

การหาอิทธิพลของแรงเสียดทานและความเร็วของหัวกดต่อความแข็งของชิ้นงานชุบชั้นรูปเย็นวัสดุ  
S20C ด้วยกรรมวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

ยอดรัก รีสิงห์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
บัณฑิตศึกษา สาขาเทคโนโลยีวิศวกรรม  
สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น  
ปีการศึกษา 2567

INFLUENCE OF FRICTION AND RAM SPEED ON HARDNESS IN COLD FORGING OF S20C  
USING FINITE ELEMENT ANALYSIS

Yod-Rak Reesing

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of Requirements  
for The Degree of Master of Engineering Program in Engineering Technology  
Graduate Studies  
Thai-Nichi Institute of Technology  
Academic Year 2024

|                             |                                                                                                                        |
|-----------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| หัวข้อวิทยานิพนธ์           | การหาอิทธิพลของแรงเสียดทานและความเร็วของหัวกดต่อความแข็งของชิ้นงานทุบขึ้นรูปเย็นวัสดุ S20C ด้วยกรรมวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ |
| โดย                         | ยอดรัก รีสิงห์                                                                                                         |
| สาขาวิชา                    | เทคโนโลยีวิศวกรรม                                                                                                      |
| อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ | ดร.ดอน แก้วดก                                                                                                          |

---

บัณฑิตศึกษา สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น อนุมัติให้บัณฑิตวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร.วรากร ศรีเชวงทรัพย์)  
วันที่.....เดือน.....พ.ศ.....

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กุลชาติ จุลเพ็ญ)

..... กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศรีสิทธิ์ เจียรบุตร)

..... กรรมการ  
(ดร.มรรณพ พักขาว)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์  
(ดร.ดอน แก้วดก)

ยอดรัก รีสิงห์ : การหาอิทธิพลของแรงเสียดทานและความเร็วของหัวกดต่อความแข็งแรงของชิ้นงาน  
 ทบขึ้นรูปเย็นวัสดุ S20C ด้วยกรรมวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์. อาจารย์ที่ปรึกษา : ดร.ดอน แก้วटक,  
 84 หน้า.

การศึกษานี้มุ่งตรวจสอบผลกระทบของค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานและความเร็วของหัวกด  
 ต่อความแข็งแรงของเหล็ก S20C หลังการทบขึ้นรูปเย็น โดยใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ผ่านโปรแกรมวิศวกรรม  
 สำเร็จรูป Simufact Forming พิจารณาระดับค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน 5 ระดับประกอบด้วย 0.02,  
 0.04, 0.06, 0.08, และ 0.10 ใช้ความเร็วการเคลื่อนที่ของหัวกด 3 ระดับประกอบด้วย 200, 220 และ  
 240 มิลลิเมตร ต่อ วินาที บนแม่พิมพ์ทบขึ้นรูปเย็นแบบ 3 ขั้นตอน ประกอบด้วยแม่พิมพ์เตรียมรูปทรง  
 เริ่มต้น แม่พิมพ์ทบขึ้นรูปชิ้นงานตามแบบ และแม่พิมพ์ตัดขอบ ผลการจำลองด้วยโปรแกรมพบว่า ความเร็ว  
 การเคลื่อนที่ของหัวกดสูงทำให้วัสดุไหลได้เร็วขึ้นมีโอกาสเกิดการกระจายความเครียดที่ไม่สม่ำเสมอใน  
 ชิ้นงานและเพิ่มอุณหภูมิในพื้นที่ที่มีแรงเสียดทานสูงจากความร้อนที่เกิดขึ้น ทำให้ความแข็งแรงลดลงในบาง  
 จุด ความเร็วต่ำส่งผลให้การกระจายความเครียดดีขึ้นและเกิดความเครียดแข็งมากขึ้น ส่งผลต่อความแข็งแรง  
 ที่สม่ำเสมอ แรงเสียดทานสูงทำให้การไหลของวัสดุถูกจำกัด โดยเฉพาะบริเวณผิวสัมผัสของแม่พิมพ์และ  
 ชิ้นงาน แรงเสียดทานต่ำช่วยให้วัสดุไหลได้ดีขึ้น ลดการสะสมของแรงกดในพื้นที่เฉพาะ ทำให้ความแข็งแรง  
 กระจายสม่ำเสมอมากขึ้น การควบคุมความเร็วหัวกดและแรงเสียดทานให้อยู่ในระดับสมดุลจะช่วยให้  
 ชิ้นงานมีความแข็งแรงที่เหมาะสมและกระจายตัวสม่ำเสมอ พร้อมทั้งลดปัญหาอุณหภูมิสูงและความเสียหาย  
 ของแม่พิมพ์ในกระบวนการผลิต ที่ระดับสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน 0.04 ระดับความเร็วของหัวกดที่เหมาะสม  
 ที่ 220 มิลลิเมตรต่อวินาที ให้ค่าอุณหภูมิ การกระจายความเครียด การไหลของเนื้อวัสดุและแรงกดที่ส่งผล  
 ให้ได้ค่าความแข็งแรงของชิ้นงานเพิ่มขึ้นสอดคล้องกับผลการทดลอง ผลการศึกษานี้แนะนำเสนอข้อเสนอแนะที่  
 สำคัญสำหรับการเพิ่มประสิทธิภาพการทบขึ้นรูปเย็นเพื่อให้ได้ความแข็งแรงที่สม่ำเสมอ ปรับปรุงการไหล  
 ของวัสดุ และลดข้อบกพร่อง ซึ่งจะช่วยเพิ่มคุณภาพของผลิตภัณฑ์และยืดอายุการใช้งานของเครื่องมือ

บัณฑิตศึกษา

สาขาวิชา เทคโนโลยีวิศวกรรม

ปีการศึกษา 2567

ลายมือชื่อนักศึกษา .....

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา .....

YOD-RAK REESING : INFLUENCE OF FRICTION AND RAM SPEED ON HARDNESS IN COLD FORGING OF S20C USING FINITE ELEMENT ANALYSIS. ADVISOR : DR.DON KAEWDOOK, 84 PP.

This study aims to investigate the effects of the friction coefficient and punch velocity on the hardness of S20C steel after cold forging using the finite element method (FEM) through Simufact Forming software. The analysis considers five levels of friction coefficients: 0.02, 0.04, 0.06, 0.08, and 0.10, and three punch velocities: 200, 220, and 240 mm/s. The forging process utilizes a three-step die setup, including a preform die, a forming die for the final shape, and a trimming die. The simulation results reveal that high punch velocities lead to faster material flow, which can cause uneven stress distribution within the workpiece and increase localized temperatures in areas with high friction. This results in reduced hardness in specific regions. In contrast, lower punch velocities improve stress distribution and promote strain hardening, resulting in more uniform hardness. High friction coefficients restrict material flow, particularly at the die-workpiece interface, while low friction coefficients facilitate smoother material flow and reduce localized compressive stress, leading to more consistent hardness distribution. Balancing punch velocity and friction coefficient is critical for achieving optimal and uniform hardness while minimizing excessive temperatures and die damage during production. At a friction coefficient of 0.04 and a punch velocity of 220 mm/s, the simulation identified optimal conditions for temperature, stress distribution, material flow, and applied force, which correlate with increased workpiece hardness, as confirmed by experimental results. This study provides significant recommendations for optimizing cold forging conditions to achieve uniform hardness, enhance material flow, and reduce defects, thereby improving product quality and extending tool life.

Graduate Studies  
Field of Engineering of Technology  
Academic Year 2024

Student's Signature.....  
Advisor's Signature.....

## กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความกรุณาและการสนับสนุนจากหลายท่านที่ผู้วิจัยขอแสดงความขอบคุณอย่างยิ่ง ขอขอบคุณ ดร.ดอน แก้วตก อาจารย์ที่ปรึกษา สำหรับคำปรึกษาและข้อเสนอแนะอันทรงคุณค่าตลอดระยะเวลาการดำเนินงานวิจัย รวมถึงการให้แนวทางการแก้ไขปัญหาด้วยความเอาใจใส่และปราณีตในทุกขั้นตอน ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กุลชาติ จุลเพ็ญ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ประธานกรรมการสอบ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศรีสิทธิ์ เจียรบุตร มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมาธิราช รวมถึง ดร.มรรณพ พิทขาว อาจารย์คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น ซึ่งเป็นกรรมการสอบ สำหรับข้อเสนอแนะอันเป็นประโยชน์และการให้ข้อคิดที่ช่วยพัฒนางานวิจัยนี้ให้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น ผู้ช่วยศาสตราจารย์ภูษิต มิตรสมหวัง จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ให้การสนับสนุนด้านโปรแกรม Simufact Forming ตลอดจนคำแนะนำทางด้านเทคนิคที่มีประโยชน์อย่างยิ่งต่อการดำเนินงานวิจัยครั้งนี้ นอกจากนี้ผู้วิจัยขอขอบพระคุณอาจารย์ทุกท่านที่ได้กล่าวนามที่ได้กรุณาให้คำปรึกษาและการสนับสนุนในด้านต่างๆ ที่ช่วยให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงได้เป็นอย่างดี ขอขอบคุณ บริษัท เด็กซ์ตร้า แมนูแฟคเจอร์ โดยเฉพาะฝ่ายออกแบบผลิตภัณฑ์ รวมถึงฝ่ายวิศวกรรมที่ได้วิเคราะห์ข้อมูล สนับสนุนเครื่องมือ และให้คำปรึกษาที่สำคัญในการสนับสนุนการวิจัยนี้

สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ ครอบครัว พี่ๆ ที่ทำงาน และเพื่อนๆ ทุกท่าน ทั้งที่ได้กล่าวนามและมีได้กล่าวนาม ที่คอยให้กำลังใจ ให้คำปรึกษา และสนับสนุนในทุกด้าน จนทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี ผู้วิจัยหวังเป็นอย่างยิ่งว่างานวิจัยฉบับนี้จะเป็นประโยชน์แก่ผู้ที่ศึกษาและนำไปต่อยอดในอนาคตได้ไม่มากนัก

ยอดรัก รีสิงห์

## สารบัญ

|                                                        | หน้า |
|--------------------------------------------------------|------|
| บทคัดย่อภาษาไทย.....                                   | ง    |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....                                | จ    |
| กิตติกรรมประกาศ.....                                   | ฉ    |
| สารบัญ .....                                           | ช    |
| สารบัญตาราง .....                                      | ฌ    |
| สารบัญรูป.....                                         | ญ    |
| <br>บทที่                                              |      |
| 1 บทนำ .....                                           | 1    |
| 1.1 ที่มาและความสำคัญ.....                             | 1    |
| 1.2 ความสำคัญของการวิจัย.....                          | 2    |
| 1.3 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....                       | 2    |
| 1.4 ขอบเขตของการวิจัย.....                             | 2    |
| 1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับ .....                          | 2    |
| 1.6 แผนงานและระยะเวลาดำเนินการ .....                   | 3    |
| 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....                   | 4    |
| 2.1 หลักการการทบทวนรูปแบบและทฤษฎีพื้นฐาน .....         | 4    |
| 2.2 ปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการทบทวนรูปแบบ.....          | 9    |
| 2.3 กระบวนการผลิต Coupler และการนำไปใช้งาน .....       | 11   |
| 2.4 เทคโนโลยีการจำลองกระบวนการด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์..... | 14   |
| 2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....                        | 19   |
| 3 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....                        | 26   |
| 3.1 การออกแบบการวิจัย .....                            | 27   |
| 3.2 การจำลองการทบทวนรูปแบบด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์.....  | 30   |
| 3.3 การวิเคราะห์ค่าที่ได้จากการจำลอง.....              | 41   |
| 3.4 การตรวจสอบความสอดคล้องของผลลัพธ์ .....             | 41   |

## สารบัญ (ต่อ)

| บทที่                                                    | หน้า |
|----------------------------------------------------------|------|
| 4 ผลการดำเนินงานวิจัย .....                              | 42   |
| 4.1 ผลการจำลองกระบวนการทึบขึ้นรูปเย็นด้วย FEM .....      | 42   |
| 4.2 เปรียบเทียบผลการจำลองกับการทดลองจริง.....            | 48   |
| 4.3 การวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม.....            | 50   |
| 5 สรุปผลและข้อเสนอแนะ .....                              | 51   |
| 5.1 สรุปผลจากการจำลอง.....                               | 51   |
| 5.2 ปัญหาที่พบระหว่างการวิจัย .....                      | 53   |
| 5.3 ข้อเสนอแนะ .....                                     | 53   |
| บรรณานุกรม .....                                         | 54   |
| ภาคผนวก .....                                            | 58   |
| ภาคผนวก ก. ผลการจำลองด้วยโปรแกรม Simulation Forming..... | 59   |
| ประวัติย่อผู้วิจัย.....                                  | 84   |

## สารบัญตาราง

| ตาราง                                    | หน้า |
|------------------------------------------|------|
| 1.1 แผนงานและระยะเวลาในการดำเนินงาน..... | 3    |

## สารบัญรูป

| รูป                                                                                     | หน้า |
|-----------------------------------------------------------------------------------------|------|
| 2.1 กระบวนการผลิต Mechanical Coupler .....                                              | 11   |
| 2.2 การทึบขึ้นรูปเย็น Mechanical Coupler .....                                          | 12   |
| 2.3 กระบวนการทำเกลียวใน (Taping) ชิ้นงานด้วยหุ่นยนต์.....                               | 13   |
| 2.4 การใช้งานของ Mechanical Coupler.....                                                | 13   |
| 3.1 รูปแบบการวิจัย (Research Flow Chart).....                                           | 26   |
| 3.2 ตัดชิ้นงานที่ทำการทดลองตามขนาดที่กำหนด.....                                         | 28   |
| 3.3 a) ชิ้นงานที่ทำความสะอาดผิวของ b) ชิ้นงานถูกเคลือบผิวพ็อตเฟส.....                   | 28   |
| 3.4 กระบวนการทึบขึ้นรูปเย็น.....                                                        | 28   |
| 3.5 ชิ้นงานทดลอง (Finish Part) .....                                                    | 29   |
| 3.6 ชิ้นงานที่ถูกตัดเพื่อเตรียมทดสอบความแข็ง.....                                       | 29   |
| 3.7 เครื่องขัดผิวชิ้นงานก่อนทำการวัดค่าความแข็งของชิ้นงาน (MP-2 Grinder Polisher) ..... | 30   |
| 3.8 เครื่องทดสอบความแข็งรุ่น CV-600D.....                                               | 30   |
| 3.9 ลำดับขั้นตอนการกำหนดเงื่อนไขเพื่อจำลองด้วยคอมพิวเตอร์ (FEM).....                    | 31   |
| 3.10 การออกแบบแม่พิมพ์และชิ้นงาน Solid Work.....                                        | 33   |
| 3.11 เข้าสู่หน้าต่างโปรแกรม Simufact Forming.....                                       | 33   |
| 3.12 หน้าต่างโปรแกรม Simufact Forming.....                                              | 34   |
| 3.13 นำเข้าชิ้นงานจากไฟล์ STEP .....                                                    | 34   |
| 3.14 การเลือกวัสดุแม่พิมพ์และชิ้นงาน.....                                               | 35   |
| 3.15 การกำหนดค่าแรงเสียดทาน.....                                                        | 36   |
| 3.16 การกำหนดอุณหภูมิของแม่พิมพ์และชิ้นงาน.....                                         | 36   |
| 3.17 การควบคุมแรงกด.....                                                                | 37   |
| 3.18 การกำหนด Mesh.....                                                                 | 37   |
| 3.19 การตรวจสอบความถูกต้องของการตั้งค่าก่อนทำการวิเคราะห์.....                          | 38   |
| 3.20 การวิเคราะห์กระบวนการทึบขึ้นรูปเย็นในโปรแกรม .....                                 | 38   |
| 3.21 การแสดงผลในการจำลองการทึบขึ้นรูป.....                                              | 39   |
| 3.22 การแสดงผลลัพธ์ในรูปแบบสามมิติ (3D) .....                                           | 40   |
| 3.23 การแสดงผลลัพธ์ในรูปแบบกราฟ .....                                                   | 40   |

## สารบัญรูป (ต่อ)

| รูป                                                                                                                                        | หน้า |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| 4.1 ผลการจำลอง Effective Plastic Strain ด้วยโปรแกรม Simufact Forming.....                                                                  | 42   |
| 4.2 ผลการจำลอง Effective Plastic Strain ที่ระดับแรงเสียดทาน 0.02-0.14 ที่ความเร็ว<br>หัวกด a) 200 mm/s, b) 220 mm/s, และ c) 240 mm/s. .... | 43   |
| 4.3 ผลการจำลอง Temperature Distribution ด้วยโปรแกรม Simufact Forming.....                                                                  | 44   |
| 4.4 ผลการจำลอง Temperature Distribution ที่ระดับแรงเสียดทาน 0.02-0.14<br>ที่ความเร็วหัวกด a) 200 mm/s, b) 220 mm/s, และ c) 240 mm/s. ....  | 44   |
| 4.5 ผลการจำลอง Material Flow ด้วยโปรแกรม Simufact Forming .....                                                                            | 45   |
| 4.6 ผลการจำลอง Material Flow ที่ระดับแรงเสียดทาน 0.02-0.14 ที่ความเร็วหัวกด<br>a) 200 mm/s, b) 220 mm/s, และ c) 240 mm/s .....             | 46   |
| 4.7 ผลการจำลอง Material Flow ด้วยโปรแกรม Simufact Forming a) แม่พิมพ์ 1<br>b) แม่พิมพ์ 2 และ C) แม่พิมพ์ 3.....                            | 47   |
| 4.8 ผลการจำลอง Z-Force ที่ระดับแรงเสียดทาน 0.02-0.14 ที่ความเร็วหัวกด<br>a) 200 mm/s, b) 220 mm/s, และ c) 240 mm/s .....                   | 48   |
| 4.9 ชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการทุบขึ้นรูปเย็น.....                                                                                             | 49   |
| 4.10 ตำแหน่งวัดความแข็งของชิ้นงานหลังทุบขึ้นรูปเย็นในขั้นตอนที่ 3.....                                                                     | 49   |
| ก.1 ผลการจำลองด้วยโปรแกรมที่สัมพันธ์แรงเสียดทาน 0.02 และความเร็ว<br>200 mm/S.....                                                          | 60   |
| ก.2 ผลการจำลองด้วยโปรแกรมที่สัมพันธ์แรงเสียดทาน 0.02 และความเร็ว<br>220 mm/S.....                                                          | 60   |
| ก.3 ผลการจำลองด้วยโปรแกรมที่สัมพันธ์แรงเสียดทาน 0.02 และความเร็ว<br>240 mm/S.....                                                          | 61   |
| ก.4 ผลการจำลองด้วยโปรแกรมที่สัมพันธ์แรงเสียดทาน 0.04 และความเร็ว<br>200 mm/S.....                                                          | 61   |
| ก.5 ผลการจำลองด้วยโปรแกรมที่สัมพันธ์แรงเสียดทาน 0.04 และความเร็ว<br>220 mm/S.....                                                          | 62   |
| ก.6 ผลการจำลองด้วยโปรแกรมที่สัมพันธ์แรงเสียดทาน 0.04 และความเร็ว<br>240 mm/S.....                                                          | 62   |

## สารบัญรูป (ต่อ)

| รูป                                                                                | หน้า |
|------------------------------------------------------------------------------------|------|
| ก.7 ผลการจำลองด้วยโปรแกรมที่สัมพันธ์แรงเสียดทาน 0.06 และความเร็ว<br>200 mm/S.....  | 63   |
| ก.8 ผลการจำลองด้วยโปรแกรมที่สัมพันธ์แรงเสียดทาน 0.06 และความเร็ว<br>220 mm/S.....  | 63   |
| ก.9 ผลการจำลองด้วยโปรแกรมที่สัมพันธ์แรงเสียดทาน 0.06 และความเร็ว<br>240 mm/S.....  | 64   |
| ก.10 ผลการจำลองด้วยโปรแกรมที่สัมพันธ์แรงเสียดทาน 0.08 และความเร็ว<br>200 mm/S..... | 64   |
| ก.11 ผลการจำลองด้วยโปรแกรมที่สัมพันธ์แรงเสียดทาน 0.08 และความเร็ว<br>220 mm/S..... | 65   |
| ก.12 ผลการจำลองด้วยโปรแกรมที่สัมพันธ์แรงเสียดทาน 0.08 และความเร็ว<br>240 mm/S..... | 65   |
| ก.13 ผลการจำลองด้วยโปรแกรมที่สัมพันธ์แรงเสียดทาน 0.1 และความเร็ว<br>200 mm/S.....  | 66   |
| ก.14 ผลการจำลองด้วยโปรแกรมที่สัมพันธ์แรงเสียดทาน 0.1 และความเร็ว<br>220 mm/S.....  | 66   |
| ก.15 ผลการจำลองด้วยโปรแกรมที่สัมพันธ์แรงเสียดทาน 0.1 และความเร็ว<br>240 mm/S.....  | 67   |
| ก.16 ผลการจำลองการไหลของเนื้อวัสดุที่แรงเสียดทาน 0.02 และความเร็ว 200 mm/S.....    | 67   |
| ก.17 ผลการจำลองการไหลของเนื้อวัสดุที่แรงเสียดทาน 0.02 และความเร็ว 220 mm/S.....    | 68   |
| ก.18 ผลการจำลองการไหลของเนื้อวัสดุที่แรงเสียดทาน 0.02 และความเร็ว 240 mm/S.....    | 68   |
| ก.19 ผลการจำลองการไหลของเนื้อวัสดุที่แรงเสียดทาน 0.04 และความเร็ว 200 mm/S.....    | 69   |
| ก.20 ผลการจำลองการไหลของเนื้อวัสดุที่แรงเสียดทาน 0.04 และความเร็ว 220 mm/S.....    | 69   |
| ก.21 ผลการจำลองการไหลของเนื้อวัสดุที่แรงเสียดทาน 0.04 และความเร็ว 240 mm/S.....    | 70   |
| ก.22 ผลการจำลองการไหลของเนื้อวัสดุที่แรงเสียดทาน 0.06 และความเร็ว 200 mm/S.....    | 70   |
| ก.23 ผลการจำลองการไหลของเนื้อวัสดุที่แรงเสียดทาน 0.06 และความเร็ว 220 mm/S.....    | 71   |
| ก.24 ผลการจำลองการไหลของเนื้อวัสดุที่แรงเสียดทาน 0.06 และความเร็ว 240 mm/S.....    | 71   |



## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ที่มาและความสำคัญ

ปัจจุบันการพัฒนาเทคโนโลยีในอุตสาหกรรมก่อสร้างมุ่งเน้นไปที่การเพิ่มประสิทธิภาพของวัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในโครงสร้างเพื่อให้ตอบสนองต่อภาระการใช้งานที่สูงขึ้น งานวิจัยนี้มุ่งศึกษาชิ้นงานข้อต่อ หรือ Coupler ซึ่งเป็นชิ้นส่วนข้อต่อสำหรับเหล็กเส้นในงานโครงสร้างที่มีบทบาทสำคัญในการเชื่อมต่อความยาวของเหล็กเส้น เพื่อทำหน้าที่รับภาระและส่งต่อแรงได้อย่างมีประสิทธิภาพ [1] ข้อต่อชนิดนี้ต้องการคุณสมบัติทางกลที่ดี โดยเฉพาะความแข็งแรงของวัสดุ เพื่อรองรับแรงกด แรงดึง และแรงเฉือนระหว่างการใช้งาน [2], [3]

เหล็ก S20C เป็นวัสดุที่ได้รับความนิยมในการผลิต Coupler เนื่องจากมีคุณสมบัติทางกลที่ดี มีความเหนียวและขึ้นรูปง่าย และสามารถปรับปรุงคุณสมบัติได้ผ่านกระบวนการชุบขึ้นรูปเย็น (Cold Forging) ซึ่งเป็นวิธีการขึ้นรูปที่ช่วยเพิ่มความแข็งแรงผ่านกระบวนการเปลี่ยนรูปพลาสติกที่อุณหภูมิต่ำ [4] อย่างไรก็ตาม ในกระบวนการชุบขึ้นรูปเย็น มีปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อคุณสมบัติของชิ้นงาน ได้แก่ แรงเสียดทานระหว่างแม่พิมพ์และชิ้นงาน และ ความเร็วของหัวกด ซึ่งทั้งสองปัจจัยนี้มีผลโดยตรงต่อการกระจายตัวของความเครียด การไหลของวัสดุ อุณหภูมิที่เกิดขึ้นในกระบวนการ และในท้ายที่สุดส่งผลต่อความแข็งแรงของชิ้นงานหลังการขึ้นรูป [5], [6] การศึกษาอิทธิพลของแรงเสียดทานและความเร็วของหัวกดต่อความแข็งแรงของชิ้นงานในกระบวนการชุบขึ้นรูปเย็นด้วยวิธี ไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method) จึงมีความสำคัญอย่างยิ่ง เนื่องจากสามารถจำลองกระบวนการผลิตเพื่อวิเคราะห์และทำนายผลลัพธ์ได้อย่างแม่นยำ [7] โดยเฉพาะอย่างยิ่ง หากสามารถคาดการณ์ระดับความแข็งแรงของชิ้นงานหลังการชุบขึ้นรูปได้ จะช่วยสร้างความมั่นใจให้กับลูกค้าในด้านคุณภาพของผลิตภัณฑ์ อีกทั้งยังเป็นประโยชน์ต่อการควบคุมคุณภาพ (Quality Control) และการวางแผนการผลิต (Production Planning) ทำให้สามารถลดข้อผิดพลาดในกระบวนการ ลดต้นทุน และเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตได้อย่างมีประสิทธิภาพ [8], [9]

ข้อมูลที่ได้จากงานวิจัยนี้สามารถนำไปใช้ในการปรับปรุงกระบวนการผลิต Coupler ให้มีคุณภาพสูงขึ้น ลดข้อบกพร่องในกระบวนการผลิต และเพิ่มประสิทธิภาพของผลิตภัณฑ์ให้รองรับภาระได้ดีขึ้น ตอบโจทย์ความต้องการในงานโครงสร้างที่ต้องการความมั่นคงและปลอดภัยในระยะยาว งานวิจัยนี้จึงเป็นพื้นฐานสำคัญในการพัฒนากระบวนการชุบขึ้นรูปเย็นและปรับปรุงการออกแบบผลิตภัณฑ์ที่เกี่ยวข้องในอุตสาหกรรมโครงสร้าง เพื่อเพิ่มคุณภาพและลดต้นทุนการผลิตอย่างยั่งยืน

## 1.2 ความสำคัญของการวิจัย

การวิจัยนี้มีความสำคัญในการศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อความแข็งแรงของชิ้นงาน Coupler จากเหล็ก S20C ผ่านกระบวนการชุบขึ้นรูปเย็น เพื่อพัฒนาคุณภาพผลิตภัณฑ์ให้มีความแข็งแรงและสม่ำเสมอ การคาดการณ์ความแข็งแรงที่แม่นยำช่วยเสริมความมั่นใจให้กับลูกค้า พร้อมทั้งเพิ่มประสิทธิภาพในการควบคุมคุณภาพและวางแผนการผลิตในอุตสาหกรรมอย่างยั่งยืน

## 1.3 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

เพื่อประยุกต์ใช้โปรแกรมจำลองทางคอมพิวเตอร์ในการวิเคราะห์ผลกระทบของค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานและความเร็วของการกดแม่พิมพ์ที่มีผลต่อความแข็งแรงของชิ้นงานหลังการชุบขึ้นรูปเย็น

## 1.4 ขอบเขตของการวิจัย

1.4.1 ศึกษาชิ้นงานที่ผลิตจากเหล็ก S20C ซึ่งนำไปใช้ในการผลิต Coupler สำหรับเชื่อมต่อเหล็กเส้นในงานโครงสร้าง โดยมุ่งเน้นกระบวนการชุบขึ้นรูปเย็น (Cold Forging)

1.4.2 ใช้ค่าพารามิเตอร์แรงเสียดทานระหว่างแม่พิมพ์และชิ้นงานใน 5 ระดับ ได้แก่ 0.02, 0.04, 0.06, 0.08 และ 0.10 เพื่อศึกษาผลกระทบต่อคุณสมบัติของชิ้นงาน

1.4.3 กำหนดความเร็วของหัวกดที่ใช้ในกระบวนการใน 3 ระดับ ได้แก่ 200, 220 และ 240 มิลลิเมตรต่อวินาที เพื่อวิเคราะห์ผลต่อการไหลของวัสดุและความแข็งแรงของชิ้นงาน

1.4.4 ใช้ซอฟต์แวร์ Simufact Forming ในการจำลองกระบวนการด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method) เพื่อวิเคราะห์แรงเสียดทาน ความเร็วหัวกด การกระจายความเครียด และความแข็งแรงของชิ้นงานหลังการขึ้นรูป

## 1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของแรงเสียดทานและความเร็วของหัวกดในการชุบขึ้นรูปเย็นวัสดุเหล็ก S20C ที่ช่วยเพิ่มความแข็งแรงและความสม่ำเสมอของชิ้นงาน Coupler

1.5.2 ความเข้าใจเกี่ยวกับผลกระทบของแรงเสียดทานและความเร็วของหัวกดต่อการกระจายความเครียด การไหลของวัสดุ อุณหภูมิ และความแข็งแรงของชิ้นงานผ่านการจำลองด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์

1.5.3 ข้อมูลที่สามารถนำไปใช้ปรับปรุงกระบวนการผลิต Coupler ให้มีประสิทธิภาพ ลดข้อผิดพลาด และเพิ่มความมั่นใจในคุณภาพของผลิตภัณฑ์

1.5.4 ข้อเสนอแนะสำหรับการพัฒนากระบวนการชุบขึ้นรูปเย็นในอุตสาหกรรมเพื่อเพิ่มคุณภาพผลิตภัณฑ์และลดต้นทุนการผลิตอย่างยั่งยืน

## 1.6 แผนงานและระยะเวลาดำเนินการ

ตารางที่ 1.1 แผนงานและระยะเวลาในการดำเนินงาน

[illegible]

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

เนื้อหาในบทนี้มุ่งนำเสนอการวิเคราะห์ผลกระทบของแรงเสียดทานและความเร็วหัวกดต่อความแข็งของชิ้นงานชุบขึ้นรูปเย็นจากเหล็ก S20C ซึ่งต้องอาศัยความเข้าใจในทฤษฎีและแนวคิดที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการชุบขึ้นรูปเย็นและคุณสมบัติของวัสดุ โดยเฉพาะปัจจัยที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของคุณสมบัติชิ้นงาน เช่น แรงเสียดทาน การกระจายความเครียด และอุณหภูมิ นอกจากนี้ การทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้องจะช่วยสนับสนุนการออกแบบกระบวนการและการวิเคราะห์ผลลัพธ์ที่สอดคล้องกับเป้าหมายของงานวิจัยนี้ให้มีประสิทธิภาพ

#### 2.1 หลักการการชุบขึ้นรูปเย็นและทฤษฎีพื้นฐาน

กระบวนการชุบขึ้นรูปเย็น (Cold Forging) เป็นหนึ่งในกระบวนการผลิตที่สำคัญในอุตสาหกรรมการผลิต ซึ่งต้องการประสิทธิภาพสูงและต้นทุนต่ำ กระบวนการนี้อาศัยหลักการเปลี่ยนรูปพลาสติก (Plastic Deformation) ของโลหะภายใต้แรงกดที่สูง โดยไม่ต้องใช้ความร้อน ทำให้มีความสำคัญในหลายมิติ ทั้งด้านเศรษฐกิจ วิศวกรรม และสิ่งแวดล้อม การชุบขึ้นรูปด้วยแรงกดจะทำให้วัสดุมีความแข็งแรงสูง เนื่องจากกระบวนการที่มีการเพิ่มความหนาแน่นของโครงสร้างผลึกและการปรับเปลี่ยนคุณสมบัติของวัสดุ การชุบขึ้นรูปด้วยแรงกด (Impact Forging) มีทฤษฎีหลายอย่างที่สามารถนำมาใช้ในการอธิบายกระบวนการและผลลัพธ์ที่เกิดขึ้น โดยเฉพาะในแง่ของ พลศาสตร์ของวัสดุ (Material Dynamics) และกลศาสตร์การผลิต (Manufacturing Mechanics) ซึ่งสามารถแบ่งออกได้ดังนี้ [10]

1. การไหลของวัสดุ (Material Flow Theory) เป็นทฤษฎีพื้นฐานที่ใช้ในการอธิบายการเคลื่อนที่และการเปลี่ยนแปลงรูปทรงของวัสดุภายใต้แรงกดหรือแรงกระทำในกระบวนการชุบขึ้นรูป ทฤษฎีนี้ช่วยให้เข้าใจว่าผลึกภายในจะเกิดการบีบอัดหรือเปลี่ยนรูปในลักษณะใดเมื่อถูกกดให้เข้าไปในแม่พิมพ์ ตัวอย่างเช่น การไหลของโลหะที่ร้อนหรือเย็นภายใต้แรงกดสูงในกระบวนการขึ้นรูปแบบต่างๆ โดยทฤษฎีนี้สามารถอธิบายการกระจายตัวของวัสดุที่มีผลต่อคุณสมบัติสุดท้ายของผลิตภัณฑ์ ทฤษฎีการไหลพลาสติก (Plastic Flow Theory) อธิบายการไหลของวัสดุภายใต้แรงกดและการเกิดการบีบอัด ซึ่งเกิดจากการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างของวัสดุจากสภาพยืดหยุ่นไปสู่สภาพพลาสติกหรือคงรูป (Plastic Deformation) โดยจะเกี่ยวข้องกับกฎของ การกระจายแรงภายใน และแรงดันที่กระทำ ในระหว่างกระบวนการชุบขึ้นรูป

2. ทฤษฎีแรงกระแทก (Impact Theory) เป็นทฤษฎีที่ใช้ในการอธิบายกระบวนการทุบขึ้นรูปด้วยแรงกระแทก (Impact Forging) โดยมีหลักการที่ว่าเมื่อวัสดุได้รับแรงกระแทกจากค้อนหรือเครื่องมือที่เคลื่อนที่อย่างรวดเร็ว วัสดุจะเกิดการเปลี่ยนแปลงในลักษณะการไหลของพลาสติกและเกิดการปรับรูปทรงที่ไม่สามารถกลับคืนได้ง่าย ทฤษฎีนี้สามารถอธิบายการเปลี่ยนแปลงความเร็วในการกระแทก (Impact Velocity) และผลกระทบต่อการเกิดการบีบอัด (Compression) และการยืด (stretching) ของวัสดุการกระจายพลังงาน (Energy Distribution) ในกระบวนการทุบด้วยแรงกระแทกจะเกิดการเปลี่ยนแปลงของพลังงานจากพลังงานจลน์ (Kinetic Energy) ที่มาจากการเคลื่อนที่ของค้อนหรือเครื่องมือทุบสู่การแปลงพลังงานเป็นการบีบอัดหรือการบิดเป็นวัสดุในช่วงที่เกิดการกระแทก การกระจายพลังงานนี้ช่วยอธิบายถึงการเกิดการบีบอัดของวัสดุภายในแม่พิมพ์ [11], [12], [13]

สมการแรงเสียดทาน (Friction Force)

$$F_f = \mu \cdot F^n \quad (1)$$

$\mu$  : สัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน

$F^n$  : แรงปกติ

สมการแรงปกติ (Normal Force)

$$F_n = \frac{P}{A} \quad (2)$$

$P$  : แรงกดทั้งหมด

$A$  : พื้นที่สัมผัส

สมการแรงกด (Ram Force)

$$F_r = \sigma \cdot A \quad (3)$$

$\sigma$  : ความเค้น

3. การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างผลึก (Grain Structure Theory) วัสดุได้รับการทุบด้วยแรงกดหรือแรงกระแทก โครงสร้างผลึกของวัสดุจะเกิดการเปลี่ยนแปลง ซึ่งส่งผลต่อคุณสมบัติทางกล เช่น ความแข็งแรงและความเหนียว ทฤษฎีนี้จะมุ่งเน้นที่การศึกษาเกี่ยวกับการจัดเรียงของผลึกในวัสดุในระหว่างกระบวนการขึ้นรูป การเกิดการบีบอัดหรือการกระจายตัวของผลึก จะช่วยในการปรับปรุงคุณสมบัติทางกลของวัสดุ เช่น การเพิ่มความแข็งแรง (Strengthening) หรือการเพิ่มความเหนียว (Toughness) ในการทุบขึ้นรูปเย็น (Cold Forging) หรือการทุบด้วยแรงกระแทก (Impact Forging) การเกิดการบีบอัดในระดับโมเลกุลหรือผลึกจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงในโครงสร้างของวัสดุ เช่น การสร้างเมล็ดผลึกใหม่ (Recrystallization) ที่ช่วยเพิ่มความแข็งแรงของวัสดุ ซึ่งจะสัมพันธ์กับทฤษฎีการควบคุมโครงสร้างผลึกในวัสดุ (Grain Refinement) เพื่อเพิ่มสมบัติของวัสดุ [14], [15], [16]

สมการการเปลี่ยนเฟส (Phase Transformation)

$$X = 1 - e^{-kt} \quad (4)$$

X : อัตราส่วนของเฟสที่เปลี่ยนแปลง (Fraction of Phase Transformation)

k : ค่าคงที่ที่ขึ้นอยู่กับการขึ้นรูปและกระบวนการ (Rate Constant)

t : เวลา (Time)

4. การถ่ายโอนความร้อน (Heat Transfer Theory) การทุบขึ้นรูปอาจเกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของวัสดุ ซึ่งจะส่งผลต่อพฤติกรรมของวัสดุภายใต้การทุบ อุณหภูมิที่สูงหรือเย็นจะมีผลต่อการไหลของวัสดุและลักษณะของการบีบอัด เช่น ในกระบวนการทุบขึ้นรูปเย็น (Cold Forging) วัสดุที่ถูกทุบจะอยู่ในอุณหภูมิที่ต่ำ ซึ่งทำให้วัสดุมีความแข็งแรงและต้านทานการไหลได้มากขึ้น ทฤษฎีการถ่ายโอนความร้อน อธิบายถึงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในระหว่างการกระทำแรงกดหรือแรงกระแทกของวัสดุ ซึ่งมีผลต่อคุณสมบัติของวัสดุที่เกิดขึ้นในกระบวนการนี้ โดยเฉพาะในกรณีที่กระบวนการทุบขึ้นรูปเกี่ยวข้องกับโลหะที่มีความไวต่ออุณหภูมิ เช่น โลหะที่มีจุดหลอมเหลวต่ำ [17]

สมการการกระจายอุณหภูมิ (Heat Transfer)

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \nabla^2 T \quad (5)$$

T : อุณหภูมิ

$\alpha$  : การนำความร้อนเฉพาะวัสดุ

5. ความเค้นและการคืบของวัสดุ (Stress and Strain Theory) ทฤษฎีความเค้นและการคืบ (Stress-Strain Theory) ใช้ในการอธิบายการกระทำที่เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการทุบขึ้นรูปเย็น โดยเฉพาะในแง่ของการเปลี่ยนแปลงของแรงดัน (Stress) และการยืดหรือบีบอัด (Strain) ของวัสดุ ทฤษฎีนี้จะช่วยอธิบายถึงความสามารถของวัสดุในการต้านทานแรงกดและการยืดหรือบีบอัดในระหว่างการทุบ ซึ่งจะส่งผลต่อรูปร่างและคุณสมบัติทางกลของวัสดุ สุดท้ายสมการความเค้น-การคืบ (Stress-Strain Equation) จะช่วยในการคำนวณค่าต่างๆ เช่น ความเค้นที่วัสดุสามารถรับได้ก่อนที่จะเกิดการเสียหาย หรือการคืบของวัสดุที่สามารถทนได้ในกระบวนการทุบขึ้นรูป ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับ การทุบขึ้นรูปเย็น และการทุบขึ้นรูปด้วยแรงกด เป็นพื้นฐานสำคัญในการอธิบายกลไกต่างๆ ที่เกิดขึ้นในระหว่างการผลิต เช่น การไหลของวัสดุ, การกระจายพลังงานจากการกระแทก, การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างผลึก, และการถ่ายโอนความร้อน การเข้าใจทฤษฎีเหล่านี้ช่วยให้สามารถพัฒนาและปรับปรุงกระบวนการผลิตได้อย่างมีประสิทธิภาพ รวมถึงการออกแบบเครื่องมือและกระบวนการผลิตที่เหมาะสมกับวัสดุที่ใช้งาน [18], [19], [20]

สมการความเค้น (Stress)

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad (6)$$

P : แรงกดทั้งหมด

A : พื้นที่สัมผัส

สมการความเครียด (Strain)

$$\epsilon = \ln\left(\frac{L_0}{L}\right) \quad (7)$$

L : ความยาวเริ่มต้น

$L_0$  : ความยาวหลังการเสียรูป

สมการแรงต้านภายใน (Internal Resistance)

$$R = k \cdot \epsilon^n \quad (8)$$

$k$  : ค่าความแข็งของวัสดุ

$\epsilon^n$  : ค่าความเครียด

สมการอัตราการเสียรูป (Strain Rate)

$$\dot{\epsilon} = \frac{d\epsilon}{dt} \quad (9)$$

$\dot{\epsilon}$  : อัตราการเสียรูป (Strain Rate)

$\epsilon$  : ความเครียด (Strain)

$t$  : เวลา (Time)

สมการแรง Z (Z-Force)

$$Z = k \cdot A \quad (10)$$

$k$  : ค่าคงที่วัสดุ

สมการความแข็ง (Hardness)

$$H = \frac{A}{F} \quad (11)$$

$H$  : ความแข็ง (Hardness)

$F$  : แรงที่กระทำ (Force)

$A$  : พื้นที่สัมผัส (Contact Area)

สมการไหลของวัสดุ (Material Flow)

$$V_m = \frac{Q}{A} \quad (12)$$

$V_m$  : ความเร็วของการไหลของวัสดุ (Material Flow Velocity)

$Q$  : อัตราการไหลของวัสดุ (Flow Rate)

$A$  : พื้นที่หน้าตัด (Cross-Sectional Area)

### เครื่องเพรสที่ใช้ในการทุบขึ้นรูปเย็น (Press Machine)

เครื่องเพรสที่ใช้ในการทุบขึ้นรูปเย็น (Press Machine) เป็นเครื่องจักรที่มีบทบาทสำคัญในกระบวนการผลิตชิ้นส่วนโลหะ โดยเฉพาะในอุตสาหกรรมยานยนต์และอิเล็กทรอนิกส์ การทุบขึ้นรูปเย็นเป็นกระบวนการที่ใช้แรงกดสูงในการเปลี่ยนรูปโลหะที่อุณหภูมิห้อง ซึ่งช่วยให้ได้ชิ้นงานที่มีความแม่นยำสูงและมีคุณภาพดี

### ประเภทของเครื่องเพรส

เครื่องเพรสที่ใช้ในการทุบขึ้นรูปเย็นสามารถแบ่งออกเป็นหลายประเภทตามลักษณะการทำงานและการใช้งาน เช่น

1. เครื่องเพรสแบบกลไก (Mechanical Press) ใช้กลไกเชิงกลในการสร้างแรงกด มีความเร็วสูงและเหมาะสำหรับการผลิตจำนวนมาก
2. เครื่องเพรสแบบไฮดรอลิก (Hydraulic Press) ใช้แรงดันน้ำมันไฮดรอลิกในการสร้างแรงกด มีความยืดหยุ่นสูงและสามารถปรับแรงกดได้ตามต้องการ
3. เครื่องเพรสแบบเซอร์โว (Servo Press) ใช้มอเตอร์เซอร์โวในการควบคุมการเคลื่อนที่ มีความแม่นยำสูงและสามารถควบคุมการทำงานได้อย่างละเอียด

## 2.2 ปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการทุบขึ้นรูปเย็น

กระบวนการทุบขึ้นรูปเย็น (Cold Forging) เป็นกระบวนการขึ้นรูปโลหะที่ดำเนินการที่อุณหภูมิห้องหรือใกล้เคียง โดยอาศัยแรงกดสูงเพื่อทำให้วัสดุเกิดการเปลี่ยนรูปพลาสติก ปัจจัยต่างๆ ที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพและคุณภาพของกระบวนการนี้สามารถแบ่งออกเป็นหลายด้าน ดังนี้

### 1. แรงเสียดทาน (Friction)

แรงเสียดทานระหว่างผิวแม่พิมพ์และวัสดุมีผลโดยตรงต่อการไหลของโลหะ

แรงเสียดทานสูง : ทำให้วัสดุไหลได้ยาก เพิ่มแรงกดและความเครียดเฉพาะจุด อาจก่อให้เกิดข้อบกพร่อง เช่น รอยร้าวหรือการไหลไม่สมบูรณ์

แรงเสียดทานต่ำ : ช่วยให้วัสดุไหลได้ดีขึ้น ลดแรงที่ต้องใช้ในกระบวนการ แต่หากต่ำเกินไป อาจทำให้วัสดุหลุดจากแม่พิมพ์

การควบคุม : การใช้สารหล่อลื่นที่เหมาะสม เช่น การเคลือบฟอสเฟตและสบู หรือการใช้สารหล่อลื่นแบบฟิล์มบาง สามารถลดแรงเสียดทานและเพิ่มประสิทธิภาพในการขึ้นรูปได้

## 2. ความเร็วของหัวกด (Punch Velocity)

ความเร็วของหัวกดส่งผลต่อการกระจายความเครียดและอุณหภูมิ:

ความเร็วสูง : เพิ่มอุณหภูมิในกระบวนการจากแรงเสียดทานและการเสียรูปพลาสติก อาจส่งผลให้ความแข็งแรงลดลงในบางบริเวณ

ความเร็วต่ำ : ลดโอกาสการกระจายความเครียดที่ไม่สม่ำเสมอ ช่วยให้วัสดุไหลได้ดีขึ้น แต่ต้องแลกมาด้วยเวลาในกระบวนการที่ยาวนานขึ้น

การควบคุม : การปรับความเร็วให้เหมาะสมจะช่วยให้กระบวนการมีประสิทธิภาพและลดข้อบกพร่อง

## 3. คุณสมบัติของวัสดุ (Material Properties)

วัสดุที่ใช้ในกระบวนการต้องมีคุณสมบัติเหมาะสม:

ความสามารถในการขึ้นรูป (Formability) : วัสดุต้องมีค่าความเหนียวที่เหมาะสม และสามารถทนต่อแรงกดได้โดยไม่แตกหัก

การเตรียมพื้นผิว : การเคลือบฟอสเฟตหรืออบอ่อนช่วยลดแรงเสียดทานและเพิ่มความสามารถในการขึ้นรูป

การเลือกวัสดุ : เช่น เหล็ก S20C เหมาะสำหรับทึบขึ้นรูปเย็นเพราะมีความเหนียวและทนทานต่อแรงกด

## 4. อุณหภูมิ (Temperature)

แม้ว่ากระบวนการทึบขึ้นรูปเย็นจะเกิดที่อุณหภูมิห้อง แต่ความร้อนที่เกิดขึ้นจากแรงเสียดทานและการเสียรูปมีผลต่อวัสดุ:

อุณหภูมิสูงขึ้น : ลดค่าความแข็งแรงของวัสดุและแรงที่ใช้ในกระบวนการ แต่สามารถส่งผลให้ความแข็งแรงลดลงในบางพื้นที่

การควบคุม : การออกแบบแม่พิมพ์และระบบระบายความร้อนที่ดีช่วยควบคุมอุณหภูมิในกระบวนการ

## 5. การออกแบบแม่พิมพ์ (Die Design)

แม่พิมพ์ที่ออกแบบอย่างเหมาะสมช่วยลดแรงเสียดทานและเพิ่มคุณภาพของชิ้นงาน

รูปทรงแม่พิมพ์ : ควรออกแบบให้วัสดุไหลได้อย่างราบรื่น ลดการสะสมความเครียดเฉพาะจุด

ความแข็งแรงของแม่พิมพ์ : แม่พิมพ์ต้องทนทานต่อแรงกดสูงในกระบวนการ

การใช้วัสดุ : แม่พิมพ์ที่ทำจากวัสดุแข็งแรง เช่น เหล็กกล้าเครื่องมือ (Tool Steel) หรือคาร์ไบด์ ช่วยยืดอายุการใช้งาน

#### 6. การหล่อลื่น (Lubrication)

การเลือกสารหล่อลื่นที่เหมาะสมมีบทบาทสำคัญ

ลดแรงเสียดทานระหว่างแม่พิมพ์และชิ้นงาน

ป้องกันการสึกหรอของแม่พิมพ์

ช่วยให้กระบวนการไหลของวัสดุเป็นไปอย่างราบรื่น

#### 7. แรงที่ใช้ในการขึ้นรูป (Forging Force)

แรงที่ใช้ในกระบวนการขึ้นรูปต้องเพียงพอที่จะทำให้วัสดุเสียรูป แต่ไม่มากเกินไปจนเกิด

ข้อบกพร่อง :

แรงที่มากเกินไปอาจทำให้แม่พิมพ์เสียหาย

การคำนวณแรงที่เหมาะสมผ่านการจำลอง FEM ช่วยเพิ่มความแม่นยำและลดข้อผิดพลาด

ปัจจัยเหล่านี้ล้วนมีผลโดยตรงต่อคุณภาพและประสิทธิภาพของกระบวนการขึ้นรูปขึ้นรูปเย็น

การควบคุมปัจจัยต่างๆ อย่างเหมาะสม เช่น การใช้แรงเสียดทานต่ำ ความเร็วหัวกดที่เหมาะสม การออกแบบแม่พิมพ์ที่ดี และการใช้วัสดุที่เหมาะสม จะช่วยเพิ่มคุณภาพของชิ้นงาน ลดข้อบกพร่อง และปรับปรุงกระบวนการผลิตให้มีประสิทธิภาพสูงสุด

### 2.3 กระบวนการผลิต Coupler และการนำไปใช้งาน

Coupler เป็นชิ้นส่วนสำคัญที่ใช้ในงานโครงสร้าง โดยเฉพาะในงานก่อสร้างที่ต้องการเชื่อมต่อความยาวของเหล็กเส้นข้ออ้อย (deformed bars) ให้สามารถส่งต่อแรงขณะรับภาระได้อย่างมีประสิทธิภาพ การใช้ Coupler ดังที่แสดงในรูปที่ 2.1 ช่วยลดการใช้เหล็กเส้นยาวเกินความจำเป็น เพิ่มความยืดหยุ่นในการออกแบบโครงสร้าง และลดข้อบกพร่องที่เกิดจากการเชื่อมเหล็กโดยตรง



รูปที่ 2.1 กระบวนการผลิต Mechanical Coupler

### กระบวนการผลิต Coupler

การผลิต Coupler มีขั้นตอนที่สำคัญเพื่อให้ได้ชิ้นส่วนที่มีคุณสมบัติทางกลสูงและสม่ำเสมอ ประกอบด้วย

#### 1) ขั้นตอนทุบขึ้นรูปเย็น (Cold Forging)

เป็นกระบวนการหลักที่ใช้ในการขึ้นรูป Coupler ให้ได้รูปร่างตามที่ต้องการ กระบวนการนี้ดำเนินการโดยใช้แม่พิมพ์และแรงกดสูงที่อุณหภูมิห้อง วัสดุที่ใช้สำหรับ Coupler มักเป็นเหล็กกล้าคาร์บอนหรือเหล็กกล้าผสมที่มีความแข็งแรงสูง การทุบขึ้นรูปเย็นช่วยเพิ่มความแข็งแรงของวัสดุผ่านกระบวนการชุบแข็งแบบงานเย็น (Work Hardening) พร้อมทั้งทำให้โครงสร้างจุลภาคของวัสดุมีความสม่ำเสมอ ดังที่แสดงในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 การทุบขึ้นรูปเย็น Mechanical Coupler

#### 2) การคว้านรูและทำเกลียวใน (Boring and Threading)

หลังจากขึ้นรูปแล้ว Coupler จะถูกนำไปคว้านรูตามขนาดที่เหมาะสม เพื่อเตรียมสำหรับการทำเกลียวภายใน (Internal Threading) ดังที่แสดงในรูปที่ 2.3 ซึ่งเป็นขั้นตอนสำคัญในการสร้าง Coupler ที่สามารถยึดติดกับเหล็กเส้นข้ออ้อยได้อย่างมั่นคง เกลียวที่ถูกสร้างขึ้นต้องมีความแม่นยำสูงเพื่อให้สามารถถ่ายแรงได้อย่างสมบูรณ์แบบ



รูปที่ 2.3 กระบวนการทำเกลียวใน (Taping) ขึ้นงานด้วยหุ่นยนต์

### 3) การนำไปใช้งานของ Coupler

Coupler ถูกนำมาใช้ในงานโครงสร้างที่ต้องการเพิ่มความยาวของเหล็กเส้นข้ออ้อย เช่น งานก่อสร้างตึกสูง สะพาน และเขื่อน โดย Coupler ทำหน้าที่เชื่อมต่อเหล็กเส้นข้ออ้อยสองเส้นเข้าด้วยกัน ดังที่แสดงในรูปที่ 2.4 ซึ่งช่วยส่งต่อแรงที่เกิดขึ้นระหว่างการใช้งาน เช่น แรงอัด (Compression), แรงดึง (Tension) และแรงเฉือน (Shear)



รูปที่ 2.4 การใช้งานของ Mechanical Coupler

การใช้งาน Coupler มีข้อดี คือ

เพิ่มความยาวของเหล็กเส้นได้ตามความต้องการ : โดยไม่ต้องใช้เหล็กเส้นขนาดยาวเกินไป

ลดความซับซ้อนของการติดตั้งในไซต์งาน : ทำให้การเชื่อมต่อเหล็กเป็นไปอย่างรวดเร็วและมีประสิทธิภาพ

ลดปัญหาการเชื่อมเหล็กโดยตรง : ซึ่งอาจทำให้เกิดข้อบกพร่อง เช่น รอยร้าวหรือความแข็งแรงที่ไม่สม่ำเสมอ

คุณสมบัติสำคัญของ Coupler

Coupler ที่ดีต้องมีความแข็งแรงสูง ทนต่อแรงดึงและแรงกดได้ดี รวมถึงมีความสามารถในการกระจายแรงอย่างสม่ำเสมอตลอดชิ้นงาน เพื่อป้องกันการล้มเหลวของโครงสร้างในระยะยาว กระบวนการผลิตที่มีคุณภาพ เช่น การชุบขึ้นรูปเย็น การคว้านรู และการทำเกลียวใน จึงเป็นหัวใจสำคัญในการสร้าง Coupler ที่ได้มาตรฐานและตอบโจทย์การใช้งานในงานโครงสร้างได้อย่างมีประสิทธิภาพ

## 2.4 เทคโนโลยีการจำลองกระบวนการด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์

กรรมวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method, FEM) เป็นเทคนิคทางคณิตศาสตร์และวิศวกรรมที่ใช้ในการแก้ปัญหาทางฟิสิกส์และวิศวกรรมที่ซับซ้อน โดยการแบ่งปัญหาออกเป็นส่วนย่อยๆ ที่เรียกว่า “เอลิเมนต์” ซึ่งสามารถวิเคราะห์และคำนวณได้ง่ายขึ้น วิธีนี้ถูกนำมาใช้ในการจำลองและวิเคราะห์พฤติกรรมของโครงสร้างและระบบต่างๆ เช่น การวิเคราะห์ความเค้นและความเครียดในวัสดุ การไหลของของไหล และการถ่ายเทความร้อน

สมการสมดุลแรง (Equilibrium Equation)

สมการพื้นฐานใน FEM ที่ใช้สำหรับการวิเคราะห์ความเค้นและความเครียด :

$$k \cdot u = F \quad (13)$$

K : เมทริกซ์ความแข็ง (Stiffness Matrix)

u : เวกเตอร์การกระจัด (Displacement Vector)

F : เวกเตอร์แรงภายนอก (External Force Vector)

สมการนี้ใช้ในการคำนวณการกระจัดของวัสดุภายใต้แรงกดในกระบวนการชุบขึ้นรูปเย็น

### กฎของฮุกส์ (Hooke's Law)

แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเครียด ( $\epsilon$ ) และความเค้น ( $\sigma$ ) สำหรับวัสดุเชิงเส้นยืดหยุ่น :

$$\sigma = C \cdot \epsilon \quad (14)$$

$\sigma$  : เมทริกซ์ความเค้น (Stress Tensor)

$\epsilon$  : เมทริกซ์ความเครียด (Strain Tensor)

C : เมทริกซ์ความยืดหยุ่น (Elasticity Matrix)

### สมการการเสียรูปพลาสติก (Plastic Deformation Equation)

สำหรับวัสดุที่ผ่านการเสียรูปพลาสติก ความเค้น ( $\sigma$ ) และอัตราการเสียรูป ( $\dot{\epsilon}^p$ ) มีความสัมพันธ์ดังนี้ :

$$\sigma = K \cdot (\epsilon^p)^n \quad (15)$$

K : ค่าความแข็งแรงของวัสดุ (Strength Coefficient)

$\epsilon^p$  : ความเครียดพลาสติก (Plastic Strain)

n : ค่าดัชนีการชุบแข็ง (Strain Hardening Exponent)

สมการนี้ใช้ในการวิเคราะห์การกระจายความเครียดและความแข็งของชิ้นงาน

### สมการความร้อนที่เกิดจากการเสียรูป (Thermal Effect of Deformation)

การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิในกระบวนการขึ้นรูปเย็นสามารถคำนวณได้จากสมการพลังงานความร้อน

$$\Delta T = \frac{\beta \cdot W}{p \cdot C_p} \quad (16)$$

$\Delta T$  : การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ

$\beta$  : สัดส่วนของพลังงานเสียรูปที่แปลงเป็นความร้อน

W : งานที่เกิดจากการเสียรูป (Deformation Work)

$\rho$  : ความหนาแน่นของวัสดุ (Material Density)

$C_p$  : ค่าความร้อนจำเพาะของวัสดุ (Specific Heat Capacity)

#### สมการแรงเสียดทาน (Friction Equation)

แรงเสียดทานระหว่างแม่พิมพ์และชิ้นงานในกระบวนการขึ้นรูปเย็นอธิบายด้วยสมการคูลอมบ์ (Coulomb Friction)

$$\tau_f = \mu \cdot \sigma_n \quad (17)$$

$\tau_f$  : ความเค้นเสียดทาน (Friction Stress)

$\mu$  : ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน (Coefficient of Friction)

$\sigma_n$  : ความเค้นตั้งฉาก (Normal Stress)

สมการนี้ใช้ในการวิเคราะห์แรงเสียดทานและผลกระทบต่อการไหลของวัสดุ

ในกระบวนการขึ้นรูปเย็น ต้องพิจารณาความเค้นและความเครียดแบบไม่เชิงเส้นสำหรับวัสดุพลาสติกการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method, FEM) ประกอบด้วยขั้นตอนหลักๆ ดังนี้

1) การกำหนดปัญหา (Problem Definition) ระบุปัญหาที่ต้องการวิเคราะห์ เช่น การวิเคราะห์ความเค้นในโครงสร้าง หรือการถ่ายเทความร้อนในวัสดุและกำหนดขอบเขตของโดเมนและเงื่อนไขขอบเขตที่เกี่ยวข้อง

2) การสร้างแบบจำลองทางเรขาคณิต (Geometric Modeling) สร้างแบบจำลองทางเรขาคณิตของโครงสร้างหรือระบบที่ต้องการวิเคราะห์ โดยใช้ซอฟต์แวร์ CAD หรือซอฟต์แวร์เฉพาะทาง

3) การแบ่งโดเมน (Discretization) ออกเป็นเอลิเมนต์ย่อยๆ ที่เชื่อมต่อกันที่จุดโหนด การแบ่งโดเมนนี้ช่วยให้สามารถวิเคราะห์ปัญหาที่ซับซ้อนได้ง่ายขึ้น

4) การกำหนดฟังก์ชันการประมาณ (Interpolation Functions) กำหนดฟังก์ชันการประมาณหรือฟังก์ชันรูปร่าง (Shape Functions) สำหรับเอลิเมนต์แต่ละตัว เพื่อใช้ในการประมาณค่าตัวแปรต่างๆ ภายในเอลิเมนต์

5) การสร้างสมการเอลิเมนต์ (Element Equations) สร้างสมการที่อธิบายพฤติกรรมของเอลิเมนต์แต่ละตัว โดยใช้หลักการทางฟิสิกส์ เช่น กฎของฮุก (Hooke's Law) หรือสมการการนำความร้อน (Heat Conduction Equation)

6) การประกอบสมการระบบ (Assembly of System Equations) รวมสมการเอลิเมนต์ทั้งหมดเข้าด้วยกันเพื่อสร้างสมการของระบบทั้งหมด โดยการรวมค่าที่โหนดร่วมกัน

7) การกำหนดเงื่อนไขขอบเขต (Boundary Conditions) กำหนดเงื่อนไขขอบเขตและเงื่อนไขเริ่มต้นสำหรับปัญหาที่ต้องการวิเคราะห์ เช่น การกำหนดแรงที่กระทำหรือการกำหนดอุณหภูมิที่ขอบเขตของโดเมน

8) การแก้สมการ (Solution of Equations) แก้สมการของระบบที่ได้จากการประกอบสมการเอลิเมนต์ โดยใช้วิธีการทางคณิตศาสตร์ เช่น วิธีการกำจัดเกาส์ (Gaussian Elimination) หรือวิธีการทำซ้ำ (Iterative Methods)

9) การวิเคราะห์ผลลัพธ์ (Post-Processing) วิเคราะห์และแสดงผลลัพธ์ที่ได้จากการแก้สมการ เช่น การแสดงการกระจาย ความเค้น หรืออุณหภูมิในโดเมนที่ต้องการวิเคราะห์ตรวจสอบและประเมินผลลัพธ์เพื่อปรับปรุงการออกแบบหรือกระบวนการผลิต

10) การตรวจสอบและยืนยันผลลัพธ์ (Verification and Validation) ตรวจสอบความถูกต้องของผลลัพธ์โดยการเปรียบเทียบกับข้อมูลทดลองหรือผลลัพธ์จากวิธีการอื่นๆ ยืนยันความน่าเชื่อถือของแบบจำลองและผลลัพธ์ที่ได้ ขั้นตอนเหล่านี้เป็นกระบวนการที่สำคัญในการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ซึ่งช่วยให้สามารถแก้ปัญหาทางวิศวกรรมและฟิสิกส์ที่ซับซ้อนได้อย่างมีประสิทธิภาพ

#### ข้อดีและข้อจำกัดของ FEM (Advantages and Limitations of FEM)

1) ความแม่นยำสูง (High Accuracy) FEM สามารถให้ผลลัพธ์ที่มีความแม่นยำสูงในการวิเคราะห์ปัญหาที่ซับซ้อน โดยเฉพาะเมื่อใช้เอลิเมนต์ที่มีขนาดเล็กและจำนวนมาก

2) ความยืดหยุ่นในการใช้งาน (Flexibility) FEM สามารถใช้ในการวิเคราะห์ปัญหาหลากหลายประเภท เช่น การวิเคราะห์เชิงโครงสร้าง การวิเคราะห์ความร้อน และการวิเคราะห์การไหลของของไหล

3) การจำลองพฤติกรรมที่ซับซ้อน (Simulation of Complex Behaviour) FEM สามารถจำลองพฤติกรรมที่ซับซ้อนของวัสดุและโครงสร้างได้ เช่น การเปลี่ยนรูปที่ไม่เชิงเส้น (Nonlinear Deformation) และการแตกหัก (Fracture)

4) การประยุกต์ใช้ในหลายสาขา (Multidisciplinary Applications) FEM ถูกนำมาใช้ในหลายสาขาวิชา เช่น วิศวกรรมเครื่องกล วิศวกรรมโยธา วิศวกรรมไฟฟ้า และวิศวกรรมอากาศยาน

5) การลดต้นทุนและเวลา (Cost and Time Reduction) การใช้ FEM ในการวิเคราะห์และออกแบบช่วยลดต้นทุนและเวลาที่ใช้ในการทดสอบและปรับปรุงผลิตภัณฑ์ เนื่องจากสามารถจำลองและทดสอบในคอมพิวเตอร์ได้ก่อนการผลิตจริง

### ข้อจำกัดของวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Limitations of FEM)

- 1) ความซับซ้อนในการสร้างแบบจำลอง (Complexity in Modelling) การสร้างแบบจำลอง FEM สำหรับปัญหาที่ซับซ้อนอาจต้องใช้เวลาและความเชี่ยวชาญสูง โดยเฉพาะในการกำหนดเงื่อนไขขอบเขตและการแบ่งโดเมน
- 2) การใช้ทรัพยากรคอมพิวเตอร์สูง (High Computational Resources) การวิเคราะห์ FEM สำหรับปัญหาขนาดใหญ่หรือซับซ้อนต้องใช้ทรัพยากรคอมพิวเตอร์สูง เช่น หน่วยความจำและเวลาในการประมวลผล
- 3) ความไวต่อการแบ่งโดเมน (Sensitivity to Mesh Quality) ผลลัพธ์ของ FEM อาจมีความไวต่อคุณภาพของการแบ่งโดเมน (Mesh Quality) การแบ่งโดเมนที่ไม่เหมาะสมอาจทำให้ผลลัพธ์ไม่แม่นยำ
- 4) ข้อจำกัดในการวิเคราะห์ปัญหาที่ไม่เชิงเส้น (Nonlinear Problems) การวิเคราะห์ปัญหาที่ไม่เชิงเส้น เช่น การเปลี่ยนรูปที่ใหญ่หรือการแตกหัก อาจต้องใช้วิธีการทางคณิตศาสตร์ที่ซับซ้อนและเวลาในการประมวลผลมากขึ้น
- 5) ความยากในการตรวจสอบและยืนยันผลลัพธ์ (Difficulty in Verification and Validation) การตรวจสอบและยืนยันผลลัพธ์ของ FEM อาจเป็นเรื่องยาก เนื่องจากต้องเปรียบเทียบกับข้อมูลทดลองหรือผลลัพธ์จากวิธีการอื่นๆ

การเข้าใจข้อดีและข้อจำกัดของวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จะช่วยให้สามารถเลือกใช่วิธีนี้ได้อย่างเหมาะสมและมีประสิทธิภาพในการแก้ปัญหาทางวิศวกรรม

### แนวโน้มในอนาคตของ FEM (Future Trends of FEM)

วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method, FEM) กำลังพัฒนาอย่างต่อเนื่องเพื่อตอบสนองต่อความต้องการที่เพิ่มขึ้นในหลายสาขาวิชา แนวโน้มสำคัญในอนาคตของ FEM ประกอบด้วย

- 1) การใช้เทคโนโลยีการจำลองขั้นสูง (Advanced Simulation Technology) การพัฒนาเทคโนโลยีการจำลองที่มีความแม่นยำสูงและสามารถจำลองพฤติกรรมที่ซับซ้อนได้มากขึ้น เช่น การจำลองการแตกหักและการเปลี่ยนรูปที่ไม่เชิงเส้น การใช้เทคโนโลยีการจำลองขั้นสูงจะช่วยให้สามารถวิเคราะห์และออกแบบโครงสร้างและระบบที่ซับซ้อนได้อย่างมีประสิทธิภาพ
- 2) การบูรณาการกับเทคโนโลยี AI และ Machine Learning (Integration with AI and Machine Learning) การนำเทคโนโลยีปัญญาประดิษฐ์ (AI) และการเรียนรู้ของเครื่อง (Machine Learning) มาใช้ในการวิเคราะห์และปรับปรุงกระบวนการ FEM เช่น การใช้ AI ในการสร้างแบบจำลองและการทำนายพฤติกรรมของโครงสร้าง การบูรณาการนี้จะช่วยเพิ่มความแม่นยำและลดเวลาในการวิเคราะห์

3) การพัฒนาเทคโนโลยีการคำนวณแบบขนาน (Parallel Computing) การใช้เทคโนโลยีการคำนวณแบบขนานและการประมวลผลแบบกระจาย (Distributed Computing) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการแก้สมการ FEM สำหรับปัญหาขนาดใหญ่และซับซ้อน การคำนวณแบบขนานจะช่วยลดเวลาในการประมวลผลและเพิ่มความสามารถในการวิเคราะห์

4) การใช้เทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติ (3D Printing Technology) การใช้เทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติในการสร้างแบบจำลองและการทดสอบโครงสร้างที่ซับซ้อน การพิมพ์สามมิติช่วยให้สามารถสร้างชิ้นงานที่มีความซับซ้อนและทดสอบพฤติกรรมของโครงสร้างได้อย่างรวดเร็วและแม่นยำ

5) การพัฒนาเทคโนโลยีการตรวจสอบและวิเคราะห์ผลลัพธ์ (Post-processing and Visualization Technology) การพัฒนาเทคโนโลยีการตรวจสอบและวิเคราะห์ผลลัพธ์ที่มีความสามารถสูง เช่น การใช้เทคโนโลยีการแสดงผลแบบเสมือนจริง (Virtual Reality) และการแสดงผลแบบเสมือนเสริม (Augmented Reality) เพื่อช่วยในการวิเคราะห์และแสดงผลลัพธ์ของการวิเคราะห์ FEM

6) การพัฒนาเทคโนโลยีการบำรุงรักษาเชิงพยากรณ์ (Predictive Maintenance Technology) การใช้เทคโนโลยีการบำรุงรักษาเชิงพยากรณ์ในการตรวจสอบและป้องกันการเสียหายของโครงสร้างและระบบ การบำรุงรักษาเชิงพยากรณ์ช่วยให้สามารถคาดการณ์และป้องกันปัญหาที่อาจเกิดขึ้นได้ล่วงหน้า

7) การพัฒนาเทคโนโลยีการวิเคราะห์เชิงมัลติฟิสิกส์ (Multiphysics Analysis Technology) การพัฒนาเทคโนโลยีการวิเคราะห์เชิงมัลติฟิสิกส์ที่สามารถวิเคราะห์ปัญหาที่เกี่ยวข้องกับหลายฟิสิกส์พร้อมกัน เช่น การวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนและการไหลของของไหล การวิเคราะห์เชิงมัลติฟิสิกส์ช่วยให้สามารถแก้ปัญหาที่ซับซ้อนได้อย่างมีประสิทธิภาพ

การพัฒนาเหล่านี้จะช่วยให้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มีประสิทธิภาพสูงขึ้นและสามารถตอบสนองต่อความต้องการของอุตสาหกรรมและวิชาการในอนาคตได้ดียิ่งขึ้น

## 2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการหาอิทธิพลของแรงเสียดทานและความเร็วของหัวกดต่อความแข็งของชิ้นงานชุบชั้นรูปี้นวัสดุ S20C ด้วยกรรมวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยมีการนำเสนอวิธีการเพื่อปรับปรุงและพัฒนากระบวนการผลิตให้มีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น สามารถสรุปได้ดังนี้

M. Szala et al. [1] ได้ศึกษาเกี่ยวกับโครงสร้างจุลภาคและความแข็งของชิ้นส่วนเหล็ก 42CrMo4 ที่ผ่านการชุบชั้นรูปี้น โดยใช้วัสดุเหล็กเกรด 42CrMo4 งานวิจัยใช้การอัดเย็นร่วมกับเทคโนโลยีการอัดขึ้นรูปและการกดขึ้นรูป โดยก่อนการชุบชั้นรูปี้นงานจะถูกอบเพื่อให้ได้ความแข็งที่ระดับ  $181 \pm 9$  HV0.3 จากนั้นใช้การวิเคราะห์องค์ประกอบจำกัด (FEM) เพื่อระบุพื้นที่ที่มีความเค้นและความเครียดสูง และใช้กล้องจุลทรรศน์แสง (LOM) และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ในการศึกษาจุลโครงสร้าง ผลวิจัยพบว่าพื้นที่ที่มีความแข็งสูงสุดอยู่ที่บริเวณขอบนอกของชิ้นส่วน ซึ่งมีความแข็งที่ระดับ  $293 \pm 7$

HV0.3 การขึ้นรูปโลหะเย็นทำให้เกิดการแข็งตัวของเหล็ก และการกระจายตัวของความเครียดที่มีประสิทธิภาพสูงสุดในบริเวณขอบนอกของชิ้นส่วน

A. Baygut and O. Çulha [2] ได้ศึกษาผลกระทบของขั้นตอนการขึ้นรูปเย็นต่อคุณสมบัติการขึ้นรูป โดยใช้การทดลองและการจำลองวัสดุเหล็กกล้าและโลหะผสมต่างๆ เช่น เหล็กกล้าคาร์บอนและโลหะผสมเหล็ก การวิจัยนี้ใช้การจำลองเชิงตัวเลขด้วยวิธีองค์ประกอบจำกัด (Finite Element Method) ผ่านซอฟต์แวร์ Simufact Forming เพื่อวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของความเค้นพลาสติก, ความเค้นยืดหยุ่น และแรงที่ใช้ในการขึ้นรูป ขึ้นอยู่กับการออกแบบแม่พิมพ์ ผลการวิจัยพบว่าขั้นตอนการขึ้นรูปเย็นและการออกแบบแม่พิมพ์มีผลต่อคุณสมบัติการขึ้นรูปของวัสดุ เช่น ความแข็งแรงและการไหลของวัสดุ การปรับปรุงขั้นตอนการขึ้นรูปและการออกแบบแม่พิมพ์สามารถเพิ่มประสิทธิภาพและคุณภาพของผลิตภัณฑ์ได้

T. W. Ku [3] ได้ศึกษาการขึ้นรูปเย็นแบบผสมสำหรับเพลาชับ โดยเน้นการศึกษาพารามิเตอร์ของรูปทรงเครื่องมือใช้วัสดุเหล็กคาร์บอน AISI 1035 ที่ผ่านการสเฟียรอยด์และการอบอ่อน การวิจัยนี้ใช้การจำลองเชิงตัวเลขแบบสามมิติ (3D Finite Element Simulations) เพื่อวิเคราะห์ผลกระทบของมุมไหล่ (Shoulder Angles) ที่แตกต่างกัน ( $30^\circ$ ,  $45^\circ$  และ  $60^\circ$ ) ต่อคุณภาพและการเปลี่ยนรูปของเพลาชับ โดยมีการใช้การขึ้นรูปเย็นแบบผสมที่ประกอบด้วยการอัดขึ้นรูปไปข้างหน้า (Forward Extrusion) และการอัดขึ้นรูปแบบผสม (Combined Extrusion) ผลการวิจัยพบว่าการใช้มุมไหล่ (Shoulder Angles) ที่เหมาะสมในการขึ้นรูปเย็นแบบผสมสามารถทำให้เพลาชับมีคุณภาพตามที่ต้องการ โดยมุมไหล่ที่เหมาะสมที่สุดคือ  $45^\circ$  สำหรับทั้งสองมุม ซึ่งช่วยให้การขึ้นรูปเย็นเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพและไม่มีข้อบกพร่องในการขึ้นรูป

C. Coroas et al. [4] ได้ศึกษาการสร้างแบบจำลองเชิงตัวเลขเพื่อทำนายจุลโครงสร้างและคุณสมบัติทางกลของชิ้นส่วนเหล็กยานยนต์ที่ผ่านการชุบแข็ง ใช้ชิ้นส่วนเหล็กยานยนต์ที่ผ่านการชุบแข็ง การวิจัยนี้ใช้แบบจำลองเชิงตัวเลขที่ประกอบด้วยแบบจำลองความร้อน-โลหะวิทยาแบบสองทางและแบบจำลองทางกลแบบหนึ่งทาง โดยใช้วิธีองค์ประกอบจำกัด (FEM) แบบจำลองความร้อนรวมถึงการถ่ายเทความร้อนจากของแข็งไปยังของเหลวที่ขึ้นอยู่กับขนาดของชิ้นงาน คุณสมบัติทางกายภาพของเหลวที่ใช้ในการชุบแข็ง และพารามิเตอร์ของกระบวนการชุบแข็ง ผลวิจัยแบบจำลองเชิงตัวเลขที่พัฒนาขึ้นสามารถทำนายจุลโครงสร้างและความแข็งของชิ้นส่วนเหล็กยานยนต์ที่ผ่านการชุบแข็งได้อย่างแม่นยำ โดยมีความคลาดเคลื่อนในอุณหภูมิและจุลโครงสร้างสุดท้ายต่ำกว่า 7.5% และ 12% ตามลำดับ

E. Ceron et al. [5] ได้ศึกษาการทดสอบแรงเสียดทานและการหล่อลื่นในกระบวนการขึ้นรูปเย็น โดยใช้การอัดขึ้นรูปแบบย้อนกลับด้วยหมัดหมุนทรงกรวยและวัสดุเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำที่ไม่มีการผสมโลหะอื่น การวิจัยนี้ใช้การวิเคราะห์เชิงตัวเลข (FE Analysis) เพื่อกำหนดการกระจายความเร็วการเลื่อนและแบบจำลองเชิงวิเคราะห์เพื่อกำหนดแรงเสียดทานจากแรงบิดที่วัดได้ ผลการวิจัยพบว่าการทดสอบ

ใหม่นี้สามารถทำลายระบบการหล่อลื่นที่ดีที่สุดสำหรับการขึ้นรูปเย็น เช่น การเคลือบฟอสเฟตบนผิวของ MoS<sub>2</sub> และแสดงให้เห็นถึงความเครียดแรงเสียดทานสำหรับเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำที่ไม่มีการผสมโลหะอื่นที่ใช้สารหล่อลื่นต่างๆ เช่น การเคลือบฟอสเฟตบนผิวของ MoS<sub>2</sub> และการหล่อลื่นแบบอาน้ำเดียวกับ PULS

T. Mitek [6] ศึกษาผลกระทบของความเพียวบางของชิ้นงานต่อการกระจายของเส้นไหลในหน้าตัดของชิ้นส่วนเหล็กที่มีสมมาตรแบบวงกลมที่ผ่านการขึ้นรูปด้วยค้อน การวิจัยนี้ใช้การจำลองเชิงตัวเลขด้วยซอฟต์แวร์ QFORM-2D ซึ่งอิงตามวิธีองค์ประกอบจำกัด (Finite Element Method, FEM) เพื่อวิเคราะห์ผลกระทบของอัตราการกดขึ้นงานที่แตกต่างกัน (ช่วงจาก 1.5 ถึง 2.8) ต่อการกระจายของเส้นไหลในหน้าตัดตามยาวของชิ้นงาน ผลการวิจัยพบว่าความเพียวบางของชิ้นงานมีผลต่อการกระจายของเส้นไหลในหน้าตัดของชิ้นงานที่มีสมมาตรแบบวงกลม การวิเคราะห์เชิงเปรียบเทียบของผลลัพธ์ช่วยให้สามารถพัฒนาข้อสรุปที่อาจเป็นประโยชน์ในการนำกระบวนการนี้ไปใช้ในสภาพแวดล้อมอุตสาหกรรมสำหรับชิ้นส่วนเหล็กที่มีรูปทรงคล้ายกัน

Y. P. Luh et al. [7] ได้ศึกษาการแข็งตัวของเพลาดรทรงกลวงในกระบวนการขึ้นรูปเย็นใช้เพลาดรทรงกลวงที่ทำจากเหล็กกล้าคาร์บอน การวิจัยนี้ใช้การจำลองเชิงตัวเลขและการทดลองจริงเพื่อวิเคราะห์การแข็งตัวของเพลาดรทรงกลวงในกระบวนการขึ้นรูปเย็น โดยใช้ซอฟต์แวร์จำลองเชิงตัวเลขเพื่อทำนายการกระจายความเค้นและความเครียดในเพล่า และทำการทดลองเพื่อยืนยันผลการจำลอง ผลการวิจัยพบว่ากระบวนการขึ้นรูปเย็นทำให้เพลาดรทรงกลวงมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ โดยการกระจายความเค้นและความเครียดที่เหมาะสมช่วยให้เพล่ามีความแข็งแรงและทนทานต่อการใช้งานในสภาพแวดล้อมที่มีแรงกระแทกสูง

A. Watanabe et al. [8] ได้ศึกษาและพัฒนาแบบจำลองความเสียหายเชิงแอนไอโซทรอปิกเพื่อทำนายการแตกหักแบบเหนียวในกระบวนการขึ้นรูปเย็น โดยใช้ชิ้นส่วนเหล็ก เช่น เพลาลงและเพล่าที่มีขอบ การวิจัยนี้ใช้การจำลองเชิงตัวเลขด้วยวิธีองค์ประกอบจำกัด (Finite Element Analysis, FEA) เพื่อทำนายการแตกหักแบบเหนียว โดยใช้สมการใหม่ que แสดงเป็นเทนเซอร์สมมาตรอันดับสอง สมการนี้ถูกทดสอบด้วยการทดสอบแรงดึงแบบแกนเดียว และนำไปใช้ในการจำลองขึ้นส่วนจริง ผลการวิจัยพบว่าสมการใหม่สามารถทำนายตำแหน่งการแตกหักในเพลาลงและการเกิดรอยแตกเฉียงในเพล่าที่มีขอบได้อย่างแม่นยำ ช่วยลดต้นทุนการออกแบบและเพิ่มความแม่นยำในการทำนายการแตกหักในกระบวนการขึ้นรูปเย็น

T. W. Ku [9] ได้ศึกษากระบวนการขึ้นรูปเย็นสองขั้นตอนสำหรับเพล่าที่มีฟันเฟืองภายในและฟันเฟืองตรง โดยใช้เหล็กกล้าคาร์บอน AISI 1035 ที่ผ่านการอบอ่อนแบบสเฟียรอยด์ งานวิจัยนี้เสนอการขึ้นรูปเย็นสองขั้นตอนที่ประกอบด้วยขั้นตอนการอัดขึ้นรูปไปข้างหน้า (Forward Extrusion) และการอัดขึ้นรูปไปข้างหลัง (Forward-Backward Extrusion) การออกแบบกระบวนการใช้การจำลอง

เชิงตัวเลขด้วยวิธีองค์ประกอบจำกัด (Finite Element Method) เพื่อประเมินความเหมาะสม และทำการทดลองจริงเพื่อเปรียบเทียบผลลัพธ์ ผลการวิจัยพบว่ากระบวนการนี้สามารถผลิตเพลาชับที่มีฟันเฟืองภายในและฟันเฟืองตรงได้ตามข้อกำหนดที่ต้องการ และแสดงให้เห็นถึงการควบคุมกระบวนการที่ดี

V. C. Nguyen et al. [10] ได้ศึกษาการปรับปรุงการออกแบบแม่พิมพ์สำหรับการขึ้นรูปเย็น โดยใช้ซอฟต์แวร์จำลอง QForm งานวิจัยนี้ใช้วิธีการวิเคราะห์เชิงลำดับชั้น (AHP) เพื่อเลือกพารามิเตอร์ทางเทคโนโลยีที่เหมาะสม การจำลองช่วยปรับปรุงรูปทรงของแม่พิมพ์และกระบวนการขึ้นรูปเพื่อลดข้อบกพร่องในการไหลและความเค้นในพื้นที่สำคัญ ผลการวิจัยพบว่าการใช้ซอฟต์แวร์จำลองสามารถทำนายและปรับปรุงการออกแบบแม่พิมพ์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ลดเวลาการออกแบบและปรับปรุงคุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่ผ่านการขึ้นรูปเย็นได้อย่างมีนัยสำคัญ

C. C. Yang and C. H. Liu [11] ได้ศึกษากระบวนการขึ้นรูปเย็นหลายขั้นตอนสำหรับการผลิตนอตปรับแรงดันวาล์วระบาย โดยใช้เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ AISI 1010 งานวิจัยนี้ใช้การจำลองเชิงตัวเลขและการทดลองจริงในการวิเคราะห์กระบวนการขึ้นรูปเย็นห้าขั้นตอน กระบวนการประกอบด้วย การเตรียมและการจัดศูนย์สำหรับการอัดขึ้นรูปย้อนกลับ, การอัดขึ้นรูปย้อนกลับผ่านหมุดแม่พิมพ์, การกดขึ้นรูป, การอัดขึ้นรูปย้อนกลับผ่านหมุดเคลื่อนที่, และการเจาะ ผลการวิจัยพบว่ากระบวนการขึ้นรูปเย็นห้าขั้นตอนสามารถเพิ่มความแข็งแรงของชิ้นงานได้ถึง 31% เมื่อเทียบกับชิ้นงานเริ่มต้น การกระจายความเครียดที่จำลองเชิงตัวเลขสอดคล้องกับการทดสอบความแข็งแรงจริง การขึ้นรูปเย็นหลายขั้นตอนช่วยเพิ่มความแข็งแรงของชิ้นงานอย่างมีนัยสำคัญ

J. O. Obiko et al. [12] ได้ศึกษาการปรับปรุงกระบวนการชุบขึ้นรูปโดยใช้การจำลองเชิงตัวเลขและวิธีการทาคุชิ (Taguchi method) โดยใช้เหล็ก X20 ซึ่งใช้ในท่อหม้อไอน้ำในโรงไฟฟ้าพลังงานฟอสซิล งานวิจัยนี้ใช้ซอฟต์แวร์ Deform™ 3D เพื่อจำลองกระบวนการชุบขึ้นรูปและใช้การออกแบบการทดลองแบบทาคุชิสามระดับสามพารามิเตอร์ (Three-Level, Three-Parameter Taguchi Design of Experiment) เพื่อวิเคราะห์ผลกระทบของอุณหภูมิการเปลี่ยนรูป, ความเร็วของแม่พิมพ์, และสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ การวิเคราะห์ ANOVA ถูกใช้เพื่อระบุความสำคัญของพารามิเตอร์ต่อการตอบสนองของการชุบขึ้นรูป ผลการวิจัยพบว่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการปรับปรุงคุณภาพของผลิตภัณฑ์คือ อุณหภูมิการเปลี่ยนรูปที่  $1,000^{\circ}\text{C}$ , ความเร็วของแม่พิมพ์ที่ 20 mm/s, และสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานที่ 0.2 การจำลองยืนยันว่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมเหล่านี้ทำให้แรงดึงสูงสุดลดลงเหลือ  $252.5 \pm 2.5$  MPa ที่พื้นผิวด้านข้างของตัวอย่างที่เปลี่ยนรูปเมื่อเทียบกับเงื่อนไขอื่นๆ

Y. T. Wang and S. Y. Hsia [13] ได้ศึกษาการสร้างแบบจำลองทำนายแรงในการขึ้นรูปเย็นสำหรับการผลิตชิ้นส่วนยึดใช้ชิ้นส่วนยึดที่ทำจากโลหะ งานวิจัยนี้ใช้การจำลองเชิงตัวเลขด้วยซอฟต์แวร์ SolidWorks (v2020) และ DEFORM-3D (v6.1) เพื่อทำนายแรงในการขึ้นรูปเย็นสำหรับการผลิตนอต โดยการจำลองนี้อิงตามเงื่อนไขการผลิตจริง การวิเคราะห์เชิงตัวเลขช่วยให้สามารถทำนายแรงที่ใช้ในการ

ขึ้นรูปได้อย่างแม่นยำและปรับปรุงประสิทธิภาพของเครื่องขึ้นรูปน็อต ผลวิจัยพบว่าแบบจำลองทำนายแรงในการขึ้นรูปเย็นสามารถปรับปรุงความแม่นยำในการทำนายแรงที่ใช้ในการขึ้นรูปได้ถึง 8-20% เมื่อเทียบกับการทำนายแบบเดิม การวิจัยนี้ช่วยให้ผู้ผลิตสามารถควบคุมพารามิเตอร์การผลิตได้ดีขึ้นและนำไปสู่การผลิตที่มีประสิทธิภาพสูงขึ้น

G. Winiarski et al. [14] ได้ศึกษาการวิเคราะห์เชิงตัวเลขของกระบวนการทูลขึ้นรูปหกชั้นตอนสำหรับการผลิตชิ้นส่วนกลวงที่มีขอบจากท่อเหล็ก 42CrMo4 ที่ผ่านการอบอ่อน งานวิจัยนี้ใช้ซอฟต์แวร์ Deform 2D/3D เพื่อจำลองกระบวนการทูลขึ้นรูปหกชั้นตอน ซึ่งประกอบด้วย การอัดขึ้นรูปด้วยแกนเคลื่อนที่, การอัดขึ้นรูปแบบแม่พิมพ์เปิด, และการกดขึ้นรูป การจำลองนี้ช่วยในการวิเคราะห์คุณภาพของรูปทรงชิ้นงานและพารามิเตอร์กระบวนการ รวมถึงเกณฑ์การแตกหักแบบเหนียวของ Cockcroft-Latham และแรงที่ใช้ในการขึ้นรูป ผลการวิจัยพบว่ากระบวนการทูลขึ้นรูปหกชั้นตอนที่เสนอสามารถผลิตชิ้นส่วนกลวงที่มีขอบได้ตามข้อกำหนดที่ต้องการ การวิเคราะห์เชิงตัวเลขช่วยให้สามารถระบุพื้นที่ที่มีความเค้นและความเครียดสูง ซึ่งช่วยในการปรับปรุงกระบวนการและลดข้อบกพร่องในการผลิต

K. Laber and M. Knapinski [15] ได้ศึกษาเงื่อนไขในการประมวลผลเทอร์โมพลาสติกเพื่อรับประกันการผลิตลวดเหล็กคุณภาพสูงสำหรับการขึ้นรูปเย็น โดยใช้เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ 20MnB4 งานวิจัยนี้ใช้การจำลองเชิงตัวเลขด้วยโปรแกรม FORGE 2011® และ QTSteel® และการจำลองทางกายภาพด้วยเครื่อง GLEEBLE 3800® ผลการวิจัยพบว่าอุณหภูมิที่เหมาะสมของแถบเหล็กก่อนการเปลี่ยนรูปในบล็อกการรีด RSM คือประมาณ 850°C และอัตราการทำความเย็นที่ดีที่สุดหลังจากกระบวนการเปลี่ยนรูปคือ 10°C/s เงื่อนไขเหล่านี้ช่วยให้ได้ผลิตภัณฑ์สุดท้ายที่มีคุณสมบัติทางกลและทางเทคโนโลยีที่ดี รวมถึงโครงสร้างจุลภาคที่ละเอียดและสม่ำเสมอ

T. Bulzak et al. [16] ได้ศึกษาการใช้การจำลองเชิงตัวเลขและการจำลองทางกายภาพเพื่อยืนยันกระบวนการทูลขึ้นรูปเย็นสำหรับปลอกหมุน โดยใช้วัสดุเหล็กกล้า EN 42CrMo4 และอลูมิเนียมอัลลอย EN AW-6060 งานวิจัยนี้เริ่มต้นด้วยการจำลองเชิงตัวเลขของกระบวนการทูลขึ้นรูปเย็นโดยใช้ซอฟต์แวร์ DEFORM 3D จากนั้นทำการทดสอบในห้องปฏิบัติการโดยใช้เครื่องมือขนาด 1:2 และวัสดุจำลองเป็นอลูมิเนียมอัลลอย EN AW-6060 ผลการวิจัยพบว่าปลอกหมุนสามารถผลิตได้จากท่อโดยการทูลขึ้นรูปเย็น การจำลองเชิงตัวเลขและการทดสอบทางกายภาพแสดงให้เห็นว่าพารามิเตอร์ทางเรขาคณิตของชิ้นส่วนที่ทูลขึ้นรูปสอดคล้องกับขนาดที่จำลองโดย FEM และแรงที่ใช้ในการทูลขึ้นรูปที่ทดสอบจริงมีความสอดคล้องกับแรงที่ได้จากการจำลองเชิงตัวเลข โดยใช้การจำลองเชิงตัวเลขด้วยวิธีองค์ประกอบจำกัด (Finite Element Simulation) เพื่อวิเคราะห์ผลกระทบของกระบวนการขึ้นรูปเย็นสองแบบที่มีลำดับการขึ้นรูปย้อนกลับต่อข้อบกพร่องในการขึ้นรูปและการกระจายความเค้นในท่อผนังบาง ผลการวิจัยพบว่ากระบวนการขึ้นรูปแบบ Type-I เป็นกระบวนการที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการผลิตท่อผนังบางที่มีคุณภาพสูง โดยช่วยลดความเครียดที่ส่วนหัวของท่อและลดโอกาสการเกิดรอยแตก การทดลองยืนยันว่า

กระบวนการ Type-I สามารถเพิ่มความแข็งแรงในส่วนหัวของท่อได้เนื่องจากการเปลี่ยนรูปพลาสติกที่เข้มข้นขึ้น

L. Tao et al. [17] ได้ศึกษานี้มุ่งเน้นไปที่การหากระบวนการอัดขึ้นรูปเย็นที่เหมาะสมสำหรับท่อซูเปอร์อัลลอย A-286 โดยใช้การจำลององค์ประกอบจำกัด (FE) เพื่อวิเคราะห์ผลกระทบของกระบวนการอัดขึ้นรูปสองแบบที่มีลำดับการอัดย้อนกลับต่อข้อบกพร่องในการขึ้นรูปและการกระจายความแข็งแรงในท่อผนังบาง ผลการจำลองพบว่ากระบวนการแบบที่ 1 (Type-I) เป็นกระบวนการที่เหมาะสมสำหรับการตอบสนองความต้องการด้านคุณภาพ โดยพบข้อบกพร่องที่เกิดจากการเติมไม่เต็มในส่วนกลางของท่อและความเข้มข้นของความเค้นในส่วนหัวน้อยกว่ากระบวนการแบบที่ 2 (Type-II) ซึ่งอาจลดโอกาสการเกิดรอยแตก การทดลองยืนยันความแข็งแรงได้ของกระบวนการแบบที่ 1 โดยพบว่าความแข็งแรงในส่วนหัวของท่อสูงขึ้นเนื่องจากการเปลี่ยนรูปพลาสติกที่เข้มข้นขึ้นในส่วนนี้

P. M. Petkar et al. [18] ได้ศึกษาพฤติกรรมการขึ้นรูปในกระบวนการทุบขึ้นรูปเย็นของเหล็ก AISI 1010 โดยใช้แบบจำลองเครือข่ายประสาทเทียม (Artificial Neural Network, ANN) งานวิจัยนี้ใช้แบบจำลองเครือข่ายประสาทเทียมแบบฟีดฟอร์เวิร์ดหลายชั้น (Multi-Layered Feed Forward ANN) เพื่อวิเคราะห์ผลกระทบของพารามิเตอร์กระบวนการ เช่น ขนาดบิลเลต, อัตราการลด, มุมหมัด, และความสูงของที่ดิน ต่อพฤติกรรมการขึ้นรูป เช่น ความเค้นที่มีประสิทธิภาพ, ความเครียด, อัตราความเครียด, และแรงหมัด ในกระบวนการทุบขึ้นรูปเย็นแบบย้อนกลับสำหรับเหล็ก AISI 1010 ผลการวิจัยพบว่าพฤติกรรมการขึ้นรูปมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามขนาดบิลเลตและอัตราการลด ในขณะที่การลดมุมหมัดและความสูงของที่ดินช่วยลดแรงหมัด ซึ่งส่งผลให้หมัดมีอายุการใช้งานยาวนานขึ้น การใช้การจำลององค์ประกอบจำกัดร่วมกับแบบจำลอง ANN ช่วยลดความพยายามในการพัฒนากระบวนการในแง่ของต้นทุนและเวลา

S. Y. Hsia [19] ได้ศึกษาการจำลองเชิงตัวเลขของการซ่อมแซมตาข่ายที่ใช้ในกระบวนการอัดขึ้นรูปแบบพอร์ทโซลสามมิติสำหรับโปรไฟล์ผนังบาง โดยใช้อลูมิเนียมอัลลอย Al6061 งานวิจัยนี้ใช้วิธีองค์ประกอบจำกัด (Finite Element Method) เพื่อวิเคราะห์ปัญหาที่เกิดขึ้นจากการอัดขึ้นรูปอลูมิเนียมผนังบาง โดยเน้นที่การอัดขึ้นรูปแบบพอร์ทโซลสำหรับจักรยาน ผลการวิจัยพบว่าการซ่อมแซมตาข่ายสามารถแก้ปัญหการเจาะตาข่ายที่เกิดขึ้นระหว่างการจำลองได้ และการปรับปรุงแม่พิมพ์ด้วยวิธีทาทุชิช่วยลดความเสี่ยงการก่อตัวที่ไม่สม่ำเสมอ การเปรียบเทียบขนาดการจำลองกับขนาดการออกแบบช่วยให้มั่นใจในความแม่นยำ โดยข้อผิดพลาดสูงสุดของขนาดอยู่ที่ 8.70% ที่ขนาด 0.92 มม. และข้อผิดพลาดสูงสุดของขนาดอื่นๆ อยู่ที่ประมาณ  $\pm 5\%$

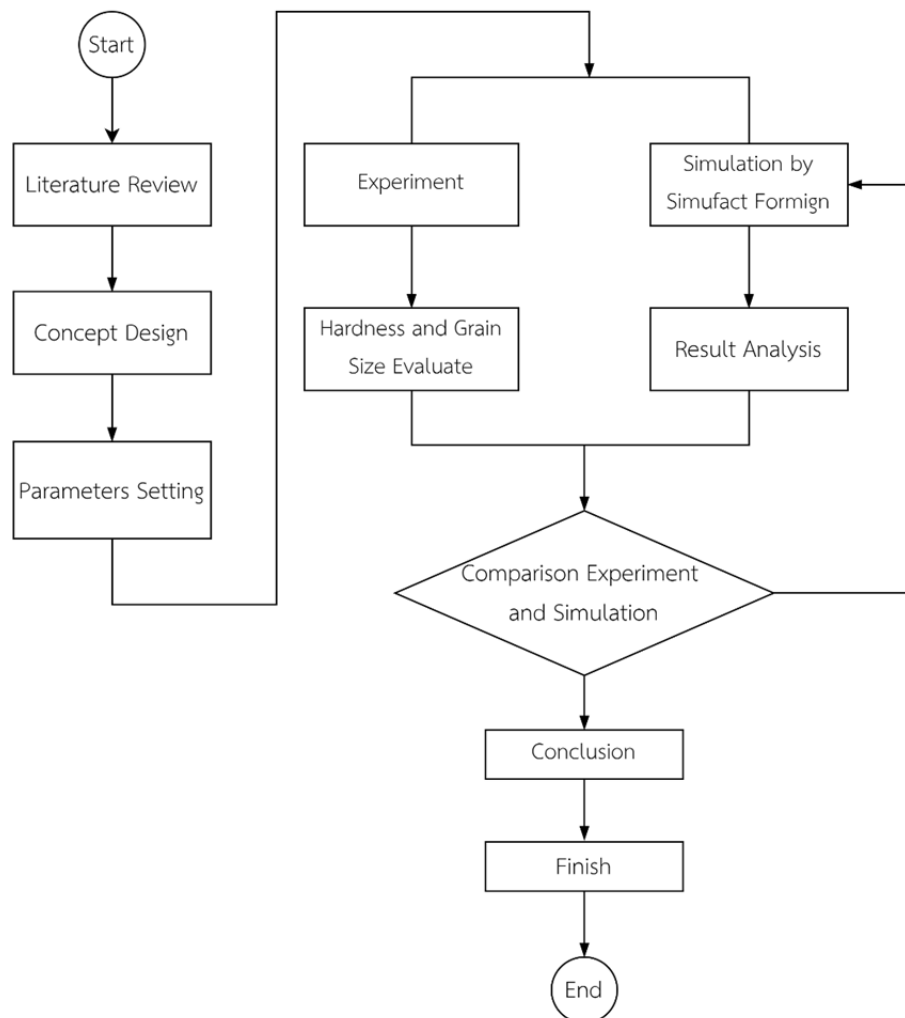
P. M. Petkar et al. [20] ได้ศึกษาเปรียบเทียบพฤติกรรมการขึ้นรูปของเหล็กเกรดต่างๆ ในการอัดเย็นแบบย้อนกลับ โดยใช้เหล็ก AISI 1010, 1018, และ 1045 งานวิจัยนี้ใช้เครือข่ายประสาทเทียม (ANN) และอัลกอริทึมวิวัฒนาการเชิงอนุพันธ์ (DE) เพื่อศึกษาผลกระทบต่อการพฤติกรรมการขึ้นรูปของเหล็กเกรดต่างๆ โดยใช้การจำลององค์ประกอบจำกัด (FE) และการออกแบบการทดลอง (DoE)

ผลการวิจัยพบว่ามี ความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญในความเค้นและแรงกดระหว่างเหล็กเกรดต่างๆ ในขณะที่ความเครียดและอัตราความเครียดมีความแตกต่างเพียงเล็กน้อย การทดลองยืนยันผลลัพธ์ที่ได้จากการใช้เทคนิค DE และพบว่าความเปื่อยเบนอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ นอกจากนี้ยังพบว่าชิ้นส่วนที่ผ่านการอัดเย็นมีความแข็งแรงและความสมบูรณ์ทางกลที่ดีขึ้น

### บทที่ 3

#### ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยนี้ใช้ระเบียบวิธีวิจัยเชิงทดลอง โดยมีวัตถุประสงค์ของการศึกษาค้นคว้าเพื่อมุ่งเน้นการวิเคราะห์ผลกระทบของค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานและความเร็วของหัวกด (Ram Speed) ต่อความแข็งแรงของเหล็ก S20C ในกระบวนการขึ้นรูปเย็น โดยใช้วิธีการวิเคราะห์เชิงตัวเลขด้วย Finite Element Method (FEM) เพื่อหาปัจจัยที่มีความเชื่อมโยงต่อความแข็งแรงของชิ้นงานหล่อเหล็กโครงสร้างหลังการขึ้นรูปเย็นในกระบวนการผลิตและรักษาคุณภาพของชิ้นงาน มีวิธีการดำเนินงานวิจัยและการทดลอง ดังแสดงในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 รูปแบบการวิจัย (Research Flow Chart)

### 3.1 การออกแบบการวิจัย

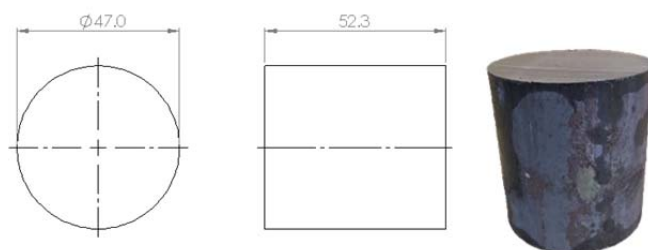
การวิจัยนี้ดำเนินการตามขั้นตอนที่กำหนดใน Flow Chart เพื่อศึกษาอิทธิพลของแรงเสียดทานและความเร็วของหัวกดต่อความแข็งของชิ้นงานชุบขึ้นรูปเย็นวัสดุ S20C โดยมีรายละเอียดของขั้นตอนดังนี้

1. ศึกษางานวิจัยและข้อมูลทางวิชาการที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการชุบขึ้นรูปเย็น (Cold Forging) แรงเสียดทาน และความเร็วของหัวกด เพื่อวางรากฐานทางทฤษฎีสำหรับงานวิจัย
2. ออกแบบแนวทางการทดลองและการจำลองกระบวนการ รวมถึงการกำหนดขอบเขตและเป้าหมายของการศึกษา เพื่อให้สอดคล้องกับวัตถุประสงค์ของงานวิจัย
3. กำหนดพารามิเตอร์ที่ใช้ในการวิจัย ได้แก่ ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน (0.02, 0.04, 0.06, 0.08, 0.10) และความเร็วของหัวกด (200, 220, 240 มิลลิเมตร/วินาที) รวมถึงรูปแบบแม่พิมพ์ชุบขึ้นรูป
4. ทำการทดลองจริงโดยการขึ้นรูปเย็นวัสดุ S20C ด้วยพารามิเตอร์ที่กำหนด เพื่อวิเคราะห์ผลกระทบต่อคุณสมบัติของชิ้นงาน
5. ใช้ซอฟต์แวร์ Simufact Forming ในการจำลองกระบวนการชุบขึ้นรูปเย็น เพื่อคาดการณ์ผลการกระจายความเครียด การไหลของวัสดุ และความแข็งของชิ้นงาน
6. วัดความแข็ง (Hardness) และตรวจสอบขนาดเม็ดลึดพีช (Grain Size) ในชิ้นงานที่ได้จากการทดลอง เพื่อประเมินคุณสมบัติทางกลของวัสดุ
7. วิเคราะห์ผลลัพธ์จากการทดลองและการจำลอง ทั้งในด้านการไหลของวัสดุ ความเครียด ความแข็ง และการกระจายตัวของอุณหภูมิ
8. เปรียบเทียบผลการทดลองจริงกับผลจากการจำลอง เพื่อประเมินความแม่นยำและความสอดคล้องของผลลัพธ์

#### วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

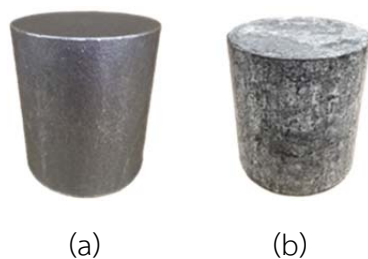
วัสดุที่ใช้ในงานวิจัยนี้คือเหล็ก S20C ซึ่งมีคุณสมบัติทางกลที่เหมาะสมสำหรับการชุบขึ้นรูปเย็น อุปกรณ์ที่ใช้ประกอบด้วยแม่พิมพ์ 3 ขั้นตอนสำหรับการขึ้นรูปเย็น และซอฟต์แวร์ Simufact Forming สำหรับการจำลองกระบวนการด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (FEM) เพื่อวิเคราะห์พฤติกรรมของวัสดุและผลกระทบต่อความแข็งของชิ้นงาน

ขั้นตอนที่ 1 ตัดชิ้นงานเพื่อใช้เป็นวัสดุในการชุบขึ้นรูปเย็นที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 47 มิลลิเมตร และความยาว 52.3 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 ตัดชิ้นงานที่ทำการทดลองตามขนาดที่กำหนด

ขั้นตอนที่ 2 นำชิ้นงานที่ได้จากการตัดตามขนาดที่กำหนดเข้าสู่การทำความสะอาดผิวของชิ้นงานทดลองด้วยกระบวนการยิงทราย ดังแสดงในรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 a) ชิ้นงานที่ทำความสะอาดผิวของ b) ชิ้นงานถูกเคลือบผิวพอดเฟส

ขั้นตอนที่ 3 นำชิ้นงานที่ผ่านการเคลือบผิวพอดเฟสเพื่อหน้าที่เป็นสารหล่อลื่นให้กับชิ้นงานก่อนทำการชุบขึ้นรูปเย็นผ่านแม่พิมพ์สามกระบวนการ ดังแสดงในรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 กระบวนการชุบขึ้นรูปเย็น

ขั้นตอนที่ 4 ได้ชิ้นงานทดลองการที่ผ่านการทุบขึ้นรูปเย็นทรงกระบอก เส้นผ่านศูนย์กลาง 49 มิลลิเมตร และความยาว 78 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 ชิ้นงานทดลอง (Finish Part)

ขั้นตอนที่ 5 นำชิ้นงานที่ผ่านจากระบวนการทุบขึ้นรูปเย็นไปทำการตัดแบ่งครึ่งออกเพื่อทำการส่งต่อวัดค่าความแข็งหลังกระบวนการทุบขึ้นรูปเย็น ดังแสดงในรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 ชิ้นงานที่ถูกตัดเพื่อเตรียมทดสอบความแข็ง

#### ขั้นตอนวิเคราะห์ความแข็งของชิ้นงาน

ในงานวิจัยนี้ใช้เครื่องวัดความแข็ง Rockwell Hardness Tester CV-600D ดังแสดงในรูปที่ 3.8 โดยทำการวัดความแข็งในหน่วย HRB มีขั้นตอนดังนี้

1. นำชิ้นงานที่ผ่านการทุบขึ้นรูปมาทำการตัดแบ่งครึ่งโดยเหลือเนื้อวัสดุความหนา 8 มิลลิเมตร
2. เตรียมผิวชิ้นงานที่ตัดมาทำการเตรียมผิวขัดผิวให้เรียบโดยใช้เครื่องขัด ก่อนทำการวัดค่าความแข็ง ดังแสดงในรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 เครื่องขัดผิวชิ้นงานก่อนทำการวัดค่าความแข็งของชิ้นงาน (MP-2 Grinder Polisher)

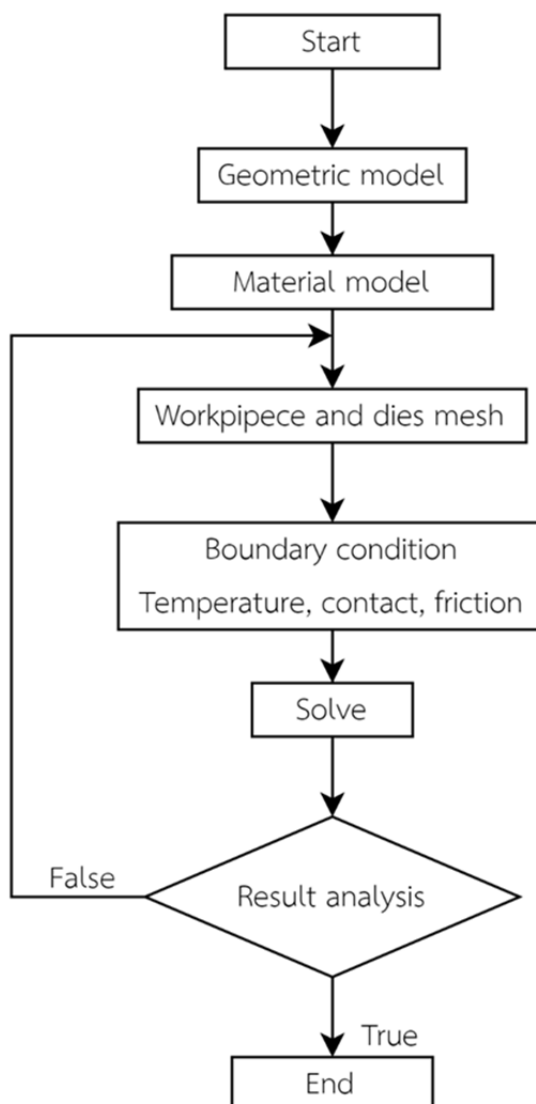
3. กำหนดจุดในการวัดความแข็งก่อนทำการวัดหาค่าความแข็งตามตำแหน่งที่กำหนดไว้
4. นำค่าที่ได้จากการวัดความแข็งมาสรุปหาค่าความแข็งที่เกิดขึ้นหลังกระบวนการชุบขึ้นรูปเย็นจากนั้นเปรียบเทียบแปลงหน่วยการวัดเป็น



รูปที่ 3.8 เครื่องทดสอบความแข็งรุ่น CV-600D

### 3.2 การจำลองการชุบขึ้นรูปเย็นด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

งานวิจัยชิ้นนี้ใช้การจำลองด้วยโปรแกรมสำเร็จรูปทางวิศวกรรมชื่อ Simufact Forming Version 2022 เพื่อศึกษาพฤติกรรมของชิ้นงานระหว่างกระบวนการชุบขึ้นรูปเย็นมีขั้นตอนการดำเนินงาน 3 ขั้นตอน ดังนี้การเตรียมชิ้นงานในการ Simulation ในกระบวนการจำลองการชุบขึ้นรูปเย็นของเหล็ก S20C โดยใช้ซอฟต์แวร์ Finite Element Analysis (FEA) ผ่าน Simufact Forming การเตรียมชิ้นงานเป็นขั้นตอนสำคัญที่ส่งผลต่อความถูกต้องของการจำลองและผลลัพธ์ที่ได้รับ โดยมีขั้นตอนการเตรียมชิ้นงาน การจำลองด้วย Finite Element Method (FEM) ดังที่แสดงในรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 ลำดับขั้นตอนการกำหนดเงื่อนไขเพื่อจำลองด้วยคอมพิวเตอร์ (FEM)

#### ขั้นตอนหลักของ Finite Element Method (FEM)

##### 1. Pre-Processing

ขั้นตอนเตรียมข้อมูลสำหรับการวิเคราะห์ FEM โดยมีรายละเอียดดังนี้

##### a) การสร้างโมเดลทางเรขาคณิต (Geometry Modeling)

กำหนดรูปร่างและขนาดของชิ้นงานและแม่พิมพ์ เช่น การออกแบบโครงสร้างของชิ้นงานในกระบวนการทุบขึ้นรูปเย็น

b) การแบ่งโครงข่าย (Meshing)

แบ่งโมเดลเป็นองค์ประกอบย่อย (Elements) และโหนด (Nodes) เพื่อใช้ในการคำนวณทางตัวเลข โดยเมชที่ละเอียดจะให้ผลลัพธ์ที่แม่นยำขึ้น แต่ใช้เวลาในการคำนวณมากขึ้น

c) การกำหนดคุณสมบัติวัสดุ (Material Properties)

ระบุค่าความหนาแน่น (Density), ค่าความยืดหยุ่น (Elastic Modulus), ค่าความเค้น-ความเครียดพลาสติก (Stress-Strain Relationship) และค่าความร้อน (Thermal Properties)

d) การตั้งค่าขอบเขตและเงื่อนไขเริ่มต้น (Boundary and Initial Conditions)

ระบุเงื่อนไขที่เกี่ยวข้อง เช่น แรงที่กระทำ, ความเร็วของหัวกด, และแรงเสียดทานระหว่างแม่พิมพ์และชิ้นงาน

## 2. Processing

ขั้นตอนการคำนวณทางตัวเลขที่ดำเนินการโดยซอฟต์แวร์ FEM

a) การแก้สมการสมดุล (Equilibrium Equation)

ซอฟต์แวร์ใช้วิธีการทางตัวเลข เช่น วิธี Newton-Raphson หรือวิธี Iterative เพื่อแก้สมการสมดุลแรง

b) การจำลองพฤติกรรมของวัสดุ:

วิเคราะห์พฤติกรรมของวัสดุในสถานการณ์ต่างๆ เช่น การเสียรูป (Deformation), การกระจายความเครียด (Stress), และการไหลของวัสดุ (Material Flow)

c) การคำนวณผลแบบไม่เชิงเส้น (Nonlinear Analysis)

กระบวนการที่ซับซ้อนขึ้นมักเป็นแบบไม่เชิงเส้น ซึ่งต้องคำนวณค่าที่เปลี่ยนแปลงในแต่ละช่วงเวลา (Incremental Step)

## 3. Post-processing

ขั้นตอนวิเคราะห์และแสดงผลลัพธ์จากการจำลอง

a) การแสดงผลลัพธ์ (Visualization)

นำเสนอข้อมูลผ่านรูปภาพ แผนที่สี (Contour Plot) หรือแอนิเมชัน เช่น การกระจายตัวของความเครียด ความเค้น และอุณหภูมิในชิ้นงาน

b) การวิเคราะห์เชิงลึก

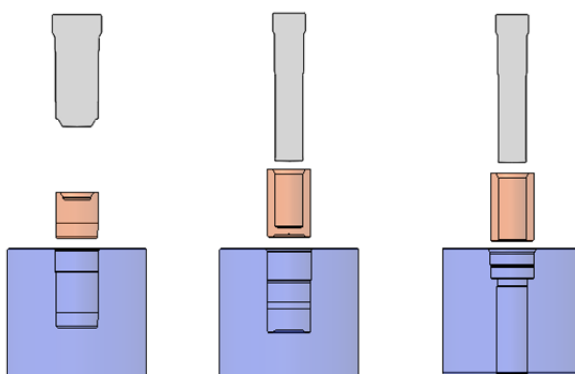
ตรวจสอบค่าความเครียด-ความเค้นสูงสุด, แรงที่กระทำ, และการไหลของวัสดุในกระบวนการขึ้นรูป

c) การเปรียบเทียบผลลัพธ์

เปรียบเทียบผลการจำลองกับการทดลองจริงเพื่อประเมินความถูกต้องของการจำลอง และนำไปปรับปรุงกระบวนการ

### 3.2.1 การปรับตั้งค่าโปรแกรม (Pre-Processing)

ออกแบบแม่พิมพ์และชิ้นงาน (CAD Design) การออกแบบแม่พิมพ์ในงานทดลองนี้ ใช้โปรแกรมช่วยในการออกแบบ Solid Work 2023 สร้างแบบสามมิติจากนั้นทำการบันทึกข้อมูลเป็นไฟล์นามสกุล (.STEP) ดังที่แสดงในรูปที่ 3.10



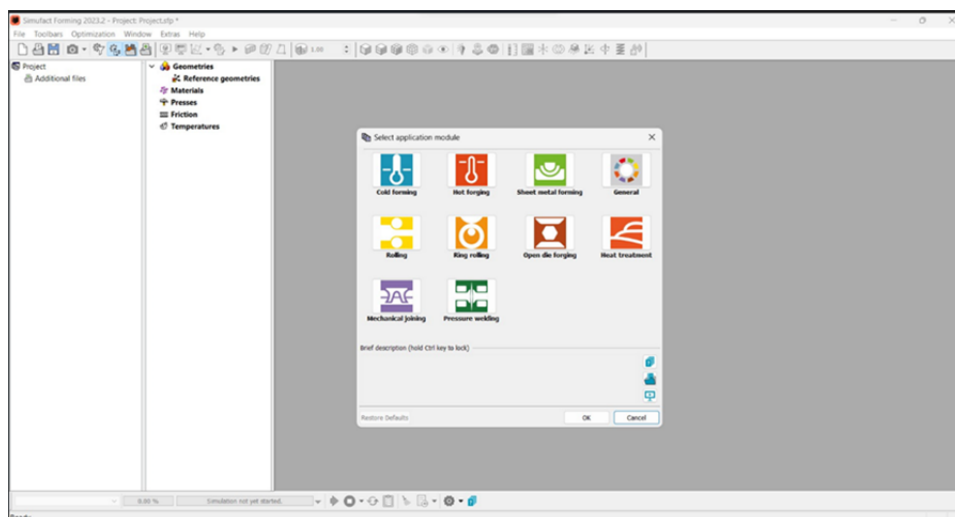
รูปที่ 3.10 การออกแบบแม่พิมพ์และชิ้นงาน Solid Work

1. นำโมเดลเข้าสู่โปรแกรม (Create New Project) เริ่มต้นโดยการคลิกที่ปุ่ม “New Project” ในแถบเครื่องมือ ตั้งชื่อและระบุตำแหน่งที่ต้องการบันทึกโปรเจกต์ จากนั้นโปรแกรมจะเปิดหน้าต่างสำหรับการตั้งค่าการจำลอง ดังที่แสดงในรูปที่ 3.11



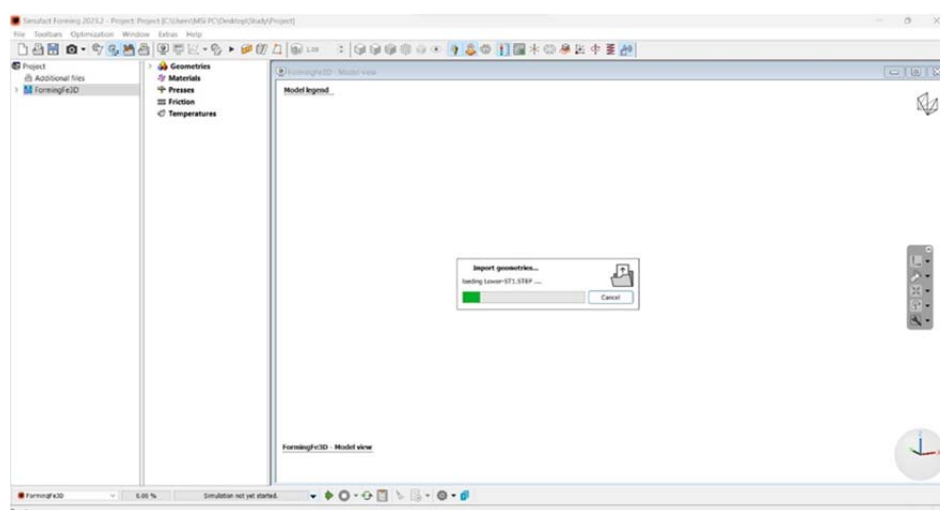
รูปที่ 3.11 เข้าสู่หน้าต่างโปรแกรม Simufact Forming

2. การเลือกประเภทกระบวนการ (Process Selection) เลือกประเภทของกระบวนการที่จะจำลอง เป็น Cold Forming หลังจากเลือกชนิดของการจำลองและการจำลองแบบสามมิติ (3D) และเลือกตัวแก้ปัญห (Solver) เป็นแบบ Finite Element (FE) ดังที่แสดงในรูปที่ 3.12



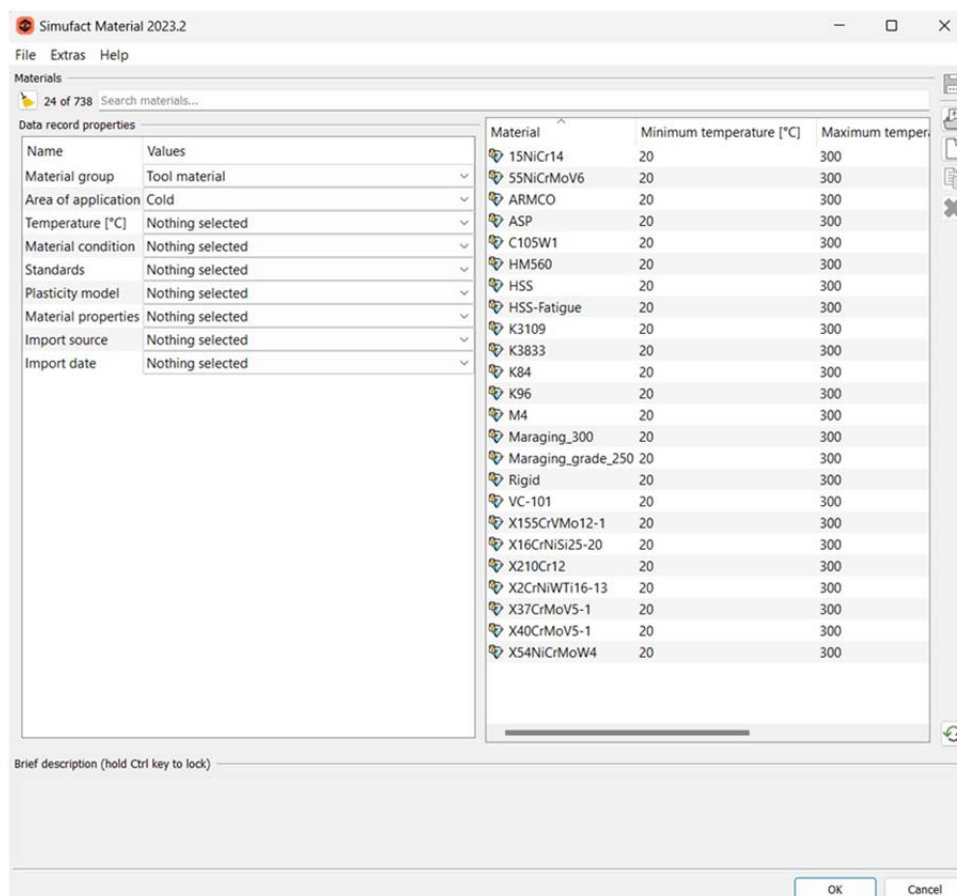
รูปที่ 3.12 หน้าต่างโปรแกรม Simufact Forming

3. การสร้างและนำเข้าชิ้นงาน (Geometry Creation or Import) นำเข้านำเข้าชิ้นงานทดลองข้อมูล CAD จากไฟล์ภายนอกแบบ STEP เมื่อชิ้นงานถูกนำเข้าหรือสร้างขึ้นแล้วให้ทำการตั้งค่าให้ตรงกับขนาดและตำแหน่งที่ต้องการในแบบจำลอง ดังที่แสดงในรูปที่ 3.13



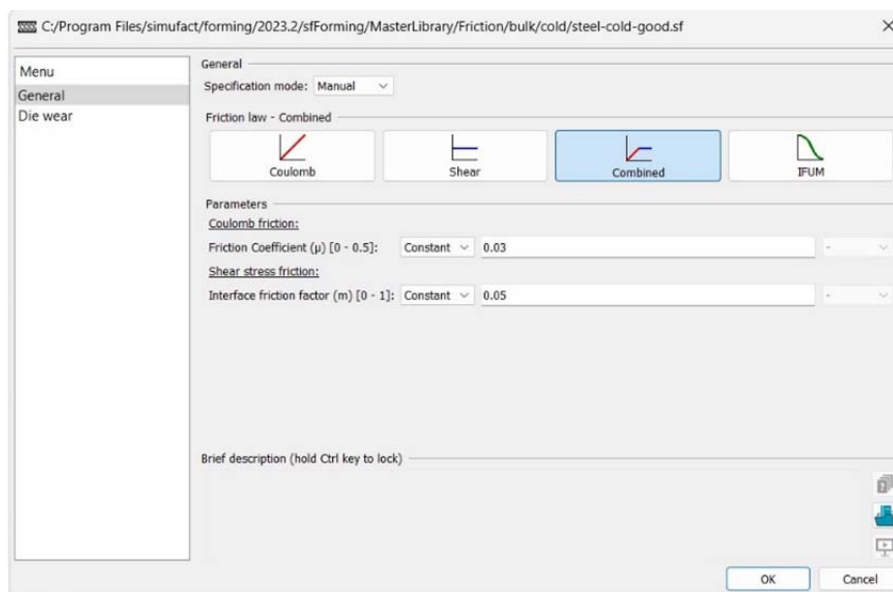
รูปที่ 3.13 นำเข้าชิ้นงานจากไฟล์ STEP

4. การกำหนดวัสดุ (Material Assignment) เลือกและกำหนดวัสดุที่จะใช้ในกระบวนการจำลอง โดยสามารถโหลดข้อมูลวัสดุจากฐานข้อมูลของโปรแกรมเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ S20C (AISI1020) โดยมีค่าคุณสมบัติต่างๆ เช่น โมดูลัสยืดหยุ่น ความแข็งแรง และพฤติกรรมทางเทอร์โมพลาสติกจะถูกใช้ในการคำนวณตามที่โปรแกรมกำหนดให้ ดังที่แสดงในรูปที่ 3.14



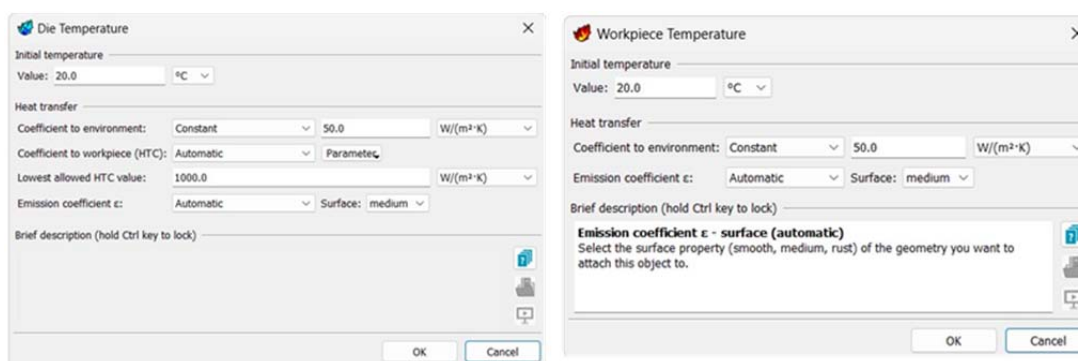
รูปที่ 3.14 การเลือกวัสดุแม่พิมพ์และชิ้นงาน

5. การตั้งค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน (Friction Definition) เลือกค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานจากการออกแบบการทดลองโดยระบุค่าเริ่มต้น 0.02, 0.04, 0.06, 0.08 และ 0.10 ไมครอน เพื่อแสดงถึงการเสียดทานระหว่างชิ้นงานและเครื่องมือตามการทดลองสำหรับการชุบขึ้นรูปเย็น ดังที่แสดงในรูปที่ 3.15



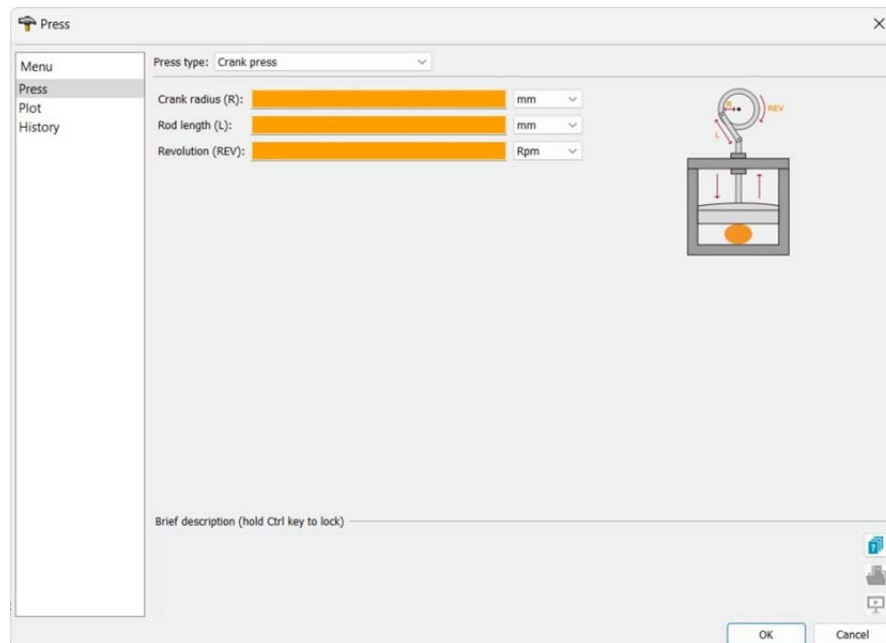
รูปที่ 3.15 การกำหนดค่าแรงเสียดทาน

6. การตั้งค่าความร้อน (Heat Object Definition) ตั้งค่าอุณหภูมิเริ่มต้นของชิ้นงาน และเครื่องมือใช้อุณหภูมิของเครื่องมือที่ 38 องศาเซลเซียส กำหนดสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนระหว่างชิ้นงานกับสภาพแวดล้อม ดังที่แสดงในรูปที่ 3.16



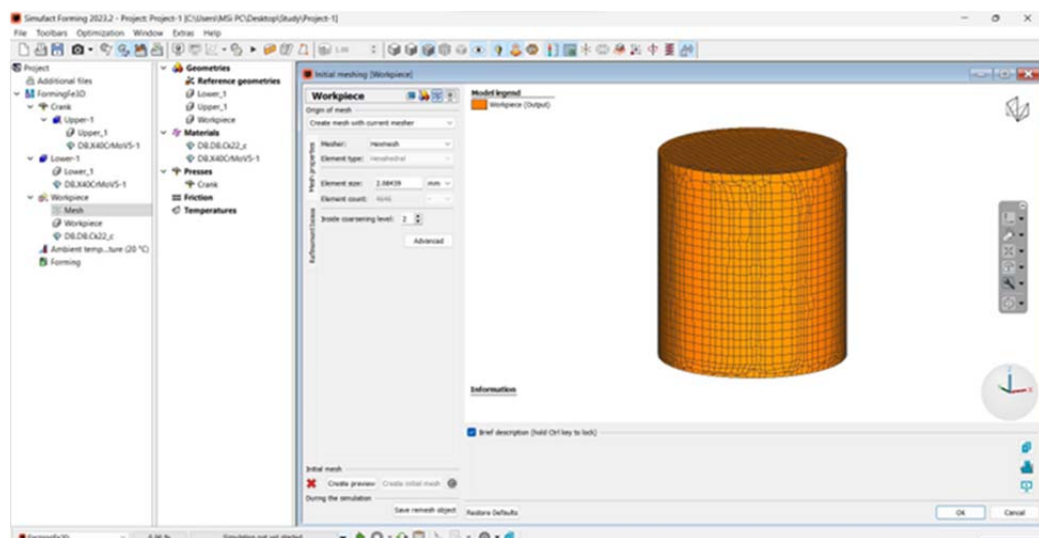
รูปที่ 3.16 การกำหนดอุณหภูมิของแม่พิมพ์และชิ้นงาน

7. การกำหนดการควบคุมการขึ้นรูป (Forming Control Setup) กำหนดการควบคุมการขึ้นรูป ความเร็วของเครื่องกด (Press Velocity) แรงที่ใช้ (Force) และจังหวะการเคลื่อนที่ (Stroke) ของเครื่องมือ เลือกให้แบบจำลองหยุดเมื่อมีการสัมผัสกับชิ้นงานทั้งหมด เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการกดเกินที่ไม่พึงประสงค์ ดังที่แสดงในรูปที่ 3.17



รูปที่ 3.17 การควบคุมแรงกด

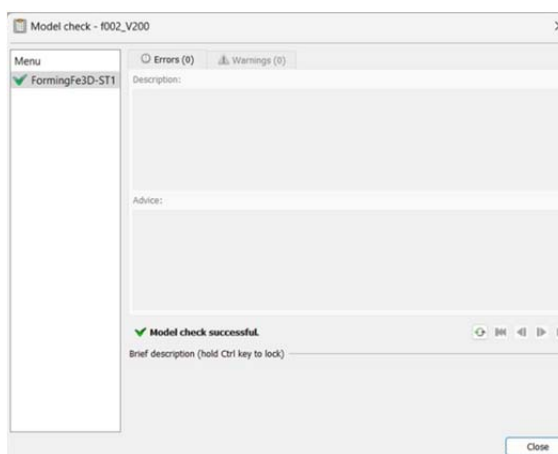
8. การสร้างตาข่าย (Meshing) การสร้างตาข่าย (Mesh) คือการแบ่งชิ้นงานออกเป็นองค์ประกอบย่อยๆ เพื่อใช้ในการคำนวณ ตั้งค่าขนาดขององค์ประกอบ (Element Size) โดยขนาดเล็กจะให้ผลลัพธ์ที่ละเอียดขึ้น แต่จะใช้เวลาประมวลผลมากขึ้น ดังที่แสดงในรูปที่ 3.18



รูปที่ 3.18 การกำหนด Mesh

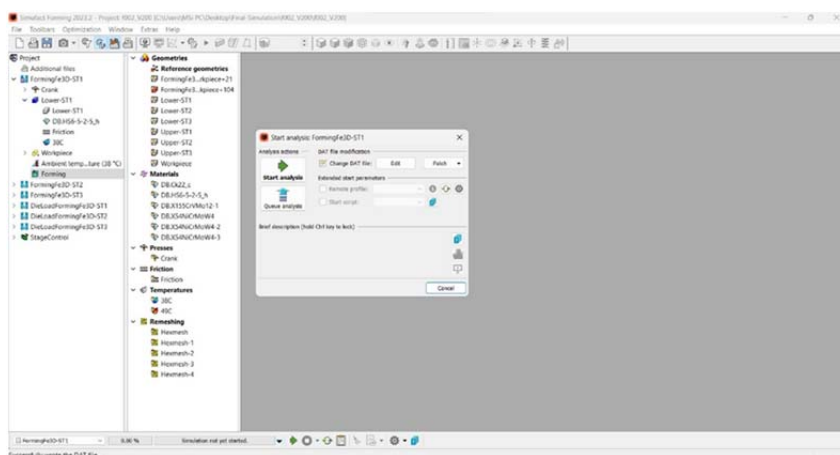
### 3.2.2 การประมวลผล (Processing)

ตรวจสอบการตั้งค่าแบบจำลอง (Model Check) ตรวจสอบความถูกต้องของการตั้งค่าต่างๆ การจัดวางชิ้นงาน การกำหนดวัสดุ และการสร้างตาข่าย เพื่อให้แน่ใจว่าแบบจำลองพร้อมสำหรับการจำลอง เมื่อการตั้งค่าทุกอย่างเรียบร้อยแล้วเริ่มการจำลองได้โดยการคลิกปุ่ม “Run Simulation” เพื่อดำเนินการขั้นตอนการจำลองจริงต่อไป ดังที่แสดงในรูปที่ 3.19



รูปที่ 3.19 การตรวจสอบความถูกต้องของการตั้งค่าก่อนทำการวิเคราะห์

เริ่มการประมวลผล (Run the Simulation) คลิกปุ่ม Start Analysis บนแถบเครื่องมือควบคุม เพื่อเริ่มการจำลองกระบวนการขึ้นรูป ระบบจะให้บันทึกโปรเจกต์ก่อนเริ่มการจำลอง ให้คลิก Yes เพื่อบันทึกและดำเนินการประมวลผลต่อไป ดังที่แสดงในรูปที่ 3.20

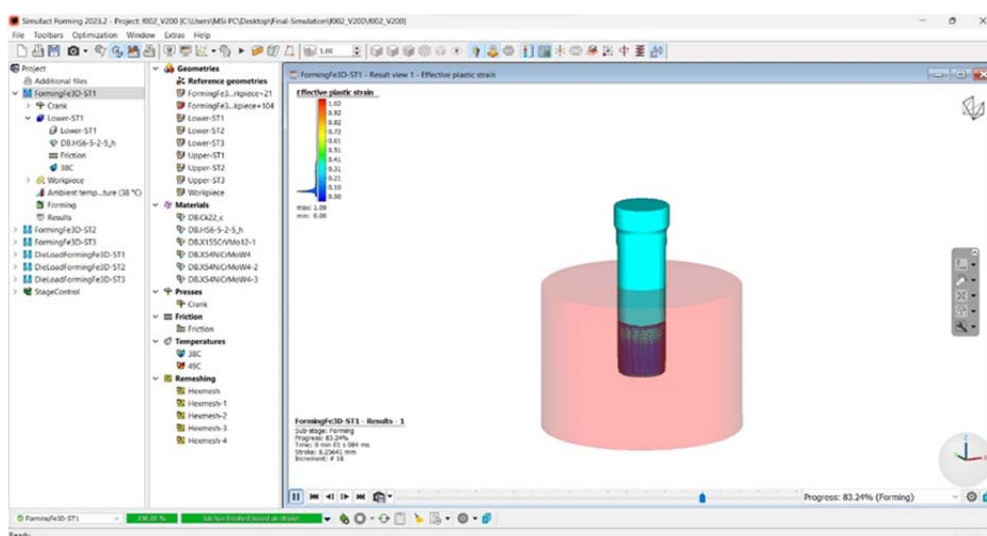


รูปที่ 3.20 การวิเคราะห์กระบวนการขึ้นรูปขึ้นรูปเย็นในโปรแกรม

### 3.2.3 ผลลัพธ์จากการจำลอง (Post Processing)

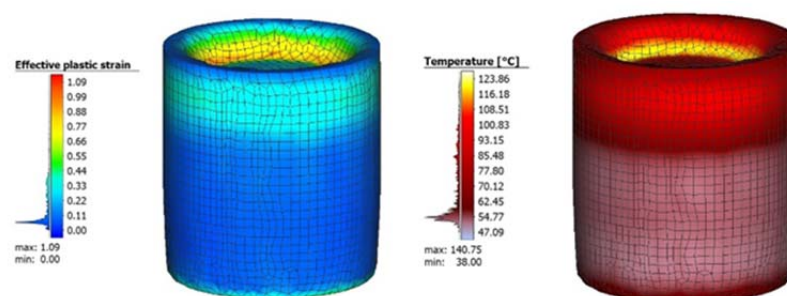
ขั้นตอนการประมวลผลผลลัพธ์จากการจำลอง (Post-Processing) ด้วยโปรแกรม Simufact Forming สามารถสรุปได้ตามลำดับ ขั้นตอนการประมวลผลผลลัพธ์ (Post-Processing)

- เปิดผลลัพธ์การจำลอง (Open Simulation Results) เมื่อการจำลองเสร็จสิ้นแล้ว สามารถเปิดผลลัพธ์ได้โดยการดับเบิลคลิกที่กระบวนการในแผนผังของโปรเจกต์หรือคลิกที่ปุ่ม “Animation” เพื่อดูผลลัพธ์เป็นแอนิเมชันของกระบวนการขึ้นรูป การดูแอนิเมชันการจำลอง (View Animation)
- หน้าต่างแอนิเมชันแสดงการเปลี่ยนแปลงของชิ้นงานและเครื่องมือระหว่างกระบวนการขึ้นรูป สามารถกดปุ่มเล่น (Play) เพื่อดูการเคลื่อนไหวทั้งหมด ผู้ใช้งานสามารถหยุดหรือย้อนกลับ การแสดงผลแอนิเมชันได้ตามต้องการ เพื่อวิเคราะห์ขั้นตอนต่างๆ ในกระบวนการแสดงผล 2D เป็น 3D (2D to 3D Result Expansion)
- หากการจำลองเป็นแบบ 2D สามารถขยายผลลัพธ์เป็นแบบ 3D เพื่อให้เห็นภาพรวมที่ชัดเจนขึ้น โดยไปที่เมนู “Extras” > “Options” > “Settings” > “View” > “Result Expansion” และเลือกการขยายผลจาก 2D เป็น 3D กำหนดมุมและจำนวนเลเยอร์ในการขยายผลลัพธ์ เพื่อตรวจสอบการกระจายแรงดันหรือการเสียรูปในรูปแบบ 3D การตรวจสอบค่าความเค้นและการเสียรูป (Stress and Strain Analysis) ในหน้าต่างผลลัพธ์ สามารถเลือกดูค่าต่างๆ เช่น ค่าความเค้น (Stress), ค่าการเสียรูป (Strain), และการกระจายแรงกด (Contact Pressure) ผ่านแถบเมนูแสดงผล ปรับมุมมองและขนาดของโมเดลเพื่อดูรายละเอียดของการเปลี่ยนแปลงในแต่ละส่วนของชิ้นงานกราฟแรงและระยะทาง (Force-Stroke Plot) ดังที่แสดงในรูปที่ 3.21



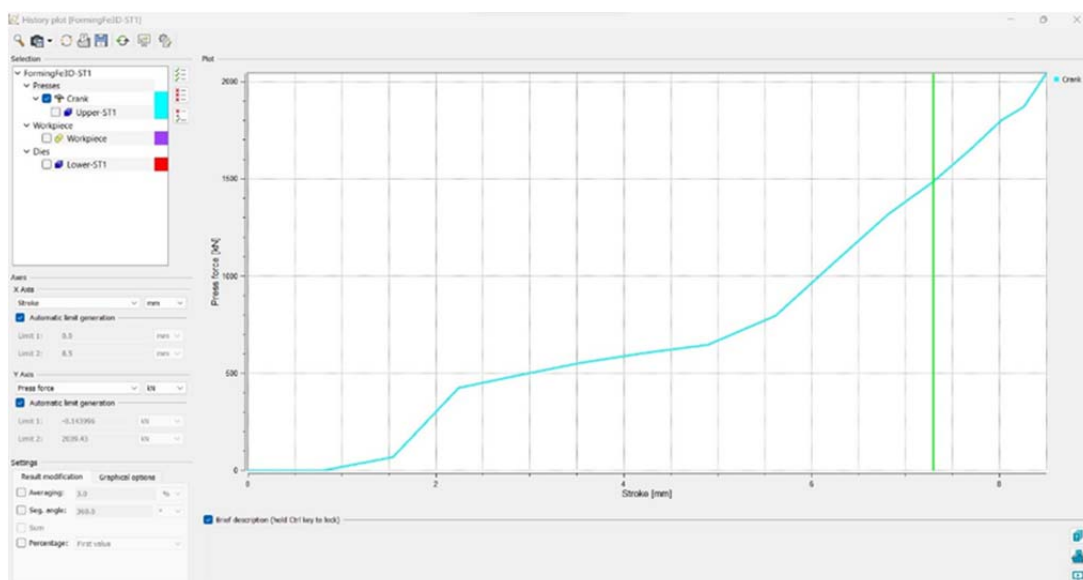
รูปที่ 3.21 การแสดงผลในการจำลองการทุบขึ้นรูป

- การแสดงผลพรีในรูปแบบ3D (3D Results Visualization) ขยายผลลัพธ์ให้แสดงในรูปแบบ 3D ได้โดยคลิกที่ปุ่มแสดงผล 3D กำหนดค่าเพิ่มเติมการเพื่อปรับให้การแสดงผลพรีมีความละเอียดมากขึ้น ดังที่แสดงในรูปที่ 3.22



รูปที่ 3.22 การแสดงผลพรีในรูปแบบสามมิติ (3D)

- การตรวจสอบกราฟแรงการขึ้นรูป (Force-Stroke Plot Review) เพื่อดูข้อมูลกราฟแรงการขึ้นรูป (Force-Stroke) คลิกที่ปุ่ม History Plot จากนั้นเลือกค่าที่ต้องการแสดง สามารถปรับแกน X ให้แสดงข้อมูลของระยะทาง (Stroke) และแกน Y เป็นค่าของแรง (Force) เพื่อวิเคราะห์แรงที่ใช้ในกระบวนการ ดังที่แสดงในรูปที่ 3.23



รูปที่ 3.23 การแสดงผลพรีในแบบกราฟ

### 3.3 การวิเคราะห์ค่าที่ได้จากการจำลอง

ขั้นตอนการตรวจสอบและวิเคราะห์ผลลัพธ์ในงานวิจัยที่ใช้ Finite Element Method (FEM) เป็นกระบวนการสำคัญที่ช่วยประเมินคุณภาพและความถูกต้องของการจำลอง ตลอดจนให้ข้อมูลเชิงลึกเพื่อปรับปรุงกระบวนการผลิตหรือพัฒนาผลิตภัณฑ์

#### a) การวิเคราะห์ความเครียดและความเค้น (Stress-Strain Analysis)

ตรวจสอบบริเวณที่เกิดความเครียดและความเค้นสูงสุด ซึ่งอาจเป็นจุดที่มีความเสี่ยงต่อการแตกหัก หรือข้อบกพร่องในกระบวนการผลิต

#### b) การวิเคราะห์การไหลของวัสดุ (Material Flow)

ศึกษาเส้นการไหลของวัสดุ (Flow Lines) เพื่อวิเคราะห์การกระจายตัวของวัสดุในแม่พิมพ์ และตรวจหาบริเวณที่เกิดการสะสมวัสดุหรือการไหลไม่สมบูรณ์

#### c) การวิเคราะห์อุณหภูมิ (Thermal Analysis)

ตรวจสอบการกระจายอุณหภูมิที่เกิดขึ้นในกระบวนการ ซึ่งอาจส่งผลต่อคุณภาพของชิ้นงาน และความแข็งแรงของวัสดุ

#### d) การวิเคราะห์แรงในแนวแกน Z (Z-Force)

แรงในแนวแกน Z มีความสำคัญในกระบวนการขึ้นรูปเย็น (Cold Forging) เนื่องจากเป็นแรงที่กระทำในแนวแกนตรงของหัวกด (Ram) ซึ่งใช้ในการเปลี่ยนรูปวัสดุในแม่พิมพ์

### 3.4 การตรวจสอบความสอดคล้องของผลลัพธ์

การเปรียบเทียบผลลัพธ์จากการจำลอง FEM กับผลจากการทดลองจริงเป็นขั้นตอนสำคัญในการประเมินความถูกต้องของการจำลอง โดยผลลัพธ์ที่นำมาเปรียบเทียบอาจรวมถึงค่าความแข็งของชิ้นงาน (Hardness) หรือแรงที่ใช้ในกระบวนการขึ้นรูป การเปรียบเทียบดังกล่าวช่วยตรวจสอบว่าการจำลองสามารถแสดงผลลัพธ์ได้ใกล้เคียงกับสภาพจริงมากเพียงใด หากผลลัพธ์จากการจำลอง และการทดลองสอดคล้องกัน จะช่วยยืนยันความน่าเชื่อถือของแบบจำลอง FEM นอกจากนี้ยังเป็นแนวทางในการปรับปรุงพารามิเตอร์ในกรณีที่พบความแตกต่างระหว่างผลการจำลองและการทดลองจริง

## บทที่ 4

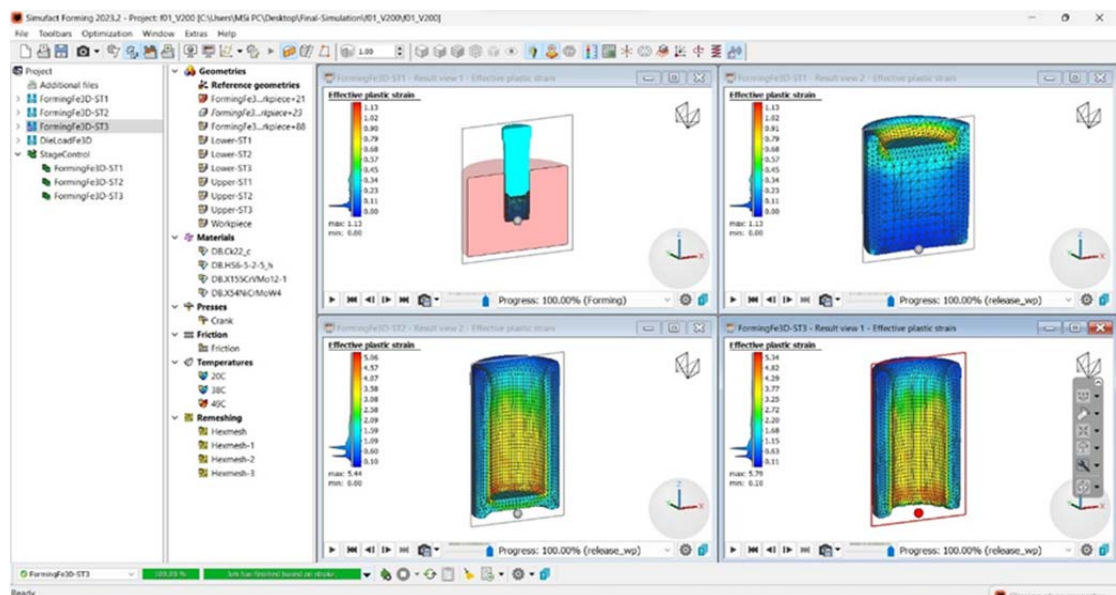
### ผลการดำเนินงานวิจัย

บทนี้นำเสนอผลการดำเนินงานวิจัยที่ได้จากการจำลองกระบวนการทูลขึ้นรูปชิ้นรูปเย็นวัสดุ S20C ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method: FEM) โดยใช้ซอฟต์แวร์ Simufact Forming และการวิเคราะห์ผลลัพธ์ที่ได้เปรียบเทียบกับผลการทดลองจริง การศึกษามุ่งเน้นการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติเชิงกลของชิ้นงานเมื่อปรับเปลี่ยนแรงเสียดทานและความเร็วหัวกด การจำลองดำเนินการภายใต้เงื่อนไขการขึ้นรูปเย็นเพื่อวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยดังกล่าวกับการกระจายความเค้น ผลลัพธ์ที่ได้ถูกเปรียบเทียบกับทฤษฎีการขึ้นรูปเย็นเพื่อแสดงผลกระทบทางวิศวกรรมที่สำคัญ

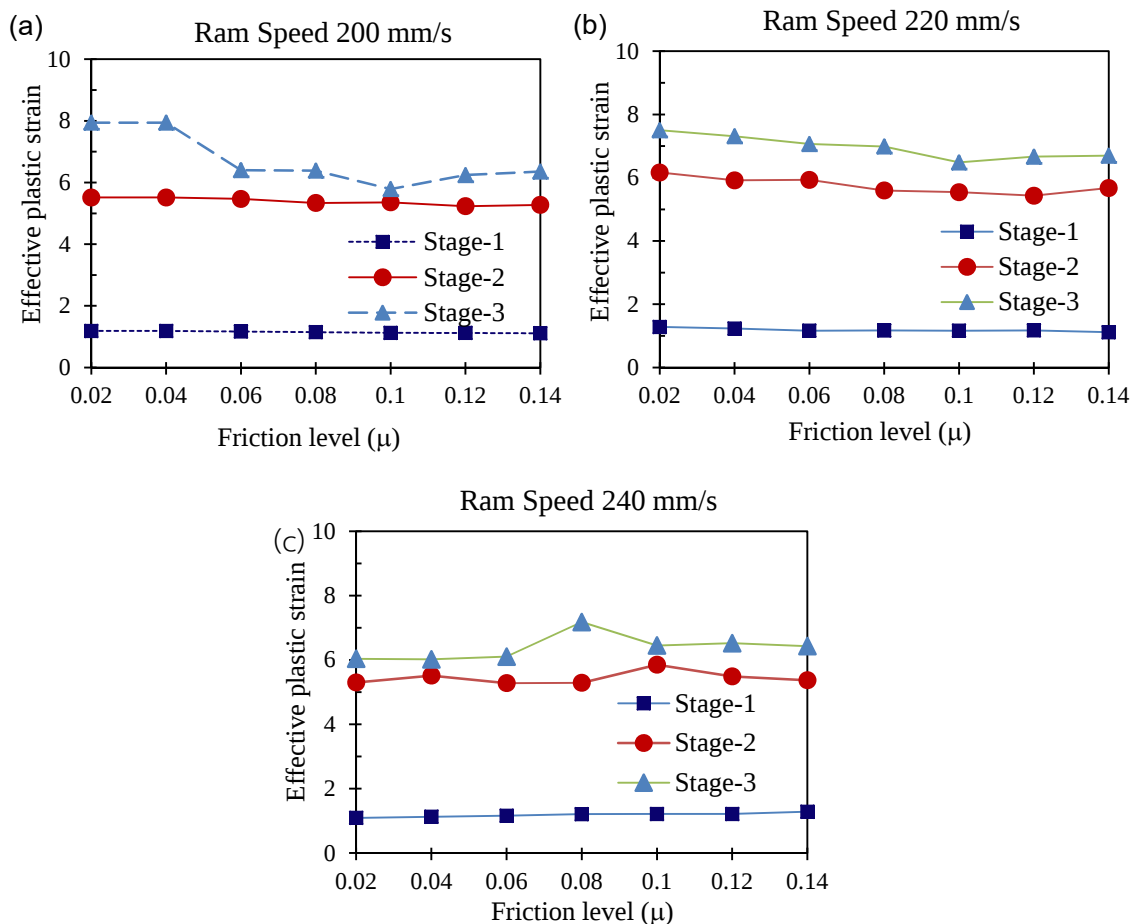
#### 4.1 ผลการจำลองกระบวนการทูลขึ้นรูปเย็นด้วย FEM

##### 4.1.1 ความเครียดพลาสติกที่มีผล (Effective Plastic Strain)

หมายถึง การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของวัสดุอย่างถาวร (Permanent Deformation) อันเป็นผลจากการเสียรูปพลาสติกในระหว่างกระบวนการขึ้นรูปเย็น (Cold Forging) ซึ่งมีผลโดยตรงต่อคุณสมบัติเชิงกล เช่น ความแข็ง (Hardness) และการกระจายแรงในชิ้นงาน ผลของแรงเสียดทานระหว่างผิวของหัวกดและชิ้นงาน ซึ่งมีการปรับเปลี่ยนค่าแรงเสียดทานตั้งแต่ระดับ 0.02, 0.04, 0.06, 0.08, และ 0.10 ค่าความเร็วหัวกด 200 mm/S, 220 mm/S และ 240 mm/S ดังที่แสดงในรูปที่ 4.4-4.10



รูปที่ 4.1 ผลการจำลอง Effective Plastic Strain ด้วยโปรแกรม Simufact Forming



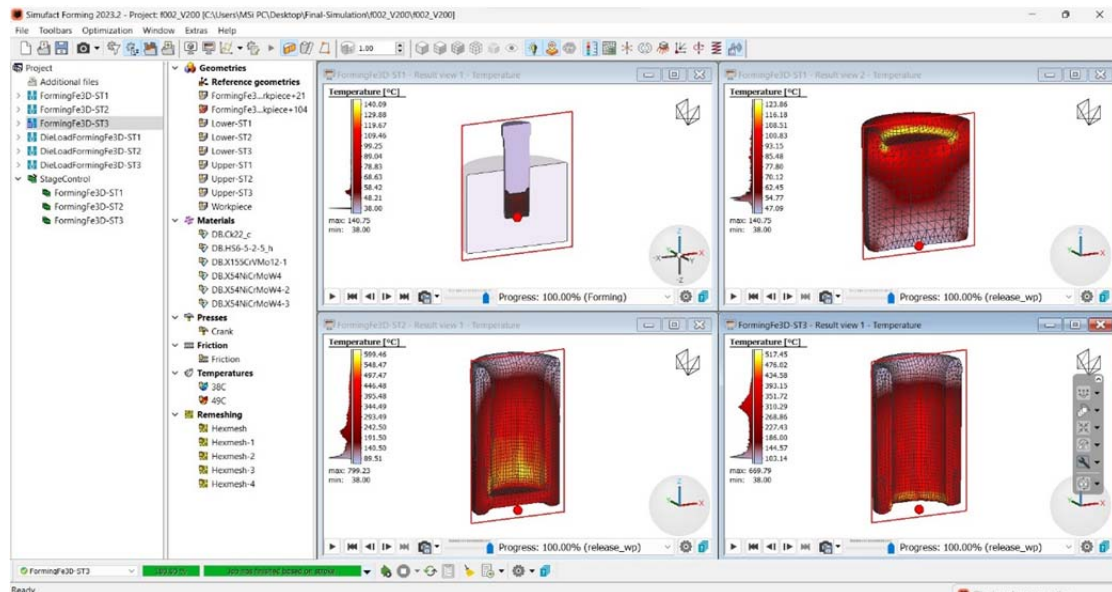
รูปที่ 4.2 ผลการจำลอง Effective Plastic Strain ที่ระดับแรงเสียดทาน 0.02-0.14 ที่ความเร็วหัวกด  
a) 200 mm/s, b) 220 mm/s, และ c) 240 mm/s.

#### จากผลการจำลองด้วยโปรแกรมซีให้เห็นว่า

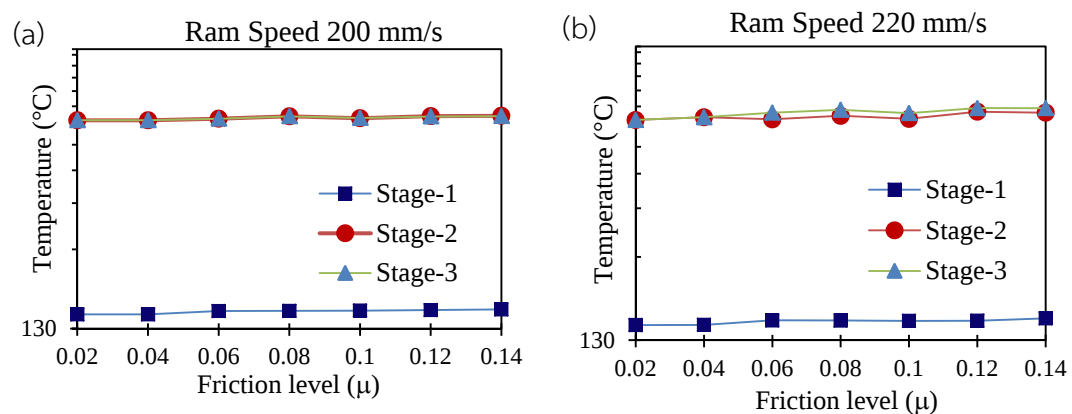
ความเสียดทานที่ระดับปานกลางส่งผลให้ชิ้นงานมีความแข็งแรงสม่ำเสมอและกระจายตัวได้ดี โดยค่าความแข็งแรงเฉลี่ยอยู่ในช่วงที่เหมาะสมกับคุณสมบัติการใช้งานที่ต้องการผลกระทบจากการปรับเปลี่ยนความเร็วของหัวกดถูกจำลองโดยใช้ค่าความเร็วต่างกันในกระบวนการทุบขึ้นรูปเย็นตั้งแต่ 200 mm/s, 220 mm/s และ 240 mm/s ผลลัพธ์จากการจำลองแสดงให้เห็นว่า ความเร็วหัวกดที่สูงช่วยลดเวลาในการขึ้นรูป แต่ส่งผลให้เกิดความเสียรูปที่มากขึ้นในบริเวณผิวของชิ้นงาน ส่งผลให้ความแข็งแรงเพิ่มขึ้นที่บริเวณผิว แต่บริเวณด้านในมีความแข็งแรงลดลง เมื่อใช้ความเร็วต่ำ ชิ้นงานมีความแข็งแรงสม่ำเสมอมากขึ้นตลอดทั้งชิ้น แต่ใช้เวลาในการขึ้นรูปมากกว่า และอาจเกิดการเสียหายจากแรงเสียดทานในกระบวนการ ค่าความแข็งแรงเฉลี่ยที่เหมาะสมในชิ้นงานได้จากการใช้ความเร็วที่ปานกลาง ซึ่งช่วยกระจายความเครียดภายในชิ้นงานอย่างสมดุลและลดโอกาสการเสียหาย

#### 4.1.2 การกระจายตัวของอุณหภูมิ (Temperature Distribution)

การกระจายตัวของอุณหภูมิหมายถึงการสะสมความร้อนในระหว่างกระบวนการ ซึ่งเกิดจากแรงเสียดทานและการเสียรูปพลาสติก อุณหภูมิที่สูงเกินไปอาจทำให้ความแข็งแรงของวัสดุลดลง และเพิ่มความเสี่ยงต่อข้อบกพร่อง เช่น รอยแตกหรือพื้นผิวเสียหาย

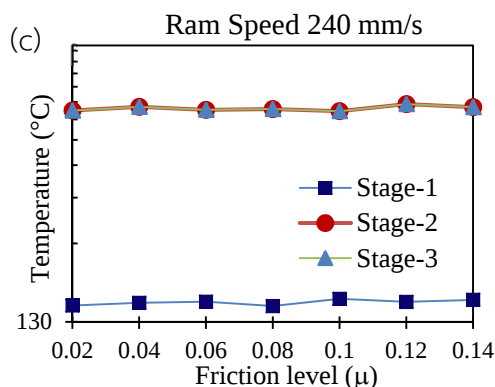


รูปที่ 4.3 ผลการจำลอง Temperature Distribution ด้วยโปรแกรม Simufact Forming



รูปที่ 4.4 ผลการจำลอง Temperature Distribution ที่ระดับแรงเสียดทาน 0.02-0.14 ที่ความเร็วหัวกด

a) 200 mm/s, b) 220 mm/s, และ c) 240 mm/s.

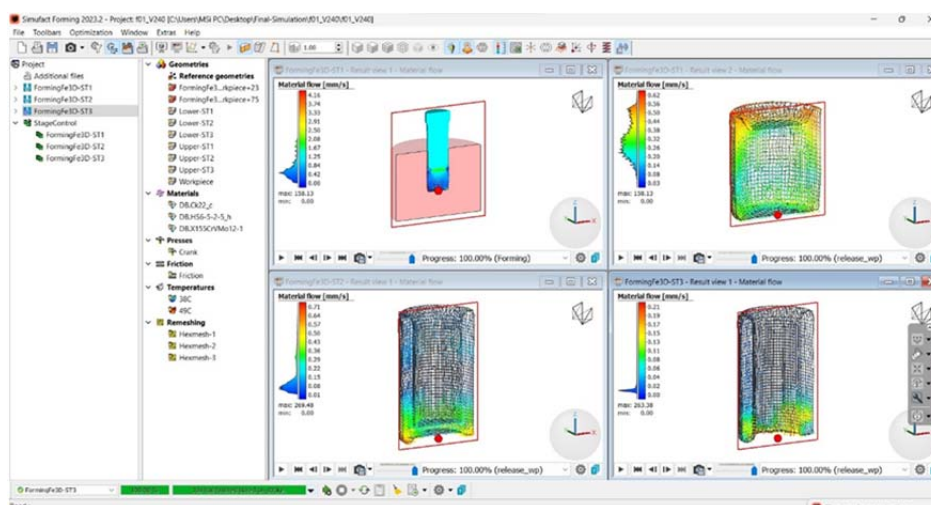


รูปที่ 4.4 ผลการจำลอง Temperature Distribution ที่ระดับแรงเสียดทาน 0.02-0.14 ที่ความเร็วหัวกด  
a) 200 mm/s, b) 220 mm/s, และ c) 240 mm/s. (ต่อ)

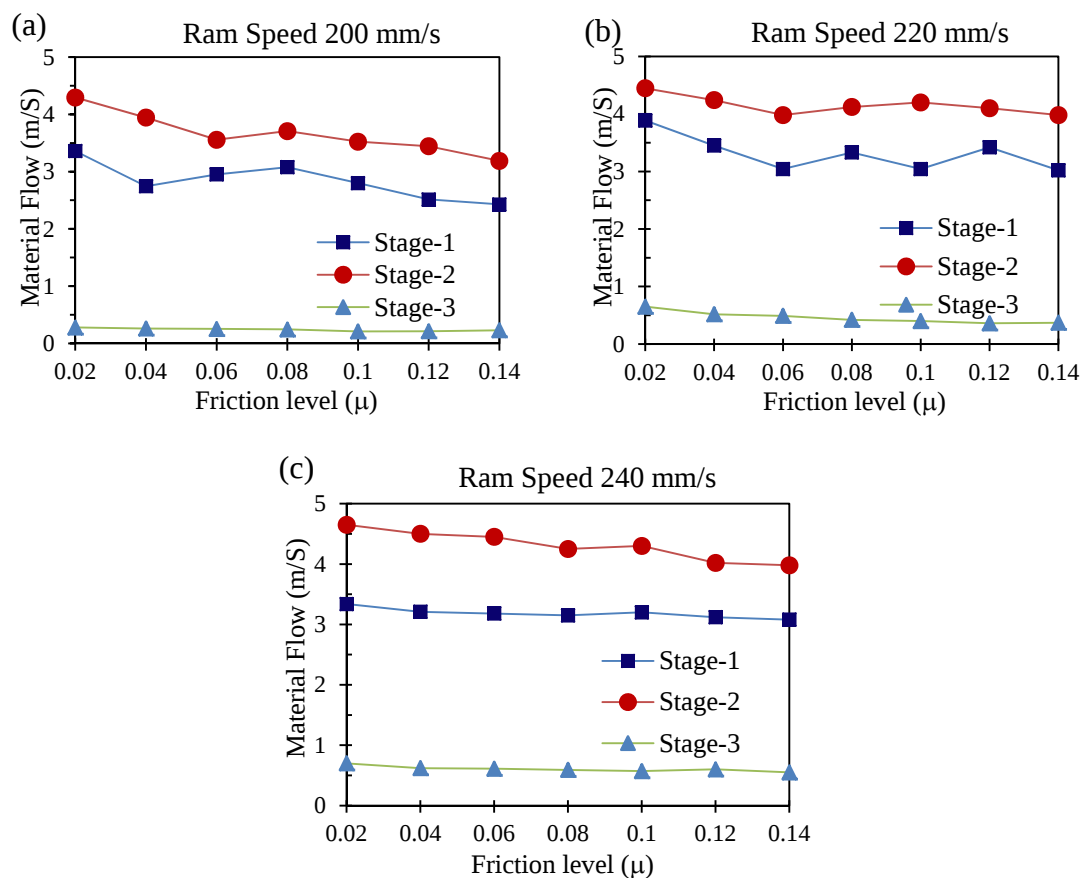
แรงเสียดทานเป็นปัจจัยหลักที่ทำให้เกิดความร้อนในบริเวณที่แม่พิมพ์สัมผัสกับวัสดุ ความเร็วการกดสูง (240 มม./วินาที) ทำให้เกิด Adiabatic Heating หรือการสะสมความร้อนเฉพาะที่ ส่งผลให้เกิดการอ่อนตัวของวัสดุและข้อบกพร่องที่ผิวชิ้นงาน ความเร็วการกดต่ำ (200 มม./วินาที) ช่วยลดการสะสมความร้อนและส่งเสริมกระบวนการ Strain Hardening

#### การไหลของวัสดุ (Material Flow)

การไหลของวัสดุ (Material Flow) ในกระบวนการทุบขึ้นรูปเย็นมีความสำคัญต่อการเติมเต็มแม่พิมพ์อย่างสมบูรณ์ เพื่อให้ได้รูปทรงชิ้นงานตามต้องการอย่างแม่นยำ การควบคุมการไหลของวัสดุช่วยลดข้อบกพร่อง เช่น การเติมแม่พิมพ์ไม่เต็มหรือการเสียรูปเฉพาะจุด ทั้งยังส่งผลต่อความแข็งแรง และคุณภาพโดยรวมของชิ้นงานที่ผลิตได้



รูปที่ 4.5 ผลการจำลอง Material Flow ด้วยโปรแกรม Simufact Forming



รูปที่ 4.6 ผลการจำลอง Material Flow ที่ระดับแรงเสียดทาน 0.02-0.14 ที่ความเร็วหัวกด a) 200 mm/s, b) 220 mm/s, และ c) 240 mm/s

จากผลการจำลองสามารถอธิบายความสัมพันธ์ได้ดังนี้

แรงเสียดทานต่ำ (0.02–0.04) ช่วยให้วัสดุไหลได้ราบรื่นและเติมเต็มแม่พิมพ์ได้สมบูรณ์

แรงเสียดทานปานกลาง (0.06) การไหลของวัสดุอาจถูกจำกัดเล็กน้อย แต่ยังคงประสิทธิภาพที่ดี

แรงเสียดทานสูง (0.08–0.10) ทำให้การไหลของวัสดุติดขัดและเกิดการเติมเต็มแม่พิมพ์ไม่สมบูรณ์

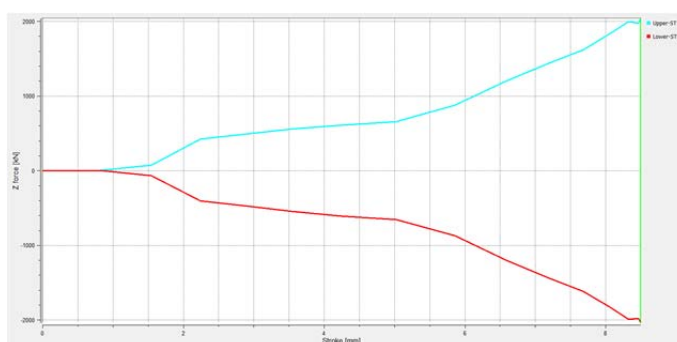
ความเร็วการกดต่ำ (200 มม./วินาที) ช่วยให้วัสดุมีเวลามากขึ้นในการเติมเต็มแม่พิมพ์ โดยเฉพาะในพื้นที่ที่มีรูปร่างซับซ้อน

ความเร็วการกดสูง (240 มม./วินาที) การไหลของวัสดุเกิดขึ้นเร็วเกินไป อาจทำให้การเติมแม่พิมพ์ไม่สมบูรณ์

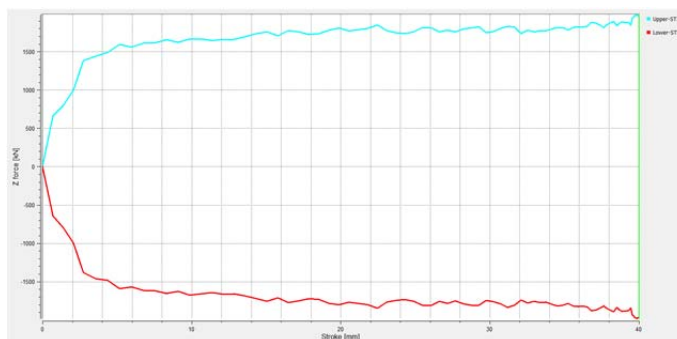
### แรงกด (Z-Force)

แรงกดหรือ Z-Force หมายถึงแรงที่ต้องใช้เพื่อเปลี่ยนรูปวัสดุในกระบวนการปั๊มขึ้นรูป แรงนี้เป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพและคุณภาพของกระบวนการ เนื่องจากมีผลโดยตรงต่อการเปลี่ยนรูปของวัสดุและการกระจายตัวของความเครียดในชิ้นงาน แรงกดเพิ่มขึ้นเมื่อแรงเสียดทานและความเร็วการกดเพิ่มขึ้น ผลการจำลองจาก Simufact Forming ค่า Z-Force จะถูกวิเคราะห์ร่วมกับกราฟ Force-Stroke เพื่อดูว่าการเปลี่ยนแปลงของระยะหัวกดส่งผลต่อแรงอย่างไร นอกจากนี้ยังสามารถใช้ค่า Z-Force เพื่อวิเคราะห์ว่าแรงที่ใช้เพียงพอหรือเกินไปในการขึ้นรูปขึ้นงานตามคุณสมบัติที่ต้องการ

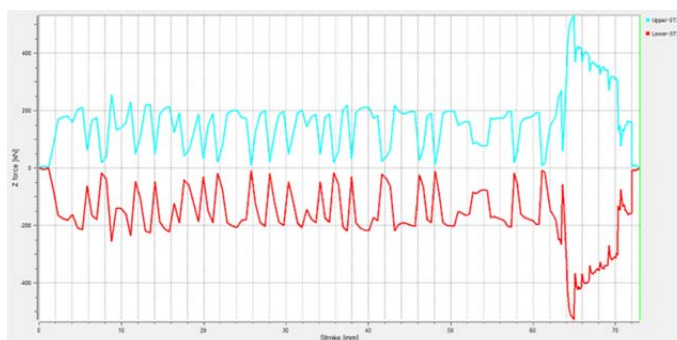
(a)



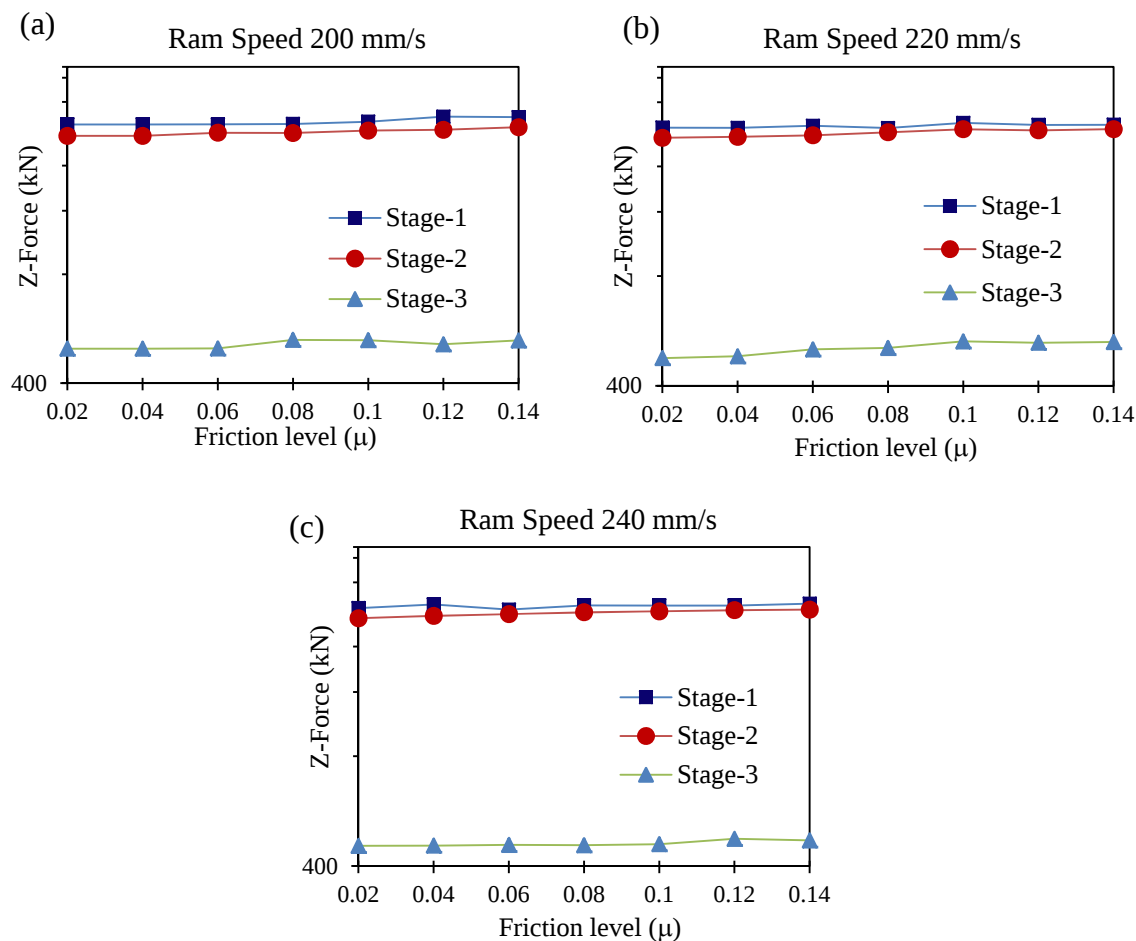
(b)



(c)



รูปที่ 4.7 ผลการจำลอง Material Flow ด้วยโปรแกรม Simufact Forming a) แม่พิมพ์ 1 b) แม่พิมพ์ 2 และ c) แม่พิมพ์ 3



รูปที่ 4.8 ผลการจำลอง Z-Force ที่ระดับแรงเสียดทาน 0.02-0.14 ที่ความเร็วหัวกด a) 200 mm/s, b) 220 mm/s, และ c) 240 mm/s

แรงเสียดทานต่ำ : ต้องใช้แรงกดย่น้อยกว่า ช่วยลดความเสียหายต่อเครื่องมือและต้นทุนการผลิต

แรงเสียดทานสูง : เพิ่มแรงต้าน ทำให้ต้องใช้แรงกดมากขึ้น

ความเร็วการกดต่ำ (200 มม./วินาที) : แรงกดย่น้อยกว่า เนื่องจากวัสดุมีเวลามากขึ้นในการเปลี่ยนรูป

ความเร็วการกดสูง (240 มม./วินาที) : แรงกดสูงขึ้นเนื่องจากวัสดุต้องเปลี่ยนรูปเร็วขึ้น

#### 4.2 เปรียบเทียบผลการจำลองกับการทดลองจริง

ชิ้นงานที่ได้จากการทุบขึ้นรูปแบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอนอ้างอิงกับไลน์การผลิตจริงประกอบด้วย  
 ขั้นตอน 1 พรiform (Centering Stage) เป็นการสร้างรอยยุบเป็นโกดในการเคลื่อนที่ของแม่  
 ขั้นตอน 2 ทุบขึ้นรูป (Backward Extrusion Stage) เป็นการทุบให้ชิ้นงานเปลี่ยนรูปตามแม่พิมพ์

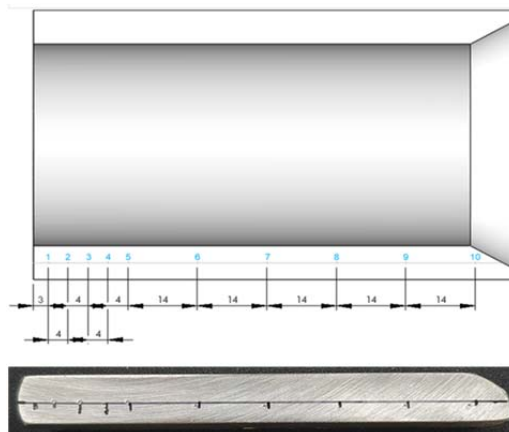
ขั้นตอน 3 ตัดขอบ (Trimming Stage) เป็นการตัดขอบของชิ้นงานส่วนเกิน



รูปที่ 4.9 ชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการทุบขึ้นรูปเย็น

การวัดค่าความแข็งของชิ้นงาน

ชิ้นงานวัสดุ S20C ที่ได้จากการทุบขึ้นรูปที่สมบูรณ์จะถูกผ่าเพื่อวัดระดับความแข็งโดยผ่าชิ้นงานแล้ววัดความแข็งภายในเนื้อชิ้นงานตามรูปที่ 4.10



รูปที่ 4.10 ตำแหน่งวัดความแข็งของชิ้นงานหลังทุบขึ้นรูปเย็นในขั้นตอนที่ 3

ผลการทดสอบแสดงค่าความแข็ง (HRB) ดังนี้

สภาพ Spheroidized 1: ค่าเฉลี่ยประมาณ 97.7 - 101.5 HRB

สภาพ Spheroidized 2: ค่าเฉลี่ยประมาณ 97.6 - 101.25 HRB

สภาพ Spheroidized 3: ค่าเฉลี่ยประมาณ 96.7 - 100.05 HRB

สภาพ As-rolled ค่าเฉลี่ยประมาณ 96 - 103 HRB

ผลการจำลอง FEM และการทดลองจริงให้ค่าความแข็ง (Hardness) ที่ใกล้เคียงกัน โดยบริเวณที่เกิดการเสียรูปสูงมีค่าความแข็งเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน แรงที่ใช้ในกระบวนการจำลองและการทดลอง มีความสอดคล้องกัน โดยค่าแรงสูงสุดเกิดขึ้นในขั้นตอนที่มีการเปลี่ยนรูปพลาสติกสูง ความสอดคล้องระหว่างผลการจำลองและผลทดลองช่วยยืนยันความน่าเชื่อถือของแบบจำลอง FEM

#### 4.3 การวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม

ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานที่เหมาะสมที่สุดคือ 0.04 และความเร็วหัวกดที่เหมาะสมที่สุดคือ 220 มม./วินาที ซึ่งให้ค่าความเครียดและอุณหภูมิที่สมดุล ส่งผลให้ค่าความแข็งของชิ้นงานกระจายตัวสม่ำเสมอ ผลการวิเคราะห์ชี้ให้เห็นว่าการควบคุมพารามิเตอร์ดังกล่าวสามารถลดข้อบกพร่องในกระบวนการผลิตและเพิ่มคุณภาพของชิ้นงานได้ ผลการดำเนินงานวิจัยแสดงให้เห็นว่าการควบคุมแรงเสียดทานและความเร็วหัวกดที่เหมาะสมมีผลต่อคุณภาพของชิ้นงานทุบขึ้นรูปเย็น โดยผลการจำลอง FEM มีความสอดคล้องกับการทดลองจริง ซึ่งช่วยยืนยันความแม่นยำของการจำลอง และให้แนวทางสำหรับการปรับปรุงกระบวนการผลิต Coupler เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพและลดข้อบกพร่องในกระบวนการผลิต

## บทที่ 5

### สรุปผลและข้อเสนอแนะ

ในการวิจัยเรื่อง “การหาอิทธิพลของแรงเสียดทานและความเร็วของหัวกดต่อความแข็งแรงของชิ้นงานทุบขึ้นรูปเย็นวัสดุ S20C ด้วยกรรมวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์” ได้ดำเนินการศึกษาผลกระทบของปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อคุณสมบัติของชิ้นงานผ่านการจำลองด้วยโปรแกรม Simufact Forming ผลการวิจัยพบว่า ปัจจัยสำคัญที่มีอิทธิพลต่อคุณภาพและความแข็งแรงของชิ้นงาน ได้แก่ แรงเสียดทานและความเร็วของหัวกด ซึ่งทั้งสองปัจจัยนี้ส่งผลต่อการกระจายตัวของความเค้นและการไหลของวัสดุ (Material Flow) ในกระบวนการทุบขึ้นรูปเย็น

#### 5.1 สรุปผลจากการจำลอง

จากการจำลองด้วยโปรแกรม Simufact Forming พบว่า ปัจจัยที่มีผลกระทบโดยตรงต่อความแข็งแรงของชิ้นงานทุบขึ้นรูปเย็นวัสดุ S20C คือแรงเสียดทานและความเร็วของหัวกด

5.1.1 การศึกษาพบว่า ความเร็วของหัวกดสูง (240 มิลลิเมตร/วินาที) ช่วยให้วัสดุไหลเร็วขึ้น แต่ทำให้เกิดการกระจายตัวของความเครียดที่ไม่สม่ำเสมอ และอุณหภูมิในพื้นที่ที่มีแรงเสียดทานสูงเพิ่มขึ้น ซึ่งส่งผลให้ความแข็งแรงของชิ้นงานลดลงในบางบริเวณ

5.1.2 ความเร็วของหัวกดต่ำ (200 มิลลิเมตร/วินาที) ช่วยให้การกระจายตัวของความเครียดดีขึ้น เกิดการแข็งตัวของวัสดุที่สม่ำเสมอมากกว่า เนื่องจากแรงดันถูกส่งผ่านอย่างต่อเนื่องและลดโอกาสการสะสมของอุณหภูมิ

5.1.3 การใช้ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานต่ำ (0.02-0.04) ส่งผลให้วัสดุไหลได้อย่างราบรื่น ลดการสะสมของแรงกดในบางพื้นที่ และช่วยให้ความแข็งแรงของชิ้นงานกระจายตัวได้อย่างสม่ำเสมอ

5.1.4 ระดับค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานที่สูงกว่า (0.08-0.10) ทำให้การไหลของวัสดุถูกจำกัด และเกิดแรงกดที่บริเวณผิวสัมผัส ส่งผลให้ความเครียดสะสมในบางจุดเพิ่มขึ้น ซึ่งอาจลดคุณภาพของชิ้นงาน

5.1.5 ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุด คือ ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน 0.04 และความเร็วของหัวกด 220 มิลลิเมตร/วินาที ซึ่งให้การกระจายตัวของความเครียดและอุณหภูมิที่สมดุล ส่งผลให้ความแข็งแรงของชิ้นงานเพิ่มขึ้นและสอดคล้องกับผลการทดลองจริง

ผลการวิจัยนี้ชี้ให้เห็นถึงความสำคัญของการควบคุมแรงเสียดทานและความเร็วหัวกดที่เหมาะสมในการทุบขึ้นรูปเย็น เพื่อเพิ่มคุณภาพของผลิตภัณฑ์ ลดข้อบกพร่อง และยืดอายุการใช้งานของแม่พิมพ์และอุปกรณ์ในกระบวนการผลิต

### การกระจายของความเครียดพลาสติก (Strain Distribution)

จากการจำลอง พบว่าความแข็งแรงของชิ้นงานที่ถูกตีขึ้นรูปได้รับผลกระทบจากการกระจายของความเครียดพลาสติก โดยในบริเวณที่มีความเครียดสูงชิ้นงานจะมีความแข็งแรงสูงขึ้น เนื่องจากกระบวนการเกิดการแข็งตัวจากความเครียด (Strain Hardening) ผลการจำลองแสดงให้เห็นว่าค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานที่สูงขึ้นมีแนวโน้มทำให้เกิดการกระจายความเครียดที่ไม่สม่ำเสมอ และอาจส่งผลให้เกิดการแตกร้าวเฉพาะจุดของชิ้นงาน

### การกระจายของอุณหภูมิ (Temperature Distribution)

แรงเสียดทานที่เพิ่มขึ้นในกระบวนการตีขึ้นรูปเย็นก่อให้เกิดความร้อนสะสมในชิ้นงาน ส่งผลให้เกิดการลดความแข็งแรงในบางพื้นที่เนื่องจากการอ่อนตัวทางความร้อน (Thermal Softening) การเพิ่มความเร็วยังทำให้เกิดการสะสมของความร้อนที่มากขึ้น โดยเฉพาะที่ความเร็วสูงสุด (240 mm/s) ทำให้เกิดปัญหาการอ่อนตัวของวัสดุในบางจุดและอาจก่อให้เกิดข้อบกพร่องที่ผิวชิ้นงาน

### การไหลของวัสดุ (Material Flow)

แรงเสียดทานมีผลต่อการไหลของวัสดุภายในแม่พิมพ์ การใช้ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานที่ต่ำทำให้วัสดุไหลเข้าไปในแม่พิมพ์ได้อย่างราบรื่นและสามารถเติมเต็มแม่พิมพ์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ในขณะที่แรงเสียดทานที่สูงขึ้นทำให้การไหลของวัสดุถูกขัดขวาง ส่งผลให้เกิดการเติมแม่พิมพ์ไม่เต็ม และอาจเกิดข้อบกพร่องในชิ้นงาน

### แรง Z-Force (Forging Force)

แรง Z-Force ที่ใช้ในการตีขึ้นรูปเพิ่มขึ้นตามค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานที่เพิ่มขึ้น ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อความแข็งแรงของชิ้นงาน ความเร็วของลูกสูบที่สูงขึ้นก็ส่งผลให้ต้องใช้แรง Z-Force ที่มากขึ้นในการตีขึ้นรูป เนื่องจากการไหลของวัสดุที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว

### การวิเคราะห์ความแข็ง (Hardness Analysis)

การจำลองและการทดลองได้แสดงให้เห็นว่าความแข็งแรงของชิ้นงานจะลดลงเมื่อค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานและความเร็วของลูกสูบสูงขึ้น ผลลัพธ์จากการจำลองสอดคล้องกับการทดลองในแง่ของการกระจายของความแข็งแรง โดยค่าการวัดความแข็งแรงของวัสดุได้ในช่วง HV 220 ที่แรงเสียดทานต่ำ และ HV 140 ที่แรงเสียดทานสูง

## 5.2 ปัญหาที่พบระหว่างการวิจัย

### 5.2.1 ความซับซ้อนในการตั้งค่าพารามิเตอร์การจำลอง

การตั้งค่าค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานและความเร็วหัวกดที่เหมาะสมในการจำลองด้วยซอฟต์แวร์ Simufact Forming มีความซับซ้อน เนื่องจากต้องคำนึงถึงหลายปัจจัย เช่น ลักษณะการไหลของวัสดุ การกระจายตัวของความเครียด และผลกระทบจากอุณหภูมิที่เกิดขึ้นในกระบวนการ ซึ่งต้องทำการปรับแต่งและตรวจสอบซ้ำหลายครั้งเพื่อให้ได้ค่าที่สมจริงและแม่นยำ

### 5.2.2 ข้อจำกัดในการวิเคราะห์ผลกระทบเชิงทดลอง

การเปรียบเทียบผลจากการจำลองและการทดลองจริงมีข้อจำกัดในเรื่องการวัดความเครียดและความแข็งในชิ้นงาน โดยเฉพาะในบริเวณที่เข้าถึงยาก เช่น พื้นที่ภายในของชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูป ซึ่งอาจส่งผลให้การวิเคราะห์และการเปรียบเทียบข้อมูลในบางกรณีไม่สามารถทำได้อย่างละเอียด

### 5.2.3 การควบคุมแรงเสียดทานในกระบวนการจำลอง

การจำลองแรงเสียดทานระหว่างแม่พิมพ์และวัสดุในแต่ละระดับของค่าสัมประสิทธิ์มีความท้าทาย เนื่องจากการคำนวณแรงเสียดทานที่เหมาะสมต้องอาศัยข้อมูลคุณสมบัติของวัสดุและสารหล่อลื่นที่อาจแตกต่างกันในแต่ละกรณี การใช้ค่าแรงเสียดทานแบบทั่วไป (Default Friction) อาจทำให้ผลลัพธ์เบี่ยงเบนจากความเป็นจริงบางประการ

## 5.3 ข้อเสนอแนะ

### 5.3.1 เพิ่มความหลากหลายของวัสดุที่ใช้ในการวิจัย

ควรขยายการศึกษาวัดคุณสมบัติแตกต่างจากเหล็ก S20C เช่น เหล็กกล้าคุณภาพสูงหรือโลหะผสม เพื่อวิเคราะห์ผลกระทบของแรงเสียดทานและความเร็วหัวกดต่อคุณสมบัติของชิ้นงานในวัสดุที่มีการตอบสนองแตกต่างกัน และเพื่อให้ได้ข้อมูลที่ครอบคลุมสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้ในงานวิจัยหรือการผลิตที่หลากหลาย

### 5.3.2 ผสมผสานการจำลองเชิงตัวเลขกับการทดลองจริงอย่างละเอียด

ควรเพิ่มความแม่นยำของการเปรียบเทียบผลลัพธ์ระหว่างการจำลองด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์และการทดลองจริง โดยเน้นการพัฒนาวิธีการวัดค่าความเครียด ความแข็ง และอุณหภูมิในพื้นที่ที่เข้าถึงยาก เช่น ภายในของชิ้นงาน เพื่อเพิ่มความน่าเชื่อถือของผลการวิจัย

### 5.3.3 พิจารณาปัจจัยเสริมที่ส่งผลต่อกระบวนการขึ้นรูป

ควรศึกษาปัจจัยเสริมที่อาจส่งผลต่อกระบวนการขึ้นรูป เช่น การออกแบบแม่พิมพ์รูปทรงต่างๆ ผลกระทบของอุณหภูมิที่สูงขึ้นจากแรงเสียดทาน, หรือประสิทธิภาพของสารหล่อลื่นชนิดใหม่ๆ เพื่อให้เข้าใจปัจจัยที่ส่งผลต่อคุณภาพชิ้นงานได้ดียิ่งขึ้น และช่วยพัฒนากระบวนการผลิตให้มีประสิทธิภาพสูงสุด

บรรณานุกรม

### บรรณานุกรม

- [1] M. Szala et al., "Microstructure and hardness of cold forged 42CrMo4 steel hollow component with the outer flange," *Advances in Science and Technology Research Journal*, vol. 16, no. 4, pp. 201-210, September 2022.
- [2] A. Baygut and O. Çulha, "Investigation of the cold forging operation steps' effect on forming properties," *Celal Bayar University Journal of Science*, vol. 16, no. 4, pp. 437-443, December 2020.
- [3] T. W. Ku, "A combined cold extrusion for a drive shaft: A parametric study on tool geometry," *Materials*, vol. 13, no. 2,244, pp. 1-19, May 2020.
- [4] C. Coroas el al., "Numerical modeling for the prediction of microstructure and mechanical properties of quenched automotive steel pieces," *Advances in Neural Networks and Applications Journal*, vol. 16, no. 11, no page, May 2023.
- [5] E. Ceron el al., "Backward can extrusion with conical, rotating punch as a cold forging tribology test," *Proceedings of the 2004 Northeast Decision Science Institute Conference, NEDSI 2004 Proceedings*, Sønderborg, Denmark, December 6-9, 2011, pp. 187-193.
- [6] T. Mitek, "Effect of workpiece slenderness on the numerical flow lines distribution in the cross-section of a circular-symmetric part hot die forged with a hammer," *Advances in Science and Technology Research Journal*, vol. 16, no. 6, pp. 108-117, December 2022.
- [7] Y. P. Luh el al., "Study of the hardening in middle shaft during cold forging," *International Conference on Information and Communication Technology Convergence, ICIT 2019*, Chengdu, China, March 22-25, 2019, no page.
- [8] A. Watanabe el al., "An anisotropic damage model for prediction of ductile fracture during cold forging," *KKU Engineering Journal*, vol. 12, no. 11, pp. 1,823, October 2022.
- [9] T. W. Ku, "A study on two-stage cold forging for a drive shaft with internal spline and spur gear geometries," *Journal of Educational Computing Research*, vol. 8, no. 11, pp. 953, November 2018.

- [10] V. C. Nguyen et al., "Optimization of a cold forging die design using simulation software," *International Journal of Scientific Engineering and Science*, vol. 7, no. 4, pp. 23-28, April 2023.
- [11] C. C. Yang and C. H. Liu, "The study of multi-stage cold forming process for the manufacture of relief valve regulating nuts," *Applied Sciences*, vol. 13, no. 10, pp. 6,299, May 2023.
- [12] J. O. Obiko et al., "Forging optimisation process using numerical simulation and Taguchi method," *SN Applied Sciences*, vol. 2, no. 3, pp. 2,547, March 2020.
- [13] Y. T. Wang and S. Y. Hsia, "Comparison of marker-based and markerless AR : A case study of an indoor decoration system," In *LC3 2017: Volume I-Proceedings of the Joint Conference on Computing in Construction, JC3*, Heraklion, Greece, July 4-7, 2017, pp. 483-490.
- [14] G. Winiarski et al., "Numerical analysis of a six-stage forging process for producing hollow flanged parts from tubular blanks," *Advances in Science and Technology Research Journal*, vol. 14, no. 1, pp. 201-208, March 2020.
- [15] K. Laber and M. Knapinski, "Determining conditions for thermoplastic processing guaranteeing receipt of high-quality wire rod for cold upsetting using numerical and physical modelling methods," *Journal of Education*, vol. 13, no. 3, pp. 711, February 2020.
- [16] T. Bulzak et al., "Application of numerical simulation and physical modeling for verifying a cold forging process for rotary sleeves," *Journal of Materials Engineering and Performance*, vol. 31, no. 3, pp. 2,267-2,280, March 2022.
- [17] L. Tao et al., "Analyzing forged quality of thin-walled A-286 superalloy tube under multi-stage cold forging processes," *Advances in Neural Networks and Applications Journal*, vol. 16, no. 13, pp. 4,598, June 2023.
- [18] P. M. Petkar et al., "Analysis of forming behavior in cold forging of AISI 1010 steel using artificial neural network," *Journal of Computer Sciences Institute*, vol. 10, no. 11, 247-253, October 2020.
- [19] S. Y. Hsia, "A numerical simulation of meshes mending used in the three-dimensional porthole die extrusion of thin wall profiles," *Journal of Engineering Research and Reports*, vol. 2, no. 4, pp. 1-14, November 2018.

- [20] P. M. Petkar et al., "A comparative study in forming behavior of different grades of steel in cold forging backward extrusion by integrating artificial neural network (ANN) with differential evolution (DE) algorithm," *Applied Sciences*, vol. 13, no. 3, no page, January 2023.

ภาคผนวก

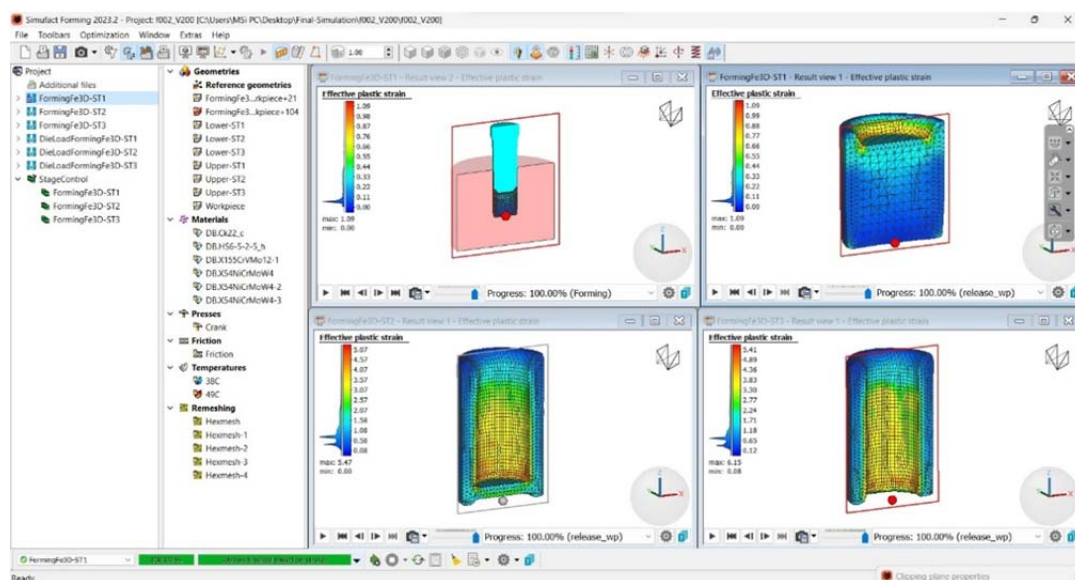
ภาคผนวก ก.

ผลการจำลองด้วยโปรแกรม Simulation Forming

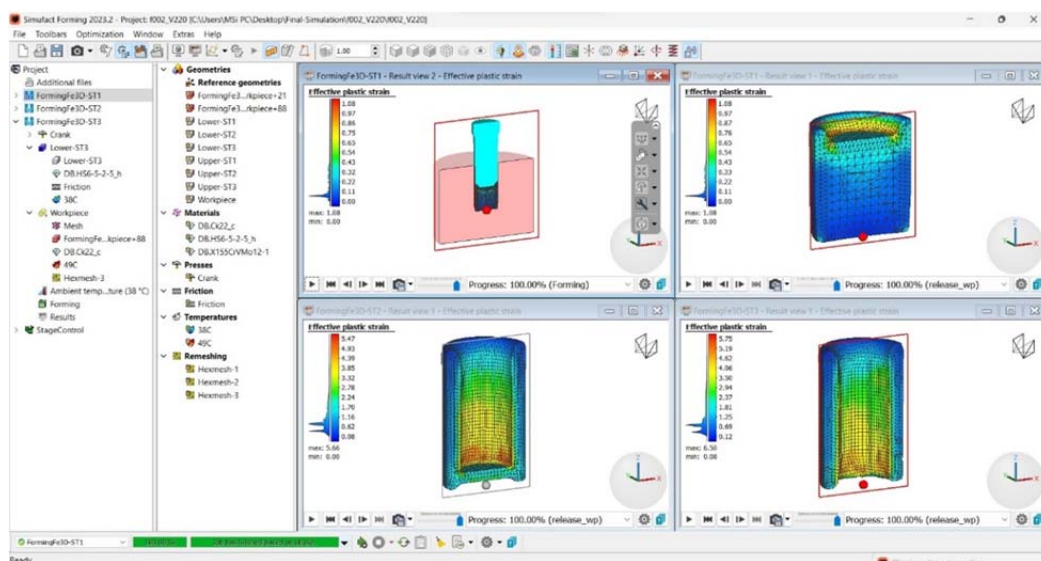
## การวิเคราะห์ผลจากการจำลองด้วยโปรแกรม Simufact Forming

### ผลลัพธ์จากการจำลองต่อ Effective Plastic Strain

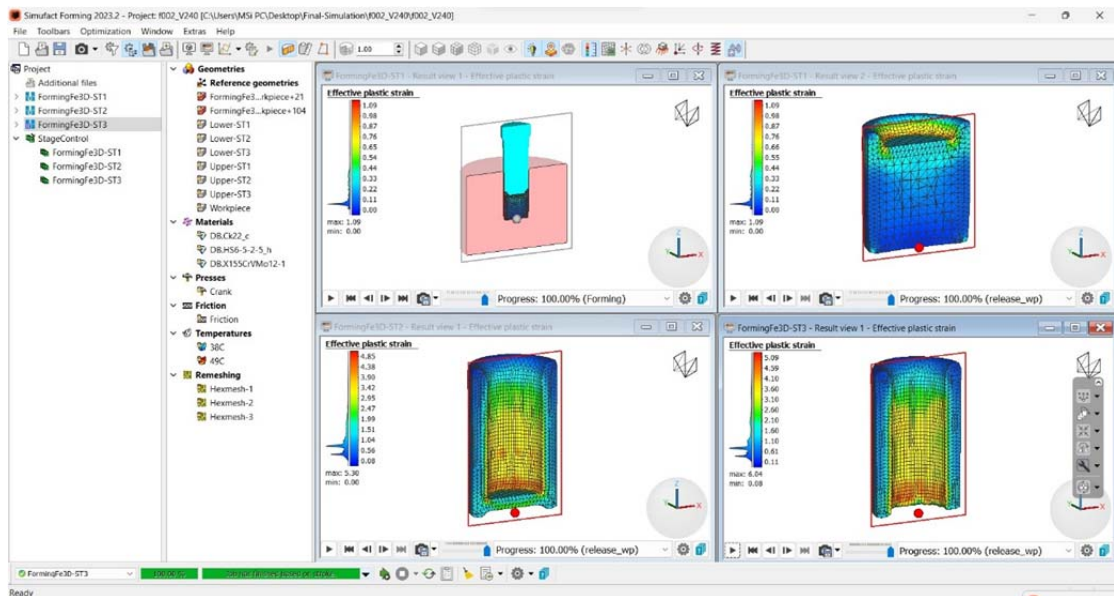
ผลของแรงเสียดทานระหว่างผิวของหัวกดและชิ้นงาน ซึ่งมีการปรับเปลี่ยนค่าแรงเสียดทาน ตั้งแต่ระดับ 0.02, 0.04, 0.06, 0.08, และ 0.10 ค่าความเร็วหัวกด 200 mm/s, 220 mm/s และ 240 mm/s] ดังแสดงในรูปที่ ก.1 - ก.10



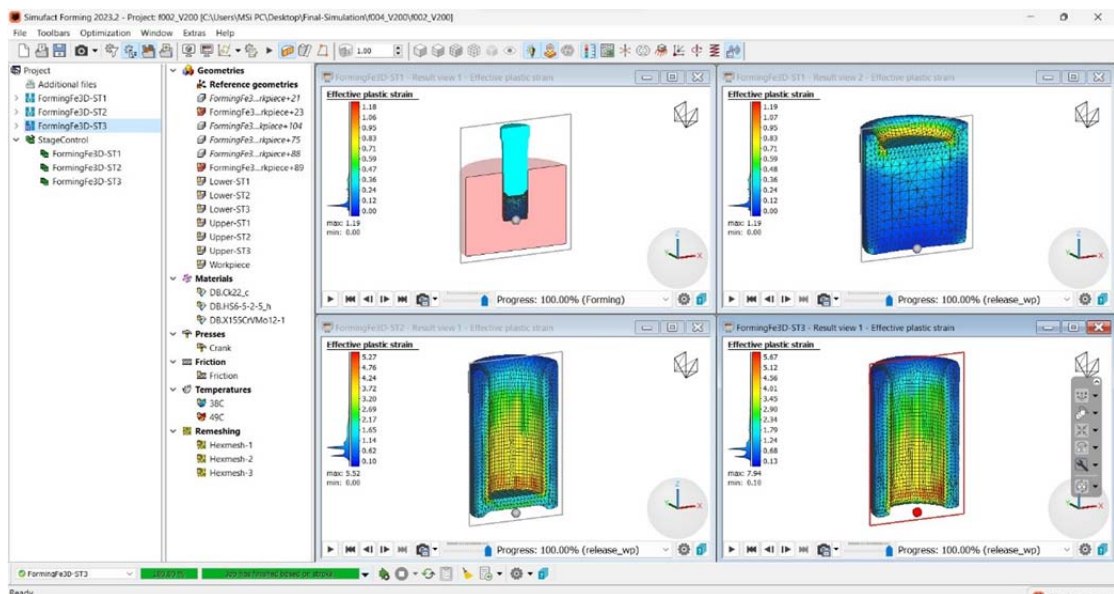
รูปที่ ก.1 ผลการจำลองด้วยโปรแกรมที่สัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน 0.02 และความเร็ว 200 mm/s



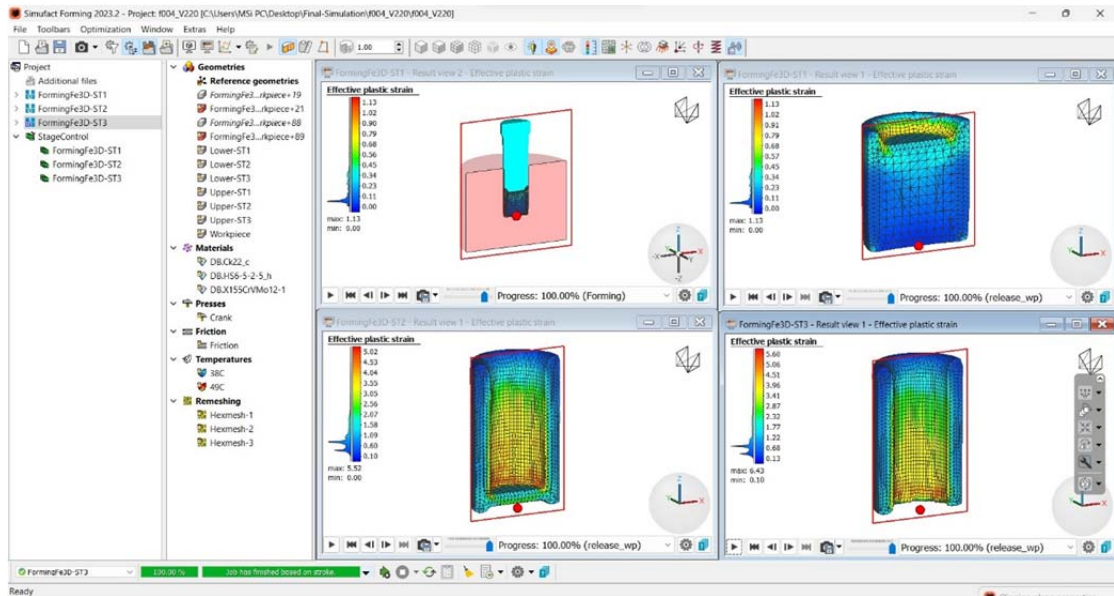
รูปที่ ก.2 ผลการจำลองด้วยโปรแกรมที่สัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน 0.02 และความเร็ว 220 mm/s



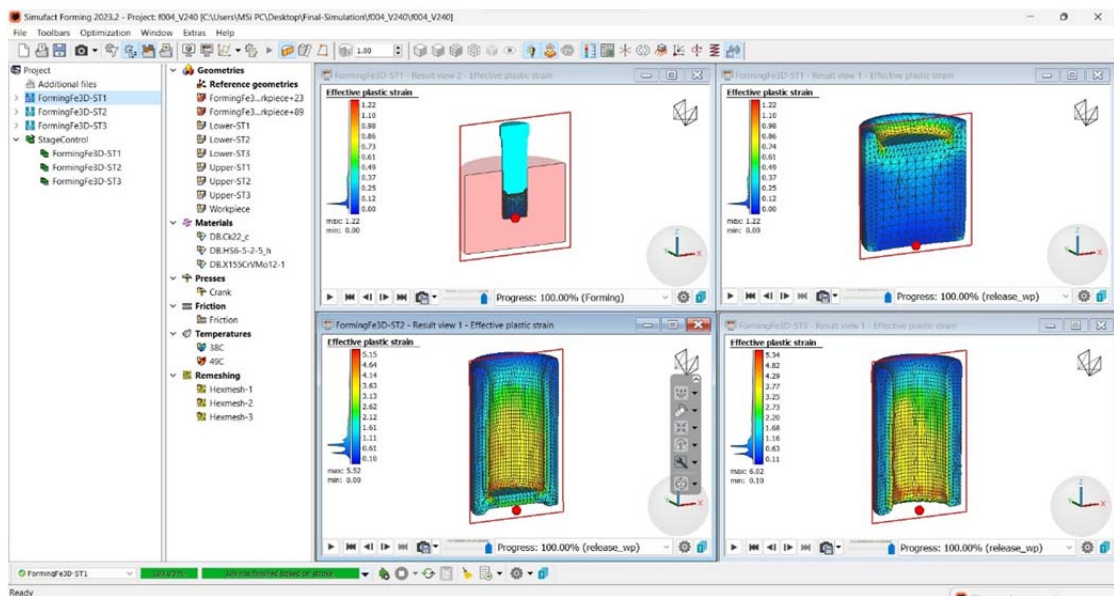
รูปที่ ก.3 ผลการจำลองด้วยโปรแกรมที่สัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน 0.02 และความเร็ว 240 mm/S



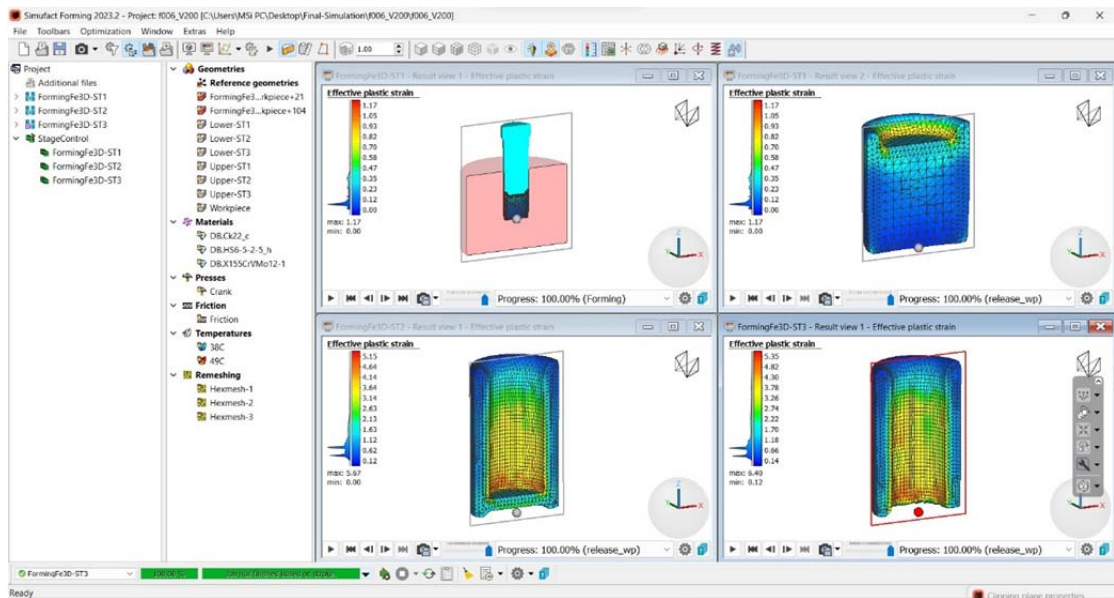
รูปที่ ก.4 ผลการจำลองด้วยโปรแกรมที่สัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน 0.04 และความเร็ว 200 mm/S



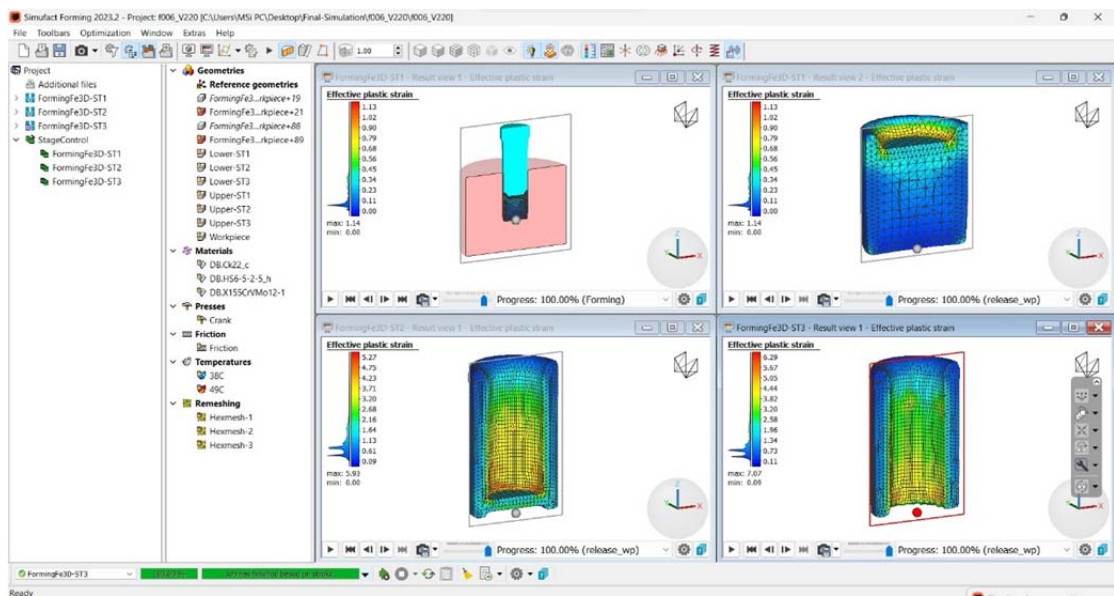
รูปที่ ก.5 ผลการจำลองด้วยโปรแกรมที่สัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน 0.04 และความเร็ว 220 mm/S



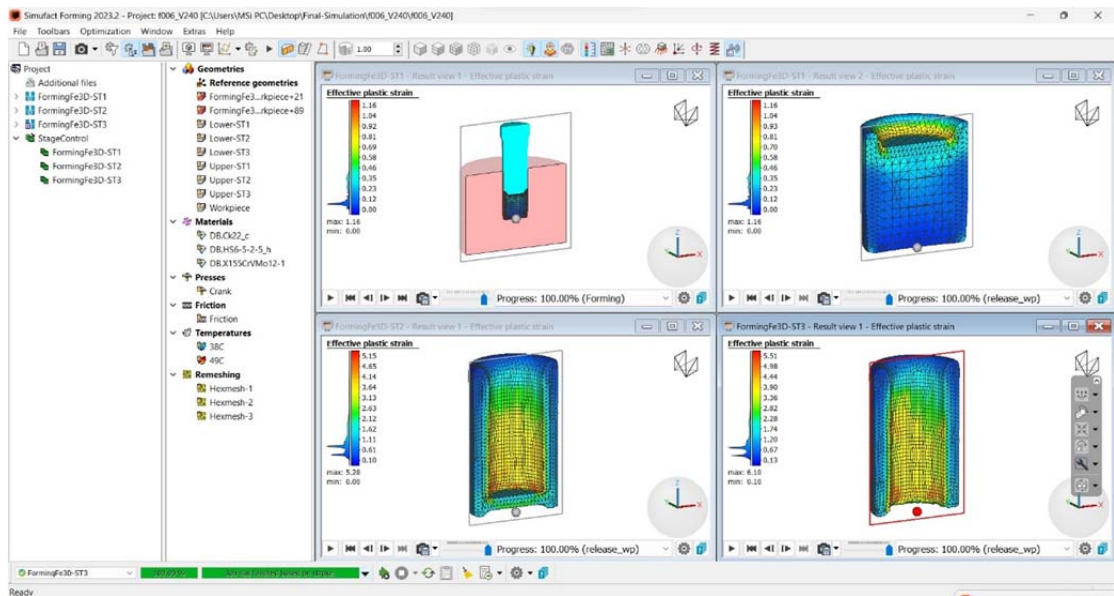
รูปที่ ก.6 ผลการจำลองด้วยโปรแกรมที่สัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน 0.04 และความเร็ว 240 mm/S



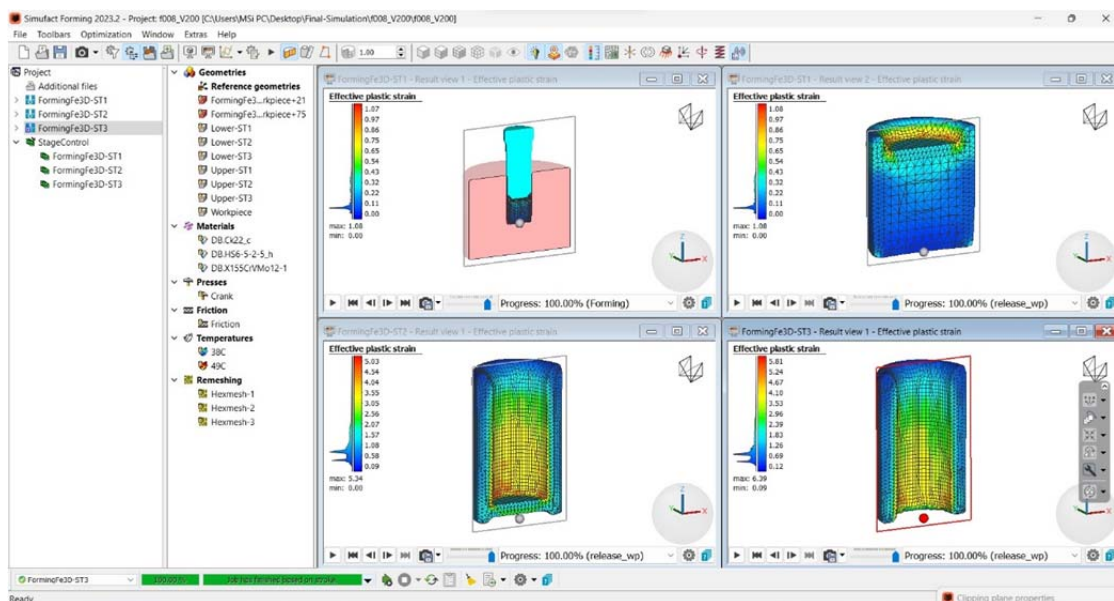
รูปที่ ก.7 ผลการจำลองด้วยโปรแกรมที่สัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน 0.06 และความเร็ว 200 mm/S



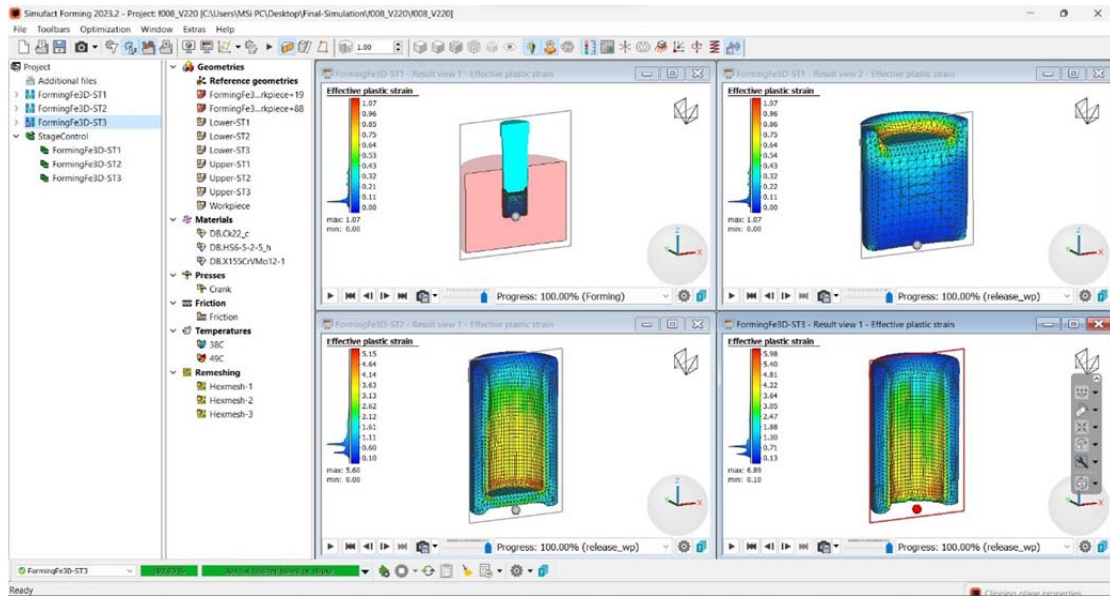
รูปที่ ก.8 ผลการจำลองด้วยโปรแกรมที่สัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน 0.06 และความเร็ว 220 mm/S



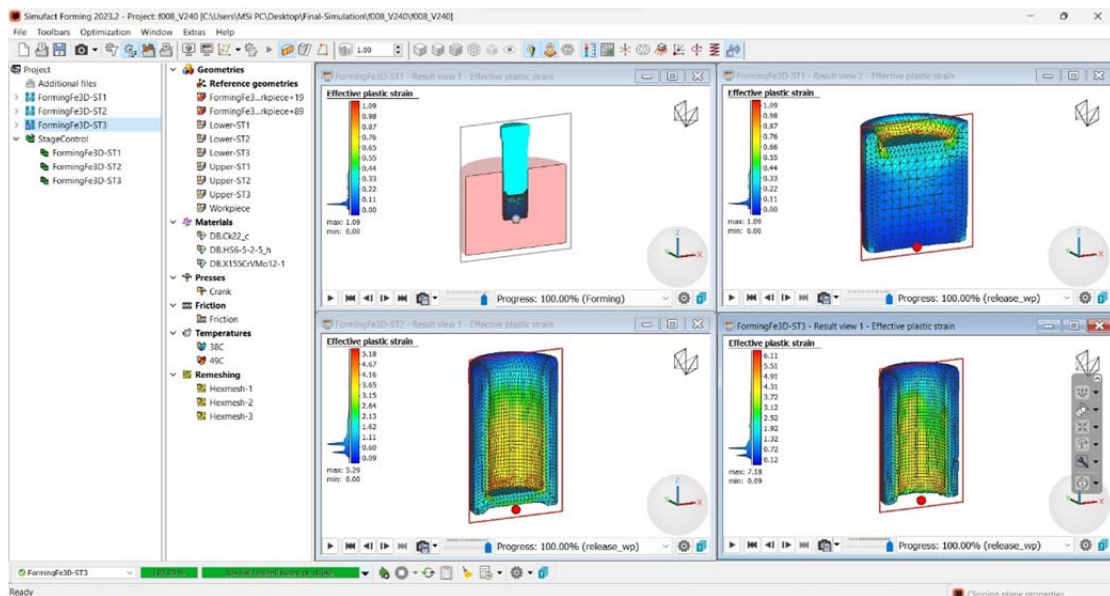
รูปที่ ก.9 ผลการจำลองด้วยโปรแกรมที่สัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน 0.06 และความเร็ว 240 mm/S



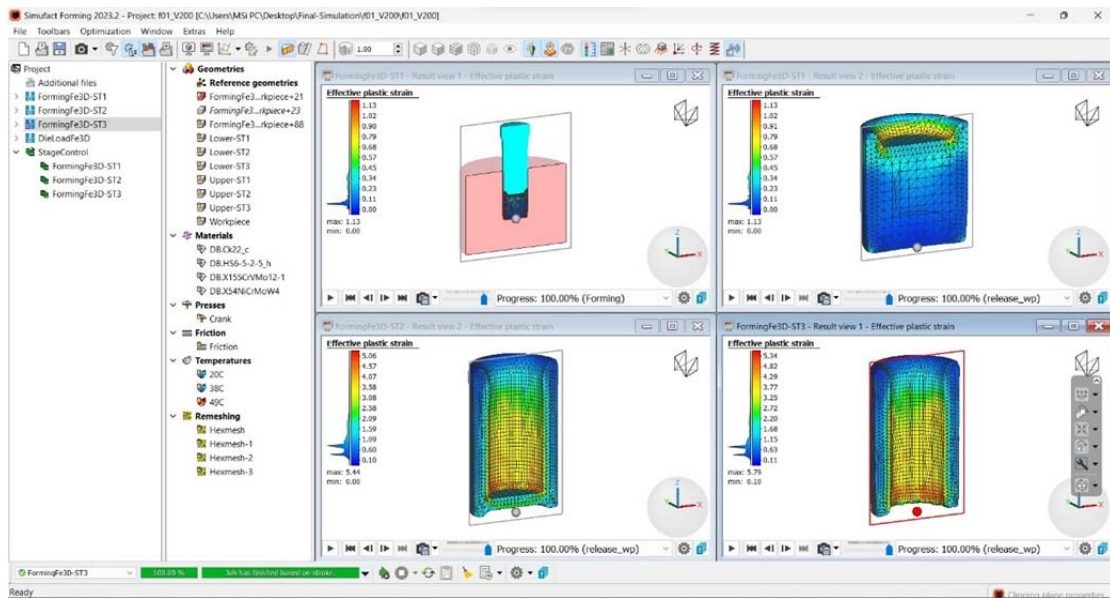
รูปที่ ก.10 ผลการจำลองด้วยโปรแกรมที่สัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน 0.08 และความเร็ว 200 mm/S



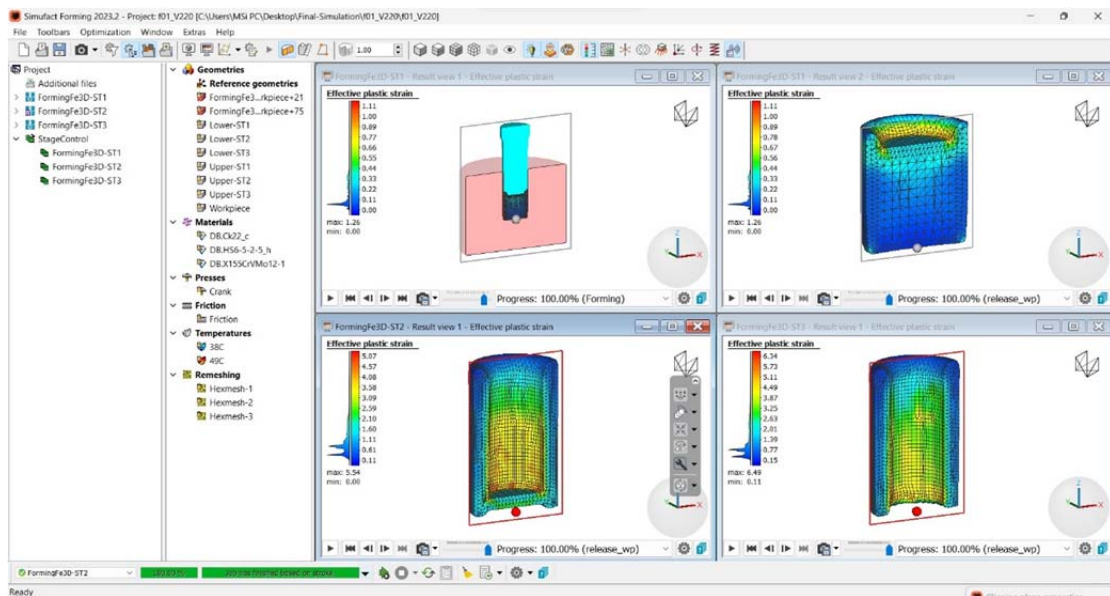
รูปที่ ก.11 ผลการจำลองด้วยโปรแกรมที่สัมพันธ์แรงเสียดทาน 0.08 และความเร็ว 220 mm/S



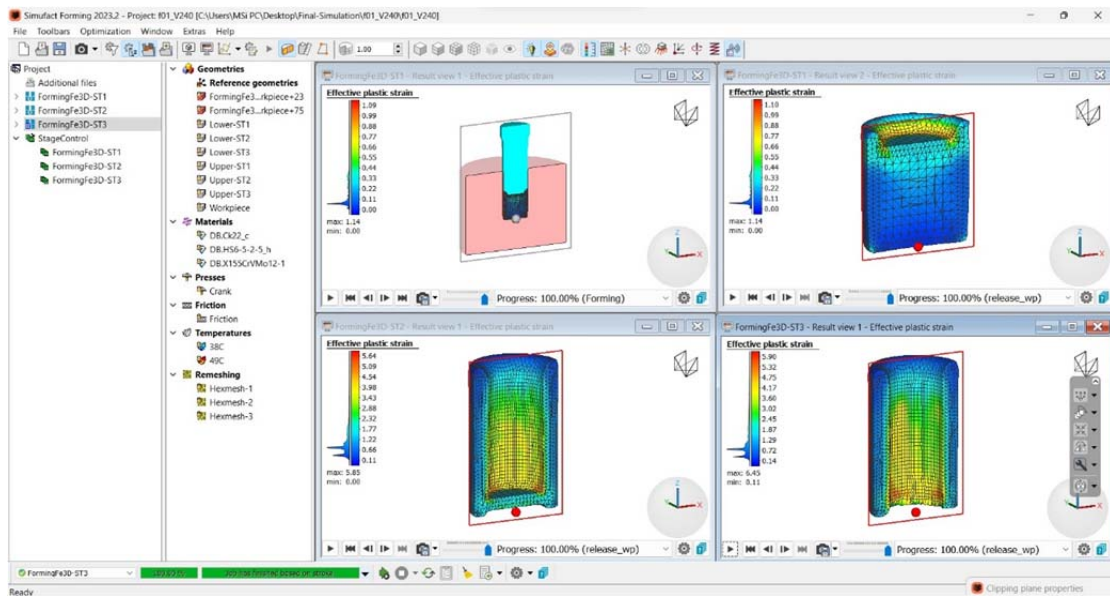
รูปที่ ก.12 ผลการจำลองด้วยโปรแกรมที่สัมพันธ์แรงเสียดทาน 0.08 และความเร็ว 240 mm/S



รูปที่ ก.13 ผลการจำลองด้วยโปรแกรมที่สัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน 0.1 และความเร็ว 200 mm/S



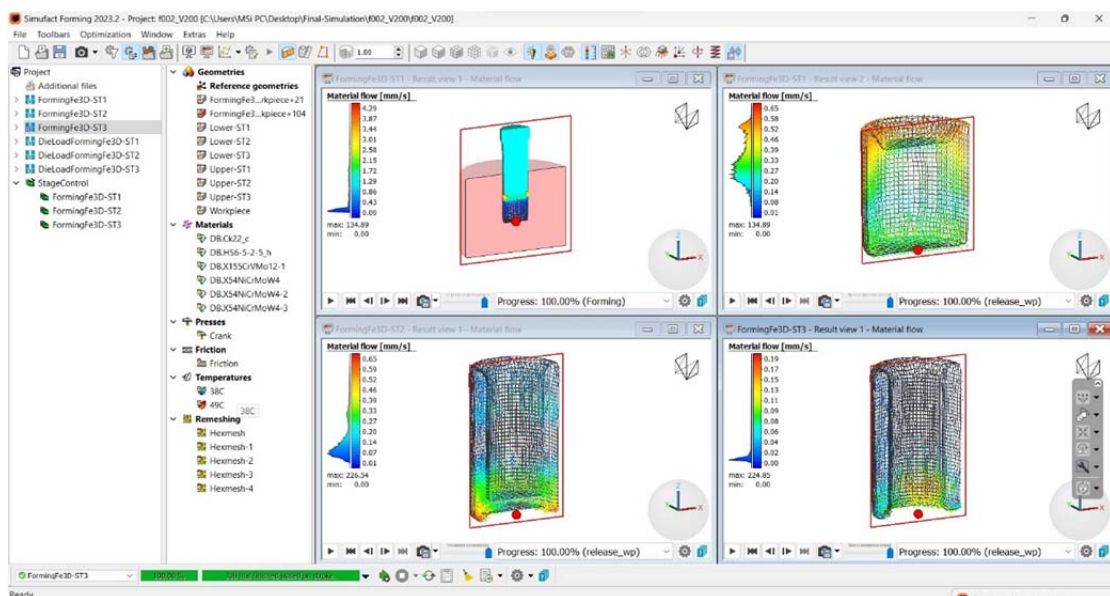
รูปที่ ก.14 ผลการจำลองด้วยโปรแกรมที่สัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน 0.1 และความเร็ว 220 mm/S



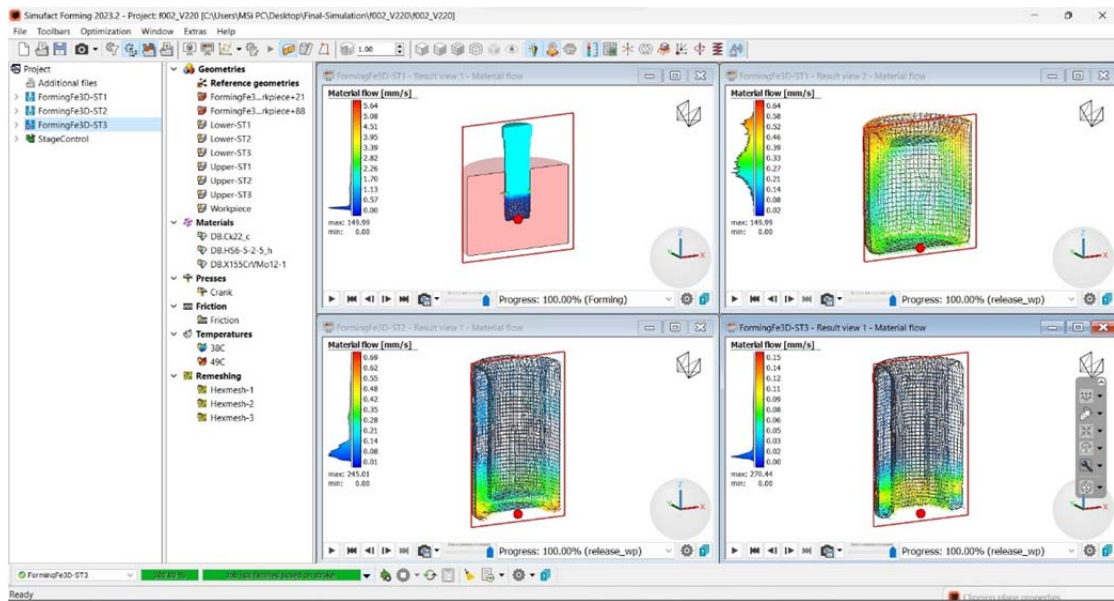
รูปที่ ก.15 ผลการจำลองด้วยโปรแกรมที่สัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน 0.1 และความเร็ว 240 mm/S

### ผลลัพธ์จากการจำลองการไหลของเนื้อวัสดุ (Material Flow)

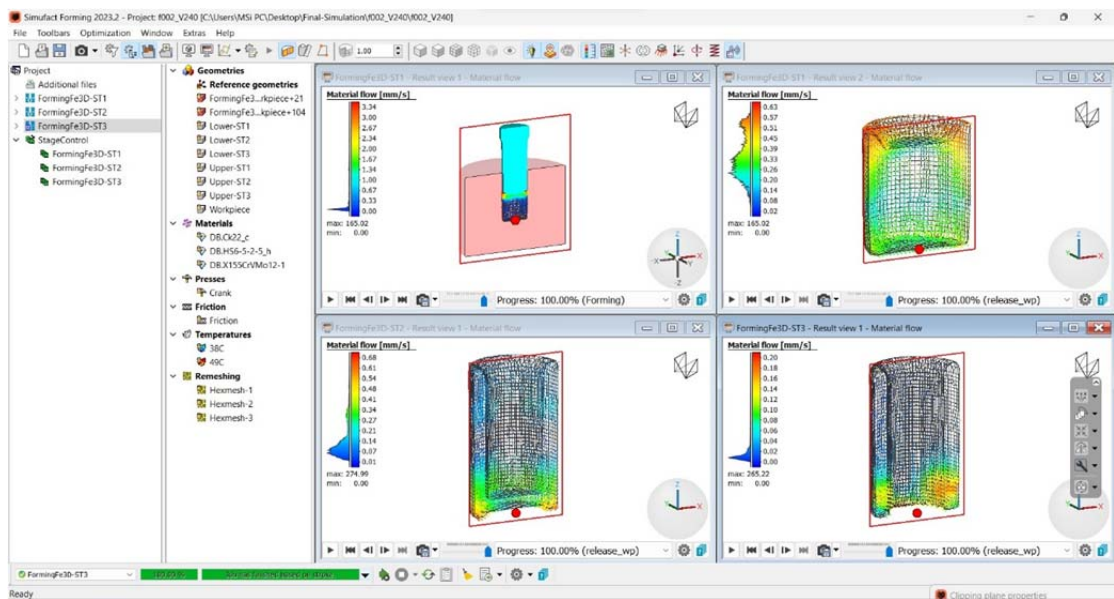
จากการจำลองกระบวนการทขึ้นรูปเป็นวัสดุ S20C ด้วยโปรแกรม Simufact Forming พบว่าการไหลของวัสดุ (Material Flow) มีบทบาทสำคัญต่อผลลัพธ์ของการขึ้นรูปและคุณสมบัติทางกลของชิ้นงาน ผลลัพธ์จากการจำลองสามารถสรุปได้ดังนี้



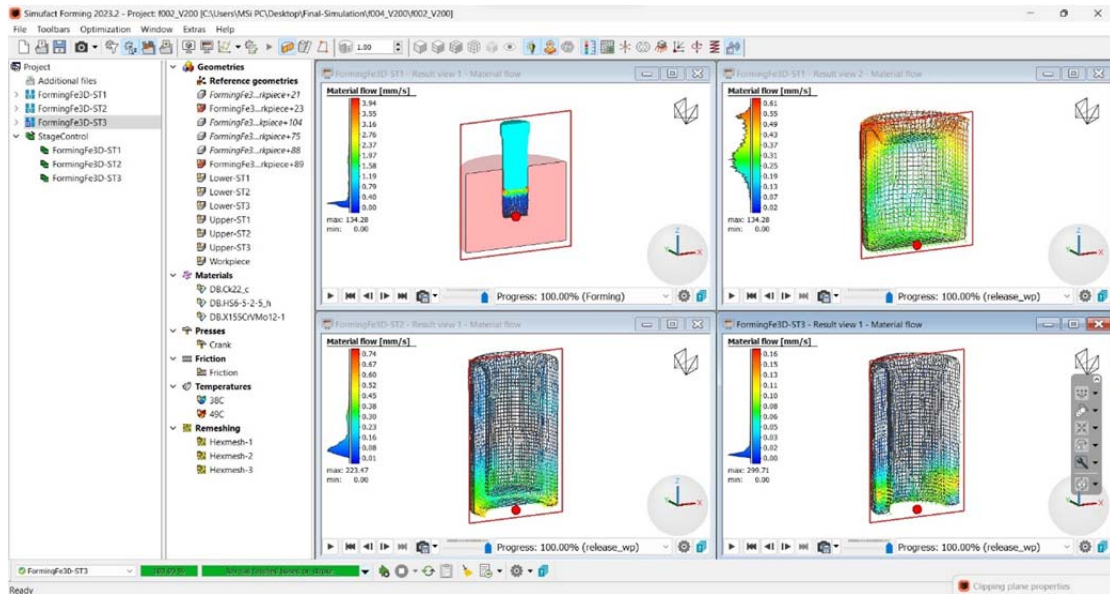
รูปที่ ก.16 ผลการจำลองการไหลของเนื้อวัสดุที่แรงเสียดทาน 0.02 และความเร็ว 200 mm/S



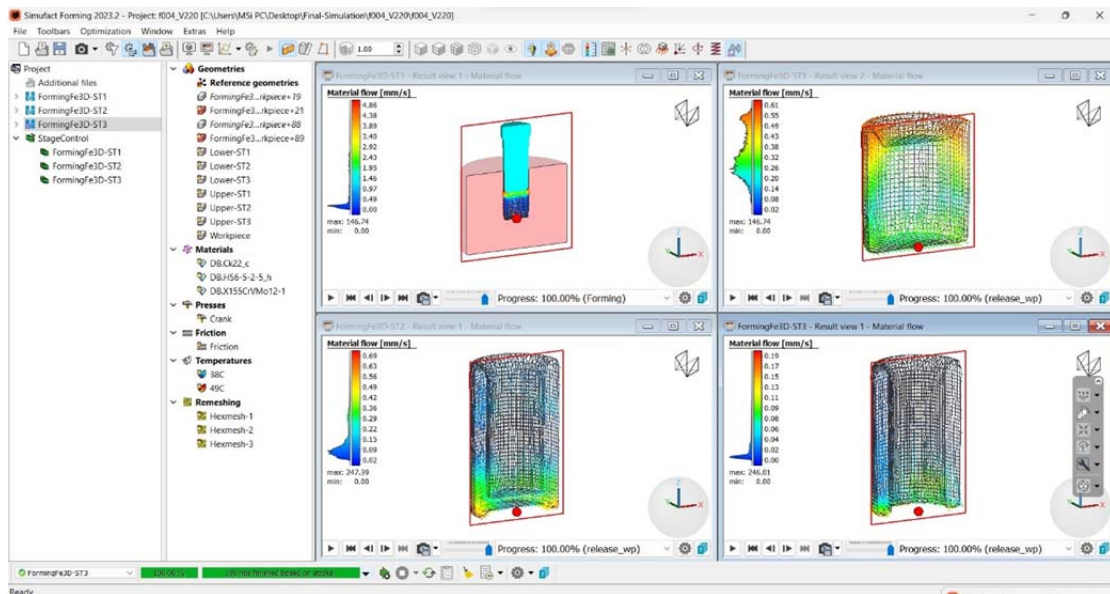
รูปที่ ก.17 ผลการจำลองการไหลของเนื้อวัสดุที่แรงเสียดทาน 0.02 และความเร็ว 220 mm/s



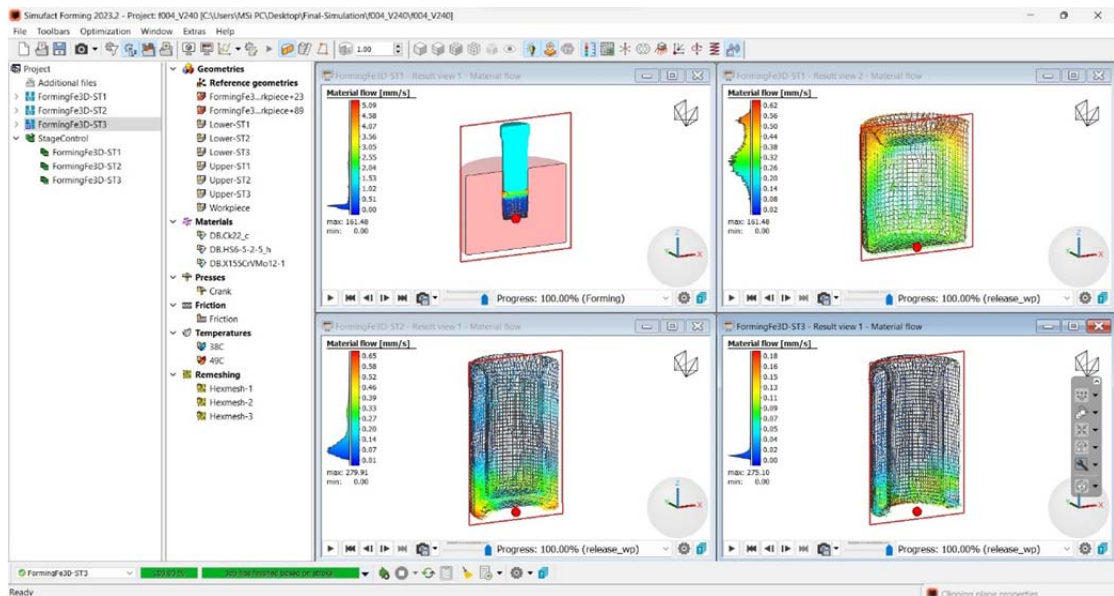
รูปที่ ก.18 ผลการจำลองการไหลของเนื้อวัสดุที่แรงเสียดทาน 0.02 และความเร็ว 240 mm/s



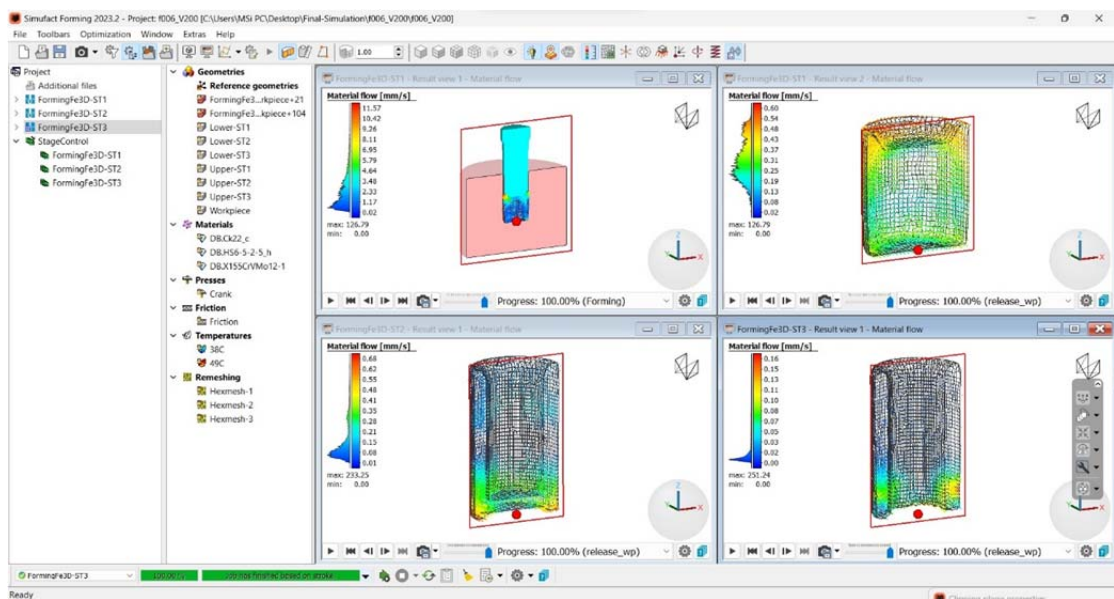
รูปที่ ก.19 ผลการจำลองการไหลของเนื้อวัสดุที่แรงเสียดทาน 0.04 และความเร็ว 200 mm/S



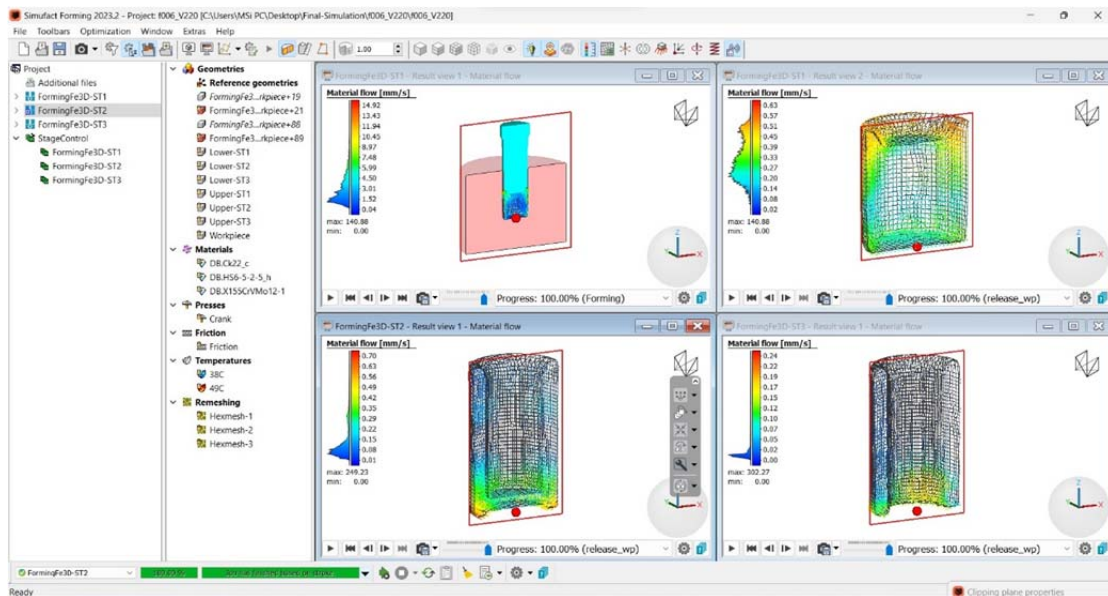
รูปที่ ก.20 ผลการจำลองการไหลของเนื้อวัสดุที่แรงเสียดทาน 0.04 และความเร็ว 220 mm/S



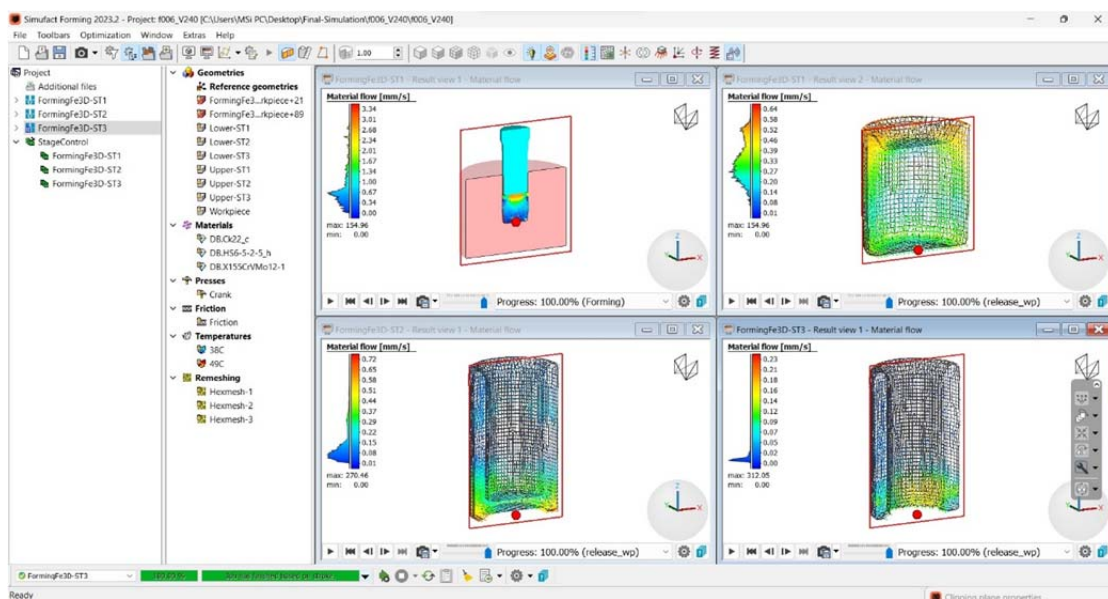
รูปที่ ก.21 ผลการจำลองการไหลของเนื้อวัสดุที่แรงเสียดทาน 0.04 และความเร็ว 240 mm/s



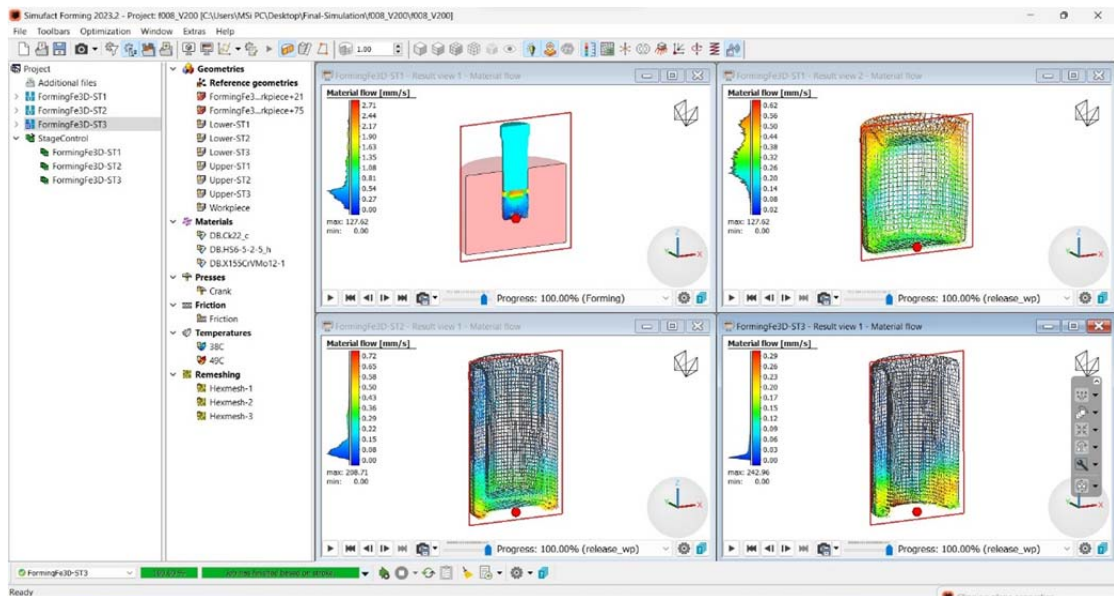
รูปที่ ก.22 ผลการจำลองการไหลของเนื้อวัสดุที่แรงเสียดทาน 0.06 และความเร็ว 200 mm/s



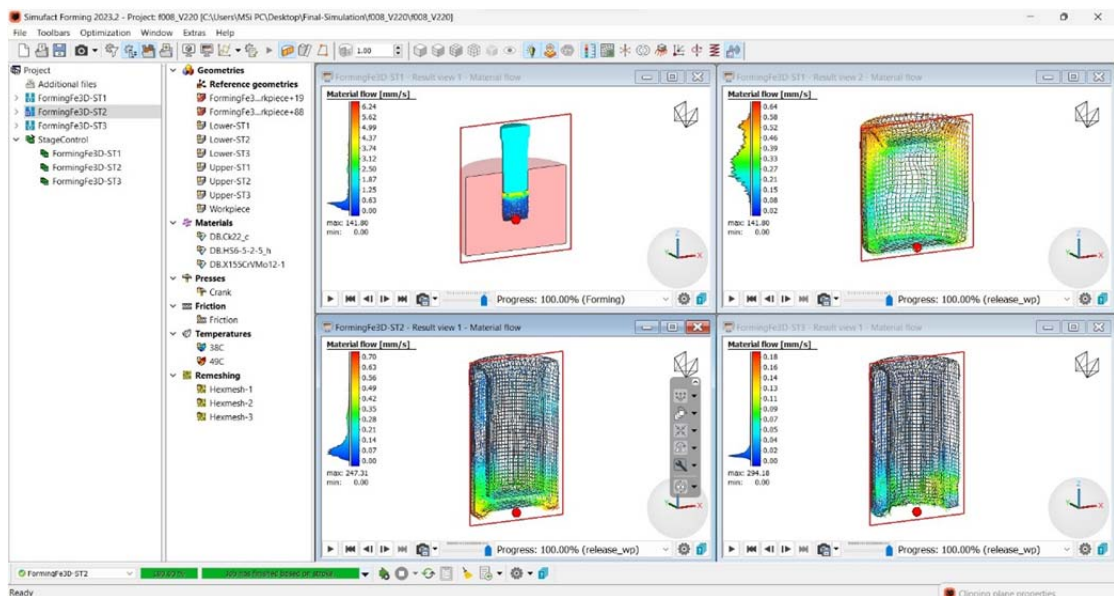
รูปที่ ก.23 ผลการจำลองการไหลของเนื้อวัสดุที่แรงเสียดทาน 0.06 และความเร็ว 220 mm/S



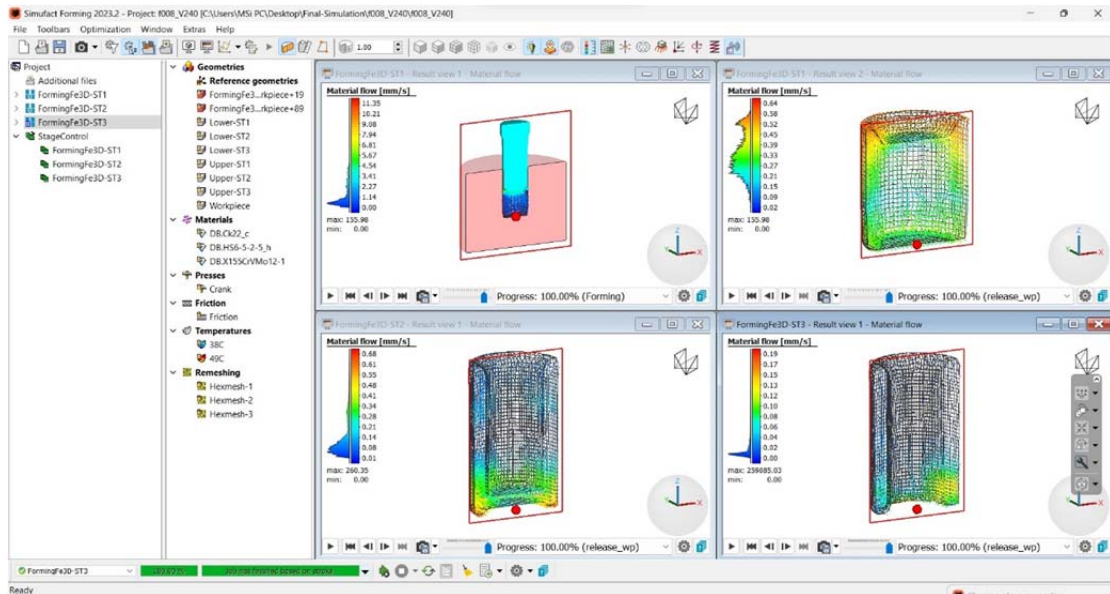
รูปที่ ก.24 ผลการจำลองการไหลของเนื้อวัสดุที่แรงเสียดทาน 0.06 และความเร็ว 240 mm/S



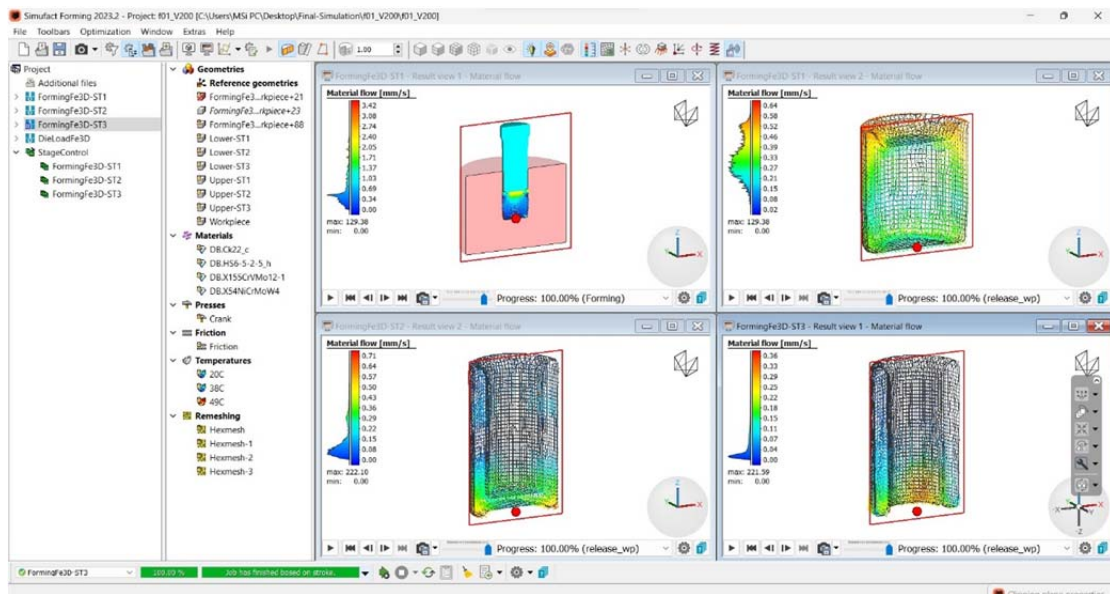
รูปที่ ก.25 ผลการจำลองการไหลของเนื้อวัสดุที่แรงเสียดทาน 0.08 และความเร็ว 200 mm/S



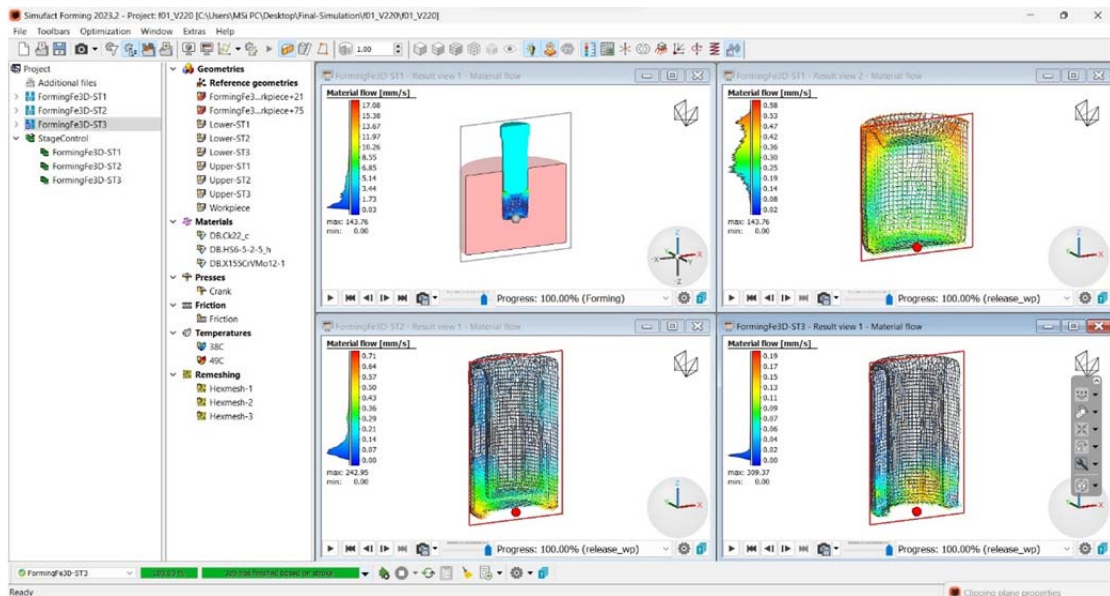
รูปที่ ก.26 ผลการจำลองการไหลของเนื้อวัสดุที่แรงเสียดทาน 0.08 และความเร็ว 220 mm/S



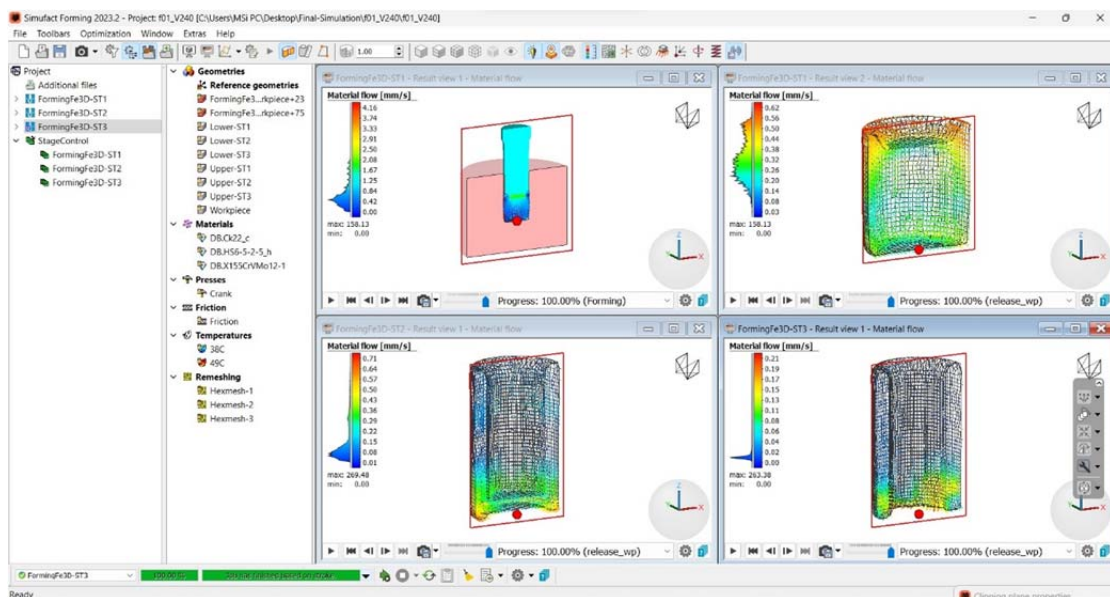
รูปที่ ก.27 ผลการจำลองการไหลของเนื้อวัสดุที่แรงเสียดทาน 0.08 และความเร็ว 240 mm/S



รูปที่ ก.28 ผลการจำลองการไหลของเนื้อวัสดุที่แรงเสียดทาน 0.1 และความเร็ว 200 mm/S

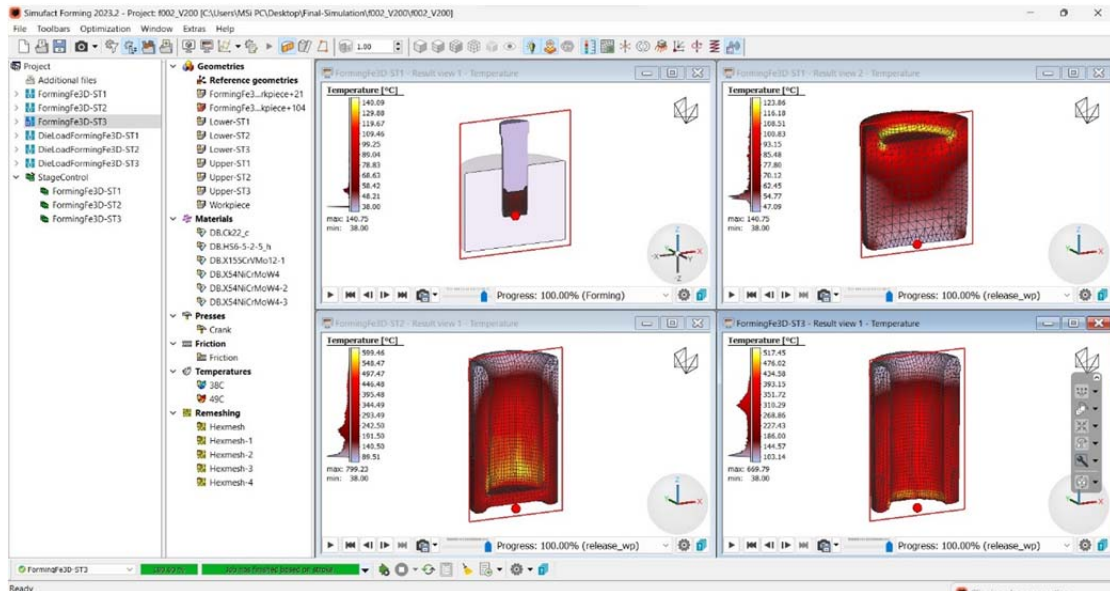


รูปที่ ก.29 ผลการจำลองการไหลของเนื้อวัสดุที่แรงเสียดทาน 0.1 และความเร็ว 220 mm/S

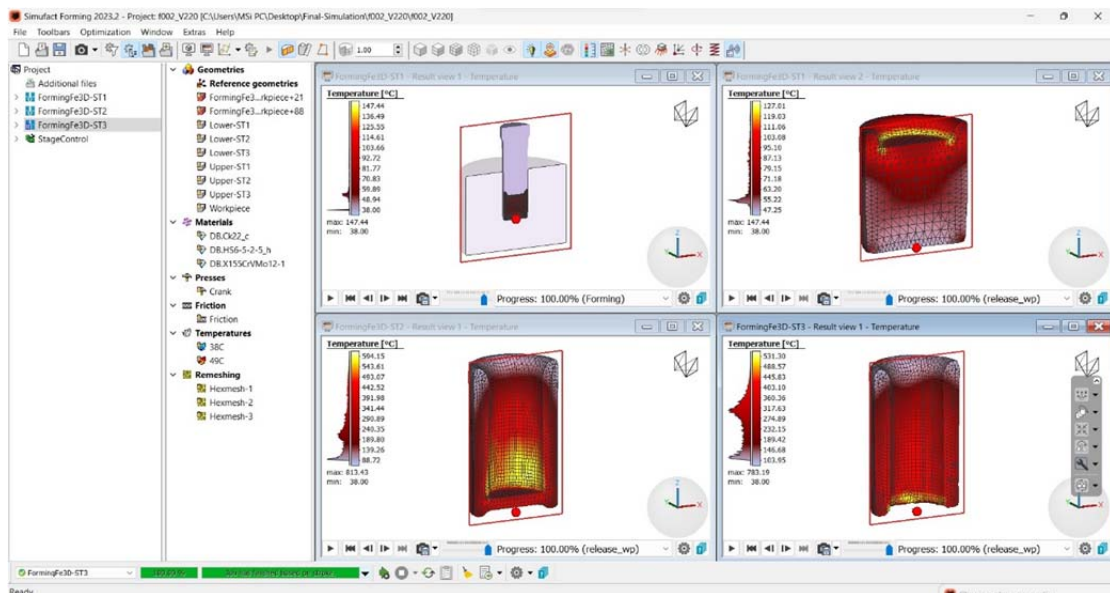


รูปที่ ก.30 ผลการจำลองการไหลของเนื้อวัสดุที่แรงเสียดทาน 0.1 และความเร็ว 240 mm/S

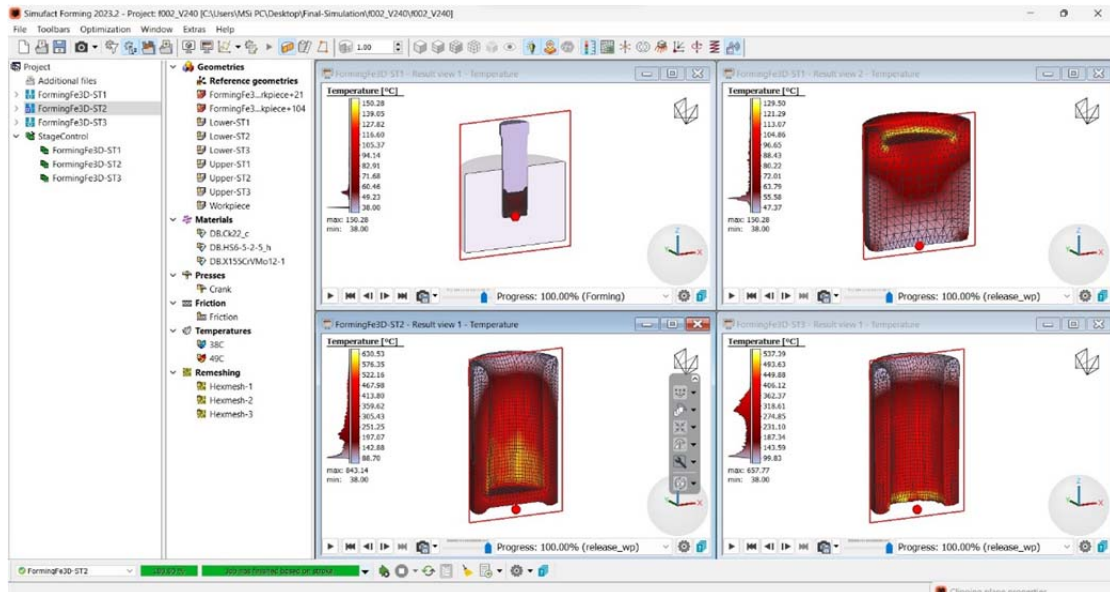
### ผลลัพธ์จากการจำลองการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ (Temperature)



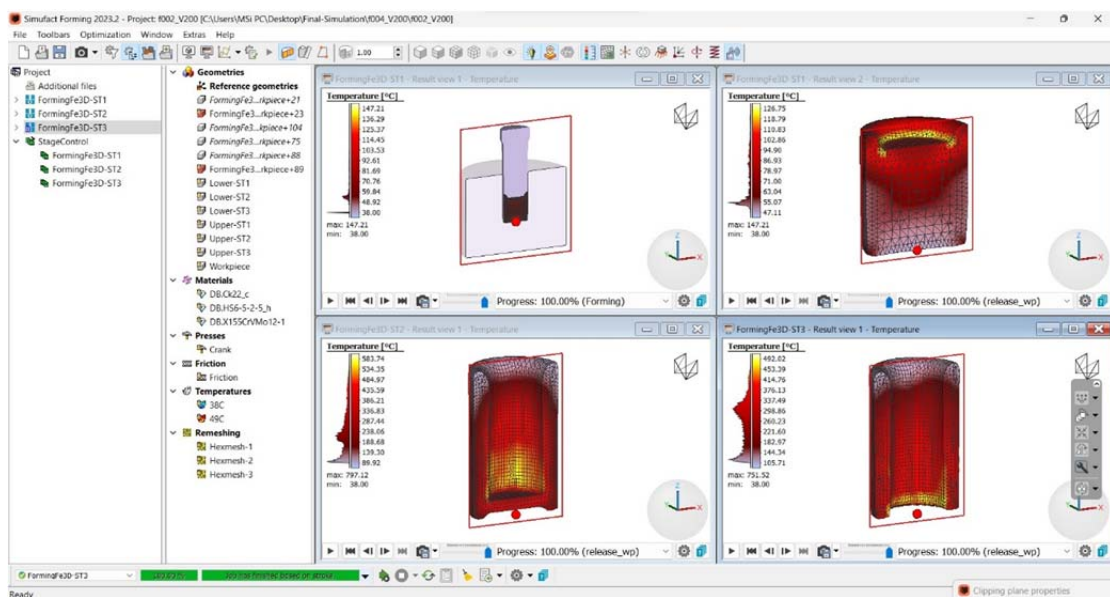
รูปที่ ก.31 ผลการจำลองการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิที่แรงเสียดทาน 0.02 และความเร็ว 200 mm/S



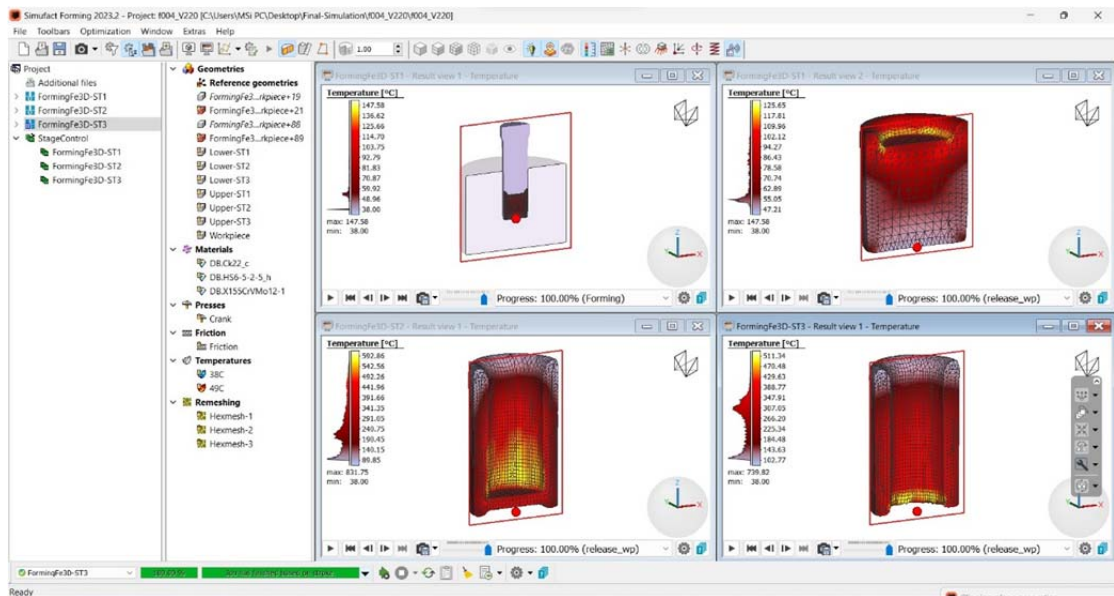
รูปที่ ก.32 ผลการจำลองการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิที่แรงเสียดทาน 0.02 และความเร็ว 220 mm/S



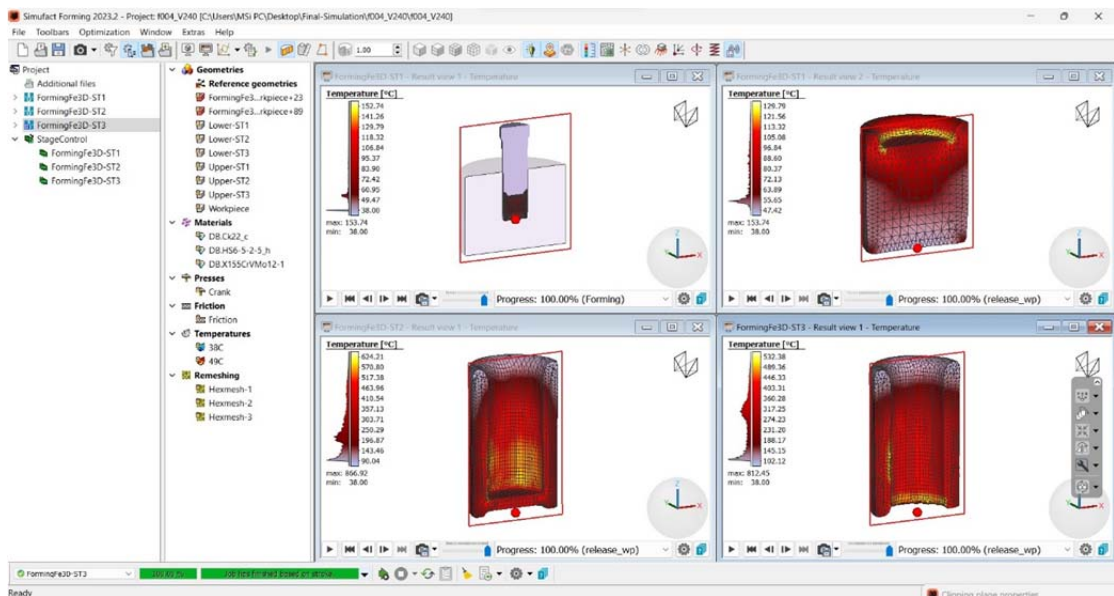
รูปที่ ก.33 ผลการจำลองการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิที่แรงเสียดทาน 0.02 และความเร็ว 240 mm/S



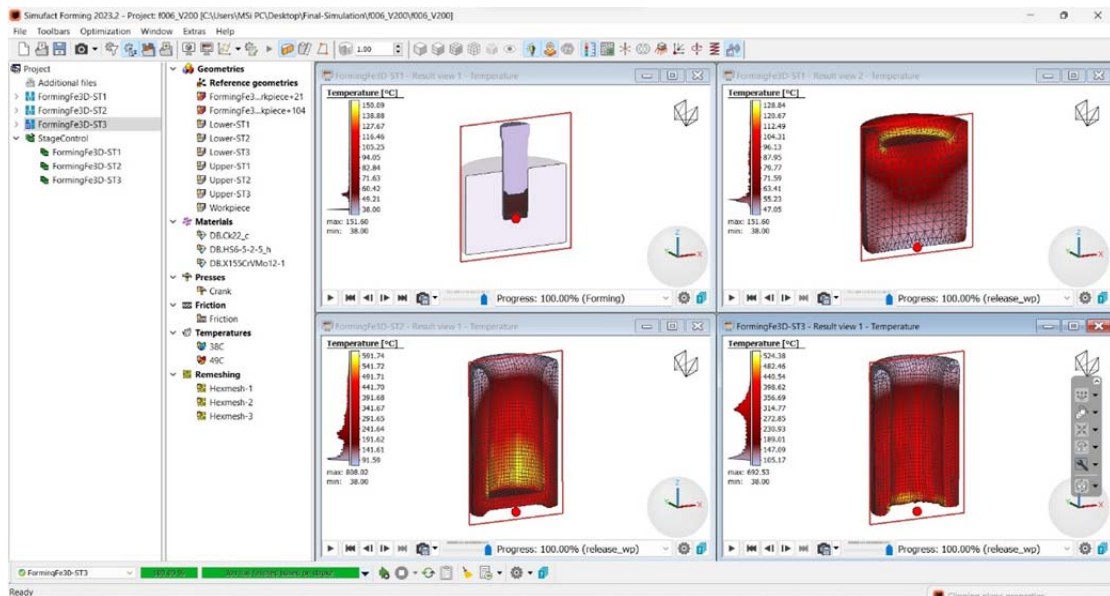
รูปที่ ก.34 ผลการจำลองการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิที่แรงเสียดทาน 0.04 และความเร็ว 200 mm/S



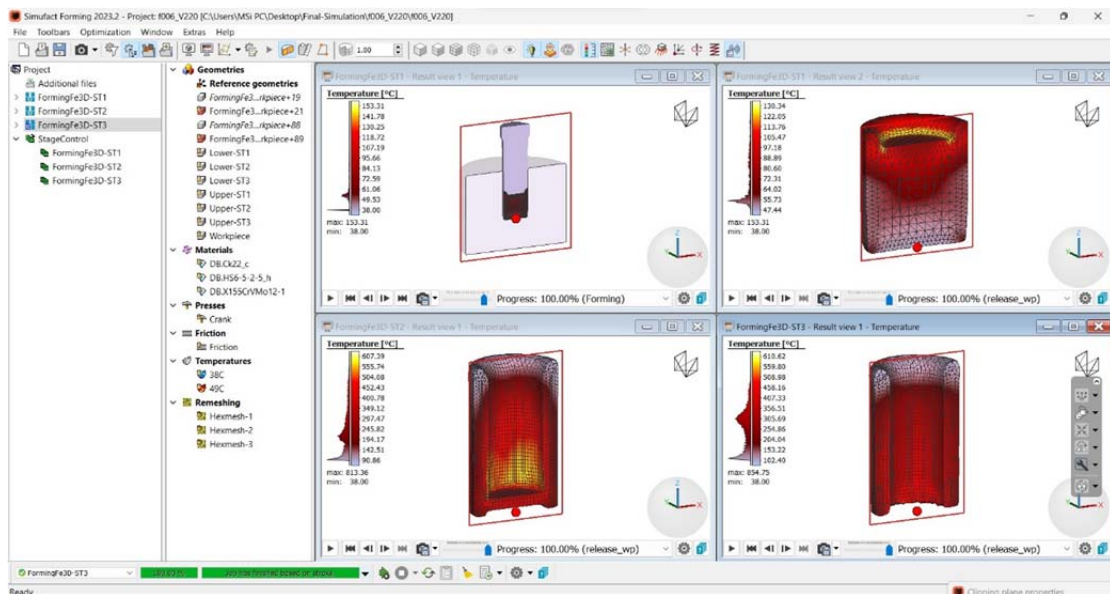
รูปที่ ก.35 ผลการจำลองการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิที่แรงเสียดทาน 0.04 และความเร็ว 220 mm/S



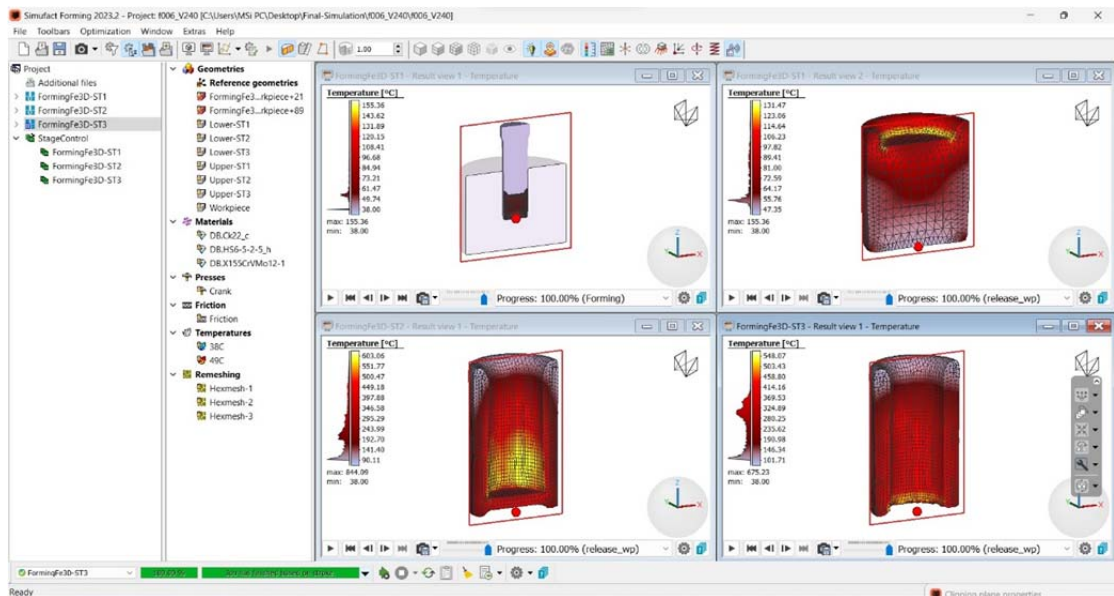
รูปที่ ก.36 ผลการจำลองการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิที่แรงเสียดทาน 0.04 และความเร็ว 240 mm/S



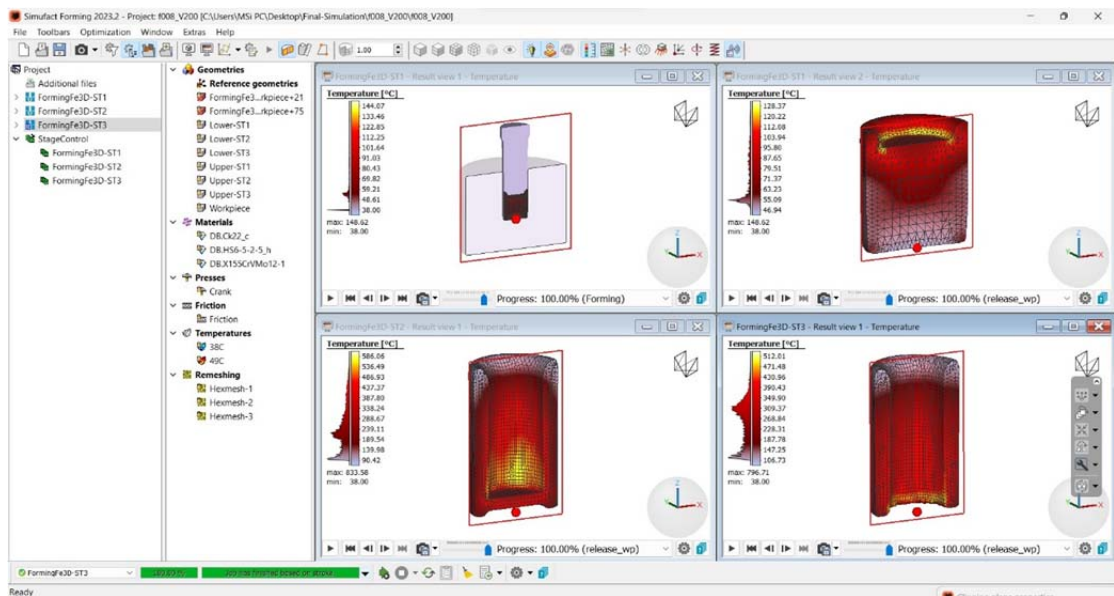
รูปที่ ก.37 ผลการจำลองการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิที่แรงเสียดทาน 0.06 และความเร็ว 200 mm/S



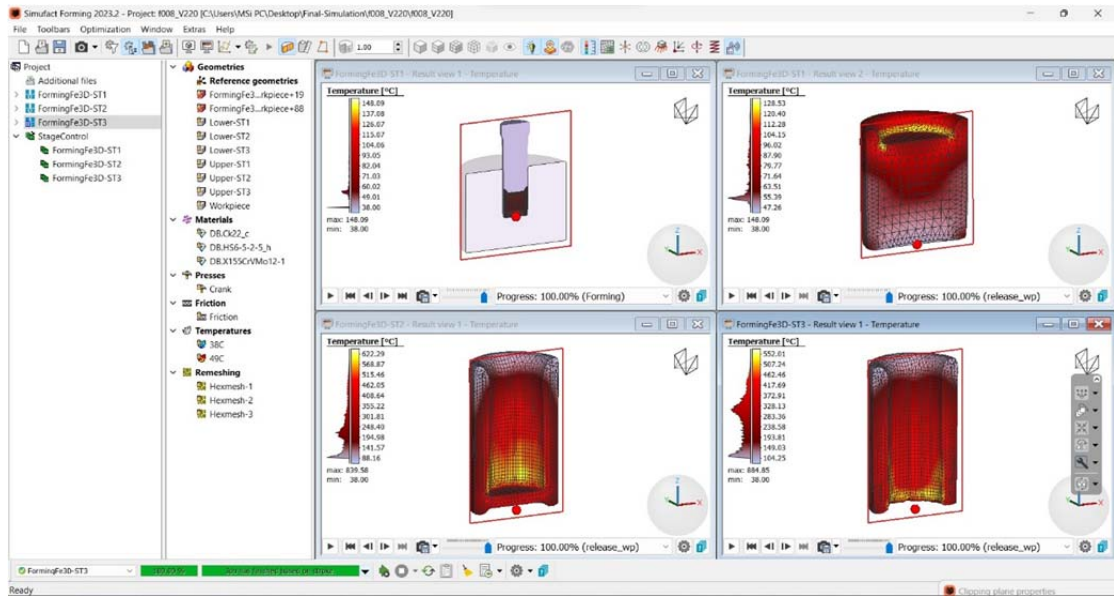
รูปที่ ก.38 ผลการจำลองการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิที่แรงเสียดทาน 0.06 และความเร็ว 220 mm/S



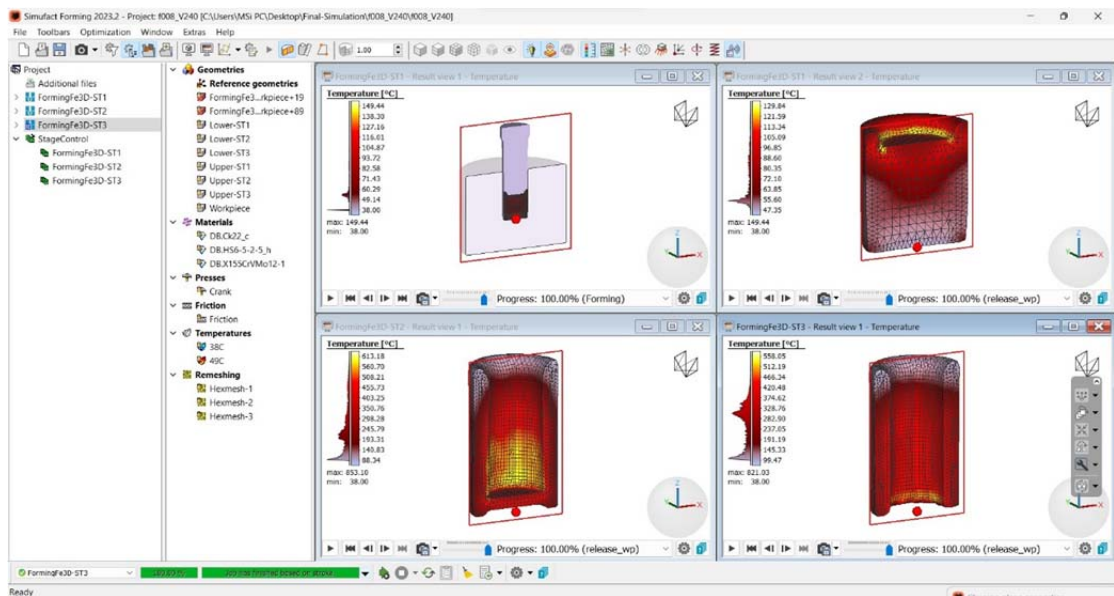
รูปที่ ก.39 ผลการจำลองการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิที่แรงเสียดทาน 0.06 และความเร็ว 240 mm/S



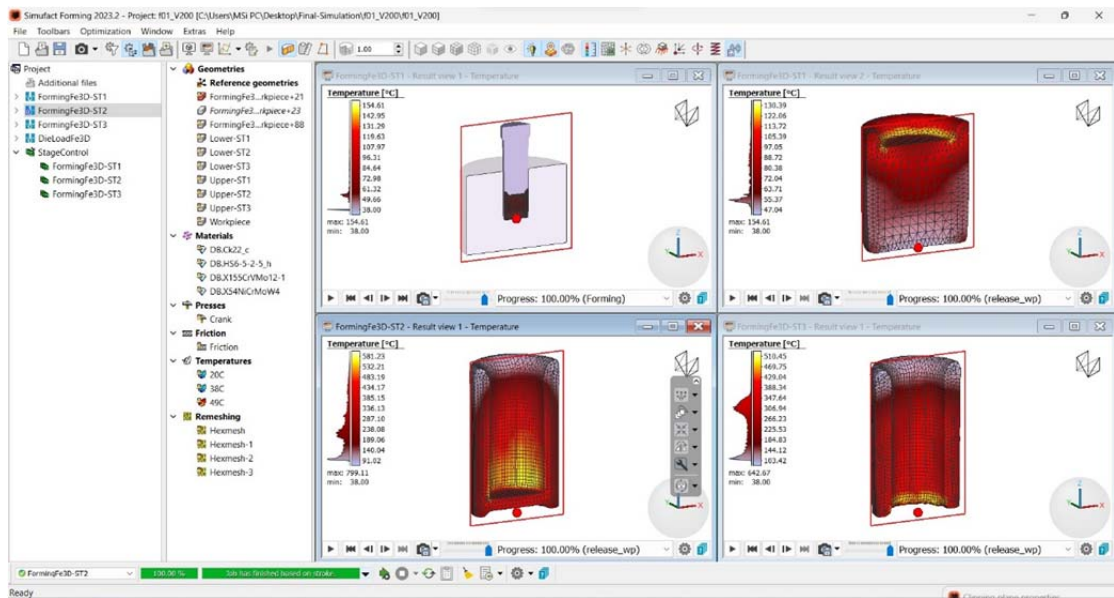
รูปที่ ก.40 ผลการจำลองการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิที่แรงเสียดทาน 0.08 และความเร็ว 200 mm/S



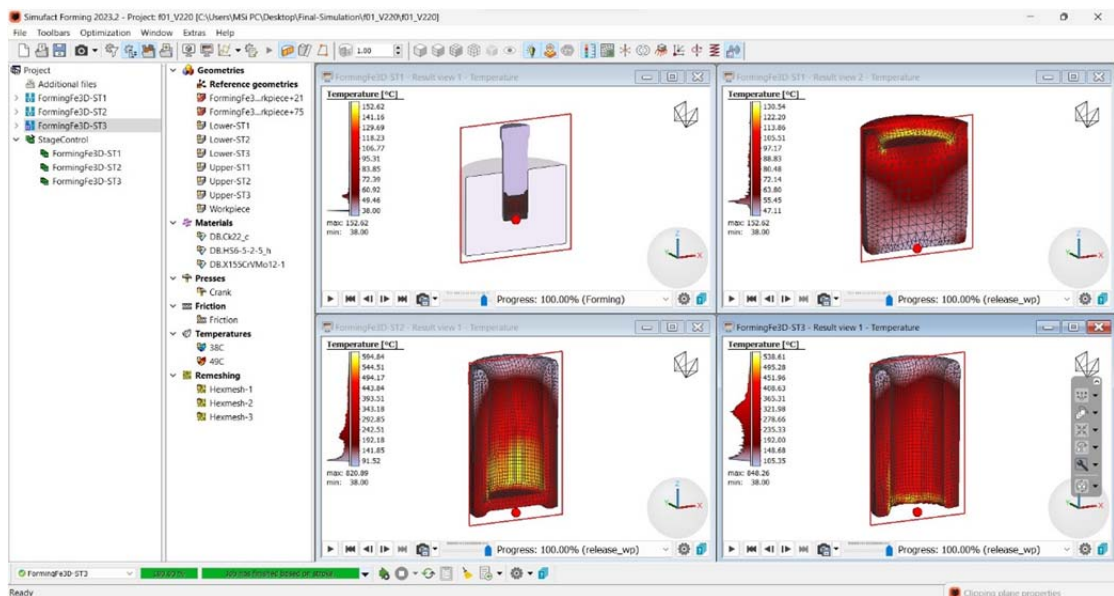
รูปที่ ก.41 ผลการจำลองการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิที่แรงเสียดทาน 0.08 และความเร็ว 220 mm/S



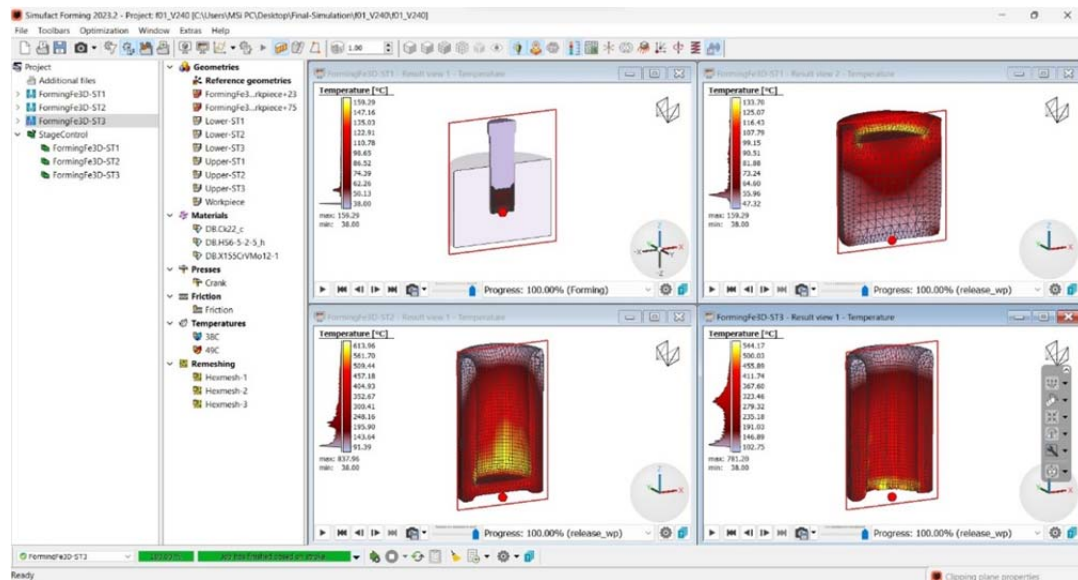
รูปที่ ก.42 ผลการจำลองการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิที่แรงเสียดทาน 0.08 และความเร็ว 240 mm/S



รูปที่ ก.43 ผลการจำลองการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิที่แรงเสียดทาน 0.1 และความเร็ว 200 mm/S



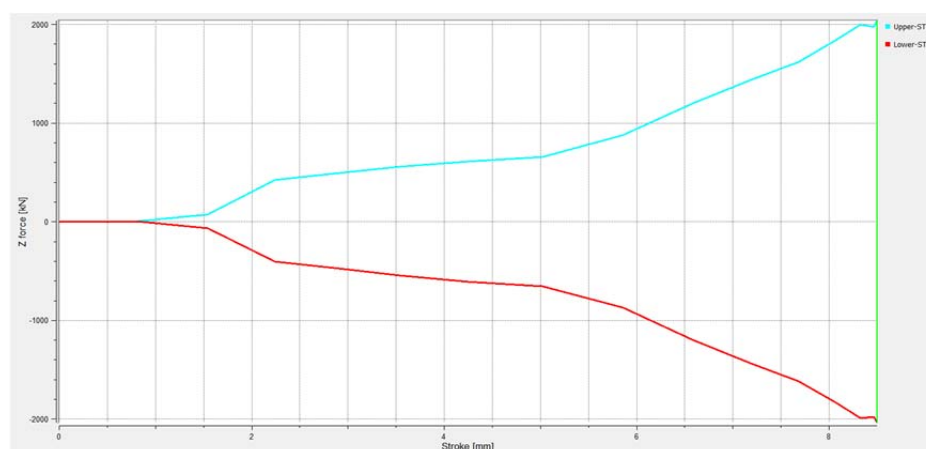
รูปที่ ก.44 ผลการจำลองการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิที่แรงเสียดทาน 0.1 และความเร็ว 220 mm/S



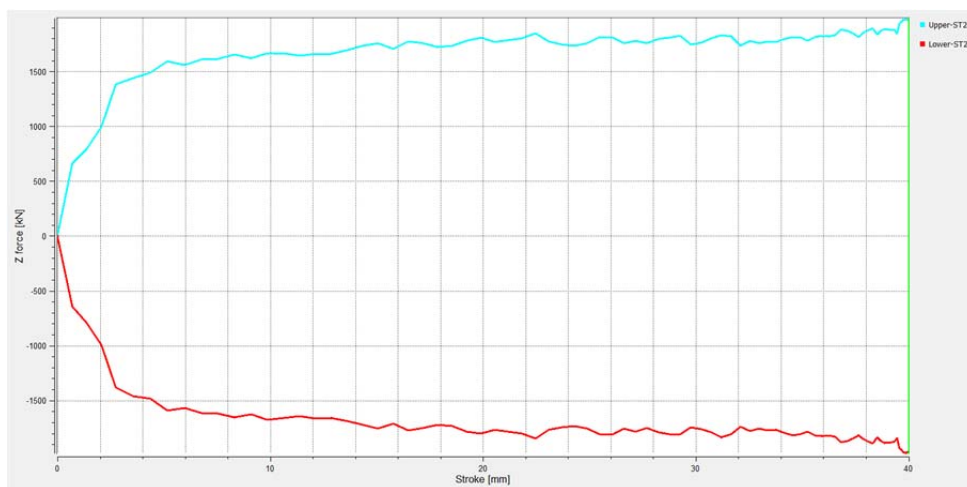
รูปที่ ก.45 ผลการจำลองการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิที่แรงเสียดทาน 0.1 และความเร็ว 240 mm/S

#### ผลลัพธ์จากการจำลองแรงที่กระทำในทิศทางแกน Z (Z-Force)

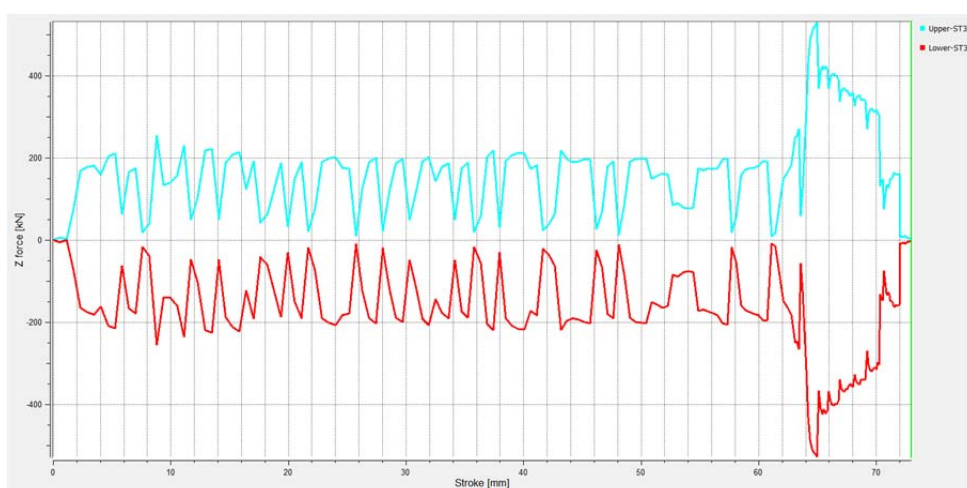
ค่า Z-Force หมายถึง แรงที่กระทำในทิศทางแกน Z ซึ่งในกรณีนี้ก็คือแรงที่หัวกดกระทำต่อชิ้นงานในกระบวนการทุบขึ้นรูป โดย Z-Force เป็นตัวแปรที่สำคัญในการวิเคราะห์การกระจายความเค้น (Stress) และความแข็ง (Hardness) ของชิ้นงาน ข้อมูลนี้สำคัญในการคำนวณขนาดของเครื่องจักรที่ใช้ในกระบวนการผลิต Force จะถูกวิเคราะห์ร่วมกับกราฟ Force-Stroke เพื่อดูว่าการเปลี่ยนแปลงของระยะหัวกดส่งผลต่อแรงอย่างไร นอกจากนี้ยังสามารถใช้ค่า Z-Force เพื่อวิเคราะห์หัวว่าแรงที่ใช้เพียงพอหรือเกินไปในการขึ้นรูปชิ้นงานตามคุณสมบัติที่ต้องการ



รูปที่ ก.46 ค่าแรง Z-Force ที่เกิดในขั้นตอนทุบขึ้นรูปที่ Stage-1



รูปที่ ก.47 ค่าแรง Z-Force ที่เกิดในขั้นตอนทุบขึ้นรูปที่ Stage-2



รูปที่ ก.48 ค่าแรง Z-Force ที่เกิดในขั้นตอนทุบขึ้นรูปที่ Stage-3