



การทำแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของการขึ้นรูปร้อนแผ่นเหล็กกล้าโบราณ

นางสาวณัฐวรรณ โกจารย์ศรี

การศึกษาโครงการเฉพาะเรื่องนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเทคโนโลยีการขึ้นรูปโลหะและนวัตกรรมการผลิต

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

ปีการศึกษา 2557

การทำแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของการขึ้นรูปรีออนแผ่นเหล็กกล้าโบราณ

นางสาวณัฐวรรณ โกจารย์ศรี วศ.บ. (วิศวกรรมอุตสาหการ)

การศึกษาโครงการเฉพาะเรื่องนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีการขึ้นรูปโลหะและนวัตกรรมการผลิต
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ปีการศึกษา 2557

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการสอบโครงการเฉพาะเรื่อง
(ผศ. ดร. กุศล พร้อมมูล)

..... กรรมการ
(รศ. ดร. สุรศักดิ์ สุรนันทชัย)

..... กรรมการ
(ดร. พงษ์ศักดิ์ ถึงสุข)

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

หัวข้อการศึกษาโครงการเฉพาะเรื่อง	การทำแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของการขึ้นรูปร้อนแผ่นเหล็กกล้าโบรอน
หน่วยกิต	6
ผู้เขียน	นางสาวฉัฐวรรณ โกจารย์ศรี
อาจารย์ที่ปรึกษา	รศ.ดร.สุรศักดิ์ สุรนนท์ชัย
หลักสูตร	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	เทคโนโลยีการขึ้นรูปโลหะและนวัตกรรมการผลิต
ภาควิชา	วิศวกรรมเครื่องมือและวัสดุ
คณะ	วิศวกรรมศาสตร์
ปีการศึกษา	2557

บทคัดย่อ

การศึกษาโดยอาศัยวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ของการขึ้นรูปร้อนประกอบด้วยความสัมพันธ์กันของ 3 ส่วนคือ สมบัติเชิงกล เชิงความร้อนและโครงสร้างอนุภาค วัตถุประสงค์ของโครงการเฉพาะเรื่องนี้คือ เพื่อศึกษาการนำโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ไปใช้ในการวิเคราะห์การขึ้นรูปร้อนของโลหะแผ่น โดยศึกษาเฉพาะในส่วนสมบัติเชิงกลและสมบัติเชิงความร้อน โปรแกรมที่ใช้คือ AutoForm R3.1 โดยวัสดุที่ใช้เป็นเหล็กโบรอน 22MnB5 ความหนาขนาด 1 มิลลิเมตร โดยการศึกษานี้ได้แบ่งการดำเนินงานออกเป็น 2 ช่วง คือ ช่วงที่ 1 เป็นการทดสอบความน่าเชื่อถือของแบบจำลอง ไฟไนต์เอลิเมนต์ที่สร้างขึ้น โดยการเปรียบเทียบอุณหภูมิของชิ้นงานที่เปลี่ยนแปลงไปและอัตราการเย็นตัวของชิ้นงานที่ได้จากแบบจำลองกับผลการทดลองจากบทความอ้างอิง เพื่อเป็นการยืนยันว่าแนวทางในการสร้างแบบจำลองมีความถูกต้องเหมาะสม ช่วงที่ 2 เป็นการนำโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ไปทดลองใช้กับการขึ้นรูปลึกชิ้นงานซึ่งขึ้นรูปด้วยอุณหภูมิปกติได้ยาก ทั้งนี้ชิ้นงานดังกล่าวมีรอยฉีกขาดและความหนาของชิ้นงานต่ำกว่าที่ยอมรับได้ โดยพบว่าความเครียดหลักและความเครียดเฉ็งที่เกิดขึ้นในชิ้นงานขึ้นรูปร้อนมีค่าต่ำกว่าชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยวิธีธรรมดา ซึ่งแสดงให้เห็นว่าชิ้นงานขึ้นรูปร้อนมีความสามารถในการขึ้นรูปสูงกว่า การขึ้นรูปร้อนจึงสามารถนำไปใช้เพื่อแก้ปัญหารอยฉีกขาดและความหนาของชิ้นงานต่ำกว่ากำหนดได้ และแบบจำลองจากโปรแกรม ไฟไนต์เอลิเมนต์นี้สามารถนำไปใช้ในการจำลองการขึ้นรูปร้อนก่อนการผลิตจริงเพื่อเพิ่มคุณภาพของชิ้นงาน ลดต้นทุนการผลิตและลดเวลาในการผลิตลงได้

คำสำคัญ : การขึ้นรูปรีออนโลหะแผ่น / วิถีไฟไนต์เอลิเมนต์ / เหล็กโบรอน / ความสามารถในการ
ขึ้นรูป

Special Project Study Title	Finite Element Modeling of Hot Forming of Boron Steel Sheet
Special Project Study Credits	6
Candidate	Ms. Nattawan Kojarayasri
Special Project Study Advisor	Assoc. Prof. Dr. Surasak Suranuntchai
Program	Master of Engineering
Field of Study	Materials Processing Technology and Manufacturing Innovation
Department	Tool and Materials Engineering
Faculty	Engineering
Academic Year	2014

Abstract

The objective of this research was to use the Finite Element Method (FEM) to analyze the thermal and mechanical aspects of the hot forming process for boron steel sheet metal. The commercial FEM software AutoForm R3.1 was used. Boron steel sheet (Grade 22MnB5) with a thickness of 1 mm was simulated. The research was divided into two steps. Firstly, accuracy and reliability testing of the FE model were carried out. The simulation results, in terms of temperature and cooling rate, were compared with experimental results, in order to confirm the optimization of the model. Secondly, the FE software was used to investigate the development of hot stamping to deform a deep drawn part that was cracked and has excessive thinning. It was found that the hot stamping process could decrease major strain and strain hardening, which increased the formability of the part. Thusly, cracks and excessive thinning of the deep drawn parts were eliminated by the hot stamping process. It was concluded that the FE model could be used to improve the quality of deep drawn parts, in addition to reduction of cost and production time.

Keywords: Hot sheet metal forming / Finite Element Method / Boron steel / Formability

กิตติกรรมประกาศ

การจัดทำการศึกษาโครงการเฉพาะเรื่องเล่มนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดีเพราะผู้จัดทำได้รับความอนุเคราะห์จากบุคคลต่างๆในการให้คำแนะนำ คำปรึกษา ตลอดจนการชี้แนะแนวทางในการแก้ปัญหาตลอดระยะเวลาในการจัดทำ ผู้จัดทำต้องขอขอบพระคุณอาจารย์ที่ปรึกษาและผู้ควบคุมการจัดทำโครงการเฉพาะเรื่อง คือ รศ.ดร.สุรศักดิ์ สุรนันทชัย ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.กุศล พร้อมมูล ที่กรุณาเป็นประธานกรรมการสอบ และ ดร.พงษ์ศักดิ์ ถึงสุข อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ที่กรุณาเป็นกรรมการสอบโครงการเฉพาะเรื่องนี้

นอกจากนี้ทางผู้จัดทำขอขอบคุณบริษัท บีเอ็มเอฟที อีบีแซด กรุ๊ป จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้อุปกรณ์คอมพิวเตอร์และโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ขอขอบคุณเพื่อนและพี่น้องนักศึกษาปริญญาโท สาขาวิชาเทคโนโลยีการขึ้นรูปโลหะและนวัตกรรมการผลิต มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรีทุกท่านที่ช่วยเหลือและให้คำแนะนำด้านต่างๆจนกระทั่งโครงการเฉพาะเรื่องนี้เสร็จสมบูรณ์

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ง
กิตติกรรมประกาศ	จ
สารบัญ	ฉ
รายการตาราง	ช
รายการรูปประกอบ	ฌ
รายการสัญลักษณ์	ฎ
ประมวลศัพท์และคำย่อ	ฏ
บทที่	
1. บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของการศึกษาโครงการเฉพาะเรื่อง	1
1.2 วัตถุประสงค์	1
1.3 ขอบเขตของการศึกษา	2
1.4 แผนการดำเนินการศึกษา	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	3
2.1 พื้นฐานกลศาสตร์การเปลี่ยนรูปของโลหะแผ่น	3
2.2 กระบวนการขึ้นรูปรีดโลหะแผ่น	8
2.3 พื้นฐานที่เกี่ยวกับข้องกับการขึ้นรูปรีดโลหะแผ่น	13
2.4 วิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์	15
2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	16
3. วิธีการดำเนินงาน	18
3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์	19
3.2 การทดสอบความน่าเชื่อถือของผลการคำนวณด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์	19
3.3 การเปรียบเทียบการขึ้นรูปรีดกับการขึ้นรูปที่อุณหภูมิปกติ	24

4. ผลการทดลองและการวิเคราะห์	25
4.1 การทดสอบความน่าเชื่อถือของแบบจำลอง	25
4.2 เปรียบเทียบผลจากการจำลองการขึ้นรูปที่อุณหภูมิปกติและขึ้นรูปร้อน	32
4.3 วิเคราะห์ผลการทดลอง	37
5. สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	39
5.1 สรุปผลการทดลอง	39
5.2 ข้อเสนอแนะ	39
เอกสารอ้างอิง	40
ภาคผนวก	48
ก สมบัติของวัสดุ 22MnB5 ที่ใช้ในโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์	42
ข การคำนวณค่าสเกลแฟคเตอร์ของสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนในช่วงขึ้นรูป	51
ค ผลการคำนวณด้วยโปรแกรม AutoForm เพื่อทดสอบความน่าเชื่อถือของแบบจำลอง	55
ง ขั้นตอนการสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของงานขึ้นรูปร้อนโลหะแผ่นโดยโปรแกรม AutoForm	58
ประวัติผู้วิจัย	68

รายการตาราง

ตาราง		หน้า
3.1	ระยะเวลาการดำเนินงานในแต่ละขั้นตอน	19
3.2	ค่าสเกลแฟคเตอร์ของสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่ได้จากการคำนวณ	23
4.1	ค่าความเครียดหลักและความเคี้ยวตรงของจุดบกพร่องบนชิ้นงานขึ้นรูปที่อุณหภูมิปกติ	33
4.2	ค่าความเครียดหลักและความเคี้ยวตรงของจุดที่เคยเป็นจุดบกพร่อง บนชิ้นงานขึ้นรูปร้อน	36
ก.1	ส่วนประกอบทางเคมีของวัสดุ 22MnB5	42
ก.2	สมบัติของวัสดุ 22MnB5	42
ก.3	ค่าความเค้น-ความเคี้ยวของวัสดุ 22MnB5 ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส	43
ก.4	ค่าความเค้น-ความเคี้ยวของวัสดุ 22MnB5 ที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส	44
ก.5	ค่าความเค้น-ความเคี้ยวของวัสดุ 22MnB5 ที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส	45
ก.6	ค่าความเค้น-ความเคี้ยวของวัสดุ 22MnB5 ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส	46
ก.7	ค่าความเค้น-ความเคี้ยวของวัสดุ 22MnB5 ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส	47
ก.8	ค่าความเค้น-ความเคี้ยวของวัสดุ 22MnB5 ที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส	48
ก.9	ขีดจำกัดการขึ้นรูปของวัสดุ 22MnB5 ในงานขึ้นรูปที่อุณหภูมิปกติ	49
ก.10	ขีดจำกัดการขึ้นรูปของวัสดุ 22MnB5 ในงานขึ้นรูปร้อน	49
ค.1	อุณหภูมิของชิ้นงานที่คำนวณได้จากโปรแกรม AutoForm	55

รายการรูปประกอบ

รูป	หน้า
2.1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของโลหะเหนียว	3
2.2 แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูป	7
2.3 เส้นขีดจำกัดการขึ้นรูปของวัสดุที่มีเลขยกกำลังความเครียดแข็งต่างๆ กำหนดโดยใช้เกณฑ์การคอดของสวิตช์	8
2.4 ขั้นตอนการขึ้นรูปร้อนโดยตรง	9
2.5 ขั้นตอนการขึ้นรูปร้อนโดยอ้อม	9
2.6 การให้ความร้อนแก่แผ่นโลหะด้วยวิธีต่างๆ (ก) การแผ่รังสีความร้อน (ข) การเหนี่ยวนำความร้อน (ค) การนำความร้อน	11
2.7 ชุดแม่พิมพ์สำหรับการขึ้นรูปร้อน	12
2.8 ความสัมพันธ์ระหว่างการขึ้นรูป การถ่ายเทความร้อนและ โครงสร้างอนุภาคของการขึ้นรูปร้อน	13
2.9 แผนผังแสดงขั้นตอนการดำเนินงานโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์	15
3.1 แผนภาพแสดงขั้นตอนการดำเนินงาน	18
3.2 รูปร่างและขนาดของแบบจำลองชิ้นงาน	20
3.3 (ก) โครงข่ายแบบจำลองของแม่พิมพ์ (ข) โครงข่ายแบบจำลองของแผ่นวัสดุ	21
3.4 ตำแหน่งของพื้นที่ คาย และแผ่นวัสดุ	21
3.5 แผนภาพแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสเกลแฟกเตอร์ของสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนกับความดัน	23
3.6 แบบจำลองชิ้นงาน Wheelhouse ซ้ายและขวา	24
3.7 แบบจำลองของแม่พิมพ์	25
4.1 ผลจากการจำลองการขึ้นรูปร้อน แสดงอุณหภูมิของแผ่น โลหะเมื่อเคลื่อนย้ายมาถึงแม่พิมพ์	29
4.2 ผลจากการจำลองการขึ้นรูปร้อน แสดงอุณหภูมิของชิ้นงานเมื่อสิ้นสุดการขึ้นรูป	30
4.3 อุณหภูมิกลางชิ้นงานที่ระยะต่างๆจากขอบชิ้นงาน	30
4.4 ผลจากการจำลองการขึ้นรูปร้อน แสดงอุณหภูมิของชิ้นงานเมื่อสิ้นสุดการลดอุณหภูมิ	31
4.5 แผนภาพแสดงอุณหภูมิของชิ้นงานที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลา	32
4.6 การกำหนดขอบเขตการแสดงสีของความสามารถในการขึ้นรูปบนชิ้นงาน	32
4.7 ความสามารถในการขึ้นรูปและจุดบกพร่องของชิ้นงานที่ขึ้นรูปที่อุณหภูมิปกติ	33

รูป	หน้า
4.8 ตำแหน่งจุดบกพร่องของชิ้นงานบนแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูป ขึ้นรูปที่อุณหภูมิปกติ	34
4.9 ค่าความเครียดแข็งของจุดบกพร่องบนชิ้นงานที่ขึ้นรูปที่อุณหภูมิปกติ	34
4.10 ความสามารถในการขึ้นรูปร้อน แสดงจุดที่เคยเป็นจุดบกพร่องจากการขึ้นรูปที่อุณหภูมิปกติ	35
4.11 ตำแหน่งของจุดที่ 1, 2 และ 3 บนแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปร้อน	36
4.12 ค่าความเครียดแข็งบริเวณจุดที่ 1, 2 และ 3 บนชิ้นงานขึ้นรูปร้อน	37
ง.1 แบบจำลองของแม่พิมพ์ที่สร้าง mesh แล้วและการกำหนดขนาดของ mesh	59
ง.2 ขั้นตอนการสร้างแบบจำลองและสร้าง mesh ให้กับแผ่นโลหะ	60
ง.3 การสร้างและกำหนดตำแหน่งของพื้นที่และตาย	61
ง.4 การกำหนดค่า HTC ของชิ้นงาน	62
ง.5 (ก) การกำหนดเวลาในขั้นตอน thermalwait (ข) การกำหนดการเคลื่อนที่ของแม่พิมพ์ในขั้นตอน gravity	63
ง.6 (ก) การกำหนดการเคลื่อนที่ของแม่พิมพ์ในขั้นตอน forming (ข) การกำหนดเวลาการ quenching	64
ง.7 (ก) การเลือกจำนวนชั้นของการแบ่งความหนาของชิ้นงาน (ข) การเลือกค่าที่ต้องการให้โปรแกรมคำนวณ	65
ง.8 แถบสีแสดงผลการคำนวณอุณหภูมิ	66
ง.9 FLD และ Formability ของชิ้นงานเมื่อสิ้นสุดขั้นตอน forming	66
ง.10 การกำหนดขอบเขตการแสดงสีค่า Formability ของชิ้นงาน	67

รายการสัญลักษณ์

a	=	สัมประสิทธิ์ของพอลิโนเมียล
A_i	=	พื้นที่หน้าตัดของวัสดุเมื่อเริ่มเกิดการเปลี่ยนรูปถาวร
F_0	=	แรงที่ทำให้วัสดุเริ่มเกิดการเปลี่ยนรูปถาวร
HTC_{cond}	=	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนจากการพาความร้อน
k	=	ค่าการนำความร้อนของอากาศ
K	=	สัมประสิทธิ์ความแข็งแรงของวัสดุ
$K(T)$	=	สัมประสิทธิ์ความแข็งแรงของวัสดุที่เป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิ
n	=	เลขชี้กำลังของความเครียดแข็ง
$n(T)$	=	เลขชี้กำลังของความเครียดแข็งที่เป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิ
P	=	ความดันสัมผัส
$\dot{\epsilon}$	=	อัตราความเครียด
$\tilde{\epsilon}$	=	ความเครียดจริง
ϵ_1	=	ความเครียดในแกนหลัก
ϵ_2	=	ความเครียดในแกนรอง
$\epsilon(T)$	=	ความเครียดจริงที่เป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิ
λ	=	พารามิเตอร์ของความเรียบผิวของแม่พิมพ์
$\tilde{\sigma}$	=	ความเค้นจริง
σ_1	=	ความเค้นในแกนหลัก
σ_2	=	ความเค้นในแกนรอง
σ_0	=	ความเค้นคราก
σ_0	=	ความเค้นคราก
$\sigma_0(T)$	=	ความเค้นครากที่เป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิ
$\tilde{\sigma}(T)$	=	ความเค้นจริงที่เป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิ

ประมวลศัพท์และคำย่อ

Blank holder	=	แผ่นจับยึดวัสดุ
Conduction	=	การนำ
Contact pressure	=	ความดันสัมผัส
Convection	=	การพา
Elastic deformation	=	การเปลี่ยนรูปในช่วงยืดหยุ่น
Forming	=	การขึ้นรูป
Formability	=	ความสามารถในการขึ้นรูป
Forming limit diagram	=	แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูป
Fracture stress	=	ความเค้นแตกหัก
Heat transfer	=	การถ่ายเทความร้อน
Heat transfer coefficient	=	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน
Induction	=	การเหนี่ยวนำ
Major strain	=	ความเครียดหลัก
Mesh	=	โครงตาข่าย
Microstructure	=	โครงสร้างอนุภาค
Minor strain	=	ความเครียดรอง
Necking	=	การคอด
Necking criteria	=	เกณฑ์การคอด
Plastic deformation	=	การเปลี่ยนรูปในช่วงพลาสติก
Radiation	=	การแผ่รังสี
Recrystallization temperature	=	อุณหภูมิการเกิดผลึกใหม่
Strain hardening	=	ความเครียดแข็ง
Strain hardening coefficient	=	ความเครียดแข็ง
Strength coefficient	=	สัมประสิทธิ์ความแข็งแรง
Ultimate stress	=	ความเค้นสูงสุด
Yield criteria	=	เกณฑ์การคราก
Yield stress	=	ความเค้นคราก

บทที่ 1 บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของการศึกษาโครงการเฉพาะเรื่อง

ในปัจจุบันอุตสาหกรรมยานยนต์มีการพัฒนาอย่างรวดเร็วทั้งในด้านคุณภาพ ความสวยงาม การลดต้นทุน และการลดระยะเวลาในการผลิต ชิ้นส่วนยานยนต์ที่ผลิตจากโลหะแผ่นมีแนวโน้มที่จะใช้วัสดุที่เป็นเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงมากยิ่งขึ้น เนื่องจากช่วยลดน้ำหนักและเพิ่มความแข็งแรงให้กับยานยนต์ นอกจากนี้รูปร่างของชิ้นงานในปัจจุบันยังซับซ้อนมากขึ้น ต้องการความสวยงาม และต้องการความเที่ยงตรง ส่งผลให้บางครั้งการผลิตด้วยวิธีดั้งเดิมไม่สามารถผลิตชิ้นงานที่มีคุณภาพตามต้องการได้ มักเกิดปัญหาชิ้นงานเสียหาย การควบคุมความเที่ยงตรงทำได้ยาก ต้องเสียเวลาในการลองผิดลองถูกหลายครั้งในขั้นตอนการผลิตแม่พิมพ์ ทำให้มีต้นทุนด้านแรงงานและด้านวัสดุสูงขึ้น

การผลิตชิ้นส่วนยานยนต์ที่ทำจากโลหะแผ่นด้วยวิธีขึ้นรูปร้อนโลหะแผ่น (hot sheet metal forming) เป็นวิธีที่ได้รับการพัฒนาขึ้นเพื่อให้สามารถผลิตชิ้นส่วนที่ผลิตด้วยวิธีธรรมดาได้ยาก ทำให้สามารถขึ้นรูปชิ้นงานทั้งหมดได้ในขั้นตอนเดียว และเป็นการเพิ่มความแข็งแรงให้กับวัสดุได้อีกด้วย นอกจากนี้ในปัจจุบันยังมีการนำวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มาใช้วิเคราะห์ผลที่ได้จากการขึ้นรูปร้อน สามารถทำการแก้ไขข้อบกพร่องและหาค่าต่างๆที่เหมาะสมก่อนทำการผลิตจริง ช่วยลดเวลาและวัสดุที่ใช้ในการลองผิด ลองถูก การขึ้นรูปร้อนและการใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จึงเหมาะสมอย่างยิ่งกับการผลิตชิ้นส่วนยานยนต์ที่มีแนวโน้มจะใช้โลหะแผ่นที่มีความแข็งแรงสูง มีรูปร่างที่ซับซ้อน และต้องการความเที่ยงตรงสูงในปัจจุบันและอนาคต ด้วยเหตุผลดังกล่าวจึงได้เกิดแนวคิดที่จะทำการศึกษการใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในการขึ้นรูปร้อนโลหะแผ่น เพื่อทำนายและวิเคราะห์ผลการขึ้นรูปกับผลการทดลองจริง

1.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาการประยุกต์ใช้แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับวิเคราะห์การขึ้นรูปร้อนโลหะแผ่น 22MnB5
2. เพื่อศึกษาสมบัติของชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูปร้อนเปรียบเทียบกับชิ้นงานที่ขึ้นรูปที่อุณหภูมิปกติ

1.3 ขอบเขตของการศึกษา

1. ประยุกต์ใช้โปรแกรมทางไฟไนต์เอลิเมนต์ AutoForm R3.1 ในการจำลองการขึ้นรูปรีออนชิ้นงาน Rail โดยดูเฉพาะการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและอัตราการเย็นตัว
2. วัสดุที่ทำการศึกษาคือ 22MnB5 หนา 1.0 มิลลิเมตร
3. เปรียบเทียบความสามารถในการขึ้นรูปของชิ้นงาน Wheel house ที่อุณหภูมิปกติกับการขึ้นรูปรีออน

1.4 แผนการดำเนินงาน

1. ศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้องและคัดเลือกงานวิจัยที่จะนำผลการทดลองมาเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์
2. ศึกษาการสร้างแบบจำลองการขึ้นรูปรีออนด้วยโปรแกรม AutoForm
3. เตรียมข้อมูลสำหรับการจำลองการขึ้นรูปรีออน
4. ใช้โปรแกรม AutoForm ในการคำนวณอุณหภูมิและอัตราการลดอุณหภูมิ นำผลที่ได้มาเปรียบเทียบกับผลการทดลองเพื่อทดสอบความแม่นยำของผลการคำนวณด้วยโปรแกรม
5. ใช้โปรแกรม AutoForm ในการคำนวณความสามารถในการขึ้นรูป และเปรียบเทียบผลการคำนวณระหว่างการขึ้นรูปรีออนและการขึ้นรูปที่อุณหภูมิปกติ
6. วิเคราะห์และสรุปผลการดำเนินงาน

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

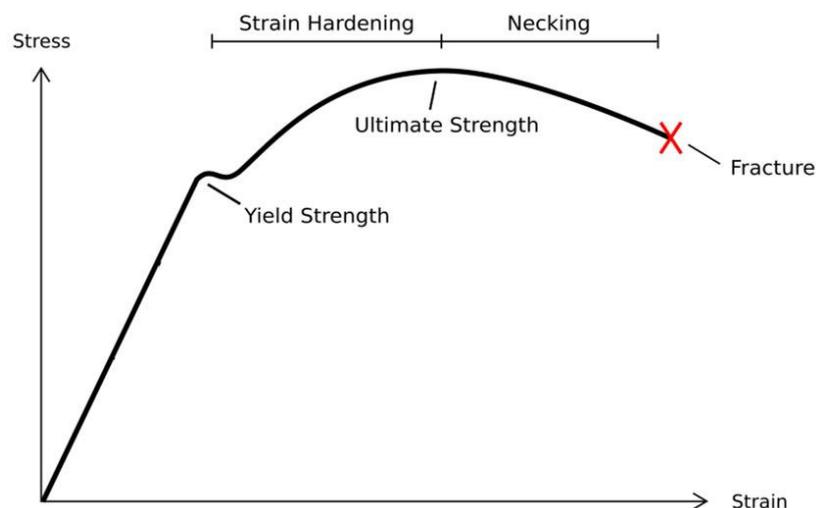
1. พัฒนาแนวคิดในการใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์กับงานขึ้นรูปรีออนโลหะแผ่น
2. นำผลการวิจัยไปประยุกต์ใช้เป็นข้อมูลในการขึ้นรูปรีออน โลหะแผ่นชนิดต่างๆ และชิ้นงานลักษณะต่างๆ

บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 พื้นฐานกลศาสตร์การเปลี่ยนรูปของโลหะแผ่น

เมื่อมีแรงภายนอกมากระทำ วัสดุจะเกิดการยืดตัวทำให้รูปร่างเปลี่ยนแปลงไป การเปลี่ยนรูปของวัสดุแบ่งออกได้เป็นสองช่วงใหญ่ๆ คือ ช่วงยืดหยุ่น (elastic deformation) ซึ่งหากลดแรงกระทำลงจะทำให้วัสดุกลับคืนสู่สภาพเดิม และช่วงพลาสติก (plastic deformation) ซึ่งวัสดุมีการเปลี่ยนรูปอย่างถาวร ในการขึ้นรูปโลหะแผ่นต้องให้แรงกระทำจนวัสดุเข้าสู่การเปลี่ยนรูปในช่วงพลาสติก

การเปลี่ยนรูปในช่วงพลาสติกประกอบด้วยสามช่วง คือ ช่วงคราก ช่วงความเครียดแข็ง (strain hardening) และช่วงคอด (necking) ดังที่แสดงในกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของโลหะเหนียว

ในช่วงครากวัสดุเริ่มเกิดการเปลี่ยนรูปถาวร ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดจะเริ่มไม่เป็นเส้นตรง ความเค้น ณ จุดนี้เรียกว่า ความเค้นคราก (yield stress) จากนั้นโครงสร้างของวัสดุจะเกิดการเปลี่ยนแปลงทำให้วัสดุสามารถรับแรงได้มากขึ้นกว่าเดิม เรียกพฤติกรรมนี้ว่า ความเครียดแข็ง (strain hardening) และความเค้นมากที่สุดที่เกิดขึ้นกับวัสดุเรียกว่า ความเค้นสูงสุด (ultimate stress)

ซึ่งเป็นจุดเปลี่ยนเข้าสู่ช่วงคอด วัสดุจะยึดตัวอย่างรวดเร็วจนขาดออกจากกันในที่สุด ความเค้นที่ทำให้วัสดุขาดจากกันเรียกว่า ความเค้นแตกหัก (fracture stress)

2.1.1 ทฤษฎีการคราก (Yield criteria) [1]

ในช่วงครากวัสดุเริ่มเกิดการเปลี่ยนรูปถาวร ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดจะเริ่มไม่เป็นเส้นตรง ความเค้น ณ จุดนี้เรียกว่า ความเค้นคราก (yield stress) คำนวณได้จากสมการ (2.1)

$$\sigma_0 = F_0/A_1 \quad (2.1)$$

เมื่อ F_0 = แรงที่ทำให้วัสดุเริ่มเกิดการเปลี่ยนรูปถาวร

A_1 = พื้นที่หน้าตัดของวัสดุเมื่อเริ่มเกิดการเปลี่ยนรูปถาวร

หากความเค้นรวมที่เกิดขึ้นในวัสดุมีค่าสูงกว่าหรือเท่ากับความเค้นคราก ชิ้นงานจะเริ่มเกิดการเปลี่ยนรูปถาวร ซึ่งเกณฑ์การคราก (yield criteria) ที่นำมาใช้ในการศึกษานี้คือ ทฤษฎีการครากของฮิล

ทฤษฎีการครากของฮิลจะพิจารณาสมบัติแอนไอโซทรอปิก (anisotropic) ของวัสดุ ซึ่งเป็นสมบัติทางกลอย่างหนึ่งของโลหะแผ่นที่ผ่านกรรมวิธีการรีด สมมุติฐานของฮิลคือวัสดุมีเนื้อสม่ำเสมอและสมมาตรกัน สมการ (2.2) คือสมการการครากของฮิล

$$F(\sigma_y - \sigma_z)^2 + G(\sigma_z - \sigma_x)^2 + 2L\tau_{xy}^2 + 2M\tau_{zx}^2 + 2N\tau_{xy}^2 = 1 \quad (2.2)$$

เมื่อ F, G, H, L, M และ N คือค่าคงตัวซึ่งเป็นคุณลักษณะของวัสดุในแต่ละทิศทาง

เมื่อพิจารณาในเทอมของความเค้นหลักจะได้

$$F(\sigma_2 - \sigma_3)^2 + G(\sigma_3 - \sigma_1)^2 + H(\sigma_1 - \sigma_2)^2 = 1 \quad (2.3)$$

ถ้ากำหนดให้ X คือความเค้นครากในทิศทาง x

Y คือความเค้นครากในทิศทาง y

Z คือความเค้นครากในทิศทาง z

เมื่อทดสอบแรงดึงในทิศทาง x ดังนั้น $\sigma_1 = X$, $\sigma_2 = \sigma_3 = 0$ แทนลงในสมการที่ (2.3) จะได้

$$X^2 = \frac{1}{G+H} \quad (2.4)$$

ในทำนองเดียวกัน เมื่อทดสอบการดึงในทิศทาง y และ z จะได้

$$Y^2 = \frac{1}{H+F} \quad (2.5)$$

$$Z^2 = \frac{1}{F+G} \quad (2.6)$$

หากพิจารณาในลักษณะความเค้นระนาบ σ_3 จะเกิดขึ้นน้อยมากจนสามารถให้เป็นศูนย์ได้ ดังนั้นสมการ (2.3) สามารถเขียนได้ดังนี้

$$F\sigma_2^2 + G\sigma_1^2 + H(\sigma_1^2 - 2\sigma_1\sigma_2 + \sigma_2^2) = 1 \quad (2.7)$$

หรือ

$$(G+H)\sigma_1^2 + (F+H)\sigma_2^2 - 2H\sigma_1\sigma_2 = 1 \quad (2.8)$$

เมื่อแทนค่าสมการ (2.4) และ (2.5) ลงใน (2.8) จะได้

$$\left(\frac{\sigma}{X}\right)^2 + \left(\frac{\sigma}{Y}\right)^2 - 2HY\left(\frac{\sigma}{XY}\right) = 1 \quad (2.9)$$

เมื่อความเค้นครากในระนาบมีค่าเท่ากันทุกทิศทาง นั่นคือ $X = Y$ ดังนั้น

$$\sigma_1^2 + \sigma_2^2 - 2HY^2\sigma_1\sigma_2 = Y^2 \quad (2.10)$$

2.1.2 ความเครียดแข็ง [1]

หลังจากผ่านช่วงครากไปแล้วโครงสร้างของวัสดุจะเกิดการเปลี่ยนแปลงทำให้วัสดุสามารถรับแรงได้มากขึ้นกว่าเดิม เรียกพฤติกรรมนี้ว่า ความเครียดแข็ง ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นจริงและความเครียดจริงในช่วงความเครียดแข็งสามารถแทนได้ด้วยสมการของ Ludwik (2.11)

$$\tilde{\sigma} = \sigma_0 + K\tilde{\epsilon}^n \quad (2.11)$$

เมื่อ $\tilde{\sigma}$ = ความเค้นจริง

σ_0 = ความเค้นคราก

K = สัมประสิทธิ์ความแข็งแรงของวัสดุ (strength coefficient)

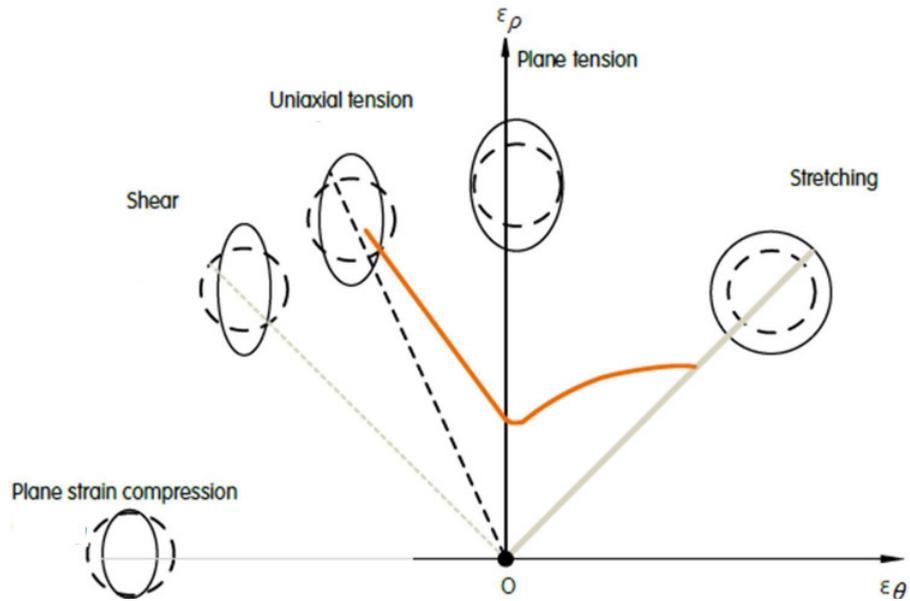
$\tilde{\epsilon}$ = ความเครียดจริง

n = เลขยกกำลังของความเครียดแข็ง (strain hardening exponent)

2.1.3 แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูป

เมื่อโลหะได้รับแรงกระทำจนกระทั่งเกิดความเค้นเท่ากับและมากกว่าความเค้นสูงสุด โลหะจะเริ่มบางลง การยืดตัวเป็นไปอย่างรวดเร็วจนขาดออกจากกัน ในที่สุด แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูป (forming limit diagram) ใช้แสดงขอบเขตที่ขึ้นงานเริ่มเกิดการคอด โดยอธิบายจากค่าความเครียดหลัก (major strain) และความเครียดรอง (minor strain) ของขึ้นงาน

แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปสร้างขึ้นมาได้จากการทดลองโดยการขึ้นรูปโลหะแผ่นที่มีรูปวงกลมขนาดและระยะห่างสม่ำเสมออยู่ทั่วแผ่น วงกลมจะเกิดการเปลี่ยนแปลงขนาดไปตามลักษณะความเครียดที่เกิดขึ้นกับวัสดุบริเวณนั้น จากนั้นวัดขนาดของวงกลมหลังการขึ้นรูปโดยให้ความเครียดของด้านที่มีขนาดใหญ่ที่สุดเป็นความเครียดหลัก และความเครียดของด้านที่มีขนาดเล็กที่สุดเป็นความเครียดรอง เมื่อนำมาสร้างแผนภาพระหว่างความเครียดหลักกับความเครียดรองจะเกิดเส้นขีดจำกัดการขึ้นรูปดังตัวอย่างในรูปที่ 2.2 เมื่อ ϵ_p คือความเค้นหลัก และ ϵ_0 คือความเค้นรอง ขึ้นงานบริเวณที่มีความเค้นอยู่เหนือเส้นขีดจำกัดการขึ้นรูปจะเกิดการคอด



รูปที่ 2.2 แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูป [2]

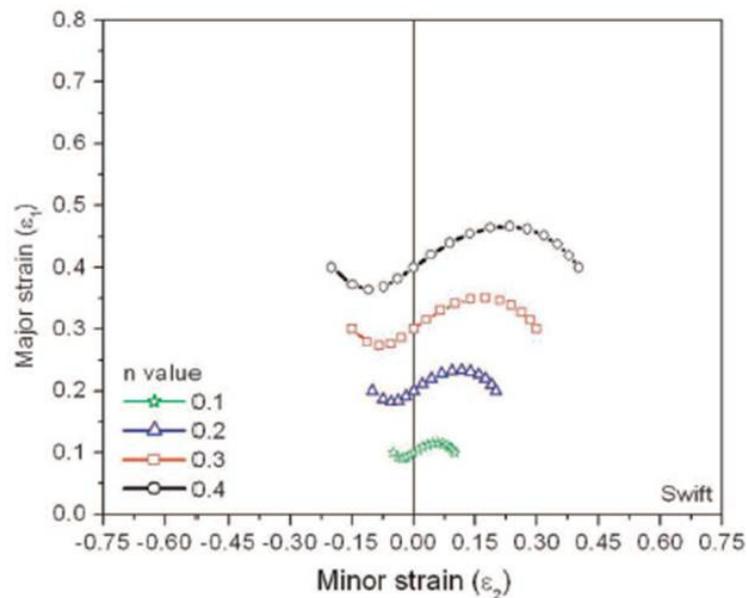
นอกจากเส้นขีดจำกัดการขึ้นรูปจะสามารถหาได้จากการทดลองแล้ว ยังมีผู้คิดทฤษฎีที่ใช้คำนวณเส้นขีดจำกัดการขึ้นรูปอีกด้วย

เกณฑ์การคอดของสวิตต์ (Swift necking criteria) [2] อธิบายไว้ว่า รอยคอดจะเริ่มขยายตัวเมื่อวัสดุได้รับแรงกระทำที่ทำให้เกิดความเค้นสูงสุด (ultimate stress) ขึ้นในแกนหลักทั้งสองแกน ความเค้นหลัก (ϵ_1) และความเค้นรอง (ϵ_2) สามารถแสดงด้วยเมตริกซ์ได้ตามสมการ (2.12)

$$\begin{pmatrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{2n(2-\beta)(1-\beta+\beta^2)}{4-3\beta-3\beta^2+4\beta^3} \\ -\frac{2n(2-\beta)(1-\beta+\beta^2)}{4-3\beta-3\beta^2+4\beta^3} \end{pmatrix} \quad (2.12)$$

เมื่อ n คือเลขยกกำลังของความเครียดแข็ง และ $\beta = \sigma_2/\sigma_1$ เมื่อ σ_1 และ σ_2 คือความเค้นในแกนหลักและแกนรองตามลำดับ

รูปที่ 2.3 เป็นการคำนวณเส้นขีดจำกัดการขึ้นรูปด้วยเกณฑ์การคอดของสวิตต์ เปรียบเทียบกันระหว่างเส้นวัสดุที่มีค่าเลขยกกำลังของความเครียดแข็งต่างๆกัน จะเห็นว่าวัสดุที่มีเลขยกกำลังของความเครียดแข็งสูงกว่าจะมีเส้นขีดจำกัดการขึ้นรูปอยู่สูงกว่า นั่นคือมีความสามารถในการขึ้นรูป (formability) มากกว่า

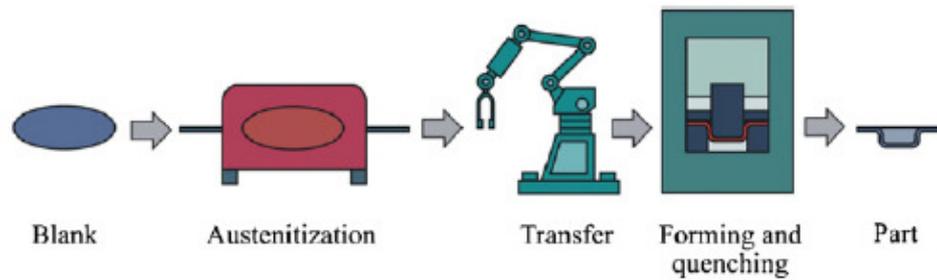


รูปที่ 2.3 เส้นขีดจำกัดการขึ้นรูปของวัสดุที่มีเลขยกกำลังความเครียดแข็งต่างๆ คำนวณโดยใช้เกณฑ์การคอดของสวิตต์ [2]

2.2 กระบวนการขึ้นรูปร้อนโลหะแผ่น

การขึ้นรูปร้อน คือการให้ความร้อนกับวัสดุจนกระทั่งเกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างอนุภาค เพื่อช่วยให้วัสดุสามารถขึ้นรูปได้ง่าย แบ่งเป็น 2 ลักษณะ คือการขึ้นรูปร้อนโดยตรง และการขึ้นรูปร้อนโดยอ้อม

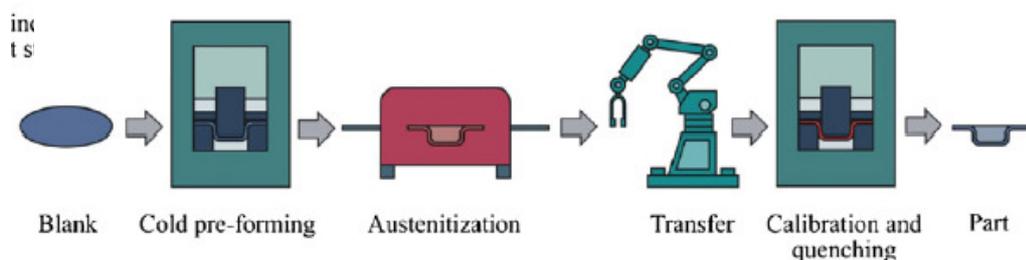
การขึ้นรูปร้อนโดยตรง เริ่มต้นจากการตัดแผ่นโลหะให้ได้รูปร่างและขนาดตามต้องการ จากนั้นให้ความร้อนแก่โลหะแผ่นจนกระทั่งโครงสร้างภายในของโลหะเปลี่ยนเป็นออสเทนไนต์ทั้งหมด และเคลื่อนย้ายแผ่นโลหะไปยังแม่พิมพ์ซึ่งมีระบบหล่อเย็น สามารถควบคุมให้ชิ้นงานเย็นตัวลงด้วยอัตราเย็นและอุณหภูมิที่ต้องการ เมื่อขึ้นรูปชิ้นงานแล้วจึงนำชิ้นงานไปผ่านกระบวนการตัดขอบ เจาะรูด้วยเลเซอร์ หรือกระบวนการอื่นๆที่จำเป็นต่อไปเพื่อให้ได้ชิ้นงานสำเร็จ [3] ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 ขั้นตอนการขึ้นรูปร้อนโดยตรง

การขึ้นรูปร้อนโดยตรง ใช้แม่พิมพ์เพียงชุดเดียว ช่วยลดต้นทุนในการผลิต แต่ข้อจำกัดของวิธีการผลิตแบบนี้คือ เหมาะกับชิ้นงานที่ไม่ซับซ้อนมากนัก ระบบหล่อเย็นของแม่พิมพ์มีความซับซ้อน ออกแบบได้ยาก และจำเป็นต้องมีการตัดด้วยเลเซอร์ภายหลังการขึ้นรูป

การขึ้นรูปร้อนโดยอ้อม เริ่มต้นจากการตัดแผ่นโลหะให้ได้รูปร่างและขนาดตามต้องการเช่นเดียวกับการขึ้นรูปร้อนโดยตรง แต่หลังจากนั้นต้องนำชิ้นงานไปขึ้นรูป ตัด เจาะ ด้วยวิธีการซึ่งไม่ใช้ความร้อนเพื่อให้ได้รูปร่างของชิ้นงานบางส่วนก่อน จากนั้นจึงนำเข้าเตาอบเพื่อให้ความร้อนแก่ชิ้นงาน และนำชิ้นงานไปขึ้นรูปในแม่พิมพ์ที่มีระบบหล่อเย็น จากนั้นจึงนำชิ้นงานไปผ่านกระบวนการอื่นๆ เช่น การตัดขอบหรือเจาะรูด้วยเลเซอร์ต่อไป [3] ดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 ขั้นตอนการขึ้นรูปร้อนโดยอ้อม

การขึ้นรูปร้อนโดยอ้อมสามารถขึ้นรูปชิ้นงานที่มีความซับซ้อนได้ และการตัด เจาะรูชิ้นงานก่อนการขึ้นรูปร้อนชิ้นงานจะมีความแข็งแรงน้อยกว่า เนื่องจากหลังจากขึ้นรูปร้อนแล้วความแข็งแรงของชิ้นงานจะเพิ่มขึ้น และการตัด เจาะด้วยแม่พิมพ์มีค่าใช้จ่ายน้อยกว่าการใช้เลเซอร์

กระบวนการขึ้นรูปรีออนมีขั้นตอนหลักคือ ให้ความร้อนแก่แผ่นโลหะ เคลื่อนย้ายแผ่นโลหะไปยังแม่พิมพ์ และขึ้นรูปพร้อมกับทำให้ชิ้นงานเย็นตัวไปพร้อมกัน

2.2.1 การให้ความร้อนแก่แผ่นโลหะ [4]

อุณหภูมิที่ให้กับชิ้นงานต้องสูงกว่าอุณหภูมิการเกิดผลึกใหม่ (recrystallization temperature) ของวัสดุ เพื่อให้โครงสร้างภายในของวัสดุเปลี่ยนไปเป็นออสเทนไนต์ แต่หากอุณหภูมิที่ใช้สูงเกินไปจะทำให้ผิวของวัสดุไหม้ได้ และทำให้เกรนมีขนาดใหญ่มาก มีผลต่อสมบัติของโลหะ เวลาที่ให้ความร้อนแก่โลหะก็มีอิทธิพลต่อโครงสร้างของโลหะเช่นเดียวกัน เวลาที่ให้ความร้อนต้องนานพอที่จะทำให้โครงสร้างภายในเปลี่ยนเป็นออสเทนไนต์ทั้งหมด แต่หากนานเกินไปจะทำให้เกรนมีขนาดใหญ่มาก ส่งผลต่อสมบัติของโลหะและยังทำให้เป็นการเพิ่มเวลาในการผลิตโดยไม่จำเป็นอีกด้วย

แผ่นโลหะได้รับความร้อนจากปรากฏการณ์ต่างๆ คือ การแผ่รังสีความร้อน (radiation) การเหนี่ยวนำความร้อน (induction) และการนำความร้อน (conduction)

2.2.1.1 การแผ่รังสีความร้อน

ให้ความร้อนแก่แผ่นโลหะด้วยการการแผ่รังสี เป็นการเคลื่อนชิ้นงานผ่านเข้าไปในเตาด้วยโรลเลอร์ ให้ความร้อนจากเตาแผ่เข้าไปในโลหะ เวลาที่ให้ชิ้นงานอยู่ในเตามีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างภายในของวัสดุ โดยเฉพาะวัสดุที่มีการเคลือบ

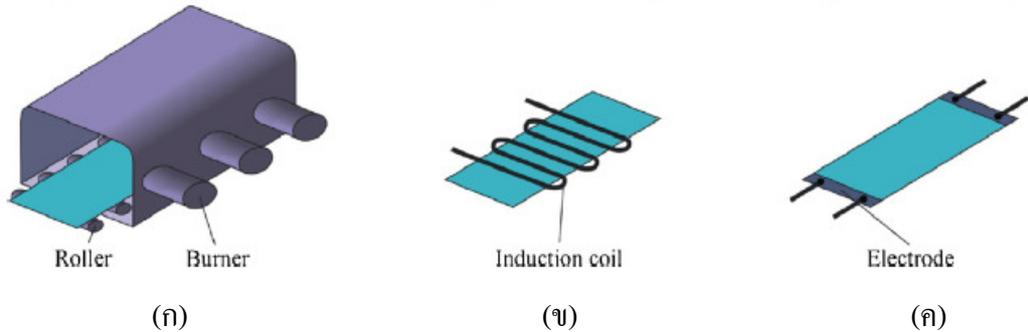
2.2.1.2 การเหนี่ยวนำความร้อน

การทำให้เกิดความร้อนโดยการเหนี่ยวนำโดยวางขดลวดไปตามรูปร่างของชิ้นงาน จากนั้นปล่อยกระแสไฟฟ้าไปในขดลวดทำให้เกิดสนามแม่เหล็กขึ้น ประสิทธิภาพของระบบให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำขึ้นอยู่กับระยะระหว่างแผ่นโลหะกับขดลวด หากเปรียบเทียบวิธีการนี้กับการใช้เตาแผ่รังสีความร้อน วิธีการนี้สามารถใช้พลังงานได้อย่างมีประสิทธิภาพมากกว่า

2.2.1.3 การนำความร้อน

การนำความร้อนมีวิธีการคือ จับยึดแผ่นโลหะทั้งสองด้านด้วยอิเล็กโทรด จากนั้นปล่อยกระแสไฟฟ้าให้ไหลผ่านแผ่นโลหะทำให้เกิดความร้อนขึ้นในแผ่นโลหะ ความต้านทานไฟฟ้าของโลหะมีผลเป็น

อย่างมากต่อความร้อนที่เกิดขึ้น ข้อจำกัดของวิธีนี้คือไม่เหมาะกับแผ่นโลหะที่มีความยาวมาก และความร้อนที่ได้ไม่สม่ำเสมอทั้งแผ่น



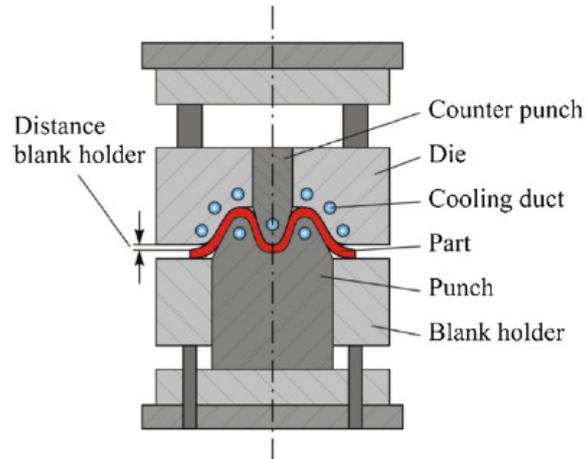
รูปที่ 2.6 การให้ความร้อนแก่แผ่นโลหะด้วยวิธีต่างๆ (ก) การแผ่รังสีความร้อน (ข) การเหนี่ยวนำความร้อน (ค) การนำความร้อน

2.2.2 การเคลื่อนย้ายแผ่นโลหะ

การเคลื่อนย้ายโลหะแผ่นจากเตาอบไปยังแม่พิมพ์ควรใช้เวลาให้น้อยที่สุด เพื่อให้แผ่นโลหะเกิดการสูญเสียความร้อนน้อยที่สุด การสูญเสียความร้อนจากแผ่นโลหะไปสู่สถานะแวดล้อมเกิดได้จาก 2 วิธี คือ การพาความร้อน (convection) และการแผ่รังสีความร้อน (radiation) หากเวลาที่ใช้ในการเคลื่อนย้ายมากเกินไปแผ่นโลหะจะเกิดการออกซิเดชัน นอกจากนั้นหากอุณหภูมิของโลหะลดต่ำลงมากก่อนการขึ้นรูป โครงสร้างภายในของโลหะจะเปลี่ยนไปเป็นเบนไนต์และเฟอไรต์ซึ่งมีผลต่อสมบัติของโลหะ

2.2.3 การขึ้นรูปและลดอุณหภูมิ

ในการขึ้นรูปชิ้นงานจะต้องมีการลดอุณหภูมิของชิ้นงานลงพร้อมกันไปด้วยเพื่อให้โครงสร้างอนุภาคของวัสดุเกิดการเปลี่ยนแปลง อุปกรณ์ในการขึ้นรูปร้อนที่สำคัญได้แก่ ชุดแม่พิมพ์ที่มีการหล่อเย็นและระบบการหล่อเย็น ตามรูปที่ 2.7 โดยการหล่อเย็นอาจมีทั้งที่พื้นซ์และคาย หรือมีเฉพาะพื้นซ์หรือคายอย่างใดอย่างหนึ่งก็ได้



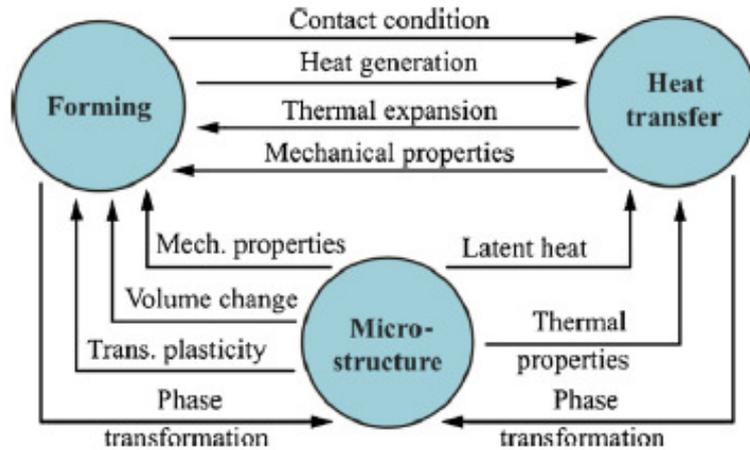
รูปที่ 2.7 ชุดแม่พิมพ์สำหรับการขึ้นรูปร้อน

การขึ้นรูปร้อนต้องขึ้นรูปชิ้นงานอย่างรวดเร็วโดยใช้เครื่องไฮดรอลิกเพื่อให้อุณหภูมิของชิ้นงานลดลงน้อยที่สุดในระหว่างการขึ้นรูป แต่อัตราการขึ้นรูปมากเกินไปก็ทำให้ชิ้นงานเสียหายได้เช่นกัน จากนั้นในขั้นตอนการลดอุณหภูมิชิ้นงานก็ควรทำให้อัตราการเย็นตัวของชิ้นงานสูงกว่าค่าอัตราการเย็นตัววิกฤติ เพื่อทำให้ออสเทนไนต์เปลี่ยนเป็นมาร์เทนไซต์โดยตรงโดยไม่เกิดเบนไนต์ขึ้นก่อน แม่พิมพ์สำหรับการขึ้นรูปร้อนต้องสามารถทนต่ออัตราการเย็นตัวที่ใช้ในงานขึ้นรูปได้ นอกจากนี้แม่พิมพ์ยังต้องสามารถดูดซับพลังงานที่เกิดจากการเกรเดียนต์อุณหภูมิ (temperature gradient) และรับความเค้นสูงที่ผิวของแม่พิมพ์ได้อีกด้วย

ผิวของแม่พิมพ์สามารถแบ่งตามลักษณะการใช้งานได้เป็น ประเภทที่เน้นการรับแรงและประเภทที่เน้นด้านอุณหภูมิ เนื่องจากความดันสัมผัส (contact pressure) ที่เกิดขึ้นที่ผิวแม่พิมพ์มีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (heat transfer coefficient) ของแม่พิมพ์ ดังนั้นผิวของแม่พิมพ์จึงควรจะมีคุณสมบัติเด่นชัด มีช่องว่างระหว่างผิวสัมผัสที่สม่ำเสมอ และวัสดุที่ใช้ผลิตแม่พิมพ์ต้องมีความต้านทานการสึกหรอ (wear resistance) ที่ดี วัสดุที่ใช้ผลิตแม่พิมพ์ควรมีทั้งความต้านทานการสึกหรอสำหรับช่วงอุณหภูมิการใช้งานที่กว้างและการนำความร้อนที่ดี การเติมอัลลอยในโลหะอาจช่วยทำให้ความแข็งของโลหะเพิ่มขึ้น แต่ก็มีผลทำให้การนำความร้อนลดลงได้

2.3 พื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับการขึ้นรูปร้อนโลหะแผ่น

การขึ้นรูปร้อนประกอบด้วยความสัมพันธ์ระหว่างการถ่ายเทความร้อน (heat transfer) การขึ้นรูป (forming) และโครงสร้างอนุภาค (microstructure) ซึ่งมีความสัมพันธ์กันดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 ความสัมพันธ์ระหว่างการขึ้นรูป การถ่ายเทความร้อนและโครงสร้างอนุภาคของการขึ้นรูปร้อน [4]

2.3.1 ความเครียดแข็ง [3]

ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของวัสดุในการขึ้นรูปร้อนในช่วงความเครียดแข็งแสดงได้ตามสมการที่ (2.14)

$$\tilde{\sigma}(T) = \sigma_0(T) + K(T)\tilde{\epsilon}(T)^{n(T)} \tag{2.12}$$

เมื่อ $\tilde{\sigma}(T)$ = ความเค้นจริงที่เป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิ

$\sigma_0(T)$ = ความเค้นครากที่เป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิ

$\tilde{\epsilon}(T)$ = ความเครียดจริงที่เป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิ

$K(T)$ = สัมประสิทธิ์ความแข็งแรงของวัสดุที่เป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิ

$n(T)$ = เลขชี้กำลังของความเครียดแข็งที่เป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิ

2.3.2 สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน [5]

สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (heat transfer coefficient) มีความสำคัญอย่างมากต่อการขึ้นรูปรีออน และในแต่ละช่วงของกระบวนการขึ้นรูปรีออนมีวิธีการถ่ายเทความร้อนที่แตกต่างกันออกไป

2.3.2.1 ช่วงเคลื่อนย้ายแผ่นโลหะ

ในช่วงนี้แผ่นโลหะจะสูญเสียความร้อนให้แก่สภาพแวดล้อม การสูญเสียความร้อนเกิดได้จาก 2 วิธี คือ การพาความร้อนและการแผ่รังสี สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมในช่วงเคลื่อนย้ายแผ่นโลหะจะเท่ากับผลรวมของสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนจากการพาความร้อน กับสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนจากการแผ่รังสี

2.3.2.1 ช่วงขึ้นรูปและทำให้เย็นตัว

ในช่วงนี้แผ่นโลหะจะสูญเสียความร้อนให้แก่แม่พิมพ์โดยการนำความร้อน สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเป็นฟังก์ชันกับความดันที่ผิวสัมผัสระหว่างผิวชิ้นงานกับแม่พิมพ์ (HTC_{cond}) สามารถคำนวณได้จากสมการของ Shvets

$$HTC_{cond} = \frac{k\pi}{4\lambda} \left[1 + 85 \left(\frac{P}{\sigma_r} \right)^{0.8} \right] \quad (2.13)$$

เมื่อ k = ค่าการนำความร้อน (thermal conductivity) ของอากาศ

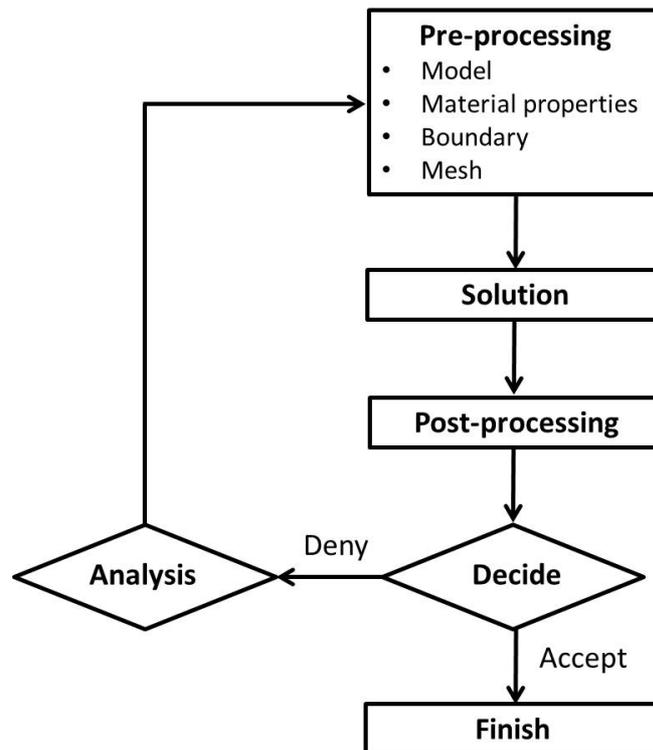
λ = พารามิเตอร์ของความเรียบผิว (roughness parameter) ของแม่พิมพ์

P = ความดันสัมผัสระหว่างผิวชิ้นงานกับแม่พิมพ์

σ_r = ความเค้นแตกหัก (rupture stress)

2.4 วิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ [6]

ขั้นตอนของวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์แบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอนหลักคือ Pre-Processing, Analysis และ Post-Processing ดังในรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 แผนผังแสดงขั้นตอนการดำเนินงาน โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

1. กระบวนการขั้นต้น (Pre-Processing)

กระบวนการขั้นต้น คือการจัดเตรียมข้อมูลเพื่อนำไปวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยเริ่มจากการสร้างแบบจำลองของชิ้นงานที่ต้องการวิเคราะห์หลังโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ แบบจำลองนี้สามารถสร้างจากโปรแกรมทางไฟไนต์เอลิเมนต์เองหรือสร้างจากโปรแกรม Computer Aided Design (CAD) แล้วจึงส่งเข้าโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ก็ได้ จากนั้นทำแบ่งรูปร่างของแบบจำลองชิ้นงานออกเป็นเอลิเมนต์ย่อยขนาดต่างๆ ซึ่งมีจุดที่มุมของแต่ละเอลิเมนต์ซึ่งเรียกว่าจุดต่อ (Node)

ผลเฉลยของวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จะมีความแม่นยำมากขึ้นหากกำหนดรูปร่างและขนาดของเอลิเมนต์ให้ใกล้เคียงกับรูปร่างของชิ้นงานจริง และในส่วนที่มีความเค้นหนาแน่น เช่นบริเวณที่มีการเปลี่ยนรูปมากๆ หรือมีส่วนเว้า โคง ควรแบ่งบริเวณนั้นออกเป็นเอลิเมนต์ขนาดเล็กเพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่แม่นยำมากขึ้น

นอกจากนั้นกระบวนการขั้นต้นยังรวมถึงการกำหนดสมบัติของวัสดุ กำหนดเงื่อนไขขอบเขตของปัญหา (Boundary Conditions) เช่น ทิศทางและระยะการเคลื่อนที่ ขนาดและทิศทางของแรงกระทำ เป็นต้น

2. ขั้นตอนการแก้ปัญหา (Solution)

โปรแกรมคอมพิวเตอร์ทำการวิเคราะห์ปัญหาโดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method, FEM) ซึ่งเป็นวิธีการคำนวณเชิงตัวเลขสำหรับแก้สมการเชิงอนุพันธ์

3. กระบวนการขั้นท้าย (Post-processing)

กระบวนการขั้นท้ายเป็นขั้นตอนการแสดงผลการวิเคราะห์ปัญหาจากกระบวนการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ การแสดงผลการคำนวณทำได้หลายวิธี เช่น แสดงเป็นแถบสี กราฟ แสดงการเคลื่อนที่ เป็นต้น

หลังจากที่ทราบผลการวิเคราะห์แล้ว หากผลการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ไม่อยู่ในเกณฑ์ที่สามารถยอมรับได้ ผู้ใช้สามารถนำผลนั้นมาทำการวิเคราะห์เพื่อหาสาเหตุและวิธีการแก้ไข แล้วกลับไปปรับปรุงขั้นตอน Pre-processing อีกครั้งเพื่อให้ได้ผลการคำนวณที่ดีขึ้น เช่น แก้ไขแบบจำลองของแม่พิมพ์ ปรับระยะการเคลื่อนที่ของแม่พิมพ์ เป็นต้น

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

มีการศึกษาและวิจัยที่เกี่ยวข้องกับตัวแปรต่างๆ ในการขึ้นรูปรีออนวัสดุแผ่น ทั้งโดยวิธีการทดลอง การคำนวณและการใช้โปรแกรมทางไฟไนต์เอลิเมนต์

ในปี 2006 Merklein และคณะ [7] ได้ทำการศึกษาอิทธิพลของทิศทางการรีดโลหะ อุนหนุมิ อัตราการเย็นตัว และอัตราความเครียด ที่มีผลต่อพฤติกรรมการไหลในการขึ้นรูปรีออนโลหะแผ่น 22MnB5 จากการพิจารณาลักษณะเฉพาะเชิงกลที่เปลี่ยนไปตามอุนหนุมิของวัสดุด้วยการทดลองเพียงอย่างเดียว พบว่าอุนหนุมิมีอิทธิพลต่อพฤติกรรมการไหล คือเมื่ออุนหนุมิเพิ่มขึ้น เป็นผลทำให้ความเค้นและ

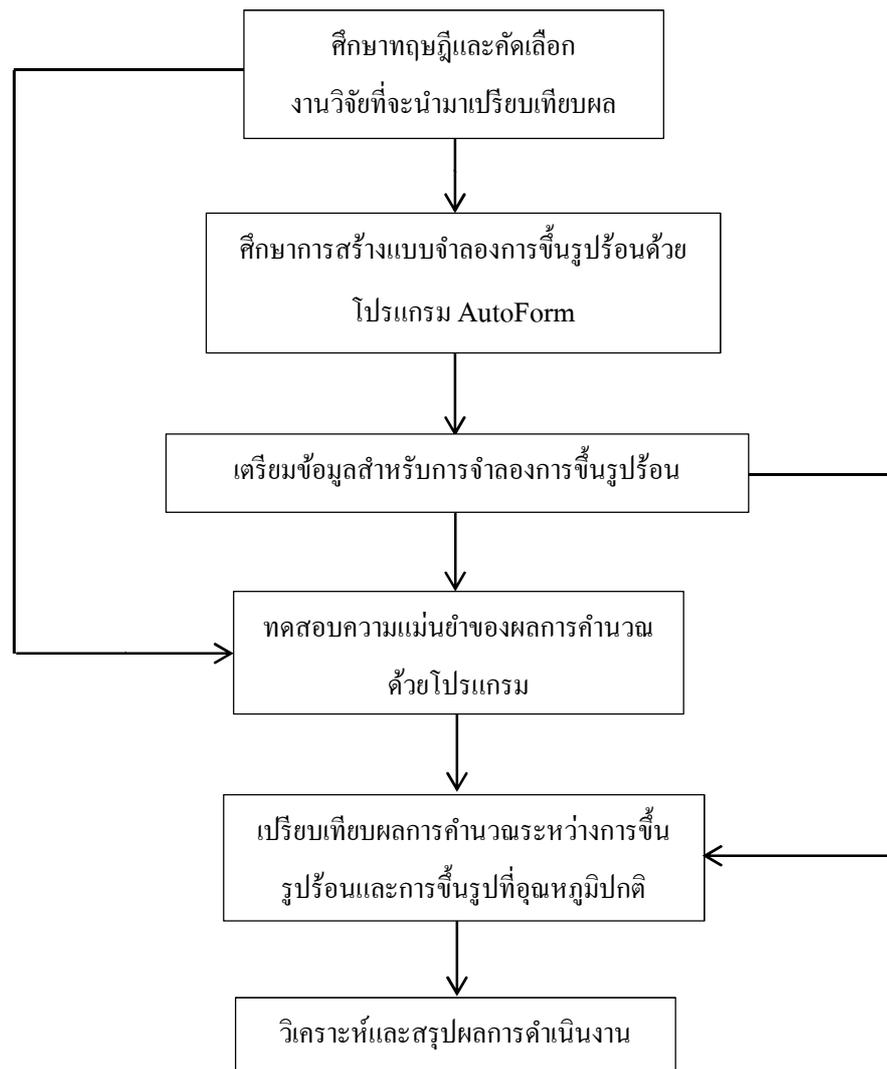
ความแข็งเนื่องจากความเครียดลดลง และพบว่าความเค้นในวัสดุเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราความเครียดเพิ่มขึ้น เฉพาะในกรณีที่อัตราความเครียดไม่น้อยเกินไปจนทำให้เกิดเฟสเบนไนต์ขึ้นมาในวัสดุ

ต่อมาได้มีผู้ศึกษาพฤติกรรมการไหลของการขึ้นรูปรีออนวัสดุ 22MnB5 เพิ่มเติมอีกโดยมีการนำผลจากการทดลองจริงมาเปรียบเทียบกับการคำนวณ ในปี 2013 Li และคณะ [8] ได้ทำการศึกษาพฤติกรรม การไหลของการขึ้นรูปรีออน วัสดุ 22MnB5 โดยศึกษาอิทธิพลของเกณฑ์การคราก (yield criteria) อุณหภูมิ อัตราความเครียดและอัตราการเย็นตัวที่มีผลต่อ forming limit curve (FLC) พบว่า ความสามารถในการขึ้นรูป (formability) ของวัสดุจะดีขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น แต่ความสามารถในการ ขึ้นรูปจะลดลงหากอัตราการเย็นตัวของวัสดุเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังได้ศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิและ ค่าอัตราความเครียดที่มีผลต่อพฤติกรรมการไหลของวัสดุ โดยเปรียบเทียบจากการคำนวณด้วยโมเดล Norton-Hoff โมเดล Molinari-Ravichandran และจากการทดลองจริง พบว่าอุณหภูมิที่ให้กับชิ้นงานที่มีค่าต่ำและอัตราความเครียดที่มีค่าสูงมีผลทำให้ความเค้นการไหล (flow stress) ของวัสดุมีค่าสูงขึ้น

ในปี 2006 ได้มีการศึกษาวิธีการทางไฟไนต์เอลิเมนต์ของการขึ้นรูปรีออนโลหะแผ่น โดย Akerstrom และ Oldenburg [9] ได้ใช้ Kirkaldy's rate equation เป็นพื้นฐานในการพัฒนาโมเดลเพื่อใช้กับวัสดุ boron steel โดยการเพิ่มโมเดลดังกล่าวเป็นโปรแกรมย่อยใน LS-DYNA ทำการคำนวณเปรียบเทียบกับ การทดลอง มีการเปรียบเทียบเฟสของชิ้นงาน อัตราส่วนของเฟสต่างๆ ความแข็ง และอุณหภูมิ พบว่าการนำความร้อนแฝงมาวิเคราะห์ในโมเดลด้วยมีผลอย่างยิ่งต่อความแม่นยำของการคำนวณ โดยเฉพาะบริเวณที่แม่พิมพ์และแผ่นโลหะมีการสัมผัสกันไม่ได้ และพบว่า การนำเกรเดียนท์ของ อุณหภูมิของแผ่นโลหะมาวิเคราะห์ด้วยจะช่วยให้การทำนายเฟส ความเค้นที่เกิดจากการลดอุณหภูมิ และการบิดเบี้ยวของชิ้นงานมีความแม่นยำมากขึ้น

บทที่ 3 วิธีการดำเนินงาน

การศึกษาโครงการเฉพาะเรื่องนี้เป็นการศึกษาผลที่ได้จากการคำนวณด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ของการขึ้นรูปรีออน โลหะ 22MnB5 เปรียบเทียบกับการขึ้นรูปที่อุณหภูมิปกติ การดำเนินงานมีขั้นตอนตามรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แผนภาพแสดงขั้นตอนการดำเนินงาน

การดำเนินงานแต่ละขั้นตอนมีระยะเวลาดังแสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ระยะเวลาการดำเนินงานในแต่ละขั้นตอน

ขั้นตอน	ระยะเวลา							
	2556				2557			
	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.
1. ศึกษาและหาข้อมูล	█							
2. ศึกษาวิธีการจำลองการขึ้นรูปรีนด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์			█					
3. สร้างแบบจำลองและขึ้นรูปด้วยโปรแกรมเพื่อทดสอบความแม่นยำ				█				
4. สร้างแบบจำลองและขึ้นรูปด้วยโปรแกรมเพื่อเปรียบเทียบกับกรขึ้นรูปธรรมดา						█		
5. วิเคราะห์และสรุปผล								█

3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์

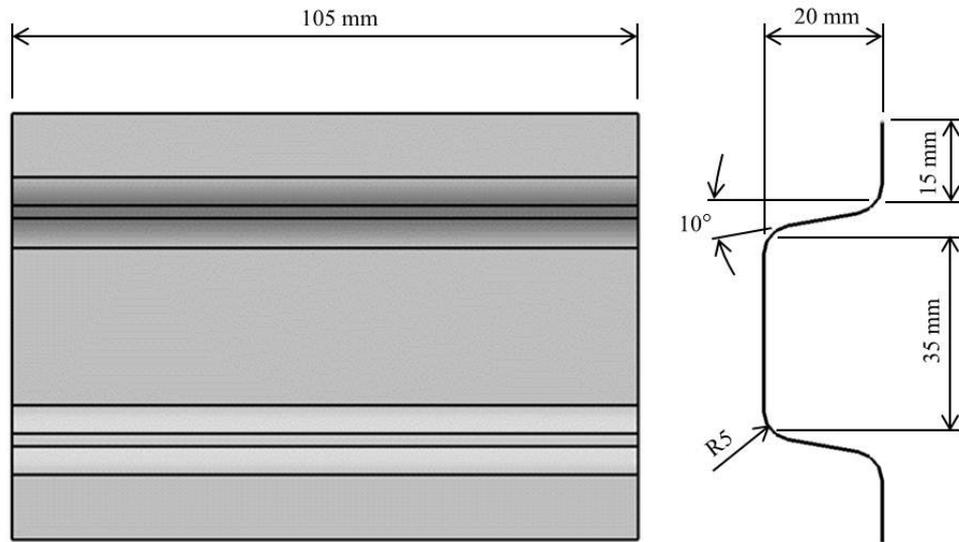
1. เครื่องคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการคำนวณมีอุปกรณ์ประมวลผลขนาด 2.5 กิกะเฮิร์ตซ์ หน่วยความจำหลัก 16 กิกะไบต์
2. โปรแกรม Catia V5 R21 ใช้ในการสร้างแบบจำลองชิ้นงานและแม่พิมพ์
3. โปรแกรมไฟ AutoForm plus R3.1 ใช้ในการคำนวณไฟไนต์เอลิเมนต์

3.2 การทดสอบความน่าเชื่อถือของผลการคำนวณด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์

ในการใช้วิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อทำนายผลของการขึ้นรูปรีนจำเป็นต้องมีการเปรียบเทียบผลการคำนวณกับผลการทดลองจริงเพื่อเป็นการยืนยันความถูกต้องน่าเชื่อถือของผลการคำนวณที่ได้

3.2.1 สร้างแบบจำลองชิ้นงาน

แบบจำลองชิ้นงาน Rail แผ่นวัสดุ และแม่พิมพ์ สร้างขึ้นโดยใช้โปรแกรม Catia โดยสร้างให้มีลักษณะเป็นพื้นผิว (surface) รูปร่างและขนาดของชิ้นงานแสดงในรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 รูปร่างและขนาดของแบบจำลองชิ้นงาน

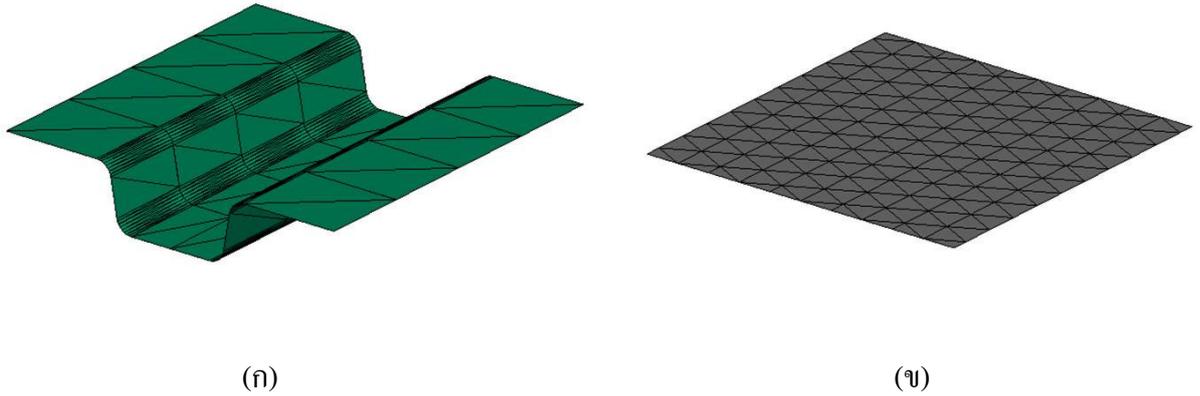
3.2.2 กำหนดสมบัติของแผ่นวัสดุ

วัสดุที่ใช้ใน โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์คือ 22MnB5 ซึ่งมีข้อมูลและสมบัติเป็นไปตามไฟล์ของวัสดุที่มีอยู่ในโปรแกรม AutoForm และกำหนดค่าต่างๆดังต่อไปนี้

1. แผ่นวัสดุมีขนาด 105x105 มิลลิเมตร ความหนา 1.0 มิลลิเมตร
2. แบ่งความหนาของแผ่นวัสดุออกเป็น 11 ชั้น
3. เนื่องจากวัสดุมีการขยายตัวจากความร้อนน้อยมาก จึงไม่้นำการขยายตัวมาพิจารณา

3.2.3 สร้างโครงตาข่าย (mesh)

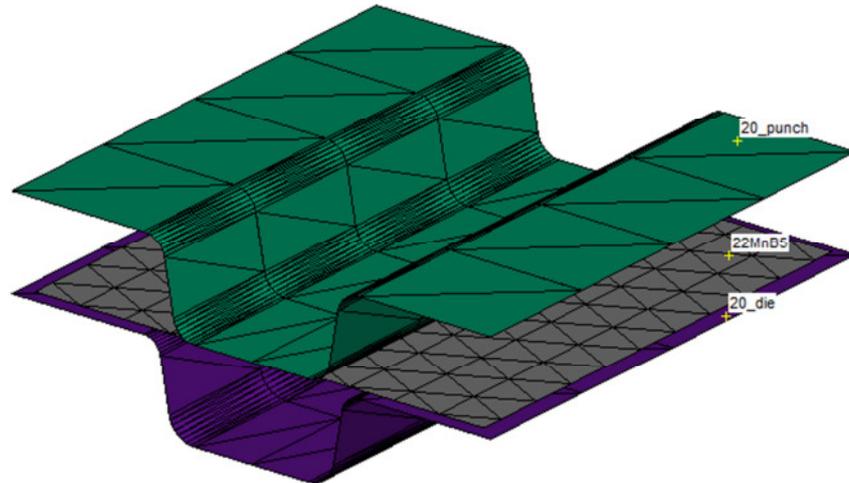
โปรแกรม AutoForm จะสร้างโครงตาข่ายรูปสามเหลี่ยมให้กับแบบจำลองของแผ่นวัสดุและแบบจำลองของแม่พิมพ์ โครงตาข่ายมีขนาดความกว้างของด้านหนึ่งไม่เกิน 50 มิลลิเมตร



รูปที่ 3.3 (ก) โครงข่ายแบบจำลองของแม่พิมพ์ (ข) โครงข่ายแบบจำลองของแผ่นวัสดุ

3.2.4 กำหนดตำแหน่งของแม่พิมพ์และแผ่นวัสดุ

กำหนดให้ชุดแม่พิมพ์ประกอบด้วยพื้นที่ซึ่งอยู่ด้านบนและคายซึ่งอยู่ด้านล่าง เมื่อเริ่มต้นให้แผ่นวัสดุวางอยู่บนคาย ดังแสดงในรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 ตำแหน่งของพื้นที่ คาย และแผ่นวัสดุ

3.2.5 กำหนดขั้นตอนการขึ้นรูปรีออน

กำหนดให้ขั้นตอนการขึ้นรูปรีออนของโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์แบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอน คือ ช่วงเคลื่อนย้ายแผ่น โลหะจากเตาอบไปยังแม่พิมพ์ ช่วงขึ้นรูปและทำให้ชิ้นงานเย็นตัวไปพร้อมกัน และช่วงที่ขึ้นรูปเสร็จแล้วแต่ยังคงลดอุณหภูมิของชิ้นงานต่อไป

3.2.5.1 ช่วงการเคลื่อนย้ายแผ่นโลหะ

เมื่อให้ความร้อนกับแผ่นโลหะจนกระทั่งโครงสร้างของวัสดุเปลี่ยนเฟสเป็นออสเทนไนต์แล้ว จากนั้นต้องย้ายแผ่นโลหะจากเตาอบมายังแม่พิมพ์ แต่ในโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์จะไม่นำขั้นตอนการให้ความร้อนแก่แผ่นโลหะมาวิเคราะห์ด้วย การวิเคราะห์จะเริ่มตั้งแต่ขั้นตอนการเคลื่อนย้ายแผ่นโลหะออกจากเตาอบเป็นต้นไป ซึ่งในช่วงนี้แผ่นโลหะจะสูญเสียความร้อนให้กับอากาศด้วยวิธีพาความร้อน ทำให้เมื่อมาถึงแม่พิมพ์แผ่นโลหะมีอุณหภูมิลดลง กำหนดค่าต่างๆในช่วงเคลื่อนย้ายแม่พิมพ์ดังนี้

1. อุณหภูมิเมื่อเริ่มต้นการเคลื่อนย้ายเท่ากับ 933 องศาเซลเซียส
2. เวลาที่ใช้ในการเคลื่อนย้ายเท่ากับ 8 วินาที
3. อากาศมีอุณหภูมิ 20°C
4. ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนจากแผ่นโลหะไปยังอากาศเท่ากับ 0.07 mW/mm²K

3.2.5.2 ช่วงการขึ้นรูป

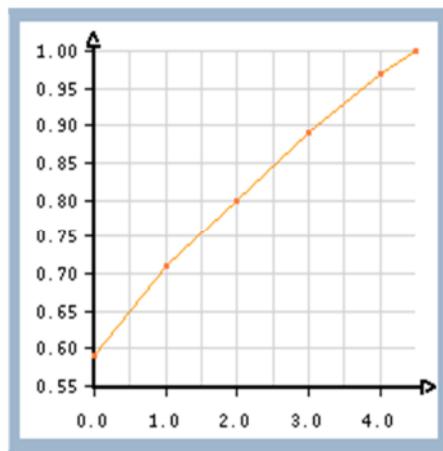
ในช่วงการขึ้นรูปจะมีการทำให้ชิ้นงานเกิดการเย็นตัวไปพร้อมกันด้วย โดยมีระบบหล่อเย็นอยู่ในแม่พิมพ์ กำหนดค่าต่างๆในช่วงการขึ้นรูปดังนี้

1. พื้นผิวเคลื่อนที่ลงมาด้วยความเร็ว 40 mm/s จนกระทั่งพื้นผิวและคายประกบกันสนิท รวมระยะทางที่พื้นผิวเคลื่อนที่ทั้งหมด 20 มิลลิเมตร
2. สัมประสิทธิ์ความเสียดทานของผิวแม่พิมพ์มีค่าเท่ากับ 0.1
3. แม่พิมพ์มีอุณหภูมิเริ่มต้น 20°C
4. ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนจากแผ่นโลหะไปยังแม่พิมพ์มีค่าแปรเปลี่ยนไปตามความดันสัมผัสบนผิวชิ้นงาน ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนนี้สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2.13) จากนั้นจึงนำค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนมาคำนวณเพื่อหาค่าสเกลแฟคเตอร์ เพื่อป้อนให้กับโปรแกรม

ตารางที่ 3.2 ค่าสเกลแฟกเตอร์ของสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่ได้จากการคำนวณ

ความดัน (MPa)	สเกลแฟกเตอร์
0	0.59
1	0.71
2	0.80
3	0.89
4	0.97
4.5	1

เมื่อป้อนค่าสเกลแฟกเตอร์และความดันให้กับโปรแกรม โปรแกรมจะทำการสร้างกราฟความสัมพันธ์ของค่าทั้งสองตามรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 แผนภาพแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสเกลแฟกเตอร์ของสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนกับความดัน

3.2.5.3 ช่วงการทำให้ชิ้นงานเย็นตัว

หลังจากขึ้นรูปชิ้นงานแล้ว กำหนดให้ปล่อยชิ้นงานไว้ในแม่พิมพ์ต่อไป พื้นผิวและตายยังคงประกบกัน เพื่อให้เกิดการถ่ายเทความร้อนจากชิ้นงานไปยังแม่พิมพ์ โดยกำหนดค่าต่างๆในช่วงการขึ้นรูปดังนี้

1. ให้ช่วงการทำให้ชิ้นงานเย็นตัวมีเวลา 15 วินาที
2. ในช่วงนี้สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนจากแผ่น โลหะ ไปยังแม่พิมพ์จะมีค่าคงที่เท่ากับ $1.2 \text{ mW/mm}^2\text{K}$

3.2.6 เปรียบเทียบผลจากโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์กับผลการทดลอง

ผลการทดลองที่นำมาใช้ในการเปรียบเทียบผลกับการทดลองคืองานวิจัยหัวข้อ A Numerical and Experimental Investigation into Hot Stamping of Boron Alloyed Heat Treated Steels [10] โดยจะพิจารณาอุณหภูมิตรงกลางแผ่นชิ้นงานตลอดกระบวนการ และนำอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงมาคำนวณหาอัตราการเย็นตัวของชิ้นงานเพื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลอง เพื่อเป็นการยืนยันความแม่นยำและความน่าเชื่อถือของวิธีการสร้างแบบจำลอง

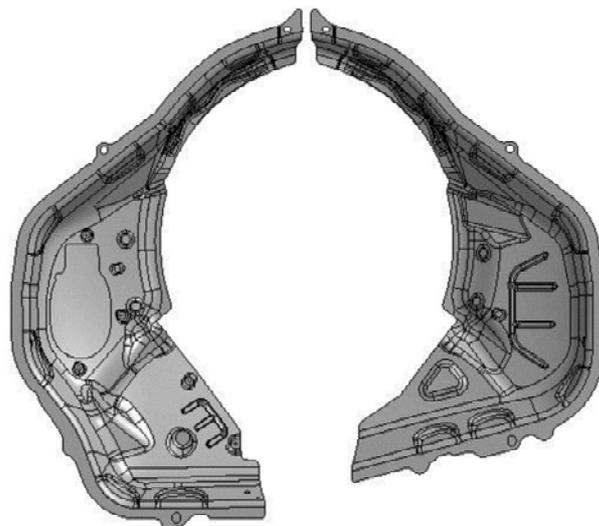
3.3 การเปรียบเทียบการขึ้นรูปร้อนกับการขึ้นรูปที่อุณหภูมิปกติ

เมื่อทำการทดสอบแล้วว่าแบบจำลองการขึ้นรูปร้อนที่สร้างขึ้นมีความน่าเชื่อถือ ขั้นตอนต่อไปจะเป็นการเปรียบเทียบผลที่ได้จากวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ของการขึ้นรูปร้อนกับการขึ้นรูปที่อุณหภูมิปกติของชิ้นงาน Wheelhouse ที่เป็นงานขึ้นรูปลึกเนื่องจากวัสดุมีการยึดตัวมาก ทำให้สามารถเห็นความแตกต่างระหว่างการขึ้นรูปร้อนกับการขึ้นรูปที่อุณหภูมิปกติได้อย่างชัดเจน

3.3.1 สร้างแบบจำลองการขึ้นรูปที่อุณหภูมิปกติ

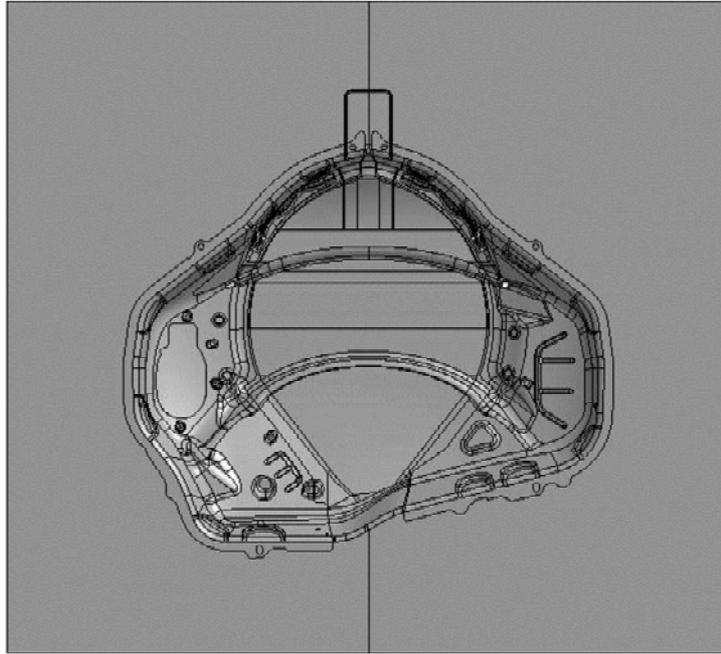
3.3.1.1 สร้างแบบจำลองของแม่พิมพ์

ชิ้นงานที่ใช้คือ Wheelhouse ขึ้นรูปชิ้นงานซ้ายและขวาในแม่พิมพ์เดียวกันตามรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 แบบจำลองชิ้นงาน Wheelhouse ซ้ายและขวา

จากนั้นทำการสร้างแบบจำลองแม่พิมพ์ตามรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 แบบจำลองของแม่พิมพ์

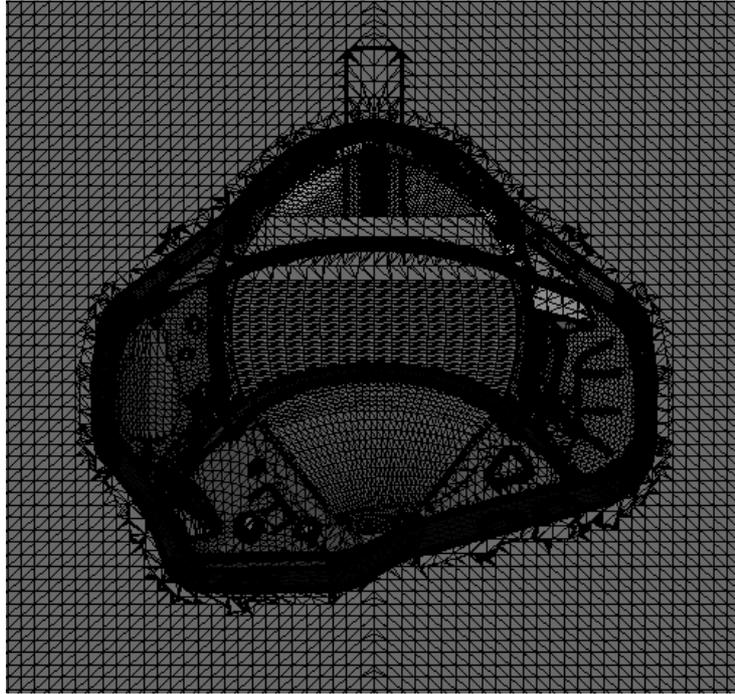
3.3.1.2 กำหนดสมบัติของแผ่นวัสดุ

วัสดุที่ใช้คือ 22MnB5 ซึ่งมีข้อมูลและสมบัติเป็นไปตามไฟล์ของวัสดุที่มีอยู่ใน โปรแกรม AutoForm และกำหนดค่าต่างๆดังต่อไปนี้

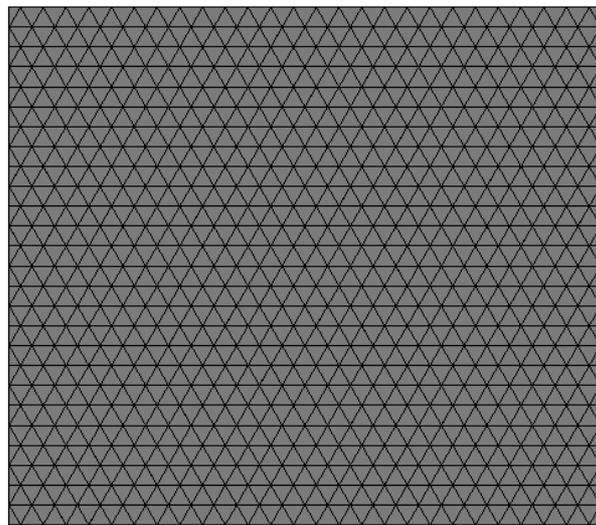
1. แผ่นวัสดุมีขนาด กว้าง 1470 มิลลิเมตร ยาว 1665 ความหนา 1.0 มิลลิเมตร
2. แบ่งความหนาของแผ่นวัสดุออกเป็น 11 ชั้น
3. เนื่องจากวัสดุมีการขยายตัวจากความร้อนน้อยมาก จึงไม่นำการขยายตัวนี้มาพิจารณา

3.3.1.3 สร้างโครงตาข่าย

สร้างโครงสร้างตาข่ายให้แก่แบบจำลองแม่พิมพ์และแผ่นวัสดุ โดยแบบจำลองจะอยู่ในรูปแบบของ พื้นผิว (surface) โครงตาข่ายเป็นรูปสามเหลี่ยม ความกว้างของด้านหนึ่งไม่เกิน 50 มิลลิเมตร



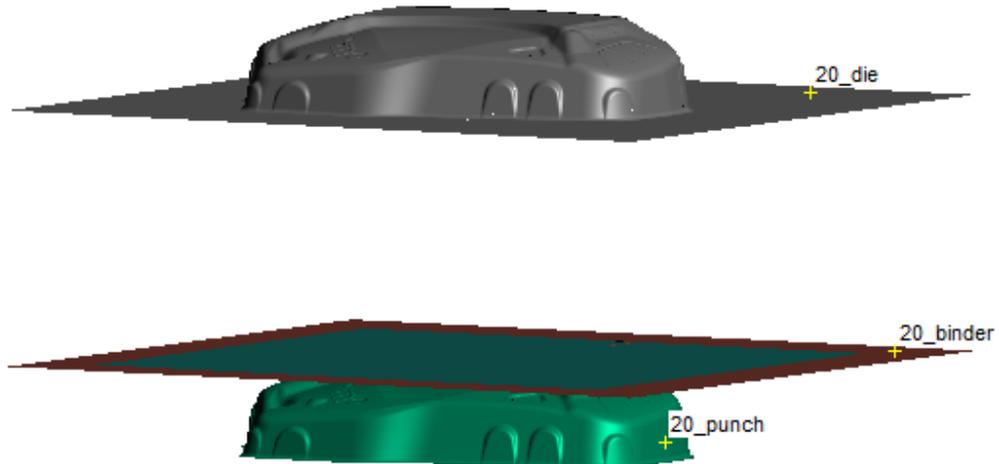
รูปที่ 3.8 โครงตาข่ายของแบบจำลองแม่พิมพ์ชิ้นรูปที่อุณหภูมิปกติ



รูปที่ 3.9 โครงตาข่ายของแบบจำลองแผ่นวัสดุชิ้นรูปที่อุณหภูมิปกติ

3.3.1.4 กำหนดตำแหน่งของแม่พิมพ์และแผ่นวัสดุ

กำหนดให้ชุดแม่พิมพ์ด้านล่างประกอบด้วยพื้นที่และแผ่นจับยึดวัสดุ (blank holder) ชุดแม่พิมพ์ด้านบนประกอบด้วยคาย เมื่อเริ่มต้น แผ่นจับยึดวัสดุ ถูกยกขึ้น 260 มิลลิเมตร และแผ่นวัสดุวางอยู่บนแผ่นจับยึดวัสดุ ดังแสดงในรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 ตำแหน่งของพื้นที่ คาย แผ่นจับยึดวัสดุ และแผ่นวัสดุ ของการขึ้นรูปที่อุณหภูมิปกติ

3.3.1.5 กำหนดขั้นตอนการขึ้นรูป

กำหนดให้ขั้นตอนการขึ้นรูปประกอบด้วยเคลื่อนที่ของแม่พิมพ์ 2 ขั้นตอน คือ

1. คายเคลื่อนที่ลงมาด้วยความเร็ว 40 มิลลิเมตรต่อวินาที จนกระทั่งประกบกับแผ่น โลหะที่วางอยู่บนแผ่นจับยึดวัสดุ
2. คายเคลื่อนที่ต่อไปโดยที่แผ่นจับยึดวัสดุมีแรงดัน 1,000,000 N จนกระทั่งคายประกบกับพื้นที่

3.3.2 สร้างแบบจำลองการขึ้นรูปร้อน

แบบจำลองของชิ้นงาน ชุดแม่พิมพ์ แผ่นวัสดุ และการสร้างโครงตาข่ายในการขึ้นรูปร้อน สามารถใช้ร่วมกันกับการขึ้นที่อุณหภูมิปกติได้ สิ่งที่แตกต่างกันคือการกำหนดขั้นตอนการขึ้นรูป โดยในการขึ้นรูปร้อนกำหนดให้มี 2 ขั้นตอนดังนี้

1. ขั้นตอนการเคลื่อนย้ายแผ่น โลหะมายังแม่พิมพ์ ในช่วงนี้แผ่น โลหะจะสูญเสียความร้อนให้กับอากาศด้วยวิธีพาความร้อน ทำให้เมื่อมาถึงแม่พิมพ์แผ่น โลหะมีอุณหภูมิลดลง กำหนดให้เวลาที่ใช้ใน

การเคลื่อนย้ายเท่ากับ 8 วินาที อากาศมีอุณหภูมิ 20°C ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนจากแผ่นโลหะไปยังอากาศเท่ากับ 0.07 mW/mm²K

2. ขั้นตอนการขึ้นรูป กำหนดให้มีขั้นตอนเช่นเดียวกับการขึ้นรูปที่อุณหภูมิปกติในหัวข้อ 3.3.1.5 โดยกำหนดให้ค่าสเกลแฟกเตอร์ของสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนมีค่าตามตารางที่ 3.2 สัมประสิทธิ์ความเสียดทานของผิวแม่พิมพ์มีค่าเท่ากับ 0.1 และแม่พิมพ์มีอุณหภูมิเริ่มต้น 20°C

3.3.3 เปรียบเทียบผลการขึ้นรูปร้อนและขึ้นรูปที่อุณหภูมิปกติ

เปรียบเทียบความสามารถในการขึ้นรูปของชิ้นงานจากการขึ้นรูปร้อนและขึ้นรูปที่อุณหภูมิปกติ โดยพิจารณาจากแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูป

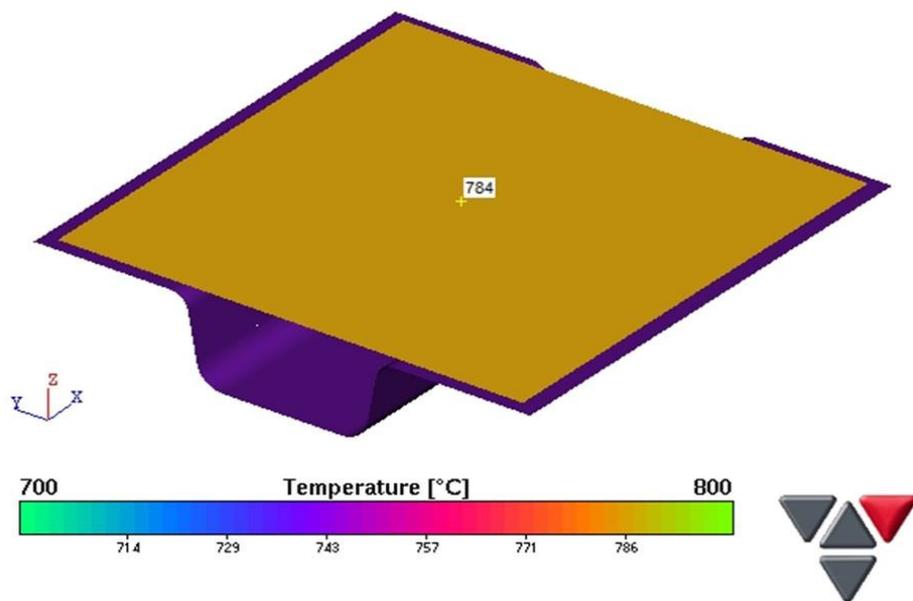
บทที่ 4 ผลการทดลองและการวิเคราะห์

4.1 การทดสอบความนำเชื่อถือของแบบจำลอง

การทดสอบความนำเชื่อถือของแบบจำลองที่สร้างขึ้นโดยใช้โปรแกรม AutoForm ทำโดยการเปรียบเทียบอุณหภูมิของชิ้นงานตั้งแต่ขั้นตอนการเคลื่อนย้ายออกจากเตาให้ความร้อน จนกระทั่งสิ้นสุดการทำให้ชิ้นงานเย็นตัว จากนั้นนำอุณหภูมิที่ได้มาคำนวณเพื่อหาค่าอัตราการเย็นตัว เปรียบเทียบกับผลจากการทดลอง

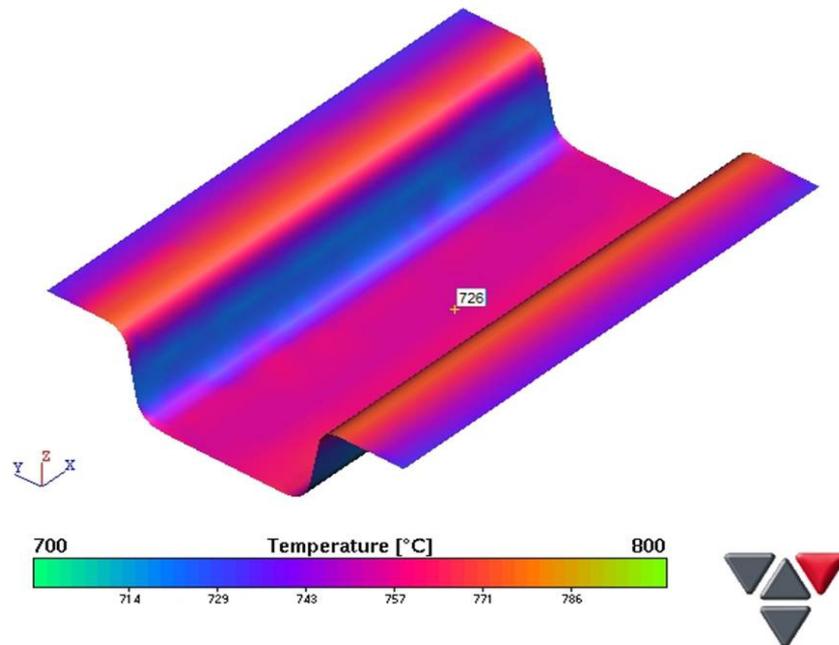
จากผลการจำลองการขึ้นรูปร้อนด้วยโปรแกรม AutoForm แสดงค่าอุณหภูมิในแต่ละช่วงของกระบวนการดังต่อไปนี้

1. ช่วงเคลื่อนย้ายแผ่นโลหะมายังแม่พิมพ์ เกิดการถ่ายเทความร้อนจากแผ่นวัสดุไปยังอากาศอย่างคงที่ อุณหภูมิของชิ้นงานลดลงจาก 933 องศาเซลเซียส เป็น 784 องศาเซลเซียสตามที่แสดงในรูปที่ 4.1 ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับผลการทดลองจากงานวิจัยที่ใช้อ้างอิงคือ 780 องศาเซลเซียส [10]

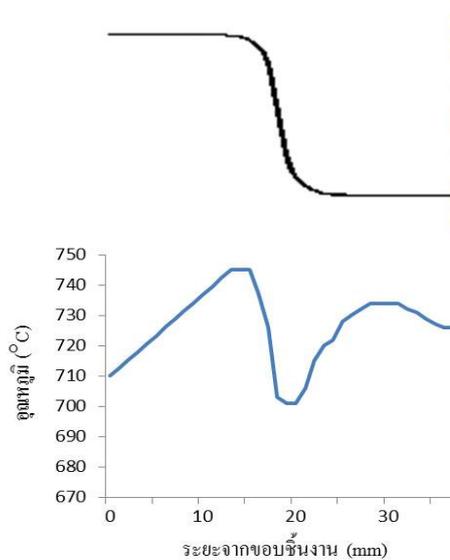


รูปที่ 4.1 ผลจากการจำลองการขึ้นรูปร้อน แสดงอุณหภูมิของแผ่นโลหะเมื่อเคลื่อนย้ายมาถึงแม่พิมพ์

2. ช่วงขึ้นรูป ระยะเวลาที่ใช้ในการขึ้นรูป 0.5 วินาที เกิดการถ่ายเทความร้อนจากแผ่นโลหะไปยังแม่พิมพ์ เมื่อสิ้นสุดการขึ้นรูปอุณหภูมิของชิ้นงานลดลงเป็น 726 องศาเซลเซียสตามที่แสดงในรูปที่ 4.2 เมื่อพิจารณาบริเวณกลางชิ้นงาน เปรียบเทียบอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงตามระยะจากขอบชิ้นงานดังแสดงในรูปที่ 4.3 จะสังเกตได้ว่าบริเวณส่วนโค้งของชิ้นงานมีความมือุณหภูมิสูงกว่าบริเวณที่มีลักษณะเรียบตรงเช่นบริเวณกลางชิ้นงาน เนื่องจากบริเวณส่วนโค้งความร้อนกระจายไปได้ยากกว่าการถ่ายเทความร้อนน้อยกว่าบริเวณที่มีลักษณะเรียบตรง



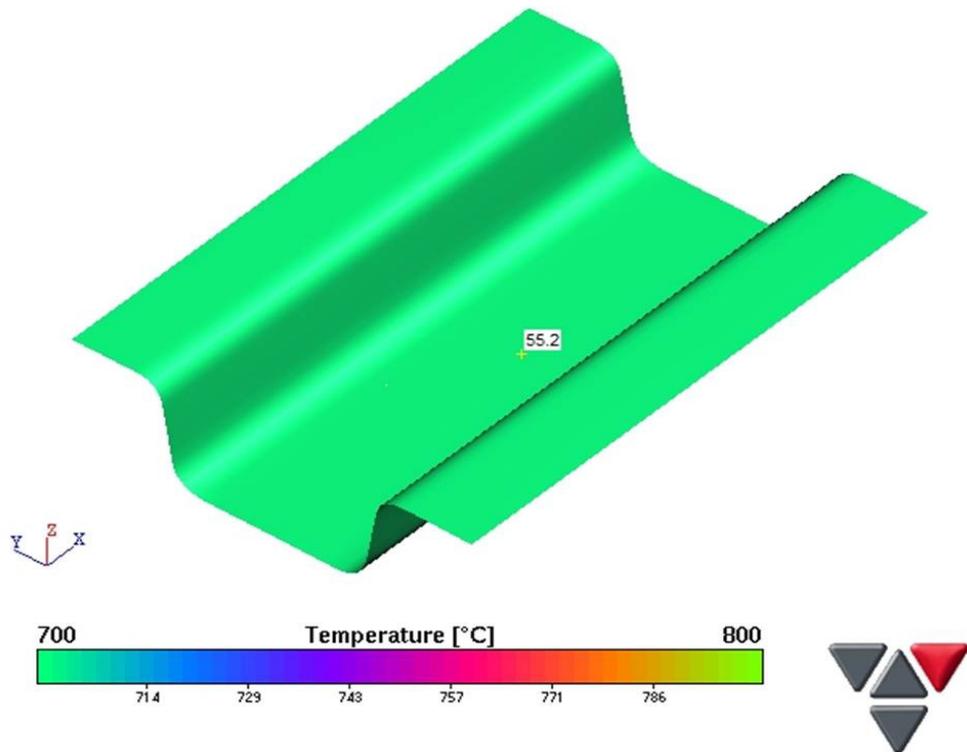
รูปที่ 4.2 ผลจากการจำลองการขึ้นรูปร้อน แสดงอุณหภูมิของชิ้นงานเมื่อสิ้นสุดการขึ้นรูป



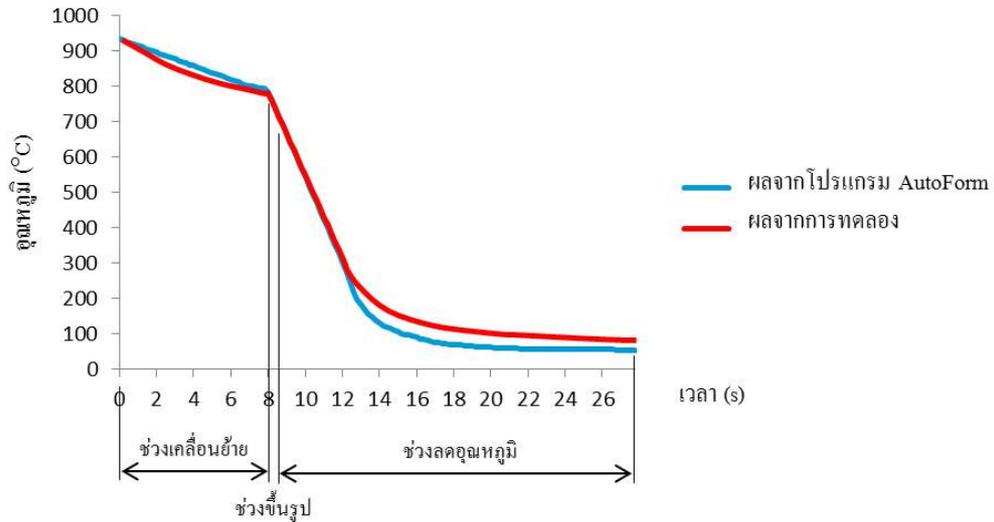
รูปที่ 4.3 อุณหภูมิกลางชิ้นงานที่ระยะต่างๆจากขอบชิ้นงาน

3. ช่วงการลดอุณหภูมิของชิ้นงาน ในช่วงแรกอุณหภูมิของชิ้นงานลดลงอย่างรวดเร็วและช้าลงจนกระทั่งคงที่ เมื่อสิ้นสุดการลดอุณหภูมิชิ้นงานมีอุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส ดังรูปที่ 4.5 ในช่วงที่อุณหภูมิลดลงอย่างรวดเร็วคือช่วงวินาทีที่ 8 ถึงวินาทีที่ 12.7 อุณหภูมิของชิ้นงานลดลงจาก 784 องศาเซลเซียสเป็น 202 องศาเซลเซียส ในช่วงนี้กราฟมีลักษณะเป็นเส้นตรง สามารถคำนวณอัตราการเย็นตัวของชิ้นงานได้เท่ากับ 123.8 องศาเซลเซียสต่อวินาที มีค่าใกล้เคียงกับผลการทดลองจากงานวิจัยที่ใช้อ้างอิงซึ่งได้อัตราการเย็นตัวเท่ากับ 120 องศาเซลเซียสต่อวินาที

จากการเปรียบเทียบอุณหภูมิของชิ้นงานที่เปลี่ยนแปลงไปตลอดกระบวนการ พบว่าผลที่ได้จากการคำนวณและผลการทดลองจากงานวิจัยที่ใช้อ้างอิงมีค่าใกล้เคียงกัน แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองที่สร้างขึ้นมีความน่าเชื่อถือ สามารถนำแนวทางในการสร้างแบบจำลองนี้ไปใช้ในการสร้างแบบจำลองการขึ้นรูปอื่น ๆ เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ผลการขึ้นรูปอื่นได้จริง



รูปที่ 4.4 ผลจากการจำลองการขึ้นรูปอื่น แสดงอุณหภูมิของชิ้นงานเมื่อสิ้นสุดการลดอุณหภูมิ



รูปที่ 4.5 แผนภาพแสดงอุณหภูมิของชิ้นงานที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลา

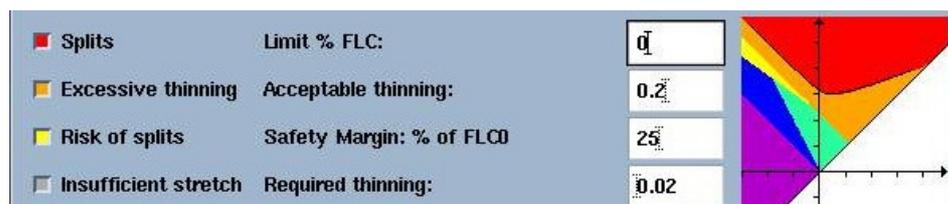
4.2 เปรียบเทียบผลจากการจำลองการขึ้นรูปที่อุณหภูมิปกติและขึ้นรูปร้อน

หลังจากการทดสอบความน่าเชื่อถือของแบบจำลองแล้ว ขั้นตอนต่อไปเป็นการทดลองใช้แบบจำลองในการวิเคราะห์ชิ้นงาน Wheelhouse เปรียบเทียบระหว่างการขึ้นรูปร้อนกับการขึ้นรูปที่อุณหภูมิปกติ

4.2.1 ผลการวิเคราะห์การขึ้นรูปที่อุณหภูมิปกติ

โปรแกรมแสดงความสามารถในการขึ้นรูป (formability) ของชิ้นงานเมื่อสิ้นสุดการลากขึ้นรูปด้วยสีต่างๆ ซึ่งผู้ใช้โปรแกรมสามารถกำหนดขอบเขตของการแสดงสีบนชิ้นงานเองได้ ในการศึกษาโครงการเฉพาะเรื่องนี้ได้กำหนดความหมายของการแสดงสีบนชิ้นงานตามรูปที่ 4.6 คือ

- ความหนาของชิ้นงานที่ลดลงมากกว่าหรือเท่ากับ 20% ของความหนาของแผ่นวัสดุให้แสดงผลเป็น Excessive thinning
- บริเวณใต้เส้นขีดจำกัดการขึ้นรูปลงมา 25% ให้แสดงผลเป็น Risk of splits



รูปที่ 4.6 การกำหนดขอบเขตการแสดงผลของความสามารถในการขึ้นรูปบนชิ้นงาน

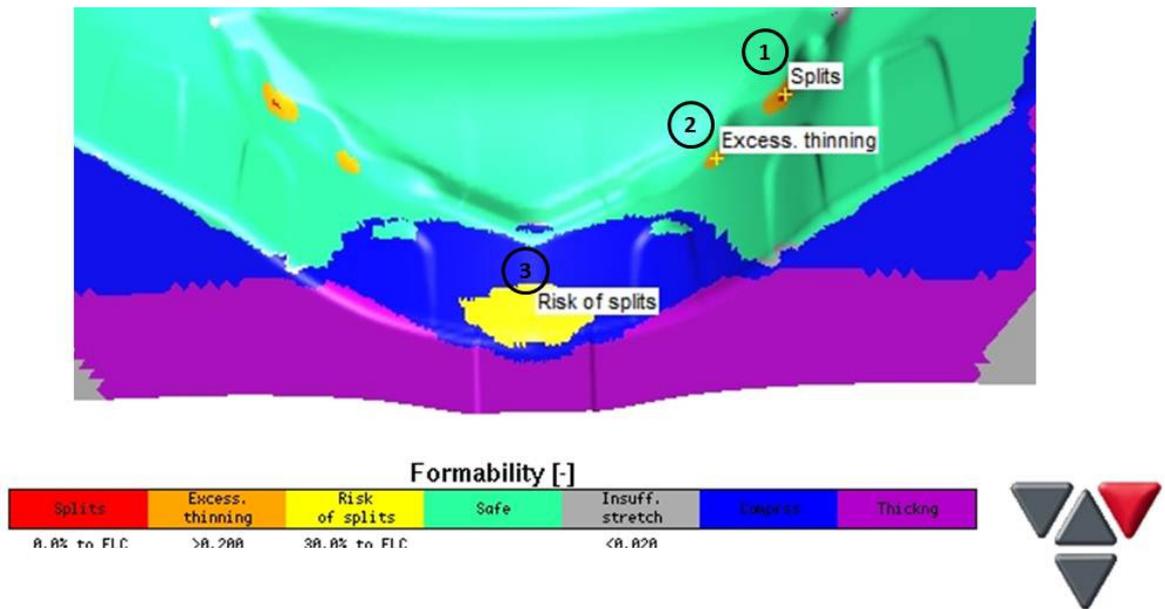
จากการแสดงผลความสามารถในการขึ้นรูป จะเห็นว่าชิ้นงานมีจุดบกพร่องอยู่ 3 จุดตามรูปที่ 4.7

จุดที่ 1 เกิดการฉีกขาด (splits)

จุดที่ 2 อัตราการลดลงของความหนาชิ้นงานมากเกินไป (Excessive thinning)

จุดที่ 3 มีความเสี่ยงที่จะเกิดการฉีกขาด (risk of splits)

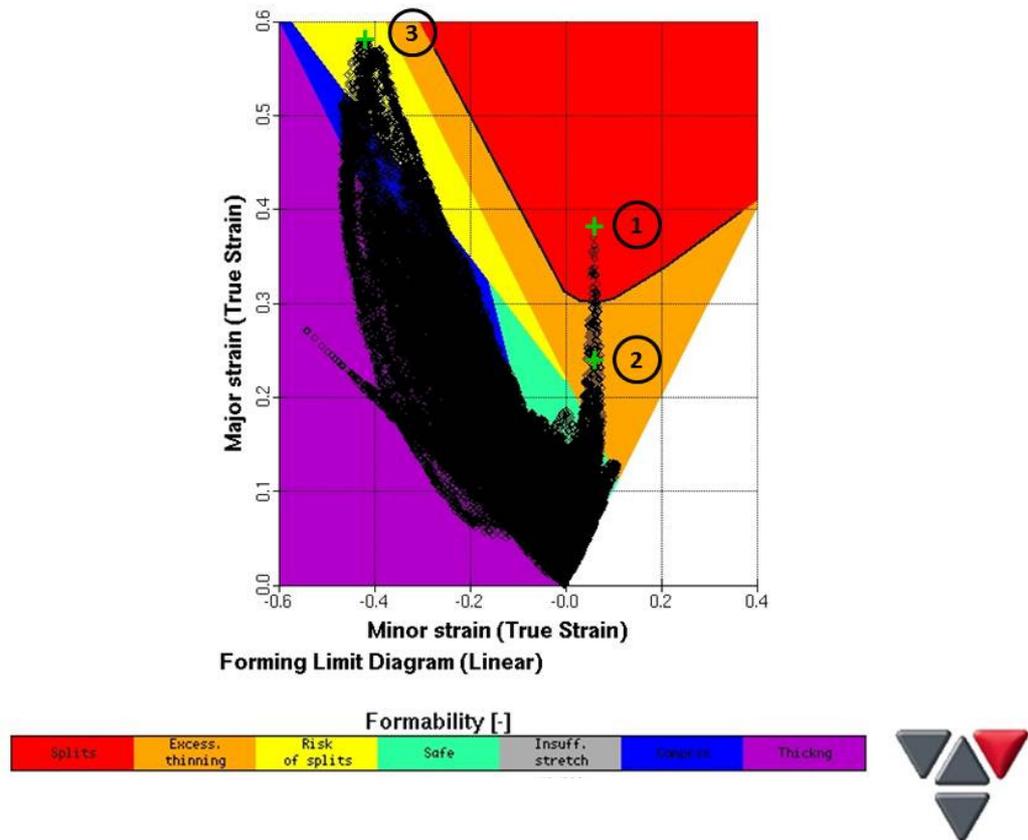
เมื่อพิจารณาจากค่าความเครียดหลักและความเครียดรองที่เกิดขึ้นกับชิ้นงานพบว่าชิ้นงานบริเวณที่มีจุดบกพร่องมีความเครียดหลักและความเครียดรองตามตารางที่ 4.1 และเมื่อเปรียบเทียบกับแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปจุดบกพร่องแต่ละจุดอยู่ในตำแหน่งต่างๆตามรูปที่ 4.7 ซึ่งจะเห็นได้ว่าจุดที่ 1 มีตำแหน่งอยู่เหนือเส้นขีดจำกัดการขึ้นรูป นั่นคือชิ้นงานในบริเวณนี้เกิดการคอด (necking) ส่วนจุดที่ 2 และ 3 ยังคงอยู่ใต้เส้นขีดจำกัดการขึ้นรูป แต่อยู่ในช่วงที่ความหนาของชิ้นงานลดลงมากเกินไปจนเสี่ยงต่อการเกิดความเสียหาย



รูปที่ 4.7 ความสามารถในการขึ้นรูปและจุดบกพร่องของชิ้นงานที่ขึ้นรูปที่อุณหภูมิปกติ

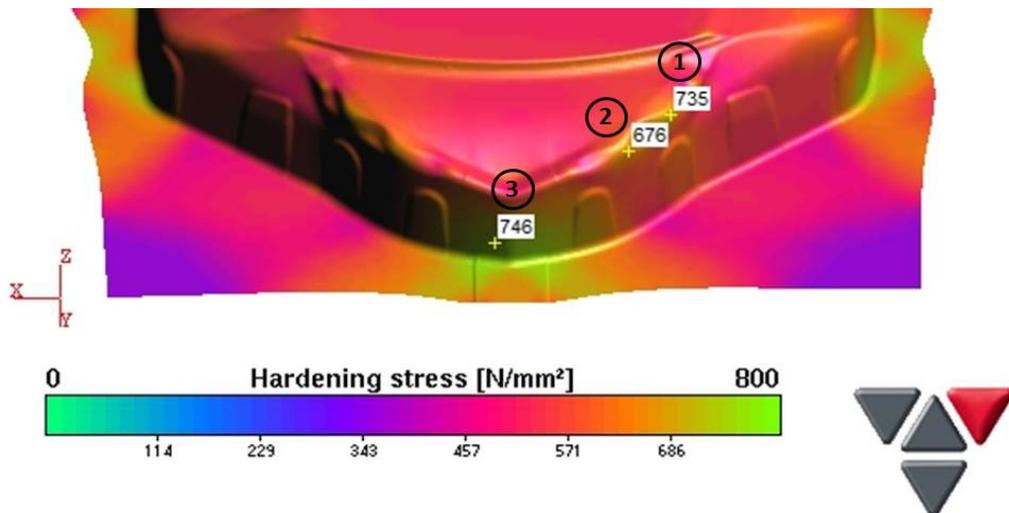
ตารางที่ 4.1 ค่าความเครียดหลักและความเครียดรองของจุดบกพร่องบนชิ้นงานขึ้นรูปที่อุณหภูมิปกติ

จุดที่	ความเครียดหลัก	ความเครียดรอง
1	0.370	0.059
2	0.208	0.069
3	0.580	-0.421



รูปที่ 4.8 ตำแหน่งจุดบกพร่องของชิ้นงานบนแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูป ชิ้นรูปที่อุณหภูมิปกติ

นอกจากนี้โปรแกรมยังสามารถคำนวณค่าความเครียดแข็งที่เกิดขึ้นบริเวณจุดที่ 1, 2 และ 3 ได้เท่ากับ 735 N/mm^2 , 676 N/mm^2 และ 746 N/mm^2 ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.9

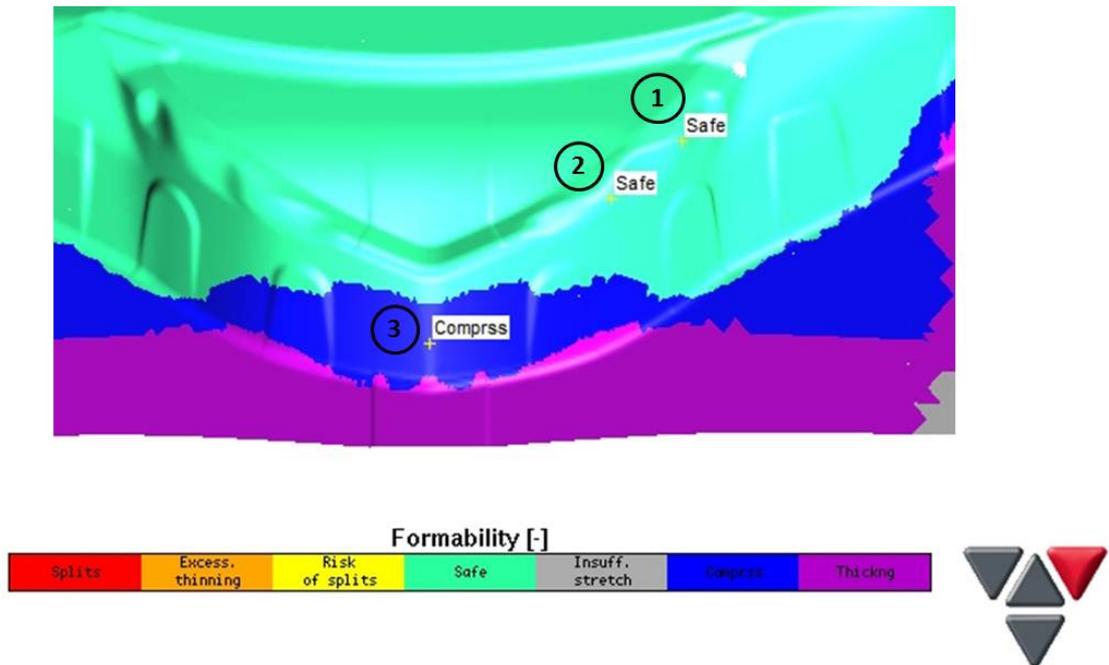


รูปที่ 4.9 ค่าความเครียดแข็งของจุดบกพร่องบนชิ้นงานที่ขึ้นรูปที่อุณหภูมิปกติ

4.2.2 ผลการจำลองการขึ้นรูปรีด

เมื่อกำหนดให้การขึ้นรูปรีดใช้ขอบเขตการแสดงสีของความสามารถในการขึ้นรูปเช่นเดียวกับการขึ้นรูปที่อุณหภูมิปกติในรูปที่ 4.5 โปรแกรมแสดงผลการคำนวณความสามารถในการขึ้นรูปของชิ้นงานตามรูปที่ 4.10 จะเห็นได้ว่าจุดที่เป็นจุดบกพร่องบนชิ้นงานขึ้นรูปที่อุณหภูมิปกติจุดที่ 1 และ 2 เมื่อขึ้นรูปรีดบริเวณดังกล่าวแสดงผลเป็น Safe คือไม่มีความบกพร่อง ส่วนจุดที่ 3 อยู่ในช่วงที่แสดงผลเป็น Compress

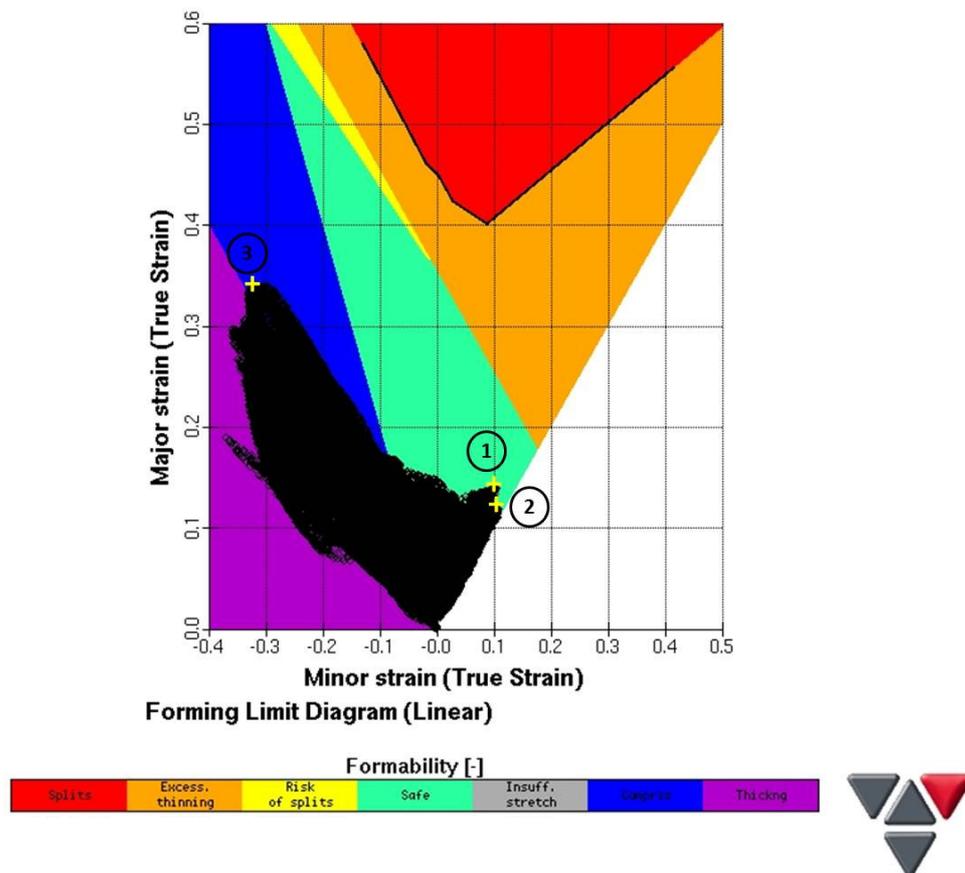
ในการขึ้นรูปรีดชิ้นงานมีค่าความเครียดหลักและความเครียดรองตามตารางที่ 4.2 และเมื่อเปรียบเทียบกับแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปจุดที่ 1, 2 และ 3 อยู่ในตำแหน่งต่างๆตามรูปที่ 4.11 จะเห็นได้ว่าจุดที่ 1 และ 2 ตกอยู่ในบริเวณที่ยอมรับได้ แต่จุดที่ 3 มีค่าความเครียดหลักสูงมากและความเครียดรองที่ต่ำมากจนกระทั่งตกอยู่ในบริเวณที่อาจทำให้เกิดปัญหาการยุบบนชิ้นงานได้



รูปที่ 4.10 ความสามารถในการขึ้นรูปรีด แสดงจุดที่เคยเป็นจุดบกพร่องจากการขึ้นรูปที่อุณหภูมิปกติ

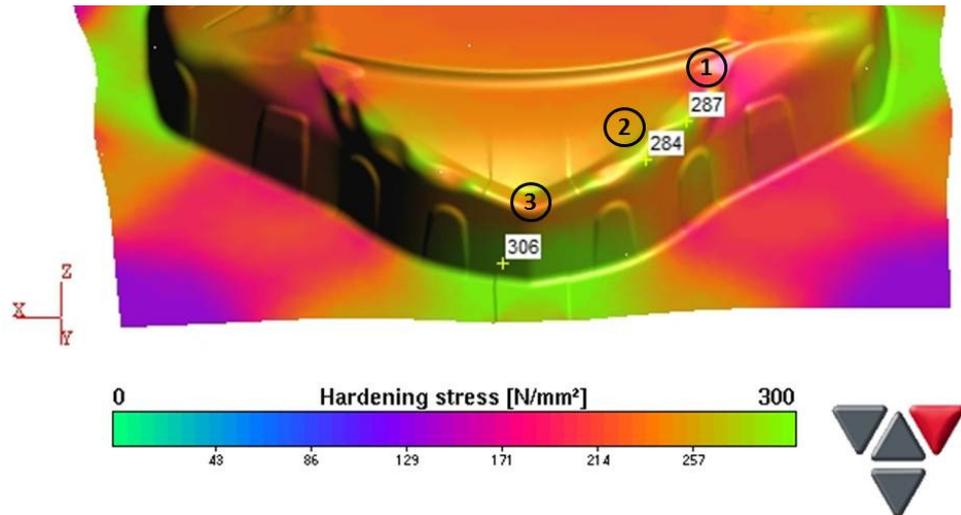
ตารางที่ 4.2 ค่าความเครียดหลักและความเครียดรองของจุดที่เคยเป็นจุดบกพร่องบนชิ้นงานขึ้นรูปรีออน

จุดที่	ความเครียดหลัก	ความเครียดรอง
1	0.137	0.092
2	0.120	0.099
3	0.334	-0.280



รูปที่ 4.11 ตำแหน่งของจุดที่ 1, 2 และ 3 บนแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปรีออน

ค่าความเครียดแข็งของชิ้นงานขึ้นรูปรีออนบริเวณจุดที่ 1, 2 และ 3 เท่ากับ 287 N/mm^2 , 284 N/mm^2 และ 306 N/mm^2 ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.12 จะเห็นได้ว่าค่าความเครียดแข็งของชิ้นงานขึ้นรูปรีออนมีค่าต่ำกว่าชิ้นงานจากการขึ้นรูปที่อุณหภูมิปกติ



รูปที่ 4.12 ค่าความเคียดแข็งบริเวณจุดที่ 1, 2 และ 3 บนชิ้นงานขึ้นรูปร้อน

4.3 วิเคราะห์ผลการทดลอง

4.3.1 เปรียบเทียบผลการจำลองการขึ้นรูปกับผลการทดลอง

จากรูปที่ 4.5 พิจารณาอุณหภูมิของชิ้นงานที่เปลี่ยนแปลงไป ในช่วงแรกอุณหภูมิลดลงอย่างรวดเร็ว เนื่องจากการถ่ายเทความร้อนเปลี่ยนมาเป็นแบบนำความร้อน มีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนมากกว่าการพาความร้อน และคายเคลื่อนที่ลงมาทำให้ความดันสัมผัสที่ผิวของชิ้นงานมีค่ามากขึ้น หลังจากนั้นอัตราการลดอุณหภูมิของชิ้นงานค่อยๆลดลงจนกระทั่งเกือบเป็นศูนย์เนื่องจากแม่พิมพ์เริ่มมีอุณหภูมิสูงขึ้น ทำให้การถ่ายเทความร้อนจากชิ้นงานไปยังแม่พิมพ์เกิดขึ้นน้อยลง

4.3.2 เปรียบเทียบการขึ้นรูปร้อนกับการขึ้นรูปที่อุณหภูมิปกติ

จากผลการทดลองพบว่า ชิ้นงานขึ้นรูปร้อนมีความสามารถในการขึ้นรูปสูงกว่าชิ้นงานที่ขึ้นรูปที่อุณหภูมิปกติ จากผลการทดลองมีข้อสังเกตดังนี้

1. พิจารณาจากแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปจะพบว่าชิ้นงานขึ้นรูปร้อนมีค่าความเคียดต่ำกว่า และค่าความเคียดรองสูงกว่าการขึ้นรูปที่อุณหภูมิปกติ ทำให้มีตำแหน่งอยู่ใต้เส้นขีดจำกัดการขึ้นรูป จึงไม่เกิดความเสียหายขึ้นกับชิ้นงาน

2. พิจารณาค่าความเครียดแข็งพบว่าชิ้นงานขึ้นรูปร้อนมีค่าความเครียดแข็งต่ำกว่าชิ้นงานจากการขึ้นรูปที่อุณหภูมิปกติ อธิบายได้จากสมการ (2.14) การที่ความเครียดแข็งของชิ้นงานขึ้นรูปร้อนมีค่าน้อยมีผลมาจากเลขยกกำลังความเครียดแข็ง (n) ที่มีค่ามาก ซึ่งแสดงให้เห็นว่าวัสดุสามารถรับความเค้นได้มาก

3. จากการที่เลขยกกำลังความเครียดแข็งของชิ้นงานขึ้นรูปร้อนมีค่ามาก จากสมการของเส้นขีดจำกัดการขึ้นรูปสมการ (2.13) มีผลให้เส้นขีดจำกัดการขึ้นรูปของวัสดุสูงขึ้น โอกาสที่ชิ้นงานจะเกิดความเสียหายจึงลดลง

บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

จากการสร้างแบบจำลองเพื่อขึ้นรูปรีออนชิ้นงาน Rail โดยใช้วัสดุ 22MnB5 ความหนา 1.0 มิลลิเมตร ด้วยโปรแกรม AutoForm R3.1 เปรียบเทียบกับผลการขึ้นรูปจริงที่ได้มีผู้ทำการทดลองไว้ พบว่าอุณหภูมิของชิ้นงานที่เปลี่ยนแปลงไปตลอดกระบวนการมีความสอดคล้องกัน แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองการขึ้นรูปรีออนที่สร้างขึ้นมีความน่าเชื่อถือ สามารถนำแนวทางนี้ไปสร้างแบบจำลองการขึ้นรูปรีออนเพื่อใช้กับชิ้นงานอื่นๆ ได้ต่อไป

เมื่อได้ทดลองสร้างแบบจำลองการขึ้นรูปรีออนของชิ้นงาน Wheelhouse เปรียบเทียบกับแบบจำลองการขึ้นรูปที่อุณหภูมิปกติ พบว่าชิ้นงานขึ้นรูปรีออนมีความสามารถในการขึ้นรูปมากกว่าเนื่องจากความเค้นหลักของชิ้นงานขึ้นรูปรีออนมีค่าต่ำกว่า เส้นขีดจำกัดการขึ้นรูปอยู่ในตำแหน่งสูงกว่า และความเครียดแข็งมีค่าต่ำกว่า แสดงให้เห็นว่าเลขยกกำลังความเครียดแข็งมีค่าสูง นั่นคือชิ้นงานขึ้นรูปรีออนมีความสามารถในการขึ้นรูปสูงกว่า ข้อได้เปรียบด้านความสามารถในการขึ้นรูปนี้ทำให้การขึ้นรูปรีออนเหมาะที่จะนำไปใช้ในการผลิตชิ้นงานที่เป็นงานขึ้นรูปลึกหรือมีรูปร่างซับซ้อนขึ้นรูปด้วยวิธีธรรมดาได้ยาก และการใช้โปรแกรมทางไฟไนต์เอลิเมนต์ในการทำนายผลจากการขึ้นรูปรีออนก่อนทำการผลิตจริงจะช่วยให้สามารถปรับแก้แบบจำลองจนกระทั่งได้ชิ้นงานที่สมบูรณ์ไว้จัดบดพร้อมก่อนที่จะนำไปผลิตจริง

5.2 ข้อเสนอแนะ

ความแม่นยำของแบบจำลองการขึ้นรูปรีออนด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ขึ้นอยู่กับสมบัติทางความร้อนของวัสดุที่ป้อนให้กับโปรแกรม ได้แก่ แผนภาพความเค้นและความเครียดของวัสดุ อุณหภูมิและอัตราความเครียดต่างๆ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของวัสดุไปสู่อากาศและแม่พิมพ์ รวมถึงการตั้งตำแหน่งและการเคลื่อนที่ของแม่พิมพ์ให้ใกล้เคียงกับการผลิตจริงมากที่สุดก็มีส่วนช่วยให้ผลจากการจำลองการขึ้นรูปรีออนมีความแม่นยำมากยิ่งขึ้น

เอกสารอ้างอิง

1. เดช พุทธเจริญทอง, 2548, **ทฤษฎีพลาสติกจิติและการเปลี่ยนรูปถาวร**, ศูนย์ส่งเสริมกรุงเทพ, หน้า 2-19.
2. Paul, S. 2012, “Theoretical Analysis of Strain and Stress-Based Forming Limit Diagrams”, **Journal of strain analysis**, Vol. 48, No.3, pp. 177-178.
3. Hu, P., Ma, N., Liu, L. and Zhu, Y., 2013, **Theories, Methods and Numerical Technology of Sheet Metal Cold and Hot Forming**, Springer, London, pp. 35-41, 69-80, 48-53.
4. Karbasian, H. and Tekkaya, A.E., 2010, “A review on hot stamping”, **Journal of Materials Processing Technology**, Vol. 210, pp. 2105-2107, 2108-2109.
5. Sharpiro, A.B., 2009, “Using LS-Dyna for Hot Stamping”, **Seventh European LS-Dyna Conference**, May 14-15, Salzburg, Austria.
6. วลัยกร สมใส, 2553, การวิเคราะห์การขึ้นรูปชิ้นงานจากวัสดุเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงชนิดเชื่อมพ่วงด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีการขึ้นรูปโลหะ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
7. Merklein, M., Lechler, J. and Geiger, M., 2006, “Characterisation of the Flow Properties of the Quenchenable Ultra High Strength Steel 22MnB5”, **Annals of the CIRP**, Vol. 55, No.1.

8. Li, H., Wu, X. and Li, G., 2013, "Prediction of Forming Limit Diagram for 22MnB5 in Hot Stamping Process", **Journal of Materials Engineering and Performance**, Vol. 22, No. 8, pp. 2131 – 2140.
9. Akerstrom, P. and Oldenburg, M., 2006, "Austenite Decomposition During Press Hardening of a Boron Steel - Computer Simulation and Test", **Journal of Materials Processing Technology**, Vol. 174. pp. 399-406.
10. Naderi, M., Uthaisangsuk, V., Prah, U. and Bleck, W., 2008, "A Numerical and Experimental Investigation into Hot Stamping of Boron Alloyed Heat Treated Steels", **Steel research international**, Vol. 79, No. 2, pp. 77-84.

ภาคผนวก ก

สมบัติของวัสดุ 22MnB5 ที่ใช้ในโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์

สมบัติของวัสดุ 22MnB5 จากโปรแกรม AutoForm

ตารางที่ ก.1 ส่วนประกอบทางเคมีของวัสดุ 22MnB5

องค์ประกอบ	C	Mn	B
เปอร์เซ็นต์มวล	0.217	1.162	0.0029

ตารางที่ ก.2 สมบัติของวัสดุ 22MnB5

Elasticity			
Young's modulus			105,000 N/mm ²
Poisson's ratio			0.3
Specific weight			7.8 x 10 ⁻⁵ N/mm ³
Yield surface			
r ₀	1	σ ₀	78.8 N/mm ²
r ₄₅	1	σ ₄₅	78.8 N/mm ²
r ₉₀	1	σ ₉₀	78.8 N/mm ²
r _b	1	σ _b	78.8 N/mm ²

ตารางที่ ก.3 ค่าความเค้น-ความเครียดของวัสดุ 22MnB5 ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส

Strain	Stress (N/mm ²)				
	0.1	0.3	1	3	10
0.0198	204.39	229.63	260.89	293.11	333.01
0.0296	219.28	246.36	279.89	314.46	357.26
0.0392	232.81	261.56	297.16	333.87	379.31
0.0488	245.38	275.68	313.21	351.89	399.79
0.0583	256.93	288.66	327.95	368.46	418.61
0.0677	267.56	300.60	341.52	383.70	435.93
0.0770	277.34	311.60	354.01	397.73	451.88
0.0862	286.36	321.72	365.52	410.66	466.56
0.0953	294.67	331.06	376.12	422.58	480.10
0.1044	302.41	339.76	386.01	433.69	492.72
0.1133	309.48	347.7	395.03	443.82	504.24
0.1222	316.08	355.12	403.46	453.29	514.99
0.1310	322.18	361.96	411.24	462.03	524.92
0.1398	327.87	368.36	418.51	470.19	534.20
0.1484	333.07	374.21	425.15	477.66	542.68
0.1570	337.95	379.69	431.37	484.64	550.62
0.1655	342.45	384.75	437.12	491.11	557.96
0.1740	346.68	389.49	442.51	497.16	564.84
0.1823	350.54	393.83	447.44	502.7	571.13
0.2000	358.00	402.21	456.96	513.4	583.29
0.3000	385.42	433.02	491.97	552.73	627.97
0.4000	398.11	447.28	508.16	570.92	648.64
0.5000	401.00	450.52	511.85	575.07	653.35

ตารางที่ ก.4 ค่าความเค้น-ความเครียดของวัสดุ 22MnB5 ที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส

Strain \ Strain rate (s ⁻¹)		Stress (N/mm ²)				
		0.1	0.3	1	3	10
0.0198		191.75	215.43	244.75	274.98	312.41
0.0296		205.37	230.73	262.14	294.51	334.6
0.0392		217.46	244.31	277.57	311.85	354.3
0.0488		228.43	256.64	291.57	327.59	372.18
0.0583		238.28	267.71	304.15	341.72	388.24
0.0677		247.15	277.67	315.46	354.43	402.67
0.0770		255.12	286.63	325.64	365.86	415.67
0.0862		262.30	294.70	334.81	376.16	427.37
0.0953		268.78	301.97	343.08	385.45	437.92
0.1044		274.68	308.61	350.62	393.92	447.54
0.1133		279.95	314.53	357.35	401.48	456.13
0.1222		284.77	319.94	363.49	408.39	463.98
0.1310		289.13	324.84	369.05	414.63	471.07
0.1398		293.11	329.31	374.14	420.35	477.56
0.1484		296.68	333.31	378.69	425.46	483.37
0.1570		299.94	336.99	382.86	430.14	488.69
0.1655		302.9	340.31	386.64	434.39	493.52
0.1740		305.62	343.36	390.1	438.28	497.94
0.1823		308.06	346.10	393.21	441.78	501.91
0.2000		312.61	351.22	399.03	448.31	509.34
0.3000		327.40	367.83	417.90	469.51	533.43
0.4000		332.76	373.86	424.75	477.21	542.17
0.5000		335.00	376.37	427.61	480.42	545.81

ตารางที่ ก.5 ค่าความเค้น-ความเครียดของวัสดุ 22MnB5 ที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส

Strain / Strain rate (s ⁻¹)		Stress (N/mm ²)				
		0.1	0.3	1	3	10
0.0198		151.25	169.93	193.06	216.90	246.43
0.0296		159.69	179.42	203.84	229.01	260.19
0.0392		167.16	187.81	213.37	239.72	272.35
0.0488		173.91	195.38	221.98	249.4	283.35
0.0583		179.94	202.17	229.69	258.06	293.18
0.0677		185.69	208.62	237.02	266.29	302.54
0.0770		191.48	215.13	244.41	274.60	311.98
0.0862		196.72	221.02	251.11	282.12	320.52
0.0953		201.48	226.36	257.17	288.93	328.26
0.1044		205.83	231.25	262.73	295.18	335.36
0.1133		209.74	235.65	267.72	300.79	341.73
0.1222		213.33	239.68	272.3	305.93	347.58
0.1310		216.59	243.34	276.46	310.61	352.89
0.1398		219.59	246.71	280.29	314.91	357.77
0.1484		222.28	249.74	283.73	318.77	362.17
0.1570		224.77	252.53	286.9	322.33	366.21
0.1655		227.03	255.07	289.79	325.58	369.89
0.1740		229.11	257.41	292.45	328.56	373.29
0.1823		230.99	259.52	294.84	331.26	376.35
0.2000		234.53	263.49	299.36	336.33	382.12
0.3000		246.34	276.76	314.44	353.27	401.36
0.4000		250.87	281.86	320.23	359.77	408.75
0.5000		252.62	283.81	322.45	362.27	411.59

ตารางที่ ก.6 ค่าความเค้น-ความเครียดของวัสดุ 22MnB5 ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส

		Stress (N/mm ²)				
Strain	Strain rate (s ⁻¹)	0.1	0.3	1	3	10
	0.0198		151.05	169.7	192.8	216.62
0.0296		159.49	179.19	203.58	228.73	259.86
0.0392		166.96	187.58	213.11	239.44	272.03
0.0488		173.71	195.16	221.73	249.11	283.02
0.0583		179.74	201.94	229.43	257.77	292.8
0.0677		184.82	207.64	235.91	265.04	301.12
0.0770		188.72	212.03	240.89	270.65	307.49
0.0862		192.19	215.92	245.31	275.61	313.13
0.0953		195.26	219.37	249.23	280.01	318.13
0.1044		198.01	222.47	252.75	283.96	322.62
0.1133		200.43	225.19	255.84	287.44	326.56
0.1222		202.61	227.63	258.62	290.56	330.11
0.1310		204.55	229.81	261.09	293.34	333.27
0.1398		206.29	231.77	263.32	295.84	336.11
0.1484		207.83	233.50	265.28	298.05	338.62
0.1570		209.22	235.06	267.06	300.04	340.88
0.1655		210.46	236.45	268.64	301.81	342.9
0.1740		211.58	237.71	270.07	303.42	344.72
0.1823		212.57	238.82	271.33	304.84	346.33
0.2000		214.38	240.85	273.64	307.44	349.28
0.3000		219.75	246.89	280.49	315.14	358.03
0.4000		221.38	248.72	282.58	317.48	360.69
0.5000		222.5	249.98	284.01	319.08	362.52

ตารางที่ ก.7 ค่าความเค้นของวัสดุ 22MnB5 ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส

Strain \ Strain rate (s ⁻¹)		Stress (N/mm ²)				
		0.1	0.3	1	3	10
0.0198		119.84	134.64	152.97	171.86	195.26
0.0296		123.31	138.54	157.39	176.83	200.90
0.0392		126.53	142.16	161.51	181.46	206.16
0.0488		129.6	145.61	165.43	185.86	211.16
0.0583		132.49	148.85	169.11	190.00	215.86
0.0677		135.2	151.9	172.58	193.89	220.28
0.0770		137.76	154.77	175.84	197.56	224.45
0.0862		140.17	157.48	178.91	201.01	228.37
0.0953		142.44	160.03	181.81	204.27	232.07
0.1044		144.60	162.46	184.57	207.37	235.60
0.1133		146.62	164.73	187.15	210.26	238.88
0.1222		148.54	166.89	189.61	213.02	242.02
0.1310		150.36	168.93	191.93	215.63	244.98
0.1398		152.09	170.88	194.14	218.11	247.81
0.1484		153.71	172.69	196.2	220.44	250.44
0.1570		155.26	174.43	198.18	222.65	252.96
0.1655		156.72	176.07	200.04	224.75	255.34
0.1740		158.11	177.64	201.82	226.75	257.62
0.1823		159.42	179.11	203.49	228.62	259.74
0.2000		162.02	182.03	206.8	232.34	263.97
0.3000		172.89	194.24	220.68	247.94	281.69
0.4000		179.3	201.44	228.86	257.13	292.13
0.5000		180	202.23	229.76	258.13	293.27

ตารางที่ ก.8 ค่าความเค้น-ความเครียดของวัสดุ 22MnB5 ที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส

Strain rate (s ⁻¹)		Stress (N/mm ²)				
		0.1	0.3	1	3	10
0.0198		107.40	120.67	137.09	154.03	174.99
0.0296		110.51	124.16	141.06	158.48	180.05
0.0392		113.4	127.41	144.75	162.63	184.76
0.0488		116.15	130.5	148.26	166.57	189.24
0.0583		118.74	133.40	151.56	170.28	193.46
0.0677		121.17	136.13	154.67	173.77	197.42
0.0770		123.46	138.71	157.59	177.05	201.16
0.0862		125.62	141.13	160.35	180.15	204.67
0.0953		127.66	143.42	162.94	183.07	207.99
0.1044		129.59	145.60	165.42	185.85	211.15
0.1133		131.4	147.63	167.73	188.44	214.09
0.1222		133.13	149.57	169.93	190.92	216.90
0.1310		134.75	151.40	172.01	193.25	219.56
0.1398		136.31	153.14	173.99	195.48	222.09
0.1484		137.76	154.77	175.84	197.56	224.45
0.1570		139.15	156.33	177.61	199.54	226.71
0.1655		140.45	157.8	179.28	201.42	228.84
0.1740		141.71	159.21	180.88	203.22	230.88
0.1823		142.87	160.52	182.37	204.89	232.78
0.2000		145.20	163.13	185.34	208.23	236.58
0.3000		154.95	174.08	197.78	222.21	252.45
0.4000		160.69	180.53	205.11	230.44	261.81
0.5000		161.00	180.88	205.51	230.89	262.32

ตารางที่ ก.9 ขีดจำกัดการขึ้นรูปของวัสดุ 22MnB5 ในงานขึ้นรูปที่อุณหภูมิปกติ

Minor strain	Major strain
-0.1300	0.5800
-0.0186	0.4612
0.0039	0.4237
0.0088	0.4009
0.4153	0.5554

ตารางที่ ก.10 ขีดจำกัดการขึ้นรูปของวัสดุ 22MnB5 ในงานขึ้นรูปร้อน

Minor strain	Major strain
-0.272	0.670
-0.142	0.545
-0.036	0.444
-0.003	0.413
0.029	0.403
0.065	0.401
0.103	0.406
0.207	0.438
0.364	0.496

ภาคผนวก ข

การคำนวณค่าสเกลแฟคเตอร์ของสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนในช่วงขึ้นรูป

สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนในช่วงจิ้นรูปเป็นฟังก์ชันกับความดันที่ผิวของจิ้นงาน ให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเมื่อความดันคงที่เท่ากับ $1.28 \text{ mW/mm}^2\text{K}$ สเกลแฟคเตอร์ของสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2.15)

$$HTC_{\text{cond}} = \frac{k\pi}{4\lambda} \left[1 + 85 \left(\frac{P}{\sigma_r} \right)^{0.8} \right]$$

เมื่อ $P = 0$

$$HTC_{(0)} = \frac{0.059\pi}{4 \times 6.18 \times 10^{-5}}$$

$$HTC_{(0)} = 0.75 \text{ mW/mm}^2\text{K}$$

$$\text{Scale factor}_{(0)} = \frac{1.28}{0.75}$$

$$\text{Scale factor}_{(0)} = 0.59$$

เมื่อ $P = 1 \text{ N/mm}^2$

$$HTC_{(1)} = \frac{0.059\pi}{4 \times 6.18 \times 10^{-5}} \left[1 + 85 \left(\frac{1}{1765} \right)^{0.8} \right]$$

$$HTC_{(1)} = 0.91 \text{ mW/mm}^2\text{K}$$

$$\text{Scale factor}_{(1)} = \frac{1.28}{0.91}$$

$$\text{Scale factor}_{(1)} = 0.71$$

$$\text{Mean } P = 2 \text{ N/mm}^2$$

$$\text{HTC}_{(2)} = \frac{0.059\pi}{4 \times 6.18 \times 10^{-5}} \left[1 + 85 \left(\frac{2}{1765} \right)^{0.8} \right]$$

$$\text{HTC}_{(2)} = 1.03 \text{ mW/mm}^2\text{K}$$

$$\text{Scale factor}_{(2)} = \frac{1.28}{1.03}$$

$$\text{Scale factor}_{(2)} = 0.8$$

$$\text{Mean } P = 3 \text{ N/mm}^2$$

$$\text{HTC}_{(3)} = \frac{0.059\pi}{4 \times 6.18 \times 10^{-5}} \left[1 + 85 \left(\frac{3}{1765} \right)^{0.8} \right]$$

$$\text{HTC}_{(3)} = 1.14 \text{ mW/mm}^2\text{K}$$

$$\text{Scale factor}_{(3)} = \frac{1.28}{1.14}$$

$$\text{Scale factor}_{(3)} = 0.89$$

$$\text{Mean } P = 4 \text{ N/mm}^2$$

$$\text{HTC}_{(4)} = \frac{0.059\pi}{4 \times 6.18 \times 10^{-5}} \left[1 + 85 \left(\frac{4}{1765} \right)^{0.8} \right]$$

$$\text{HTC}_{(4)} = 1.24 \text{ mW/mm}^2\text{K}$$

$$\text{Scale factor}_{(4)} = \frac{1.28}{1.24}$$

$$\text{Scale factor}_{(4)} = 0.97$$

$$\text{HTC}_{(4.5)} P = 4.5 \text{ N/mm}^2$$

$$\text{HTC}_{(4.5)} = \frac{0.059\pi}{4 \times 6.18 \times 10^{-5}} \left[1 + 85 \left(\frac{4.5}{1765} \right)^{0.8} \right]$$

$$\text{HTC}_{(4.5)} = 1.28 \text{ mW/mm}^2 \text{ K}$$

$$\text{Scale factor}_{(4.5)} = \frac{1.28}{1.28}$$

$$\text{Scale factor}_{(4.5)} = 1$$

ภาคผนวก ค

ผลการคำนวณด้วยโปรแกรม AutoForm เพื่อทดสอบความน่าเชื่อถือของแบบจำลอง

ตารางที่ ค.1 อุณหภูมิของชิ้นงานที่คำนวณได้จากโปรแกรม AutoForm

เวลา (วินาที)	อุณหภูมิ (°C)						
0	933	7.0	800	14.0	131	21.0	59
0.2	929	7.2	798	14.2	124	21.2	59
0.4	925	7.4	796	14.4	119	21.4	59
0.6	921	7.6	794	14.6	115	21.6	58
0.8	917	7.8	792	14.8	110	21.8	58
1.0	914	8.0	784	15.0	106	22.0	58
1.2	910	8.2	760	15.2	102	22.2	58
1.4	906	8.4	736	15.4	98	22.4	58
1.6	902	8.6	712	15.6	96	22.6	57
1.8	898	8.8	688	15.8	93	22.8	57
2.0	895	9.0	664	16.0	90	23.0	57
2.2	891	9.2	640	16.2	86	23.2	57
2.4	887	9.4	616	16.4	84	23.4	57
2.6	883	9.6	592	16.6	81	23.6	57
2.8	879	9.8	568	16.8	79	23.8	56
3.0	876	10.0	544	17.0	77	24.0	56
3.2	872	10.2	520	17.2	76	24.2	56
3.4	868	10.4	496	17.4	74	24.4	56
3.6	864	10.6	472	17.6	72	24.6	56
3.8	860	10.8	448	17.8	71	24.8	56
4.0	857	11.0	424	18.0	70	25.0	56
4.2	853	11.2	400	18.2	69	25.2	56
4.4	849	11.4	376	18.4	68	25.4	56
4.6	845	11.6	352	18.6	67	25.6	56
4.8	841	11.8	328	18.8	66	25.8	56
5.0	838	12.0	304	19.0	65	26.0	56
5.2	834	12.2	281	19.2	64	26.2	56
5.4	830	12.4	248	19.4	63	26.4	56
5.6	826	12.6	219	19.6	63	26.6	56
5.8	822	12.8	197	19.8	62	26.8	55
6.0	819	13.0	181	20.0	62	27.0	55
6.2	815	13.2	168	20.2	61	27.2	55
6.4	811	13.4	158	20.4	61	27.4	55
6.6	807	13.6	148	20.6	60	27.6	55
6.8	803	13.8	139	20.8	60	27.8	55

อัตราการเขียนตัวคำนวณจากช่วงที่กราฟเป็นเส้นตรง คือวินาทีที่ 8 ถึงวินาทีที่ 12.7

$$\begin{aligned}\text{อัตราการเขียนตัว} &= \frac{784 - 202}{12.7 - 8} \\ &= 123.8 \text{ องศาเซลเซียสต่อวินาที}\end{aligned}$$

ภาคผนวก ง

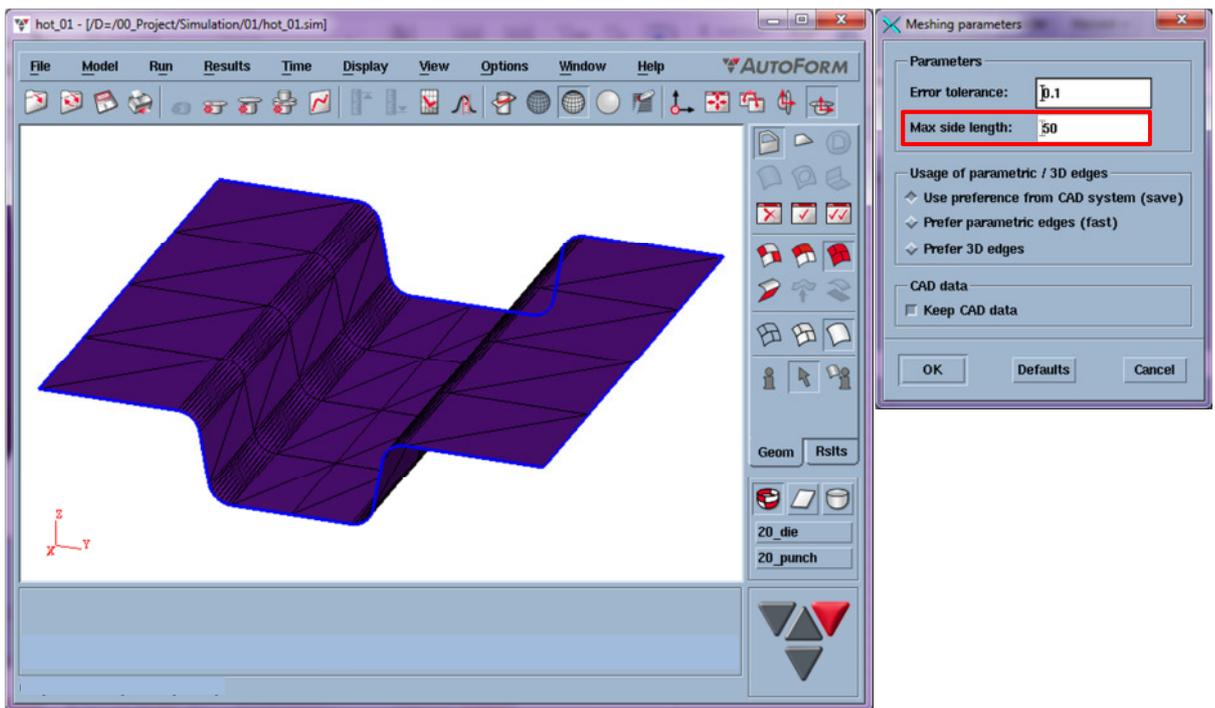
ขั้นตอนการสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของงานขึ้นรูปรีดโลหะแผ่นโดยโปรแกรม

AutoForm R3.1

การสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของงานขึ้นรูปรีดโลหะแผ่นโดยใช้โปรแกรม AutoForm R3.1 มีขั้นตอนหลัก 3 ขั้นตอน คือ Geometry generator, Process generator และการดูผลจากการคำนวณ ตัวอย่างที่นำมาแสดงต่อไปนี้ เป็นแบบจำลองของชิ้นงาน Rail ที่ใช้ในการทดสอบความแม่นยำของโปรแกรม

1. Geometry generator

เป็นการนำแบบจำลองของชิ้นงานและแม่พิมพ์ (geometry) ที่สร้างด้วยโปรแกรม CAD เข้ามาในโปรแกรม AutoForm และสร้างโครงตาข่าย (mesh) ให้กับแบบจำลอง โปรแกรม AutoForm จะสร้าง mesh ให้โดยอัตโนมัติเป็นรูปสามเหลี่ยม ผู้ใช้สามารถกำหนดขนาดของ mesh ได้ตามต้องการ โดยในการใช้งานเฉพาะเรื่องนี้ใช้ขนาด mesh ตามตัวเลือกอัตโนมัติ (default) ของโปรแกรม คือแต่ละด้านมีความกว้างไม่เกิน 50 มิลลิเมตร



รูปที่ ง.1 แบบจำลองของแม่พิมพ์ที่สร้าง mesh แล้วและการกำหนดขนาดของ mesh

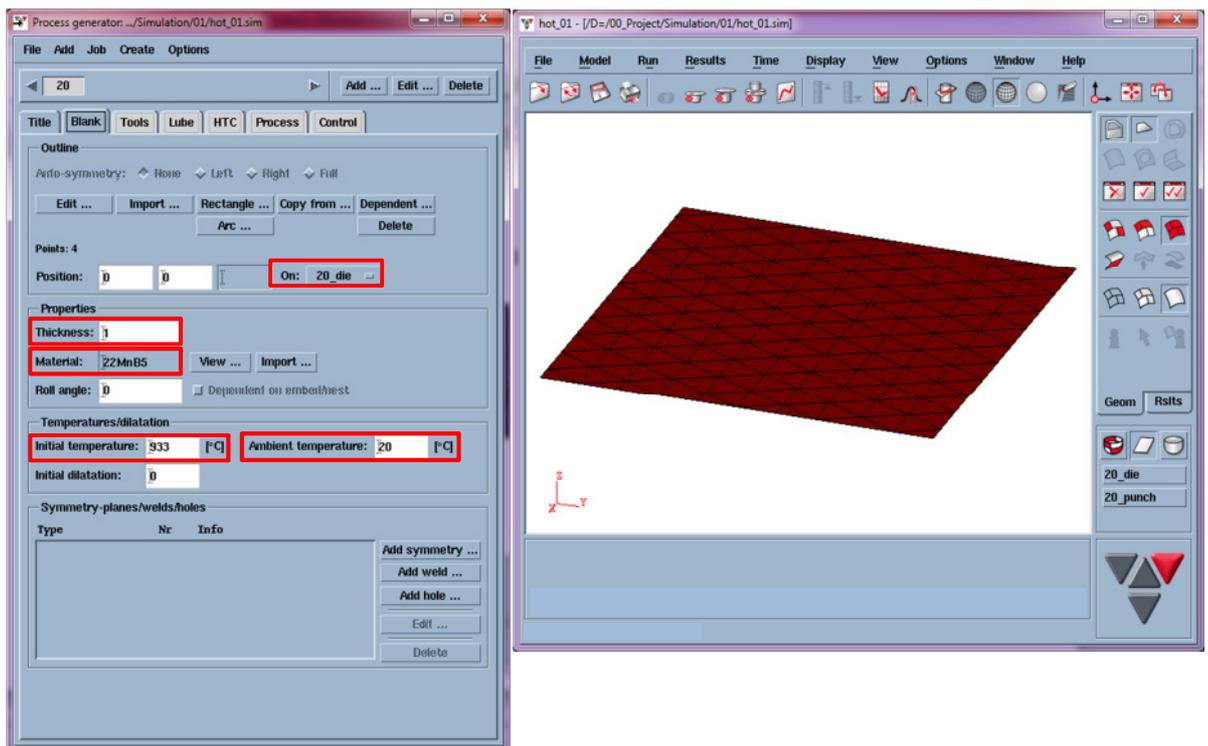
2. Process generator

2.1 Blank

เป็นการกำหนดค่าต่างๆของแผ่นโลหะ (blank) ที่จะใช้ในการขึ้นรูป ได้แก่ ขนาด รูปร่าง ความหนา ชนิดของวัสดุ ตำแหน่งของแผ่นโลหะ อุณหภูมิเริ่มต้น และทำการสร้าง mesh ให้กับ blank

ในโครงการเฉพาะเรื่องนี้กำหนดค่าต่างๆของ blank ดังต่อไปนี้

- ตำแหน่งเริ่มต้นของ blank คือวางอยู่บนคาน
- Blank มีขนาดกว้าง 105 มิลลิเมตร ยาว 105 มิลลิเมตร ความหนา 1 มิลลิเมตร
- วัสดุที่ใช้คือ 22MnB5
- อุณหภูมิเริ่มต้นของ blank เท่ากับ 933 องศาเซลเซียส
- อุณหภูมิของสภาวะแวดล้อมเท่ากับ 20 องศาเซลเซียส



รูปที่ ง.2 ขั้นตอนการสร้างแบบจำลองและสร้าง mesh ให้กับแผ่นโลหะ

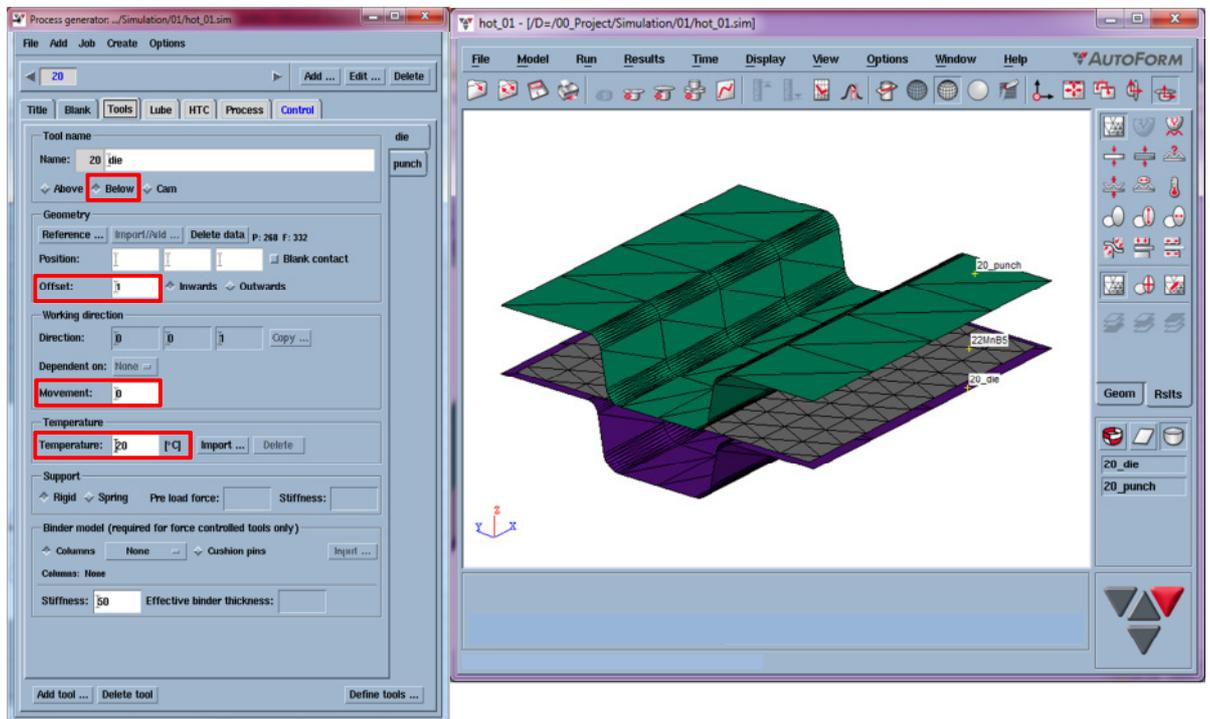
2.2 Tool

เป็นการกำหนดรูปร่าง ขนาด ตำแหน่ง ช่องว่างระหว่างผิวของพื้นที่และคาย (clearance) เมื่อสิ้นสุดการ

ขึ้นรูป และกำหนดอุณหภูมิเริ่มต้นของพื้นที่และคาย

ในการโครงการเฉพาะเรื่องนี้กำหนดค่าต่างๆของพื้นที่และคายดังต่อไปนี้

- พื้นที่และคายมี clearance เท่ากับความหนาของชิ้นงานคือ 1 มิลลิเมตร
- อุณหภูมิเริ่มต้นของพื้นที่และคายเท่ากับ 20 องศาเซลเซียส
- พื้นที่มีตำแหน่งอยู่ด้านบน สูงขึ้นไป 20 มิลลิเมตร และคายมีตำแหน่งอยู่ด้านล่าง

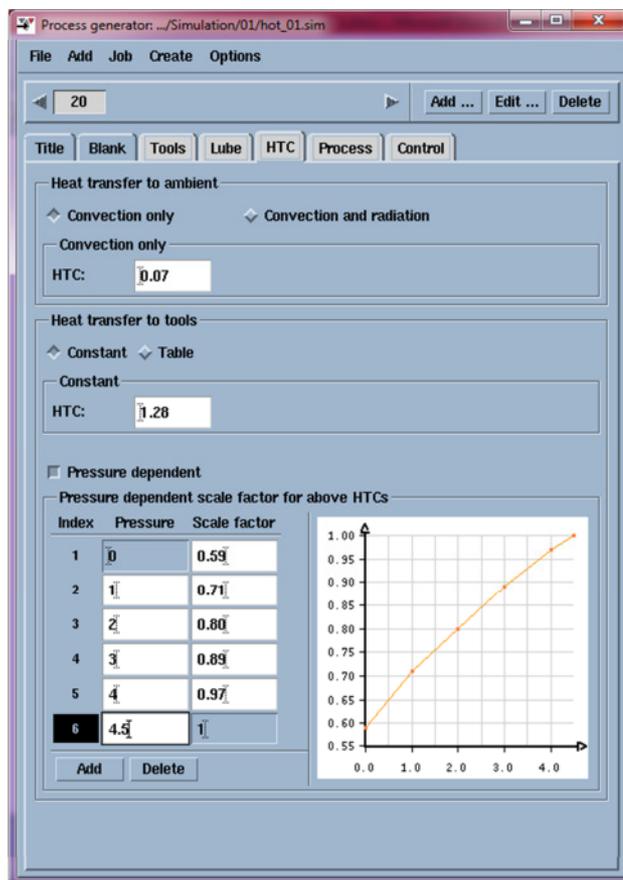


รูปที่ 3 การสร้างและกำหนดตำแหน่งของพื้นที่และคาย

2.3 HTC

เป็นการกำหนดค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (HTC) จากแผ่นโลหะไปยังอากาศและแม่พิมพ์ โดยในการโครงการเฉพาะเรื่องนี้ได้กำหนดค่า HTC ของแผ่นโลหะดังต่อไปนี้

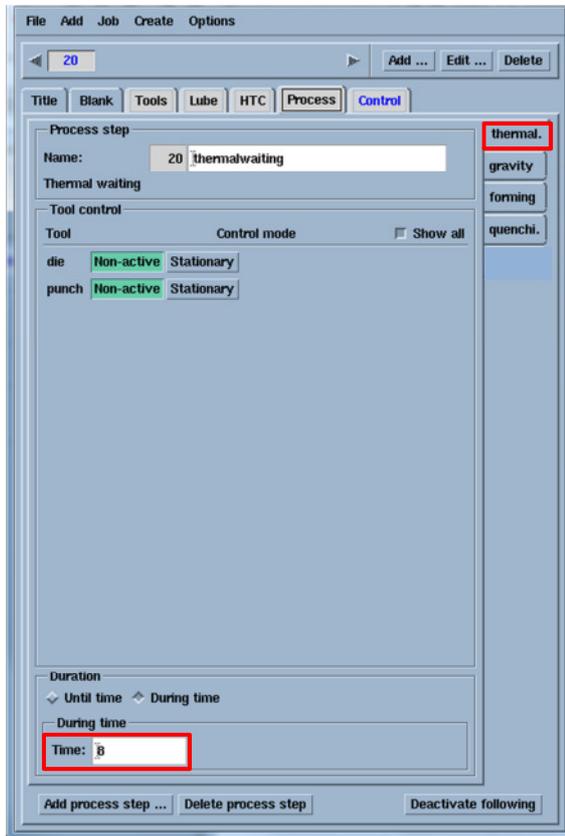
- HTC ของการพาความร้อน (convection) ไปยังอากาศมีค่าเท่ากับ $0.07 \text{ mW/mm}^2\text{K}$ และมีเฉพาะการพาความร้อนเท่านั้น เนื่องจากการแผ่รังสีความร้อน (radiation) เกิดขึ้นน้อยมาก [5]
- HTC ของการนำความร้อนไปยังแม่พิมพ์มีค่าเท่ากับ $1.2 \text{ mW/mm}^2\text{K}$
- ให้ HTC เป็นฟังก์ชันกับความดันที่ผิวสัมผัส (pressure) ของชิ้นงานกับแม่พิมพ์ โดยการคำนวณสเกลแฟคเตอร์ได้แสดงไว้ในภาคผนวก ข



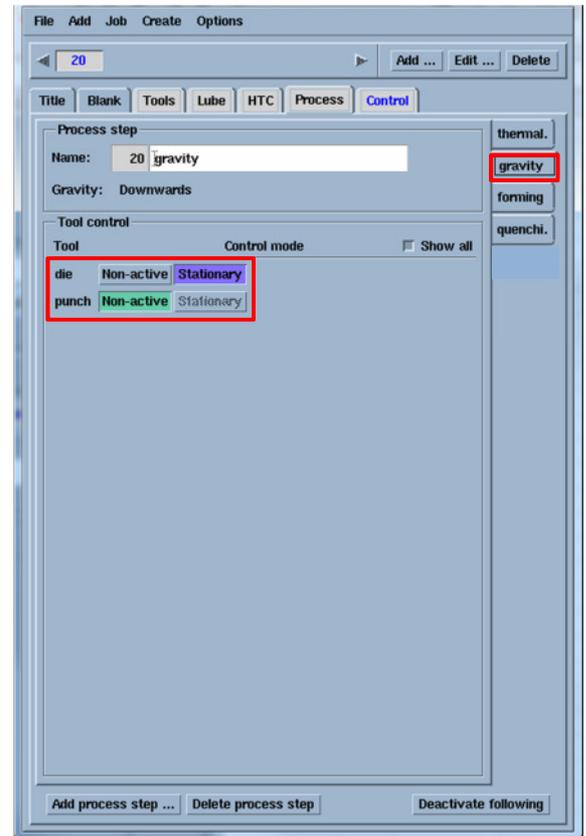
รูปที่ ง.4 การกำหนดค่า HTC ของชิ้นงาน

2.4 Process

เป็นการสร้างขั้นตอนการทำงานตั้งแต่ต้นจนจบกระบวนการขึ้นรูปร้อน รวมทั้งกำหนดทิศทาง การเคลื่อนที่และระยะทางการเคลื่อนที่ของแม่พิมพ์ในแต่ละขั้นตอน



(ก)



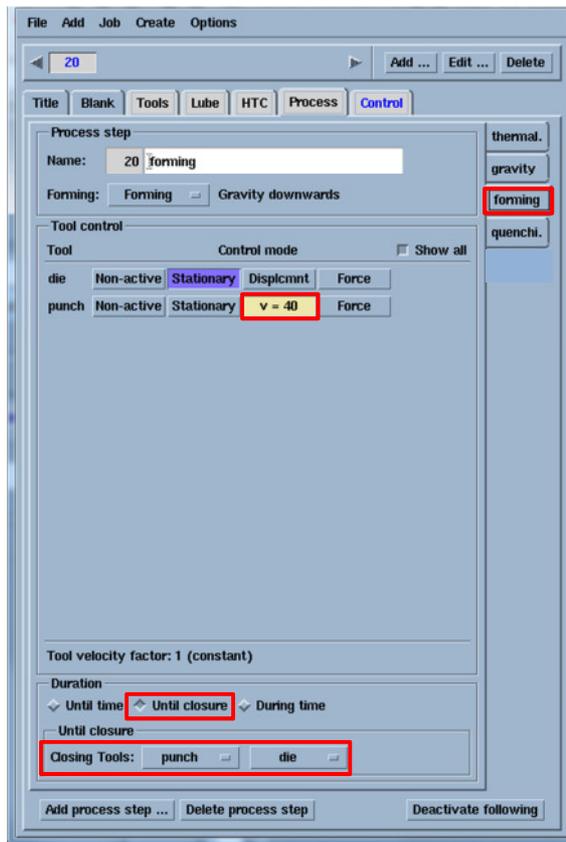
(ข)

รูปที่ ๓.5 (ก) การกำหนดเวลาในขั้นตอน thermalwait (ข) การกำหนดการเคลื่อนที่ของแม่พิมพ์ใน ขั้นตอน gravity

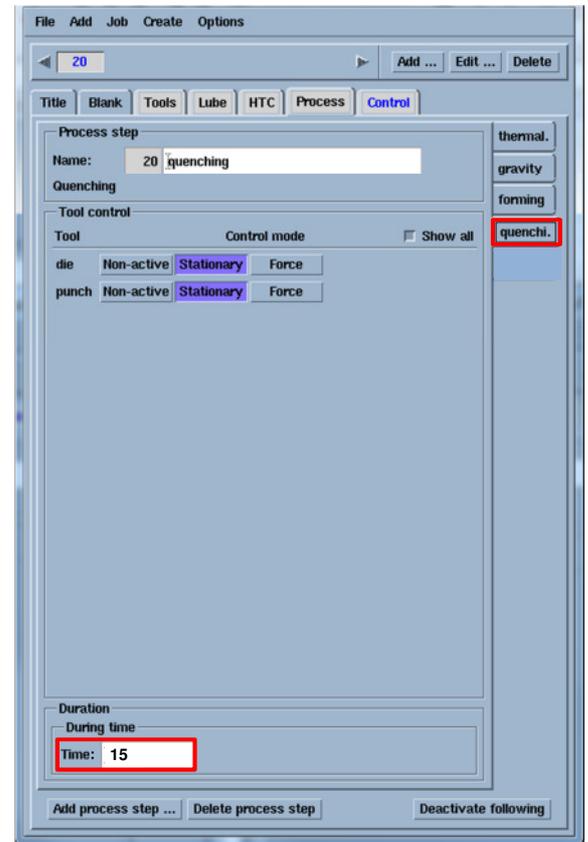
แบบจำลองการขึ้นรูปร้อนของการศึกษาโครงการนี้ประกอบด้วยขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. Thermalwait คือช่วงเวลาที่ใช้ในการเคลื่อนย้ายแผ่นโลหะจากเตาอบมายังแม่พิมพ์ กำหนดให้ใช้เวลา 8 วินาที ตามรูปที่ ๓.5 (ก)
2. Gravity คือช่วงที่แผ่นโลหะวางอยู่บนคาน แม่พิมพ์ยังไม่เริ่มเคลื่อนที่
3. Forming ขั้นตอนนี้เริ่มต้นเมื่อพินช์เริ่มเคลื่อนที่ลงมาและสิ้นสุดเมื่อพินช์ประกบกับคานสนิท กำหนดให้พินช์เคลื่อนที่ด้วยความเร็ว 40 มิลลิเมตรต่อวินาที ตามรูปที่ ๓.6 (ก)
4. Quenching คือการลดอุณหภูมิของชิ้นงานหลังจากการขึ้นรูปแล้ว โดยการทิ้งชิ้นงานไว้ในแม่พิมพ์ต่อไป

กำหนดให้เวลาในการ quenching เท่ากับ 15 วินาที ตามรูปที่ ง.6 (ข)



(ก)



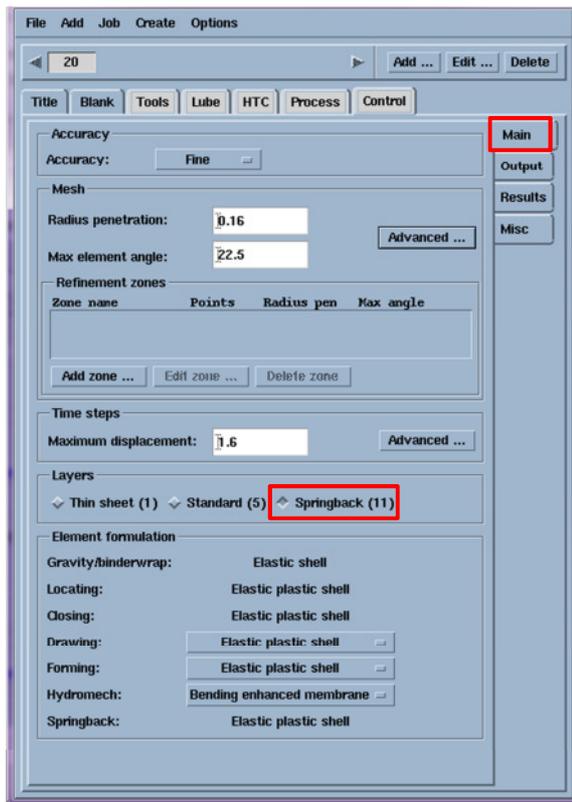
(ข)

รูปที่ ง.6 (ก) การกำหนดการเคลื่อนที่ของแม่พิมพ์ในขั้นตอน forming (ข) การกำหนดเวลาการ quenching

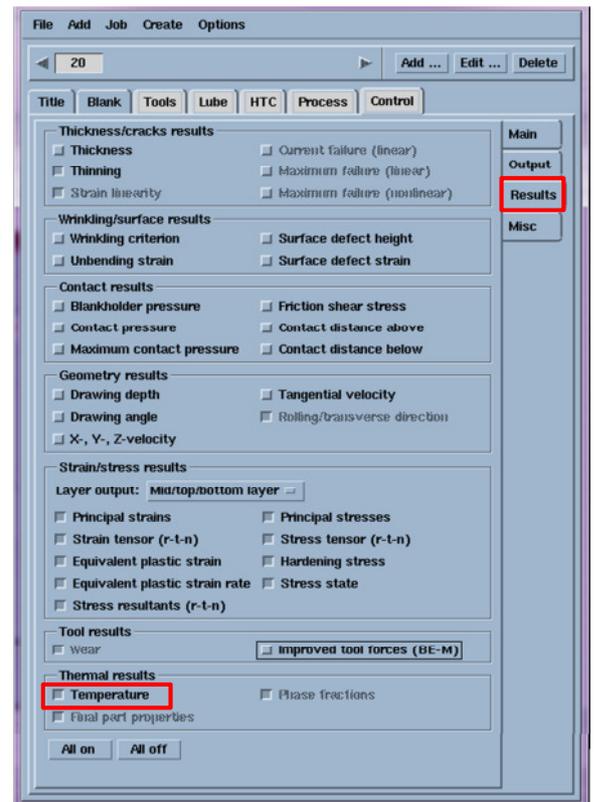
2.5 Control

เป็นส่วนที่ใช้กำหนดรายละเอียดในการคำนวณของโปรแกรม มีส่วนที่สำคัญดังนี้

- Layers คือการกำหนดจำนวนชั้นของการแบ่งความหนาของชิ้นงาน ในการศึกษาโครงการนี้ เลือกเป็น 11 ชั้นตามรูปที่ ง.7 (ก) เพื่อความแม่นยำในการคำนวณ
- Results คือการเลือกค่าที่ต้องการให้โปรแกรมคำนวณ เช่นในการศึกษาโครงการนี้เลือกให้โปรแกรมคำนวณ Temperature ตามรูปที่ ง.7 (ข) เนื่องจากต้องการวิเคราะห์อุณหภูมิของชิ้นงาน



(ก)



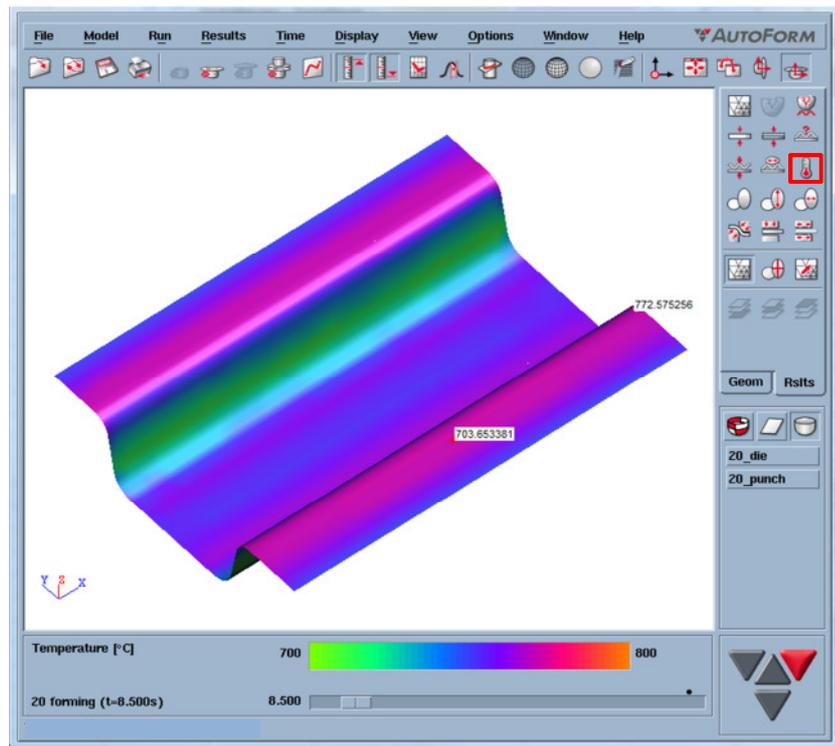
(ข)

รูปที่ ง.7 (ก) การเลือกจำนวนชั้นของการแบ่งความหนาของชิ้นงาน (ข) การเลือกค่าที่ต้องการให้โปรแกรมคำนวณ

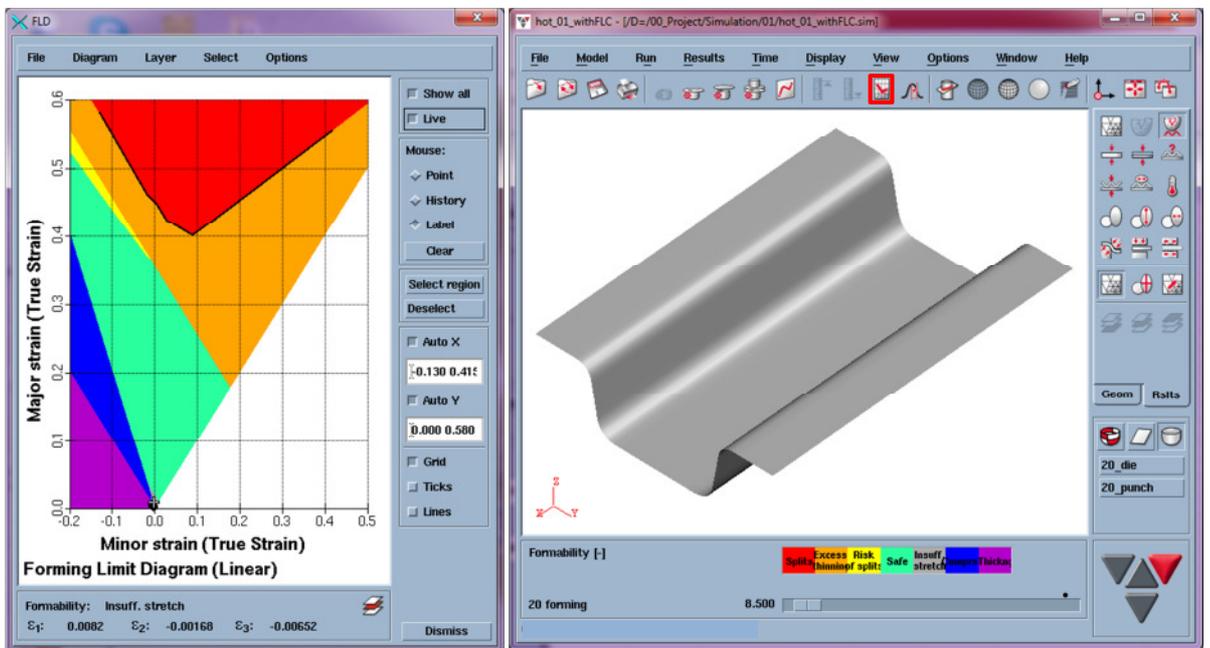
3. การแสดงผลการคำนวณ

โปรแกรม AutoForm สามารถแสดงผลการคำนวณออกมาเป็นแถบสีและแผนภาพ ผู้ใช้สามารถเลือกสีและช่วงของผลการคำนวณที่ต้องการให้แสดงได้ รูปที่ ง.8 เป็นการแสดงอุณหภูมิของชิ้นงานเมื่อสิ้นสุดขั้นตอน forming

รูปที่ ง.9 เป็นการแสดงสีบอกความสามารถในการขึ้นรูป (formability) ของชิ้นงานเมื่อสิ้นสุดขั้นตอน forming และพล็อตค่าความเค้นและความเครียดของชิ้นงานแต่ละเอลิเมนต์ลงในแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูป (FLD) โดยผู้ใช้สามารถกำหนดขอบเขตของการแสดงสีแต่ละสีได้ตามรูปที่ ง.10



รูปที่ ๓.๘ แถบสีแสดงผลการคำนวณอุณหภูมิ



รูปที่ ๓.๙ FLD และ Formability ของชิ้นงานเมื่อสิ้นสุดขั้นตอน forming



รูปที่ ๓.10 การกำหนดขอบเขตการแสดงสีค่า Formability ของชิ้นงาน

ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ – สกุล	นางสาวณัฐวรรณ โกจารย์ศรี
วัน เดือน ปีเกิด	17 มีนาคม 2523
ประวัติการศึกษา	
ระดับมัธยมศึกษา	โรงเรียนขอนแก่นวิทยายน พ.ศ. 2540
ระดับปริญญาตรี	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยขอนแก่น พ.ศ. 2545
ระดับปริญญาโท	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีการขึ้นรูปโลหะและนวัตกรรมการผลิต มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี พ.ศ. 2557
ประวัติการทำงาน	
	วิศวกร บริษัท ทีเอสอินเตอร์เทค จำกัด พ.ศ. 2546-2554
	วิศวกร บริษัท บีเอ็มเอฟที อีบีแซด กรุ๊ป จำกัด พ.ศ. 2554-2557