยาบผิว).....                                     | 32   |
| ตารางที่ 4 ตารางการออกแบบการทดลองแบบ Full factorial design (รูปทรงซับซ้อน).....                                   | 33   |
| ตารางที่ 5 ตารางปัจจัยที่ใช้ในการขึ้นรูปและนำชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์.....   | 37   |
| ตารางที่ 6 ตารางผลการทดสอบอุปกรณ์หยิบจับประเภทสุญญากาศ.....   | 51   |
| ตารางที่ 7 ตารางผลการทดสอบอุปกรณ์หยิบจับประเภทหนีบจับ.....  | 54   |
| ตารางที่ 8 Full Factorial Design Matrix สำหรับชิ้นงานทรงกระบอก.....   | 58   |
| ตารางที่ 9 Full Factorial Design Matrix สำหรับชิ้นงานทรงสี่เหลี่ยม .....  | 59   |

## สารบัญภาพ

|  | หน้า |
|--|------|
| ภาพที่ 1 เครื่องผสมยางแบบต่อเนื่อง (Continuous mixer).....   | 5    |
| ภาพที่ 2 เครื่องผสมยางแบบ 2 ลูกกลิ้ง (Two-roll Mill).....    | 6    |
| ภาพที่ 3 เครื่องผสมแบบนบุรี (Banbury internal mixer).....    | 6    |
| ภาพที่ 4 เครื่องนวดยางหรือคเนเดอร์ (Kneader) .....           | 7    |
| ภาพที่ 5 เครื่อง Ribbon rubber cutting (Kneader).....        | 8    |
| ภาพที่ 6 เครื่อง Rubber Cutting .....                        | 8    |
| ภาพที่ 7 เครื่อง Rubber preformer .....                      | 9    |
| ภาพที่ 8 การขึ้นรูปด้วยการอัด.....                           | 10   |
| ภาพที่ 9 การขึ้นรูปด้วยการอัดสัง.....                        | 11   |
| ภาพที่ 10 การขึ้นรูปด้วยการฉีด.....                          | 11   |
| ภาพที่ 11 การขึ้นรูปโดยอัดผ่านหัวดาย (Extrusion).....        | 12   |
| ภาพที่ 12 การขึ้นรูปโดยเครื่องคาลเ็นเดอร์ (Calendering)..... | 12   |
| ภาพที่ 13 การนำชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์ที่ละชิ้น.....           | 13   |
| ภาพที่ 14 การนำชิ้นงานประเภทผึงที่ออกจากแม่พิมพ์ .....       | 14   |
| ภาพที่ 15 การใช้อุปกรณ์ช่วยในการนำชิ้นงานจากแม่พิมพ์.....    | 14   |
| ภาพที่ 16 ระบบไครโรติกสำหรับดันชิ้นงานออกในแนวตั้ง.....      | 15   |
| ภาพที่ 17 แผนผังการออกแบบแม่พิมพ์.....                       | 16   |
| ภาพที่ 18 ภาพการนำวัสดุมาเคลื่อนที่บนยาง.....                | 18   |
| ภาพที่ 19 ภาพทฤษฎีของ JKR.....                               | 18   |
| ภาพที่ 20 ภาพจำลองแบบทั่วไปของระบบ .....                     | 19   |
| ภาพที่ 21 ภาพการเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์กำหนด .....        | 23   |

|   |    |
|---|----|
| ภาพที่ 22 ภาพการเลือกใช้งานอุปกรณ์หยิบจับ (Gripper) .....             | 24 |
| ภาพที่ 23 ภาพอุปกรณ์หยิบจับด้วยไฟฟ้า (Electric gripper).....          | 25 |
| ภาพที่ 24 ภาพอุปกรณ์หยิบจับด้วยลม (Pneumatic gripper).....            | 25 |
| ภาพที่ 25 ภาพอุปกรณ์หยิบจับด้วยน้ำมัน (Hydraulic gripper).....        | 25 |
| ภาพที่ 26 ภาพอุปกรณ์หยิบจับแบบสุญญากาศ (Vacuum gripper).....          | 26 |
| ภาพที่ 27 ภาพส่วนประกอบของผิวสัมผัส .....                             | 27 |
| ภาพที่ 28 แผนผังวิธีการดำเนินงานวิจัย.....                            | 30 |
| ภาพที่ 29 ภาพชิ้นงานทรงกระบอก .....                                   | 33 |
| ภาพที่ 30 ภาพชิ้นงานทรงสี่เหลี่ยม .....                               | 34 |
| ภาพที่ 31 ภาพชิ้นงานรูปทรงซับซ้อน .....                               | 34 |
| ภาพที่ 32 ภาพแม่พิมพ์สำหรับขึ้นรูปชิ้นงาน .....                       | 34 |
| ภาพที่ 33 ภาพชุดทดลอง .....   | 35 |
| ภาพที่ 34 ภาพการจำลองการรับน้ำหนักของชุดทดลอง .....                   | 35 |
| ภาพที่ 35 ภาพขั้นตอนการทดลอง.....                                     | 36 |
| ภาพที่ 36 ภาพการทดลองวัดแรงปลดชิ้นงาน (Demolding force).....          | 37 |
| ภาพที่ 37 ภาพแรงปลดชิ้นงานที่ความกว้างชิ้นงานมากขึ้น .....            | 38 |
| ภาพที่ 38 ภาพแรงปลดชิ้นงานของชิ้นงานทรงกระบอก .....                   | 38 |
| ภาพที่ 39 ภาพแรงปลดชิ้นงานของชิ้นงานทรงสี่เหลี่ยม.....                | 39 |
| ภาพที่ 40 ภาพตัวอย่างข้อมูลการทดลองความหยาบผิว.....                   | 39 |
| ภาพที่ 41 ภาพการนิกขาดที่เกิดจากการทดลองของชิ้นงานรูปทรงซับซ้อน ..... | 40 |
| ภาพที่ 42 ภาพแสดงการทำงานโดยรวมของซอฟต์แวร์ .....                     | 41 |
| ภาพที่ 43 ภาพแสดงหน้าต่างฟอร์มหลัก.....                               | 42 |
| ภาพที่ 44 ภาพแสดงหน้าต่างฟอร์มการป้อนลักษณะชิ้นงาน.....               | 42 |
| ภาพที่ 45 ภาพแสดงหน้าต่างฟอร์มคุณสมบัติทางกลของชิ้นงาน.....           | 43 |

|   |    |
|---|----|
| ภาพที่ 46 ภาพแสดงหน้าตาฟอร์มแม่พิมพ์ .....                                      | 43 |
| ภาพที่ 47 ภาพแสดงหน้าตาฟอร์มสรุปผล .....  | 44 |
| ภาพที่ 48 ภาพแสดงหน้าตาฟอร์มการออกแบบอุปกรณ์หีบจับ .....                        | 45 |
| ภาพที่ 49 ภาพแสดงหน้าตาฐานข้อมูล .....  | 45 |
| ภาพที่ 50 ภาพแสดงตัวอย่างหน้าตาไฟล์ Excel .....                                 | 46 |
| ภาพที่ 51 ภาพแสดงตัวอย่างการกระจายของค่าความคลาดเคลื่อน .....                   | 47 |
| ภาพที่ 52 ภาพแสดงตัวอย่างข้อมูลที่ใช้สำหรับการเรียนรู้ .....                    | 47 |
| ภาพที่ 53 ภาพแสดงตัวการนำเข้าข้อมูลตาราง .....                                  | 47 |
| ภาพที่ 54 ภาพตัวอย่างการแบ่งข้อมูลสำหรับเรียนรู้ของเครื่องและการทดสอบ .....     | 48 |
| ภาพที่ 55 ภาพตัวอย่างการเรียนรู้ชุดข้อมูลโดยใช้ฟังก์ชัน Linear Regression ..... | 48 |
| ภาพที่ 56 ภาพตัวอย่างการใช้ Regression model .....                              | 48 |
| ภาพที่ 57 ภาพอุปกรณ์หีบจับสุญญากาศต้นแบบ .....                                  | 50 |
| ภาพที่ 58 ภาพการทดลองอุปกรณ์หีบจับสุญญากาศต้นแบบ .....                          | 50 |
| ภาพที่ 59 ภาพการแนะนำอุปกรณ์ประเภทหีบจับ .....                                  | 52 |
| ภาพที่ 60 ภาพการออกแบบโครงสร้างอุปกรณ์ประเภทหีบจับ .....                        | 52 |
| ภาพที่ 61 ภาพการทดลองอุปกรณ์ประเภทหีบจับ .....                                  | 53 |
| ภาพที่ 62 ภาพการทดลองหาสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน .....                            | 53 |

# บทที่ 1

## บทนำ

### ที่มาและความสำคัญ

ในปัจจุบันประเทศไทยเป็นประเทศที่มีมูลค่าการส่งออกทั้งยางและผลิตภัณฑ์ที่ผลิตจากยางเป็นอันดับต้นๆของโลกซึ่งจะประกอบไปด้วยหลากหลายกลุ่มธุรกิจได้แก่ 1) กลุ่มธุรกิจยางแผ่นรมควัน 2) กลุ่มธุรกิจยางแท่ง 3) น้ำยางข้น 4) ยางคอมปาวด์และยางผสม โดยในงานวิจัยนี้จะเน้นไปที่กลุ่มธุรกิจยางคอมปาวด์และยางผสมซึ่งถูกทำนายว่าแนวโน้มที่จะมีปริมาณการส่งออกเติบโตปีละ 3.0 - 4.0% ต่อปี นอกจากนี้ยางคอมปาวด์หรือยางผสมยังเป็นส่วนประกอบหลักที่ใช้ผลิตผลิตภัณฑ์ยางแปรรูปต่างๆไม่ว่าเป็นผลิตภัณฑ์ยางแปรรูปที่ใช้ในอุตสาหกรรมยานยนต์ อุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ และอุตสาหกรรมทางการแพทย์ เป็นต้น ยิ่งไปกว่านี้ ณ ปัจจุบันรัฐบาลได้มีนโยบายผลักดันการเพิ่มปริมาณการใช้และการผลิตผลิตภัณฑ์ยางแปรรูป ดังนั้นจะเห็นได้ว่าการเพิ่มองค์ความรู้ในการพัฒนาวัสดุกรรมแปรรูปยางเป็นสิ่งสำคัญเพื่อตอบสนองนโยบาย และมูลค่าปริมาณการส่งออกผลิตภัณฑ์ยางแปรรูปที่จะเพิ่มมากขึ้นในอนาคต โดยหนึ่งในการพัฒนาวัสดุกรรมยางแปรรูป คือการนำหุ่นยนต์และระบบอัตโนมัติเข้ามาประยุกต์ใช้งานเข้ากับกระบวนการผลิตในอุตสาหกรรมผลิตยางแปรรูป เพื่อเพิ่มกำลังผลิตและรักษาคุณภาพของผลิตภัณฑ์ยางแปรรูป แต่ในปัจจุบันการนำหุ่นยนต์และระบบอัตโนมัติเข้ามาใช้งานอุตสาหกรรมยางแปรรูปโดยเฉพาะการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ยางแปรรูปโดยให้ความร้อนกับแม่พิมพ์โลหะยังคงเป็นเรื่องยากเนื่องจากยางเป็นวัสดุที่มีพฤติกรรมเป็นวัสดุที่มีความยืดหยุ่นหนืด ดังนั้นในกระบวนการนำผลิตภัณฑ์ยางแปรรูปที่ผ่านกระบวนการขึ้นรูปด้วยความร้อนออกจากแม่พิมพ์โลหะหรือที่เรียกว่า “Demolding process” จึงเป็นเรื่องที่จำเป็นที่ต้องศึกษาแรงที่ต้องใช้ นำผลิตภัณฑ์ยางออกจากแม่พิมพ์โลหะหรือที่เรียกว่า “Demolding force” (Li et al., 2021) โดยเป็นแรงที่ใช้ดึงชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์ในแนวตั้งฉากหรือในแนวแกน Z ซึ่งประกอบไปด้วยองค์ประกอบหลักสองส่วนได้แก่ แรงยึดติด (Adhesion force) (Popov, 2010) จากพื้นผิวส่วนล่างของหลุมแม่พิมพ์โลหะ และแรงเสียดทาน (Friction force) (Popov, 2010) จากพื้นผิวส่วนข้างของหลุมแม่พิมพ์โลหะ เพื่อนำ Demolding force นี้ไปเลือกอุปกรณ์หยิบจับหรือ “Gripper” (Mohammed, 2010) ซึ่งเป็นเครื่องมือที่ช่วยมนุษย์ในการหยิบจับวัตถุที่มีความยุ่งยากในเรื่อง ขนาด รูปร่าง วัสดุ และเงื่อนไขสภาพแวดล้อมต่างๆในการหยิบจับ โดย Gripper ในอุตสาหกรรมแบ่งได้หลายประเภท

ตามประเภทของตัวกระตุ้น อาทิ เช่น Electric gripper, Pneumatic gripper, Hydraulic gripper, Vacuum gripper และ Magnetic gripper เป็นต้น

ดังนั้นเพื่อเลือก Gripper ให้เหมาะสมกับการนำไปใช้งานในอุตสาหกรรมยางแปรรูป เบื้องต้นวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงต้องการศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อ Demolding force ได้แก่ คุณสมบัติทางกลของยางแปรรูป รูปร่างของยางแปรรูป พื้นที่สัมผัสระหว่างยางแปรรูปและแม่พิมพ์โลหะ และความหยาบผิวของแม่พิมพ์โลหะ และโดยองค์ความรู้ที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบและพัฒนา อุปกรณ์หยิบจับ (Gripper) เพื่อหยิบจับผลิตภัณฑ์ยางแปรรูปตามความเหมาะสมของผลิตภัณฑ์นั้นๆ ได้นำมาพัฒนาเป็นซอฟต์แวร์เพื่อเลือกอุปกรณ์หยิบจับ (Gripper) ที่นำมาใช้หยิบจับผลิตภัณฑ์ยางแปรรูปออกจากแม่พิมพ์โลหะได้อย่างเหมาะสม เพื่อใช้เป็นแนวทางในการออกแบบให้กับวิศวกร ทำให้วิศวกรสามารถลดเวลาในการออกแบบ และช่วยลดความผิดพลาดทางวิศวกรรมที่อาจจะเกิดจากการออกแบบอีกด้วย

#### วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์

- 1) พัฒนาซอฟต์แวร์คอมพิวเตอร์สำหรับช่วยแนะนำการออกแบบและพัฒนาอุปกรณ์หยิบจับชิ้นงานยางแปรรูปให้เหมาะสมตรงกับผลิตภัณฑ์ยางแปรรูป
- 2) ศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อแรงในการดึงผลิตภัณฑ์ยางแปรรูปออกจากแม่พิมพ์

#### ขอบเขตของวิทยานิพนธ์

- 1) ศึกษา Demolding Force จากชิ้นงานรูปทรงกระบอก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 ถึง 50 mm. และรูปทรงสี่เหลี่ยมกว้างตั้ง 10x10 ถึง 50x50 mm.
- 2) ศึกษา Demolding Force จากชิ้นงานรูปทรงกระบอกและรูปทรงสี่เหลี่ยมความสูง 10 ถึง 40 mm.
- 3) ศึกษา Demolding Force ด้วยยาง EPDM ที่มีความแข็ง 3 ระดับได้แก่ 40,50 และ 60 Shore A
- 4) ศึกษา Demolding Force จากแม่พิมพ์ที่มีความหยาบผิว 2 ระดับได้แก่ ผิวกลึง ( $R_a = 1.66 \mu\text{m}$ ) และ ผิวพันทราย ( $R_a = 7.16 \mu\text{m}$ )
- 5) ชิ้นรูปร่างแปรรูปด้วยการขึ้นรูปชิ้นงานด้วยการอัด

### ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) เพื่อให้วิศวกรมีโปรแกรมสนับสนุนเพื่อใช้ออกแบบและพัฒนา Gripper หีบจับชิ้นงานยางแปรรูป
- 2) เพื่อช่วยลดระยะเวลาและลดความยุ่งยากในการออกแบบให้กับวิศวกร





## บทที่ 2

### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### บทนำ

ณ ปัจจุบันในกระบวนการผลิตยางแปรรูปในอุตสาหกรรมยางคอมปาวด์และยางผสมนั้น มีกระบวนการในการผลิตดังนี้ 1) กระบวนการผสมยาง (Rubber mixing) 2) กระบวนการเตรียมยาง (Rubber preform) 3) กระบวนการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ยางแปรรูป (Rubber manufacturing) 4) การนำยางแปรรูปออกจากแม่พิมพ์และบรรจุภัณฑ์ (Rubber demolding and packaging)

#### 2.1 กระบวนการผสมยาง (Rubber mixing)

การผลิตผลิตภัณฑ์ยางแปรรูปนั้นเริ่มต้นด้วยกระบวนการผสมยาง (Rubber mixing) ซึ่งเป็นกระบวนการที่ผสมวัตถุดิบยาง (Raw materials) ประเภทต่างๆ เช่น ยางธรรมชาติ (Natural rubber; NR) ยางผสม (Blends) และยางเทอโมพลาสติก (Thermoplastic elastomer; TPE) เป็นต้น เข้ากับสารเคมีชนิดต่างๆ เช่น สารวัลคาไนซ์ (Vulcanizing agent) สารเร่งปฏิกิริยา (Accelerator) สารป้องกันการเสื่อมสภาพ (Anti degradants) สารตัวเติม (Fillers) และสี (Pigments) เป็นต้น โดยในปัจจุบันเครื่องผสมยางมีอยู่ 2 ประเภทได้แก่ เครื่องผสมยางแบบต่อเนื่อง (Continuous mixer) และเครื่องผสมยางแบบไม่ต่อเนื่อง (Batch mixer) การผลิตผลิตภัณฑ์ยางแปรรูปนั้นเริ่มต้นด้วยกระบวนการผสมยาง (Rubber mixing) ซึ่งเป็นกระบวนการที่ผสมวัตถุดิบยาง (Raw materials) ประเภทต่างๆ เช่น ยางธรรมชาติ (Natural rubber; NR) ยางผสม (Blends) และยางเทอโมพลาสติก (Thermoplastic elastomer; TPE) เป็นต้น เข้ากับสารเคมีชนิดต่างๆ เช่น สารวัลคาไนซ์ (Vulcanizing Agent) สารเร่งปฏิกิริยา (Accelerator) สารป้องกันการเสื่อมสภาพ (Anti degradants) สารตัวเติม (Fillers) และสี (Pigments) เป็นต้น โดยในปัจจุบันเครื่องผสมยางมีอยู่ 2 ประเภทได้แก่ เครื่องผสมยางแบบต่อเนื่อง (Continuous mixer) และเครื่องผสมยางแบบไม่ต่อเนื่อง (Batch mixer)

##### 2.1.1 เครื่องผสมยางแบบต่อเนื่อง (Continuous mixer)

เครื่องผสมยางแบบต่อเนื่อง (Continuous mixer) มีด้วยกัน 2 รูปแบบได้แก่ รูปแบบเครื่องผสมแบบเกลียวหนอนเดี่ยว (Single screw) และรูปแบบเครื่องผสมแบบเกลียวหนอนคู่ (Twin Screw) โดยตัวเครื่องมีการแบ่งได้ออกเป็น 3 บริเวณได้แก่ บริเวณป้อนสาร (Feed zone) บริเวณผสม (Mixing Zone) และบริเวณปล่อยยางออกจากเครื่อง (Discharge Zone) โดยเครื่องผสม

ประเภทนี้ปริมาณวัตถุดิบที่ป้อนเข้าเครื่องจะส่งผลต่อคุณภาพยางคอมปาวด์คือหากเพิ่มอัตราการป้อนวัตถุดิบทำให้ระยะเวลาที่ยางคอมปาวด์อยู่ในเครื่องนั้นสั้นลงทำให้ได้ยางคอมปาวด์ที่มีประสิทธิภาพลดน้อยลงไปดังภาพที่ 1



ภาพที่ 1 เครื่องผสมยางแบบต่อเนื่อง (Continuous mixer)

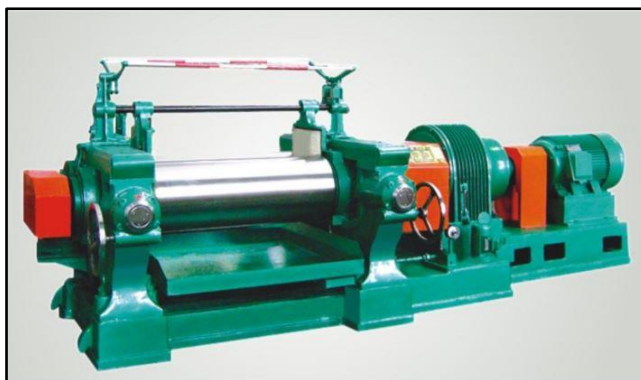
ที่มา: เทคโนโลยีผลิตยางคอมปาวด์ โครงการพัฒนาอุตสาหกรรมยางคอมปาวด์เพื่อยกระดับมูลค่าผลิตภัณฑ์ เพื่อสนับสนุนอุตสาหกรรมยานยนต์และเครื่องมือแพทย์

## 2.1.2 เครื่องผสมยางแบบไม่ต่อเนื่อง (Batch mixer)

เครื่องผสมยางแบบไม่ต่อเนื่อง (Batch mixer) มีด้วยกัน 2 รูปแบบได้แก่ ระบบเปิด และระบบปิด

### จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.1.2.1 ระบบเปิด ได้แก่ เครื่องผสมแบบ 2 ลูกกลิ้ง (Two-roll mill) ซึ่งจะประกอบไปด้วยลูกกลิ้ง 2 ตัว หมุนเข้าหากันด้วยความเร็วต่างกันทำให้เกิดแรงเฉือนเพื่อให้ยางผสมกัน โดยพนักงานทำการผสมยางโดยการกรีดยางแผ่นและพับไปพับมาและเติมสารเคมีลงไประหว่างลูกกลิ้งทั้งสองดังภาพที่ 2



ภาพที่ 2 เครื่องผสมยางแบบ 2 ลูกกลิ้ง (Two-roll Mill)

ที่มา: เทคโนโลยีผลิตยางคอมพาวด์ โครงการพัฒนาอุตสาหกรรมยางคอมพาวด์เพื่อยกระดับมูลค่าผลิตภัณฑ์ เพื่อสนับสนุนอุตสาหกรรมยานยนต์และ  
เครื่องมือแพทย์

2.1.2.2 ระบบปิด โดยแบ่งตามลักษณะของโรเตอร์ได้เป็น 4 ประเภท ได้แก่ เครื่องผสมแบบบูรี (Banbury internal mixer) โดยตัวเครื่องจะประกอบไปด้วย ห้องผสม (Chamber) ตัวบดหรือโรเตอร์ (Rotor) ตัวกดหรือแรม (Ram) และระบบหล่อเย็น (Cooling system) และอัตราเร็วของโรเตอร์ทั้งสองจะต่างกันดังภาพที่ 3



ภาพที่ 3 เครื่องผสมแบบบูรี (Banbury internal mixer)

ที่มา: เทคโนโลยีผลิตยางคอมพาวด์ โครงการพัฒนาอุตสาหกรรมยางคอมพาวด์เพื่อยกระดับมูลค่าผลิตภัณฑ์ เพื่อสนับสนุนอุตสาหกรรมยานยนต์และ  
เครื่องมือแพทย์

เครื่องนวดยางหรือนีดเดอร์ (Kneader) เป็นเครื่องที่มีหลักการทำงานคล้ายกับเครื่องผสมเบนบูรี (Banbury internal mixer) ดังภาพที่ 4



ภาพที่ 4 เครื่องนวดยางหรือนีดเดอร์ (Kneader)

ที่มา: เทคโนโลยีผลิตยางคอมพาวด์ โครงการพัฒนาอุตสาหกรรมยางคอมพาวด์เพื่อยกระดับมูลค่าผลิตภัณฑ์ เพื่อสนับสนุนอุตสาหกรรมยานยนต์และ  
เครื่องมือแพทย์

## 2.2 กระบวนการเตรียมยาง (Rubber preform)

ในกระบวนการนี้ยางคอมพาวด์ (Rubber compound) ที่ได้จากการผสมยาง (Rubber mixing) ถูกนำมาตัดตกแต่งให้ได้ขนาดและน้ำหนักที่เหมาะสมเพื่อนำไปขึ้นรูปโดยสามารถตัดตกแต่งโดยแรงงานคนหรือเครื่องจักร โดยเครื่องจักรในปัจจุบันมีหลากหลายชนิดยกตัวอย่างเช่น

2.2.1 Ribbon rubber cutting ซึ่งมีหน้าที่ตัดยาวคอมพาวด์ให้เป็นเส้นยาวเพื่อใช้สำหรับการขึ้นรูปชิ้นงาน โดยใช้เครื่องชนิดดังภาพที่ 5



ภาพที่ 5 เครื่อง Ribbon rubber cutting (Kneader)

ที่มา: บริษัท ไทยรับเทค จำกัด

2.2.2 Rubber cutting ซึ่งสามารถตัดยางคอมปาวด์แผ่นให้มีขนาดและน้ำหนักตามที่ต้องการได้ดัง

ภาพที่ 6



ภาพที่ 6 เครื่อง Rubber Cutting

ที่มา: บริษัท ไทยรับเทค จำกัด

2.2.3 Rubber preformer เป็นเครื่องเตรียมยางซึ่งจะดันยางออกมาทางหัวตาย (Die head) ทำให้รูปแบบของยางคอมปาวด์ที่ได้จะแตกต่างกันขึ้นอยู่กับลักษณะของหัวตายดังภาพที่ 7



ภาพที่ 7 เครื่อง Rubber preformer

ที่มา: บริษัท ไทยรับเทค จำกัด

### 2.3 กระบวนการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ยาง (Rubber manufacturing)

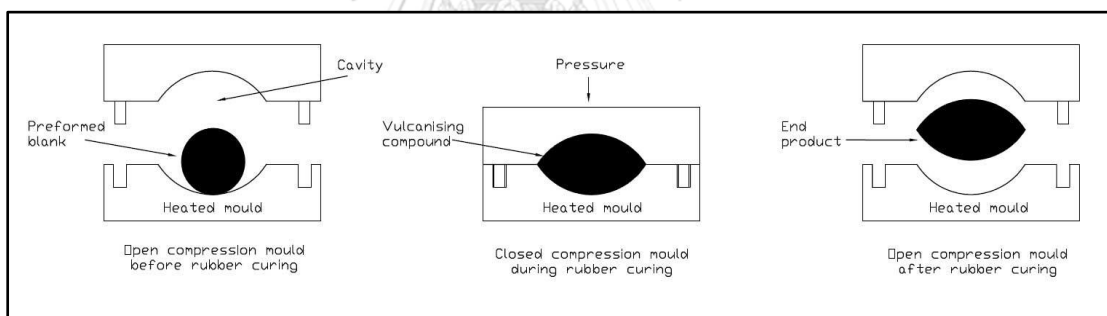
หลังจากที่ได้ยางคอมปาวด์ (Rubber compound) ที่ผ่านกระบวนการเตรียมยาง (Rubber preform) เพื่อให้ได้รูปร่าง ขนาด และน้ำหนักตามที่ต้องการแล้วจะนำยางคอมปาวด์ที่ได้ไปขึ้นรูป (Rubber manufacturing) โดยสามารถแบ่งได้เป็น 3 ประเภทคือ 1) การขึ้นรูปโดยใช้แม่พิมพ์ (Moulding) 2) การขึ้นรูปโดยอัดผ่านหัวตาย (Extrusion) 3) การขึ้นรูปโดยใช้เครื่องคาลเ็นเดอร์ (Calendering) หลังจากที่ได้ยางคอมปาวด์ (Rubber compound) ที่ผ่านกระบวนการเตรียมยาง (Rubber preform) เพื่อให้ได้รูปร่าง ขนาด และน้ำหนักตามที่ต้องการแล้วจะนำยางคอมปาวด์ที่ได้ไปขึ้นรูป (Rubber manufacturing) โดยสามารถแบ่งได้เป็น 3 ประเภทคือ 1) การขึ้นรูปโดยใช้แม่พิมพ์ (Moulding) 2) การขึ้นรูปโดยอัดผ่านหัวตาย (Extrusion) 3) การขึ้นรูปโดยใช้เครื่องคาลเ็นเดอร์ (Calendering)

### 2.3.1 การขึ้นรูปโดยใช้แม่พิมพ์ (Moulding)

การขึ้นรูปวิธีนี้ใช้ความร้อนจากแม่พิมพ์ (Mould) เพื่อให้ยางคอมปาวด์เกิดการคงรูป (Vulcanization) โดยการขึ้นรูปโดยใช้แม่พิมพ์มี 3 ประเภทดังนี้ 1) การขึ้นรูปด้วยการอัด (Compression moulding) 2) การขึ้นรูปด้วยการอัดส่ง (Transfer moulding) 3) การขึ้นรูปด้วยการฉีด (Injection moulding)

#### 2.3.1.1 การขึ้นรูปด้วยการอัด (Compression moulding)

การขึ้นรูปด้วยวิธีนี้เป็นการขึ้นรูปที่นิยมที่สุดเพราะเป็นวิธีที่ง่าย และราคาเครื่องจักรไม่สูง โดยเครื่องจักรมีระบบไฮดรอลิก (Hydraulic system) สำหรับส่งแรงอัดไปยังแม่พิมพ์โดยการขึ้นรูปชิ้นงานเริ่มนำยางคอมปาวด์เข้าเบ้าแม่พิมพ์ (Cavity) จากนั้นเครื่องจักรที่ให้ความร้อนแม่พิมพ์ทำการปิดแม่พิมพ์แผ่นบนและแผ่นล่าง และให้ความร้อนตามเวลา (Cure time) ของยางคอมปาวด์จนยางเกิดการคงรูป (Vulcanization) เป็นรูปร่างตามเบ้าของแม่พิมพ์ (Cavity) เมื่อครบเวลาทำการนำชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์ (Demolding) การทำงานดังภาพที่ 8



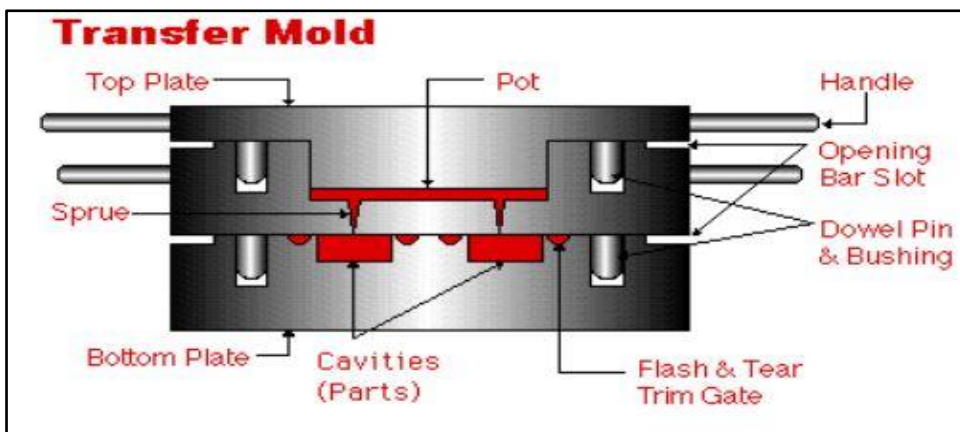
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาพที่ 8 การขึ้นรูปด้วยการอัด

ที่มา: [www.Cliftonrubber.co.uk](http://www.Cliftonrubber.co.uk)

#### 2.3.1.2 การขึ้นรูปด้วยการอัดส่ง (Transfer moulding)

การขึ้นรูปด้วยวิธีนี้ถูกพัฒนามาจากการขึ้นรูปด้วยการอัด โดยวิธีนี้เหมาะสำหรับชิ้นงานที่มีความซับซ้อน และวิธีนี้ยังใช้ยางคอมปาวด์ (Rubber compound) น้อยแต่สามารถเติมยางให้ลงไปเบ้าของแม่พิมพ์ให้เต็มได้ทำให้ลดเวลาการขึ้นรูปได้อีกด้วย แต่ราคาแม่พิมพ์จะสูงตามไปโดยวิธีนี้จะเริ่มจากการวางยางลงไปบนเบ้าอัดส่ง (Pot) จากนั้นเมื่อแม่พิมพ์เกิดการอัดยางคอมปาวด์จะไหลลงไปยังหลุมชิ้นงาน (Cavity) ผ่าน รูฉีด ด้วยดังรูปที่ 9



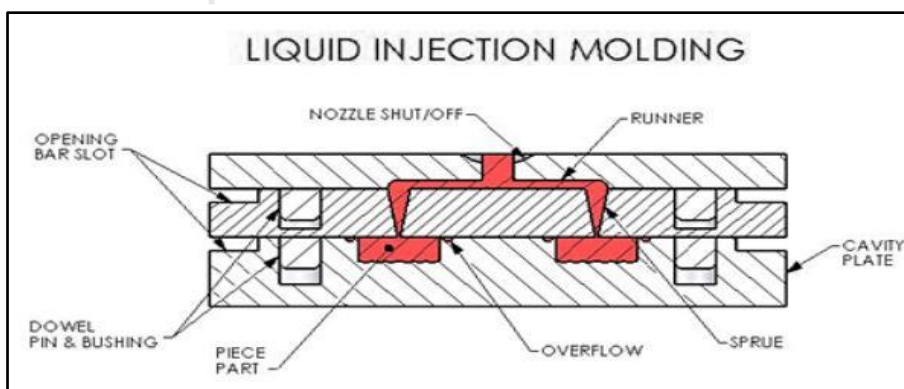
ภาพที่ 9 การขึ้นรูปด้วยการอัดส่ง

ที่มา: Hawthorncerubber.com

2.3.1.3 การขึ้นรูปด้วยการฉีด (Injection moulding)

การขึ้นรูปด้วยวิธีการนี้เป็นวิธีการมีคุณภาพที่สุดเนื่องจากเป็นวิธีที่สามารถลดเวลาการขึ้นรูป ควบคุมคุณภาพของชิ้นงานได้ดี แต่วิธีนี้ตามมาด้วยราคาแม่พิมพ์และเครื่องจักรที่สูงตามไปด้วย โดยวิธีนี้เริ่มจากนำยางคอมปาวด์ประเภทเส้นยาว (Ribbon) เข้าไปในกระบอกสกรู (Screw) จากนั้นสกรูทำหน้าที่หมุนเพื่อลำเลียงยางคอมปาวด์ที่จะถูกทำให้ร้อนและอ่อนตัวผ่านกระบอกฉีด (Injection barrel) หลังจากนั้นจะถูกดันไปยังหัวฉีด (Nozzle) สุดท้ายยางจะถูกดันเข้าสู่แม่พิมพ์ (Runner) และจะไหลลงไปในเบ้าแม่พิมพ์ (Cavity) ดังภาพที่ 10

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาพที่ 10 การขึ้นรูปด้วยการฉีด

ที่มา: Flenxan Corporation



### 2.3.2 การขึ้นรูปโดยอัดผ่านหัวตาย (Extrusion)

การขึ้นรูปด้วยวิธีนี้เหมาะสำหรับขึ้นรูปชิ้นงานที่มีลักษณะเป็นแนวยาวตลอดเช่น ยางหุ้มสายเคเบิล ยางท่อ และยางรัด เป็นต้น โดยมีทั้งใช้แรงอัดจากแรม (Ram extruder) และใช้แรงอัดจากสกรู (Screw extruder)



ภาพที่ 11 การขึ้นรูปโดยอัดผ่านหัวตาย (Extrusion)

ที่มา: <https://rubbermachineryworld.com/tag/ram-type-extruders/>

### 2.3.3 การขึ้นรูปโดยเครื่องคาลเอนเดอร์ (Calendering)

การขึ้นรูปด้วยวิธีนี้เป็นที่นิยมสำหรับชิ้นงานที่มีลักษณะเป็นยางแผ่นเรียบซึ่งมีความกว้างสม่ำเสมอเช่น ยางสายพาน ยางปูพื้น และยางแผ่นบ่อน้ำ เป็นต้น โดยตัวเครื่องจะมีระบบทำความร้อนและระบบหล่อเย็น และมีลูกกลิ้งที่ทำหน้าที่หมุนเพื่อรีดยางคอมปาวด์ออกมาเป็นยางแผ่นดัง

ภาพที่12



ภาพที่ 12 การขึ้นรูปโดยเครื่องคาลเอนเดอร์ (Calendering)

ที่มา: [https://www.alibaba.com/product-detail/three-rolls-rubber-calender-machine-for\\_60306934369.html](https://www.alibaba.com/product-detail/three-rolls-rubber-calender-machine-for_60306934369.html)

## 2.4 การนำยางแปรรูปออกจากแม่พิมพ์และการบรรจุภัณฑ์ (Rubber Demolding and Packaging)

หลังจากผ่านกระบวนการขึ้นรูปชิ้นงานโดยใช้แม่พิมพ์พนักงานจะนำชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์ (Cavity) เพื่อนำชิ้นงานมาคัดของดีของเสียและบรรจุหีบห่อต่อไป โดยกระบวนการพนักงานต้องใช้แรงในการนำชิ้นงานออกมาก และต้องใช้ประสบการณ์สูงเนื่องจากอาจเกิดอุบัติเหตุระหว่างการดำเนินงานได้เนื่องจากเป็นแม่พิมพ์มีอุณหภูมิที่สูง โดยในปัจจุบันมีการคิดค้นวิธีการนำชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์หลากหลายวิธีเพื่อความสะดวกมากขึ้น และลดเวลาการนำชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์โดยสามารถแบ่งได้เป็น 2 แบบ คือ 1) การนำชิ้นงานออกโดยใช้แรงคน 2) การนำชิ้นงานออกโดยใช้เครื่องจักร

### 2.4.1 การนำชิ้นงานออกโดยใช้แรงคน

การนำชิ้นงานออกโดยใช้แรงงานคนซึ่งเป็นวิธีที่ใช้แรงงานคนในการดึงชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์ โดยมีทั้งการดึงชิ้นงานออกทีละหลุมดังภาพที่ 13 การดึงชิ้นงานประเภทฝังพีดซึ่งเป็นลักษณะคล้ายยางแผ่นที่ยึดติดชิ้นงานทุกหลุมเข้าด้วยกันทำให้ลดเวลาในการนำชิ้นงานออกทำให้นำชิ้นงานได้เร็วกว่าการดึงชิ้นงานออกทีละหลุมแต่จะต้องใช้ยางคอมปาวด์มากกว่าดังภาพที่ 14 และสุดท้ายการใช้อุปกรณ์ช่วยในการนำชิ้นงานจากแม่พิมพ์ดังภาพที่ 15



ภาพที่ 13 การนำชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์ทีละชิ้น

ที่มา: บริษัท เอสเคพอลิเมอร์ จำกัด



ภาพที่ 14 การนำชิ้นงานประเภทผงพีดีออกจากแม่พิมพ์

ที่มา: บริษัท เอสเคพอลิเมอร์ จำกัด

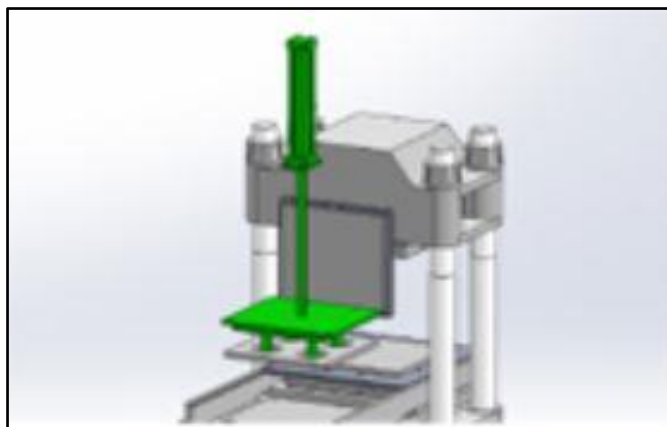


ภาพที่ 15 การใช้อุปกรณ์ช่วยในการนำชิ้นงานจากแม่พิมพ์

ที่มา: sternrubber.com

### 2.4.2 การนำชิ้นงานออกโดยเครื่องจักร

ในเครื่องขึ้นรูปชิ้นงานแบบอัดหรือแบบฉีดในบางครั้งผู้ผลิตสามารถเพิ่มฟังก์ชันการทำงานให้เครื่องจักรขึ้นอยู่กับความต้องการของผู้ซื้อเครื่องจักร โดยฟังก์ชันการทำงานนี้การติดตั้งระบบไฮดรอลิก (Hydraulic System) เพื่อดันชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์นั่นเองตามภาพที่ 16



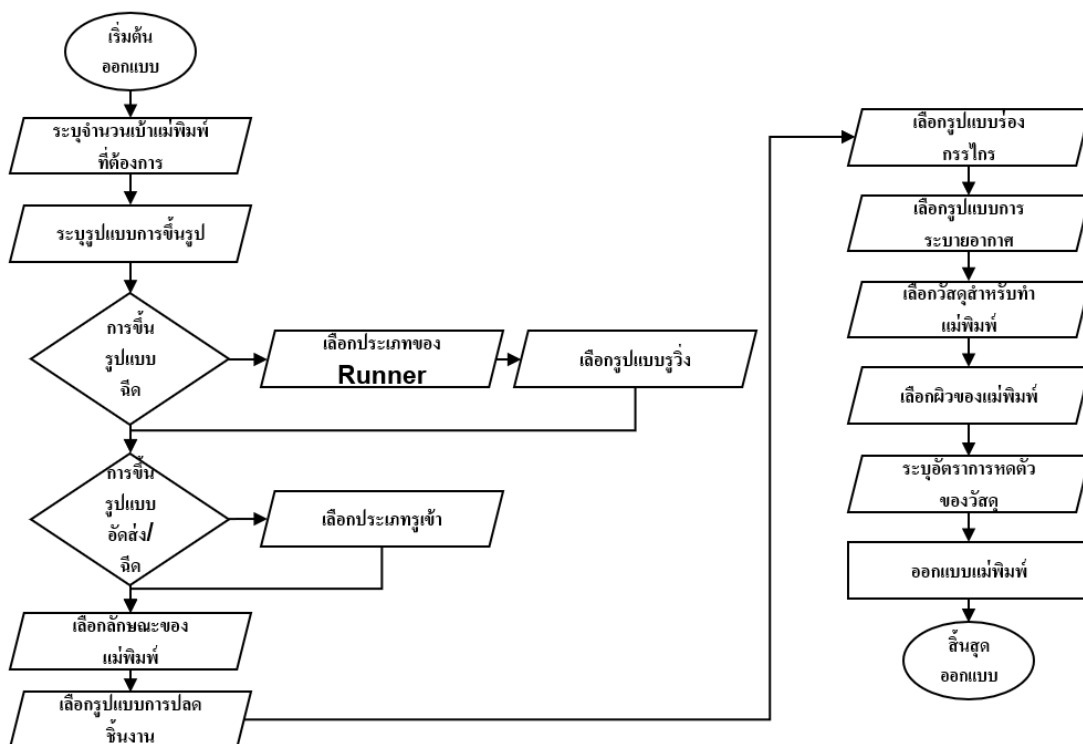
ภาพที่ 16 ระบบไฮดรอลิกสำหรับดันชิ้นงานออกในแนวตั้ง

ที่มา: [www.panstone.com](http://www.panstone.com)

### 2.5 การออกแบบแม่พิมพ์ยาง (Rubber mold design)

ลักษณะของแม่พิมพ์ยางเป็นปัจจัยหนึ่งในการเลือกใช้อุปกรณ์หยิบจับ (Gripper) โดยการออกแบบแม่พิมพ์จะต้องคำนึงถึง ลักษณะของชิ้นงาน ระบบที่ใช้ขึ้นรูปชิ้นงาน วิธีการนำชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์ วัสดุของแม่พิมพ์ เป็นต้น โดยมีแผนผังการทำดำเนินการออกแบบแม่พิมพ์ตามภาพที่ 17

CHULALONGKORN UNIVERSITY



ภาพที่ 17 แผนผังการออกแบบแม่พิมพ์

2.6 ทฤษฎี

2.6.1 แรงที่ใช้นำยางแปรรูปออกจากแม่พิมพ์ (Demolding force)

หรับแรงที่ใช้นำชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์ในทิศทางแรงตั้งฉากนั้นปกติแล้วจะประกอบไปด้วยน้ำหนักของชิ้นงาน แรงยึดติดระหว่างยางและแม่พิมพ์ (Adhesion force) และแรงเสียดทาน (Friction force) จึงสามารถเขียนเป็นสมการอย่างง่ายได้ตามสมการที่ 1.

$$F_{demolding} = f_{Adhesion} + f_{Friction} + Weight_{Rubber} \quad (1)$$

ดังนั้นตัวแปรที่ส่งผลต่อทั้งแรงยึดติด (Adhesion force) และแรงเสียดทาน (Friction force) และสามารถอธิบายแรงที่ใช้นำชิ้นงานยางออกในแนวตั้ง (Demolding force) ได้ และวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ศึกษามีดังนี้

### a) ความแข็งของยาง (Hardness : H)

ความแข็งของยาง (Hardness) (Qi et al., 2003) เป็นคุณสมบัติทางกลของยางพื้นฐานซึ่งสามารถใช้ในการอธิบายถึงพฤติกรรมความยืดหยุ่นแบบหน่วงหนืด (Viscoelastic) (Christensen, 1982) ซึ่งมีอิทธิพลต่อแรงเสียดทานระหว่างยางและแม่พิมพ์ (Friction force) โดยเฉพาะการสูญเสียพลังงานของยาง ( $W^*$ ) สามารถอธิบายได้จากสมการที่ 2 และ 3

โดยมีสูตรคำนวณดังนี้

$$f_R = \left[ \frac{2G_0 W^*}{l} \right]^t a_r \quad (2)$$

เมื่อ

$f_R$  = แรงเสียดทานต่อมวลรวม (N)

$G_0$  = โมดูลัสเฉือน ( $kgf/mm^2$ )

$W^*$  = งานของการยืดติดต่อบริเวณพันธะ (J)

$l$  = ส่วนสูงของมวลรวม

$t$  = เวลาที่นับจากจุดเริ่มต้นของแต่ละการยืดติด

$a_r$  = มิติเชิงเส้นของมวลรวม

ซึ่งส่งผลไปยังแรงเสียดทานโดยรวม

$$F_R = N_B f_R \quad (3)$$

เมื่อ

$F_R$  = แรงเสียดทานโดยรวม (N)

$N_B$  = จำนวนของพันธะ

$f_R$  = แรงเสียดทานต่อมวลรวม (N)

### b) ความหยาบผิวของแม่พิมพ์ (Roughness : R)

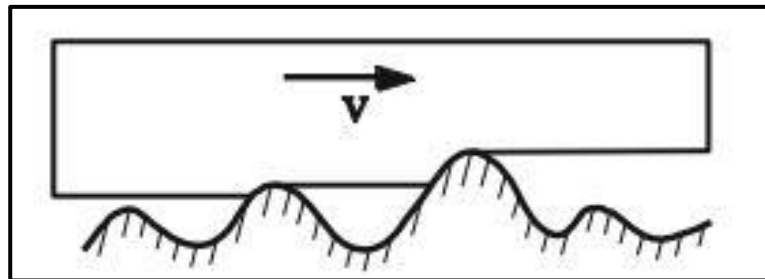
ความหยาบผิวของแม่พิมพ์นั้นมีค่าประมาณเท่ากับค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานดังสมการที่ 3 ซึ่งจะส่งผลไปยังแรงเสียดทานเช่นเดียวกันสามารถอธิบายได้ดังภาพที่ 18 เมื่อนำวัสดุมาเคลื่อนที่บนยาง

เมื่อ

$$\mu \approx \nabla_z \quad (4)$$

$\mu$  = สัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน

$\nabla_z$  = ความหยาบผิว ( $\mu m$ )

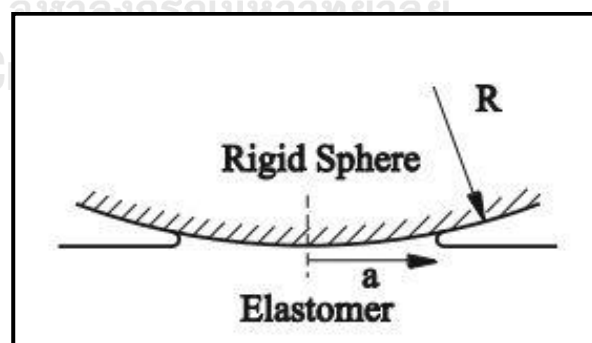


ภาพที่ 18 ภาพการนำวัตถุมาเคลื่อนที่บนยาง

ที่มา: Contact Mechanics and Friction (2017)

c) พื้นที่สัมผัสระหว่างยางและแม่พิมพ์ (Contact area: A)

พื้นที่สัมผัสระหว่างยางและแม่พิมพ์นั้นจะส่งผลต่อแรงยึดติด (Adhesion force) ของยาง ซึ่งทฤษฎีของ JKR ซึ่งเป็นการอธิบายการกดลูกทรงกลมลงบนยางแล้วดึงขึ้นเพื่อดูแรงยึดติดดังภาพที่ 19 จึงนำมาอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างแรงยึดติดและพื้นที่สัมผัสดังสมการที่ 5



ภาพที่ 19 ภาพทฤษฎีของ JKR

ที่มา: Contact Mechanics and Friction (2017)

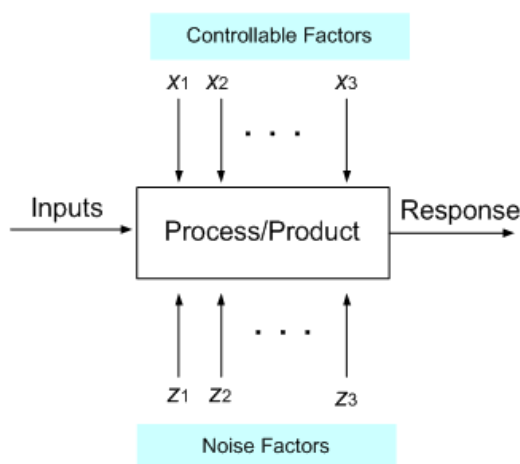
$$F_N = E^* \left[ \frac{4a^3}{3R} - \left[ \frac{8\gamma\pi a^3}{E^*} \right]^{1/2} \right] \quad (5)$$

เมื่อ

- $F_N$  = แรงปฏิกิริยา ( $N$ )  
 $E^*$  = มอดูลัสความยืดหยุ่น ( $kgf/mm^2$ )  
 $a$  = พื้นที่สัมผัส ( $mm^2$ )  
 $R$  = รัศมีวงกลม ( $mm$ )  
 $\gamma$  = แรงตึงพื้นผิว ( $kgf/mm^2$ )

### 2.6.2 การออกแบบการทดลอง (Design of experiment: DOE)

การออกแบบการทดลองเป็นเพื่อเป็นตัวช่วยในการเก็บข้อมูลของปัจจัยต่างๆ (Factors) ของกระบวนการเพื่อนำข้อมูลเหล่านี้ไปวิเคราะห์ผลกระทบที่เกิดขึ้นต่อตัวแปรตาม (Response variables) จากการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรต้น (Input variables) ดังภาพภาพแบบจำลองทั่วไปของระบบที่ 20 โดยการออกแบบการทดลองสามารถนำมาใช้เพื่อคัดกรอง (Screening design) หาปัจจัยสำคัญที่ส่งผลกระทบต่อตัวแปรตามอย่างมีนัยยะสำคัญหากในกระบวนการมีปัจจัยหลายปัจจัย โดยส่วนมากจะใช้การทดลองแบบแฟกทอเรียลบางส่วน (Fractional factorial experiment) ทำให้สามารถลดเวลาและงบประมาณในการทดลองได้ นอกจากนี้การออกแบบการทดลองเพื่อเก็บข้อมูลในทุกระดับปัจจัยสามารถใช้การทดลองแบบฟูลแฟกทอเรียล (Full factorial experiment)



ภาพที่ 20 ภาพจำลองแบบทั่วไปของระบบ

ที่มา: Montgomery (1999)



การออกแบบการทดลองแบบฟูลแฟกทอเรียล (Full factorial design) สามารถนำมาใช้เพื่อศึกษาปัจจัยต่างๆที่มีปฏิสัมพันธ์กับปัจจัยตอบสนอง โดยแต่ละปัจจัยสามารถมีได้หลายระดับปัจจัย (Levels) และสามารถทำซ้ำ (Replicates: n) ได้หลายครั้ง โดยในการทดลองที่มี 2 ปัจจัย หากออกแบบสุ่มแบบสมบูรณ์ สามารถเขียนเป็นสมการ ได้ดังสมการที่ 6

$$Y_{ijk} = \mu + \alpha_i + \beta_j + (\alpha\beta)_{ij} + e_{ijk} \quad (6)$$

เมื่อ

$Y_{ijk}$  = ค่าสังเกตที่ได้รับที่ระดับการทดลอง ij ตัวที่ k

$\mu$  = ค่าเฉลี่ยทั้งหมด

$\alpha$  = อิทธิพลรวมของปัจจัย A

$\beta$  = อิทธิพลรวมของปัจจัย B

$\alpha\beta$  = อิทธิพลรวมของปัจจัย A และ B

$e_{ijk}$  = ความคลาดเคลื่อนสุ่มของการทดลอง

การออกแบบการทดลองแบบฟูลแฟกทอเรียล (Full factorial design) นั้นมีทั้งข้อดีและข้อเสีย ตามตารางที่ 1 เพื่อให้ผู้ใช้งานมีการเปรียบเทียบ

ตารางที่ 1 ตารางเปรียบเทียบข้อดีข้อเสียของแบบฟูลแฟกทอเรียล

| ข้อดี  | ข้อเสีย  |
|--|--|
| <ol style="list-style-type: none"> <li>1. ไม่มีการเกิด Alias หรือความสับสนในการแยกแยะผลกระทบ</li> <li>2. สามารถวิเคราะห์ผลกระทบแต่ละตัวแปรและแต่ละระดับของตัวแปรได้ทั้งหมดทำให้ได้ข้อมูลจากการทดลองจำนวนมาก</li> </ol> | <ol style="list-style-type: none"> <li>1. เกิดความสูญเสียทั้งเวลาและทรัพยากรเนื่องจากมีจำนวนครั้งในการทดลองมาก</li> <li>2. เมื่อจำนวนครั้งในการทดลองมาก ทำให้อาจเกิดความผิดพลาดจากปัจจัยใดๆที่เปลี่ยนไป</li> </ol> |

### 2.6.3 การวิเคราะห์ถดถอย (Regression analysis)

การวิเคราะห์ถดถอย (Regression analysis) เป็นการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของตัวแปร (Variables) โดยในปัจจุบันนิยมนำมาประยุกต์ใช้ในการทำนายหรือพยากรณ์ ซึ่งเป็นการพยากรณ์ตัวแปรหนึ่งซึ่งถูกเรียกว่า ตัวแปรตาม (Dependent variable: Y) จากตัวแปรอื่นที่เรียกว่าตัวแปรอิสระ (Independent variable: X) ซึ่งหากมีตัวแปรอิสระ X เพียงตัวแปรเดียวในการประมาณค่าตัวแปรตาม Y โดยความสัมพันธ์ของตัวแปรทั้งคู่เป็นเชิงเส้นจะเรียกว่า การถดถอยเชิงเส้นอย่างง่าย (Simple linear regression) โดยสามารถเขียนในรูปสมการได้ตามสมการที่

$$Y = \alpha + \beta X \quad (7)$$

เมื่อ

$$\begin{aligned} Y &= \text{ตัวแปรตาม} \\ X &= \text{ตัวแปรอิสระ} \\ \alpha &= \text{สัมประสิทธิ์การถดถอยของประชากร} \\ \beta &= \text{สัมประสิทธิ์การถดถอยของประชากร} \end{aligned}$$

ในบางกรณีที่ต้องการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของตัวแปรอิสระ (Independent variable: X) หลายตัวแปร กับตัวแปรตาม (Dependent variable: Y) แบบเชิงเส้นจะถูกเรียกว่า การวิเคราะห์ถดถอยพหุคูณ (Multiple regression analysis) ซึ่งสามารถเขียนให้อยู่ในรูปแบบสมการที่ 8 ดังนี้

$$Y = B_0 + B_1X_1 + B_2X_2 + \dots + B_nX_n \quad (8)$$

เมื่อ

$$\begin{aligned} Y &= \text{ตัวแปรตาม} \\ B_n &= \text{สัมประสิทธิ์การถดถอยของประชากรที่ } n \\ x_n &= \text{ตัวแปรอิสระที่ } n \end{aligned}$$

ในกรณีที่การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระ (Independent variable: X) กับตัวแปรตาม (Dependent variable: Y) ที่มีความสัมพันธ์ไม่เป็นเชิงเส้น จะถูกเรียกว่า การวิเคราะห์ถดถอยโพลิโนเมียล (Polynomial regression analysis) สามารถเขียนให้อยู่ในรูปแบบสมการที่ 9

$$Y = B_0 + B_1X_1 + B_1X_1^2 + \dots + B_nX_n^2 \quad (9)$$

เมื่อ

$Y$  = ตัวแปรตาม

$B_n$  = สัมประสิทธิ์การถดถอยของประชากรที่  $n$

$x_n$  = ตัวแปรอิสระที่  $n$

สำหรับการวิเคราะห์ถดถอยนั้นหากต้องการที่จะประเมินว่าการวิเคราะห์ที่ได้เลือกไว้สามารถอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระ (Independent variable: X) และตัวแปรตามได้ดีเพียงใด สามารถหาได้จากสัดส่วนระหว่าง ผลกำลังสองของเส้นถดถอยส่วนด้วยผลกำลังสองของทั้งหมด ซึ่งถูกเรียกว่า สัมประสิทธิ์การกำหนด (The coefficient of determine:  $R^2$ ) ซึ่งสามารถเขียนให้อยู่ในรูปสมการที่ 10 โดยค่าสัมประสิทธิ์กำหนดจะมีค่าต่ำสุดคือ 0 และมากที่สุดคือ 1 โดยสามารถแสดงได้ดังภาพที่ 21

$$R^2 = \frac{\Sigma(y - \bar{y})^2}{\Sigma(y_i - \bar{y})^2} \quad (10)$$

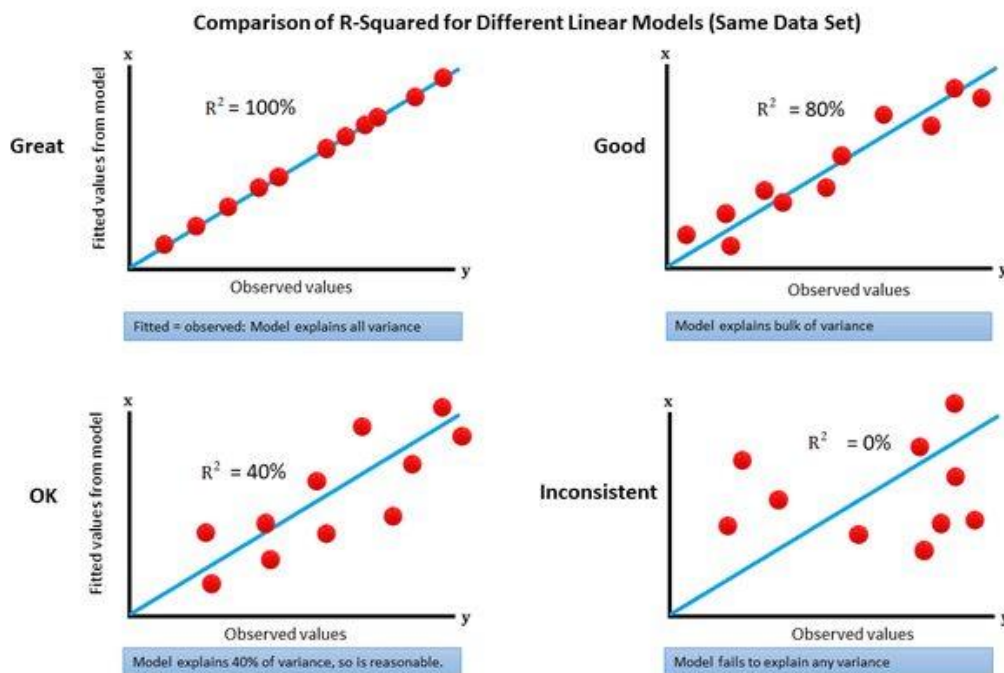
เมื่อ

$R^2$  = สัมประสิทธิ์การกำหนด

$y$  = ค่าสังเกตการ

$\bar{y}$  = ค่าสังเกตการจากสมการถดถอย

$\bar{y}_i$  = ค่าสังเกตการที่  $i$

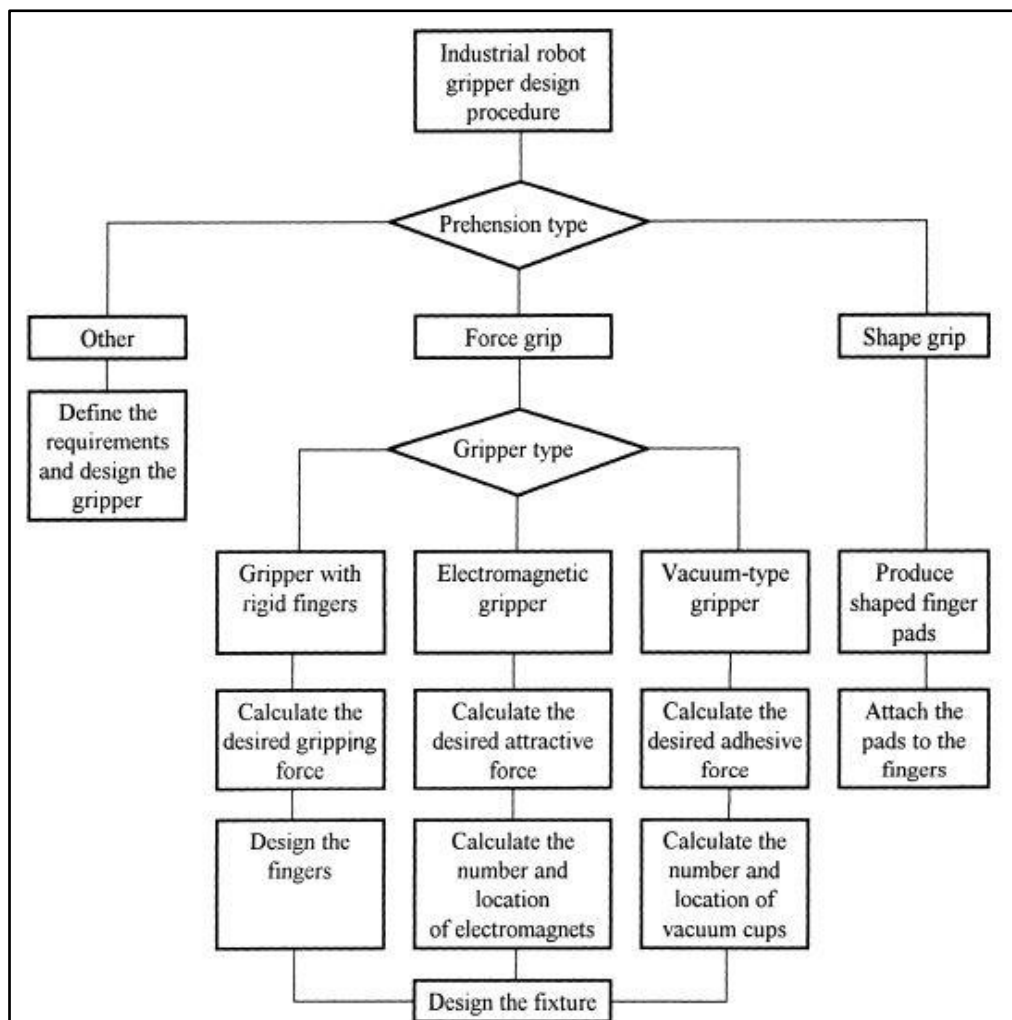


ภาพที่ 21 ภาพการเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์กำหนด

ที่มา: <https://www.datasciencecentral.com/r-squared-in-one-picture/>

### 2.6.1 อุปกรณ์หยิบจับ (Gripper)

อุปกรณ์หยิบจับ (Gripper) ซึ่งเป็นประเภทหนึ่งของ End of arm tooling (EOAT) มีหน้าที่ช่วยให้หุ่นยนต์สามารถหยิบจับวัตถุไปวางยังตำแหน่งต่างๆ จัดเรียงวัตถุใหม่ ด้วยความแม่นยำ และรวดเร็ว โดยอุปกรณ์หยิบจับ (Gripper) สามารถแบ่งตามประเภทของตัวกระตุ้น ได้แก่ Pneumatic Gripper, Hydraulic gripper, Vacuum gripper, Servo-electric gripper และ Magnetic gripper โดยในการเลือกใช้งานสามารถเลือกได้จากประเภทการหยิบจับเช่น การหยิบจับด้วยแรง (Force grip) หรือการหยิบจับด้วยรูปร่าง (Shape grip) เป็นต้นดังภาพที่ 22



ภาพที่ 22 ภาพการเลือกใช้งานอุปกรณ์หยิบจับ (Gripper)

ที่มา: (Zielinska et al., 1999)

#### a) ประเภทมือจับ (Mechanical gripper)

อุปกรณ์หยิบจับประเภทมือจับ (Mechanical gripper) ในปัจจุบันถูกออกแบบมาหลากหลายรูปแบบทั้งแบบใช้ขากรรไกตั้งแต่ 2,3,4 หรือ 5 ขากรรไก โดยสามารถเลือกต้นกำลังได้ตั้งแต่ระบบลม (Pneumatic system) ดังภาพที่ 23 ระบบไฟฟ้า (Electric system) ดังภาพที่ 24 และระบบไฮดรอลิกส์ (Hydraulic system) ดังภาพที่ 25 โดยสามารถนำไปใช้ได้ทั้งในการหยิบจับด้วยแรง (Force grip) และ การหยิบจับด้วยรูปร่าง (Shape grip) หากเลือกการหยิบจับด้วยแรงในการเริ่มต้นออกแบบหรือเลือกใช้อุปกรณ์หยิบจับประเภทมือจับต้องทราบถึงแรงหนีบจับ (Gripping force) ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 11



ภาพที่ 23 ภาพอุปกรณ์หยิบจับด้วยไฟฟ้า (Electric gripper)

ที่มา: <https://www.denso-wave.com/>



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
ภาพที่ 24 ภาพอุปกรณ์หยิบจับด้วยลม (Pneumatic gripper)

ที่มา: <https://www.somwangsub.co.th/>



ภาพที่ 25 ภาพอุปกรณ์หยิบจับด้วยน้ำมัน (Hydraulic gripper)

ที่มา: <https://www.universal-robots.com>

สมการแรงหนีบจับของอุปกรณ์หนีบจับ (Gripper)

$$F = \frac{m(a + g)}{\mu n} s \quad (11)$$

เมื่อ

$F$  = แรงหนีบจับ (N)

$m$  = มวล (kg)

$a$  = ความเร่ง ( $m/s^2$ )

$g$  = แรงโน้มถ่วง ( $m/s^2$ )

$\mu$  = สัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน

$n$  = จำนวนขากรรไกร

b) ประเภทสุญญากาศ (Vacuum gripper)

อุปกรณ์หนีบจับประเภทสุญญากาศ (Vacuum gripper) เป็นประเภทที่ได้รับความนิยมเช่นเดียวกันเนื่องจากเหมาะสำหรับหนีบจับชิ้นงานที่มีความเปราะบางไม่ต้องการให้เกิดรอยและในปัจจุบันมีการพัฒนาให้เลือกใช้งานได้หลากหลายทั้งแบบ ทนความร้อน แบบหนีบจับวัตถุผิวลื่น แบบหนีบจับวัตถุผิวโค้ง และหนีบจับวัตถุผิวเรียบ เป็นต้น แต่ข้อเสียคือไม่เหมาะกับชิ้นงานที่มีผิวเป็นรูทำให้อากาศสามารถไหลผ่านออกได้เนื่องจากจะไม่ทำให้เกิดสถานะสุญญากาศตามภาพที่ 26 และสามารถคำนวณหาแรงยกได้จากสมการที่ 12



ภาพที่ 26 ภาพอุปกรณ์หนีบจับแบบสุญญากาศ (Vacuum gripper)

ที่มา: <https://www.universal-robots.com>

การคำนวณหาแรงยกของอุปกรณ์ (Vacuum gripper)

$$F = k_p(p(p_a - p_p)) \quad (12)$$

เมื่อ

$$F = \text{แรงยก (N)}$$

$$k_p = \text{สัมประสิทธิ์การเปลี่ยนแรงดันบรรยากาศกับอุปกรณ์ (kg)}$$

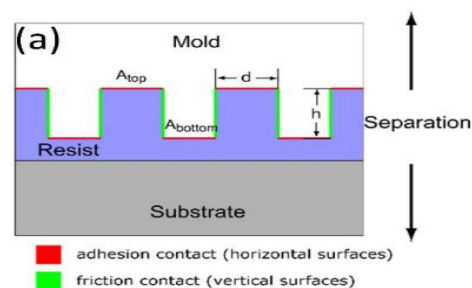
$$p = \text{พื้นที่ของอุปกรณ์ (mm}^2\text{)}$$

$$p_{a,p} = \text{แรงดันบรรยากาศและแรงดันภายในอุปกรณ์ (Pa)}$$

#### 2.6.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

เนื่องจากงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์มุ่งเน้นไปที่การพัฒนาซอฟต์แวร์เพื่อแนะนำการออกแบบและพัฒนาอุปกรณ์หยิบจับ (Gripper) และศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อแรงที่ใช้ดึงชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์โลหะซึ่งเป็นส่วนสำคัญในการนำไปออกแบบอุปกรณ์หยิบจับ (Gripper) จึงได้มีการศึกษาในเรื่องแรงที่ใช้ในการนำชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์ (Demolding Force) การพัฒนาซอฟต์แวร์เพื่อใช้ในการพยากรณ์ และรวมไปถึงการออกแบบอุปกรณ์หยิบจับ (Gripper)

(Li et al., 2021) ได้ศึกษาเรื่องแรงถอน (Demolding force) โดยการปรับแก้ผิวของแม่พิมพ์ ในกระบวนการยูวีนาโนอิมพริ้น (UV nanoimprint lithography) ซึ่งได้อธิบายถึงแรงถอน (Demolding force) ว่าประกอบด้วยแรงเสียดทาน (Friction force) ที่เกิดจากพื้นที่ส่วนข้างของหลุมชิ้นงาน และแรงยึดติดที่เกิดขึ้นจากพื้นผิวส่วนล่างของหลุมชิ้นงานดังภาพที่ 27 ซึ่งเป็นเรื่องยากในการวัดและแยกแรงทั้งสองนี้



ภาพที่ 27 ภาพส่วนประกอบของผิวสัมผัส

ที่มา: (Li et al., 2021)



(Qi et al., 2003) ได้ศึกษาการนำ Durometer เพื่อทดสอบความแข็งของวัสดุยืดหยุ่น (Elastomer) โดยมีหน่วยวัดคือ Shore A และ Shore D และทำการเปรียบเทียบเพื่อแปลงเป็นพฤติกรรมความเค้นความเครียดของวัสดุยืดหยุ่น (Elastomer) นอกจากนี้ยังได้ใช้การจำลองพฤติกรรมของวัสดุ (Elastomer) โดยใช้ Gaussian (neo-Hookean) Constitutive model ซึ่งจากผลลัพธ์ทำให้เห็นว่า การทดสอบความแข็งด้วย Durometer สามารถใช้เป็นค่าประมาณที่สมเหตุสมผลของโมดูลัสได้

(Golkarnarenji et al., 2019) ทำการศึกษาการออกแบบการทดลองด้วยทากูชิ (Tagushi design of experiment) และการเรียนรู้ของเครื่องจักร (Machine learning) โดยใช้ Support vector regression และ Artificial neural network (ANN) เพื่อนำมาเป็นเครื่องมือในการพยากรณ์คุณสมบัติทางกลของไฟเบอร์คาร์บอน โดยใช้ข้อมูลในการเรียนรู้ที่จำกัด

(Dahbi et al., 2015) ได้อธิบายการประยุกต์ใช้การถดถอยพหุคูณ (Multiple regression) เพื่อตรวจสอบปฏิกิริยาของค่าพารามิเตอร์ต่างๆในการกลึงเหล็ก AISI 1042 คือ ความเร็วตัด อัตราป้อน ความลึกของการตัด และรัศมีของเครื่องมือ ต่อกความหยาบผิวของเหล็ก โดยมีการออกแบบการทดลองแบบฟูลแฟคทอเรียล (Full factorial design) โดยผลลัพธ์ของการถดถอยพหุคูณ มีค่าสัมประสิทธิ์กำหนด 99.55 % และค่าความคลาดเคลื่อน 0.07

(Rad & Kalivitis, 2011) ทำการวิจัยในการออกแบบอุปกรณ์มือจับเพื่อศึกษาหาแรงที่เหมาะสมในการจับชิ้นงานที่มีรูปร่าง วัสดุ ผิวสัมผัส และน้ำหนักที่ต่างกัน โดยออกแบบให้มือจับมีการติดตั้งเซนเซอร์วัดแรง (Force Sensor) เพื่อใช้ในการเปรียบเทียบแรงในการจับที่วัดได้จริงกับการคำนวณเพื่อหาแรงหยาบจับที่เหมาะสม

## บทที่ 3

### วิธีการดำเนินงานวิจัย

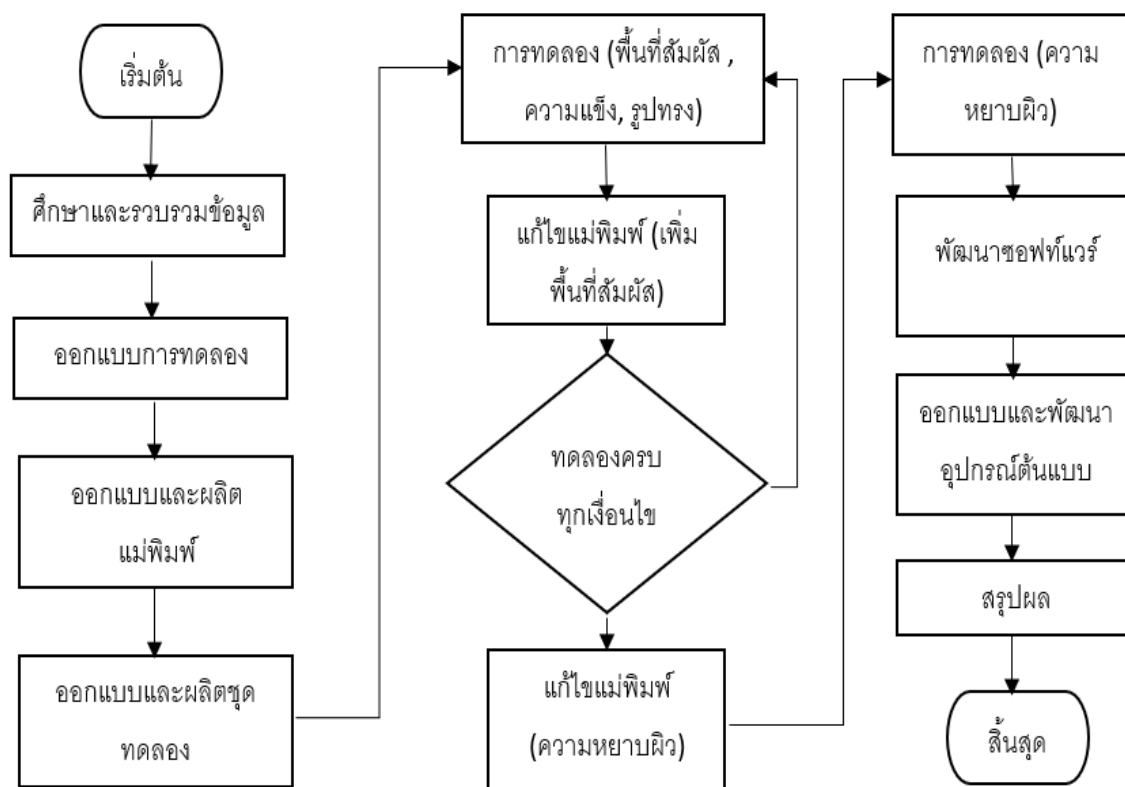
#### บทนำ

เนื่องจากการออกแบบและพัฒนาอุปกรณ์หยิบจับ (Gripper) เพื่อหยิบจับผลิตภัณฑ์ยางแปรรูปที่มีรูปร่าง ขนาด คุณสมบัติทางกล แม่พิมพ์โลหะ และวิธีการขึ้นรูปที่ต่างกัน ดังนั้นการดำเนินงานวิจัยในระยะเริ่มแรกจึงเป็นการศึกษาวิธีการผลิตขึ้นรูปยางแปรรูปทั้งรูปแบบการฉีดและการอัด การปลดผลิตภัณฑ์ออกจากแม่พิมพ์ รวมถึงค้นคว้ารวบรวมข้อมูลเพื่อเลือกหาปัจจัยที่ส่งผลต่อแรงที่ใช้ในการปลดชิ้นงานยางแปรรูปออกจากแม่พิมพ์ (Demolding force) จากนั้นจึงได้ออกแบบการทดลองด้วย Full factorial design รวมถึงวิธีการทำการทดลอง หลังจากนั้นเป็นการออกแบบและผลิตอุปกรณ์สำหรับการทดลอง และหลังจากนั้นทำการทดลองตามที่ได้ออกแบบการทดลองไว้ด้วย Full factorial design เมื่อทำการทดลองจนครบจากนั้นจึงพัฒนาซอฟต์แวร์แนะนำการออกแบบและผลิตอุปกรณ์หยิบจับเบื้องต้น โดยมีการทำนายแรงปลดชิ้นงาน (Demolding force) โดยใช้การวิเคราะห์ถดถอย (Multiple regression analysis) จากนั้นทำการออกแบบและพัฒนาอุปกรณ์หยิบจับต้นแบบตามผลลัพธ์ที่ได้จากซอฟต์แวร์ สุดท้ายนำผลลัพธ์ที่ได้จากการใช้งานอุปกรณ์หยิบจับต้นแบบนี้ไปสรุปผลเพื่อนำไปปรับปรุงพัฒนาซอฟต์แวร์

#### 3.1 ระเบียบวิจัย

- ศึกษาและรวบรวมข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับการผลิตยางแปรรูป การปลดยางแปรรูปออกจากแม่พิมพ์ การออกแบบแม่พิมพ์โลหะสำหรับยางเบื้องต้น รวมถึงปัจจัยที่ส่งผลต่อการปลดชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์
- ออกแบบการทดลองโดยใช้ Full factorial design
- ออกแบบและผลิตแม่พิมพ์
- ออกแบบและผลิตชุดทดลองแรงปลดชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์ (Demolding force)
- การทดลองแรง Demolding force (พื้นที่สัมผัส, ความแข็ง, ความหยาบผิว, รูปทรง)
- ออกแบบและพัฒนาซอฟต์แวร์แนะนำการออกแบบและพัฒนาอุปกรณ์หยิบจับเบื้องต้น
- ออกแบบและพัฒนาอุปกรณ์หยิบจับต้นแบบตามคำแนะนำของซอฟต์แวร์
- สรุปผลเพื่อนำไปปรับปรุงพัฒนาซอฟต์แวร์

โดยวิธีการดำเนินงานวิจัยสามารถเขียนได้ตามภาพแผนผังที่ 28



ภาพที่ 28 แผนผังวิธีการดำเนินงานวิจัย  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CHULALONGKORN UNIVERSITY

### 3.2 การออกแบบการทดลอง

หลังจากได้ศึกษาแรงที่ต้องใช้นำชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์ (Demolding force) แล้วพบว่าแรงนี้มีองค์ประกอบไปด้วย 1) แรงเสียดทาน (Friction force) 2) แรงยึดติด (Adhesion force) 3) น้ำหนักชิ้นงาน โดยสามารถเขียนเป็นสมการอย่างง่ายได้ดังสมการที่ 12

$$F_{Demolding} = F_{Friction} + F_{Adhesion} + m \quad (12)$$

เมื่อ

$$F_{Demolding} = \text{แรงปลดชิ้นงานจากแม่พิมพ์ (N)}$$

$$F_{Friction} = \text{แรงเสียดทาน (N)}$$

$$F_{Adhesion} = \text{แรงยึดติด (N)}$$

$$m = \text{น้ำหนักชิ้นงาน (Kg)}$$

มากกว่านั้นเมื่อได้ศึกษาปัจจัยที่ส่งผลไปยัง แรงเสียดทาน และแรงยึดติด พบว่ามีปัจจัยที่ส่งผลไปยังทั้งแรงเสียดทานและแรงยึดติด มีดังนี้ 1) พื้นที่สัมผัสระหว่างผิวยางและแม่พิมพ์โลหะ 2) ความแข็งของยาง 3) รูปทรงของชิ้นงานยาง 4) ความหยาบผิวของแม่พิมพ์ ดังนั้นผู้วิจัยจึงเลือกใช้การออกแบบการทดลองแบบ Full factorial design เพื่อศึกษาผลกระทบต่อปัจจัยทุกปัจจัยและทุกระดับปัจจัย แต่การออกแบบการทดลองแบบนี้มีผลเสียคือใช้ระยะเวลาในการทดลองมากและค่าใช้จ่ายในการทดลองจำนวนมาก ทำให้ผู้วิจัยต้องออกแบบการทดลองโดยใช้แม่พิมพ์โลหะ 1 ตัว ทำให้ผู้วิจัยออกแบบการทดลองเป็น 3 การทดลองดังนี้

- การทดลองพื้นที่สัมผัส ความแข็ง และรูปทรงของชิ้นงาน โดยการทดลองเริ่มต้นนี้มีหลุมชิ้นงานของทรงกระบอกและทรงสี่เหลี่ยม อย่างละ 5 ขนาด หลังจากทดลองที่ความสูงเริ่มต้นเสร็จเพิ่มความสูงของชิ้นงานหรือเป็นการเพิ่มพื้นที่สัมผัสระหว่างชิ้นงานและแม่พิมพ์โดยการนำแม่พิมพ์ไปกัดเพิ่มความลึกโดยใช้เครื่อง CNC และในส่วนของความแข็งได้เลือกระดับปัจจัย 3 ระดับ คือ ความแข็ง 40 (ยาง EPDM 18%, คาร์บอนแบล็ค 20%, เคลเซียม คาร์บอนเนต 28%, น้ำมัน 30%, สารเติมแต่ง 2.5%, สารทำให้เกิดการเชื่อมโยง 1.5%), 50 (ยาง EPDM 30%, คาร์บอนแบล็ค 25%, เคลเซียม คาร์บอนเนต 15%, น้ำมัน 26%, สารเติมแต่ง 2.5%, สารทำให้เกิดการเชื่อมโยง 1.5%) และ 60 (ยาง EPDM 40%, คาร์บอนแบล็ค 25%, เคลเซียม คาร์บอนเนต 25%, น้ำมัน 15%, สารเติมแต่ง 2.5%, สารทำให้เกิดการเชื่อมโยง 1.5%) Shore A เนื่องจากเป็นช่วงความแข็งที่ใช้เยอะที่สุดในอุตสาหกรรมยางแปรรูป สุดท้ายได้เลือกศึกษาชิ้นงานรูปทรงกระบอกและรูปทรงสี่เหลี่ยม โดยประกอบไปด้วย 120 การทดลองในแต่ละการทดลองได้มีการทำการทดลองซ้ำ 5 ครั้ง

ตารางที่ 2 ตารางการออกแบบการทดลองแบบ Full factorial design (พื้นที่สัมผัส, ความแข็ง, รูปร่างของชิ้นงาน)

| ปัจจัย    | ระดับปัจจัย | ระดับปัจจัย |               |    |    |    | หน่วย   |
|-----------|-------------|-------------|---------------|----|----|----|---------|
|           |             | 1           | 2             | 3  | 4  | 5  |         |
| ความกว้าง | 5           | 10          | 20            | 30 | 40 | 50 | mm.     |
| ความสูง   | 4           | 10          | 20            | 30 | 40 |    | mm.     |
| ความแข็ง  | 3           | 40          | 50            | 60 |    |    | Shore A |
| รูปทรง    | 2           | ทรงกระบอก   | ทรงสี่เหลี่ยม |    |    |    | -       |

- การทดลองความหยาบผิวของแม่พิมพ์ โดยการทดลองจะนำแม่พิมพ์เดิมที่ผ่านทดลองทั้งหมด มาพ่นทรายเพื่อเพิ่มความหยาบผิวของแม่พิมพ์และทำการทดลอง โดยประกอบไปด้วย 60 การทดลองในแต่ละการทดลองได้มีการทำการทดลองซ้ำ 5 ครั้ง

ตารางที่ 3 ตารางการออกแบบการทดลองแบบ Full factorial design (ความหยาบผิว)

| ปัจจัย      | ระดับปัจจัย | ระดับปัจจัย        |                      |    |    |    | หน่วย         |
|-------------|-------------|--------------------|----------------------|----|----|----|---------------|
|             |             | 1                  | 2                    | 3  | 4  | 5  |               |
| ความกว้าง   | 5           | 10                 | 20                   | 30 | 40 | 50 | mm.           |
| ความสูง     | 1           | 50                 |                      |    |    |    | mm.           |
| ความแข็ง    | 3           | 40                 | 50                   | 60 |    |    | Shore A       |
| ความหยาบผิว | 2           | ผิวกลิ้ง<br>(1.66) | ผิวยิงทราย<br>(7.16) |    |    |    | $\mu\text{m}$ |
| รูปทรง      | 2           | ทรงกระบอก          | ทรงสี่เหลี่ยม        |    |    |    | -             |

- การทดลองศึกษาชิ้นงานรูปทรงซับซ้อน ซึ่งเป็นชิ้นงานที่มีรูปร่างซับซ้อนและในปัจจุบันในการนำชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์เป็นเรื่องที่ยาก โดยประกอบไปด้วย 3 การทดลองในแต่ละการทดลองได้มีการทำการทดลองซ้ำ 5 ครั้ง

ตารางที่ 4 ตารางการออกแบบการทดลองแบบ Full factorial design (รูปทรงซับซ้อน)

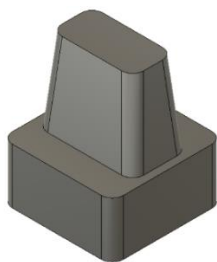
| ปัจจัย           | ระดับปัจจัย | ระดับปัจจัย |    |    |   |   | หน่วย   |
|------------------|-------------|-------------|----|----|---|---|---------|
|                  |             | 1           | 2  | 3  | 4 | 5 |         |
| ความกว้าง        | 1           | 30          |    |    |   |   | mm.     |
| ความสูง          | 1           | 50          |    |    |   |   | mm.     |
| ความแข็ง         | 3           | 40          | 50 | 60 |   |   | Shore A |
| ความหยาบผิว      | 1           | ผิวกลิ้ง    |    |    |   |   | -       |
| รูปร่าง          | 1           | Undercut    |    |    |   |   | -       |
| ความหนา Undercut | 1           | 3           |    |    |   |   | mm.     |

### 3.3 การออกแบบและผลิตแม่พิมพ์

ในการออกแบบแม่พิมพ์นั้นผู้วิจัยได้เลือกแบบที่ใช้ในการขึ้นรูปเป็นระบบอัดเนื่องจากเป็นวิธีที่ใช้งบประมาณไม่สูง ไม่มีความยุ่งยากในการออกแบบและผลิตแม่พิมพ์ อีกทั้งใช้เวลาในการผลิตไม่นาน ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้ออกแบบขึ้นงานสำหรับการทดลองให้มีลักษณะมีพื้นที่ในการหยิบจับยื่นออกมาจากแม่พิมพ์เมื่อแม่พิมพ์เปิดออกโดยตัวอย่างขึ้นงานทรงกระบอกกึ่งภาพที่ 29 ขึ้นงานทรงสี่เหลี่ยมคางหมูที่ 30 และขึ้นงานทรงซับซ้อนคางหมูที่ 31



ภาพที่ 29 ภาพขึ้นงานทรงกระบอก

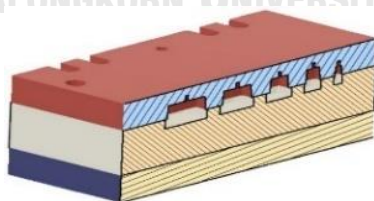


ภาพที่ 30 ภาพชิ้นงานทรงสี่เหลี่ยม



ภาพที่ 31 ภาพชิ้นงานรูปทรงซับซ้อน

ในการออกแบบแม่พิมพ์ผู้วิจัยได้ออกแบบแม่พิมพ์ให้เป็นแม่พิมพ์ 3 แผ่นประกบกันเนื่องจากผู้วิจัยต้องการนำแม่พิมพ์เดิมไปปรับปรุงแก้ไขเพื่อเพิ่มความลึก และเพื่อให้สามารถขึ้นรูปชิ้นงานรูปทรงซับซ้อนได้จึงต้องเป็นแม่พิมพ์ 3 แผ่น โดยผู้วิจัยได้เลือกใช้วัสดุเหล็ก S50C เนื่องจากมีราคาที่ถูกโดยได้ออกแบบให้แม่พิมพ์มีขนาดกว้าง 300 mm. และ ยาว 300 mm. ดังภาพที่ 32

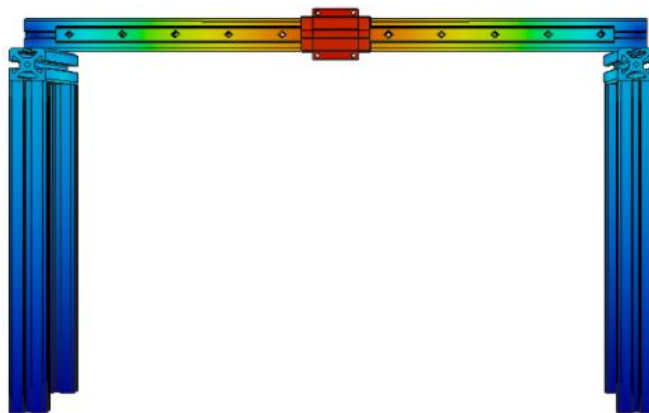
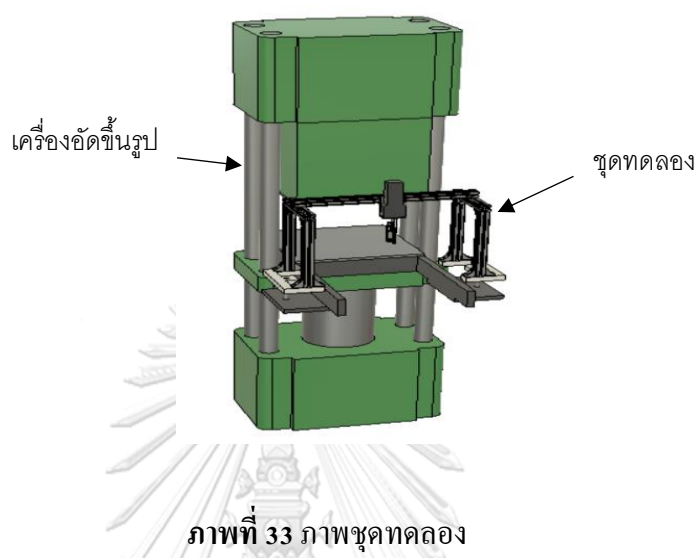


ภาพที่ 32 ภาพแม่พิมพ์สำหรับขึ้นรูปชิ้นงาน

### 3.4 การออกแบบและผลิตชุดทดลอง

ผู้วิจัยได้พัฒนาชุดทดลองสำหรับวัดแรงที่ใช้ในการนำชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์ (Demolding force) ซึ่งจะติดตั้งอยู่บนเครื่องขึ้นรูปแบบอัด (Compression machine) โดยชุดทดลองนี้สามารถเคลื่อนที่ได้ในแกน X และ Y ในระบบพิกัดคาร์ทีเซียน (Cartesian coordinate system) เพื่อ

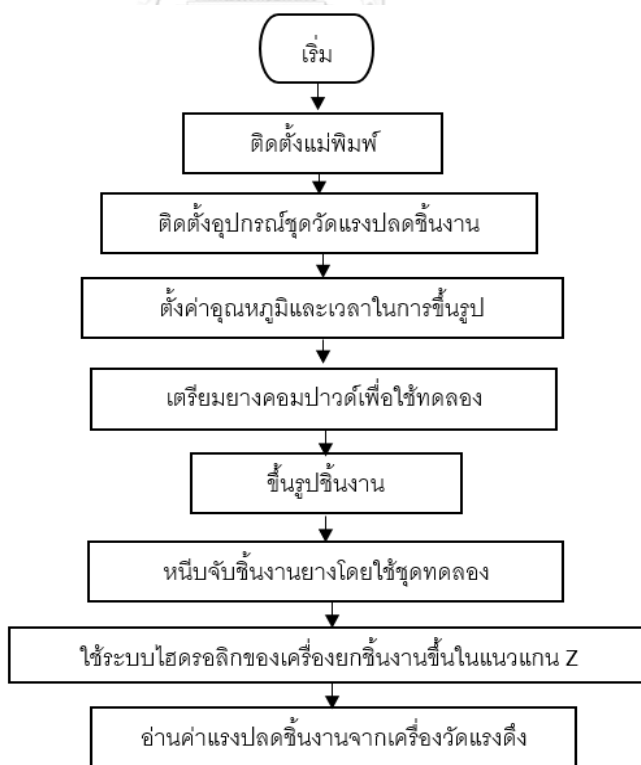
สามารถหยิบจับชิ้นงานเพื่อวัดแรงปลดชิ้นงานที่ตำแหน่งต่างๆได้ โดยในการยกชิ้นงานขึ้นในแกน Z ชุดทดลองใช้ระบบของเครื่องขึ้นรูปในการเคลื่อนที่ในแกน Z ในการวัดแรงปลดชิ้นงานนั้นชุดทดลองได้ติดตั้งอุปกรณ์วัดแรงดึง (Force gauge) ไว้ด้วยดังภาพที่ 33 และสามารถรับน้ำหนักได้สูงสุด 50 Kg ดังภาพที่ 34





### 3.5 การทดลองแรง Demolding force

สำหรับการทดลองนั้นผู้วิจัยได้เริ่มจากการติดตั้งแม่พิมพ์บนเครื่องขึ้นรูปแบบอัด หลังจากนั้นติดตั้งชุดอุปกรณ์วัดแรงบนเครื่องขึ้นรูป และหลังจากนั้นทำการเตรียมยางโดยการใส่กรรไกรตัดแต่งยางให้ได้ขนาดและน้ำหนักตามที่ต้องการซึ่งในการทดลองได้เลือกใช้ยาง EPDM ที่ความแข็ง 40 50 และ 60 Shore A เพราะเป็นช่วงของความแข็งที่มีใช้เยอะที่สุดในอุตสาหกรรมขึ้นรูปยางแปรรูป หลังจากนั้นทำการปรับค่าอุณหภูมิของแม่พิมพ์โดยในที่นี้ใช้อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียสและทำการปรับค่าเวลาที่ใช้ขึ้นรูป (Curing time) ซึ่งจะขึ้นอยู่กับความหนาของชิ้นงานหากชิ้นงานมีความมากทำให้ต้องใช้เวลาในการขึ้นรูปนานตามไปด้วย และจากนั้นจึงเริ่มการทดลองโดยการใส่ยางคอมปาวด์ที่ได้ตัดแต่งให้ได้ขนาดและน้ำหนักตามที่ต้องการแล้วลงไปในห้องขึ้นงาน (Cavity) จากนั้นเริ่มขึ้นรูปชิ้นงานเป็นเวลาขึ้นรูปที่ได้ตั้งค่าไว้เบื้องต้น สุดท้ายเมื่อครบเวลาที่กำหนดเครื่องอัดขึ้นรูปจะผลักแม่พิมพ์ออกมาแล้วทำการใช้ชุดทดลองหนีบชิ้นงานและยกชิ้นงานขึ้นมาในแกน Z จากนั้นอ่านค่าที่อยู่บนเครื่องวัดแรงดึง (Force gauge) แล้วบันทึกค่าโดยขึ้นตอนการทำงานเป็นดังภาพการทดลองที่ 35 โดยการทดลองเป็นไปดังภาพที่ 36 และมีการกำหนดเงื่อนไขปัจจัยที่ใช้ในการขึ้นรูปและนำชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์ดังตารางที่ 5



ภาพที่ 35 ภาพขั้นตอนการทดลอง



ภาพที่ 36 ภาพการทดลองวัดแรงปลดชิ้นงาน (Demolding force)

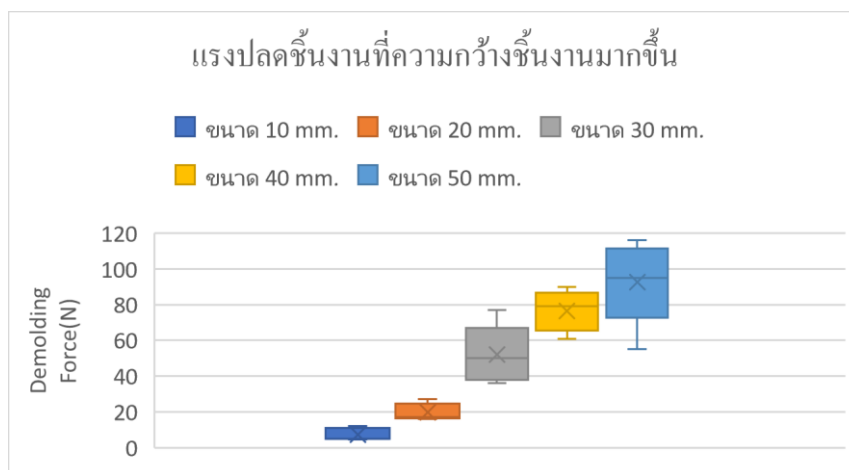
ตารางที่ 5 ตารางปัจจัยที่ใช้ในการขึ้นรูปและนำชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์

| ปัจจัย                   | หน่วย        |
|--------------------------|--------------|
| อุณหภูมิขึ้นรูป          | องศาเซลเซียส |
| เวลาขึ้นรูป              | -            |
| ความเร่งที่ใช้ดึงชิ้นงาน | $m/s^2$      |
| องศาการดึงชิ้นงาน        | องศา         |

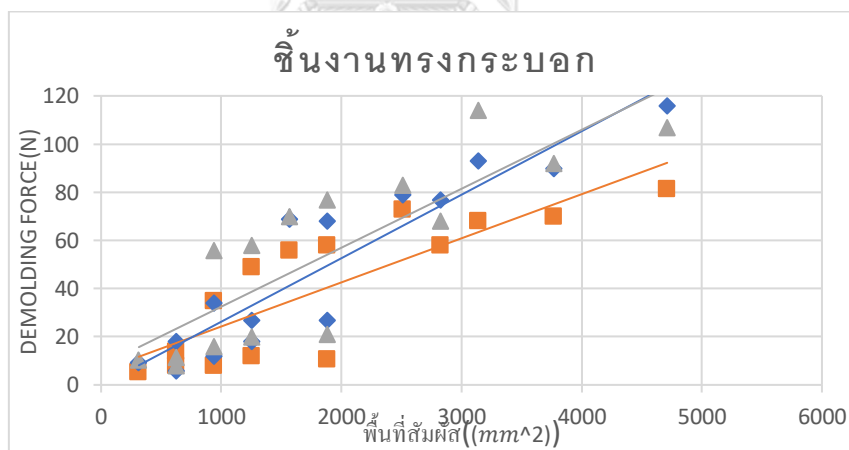
### 3.5.1 ผลการทดลองแรง Demolding force

- จากการทดลอง(พื้นที่สัมผัส ความแข็ง และรูปร่างชิ้นงาน) พบว่าเมื่อชิ้นงานมีความกว้างเพิ่มมากขึ้นทำให้ผลลัพธ์ที่ได้มีค่าความเบี่ยงเบนสูงขึ้นดังภาพที่ 37 ทำให้ผู้วิจัยเลือกใช้ผลลัพธ์ที่เป็นค่าสูงสุดเพราะเป็นค่าที่ปลอดภัยในการนำไปใช้ทำให้ได้ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรตอบสนอง (Respond variable) นั่นก็คือ แรงที่ใช้ดึงชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์ (Demolding force) และตัวแปรคุณลักษณะ (Feature

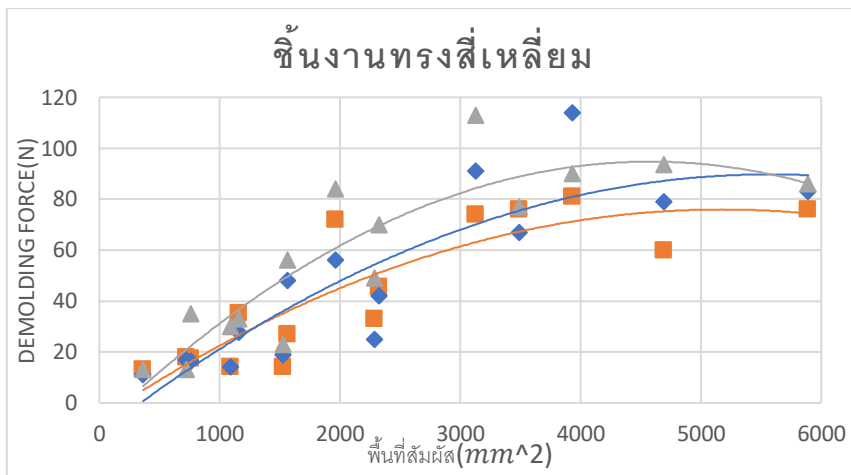
variable) ได้แก่ พื้นที่สัมผัส ความแข็งของยาง และรูปทรงของชิ้นงาน พบว่าเมื่อพื้นที่สัมผัส ความแข็งของชิ้นงานเพิ่มมากขึ้นส่งผลให้แรง Demolding force มีค่าสูงขึ้นตามไปด้วย โดยมีผลลัพธ์ของชิ้นงานทรงกระบอกค่อนข้างเป็นเชิงเส้นดังภาพที่ 38 และในขณะที่ผลลัพธ์ของชิ้นงานทรงสี่เหลี่ยมค่อนข้างไม่เป็นเชิงเส้นดังภาพที่ 39



ภาพที่ 37 ภาพแรงปลดชิ้นงานที่ความกว้างชิ้นงานมากขึ้น

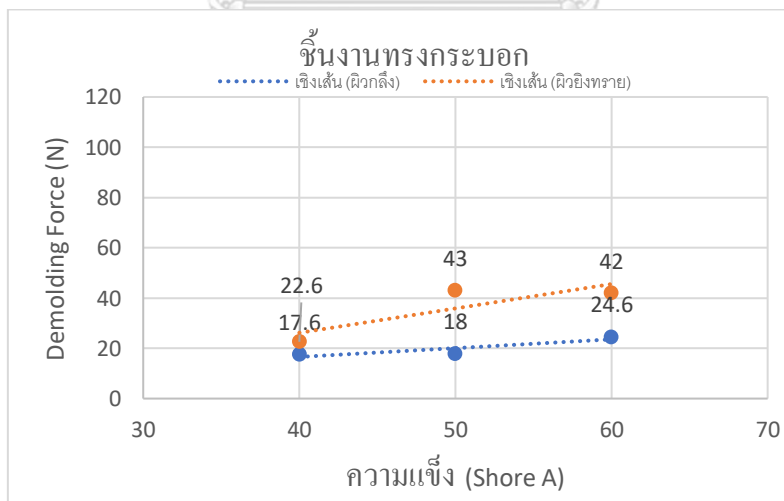


ภาพที่ 38 ภาพแรงปลดชิ้นงานของชิ้นงานทรงกระบอก



ภาพที่ 39 ภาพแรงปลดชิ้นงานของชิ้นงานทรงสี่เหลี่ยม

- จากการทดลอง (ความหยาบผิว) โดยในการทดลองนี้ผู้วิจัยนำแม่พิมพ์เดิมไปทำการพ่นทรายเพื่อเป็นการเพิ่มความหยาบผิว ทำให้ได้ผลลัพธ์เมื่อความหยาบผิวเพิ่มขึ้นส่งผลให้แรง Demolding force เพิ่มขึ้นตามไปด้วยดังภาพตัวอย่างที่ 40



ภาพที่ 40 ภาพตัวอย่างข้อมูลการทดลองความหยาบผิว

- จากการทดลอง (รูปทรงซับซ้อน) พบว่าเมื่อทำการทดลองชิ้นงานเกิดการฉีกขาดบริเวณที่เป็นจุดซับซ้อนดังภาพที่ 41 และเมื่อจำลองวิเคราะห์ความแรงของชิ้นงาน (Finite element analysis) เบื้องต้นจะพบว่าเมื่อมีแรงดึงชิ้นงานขนาด 25 N ซึ่งเป็นแรงต่ำสุดที่ได้จากการทดลอง ชิ้นงานมีจุดที่เสี่ยงต่อการฉีกขาดบริเวณเดียวกับที่เกิดการฉีกขาดดังภาพที่ 40 ทำให้สรุปได้ว่าสำหรับชิ้นงานรูปทรงซับซ้อนเป็นต้องศึกษาเพิ่มเติมถึงความแข็งแรงของวัสดุซึ่งมีความหลากหลายในคุณสมบัติทางกลของชิ้นงานในแต่ละประเภท และรูปร่างของชิ้นงานยาง

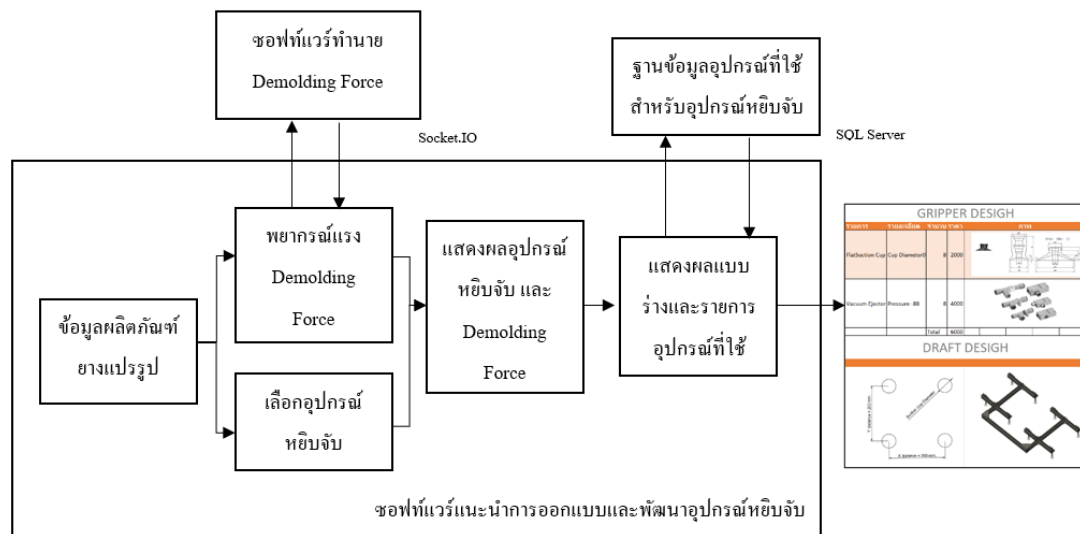


ภาพที่ 41 ภาพการฉีกขาดที่เกิดจากการทดลองของชิ้นงานรูปทรงซับซ้อน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

### 3.6 การออกแบบและพัฒนาซอฟต์แวร์แนะนำการออกแบบและพัฒนาอุปกรณ์หยิบจับเบื้องต้น

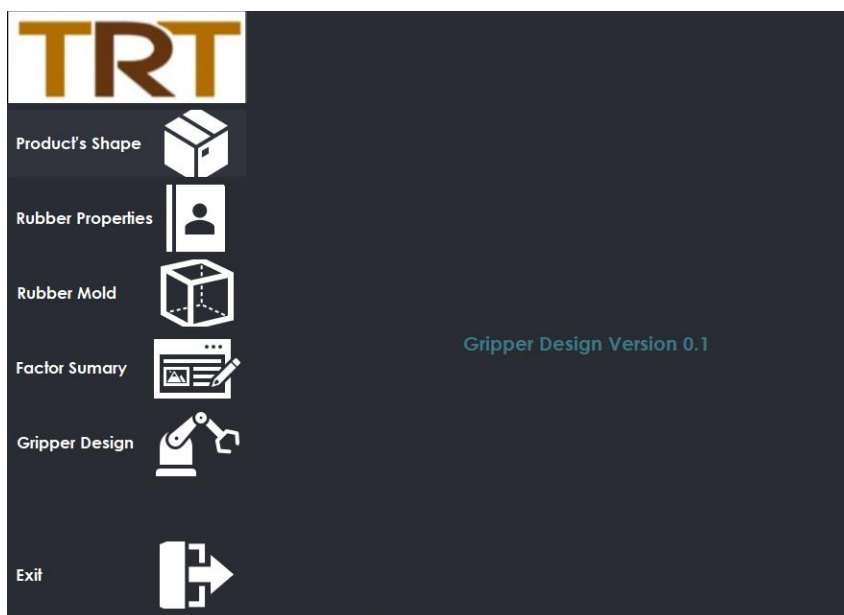
ในการพัฒนาซอฟต์แวร์ผู้วิจัยได้เลือกพัฒนาการทำงานและหน้าตาของซอฟต์แวร์ (User Interface: UI) โดยใช้ซอฟต์แวร์ Visual Studio โดยใช้ภาษา C# แต่ในส่วนของการพยากรณ์แรง Demolding Force นั้นผู้วิจัยได้เลือกพัฒนาด้วยภาษา Python โดยใช้ไลบรารี Scikit-learn โดยมีการสื่อสารกันระหว่างซอฟต์แวร์หลักโดยใช้ Socket IO นอกจากนี้ยังได้พัฒนาระบบฐานข้อมูล (Database) โดย SQL Server โดยการทำงานของซอฟต์แวร์จะรับข้อมูลต่างๆที่เกี่ยวข้องเพื่อนำไปเลือกใช้และแนะนำการออกแบบอุปกรณ์หยิบจับให้ผู้ใช้งาน โดยการทำงานโดยรวมของซอฟต์แวร์นั้นเป็นดังภาพที่ 42



ภาพที่ 42 ภาพแสดงการทำงานโดยรวมของซอฟต์แวร์

### 3.6.1 การออกแบบซอฟต์แวร์แนะนำการออกแบบและพัฒนาอุปกรณ์หยิบจับ

การออกแบบและซอฟต์แวร์นั้นในส่วนของการออกแบบหน้าตาของซอฟต์แวร์ (User Interface: UI) และการทำงานของซอฟต์แวร์ผู้วิจัยได้เลือกใช้ซอฟต์แวร์ Visual Studio ซึ่งเป็นซอฟต์แวร์ที่ได้รวบรวมเครื่องมือที่ใช้พัฒนาแอปพลิเคชันบนแพลตฟอร์มต่างๆ ไม่ว่าจะเป็น Windows Android และ Web อีกทั้งยังมีเครื่องมือสำหรับฐานข้อมูล (Database) และพัฒนาหน้าตา User Interface อีกด้วย โดย Visual Studio ส่วนมากถูกใช้พัฒนา โปรแกรม (Program) โปรแกรมบนเว็บไซต์ (Web Application) บริการบนเว็บ (Web Service) โปรแกรมบนอุปกรณ์พกพา (Mobile Application) และเกมส์ เป็นต้น โดยมีการออกแบบหน้าตาฟอร์มหลักของซอฟต์แวร์ดังภาพที่ 43 โดยจะมีเมนูทางซ้ายมือ

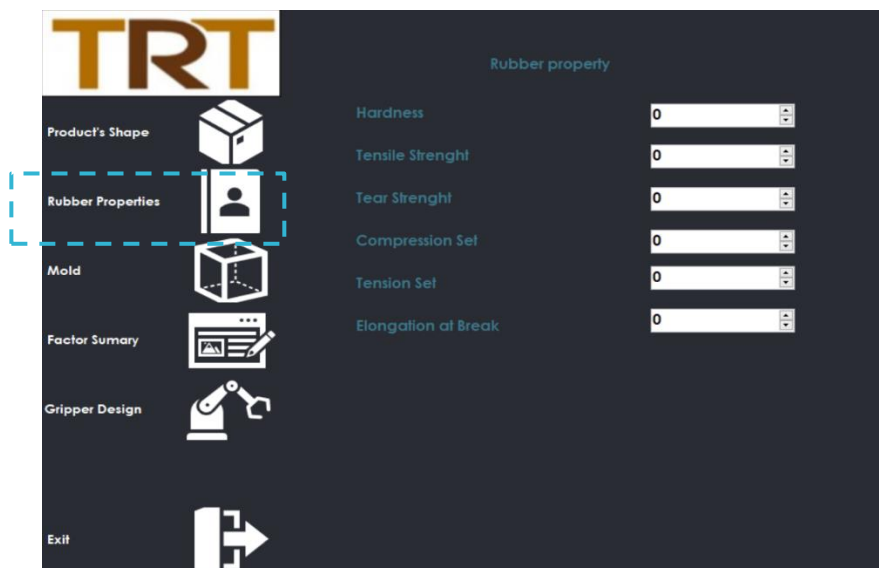


ภาพที่ 43 ภาพแสดงหน้าจอฟอร์มหลัก

โดยหากผู้ใช้งานเลือกที่เมนู Product's Shape เพื่อทำการใส่ข้อมูลของผลิตภัณฑ์ไม่ว่าจะเป็น ขนาด รูปร่าง น้ำหนัก และลักษณะผิวสัมผัส เป็นดังภาพที่ 44

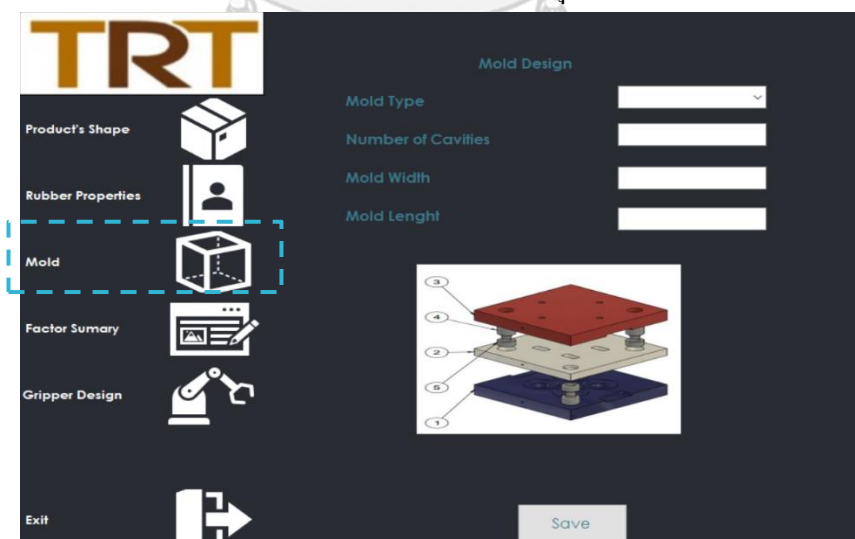
ภาพที่ 44 ภาพแสดงหน้าจอฟอร์มการป้อนลักษณะชิ้นงาน

หลังจากผู้ใช้งานได้ทำการเลือก รูปร่าง ขนาด น้ำหนัก และ ผิวสัมผัสชิ้นงานแล้ว หากผู้ใช้งานเลือกที่ Rubber Properties เพื่อกำหนดคุณสมบัติทางกลของชิ้นงานดังภาพที่ 45



ภาพที่ 45 ภาพแสดงหน้าต่างฟอร์มคุณสมบัติทางกลของชิ้นงาน

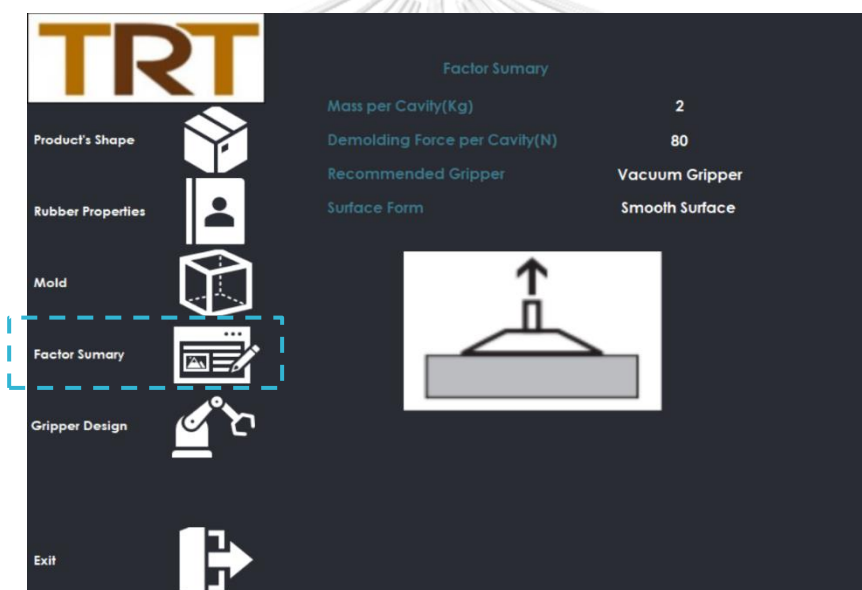
หลังจากผู้ใช้งานได้ทำการเลือกคุณสมบัติทางกลของชิ้นงานแล้ว หากผู้ใช้งานเลือกที่ Mold เพื่อกำหนดประเภทของแม่พิมพ์ ขนาด และจำนวนหลุมชิ้นงานของแม่พิมพ์ดังภาพที่ 46



ภาพที่ 46 ภาพแสดงหน้าต่างฟอร์มแม่พิมพ์

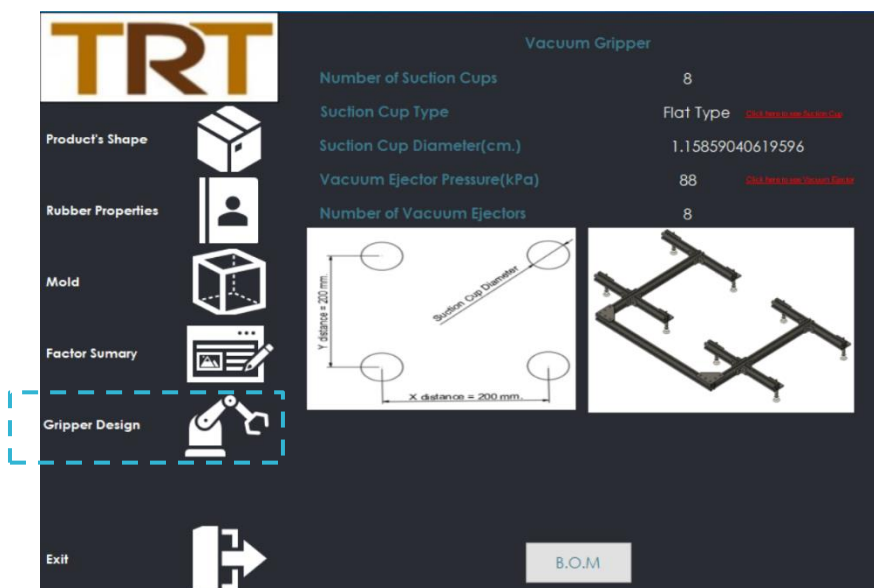


หลังจากผู้ใช้งานกำหนดคุณสมบัติต่างๆที่จำเป็นข้างต้นแล้ว เมื่อผู้ใช้งานกดที่ปุ่ม Save บนหน้าฟอร์มแม่พิมพ์ซอฟต์แวร์จะเลือกดังภาพที่ 46 ซอฟต์แวร์จะทำการเลือกรูปแบบอุปกรณ์หยิบจับที่เหมาะสมกับชิ้นงาน โดยจะมีทั้งหมด 3 รูปแบบคือ 1) รูปแบบสุญญากาศ (Vacuum gripper) 2) รูปแบบหนีบจับ (Rigid gripper) 3) รูปแบบหนีบจับสำหรับชิ้นงานประเภทผงพืด (Special rigid gripper) โดยมีการกำหนดเงื่อนไข (Condition) การเลือกไว้ตามลักษณะชิ้นงานและลักษณะของแม่พิมพ์ และซอฟต์แวร์จะทำการส่งข้อมูลรูปทรงชิ้นงาน ขนาดพื้นที่ผิวสัมผัส และความแข็งชิ้นงาน ไปยังซอฟต์แวร์สำหรับทำนายแรง Demolding force ซึ่งพัฒนาด้วย Python จากนั้นรับค่า Demolding force ที่ได้จากการทำนาย และหากผู้ใช้งานกดที่เมนู Factor summary เพื่อแสดงผลรูปแบบอุปกรณ์หยิบจับที่ได้เลือกและแรง Demolding force ที่ได้จากการพยากรณ์ดังภาพที่ 47

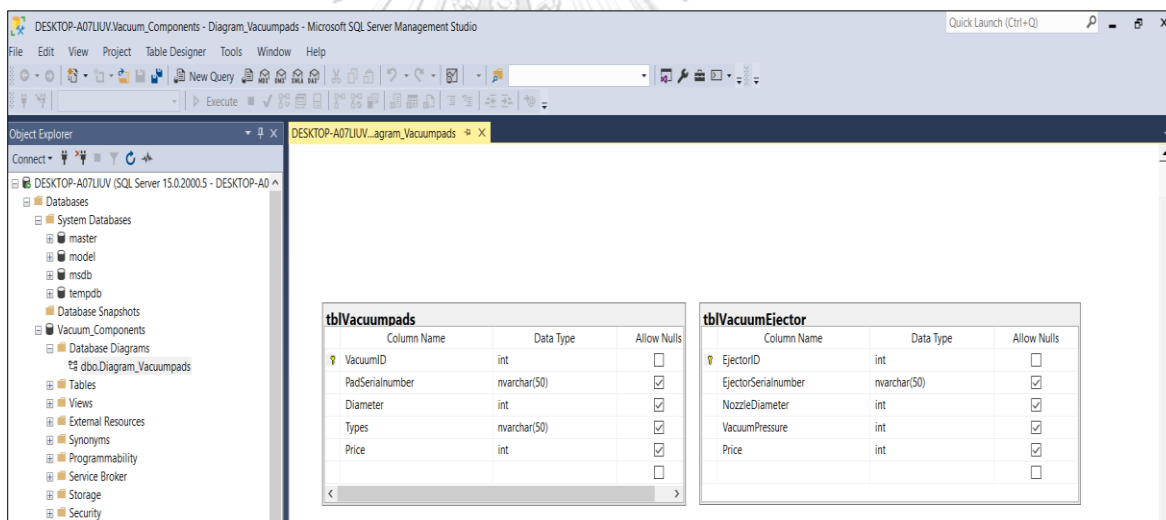


ภาพที่ 47 ภาพแสดงหน้าตาฟอร์มสรุปผล

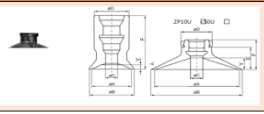
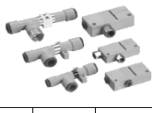
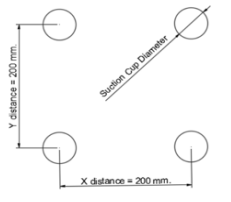
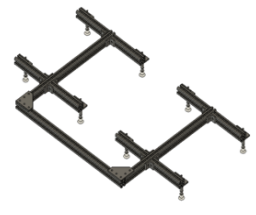
สุดท้ายหากผู้ใช้งานกดที่เมนู Gripper design ผู้ใช้งานจะพบกับหน้าตาฟอร์มแนะนำอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับอุปกรณ์หยิบจับประเภทนั้น และหน้าตาแบบร่างของอุปกรณ์ประเภทนั้นดังภาพที่ 48 และอีกทั้งยังสามารถกดที่คำว่า B.O.M เพื่อส่งออกไฟล์ Excel ที่จะมีข้อมูลอุปกรณ์จากระบบฐานข้อมูล SQL Server ที่ได้สร้างไว้ดังภาพที่ 49 โดยหน้าไฟล์ Excel ที่ได้ดังภาพที่ 50



ภาพที่ 48 ภาพแสดงหน้าต่างฟอร์มการออกแบบอุปกรณ์หยิบจับ



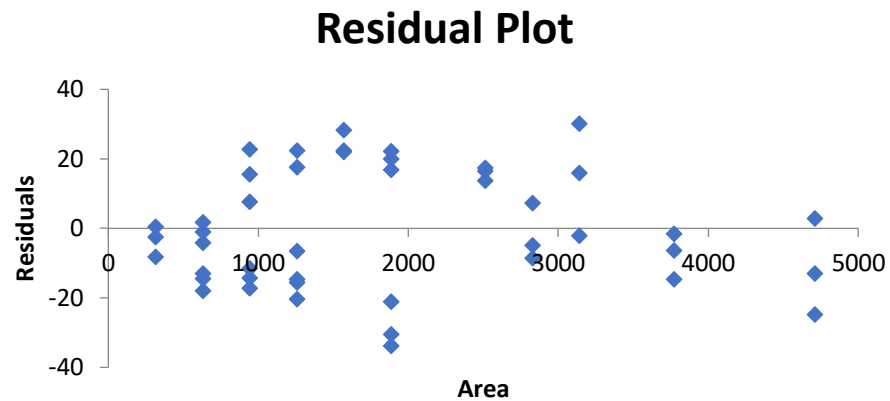
ภาพที่ 49 ภาพแสดงหน้าต่างฐานข้อมูล

| GRIPPER DESIGN  |               |       |  |  |  |
|---|---------------|-------|--|--|--|
| รายการ  | รายละเอียด    | จำนวน | ราคา   | ภาพ  |  |
| FlatSuction Cup   | Cup DiameterØ | 8     | 2000   |  |  |
| Vacuum Ejector  | Pressure -88  | 8     | 4000   |  |  |
|   |               | Total | 6000   |  |  |
| DRAFT DESIGN  |               |       |  |  |  |
|  |               |       |  |  |  |

ภาพที่ 50 ภาพแสดงตัวอย่างหน้าตาไฟล์ Excel

### 3.6.2 การพัฒนาซอฟต์แวร์สำหรับทำนายแรงที่ใช้ในชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์

สำหรับการทำนายแรง Demolding force เริ่มแรกผู้วิจัยได้นำข้อมูลที่ได้จากทดลอง (Dataset) มาดูการกระจายของค่าความผิดพลาดโดยจากข้อมูลการทดลองการกระจายไม่เป็นรูปแบบจึงสามารถนำข้อมูลนี้ไปใช้ในการทำนายได้ดังภาพตัวอย่างที่ 51 หลังจากนั้นผู้วิจัยได้เลือกพัฒนาด้วยภาษา Python ด้วยไลบรารี Scikit-learn เนื่องจากเป็นไลบรารีที่รวบรวมฟังก์ชันพื้นฐานที่จำเป็นสำหรับเพื่อใช้ในการเรียนรู้อของเครื่องจักร (Machine learning) อีกทั้งยังไม่มีค่าใช้จ่ายในการใช้งาน โดยผู้วิจัยต้องการใช้การทำนายพหุคูณ (Multiple regression) โดยการพัฒนาซอฟต์แวร์จะต้องใช้ข้อมูลที่ได้จากการทดลอง (Data set) โดยจะประกอบไปด้วยตัวแปรตอบสนอง (Respond variable) หรือก็คือ Demolding force และตัวแปรคุณลักษณะ (Feature) ในที่นี้ได้แก่ พื้นที่สัมผัส และความแข็ง ดังภาพที่ 52 แต่ในส่วนงานของชิ้นงานที่มีผิวอิงทรายจะนำผลลัพธ์ที่ได้มาคูณด้วยค่าสัมประสิทธิ์ของผิวอิงทรายซึ่งได้มากจากการทดลอง โดยผู้วิจัยได้ใช้ข้อมูลของชิ้นงานทรงกระบอก และชิ้นงานทรงสี่เหลี่ยม



ภาพที่ 51 ภาพแสดงตัวอย่างการกระจายของค่าความคลาดเคลื่อน

| Features | Area   | Hardness | Force |
|----------|--------|----------|-------|
|          | 314    | 40       | 5.5   |
|          | 628    | 40       | 14    |
|          | 942.7  | 40       | 35    |
|          | 1256   | 40       | 49    |
|          | 1570.7 | 40       | 56    |
|          | 628.3  | 40       | 8     |
|          | 1256.6 | 40       | 12    |
|          | 1884.9 | 40       | 58    |
|          | 2513.2 | 40       | 73    |
|          | 3141.5 | 40       | 68    |

ภาพที่ 52 ภาพแสดงตัวอย่างข้อมูลที่ใช้สำหรับการเรียนรู้

ในส่วนของการพัฒนาซอฟต์แวร์สำหรับโมเดลการเรียนรู้ของเครื่อง (Machine learning Model) นั้นจะเริ่มจากการอ่านไฟล์ตาราง (Comma-separated value: CSV) จากนั้นกำหนดให้ Area และ Hardness เป็นตัวแปรคุณลักษณะ (Feature variable: X) และ Force เป็นตัวแปรตอบสนอง (Respond variable) ดังภาพที่ 53

```
data = pd.read_csv('CylinderData.csv')
numeric_features = ['Area', 'Hardness']
X = data[['Area', 'Hardness']]
Y = data[['Force']]
```

ภาพที่ 53 ภาพแสดงตัวการนำเข้าข้อมูลตาราง

หลังจากนั้นทำการแยกข้อมูลเป็น 2 ส่วนเป็นชุดข้อมูลสำหรับทดสอบและชุดข้อมูลสำหรับการเรียนรู้ของเครื่องโดยในที่นี้กำหนดให้ข้อมูลที่ใช้สำหรับทดสอบเป็น 30 % และข้อมูลสำหรับการเรียนรู้ของเครื่องเป็น 70 % ของข้อมูลทั้งหมดดังภาพที่ 54

```
X_train, X_test, y_train, y_test = train_test_split(X, Y, test_size=0.30, random_state=0)
print_('Training Set: %d rows\nTest Set: %d rows' % (X_train.shape[0], X_test.shape[0]))
```

ภาพที่ 54 ภาพตัวอย่างการแบ่งข้อมูลสำหรับเรียนรู้ของเครื่องและการทดสอบ

สุดท้ายสามารถใช้ฟังก์ชัน Linear regression สำหรับการเรียนรู้ของเครื่องสำหรับข้อมูลที่เป็นเชิงเส้นดังภาพที่ 55

```
model = LinearRegression()
model.fit(X_train, y_train)
```

ภาพที่ 55 ภาพตัวอย่างการเรียนรู้ชุดข้อมูลโดยใช้ฟังก์ชัน Linear Regression

ในส่วนต่อไปเป็นการนำ Regression model ที่ได้ไปใช้งานโดยส่วนนี้จะประกอบไปกับการเรียกใช้งาน Regression model ดังภาพที่ 56 และการรับส่งข้อมูลผ่าน Socket IO กับซอฟต์แวร์แนะนำการออกแบบและพัฒนาอุปกรณ์หยิบจับ โดยผู้วิจัยเรียกซอฟต์แวร์นี้ว่า ซอฟต์แวร์ทำนาย Demolding force

```
X_new = np.array([[Area, Hardness]]).astype('float64')
result = loaded_model.predict(X_new)
```

ภาพที่ 56 ภาพตัวอย่างการใช้ Regression model

### 3.6.3 ผลลัพธ์จากการวิเคราะห์การถดถอยพหุคูณ (Multiple Regression Analysis)

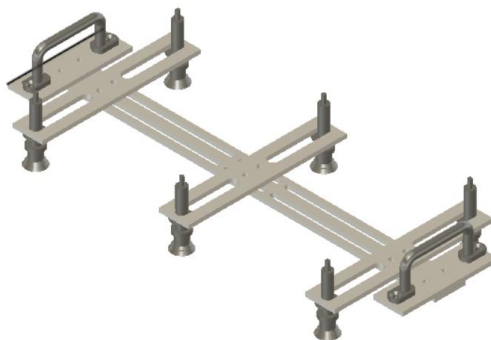
หลังจากการเรียนรู้ชุดข้อมูลของชิ้นงานทรงกระบอก ผลลัพธ์ของโมเดลการเรียนรู้ของเครื่องชิ้นงานทรงกระบอกแสดงถึงอิทธิพลของพื้นที่สัมผัสของยาง และความแข็งของยางอย่างมีนัยยะสำคัญ โดยดูจาก P-value ของตัวแปรพื้นที่สัมผัส (Contact area: A) เท่ากับ  $6.16 \times 10^{-14}$  และของตัวแปรความแข็งของยาง (Hardness: H) เท่ากับ 0.036 ซึ่งมาค่าน้อยกว่า 0.05 แสดงให้เห็นว่ามีผลอย่างเป็นนัยยะสำคัญทางสถิติ เช่นเดียวกับชุดข้อมูลชิ้นงานทรงสี่เหลี่ยมที่มีค่า P-value ของตัวแปรพื้นที่สัมผัส (Contact area: A) เท่ากับ  $4.08 \times 10^{-11}$  และของตัวแปรความแข็งของยาง (Hardness: H) เท่ากับ 0.042 และในส่วนของค่าสัมประสิทธิ์กำหนด (The coefficient of determine:  $R^2$ ) ของโมเดลทรงกระบอก และทรงสี่เหลี่ยม มีค่าเท่ากับ 74.9 % และ 66 % ตามลำดับซึ่งแสดงให้เห็นว่าปัจจัยพื้นที่สัมผัสและความแข็งของยางสามารถอธิบายตัวแปรแรง Demolding Force ได้มากน้อยเพียงใดซึ่งการวิเคราะห์ที่เลือกใช้ในเบื้องต้นเป็นลักษณะการวิเคราะห์เชิงเส้น

## 3.7 การพัฒนาอุปกรณ์หยิบจับต้นแบบ

ในส่วนการพัฒนาอุปกรณ์หยิบจับต้นแบบผู้วิจัยได้พัฒนาอุปกรณ์หยิบจับเพื่อทดสอบประสิทธิภาพของซอฟต์แวร์แนะนำการออกแบบและพัฒนาอุปกรณ์หยิบจับ และเพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพของซอฟต์แวร์ให้ดียิ่งขึ้น โดยผู้วิจัยได้พัฒนาอุปกรณ์หยิบจับประเภทสุญญากาศ (Vacuum gripper) และอุปกรณ์หยิบจับประเภทหนีบจับ (Rigid gripper)

### 3.7.1 อุปกรณ์หยิบจับประเภทสุญญากาศ (Vacuum gripper)

อุปกรณ์ประเภทนี้เหมาะสำหรับชิ้นงานประเภทยางแผ่นที่มีลักษณะเป็นทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้าเรียบในการป้อนข้อมูลให้ซอฟต์แวร์ผู้วิจัยจึงเลือกใช้ข้อมูลของชิ้นงานยางแผ่นขนาด 150 x 150 x 2 mm. ผิวกลิ้ง ที่มีความแข็ง 65 Shore A และยางแผ่นขนาด 320 x 220 x 2 mm. ที่มีความแข็ง 65 ทำให้ซอฟต์แวร์แนะนำให้ใช้อุปกรณ์ประเภทสุญญากาศ (Vacuum gripper) โดยที่ซอฟต์แวร์จะคำนวณ Demolding Force พร้อมแนะนำอุปกรณ์ที่ใช้ได้แก่ อุปกรณ์สร้างสุญญากาศ (Vacuum ejector) และอุปกรณ์ส่วนดูดชิ้นงาน (Vacuum Pad) หลังจากนั้นจึงได้นำข้อมูลที่ได้ออกแบบโครงสร้าง Gripper ด้วยโปรแกรม Fusion 365 ดังภาพที่ 57 และได้นำอุปกรณ์ต้นแบบไปทดลองหยิบจับชิ้นงานขนาด 150 x 150 x 2 mm. ที่มีความแข็ง 65 และยางแผ่นขนาด 320 x 220 x 2 mm. ที่มีความแข็ง 65 ดังภาพที่ 58



ภาพที่ 57 ภาพอุปกรณ์หยิบจับสุญญากาศต้นแบบ



ภาพที่ 58 ภาพการทดลองอุปกรณ์หยิบจับสุญญากาศต้นแบบ

- ผลการทดลองอุปกรณ์หยิบจับสุญญากาศ

ส่วนต่อไปผลลัพธ์ที่ได้จากการใช้ซอฟต์แวร์แนะนำการออกแบบอุปกรณ์หยิบ โดยเมื่อใส่ข้อมูลชิ้นงานยางแผ่นที่มีขนาดพื้นที่สัมผัสเท่ากับ  $23700 \text{ mm}^2$  ผิวแม่พิมพ์เป็นผิวกลึง ชิ้นงานมีความแข็งเท่ากับ 65 Shore A ทำให้ซอฟต์แวร์เลือกอุปกรณ์ประเภทสุญญากาศโดยจะประกอบอุปกรณ์ดูดชิ้นงาน (Vacuum pad) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 32 mm. และอุปกรณ์สร้างแรงดันสุญญากาศขนาด -85 kPa โดยใช้ทั้งหมด 6 ชุด ซึ่งจากการคำนวณจะได้แรง Demolding force มีค่าเท่ากับ 420 N ในขณะที่ Demolding Force ที่ได้จากการคำนวณมีค่าเท่ากับ 322 N ในขณะที่แรง Demolding Force ที่ตัว Gripper ทำได้จริงมีค่าเท่ากับ 150 N ก็เพียงพอสำหรับนำชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์ ด้วยเหตุนี้แรง Demolding Force จึงมีค่าความปลอดภัยอยู่ที่ 2.8 ในขณะที่เมื่อใส่ข้อมูล

ชิ้นงานยางแผ่นที่มีขนาดพื้นที่สัมผัสเท่ากับ  $79200 \text{ mm}^2$  ผิวแม่พิมพ์เป็นผิวกลึง ชิ้นงานมีความแข็งเท่ากับ 65 Shore A ทำให้ซอฟต์แวร์เลือกอุปกรณ์ประเภทสุญญากาศโดยจะประกอบอุปกรณ์ดูดชิ้นงาน (Vacuum pad) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 32 mm. และอุปกรณ์สร้างแรงดันสุญญากาศขนาด -85 kPa โดยใช้ทั้งหมด ชุด ซึ่งจากการคำนวณจะได้แรง Demolding force มีค่าเท่ากับ 1291 N ในขณะที่ Demolding force ที่ได้จากการคำนวณมีค่าเท่ากับ 1360 N ในขณะที่แรง Demolding force ที่ตัว Gripper ทำได้จริงมีค่าเท่ากับ 300 N ซึ่งเกิดจากการที่เมื่อเพิ่มจำนวนอุปกรณ์ดูดชิ้นงาน (Vacuum pad) ทำให้ประสิทธิภาพแรงสุญญากาศลดลง ทำให้ไม่สามารถนำชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์ได้ตามต้องการ

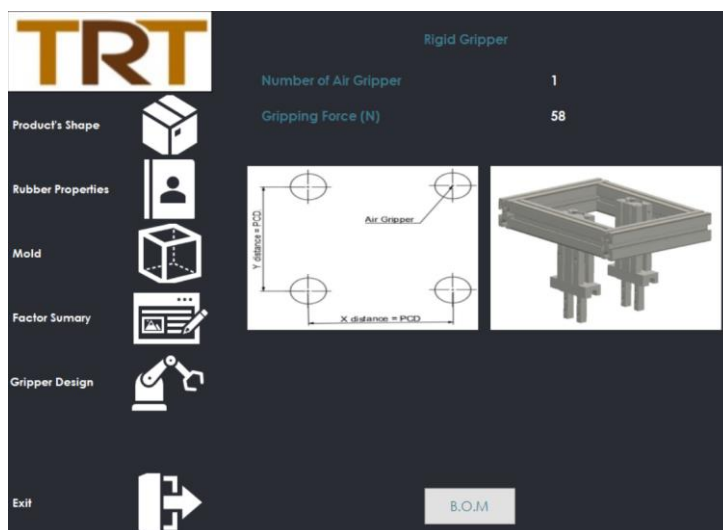
ตารางที่ 6 ตารางผลการทดสอบอุปกรณ์หยิบจับประเภทสุญญากาศ

| พื้นที่สัมผัส ( $\text{mm}^2$ ) | ความแข็ง (Shore A) | จำนวน Vacuum pad | เส้นผ่านศูนย์กลาง Vacuum pad (mm.) | ความดันสุญญากาศ (kPa) | แรง Demolding Force ที่คำนวณ (N) | แรง Demolding force จากการคำนวณโดยใช้ Vacuum pad (N) | แรง Demolding force จาก Vacuum pad ที่ทำได้จริง (N) | ผลลัพธ์   |
|---------------------------------|--------------------|------------------|------------------------------------|-----------------------|----------------------------------|--|---|-----------|
| 23700                           | 65                 | 6                | 32                                 | -85                   | 322                              | 420  | 150   | สำเร็จ    |
| 79200                           | 65                 | 20               | 32                                 | -85                   | 1291                             | 1360   | 300   | ไม่สำเร็จ |

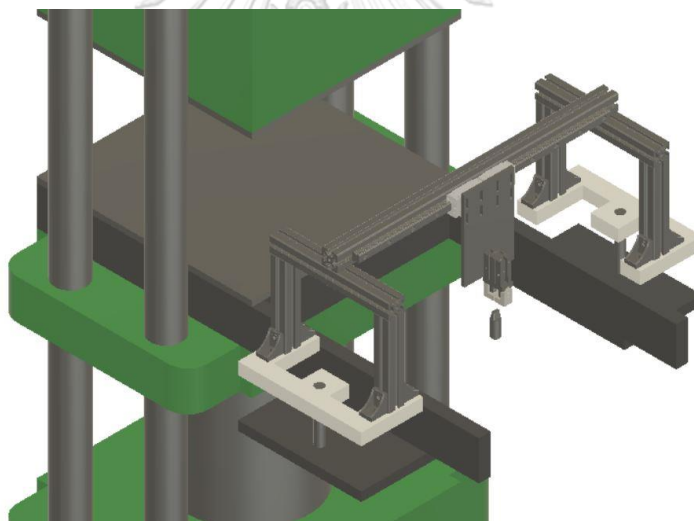
### 3.7.2 อุปกรณ์หยิบจับประเภทหนีบจับ (Rigid gripper)

ในส่วนอุปกรณ์หยิบจับประเภทหนีบจับ (Rigid gripper) ผู้วิจัยได้เลือกทำการทดลองกับชิ้นงานทรงกระบอกผิววงทลายที่มีพื้นที่สัมผัสขนาด  $2826 \text{ mm}^2$  ความแข็ง 50 Shore A โดยผลที่ได้จากซอฟต์แวร์คือแนะนำให้ใช้อุปกรณ์หยิบจับประเภทหนีบจับ (Rigid gripper) ดังภาพที่ 59 และได้แนะนำอุปกรณ์หนีบจับประเภทลม (Pneumatic gripper) หลังจากนั้นจึงได้นำข้อมูลไปออกแบบโครงสร้างด้วยโปรแกรม Fusion 365 ดังภาพ 60 และทำการทดลองดังภาพ 61

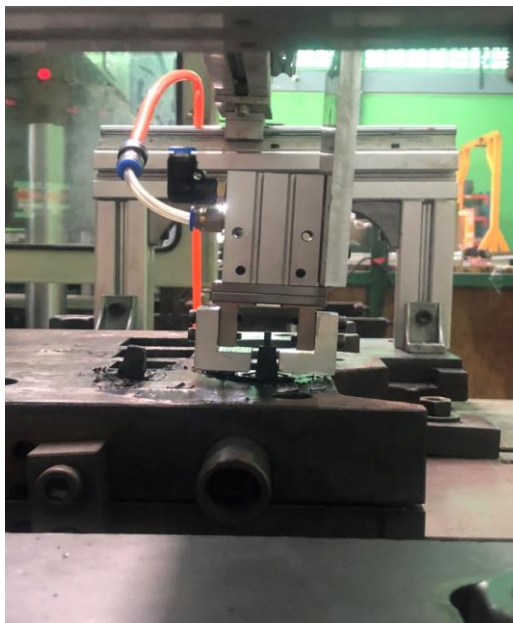




ภาพที่ 59 ภาพการแนะนำอุปกรณ์ประเภทหนีบจับ

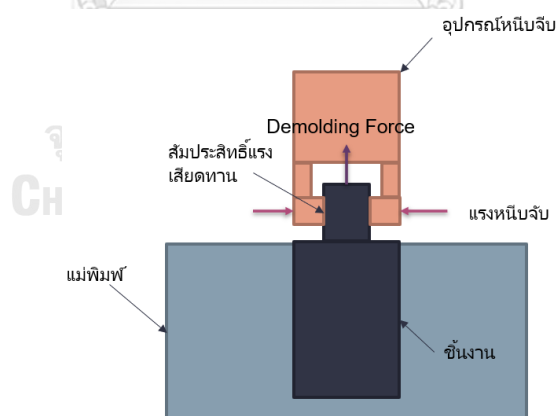


ภาพที่ 60 ภาพการออกแบบโครงสร้างอุปกรณ์ประเภทหนีบจับ



ภาพที่ 61 ภาพการทดลองอุปกรณ์ประเภทหนีบจับ

สำหรับการทดสอบในส่วนของรูปแบบหนีบจับ (Rigid gripper) จำเป็นต้องทำการทดลองเพิ่มเติมเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานระหว่างอุปกรณ์หนีบจับและชิ้นงานดังภาพที่ 62



ภาพที่ 62 ภาพการทดลองหาสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน

- ผลการทดลองอุปกรณ์หนีบจับแบบหนีบจับ

ผลลัพธ์ที่ได้จากการใช้ซอฟต์แวร์แนะนำการออกแบบอุปกรณ์หนีบโดยเมื่อใส่ข้อมูลของชิ้นงานทรงกระบอกมีขนาดพื้นที่สัมผัสเท่ากับ  $2826 \text{ mm}^2$  ผิวแม่พิมพ์เป็นผิวยิงทราย ชิ้นงานมีความแข็งเท่ากับ 50 Shore A ทำให้ซอฟต์แวร์เลือกอุปกรณ์ประเภทหนีบจับ (Rigid gripper) โดยจะประกอบไปด้วยอุปกรณ์หนีบจับลม (Pneumatic gripper) ซึ่งซอฟต์แวร์ทำนายแรง Demolding force ได้ที่ 133 N ซึ่งแรง Demolding force ที่ได้จากการทดลองอยู่ที่ 40 ถึง 48 N และแรงหนีบจับจากซอฟต์แวร์อยู่ที่ 133 N โดยแรงตรงนี้จะใช้ในการเลือกอุปกรณ์หนีบจับลม (Pneumatic gripper) ในขณะที่แรงหนีบจับจากการทดลองอยู่ 42 N ทำให้มีค่าความปลอดภัยในการเลือกใช้อยู่ที่ 3.1 ดังตารางที่ 7

ตารางที่ 7 ตารางผลการทดสอบอุปกรณ์หนีบจับประเภทหนีบจับ

| พื้นที่สัมผัส<br>( $\text{mm}^2$ ) | ความแข็ง<br>(ShoreA) | ความหยาบผิว | แรงดันลมที่ใช้<br>(Mpa) | แรง Demolding<br>force ทำนาย (N) | แรง Demolding<br>force จากการ<br>ทดลอง (N) | แรงหนีบจับทำนาย<br>(N) | แรงหนีบจับจากการ<br>ทดลอง (N) | ผลลัพธ์ |
|------------------------------------|----------------------|-------------|-------------------------|----------------------------------|--|------------------------|-------------------------------|---------|
| 2826                               | 50                   | ผิวยิงทราย  | 0.4                     | 133                              | 40-48                                      | 113                    | 42                            | สำเร็จ  |

## บทที่ 4

### สรุปผลและข้อเสนอแนะ

#### 4.1 สรุปผล

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาซอฟต์แวร์คอมพิวเตอร์สำหรับช่วยแนะนำการออกแบบและพัฒนาอุปกรณ์หยิบจับชิ้นงานยางแปรรูปให้เหมาะสมตรงกับผลิตภัณฑ์ยางแปรรูปซึ่งในปัจจุบันยางแปรรูปมีหลากหลายทั้งรูปร่าง ขนาด และคุณสมบัติทางกล รวมถึงกระบวนการขึ้นรูปชิ้นงานที่หลากหลาย ทำให้ในระยะเริ่มต้นของวิทยานิพนธ์นี้ผู้วิจัยได้เริ่มจากการศึกษากระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์ยางแปรรูปที่เกิดขึ้นในโรงงานแปรรูปยาง จากนั้นจึงได้ทำการเลือกรูปแบบการขึ้นรูปที่ต้องการศึกษาซึ่งเป็นการขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์แบบอัดเพราะเป็นกระบวนการขึ้นรูปที่ได้รับความนิยมมากที่สุดในการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ยางแปรรูป นอกจากนี้ในกระบวนการในการนำชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์นั้นยังเป็นเรื่องที่ศึกษาเพิ่มเติมถึงแรงที่ต้องใช้ในการนำชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์เพราะจากการสังเกตและรวบรวมข้อมูลเบื้องต้นพบว่าพนักงานต้องใช้แรงในการดึงชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์มากและต้องอาศัยทักษะความชำนาญ ผู้วิจัยจึงได้ศึกษาและรวบรวมข้อมูลในเรื่องแรงที่ต้องใช้ในการนำชิ้นงานยางออกจากแม่พิมพ์ (Demolding force) และพบว่าแรง Demolding force ประกอบไปด้วย 2 ส่วนหลักๆ นั่นก็คือ แรงเสียดทาน (Friction force) และแรงยึดติด (Adhesion force) ซึ่งเป็นเรื่องที่ยากหากต้องการวัดและแยกแรงเสียดทาน และแรงยึดติดนี้ นอกจากนี้ปัจจัยที่ส่งผลต่อแรงทั้งสองนี้ได้แก่ รูปร่างของยาง พื้นที่สัมผัส ความหยาบผิว และความแข็งของยาง ดังนั้นจากวัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์ในขั้นตอนถัดไปผู้วิจัยจึงออกแบบรูปแบบวิธีการทดลองและการทดลองด้วย Full factorial design เพื่อสามารถวัดและรวบรวมผลลัพธ์แรง Demolding force ในหลากหลายสภาวะ โดยได้แบ่งการทดลองเป็น 3 การทดลองได้แก่

- 1) การทดลอง Full factorial design (พื้นที่สัมผัส, ความแข็ง และรูปร่างชิ้นงาน)
- 2) การทดลอง Full factorial design (ความหยาบผิว)
- 3) การทดลอง Full factorial design (รูปร่างชิ้นงาน)

จากการทดลองจึงสรุปได้ว่าเมื่อพื้นที่สัมผัส ความแข็งของยาง และความหยาบผิวเพิ่มมากขึ้นจะส่งผลให้แรง Demolding เพิ่มขึ้นตามไปด้วยโดยปัจจัยที่ส่งผลมากที่สุดได้แก่ พื้นที่สัมผัส เนื่องจากข้อมูลชิ้นงานทรงกระบอกมีค่า P-value ของตัวแปรพื้นที่สัมผัส (Contact area: A) เท่ากับ  $6.16 \times 10^{-14}$  และข้อมูลชิ้นงานทรงสี่เหลี่ยมที่มีค่า P-value ของตัวแปรพื้นที่สัมผัส (Contact area: A) เท่ากับ  $4.08 \times 10^{-11}$

หลังจากที่ได้ทำการทดลองแล้วทำให้ได้ข้อมูลของแรง Demolding force ในสถานะต่างๆ และจากวัตถุประสงค์คือพัฒนาซอฟต์แวร์แนะนำการออกแบบอุปกรณ์หยิบจับ ผู้วิจัยจึงเลือกใช้การวิเคราะห์พหุคูณ (Multiple regression) เพื่อพยากรณ์แรง Demolding force เพื่อที่จะนำไปใช้ในการออกแบบและพัฒนาอุปกรณ์หยิบจับต่อไป โดยจากผลลัพธ์จากโมเดลพบว่าสัมประสิทธิ์กำหนด (The coefficient of determine:  $R^2$ ) ของโมเดลทรงกระบอก และทรงสี่เหลี่ยม มีค่าเท่ากับ 74.9 % และ 66 % ตามลำดับ โดยชุดข้อมูลของชิ้นงานทรงกระบอกมีลักษณะค่อนข้างเป็นเชิงเส้นมากกว่าทรงสี่เหลี่ยม

ในส่วนของการพัฒนาซอฟต์แวร์แนะนำการออกแบบผู้วิจัยได้พัฒนาการทำงานของซอฟต์แวร์และหน้าตา (User Interface : UI) ด้วยภาษา C# โดยหน้าตาของซอฟต์แวร์ถูกออกแบบให้ง่ายต่อวิศวกรผู้ใช้งานซึ่งได้ร่วมกันออกแบบกับวิศวกรผู้ใช้งานโดยมีการใช้ภาษาทางเทคนิคให้ตรงกับทางวิศวกรที่ใช้งานอยู่ในปัจจุบัน และออกแบบการทำงานของซอฟต์แวร์โดยเริ่มจากการรับข้อมูลต่างๆของผลิตภัณฑ์เช่น ขนาด รูปร่าง ความแข็ง จำนวนหลุมชิ้นงาน เป็นต้น จากนั้นซอฟต์แวร์จะเลือกประเภทของอุปกรณ์หยิบจับตามเงื่อนไขที่ได้ตั้งไว้ อีกทั้งยังทำการพยากรณ์แรง Demolding force ผ่าน Regression model ที่ได้พัฒนาก่อนหน้านี้ หลังจากนั้นซอฟต์แวร์จะทำการเลือกอุปกรณ์ที่ต้องใช้ในการผลิตอุปกรณ์หยิบจับตามที่ได้เลือกตามเงื่อนไขก่อนหน้านี้โดยข้อมูลของอุปกรณ์ที่ต้องใช้ในการผลิตอุปกรณ์หยิบจับนี้จะถูกเก็บอยู่ในรูปแบบฐานข้อมูล (Database) ซึ่งทำให้ผู้ใช้งานสามารถเข้าไปเพิ่ม ลด และปรับแก้ได้ อีกทั้งซอฟต์แวร์ยังสามารถส่งออกเป็นรายการอุปกรณ์และราคา (Bill of material : BOM)

สุดท้ายผู้วิจัยได้ทำการทดลองพัฒนาอุปกรณ์หยิบจับจากผลลัพธ์ที่ได้จากซอฟต์แวร์เพื่อทดสอบประสิทธิภาพของซอฟต์แวร์โดยแบ่งเป็น 2 การทดลองคือ อุปกรณ์หยิบจับสุญญากาศ (Vacuum gripper) และอุปกรณ์หยิบจับแบบหนีบจับ (Rigid Gripper) พบว่าในการทดลองอุปกรณ์หยิบจับสุญญากาศซอฟต์แวร์เลือกอุปกรณ์ที่มีแรง Demolding force มากกว่าที่ต้องใช้จริงอยู่ที่ 2.8 เท่า และการทดลองอุปกรณ์หยิบจับแบบหนีบจับซอฟต์แวร์เลือกอุปกรณ์ที่มีแรง Demolding force มากกว่าที่ต้องใช้จริงอยู่ที่ 3.1 เท่า ซึ่งผู้วิจัยมองว่าเป็นค่าความปลอดภัยในการใช้งานเนื่องจากในสถานการณ์จริงสามารถมีปัจจัยอื่นๆที่ส่งผลต่อการนำชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์

#### 4.2 ข้อเสนอแนะ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอแนวทางการเลือกใช้และพัฒนาอุปกรณ์หยิบจับ (Gripper) สำหรับการนำผลิตภัณฑ์ยางแปรรูปออกจากแม่พิมพ์ขึ้นรูปชิ้นงาน โดยที่ผ่านมาการพัฒนาอุปกรณ์หยิบจับในอุตสาหกรรมยางแปรรูปยังอาศัยการลองผิดลองถูกเนื่องจากวิศวกรไม่ทราบแรงที่ต้องใช้ในการนำชิ้นงานยางออกจากแม่พิมพ์จริงๆ ซึ่งทำให้เกิดความสูญเปล่าด้านงบประมาณที่ใช้ผลิตอุปกรณ์หยิบจับที่ต้องพัฒนาอุปกรณ์หยิบจับต้นแบบออกมาในหลากหลายรูปแบบเพื่อให้สามารถนำชิ้นงานยางออกจากแม่พิมพ์ได้ โดยซอฟต์แวร์นี้สามารถนำมาใช้งานเพื่อเพิ่มความมั่นใจในการออกแบบอุปกรณ์หยิบจับให้กับวิศวกรได้ และซอฟต์แวร์ยังมีความยืดหยุ่นโดยเปิดระบบให้วิศวกรสามารถปรับแก้ไขค่าพารามิเตอร์ความปลอดภัยในการเลือกใช้งานอุปกรณ์ (Safety factor) รวมถึงแก้ไขข้อมูลของอุปกรณ์ที่ใช้ในการผลิตอุปกรณ์หยิบจับเช่น Vacuum pads, Vacuum ejectors และ Air gripper เป็นต้น ในระบบฐานข้อมูล (Database)

ในการปรับปรุงพัฒนาซอฟต์แวร์ในอนาคตเพื่อให้มีซอฟต์แวร์มีความแม่นยำในการเลือกอุปกรณ์หยิบจับมากขึ้นนั้น ผู้วิจัยแนะนำให้มีการทดลองในส่วนของการทดสอบประสิทธิภาพของซอฟต์แวร์เพิ่มเติมในสถานการณ์ต่างๆ เพื่อเปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้จากซอฟต์แวร์ โดยหลังจากนั้นจึงสามารถปรับปรุง Regression model ที่ใช้สำหรับการทำนายแรง Demolding force โดยการเปลี่ยนข้อมูลสำหรับการเรียนรู้ (Dataset) โดยก่อนหน้าใช้ข้อมูลที่เป็นค่าสูงสุดเนื่องจากต้องการให้เป็นค่าความปลอดภัย ให้เป็นชุดข้อมูลแรง Demolding force เฉลี่ย และสามารถปรับเปลี่ยนอัลกอริทึม (Algorithm) ที่ใช้สอนโมเดลเป็นรูปแบบอื่นเช่น Polynomial regression และ Neural network เป็นต้น เพื่อเปรียบเทียบผลลัพธ์ในแต่ละโมเดลให้ได้ความแม่นยำที่มากที่สุด

## ภาคผนวก

ตารางที่ 8 Full Factorial Design Matrix สำหรับชิ้นงานทรงกระบอก

| Run order | Area (mm <sup>2</sup> ) | Hardness (Shore A) | Demolding force(N) |
|-----------|-------------------------|--------------------|--------------------|
| 1         | 314                     | 40                 | 5.5                |
| 2         | 628                     | 40                 | 14                 |
| 3         | 942.7                   | 40                 | 35                 |
| 4         | 1256                    | 40                 | 49                 |
| 5         | 1570.7                  | 40                 | 56                 |
| 6         | 314                     | 50                 | 9.4                |
| 7         | 628                     | 50                 | 18                 |
| 8         | 942.7                   | 50                 | 34                 |
| 9         | 1256                    | 50                 | 27                 |
| 10        | 1570.7                  | 50                 | 69                 |
| 11        | 314                     | 60                 | 10.5               |
| 12        | 628                     | 60                 | 11.5               |
| 13        | 942.7                   | 60                 | 56                 |
| 14        | 1256                    | 60                 | 58                 |
| 15        | 1570.7                  | 60                 | 70                 |
| 16        | 628.3                   | 40                 | 8                  |
| 17        | 1256.6                  | 40                 | 12                 |
| 18        | 1884.9                  | 40                 | 58                 |
| 19        | 2513.2                  | 40                 | 73                 |
| 20        | 3141.5                  | 40                 | 68                 |
| 21        | 628.3                   | 50                 | 6                  |
| 22        | 1256.6                  | 50                 | 18                 |
| 23        | 1884.9                  | 50                 | 68                 |
| 24        | 2513.2                  | 50                 | 79                 |
| 25        | 3141.5                  | 50                 | 93                 |
| 26        | 628.3                   | 60                 | 8                  |
| 27        | 1256.6                  | 60                 | 20                 |
| 28        | 1884.9                  | 60                 | 77                 |
| 29        | 2513.2                  | 60                 | 83                 |
| 30        | 3141.5                  | 60                 | 114                |
| 31        | 942                     | 40                 | 8                  |
| 32        | 1884.9                  | 40                 | 10.7               |
| 33        | 2828                    | 40                 | 58                 |
| 34        | 3769.8                  | 40                 | 70                 |
| 35        | 4712                    | 40                 | 81.5               |
| 36        | 942                     | 50                 | 12                 |
| 37        | 1884.9                  | 50                 | 27                 |
| 38        | 2828                    | 50                 | 77                 |
| 39        | 3769.8                  | 50                 | 90                 |
| 40        | 4712                    | 50                 | 116                |
| 41        | 942                     | 60                 | 16                 |
| 42        | 1884.9                  | 60                 | 21                 |
| 43        | 2828                    | 60                 | 68                 |
| 44        | 3769.8                  | 60                 | 92                 |
| 45        | 4712                    | 60                 | 107                |

ตารางที่ 9 Full Factorial Design Matrix สำหรับชิ้นงานทรงสี่เหลี่ยม

| Run order | Area (mm <sup>2</sup> ) | Hardness (Shore A) | Demolding force(N) |
|-----------|-------------------------|--------------------|--------------------|
| 1         | 364                     | 40                 | 13                 |
| 2         | 764                     | 40                 | 17.4               |
| 3         | 1164                    | 40                 | 35.3               |
| 4         | 1564                    | 40                 | 27                 |
| 5         | 1964                    | 40                 | 72                 |
| 6         | 364                     | 50                 | 11                 |
| 7         | 764                     | 50                 | 16.3               |
| 8         | 1164                    | 50                 | 27.6               |
| 9         | 1564                    | 50                 | 48                 |
| 10        | 1964                    | 50                 | 56                 |
| 11        | 364                     | 60                 | 13                 |
| 12        | 764                     | 60                 | 35                 |
| 13        | 1164                    | 60                 | 33                 |
| 14        | 1564                    | 60                 | 56                 |
| 15        | 1964                    | 60                 | 84                 |
| 16        | 728                     | 40                 | 18                 |
| 17        | 1528                    | 40                 | 14                 |
| 18        | 2328                    | 40                 | 45.5               |
| 19        | 3128                    | 40                 | 74                 |
| 20        | 3931                    | 40                 | 81                 |
| 21        | 728                     | 50                 | 17                 |
| 22        | 1528                    | 50                 | 19                 |
| 23        | 2328                    | 50                 | 42                 |
| 24        | 3128                    | 50                 | 91                 |
| 25        | 3931                    | 50                 | 114                |
| 26        | 728                     | 60                 | 13                 |
| 27        | 1528                    | 60                 | 23                 |
| 28        | 2328                    | 60                 | 70                 |
| 29        | 3128                    | 60                 | 113                |
| 30        | 3931                    | 60                 | 90                 |
| 31        | 1092                    | 40                 | 14                 |
| 32        | 2292                    | 40                 | 33                 |
| 33        | 3492                    | 40                 | 76                 |
| 34        | 4692                    | 40                 | 60                 |
| 35        | 5892                    | 40                 | 76                 |
| 36        | 1092                    | 50                 | 14                 |
| 37        | 2292                    | 50                 | 25                 |
| 38        | 3492                    | 50                 | 67                 |
| 39        | 4692                    | 50                 | 79                 |
| 40        | 5892                    | 50                 | 83                 |
| 41        | 1092                    | 60                 | 30                 |
| 42        | 2292                    | 60                 | 49                 |
| 43        | 3492                    | 60                 | 77                 |
| 44        | 4692                    | 60                 | 93.5               |
| 45        | 5892                    | 60                 | 86                 |



## บรรณานุกรม

- Christensen, R. M. (1982). Chapter I - Viscoelastic Stress Strain Constitutive Relations. In R. M. Christensen (Ed.), *Theory of Viscoelasticity (Second Edition)* (pp. 1-34). Academic Press.  
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-174252-2.50005-3>
- Dahbi, S., El Moussami, H., & Ezzine, L. (2015). Multiple regression model for surface roughness using full factorial design. *2015 International Conference on Industrial Engineering and Systems Management (IESM)*, 439-444.
- Golkarnarenji, G., Naebe, M., Badii, K., Milani, A. S., Jazar, R. N., & Khayyam, H. (2019). A machine learning case study with limited data for prediction of carbon fiber mechanical properties. *Computers in Industry*, *105*, 123-132.  
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.compind.2018.11.004>
- Li, M., Chen, Y., Luo, W., & Cheng, X. (2021). Demolding force dependence on mold surface modifications in UV nanoimprint lithography. *Microelectronic Engineering*, *236*, 111470.  
<https://doi.org/10.1016/j.mee.2020.111470>
- Mohammed, K. (2010). *Design of a gripper tool for robotic picking and placing* [Student thesis, DiVA. <http://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:uu:diva-135387>
- Popov, V. L. (2010). *Contact Mechanics and Friction Physical Principles and Applications* (1st ed. 2010. ed.). Springer Berlin Heidelberg.
- Qi, H., Joyce, K., & Boyce, M. (2003). Durometer Hardness and the Stress-Strain Behavior of Elastomeric Materials. *Rubber Chemistry and Technology*, *76*, 419-435.  
<https://doi.org/10.5254/1.3547752>
- Rad, M. T., & Kalivitis, P. (2011). Development of an Autonomous Friction Gripper for Industrial Robots. *World Academy of Science, Engineering and Technology, International Journal of Mechanical, Aerospace, Industrial, Mechatronic and Manufacturing Engineering*, *5*, 1993-1998.
- Zielinska, T., Morecki, A., & Knapczyk, J. (1999). *Basics of Robotics - Theory and Components of Manipulators and Robots*. <https://doi.org/10.1007/978-3-7091-2532-8>



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
**CHULALONGKORN UNIVERSITY**



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
**CHULALONGKORN UNIVERSITY**

## ประวัติผู้เขียน

|                   |   |
|-------------------|---|
| ชื่อ-สกุล         | นายพีรวัส รัตนโชติ  |
| วัน เดือน ปี เกิด | 27 มกราคม 2537  |
| สถานที่เกิด       | นครปฐม  |
| วุฒิการศึกษา      | วศ.บ วิศวกรรมหุ่นยนต์และระบบอัตโนมัติ   |
| ที่อยู่ปัจจุบัน   | 281 หมู่ที่ 2 ถ.ขนตรการกำจร ต.ฉลุง อ.เมืองสตูล จ.สตูล   |
| ผลงานตีพิมพ์      | Multiple Regression Model for Demolding Force of Rubber Products<br>Using A Full Factorial Design |



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY