ห้องสมุดงานวิจัย สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ
247139

การลดจุดเสียในงานหล่อชิ้นส่วนเครื่องจักรที่ทำจากเหล็กหล่อแกรไฟต์กลมด้วยการปรับปรุงการออกแบบระบบทางเข้าโดยใช้การจำลองแบบทางคอมพิวเตอร์

นายนิติศักดิ์ ปิ่นโรจน์

โครงงานวิจัยอุตสาหกรรมนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโลหการ
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
พ.ศ. 2554

b00252967
ห้องสมุดงานวิจัย สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ
247139

การลดจุดเสียในงานหล่อชิ้นส่วนเครื่องจักรที่ทำจากเหล็กหล่อแกรไฟต์กลมด้วยการปรับปรุงการออกแบบระบบทางวิ่งโดยใช้การจำลองแบบทางคอมพิวเตอร์

นายกิตติศักดิ์ ปัทมโรจน์ วท.บ. (เทคโนโลยีเครื่องกล)

โครงงานวิจัยอุตสาหกรรมนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโลหการ
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
พ.ศ. 2554

สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ห้องสมุดงานวิจัย

คณะกรรมการสอบโครงงานวิจัยอุตสาหกรรม

.... ประธานกรรมการสอบโครงงานวิจัยอุตสาหกรรม
(ดร.พงษ์ศักดิ์ ถึงสุข)

.... กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษาโครงงานวิจัยอุตสาหกรรม
(รศ.ดร.เชาวลิต ลิ้มมณีวิจิตร)

.... กรรมการ
(ดร.ไพบูลย์ ช่วงทอง)

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

หัวข้อโครงงานวิจัยอุตสาหกรรม	การลดจุดเสียในงานหล่อชิ้นส่วนเครื่องจักรที่ทำจากเหล็กหล่อแกรไฟต์กลมด้วยการปรับปรุงการออกแบบระบบทางวิ่งโดยใช้การจำลองแบบทางคอมพิวเตอร์
หน่วยกิต	6
ผู้เขียน	นายกิตติศักดิ์ ปัทมโรจน์
อาจารย์ที่ปรึกษา	รศ.ดร.เชาวลิต ลิ้มมณีวิจิตร
หลักสูตร	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมโลหการ
ภาควิชา	วิศวกรรมอุตสาหการ
คณะ	วิศวกรรมศาสตร์
พ.ศ.	2554

บทคัดย่อ

247139

โครงงานวิจัยอุตสาหกรรมนี้ ผู้วิจัยนำปัญหาหลักที่เกิดจุดเสียชนิดโพรงหดตัวหรือยุบตัวของชิ้นงานหล่อชิ้นส่วนเครื่องจักรกลที่ทำจากเหล็กหล่อแกรไฟต์กลมโดยใช้เทคโนโลยีทางด้านโปรแกรมคอมพิวเตอร์จำลองการหล่อที่ใช้วิธีการผลต่างสืบเนื่อง (Finite Different Method) นำมาประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์หาสาเหตุของจุดเสียที่เกิดขึ้นแทนการลองผิดลองถูกและช่วยในการออกแบบระบบทางน้ำโลหะ (Gating system) รูล้น (Riser) และทุ่นเย็นช่วยในการเย็นตัว (Chill) โดยนำผลการจำลองการหล่อมาพิจารณาทิศทางการไหลตัวของน้ำโลหะ อุณหภูมิการแข็งตัว จุดแข็งตัวสุดท้าย และการป้อนเติมขณะแข็งตัวจากนั้นทำการจำลองการหล่อจนกระทั่งได้ผลจำลองการหล่อที่พบจุดเสียน้อยที่สุด แล้วทำการแก้ไขแม่พิมพ์ชนิดแบบไม้ (Wooden Pattern) และระบบทางเข้าน้ำโลหะเพื่อทดลองหล่อจริง จากผลการทดลองหล่อชิ้นงานจริงสามารถแก้ไขการเกิดจุดเสียชนิดการเกิดโพรงหดตัวหรือยุบตัวได้ แล้วทำการเก็บข้อมูลในสายการผลิตหลังจากการทดลองผ่านเป็นระยะเวลา 7 เดือน ตรวจพบของเสียชนิดอื่นๆคิดเป็นร้อยละ 1.7 ต่อยอดการผลิตและตรวจพบของเสียชนิดโพรงหดตัวเพียงร้อยละ 0.2 ค่า Casting Yield อยู่ที่ร้อยละ 70

คำสำคัญ : การออกแบบระบบทางน้ำโลหะ / การใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยจำลองการหล่อระดับมหภาค / กรรมวิธีการผลิตเหล็กหล่อแกรไฟต์กลม

Industrial Research Project Title	Casting Defect Reduction of Ductile Cast Iron Machinery Parts by Runner Design Improvement Using Computer Simulation
Industrial Research Project Credits	6
Candidate	Mr. Kittisak Patthamarot
Industrial Research Project Advisor	Assoc. Prof. Dr. Chaowalit Limmaneevichitr
Program	Master of Engineering
Field of Study	Metallurgical Engineering
Department	Production Engineering
Faculty	Engineering
B.E.	2554

Abstract

247139

Casting defects of ductile cast iron machinery parts were investigated this study. The researcher applied casting simulation program using Finite Different Method in analyzing the causes of defect to shorten trial and error time. Various designs of gating system, riser, and chill were accomplished by this computer simulation program. Information from the simulations such as filling of molten iron, solidification temperature, last solidifying positions, and feeding during solidification were studied and repeated until achieving the desired defect. The wooden pattern and gating system were made according to the new design. The new design was then put to the production line for seven months in production line. The result turned out that 1.7 percent casting defects were obtained from total production. The shrinkage defect was reduced to 0.2 percent. The casting yield of this design was at about 70 percent.

Keywords: Casting Design and Gating System Design / Casting Simulation by Computer / Manufacturing Process of Nodular Graphite Cast Iron

กิตติกรรมประกาศ

การทำโครงงานวิจัยอุตสาหกรรมฉบับนี้ผู้เขียนขอขอบพระคุณ รศ.ดร.เชาวลิต ลิ้มมณีวิจิตร เป็นอย่างสูงซึ่งท่านเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาโครงงานวิจัยอุตสาหกรรมที่ให้แนวทางการดำเนินงานในการวิจัย แนวทางการแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้นของการทำโครงงานวิจัยอุตสาหกรรมด้วยดีเสมอมาทำให้โครงงานวิจัยอุตสาหกรรมเล่มนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี และเป็นผลทำให้ผู้เขียนประสบความสำเร็จในการทำงานวิจัยในครั้งนี้ ขอขอบพระคุณท่านอาจารย์ผู้สอนทุกท่านที่ได้ถ่ายทอดความรู้และความสามารถให้ผู้เขียนทำโครงงานวิจัยอุตสาหกรรมได้สำเร็จ คณะกรรมการสอบโครงงานวิจัยอุตสาหกรรมทุกท่านที่กรุณาชี้แนะให้ข้อมูลที่เป็นความรู้ให้คำปรึกษาและสนับสนุนห้องปฏิบัติการที่ใช้ในการทดลองและวิเคราะห์ผล ตลอดจนโอกาสและเวลาในการศึกษาจนกระทั่งโครงงานวิจัยอุตสาหกรรมนี้สำเร็จด้วยดี และกรรมการตรวจสอบวิทยานิพนธ์ทุกท่านที่กรุณาตรวจสอบ และให้ข้อคิดเห็นต่อการทำโครงงานวิจัยอุตสาหกรรมฉบับนี้ถูกต้องและสมบูรณ์ยิ่งขึ้น ขอขอบคุณ คุณสมจิตร์ อัปมะโท ที่ได้ให้ช่วยเหลือและข้อชี้แนะการใช้โปรแกรมจำลองการหล่อ ขอขอบคุณบริษัท Solid system ที่ได้เอื้อเฟื้อการให้คำแนะนำที่ดี ขอขอบคุณ คุณซูเนยูกิ อิชิ ประธานบริษัท คุณโนบูยูกิ ฮาราดะ กรรมการผู้จัดการโรงหล่อโลหะ คุณวิบูลยศ อมาตยกุล ประธานกรรมการผู้จัดการซึ่งทรงดำรงตำแหน่งนายกสมาคมอุตสาหกรรมหล่อโลหะไทย คุณธวัชชัย วิฬุรห์รักษ์กุล รองผู้จัดการโรงหล่อโลหะ คุณยาซุยูกิ โคดามะ ผู้จัดการโรงแบบไม้และคุณสุรันต์ ชูเชื้อ คุณวรวิทย์ เทศทอง แห่งบริษัท โอกาโมโต้ (ไทย) จำกัด ทุกท่านที่ได้อนุเคราะห์ข้อมูลและสถานที่ในการโครงงานวิจัยอุตสาหกรรมในครั้งนี้

ผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณของ บิดา มารดา ผู้มีพระคุณ ครูอุปรัชฌา อาจารย์ทุกท่านที่ปลูกสร้างให้ข้าพเจ้ามีความรู้ ความสามารถ และความเพียรพยายาม ในการศึกษาเพื่อให้เกิดความก้าวหน้าในอาชีพและนำความรู้ความสามารถไปพัฒนาตนเอง องค์กร เพื่อประเทศชาติต่อไป

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ค
กิตติกรรมประกาศ	ง
สารบัญ	จ
รายการตาราง	ช
รายการรูปประกอบ	ซ
รายการสัญลักษณ์	ฐ

บทที่

1.	**บทนำ**	**1**
1.1	ที่มาและหลักการของโครงงานวิจัย	1
1.2	หัวข้อโครงงานวิจัย	2
1.3	รายละเอียดของบริษัท	2
1.4	วัตถุประสงค์ของโครงงานวิจัย	2
1.5	ขอบเขตของโครงงานวิจัย	2
1.6	ขั้นตอนการดำเนินโครงงานวิจัย	3
1.7	ระยะเวลาในการดำเนินโครงงานวิจัย	4
1.8	ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	4
1.9	กระบวนการออกแบบและการทดลองหล่อชิ้นส่วนเครื่องจักรกล	4
1.10	การระบุปัญหาในการศึกษาและจุดที่เกิดการหดตัวหรือยุบตัวของชิ้นงานหล่อ	5
2.	**ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย**	**7**
2.1	บทนำ	7
2.2	ทฤษฎีทางด้านโลหะวิทยาของเหล็กหล่อหล่อแกรไฟต์กลม	7
2.3	คุณสมบัติของน้ำโลหะ	11
2.4	รูปร่างและมิติของชิ้นงานหล่อ	14
2.5	แบบรูป (Drawing) สำหรับการหล่อ	19
2.6	การจัดระบบงานหล่อ	21
2.7	การประยุกต์ใช้คอมพิวเตอร์จำลองแบบงานหล่อ	32

2.8 จุดเสียในงานหล่อและวิธีแก้ไข 36

3. การดำเนินการวิจัย **48**

3.1 การสร้างแบบสามมิติ 49

3.2 การใช้โปรแกรมจำลองการหล่อด้วยคอมพิวเตอร์ 52

3.3 การทดลองหล่อชิ้นงานจริง 61

4. ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลอง **66**

4.1 ผลการจำลองงานหล่อแบบทดลองที่ 1 แบบหล่อปัจจุบัน 66

4.2 ผลการจำลองงานหล่อแบบทดลองที่ 2 68

4.3 ผลการจำลองงานหล่อแบบทดลองที่ 3 70

4.4 ผลการจำลองงานหล่อแบบทดลองที่ 4 72

4.5 ผลการจำลองงานหล่อแบบทดลองที่ 5 75

4.6 การวิเคราะห์ผลการจำลองการหล่อ 77

5. สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ **81**

5.1 สรุปผลการทดลอง 81

5.2 ข้อเสนอแนะ 83

เอกสารอ้างอิง **85**

ภาคผนวก **87**

ก. คุณสมบัติของวัสดุชนิดเหล็กหล่อแกรไฟต์กลมของโปรแกรมจำลองการหล่อ 87

ข. หลักการคำนวณทางวิศวกรรมที่เกี่ยวข้องทาง Finite Different Method 89

ประวัติผู้วิจัย **91**

รายการตาราง

ตาราง **หน้า**

2.1 สัมประสิทธิ์ของความหนืดและความตึงผิวของโลหะ 12

2.2 พิกัดของไส้แบบใช้ในการทำรู 18

2.3 ความหนาต่ำสุด (mm) ของผนังที่จะหล่อได้โดยใช้แบบหล่อทราย 18

2.4 ขนาดการเผื่อหดที่ควรใช้ 21

2.5 ตัวอย่างมิติมาตรฐานของรูเท รูวิ่ง รูเข้า สำหรับการหล่อเหล็กหล่อเทา 28

2.6 อัตราส่วนการป้อนที่ใช้ได้จริง 31

2.7 วิธีหาขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของรูล้น 31

2.8 ตัวอย่างของโปรแกรมเขียนแบบสามมิติ (3D CAD Modeling Software) 34

2.9 ตัวอย่างของโปรแกรมคอมพิวเตอร์จำลองการหล่อ (Commercial Software for computer simulation in metal casting) 34

4.1 เปรียบเทียบผลจำลองการหล่อแบบทดลองที่ 3, 4 และ 5 78

5.1 ผลการทดลองหล่อชิ้นงานและผลการเก็บข้อมูลการตรวจสอบ 82

5.2 เปรียบเทียบผลการออกแบบระบบทางเข้าน้ำโลหะและกระบวนการหล่อจากการทดลองหล่อชิ้นงาน 83

รายการรูปประกอบ

รูป		หน้า
1.1	กระบวนการออกแบบและการทดลองหล่อแบบเดิม	4
1.2	กระบวนการออกแบบและการทดลองหล่อแบบใช้การจำลองการหล่อทางคอมพิวเตอร์	5
1.3	บริเวณที่เกิดจุดเสียที่ 1	6
1.4	บริเวณที่เกิดจุดเสียที่ 2	6
1.5	บริเวณที่เกิดจุดเสียที่ 3	6
2.1	กลไกในการฟอร์มแกรไฟต์กลมตามทฤษฎีของ Gorshkov	9
2.2	การโตของแกรไฟต์	9
2.3	รูปร่างของแกรไฟต์ที่สามารถโตขึ้นได้ในเหล็กหล่อเหนียว	9
2.4	ลำดับขั้นตอนการเกิดโครงสร้างยูเทคติกของออสเทนไนต์และแกรไฟต์กลม	10
2.5	ลักษณะการกระจายตัวของแกรไฟต์ที่ปรากฏให้เห็นในเหล็กหล่อแกรไฟต์กลม	11
2.6	การเปลี่ยนแปลงความหนืดของเหล็กหล่อ	12
2.7	อัตราความเร็วของของเหลวที่ไหลออกจากถัง	13
2.8	แรงที่เกิดจากของเหลวชนผนัง	13
2.9	รูปร่างของกระสวนเปลี่ยนแปลงให้ง่ายต่อการทำ	15
2.10	ทำให้ไม่ต้องมีหน้าผ่า	15
2.11	ทำให้หน้าผ่าเป็นพื้นราบ	15
2.12	ไม่ต้องมีชิ้นแยกอยู่ต่างหาก	15
2.13	หลีกเลี่ยงความบาง	16
2.14	ไม่ให้มีการเปลี่ยนแปลงในความหนามากเกิน	16
2.15	ไม่ให้ตรงสันติดกันมีความหนามาก	17
2.16	ป้องกันการเกิดจุดเสียจากน้ำโลหะไหลไม่ดี	17
2.17	พิกัดของไส้แบบใช้ในการทำรู	17
2.18	ความหนาเปลี่ยนไปตามความลาด	18
2.19	หัวต่อรูปตัว L	18
2.20	หัวต่อรูปตัว T	19
2.21	ชื่อของส่วนต่างๆ ในระบบการป้อนน้ำโลหะ	22
2.22	แอ่งเทพร้อมด้วยส่วนกันขี้ตะกรัน	22
2.23	แอ่งเทพร้อมด้วยจุกอุด	22

2.25 มิติของรูวิ่ง 24
2.26 ทางเข้าวน 24
2.27 ส่วนต่อเพื่อดักสิ่งเจือปน 24
2.28 รูปร่างของรูเข้า 24
2.29 รูเข้าที่หน้าผ่า 25
2.30 รูเข้าทางข้างบน 25
2.31 รูเข้าทางข้างล่าง 25
2.32 รูเข้ารูปวงแหวน 25
2.33 รูงอน 25
2.34 รูเข้ารูปดินสอ 26
2.35 รูเข้าหลายระดับ 26
2.36 รูเข้ารูปลิ่ม 26
2.37 แผนภูมิอัตราการเทน้ำโลหะ 27
2.38 ระบบรูเข้าของที่ตั้งแบริ่ง 28
2.39 ระบบรูเข้าของปลอกเพลากันรั่ว 28
2.40 ระบบรูเข้าของท่อไอดี 28
2.41 ระบบรูเข้าของกล่องเฟืองรูปตัดของรูวิ่งและรูล้น 28
2.42 ตัวอย่างของรูล้นข้าง 29
2.43 ตัวอย่างรูล้นบน 29
2.44 ไส้แบบแห้งสนิทเสียบอยู่บนรูล้นปิด 29
2.45 มิติของรูล้นข้าง 30
2.46 มิติของรูล้นบน 30
2.47 มิติของรูล้นบน 30
2.48 ระยะทางที่รูล้นสามารถป้อนน้ำโลหะถึง 30
2.49 การใช้ทุ่นเย็น 32
2.50 ขั้นตอนการจำลองแบบกระบวนการหล่อ 33
2.51 ลักษณะการไหลแบบปั่นป่วน (Turbulence) 36
2.52 ลักษณะจุดเสียการเกิดรูพรุน 37
2.53 การเปลี่ยนตำแหน่งรูเทเลี่ยงการเกิดรูพรุน 38
2.54 การเปลี่ยนตำแหน่งรูเทเพื่อลดการเกิดรูพรุน 38
2.55 จัดให้มีรูไอที่โตพอสำหรับให้แก๊สออกเสี่ยงการเกิดรูพรุน 39
2.56 การหลีกเลี่ยงรูพรุนโดยการจัดให้มีเพื่อความดันของน้ำโลหะสูง 39

2.57 ลักษณะการเกิดจุดเสียชนิดรูเข็ม 39

2.58 ทุ่นเย็นซึ่งมีรูปร่างบนผิวหน้าทำให้แก๊สหนีออกง่ายขึ้น 40

2.59 ที่รองรับหมุดยึดไส้แบบ 40

2.60 ลักษณะการหดตัวภายใน 41

2.61 ลักษณะการหดตัวภายนอก 41

2.62 การวางตำแหน่งต่างๆ ของรูเทและรูล้นและผลที่เกิดขึ้นจากรูล้น 42

2.63 การวางรูเทสำหรับปลอกเสื้อสูบ 43

2.64 โพรงที่เกิดจากการหดหัวอาจเกิดแต่ใส่ทุ่นเย็นแล้วจะไม่เกิด 43

2.65 เขตใช้ได้ผลของรูล้นสำหรับการหล่อเหล็กหล่อ 43

2.66 ลักษณะรอยร้าวหรือรอยแตก 44

2.67 รอยร้าวเกิดเพราะแขนเสริมมีขนาดเล็กถ้าจะเลี่ยงไม่ให้เกิดการแตกเช่นนี้ จะต้องเทน้ำโลหะเข้าตรงส่วนวงกลมนอกและวางทุ่นเย็นไว้ติดกับดุม 45

2.68 การหลีกเลี่ยงจุดเย็นช้า 45

2.69 รูวิ่งต่างๆ ทำไว้ในหีบส่วนบน และรูเข้าต่างๆ อยู่ในหีบส่วนล่าง 47

3.1 แผนภูมิขั้นตอนการดำเนินการทดลอง 48

3.2 รูปแบบโมลฝาล่างและแบบโมลฝาบน 49

3.3 แบบชิ้นงานหล่อสามมิติเดิมก่อนการแก้ไข 50

3.4 เกิดโพรงหดตัวบริเวณผิวชิ้นงาน 50

3.5 การวางทุ่นเย็นด้านในทำให้เป็นครีบด้านในทำให้การเจียระไนทำได้ยาก 50

3.6 แบบชิ้นงานสามมิติสำหรับแบบทดลองที่ 2 50

3.7 แบบชิ้นงานสามมิติโดยมีการใส่ทุ่นเย็น (Chill) 51

3.8 แบบชิ้นงานสามมิติโดยมีการใส่รูล้น (Riser) เพื่อเป็นตัวป้อนเติมขณะแข็งตัว 51

3.9 แบบชิ้นงานสามมิติโดยมีการใส่ระบบป้อนเติม (Riser) และทุ่นเย็น (Chill) 52

3.10 เข้าเมนูหลัก 52

3.11 การนำไฟล์ Stl เข้าสู่โปรแกรม 53

3.12 การกำหนดข้อมูลชนิดวัสดุที่ใช้ในการจำลองการหล่อ 54

3.13 การกำหนดวัตถุส่วนที่มีผลต่อการแข็งตัวของงานหล่อ 54

3.14 การกำหนดขอบเขตและการกำหนดเอลิเมนต์ 55

3.15 การกำหนดขอบเขตและการกำหนดเอลิเมนต์จำนวนเมชบล็อคหยาบ 56

3.16 การกำหนดสภาวะขอบเขตโดยรอบ 56

3.17 การกำหนดช่องทางเข้าของน้ำโลหะ 57

3.18 การกำหนดชนิดของวัสดุที่จะนำมาทำการทดลองและอุณหภูมิเท 57

3.19 การกำหนดค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน 58

3.20 การกำหนดเงื่อนไขและข้อกำหนดเพื่อการประมวลผลการจำลองการแข็งตัว 59

3.21 การกำหนดเงื่อนไขและข้อกำหนดเพื่อการประมวลผลการจำลองการไหลของน้ำโลหะ 59

3.22 การบันทึก (Save) และเริ่มการคำนวณ (Calculate) 60

3.23 การเลือกคำสั่งการจำลองการแข็งตัวสุดท้ายของน้ำโลหะ 60

3.24 การเลือกคำสั่งการจำลองหาบริเวณที่มีโอกาสเกิดการโพรงหดตัว 61

3.25 การเลือกคำสั่งการจำลองระดับการเกิดช่องว่างหรือเป็นโพรง 61

3.26 รูปร่างลักษณะของทุ่นเย็น (Chill) 62

3.27 รูปแบบไม้ที่ใช้ทำทุ่นเย็น 62

3.28 รูปร่างและขนาดของรูล้น (Riser) 62

3.29 การวางระบบทางน้ำโลหะจากผลการจำลองการหล่อ แบบทดลองที่ 5 62

3.30 การทำแบบโมลสำหรับการทดลองหล่อจริง 63

3.31 ทำการประกอบงานทั้งหีบโมลฝาบนและฝาล่าง 64

3.32 การหล่อโลหะและการเทน้ำโลหะลงสู่แบบ 64

3.33 การเขย่าเอาทรายออก (Shake out) และทำความสะอาดชิ้นงานหล่อด้วยเครื่องยิงทราย 65

3.34 การเจียระไน (Grinding) ชิ้นงานและการเจียร์ตัดระบบทางน้ำออก 65

4.1 พฤติกรรมการไหลตัวของน้ำโลหะของระบบทางเข้าน้ำโลหะแบบหล่อปัจจุบัน 66

4.2 ทิศทางและความเร็วการไหลของระบบทางเข้าน้ำโลหะแบบหล่อปัจจุบัน 66

4.3 ลักษณะการแข็งตัวสุดท้ายของชิ้นงานปัจจุบัน 67

4.4 ผลการจำลองอุณหภูมิการแข็งตัวที่มีผลต่อการเกิดโพรงหดตัวของชิ้นงานปัจจุบัน 67

4.5 ผลการจำลองระดับการเกิดโพรงของชิ้นงานปัจจุบัน 68

4.6 ลักษณะการแข็งตัวสุดท้ายของชิ้นงานอย่างเดียว 68

4.7 ผลการจำลองอุณหภูมิการแข็งตัวที่มีผลต่อการเกิดโพรงหดตัวของชิ้นงานอย่างเดียว 69

4.8 ผลการจำลองระดับการเกิดโพรงของชิ้นงานอย่างเดียว 69

4.9 พฤติกรรมการไหลของน้ำโลหะของระบบทางเข้าน้ำโลหะแบบทดลองที่ 3 70

4.10 ทิศทางและความเร็วการไหลของระบบทางเข้าน้ำโลหะแบบทดลองที่ 3 70

4.11 ลักษณะการแข็งตัวสุดท้ายของชิ้นงานแบบทดลองที่ 3 71

4.12 ผลการจำลองอุณหภูมิการแข็งตัวที่มีผลต่อการเกิดโพรงหดตัวแบบทดลองที่ 3 71

4.13 ผลการจำลองระดับการเกิดโพรงของชิ้นงานแบบทดลองที่ 3 72

4.14 พฤติกรรมการไหลของน้ำโลหะของระบบทางเข้าน้ำโลหะแบบทดลองที่ 4 72

4.15 ทิศทางและความเร็วการไหลของระบบทางเข้าน้ำโลหะแบบทดลองที่ 4 73

4.16 ลักษณะการแข็งตัวสุดท้ายของชิ้นงานแบบทดลองที่ 4 73

4.17	ผลการจำลองอุณหภูมิการแข็งตัวที่มีผลต่อการเกิดโพรงหดตัวแบบทดลองที่ 4	74
4.18	ผลการจำลองระดับการเกิดโพรงของชิ้นงานแบบทดลองที่ 4	74
4.19	พฤติกรรมการไหลของน้ำโลหะของระบบทางเข้าน้ำโลหะแบบทดลองที่ 5	75
4.20	ทิศทางและความเร็วการไหลของระบบทางเข้าน้ำโลหะแบบทดลองที่ 5	75
4.21	ลักษณะการแข็งตัวสุดท้ายของชิ้นงานแบบทดลองที่ 5	76
4.22	ผลการจำลองอุณหภูมิการแข็งตัวที่มีผลต่อการเกิดโพรงหดตัวการแบบทดลองที่ 5	76
4.23	ผลการจำลองระดับการเกิดโพรงของชิ้นงานแบบทดลองที่ 5	77
4.24	ค่า Casting yield % ของระบบทางเข้าน้ำโลหะจากแบบทดลอง	79
4.25	ผลการตรวจสอบลักษณะภายนอกเพื่อหาโพรงหดตัวของชิ้นงานหล่อ	79
4.26	ผลการตรวจสอบลักษณะภายในเพื่อหาโพรงหดตัวของชิ้นงานหล่อ	80
4.27	ผลการตรวจสอบลักษณะภายในชิ้นงานหล่อ	80
5.1	แผนภูมิการเปรียบเทียบการเกิดโพรงหดตัวและจุดเสียอื่นๆจากจำนวนการผลิต	82
5.2	การกำหนดเงื่อนไขและข้อกำหนดเพื่อการประมวลผลการจำลองการหล่อที่เร็วขึ้น	84
ก.1	คุณสมบัติของวัสดุชนิดเหล็กหล่อแกรไฟต์กลมของโปรแกรมจำลองการหล่อ	88

รายการสัญลักษณ์

a	=	พื้นที่หน้าตัดของรูเข้า
C	=	สัมประสิทธิ์ของความเร็ว
g	=	ค่าแรงโน้มถ่วง
h	=	ระยะความสูง
Q	=	อัตราการไหล
T	=	เวลาที่ใช้ในการเท
W	=	น้ำหนักของน้ำโลหะทั้งหมดที่ใช้ในการเท
υ	=	ทิศทางของความเร็ว
γ	=	น้ำหนักจำเพาะของของเหลว