

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูป.....	ณ

บทที่

1 บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหาของการวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการทำวิจัย	2
1.3 สมมติฐานงานวิจัย	2
1.4 ขอบเขตการทำวิจัย.....	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
2 ทัศนัวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 บทนำ.....	4
2.2 เหล็กหล่อเหนียว (DUCTILE CAST IRON).....	5
2.2.1 สมบัติเหล็กหล่อเหนียว	5
2.2.2 การใช้งานเหล็กหล่อเหนียว.....	6
2.3 รูปร่างของแกรไฟต์	7
2.4 การออกแบบการทดลองและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	9

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.5	การแข็งตัวของโลหะ (SOLIDIFICATION OF METALS).....	19
2.5.1	กระบวนการแข็งตัวของโลหะ.....	19
2.5.2	กลไกการเกิดนิวเคลียส.....	20
2.5.3	การแข็งตัวของโลหะในแบบหล่อ.....	24
2.6	เกรนรีไฟน์เมนต์ (GRAIN REFINEMENT).....	25
2.6.1	วิธีการทำอินนोकูลเลชั่น.....	28
2.7	หลักการและทฤษฎีของเทอร์โมคัปเปิล	31
3	วิธีการดำเนินการวิจัย	33
3.1	ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	33
3.1.1	การออกแบบการทดสอบการหล่อ.....	33
3.2	วัสดุที่ใช้ในการวิจัย	35
3.3	อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง	37
3.4	ขั้นตอนการหล่อเหล็กหล่อเหนียว	47
3.5	การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคและการวิเคราะห์ทางภาพ	49
3.6	ทดสอบสมบัติเชิงกล	52
3.6.1	การทดสอบความแข็งของวัสดุ (Hardness Test)	52
3.6.2	การทดสอบแรงดึง (Tensile Test).....	52
3.7	การย้อมสีโครงสร้าง.....	52
3.7.1	วัสดุที่ใช้ในการย้อมสี.....	52
3.7.2	ขั้นตอนการย้อมสีโครงสร้าง	53
3.8	การวิเคราะห์ด้วยเครื่องวิเคราะห์ไมโครโพรบอิเล็กตรอน (ELECTRON PROBE MICRO ANALYSIS; EPMA).....	54

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4 ผลการวิจัยและอภิปรายผล	55
4.1 องค์ประกอบทางเคมี	57
4.2 ผลของบิสมัทที่มีต่อโครงสร้างจุลภาคของเหล็กหล่อเหนียว.....	57
4.2.1 โครงสร้างจุลภาคก่อนกัดกรด.....	57
4.2.2 โครงสร้างจุลภาคหลังกัดกรด	59
5 สรุปและข้อเสนอแนะ.....	71
5.1 สรุปผลงานวิจัย.....	71
5.2 ข้อเสนอแนะ	72
รายการอ้างอิง	73
ภาคผนวก.....	79
ภาคผนวก ก ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคก่อนกัดกรดและหลังกัดกรด	80
ภาคผนวก ข ผลทดสอบสมบัติเชิงกล.....	91
ภาคผนวก ค การหาค่าคาร์บอนสมมูล (CARBON EQUIVALENT).....	94
ภาคผนวก ง บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างการศึกษา	96
ประวัติผู้เขียน	113

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1	สรุปช่วงที่เหมาะสมของ Ce/Bi จากการศึกษาที่กล่าวถึงข้างต้น 19
2.2	ตัวอย่างส่วนผสมของอินนอคคูลนต์สำหรับใช้ในการผลิตเหล็กหล่อ 27
2.3	ส่วนประกอบของช่วงอุณหภูมิและวัสดุตัวนำการวัดของเทอร์โมคัปเปิลแต่ละชนิด 32
3.1	สรุปเงื่อนไขการทดลอง 35
3.2	ส่วนผสมทางเคมีของวัตถุดิบที่ใช้ในการหล่อเหล็กหล่อเหนียว 36
3.3	ส่วนผสมทางเคมีของเหล็กหล่อเหนียวที่ต้องการ 48
3.4	พารามิเตอร์สำหรับการทดลอง EPMA 54
4.1	ส่วนประกอบทางเคมีของชิ้นงานเหล็กเหนียวในการศึกษานี้ 57
4.2	รวมอุณหภูมิที่สำคัญที่ได้จากกราฟการเย็นตัว 64
4.3	คุณสมบัติทางกายภาพและพลังงานอิสระมาตรฐานของการเกิดสารประกอบที่เกี่ยวข้อง. 70

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 โครงสร้างจุลภาคของเหล็กหล่อเหนียว.....	5
2.2 ตัวอย่างการใช้งานของเหล็กหล่อเหนียว.....	7
2.3 ลักษณะของแกรไฟต์แต่ละประเภท.....	9
2.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณบิสมีทและจำนวนโหนดของแกรไฟต์.....	10
2.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณบิสมีทและอัตราส่วนของการเกิดทรงกลมของแกรไฟต์	10
2.6 การออกแบบการทดลองของ H. Takeda และคณะ	11
2.7 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณบิสมีทและอัตราการเย็นตัวของอุณหภูมิของจุดยูเทคติก เริ่มต้นและจุดสิ้นสุดการแข็งตัวของยูเทคติก	11
2.8 การเจริญเติบโตของแกรไฟท์รูปทรงกลม อินเทอมีเดียทแกรไฟต์ และซังกี้แกรไฟต์.....	12
2.9 การก่อตัวของแกรไฟต์ในเหล็กหล่อที่ผ่านการทรีตด้วยแมกนีเซียม	12
2.10 ความสัมพันธ์ระหว่าง RCG กับสมบัติเชิงกลของชิ้นงานเหล็กหล่อแกรไฟต์ทรงกลม.....	13
2.11 สันฐานวิทยาของกราฟไฟต์ของตัวอย่างที่มีปริมาณ Bi ต่างกันที่ตำแหน่ง 4; (a) 0.05wt.%; (b) 0.008wt.%; (c) 0.011wt.%; (d) 0.014wt.%.....	14
2.12 การออกแบบชิ้นงานของ Glavas Z และคณะ	15
2.13 ผลของการเพิ่มบิสมีทต่อความทรงกลม (a) และ จำนวนของแกรไฟต์ (b) ในความหนา ของหน้าตัด 3 -100 มิลลิเมตร	15
2.14 การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่มีความหนา 3 มิลลิเมตร เมื่อมีการเติม บิสมีทที่แตกต่างกัน.....	16
2.15 โครงสร้างจุลภาคของกรวย: (a) กรวย 1 (b) กรวย 2, (c) กรวย 3, (d) กรวย 4	17
2.16 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณบิสมีทและพื้นที่ของซังกี้แกรไฟต์.....	18
2.17 กระบวนการแข็งตัวของโลหะ a) การเกิดนิวคลีไอ b, c, d) โครงสร้างกิ่งไม้ขยายตัว e) สิ้นสุดการแข็งตัวเกิดเม็ดเกรนของโลหะและรอยต่อเรียกว่าขอบเกรน	20

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.18	พลังงานอิสระรวมที่เปลี่ยนแปลงเทียบกับรัศมีวิกฤติของเอมบริโอ 21
2.19	การเกิดนิวเคลียสแบบวิวิธพันธ์ โดยการเกิดนิวคลีไอบนพื้นผิวของแข็ง 23
2.20	ลักษณะการแข็งตัวของน้ำโลหะในแบบหล่อ..... 25
2.21	โครงสร้างมหภาคของงานหล่อ Al-7Si ที่ผ่านการทำเกรนรีไฟน์เมนต์ด้วยการเติมโลหะ ผสม Ti-B 27
2.22	วิธีการทำอินนोकูลेशन; a) ทรานสเฟอร์เลเดิล; b) อินสตรีม; c) อินโมลต..... 29
2.23	ลักษณะของนิวเคลียสเทียมในน้ำโลหะหลอมเหลว 30
2.24	เปรียบเทียบโครงสร้างจุลภาคของเหล็กหล่อเหนียว a) ไม่อินนอคูลेशन; b) ทำอินนอคูลेशनได้ไม่ดี; c) ทำอินนอคูลेशनได้ดี 31
2.25	หลักการของเทอร์โมคัปเปิล 31
3.1	ขนาดของการหล่อแบบขึ้นบันได 33
3.2	ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย 34
3.3	วัสดุที่ใช้ในการทดลอง..... 36
3.4	เตาหลอมและตู้ควบคุม 37
3.5	เครื่องมือทราย 37
3.6	ทรายแบบ (ซ้าย) หีบแบบ (ขวา) 38
3.7	ชุดอุปกรณ์วัดอุณหภูมิ..... 38
3.8	แก๊สสำหรับเผาแบบ 39
3.9	เบ้ารองรับน้ำโลหะ (Ladle) 39
3.10	แม่พิมพ์ทองแดงสำหรับรองรับการชักตัวอย่างน้ำโลหะ 40
3.11	เบ้ารองรับน้ำโลหะสำหรับชักตัวอย่าง 40
3.12	เครื่องชั่งน้ำหนักแบบหยาบ (ซ้าย) เครื่องชั่งน้ำหนักแบบละเอียด (ขวา)..... 41
3.13	เครื่องตรวจสอบส่วนผสมทางเคมี..... 41
3.14	อุปกรณ์สำหรับการวัดอัตราการเย็นตัวของเหล็กหล่อเหนียว 42

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.15 ระบบเก็บข้อมูลแบบดิจิทัล (Digital data acquisition system).....	42
3.16 คอมพิวเตอร์โน้ตบุ๊กเพื่อแสดงผล.....	43
3.17 เครื่องตัดเหล็กเพื่อใช้ในการตัดชิ้นงาน	43
3.18 เครื่องขัดผิวชิ้นงาน.....	44
3.19 กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงพร้อมชุดอุปกรณ์ถ่ายภาพ.....	44
3.20 เครื่องกลึงเหล็กอัตโนมัติ	45
3.21 เครื่องทดสอบความแข็ง	45
3.22 เครื่อง Electron Probe Micro Analyzer (EPMA)	46
3.23 เครื่องทดสอบแรงดึง	46
3.24 ขั้นตอนการดำแบบหล่อ	47
3.25 การเทน้ำเหล็กมายังเบ้ารองรับน้ำโลหะเพื่อทำการอินน็อคูเลชัน.....	48
3.26 ขั้นตอนการขัดด้วยผ้าสักหลาดโดยใช้ผงอะลูมินา	49
3.27 โปรแกรมวิเคราะห์ทางภาพ.....	50
3.28 วิธีการตั้งสเกลของโปรแกรมทางภาพ	50
3.29 ผลการคำนวณค่าต่างๆโดยการใช้โปรแกรมทางภาพ	50
3.30 การใช้ซอฟต์แวร์วิเคราะห์ทางภาพ ที่แสดงวิธีการนับจำนวนเกรไฟต์	51
3.31 ตัวอย่างทดสอบแรงดึงมาตรฐานสำหรับเหล็กหล่อ	52
3.32 สีของกรดก่อนจุ่มชิ้นงาน	53
3.33 ชิ้นงานที่ใช้สำหรับวิเคราะห์ด้วยเครื่อง EPMA	54
4.1 ผลจากการจำลองการหล่อจากซอฟต์แวร์; a) อัตราการเย็นตัว; b) กราฟการเย็นตัว.....	56
4.2 โครงสร้างจุลภาคของเหล็กหล่อเหนียวที่มีความหนาและบิสมัทแตกต่างกัน (ก่อนกัดกรด). 58	
4.3 ผลของบิสมัทและความหนาต่อจำนวนเกรไฟต์; a) ความหนาของหน้าตัด ; b) บิสมัท	59

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.4 Inversed chill ที่พบในตัวอย่างที่มีความหนาของหน้าตัด 4 มิลลิเมตร (ซ้าย) 0.000%Bi; (ขวา) 0.003%Bi	60
4.5 โครงสร้างจุลภาคของเหล็กหล่อเหนียวที่มีความหนาและบิสมีทที่แตกต่างกัน (กัดกรดด้วย 3% Nital).....	60
4.6 พื้นที่ร้อยละของเฟสในโครงสร้างจุลภาคที่สัมพันธ์กับความหนา; (a) เพิร์ลไลต์ (b) เพอร์ไรต์ (c) คาร์ไบด์ (d) แกรไฟต์	61
4.7 พื้นที่ร้อยละของเฟสในโครงสร้างจุลภาคที่สัมพันธ์กับบิสมีท; (a) เพิร์ลไลต์ (b) เพอร์ไรต์ (c) คาร์ไบด์ (d) แกรไฟต์.....	62
4.8 กราฟการเย็นตัว (a) นิยามของสัญลักษณ์ (b) จากตัวอย่างเหล็กหล่อเหนียวที่มีบิสมีท ตั้งแต่ 0 – 0.01%	63
4.9 ผลกระทบของบิสมีทและความหนาของหน้าตัดต่อความแข็ง a) ความหนา b) บิสมีท	64
4.10 สมบัติเชิงกลของเหล็กหล่อเหนียวที่มีบิสมีทตั้งแต่ 0 – 0.01% ; ความแข็งแรงของจุดคราก (Yield Strength, YS) , ความต้านทานแรงดึงสูงสุด (Ultimate Tensile Strength, UTS) และเปอร์เซ็นต์การยืดตัว (Percent Elongation, %EL).....	65
4.11 โครงสร้างจุลภาคนัยมสีเหล็กหล่อเหนียวที่มีบิสมีทตั้งแต่ 0 – 0.01% ที่ความหนา 36 มิลลิเมตร	66
4.12 โครงสร้างจุลภาคและการทำแผนที่ด้วย EPMA	67
4.13 ภาพรวมแผนที่ EPMA ของคาร์บอนและบิสมีท	68
4.14 แผนที่ EPMA ของบิสมีท ออกซิเจน และกำมะถันที่แกนแกรไฟต์	68
4.15 แผนภาพเฟสบิสมีทและเหล็ก.....	69