# บทที่ 3 การดำเนินงานวิจัย

### 3.1 แผนการดำเนินงานวิจัย

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาโครงสร้างจุลภาคและสมบัติทางกลของเหล็กกล้าโบรอนที่ผ่าน กระบวนการขึ้นรูปร้อน (Hot stamping) โดยสามารถแบ่งงานออกเป็น 2 ส่วนหลัก ๆ คือ การทคลอง เพื่อศึกษาสมบัติทางกลของเหล็กกล้าที่ผ่านกระบวนการขึ้นรูปร้อน และการสร้างแบบจำลองด้วย วิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อทำนายโครงสร้างและ stress - strain curve ของเหล็กกล้าที่ผ่าน กระบวนการขึ้นรูปร้อน ขั้นตอนในการดำเนินงานวิจัยสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.1และ 3.2



รูปที่ 3.1 แผนผังการคำเนินงานวิจัยสำหรับการทคลองขึ้นรูปร้อนเพื่อศึกษาสมบัติทางกลของ เหล็กกล้าโบรอน



ร**ูปที่ 3.2** แผนผังการคำเนินงานวิจัยสำหรับการสร้างแบบจำลองทางไฟในต์เอลิเมนต์เพื่อทำนาย stress - strain curve ของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการขึ้นรูปร้อน

### 3.2 การดำเนินงานวิจัย

## **3.2.1** การเตรียมวัสดุตั้งต้นสาหรับการทดสอบงิ้นรูปร้อน

เหล็กที่นำมาใช้ในงานวิจัยเป็นเหล็กกล้าโบรอน เกรด 22MnB5 เหล็กตั้งต้นในงานวิจัยนี้เป็นเหล็กที่มี ปริมาณการ์บอนต่ำ มีส่วนผสมของแมงกานีสและโบรอน เหล็กตั้งต้นมีโครงสร้างเป็นเฟอร์ไรท์และ เพิร์ลไลท์ และมีความหนา 1.4 มิลลิเมตร ขนาดกว้าง 130 มิลลิเมตร และยาว 150 มิลลิเมตร แสดงดัง รูปที่ 3.3



**รูปที่ 3.3** ชิ้นงานวัสดุตั้งต้น

### 3.2.2 การวิเคราะห้องค์ประกอบทางเคมี (Chemical compositions analysis)

การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของโลหะ โดยทั่วไปนิยมใช้เครื่อง Atomic Absorption Spectrometer (AAS) ดังรูปที่ 3.4 ซึ่งเป็นเครื่องมือที่ใช้ในการตรวจหาปริมาณของธาตุผสมภายใน โลหะด้วยเทคนิค Atomic Absorption Spectroscopy ซึ่งเป็นกระบวนการที่อะตอมอิสระของธาตุ ดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นต่างๆโดยเฉพาะซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของธาตุแต่ละธาตุ เนื่องจากธาตุแต่ละ ชนิดมีระดับของพลังงานต่างกันจึงมีการดูดกลืนพลังงานได้แตกต่างกัน พลังงานที่พอดีกับ คุณสมบัติเฉพาะของธาตุจะทำให้อิเล็กตรอนของธาตุนั้นๆ เปลี่ยนสถานะจากสถานะพื้น (Ground State) ไปเป็นสถานะกระตุ้น (Exited State)



ร**ูปที่ 3.4** เครื่องวิเคราะห์ปริมาณธาตุผสมในวัสดุ (AAS) [51]

เหล็กกล้าโบรอนเกรด 22MnB5 ที่นำมาทดสอบพบว่าเป็นเหล็กการ์บอนต่ำ มีธาตุ C อยู่ประมาณ 0.2% และมีส่วนผสมของแมงกานีสและซิลิกอน ซึ่งการ์บอนที่มีอยู่ในเหล็กจะเป็นตัวกำหนดปริมาณ มาร์เทนไซต์ในโครงสร้างจุลภาคขณะที่เกิดการเย็นตัว แมงกานีสเป็นตัวควบคุมความแข็ง ซิลิกอนจะ เป็นตัวเพิ่มความแข็งแรงของการเกิดการแทรกตัวของธาตุผสม และยังมีโบรอนที่ช่วยเพิ่มความ แข็งแรงให้กับโครงสร้างอีกด้วย ซึ่งผลที่ได้จากการวิเคราะห์ธาตุผสมแสดงดังรูปที่ 3.5 จากการศึกษา งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับเหล็กกล้าโบรอนเช่นในงานของ Salzgitter Flachstahl 22MnB5 [16] พบว่า เหล็กกล้าโบรอนมีส่วนประกอบทางเคมีดังนี้คือ C~0.22-0.25, Mn~1.2-1.4, Si~0.2-0.3, P~0.02, S~0.005, Al~0.02-0.05, Cr~0.11-0.2, B~0.002-0.0035, Mo~0.1, Cu~0.1 และ Ni~0.1 และในงานวิจัย ของ Naderi [1] ใช้เหล็กโบรอนที่มีส่วนประกอบทางเคมีดังนี้คือ C~0.23, Mn~1.18, Si~0.22, Al~0.03, Cr~0.16, B~0.002, Ni~0.12, N~0.005 และ Ti~0.040 จะเห็นได้ว่าค่าองก์ประกอบทางเคมีของวัสดุตั้ง ต้นที่ใช้ในงานวิจัยที่ได้จากการวิเคราะห์มีก่าใกล้เกียงกับราดอบทางเคมีองวัสดุตั้ง



รูปที่ 3.5 กราฟแสดงส่วนผสมทางเคมีที่วิเคราะห์ได้จากเครื่องสเปค โตมิเตอร์ของเหล็กตั้งต้น

จากผลการตรวจสอบส่วนผสมทางเกมีพบว่าเหล็กกล้าตั้งต้นมีส่วนผสมของธาตุที่สำคัญดังนี้คือ C ~ 0.280, Mn ~ 1.342 และ B ~ 0.0014 ซึ่งมีความเหมาะสมสาหรับใช้ในการผลิตเหล็กกล้าความแข็งแรง สูงพิเศษด้วยวิธีการขึ้นรูปร้อนเมื่อมีการอ้างอิงงานวิจัยอื่นๆ การมีธาตุการ์บอนที่น้อยจะทำให้เส้นการ เกิดมาร์เทนไซต์สูงขึ้นหรือหมายถึงการเกิดมาร์เทนไซต์ได้ง่ายขึ้นเมื่อมีอัตราการเย็นตัวเท่าเดิมและ การมีธาตุผสมของโบรอน จะช่วยทำให้อัตราการเย็นตัววิกฤตลดลงเนื่องจากมีการเลื่อนขอบเขตของ เฟสเฟอร์ไรต์และเบนไนต์ในแผนภาพของ CCT ไปทางขวามากขึ้น

### 3.2.3 การวิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาค

การวิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาค คือ การวิเคราะห์ลักษณะของโครงสร้างจุลภาคพื้นผิวของชิ้นงาน ที่ผ่านการเตรียมโดยการถ่ายภาพภายใต้กล้องจุลทรรศน์ที่กำลังขยายสูงกว่า 25 เท่า ในทางปฏิบัติ โครงสร้างจุลภาคของโลหะมักจะประกอบไปด้วยเกรน (Grain) และเฟสต่างๆ ซึ่งหากเป็นเนื้อหลักจะ เรียกว่า เมทริกซ์ (Matrix) แต่หากเป็นโครงสร้างเล็กๆ ในเนื้อหลักจะเรียกรวมๆ ว่า อนุภาค (Particle) ในงานนี้ได้ทำการวิเคราะห์เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้างจุลภาคกับสมบัติทางกลของ เหล็กที่ผ่านการขึ้นรูป เพื่อตรวจสอบและยืนยันคุณภาพของชิ้นงานที่ได้ ซึ่งในงานวิจัยนี้เบื้องต้นได้ ทำการวิเคราะห์โครงสร้างเริ่มต้นของเหล็กกล้าโบรอนเกรค 22MnB5 เพื่อตรวจสอบให้แน่ใจว่าเป็น เหล็กที่ตรงตามมาตรฐานจริงด้วย

ในการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้าโบรอน เริ่มจากการทำที่จับยึดชิ้นงานโดยวิธีการ หล่อเรซิ่นแบบร้อน (Hot mounting) โดยการใช้เครื่องอัดรุ่น XQ-2B ใช้อุณหภูมิประมาณ 145°C เป็น เวลา 20 นาที จากนั้น ทำการขัดชิ้นงานแบบหยาบ (Grinding) โดยเริ่มขัดจากกระคาษทรายเบอร์ 400, 600, 800, 1000 และ 1200 ตามลำดับหลังจากนั้นจึงนำชิ้นงานไปขัดละเอียด (Polishing) ด้วยผงเพชร ขนาด 6 ไมครอน ตามด้วยผงอลูมิน่าขนาด 3 ไมครอน และ 1 ไมครอน ตามลำดับ เมื่อชิ้นทดสอบผ่าน การขัดทั้งหมดแล้วจึงนำมาผ่านขั้นตอนสุดท้ายคือการกัดด้วยกรด 2% Nital (HNO<sub>3</sub> 2 ml ละลายใน ethanol 98 ml) เป็นเวลา 5-10 วินาที แล้วจึงฉีดแอลกอฮอล์ไล่คราบที่ผิวหน้า สุดท้ายใช้ เมทิลแอลกอฮอล์ไล่คราบน้าที่ผิวหน้าและซับเมทิลแอลกอฮอล์ด้วยกระดาษชำระ

เมื่อเตรียมชิ้นงานเสร็จจึงนำชิ้นงานที่ผ่านการกัดกรดแล้วมกศึกษาลักษณะ โครงสร้างจุลภาค โดยการ ถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง (Optical Microscope, OM) รุ่น Olympus BX51M ที่กำลังขยาย 5, 10, 20, 50 และ 100 โดยมีเลนส์ใกล้ตากำลังขยาย 10 เท่า ดังแสดงดังรูปที่ 3.6 และถ่ายภาพด้วย กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) ดังแสดงในรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.6 กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Optical microscope, OM)



รูปที่ 3.7 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM)

โครงสร้างตั้งต้นของเหล็กกล้าโบรอนเกรด 22MnB5 ประกอบไปด้วยเฟสพื้นฐานสองเฟสคือ เฟอร์ ไรท์และเพิร์ลไลท์ ดังแสดงในรูปที่ 3.8 จากภาพจะเห็นได้ว่าเนื้อพื้นสีขาวคือเฟสเฟอร์ไรท์ ส่วน ลักษณะของกลุ่มก้อนสีเทาเข้มหรือสีดำคือเฟสเพิร์ลไลท์ เกิดผลึกเป็นแถบยาวๆ สลับกันระหว่าง เฟอร์ไรท์ และซีเมน-ไตท์ ดังนั้นเพิร์ลไลท์จึงไม่ใช่เฟสเดียวแต่เป็นสองเฟสที่ประกอบกัน

สำหรับการเคลือบผิวของเหล็กกล้าโบรอนในงานนี้พบว่าถูกเคลือบด้วยชั้นของอลูมิเนียมและซิลิกอน ซึ่งประกอบด้วยชั้น 2 ชั้นดังแสดงดังรูปที่ 3.9 จากผลการตรวจสอบพบว่าชั้นที่ 1 ใช้อลูมิเนียมในการ เคลือบผิวที่ประมาณ 80 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักและชั้นที่ 2 มีองค์ประกอบของอลูมิเนียมและซิลิกอน ประมาณ 50 และ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ตามลำดับ



รูปที่ 3.8 โครงสร้างเฟอร์ไรท์และเพิร์ลไลท์ของเหล็กกล้าโบรอนตั้งต้น



รูปที่ 3.9 ชั้นเคลือบผิวของเหล็กกล้าโบรอนตั้งต้น

#### 3.2.4 การทดสอบความแข็งจุลภาค (Micro Hardness Test)

การทดสอบความแข็งจุลภาค (Micro hardness Test) ในงานวิจัยนี้ใช้เครื่องที่ผลิตจากบริษัท Shimadzu รุ่น HMV-2000 ซึ่งเป็นเครื่องวัดค่าของความแข็งแบบ ไม โครวิกเกอร์ (Micro Vicker Hardness Test, HV) หัวกดเป็นรูปพีระมิดฐานสี่เหลี่ยมจัตุรัสมุมยอด 136 องศา ดังรูปที่ 3.10 (a) ซึ่งสามารถเลือก ค่าแรงกดที่จะกระทำกับผิวของชิ้นงานทดสอบ ได้หลายค่าตั้งแต่ 1 gf จนถึง 1,000 gf เวลาที่ใช้ในการ กดค้าง ไว้บนผิวชิ้นงานเป็นเวลา 10 วินาที ค่าความแข็งที่เครื่องอ่านจะคำนวณออกมาจากเส้นทแยงมุม ของรอยกดทั้ง 2 เส้น คือ d<sub>1</sub> และ d<sub>2</sub> ในงานนี้ใช้แรงกดที่กระทำต่อผิวชิ้นงานเป็น 10 gf กดห่างกัน 3 มิลลิเมตร ตลอดความยาวของชิ้นงานดัฐปที่ 3.10 (b)



ร**ูปที่ 3.10** (a) เครื่องวัดความแข็งแบบไมโครวิกเกอร์ (b) ตัวอย่างตำแหน่งรอยกดบนชิ้นงาน

#### 3.2.5 การทดสอบแรงดิ่ง (Tensile Test)

ก่อนทำการทดสอบแรงดึงจะต้องนำชิ้นงานไปเตรียมตัดเป็นชิ้นงานตามขนาดมาตรฐาน DIN 50114 [52] ซึ่งมีความยาวพิกัด (Gauge length) 25 มิลลิเมตร สำหรับเหล็กที่มีความหนาน้อยกว่า 3 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 3.11 ด้วยเครื่องตัดลวด ไฟฟ้า CNC wire cutting จากนั้นจึงนำมาทดสอบด้วยเครื่อง ทดสอบแรงดึง (Universal Testing) ยี่ห้อ Tinius Olsen รุ่น H50KS แสดงดังรูปที่ 3.12 ภายใต้เงื่อนไข การทดสอบที่อุณหภูมิห้อง โดยใช้ความเร็วของ Crosshead ในการทดสอบ 3.5 mm/min คงที่ คิดเป็น ค่า strain rate เท่ากับ 0.0023 s<sup>-1</sup>



รูปที่ 3.11 ขนาคชิ้นงานทคสอบแรงคึงตามมาตรฐานDIN 50114 [52]



รูปที่ 3.12 เครื่องทคสอบแรงคึง

### 3.2.6 การเตรียมอุปกรณ์สำหรับกระบวนการขึ้นรูปร้อน

ในการเตรียมอุปกรณ์สำหรับกระบวนการขึ้นรูปร้อนนั้นจะต้องติดตั้งชุดแม่พิมพ์ที่จะใช้ในการขึ้นรูป กับเครื่องอัดแบบไฮดรอลิกซึ่งแม่พิมพ์ที่ใช้ในงานวิจัยใช้เหล็กเกรด AISI 13 หรือ SKD61 H13 ซึ่ง จัดเป็นเหล็กกล้าเครื่องมืองานร้อน (Hot work tool steel) ที่ผสมโครเมี่ยม โมลิบดีนั่มและวาเนเดียม (Cr-Mo-V) ที่มีความเหนียวสูง ทนความร้อน ทนกระแทกใด้ดี แปรรูปได้ง่าย สามารถนำไปใช้งานได้ อย่างกว้างขวาง เหมาะกับแม่พิมพ์งานร้อนทุกชนิดทั้งงานขึ้นรูปโลหะ พลาสติก และแก้ว สามารถ รักษาความแข็งแรงที่อุณหภูมิสูงได้ดีมาก ทนต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างฉับพลัน มีค่าการนำ ความร้อนดีมาก สามารถระบายความร้อนด้วยน้ำได้โดยตรง [20] ขนาดต่างๆของแม่พิมพ์แสดงในรูป ที่ 3.13 โดยเริ่มต้นด้วยการเตรียมชิ้นงานที่จะใช้ในการขึ้นรูปร้อนให้มีขนาดกว้าง 130 มิลลิเมตรและ ยาว 150 มิลลิเมตร เตรียมเจาะรูบนชิ้นงานเพื่อทำการวัดอุณหภูมิ โดยดำแหน่งการวัดอุณหภูมิบน ชิ้นงานและแม่พิมพ์แสดงในรูปที่ 3.13 พร้อมทั้งติดตั้งเกรื่องวัดอุณหภูมิและเตาไฟฟ้าที่สามารถตั้งค่า อุณหภูมิที่ต้องการได้คือที่ 950 องศาเซลเซียส พร้อมทั้งระบบหล่อเย็นเพื่อระบายความร้อนออกจาก แม่พิมพ์ อุปกรณ์ทั้งหมดแสดงดังรูปที่ 3.14



รูปที่ 3.13 แม่พิมพ์ที่จะใช้ในการขึ้นรูปร้อน



ร**ูปที่ 3.14** ลักษณะการติดตั้งชุดทดลองการขึ้นรูปร้อน (Hot Stamping)

## 3.2.7 การวัดอุณหภูมิบนชิ้นงาน

การวัคอุณหภูมิบนชิ้นงานในระหว่างการขึ้นรูปจะใช้ Thermocouple ประเภท K และใช้มัลติมิเตอร์ (Multimeter) ที่มีความสามารถในการอ่านและบันทึกค่าอุณหภูมิได้ เป็นตัวบันทึกข้อมูลตลอดการ ทดสอบ โดยในการบันทึกผลอุณหภูมิจะจับเวลาที่ใช้ในแต่ละขั้นตอน ซึ่งมี 3 ขั้นตอน คือ

ขั้นตอนที่ 1 การย้ายชิ้นงานจากเตามายังแม่พิมพ์ ใช้เวลาในขั้นตอนนี้ประมาณ 4-6 วินาที ขั้นตอนที่ 2 การขึ้นรูปชิ้นงาน ใช้เวลาในขั้นตอนนี้ประมาณ 1 วินาที ขั้นตอนที่ 3 การทำให้ชิ้นงานเย็นตัวอย่างรวดเร็วในแม่พิมพ์ ใช้เวลาในขั้นตอนนี้ประมาณ 20 วินาที เนื่องจากข้อจำกัดของเครื่องมือที่สามารถวัดอุณหภูมิได้ทีละบริเวณ จึงจำเป็นต้องแยกการเก็บข้อมูล การทดลองละ 1 บริเวณ โดยข้อมูลที่สามารถนำมาใช้งานได้นั้น จะเลือกจากข้อมูลเวลาของแต่ละ ขั้นตอนที่มีความใกล้เคียงกันมากที่สุด และใช้ข้อมูลอุณหภูมิดังกล่าวมาเป็นข้อมูลอ้างอิงในการสร้าง แบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ ดังรูปที่ 3.15 แสดงตำแหน่งการวัดอุณหภูมิบนชิ้นงาน



**รูปที่ 3.15** บริเวณชิ้นงานที่ทำการวัดอุณหภูมิ

## 3.3 การทดลองการขึ้นรูปร้อน (Hot stamping)

ชิ้นงานเริ่มต้นที่ความกว้าง 130 mm ขาว 150 mm และหนา 1.4 mm ถูกให้ความร้อนด้วยเตาไฟฟ้าที่ อุณหภูมิ 950°C เป็นเวลา 5 นาที เพื่อให้มั่นใจว่าโครงสร้างของชิ้นงานมีเฟสออสเทนในด์ทั้งหมด ที่ อุณหภูมิสูงเหล็กสามารถขึ้นรูปได้ง่าย ทำให้สามารถขึ้นรูปชิ้นงานที่ซับซ้อนได้ หลังจากนั้นข้าย ชิ้นงานจากเตามายังแม่พิมพ์ใช้เวลาในขั้นตอนนี้ประมาณ 4-6 วินาทีหลังจากนั้นทำการขึ้นรูปชิ้นงาน ใช้เวลาในขั้นตอนนี้ประมาณ 1 วินาที มีน้ำเป็นสารหล่อเย็นที่ใหลเวียนในแม่พิมพ์ มีอัตราความเร็วใน ท่อประมาณ 20 ลิตรต่อนาที ใช้เวลาขึ้นรูปและหล่อเย็นประมาณ 20 วินาที จะได้ชิ้นงานที่มีอุณหภูมิ ประมาณ 130°C แล้วปล่อยให้เย็นตัวในอากาศเป็นขั้นตอนสุดท้าย แสดงเป็นรูปแบบแผนภาพ อุณหภูมิและของกระบวนการขึ้นรูปร้อนดังรูปที่ 3.16โดยที่อัตราการเย็นตัวของเหล็กกล้าในแม่พิมพ์ จะต้องสูงพอที่จะทำให้เกิดการเปลี่ยนเฟสจากออสเตนในต์เป็นมาร์เทนไซต์ ในทางกลับกันเฟสเบน ในต์และเฟอร์ไรท์จะต้องไม่เกิดขึ้นหรือเกิดขึ้นน้อยที่สุด หลังจากนั้นจึงนำชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูป ร้อนไปทดสอบสมบัติต่างๆ ต่อไป



รูปที่ 3.16 แผนภาพ อุณหภูมิ – เวลา ของกระบวนการขึ้นรูปร้อน (Hot stamping process)

## 3.4 การทดสอบสมบัติทางกลของชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูปร้อน

ในขั้นตอนนี้จะนำชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูปร้อนไปทำการทดสอบแรงคึง โดยนำชิ้นงานมาตัดเป็น ชิ้นงานตามมาตรฐาน DIN 50114 ด้วยเครื่องตัดโลหะลวดไฟฟ้า (Wire cut) จากนั้นนำชิ้นงานมา ทดสอบด้วยเครื่องทดสอบแรงคึง (Universal Testing) ด้วยเงื่อนไขเดียวกับหัวข้อ 3.2.5 มาตรฐานของ ชิ้นงานทดสอบที่ใช้ในการทดลองคือ DIN 50114 [52] และตำแหน่งของชิ้นงานที่ตัดเตรียมชิ้นงาน ทดสอบแสดงดังรูปที่ 3.17



รูปที่ 3.17 ชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูปร้อน (a) แสดงตำแหน่งการเตรียมชิ้นงาน Tensile test และ (b) รูปร่างของชิ้นงานทดสอบที่ใช้ในการสอบแรงดึงตามมาตรฐาน (DIN 50114) [52]

สำหรับการทดสอบความแข็งของชิ้นงานในแนวขนานได้ทำการทดสอบบริเวณปีกทั้ง 2 ข้างของ ชิ้นงานในที่นี้ให้ชื่อว่าFlange 1 และ Flange 2 และทดสอบบริเวณตรงกลางของชิ้นงานในที่นี้เรียกว่า Bottom รอยกดแต่ละรอยห่างกัน 3 มิลลิเมตรตามแนวของชิ้นงาน สำหรับการทดสอบความแข็งของ ชิ้นงานในแนวตามขวาง แบ่งการทดสอบออกเป็นสองบริเวณคือ บริเวณด้านบน (Edge) และตรง กลาง (Middle) กดห่างกัน 5 มิลลิเมตรตามแนวขวางของชิ้นงานดังแสดงดังรูปที่ 3.18



รูปที่ 3.18 แนวการทดสอบความแข็งของชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูปร้อน

## 3.5 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

### 3.5.1 เครื่องตัดเหล็กด้วยลวดไฟฟ้า

เกรื่องตัดเหล็กด้วยลวดไฟฟ้าที่ใช้เป็นยี่ห้อ TROOP ใช้ไฟฟ้าเป็นตัวหลอมละลาย ขนาดและรูปร่างที่ ได้หลังการตัดมีความแม่นยาสูง แสดงดังรูปที่ 3.19



รูปที่ 3.19 เครื่องตัด โลหะด้วยลวด ไฟฟ้า

## 3.5.2 เครื่องหล่อเรซิ่นแบบร้อน (Hot Mounting)

เครื่องหล่อเรซิ่นที่ใช้เป็นยี่ห้อ Sample inlay machine รุ่น XQ-2B ใช้สำหรับหล่อแบล็คการ์ไรต์เพื่อยึด ติดชิ้นงานทดสอบและเป็นตัวจับชิ้นงานในการนำไปขัดหรือถ่ายภาพโครงสร้างทางจุลภาค ดังแสดง ในรูปที่ 3.20



รูปที่ 3.20 เครื่องหล่อเรซิ่นแบบร้อน

## 3.5.3 เครื่องขัดผิวโลหะ

เครื่องขัดผิวโลหะที่ใช้เป็นยี่ห้อ Struers รุ่น LaboPol-21 ใช้ขัดผิวชิ้นงานแบบละเอียดโดยใช้ผ้า กำมะหยี่และอลูมิน่าในการขัด เพื่อให้ผิวชิ้นงานมีลักษณะมันวาวก่อนที่จะนำไปวิเคราะห์ด้วยกล้อง OM ต่อไป แสดงดังรูปที่ 3.21



รูปที่ 3.21 เครื่องขัดผิวโลหะ

#### **3.5.4 เตาไฟฟ้า**

เตาไฟฟ้าใช้ในการอบชิ้นงานที่จะขึ้นรูป ขนาดเตาภายนอกกว้าง 450 mm ลึก 500 mm สูง 530 mm ภายในเตา กว้าง 170 mm ลึก 250 mm สูง 160 mm น้ำหนักประมาณ 40 กิโลกรัม อุณหภูมิสูงสุด 1,200 ℃ ขนาดไฟป้อน 220 VAC 1 phase 12.5 A



**รูปที่ 3.22** เตาไฟฟ้า

## 3.5.5 เครื่องอัดแบบไฮดรอลิก

ในงานนี้ใช้เครื่องอัดแบบไฮครอลิกขนาค 150 ตัน ซึ่งเป็นเครื่องที่มีแรงในการอัดสูง เพื่อทำการขึ้นรูป ชิ้นงานด้วยแม่พิมพ์





### 3.5.6 เครื่องวัดอุณหภูมิ (Thermocouple)

เทอร์ โมคัปเปิลที่ใช้ในการทดลองนี้เป็นเทอร์ โมคัปเปิล ประเภท K และใช้ มัลติมิเตอร์รุ่น Fluke 287 True RMS Logging Multimeter ในการอ่านและบันทึกค่าอุณหภูมิของชิ้นงาน



ร**ูปที่ 3.24** อุปกรณ์วัดอุณหภูมิ Fluke 287 True RMS Logging Multimeter

#### 3.5.7 ระบบหล่อเย็น (Cooling system)

ระบบหล่อเย็นแม่พิมพ์ประกอบด้วยปั๊มน้ำ Polo ชนิดหอยโข่ง รุ่น CPM-130 ท่อส่ง 1 นิ้วกำลัง มอเตอร์ 0.5 แรงม้า อัตราการ ใหลสูงสุด 100 ลิตรต่อนาที และ Flow meter ยี่ห้อ Blue-White วัดอัตรา การ ใหลสูงสุด ได้ 350 ลิตรต่อนาที ระบบหล่อเย็นใช้สำหรับระบายความร้อนออกจากแม่พิมพ์แสดง ดังรูปที่ 3.25



**รูปที่ 3.25** ระบบหล่อเย็นแม่พิมพ์