

รหัสโครงการ SUT7-713-59-12-50



รายงานการวิจัย

ผลของโครงสร้างผิวงานหล่อต่อสมบัติเชิงกลในเหล็กหล่อกราไฟต์

ตัวหนอนและเหล็กหล่อเหนียว

EFFECT OF CASTING SKIN ON MECHANICAL PROPERTIES IN

COMPACTED GRAPHITE AND DUCTILE IRONS

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจาก
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

รหัสโครงการ SUT7-713-59-12-50



รายงานการวิจัย

ผลของโครงสร้างผิวงานหล่อต่อสมบัติเชิงกลในเหล็กหล่อกราไฟต์

ตัวหนอนและเหล็กหล่อเหนียว

EFFECT OF CASTING SKIN ON MECHANICAL PROPERTIES IN

COMPACTED GRAPHITE AND DUCTILE IRONS

คณะผู้วิจัย

หัวหน้าโครงการ

ผศ.ดร.สารัมภ์ บุญมี

สาขาวิชาวิศวกรรมโลหการ

สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ พ.ศ. 2557

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

สิงหาคม 2563

กิตติกรรมประกาศ

ผลของการเสียรูปร่างของกราฟไฟต์ที่ผิวงานหล่อของเหล็กหล่อนั้นเป็นที่ทราบกันดีอยู่บ้างแล้ว ว่าส่งผลเสียต่อสมบัติเชิงกล โดยเฉพาะความต้านทานการล้า อย่างไรก็ตามก็ตีอิทธิพลที่เกิดขึ้นในเชิงปริมาณ นั้นยังไม่ชัดเจนว่ามีมากเท่าใด รายงานการวิจัยฉบับนี้จึงมีวัตถุประสงค์ที่จะรายงานผลการทดลองที่เกี่ยวข้อง อันจะเป็นคุณประโยชน์ต่อภาคอุตสาหกรรมและภาควิชาการในการนำไปประยุกต์ใช้หรือ อ้างอิงในอนาคต

ผู้วิจัยขอขอบคุณผู้สนับสนุนวัสดุสิ้นเปลืองบางส่วนในการวิจัยได้แก่ บริษัท พีเอส สตีล จำกัด ขอขอบคุณ บริษัท ESI group ที่เอื้อเฟื้ออนุญาตให้ใช้ซอฟต์แวร์จำลองการหล่อโลหะเพื่อการวิจัยโดยไม่มีค่าใช้จ่าย

สุดท้ายนี้ผู้วิจัยขอขอบคุณความช่วยเหลือจากนักศึกษาและเจ้าหน้าที่ศูนย์เครื่องมือ วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี รวมถึงสำนักงานคณะกรรมการวิจัย แห่งชาติ ที่สนับสนุนทุนในการทำวิจัยในครั้งนี้

สารัมภ์ บุญมี



มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ศึกษากระบวนการเกิดการเสีรูปร่างของกราไฟต์ที่บริเวณผิวของเหล็กหล่อหล่อกราไฟต์กลม ซึ่งแบ่งการศึกษาออกเป็น 3 ส่วนหลัก ส่วนแรกศึกษาอิทธิพลของตัวแปรของกระบวนการหล่อโลหะได้แก่ อัตราการเย็นตัว ประเภทของวัสดุทำแบบหล่อ และปริมาณแมกนีเซียมคงเหลือ ส่วนที่สองศึกษาอิทธิพลของสารเคลือบแบบหล่อและไส้แบบ และส่วนสุดท้ายคือการพัฒนาเหล็กหล่อกราไฟต์คู่ด้วยวิธีการเติมกำมะถัน พบว่าความหนาของชั้นการเสีรูปร่างของกราไฟต์เพิ่มขึ้นเมื่อความหนาของชั้นงานเพิ่มขึ้น เนื่องจากชั้นงานที่มีความหนาจะทำให้มีช่วงเวลาในการแข็งตัวของน้ำเหล็กนาน และมีเวลาในการทำปฏิกิริยาออกซิเดชันของแมกนีเซียมมากขึ้น ชั้นความหนาของการเสีรูปร่างของกราไฟต์จึงแปรผกผันกับปริมาณแมกนีเซียมคงเหลือและค่าเฉลี่ยของชั้นความหนาของการเสีรูปร่างของกราไฟต์ในแบบหล่อทรายเรซินมากกว่าในแบบหล่อทรายขึ้นทุกกรณี ในส่วนของอิทธิพลของสารเคลือบแบบ พบว่าสารเคลือบแบบที่มีความสามารถในการนำความร้อนสูงจะทำให้เหล็กบริเวณแบบหล่อที่เคลือบสารนั้นแข็งตัวเร็วขึ้นซึ่งช่วยลดการเกิดชั้นความหนาของการเสีรูปร่างของกราไฟต์ โดยเฉพาะสารเซอร์คอนเบส และสำหรับส่วนของการพัฒนาเหล็กหล่อกราไฟต์คู่ พบว่าวิธีการเติมกำมะถันสามารถเป็นไปได้ที่จะทำให้เกิดเหล็กหล่อกราไฟต์คู่ โดยชั้นความหนาของการเสีรูปร่างของกราไฟต์เพิ่มขึ้นตามปริมาณกำมะถันและมีค่าสูงสุดที่ 1,116.54 ไมโครเมตร ที่ปริมาณกำมะถันร้อยละ 3.5

Abstract

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 demonstrates 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.

สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	ก
บทคัดย่อ (ภาษาไทย)	ข
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูป.....	ซ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย.....	2
1.3 สมมติฐานการวิจัย	2
1.4 ขอบเขตการวิจัย	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	
2.1 บทนำ.....	4
2.2 สมบัติทั่วไปของเหล็กหล่อเทา เหล็กหล่อกราไฟต์ตัวหนอน และเหล็ก หล่อเหนียว	5
2.2.1 เหล็กหล่อเทา.....	5
2.2.2 เหล็กหล่อกราไฟต์ตัวหนอน	5
2.2.3 เหล็กหล่อเหนียว.....	5
2.2.4 สมบัติเชิงกลของเหล็กหล่อเทา กราไฟต์ตัวหนอนและเหล็กหล่อเหนียว.....	8
2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการพัฒนาสมบัติเชิงกล	10
2.3.1 ผลของโครงสร้างผิวงานหล่อต่อความสามารถในการต้านทานแรงดึง	10
2.3.2 ผลของโครงสร้างผิวงานหล่อต่อความสามารถในการต้านทานความล้า	12
2.4 กลไกการเกิดการเสีรุกร่างของกราไฟต์	14
2.5 ตัวแปรที่มีผลต่อการเกิดการเสีรุกร่างของกราไฟต์	15
2.5.1 อุณหภูมิเท.....	15
2.5.2 อัตราส่วนระหว่างแมกนีเซียมและกำมะถัน.....	16
2.5.3 ความหนาของชั้นงาน.....	16
2.5.4 วัสดุแบบหล่อ.....	17

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.5.5 สารเคลือบแบบ	20
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	22
3.1 บทนำ.....	22
3.2 เครื่องมือ อุปกรณ์ และวัสดุที่ใช้ในการทดลอง	24
3.3 การออกแบบและเตรียมชิ้นงานก่อนการทดลอง.....	25
3.4 การหล่อชิ้นงาน ทดสอบสมบัติเชิงกล และการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค	33
3.4.1 การหล่อชิ้นงาน.....	33
3.4.2 การทดสอบทางกล.....	33
3.4.3 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค	34
บทที่ 4 ผลการวิจัย	38
4.1 ชิ้นงานทดสอบ	38
4.2 อิทธิพลของตัวแปรของกระบวนการหล่อโลหะต่อโครงสร้างจุลภาคที่ผิวงานหล่อ.....	39
4.2.1 อิทธิพลของความหนาของชิ้นงานต่อการเสียรูปของกราฟไฟต์บริเวณผิวงานหล่อ.....	39
4.2.2 อิทธิพลของแมกนีเซียมคงเหลือต่อการเสียรูปของกราฟไฟต์บริเวณผิวงานหล่อ	41
4.3 อิทธิพลสารเคลือบแบบและอัตราการเย็นตัวต่อการเสียรูปร่างของกราฟไฟต์.....	48
4.3.1 ผลของสารเคลือบแบบต่อการเกิดการเสียรูปร่างของกราฟไฟต์	48
4.3.2 ผลของอัตราการเย็นตัวต่อการเกิดการเสียรูปร่างของกราฟไฟต์.....	53
4.3.3 ผลของปริมาณกำมะถันในไส้แบบต่อการเกิดการเสียรูปร่างของกราฟไฟต์.....	57
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ.....	67
5.1 สรุปผล.....	67
5.2 ข้อเสนอแนะ	68
รายการอ้างอิง	69
ภาคผนวก.....	70
ภาคผนวก ก การหาค่าคาร์บอนสมมูล (Carbon Equivalent, CE)	70

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
ภาคผนวก ข บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่	72
ประวัตินักวิจัย	74



สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1	เปรียบเทียบสมบัติเชิงกลของ เหล็กหล่อเทา เหล็กหล่อกราไฟต์ตัวหนอน เหล็กหล่อเหนียวที่มีโครงสร้างเนื้อพื้นเป็นเฟิร์ลไลต์ 10
2.2	พลังงานอิสระของกิบส์ในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของแมกนีเซียมที่อุณหภูมิ 1,600 K 15
2.3	วัสดุแบบหล่อชนิดต่างๆที่ใช้ในการทดลอง 19
2.4	ค่าความหนาของโครงสร้างผิวที่เสีรูปร่างของกราไฟต์ 20
3.1	ส่วนผสมทางเคมีที่ใช้ในการศึกษา 22
3.2	เงื่อนไขการทดลองของประสิทธิภาพของสารเคลือบไส้แบบ 30
4.1	ส่วนประกอบทางเคมีของชิ้นงานทดสอบในชุดการทดลองที่ 1 38
4.2	ส่วนประกอบทางเคมีของชิ้นงานทดสอบในชุดการทดลองที่ 2 39
4.3	ส่วนประกอบทางเคมีของชิ้นงานทดสอบในชุดการทดลองที่ 3 39
4.4	ความหนาของชั้นการเสีรูปร่างของกราไฟต์ในแต่ละความหนาของชิ้นงาน 40
4.5	ความหนาของชั้นการเสีรูปร่างของกราไฟต์ 62
4.6	ค่าความกลมที่วัดได้ในชิ้นงานที่มีปริมาณกำมะถันในไส้แบบแตกต่างกัน 65



สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1	โครงสร้างจุลภาคของเหล็กหล่อกราไฟต์ตัวหนอนที่บริเวณผิวงานหล่อเกิดการเสียรูปร่างของกราไฟต์ 2
2.1	โครงสร้างจุลภาคของเหล็กหล่อเทา 6
2.2	ชิ้นส่วนที่ผลิตจากเหล็กหล่อเทา 6
2.3	โครงสร้างจุลภาคของเหล็กหล่อกราไฟต์ตัวหนอน 7
2.4	ชิ้นส่วนเครื่องยนต์ที่ผลิตจากเหล็กหล่อกราไฟต์ตัวหนอน 7
2.5	โครงสร้างจุลภาคของเหล็กหล่อเหนียว 8
2.6	ชิ้นส่วนเครื่องยนต์ที่ผลิตจากเหล็กหล่อเหนียว 8
2.7	โครงสร้างจุลภาคของเหล็กหล่อเทา เหล็กหล่อกราไฟต์ตัวหนอน และเหล็กหล่อเหนียว 9
2.8	ภาพถ่าย SEM ของเหล็กหล่อเทา เหล็กหล่อกราไฟต์ตัวหนอนและเหล็กหล่อเหนียว 9
2.9	ความต้านทานแรงดึงของชิ้นงานตัวอย่างที่ผ่านกระบวนการยิงทราย ชัดผิว และกลึงผิว 11
2.10	ความต้านทานแรงหลังจากชิ้นกราไฟต์ประเภท D ที่ถูกกลึงออก 11
2.11	ปริมาณกราไฟต์ประเภท D ตามระยะจากผิวชิ้นงานไปยังกลางชิ้นงาน 12
2.12	ความสามารถในการต้านทานความความล้าระหว่างชิ้นงานที่ผ่านการกลึงผิวกับชิ้นงานสภาพหลังหล่อ 13
2.13	ความสามารถในการต้านทานความความล้าระหว่างชิ้นงานที่ผ่านการ กลึงผิว กับชิ้นงานสภาพหลังหล่อของชิ้นงานขนาด 4 และ 6 มิลลิเมตร 13
2.14	S-N curves ของชิ้นงานหลังหล่อ (AC) ชิ้นงานที่ผ่านการกลึงผิว (M) ชิ้นงานหลังหล่อที่ผ่านการยิงทราย (AC-SB) และชิ้นงานที่ผ่านการกลึงผิวแล้วนำไปยิงทราย (M-SB) สำหรับเหล็กหล่อกราไฟต์ตัวหนอนที่มีค่าความกลม 15% 14
2.15	อิทธิพลของอัตราส่วน Mg(add)/S(in) ต่อการฟอร์มตัวของเหล็กหล่อกราไฟต์ตัวหนอนที่ระดับของกำมะถันเริ่มต้นที่ต่างกัน 16
2.16	ค่าความหนาของชิ้นงานต่อชั้นของการเกิดชั้นการเสียรูปของกราไฟต์ 17
2.17	ผลของความหนาของชิ้นงานต่อค่าความกลมของกราไฟต์ 17
2.18	อิทธิพลของวัสดุแบบหล่อต่อโครงสร้างผิวงานหล่อ 19
2.19	อิทธิพลของสารเคลือบไล่แบบแต่ละชนิดต่อความหนาของชั้นโครงสร้างการเสียรูปร่างของกราไฟต์ 21
3.1	ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย 23
3.2	การออกแบบชิ้นงานแบบหล่อทรายสามมิติด้วยโปรแกรม Solidworks 25

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.3	การยึดแบบหล่อไส้แบบ AM ด้วยแคลมป์จับชิ้นงานรูปตัว C.....26
3.4	ไส้แบบโซเดียมซัลไฟเกตแบบผสมผงกำมะถัน 5%wt ขนาด 1.5 นิ้ว27
3.5	ไส้แบบโซเดียมซัลไฟเกต ขนาด 0.5 1.0 1.5 และ 2.0 นิ้ว28
3.6	ไส้แบบ AM ขนาด 0.5 1.0 1.5 และ 2.0 นิ้ว29
3.7	ไส้แบบโซเดียมซัลไฟเกตแบบผสมผงกำมะถันขนาด 1.5 นิ้ว หลังเคลือบไส้แบบ.....29
3.8	ไส้แบบ AM ขนาด 1.5 นิ้ว หลังเคลือบไส้แบบ29
3.9	กระสวนแบบขนาดไส้แบบเท่ากัน และแบบขนาดไส้แบบไม่เท่ากัน31
3.10	การวางไส้แบบลงในแบบหล่อทราย31
3.11	แบบของชิ้นงานที่จะหล่อทดสอบ.....32
3.12	แบบจำลอง 3 มิติของชิ้นงานหลังหล่อทดสอบ32
3.13	ขนาดชิ้นงานทดสอบแรงดึง ตามมาตรฐาน ASTM A356.....34
3.14	การขึ้นเรือนแบบเย็นชิ้นงานที่ตัดแล้ว34
3.15	ตัวอย่างวิธีการหาค่าความหนาของชั้นการเสีรูปร่างของกราไฟต์.....35
3.16	ตัวอย่างวิธีการหาค่าความคดโค้ง36
3.17	การวิเคราะห์ความกลมของกราไฟต์.....37
3.18	การประมวลผลปริมาณความกลมของกราไฟต์แต่ละช่วง.....37
4.1	ชั้นความหนาของกราไฟต์ที่ความหนา 7 และ 28 มิลลิเมตร ที่ 0.025%Mg ใน แบบหล่อเรซิน.....40
4.2	ชั้นความหนาของกราไฟต์ที่ความหนา 7 และ 28 มิลลิเมตร ที่ 0.025%Mg ใน แบบหล่อทราย.....41
4.3	ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของชิ้นงานและชั้นการเสีรูปร่างของกราไฟต์.....41
4.4	ปริมาณแมกนีเซียม 0.010% ความหนา ที่ 28 มิลลิเมตร ในแบบหล่อทรายเรซิน42
4.5	ปริมาณแมกนีเซียม 0.015% ความหนา ที่ 28 มิลลิเมตรในแบบหล่อทรายเรซิน42
4.6	ปริมาณแมกนีเซียม 0.020% ความหนา ที่ 28 มิลลิเมตร ในแบบหล่อทรายเรซิน43
4.7	ปริมาณแมกนีเซียม 0.025% ความหนา ที่ 28 มิลลิเมตร ในแบบหล่อทรายเรซิน43
4.8	ปริมาณแมกนีเซียม 0.030% ความหนา ที่ 28 มิลลิเมตรในแบบหล่อทรายเรซิน.....44
4.9	ปริมาณแมกนีเซียม 0.010% ความหนา ที่ 28 มิลลิเมตรในแบบหล่อทรายขึ้น.....44
4.10	ปริมาณแมกนีเซียม 0.015% ความหนา ที่ 28 มิลลิเมตร ในแบบหล่อทรายขึ้น.....45
4.11	ปริมาณแมกนีเซียม 0.020% ความหนา ที่ 28 มิลลิเมตร ในแบบหล่อทรายขึ้น.....45

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.12	ปริมาณแมกนีเซียม 0.025% ความหนา ที่ 28 มิลลิเมตร ในแบบหล่อทรายขึ้น..... 46
4.13	ชั้นความหนาของชั้นการเสีรูปรางของกราไฟต์ที่ขึ้นงานหนา 7 และ14 มิลลิเมตร 46
4.14	ชั้นความหนาของชั้นการเสีรูปรางของกราไฟต์ที่ขึ้นงานหนา 21 และ28 มิลลิเมตร 47
4.15	ความต้านทานแรงดึงต่อปริมาณแมกนีเซียม..... 47
4.16	โครงสร้างจุลภาคเหล็กหล่อกราไฟต์ตัวหนอน ของไส้แบบโซเดียมซิลิเกตที่ไม่เคลือบสาร 48
4.17	โครงสร้างจุลภาคเหล็กหล่อกราไฟต์ตัวหนอน ของไส้แบบโซเดียมซิลิเกต ที่เคลือบฟิลาซิลิเกต 49
4.18	โครงสร้างจุลภาคเหล็กหล่อกราไฟต์ตัวหนอน ของไส้แบบโซเดียมซิลิเกต ที่เคลือบมัลไลต์..... 49
4.19	โครงสร้างจุลภาคเหล็กหล่อกราไฟต์ตัวหนอน ของไส้แบบโซเดียมซิลิเกต ที่เคลือบเซอร์คอนเบส 50
4.20	โครงสร้างจุลภาคเหล็กหล่อกราไฟต์ตัวหนอน และโซเดียมซิลิเกตของไส้แบบ AM ที่ไม่เคลือบสาร 51
4.21	โครงสร้างจุลภาคเหล็กหล่อกราไฟต์ตัวหนอน และชั้นการเสีรูปรางของกราไฟต์ ของไส้แบบ AM ที่เคลือบฟิลาซิลิเกต..... 51
4.22	โครงสร้างจุลภาคเหล็กหล่อกราไฟต์ตัวหนอน และชั้นการเสีรูปรางของกราไฟต์ ของไส้แบบ AM ที่เคลือบมัลไลต์ 52
4.23	โครงสร้างจุลภาคเหล็กหล่อกราไฟต์ตัวหนอน และชั้นการเสีรูปรางของกราไฟต์ ของไส้แบบ AM ที่เคลือบเซอร์คอนเบส 52
4.24	กราฟเปรียบเทียบความหนาของชั้นการเสีรูปรางของกราไฟต์กับสารเคลือบแต่ละชนิด 53
4.25	โครงสร้างจุลภาคเหล็กหล่อกราไฟต์ตัวหนอนและชั้นการเสีรูปรางของกราไฟต์ ของไส้แบบโซเดียมซิลิเกตขนาดไส้แบบ 0.5 นิ้ว 53
4.26	โครงสร้างจุลภาคเหล็กหล่อกราไฟต์ตัวหนอนและชั้นการเสีรูปรางของกราไฟต์ ของไส้แบบโซเดียมซิลิเกตขนาดไส้แบบ 2.0 นิ้ว 54
4.27	กราฟแสดงความหนาของชั้นการเสีรูปรางของกราไฟต์กับขนาดไส้แบบต่างกัน 55
4.28	ลักษณะการแบ่งชิ้นงานเพื่อนำไปคำนวณหาค่าภาระทางความร้อน 55
4.29	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างภาระทางความร้อนกับไส้แบบที่ขนาดต่างกัน 56
4.30	โครงสร้างจุลภาคเหล็กหล่อกราไฟต์ตัวหนอน ของไส้แบบ AM ที่ขนาดไส้แบบ 0.5 นิ้ว..... 56

สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.31	โครงสร้างจุลภาคเหล็กหล่อกราไฟต์ตัวหนอน ของไส้แบบ AM ที่ขนาดไส้แบบ 2.0 นิ้ว.....57
4.32	โครงสร้างจุลภาคของเหล็กหล่อเหนียวที่ไม่มีกำมะถันในไส้แบบต่อชั้น ความหนาของกราไฟต์แบบแผ่นที่เกิดขึ้น58
4.33	โครงสร้างจุลภาคของเหล็กหล่อเหนียวที่มีปริมาณกำมะถันในไส้แบบ 0.5% โดยน้ำหนักต่อชั้นความหนาของกราไฟต์แบบแผ่นที่เกิดขึ้น59
4.34	โครงสร้างจุลภาคของเหล็กหล่อเหนียวที่มีปริมาณกำมะถันในไส้แบบ 1.0% โดยน้ำหนักต่อชั้นความหนาของกราไฟต์แบบแผ่นที่เกิดขึ้น59
4.35	โครงสร้างจุลภาคของเหล็กหล่อเหนียวที่มีปริมาณกำมะถันในไส้แบบ 1.5% โดยน้ำหนักต่อชั้นความหนาของกราไฟต์แบบแผ่นที่เกิดขึ้น60
4.36	โครงสร้างจุลภาคของเหล็กหล่อเหนียวที่มีปริมาณกำมะถันในไส้แบบ 2.0% โดยน้ำหนักต่อชั้นความหนาของกราไฟต์แบบแผ่นที่เกิดขึ้น60
4.37	โครงสร้างจุลภาคของเหล็กหล่อเหนียวที่มีปริมาณกำมะถันในไส้แบบ 2.5% โดยน้ำหนักต่อชั้นความหนาของกราไฟต์แบบแผ่นที่เกิดขึ้น61
4.38	โครงสร้างจุลภาคของเหล็กหล่อเหนียวที่มีปริมาณกำมะถันในไส้แบบ 3.0% โดยน้ำหนักต่อชั้นความหนาของกราไฟต์แบบแผ่นที่เกิดขึ้น61
4.39	โครงสร้างจุลภาคของเหล็กหล่อเหนียวที่มีปริมาณกำมะถันในไส้แบบ 3.5% โดยน้ำหนักต่อชั้นความหนาของกราไฟต์แบบแผ่นที่เกิดขึ้น62
4.40	ความหนาของชั้นการเสีรูปร่างของกราไฟต์กับปริมาณกำมะถันที่ผสมลง ในไส้แบบ.....63
4.41	ความคดโค้งของชั้นการเสีรูปร่างของกราไฟต์.....64
4.42	ค่าความกลมของกราไฟต์ที่ระยะต่างๆ จากผิวที่สัมผัสกับไส้แบบที่ผสมเพอร์กำมะถัน 3.0% โดยน้ำหนัก.....65
4.43	ความสัมพันธ์ระหว่างระยะความลึกจากผิวและความกลมของกราไฟต์.....66

บทที่ 1

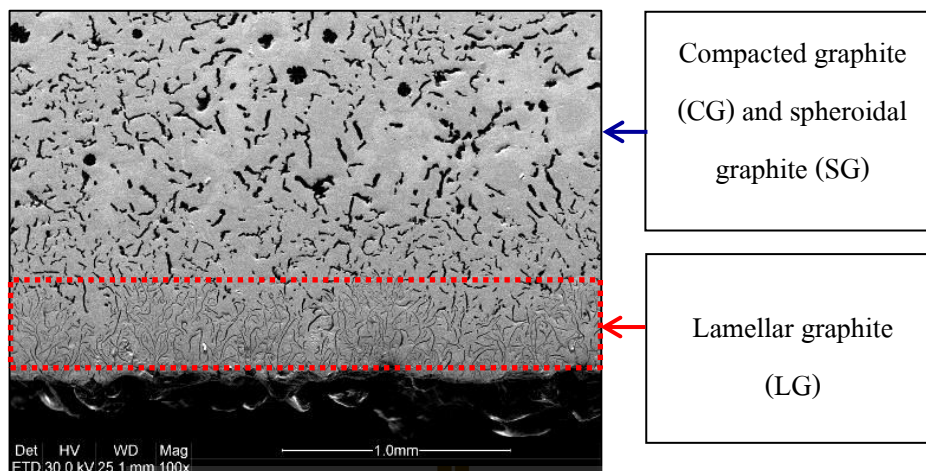
บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

เหล็กหล่อเป็นโลหะที่ถูกลำดับนำไปใช้งานอย่างกว้างขวาง เนื่องจากมีต้นทุนต่ำและสามารถผลิตได้ง่าย อีกทั้งยังมีสมบัติทางกลอยู่ในเกณฑ์ที่ดี เพื่อรองรับความต้องการของผู้บริโภคที่ต้องการสมบัติของเหล็กที่หลากหลายขึ้น จึงมีการพัฒนาเหล็กหล่อหลากหลายเกรด ซึ่งมีสมบัติเชิงกลและสมบัติทางกายภาพที่แตกต่างกันออกไป ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับลักษณะการนำไปใช้งาน เช่น เหล็กหล่อเทา (Gray iron, GI) มีความสามารถในการนำความร้อนและการดูดซับแรงสั่นสะเทือนได้ดี แต่มีความต้านทานแรงดึงต่ำ ในทางตรงกันข้ามเหล็กหล่อเหนียว (Ductile iron, DI) มีความต้านทานแรงดึงสูง แต่ความสามารถในการนำความร้อนและดูดซับแรงสั่นสะเทือนต่ำ ในขณะที่เหล็กหล่อกราไฟต์ตัวหนอน (Compacted graphite iron, CGI) มีสมบัติเชิงกลและกายภาพอยู่ในช่วงระหว่างเหล็กหล่อเทาและเหล็กหล่อเหนียว ซึ่งถือเป็นการรวมข้อดีของเหล็กทั้งสองไว้ด้วยกัน

เหล็กหล่อเป็นโลหะที่ถูกใช้มาอย่างยาวนาน ถูกปรับปรุง และพัฒนาจากผู้เชี่ยวชาญทางด้านโลหะวิทยามากมาย แต่พบว่ายังมีอยู่อีกปัญหาที่ยังไม่ได้รับการแก้ไขอย่างสมบูรณ์ คือโครงสร้างจุลภาคที่ผิวชั้นนอกของเหล็กหล่อเหนียวและเหล็กหล่อกราไฟต์ตัวหนอน มักจะพบว่ากราไฟต์มีความกลมต่ำกว่าที่ควร ตามการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM A536 (Standard specification for ductile iron castings) นั้นชิ้นงานที่ทดสอบจะถูกกลึงผิว ส่วนที่เป็นโครงสร้างการเสีรูปร่างของกราไฟต์จะถูกกลึงออกไปทำให้เมื่อทดสอบสมบัติเชิงกลจะได้ค่าตามเกณฑ์มาตรฐาน แต่ชิ้นงานที่ถูกผลิตในอุตสาหกรรมนั้นส่วนใหญ่จะนำไปใช้งานในสภาพหลังหล่อ (As-cast) ทันที ทำให้อายุการใช้งานของงานหล่อสั้นกว่าที่ออกแบบไว้ ซึ่งปัญหานี้เองจะส่งผลกระทบต่อความผิดพลาดในการออกแบบทางกล ทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีคุณภาพต่ำกว่ามาตรฐานที่กำหนดไว้ ส่งผลต่อให้เกิดของเสียในกระบวนการผลิต หรือปัญหาทางด้านคุณภาพต่างๆ

จากอดีตจนถึงปัจจุบันนักวิจัยหลายคนได้พยายามศึกษาและวิจัยเกี่ยวกับเรื่องผิวงานหล่อในสภาพหลังการหล่อ เช่น การทดสอบการต้านทานแรงดึง [3] การทดสอบขีดจำกัดความล้า [5] อิทธิพลของความหนาของงานต่อการเกิดโครงสร้างบริเวณผิวงานหล่อ [9] รวมไปถึงการศึกษาการเกิดผิวงานหล่อ เพื่อที่จะสามารถควบคุมโครงสร้างและสมบัติที่จำเป็นต่อการนำไปใช้งานให้มีคุณภาพตามความต้องการได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น โดยงานวิจัยนี้ได้ศึกษาอิทธิพลของตัวแปรการหล่อและสารเคลือบไล่แบบที่ส่งผลต่อชั้นการเสีรูปร่างของกราไฟต์ที่ผิวงานหล่อเพื่อเป็นข้อมูลและแนวทางในการผลิตเหล็กหล่อกราไฟต์คู่ที่สามารถควบคุมชั้นความหนาของการเสีรูปร่างของกราไฟต์ได้ รูปที่ 1.1 แสดงการเปรียบเทียบโครงสร้างจุลภาคที่ผิวและภายในของเหล็กหล่อกราไฟต์ตัวหนอน จากภาพจะเห็นได้ว่าโครงสร้างจุลภาคที่ผิวนั้น กราไฟต์มีลักษณะคล้ายกราไฟต์ประเภท D ของเหล็กหล่อเทา



รูปที่ 1.1 โครงสร้างจุลภาคของเหล็กหล่อกราไฟต์ตัวหนอนที่บริเวณผิวงานหล่อเกิดการเสีรูปร่างของกราไฟต์ [6]

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาอิทธิพลของตัวแปรในกระบวนการหล่อโลหะ ได้แก่ ปริมาณแมกนีเซียม เหลือค้ำ อัตราการเย็นตัวต่อการเกิดการเสีรูปร่างของกราไฟต์

1.2.2 เพื่อศึกษาอิทธิพลของสารเคลือบต่อการเสีรูปร่างของกราไฟต์ด้วยสารเคลือบไส้แบบ

1.2.3 ศึกษาและนำความรู้เกี่ยวกับการเสีรูปร่างของกราไฟต์เพื่อนำไปใช้ในการผลิตเหล็กหล่อกราไฟต์คู่

1.3 สมมติฐานของการวิจัย

1.3.1 ตัวแปรของกระบวนการหล่อโลหะ เช่น วัสดุที่ใช้ในการผลิตแบบหล่อ อัตราการเย็นตัว อัตราส่วนระหว่างแมกนีเซียม (Mg) ต่อกำมะถัน (S) มีผลต่อการเสีรูปร่างของกราไฟต์

1.3.2 สารเคลือบไส้แบบบางชนิดสามารถป้องกันการเสีรูปร่างของกราไฟต์ได้

1.3.3 สามารถนำความรู้จากการศึกษาการเสีรูปร่างของกราไฟต์ไปพัฒนาการผลิตเหล็กหล่อกราไฟต์คู่ได้

1.4 ขอบเขตการศึกษา

งานวิจัยนี้มีขอบเขตของการศึกษาดังนี้

1.4.1 ศึกษาอิทธิพลของตัวแปรในกระบวนการหล่อโลหะต่อการเสีรูปร่างของกราไฟต์

1.4.2 ศึกษาอิทธิพลของสารเคลือบไส้แบบต่อการเสีรูปร่างของกราไฟต์

1.4.3 นำความรู้เกี่ยวกับการเกิดการเสีรูปร่างของกราไฟต์ไปการผลิตเหล็กหล่อกราไฟต์คู่

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 สามารถนำไปเป็นข้อมูลในควบคุมตัวแปรต่างๆในกระบวนการหล่อเหล็กหล่อกราไฟต์
ตัวหนอนและเหล็กหล่อกราไฟต์กลมเพื่อให้ได้โครงสร้างและสมบัติตามต้องการ

1.5.2 สามารถนำไปเป็นข้อมูลในการพัฒนาและผลิตเหล็กหล่อกราไฟต์คู่ได้



บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 บทนำ

เหล็กหล่อเป็นอโลหะหนึ่งที่ถูกนำมาใช้ในภาคอุตสาหกรรมอย่างแพร่หลาย เนื่องจากมีสมบัติทางวิศวกรรมหลายประการที่จำเป็นต่อการใช้งาน โดยการจำแนกเหล็กหล่อนั้นสามารถจำแนกได้หลายลักษณะเช่น จำแนกตามส่วนผสมทางเคมี โครงสร้างพื้นฐาน หรือรูปร่างของกราไฟต์ ซึ่งสามารถแบ่งออกได้ เป็นเหล็กหล่อขาว เหล็กหล่อเทา เหล็กหล่อกราไฟต์ตัวหนอน และเหล็กหล่อเหนียว โดยแต่ละชนิดมีสมบัติที่แตกต่างกันไปตามลักษณะของการใช้งาน

ในเหล็กหล่อกราไฟต์ตัวหนอนจะพบปัญหาการเกิดชั้นการเสีรูปร่างของกราไฟต์ (Graphite degradation) ที่บริเวณผิวงานหล่อ ทำให้ได้โครงสร้างจุลภาคคล้ายกับเหล็กหล่อเทา และส่งผลเสียต่อสมบัติทางกลซึ่งไม่เป็นที่พึงประสงค์ของเหล็กหล่อเหนียว เหล็กหล่อที่มีความแข็งแรงสูงคือเหล็กหล่อเหนียว (Ductile iron) เนื่องจากมีรูปร่างของกราไฟต์เป็นทรงกลม อย่างไรก็ตามข้อดีของเหล็กหล่อเหนียวคือมีความสามารถในการนำความร้อนต่ำ ในขณะที่เหล็กหล่อที่มีความสามารถในการนำความร้อนสูงคือเหล็กหล่อเทา (Gray iron) ซึ่งมีรูปร่างของกราไฟต์เป็นลักษณะแผ่น แต่มีความแข็งแรงต่ำ เนื่องจากวัสดุสำหรับผลิตเป็นเสื้อสูบรถยนต์จะต้องสามารถถ่ายเทความร้อนได้ดีและมีความแข็งแรงอยู่ในเกณฑ์ที่รับได้ จึงทำให้เหล็กหล่อเทาเป็นวัสดุดั้งเดิมสำหรับการผลิตเหล็กหล่อ อย่างไรก็ตามการพัฒนาการผลิตเหล็กหล่อกราไฟต์ตัวหนอน ซึ่งมีความแข็งแรงกว่าแต่มีความสามารถในการนำความร้อนใกล้เคียงกับเหล็กหล่อเทา จึงทำให้สามารถนำไปผลิตเป็นเสื้อสูบที่มีสมรรถนะสูงขึ้น หรือในอีกแง่หนึ่งคือสามารถผลิตเสื้อสูบที่มีน้ำหนักเบาได้ ซึ่งนำไปสู่ประสิทธิภาพในการประหยัดน้ำมัน (Fuel efficiency) ที่ดีขึ้น จึงมีการวิจัย [1] ที่เล็งเห็นถึงสมบัติที่ดีทั้งในเหล็กหล่อเหนียวและเหล็กหล่อเทาและพยายามผลิตเหล็กหล่อที่มีสมบัติที่ดีของทั้งเหล็กหล่อทั้งคู่ผ่านการควบคุมการเกิดและตำแหน่งของรวมไปถึงรูปร่างของกราไฟต์ทั้งสองประเภทได้ นำไปสู่นวัตกรรมการออกแบบเสื้อสูบก้าวหน้าที่มีโครงสร้างแบบเหล็กหล่อเทาบริเวณที่ต้องการให้มีการถ่ายเทความร้อนดี และมีโครงสร้างแบบเหล็กหล่อเหนียวบริเวณที่ต้องการให้มีความแข็งแรงสูงโดยเรียกกันว่าเหล็กหล่อกราไฟต์คู่ ในบทนี้จะกล่าวถึงสมบัติของเหล็กหล่อเทา เหล็กหล่อกราไฟต์ตัวหนอน เหล็กหล่อเหนียวและการพัฒนาเหล็กหล่อกราไฟต์คู่ที่เคยมีการค้นคว้าวิจัยและพัฒนา มาจนถึงปัจจุบัน

2.2 สมบัติทั่วไปของเหล็กหล่อเทา เหล็กหล่อกราไฟต์ตัวหนอน และเหล็กหล่อเหนียว

2.2.1 เหล็กหล่อเทา (Gray iron)

เหล็กหล่อเทาเป็นเหล็กหล่อที่มีส่วนผสม และโครงสร้างใกล้เคียงกับเหล็กดิบ (Pig iron) เหล็กหล่อชนิดนี้เมื่อหักออกเนื้อเหล็กตรงรอยหักจะเห็นเป็นสีเทา ซึ่งเป็นสีของกราไฟต์ แตกต่างกับเหล็กหล่อสีขาวซึ่งมีเปอร์เซ็นต์คาร์บอนที่ใกล้เคียงกัน คือประมาณ 2.5 – 4% แต่คาร์บอนในเหล็กหล่อนี้จะเกิดขึ้นเนื่องจากเย็นตัวเป็นไปอย่างช้าๆ ทำให้คาร์บอนส่วนใหญ่จะแยกตัวออกมา รวมกันในรูปของคาร์บอนบริสุทธิ์เป็นแผ่นหรือเกล็ด (Flakes) ซึ่งเรียกว่ากราไฟต์ ดังแสดงในรูปที่ 2.1 ซึ่งทำให้เห็นเนื้อเหล็กเป็นสีเทา แต่ก็ยังมีคาร์บอนในเนื้อเหล็กบางส่วนรวมตัว ในลักษณะสารประกอบ เรียกว่า ซีเมนไตต์ (Cementite) เหมือนในเหล็กหล่อขาว

สมบัติของเหล็กหล่อเทาที่เด่นชัด คือ ทนต่อแรงอัด ทนต่อแรงสั่นสะเทือน ดูดซับเสียง ได้ดี มีความแข็งไม่สูง ทำให้กลึง ไส ดัด เจาะได้ง่าย มีอุณหภูมิหลอมเหลวไม่สูง มีความสามารถในการไหลดี ทำให้หล่อชิ้นงานที่มีรูปร่างซับซ้อนได้ง่าย มีอัตราการขยายตัวต่ำ ทำให้หล่อชิ้นงานได้รูปร่างและขนาดที่แน่นอน ทนต่อการกัดกร่อนได้พอสมควร เนื่องจากมีฟิล์มคาร์บอนที่บริเวณผิว นอกจากนี้ยังสามารถปรับปรุงสมบัติเชิงกลได้จากการปรับปรุงส่วนผสมและการอบชุบ

การใช้งาน ใช้ผลิตชิ้นส่วนของเครื่องยนต์ เช่น ก้านสูบ เสือสูบ เบรก ชิ้นส่วนเครื่องจักรกล เช่น เครื่องม้วน เครื่องปั๊มอัด และแท่นฐานเครื่องจักรกลต่าง ๆ เช่น ฐานเครื่องกลึง ทำปากกาจับชิ้นงาน เป็นต้น ตัวอย่างผลิตภัณฑ์จากเหล็กหล่อเทาแสดงดังรูปที่ 2.2

2.2.2 เหล็กหล่อกราไฟต์ตัวหนอน (Compacted graphite iron)

เหล็กหล่อกราไฟต์ตัวหนอนเป็นเหล็กหล่อที่กระบวนการผลิตจะเหมือนกับการผลิตเหล็กหล่อเหนียวต่างกันที่ ปริมาณของแมกนีเซียมซึ่งจะต่ำกว่าการผลิตเหล็กหล่อเหนียว ซึ่งทำให้กราไฟต์ไม่กลม และมีลักษณะคล้ายตัวหนอน ดังแสดงในรูปที่ 2.3

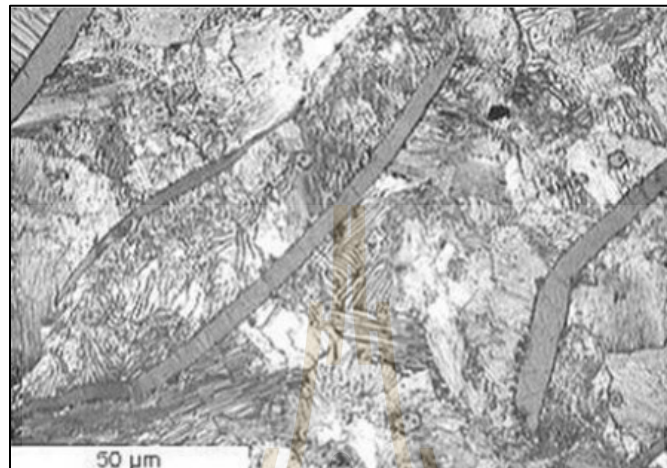
สมบัติของเหล็กหล่อกราไฟต์ตัวหนอนที่เด่นชัด คือ มีความต้านทานแรงดึงสูง และการหดตัวต่ำ มีสมบัติอยู่ระหว่างเหล็กหล่อเทาและเหล็กหล่อเหนียว คือ มีความต้านทานแรงดึงสูงกว่าเหล็กหล่อเทา แต่ความเหนียวจะต่ำกว่า การใช้งานนิยมใช้ทำชิ้นส่วนรถยนต์เช่น เครื่องยนต์ เฟือง ล้อช่วยแรง เบรก และท่อไอเสีย เป็นต้น ตัวอย่างผลิตภัณฑ์จากเหล็กหล่อกราไฟต์ตัวหนอนแสดงดังรูปที่ 2.4

2.2.3 เหล็กหล่อเหนียว (Ductile iron)

เหล็กหล่อเหนียวเป็นเหล็กหล่อที่เติมแมกนีเซียมเข้าไปในระหว่างกระบวนการผลิต โดยแมกนีเซียมจะเปลี่ยนรูปร่างของกราไฟต์จากแผ่นให้เป็นทรงกลม ดังแสดงในรูปที่ 2.5

สมบัติของเหล็กหล่อเหนียวเป็นเหล็กหล่อที่รวมเอาข้อดีของเหล็กหล่อเทาและเหล็กกล้าเข้าไว้ด้วยกัน คือ มีความแข็งแรงสูง สามารถรับแรงกระแทกได้ดี มีจุดหลอมตัวไม่สูง มี

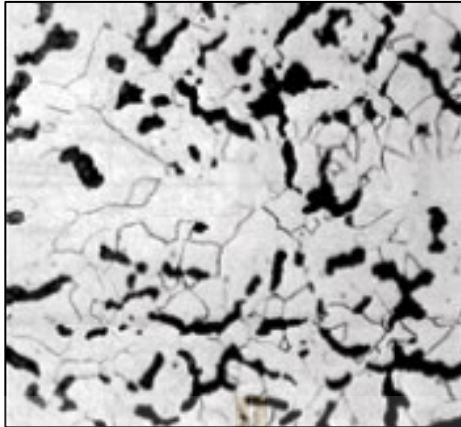
ความสามารถในการไหลดี มีอัตราการขยายตัวต่ำ และต้นทุนการผลิตต่ำกว่าเหล็กกล้า นิยมใช้ทำชิ้นส่วนรถยนต์แทนชิ้นส่วนที่ผลิตมาจากเหล็กกล้าเช่น เพลาลูกเบี้ยว เพลาข้อเหวี่ยง เพลาต่างๆของเครื่องจักร เป็นต้น ตัวอย่างผลิตภัณฑ์จากเหล็กหล่อเหนียวแสดงดังรูปที่ 2.6



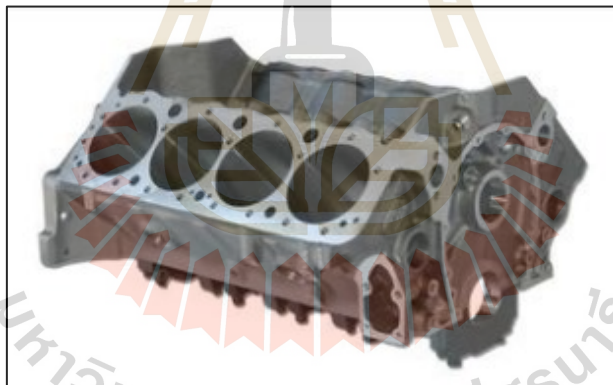
รูปที่ 2.1 โครงสร้างจุลภาคของเหล็กหล่อเทา (ที่มา: www.metals-china.com, 2016)



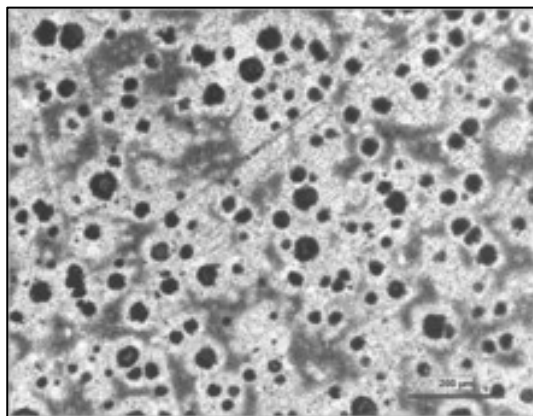
รูปที่ 2.2 ชิ้นส่วนที่ผลิตจากเหล็กหล่อเทา (ที่มา: www.competitiveproduction.com, 2016)



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



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



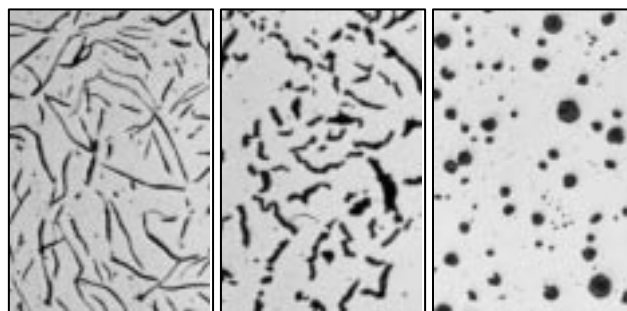
รูปที่ 2.5 โครงสร้างจุลภาคของเหล็กหล่อเหนียว (ที่มา: www.metals-china.com, 2016)



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

2.2.4 เปรียบเทียบสมบัติเชิงกลของเหล็กหล่อเทา เหล็กหล่อกราไฟต์ตัวหนอน และเหล็กหล่อเหนียว

สิ่งที่ทำให้สมบัติเชิงกลของเหล็กหล่อเทา เหล็กหล่อกราไฟต์ตัวหนอน และเหล็กหล่อเหนียวแตกต่างกันนั้นมาจากรูปร่างของกราไฟต์ ดังแสดงในรูปที่ 2.7 กล่าวคือกราไฟต์ที่รูปทรงกลมสามารถรับแรงดึงได้ดีกว่า มีความเหนียวที่มากกว่า ส่วนกราไฟต์ที่เป็นแผ่นสามารถที่จะนำความร้อนได้ดีกว่าและหากสังเกตจากรูปที่ 2.8 ซึ่งถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope) รูปร่างกราไฟต์ของเหล็กหล่อกราไฟต์ตัวหนอน จะมีขนาดสั้น หนา มีความโค้งมนบริเวณปลาย และยึดติดกันมากกว่า ทำให้เกิดการยึดติดระหว่างเนื้อพื้นและกราไฟต์ที่ดีกว่า เหล็กหล่อกราไฟต์ตัวหนอนจึงมีความสามารถในการดูดซับแรงกระแทกได้ดี การนำความร้อนดีเหมือนเหล็กหล่อเทา และมีความแข็งแรงและความเหนียวเหมือนเหล็กหล่อเหนียว ด้วยเหตุผลนี้เองทำให้เหล็กหล่อกราไฟต์ตัวหนอนเป็นที่ได้รับความนิยมในอุตสาหกรรมมากขึ้น

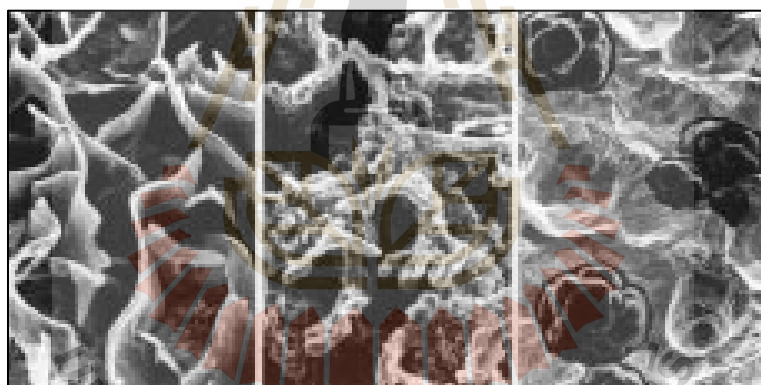


(2.7a)

(2.7b)

(2.7c)

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



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

จากที่กล่าวมาก่อนหน้าถึงสมบัติของเหล็กหล่อทั้ง 3 ชนิดสามารถสรุปได้ว่า เหล็กหล่อเทามีความสามารถในการกลึง ไซ ตัด เจาะ ความสามารถในการรับแรงกระแทก และความสามารถในการนำความร้อนดีกว่าเหล็กหล่อเหนียว แต่เหล็กหล่อเหนียวจะให้ความแข็งแรง และความเหนียวที่สูงกว่า ส่วนเหล็กหล่อกราไฟต์ตัวหนอนนั้นมีสมบัติอยู่กึ่งกลางระหว่างเหล็กหล่อเทาและเหล็กหล่อเหนียว การเปรียบเทียบคุณสมบัติเหล่านี้แสดงได้ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 เปรียบเทียบสมบัติเชิงกลของ เหล็กหล่อเทา เหล็กหล่อกราไฟต์ตัวหนอน และ เหล็กหล่อเหนียว ที่มีโครงสร้างเนื้อพื้นเป็นเพิร์ลไลต์

สมบัติเชิงกล	เหล็กหล่อเทา	เหล็กหล่อกราไฟต์ ตัวหนอน	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

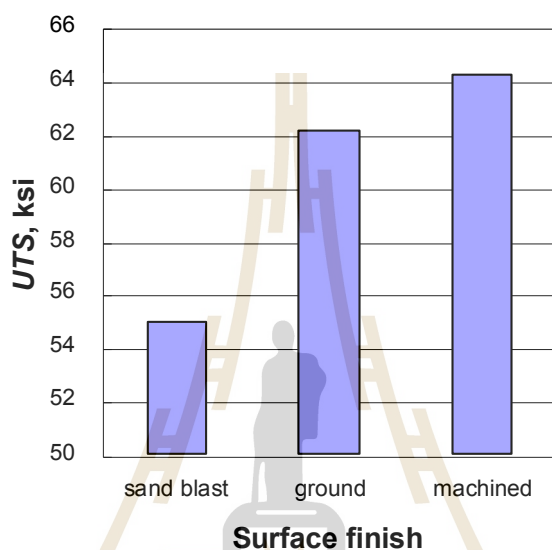
2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการพัฒนาสมบัติเชิงกล

2.3.1 ผลของโครงสร้างผิวงานหล่อต่อความสามารถในการต้านทานแรงดึง

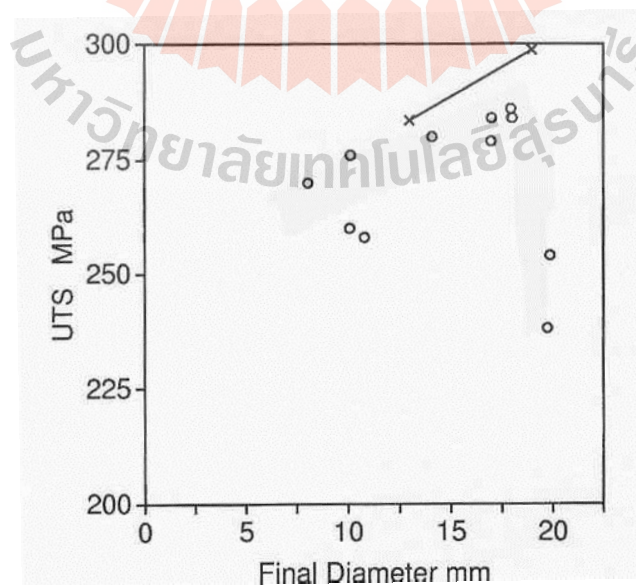
Goodrich และ Lobenhofer [1] ได้ศึกษาอิทธิพลของผิวงานหล่อ(Casting skin) ของเหล็กหล่อเหนียวต่อสมบัติทางกล โดยแบ่งชิ้นงานตัวอย่างสำหรับทดสอบความแข็งแรงดึงและเปอร์เซ็นต์การยืดตัวผลิตตามมาตรฐาน ASTM (American Society for Testing and Materials) จากผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าค่าความแข็งแรงดึงสูงสุด และเปอร์เซ็นต์การยืดตัวของเหล็กหล่อเหนียวลดลงเนื่องมาจากโครงสร้างที่ผิวงานหล่อของชิ้นงานทดสอบ และยังพบว่าชิ้นงานที่มีขนาดเล็กลง จะมีผลกระทบมากขึ้น โดยโครงสร้างที่ชั้นการเสีรูปร่างองกราไฟต์นี้จะอยู่ใกล้ลงไปจากผิวงานหล่อประมาณ 1.3 มิลลิเมตร

Dix และคณะ [2] ได้ทดสอบความสามารถต้านทานแรงดึงของชิ้นงานหล่อของแผ่นเหล็กหล่อเหนียวที่มีความหนา 2.5 ถึง 6 มิลลิเมตร อัตราการเย็นตัวอยู่ที่ 4 – 12 องศาเซลเซียสต่อวินาที และชิ้นงานหลังการหล่อผ่านกระบวนการเตรียมผิวจาก 3 กระบวนการ ได้แก่ ชิ้นงานที่ผ่านการยิงทราย ชิ้นงานที่ผ่านการขัดผิว และชิ้นงานที่ผ่านการกลึง พบว่าชิ้นงานที่ผ่านการขัดผิวความต้านทานแรงดึงเพิ่มขึ้นประมาณ 13% และเพิ่มขึ้นประมาณ 17% เมื่อผ่านการกลึง โดยเปรียบเทียบกับชิ้นงานที่ผ่านการยิงทราย ดังแสดงในภาพที่ 2.9 ทั้งนี้คุณภาพพื้นผิวของแผ่นทดสอบมีอิทธิพลอย่างมากต่อสมบัติทางกล และความขรุขระของพื้นผิวได้รับอิทธิพลมาจากแรงดันน้ำเหล็กและอุณหภูมิเท โดยแรงดันน้ำเหล็กและอุณหภูมิเทที่สูงขึ้นจะส่งผลให้พื้นผิวขรุขระมากขึ้น จากนั้น Mampaey และคณะ [3] ได้ศึกษาอิทธิพลของผิวชิ้นงานเหล็กหล่อเทาต่อค่าความต้านทานแรงดึงดังแสดงในรูปที่ 2.10 ซึ่งเป็นการเปลี่ยนแปลงของความต้านทานแรงดึงของชิ้นงานเหล็กหล่อเทาทรงกระบอกขนาดเส้นผ่าน

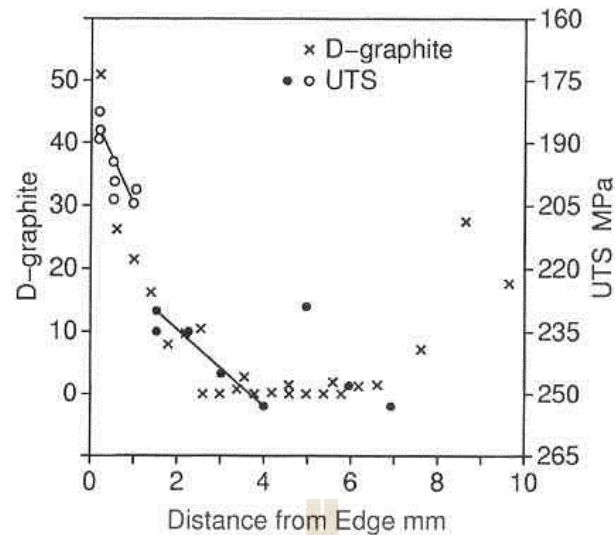
ศูนย์กลาง 20 มิลลิเมตร พบว่าชิ้นงานสภาพผิวหลังหล่อมีความต้านทานแรงดึง ประมาณ 230 – 255 MPa และเมื่อกลึงผิวงานหล่อออกประมาณ 1 มิลลิเมตร พบว่าความต้านทานแรงดึงสูงขึ้นเป็นประมาณ 280 MPa โดย Mampaey และคณะได้สรุปว่าปรากฏการณ์นี้เกิดจากการกำจัดคราไฟต์ประเภท D ที่ผิวชิ้นงาน จากรูปที่ 2.11 แสดงปริมาณคราไฟต์ประเภท D และความต้านทานแรงดึงที่ขึ้นอยู่กับระยะความลึกจากผิวงานหล่อ จะเห็นได้ว่าคราไฟต์ประเภท D มีปริมาณมากที่ผิวชิ้นงานและลดลงอย่างมากที่ระยะความลึกจากผิวชิ้นงานประมาณ 2 – 3 มิลลิเมตร ซึ่งสาเหตุที่ทำให้ความต้านทานแรงดึงสูงขึ้นเนื่องจากชั้นคราไฟต์ประเภท D ถูกกลึงออก



รูปที่ 2.9 ความต้านทานแรงดึงเมื่อนำชิ้นงานตัวอย่างไปผ่านกระบวนการยิงทราย ชัดผิว และกลึงผิว [2]



รูปที่ 2.10 ค่าความต้านทานแรงดึงสูงขึ้นเมื่อชั้นคราไฟต์ประเภท D ถูกกลึงออก [3]

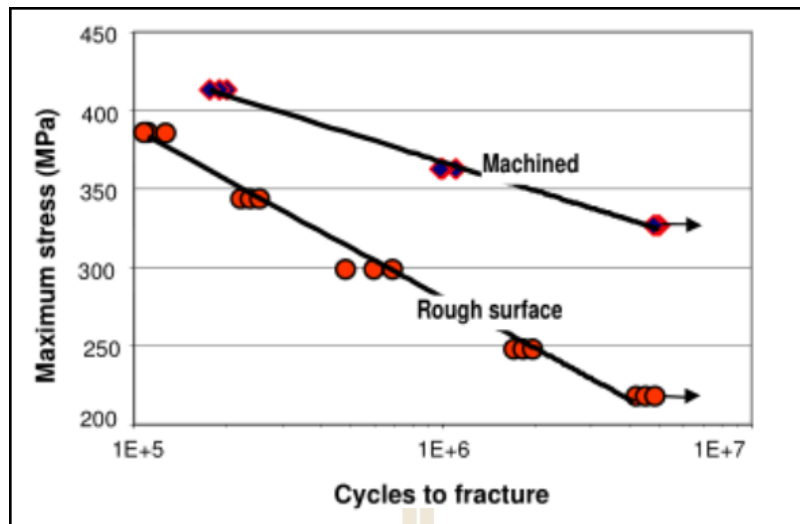


รูปที่ 2.11 ปริมาณกราฟไฟต์ประเภท D ลดลง ตามระยะจากผิวชิ้นงานไปกลางชิ้นงาน [3]

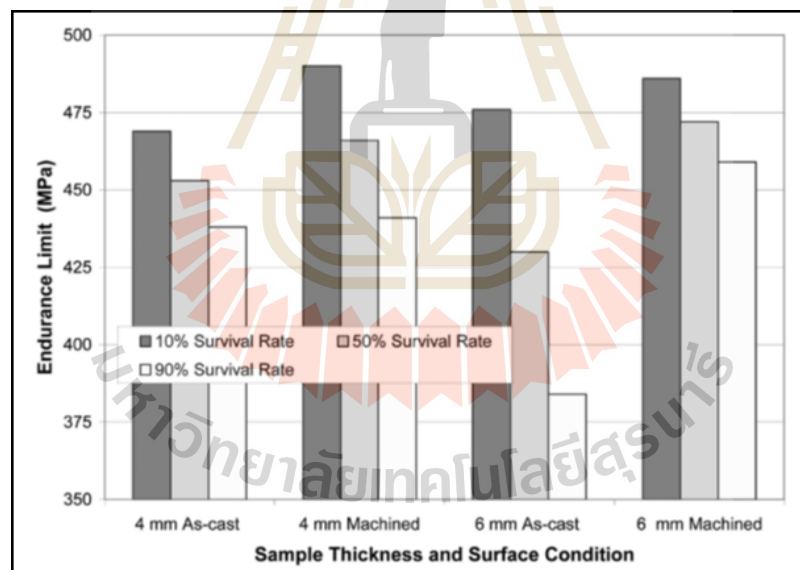
2.3.2 ผลของโครงสร้างผิวงานหล่อต่อความสามารถในการต้านทานความล้า

R. Suaveg [4] ได้ศึกษาอิทธิพลของสภาพผิวที่มีต่อความสามารถในการต้านทานความล้า จากรูปที่ 2.12 จะเห็นว่าที่ความเค้นสูงสุดในชิ้นงานที่ผ่านการกลึงผิวจะมีความสามารถในการต้านทานความล้าได้มากกว่าชิ้นงานสภาพหล่อที่ไม่ได้กลึงผิว Labrecque และคณะ [5] ได้สรุปผลการทดสอบความสามารถในการต้านทานความล้า ของชิ้นงานขนาด 4 และ 6 มิลลิเมตร ชิ้นงานที่ผ่านการกลึงผิวมีความสามารถในการต้านทานความล้าเพิ่มขึ้น 2-19% ดังแสดงในรูปที่ 2.13 ทั้งนี้เนื่องจากงานที่ไม่ผ่านการกลึงผิวโครงสร้างในสภาพหลังการหล่อนั้นประกอบไปด้วยพื้นผิวหรือใต้ผิวงานหล่อที่มีความขรุขระ ชั้นการเสีรูปร่างของกราฟไฟต์ (Graphite degradation) ขอบของเพิร์ลไลต์ (Pearlitic rim) และขอบของเฟอร์ไรต์ (Ferritic rim) ซึ่งมีสมบัติทางกลต่ำกว่ามาตรฐานที่ ASTM กำหนด

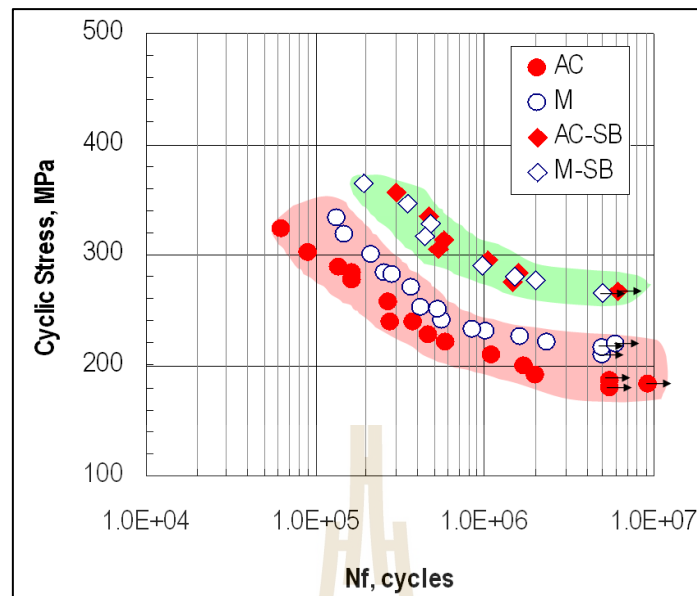
Boonmee และคณะ [6] ได้ทดลองเปรียบเทียบความสามารถในการต้านทานความล้าของชิ้นงานหล่อกับชิ้นงานที่ผ่านการกลึงผิว พบว่าชิ้นงานที่ผ่านการกลึงผิวมีความสามารถในการต้านทานความล้าเพิ่มขึ้น 43.5% และเปรียบเทียบความสามารถในการต้านทานความล้าของชิ้นงานหล่อแล้วนำไปยิงทราย (Shot blasting) กับชิ้นงานที่ผ่านการกลึงผิวแล้วนำไปยิงทราย พบว่า ชิ้นงานที่ผ่านการกลึงผิวและผ่านการยิงทรายมีความสามารถในการต้านทานความล้าเพิ่มขึ้น 21.4% เนื่องจากการกลึงผิวและการยิงทรายได้กำจัดผิวงานหล่อที่มีผลกระทบต่อความสามารถในการต้านทานความล้าออกไปทำให้มีความสามารถในการต้านทานการล้าเพิ่มขึ้นดังแสดงในรูป 2.14



รูปที่ 2.12 ความสามารถในการต้านทานความความล้าระหว่างชิ้นงานที่ผ่านการกลึงผิวกับชิ้นงานสภาพหลังหล่อ [4]



รูปที่ 2.13 ความสามารถในการต้านทานความความล้าระหว่างชิ้นงานที่ผ่านการกลึงผิว กับชิ้นงานสภาพหลังหล่อของชิ้นงานขนาด 4 และ 6 มิลลิเมตร [5]

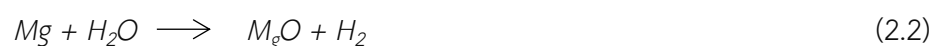


รูปที่ 2.14 S-N curves ของชิ้นงานหลังหล่อ (AC) ชิ้นงานที่ผ่านการกลึงผิว (M) ชิ้นงานหลังหล่อที่ผ่านการยิงทราย (AC-SB) และชิ้นงานที่ผ่านการกลึงผิวแล้วนำไปยิงทราย (M-SB) สำหรับเหล็กหล่อกราไฟต์ตัวหนอนที่มีค่าความกลม 15% [6]

2.4 กลไกการเกิดการเสีรูปร่างของกราไฟต์

2.4.1 การสูญเสียแมกนีเซียมที่เกิดจากการทำปฏิกิริยากับออกซิเจน (Mg depletion due to oxidation)

Boonmee และ Stefanescu [7] ได้ศึกษาการเกิดและผลกระทบของผิวงานหล่อในเหล็กหล่อกราไฟต์ตัวหนอน โดยสรุปถึงการเสีรูปร่างของกราไฟต์ได้ว่า เกิดการสูญเสียแมกนีเซียมในผิวงานหล่อซึ่งทำปฏิกิริยากับคาร์บอนไดออกไซด์ น้ำ และออกซิเจนที่อยู่ในแบบหล่อ โดยอธิบายได้ดังสมการต่อไปนี้



เมื่อพิจารณาจากพลังงานอิสระของกิบส์ (Gibbs free energies) ในการเกิดปฏิกิริยา ดังตารางที่ 2.2 จะพบว่า ปฏิกิริยาที่ 2 มีพลังงานอิสระของกิบส์ต่ำที่สุดทำให้มีโอกาสเกิดได้มากที่สุด ในทรายที่แห้งและมีความชื้นเล็กน้อย เช่น ทรายแบบที่ทำจากโซเดียมซิลิเกตปฏิกิริยาที่เกิดจะเป็น ปฏิกิริยาที่ 3

ตารางที่ 2.2 พลังงานอิสระของกิบของการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของ Mg ที่อุณหภูมิ 1,600 °K [7]

Reaction	$\Delta G_f^\circ, \text{kJ/mol}$
$\text{Mg} + \text{CO}_2 \longrightarrow \text{MgO} + \text{CO}$	-285.6
$\text{Mg} + \text{H}_2\text{O} \longrightarrow \text{MgO} + \text{H}_2$	-794.3
$\text{Mg} + \frac{1}{2}\text{O}_2 \longrightarrow \text{MgO}$	-554.0

ดังนั้นทรายแบบมีความชื้นสูงจะสูญเสียแมกนีเซียมที่ผิวงานหล่อสูงซึ่งความหนาของการเสีรูปร่างของกราไฟต์ก็จะเพิ่มขึ้น

2.4.2 การสูญเสียแมกนีเซียมที่เกิดจากการทำปฏิกิริยากับกำมะถัน (Mg depletion due to desulfurization)

โดยปกติแล้วแมกนีเซียมจะทำปฏิกิริยากับกำมะถันในแบบหล่อ และกำมะถันที่เกิดจากการเผาไหม้ของกรดพีทีเอสเอ (P-Toluene sulfonic acid, PTSA) ซึ่งเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในสารฟูแรนเรซิน (Furan resin) และ ฟีนอลิก โพลียูรีเทน (Phenolic urethane) ทำให้เกิดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ก๊าซนี้จะทำปฏิกิริยากับแมกนีเซียมเป็นแมกนีเซียมซัลไฟด์ ส่งผลให้เกิดการสูญเสียแมกนีเซียมที่ผิวงานหล่อและเกิดการเสีรูปร่างของกราไฟต์ นอกจากนี้การใช้ทรายที่ผ่านการหล่อก่อนแล้ว (Furan and phenolic urethane) มาเป็นส่วนผสมในการทำแบบหล่อใหม่และทำให้ชั้นความหนาของการเสีรูปร่างของกราไฟต์เพิ่มขึ้น

2.5 ตัวแปรที่มีผลต่อการเกิดการเสีรูปร่างของกราไฟต์

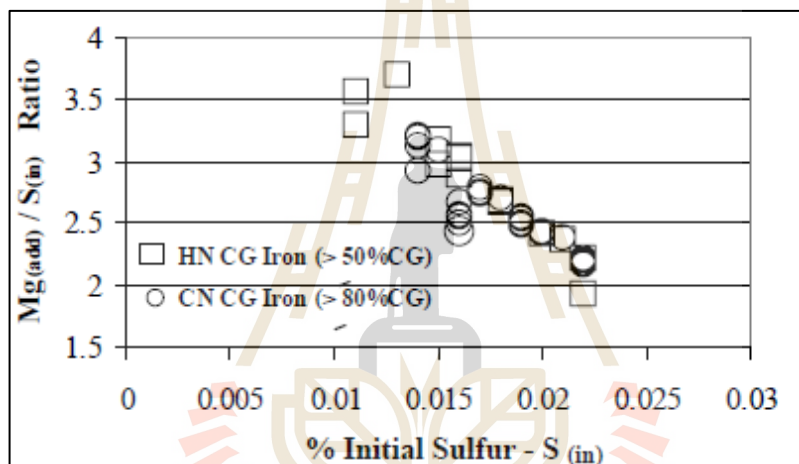
2.5.1 อุณหภูมิเท

อุณหภูมิเทจะส่งผลต่อการสูญเสียแมกนีเซียมโดยตรงเนื่องจากแมกนีเซียมจะกลายเป็นไอที่อุณหภูมิ ประมาณ 1,100 °C ดังนั้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิเทจึงทำให้แมกนีเซียมสูญเสียไปกับการกลายเป็นไอมากขึ้น นอกจากนี้แมกนีเซียมยังมีการสูญเสียจากการทำปฏิกิริยาออกซิเดชันอีกด้วย

2.5.2 อัตราส่วนระหว่างแมกนีเซียมและกำมะถัน (Mg/S ratio)

โดยปกติการผลิตเหล็กหล่อกราไฟต์กลมและกราไฟต์ตัวหนอนจะกำจัดกำมะถัน ซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดกราไฟต์แผ่นในเหล็กหล่อเทา โดยการเติมแมกนีเซียมเพื่อให้เกิดสารประกอบแมกนีเซียมซัลไฟด์ระหว่างการหล่อเหล็กหล่อกราไฟต์กลม และเหล็กหล่อกราไฟต์ตัวหนอน

Riposan และคณะ [8] ทำการทดลองหาอัตราส่วนระหว่างแมกนีเซียมและกำมะถัน พบว่า Mg/S ratio ที่ 2.0-3.2 จะทำให้ได้คุณสมบัติเหล็กหล่อกราไฟต์ตัวหนอนที่ดีที่สุด หากมากกว่า 3.2 จะส่งผลให้ค่าความกลมของกราไฟต์สูงขึ้น และปริมาณเหล็กหล่อกราไฟต์ตัวหนอนจะลดลง ดังแสดงในรูปที่ 2.15



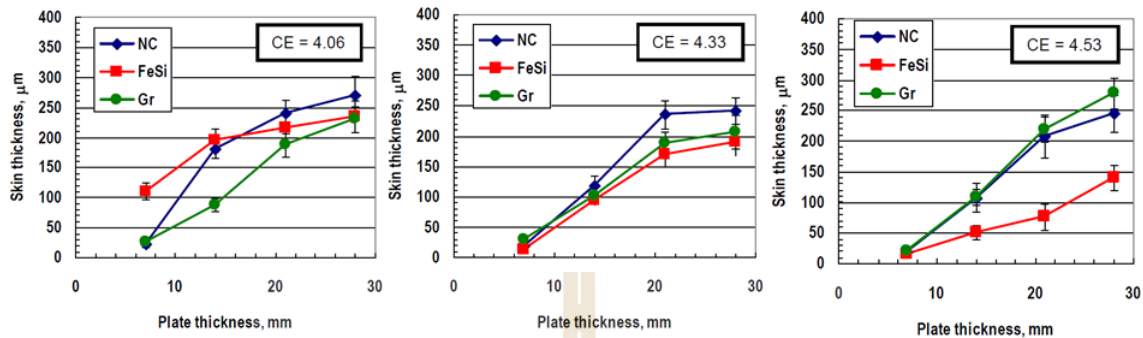
รูปที่ 2.15 อิทธิพลของอัตราส่วน Mg(Add)/S(in) ต่อการฟอร์มตัวของเหล็กหล่อกราไฟต์ตัวหนอน ที่ระดับของกำมะถันเริ่มต้นที่ต่างกัน [8]

2.5.3 ความหนาของชิ้นงาน

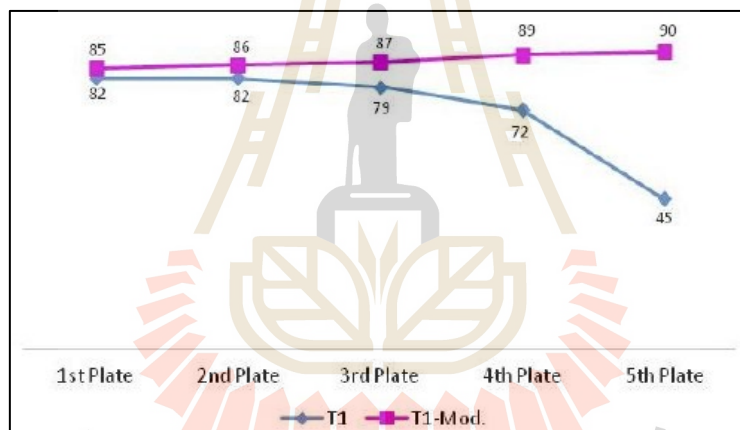
Boonmee และ Stefanescu [9] ได้หล่อชิ้นงานที่มีความหนาแตกต่างกันเพื่ออธิบายการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของแมกนีเซียมโดยชิ้นงานที่มีความหนาจะมีช่วงเวลาการแข็งตัวที่นานขึ้น มีเวลาให้แมกนีเซียมทำปฏิกิริยากับออกซิเจนนานขึ้น ส่งผลให้ชิ้นการเสีรูปร่างของกราไฟต์เพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 2.16

Rianti Dewi Sulamet-Ariobono และคณะ [10] ได้ทดลองหล่อชิ้นงานที่มีความหนาต่างกันเพื่อศึกษาผลกระทบของความหนาชิ้นงานต่อการเกิดโครงสร้างผิว ดังแสดงในภาพที่ 2.17 โดย T₁-Mod จะมีปริมาณแมกนีเซียมมากกว่า T₁ อยู่ 75% พบว่า ชิ้นงาน T₁-Mod เมื่อความหนาของชิ้นสูงขึ้นความกลมของกราไฟต์จะสูงขึ้น แต่ชิ้นงาน T₁ ค่าความกลมจะลดต่ำลงเนื่องจากได้รับผลกระทบ

จากปัญหาการเสีรูปร่างของกราไฟต์จากการสูญเสีย Mg โดยชิ้นงานที่หนาขึ้นจะทำให้ชั้นการเสีรูปร่างของกราไฟต์หนาขึ้นเนื่องจากอัตราการเย็นตัวที่ช้า ทำให้มีเวลาในการทำปฏิกิริยาที่มากขึ้น ส่วน T₁-Mod ไม่เกิดการเสีรูปร่างของกราไฟต์เนื่องจากมีปริมาณแมกนีเซียมสูงกว่า T₁



รูปที่ 2.16 ค่าความหนาของชิ้นงานต่อชั้นของการเกิดการเสีรูปร่างของกราไฟต์ [9]



ภาพที่ 2.17 ผลของความหนาของชิ้นงานต่อค่าความกลมของกราไฟต์ [10]

2.5.4 วัสดุสำหรับทำแบบหล่อ (Molding materials)

2.5.4.1 แบบหล่อทรายขึ้น (Green sand mold) การหล่อด้วยแบบหล่อทรายขึ้น

เป็นการหล่อด้วยแบบหล่อทรายที่นิยมกันมากที่สุดเนื่องจากมีต้นทุนต่ำ ซึ่งส่วนประกอบของแบบหล่อทรายขึ้นจะประกอบด้วยส่วนต่างๆ ดังนี้

- ทรายแก้ว ซึ่งจะมีปริมาณ SiO₂ มากกว่า 90% มีลักษณะสีขาว จุดหลอมตัวประมาณ 1,700 °C แต่หากมีสารเจือปนอาจทำให้อุณหภูมิหลอมตัวต่ำลง
- ตัวประสาน (Binder) ซึ่งจะเป็นดินเหนียวซึ่งโดยธรรมชาติของดินเหนียวส่วนใหญ่จะประกอบด้วยไฮเดรต ซิลิเกต และอลูมินา แยกออกเป็น 3 กลุ่มคือ ดินเหนียวคาโอลิไนต์

(Kaolinite) หรือไชน่าเคลย์เป็นดินสีขาว มีสมบัติทนความร้อนสูง แต่มีความเหนียวน้อย ดินเหนียว ball clay แต่จะมีความละเอียดมากกว่าและให้ความเหนียวมากกว่าประเภทแรก ใช้ผสมทรายแบบ เพื่อเพิ่มคุณสมบัติด้านความแข็งแรงในสภาพแห้ง (Dry strength) ดินเหนียวเบนโทไนต์ (Bentonite clay) เป็นดินเหนียวที่ได้มาจากการสลายตัวของแร่ภูเขาไฟ เป็นดินเหนียวที่ดูดซึมน้ำ และขยายตัว (Swelling) ได้มาก ทำให้มีความเหนียวสูงมากเหมาะสำหรับผสมปั้นทรายแบบ โดยปกตินิยมใช้ เบนโทไนต์มากที่สุด

- สารเติมแต่งมีหลายชนิด ได้แก่ สารที่ให้คาร์บอน เช่นซีโคล กิลโซไนต์ ลิกไนต์ แอสฟัลต์ และสารอื่นๆเช่น ซีเรียล แป้ง เซลลูโลส

- น้ำ

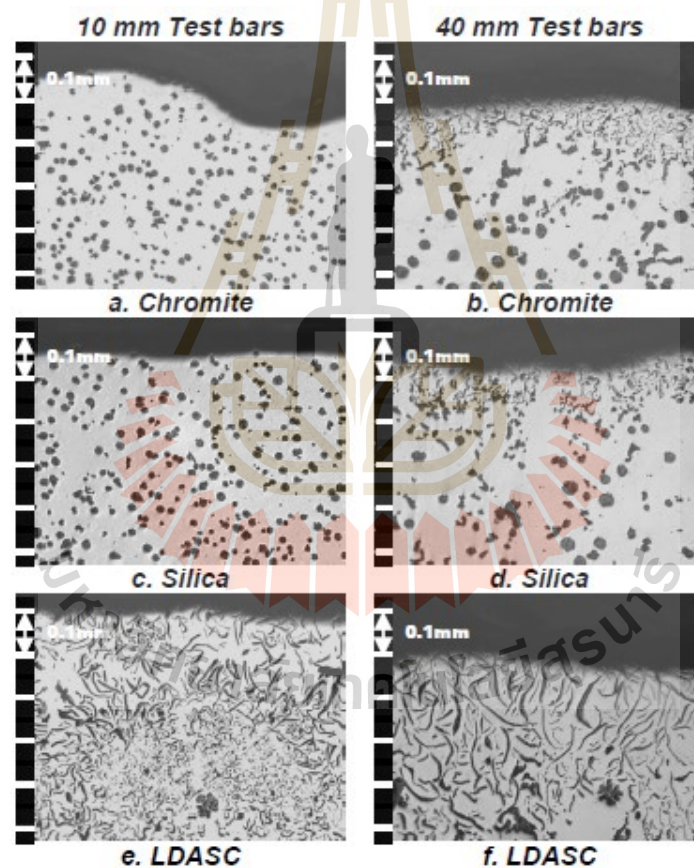
แต่แบบหล่อทรายขึ้นก็มีข้อจำกัดเช่น หากมีปริมาณน้ำน้อยเกินไปอาจทำให้ผสมไม่ทั่วถึงได้ความแข็งแรงต่ำ แต่ถ้าปริมาณน้ำมากเกินไปอาจทำให้ความแข็งแรงต่ำ และความชื้นในทรายสูงทำให้เกิดไอน้ำมากอาจส่งผลให้เกิดแก๊สฝังตัวอยู่ในงานหล่อได้

2.5.4.2 แบบหล่อที่ผลิตโดยการเพิ่มเนื้อวัสดุ (Additive manufacturing mold, AM mold, AM mold) หรืออาจเรียกอีกอย่างว่า 3D printing ซึ่งเป็นกระบวนการขึ้นรูปแบบ 3 มิติ โดยวัสดุที่ขึ้นรูปนั้นจะมีสถานะเป็นของแข็งและถูกควบคุมการขึ้นรูปด้วยคอมพิวเตอร์ ซึ่งวัสดุที่นำมาเติมนั้นจะถูกยึดให้ติดกันด้วยตัวประสาน รูปทรงของชิ้นงานจะถูกออกแบบด้วยโมเดล 3 มิติ โดยสามารถใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ประเภท CAD (Computer aided design) ในการออกแบบ นอกจากนี้ยังสามารถใช้เครื่องสแกน 3 มิติ ในการเปลี่ยนวัตถุในโลกความจริงไปเป็นไฟล์ดิจิทัล ที่สามารถนำไปผลิตโมลด์จากเครื่องพิมพ์แบบหล่อ 3 มิติได้ โดย AM mold มีปริมาณกัมมะถันสูง ซึ่งแมกนีเซียมจะทำปฏิกิริยากับกัมมะถันในแบบหล่อซึ่งสามารถตรวจสอบได้จากกลไกการเกิดการพองของแมกนีเซียม เนื่องจากการสูญเสียกัมมะถัน

Duncan และ Kroker [11] ได้ทำการทดลองเพื่อหาผลกระทบของวัสดุที่ใช้ทำแบบหล่อที่มีต่อโครงสร้างบริเวณผิวของเหล็กหล่อกราไฟต์ตัวหนอนด้วยแบบหล่อที่แตกต่างกันดังแสดงในตารางที่ 2.3 ได้แก่แบบหล่อจากทรายโครไมต์ ทรายซิลิกา และ Low density alumina-silicate ceramic (LDASC) โดยใช้สารเคลือบจำพวกเซอร์คอน และไมกา พบว่าวัสดุแบบหล่อต่างชนิดกันจะเกิดผลกระทบกับโครงสร้างบริเวณผิวของชิ้นงานทดสอบที่ต่างกันดังแสดงในรูปที่ 2.18 ทั้งนี้แบบหล่อทรายขึ้นที่มีความชื้นสูงอาจทำให้เกิดการพองของแมกนีเซียมได้ เนื่องจากความชื้นในแบบหล่อสามารถทำปฏิกิริยาและเกิดการออกซิไดซ์แมกนีเซียมในน้ำเหล็กหลอมเหลว

ตารางที่ 2.3 วัสดุแบบหล่อชนิดต่างๆที่ใช้ในการทดลอง [11]

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



รูปที่ 2.18 อิทธิพลของวัสดุแบบหล่อต่อโครงสร้างผิวงานหล่อ [11]

จากรูปที่ 2.18 เมื่อเปรียบเทียบระหว่างความหนาของชิ้นงานทดสอบพบว่าชิ้นงานทดสอบที่ความหนา 40 มิลลิเมตรมีปริมาณการเกิดชั้นการเสีรูปร่างของกราไฟต์มากกว่าที่ความหนา 10 มิลลิเมตร

และแบบหล่อที่ทำจาก LDASC ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของกราไฟต์มากกว่าวัสดุอื่นอย่างเห็นได้ชัด โดยตารางที่ 2.4 ได้แสดงการเปรียบเทียบระหว่างความหนาของชั้นการเสีรูปร่างของกราไฟต์ต่อความหนาของชิ้นงานทดสอบและวัสดุที่ใช้ทำแบบหล่อ

ตารางที่ 2.4 แสดงค่าความหนาของโครงสร้างผิวที่เสีรูปร่างของกราไฟต์ [11]

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) มีอิทธิพลต่อโครงสร้างผิวมากที่สุด คือให้ความหนามากกว่าของชั้นการเสีรูปร่างของกราไฟต์ 0.4-0.6 มิลลิเมตร

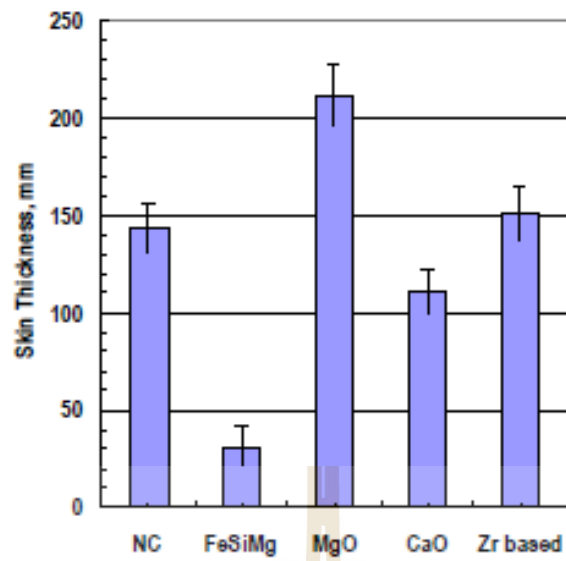
2.5.5 สารเคลือบแบบ (Coating)

ในงานวิจัยของ Boonmee และ Stefanescu [9] ได้ทำการทดลองโดยนำไส้แบบไปจุ่มสีทาแบบแต่ละชนิดโดยสีทาแบบที่ใช้จะแบ่งออกเป็น 3 กลุ่ม ได้แก่

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

2.5.5.2 Reactive coating เป็นสีทาแบบที่ทำปฏิกิริยาเคมีจะมีอยู่ 3 ชนิด ได้แก่ แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) แคลเซียมออกไซด์ (CaO) และ เฟอร์โรซิลิคอนแมกนีเซียม (FeSiMg) โดยตัวอย่างการเกิดปฏิกิริยาเคมี เช่น แมกนีเซียมในเฟอร์โรซิลิคอนแมกนีเซียมจะทำปฏิกิริยากับออกซิเจนหรือซัลไฟด์เฟอร์ ช่วยลดความหนาของชั้นการเสีรูปร่างของกราไฟต์ได้

2.5.5.3 Active coating เป็นสีทาแบบที่ไม่เกิดปฏิกิริยา แต่จะมีธาตุเจือลงไปในตัวเหล็ก เช่น คาร์บอน ที่มาจากสารเคลือบกราไฟต์ ซึ่งก็จะเพิ่มคาร์บอนในงานหล่อ ในกลุ่มนี้จะมีสีทาแบบอยู่ 2 ชนิดคือ เฟอร์โรซิลิคอน (Ferrosilicon) และ กราไฟต์ พบว่าเฟอร์โรซิลิคอนแมกนีเซียมช่วยลดชั้นความหนาของการเสีรูปร่างของกราไฟต์ได้มากที่สุด เนื่องจากอัตราการเย็นตัวสูงสุดที่ต่ำ ทำให้ได้ค่าความกลมของกราไฟต์สูง จึงมีส่วนช่วยให้ไม่เกิดการเสีรูปร่างของกราไฟต์ ส่วนแมกนีเซียมออกไซด์ มีค่าการนำความร้อนที่สูงทำให้มีช่วงการแข็งตัวนานจึงส่งผลให้เกิดการเสีรูปร่างกราไฟต์มากขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 2.19



รูปที่ 2.19 อิทธิพลของสารเคลือบสีแบบแต่ละชนิดต่อความหนาของชั้นโครงสร้างการเสียรูปร่างของกราฟไฟต์ [12]

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 บทนำ

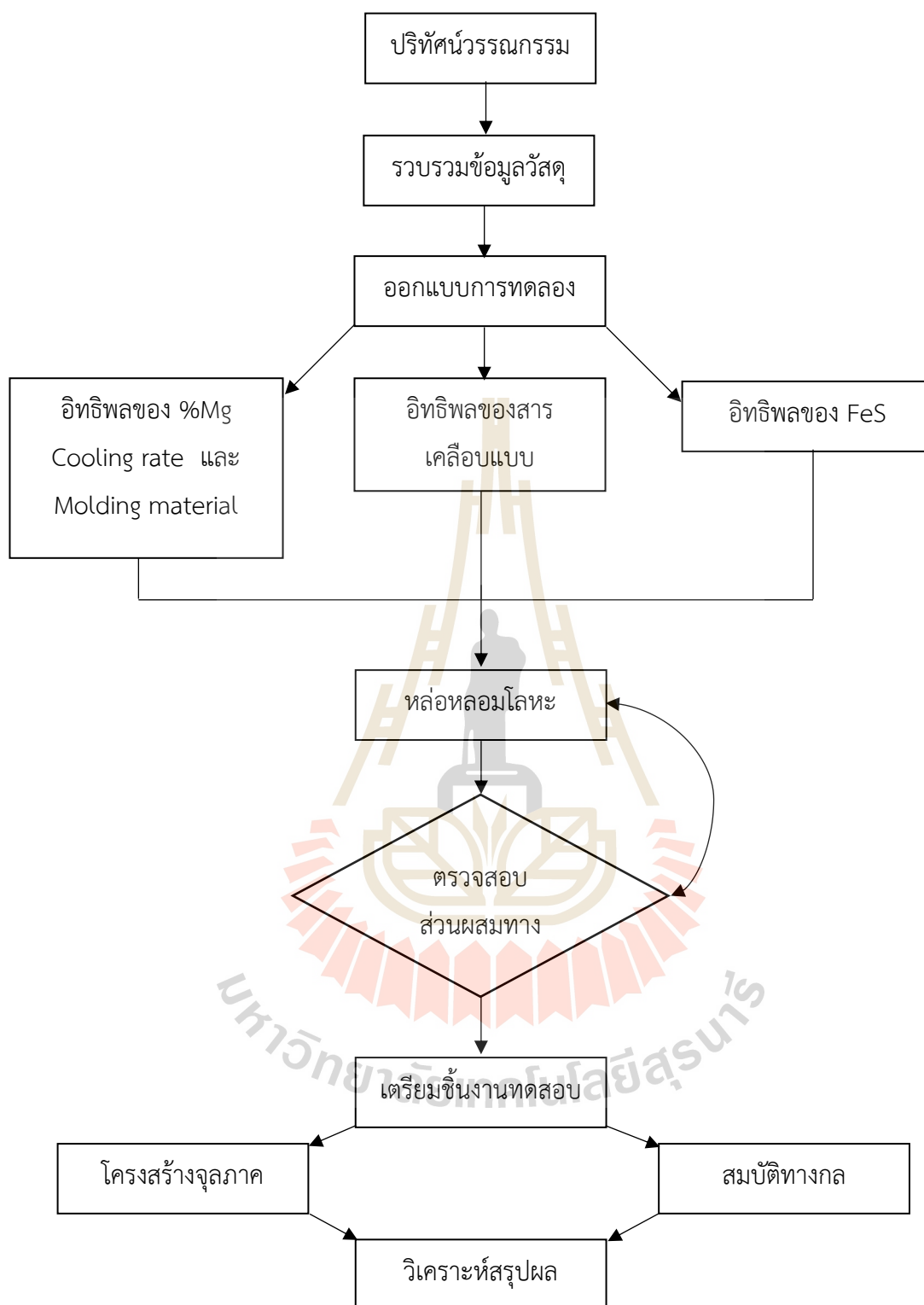
งานวิจัยนี้ได้แบ่งการทดลองออกเป็น 3 ชุดการทดลองโดยศึกษาอิทธิพลของตัวแปรต่างๆในกระบวนการหล่อโลหะต่อโครงสร้างจุลภาคที่ผิวงานหล่อ มีการออกแบบงานหล่อและจำลองการหล่อโดยใช้โปรแกรม ProCastVer. 2016 เพื่อสังเกตลักษณะการเย็นตัว โดยชุดการทดลองแรกศึกษาอิทธิพลของวัสดุที่ใช้ทำแบบหล่อ อัตราการเย็นตัว และปริมาณแมกนีเซียมที่ 0.01-0.03% ซึ่งใช้แบบหล่อทรายขึ้นและแบบหล่อที่ผลิตจากการผลิตแบบเพิ่มเนื้อวัสดุ (Additive manufacturing mold, AM mold) ที่ออกแบบขึ้นงานให้มีความหนาแตกต่างกัน ชุดการทดลองที่ 2 ศึกษาอิทธิพลของสารเคลือบไส้แบบต่อการเกิดโครงสร้างจุลภาคที่ผิวงานหล่อในเหล็กหล่อกราไฟต์ตัวหนอน ซึ่งในการทดลองจะแบ่งออกเป็น 4 เงื่อนไขโดยจะใช้ไส้แบบที่ผลิตจากเครื่องพิมพ์แบบหล่อ 3 มิติและโซเดียมซิลิเกตโดยกำหนดขนาดไส้แบบให้มีขนาดแตกต่างกันที่ 0.5 1.0 1.5 และ 2.0 นิ้ว สารเคลือบไส้แบบที่ใช้ ได้แก่ ฟิลโลซิลิเกต มัลโลสต์ และเซอร์คอนเบส ชุดการทดลองที่ 3 ศึกษาอิทธิพลของกำมะถันในไส้แบบโซเดียมซิลิเกตในปริมาณที่แตกต่างกันคือ 0 0.5 1.0 1.5 2.0 2.5 3.0 และ 3.5 ร้อยละโดยน้ำหนัก 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

$$CE = \%C + \left(\frac{\%Si + \%P}{3} \right) \quad (3.1)$$

โดย %C คือ ร้อยละโดยน้ำหนักของธาตุคาร์บอนที่เจืออยู่ในเหล็กหล่อ
%Si คือ ร้อยละโดยน้ำหนักของธาตุซิลิคอนที่เจืออยู่ในเหล็กหล่อ
%P คือ ร้อยละโดยน้ำหนักของธาตุฟอสฟอรัสที่เจืออยู่ในเหล็กหล่อ



รูปที่ 3.1 ขั้นตอนดำเนินการวิจัย

3.2 เครื่องมือ อุปกรณ์ และวัสดุที่ใช้ในการทดลอง

- 3.2.1) เครื่องพิมพ์พลาสติก 3 มิติ
- 3.2.2) เครื่องพิมพ์แบบหล่อ 3 มิติ
- 3.2.3) เตาอินดักชั่นสำหรับหลอมโลหะ
- 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) เหล็กตีบ
- 3.2.19) เฟอร์โรซิลิคอน
- 3.2.20) เฟอร์โร ซิลิก้า 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 (Additive Manufacturing)

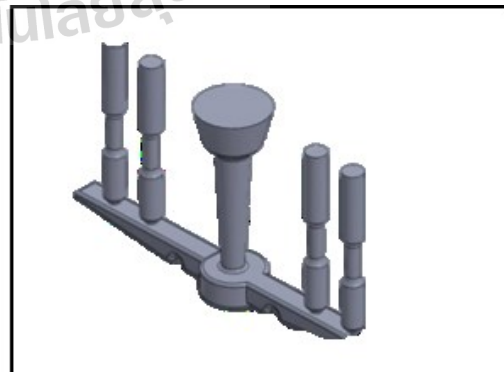
- ออกแบบชิ้นงานแบบหล่อทรายสามมิติด้วยโปรแกรม Solidworks โดยชิ้นงานที่ทำการออกแบบมีอยู่ 3 แบบคือ แบบ Dog bone, ทรงกระบอก (Cylinder) และ แบบ Step ดังแสดงในรูปที่ 3.2

- นำแบบจำลองที่ได้ออกแบบในข้อที่ไปทำการจำลองการไหลของน้ำเหล็กด้วยโปรแกรม Procast

- เตรียมแบบหล่อรูปกระดุกดังแสดงในรูป 3.3 ด้วยการขึ้นรูปด้วยการพิมพ์แบบหล่อทรายสามมิติ มีวัตถุประสงค์เพื่อหาอิทธิพลของโครงสร้างภายใต้ผิวงานหล่อต่อความต้านทานแรงดึง ความต้านทานแรงดิ่ง ณ จุดคราก และเปอร์เซ็นต์การยึดตัวของเหล็กหล่อประเภทต่าง ๆ

- เตรียมแบบหล่อทรงกระบอกด้วยการขึ้นรูปด้วยการพิมพ์แบบหล่อทรายสามมิติจะนำมากลึงผิวนอกให้มีรูปร่างตามชิ้นงาน Dog bone เพื่อเปรียบเทียบความต้านทานแรงดึง ความต้านทานแรงดิ่ง ณ จุดคราก และเปอร์เซ็นต์การยึดตัวของเหล็กหล่อประเภทต่างๆต่อชิ้นงาน

- เตรียมแบบหล่อ Step ด้วยการขึ้นรูปด้วยการพิมพ์แบบหล่อทรายสามมิติ มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอิทธิพลของตัวแปรต่าง ๆ เช่น อุณหภูมิเท ปริมาณแมกนีเซียม อัตราการเย็นตัวต่อความหนาของชั้นโครงสร้างภายใต้ผิวงานหล่อ สำหรับแบบหล่อประเภทนี้จะขึ้นรูปการพิมพ์แบบหล่อทรายสามมิติ สำหรับแบบหล่อ Dog bone ชิ้นงานมีขนาดและรูปร่างตามมาตรฐาน ASTM E8 มีความยาวแกนเท่ากับ 50 มิลลิเมตร สำหรับแบบหล่อ step ออกแบบให้มีความหนาแตกต่างกันเพื่อศึกษาอิทธิพลของอัตราการเย็นตัว มีความหนาตั้งแต่ 7 14 21 และ 28 มิลลิเมตร ตามลำดับ



รูปที่ 3.2 การออกแบบชิ้นงานแบบหล่อทรายสามมิติด้วยโปรแกรม Solidworks

3.3.1.2 การเตรียมชิ้นงานเพื่อศึกษาอัตราการเย็นตัวของชิ้นงานที่เทในแบบหล่อทรายขึ้น

- ทำกระสวน Step ตามที่ได้ออกแบบไว้ก่อนหน้านี้
- ผสมทรายกับตัวประสาน สารเติมแต่ง และน้ำ ลงในเครื่องผสมทรายให้ได้ความชื้นที่สามารถทำแบบทรายได้
- ทาผงกราไฟต์จนทั่วผิวของกระสวนและวางกระสวนลงในหีบแบบล่าง
- ร่อนทรายที่ผสมแล้วให้ปกคลุมทั่วทั้งผิวชิ้นงาน จากนั้นใช้มือกดทรายให้สนิทกับชิ้นงานกระสวนแล้วตำทรายด้วยค้อนตำแบบเล็ก
- เททรายลงในหีบแบบล่างจนเต็มและตำทรายด้วยค้อนตำแบบใหญ่ จากนั้นเททรายที่เหลือลงซ้ำแล้วตำทรายให้แน่นแล้วปาดทรายที่ล้นหีบให้ได้ระนาบ
- หายหีบแบบล่างขึ้น ทำเดือยยึด แล้ววางตำแหน่ง รูเท รูล้น ทรายทรายแก้วให้ทั่วผิวแบบ จากนั้นวางหีบแบบบนประกบหีบแบบล่าง
- ร่อนทรายลงในหีบแบบบนแล้วใช้มือกดทรายที่ร่อนให้แน่น จากนั้นเททรายที่เหลือลงในหีบแบบ ตำด้วยค้อนตำแบบใหญ่ จากนั้นเททรายที่เหลือลงซ้ำในหีบแบบบนแล้วตำทรายให้แน่น ปาดผิวทรายที่ล้นให้ได้ระนาบแล้วคว้านรูเท รูล้นแล้วจึงดึงแบบของรูเทและรูล้นออก
- เปิดหีบแบบบนออก แล้วทำทางเดินน้ำเหล็กที่หีบแบบล่าง แล้วนำกระสวนออกจากหีบแบบล่าง
- ประกบหีบแบบบนและหีบแบบล่างเข้าด้วยกัน และนำเหล็กถ่วงน้ำหนักทับกับหีบแบบไว้เพื่อไม่ให้แรงลอยตัวของน้ำเหล็กดันหีบแบบบนขึ้นในขณะที่เทน้ำเหล็ก



รูปที่ 3.3 การยึดแบบหล่อไส้แบบ AM ด้วยแคลมป์จับชิ้นงานรูปตัว C

3.3.2 การออกแบบและเตรียมชิ้นงานของชุดการศึกษาที่ 2

3.3.2.1. การเตรียมไส้แบบโซเดียมซัลไฟด์แบบผสมผงกำมะถัน (Ferro Sulphur)

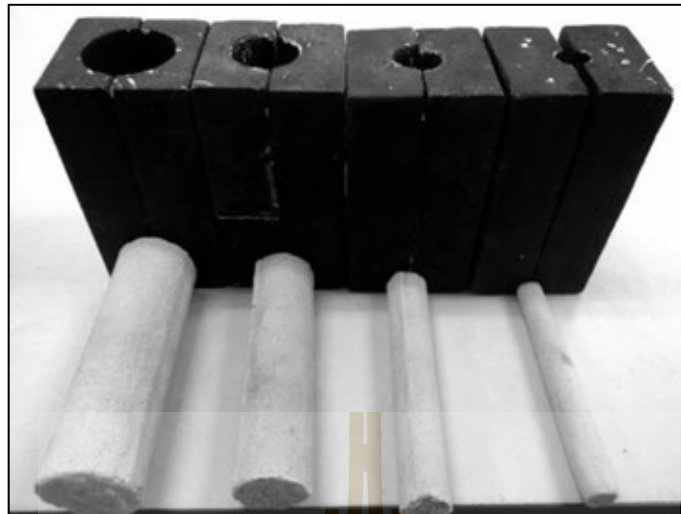
- ต่ำกำมะถันแล้วใช้ตะแกรงร่อนให้ได้ขนาด 30 (mesh)
- ผสมทรายแก้ว กับผงกำมะถัน 5% โดยน้ำหนัก ให้เข้าโดยใช้เครื่องผสมทรายสำหรับไส้แบบเติมโซเดียมซัลไฟด์ 5% โดยน้ำหนัก และผสมจนส่วนผสมเข้ากัน
- นำทรายไส้แบบที่ผสมแล้วอัดลงใน ภาชนะไส้แบบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.5 นิ้ว ยาว 6 นิ้ว แล้วพ่นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จนไส้แบบแข็ง ผลิตจำนวน 4 ชิ้น โดยชิ้นที่ 1 สำหรับงานที่ไม่เคลือบแบบ ชิ้นที่ 2 สำหรับฟิลโลซัลไฟด์ ชิ้นที่ 3 สำหรับเคลือบด้วยมัลไลต์และชิ้นที่ 4 สำหรับเคลือบด้วยเซอร์คอนเบส ดังแสดงในรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 ไส้แบบโซเดียมซัลไฟด์แบบผสมผงกำมะถัน 5% โดยน้ำหนัก (ขนาด 1.5 นิ้ว)

3.3.2.2 การเตรียมไส้แบบโซเดียมซัลไฟด์แบบไม่ผสมผงกำมะถัน

- ผสมทรายแก้วกับโซเดียมซัลไฟด์ 5% โดยน้ำหนัก โดยค่อยๆผสม จนส่วนผสมทั้งหมดเข้ากัน แล้วนำทรายไส้แบบที่ผสมแล้วอัดลงใน ภาชนะไส้แบบขนาดไส้แบบ 0.5 1.0 1.5 และ 2.0 นิ้ว แล้วพ่นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จนไส้แบบแข็ง ผลิตขนาดละ 1 ชิ้น ดังแสดงในรูปที่ 3.5

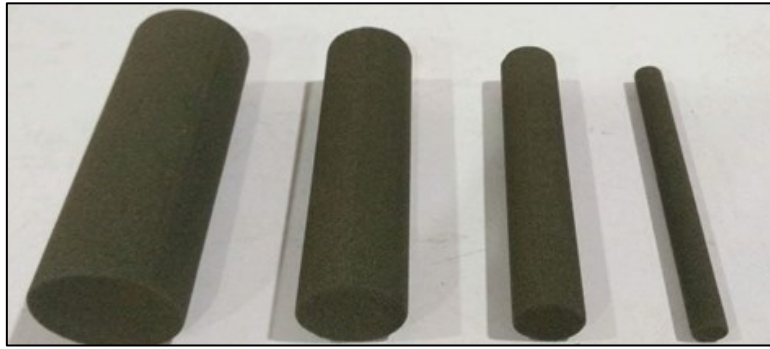


รูปที่ 3.5 ไส้แบบโซเดียมซิลิเกต ขนาด 0.5 1.0 1.5 และ 2.0 นิ้ว

3.3.2.3 การเตรียมไส้แบบแบบเพิ่มเนื้อวัสดุ (AM mold) ผลิตจากเครื่องพิมพ์ทราย 3 มิติโดยใช้ฟลูแรนเรซินเป็นตัวประสานให้เม็ดทรายจับตัวกัน กำหนดขนาดไส้แบบ 0.5 1.0 และ 1.5 นิ้ว อย่างละ 1 ชั้น และ 2.0 นิ้ว 5 ชั้น ดังแสดงในรูปที่ 3.6

3.3.2.4 การเคลือบไส้แบบ จะเคลือบเฉพาะไส้แบบที่ทำจากโซเดียมซิลิเกตแบบผสมผงกำมะถัน และไส้แบบ AM ที่มีขนาด 1.5 นิ้ว ดังรูปที่ 3.7 และ 3.8 และสรุปเงื่อนไขการทดลองประสิทธิภาพของสารเคลือบไส้แบบได้แสดงในตารางที่ 3.2

3.3.2.5 การทำแบบหล่อทรายโดยใช้กระสวนไม้ทำ 2 ชนิด ได้แก่ แบบที่ขนาดไส้แบบเท่ากัน และแบบที่ขนาดไส้แบบไม่เท่ากัน กระสวนแบบแสดงในรูปที่ 3.9 จากนั้นนำไส้แบบที่ผลิตจากกระบวนการข้างต้นวางในแบบทราย ดังแสดงในรูปที่ 3.10 และประกบหีบแบบเพื่อร่อนน้ำเหล็ก



รูปที่ 3.6 ไส้แบบ AM ขนาด 0.5 1.0 1.5 และ 2.0 นิ้ว



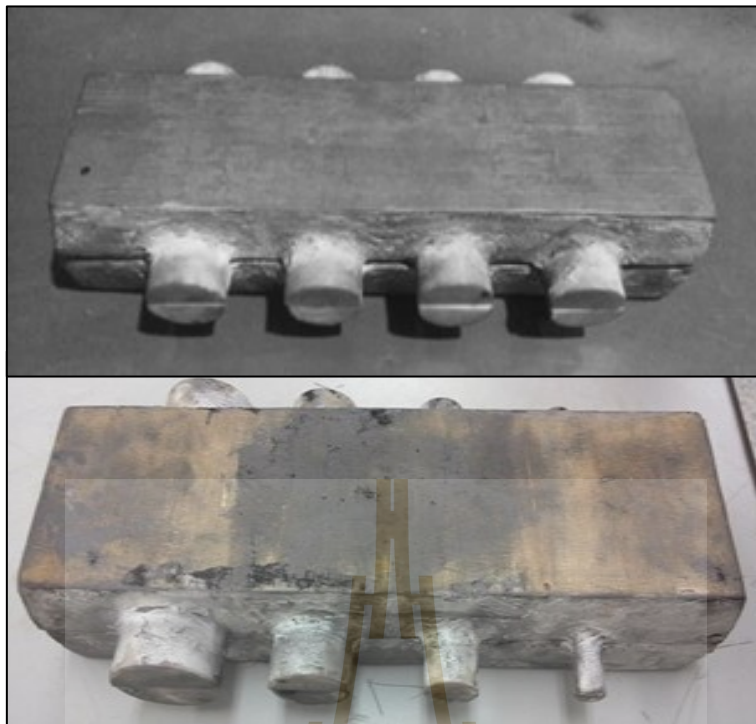
รูปที่ 3.7 ไส้แบบโพลีเอทิลีนเทเรฟทาเลตแบบผสมผงกำมะถันขนาด 1.5 นิ้ว หลังเคลือบไส้แบบ



รูปที่ 3.8 ไส้แบบ AM ขนาด 1.5 นิ้ว หลังเคลือบไส้แบบ

ตารางที่ 3.2 เงื่อนไขการทดลองของประสิทธิภาพของสารเคลือบไส้แบบ

การทดลอง	ประเภทของไส้แบบ	ขนาดไส้แบบ (นิ้ว)	Coating			
			No coating	Phyllosilicate	Mullite	Zircon-based
1	โซเดียมซิลิเกตแบบไม่ผสมผงกำมะถัน	1.5	X	X	X	X
2	โซเดียมซิลิเกตแบบผสมผงกำมะถัน	1.5	X	X	X	X
3	ไส้แบบ Additive-manufactured (AM)	1.5	X	X	X	X
4	โซเดียมซิลิเกตแบบไม่ผสมผงกำมะถัน	0.5	X			
		1.0	X			
		1.5	X			
		2.0	X			
5	ไส้แบบ Additive-manufactured (AM)	0.5	X			
		1.0	X			
		1.5	X			
		2.0	X			



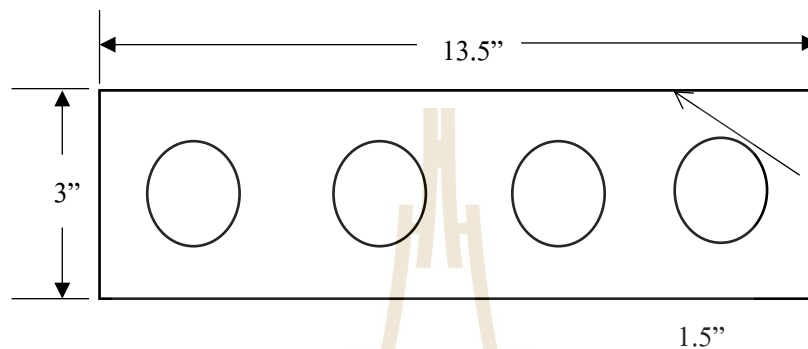
รูปที่ 3.9 กระสวยแบบขนาดใส่แบบเท่ากัน และแบบขนาดใส่แบบไม่เท่ากัน



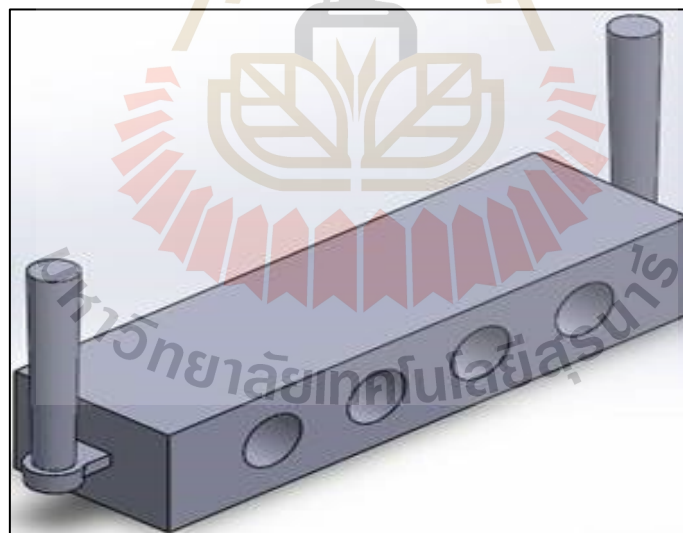
รูปที่ 3.10 การวางใส่แบบลงในแบบหล่อทราย

3.3.3 การออกแบบและเตรียมชิ้นงานของชุดการศึกษาที่ 3

3.3.3.1 ออกแบบชิ้นงานเพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณกำมะถันในไส้แบบต่อการเกิดโครงสร้างการเสี้ยวรูปร่างของกราฟิต โดยการวางไส้แบบที่มีปริมาณของกำมะถันแตกต่างกันลงในแบบดังรูปที่ 3.11 และได้ชิ้นงานแบบจำลอง 3 มิติภายหลังการหล่อดังแสดงในรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.11 แบบของชิ้นงานที่จะหล่อทดสอบ



รูปที่ 3.12 แบบจำลอง 3 มิติของชิ้นงานหลังหล่อทดสอบ

3.3.3.2 การทำไส้แบบ

- ชั่งทรายละเอียดด้วยตาชั่งสปริงให้มากกว่าปริมาตรของไส้แบบ 2 เท่า แล้วนำไปใส่ลงในเครื่องผสมทราย

- เติมสารละลายโซเดียมซัลไฟด์ลงในเครื่องผสมทราย เริ่มต้นที่ 5% ของน้ำหนักทราย โดยเปิดเครื่องผสมทรายค่อยๆผสมและให้สังเกตว่าทรายสามารถปั้นได้จึงหยุดผสม หากทรายยังไม่สามารถจับตัวกันได้ให้เพิ่มสารละลายโซเดียมซัลไฟด์ทีละน้อยจนสามารถปั้นได้แบบได้

- นำทรายจากเครื่องใส่ลงในแบบ ทีละน้อย และกดทรายจนแน่น
- ใช้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป่าไล่แบบ จนไล่แบบแข็งตัวจึงแกะแบบออก
- ทำซ้ำอีกครั้งโดยผสมผงกำมะถัน 0.5 1.0 1.5 2.0 2.5 3.0 และ 3.5 % โดย

น้ำหนักของทราย

3.3.3.3 การทำแบบหล่อทรายโดยเตรียมแบบทรายด้วยกระสวนที่มีขนาดไล่แบบเท่ากัน นำไล่แบบที่มีปริมาณกำมะถัน 0 0.5 1.0 1.5 2.0 2.5 3.0 และ 3.5 % โดยน้ำหนักมาวางบนหีบแบบล่างและประกบแบบ

3.4. การหล่อชิ้นงาน ทดสอบสมบัติเชิงกล และการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค

3.4.1 การหล่อชิ้นงาน

3.4.1.1 ชั่งน้ำหนักแล้ว ใส่เหล็กดิบ เฟอร์โรซิลิกอน คาร์บอน ในเตาหลอมอินดักชัน รอให้ส่วนผสมหลอมเข้ากัน

3.4.1.2 ตรวจสอบส่วนผสมด้วยเครื่อง Optical emission spectrometer

3.4.1.3 ปรับส่วนผสมให้ได้ตามขอบเขตการทดลอง

3.4.1.4 วัดอุณหภูมิหน้าเหล็กให้ได้ตามขอบเขตการทดลอง

3.4.1.5 เริ่มเผาเบอร์รองรับน้ำเหล็กในขณะส่วนผสมในเตาเริ่มละลาย จนกระทั่งจะเทน้ำเหล็กเพื่อให้อุณหภูมิหน้าเหล็กไม่ลดลงมาก

3.4.1.6 เทน้ำเหล็กลงในแบบและนำเหล็กทับหีบแบบวางทับเพื่อป้องกันแรงดันจากการขยายตัวของเหล็กซึ่งอาจทำให้หีบแบบร้าวได้

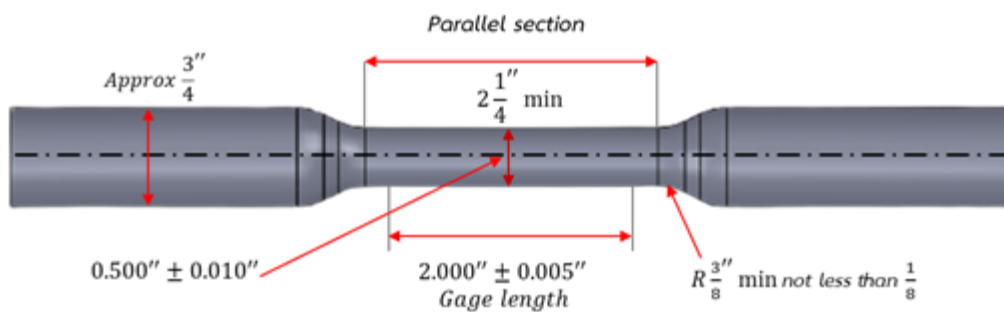
3.4.1.7 รอชิ้นงานเย็นตัวแล้วจึงรื้อแบบ ทำความสะอาด เตรียมนำไปตัดเพื่อทดสอบสมบัติเชิงกล และวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค

3.4.2 การทดสอบทางกล

เตรียมชิ้นงานเพื่อศึกษาสมบัติเชิงกลของชุดการทดลองที่ 1 สำหรับชิ้นงานหล่อที่มีปริมาณแมกนีเซียมเหลือค้างที่ต่างกัน โดยนำชิ้นงานไปทดสอบแรงดึงตามมาตรฐาน ASTM A356 ซึ่งมีขั้นตอนดังนี้

3.4.2.1 ชิ้นงาน As-cast ที่เป็นรูป Dog bone นำไปตัดและนำไปทดสอบด้วยเครื่องทดสอบแรงดึงได้ทันที

3.4.2.2 ชิ้นงานที่เป็นรูปทรงกระบอกนำไปตัดและกลึงเพื่อกำจัดอิทธิพลของชิ้นการเสีรูปร่างของกราไฟต์ให้ได้ขนาด 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) เพื่อสะดวก

ต่อการทดสอบโครงสร้างจุลภาค ดังแสดงในรูปที่ 3.14



รูปที่ 3.14 การขึ้นเรือนแบบเย็นสำหรับชิ้นงานที่ตัดแล้ว

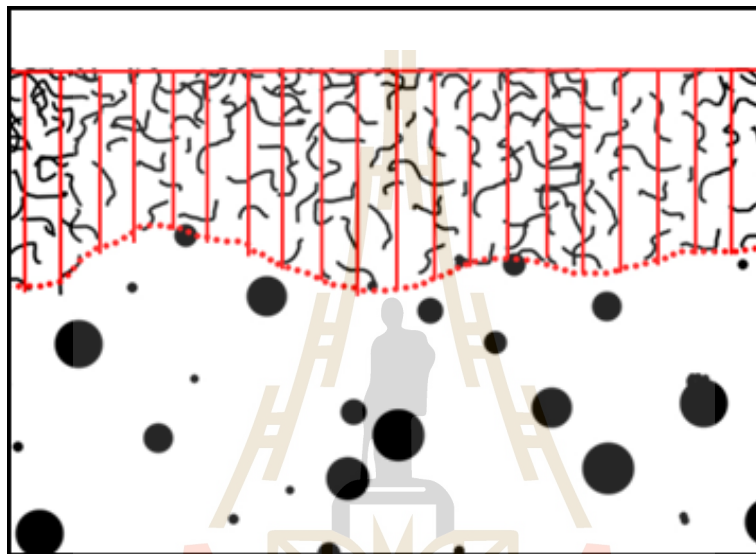
3.4.3.3 ขัดชิ้นงานด้วยกระดาษทรายตั้งแต่เบอร์ 100-1200 จากนั้นขัดด้วยผ้า
สักหลาดโดยใช้ผงอะลูมินา 0.3 ไมครอน และ 0.05 ไมครอน ตามลำดับ

3.4.3.4 นำชิ้นงานที่ขัดเสร็จแล้วไปตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์
แบบใช้แสงและซอฟต์แวร์วิเคราะห์ทางภาพถ่าย

3.4.3.5 วัดความหนาของชั้นการเสีรูปร่างของกราไฟต์โดย

- ลากเส้นขนานกับผิวงานหล่อมีความยาวตามที่กำหนดไว้
- ลากเส้นตั้งฉากจากผิวงานหล่อไปจนถึงจุดที่ปรากฏกราไฟต์กลม โดยมีจำนวนและเว้นช่องตามที่กำหนด โดยในการทดลองนี้ลากเส้น 20 เส้น กำลังขยายที่ใช้ในการถ่ายภาพ 50 เท่า

- ทำซ้ำตลอดทั้งชิ้นงาน ดังแสดงในรูปที่ 3.15



รูปที่ 3.15 ตัวอย่างวิธีการหาค่าความหนาของชั้นการเสีรูปร่างของกราไฟต์

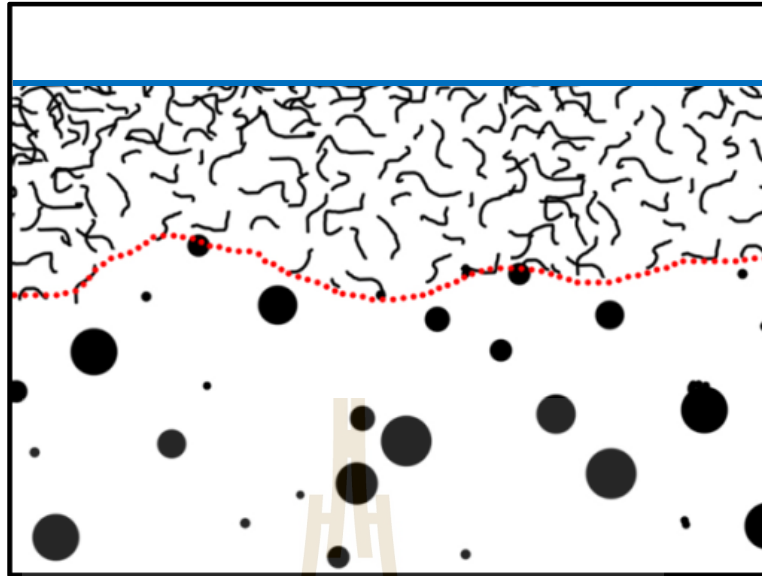
- คำนวณค่าความหนาของชั้นการเสีรูปร่างของกราไฟต์โดยใช้สมการที่ 3.1

$$\text{ความหนา} = \frac{\sum_i^n Y_i}{n} \quad (3.1)$$

โดยที่ Y คือ ความยาวในแต่ละเส้น และ n คือ จำนวนของเส้นที่วัด

3.4.3.6 วัดความคดโค้ง (Tortuosity)

ถ่ายรูปลูกโครงสร้าจลภาคที่กำลังขยายสามารถมองเห็นเส้นรอยต่อได้ชัดเจน หาความยาวรอยต่อของโครงสร้างด้วยโปรแกรมวิเคราะห์ทางภาพ แล้วนำความยาวของรอยต่อหารด้วยระยะการกระจัดที่กำหนด เพื่อนำมาเปรียบเทียบกับความยาวทั้งหมดของชิ้นงาน ดังแสดงในภาพที่ 3.16



รูปที่ 3.16 ตัวอย่างวิธีการหาค่าความคดโค้ง

โดยกำหนดให้

เส้นประสีแดง คือ ระยะทาง (L)

เส้นสีน้ำเงิน คือ ระยะความยาวทั้งหมดของภาพ (S)

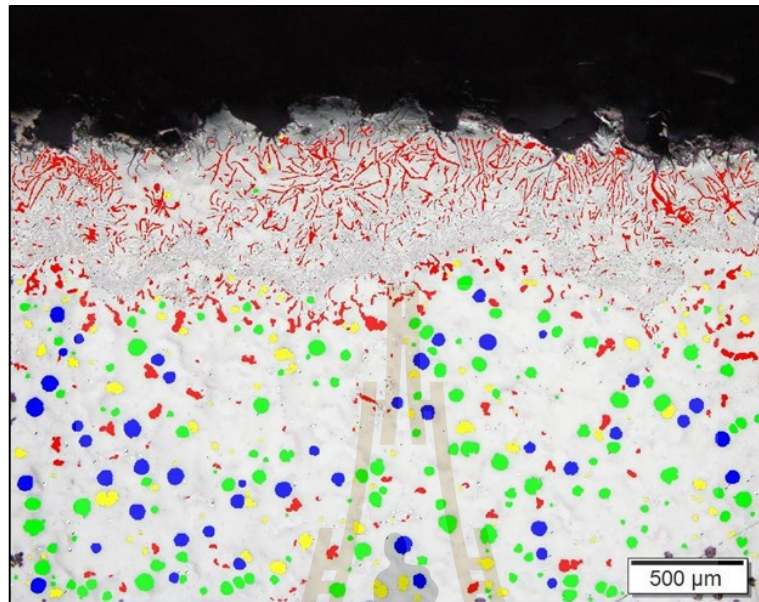
$$\text{Tortuosity} = L/S$$

โดยค่าความคดโค้งนี้จะเป็นตัวที่บ่งบอกว่าสามารถควบคุมลักษณะของผิวได้มากน้อยเพียงใดนั่นเอง

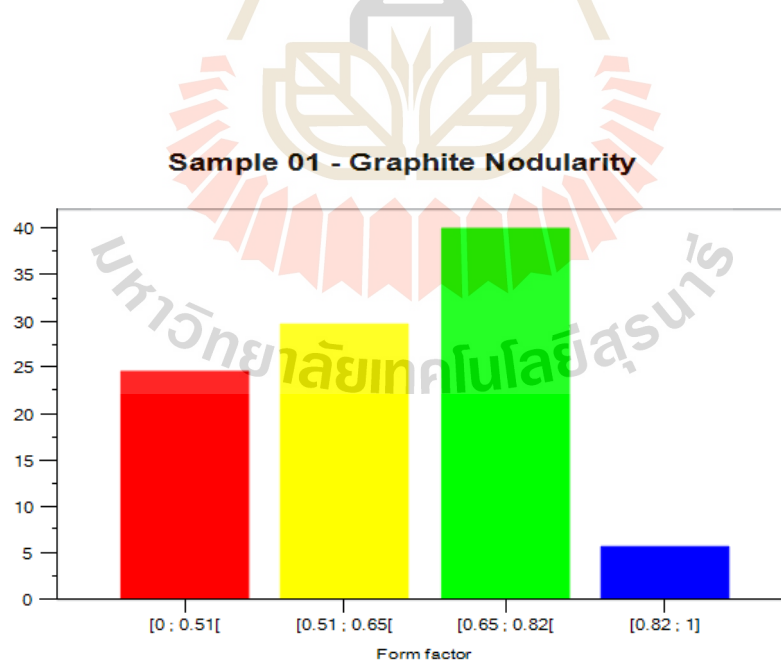
3.4.3.7 วัดความกลม (Nodularity)

เป็นการวัดค่าความกลมของกราฟไฟต์ การวัดนี้เพื่อแสดงการเปลี่ยนแปลงของรูปร่างกราฟไฟต์จากเหล็กหล่อเทาไปเป็นเหล็กหล่อเหนียว โดยใช้ค่าความเป็นทรงกลม (Sphericity) เป็นดัชนีบอกรูปร่างของกราฟไฟต์ ซึ่งจะช่วยบอกได้ว่าการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นเป็นแบบค่อยเป็นค่อยไปหรืออย่างฉับพลันโดยใช้โปรแกรมวิเคราะห์ภาพถ่าย ทำการวัดความกลมตามมาตรฐาน ASTM A274 หลักการวัดคือ โปรแกรมจะทำการประมวลผลจากภาพถ่าย ซึ่งในส่วนของความกลมจะคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ ค่าความกลมแบ่งตามสี คือ สีแดงมีความกลมเท่ากับ 0% สีเหลืองมีความกลมเท่ากับ 51% สีเขียวมีความกลมเท่ากับ 65% และสีน้ำเงินมีความกลมเท่ากับ 82% ดังรูปที่ 3.17 และกราฟแท่งใน

รูปที่ 3.18 จะเป็นส่วนที่แสดงให้เห็นว่าในภาพที่ทำการวิเคราะห์นั้น มีสีที่แสดงเปอร์เซ็นต์ความกลมประมาณเท่าใด



รูปที่ 3.17 การวิเคราะห์ความกลมของกราไฟต์



รูปที่ 3.18 การประมวลผลปริมาณความกลมของกราไฟต์แต่ละช่วง

บทที่ 4

ผลการวิจัย

4.1 ชิ้นงานทดสอบ

ผลการทดลองจากงานวิจัยนี้ถูกแบ่งออกเป็น 3 ชุด ได้แก่ 1. อิทธิพลของตัวแปรของกระบวนการหล่อโลหะต่อโครงสร้างจุลภาคที่ผิวงานหล่อ ได้แก่ วัสดุที่ใช้ในการผลิตแบบหล่อ อัตราการเย็นตัว ปริมาณแมกนีเซียมที่หล่อค้ำในชิ้นงานหล่อที่มีผลกระทบต่อเกิดการเสีรูปร่างของกราไฟต์ที่ผิวงานหล่อ 2. วิธีป้องกันการเกิดการเสีรูปร่างของกราไฟต์ โดยใช้ไส้แบบที่ผลิตจากโซเดียมซิลิเกตและไส้แบบ AM แล้วเปรียบเทียบประสิทธิภาพของสารเคลือบไส้แบบแต่ละชนิดว่าแตกต่างกันอย่างไร รวมถึงผลการเปรียบเทียบอัตราการถ่ายเทความร้อนที่ต่างกันต่อการเกิดการเสีรูปร่างของกราไฟต์ และ 3. ผลจากการนำความรู้เกี่ยวกับการเกิดการเสีรูปร่างของกราไฟต์ไปใช้ในการผลิตเหล็กหล่อกราไฟต์คู่โดยใช้ไส้แบบโซเดียมซิลิเกตที่มีปริมาณของกำมะถันที่ต่างกัน ทำให้ทราบถึงอิทธิพลของกำมะถันต่อที่มีต่อโครงสร้างจุลภาคของเหล็กหล่อกราไฟต์คู่ เช่น ความหนา ความคดโค้ง และความกลมของกราไฟต์ของชิ้นโครงสร้างการสูญเสียรูปร่างของแก๊สไฟต์และชิ้นโครงสร้างปกติ โดยส่วนผสมทางเคมีของการทดลองทั้ง 3 ชุดแสดงในตารางที่ 4.1 4.2 และ 4.3 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.1 ส่วนประกอบทางเคมีของชิ้นงานทดสอบในชุดการทดลองที่ 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 ส่วนประกอบทางเคมีของชิ้นงานทดสอบในชุดการทดลองที่ 2

Heat	%C	%Si	%S	%P	%Mn	%Mg	CE
1	3.26	2.52	0.0123	0.0865	0.00003	0.0087	4.13
2	3.67	2.73	0.0148	0.136	0.0066	0.019	4.63
3	3.30	2.49	0.0152	0.162	0.0002	0.02	4.18
4	2.98	2.55	0.0112	0.0365	0.0381	0.0078	3.84

ตารางที่ 4.3 ส่วนประกอบทางเคมีของชิ้นงานทดสอบในชุดการทดลองที่ 3

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

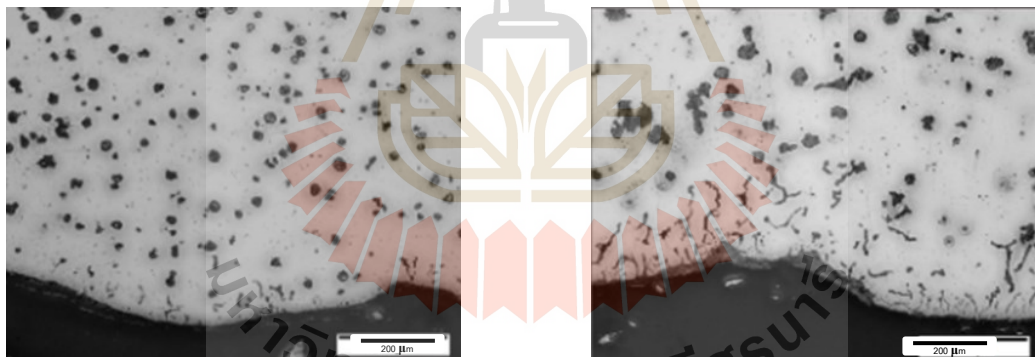
4.2 อิทธิพลของตัวแปรของกระบวนการหล่อโลหะต่อโครงสร้างจุลภาคที่ผิวงานหล่อ

4.2.1 อิทธิพลของความหนาของชิ้นงานต่อการเสีรูปร่างของกราไฟต์บริเวณผิวงานหล่อ

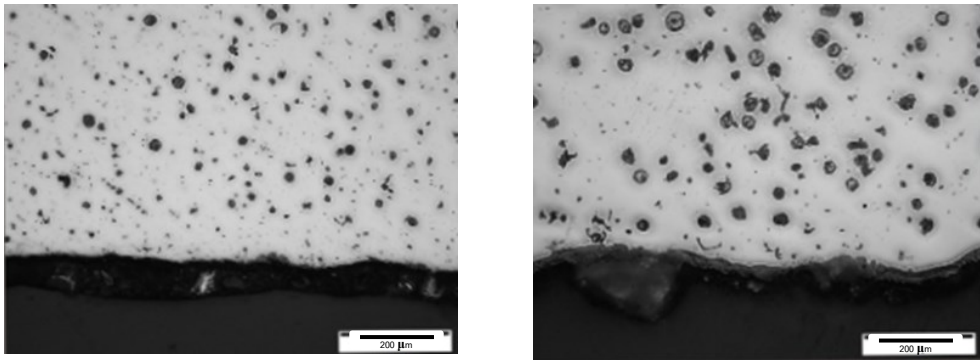
จากการทดลองออกแบบให้ชิ้นงานมีความหนาต่างกันว่า 7 14 21 และ 28 มิลลิเมตร เพื่อศึกษาผลของความหนาของงานต่อชิ้นการเสีรูปร่างของกราไฟต์ ผลการทดลองพบว่าโครงสร้างจุลภาคที่ผิวของชิ้นงานมีความสัมพันธ์กับความหนาของชิ้นงานหล่อ ตารางที่ 4.4 แสดงข้อมูลความหนาของชิ้นงานหล่อ ปริมาณแมกนีเซียมเหลือค้าง และความหนาของชิ้นการเสีรูปร่างของกราไฟต์ พบว่าเมื่องานหล่อมีความหนาเพิ่มขึ้นจะมีความหนาของชิ้นการเสีรูปร่างของกราไฟต์เพิ่มขึ้นตาม ทั้งนี้ อาจเป็นผลมาจากการที่การที่ชิ้นงานมีความหนาเพิ่มขึ้นส่งผลให้อัตราการเย็นตัวของชิ้นงานลดลงทำให้เกิดชิ้นการเสีรูปร่างของกราไฟต์ และพบว่าแบบหล่อ AM mold ส่งผลให้ชิ้นงานมีความหนาของชิ้นการเสีรูปร่างของกราไฟต์มากกว่าแบบหล่อทรายขึ้นเนื่องจากแบบหล่อ AM mold มีฟูแรนเรซินเป็นตัวประสานซึ่งมีส่วนผสมของพี -กรดโทลูเอนิซัลโฟนิก (p-Toluenesulfonic acid) โดยกำมะถันจะไปลดความกลมของกราไฟต์ในเหล็กหล่อเหนียว จากโครงสร้างจุลภาคพบลักษณะของกราไฟต์แบบตัวหนอนและแบบแผ่นบริเวณผิวของงานหล่อ แสดงดังรูปที่ 4.1 และ 4.2 ทั้งนี้ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของชิ้นงานและชิ้นการเสีรูปร่างของกราไฟต์แสดงดังรูปที่ 4.3

ตารางที่ 4.4 ความหนาของชั้นการเสีรูปร่างของกราฟิตในแต่ละความหนาของชิ้นงาน

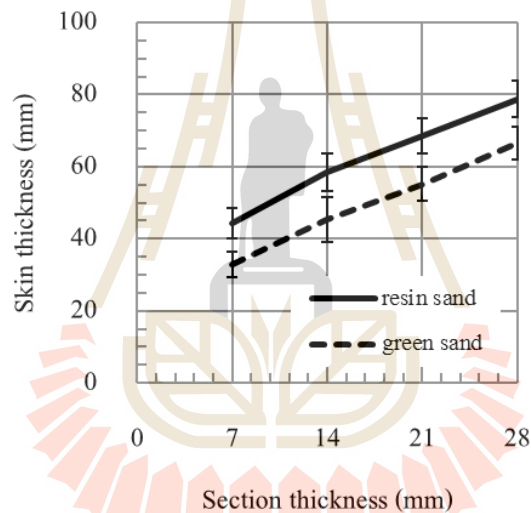
Thickness	7mm		14mm		21mm		28mm	
	AM	Green sand	AM	Green sand	AM	Green sand	AM	Green sand
0.01	56.94	35.48	89.91	52.94	97.96	65.95	98.26	78.10
0.015	45.76	33.07	64.13	49.20	68.79	62.69	82.34	68.65
0.02	35.26	26.42	41.27	33.41	46.32	38.67	50.28	41.34
0.025	40.60	32.03	47.93	41.25	62.49	52.92	73.35	63.00
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 ชั้นความหนาของกราฟิตแผ่นที่ความหนา 7 มิลลิเมตร (ซ้าย) และ 28 มิลลิเมตร (ขวา) ที่ 0.025%Mg ในแบบหล่อเรซิน



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



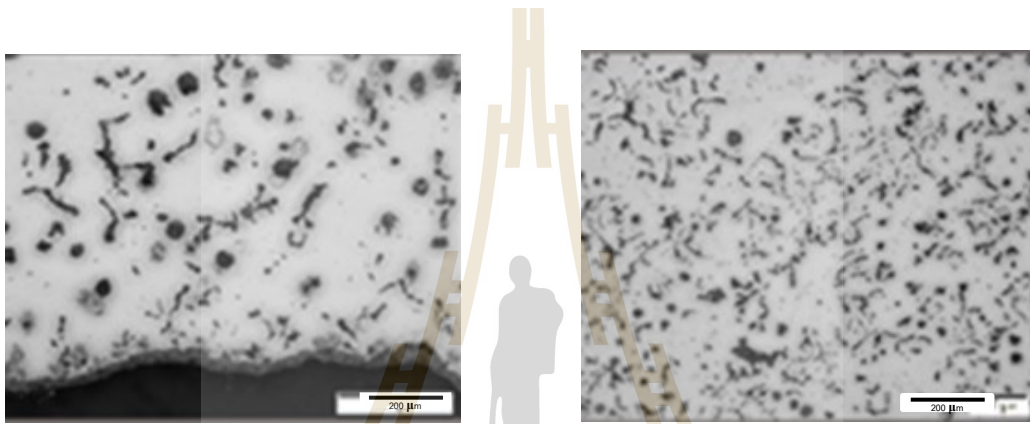
รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของชิ้นงานและความหนาของชั้นการเสีรูปร่างกราไฟต์

4.2.2 อิทธิพลของแมกนีเซียมคงเหลือต่อการเสีรูปร่างของกราไฟต์บริเวณผิวงานหล่อ

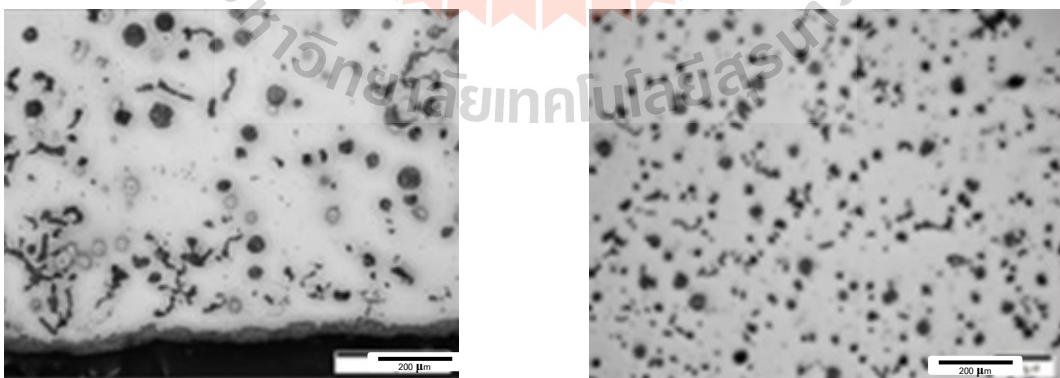
จากการทดลองพบว่าโครงสร้างจุลภาคที่ผิวของชิ้นงานมีความสัมพันธ์กับรูปร่างของกราไฟต์ที่บริเวณใจกลาง กล่าวคือหากบริเวณใจกลางของชิ้นมีรูปร่างของกราไฟต์กลมมากหรือมีปริมาณแมกนีเซียมสูงจะทำให้ชั้นการเสีรูปร่างของกราไฟต์บางมาก ในทางกลับกันหากใจกลางชิ้นงานมีรูปร่างกราไฟต์ที่รูปร่างกลมน้อย (เป็นตัวหอนหรือเป็นแผ่น) จะทำให้ชั้นการเสีรูปร่างของกราไฟต์หนา ฉะนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าความหนาของชั้นการเสีรูปร่างของกราไฟต์นั้นแปรผกผันกลับความกลมของกราไฟต์หรือปริมาณแมกนีเซียมและยังสังเกตได้ว่าในแบบหล่อที่ทำจากเรซินนั้นมีความหนาของชั้นการเสีรูปร่างของกราไฟต์มากกว่าแบบหล่อทรายขึ้น โดยภาพโครงสร้างจุลภาคของเหล็กหล่อ

ที่มีปริมาณแมกนีเซียมที่แตกต่างกันในแบบหล่อทรายเรซินและแบบหล่อทรายขึ้นแสดงในรูปที่ 4.4 ถึง 4.12

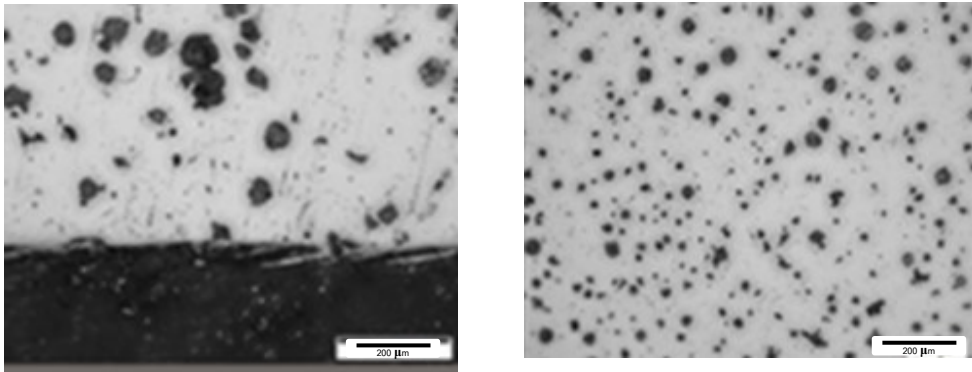
จากผลการทดลองในตารางที่ 4.4 และจากรูปโครงสร้างจุลภาคของเหล็กหล่อในแบบหล่อทรายเรซินที่ความหนา 28 มิลลิเมตรที่มีการเปลี่ยนแปลงปริมาณแมกนีเซียม นั้น จะเห็นได้ว่ายิ่งเปอร์เซ็นต์แมกนีเซียมเพิ่มขึ้นชั้นความหนาของกราไฟต์จะลดน้อยลงตามลำดับ ทั้งนี้เป็นผลมาจากการที่น้ำเหล็กที่มีแมกนีเซียมมากขึ้นนั้น เมื่อเกิดการสูญเสียแมกนีเซียมเนื่องจากปฏิกิริยาออกซิเดชันที่ผิวจะทำให้บริเวณที่มีแมกนีเซียมต่ำกว่าปกติแคบลงจึงทำให้ชั้นการเสีรูปร่างของกราไฟต์บางลง



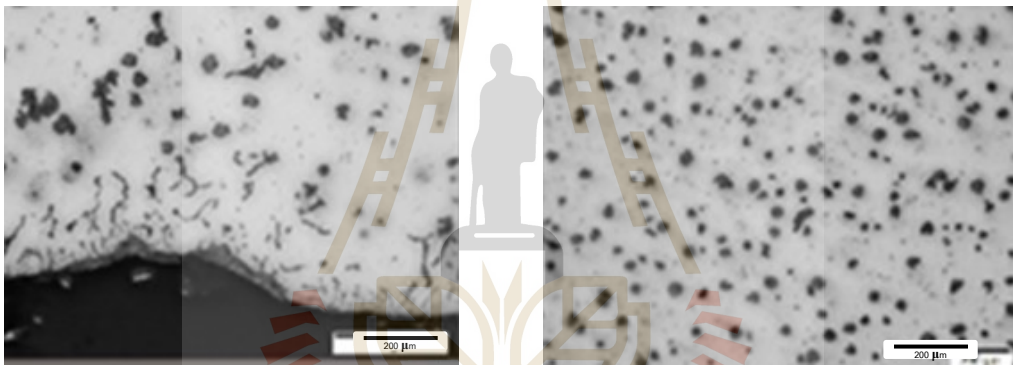
รูปที่ 4.4 ปริมาณแมกนีเซียม 0.010 % ที่ความหนา ที่ 28 มิลลิเมตร ในแบบหล่อทรายเรซิน



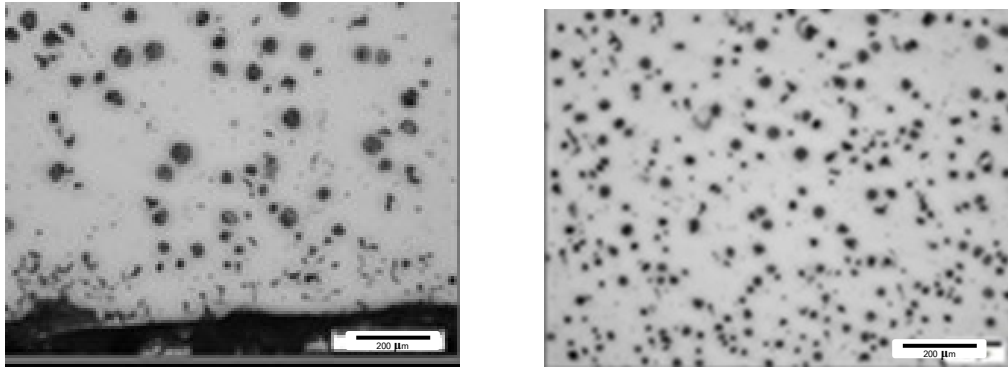
รูปที่ 4.5 ปริมาณแมกนีเซียม 0.015 % ที่ความหนา ที่ 28 มิลลิเมตรในแบบหล่อทรายเรซิน



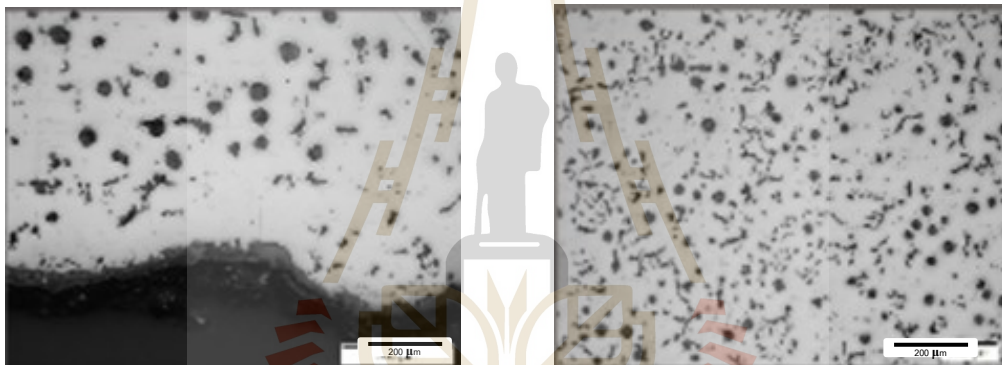
รูปที่ 4.6 ปริมาณแมกนีเซียม 0.020 % ที่ความหนา ที่ 28 มิลลิเมตร ในแบบหล่อทรายเรซิน



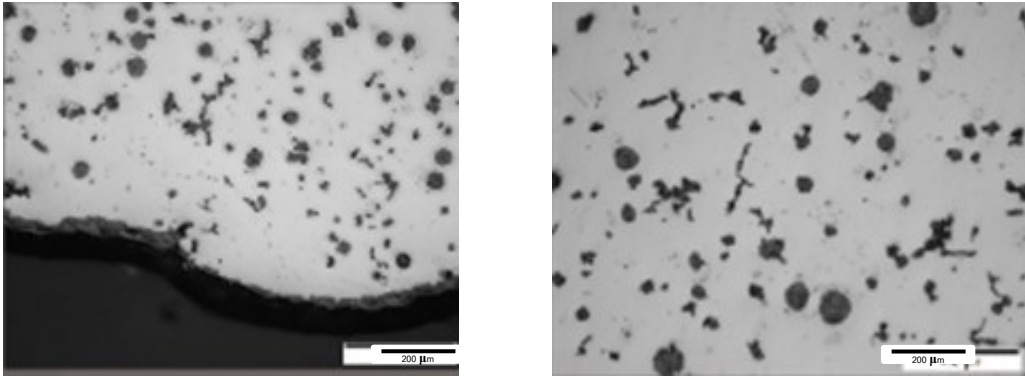
รูปที่ 4.7 ปริมาณแมกนีเซียม 0.025 % ที่ความหนา ที่ 28 มิลลิเมตร ในแบบหล่อทรายเรซิน



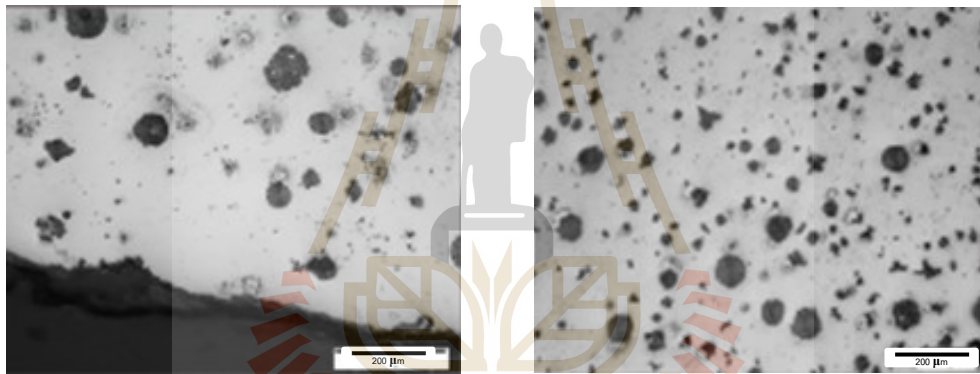
รูปที่ 4.8 ปริมาณแมกนีเซียม 0.030 % ที่ความหนา ที่ 28 มิลลิเมตรในแบบหล่อทรายเรซิน



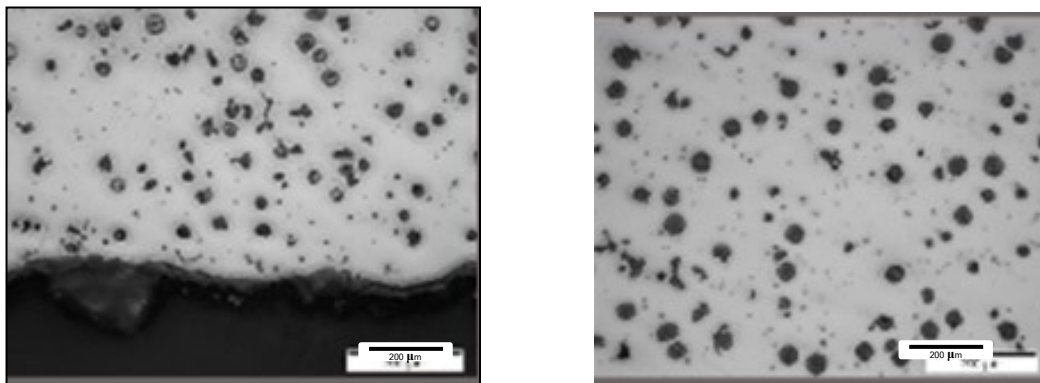
รูปที่ 4.9 ปริมาณแมกนีเซียม 0.010 % ที่ความหนา ที่ 28 มิลลิเมตรในแบบหล่อทรายขึ้น



รูปที่ 4.10 ปริมาณแมกนีเซียม 0.015 % ที่ความหนา ที่ 28 มิลลิเมตร ในแบบหล่อทรายขึ้น



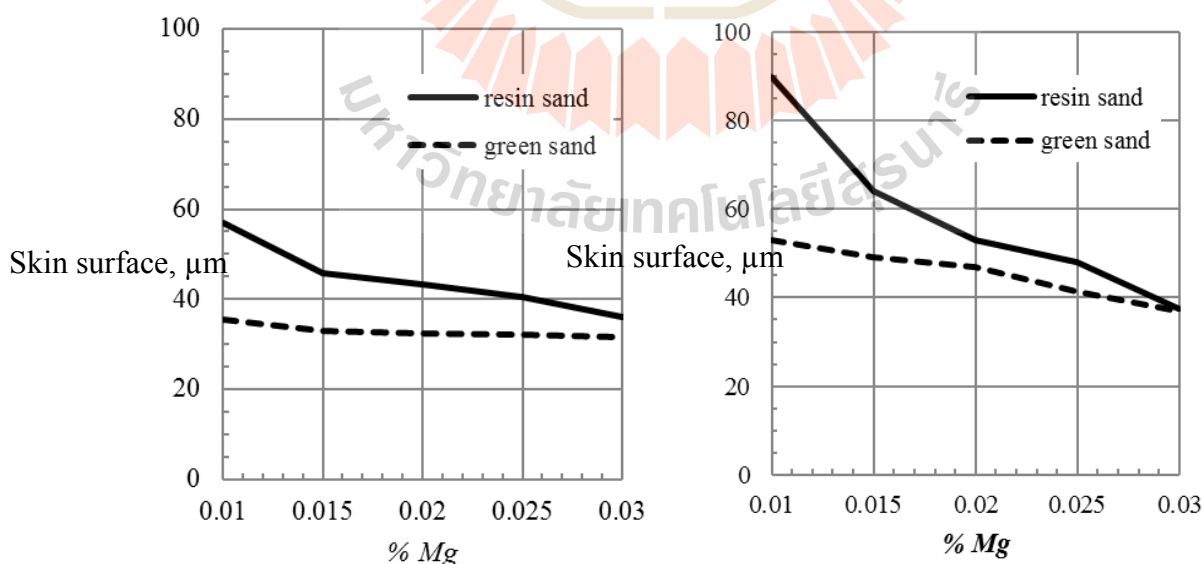
รูปที่ 4.11 ปริมาณแมกนีเซียม 0.020 % ที่ความหนา ที่ 28 มิลลิเมตร ในแบบหล่อทรายขึ้น



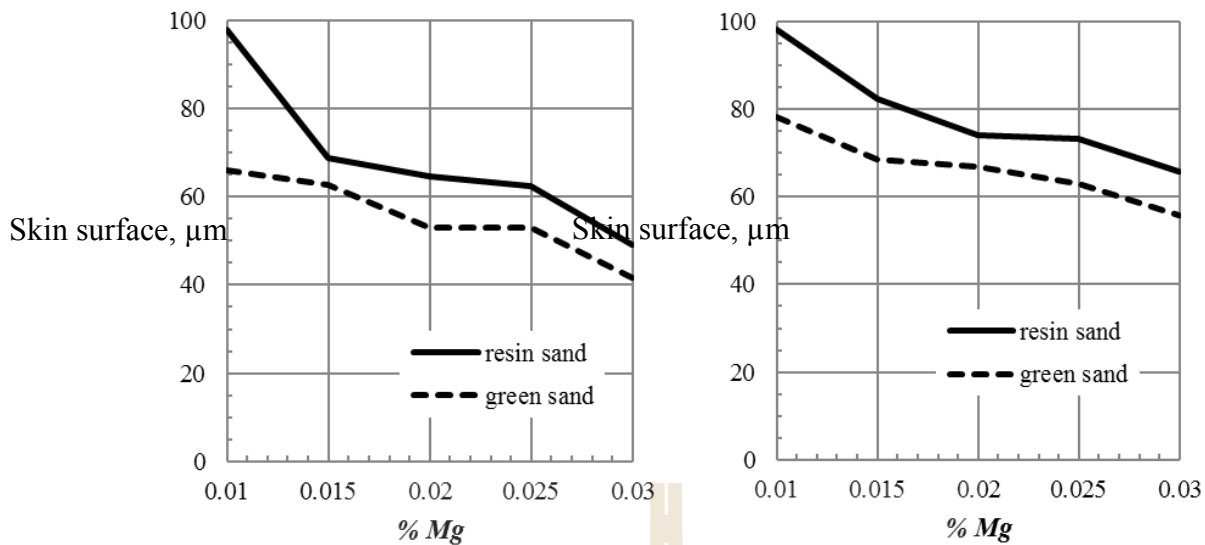
รูปที่ 4.12 ปริมาณแมกนีเซียม 0.025 % ที่ความหนา ที่ 28 มิลลิเมตร ในแบบหล่อทรายขึ้น

จากรูปที่ 4.12 จะเห็นได้อย่างชัดเจนว่าแบบหล่อทรายขึ้นจะมีชั้นการเสีรูปร่างของกราไฟต์อยู่น้อยมาก (ในงานที่มีแมกนีเซียมอยู่มาก (0.025%) แทบจะไม่เกิดชั้นการเสีรูปร่างของกราไฟต์เลย) ซึ่งเป็นผลมาจากแบบหล่อทรายเรซินนั้นมีส่วนผสมของกำมะถันอยู่ทำให้แมกนีเซียมในชิ้นงานไปจับตัวกับกำมะถันเป็นแมกนีเซียมซัลไฟด์ (Magnesium sulfide, MgS) ดังนั้น อัตราการสูญเสียแมกนีเซียมในชิ้นงานจึงมีมากขึ้นไปจากเดิมและส่งผลให้กราไฟต์แผ่นที่ผิวมีความหนากว่ามาก

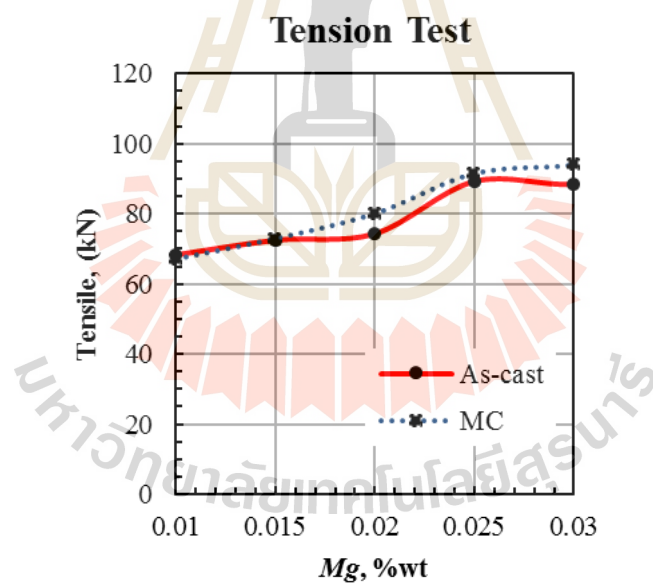
ทั้งนี้ความสัมพันธ์ระหว่างการเกิดชั้นการเสีรูปร่างของกราไฟต์และปริมาณแมกนีเซียมที่ความหนา 7 14 21 และ 28 มิลลิเมตร แสดงได้ในรูปที่ 4.13 และ 4.14 และความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณแมกนีเซียมต่อความต้านทานแรงดึงแสดงได้ดังรูปที่ 4.15



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



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



รูปที่ 4.15 ความต้านทานแรงดึงต่อปริมาณแมกนีเซียม

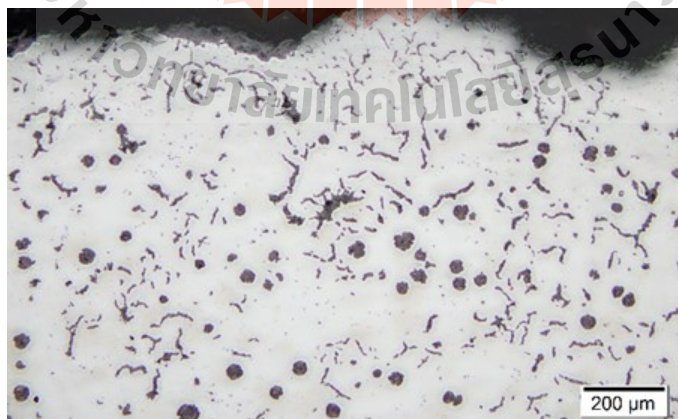
จากการทดลองโดยหล่อเหล็กโดยใช้แบบหล่อทรายเรซินที่มีปริมาณแมกนีเซียมต่างกัน 2 ชุด แล้วนำไปทดสอบความต้านทานแรงดึง ชุดแรกเป็นแบบโครงสร้างหลังการหล่อ (As-cast) ซึ่งที่ผิวยังพบความหนาของชั้นการเสียรูปร่างของกราฟไฟต์ที่ขึ้นอยู่กับปริมาณแมกนีเซียมเหลือค้าง และอีกชุด

นำไปกลึงผิวออกซึ่งปราศจากชั้นการเสีรูปร่างของกราฟไฟต์พบว่าความต้านทานแรงดึงของชุดที่กลึงผิวออกมีค่ามากกว่าและยังมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณของแมกนีเซียมในทั้ง 2 กรณีด้วย

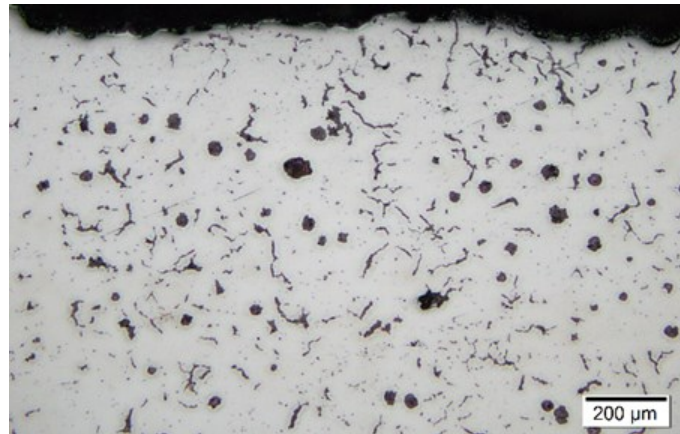
4.3 ผลการศึกษาอิทธิพลสารเคลือบแบบและอัตราการเย็นตัวต่อการเสีรูปร่างของกราฟไฟต์

4.3.1 ผลของสารเคลือบแบบต่อการเกิดการเสีรูปร่างของกราฟไฟต์

4.3.1.1 ไล่แบบโซเดียมซิลิเกตโดยใช้ไล่แบบ ขนาด 1.5 นิ้ว จำนวน 4 ชั้นและเคลือบสารเคลือบดังนี้คือ ชั้นที่ 1 ไม่เคลือบสาร ชั้นที่ 2 เคลือบฟิลาซิลิเกต ชั้นที่ 3 เคลือบ มัลไลต์และชั้นที่ 4 เคลือบเซอร์คอนเบสมีอุณหภูมิน้ำเหล็กขณะเทลงแบบหล่อ 1,379 °C พบว่าที่ผิวงานหล่อบริเวณที่ติดกับไล่แบบ ไม่เกิดชั้นการเสีรูปร่างของกราฟไฟต์ ดังแสดงในรูปที่ 4.16 สาเหตุที่ไม่เกิดชั้นการเสีรูปร่างของกราฟไฟต์ ซึ่งเป็นไปได้สองสาเหตุหลักดังนี้ สาเหตุแรกคืออุณหภูมิเตาทำให้น้ำเหล็กบริเวณนั้นแข็งตัวเร็ว กำมะถันและแมกนีเซียมจึงทำปฏิกิริยาไม่ทัน ส่งผลให้ไม่เกิดการสูญเสียแมกนีเซียมที่ผิวงาน ส่วนสาเหตุที่สองอาจมาจากไล่แบบโซเดียมซิลิเกตมีปริมาณกำมะถันที่ต่ำกว่าแบบทรายขึ้นปกติ ทำให้ไม่เกิดการทำปฏิกิริยาหรืออาจเกิดน้อยมากจนแทบจะไม่มีการสูญเสียแมกนีเซียม ซึ่งในการทดลองถัดไปนั้นจะทำการพิสูจน์โดยการทดลองเติมกำมะถันลงในไล่แบบ ส่วนอุณหภูมิในการเทนั้นสามารถเพิ่มได้เล็กน้อยแต่ไม่เกิน 1,400 °C เนื่องจากข้อจำกัดของวัสดุที่ใช้ทำเตา ทั้งนี้จากการสังเกตโครงสร้างจุลภาคที่ได้ภายหลังจากการหล่อโครงสร้างจุลภาคส่วนใหญ่ประกอบด้วยกราฟไฟต์ตัวหนอน และมีกราฟไฟต์กลมกระจายอยู่ทั่วไป สำหรับโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานทดสอบที่ไล่แบบเคลือบสารฟิลาซิลิเกตแสดงดังรูปที่ 4.17 เคลือบมัลไลต์แสดงดังรูปที่ 4.18 และเคลือบเซอร์คอนเบสแสดงดังรูปที่ 4.19 พบว่าสารเคลือบเซอร์คอนเบสสามารถช่วยลดความหนาของชั้นการเสีรูปร่างของกราฟไฟต์ได้ดีกว่า



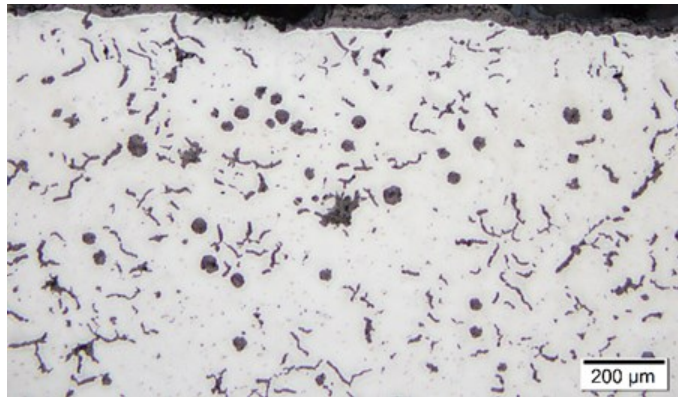
รูปที่ 4.16 โครงสร้างจุลภาคเหล็กหล่อกราฟไฟต์ตัวหนอนของไล่แบบโซเดียมซิลิเกตไม่เคลือบสาร



รูปที่ 4.17 โครงสร้างจุลภาคเหล็กหล่อกราไฟต์ตัวนอนของไส้แบบโซเดียมซัลไฟเกตที่เคลือบฟิลโซลิตเกต

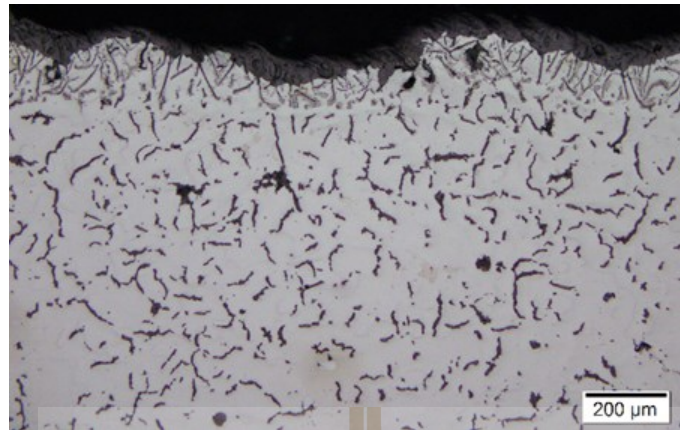


รูปที่ 4.18 โครงสร้างจุลภาคเหล็กหล่อกราไฟต์ตัวนอน ของไส้แบบโซเดียมซัลไฟเกตที่เคลือบมัลไลต์

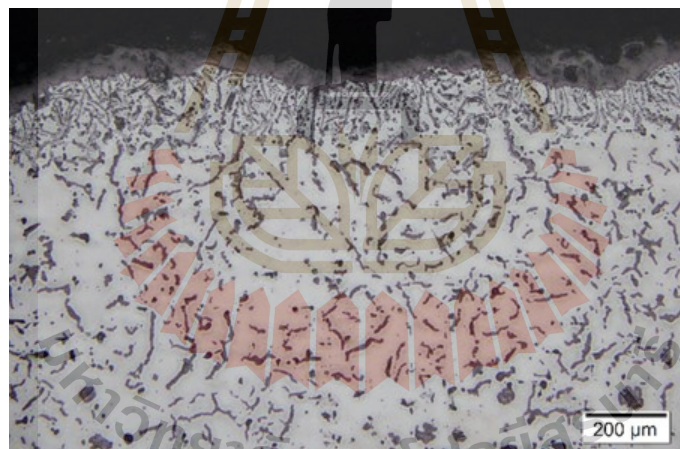


รูปที่ 4.19 โครงสร้างจุลภาคเหล็กหล่อกราไฟต์ตัวหอน ของไส้แบบโซเดียมซิลิเกตที่เคลือบ เซอร์คอนเบส

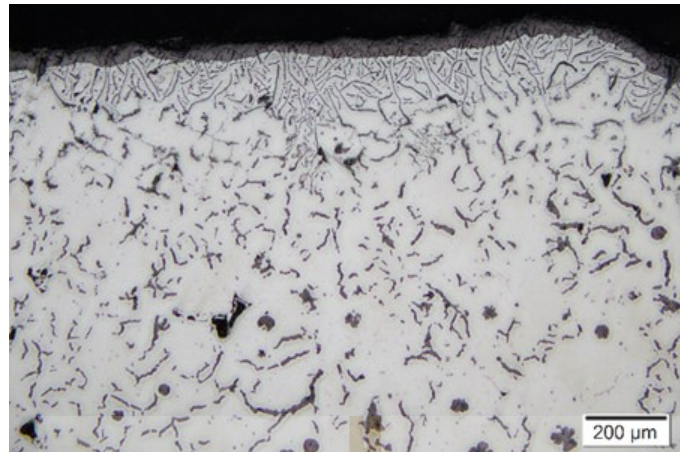
4.3.1.2 ไส้แบบ AM ที่ผลิตจากเครื่องพิมพ์แบบหล่อ 3 มิติ มีขนาดไส้แบบ 1.5 นิ้ว จำนวน 4 ชั้น ส่วนการเคลือบใช้สารเคลือบที่ต่างกัน คือ ชั้นที่ 1 ไม่เคลือบสารโครงสร้างแสดงดังรูปที่ 4.20 ชั้นที่ 2 เคลือบฟิลโลซิลิเกตโครงสร้างแสดงดังรูปที่ 4.21 ชั้นที่ 3 เคลือบมัลไลต์โครงสร้างแสดงดังรูปที่ 4.22 และ ชั้นที่ 4 เคลือบเซอร์คอนเบสโครงสร้างแสดงดังรูปที่ 4.23 โดยอุณหภูมิเผาเหล็กแบบหล่ออยู่ที่ 1,489 °C พบว่าที่ผิวงานหล่อบริเวณที่ติดกับไส้แบบเกิดการเสีรูปร่างของกราไฟต์ โดยการเคลือบเซอร์คอนเบสมีแนวโน้มช่วยลดการเกิดชั้นการเสีรูปร่างของกราไฟต์และเมื่อนำไปเทียบกับไส้แบบที่ไม่ได้ทำการเคลือบไส้สารเคลือบไส้แบบ จะเห็นได้ว่าสามารถลดชั้นการเสีรูปร่างของกราไฟต์ได้เกือบครึ่งหนึ่งของไส้แบบที่ไม่ได้ทำการเคลือบสารเคลือบ แต่ในทางกลับกันไส้แบบที่เคลือบฟิลโลซิลิเกต และ มัลไลต์ไม่ได้ช่วยลดการเกิดชั้นการเสีรูปร่างของกราไฟต์แต่กลับมีชั้นความหนาของการเสีรูปร่างของกราไฟต์เพิ่มขึ้น และเมื่อนำไปวัดชั้นความหนาของการเสีรูปร่างของกราไฟต์ของไส้แบบที่ทำการเคลือบด้วยสารเคลือบแต่ละชนิด คือชั้นที่ 1 ไม่เคลือบสาร ชั้นที่ 2 เคลือบฟิลโลซิลิเกต ชั้นที่ 3 เคลือบมัลไลต์และชั้นที่ 4 เคลือบ เซอร์คอนเบสจะได้ความหนาเท่ากับ 0.108 0.141 0.142 และ 0.056 มิลลิเมตร ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.24 เป็นกราฟเปรียบเทียบชั้นความการเสีรูปร่างของกราไฟต์กับสารเคลือบแต่ละชนิด เนื่องจากอุณหภูมิที่สูงทำให้ที่ผิวงานหล่อบริเวณที่ติดกับไส้แบบเกิดการสูญเสียแมกนีเซียมมาก แมกนีเซียมมีเวลานานพอที่จะทำปฏิกิริยากับออกซิเจนและกำมะถัน และที่สารเคลือบแต่ละชนิดมีชั้นความหนาของการเสีรูปร่างของกราไฟต์แตกต่างกัน เพราะสารเคลือบเซอร์คอนเบสมีความสามารถในการนำความร้อนสูงกว่าฟิลโลซิลิเกต และ มัลไลต์ทำให้น้ำเหล็กบริเวณนั้นแข็งตัวเร็วช่วยลดการเกิดชั้นการเสีรูปร่างของกราไฟต์



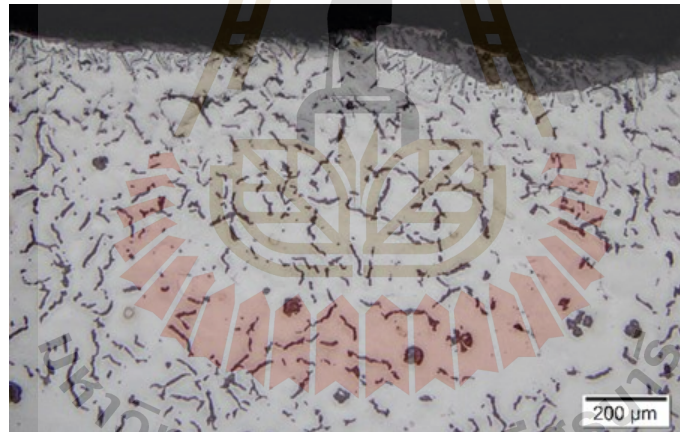
รูปที่ 4.20 โครงสร้างจุลภาคเหล็กหล่อกราไฟต์ตัวหนอน และชั้นการเสีรูปร่างของกราไฟต์ของ ใ้แบบ AM ที่ไม่เคลือบสาร



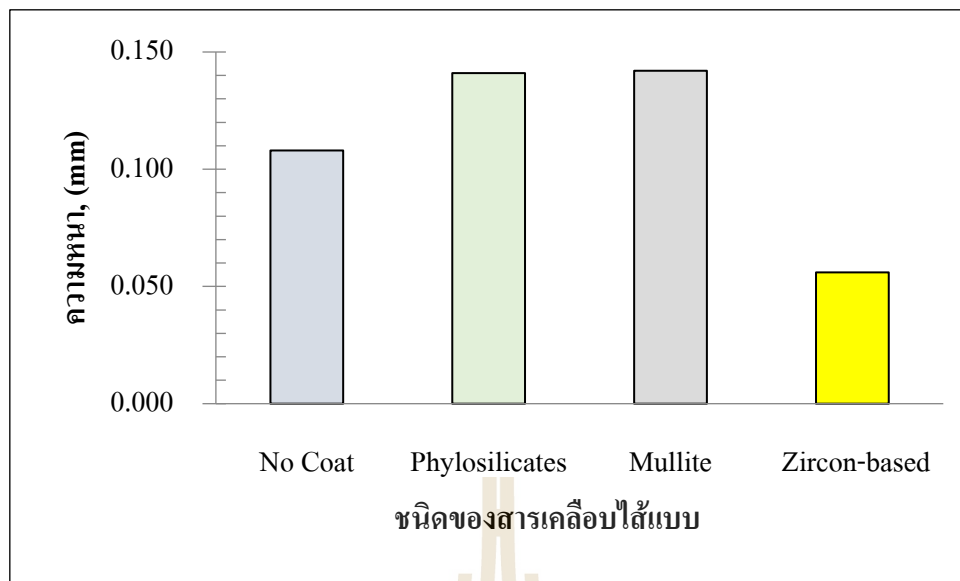
รูปที่ 4.21 โครงสร้างจุลภาคเหล็กหล่อกราไฟต์ตัวหนอน และชั้นการเสีรูปร่างของกราไฟต์ของ ใ้ แบบ AM ที่เคลือบฟิลโลซิลิเกต



รูปที่ 4.22 โครงสร้างจุลภาคเหล็กหล่อกราไฟต์ตัวหนอน และชั้นการเสีรูปร่างของกราไฟต์ของ
ไส้แบบ AM ที่เคลือบมัลลิต์



รูปที่ 4.23 โครงสร้างจุลภาคเหล็กหล่อกราไฟต์ตัวหนอน และชั้นการเสีรูปร่างของกราไฟต์ของ
ไส้แบบAM ที่เคลือบเซอร์คอนเบส



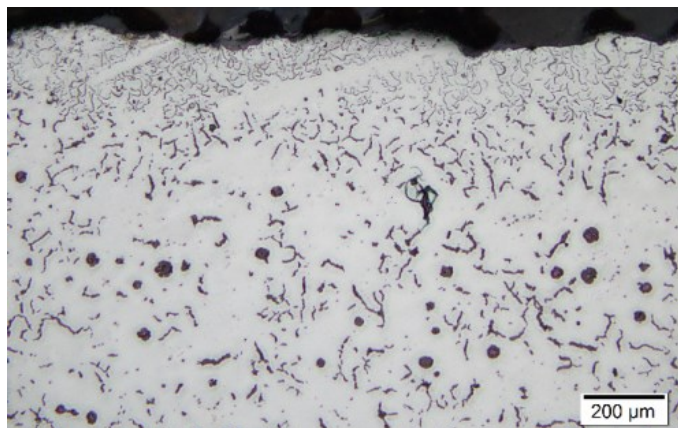
รูปที่ 4.24 กราฟเปรียบเทียบชั้นความหนาการเสีรูปร่างของกราฟิต์กับสารเคลือบแต่ละชนิด

4.3.2 ผลของอัตราการเย็นตัวต่อการเกิดการเสีรูปร่างของกราฟิต์

4.3.2.1 อัตราการเย็นตัวในไส้แบบโซเดียมซิลิเกต โดยมีการผลิตไส้แบบโซเดียมซิลิเกตขนาด 0.5 1.0 1.5 และ 2.0 นิ้ว ไม่เคลือบสารเคลือบใดๆ มีอุณหภูมิเทโลหะหลอมเหลวลงแบบที่ 1,544 °C พบว่าที่ผิวงานหล่อบริเวณที่ติดกับไส้แบบเกิดการเสีรูปร่างของกราฟิต์ ดังแสดงในรูปที่ 4.25 เมื่อมีขนาดไส้แบบใหญ่ขึ้นจะพบว่าชั้นการเสีรูปร่างของกราฟิต์มีแนวโน้มลดลง

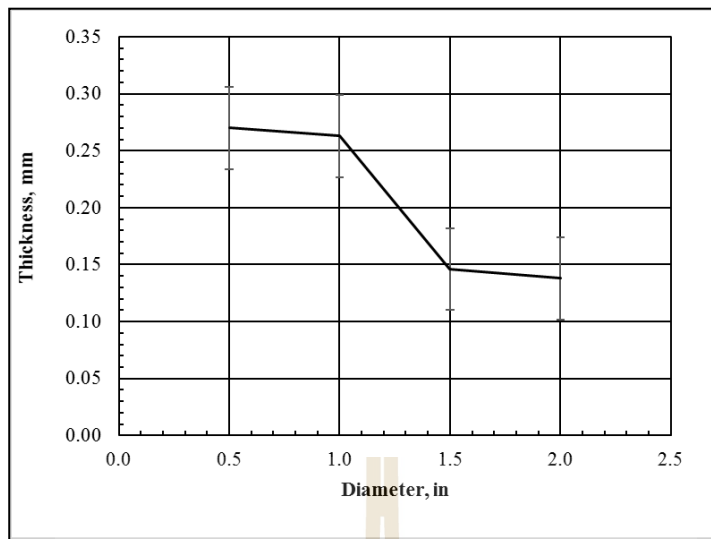


รูปที่ 4.25 โครงสร้างจุลภาคเหล็กหล่อกราฟิต์ตัวหอน และชั้นการเสีรูปร่างของกราฟิต์ของไส้แบบโซเดียมซิลิเกตที่ขนาดไส้แบบ 0.5 นิ้ว

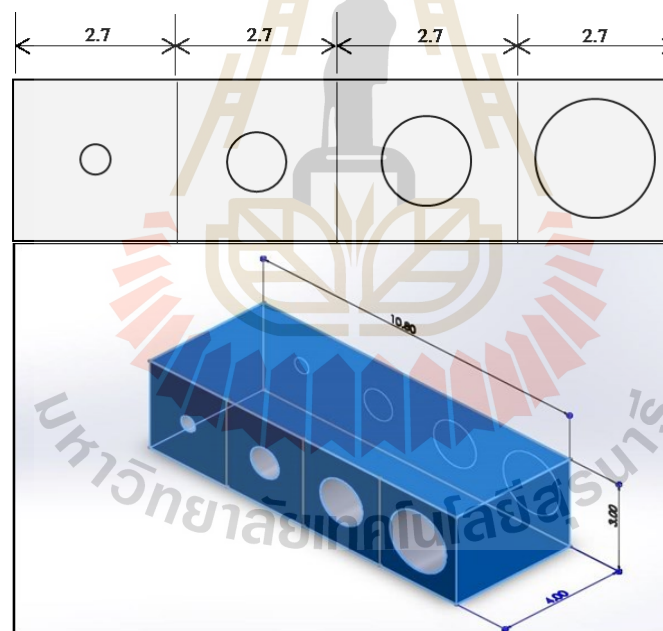


รูปที่ 4.26 โครงสร้างจุลภาคเหล็กหล่อกราไฟต์ตัวหอน และชั้นการเสีรูปร่างของกราไฟต์ของ
ไส้แบบโซเดียมซิลิเกตที่ขนาดไส้แบบ 2.0 นิ้ว

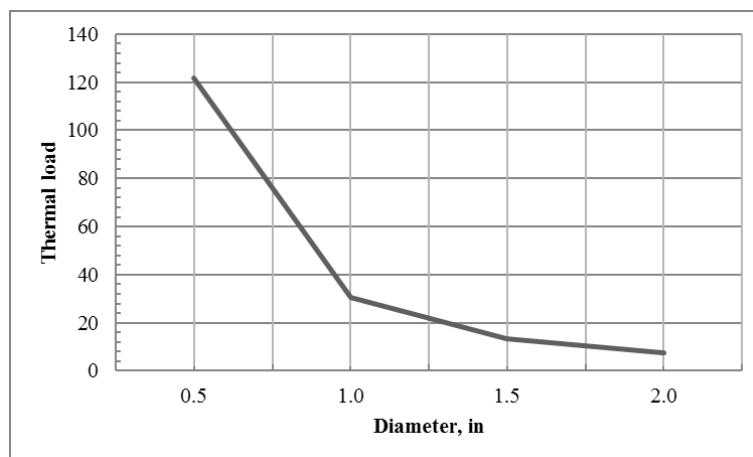
เมื่อนำไปวัดชั้นความหนาของการเสีรูปร่างของกราไฟต์ของไส้แบบขนาดต่างกัน คือ 0.5 1.0 1.5 และ 2.0 นิ้ว จะมีชั้นความหนาเท่ากับ 0.270 0.263 0.146 และ 0.138 มิลลิเมตร ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.27 ซึ่งแสดงชั้นความหนากับขนาดไส้แบบ สาเหตุที่ทำให้เกิดชั้นการเสีรูปร่างของกราไฟต์เนื่องจากมีอุณหภูมิที่สูงมาก ทำให้ที่ผิวงานหล่อบริเวณที่ติดกับไส้แบบเกิดการสูญเสียแมกนีเซียมมาก และการที่ชั้นการเสีรูปร่างของกราไฟต์มีแนวโน้มลดลงเรื่อยๆ ตามขนาดของไส้แบบที่มีขนาดใหญ่ขึ้นนั้นเนื่องจาก ไส้แบบที่มีขนาดใหญ่จะมีเวลาในการแข็งตัวที่เร็ว กว่าไส้แบบขนาดเล็กจึงทำให้เกิดการสูญเสียแมกนีเซียมที่ผิวงานหล่อน้อย ชั้นความหนาของการเสีรูปร่างของกราไฟต์มีแนวโน้มลดลง และได้คำนวณหาค่าภาระทางความร้อน (Thermal load) ของไส้แบบที่มีขนาดแตกต่างกัน โดยที่ค่าภาระทางความร้อนนี้ จะเป็นการวัดปริมาณความร้อนที่ไส้แบบได้รับ เป็นการเปรียบเทียบปริมาณน้ำเหล็กกับขนาดไส้แบบ ซึ่งหาได้จากอัตราส่วนระหว่างน้ำหนักของโลหะกับน้ำหนักของทราย โดยในการวัดจะทำการการแบ่งชิ้นงานให้มีขนาดเท่ากัน ดังแสดงในรูปที่ 4.28 พบว่าบริเวณที่มีค่าภาระทางความร้อนมากหรือบริเวณที่มีขนาดไส้แบบเล็กจะส่งผลให้ไส้แบบบริเวณนั้นมีอุณหภูมิสูงน้ำเหล็กแข็งตัวช้า เวลาในการเกิดปฏิกิริยาการสูญเสียแมกนีเซียมจะนานกว่าบริเวณที่มีภาระทางความร้อนต่ำ หรือบริเวณที่มีไส้แบบขนาดใหญ่ขึ้น ส่งผลให้ชั้นการเสีรูปร่างของกราไฟต์เพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.29 ซึ่งจะแสดงให้เห็นว่าเมื่อไส้แบบมีขนาดใหญ่ขึ้นค่าภาระทางความร้อน ก็มีแนวโน้มลดลงเรื่อยๆ



รูปที่ 4.27 กราฟแสดงความหนาของชั้นการเสีรูปร่างของกราฟต์กับขนาดใส่แบบต่างกัน

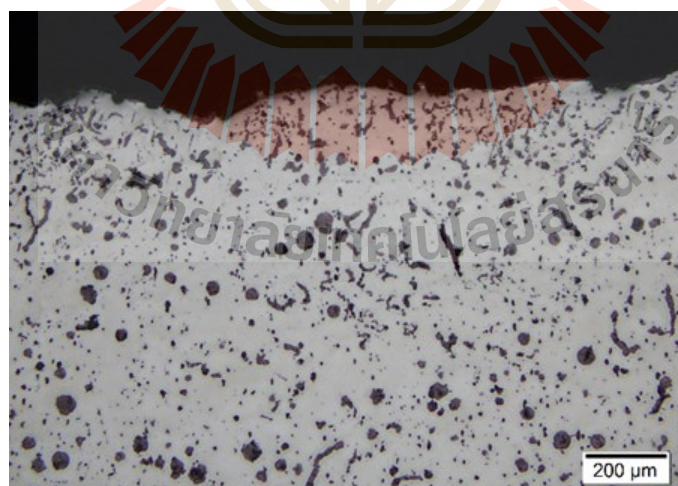


รูปที่ 4.28 ลักษณะการแบ่งชิ้นงานเพื่อนำไปคำนวณหาค่าภาระทางความร้อน

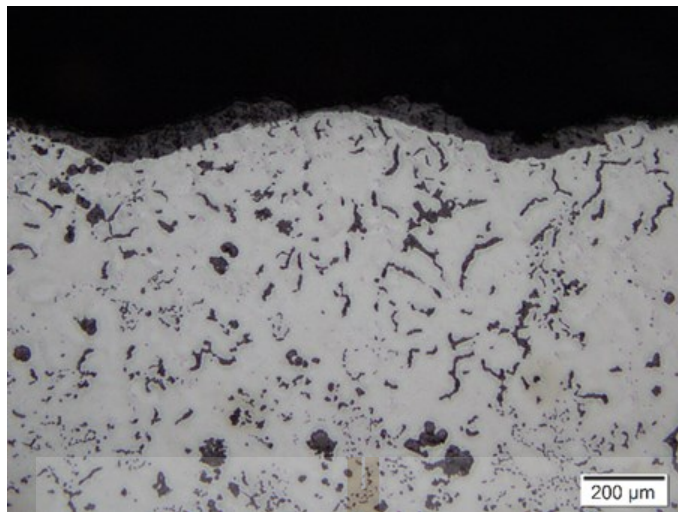


รูปที่ 4.29 ความสัมพันธ์ระหว่างภาระทางความร้อนกับไส้แบบที่ขนาดต่างกัน

4.3.2.1 อัตราการเย็นตัวในไส้แบบ AM แบบขนาด 0.5 1.0 1.5 และ 2.0 นิ้ว ไม่เคลือบสารเคลือบ มีอุณหภูมิ 1,423 องศาเซลเซียส พบว่าไม่เกิดชั้นการเสีรูปร่างของกราฟิต์ดังแสดงในรูปที่ 4.30 และ 4.31 ซึ่งสาเหตุที่ไม่เกิดชั้นการเสีรูปร่างของกราฟิต์เนื่องจากมีอุณหภูมิที่ไม่สูงมาก ถึงแม้จะมีเวลาในการแข็งตัวที่แตกต่างกัน ทำให้น้ำเหล็กแข็งตัวเร็ว ไม่เกิดการสูญเสียแมกนีเซียมที่ผิวงานหล่อบริเวณที่ติดกับไส้แบบ ช่วยลดการเกิดชั้นการเสีรูปร่างของกราฟิต์



รูปที่ 4.30 โครงสร้างจุลภาคเหล็กหล่อกราฟิต์ตัวหอน ของไส้แบบ AM ที่ขนาดไส้แบบ 0.5 นิ้ว



รูปที่ 4.31 โครงสร้างจุลภาคเหล็กหล่อกราไฟต์ตัวหอน ของไส้แบบ AM ที่ขนาดไส้แบบ 2.0 นิ้ว

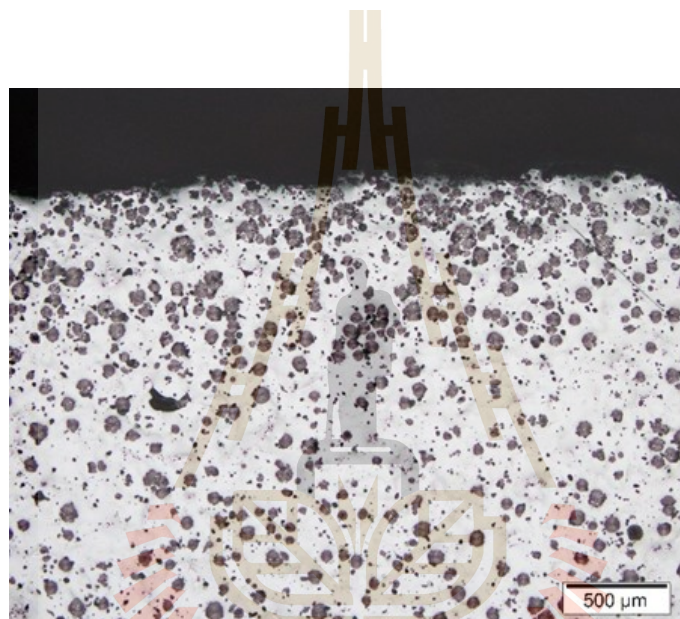
จากผลการทดลองพบว่า ที่อุณหภูมิสูงขึ้นชั้นความหนาของการเสีรูปร่างของกราไฟต์มีแนวเพิ่มขึ้นสูงขึ้นด้วยการทำให้น้ำเหล็กแข็งตัวช้า เกิดการสูญเสียแมกนีเซียมที่ผิวงานหล่อบริเวณที่ติดกับไส้แบบ แมกนีเซียมมีเวลานานพอในการทำปฏิกิริยากับออกซิเจนและกำมะถัน ซึ่งไส้แบบที่มีขนาดใหญ่ ชั้นความหนาของการเสีรูปร่างของกราไฟต์มีแนวโน้มลดลง เพราะว่าไส้แบบขนาดใหญ่มีการถ่ายเทความร้อนที่ดีกว่าทำให้เวลาในการแข็งตัวเร็วกว่าไส้แบบที่มีขนาดเล็ก เนื่องจาก สูญเสียแมกนีเซียมที่ผิวงานหล่อน้อยกว่า จึงส่งผลให้ชั้นความหนาของการเสีรูปร่างของกราไฟต์ที่แตกต่างกัน จากผลการทดลองพบว่าการเคลือบไส้แบบด้วยเซอร์คอนเบส ช่วยลดชั้นความหนา ของชั้นการเสีรูปร่างของกราไฟต์ได้ดีกว่าการเคลือบด้วยฟิลโลซิลิเกต และมัลโลด์ ซึ่งการเคลือบไส้แบบด้วยฟิลโลซิลิเกตและมัลโลด์ นอกจะไม่ช่วยลดชั้นความหนาของการเสีรูปร่างของกราไฟต์แล้ว กลับมีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้นความหนาแทน ซึ่งสาเหตุที่ทำให้ชั้นความหนาของการเสีรูปร่างของกราไฟต์ของสารเคลือบแต่ละชนิดต่างกัน เพราะสารเคลือบเซอร์คอนเบสมีความสามารถการนำความร้อนดีกว่าฟิลโลซิลิเกต และมัลโลด์ ทำให้น้ำเหล็กบริเวณนั้นแข็งเร็ว ลดการสูญเสียแมกนีเซียมที่ผิวงานหล่อ จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่า อุณหภูมิ สารเคลือบไส้แบบ และเวลาในการแข็งตัวนั้นล้วนมีอิทธิพลต่อการเกิดชั้นการเสีรูปร่างของกราไฟต์ทั้งสิ้น

4.3.3 ผลของปริมาณกำมะถันในไส้แบบต่อการเกิดการเสีรูปร่างของกราไฟต์

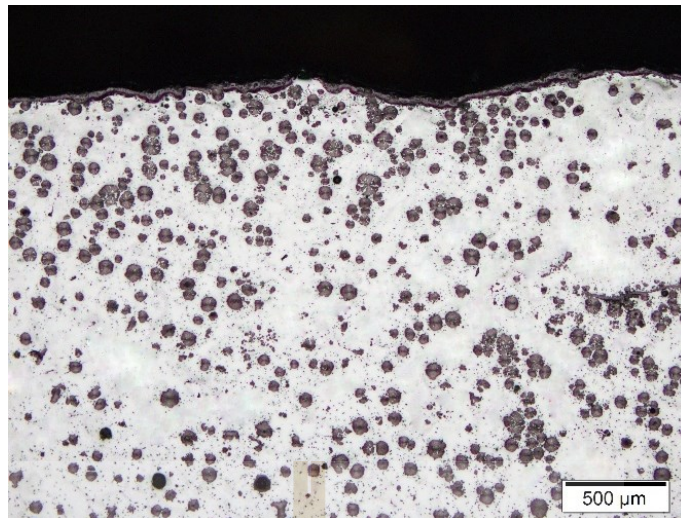
จากการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคที่บริเวณผิวชิ้นงานหล่อเหนียว พบว่าผงกำมะถันที่ผสมอยู่ในไส้แบบมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงสัญญาณของกราไฟต์ในเหล็กหล่อเหนียว ทั้งนี้สาเหตุเกิดจากการสูญเสียแมกนีเซียมที่ผิว เนื่องจากแมกนีเซียมจะรวมตัวกับกำมะถันได้ดี จึงส่งผลให้บริเวณผิวของงานหล่อที่สัมผัสกับไส้แบบมีปริมาณแมกนีเซียมลดลง และไม่เพียงพอที่จะทำให้ลักษณะสัญญาณ

ของกราฟไฟต์ที่เกิดขึ้นนั้นมีทรงกลม ซึ่งทำให้สัณฐานของกราฟไฟต์มีลักษณะเป็นแบบแผ่นที่บริเวณผิวชิ้นงานนั่นเอง

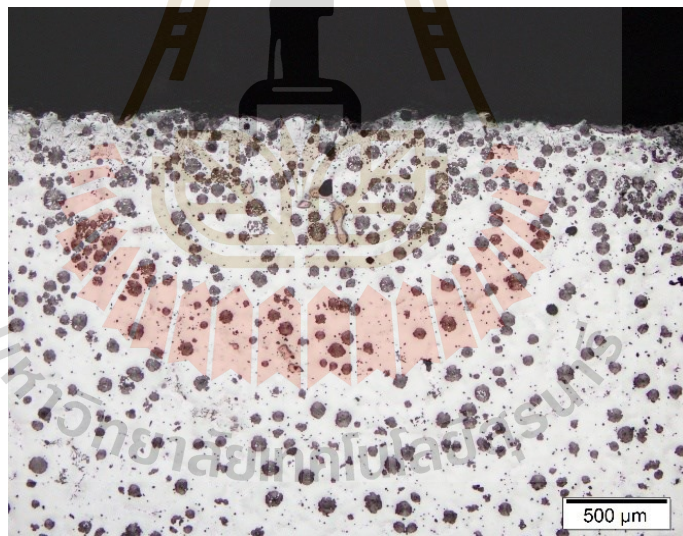
นอกจากนี้จากการทดลองทำให้ทราบว่าปริมาณผงกำมะถันที่ผสมในไส้แบบนี้ มีผลต่อชั้นความหนาของกราฟไฟต์แบบแผ่นที่เกิดขึ้นที่ผิวงานหล่อ โดยในชิ้นงานที่สัมผัสกับไส้แบบที่มีกำมะถันผสมอยู่ในปริมาณน้อย ชั้นความหนาของกราฟไฟต์แบบแผ่นก็จะน้อย และชั้นความหนาของกราฟไฟต์แบบแผ่นจะมีความหนาเพิ่มขึ้นตามปริมาณผงกำมะถันที่เติมในไส้แบบที่เพิ่มขึ้นตามลำดับ โดยภาพที่ 4.32 ถึง 4.39 แสดงผลของปริมาณผงกำมะถันในไส้แบบต่อความหนาของชั้นกราฟไฟต์แบบแผ่นที่เกิดขึ้นที่ผิวชิ้นงานของเหล็กหล่อเหนียวบริเวณที่สัมผัสกับไส้แบบ และสรุปผลไว้ในตารางที่ 4.5



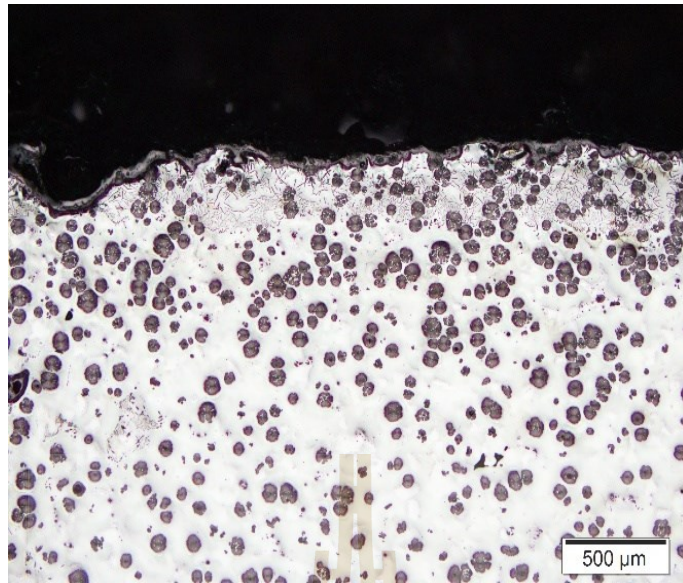
รูปที่ 4.32 โครงสร้างจุลภาคของเหล็กหล่อเหนียวที่ไม่มีกำมะถันในไส้แบบต่อชั้นความหนาของกราฟไฟต์แบบแผ่นที่เกิดขึ้น



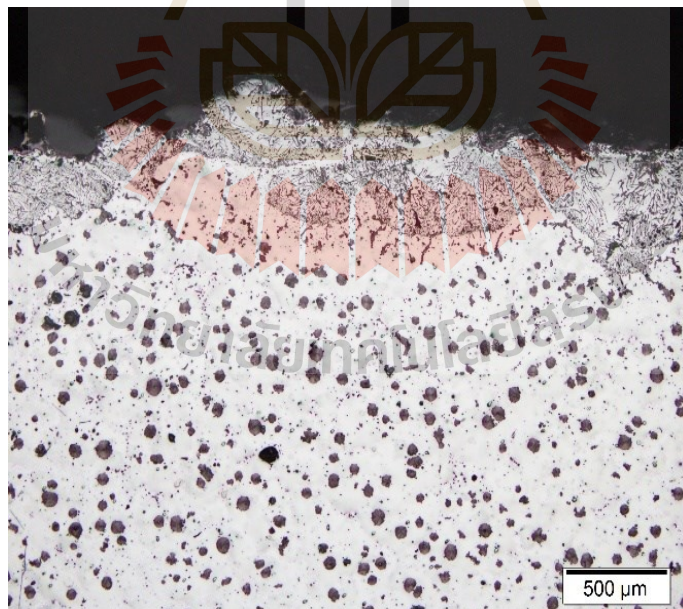
รูปที่ 4.33 โครงสร้างจุลภาคของเหล็กหล่อเหนียวที่มีปริมาณกำมะถันในไส้แบบ 0.5% โดยน้ำหนักต่อชั้นความหนาของกราฟไฟต์แบบแผ่นที่เกิดขึ้น



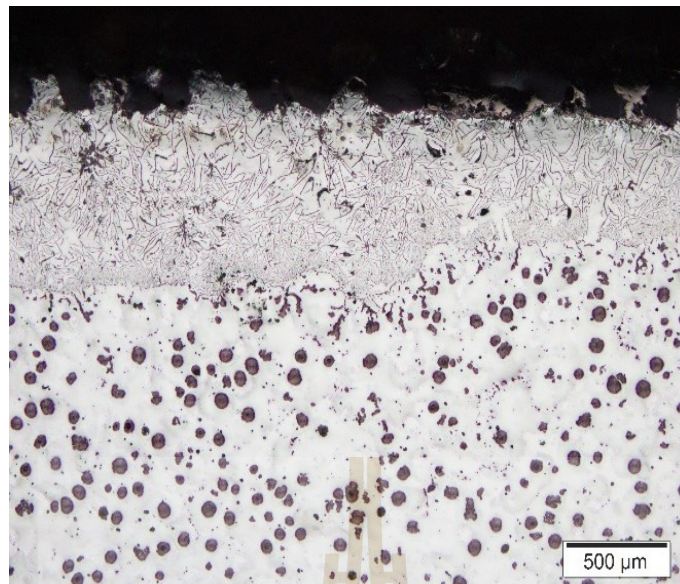
รูปที่ 4.34 โครงสร้างจุลภาคของเหล็กหล่อเหนียวที่มีปริมาณกำมะถันในไส้แบบ 1.0% โดยน้ำหนักต่อชั้นความหนาของกราฟไฟต์แบบแผ่นที่เกิดขึ้น



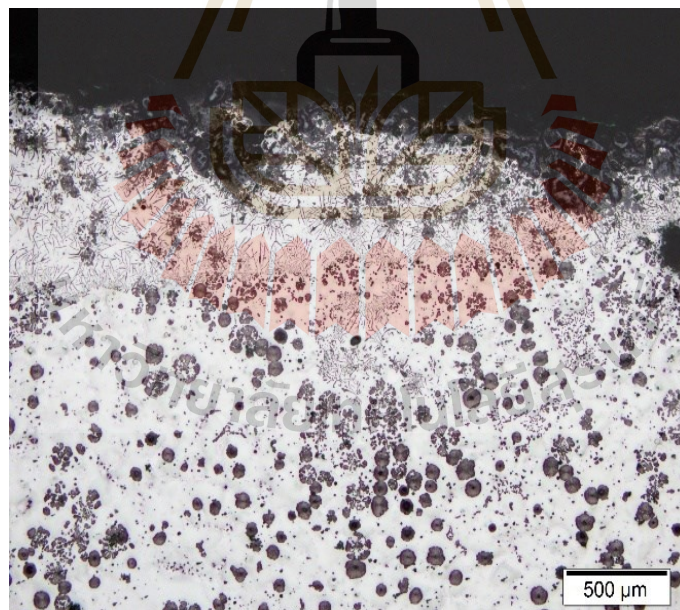
รูปที่ 4.35 โครงสร้างจุลภาคของเหล็กหล่อเหนียวที่มีปริมาณกำมะถันในไส้แบบ 1.5% โดยน้ำหนักต่อชั้นความหนาของกราฟไฟต์แบบแผ่นที่เกิดขึ้น



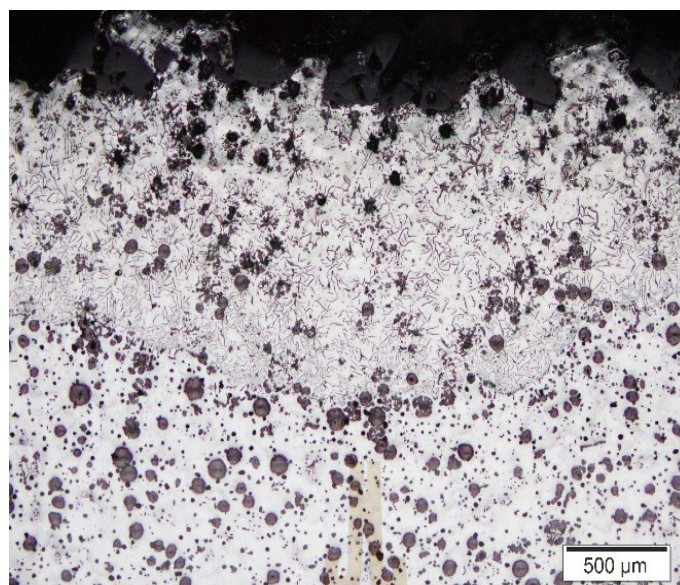
รูปที่ 4.36 โครงสร้างจุลภาคของเหล็กหล่อเหนียวที่มีปริมาณกำมะถันในไส้แบบ 2.0% โดยน้ำหนักต่อชั้นความหนาของกราฟไฟต์แบบแผ่นที่เกิดขึ้น



รูปที่ 4.37 โครงสร้างจุลภาคของเหล็กหล่อเหนียวที่มีปริมาณกำมะถันในไส้แบบ 2.5% โดยน้ำหนักต่อชั้นความหนาของกราฟต์แบบแผ่นที่เกิดขึ้น



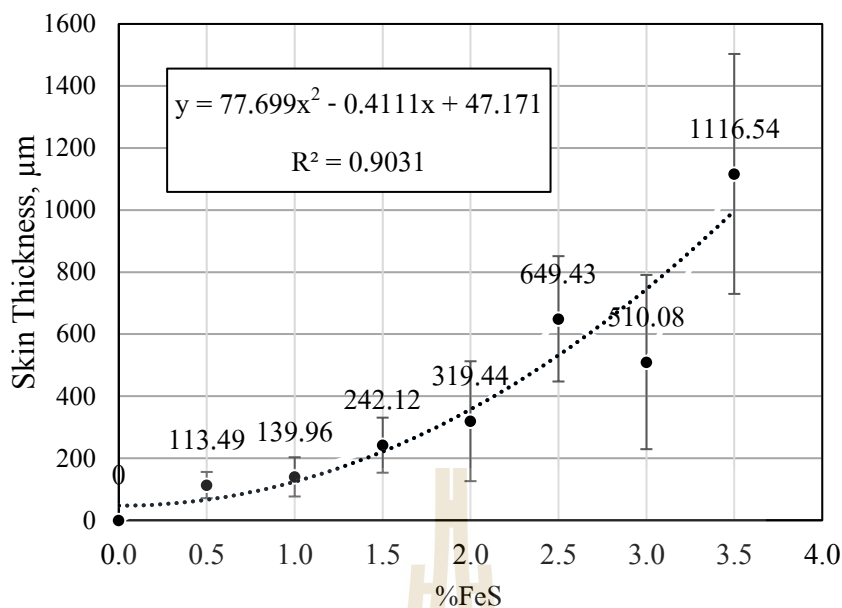
รูปที่ 4.38 โครงสร้างจุลภาคของเหล็กหล่อเหนียวที่มีปริมาณกำมะถันในไส้แบบ 3.0% โดยน้ำหนักต่อชั้นความหนาของกราฟต์แบบแผ่นที่เกิดขึ้น



รูปที่ 4.39 โครงสร้างจุลภาคของเหล็กหล่อเหนียวที่มีปริมาณกำมะถันในไส้แบบ 3.5%โดยน้ำหนักต่อชั้นความหนาของกราฟไฟต์แบบแผ่นที่เกิดขึ้น

ตารางที่ 4.5 ความหนาของชั้นการเสีรูปร่างของกราฟไฟต์

%wt FeS ในไส้แบบ	ค่าความหนา (μm)	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน(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

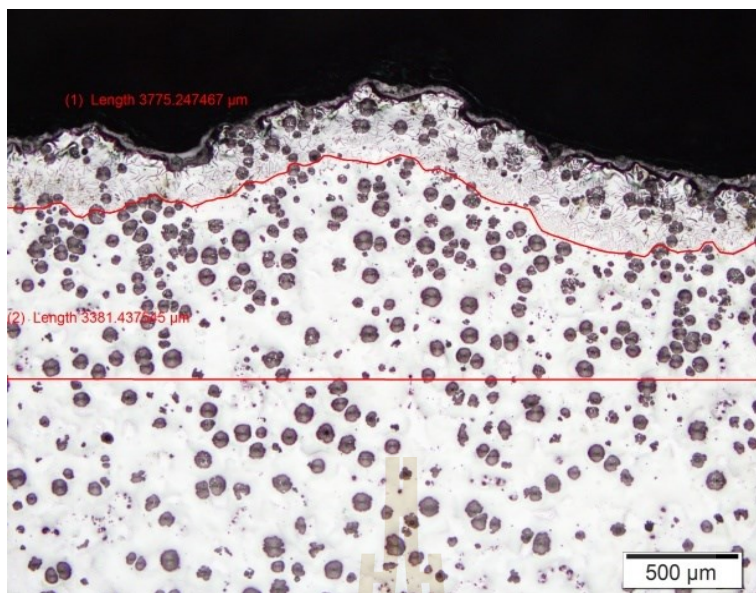


รูปที่ 4.40 ความหนาของชั้นการเสีรูปร่างของกราฟไฟต์กับปริมาณกำมะถันที่ผสมลงในไส้แบบ

จากรูปที่ 4.40 กราฟแสดงความสัมพันธ์ดังกล่าวทำให้ได้สมการที่สามารถทำนายแนวโน้มชั้นความหนาเหล็กหล่อเทาในการผลิตต่อไปได้ คือ

$$y = 79.014x^2 - 11.589x + 67.884 \quad (4.1)$$

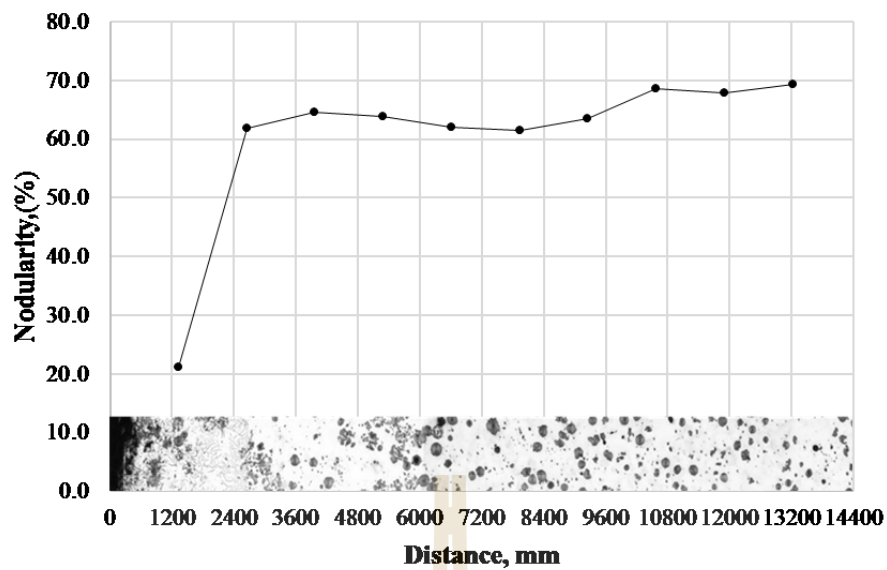
ในแง่ของการตรวจสอบค่าความคดโค้ง (Tortuosity) นั้น เพื่อตรวจสอบว่าในการผลิตเหล็กหล่อกราฟไฟต์คู่สามารถควบคุมการผลิตได้มากน้อยเพียงใด โดยการทดลองนี้ต้องการให้ค่าความคดโค้งที่ทำการวัดมีค่าเข้าใกล้ 1 คือมีความคดโค้งของชั้นกราฟไฟต์น้อยหรือเท่ากับ 1 แสดงว่าไม่มีความคดโค้ง ชั้นกราฟไฟต์แบบแผ่นที่เกิดขึ้นเกิดอย่างสม่ำเสมอและเป็นเส้นตรง จากการตรวจสอบจากผลของปริมาณกำมะถันในไส้แบบ กลับพบว่าปริมาณกำมะถันที่ผสมในไส้แบบมีผลกับ ค่าความคดโค้งที่เกิดขึ้นบนผิวงานหล่อน้อยกว่าความเรียบของไส้แบบ แสดงตัวอย่างดังรูปที่ 4.41



รูปที่ 4.41 ความคดโค้งของชั้นการเสียรูปร่างของกราไฟต์

จากรูปจะเห็นว่า แนวโน้มของการเกิดชั้นกราไฟต์แบบแผ่นที่ผิวงานหล่อนั้น มักมีแนวโน้มเกิดไปตามความโค้งของผิวที่สัมผัสกับไส้แบบ จึงทำให้พออนุมานได้ว่ากำมะถันมีผลน้อยต่อ ความคดโค้งนั้นเอง

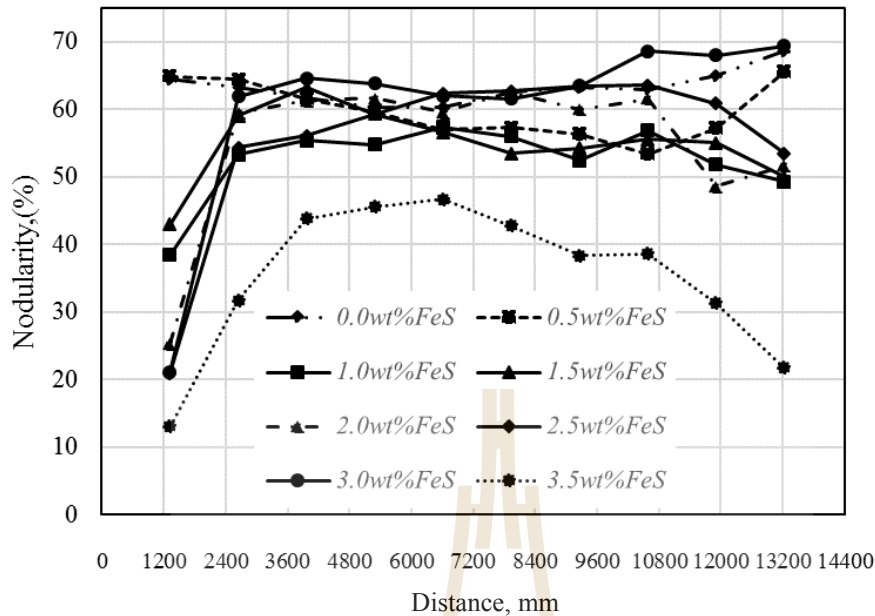
ในด้านของการตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงสัณฐานของกราไฟต์ หรือการตรวจสอบค่าความกลมนั้น พบว่าสัณฐานของกราไฟต์จะเปลี่ยนแปลงจากลักษณะกราไฟต์แบบแผ่นไปเป็นทรงกลมทันที ซึ่งส่วนนี้น่าจะเป็นผลจากความสามารถของการแพร่กำมะถันที่อยู่ในผงกำมะถันเข้าไปในเนื้อเหล็กแล้วรวมตัวกับแมกนีเซียมจนทำให้เนื้อเหล็กบริเวณนั้นสูญเสียแมกนีเซียม ดังได้กล่าวไว้แล้วในข้างต้น และส่วนที่ไม่มีการรวมตัวกับกำมะถัน ก็ยังคงก่อให้เกิดสัณฐานของกราไฟต์ทรงกลมได้ตามปกติ ทั้งนี้ความสามารถของการแพร่ของกำมะถันจะขึ้นกับปริมาณกำมะถันเองและขึ้นกับการอัตราเย็นตัวตลอดจนการแข็งตัวของเหล็กอีกด้วย โดยค่าความกลมของกราไฟต์ที่ระยะต่างๆจากผิวที่สัมผัสไส้แบบที่ผสมกำมะถันแสดงในรูปที่ 4.42 และค่าความกลมที่วัดได้แสดงดังตารางที่ 4.6



รูปที่ 4.42 ค่าความกลมของกราฟไฟต์ที่ระยะต่างๆ จากผิวที่สัมผัสกับไส้แบบที่ผสมกำมะถัน 3.0% โดยน้ำหนัก

ตารางที่ 4.6 ค่าความกลมที่วัดได้ในชิ้นงานที่มีปริมาณกำมะถันในไส้แบบแตกต่างกัน

FeSในไส้แบบ, (%wt)	ค่าความกลม	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน(SD)
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 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะความลึกจากผิวทางกับความกลมของกราไฟต์

จากรูปที่ 4.43 พิจารณากราฟจากการทดลองที่ปริมาณกำมะถัน 0 และ 0.5% โดยน้ำหนัก ซึ่งนำมาตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคและไม่พบชั้นของแกรไฟแบบแผ่นจึงเห็นว่าความชื้นของกราฟไม่ค่อยมีการเปลี่ยนแปลง ขณะขึ้นอื่นๆที่มีปริมาณกำมะถันเพิ่มขึ้น จะพบชั้นกราไฟต์แบบแผ่น และในช่วงของระยะการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของกราไฟต์ ความชื้นของกราฟจะเปลี่ยนแปลงอย่างเห็นได้ชัด มีข้อสังเกตที่จะเห็นว่า เส้นกราฟที่มีปริมาณกำมะถัน 3.5% โดยน้ำหนัก เมื่อถึงช่วงระยะหนึ่งจะมีค่าความกลมต่ำลงซึ่งแตกต่างจากชั้นอื่นๆ ทั้งนี้เกิดขึ้นเพราะผู้ทดลองได้ทำตรวจสอบโดยเลือกตรวจสอบโครงสร้างบริเวณที่มีการเย็นตัวช้ากว่าชั้นงานอื่นๆ เพื่อดูว่าการเย็นตัวมีผลต่อการฟอร์มรูปร่างของกราไฟต์อย่างไร และทำให้พบว่า ส่วนที่เย็นตัวช้ามีผลทำให้ความกลมของกราไฟต์ลดลง

บทที่ 5

บทสรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลงานวิจัย

การศึกษาด้านประสิทธิภาพของตัวแปรการหล่อต่อการเสีรุกร่างของกราฟไฟต์ที่ผิวของเหล็กหล่อกราฟไฟต์ตัวหนอนและเหล็กหล่อกราฟไฟต์กลมจากผลการวิจัยสามารถสรุปได้ดังนี้

5.1.1 จากผลการทดลองชุดที่ 1 สามารถสรุปได้ว่า

5.1.1.1 ชั้นความหนาของชั้นการเสีรุกร่างของกราฟไฟต์แปรผกผันกับปริมาณแมกนีเซียมทั้งนี้เป็ผลมาจากคานที่น้ำเหล็กมีแมกนีเซียมน้อยลงนั้น จากการสูญเสียแมกนีเซียมเนื่องจากปฏิกิริยาออกซิเดชันจะทำให้บริเวณผิวมีแมกนีเซียมต่ำกว่าปกติ จึงทำให้ชั้นการเสีรุกร่างของกราฟไฟต์หนาขึ้น

5.1.1.2 ชั้นความหนาของการเสีรุกร่างของกราฟไฟต์แปรผันตรงกับคานความหนาของชิ้นงานเนื่องจากชิ้นงานที่หนาขึ้นทำให้ช่วงเวลาในการแข็งตัวของน้ำเหล็กนานขึ้นและเกิดการทำปฏิกิริยา ออกซิเดชันมากขึ้น จึงส่งผลให้ชั้นความหนาของชั้นการเสีรุกร่างของกราฟไฟต์หนาขึ้น โดยค่าเฉลี่ยของชั้นความหนาของชั้นการเสีรุกร่างของกราฟไฟต์ในแบบหล่อทรายเรซินอยู่ที่ 42.90 56.14 64.95 และ 74.00 ไมโครเมตร ที่คานหนา 7 14 21 และ 28 มิลลิเมตรตามลำดับ และค่าเฉลี่ยของชั้นความหนาของการเสีรุกร่างของกราฟไฟต์ ในแบบหล่อทรายขึ้นอยู่ที่ 31.72 42.77 52.36 และ 61.35 ตามลำดับ

5.1.1.3 ทรายเรซินส่งผลให้ชั้นความหนาของชั้นการเสีรุกร่างของกราฟไฟต์มีมากกว่าทรายขึ้นเนื่องจากกำมะถันซึ่งเป็นสารเร่งปฏิกิริยาการจับตัวกันของทรายเรซินและจะทำปฏิกิริยารวมตัวกับแมกนีเซียมเป็น แมกนีเซียมซัลไฟด์ ทำให้ปริมาณแมกนีเซียมที่ผิวลดลง ในขณะที่ทรายขึ้นมีการทาผิวแบบหล่อด้วยกราฟไฟต์ทำให้คาร์บอนรวมตัวกับออกซิเจนเป็นคาร์บอนมอนอกไซด์ทำให้เกิดสภาพบรรยากาศแบบ Reducing atmosphere ส่งผลให้เกิดแมกนีเซียมออกไซด์ซึ่งเป็นที่มาของการสูญเสียแมกนีเซียมที่ผิว

5.1.1.4 ซีโคลที่มีอยู่ในทรายหล่อเป็นผงถ่านหินที่อยู่ในรูปของคาร์บอน ซึ่งจะทำให้คาร์บอนรวมตัวกับออกซิเจนทำให้เกิดเป็นคาร์บอนมอนอกไซด์ทำให้เกิด Reducing atmosphere จึงส่งผลให้ไม่เกิดแมกนีเซียมออกไซด์ซึ่งเป็นที่มาของการสูญเสียแมกนีเซียมที่ผิวจึงทำให้พบเจอชั้นการเสีรุกร่างของกราฟไฟต์น้อยมากหรือไม่พบเลยในแบบหล่อทรายขึ้น

- 5.1.2 จากผลการทดลองชุดที่ 2 สามารถสรุปได้ว่า
- 5.1.2.1 อุณหภูมิที่สูงขึ้นมีแนวโน้มที่จะเกิดขึ้นการเสีรูปร่างของกราไฟต์มากขึ้น
- 5.1.2.2 สารเคลือบฟิลโลซิลิเกตและมัลไลต์ไม่ได้ช่วยลดการเกิดขึ้นการเสีรูปร่างของกราไฟต์ เพราะมีค่าความสามารถนำความร้อนที่ต่ำ แต่เซอร์คอนเบสมีความสามารถในการนำความร้อนสูงกว่า ทำให้น้ำเหล็กบริเวณนั้นแข็งตัวเร็วช่วยลดการเกิดขึ้นการเสีรูปร่างของกราไฟต์
- 5.1.2.3 ขนาดไส้แบบส่งผลต่อการเกิดขึ้นการเสีรูปร่างของกราไฟต์ พบว่าไส้แบบที่มีขนาดเล็กทำให้เกิดขึ้นการเสีรูปร่างของกราไฟต์มาก เนื่องจากเวลาในการแข็งตัวช้าจึงทำให้เกิดขึ้นการเสีรูปร่างของกราไฟต์มาก ไส้แบบที่มีขนาดใหญ่ขึ้นมีแนวโน้มทำให้เกิดขึ้นการเสีรูปร่างของกราไฟต์ลดลง เนื่องจากเวลาในการแข็งตัวเร็วจึงทำให้เกิดการสูญเสียแมกนีเซียมที่ผิวงานหล่นน้อย
- 5.1.3 จากผลการทดลองชุดที่ 3 สามารถสรุปได้ว่า
- 5.1.3.1 ความหนาของชั้นการเสีรูปร่างของกราไฟต์เพิ่มขึ้นตามปริมาณกำมะถันโดยมีค่าสูงสุดที่ 1,116.54 ไมโครเมตร ที่ปริมาณกำมะถัน 3.5%โดยน้ำหนัก
- 5.1.3.2 ส่วนที่เย็นตัวช้ามีผลทำให้ความกลมของกราไฟต์ลดลง
- 5.1.3.3 กำมะถันมีผลน้อยต่อค่าความคดโค้งเนื่องจากแนวโน้มของการเกิดขึ้นกรราไฟต์แบบแผ่นที่ผิวงานหล่นนั้น มักมีแนวโน้มเกิดไปตามความโค้งของผิวที่สัมผัสกับไส้แบบ

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ปัญหาในการเติมคาร์บอน ในช่วงแรกเติมคาร์บอนในขั้นตอนสุดท้ายครั้งเดียวจนหมดทำให้คาร์บอนลอยตัวขึ้นสู่ชั้นบนแล้วฟอร์มตัวรวมกับสแลกเป็นจำนวนมาก ส่งผลให้ค่าคาร์บอนที่ได้ลดต่ำลงมาก จึงเปลี่ยนเป็นการเติมทีละน้อยทำให้ปริมาณคาร์บอนที่ละลายลงในน้ำเหล็กมีปริมาณมากขึ้น อย่างไรก็ตามก็ดียังไม่เพียงพอต่อการทดลอง ดังนั้นในการแก้ปัญหาจึงควรเติมคาร์บอนหลายๆส่วนๆละเท่าๆกัน โดยทยอยเติมทีละส่วนในระหว่างที่เหล็กค่อยๆหลอมไปพร้อมๆกันโดยประมาณให้ช่วงสุดท้ายเติมเมื่อเหล็กและเหล็กเหนียวในเตาละลายจนหมด

5.2.2 ปัญหาการเติมกำมะถัน ในการคำนวณปริมาณกำมะถันสุดท้ายนั้นต้องคำนวณปริมาณในการเติมกำมะถันให้พอเหมาะ เพราะหากกำมะถันที่เติมลงไปใต้น้ำเหล็กมีปริมาณที่มากเกินไปจะทำให้ยากต่อการควบคุมส่วนผสมอื่นๆ เนื่องจากกำมะถันเกิดการสูญเสียด้วยการระเหยค่อนข้างยาก

5.2.3 ปัญหาในการทำแบบหล่อทราย แบบหล่อทรายที่มีความชื้นมากเกินไปจะส่งผลให้ชิ้นงานไม่เป็นรูปร่างที่ต้องการ ฉะนั้นในการผสมทรายแบบจึงต้องควบคุมไม่ให้ทรายชื้นจนเกินไป

บรรณานุกรม

- [1] G.M. Goodrich and R.W. Lobenhofer, “Effect of Cooling rate on ductile iron Mechanical Properties”, Trans. AFS, Vol 110 (2002) pp 1003-1032 .
- [2] L.P. Dix, R. Ruxanda, J. Torrance, M. Fukumoto and D.M. Stefanescu, “Static Mechanical Properties of Ferritic and Pearlitic Lightweight Ductile Iron Castings”, Trans. AFS, Vol 111 (2003) pp 1149-1164.
- [3] F .Mampaey, P. Li and E. Wittink, “Determination of Grey Iron Strength on the Microscale”, Trans. AFS , Vol 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, “Comparative Study of Fatigue Endurance Limit for 4 And 6 mm Thin Wall Ductile Iron Castings”, Int. J. of Metal Casting 2 Issue 2 (2008).
- [6] S. Boonmee and D.M. Stefanescu, “The Effect of Nodularity and Surface Condition on the Fatigue Properties of CG Iron”, Trans. AFS, (2012) Paper 12-037
- [7] S. Boonmee and D.M. Stefanescu, “The Occurrence and the Effect of Casting Skin in Compacted Graphite Iron”, IJCMR,(2016) pp 29:1-2, 47-54.
- [8] I. Riposan and M. Chisamera, “Magnesium-Sulfur Relationships in Ductile and Compacted Graphite Cast Irons as Influenced by Late Sulfur Additions”, Trans AFS 2003 pp 03-093.
- [9] S. Boonmee and D.M. Stefanescu, “Casting Skin Management in Compacted Graphite Iron Part I: Effect of Mold Coating and Section Thickness”, Trans. AFS, 121 (2013) paper 1391.
- [10] 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.
- [11] F.C. Duncan and J.Kroker, “A new test casting to evaluate skin formation in CGI”, American Foundry Society, 2010.
- [12] iFoundryman. 2016 February. Cast iron introduction(Online). Available URI <http://www.ifoundryman.com/cast-iron/>.
- [13] Steve Dawson and Tom Schroeder, “Compacted Graphite Iron A Viable, Alternative” Engineered Casting Solutions AFS, 2000.

ภาคผนวก ก

การหาค่าคาร์บอนสมมูล (Carbon Equivalent)

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

การหาค่าคาร์บอนสมมูล (Carbon Equivalent)

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

- โดย %C คือ ร้อยละโดยน้ำหนักของธาตุคาร์บอนที่เจืออยู่ในเหล็กหล่อ
%Si คือ ร้อยละโดยน้ำหนักของธาตุซิลิคอนที่เจืออยู่ในเหล็กหล่อ
%P คือ ร้อยละโดยน้ำหนักของธาตุฟอสฟอรัสที่เจืออยู่ในเหล็กหล่อ





ภาคผนวก ข

ปริมาณการหดและขยายตัวของชิ้นงานหล่อ

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.



ประวัตินักวิจัย

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สารัมภ์ บุญมี เกิดเมื่อวันที่ 14 พฤศจิกายน พ.ศ. 2520 สำเร็จ การศึกษาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมโลหการ) จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี เมื่อ พ.ศ. 2541 และสำเร็จการศึกษาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมโลหการ) จากจุฬาลงกรณ์ มหาวิทยาลัย เมื่อ พ.ศ. 2547 หลังจากนั้นได้ศึกษาต่อยัง The Ohio State University ประเทศ สหรัฐอเมริกา สำเร็จการศึกษา Master of Science และ Doctor of Philosophy ด้าน Materials Science and Engineering ในปี พ.ศ. 2554 และ 2556 ตามลำดับ ปัจจุบันเป็นอาจารย์ประจำ สาขาวิชาวิศวกรรมโลหการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี สามารถติดต่อได้ที่ sarum@sut.ac.th หรือ โทรศัพท์สำนักงาน 044-224360

