

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

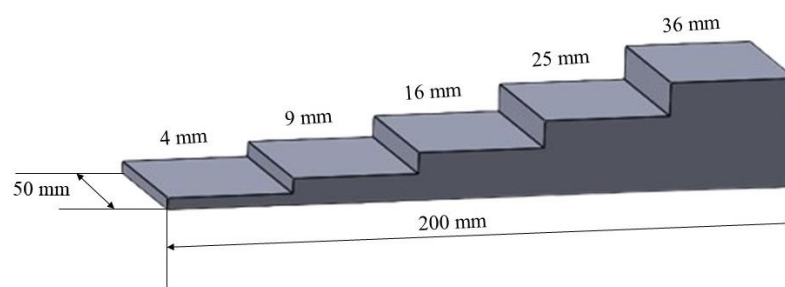
3.1.1 การออกแบบการทดสอบการหล่อ

งานวิจัยนี้ต้องการต้องศึกษาอิทธิพลของบิสมัทที่มีผลต่อโครงสร้างจุลภาคและสมบัติเชิงกลของเหล็กหล่อเหนียว มีขั้นตอนในการดำเนินงานวิจัยแสดงดังรูปที่ 3.2 โดยใช้เทคนิคการหล่อเหล็กหล่อเหนียวขึ้นมาทั้งหมด 5 ชุด ตามตารางที่ 3.1 โดยแต่ละชุดมีการเติมบิสมัทที่แตกต่างกัน ตั้งแต่ 0 ถึง 0.01% ตามน้ำหนัก ซึ่งในการออกแบบการทดสอบการหล่อชิ้นงานตัวอย่างจะมีทั้งหมด 2 ประเภท ดังต่อไปนี้

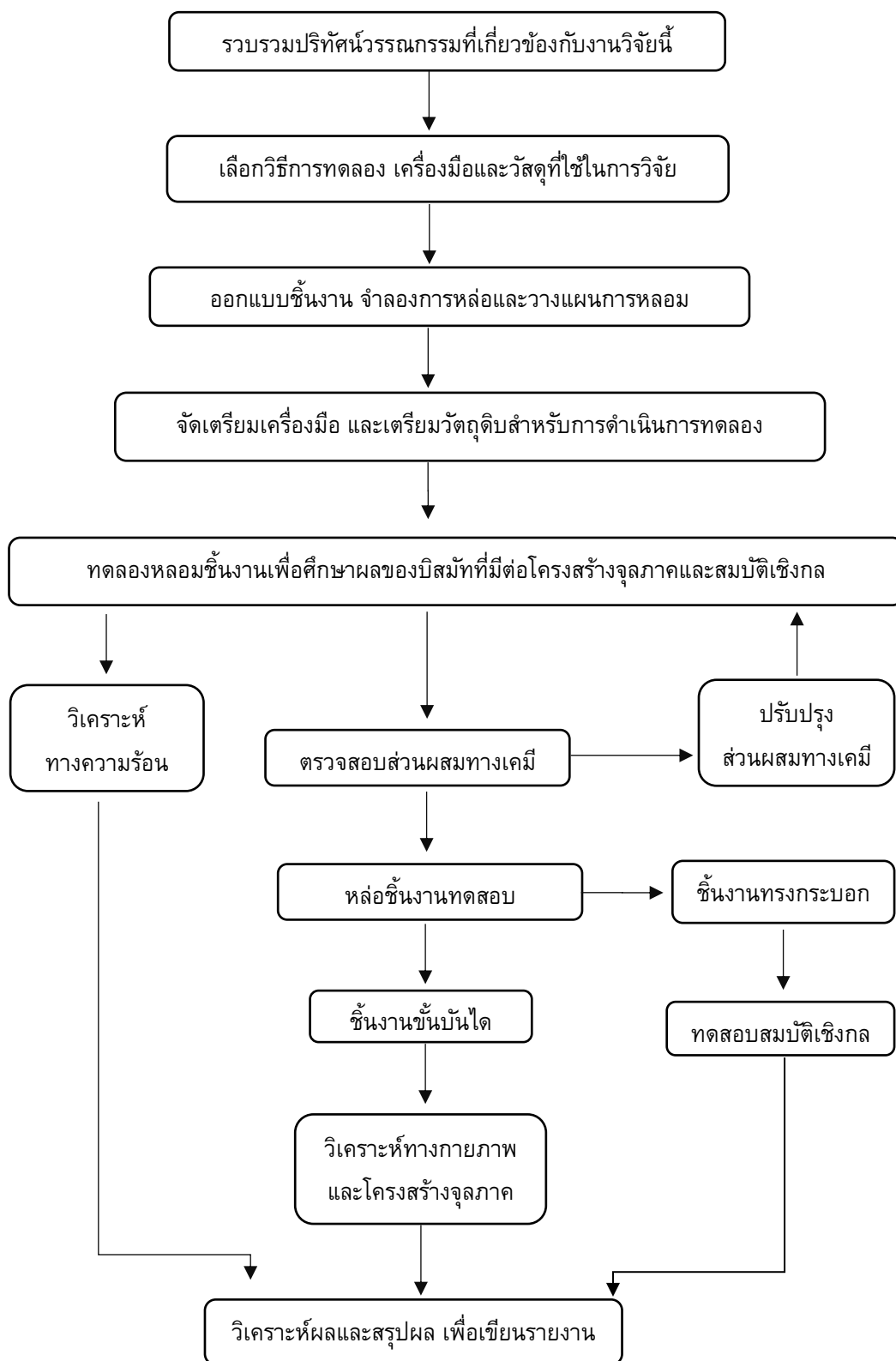
1) การออกแบบแรกคือการหล่อทรงกระบอกสำหรับการทดสอบแรงดึง ตามมาตรฐาน ASTM E8 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางงานหล่อ 25.4 มิลลิเมตร

2) การออกแบบประเภทที่สองคือการหล่อแบบขั้นบันได (Step pattern) ซึ่งจะมีขนาดความหนาแตกต่างกัน ตั้งแต่ 4 9 16 25 และ 36 มิลลิเมตร ตามลำดับ ดังรูปที่ 3.1

นอกจากนี้ยังได้นำซอฟต์แวร์จำลองการหล่อเชิงพาณิชย์ มาใช้เพื่อประมาณอัตราการเย็นตัวที่สอดคล้องกับความหนาของส่วนต่างๆ อีกด้วย



รูปที่ 3.1 ขนาดของการหล่อแบบขั้นบันได



รูปที่ 3.2 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

ตารางที่ 3.1 สรุปเงื่อนไขการทดลอง

เงื่อนไข	ความหนา (มิลลิเมตร)	จำนวนบิสมีท (%น้ำหนัก)
เหล็กหล่อเหนียว	4	0, 0.003, 0.005, 0.007, 0.010
	9	0, 0.003, 0.005, 0.007, 0.010
	16	0, 0.003, 0.005, 0.007, 0.010
	25	0, 0.003, 0.005, 0.007, 0.010
	36	0, 0.003, 0.005, 0.007, 0.010

3.2 วัสดุที่ใช้ในการวิจัย

3.2.1 เหล็กดิบ (Ductile Pig iron) เป็นวัตถุดิบตั้งต้นสำหรับการผลิตเหล็กหล่อเหนียว จะใส่ลงไปในเตาหลอมเป็นลำดับแรก โดยต้องเผาไล่ความชื้นในเหล็กก่อนนำลงไปในเตาหลอม

3.2.2 เหล็กกล้า (Steel) เป็นวัตถุดิบที่ใส่ลงไปเพื่อช่วยลดปริมาณคาร์บอนของเหล็กหลอมเหลว ในกรณีที่เหล็กหลอมเหลวนั้นมีคาร์บอนเกินความต้องการ

3.2.3 เฟอโร-ซิลิคอน-แมกนีเซียม (Fe-Si-Mg alloy) เป็นวัตถุดิบที่เติมลงไปในเหล็กหลอมเหลว เพื่อเปลี่ยนรูปทรงของแกรไฟต์เป็นรูปทรงกลม (Spheroidal Graphite) การเปลี่ยนรูปร่างของแกรไฟต์นั้นขึ้นอยู่กับปริมาณของแมกนีเซียม

3.2.4 ผงคาร์บอน (Carbon) เป็นวัตถุดิบที่เติมเพื่อเพิ่มปริมาณคาร์บอนในเหล็กหลอมเหลว ผงคาร์บอนที่เติมมักมีเปอร์เซ็นต์คาร์บอนไม่น้อยกว่า 99%

3.2.5 บิสมีทบริสุทธิ์ (Pure Bismuth) เป็นวัตถุดิบที่เติมเพื่อเพิ่มปริมาณบิสมีทในเหล็กหลอมเหลวให้มีปริมาณคาร์บอนตามเงื่อนไขที่กำหนด ดังรูปที่ 3.3

3.2.6 สารอินนอคูแลนต์ เป็นวัตถุดิบสำหรับการทำอินนอคูเลชั่น ในน้ำเหล็ก ซึ่งสารอินนอคูแลนต์ที่ใช้ได้ในการทดลองนี้ได้แก่ Superseed75 inoculant โดยมีส่วนผสมตามตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 ส่วนผสมทางเคมีของวัตถุดิบที่ใช้ในการหล่อเหล็กหล่อเหนียว

Materials	%C	%Si	%Mn	%P	%S
Ductile Pig iron	4.439	0.61	0.062	0.058	0.028
Steel scrap	0.191	0.284	0.359	0.0082	0.0018

Materials	%C	%Si	%Mg	%Ca	%Re	%Al	%S
Ferro silicon magnesium	-	48.0	5.1	-	-	0.8	-

Materials	%Si	%Ba	%Ca	%Sr	%Al	%Zr	%Ce
Superseed 75 inoculant	73-78	-	0.1 Max	0.6-0.1	0.5 Max	-	-



Pig Iron



Steel scrap



Fe-Si-Mg alloy



Carbon



Pure Bismuth



Superseed75 inoculant

รูปที่ 3.3 วัสดุที่ใช้ในการทดลอง

3.3 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

3.3.1 เตาหลอมโลหะประเภทไฟฟ้ากระแสเหนี่ยวนำ (Electric Induction Furnaces) เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการหลอมละลายก้อนเหล็กดิบ ก่อนจะมีการเติมส่วนผสมอื่นลงไปให้น้ำโลหะหลอมเหลว เพื่อให้ได้ส่วนผสมทางเคมีตามเงื่อนไขที่ต้องการ โดยเตาหลอมมาพร้อมชุดควบคุมการจ่ายพลังงานไฟฟ้าสามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดได้ที่ 100 kVA แสดงดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 เตาหลอมและตู้ควบคุม

3.3.2 เครื่องโม่ทราย เครื่องบดทราย (sand mill) คือเครื่องจักรที่ใช้สำหรับโม่หรือกระจายตัวทราย เพื่อให้ได้เม็ดทรายที่มีขนาดละเอียดและสม่ำเสมอ เหมาะสำหรับการใช้งานในกระบวนการผลิต เช่น การหล่อโลหะ การผลิตกระเบื้อง หรือการใช้งานในอุตสาหกรรมอื่น ๆ ที่ต้องการทรายละเอียดคุณภาพสูง เครื่องโม่ทรายมักมีหลายรูปแบบและขนาด ขึ้นอยู่กับลักษณะการใช้งานและประเภทของวัสดุที่ต้องการบด ดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 เครื่องโม่ทราย

3.3.2 หีบแบบและทรายแบบ เป็นอุปกรณ์และวัสดุที่ใช้ในการทำแม่พิมพ์สำหรับการหล่อโลหะ หีบแบบ (mold) คือโครงสร้างที่ใช้ในการสร้างรูปทรงของชิ้นงาน โดยทั่วไปมักทำจากโลหะ หรือวัสดุแข็งอื่น ๆ ส่วนทราย (sand) ใช้เป็นวัสดุทำแม่พิมพ์ในกระบวนการหล่อโลหะ โดยเฉพาะในการหล่อเหล็กหรืออลูมิเนียม ทรายที่ใช้หล่อมักมีการผสมสารเคมีเพื่อเพิ่มความแข็งแรงและความทนทานในการใช้งาน ดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 ทรายแบบ (ซ้าย) หีบแบบ (ขวา)

3.3.3 ชุดอุปกรณ์วัดอุณหภูมิที่ประกอบไปด้วยเทอร์โมคัปเปิลประเภท S ใช้ในการวัดอุณหภูมิน้ำโลหะหลอมเหลวก่อนเทลงในแม่พิมพ์ ดังแสดงในรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 ชุดอุปกรณ์วัดอุณหภูมิ (ที่มา : <http://th.qrdetecting.com> และ <https://nakayama-meps.co.jp/english/thermometer/index.html>)

3.3.4 แก๊สเผาแบบ (gas-fired mold) เป็นเชื้อเพลิงในการให้ความร้อนกับแม่พิมพ์ เพื่อให้แม่พิมพ์ร้อนและพร้อมใช้งานในการหล่อโลหะ การเผาแม่พิมพ์ด้วยแก๊สช่วยเพิ่มความแม่นยำในการควบคุมอุณหภูมิ ทำให้แม่พิมพ์มีความทนทานและให้ผลลัพธ์ที่ดีกว่าในกระบวนการผลิต ดังรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 แก๊สสำหรับเผาแบบ

3.3.5 เบ้ารองรับน้ำโลหะ (Ladle) เป็นเบ้าที่รองรับน้ำโลหะจากเตาหลอมโลหะ และเป็นที่ใช้ในการผสมสารโนดูลาไรเซอร์ (Nodularizer) หรือสารอินทรีย์คุแลนต์ก่อนเทลงแบบหล่อ ดังแสดงในรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 เบ้ารองรับน้ำโลหะ (Ladle)

3.3.6 ชุดอุปกรณ์สำหรับชักตัวอย่างน้ำโลหะ ประกอบไปด้วยแม่พิมพ์ที่ทำด้วยโลหะทองแดงและเบ้ารองรับน้ำโลหะสำหรับชักตัวอย่างแบบเหรียญ ก่อนที่จะนำไปตรวจสอบส่วนผสมทางเคมีด้วยเครื่องสเปกโตรมิเตอร์ (Optical emission spectrometers) ดังแสดงในรูปที่ 3.10 และรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.10 แม่พิมพ์ทองแดงสำหรับรองรับการชักตัวอย่างน้ำโลหะ



รูปที่ 3.11 เบ้ารองรับน้ำโลหะสำหรับชักตัวอย่าง

3.3.7 เครื่องชั่งน้ำหนักแบบหยาบและเครื่องดิจิตอล (ชั่งละเอียด) สำหรับเครื่องชั่งหยาบ ใช้สำหรับชั่งเหล็กดิบ (Pig iron) และเศษเหล็กกล้าก่อนใส่เตาหลอมและเครื่องชั่งละเอียดนั้นใช้สำหรับชั่งวัตถุดิบต่าง ๆ ลงสู่เตาหลอม เพื่อปรับส่วนผสมทางเคมีของน้ำโลหะ ดังแสดงในรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 เครื่องชั่งน้ำหนักแบบหยาบ (ซ้าย) เครื่องชั่งน้ำหนักแบบละเอียด (ขวา)

3.3.8 เครื่องตรวจสอบส่วนผสมทางเคมี หรือที่เรียกว่าสเปกโตรมิเตอร์ (Optical emission spectrometers) เป็นเครื่องในการตรวจสอบส่วนผสมทางเคมี ในขณะที่ทำการหล่อหลอมและก่อน เหน้าโลหะลงแม่พิมพ์เพื่อตรวจสอบส่วนผสมทางเคมีของน้ำโลหะ แสดงในรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.13 เครื่องตรวจสอบส่วนผสมทางเคมี

3.3.9 อุปกรณ์สำหรับการวัดอัตราากาเย็นตัวของเหล็กหล่อเหนียว ประกอบไปด้วย

3.3.9.1 เทอร์โมคัปเปิลประเภท S ที่สามารถวัดอุณหภูมิได้สูงถึง 1600 °C ซึ่งจะต่อเข้ากับระบบเก็บข้อมูล (Digital data acquisition system) แสดงในรูปที่ 3.14



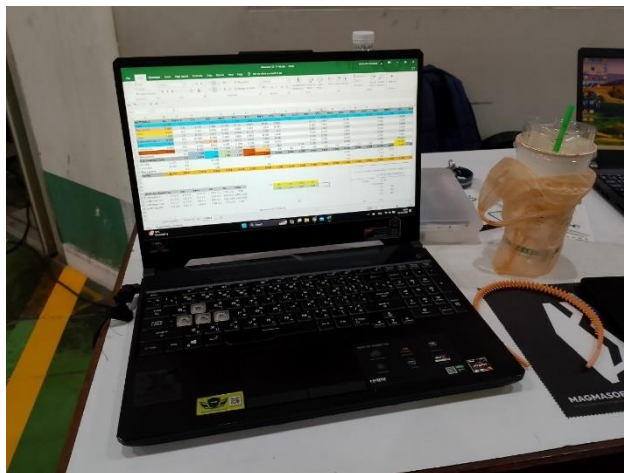
รูปที่ 3.14 อุปกรณ์สำหรับการวัดอัตราการเย็นตัวของเหล็กหล่อเหนียว

3.3.9.2 ระบบเก็บข้อมูลแบบดิจิทัล (Digital data acquisition system) เป็นอุปกรณ์ในการเก็บระบบข้อมูลจาก Transducer และ Thermocouple ซึ่งตัวระบบเก็บข้อมูลนั้นจะเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์โน้ตบุ๊กเพื่อแสดงผลการทดลอง แสดงในรูปที่ 3.15



รูปที่ 3.15 ระบบเก็บข้อมูลแบบดิจิทัล (Digital data acquisition system)

3.3.9.3 คอมพิวเตอร์โน้ตบุ๊ก เป็นอุปกรณ์ทำหน้าที่เป็นจอแสดงผลการทดลองที่ได้มาจากระบบเก็บข้อมูลแบบดิจิทัล แสดงในรูปที่ 3.16



รูปที่ 3.16 คอมพิวเตอร์โน้ตบุ๊กเพื่อแสดงผล

3.3.10 เครื่องตัดเหล็ก (Steel Cutting Machine) เป็นเครื่องจักรที่ใช้สำหรับตัดเหล็กและวัสดุโลหะต่างๆ โดยทั่วไปมีหลายประเภทที่ออกแบบมาเพื่อรองรับการตัดในรูปแบบและขนาดที่แตกต่างกัน แสดงในรูปที่ 3.17



รูปที่ 3.17 เครื่องตัดเหล็กเพื่อใช้ในการตัดชิ้นงาน

3.3.11 เครื่องขัดผิวชิ้นงาน สำหรับเตรียมผิวชิ้นงานให้เรียบเนียนหรือขจัดคราบสนิม และความไม่เรียบของพื้นผิว ช่วยให้ชิ้นงานมีคุณภาพและความสวยงามที่ดีขึ้นเพื่อนำมาใช้ในการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค แสดงในรูปที่ 3.18



รูปที่ 3.18 เครื่องขัดผิวชิ้นงาน

3.3.12 กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงพร้อมอุปกรณ์การถ่ายภาพ (Optical Microscope with Imaging Equipment) เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการขยายภาพวัตถุขนาดเล็กโดยใช้แสง เพื่อให้มองเห็นรายละเอียดที่ไม่สามารถมองเห็นด้วยตาเปล่าได้ โดยมีการติดตั้งอุปกรณ์ถ่ายภาพเพื่อบันทึกภาพหรือวิดีโอของสิ่งที่สังเกตได้ ใช้ในการตรวจสอบลักษณะของโครงสร้างจุลภาคภายหลังการหล่อ ดังแสดงในรูปที่ 3.19



รูปที่ 3.19 กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงพร้อมชุดอุปกรณ์ถ่ายภาพ

3.3.13 เครื่องกลึงเหล็ก (Metal Lathe) คือเครื่องจักรที่ใช้สำหรับการขึ้นรูปและแปรรูปเหล็กและโลหะอื่น ๆ ให้เป็นชิ้นงานที่มีรูปทรงต่าง ๆ โดยการหมุนวัสดุรอบแกนหมุนและใช้เครื่องมือ

ในการตัด เจาะ หรือขัดพื้นผิว เครื่องกลึงเหล็กมีหลายประเภทและสามารถใช้งานหลากหลายประเภท ตั้งแต่งานผลิตชิ้นส่วนขนาดเล็กจนถึงงานผลิตชิ้นส่วนขนาดใหญ่ในอุตสาหกรรมหนัก ดังแสดงในรูปที่ 3.20



รูปที่ 3.20 เครื่องกลึงเหล็กอัตโนมัติ

3.3.14 เครื่องทดสอบความแข็ง (Hardness Tester) เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการวัดค่าความแข็งของวัสดุ ซึ่งเป็นการประเมินความทนทานของวัสดุต่อการเกิดรอยบุ๋มหรือการเสียรูปแบบถาวรเมื่อมีแรงกด เครื่องทดสอบความแข็งมีหลายประเภทที่ใช้วิธีการวัดที่แตกต่างกันออกไป เช่น วิธีการทดสอบความแข็งแบบบริเนล (Brinell), ร็อคเวล (Rockwell), วิกเกอร์ส (Vickers) และอื่น ๆ ดังแสดงในรูปที่ 3.21



รูปที่ 3.21 เครื่องทดสอบความแข็ง

3.3.15 Electron Probe Micro Analyzer (EPMA) เป็นเครื่องมือในการวิเคราะห์ว่าองค์ประกอบใดบ้างที่ประกอบเป็นสสาร โดยการฉายรังสีลำอิเล็กตรอนลงบนพื้นผิวของสารและวัดลักษณะเฉพาะของรังสีเอกซ์ที่สร้างขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 3.22



รูปที่ 3.22 เครื่อง Electron Probe Micro Analyzer (EPMA) (ที่มา: <https://www.jeol.com/products/science/epma.php>)

3.3.16 เครื่องทดสอบแรงดึง (Tensile Testing Machine) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบแรงดึงของวัสดุต่าง ๆ โดยการดึงวัสดุให้ยืดออกจนถึงจุดที่วัสดุนั้นแตกหรือขาด การทดสอบนี้ช่วยในการวัดคุณสมบัติทางกลของวัสดุ เช่น ความแข็งแรง ความยืดหยุ่น และความทนทาน ดังแสดงในรูปที่ 3.23



รูปที่ 3.23 เครื่องทดสอบแรงดึง

3.4 ขั้นตอนการหล่อเหล็กหล่อเหนียว

3.4.1 เตรียมขี้ผึ้งน้ำหนักรัดดูดิบและเตรียมอุปกรณ์ไว้สำหรับการหล่อ

3.4.2 จากนั้นผสมทรายแบบและตำแบบทั้ง 2 ชิ้นงานเพื่อขึ้นงานขึ้นแบบได้และขึ้นงานทรงกระบอก ดังรูปที่ 3.24



รูปที่ 3.24 ขั้นตอนการตำแบบหล่อ

3.4.3 นำเหล็กดิบ (Ductile Pig iron) ที่เตรียมไว้ใส่เตาหลอมและทำการเปิดเตาหลอมโลหะ เมื่อเหล็กหลอมเหลวแล้วก็ทำการปรุงส่วนผสมทางเคมีตามเงื่อนไขที่กำหนด โดยจะทำการหลอมทั้งหมด 5 ชุด ดังตารางที่ 3.3

3.4.4 หลังจากการปรุงส่วนผสมทางเคมีเป็นที่เรียบร้อยแล้ว จะต้องตรวจสอบส่วนผสมทางเคมี โดยเทน้ำเหล็กลงบนแท่นทองแดงเพื่อนำเหรียญตัวอย่างไปตรวจสอบส่วนผสมทางเคมีด้วยเครื่องสเปกโตรมิเตอร์ (Spectrometer) และคำนวณค่าคาร์บอนสมมูล (Carbon equivalent, CE) ให้ตรงตามความต้องการ หากน้ำเหล็กมีปริมาณคาร์บอนที่มากเกินไปจะทำการเติมเหล็กกล้า เพื่อลดปริมาณคาร์บอนในน้ำเหล็ก หรือถ้ามีปริมาณซิลิคอนในน้ำเหล็กมีมากจะต้องเติมเหล็กดิบเพื่อลดปริมาณซิลิคอน

3.4.5 สำหรับการจะทำให้แกรไฟต์กลมนั้น จะต้องเติมสารเฟอร์โร-ซิลิคอน-แมกนีเซียม อินน็อคูแลนต์ และบัสเมตบริสฟุทธ์หลังจากการกำจัดออกซิเจน เหล็กหลอมเหลวจะถูกทำให้ร้อนจนถึงอุณหภูมิสูง และถูกเทออกที่ประมาณ 1500°C และ 1450°C ตามลำดับ มายังเบ้ารองรับน้ำ

3.5 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคและการวิเคราะห์ทางภาพ

3.5.1 นำชิ้นงานที่ได้จากการหล่อแบบขึ้นบันได ทั้ง 5 เงื่อนไขนำมาตัดด้วยเครื่องตัดเหล็ก (Cutting Machine) แยกเป็นชิ้นของแต่ละความหนา ตั้งแต่ 4 ถึง 36 มิลลิเมตร จากนั้นผ่ากลางชิ้นงานทุกชิ้น เพื่อเตรียมนำไปขัด

3.5.2 นำชิ้นงานที่ตัดแล้วมาขัดด้วยกระดาษทรายตั้งแต่เบอร์ 100 -1200 จากนั้นขัดด้วยผ้าสักหลาดโดยใช้ผงอะลูมินา 0.3 ไมครอน และ 0.05 ไมครอน ตามลำดับ ดังรูปที่ 3.26

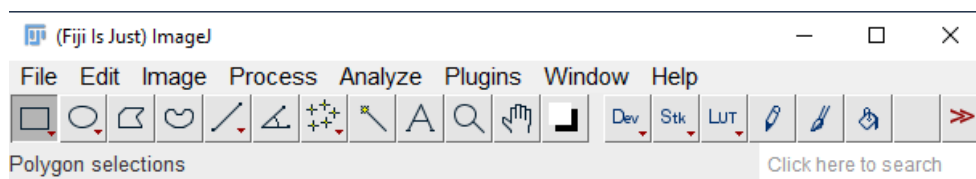


รูปที่ 3.26 ขั้นตอนการขัดด้วยผ้าสักหลาดโดยใช้ผงอะลูมินา

3.5.3 นำชิ้นงานที่ขัดเสร็จแล้วไปกัดกรดด้วย 3% Nital จากนั้นทำการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงและทำการถ่ายภาพโครงสร้างใช้เพื่อนำภาพที่ได้มาใช้ซอฟต์แวร์วิเคราะห์ทางภาพ

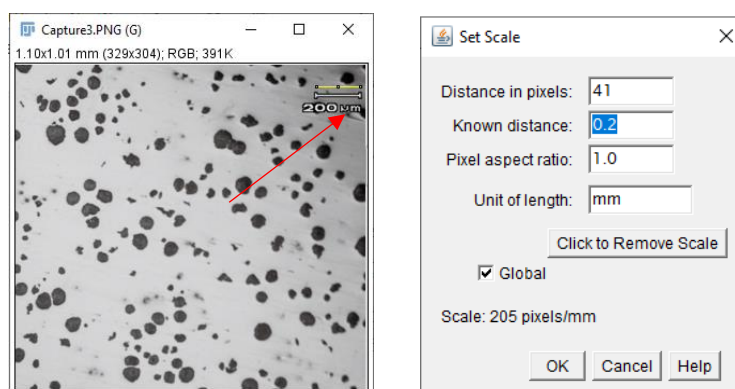
3.5.4 เมื่อนำภาพมาวิเคราะห์ในซอฟต์แวร์วิเคราะห์ทางภาพ จากนั้นทำการวัดจำนวนกราฟไฟต์ เส้นผ่านศูนย์กลาง ความกลมของแกรไฟต์ อัตราส่วนพื้นที่ของแกรไฟต์ เพอร์ไรต์ และเฟิร์ลโลต์ นำค่าที่ได้มาวิเคราะห์และสรุปผล

3.5.5 วิธีการวัดจำนวนก้อนแกรไฟต์ เส้นผ่านศูนย์กลางและความกลมของแกรไฟต์ นำภาพถ่ายที่กำลังขยาย 50X เท่า ที่บริเวณใจกลางหน้าตัดของชิ้นงานแต่ละความหนาดังแต่ 4 ถึง 36 มิลลิเมตร มาเข้าโปรแกรมวิเคราะห์ทางภาพ (Image J) ดังรูปที่ 3.27



รูปที่ 3.27 โปรแกรมวิเคราะห์ทางภาพ

3.5.6 เมื่อเปิดโปรแกรมแล้วเลือกไปที่ File>Open> เลือกรูปภาพที่ต้องการหาค่าต่างๆ จากนั้นลากเส้นตรงบนรูปภาพ (เส้นสีเหลือง) ให้เท่ากับสเกลบาร์บนรูปภาพ แล้วเลือกไปที่ Analyze>set scale แล้วใส่ค่าต่างๆให้ตรงกับรูปภาพลงไป เสร็จแล้วกด OK เพื่อทำการตั้งค่าสเกล แสดงดังรูปที่ 3.28



รูปที่ 3.28 วิธีการตั้งสเกลของโปรแกรมทางภาพ

3.5.7 การวัดเส้นผ่านศูนย์กลางนั้นทำได้โดยลากเส้นจากขอบของแกรไฟต์ไปยังขอบฝั่งตรงข้ามกัน ซึ่งโปรแกรมจะคำนวณออกมาให้ในช่อง MinFerret แสดงดังรูปที่ 3.29

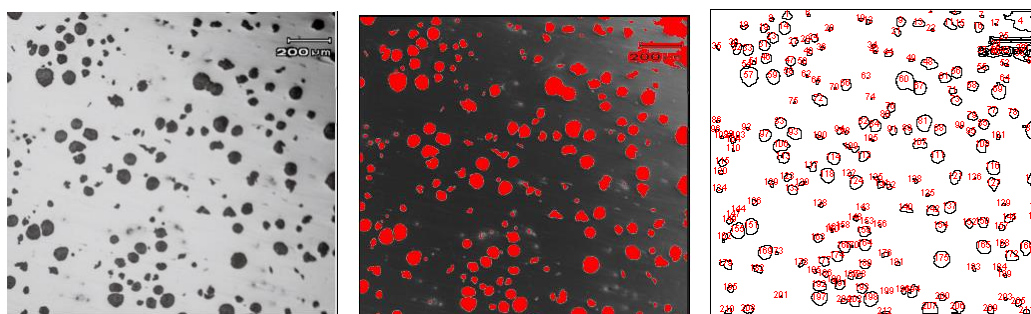
พื้นที่ของแกรไฟต์

	Area	Mean	Min	Max	Perim.	Major	Minor	Angle	Circ.	Feret	%Area	FeretX	FeretY	FeretAngle	MinFerret	Round	Solidity
1	0.002	255	255	255	0.167	0.054	0.051	33.343	0.973	0.58	100	65	117	34.992	0.052	0.05	0.919
2	0.003	255	255	255	0.206	0.071	0.055	157.00	0.915	0.78	100	77	118	142.431	0.057	0.28	0.928
3	0.003	255	255	255	0.187	0.062	0.055	39.960	0.964	0.66	100	48	129	30.256	0.057	0.11	0.940
4	0.003	255	255	255	0.224	0.078	0.051	5.176	0.793	0.83	100	62	139	13.241	0.059	0.52	0.864
5	0.002	255	255	255	0.200	0.057	0.046	18.807	0.647	0.62	100	66	145	157.380	0.050	0.22	0.854

จำนวนแกรไฟต์ ความเป็นวงกลม เส้นผ่านศูนย์กลาง ความกลม

รูปที่ 3.29 ผลการคำนวณค่าต่างๆโดยการใช้โปรแกรมทางภาพ

3.5.8 จากนั้นวัดจำนวนแกรไฟต์ออกมาเป็น *Nodule/mm²* โดยไปที่ File > Open > เลือกรูปภาพที่ต้องการหาค่าต่างๆ > Edit > Invert จากนั้นปรับชนิดภาพเป็น 8 bit และใช้ Threshold ในการเลือกพื้นที่ที่ต้องการหา ทำการ Analyze particle ดังรูปที่ 3.30



ภาพถ่ายจริง

ใช้ Threshold

outline

Image > Adjust > Threshold

รูปที่ 3.30 การใช้ซอฟต์แวร์วิเคราะห์ทางภาพ ที่แสดงวิธีการนับจำนวนแกรไฟต์

3.5.9 การคำนวณความกลมของแกรไฟต์ของซอฟต์แวร์วิเคราะห์ทางภาพ หาได้จากสมการทั้ง 2 สมการนี้ แสดงดังรูปที่ 3.26

$$Circ = 4\pi A/P^2 \quad \text{สมการที่ 3.1}$$

$$Round = 4A/\pi l_m^2 \quad \text{สมการที่ 3.2}$$

3.5.10 วิธีการหาร้อยละพื้นที่ของแกรไฟต์ เพอร์ไรต์ เพิร์ลไลต์ นำพื้นที่ของแกรไฟต์ เพอร์ไรต์ เพิร์ลไลต์ ที่ได้จากโปรแกรมมาคำนวณหาร้อยละพื้นที่ของแกรไฟต์ เพอร์ไรต์ เพิร์ลไลต์ ตามมาสมการที่กำหนดไว้ดังต่อไปนี้

$$\%Gr = \frac{A_{Gr}}{A_{Total}} \times 100 \quad \text{สมการที่ 3.3}$$

$$\% \alpha = \frac{A_{\alpha}}{A_{Total}} \times 100 \quad \text{สมการที่ 3.4}$$

$$\%P = \frac{A_p}{A_{Total}} \times 100 \quad \text{สมการที่ 3.5}$$

3.6 ทดสอบสมบัติเชิงกล

3.6.1 การทดสอบความแข็งของวัสดุ (Hardness Test)

3.6.1.1 เตรียมชิ้นงานที่ได้จากการหล่อแบบขั้นบันได (Step pattern) ทั้ง 5 เงื่อนไขที่ทำการตัดแยกเป็นชิ้นของแต่ละความหนา ตั้งแต่ 4 ถึง 36 มิลลิเมตร

3.6.1.2 ตั้งค่าแรงกดสำหรับหัวกดแบบบริเนลล์ จากนั้นนำชิ้นงานที่เตรียมไว้มาทดสอบ 5 จุด เพื่อหาค่าเฉลี่ยความแข็งของชิ้นงาน ทำวนไปทั้งหมดจำนวน 25 ชิ้น

3.6.2 การทดสอบแรงดึง (Tensile Test)

3.6.2.1 นำชิ้นงานเหล็กหล่อเหนียวทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหล่อ 25.4 มิลลิเมตร ที่ได้ทำการหล่อไว้ในตอนต้น ไปกลึงให้ได้ขนาดและรูปร่างที่เหมาะสมสำหรับทดสอบแรงดึงตามมาตรฐาน ASTM E8 แบบที่ 1 ดังรูปที่ 3.31

3.6.2.2 เมื่อกลึงจนได้รูปร่างตามมาตรฐานแล้ว นำชิ้นงานไปทำการทดสอบด้วยเครื่องทดสอบแรงดึงได้ทันที ทำวนไปทั้งหมดจำนวน 20 ชิ้น



รูปที่ 3.31 ตัวอย่างทดสอบแรงดึงมาตรฐานสำหรับเหล็กหล่อ

3.7 การย้อมสีโครงสร้าง

3.7.1 วัสดุที่ใช้ในการย้อมสี

- 1) ชิ้นงานเหล็กหล่อเหนียว ความหนา 36 มิลลิเมตร จำนวน 5 ชิ้น
- 2) โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) 80 กรัม
- 3) โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) 20 กรัม
- 4) กรดฟอสฟอริก 20 กรัม

5) น้ำ DI 200 มิลลิลิตร

3.7.2 ขั้นตอนการย้อมสีโครงสร้าง

3.7.2.1 ชั่งสาร NaOH 80 กรัมและ KOH 20 กรัม เตรียมไว้

3.7.2.2 ตวงน้ำกลั่น 200 มิลลิลิตร นำ NaOH 80 กรัม เทลงในน้ำกลั่น ค่อยๆเททีละนิดแล้วคนให้ละลาย เมื่อ NaOH ละลายหมดแล้วให้เท KOH 20 กรัม ลงในน้ำกลั่น แล้วคนจนกว่าจะละลายทั้งหมด จากสีขาวขุ่นจนใส

3.7.2.3 ชั่ง Picric ประมาณ 20 กรัม แล้วค่อยๆ เทลงในบีกเกอร์ที่ละลาย NaOH ผสม KOH แล้ว คนจนกว่าจะละลาย

3.7.2.4 เปิด Hot plate แล้วตั้งอุณหภูมิให้อุณหภูมิกรดถึงประมาณ 120°C ใช้เทอร์มิเตอร์คอยวัดอุณหภูมิกรด ในระหว่างที่มีความร้อนเกิดขึ้นหาฟอยล์อะลูมิเนียมมาปิดปากบีกเกอร์ไว้ เพื่อลดการระเหยของน้ำ เพราะกรดมันจะเดือด

3.7.2.5 เมื่อทุกอย่างละลายหมดแล้วกรดจะเป็นสีน้ำตาลเข้มตามภาพที่ 3.32 อุณหภูมิกรดถึงประมาณ 120°C แล้วให้น้ำชิ้นงานจุ่มลงไป พยายามอย่าวางลงไปก้นบีกเกอร์ เนื่องจากมันมีตะกอนของสารที่ละลายไม่หมดอยู่ซึ่งจะทำให้งานสกปรก จุ่มชิ้นงานลงไปประมาณ 120 วินาที จนผิวหน้างานออกเป็นสีตามที่ต้องการ

3.7.2.6 นำชิ้นงานไปล้างน้ำ และแอลกอฮอล์ แล้วเป่าให้แห้ง จากนั้นนำไปตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค



รูปที่ 3.32 สีของกรดก่อนจุ่มชิ้นงาน

3.8 การวิเคราะห์ด้วยเครื่องวิเคราะห์ไมโครโพรบอิเล็กตรอน (Electron Probe

Micro Analysis; EPMA)

3.8.1 เตรียมชิ้นงานที่ได้จากการหล่อแบบขึ้นบันได ความหนา 36 มิลลิเมตรและมีการเติม บิสมัท 0.005% นำไปตัดให้ได้ขนาด 1x1x1 เซนติเมตร

3.8.2 แล้วนำชิ้นงานมาขัดด้วยกระดาษทรายตั้งแต่เบอร์ 100 -1200 จากนั้นขัดด้วยผ้า สักหลาดโดยใช้ผงอะลูมินา 0.3 ไมครอน และ 0.05 ไมครอน ตามลำดับ ดังรูปที่ 3.33



รูปที่ 3.33 ชิ้นงานที่ใช้สำหรับวิเคราะห์ด้วยเครื่อง EPMA

3.8.3 นำชิ้นงานที่ขัดเสร็จแล้วไปกัดกรดด้วย 3% Nital จากนั้นเป่าชิ้นงานให้แห้งสนิท เพื่อไม่ให้เกิดสนิมบนผิวชิ้นงาน

3.8.4 นำชิ้นงานที่เตรียมไว้ไปทำการวิเคราะห์ด้วยเครื่องวิเคราะห์ไมโครโพรบอิเล็กตรอน (EPMA) เพื่อสังเกตการกระจายตัวขององค์ประกอบในโครงสร้างจุลภาค เภณท์ที่ใช้ในการทดลอง EPMA แสดงดังตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 พารามิเตอร์สำหรับการทดลอง EPMA

	Parameter
Acceleration volage	15 kV
Beam size	1 mm
Current	7.5 nA
Measuring time	10 msec
Step size	0.4 mm
Total area size	410d x 307 mm