



การศึกษาโครงสร้างจุลภาคและสมบัติทางกลของเหล็กกล้าโบรอนหลังการขึ้นรูปร้อน

นายปวุฒิ แนมกลาง

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ปีการศึกษา 2557

การศึกษาโครงสร้างจุลภาคและสมบัติทางกลของเหล็กกล้าโบราณ
หลังการขึ้นรูปร้อน

นายปวุฒิ แนนกลาง วศ.บ. (วิศวกรรมเครื่องกล)

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ปีการศึกษา 2557

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์
(ดร.จุลเทพ ขจรไชยกุล)

..... กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์
(ผศ. ดร.วิฑูร อุทัยแสงสุข)

..... กรรมการ
(รศ. ดร.พงศ์พันธ์ แก้วตาทิพย์)

..... กรรมการ
(รศ.ดิลลภ ศรีประไพ)

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาโครงสร้างจุลภาคและสมบัติทางกลของเหล็กกล้าโบรอนหลังการขึ้นรูปร้อน
หน่วยกิต	12
ผู้เขียน	นายปวุฒิ แนมกลาง
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ. ดร.วิฑูร อุทัยแสงสุข
หลักสูตร	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมเครื่องกล
ภาควิชา	วิศวกรรมเครื่องกล
คณะ	วิศวกรรมศาสตร์
ปีการศึกษา	2557

บทคัดย่อ

กระบวนการขึ้นรูปร้อนถูกนำมาใช้เพิ่มสูงขึ้นสำหรับการผลิตชิ้นส่วนยานยนต์ที่มีความแข็งแรงสูงพิเศษ การลดน้ำหนักตัวรถยนต์และเพิ่มความต้านทานแรงกระแทกของยานพาหนะรุ่นใหม่ ถูกพัฒนาไปพร้อมๆ กัน งานวิจัยนี้ ศึกษาการขึ้นรูปร้อนแบบตรงของเหล็กกล้าโบรอนจากการทดลองจริงและการจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ ศึกษาอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงในชิ้นงานและแม่พิมพ์ขณะขึ้นรูปร้อนจากการทดลองเปรียบเทียบกับค่าคำนวณจากไฟไนต์เอลิเมนต์ วิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาคทดสอบความแข็ง และทดสอบแรงดึง บริเวณปีกและตรงกลางของชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูปร้อน จากข้อมูลของแผนภาพแสดงการเปลี่ยนเฟสที่อุณหภูมิคงที่เทียบเวลาใช้ทำนายโครงสร้างจุลภาคที่เกิดขึ้น ซึ่งตอบสนองกับการกระจายตัวของความแข็งที่เปลี่ยนแปลงของชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูปร้อน นอกจากนี้ ทดสอบการเย็นตัวในสภาวะต่างๆ ของเหล็กกล้าโบรอน กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นความเครียดจากสภาวะการเย็นตัวต่างๆ อธิบายด้วยสมการของแข็งของวัสดุของว็อยซ์ และสร้างความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งและพารามิเตอร์ต่างๆ จากสมการของว็อยซ์ จากนั้นพัฒนาสมการเพื่อใช้ในการประเมินสมบัติทางกลของชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูปร้อนในแต่ละบริเวณจากผลการคำนวณจากไฟไนต์เอลิเมนต์ พบว่าการคำนวณกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นความเครียดของชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูปร้อนของแต่ละบริเวณมีความใกล้เคียงกับผลการทดลอง

คำสำคัญ : การขึ้นรูปร้อน / เหล็กกล้าโบรอน / โมเดลของว็อยซ์ / ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นความเครียด

Thesis Title	Investigation of Microstructures and Mechanical Properties of Boron Steel Sheet after Hot Stamping Process
Thesis Credits	12
Candidate	Mr. Pawut Namklang
Thesis Advisor	Asst. Prof. Dr. Vitoon Uthaisangsuk
Program	Master of Engineering
Field of Study	Mechanical Engineering
Department	Mechanical Engineering
Faculty	Engineering
Academic Year	2014

Abstract

Hot stamping process has been increasingly applied for producing automotive parts with ultra-high strength property. Reduction of car body weight and increasing crashworthiness of new generation vehicles could be hereby achieved at the same time. In this work, direct hot stamping of a boron alloy steel was investigated by experiment and FE simulation. Temperature evolutions of blank and dies were gathered during the experiments and verified with FE results. Metallographic analysis, hardness measurement and tensile test were performed for different locations of formed samples. Based on Time-Temperature-Transformation (TTT) diagram, local emerged microstructures and corresponding distributed hardness values of the stamped parts were predicted. Additionally, quenching tests by various media were carried out for the examined boron steel. Determined tensile stress-strain curves from each cooling condition were described using Voce hardening equation. Relationships between hardness and Voce model parameters were established. Then, developed constitutive equations were used to evaluate local mechanical properties of the samples after hot stamping with regard to obtained FE results. It was found that calculated stress-strain responses of different sample areas fairly agreed with those from the experiments.

Keywords : Hot stamping / Boron alloy steel / Voce model / Stress-strain behavior

กิตติกรรมประกาศ

ในการจัดทำวิทยานิพนธ์นี้สำเร็จเรียบร้อยด้วยดี เพราะได้รับการสนับสนุนอุปกรณ์การทดลองจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี รวมทั้งเครื่องมือและวัสดุต่างๆ พร้อมทั้งได้รับคำแนะนำจาก ผศ. ดร. วิฑูร อุทัยแสงสุข อาจารย์ที่ปรึกษา ซึ่งท่านได้ให้คำปรึกษาและคำแนะนำด้านต่างๆ สำหรับวิทยานิพนธ์นี้ ให้ปฏิบัติงานได้ถูกต้องและบรรลุเป้าหมายที่วางไว้ นอกจากนี้ขอขอบพระคุณ รศ.ดร.พงศ์พันธ์ แก้วตาทิพย์ และ รศ. ดิลก ศรีประไพ ที่แนะนำข้อบกพร่องตลอดจนเสนอแนะแนวทางในการปรับปรุงเพื่อทำให้งานวิจัยนี้มีความถูกต้องสมบูรณ์ยิ่งขึ้น ขอขอบพระคุณ ดร.จุลเทพ ขจรไชยกูล ที่ได้สละเวลามาเป็นกรรมการสอบปริญญานิพนธ์ รวมทั้งภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ที่ได้ให้คำแนะนำและเงินทุนสนับสนุนโครงการวิทยานิพนธ์นี้

นอกจากนี้ขอขอบคุณหน่วยงานต่างๆ ที่ให้ความอนุเคราะห์ช่วยเหลือในการดำเนินการวิจัยโดยภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ให้ความอนุเคราะห์ในการทดสอบความแข็งและเครื่องทดสอบกระบวนการขึ้นรูปรีดร้อน ตลอดจนบุคคลากร รุ่นพี่ นักศึกษาปริญญาโท เอก ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล ที่ให้ความช่วยเหลือ คำแนะนำ คำปรึกษาที่เป็นประโยชน์ต่องานวิจัย และกำลังใจดีๆ ที่ทำให้ผ่านอุปสรรคไปได้

ผู้จัดทำวิทยานิพนธ์นี้ใคร่ขอยกส่วนดีของปริญญานิพนธ์นี้ให้แก่ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี และผู้ที่ทำให้การสนับสนุนทุกท่าน

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ค
กิตติกรรมประกาศ	ง
สารบัญ	จ
รายการตาราง	ฉ
รายการรูปประกอบ	ญ
รายการสัญลักษณ์	ด
ประมวลศัพท์และคำย่อ	ค

บทที่

1. บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	3
1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
1.4 ขอบเขตงานวิจัย	3
2. ทฤษฎี/งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 เหล็กกล้าสำหรับผลิตชิ้นส่วนยานยนต์	4
2.2 กระบวนการขึ้นรูปร้อน (Hot stamping process)	8
2.3 เหล็กกล้าโบรอนและการเคลือบผิว (Material and coating)	13
2.3.1 22MnB5	13
2.3.1 USIBOR®	14
2.3.3 PHS-Ultraform®	16
2.3.4 MBW® 1500	17
2.4 อิทธิพลของธาตุผสมต่างๆในเหล็กกล้า	18
2.5 การปรับปรุงสมบัติของเหล็กกล้าคาร์บอน ด้วยกรรมวิธีทางความร้อน	23
2.5.1 การชุบแข็ง (Hardening)	23
2.5.2 โครงสร้างมาร์เทนไซต์ของเหล็กกล้าคาร์บอน	23

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.5.3 อุณหภูมิการเกิดมาร์เทนไซต์ (Martensite start temperature M_s)	24
2.5.4 โครงสร้างของมาร์เทนไซต์ในระดับอะตอม	25
2.5.5 ความแข็ง (Hardness) และความแข็งแรง (Strength) ของเหล็กกล้าคาร์บอนที่มีโครงสร้างมาร์เทนไซต์	29
2.6 Time Temperature Transformation (TTT) Diagram และ Continuous Cooling Transformation Diagram (CCT) Diagram	30
2.7 แม่พิมพ์สำหรับงานขึ้นรูปร้อน	34
2.7.1 การออกแบบแม่พิมพ์สำหรับงานขึ้นรูปร้อน	35
2.7.1.1 วัสดุสำหรับแม่พิมพ์	36
2.7.1.2 การออกแบบการกระจายตัวของท่อระบายความร้อน	36
2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	39
3 การดำเนินงานวิจัย	44
3.1 แผนการดำเนินงานวิจัย	44
3.2 การดำเนินงานวิจัย	45
3.2.1 การเตรียมวัสดุตั้งต้นสำหรับการทดสอบขึ้นรูปร้อน	45
3.2.2 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี (Chemical compositions analysis)	45
3.2.3 การวิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาค	47
3.2.4 การทดสอบความแข็งจุลภาค (Micro Hardness Test)	49
3.2.5 การทดสอบแรงดึง (Tensile test)	50
3.2.6 การเตรียมอุปกรณ์สำหรับกระบวนการขึ้นรูปร้อน	51
3.2.7 การวัดอุณหภูมิบนชิ้นงาน	52
3.3 การทดลองกระบวนการขึ้นรูปร้อน (Hot stamping)	53
3.4 ทดสอบสมบัติทางกลของชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูปร้อน	54
3.5 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย	55
3.5.1 เครื่องตัดเหล็กด้วยลวดไฟฟ้า	55
3.5.2 เครื่องหล่อเรซินแบบร้อน (Hot Mounting)	56
3.5.3 เครื่องขัดผิวโลหะ	56

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.5.4	เตาไฟฟ้า	57
3.5.5	เครื่องอัดแบบไฮดรอลิก	57
3.5.6	เครื่องวัดอุณหภูมิ (Thermocouple)	58
3.5.7	ระบบหล่อเย็น (Cooling system)	58
4	ผลการทดสอบโครงสร้างจุลภาคและสมบัติทางกล	60
4.1	อัตราการเย็นตัวในระหว่างการขึ้นรูปร้อน	60
4.2	ผลการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค	62
4.3	ผลการทดสอบความแข็งแรงจุลภาค	64
4.3.1	ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงกับอัตราการเย็นตัว	66
4.4	ผลการทดสอบแรงดึง	67
5	การวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์	74
5.1	แบบจำลองการขึ้นรูปร้อน	74
5.1.1	สมบัติทางกลและสมบัติทางความร้อนของเหล็กกล้าโบรอน	75
5.1.2	สมบัติทางกลและสมบัติทางความร้อนของแม่พิมพ์	78
5.1.3	กระบวนการขึ้นรูปร้อน (Hot stamping process)	78
5.2	อัตราการเย็นตัวของชิ้นงานและแม่พิมพ์	81
5.2.1	อัตราการเย็นตัวของชิ้นงาน	81
5.2.2	ผลการกระจายตัวของอุณหภูมิในแม่พิมพ์	82
5.3	อิทธิพลของอัตราการเย็นตัวต่อสมบัติทางกลของชิ้นงาน	83
5.4	การทำนายสมบัติทางกลจากผลของแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์	87
6	สรุปผลและข้อเสนอแนะ	92
6.1	สรุปผลการวิจัย	92
6.1.1	การศึกษาและการทดลองกระบวนการขึ้นรูปร้อนชิ้นงานเหล็กแผ่น	92
6.1.2	ศึกษาการจำลองการขึ้นรูปร้อนด้วยวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์	93
6.2	ประโยชน์ที่ได้รับจากงานวิจัย	93

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
6.3 ข้อเสนอแนะเกี่ยวกับงานวิจัย	94
เอกสารอ้างอิง	95
ภาคผนวก	103
ก ตารางสมบัติต่างๆ	103
ข การคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน	108
ประวัติผู้วิจัย	110

รายการตาราง

ตาราง	หน้า
2.1 การแบ่งประเภทของเหล็กกล้าตามค่าความแข็งแรงของวัสดุ	4
2.2 องค์ประกอบทางเคมีของเหล็กกล้าโบรอน เกรด 22MnB5 (%/wt.)	13
2.3 การใช้งานเหล็กกล้าตามชนิดของชั้นเคลือบผิว	16
4.1 ตารางสมบัติทางกลของเหล็กกล้าโบรอนตั้งต้น เย็นตัวในอากาศและที่ผ่านการขึ้นรูปร้อน	69
4.2 พารามิเตอร์ของ Voce โมเดลที่ใช้สำหรับจำลองพฤติกรรมสมบัติทางกลของเหล็กกล้าโบรอนและค่าความแข็ง (HV) ที่อัตราการเย็นตัวที่ต่างกันตามรูปที่ 4.13	72
4.3 ค่าคงที่ของพารามิเตอร์จากสมการที่ 4.6-4.8	73
5.1 สมบัติทางกลและสมบัติทางความร้อนของเหล็กกล้าโบรอน เกรด 22MnB5 ที่อุณหภูมิต่างๆ [65]	77
5.2 สมบัติทางความร้อนของแม่พิมพ์ AISI H13	78
5.3 Flow Stress ของแม่พิมพ์ AISI H13 ที่อุณหภูมิ 820 องศาเซลเซียส	78

รายการรูปประกอบ

รูป	หน้า
1.1 ชิ้นส่วนที่ผลิตโดยใช้กระบวนการขึ้นรูปร้อน (Hot stamping)	2
2.1 โครงสร้างความปลอดภัยของรถยนต์ (a) โครงสร้างกันแรงกระแทกที่มีความสามารถในการดูดซับพลังงานที่ดี (b) โครงสร้างที่มีความต้านทานต่อการเปลี่ยนแปลงรูปสูง	5
2.2 การใช้เหล็กกล้าความแข็งแรงสูงพิเศษในรถยนต์	6
2.3 จำนวนโรงงานขึ้นรูปเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงพิเศษในทวีปต่างๆ	7
2.4 ปริมาณการใช้เหล็กกล้าความแข็งแรงสูงพิเศษในชิ้นส่วนรถยนต์	7
2.5 ความหนาของเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงพิเศษที่ใช้ในชิ้นส่วนต่างๆ	8
2.6 ขั้นตอนของกระบวนการขึ้นรูปร้อน (Hot stamping)	8
2.7 ขั้นตอนการขึ้นรูปร้อนแบบตรง (Direct hot stamping)	10
2.8 ตัวอย่างชิ้นงานที่ใช้กระบวนการขึ้นรูปร้อนแบบตรง	11
2.9 การขึ้นรูปร้อนแบบอ้อม (Indirect hot stamping)	11
2.10 การขึ้นรูปโดยให้ความร้อนโดยตรงกับชิ้นงานในแม่พิมพ์โดยวิธีความต้านทานทางไฟฟ้า	12
2.11 สมบัติทางกลและโครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้าโบรอน 22MnB5 ที่เปลี่ยนแปลงในกระบวนการขึ้นรูปร้อน	12
2.12 โครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้าโบรอน 22MnB5, (a) ก่อนผ่านกระบวนการขึ้นรูปร้อน ประกอบด้วยเฟสเฟอร์ไรต์และเพอร์ไลต์, (b) หลังผ่านกระบวนการขึ้นรูปร้อนประกอบด้วยเฟสมาร์เทนไซต์ 2.13 ขั้นตอนกระบวนการขึ้นรูปร้อนโดยใช้ 22MnB5 เป็นวัสดุที่ไม่มีการเคลือบผิวที่ชิ้นงาน	13
2.13 ขั้นตอนการขึ้นรูปร้อนโดยใช้เหล็ก 22MnB5 ที่ไม่มีการเคลือบผิวที่ชิ้นงาน	14
2.14 การแพร่ของชั้น Fe เข้าไปสู่ชั้นเคลือบผิว (Al-Si)	15
2.15 ขนาดของชั้นเคลือบผิวที่เกิดขึ้นของเหล็กเกรด USIBOR® 1500-AS ที่เผาโดยในเวลาที่แตกต่างกัน	15
2.16 ขั้นตอนการขึ้นรูปร้อนโดยใช้เหล็กเกรด USIBOR® 1500-GI ที่มีการเคลือบผิวชิ้นงานด้วยสังกะสี (Zn)	16
2.17 การแพร่ของอะตอมสังกะสีไปยังชั้นของเหล็ก เกิดเป็นชั้น Zn-Fe ในระหว่างการขึ้นรูป	17
2.18 เปรียบเทียบราคาและน้ำหนักของวัสดุชนิดต่างๆที่ใช้ในการขึ้นรูป B-pillar	17

รายการรูปประกอบ (ต่อ)

รูป	หน้า
2.19 ความสามารถในการชุบแข็งสำหรับเหล็ก 0.44-0.43% C และอิทธิพลการเติมธาตุต่างๆ (1) ไม่มีการเติมโบรอน (2) เติมนโบรอน (3) เติมนโบรอนและวาเดเนียม (4) เติมนโบรอน วาเดเนียม และไทเทเนียม	20
2.20 อิทธิพลของธาตุโบรอนที่มีต่อการเกิดเฟสเบนไนต์ เฟอไรต์และเฟอไรต์ไลต์ในกราฟ CCT	20
2.21 อิทธิพลของธาตุโบรอนที่มีต่อความสามารถในการชุบแข็งของเหล็กที่มีปริมาณคาร์บอนต่างๆ	22
2.22 รูปร่างที่แตกต่างของโครงสร้างมาร์เทนไซต์ของเหล็กกล้าคาร์บอน (a) มาร์เทนไซต์แบบ Lath, (b) มาร์เทนไซต์แบบ Plate	24
2.23 ปริมาณคาร์บอนในเหล็กกล้าคาร์บอนที่มีผลต่ออุณหภูมิที่เริ่มมีการเปลี่ยนไปเป็นมาร์เทนไซต์ (M_s)	25
2.24 การเปลี่ยนเฟสของออสเทนไนต์ ซึ่งมีโครงสร้างแบบ FCC ไปเป็น BCC ด้วยแรงเฉือนและแรงดึง	26
2.25 การเปลี่ยนเฟสของออสเทนไนต์ไปเป็นเฟสมาร์เทนไซต์ตามทฤษฎีของ Bain model, (a) โครงสร้างผลึกออสเทนไนต์ 2 หน่วยและโครงสร้างผลึกแบบ BCT (มาร์เทนไซต์) ที่อยู่ติดกัน, (b) โครงสร้างผลึกแบบ BCT (มาร์เทนไซต์) จาก (a), (c) และ (d) โครงสร้างผลึกแบบ BCC มาร์เทนไซต์และเฟอไรต์	27
2.26 การเปลี่ยนเฟสของออสเทนไนต์ไปเป็นมาร์เทนไซต์, (a) กลไกของ Lattice-changing deformation อธิบายด้วย Bain model, กลไกของ Lattice-retaining deformation อธิบายด้วย (b) Slipping, (c)	28
2.27 อิทธิพลของอุณหภูมิที่มีผลต่อความเค้นที่จำเป็นสำหรับการเกิด Slipping และ Twinning ซึ่งส่งผลต่อรูปร่างมาร์เทนไซต์	29
2.28 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งโดยประมาณของเหล็กกล้า Fully Hardened Martensitic Plain-Carbon ที่ถูกทำให้แข็งอย่างสมบูรณ์ และปริมาณคาร์บอนของเหล็ก	30

รายการรูปประกอบ (ต่อ)

รูป	หน้า
2.29 แผนภาพ TTT ของเหล็กกล้าคาร์บอน AISI1080 และ เหล็กกล้าผสม AISI4340	31
2.30 ส่วนบนของแผนภาพ TTT ของเหล็กกล้าคาร์บอน AISI1080	32
2.31 อุณหภูมิเริ่มเกิดมาร์เทนไซต์ (M_s) และอุณหภูมิสิ้นสุดการเกิดมาร์เทนไซต์ (M_f)	33
2.32 แผนภาพ Continuous Cooling Transformation (CCT) Diagram ของเหล็กกล้าโบรอนเกรด 22MnB5	34
2.33 ตัวอย่างการออกแบบแม่พิมพ์ที่ใช้ในกระบวนการขึ้นรูปร้อน	35
2.34 ตัวแปรสำหรับการออกแบบท่อหล่อเย็นแม่พิมพ์	37
2.35 การต่อระบบท่อแบบอนุกรม	37
2.36 การต่อระบบท่อแบบขนาน	37
2.37 Velocity Profile ของการไหล	39
2.38 อิทธิพลของอุณหภูมิออสเทนไนต์ซึ่งและเวลา (a) ความหนาของชิ้นงานที่ 1.75 mm, (b) เวลาที่น้อยที่สุดของอุณหภูมิออสเทนไนต์ที่มีผลต่อความแข็ง 470 HV	41
2.39 รูปร่างของชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูปร้อน	42
2.40 การเปรียบเทียบความต้านทานแรงดึงที่ได้จากการทดลองกับการทำนายด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์	42
2.41 ตัวแปรที่ใช้ในการวิเคราะห์ทางไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับการออกแบบท่อหล่อเย็นแม่พิมพ์	43
3.1 แผนผังการดำเนินงานวิจัยสำหรับการทดลองขึ้นรูปร้อนเพื่อศึกษาสมบัติทางกลของเหล็กกล้าโบรอน	44
3.2 แผนผังการดำเนินงานวิจัยสำหรับการสร้างแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อทำนาย stress - strain curve ของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการขึ้นรูปร้อน	44
3.3 ชิ้นงานวัสดุตั้งต้น	45
3.4 เครื่องวิเคราะห์ปริมาณธาตุผสมในวัสดุ (AAS)	46
3.5 กราฟแสดงส่วนผสมทางเคมีที่วิเคราะห์ได้จากเครื่องสเปกโตรมิเตอร์ของเหล็กตั้งต้น	46
3.6 กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Optical microscope, OM)	48
3.7 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM)	48
3.8 โครงสร้างเฟอร์ไรต์และเฟิร์ลไลต์ของเหล็กกล้าโบรอนตั้งต้น	49
3.9 โครงสร้างเฟอร์ไรต์-เฟิร์ลไลต์ (ด้านข้าง) และชั้นเคลือบผิวของเหล็กกล้าโบรอนตั้งต้น	49
3.10 (a) เครื่องวัดความแข็งแบบไมโครวิกเกอร์ (b) ตัวอย่างตำแหน่งรอยกดบนชิ้นงาน	50

รายการรูปประกอบ (ต่อ)

รูป	หน้า
3.11 ขนาดชิ้นงานทดสอบแรงดึงตามมาตรฐาน DIN 50114	50
3.12 เครื่องทดสอบแรงดึง	51
3.13 แม่พิมพ์ที่จะใช้ในการขึ้นรูปร้อน	52
3.14 ลักษณะการติดตั้งชุดทดลองการขึ้นรูปร้อน (Hot Stamping)	52
3.15 บริเวณชิ้นงานที่ทำการวัดอุณหภูมิ	53
3.16 แผนภาพ อุณหภูมิ – เวลา ของกระบวนการขึ้นรูปร้อน (Hot stamping process)	54
3.17 ชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูปร้อน (a) แสดงตำแหน่งการเตรียมชิ้นงาน Tensile test และ (b) รูปร่างของชิ้นงานทดสอบที่ใช้ในการทดสอบแรงดึงตามมาตรฐาน (DIN 50114)	54
3.18 แนวการทดสอบความแข็งของชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูปร้อน	55
3.19 เครื่องตัดโลหะด้วยลวดไฟฟ้า	56
3.20 เครื่องหล่อเรซินแบบร้อน	56
3.21 เครื่องขัดผิวโลหะ	57
3.22 เตาไฟฟ้า	57
3.23 เครื่องอัดแบบไฮดรอลิก	58
3.24 อุปกรณ์วัดอุณหภูมิ Fluke 287 True RMS Logging Multimeter	58
3.25 ระบบหล่อเย็น	59
4.1 อัตราการเย็นตัวของชิ้นงานและอุณหภูมิของแม่พิมพ์ขณะขึ้นรูปร้อนที่วัดได้ด้วยเทอร์โมคัปเปิล	60
4.2 อัตราการเย็นตัวของชิ้นงานในการขึ้นรูปร้อน, เย็นตัวในอากาศและเย็นตัวในเตาเทียบกับ CCT diagram ของเหล็กกล้าโบรอนเกรด 22MnB5	61
4.3 โครงสร้างเฟอร์ไรต์และเพิร์ลไลต์ของเหล็กกล้าโบรอนที่ถูกให้ความร้อนภายในเตาจนมีอุณหภูมิประมาณ 950°C ใช้เวลาประมาณ 5 นาที หลังจากนั้นปิดเตาและเปิดเตาเล็กน้อย	62
4.4 โครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้าโบรอนที่ผ่านการขึ้นรูปร้อนบริเวณตรงกลาง (bottom) ของชิ้นงาน (a) ภาพถ่ายจากกล้อง OM กำลังขยาย 500 เท่า (b) ภาพถ่ายจากกล้อง SEM กำลังขยาย 1000 เท่า	63

รายการรูปประกอบ (ต่อ)

รูป	หน้า
4.5 โครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้าโบรอนที่ผ่านการขึ้นรูปร้อนบริเวณตรงปีก (Flange) ของชิ้นงาน (a) ภาพถ่ายจากกล้อง OM กำลังขยาย 500 เท่า (b) ภาพถ่ายจากกล้อง SEM กำลังขยาย 1000 เท่า SEM กำลังขยาย 1000 เท่า	63
4.6 โครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้าโบรอนที่ผ่านการเย็นตัวในอากาศ (a) ภาพถ่ายจากกล้อง OM กำลังขยาย 500 เท่า (b) ภาพถ่ายจากกล้อง SEM กำลังขยาย 1000 เท่า	64
4.7 ค่าความแข็งจุลภาคของเหล็กกล้าโบรอนตั้งต้นและเหล็กกล้าที่เย็นตัวในอากาศ	65
4.8 ค่าความแข็งตามแนวยาวของชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูปร้อนบริเวณ Bottom และ Flange	65
4.9 ค่าความแข็งตามแนวขวางของชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูปร้อนบริเวณ Edge และ Middle	66
4.10 (a) แผนภาพ Continuous Cooling Transformation (CCT) Diagram ของเหล็กกล้าโบรอนเกรด 22MnB5 (b) แนวโน้มของค่าความแข็งที่ได้ของเหล็กกล้าโบรอนที่ผ่านอัตราการเย็นตัวต่างๆ เทียบระหว่างผลการทำนายและข้อมูลอ้างอิง	67
4.11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นความเครียดจริงของเหล็กกล้าโบรอนที่ผ่านการขึ้นรูปร้อน ณ บริเวณ Bottom และ Flange ของชิ้นงานเทียบกับเหล็กตั้งต้น	68
4.12 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นความเครียดทางวิศวกรรมของเหล็กกล้าโบรอนที่ผ่านการขึ้นรูปร้อน เทียบกับเหล็กกล้าที่เย็นตัวในอากาศ และเหล็กกล้าตั้งต้น	68
4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นความเครียดที่ทำนายด้วย Hollmon, Swift, Luwik และ Voce ของเหล็กกล้าตั้งต้น เหล็กกล้าที่เย็นตัวในอากาศและเหล็กกล้าหลังผ่านการขึ้นรูปร้อน	71
4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นความเครียดที่ทำนายด้วย Hollmon, Swift, Luwik และ Voce ของเหล็กกล้าโบรอนหลังผ่านการขึ้นรูปร้อน	72
4.15 พารามิเตอร์ของ Voce โมเดลที่อยู่ในฟังก์ชันของค่าความแข็ง	73
5.1 ความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติทางกล สมบัติทางความร้อน และเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคขณะทำการขึ้นรูปร้อน	74
5.2 แผนภาพ TTT ของเหล็กกล้าโบรอน เกรด 22MnB5	76
5.3 Flow Stress ของเหล็กกล้าโบรอน เกรด 22MnB5 ที่ strain rate 0.1 s^{-1}	76
5.4 Flow Stress ของเหล็กกล้าโบรอน เกรด 22MnB5 เป็นฟังก์ชันของ strain rate ที่อุณหภูมิ 650°C	77
5.5 กลไกการให้ความร้อนชิ้นงานในแบบจำลองการขึ้นรูปร้อน	79

รายการรูปประกอบ (ต่อ)

รูป	หน้า
5.6	ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนระหว่างชิ้นงานเหล็กกับอากาศ 79
5.7	ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนระหว่างชิ้นงานกับแม่พิมพ์ขณะปล่อยชิ้นงานเย็นตัวลง 80
5.8	การถ่ายเทความร้อนของชิ้นงานไปยังน้ำในท่อหล่อเย็นแม่พิมพ์ 80
5.9	การเปรียบเทียบผลอัตราการเย็นตัวของชิ้นงานและอุณหภูมิของแม่พิมพ์จากการทดลองกับแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ 82
5.10	ผลการคำนวณการกระจายตัวของอุณหภูมิที่เกิดขึ้นในแม่พิมพ์ที่มีต่อระบายความร้อนในเวลาต่างกัน (5, 10, 15 และ 20s) 83
5.11	ตำแหน่งของอุณหภูมิที่เกิดขึ้นในแม่พิมพ์ที่มีต่อระบายความร้อน 83
5.12	กราฟอุณหภูมิ-เวลาของการจำลองการขึ้นรูปร้อนโดยใช้เวลาในการเย็นตัวของชิ้นงานในแม่พิมพ์และการเย็นตัวของชิ้นงานในอากาศแบบต่างๆ 84
5.13	ผลการทำนายการกระจายตัวของโครงสร้างจุลภาคที่เกิดขึ้นในชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูปร้อนและเย็นตัวในแม่พิมพ์เป็นเวลา 4, 5, 6, และ 8s และหลังจากนั้นจึงนำชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์ให้เย็นตัวในอากาศ 85
5.14	ผลการทำนายการกระจายตัวของความเค้นของชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูปร้อนและเย็นตัวในแม่พิมพ์ในเวลา 4, 5, 6, และ 8s หลังจากนั้นจึงนำชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์มาปล่อยให้เย็นตัวในอากาศ 86
5.15	ผลการทำนายค่าความเค้นในตำแหน่งต่างๆ บนชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูปร้อนและเย็นตัวในแม่พิมพ์เป็นเวลา 4, 5, และ 8s หลังจากนั้นนำชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์และปล่อยให้เย็นตัวในอากาศ 87
5.16	(a) ผลการทำนายค่า yield strength (<i>A</i>) และ (b) ผลการทำนายค่า tensile strength (<i>B</i>) ของชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูปร้อนตำแหน่ง 2, 4 และ 6 และเย็นตัวในแม่พิมพ์เป็นเวลา 4, 5, และ 8s หลังจากนั้นจึงนำชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์ปล่อยให้เย็นตัวในอากาศด้วยโมเดลของ Voce 88
5.17	ผลการทำนายกราฟความเค้นความเครียดจริงของชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูปร้อนที่บริเวณตำแหน่งปีก (Flange) หลังการเย็นตัวในแม่พิมพ์เป็นเวลา 4, 5, และ 8s และนำชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์เพื่อเย็นตัวในอากาศเทียบกับผลการทดลองกราฟความเค้นความเครียดจริงของชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูปร้อนที่บริเวณตำแหน่งปีก (Flange) 89

รายการรูปประกอบ (ต่อ)

รูป	หน้า
5.18 ผลการทำนายกราฟความเค้นความเครียดจริงของชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูปร้อนที่บริเวณตำแหน่งตรงกลาง (Bottom) หลังการเย็นตัวในแม่พิมพ์เป็นเวลา 4, 5, และ 8s และนำชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์เพื่อเย็นตัวในอากาศเทียบกับกราฟความเค้นความเครียดจริงของชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูปร้อนที่บริเวณตำแหน่งตรงกลาง (Bottom)	90
5.19 ผลการทำนายกราฟความเค้นความเครียดจริงของชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูปร้อนบริเวณตำแหน่งด้านข้าง (Wall) หลังการเย็นตัวในแม่พิมพ์เป็นเวลา 4, 5, และ 8s และนำชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์เพื่อเย็นตัวในอากาศ	91

รายการสัญลักษณ์

A_1	=	อุณหภูมิเริ่มการเปลี่ยนเฟสเป็นออสเทนไนต์
A_3	=	อุณหภูมิสิ้นสุดการเปลี่ยนเฟสออสเทนไนต์
E	=	มอดูลัสความยืดหยุ่น
h	=	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน
k	=	สัมประสิทธิ์การนำความร้อน
M_r	=	อุณหภูมิสิ้นสุดการเปลี่ยนเฟสมาร์เทนไซต์
M_s	=	อุณหภูมิเริ่มต้นการเปลี่ยนเฟสมาร์เทนไซต์
Pr	=	จำนวนพรีนค์เทิล
Re	=	ค่าเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์
T	=	อุณหภูมิ
t	=	เวลา
α	=	เฟสเฟอร์ไรต์ (Ferrite)
α'	=	เฟสมาร์เทนไซต์
γ	=	เฟสออสเทนไนต์ (Austenite)
ρ	=	ความหนาแน่นของน้ำหล่อเย็น
μ_b	=	ค่าความหนืดพลวัตของน้ำที่อุณหภูมิเฉลี่ย
μ_s	=	ค่าความหนืดพลวัตของน้ำที่อุณหภูมิพื้นผิว
μ	=	สัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน
v	=	อัตราเร็วของน้ำหล่อเย็นในท่อ

ประมวลศัพท์และคำย่อ

A	=	Austenite
AAS	=	Atomic Absorption Spectrometer
AHSS	=	Advanced High-Strength Steel
B	=	Bainite
BCC	=	Body Centered Cubic
BCT	=	Body Centered Tetragonal
CCT	=	Continuous Cooling Transformation
DIN	=	Deutsches Institut für Normung
<i>E</i>	=	Modulus of elasticity
El	=	Elongation
F	=	Ferrite
FCC	=	Face Centered Cubic
<i>G</i>	=	Shear Modulus
FEM	=	Finite Element Method
HSS	=	High Strength Steel
IT	=	Isothermal Transformation
LSS	=	Low Strength Steel
M	=	Martensite
OM	=	Optical microscope
P	=	Pearlite
SEM	=	Scanning Electron Microscope
UHSS	=	Ultra High Strength Steel
UTS	=	Ultimate Tensile Strength
YS	=	Yield Strength