

การลดปัญหาข้อบกพร่องในกระบวนการผลิตชิ้นส่วนยานยนต์
จากอะลูมิเนียมหล่อโดยใช้โปรแกรมจำลองงานหล่อขึ้นรูป

นายมงคล แก้วนพรัตน์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมโลหการ
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2555

**DEFECT REDUCTION IN AUTOMOTIVE ALUMINUM
DIE CASTING USING CASTING SIMULATION
SOFTWARE**

Mongkol Kaewnopparat

**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirement for the
Degree of Master of Engineering in Metallurgical Engineering**

Suranaree University of Technology

Academic Year 2012

การลดปัญหาข้อบกพร่องในกระบวนการผลิตชิ้นส่วนยานยนต์
จากอะลูมิเนียมหล่อโดยใช้โปรแกรมจำลองงานหล่อขึ้นรูป

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้แก่นักวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาโทบริหารธุรกิจ

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

(ผศ. ดร.อุษณีย์ กิตติคำธร)

ประธานกรรมการ

(อ. ดร.ฐาปนี พชรวิชัย)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)

(อ. ดร.รัตน บริสุทธิกุล)

กรรมการ

(อ. ดร. สมศักดิ์ ศิวดำรงพงศ์)

กรรมการ

(ศ. ดร. ชูกิจ ลิ้มปิจำนงค์)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการ

(รศ. ร.อ. ดร. กนต์ธร ชำนิประศาสน์)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

มงคล แก้วนพรัตน์ : การลดปัญหาข้อบกพร่องในกระบวนการผลิตชิ้นส่วนยานยนต์จาก
อะลูมิเนียมหล่อโดยใช้โปรแกรมจำลองงานหล่อขึ้นรูป (DEFECT REDUCTION IN
AUTOMOTIVE ALUMINUM DIE CASTING USING CASTING SIMULATION
SOFTWARE) อาจารย์ที่ปรึกษา: อาจารย์ ดร.ฐาปนีย์ พัชรวิชัย, 109 หน้า.

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์สาเหตุการเกิดข้อบกพร่องในงานหล่อโลหะผสม
อะลูมิเนียม กรณีเกิดการรั่วบริเวณใต้รูเกลียว (Tap M6) ของชิ้นส่วนยานยนต์ Pipe inlet ที่ผลิตด้วย
กระบวนการฉีดขึ้นรูปแรงดันต่ำ และเพื่อหาแนวทางลดจำนวนชิ้นงานที่เกิดข้อบกพร่อง ด้วยการ
วิเคราะห์ทางโลหวิทยาและการใช้ซอฟต์แวร์จำลองกระบวนการหล่อขึ้นรูปขึ้นงาน ซึ่งมีสถานะการ
หล่อขึ้นรูปดังนี้ คือ อุณหภูมิเทน้ำโลหะที่ 760 องศาเซลเซียส อุณหภูมิแม่พิมพ์โลหะที่ 350 องศา
เซลเซียส จากการวิเคราะห์ปัจจัยที่ทำให้เกิดข้อบกพร่องจากแผนภูมิแก๊งปลา และตรวจสอบชิ้นงาน
ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด พบว่า ปัจจัยหลักที่อาจเป็นสาเหตุของการเกิดรูพรุน
ได้แก่ อุณหภูมิแม่พิมพ์โลหะ อุณหภูมิเทน้ำโลหะ และการออกแบบแม่พิมพ์โลหะ ทั้งนี้ จึงสร้าง
แบบจำลองโดยศึกษาการเปลี่ยนแปลงสถานะการหล่อดังนี้ คือ 1) อุณหภูมิแม่พิมพ์โลหะที่ 300 350
400 450 และ 480 องศาเซลเซียส 2) อุณหภูมิเทน้ำโลหะที่ 680 720 730 740 และ 780 องศาเซลเซียส
และ 3) แก๊งแม่พิมพ์โลหะโดยการเพิ่มทางเดินน้ำโลหะที่มีขนาดพื้นที่หน้าตัด 10×10 15×15 และ
20×20 ตารางมิลลิเมตร จากผลการจำลองพบว่า เมื่อทางเดินน้ำโลหะมีขนาดเพิ่มขึ้น ทำให้ปริมาณ
รูพรุนในชิ้นงานลดลง แต่การที่แม่พิมพ์โลหะมีทางเดินน้ำโลหะขนาดใหญ่เกินไป ก็จะสูญเสียวัตถุดิบใน
การผลิตมากเกินไป ดังนั้นจึงเลือกทำการแก้ไขแม่พิมพ์โลหะให้มีทางเดินน้ำโลหะขนาด 15X15
ตารางมิลลิเมตร โดยไม่เปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเทน้ำโลหะ และอุณหภูมิของแม่พิมพ์โลหะ จากนั้นทำ
การหล่อชิ้นส่วน Pipe inlet จำนวน 188 ชิ้น ผลการตรวจสอบจำนวนชิ้นงานที่มีข้อบกพร่องจากการ
ขึ้นตอนทดสอบการรั่ว เปรียบเทียบชิ้นงานหล่อก่อนและหลังการแก้ไขแม่พิมพ์โลหะ ร่วมกับการ
ตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง และการวิเคราะห์ปริมาณรูพรุนด้วย
โปรแกรมวิเคราะห์ภาพ พบว่า เมื่อทำการแก้ไขแม่พิมพ์โลหะ จำนวนชิ้นงานที่เกิดข้อบกพร่อง
ลดลงจากร้อยละ 4.92 เหลือร้อยละ 0.53 ส่วนรูพรุนที่เกิดขึ้นในชิ้นงานหลังจากแก้ไขแม่พิมพ์โลหะ
ก็มีขนาดเล็กและมีจำนวนลดลง

สาขาวิชา วิศวกรรมโลหการ

ปีการศึกษา 2555

ลายมือชื่อนักศึกษา _____

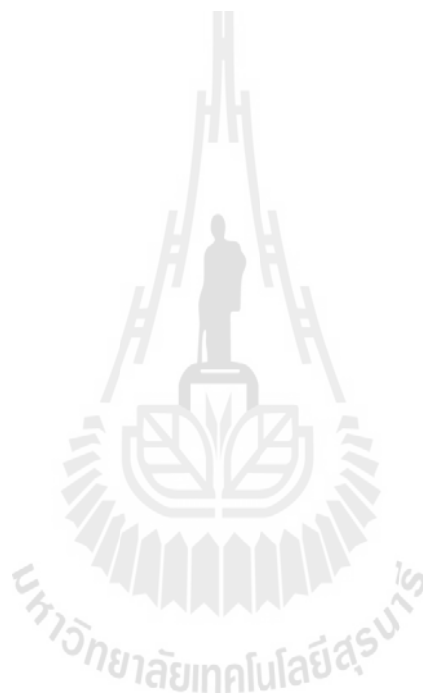
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา _____

MONGKOL KAEWNOPPARAT : DEFECT REDUCTION IN
AUTOMOTIVE ALUMINUM DIE CASTING USING CASTING
SIMULATION SOFTWARE. THESIS ADVISOR : TAPANY
PATCHARAWIT, Ph.D., 109 PP.

LEAK/SHRINKAGE POROSITY/SIMULATION PROGRAM

The objectives of this research are to study the leak problem at Tap M6 of pipe inlet automotive part produced by low pressure die casting process and to reduce such defect via metallurgical analysis and casting simulation. The casting process parameters are 760°C pouring temperature and 350°C mold temperature. According to defect analysis and microstructure examination via SEM coupled with image analysis, it was found that the causes of defect might be due to pouring temperature, mold temperature, and die design. By using software, the varied casting parameters in casting simulation are 1) pouring temperatures at 680, 720, 730, 740 and 780°C, 2) mold temperatures at 300 350 400 450 and 480°C, and gate runner cross-sectional areas at 10×10, 15×15 and 20×20 mm². Simulation results showed that although the largest gate runner cross sectional area could reduce the most shrinkage porosity, the casting yield could be affected. The gate runner cross-sectional area of 15X15 mm² was therefore selected to give the optimum result while maintaining pouring temperature and mold temperature at 760°C and 350°C respectively. Pipe inlets of 188 pieces were then re-cast using the predetermined parameters. According to defect analysis and microstructure examination via optical microscope coupled with image

analyzer, the results revealed that leak defect decreased from 4.92 to 0.53% and porosity was observed to be reduced and small in size.



School of Metallurgical Engineering

Academic Year 2012

Student's Signature_____

Advisor's Signature_____

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี เนื่องจากได้รับความช่วยเหลืออย่างดียิ่งทั้งด้านวิชาการและด้านการเงินงานวิจัย จากบุคคลและกลุ่มบุคคลต่าง ๆ ได้แก่

อาจารย์ ดร.ฐาปนีย์ พัชรวิษณุ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้โอกาสทางการศึกษา ให้คำแนะนำปรึกษา ช่วยแก้ปัญหา และให้กำลังใจแก่ผู้วิจัยมาโดยตลอด รวมทั้งช่วยตรวจทานและแก้ไขวิทยานิพนธ์เล่มนี้จนเสร็จสมบูรณ์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อุษณีย์ กิตติอักษร อาจารย์ ดร.รัตน บิริสุททธิกุล และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พรวิสา วงศ์ปัญญา อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมโลหการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่คอยให้คำแนะนำปรึกษาด้านวิชาการ และให้กำลังใจแก่ผู้วิจัยมาโดยตลอด

ขอขอบคุณ คุณเทอดศักดิ์ เดชปัญญา ผู้จัดการบริษัท ไคชิน จำกัด ที่ได้ให้โอกาสทำการศึกษากระบวนการผลิตชิ้นงานในบริษัท คุณปาทิน ไทยทอง ผู้จัดการส่วนหล่อหลอม และผลิตชิ้นงาน คุณนิรุท รุ่งน้อย หัวหน้าแผนกหล่อหลอม และคุณรัชพล ฮวดยิ่ง รองหัวหน้าแผนกหล่อหลอม บริษัท ไคชินจำกัด ที่ได้ช่วยเหลือและให้คำปรึกษากระบวนการผลิตในชิ้นงาน รวมทั้งได้ให้แนวทางในการแก้ไขชิ้นงานในกระบวนการผลิต จนสามารถทำงานสำเร็จไปได้ด้วยดี

ขอขอบคุณการสนับสนุนเงินทุนตามโครงการสร้างขีดความสามารถด้านการวิจัยและพัฒนา และการแข่งขันของภาคอุตสาหกรรม โดยกลไกความร่วมมือ ระหว่างภาครัฐ เอกชน และมหาวิทยาลัย สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ผู้วิจัยขอมอบให้กับบิดา มารดา ซึ่งเป็นที่รักและเคารพยิ่ง ตลอดจนครูอาจารย์ที่เคารพทุกท่าน ที่ได้ประสิทธิ์ประสาทความรู้และถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดีให้แก่ผู้วิจัยตลอดมา จนทำให้ประสบความสำเร็จในชีวิต

มงคล แก้วนพรัตน์

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูป.....	ซ
บทที่	
1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย.....	5
1.3 สมมุติฐานของการวิจัย.....	5
1.4 ขอบเขตของงานวิจัย.....	5
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	6
2 ปรัชญ่วรรณกรรม	7
2.1 วัตถุประสงค์สมมติเนียมเกรดงานหล่อ.....	7
2.2 ผสมอะลูมิเนียมเกรดงานหล่อ.....	10
2.3 แม่พิมพ์โลหะ.....	12
2.4 กระบวนการแข็งตัวของโลหะ.....	14
2.5 ในชิ้นงานหล่อโลหะผสมอะลูมิเนียม.....	20
2.6 โปรแกรมช่วยในการจำลองงานหล่อ.....	24
2.7 การวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	27

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3 วัสดุและวิธีการทดลอง	32
3.1 การศึกษากระบวนการหล่อขึ้นรูปแบบแรงดันต่ำ.....	33
3.2 การวิเคราะห์ข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นในชิ้นงานหล่อ Pipe inlet.....	47
3.3 ศึกษาแนวทางการแก้ไขแม่พิมพ์โดยใช้ซอฟต์แวร์จำลองงานหล่อ.....	56
3.4 การทดสอบและเปรียบเทียบผลการหล่อชิ้นงาน Pipe inlet ก่อนและหลังทำการแก้ไขแม่พิมพ์.....	51
3.5 เงื่อนไขที่ใช้ในการทดลอง.....	53
4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล	55
4.1 การตรวจสอบข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิต.....	55
4.2 ผลการศึกษาแนวทางการแก้ไขแม่พิมพ์ด้วยซอฟต์แวร์จำลองงานหล่อ.....	67
4.3 ผลการศึกษาวิเคราะห์จำลองการแก้ไขแม่พิมพ์โลหะ.....	73
4.4 แนวทางการแก้ไขแม่พิมพ์โลหะ.....	80
4.5 การประเมินผลการปรับปรุงกระบวนการผลิตเพื่อลดข้อบกพร่อง ในชิ้นส่วน Pipe inlet.....	84
4.6 การวิเคราะห์ผล.....	86
5 สรุปผลการวิจัย	87
รายการอ้างอิง.....	89
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก. ภาพการแสดงผลงานหล่อในชิ้นงาน.....	90
ภาคผนวก ข. บทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่.....	107
ประวัติผู้เขียน.....	109

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
3.1	แสดงองค์ประกอบทางเคมีโลหะผสมอะลูมิเนียม.....	34
3.2	แสดงเงื่อนไขที่ใช้ในการทดลอง.....	53
4.1	แสดงการวิเคราะห์ความเป็นไปได้ของปัจจัยในกระบวนการผลิตที่จะเป็นสาเหตุทำให้เกิดข้อบกพร่องในชิ้นงาน.....	58
4.2	แสดงการวิเคราะห์ความเป็นไปได้ของปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับเครื่องจักรที่จะเป็นสาเหตุทำให้เกิดข้อบกพร่องในชิ้นงาน.....	62
4.3	แสดงการวิเคราะห์ความเป็นไปได้ของปัจจัยด้านผู้ปฏิบัติงานที่จะเป็นสาเหตุทำให้เกิดข้อบกพร่องในชิ้นงาน.....	63
4.4	แสดงการวิเคราะห์ความเป็นไปได้ของปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับวัตถุดิบที่จะเป็นสาเหตุทำให้เกิดข้อบกพร่องในชิ้นงาน.....	63
4.5	แสดงการวิเคราะห์โอกาสของตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับแม่พิมพ์โลหะที่จะเป็นสาเหตุของการเกิดข้อบกพร่องในชิ้นงาน.....	65

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1	แสดงภาพจำลองกระบวนการหล่อแบบ Low Pressure Die Casting..... 2
1.2	แสดงส่วนประกอบคาร์บูเรเตอร์ในรถจักรยานยนต์..... 3
1.3	แสดงกระบวนการทำงานของคาร์บูเรเตอร์ในรถจักรยานยนต์..... 4
2.1	แสดงเฟสไดอะแกรม ก) Al-Si binary diagram..... ข) Al-Cu binary diagram ค) Al-Cu-Si ternary diagram..... 8
2.2	แสดงลักษณะโครงสร้างจุลภาคของโลหะผสม..... ก) ในสภาพภายหลังการหล่อ ข) ในสภาพภายหลังการอบชุบความร้อน T4..... 9
2.3	แสดงเครื่องหล่อแบบแรงดันต่ำ..... 11
2.4	แสดงส่วนประกอบทั้งหมดของเครื่องหล่อแบบแรงดันต่ำ..... 11
2.5	แสดงส่วนผสมทางเคมีของแม่พิมพ์โลหะ..... 13
2.6	แสดงส่วนประกอบและตำแหน่งต่างๆ ในแม่พิมพ์โลหะ..... 14
2.7	แสดงกระบวนการเกิดนิวเคลียสแบบ Homogeneous nucleation..... 15
2.8	แสดงกระบวนการเกิดนิวเคลียสแบบ Heterogeneous nucleation..... 16
2.9	แสดงการเติบโตแบบระนาบ (Planar growth)..... 17
2.10	แสดงการเติบโตแบบเดนไดรต์ (Dendrite growth)..... 18
2.11	แสดง Temperature profile across a casting freezing in a mould, showing the effect of the addition of thermal resistances which control the rate of loss of heat..... 19
2.12	แสดงลักษณะของรูพรุนที่เกิดขึ้นจากกระบวนการแข็งตัว..... 21
2.13	แสดงลักษณะของรูพรุนขนาดเล็ก..... 22
2.14	ข้อบกพร่องของชิ้นงานที่เกิดการแตกขณะร้อน..... 23
2.15	แสดง Cycle ในการจำลองงานหล่อ..... 24
2.16	แสดง Schematic diagram of the different physical processes involved in the formation of micro porosity..... 28

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.17 Prediction of L_{\max} obtained via CA-based empirical functions, using the solidification times calculated by ProCAST, for the V2.31 engine block a) at low (0.1 ml/100 g) and b) high (0.2 ml/100 g)	29
2.18 Characteristics of HPDC process parameters w.r.t. T_{melt} and T_{mold}	30
3.1 แสดงรูปชิ้นงาน Pipe inlet	32
3.2 แสดงลักษณะข้อบกพร่องบริเวณใต้รูเจาะเกลียวของชิ้นงาน Pipe Inlet	33
3.3 ขั้นตอนการผลิตชิ้นงาน Pipe Inlet	33
3.4 แสดงลักษณะของเตาหลอมโลหะ	35
3.5 แสดงลักษณะวัสดุที่ใช้ในกระบวนการผลิตชิ้นส่วน Pipe inlet	36
3.6 แสดงขั้นตอนการเคลื่อนย้ายน้ำโลหะหลอมเหลว	36
3.7 แสดงขั้นตอนการทำความสะอาดอะลูมิเนียม	37
3.8 แสดงขั้นตอนการจำกัดก๊าซไฮโดรเจน	38
3.9 เครื่องทดสอบสุญญากาศ	38
3.10 แสดงกระบวนการเคลือบผิวแม่พิมพ์โลหะ	39
3.11 แสดงการติดตั้งแม่พิมพ์โลหะก่อนกระบวนการผลิต	40
3.12 แสดงเครื่องผลิตทรายใส่แบบ	40
3.13 แสดง Low Pressure Die Casting Machine	41
3.14 แสดงใส่ทรายใส่แบบลงในแม่พิมพ์โลหะ	42
3.15 แสดงนำชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์โลหะ	42
3.16 แสดงชิ้นงานภายหลังกระบวนการผลิต	43
3.17 ตะกร้าใส่ชิ้นงานสำหรับอบชุบความร้อน	43
3.18 เตาอบชิ้นงาน	44
3.19 แสดงขั้นตอนการตัด Gate runner และ Over flow	44
3.20 แสดงเศษชิ้นส่วนงานเสีย สำหรับนำเข้าสู่กระบวนการหลอมใหม่	45
3.21 เครื่องกลึงชิ้นงาน	45
3.22 แสดงเครื่องทดสอบรั่ว (Leak test) และการทดสอบ	46

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.23	แสดงกระบวนการ rework งานเสีย จากกระบวนการตัดแต่งชิ้นงาน..... 46
3.24	แสดงกระบวนการบรรจุชิ้นงานลงกล่อง ก่อนส่งลูกค้า..... 47
3.25	แสดงตำแหน่งที่ใช้วิเคราะห์ ด้วยโปรแกรม ProCAST [®] V.2009 48
3.26	แสดงแบบจำลองของแม่พิมพ์โลหะที่ใช้ในกระบวนการผลิตชิ้นส่วน Pipe inlet 49
3.27	แสดงการจำลองการแก้ไขแม่พิมพ์โลหะ..... 50
3.28	แสดง 28 ภาพจำลองการตัดชิ้นงาน Pipe inlet ที่มีข้อบกพร่องบริเวณใต้รูเจาะเกลียว..... 52
4.1	การจำแนกประเภทและเปอร์เซ็นต์ของข้อบกพร่องที่ตรวจพบในชิ้นงาน Pipe inlet..... 55
4.2	แสดงการตรวจสอบการรั่วใต้ผิวน้ำ และบริเวณที่เกิดการรั่วในชิ้นงาน 56
4.3	แสดงภาพถ่ายกำลังขยายตำแหน่งใต้รูเจาะเกลียวของชิ้นงาน Pipe inlet..... 57
4.4	ตำแหน่งของชิ้นงานที่นำไปตรวจสอบ โครงสร้างจุลภาค..... 58
4.5	แสดงภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่เกิดรูพรุน..... 59
4.6	ปริมาณรูพรุนต่อพื้นที่ที่ทำการวัดแตกต่างกันตามส่วนต่าง ๆ ในชิ้นงาน Pipe inlet..... 60
4.7	แสดงภาพถ่ายชิ้นงานที่เกิดรูพรุนบริเวณใต้รูเจาะเกลียวจากกล้องจุลทรรศน์ อิเล็กตรอนแบบส่องกราด..... 60
4.8	แสดงผลการวิเคราะห์ปัญหาการเกิดข้อบกพร่องในชิ้นงาน โดยใช้แผนภูมิแก๊งปลา..... 61
4.9	แผนภูมิแก๊งปลาแสดงตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับแม่พิมพ์ที่มีโอกาสเป็นสาเหตุให้เกิด ข้อบกพร่องในชิ้นงาน..... 64
4.10	แสดงภาพจำลองแสดงช่วงเวลาการแข็งตัวของน้ำโลหะ..... 68
4.11	แสดงภาพจำลองแสดงปริมาณการเกิดรูพรุนจากการหดตัว ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ในชิ้นงาน..... 68
4.12	แสดงตำแหน่งที่เกิดรูพรุนในชิ้นงาน..... 69
4.13	แสดงผลการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเทน้ำโลหะต่อระยะเวลาการแข็งตัวของน้ำโลหะ..... 70

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.14	แสดงปริมาณรูพรุนที่เกิดขึ้นในชิ้นงานหล่อเมื่อเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเทน้ำโลหะ..... 71
4.15	แสดงผลการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิแม่พิมพ์โลหะต่อระยะเวลาการแข็งตัวของน้ำโลหะ... 72
4.16	แสดงปริมาณรูพรุนที่เกิดขึ้นในชิ้นงานหล่อเมื่อเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิแม่พิมพ์โลหะ..... 72
4.17	แสดงเปรียบเทียบแม่พิมพ์โลหะก่อนและหลังการแก้ไข โดยการปิดรูสันของชิ้นงาน และเพิ่มทางน้ำเข้าของน้ำโลหะ..... 74
4.18	แสดงภาพจำลองปริมาณรูพรุนที่เกิดขึ้นในชิ้นงานก่อน และหลังการแก้ไขแม่พิมพ์โดยเพิ่มทางเดินน้ำโลหะขนาด 10x10 มิลลิเมตร..... 75
4.19	แสดงผลการจำลองเวลาการแข็งตัวของน้ำโลหะ เมื่อเพิ่มขนาดทางวิ่งของน้ำโลหะ..... 76
4.20	แสดงผลการจำลองปริมาณรูพรุนที่เกิดขึ้นในชิ้นงานหล่อ เมื่อเพิ่มขนาดทางวิ่งของน้ำโลหะ..... 76
4.21	แสดงผลการจำลองเวลาการแข็งตัวของน้ำโลหะ เมื่อเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิเทน้ำโลหะ ร่วมกับการแก้ไขทางเดินน้ำโลหะของแม่พิมพ์..... 78
4.22	แสดงผลการจำลองปริมาณรูพรุนที่เกิดขึ้น เมื่อเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิเทน้ำโลหะ ร่วมกับการแก้ไขทางเดินน้ำโลหะของแม่พิมพ์..... 78
4.23	แสดงผลการจำลองปริมาณรูพรุนที่เกิดขึ้น เมื่อเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิเทน้ำโลหะ ร่วมกับการแก้ไขทางเดินน้ำโลหะของแม่พิมพ์..... 79
4.24	แสดงผลการจำลองปริมาณรูพรุนที่เกิดขึ้น เมื่อเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิแม่พิมพ์โลหะร่วมกับการแก้ไขแม่พิมพ์โลหะ..... 80
4.25	แสดงภาพจำลองการแก้ไขแม่พิมพ์โลหะ..... 82
4.26	ภาพจำลองปริมาณรูพรุนที่เกิดขึ้นในชิ้นงาน ก) ก่อนปรับปรุงกระบวนการผลิต ข) ภายหลังจากปรับปรุงกระบวนการผลิต..... 83
4.27	แสดงแม่พิมพ์โลหะหลังจากได้รับการแก้ไข..... 84
4.28	แสดงชิ้นงาน Pipe inlet ก) ก่อนแก้ไขแม่พิมพ์ ข) ภายหลังจากแก้ไขแม่พิมพ์..... 85
4.29	แสดงชิ้นงาน Pipe inlet ก) ก่อนแก้ไขแม่พิมพ์ ข) ภายหลังจากแก้ไขแม่พิมพ์..... 85
4.30	แสดงปริมาณรูพรุนก่อนและหลังการแก้ไขแม่พิมพ์ ณ ตำแหน่งที่ 1-8..... 86

บทที่ 1

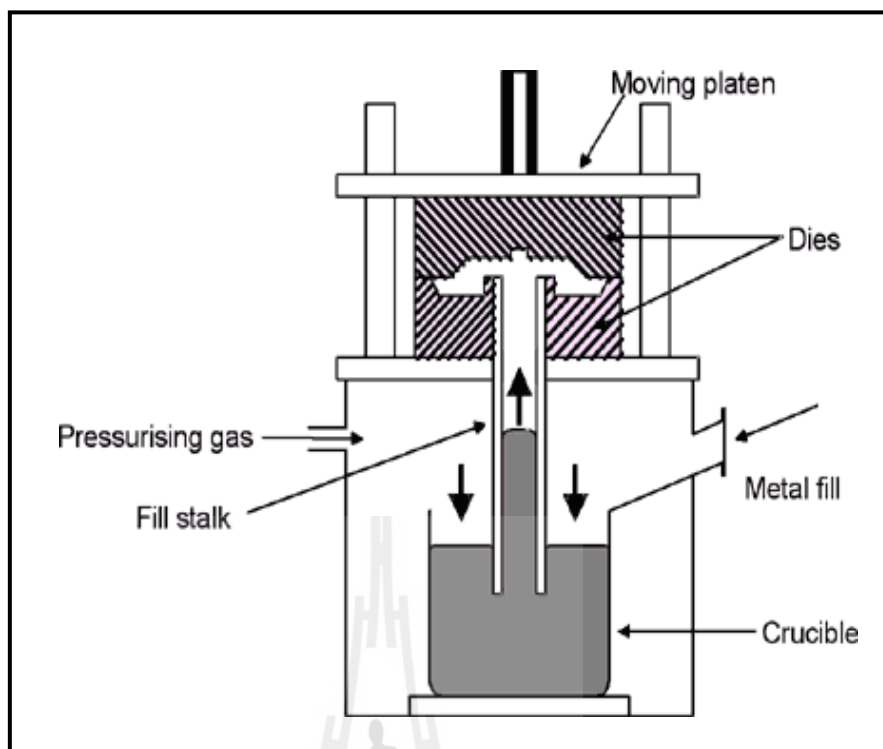
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันโลหะผสมอะลูมิเนียมถูกนำมาใช้งานทางวิศวกรรมมากขึ้น โดยเฉพาะอุตสาหกรรมยานยนต์ รวมถึงการใช้ทดแทนที่วัสดุจำพวกเหล็ก เนื่องจากโลหะผสมอะลูมิเนียมมีน้ำหนักเบากว่าเหล็กประมาณ 3 เท่า (Density of Aluminum = 2.7 g/cm^3 , Density of Iron = 7.8 g/cm^3) และมีลักษณะผิวมันวาว ด้านทานต่อการกัดกร่อนดี เนื่องจากเกิดฟิล์มออกไซด์ (Al_2O_3) ได้ง่ายตามธรรมชาติ นอกจากนี้แล้วยังสามารถขึ้นรูปทางกลได้ง่ายเนื่องจากมีโครงสร้างผลึกแบบ Face Center Cubic (FCC) และมีสมบัติทางด้านการไหลตัว (Fluidity) ที่ดี รวมทั้งอุณหภูมิจุดหลอมตัวต่ำ (660 องศาเซลเซียส) คุณสมบัติที่ดีดังกล่าวทำให้มีการนำโลหะผสมอะลูมิเนียมมาใช้ในทางวิศวกรรมมากขึ้น (มนัส สติรจินดา, 2543) โดยเฉพาะอย่างยิ่งการผลิตขึ้นรูปชิ้นส่วนอะลูมิเนียมจากกระบวนการหล่อซึ่งมีอัตราการการผลิตภายในประเทศสูง เพื่อตอบสนองต่ออุตสาหกรรมการผลิตชิ้นส่วนยานยนต์ เครื่องจักรกลและอุปกรณ์ต่างๆ

กระบวนการหล่อแบบใช้แรงดันต่ำ (Low Pressure Die Casting) เป็นกรรมวิธีการหล่อโลหะผสมอะลูมิเนียมอีกวิธีหนึ่ง เหมาะสำหรับงานที่ต้องการควบคุมคุณภาพเป็นพิเศษ โดยจะใช้แรงดันค้ำน้ำโลหะในเตาสุญญากาศ เพื่อให้เข้าไปในแม่พิมพ์โลหะ ดังแสดงในรูปที่ 1.1 โดยกระบวนการผลิตนี้จะลดปริมาณแก๊สไฮโดรเจนที่อาจเข้าไปผสมกับน้ำโลหะ ส่งผลให้ปริมาณรูพรุนในชิ้นงานน้อย ทำให้ของเสียในกระบวนการผลิตมีปริมาณต่ำ

กระบวนการหล่อแบบแรงดันต่ำนี้เหมาะกับชิ้นงานประเภทที่ต้องการความแน่นของชิ้นงานสูง เนื่องจากการใช้งานจะต้องรับแรงดันสูง รูปร่างสลับซับซ้อน เช่น คาร์บูเรเตอร์ในเครื่องยนต์ และล้อแมกเครื่องยนต์ เป็นต้น



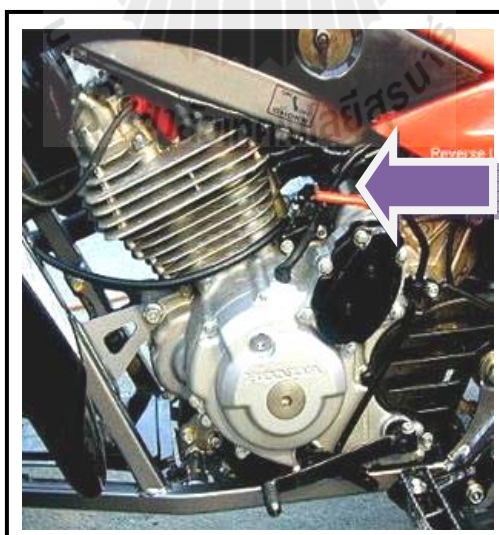
รูปที่ 1.1 แสดงภาพจำลองกระบวนการหล่อแบบ Low Pressure Die Casting

[<http://www.emt-india.net/process/aluminium/AluCastings.htm>]



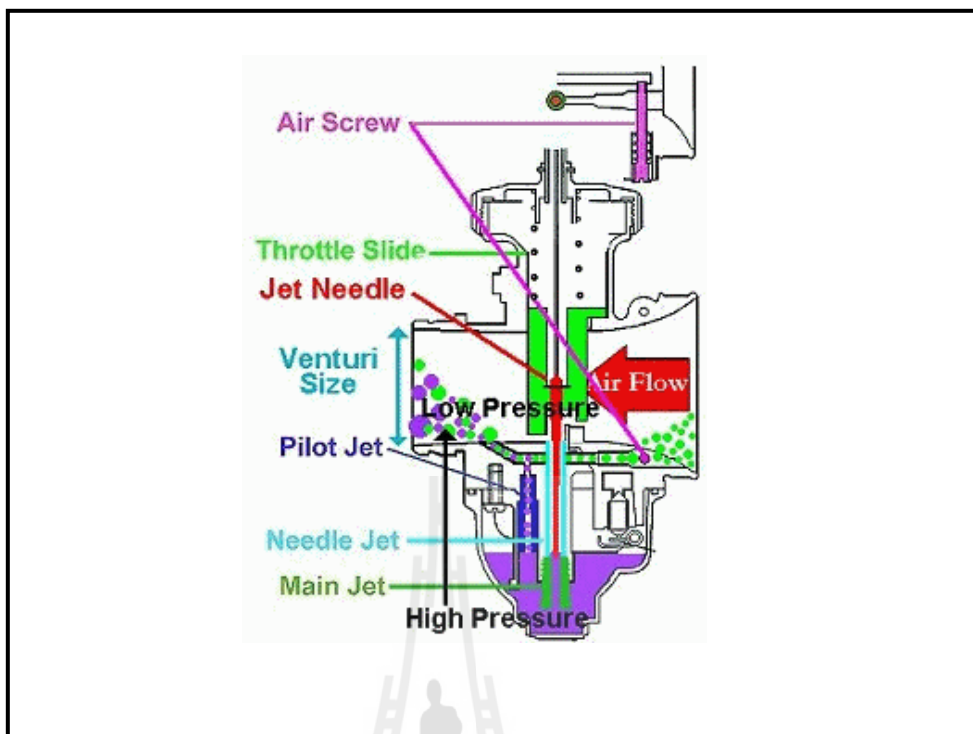
อย่างไรก็ดี ในกระบวนการผลิตชิ้นส่วนงานหล่ออะลูมิเนียมนั้นยังประสบปัญหาบางประการเช่น ปัญหารูพรุนจากแก๊สและการหดตัว ชิ้นงานไม่เต็ม และรอยแตกร้าว เป็นต้น ซึ่งปัญหาเหล่านี้ส่งผลให้สมบัติเชิงกลของชิ้นงานหล่อลดลงเป็นอย่างมาก และทำให้ประสิทธิภาพในกระบวนการผลิตลดลง โดยมีปริมาณของเสียในกระบวนการผลิตมาก สิ้นเปลืองพลังงานในการตรวจสอบซ่อมแซมชิ้นงานหรือต้องนำมาหลอมใหม่ ปัญหาต่างๆที่เกิดขึ้นอาจสืบเนื่องมาจากสาเหตุหลายประการ เช่น วัสดุดิบหรืออุปกรณ์ที่ใช้ในกระบวนการหล่อหลอมขึ้นรูป เทคโนโลยีและการควบคุมกระบวนการผลิต รวมถึงความชำนาญความเข้าใจและทัศนคติของพนักงานในการทำงาน เป็นต้น องค์กรประกอบดังกล่าวนี้มีผลอย่างมากต่อการผลิตชิ้นงานให้มีคุณภาพตามต้องการ เพื่อลดปริมาณของเสียที่เกิดขึ้น

สำหรับการวิจัยครั้งนี้เป็นการศึกษาเพื่อที่จะหาสาเหตุการเกิดข้อบกพร่องที่เกิดขึ้น จากกระบวนการหล่อหลอมชิ้นงานโลหะผสมอะลูมิเนียม เพื่อลดปริมาณของเสียในกระบวนการผลิต และศึกษาเป็นแนวทางในการแก้ปัญหาการผลิตในภาคอุตสาหกรรม โดยผู้ทำการทดลองได้ศึกษาค้นคว้าข้อมูลเบื้องต้นในส่วนของชิ้นงานหล่อ กระบวนการผลิต และปัญหาข้อบกพร่องที่ในชิ้นส่วนงานหล่อที่เรียกว่า Pipe inlet ซึ่งเป็นส่วนประกอบในคาร์บูเรเตอร์ สำหรับรถจักรยานยนต์ ตำแหน่งของคาร์บูเรเตอร์แสดงในรูปที่ 1.2 โดยจะทำหน้าที่เป็นตัวควบคุมปริมาณอากาศก่อนเข้าสู่ห้องเผาไหม้ในเครื่องยนต์ ชิ้นส่วนนี้จะต้องรับแรงดันสูงขณะทำงาน ซึ่งจะได้รับทั้ง Low Pressure และ High Pressure รูปที่ 1.3 แสดงลักษณะการทำงานของคาร์บูเรเตอร์ในรถจักรยานยนต์



รูปที่ 1.2 ส่วนประกอบคาร์บูเรเตอร์ในรถจักรยานยนต์

[<http://commons.wikimedia.org/wiki/carburetor.jpg>]



รูปที่ 1.3 กระบวนการทำงานของคาร์บูเรเตอร์ในรถจักรยานยนต์ ซึ่ง Pipe Inlet คือส่วนประกอบด้านนอกที่รับ Low pressure และ High Pressure
 [http://www.flightlearnings.com/2010/03/02/carburetor-icing.jpg]

ดังนั้นในกระบวนการหล่อขึ้นรูปชิ้นงานดังกล่าว จึงต้องไม่ให้เกิดการรั่วของชิ้นงาน ในขณะที่ใช้งาน อย่างไรก็ตาม การศึกษาข้อมูลเบื้องต้น พบว่า การผลิตชิ้นงานด้วยกระบวนการหล่อแบบแรงดันต่ำนั้น จะพบข้อบกพร่องประเภทรั่วบริเวณใต้รูเจาะเกลียวของชิ้นงาน ซึ่งจะพบได้ในกระบวนการทดสอบรั่ว ในกระบวนการผลิต โดยในการศึกษานี้ จะทำการศึกษาผลจากการเปลี่ยนอุณหภูมิแม่พิมพ์โลหะ อุณหภูมิเทน้ำโลหะ และการเปลี่ยนขนาดทางเข้าของน้ำโลหะ เพื่อให้ชิ้นงานมีปริมาณของเสียลดลง และลดปริมาณรูพรุนที่เกิดขึ้นในชิ้นงาน เพื่อความปลอดภัยสำหรับผู้ใช้งาน

1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย

- 1.2.1 เพื่อศึกษาหาสาเหตุการเกิดข้อบกพร่องของชิ้นงานหล่อ โลหะผสมอะลูมิเนียมในชิ้นส่วน Pipe Inlet
- 1.2.2 เพื่อหาแนวทางการแก้ไขปัญหาการเกิดข้อบกพร่องในกระบวนการผลิตชิ้นส่วน Pipe Inlet ประเภทปัญหาการรั่วบริเวณใต้รูเกลียว โดยศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิแม่พิมพ์โลหะ อุณหภูมิการเทน้ำโลหะ และขนาดทางเดินน้ำโลหะต่อการเกิดข้อบกพร่อง โดยใช้ซอฟต์แวร์จำลองงานหล่อ

1.3 สมมติฐานการวิจัย

การหล่ออะลูมิเนียมในกระบวนการผลิตที่มีการควบคุมคุณภาพทุกขั้นตอนตามมาตรฐานของสถานประกอบการ ตั้งแต่การรับวัตถุดิบ กระบวนการหลอม และผ่านกระบวนการกำจัดแก๊สไฮโดรเจนแล้วและได้รับการทดสอบปริมาณแก๊ส ดังนั้น น้ำโลหะอะลูมิเนียมที่เติมเข้าเครื่อง Low Pressure Die Casting Machine จึงมีปริมาณแก๊สไฮโดรเจนต่ำ และไม่ส่งผลต่อการเกิดรูพรุนในชิ้นงาน

ปัญหาการรั่วที่เกิดขึ้นในชิ้นงานหล่อที่ตรวจสอบได้จากการทดสอบรั่วนั้น น่าจะมีสาเหตุหลักมาจากรูพรุนที่เกิดจากการหดตัว โดยอาจจะเกี่ยวข้องกับตัวแปรในกระบวนการผลิต เช่น อุณหภูมิเทน้ำโลหะ อุณหภูมิแม่พิมพ์โลหะ การออกแบบแม่พิมพ์โลหะ ที่ส่งผลกระทบต่อกระบวนการแข็งตัวของน้ำโลหะ เป็นต้น ซึ่งตัวแปรในกระบวนการผลิตเหล่านี้จะถูกนำมาศึกษาในงานวิจัยนี้

1.4 ขอบเขตของการวิจัย

- 1.4.1 การวิจัยนี้ทำการศึกษาเพื่อลดข้อบกพร่องของชิ้นงานหล่ออะลูมิเนียมผสม ในชิ้นส่วน Pipe Inlet ที่เกิดการรั่วบริเวณใต้รูเกลียว โดยในกระบวนการผลิตจะมีการควบคุมเงื่อนไขในกระบวนการผลิต ดังนี้
 - ใช้โลหะผสมอะลูมิเนียมเกรด AC2B ในกระบวนการผลิต
 - อุณหภูมิในการหลอมโลหะผสมอะลูมิเนียม 760 - 800 องศาเซลเซียส
 - เวลาที่ใช้ในกระบวนการกำจัดแก๊สไฮโดรเจนในน้ำโลหะหลอมเหลวโดยใช้แก๊สอาร์กอน เป็นเวลา 20 นาทีและใช้อัตราการไหลของแก๊สอาร์กอน 20 ลิตรต่อนาที
 - อุณหภูมิของน้ำโลหะหลอมเหลวก่อนเทลงแบบหล่อ 720 - 740 องศาเซลเซียส

- อุณหภูมิของแม่พิมพ์โลหะก่อนการเทโลหะหลอมเหลว ที่อุณหภูมิ 330 – 400 องศาเซลเซียส ใช้แรงดันลม 70 - 150 จิกะปาสกาล
 - กระบวนการอบชุบความร้อน ด้วยกระบวนการ T4 โดยทำการอบละลาย (Solution treatment) ที่อุณหภูมิ 490 - 510 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง และเย็นตัวในอากาศ จากนั้นจึงทำการบ่มที่อุณหภูมิห้อง (Natural aging)
- 1.4.2 ศึกษาการสาเหตุการเกิดข้อบกพร่องในชิ้นงานหล่อ ในชิ้นส่วน Pipe Inlet และศึกษาแนวทางการแก้ไขแม่พิมพ์โลหะ ด้วยซอฟต์แวร์จำลองงานหล่อ โดยใช้โปรแกรม ProCAST® V.2009

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.5.1 สามารถหาสาเหตุการเกิดข้อบกพร่องของชิ้นงานหล่อ โลหะผสมอะลูมิเนียมในชิ้นส่วน Pipe Inlet ได้
- 1.5.2 สามารถหาแนวทางการแก้ไขปัญหาการเกิดข้อบกพร่องในกระบวนการผลิตชิ้นส่วน Pipe Inlet ประเภทปัญหาการรั่วบริเวณใต้รูเกลียวได้ และสามารถศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิแม่พิมพ์โลหะ อุณหภูมิการเทหล่อ และขนาดทางเดินน้ำโลหะต่อการเกิดข้อบกพร่องจากการใช้ซอฟต์แวร์จำลองงานหล่อ

บทที่ 2

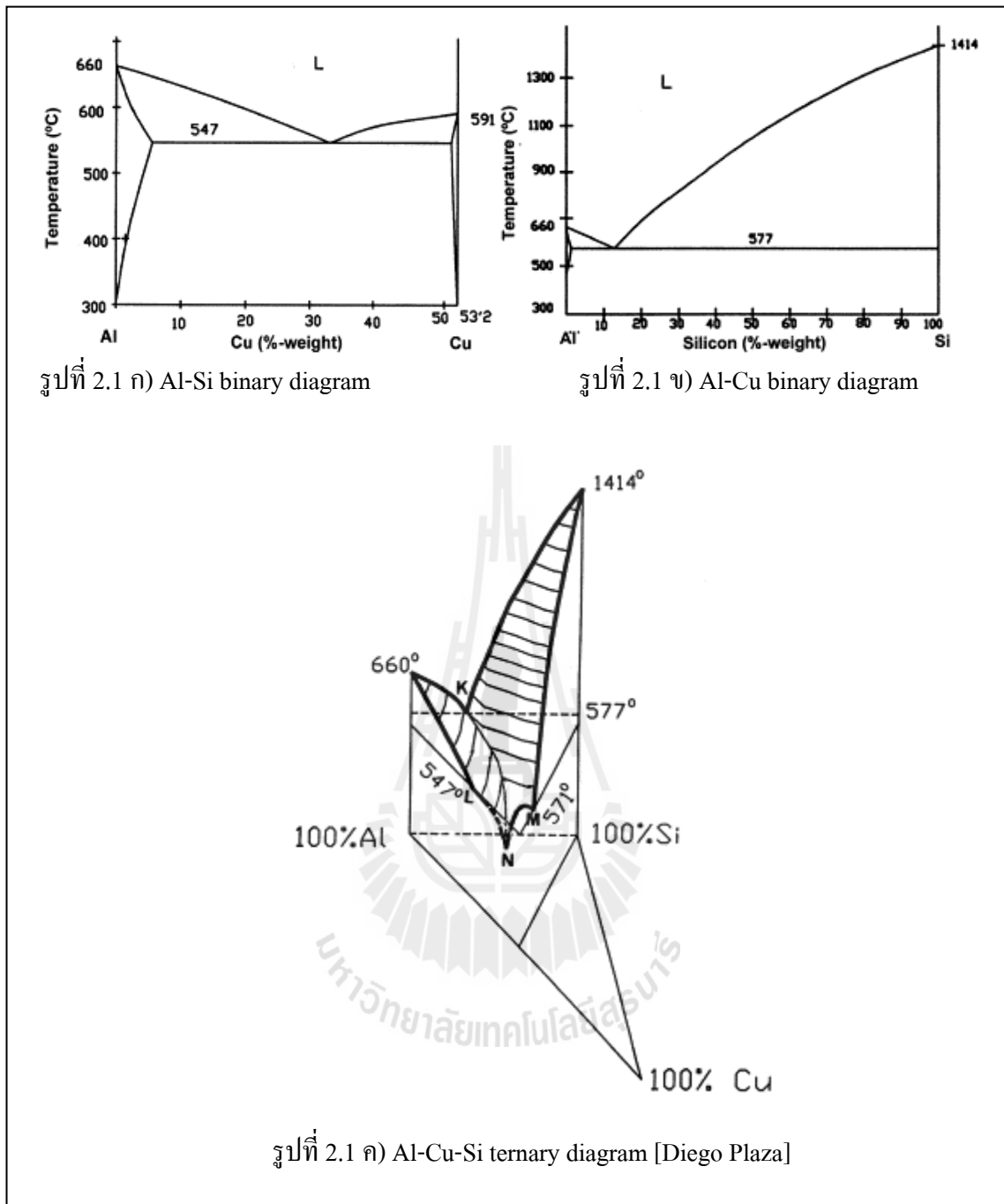
ปรีทัศน์วรรณกรรม

2.1 โลหะผสมอะลูมิเนียมเกรดงานหล่อ (Cast aluminum alloys)

โลหะผสมอะลูมิเนียมเกรดงานหล่อพัฒนามาจากระบบยูเทกติกของ 2 ธาตุ เช่น อะลูมิเนียมซิลิกอน (Al-Si) อะลูมิเนียม-ทองแดง (Al-Cu) และอะลูมิเนียม-แมกนีเซียม (Al-Mg) แต่ทั้งนี้ โลหะที่ใช้ในงานหล่อส่วนใหญ่จะพัฒนามาจากระบบอะลูมิเนียม-ซิลิกอน เนื่องจากซิลิกอนทำให้โลหะผสมมีจุดหลอมเหลวต่ำลง มีความสามารถในการไหลตัวดี และทำให้ความสามารถในการหล่อขึ้นรูป (Cast ability) ดี การปรับปรุงสมบัติเชิงกลของอะลูมิเนียม-ซิลิกอน ด้วยการเติมโบรอน หรือไทเทเนียมเพื่อเพิ่มความแข็งแรงด้วยการลดขนาดเกรนของอะลูมิเนียมปฐมภูมิ การเติมโซเดียม หรือสตรอนเทียมเพื่อปรับโครงสร้างยูเทกติกให้ละเอียด ส่วนการเติมฟอสฟอรัสเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของซิลิกอนโดยการลดขนาดเกรนของซิลิกอนปฐมภูมิ นอกจากนั้นยังเติมแมกนีเซียม ทองแดง หรือสังกะสีเพื่อช่วยให้สามารถเพิ่มความแข็งแรงได้ด้วยการบ่มแข็ง และการเพิ่มธาตุบางอย่าง เช่น นิกเกิล โครเมียม และแมงกานีส ยังช่วยเพิ่มความแข็งแรงได้โดยการทำให้เป็นสารละลายของแข็ง (Solid Solution Hardening) และยังช่วยปรับปรุงความแข็งแรงในการใช้งานที่อุณหภูมิสูง (Hot Strength) เป็นต้น (กิตติพงษ์ กิมะพงศ์และคณะ, 2553)

โลหะอะลูมิเนียมผสมที่ใช้ทั่วไปแบ่งเป็น 3 ประเภทหลัก ๆ ได้แก่ โลหะผสมไฮโปยูเทกติก (Hypo-eutectic alloys) โลหะผสมใกล้ยูเทกติก (Near-eutectic alloys) โลหะผสมไฮเปอร์ยูเทกติก (Hyper-eutectic alloys) โลหะผสม AC2B ที่ใช้ในการทดลองจะเป็นโลหะผสมผสมไฮโปยูเทกติก อะลูมิเนียม – ซิลิกอน (Hypo-eutectic alloys Al-Si) โดยมีทองแดงเป็นองค์ประกอบร่วมด้วย ซึ่งมีความสามารถในการไหลได้ดี หล่อหลอมได้ง่าย มีความแข็งแรงสูง สามารถเพิ่มความแข็งแรงด้วยกระบวนการทางความร้อนได้

รูปที่ 2.1ก) แสดงเฟสไดอะแกรมของโลหะผสมอะลูมิเนียม-ซิลิกอน รูปที่ 2.1ข) แสดงเฟสไดอะแกรมของโลหะผสมอะลูมิเนียม-ทองแดง และรูปที่ 2.3 แสดง Al-Cu-Si ternary diagram

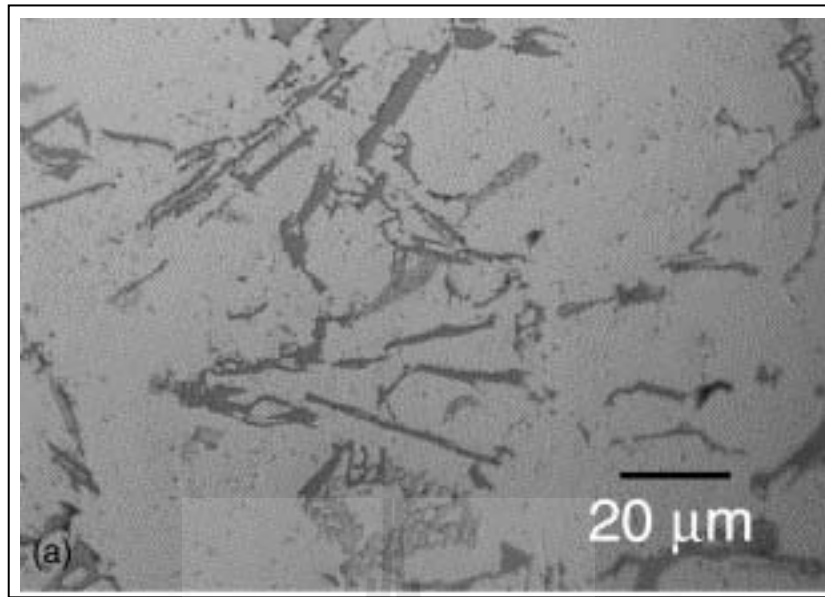


รูปที่ 2.1 ก) Al-Si binary diagram

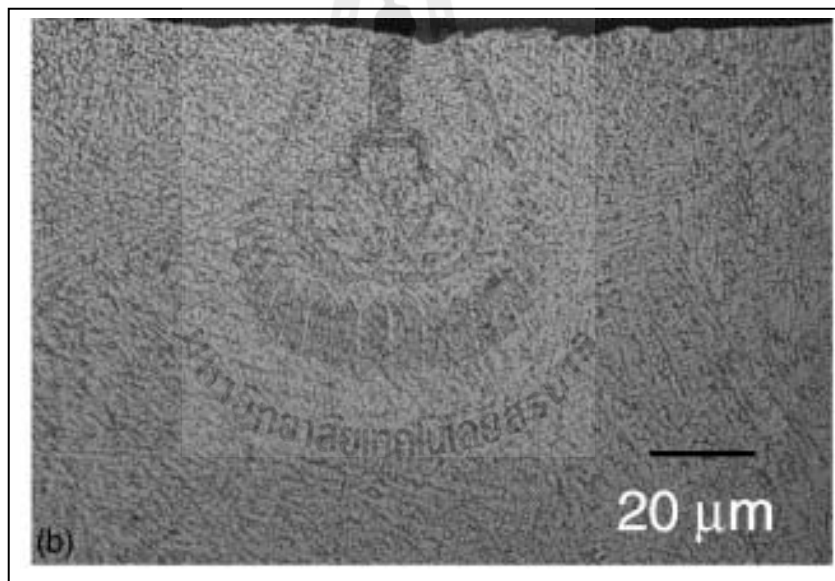
รูปที่ 2.1 ข) Al-Cu binary diagram

รูปที่ 2.1 ค) Al-Cu-Si ternary diagram [Diego Plaza]

รูปที่ 2.2 ก) แสดงลักษณะโครงสร้างจุลภาคของโลหะผสม AC2B ในสภาพภายหลังการหล่อ ประกอบด้วยพื้นผิวที่เป็นอะลูมิเนียม โดยมี Eutectic Al-Cu และ Eutectic Al-Si ขนาดใหญ่ ส่วนรูปที่ 2.2ข) แสดงลักษณะโครงสร้างจุลภาคของโลหะผสม AC2B ในสภาพภายหลังการอบชุบความร้อน T4 ประกอบด้วยพื้นผิวที่เป็นอะลูมิเนียม โดยมี Eutectic Al-Cu และ Eutectic Al-Si ขนาดเล็กกระจายอยู่ทั่วไป



รูปที่ 2.2ก) แสดงลักษณะโครงสร้างจุลภาคของโลหะผสม AC2B ในสภาพภายหลังการหล่อ



รูปที่ 2.2ข) แสดงลักษณะโครงสร้างจุลภาคของโลหะผสม AC2B ในสภาพภายหลังการอบชุบความร้อน T4

โลหะผสมเกรดนี้สามารถเพิ่มความแข็งแรงได้ ด้วยวิธีการตกตะกอนเพิ่มความแข็ง (Precipitation hardening) โครงสร้างจุลภาคของอะลูมิเนียมผสม จะประกอบด้วยเดนไดรต์ของอะลูมิเนียมและยูเทคติกซิลิคอนที่แยกตัวออกมาอยู่ระหว่างเดนไดรต์ (Interdendritic “divorced” eutectic Si) และอาจมี Intermetallic compound เช่น Al_2Cu , $\text{Cu}_{56}\text{Si}_{11}$, $\text{Cu}_{15}\text{Si}_4$, $\text{Cu}_{19}\text{Si}_6$ และจะ

สังเกตเห็น โพรงหดตัว (Shrinkage pore) กระจายอยู่บ้าง เนื่องจากโลหะผสมไฮโปยูเทกติกมีช่วงการแข็งตัวกว้าง (Wide freezing range)

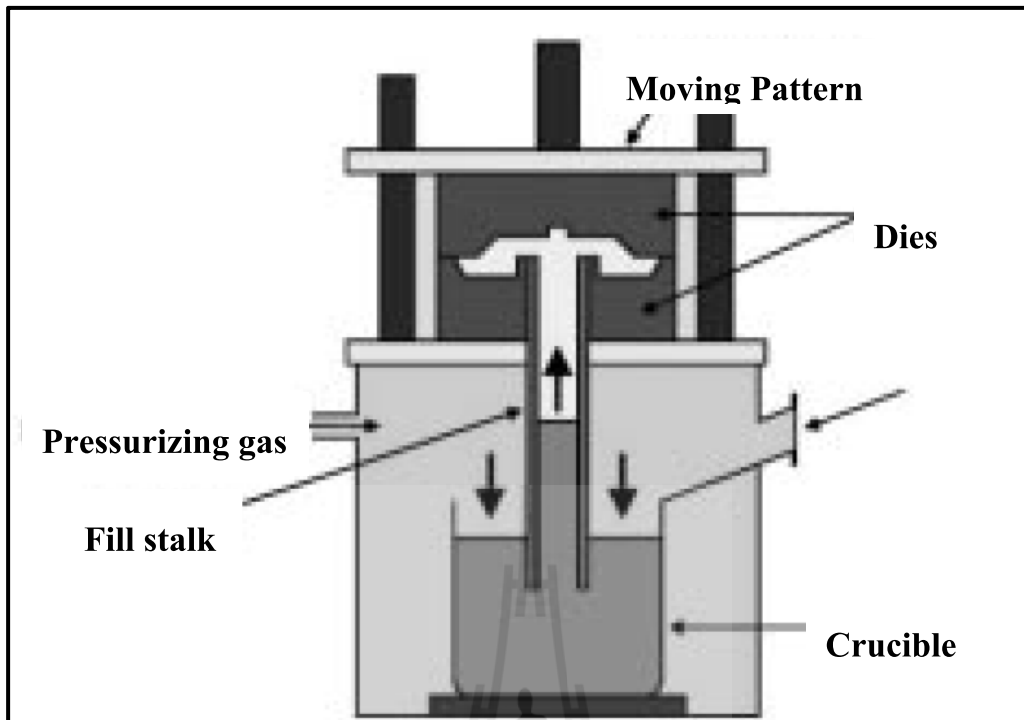
2.2 กระบวนการหล่อแบบแรงดันต่ำ (Low pressures die casting)

การหล่อโลหะ (Casting) หมายถึง การขึ้นรูปโลหะด้วยกระบวนการทางความร้อน โดยทำให้โลหะเปลี่ยนสถานะเป็นของเหลว โดยควบคุมอุณหภูมิการหลอม แล้วทำการกำจัดแก๊สไฮโดรเจนในน้ำโลหะหลอมเหลวก่อนที่จะเทหรือฉีดเข้าสู่แบบหล่อ เมื่อโลหะแข็งตัวก็จะได้ชิ้นงานที่มีรูปร่างที่มีทางวิ่ง และทางเข้าของน้ำโลหะ จากนั้นจึงนำชิ้นงานมาตกแต่งเพื่อที่จะตัดทางวิ่งน้ำโลหะออก ก่อนที่จะทำการเจาะ กลึง โลหะให้ได้รูปร่างตามต้องการ

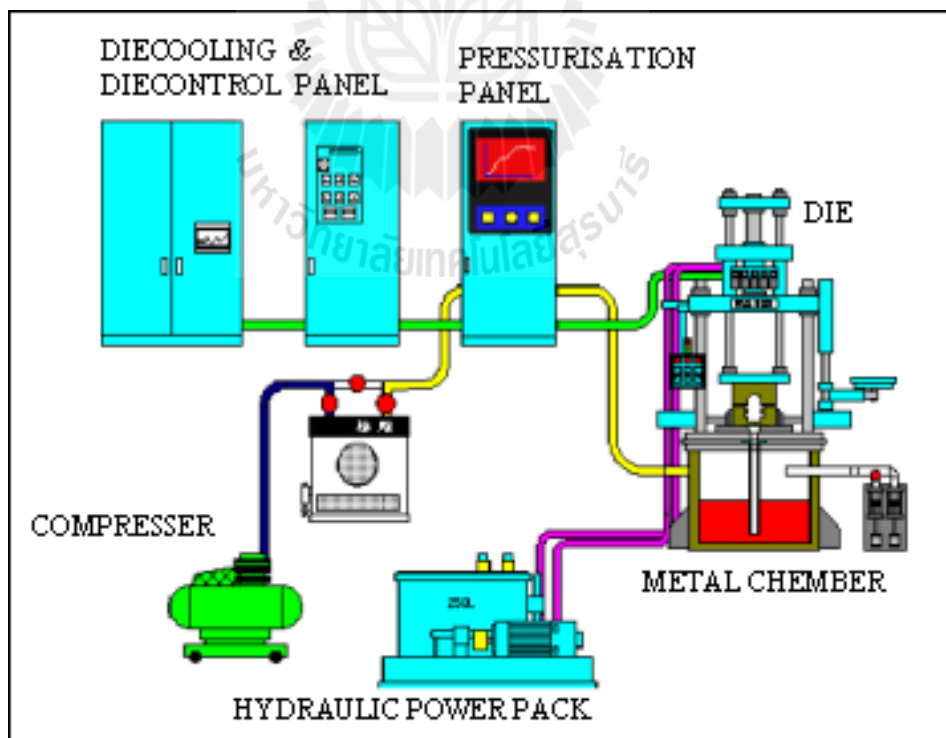
สำหรับกระบวนการหล่อแบบแรงดันต่ำ สามารถใช้ผลิตชิ้นงานจำนวนมากและสามารถผลิตชิ้นงานหล่อได้อย่างต่อเนื่อง โดยขั้นตอนการผลิต หลังจากได้น้ำโลหะหลอมเหลวและทำการกำจัดแก๊สไฮโดรเจนแล้ว จะใส่น้ำโลหะเข้าไปในเบ้าที่ปิดมิดชิด และใช้แก๊สความดันต่ำกว่าหนึ่งบรรยากาศ (ใช้แรงดันประมาณ 0.15-0.7 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร และความเร็วในการเพิ่มแรงดัน 0.025-0.060 กิโลเมตรต่อลูกบาศก์เซนติเมตรวินาที) ดันน้ำโลหะเข้าสู่แม่พิมพ์โลหะ ซึ่งอยู่ด้านบนของน้ำโลหะดังแสดงอุปกรณ์การหล่อแรงดันต่ำในรูปที่ 2.3 เมื่อน้ำโลหะเต็มแบบหล่อแล้วจะลดความดันลง เพื่อดูดน้ำโลหะเข้าสู่เบ้าปิด และแม่พิมพ์โลหะจะเปิดออกเพื่อนำชิ้นงานออก จากนั้นจะเข้าสู่กระบวนการตรวจสอบคุณภาพชิ้นงานหล่อ สำหรับกระบวนการหล่อแบบแรงดันต่ำมีข้อดีดังนี้

1. เป็นการหล่อแบบปิด ซึ่งน้ำโลหะจะถูกดันเข้าสู่แม่พิมพ์โลหะโดยตรง ทำให้มีการสัมผัสกับอากาศน้อย ดังนั้นโอกาสที่จะเกิดรูพรุนจากแก๊สจะต่ำ
2. กระบวนการแข็งตัวของโลหะภายในแม่พิมพ์โลหะเกิดขึ้นอย่างช้าๆ ส่งผลให้การแข็งตัวของชิ้นงานสมบูรณ์ เนื้อของชิ้นงานมีลักษณะแน่น (Soundness)
3. ไม่จำเป็นต้องใช้ รุเท รูลิ้น เพื่อช่วยในการแข็งตัวของน้ำโลหะ จึงเป็นการลดต้นทุนในกระบวนการผลิตได้
4. ชิ้นงานหล่อมีความสวยงาม และสามารถผลิตชิ้นงานที่มีความซับซ้อนได้
5. สามารถทำการผลิตชิ้นงานได้มาก และสามารถทำการผลิตได้อย่างต่อเนื่อง

โดยรูปที่ 2.3 แสดงหลักการทำงานของเครื่องหล่อแบบแรงดันต่ำ และ รูปที่ 2.4 แสดงส่วนประกอบทั้งหมดของเครื่องหล่อแบบแรงดันต่ำ



รูปที่ 2.3 เครื่องหล่อแบบแรงดันต่ำ (Low Pressure Die Casting Machine) [หริศ สุตะบุตร, 1998]



รูปที่ 2.4 ส่วนประกอบทั้งหมดของเครื่องหล่อแบบแรงดันต่ำ (Low Pressure Die Casting Machine)

ส่วนการหล่อแบบแรงดันสูงจะใช้แรงดันสูง เพื่อให้ต้นน้ำโลหะเข้าสู่แม่พิมพ์โลหะอย่างรวดเร็ว โดยการแข็งตัวของน้ำโลหะจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว เหมาะสำหรับชิ้นงานขนาดใหญ่ มีรูปร่างซับซ้อน

2.3 แม่พิมพ์โลหะ

แม่พิมพ์โลหะที่ใช้ในการหล่อขึ้นรูป นิยมใช้เป็นเหล็กกล้าเครื่องมือร้อน เนื่องจากต้องรองรับอุณหภูมิที่สูงขณะใช้งานและต้องมีความแข็งแรงสูง เพื่อใช้ในการขึ้นรูปร่างของชิ้นงานประเภท อะลูมิเนียม เหล็ก หรือโลหะต่างๆ ลักษณะการใช้งานสำหรับแม่พิมพ์โลหะงานร้อนที่แพร่หลายมากคือ การหล่อด้วยแม่พิมพ์ (Die-casting) การอัดรีดขึ้นรูป (Extrusion) และการทุบขึ้นรูป (Forging) ทำให้เหล็กกล้าเครื่องมือต้องมีอายุการใช้งานที่สูงขึ้น วัสดุทำแม่พิมพ์โลหะควรมีคุณสมบัติดังนี้คือ มีความต้านทานสูงต่อการแตกลายที่ผิวของแม่พิมพ์โลหะ มีความแข็งแรงสูงที่อุณหภูมิสูง และมีความต้านทานต่อการโตของรอยแตกหรือต้านทานต่อการแตกร้าว

ส่วนผสมทางเคมีของแม่พิมพ์โลหะแสดงในรูปที่ 2.5 ซึ่งโดยทั่วไปจะผสมธาตุ โครเมียม, โมลิบดีนัม และ วานาเดียม เป็นธาตุหลัก ส่วนแม่พิมพ์โลหะบางชนิดนิยมใช้ ทังสเตน และ โครเมียมเป็นธาตุหลัก ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับการใช้งานตามความเหมาะสม

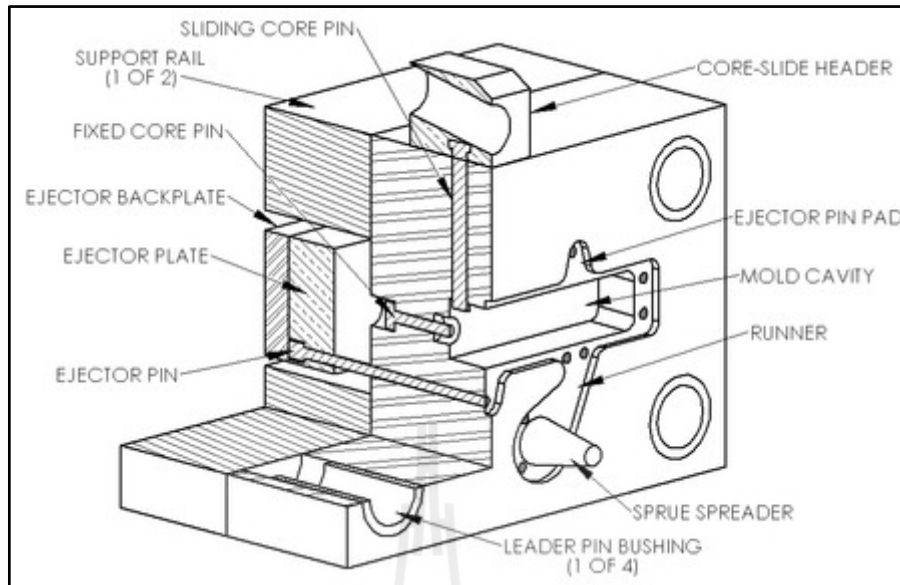
มาตรฐาน AISI	% C	% W	% Mo	% Cr	% V	อื่น ๆ	การใช้งานโดยทั่วไป
ชนิดโครเมียมเป็นธาตุผสม							
H10	0.40	...	2.50	3.25	0.40	...	แมนเดรล, แม่พิมพ์อัดขึ้นรูป, แม่พิมพ์ทุบขึ้นรูป, แม่พิมพ์หล่อฉีดขึ้นรูป อะลูมิเนียมผสม, แม่พิมพ์อินเสิร์ท (Insert) ทุบขึ้นรูป
H11	0.35	...	1.50	5.00	0.40	...	แม่พิมพ์หล่อฉีดขึ้นรูป, พันซ์, เครื่องมือเจาะขึ้นรูป
H12	0.35	1.50	1.50	5.00	0.40	...	แม่พิมพ์อัดขึ้นรูป, แม่พิมพ์ทุบขึ้นรูป, แมนเดรล
H13	0.35	...	1.50	5.00	1.00	...	แม่พิมพ์หล่อฉีดขึ้นรูป, แม่พิมพ์อัดขึ้นรูป, Plungers
ชนิดทังสเตนเป็นธาตุผสม							
H21	0.35	9.00	...	3.50	แมนเดรล, Hot Plungers
H22	0.35	11.00	...	2.00	แมนเดรล, พันซ์, ทำงานร้อน
H23	0.35	12.00	...	12.00	แม่พิมพ์หล่อฉีดขึ้นรูป, แม่พิมพ์อัดขึ้นรูปร้อน (ทองเหลือง)

รูปที่ 2.5 ส่วนผสมทางเคมีของแม่พิมพ์โลหะ [วารุณี เปรมานนท์ และอรจิรา เตี่ยวณิชย์]

ส่วนประกอบหลักของแม่พิมพ์โลหะประกอบด้วย

- ส่วนของแม่พิมพ์ที่ไม่เคลื่อนที่ติดตั้งอยู่ด้านล่าง (Fix Dies)
- ส่วนของแม่พิมพ์เคลื่อนที่ได้ ติดตั้งอยู่ด้านบน (Move Dies)
- ส่วนไส้แบบของแม่พิมพ์ (Slide core pin)
- แท่งดันชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์ (Ejector pin)
- ทางเข้าน้ำโลหะ (Spure spreader)
- ทางวิ่งน้ำโลหะ (Runner)

ส่วนประกอบและตำแหน่งต่างๆ ในแม่พิมพ์โลหะแสดงในรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 ส่วนประกอบและตำแหน่งต่างๆ ในแม่พิมพ์โลหะ

2.4 กระบวนการแข็งตัวของโลหะ (Solidification of metals)

การแข็งตัว (Solidification) เป็นปรากฏการณ์ที่สสารเกิดการเปลี่ยนแปลงสถานะจากของเหลวเป็นของแข็งเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ความดัน หรือปัจจัยอื่น กระบวนการแข็งตัวของน้ำโลหะในกระบวนการหล่อโลหะนั้น เป็นกระบวนการหนึ่งที่มีความสำคัญต่อกระบวนการผลิตในอุตสาหกรรม โดยทั่วไปแล้วการแข็งตัวจะแบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอน คือ

2.4.1 การเกิดนิวเคลียส (Nucleation)

เป็นขั้นตอนการเกิดนิวเคลียส ซึ่งกลไกการเกิดมี 2 แบบ ดังนี้

ก) การเกิดนิวเคลียสแบบ Homogeneous Nucleation คือ กลไกที่เกิดขึ้นในกระบวนการแข็งตัวในโลหะบริสุทธิ์ที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิจุดเยือกแข็งสมดุล นิวเคลียสที่เกิดจากกลไกนี้จะเกิดจากการเคลื่อนตัวของอะตอมโลหะและเกิดพันธะระหว่างกันจนกระทั่งได้ขนาดที่มีเสถียรภาพ เรียกว่า ขนาดวิกฤต (r^*) ซึ่งสามารถโตต่อไปเป็นผลึกได้ สำหรับนิวเคลียสที่เล็กกว่าขนาดวิกฤต เรียกว่า เอมบริโอ (embryo) ซึ่งไม่เสถียรภาพจะสลายตัวกลายเป็นโลหะหลอมเหลว ส่วนนิวเคลียสที่มีขนาดโตกว่าขนาดวิกฤต เรียกว่า นิวเคลียส ซึ่งจะสามารถโตต่อไปเป็นผลึก ซึ่งพลังงานที่เกี่ยวข้องกับการแข็งตัวของลักษณะการเกิดนิวเคลียสแบบ Homogeneous nucleation จะมีการเปลี่ยนแปลงพลังงาน 3 ประเภท คือ

1. พลังงานอิสระเชิงปริมาตร (Bulk free energy, ΔG_V) แสดงความสัมพันธ์ในสมการที่ 2.1

$$\Delta G_V = -\frac{4}{3}\pi r^3 \Delta G_v \quad (2.1)$$

โดยที่ ΔG_v คือ การเปลี่ยนแปลงระหว่างพลังงานอิสระระหว่างของเหลวและของแข็งต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรของโลหะ

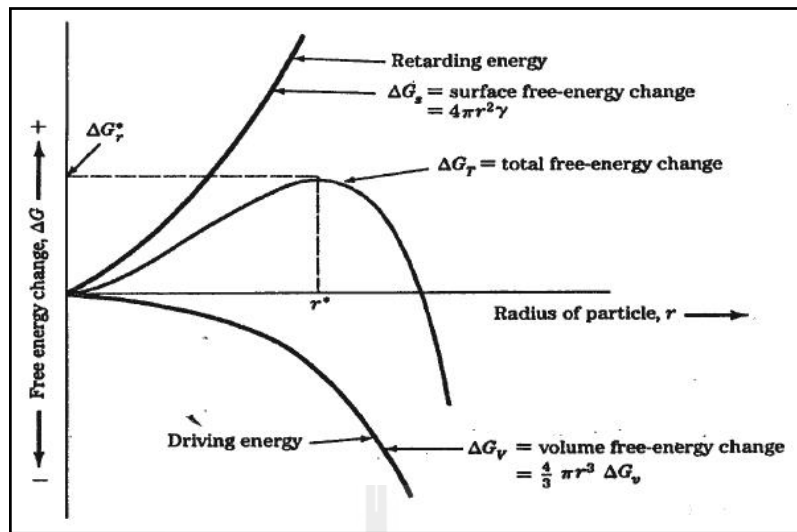
2. พลังงานอิสระเชิงพื้นผิว (Surface free energy, ΔG_S) แสดงความสัมพันธ์ดังสมการที่ 2.2

$$\Delta G_S = 4\pi r^2 \gamma_s \quad (2.2)$$

โดยที่ γ_s คือ พลังงานอิสระเชิงพื้นผิว

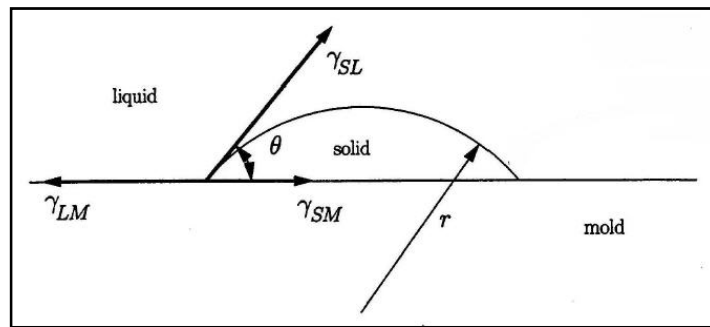
3. พลังงานที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงปริมาตร จากสภาพหลอมเหลวไปเป็นของแข็ง แต่มีการเปลี่ยนแปลงพลังงานน้อยมาก จึงไม่นำมาคำนวณ

ผลที่ได้จากองค์ประกอบของพลังงานทั้ง 2 พลังงาน เมื่อนำมาสร้างความสัมพันธ์จะได้กราฟดังแสดงในรูปที่ 2.7 ซึ่งจะทำให้พลังงานรวมของอนุภาคถึงระดับสูงสุดที่ขนาดวิกฤตของอนุภาค ซึ่งขนาดวิกฤตนี้หมายถึงขนาดที่อนุภาค หรือนิวเคลียสจะเสถียรและเติบโตต่อไปได้ที่ระดับการเย็นตัวนั้นๆ เมื่ออัตราการเย็นตัวเพิ่มขึ้น พลังงานอิสระจากการเปลี่ยนแปลงของเหลวของแข็งจะเพิ่มขึ้น ขนาดวิกฤตของอนุภาคจะน้อยลง และอัตราการเกิดนิวเคลียสจะเพิ่มขึ้น (แม้น อมรสิทธิ์, สมชัย อัครทิวา และ ชรรมนบุญ อุดมมัน, ผู้แปล, 2551)



รูปที่ 2.7 กระบวนการเกิดนิวเคลียสแบบ Homogeneous nucleation
(แม้น อมรสิทธิ์ และ คณะ, 2551)

ข) กระบวนการเกิดนิวเคลียสแบบ Heterogeneous nucleation เป็นกลไกการเกิดนิวเคลียสที่พบได้บ่อยที่สุดในอุตสาหกรรมหล่อโลหะ เนื่องจากในทางปฏิบัติการเกิดนิวเคลียสแบบ Heterogeneous nucleation มักเกิดขึ้นได้ง่าย หากมีสิ่งแปลกปลอมหรือสารมลทินแขวนลอยอยู่ในน้ำโลหะหรือเกาะอยู่บนผิวภาชนะบรรจุน้ำโลหะ ซึ่งอนุภาคแปลกปลอมที่กล่าวนี้จะทำหน้าที่เป็น Nucleating agent หรือที่เรียกว่า สารก่อเกิดนิวคลีโอ ซึ่งในรูปที่ 2.8 จะแสดงกลไกการเกิดนิวคลีโอแบบ Heterogeneous ซึ่งสารก่อเกิดนิวคลีโอจะถูกทำให้เปียกด้วยน้ำโลหะหลอมเหลวที่กำลังจะเข้าสู่ภาวะการแข็งตัว ซึ่งการเกิดมุมสัมผัสระหว่างของแข็งและสารก่อเกิดนิวคลีโอที่ค่ามุมสัมผัส (θ) น้อยๆ ซึ่งจะส่งผลให้พลังงานพื้นผิวที่จะเกิดนิวเคลียสที่เสถียรบนสารก่อเกิดนิวคลีโอนี้ต่ำกว่าพลังงานพื้นผิวที่กระบวนการเกิดนิวเคลียสแบบ Homogeneous nucleation ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระสำหรับการเกิดนิวเคลียสที่เสถียรจึงมีค่าต่ำกว่าและขนาดวิกฤติของนิวเคลียสก็จะเล็กกว่า ซึ่งจะทำให้ปริมาณ Under cooling ที่ใช้ในการเกิดนิวเคลียสในกระบวนการเกิดนิวเคลียสแบบ Heterogeneous nucleation จึงมีค่าน้อยกว่า (แม้น อมรสิทธิ์ และ คณะ, 2551)

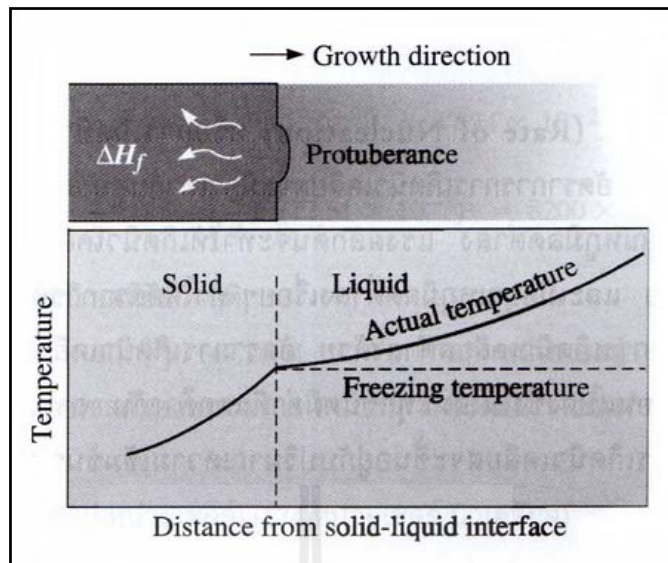


รูปที่ 2.8 กระบวนการเกิดนิวเคลียสแบบ Heterogeneous nucleation
(แม้น อมรสิทธิ์ และ คณะ, 2551)

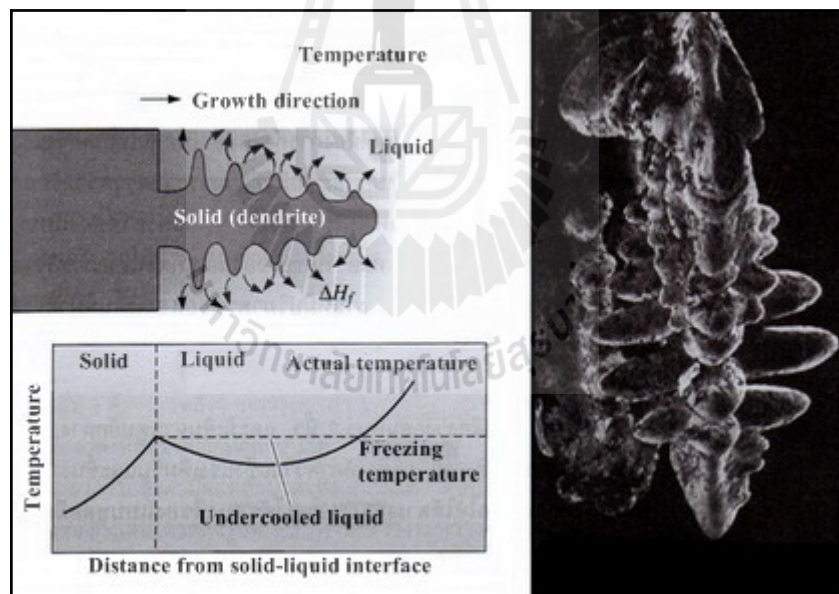
2.4.2 การโตของนิวเคลียสและเกิดเป็นโครงสร้างของเกรน

ตัวแปรที่ทำให้นิวเคลียสเกิดการเติบโต คือ โลหะหลอมเหลวเกิดการสูญเสียความร้อน สำหรับการแข็งตัวของโลหะบริสุทธิ์ในแบบหล่อเกิดการสูญเสียความร้อน 2 ลักษณะ ซึ่งได้แก่ ความร้อนจำเพาะ (Specific heat) ของของเหลวซึ่งเป็นความร้อนที่ต้องการในการเปลี่ยนอุณหภูมิของวัสดุ 1 หน่วยไป 1 องศาเซลเซียส หรือเป็นการนำความร้อนผ่านผนังแม่พิมพ์โลหะจนกระทั่งโลหะเกิดการแข็งตัวและอุณหภูมิลดลงเข้าสู่อุณหภูมิจุดเยือกแข็ง และความร้อนอีกชนิดหนึ่งที่เกิดการสูญเสีย คือ ความร้อนแฝง (Latent heat) ของการหลอมละลาย หรือความร้อนที่เกิดขึ้นและสูญเสียไปเมื่อของเหลวเปลี่ยนสถานะเป็นของแข็ง ดังนั้นการอธิบายกลไกการเติบโตของของแข็งสามารถแบ่งได้ดังนี้

1) การเติบโตแบบระนาบ (Planar growth) เมื่อน้ำโลหะหลอมเหลวที่มีสารก่อเกิดนิวเคลียสละลายอยู่เกิดการเย็นตัวลงภายใต้สภาวะสมดุล ลักษณะการเกิดนิวเคลียสจะเป็นแบบ Heterogeneous nucleation ซึ่งสามารถเกิดขึ้นได้โดยไม่ต้องผ่าน Under cooling ซึ่งจะทำให้อุณหภูมิของของเหลวบริเวณระหว่างของแข็งและของเหลวจะมีค่ามากกว่าอุณหภูมิการแข็งตัว ความร้อนแฝงจะทำการถ่ายเทจากของเหลวผ่านบริเวณระหว่างของแข็งและของเหลวเข้าไปในของแข็งทำให้เกิดเฟสของแข็งขนาดเล็กเริ่มก่อตัวและขึ้นจากพื้นที่ระหว่างของแข็งและของเหลวซึ่งอุณหภูมิของเหลวที่มีค่าสูงกว่าของแข็ง ซึ่งการถ่ายเทความร้อนแฝงจากน้ำโลหะหลอมเหลวเข้าสู่ผนังแม่พิมพ์โลหะจะทำให้ของแข็งเกิดขึ้นบริเวณพื้นที่ระหว่างของแข็งและของเหลวเพิ่มมากขึ้น โดยการเติบโตของของแข็งที่ยื่นออกมาจะหยุดการเติบโตลงเมื่ออุณหภูมิจากของเหลวและของแข็งที่ค่าเท่ากัน (กิตติพงษ์ กิมะพงศ์, ศิริชัย ต่อสกุล, อนินท์ มีมนต์ และ นรพร กลั่นประชา, ผู้แปล, 2553)



รูปที่ 2.9 การเติบโตแบบระนาบ (Planar growth) (กิตติพงษ์ กิมะพงศ์ และ คณะ, 2553)



รูปที่ 2.10 การเติบโตแบบเดนไดรต์ (Dendrite growth) (กิตติพงษ์ กิมะพงศ์ และ คณะ, 2553)

2) การเติบโตแบบเดนไดรต์(Dendrite growth) จะเกิดขึ้นเมื่อน้ำโลหะหลอมเหลวไม่มีสารก่อนิวเคลียสผสมปนอยู่ และการแข็งตัวจำเป็นต้องผ่าน Under cooling เพื่อให้ของแข็งก่อตัวขึ้น ซึ่งของแข็งขนาดเล็กจะก่อตัวขึ้นจากพื้นที่ระหว่างของแข็งและของเหลว เรียกว่าเดนไดรต์

(Dendrite) เมื่อเดนไดรต์โตขึ้น ความร้อนแฝงในของแข็งจะถ่ายเทสู่ของเหลวที่ผ่าน Under cooling ทำให้อุณหภูมิของเหลวมีค่าเพิ่มขึ้นและเดนไดรต์จะเกิดขึ้นเรื่อยๆ จนกระทั่งการถ่ายความร้อนจากของแข็งที่เกิดขึ้นสู่ของเหลวที่ผ่าน Under cooling มีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิจากการแข็งตัว ความแตกต่างระหว่างการแข็งตัวแบบ Planar growth และ Dendrite growth คือ รูปแบบความร้อนแฝงที่สูญเสีย ซึ่งการแข็งตัวแบบระนาบ ผนังแม่พิมพ์โลหะจะดูดซับความร้อนแฝงจากการแข็งตัว ขณะที่การแข็งตัวแบบเดนไดรต์ ความร้อนแฝงจะถูกดูดซับด้วยของเหลวที่ผ่าน Under cooling ซึ่งสัดส่วนของการเกิดเดนไดรต์สามารถหาได้จากสมการที่ 2.3 (กิตติพงษ์ กิมะพงศ์ และ คณะ, 2553)

$$\text{Dendrite fraction} = \frac{c\Delta T}{\Delta H_f} \quad (2.3)$$

โดยที่ c คือ ความร้อนจำเพาะของของเหลว และ ΔH_f คือ ค่าความร้อนแฝงที่สูญเสียไปขณะเกิดการแข็งตัว เมื่อค่า Under cooling (ΔT) เพิ่มขึ้นการเติบโตของเดนไดรต์จะเพิ่มขึ้น ถ้าหากของเหลวนั้นมีสารก่อเกิดนิวเคลียส และเมื่อค่า ΔT เท่ากับศูนย์ กลไกการเติบโตของของแข็งจะกลายเป็นแบบ Planar Growth

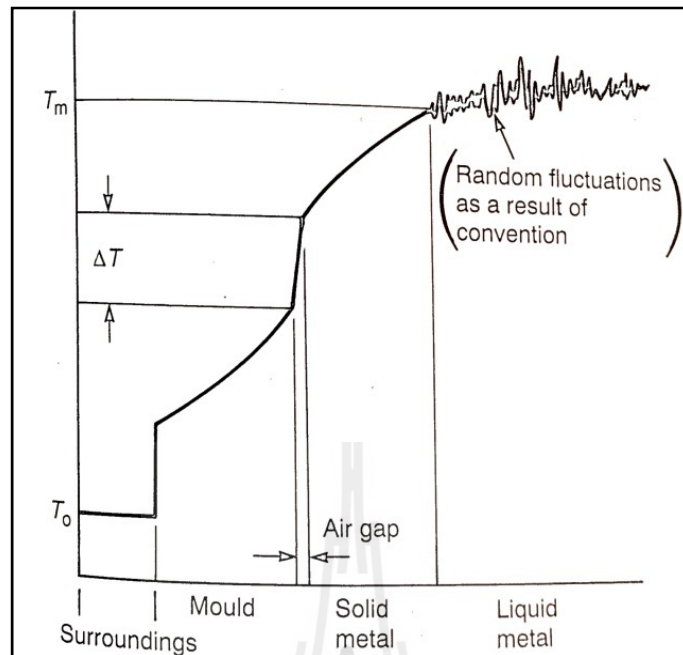
การแข็งตัวของน้ำโลหะซึ่งเกิดโครงสร้างแบบเดนไดรต์ จะก่อให้เกิดจุดบกพร่องภายในชิ้นงานที่เรียกว่า Micro shrinkage หรือ Shrinkage porosity ซึ่งเกิดจากการหดตัวขั้นสุดท้ายของโลหะหลอมเหลวที่อยู่ระหว่างเดนไดรต์ และไม่มีทางที่โลหะหลอมเหลวภายนอกจะเข้ามาถึง ดังนั้นจะทำให้เกิดช่องว่างเล็กๆ ภายในเดนไดรต์ โดยช่องว่างเล็กๆ เหล่านี้เปรียบเสมือนเป็นจุดบกพร่องภายในชิ้นงาน ซึ่งมีผลต่อสมบัติเชิงกลของวัสดุ

การถ่ายโอนความร้อน (Heat Transfer) ในกระบวนการหล่อ

ช่วงกระบวนการแข็งตัวของโลหะหลอมเหลว การถ่ายโอนความร้อนของส่วนต่างๆ ในกระบวนการแข็งตัว แบ่งเป็น

1. ส่วนของของเหลว (Liquid)
2. ส่วนของของแข็ง (Solid metal)
3. ส่วนระหว่างของแข็งและแม่พิมพ์โลหะ (Metal mold interface)
4. ส่วนของแม่พิมพ์โลหะ (Mold)
5. สภาพแวดล้อมรอบๆแม่พิมพ์โลหะ (Surrounding of the mold)

ดังแสดงในรูปที่ 2.11 ซึ่งแบ่งส่วนต่างๆ ของการถ่ายเทความร้อนในกระบวนการแข็งตัวของโลหะหลอมเหลว



รูปที่ 2.11 Temperature profile across a casting freezing in a mould, showing the effect of the addition of thermal resistances which control the rate of loss of heat.

[John Campbell, Castings : 125]

ในช่วงการแข็งตัว น้ำโลหะจะเข้าถ่ายเทออกสู่บรรยากาศรอบๆ โดยจะเกิดทั้งการถ่ายเทความร้อนระหว่างแม่พิมพ์โลหะกับบรรยากาศรอบ และการถ่ายเทความร้อน ระหว่างโลหะหลอมเหลวกับแม่พิมพ์โลหะ เกิดเป็นความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิ (Temperature Gradient) โดยเกิดในช่วงของช่องว่าง (Air gap) ระหว่างโลหะที่แข็งตัวแล้วกับน้ำโลหะ โดยเมื่อ Air gap เพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้ความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิน้ำโลหะ และอุณหภูมิโลหะที่แข็งตัวแล้วลดลง ความแตกต่างของอุณหภูมิจะหมดไปเมื่อโลหะแข็งตัวอย่างสมบูรณ์

2.5 ข้อบกพร่องในชิ้นงานหล่อโลหะผสมอะลูมิเนียม

ข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นในชิ้นงานหล่อโลหะผสมอะลูมิเนียม จะส่งผลโดยตรงต่อสมบัติทางกลของชิ้นงาน ทำให้เกิดความเสียหายในขณะใช้งานได้ หัวข้อนี้จะกล่าวถึงลักษณะการเกิดและสาเหตุของข้อบกพร่องของชิ้นงานที่เกิดขึ้นจากกระบวนการหล่อ โดยจะเน้นถึงข้อบกพร่องที่เกิด

จากกระบวนการหล่อที่พบมาก ในชิ้นงานที่ศึกษา ได้แก่ ปัญหาเกี่ยวกับรูพรุน (Porosity) รูเข็ม (Pinhole) และปัญหารั่ว (Leak)

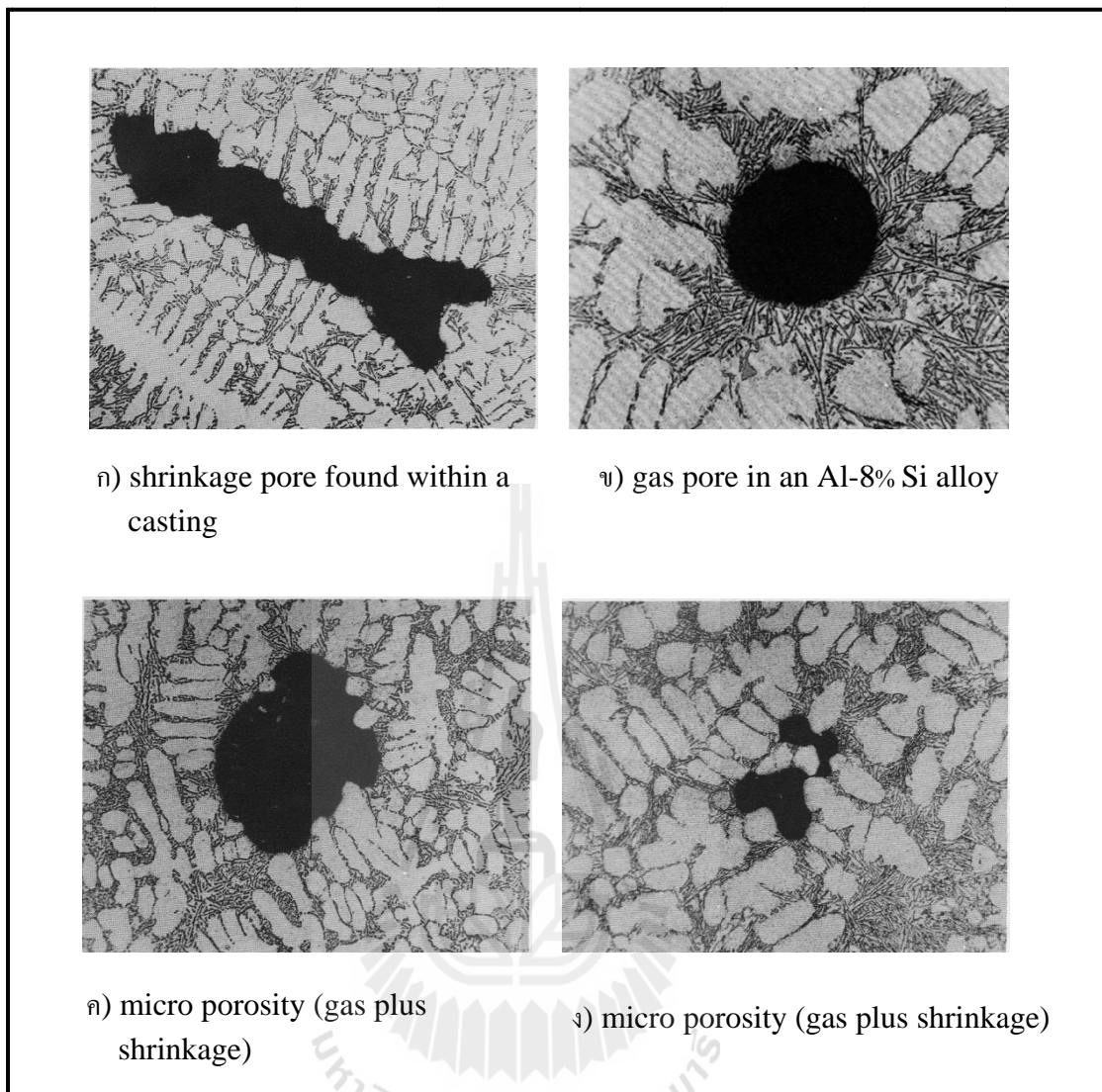
ปัญหาของรูพรุนในชิ้นงานนั้นอาจเกิดจากหลายสาเหตุ เช่น ฟองแก๊สที่หลงเหลือในน้ำโลหะเนื่องจากความสามารถในการละลายของไฮโดรเจนระหว่างการหลอมมากกว่าในสภาวะที่อะลูมิเนียมแข็งตัว ปัญหาของรูพรุนเนื่องจากการหดตัว และปัญหาฟองแก๊สโดนกักในชิ้นงานระหว่างกระบวนการเย็นตัว เป็นต้น ในที่นี้ขอกล่าวถึงปัญหาข้อบกพร่องในชิ้นงาน Pipe Inlet ที่ทำการศึกษา ดังต่อไปนี้

2.5.1 รูพรุนที่เกิดจากการหดตัว

รูพรุนที่เกิดจากการหดตัว เป็นรูพรุนที่มีลักษณะรูปร่างไม่แน่นอน (Irregular) โค้งเว้าไปตามขอบของเกรนไครสต์ หดตัวและบางครั้งอาจเกิดร่วมกับแก๊สที่เหลืคั้งอยู่ในชิ้นงาน ปรากฏให้เห็นภายในหรือที่ผิวชิ้นงาน โดยส่วนมากจะพบในบริเวณตำแหน่งที่ชิ้นงานมีความหนา โดยมีสาเหตุจากการหดตัวของโลหะผสมหลอมเหลวที่กำลังแข็งตัว ซึ่งอาจมีผลมาจากการที่โลหะอยู่ในสถานะของแข็งย่อมมีความหนาแน่นสูงกว่าในสถานะของเหลว ดังนั้นในขณะที่เกิดการแข็งตัววัสดุมักเกิดการหดตัว สำหรับอะลูมิเนียมเมื่อเปลี่ยนสถานะจากของเหลวกลายเป็นของแข็ง จะเกิดการหดตัวประมาณ 7 เปอร์เซ็นต์ (กิตติพงษ์ กิมะพงศ์ และคณะ, 2553) โดยรูพรุนจากการหดตัวนี้จะเกิดขึ้นในกระบวนการแข็งตัวของโลหะที่หดตัวขณะเปลี่ยนสถานะเป็นของแข็งและมีการซดเขยน้ำโลหะเข้าไปแทนที่ในส่วนช่องว่างที่เกิดการหดตัวนี้ได้ไม่เพียงพอ (John and Bernard, 1990) จึงมีช่องว่างเกิดขึ้นล้อมรอบเกรนไครสต์หรือเกรนแสดงในรูปที่ 2.12 ก)

2.5.2 รูพรุนที่เกิดจากแก๊ส (Gas Porosity)

ตามปกติแล้วไฮโดรเจนละลายอยู่ในอะลูมิเนียมหลอมเหลวได้มากขึ้นเมื่อน้ำโลหะมีอุณหภูมิสูงขึ้น สำหรับในกระบวนการแข็งตัวของโลหะนั้น เมื่อเริ่มมีเฟสของแข็งเกิดขึ้นไฮโดรเจนอะตอมจะถูกผลักออกมายังอันตรภาคระหว่างของแข็งและของเหลวเกิดการรวมตัวกันเป็นโมเลกุลของไฮโดรเจน จนกระทั่งกระบวนการแข็งตัวของโลหะเสร็จสิ้น รูพรุนจากแก๊สไฮโดรเจนที่มีรูปร่างค่อนข้างกลม ดังแสดงในรูปที่ 2.7ข) ส่วนรูปที่ 2.12 ก) เป็นรูพรุนที่เกิดจากการหดตัวโดยเกิดตามขอบเกรน รูปที่ 2.12 ค) เป็นรูพรุนที่เกิดจากการหดตัว ร่วมกับรูพรุนจากแก๊ส และรูปที่ 2.12 ง) เป็นรูพรุนที่เกิดจากการหดตัว ร่วมกับรูพรุนจากแก๊สขนาดเล็ก

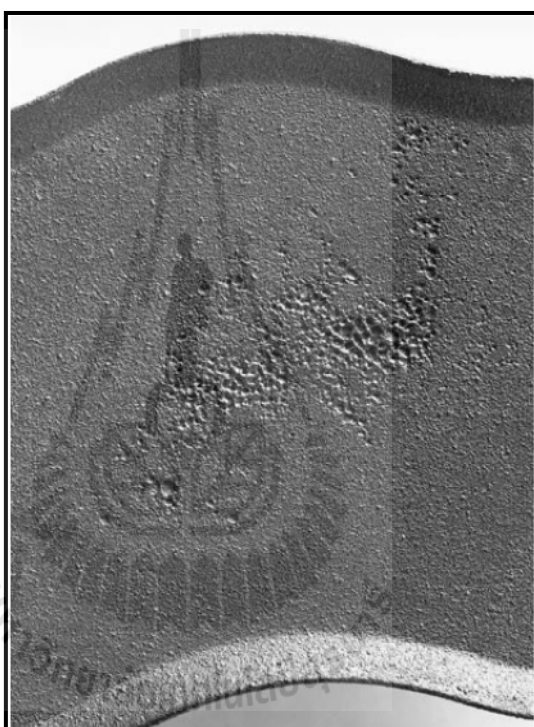


รูปที่ 2.12 แสดงลักษณะของรูพรุนที่เกิดขึ้นจากกระบวนการแข็งตัว (John and Bernard, 1990)

2.5.3 รูพรุนขนาดเล็ก (Pinhole)

เป็นรูเล็ก ๆ คล้ายรูที่เกิดจากเข็มเจาะเรียกว่ารูเข็ม (Pin hole) มีพิวด้านในเรียบ และมักเป็นรูกลม โดยจะเกิดภายในชิ้นงาน ซึ่งจะพบเห็นหลังจากกระบวนการล้างแต่งผิวชิ้นงาน โดยตำแหน่งของแก๊สขนาดเล็กที่เกิดในตัวชิ้นงาน Pipe Inlet แสดงในรูปที่ 2.13 การเกิดรูพรุนขนาดเล็กเกิดจากแก๊สไฮโดรเจนในน้ำโลหะ ไม่สามารถระบายออกได้ทัน ขณะที่โลหะผสมกำลังแข็งตัว โดยการเกิดของแก๊สไฮโดรเจนในน้ำโลหะอาจมีผลมาจาก

1. ความชื้นที่อยู่ในวัตถุดิบ หรืออุปกรณ์ที่ใช้ในกระบวนการหล่อ โดยไล่ความชื้นออกไปไม่หมด เมื่อน้ำโลหะอะลูมิเนียมหลอมเหลวที่อุณหภูมิสูง เกิดการละลายของไฮโดรเจนอะตอมเข้าสู่โลหะอะลูมิเนียมหลอมเหลว
2. อุณหภูมิของน้ำโลหะสูงกว่าอุณหภูมิจุดหลอมเหลวมาก ทำให้เกิดการละลายของไฮโดรเจนอะตอมได้ดี
3. การออกแบบรูระบายอากาศภายในแม่พิมพ์โลหะไม่ดีพอ ทำให้เกิดแก๊สเหลือตกค้างในชิ้นงาน



รูปที่ 2.13 ลักษณะของรูพรุนขนาดเล็ก

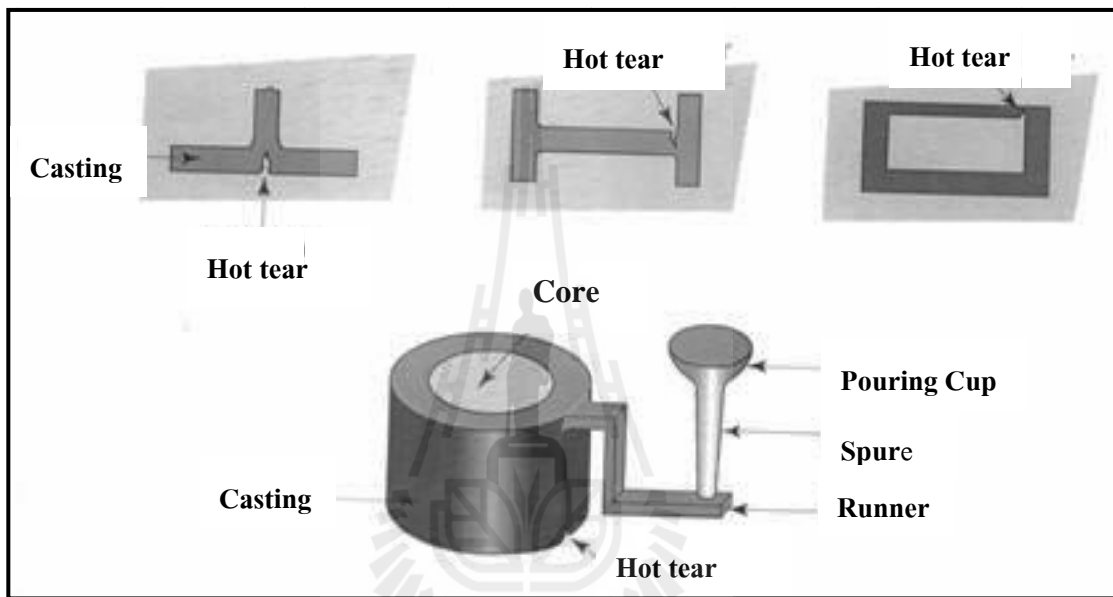
(http://ikominerals.com/uploads/media/12_Pinholes.pdf)

2.5.4 การแตกขณะร้อน (Hot Tear)

ข้อบกพร่องที่เกิดการแตกขณะร้อน มีลักษณะเป็นรอยแตกมีรูปร่างที่ไม่สม่ำเสมอ โดยเกิดขึ้นขณะที่น้ำโลหะไหลเข้าแบบแล้วอยู่ในช่วงสุดท้ายก่อนการแข็งตัว และเกิดการแตกขณะที่โลหะกำลังแข็งตัว ซึ่งมีสาเหตุมาจาก

1. เกิดจากการหดตัวในช่วงกระบวนการแข็งตัวของน้ำโลหะ ทำให้ความเค้นภายในเพิ่มขึ้นในขณะแข็งตัว

2. ชิ้นงานมีรูปร่างที่สลับซับซ้อน ซึ่งทำให้การเย็นตัวในแต่ละตำแหน่งไม่เท่ากัน ในกระบวนการหล่อโลหะผสมอะลูมิเนียม นั้น การออกแบบแม่พิมพ์โลหะสำหรับการหล่อนั้นมีความสำคัญมาก เนื่องจากแม่พิมพ์โลหะเป็นปัจจัยหลักที่ทำให้กระบวนการหล่อโลหะมีคุณภาพ ปราศจากข้อบกพร่อง ซึ่งบทบาทของการออกแบบแม่พิมพ์โลหะนั้นจะส่งผลต่อการไหลของน้ำโลหะหลอมเหลว การถ่ายเทความร้อน การแข็งตัวของน้ำโลหะ เป็นต้น



รูป 2.14 ข้อบกพร่องของชิ้นงานที่เกิดการแตกขณะร้อน

[Szukaj w Bazie Wiedzy,]

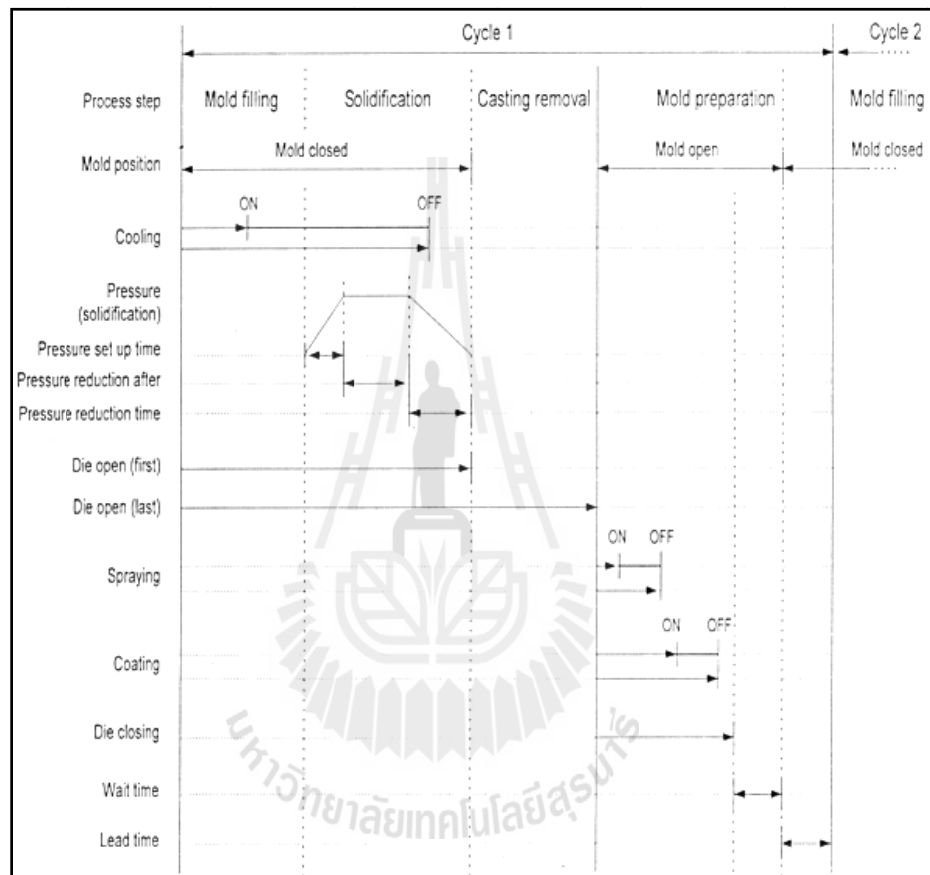
2.6 โปรแกรมช่วยในการจำลองงานหล่อ

ProCAST® V.2009 คือ โปรแกรมสำหรับใช้จำลองกรรมวิธีการหล่อขึ้นรูปอะลูมิเนียม ซึ่งถูกนำมาใช้ในการศึกษากระบวนการหล่อมี cycle ของการทำงานเป็น 1 cycle ต่อการผลิตชิ้นงาน 1 shot โดย cycle นั้นเริ่มตั้งแต่น้ำอะลูมิเนียมอยู่ที่ทางเข้าน้ำโลหะ และกระบอกสูบเริ่มอัดน้ำอะลูมิเนียมเหลวเข้าสู่ Cavity จนเต็ม หลังจากนั้นจะเข้าสู่การแข็งตัว (Solidification) เมื่อแข็งตัวได้ตามเวลาที่กำหนด แม่พิมพ์โลหะจะเปิดเพื่อเอาชิ้นงานหล่อออก นับเป็น 1 cycle ดังแสดงไว้ในรูปที่ 2.15

การวิเคราะห์ผลของการจำลองหลัก ๆ นั้นมีดังนี้

- การไหลของน้ำอะลูมิเนียมหลอมเหลวในแม่พิมพ์โลหะ (Filling)

- ความเร็วในการไหลของน้ำอะลูมิเนียมหลอมเหลวในแม่พิมพ์โลหะ (melt velocity)
- แรงดันของน้ำอะลูมิเนียมหลอมเหลวในแม่พิมพ์โลหะ (melt pressure)
- การแข็งตัวของน้ำอะลูมิเนียมหลอมเหลวในแม่พิมพ์โลหะ (Solidification)
- ทิศทางการไหลของน้ำอะลูมิเนียมหลอมเหลวในแม่พิมพ์โลหะ (Flow direction)
- รูพรุนที่อาจเกิดขึ้นในเนื้อชิ้นงานอะลูมิเนียมหล่อ (Porosity)



รูปที่ 2.15 Cycle ในการจำลองงานหล่อ

ในการจำลองงานหล่อขึ้นรูปนั้นผลที่ได้จะมีความเที่ยงตรงหรือถูกต้องมากน้อยแค่ไหนนั้นขึ้นอยู่กับค่าพารามิเตอร์ (Parameter) ต่าง ๆ ที่ป้อนเข้าไปในโปรแกรม ซึ่งโปรแกรมของ ProCAST® V.2009 ที่ใช้ในการศึกษานี้จะใช้หลักการการคำนวณแบบ Finite differential และใช้สูตรในการคำนวณในโปรแกรมแยกได้ดังนี้

- Continuity equation

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho U_j) = 0 \quad (2.4)$$

- Navier-Stokes equation

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho U_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho U_j U_i) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \right) + (\rho g_i + X_i + S_\mu) \quad (2.5)$$

- Energy equation

$$(\rho c_p) \frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (U_j \rho c_p T) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x_j} \right) + \mu \Phi_T + L \frac{\partial f_s}{\partial t} + S_T \quad (2.6)$$

- open surface (VOF method)

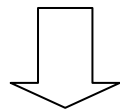
$$\frac{\partial f}{\partial t} + U_j \frac{\partial f}{\partial x_j} = 0 \quad (2.7)$$

- Newton's Law of cooling

$$\frac{q}{A} = h(T_2 - T_1) \quad (2.8)$$

- Radiation Heat Transfer Coefficient

$$\frac{q}{A} = \epsilon \sigma (T_{Surface}^4 - T_{Surrounding}^4) = h_{radiation} (T_{Surface} - T_{Surrounding}) \quad (2.9)$$



$$x^4 - y^4 = (x + y)(x - y)(x^2 + y^2)$$

$$h_{radiation} \equiv \epsilon \sigma (T_{Surface} + T_{Surrounding})(T_{Surface}^2 + T_{Surroundings}^2) \quad (2.10)$$

- Resistances in Series

$$R_{total} = \sum_{j=1}^m R_j \quad (2.11)$$

$$R_{total} = R_{casting} + R_{boundary} + R_{mold}$$

$$R_{total} = \frac{d}{\lambda_{casting} A} + \frac{1}{hA} + \frac{d}{\lambda_{mold} A} \quad (2.12)$$

ขั้นตอนการจำลองงานหล่อเริ่มต้นกระบวนการโดยการสร้างแบบจำลองชิ้นงาน 3 มิติ (CAD) หลังจากนั้นทำการส่งไฟล์ของแบบที่เขียนโดย CAD เข้าสู่กระบวนการจำลองซึ่งเป็นโปรแกรม ProCAST® V.2009 (CAE) แล้วทำการป้อนค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ตามกระบวนการโดยเริ่มจากการเขียนตำแหน่งทางเข้าของน้ำโลหะที่เข้าแม่พิมพ์โลหะ ตำแหน่งระบายอากาศ เสร็จแล้วจะเข้าสู่การแบ่งเมช (Enmeshment) จะมีลักษณะเป็นที่เหลี่ยมลูกบาศก์ การคำนวณค่าต่าง ๆ จะอยู่ใน

ขอบเขตของลูกบาศก์ต่อเนื่องกันไป ดังนั้นการแบ่งเมชนี้จะต้องไม่หยابจนเกินไปทำให้ค่าจากการคำนวณคาดเคลื่อนกว่าความเป็นจริงมาก แต่ก็ไม่ควรละเอียดจนเกินไป เพราะถึงจะได้ผลจากการคำนวณตรงกับความเป็นจริงมาก แต่ก็เสียเวลาสำหรับการคำนวณมากเช่นเดียวกัน

เมื่อแบ่งเมชเรียบร้อยแล้ว ขั้นตอนต่อไปคือการป้อนพารามิเตอร์เข้าสู่โปรแกรม ซึ่งพารามิเตอร์นี้จะต้องเป็นค่าพารามิเตอร์จริงที่ใช้ในการทำงานจริง เพื่อความถูกต้องในการคำนวณของโปรแกรม ค่าพารามิเตอร์โดยหลัก ๆ ที่ต้องป้อนมีดังนี้

- Machine Parameter (การกำหนดทิศทางการไหลของน้ำโลหะ ด้านล่าง,บน)
- Material (ชนิดและคุณสมบัติของวัสดุชิ้นงาน, แม่พิมพ์โลหะ, ทรายใส่แบบ)
- Heat Transfer
- เวลาการเปิด-ปิดแม่พิมพ์โลหะ (Cycle Time)

ในโปรแกรม ProCAST® V.2009 นี้จะทำการคำนวณตามขอบเขตของชิ้นส่วนเล็ก ๆ ที่ได้จากการแบ่งเมช (Enmeshment) แต่ละเมชนี้จะมีรูปร่างเป็นสี่เหลี่ยมลูกบาศก์ โปรแกรมจะคำนวณแต่ละเมชต่อเนื่องกันไปเรื่อย ๆ ตามการคำนวณแบบ Finite differential ไม่ว่าจะเป็นการไหลของน้ำอะลูมิเนียม (Filling) การแข็งตัวของอะลูมิเนียม (Solidification) อุณหภูมิ (Temperature) เป็นต้น การที่โปรแกรมจะคำนวณได้ถูกต้องนั้นขึ้นอยู่กับค่าพารามิเตอร์ หรือตัวแปรต่าง ๆ ที่ผู้ทำการจำลองกำหนดในโปรแกรม ในอุตสาหกรรมสามารถทำการศึกษาตามขั้นตอนดังนี้ คือ วิเคราะห์ปัญหาเบื้องต้นกับชิ้นงานจริง ได้ผลของปัญหาที่เกิดขึ้น พบว่าชิ้นงานมีโพรงอากาศมาก (Porosity) มีรอยยวบหรือหดตัว (เนื้อไม่เต็ม) มีรอยการไหลของน้ำอะลูมิเนียม (Flow line) ซึ่งเป็นปัญหาที่ลูกค้าไม่ยอมรับ สาเหตุหลัก ๆ คือการไหลที่ไม่สมดุล มีการไหลแบบปั่นป่วน (Turbulent) ซึ่งจะหมุนวนเอาอากาศและแก๊สไว้ในเนื้อชิ้นงานนั่นเอง การจำลองงานเหล่านี้จะช่วยลดเวลาในการแก้ไขปัญหาในกระบวนการผลิต และสามารถใช่วิธีที่เหมาะสมในการแก้ไขปัญหาได้

2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

กระบวนการแข็งตัวของน้ำโลหะเป็นตัวกำหนดคุณภาพของชิ้นงานหล่อ เพื่อให้ได้คุณภาพตามต้องการ ลดการแยกตัว (Micro segregation) และการเกิดข้อบกพร่องในชิ้นงาน P.D. Lee ได้สรุปปรากฏการณ์สำคัญที่ทำให้เกิดรูพรุนได้ ดังนี้

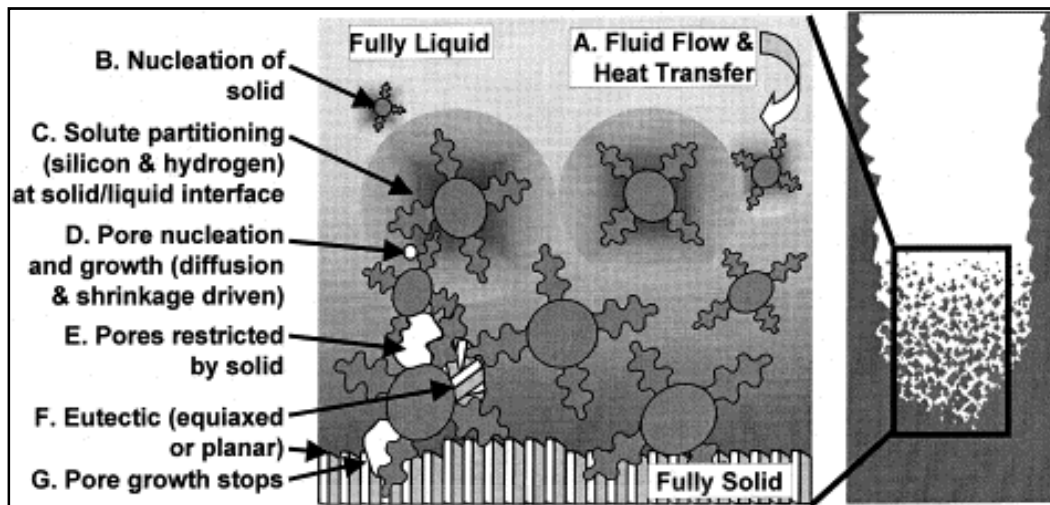
- 1) การไหลของของไหล และการเคลื่อนย้ายมวลในของเหลว (Fluid Flow and mass transport in bubble)
- 2) การถ่ายเทความร้อนและกระบวนการแข็งตัว

- 3) การเกิดและโตของเกรน รวมถึงปฏิสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและความเข้มข้นของสารละลาย
- 4) การไหลที่ถูกรบกวนของของเหลวที่อยู่บริเวณระหว่างแขนเดนไดรต์ส่งผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงความดันบริเวณดังกล่าว
- 5) การแยกตัวของ Solute อะตอมในระดับจุลภาค และเกิดการละลายของไฮโดรเจน
- 6) การเกิดและโตของรูพรุน
- 7) การชนและการรวมตัวของรูพรุนขนาดเล็กระหว่างการโตของเกรน ซึ่งทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงที่พลังงานระหว่างพื้นผิว (Interface energy) และรัศมีความโค้งของรูพรุน (Imposing curvature)

สำหรับข้อบกพร่องประเภทรูพรุนนั้น สามารถแบ่งแยกออกตามขนาดได้เป็นรูพรุนระดับมหภาค (Macro porosity) และรูพรุนระดับจุลภาค (Micro porosity) และหากแยกตามสาเหตุที่เกิดขึ้นจะสามารถแบ่งออกเป็น รูพรุนที่เกิดจากการหดตัว (Shrinkage porosity) และ รูพรุนที่เกิดจากแก๊ส (Gas porosity)

ในน้ำโลหะหลอมเหลวที่กำลังแข็งตัวมีการเกิดปฏิกิริยาต่างๆ ดังรูปที่ 2.16 ดังนี้

- A.) การไหลของโลหะหลอมเหลวและการถ่ายเทความร้อน (Fluid flow & Heat transfer)
- B.) การเกิดนิวเคลียสของของแข็ง (Nucleation of solid)
- C.) การละลายของธาตุ ต่างๆ เช่น ซิลิกอน, ไฮโดรเจน ที่ระหว่างของแข็งและของเหลว (Solute partitioning silicon & hydrogen at solid/liquid interface)
- D.) การเกิดช่องว่างและขยายตัว เกิดเป็นการหดตัว (Pore nucleation and growth [diffusion & shrinkage driven])
- E.) ช่องว่างถูกจำกัดด้วยของแข็ง (Pores restricted by solid)
- F.) การเกิดยูเทคติกเฟส (Eutectic)
- G.) รูพรุนที่หยุดการโต (Pore growth stops)



รูป 2.16 Schematic diagram of the different physical processes involved in the formation of micro porosity. [P.D.Lee]

P.D. Lee และคณะ ได้ศึกษาอิทธิพลของระยะเวลาการแข็งตัว ณ ตำแหน่งที่สนใจ (Local solidification time) ปริมาณไฮโดรเจน (Hydrogen content) แรงดันสถิตยทางโลหวิทยา (Local metallostatic pressure) และองค์ประกอบทางเคมีของโลหะผสม (Alloy composition) ต่อการทำนายโครงสร้างของเกรนและขนาดของความยาวสูงสุด L_{max} (Grain structure and maximum pore length, L_{max}) ด้วยวิธี Multi scale modeling สำหรับชิ้นงานโลหะผสมอะลูมิเนียม A319

จากผลการศึกษา โดยมีสมมติฐานที่ว่าหากโครงสร้างของเกรนเป็น equiaxed และไม่เกิดการแยกตัวระดับมหภาค (No significant macro segregation) เมื่อทราบตัวแปร

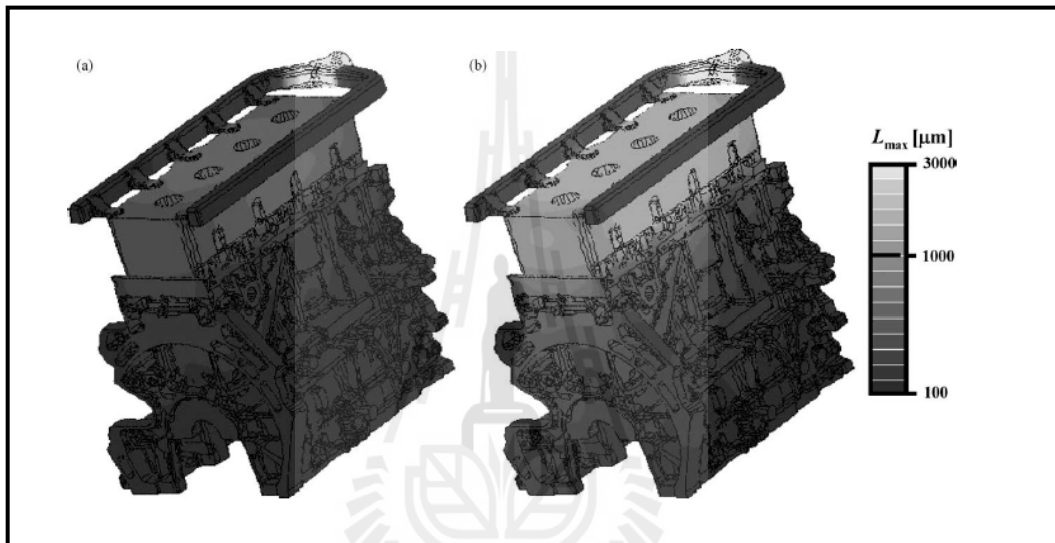
- Local solidification time , t_s
- ความเข้มข้นเริ่มต้นของ Solute อะตอมของทองแดง C_{Cu} และ ไฮโดรเจน C_H
- ความดัน P
- การกระจายตัวของนิวคลีไอของเกรน และรูพรุน

จะสามารถทำนายค่าความยาวสูงสุดของรูพรุน (Maximum pore length, L_{max}) จากสมการ

$$\ln(L_{max}) = -c_1 + (c_2 \ln(t_s)) + (c_3 wt.\% Cu) + (c_4 P^{-1}) + (c_5 \ln(H_0)) [\mu m] \quad (2.13)$$

โดยค่า $c_1 - c_5$ คือ regression determined coefficients โดยใช้ทำนายโลหะผสมที่มีปริมาณทองแดง 0 และ 3 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และเมื่อ $P \gg 0.01$ โดยพบว่า เมื่อทำการเพิ่ม t_s หรือ C_H จะทำให้ L_{max} เพิ่มขึ้นตามไปด้วย

ผลการทำนายในชิ้นงาน Wedge ดังกล่าว ถูกนำมาใช้ในการทำนาย L_{max} ของชิ้นงานหล่อ Engine Block Ford V231 ด้วย Cosmorth Pressure โดยผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 2.17 ซึ่งสอดคล้องกับผลการตรวจสอบในกระบวนการหล่อจริงโดยพบว่าเมื่อปริมาณไฮโดรเจนในน้ำโลหะเพิ่มขึ้น จาก 0.1ml/100g เป็น 0.2ml/100g จะให้ความยาวสูงสุดของรูพรุน, L_{max} เพิ่มมากขึ้นด้วย

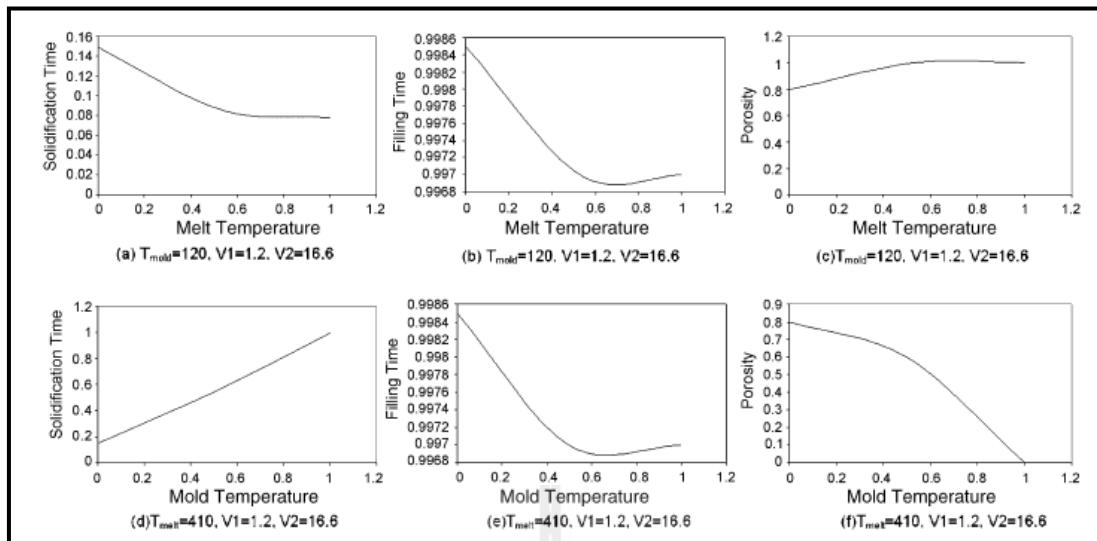


รูป 2.17 Prediction of L_{max} obtained via CA-based empirical functions, using the solidification times calculated by ProCAST, for the V2.31 engine block a) at low (0.1 ml/100 g) and b) high (0.2 ml/100 g) initial hydrogen contents.

ผลการศึกษาของ Jitender K. Rai และคณะได้นำโปรแกรมจำลองงานหล่อขึ้นรูปมาปรับใช้ในการเลือกพารามิเตอร์สำหรับกระบวนการหล่อขึ้นรูปโดยใช้แรงดันสูง (High Pressure Die Casting, HPDC) โดยใช้ค่าพารามิเตอร์ ดังนี้

- อุณหภูมิน้ำโลหะขาเข้า (Inlet melt temperature)
- อุณหภูมิเริ่มต้นของแม่พิมพ์โลหะ (Mold initial temperature)

โดยพบว่าค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวส่งผลกระทบต่อปัจจัยที่มีผลต่อกำลังการผลิตคือเวลาที่ใช้ในการเติมเต็มแม่พิมพ์โลหะ (Filling time) และระยะเวลาในการแข็งตัว (Solidification time) อีกทั้งยังส่งผลกระทบต่อถึงคุณภาพของชิ้นงานหล่อ ซึ่งอาจพิจารณาจากการเกิดรูพรุน ดังแสดงในรูปที่ 2.18



รูป 2.18 Characteristics of HPDC process parameters w.r.t. T_{melt} and T_{mold}

เมื่อเพิ่มอุณหภูมิของน้ำโลหะทำให้ระยะเวลาในการเติมเต็มแม่พิมพ์โลหะลดลง (Filling time) ซึ่งอาจก่อให้เกิดปัญหาตามมา เช่น การพุ่งของน้ำโลหะ (Jetting) การกระจาย (Splashing) หรือการที่อากาศหรือแก๊สถูกกักไว้ในน้ำโลหะ (Air entrapment) เนื่องจากค่าความหนืดของน้ำโลหะที่ลดลง เมื่อเพิ่มอุณหภูมิน้ำโลหะ ส่วนการเพิ่มอุณหภูมิแม่พิมพ์โลหะ ทำให้ลดการสูญเสียความร้อน (Heat loss) และความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิน้ำโลหะในขั้นตอนการเติมน้ำโลหะ ซึ่งจะทำให้คุณภาพชิ้นงานเพิ่มขึ้น แต่อย่างไรก็ดีจะเป็นระยะเวลาในการแข็งตัว และทำให้อัตราการผลิตลดลง

จะเห็นได้ว่าการนำโปรแกรมจำลองงานหล่อขึ้นรูปมาใช้ในการทำนายพฤติกรรมการหล่อโลหะนั้นเป็นประโยชน์ สามารถลดขั้นตอนในกระบวนการทดลอง และหาเงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุดในกระบวนการผลิตได้

ดังนั้นในงานวิจัยนี้ จึงนำโปรแกรมจำลองงานหล่อมาใช้เพื่อหาแนวทางการแก้ไขปัญหการเกิดข้อบกพร่องในกระบวนการผลิตชิ้นส่วน Pipe Inlet ประเภทปัญหาการรั่วบริเวณใต้รูเกลียว และใช้ศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิแม่พิมพ์ อุณหภูมิการเทหล่อ และขนาดทางเดินน้ำโลหะต่อการเกิดข้อบกพร่อง

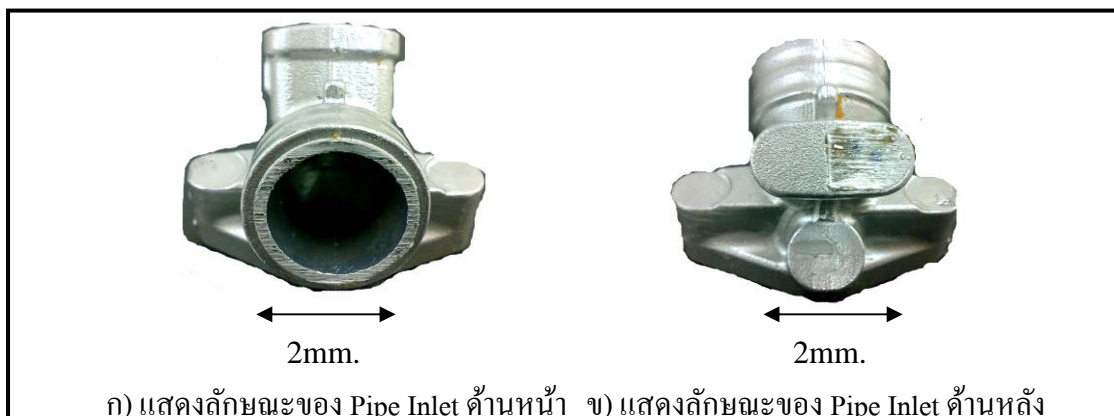
บทที่ 3

วัสดุและวิธีการทดลอง

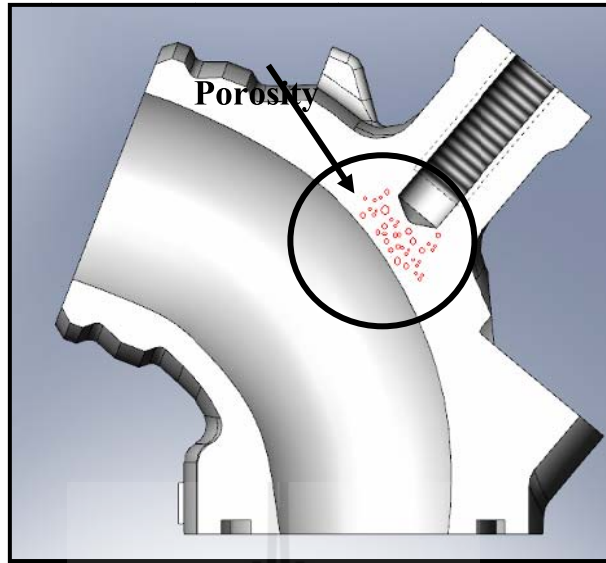
การวิจัยนี้เป็นการศึกษาถึงสาเหตุการเกิดข้อบกพร่องและหาแนวทางป้องกันการเกิดข้อบกพร่องในชิ้นส่วน Pipe Inlet ซึ่งมีลักษณะดังที่ได้แสดงในรูปที่ 3.1 เป็นส่วนประกอบในคาร์บูเรเตอร์ สำหรับรถจักรยานยนต์ ซึ่งเป็นชิ้นส่วนที่ทำหน้าที่เป็นตัวควบคุมปริมาณอากาศก่อนเข้าสู่ห้องเผาไหม้ในเครื่องยนต์ โดยภายหลังการผลิตตรวจพบข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นหลายลักษณะ คือ รูพรุนใต้รูเจาะเกลียว โพรงแก๊สขนาดเล็กภายในชิ้นงาน รูพรุนจากทรายที่ผิวท่อด้านในและในชิ้นงาน และการแตกขณะร้อน (Hot Tear) โดยในการวิจัยนี้จะทำการศึกษาข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นบริเวณใต้รูเจาะเกลียว แสดงในภาพตัดขวางด้านข้างดังรูปที่ 3.2 โดยทำการศึกษาด้วยการวิเคราะห์ทางโลหวิทยา และการจำลองงานหล่อ ด้วยซอฟต์แวร์ (ProCAST® V.2009) ซึ่งมีวิธีการดำเนินการวิจัยประกอบไปด้วย 4 ขั้นตอนหลัก ดังนี้

- ขั้นตอนที่ 1 การศึกษากระบวนการหล่อขึ้นรูปแบบแรงดันต่ำ
- ขั้นตอนที่ 2 การวิเคราะห์ข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นในชิ้นงานหล่อ Pipe inlet
- ขั้นตอนที่ 3 ศึกษาแนวทางการแก้ไขแม่พิมพ์โดยใช้ซอฟต์แวร์จำลองงานหล่อ
- ขั้นตอนที่ 4 การทดสอบและเปรียบเทียบผลการหล่อชิ้นงาน Pipe inlet ก่อนและหลังทำการแก้ไขแม่พิมพ์

โดยในส่วนของรายละเอียดของแต่ละขั้นตอนจะแสดงในหัวข้อที่ 3.1-3.4 ดังต่อไปนี้



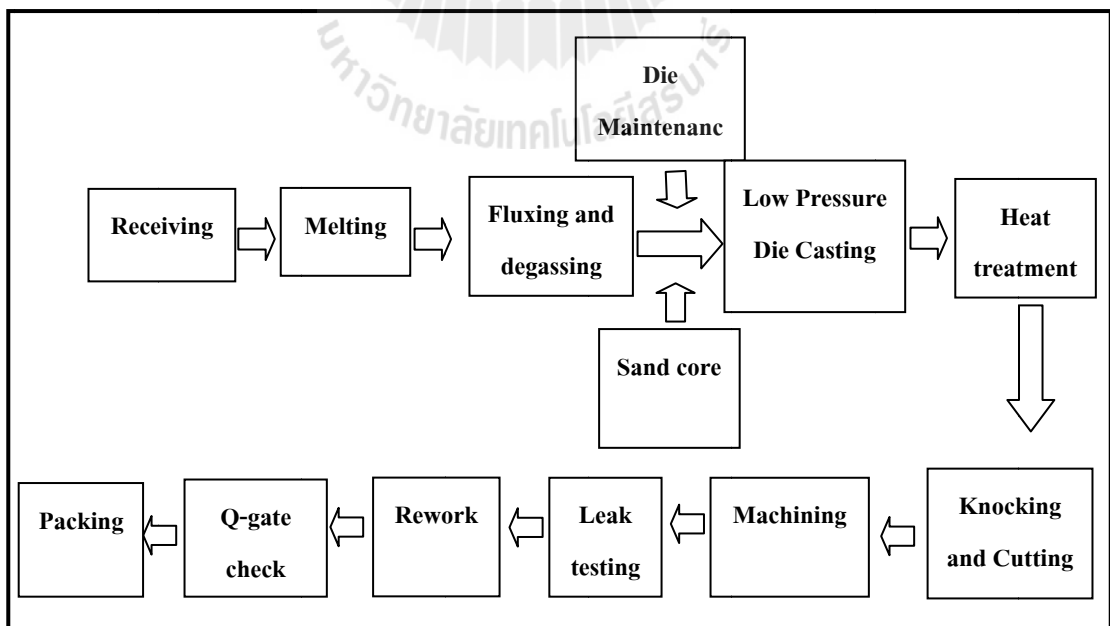
รูปที่ 3.1 แสดงรูปชิ้นงาน Pipe inlet



รูปที่ 3.2 แสดงลักษณะข้อบกพร่องบริเวณใต้รูเจาะเกลียวของชิ้นงาน Pipe Inlet (ภาพตัดขวางด้านข้าง)

3.1 การศึกษากระบวนการหล่อขึ้นรูปแบบแรงดันต่ำ

สำหรับกระบวนการผลิตชิ้นส่วน Pipe inlet (KVBM) จะมีขั้นตอน เริ่มจากการรับวัตถุดิบ เข้ามาจนกระทั่งผลิตชิ้นงานเสร็จสมบูรณ์ ดังแสดงในรูปที่ 3.3 โดยมีรายละเอียดของแต่ละขั้นตอน ดังนี้



รูปที่ 3.3 ขั้นตอนการผลิตชิ้นงาน Pipe Inlet

3.1.1 การตรวจรับวัตถุดิบ (Receiving)

เป็นขั้นตอนแรก ก่อนเริ่มกระบวนการผลิตชิ้นงาน โดยทำการตรวจสอบวัตถุดิบ และวัสดุอุปกรณ์ต่างๆ ที่ใช้ในกระบวนการผลิตให้เป็นไปตามมาตรฐาน สำหรับวัตถุดิบ (Ingot) ที่ใช้ในกระบวนการผลิตนั้น เป็นโลหะผสมอะลูมิเนียมเกรด AC2B และมีการเพิ่มธาตุควบคุมพิเศษ เป็น HS1-SV ซึ่งมีส่วนผสมทางเคมีดังแสดงในตารางที่ 3.1 โดยในขั้นตอนการตรวจรับ จะนำวัตถุดิบนำมาตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมีด้วยเครื่องวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมี (Spectrometer) ซึ่งจะถูกลงความถี่ให้อยู่ในค่ามาตรฐานที่กำหนดดังแสดงในตารางที่ 3.1

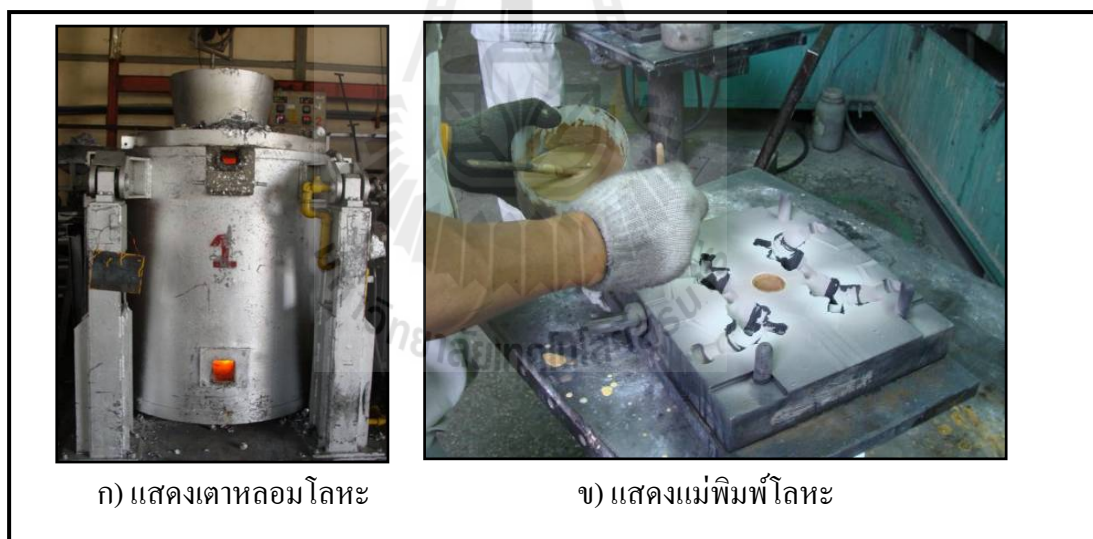
ตารางที่ 3.1 แสดงองค์ประกอบทางเคมีโลหะผสมอะลูมิเนียม

ธาตุผสม	ร้อยละโดยน้ำหนัก ตามมาตรฐาน	ร้อยละโดยน้ำหนัก ที่ตรวจสอบได้
Cu	2.5-4.0	3.19
Zn	0.10 max.	0.06
Ni	0.10 max.	0.08
Sn	0.05 max.	0.02
Bi	0.005 max.	0.001
Si	5.0-8.0	7.21
Fe	0.35 max.	0.30
Ti	0.10 max.	0.03
Cr	0.10 max.	0.03
P	0.05 max.	0.01
Mg	0.30 max.	0.16
Mn	0.10 max.	0.08
Pb	0.05 max.	0.03
Ca	0.05 max.	0.02

3.1.2 กระบวนการหลอม (Melting)

ในขั้นตอนของการศึกษากระบวนการผลิตชิ้นส่วน Pipe inlet ในสถานประกอบการ โดยได้รับความอนุเคราะห์จาก บริษัทไดซิน จำกัด ซึ่งเป็นบริษัทผลิตชิ้นส่วนประกอบยานยนต์ สำหรับในกระบวนการผลิตชิ้นส่วน Pipe inlet นั้น จะใช้กระบวนการหล่อแบบแรงดันต่ำโดยใช้แม่พิมพ์โลหะ (Low Pressure Die Casting) และใช้แก๊สเป็นเชื้อเพลิง โดยเตาหลอมโลหะที่ใช้ แสดงในรูปที่ 3.4 ก) และลักษณะแม่พิมพ์โลหะที่ใช้ ดังแสดงในรูปที่ 3.4 ข)

ในกระบวนการหลอมโลหะผสมอะลูมิเนียมแต่ละครั้งจะใช้โลหะผสมอะลูมิเนียม ปริมาณ 540 –580 กิโลกรัม ประกอบไปด้วยแท่งโลหะผสมอะลูมิเนียม (Ingot) เกรด AC2B ที่ผลิตเพื่อการค้า ดังแสดงในรูป 3.5 a) และชิ้นงานเสีย (Scrap) ซึ่งได้ตรวจพบว่ามีข้อบกพร่องและไม่ผ่านการตรวจสอบคุณภาพกระบวนการผลิต ดังแสดงในรูป 3.5 ข) โดยใช้วัสดุทั้งสองร่วมกัน ในสัดส่วน 1:1 ซึ่งจะทำให้การควบคุมน้ำโลหะอะลูมิเนียมหลอมเหลวภายในเตาที่อุณหภูมิ 780 ± 20 องศาเซลเซียส



รูปที่ 3.4 แสดงลักษณะของเตาหลอมโลหะ และแม่พิมพ์โลหะที่ใช้ในกระบวนการผลิตชิ้นส่วน Pipe inlet



ก) แท่งโลหะผสมอะลูมิเนียมเกรด AC2B



ข) ชั้นงาน Pipe inlet ที่มีข้อบกพร่อง

รูปที่ 3.5 แสดงลักษณะวัสดุที่ใช้ในกระบวนการผลิตชิ้นส่วน Pipe inlet



รูปที่ 3.6 ขั้นตอนการเคลื่อนย้ายน้ำโลหะหลอมเหลว

3.1.3 การเติมฟลักซ์และการกำจัดแก๊สไฮโดรเจน (Fluxing and Hydrogen Degassing)

ทำความสะอาดน้ำโลหะโดยใช้ฟลักซ์ทำความสะอาดน้ำโลหะ (Flux No. 184P6) ที่อุณหภูมิประมาณ 750 องศาเซลเซียส ซึ่งใช้ปริมาณฟลักซ์ 400 กรัมต่อน้ำโลหะอะลูมิเนียม 250 – 280 กิโลกรัม โดยจะโรยผงฟลักซ์ลงบริเวณที่ผิวด้านบนของน้ำโลหะอะลูมิเนียมหลอมเหลว เพื่อให้เกิดการจับตัวกันเป็นก้อนของสิ่งสกปรกที่ผิวหน้าโลหะ ซึ่งจะเรียกว่า Aluminum dross จากนั้นจะตัก Aluminum dross ออกก่อนที่จะทำกระบวนการกำจัดแก๊สไฮโดรเจน

โดยขั้นตอนการกำจัดแก๊สไฮโดรเจนในน้ำโลหะผสมอะลูมิเนียมหลอมเหลว (Hydrogen degassing) ด้วยการใส่แก๊สอาร์กอน (Ar_2) ซึ่งมีความบริสุทธิ์ 99.99 เปอร์เซ็นต์ ป้อนลงใต้ผิวน้ำโลหะอะลูมิเนียมหลอมเหลว ทำให้เกิดฟองแก๊สอาร์กอนขนาดเล็กกระจายอยู่ในน้ำโลหะ เพื่อให้เกิดการแพร่ของไฮโดรเจนอะตอมเข้าสู่ฟองของแก๊สอาร์กอนและลอยขึ้นสู่ด้านบนผิวน้ำโลหะหลอมเหลว โดยใช้อัตราการไหลของแก๊สอาร์กอน 15 – 20 ลิตรต่อนาที และใช้เวลา 20 นาที

ภายหลังจากกระบวนการกำจัดแก๊สไฮโดรเจน จะทำการตรวจสอบปริมาณของแก๊สไฮโดรเจนที่เหลือค้างอยู่ในน้ำโลหะหลอมเหลวโดยใช้เครื่องทดสอบสุญญากาศ (Vacuum test) เพื่อตรวจสอบปริมาณรูพรุนที่สามารถยอมรับได้ตามที่มาตรฐานกำหนด ก่อนเริ่มการหล่อขึ้นรูปชิ้นงาน



รูปที่ 3.7 แสดงขั้นตอนการทำความสะอาดอะลูมิเนียม



รูปที่ 3.8 แสดงขั้นตอนการกำจัดก๊าซไฮโดรเจน



รูปที่ 3.9 เครื่องทดสอบสุญญากาศ (Vacuum test) สำหรับตรวจสอบปริมาณรูพรุน

3.1.4 การเตรียมพร้อมแม่พิมพ์ (Die Preparation / Maintenance)

การเตรียมพร้อมแม่พิมพ์โลหะด้วยการเคลือบผิวด้วยน้ำยาเคลือบแม่พิมพ์โลหะ (Coating die No. HFP 001, HFP 8321 และ TV-11, LNO) เพื่อป้องกันการสึกหรอของแม่พิมพ์และควบคุมสภาพผิวของชิ้นงานภายหลังกระบวนการผลิตให้มีผิวสวยงามตามข้อกำหนดของลูกค้า และเพื่อให้การถ่ายเทความร้อนในแม่พิมพ์โลหะมีประสิทธิภาพ โดยกำหนดระยะเวลาการเคลือบผิวแม่พิมพ์โลหะ ทุก ๆ 8 ชั่วโมง



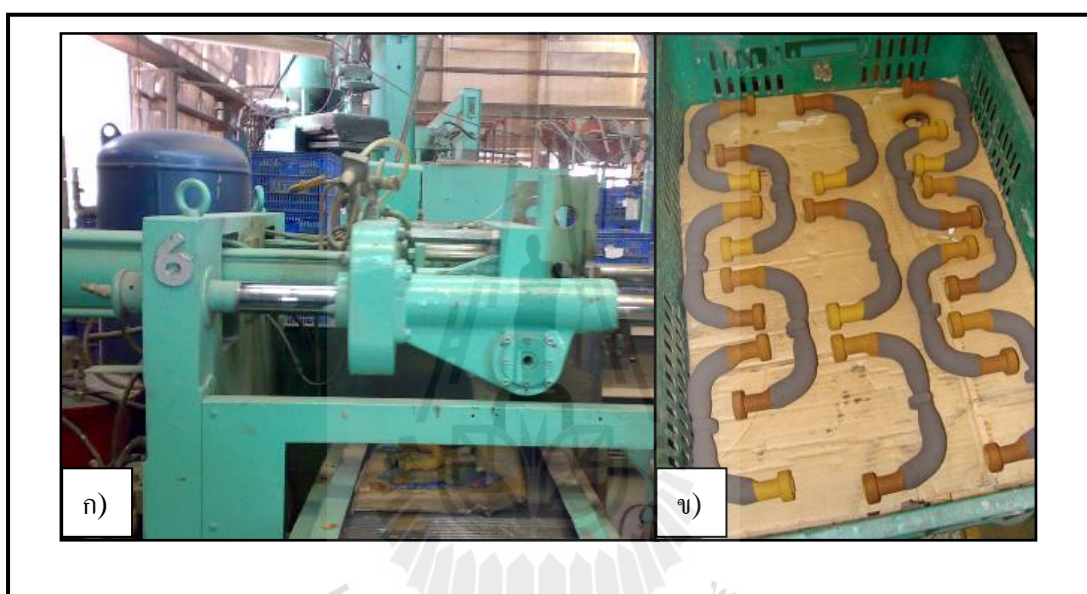
รูปที่ 3.10 กระบวนการเคลือบผิวแม่พิมพ์โลหะ



รูปที่ 3.11 การติดตั้งแม่พิมพ์โลหะก่อนกระบวนการผลิต

3.1.5 การเตรียมทรายใส่แบบ (Sand Core Preparation)

สำหรับการผลิตชิ้นงาน Pipe inlet นั้น จำเป็นต้องมีทรายใส่แบบ เนื่องจากชิ้นงานมีช่องว่างภายใน โดยกระบวนการผลิตใส่แบบหล่อด้วยทรายซิลิกอนั้นเริ่มจากการให้ความร้อนแก่แม่พิมพ์โลหะทรายใส่แบบ (Core sand die) เพื่อใช้เป็นใส่แบบในกระบวนการผลิตชิ้นงาน โดยจะควบคุมอุณหภูมิแม่พิมพ์โลหะที่ 150 - 350 องศาเซลเซียส โดยเวลาที่ทรายอยู่ในแม่พิมพ์โลหะ 25 - 30 วินาที เพื่อให้ทรายแห้งปราศจากความชื้น



รูปที่ 3.12 ก) แสดงเครื่องผลิตทรายใส่แบบ ข) ทรายใส่แบบก่อนนำไปใช้งาน

3.1.6 กระบวนการหล่อแบบแรงดันต่ำ (Low-Pressure Die Casting Process)

กระบวนการผลิตชิ้นงานหล่อโลหะอะลูมิเนียมผสม โดยกรรมวิธีการหล่อด้วยแรงดันต่ำ (Low Pressure Die Casting) ในกระบวนการหล่อนี้จะทำการควบคุมส่วนผสมของชิ้นงานตามมาตรฐาน HS1-SV ตรวจสอบความเรียบร้อยและตำแหน่งของแม่พิมพ์และทรายใส่แบบก่อนหล่อขึ้นรูป

โดยจะควบคุมน้ำโลหะหลอมเหลวที่อุณหภูมิ 720 - 740 องศาเซลเซียส และควบคุมอุณหภูมิแม่พิมพ์โลหะในกระบวนการผลิตที่ 350 - 480 องศาเซลเซียส โดยใช้แรงดันลมแบ่งเป็น 3 ขั้นตอน คือ

ขั้นตอน	แรงดันลมตามมาตรฐาน กระบวนการผลิต (kPa)	แรงดันลมที่ใช้ ในกระบวนการผลิต (kPa)
First step	70 -150	70
Second step	70 -150	110
Third step	70 -150	140

เวลาที่ชิ้นงานอยู่ในแม่พิมพ์โลหะประมาณ 40 – 60 วินาที หลังจากนั้น จะนำชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์ รูปที่ 3.13 แสดงขั้นตอนการหล่อขึ้นรูปแบบแรงดันต่ำ



รูปที่ 3.13 Low Pressure Die Casting Machine



รูปที่ 3.14 ใส่วางสายไฟแบบลงในแม่พิมพ์โลหะ



รูปที่ 3.15 นำชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์โลหะ



รูปที่ 3.16 ชิ้นงานภายหลังกระบวนการผลิต

3.1.7 กระบวนการอบชุบความร้อน (Heat Treatment)

กระบวนการอบชุบความร้อนชิ้นงานภายหลังกระบวนการหล่อ มีจุดประสงค์เพื่ออบในขั้นตอนการอบละลาย (Solution treatment) รวมถึงอบให้ทรายออกจากชิ้นงาน ก่อนเข้าสู่กระบวนการตัดแต่งชิ้นงาน โดยจะทำการควบคุมอุณหภูมิเตาอบที่ 500 – 510 องศาเซลเซียส โดยใช้เวลาในการอบประมาณ 4 ชั่วโมง รูปที่ 3.17 แสดงชิ้นงานสำหรับอบชุบความร้อนและเตาสำหรับอบชุบความร้อน



รูปที่ 3.17 ตะกร้าใส่ชิ้นงานสำหรับอบชุบความร้อน



รูปที่ 3.18 เตابอบชิ้นงาน

3.1.8 การตัดทางเดินน้ำโลหะ (Knocking and cutting)

ทำการเขย่าทรายให้ออกจากชิ้นงานและเข้าสู่กระบวนการตัดระบบทางเดินน้ำโลหะ เช่น Gate Runner และ Over flow ออก



รูปที่ 3.19 ขั้นตอนการตัด Gate runner และ Over flow



รูปที่ 3.20 เศษชิ้นส่วนงานเสีย สำหรับนำเข้าสู่กระบวนการหลอมใหม่

3.1.9 การกลึงผิวชิ้นงาน (Machining)

ชิ้นงานถูกนำมากลึงด้วยเครื่องกลึงชิ้นงาน เพื่อให้ได้ตามมาตรฐานที่กำหนด



รูปที่ 3.21 เครื่องกลึงชิ้นงาน (Machining)

3.1.10 การทดสอบรั่ว (Leak Testing)

ทำการทดสอบรั่วในชิ้นงานภายหลังการตัดแต่ง เพื่อตรวจสอบหาตำแหน่งที่เกิดรอยรั่ว ผิววน้ำ โดยจะใช้แรงดันลมประมาณ 0.2 MPa อัดเข้าไปในตัวชิ้นงาน โดยใช้เวลาดทดสอบ 10 – 20 วินาที ดังแสดงในรูปที่ 3.22



รูปที่ 3.22 แสดงเครื่องทดสอบรั่ว (Leak test) และการทดสอบ

3.1.11 การซ่อมแซมชิ้นงาน (Rework)

ทำการแก้ไขซ่อมแซมชิ้นงานหล่อภายหลังจากกระบวนการตัดแต่งชิ้นงาน เช่น แต่งครีบเหลือค้างจากกระบวนการตัดแต่งชิ้นงาน การแต่งผิวชิ้นงาน เป็นต้น



รูปที่ 3.23 กระบวนการ rework งานเสีย จากกระบวนการตัดแต่งชิ้นงาน

3.1.12 การตรวจสอบชิ้นงานขั้นสุดท้ายและการบรรจุ (Q-gate check and Packing)

ทำการตรวจสอบชิ้นงานในขั้นตอนสุดท้ายให้ตรงตามมาตรฐานที่ลูกค้ากำหนดก่อนทำการบรรจุชิ้นงาน ดังแสดงในรูปที่ 3.24



รูปที่ 3.24 กระบวนการบรรจุชิ้นงานลงกล่อง ก่อนส่งลูกค้า

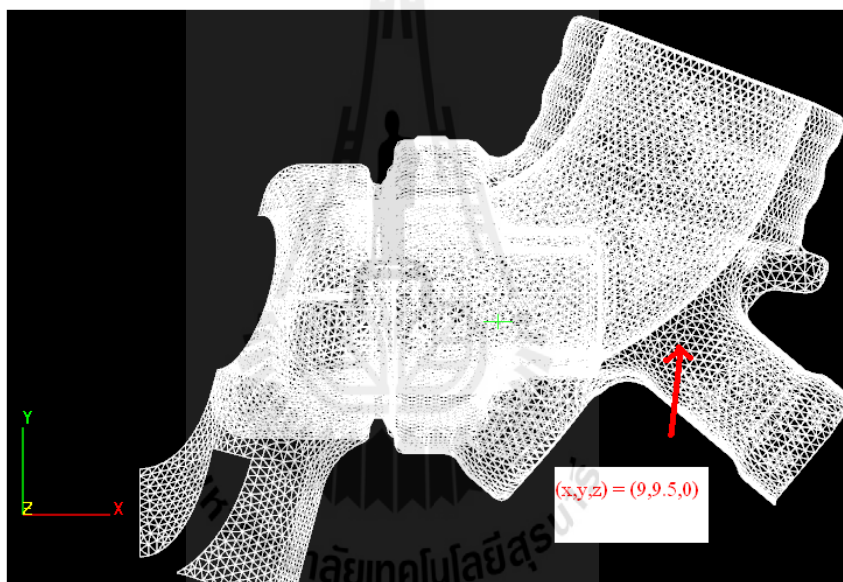
3.2 การวิเคราะห์ข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นในชิ้นงานหล่อ Pipe inlet

ทำการศึกษาและวิเคราะห์ข้อมูลข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นในชิ้นงานกรณีศึกษา คัดแยกประเภทของข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นในชิ้นงาน ตรวจสอบตำแหน่งที่เกิดของข้อบกพร่อง ปริมาณของชิ้นงานที่เกิดข้อบกพร่อง รวมทั้งลักษณะของข้อบกพร่อง โดยใช้เครื่องมือการทดสอบทางกายภาพ เช่น การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง (Optical microscope) กล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (Scanning Electron microscope) ร่วมกับ Energy Dispersive Spectroscopy: EDS) เพื่อวิเคราะห์รายละเอียดของข้อบกพร่องที่เกิดขึ้น ตรวจสอบเฟสและธาตุผสม เพื่อหาความเป็นไปได้ของที่มาของข้อบกพร่อง และทำการรวบรวมข้อมูลและแจกแจงประเภทของข้อบกพร่องโดยใช้แผนภูมิพาเรโตศึกษาความเป็นไปได้ของสาเหตุการเกิดข้อบกพร่องในชิ้นงานหล่อจากกระบวนการผลิต โดยใช้แผนภูมิแกงปลา รวมถึงค้นหาแนวทางการแก้ไขข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นในชิ้นงานกรณีศึกษา

3.3 ศึกษาแนวทางการแก้ไขแม่พิมพ์โดยใช้ซอฟต์แวร์จำลองงานหล่อ

ทดลองใช้ซอฟต์แวร์เพื่อจำลองการเกิดข้อบกพร่องในชิ้นงานก่อนแก้ไขแม่พิมพ์ เพื่อทดสอบความเป็นไปได้ของการเกิดข้อบกพร่องในชิ้นงาน รวมถึงทำการจำลองการเกิดข้อบกพร่อง

ภายหลังการแก้ไขแม่พิมพ์ในส่วนของระบบทางเดินน้ำโลหะในรูปแบบต่างๆ โดยมีขั้นตอนดังนี้ สำหรับขั้นตอนการสร้างแบบจำลองปัญหา (Simulations model) สำหรับกระบวนการผลิตชิ้นส่วน Pipe inlet ที่ขึ้นรูปโดยใช้การหล่อแบบแรงดันต่ำ (Low pressure die) โดยใช้โปรแกรม ProCAST[®] V.2009 ซึ่งเป็นโปรแกรมคอมพิวเตอร์ในการสร้างแบบจำลองปัญหา (Simulation program) เพื่อช่วยวิเคราะห์ตัวแปรที่มีผลกระทบต่อ การเกิดรูพรุนในชิ้นงาน จึงกำหนดตำแหน่งที่ทำการจำลองด้วยซอฟต์แวร์ที่พิกัด (9, 9.5, 0) ดังแสดงในรูปที่ 3.25 ซึ่งเป็นตำแหน่งในระบบพิกัดคาร์ทีเซียนแบบสามมิติ หรือพิกัด (X,Y,Z) โดยตำแหน่งนี้จะใช้ในการจำลองด้วยโปรแกรม ProCAST[®] V.2009 เพื่อแสดงช่วงเวลาการแข็งตัวของน้ำโลหะ และปริมาณรูพรุนที่เกิดขึ้น สำหรับสภาวะการหล่อทุกเงื่อนไขการทดลองที่กำหนดขึ้นสำหรับการวิจัยในครั้งนี้



รูปที่ 3.25 แสดงตำแหน่งที่ใช้วิเคราะห์ ด้วยโปรแกรม ProCAST[®] V.2009

โดยในการสร้างแบบจำลองงานหล่อ จะใช้ Mesh ขนาด 1 mm. โดยจะมี Total number of Elements เป็น 828016 Elements และมี Total Number of Nodes เป็น 167433 Nodes โดยกำหนดเงื่อนไข Boundary Condition: ดังนี้

- อุณหภูมิเทน้ำโลหะ (Pouring Temperature) 730 องศาเซลเซียส โดยกำหนดเป็น Aluminum A319
- อุณหภูมิแม่พิมพ์โลหะ (Mold Temperature) 350 องศาเซลเซียส โดยกำหนดเป็น Steel H13
- อุณหภูมิทรายใส่แบบ (Core sand) 50 องศาเซลเซียส โดยกำหนดเป็น Silica Sand

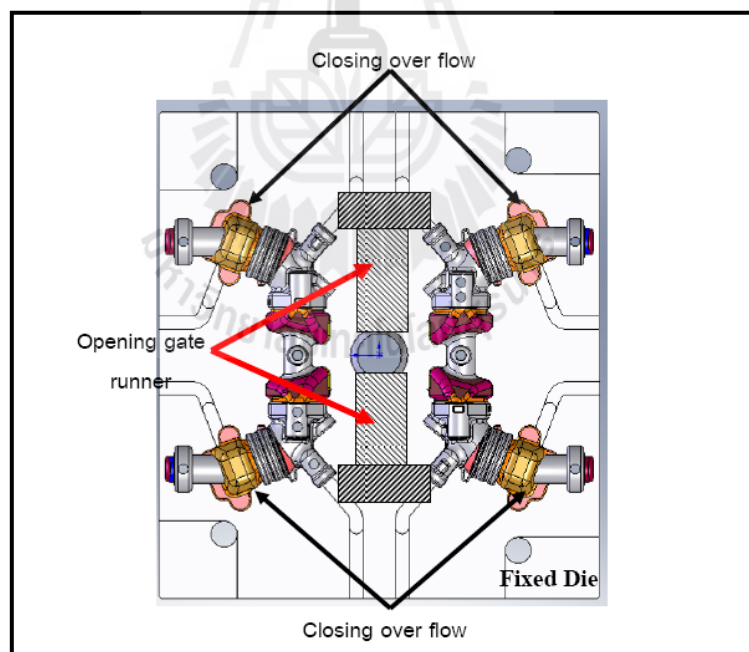
- อุณหภูมิอากาศ (Air Cooling) 25 องศาเซลเซียส

การจำลองด้วยโปรแกรม ProCAST[®] V.2009 ได้แบ่งเป็น 3 ส่วน ได้แก่ ส่วนแรกเป็นการวิเคราะห์สาเหตุที่เกิดข้อบกพร่อง โดยการจำลองกระบวนการแข็งตัวของน้ำโลหะภายในแม่พิมพ์ ส่วนที่สอง คือ การเปลี่ยนแปลงสภาวะการหล่อ และ ส่วนที่สามเป็นการจำลองการแก้ไขแม่พิมพ์ พร้อมทั้งเปลี่ยนแปลงสภาวะการหล่อ

โดยในแต่ละส่วนมีรายละเอียด ดังนี้

3.3.1 ขั้นตอนการวิเคราะห์ปัญหา

ขั้นตอนนี้เป็นการสร้างแบบจำลองปัญหา เพื่อเป็นการวิเคราะห์สาเหตุที่ทำให้เกิดข้อบกพร่องที่ตำแหน่งได้ระบุเจาะเกลียว (TAP M6) ในชิ้นส่วน Pipe inlet ด้วยการสร้างแบบจำลองแม่พิมพ์โลหะที่ใช้ในกระบวนการผลิตชิ้นส่วน Pipe inlet ในสถานประกอบการ ดังแสดงในรูปที่ 3.26 โดยกำหนดกำหนดสภาวะการหล่อขึ้นรูป โดยให้น้ำโลหะหลอมเหลวมีอุณหภูมิเท่ากับ 760 องศาเซลเซียส ขณะเทน้ำโลหะลงแบบหล่อแม่พิมพ์โลหะมีอุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส



รูปที่ 3.26 แสดงแบบจำลองของแม่พิมพ์โลหะที่ใช้ในกระบวนการผลิตชิ้นส่วน Pipe inlet ในสถานประกอบการ

3.3.2 การแก้ปัญหาโดยจำลองการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเทน้ำโลหะ

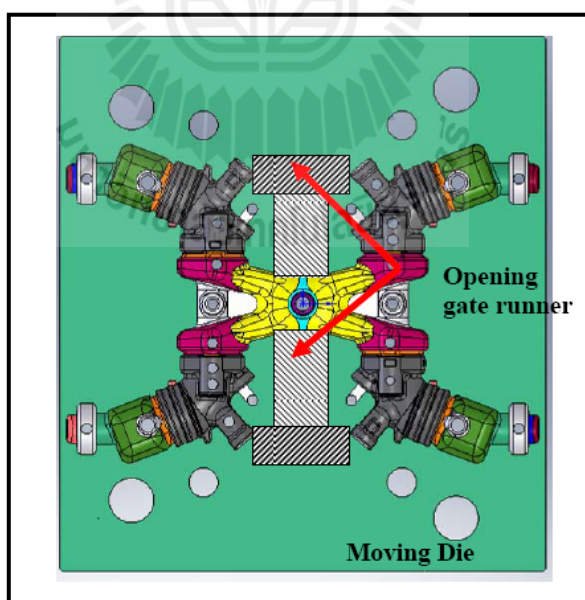
ในขั้นตอนนี้จะใช้การจำลองการแก้ปัญหาในการหล่อขึ้นรูปชิ้นส่วน Pipe inlet โดยการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของแม่พิมพ์โลหะขณะเทน้ำอะลูมิเนียม ได้แก่ 300 400 และ 450 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นอุณหภูมิของแม่พิมพ์โลหะที่แตกต่างจากที่ใช้ในกระบวนการผลิต Pipe inlet คือ 350 องศาเซลเซียส แต่ในขั้นตอนนี้ยังกำหนดให้ใช้อุณหภูมิของน้ำโลหะเท่ากับ 760 องศาเซลเซียส ในขณะที่เทน้ำโลหะลงแบบหล่อ

3.3.3 การจำลองการแก้ปัญหาด้วยการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิน้ำโลหะขณะเทลงแบบหล่อ

ในขั้นตอนนี้จะใช้การจำลองการแก้ปัญหาในการหล่อขึ้นรูปชิ้นส่วน Pipe inlet โดยการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของน้ำโลหะอะลูมิเนียมขณะเทลงในแม่พิมพ์โลหะ ได้แก่ 600 650 700 และ 800 องศาเซลเซียส ในขณะที่กำหนดให้แม่พิมพ์โลหะมีอุณหภูมิเท่ากับ 350 องศาเซลเซียส

3.3.4 การจำลองการแก้ปัญหาด้วยการเพิ่มทางวิ่งของน้ำโลหะ

ในขั้นตอนนี้จะเป็นการจำลองการแก้ปัญหาในกระบวนการผลิตชิ้นส่วน Pipe inlet เพื่อแก้ไขปัญหาทางรั่วบริเวณรู TAP M6 ด้วยการแก้ไขแม่พิมพ์ ด้วยการเพิ่มทางวิ่งของน้ำโลหะ ดังแสดงในรูปที่ 3.26 โดยทางวิ่งของน้ำโลหะที่ใช้ในการจำลองมีขนาดพื้นที่แตกต่างกัน คือ 10×10 ตารางมิลลิเมตร 15×15 ตารางมิลลิเมตร และ 20×20 ตารางมิลลิเมตร



รูปที่ 3.27 แสดงการจำลองการแก้ไขแม่พิมพ์โลหะ

3.4 การทดสอบและเปรียบเทียบผลการหล่อชิ้นงาน Pipe inlet ก่อนและหลังทำการแก้ไขแม่พิมพ์

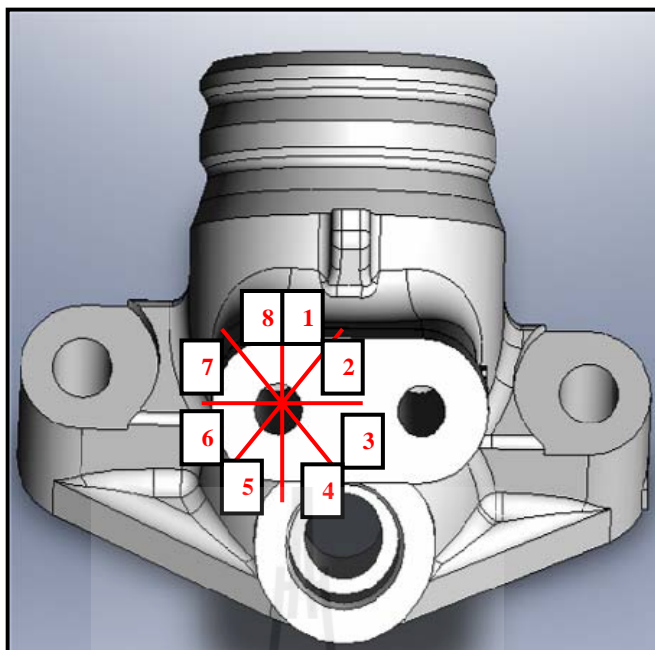
หลังจากขั้นตอนการวิเคราะห์ความเหมาะสมของการแก้ปัญหาจากการใช้โปรแกรมจำลองปัญหา (ProCAST[®] V.2009) จะนำเงื่อนไขการทดลองที่มีสภาวะการหล่อขึ้นรูปที่เหมาะสม มาสร้างแบบหล่อ และทดลองหล่อขึ้นรูปชิ้นส่วน Pipe inlets จำนวน 188 ชิ้น โดยจะทำการตรวจสอบและวิเคราะห์ข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นในชิ้นงานก่อนและหลังการแก้ไข เพื่อประเมินผล โดยมีรายละเอียดดังนี้

3.4.1 การทดสอบรั่วด้วยเครื่อง Leak test

เพื่อตรวจสอบจำนวนชิ้นงาน ที่มีรูพรุนบริเวณใต้รูเจาะเกลียว และนำข้อมูลมาเปรียบเทียบปริมาณชิ้นงานที่มีข้อบกพร่องบริเวณใต้รูเจาะเกลียวที่ตรวจพบ

3.4.2 ตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคโดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบแสง

หลังกระบวนการทดสอบรั่วด้วยเครื่อง Leak test เพื่อหาตำแหน่งรั่วของชิ้นส่วน Pipe inlet แล้ว จะนำชิ้นส่วน Pipe inlet ที่ตรวจพบข้อบกพร่องในตำแหน่งใต้รูเจาะเกลียวของชิ้นงาน มาตัดแบ่งเป็น 8 ส่วน แสดงดังภาพจำลองของการตัดชิ้นงานในรูปที่ 3.28 หลังจากนั้นนำแต่ละส่วน ตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสงยี่ห้อ Carl Zeiss โดยมีการเตรียมผิวชิ้นงาน เริ่มจากการขัดหยาบด้วยกระดาษทรายเบอร์ 100 180 400 1200 และขัดละเอียดด้วยผงเพชรขนาด 9 ไมโครเมตร 3 ไมโครเมตร และ 1 ไมโครเมตร ตามลำดับ โดยทำการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค ด้วยกำลังขยาย 5 เท่า 10 เท่า 20 เท่า และ 100 เท่า ตามลำดับ



รูปที่ 3.28 ภาพจำลองการตัดชิ้นงาน Pipe inlet ที่มีข้อบกพร่องบริเวณใต้รูเจาะเกลียว เพื่อนำไปตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

3.4.3 การวิเคราะห์ปริมาณเฟส

การวิเคราะห์หาปริมาณความหนาแน่นของรูพรุน โดยนำภาพถ่ายโครงสร้างทางจุลภาคที่ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง กำลังขยาย 10 เท่า จำนวน 10 รูป ต่อ ตัวอย่าง มาวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมวิเคราะห์ภาพ (Image J Analysis) เพื่อหาร้อยละของพื้นที่รูพรุน และพื้นที่ของเฟสพื้นโลหะอะลูมิเนียม ที่ปรากฏบนภาพถ่ายโครงสร้างทางจุลภาคและนำมาคำนวณหาค่าเฉลี่ย

3.4.4 การตรวจสอบโครงสร้างโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

การถ่ายภาพพื้นผิวชิ้นงานภาคตัดขวาง โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope) รุ่น JSM-5800LV ซึ่งใช้ความต่างศักย์ 20 กิโลโวลต์ และถ่ายภาพที่กำลังขยาย 20 50 200 400 และ 800 เท่า บนพื้นผิวของชิ้นงาน

3.5 เจ็อนไขที่ใช้ในการทดลอง

การวิจัยนี้ ได้สร้างแบบจำลอง การแก้ปัญหาการเกิดรูพรุนใต้ฐานะเกลียวของชิ้นส่วน Pipe inlet จำนวน 36 เจ็อนไขการทดลอง ดังแสดงในตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 แสดงเจ็อนไขที่ใช้ในการทดลอง

ชุดการทดลองที่	ตัวอย่างที่	อุณหภูมิแม่พิมพ์ (องศาเซลเซียส)	อุณหภูมิเทน้ำ โลหะ (องศา เซลเซียส)	ขนาดทางวิ่งน้ำ โลหะ (ตาราง มิลลิเมตร)
1	1	300	730	-
	2	350	730	-
	3	400	730	-
	4	450	730	-
	5	480	730	-
2	6	350	680	-
	7	350	720	-
	8	350	730	-
	9	350	740	-
	10	350	780	-
3	11	300	730	10×10
	12	350	730	10×10
	13	400	730	10×10
	14	450	730	10×10
	15	480	730	10×10
4	16	350	680	10×10
	17	350	720	10×10
	18	350	730	10×10
	19	350	740	10×10
	20	350	780	10×10

ตารางที่ 3.2 แสดงเงื่อนไขที่ใช้ในการทดลอง (ต่อ)

ชุดการทดลองที่	ตัวอย่างที่	อุณหภูมิแม่พิมพ์ (องศาเซลเซียส)	อุณหภูมิเทน้ำ โลหะ	ขนาดทางวิ่งน้ำ โลหะ (ตาราง มิลลิเมตร)
5	21	300	730	15×15
	22	350	730	15×15
	23	400	730	15×15
	24	450	730	15×15
	25	480	730	15×15
6	26	350	680	15×15
	27	350	720	15×15
	28	350	730	15×15
	29	350	740	15×15
	30	350	780	15×15
7	31	300	730	20×20
	32	350	730	20×20
	33	400	730	20×20
	34	450	730	20×20
	35	480	730	20×20
8	36	350	680	20×20
	37	350	720	20×20
	38	350	730	20×20
	39	350	740	20×20
	40	350	780	20×20

บทที่ 4

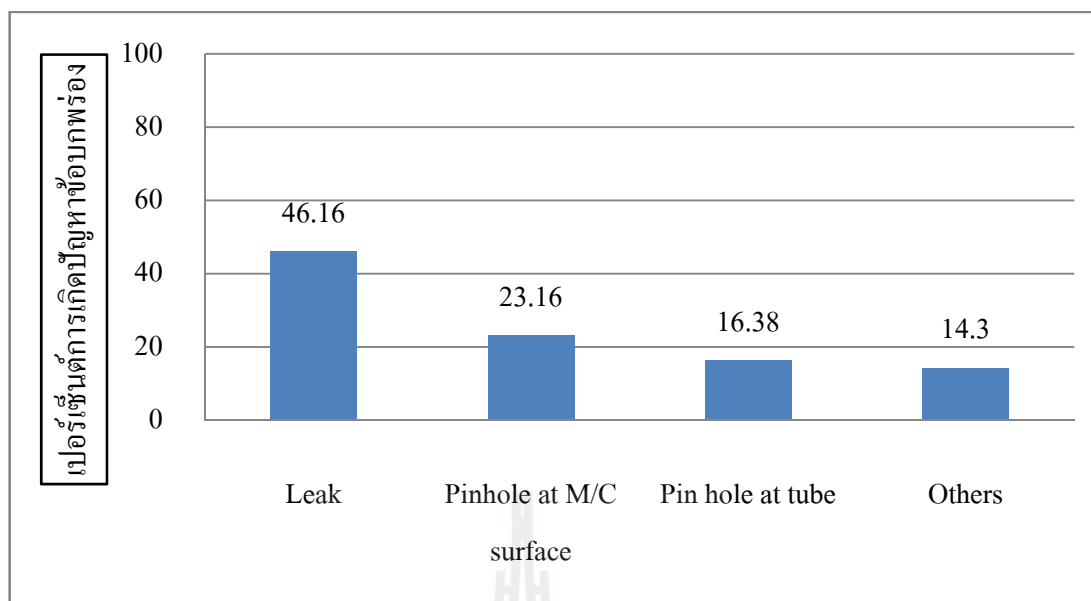
ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล

ในบทนี้จะกล่าวถึงผลการทดลองซึ่งแบ่งออกเป็น 3 ส่วนคือ ในส่วนแรก จะกล่าวถึงผล การศึกษาและวิเคราะห์ปัญหาข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นในชิ้นงานหล่อ Pipe inlet ส่วนที่ 2 จะกล่าวถึงผล การศึกษาแนวทางการแก้ไขแม่พิมพ์โดยใช้ซอฟต์แวร์จำลองงานหล่อ และในส่วนที่ 3 จะกล่าวถึงผล การทดสอบการแก้ไขแม่พิมพ์โดยนำมาผลิตเป็นชิ้นงานหล่อ Pipe inlet เพื่อเปรียบเทียบกับผลการ ทดลองก่อนทำการแก้ไขแม่พิมพ์ โดยจะกล่าวในรายละเอียดต่อไปนี้

4.1 การตรวจสอบข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิต

4.1.1 ปริมาณข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิตชิ้นส่วน Pipe inlet

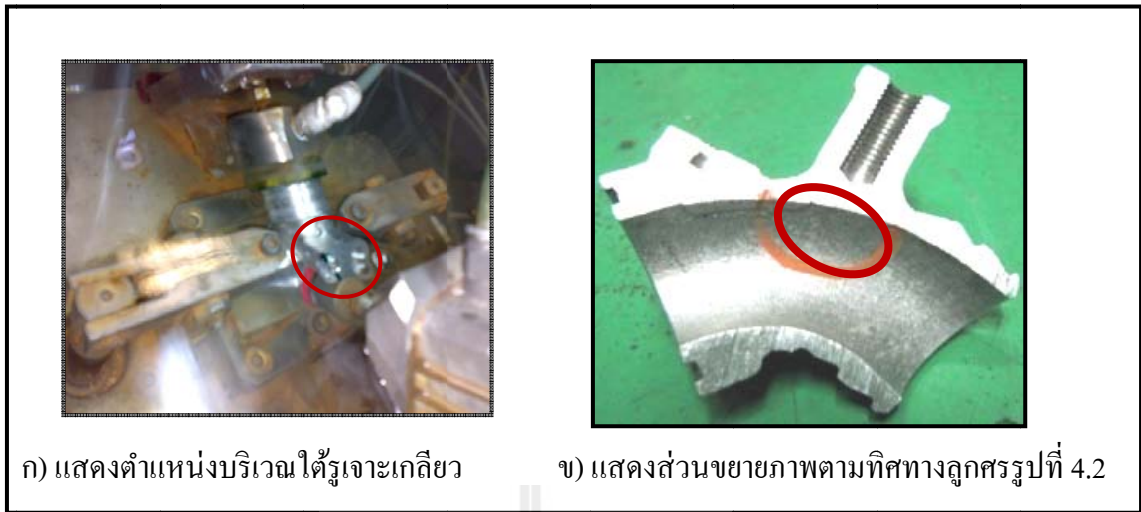
การสำรวจข้อมูลการผลิตชิ้นงาน Pipe inlet พบว่าข้อมูลการผลิตในเดือนสิงหาคม พ.ศ.2551 มีจำนวนชิ้นงานที่ไม่ผ่านการตรวจสอบคุณภาพ ร้อยละ 10.67 ของชิ้นงานที่มีการผลิต ทั้งหมดจำนวน 118,505 ชิ้น และในจำนวนของชิ้นงานที่ไม่ผ่านการตรวจสอบคุณภาพนั้น พบว่า ข้อบกพร่องที่เกิดจากการรั่วของชิ้นงาน (Leak) มีปริมาณมากที่สุด ถึงร้อยละ 4.92 ของจำนวน ชิ้นงานที่ผลิตทั้งหมด ซึ่งคิดเป็นร้อยละ 46.16 ของชิ้นงานที่ไม่ผ่านการตรวจสอบคุณภาพ นอกจากนี้ ยังตรวจพบข้อบกพร่องประเภทอื่นที่ได้แก่ รูพรุนที่ผิวตัดกลึง (Pinhole at M/C surface) รูพรุนที่ผิวท่อด้านใน (Pinhole at tube) และปัญหาคุณภาพอื่น ๆ (Others) โดยมีรายละเอียดแสดงดัง ในรูปที่ 4.1



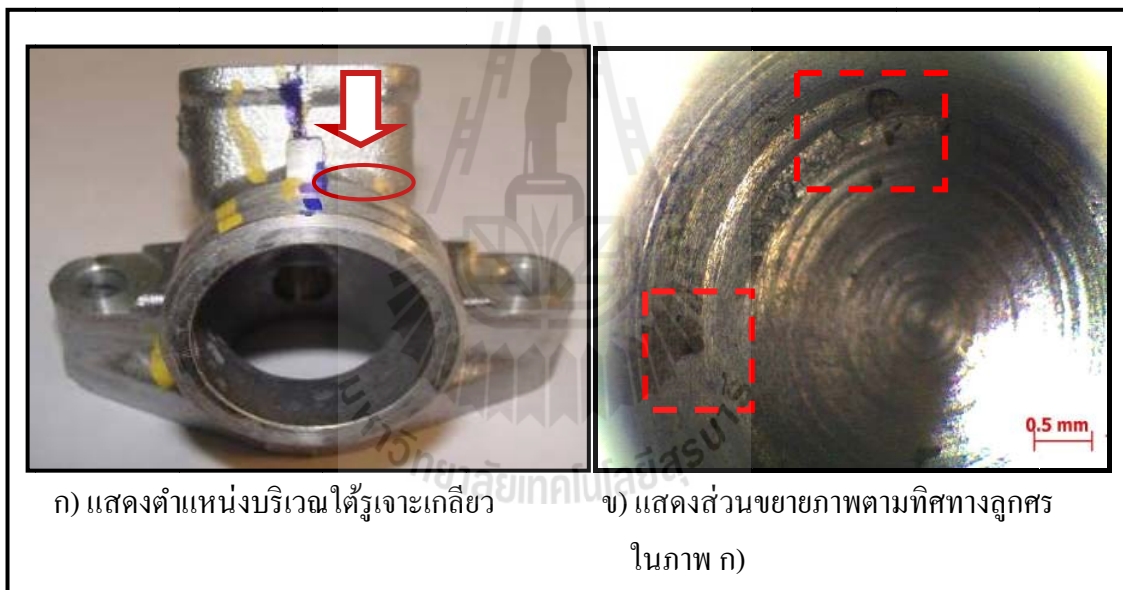
รูปที่ 4.1 การจำแนกประเภทและเปอร์เซ็นต์ของข้อบกพร่องที่ตรวจพบในชิ้นงาน Pipe inlet

4.1.2 ตำแหน่งของชิ้นงาน Pipe inlet ที่เกิดการรั่ว

จากรูปที่ 4.1 แสดงให้เห็นว่าลักษณะข้อบกพร่องที่ตรวจพบมากที่สุดในจำนวนของชิ้นงานที่ไม่ผ่านเกณฑ์การตรวจสอบคุณภาพ ได้แก่ ข้อบกพร่องประเภทการรั่ว (Leak) ซึ่งตรวจพบได้ในขั้นตอนทดสอบการรั่วของชิ้นงานใต้ผิวน้ำ (Leak test) ดังแสดงในรูปที่ 4.2 ก) โดยจะใช้แรงดันลม 0.2 MPa และเวลาทดสอบ 10 – 20 วินาที หากชิ้นงานรั่วจะพบว่า มีฟองเกิดขึ้น หลังจากนั้นตรวจสอบชิ้นงาน ณ ตำแหน่งที่เกิดการรั่วโดยการตัดผ่านบริเวณรูเจาะเกลียว พบรูพรุนจำนวนหนึ่งได้รูเจาะเกลียว แสดงดังรูปที่ 4.2 ข) นอกจากนี้เมื่อได้ตรวจสอบพื้นผิวของชิ้นงานด้วยกล้องกำลังขยายต่ำบริเวณรูเจาะเกลียวตามทิศทางของลูกศร ดังแสดงในรูปที่ 4.3 ก) จะพบว่า มีรูพรุนเกิดขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.3 ข) โดยรูพรุนที่เกิดขึ้นนี้เป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดการรั่วในชิ้นงาน Pipe inlet (ภายหลังการเจาะเกลียว TAP M6)



รูปที่ 4.2 แสดงการตรวจสอบการรั่วใต้ผิวน้ำ และบริเวณที่เกิดการรั่วในชิ้นงาน

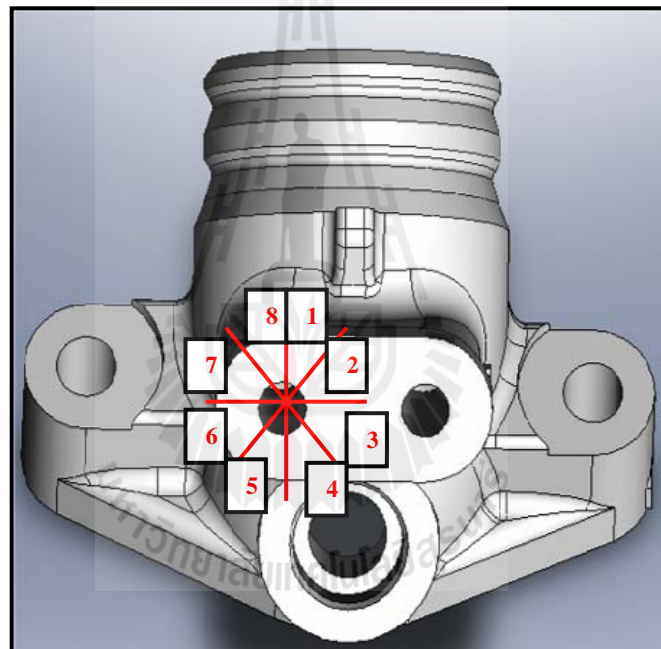


รูปที่ 4.3 แสดงภาพถ่ายกำลังขยายตำแหน่งใต้รูเจาะเกลียวของชิ้นงาน Pipe inlet

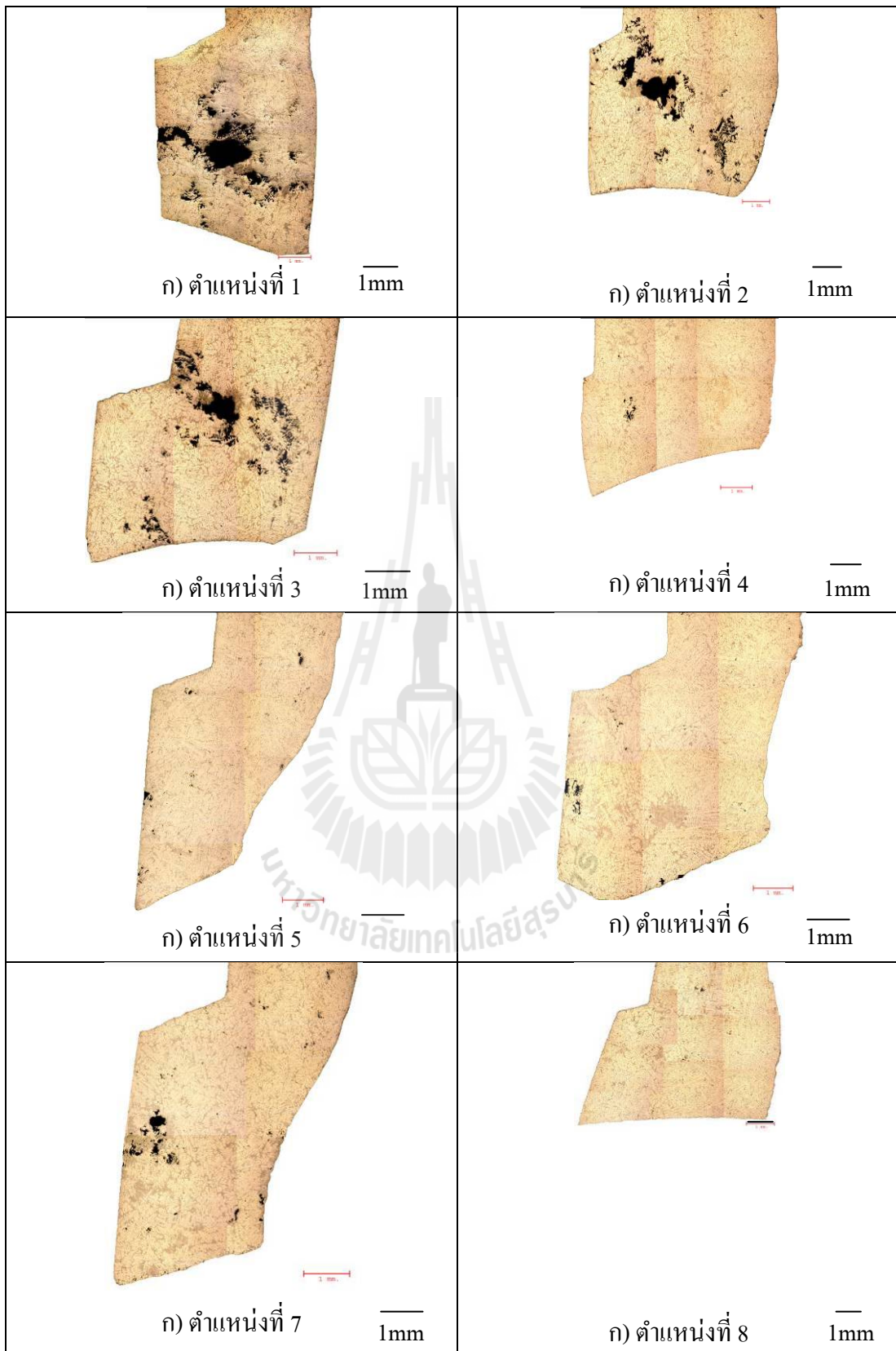
4.1.3 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงาน ณ ตำแหน่งที่เกิดการรั่ว

การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงาน ณ ตำแหน่งที่ตรวจพบการรั่วบริเวณใต้รูเจาะเกลียว โดยนำชิ้นงานมาทำการตัดแบ่งเป็น 8 ส่วนบริเวณรูเจาะเกลียว ดังแสดงในภาพจำลองการตัดชิ้นงานในรูปที่ 4.4 เพื่อตรวจสอบปริมาณรูพรุนที่เกิดขึ้นในแต่ละตำแหน่งของชิ้นงาน จากภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคดังแสดงในรูปที่ 4.5 ซึ่งจากการตรวจสอบด้วยการวิเคราะห์ปริมาณรูพรุนด้วยโปรแกรมวิเคราะห์ภาพ Image J พบว่าส่วนที่ 1-3 ของชิ้นงาน เป็นบริเวณที่มีรูพรุนปริมาณ

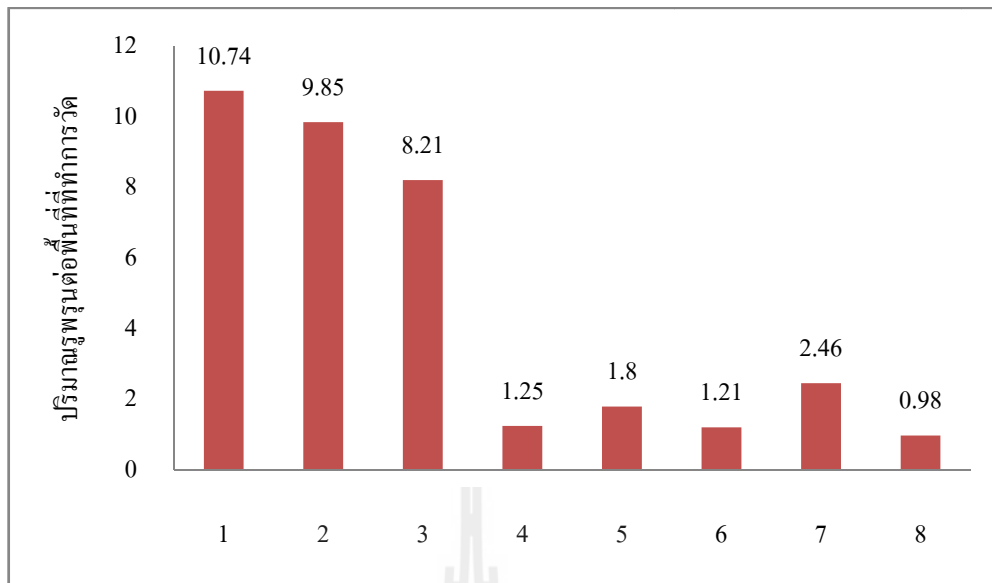
สูง ดังแสดงในรูปที่ 4.6 โดยตำแหน่งดังกล่าวจะอยู่บริเวณส่วนของ Parting line ซึ่งน่าจะเป็นส่วนสุดท้ายของชิ้นงานที่เปลี่ยนสถานะกลายเป็นของแข็ง ดังนั้นรูพรุนที่เกิดขึ้นนี้อาจมีสาเหตุมาจากการหดตัวของน้ำโลหะ (Melt feeding) ในกระบวนการแข็งตัวไม่เพียงพอทำให้เกิดช่องว่างหรือโพรงหดตัว (Shrinkage porosity) ภายหลังจากกระบวนการแข็งตัวของโลหะเสร็จสมบูรณ์ จึงเกิดเป็นรูพรุนเนื่องจากการหดตัว โดยเฉพาะส่วนสุดท้ายที่เกิดการแข็งตัว โดยรูพรุนที่เกิดขึ้นนี้จะมีความต่อเนื่องกันบริเวณขอบเกรน ซึ่งจากการตรวจสอบชิ้นงานด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope; SEM) ในตำแหน่งที่ 1 และ 3 ดังแสดงในรูปที่ 4.7 ก) และ ข) ตามลำดับ พบว่า รูพรุนที่เกิดขึ้นมีความต่อเนื่องบริเวณขอบเกรน ซึ่งเป็นลักษณะของรูพรุนที่เกิดขึ้นจากการหดตัวในกระบวนการแข็งตัวของน้ำโลหะ



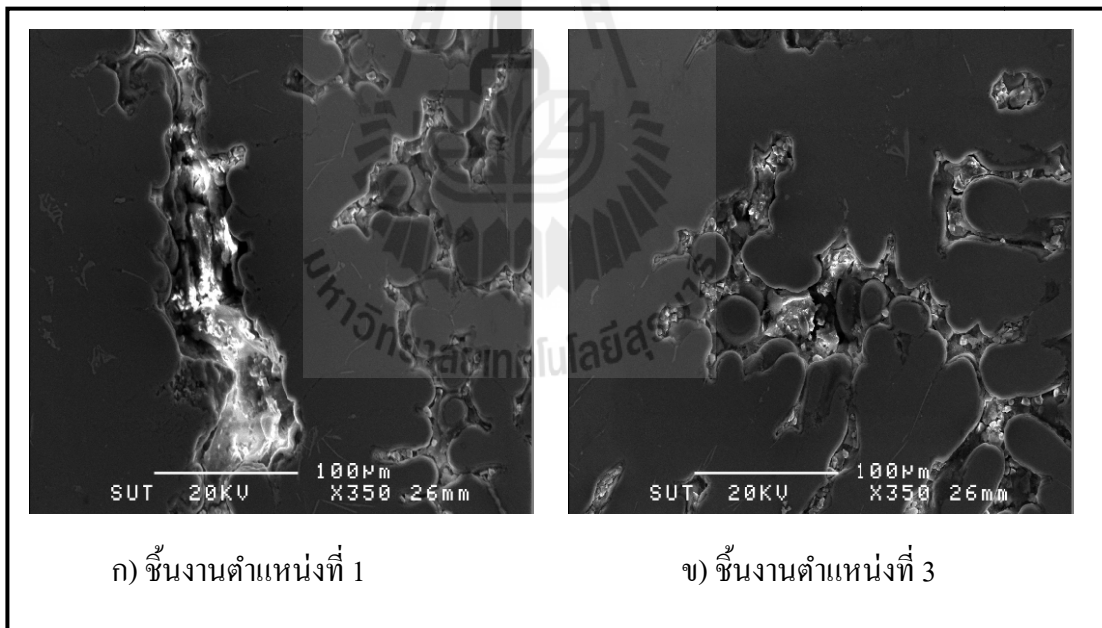
รูปที่ 4.4 ตำแหน่งของชิ้นงานที่นำไปตรวจสอบ โครงสร้างจุลภาค



รูปที่ 4.5 แสดงภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่เกิดรุกรุน (สีดำ) บริเวณใต้รูเจาะเกลียว



รูปที่ 4.6 แสดงปริมาณรูพรุนต่อพื้นที่ที่ทำการวัดแตกต่างกันตามส่วนต่าง ๆ ในชิ้นงาน Pipe inlet

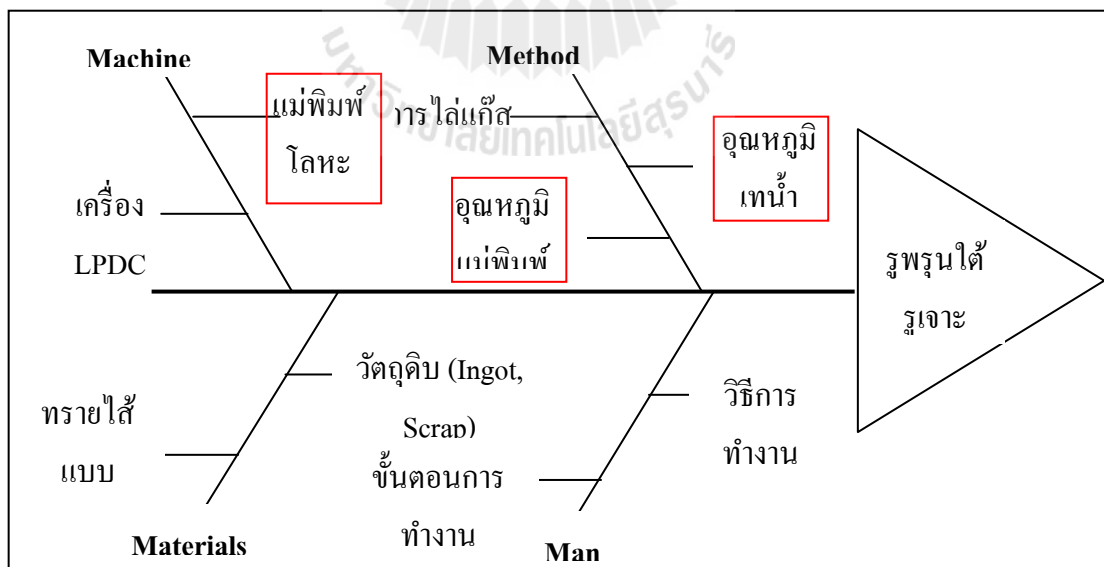


รูปที่ 4.7 แสดงภาพถ่ายชิ้นงานที่เกิดรูพรุนบริเวณใต้รูเจาะเกลียวจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

4.1.4 การวิเคราะห์กระบวนการผลิตเพื่อหาสาเหตุข้อบกพร่อง

การวิเคราะห์กระบวนการผลิตเพื่อหาสาเหตุที่ทำให้เกิดข้อบกพร่องในชิ้นงาน Pipe inlet เริ่มจากการวิเคราะห์ปัจจัยหลัก 4 ประการ ซึ่งเป็นปัจจัยที่มีผลกระทบโดยตรงต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ ได้แก่ ผู้ปฏิบัติงาน (Man) กระบวนการผลิต (Method) เครื่องจักร (Machine) และ วัสดุดิบ (Material) ทั้งนี้ได้ทำการตรวจสอบขั้นตอนการควบคุมกระบวนการผลิต เพื่อวิเคราะห์โอกาสที่ทำให้เกิดขึ้นบกพร่องในชิ้นงานจากปัจจัยหลัก ทั้ง 4 ประการ ดังกล่าว ด้วยการวิเคราะห์ตัวแปรของแต่ละปัจจัย โดยแสดงผลในรูปแบบของแผนภูมิแกงปลา ดังแสดงในรูปที่ 4.8 โดยผลการวิเคราะห์โอกาสของแต่ละตัวแปรที่จะเป็นสาเหตุให้เกิดข้อบกพร่อง ดังแสดงในตารางที่ 4.1-4.4 พบว่า ตัวแปรที่มีโอกาสมากที่สุดที่จะเป็นสาเหตุที่จะทำให้เกิดข้อบกพร่องในกระบวนการผลิตชิ้นส่วน Pipe inlet คือ แม่พิมพ์โลหะ

เมื่อทำการวิเคราะห์ในรายละเอียดของตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับแม่พิมพ์ ดังแสดงแผนภูมิแกงปลาในรูปที่ 4.9 และจากการศึกษาความเป็นไปได้ของตัวแปรที่จะทำให้เกิดข้อบกพร่องใน ดังแสดงในตารางที่ 4.5 พบว่า การออกแบบแม่พิมพ์โลหะที่ไม่เหมาะสม มีโอกาสที่จะเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดข้อบกพร่องในชิ้นงาน เนื่องจากพบว่าไม่มีการออกแบบให้แม่พิมพ์ให้สามารถหดเย็นน้ำโลหะในบริเวณ Parting line ซึ่งจะเป็นตำแหน่งสุดท้ายที่เกิดการแข็งตัว และจะทำให้การหดเย็นน้ำโลหะเมื่อเปลี่ยนสถานะเป็นของแข็งไม่เพียงพอ ซึ่งจะเกิดเป็นรูพรุนเนื่องจากการหดตัวในชิ้นงาน



รูปที่ 4.8 แสดงการวิเคราะห์ปัญหาการเกิดข้อบกพร่องในชิ้นงาน โดยใช้แผนภูมิแกงปลา

ตารางที่ 4.1 การวิเคราะห์ความเป็นไปได้ของปัจจัยในกระบวนการผลิตที่จะเป็นสาเหตุทำให้เกิด
ข้อบกพร่องในชิ้นงาน

ตัวแปรที่ทำการศึกษา	สาเหตุที่เกิดข้อบกพร่องในกระบวนการ	สิ่งที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิต	ความเป็นไปได้ของการเกิดข้อบกพร่องในชิ้นงาน
1. อุณหภูมิเทน้ำโลหะ	- อุณหภูมิสูงเทน้ำโลหะสูงหรือต่ำเกินไป	- มีมาตรฐานการควบคุมอุณหภูมิเทน้ำโลหะ 700 - 780 องศาเซลเซียส	มาก (เนื่องจากมีช่วงการควบคุมอุณหภูมิเทน้ำโลหะที่กว้าง)
2. กระบวนการไล่แก๊ส	- ใช้เวลาไล่แก๊สด้วยอาร์กอนน้อยเกินไป ทำให้แก๊สไฮโดรเจนออกไม่หมด	- มีมาตรฐานการควบคุมกระบวนการไล่แก๊สด้วยเวลา 20 นาที	น้อย
3. อุณหภูมิแม่พิมพ์โลหะ	- อุณหภูมิสูงแม่พิมพ์โลหะสูงหรือต่ำเกินไป	- มีมาตรฐานการควบคุมอุณหภูมิแม่พิมพ์โลหะ 300 - 480 องศาเซลเซียส	มาก (เนื่องจากมีช่วงการควบคุมอุณหภูมิแม่พิมพ์โลหะที่กว้าง)

ตารางที่ 4.2 การวิเคราะห์ความเป็นไปได้ของปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับเครื่องจักรที่จะเป็นสาเหตุทำให้เกิดข้อบกพร่องในชิ้นงาน

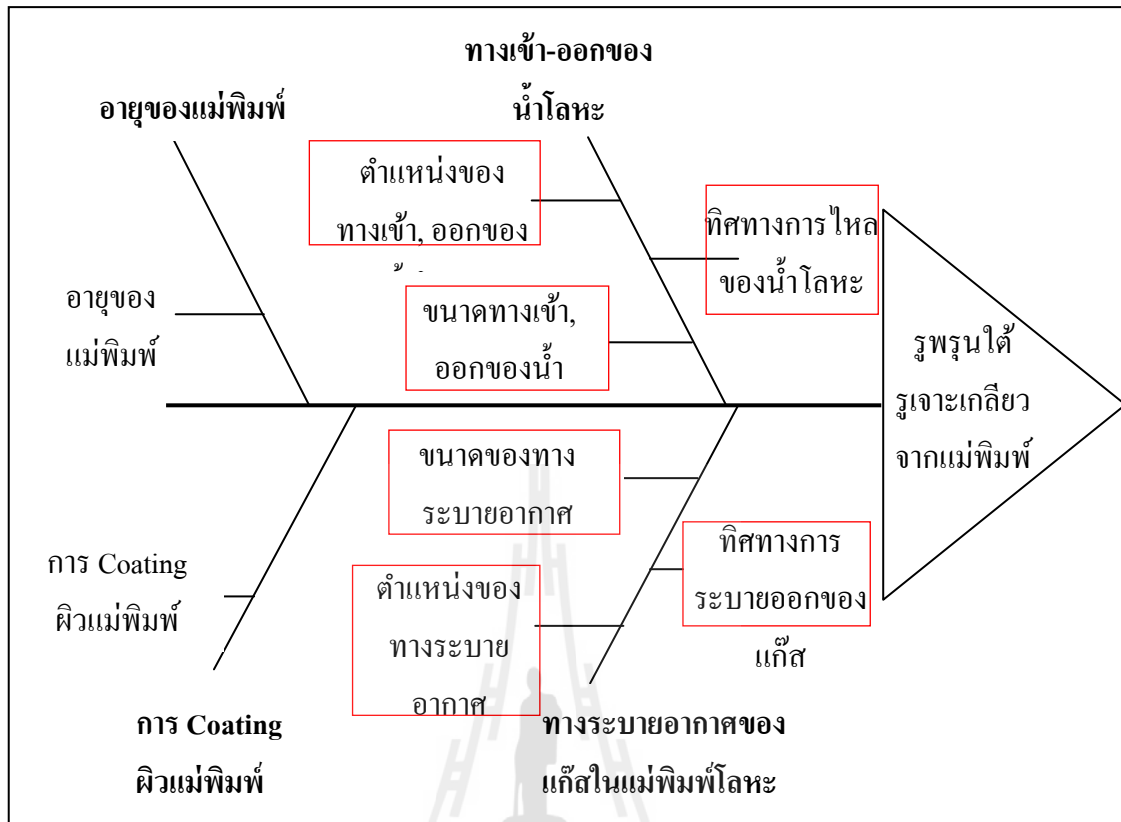
ตัวแปรที่ทำการศึกษา	สาเหตุที่เกิดข้อบกพร่องในกระบวนการ	สิ่งที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิต	ความเป็นไปได้ของการเกิดข้อบกพร่องในชิ้นงาน
1. เครื่องจักร LPDC	เครื่องจักรมีปัญหา จากการใช้งาน	- มีมาตรฐานการตรวจสอบและบำรุงรักษาตามกำหนด	น้อย
2. แม่พิมพ์โลหะ	การออกแบบแม่พิมพ์โลหะไม่เหมาะสม ทำให้เกิดรูพรุนด้านในตัวงาน	- การออกแบบแม่พิมพ์โลหะไม่เหมาะสม	มาก

ตารางที่ 4.3 การวิเคราะห์ความเป็นไปได้ของปัจจัยด้านผู้ปฏิบัติงานที่จะเป็นสาเหตุทำให้เกิด
ข้อบกพร่องในชิ้นงาน

ตัวแปรที่ทำการศึกษา	สาเหตุที่เกิดข้อบกพร่องในกระบวนการ	สิ่งที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิต	ความเป็นไปได้ของการเกิดข้อบกพร่องในชิ้นงาน
1. วิธีการทำงาน	- พนักงานในกระบวนการทำงานไม่ถูกวิธีการ	- มีมาตรฐานการฝึกอบรมพนักงานก่อนการปฏิบัติงาน	น้อย*
2. ขั้นตอนการทำงาน	- พนักงานทำงานข้ามขั้นตอนในแต่ละกระบวนการ	มีมาตรฐานฝึกอบรมขั้นตอนการทำงานในแต่ละกระบวนการ	น้อย*

ตารางที่ 4.4 การวิเคราะห์ความเป็นไปได้ของปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับวัตถุดิบที่จะเป็นสาเหตุทำให้เกิด
ข้อบกพร่องในชิ้นงาน

ตัวแปรที่ทำการศึกษา	สาเหตุที่เกิดข้อบกพร่องในกระบวนการ	สิ่งที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิต	ความเป็นไปได้ของการเกิดข้อบกพร่องในชิ้นงาน
1. อุปกรณ์ที่ใช้	- อุปกรณ์มีความชื้น	- มีมาตรฐานการ Pre-heat อุปกรณ์ก่อนการใช้งานทุกครั้ง	น้อย
2. มาตรฐานของวัตถุดิบ (Ingot, Scrap)	- วัตถุดิบไม่ได้มาตรฐานในกระบวนการผลิต	- มีมาตรฐานฐานการตรวจสอบวัตถุดิบก่อนก่อนการใช้งานทุกครั้ง	น้อย
3. มาตรฐานของวัตถุดิบ (ทรายใส่แบบ)	- ทรายใส่แบบไม่ได้มาตรฐานในกระบวนการผลิต	- มีมาตรฐานฐานการตรวจสอบทรายใส่แบบก่อนก่อนการใช้งานทุกครั้ง	น้อย



รูปที่ 4.9 แผนภูมิแกงปลาแสดงตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับแม่พิมพ์ที่มีโอกาสเป็นสาเหตุให้เกิดข้อบกพร่องในชิ้นงาน

ตารางที่ 4.5 แสดงการวิเคราะห์โอกาสของตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับแม่พิมพ์โลหะที่จะเป็นสาเหตุของการเกิดข้อบกพร่องในชิ้นงาน

ตัวแปรที่ทำการศึกษา	สาเหตุที่เกิดข้อบกพร่องในกระบวนการ	สิ่งที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิต	ความเป็นไปได้ของการเกิดข้อบกพร่องในชิ้นงาน
1. ทางเข้า-ออกของน้ำโลหะในแม่พิมพ์โลหะ			
1.1 ตำแหน่งทางเข้า-ออกของน้ำโลหะ	- ตำแหน่งของทางเข้า-ออก ไม่เหมาะสม ทำให้เป็นรูพรุนในตัวชิ้นงานขณะน้ำโลหะแข็งตัว	- ไม่มีตำแหน่งทางเข้าของน้ำโลหะบริเวณรูเจาะเกลียวทำให้บริเวณนี้เป็นจุดสุดท้ายของการเย็นตัว	มาก
1.1 ทิศทางการไหลของน้ำโลหะ	- การไหลของน้ำโลหะอาจเกิดการไหลวน เนื่องจากตำแหน่งของทางเข้าชิ้นงานไม่เหมาะสม	- น้ำโลหะเกิดการไหลวนในชิ้นงาน ส่งผลต่อการเกิดรูพรุนขณะแข็งตัว	มาก
1.2 ขนาดทางเข้า-ออกของน้ำโลหะ	- ขนาดของทางเข้าออกของน้ำโลหะมีขนาดเล็ก ทำให้เกิดแรงดันในปริมาณมากขณะไหลเข้าชิ้นงาน - หากอุณหภูมิของแม่พิมพ์โลหะสูงหรือต่ำเกินไปทำให้เกิดการเย็นตัวในชิ้นงานไม่สม่ำเสมอและเกิดการหดตัวจุดสุดท้ายได้	- ขนาดของทางเข้าออกของน้ำโลหะมีขนาดเล็ก ส่งผลต่อแรงดันก่อนเข้าชิ้นงาน	มาก

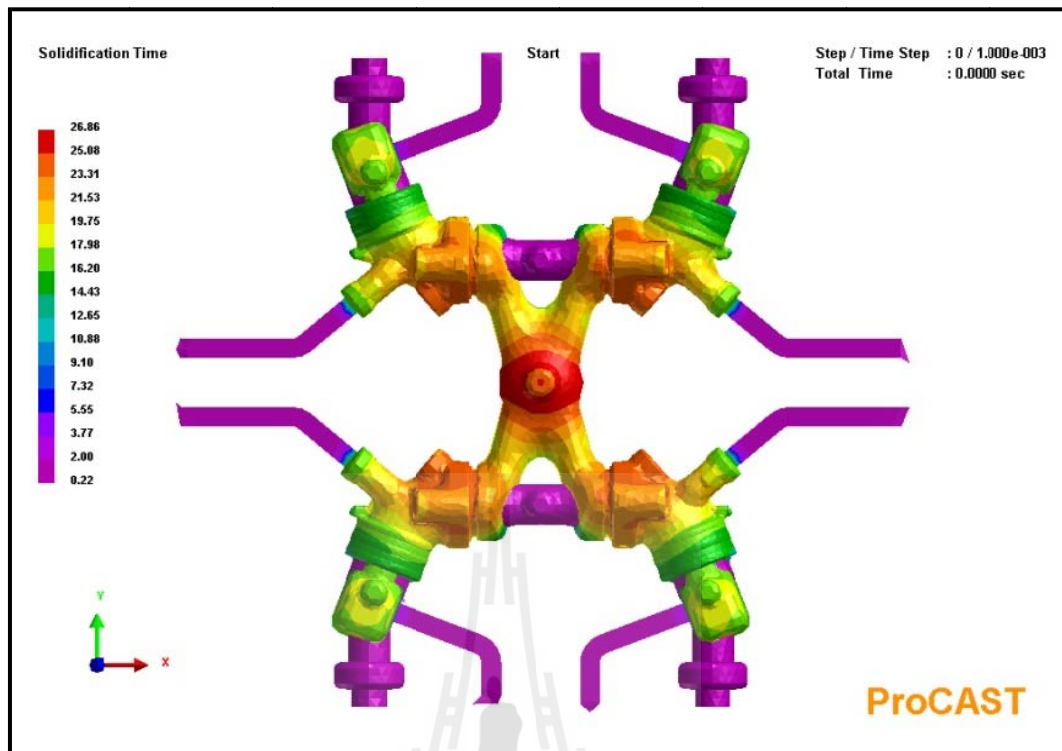
ตารางที่ 4.5 แสดงการวิเคราะห์โอกาสของตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับแม่พิมพ์โลหะที่จะเป็นสาเหตุของการเกิดข้อบกพร่องในชิ้นงาน (ต่อ)

ตัวแปรที่ทำการศึกษา	สาเหตุที่เกิดข้อบกพร่องในกระบวนการ	สิ่งที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิต	ความเป็นไปได้ของการเกิดข้อบกพร่องในชิ้นงาน
2. อายุของแม่พิมพ์โลหะ			
1.1 อายุของแม่พิมพ์โลหะ	- หากเกินอายุของแม่พิมพ์โลหะจะทำให้แม่พิมพ์ชำรุด อาจส่งผลต่อการเกิดรูพรุนในชิ้นงานได้	- มีมาตรฐานควบคุมอายุแม่พิมพ์ ไม่เกิน 100,000 shot	น้อย
3. รุระบายของแก๊สในแม่พิมพ์โลหะ			
3.1 ตำแหน่งของรุระบายอากาศ	- รุระบายอากาศอยู่ในตำแหน่งที่ไม่เหมาะสม ทำให้มีแก๊สตกค้างเหลืออยู่ในชิ้นงาน	- รุระบายอากาศยังอยู่ในตำแหน่งที่ไม่เหมาะสม	มาก
3.2 ทิศทางการไหลของอากาศสู่รุระบายอากาศ	- การกำหนดทิศทางการไหลของอากาศในน้ำโลหะเพื่อไปสู่รุระบายอากาศไม่เหมาะสม ทำให้มีแก๊สตกค้างเหลืออยู่ในชิ้นงาน	- ทิศทางการไหลของอากาศในน้ำโลหะยังออกแบบไม่เหมาะสม	มาก
3.3 ขนาดของรุระบายอากาศ	- หากขนาดของรุระบายอากาศเล็กเกินไป ทำให้มีแก๊สตกค้างเหลืออยู่ในชิ้นงาน กระบวนการ	- ขนาดของรุระบายอากาศเล็กเกินไป	มาก
4. การเคลือบผิวแม่พิมพ์โลหะ(Die Coating)			
4.1 การเคลือบผิวแม่พิมพ์โลหะ	- การเคลือบผิวแม่พิมพ์โลหะน้อยเกินไปจะทำให้การถ่ายเทความร้อนเร็วเกิดการหดตัวในชิ้นงาน	- มีมาตรฐานกำหนดการเคลือบผิวแม่พิมพ์โลหะ	น้อย

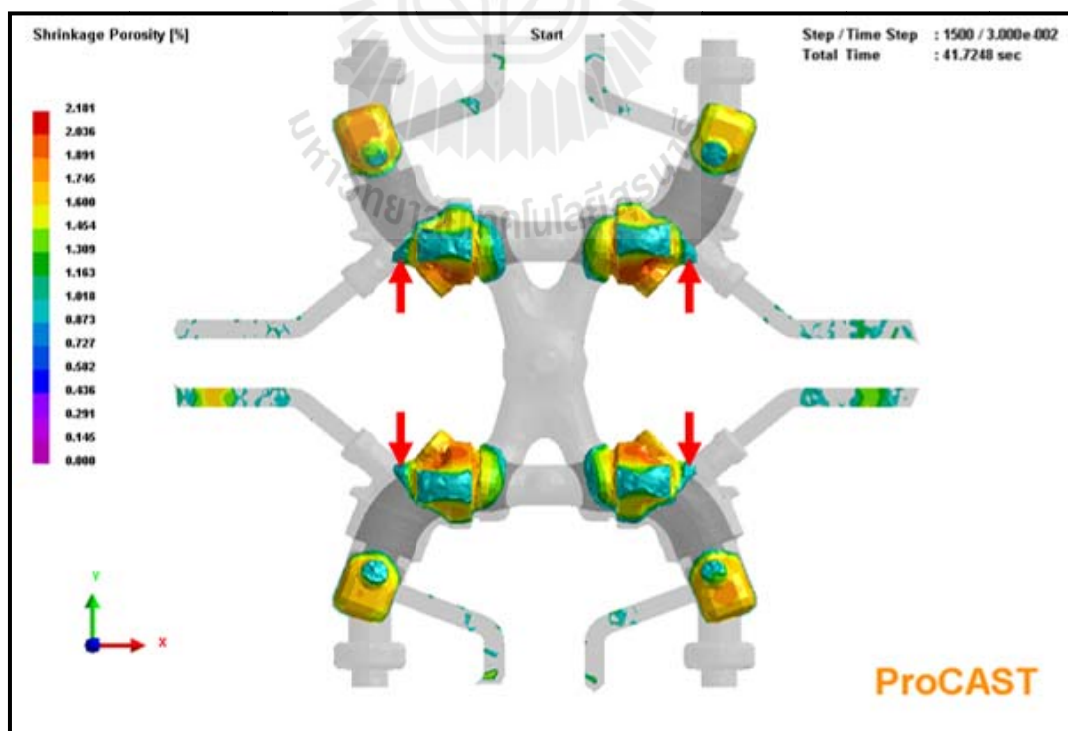
4.2 ผลการศึกษาแนวทางการแก้ไขแม่พิมพ์ด้วยซอฟต์แวร์จำลองงานหล่อ

ในส่วนของการจำลองการหล่อขึ้นรูปชิ้นส่วน Pipe inlet โดยใช้โปรแกรม ProCAST® V.2009 เพื่อวิเคราะห์การเกิดรูพรุนเนื่องจากการหดตัวบริเวณใต้รูเจาะเกลียว ด้วยการจำลองสภาวะการหล่อขึ้นรูปที่ใช้แม่พิมพ์โลหะสำหรับกระบวนการผลิตชิ้นส่วน Pipe inlet โดยใช้ตัวแปรในกระบวนการหลอดังนี้ คือแรงดันที่ดันน้ำโลหะเข้าสู่แม่พิมพ์ในแนวแกน z มีค่าเท่ากับ 0.2 บาร์ น้ำโลหะขณะเทลงแบบหล่อมีอุณหภูมิเท่ากับ 730 องศาเซลเซียส อุณหภูมิของแม่พิมพ์โลหะ คือ 350 องศาเซลเซียส และทรายใส่แบบมีอุณหภูมิอยู่ที่ 50 องศาเซลเซียส โดยจะแสดงผลการจำลองช่วงระยะเวลาการแข็งตัวของน้ำโลหะ (Solidification time) ภายในแม่พิมพ์ และจำลองปริมาณรูพรุนที่เกิดขึ้น ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ของชิ้นงานภายในแบบหล่อ โดยผลการจำลองดังกล่าวจะนำมาเปรียบเทียบกับชิ้นงาน Pipe inlet ที่ตรวจพบการรั่วในขั้นตอนการตรวจสอบคุณภาพของกระบวนการผลิต

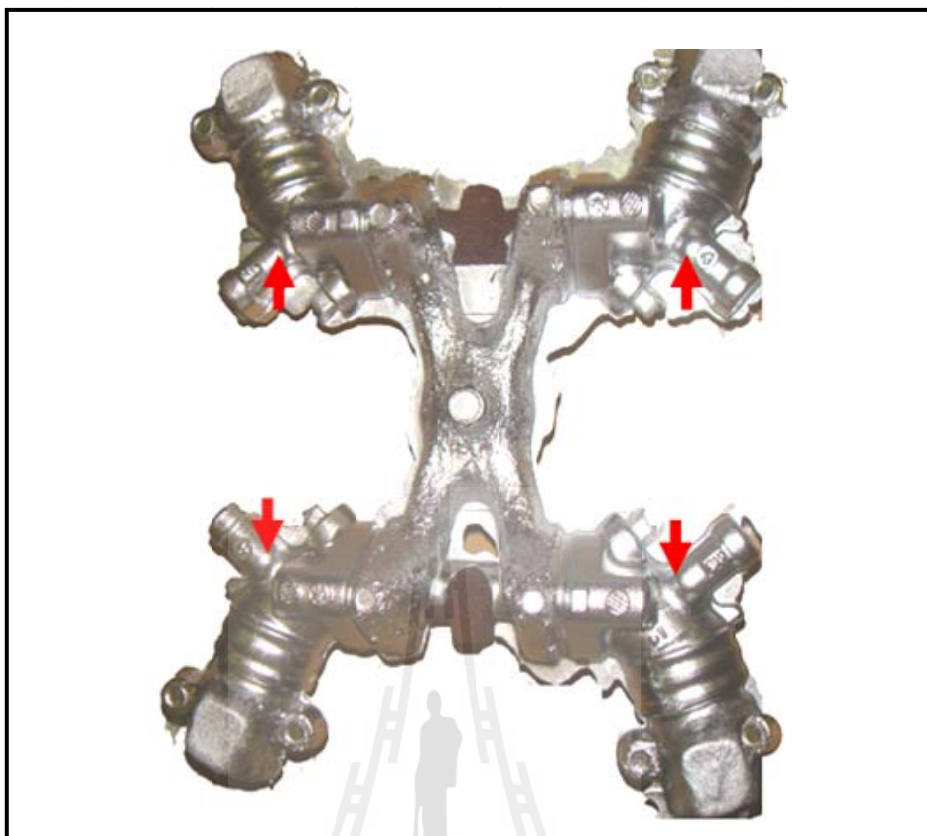
จากผลของการจำลองด้วยซอฟต์แวร์จำลองงานหล่อขึ้นรูป แสดงให้เห็นช่วงระยะเวลาแข็งตัวของน้ำโลหะ ที่มีความแตกต่างกันตามตำแหน่งภายในแม่พิมพ์ ดังที่ได้แสดงในรูปที่ 4.10 ส่วนผลการจำลองปริมาณรูพรุนที่เกิดขึ้นในตำแหน่งต่าง ๆ ของชิ้นงานภายในแม่พิมพ์ แสดงในรูปที่ 4.11 พบว่ารูพรุนจะเกิดขึ้นบริเวณตำแหน่งใต้รูเจาะเกลียว ทั้ง 4 ตำแหน่ง ซึ่งตำแหน่งที่เกิดข้อบกพร่องจากการจำลองด้วยซอฟต์แวร์นี้ เป็นบริเวณเดียวกันกับตำแหน่งที่เกิดข้อบกพร่องที่ตรวจพบในชิ้นส่วน Pipe inlet ดังแสดงเปรียบเทียบในรูปที่ 4.12



รูปที่ 4.10 แสดงภาพจำลองแสดงช่วงเวลาการแข็งตัวของน้ำโลหะ (Solidification Time)



รูปที่ 4.11 ภาพจำลองแสดงปริมาณการเกิดรูพรุนจากการหดตัว ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ในชิ้นงาน



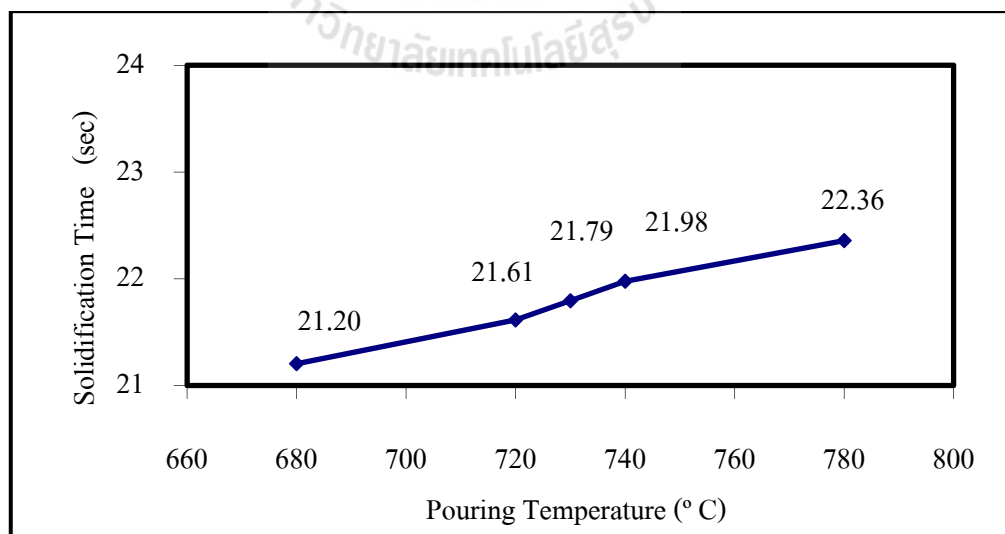
รูปที่ 4.12 แสดงตำแหน่งที่เกิดรูพรุนในชิ้นงาน

จากผลการจำลองด้วยซอฟต์แวร์จำลองงานหล่อ พบว่าตำแหน่งที่เกิดข้อบกพร่องในชิ้นงานมีความสอดคล้องกับตำแหน่งข้อบกพร่องที่ตรวจพบในกระบวนการผลิต ดังนั้นในส่วนของการศึกษาเพื่อหาแนวทางแก้ไขการเกิดข้อบกพร่องในตำแหน่งกล่าว ด้วยการใช้โปรแกรม ProCAST® V.2009 เพื่อช่วยวิเคราะห์ตัวแปรที่มีผลกระทบต่ออาการเกิดรูพรุนในชิ้นงาน

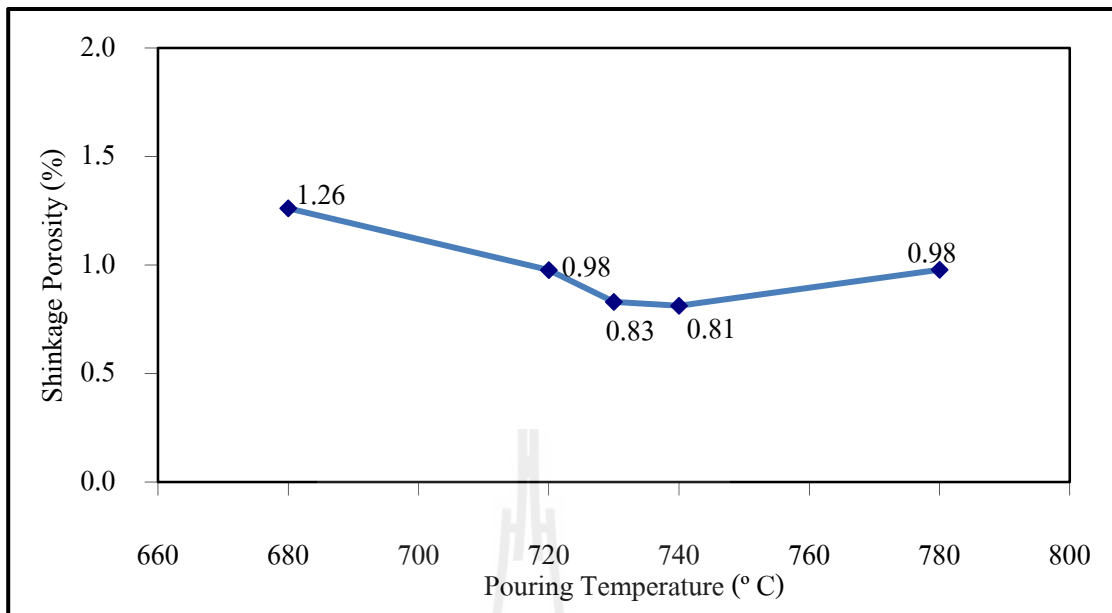
4.2.1 ผลกระทบของอุณหภูมิหน้าโลหะต่อระยะเวลาการแข็งตัวและปริมาณรูพรุน

สำหรับตัวแปรแรกที่จำลองเพื่อศึกษาถึงผลกระทบต่อระยะเวลาในการแข็งตัวและปริมาณรูพรุนที่เกิดขึ้น ณ ตำแหน่ง (9, 9.5, 0) คืออุณหภูมิของน้ำโลหะขณะเทลงแบบหล่อ โดยทดลองเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของน้ำโลหะที่แตกต่างกัน 5 องศาเซลเซียส ได้แก่ 680 720 730 740 และ 780 องศาเซลเซียส ตามลำดับ โดยได้กำหนดให้ตัวแปรการหล่อขึ้นรูปอื่นๆ มีค่าเช่นเดียวกันกับที่ใช้ในกระบวนการหล่อขึ้นรูปชิ้นส่วน Pipe inlet ดังนี้ คือ แรงดันที่ดันน้ำโลหะเข้าสู่แม่พิมพ์ในแนวแกน z มีค่าเท่ากับ 0.2 บาร์ อุณหภูมิของแม่พิมพ์โลหะ คือ 350 องศาเซลเซียส และทรายใส่แบบมีอุณหภูมิอยู่ที่ 50 องศาเซลเซียส

จากผลการจำลองแสดงช่วงเวลาของการแข็งตัวของน้ำโลหะ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของน้ำโลหะขณะเทลงแบบหล่อ ดังแสดงในรูปที่ 4.13 พบว่า เมื่ออุณหภูมิของน้ำโลหะเพิ่มขึ้น ทำให้ช่วงเวลาการแข็งตัวของน้ำโลหะเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย มีค่าระหว่าง 21-22.5 วินาที ส่วนผลการจำลองปริมาณรูพรุนที่เกิดขึ้นแสดงในรูปที่ 4.14 พบว่าเมื่ออุณหภูมิเทน้ำโลหะอยู่ที่ 680 องศาเซลเซียส พบรูพรุนปริมาณมากที่สุดสำหรับตัวแปรนี้ แต่ปริมาณรูพรุนที่พบมีแนวโน้มลดลง เมื่อเพิ่มอุณหภูมิของน้ำโลหะขณะเทลงแบบหล่อจนถึง 730 องศาเซลเซียส แต่หลังจากที่เพิ่มอุณหภูมิเทของน้ำโลหะเป็น 740 และ 780 องศาเซลเซียส ก็พบว่ารูพรุนมีปริมาณเพิ่มขึ้นอีกครั้ง แต่อย่างไรก็ดี รูพรุนที่เพิ่มขึ้นนี้ก็มีจำนวนน้อยกว่าเงื่อนไขที่กำหนดอุณหภูมิเทของน้ำโลหะอยู่ที่ 680 องศาเซลเซียส อาจเนื่องมาจากในขณะที่น้ำโลหะมีอุณหภูมิต่ำจะทำให้การแข็งตัวของน้ำโลหะเกิดขึ้นก่อนที่น้ำโลหะจะสามารถไหลเข้าสู่แม่พิมพ์จนเต็มเต็มในแบบหล่อ แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิเทน้ำโลหะขณะเทลงแบบหล่อจะทำให้การเติมเต็มน้ำโลหะในแบบหล่อดีขึ้น แต่ทั้งนี้ การเพิ่มอุณหภูมิของน้ำโลหะขณะเทลงแบบหล่อที่สูงเกินไป ก็เป็นสาเหตุทำให้ ปริมาตรโลหะหลอมเหลวเมื่อเปลี่ยนสถานะกลายเป็นของแข็งมีเพิ่มขึ้น และเกิดเป็นรูพรุนจากการหดตัวในชิ้นงานหล่อ ดังนั้นเมื่ออุณหภูมิขณะเทน้ำโลหะต่ำเกินไปก็ทำให้เกิดรูพรุนจากการไม่เต็มของน้ำโลหะในแบบหล่อ แต่เมื่ออุณหภูมิเทน้ำโลหะขณะเทลงแบบหล่อสูงเกินไป ก็เป็นสาเหตุให้เกิดรูพรุนจากการหดตัว โดยผลจากการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ดังที่ได้แสดงในรูปที่ 4.14 แสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิที่เหมาะสมของน้ำโลหะขณะเทลงแบบหล่อ คือ 730 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นอุณหภูมิของน้ำโลหะขณะเทลงแบบหล่อที่ใช้ในกระบวนการผลิตชิ้นส่วน Pipe inlet



รูปที่ 4.13 แสดงผลการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเทน้ำโลหะต่อระยะเวลาการแข็งตัวของน้ำโลหะ



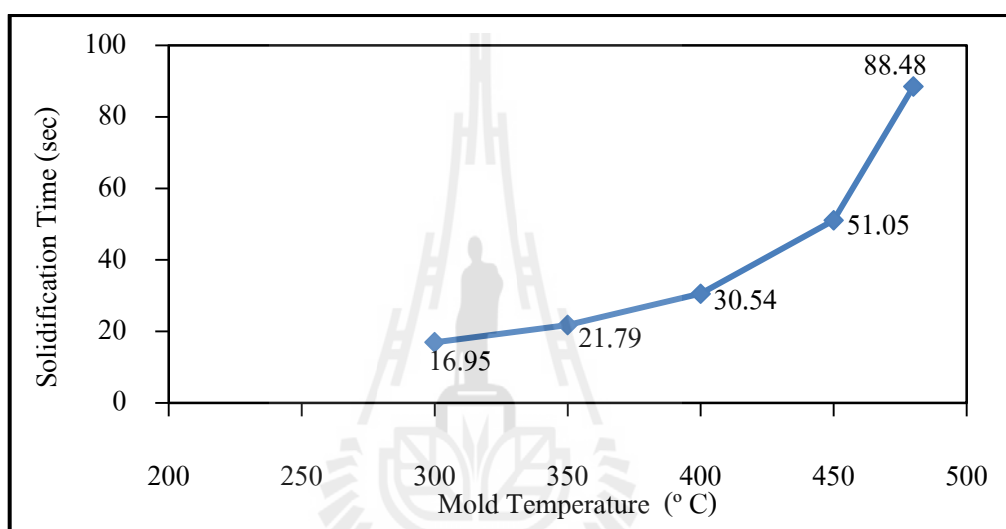
รูปที่ 4.14 แสดงปริมาณรูพรุนที่เกิดขึ้นในชิ้นงานหล่อเมื่อเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเทน้ำโลหะ

4.2.2 ผลกระทบของอุณหภูมิแม่พิมพ์โลหะต่อระยะเวลาการแข็งตัวและปริมาณรูพรุน

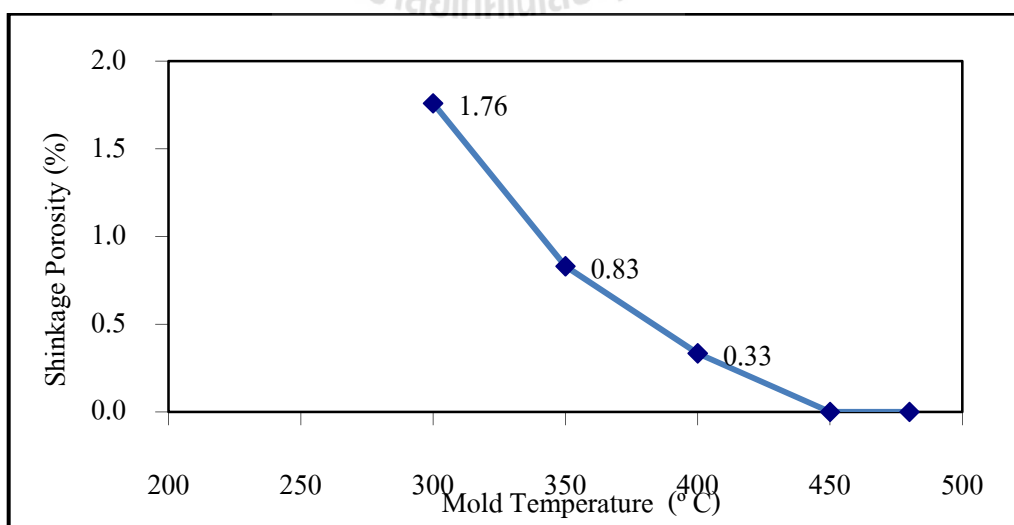
การศึกษาผลกระทบต่อระยะเวลาการแข็งตัวและปริมาณรูพรุนที่เกิดขึ้นในชิ้นงานหล่อ เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของแม่พิมพ์โลหะ ที่มีความแตกต่างกัน 5 เงื่อนไขการทดลอง ได้แก่ 300 350 400 450 และ 480 องศาเซลเซียส โดยสภาวะการหล่อขึ้นรูปอื่นได้กำหนดให้มีค่าเช่นเดียวกันกับกระบวนการหล่อขึ้นรูปของสถานประกอบการ คือ แรงลมที่ดันน้ำโลหะเข้าสู่แม่พิมพ์ในแนวแกน z มีค่าเท่ากับ 0.2 บาร์ น้ำโลหะขณะเทลงแบบหล่อมีอุณหภูมิเท่ากับ 730 องศาเซลเซียส และทรายใส่แบบมีอุณหภูมิอยู่ที่ 50 องศาเซลเซียส

ผลการวิเคราะห์เวลาในการแข็งตัว ดังแสดงในรูปที่ 4.15 พบว่าเวลาในการแข็งตัวมีการเปลี่ยนแปลงเป็นอย่างมาก โดยพบว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิแม่พิมพ์โลหะจาก 300 ถึง 480 องศาเซลเซียส ทำให้เวลาในการแข็งตัวเพิ่มขึ้นจาก 20 ถึง 90 วินาทีโดยประมาณ ส่วนผลการจำลองปริมาณรูพรุนที่เกิดขึ้น แสดงในรูปที่ 4.16 พบว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิแม่พิมพ์โลหะจาก 300 ถึง 480 องศาเซลเซียส รูพรุนที่เกิดขึ้นมีแนวโน้มลดลงจาก 1.7 มาที่ 0 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร เนื่องจากเมื่อแม่พิมพ์โลหะมีอุณหภูมิต่ำ จะมีความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิแม่พิมพ์โลหะกับน้ำโลหะขณะเทลงแบบหล่อค่อนข้างมาก ส่งผลให้ชิ้นงานเกิดการแข็งตัวอย่างรวดเร็ว ในขณะที่น้ำโลหะอาจยังไม่เต็มเต็มในชิ้นงาน เมื่ออุณหภูมิแม่พิมพ์โลหะเพิ่มสูงขึ้น จะทำให้ความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างน้ำโลหะขณะเทลงแบบหล่อและแม่พิมพ์ลดลง ดังนั้นการเติมเต็มของน้ำโลหะจะมีประสิทธิภาพมาก

ขึ้น ส่งผลให้ปริมาณรูพรุนในชิ้นงานลดลง จนกระทั่งมีค่าเป็นศูนย์เมื่อแม่พิมพ์โลหะมีอุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส ดังนั้นถ้าต้องการป้องกันไม่ให้เกิดรูพรุนในตำแหน่งนี้ ต้องกำหนดให้แม่พิมพ์มีอุณหภูมิไม่ต่ำกว่า 450 องศาเซลเซียส ซึ่งในทางปฏิบัติการแก้ปัญหาด้วยวิธีดังกล่าว จะทำให้ต้นทุนการผลิตเพิ่มขึ้นสูง เนื่องจาก ถ้าแม่พิมพ์โลหะมีอุณหภูมิสูงกว่า 450 องศาเซลเซียส จะทำให้อายุการใช้งานของแม่พิมพ์ลดลง และยังมีผลทำให้ผลิตชิ้นงานได้จำนวนน้อยลง ใช้ระยะเวลาในการแข็งตัวเพิ่มขึ้น และต้องเพิ่มเวลาในการให้ความร้อนแก่แม่พิมพ์ จนกระทั่งมีอุณหภูมิสูงกว่า 450 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.15 แสดงผลการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิแม่พิมพ์โลหะต่อระยะเวลาการแข็งตัวของน้ำโลหะ



รูปที่ 4.16 แสดงปริมาณรูพรุนที่เกิดขึ้นในชิ้นงานหล่อเมื่อเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิแม่พิมพ์โลหะ

4.3 ผลการศึกษาวิเคราะห์จำลองการแก้ไขแม่พิมพ์โลหะ

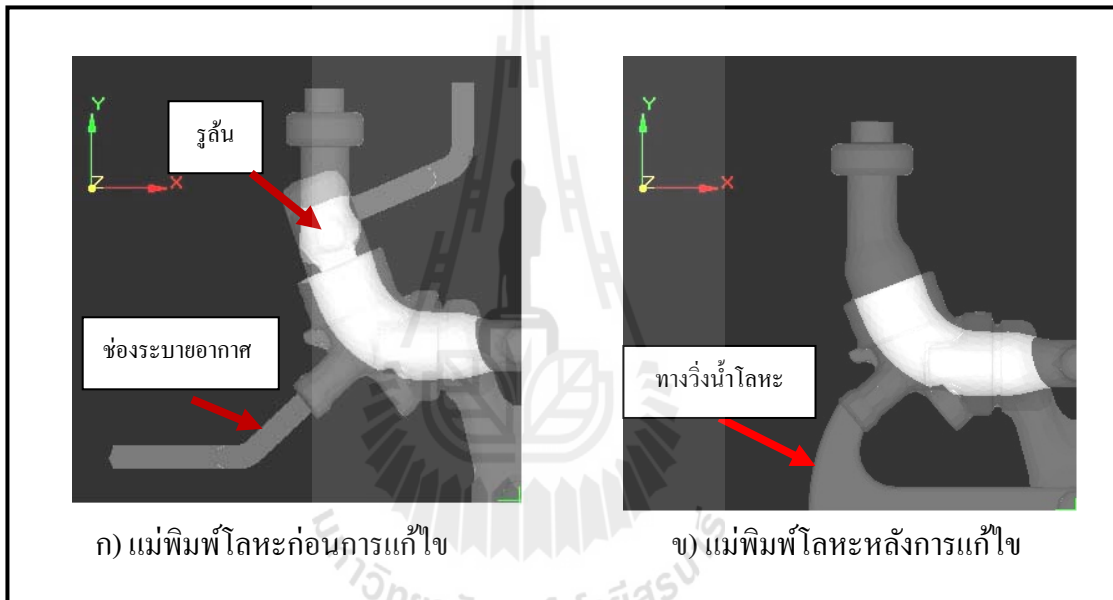
เนื่องจากแนวทางการแก้ไขข้อบกพร่องด้วยการเพิ่มอุณหภูมิของแม่พิมพ์เป็น 450 องศาเซลเซียส จะทำให้อัตราการสึกหรอของแม่พิมพ์โลหะเพิ่มขึ้นสูงและลดอัตราการผลิต จึงวิธีการที่ไม่คุ้มทุนในการผลิตชิ้นส่วน Pipe inlet ดังนั้นจึงต้องวิเคราะห์ตัวแปรอื่นที่สามารถลดการเกิดข้อบกพร่องในชิ้นงาน โดยเฉพาะตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับแม่พิมพ์โลหะ ซึ่งจากการวิเคราะห์กระบวนการผลิต ดังที่ได้กล่าวไว้ในข้อที่ 4.2 แสดงให้เห็นว่าการออกแบบแม่พิมพ์อาจจะยังมีข้อบกพร่อง ซึ่งมีโอกาสสูงที่จะเป็นสาเหตุทำให้เกิดข้อบกพร่องในกระบวนการผลิตชิ้นส่วน Pipe inlet โดยจากการวิเคราะห์ตำแหน่งที่เกิดรูพรุนเป็นตำแหน่งที่มีการเย็นตัวช้าที่สุด ดังที่ได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.12 ดังนั้นการออกแบบแม่พิมพ์ที่ไม่เหมาะสมจะทำให้การชดเชยน้ำโลหะ (Melt feeding) ไม่เพียงพอ และจะเป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้เกิดรูพรุนจากการหดตัวในกระบวนการแข็งตัวของโลหะ

หลังจากการพิจารณาการออกแบบแม่พิมพ์โลหะที่ใช้ในกระบวนการผลิตชิ้นส่วน Pipe inlet พบว่ามีการออกแบบให้น้ำโลหะไหลเข้าสู่แม่พิมพ์โลหะจากทางเข้า (Gate Runner) เพียงด้านเดียวด้วยแรงดันของน้ำโลหะ เมื่อกระบวนการแข็งตัวของน้ำโลหะเริ่มขึ้น โดยเริ่มแข็งตัวจากผิวด้านบนที่ติดกับแม่พิมพ์โลหะก่อน ซึ่งเป็นส่วนที่มีการถ่ายเทความร้อนได้เร็ว แต่บริเวณ Parting line ซึ่งอยู่บริเวณตรงกลางของแม่พิมพ์โลหะนั้นมีการเย็นตัวช้าที่สุด เนื่องจากเป็นตำแหน่งที่มีความหนามากกว่าบริเวณอื่น (โดยมีความหนาประมาณ 40 มิลลิเมตร) การถ่ายเทความร้อนบริเวณนี้จะเกิดขึ้นได้ช้าที่สุดในชิ้นงานหล่อ ส่วนน้ำโลหะบริเวณรอบ ๆ ที่ติดกับแม่พิมพ์โลหะที่เริ่มการแข็งตัวก่อน และดึงน้ำโลหะจากบริเวณรอบ ๆ เพื่อชดเชยการหดตัวที่เกิดขึ้น ส่งผลให้บริเวณส่วนกลางของชิ้นงานจะเกิดเป็นช่องว่าง ถ้าหากไม่มีน้ำโลหะเข้ามาชดเชยส่วนที่เกิดการหดตัวนี้ ดังนั้นเมื่อกระบวนการแข็งตัวของโลหะเสร็จสมบูรณ์ จึงเกิดเป็นช่องว่างบริเวณส่วนกลางของชิ้นงาน ซึ่งเป็นจุดสุดท้ายในกระบวนการแข็งตัว

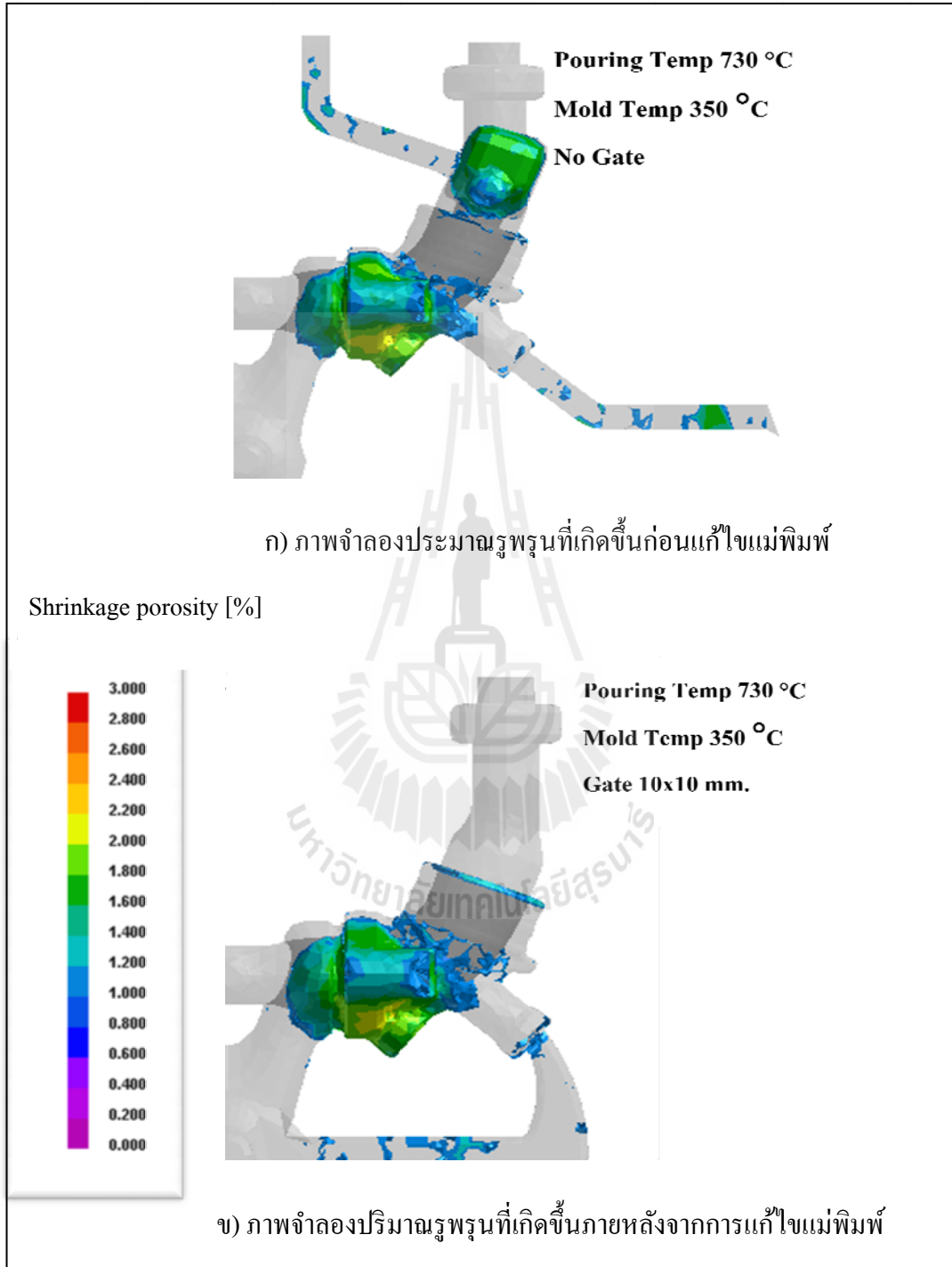
4.3.1 ผลการจำลองการเพิ่มขนาดทางเดินน้ำโลหะ

เพื่อแก้ไขปัญหาดังกล่าว จึงจำลองการแก้ไขแม่พิมพ์โลหะด้วยซอฟต์แวร์จำลองงานหล่อให้สามารถชดเชยน้ำโลหะได้ดีขึ้น ด้วยการปิดรูสั้น (Riser) และเปลี่ยนช่องระบายอากาศให้เป็นทางวิ่งน้ำของน้ำโลหะ (Runner) เข้าสู่แม่พิมพ์ โดยภาพจำลองแม่พิมพ์โลหะก่อนและหลังการแก้ไข ดังแสดงในรูปที่ 4.17 ก) และ ข) ตามลำดับ โดยในเบื้องต้นได้กำหนดให้เพิ่มทางวิ่งของน้ำโลหะมีขนาด 10×10 มิลลิเมตร (จากตำแหน่ง 9, 9.5, 0) ซึ่งผลจากการจำลอง พบว่าการเพิ่มทางวิ่งของน้ำโลหะ 10×10 มิลลิเมตร ในตำแหน่งดังกล่าวสามารถลดการเกิดรูพรุนภายในชิ้นงานได้ โดยปริมาณรูพรุนที่เกิดขึ้นในชิ้นงานก่อนและหลังการแก้ไขแม่พิมพ์ แสดงเปรียบเทียบในรูปที่ 4.17 ก) และ ข) ตามลำดับ

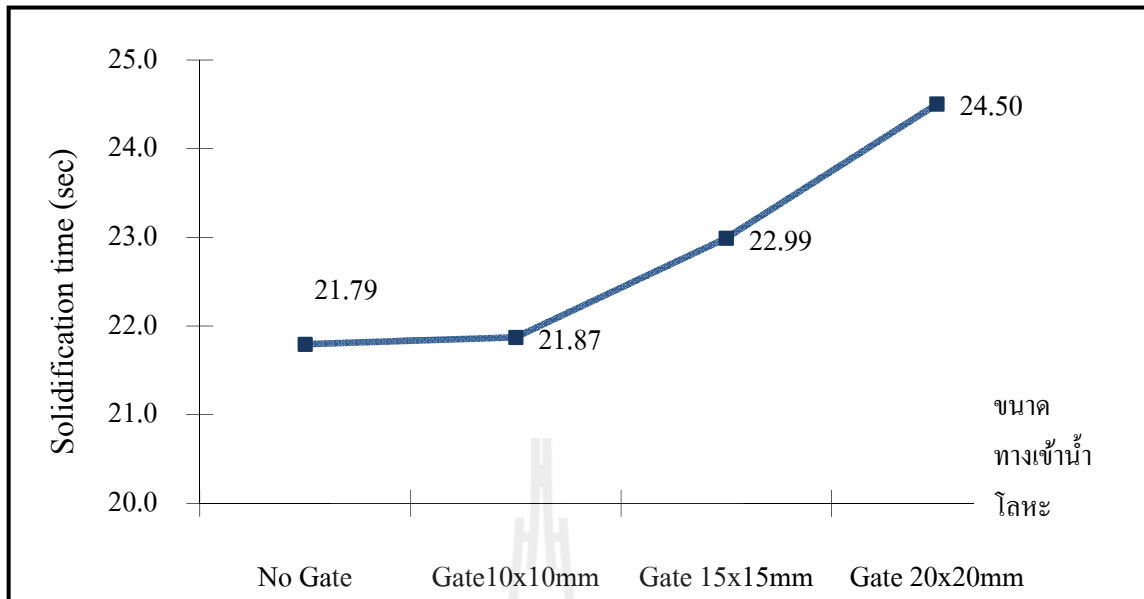
จากผลการจำลอง แสดงให้เห็นว่าปริมาณรูพรุนลดลงเมื่อทำการแก้ไขแม่พิมพ์ โดยการเพิ่มทางเดินน้ำโลหะ แต่อย่างไรก็ตามปริมาณรูพรุนที่เกิดขึ้นยังคงมีปริมาณค่อนข้างสูง ดังนั้นเพื่อวิเคราะห์แนวทางการแก้ไขเพิ่มเติม จึงทำการจำลองผลกระทบที่เกิดขึ้นใน ตำแหน่ง (9, 9.5, 0) ซึ่งเป็นส่วนที่มีรูพรุนเกิดขึ้นในปริมาณสูง ดังที่ได้กล่าวไว้ในข้อที่ 4.3 โดยกำหนดให้มีความแตกต่างของขนาดทางเดินน้ำโลหะ 3 ขนาด ได้แก่ ขนาด 10×10 มิลลิเมตร 15×15 มิลลิเมตร และ 20×20 มิลลิเมตร โดยใช้สภาวะการขึ้นรูปสำหรับกระบวนการผลิตชิ้นส่วน Pipe inlet คือ อุณหภูมิน้ำโลหะขณะเทลงแบบหล่อ 730 องศาเซลเซียสตามลำดับ และกำหนดให้แม่พิมพ์โลหะมีอุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส โดยผลการแสดงผลการจำลองในรูปแบบที่ 4.19-4.20 ซึ่งจะเห็นได้ว่า ปริมาณรูพรุนมีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มขนาดทางเดินน้ำโลหะเป็น 15×15 มิลลิเมตร และ 20×20 มิลลิเมตร



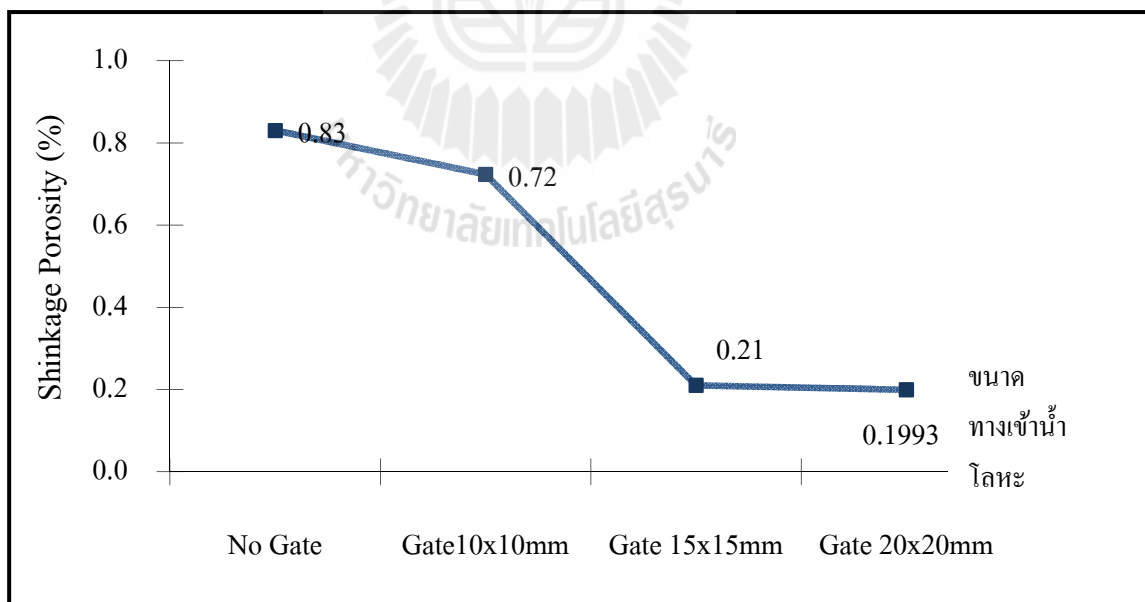
รูปที่ 4.17 แสดงเปรียบเทียบแม่พิมพ์โลหะก่อนและหลังการแก้ไข โดยการปิดรูต้นของชิ้นงาน และเพิ่มทางน้ำเข้าของน้ำโลหะ



รูปที่ 4.18 แสดงภาพจำลองประมาณรูพรุนที่เกิดขึ้นในชิ้นงานก่อน และหลังการแก้ไขแม่พิมพ์โดยเพิ่มทางเดินน้ำโลหะขนาด 10×10 มิลลิเมตร



รูปที่ 4.19 แสดงผลการจำลองเวลาการแข็งตัวของน้ำโลหะ เมื่อเพิ่มขนาดทางวิ่งของน้ำโลหะ

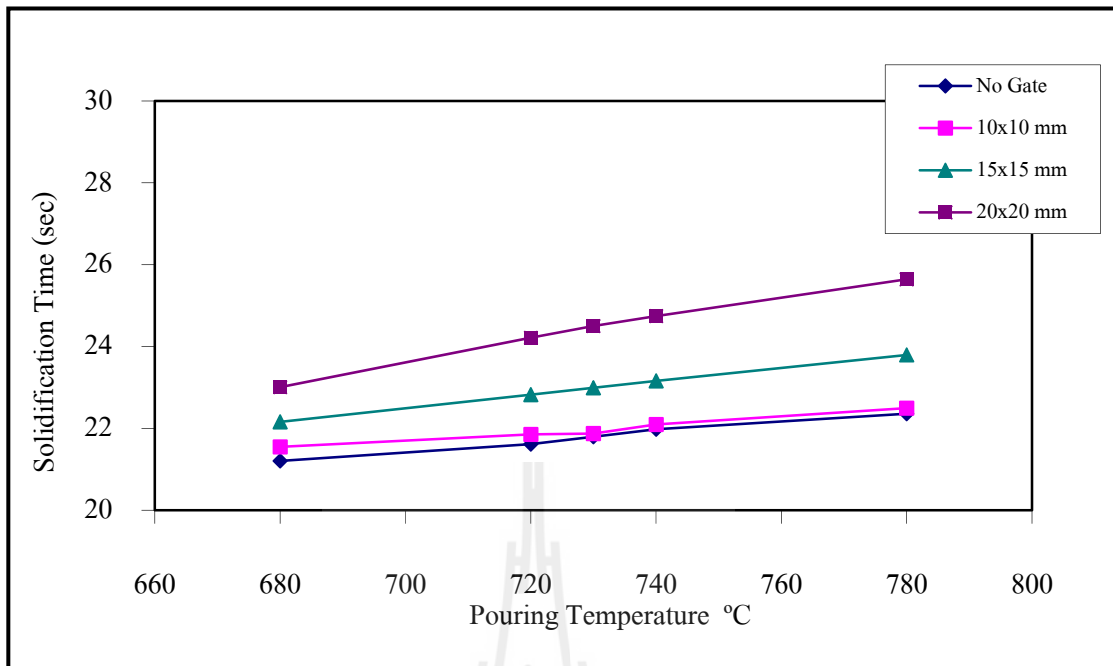


รูปที่ 4.20 แสดงผลการจำลองปริมาณรูพรุนที่เกิดขึ้นในชิ้นงานหล่อ เมื่อเพิ่มขนาดทางวิ่งของน้ำโลหะ

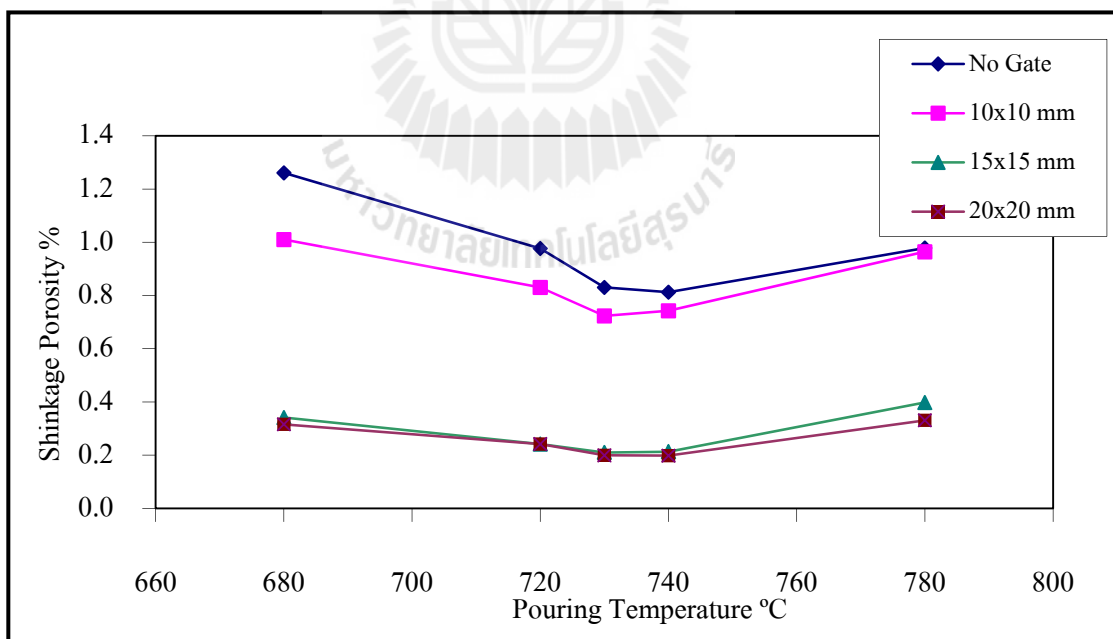
4.3.2 ผลการจำลองการเพิ่มขนาดทางเดินน้ำโลหะร่วมกับการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเทน้ำโลหะ

นอกเหนือจากการศึกษาเพิ่มขนาดทางเดินน้ำโลหะแล้ว ยังได้ศึกษาผลของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิการเทน้ำโลหะในช่วงอุณหภูมิ 680-780 องศาเซลเซียสร่วมด้วย โดยทำการเปรียบเทียบในกรณีที่ไม่เพิ่มทางวิ่ง และเพิ่มทางเดินน้ำโลหะเป็นขนาด 10×10 มิลลิเมตร 15×15 มิลลิเมตร และ 20×20 มิลลิเมตร ผลการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม ProCAST® V.2009 แสดงผลการจำลองระยะเวลาในการแข็งตัวของน้ำโลหะดังในรูปที่ 4.21 แสดงให้เห็นว่า เมื่อเพิ่มอุณหภูมิเทน้ำโลหะ ทำให้เวลาในการแข็งตัวของน้ำโลหะเพิ่มขึ้น ส่วนผลกระทบจากขนาดทางวิ่งของน้ำโลหะ ต่อเวลาในการแข็งตัวของน้ำโลหะนั้น พบว่าเงื่อนไขการจำลองที่กำหนดให้แม่พิมพ์โลหะไม่มีทางเดินน้ำโลหะ (No gate) ซึ่งเป็นแม่พิมพ์เดิมที่ใช้ในกระบวนการผลิตชิ้นส่วน Pipe inlet จะมีช่วงเวลาการแข็งตัวของน้ำโลหะต่ำที่สุด และช่วงเวลาการแข็งตัวของน้ำโลหะจะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มทางวิ่งของน้ำโลหะ ให้มีขนาด 10×10 มิลลิเมตร และช่วงเวลาการแข็งตัวของน้ำโลหะจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ เมื่อเพิ่มขนาดของทางเดินน้ำโลหะน้ำโลหะ เป็น 15×15 มิลลิเมตร และ 20×20 มิลลิเมตร ตามลำดับ

ในส่วนของผลจากจำลองปริมาณรูพรุนที่เกิดขึ้นเมื่อเพิ่มขนาดทางเดินน้ำโลหะร่วมกับการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเทน้ำโลหะ แสดงในรูปที่ 4.22 พบว่า แม่พิมพ์โลหะเดิมที่ใช้ในกระบวนการผลิตมีปริมาณรูพรุนสูงที่สุด แต่อย่างไรก็ดีปริมาณรูพรุนที่เกิดขึ้นในชิ้นงานจะลดต่ำลงเมื่ออุณหภูมิเทน้ำโลหะเพิ่มสูงขึ้น นอกจากนี้การเพิ่มขนาดของทางวิ่งน้ำโลหะก็ทำให้ปริมาณรูพรุนลดลง แต่มีข้อพิจารณาเพิ่มเติมว่า การเพิ่มขนาดทางวิ่งของน้ำโลหะเป็น 20×20 มิลลิเมตร เป็นเงื่อนไขที่พบปริมาณรูพรุนน้อยที่สุด แต่ปริมาณรูพรุนลดลงเพียงเล็กน้อย เมื่อเปรียบเทียบกับเงื่อนไขการทดลองที่มีขนาดทางวิ่งของน้ำโลหะ 15×15 มิลลิเมตร แต่การเพิ่มขนาดทางเดินน้ำโลหะจะมีผลกระทบต่อการสูญเสียเนื้อโลหะต่อชิ้นงาน ทำให้สิ้นเปลืองพลังงานในการหลอมโลหะอีกครั้ง เพื่อนำมาเข้าสู่กระบวนการผลิต



รูปที่ 4.21 แสดงผลการจำลองเวลาการแข็งตัวของน้ำโลหะ เมื่อเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิเทน้ำโลหะ ร่วมกับการแก้ไขทางเดินน้ำโลหะของแม่พิมพ์

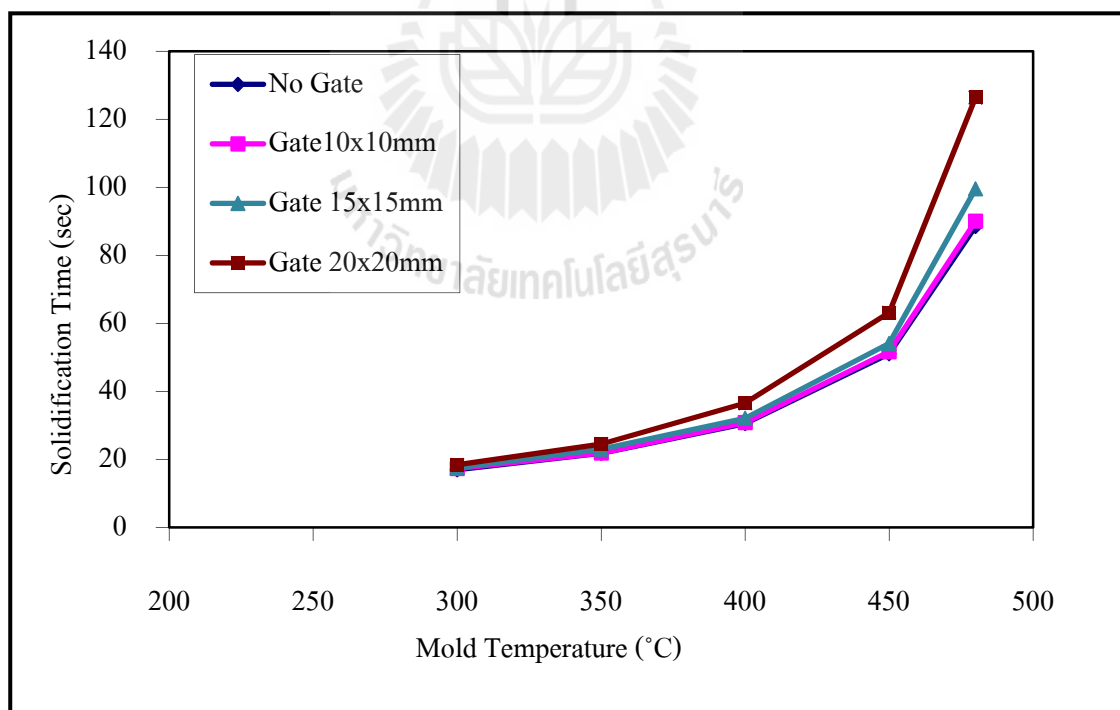


รูปที่ 4.22 แสดงผลการจำลองปริมาณรูพรุนที่เกิดขึ้น เมื่อเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิเทน้ำโลหะ ร่วมกับการแก้ไขทางเดินน้ำโลหะของแม่พิมพ์

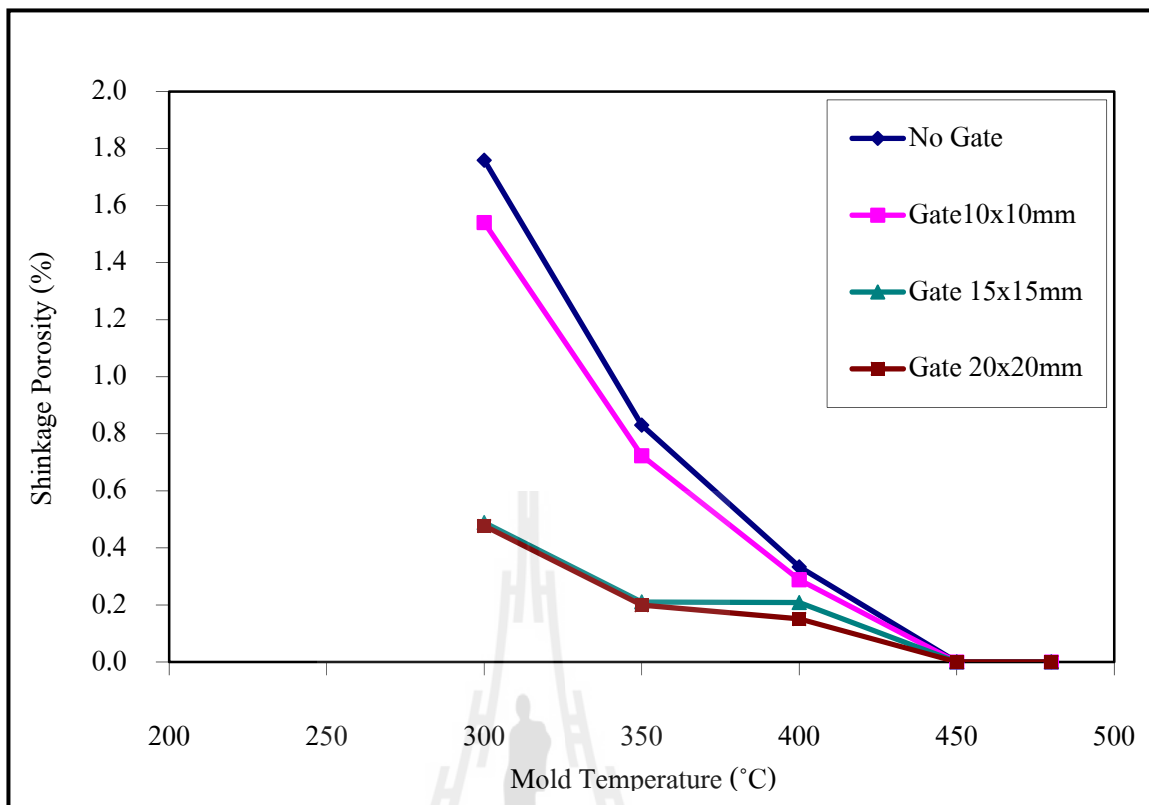
4.3.3 ผลการจำลองการเพิ่มขนาดทางเดินน้ำโลหะร่วมกับการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิแม่พิมพ์โลหะ

เมื่อทำการศึกษาผลกระทบของ เพิ่มขนาดทางเดินน้ำโลหะ ร่วมกับการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของแม่พิมพ์โลหะต่อระยะเวลาการแข็งตัวของน้ำโลหะและปริมาณรูพรุนที่เกิดขึ้นในชิ้นงานหล่อ ด้วยโปรแกรม ProCAST[®] V.2009 ดังแสดงในรูปที่ 4.23 พบว่าที่อุณหภูมิแม่พิมพ์โลหะ 300 องศาเซลเซียส จะมีช่วงเวลาการแข็งตัวของน้ำโลหะต่ำที่สุด แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิของแม่พิมพ์โลหะ ทำให้ช่วงเวลาการแข็งตัวของน้ำโลหะเพิ่มขึ้น ทั้งในกรณีที่ไม่มีการแก้ไขและแก้ไขแม่พิมพ์ในส่วนช่องทางเดินน้ำโลหะ แต่จะสังเกตได้ว่าหากเพิ่มขนาดทางเดินน้ำโลหะเป็น 20×20 มิลลิเมตร จะทำให้มีระยะเวลาในการแข็งตัวมากที่สุด

ส่วนผลการจำลองปริมาณรูพรุนที่เกิดขึ้นในชิ้นงานเมื่อเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของแม่พิมพ์แสดงในรูปที่ 4.24 พบว่า ปริมาณรูพรุนที่เกิดขึ้นในชิ้นงานจะลดลงเมื่อเพิ่มอุณหภูมิของแม่พิมพ์โลหะ และการเพิ่มขนาดของทางเดินน้ำโลหะ แต่เมื่อกำหนดให้ทางวิ่งของน้ำโลหะมีขนาด 20×20 มิลลิเมตร ซึ่งเป็นเงื่อนไขการทดลองที่มีปริมาณรูพรุนต่ำที่สุด แต่รูพรุนมีปริมาณลดลงเพียงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับเงื่อนไขการทดลองที่กำหนดให้ทางวิ่งของน้ำโลหะมีขนาด 15×15 มิลลิเมตร



รูปที่ 4.23 แสดงผลการจำลองเวลาการแข็งตัวของน้ำโลหะ เมื่อเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิแม่พิมพ์โลหะร่วมกับการแก้ไขแบบพิมพ์



รูปที่ 4.24 แสดงผลการจำลองปริมาณรูพรุนที่เกิดขึ้น เมื่อเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิแม่พิมพ์โลหะร่วมกับการแก้ไขแม่พิมพ์โลหะ

4.4 แนวทางการแก้ไขแม่พิมพ์โลหะ

จากผลการจำลองปริมาณรูพรุนที่เกิดขึ้นจากการเปลี่ยนแปลงน้ำโลหะขณะเทลงแบบหล่อร่วมกับการแก้ไขแม่พิมพ์โลหะ ก็ยืนยันได้ว่า การที่น้ำโลหะมีอุณหภูมิ 730 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นอุณหภูมิของน้ำโลหะขณะเทลงแบบหล่อที่ใช้ในกระบวนการผลิตชิ้นส่วน Pipe inlet มีความเหมาะสม เนื่องจากพบว่าเงื่อนไขที่กำหนดให้อุณหภูมิเทน้ำโลหะลงแบบหล่อเท่ากับ 730 องศาเซลเซียส มีรูพรุนเกิดขึ้น ณ ตำแหน่ง (9, 9.5, 0) น้อยที่สุด ทั้งในกรณีที่มีทางเดินน้ำโลหะ และไม่มีทางเดินน้ำโลหะ ดังที่ได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.22

ส่วนผลจากการจำลองสภาวะการหล่อด้วยการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของแม่พิมพ์ร่วมกับการแก้ไขแม่พิมพ์โลหะ เพื่อลดการเกิดรูพรุนในชิ้นส่วน Pipe inlet ณ ตำแหน่ง (9, 9.5, 0) พบว่า การทำให้แม่พิมพ์มีอุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส เป็นวิธีการที่สามารถลดปริมาณรูพรุนที่เกิดขึ้นจนมีค่าเป็น ร้อยละ 0 โดยปริมาตร ทั้งในเงื่อนไขที่ไม่มีการเพิ่มทางเดินน้ำโลหะ และในกรณีที่มีเพิ่มทางเดินน้ำโลหะ ดังแสดงในรูปที่ 4.24 แต่วิธีการดังกล่าว เป็นผลให้แม่พิมพ์มีอัตราการใช้สึกหรอมาก และเป็นวิธีการที่ไม่คุ้มทุนสำหรับผลิตชิ้นส่วน Pipe inlet

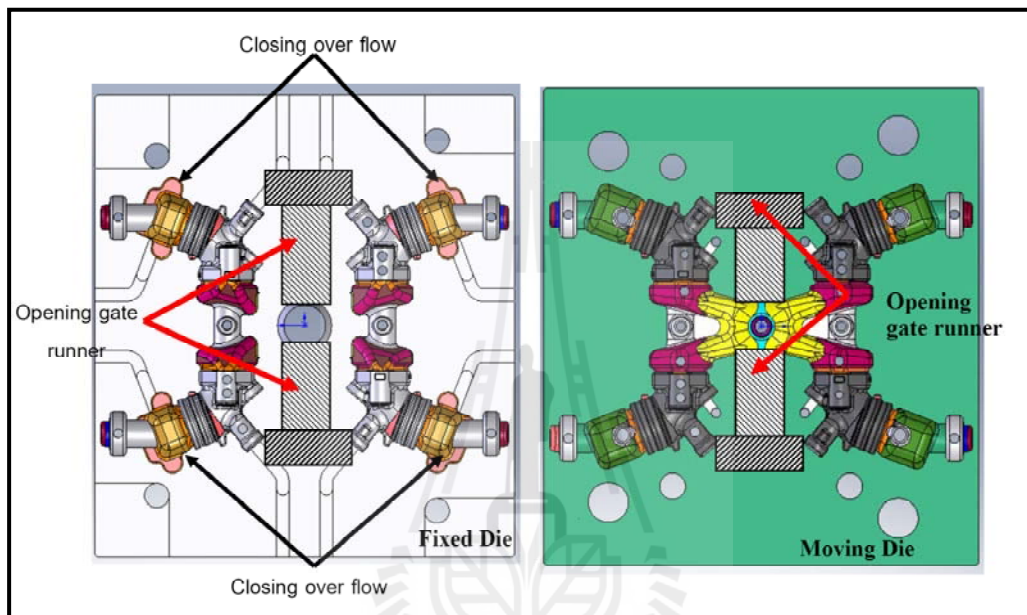
ดังนั้นจึงต้องพิจารณาเงื่อนไขที่มีการกำหนดให้แม่พิมพ์มีอุณหภูมิต่ำกว่า 450 องศาเซลเซียส จากผลการจำลองในรูปที่ 4.24 พบว่า เมื่ออุณหภูมิของแม่พิมพ์เท่ากับ 400 และ 350 องศาเซลเซียส มีปริมาณรูพรุนเกิดขึ้นในปริมาณที่ใกล้เคียงกันเมื่อมีการเพิ่มทางเดินน้ำโลหะ ขนาด 20×20 มิลลิเมตร และ 15×15 มิลลิเมตร การวิเคราะห์ดังกล่าว สถานประกอบการพิจารณาว่า การกำหนดให้แม่พิมพ์โลหะมีอุณหภูมิเท่ากับ 350 องศาเซลเซียส จะสามารถป้องกันการเกิดรูพรุนได้ไม่ต่างจากการกำหนดให้แม่พิมพ์โลหะมีอุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส แต่การเลือกเงื่อนไขที่มีอุณหภูมิของแม่พิมพ์โลหะที่มีค่าต่ำกว่า จะสามารถลดอัตราสึกหรอของแม่พิมพ์ที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิต สำหรับในส่วนของทางเดินน้ำโลหะ ขนาด 15×15 มิลลิเมตร ก็สามารถลดการเกิดรูพรุนได้ในปริมาณใกล้เคียงกับการเพิ่มทางเดินน้ำโลหะขนาด 20×20 มิลลิเมตร แต่ถ้าเลือกใช้ทางเดินน้ำโลหะที่มีขนาดใหญ่กว่าจะเป็นการเพิ่มปริมาณการสูญเสียอะลูมิเนียม ซึ่งเป็นวัตถุดิบในการหล่อขึ้นรูปชิ้นส่วน Pipe inlet

จากการวิเคราะห์ผลประโยชน์ที่ได้รับจากการลดอัตราการเกิดรูพรุน และความสูญเสียที่เพิ่มขึ้นในกระบวนการได้เลือกเงื่อนไขการทดลองที่มีการเพิ่มทางเดินน้ำน้ำโลหะขนาด 15×15 มิลลิเมตร โดยใช้อุณหภูมิของแม่พิมพ์โลหะเท่ากับ 350 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิของน้ำโลหะขณะเทลงแบบหล่อมีค่าเท่ากับ 730 องศาเซลเซียส ซึ่งทั้งอุณหภูมิของแม่พิมพ์โลหะ และอุณหภูมิเทน้ำโลหะลงแบบหล่อเหล่านี้เป็นสภาวะการหล่อขึ้นรูปเดิมที่สถานประกอบการใช้ในกระบวนการผลิต โดยได้สรุปแนวทางการป้องกันการเกิดข้อบกพร่องบริเวณใต้รูเจาะเกลียวของชิ้นงานหล่อ มีรายละเอียดดังนี้

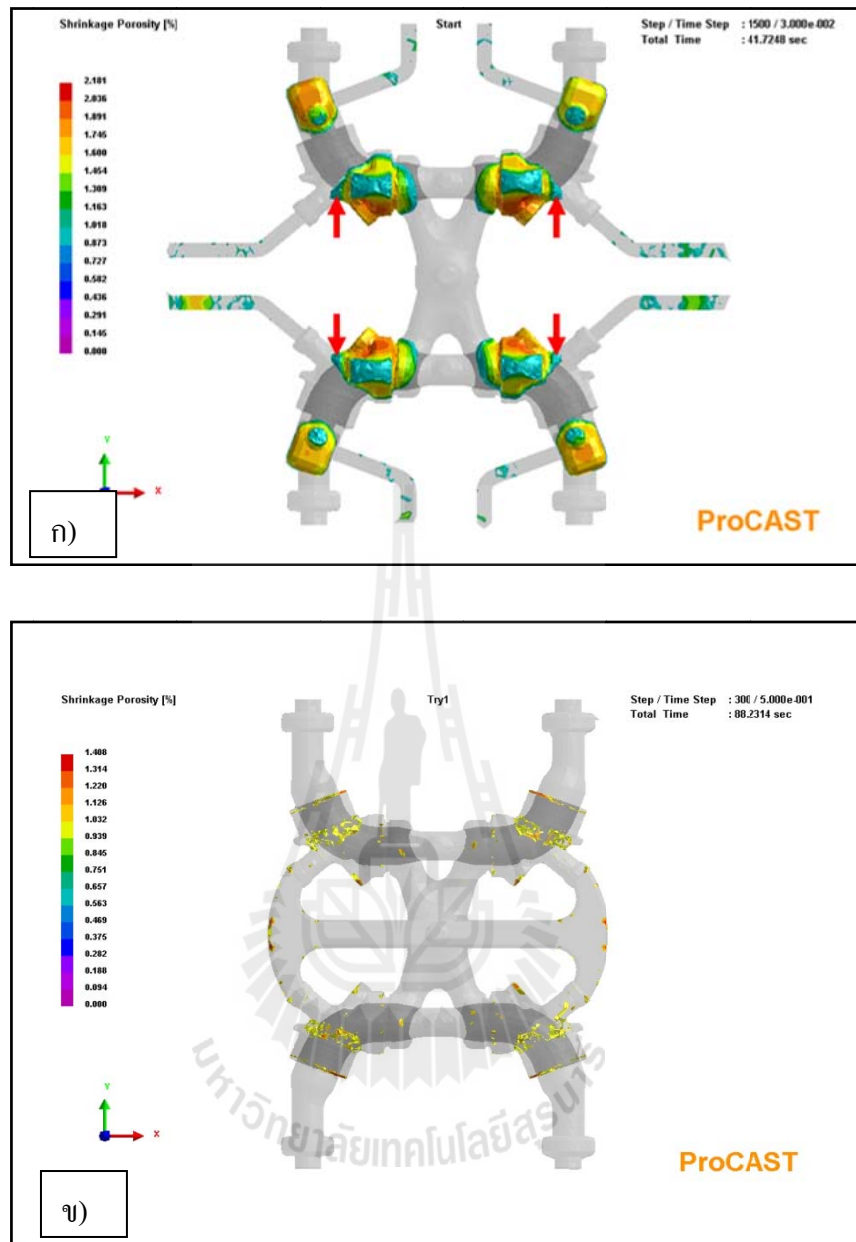
1. ปิดรูระบายอากาศทั้ง 4 ด้านในแม่พิมพ์โลหะ เนื่องจากได้ทำการพิจารณาแล้วว่ารูระบายอากาศนี้จะเป็นจุดสุดท้ายของการแข็งตัว และจะดึงน้ำโลหะบริเวณส่วนที่บาง
2. เปิดทางเดินน้ำโลหะ (Gate runner) เพิ่ม 2 ตำแหน่ง โดยตำแหน่งการไหลของน้ำโลหะควรจะเข้าบริเวณรูเจาะเกลียว M6 โดยมีจุดประสงค์เพื่อเพิ่มทางเข้าของน้ำโลหะบริเวณรูเจาะเกลียว M6 และเพื่อป้องกันไม่ให้บริเวณนี้เป็นจุดสุดท้ายของการแข็งตัวในชิ้นงาน
3. อุณหภูมิของน้ำโลหะขณะเทลงแบบหล่อ เท่ากับ 730 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่ใช้ในกระบวนการผลิตชิ้นส่วน Pipe inlet
4. อุณหภูมิของแม่พิมพ์มีค่าเท่ากับ 350 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นสภาวะที่ใช้ในกระบวนการผลิตชิ้นส่วน Pipe inlet ในสถานประกอบการ

จากข้อมูลการปรับปรุงกระบวนการผลิตด้วยการแก้แม่พิมพ์นั้น แสดงภาพจำลองของแม่พิมพ์โลหะดังรูปที่ 4.25 นอกจากนี้ยังทำการตรวจสอบว่าแนวทางการป้องกันการเกิดรูพรุนในชิ้นงานหล่อบริเวณใต้รูเจาะเกลียว ด้วยการจำลองงานหล่อ เพื่อแสดงความแตกต่างของปริมาณรู

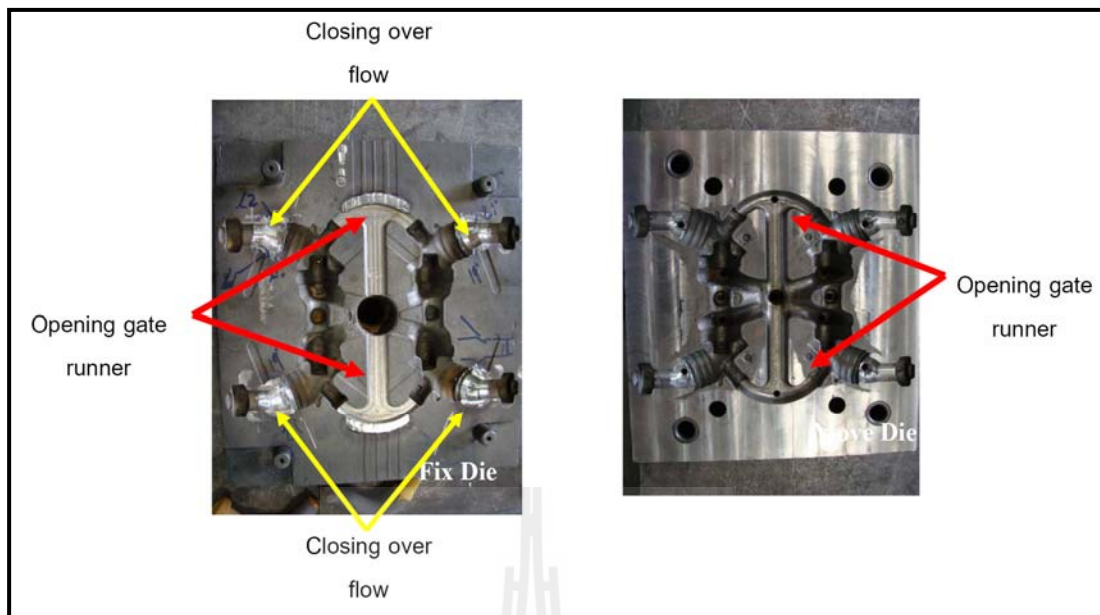
พอรุนที่เกิดขึ้น ก่อนและหลังการปรับปรุงกระบวนการผลิต ดังแสดงในรูปที่ 4.26 ก) และ ข) ตามลำดับ โดยผลการจำลองแสดงให้เห็นว่า ปริมาณพอรุนที่เกิดขึ้นในชิ้นงานภายหลังการแก้ไขแม่พิมพ์โลหะ มีปริมาณน้อยกว่าพอรุนที่เกิดขึ้นในชิ้นงานที่ยังไม่ได้ทำการแก้ไขแม่พิมพ์ จากนั้นจึงได้ทำการแก้ไขแม่พิมพ์โลหะ ดังแสดงในรูปที่ 4.27 เพื่อทำการทดลองหล่อขึ้นรูปชิ้นส่วน Pipe inlet จำนวนทั้งสิ้น 188 ชิ้น



รูปที่ 4.25 แสดงภาพจำลองการแก้ไขแม่พิมพ์โลหะ



รูปที่ 4.26 ภาพจำลองปริมาณรูพรุนที่เกิดขึ้นในชิ้นงาน ก) ก่อนปรับปรุงกระบวนการผลิต
ข) ภายหลังจากปรับปรุงกระบวนการผลิต



รูปที่ 4.27 แสดงแม่พิมพ์โลหะหลังจากได้รับการแก้ไข

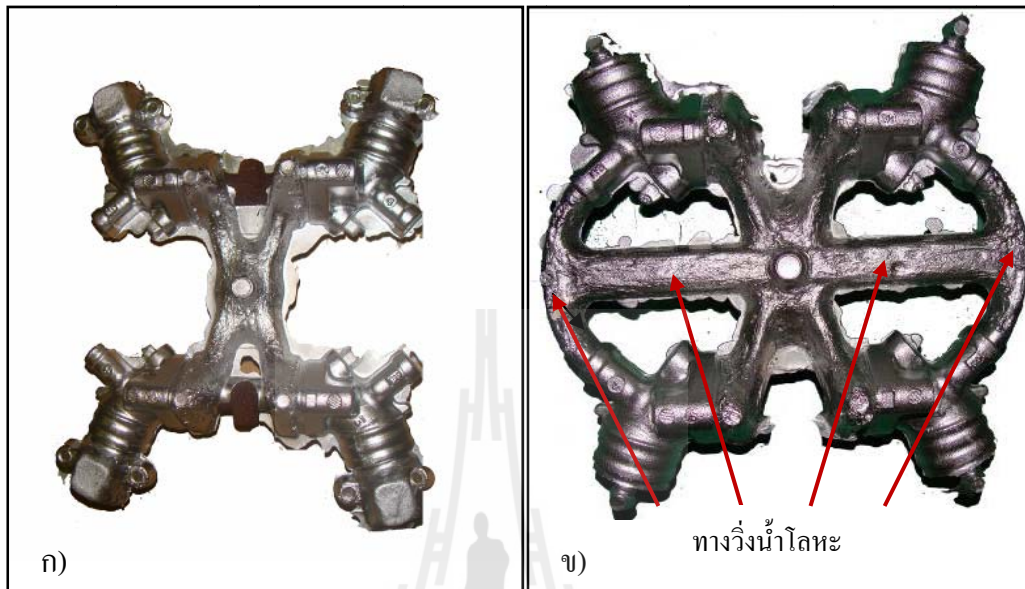
4.5 การประเมินผลการปรับปรุงกระบวนการผลิตเพื่อลดข้อบกพร่องในชิ้นส่วน

Pipe inlet

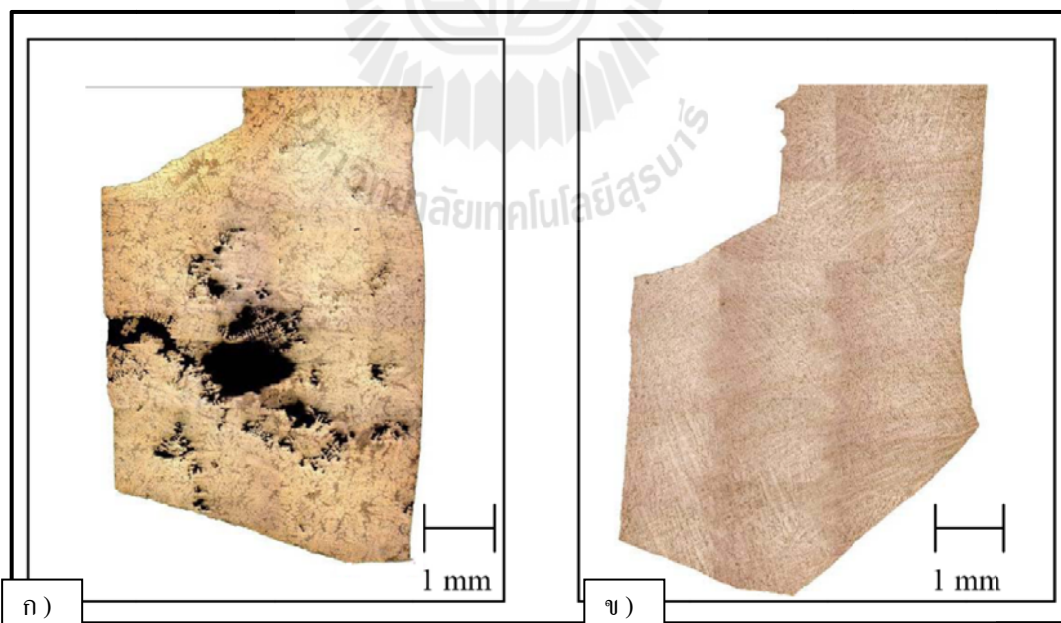
ภายหลังการแก้ไขแม่พิมพ์โลหะ ได้ทำการทดลองผลิตชิ้นงานหล่อจำนวน 188 ชิ้นงาน โดยลักษณะของชิ้นส่วน Pipe inlet ที่ถอดออกจากแม่พิมพ์ก่อนและหลังการปรับปรุง แสดงเปรียบเทียบในรูปที่ 4.28 ก) และ ข) ตามลำดับ หลังจากที่นำชิ้นงานทั้งหมด มาตรวจสอบปัญหาทาง รั่วบริเวณรูเจาะเกลียว พบว่า มีชิ้นงานที่เกิดข้อบกพร่อง จำนวน 1 ชิ้น ซึ่งคิดเป็น ร้อยละ 0.53 ของ ปริมาณการผลิต ซึ่งเป็นปริมาณที่ลดลงจากจำนวนชิ้นงานที่ตรวจสอบการเกิดข้อบกพร่องก่อนทำ การปรับปรุง ซึ่งมีข้อบกพร่องจากการรั่วบริเวณใต้รูเจาะเกลียว ถึงร้อยละ 4.92 ของจำนวนชิ้นงานที่ ทำการผลิตทั้งหมด ซึ่งปริมาณของชิ้นงานที่ตรวจพบข้อบกพร่องที่เกิดการรั่วบริเวณใต้รูเจาะเกลียว ภายหลังจากการแก้ไขแม่พิมพ์นี้ เป็นข้อบกพร่องที่เกิดขึ้น ในปริมาณที่ยอมรับได้ในกระบวนการ ผลิตชิ้นส่วน Pipe inlet โดยสถานประกอบการกำหนดมาตรฐานการผลิตให้มีชิ้นงานเสียเกิดขึ้นได้ ไม่เกินร้อยละ 1 ของจำนวนชิ้นงานที่ผลิตทั้งหมด

จากนั้นจึงนำชิ้นส่วน Pipe inlet ที่มีข้อบกพร่อง มาตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค ณ ตำแหน่ง ใต้รูเจาะเกลียวดังแสดงในรูปที่ 4.29 แสดงให้เห็นว่า รูพรุนที่เกิดขึ้นในชิ้นงานภายหลังจากทำการ แก้ไขแม่พิมพ์มีขนาดเล็กและจำนวนลดลง เมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นงานก่อนได้รับการแก้ไข โดยจาก ผลการวิเคราะห์ปริมาณรูพรุนด้วยโปรแกรม Image J analysis ดังแสดงในรูปที่ 4.30 พบว่าปริมาณรู พรุนที่เกิดขึ้นในส่วนต่างของชิ้นงาน Pipe inlet เมื่อตัดชิ้นงานออกเป็น 8 ส่วน (ตำแหน่งที่ 1-8) ดังที่

ได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.4 พบว่าทุกตำแหน่งของชิ้นงาน Pipe inlet ที่ทำการตรวจสอบมีปริมาณรูพรุนลดลง

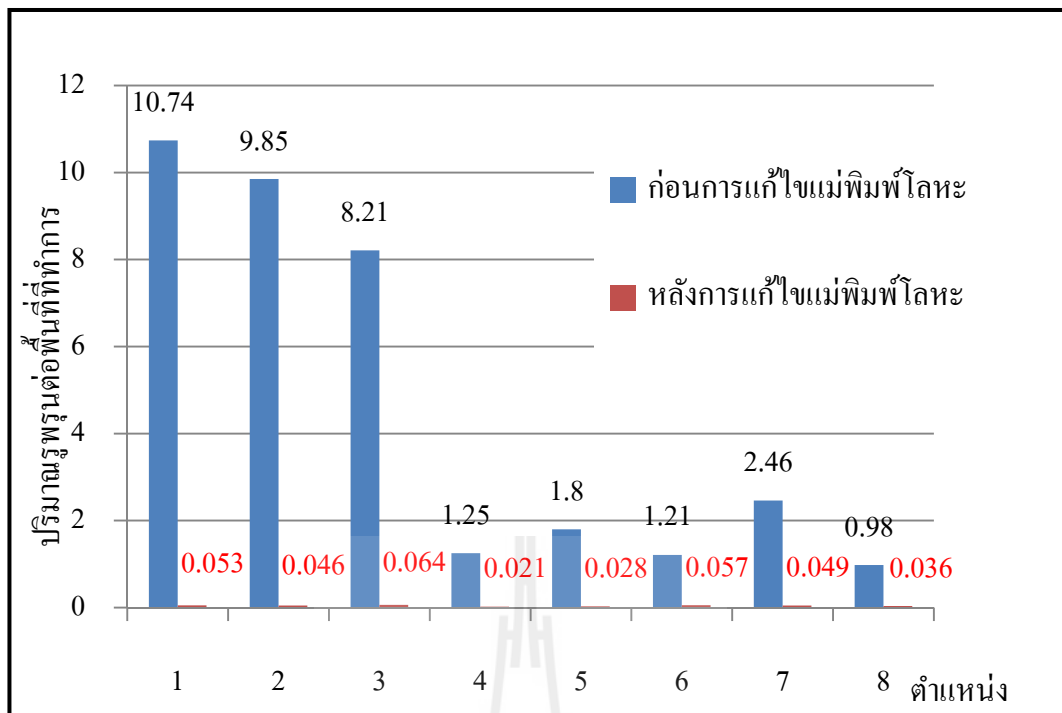


รูปที่ 4.28 แสดงชิ้นงาน Pipe inlet ก) ก่อนแก้ไขแม่พิมพ์ ข) ภายหลังจากแก้ไขแม่พิมพ์



รูปที่ 4.29 แสดงโครงสร้างจุดภาคและรูพรุนที่เกิดขึ้นในชิ้นงานหล่อ

ก) ก่อนแก้ไขแม่พิมพ์ ข) ภายหลังจากแก้ไขแม่พิมพ์



รูปที่ 4.30 แสดงปริมาณรูพรุนก่อนและหลังการแก้ไขแม่พิมพ์ ณ ตำแหน่งที่ 1-8

4.6 การวิเคราะห์ผล

จากผลการทดลองพบว่า เมื่อมีทางเดินของน้ำโลหะใหม่ในตำแหน่งที่มีการแก้ไขแม่พิมพ์โลหะส่งผลให้ตำแหน่งใหม่นี้เป็นทางเดินหลักของน้ำโลหะที่เดิมเข้าสู่ชิ้นงานในตำแหน่งที่เป็นส่วนหนาในชิ้นงานก่อน และในช่วงการแข็งตัวของน้ำโลหะ ตำแหน่งที่หนาในชิ้นงานก็เกิดการหดตัว แต่ยังคงมีการเติมน้ำโลหะเข้าสู่ชิ้นงานจากทางเดินน้ำโลหะอยู่ ส่งผลให้รูพรุนที่เกิดขึ้นในชิ้นงานจะมีปริมาณต่ำ เนื่องจากการแข็งตัวเกิดขึ้นอย่างช้าๆ มีการเติมเต็มตลอดเวลาก่อนที่ทางเดินน้ำโลหะจะแข็งตัว

ขนาดของทางเดินน้ำโลหะก็เป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่มีความสำคัญ เนื่องทางเดินน้ำโลหะที่มีขนาดใหญ่ จะทำให้ปริมาณการไหลของน้ำโลหะมีมากขึ้น การเติมเต็มของน้ำโลหะยิ่งสมบูรณ์มากขึ้น แต่ขนาดทางวิ่งของน้ำโลหะที่ใหญ่เกินไปก็ส่งผลต่อสูญเสียอะลูมิเนียม และสิ้นเปลืองพลังงานการนำชิ้นงานไปหลอมใหม่

การวิเคราะห์ผลการทดลองดังกล่าว ควบคุมอุณหภูมิการเทน้ำโลหะหลอมเหลวไว้ที่ 760 องศาเซลเซียส และกำหนดให้แม่พิมพ์โลหะมีอุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส จากผลการทดลอง พบว่าทางเดินน้ำโลหะขนาด 20×20 ตารางมิลลิเมตร ให้ผลของการเกิดรูพรุนต่ำที่สุดที่ร้อยละ 0.199 ทางเดินน้ำโลหะขนาด 15×15 ตารางมิลลิเมตร ซึ่งมีปริมาณรูพรุนที่ร้อยละ 0.21 และทางเดินน้ำโลหะขนาด 10×10 ตารางมิลลิเมตร มีปริมาณรูพรุนที่ร้อยละ 0.72 ซึ่งมีปริมาณรูพรุนสูงที่สุด

บทที่ 5

สรุปผล

สาเหตุการบกพร่องประเภทรั่วในชิ้นงาน Pipe inlet เกิดเนื่องจากเกิดรูพรุนที่ต่อเนื่องกันในชิ้นงาน โดยรูพรุนที่เกิดขึ้นนี้อยู่ในชิ้นงานในตำแหน่งที่หนา เมื่อเปิดผิวชิ้นงานออกและทำการเจาะเกลียว Tap M6 จึงทำให้เกิดการรั่วจากด้านในชิ้นงานสู่ผิวที่มีการเปิดออก จากผลการตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดพบว่า รูพรุนนี้เกิดขึ้นในกระบวนการแข็งตัวของน้ำโลหะหลอมเหลวและมีความต่อเนื่องกัน ซึ่งได้รู้ Tap M6 เป็นบริเวณที่หนา ทำให้เกิดการแข็งตัวช้า และมีโอกาสเกิดรูพรุนในชิ้นงานได้สูง

ในการแก้ไขข้อบกพร่องในชิ้นงานหล่อ Pipe inlet นี้ ได้ทดลองใช้ซอฟต์แวร์จำลองงานหล่อเพื่อศึกษาผลของอุณหภูมิเทน้ำโลหะ (680-780 องศาเซลเซียส) อุณหภูมิแม่พิมพ์ (300-480 องศาเซลเซียส) และการออกแบบแม่พิมพ์ (ขนาดพื้นที่หน้าตัดทางเดินน้ำโลหะ 15×15 – 20×20 ตารางมิลลิเมตร) ในลำดับแรก เมื่อศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิเทน้ำโลหะ พบว่าเมื่อกำหนดให้อุณหภูมิแม่พิมพ์โลหะเป็น 350 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิเทน้ำโลหะ 680 องศาเซลเซียส ชิ้นงานจะมีปริมาณรูพรุนสูงที่สุด คือ ร้อยละ 1.26 เนื่องจากอุณหภูมิเทน้ำโลหะที่ต่ำเกินไปส่งผลให้ความแตกต่างของอุณหภูมิต่างกันระหว่างน้ำโลหะหลอมเหลวและแม่พิมพ์โลหะน้อย ทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อนอย่างรวดเร็ว การแข็งตัวของน้ำโลหะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว น้ำโลหะที่ติดกับแม่พิมพ์โลหะเกิดการแข็งตัวขัดขวางการเติมน้ำโลหะเข้าสู่ชิ้นงาน เกิดเป็นช่องว่างในชิ้นงาน เมื่ออุณหภูมิเทน้ำโลหะเพิ่มสูงขึ้นทำให้ปริมาณรูพรุนในชิ้นงานลดลง และปริมาณรูพรุนลดลงต่ำสุดที่อุณหภูมิเทน้ำโลหะ 730 องศาเซลเซียส แต่เมื่ออุณหภูมิเทน้ำโลหะหลอมเหลวสูงกว่า 730 องศาเซลเซียส ทำให้ปริมาณรูพรุนมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากที่อุณหภูมิสูงการหดตัวของน้ำโลหะจะเกิดขึ้นได้มากในขณะที่แข็งตัว เกิดเป็นรูพรุนในชิ้นงาน ดังนั้นในกระบวนการผลิตควรควบคุมอุณหภูมิการเทน้ำโลหะหลอมเหลวอยู่ที่ 720 -740 องศาเซลเซียส

ในลำดับที่สอง เมื่อทำการศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิแม่พิมพ์โลหะต่อปริมาณรูพรุนในชิ้นงานด้วยซอฟต์แวร์จำลองงานหล่อ โดยกำหนดให้อุณหภูมิเทน้ำโลหะเป็น 730 องศาเซลเซียส พบว่า เงื่อนไขอุณหภูมิแม่พิมพ์โลหะที่ 300 องศาเซลเซียส จะพบปริมาณรูพรุนสูงที่สุด คือ ร้อยละ 1.76 เนื่องจากแม่พิมพ์โลหะที่มีอุณหภูมิต่ำส่งผลให้ความแตกต่างของอุณหภูมิต่างกันระหว่างน้ำโลหะ

หลอมเหลวและแม่พิมพ์โลหะสูงมาก ทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อนอย่างรวดเร็ว การแข็งตัวของน้ำโลหะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว ส่งผลน้ำโลหะแข็งตัวก่อนการเติมเต็มสมบูรณ์ในแม่พิมพ์โลหะ เมื่ออุณหภูมิแม่พิมพ์โลหะเพิ่มสูงขึ้นทำให้ปริมาณรูพรุนในชิ้นงานลดลง เนื่องจากการความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิของน้ำโลหะหลอมเหลวและแม่พิมพ์โลหะลดลง จึงเอื้ออำนวยให้เกิดการเติมเต็มในช่องว่างของแม่พิมพ์ได้ยาวนานขึ้น และปริมาณรูพรุนในชิ้นงานลดลงเป็นศูนย์เมื่ออุณหภูมิแม่พิมพ์โลหะสูงกว่า 450 องศาเซลเซียส อย่างไรก็ตาม ในกระบวนการผลิตควรควบคุมแม่พิมพ์โลหะอยู่ที่ 350 องศาเซลเซียสขึ้นไป เนื่องจากอุณหภูมิแม่พิมพ์โลหะที่สูงจะช่วยให้ความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิแม่พิมพ์โลหะและน้ำโลหะน้อย กระบวนการถ่ายเทความร้อนเกิดขึ้นอย่างช้าๆ กระบวนการแข็งตัวของน้ำโลหะจะสมบูรณ์มากกว่า

ในลำดับที่ 3 การวิเคราะห์ปัญหาเมื่อทำการแก้ไขแม่พิมพ์โลหะด้วยการปิดรูสั้น และเปลี่ยนช่องระบายอากาศให้เป็นทางเดินของน้ำโลหะเข้าสู่แม่พิมพ์โลหะ โดยกำหนดขนาดพื้นที่หน้าตัดของทางเดินของน้ำโลหะต่างๆ กัน คือ 10×10 15×15 และ 20×20 ตารางมิลลิเมตร จากการศึกษาผลของขนาดทางเดินของน้ำโลหะต่อปริมาณรูพรุนในชิ้นงานด้วยซอฟต์แวร์จำลองงานหล่อ โดยกำหนดให้อุณหภูมิเทน้ำโลหะเป็น 730 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิแม่พิมพ์โลหะเป็น 350 องศาเซลเซียส พบว่า ทางเดินน้ำโลหะขนาด 20×20 ตารางมิลลิเมตร ให้ผลของการเกิดรูพรุนต่ำที่สุดที่ร้อยละ 0.199 แต่การเพิ่มขนาดทางเดินน้ำโลหะจะมีผลกระทบต่อการสูญเสียเนื้อโลหะต่อชิ้นงาน ทำให้สิ้นเปลืองพลังงานในการหลอมโลหะอีกครั้ง เพื่อนำมาเข้าสู่กระบวนการผลิต ดังนั้นในการแก้ไขปัญหาจึงเลือกใช้ทางเดินน้ำโลหะขนาด 15×15 ตารางมิลลิเมตร ซึ่งมีปริมาณรูพรุนสูงกว่าเล็กน้อยเป็นที่ยอมรับได้ แต่สามารถลดค่าใช้จ่ายในการหลอมโลหะ และเหมาะสมที่สุดในการแก้ปัญหา

จากผลการทดลองหล่อชิ้นงานจำนวน 188 ชิ้น โดยกำหนดเงื่อนไขในกระบวนการผลิตให้อุณหภูมิเทน้ำโลหะเป็น 730 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิแม่พิมพ์โลหะสูงกว่า 350 องศาเซลเซียส และมีการผลิตชิ้นงานอย่างต่อเนื่อง ตรวจสอบพบชิ้นงานที่เกิดการร้าวภายหลังการแก้ไขแม่พิมพ์โลหะเพียง 1 ชิ้น ซึ่งผลให้การเกิดการร้าวภายหลังการแก้ไขแม่พิมพ์โลหะเหลือเพียงร้อยละ 0.53 ของชิ้นงานที่มีการทดลอง โดยให้ผลสอดคล้องกับปริมาณรูพรุนที่ลดลง เนื่องจากรูพรุนที่เกิดขึ้นมีปริมาณต่ำส่งผลให้การร้าวในชิ้นงานลดลงด้วย

รายการอ้างอิง

มนัส สติริจินดา. โลหะนอกกลุ่มเหล็ก (2540)

Lucio F. Mondolfo, **Metallography Of Aluminum Alloys**, 2001

John E. Gruzleski, B. M. C. (1999). **The Treatment of Liquid Alimunum-Silicon**

American foundry society International atlas of casting defects, 1974

R. Nadella a, D.G. Eskin a,* , Q. Du a, L. Katgerman 2008, **Macrosegregation in direct-chill casting of aluminium alloys**. Progress in Materials Science, 53: 421-480

J. Espinoza-Cuadra, H. Mancha-Molinar,(2007) **Influence of defects on strength of industrial aluminum alloy Al-Si 319**, Materials and Design 28, 1038 -1044

P.D. Lee, A. Chirazi, R.C. Atwood, W. Wang 2004, Multiscale modelling of solidification microstructures, including microsegregation and microporosity, in an Al-Si-Cu alloy,**Materials Science and Engineering A365**; 57-65

Jitender K. Rai, Amir M. Lajimi, Paul Xirouchakis 2008, An intelligent system for predicting HPDC process variables in interactive environment, journal of materials processing technology 203; 72-79

JOY A. HINES (2004) "Determination of Interfacial Heat-Transfer Boundary Conditions in an Aluminum Low-Pressure Permanent Mold Test Casting",**METALLURGICAL AND MATERIALS TRANSACTIONS B, VOLUME 35B**, 1-13

D.R. Gunasegaram, D.J. Farnsworth, T.T. Nguyen (2009) , Identification of critical factors affecting shrinkage porosity in permanent mold casting using numerical simulations based on design of experiments. **journal of materials processing technology 209**, 1209 -1219

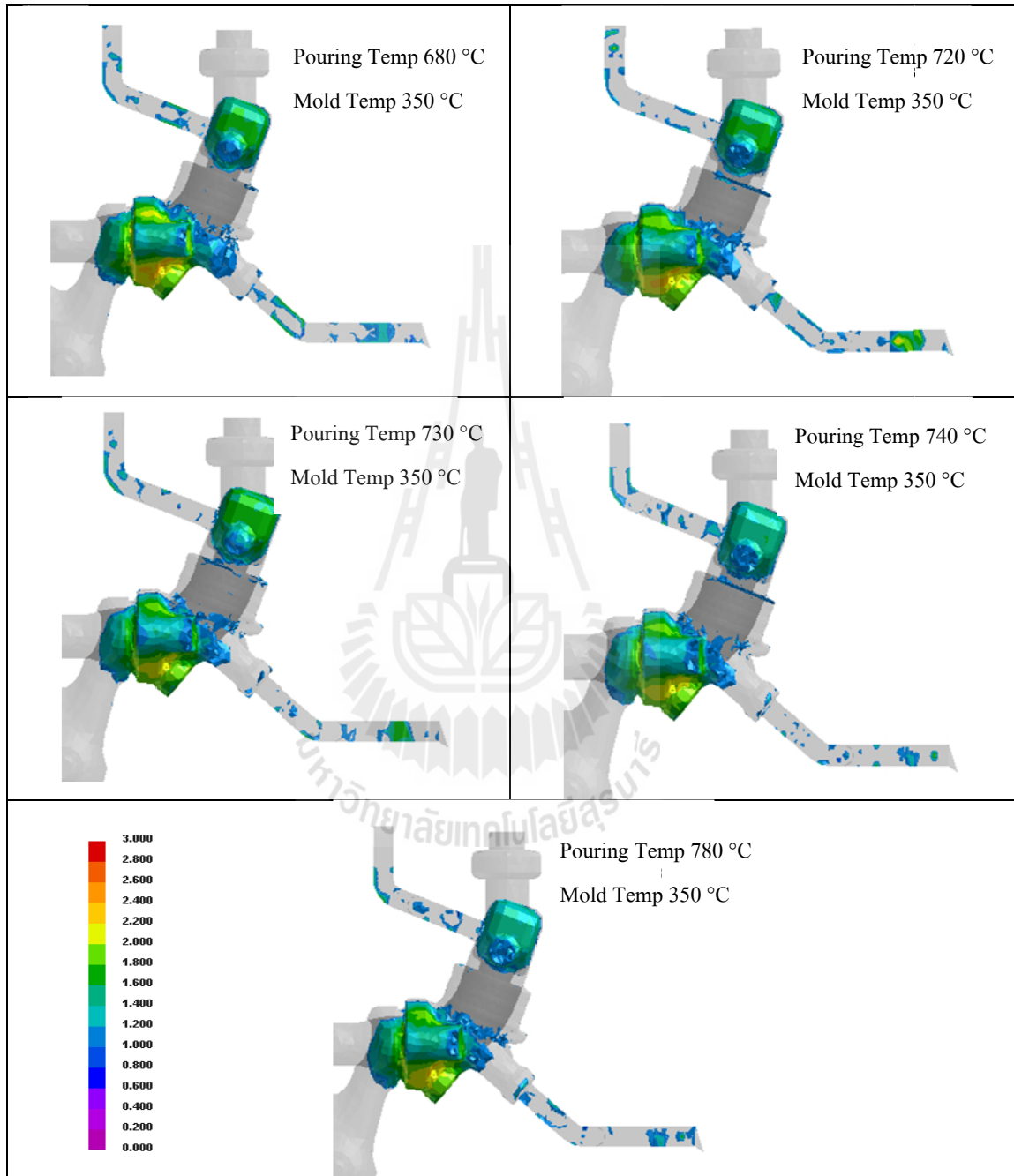
Dominique Lefebvre, Alfons Mackenbrock 1996 ESI Group, France, **ADVANCED CASTING SIMULATIONS**,1-14

ภาคผนวก ก

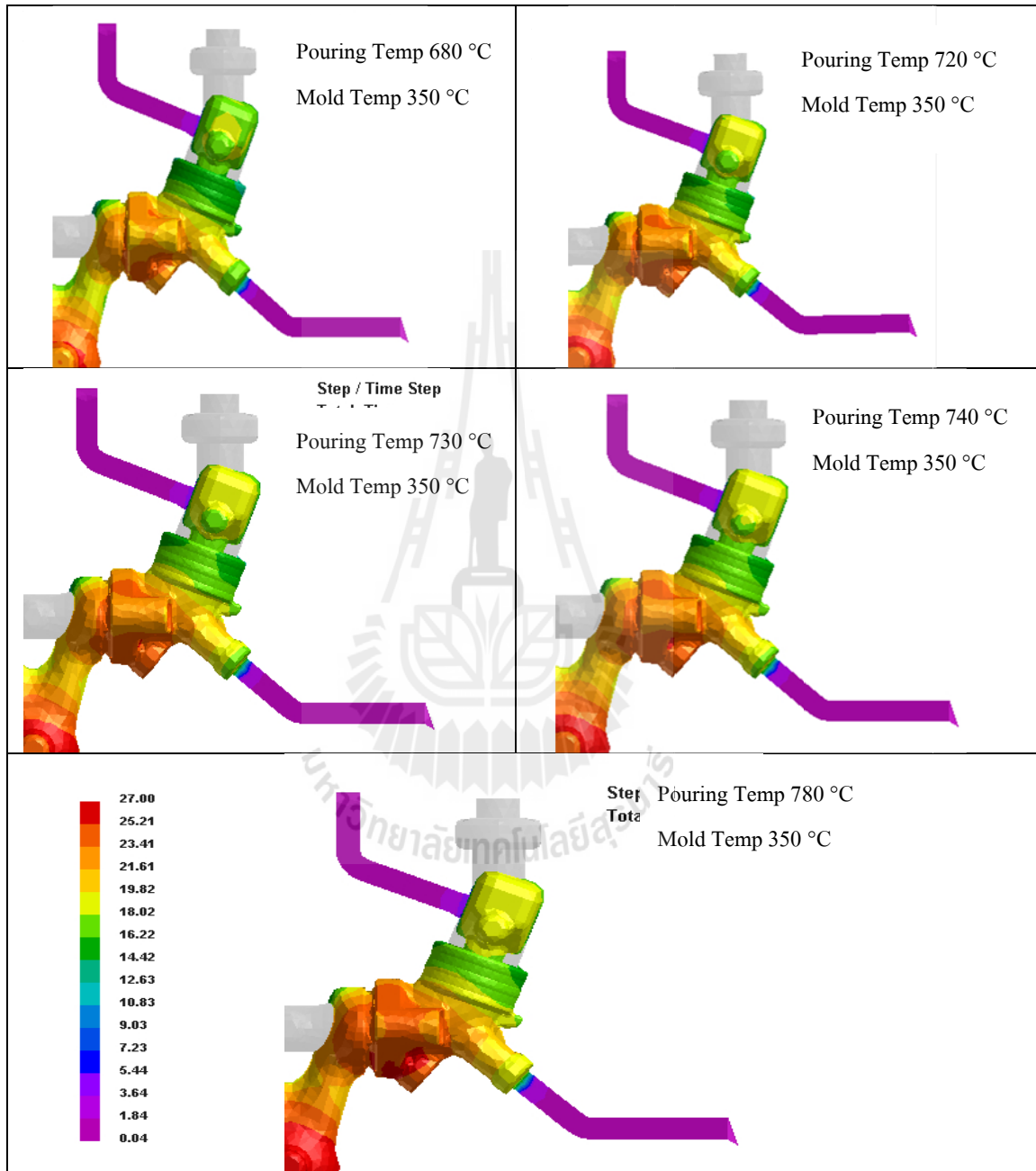
ภาพแสดงการจำลองงานหล่อในชิ้นงาน

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

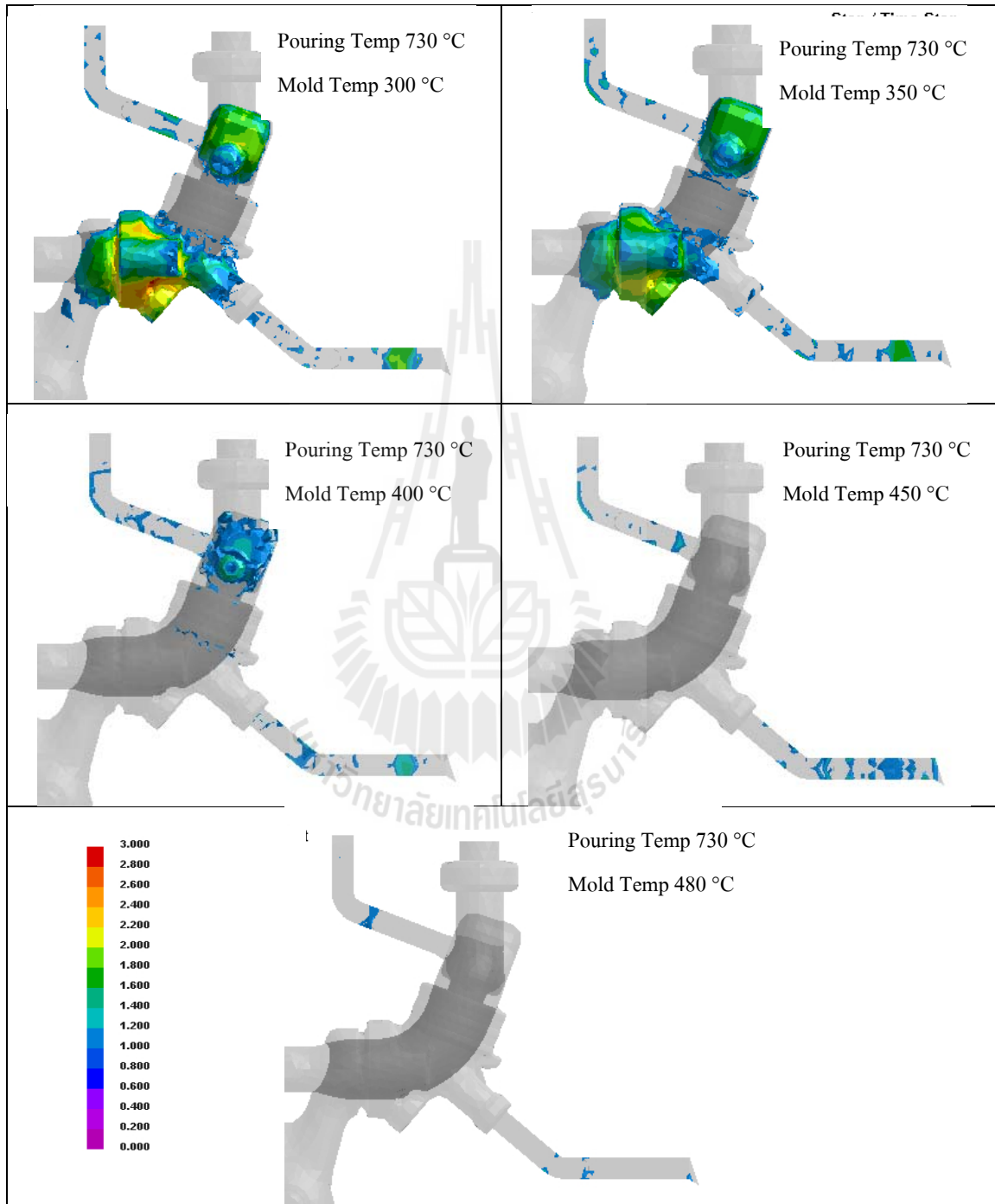
ภาพแสดงผลการเกิดรูพรุนในชิ้นงานหล่อเมื่อเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเทน้ำโลหะเป็น 680 °C
720 °C 730 °C 740 °C และ 780 °C



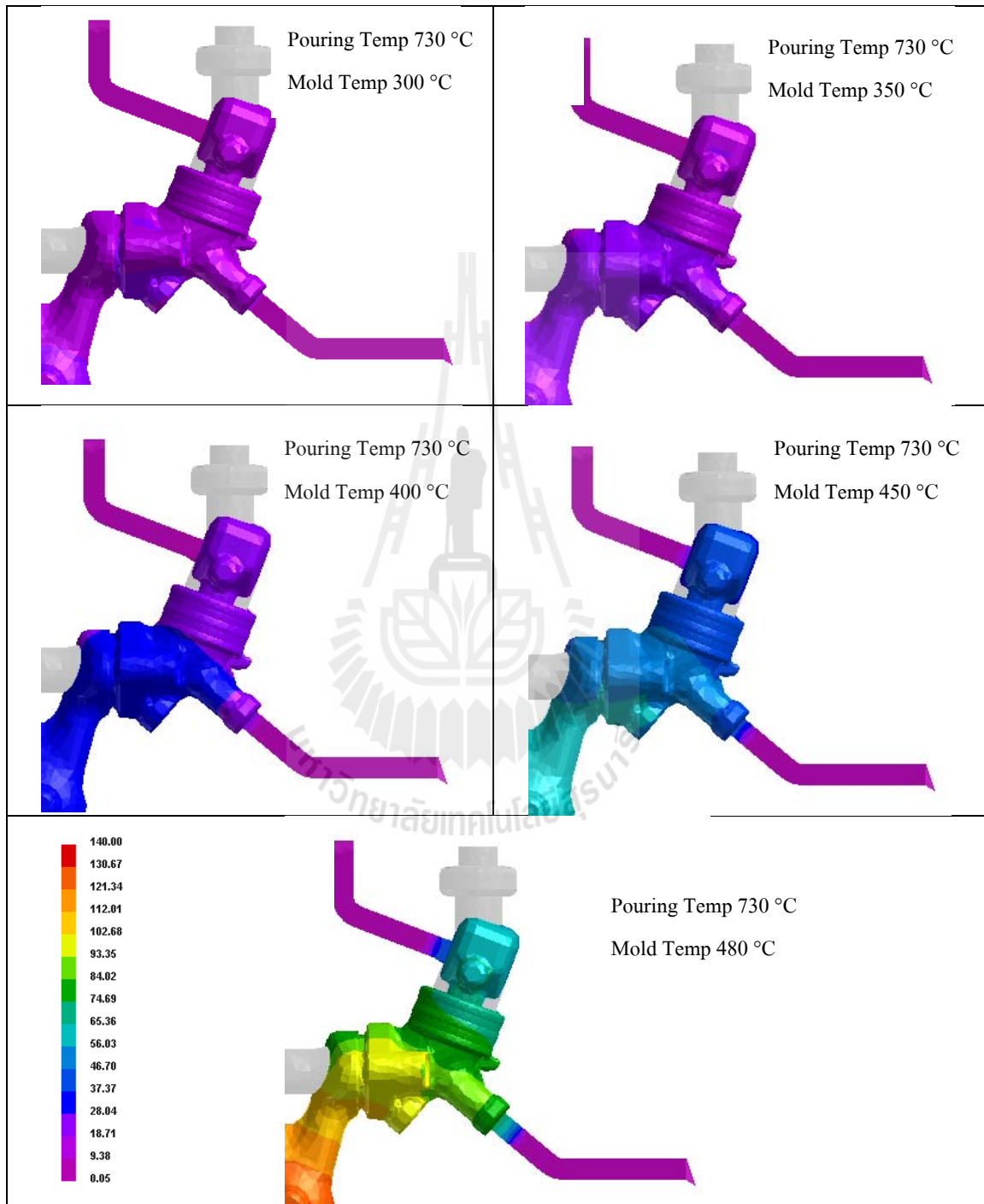
ภาพแสดงผลช่วงเวลาการแข็งตัวของน้ำโลหะเมื่อเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเทน้ำโลหะเป็น 680 °C 720 °C 730 °C 740 °C และ 780 °C



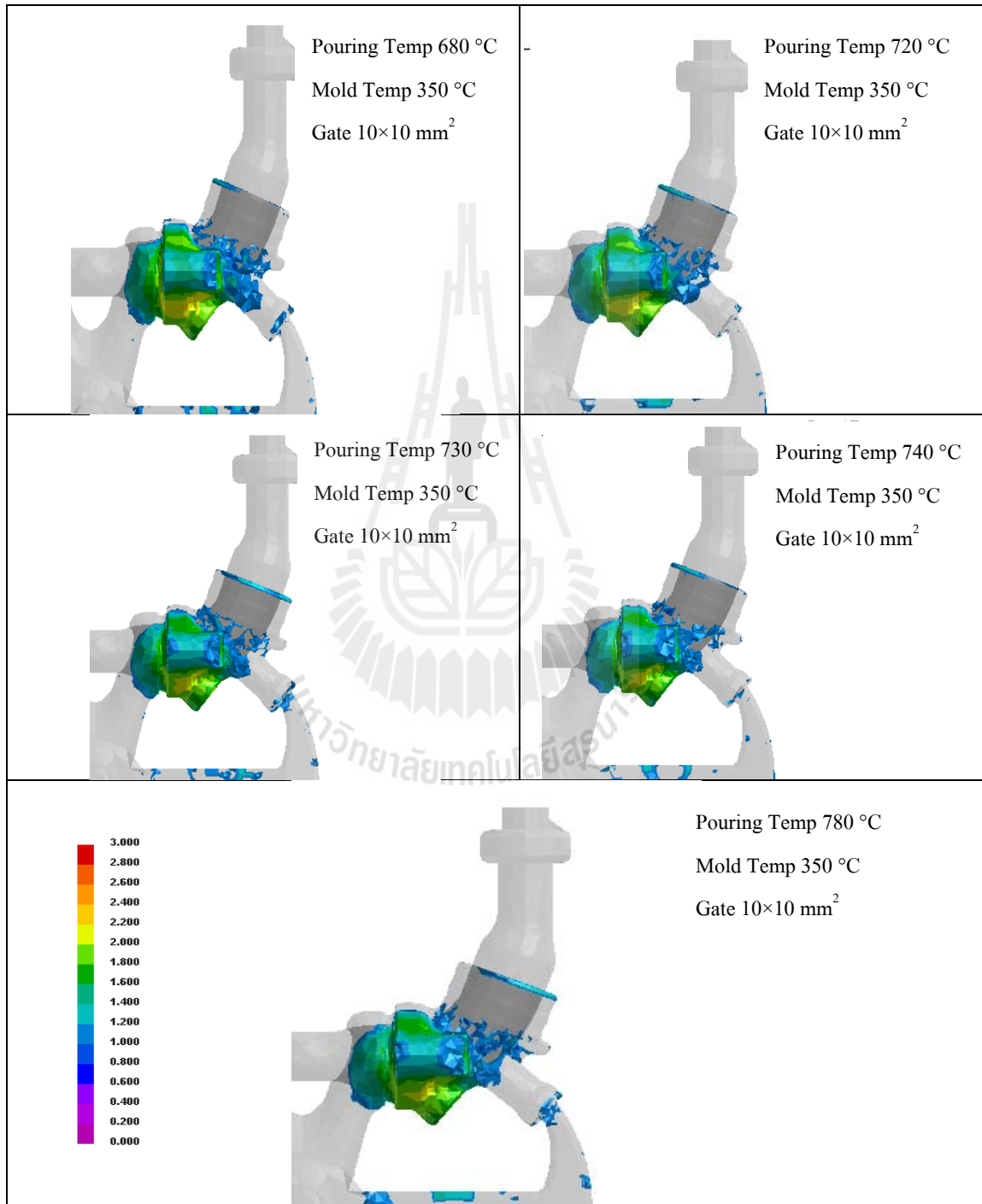
ภาพแสดงผลการเกิดรูพรุนในชิ้นงานหล่อเมื่อเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิแม่พิมพ์โลหะเป็น 300 °C 350 °C 400 °C 450 °C และ 480 °C



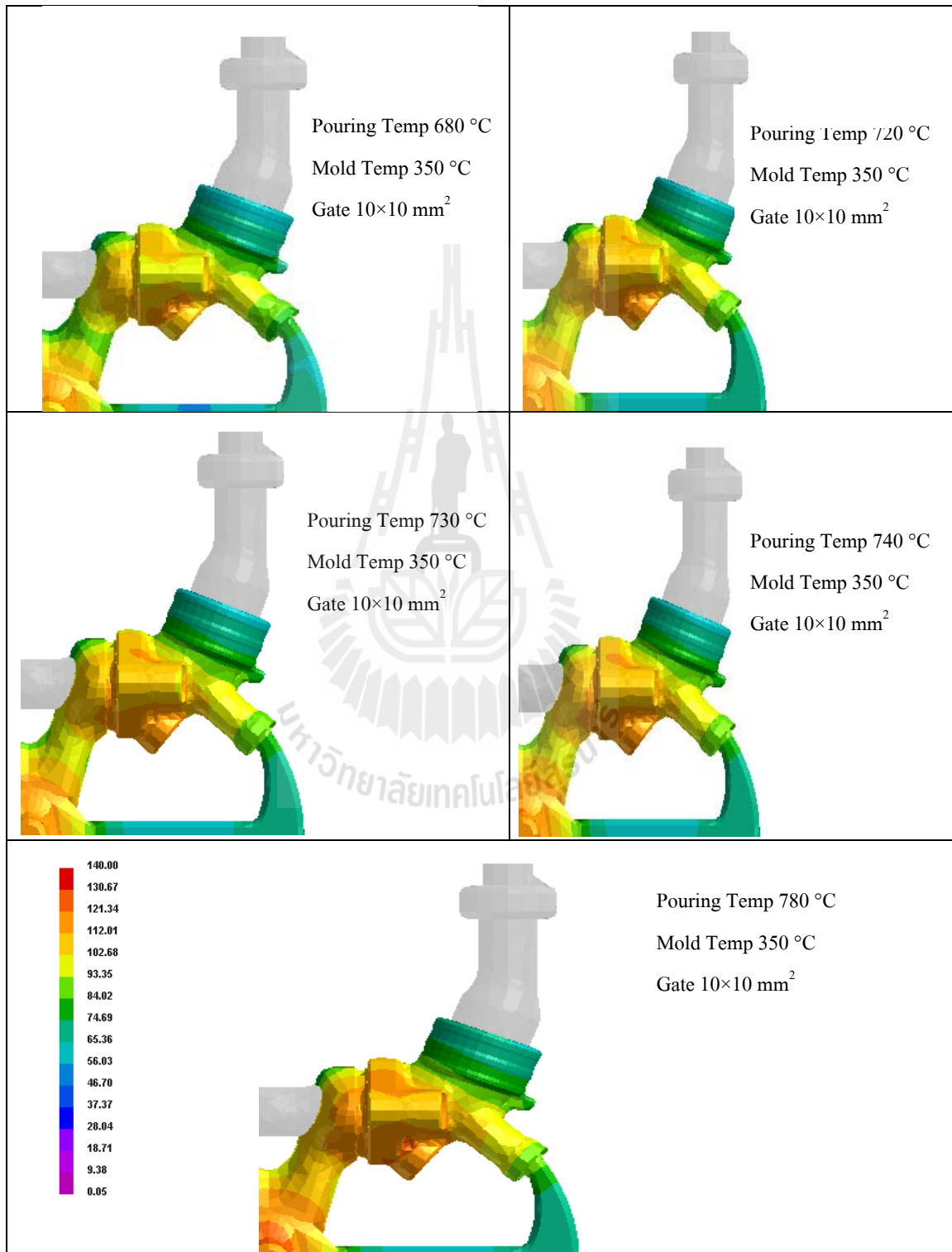
ภาพแสดงผลช่วงเวลาการแข็งตัวของน้ำโลหะเมื่อเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิแม่พิมพ์โลหะเป็น 300 °C 350 °C 400 °C 450 °C และ 480 °C



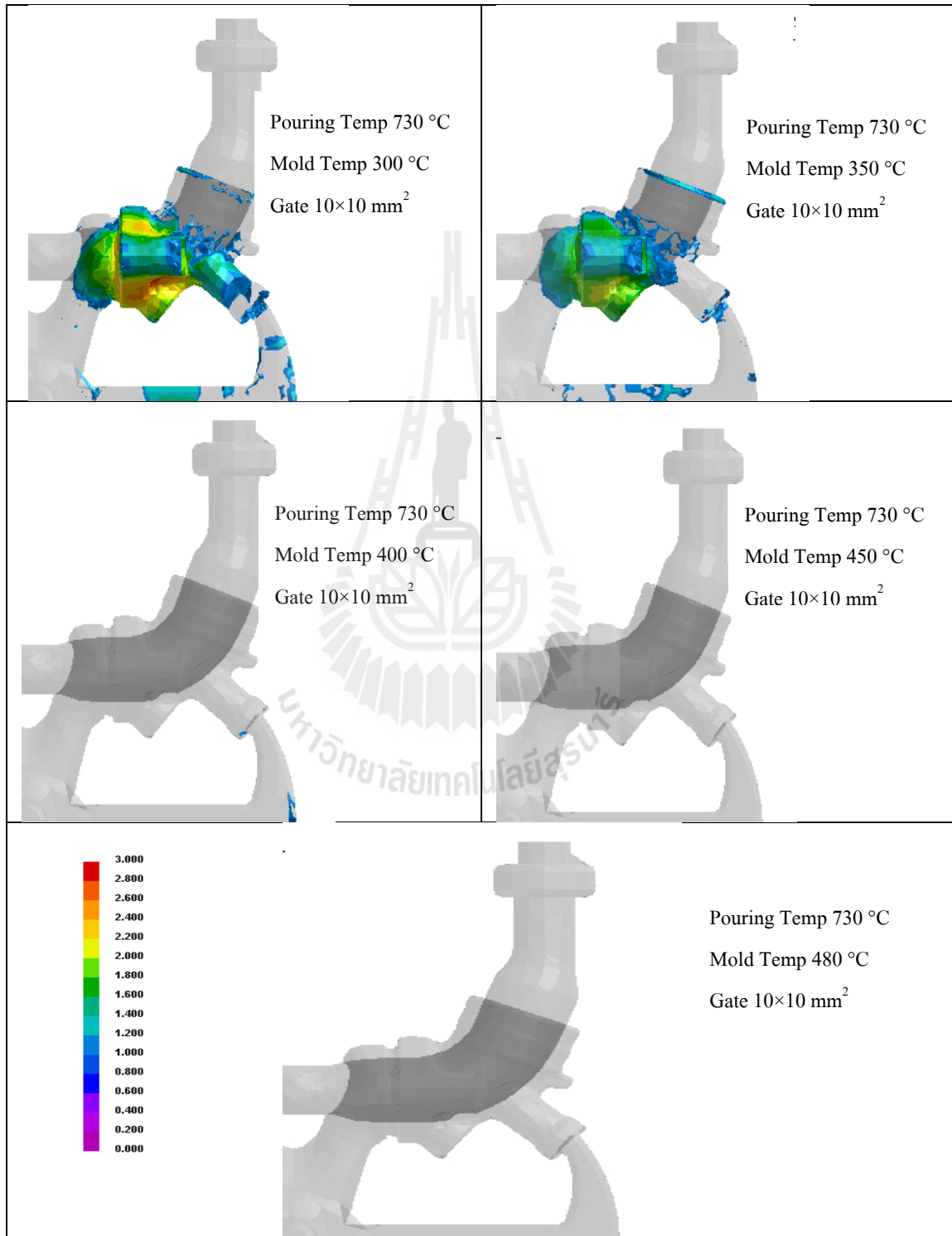
ภาพแสดงผลการเกิดรูพรุนในชิ้นงานหล่อเมื่อเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเทน้ำโลหะเป็น 680 °C 720 °C 730 °C 740 °C และ 780 °C และใช้ทางเดินน้ำโลหะขนาด 10×10 ตารางมิลลิเมตร



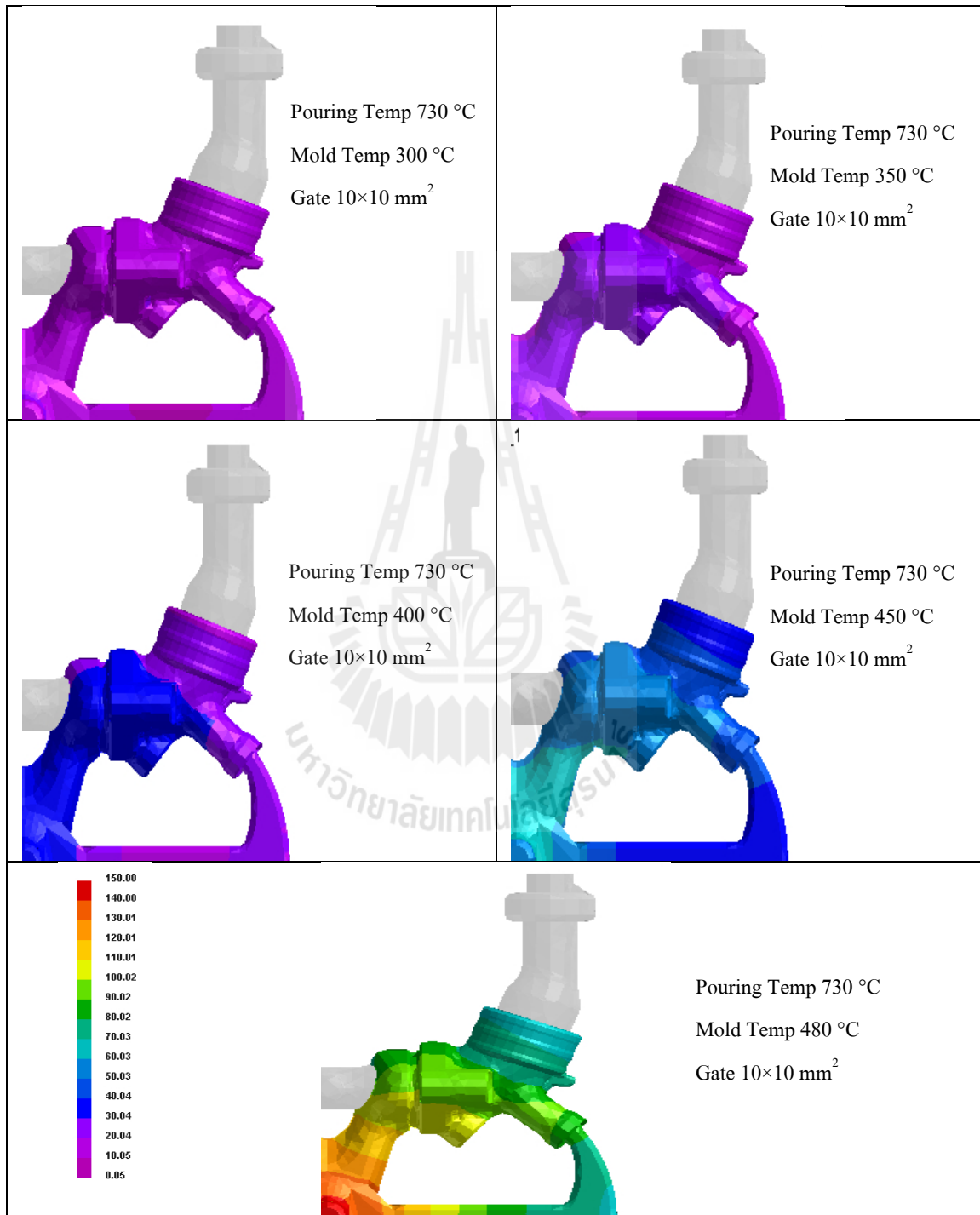
ภาพแสดงผลช่วงเวลาการแข็งตัวของน้ำโลหะเมื่อเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเทน้ำโลหะเป็น 680 °C 720 °C 730 °C 740 °C และ 780 °C และใช้ทางเดินน้ำโลหะขนาด 10×10 ตารางมิลลิเมตร



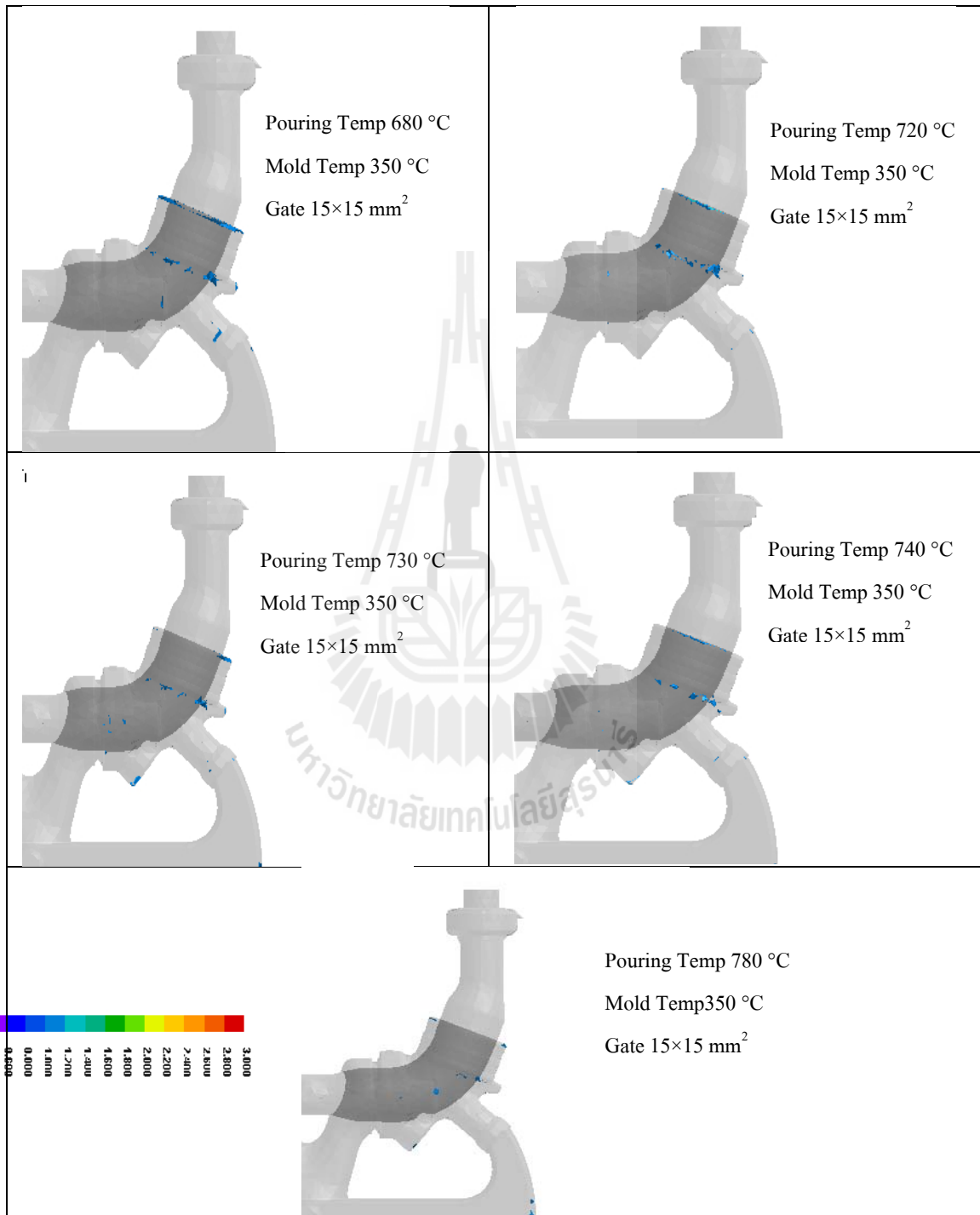
ภาพแสดงผลการเกิดรูพรุนในชิ้นงานหล่อเมื่อเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิแม่พิมพ์โลหะเป็น 300 °C 350 °C 400 °C 450 °C และ 480 °C และใช้ทางเดินน้ำโลหะขนาด 10×10 ตารางมิลลิเมตร



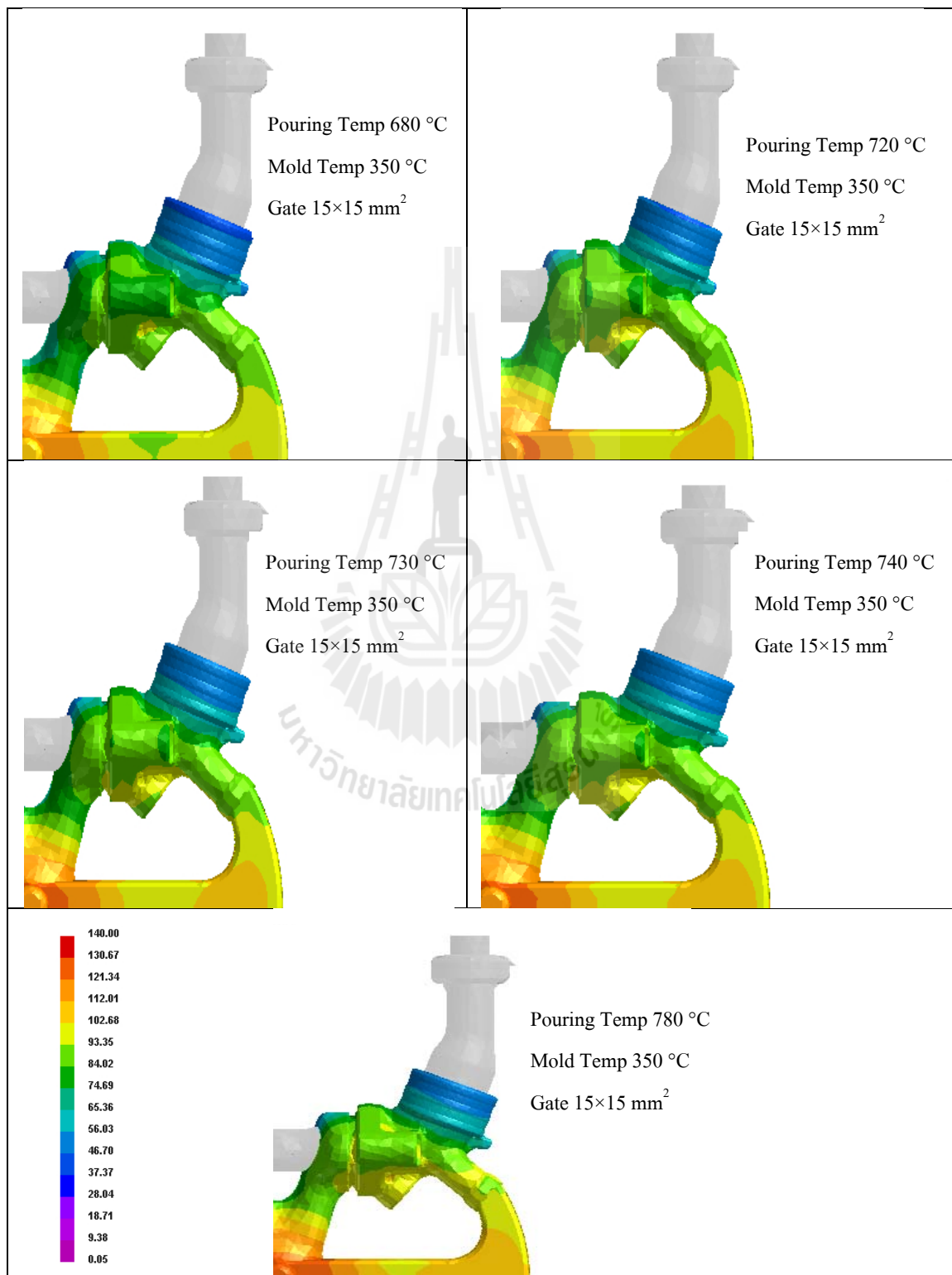
ภาพแสดงผลช่วงเวลาการแข็งตัวของน้ำโลหะเมื่อเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเทน้ำโลหะเป็น 300 °C 350 °C 400 °C 450 °C และ 480 °C และใช้ทางเดินน้ำโลหะขนาด 10×10 ตารางมิลลิเมตร



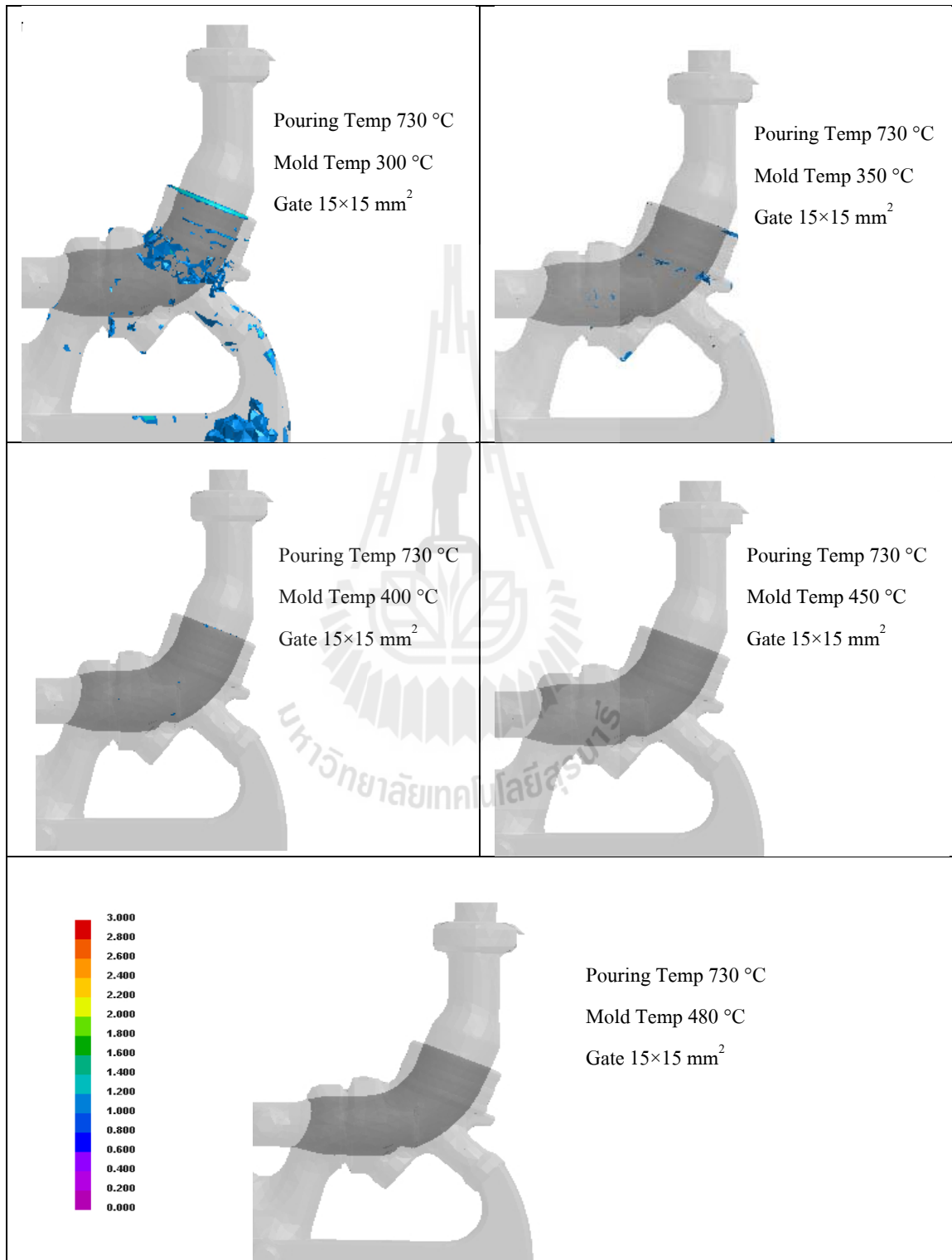
ภาพแสดงผลการเกิดรูพรุนในชิ้นงานหล่อเมื่อเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเทน้ำโลหะเป็น 680 °C 720 °C 730 °C 740 °C และ 780 °C และใช้ทางเดินน้ำโลหะขนาด 15×15 ตารางมิลลิ



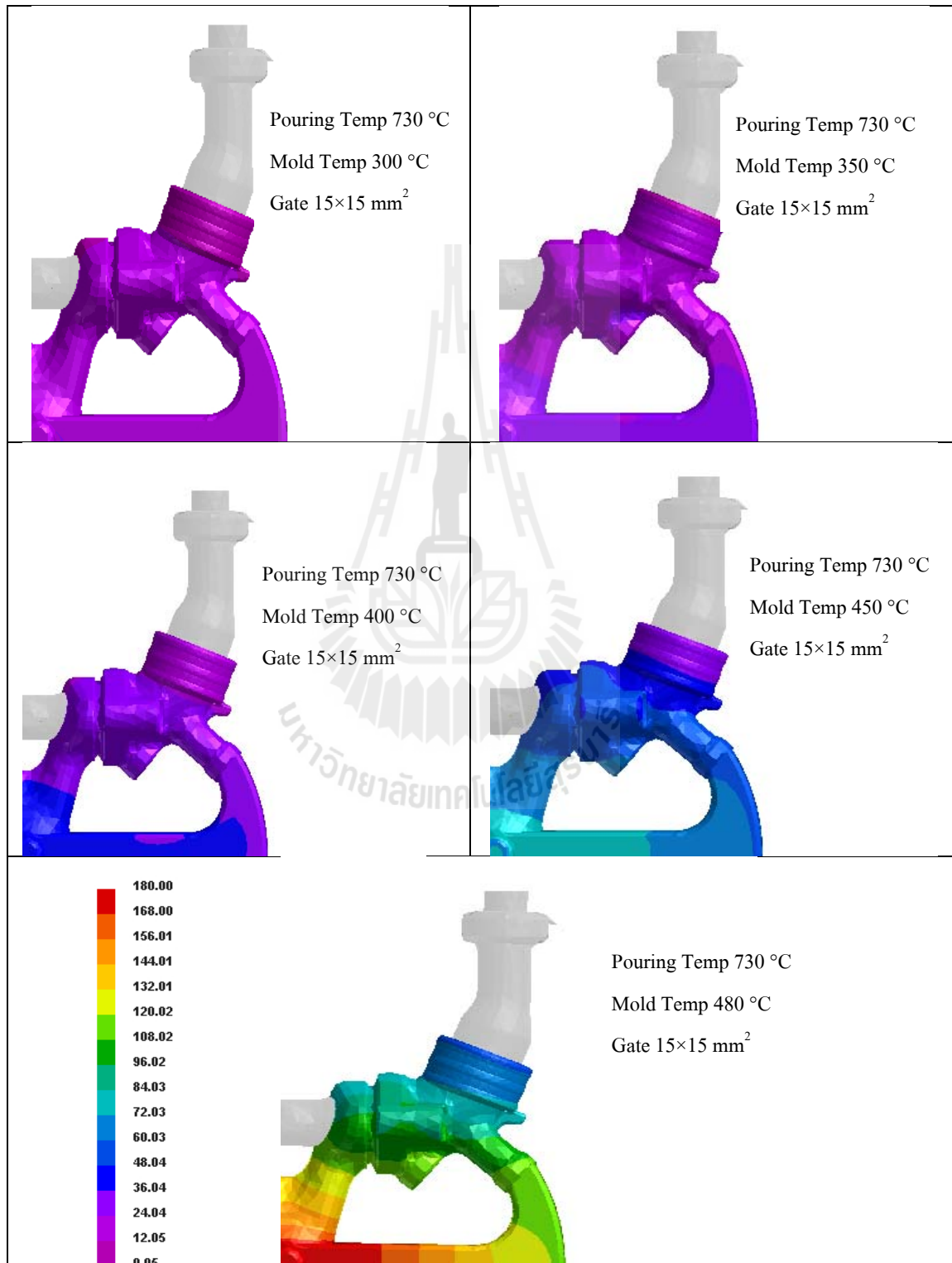
ภาพแสดงผลช่วงเวลาการแข็งตัวของน้ำโลหะเมื่อเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเทน้ำโลหะเป็น 680 °C 720 °C 730 °C 740 °C และ 780 °C และใช้ทางเดินน้ำโลหะขนาด 15×15 ตารางมิลลิเมตร



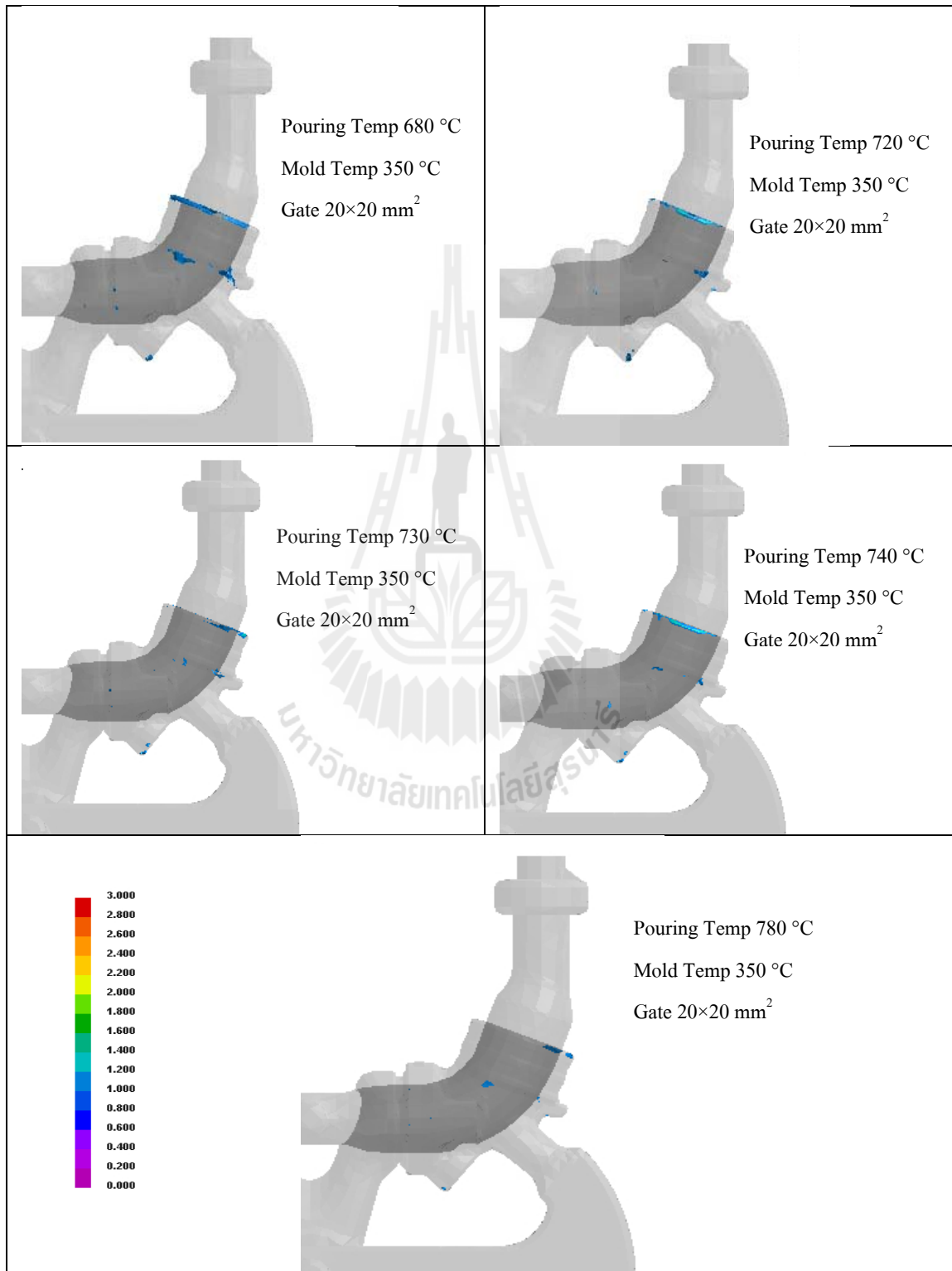
ภาพแสดงผลการเกิดรูพรุนในชิ้นงานหล่อเมื่อเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิแม่พิมพ์โลหะเป็น 300 °C 350 °C 400 °C 450 °C และ 480 °C และใช้ทางเดินน้ำโลหะขนาด 15×15 ตารางมิลลิเมตร



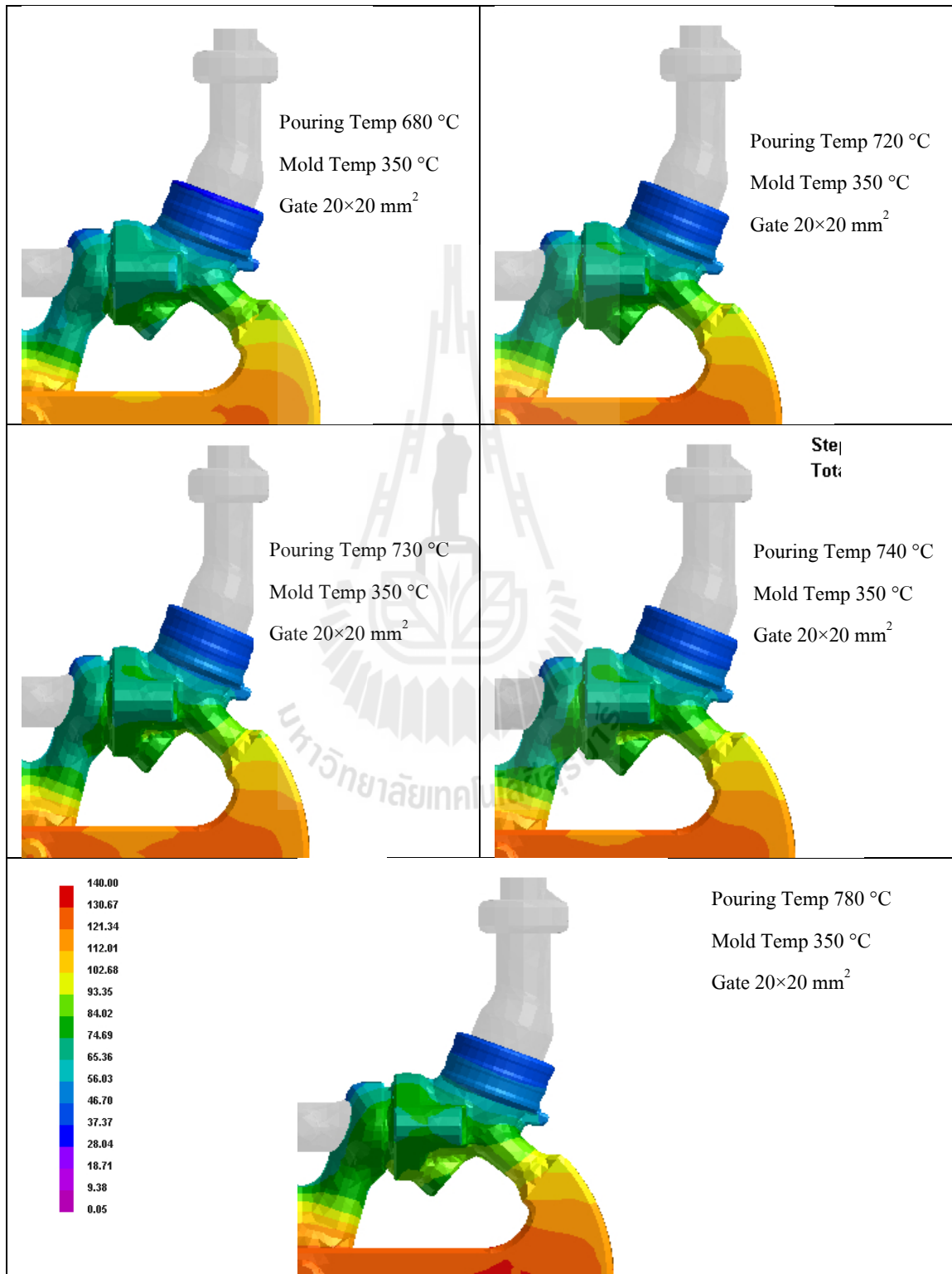
ภาพแสดงผลช่วงเวลาการแข็งตัวของน้ำโลหะเมื่อเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเทน้ำโลหะเป็น 300 °C 350 °C 400 °C 450 °C และ 480 °C และใช้ทางเดินน้ำโลหะขนาด 15×15 ตารางมิลลิเมตร



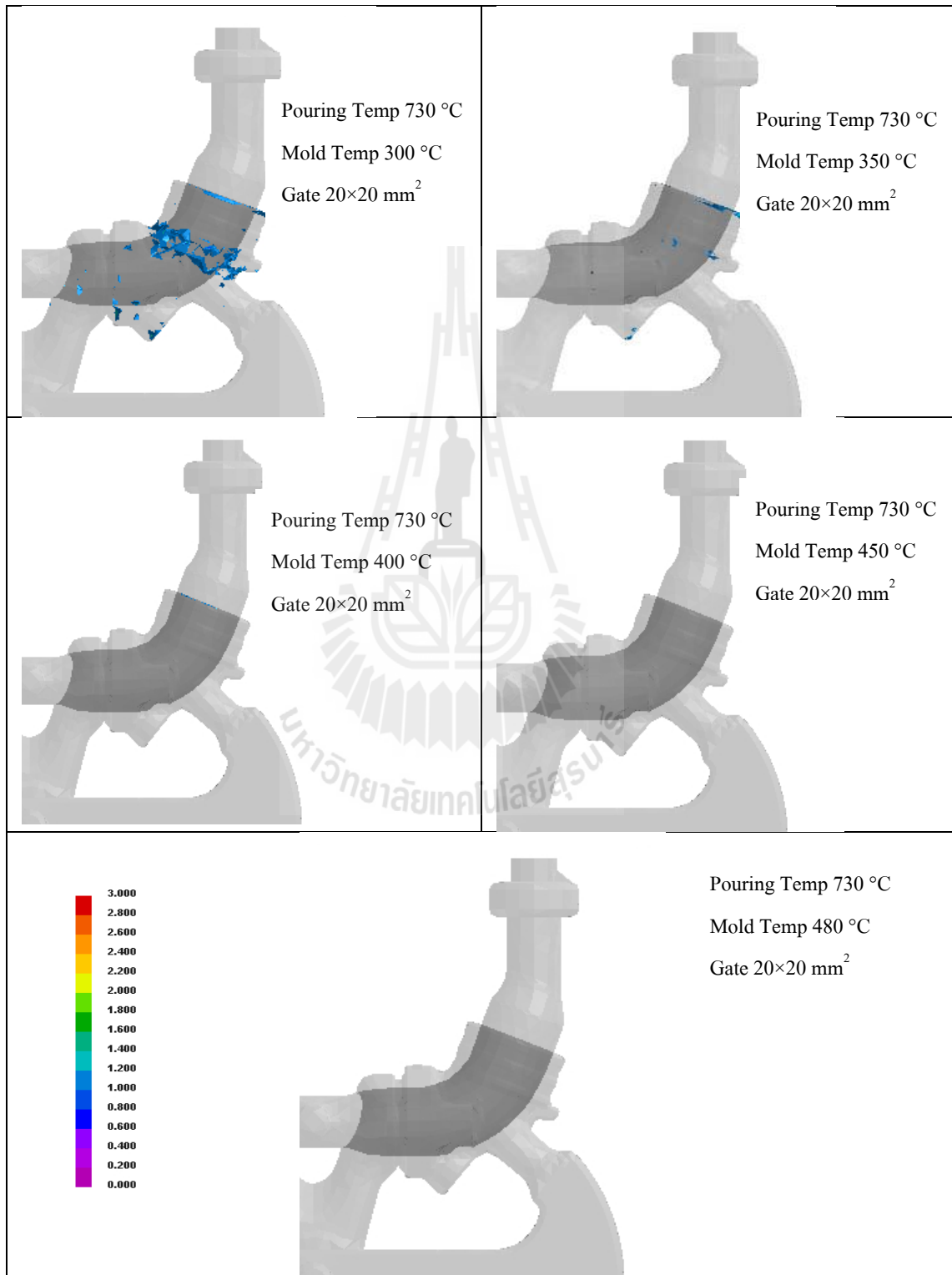
ภาพแสดงผลการเกิดรูพรุนในชิ้นงานหล่อเมื่อเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเทน้ำโลหะเป็น 680 °C 720 °C 730 °C 740 °C และ 780 °C และใช้ทางเดินน้ำโลหะขนาด 20×20 ตารางมิลลิเมตร



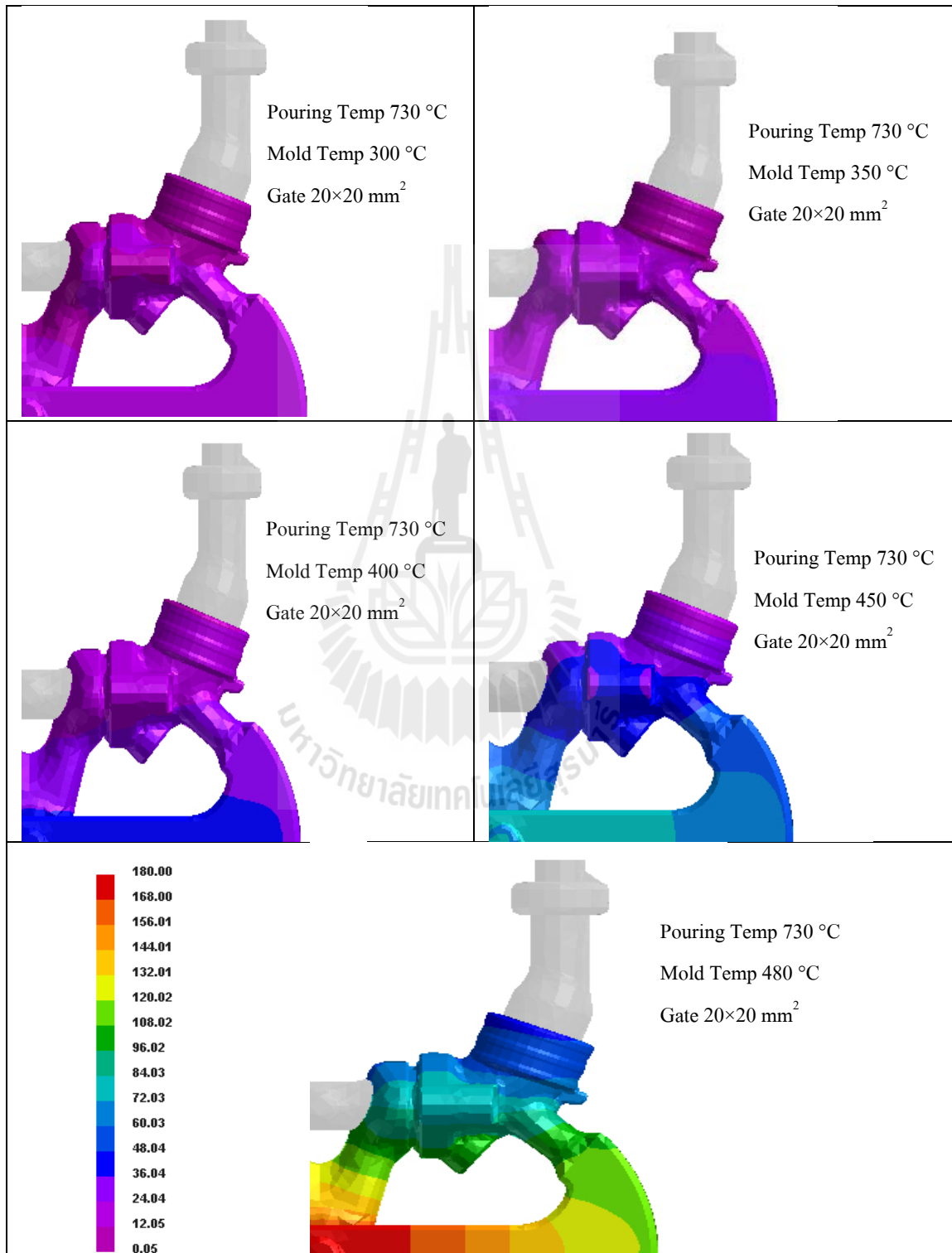
ภาพแสดงผลช่วงเวลาการแข็งตัวของน้ำโลหะเมื่อเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเทน้ำโลหะเป็น 680 °C 720 °C 730 °C 740 °C และ 780 °C และใช้ทางเดินน้ำโลหะขนาด 20×20 ตารางมิลลิเมตร



ภาพแสดงผลการเกิดรูพรุนในชิ้นงานหล่อเมื่อเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิแม่พิมพ์โลหะเป็น 300 °C 350 °C 400 °C 450 °C และ 480 °C และใช้ทางเดินน้ำโลหะขนาด 20×20 ตารางมิลลิเมตร



ภาพแสดงผลช่วงเวลากการแข็งตัวของน้ำโลหะเมื่อเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเทน้ำโลหะเป็น 300 °C 350 °C 400 °C 450 °C และ 480 °C และใช้ทางเดินน้ำโลหะขนาด 20×20 ตารางมิลลิเมตร



The logo of Sakon Nakhon Rajabhat University is a circular emblem. At the top, there is a stylized representation of a traditional Thai roof structure. Below this, a central figure of a person stands on a pedestal. The figure is flanked by two large, stylized Thai characters, 'ส' and 'น'. The entire emblem is set against a background of radiating lines, suggesting a sun or a fan. The text 'มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี' is written in a circular path around the bottom of the emblem.

ภาคผนวก ข

บทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างการศึกษา

รายชื่อบทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างการศึกษา

Mongkol Kaewnopparat and Tapany Udomphol. (2010). **Investigation of Leak Problem in**

Automotive in Automotive Aluminium Alloy Die Casting Via Metallurgical

Analysis. การประชุมวิชาการทางโลหะวิทยาแห่งประเทศไทยครั้งที่ 3 (The 3th Thailand Metallurgy Conference) 26-27 ตุลาคม 2552 โรงแรมเซ็นจูรี่ พาร์ค.



ประวัติผู้เขียน

นายมงคล แก้วนพรัตน์ เกิดเมื่อวันที่ 10 พฤษภาคม พ.ศ. 2527 จังหวัดนนทบุรี สำเร็จ การศึกษาระดับมัธยมศึกษาจากโรงเรียนบางกรวย อำเภอบางกรวย จังหวัดนนทบุรี ในปีการศึกษา 2545 และ สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีจากคณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิชาวิศวกรรมโลหการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ในปีการศึกษา 2549 หลังจากสำเร็จการศึกษาได้เข้าทำงานที่บริษัท ผลิตภัณฑ์วิศวะไทย จำกัด จังหวัดปทุมธานี ในตำแหน่งวิศวกรประกันคุณภาพ โดยทำหน้าที่ควบคุม กระบวนการผลิตอะลูมิเนียมหล่อสำหรับชิ้นส่วนยานยนต์ ตรวจสอบคุณภาพผลิตภัณฑ์ รวมทั้ง ประกันคุณภาพชิ้นงานภายหลังกระบวนการผลิต ทำให้มีความรู้ความชำนาญ และเข้าใจในกระบวนการ ผลิตอะลูมิเนียมหล่อขึ้นรูป เป็นอย่างดี เพื่อเป็นการพัฒนาความรู้และความสามารถให้กับตนเอง จึง ได้เข้าศึกษาต่อระดับปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมโลหการ สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี และในการศึกษาระดับบัณฑิตศึกษานี้ได้ศึกษาต่อเนื่องในเรื่องของ กระบวนการผลิตอะลูมิเนียมหล่อ และการลดปัญหาข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิต จึงทำ ให้ผู้วิจัยได้เข้าใจถึงปัญหาการเกิดข้อบกพร่องอย่างแท้จริง สามารถหาแนวทางในการแก้ไข ข้อบกพร่องในกระบวนการผลิตได้ และสามารถนำไปใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตได้จริง