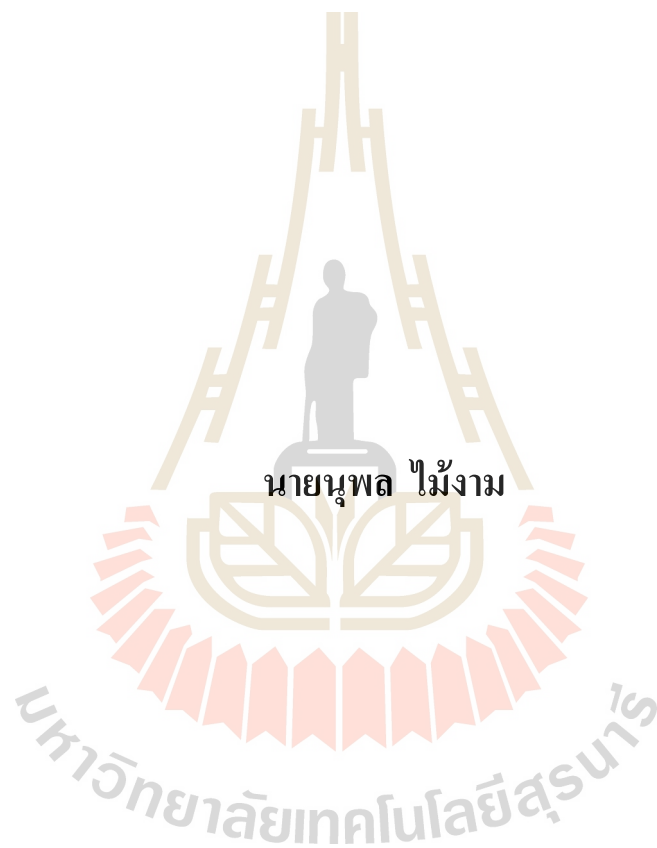


อิทธิพลของตัวแปรการหล่อต่อการเสีรูปร่างแกรไฟต์ที่ผิว
ของเหล็กหล่อแกรไฟต์กลม



นายอนุพล ไม้งาม

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมวัสดุ
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2562

**INFLUENCE OF CASTING PARAMETERS ON THE
GRAPHITE DEGRADATION IN CASTING
SKIN OF SPHEROIDAL GRAPHITE IRON**



Nupol Mai-Ngam

**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the
Degree of Master of Engineering in Materials Engineering**

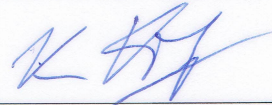
Suranaree University of Technology

Academic Year 2019

อิทธิพลของตัวแปรการหล่อต่อการเสียรูปร่างแกรไฟต์ที่ผิว
ของเหล็กหล่อแกรไฟต์กลม

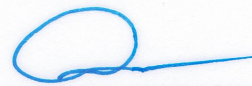
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



(ผศ. ดร.อุษณีย์ กิตกัาธร)

ประธานกรรมการ



(ผศ. ดร.สารัมภ์ บุญมี)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)



(รศ. ดร.สุดสาคร อินธิเดช)

กรรมการ



(รศ. ดร.พรวสา วงศ์ปัญญา)

กรรมการ



(อ. ดร.ปัญญา บัวชมบุรา)

กรรมการ



(รศ. ดร.พรศิริ จงกล)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์



(รศ. ร.อ. ดร.กนต์ธร ชำนิประศาสน์)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการ

และพัฒนาความเป็นสากล

นุพล ไม้งาม : อิทธิพลของตัวแปรการหล่อต่อการเสีรูปร่างแกรไฟต์ที่ผิวของเหล็กหล่อ
แกรไฟต์กลม (INFLUENCE OF CASTING PARAMETERS ON THE GRAPHITE
DEGRADATION IN THE CASTING SKIN OF SPHEROIDAL CAST IRON)

อาจารย์ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สารัมภ์ บุญมี, 77 หน้า.

งานวิจัยนี้ได้ศึกษากระบวนการเกิดการเสีรูปร่างของแกรไฟต์ที่บริเวณผิวของเหล็กหล่อ
หล่อแกรไฟต์กลม ซึ่งแบ่งการศึกษาออกเป็น 3 ส่วนหลัก ส่วนแรกศึกษาอิทธิพลของตัวแปรของ
กระบวนการหล่อโลหะได้แก่ อัตราการเย็นตัว ประเภทของวัสดุทำแบบหล่อ และปริมาณ
แมกนีเซียมเหลือค้าง ส่วนที่สองศึกษาอิทธิพลของสารเคลือบแบบหล่อและไส้แบบ และส่วน
สุดท้ายคือการพัฒนาเหล็กหล่อแกรไฟต์ด้วยวิธีการเติมเฟอร์โรซิลเฟอร์ พบว่าความหนาของชั้น
การเสีรูปร่างของแกรไฟต์เพิ่มขึ้นเมื่อความหนาของชิ้นงานเพิ่มขึ้น เนื่องจากชิ้นงานที่มีความหนา
จะทำให้มีช่วงเวลาในการแข็งตัวของน้ำเหล็กนานและมีเวลาในการทำปฏิกิริยาออกซิเดชันของ
แมกนีเซียมนานขึ้น ชั้นความหนาของการเสีรูปร่างของแกรไฟต์จึงแปรผกผันกับปริมาณ
แมกนีเซียมเหลือค้างและค่าเฉลี่ยของชั้นความหนาของการเสีรูปร่างของแกรไฟต์ในแบบหล่อ
ทรายเรซินมากกว่าในแบบหล่อทรายขึ้นทุกกรณี ในส่วนของอิทธิพลของสารเคลือบแบบ พบว่า
สารเคลือบแบบที่มีความสามารถในการนำความร้อนสูงจะทำให้หน้าโลหะบริเวณแบบหล่อที่เคลือบ
สารนั้นแข็งตัวเร็วขึ้นซึ่งช่วยลดการเกิดชั้นความหนาของการเสีรูปร่างของแกรไฟต์ โดยเฉพาะ
สารเซอร์คอนเบส และสำหรับส่วนของการพัฒนาเหล็กหล่อแกรไฟต์ พบว่าวิธีการเติมเฟอร์โร
ซิลเฟอร์สามารถเป็นไปได้ที่จะทำให้เกิดเหล็กหล่อแกรไฟต์คู่ โดยชั้นความหนาของการเสีรูปร่าง
ของแกรไฟต์เพิ่มขึ้นตามปริมาณเฟอร์โรซิลเฟอร์และมีค่าสูงสุดที่ 1,116.54 ไมโครเมตรที่ปริมาณ
เฟอร์โรซิลเฟอร์ร้อยละ 3.5

สาขาวิชา วิศวกรรมโลหการ
ปีการศึกษา 2562

ลายมือชื่อนักศึกษา นุพล ไม้งาม
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา

NUPOL MAI-NGAM : INFLUENCE OF CASTING PARAMETERS ON
THE GRAPHITE DEGRADATION IN CASTING SKIN OF SPHEROIDAL
GRAPHITE IRON. THESIS ADVISOR : ASST. PROF. SARUM
BOONMEE, PhD., 77 PP.

GRAPHITE DEGRADATION/CASTING SKIN/CAST IRON.

In present study, the occurrence of the casting skin in the spheroidal graphite iron was explored. The experimental work was divided into 3 parts. The first part was the effect of cooling rates, type of molding materials and the residual magnesium. The second part was the influence of the mold coating materials on the occurrence of the casting skin. The last part was the development of the Dual Graphite (DG) iron using the sulfurization method. It was found that the casting skin thickness increased with the casting section thickness. This was because of the longer solidification time allowed more time for the magnesium oxidation. The casting skin thickness was suppressed by higher residual magnesium. The average skin thickness produced by resin molds were higher than the green sand molds in all conditions. The mold coatings with higher thermal conductivity demonstrated the thicker casting skin especially zircon-based coating. In addition, this research demonstrate that the development of the DG iron using the sulfurization method was possible. The greater sulfur content in the molding materials promoted the occurrence of the graphite degradation layer. An empirical equation was proposed for the DG iron making process. The largest skin thickness of 1,116.54 microns was observed at 3.5 %FeS.

School of Metallurgical Engineering

Academic Year 2019

Student's Signature Nupol Maingam

Advisor's Signature Sarum

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดีอันเนื่องมาจากได้รับความร่วมมือจากบุคคลหลายส่วนด้วยกัน ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณบุคคลต่าง ๆ เหล่านี้ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษา แนะนำ และช่วยเหลือข้าพเจ้าในระหว่างการดำเนินงานวิจัยนี้

ขอขอบคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สารัมภ์ บุญมี อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ให้โอกาสทางศึกษา ให้คำแนะนำ ในการดำเนินงานวิจัยนี้ อีกทั้งยังช่วยแก้ปัญหาและให้กำลังใจแก่ผู้วิจัยมาโดยตลอด รวมถึงช่วยตรวจทาน และแก้ไขวิทยานิพนธ์เล่มนี้จนกระทั่งงานวิจัยเสร็จสมบูรณ์

ขอขอบคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อุษณีย์ กิตติคำธร รองศาสตราจารย์ ดร.พรวิสา วงศ์ปัญญา อาจารย์ ดร.ปัญญา บัวสมบุรา อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมโลหการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่คอยให้คำปรึกษาในด้านวิชาการ และให้กำลังใจมาโดยตลอด

ขอขอบคุณ คุณวิชาญ วิรัชสุนทร คุณวิเชษฐ์ เพ็ญแดง คุณกฤษดา ศรีรักษ์ คุณสุนิศา ชื่นเกษม คุณสังเวียน เข้มเกษม เจ้าหน้าที่ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ผู้ให้คำแนะนำในการใช้เครื่องมือ และอำนวยความสะดวกในการดำเนินการวิจัยเป็นอย่างดี

ขอขอบคุณ บริษัทเหล็กประเสริฐเทรดดิ้งจำกัด บริษัท ไลน์-แปซิฟิคคอปเปอร์เรชั่นจำกัด บริษัท พี.ซี.เอส.แมชชีนกรุ๊ปโฮลดิ้งจำกัด(มหาชน) บริษัท แอลมีอินเตอร์เนชั่นแนล (ประเทศไทย) จำกัด บริษัท สปีดทีดีโมลด์ จำกัด ที่สนับสนุนวัสดุดิบในงานวิจัย

ขอขอบคุณสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ที่สนับสนุนทุนในการทำงานวิจัย

และสุดท้าย คุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ผู้วิจัยขอมอบให้กับบิดามารดา ซึ่งเป็นที่รักและเคารพยิ่ง ตลอดจนจรรยาอาจารย์ที่เคารพทุกท่าน ที่เป็นกำลังใจที่ดีในการทำวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้ให้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี

นุพล ไม้งาม

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

| | | |
|-------|---|----|
| 2.3.2 | ผลของโครงสร้างผิวงานหล่อต่อความสามารถในการต้านทาน ความล้า..... | 12 |
| 2.4 | กลไกการเกิดการเสีรูปร่างของแกรไฟต์ | 14 |
| 2.5 | ตัวแปรที่มีผลต่อการเกิดการเสีรูปร่างของแกรไฟต์ | 15 |
| 2.5.1 | อุณหภูมิเท..... | 15 |
| 2.5.2 | อัตราส่วนระหว่างแมกนีเซียมและซิลเฟอร์ | 16 |
| 2.5.3 | ความหนาของชั้นงาน | 16 |
| 2.5.4 | วัสดุแบบหล่อ | 17 |
| 2.5.5 | สารเคลือบแบบ..... | 20 |
| 3 | วิธีการดำเนินงานวิจัย | 22 |
| 3.1 | บทนำ..... | 22 |
| 3.2 | เครื่องมือ อุปกรณ์ และวัสดุที่ใช้ในการทดลอง..... | 24 |
| 3.3 | การออกแบบและเตรียมชิ้นงานก่อนการทดลอง..... | 25 |
| 3.4 | การหล่อชิ้นงาน ทดสอบสมบัติเชิงกล และการตรวจสอบโครงสร้าง จุลภาค | 33 |
| 3.4.1 | การหล่อชิ้นงาน..... | 33 |
| 3.4.2 | การทดสอบทางกล..... | 34 |
| 3.4.3 | การตรวจสอบ โครงสร้างจุลภาค | 34 |
| 4 | ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง | 39 |
| 4.1 | บทนำ..... | 39 |
| 4.2 | อิทธิพลของตัวแปรของกระบวนการหล่อโลหะต่อโครงสร้างจุลภาคที่ ผิวงานหล่อ | 40 |
| 4.2.1 | อิทธิพลของความหนาของชิ้นงานต่อการเสีรูปร่างของแกรไฟต์ บริเวณผิวงานหล่อ | 40 |
| 4.2.2 | อิทธิพลของแมกนีเซียมคงเหลือต่อการเสีรูปร่างของแกรไฟต์ บริเวณผิวงานหล่อ | 42 |

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

| | | |
|-------|---|----|
| 4.3 | อิทธิพลสารเคลือบแบบและอัตราการเย็นตัวต่อการเสีรูปร่างของ แกรไฟต์..... | 48 |
| 4.3.1 | ผลของสารเคลือบแบบต่อการเกิดการเสีรูปร่างของแกรไฟต์..... | 48 |
| 4.3.2 | ผลของอัตราการเย็นตัวต่อการเกิดการเสีรูปร่างของแกรไฟต์..... | 54 |
| 4.3.3 | ผลของปริมาณเฟอร์โรซิลเฟอร์ไนไซด์แบบต่อการเกิดการเสี รูปร่างของแกรไฟต์..... | 58 |
| 5 | สรุปผลและข้อเสนอแนะ..... | 68 |
| 5.1 | สรุปผล..... | 68 |
| 5.2 | ข้อเสนอแนะ..... | 70 |
| | รายการอ้างอิง..... | 71 |
| | ภาคผนวก..... | 73 |
| | ภาคผนวก ก การหาค่าคาร์บอนสมมูล (Carbon Equivalent, CE)..... | 74 |
| | ภาคผนวก ข บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่..... | 75 |
| | ประวัติผู้เขียน..... | 77 |

สารบัญตาราง

| ตารางที่ | หน้า |
|----------|---|
| 2.1 | เปรียบเทียบสมบัติเชิงกลของ เหล็กหล่อเทา เหล็กหล่อแกรไฟต์ตัวหนอน เหล็กหล่อเหนียวที่มีโครงสร้างเนื้อพื้นเป็นเฟิร์ลไลต์8 |
| 2.2 | พลังงานอิสระของกิบส์ในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของแมกนีเซียมที่อุณหภูมิ 1,600 °K15 |
| 2.3 | วัสดุแบบหล่อชนิดต่าง ๆ ที่ใช้ในการทดลอง19 |
| 2.4 | ค่าความหนาของโครงสร้างผิวที่เสีรูปร่างของแกรไฟต์20 |
| 3.1 | ส่วนผสมทางเคมีที่ใช้ในการศึกษา22 |
| 3.2 | เงื่อนไขการทดลองของประสิทธิภาพของสารเคลือบใส่แบบ29 |
| 4.1 | ส่วนประกอบทางเคมีของเหล็กในชุดการทดลองที่ 139 |
| 4.2 | ส่วนประกอบทางเคมีของเหล็กในชุดการทดลองที่ 240 |
| 4.3 | ส่วนประกอบทางเคมีของเหล็กในชุดการทดลองที่ 340 |
| 4.4 | ความหนาของชั้นการเสีรูปร่างของแกรไฟต์ในแต่ละความหนาของชิ้นงาน41 |
| 4.5 | ความหนาของชั้นการเสีรูปร่างของแกรไฟต์63 |
| 4.6 | ค่าความกลมที่วัดได้ในชิ้นงานที่มีปริมาณเฟอร์โรซิลเฟอร์ในใส่แบบแตกต่างกัน66 |

สารบัญรูป

| รูปที่ | หน้า |
|--------|--|
| 1.1 | โครงสร้างจุลภาคของเหล็กหล่อเกรไฟต์ตัวหนอนที่บริเวณผิวงานหล่อเกิดการ เสียดสีรูปร่างของเกรไฟต์ 2 |
| 2.1 | โครงสร้างจุลภาคของเหล็กหล่อเทา 6 |
| 2.2 | ชิ้นส่วนที่ผลิตจากเหล็กหล่อเทา 6 |
| 2.3 | โครงสร้างจุลภาคของเหล็กหล่อเกรไฟต์ตัวหนอน 7 |
| 2.4 | ชิ้นส่วนเครื่องยนต์ที่ผลิตจากเหล็กหล่อเกรไฟต์ตัวหนอน 7 |
| 2.5 | โครงสร้างจุลภาคของเหล็กหล่อเหนียว 8 |
| 2.6 | ชิ้นส่วนเครื่องยนต์ที่ผลิตจากเหล็กหล่อเหนียว 8 |
| 2.7 | โครงสร้างจุลภาคของเหล็กหล่อเทา เหล็กหล่อเกรไฟต์ตัวหนอนและเหล็ก หล่อเหนียว 9 |
| 2.8 | ภาพถ่าย SEM ของเหล็กหล่อเทา เหล็กหล่อเกรไฟต์ตัวหนอนและเหล็ก หล่อเหนียว 10 |
| 2.9 | ความต้านทานแรงดึงของชิ้นงานตัวอย่างที่ผ่านกระบวนการยิงทราย ชัดผิว และ กลึงผิว 11 |
| 2.10 | ความต้านทานแรงหลังจากชิ้นเกรไฟต์ประเภท D ที่ถูกกลึงออก 11 |
| 2.11 | ปริมาณเกรไฟต์ประเภท D ตามระยะจากผิวชิ้นงานไปยังกลางชิ้นงาน 12 |
| 2.12 | ความสามารถในการต้านทานความความล้าระหว่างชิ้นงานที่ผ่านการกลึงผิวกับ ชิ้นงานสภาพหล่อ 13 |
| 2.13 | ความสามารถในการต้านทานความความล้าระหว่างชิ้นงานที่ผ่านการ กลึงผิว กับชิ้นงานสภาพหล่อของชิ้นงานขนาด 4 และ 6 มิลลิเมตร 13 |
| 2.14 | S-N curves ของชิ้นงานหล่อ (AC) ชิ้นงานที่ผ่านการกลึงผิว (M) ชิ้นงาน หล่อที่ผ่านการยิงทราย (AC-SB) และชิ้นงานที่ผ่านการกลึงผิวแล้วนำไปยิง ทราย (M-SB) สำหรับเหล็กหล่อเกรไฟต์ตัวหนอนที่มีค่าความกลม 15% 14 |
| 2.15 | อิทธิพลของอัตราส่วน Mg(add)/S(in) ต่อการฟอร์มตัวของเหล็กหล่อเกรไฟต์ ตัวหนอนที่ระดับของซัลเฟอร์เริ่มต้นที่ต่างกัน 16 |
| 2.16 | ค่าความหนาของชิ้นงานต่อชั้นของการเกิดชั้นการเสียดสีรูปร่างของเกรไฟต์ 17 |

สารบัญรูป (ต่อ)

| รูปที่ | หน้า |
|--|------|
| 2.17 ค่าความกลมของแกรไฟต์ที่เมื่อขึ้นงานความหนาสูงขึ้น | 17 |
| 2.18 อิทธิพลของวัสดุแบบหล่อต่อโครงสร้างผิวงานหล่อ | 19 |
| 2.19 อิทธิพลของสารเคลือบใส่แบบแต่ละชนิดต่อความหนาของชั้นโครงสร้างการ เสีรูปร่างของแกรไฟต์ | 21 |
| 3.1 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย | 23 |
| 3.2 การออกแบบชิ้นงานแบบหล่อทรายสามมิติด้วยโปรแกรม Solidworks | 25 |
| 3.3 การยึดแบบหล่อใส่แบบ AM ด้วยแคลมป์จับชิ้นงานรูปตัว C | 27 |
| 3.4 ใส่แบบโซเดียมซิลิเกตแบบผสมผงเฟอร์โรซิลเฟอร์ 5%wt. ขนาด 1.5 นิ้ว | 28 |
| 3.5 ใส่แบบโซเดียมซิลิเกต ขนาด 0.5 1.0 1.5 และ 2.0 นิ้ว | 28 |
| 3.6 ใส่แบบ AM ขนาด 0.5 1.0 1.5 และ 2.0 นิ้ว | 29 |
| 3.7 ใส่แบบโซเดียมซิลิเกตแบบผสมผงเฟอร์โรซิลเฟอร์ขนาด 1.5 นิ้ว หลังเคลือบ ใส่แบบ | 29 |
| 3.8 ใส่แบบ AM ขนาด 1.5 นิ้ว หลังเคลือบใส่แบบ | 30 |
| 3.9 กระสวนแบบขนาดใส่แบบเท่ากัน และแบบขนาดใส่แบบไม่เท่ากัน | 31 |
| 3.10 การวางใส่แบบลงในแบบหล่อทราย | 31 |
| 3.11 แบบของชิ้นงานที่จะหล่อทดสอบ | 32 |
| 3.12 แบบจำลอง 3 มิติของชิ้นงานหลังหล่อทดสอบ | 32 |
| 3.13 ขนาดชิ้นงานทดสอบแรงดึง ตามมาตรฐาน ASTM A356 | 34 |
| 3.14 การขึ้นเรือนแบบเย็นชิ้นงานที่ตัดแล้ว | 35 |
| 3.15 ตัวอย่างวิธีการหาค่าความหนาของชั้นการเสีรูปร่างของแกรไฟต์ | 36 |
| 3.16 ตัวอย่างวิธีการหาค่าความคดโค้ง | 37 |
| 3.17 การวิเคราะห์ความกลมของแกรไฟต์ | 38 |
| 3.18 การประมวลผลปริมาณความความกลมของแกรไฟต์แต่ละช่วง | 38 |
| 4.1 ชั้นความหนาของแกรไฟต์ที่ความหนา 7 และ 28 มิลลิเมตร ที่ 0.025%Mg ใน แบบหล่อเรซิน | 41 |
| 4.2 ชั้นความหนาของแกรไฟต์ที่ความหนา 7 และ 28 มิลลิเมตร ที่ 0.025%Mg ใน แบบหล่อทราย | 42 |

สารบัญรูป (ต่อ)

| รูปที่ | หน้า |
|---|------|
| 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของชิ้นงานและชั้นการเสีรูปของแกรไฟต์..... | 42 |
| 4.4 ปริมาณแมกนีเซียม 0.010% ที่ความหนา ที่ 28 มิลลิเมตร ในแบบหล่อทรายเรซิน | 43 |
| 4.5 ปริมาณแมกนีเซียม 0.015% ที่ความหนา ที่ 28 มิลลิเมตรในแบบหล่อทรายเรซิน | 43 |
| 4.6 ปริมาณแมกนีเซียม 0.020% ที่ความหนา ที่ 28 มิลลิเมตร ในแบบหล่อทรายเรซิน | 44 |
| 4.7 ปริมาณแมกนีเซียม 0.025% ที่ความหนา ที่ 28 มิลลิเมตร ในแบบหล่อทรายเรซิน | 44 |
| 4.8 ปริมาณแมกนีเซียม 0.030% ที่ความหนา ที่ 28 มิลลิเมตรในแบบหล่อทรายเรซิน | 44 |
| 4.9 ปริมาณแมกนีเซียม 0.010% ที่ความหนา ที่ 28 มิลลิเมตรในแบบหล่อทรายขึ้น..... | 45 |
| 4.10 ปริมาณแมกนีเซียม 0.015% ที่ความหนา ที่ 28 มิลลิเมตร ในแบบหล่อทรายขึ้น..... | 45 |
| 4.11 ปริมาณแมกนีเซียม 0.020% ที่ความหนา ที่ 28 มิลลิเมตร ในแบบหล่อทรายขึ้น..... | 46 |
| 4.12 ปริมาณแมกนีเซียม 0.025% ที่ความหนา ที่ 28 มิลลิเมตร ในแบบหล่อทรายขึ้น..... | 46 |
| 4.13 ชั้นความหนาของชั้นการเสีรูปรางของแกรไฟต์ที่ชิ้นงานหนา 7 และ 14 มิลลิเมตร | 47 |
| 4.14 ชั้นความหนาของชั้นการเสีรูปรางของแกรไฟต์ที่ชิ้นงานหนา 21 และ 28 มิลลิเมตร | 47 |
| 4.15 ความต้านทานแรงดึงต่อปริมาณแมกนีเซียม | 48 |
| 4.16 โครงสร้างจุลภาคเหล็กหล่อแกรไฟต์ตัวหนอน ของไส้แบบ โซเดียมซิลิเกต ที่ไม่เคลือบสาร..... | 49 |
| 4.17 โครงสร้างจุลภาคเหล็กหล่อแกรไฟต์ตัวหนอน ของไส้แบบ โซเดียมซิลิเกต ที่เคลือบฟิล โลซิลิเกต | 49 |
| 4.18 โครงสร้างจุลภาคเหล็กหล่อแกรไฟต์ตัวหนอน ของไส้แบบ โซเดียมซิลิเกต ที่เคลือบมัล ไลต์..... | 50 |
| 4.19 โครงสร้างจุลภาคเหล็กหล่อแกรไฟต์ตัวหนอน ของไส้แบบ โซเดียมซิลิเกต ที่เคลือบเซอร์คอนเบส..... | 50 |
| 4.20 โครงสร้างจุลภาคเหล็กหล่อแกรไฟต์ตัวหนอน และ โซเดียมซิลิเกตของ ไส้แบบ AM ที่ไม่เคลือบสาร..... | 51 |
| 4.21 โครงสร้างจุลภาคเหล็กหล่อแกรไฟต์ตัวหนอน และชั้นการเสีรูปรางของ แกรไฟต์ของไส้แบบ AM ที่เคลือบฟิล โลซิลิเกต..... | 52 |

สารบัญญรูป (ต่อ)

| รูปที่ | หน้า |
|--------|---|
| 4.22 | โครงสร้างจุลภาคเหล็กหล่อแกรไฟต์ตัวหนอน และชั้นการเสียรูปร่างของแกรไฟต์ของไส้แบบ AM ที่เคลือบมัลไลต์52 |
| 4.23 | โครงสร้างจุลภาคเหล็กหล่อแกรไฟต์ตัวหนอน และชั้นการเสียรูปร่างของแกรไฟต์ของไส้แบบ AM ที่เคลือบเซอร์คอนเบส53 |
| 4.24 | กราฟเปรียบเทียบความหนาของชั้นการเสียรูปของแกรไฟต์กับสารเคลือบแต่ละชนิด.....53 |
| 4.25 | โครงสร้างจุลภาคเหล็กหล่อแกรไฟต์ตัวหนอนและชั้นการเสียรูปร่างของแกรไฟต์ของไส้แบบโซเดียมซิลิเกตขนาดไส้แบบ 0.5 นิ้ว54 |
| 4.26 | โครงสร้างจุลภาคเหล็กหล่อแกรไฟต์ตัวหนอนและชั้นการเสียรูปร่างของแกรไฟต์ของไส้แบบโซเดียมซิลิเกตขนาดไส้แบบ 2.0 นิ้ว54 |
| 4.27 | กราฟแสดงความหนาของชั้นการเสียรูปร่างของแกรไฟต์กับขนาดไส้แบบต่างกัน55 |
| 4.28 | ลักษณะการแบ่งชิ้นงานเพื่อนำไปคำนวณหาค่าภาระทางความร้อน.....56 |
| 4.29 | กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างภาระทางความร้อนกับไส้แบบที่ขนาดต่างกัน56 |
| 4.30 | โครงสร้างจุลภาคเหล็กหล่อแกรไฟต์ตัวหนอน ของไส้แบบ AM ที่ขนาดไส้แบบ 0.5 นิ้ว57 |
| 4.31 | โครงสร้างจุลภาคเหล็กหล่อแกรไฟต์ตัวหนอน ของไส้แบบ AM ที่ขนาดไส้แบบ 2.0 นิ้ว57 |
| 4.32 | โครงสร้างจุลภาคของเหล็กหล่อเหนียวที่มีไม่มีเฟอร์โรซิลเฟอร์ไนไส้แบบต่อชั้นความหนาของแกรไฟต์แบบแผ่นที่เกิดขึ้น59 |
| 4.33 | โครงสร้างจุลภาคของเหล็กหล่อเหนียวที่มีปริมาณเฟอร์โรซิลเฟอร์ไนไส้แบบ 0.5% โดยน้ำหนักต่อชั้นความหนาของแกรไฟต์แบบแผ่นที่เกิดขึ้น59 |
| 4.34 | โครงสร้างจุลภาคของเหล็กหล่อเหนียวที่มีปริมาณเฟอร์โรซิลเฟอร์ไนไส้แบบ 1.0%โดยน้ำหนักต่อชั้นความหนาของแกรไฟต์แบบแผ่นที่เกิดขึ้น60 |
| 4.35 | โครงสร้างจุลภาคของเหล็กหล่อเหนียวที่มีปริมาณเฟอร์โรซิลเฟอร์ไนไส้แบบ 1.5% โดยน้ำหนักต่อชั้นความหนาของแกรไฟต์แบบแผ่นที่เกิดขึ้น60 |
| 4.36 | โครงสร้างจุลภาคของเหล็กหล่อเหนียวที่มีปริมาณเฟอร์โรซิลเฟอร์ไนไส้แบบ 2.0% โดยน้ำหนักต่อชั้นความหนาของแกรไฟต์แบบแผ่นที่เกิดขึ้น61 |

สารบัญรูป (ต่อ)

| รูปที่ | | หน้า |
|--------|---|------|
| 4.37 | โครงสร้างจุลภาคของเหล็กหล่อเหนียวที่มีปริมาณเฟอร์โรซิลเฟอร์ในไส้แบบ 2.5% โดยน้ำหนักต่อชั้นความหนาของเกรไฟต์แบบแผ่นที่เกิดขึ้น | 61 |
| 4.38 | โครงสร้างจุลภาคของเหล็กหล่อเหนียวที่มีปริมาณเฟอร์โรซิลเฟอร์ในไส้แบบ 3.0% โดยน้ำหนักต่อชั้นความหนาของเกรไฟต์แบบแผ่นที่เกิดขึ้น | 62 |
| 4.39 | โครงสร้างจุลภาคของเหล็กหล่อเหนียวที่มีปริมาณเฟอร์โรซิลเฟอร์ในไส้แบบ 3.5% โดยน้ำหนักต่อชั้นความหนาของเกรไฟต์แบบแผ่นที่เกิดขึ้น | 62 |
| 4.40 | ความหนาของชั้นการเสีรูปร่างของเกรไฟต์กับปริมาณเฟอร์โรซิลเฟอร์ที่ผสมลงในไส้แบบ | 63 |
| 4.41 | ความคดโค้ง..... | 64 |
| 4.42 | ค่าความกลมของเกรไฟต์ที่ระยะต่าง ๆ จากผิวที่สัมผัสกับไส้แบบที่ผสมเฟอร์โรซิลเฟอร์ 3.0%โดยน้ำหนัก | 65 |
| 4.43 | ความสัมพันธ์ระหว่างระยะความลึกจากผิวและความกลมของเกรไฟต์ | 66 |



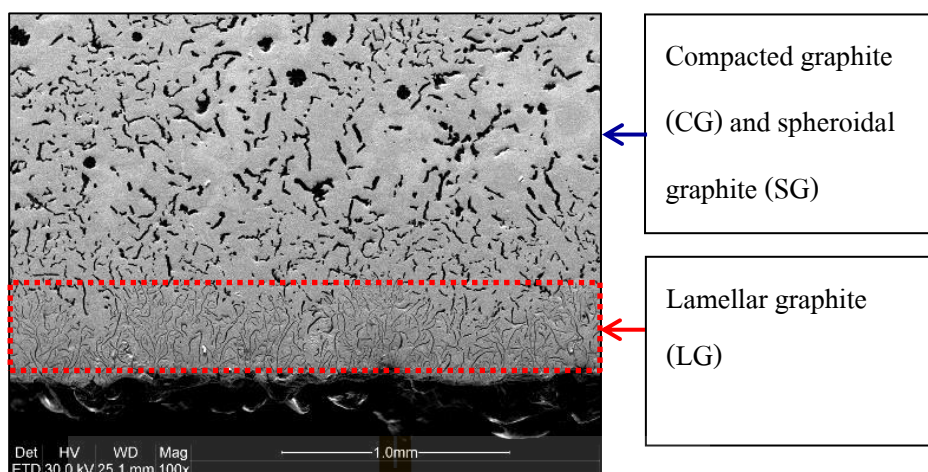
บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

เหล็กหล่อเป็นโลหะที่ถูกนำไปใช้งานอย่างกว้างขวาง เนื่องจากมีต้นทุนต่ำและสามารถผลิตได้ง่าย อีกทั้งมีสมบัติทางกลอยู่ในเกณฑ์ที่ดี เพื่อรองรับความต้องการของผู้บริโภคที่ต้องการสมบัติของเหล็กที่หลากหลายขึ้น จึงมีการพัฒนาเหล็กหล่อหลากหลายเกรด ซึ่งมีสมบัติเชิงกลและสมบัติทางกายภาพที่แตกต่างกันออกไป ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับลักษณะการนำไปใช้งาน เช่น เหล็กหล่อเทา (Gray iron, GI) มีความสามารถในการนำความร้อนและการดูดซับแรงสั่นสะเทือนได้ดี แต่มีความต้านทานแรงดึงต่ำ ในทางตรงกันข้ามเหล็กหล่อเหนียว (Ductile iron, DI) มีความต้านทานแรงดึงสูง แต่ความสามารถในการนำความร้อนและการดูดซับแรงสั่นสะเทือนต่ำ ในขณะที่เหล็กหล่อแกรไฟต์ตัวหนอน (Compacted graphite iron, CGI) มีสมบัติเชิงกลและกายภาพอยู่ในช่วงระหว่างเหล็กหล่อเทาและเหล็กหล่อเหนียว ซึ่งถือเป็นการรวมข้อดีของเหล็กทั้งสองไว้ด้วยกัน

เหล็กหล่อเป็นโลหะที่ถูกใช้มาอย่างยาวนาน ถูกปรับปรุง และพัฒนาจากผู้เชี่ยวชาญทางด้านโลหะวิทยามากมาย แต่พบว่ายังมีอยู่อีกปัญหาที่ยังไม่ได้รับการแก้ไขอย่างสมบูรณ์ คือ โครงสร้างจุลภาคที่ผิวชั้นนอกของเหล็กหล่อเหนียวและเหล็กหล่อแกรไฟต์ตัวหนอน มักจะพบว่าแกรไฟต์มีความกลมต่ำกว่าที่ควร ตามการทดสอบเหล็กหล่อเหนียวตามมาตรฐาน ASTM A536 (Standard specification for ductile iron castings) นั้น ชิ้นงานที่ทดสอบจะถูกกลึงผิว ส่วนที่เป็นโครงสร้างการเลี้ยวรูปร่างของแกรไฟต์จะถูกกลึงออกไปทำให้เมื่อทดสอบสมบัติเชิงกลจะได้ค่าตามเกณฑ์มาตรฐาน แต่ชิ้นงานที่ถูกผลิตในอุตสาหกรรมนั้นส่วนใหญ่จะนำไปใช้งานในสภาพหล่อ (As-cast) ทันที ทำให้อายุการใช้งานของงานหล่อสั้นกว่าที่ออกแบบไว้ ซึ่งปัญหานี้เองจะส่งผลกระทบต่อความผิดพลาดในการออกแบบทางกล ทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีคุณภาพต่ำกว่ามาตรฐานที่กำหนดไว้ ส่งผลต่อให้เกิดของเสียในกระบวนการผลิต หรือปัญหาทางด้านคุณภาพต่าง ๆ ภาพที่ 1.1 แสดงการเปรียบเทียบโครงสร้างจุลภาคที่ผิวและภายในของเหล็กหล่อแกรไฟต์ตัวหนอน จากภาพจะเห็นได้ว่าโครงสร้างจุลภาคที่ผิวนั้นแกรไฟต์มีลักษณะคล้ายแกรไฟต์ type D ของเหล็กหล่อเทา



รูปที่ 1.1 โครงสร้างจุลภาคของเหล็กหล่อแกรไฟต์ตัวหนอนที่บริเวณผิวงานหล่อเกิดการเสีรูปร่างของแกรไฟต์ [6]

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาอิทธิพลของตัวแปรในกระบวนการหล่อเหล็กหล่อแกรไฟต์กลม ได้แก่ ปริมาณแมกนีเซียมเหลือค้าง อัตราการเย็นตัว ต่อการเกิดการเสีรูปร่างของแกรไฟต์

1.2.2 เพื่อศึกษาอิทธิพลของสารเคลือบต่อการเสีรูปร่างของแกรไฟต์ด้วยสารเคลือบไส้แบบ

1.2.3 ศึกษาและนำความรู้เกี่ยวกับการเสีรูปร่างของแกรไฟต์เพื่อนำไปใช้ในการผลิตเหล็กหล่อแกรไฟต์คู่

1.3 สมมติฐานของการวิจัย

1.3.1 ตัวแปรของกระบวนการหล่อโลหะ เช่น วัสดุที่ใช้ในการผลิตแบบหล่อ อัตราการเย็นตัว อัตราส่วนระหว่างแมกนีเซียม (Mg) ต่อซิลเฟอร์ (S) มีผลต่อการเสีรูปร่างของแกรไฟต์

1.3.2 สารเคลือบไส้แบบบางชนิดสามารถป้องกันการเสีรูปร่างของแกรไฟต์ได้

1.3.3 สามารถนำความรู้จากการศึกษาการเสีรูปร่างของแกรไฟต์ไปพัฒนาการผลิตเหล็กหล่อแกรไฟต์คู่ได้

1.4 ขอบเขตการศึกษา

งานวิจัยนี้มีขอบเขตของการศึกษาดังนี้

1.4.1 ศึกษาอิทธิพลของตัวแปรในกระบวนการหล่อโลหะต่อการเสีรูปร่างของแกรไฟต์

1.4.2 ศึกษาอิทธิพลของสารเคลือบไส้แบบต่อการเสีรูปร่างของแกรไฟต์

1.4.3 นำความรู้เกี่ยวกับการเกิดการเสีรูปร่างของแกรไฟต์ไปการผลิตเหล็กหล่อแกรไฟต์คู่

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 สามารถนำไปเป็นข้อมูลในควบคุมตัวแปรต่าง ๆ ในกระบวนการหล่อเหล็กหล่อแกรไฟต์ตัวหนอนและเหล็กหล่อแกรไฟต์กลมเพื่อให้ได้โครงสร้างและสมบัติตามต้องการ

1.5.2 สามารถนำไปเป็นข้อมูลในการพัฒนาและผลิตเหล็กหล่อกราไฟต์คู่ได้



บทที่ 2

ปรีทรรศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 บทนำ

เหล็กหล่อเป็นอีกวัสดุหนึ่งที่ถูกนำมาใช้ในภาคอุตสาหกรรมอย่างแพร่หลาย เนื่องจากมีสมบัติทางวิศวกรรมหลายประการที่จำเป็นต่อการใช้งาน โดยการจำแนกเหล็กหล่อนั้นสามารถจำแนกได้หลายลักษณะเช่น จำแนกตามส่วนผสมทางเคมี โครงสร้างพื้นฐาน หรือรูปร่างของแกรไฟต์ ซึ่งสามารถแบ่งออกได้ เป็นเหล็กหล่อขาว เหล็กหล่อเทา เหล็กหล่อแกรไฟต์ตัวหนอน และเหล็กหล่อเหนียว โดยแต่ละชนิดมีสมบัติที่แตกต่างกันไปตามลักษณะของการใช้งาน

ในเหล็กหล่อแกรไฟต์ตัวหนอนจะพบปัญหาการเกิดชั้นการเสื่อยรูปร่างของแกรไฟต์ (Graphite degradation) ที่บริเวณผิวงานหล่อ ทำให้ได้โครงสร้างจุลภาคคล้ายกับเหล็กหล่อเทา และส่งผลเสียต่อสมบัติทางกลซึ่งไม่เป็นที่พึงประสงค์ของเหล็กหล่อเหนียว เหล็กหล่อที่มีความแข็งแรงสูงคือเหล็กหล่อเหนียว (Ductile iron) เนื่องจากมีรูปร่างของแกรไฟต์เป็นทรงกลม อย่างไรก็ตาม ข้อดีของเหล็กหล่อเหนียว คือมีความสามารถในการนำความร้อนต่ำ ในขณะที่เหล็กหล่อที่มีความสามารถในการนำความร้อนสูงคือเหล็กหล่อเทา (Gray iron) ซึ่งมีรูปร่างของแกรไฟต์เป็นลักษณะแผ่น แต่มีความแข็งแรงต่ำ เนื่องจากวัสดุสำหรับผลิตเป็นเสื้อสูบรถยนต์จะต้องสามารถถ่ายเทความร้อนได้ดีและมีความแข็งแรงอยู่ในเกณฑ์ที่รับได้ จึงทำให้เหล็กหล่อเทาเป็นวัสดุดั้งเดิมสำหรับการผลิตเหล็กหล่อ อย่างไรก็ตาม การพัฒนาการผลิตเหล็กหล่อแกรไฟต์ตัวหนอน ซึ่งมีความแข็งแรงกว่าแต่มีความสามารถในการนำความร้อนใกล้เคียงกับเหล็กหล่อเทา จึงทำให้สามารถนำไปผลิตเป็นเสื้อสูบที่มีประสิทธิภาพสูงขึ้น หรือในอีกแง่หนึ่งก็สามารถผลิตเสื้อสูบที่มีน้ำหนักเบาได้ ซึ่งนำไปสู่ประสิทธิภาพในการประหยัดน้ำมัน (Fuel efficiency) ที่ดีขึ้น จึงมีการวิจัยที่เล็งเห็นถึงสมบัติที่ดีทั้งในเหล็กหล่อเหนียวและเหล็กหล่อเทาและพยายามผลิตเหล็กหล่อที่มีสมบัติที่ดีของทั้งเหล็กหล่อทั้งคู่ผ่านการควบคุมการเกิด ตำแหน่ง รวมไปถึงรูปร่างของแกรไฟต์ทั้งสองประเภทได้ นำไปสู่นวัตกรรมการออกแบบเสื้อสูบก้าวใหม่ที่มิโครงสร้างแบบเหล็กหล่อเทาบริเวณที่ต้องการให้มีการถ่ายเทความร้อนดี และมีโครงสร้างแบบเหล็กหล่อเหนียวบริเวณที่ต้องการให้มีความแข็งแรงสูงโดยเรียกกันว่าเหล็กหล่อแกรไฟต์คู่ ในบทนี้จะกล่าวถึงสมบัติของเหล็กหล่อเทา เหล็กหล่อแกรไฟต์ตัวหนอนเหล็กหล่อเหนียวและการพัฒนาเหล็กหล่อแกรไฟต์คู่ที่เคยมีการพัฒนามาจนถึงปัจจุบัน

2.2 สมบัติทั่วไปของเหล็กหล่อเทา เหล็กหล่อแกรไฟต์ตัวหนอน

และเหล็กหล่อเหนียว

2.2.1 เหล็กหล่อเทา (Gray iron)

เหล็กหล่อเทาเป็นเหล็กหล่อที่มีส่วนผสม และ โครงสร้างใกล้เคียงกับเหล็กคิบ (Pig iron) เหล็กหล่อชนิดนี้เมื่อหักออกเนื้อเหล็กตรงรอยหักจะเห็นเป็นสีเทา ซึ่งเป็นสีของแกรไฟต์ แตกต่างกับเหล็กหล่อสีขาวซึ่งมีเปอร์เซ็นต์คาร์บอนที่ใกล้เคียงกัน คือประมาณ 2.5 – 4% แต่ คาร์บอนในเหล็กหล่อนี้จะเกิดขึ้นเนื่องจากเย็นตัวเป็นไปอย่างช้า ๆ ทำให้คาร์บอนส่วนใหญ่จะ แยกตัวออกมารวมกันในรูปของคาร์บอนบริสุทธิ์เป็นแผ่นหรือเกล็ด (Flakes) ซึ่งเรียกว่าแกรไฟต์ ดังแสดงในรูปที่ 2.1 ซึ่งทำให้เห็นเนื้อเหล็กเป็นสีเทา แต่ก็ยังมีคาร์บอนในเนื้อเหล็กบางส่วนรวมตัว ในลักษณะสารประกอบเรียกว่า ซีเมนไตต์ (Cementite) เหมือนในเหล็กหล่อขาว

สมบัติของเหล็กหล่อเทาที่เด่นชัด คือ ทนต่อแรงอัด ทนต่อแรงสั่นสะเทือน อดซับ เสียงได้ดี มีความแข็งไม่สูงมากนัก จึงทำให้สามารถ กลึง ไส ตัด เจาะ ได้ง่าย มีอุณหภูมิหลอมเหลว ไม่สูง มีความสามารถในการไหลดี ทำให้หล่อชิ้นงานที่มีรูปร่างซับซ้อนได้ง่าย มีอัตราการขยายตัว ต่ำ ทำให้หล่อชิ้นงานได้รูปร่างและขนาดที่แน่นอน ทนต่อการกัดกร่อนได้พอสมควร เนื่องจากมี ฟิล์มคาร์บอนที่บริเวณผิว นอกจากนี้ยังสามารถปรับปรุงสมบัติเชิงกลได้จากการปรับปรุงส่วนผสม และการอบชุบ

การใช้งาน ใช้ผลิตชิ้นส่วนของเครื่องยนต์ เช่น ก้านสูบ เสื้อสูบ เบรก ชิ้นส่วน เครื่องจักรกล เช่น เครื่องม้วน เครื่องบีบอัด และแท่นฐานเครื่องจักรกลต่าง ๆ เช่น ฐานเครื่องกลึง ทำปากกาจับชิ้นงาน เป็นต้น

2.2.2 เหล็กหล่อแกรไฟต์ตัวหนอน (Compacted graphite iron)

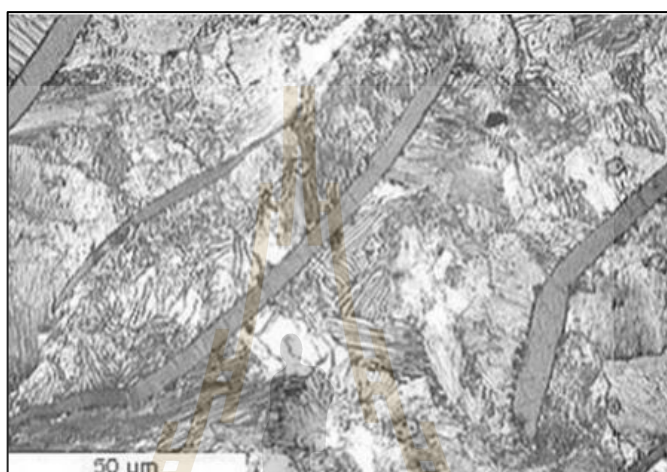
เหล็กหล่อแกรไฟต์ตัวหนอนเป็นเหล็กหล่อที่กระบวนการผลิตจะเหมือนกับการ ผลิตเหล็กหล่อเหนียวต่างกันที่ ปริมาณของแมกนีเซียมซึ่งจะต่ำกว่าการผลิตเหล็กหล่อเหนียว ซึ่งทำ ให้แกรไฟต์ไม่กลม และมีลักษณะคล้ายตัวหนอน ดังแสดงในรูปที่ 2.3

สมบัติของเหล็กหล่อแกรไฟต์ตัวหนอนที่เด่นชัด คือ มีความต้านทานแรงดึงสูง และการหดตัวต่ำ มีสมบัติอยู่ระหว่างเหล็กหล่อเทาและเหล็กหล่อเหนียว คือ มีความต้านทานแรงดึง สูงกว่าเหล็กหล่อเทา แต่ความเหนียวจะต่ำกว่า การใช้งานนิยมใช้ทำชิ้นส่วนรถยนต์เช่น เครื่องยนต์ เฟือง ล้อช่วยแรง เบรก และท่อไอเสีย เป็นต้น

2.2.3 เหล็กหล่อเหนียว (Ductile iron)

เหล็กหล่อเหนียวเป็นเหล็กหล่อที่เติมแมกนีเซียมเข้าไปในระหว่างกระบวนการ ผลิต โดยแมกนีเซียมจะเปลี่ยนรูปทรงของแกรไฟต์จากแผ่นให้เป็นทรงกลม ดังแสดงในรูปที่ 2.5

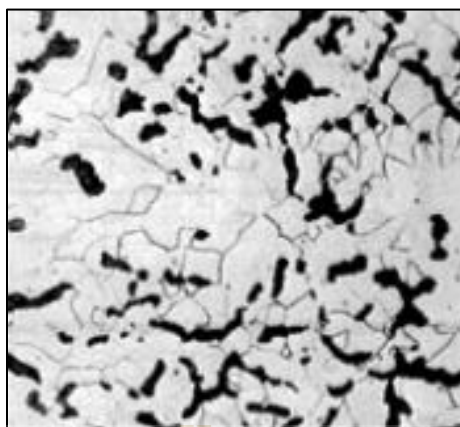
สมบัติของเหล็กหล่อเหนียวเป็นเหล็กหล่อที่รวมเอาข้อดีของเหล็กหล่อเทาและเหล็กกล้าเข้าไว้ด้วยกัน คือ มีความแข็งแรงค่อนข้างสูง สามารถรับแรงกระแทกได้ดี มีจุดหลอมตัวไม่สูง มีความสามารถในการไหลดี มีอัตราการขยายตัวต่ำ และต้นทุนการผลิตต่ำกว่าเหล็กกล้า นิยมใช้ทำชิ้นส่วนรถยนต์แทนชิ้นส่วนที่ผลิตมาจากเหล็กกล้าเช่น เพลาลูกเบี้ยว เพลาข้อเหวี่ยง เพลาต่าง ๆ ของเครื่องจักร เป็นต้น



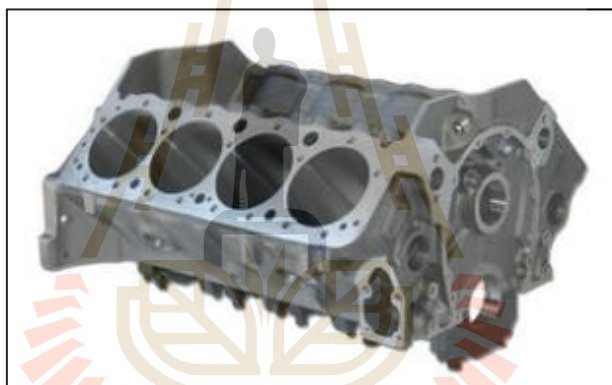
รูปที่ 2.1 แสดง โครงสร้างจุลภาคของเหล็กหล่อเทา (ที่มา: www.metals-china.com, 2016)



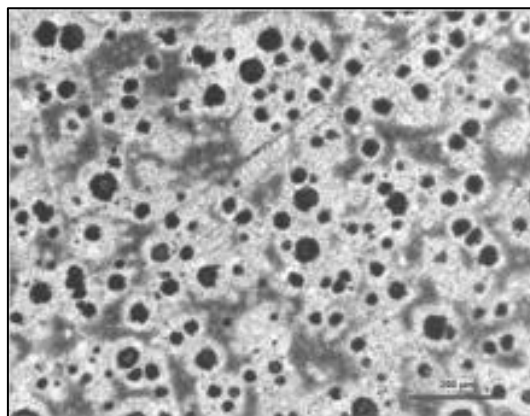
รูปที่ 2.2 ชิ้นส่วนที่ผลิตจากเหล็กหล่อเทา (ที่มา: www.competitiveproduction.com, 2016)



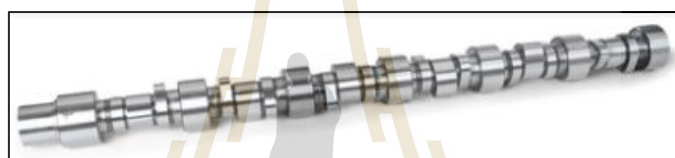
รูปที่ 2.3 โครงสร้างจุลภาคของเหล็กหล่อเกรไฟต์ตัวหนอน (ที่มา: www.metals-china.com, 2016)



รูปที่ 2.4 ชิ้นส่วนที่ผลิตจากเหล็กหล่อเกรไฟต์ตัวหนอน (ที่มา: www.competitiveproduction.com, 2016)



รูปที่ 2.5 โครงสร้างจุลภาคของเหล็กหล่อเหนียว (ที่มา: www.metals-china.com, 2016)



รูปที่ 2.6 ชิ้นส่วนเครื่องยนต์ที่ผลิตจากเหล็กหล่อเหนียว (ที่มา: www.vmeengineparts.com, 2015)

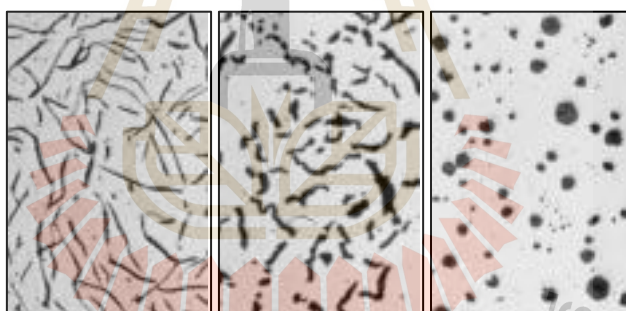
2.2.4 เปรียบเทียบสมบัติเชิงกลของเหล็กหล่อเทา แกรไฟต์ตัวหนอน และเหล็กหล่อเหนียว

ตารางที่ 2.1 เปรียบเทียบสมบัติเชิงกลของ เหล็กหล่อเทา เหล็กหล่อแกรไฟต์ตัวหนอน และเหล็กหล่อเหนียว ที่มีโครงสร้างเนื้อพื้นเป็นเฟอร์ไรต์

| สมบัติเชิงกล | เหล็กหล่อเทา | เหล็กหล่อแกรไฟต์ตัวหนอน | เหล็กหล่อเหนียว |
|------------------------------|--------------|-------------------------|-----------------|
| Tensile strength (MPa) | 250 | 450 | 750 |
| Elastic modulus (GPa) | 105 | 145 | 160 |
| Elongation (%) | 0 | 1.5 | 5 |
| Thermal conductivity (W/m.K) | 48 | 37 | 28 |
| Relative damping capacity | 1 | 0.35 | 0.22 |
| Hardness (BHN 10/3000) | 179–202 | 217–241 | 217–255 |
| R-B fatigue (MPa) | 110 | 200 | 250 |

จากที่ได้กล่าวมาข้างต้น และตารางที่ 2.1 สรุปได้ว่า เหล็กหล่อเทามีความสามารถในการกลึง ไซ ตัด เจาะ ความสามารถในการรับแรงกระแทก และความสามารถในการนำความร้อนดีกว่า เหล็กหล่อเหนียว แต่เหล็กหล่อเหนียวจะให้ความแข็งแรง และความเหนียวที่สูงกว่า

สิ่งที่ทำให้สมบัติเชิงกลของเหล็กหล่อเทา เหล็กหล่อแกรไฟต์ตัวหนอน เหล็กหล่อเหนียวแตกต่างกันนั้นมาจากรูปร่างของแกรไฟต์ ดังแสดงในรูปที่ 2.7 กล่าวคือแกรไฟต์ที่รูปทรงกลมสามารถรับแรงดึงได้ดีกว่า มีความเหนียวที่มากกว่า ส่วนแกรไฟต์ที่เป็นแผ่นสามารถที่จะนำความร้อนได้ดีกว่าและหากสังเกตจากรูปที่ 2.8 ซึ่งถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope) รูปร่างแกรไฟต์ของเหล็กหล่อแกรไฟต์ตัวหนอน จะมีขนาดสั้น หนา มีความโค้งมนบริเวณปลาย และยึดติดกันมากกว่า ทำให้เกิดการยึดติดระหว่างเนื้อพื้นและแกรไฟต์ที่ดีกว่า ทำให้เหล็กหล่อแกรไฟต์ตัวหนอนมีความสามารถในการดูดซับแรงกระแทกได้ดี การนำความร้อนดีเหมือนเหล็กหล่อเทา และมีความแข็งแรงและความเหนียวเหมือนเหล็กหล่อเหนียว ด้วยเหตุผลนี้เองทำให้เหล็กหล่อแกรไฟต์ตัวหนอนเป็นที่ได้รับความนิยมในอุตสาหกรรมมากขึ้น

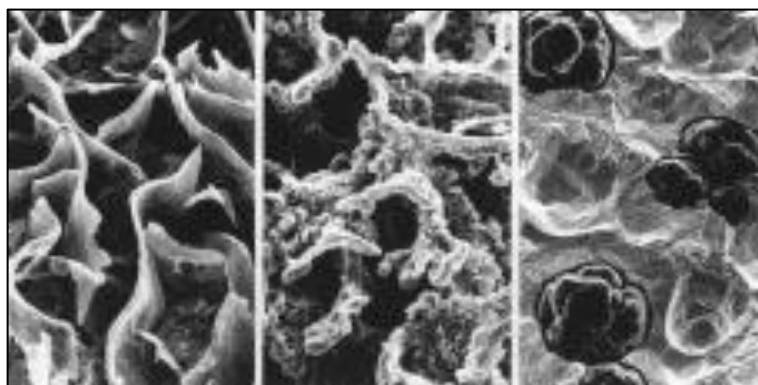


(2.7a)

(2.7b)

(2.7c)

รูปที่ 2.7 โครงสร้างจุลภาคของเหล็กหล่อเทา (2.7a) แกรไฟต์ตัวหนอน (2.7b) และเหล็กหล่อเหนียว (2.7c) (ที่มา: www.metals-china.com, 2016)



รูปที่ 2.8 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของเหล็กหล่อเทา เหล็กหล่อแกรไฟต์ตัวหอนและเหล็กหล่อเหนียว (ที่มา: www.metals-china.com, 2016)

2.3 ผลของโครงสร้างผิวงานหล่อต่อสมบัติเชิงกล

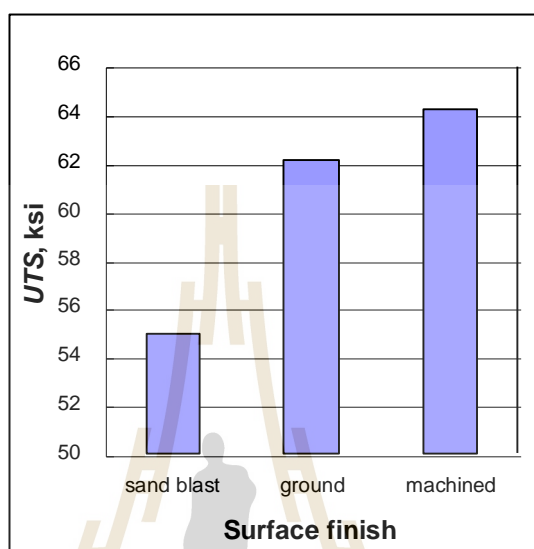
2.3.1 ผลของโครงสร้างผิวงานหล่อต่อความสามารถในการต้านทานแรงดึง

ปี 2002 Goodrich และ Lobenhofer [1] แสดงให้เห็นว่าค่าความแข็งแรง และเปอร์เซ็นต์การยืดตัวของเหล็กหล่อเหนียวลดลง เนื่องจากโครงสร้างที่ผิวงานหล่อของชิ้นงานทดสอบ และยังพบว่าชิ้นงานที่มีขนาดเล็กจะมีผลกระทบมากขึ้น โดยโครงสร้างที่มีรูปร่างของแกรไฟต์ผิดปกตินี้จะอยู่ลึกลงไปจากผิวงานหล่อประมาณ 1.3 มิลลิเมตร

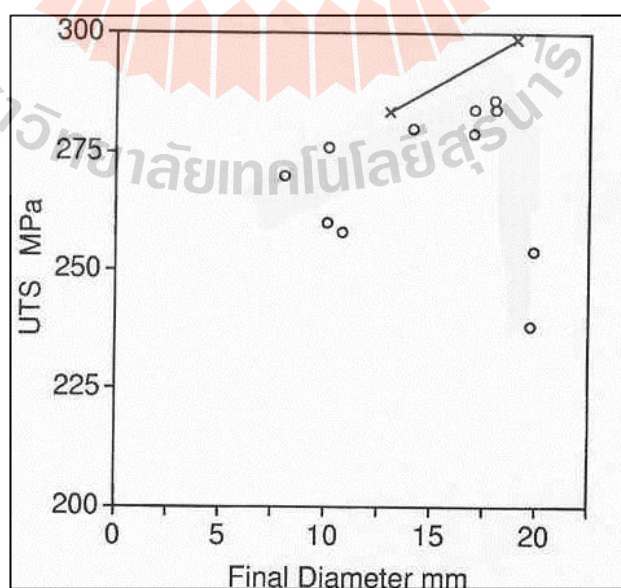
ปี 2003 Dix และคณะ [2] ได้ทดสอบความสามารถต้านทานแรงดึงของชิ้นงานหล่อ ที่ผ่านการเตรียมผิวจาก 3 กระบวนการ คือ ชิ้นงานที่ผ่านการยิงทราย ชิ้นงานที่ผ่านการขัดผิว และชิ้นงานที่ผ่านการกลึง พบว่าชิ้นงานที่ผ่านการขัดผิวความต้านทานแรงดึงเพิ่มขึ้นประมาณ 13% และเพิ่มขึ้นประมาณ 17% เมื่อผ่านการกลึง โดยเปรียบเทียบกับชิ้นงานที่ผ่านการยิงทราย ดังแสดงในภาพที่ 2.9

ปี 2003 Mampaey และคณะ [3] ได้ศึกษาอิทธิพลของผิวชิ้นงานเหล็กหล่อเทา รูปที่ 2.10 แสดงการเปลี่ยนแปลงของความต้านทานแรงดึงของชิ้นงานเหล็กหล่อเทาทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 มิลลิเมตร พบว่าในชิ้นงานสภาพผิวหลังหล่อมีความต้านทานแรงดึงประมาณ 230 – 255 MPa และเมื่อกลึงผิวงานหล่อออกประมาณ 1 มิลลิเมตร พบว่าความต้านทานแรงดึงสูงขึ้นเป็นประมาณ 280 MPa และลดลงเล็กน้อยหลังจากนั้น Mampaey และคณะได้สรุปว่าปรากฏการณ์นี้เกิดจากการกำจัดแกรไฟต์ประเภท D ที่ผิวชิ้นงาน จากรูปที่ 2.11 แสดงปริมาณแกรไฟต์ประเภท D และความต้านทานแรงดึงที่ขึ้นอยู่กับระยะลึกจากผิวงานหล่อ จะเห็นได้ว่า

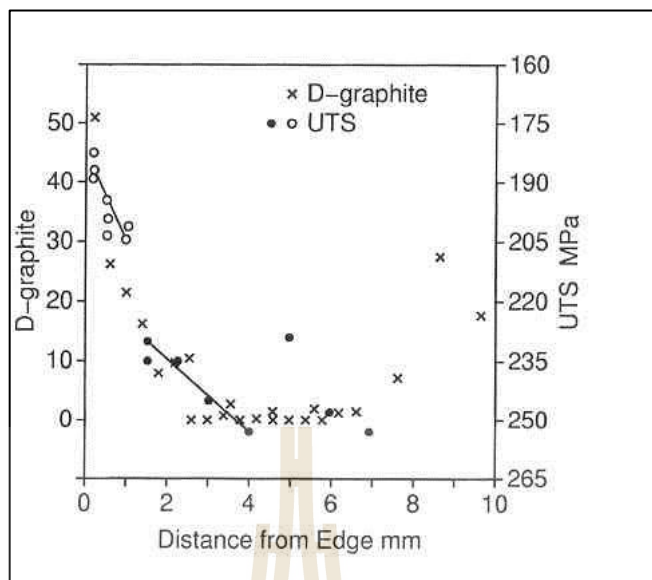
แกรไฟต์ประเภท D มีปริมาณมากที่ผิวชิ้นงานและลดลงอย่างมากที่ระยะลึกจากผิวชิ้นงานประมาณ 2 – 3 มิลลิเมตร ซึ่งสาเหตุที่ทำให้ความต้านทานแรงดึงสูงขึ้นเนื่องจากชั้นแกรไฟต์ประเภท D ถูกกลิ้งออก



รูปที่ 2.9 เปรียบเทียบความต้านทานแรงดึงเมื่อนำชิ้นงานตัวอย่างไปผ่านกระบวนการยิงทรายขัดผิวและกลิ้งผิว [2]



รูปที่ 2.10 ค่าความต้านทานแรงดึงสูงขึ้นเมื่อชั้นแกรไฟต์ประเภท D ถูกกลิ้งออก [3]

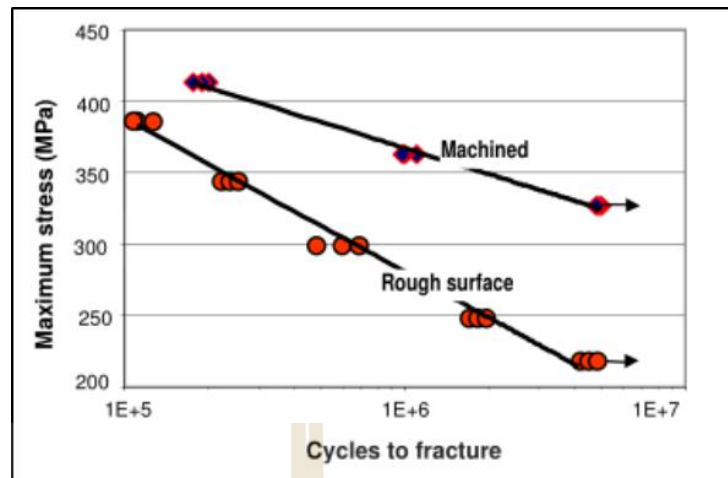


รูปที่ 2.11 ปริมาณแกรไฟต์ type D ลดลง ตามระยะจากผิวชิ้นงาน ไปกลางชิ้นงาน [3]

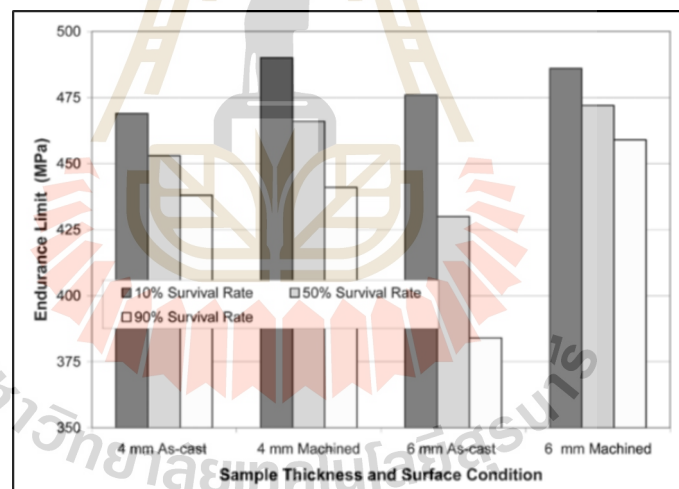
2.3.2 ผลของโครงสร้างผิวงานหล่อต่อความสามารถในการต้านทานความล้า

R. Suaveg [4] ได้ทดสอบชิ้นงานเปรียบเทียบ ให้เห็นอิทธิพลของสภาพผิว ที่มีต่อความสามารถในการต้านทานความล้า จากรูปที่ 2.12 จะเห็นว่าที่ความเค้นสูงสุดในชิ้นงานที่ผ่านการกลึงผิวจะมีความสามารถในการต้านทานความล้าได้มากกว่าชิ้นงานสภาพหลังหล่อที่ไม่ได้กลึงผิว และปี 2008 Labrecque, และคณะ [5] ได้สรุปผลการทดสอบความสามารถในการต้านทานความล้า ของชิ้นงานขนาด 4 และ 6 มิลลิเมตร ชิ้นงานที่ผ่านการกลึงผิวมีความสามารถในการต้านทานความล้าเพิ่มขึ้น 2-19% ดังแสดงในรูปที่ 2.13

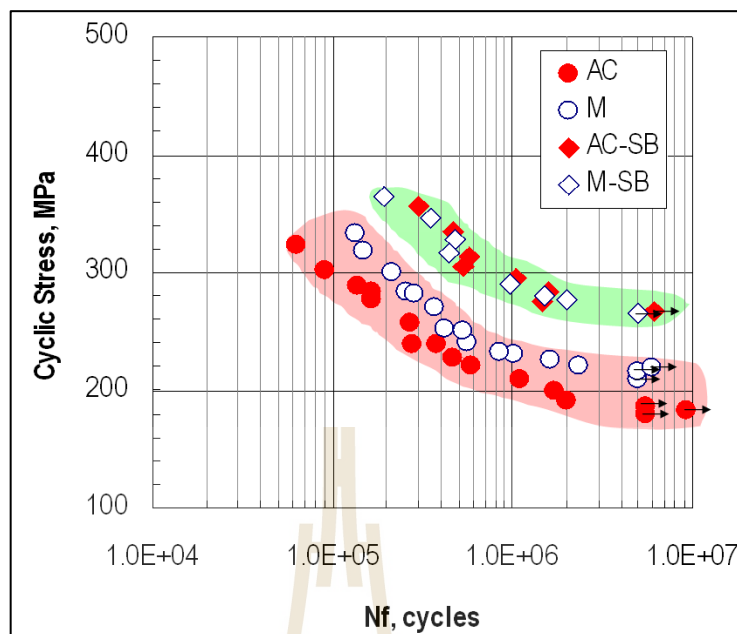
จากนั้นปี 2013 Boonmee และคณะ [6] ได้ทดลองเปรียบเทียบความสามารถในการต้านทานความล้าชิ้นงานหล่อกับชิ้นงานที่ผ่านการกลึงผิวพบว่าชิ้นงานที่ผ่านการกลึงผิวมีความสามารถในการต้านทานความล้าเพิ่มขึ้น 43.5% และเปรียบเทียบความสามารถในการต้านทานความล้าชิ้นงานหล่อแล้วนำไปยิงทราย (Shot blasting) กับชิ้นงานที่ผ่านการกลึงผิวแล้วนำไปยิงทรายพบว่า ชิ้นงานที่ผ่านการกลึงผิวแล้วนำไปยิงทรายมีความสามารถในการต้านทานความล้าเพิ่มขึ้น 21.4% เนื่องจากการกลึงผิวและการยิงทรายได้กำจัดผิวงานหล่อที่มีผลกระทบต่อความสามารถในการต้านทานความล้าออกไปดังแสดงในรูป 2.14



รูปที่ 2.12 เปรียบเทียบความสามารถในการต้านทานความเค้นระหว่างชิ้นงานที่ผ่านการกลึงผิวกับชิ้นงานสภาพหล่อ [4]



รูปที่ 2.13 เปรียบเทียบความสามารถในการต้านทานความเค้นระหว่างชิ้นงานที่ผ่านการกลึงผิวกับชิ้นงานสภาพหล่อของชิ้นงานขนาด 4 และ 6 มิลลิเมตร [5]



รูปที่ 2.14 S-N curves ของชิ้นงานหลังหล่อ (AC) ชิ้นงานที่ผ่านการกลึงผิว (M) ชิ้นงานหลังหล่อ ที่ผ่านการยิงทราย (AC-SB) และชิ้นงานที่ผ่านการกลึงผิวแล้วนำไปยิงทราย (M-SB) สำหรับเหล็กหล่อเกรดไฟต์ตัวหนอนที่มีค่าความกลม 15% [6]

2.4 กลไกการเกิดการเสียรูปร่างของแกรไฟต์

2.4.1 การสูญเสียแมกนีเซียมที่เกิดจากการทำปฏิกิริยากับออกซิเจน (Mg depletion due to oxidation)

Boonmee และ Stefanescu [6] กล่าวถึงการเกิดการเสียรูปร่างของแกรไฟต์ ว่าเกิดการสูญเสียแมกนีเซียมในผิวงานหล่อโดยทำปฏิกิริยากับคาร์บอนไดออกไซด์ น้ำ และออกซิเจนที่อยู่ในแบบหล่อ โดยอธิบายได้ดังสมการต่อไปนี้



เมื่อพิจารณาจากพลังงานอิสระของกิบส์ (Gibbs free energies) ในการเกิดปฏิกิริยาดังตารางที่ 2.2 จะพบว่า ปฏิกิริยาที่ 2 นั้นมีพลังงานอิสระของกิบส์ต่ำที่สุดทำให้เกิดปฏิกิริยาได้มากที่สุด ในทรายที่แห้งและมีความชื้นเล็กน้อย เช่น ทรายแบบที่ทำจากโซเดียมซิลิเกตปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจะเป็นปฏิกิริยาที่ 3

ตารางที่ 2.2 พลังงานอิสระของกิบส์ของการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของ Mg ที่อุณหภูมิ 1,600 °K

[6]

| Reaction | $\Delta G^\circ, \text{kJ/mol}$ |
|---|---------------------------------|
| $Mg + CO_2 \longrightarrow MgO + CO$ | -285.6 |
| $Mg + H_2O \longrightarrow MgO + H_2$ | -794.3 |
| $Mg + \frac{1}{2}O_2 \longrightarrow MgO$ | -554.0 |

ดังนั้นทรายแบบมีความชื้นสูงจะสูญเสียแมกนีเซียมที่ผิวงานหล่อสูงชันความหนาของการเสีรูปร่างของแกรไฟต์ก็จะเพิ่มขึ้น

2.4.2 การสูญเสียแมกนีเซียมที่เกิดจากการทำปฏิกิริยากับซัลเฟอร์ (Mg depletion due to desulfurization)

โดยแมกนีเซียมจะทำปฏิกิริยากับซัลเฟอร์ในแบบหล่อ และซัลเฟอร์ที่เกิดจากการเผาไหม้ของกรดพีทีเอสเอ (P-Toluenesulfonic acid, PTSA) ซึ่งเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในฟูแรนเรซิน (Furan resin) และ ฟีนอลิก โพลียูรีเทน (Phenolic urethane) ทำให้เกิดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์แล้วทำปฏิกิริยากับแมกนีเซียมได้เป็นแมกนีเซียมซัลไฟด์ ส่งผลให้เกิดการสูญเสียแมกนีเซียมที่ผิวงานหล่อ ทำให้เกิดการเสีรูปร่างของแกรไฟต์นอกจากนั้นการใช้ทรายที่ผ่านการหล่อก่อนแล้ว (Furan and phenolic urethane) มาเป็นส่วนผสมในการทำแบบหล่อใหม่ ยังส่งผลให้ชันความหนาของการเสีรูปร่างของแกรไฟต์เพิ่มขึ้นอีกด้วย

2.5 ตัวแปรที่มีผลต่อการเกิดการเสีรูปร่างของแกรไฟต์

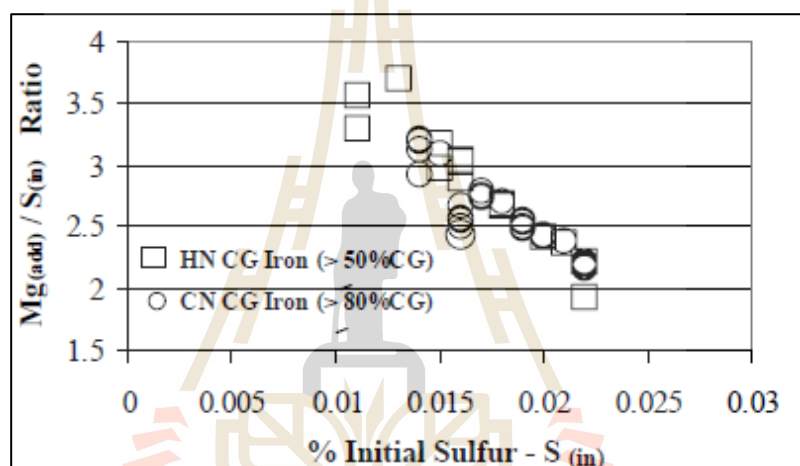
2.5.1 อุณหภูมิ

อุณหภูมิจะส่งผลต่อการสูญเสียแมกนีเซียมโดยตรงเนื่องจากแมกนีเซียมจะกลายเป็นไอที่อุณหภูมิ ประมาณ 1,100 °C ดังนั้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิจะทำให้แมกนีเซียมสูญเสียไปกับการกลายเป็นไอมากขึ้น นอกจากนี้แมกนีเซียมที่จะสูญเสียจากการทำปฏิกิริยาออกซิเดชัน

2.5.2 อัตราส่วนระหว่างแมกนีเซียมและซัลเฟอร์ (Mg/S ratio)

โดยปกติการผลิตเหล็กหล่อแกรไฟต์กลมและแกรไฟต์ตัวหนอนจะทำการกำจัด ซัลเฟอร์ ซึ่งเป็นสาเหตุให้เกิดเหล็กหล่อเทาโดยการเติมแมกนีเซียมเพื่อให้เกิดแมกนีเซียมซัลไฟด์ระหว่างการหล่อเหล็กหล่อแกรไฟต์กลม และเหล็กหล่อแกรไฟต์ตัวหนอน

ในปี 2003 Riposan และคณะ [7] ได้ทำการทดลองหาอัตราส่วนของแมกนีเซียมและซัลเฟอร์พบว่า Mg/S ratio ที่ 2.0-3.2 จะทำให้ได้คุณสมบัติเหล็กหล่อแกรไฟต์ตัวหนอนที่ดีที่สุด หากมากกว่า 3.2 จะส่งผลให้ค่าความกลมของแกรไฟต์สูงขึ้น และปริมาณเหล็กหล่อแกรไฟต์ตัวหนอนจะลดลง ดังแสดงในรูปที่ 2.15

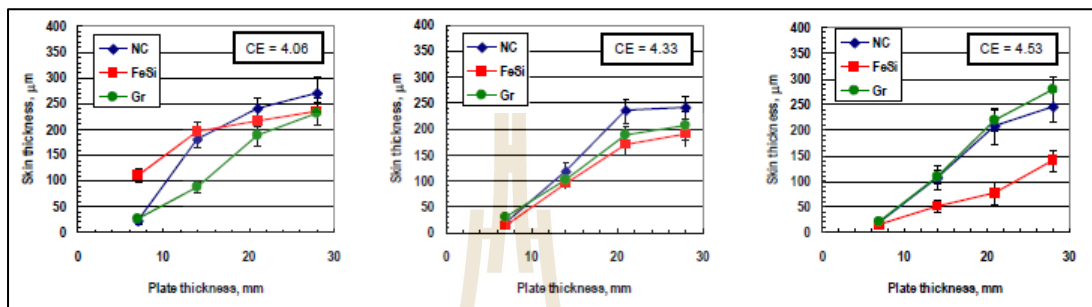


รูปที่ 2.15 อิทธิพลของอัตราส่วน Mg (add) / S(in) ต่อการฟอร์มตัวของเหล็กหล่อแกรไฟต์ตัวหนอนที่ระดับของซัลเฟอร์เริ่มต้นที่ต่างกัน [7]

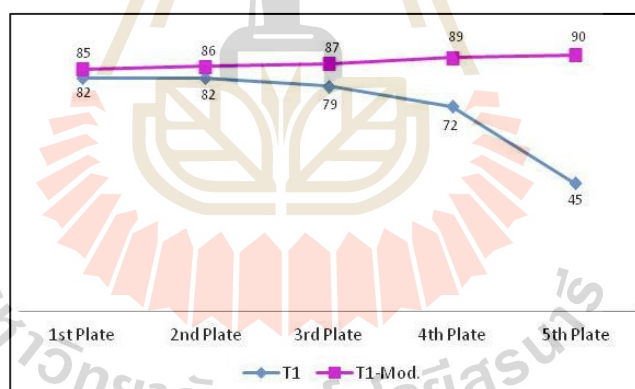
2.5.3 ความหนาของชิ้นงาน

Boonmee และ Stefanescu [8] ได้หล่อชิ้นงานที่มีความหนาต่างการเพื่อให้อธิบายการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของแมกนีเซียมโดยชิ้นงานที่มีความหนาจะมีช่วงเวลาการแข็งตัวที่นานขึ้นมีเวลาให้แมกนีเซียมทำปฏิกิริยากับออกซิเจนนานขึ้น ส่งผลให้ชั้นการเสีรูปร่างของแกรไฟต์เพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 2.16 และปี 2016 Rianti Dewi Sulamet-Ariobono และคณะ [9] ได้ทดลองหล่อชิ้นงานที่มีความหนาต่างกันเพื่อศึกษาผลกระทบของความหนาชิ้นงานต่อการเกิดโครงสร้างผิว ดังแสดงในภาพที่ 2.17 โดย T_1 -Mod จะมีปริมาณแมกนีเซียมมากกว่า T_1 อยู่ 75% พบว่า ชิ้นงาน T_1 -Mod เมื่อความหนาของชิ้นสูงขึ้นความกลมของแกรไฟต์จะสูงขึ้น แต่ชิ้นงาน T_1 ค่าความกลมจะ

ลดต่ำลงเนื่องจากได้รับผลกระทบจากปัญหาการเสีรูปร่างของแกรไฟต์จากการสูญเสีย Mg โดย
 ชั้นงานที่หนาขึ้นจะทำให้ชั้นการเสีรูปร่างของแกรไฟต์หนาขึ้นเนื่องจากอัตราการเย็นตัวที่ช้า
 ทำให้มีเวลาในการทำปฏิกิริยาที่มากขึ้น ส่วน T₁-Mod ไม่เกิดการเสีรูปร่างของแกรไฟต์เนื่องจากมี
 ปริมาณแมกนีเซียมสูงกว่า T₁



รูปที่ 2.16 แสดงค่าความหนาของชั้นงานต่อชั้นของการเกิดการเสีรูปร่างของแกรไฟต์ [8]



ภาพที่ 2.17 แสดงค่าความกลมของแกรไฟต์ที่เมื่อชั้นงานความหนาสูงขึ้น [9]

2.5.4 วัสดุสำหรับทำแบบหล่อ (Molding material)

2.5.4.1 แบบหล่อทรายขึ้น (Green sand mold) การหล่อด้วยแบบหล่อทรายขึ้น

เป็นการหล่อด้วยแบบหล่อทรายที่นิยมนกันมากที่สุดเนื่องจากมีต้นทุนที่ถูกที่สุด ซึ่งส่วนประกอบ
 ของแบบหล่อทรายขึ้นจะประกอบด้วยส่วนต่าง ๆ ดังนี้

- ทรายแก้ว ซึ่งจะมีปริมาณ SiO₂ มากกว่า 90% มีลักษณะสีขาว จุดหลอม
 ตัวประมาณ 1,700 °C แต่หากมีสารเจือปนอาจทำให้อุณหภูมิหลอมตัวต่ำลง

- ตัวประสาน (Binder) ซึ่งจะเป็นดินเหนียว โดยธรรมชาติของดินเหนียวส่วนใหญ่ จะประกอบด้วยไฮดรต ซิลิเกต และอลูมินา โดยมีการแยกออกเป็น 3 กลุ่มคือ ดินเหนียวคาโอลิไนต์ (Kaolinite) หรือไชน่าเคลย์เป็นดินสีขาว มีสมบัติทนความร้อนสูง แต่มีความเหนียวน้อย ดินเหนียวบอลล์เคลย์ แต่จะมีความละเอียดมากกว่าและให้ความเหนียวมากกว่าประเภทแรก ใช้ในการผสมทรายแบบเพื่อเพิ่มคุณสมบัติด้านความแข็งแรงในสภาพแห้ง (Dry strength) ดินเหนียวเบนโทไนต์ (Bentonite clay) เป็นดินเหนียวที่ได้มาจากการสลายตัวของเก้าภูเขาไฟ เป็นดินเหนียวที่ดูดซึมน้ำ และขยายตัว (Swelling) ได้มาก ทำให้มีความเหนียวสูงมาก เหมาะสำหรับผสมปั้นทรายแบบ โดยปกตินิยมใช้เบนโทไนต์มากที่สุด

- สารเติมแต่งมีหลายชนิด ได้แก่ สารที่ให้คาร์บอน เช่นซีโคล กิล โซไนต์ ลิกไนต์ แอสฟัลต์ และสารอื่น ๆ เช่น ซีเรียล แป้ง เซลลูโลส

- น้ำ

แต่ greensand ก็มีข้อจำกัดเช่น หากมีปริมาณน้ำน้อยเกินไปอาจทำให้ผสมไม่ทั่วถึงได้ความแข็งแรงต่ำ แต่ถ้าปริมาณน้ำมากเกินไปอาจทำให้ความแข็งแรงต่ำ และความชื้นในทรายสูงทำให้เกิดไอน้ำมากอาจส่งผลให้เกิดข้อบกพร่องในงานหล่อได้

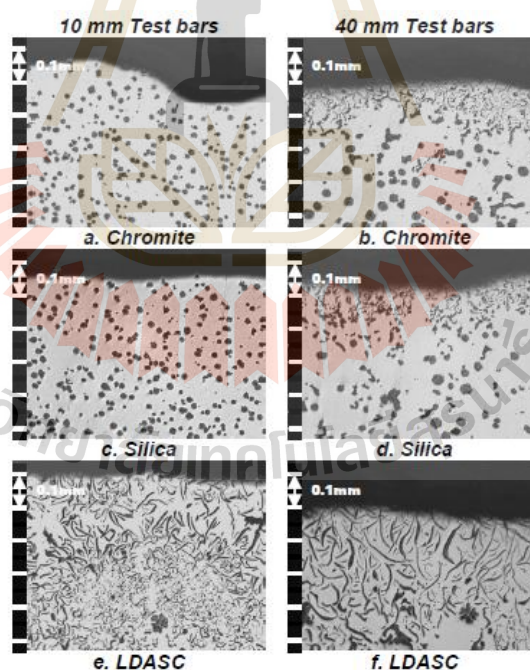
2.5.4.2 แบบหล่อที่ผลิตโดยการเพิ่มเนื้อวัสดุ (Additive manufacturing mold, AM mold) หรืออาจเรียกอีกอย่างว่า 3d printing ซึ่งเป็นกระบวนการขึ้นรูปแบบ 3 มิติ ซึ่งวัสดุที่ขึ้นรูปนั้นจะมีสถานะเป็นของแข็งและถูกควบคุมการขึ้นรูปด้วยคอมพิวเตอร์ ซึ่งวัสดุที่นำมาเติมนั้นจะถูกยึดให้ติดกันด้วยตัวประสาน ซึ่งรูปทรงของชิ้นงานจะถูกออกแบบด้วยโมเดล 3 มิติ ซึ่งสามารถใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์จำพวก CAD (Computer aided design) ในการออกแบบ นอกจากนี้จะใช้คอมพิวเตอร์ในการออกแบบแล้ว ยังสามารถใช้ สแกนเนอร์ 3 มิติ ในการเปลี่ยนวัตถุในโลกความจริงไปเป็นไฟล์ดิจิทัล ที่สามารถนำไปผลิตโมลด์จากเครื่องพิมพ์แบบหล่อ 3 มิติได้ โดยแบบหล่อ AM มีปริมาณซัลเฟอร์สูง ซึ่งเมกนีเซียมจะทำปฏิกิริยากับซัลเฟอร์ในแบบหล่อซึ่งสามารถดูได้จากกลไกการเกิดการพองของเมกนีเซียมเนื่องจากการสูญเสียซัลเฟอร์

ในปี 2010 Duncan และ Kroker [14] ได้ทำการทดลองเพื่อหาผลกระทบของวัสดุที่ใช้ทำแบบหล่อที่มีต่อโครงสร้างบริเวณผิวของเหล็กหล่อแกรไฟต์ตัวหนอน โดยใช้ชนิดของแบบหล่อดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 วัสดุแบบหล่อชนิดต่าง ๆ ที่ใช้ในการทดลอง [14]

| Experiment# | Aggregate type | Refractory coating type |
|-------------|----------------|-------------------------|
| 1 | Chromite | None |
| 2 | Silica | None |
| 3 | LDASC | None |
| 4 | Silica | Zircon |
| 5 | Silica | Mica |
| 6 | Silica | Mica + LDASC |

พบว่าวัสดุแบบหล่อต่างชนิดกันจะเกิดผลกระทบกับโครงสร้างบริเวณผิวที่ต่างกันดังแสดงในรูปที่ 2.18 ทั้งนี้แบบหล่อทรายขึ้นมีความชื้นสูงซึ่งสามารถอธิบายได้จากกลไกการเกิดการพองของเมกนีเซียมเนื่องจากการสูญเสียซัลเฟอร์ดังที่ได้กล่าวมาข้างต้น



รูปที่ 2.18 แสดงอิทธิพลของวัสดุแบบหล่อต่อโครงสร้างผิวงานหล่อ [14]

ตารางที่ 2.4 ค่าความหนาของโครงสร้างผิวที่เสีรูปร่างของแกรไฟต์

| Exp # | Test bar diameter [mm] | | | |
|-----------|------------------------|------------|------------|------------|
| | 10 | 20 | 30 | 40 |
| 1.Cromite | 0 | >0 – 0.2 | >0 – 0.2 | >0 – 0.2 |
| 2.Silica | 0 | 0 | >0 – 0.2 | >0 – 0.2 |
| 3.LDASC | >0.4 - 0.6 | >0.4 – 0.6 | >0.4 - 0.6 | >0.4 – 0.6 |

พบว่า Low density alumina-silicate ceramic (LDASC) มีอิทธิพลต่อ โครงสร้างผิวมากที่สุด คือให้ความหนามากกว่า 0.4-0.6 มิลลิเมตร

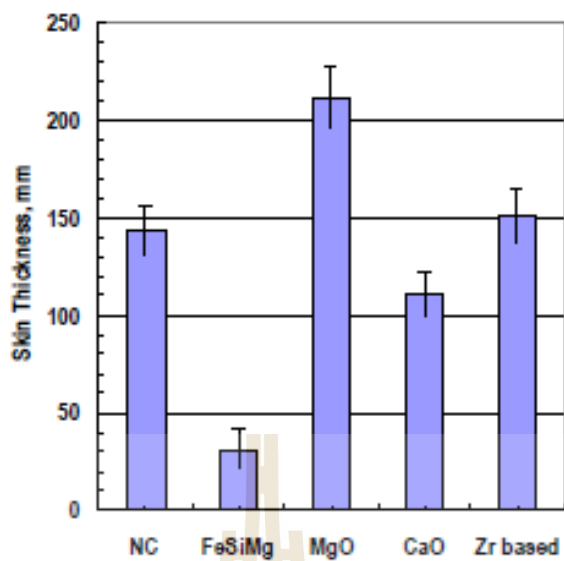
2.5.5 สารเคลือบแบบ (Coating)

ในงานวิจัยของ Boonmee และ Stefanescu [12] ได้ทำการทดลองโดยนำไส้แบบไปจุ่มสีทาแบบแต่ละชนิด โดยสีทาแบบที่ใช้จะแบ่งออกเป็น 3 กลุ่ม คือ

2.5.5.1 Inactive coating เป็นสีทาแบบที่ไม่ทำปฏิกิริยาหรือเกิดปฏิกิริยาได้น้อยจะมีอยู่ 3 ชนิด คือ ไมกา (Mica), เซอร์คอน (Zircon) และ โบรอนไนไตรด์ (Boron nitride)

2.5.5.2 Reactive coating เป็นสีทาแบบที่มีการทำปฏิกิริยาเคมีจะมีอยู่ 3 ชนิด คือ แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) แคลเซียมออกไซด์ (CaO) และ เฟอร์โรซิลิคอนแมกนีเซียม (FeSiMg) โดยตัวอย่างการเกิดปฏิกิริยาเคมี เช่น แมกนีเซียมในเฟอร์โรซิลิคอนแมกนีเซียมจะทำปฏิกิริยากับออกซิเจนหรือซัลเฟอร์ ช่วยลดความหนาของชั้นการเสีรูปร่างของแกรไฟต์ได้

2.5.5.3 Active coating เป็นสีทาแบบที่ไม่เกิดปฏิกิริยา แต่จะมีธาตุเจือลงไปในตัวเหล็ก เช่น คาร์บอน ที่มาจากสารเคลือบแกรไฟต์ ซึ่งก็จะเพิ่มคาร์บอนในงานหล่อ ในกลุ่มนี้ก็มีสีทาแบบอยู่ 2 ชนิดคือเฟอร์โรซิลิคอน (Ferrosilicon) และ แกรไฟต์ (Graphite)พบว่าเฟอร์โรซิลิคอนแมกนีเซียมช่วยลดชั้นความหนาของการเสีรูปร่างของแกรไฟต์ได้มากที่สุด เนื่องจากอัตราการเย็นตัวสูงสุดที่ต่ำ ทำให้ได้ค่าความกลมของแกรไฟต์สูง จึงมีส่วนช่วยให้ไม่เกิดการเสีรูปร่างของแกรไฟต์ ส่วนแมกนีเซียมออกไซด์ มีค่าการนำความร้อนที่สูงทำให้มีช่วงการแข็งตัวนานจึงส่งผลให้เกิดการเสีรูปร่างแกรไฟต์มากขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 2.18



รูปที่ 2.19 อิทธิพลของสารเคลือบใสแบบแต่ละชนิดต่อความหนาของชั้น โครงสร้างการเสีรูปร่างของแกรไฟต์ [12]

บทที่ 3

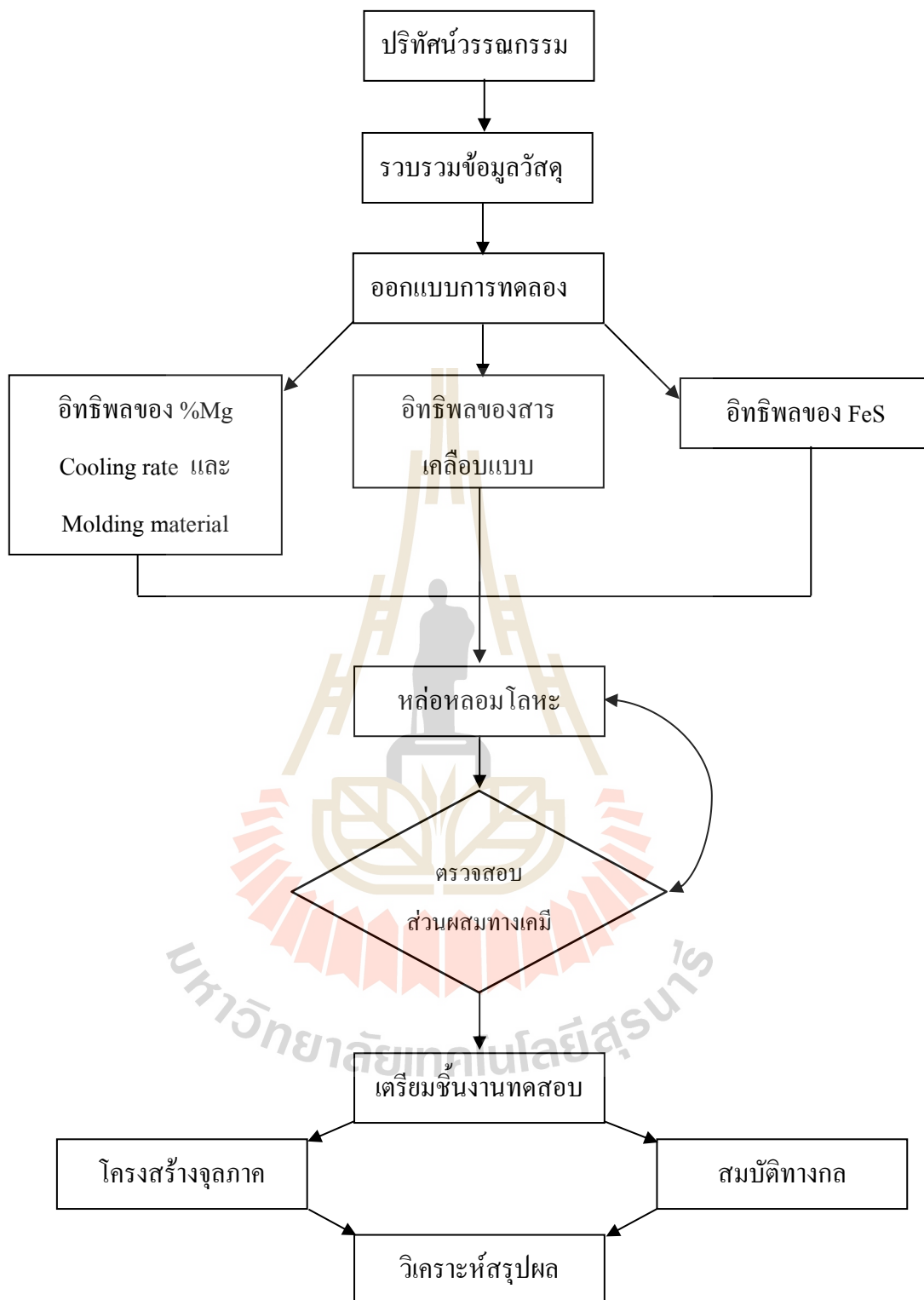
วิธีดำเนินงานวิจัย

3.1 บทนำ

งานวิจัยนี้ได้แบ่งการทดลองออกเป็น 3 ชุดการทดลองโดยศึกษาอิทธิพลของตัวแปรต่าง ๆ ในกระบวนการหล่อโลหะต่อโครงสร้างจุลภาคที่ผิวงานหล่อ มีการออกแบบงานหล่อและจำลองการหล่อโดยใช้โปรแกรม ProCastVer. 2016 เพื่อสังเกตลักษณะการเย็นตัว โดยชุดการทดลองแรกศึกษาอิทธิพลของวัสดุที่ใช้ทำแบบหล่อ อัตราการเย็นตัว และปริมาณแมกนีเซียมที่ 0.01-0.03% ซึ่งใช้แบบหล่อทรายขึ้นและแบบหล่อที่ผลิตจากการผลิตแบบเพิ่มเนื้อวัสดุ (Additive manufacturing mold, AM mold) ที่ออกแบบขึ้นงานให้มีความหนาแตกต่างกัน ชุดการทดลองที่ 2 ศึกษาอิทธิพลของสารเคลือบไส้แบบต่อการเกิดโครงสร้างจุลภาคที่ผิวงานหล่อในเหล็กหล่อเกรไฟต์ตัวหนอน ซึ่งในการทดลองจะแบ่งออกเป็น 4 เงื่อนไขโดยจะใช้ไส้แบบที่ผลิตจากเครื่องพิมพ์แบบหล่อ 3 มิติ และโซเดียมซิลิเกตโดยกำหนดขนาดไส้แบบให้มีขนาดแตกต่างกันที่ 0.5 1.0 1.5 และ 2.0 นิ้ว สารเคลือบไส้แบบที่ใช้ได้แก่ ฟิลโลซิลิเกต มัลไลต์ และเซอร์คอนเบส ชุดการทดลองที่ 3 ศึกษาอิทธิพลของเฟอร์โรซิลเฟอร์โรไนต์แบบโซเดียมซิลิเกตในปริมาณที่ต่างกัน คือ 0 0.5 1.0 1.5 2.0 2.5 3.0 และ 3.5 % โดยน้ำหนัก โดยมีขอบเขตส่วนผสมทางเคมีแสดงดังตารางที่ 3.1 และขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยแสดงดังรูปที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ส่วนผสมทางเคมีที่ใช้ในการศึกษา

| Element | C | Si | Mn | P | S | Mg | CE |
|---------|---------|---------|-----------|-----------|-----------|-----------|---------|
| Rang | 3.2-3.5 | 2.0-3.5 | 0.05-0.09 | 0.02-0.09 | 0.01-0.07 | 0.01-0.03 | 3.9-4.3 |



รูปที่ 3.1 ขั้นตอนดำเนินการวิจัย

3.2 เครื่องมือ อุปกรณ์ และวัสดุที่ใช้ในการทดลอง

- 3.2.1) เครื่องพิมพ์พลาสติก 3 มิติ
- 3.2.2) เครื่องพิมพ์แบบหล่อ 3 มิติ
- 3.2.3) เตาอินดักชันสำหรับหลอมโลหะ
- 3.2.4) เทอร์โมคัปเปิล
- 3.2.5) เครื่องตรวจสอบส่วนผสมทางเคมีด้วยวิธีออปติคัลสเปกโตรเมทรี
- 3.2.6) ซอฟต์แวร์จำลองการหล่อโลหะ
- 3.2.7) ตาชั่งดิจิทัล และตาชั่งสปริง
- 3.2.8) เครื่องผสมทราย
- 3.2.9) เครื่องตัดโลหะ
- 3.2.11) เครื่องขัดกระดาษทราย และเครื่องขัดละเอียด
- 3.2.12) อุปกรณ์ในการทำแบบหล่อ
- 3.2.13) อุปกรณ์ในการป้องกันภัยส่วนบุคคล
- 3.2.14) อุปกรณ์และสีทาแบบ
- 3.2.15) กระดาษทราย เบอร์ 100-1200
- 3.2.16) ผงขัดอลูมินา ขนาด 0.3 และ 0.05 ไมโครเมตร
- 3.2.17) แอลกอฮอล์
- 3.2.18) เหล็กคียบ
- 3.2.19) เฟอร์โรซิลิกอน
- 3.2.20) เฟอร์โร ซิลิโก แมกนีเซียม
- 3.2.21) คาร์บอน
- 3.2.22) โซเดียมซิลิเกต
- 3.2.23) ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์
- 3.2.24) เหล็กเหนียว
- 3.2.25) กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงและซอฟต์แวร์วิเคราะห์ทางภาพถ่าย
- 3.2.26) ครก และตะแกรงร่อนขนาด 30 เมช
- 3.2.27) ทรายละเอียด
- 3.2.28) กระจกใส

3.3 การออกแบบและเตรียมชิ้นงานก่อนการทดลอง

3.3.1 การออกแบบและเตรียมชิ้นงานของชุดการศึกษาที่ 1

3.3.1.1. การเตรียมชิ้นงานเพื่อศึกษาอัตราการเย็นตัวของชิ้นงานของไส้แบบ AM

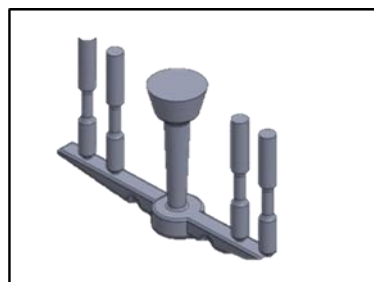
- ออกแบบชิ้นงานแบบหล่อทรายสามมิติด้วยโปรแกรม Solidworks โดยชิ้นงานที่ทำ การออกแบบมีอยู่ 3 แบบคือ แบบ Dog bone, ทรงกระบอก (Cylinder) และ แบบ Step

- นำแบบจำลองที่ได้ออกแบบในซอฟต์แวร์ไปทำการจำลองการไหลของน้ำโลหะด้วยโปรแกรม Procast

- เตรียมแบบหล่อรูปกระดุก ด้วยการขึ้นรูปด้วยการพิมพ์แบบหล่อทรายสามมิติมีวัตถุประสงค์เพื่อหาอิทธิพลของโครงสร้างภายใต้ผิวงานหล่อต่อความต้านทานแรงดึง ความต้านทานแรงดึง ณ จุดคราก และเปอร์เซ็นต์การยืดตัว ของเหล็กหล่อประเภทต่าง ๆ

- เตรียมแบบหล่อทรงกระบอกด้วยการขึ้นรูปด้วยการพิมพ์แบบหล่อทรายสามมิติจะนำมาถึงผิวงานให้มีรูปร่างตามชิ้นงาน Dog bone เพื่อเปรียบเทียบความต้านทานแรงดึง ความต้านทานแรงดึง ณ จุดคราก และเปอร์เซ็นต์การยืดตัว ของเหล็กหล่อประเภทต่าง ๆ ต่อชิ้นงาน

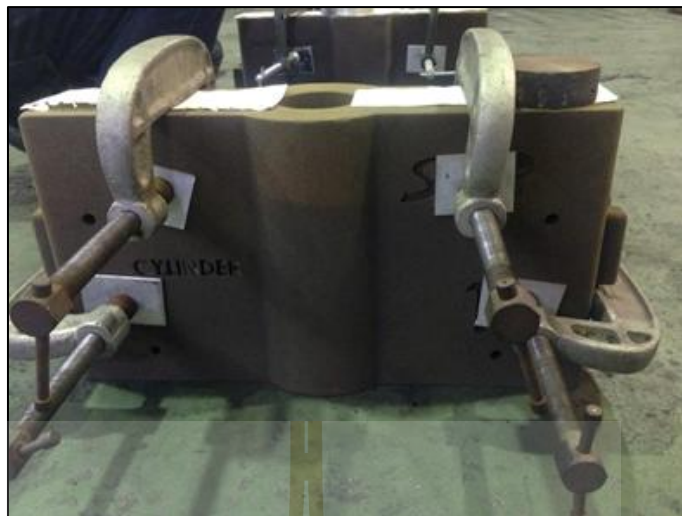
- เตรียมแบบหล่อ Step ด้วยการขึ้นรูปด้วยการพิมพ์แบบหล่อทรายสามมิติ มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอิทธิพลของตัวแปรต่าง ๆ เช่น อุณหภูมิเท ปริมาณแมกนีเซียม อัตราการเย็น ต่อความหนาของชิ้น โครงสร้างภายใต้ผิวงานหล่อ สำหรับแบบหล่อประเภทนี้จะขึ้นรูปการพิมพ์แบบหล่อทรายสามมิติ สำหรับแบบหล่อ Dog bone ชิ้นงานมีขนาดและรูปร่างตามมาตรฐาน ASTM E8 มีความยาวเท่ากับ 50 มิลลิเมตร สำหรับแบบหล่อ step ออกแบบให้มีความหนาแตกต่างกันเพื่อศึกษาอิทธิพลของอัตราการเย็นตัว มีความหนาตั้งแต่ 7 14 21 และ 28 มิลลิเมตรตามลำดับ



รูปที่ 3.2 แสดงการออกแบบชิ้นงานแบบหล่อทรายสามมิติด้วยโปรแกรม Solidworks

3.3.1.2 การเตรียมชิ้นงานเพื่อศึกษาอัตราการเย็นตัวของชิ้นงานของแบบหล่อ
ทรายขึ้น

- ทำกระสวน Step ตามที่ได้ออกแบบไว้ก่อนหน้านี้
- ผสมทรายกับตัวประสาน สารเติมแต่ง และน้ำ ลงในเครื่องผสมทรายให้
ได้ความชื้นที่สามารถทำแบบทรายได้
- ทาผงเกรไฟต์จนทั่วผิวของกระสวนและวางกระสวนลงในหีบแบบล่าง
- ร่อนทรายที่ผสมแล้วให้ปกคลุมทั่วทั้งผิวชิ้นงาน จากนั้นใช้มือกดทราย
ให้สนิทกับชิ้นงานกระสวนแล้วตำทรายด้วยค้อนตำแบบเล็ก
- เททรายลงในหีบแบบล่างจนเต็มและตำทรายด้วยค้อนตำแบบใหญ่
จากนั้นเททรายที่เหลือลงช้าแล้วตำทรายให้แน่นแล้วปาดทรายที่ล้นหีบให้ได้ระนาบ
- หางยหีบแบบล่างขึ้น ทำเดือยยึด แล้ววางตำแหน่ง รูเท รูล้น โรอยทราย
แก้วให้ทั่วผิวแบบ จากนั้นวางหีบแบบบนประกบหีบแบบล่าง
- ร่อนทรายลงในหีบแบบบนแล้วใช้มือกดทรายที่ร่อนให้แน่น จากนั้นเท
ทรายที่เหลือลงในหีบแบบ ตำด้วยค้อนตำแบบใหญ่ จากนั้นเททรายที่เหลือลงช้าในหีบแบบบนแล้ว
ตำทรายให้แน่น ปาดผิวทรายที่ล้นให้ได้ระนาบแล้วคว้านรูเท รูล้นแล้วจึงดึงแบบของรูเทและรูล้น
- เปิดหีบแบบบนออก แล้วทำทางเดินน้ำ โลหะที่หีบแบบล่าง แล้วนำ
กระสวนออกจากหีบแบบล่าง
- ประกบหีบแบบบนและหีบแบบล่างเข้าด้วยกัน และนำเหล็กถ่วงน้ำหนัก
ทับกับหีบแบบไว้เพื่อไม่ให้แรงลอยตัวของน้ำโลหะดันหีบแบบบนขึ้นในขณะที่เทน้ำโลหะ



รูปที่ 3.3 การยึดแบบหล่อใส่แบบ AM ด้วยแคลมป์จับชิ้นงานรูปตัว C

3.3.2 การออกแบบและเตรียมชิ้นงานของชุดการศึกษาที่ 2

3.3.2.1. การเตรียมใส่แบบโซเดียมซิลิเกตแบบผสมผงเฟอร์โรซิลเฟอร์

- ดำเฟอร์โรซิลเฟอร์แล้วใช้ตะแกรงร่อนให้ได้ขนาด 30 เมช
- ผสมทรายแก้ว กับผงเฟอร์โรซิลเฟอร์ 5% โดยน้ำหนัก ให้เข้าโดยใช้เครื่องผสมทรายสำหรับใส่แบบเต็มโซเดียมซิลิเกต 5% โดยน้ำหนัก และผสมจนส่วนผสมเข้ากัน
- นำทรายใส่แบบที่ผสมแล้วอัดลงใน ภาชนะใส่แบบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.5 นิ้ว ยาว 6 นิ้ว แล้วพ่นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จนใส่แบบแข็ง ผลิตจำนวน 4 ชิ้น โดยชิ้นที่ 1 สำหรับงานที่ไม่เคลือบแบบ ชิ้นที่ 2 สำหรับฟิลโลซิลิเกต ชิ้นที่ 3 สำหรับเคลือบด้วยมัลติโค้ตและชิ้นที่ 4 สำหรับเคลือบด้วยเซอรॅคอนเบส



รูปที่ 3.4 ไม้แบบโซเดียมซิลิเกตแบบผสมผงเฟอร์โรซิลเฟอร์ 5% โดยน้ำหนัก ขนาด 1.5 นิ้ว

3.3.2.2 การเตรียมไม้แบบโซเดียมซิลิเกตแบบไม่ผสมผงเฟอร์โรซิลเฟอร์

- ผสมทรายแก้วกับ โซเดียมซิลิเกต 5% โดยน้ำหนัก โดยค่อย ๆ ผสม จน ส่วนผสมทั้งหมดเข้ากัน แล้วนำทรายไม้แบบที่ผสมแล้วอัดลงใน กระสวนไม้แบบขนาดไม้แบบ 0.5 1.0 1.5 และ 2.0 นิ้ว แล้วพ่นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จนไม้แบบแข็ง ผลิตภัณฑ์ขนาดละ 1 ชิ้น ดังรูป ที่ 3.5



รูปที่ 3.5 ไม้แบบโซเดียมซิลิเกต ขนาด 0.5 1.0 1.5 และ 2.0 นิ้ว

3.3.2.3 การเตรียมไส้แบบแบบเพิ่มเนื้อวัสดุ (AM mold) โดยผลิตจากเครื่องพิมพ์ 3 มิติขนาดไส้แบบ 0.5 1.0 1.5 อย่างละ 1 ชิ้น และ 2.0 นิ้ว 5 ชิ้น



รูปที่ 3.6 ไส้แบบ AM ขนาด 0.5 1.0 1.5 และ 2.0 นิ้ว

3.3.2.4 การเคลือบไส้แบบ จะเคลือบเฉพาะไส้แบบโซเดียมซิลิเกตแบบผสมผงเฟอร์โรซิลเฟอร์ และไส้แบบ AM ขนาด 1.5 นิ้ว สรุปลงในตารางที่ 3.2

3.3.2.5 ทำแบบหล่อทรายโดยใช้กระสวนไม้ 2 ชนิด คือ แบบขนาดไส้แบบเท่ากัน และแบบขนาดไส้แบบไม่เท่ากัน แล้วนำไส้แบบที่ผลิตจากข้างต้นวางในแบบทราย ดังแสดงในรูปที่ 3.10 จากนั้นประกบหีบแบบเพื่อร่อนน้ำโลหะ



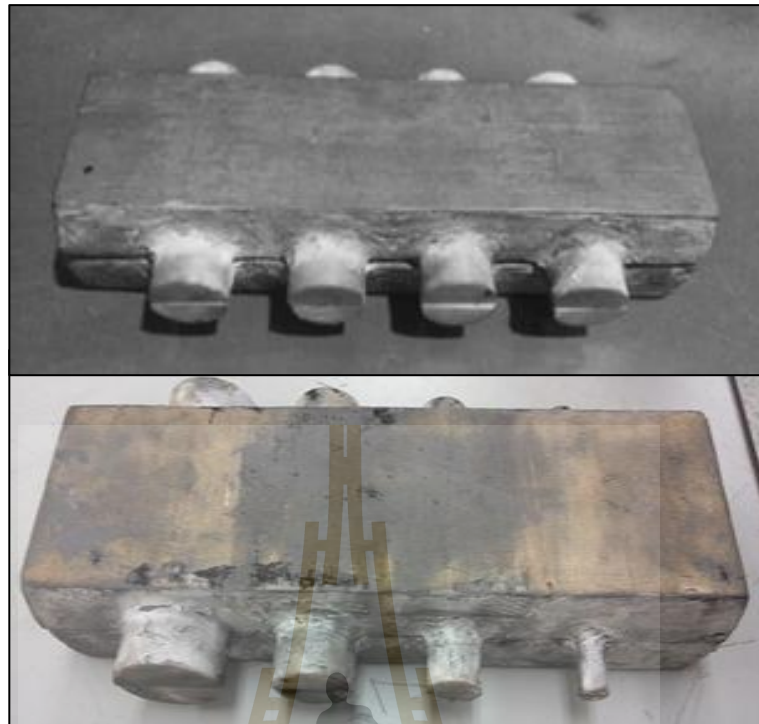
รูปที่ 3.7 ไส้แบบโซเดียมซิลิเกตแบบผสมผงเฟอร์โรซิลเฟอร์ขนาด 1.5 นิ้ว หลังเคลือบไส้แบบ



รูปที่ 3.8 ใ้แบบ AM ขนาด 1.5 นิ้ว หลังเคลือบใ้แบบ

ตารางที่ 3.2 เงื่อนไขการทดลองของประสิทธิภาพของสารเคลือบใ้แบบ

| การทดลอง | ประเภทของใ้แบบ | ขนาดใ้แบบ (นิ้ว) | Coating | | | |
|----------|--|------------------|------------|----------------|---------|--------------|
| | | | No coating | Phyllosilicate | Mullite | Zircon-based |
| 1 | โซเดียมซิลิเกตแบบไม่ผสมผงเฟอร์โรซัลเฟอร์ | 1.5 | X | X | X | X |
| 2 | โซเดียมซิลิเกตแบบผสมผงเฟอร์โรซัลเฟอร์ | 1.5 | X | X | X | X |
| 3 | ใ้แบบ Additive-manufactured (AM) | 1.5 | X | X | X | X |
| 4 | โซเดียมซิลิเกตแบบไม่ผสมผงเฟอร์โรซัลเฟอร์ | 0.5 | X | | | |
| | | 1.0 | X | | | |
| | | 1.5 | X | | | |
| | | 2.0 | X | | | |
| 5 | ใ้แบบ Additive-manufactured (AM) | 0.5 | X | | | |
| | | 1.0 | X | | | |
| | | 1.5 | X | | | |
| | | 2.0 | X | | | |



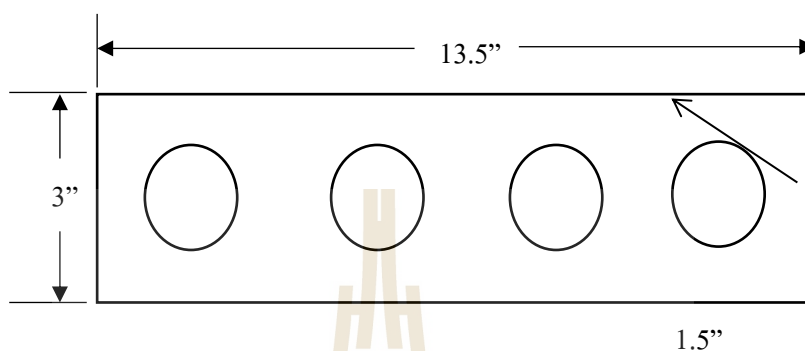
รูปที่ 3.9 กระสวนแบบขนาดใส่แบบเท่ากัน และแบบขนาดใส่แบบไม่เท่ากัน



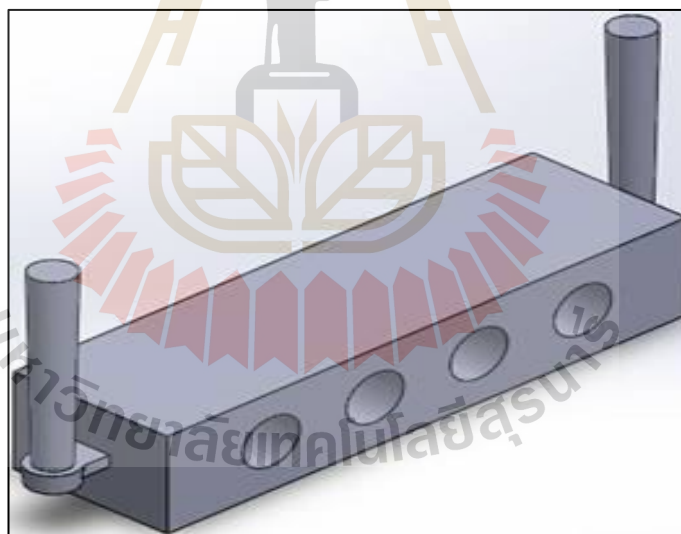
รูปที่ 3.10 การวางใส่แบบลงในแบบหล่อทราย

3.3.3 การออกแบบและเตรียมชิ้นงานของชุดการศึกษาที่ 3

3.3.3.1 ออกแบบชิ้นงานเพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่าง ปริมาณซิลเฟอร์ไนไลต์
แบบต่อการเกิดโครงสร้างการเสียบรูปร่างของแกรไฟต์



รูปที่ 3.11 แบบของชิ้นงานที่จะหล่อทดสอบ



รูปที่ 3.12 แบบจำลอง 3 มิติของชิ้นงานหลังหล่อทดสอบ

3.3.3.2 การทำไส้แบบ

- ชั่งทรายละเอียดด้วยตาชั่งสปริงให้มากกว่าปริมาตรของไส้แบบ 2 เท่า
แล้วนำไปใส่ลงในเครื่องผสมทราย

- เติมสารละลายโซเดียมซิลิเกตลงในเครื่องผสมทราย เริ่มต้นที่ 5% ของน้ำหนัก ทราย โดยเปิดเครื่องผสมทรายค่อย ๆ ผสมและให้สังเกตว่าทรายสามารถปั้น ได้จึงหยุดผสม หากทรายยังไม่สามารถจับตัวกัน ได้ให้เพิ่มสารละลายโซเดียมซิลิเกตทีละน้อยจนสามารถปั้น ไล่แบบได้

- นำทรายจากเครื่องไล่ลงในแบบ ทีละน้อย และกดทรายจนแน่น

- ใช้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป่าไล่แบบ จนไล่แบบแข็งตัวจึงแกะแบบ

- ทำซ้ำอีกครั้งโดยผสมผงเฟอร์โรซิลเฟอร์ 0.5 1.0 1.5 2.0 2.5 3.0 และ 3.5 % โดยน้ำหนักของทราย

3.3.3.3 การทำแบบหล่อทรายโดยเตรียมแบบทรายด้วยกระสวนที่มีขนาดไล่แบบ เท่ากัน นำไล่แบบที่มีปริมาณ เฟอร์โรซิลเฟอร์ 0 0.5 1.0 1.5 2.0 2.5 3.0 และ 3.5 % โดยน้ำหนักมา วางบนหีบแบบล่างและประกบแบบ

3.4 การหล่อชิ้นงาน ทดสอบสมบัติเชิงกล และการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค

3.4.1 การหล่อชิ้นงาน

3.4.1.1 ชั่งน้ำหนักวัสดุดิบแล้ว ใส่เหล็กดิบ เฟอร์โรซิลิกอน คาร์บอน ลงไปในเตาหลอมอินดักชัน รอให้ส่วนผสมหลอมเข้ากัน

3.4.1.2 ตรวจสอบส่วนผสมด้วยเครื่อง Optical emission spectrometer

3.4.1.3 ปรับส่วนผสมให้ได้ตามขอบเขตการทดลอง

3.4.1.4 วัดอุณหภูมิหน้าเหล็กให้ได้ตามขอบเขตการทดลอง

3.4.1.5 เริ่มเผาเบ้ารองรับน้ำโลหะในขณะที่ส่วนผสมในเตาเริ่มละลาย จนกระทั่งจะเทน้ำโลหะเพื่อให้อุณหภูมิหน้าโลหะไม่ลดลงมาก

3.4.1.6 เทน้ำโลหะลงแบบและนำแบบทราย นำเหล็กทับหีบแบบวางทับเพื่อ ป้องกันแรงดันจากการขยายตัวของเหล็กซึ่งอาจทำให้หีบแบบร้าวได้

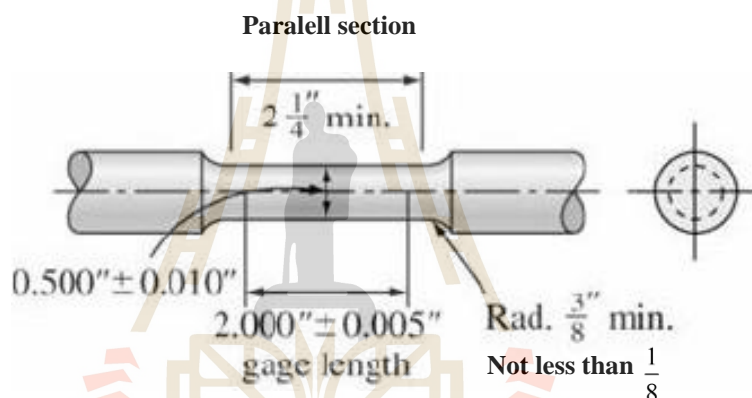
3.4.1.7 รอชิ้นงานเย็นตัวแล้วจึงรื้อแบบ ทำความสะอาด เตรียมนำไปตัดเพื่อ ทดสอบสมบัติเชิงกล และวิเคราะห์โครงสร้างต่อไป

3.4.2 การทดสอบทางกล

เตรียมชิ้นงานเพื่อศึกษาสมบัติเชิงกลของชุดการทดลองที่ 1 สำหรับชิ้นงานหล่อที่มีปริมาณแมกนีเซียมเหลือค้างที่ต่างกัน โดยนำชิ้นงานไปทดสอบแรงดึงตามมาตรฐาน ASTM A356 ซึ่งมีขั้นตอนดังนี้

3.4.2.1 ชิ้นงาน As-cast ที่เป็นรูป Dog bone นำไปตัดและทำไปทดสอบด้วยเครื่องทดสอบแรงดึงได้ทันที

3.4.2.2 ชิ้นงานที่เป็นรูปทรงกระบอกให้นำไปตัดและกลึงเพื่อกำจัดอิทธิพลของชั้นการเสียรูปของแกรไฟต์ให้ได้ขนาด ดังแสดงในรูปที่ 3.13

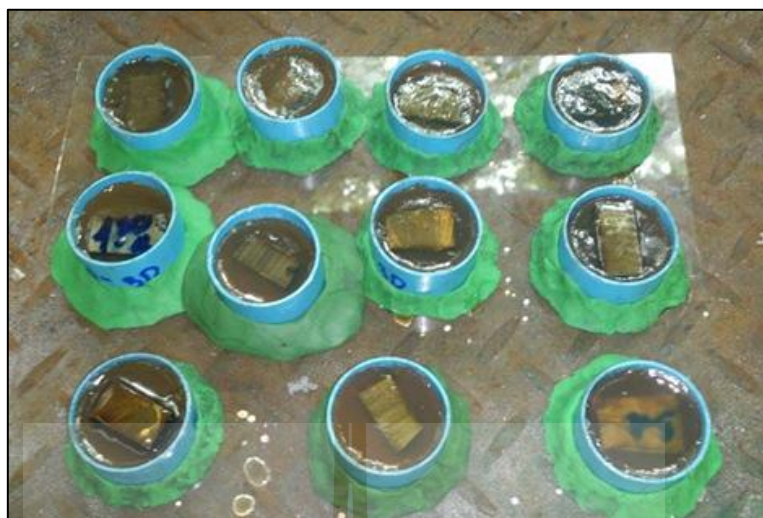


รูปที่ 3.13 ขนาดชิ้นงานทดสอบแรงดึง ตามมาตรฐาน ASTM A356

3.4.3 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค

3.4.3.1 นำชิ้นงาน ที่ได้จากการหล่อ นำมาตัดเป็นชิ้น

3.4.3.2 นำชิ้นงานที่ได้จากการตัดไปขึ้นเรือนแบบเย็น (Cold mounting) เพื่อความสะดวกในการขัด ดังแสดงในรูปที่ 3.14



รูปที่ 3.14 การขึ้นเรือนแบบเย็นสำหรับชิ้นงานที่ตัดแล้ว

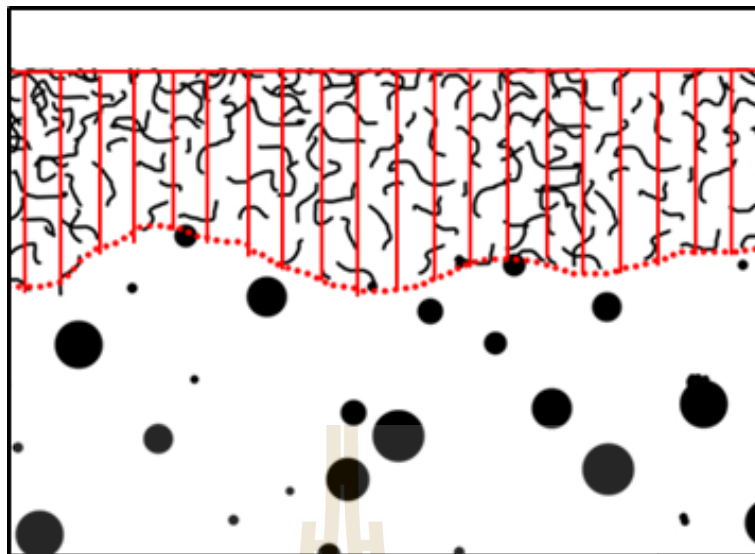
3.4.3.3 ชัดชิ้นงานด้วยกระดาษทรายตั้งแต่เบอร์ 100-1200 จากนั้นขัดด้วยผ้าสักหลาดโดยใช้ผงอะลูมินา 0.3 ไมครอน และ 0.05 ไมครอน ตามลำดับ

3.4.3.4 นำชิ้นงานที่ขัดเสร็จแล้วไปทำการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงและซอฟต์แวร์วิเคราะห์ทางภาพถ่าย

3.4.3.5 วัดความหนาของชั้นการเสียรูปร่างของแกรไฟต์โดย

- ลากเส้นขนานกับผิวงานหล่อมีความยาวตามที่กำหนดไว้
- ลากเส้นตั้งฉากจากผิวงานหล่อไปจนถึงจุดที่ปรากฏแกรไฟต์กลม โดยมีจำนวนและเว้นช่องตามที่กำหนด โดยในการทดลองนี้ลากเส้น 20 เส้น กำลังขยายที่ใช้ในการถ่ายภาพ 50 เท่า

- ทำซ้ำตลอดทั้งชิ้นงาน ดังแสดงในรูปที่ 3.15



รูปที่ 3.15 ตัวอย่างวิธีการหาค่าความหนาของชั้นการเสียนรูปร่างของแกรไฟต์

- คำนวณหาค่าความหนาของชั้นการเสียนรูปร่างของแกรไฟต์โดยใช้

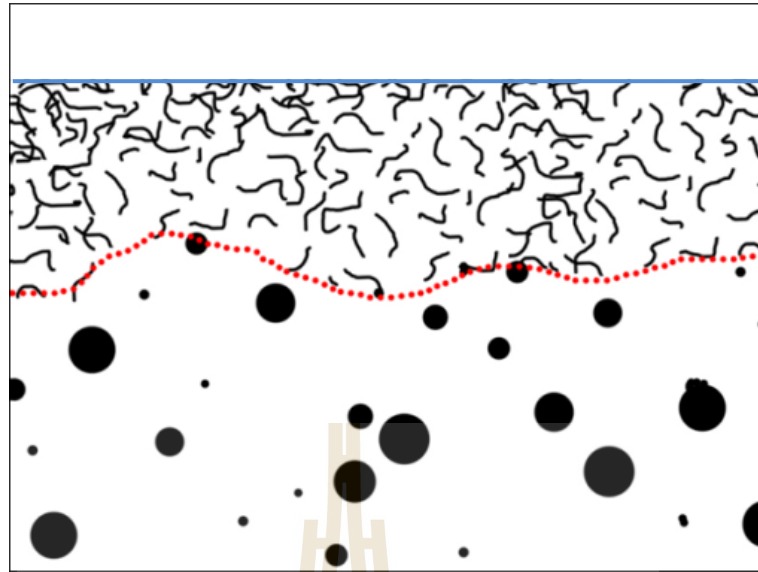
สมการที่ 3.1

$$\text{ความหนา} = \frac{\sum_{i=1}^n Y_i}{n} \quad (3.1)$$

โดยที่ Y คือ ความยาวในแต่ละเส้น และ n คือ จำนวนของเส้นที่วัด

3.4.3.6 วัดความคดโค้ง (Tortuosity)

ถ่ายรูปโครงสร้างจุลภาคที่กำลังขยายที่มองเห็นเส้นรอยต่อได้ชัดเจน หาความยาวของรอยต่อของโครงสร้างด้วยโปรแกรมวิเคราะห์ทางภาพ แล้วนำความยาวของรอยต่อหารด้วยระยะการกระจัดที่กำหนด เพื่อนำมาเปรียบเทียบกับความยาวทั้งหมดของชั้นงาน ดังแสดงในภาพด้านล่างนี้



รูปที่ 3.16 ตัวอย่างวิธีการหาค่าความคดโค้ง

โดยกำหนดให้

เส้นประสีแดง คือ ระยะทาง (L)

เส้นสีน้ำเงิน คือ ระยะความยาวทั้งหมดของภาพ (S)

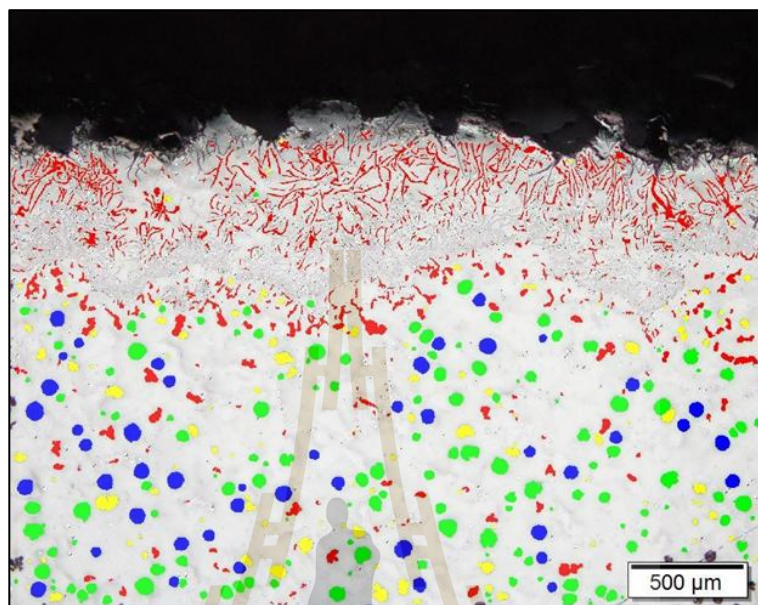
$$\text{Tortuosity} = L/S$$

โดยค่าความคดโค้งนี้จะเป็นตัวที่บ่งบอกว่าสามารถควบคุมลักษณะของผิวได้มากน้อยเพียงใดนั่นเอง

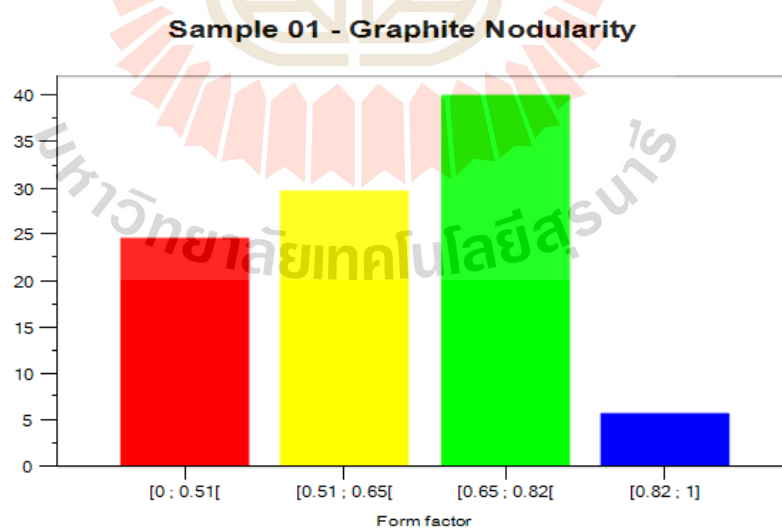
3.4.3.7 วัดความกลม (Nodularity)

เป็นการวัดค่าความกลมของแกรไฟต์ การวัดนี้เพื่อแสดงการเปลี่ยนแปลงของรูปร่างแกรไฟต์จากเหล็กหล่อเทาไปเป็นเหล็กหล่อเหนียว โดยใช้ค่าความเป็นทรงกลม (Sphericity) เป็นดัชนีบอกรูปร่างของแกรไฟต์ ซึ่งจะช่วยบอกได้ว่าการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นเป็นแบบค่อยเป็นค่อยไปหรืออย่างฉับพลัน ใช้โปรแกรมวิเคราะห์ภาพถ่าย โดยทำการวัดความกลมตามมาตรฐาน ASTM A274 หลักการวัดคือ โปรแกรมจะทำการประมวลผลจากภาพถ่าย โดยในส่วนของความกลมจะคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ ค่าความกลมแบ่งตามสี คือ สีแดงมีความกลมเท่ากับ 0% สีเหลืองมีความกลมเท่ากับ 51% สีเขียวมีความกลมเท่ากับ 65% และสีน้ำเงินมีความกลมเท่ากับ 82%

ส่วนในกราฟแท่งจะเป็นส่วนที่แสดงให้เห็นว่าในภาพที่ทำการวิเคราะห์นั้นมีสีที่แสดงเปอร์เซ็นต์ความกลมประมาณเท่าใด



รูปที่ 3.17 การวิเคราะห์ความกลมของแกรไฟต์



รูปที่ 3.18 การประมวลผลปริมาณความกลมของแกรไฟต์แต่ละช่วง

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

4.1 บทนำ

บทนี้จะนำเสนอผลของการศึกษาจากการทดลองทั้ง 3 ชุดคือการศึกษากิจกรรมของตัวแปรของกระบวนการหล่อโลหะต่อโครงสร้างจุลภาคที่ผิวงานหล่อ เช่น วัสดุที่ใช้ในการผลิตแบบหล่อ อัตราการเย็นตัว ปริมาณแมกนีเซียมที่ละลายในชิ้นงานหล่อที่มีผลกระทบต่อเกิดการเสีรูปร่างของแกรไฟต์ที่ผิวงานหล่อ ผลของการศึกษาและหาวิธีป้องกันการเกิดการเสีรูปร่างของแกรไฟต์ โดยใช้ไส้แบบที่ผลิตจากโซเดียมซิลิเกต และไส้แบบ AM แล้วเปรียบเทียบประสิทธิภาพของสารเคลือบไส้แบบแต่ละชนิดว่าแตกต่างกันอย่างไร รวมถึงเปรียบเทียบอัตราการถ่ายเทความร้อนที่ต่างกันมีผลต่อการเกิดการเสีรูปร่างของแกรไฟต์และผลจากการนำความรู้เกี่ยวกับการเกิดการเสีรูปร่างของแกรไฟต์ไปใช้ในการผลิตเหล็กหล่อแกรไฟต์คู่ โดยใช้ไส้แบบโซเดียมซิลิเกตที่มีปริมาณของซัลเฟอร์ที่ต่างกัน ทำให้ทราบถึงอิทธิพลของซัลเฟอร์ต่อที่มีต่อโครงสร้างจุลภาคของเหล็กหล่อแกรไฟต์คู่ เช่น ความหนา ความคดโค้ง และความกลมของชิ้น โครงสร้าง โดยส่วนผสมทางเคมีของการทดลองทั้ง 3 ชุดแสดงในตารางที่ 4.1 4.2 และ 4.3 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.1 ส่วนประกอบทางเคมีของเหล็กในชุดการทดลองที่ 1

| Heat | C | Si | Mn | P | S | Mg | CE |
|------|------|------|--------|--------|----------|-------|------|
| 1 | 3.34 | 2.65 | 0.0916 | - | 0.138 | 0.030 | 4.22 |
| 2 | 3.36 | 2.28 | 0.0507 | - | <0.00002 | 0.015 | 4.12 |
| 3 | 3.22 | 2.50 | 0.0756 | 0.2 | 0.0068 | 0.020 | 4.05 |
| 4 | 3.31 | 3.16 | 0.0910 | 0.092 | 0.0506 | 0.025 | 4.36 |
| 5 | 3.41 | 2.40 | 0.0913 | 0.0865 | 0.0669 | 0.020 | 4.21 |
| 6 | 3.45 | 2.16 | 0.0925 | 0.0742 | <0.00002 | 0.010 | 4.13 |

ตารางที่ 4.2 ส่วนประกอบทางเคมีของเหล็กในชุดการทดลองที่ 2

| Heat | C | Si | S | P | Mn | Mg |
|------|------|------|--------|--------|---------|--------|
| 1 | 3.26 | 2.52 | 0.0123 | 0.0865 | 0.00003 | 0.0087 |
| 2 | 3.67 | 2.73 | 0.0148 | 0.136 | 0.0066 | 0.019 |
| 3 | 3.30 | 2.49 | 0.0152 | 0.162 | 0.0002 | 0.02 |
| 4 | 2.98 | 2.55 | 0.0112 | 0.0365 | 0.0381 | 0.0078 |

ตารางที่ 4.3 ส่วนประกอบทางเคมีของเหล็กในชุดการทดลองที่ 3

| ธาตุ | C | Si | Mg | S | P | Mn | CE |
|----------------------|------|------|--------|--------|--------|--------|------|
| ร้อยละโดยน้ำหนัก (%) | 3.25 | 2.67 | 0.0564 | 0.0104 | 0.0366 | 0.0347 | 4.12 |

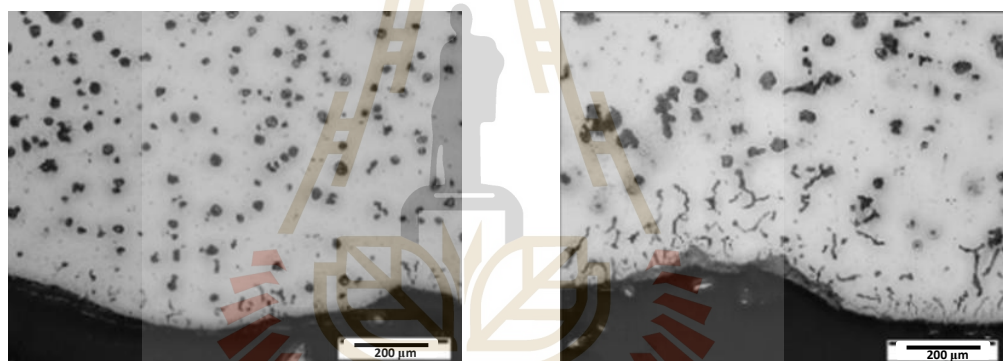
4.2 ผลการศึกษาอิทธิพลของตัวแปรของกระบวนการหล่อโลหะต่อโครงสร้างจุลภาคที่ผิวงานหล่อ

4.2.1 อิทธิพลของความหนาของชิ้นงานต่อการเสีรูปร่างของแกรไฟต์บริเวณผิวงานหล่อ

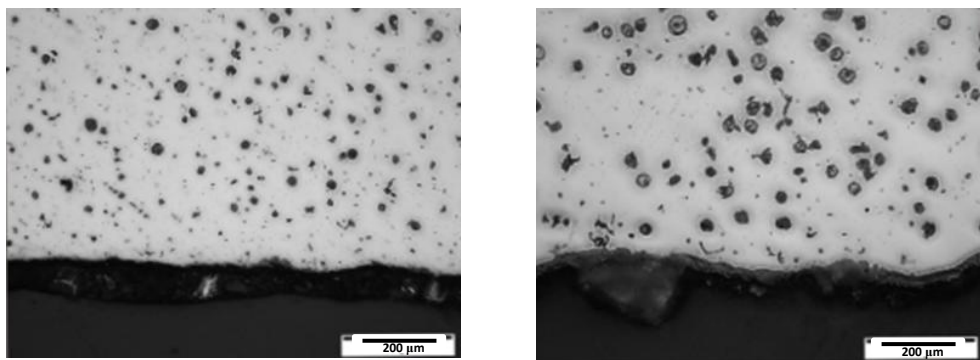
จากการทดลองออกแบบให้ชิ้นงานมีความหนาต่างกันที่ 7 14 21 และ 28 มิลลิเมตร นั้นพบว่าโครงสร้างจุลภาคที่ผิวของชิ้นงานมีความสัมพันธ์กับความหนาของชิ้นงานหล่อ จากตารางที่ 4.4 เป็นการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของชิ้นงานหล่อ ปริมาณแมกนีเซียมเหลือค้าง และความหนาของชั้นการเสีรูปร่างของแกรไฟต์ เห็นได้ว่าเมื่องานหล่อมีความหนาเพิ่มขึ้นจะยังมีความหนาของชั้นการเสีรูปร่างของแกรไฟต์เพิ่มขึ้น ทั้งนี้อาจเป็นผลมาจากการที่ชิ้นงานหนานำขึ้นส่งผลให้การเย็นตัวของชิ้นงานช้าลงตามความหนาที่เพิ่มทำให้เกิดชั้นการเสีรูปร่างของแกรไฟต์และพบเป็นลักษณะของแกรไฟต์แบบตัวหนอนและแบบแผ่นบริเวณผิวของงานหล่อ แสดงดังรูปที่ 4.1 และ 4.2 ทั้งนี้ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของชิ้นงานและชั้นการเสีรูปร่างของแกรไฟต์แสดงดังรูปที่ 4.3

ตารางที่ 4.4 ความหนาของชั้นการเสีรูปร่างของแกรไฟต์ในแต่ละความหนาของชิ้นงาน

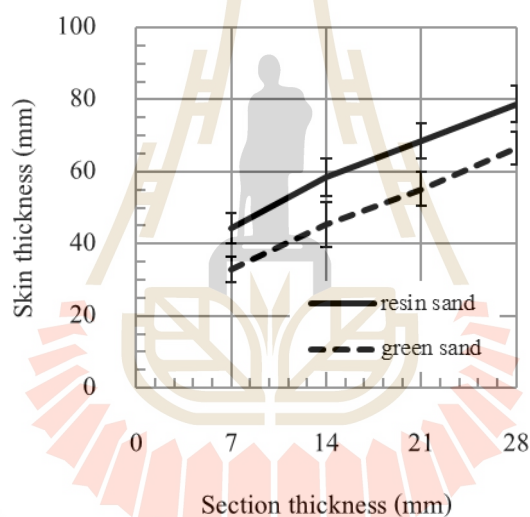
| Thickness | 7mm | | 14mm | | 21mm | | 28mm | |
|-----------|--------|------------|--------|------------|--------|------------|--------|------------|
| | AM | Green sand | AM | Green sand | AM | Green sand | AM | Green sand |
| 0.01 | 56.94 | 35.48 | 89.91 | 52.94 | 97.96 | 65.95 | 98.26 | 78.10 |
| 0.015 | 45.76 | 33.07 | 64.13 | 49.20 | 68.79 | 62.69 | 82.34 | 68.65 |
| 0.02 | 35.26 | 26.42 | 41.27 | 33.41 | 46.32 | 38.67 | 50.28 | 41.34 |
| 0.025 | 40.60 | 32.03 | 47.93 | 41.25 | 62.49 | 52.92 | 73.35 | 63.00 |
| 0.03 | 35.96 | 31.59 | 37.45 | 37.06 | 49.2 | 41.60 | 65.76 | 55.65 |
| Average | 42.904 | 31.718 | 56.138 | 42.772 | 64.952 | 52.366 | 73.998 | 61.348 |



รูปที่ 4.1 ชั้นความหนาของแกรไฟต์แผ่นที่ความหนา 7 มิลลิเมตร (ซ้าย) และ 28 มิลลิเมตร (ขวา) ที่ 0.025%Mg ในแบบหล่อเรซิน



รูปที่ 4.2 ชั้นความหนาของแกรไฟต์แผ่นที่ความหนา 7 มิลลิเมตร (ซ้าย) และ 28 มิลลิเมตร (ขวา) ที่ 0.025%Mg ในแบบหล่อทราย

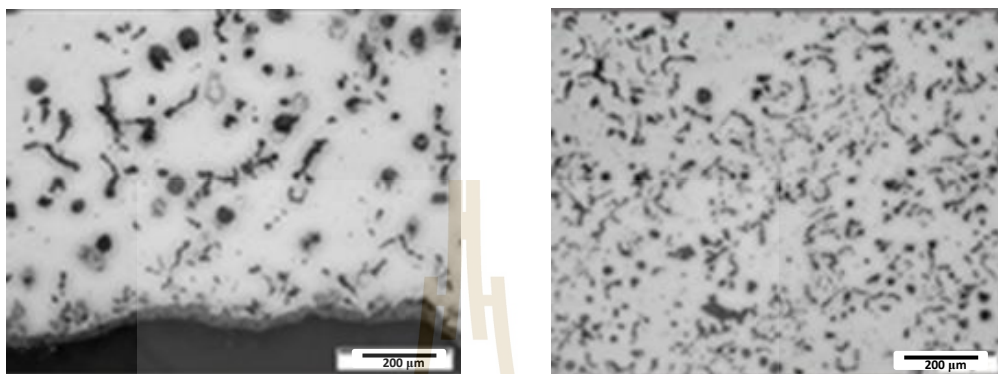


รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของชิ้นงานและความหนาของชั้นการเสีรูปร่างแกรไฟต์

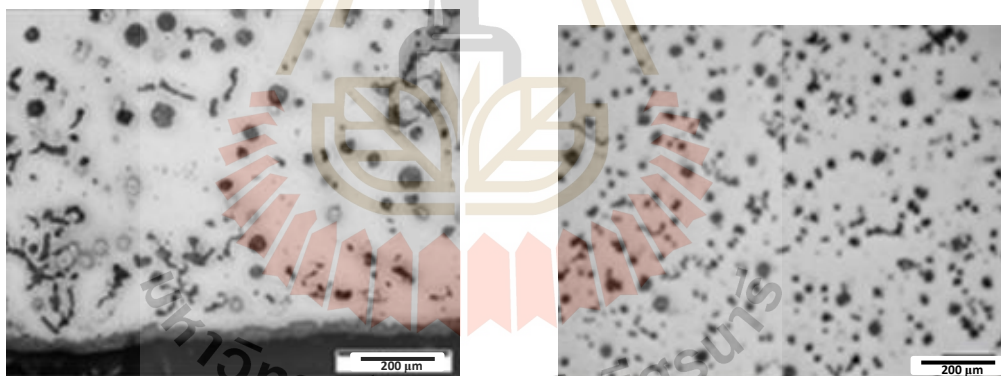
4.2.2 อิทธิพลของแมกนีเซียมคงเหลือต่อการเสีรูปร่างของแกรไฟต์บริเวณผิวงานหล่อ

จากการทดลองสังเกตได้ว่า โครงสร้างจุลภาคที่ผิวของชิ้นงานมีความสัมพันธ์กับรูปร่างของแกรไฟต์ที่บริเวณใจกลาง กล่าวคือ หากบริเวณใจกลางของชิ้นมีรูปร่างของแกรไฟต์กลมมากหรือมีปริมาณแมกนีเซียมสูงจะทำให้ชั้นการเสีรูปร่างของแกรไฟต์บางมาก ในทางกลับกัน หากใจกลางชิ้นงานมีรูปร่างแกรไฟต์ที่รูปร่างกลมน้อย (เป็นตัวหอนหรือเป็นแผ่น) จะทำให้ชั้นการเสีรูปร่างของแกรไฟต์หนา ฉะนั้น จึงสามารถสรุปได้ว่าความหนาของชั้นการเสีรูปร่างของแกรไฟต์นั้นแปรผกผันกับความกลมของแกรไฟต์หรือปริมาณแมกนีเซียมและยังสังเกตได้ว่าใน

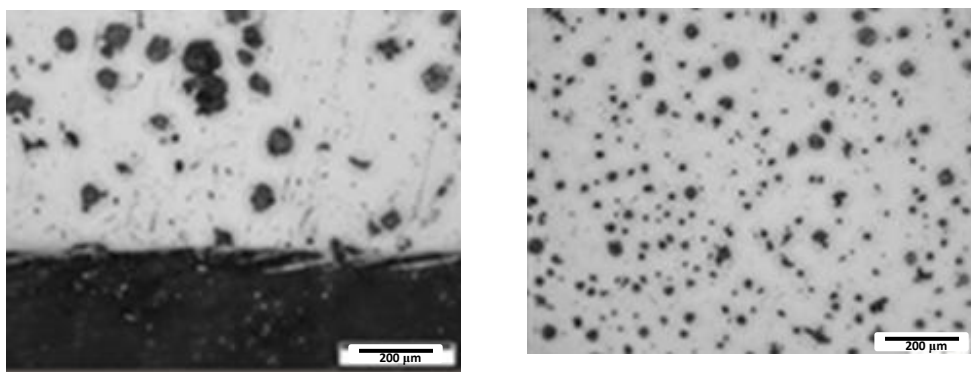
แบบหล่อที่ทำจากเรซินนั้นมีความหนาของชั้นการเสีรูปร่างของแกรไฟต์มากกว่าแบบหล่อทราย
 ชื้น โดยภาพ โครงสร้างจุลภาคของปริมาณแมกนีเซียมที่แตกต่างกันในแบบหล่อทรายเรซินและ
 แบบหล่อทรายชื้นแสดงในรูปที่ 4.4 ถึง 4.13



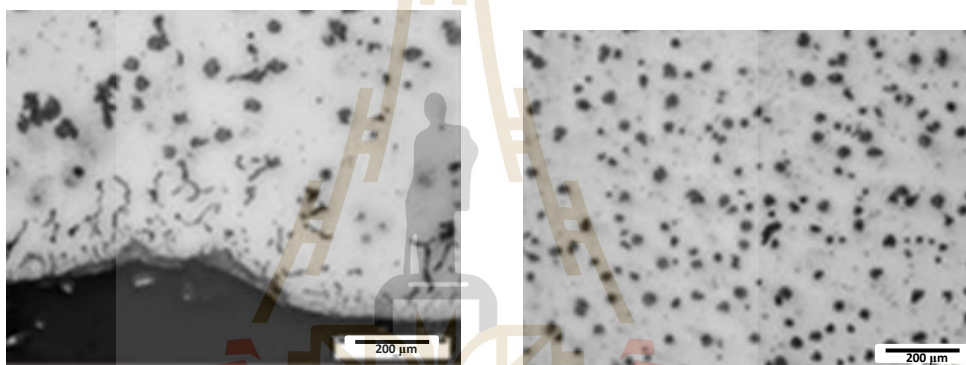
รูปที่ 4.4 ปริมาณแมกนีเซียม 0.010 % ที่ความหนา ที่ 28 มิลลิเมตร ในแบบหล่อทรายเรซิน



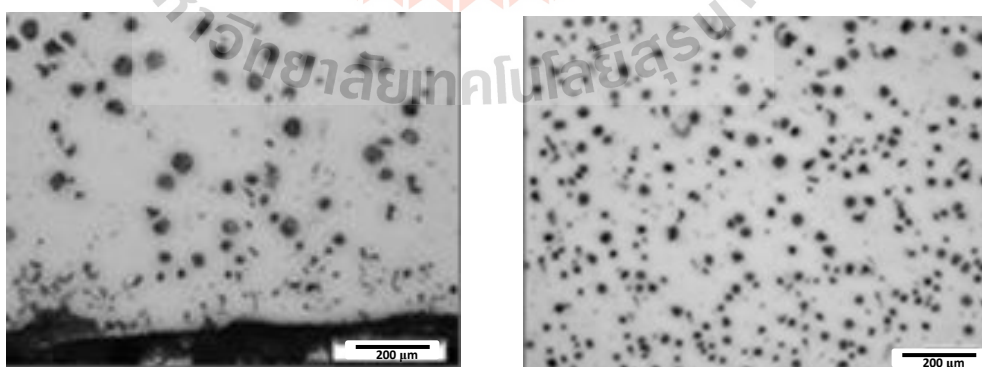
รูปที่ 4.5 ปริมาณแมกนีเซียม 0.015 % ที่ความหนา ที่ 28 มิลลิเมตรในแบบหล่อทรายเรซิน



รูปที่ 4.6 ปริมาณแมกนีเซียม 0.020 % ที่ความหนา ที่ 28 มิลลิเมตร ในแบบหล่อทรายเรซิน

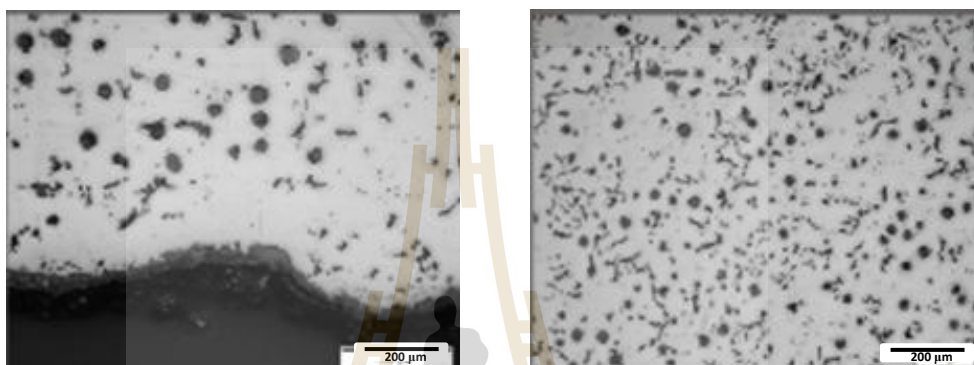


รูปที่ 4.7 ปริมาณแมกนีเซียม 0.025 % ที่ความหนา ที่ 28 มิลลิเมตร ในแบบหล่อทรายเรซิน

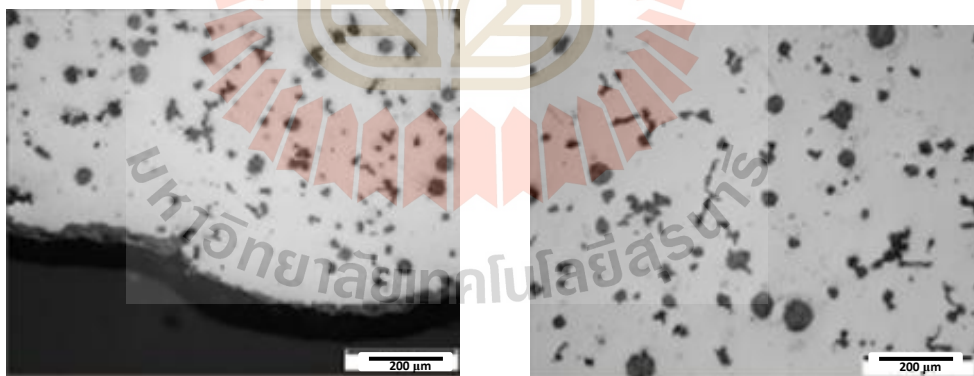


รูปที่ 4.8 ปริมาณแมกนีเซียม 0.030 % ที่ความหนา ที่ 28 มิลลิเมตร ในแบบหล่อทรายเรซิน

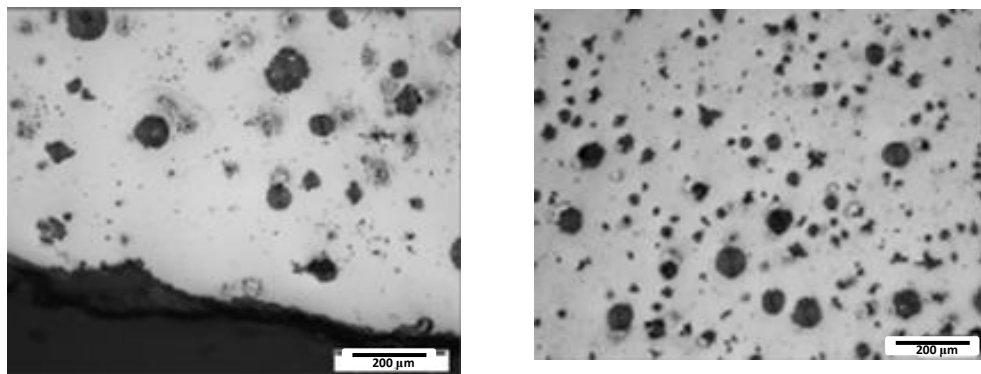
จากผลการทดลองในตารางที่ 4.4 และจากรูปโครงสร้างจุลภาคของเหล็กหล่อในแบบหล่อทรายเรซินที่ความหนา 28 มิลลิเมตรและมีการเปลี่ยนแปลงปริมาณแมกนีเซียม นั้น จะเห็นได้ว่ายิ่งเปอร์เซ็นต์แมกนีเพิ่มขึ้นชั้นความหนาของแกรไฟต์จะลดน้อยลงตามลำดับ ทั้งนี้เป็นผลมาจากการที่น้ำเหล็กที่มีแมกนีเซียมมากขึ้นนั้นเมื่อเกิดการสูญเสียแมกนีเซียมเนื่องจากปฏิกิริยาออกซิเดชันที่ผิวจะทำให้บริเวณที่มีแมกนีเซียมต่ำกว่าปกติแคบลงจึงทำให้ชั้นการเสีรูปร่างของแกรไฟต์บางลง



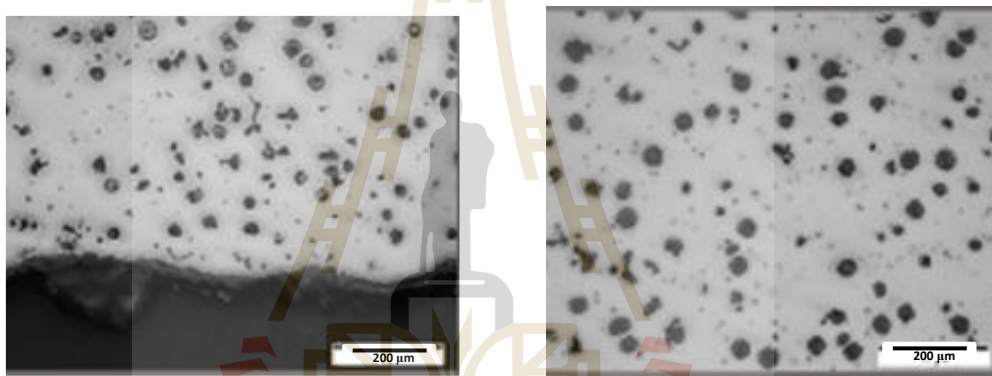
รูปที่ 4.9 ปริมาณแมกนีเซียม 0.010 % ที่ความหนา ที่ 28 มิลลิเมตรในแบบหล่อทรายขึ้น



รูปที่ 4.10 ปริมาณแมกนีเซียม 0.015 % ที่ความหนา ที่ 28 มิลลิเมตร ในแบบหล่อทรายขึ้น



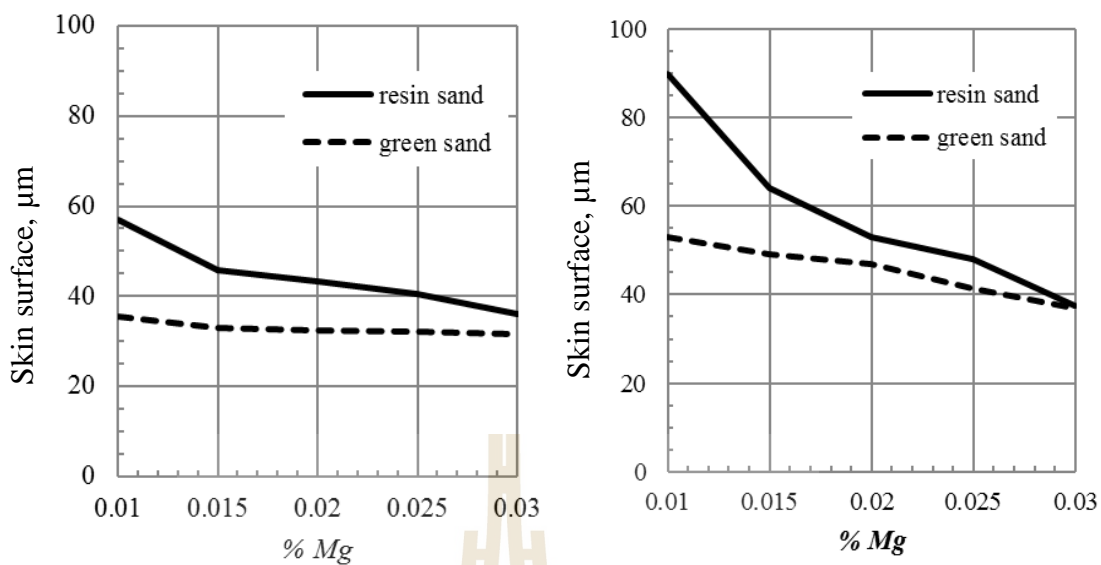
รูปที่ 4.11 ปริมาณแมกนีเซียม 0.020 % ที่ความหนา ที่ 28 มิลลิเมตร ในแบบหล่อทรายขึ้น



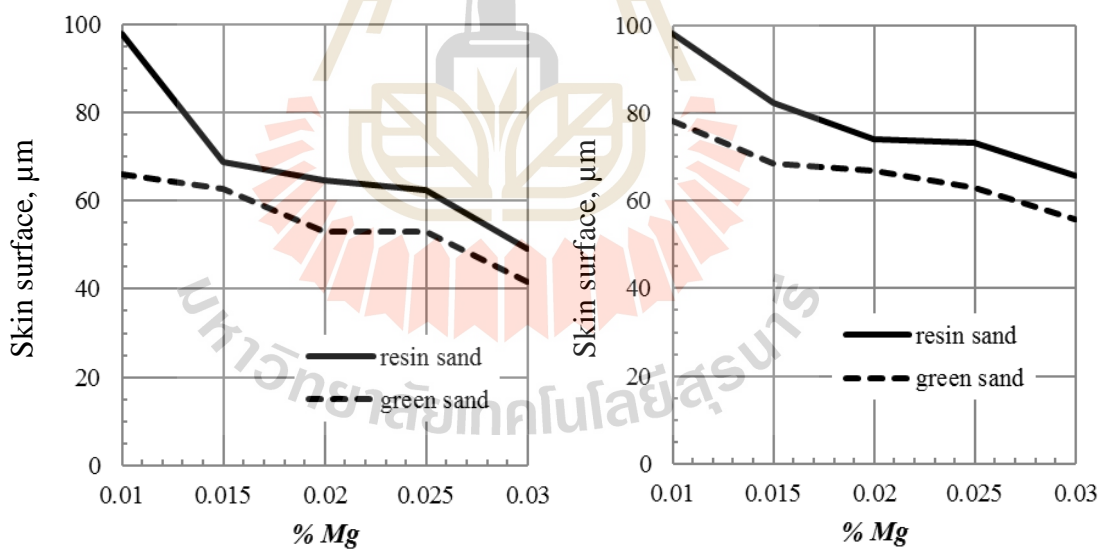
รูปที่ 4.12 ปริมาณแมกนีเซียม 0.025 % ที่ความหนา ที่ 28 มิลลิเมตร ในแบบหล่อทรายขึ้น

จากรูปจะเห็นได้อย่างชัดเจนว่าแบบหล่อทรายขึ้นจะมีชั้นการเสีรูปร่างของแกรไฟต์อยู่น้อยมาก (ในขึ้นที่มีแมกนีเซียมอยู่มากแทบเกิดขึ้นเลย) ซึ่งเป็นผลมาจากแบบหล่อทรายเรซินนั้นมีส่วนผสมของ ซัลเฟอร์อยู่ทำให้แมกนีเซียมในขึ้นงานไปจับตัวกับซัลเฟอร์เป็นแมกนีเซียมซัลไฟด์ (Magnesium sulphide, MgS) ทำให้อัตราการสูญเสียแมกนีเซียมในขึ้นงานมีมากขึ้นไปจากเดิมจึงส่งผลให้แกรไฟต์แผ่นที่ผิวมีความหนากว่ามาก

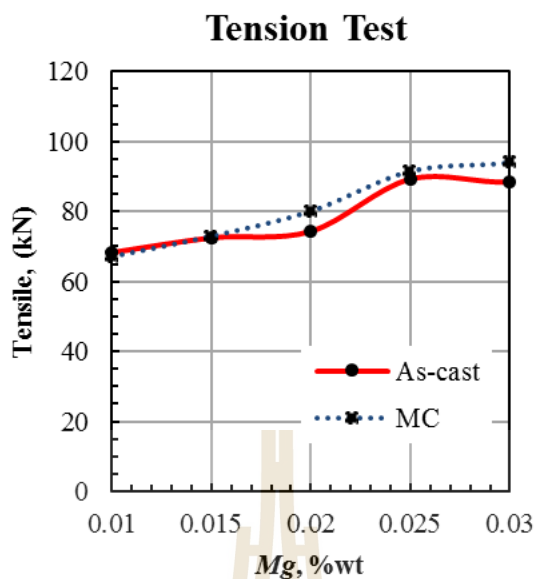
ทั้งนี้ความสัมพันธ์ระหว่างการเกิดชั้นการเสีรูปร่างของแกรไฟต์และปริมาณแมกนีเซียมที่ความหนา 7 14 21 และ 28 มิลลิเมตร แสดงได้ในรูปที่ 4.13 และ 3.14 และความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณแมกนีเซียมต่อความต้านทานแรงดึงแสดงได้ดังรูปที่ 4.15



รูปที่ 4.13 ชั้นความหนาของชั้นการเสีรูปร่างของแกรไฟต์ที่ขึ้นงานหนา 7 มิลลิเมตร (ซ้าย) และ 14 มิลลิเมตร (ขวา)



รูปที่ 4.14 ชั้นความหนาของชั้นการเสีรูปร่างของแกรไฟต์ที่ขึ้นงานหนา 21 มิลลิเมตร (ซ้าย) และ 28 มิลลิเมตร (ขวา)



รูปที่ 4.15 ความต้านทานแรงดึงต่อปริมาณแมกนีเซียม

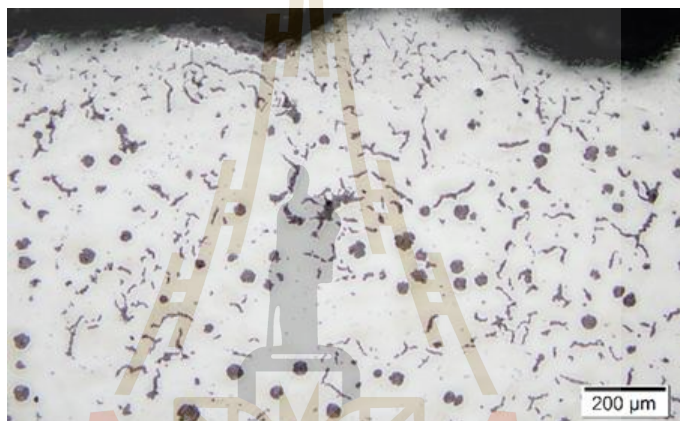
จากการทดลองโดยหล่อเหล็ก โดยใช้แบบหล่อทรายเรซินที่มีปริมาณแมกนีเซียมต่างกัน 2 ชุดแล้วนำไปทดสอบความต้านทานแรงดึง ชุดแรกเป็นแบบโครงสร้างหลังการหล่อ (As-cast) ซึ่งที่ผิวยังพบความหนาของชั้นการเสีรูปร่างของแกรไฟต์ที่ขึ้นอยู่กับปริมาณแมกนีเซียมเหลือค้าง และอีกชุดนำไปกลึงผิวออกซึ่งปราศจากชั้นการเสีรูปร่างของแกรไฟต์พบว่าความต้านทานแรงดึงของชุดที่กลึงผิวออกมีค่ามากกว่าและยังมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณของแมกนีเซียมในทั้ง 2 กรณีด้วย

4.3 ผลการศึกษาอิทธิพลสารเคลือบแบบและอัตราการเย็นตัวต่อการเสีรูปร่างของแกรไฟต์

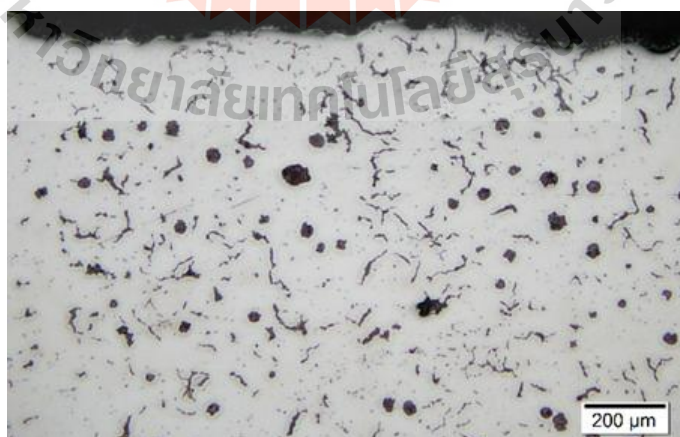
4.3.1 ผลของสารเคลือบแบบต่อการเกิดการเสีรูปร่างของแกรไฟต์

4.3.1.1 ไล่แบบโซเดียมซิลิเกตโดยใช้ไล่แบบ ขนาด 1.5 นิ้ว จำนวน 4 ชั้นและเคลือบสารเคลือบดังนี้คือ ชั้นที่ 1 ไม่เคลือบสาร ชั้นที่ 2 เคลือบฟอสโฟซิลิเกต ชั้นที่ 3 เคลือบ มัลไลต์ และชั้นที่ 4 เคลือบเซอร์คอนเบสมีอุณหภูมินำโลหะขณะเทลงแบบหล่อ 1,379 °C พบว่าที่ผิวงานหล่อบริเวณที่ติดกับไล่แบบ ไม่เกิดชั้นการเสีรูปร่างของแกรไฟต์ ดังแสดงในรูปที่ 4.16 สาเหตุที่ไม่เกิดชั้นการเสีรูปร่างของแกรไฟต์ มีความเป็นไปได้สองสาเหตุหลักดังนี้ สาเหตุแรกคืออุณหภูมิเต้าทำให้น้ำโลหะบริเวณนั้นแข็งตัวเร็ว ซัลเฟอร์และแมกนีเซียมจึงทำปฏิกิริยาไม่ทัน ส่งผลให้

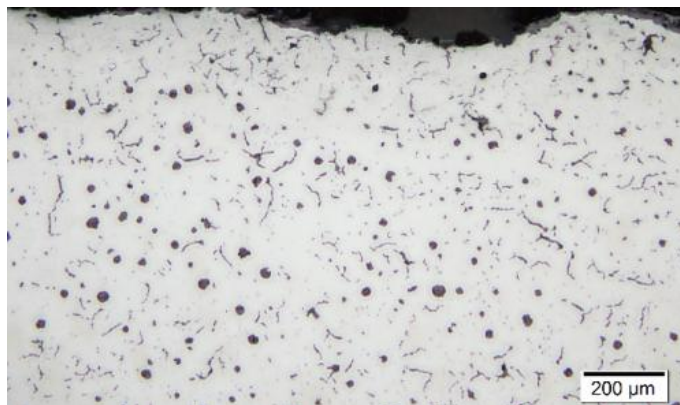
ไม่เกิดการสูญเสียแมกนีเซียมที่ผิวงาน ส่วนสาเหตุที่สองอาจมาจากไส้แบบโซเดียมซิลิเกตมีปริมาณซัลเฟอร์ที่ต่ำกว่าแบบทรายขึ้นปกติ ทำให้ไม่เกิดการทำปฏิกิริยาหรืออาจเกิดน้อยมากจนแทบจะไม่เกิดการสูญเสียแมกนีเซียม ซึ่งในการทดลองถัดไปนั้นจะทำการพิสูจน์โดยการทดลองเติมเฟอร์โรซัลเฟอร์ลงในไส้แบบ ส่วนอุณหภูมิในการเท่นั้นสามารถเพิ่มได้เล็กน้อยแต่ไม่เกิน 1,400 °C เนื่องจากข้อจำกัดของวัสดุที่ใช้ทำเตา ทั้งนี้จากการสังเกตโครงสร้างจุลภาคที่ได้ภายหลังจากการหล่อ โครงสร้างจุลภาคส่วนใหญ่ประกอบด้วยแกรไฟต์ตัวหอน และมีแกรไฟต์กลมกระจายอยู่ทั่วไป



รูปที่ 4.16 โครงสร้างจุลภาคเหล็กหล่อแกรไฟต์ตัวหอนของไส้แบบ โซเดียมซิลิเกตไม่เคลือบสาร



รูปที่ 4.17 โครงสร้างจุลภาคเหล็กหล่อแกรไฟต์ตัวหอนของไส้แบบ โซเดียมซิลิเกตที่เคลือบฟิลโลซิลิเกต



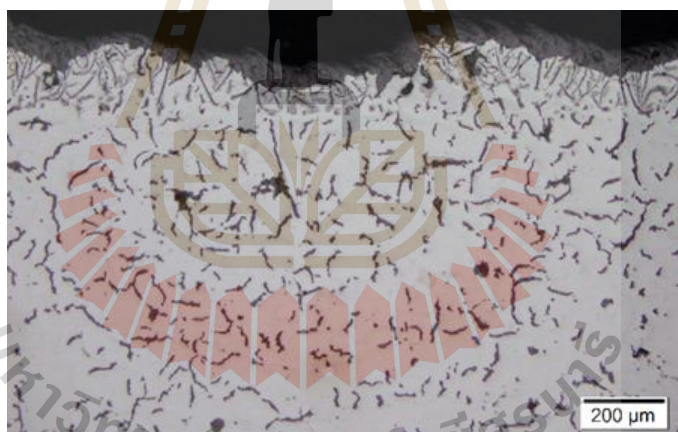
รูปที่ 4.18 โครงสร้างจุลภาคเหล็กหล่อแกรไฟต์ตัวนอน ของไส้แบบ โพลีเอทิลีนเทเรฟทาเลตที่เคลือบมัลไลต์



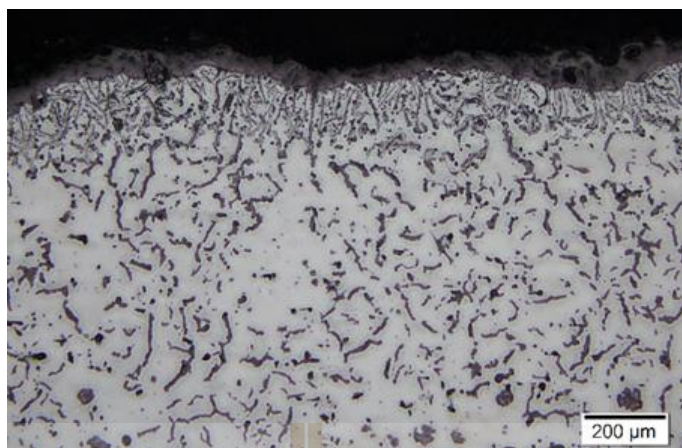
รูปที่ 4.19 โครงสร้างจุลภาคเหล็กหล่อแกรไฟต์ตัวนอน ของไส้แบบ โพลีเอทิลีนเทเรฟทาเลตที่เคลือบเซอรัคอนเบส

4.3.1.2 ไส้แบบ AM โดยผลิตไส้แบบ AM จากเครื่องพิมพ์แบบหล่อ 3 มิติที่มีขนาดไส้แบบ 1.5 นิ้ว จำนวน 4 ชั้น ส่วนการเคลือบแตกต่างกันดัง คือ ชั้นที่ 1 ไม่เคลือบสาร ชั้นที่ 2 เคลือบฟิล โลซิลิเกต ชั้นที่ 3 เคลือบมัลไลต์และ ชั้นที่ 4 เคลือบเซอรัคอนเบส มีอุณหภูมิเทโหะหลอมเหลวลงแบบหล่อที่ 1,489 °C พบว่าที่ผิวงานหล่อบริเวณที่ติดกับไส้แบบเกิดการเสีรูปร่างของแกรไฟต์ดังแสดงในรูปที่ 4.20 โดยการเคลือบเซอรัคอนเบสมิแนวน้ำมช่วยลดการเกิดชั้นการเสีรูปร่างของแกรไฟต์และเมื่อนำไปเทียบกับไส้แบบที่ไม่ได้ทำการเคลือบไส้สารเคลือบไส้แบบ จะเห็นได้ว่าสามารถลดชั้นการเสีรูปร่างของแกรไฟต์ได้เกือบครึ่งหนึ่งของไส้แบบที่ไม่ได้ทำการ

เคลือบสารเคลือบ แต่ในทางกลับกันไส้แบบที่เคลือบฟิลโลซิลิเกต และ มัลไลต์ไม่ได้ช่วยลดการเกิดชั้นการเสีรูปร่างของแกรไฟต์แต่กลับมีชั้นความหนาของการเสีรูปร่างของแกรไฟต์เพิ่มขึ้น และเมื่อนำไปวัดชั้นความหนาของการเสีรูปร่างของแกรไฟต์ของไส้แบบที่ทำการเคลือบด้วยสารเคลือบแต่ละชนิด คือชั้นที่ 1 ไม่เคลือบสาร ชั้นที่ 2 เคลือบฟิลโลซิลิเกต ชั้นที่ 3 เคลือบมัลไลต์และ ชั้นที่ 4 เคลือบ เซอร์คอนเบสจะได้ความหนาเท่ากับ 0.108 0.141 0.142 และ 0.056 มิลลิเมตร ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.24 เป็นกราฟเปรียบเทียบชั้นความการเสีรูปร่างของแกรไฟต์กับสารเคลือบแต่ละชนิด เนื่องจากอุณหภูมิที่สูงทำให้ที่ผิวงานหล่อบริเวณที่ติดกลับไส้แบบเกิดการสูญเสียแมกนีเซียมมาก แมกนีเซียมมีเวลานานพอที่จะทำปฏิกิริยากับออกซิเจนและซัลเฟอร์ และที่สารเคลือบแต่ละชนิดมีชั้นความหนาของการเสีรูปร่างของแกรไฟต์แตกต่างกัน เพราะสารเคลือบเซอร์คอนเบสมีความสามารถในการนำความร้อนสูงกว่าฟิลโลซิลิเกต และมัลไลต์ทำให้น้ำโลหะบริเวณนั้นแข็งตัวเร็วช่วยลดการเกิดชั้นการเสีรูปร่างของแกรไฟต์



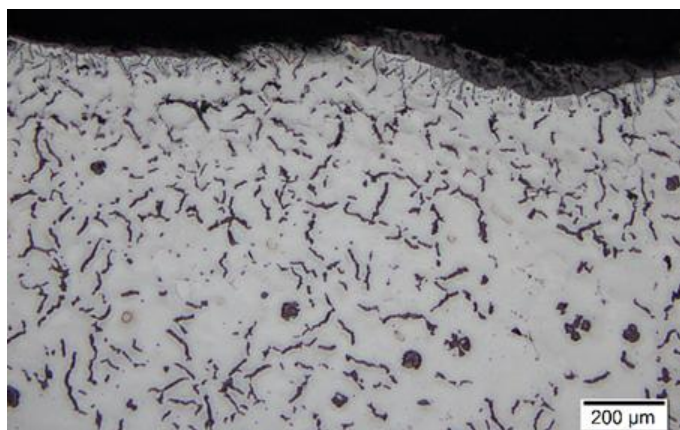
รูปที่ 4.20 โครงสร้างจุลภาคเหล็กหล่อแกรไฟต์ตัวหอน และชั้นการเสีรูปร่างของแกรไฟต์ของไส้แบบ AM ที่ไม่เคลือบสาร



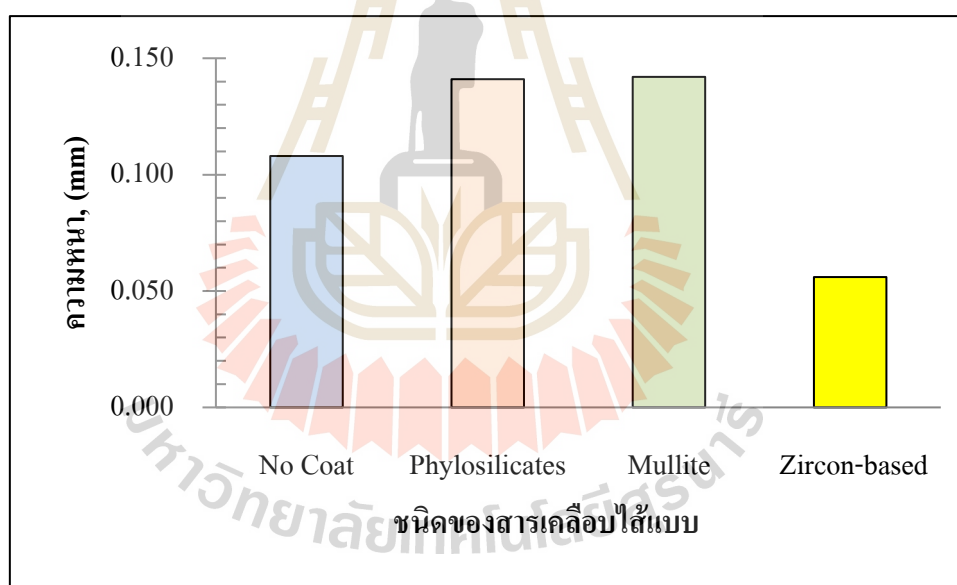
รูปที่ 4.21 โครงสร้างจุลภาคเหล็กหล่อแกรไฟต์ตัวนอน และชั้นการเสีรูปร่างของแกรไฟต์ของ
ไส้แบบ AM ที่เคลือบฟิลโลซิลิเกต



รูปที่ 4.22 โครงสร้างจุลภาคเหล็กหล่อแกรไฟต์ตัวนอน และชั้นการเสีรูปร่างของแกรไฟต์ของ
ไส้แบบ AM ที่เคลือบมัลไลต์



รูปที่ 4.23 โครงสร้างจุลภาคเหล็กหล่อแกรไฟต์ตัวนอน และชั้นการเสีรูปร่างของแกรไฟต์ของไส้แบบAM ที่เคลือบเซอร์คอนเบส



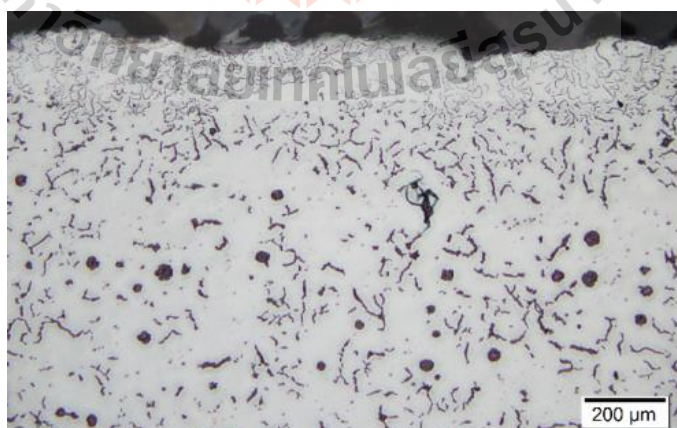
รูปที่ 4.24 กราฟเปรียบเทียบชั้นความหนาการเสีรูปร่างของแกรไฟต์กับสารเคลือบแต่ละชนิด

4.3.2 ผลของอัตราการเย็นตัวต่อการเกิดการเสีรูปร่างของแกรไฟต์

4.3.2.1 อัตราการเย็นตัวในไส้แบบโซเดียมซัลไฟด์ โดยมีการผลิตไส้แบบโซเดียมซัลไฟด์ขนาด 0.5 1.0 1.5 และ 2.0 นิ้ว ไม่เคลือบสารเคลือบใด ๆ มีอุณหภูมิเตโลหะหลอมเหลวลงแบบที่ 1,544 °C พบว่าที่บริเวณผิวงานหล่อจุดที่ติดกับไส้แบบเกิดการเสีรูปร่างของแกรไฟต์ดังแสดงในรูปที่ 4.25 โดยเมื่อมีขนาดไส้แบบใหญ่ขึ้นจะพบว่าชั้นการเสีรูปร่างของแกรไฟต์มีแนวโน้มลดลง

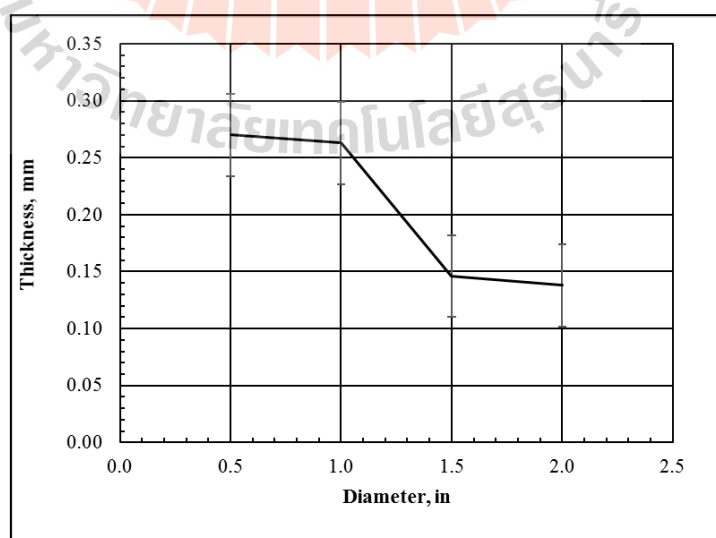


รูปที่ 4.25 โครงสร้างจุลภาคเหล็กหล่อแกรไฟต์ตัวหอน และชั้นการเสีรูปร่างของแกรไฟต์ของไส้แบบโซเดียมซัลไฟด์ที่ขนาดไส้แบบ 0.5 นิ้ว

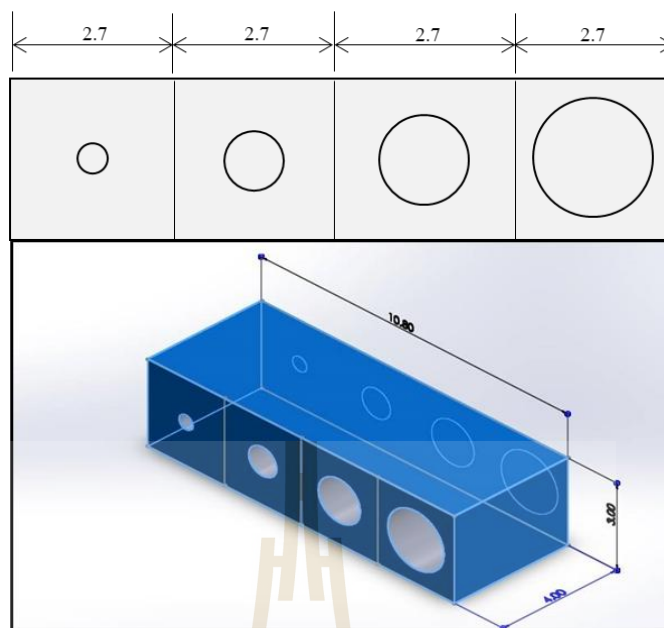


รูปที่ 4.26 โครงสร้างจุลภาคเหล็กหล่อแกรไฟต์ตัวหอน และชั้นการเสีรูปร่างของแกรไฟต์ของไส้แบบโซเดียมซัลไฟด์ที่ขนาดไส้แบบ 2.0 นิ้ว

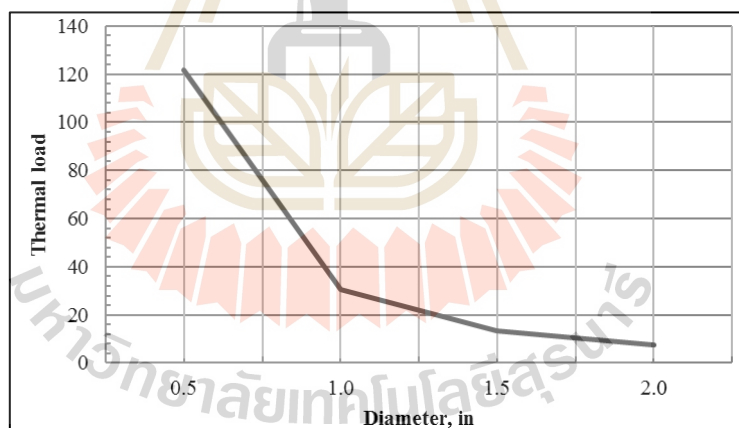
เมื่อนำไปวัดชั้นความหนาของการเสีรูปร่างของแกรไฟต์ของไส้แบบขนาดต่างกัน คือ 0.5 1.0 1.5 และ 2.0 นิ้ว จะมีชั้นความหนาเท่ากับ 0.270 0.263 0.146 และ 0.138 มิลลิเมตร ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.27 ซึ่งแสดงชั้นความหนากับขนาดไส้แบบ สาเหตุที่ทำให้เกิดชั้นการเสีรูปร่างของแกรไฟต์เนื่องจากมีอุณหภูมิที่สูงมาก ทำให้ที่ผิวงานหล่อบริเวณที่ติดกับไส้แบบเกิดการสูญเสียแมกนีเซียมมาก และการที่ชั้นการเสีรูปร่างของแกรไฟต์มีแนวโน้มลดลงเรื่อย ๆ ตามขนาดของไส้แบบที่มีขนาดใหญ่ขึ้นนั้นเนื่องจาก ไส้แบบที่มีขนาดใหญ่จะมีเวลาในการแข็งตัวที่เร็ว กว่าไส้แบบขนาดเล็กจึงทำให้เกิดการสูญเสียแมกนีเซียมที่ผิวงานหล่อน้อย ชั้นความหนาของการเสีรูปร่างของแกรไฟต์มีแนวโน้มลดลง และได้คำนวณค่าภาระทางความร้อน (Thermal load) ของไส้แบบที่มีขนาดแตกต่างกัน โดยที่ค่าภาระทางความร้อนนี้ จะเป็นการวัดปริมาณความร้อนที่ไส้แบบได้รับ เป็นการเปรียบเทียบปริมาณน้ำโลหะกับขนาดไส้แบบ ซึ่งหาได้จากอัตราส่วนระหว่างน้ำหนักของโลหะกับน้ำหนักของทราย โดยในการวัดจะทำการการแบ่งชิ้นงานให้มีขนาดเท่ากัน ดังแสดงในรูปที่ 4.28 พบว่าบริเวณที่มีค่าภาระทางความร้อนมากหรือบริเวณที่มีขนาดไส้แบบเล็กจะส่งผลให้ไส้แบบบริเวณนั้นมีอุณหภูมิสูงน้ำโลหะแข็งตัวช้า เวลาในการเกิดปฏิกิริยาการสูญเสียแมกนีเซียมจะนานกว่าบริเวณที่มีภาระทางความร้อนต่ำ หรือบริเวณที่มีไส้แบบขนาดใหญ่ขึ้น ส่งผลให้ชั้นการเสีรูปร่างของแกรไฟต์เพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.29 ซึ่งจะแสดงให้เห็นว่าเมื่อไส้แบบมีขนาดใหญ่ขึ้นค่าภาระทางความร้อน ก็มีแนวโน้มลดลงเรื่อย ๆ



รูปที่ 4.27 กราฟแสดงความหนาของชั้นการเสีรูปร่างของแกรไฟต์กับขนาดไส้แบบต่างกัน

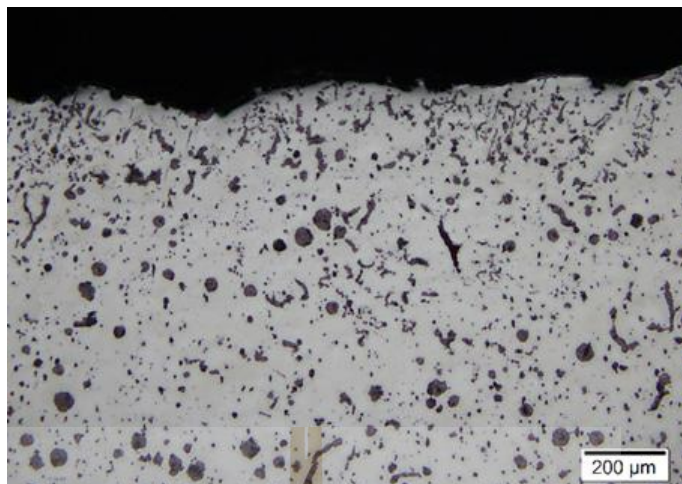


รูปที่ 4.28 ลักษณะการแบ่งชิ้นงานเพื่อนำไปคำนวณหาค่าภาระทางความร้อน



รูปที่ 4.29 ความสัมพันธ์ระหว่างภาระทางความร้อนกับไส้แบบที่ขนาดต่างกัน

4.3.2.1 อัตราการเย็นตัวในไส้แบบ AM แบบขนาด 0.5 1.0 1.5 และ 2.0 นิ้ว ไม่เคลือบสารเคลือบมีอุณหภูมิ 1,423 องศาเซลเซียส พบว่าไม่เกิดชั้นการเสีรูปร่างของแกรไฟต์ดังแสดงในรูปที่ 4.30 ซึ่งสาเหตุที่ไม่เกิดชั้นการเสีรูปร่างของแกรไฟต์เนื่องจากมีอุณหภูมิที่ไม่สูงมากถึงแม้จะมีเวลาในการแข็งตัวที่แตกต่างกันทำให้น้ำโลหะแข็งตัวเร็วไม่เกิดการสูญเสียแมกนีเซียมที่ผิวงานหล่อบริเวณที่ติดกับไส้แบบช่วยลดการเกิดชั้นการเสีรูปร่างของแกรไฟต์



รูปที่ 4.30 โครงสร้างจุลภาคเหล็กหล่อแกรไฟต์ตัวนอน ของไส้แบบ AM ที่ขนาดไส้แบบ 0.5 นิ้ว



รูปที่ 4.31 โครงสร้างจุลภาคเหล็กหล่อแกรไฟต์ตัวนอน ของไส้แบบ AM ที่ขนาดไส้แบบ 2.0 นิ้ว

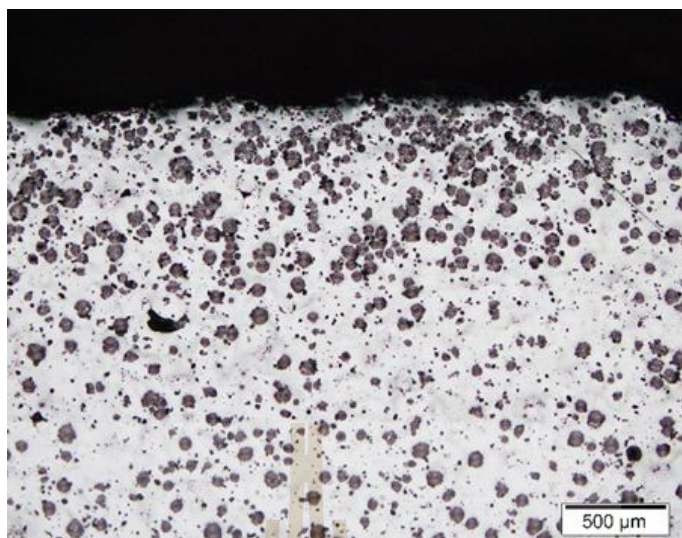
จากผลการทดลองพบว่า ที่อุณหภูมิสูงขึ้นซึ่งความหนาของการเสียรูปร่างของแกรไฟต์มีแนวเพิ่มขึ้นสูงขึ้นด้วยการทำให้น้ำโลหะแข็งตัวช้า เกิดการสูญเสียแมกนีเซียมที่ผิวงานหล่อบริเวณที่ติดกับไส้แบบ แมกนีเซียมมีเวลานานพอในการทำปฏิกิริยากับออกซิเจนและกำมะถัน ซึ่งไส้แบบที่มีขนาดใหญ่ซึ่งความหนาของการเสียรูปร่างของแกรไฟต์มีแนวโน้มลดลง เพราะว่าไส้แบบขนาดใหญ่มีการถ่ายเทความร้อนที่ดีกว่าทำให้เวลาในการแข็งตัวเร็วกว่าไส้แบบที่มีขนาดเล็ก เนื่องจากสูญเสียแมกนีเซียมที่ผิวงานหล่อน้อยกว่า จึงส่งผลให้ซึ่งความหนาของการเสียรูปร่างของแกรไฟต์

ที่แตกต่างกัน จากผลการทดลองพบว่า การเคลือบไส้แบบด้วยเซอรัคอนเบส ช่วยลดชั้นความหนาของชั้นการเสีรูปร่างของแกรไฟต์ได้ดีกว่าการเคลือบด้วยฟิลโลซิลิเกต และมัลไลต์ ซึ่งการเคลือบไส้แบบด้วยฟิลโลซิลิเกตและมัลไลต์นั้นจะไม่ช่วยลดชั้นความหนาของการเสีรูปร่างของแกรไฟต์แล้ว กลับมีแนวโน้มที่จะเพิ่มชั้นความหนาแทน ซึ่งสาเหตุที่ทำให้ชั้นความหนาของการเสีรูปร่างของแกรไฟต์ของสารเคลือบแต่ละชนิดต่างกัน เพราะสารเคลือบเซอรัคอนเบสมีความสามารถในการนำความร้อนดีกว่าฟิลโลซิลิเกต และมัลไลต์ ทำให้น้ำโลหะบริเวณนั้นแข็งเร็ว ลดการสูญเสียแมกนีเซียมที่ผิวงานหล่อ จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่า อุณหภูมิ สารเคลือบ และเวลาในการแข็งตัวของวัสดุมีอิทธิพลต่อการเกิดชั้นการเสีรูปร่างของแกรไฟต์ทั้งสิ้น

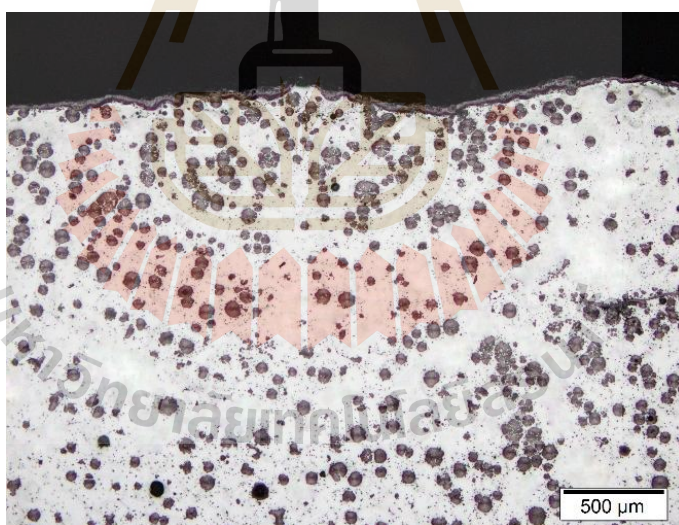
4.3.3 ผลของปริมาณเฟอร์โรซิลเฟอร์ไนต์ไส้แบบต่อการเกิดการเสีรูปร่างของแกรไฟต์

จากการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคที่บริเวณผิวชิ้นงานหล่อเหนียว พบว่าผงเฟอร์โรซิลเฟอร์ที่ผสมอยู่ในไส้แบบมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงสถานะของแกรไฟต์ในเหล็กหล่อเหนียว ทั้งนี้สาเหตุเกิดจากการสูญเสียแมกนีเซียมที่ผิว เนื่องจากแมกนีเซียมจะรวมตัวกับซิลเฟอร์ได้ดี จึงส่งผลให้บริเวณผิวของงานหล่อที่สัมผัสกับไส้แบบมีปริมาณแมกนีเซียมลดลง และไม่เพียงพอที่จะทำให้ลักษณะสถานะของแกรไฟต์ที่เกิดขึ้นนั้นมีทรงกลม ซึ่งทำให้สถานะของแกรไฟต์มีลักษณะเป็นแบบแผ่นที่บริเวณผิวชิ้นงานนั่นเอง

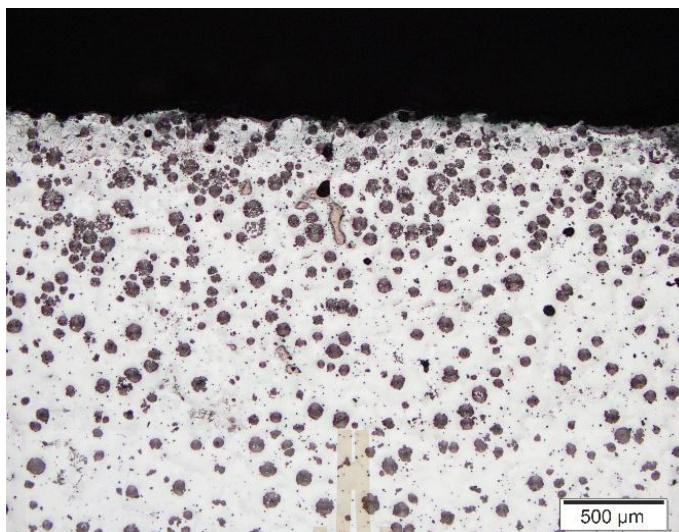
นอกจากนี้จากการทดลองทำให้ทราบว่าปริมาณผงเฟอร์โรซิลเฟอร์ที่ผสมในไส้แบบนั้น มีผลต่อชั้นความหนาของแกรไฟต์แบบแผ่นที่เกิดขึ้นที่ผิวงานหล่อ โดยในชิ้นงานที่สัมผัสกับไส้แบบที่มีเฟอร์โรซิลเฟอร์ในปริมาณน้อย ชั้นความหนาของแกรไฟต์แบบแผ่นก็จะน้อย และชั้นความหนาของแกรไฟต์แบบแผ่นจะมีความหนามากขึ้นตามปริมาณผงเฟอร์โรซิลเฟอร์ที่เติมในไส้แบบเพิ่มขึ้นตามลำดับ โดยภาพด้านล่างแสดงผลของปริมาณผงเฟอร์โรซิลเฟอร์ไนต์ไส้แบบต่อความหนาของชั้นแกรไฟต์แบบแผ่นที่เกิดขึ้นที่ผิวชิ้นงานของเหล็กหล่อเหนียวบริเวณที่สัมผัสกับไส้แบบ



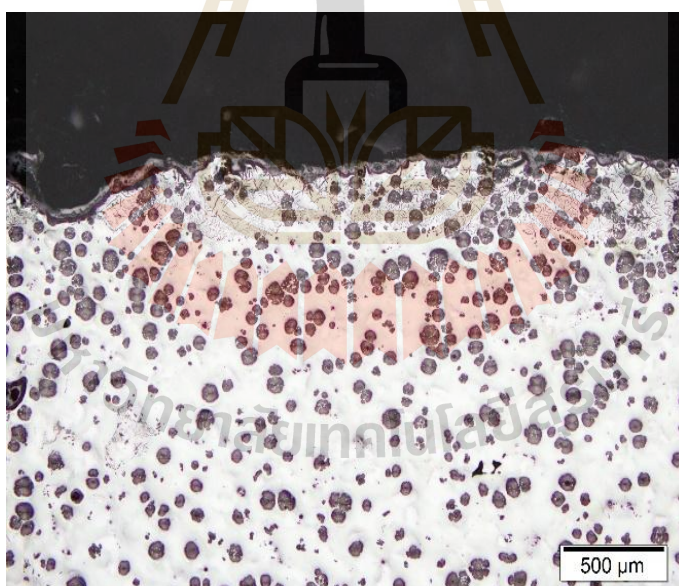
รูปที่ 4.32 โครงสร้างจุลภาคของเหล็กหล่อเหนียวที่ไม่มีเฟอร์โรซิลเฟอร์ไนส์แบบต่อชั้น ความหนาของแกรไฟต์แบบแผ่นที่เกิดขึ้น



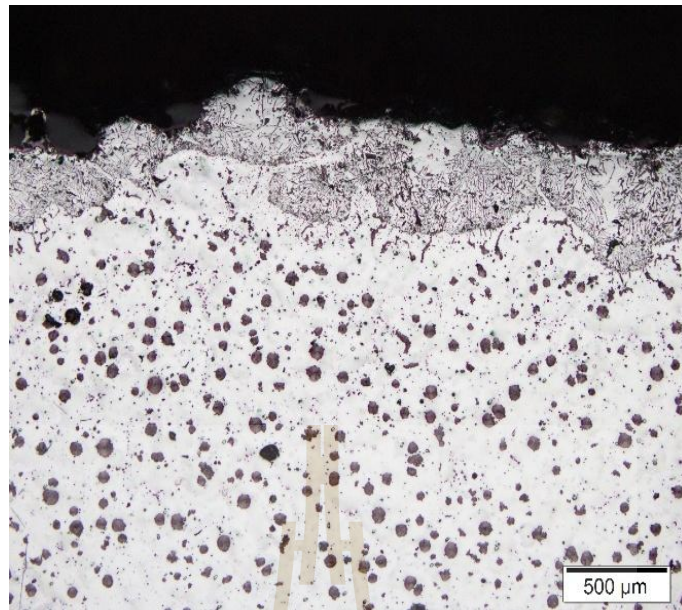
รูปที่ 4.33 โครงสร้างจุลภาคของเหล็กหล่อเหนียวที่มีปริมาณเฟอร์โรซิลเฟอร์ไนส์แบบ 0.5% โดยน้ำหนัก ต่อชั้นความหนาของแกรไฟต์แบบแผ่นที่เกิดขึ้น



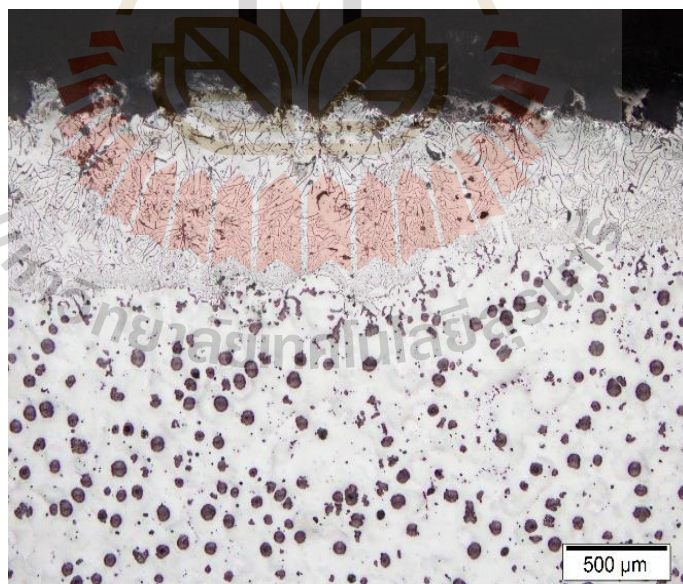
รูปที่ 4.34 โครงสร้างจุลภาคของเหล็กหล่อเหนียวที่มีปริมาณเฟอร์ไรต์เฟอร์ไรต์ในไส้แบบ 1.0% โดยน้ำหนัก ต่อชั้นความหนาของแกรไฟต์แบบแผ่นที่เกิดขึ้น



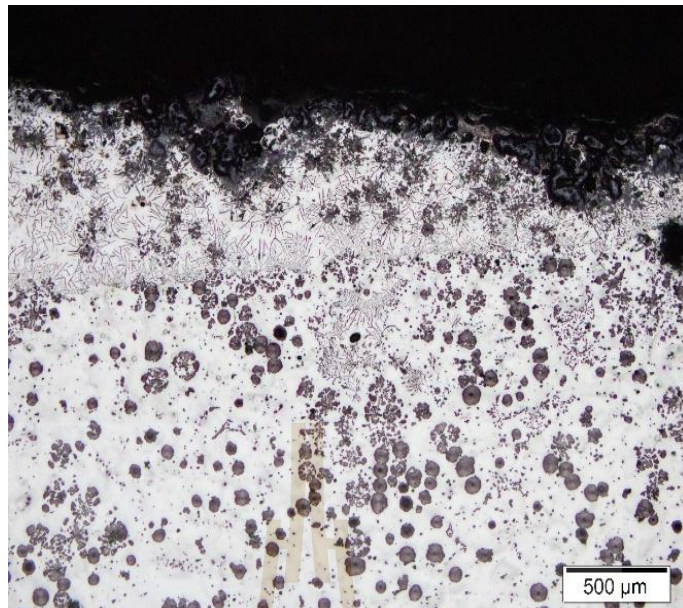
รูปที่ 4.35 โครงสร้างจุลภาคของเหล็กหล่อเหนียวที่มีปริมาณเฟอร์ไรต์เฟอร์ไรต์ในไส้แบบ 1.5% โดยน้ำหนัก ต่อชั้นความหนาของแกรไฟต์แบบแผ่นที่เกิดขึ้น



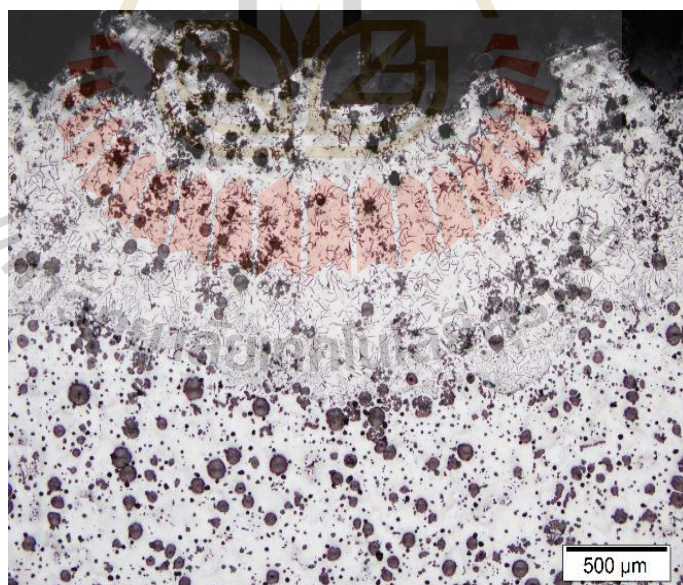
รูปที่ 4.36 โครงสร้างจุลภาคของเหล็กหล่อเหนียวที่มีปริมาณเฟอร์โรซิลเฟอร์ไนไลต์แบบ 2.0% โดยน้ำหนักต่อ ชั้นความหนาของเกรไฟต์แบบแผ่นที่เกิดขึ้น



รูปที่ 4.37 โครงสร้างจุลภาคของเหล็กหล่อเหนียวที่มีปริมาณเฟอร์โรซิลเฟอร์ไนไลต์แบบ 2.5% โดยน้ำหนักต่อชั้นความหนาของเกรไฟต์แบบแผ่นที่เกิดขึ้น



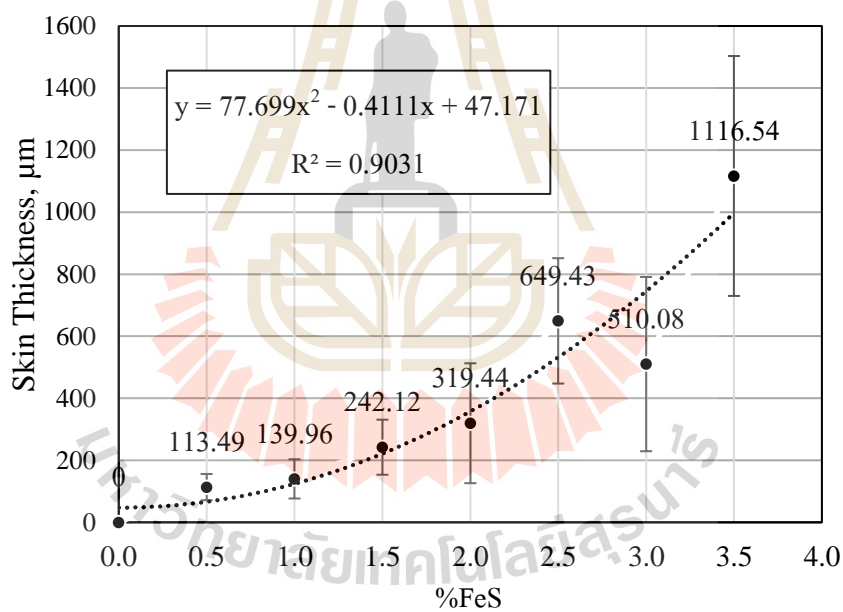
รูปที่ 4.38 โครงสร้างจุลภาคของเหล็กหล่อเหนียวที่มีปริมาณเฟอร์โรซิลเฟอร์ไนส์แบบ 3.0% โดยน้ำหนัก ต่อชั้นความหนาของแกรไฟต์แบบแผ่นที่เกิดขึ้น



รูปที่ 4.39 โครงสร้างจุลภาคของเหล็กหล่อเหนียวที่มีปริมาณเฟอร์โรซิลเฟอร์ไนส์แบบ 3.5% โดยน้ำหนัก ต่อชั้นความหนาของแกรไฟต์แบบแผ่นที่เกิดขึ้น

ตารางที่ 4.5 ความหนาของชั้นการเสีรูปร่างของแกรไฟต์

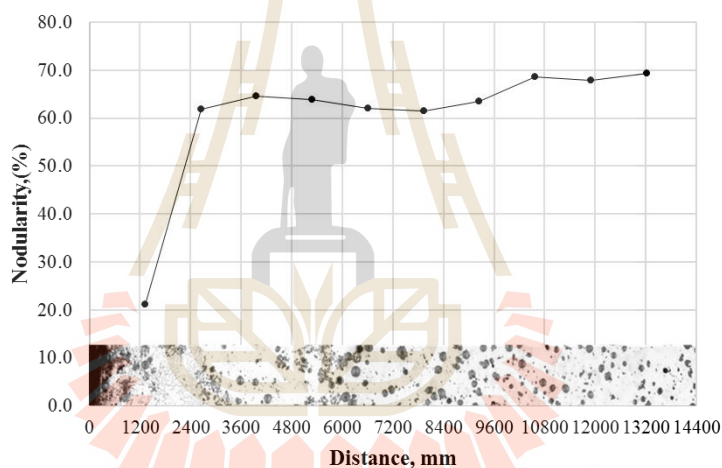
| %wt FeS ในไส้แบบ | ค่าความหนา (μm) | SD |
|------------------|------------------------------|--------|
| 0.0 | 0.00 | 0.00 |
| 0.5 | 113.49 | 42.28 |
| 1.0 | 139.96 | 63.21 |
| 1.5 | 242.12 | 88.75 |
| 2.0 | 319.44 | 193.25 |
| 2.5 | 649.43 | 202.08 |
| 3.0 | 510.08 | 280.79 |
| 3.5 | 1116.54 | 386.71 |



รูปที่ 4.40 ความหนาของชั้นการเสีรูปร่างของแกรไฟต์กับปริมาณเฟอร์ไรต์เฟอร์ไรท์ที่ผสมลงในไส้แบบ

จากรูปจะเห็นว่า แนวโน้มของการเกิดชั้นแกรไฟต์แบบแผ่นที่ผิวงานหล่อนั้น มักมีแนวโน้มเกิดไปตามความโค้งของผิวที่สัมผัสกับไส้แบบ จึงทำให้พออนุมานได้ว่าเฟอร์โรซิลเฟอร์มีผลน้อยต่อ ความคดโค้งนั่นเอง

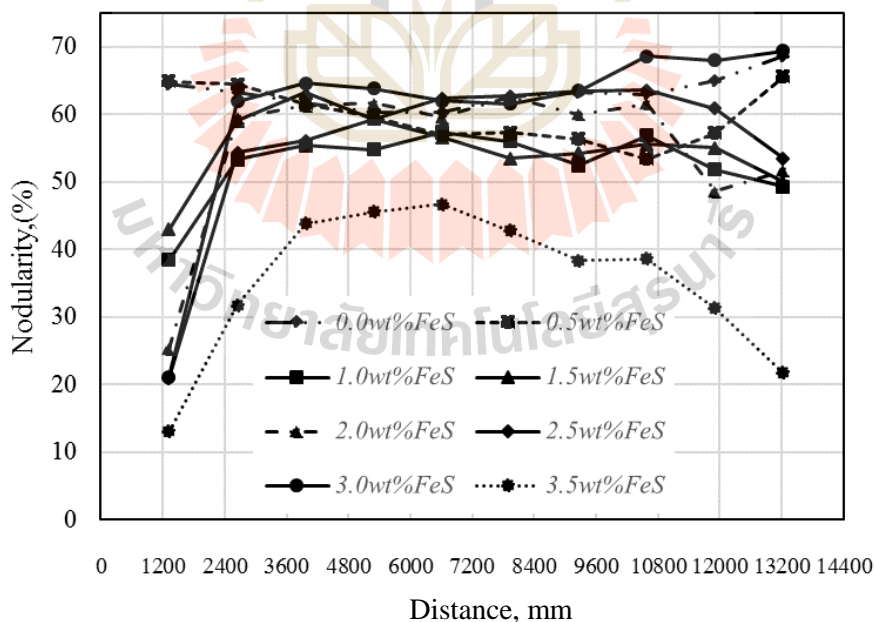
ในด้านของการตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงสถานะของแกรไฟต์ หรือการตรวจสอบค่าความกลมมนั้น พบว่าสถานะของแกรไฟต์จะเปลี่ยนแปลงจากลักษณะแกรไฟต์แบบแผ่นไปเป็นทรงกลมทันที ซึ่งส่วนนี้น่าจะเป็นผลจากความสามารถของการแพร่ซิลเฟอร์ ที่อยู่ในผงเฟอร์โรซิลเฟอร์เข้าไปในเนื้อเหล็กแล้วรวมตัวกับแมกนีเซียมจนทำให้เนื้อเหล็กบริเวณนั้นสูญเสียแมกนีเซียมดังได้กล่าวไว้แล้วในข้างต้น และส่วนที่ไม่มีการรวมตัวกับซิลเฟอร์ ก็จะยังคงก่อให้เกิดสถานะของแกรไฟต์ทรงกลมได้ตามปกติ ทั้งนี้ความสามารถของการแพร่ของซิลเฟอร์จะขึ้นกับปริมาณซิลเฟอร์เอง และขึ้นกับการเย็นตัว ตลอดจนการแข็งตัวของเหล็กอีกด้วย



รูปที่ 4.42 ค่าความกลมของแกรไฟต์ที่ระยะต่าง ๆ จากผิวที่สัมผัสกับไส้แบบที่ผสมเฟอร์โรซิลเฟอร์ 3.0% โดยน้ำหนัก

ตารางที่ 4.6 ค่าความกลมที่วัดได้ในชิ้นงานที่มีปริมาณเฟอร์โรซัลเฟอร์ในไส้แบบแตกต่างกัน

| FeSในไส้แบบ, (%wt) | ค่าความกลม | ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน |
|--------------------|------------|---------------------|
| 0.0 | 57.92 | 4.202 |
| 0.5 | 62.28 | 4.570 |
| 1.0 | 57.86 | 5.033 |
| 1.5 | 54.4 | 8.027 |
| 2.0 | 64.54 | 21.276 |
| 2.5 | 65.94 | 25.837 |
| 3.0 | 57.94 | 19.988 |
| 3.5 | 66.60 | 20.726 |



รูปที่ 4.43 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะความลึกจากผิวทางกับความกลมของแกรไฟต์

พิจารณากราฟจากการทดลองที่ปริมาณเฟอร์โรซัลเฟอร์ 0 และ 0.5% โดยน้ำหนัก ซึ่งนำมาตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคและไม่พบชั้นของแกรไฟแบบแผ่น จึงเห็นว่าความชันไม่ค่อมมีการเปลี่ยนแปลง ขณะชั้นอื่น ๆ ที่มีปริมาณเฟอร์โรซัลเฟอร์เพิ่มขึ้น จะพบชั้นแกรไฟด์แบบแผ่น และในช่วงของระยะการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของแกรไฟต์ ความชันของกราฟจะเปลี่ยนแปลงอย่างเห็นได้ชัด ข้อสังเกตอีกประการหนึ่ง จะเห็นว่า เส้นกราฟที่มีปริมาณเฟอร์โรซัลเฟอร์ 3.5% โดยน้ำหนัก เมื่อถึงช่วงระยะหนึ่งจะมีค่าความกลมต่ำลงซึ่งแตกต่างจากชั้นอื่น ๆ ทั้งนี้เกิดขึ้นเพราะผู้ทดลองได้ทำตรวจสอบโดยเลือกตรวจสอบโครงสร้างบริเวณที่มีการยื่นตัวช้ากว่าชั้นงานอื่น ๆ เพื่อดูว่าการยื่นตัวมีผลต่อการฟอร์มรูปร่างของแกรไฟต์อย่างไร และทำให้พบว่า ส่วนที่ยื่นตัวช้าจะมีผลทำให้ความกลมของแกรไฟต์ลดลง



บทที่ 5

บทสรุป

5.1 สรุปผลงานวิจัย

การศึกษาอิทธิพลของตัวแปรการหล่อต่อการเสีรูปร่างแกรไฟต์ที่ผิวของเหล็กหล่อแกรไฟต์ตัวหนอนและเหล็กหล่อแกรไฟต์กลมจากผลการวิจัยสามารถสรุปได้ดังนี้

5.1.1 จากผลการทดลองชุดที่ 1 สามารถสรุปได้ว่า

5.1.1.1 ชั้นความหนาของชั้นการเสีรูปร่างของแกรไฟต์แปรผกผันกับปริมาณแมกนีเซียมทั้งนี้เป็ผลมาจากการที่น้ำเหล็กมีแมกนีเซียมน้อยลงนั้น จากการสูญเสียแมกนีเซียมเนื่องจากการปฏิกิริยาออกซิเดชันจะทำให้บริเวณผิวมีแมกนีเซียมต่ำกว่าปกติ จึงทำให้ชั้นการเสีรูปร่างของแกรไฟต์หนาขึ้น

5.1.1.2 ชั้นความหนาของการเสีรูปร่างของแกรไฟต์แปรผันตรงกับความหนาของชิ้นงานเนื่องจากชิ้นงานที่หนาขึ้นทำให้ช่วงเวลาในการแข็งตัวของน้ำเหล็กนานขึ้นและเกิดการทำปฏิกิริยา ออกซิเดชันมากขึ้น จึงส่งผลให้ชั้นความหนาของชั้นการเสีรูปร่างของแกรไฟต์หนาขึ้น โดยค่าเฉลี่ยของชั้นความหนาของชั้นการเสีรูปร่างของแกรไฟต์ในแบบหล่อทรายเรซินอยู่ที่ 42.90 56.14 64.95 และ 74.00 ไมโครเมตร ที่ความหนา 7 14 21 และ 28 มิลลิเมตรตามลำดับ และค่าเฉลี่ยของชั้นความหนาของการเสีรูปร่างของแกรไฟต์ ในแบบหล่อทรายขึ้นอยู่ที่ 31.72 42.77 52.36 และ 61.35 ตามลำดับ

5.1.1.3 ทรายเรซินส่งผลให้ชั้นความหนาของชั้นการเสีรูปร่างของแกรไฟต์มีมากกว่าทรายขึ้นเนื่องจากซัลเฟอร์ซึ่งเป็นสารเร่งปฏิกิริยาการจับตัวกันของทรายเรซินและจะทำปฏิกิริยารวมตัวกับ แมกนีเซียมเป็น แมกนีเซียมซัลไฟด์ ทำให้ปริมาณแมกนีเซียมที่ผิวลดลง ในขณะที่ทรายขึ้นมีการทาผิวแบบหล่อด้วยแกรไฟต์ทำให้คาร์บอนรวมตัวกับออกซิเจนเป็นคาร์บอนมอนอกไซด์ทำให้เกิด สภาพบรรยากาศแบบ Reducing atmosphere ส่งผลให้มีการเกิดแมกนีเซียมออกไซด์ซึ่งเป็นที่มาของการสูญเสียแมกนีเซียมที่ผิว

5.1.1.4. ซีโคลที่มีอยู่ในทรายหล่อเป็นผงถ่านหินที่อยู่ในรูปของคาร์บอน ซึ่งจะทำให้คาร์บอนรวมตัวกับออกซิเจนทำให้เกิดเป็นคาร์บอนมอนอกไซด์ทำให้เกิด Reducing atmosphere จึงส่งผลให้ไม่เกิดแมกนีเซียมออกไซด์ซึ่งเป็นที่มาของการสูญเสียแมกนีเซียมที่ผิวจึงทำให้พบเจือปนการเสีรูปร่างของแกรไฟต์น้อยมากหรือไม่พบเลยในแบบหล่อทรายขึ้น

5.1.2 จากผลการทดลองชุดที่ 2 สามารถสรุปได้ว่า

5.1.2.1 อุณหภูมิที่สูงขึ้นมีแนวโน้มที่จะเกิดชั้นการเสีรูปร่างของแกรไฟต์มากขึ้น

5.1.2.2 สารเคลือบฟิลโลซิลิเกตและมัลไลต์ไม่ได้ช่วยลดการเกิดชั้นการเสีรูปร่างของแกรไฟต์ เพราะมีค่าความสามารถการนำความร้อนที่ต่ำ แต่เซอร์คอนเบสมีความสามารถในการนำความร้อนสูงกว่า ทำให้น้ำโลหะบริเวณนั้นแข็งตัวเร็วช่วยลดการเกิดชั้นการเสีรูปร่างของแกรไฟต์

5.1.2.3. ขนาดไส้แบบส่งผลต่อการเกิดชั้นการเสีรูปร่างของแกรไฟต์ พบว่าไส้แบบที่มีขนาดเล็กทำให้ชั้นการเสีรูปร่างของแกรไฟต์มาก เนื่องจากเวลาในการแข็งตัวช้าจึงทำให้เกิดชั้นการเสีรูปร่างของแกรไฟต์มาก ไส้แบบที่มีขนาดใหญ่ขึ้นมีแนวโน้มทำให้ชั้นการเสีรูปร่างของแกรไฟต์ลดลง เนื่องจากเวลาในการแข็งตัวเร็วจึงทำให้เกิดการสูญเสียแมกนีเซียมที่ผิวงานหล่อน้อย

5.1.3 จากผลการทดลองชุดที่ 3 สามารถสรุปได้ว่า

5.1.3.1. ความหนาของชั้นการเสีรูปร่างของแกรไฟต์เพิ่มขึ้นตามปริมาณเฟอร์โรซิลเฟอร์โดยมีค่าสูงสุดที่ 1,116.54 ไมโครเมตร ที่ปริมาณเฟอร์โรซิลเฟอร์ 3.5% โดยน้ำหนัก

5.1.3.2. ส่วนที่เย็นตัวช้ามีผลทำให้ความกลมของแกรไฟต์ลดลง

5.1.3.3 เฟอร์โรซิลเฟอร์มีผลน้อยต่อค่าความคดโค้งเนื่องจากแนวโน้มของการเกิดชั้นแกรไฟต์แบบแผ่นที่ผิวงานหล่อนั้น มักมีแนวโน้มเกิดไปตามความโค้งของผิวที่สัมผัสกับไส้แบบ

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ปัญหาในการเติมคาร์บอน ในช่วงแรกเติมคาร์บอนในขั้นตอนสุดท้ายครั้งเดียวจนหมดทำให้คาร์บอนลอยตัวขึ้นสู่ชั้นบนแล้วฟอร์มตัวร่วมกับสแลกเป็นจำนวนมาก ส่งผลให้ค่าคาร์บอนที่ได้ลดต่ำลงมาก จึงเปลี่ยนเป็นการเติมทีละน้อยทำให้ปริมาณคาร์บอนที่ละลายลงในน้ำเหล็กมีปริมาณมากขึ้น อย่างไรก็ตามก็ดียังไม่เพียงพอต่อการทดลอง ดังนั้นในการแก้ปัญหาจึงควรเติมคาร์บอนหลาย ๆ ส่วน ส่วนละเท่า ๆ กัน โดยทยอยเติมทีละส่วนในระหว่างที่เหล็กกำลังหลอมไปพร้อม ๆ กันโดยช่วงสุดท้ายของการเติม เหล็กและเหล็กเหนียวในเตาควรหลอมละลายจนหมด

5.2.2 ปัญหาการเติมเฟอร์โรซิลเฟอร์ ในการคำนวณปริมาณซิลเฟอร์สุดท้ายนั้นต้องคำนวณปริมาณในการเติมเฟอร์โรซิลเฟอร์ให้พอเหมาะ เพราะหากเฟอร์โรซิลเฟอร์ที่เติมลงไปใต้น้ำเหล็กมีปริมาณที่มากเกินไป จะทำให้ยากต่อการควบคุมส่วนผสมของธาตุอื่น ๆ เนื่องจากว่าเฟอร์โรซิลเฟอร์เกิดการสูญเสียด้วยการระเหยยากมาก

5.2.3 ปัญหาในการทำแบบหล่อทราย แบบหล่อทรายที่มีความชื้นมากเกินไปจะส่งผลให้ชิ้นงานไม่เป็นรูปร่างที่ต้องการ ฉะนั้นในการผสมทรายแบบจึงต้องควบคุมไม่ให้ทรายชื้นจนเกินไป



รายการอ้างอิง

- [1] G.M. Goodrich and R.W. Lobenhofer, “Effect of Cooling rate on ductile iron Mechanical Properties”, Trans. AFS, 110 (2002) pp 1003-1032 .
- [2] L.P. Dix, R. Ruxanda, J. Torrance, M. Fukumoto and D.M. Stefanescu, Trans. AFS, 111 (2003) pp 1149-1164.
- [3] F .Mampaey, P. Li and E. Wittink, “The Mechanism of Formation of Casting Skin in CG Iron and its Effect on Tensile Properties”, Trans. AFS , 111 (2003) paper 03 056 .
- [4] Azterlan, Euskadia, Spain, Private Communication.
- [5] C. Labrecque, M. Gagné, P.-M. Cabanne, C. François, C. Bécet, and F. Hoffmann, Int. J. of Metal Casting 2 Issue 2 (2008).
- [6] S. Boonmee and D.M. Stefanescu, Casting Skin Management in Compacted Graphite Iron Part I: Effect of Mold Coating and Section Thickness American Foundry Society, 2013.
- [7] I. Riposan, M. Chisamera “Magnesium-Sulfur Relationships in Ductile and Compacted.
- [8] S. Boonmee and D.M. Stefanescu, “The Occurrence and the Effect of Casting Skin in Compacted Graphite Iron”, ,SPCI 10.
- [9] Rianti Dewi Sulamet-Ariobono and Johny Wahyuadi Soedarsono, “ Effect of plate thickness and casting position on skin effect formation in thin wall ductile iron plate”, International Journal of Technology ,2016.
- [10] F.C. Duncan and J.Kroker, “A new test casting to evaluate skin formation in CGI”, American Foundry Society, 2010.
- [11] iFoundryman. 2016 February. Cast iron properties introduction (Online). Available URL: <http://www.ifoundryman.com/cast-iron/>.
- [12] Steve Dawson and Tom Schroeder, “Compacted Graphite Iron A Viable Alternative”, Engineered Casting Solutions AFS, 2000.

- [13] S. Boonmee and D. M. Stefanescu, "Casting Skin Management in Compacted Graphite Iron Part II: Mechanism of Casting Skin Formation", American Foundry Society, 2013.

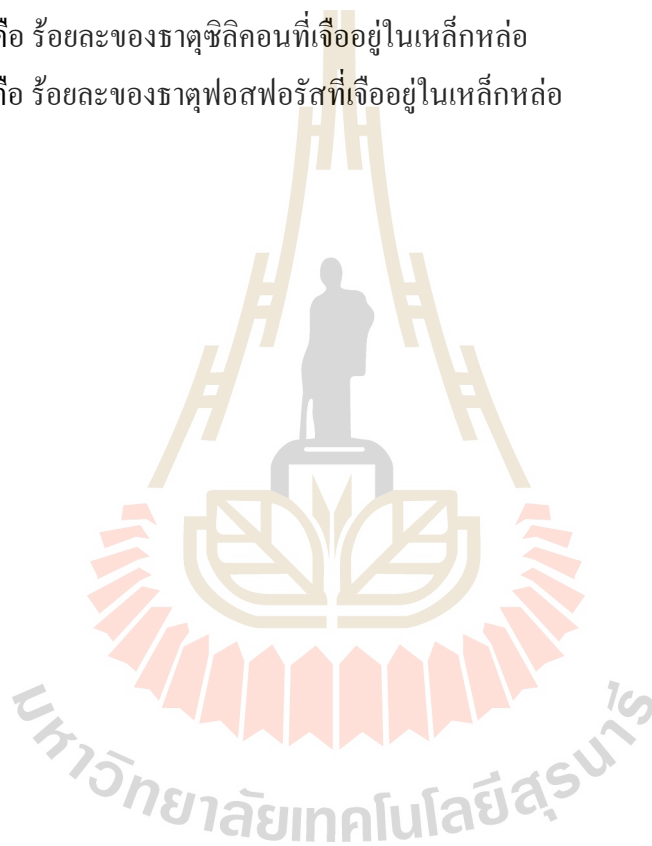




การหาค่าคาร์บอนสมมูล (Carbon Equivalent)

$$CE = \%C + \left(\frac{\%Si + \%P}{3} \right)$$

โดย %C คือ ร้อยละของธาตุคาร์บอนที่เจืออยู่ในเหล็กหล่อ
%Si คือ ร้อยละของธาตุซิลิกอนที่เจืออยู่ในเหล็กหล่อ
%P คือ ร้อยละของธาตุฟอสฟอรัสที่เจืออยู่ในเหล็กหล่อ





รายชื่อบทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

1. Sarum boonme, Nupol Mai-Ngam. 2017. Effect of Sulfur on the Formation of the Graphite degradation in ductile Iron. Materials Science Forum, ISSN: 1662-9752, Vol. 895, pp 89-93, 2017 Trans Tech Publications, Switzerland.

2. Sarum boonme, Nupol Mai-Ngam. 2018. **On the development of the dual graphite iron.** Materials Today: Proceedings 5 (2018) 9264–9271, The 10th Thailand International Metallurgy Conference (The 10th TIMETC), Ramada Plaza Bangkok Menam Riverside, Bangkok, Thailand. 30-31 March 2017.

3. Sarum boonme, Kittirat worakut, Auttachai utsajai, Suphalerk rassamipat, Nupol maingam. 2018. **On the prediction of residual magnesium and nodularity in ductile iron by thermal analysis.** Solid state phenomena ISSN :1662-9779. vol 287, P 24-29, The 9th international conference on manufacturing science and technology (ICMST 2018), University of Malaya, Kuala Lumpur, Malaysia 11-13/8/2018.

ประวัติผู้เขียน

นายอนุพล ไม้งาม เกิดเมื่อวันที่ 2 เดือนมกราคม พ.ศ. 2526 ณ จังหวัดจันทบุรี สำเร็จ การศึกษาระดับชั้นประถมศึกษาจากโรงเรียนบ้านช่องกะพัด ในปีการศึกษา 2539 และระดับ มัธยมศึกษาจากโรงเรียนชลราษฎรอำรุง อำเภอเมือง จังหวัดชลบุรี ในปีการศึกษา 2545 จากนั้นได้ เข้าศึกษาต่อมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีและสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีจากคณะ วิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมโลหการ ในปีการศึกษา 2549 จากนั้นเริ่มทำงานในตำแหน่งวิศวกร โลหการ ที่ บริษัท เอ็นอาร์บี แบริงส์ (ประเทศไทย) จำกัด จนกระทั่ง ปี 2552 ได้เข้าทำงานใน ตำแหน่งวิศวกรควบคุมและประกันคุณภาพบริษัท ซุมิโตโม รับบอเตอร์ (ประเทศไทย) จำกัด จนถึงปี 2555 ได้เข้าทำงานที่บริษัท เออร์ลิคอน บัลเซอร์ส โค้ทติ้ง (ประเทศไทย) จำกัด โดยในช่วง ปี 2555 ถูกส่งไปฝึกงานและปฏิบัติงาน ณ บริษัทเออร์ลิคอนนิสอนบัลเซอร์สจำกัด ประเทศญี่ปุ่น ก่อน จะกลับมาทำงานในตำแหน่งผู้ช่วยผู้จัดการฝ่ายควบคุมและประกันคุณภาพบริษัท เออร์ลิคอนบัล เซอร์สโค้ทติ้ง(ประเทศไทย) ในปี 2557 ได้ลาออกมาประกอบธุรกิจส่วนตัว และในปี 2558 มีความ สนใจที่จะศึกษาต่อในระดับปริญญาโท เพื่อเป็นการพัฒนาความรู้และความสามารถให้กับ ตนเอง โดยได้เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโท หลักสูตรวิศวกรรมวัสดุ สาขาวิชาวิศวกรรมโลหการสำนัก วิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ในปีการศึกษา 2558 มีอาจารย์ที่ปรึกษา วิทยานิพนธ์คือ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สารัมภ์ บุญมี ในขณะที่ศึกษาอยู่มีโอกาสเป็นผู้ช่วยสอนและ วิจัยในสาขาวิชาวิศวกรรม โลหการ จำนวน 2 รายวิชา คือ 1. วิศวกรรมการหล่อ 2. โลหการการภาพ ในระหว่างการศึกษาระดับปริญญาโท ได้มีผลงานตีพิมพ์เผยแพร่จำนวน 3 เรื่อง ปัจจุบันทำงานใน ตำแหน่งวิศวกรวิจัยและพัฒนาอาวุโส บริษัทสยามลวดเหล็กอุตสาหกรรมจำกัด