



การออกแบบและวิเคราะห์ข้อบกพร่องในการหดตัวของชิ้นงานหล่ออินเวสต์เมนต์ด้วยซอฟต์แวร์ Cast-
Designer

สุเมธินี หุชัยภูมิ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมเครื่องกล

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

ปีการศึกษา 2567

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

การออกแบบและวิเคราะห์ข้อบกพร่องในการหดตัวของชิ้นงานหล่ออินเวสต์เมนต์ด้วยซอฟต์แวร์ Cast-Designer



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาลัทธิ

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมเครื่องกล

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

ปีการศึกษา 2567

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ



ใบรับรองวิทยานิพนธ์

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

เรื่อง การออกแบบและวิเคราะห์ข้อบกพร่องในการหดตัวของชิ้นงานหล่ออินเวสต์เมนต์ด้วยซอฟต์แวร์ Cast-Designer

โดย สุเมธิณี หุชัยภูมิ

ได้รับอนุมัติให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมเครื่องกล

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย / หัวหน้าภาควิชา

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

ประธานกรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นุชนา พูลทอง)

อาจารย์ที่ปรึกษา

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พัทธ์พิมล สุวรรณกาญจน์)

กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วรรณลักษณ์ เหล่าทวีทรัพย์)

กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.เพ็ญญารัตน์ สายสิริรัตน์)

ชื่อ : สุเมธิณี หุชัยภูมิ
 ชื่อวิทยานิพนธ์ : การออกแบบและวิเคราะห์ข้อบกพร่องในการหดตัวของ
 ชิ้นงานหล่ออินเวสต์เมนต์ด้วยซอฟต์แวร์ Cast-Designer
 สาขาวิชา : เทคโนโลยีวิศวกรรมเครื่องกล
 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
 อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พัชรพิมล สุวรรณกาญจน์
 ปีการศึกษา : 2567

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้วิเคราะห์การออกแบบระบบทางเข้า (Gating System) สำหรับกรณีศึกษาชิ้นงาน Body OTC Steady ที่เป็นชิ้นส่วนของเครื่องจักรซีเอ็นซีที่ผลิตจากวัสดุเหล็กเกรด AISI 4140 ด้วยกระบวนการหล่ออินเวสต์เมนต์ (Investment Casting) โดยใช้ซอฟต์แวร์ Cast-Designer ในการจำลองพฤติกรรมที่เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการเติมเต็มของโลหะเหลวในแม่พิมพ์ ขอบเขตการวิจัยคือการวิเคราะห์ตัวแปรด้านการออกแบบเพื่อให้ปริมาตรการเกิดโพรงหดตัว (Shrinkage Porosity) ในชิ้นงานลดลง โดยมีตัวแปรในการออกแบบดังนี้ การเปลี่ยนลักษณะหน้าตัดของทางเข้า ($Gate_1$) การเพิ่มทางเข้า ($Gate_2$) การปรับความสูงของทางเข้า (H_{G2}) การปรับระยะห่างของทางวิ่ง (W_R) การปรับความยาวของทางวิ่ง (H_R) และการปรับช่องสามมุมของทางวิ่ง (D_R) โดยมีการวิเคราะห์พฤติกรรมการไหลของโลหะเหลว (Fluid Fraction) เวลาในการเติมเต็มของโลหะเหลว (Fill Time) เวลาในการแข็งตัว (Solidification Time) และปริมาตรการเกิดโพรงหดตัว (Shrinkage Porosity) พบว่าตัวแปรที่ทำให้คุณภาพของชิ้นงานดีขึ้นคือมีหน้าตัดทางเข้า ($Gate_1$) เป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้าจำนวนทางเข้า ($Gate_2$) 2 ทาง ความสูงของทางเข้า (H_{G2}) 20 ตารางมิลลิเมตร ระยะห่างของทางวิ่ง (W_R) 86.32 ตารางมิลลิเมตร ความยาวของทางวิ่ง (H_R) 284.85 ตารางมิลลิเมตร และช่องสามมุมของทางวิ่ง (D_R) 10 องศา ซึ่งผลการวิเคราะห์ทำให้ทราบว่าพฤติกรรมการไหลของโลหะเหลวมีการไหลที่สม่ำเสมอและราบเรียบมากขึ้น มีเวลาในการเติมเต็ม (Fill Time) เพิ่มขึ้นจากเดิม 5.158 วินาที เป็น 7.385 วินาที มีเวลาในการแข็งตัว (Solidification Time) ลดลงจากเดิม 433.797 วินาที เหลือ 276.753 วินาที เนื่องจากปริมาตรของชิ้นงานที่ลดลงถึง 1899.14 ลูกบาศก์เซนติเมตร และผลของการเกิดโพรงหดตัวมีปริมาตรโพรงหดตัวในชิ้นงานจากเดิม 13.04 ลูกบาศก์เซนติเมตร ลดลงเหลือ 7.19 ลูกบาศก์เซนติเมตร คิดเป็น 44.86 เปอร์เซ็นต์

คำสำคัญ : การหล่ออินเวสต์เมนต์, การหดตัว, โปรแกรมแคสติ้งไฮนเนอร์, การจำลองการหล่อ

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

Name : Sumethinee Hoochaiyaphum
Thesis Title : Design and Analysis of Shrinkage Defect for an
Investment Casting Pieces by Cast-Designer Software
Major Field : Mechanical Engineering Technology
King Mongkut's University of Technology North
Bangkok
Thesis Advisor : Assistant Professor Dr. Patpimol Suwankan
Academic Year : 2024

ABSTRACT

This research focuses on the design of the gating system for the case study of a Body OTC Steady part, which is a component of CNC machines made from AISI 4140 steel using the investment casting process. The software Cast-Designer was used to simulate the behavior during the molten metal filling process in the mold. The scope of the research focuses on analyzing design variables to reduce shrinkage porosity in the workpiece. The design variables considered are as follows: changing the cross-sectional shape of the gate ($Gate_1$), adding a gate ($Gate_2$), changing the height of the gate (H_{G2}), changing the runner spacing (W_R), changing the runner length (H_R), and changing the runner angle (D_R). The analysis includes the behavior of molten metal flow, fill time, solidification time, and the shrinkage porosity. The results showed that the design variables improving the workpiece quality include a rectangular cross-section for the $Gate_1$, using two the $Gate_2$, a gate height (H_{G2}) of 20 mm², a runner spacing (W_R) of 86.32 mm², a runner length (H_R) of 284.85 mm², and a runner angle (D_R) of 10 degrees. The simulation results revealed that the molten metal flow became more uniform and smoother. The fill time increased from 5.158 seconds to 7.385 seconds, while the solidification time decreased from 433.797 seconds to 276.753 seconds due to the reduction in the workpiece volume by 1,899.14 cm³. Shrinkage porosity volume decreased from 13.04 cm³ to 7.19 cm³, a reduction of 44.86%.

Keywords: Investment Casting, Shrinkage, Cast-Designer Program, Casting Simulation

Advisor

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีความช่วยเหลือจากหลายฝ่าย ผู้จัดทำขอขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พัทธ์พิมล สุวรรณกาญจน์ ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ อาจารย์ ดร.ทศพร อัสวรังษี ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วรรณลักษณ์ เหล่าทวีทรัพย์ ที่ได้ให้แนวคิดและคำแนะนำที่ใช้ในการทำงานวิจัยครั้งนี้มาโดยตลอด และขอขอบคุณสาขาวิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมเครื่องกล วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ที่อำนวยความสะดวกในการทำงานวิจัยในครั้งนี้

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนภายใต้ความร่วมมือของ บริษัท พีริซิชั่น แมนูแฟคเจอร์ริง จำกัด และ คุณสมเกียรติ จำรัสอรุณ จากบริษัท 4D Corporation Limited ที่ให้การสนับสนุนจนสามารถใช้โปรแกรมจำลอง CAST-DESIGNER อย่างถูกต้องและให้คำแนะนำด้วยความปรารถนาดีมาโดยตลอด ประโยชน์จากการวิจัยนี้ย่อมเป็นผลมาจากความกรุณาของทุกท่านที่กล่าวมาข้างต้น ผู้จัดทำมีความซาบซึ้งต่อพระคุณของทุกท่านเป็นอย่างยิ่ง

สุเมธินี หุชัยภูมิ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง	ฌ
สารบัญรูปภาพ	ฎ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ	1
1.2 วัตถุประสงค์	2
1.3 ขอบเขตการศึกษา	2
1.4 สมมติฐาน	3
1.5 นิยามศัพท์เฉพาะ	3
1.6 วิธีการดำเนินงาน	4
1.7 เครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย	5
1.8 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	5
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	6
2.1 เหล็กกล้าคาร์บอนโครเมียมโมลิบดีนัม	6
2.2 กระบวนการหล่อ (Molding Process)	7
2.3 การออกแบบระบบป้อนเติมและจ่ายโลหะเหลว	9
2.4 ซอฟต์แวร์ในการจำลองพฤติกรรมงานหล่อ	23
2.5 ข้อบกพร่องในงานหล่อ	24
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	24
บทที่ 3 การดำเนินงาน	29
3.1 แผนการดำเนินงาน	29
3.2 กระบวนการผลิตชิ้นงานหล่ออินเวสต์เมนต์	30
3.3 ลักษณะชิ้นงานและลักษณะแม่พิมพ์	37

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.4 ขั้นตอนการใช้ซอฟต์แวร์จำลองพฤติกรรม (Simulation Software)	39
3.5 การวิเคราะห์รูปแบบจากระบบป้อนเดิมรูปแบบเดิม	41
3.6 การคำนวณหาตัวแปรของระบบป้อนเดิมโลหะเหลว	45
บทที่ 4 ผลการดำเนินการวิจัย	53
4.1 ผลของการจำลองพฤติกรรมในการหล่อ	53
4.2 การเปรียบเทียบผลการทดลองจากการจำลองด้วยโปรแกรม Cast-Designer	74
4.3 ผลการทดลองเทหล่อชิ้นงานจริง	79
4.4 การเปรียบเทียบผลการจำลองสถานการณ์ของระบบป้อนเดิมรูปแบบเดิมและรูปแบบใหม่	84
4.5 ผลการทดลองตัวแปรอุณหภูมิการเทเพื่อแก้ไขปัญหาการลดข้อบกพร่องของโพรงหดตัว	87
4.6 ผลการทดลองการเกิดโพรงหดตัวที่ชิ้นงานและระบบป้อนเดิม	94
บทที่ 5 สรุปผลและข้อเสนอแนะ	96
5.1 สรุปผลการทดลอง	96
5.2 อภิปรายผล	98
5.3 ข้อเสนอแนะ	99
บรรณานุกรม	100
ภาคผนวก ก	104
แบบของชิ้นงานและแม่พิมพ์หล่อ	
ภาคผนวก ข	124
ส่วนหนึ่งของวิทยานิพนธ์ที่ได้รับการตอบรับให้ตีพิมพ์เผยแพร่	
ประวัติผู้วิจัย	142

สารบัญตาราง

	หน้า
2-1 ส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้าคาร์บอนโครเมียมโมลิบดีนัม	6
2-2 คุณสมบัติทางกลของเหล็กกล้าคาร์บอนโครเมียมโมลิบดีนัม	7
2-3 เวลาเทสำหรับเหล็กหล่อ	10
2-4 เวลาเทสำหรับเหล็กกล้า	10
3-1 ตัวแปรที่ใช้ในระบบป้อนเติมรูปแบบเดิม	42
3-2 ลักษณะการไหลของระบบป้อนเติมรูปแบบเดิม	43
3-3 ตัวแปรที่ใช้ในการออกแบบการทดลองทั้ง 5 การทดลอง	51
4-1 ลักษณะการไหลของแบบจำลองที่ 1	54
4-2 ลักษณะการไหลของแบบจำลองที่ 2	54
4-3 ลักษณะการไหลของแบบจำลองที่ 3	55
4-4 เวลาที่ใช้ในการเติมเต็มของทั้ง 3 แบบจำลอง	55
4-5 เวลาที่ใช้ในการแข็งตัวของทั้ง 3 แบบจำลอง	56
4-6 ปริมาณการเกิดโพรงหดตัวของชุดการทดลองที่ 1	57
4-7 ลักษณะการไหลของแบบจำลองที่ 4	58
4-8 ลักษณะการไหลของแบบจำลองที่ 5	58
4-9 ลักษณะการไหลของแบบจำลองที่ 6	59
4-10 ลักษณะการไหลของแบบจำลองที่ 7	59
4-11 เวลาที่ใช้ในการเติมเต็มของชุดการทดลองที่ 2	59
4-12 เวลาที่ใช้ในการแข็งตัวของชุดการทดลองที่ 2	60
4-13 ปริมาณการเกิดโพรงหดตัวของชุดการทดลองที่ 2	61
4-14 ลักษณะการไหลของแบบจำลองที่ 8	63
4-15 ลักษณะการไหลของแบบจำลองที่ 9	63
4-16 ลักษณะการไหลของแบบจำลองที่ 10	64
4-17 เวลาที่ใช้ในการเติมเต็มของชุดการทดลองที่ 3	64
4-18 เวลาที่ใช้ในการแข็งตัวของชุดการทดลองที่ 3	65
4-19 ปริมาณการเกิดโพรงหดตัวของชุดการทดลองที่ 3	66
4-20 ลักษณะการไหลของแบบจำลองที่ 11	67
4-21 ลักษณะการไหลของแบบจำลองที่ 12	67

สารบัญตาราง (ต่อ)

	หน้า
4-22 เวลาที่ใช้ในการเติมเต็มของชุดการทดลองที่ 4	67
4-23 เวลาที่ใช้ในการแข็งตัวของชุดการทดลองที่ 4	68
4-24 ปริมาตรการเกิดโพรงหดตัวของชุดการทดลองที่ 4	69
4-25 ลักษณะการไหลของแบบจำลองที่ 13	70
4-26 ลักษณะการไหลของแบบจำลองที่ 14	70
4-27 ลักษณะการไหลของแบบจำลองที่ 15	71
4-28 เวลาที่ใช้ในการเติมเต็มของชุดการทดลองที่ 5	71
4-29 เวลาที่ใช้ในการแข็งตัวของชุดการทดลองที่ 5	72
4-30 ปริมาตรการเกิดโพรงหดตัวของชุดการทดลองที่ 5	73
4-31 ตารางสรุปผลการทดลองทั้ง 16 การทดลอง	74
4-32 ปริมาตรของชิ้นงานและระบบป้อนเติม	78
4-33 ตัวแปรที่ใช้ในระบบป้อนเติมรูปแบบใหม่ (NML)	79
4-34 ตัวแปรที่ใช้ในระบบป้อนเติมที่ปรับปรุงใหม่ (IML)	80
4-35 รายงานผลการทดสอบด้วยภาพถ่ายรังสี	83
4-36 ลักษณะการไหลของระบบป้อนเติมรูปแบบเดิม (CML)	85
4-37 ลักษณะการไหลของระบบป้อนเติมที่ปรับปรุงใหม่ (IML)	85
4-38 การเปรียบเทียบผลการจำลองลักษณะการแข็งตัว (Solidification) ของระบบ ป้อนเติมรูปแบบเดิมและระบบป้อนเติมที่ปรับปรุงใหม่	86
4-39 การเปรียบเทียบผลการจำลองการเกิดโพรงหดตัว (Shrinkage Porosity)	86
4-40 ลักษณะการไหลของแบบจำลอง IMP1680	88
4-41 ลักษณะการไหลของแบบจำลอง IMP	88
4-42 ลักษณะการไหลของแบบจำลอง IMP1660	89
4-43 ลักษณะการไหลของแบบจำลอง IMP1650	89
4-44 เวลาที่ใช้ในการเติมเต็มของการปรับอุณหภูมิเท	89
4-45 เวลาที่ใช้ในการแข็งตัวของการปรับอุณหภูมิเท	90
4-46 ปริมาตรการเกิดโพรงหดตัวของการปรับอุณหภูมิเท	91
4-47 ตารางสรุปผลการทดลองทั้ง 4 การทดลอง	92
4-48 ปริมาตรการเกิดโพรงหดตัวที่ชิ้นงานและระบบป้อนเติม	95

สารบัญรูปภาพ

	หน้า
2-1 การจำแนกประเภทของกระบวนการหล่อโลหะตามลักษณะของแบบหล่อ	8
2-2 ขั้นตอนของกระบวนการหล่ออินเวสต์เมนต์	8
2-3 โนโมแกรมสำหรับการคำนวณระบบทางวิ่งสำหรับเหล็กหล่อสีเทาและเหล็กกล้าคาร์บอน	12
2-4 ลักษณะของแอ่งรูเท	13
2-5 ลักษณะรูปทรงของแอ่งรูเทรูปกรวยแบบต่าง ๆ	13
2-6 รูปทรงการไหลของโลหะเหลว	14
2-7 เปรียบเทียบการใช้รูเทและแอ่งรูเทที่แตกต่างกัน	15
2-8 การเปลี่ยนทิศทางการไหล	15
2-9 ลักษณะฐานรูเทแบบต่าง ๆ ที่เรียงลำดับตามความเหมาะสมของการใช้งานจากน้อยที่สุดไปยังมากที่สุด	16
2-10 ลักษณะการวางทางวิ่ง	16
2-11 การแก้ปัญหาทางวิ่งที่ความเร็วการไหลไม่เท่ากัน	17
2-12 อัตราส่วนพื้นที่ระหว่าง รูเท : ทางวิ่ง : ทางเข้า	18
2-13 การหาขนาดของรูลันด้วยวิธี Shape Factor Method	19
2-14 รูปร่างของโพรงหดตัว	20
2-15 สูตรคำนวณหาโมดูลัสของงานหล่อรูปทรงต่าง ๆ	21
2-16 การหดตัวแบบเส้นศูนย์กลางในเหล็กกล้าหล่อลักษณะงานเป็นแผ่นและการกระจายตัวของความร้อนช่วงต่าง ๆ	22
2-17 ระยะที่รูลันสามารถทำหน้าที่ป้อนเติมได้อย่างสมบูรณ์สำหรับชิ้นงานแบบแผ่น	22
3-1 แผนผังการดำเนินงาน	30
3-2 เครื่องฉีดและแม่พิมพ์ฉีดขี้ผึ้ง (Wax)	31
3-3 การตกแต่งชิ้นงานขี้ผึ้ง (Wax)	31
3-4 การประกอบแบบแม่พิมพ์ขี้ผึ้ง (Wax)	32
3-5 การโปรยทรายและจุ่มกาว	32
3-6 (ก) ลักษณะการมัดลวดหรือมัดตะแกรง (ข) การตากแม่พิมพ์	33
3-7 เครื่อง Dewax	33
3-8 (ก) เตาอบ (ข) แม่พิมพ์ที่ผ่านการอบแล้ว	34

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

	หน้า
3-9 (ก) ขั้นตอนการหลอมวัตถุดิบ (ข) ขั้นตอนการเทหล่อ	34
3-10 ขั้นตอนการกระแทกเปลือก	35
3-11 ชิ้นงานที่ถูกตัดระบบป้อนเต็มออกแล้ว	35
3-12 ขั้นตอนการตกแต่งชิ้นงาน	36
3-13 เตาอบ Annealing	36
3-14 (ก) รอยยุบบริเวณผิวชิ้นงาน (ข) ผิวขรุขระบริเวณผิวชิ้นงาน (ค) ผิวเปลือกสัมผัสบริเวณผิวชิ้นงาน (ง) ชิ้นงานบิดโก่ง (จ) โพรงหดตัว	37
3-15 ลักษณะรูปร่างชิ้นงาน Body OTC Steady	37
3-16 ขนาดของชิ้นงานโดยสังเขป	38
3-17 ลักษณะชิ้นงานและระบบป้อนเต็มโลหะเหลว	38
3-18 ขั้นตอนการจำลองพฤติกรรมโดยใช้ซอฟต์แวร์ Cast-Designer	39
3-19 โมเดล CAD	40
3-20 ชิ้นงานที่คลุมด้วยเปลือก (Shell Mould)	40
3-21 การกำหนดค่าตัวแปรต่าง ๆ	41
3-22 จุดข้อบกพร่องประเภทโพรงหดตัวในเนื้อชิ้นงาน	42
3-23 ส่วนประกอบของระบบป้อนเต็มโลหะเหลวรูปแบบเดิม (Current Model: CML)	42
3-24 ผลการจำลองเวลาในการเติมเต็มของระบบป้อนเต็มรูปแบบเดิม (CML)	44
3-25 ผลการจำลองลักษณะการแข็งตัวของระบบป้อนเต็มรูปแบบเดิม (CML)	44
3-26 ผลการจำลองลักษณะการเกิดโพรงหดตัวของระบบป้อนเต็มรูปแบบเดิม (CML)	44
3-27 ภาพแสดงตัวแปรที่จะมีการปรับเปลี่ยน	45
3-28 แบบจำลองระบบป้อนเต็มโลหะเหลวของชุดการทดลองที่ 1 (ก) แบบจำลองที่ 1 (ข) แบบจำลองที่ 2 (ค) แบบจำลองที่ 3	47
3-29 แบบจำลองระบบป้อนเต็มโลหะเหลวของชุดการทดลองที่ 2 (ก) แบบจำลองที่ 4 (ข) แบบจำลองที่ 5 (ค) แบบจำลองที่ 6 (ง) แบบจำลองที่ 7	47
3-30 แบบจำลองระบบป้อนเต็มโลหะเหลวของชุดการทดลองที่ 3 (ก) แบบจำลองที่ 8 (ข) แบบจำลองที่ 9 (ค) แบบจำลองที่ 10	48
3-31 แบบจำลองระบบป้อนเต็มโลหะเหลวของชุดการทดลองที่ 4 (ก) แบบจำลองที่ 11 (ข) แบบจำลองที่ 12	49
3-32 แบบจำลองระบบป้อนเต็มโลหะเหลวของชุดการทดลองที่ 5 (ก) แบบจำลองที่ 13 (ข) แบบจำลองที่ 14 (ค) แบบจำลองที่ 15	49

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

	หน้า
4-1 ผลการจำลองเวลาในการเติมเต็ม (ก) แบบจำลองที่ 1 (ข) แบบจำลองที่ 2 (ค) แบบจำลองที่ 3	55
4-2 ผลการจำลองการแข็งตัว (ก) แบบจำลองที่ 1 (ข) แบบจำลองที่ 2 (ค) แบบจำลองที่ 3	56
4-3 ผลการจำลองการเกิดโพรงหดตัว (ก) แบบจำลองที่ 1 (ข) แบบจำลองที่ 2 (ค) แบบจำลองที่ 3	57
4-4 ผลการจำลองเวลาในการเติมเต็ม (ก) แบบจำลองที่ 4 (ข) แบบจำลองที่ 5 (ค) แบบจำลองที่ 6 (ง) แบบจำลองที่ 7	60
4-5 ผลการจำลองการแข็งตัว (ก) แบบจำลองที่ 4 (ข) แบบจำลองที่ 5 (ค) แบบจำลองที่ 6 (ง) แบบจำลองที่ 7	61
4-6 ผลการจำลองการเกิดโพรงหดตัว (ก) แบบจำลองที่ 4 (ข) แบบจำลองที่ 5 (ค) แบบจำลองที่ 6 (ง) แบบจำลองที่ 7	62
4-7 ผลการจำลองเวลาในการเติมเต็ม (ก) แบบจำลองที่ 8 (ข) แบบจำลองที่ 9 (ค) แบบจำลองที่ 10	64
4-8 ผลการจำลองการแข็งตัว (ก) แบบจำลองที่ 8 (ข) แบบจำลองที่ 9 (ค) แบบจำลองที่ 10	65
4-9 ผลการจำลองการเกิดโพรงหดตัว (ก) แบบจำลองที่ 8 (ข) แบบจำลองที่ 9 (ค) แบบจำลองที่ 10	66
4-10 ผลการจำลองเวลาในการเติมเต็ม (ก) แบบจำลองที่ 11 (ข) แบบจำลองที่ 12	68
4-11 ผลการจำลองการแข็งตัว (ก) แบบจำลองที่ 11 (ข) แบบจำลองที่ 12	68
4-12 ผลการจำลองการเกิดโพรงหดตัว (ก) แบบจำลองที่ 11 (ข) แบบจำลองที่ 12	69
4-13 ผลการจำลองเวลาในการเติมเต็ม (ก) แบบจำลองที่ 13 (ข) แบบจำลองที่ 14 (ค) แบบจำลองที่ 15	71
4-14 ผลการจำลองการแข็งตัว (ก) แบบจำลองที่ 13 (ข) แบบจำลองที่ 14 (ค) แบบจำลองที่ 15	72
4-15 ผลการจำลองการเกิดโพรงหดตัว (ก) แบบจำลองที่ 13 (ข) แบบจำลองที่ 14 (ค) แบบจำลองที่ 15	73
4-16 กราฟแสดงผลของเวลาในการเติมเต็ม (Fill Time) ของทั้ง 15 การทดลอง	76
4-17 กราฟแสดงผลของเวลาในการแข็งตัว (Solidification Time) ของทั้ง 15 การทดลอง	77
4-18 กราฟแสดงผลของปริมาตรการเกิดโพรงหดตัว (Shrinkage Porosity) ของทั้ง 15 การทดลอง	78
4-19 รูปร่างโดยรวมของระบบป้อนเติมรูปแบบใหม่ (NML)	80

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

	หน้า
4-20 รูปร่างโดยรวมของระบบป้อนเติมที่ปรับปรุงใหม่ (IML)	81
4-21 ชิ้นงานหล่อที่ได้หล่อจริง	81
4-22 ผลการจำลองการเกิดโพรงหดตัวจากโปรแกรมแสดงตำแหน่งโพรงหดตัว	87
4-23 (ก) ภาพถ่ายรังสีด้านหน้าของชิ้นงาน (ข) ภาพถ่ายรังสีด้านหลังของชิ้นงาน	87
4-24 ผลการจำลองเวลาในการเติมเต็ม (ก) แบบจำลอง IMP1680 (ข) แบบจำลอง IMP (ค) แบบจำลอง IMP1660 (ง) แบบจำลอง IMP1650	90
4-25 ผลการจำลองการแข็งตัว (ก) แบบจำลอง IMP1680 (ข) แบบจำลอง IMP (ค) แบบจำลอง IMP1660 (ง) แบบจำลอง IMP1650	91
4-26 ผลการจำลองการเกิดโพรงหดตัว (ก) แบบจำลอง IMP1680 (ข) แบบจำลอง IMP (ค) แบบจำลอง IMP1660 (ง) แบบจำลอง IMP1650	92
4-27 กราฟแสดงผลของเวลาในการเติมเต็ม (Fill Time) ของทั้ง 4 การทดลอง	93
4-28 กราฟแสดงผลของเวลาในการแข็งตัว (Solidification Time) ของทั้ง 4 การทดลอง	94
4-29 กราฟแสดงผลของปริมาตรการเกิดโพรงหดตัว (Shrinkage Porosity) ของทั้ง 4 การทดลอง	94

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การหล่ออินเวสต์เมนต์ (Investment Casting) หรือที่เรียกกันว่ากระบวนการหล่อขึ้นฝั่งหาย (Lost Wax Casting) เป็นเทคนิคการผลิตที่ใช้กันอย่างแพร่หลายเพื่อสร้างชิ้นส่วนโลหะที่ซับซ้อน ความแม่นยำสูงและผิวละเอียด (ณรงค์ศักดิ์, 2562 : 81) โดยที่ในกระบวนการผลิตจะมีปัจจัยต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องที่ทำให้ได้ชิ้นงานหล่อที่ดีที่สุด ปัจจัยต่าง ๆ ได้แก่ รูปร่างของชิ้นงาน อุณหภูมิของโลหะเหลว (Melt Temperature) อุณหภูมิของแม่พิมพ์ (Mold Temperature) อุณหภูมิขณะเทหล่อ (Pouring Temperature) และความเร็วในการไหลของโลหะเหลว (Velocity) โดยปัจจัยที่กล่าวมานั้นล้วนส่งผลต่อข้อบกพร่อง (Defect) ของชิ้นงาน ความต้องการชิ้นงานหล่อที่มีความแม่นยำสูงยังเพิ่มขึ้นเนื่องจากความต้องการที่เข้มงวดของอุตสาหกรรมด้านต่าง ๆ (ธนพล, 2553) โดยบริษัท พีริซิชั่น แมนูแฟคเจอร์ริง จำกัด เป็นผู้เชี่ยวชาญในการผลิตงานหล่ออินเวสต์เมนต์ (Investment Casting) ที่มีคุณภาพสูง ผลิตภัณฑ์มีตั้งแต่ชิ้นส่วนขนาดเล็กมากจนไปถึงชิ้นส่วนขนาดใหญ่และหนัก ซึ่งครอบคลุมอุตสาหกรรมส่วนใหญ่ตั้งแต่ภาคพื้นดินถึงบนฟ้า ในทุกกระบวนการผลิตจะพิจารณาการคำนวณวัสดุอย่างเหมาะสมเพื่อใช้วัสดุในการผลิตอย่างดี เหลือวัสดุเหลือใช้น้อยที่สุดและยังคงรักษาผลิตภัณฑ์สำเร็จรูปให้มีคุณภาพสูงและตรงตามความต้องการของลูกค้า (Precision Manufacturing Co., Ltd, 2017) ซึ่งในช่วงไม่กี่ปีที่ผ่านมาการหล่ออินเวสต์เมนต์ (Investment Casting) ได้ให้ความสำคัญกับการรวมเทคนิคจำลองด้วยคอมพิวเตอร์เข้ากับอุตสาหกรรมการผลิตมากขึ้น โดยการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์จะเกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์ในการเพิ่มประสิทธิภาพด้านต่าง ๆ ของกระบวนการหล่ออินเวสต์เมนต์ (Investment Casting) รวมทั้งการจำลองเหล่านี้ช่วยให้ผู้ผลิตสามารถคาดการณ์และลดข้อบกพร่องของชิ้นงานหล่อให้มีคุณภาพดีขึ้น สามารถปรับปรุงปัจจัยของกระบวนการหล่อที่เหมาะสมที่สุดส่งผลให้ระยะเวลาและต้นทุนในการผลิตลดลงและมีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อยที่สุด โดยการใช้เทคนิคการจำลองสถานการณ์การไหลของโลหะด้วยโปรแกรมวิเคราะห์มีความก้าวหน้าและแม่นยำสูงขึ้นส่งผลให้มีความน่าเชื่อถือสามารถนำไปใช้ในการตัดสินใจได้ดีขึ้น (พัตรพิมล ญัฎฐพงศ์ และพิมพ์รภัส, 2565)

ในการผลิตชิ้นส่วนของเครื่องจักรซีเอ็นซีที่มีขนาดใหญ่ด้วยกระบวนการหล่ออินเวสต์เมนต์ (Investment Casting) มีความต้องการความละเอียดผิวและความแม่นยำของขนาด โดยเฉพาะอย่างยิ่ง

การขึ้นรูปด้วยเครื่องจักรซีเอ็นซีมีบทบาทสำคัญในการผลิตชิ้นส่วนคุณภาพสูงและความซับซ้อนที่ต้องอาศัยความแม่นยำที่มีประสิทธิภาพ และเทคนิคของการขึ้นรูปที่ละเอียดแม่นยำ จากปัญหาการผลิตชิ้นงาน Body OTC Steady ของเครื่องจักรซีเอ็นซี พบว่ามีการเทหล่อทั้งหมด 10 ชิ้น โดยในจำนวนชิ้นงานทั้งหมดนี้จะมีชิ้นงานที่เสียและชิ้นงานที่ต้องนำกลับไปซ่อม 10 ชิ้น และจากรายงานปริมาณชิ้นงานที่เสียและชิ้นงานที่ต้องนำกลับไปซ่อม พบว่าเกิดข้อบกพร่องหลายลักษณะ เช่น ผิวย่น ตามด และเกิดการหดตัวในชิ้นงาน เป็นต้น

ในการศึกษานี้ได้ศึกษาการออกแบบระบบป้อนเติม (Gating System) สำหรับชิ้นงาน Body OTC Steady ด้วยกระบวนการหล่ออินเวสต์เมนต์ (Investment Casting) โดยจะกล่าวถึงวิธีการแก้ปัญหาการเกิดข้อบกพร่อง ได้แก่ โพรงหดตัว (Shrinkage Porosity) และชิ้นงานไม่สมบูรณ์ในการหล่อที่ผลิตจากวัสดุเหล็กเกรด 4140 โดยใช้ซอฟต์แวร์ในการจำลองพฤติกรรมที่เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการเติมเต็มของโลหะเหลวในแม่พิมพ์ ขอบเขตการศึกษาคือการปรับพารามิเตอร์ของระบบป้อนเติม ได้แก่ การปรับลักษณะทางเข้า (Gate₁) การเพิ่มทางเข้า (Gate₂) การปรับความสูงทางเข้า (Gate₂) การปรับระยะห่างทางวิ่ง (Runner) การปรับความยาวทางวิ่ง (Runner) และการปรับมุมองศาทางวิ่ง (Runner) เพื่อปรับปรุงคุณภาพของชิ้นงานหล่อและลดต้นทุนด้านการผลิต ซึ่งมีอุณหภูมิเทอยู่ที่ 1670 องศาเซลเซียส อุณหภูมิแม่พิมพ์ 850 องศาเซลเซียส และมีความเร็วในการไหล 1.2 เมตรต่อวินาที โดยมีการศึกษาพฤติกรรมการไหลของโลหะเหลว (Fluid Fraction) เวลาในการเติมเต็มของโลหะเหลว (Fill Time) เวลาในการแข็งตัวของโลหะเหลว (Solidification Time) และปริมาตรการเกิดโพรงหดตัว (Shrinkage Porosity) เพื่อนำมาพัฒนากระบวนการผลิตให้ได้ชิ้นงานที่มีคุณภาพมากยิ่งขึ้น

1.2 วัตถุประสงค์

- 1.2.1 เพื่อปรับปรุงคุณภาพของชิ้นงานหล่อสามารถลดข้อบกพร่องของชิ้นงานจากการเกิดโพรงหดตัว (Shrinkage Porosity)
- 1.2.2 ลดต้นทุนการผลิตในกระบวนการหล่อ

1.3 ขอบเขตการศึกษา

- 1.3.1 ชิ้นงาน Body OTC Steady ของเครื่องจักรซีเอ็นซี ขนาด 267.81 มิลลิเมตร x 195.85 มิลลิเมตร x 98.92 มิลลิเมตร
- 1.3.2 วัสดุที่ใช้คือ เหล็กเกรด 4140
- 1.3.3 โปรแกรมสร้างแบบจำลองสามมิติ SolidWorks Version 2021
- 1.3.4 โปรแกรมจำลองสถานการณ์การไหลของโลหะเหลว CAST-DESIGNER Version 7.6
- 1.3.5 อัตราส่วนพื้นที่หน้าตัด รูเท : ทางวิ่ง : ทางเข้า คือ 1 : 3 : 3
- 1.3.6 หล่อโลหะด้วยกระบวนการหล่ออินเวสต์เมนต์ (Investment Casting)
- 1.3.7 ความสูงของระบบป้อนเติม 384.85 - 325.65 มิลลิเมตร

1.4 สมมติฐาน

การเพิ่มเวลาในการเทมากกว่า 4 วินาที จะแก้ไขปัญหาคายแก๊สหรือดันแก๊สออกได้ดีขึ้น ซึ่งเป็นที่มาของข้อบกพร่องตามดและรูพรุนในชิ้นงานหล่อ

1.5 นิยามศัพท์เฉพาะ

1.5.1 การหล่ออินเวสต์เมนต์หรือการหล่อขี้ผึ้งหาย (Investment Casting) หมายถึงวิธีการหล่อแบบแม่นยำโดยเคลือบขี้ผึ้ง (Wax) หรือพลาสติกกระสวน (Pattern) ด้วยวัสดุทนไฟเพื่อสร้างแม่พิมพ์ จากนั้นกระสวน (Pattern) จะถูกละลายหรือถูกเผาให้เหลือช่องที่เทโลหะเหลวลงไป

1.5.2 กระสวน (Pattern) หมายถึงแบบจำลองของชิ้นส่วนสุดท้ายที่จะหล่อ มักทำจากขี้ผึ้ง พลาสติกหรือวัสดุอื่น ๆ

1.5.3 กระสวนขี้ผึ้ง (Wax Pattern) หมายถึงกระสวนที่ทำจากขี้ผึ้งสำหรับทำแม่พิมพ์เซรามิก

1.5.4 แบบหล่อ (Mold) หมายถึงวัสดุหรือเครื่องมือที่ใช้ในการสร้างรูปทรงของชิ้นงานที่ต้องการหล่อ โดยโลหะหลอมเหลวจะถูกเทในแบบหล่อนี้

1.5.5 เปลือกเซรามิก (Ceramic Shell) หมายถึงแม่พิมพ์หลายชั้นที่ทำโดยการจุ่มกระสวนขี้ผึ้ง (Wax Pattern) ลงในส่วนผสมของวัสดุเซรามิกและเคลือบด้วยเซรามิกขนาดเล็ก จากนั้นปล่อยให้แห้งเพื่อให้เปลือกแข็ง

1.5.6 สารละลายเข้มข้น (Slurry) หมายถึงสารละลายของผงเซรามิกที่ผสมกับของเหลวแล้วนำมาพอกลงบนต้นแบบของชิ้นงานที่ต้องการหล่อเพื่อสร้างเป็นเปลือกเซรามิกสำหรับใช้เป็นแบบหล่อ

1.5.7 การเผาไล่ขี้ผึ้ง (Dewaxing) หมายถึงขั้นตอนการจัดกระสวนขี้ผึ้ง (Wax Pattern) ออกจากแม่พิมพ์เปลือกเซรามิก (Ceramic Shell) ก่อนเทโลหะเหลว ซึ่งสามารถทำได้โดยการหลอมหรือเผา

1.5.8 ระบบทางเข้า (Gating System) หมายถึงช่องทาง (ทางเข้า ทางวิ่ง และรูเท) ที่สร้างขึ้นในแม่พิมพ์เพื่อนำโลหะเหลวเข้าสู่โพรงและปล่อยให้อากาศไหลออกมา

1.5.9 ทางเข้า (Gate or Ingate) หมายถึงช่องที่ทำไว้สำหรับให้โลหะหลอมเหลวไหลจากทางวิ่งหลักเข้าสู่แบบหล่อ

1.5.10 ทางวิ่ง (Runner) หมายถึงช่องทางที่ทำขึ้นเพื่อให้โลหะหลอมเหลวไหลผ่านจากจุดเทไปยังจุดต่าง ๆ ของแบบหล่อ

1.5.11 รูเท (Sprue) หมายถึงจุดที่เทโลหะหลอมเหลวลงสู่แบบหล่อผ่านช่องทางทางวิ่งหรือช่องทางเข้า

1.5.12 รูลัน (Riser) หมายถึงช่องทางที่ออกแบบไว้เพื่อระบายโลหะหลอมเหลวส่วนเกินที่ไม่สามารถเติมเต็มแบบหล่อได้อย่างสมบูรณ์ในกระบวนการหล่อ

1.5.13 อุณหภูมิเท (Pouring Temperature) หมายถึงอุณหภูมิที่ใช้ในการเทโลหะหลอมเหลวลงในแบบหล่อ กระบวนการเทจะต้องควบคุมอุณหภูมิของโลหะให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสม เพื่อให้โลหะสามารถไหลลงแบบหล่อได้ดีและเกิดการแข็งตัวตามต้องการ

1.5.14 วิธีการโนโมแกรม (Nomogram Method) หมายถึงวิธีการใช้โนโมแกรมซึ่งเป็นกราฟหรือแผนภูมิที่ประกอบด้วยสเกลหลายชุดที่เชื่อมโยงกัน เพื่อช่วยคำนวณหรือแก้ปัญหาทางคณิตศาสตร์หรือวิศวกรรม โดยไม่จำเป็นต้องใช้เครื่องคิดเลขหรือสูตรซับซ้อน

1.5.15 อัตราส่วนระบบทางเข้า (Gate Ratio) หมายถึงสัดส่วนของขนาดหรือความกว้างของช่องทางเข้า (Gate) เทียบกับขนาดของช่องทางวิ่ง (Runner) และรูเท (Sprue) ในแบบหล่อ อัตราส่วนนี้มีผลต่อการไหลของโลหะหลอมเหลวในกระบวนการหล่อ

1.5.16 วิธีอัตราส่วนรูปร่าง (Shape Factor Method) หมายถึง วิธีการที่ใช้ในการคำนวณหรือวิเคราะห์คุณสมบัติของรูปทรงต่าง ๆ โดยอิงจากอัตราส่วนหรือพารามิเตอร์ที่สัมพันธ์กับรูปร่างของวัตถุ วิธีนี้มักใช้ในการศึกษาและออกแบบระบบหล่อ เช่น การประเมินความเร็วการไหลของโลหะหลอมเหลวในแบบหล่อ หรือการคำนวณเวลาการแข็งตัวของโลหะ

1.5.17 วิธีเรขาคณิต (Geometric Method) หมายถึงวิธีการที่ใช้หลักการและเทคนิคจากเรขาคณิตในการวิเคราะห์หรือออกแบบระบบหล่อโลหะหรือในกระบวนการทางวิศวกรรมและการผลิตอื่น ๆ

1.5.18 วิธีมอดุลัส (Modulus Method) หมายถึงวิธีที่ใช้ในการวิเคราะห์และออกแบบระบบหล่อโลหะ โดยเฉพาะในการคำนวณปริมาตรของแบบหล่อและการออกแบบระบบทางเข้า (Gate System) เพื่อให้การกระจายของโลหะหลอมเหลวเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ

1.5.19 เวลาที่ใช้ในการเติมโลหะหลอมลงแบบหล่อ (Fill Time) หมายถึงระยะเวลาในการเทโลหะหลอมเหลวลงในแบบหล่อจนเต็มรูปทรงที่ต้องการ

1.5.20 เวลาที่ใช้ในการแข็งตัว (Solidification Time) หมายถึงระยะเวลาในการที่โลหะหลอมเหลวเย็นตัวลงและแข็งตัวเป็นรูปทรงที่ต้องการหลังจากที่เทลงในแบบหล่อ

1.5.21 การเกิดโพรงหดตัว (Shrinkage Porosity) หมายถึงการเกิดช่องว่างหรือโพรงในชิ้นงานโลหะหลังจากที่มันแข็งตัวและเย็นตัวลง ซึ่งเกิดจากการหดตัวของโลหะหลอมเหลวในระหว่างกระบวนการหล่อ

1.6 วิธีการดำเนินงาน

1.6.1 ตรวจสอบสภาพปัญหาในปัจจุบัน ความต้องการและเงื่อนไขต่าง ๆ ของชิ้นงาน Body OTC Steady เพื่อกำหนดวัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.6.2 ศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1.6.3 ออกแบบระบบทางเข้า (Gating System) ในแบบหล่อสำหรับสร้างชิ้นงานด้วยโปรแกรม SolidWorks Version 2021

1.6.4 ทดลองจำลองสถานการณ์การไหลของโลหะเหลว ตามเงื่อนไขที่กำหนดโดยใช้โปรแกรมวิเคราะห์งานหล่อ Cast-Designer Version 7.6

1.6.5 เก็บรวบรวมและวิเคราะห์ผลการจำลอง

1.6.6 สรุปผลการทำงานวิจัยและข้อเสนอแนะ

1.7 เครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย

- 1.7.1 เครื่องคอมพิวเตอร์และเครื่องพิมพ์รายงาน (Specifications: Intel Core i7-6800K CPU @3.40GHz)
- 1.7.2 โปรแกรม SolidWorks Version 2021
- 1.7.3 โปรแกรม Cast-Designer Version 7.6

1.8 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.8.1 ได้ข้อมูลเกี่ยวข้องกับปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลกระทบต่อการหล่อขึ้นรูปแบบอินเวสต์เมนต์ (Investment Casting)
- 1.8.2 สามารถออกแบบระบบทางเข้า (Gating System) ให้มีความเหมาะสมเพื่อเพิ่มผลผลิตได้ดียิ่งขึ้น
- 1.8.3 สามารถหาแนวทางการแก้ไขการเกิดข้อบกพร่องของชิ้นงาน Body OTC Steady ในกระบวนการหล่ออินเวสต์เมนต์ (Investment Casting)
- 1.8.4 สามารถลดเวลา ต้นทุนและข้อบกพร่องในกระบวนการหล่ออินเวสต์เมนต์ (Investment Casting)
- 1.8.5 สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการผลิตเพื่อลดของเสียที่เกิดจากการหล่อขึ้นรูปได้
- 1.8.6 สามารถนำข้อมูลและแนวทางแก้ไขปัญหามาประยุกต์ใช้กับชิ้นงานอื่น ๆ ได้

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในการศึกษาวิทยานิพนธ์บทนี้เป็นส่วนที่สำคัญในการอธิบายแนวคิด ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง เพื่อสร้างความเข้าใจพื้นฐานและนำเสนอกรอบแนวคิดในการศึกษาของงานวิจัยนี้ โดยในบทนี้ ผู้วิจัยจะทำการทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับหัวข้อการวิเคราะห์ประกอบไปด้วย เหล็กกล้าคาร์บอนโครเมียมโมลิบดีนัม AISI4140 กระบวนการหล่อ (Casting Process) การออกแบบระบบป้อนเติมและจ่ายโลหะเหลว ซอฟต์แวร์ในการจำลองพฤติกรรมงานหล่อ ข้อบกพร่องในงานหล่อ และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง โดยมีเนื้อหา ดังนี้

2.1 เหล็กกล้าคาร์บอนโครเมียมโมลิบดีนัม AISI 4140 (Cline Limited Partnership, 2561)

เหล็กกล้าคาร์บอนโครเมียมโมลิบดีนัมตามมาตรฐาน AISI (American Iron and Steel Institute) หมายถึง เหล็กกล้าผสมต่ำความแข็งแรงสูงที่มีโครเมียมและโมลิบดีนัมเป็นส่วนผสมสำคัญในการเพิ่มความแข็งแรงและความสามารถในการชุบแข็ง มีความต้านทานการสึกหรอและความเหนียวแรงแ้งที่อุณหภูมิต่ำได้ดีกว่าเหล็กกล้าคาร์บอนที่มีส่วนผสมใกล้เคียงกันและยังสามารถทำการชุบผิวแข็งเฉพาะผิวได้ มีส่วนผสมทางเคมีดังแสดงในตารางที่ 2-1

ตารางที่ 2-1 ส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้าคาร์บอนโครเมียมโมลิบดีนัม

ส่วนผสมทางเคมี (wt%)						
โครเมียม	แมงกานีส	คาร์บอน	ซิลิกอน	โมลิบดีนัม	กำมะถัน	ฟอสฟอรัส
0.80-1.10	0.75-1.0	0.38-0.43	0.15-0.30	0.15-0.25	0.040	0.035

ที่มา : Fushun Special Steel Co., Ltd. (2023)

เหล็กกล้าคาร์บอนโครเมียมโมลิบดีนัม AISI4140 เทียบได้กับเหล็กกล้า SCM440 ตามมาตรฐาน JIS (Japanese Industrial Standards) และเหล็ก 42CrMo4/1.7225 ตามมาตรฐาน DIN (Deutsches Institut fur Normung) ไม่ควรใช้งานที่อุณหภูมิสูงเกินกว่า 480 องศาเซลเซียส เนื่องจากความแข็งแรงจะลดอย่างรวดเร็ว นอกจากนี้ยังไม่ควรอบคืนตัวในช่วงอุณหภูมิ 230-370 องศาเซลเซียส เนื่องจากเหล็กจะมีความเปราะมากจากการเกิดบรูบริทเทิลเนส ดังนั้นควรอบคืนตัวในช่วงอุณหภูมิที่สูงหรือต่ำกว่านี้ การอบคืนตัวที่อุณหภูมิ 190 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2-4 ชั่วโมง ทำให้เพียงพอต่อการใช้งานทั่วไป มีคุณสมบัติทางกลดังแสดงในตารางที่ 2-2

ตารางที่ 2-2 คุณสมบัติทางกลของเหล็กกล้าคาร์บอนโครเมียมโมลิบดีนัม

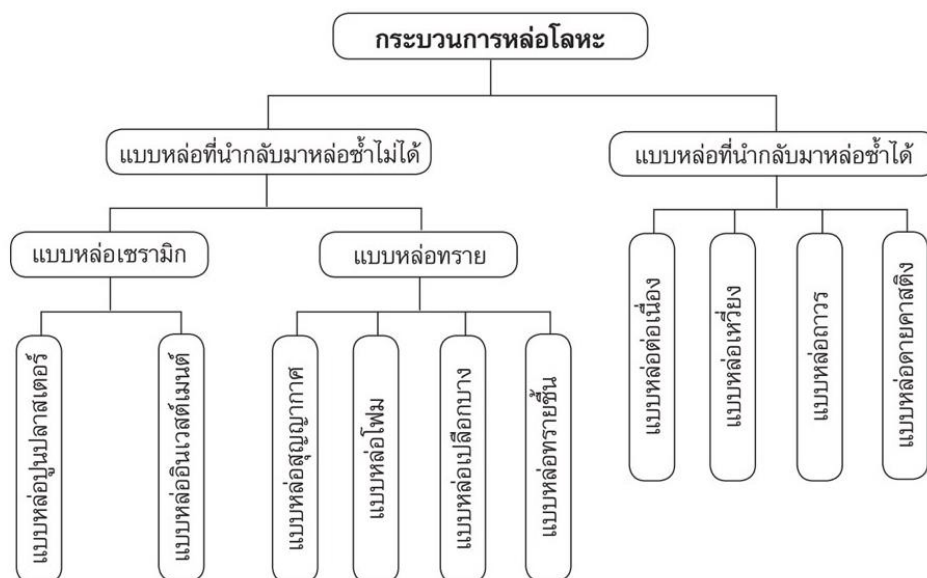
คุณสมบัติ	เมตริก
Tensile Strength	655 เมกะปาสกาล
Yield Strength	415 เมกะปาสกาล
Bulk Modulus (Typical for Steel)	140 กิกะปาสกาล
Shear Modulus (Typical for Steel)	80 กิกะปาสกาล
Elastic Modulus	190-210 กิกะปาสกาล
Poisson's Ratio	0.27-0.30
Elongation at Break (in 50 mm)	25.70 เปอร์เซนต์
Hardness, Brinell	197
Hardness, Knoop	219
Hardness, Rockwell B	92
Hardness, Rockwell C	13
Hardness, Vickers	207
Machinability	65

ที่มา : Fushun Special Steel Co., Ltd. (2023)

เหล็กกล้าคาร์บอน AISI4140 สามารถนำไปใช้ในงานสำหรับชิ้นส่วนเครื่องจักรกลที่ต้องการความแข็งแรงสูง เช่น เพลาข้อเหวี่ยง ข้อต่อก้านพวงมาลัย เพลาล้อ ก้านสูบ ดอกสว่านเจาะบ่อน้ำมัน ชิ้นส่วนปั้มน้ำ ท่อนแรงดันสูง เฟืองเครื่องจักร จานหน้า ประแจ ปากกาจับชิ้นงาน และยังมีนิยมนำมาใช้ทำชิ้นส่วนรถไฟ เพลาเครื่องจักร แกนกลางเครื่องอัด แกนกลางของแม่แรงไฮดรอลิก สกรูและน็อตสำหรับงานอุตสาหกรรมน้ำมัน รวมทั้งชิ้นส่วนเครื่องจักรที่ต้องการความแข็งแรงสูง

2.2 กระบวนการหล่อ (Casting Process)

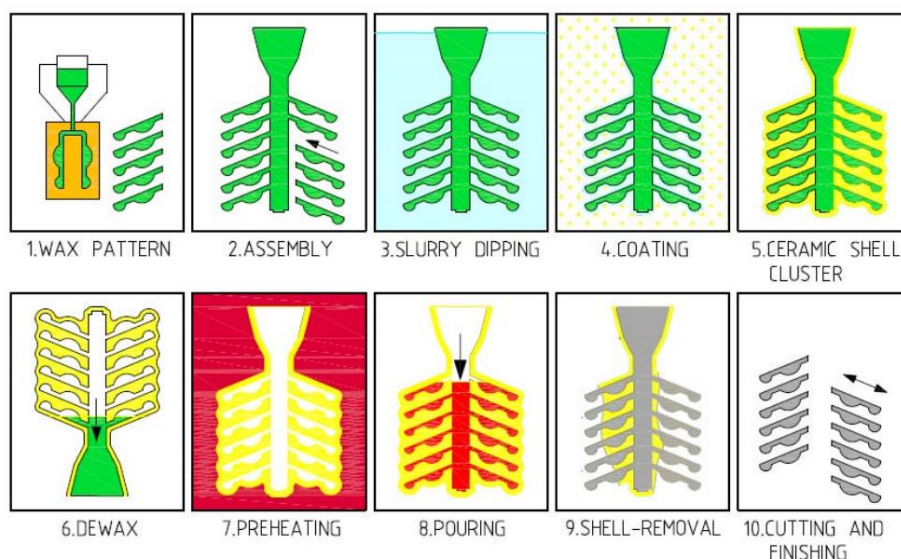
กระบวนการหล่อ (Casting Process) อาจจำแนกตามลักษณะของแบบหล่อออกเป็น 2 กลุ่มใหญ่ด้วยกัน ดังแสดงในภาพที่ 2-1 คือ แบบหล่อที่นำกลับมาหล่อซ้ำไม่ได้ (Non-reusable Mold) แบบหล่อกลุ่มนี้เมื่อเทโลหะเหลวและปล่อยให้แข็งตัวแล้วจะทำการรื้อแบบเพื่อนำชิ้นงานออกมา ดังนั้นแบบหล่อจึงไม่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้อีก แบบหล่อกลุ่มนี้ยังจำแนกตามวัสดุที่ใช้ทำแบบออกเป็น 2 ชนิดคือ แบบหล่อทรายและแบบหล่อเซรามิก แบบหล่อทรายประกอบไปด้วย แบบหล่อทรายขึ้น แบบหล่อเปลือกบาง แบบหล่อโฟม และแบบหล่อสูญญากาศ ส่วนแบบหล่อเซรามิกนั้นประกอบไปด้วยแบบหล่ออินเวสต์เมนต์ แบบหล่อพลาสติก แบบหล่อกลุ่มที่ 2 เป็นแบบหล่อที่สามารถใช้ซ้ำได้ (Reusable Mold) แบบหล่อกลุ่มนี้โดยมากจะทำจากโลหะเป็นส่วนใหญ่ โดยแบบหล่ออาจจะทำจากเหล็กแม่พิมพ์โดยเฉพาะหรืออาจทำจากเหล็กหล่อ แบบหล่อที่นำกลับมาหล่อซ้ำได้ประกอบไปด้วย แบบหล่อตายคาสติง แบบหล่อถาวร แบบหล่อเหวี่ยง และแบบหล่อต่อเนื่อง เป็นต้น (ณรงค์ศักดิ์, 2562)



ภาพที่ 2-1 การจำแนกประเภทของกระบวนการหล่อโลหะตามลักษณะของแบบหล่อ (ณรงค์ศักดิ์, 2562)

2.2.1 กระบวนการหล่ออินเวสต์เมนต์ (Investment Casting)

การหล่อแบบอินเวสต์เมนต์ (Investment Casting) ซึ่งกรรมวิธีการหล่อนี้จะใช้กระสวนขี้ผึ้งเป็นชิ้นงานมีขนาดและรูปร่างเท่ากับขนาดของชิ้นงานจริง ขั้นตอนในการทำแบบหล่ออินเวสต์เมนต์ (พัทร์พิมล, 2557) แสดงในภาพที่ 2-2



ภาพที่ 2-2 ขั้นตอนของกระบวนการหล่ออินเวสต์เมนต์ (พัทร์พิมล, 2557)

ขั้นตอนในการทำแบบหล่ออินเวสต์เมนต์ มีรายละเอียดดังนี้ (พัทร์พิมล, 2557)

2.2.1.1 การสร้างกระสวนขี้ผึ้ง (Wax Pattern) ขี้ผึ้งเหลวจะถูกฉีดเข้าสู่แม่พิมพ์ ซึ่งจะได้อแบบขี้ผึ้งหรือกระสวนขี้ผึ้งที่มีรูปร่างและขนาดเหมือนกับชิ้นงานที่ต้องการ

2.2.1.2 การประกอบหุ่นขึ้นผึ้ง (Assembly) นำแบบขึ้นผึ้งหรือกระสวนขึ้นผึ้งมาประกอบกับ ก้านขึ้นผึ้งประกอบเรียงกันเหมือนต้นไม้ (Wax Tree) ซึ่งลำต้นคือรูเท (Sprue) ที่ใช้เป็นทางวิ่งของ โลหะเหลวผ่านเข้าสู่แบบขึ้นผึ้งเป็นโพรงแบบในการเทโลหะเหลวเข้าสู่โพรงแบบขึ้นงานจริง

2.2.1.3 การจุ่มน้ำกาวเซรามิก (Slurry Dipping) นำแบบขึ้นผึ้งที่ประกอบสมบูรณ์แล้วมา จุ่มน้ำกาวเซรามิกเคลือบผิวของชุดกระสวนขึ้นผึ้งจนมีความหนาพอสมควร

2.2.1.4 การเคลือบ (Coating) หลังจากจุ่มน้ำกาวเซรามิกแล้วให้โปรยทรายให้ทั่วทั้ง แบบแม่พิมพ์เพื่อหุ้มเปลือกเซรามิกอีกชั้นเป็นการเสริมความแข็งแรงของแม่พิมพ์

2.2.1.5 เปลือกเซรามิกหุ้มแบบหล่อ (Ceramic Shell Cluster) เมื่อโปรยทรายหุ้มแบบ แม่พิมพ์แล้วต้องตากทิ้งไว้ให้แห้งในอากาศปกติจึงจะนำไปใช้งานได้ต่อไป

2.2.1.6 การเผาไล่ขึ้นผึ้ง (Dewax) เป็นการให้ความร้อนไอน้ำและความร้อน อุณหภูมิ 90-175 องศาเซลเซียส ทำให้เกิดช่องว่างที่เป็นโพรงแบบหล่อ

2.2.1.7 การอบแม่พิมพ์ (Preheating) การเผาแบบแม่พิมพ์ด้วยอุณหภูมิสูงขึ้นไปอีก ระหว่าง 650-1050 องศาเซลเซียส สำหรับการเทโลหะเหลวลงไป

2.2.1.8 เทโลหะเหลวลงแบบหล่อ (Pouring) เมื่อเตาหลอมโลหะได้โลหะเหลวที่ อุณหภูมิเท่าแล้วจึงเทโลหะเหลวในแบบแม่พิมพ์ โลหะเหลวจะไหลสู่โพรงแบบแทนขึ้นผึ้งจนเต็มแบบ แม่พิมพ์แล้วปล่อยให้เย็นตัวในอากาศ

2.2.1.9 เคาะเปลือกแบบออก (Shell Removal) ส่วนเนื้อเปลือกเซรามิกที่หุ้มขึ้นงาน หล่อต้องทุบทำลายให้หลุดออกจากขึ้นงานทั้งหมดเหลือแต่ขึ้นงานหล่อจริง

2.2.1.10 การตกแต่งขึ้นงาน (Cutting and Finishing) เมื่อตัดขึ้นงานออกจากก้านรูเท นำมาขัดผิวให้สะอาดโดยใช้วิธีเข้าเครื่องขัดผิว เพื่อเตรียมการขึ้นรูปตกแต่งหรือกระบวนการทางความ ร้อน (Heat Treatment) ขึ้นอยู่กับลักษณะการใช้งานและชนิดของโลหะ

2.3 การออกแบบระบบป้อนเติมและจ่ายโลหะเหลว

การออกแบบระบบป้อนเติมและจ่ายโลหะเหลวนั้นถือว่ามีความจำเป็นต่อคุณภาพและ ค่าใช้จ่ายในการผลิตงานหล่ออย่างยิ่ง ถ้าสามารถออกแบบระบบป้อนเติมและจ่ายโลหะเหลวได้ดีแล้ว ย่อมหมายถึงการเพิ่มของผลผลิตและลดปริมาณของเศษ (Scrap) ได้อีกทางหนึ่ง (ศุภฤทธิ, 2544)

ในการออกแบบระบบป้อนเติมและจ่ายโลหะเหลวจะต้องคำนวณน้ำหนักของงานหล่อไว้ แน่นนอนแล้วก็ตาม จำเป็นต้องเผื่อโลหะเหลวไว้ด้วย โดยถ้าเป็นงานที่ไม่ต้องตกแต่งผิวมากเผื่อ 1.1 เท่า และงานที่ต้องตกแต่งผิวมากเผื่อ 1.3 เท่าของน้ำหนักที่คำนวณได้ และขณะเก็บโลหะเหลวไว้ใน เบ้าต้องควบคุมอย่าให้อุณหภูมิโลหะเหลวลดมากเกินไป (บัณฑิต, 2529)

2.3.1 ความสำคัญของอุณหภูมิเท (บัณฑิต, 2529)

อุณหภูมิเท (Pouring Temperature) เป็นอุณหภูมิของโลหะเหลวขณะที่เทลงในรูเท การเลือก อุณหภูมิเทต้องพิจารณาตามชนิดของโลหะเหลว ความหนา รูปร่างของงานหล่อ และสภาวะของแบบ หล่อ สำหรับงานเหล็กหล่อควรใช้อุณหภูมิสูงเท่าที่จะทำได้เพราะถ้าใช้อุณหภูมิสูงจะเกิด ข้อบกพร่องได้น้อย โดยทั่วไปสำหรับงานเหล็กหล่อขนาดเล็กและบาง ควรใช้อุณหภูมิประมาณ

1350-1450 องศาเซลเซียส และถ้างานขนาดใหญ่ควรใช้อุณหภูมิประมาณ 1300-1400 องศาเซลเซียส

2.3.2 เวลาในการเท

การคำนวณหาเวลาในการเทนั้น งานหล่อมีรูปร่างลักษณะที่แตกต่างกันออกไปและขนาดที่ต่างกัน เวลาในการเทโลหะลงในแบบหล่อก็ย่อมจะแตกต่างกันออกไปด้วย แต่สิ่งที่สำคัญที่สุดที่ต้องคำนึงถึงคือ อัตราการแข็งตัวของโลหะที่เราทำการหล่อเพราะถ้ากำหนดเวลาในการเทที่เหมาะสมแล้ว การป้อนเติมโลหะเหลวลงในแบบก็จะสมบูรณ์และก็สามารถที่จะลดปัญหาที่จะเกิดในงานหล่อได้ (สันติรัฐ, 2544)

ซึ่งการคำนวณหาเวลาในการเทโลหะเหลวได้จากสมการที่ 2-3 (ณรงค์ศักดิ์, 2562)

$$T = 2\sqrt{W} \quad (2-3)$$

โดย w คือน้ำหนักของชิ้นงาน มีหน่วยเป็นกิโลกรัม

T คือเวลาในการเท มีหน่วยเป็นวินาที

การออกแบบรูปร่างของทางวิ่งและทางเข้าเป็นรูปร่างต่าง ๆ ยิ่งมีความซับซ้อนมากค่าประสิทธิภาพก็จะมีค่าต่ำลง (พัทธ์พิมล, 2557) เวลาเทสำหรับงานเหล็กหล่อและเหล็กกล้าไว้ดังตารางที่ 2-3 และตารางที่ 2-4 (บัณฑิต, 2529)

ตารางที่ 2-3 เวลาเทสำหรับเหล็กหล่อ

น้ำหนัก (กิโลกรัม)	เวลาเท (วินาที)
น้อยกว่า 500	4-8
มากกว่า 500	6-10
มากกว่า 1000	10-20
น้อยกว่า 4000	25-35
มากกว่า 4000	35-60

ที่มา : (ณรงค์ศักดิ์, 2562)

ตารางที่ 2-4 เวลาเทสำหรับเหล็กกล้า

น้ำหนัก (กิโลกรัม)	เวลาเท (วินาที)
น้อยกว่า 100	น้อยกว่า 4
100-250	4-6
250-500	6-12
500-1000	12-20
1000-3000	20-50
3000-5000	50-80 (40)
5000-10000	(40)-(80)
มากกว่า 10000	(80)-(150)

หมายเหตุ ท่อรูเทกันเบ้ามีขนาด 5-6 มิลลิเมตร ตัวเลขในวงเล็บสำหรับเทกันเบ้า 2 รูพร้อมกัน

ที่มา : (ณรงค์ศักดิ์, 2562)

2.3.3 อัตราการไหลของโลหะเหลว

การหาอัตราการไหลของโลหะเหลวนั้นสามารถคำนวณหาได้โดยสมมุติว่า “แอ่งเท (Pouring Basin) หรือรูเท (Sprue) จะต้องเต็มและรักษาระดับความสูงไว้เสมอ” จากทฤษฎีของเบอร์นูลลีได้สูตรอย่างง่ายในการคำนวณหาความเร็วของโลหะเหลวดังนี้

$$Q = \frac{W}{\rho \times T} \quad (2-4)$$

โดย	Q	คืออัตราการไหลของโลหะเหลว	มีหน่วยเป็นลูกบาศก์เมตรต่อวินาที
	ρ	คือความหนาแน่นของโลหะเหลว	มีหน่วยเป็นกิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร
	T	คือเวลาในการเทของโลหะเหลว	มีหน่วยเป็นวินาที

2.3.3.1 แรงโน้มถ่วงเป็นปัจจัยสำคัญในการป้อนเติมโลหะเหลวเข้าสู่โพรงแบบหล่อ เมื่อเทโลหะเหลวออกจากบ้ำหลอมลงสู่แอ่งรูเท การไหลของโลหะเหลวจะเกิดขึ้นในแนวดิ่ง ความเร็วในการไหลจะขึ้นอยู่กับระยะความสูงจากจุดที่เริ่มต้นการไหลไปสู่ตำแหน่งที่ต้องการทราบความเร็ว โดยความเร็วในการไหลหาได้จากสูตร (ณรงค์ศักดิ์, 2562) ดังสมการที่ 2-5

$$v = \sqrt{2 \times g \times h_1} \quad (2-5)$$

โดย	v	คือความเร็วของโลหะเหลว	มีหน่วยเป็นเมตรต่อวินาที
	g	คือค่าความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วง	มีหน่วยเป็นเมตรต่อวินาทีกำลังสอง
	h_1	คือความสูงของรูเท	มีหน่วยเป็นเมตร
ดังนั้น			

$$Q = A_1 V_1 = A_2 V_2 \quad (2-6)$$

โดย	Q	คืออัตราการไหล	มีหน่วยเป็นลูกบาศก์เมตรต่อวินาที
	V	คือความเร็วในการไหลของของเหลว	มีหน่วยเป็นเมตรต่อวินาที
	A	คือพื้นที่หน้าตัดของของเหลว	มีหน่วยเป็นตารางเมตร
	1 และ 2 คือตำแหน่งใด ๆ 2 ตำแหน่งในระบบของการไหล		

ดังนั้นจากสมการทั้งสองสามารถหาอัตราการไหลของโลหะเหลวได้และสามารถหาความเร็วของโลหะเหลว ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ในระบบได้อีกด้วย ซึ่งความเร็วของโลหะเหลว ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ต้องควบคุมให้มีลักษณะการไหลแบบราบเรียบให้มากที่สุด ทั้งนี้เพื่อป้องกันการเกิดปฏิกิริยาระหว่างโลหะเหลวกับอากาศ (พัตร์พิมล, 2557)

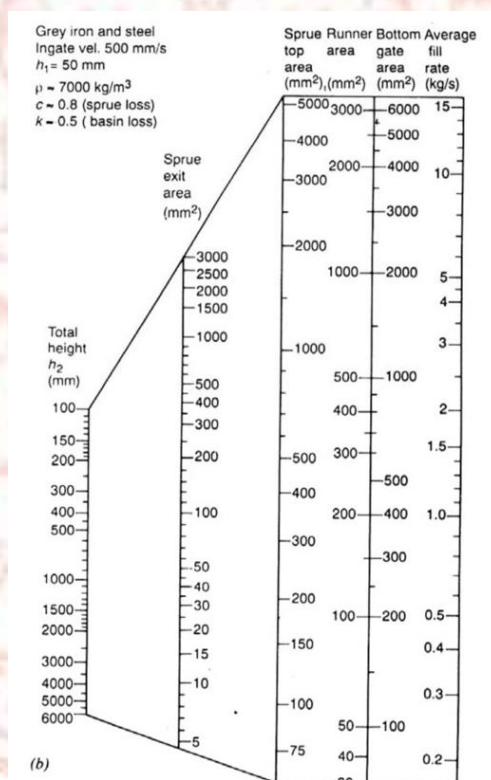
2.3.3.1 การหาขนาดของรูล้นด้วยวิธีโนโมแกรม (Nomogram Method) (Cambell J., 1998) สำหรับการออกแบบด้วยวิธีนี้ช่วยให้สามารถหาขนาดพื้นที่หน้าตัดของระบบจ่ายโลหะเหลวได้รวดเร็วยิ่งขึ้น ซึ่งมีพื้นฐานมาจากสมการเช่นเดียวกับข้างต้น โดยมีสมมติฐานดังนี้

2.3.3.1.1 อัตราการเทโลหะเหลวเริ่มต้น (Initial Pouring Rate) ต้องมีค่าโดยประมาณเป็น 1.5 เท่าของอัตราการเทโลหะเหลวเฉลี่ย (Average Pouring Rate)

2.3.3.1.2 ขนาดของรูเท้านบน (Sprue Top Area) มีการเผื่อขนาดเกินจริง (Oversize) ประมาณ 20 เปอร์เซ็นต์ และมีค่าสัมประสิทธิ์การจ่ายโลหะเหลว (Discharge Coefficient) เท่ากับ 0.8

2.3.3.1.3 ระบบเกิดการสูญเสียเนื่องจากแรงเสียดทาน (Friction) 20 เปอร์เซ็นต์

สำหรับการใช้โนโมแกรมนั้น เริ่มจากการต้องรู้ค่าอัตราการเทโลหะเหลวเริ่มต้นหรืออัตราการเทโลหะเหลวเฉลี่ย เช่น เมื่อกำหนดให้อัตราการเทโลหะเหลวเฉลี่ยเท่ากับ 1.0 กิโลกรัมต่อวินาที (แสดงว่าอัตราการเทโลหะเหลวเริ่มต้นมีค่าประมาณ 1.5 กิโลกรัมต่อวินาที) และความสูงของแบบหล่อ ซึ่งถูกกำหนดด้วยความสูงของรูเทามีค่าเท่ากับ 250 มิลลิเมตร ดังนั้นจากโนโมแกรมดังภาพที่ 2-3 พบว่าพื้นที่หน้าตัดของรูเท้านบนและรูเท้านล่างมีค่าเท่ากับ 800 และ 400 ตารางมิลลิเมตร ตามลำดับ โดยสามารถนำค่าของพื้นที่หน้าตัดของรูเท้านล่างมาหาค่าพื้นที่หน้าตัดของทางเข้าโลหะเหลวและพื้นที่หน้าตัดของทางวิ่งได้โดยเทียบกับสัดส่วนของระบบที่ต้องการหรืออ่านค่าจากโนโมแกรมได้เช่นเดียวกัน

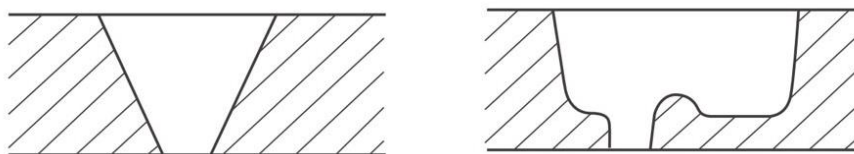


ภาพที่ 2-3 โนโมแกรมสำหรับการคำนวณระบบทางวิ่งสำหรับเหล็กหล่อสีเทาและเหล็กกล้าคาร์บอน (Foundry Engineering Sessional) (Cambell J., 1998)

2.3.4 การออกแบบแอ่งเท (Pouring Basin) (ณรงค์ศักดิ์, 2562)

ทำหน้าที่รองรับโลหะเหลวจากบ่้าเทหรือกระบวยตักโลหะเหลว ดังนั้นจึงต้องทำให้มีขนาดปากรองรับที่กว้างพอในขณะเดียวกันแอ่งรูเทจะทำหน้าที่ในการกักเก็บโลหะเหลวเพื่อป้อนลงสู่รูเทด้วยอัตราเร็วที่กำหนด โดยแอ่งรูเทที่ดีต้องไม่ทำให้เกิดการไหลแบบปั่นป่วน รวมถึงควรที่จะกักก

สารมลทินไม่ให้ไหลลงสู่โพรงแบบได้ด้วย ลักษณะรูปทรงของแอ่งรูเทอาจแบ่งได้ 2 แบบคือ แอ่งรูเทรูปถ้วยหรือรูปทรงกรวย (Pouring up or Conical) และแอ่งรูเทรูปอ่างน้ำหรือเบซิน (Pouring Basin) ดังแสดงในภาพที่ 2-4 แอ่งรูเทรูปถ้วยมีข้อดีตรงที่ทำงานง่าย แต่มีข้อจำกัดอยู่หลายประการเมื่อเทียบกับแอ่งรูเทแบบเบซินหรือแอ่งรูเทรูปอ่างน้ำ

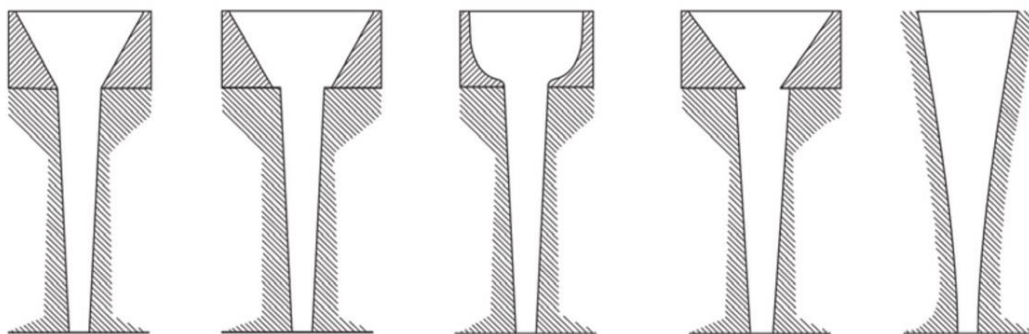


(ก) แอ่งรูเทรูปถ้วย

(ข) แอ่งรูเทรูปอ่างน้ำ

ภาพที่ 2-4 ลักษณะของแอ่งรูเท (ณรงค์ศักดิ์, 2562)

แอ่งรูเทรูปทรงกรวย ดังแสดงในภาพที่ 2-5 (ก) เป็นแอ่งรูเทที่มีใช้โดยทั่ว ๆ ไปในอุตสาหกรรม การหล่อ หากพิจารณาในรายละเอียดแล้วแอ่งรูเทแบบนี้จะมีข้อเสียหลายประการ ไม่ว่าจะเป็นการดูดอากาศเข้าสู่โลหะเหลวได้ง่ายขณะเทเพราะการเริ่มต้นเทนั้น โลหะเหลวจะไหลลงสู่ฐานรูเทโดยตรง ซึ่งอาจทำให้เกิดแรงกระแทกที่รุนแรงถัดมาคือ การเทให้โลหะเหลวเต็มแอ่งรูเทนั้นจะทำให้ค่อนข้างยาก เพราะโลหะเหลวจะไหลลงสู่รูเทได้อย่างรวดเร็ว เมื่อเทโลหะเหลวไม่เต็มแอ่งรูเทการดูดอากาศปะปนเข้าไปจึงเกิดขึ้นง่าย โลหะเหลวที่เริ่มต้นเทลงไปไม่สามารถทราบความเร็วที่แน่นอนได้เพราะไม่ทราบระดับความสูงที่แท้จริงของการเทได้ อีกทั้งแอ่งรูเทแบบนี้จะไม่มีบริเวณที่กักเก็บกากของเหลวหรือสารมลทินได้ทำให้ไหลลงสู่รูเทได้โดยตรง ลักษณะของแอ่งรูเทที่มีขนาดใหญ่กว่ารูเทดังแสดงในภาพที่ 2-5 (ข) ซึ่งเป็นรูปแบบที่จะทำให้เกิดการไหลแบบปั่นป่วนที่รุนแรง ส่วนภาพที่ 2-5 (ค) มีลักษณะเป็นรูปถ้วย ซึ่งจะส่งผลเสียคล้ายกับแบบ (ข) ส่วนภาพที่ 2-5 (ง) ขนาดรูของแอ่งรูเทมีขนาดเล็กกว่ารูเทลักษณะนี้ยังก่อให้เกิดปัญหามากขณะโลหะเหลวไหลเข้าสู่รูเท ส่วนภาพที่ 2-5 (จ) มีลักษณะเหมือนเป็นการรวมแอ่งรูเทและรูเทเข้าด้วยกัน ซึ่งจะมีส่วนช่วยให้เกิดอัตราเร่งของการไหลให้สูงขึ้นแต่ก็ยังมีข้อเสียอยู่เพราะแอ่งรูเทจะมีขนาดเล็กทำให้ลำบากในการเท



(ก) ขนาดทางเข้ารูเท (ข) ขนาดทางเข้า (ค) แอ่งรูเทรูปถ้วย (ง) ขนาดทางเข้า (จ) การรวมแอ่งรูเทกับแอ่งรูเทเท่ากัน รูเทเล็กกว่า รูเทใหญ่กว่า และรูเทเข้าด้วยกัน

ภาพที่ 2-5 ลักษณะรูปทรงของแอ่งรูเทรูปกรวยแบบต่าง ๆ (Campbell J., 2015)

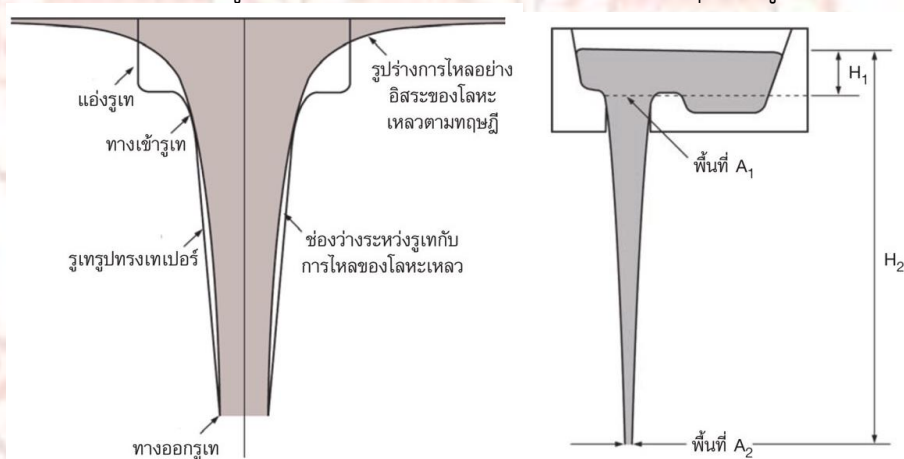
2.3.5 การออกแบบรูเท (Sprue) ทางวิ่ง (Gate) และทางเข้า (Runner)

2.3.5.1 รูเท (Sprue)

รูเทเป็นส่วนที่ต่อจากแอ่งรูเททำหน้าที่เป็นทางผ่านโลหะเหลวในแนวดิ่งจากแอ่งรูเทไปฐานรูเท รูเทที่ดีจะต้องมีขนาดพอเหมาะที่จะให้โลหะผ่านด้วยอัตราการไหลที่ต้องการและจะต้องไม่ดูดอากาศเข้าไปปะปนกับโลหะเหลว สำหรับรูปทรงของรูเทนั้นตามทฤษฎีแล้วการไหลของโลหะเหลวจากรูเทลงสู่ฐานรูเท หากปล่อยให้ไหลลงอย่างอิสระจะพบว่าลำของการไหลจะมีรูปทรงพาราโบลา ดังแสดงในภาพที่ 2-6 โดยรูปทรงนี้เกิดขึ้นจากความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่หน้าตัดและความสูงของการไหล ดังสมการ

$$\frac{A_1}{A_2} = \sqrt{\frac{H_2}{H_1}} \quad (2-7)$$

โดย A_1 คือพื้นที่หน้าตัดจุดที่ 1
 A_2 คือพื้นที่หน้าตัดจุดที่ 2
 H_1 คือความสูงจากผิวบนของระดับโลหะเหลวถึงทางเข้ารูเท
 H_2 คือความสูงจากผิวบนของระดับโลหะเหลวถึงปลายสุดของรูเท

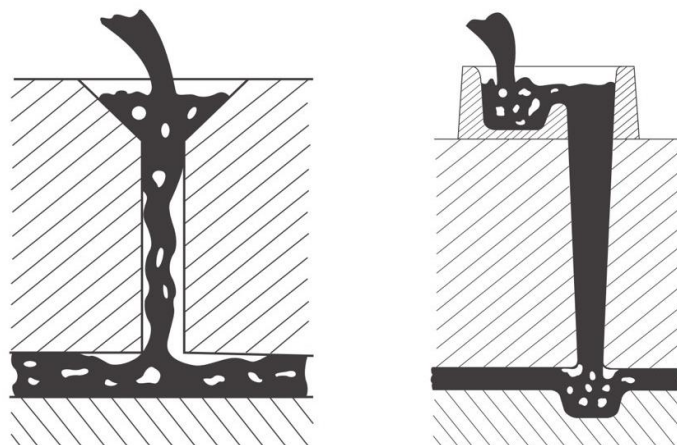


(ก) การไหลที่เป็นรูปพาราโบลา

(ข) ตำแหน่งของพื้นที่และความสูงของการไหลของโลหะเหลวจากแอ่งรูเท

ภาพที่ 2-6 รูปทรงการไหลของโลหะเหลว (Campbell J., 2015)

จะเห็นได้ว่าหากต้องการให้โลหะเหลวไหลด้วยความเร็วสม่ำเสมอ รูเทจะต้องมีรูปทรงพาราโบลา ซึ่งในทางปฏิบัตินั้นทำได้ยากจึงทำเป็นรูปทรงเทเปอร์ (Taper) ภาพที่ 2-7 เป็นการเปรียบเทียบการใช้รูเทรูปทรงกระบอกร่วมกับแอ่งรูเทรูปทรงกรวยและการใช้รูเทรูปทรงเทเปอร์กับแอ่งรูเทเบซินซึ่งช่วยลดการดูดอากาศเข้าไปปะปนกับโลหะเหลวได้



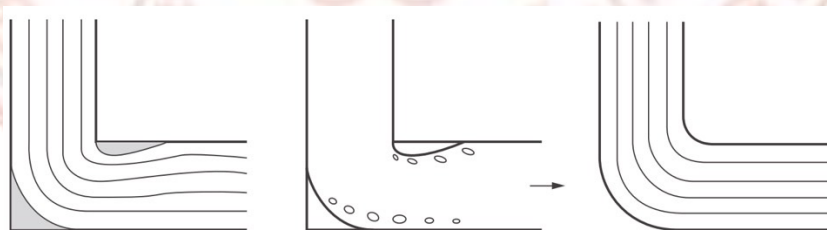
(ก) แอ่งรูเทรูปกรวยกับรูเทรูปทรงกระบอก (ข) แอ่งรูเทเบชินกับรูเทรูปทรงเทเปอร์

ภาพที่ 2-7 เปรียบเทียบการใช้รูเทและแอ่งรูเทที่แตกต่างกัน

(Taylor H.F., Flemings M.C. and Wulff J., 1966)

2.3.5.2 ฐานรูเท (Sprue Base)

ฐานรูเทเป็นส่วนที่ติดอยู่ปลายรูเทด้านล่างและจะเชื่อมต่อกับทางวิ่ง ฐานรูเททำหน้าที่รองรับโลหะเหลวจากรูเทที่ไหลมาด้วยความเร็วแล้วพักโลหะเหลวก่อนที่จะไหลต่อไปยังทางวิ่ง ฐานรูเทจึงทำหน้าที่เปลี่ยนทิศทางการไหลจากรูเทในแนวตั้งไปวิ่งในแนวนอน การเปลี่ยนทิศทางการไหลอาจก่อให้เกิดปัญหาของช่องอากาศบริเวณมุมแหลมทั้งด้านในและด้านนอก ดังแสดงในภาพที่ 2-8 (ก) การเกิดช่องอากาศดังกล่าวจะทำให้เกิดการดูดอากาศเข้าไปในโลหะเหลวได้ดังภาพที่ 2-8 (ข) การแก้ไขอาจทำได้โดยทำให้บริเวณที่มีการเปลี่ยนทิศทางจากมุมแหลมให้เป็นมุมโค้ง ดังแสดงในภาพที่ 2-8 (ค) ที่บริเวณฐานของรูเทนั้นปกติแล้วนิยมทำเป็นบ่อ (Well) ดังแสดงในภาพที่ 2-9 (ก) ซึ่งพบว่า การทำฐานเป็นบ่อนั้น จะส่งผลให้เกิดฟองอากาศเมื่อโลหะเหลวไหลลงมาในบ่อดังกล่าว ดังนั้นการทำบ่อบริเวณฐานรูเทจึงอาจทำให้เกิดปัญหาขึ้นมาได้ หากเรียงลำดับรูปทรงบริเวณฐานรูเทที่เหมาะสมจากน้อยไปมากจะแสดงในภาพที่ 2-9 (ก) ไปถึง (ง)

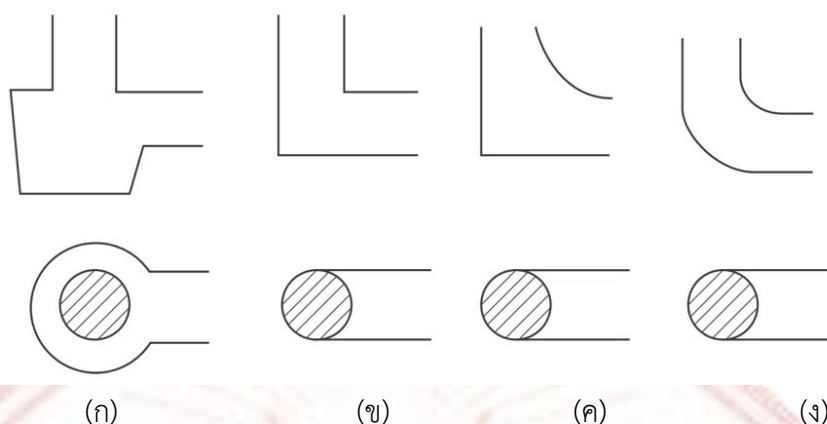


(ก) การไหลแบบปัดป่วน
จะเกิดขึ้นที่มุมแหลม

(ข) การดูดอากาศจากช่อง
ว่างเข้าไปในโลหะเหลว

(ค) เส้นแนวการไหลแบบราบ
เรียบบริเวณมุมที่เป็นส่วนโค้ง

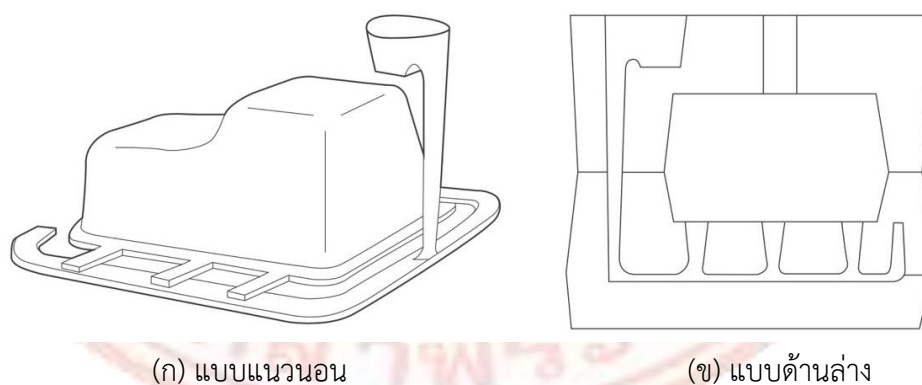
ภาพที่ 2-8 การเปลี่ยนทิศทางการไหล (ASM Handbook Volume 15, 1988)



ภาพที่ 2-9 ลักษณะฐานรูเทแบบต่าง ๆ ที่เรียงลำดับตามความเหมาะสมของการใช้งานจากน้อยที่สุดไปยังมากที่สุด (Campbell J., 2015)

2.3.5.3 ทางวิ่ง (Runner)

ทางวิ่งเป็นส่วนที่ต่อจากฐานรูเท ทำหน้าที่กระจายโลหะเหลวในแนวนอนโดยรอบแบบหล่อหรือภายใต้แบบหล่อ เพื่อป้อนเติมโลหะเหลวให้เข้าสู่โพรงแบบหล่อได้รวดเร็วและเกิดการสูญเสียความร้อนน้อยที่สุด ปกติแล้วทางวิ่งจะวางตามแนวนอน ดังแสดงในภาพที่ 2-10 (ก) ทั้งนี้เนื่องจากง่ายต่อการเชื่อมต่อเข้ากับแบบหล่อที่มีกวางอยู่ในแนวนอน อย่างไรก็ตาม ทางวิ่งสามารถวางไว้ด้านล่างของแบบหล่อ ดังแสดงในภาพที่ 2-10 (ข) ซึ่งถือเป็นการวางที่เหมาะสมเพราะช่วยลดปัญหาการไหลกระแทกของโลหะเหลวทำให้ไม่เกิดการกัดเซาะแบบหล่อ อีกทั้งยังช่วยให้เกิดการไหลแบบปั่นป่วนน้อยอีกด้วย



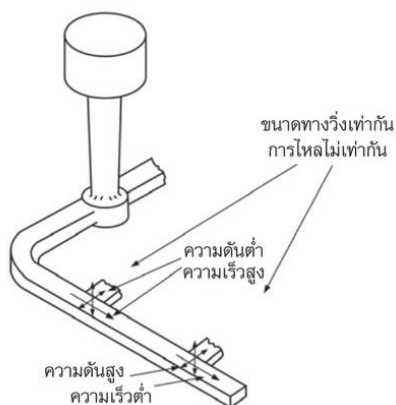
(ก) แบบแนวนอน

(ข) แบบด้านล่าง

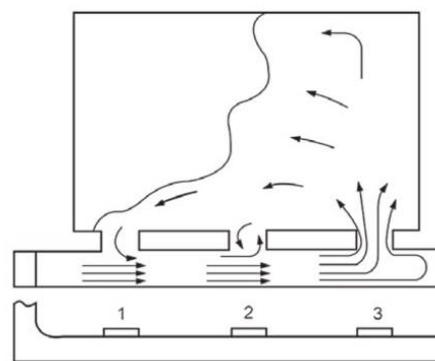
ภาพที่ 2-10 ลักษณะการวางทางวิ่ง (Campbell J., 2015)

โดยปกติแล้วหากทางวิ่งมีขนาดเท่ากันตลอดความยาว ดังภาพที่ 2-11 (ก) จะทำให้ความเร็วในการไหลของโลหะเหลวนั้นไม่เท่ากัน โดยจากทฤษฎีของเบอร์นูลลีจะทำให้ทราบว่าที่ตำแหน่งของทางเข้าตำแหน่งที่ 1 ในภาพที่ 2-11 (ข) จะมีความเร็วของโลหะเหลวที่สูงในขณะที่แรงดันที่ทางเข้าจะต่ำ ส่วนตำแหน่งที่ 3 ความเร็วที่ทางวิ่งจะต่ำแต่แรงดันที่ทางเข้าจะสูงส่งผลให้การป้อนเติมโลหะเหลวขณะไหลเข้าโพรงแบบหล่อความเร็วจะไม่เท่ากัน ดังนั้นทางวิ่งจะต้องทำให้มีลักษณะที่ลดขนาดหน้า

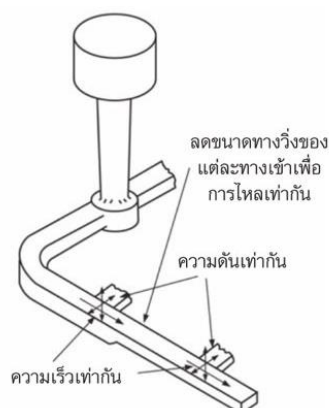
ตัดลงเป็นขั้น ๆ ดังภาพที่ 2-11 (ค) เรียกทางวิ่งแบบนี้ว่า ทางวิ่งแบบขั้น (Stepped Runner) หรือ อาจทำให้ทางวิ่งมีลักษณะเรียวยาวที่เรียกว่า ทางวิ่งแบบเทเปอร์ (Tapper Runer) ดังภาพที่ 2-11 (ง)



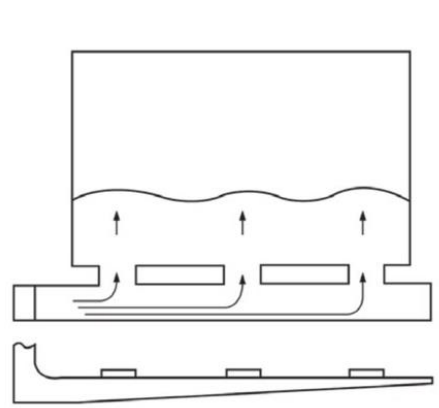
(ก) ทางวิ่งที่มีขนาดหน้าตัดเท่ากันตลอดความยาว



(ข) ตำแหน่งการไหลที่ความเร็วไม่เท่ากัน



(ค) ทางวิ่งแบบขั้น



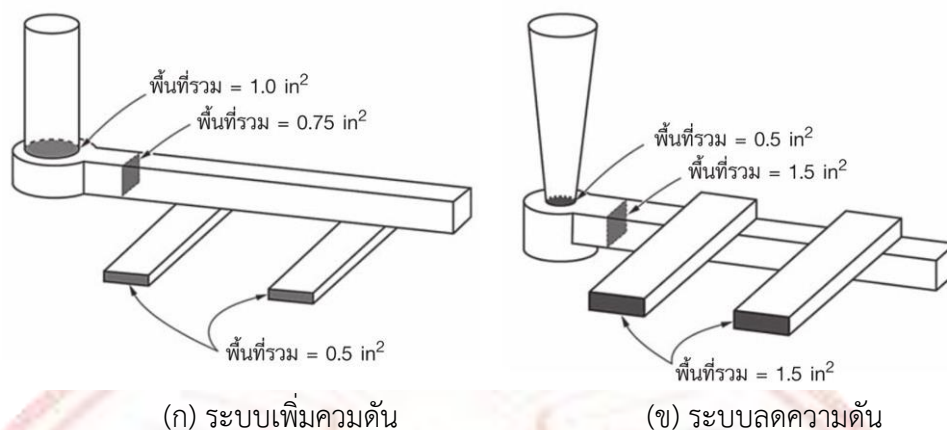
(ง) ทางวิ่งแบบเทเปอร์

ภาพที่ 2-11 การแก้ปัญหาทางวิ่งที่ความเร็วการไหลไม่เท่ากัน

((ก) และ (ค) (ASM Handbook Volume 15, 1988), (ข) และ (ง) (Campbell J., 2015)

2.3.5.4 ทางเข้า (Gates or Ingates)

ทางเข้าเป็นส่วนต่อจากทางวิ่งสู่โพรงแบบหล่อหรือเป็นส่วนที่โลหะเหลวจะไหลเข้าสู่โพรงแบบหล่อ ทางเข้าที่ดีจะต้องทำให้โลหะเหลวเข้าสู่โพรงแบบหล่อได้อย่างสม่ำเสมอ โดยเกิดการปั่นป่วนน้อยที่สุด โดยทั่วไปแล้วทางเข้าจะติดอยู่ด้านบนทางวิ่ง ดังภาพที่ 2-12 มีข้อดีอยู่ตรงที่เมื่อโลหะเหลวผ่านมายังทางวิ่งจะเต็มเต็มทางวิ่งเสียก่อนที่จะไหลขึ้นไปยังทางเข้า ซึ่งทำให้การไหลของโลหะเหลวไหลได้เต็มช่องว่างของทางวิ่งทำให้ไม่มีช่องว่างที่อากาศจะปะปนเข้าไปได้และช่วยลดการไหลแบบปั่นป่วน อีกทั้งโลหะเหลวที่มีปริมาณเพิ่มขึ้นจะช่วยดันสิ่งสกปรกที่มีน้ำหนักเบาที่ลอยอยู่บนผิวให้ถูกดันขึ้นไปติดกับผนังของโพรงแบบด้านบนเป็นการช่วยป้องกันไม่ให้ไหลไปปะปนกับโลหะเหลวได้อีกทางหนึ่ง



(ก) ระบบเพิ่มความดัน

(ข) ระบบลดความดัน

ภาพที่ 2-12 อัตราส่วนพื้นที่ระหว่าง รูเท : ทางวิ่ง : ทางเข้า

(Taylor H.F., Flemings M.C. and Wulff J., 1966)

2.3.5.4.1 อัตราส่วนระบบทางเข้า (Gate Ratios)

อัตราส่วนของการจ่ายโลหะเหลวคือสัดส่วนของพื้นที่หน้าตัดของรูเทต่อพื้นที่หน้าตัดของทางวิ่งต่อพื้นที่หน้าตัดของทางเข้า ซึ่งอัตราส่วนนี้มีค่าไม่แน่นอนทั้งนี้ขึ้นอยู่กับประสบการณ์ของแต่ละบุคคล แต่โดยทั่วไปสามารถแบ่งได้ 2 ระบบ (ASM International, 1988) คือ

ก) ระบบที่มีความดัน (Pressurized System) เป็นระบบที่มีสัดส่วนของพื้นที่หน้าตัดของรูเทมากกว่าพื้นที่หน้าตัดทางวิ่งและพื้นที่หน้าตัดทางวิ่งมากกว่าพื้นที่หน้าตัดทางเข้า ซึ่งระบบนี้ช่วยลดขนาดและน้ำหนักของทางวิ่งและทางเข้าให้เล็กลงทำให้มีประสิทธิภาพการหล่อ (Yield) สูงขึ้น แต่ระบบนี้จะทำให้ความเร็วของโลหะเหลวมีค่าสูงขึ้นและเกิดการไหลแบบปั่นป่วนและมีโอกาสเกิดการกัดเซาะ (Erosion) ของแบบหล่อได้

ข) ระบบไม่มีความดัน (Unpressurized System) เป็นระบบที่มีสัดส่วนของพื้นที่หน้าตัดของรูเทน้อยกว่าพื้นที่หน้าตัดของทางวิ่งและพื้นที่หน้าตัดของทางวิ่งน้อยกว่าพื้นที่หน้าตัดของทางเข้า ซึ่งระบบนี้ช่วยลดความเร็วของโลหะเหลวและสนับสนุนให้การไหลเป็นแบบราบเรียบ ดังนั้นจึงนิยมใช้กับโลหะเหลวที่มีความไวต่อการเกิดออกไซด์และขึ้นครากัน (Dross)

2.3.6 การออกแบบรูลัน (Riser)

หน้าที่พื้นฐานของรูลันคือ บ่อนเติมโลหะเหลวในระหว่างการแข็งตัวของชิ้นงานเพื่อที่จะชดเชยการหดตัวของชิ้นงาน รูลันนี้ควรมีโลหะเหลวเพียงพอสำหรับชดเชยการหดตัวในสภาวะที่เป็นของเหลวและเป็นของแข็ง โดยเนื้อโลหะงานหล่อสามารถที่จะหลีกเลี่ยงการเกิดการหดตัวภายในหรือรูปทรงและการหดตัวภายนอกอื่น ๆ เวลาการแข็งตัวของรูลันควรจะมากกว่างานหล่อ (ประเสริฐ, 2544)

รูลันเป็นสิ่งที่สำคัญที่สุดในการหล่อเหล็กกล้าและเป็นตัวช่วยลดปัญหาที่เกิดขึ้นในงานหล่อหน้าที่ส่วนที่สองคือ เป็นรูระบายแก๊สและช่วยในการเติมเต็มของโลหะเหลวลงในแบบหล่อช่วยบังคับโลหะเหลวเข้าสู่แม่พิมพ์โดยใช้แรงดันที่หัวป้อน (Ruddle, R. W., 1979)

สำหรับวิธีการออกแบบรูลัน สามารถแบ่งได้เป็น 3 ขั้นตอน (N. Srinivasan, 1996) ได้แก่

2.3.6.1 การหาตำแหน่งติดตั้งรูล้น โดยทั่วไปนิยมติดตั้งในบริเวณที่มีความหนาหรือบริเวณจุดต่อต่าง ๆ เช่น จุดต่อรูปตัวที จุดต่อรูปตัวแอล เป็นต้น อย่างไรก็ตามการเลือกตำแหน่งติดตั้งให้เหมาะสมต้องอาศัยประสบการณ์อย่างมากเพื่อให้รูล้นสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ

2.3.6.2 การหาขนาดรูล้น สามารถหาขนาดรูล้นได้ด้วยวิธีดังนี้

2.3.6.2.1 การหาขนาดรูล้นด้วยวิธีอัตราส่วนรูปร่าง (Shape Factor Method) วิธีการหาขนาดของรูล้นโดยทำการคำนวณหาค่าอัตราส่วนรูปร่าง (Shape Factor) ซึ่งหาได้จากผลรวมของความยาวกับความกว้างของหน้าตัดชิ้นงานหารด้วยความหนา แล้วนำค่าอัตราส่วนรูปร่าง (Shape Factor) ไปเปรียบเทียบกับกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนรูปร่าง (Shape Factor) กับสัดส่วนของปริมาตรรูล้นต่อปริมาตรของชิ้นงาน ซึ่งสัดส่วนนี้ทำให้สามารถนำไปคำนวณหาขนาดของรูล้นได้ดังภาพที่ 2-13

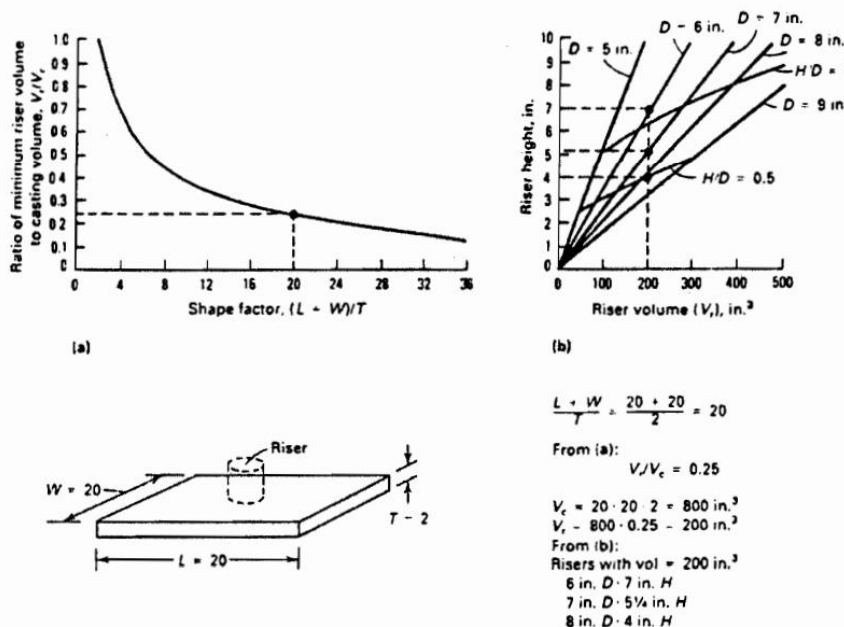
$$S = \frac{(L + W)}{T} \quad (2-5)$$

โดย S คืออัตราส่วนรูปร่าง (Shape Factor)

L คือความยาวของชิ้นงานหล่อ (Length of Casting)

W คือความกว้างของชิ้นงานหล่อ (Width of Casting)

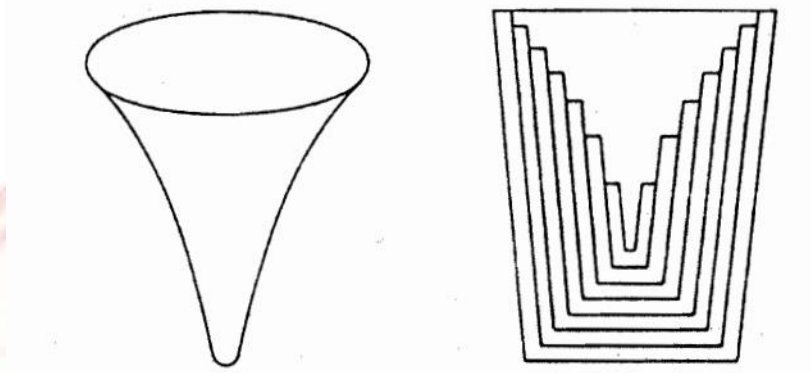
T คือความหนาของชิ้นงานหล่อ (Thickness of Casting)



ภาพที่ 2-13 การหาขนาดของรูล้นด้วยวิธีอัตราส่วนรูปร่าง (Shape Factor Method) (ASM International, 1988)

2.3.6.2.2 การหาขนาดของรูล้นด้วยวิธีเรขาคณิต (Geometric Method) วิธีนี้ใช้สำหรับการคำนวณหาขนาดรูล้นด้านข้าง (Side Riser) สำหรับเหล็กหล่ออบเหนียว (Malleable Iron Casting) โดยตั้งอยู่บนสมมติฐานที่ว่า “โพรงหดตัวที่เกิดขึ้นเป็นรูปกรวย (Conical Shape)” ดัง

ภาพที่ 2-14 โดยขนาดของโพรงหดตัวขึ้นอยู่กับน้ำหนักของชิ้นงานและเปอร์เซ็นต์การหดตัว (Shrinkage Percentage) ซึ่งรวมทั้งการหดตัวของโลหะเหลวและการหดตัวขณะแข็งตัวของโลหะนั้น ๆ โดยการเปิดตารางหรือจากโนโมแกรม (Nomogram)



ภาพที่ 2-14 รูปร่างของโพรงหดตัว (ศุภฤทธิ์, 2544)

2.3.6.2.3 การหาขนาดของรูล้นด้วยวิธีโมดูลัส (Modulus Method) วิธีการนี้มีรากฐานมาจากการคำนวณหาเวลาในการแข็งตัว (Freezing Time) ของชิ้นงานซึ่งสามารถหาได้จากสมการของ Chvorinov ดังสมการที่ 2-6

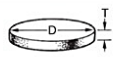
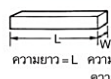
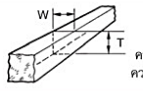
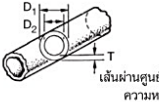
$$t = k^2 \left(\frac{V_c}{A_c} \right)^2 \quad (2-6)$$

โดย	t	คือเวลาในการแข็งตัว	มีหน่วยเป็นวินาที
	V_c	คือปริมาตรของงาน	มีหน่วยเป็นลูกบาศก์เมตร
	A_c	คือพื้นที่ผิวของงานที่มีการถ่ายเทความร้อน	มีหน่วยเป็นตารางเมตร
	k	คือค่าคงที่ ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของโลหะและสมบัติของแบบหล่อ	

ซึ่งต่อมาได้พัฒนาเพื่อใช้ในการคำนวณหาขนาดของรูล้น โดยการใช้ค่าโมดูลัส (Modulus; M_c) ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2-7

$$M_c = \frac{V_c}{A_c} \quad (2-7)$$

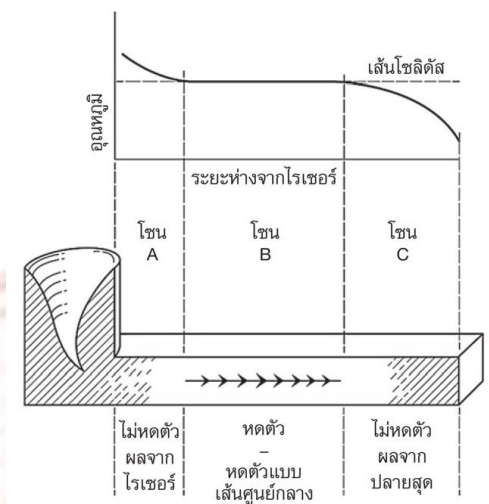
จากความสัมพันธ์ระหว่างสมการที่ 2-6 และสมการที่ 2-7 พบว่าเวลาในการแข็งตัวของชิ้นงานนั้นแปรผันตามค่าของโมดูลัส ดังนั้นถ้าทำการออกแบบให้รูล้นมีค่าโมดูลัส (Modulus; M_R) สูงกว่าค่าโมดูลัส (Modulus; M_c) ของชิ้นงาน แสดงว่ารูล้นจะใช้เวลาในการแข็งตัวนานกว่าชิ้นงานส่งผลทำให้รูล้นสามารถป้อนเต็มโลหะเหลวเพื่อชดเชยการหดตัวของชิ้นงานได้ โดยปกติแล้วค่าโมดูลัสของรูล้นจะมีขนาดอยู่ที่ 1.2 เท่ากับโมดูลัสของชิ้นงานหล่อ $M_R = 1.2M_c$ สำหรับชิ้นงานที่มีรูปทรงอย่างง่ายได้สรุปสูตรการหาค่าโมดูลัสดังภาพที่ 2-15

รูปร่าง	ขนาด	โมดูลัส
(1) ลูกบาศก์	 ขนาดด้านข้าง = L	$\frac{L}{6}$
(2) ทรงกระบอก	 เส้นผ่านศูนย์กลาง = D ความสูง = H	$\frac{DH}{2D + 4H}$ หมายเหตุ : ถ้า H = D โมดูลัสมีค่า $\frac{D}{6}$
(3) แผ่นกลม	 เส้นผ่านศูนย์กลาง = D ความหนา = T	$\frac{DT}{2D + 4T}$
(4) แท่ง หรือ แผ่น	 ความยาว = L ความกว้าง = W ความหนา = T	$\frac{TWL}{2(TW + WL + LT)}$
(5) ทรงกระบอกไม่จำกัดปลายสุด (ปลายต่อกับส่วนอื่นของงานหล่อ)	 เส้นผ่านศูนย์กลาง = D	$\frac{D}{7}$ หมายเหตุ : การแผ่กระจายความร้อนของรูปทรงกลมจะเร็วกว่ารูปทรงแผ่น ดังนั้นค่าโมดูลัสที่คำนวณได้ของรูปทรงกระบอกไม่จำกัดปลายสุดต้องลดลงโดยการคูณด้วย 0.85
(6) แผ่นไม่จำกัดปลายสุด (ปลายต่อกับส่วนอื่นของงานหล่อ)	 ความหนา = T	$\frac{T}{2}$
(7) แท่งไม่จำกัดปลายสุด (ปลายต่อกับส่วนอื่นของงานหล่อ)	 ความหนา = T ความกว้าง = W	$\frac{TW}{2(W + T)}$
(8) ทรงกระบอกกลวงไม่จำกัดปลายสุด	 OD = D ₁ เส้นผ่านศูนย์กลางรูใน = D ₂ ความหนาของท่อ = T	$\frac{D_1 - D_2}{4} = \frac{T}{2}$
(9) วงแหวน	 OD = D ₁ เส้นผ่านศูนย์กลางรูใน = D ₂	$\frac{(D_1 - D_2)}{2(D_1 - D_2) + H} = \frac{TH}{2(T + H)}$

ภาพที่ 2-15 สูตรคำนวณหาโมดูลัสของงานหล่อรูปทรงต่าง ๆ
(Foseco International Ltd., 1994)

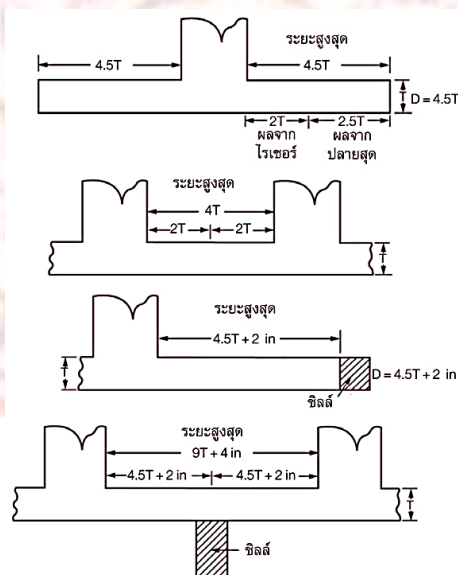
2.3.6.3 การหาระยะในการป้อนเติมโลหะเหลวของรูลัน (Feeding Distance)

รูลันแต่ละอันมีความสามารถในการป้อนเติมโลหะเหลวได้ถึงแค่ระยะหนึ่ง ๆ เท่านั้น โดยเรียกระยะนี้ว่า “ระยะในการป้อนเติมโลหะเหลว (Feeding Distance)” หากชิ้นงานมีความยาวมาก ๆ จะต้องติดรูลันหลายตัวเพื่อช่วยให้การป้อนเติมสมบูรณ์ยิ่งขึ้น สำหรับระยะที่อาจเกิดโพรงหดตัวในชิ้นงานหล่อเหล็กกล้าที่มีรูปทรงเป็นแผ่น ดังแสดงในภาพ 2-16 จะเห็นได้ว่าปลายสุดของชิ้นงานหรือโซน C จะไม่เกิดโพรงหดตัวเนื่องจากบริเวณปลายสุดสามารถถ่ายเทความร้อนได้เร็ว ส่วนโซน A จะไม่เกิดโพรงหดตัวเช่นกัน เพราะรูลันสามารถป้อนเติมโลหะเหลวเข้ามาชดเชยได้ อย่างไรก็ตาม บริเวณโซน B ซึ่งรูลันไม่สามารถทำหน้าที่ป้อนเติมมาถึงจะเกิดการหดตัวแบบเส้นศูนย์กลาง (Central-line Shrinkage) เกิดขึ้น



ภาพที่ 2-16 การหดตัวแบบเส้นศูนย์กลางในเหล็กกล้าหล่อลักษณะงานเป็นแผ่นและการกระจายตัวของความร้อนช่วงต่าง ๆ (Taylor H.F., et al., 1966)

ในกรณีที่ชิ้นงานมีลักษณะเป็นแผ่นผลจากการถ่ายเทความร้อนที่ปลายของชิ้นงานหล่อได้รวดเร็วทำให้เกิดการแข็งตัวที่ไม่เกิดโพรงหดตัวขึ้น ระยะนี้วัดจากปลายสุดเข้ามาค่าจะอยู่ที่ $2.5T$ ส่วนระยะที่รูลันมีความสามารถบ่อนเติมได้อย่างสมบูรณ์นั้นวัดจากขอบรูลันออกมามีระยะอยู่ที่ $2.0T$ ดังนั้นเมื่อรวมระยะทั้ง 2 ส่วนเข้าด้วยกัน จะเห็นว่าระยะที่ชิ้นงานหล่อจะไม่เกิดโพรงหดตัวจะมีค่า $4.5T$ ดังแสดงในภาพที่ 2-17 สำหรับระยะห่างระหว่างรูลันแต่ละตัวจะอยู่ห่างกันเป็นระยะ $4T$ และหากนำทุ่นเย็น (Chill) เข้ามาติดในแบบหล่อเพื่อช่วยให้การระบายความร้อนได้เร็วมากขึ้น โดยทุ่นเย็น (Chill) ที่ติดจะช่วยเพิ่มระยะที่จะไม่เกิดการหดตัวได้อีกเป็นระยะ 2 นิ้ว (2.54 มิลลิเมตร)



ภาพที่ 2-17 ระยะที่รูลันสามารถทำหน้าที่บ่อนเติมได้อย่างสมบูรณ์สำหรับชิ้นงานแบบแผ่น (ณรงค์ศักดิ์, 2562)

2.4 ซอฟต์แวร์ในการจำลองพฤติกรรมงานหล่อ

ปัจจุบันการเพิ่มผลผลิตของงานหล่อจำเป็นต้องใช้เครื่องมือและอุปกรณ์เข้าช่วยในการผลิตให้ได้มาซึ่งปริมาณของผลผลิตที่มากที่สุดหรืออาจจะกล่าวได้ว่าให้มีของเสียน้อยที่สุดนั่นเอง การจำลองพฤติกรรมการแข่งขันตัวของงานหล่อจึงเป็นเครื่องมือหนึ่งที่มีความสำคัญในการที่จะได้ผลผลิตที่มีคุณภาพดี ซอฟต์แวร์คอมพิวเตอร์แบ่งออกเป็น 3 ประเภทคือ (Tony C. M. & David, S. 1999)

2.4.1 ซอฟต์แวร์ที่อาศัยพื้นฐานจากผลการทดลองและประสบการณ์

2.4.2 ซอฟต์แวร์ที่กึ่งอาศัยพื้นฐานของผลการทดลองและเพิ่มคุณสมบัติพื้นฐานทางกายภาพเข้าไป

2.4.3 ซอฟต์แวร์ที่อาศัยหลักการพื้นฐานทางกายภาพโดยจะเป็นการใช้สมการทางคณิตศาสตร์ที่ซับซ้อนและคุณสมบัติทางเทอร์โมฟิสิกส์ของวัสดุเข้ามาช่วย

โดยทั้ง 3 ซอฟต์แวร์ข้างต้นนี้ ซอฟต์แวร์ประเภทที่ 1 และ 2 นั้นจะใช้ผลการทดลองเป็นหลัก กฎทางฟิสิกส์และสมการอาร์บิกในการสร้างรูปแบบของสมการทางกายภาพและซอฟต์แวร์ทั้ง 2 ประเภทนี้จะใช้กรรมวิธีทางผลต่างอันตะ (Finite Difference) หรือไฟไนต์เอลิเมนต์ในการแก้สมการ ส่วนซอฟต์แวร์ประเภทที่ 3 จะเป็นการแก้สมการที่ซับซ้อนมาก ๆ ทางกายภาพโดยจะใช้สมการที่ยาวมากในการขยายข้อมูลทางกายภาพโดยจะใช้วิธีการทางผลต่างอันตะ (Finite Difference) หรือไฟไนต์เอลิเมนต์ในการแก้สมการ โดยปกติแล้วซอฟต์แวร์ในการจำลองพฤติกรรมส่วนใหญ่จะเป็นการจำลองในรูปแบบการไหลป้อนเต็ม (Filling Modeling) และรูปแบบการแข่งขันตัว (Solidification Modeling) ซึ่งจะเป็นตัวช่วยต่อการผลิตงานหล่อ ซึ่งในการทำนายลักษณะรูปแบบของการไหลของโลหะเหลวเป็นการคำนวณขั้นพื้นฐานของซอฟต์แวร์ โดยจะใช้วิธีการของการแก้สมการนาเวียร์-สโตกส์ (Navier-Stokes) กับ 2 สมการของรูปแบบการแปรปรวน (Turbulence Mode) ซึ่งจะใช้ในการทำนายคุณลักษณะจำเพาะของการไหลของโลหะเหลว เช่น ความเร็ว ความหนืด และเรย์โนลด์สจำนวน (Reynold's Number) เป็นต้น

ส่วนการแข่งขันตัวของงานหล่อนั้นจะใช้ซอฟต์แวร์ประเภทที่ 2 และ 3 จากข้างต้นเป็นเครื่องมือในการแก้ปัญหา โดยสมการประเภทที่ 2 นั้นจะเป็นสมการในการแก้ปัญหาในรูปแบบง่าย ๆ เช่น ระยะห่างของรูล้น คุณลักษณะของการแข่งขันตัวของงานที่รูปร่างไม่ซับซ้อน ส่วนสมการประเภทที่ 3 นั้นจะเป็นการแก้ปัญหาที่ง่าย ๆ ไปจนถึงปัญหาที่ซับซ้อนโดยในการแก้ปัญหานี้จะใช้สมการการถ่ายเทความร้อนแบบฟูริเยร์ (Fourier Heat Transfer Equation) มาช่วยในการแก้ปัญหา โดยจะกระทำในรูปแบบ 3 มิติของการถ่ายเทความร้อน ซึ่งกรรมวิธีนี้จะเป็นการรวมเอาคุณลักษณะทางเทอร์โมฟิสิกส์ของวัสดุ สมการการพาความร้อน (Convection Equation) และสมการการถ่ายเทความร้อนจากการแผ่รังสี (Radiation Heat Transfer Equation) มาช่วยในการแก้ปัญหา ซึ่งกรรมวิธีนี้จะช่วยในการทำนายเวลาการแข่งขันตัว การเกิดรูพรุน การแยกตัวและความเค้น ความเครียด แต่ในการคำนวณในแต่ละครั้งต้องใช้เวลาในการทำมากทีเดียว ดังนั้นการใช้คอมพิวเตอร์ในการจำลองพฤติกรรมของงานหล่อจึงเป็นกรรมวิธีหนึ่งที่ช่วยในการลดจุดบกพร่องที่เกิดขึ้นจากการแปรปรวนและการไหลของโลหะเหลวเพื่อช่วยลดต้นทุนในการหล่อในแต่ละครั้ง (Arno Louvo. 1997)

2.5 ข้อบกพร่องในงานหล่อ

2.5.1 โพรงที่เกิดจากการหดตัว

โดยทั่วไปเป็นโพรงที่มีลักษณะรูปร่างไม่แน่นอน (Irregular) โค้งเว้าไปตามขอบของเดนไดรต์ การหดตัวบางครั้งอาจเกิดร่วมกับแก๊สที่เหลืค้างอยู่ในชิ้นงานปรากฏให้เห็นภายในและที่ผิวชิ้นงาน โดยส่วนใหญ่จะพบบริเวณตำแหน่งที่ชิ้นงานมีความหนา มักมีสาเหตุมาจากการหดตัวของโลหะผสม หลอมเหลวที่กำลังแข็งตัว ซึ่งอาจมีผลมาจากการที่โลหะอยู่ในสถานะของแข็งย่อมมีความหนาแน่นสูงกว่าในสถานะของเหลว ดังนั้นในขณะที่เกิดการแข็งตัววัสดุมักเกิดการหดตัว โพรงจากการหดตัวนี้จะเกิดขึ้นในกระบวนการการแข็งตัวของโลหะที่หดตัวขณะเปลี่ยนสถานะเป็นของแข็งและมีการหดเซยโลหะเหลวเข้าไปแทนที่ในส่วนช่องว่างที่เกิดการหดตัวนี้ไม่เพียงพอ (หริส และเคนจิ, 2543)

2.5.2 รูเข็มหรือตามด

คือรูซึ่งมีผิวเรียบและมักเป็นรูปกลม ๆ ขนาดประมาณ 1-2 มิลลิเมตร หรือต่ำกว่านั้น มักเกิดกระจายตัวบริเวณผิวหน้าหรือผิวที่ถูกกลึง มักปรากฏบริเวณที่ห่างจากทางเข้าโลหะเหลว มีสาเหตุมาจากมีแก๊สในโลหะเหลวหรือมีสิ่งแปลกปลอมในโลหะเหลวหรือสิ่งเจือปนต่าง ๆ ที่นอกเหนือจากโลหะเหลวบริสุทธิ์ (เทพนารินทร์, 2545)

2.5.3 ผิวเปลือกส้ม

ลักษณะทั่วไปที่ผิวชิ้นงานมีลักษณะหยาบไม่เรียบเหมือนเปลือกส้ม มีสาเหตุมาจากมีแก๊สจับตัวอยู่ที่โลหะเหลวกับแบบหล่อ การที่โลหะเหลวที่ไม่เต็มรูทำให้เกิดแก๊สขึ้นได้ง่าย (John, T. H. Pearce. & Metals Group. 2001)

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.6.1 การออกแบบระบบป้อนเติมโลหะเหลว (Gate System)

Ondrej, V. (2019) มุ่งศึกษาความสำคัญของประเภทของระบบทางเข้า (Gating System) ในเทคโนโลยีการหล่อแบบอินเวสต์เมนต์ (Investment Casting) การศึกษาเน้นการวิเคราะห์ประเภทต่าง ๆ ของระบบทางเข้าหล่อ เช่น ระบบทางเข้าแบบช่องทางเดียวหรือหลายช่องทางเพื่อเปรียบเทียบระบบทางเข้า (Gating System) ที่มีการเติมเต็มที่แตกต่างกันมีผลอย่างไรกับชิ้นงานด้วยการจำลองจากซอฟต์แวร์ ProCAST ผลการจำลองพบว่า การเติมเต็มชิ้นงานจากด้านล่างมีการเติมเต็มที่เหมาะสมและราบเรียบกว่าการเติมเต็มจากด้านบน

Wang, R., et al. (2019) มุ่งเน้นไปที่การทดสอบและวิเคราะห์ผลกระทบของระยะห่างทางวิ่ง (Runner Spacing) ที่มีต่อกระบวนการไหลของโลหะในแม่พิมพ์ที่ซับซ้อน โดยเฉพาะอย่างยิ่งในการหล่อชิ้นงานที่มีโครงสร้างซับซ้อนหรือรายละเอียดสูง การปรับระยะห่างนี้มีจุดประสงค์เพื่อลดปัญหาการกระจายตัวของโลหะที่ไม่สม่ำเสมอ ซึ่งมักนำไปสู่การแข็งตัวไม่พร้อมกันและการเกิดข้อบกพร่องในชิ้นงาน ผลการทดลองพบว่าระยะห่างทางวิ่งมีผลสำคัญต่อการเพิ่มประสิทธิภาพการหล่อโลหะ ทำให้ชิ้นงานมีคุณภาพดีขึ้น

Hyung-Yoon Seo, Chul-Kyu Jin and Chung-Gil Kang. (2018) ศึกษากระบวนการทางเข้าที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการผลิตชิ้นส่วนเทอร์ไบน์เฮาส์ซิง (Turbine Housing) โดยการใส่ตัวทำความร้อน (Heater) ให้กับรูลิ้น (Riser) และการลดขนาดรูลิ้น (Riser) ในงานวิจัยนี้จะออกแบบทางเข้า

สำหรับชิ้นงานเทอร์ไบน์เฮาส์ซิง (Turbine Housing) และปรับปรุงอัตราการคืนตัว (Recovery Rate) ด้วยกระบวนการหล่อทราย วัสดุที่ใช้คือเหล็กหล่อกราไฟท์ทรงกลม โดยจะออกแบบให้ทางเข้าและทางวิ่งสมมาตรกันและอัตราส่วนที่ใช้คือ 1:0.9:0.6 จำลองด้วยซอฟต์แวร์ MAGMA Soft ผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่าการออกแบบที่เหมาะสมของระบบทางเข้าและรูสันสามารถลดข้อบกพร่องและเพิ่มประสิทธิภาพของชิ้นงานหล่อได้

Zhao et al. (2017) ได้ทำการศึกษาผลกระทบของการเพิ่มความสูงของทางวิ่ง (Runner Height) ต่อกระบวนการหล่อโดยมุ่งเน้นไปที่การทดสอบในแม่พิมพ์ที่มีโครงสร้างซับซ้อนซึ่งในงานนี้มีการวิเคราะห์ทั้งการกระจายความร้อนและการควบคุมเวลาการแข็งตัวของโลหะเพื่อให้เข้าใจถึงการปรับปรุงกระบวนการหล่อผ่านการออกแบบทางวิ่ง สรุปได้ว่าการเพิ่มความสูงของทางวิ่งในกระบวนการหล่อสามารถปรับปรุงการกระจายความร้อนและการควบคุมการแข็งตัวของโลหะได้อย่างมีนัยสำคัญ การศึกษานี้ยังชี้ให้เห็นถึงความสำคัญของการออกแบบระบบทางวิ่งที่เหมาะสมในกระบวนการหล่อที่ซับซ้อน

Lee, S., Choi, Y., and Kim, J. (2016) ผลกระทบของมุมทางวิ่ง (Gating Angle) ต่อพฤติกรรมการไหลของโลหะเหลวในกระบวนการหล่อโลหะ โดยมุ่งเน้นไปที่การออกแบบและการปรับเปลี่ยนมุมทางวิ่งเพื่อลดข้อบกพร่องและเพิ่มประสิทธิภาพในการเติมเต็มแม่พิมพ์ วัตถุประสงค์ของงานวิจัยคือศึกษาผลกระทบของมุมทางวิ่งต่อพฤติกรรมการไหลเมื่อเปลี่ยนแปลงมุมทางวิ่งแล้วจะส่งผลอย่างไรต่อความเร็ว แรงดันและลักษณะการไหลของโลหะเหลวภายในระบบทางวิ่ง ศึกษาการปรับปรุงการเติมเต็มแม่พิมพ์เพื่อค้นหามุมที่เหมาะสมที่สุดในการออกแบบทางวิ่งให้โลหะไหลได้อย่างสมบูรณ์และลดปัญหาการหล่อไม่เต็ม (Incomplete Filling) และศึกษาการลดการเกิดฟองอากาศและการหมุนวนว่ามุมทางวิ่งที่ปรับเปลี่ยนส่งผลอย่างไรต่อการลดฟองอากาศและการเกิด การหมุนวนที่อาจก่อให้เกิดข้อบกพร่องในชิ้นงานหล่อ ผลลัพธ์ที่ได้พบว่ามุมทางวิ่งที่มีความเอียงมากจะช่วยให้โลหะเหลวไหลได้อย่างสะดวกและรวดเร็วขึ้น การกระจายตัวของโลหะเหลวในแม่พิมพ์เป็นไปอย่างสม่ำเสมอ ซึ่งช่วยลดการเกิดปัญหาจากการแข็งตัวไม่สมบูรณ์

Pei-Hsing Huang and Chi-Ju Lin. (2015) ศึกษาการสร้างแบบจำลองเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการหล่อโรเตอร์สแตนเลส 17-4 PH ที่ใช้สำหรับเครื่องไต่เทียมซึ่งปัญหาที่พบในการผลิตมีสองประการคือ ประการที่หนึ่งการออกแบบแม่พิมพ์ส่วนใหญ่ขึ้นอยู่กับประสบการณ์และประการที่สองไม่สามารถควบคุมการหดตัว การเติมที่ไม่สมบูรณ์ และความพรุนของก๊าซในการหล่อได้ผลการจำลองพบว่าการใช้อุณหภูมิเทและอุณหภูมิเปลือกต่ำจะเร่งอัตราการเย็นตัวที่ผนังบาง ซึ่งอาจทำให้เกิดการเสียรูปและเกิดรูพรุน การออกแบบทางวิ่ง (Runner) ที่ซับซ้อนเกินไปทำให้เกิดความปั่นป่วนในแม่พิมพ์ซึ่งนั่นอาจเพิ่มโอกาสที่จะเกิดรูพรุน หลังจากการปรับปรุงระบบป้อนเติมพบว่าความปั่นป่วนลดลงและเวลาในการแข็งตัวลดลงจาก 1176 เป็น 1059 วินาที

Harshil Bhatt, et al. (2014) ในงานวิจัยนี้จะปรับเปลี่ยนการออกแบบระบบป้อนเติมเพื่อให้ได้การออกแบบที่เหมาะสมและเพื่อเพิ่มผลผลิต (Yield) ซึ่งในการหล่อชิ้นงานนี้จะพบข้อบกพร่องหลายอย่าง เช่น การหดตัว หล่อไม่เต็มแบบ รอยแตก เป็นต้น โดยจะออกแบบรูสันเป็นทรงกระบอกและกำหนดตำแหน่งรูสันใหม่ พื้นที่หน้าตัดของทางวิ่งและทางเข้าเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้า อัตราส่วนความ

สูงต่อความกว้าง 1:2 และใช้ทางเข้าทั้งหมด 4 อัน ผลลัพธ์แสดงให้เห็นว่าการออกแบบที่เหมาะสมสามารถลดข้อบกพร่องและเพิ่มคุณภาพของชิ้นส่วนเหล็กหล่อ

Jiang Wenming and Fan Zitian. (2014) ในการศึกษาเป็นการจำลองเชิงตัวเลขของกระบวนการเติมและการแข็งตัวของการหล่อที่รวมไอคือลูมิเนียมอัลลอย A356 ด้วยการหล่อแรงดันต่ำได้ดำเนินการโดยใช้ซอฟต์แวร์ ProCAST โดยมีการปรับปรุงระบบทางเข้า (Gating System) ให้เหมาะสมเพื่อกำจัดโพรงหดตัว (Shrinkage Porosity) โดยการเพิ่มทางวิ่ง (Runner) และทางเข้า (Gate) ทำให้การเติมโลหะเหลวมีความเสถียรมากขึ้น แต่การหล่อนี้ไม่เป็นไปตามลำดับการแข็งตัว และได้มีการปรับปรุงระบบทางเข้า (Gating System) อีกครั้งโดยการเพิ่มรูสัน (Riser) และท่อนเย็น (Chill) ทำให้ชิ้นงานมีคุณภาพภายในที่ดีขึ้นและไม่พบข้อบกพร่องใด ๆ

2.6.2 การจำลองกระบวนการหล่อ (Simulation)

กันติหัต และคณะ (2020) ศึกษาการวิเคราะห์และปรับปรุงระบบทางเข้า (Gating System) สำหรับการผลิตชิ้นงานอลูมิเนียมรูปทรงแท่ง โดยงานวิจัยนี้ศึกษาสามส่วนได้แก่ ลักษณะหน้าตัดทางเข้า 3 ลักษณะได้แก่ หน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้า หน้าตัดครึ่งวงกลม และหน้าตัดสี่เหลี่ยมคางหมู อัตราส่วนทางเข้า 2 อัตราส่วนได้แก่ 1:2:2 และ 1:4:4 ระยะทางเข้า 2 ระยะได้แก่ 15 และ 20 มิลลิเมตร ด้วยการใช้เทคนิคการจำลองและการวิเคราะห์การไหลของโลหะในแม่พิมพ์เพื่อลดข้อบกพร่อง เช่น ฟองอากาศและการหดตัว การวิจัยแสดงให้เห็นว่าลักษณะทางเข้ามีผลต่อลักษณะการไหลและเวลาในการเติมเต็มของโลหะเหลว ซึ่งลักษณะทางเข้าสี่เหลี่ยมคางหมูให้ผลดีที่สุดและยังพบว่าพื้นที่หน้าตัดสี่เหลี่ยมคางหมูที่มีรูปร่างแบนและพื้นที่หน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มีรูปร่างป้อมมีลักษณะการไหลที่ค่อนข้างสม่ำเสมอ

Smith, J., and Gupta, R. (2020) มุ่งเน้นการพัฒนาและปรับปรุงระบบทางเข้าโลหะ (Gating System) ที่สั้นในกระบวนการหล่อเหล็กโดยมีเป้าหมายเพื่อลดการสูญเสียและเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการ ซึ่งการวิจัยด้านนี้มักใช้ทั้งการจำลองด้วยซอฟต์แวร์ (Simulation) และการทดลองจริง (Experiment) เพื่อเปรียบเทียบผลลัพธ์และหาข้อสรุป ผลที่ได้จากการงานวิจัยพบว่าระบบทางเข้าโลหะที่สั้นช่วยลดของเสียจากการหล่อ เช่น รอยแตก ร้าว หรือการยุบตัวที่เกิดจากการไหลของโลหะที่ไม่สมบูรณ์และสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการผลิต ลดเวลาการหล่อและเพิ่มคุณภาพของชิ้นงาน

Zhang, X., et al. (2017) มุ่งเน้นการปรับปรุงการออกแบบระบบทางเข้า (Gating System) เพื่อเพิ่มคุณภาพของชิ้นงานหล่อโดยใช้เทคโนโลยีการจำลอง (Simulation Technology) การศึกษาใช้การจำลองทางคอมพิวเตอร์เพื่อวิเคราะห์การไหลของโลหะและการกระจายความร้อนในแม่พิมพ์ โดยการปรับปรุงการออกแบบระบบทางเข้าเพื่อป้องกันข้อบกพร่อง เช่น ฟองอากาศและการหดตัว ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าการใช้เทคโนโลยีการจำลองช่วยให้สามารถออกแบบระบบทางเข้าที่มีประสิทธิภาพมากขึ้นซึ่งนำไปสู่การปรับปรุงคุณภาพของชิ้นงานหล่อ

Mahamad Riyaz S H and Prasad U Raikar. (2015) ในงานวิจัยนี้จะศึกษาออกแบบระบบป้อนเติมเพื่อกำจัดตำแหน่งของจุดร้อนจากการหล่อแล้ว ซึ่งใช้วิธีการคำนวณทางโมดูลัส ในขั้นตอนการจำลองการหล่อดำเนินการโดยใช้ซอฟต์แวร์ Solid-cast วัสดุเหล็กหล่อ ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าการใช้การจำลองช่วยเพิ่มอัตราผลผลิต ลดของเสีย และปรับปรุงคุณภาพของชิ้นส่วนหล่อได้อย่างมีประสิทธิภาพ

Navee Hebsur and Sunil Mangshetty. (2014) ในบทความนี้กล่าวถึงการจำลองการผลิตมูลเหล็กที่พัฒนาขึ้นใหม่เพื่อเป็นต้นแบบในการหล่อทราย ผลการจำลองสามารถนำมาใช้คาดการณ์ข้อบกพร่องในการหล่อ เช่น การหดตัว (Shrinkage Porosity) รูพรุน (Blow Holes) หล่อไม่เต็มแบบ (Cold Shut) รอยแตก (Cracks) โดยจะใช้การจำลองในโปรแกรม ADSTEFAN จากผลการจำลองพบว่า การนำระบบทางเข้าแบบแรงดันมาใช้ การไหลของของเหลวราบรื่นและอากาศถูกไล่ออกโดยไม่ติดค้างภายใน ตำแหน่งทางเข้าที่เหมาะสมทำให้ไม่เกิดการหดตัว (Shrinkage Porosity) ซึ่งลดลงถึง 98 เปอร์เซ็นต์ และขจัดข้อบกพร่องในการหล่อให้หมดไปได้และทำให้ได้ชิ้นงานที่มีคุณภาพ

Sachin, L. (2014) เป็นการทบทวนและสรุปวิธีการออกแบบและปรับปรุงระบบทางเข้า (Gating System) และระบบป้อนเติมโลหะ (Feeding System) ในกระบวนการหล่อ การศึกษาเน้นการรวบรวมข้อมูลและเทคนิคต่าง ๆ ที่ใช้ในการออกแบบและปรับปรุงระบบเหล่านี้ รวมถึงการใช้การจำลองและการวิเคราะห์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการหล่อเพื่อลดข้อบกพร่อง เช่น ฟองอากาศและการหดตัวของโลหะ งานวิจัยแสดงให้เห็นว่าการออกแบบและการปรับปรุงที่เหมาะสมของทางวิ่ง (Runner) มีความสำคัญอย่างมากในการรักษาคุณภาพชิ้นงานและพื้นที่หน้าตัดของทางเข้าที่เหมาะสมคือ สี่เหลี่ยมจัตุรัส สี่เหลี่ยมผืนผ้า และสี่เหลี่ยมคางหมู

2.6.3 ข้อบกพร่องในงานหล่อ (Defects)

นันทวัฒน์ และกรรณชัย (2563) ได้ศึกษาการผลิตชิ้นงานเครื่องประดับจากเงินสีชมพูด้วยวิธีการหล่อแบบประณีต (Investment Casting) ของบริษัทกรณีศึกษาพบปัญหาคุณภาพชิ้นงานมากที่สุดในรูปแบบของรูพรุนจากการหดตัว (Shrinkage Porosity) ถึง 56 เปอร์เซ็นต์ งานวิจัยนี้มีการศึกษาตัวแปรในการหล่อที่มีอิทธิพลต่อการเกิดรูพรุน เพื่อหาเงื่อนไขการหล่อที่เหมาะสมของการหล่อเงินสีชมพูด้วยวิธีการหล่อแบบประณีต ซึ่งตัวแปรที่ทำการศึกษาคือ อุณหภูมิอบเบ้า (Flask Temperature) และอุณหภูมิหล่อ (Casting Temperature) และมีตัวแปรตอบสนองคือ เปอร์เซ็นต์ของพื้นที่การเกิดรูพรุน พบว่าการใช้อุณหภูมิอบเบ้า 600 องศาเซลเซียส กับอุณหภูมิหล่อ 1030 องศาเซลเซียส หรือการใช้อุณหภูมิอบเบ้า 480 องศาเซลเซียส กับอุณหภูมิหล่อ 1060 องศาเซลเซียส ทำให้มีเปอร์เซ็นต์ของการเกิดรูพรุนน้อยกว่าเงื่อนไขการผลิตอื่น ๆ เมื่อนำเงื่อนไขดังกล่าวมาใช้ในการกระบวนการผลิตจริงทำให้ข้อบกพร่องลดลงจากเดิมโดยเฉลี่ย 29.5 เปอร์เซ็นต์

พิมพ์เพชร และคณะ (2557) ศึกษาการลดปัญหาความบกพร่องของชิ้นงานตัวเรือนสบู่ที่เกิดจากโพรงอากาศในระหว่างกระบวนการหล่อขึ้นรูป งานวิจัยนี้จึงทำการจำลองกระบวนการหล่อขึ้นรูปด้วยโปรแกรม Flow 3D@Cast โดยแบ่งออกเป็น 3 กรณีศึกษาคือ กรณีที่หนึ่งเงื่อนไขต่าง ๆ ที่ใช้ในปัจจุบัน กรณีที่สองเพิ่มตำแหน่งทางเข้าน้ำโลหะ (Gate Runner) และกรณีที่สามเพิ่มช่องทางออกของน้ำโลหะ (Overflow) จากผลการศึกษาพบว่าในกรณีที่สาม การเพิ่มช่องทางออกของน้ำโลหะของชิ้นงานส่งผลให้เกิดโพรงอากาศน้อยที่สุด เนื่องจากการเพิ่มช่องทางระบายอากาศเมื่อน้ำโลหะไหลเข้ามาแทนที่ทำให้อากาศสามารถไหลออกจากแม่พิมพ์ได้อย่างราบรื่น

ธนพล และวรชาติ (2553) ศึกษาการลดของเสียในกระบวนการหล่อโลหะโดยใช้กรณีศึกษาจากโรงงานหล่อโลหะของบริษัท แคสท์เทค จำกัด ซึ่งต้องเผชิญกับปัญหาของเสียในกระบวนการผลิตที่ส่งผลต่อคุณภาพผลิตภัณฑ์และต้นทุนการผลิต โดยมีวัตถุประสงค์หลักคือการวิเคราะห์และเสนอแนวทางลดของเสียในกระบวนการผลิตเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพและลดต้นทุน โดยงานวิจัยนี้ได้นำ

เทคนิคต่าง ๆ มาช่วยในการวิเคราะห์ปัญหาที่ทำให้เกิดของเสีย เช่น การวิเคราะห์ด้วยแผนผังก้างปลา การวิเคราะห์และแก้ปัญหาด้วย (5 Whys) เพื่อระบุสาเหตุที่แท้จริงของการเกิดของเสียในกระบวนการหล่อโลหะ ซึ่งอาจมาจากการควบคุมอุณหภูมิที่ไม่เหมาะสม คุณภาพของแบบหล่อ การเทโลหะที่ไม่ถูกวิธีและการระบายความร้อนไม่ดี จากการปรับปรุงและใช้เครื่องมือควบคุมคุณภาพทำให้ปริมาณของเสียในกระบวนการหล่อลดลงอย่างมีนัยสำคัญส่งผลให้ประสิทธิภาพของการผลิตเพิ่มขึ้น ค่าใช้จ่ายที่เกิดจากของเสียลดลงและยังช่วยเพิ่มความสามารถในการแข่งขันของบริษัท

ในงานวิจัยนี้จึงได้มุ่งเน้นการวิเคราะห์ตัวแปรจากการทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องและทฤษฎีพื้นฐาน ซึ่งเป็นพื้นฐานสำหรับการออกแบบระบบป้อนเติม โดยตัวแปรเบื้องต้นที่ใช้ในการออกแบบการทดลองของงานวิจัยนี้ได้แก่ ตัวแปรที่หนึ่งลักษณะหน้าตัดทางเข้าสู่เหล็กหล่อเข้าสู่เหล็กหล่อ และสี่เหลี่ยมคางหมู เป็นลักษณะหน้าตัดทางเข้าที่มีความเหมาะสมตามความเห็นของ Sachin, L. and Rajendra, S. (2014) ตัวแปรที่สองความสูงของทางวิ่งจากงานวิจัยของ Zhao, X., et al. (2017) กล่าวว่าความสูงของทางวิ่งช่วยเพิ่มความเร็วในการไหลและทำให้การไหลสม่ำเสมอมากขึ้น ตัวแปรที่สามระยะห่างทางวิ่งจากงานวิจัยของ Wang, R. et al. (2019) กล่าวว่าระยะห่างทางวิ่งมีผลต่อพฤติกรรมไหลและการกระจายตัวทางความร้อน ตัวแปรที่สี่การลดความยาวทางวิ่งจากงานวิจัยของ Smith, J., and Gupta, R. (2020) กล่าวว่าการใช้ระบบทางเดินโลหะที่ลดความยาวมาอย่างเหมาะสมสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการผลิต ลดเวลาการหล่อและเพิ่มคุณภาพของชิ้นงาน และตัวแปรตัวสุดท้ายมุมมองทางวิ่งจากงานวิจัยของ Lee, S. et al. (2016) กล่าวว่ามุมมองที่เอียงมากมีผลต่อพฤติกรรมไหลและคุณภาพของชิ้นงานที่ดีขึ้น ผู้วิจัยจึงนำตัวแปรเหล่านี้มาเป็นแนวทางในการออกแบบและศึกษา เพื่อมุ่งเน้นไปที่การพัฒนาและออกแบบระบบป้อนเติมที่มีความเหมาะสม โดยใช้การจำลองและการทดลองจริง ซึ่งขั้นตอนและเงื่อนไขในการทดลองได้อธิบายไว้ในบทที่ 3 ต่อไป

บทที่ 3

การดำเนินการวิจัย

การดำเนินการวิจัยได้ออกแบบการทดลองเพื่อวิเคราะห์ตัวแปรที่มีอิทธิพลที่ส่งผลต่อพฤติกรรมการไหลของโลหะเหลวในแม่พิมพ์หล่ออินเวสต์เมนต์ ซึ่งจากกระบวนการหล่อพบปัจจัยที่เป็นเงื่อนไขในการผลิตของโรงงานบริษัท พรیشัน แมนูเฟคเจอร์ จำกัด ซึ่งใช้ดำเนินการผลิตอยู่ในปัจจุบัน จึงได้ดำเนินการวิจัยตามขั้นตอนดังต่อไปนี้

3.1 แผนการดำเนินงาน

3.1.1 รวบรวมข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นในชิ้นงานจากกระบวนการหล่ออินเวสต์เมนต์

3.1.2 ศึกษาปัญหาและเงื่อนไขต่าง ๆ ของกระบวนการผลิตชิ้นงานของบริษัท พรیشัน แมนูเฟคเจอร์ จำกัด

3.1.3 ศึกษาการออกแบบระบบป้อนเติมโลหะเหลว (Gating System) สำหรับงานหล่อเหล็ก (Iron Casting)

3.1.4 ศึกษาการใช้คอมพิวเตอร์ซอฟต์แวร์ในการจำลองพฤติกรรมของงานหล่อ (Casting Simulation) โดยโปรแกรมที่ทำการเลือกศึกษาคือ Cast-Designer Version 7.6

3.1.5 ออกแบบแม่พิมพ์งานหล่ออินเวสต์เมนต์ โดยมุ่งเน้นไปที่การออกแบบรูปร่างของระบบป้อนเติมโลหะเหลว

3.1.6 ทดลองหล่อชิ้นงานโดยเลือกเหล็กเกรด AISI 4140 เป็นวัสดุหล่อ

3.1.7 ใช้คอมพิวเตอร์ซอฟต์แวร์ช่วยในการจำลองพฤติกรรมต่าง ๆ ของชิ้นงาน โดยทำการเปรียบเทียบผลดังนี้

3.1.7.1 ลักษณะการไหลของโลหะเหลว (Fluid Fraction)

3.1.7.2 เวลาในการเติมเต็ม (Fill Time)

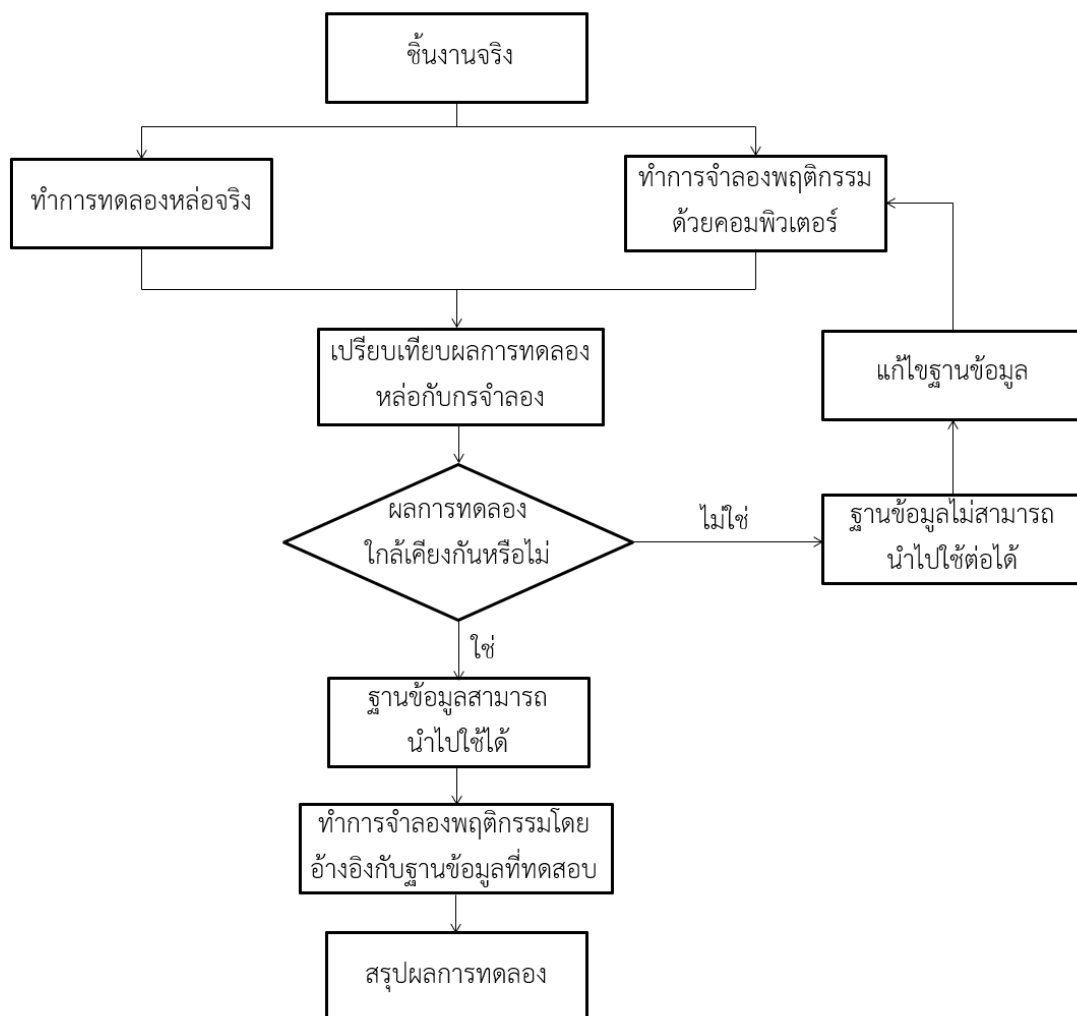
3.1.7.3 ลักษณะการแข็งตัว (Solidification)

3.1.7.4 ลักษณะการเกิดโพรงหดตัว (Shrinkage Porosity)

3.1.8 วิเคราะห์ผลการจำลองพฤติกรรมเพื่อทำนายข้อบกพร่องที่เกิดขึ้น

3.1.9 ทดลองหล่อชิ้นงานที่ทำการออกแบบไว้ โดยใช้กระบวนการหล่ออินเวสต์เมนต์ และเปรียบเทียบผลที่ได้กับชิ้นงานจริง โดยสนใจที่ลักษณะของข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นจริง

3.1.10 สรุปผลการทดลองและความเป็นไปได้ในการใช้คอมพิวเตอร์ซอฟต์แวร์มาช่วยในการออกแบบระบบป้อนเติมโลหะเหลวสำหรับงานหล่อเหล็ก



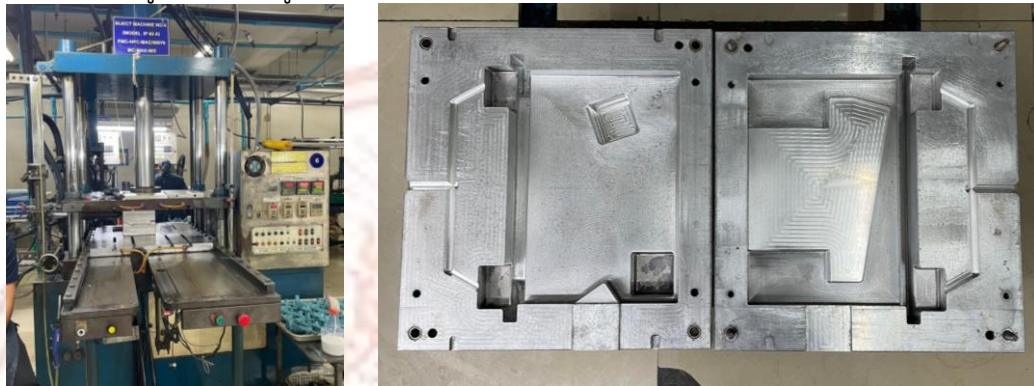
ภาพที่ 3-1 แผนผังการดำเนินงาน

3.2 กระบวนการผลิตชิ้นงานหล่ออินเวสต์เมนต์

ชิ้นงานหล่ออินเวสต์เมนต์เป็นชิ้นงาน Body OTC Steady ทำการผลิตชิ้นงานหล่อด้วยกระบวนการผลิตในบริษัท ปริซึน แมนูแฟคเจอร์ จำกัด โดยมีวิธีการควบคุมการผลิตตามขั้นตอนดังต่อไปนี้

3.2.1 การฉีดขี้ผึ้ง (Wax)

ต้มขี้ผึ้ง (Wax) ทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง ต้องเปิดเครื่องทำความร้อน (Heater) ไว้ตลอดและต้องมีการเติมขี้ผึ้ง (Wax) เพื่อไม่ให้ขี้ผึ้ง (Wax) เดิมเกิดความเหนียวมากเกินไป แล้วเครื่องฉีดขี้ผึ้ง (Wax) จะฉีดขี้ผึ้ง (Wax) เข้าสู่แม่พิมพ์ที่มีรูปร่างและขนาดเหมือนชิ้นงานจริง โดยใช้ความดันฉีดที่ 200 บาร์



ภาพที่ 3-2 เครื่องฉีดและแม่พิมพ์ฉีดขี้ผึ้ง (Wax)

3.2.2 การตกแต่งขี้ผึ้ง (Wax)

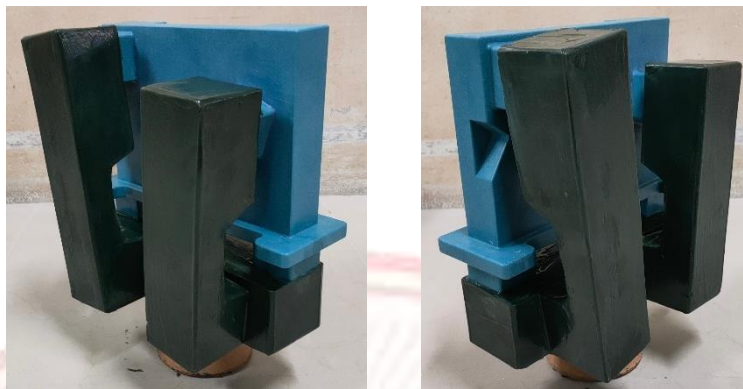
การตกแต่งชิ้นงานที่ฉีดขี้ผึ้ง (Wax) ต้องตกแต่งครีบลและส่วนเกินต่าง ๆ ที่ไม่ต้องการในชิ้นงานออก ให้มีความเรียบเสมอกันเพื่อให้ผิวชิ้นงานที่ได้จากการหล่อเรียบตามชิ้นงานที่ฉีดขี้ผึ้ง (Wax)



ภาพที่ 3-3 การตกแต่งชิ้นงานขี้ผึ้ง (Wax)

3.2.3 การประกอบแม่พิมพ์ขี้ผึ้ง (Wax)

นำชิ้นงานที่ฉีดขึ้นส่วนต่าง ๆ มาประกอบกับส่วนของฐานรูเทและทางเข้า จากนั้นนำชิ้นงาน Body OTC Steady ติดที่ชุดรูเท โดยใช้วิธีบัดกรีด้วยโบมีดร้อนอุณหภูมิให้ขี้ผึ้ง (Wax) ละลายเป็นของเหลวเพื่อใช้เชื่อมประสานให้ชิ้นงานติดกับฐานรูเท



ภาพที่ 3-4 การประกอบแบบแม่พิมพ์ขี้ผึ้ง (Wax)

3.2.4 การล้างน้ำยา

การจุ่มน้ำยาที่มีส่วนผสมของแอลกอฮอล์เป็นหลัก โดยนำชิ้นงานจุ่มลงในถังน้ำยา การล้างแบบแม่พิมพ์ขี้ผึ้ง (Wax) เพื่อกำจัดคราบสกปรกและฝุ่นผงที่ติดอยู่ตามมุมของแบบแม่พิมพ์ก่อนนำไปจุ่มน้ำกาวเซรามิก จากนั้นนำแบบแม่พิมพ์ไปตากทิ้งไว้จนแห้งสนิท ซึ่งการล้างน้ำยามีผลต่อความสมบูรณ์ของชิ้นงาน

3.2.5 การจุ่มน้ำกาวและการโปรยทราย

ในขั้นตอนนี้จะเตรียมน้ำกาวที่ใช้จุ่มและตรวจสอบความหนืดของน้ำกาว โดยชิ้นงาน Body OTC Steady จะผ่านการจุ่มน้ำกาวทั้ง 12 ชั้น โดยในชั้นที่ 5 และชั้นที่ 9 จะมีการมัดลวดหรือมัดตะแกรงก่อนชุบ ซึ่งมีขั้นตอนดังนี้

3.2.5.1 ชั้นที่ 1 คือจุ่ม Zircon Sand ทิ้งให้แห้ง 2-4 ชั่วโมง

3.2.5.2 ชั้นที่ 2 คือจุ่ม Mullite Sand ขนาด 0.3-0.7 มิลลิเมตร ทิ้งให้แห้ง 4-6 ชั่วโมง

3.2.5.3 ชั้นที่ 3-12 คือจุ่ม Mullite Sand ขนาด 0.7-1.0 มิลลิเมตร ทิ้งให้แห้งอย่างน้อย 6-24 ชั่วโมง



ภาพที่ 3-5 การโปรยทรายและจุ่มกาว



(ก)



(ข)

ภาพที่ 3-6 (ก) ลักษณะการมัดลวดหรือมัดตะแกรง (ข) การตากแม่พิมพ์

3.2.6 การไล่ไขมัน (Dewax)

แม่พิมพ์ที่ตากแห้งสนิทแล้วจะนำมาเข้าเตาอบที่ความดัน 7 บาร์ เวลา 30 นาทีต่อรอบ เพื่อให้ไขมันละลายเหลือไว้แค่แม่พิมพ์ที่แข็งแรง



ภาพที่ 3-7 เครื่อง Dewax

3.2.7 การอบแม่พิมพ์ (Pre Heat Mold)

นำแม่พิมพ์ที่ผ่านการกำจัดไขมันแล้ว เข้าเตาอบให้อุณหภูมิความร้อนถึง 850 ± 20 องศาเซลเซียส



(ก)



(ข)

ภาพที่ 3-8 (ก) เตาอบ (ข) แม่พิมพ์ที่ผ่านการอบแล้ว

3.2.8 การเทหลอมโลหะ (Pouring)

นำส่วนผสมของวัตถุดิบมาหลอมในเตาที่อุณหภูมิ 1670 ± 10 องศาเซลเซียส ให้เป็นโลหะเหลว จากนั้นนำมาเทลงในแม่พิมพ์จนเต็ม



(ก)



(ข)

ภาพที่ 3-9 (ก) ขั้นตอนการหลอมวัตถุดิบ (ข) ขั้นตอนการเทหล่อ

ในกระบวนการเทโลหะเหลวเข้าสู่แม่พิมพ์ต้องใช้เวลาที่รวดเร็ว โดยควบคุมจังหวะการนำแม่พิมพ์หล่อที่อยู่ในเตาอบที่ร้อนอยู่ออกมาเทโลหะเหลวเข้าไปทันที ซึ่งการติดตั้งวางเตาอบแม่พิมพ์หล่อกับเตาหลอมโลหะจำเป็นต้องอยู่ในระยะไม่ห่างกันมาก เพื่อจะได้ควบคุมไม่ให้สูญเสียอุณหภูมิของแม่พิมพ์หล่อที่ออกจากเตาอบไปถึงปากบ่้าหลอมโลหะมากเกินไป ซึ่งเป็นสาเหตุทำให้ชิ้นงานหล่อเสียหายในระหว่างเทโลหะเหลว

3.2.9 การกระแทกเปลือกแม่พิมพ์ (Shattering)

แม่พิมพ์ที่เทโลหะเหลวจนเต็มแล้วปล่อยให้เย็นตัวในอากาศปกติจะต้องทำให้เปลือกแบบแม่พิมพ์เซรามิกที่ติดอยู่กับเนื้อชิ้นงานหลุดออกมา อาจจะต้องทุบให้แตกออกหรือใช้เครื่องกระแทกเปลือกเซรามิกจนหมดเหลือแต่ชิ้นงานหล่อที่เป็นโลหะ



ภาพที่ 3-10 ขั้นตอนการกระแทกเปลือก

3.2.10 การยิงทราย

การทำความสะอาดผิวชิ้นงานหล่อให้ปราศจากเศษเม็ดทรายเซรามิกของเปลือกแม่พิมพ์ โดยใช้เครื่องยิงทรายไปขัดที่ผิวชิ้นงานให้สะอาดเป็นมันเงา

3.2.11 การตัดชิ้นงาน (Cutting Off)

การแยกชิ้นงานหล่อออกจากทางวิ่งโลหะเหลว โดยการตัดโมลด์และแยกระบบป้อนเดิม รวมทั้งคัดแยกของเสียที่ชิ้นงานออกทิ้งไปแล้วทำการหล่อใหม่



ภาพที่ 3-11 ชิ้นงานที่ถูกตัดระบบป้อนเดิมออกแล้ว

3.2.12 การตกแต่งผิว (Finishing)

ขั้นตอนกำจัดครีบกมที่เกิดจากการตัดส่วนเกินของชิ้นงานที่ได้จากการหล่อโลหะ เพื่อตกแต่งชิ้นงานให้สมบูรณ์



ภาพที่ 3-12 ขั้นตอนการตกแต่งชิ้นงาน

3.2.13 การอบชิ้นงานเพื่อปรับโครงสร้างหลัก

หลังจากทำการอบชิ้นงานหล่อจะมีผิวงานสีดำ ที่อุณหภูมิ 870 องศาเซลเซียส เวลา 2 ชั่วโมง
ปล่อยให้เย็นตัวภายในเตา

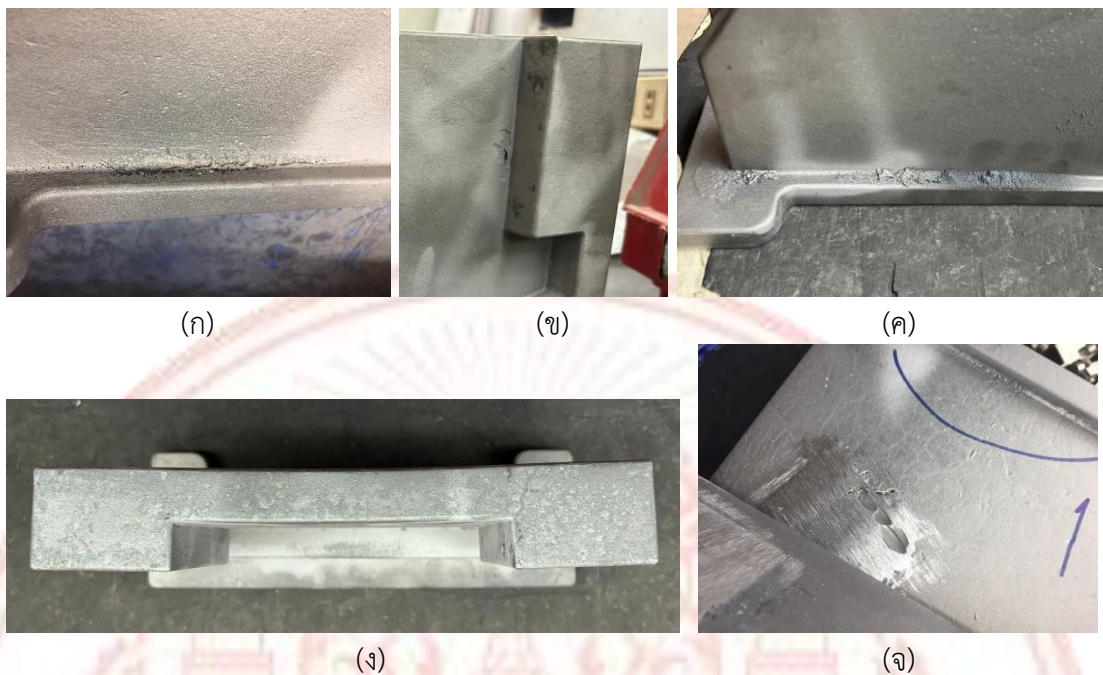


ภาพที่ 3-13 เตาอบ Annealing

3.2.14 การตรวจสอบชิ้นงาน

การตรวจสอบชิ้นงานคือ การเช็คผลจากการหล่อว่าชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการหล่ออินเวสต์เมนต์ (Investment Casting) ออกมานั้นขนาดได้ตามโพรแกรมที่ต้องการหรือไม่และมีข้อบกพร่องทั้งภายนอกและภายในเกิดขึ้นกับชิ้นงานหรือไม่

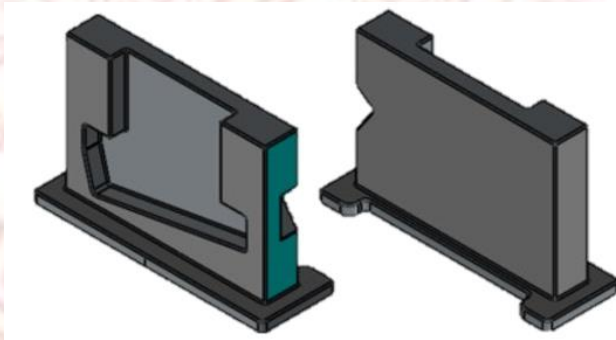
3.2.14.1 ทำการตรวจสอบด้วยตาเปล่าลักษณะภายนอกของชิ้นงานพบรอยยุบ ผิวขรุขระ ผิวเปลือกส้ม ชิ้นงานบิดโก่ง และโพรงหดตัว



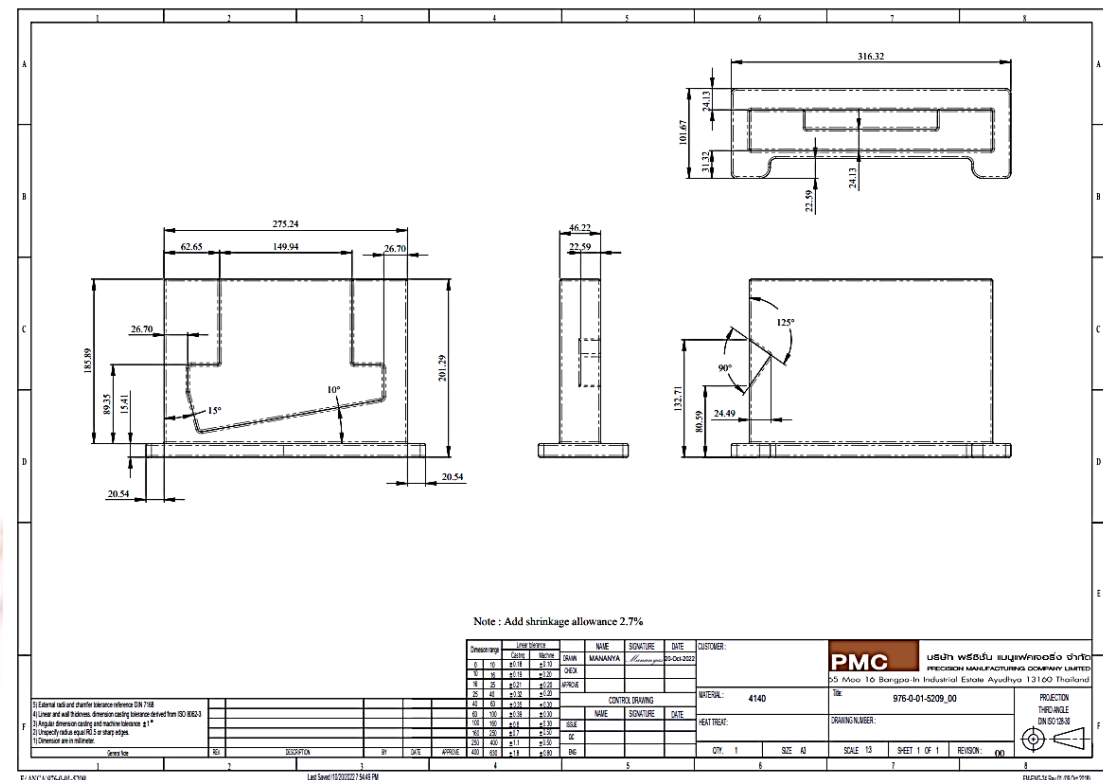
ภาพที่ 3-14 (ก) รอยยุบบริเวณผิวชิ้นงาน (ข) ผิวขรุขระบริเวณผิวชิ้นงาน
(ค) ผิวเปลือกส้มบริเวณผิวชิ้นงาน (ง) ชิ้นงานบิดโก่ง (จ) โพรงหดตัว

3.3 ลักษณะชิ้นงานและลักษณะแม่พิมพ์ในกรณีศึกษา

3.3.1 ชิ้นงาน Body OTC Steady เป็นส่วนประกอบของเครื่องจักรซีเอ็นซี ขนาด 267.81 มิลลิเมตร x 195.85 มิลลิเมตร x 98.92 มิลลิเมตร เนื่องจากบริษัท ปริซิชัน แมนูแฟคเจอร์ริง จำกัด พบข้อบกพร่องในชิ้นงานซึ่งมีผลกระทบต่อยุติได้เป็นสำคัญจึงได้ทำการวิจัยในครั้งนี้

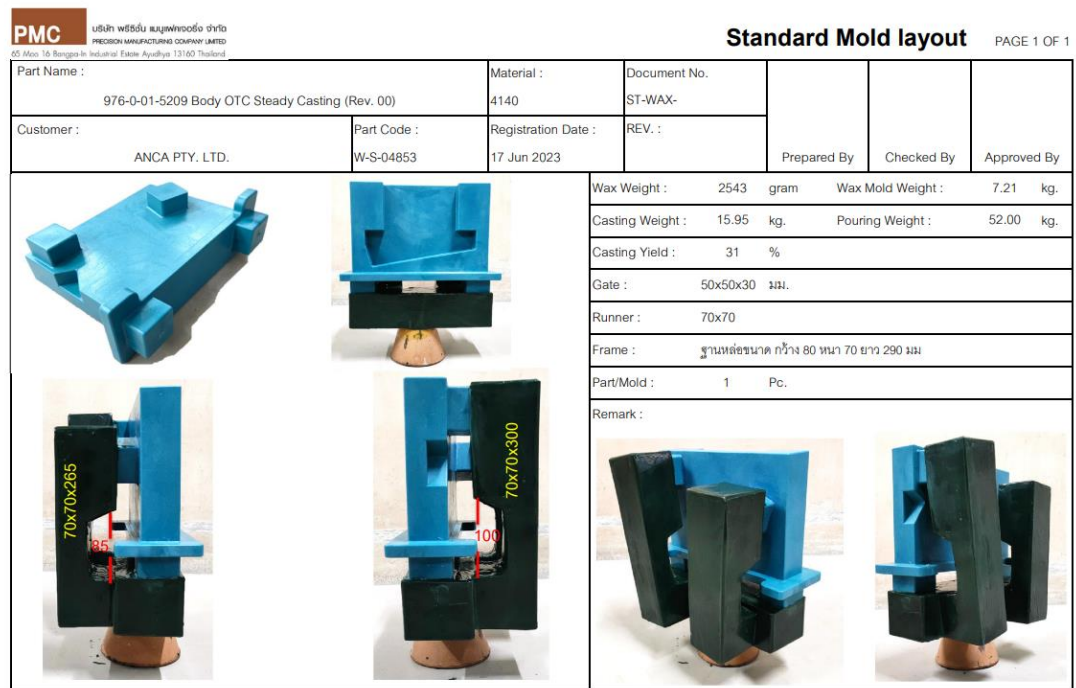


ภาพที่ 3-15 ลักษณะรูปร่างชิ้นงาน Body OTC Steady



ภาพที่ 3-16 ขนาดของชิ้นงานโดยสังเขป

3.3.2 ลักษณะระบบป้อนเติมโลหะเหลว (Gating System) ของบริษัท

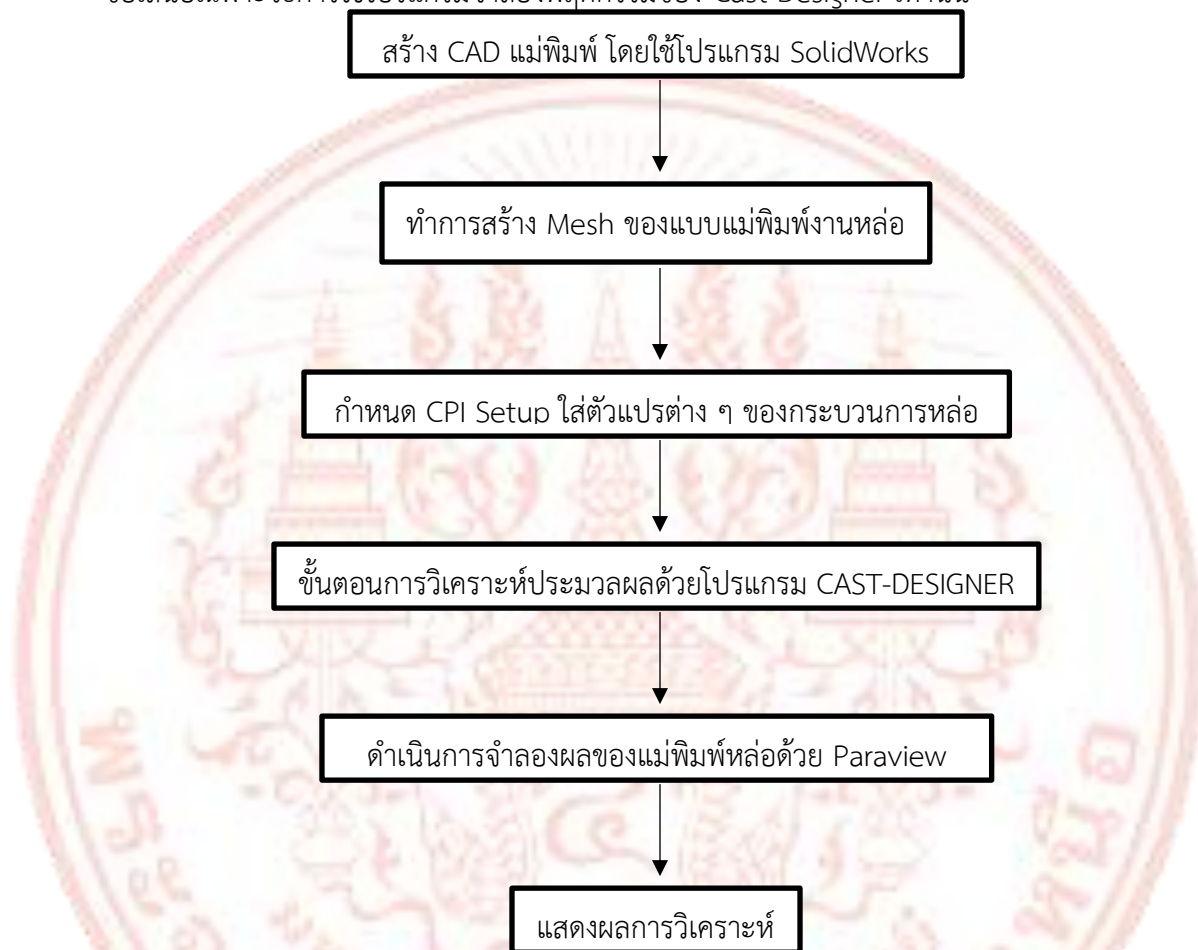


FM-WAX-24 Rev.02 Standard Mold Layout

ภาพที่ 3-17 ลักษณะชิ้นงานและระบบป้อนเติมโลหะเหลว

3.4 ขั้นตอนการใช้ซอฟต์แวร์จำลองพฤติกรรม (Simulation Software)

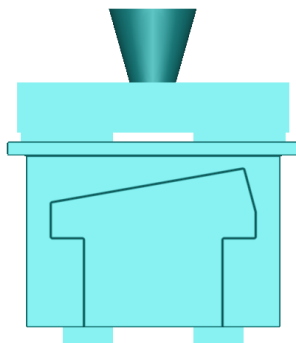
ขั้นตอนการใช้โปรแกรมจำลองพฤติกรรมทั่วไปมีลักษณะคล้ายคลึงกัน ดังแสดงได้ดังภาพที่ 3-18 แต่โปรแกรมแต่ละชนิดอาจมีรายละเอียดและวิธีการใช้ที่แตกต่างกันออกไป สำหรับวิทยานิพนธ์นี้ ขอเสนอเฉพาะวิธีการใช้โปรแกรมจำลองพฤติกรรมของ Cast-Designer เท่านั้น



ภาพที่ 3-18 ขั้นตอนการจำลองพฤติกรรมโดยใช้ซอฟต์แวร์ Cast-Designer

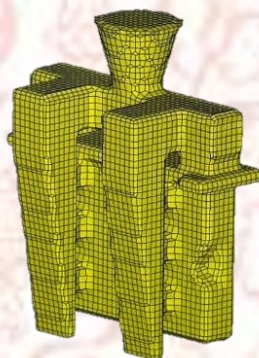
3.4.1 ขั้นตอนในการจำลองพฤติกรรมโดยใช้โปรแกรม Cast-Designer

3.4.1.1 นำ Computer Aided Design (CAD) ที่สร้างจากโปรแกรม SolidWorks ดังภาพที่ 3-19 แล้วส่งข้อมูล (Export) ในรูปของ *.STL File นำข้อมูลดังกล่าวส่งเข้า (Import) โปรแกรม Cast-Designer เพื่อแปลงข้อมูลดังกล่าวให้อยู่ในรูปที่โปรแกรม Cast-Designer สามารถรองรับได้



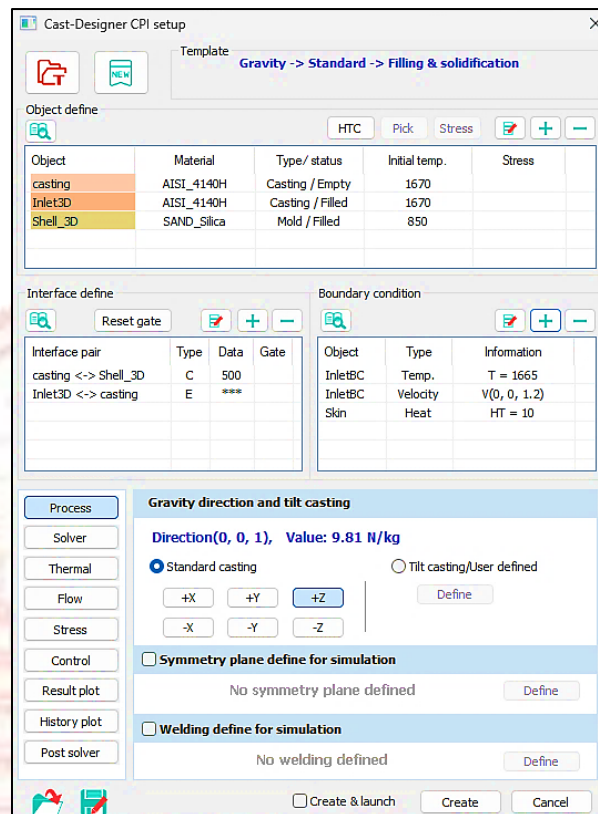
ภาพที่ 3-19 โมเดล CAD

3.4.1.2 การสร้างเปลือก (Shell Mould) คลุมชิ้นงานเพื่อจำลองแบบแม่พิมพ์เซรามิกที่ได้หลังจากการกำจัดแม่พิมพ์ก็จะกลายเป็นโพรงอากาศให้โลหะเหลวไหลเข้าไปจนเต็ม ซึ่งนำไปใช้ในการวิเคราะห์ผลเพื่อศึกษาพฤติกรรมต่าง ๆ ของการหล่ออินเวสต์เมนต์



ภาพที่ 3-20 ชิ้นงานที่คลุมด้วยเปลือก (Shell Mould)

3.4.1.3 การกำหนดสภาวะขอบเขตตัวแปรต่าง ๆ ของกระบวนการหล่ออินเวสต์เมนต์ เช่น ชนิดของวัสดุ (Material) ชนิดของวัสดุที่ใช้ทำเปลือก (Shell Mould) อุณหภูมิแม่พิมพ์ (Mould Temperature) อุณหภูมิการเท (Pouring Temperature) ความเร็วในการไหล (Velocity) และทิศทางการไหล



ภาพที่ 3-21 การกำหนดค่าตัวแปรต่าง ๆ

3.4.1.4 การจำลองพฤติกรรมงานหล่อครั้งนี้จะใช้โปรแกรม Cast-Designer ในการจำลองแต่ละครั้งจะทำการพิจารณาผลของงานที่เกิดขึ้นได้แก่ ลักษณะการไหล (Fluid Fraction) เวลาในการเติมเต็ม (Fill Time) ลักษณะการแข็งตัว (Solidification) ลักษณะของการเกิดโพรงหดตัว (Shrinkage Porosity) เพื่อทำนายลักษณะการเกิดความผิดพลาดที่เกิดขึ้นได้

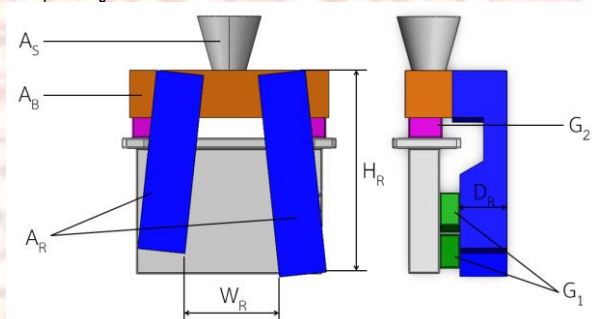
3.5 การวิเคราะห์รูปแบบจากระบบป้อนเติมรูปแบบเดิม

จากการตรวจสอบชิ้นงานที่ผ่านการหล่อขึ้นรูปโดยบริษัท พรซิชั่น แมนูแฟเจอริง จำกัด พบว่าหลังจากการเทหล่อขึ้นรูปชิ้นงานสำเร็จแล้ว ชิ้นงานส่วนใหญ่จะยุบตัวและมีข้อบกพร่องภายนอก ดังภาพที่ 3-22 จากการวิเคราะห์สาเหตุของปัญหาพบว่าโพรงหดตัวที่เกิดขึ้นนั้นมีสาเหตุมาจากตำแหน่งทางเข้าของโลหะเหลวไม่เหมาะสมทำให้โลหะเหลวไม่สามารถไหลเพื่อไล่อากาศออกจากแม่พิมพ์ได้อย่างราบรื่น เพื่อแก้ไขปัญหาดังกล่าวผู้วิจัยจึงได้มีการนำโปรแกรม Cast-Designer มาช่วยในการจำลองพฤติกรรมงานหล่อเพื่อทำนายลักษณะการเกิดความผิดพลาดที่เกิดขึ้นโดยจะพิจารณาผลที่เกิดขึ้นจากลักษณะการเกิดโพรงหดตัว (Shrinkage Porosity) ทางผู้วิจัยจึงจำลองกระบวนการหล่อขึ้นรูปชิ้นงานดังกล่าว



ภาพที่ 3-22 จุดข้อบกพร่องประเภทโพรงหดตัวในเนื้อชิ้นงาน

โดยระบบป้อนเติมโลหะเหลวรูปแบบเดิมมีตัวแปรที่ใช้ในระบบป้อนเติมดังตารางที่ 3-1 และแสดงแบบจำลองสามมิติของระบบป้อนเติมโลหะเหลวรูปแบบเดิมดังภาพที่ 3-23 โดยตัวแปรที่ใช้ในการกำหนดค่าในโปรแกรมจำลองมีดังนี้ เวลาในการเท 4 วินาที ความเร็วของโลหะเหลว 0.9 เมตรต่อวินาที วัสดุที่ใช้ในการเทหล่อ AISI 4140 วัสดุที่ใช้ทำแม่พิมพ์ ซิลิกา (Silica) อุณหภูมิของโลหะเหลว 1670 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิแม่พิมพ์ 850 องศาเซลเซียส



ภาพที่ 3-23 ส่วนประกอบของระบบป้อนเติมโลหะเหลวรูปแบบเดิม (Current Model: CML)

3.3.3 ข้อมูลเบื้องต้นของชิ้นงานและระบบจ่ายโลหะเหลวรูปแบบเดิม

ตารางที่ 3-1 ตัวแปรที่ใช้ในระบบป้อนเติมรูปแบบเดิม

ตัวแปร (สัญลักษณ์)	ค่าที่กำหนด (หน่วย)
จำนวน/ลักษณะหน้าตัดรูเท	1/วงกลม
พื้นที่ของรูเท (A_S)	1963.5 (ตารางมิลลิเมตร: mm^2)
จำนวน/ลักษณะหน้าตัดฐานรูเท	1/สี่เหลี่ยมจัตุรัส
พื้นที่ของฐานรูเท (A_B)	70x70x295 (มิลลิเมตร: mm)
จำนวน/ลักษณะหน้าตัดทางวิ่ง	2/สี่เหลี่ยมจัตุรัส
พื้นที่ของทางวิ่ง (A_R)	70x70 (มิลลิเมตร: mm)
ระยะห่างทางวิ่ง (W_R)	80.77 (มิลลิเมตร: mm)
ความสูงทางวิ่ง (H_R)	265, 300 (มิลลิเมตร: mm)
องศามุมของทางวิ่ง (D_R)	0 (องศา: $^\circ$)

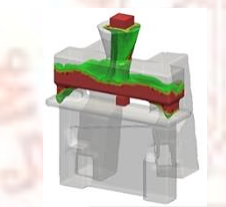
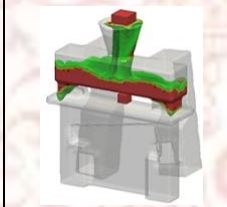
ตารางที่ 3-1 ต่อ

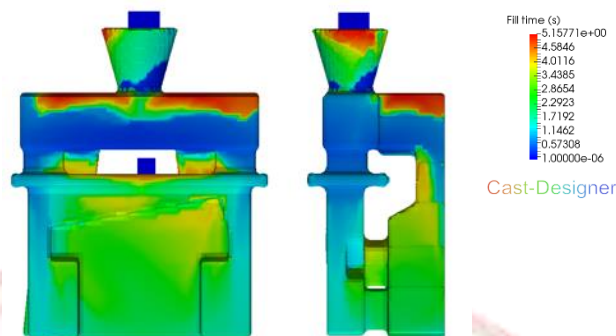
ตัวแปร (สัญลักษณ์)	ค่าที่กำหนด (หน่วย)
จำนวน/ลักษณะหน้าตัดทางเข้า	2/สี่เหลี่ยมจัตุรัส
พื้นที่ช่องทางเข้า (Gate ₁ : G ₁)	50x50x30 (มิลลิเมตร: mm)
จำนวน/ลักษณะหน้าตัดทางเข้า	2/สี่เหลี่ยมจัตุรัส
พื้นที่ช่องทางเข้า (Gate ₂ : G ₂)	50x50x30 (มิลลิเมตร: mm)
ปริมาตรของระบบทางเข้า	4590.29 (ลูกบาศก์เซนติเมตร: cm ³)
น้ำหนักของระบบทางเข้า	35.04 (กิโลกรัม: kg)

3.5.1 ผลการพิจารณาการจำลองของชิ้นงานหล่อด้วยโปรแกรม Cast-Designer โดยผลที่พิจารณาได้แก่

- ลักษณะการไหล (Fluid Fraction) และเวลาในการเติมเต็ม (Fill Time) ในการพิจารณานั้น จะพิจารณาการป้อนเต็มในปริมาณต่าง ๆ ซึ่งพบว่าการไหลป้อนเต็มทำได้ดี มีพฤติกรรมการไหลจากด้านบนลงมาทางด้านข้างของชิ้นงานแล้วค่อย ๆ ไหลเติมเต็มจากด้านหลังจนเต็มชิ้นงาน ซึ่งการไหลมีความปั่นป่วนในช่วง 40-80 เปอร์เซ็นต์ ดังตารางที่ 3-2 แสดงลำดับการไหลเข้าโพรงแบบของโลหะเหลว โดยระบบป้อนเต็มรูปแบบเดิมใช้เวลาในการเติมเต็ม 5.158 วินาที

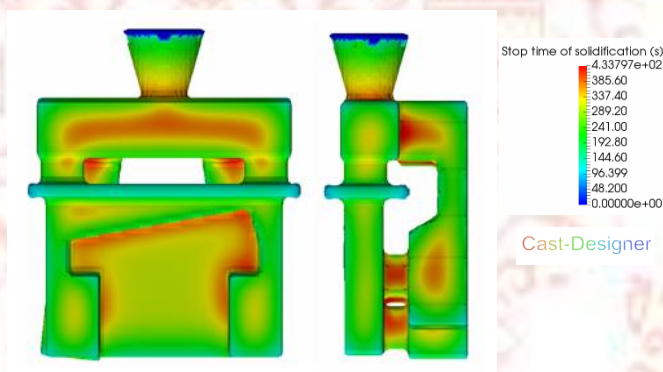
ตารางที่ 3-2 ลักษณะการไหลของระบบป้อนเต็มรูปแบบเดิม

				
10% / 0.516 วินาที	20% / 1.032 วินาที	30% / 1.547 วินาที	40% / 2.063 วินาที	50% / 2.579 วินาที
				
60% / 3.095 วินาที	70% / 3.611 วินาที	80% / 4.126 วินาที	90% / 4.642 วินาที	100% / 5.158 วินาที



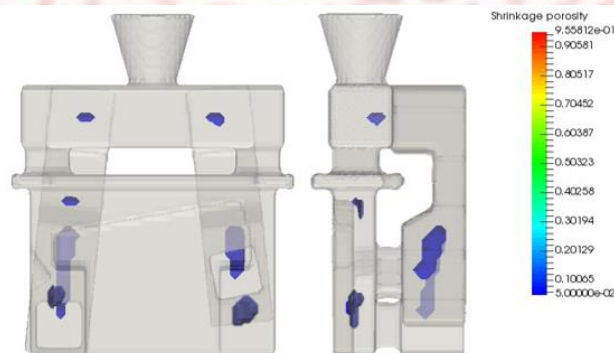
ภาพที่ 3-24 ผลการจำลองเวลาในการเติมเต็มของระบบป้อนเติมรูปแบบเดิม (CML)

- ลักษณะการแข็งตัว (Solidification) การพิจารณาลักษณะการแข็งตัวจะดูการแข็งตัวในช่วงเวลาสุดท้ายเพื่อดูว่ามีจุดใดบ้างที่ต้องการการป้อนเติมมากหรือน้อย และลำดับการแข็งตัวก่อนหลัง โดยในการจำลองนี้ปรากฏว่าบริเวณที่แข็งตัวช้าที่สุดคือบริเวณร่องตรงกลางชิ้นงานและบริเวณทางเข้า (Gate₁) ดังภาพที่ 3-25 โดยระบบป้อนเติมรูปแบบเดิมใช้เวลาในการแข็งตัว 433.797 วินาที



ภาพที่ 3-25 ผลการจำลองลักษณะการแข็งตัวของระบบป้อนเติมรูปแบบเดิม (CML)

- ลักษณะของการเกิดโพรงหดตัว (Shrinkage Porosity) การพิจารณาในเงื่อนไขนี้จะสังเกตบริเวณที่มีการเกิดโพรงหดตัว โดยในการจำลองปรากฏว่ามีบริเวณที่เกิดโพรงหดตัวในเนื้อชิ้นงานและบริเวณทางวิ่ง (Runner) ดังภาพที่ 3-26 โดยมีปริมาตรการเกิดโพรงหดตัว 29.60 ลูกบาศก์เซนติเมตร

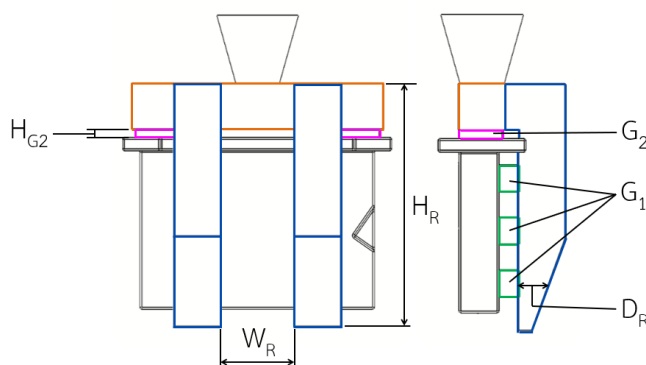


ภาพที่ 3-26 ผลการจำลองลักษณะการเกิดโพรงหดตัวของระบบป้อนเติมรูปแบบเดิม (CML)

ซึ่งในการจำลองด้วยโปรแกรมปรากฏว่าชิ้นงานมีการเกิดโพรงหดตัว (Shrinkage Porosity) อยู่ที่ 29.60 ลูกบาศก์เซนติเมตร ดังภาพ 3-26 การพิจารณาในเงื่อนไขนี้จะสังเกตบริเวณที่มีการเกิดโพรงหดตัว ซึ่งผลการจำลองพบว่าตำแหน่งการเกิดโพรงหดตัวอยู่ที่เนื้อชิ้นงานและทางวิ่ง (Runner) เมื่อทำการตัดแต่งระบบทางเข้าต่าง ๆ ออกเพื่อให้ได้ชิ้นงานจริงออกมา พบว่าที่บริเวณทางเข้า (gate₁) มีโพรงหดตัวเกิดขึ้นดังภาพที่ 3-22 เนื่องมาจากการหดตัวของโลหะเหลวบริเวณนั้นไม่เพียงพอสำหรับการเติมเต็มและมีตัวแปรที่เกี่ยวข้องที่มีผลต่อคุณภาพของชิ้นงานได้แก่ อุณหภูมิของโลหะเหลว อุณหภูมิของแม่พิมพ์ ระบบป้อนเติม (Gating System) และความเร็วในการไหล ตัวแปรเหล่านี้ล้วนส่งผลต่อความบกพร่องของชิ้นงาน เพื่อให้ได้ชิ้นงานหล่อที่สมบูรณ์จะต้องเริ่มต้นจากการทำให้โลหะเหลวไหลเข้าสู่โพรงแบบได้อย่างสมบูรณ์ การทำให้โลหะเหลวไหลเข้าสู่โพรงแบบได้อย่างราบรื่นนั้น จะต้องมีการออกแบบของโลหะเหลวที่เหมาะสม ระบบป้อนเติมของงานหล่อ (Gating System) ประกอบไปด้วยส่วนประกอบหลัก ๆ คือ แอ่งรูเท รูเท ทางวิ่งและทางเข้าโลหะเหลว ซึ่งจะต้องออกแบบให้มีความสอดคล้องกันทั้งขนาดและรูปร่าง เพื่อทำหน้าที่ให้โลหะเหลวสามารถไหลผ่านเข้าไปยังโพรงแบบหล่อได้อย่างสะดวก โดยไม่ก่อให้เกิดความเสียหายใด ๆ ขึ้นกับชิ้นงานหล่อ ดังนั้นระบบทางเข้าของงานหล่อที่ดีจะต้องทำให้เกิดการไหลแบบปั่นป่วนน้อยที่สุด (ณรงค์ศักดิ์, 2562) ผู้วิจัยจึงมีแนวคิดในการออกแบบระบบป้อนเติม (Gating System) เพื่อลดข้อบกพร่องของชิ้นงานที่เกิดจากโพรงหดตัว (Shrinkage Porosity) และลดต้นทุนด้านการผลิต

3.6 การคำนวณหาตัวแปรของระบบป้อนเติมโลหะเหลว

สำหรับขั้นตอนนี้เป็นการนำผลที่ได้จากการจำลองพฤติกรรมต่าง ๆ ของระบบป้อนเติมรูปแบบเดิมมาวิเคราะห์ในสิ่งที่ได้จากการจำลองพฤติกรรมของงานหล่อ โดยจากผลการจำลองของระบบป้อนเติมรูปแบบเดิมปรากฏว่าชิ้นงาน Body OTC Steady นั้นมีปริมาตรโพรงหดตัวที่เกิดขึ้นจำนวนมากและผู้วิจัยมีแนวคิดในการออกแบบระบบป้อนเติม (Gating System) เพื่อลดข้อบกพร่องของชิ้นงานที่เกิดจากโพรงหดตัว (Shrinkage Porosity) และลดต้นทุนด้านการผลิต ซึ่งการออกแบบระบบทางเข้า (Gating System Desing) ในการหล่อโลหะมีความสำคัญอย่างมากต่อคุณภาพของชิ้นงาน เนื่องจากการออกแบบที่เหมาะสมจะช่วยควบคุมการไหลของโลหะเหลว ลดข้อบกพร่องและเพิ่มประสิทธิภาพในการหล่อ โดยการทดลองและตัวแปรที่จะมีการปรับเปลี่ยนแสดงดังภาพที่ 3-27 และขั้นตอนการออกแบบมีดังนี้



ภาพที่ 3-27 ภาพแสดงตัวแปรที่จะมีการปรับเปลี่ยน

3.5.1 การเลือกอัตราส่วนทางเข้า (Gating Ratio) ที่เหมาะสมกับเหล็กกล้าขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่าง เช่น ชนิดของเหล็ก อุณหภูมิของโลหะเหลวและการออกแบบระบบทางเข้าเพื่อลดปัญหาต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นระหว่างการหล่อ ซึ่งโดยทั่วไปแล้วอัตราส่วนทางเข้าแบบไม่มีแรงดันที่เหมาะสมสำหรับเหล็กกล้ามักใช้อัตราส่วน 1:3:3 (Wang, Tong. et al, 2019)

3.5.2 การกำหนดพื้นที่หน้าตัดของรูเท (Sprue) ทางวิ่ง (Runner) และทางเข้า (Gate)

3.5.2.1 พื้นที่หน้าตัดรูเท (Sprue: A_S) สามารถหาได้จากสมการที่ (3-1) ดังนี้

$$\begin{aligned} \text{จากสมการ} \quad A &= \pi r^2 \\ &= \pi \times 25^2 \\ &= 1963.5 \text{ ตารางมิลลิเมตร} \end{aligned} \quad (3-1)$$

3.5.2.2 พื้นที่หน้าตัดทางวิ่ง (Runner: A_R) และทางเข้า (Gate: A_G) ใช้อัตราส่วน 1:3:3 สามารถคำนวณได้ดังนี้

พื้นที่รูเท (A_S) $1963.5 \times 1 = 1963.5$ ตารางมิลลิเมตร

พื้นที่ทางวิ่ง (A_R) $1963.5 \times 3 = 5891$ ตารางมิลลิเมตร

พื้นที่ทางเข้า (A_G) $1963.5 \times 3 = 5891$ ตารางมิลลิเมตร

3.5.2.3 คำนวณหาเวลาในการเท ได้จากสมการที่ 3-2

$$\begin{aligned} \text{จากสมการ} \quad T &= 2\sqrt{W} \\ T &= 2\sqrt{15.95} \\ T &= 7.9 \text{ วินาที} \end{aligned} \quad (3-2)$$

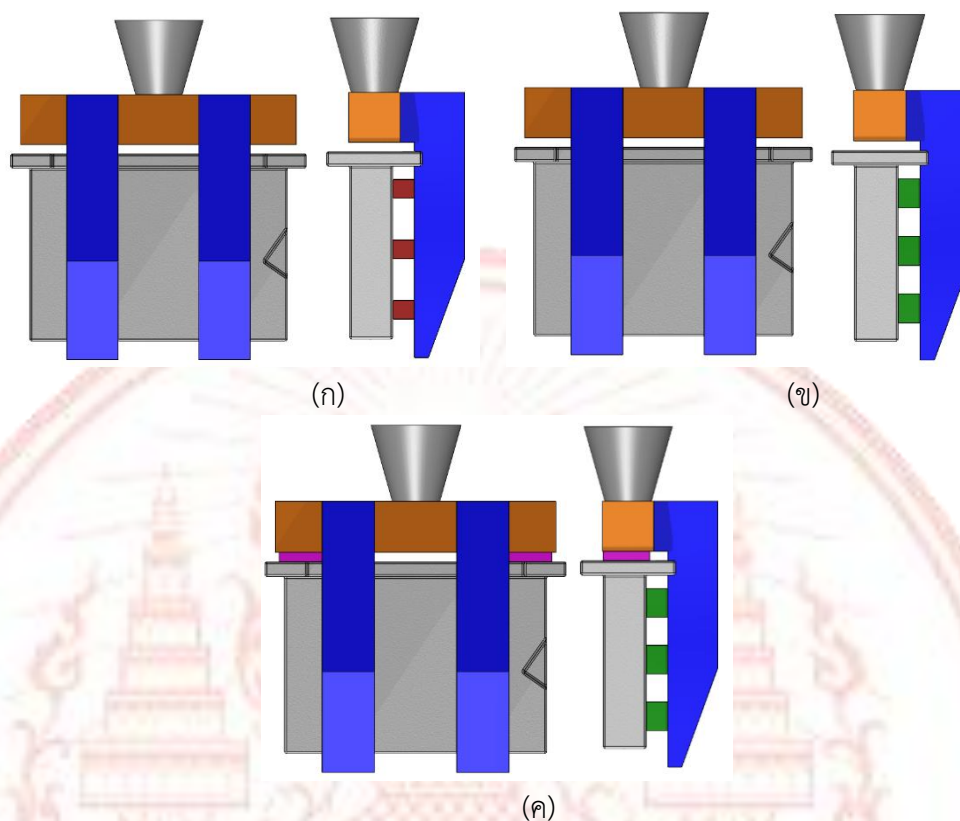
3.5.2.4 คำนวณหาความเร็วจากทฤษฎีของเบอร์นูลลีดังสมการที่ 3-3

$$\begin{aligned} \text{จากสมการ} \quad v &= \sqrt{2 \times g \times h_1} \\ v &= \sqrt{2 \times 9.81 \times 0.08} \\ v &= 1.2 \text{ เมตรต่อวินาที} \end{aligned} \quad (3-3)$$

3.5.2 แนวคิดในการออกแบบการทดลอง

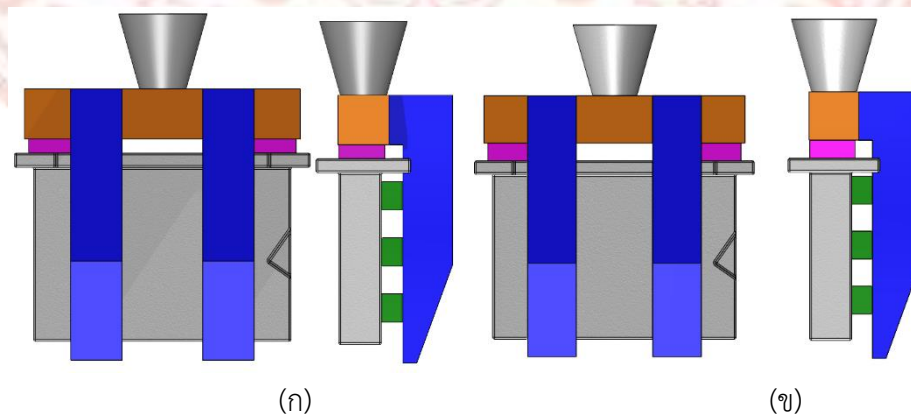
จากการคำนวณหาพื้นที่หน้าตัดตามสมการข้างต้น โดยมีแนวคิดในการออกแบบการทดลองทั้งหมด 5 ชุด ได้แก่

3.5.2.1 ชุดการทดลองที่ 1 เป็นการทดลองเกี่ยวกับการเปลี่ยนลักษณะหน้าตัดของทางเข้า ($Gate_1$) และการเพิ่มทางเข้า ($Gate_2$) จำนวน 3 เงื่อนไข ดังภาพที่ 3-28 มีแนวคิดจากทฤษฎีเบอร์นูลลีที่กล่าวว่าทางวิ่งลักษณะที่ลดขนาดหน้าตัดเป็นขั้น ๆ หรือแบบเทเปอร์จะทำให้การไหลของโลหะเหลวมีความเร็วที่เท่ากัน และจากการศึกษางานวิจัยของ (Sachin L. and Rajendra S, 2014) ได้ให้ความเห็นเกี่ยวกับลักษณะพื้นที่หน้าตัดของทางเข้า (Gate) ไว้ว่าลักษณะพื้นที่หน้าตัดที่เหมาะสมคือ สี่เหลี่ยมจัตุรัส สี่เหลี่ยมผืนผ้า และสี่เหลี่ยมคางหมู จึงนำตัวแปรเหล่านี้มาออกแบบการทดลองในแบบจำลองที่ 1 และแบบจำลองที่ 2 สำหรับแบบจำลองที่ 3 ได้มีการเพิ่มทางเข้า ($Gate_2$) เพื่อช่วยในการเติมโลหะเหลวและลดปริมาตรการเกิดโพรงหดตัว (Shrinkage Porosity) ซึ่งตัวแปรสำหรับการออกแบบแสดงในตารางที่ 3-3

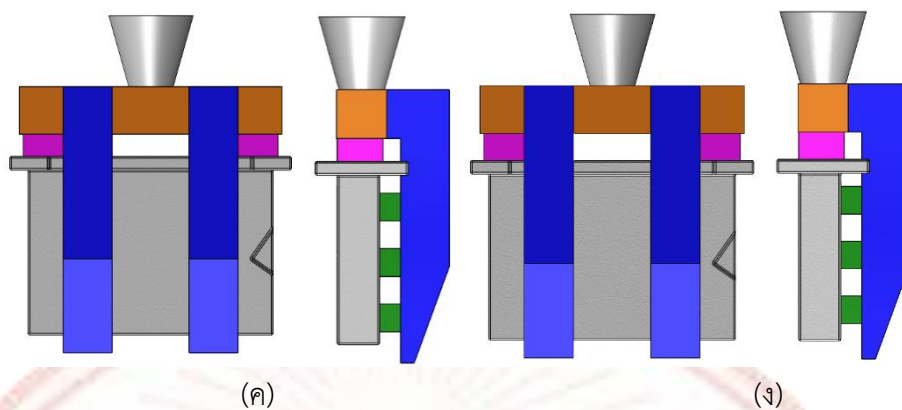


ภาพที่ 3-28 แบบจำลองระบบป้อนเต็มโลหะเหลวของชุดการทดลองที่ 1 (ก) แบบจำลองที่ 1 (ข) แบบจำลองที่ 2 (ค) แบบจำลองที่ 3

3.5.2.2 ชุดการทดลองที่ 2 เป็นการทดลองเกี่ยวกับการปรับความสูงของทางเข้า (H_{G2}) ที่ 15, 20, 25 และ 30 มิลลิเมตร จำนวน 4 เงื่อนไข ดังภาพที่ 3-29 มีแนวคิดจากการศึกษาของ (Zhao et al, 2017) ได้กล่าวว่าการเพิ่มความสูงของทางเข้าช่วยเพิ่มความเร็วในการไหลของโลหะเหลวได้อย่างสม่ำเสมอมากขึ้น ซึ่งตัวแปรสำหรับการออกแบบแสดงในตารางที่ 3-3

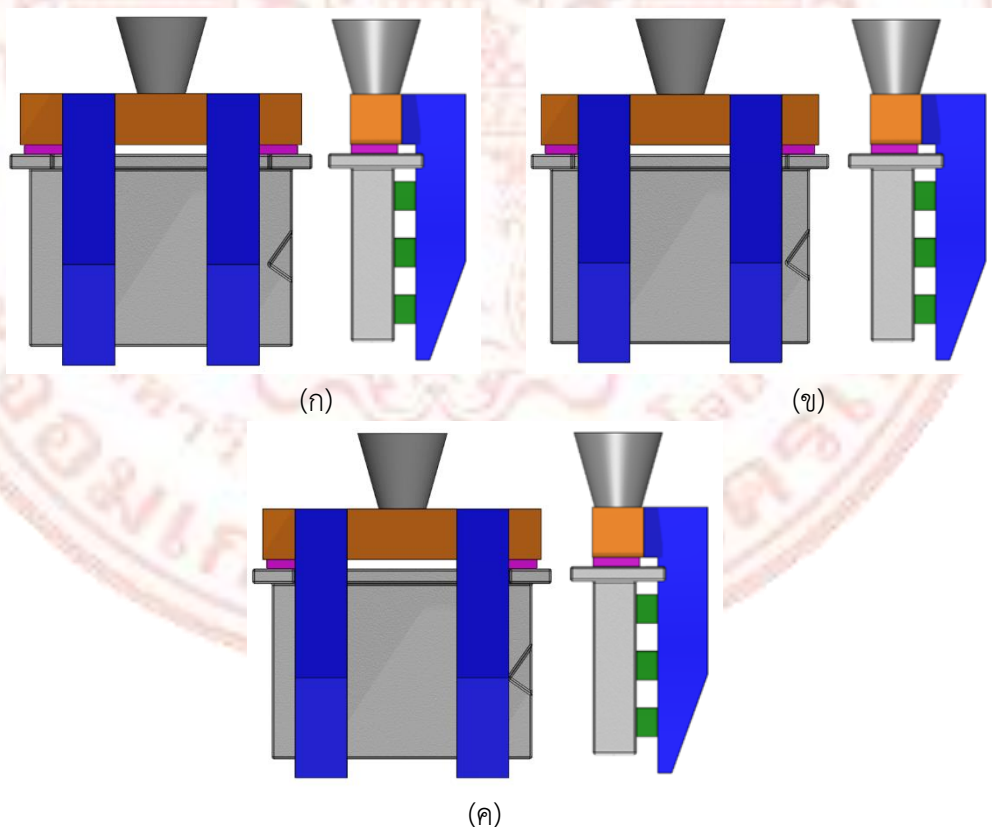


ภาพที่ 3-29 แบบจำลองระบบป้อนเต็มโลหะเหลวของชุดการทดลองที่ 2 (ก) แบบจำลองที่ 4 (ข) แบบจำลองที่ 5 (ค) แบบจำลองที่ 6 (ง) แบบจำลองที่ 7



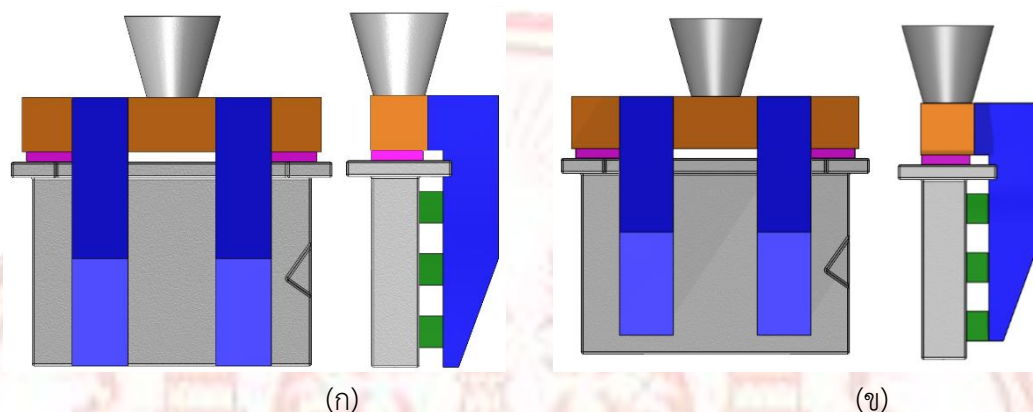
ภาพที่ 3-29 (ต่อ)

3.5.2.3 ชุดการทดลองที่ 3 เป็นการทดลองเกี่ยวกับการปรับระยะห่างของทางวิ่ง (W_R) จากศูนย์กลางชิ้นงานที่ 96.32, 106.32 และ 116.32 มิลลิเมตร จำนวน 3 เงื่อนไข ดังภาพที่ 3-30 มีแนวคิดจากการศึกษาวิจัยของ (Wang, R. et al, 2019) กล่าวว่าระยะห่างทางวิ่งมีผลสำคัญต่อการเพิ่มประสิทธิภาพการหล่อโลหะ ทำให้ชิ้นงานมีคุณภาพดีขึ้น ซึ่งตัวแปรสำหรับการออกแบบแสดงในตารางที่ 3-3



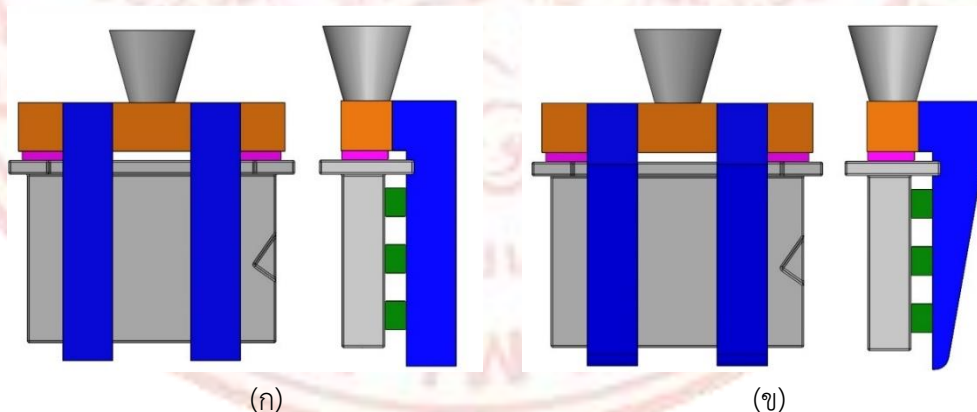
ภาพที่ 3-30 แบบจำลองระบบป้อนเติมโลหะเหลวของชุดการทดลองที่ 3 (ก) แบบจำลองที่ 8 (ข) แบบจำลองที่ 9 (ค) แบบจำลองที่ 10

3.5.2.4 ชุดการทดลองที่ 4 เป็นการทดลองเกี่ยวกับการปรับความยาวของทางวิ่ง (H_R) ที่ 264.85 และ 245.65 มิลลิเมตร จำนวน 2 เงื่อนไข ดังภาพที่ 3-31 มีแนวคิดจากงานวิจัยของ (Smith, J., and Gupta, R, 2020) กล่าวว่าการลดความยาวของทางวิ่งสามารถช่วยเพิ่มความเร็วในการผลิตชิ้นงาน เนื่องจากโลหะเหลวจะไหลเข้าแม่พิมพ์ได้เร็วขึ้นและลดเวลาในการแข็งตัวของชิ้นงาน ซึ่งตัวแปรสำหรับการออกแบบแสดงในตารางที่ 3-3

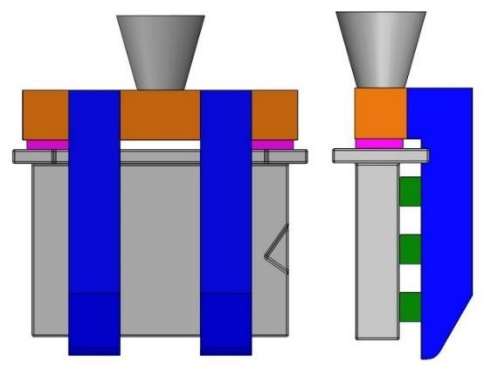


ภาพที่ 3-31 แบบจำลองระบบป้อนเติมโลหะเหลวของชุดการทดลองที่ 4 (ก) แบบจำลองที่ 11 (ข) แบบจำลองที่ 12

3.5.2.5 ชุดการทดลองที่ 5 เป็นการทดลองเกี่ยวกับการปรับองศาของทางวิ่ง (D_R) ที่ 0, 10 และ 30 องศา จำนวน 3 เงื่อนไข ดังภาพที่ 3-32 มีแนวคิดจากงานวิจัย (Lee, S. et al, 2016) กล่าวว่าการเปลี่ยนแปลงมุมทางวิ่งที่มีความเฉียงมากกว่าจะช่วยให้โลหะเหลวไหลได้อย่างสะดวกและรวดเร็วขึ้น ซึ่งตัวแปรสำหรับการออกแบบแสดงในตารางที่ 3-3



ภาพที่ 3-32 แบบจำลองระบบป้อนเติมโลหะเหลวของชุดการทดลองที่ 5 (ก) แบบจำลองที่ 13 (ข) แบบจำลองที่ 14 (ค) แบบจำลองที่ 15



(ค)

ภาพที่ 3-32 (ต่อ)

ตารางที่ 3-3 สรุปตัวแปรสำหรับการออกแบบการทดลองทั้งหมด 15 การทดลอง โดยชุดการทดลองที่ 1 คือการเปลี่ยนลักษณะหน้าตัดของทางเข้า ($Gate_1$) และการเพิ่มทางเข้า ($Gate_2$) ชุดการทดลองที่ 2 คือการปรับความสูงของทางเข้า (H_{G2}) ตั้งแต่ 15 ถึง 30 มิลลิเมตร ชุดการทดลองที่ 3 คือการปรับระยะห่างของทางวิ่ง (W_R) จากศูนย์กลางชิ้นงานตั้งแต่ 96.32 ถึง 116.32 มิลลิเมตร ชุดการทดลองที่ 4 คือการปรับความยาวของทางวิ่ง (H_R) ที่ 264.45 และ 245.65 มิลลิเมตร และชุดการทดลองที่ 5 คือการปรับองศาของทางวิ่ง (D_R) ที่ 0, 10 และ 30 องศา

ตารางที่ 3-3 ตัวแปรที่ใช้ในการออกแบบการทดลองทั้ง 15 การทดลอง

ตัวแปร (หน่วย)												
แบบจำลอง	ฐานรูปเท (Sprue Base)		ทางวิ่ง (Runner)					ทางเข้า (Gate ₁)		ทางเข้า (Gate ₂)		
	จำนวน/หน้าตัด	A _B (mm ²)	จำนวน/หน้าตัด	A _R (mm ²)	W _R (mm ²)	H _R (mm ²)	D _R (mm ²)	จำนวน/หน้าตัด	G ₁ (mm ²)	จำนวน/หน้าตัด	G ₂ (mm ²)	H _{G2} (mm ²)
1	1/ผืนผ้า	55x53.55x295	2/ผืนผ้า	55x53.55	86.32	284.85	20	6/คางหมู	48.2x50x20	-	-	-
2	1/ผืนผ้า	55x53.55x295	2/ผืนผ้า	55x53.55	86.32	284.85	20	6/ผืนผ้า	32x30.7x23	-	-	-
3	1/ผืนผ้า	55x53.55x295	2/ผืนผ้า	55x53.55	86.32	284.85	20	6/ผืนผ้า	32x30.7x23	2/จัดรัส	50x50	10
4	1/ผืนผ้า	55x53.55x295	2/ผืนผ้า	55x53.55	86.32	284.85	20	6/ผืนผ้า	32x30.7x23	2/จัดรัส	50x50	15
5	1/ผืนผ้า	55x53.55x295	2/ผืนผ้า	55x53.55	86.32	284.85	20	6/ผืนผ้า	32x30.7x23	2/จัดรัส	50x50	20
6	1/ผืนผ้า	55x53.55x295	2/ผืนผ้า	55x53.55	86.32	284.85	20	6/ผืนผ้า	32x30.7x23	2/จัดรัส	50x50	25
7	1/ผืนผ้า	55x53.55x295	2/ผืนผ้า	55x53.55	86.32	284.85	20	6/ผืนผ้า	32x30.7x23	2/จัดรัส	50x50	30
8	1/ผืนผ้า	55x53.55x295	2/ผืนผ้า	55x53.55	96.32	284.85	20	6/ผืนผ้า	32x30.7x23	2/จัดรัส	50x50	10
9	1/ผืนผ้า	55x53.55x295	2/ผืนผ้า	55x53.55	106.32	284.85	20	6/ผืนผ้า	32x30.7x23	2/จัดรัส	50x50	10
10	1/ผืนผ้า	55x53.55x295	2/ผืนผ้า	55x53.55	116.32	284.85	20	6/ผืนผ้า	32x30.7x23	2/จัดรัส	50x50	10
11	1/ผืนผ้า	55x53.55x295	2/ผืนผ้า	55x53.55	86.32	264.85	20	6/ผืนผ้า	32x30.7x23	2/จัดรัส	50x50	10
12	1/ผืนผ้า	55x53.55x295	2/ผืนผ้า	55x53.55	86.32	245.65	20	6/ผืนผ้า	32x30.7x23	2/จัดรัส	50x50	10
13	1/ผืนผ้า	55x53.55x295	2/ผืนผ้า	55x53.55	86.32	284.85	0	6/ผืนผ้า	32x30.7x23	2/จัดรัส	50x50	10
14	1/ผืนผ้า	55x53.55x295	2/ผืนผ้า	55x53.55	86.32	284.85	10	6/ผืนผ้า	32x30.7x23	2/จัดรัส	50x50	10
15	1/ผืนผ้า	55x53.55x295	2/ผืนผ้า	55x53.55	86.32	284.85	30	6/ผืนผ้า	32x30.7x23	2/จัดรัส	50x50	10

ซึ่งเงื่อนไขที่ใช้ในการทดลองทั้งหมดนี้จะกำหนดตัวแปรในกระบวนการหล่ออินเวสต์เมนต์เพื่อป้อนคำสั่งในโปรแกรม Cast-Designer ได้ดังนี้ เวลาในการเท 7.9 วินาที ความเร็วของโลหะเหลว 1.2 เมตรต่อวินาที วัสดุที่ใช้ในการเทหล่อ AISI 4140 วัสดุที่ใช้ทำแม่พิมพ์ ซิลิกา (Silica) อุณหภูมิของโลหะเหลว 1670 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิแม่พิมพ์ 850 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นค่าที่ใช้เหมือนกันทั้งหมด 15 การทดลอง โดยผลการวิเคราะห์ของการจำลองพฤติกรรมงานหล่อในแต่ละแบบจำลองที่ทำการพิจารณาได้แก่ ลักษณะการไหล (Fluid Fraction) เวลาในการเติมเต็ม (Fill Time) ลักษณะการแข็งตัว (Solidification) ลักษณะของการเกิดโพรงหดตัว (Shrinkage Porosity) เพื่อทำนายลักษณะการเกิดความผิดพลาดที่เกิดขึ้นได้ของการทดลองทั้ง 15 การทดลอง และจะนำผลการวิเคราะห์ไปอธิบายและสรุปไว้ในบทที่ 4 ต่อไป



บทที่ 4

ผลการดำเนินการวิจัย

การดำเนินงานและออกแบบการทดลองเพื่อวิเคราะห์ตัวแปรและพฤติกรรมของกระบวนการหล่ออินเวสต์เมนต์ (Investment Casting) เพื่อนำผลที่ได้มาทำการวิเคราะห์หาสาเหตุต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นในกระบวนการหล่อ โดยวิเคราะห์เปรียบเทียบผลด้วยลักษณะการไหล (Fluid Fraction) เวลาในการเติมเต็ม (Fill Time) ลักษณะการแข็งตัว (Solidification) ลักษณะของการเกิดโพรงหดตัว (Shrinkage Porosity) ซึ่งได้ผลจากการดำเนินงานตามขั้นตอนดังต่อไปนี้

- 4.1 ผลของการจำลองพฤติกรรมในการหล่อ
- 4.2 การเปรียบเทียบผลการทดลองจากการจำลองด้วยโปรแกรม Cast-Designer
- 4.3 ผลการทดลองเทหล่อชิ้นงานจริง
- 4.4 การเปรียบเทียบผลการจำลองสถานการณ์ของระบบป้อนเติมรูปแบบเดิมและรูปแบบใหม่
- 4.5 ผลการทดลองตัวแปรอุณหภูมิการเทเพื่อแก้ไขปัญหาการลดข้อบกพร่องของโพรงหดตัว
- 4.6 ผลการทดลองการเกิดโพรงหดตัวที่ชิ้นงานและระบบป้อนเติม

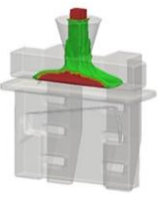
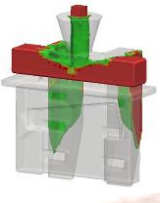
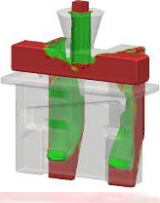
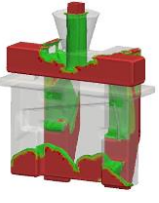
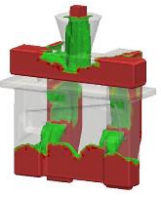
4.1 ผลของการจำลองพฤติกรรมในการหล่อ

ผลการจำลองพฤติกรรมที่ได้จากโปรแกรม Cast-Designer ผลลัพธ์ที่ได้จากโปรแกรมมีดังนี้ ลักษณะการไหล (Fluid Fraction) เวลาในการเติมเต็ม (Fill Time) ลักษณะการแข็งตัว (Solidification) ลักษณะของการเกิดโพรงหดตัว (Shrinkage Porosity)

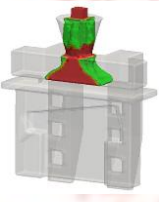
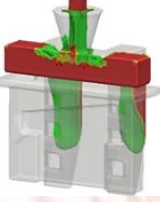
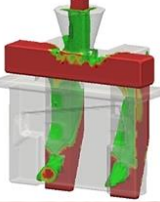
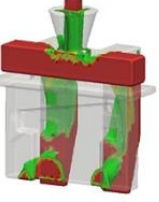
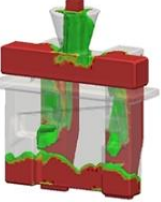
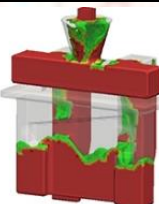
4.1.1 ชุดการทดลองที่ 1 โดยการเปลี่ยนลักษณะหน้าตัดของทางเข้า ($Gate_1$) และการเพิ่มทางเข้า ($Gate_2$)

- ลักษณะการไหล (Fluid Fraction) และเวลาในการเติมเต็ม (Fill Time) ในการพิจารณานั้น จะพิจารณาการป้อนเติมในปริมาณต่าง ๆ ของทั้ง 3 แบบจำลอง พบว่าลักษณะการไหลของแบบจำลองที่ 1 ที่หน้าตัดทางเข้าเป็นสี่เหลี่ยมคางหมูและแบบจำลองที่ 2 ที่หน้าตัดทางเข้าเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้ามีลักษณะการไหลเหมือนกันคือไหลเติมเต็มจากด้านล่างขึ้นด้านบนของชิ้นงาน แต่แบบจำลองที่ 1 มีการไหลที่ปั่นป่วนมากกว่าแบบจำลองที่ 2 สังเกตในช่วง 40-80 เปอร์เซ็นต์ และในส่วน of แบบจำลองที่ 3 ที่มีหน้าตัดทางเข้าเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้ามีลักษณะการไหลจากด้านบนลงมาทางด้านข้างของชิ้นงานแล้วค่อย ๆ ไหลเติมเต็มจากด้านหลังจนเต็มชิ้นงาน มีการไหลปั่นป่วนปานกลางในช่วง 40-70 เปอร์เซ็นต์ เนื่องจากมี การเพิ่มทางเข้า ($Gate_2$) แต่มีเวลาในการเติมเต็มเร็วกว่าแบบจำลองอื่น ๆ ดังตารางที่ 4-1 ถึง 4-3 แสดงลำดับการไหลเข้าโพรงแบบของโลหะเหลวโดยทั้ง 3 แบบจำลอง ใช้เวลาในการเติมเต็มดังตารางที่ 4-4

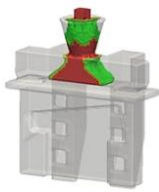
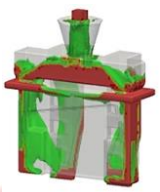
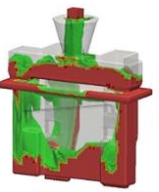
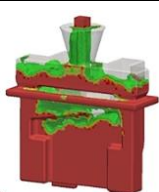
ตารางที่ 4-1 ลักษณะการไหลของแบบจำลองที่ 1

				
10% / 0.373 วินาที	20% / 1.473 วินาที	30% / 2.210 วินาที	40% / 2.946 วินาที	50% / 3.683 วินาที
				
60% / 4.419 วินาที	70% / 5.156 วินาที	80% / 5.892 วินาที	90% / 6.629 วินาที	100% / 7.765 วินาที

ตารางที่ 4-2 ลักษณะการไหลของแบบจำลองที่ 2

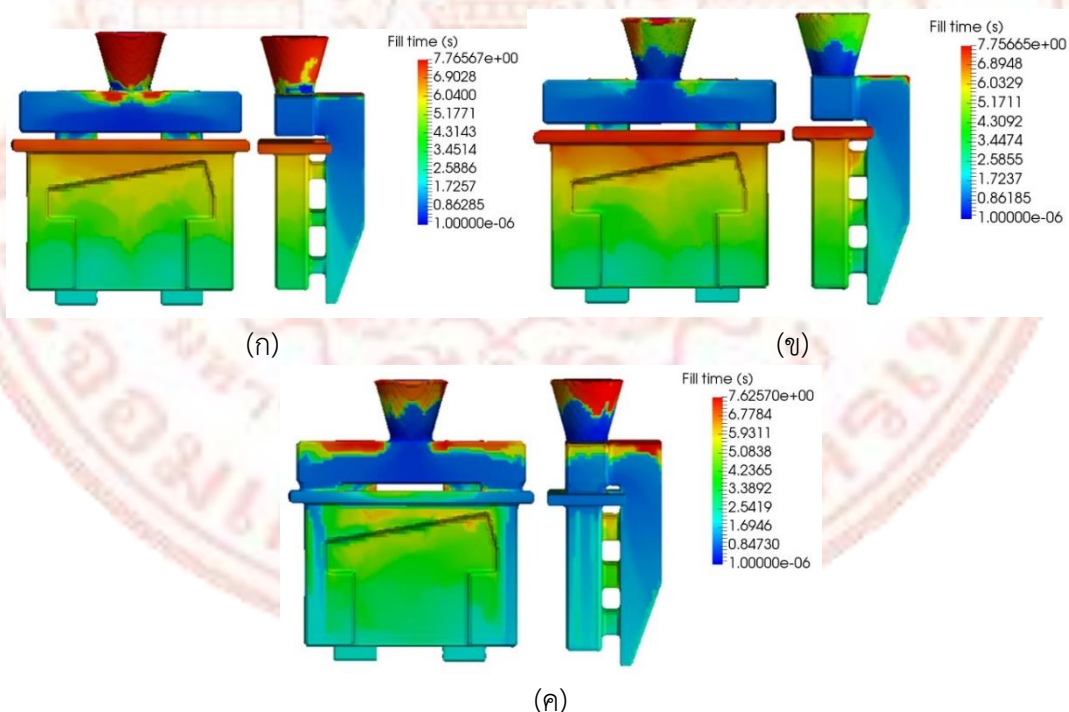
				
10% / 0.765 วินาที	20% / 1.529 วินาที	30% / 2.294 วินาที	40% / 3.059 วินาที	50% / 3.824 วินาที
				
60% / 4.588 วินาที	70% / 5.353 วินาที	80% / 6.118 วินาที	90% / 6.882 วินาที	100% / 7.756 วินาที

ตารางที่ 4-3 ลักษณะการไหลของแบบจำลองที่ 3

				
10% / 0.687 วินาที	20% / 1.374 วินาที	30% / 2.061 วินาที	40% / 2.748 วินาที	50% / 3.435 วินาที
				
60% / 4.122 วินาที	70% / 4.809 วินาที	80% / 5.496 วินาที	90% / 6.183 วินาที	100% / 7.625 วินาที

ตารางที่ 4-4 เวลาที่ใช้ในการเติมเต็มของทั้ง 3 แบบจำลอง

ผลการจำลอง	แบบจำลอง	1	2	3
เวลาในการเติมเต็ม (วินาที)		7.765	7.756	7.625



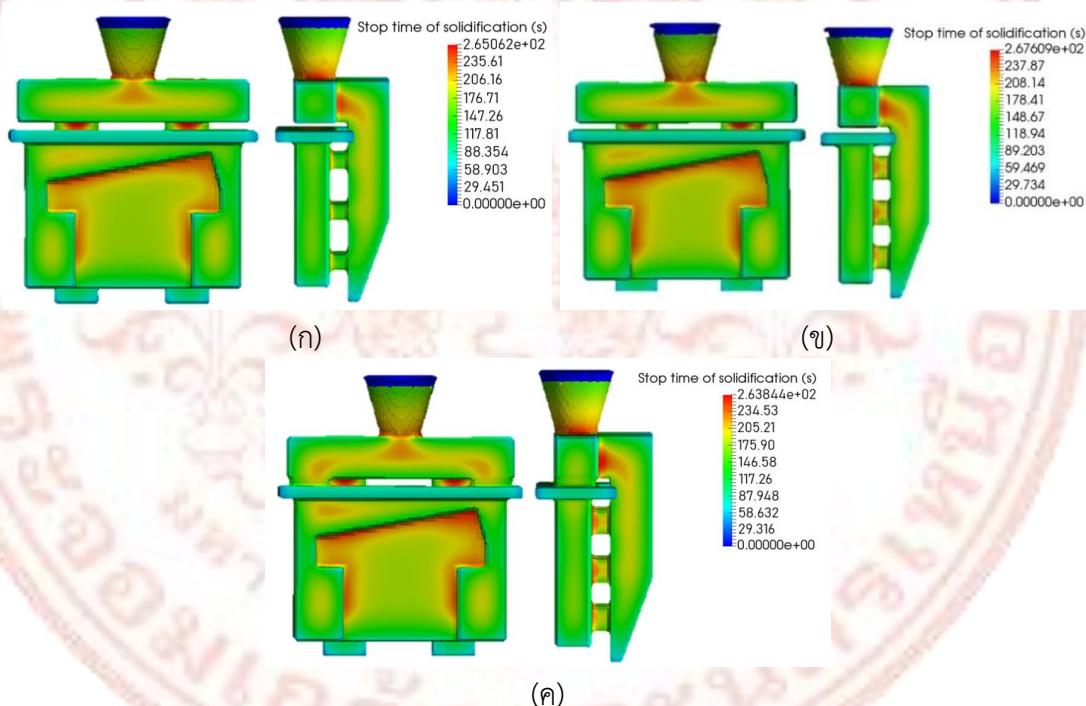
ภาพที่ 4-1 ผลการจำลองเวลาในการเติมเต็ม (ก) แบบจำลองที่ 1 (ข) แบบจำลองที่ 2 (ค) แบบจำลองที่ 3

ผลจากการจำลองด้วยโปรแกรม Cast-Designer สามารถจำลองเวลาในการเต็มเต็มของโลหะเหลว (Fill Time) ของแบบจำลองทั้ง 3 แบบ พบว่าแบบจำลองที่ 3 ใช้เวลาน้อยที่สุดคือ 7.625 วินาที ตามด้วยแบบจำลองที่ 2 ใช้เวลา 7.756 วินาที และแบบจำลองที่ 1 ใช้เวลามากที่สุดคือ 7.765 วินาที

- ลักษณะการแข็งตัว (Solidification) พิจารณาลักษณะการแข็งตัวจะพิจารณาการแข็งตัวในช่วงเวลาสุดท้ายของทั้ง 3 แบบ โดยผลในการจำลองปรากฏว่าบริเวณที่แข็งตัวช้าที่สุดคือบริเวณร่องตรงกลางชิ้นงาน ซึ่งเป็นตำแหน่งเดียวกันกับผลในการจำลองของระบบป้อนเติมแบบเดิม โดยลักษณะการแข็งตัวสามารถบอกถึงตำแหน่งที่แข็งตัวล่าช้าที่สุดท้ายและยังสามารถทำนายถึงจุดที่จะเกิดโพรงหดตัวที่ชิ้นงานได้อีกด้วย ดังภาพที่ 4-2 โดยทั้ง 3 แบบจำลองใช้เวลาในการแข็งตัวดังตารางที่ 4-5

ตารางที่ 4-5 เวลาที่ใช้ในการแข็งตัวของทั้ง 3 แบบจำลอง

ผลการจำลอง \ แบบจำลอง	1	2	3
เวลาในการแข็งตัว (วินาที)	265.062	267.609	263.844



ภาพที่ 4-2 ผลการจำลองการแข็งตัว (ก) แบบจำลองที่ 1 (ข) แบบจำลองที่ 2 (ค) แบบจำลองที่ 3

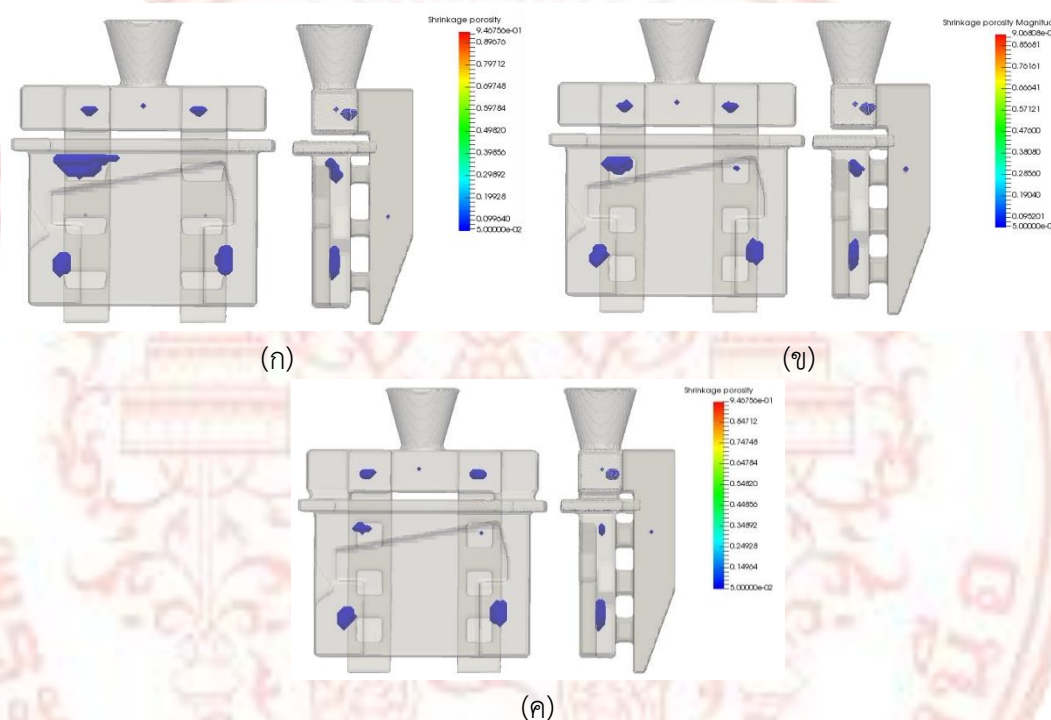
ผลจากการจำลองด้วยโปรแกรม Cast-Designer สามารถจำลองเวลาในการแข็งตัว (Solidification Time) ของแบบจำลองทั้ง 3 แบบ พบว่าแบบจำลองที่ 3 ใช้เวลาน้อยที่สุดคือ 263.844 วินาที ตามด้วยแบบจำลองที่ 1 ใช้เวลา 265.062 วินาที และแบบจำลองที่ 2 ใช้เวลามากที่สุดคือ 267.609 วินาที

- ลักษณะของการเกิดโพรงหดตัว (Shrinkage Porosity) การพิจารณาในเงื่อนไขนี้จะสังเกตบริเวณที่มีการเกิดโพรงหดตัวของแบบจำลองทั้ง 3 แบบ โดยในการจำลองปรากฏว่าชิ้นงานมีปริมาตร

โพรงหดตัวในเนื้อชิ้นงานและบริเวณทางวิ่ง (Runner) ดังภาพที่ 4-3 โดยทั้ง 3 แบบจำลอง มีปริมาณการเกิดโพรงหดตัวดังตารางที่ 4-6

ตารางที่ 4-6 ปริมาณการเกิดโพรงหดตัวของชุดการทดลองที่ 1

ผลการจำลอง \ แบบจำลอง	1	2	3
ปริมาณการเกิดโพรงหดตัว (ลูกบาศก์เซนติเมตร)	29.60	19.08	14.83



ภาพที่ 4-3 ผลการจำลองการเกิดโพรงหดตัว (ก) แบบจำลองที่ 1 (ข) แบบจำลองที่ 2 (ค) แบบจำลองที่ 3

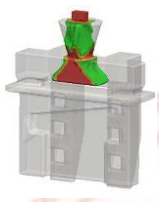
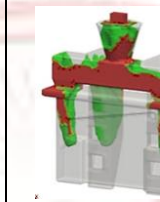
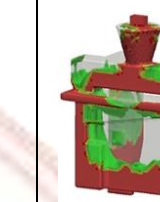
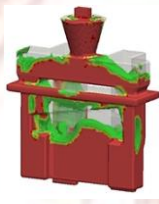
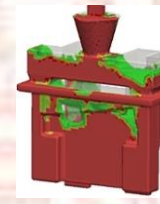
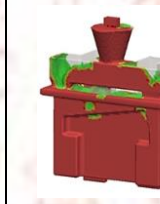
ผลจากการจำลองด้วยโปรแกรม Cast-Designer สามารถจำลองการเกิดโพรงหดตัว (Shrinkage Porosity) ของแบบจำลองทั้ง 3 แบบจำลอง พบว่าแบบจำลองที่ 3 ที่มีหน้าตัดทางเข้า (Gate₁) เป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้าและเพิ่มทางเข้า (Gate₂) หน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส มีปริมาณโพรงหดตัวน้อยสุดคือ 14.83 ลูกบาศก์เซนติเมตร ตามด้วยแบบจำลองที่ 2 ที่มีหน้าตัดทางเข้า (Gate₁) เป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้า มีปริมาณโพรงหดตัว 19.08 ลูกบาศก์เซนติเมตร และแบบจำลองที่ 1 ที่มีหน้าตัดทางเข้า (Gate₁) เป็นสี่เหลี่ยมคางหมู มีปริมาณโพรงหดตัวมากที่สุดคือ 29.60 ลูกบาศก์เซนติเมตร

4.1.2 ชุดการทดลองที่ 2 โดยมีการปรับความสูงของพื้นที่ทางเข้า (H_{G2}) จาก 15 มิลลิเมตร เป็น 30 มิลลิเมตร จำนวน 4 เงื่อนไข

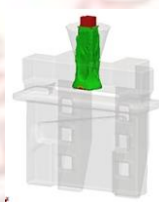
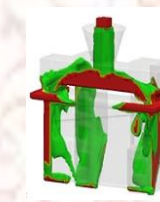
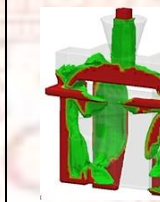
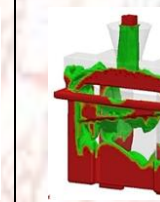
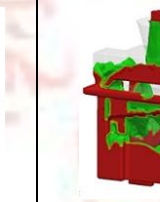
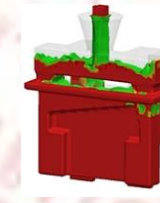
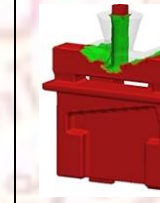
- ลักษณะการไหล (Fluid Fraction) และเวลาในการเติมเต็ม (Fill Time) ในการพิจารณานั้น จะพิจารณาการป้อนเติมในปริมาณต่าง ๆ ของทั้ง 4 แบบจำลอง พบว่าลักษณะการไหลของแบบจำลองที่ 4 ถึง 7 จะมีลักษณะการไหลเหมือนกันคือไหลจากด้านบนลงมาทางด้านข้างของชิ้นงาน

แล้วค่อย ๆ ไหลเติมเต็มจากด้านหลังจนเต็มชิ้นงาน เมื่อเพิ่มความสูงของทางเข้า (H_{G2}) ลักษณะการไหลของทั้ง 4 แบบจำลองไม่มีความแตกต่างกันแต่ทำให้ความเร็วในการไหลของโลหะเหลวค่อนข้างสม่ำเสมอมากขึ้นเกิดการไหลแบบปั่นป่วนน้อยลง ดังตารางที่ 4-7 ถึง 4-10 แสดงลำดับการไหลเข้าโพรงแบบของโลหะเหลว และใช้เวลาในการเติมเต็มใกล้เคียงกันดังตารางที่ 4-12

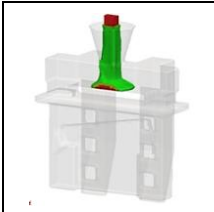
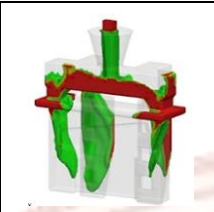
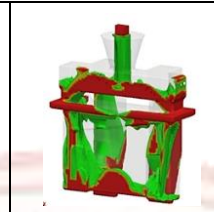
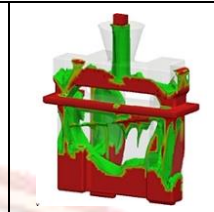
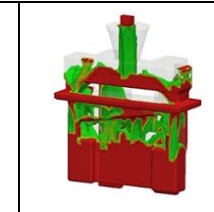
ตารางที่ 4-7 ลักษณะการไหลของแบบจำลองที่ 4

				
10% / 0.753 วินาที	20% / 1.505 วินาที	30% / 2.258 วินาที	40% / 3.010 วินาที	50% / 3.763 วินาที
				
60% / 4.515 วินาที	70% / 5.268 วินาที	80% / 6.020 วินาที	90% / 6.773 วินาที	100% / 7.619 วินาที

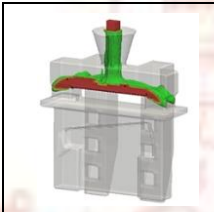
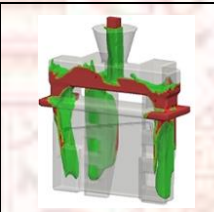
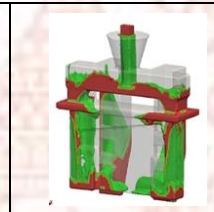
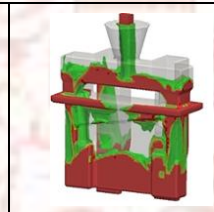
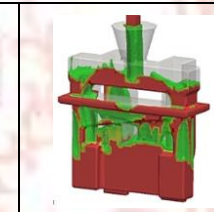
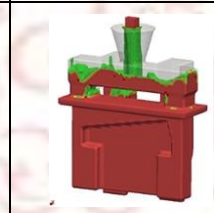
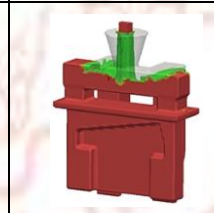
ตารางที่ 4-8 ลักษณะการไหลของแบบจำลองที่ 5

				
10% / 0.763 วินาที	20% / 1.525 วินาที	30% / 2.288 วินาที	40% / 3.051 วินาที	50% / 3.814 วินาที
				
60% / 4.576 วินาที	70% / 5.339 วินาที	80% / 6.102 วินาที	90% / 6.864 วินาที	100% / 7.608 วินาที

ตารางที่ 4-9 ลักษณะการไหลของแบบจำลองที่ 6

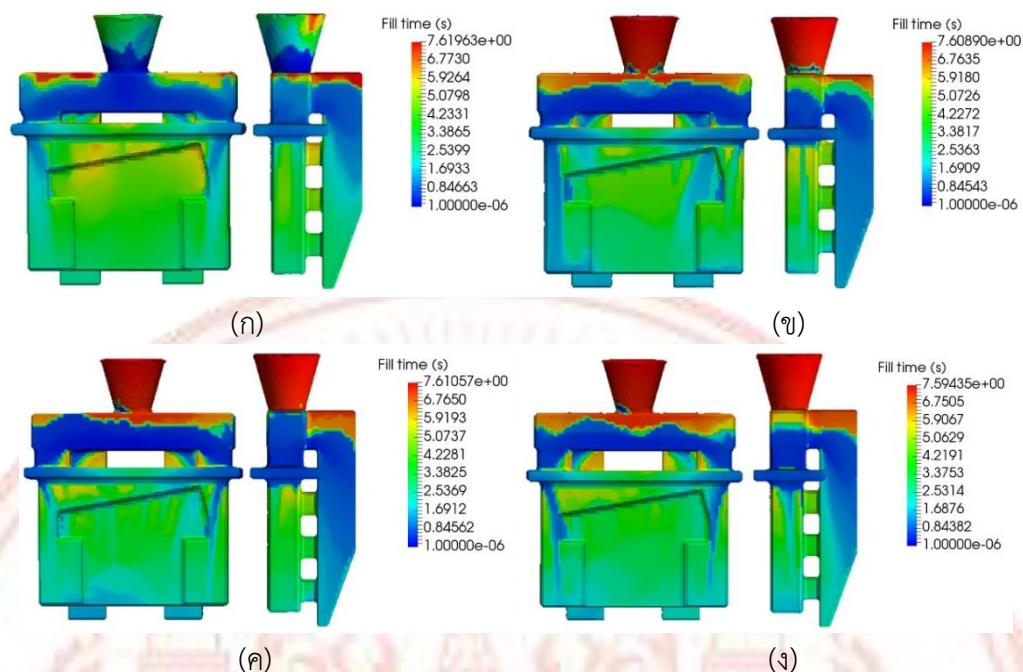
				
10% / 0.770 วินาที	20% / 1.539 วินาที	30% / 2.309 วินาที	40% / 3.078 วินาที	50% / 3.848 วินาที
				
60% / 4.618 วินาที	70% / 5.387 วินาที	80% / 6.157 วินาที	90% / 6.926 วินาที	100% / 7.610 วินาที

ตารางที่ 4-10 ลักษณะการไหลของแบบจำลองที่ 7

				
10% / 0.779 วินาที	20% / 1.558 วินาที	30% / 2.336 วินาที	40% / 3.115 วินาที	50% / 3.894 วินาที
				
60% / 4.673 วินาที	70% / 5.452 วินาที	80% / 6.230 วินาที	90% / 7.009 วินาที	100% / 7.594 วินาที

ตารางที่ 4-11 เวลาที่ใช้ในการเติมเต็มของชุดการทดลองที่ 2

ผลการจำลอง แบบจำลอง	4	5	6	7
เวลาในการเติมเต็ม (วินาที)	7.619	7.608	7.610	7.594



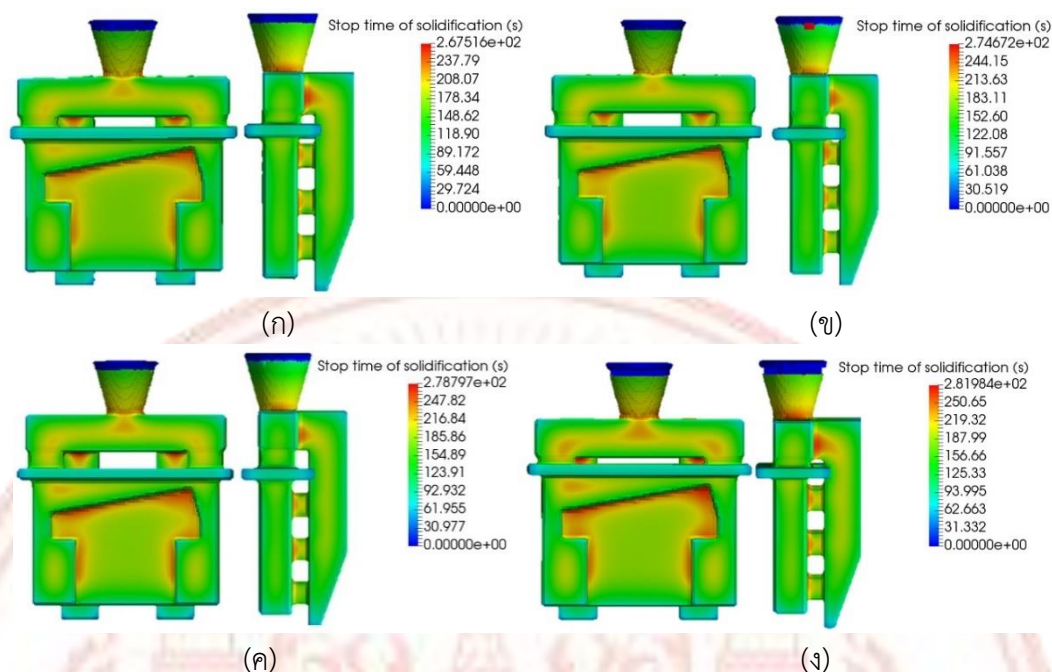
ภาพที่ 4-4 ผลการจำลองเวลาในการเติมเต็ม (ก) แบบจำลองที่ 4 (ข) แบบจำลองที่ 5 (ค) แบบจำลองที่ 6 (ง) แบบจำลองที่ 7

ผลจากการจำลองด้วยโปรแกรม Cast-Designer สามารถจำลองเวลาในการเติมเต็มของโลหะเหลว (Fill Time) ของแบบจำลองทั้ง 4 แบบจำลอง พบว่าแบบจำลองที่ 7 ที่มีระยะความสูง 30 มิลลิเมตร ใช้เวลาน้อยที่สุดคือ 7.594 วินาที ตามด้วยแบบจำลองที่ 5 ที่มีระยะความสูง 20 มิลลิเมตร แบบจำลองที่ 6 ที่มีระยะความสูง 25 มิลลิเมตร โดยใช้เวลา 7.608 วินาที 7.610 วินาที ตามลำดับ และแบบจำลองที่ 4 ที่มีระยะความสูง 15 มิลลิเมตร ใช้เวลามากที่สุดคือ 7.619 วินาที

- ลักษณะการแข็งตัว (Solidification) พิจารณาลักษณะการแข็งตัวจะพิจารณาจากการแข็งตัวในช่วงเวลาสุดท้ายของทั้ง 4 แบบ ปรากฏว่าบริเวณที่แข็งตัวช้าที่สุดคือบริเวณร่องตรงกลางชิ้นงาน ซึ่งลักษณะการแข็งตัวสามารถบอกถึงตำแหน่งที่แข็งตัวล่าช้าที่สุดท้าย และยังสามารถทำนายถึงจุดที่จะเกิดโพรงหดตัวที่ชิ้นงานได้อีกด้วย ดังภาพที่ 4-5 โดยทั้ง 4 แบบจำลองใช้เวลาในการแข็งตัวดังตารางที่ 4-12

ตารางที่ 4-12 เวลาที่ใช้ในการแข็งตัวของชุดการทดลองที่ 2

ผลการจำลอง \ แบบจำลอง	4	5	6	7
เวลาในการแข็งตัว (วินาที)	267.516	274.672	278.797	281.984



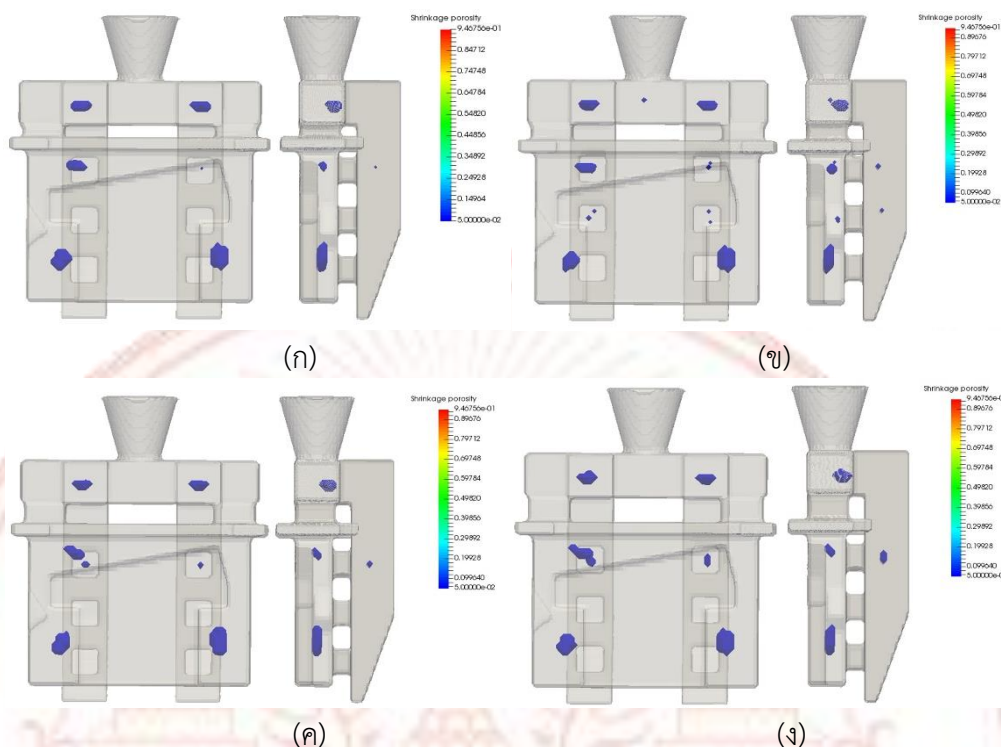
ภาพที่ 4-5 ผลการจำลองการแข็งตัว (ก) แบบจำลองที่ 4 (ข) แบบจำลองที่ 5 (ค) แบบจำลองที่ 6 (ง) แบบจำลองที่ 7

ผลจากการจำลองด้วยโปรแกรม Cast-Designer สามารถจำลองเวลาในการแข็งตัว (Solidification Time) ของแบบจำลองทั้ง 4 แบบ พบว่าแบบจำลองที่ 4 ที่มีระยะความสูง 15 มิลลิเมตร ใช้เวลาน้อยที่สุดคือ 267.516 วินาที ตามด้วยแบบจำลองที่ 5 ที่มีระยะความสูง 20 มิลลิเมตร แบบจำลองที่ 6 ที่มีระยะความสูง 25 มิลลิเมตร โดยใช้เวลา 274.672 วินาที 278.797 วินาที ตามลำดับ และแบบจำลองที่ 7 ที่มีระยะความสูง 30 มิลลิเมตร ใช้เวลามากที่สุดคือ 281.984 วินาที

- ลักษณะการเกิดโพรงหดตัว (Shrinkage Porosity) การพิจารณาในเงื่อนไขจะสังเกตบริเวณที่มีการเกิดโพรงหดตัวของแบบจำลองทั้ง 4 แบบ ปรากฏว่าชิ้นงานมีปริมาตรโพรงหดตัวในเนื้อชิ้นงาน และบริเวณทางวิ่ง (Runner) ดังภาพที่ 4-6 โดยทั้ง 4 แบบจำลองมีปริมาตรการเกิดโพรงหดตัวดังตารางที่ 4-13

ตารางที่ 4-13 ปริมาตรการเกิดโพรงหดตัวของชุดการทดลองที่ 2

ผลการจำลอง แบบจำลอง	4	5	6	7
ปริมาตรการเกิดโพรงหดตัว (ลูกบาศก์เซนติเมตร)	15.40	17.19	16.65	17.04



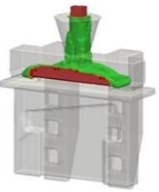
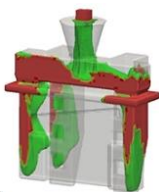
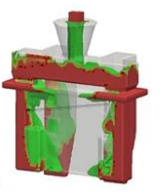
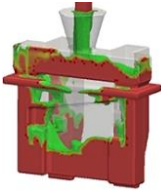
ภาพที่ 4-6 ผลการจำลองการเกิดโพรงหดตัว (ก) แบบจำลองที่ 4 (ข) แบบจำลองที่ 5 (ค) แบบจำลองที่ 6 (ง) แบบจำลองที่ 7

ผลจากการจำลองด้วยโปรแกรม Cast-Designer สามารถจำลองปริมาตรการเกิดโพรงหดตัว (Shrinkage Porosity) ของแบบจำลองทั้ง 4 แบบ พบว่าแบบจำลองที่ 4 ที่มีระยะความสูง 15 มิลลิเมตร มีปริมาตรโพรงหดตัวน้อยสุดคือ 15.40 ลูกบาศก์เซนติเมตร ตามด้วยแบบจำลองที่ 6 ที่มีระยะความสูง 25 มิลลิเมตร แบบจำลองที่ 7 ที่มีระยะความสูง 30 มิลลิเมตร มีปริมาตรโพรงหดตัว 16.65 ลูกบาศก์เซนติเมตร 17.04 ลูกบาศก์เซนติเมตร ตามลำดับ และแบบจำลองที่ 5 ที่มีระยะความสูง 20 มิลลิเมตร มีปริมาตรโพรงหดตัวมากที่สุดคือ 17.19 ลูกบาศก์เซนติเมตร

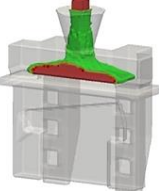
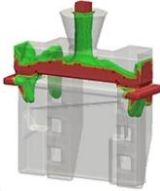
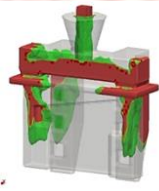
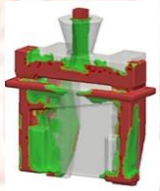
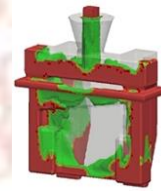
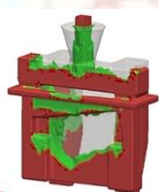
4.1.3 ชุดการทดลองที่ 3 โดยมีการปรับระยะห่างของทางวิ่ง (W_R) จากศูนย์กลางชิ้นงานตั้งแต่ 96.32 ถึง 116.32 มิลลิเมตร จำนวน 3 เงื่อนไข

- ลักษณะการไหล (Fluid Fraction) และเวลาในการเติมเต็ม (Fill Time) ในการพิจารณานั้น จะพิจารณาการป้อนเติมในปริมาณต่าง ๆ ของทั้ง 3 แบบจำลอง พบว่ามีลักษณะการไหลเหมือนกัน คือไหลจากด้านบนลงมาทางด้านข้างของชิ้นงานแล้วค่อย ๆ ไหลเติมเต็มจากด้านหลังจนเต็มชิ้นงาน เมื่อเพิ่มระยะห่างของทางวิ่ง (W_R) ลักษณะการไหลของทั้ง 3 แบบจำลองไม่มีความแตกต่างกัน ความเร็วในการไหลของโลหะเหลวค่อนข้างสม่ำเสมอและทั้ง 3 แบบจำลองเกิดการไหลแบบปั่นป่วนค่อนข้างน้อยดังตารางที่ 4-14 ถึง 4-16 แสดงลำดับการไหลเข้าโพรงแบบของโลหะเหลว ใช้เวลาในการเติมเต็มใกล้เคียงกันดังตารางที่ 4-17

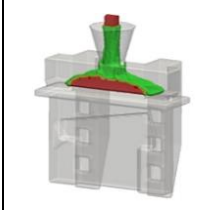
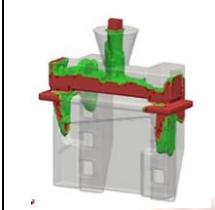
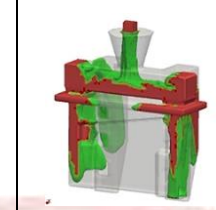
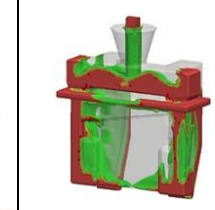
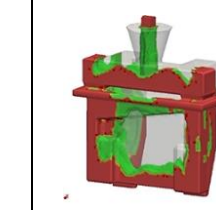
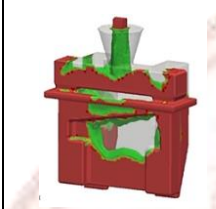
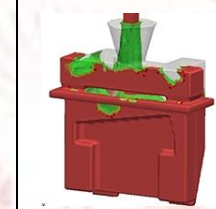
ตารางที่ 4-14 ลักษณะการไหลของแบบจำลองที่ 8

				
10% / 0.779 วินาที	20% / 1.558 วินาที	30% / 2.338 วินาที	40% / 3.117 วินาที	50% / 3.896 วินาที
				
60% / 4.675 วินาที	70% / 5.454 วินาที	80% / 6.234 วินาที	90% / 7.013 วินาที	100% / 7.727 วินาที

ตารางที่ 4-15 ลักษณะการไหลของแบบจำลองที่ 9

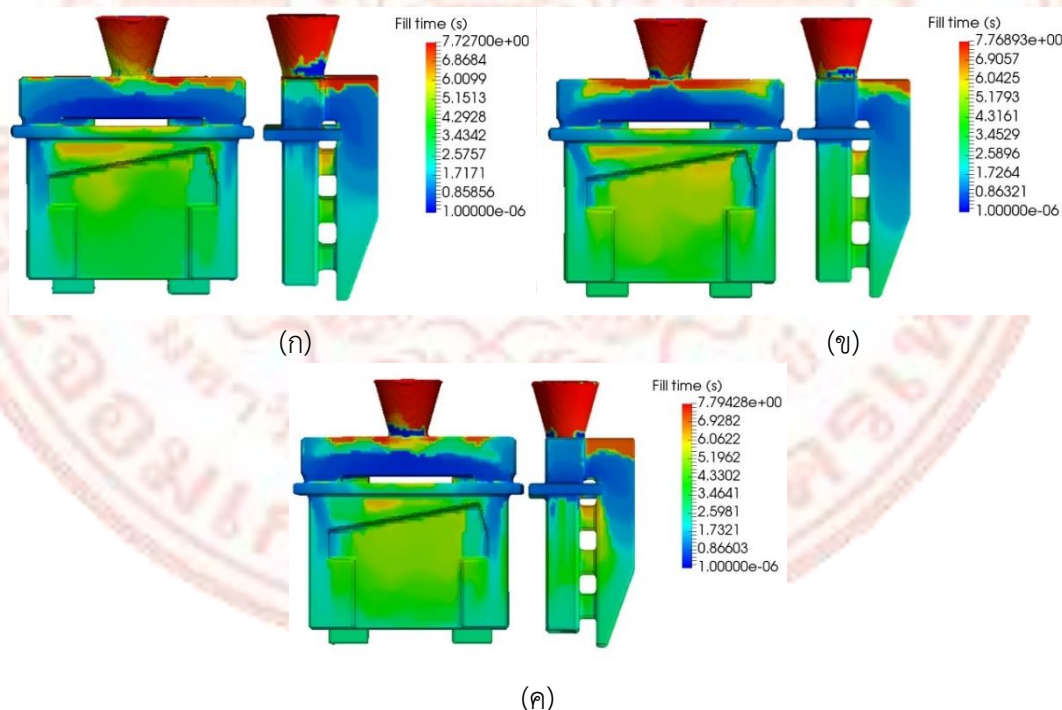
				
10% / 0.743 วินาที	20% / 1.485 วินาที	30% / 2.228 วินาที	40% / 2.971 วินาที	50% / 3.714 วินาที
				
60% / 4.456 วินาที	70% / 5.199 วินาที	80% / 5.942 วินาที	90% / 6.684 วินาที	100% / 7.768 วินาที

ตารางที่ 4-16 ลักษณะการไหลของแบบจำลองที่ 10

				
10% / 0.765 วินาที	20% / 1.539 วินาที	30% / 2.308 วินาที	40% / 3.078 วินาที	50% / 3.847 วินาที
				
60% / 4.616 วินาที	70% / 5.386 วินาที	80% / 6.155 วินาที	90% / 6.925 วินาที	100% / 7.794 วินาที

ตารางที่ 4-17 เวลาที่ใช้ในการเติมเต็มของชุดการทดลองที่ 3

ผลการจำลอง	แบบจำลอง	8	9	10
เวลาในการเติมเต็ม (วินาที)		7.727	7.768	7.794



ภาพที่ 4-7 ผลการจำลองเวลาในการเติมเต็ม (ก) แบบจำลองที่ 8 (ข) แบบจำลองที่ 9
(ค) แบบจำลองที่ 10

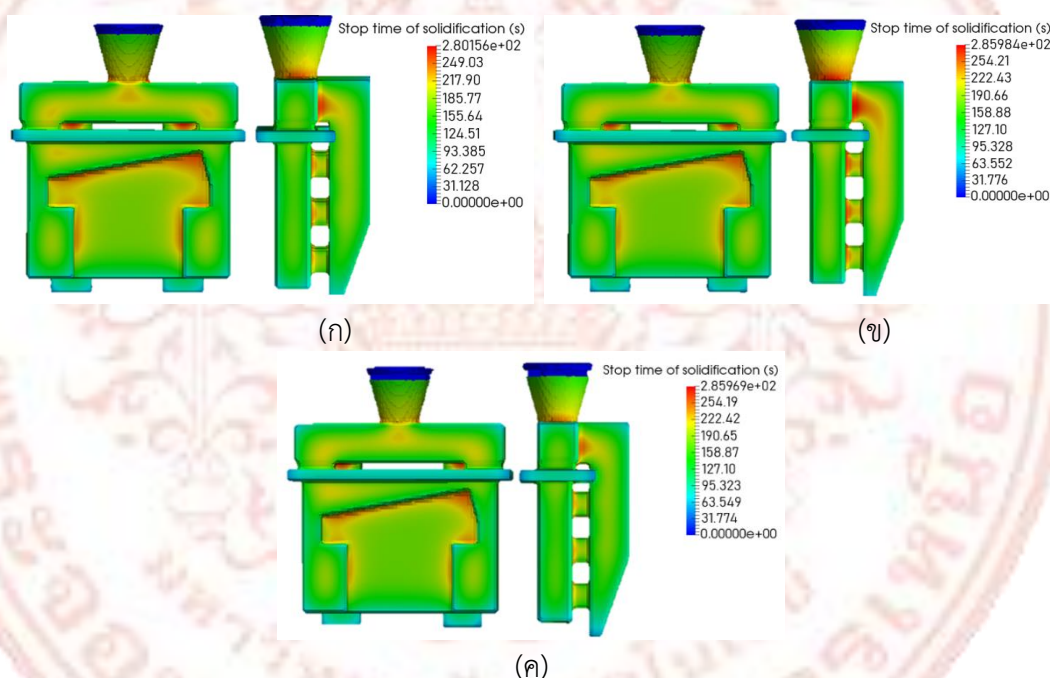
ผลจากการจำลองด้วยโปรแกรม Cast-Designer สามารถจำลองเวลาในการเติมเต็มของโลหะเหลว (Fill Time) ของแบบจำลองทั้ง 3 แบบ พบว่าแบบจำลองที่ 8 ที่มีระยะห่าง 96.32 มิลลิเมตร

ใช้เวลาน้อยสุดคือ 7.727 วินาที ตามด้วยแบบจำลองที่ 9 ที่มีระยะห่าง 106.32 มิลลิเมตร ใช้เวลา 7.768 วินาที และแบบจำลองที่ 10 ที่มีระยะห่าง 116.32 มิลลิเมตร ใช้เวลามากที่สุดคือ 7.794 วินาที

- ลักษณะการแข็งตัว (Solidification) พิจารณาลักษณะการแข็งตัวจากการแข็งตัวในช่วงเวลาสุดท้ายของทั้ง 3 แบบจำลอง ปรากฏว่าบริเวณที่แข็งตัวช้าที่สุดคือบริเวณร่องตรงกลางชิ้นงาน ซึ่งลักษณะการแข็งตัวสามารถบอกถึงตำแหน่งที่แข็งตัวล่าช้าที่สุดและยังสามารถทำนายถึงจุดที่จะเกิดโพรงหดตัวที่ชิ้นงานได้อีกด้วย ดังภาพที่ 4-8 โดยทั้ง 3 แบบจำลองใช้เวลาในการแข็งตัวดังตารางที่ 4-18

ตารางที่ 4-18 เวลาที่ใช้ในการแข็งตัวของชุดการทดลองที่ 3

ผลการจำลอง \ แบบจำลอง	8	9	10
เวลาในการแข็งตัว (วินาที)	280.156	285.984	285.969



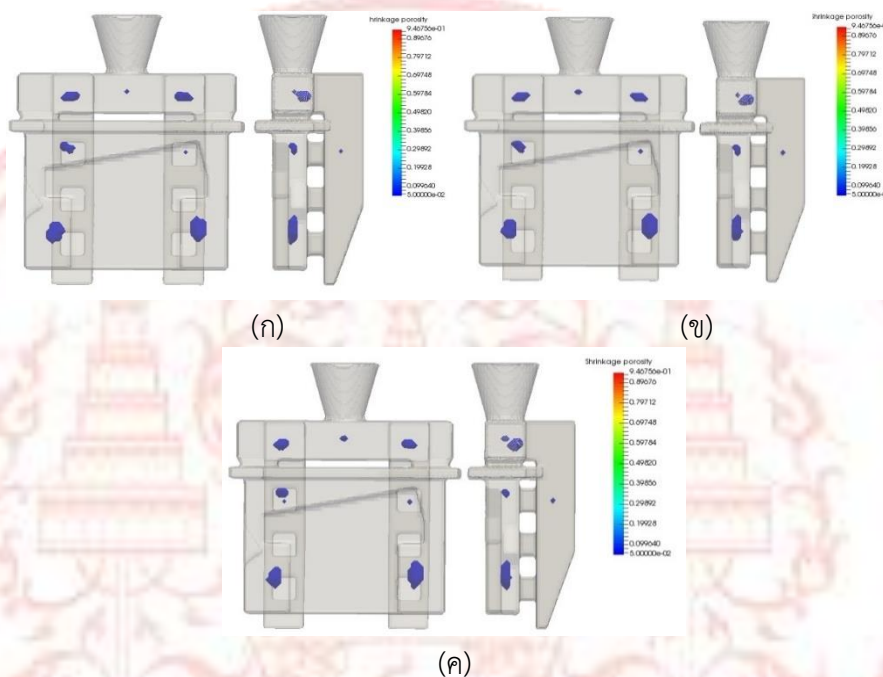
ภาพที่ 4-8 ผลการจำลองการแข็งตัว (ก) แบบจำลองที่ 8 (ข) แบบจำลองที่ 9 (ค) แบบจำลองที่ 10

ผลจากการจำลองด้วยโปรแกรม Cast-Designer สามารถจำลองเวลาในการแข็งตัว (Solidification Time) ของแบบจำลองทั้ง 3 แบบ พบว่าแบบจำลองที่ 8 ที่มีระยะห่าง 96.32 มิลลิเมตร ใช้เวลาน้อยสุดคือ 280.156 วินาที ตามด้วยแบบจำลองที่ 9 ที่มีระยะห่าง 106.32 มิลลิเมตร ใช้เวลา 285.984 วินาที และแบบจำลองที่ 10 ที่มีระยะห่าง 116.32 มิลลิเมตร ใช้เวลามากที่สุดคือ 285.969 วินาที

- ลักษณะการเกิดโพรงหดตัว (Shrinkage Porosity) การพิจารณาในเงื่อนไขจะสังเกตบริเวณที่มีการเกิดโพรงหดของแบบจำลองทั้ง 3 แบบ ปรากฏว่าชิ้นงานมีปริมาตรโพรงหดในเนื้อชิ้นงานและบริเวณทางวิ่ง (Runner) ดังภาพที่ 4-9 โดยทั้ง 4 แบบจำลองมีปริมาตรการเกิดโพรงหดตัวดังตารางที่ 4-19

ตารางที่ 4-19 ปริมาณการเกิดโพรงหดตัวของชุดการทดลองที่ 3

ผลการจำลอง / แบบจำลอง	8	9	10
ปริมาณการเกิดโพรงหดตัว (ลูกบาศก์เซนติเมตร)	15.92	15.90	15.63



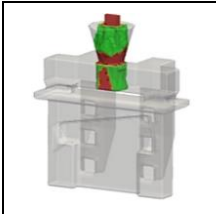
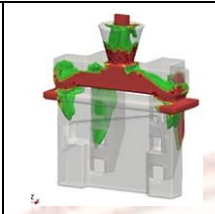
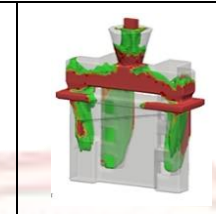
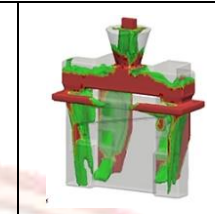
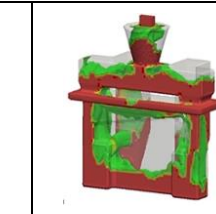
ภาพที่ 4-9 ผลการจำลองการเกิดโพรงหดตัว (ก) แบบจำลองที่ 8 (ข) แบบจำลองที่ 9 (ค) แบบจำลองที่ 10

ผลจากการจำลองด้วยโปรแกรม Cast-Designer สามารถจำลองการเกิดโพรงหดตัว (Shrinkage Porosity) ของแบบจำลองทั้ง 3 แบบ พบว่าแบบจำลองที่ 10 ที่มีระยะห่าง 116.32 มิลลิเมตร มีปริมาณโพรงหดตัวน้อยที่สุดคือ 15.63 ลูกบาศก์เซนติเมตร ตามด้วยแบบจำลองที่ 9 ที่มีระยะห่าง 106.32 มิลลิเมตร มีปริมาณโพรงหดตัว 15.90 ลูกบาศก์เซนติเมตร และแบบจำลองที่ 8 ที่มีระยะห่าง 96.32 มิลลิเมตร มีปริมาณโพรงหดตัวมากที่สุดคือ 15.92 ลูกบาศก์เซนติเมตร

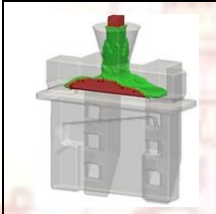
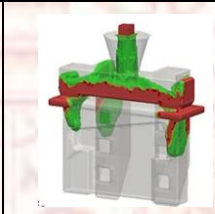
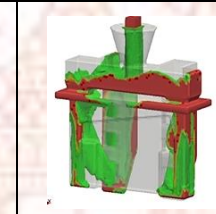
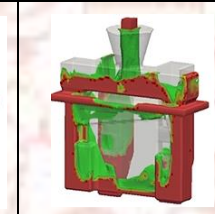
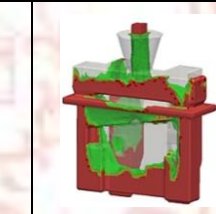
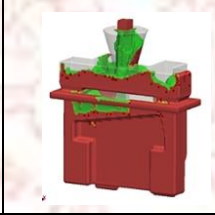
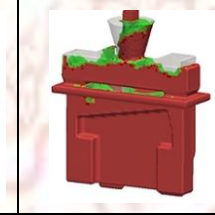
4.1.4 ชุดการทดลองที่ 4 โดยมีการปรับความยาวของทางวิ่ง (H_R) ที่ 264.85 และ 245.65 มิลลิเมตร จำนวน 2 เงื่อนไข

- ลักษณะการไหล (Fluid Fraction) และเวลาในการเติมเต็ม (Fill Time) ในการพิจารณานั้น จะพิจารณาการป้อนเติมในปริมาณต่าง ๆ ของทั้ง 2 แบบจำลอง ซึ่งพบว่ามีความคล้ายคลึงกัน คือไหลจากด้านบนลงมาทางด้านข้างของชิ้นงานแล้วค่อย ๆ ไหลเติมเต็มจากด้านหลังจนเต็มชิ้นงาน เมื่อลดความยาวของทางวิ่ง (H_R) ลักษณะการไหลของทั้ง 2 แบบจำลองไม่มีความแตกต่างกันแต่ทำให้เพิ่มความเร็วในการไหลของโลหะเหลวทำให้โลหะเหลวไหลเข้าแม่พิมพ์ได้เร็วขึ้นและทั้ง 2 แบบจำลอง เกิดการไหลแบบปั่นป่วนค่อนข้างน้อย ดังตารางที่ 4-20 ถึง 4-21 แสดงลำดับการไหลเข้าโพรงแบบของโลหะเหลว ใช้เวลาในการเติมเต็มใกล้เคียงกันดังตารางที่ 4-22

ตารางที่ 4-20 ลักษณะการไหลของแบบจำลองที่ 11

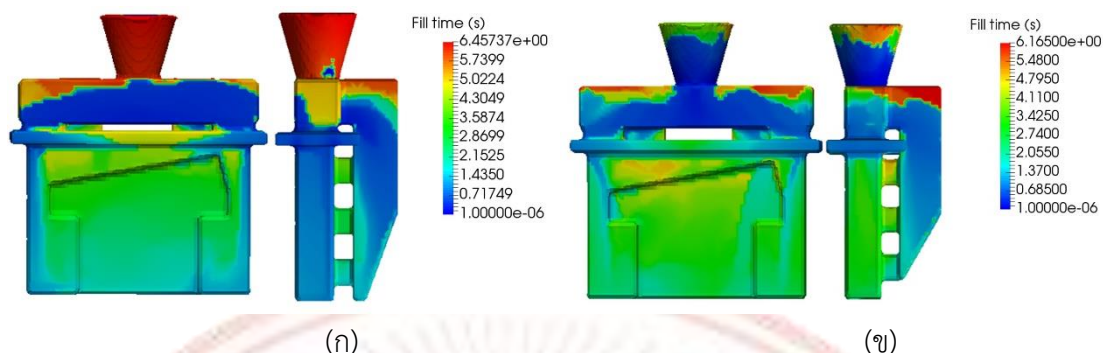
				
10% / 0.746 วินาที	20% / 1.491 วินาที	30% / 2.237 วินาที	40% / 2.983 วินาที	50% / 3.729 วินาที
				
60% / 4.474 วินาที	70% / 5.220 วินาที	80% / 5.966 วินาที	90% / 6.711 วินาที	100% / 6.457 วินาที

ตารางที่ 4-21 ลักษณะการไหลของแบบจำลองที่ 12

				
10% / 0.757 วินาที	20% / 1.513 วินาที	30% / 2.270 วินาที	40% / 3.026 วินาที	50% / 3.783 วินาที
				
60% / 4.539 วินาที	70% / 5.296 วินาที	80% / 6.052 วินาที	90% / 6.809 วินาที	100% / 6.565 วินาที

ตารางที่ 4-22 เวลาที่ใช้ในการเติมเต็มของชุดการทดลองที่ 4

ผลการจำลอง	แบบจำลอง	11	12
เวลาในการเติมเต็ม (วินาที)		6.457	6.165



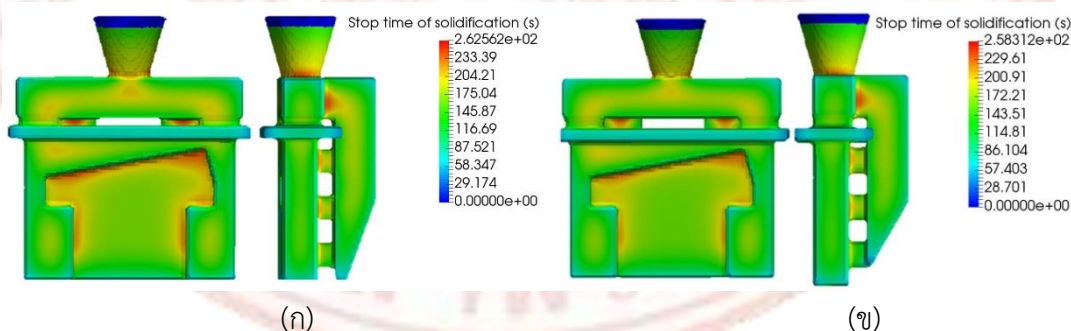
ภาพที่ 4-10 ผลการจำลองเวลาในการเติมเต็ม (ก) แบบจำลองที่ 11 (ข) แบบจำลองที่ 12

ผลจากการจำลองด้วยโปรแกรม Cast-Designer สามารถจำลองเวลาในการเติมเต็มของโลหะเหลว (Fill Time) ของแบบจำลองทั้ง 2 แบบ พบว่าแบบจำลองที่ 12 ที่มีระยะความยาวทางวิ่ง 245.65 มิลลิเมตร ใช้เวลาน้อยที่สุดคือ 6.165 วินาที และแบบจำลองที่ 11 ที่มีระยะความยาวทางวิ่ง 264.45 มิลลิเมตร ใช้เวลามากที่สุดคือ 6.457 วินาที

- ลักษณะการแข็งตัว (Solidification) พิจารณาลักษณะการแข็งตัวจากการแข็งตัวในช่วงเวลาสุดท้ายของทั้ง 2 แบบจำลอง ปรากฏว่าบริเวณที่แข็งตัวช้าที่สุดคือบริเวณร่องตรงกลางชิ้นงาน ซึ่งลักษณะการแข็งตัวสามารถบอกถึงตำแหน่งที่แข็งตัวล่าช้าที่สุดท้าย และยังสามารถทำนายถึงจุดที่จะเกิดโพรงหดตัวที่ชิ้นงานได้อีกด้วย ดังภาพที่ 4-11 โดยทั้ง 2 แบบจำลองใช้เวลาในการแข็งตัวดังตารางที่ 4-23

ตารางที่ 4-23 เวลาที่ใช้ในการแข็งตัวของชุดการทดลองที่ 4

ผลการจำลอง	แบบจำลอง	11	12
เวลาในการแข็งตัว (วินาที)		262.562	258.312



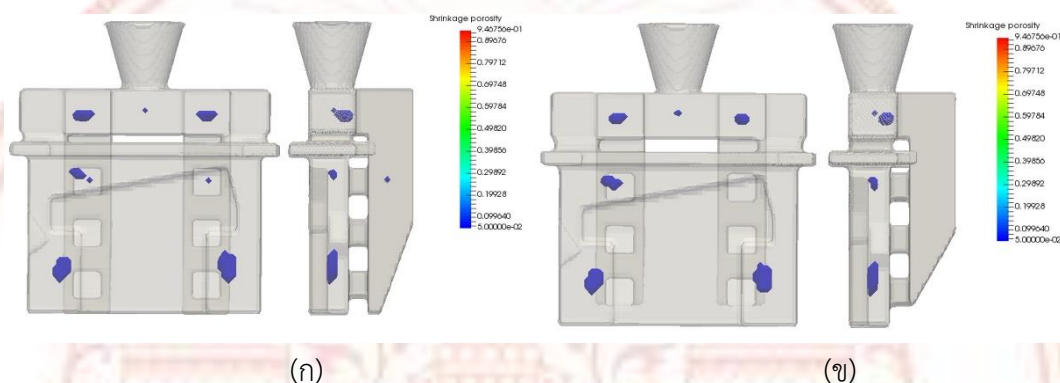
ภาพที่ 4-11 ผลการจำลองการแข็งตัว (ก) แบบจำลองที่ 11 (ข) แบบจำลองที่ 12

ผลจากการจำลองด้วยโปรแกรม Cast-Designer สามารถจำลองเวลาในการแข็งตัว (Solidification Time) ของแบบจำลองทั้ง 2 แบบ พบว่าแบบจำลองที่ 12 ที่มีระยะความยาวทางวิ่ง 245.65 มิลลิเมตร ใช้เวลาน้อยที่สุดคือ 258.312 วินาที และแบบจำลองที่ 11 ที่มีระยะความยาวทางวิ่ง 264.45 มิลลิเมตร ใช้เวลามากที่สุดคือ 262.562 วินาที

- ลักษณะการเกิดโพรงหดตัว (Shrinkage Porosity) การพิจารณาในเงื่อนไขนี้จะสังเกตบริเวณที่มีการเกิดโพรงหดของแบบจำลองทั้ง 2 แบบ ปรากฏว่าชิ้นงานมีปริมาตรโพรงหดในเนื้อชิ้นงานและบริเวณทางวิ่ง (Runner) ดังภาพที่ 4-12 โดยทั้ง 2 แบบจำลองมีปริมาตรการเกิดโพรงหดตัวดังตารางที่ 4-24

ตารางที่ 4-24 ปริมาตรการเกิดโพรงหดตัวของชุดการทดลองที่ 4

ผลการจำลอง	แบบจำลอง	11	12
ปริมาตรการเกิดโพรงหดตัว (ลูกบาศก์เซนติเมตร)		15.31	15.41



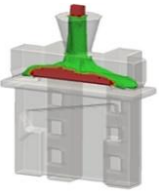
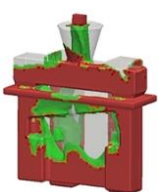
ภาพที่ 4-12 ผลการจำลองการเกิดโพรงหดตัว (ก) แบบจำลองที่ 11 (ข) แบบจำลองที่ 12

ผลจากการจำลองด้วยโปรแกรม Cast-Designer สามารถจำลองการเกิดโพรงหดตัว (Shrinkage Porosity) ของแบบจำลองทั้ง 2 แบบ พบว่าแบบจำลองที่ 11 ที่มีระยะความยาวทางวิ่ง 264.45 มิลลิเมตร มีปริมาตรโพรงหดตัวน้อยที่สุดคือ 15.31 ลูกบาศก์เซนติเมตร และแบบจำลองที่ 12 ที่มีระยะความยาวทางวิ่ง 245.65 มิลลิเมตร มีปริมาตรโพรงหดตัวมากที่สุดคือ 15.31 ลูกบาศก์เซนติเมตร

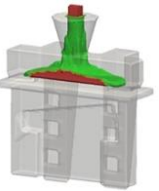
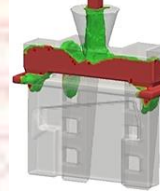
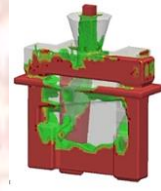
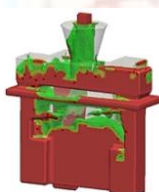
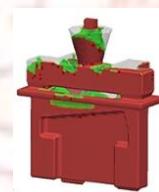
4.1.5 ชุดการทดลองที่ 5 โดยมีการปรับองศาของทางวิ่ง (D_R) ที่ 0, 10 และ 30 องศา จำนวน 3 เงื่อนไข

- ลักษณะการไหล (Fluid Fraction) และเวลาในการเติมเต็ม (Fill Time) ในการพิจารณานั้นจะพิจารณาการป้อนเติมในปริมาณต่าง ๆ ของทั้ง 3 แบบจำลอง จะมีลักษณะการไหลเหมือนกันคือไหลจากด้านบนลงมาทางด้านข้างของชิ้นงานแล้วค่อย ๆ ไหลเติมเต็มจากด้านหลังจนเต็มชิ้นงาน เมื่อเพิ่มองศาของทางวิ่ง (D_R) ลักษณะการไหลของทั้ง 3 แบบจำลองไม่มีความแตกต่างกันแต่องศาทางวิ่งที่มีความเอียงมากสามารถช่วยให้โลหะเหลวไหลได้รวดเร็วขึ้น และทั้ง 3 แบบจำลองเกิดการไหลแบบปั่นป่วนค่อนข้างน้อย ดังตารางที่ 4-25 ถึง 4-27 แสดงลำดับการไหลเข้าโพรงแบบของโลหะเหลว ใช้เวลาในการเติมเต็มดังตารางที่ 4-28

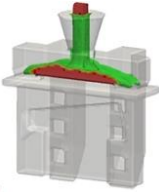
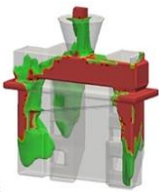
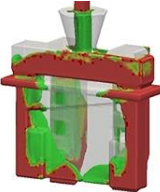
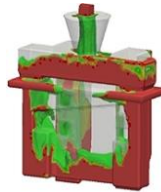
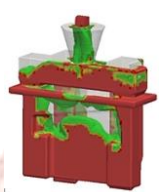
ตารางที่ 4-25 ลักษณะการไหลของแบบจำลองที่ 13

				
10% / 0.778 วินาที	20% / 1.555 วินาที	30% / 2.333 วินาที	40% / 3.110 วินาที	50% / 3.888 วินาที
				
60% / 4.665 วินาที	70% / 5.443 วินาที	80% / 6.220 วินาที	90% / 6.998 วินาที	100% / 7.836 วินาที

ตารางที่ 4-26 ลักษณะการไหลของแบบจำลองที่ 14

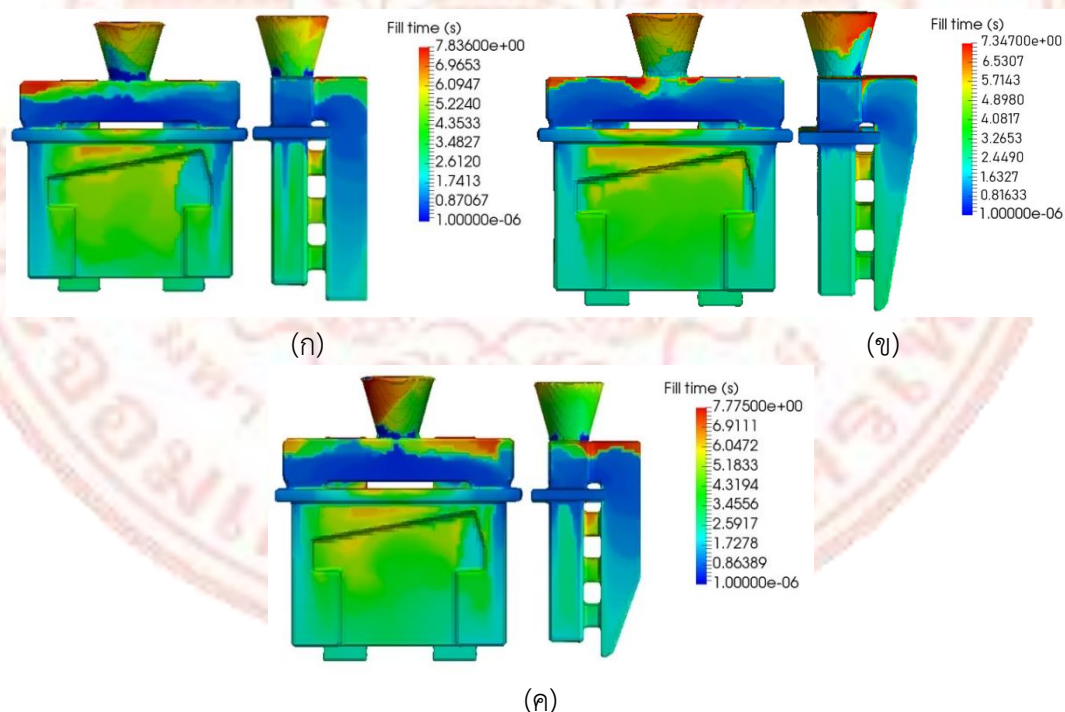
				
10% / 0.735 วินาที	20% / 1.469 วินาที	30% / 2.204 วินาที	40% / 2.939 วินาที	50% / 3.674 วินาที
				
60% / 4.408 วินาที	70% / 5.143 วินาที	80% / 5.878 วินาที	90% / 6.612 วินาที	100% / 7.347 วินาที

ตารางที่ 4-27 ลักษณะการไหลของแบบจำลองที่ 15

				
10% / 0.784 วินาที	20% / 1.567 วินาที	30% / 2.351 วินาที	40% / 3.134 วินาที	50% / 3.918 วินาที
				
60% / 4.702 วินาที	70% / 5.485 วินาที	80% / 6.269 วินาที	90% / 7.052 วินาที	100% / 7.775 วินาที

ตารางที่ 4-28 เวลาที่ใช้ในการเติมเต็มของชุดการทดลองที่ 5

ผลการจำลอง	แบบจำลอง	13	14	15
เวลาในการเติมเต็ม (วินาที)		7.836	7.347	7.775



ภาพที่ 4-13 ผลการจำลองเวลาในการเติมเต็ม (ก) แบบจำลองที่ 13 (ข) แบบจำลองที่ 14 (ค) แบบจำลองที่ 15

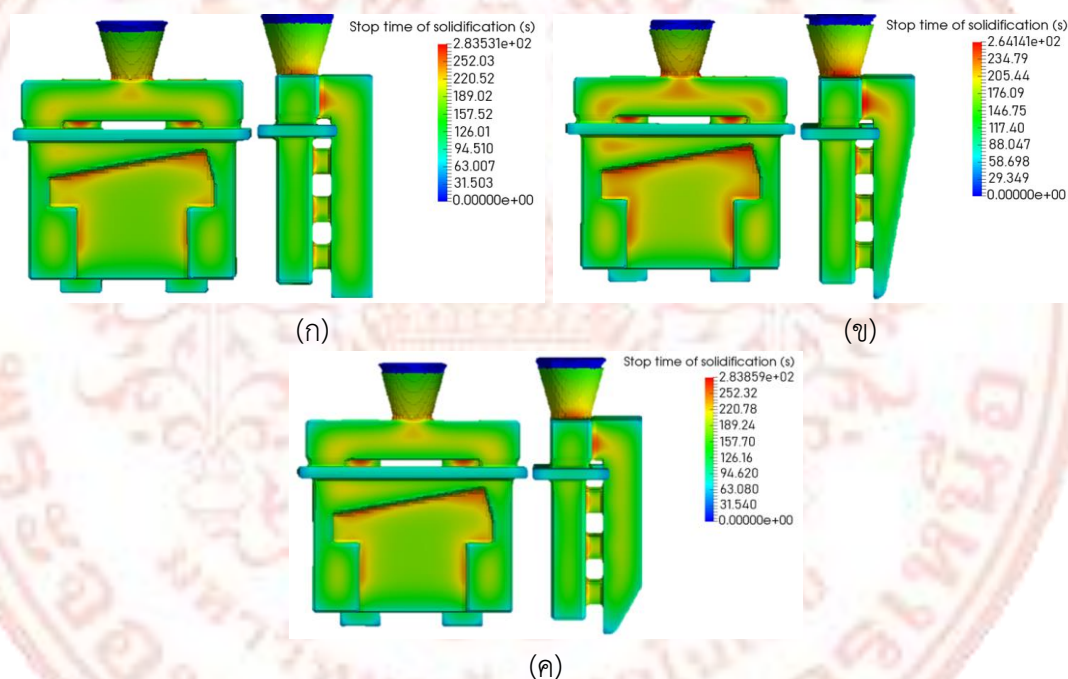
ผลจากการจำลองด้วยโปรแกรม Cast-Designer สามารถจำลองเวลาในการเติมเต็มของโลหะเหลว (Fill Time) ของแบบจำลองทั้ง 3 แบบ พบว่าแบบจำลองที่ 14 ที่มีระยะองศาของทางวิ่ง 10

องศา ใช้เวลาน้อยสุดคือ 7.347 วินาที ตามด้วยแบบจำลองที่ 15 ที่มีระยะองศาของทางวิ่ง 30 องศา ใช้เวลา 7.775 วินาที และแบบจำลองที่ 13 ที่มีระยะองศาของทางวิ่ง 0 องศา ใช้เวลามากที่สุดคือ 7.836 วินาที

- ลักษณะการแข็งตัว (Solidification) พิจารณาลักษณะการแข็งตัวจากการแข็งตัวในช่วงเวลาสุดท้ายของทั้ง 3 แบบจำลอง ปรากฏว่าบริเวณที่แข็งตัวช้าที่สุดคือบริเวณร่องตรงกลางชิ้นงาน ซึ่งลักษณะการแข็งตัวสามารถบอกถึงตำแหน่งที่แข็งตัวล่าช้าที่สุดท้าย และยังสามารถทำนายถึงจุดที่จะเกิดโพรงหดตัวที่ชิ้นงานได้อีกด้วย ดังภาพที่ 4-14 โดยทั้ง 3 แบบจำลองใช้เวลาในการแข็งตัวดังตารางที่ 4-29

ตารางที่ 4-29 เวลาที่ใช้ในการแข็งตัวของชุดการทดลองที่ 5

ผลการจำลอง \ แบบจำลอง	13	14	15
เวลาในการแข็งตัว (วินาที)	283.531	264.141	283.859



ภาพที่ 4-14 ผลการจำลองการแข็งตัว (ก) แบบจำลองที่ 13 (ข) แบบจำลองที่ 14 (ค) แบบจำลองที่ 15

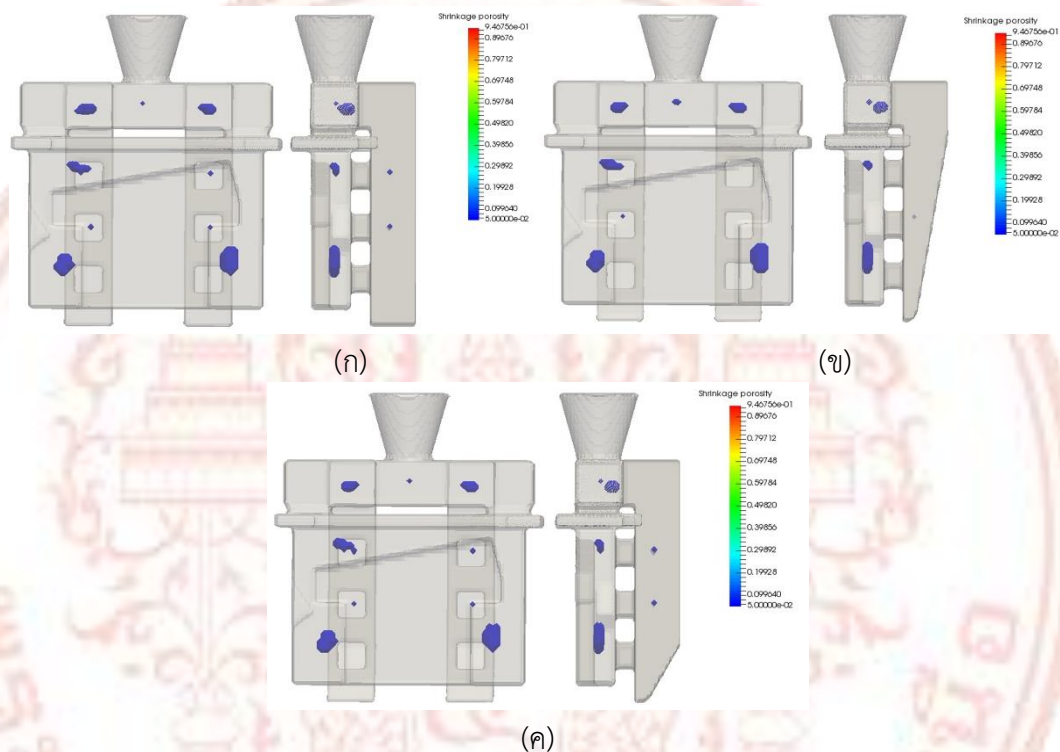
ผลจากการจำลองด้วยโปรแกรม Cast-Designer สามารถจำลองเวลาในการแข็งตัว (Solidification Time) ของแบบจำลองทั้ง 3 แบบ พบว่าแบบจำลองที่ 14 ที่มีระยะองศาของทางวิ่ง 10 องศา ใช้เวลาน้อยสุดคือ 264.141 วินาที ตามด้วยแบบจำลองที่ 13 ที่มีระยะองศาของทางวิ่ง 0 องศา ใช้เวลา 283.531 วินาที และแบบจำลองที่ 15 ที่มีระยะองศาของทางวิ่ง 30 องศา ใช้เวลามากที่สุดคือ 283.859 วินาที

- ลักษณะการเกิดโพรงหดตัว (Shrinkage Porosity) การพิจารณาในเงื่อนไขนี้จะสังเกตบริเวณที่มีการเกิดโพรงหดตัวของแบบจำลองทั้ง 3 แบบ ปรากฏว่าชิ้นงานมีปริมาตรโพรงหดตัวในเนื้อชิ้นงาน

และบริเวณทางวิ่ง (Runner) ดังภาพที่ 4-15 โดยทั้ง 3 แบบจำลองมีปริมาตรการเกิดโพรงหดตัวดังตารางที่ 4-30

ตารางที่ 4-30 ปริมาตรการเกิดโพรงหดตัวของชุดการทดลองที่ 5

ผลการจำลอง \ แบบจำลอง	13	14	15
ปริมาตรการเกิดโพรงหดตัว (ลูกบาศก์เซนติเมตร)	14.92	14.68	14.69



ภาพที่ 4-15 ผลการจำลองการเกิดโพรงหดตัว (ก) แบบจำลองที่ 13 (ข) แบบจำลองที่ 14 (ค) แบบจำลองที่ 15

ผลจากการจำลองด้วยโปรแกรม Cast-Designer สามารถจำลองการเกิดโพรงหดตัว (Shrinkage Porosity) ของแบบจำลองทั้ง 3 แบบ พบว่าแบบจำลองที่ 14 ที่มีระยะองศามุมของทางวิ่ง 10 องศา มีปริมาตรโพรงหดตัวน้อยที่สุดคือ 14.68 ลูกบาศก์เซนติเมตร ตามด้วยแบบจำลองที่ 15 ที่มีระยะองศามุมของทางวิ่ง 30 องศา มีปริมาตรโพรงหดตัว 14.69 ลูกบาศก์เซนติเมตร และแบบจำลองที่ 13 ที่มีระยะองศามุมของทางวิ่ง 0 องศา มีปริมาตรโพรงหดตัวมากที่สุดคือ 14.92 ลูกบาศก์เซนติเมตร

4.2 การเปรียบเทียบผลการทดลองจากการจำลองด้วยโปรแกรม Cast-Designer

4.2.1 ผลการทดลองจากการจำลองด้วยโปรแกรม Cast-Designer ทั้ง 16 การทดลอง ประกอบด้วยการปรับตัวแปร 15 การทดลองและระบบป้อนเติมรูปแบบเดิม (Current Model: CML) 1 การทดลอง โดยสรุปผลของเวลาในการเติมเต็ม (Fill Time) เวลาในการแข็งตัว (Solidification Time) และปริมาตรการเกิดโพรงหดในชิ้นงาน (Shrinkage Porosity)

ตารางที่ 4-31 ตารางสรุปผลการทดลองทั้ง 16 การทดลอง

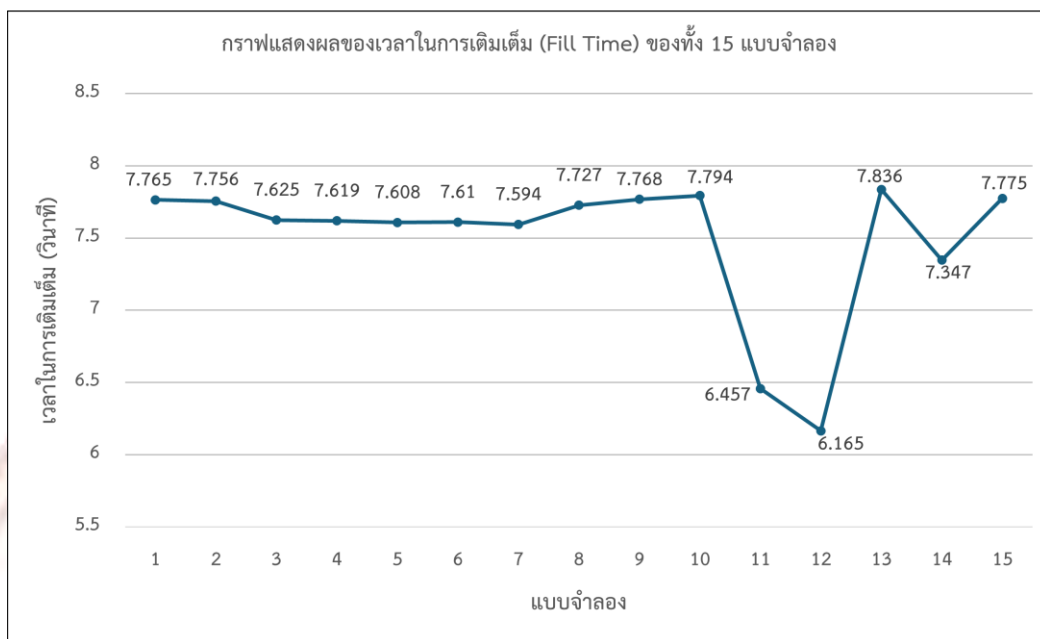
แบบจำลอง	ทางเข้า (Gate1)		ทางเข้า (Gate2)				ทางวิ่ง (Runner)				Fill Time (sec)	Solidification Time (sec)	Shrinkage (cm ³)
	จำนวน/หน้าตัด	G ₁ (mm ²)	จำนวน/หน้าตัด	G ₂ (mm ²)	H _{G2} (mm ²)	W _R (mm ²)	H _R (mm ²)	D _R (mm ²)					
1	6/คางหมู	48.2x50x20	-	-	-	86.32	284.85	20	7.765	265.062	12.68		
2	6/ผืนผ้า	32x30.7x23	-	-	-	86.32	284.85	20	7.756	267.609	8.19		
3	6/ผืนผ้า	32x30.7x23	2/จัตุรัส	50x50	10	86.32	284.85	20	7.625	263.844	6.28		
4	6/ผืนผ้า	32x30.7x23	2/จัตุรัส	50x50	15	86.32	284.85	20	7.619	267.516	6.34		
5	6/ผืนผ้า	32x30.7x23	2/จัตุรัส	50x50	20	86.32	284.85	20	7.608	274.672	6.43		
6	6/ผืนผ้า	32x30.7x23	2/จัตุรัส	50x50	25	86.32	284.85	20	7.610	278.797	6.53		
7	6/ผืนผ้า	32x30.7x23	2/จัตุรัส	50x50	30	86.32	284.85	20	7.594	281.984	7.00		
8	6/ผืนผ้า	32x30.7x23	2/จัตุรัส	50x50	10	96.32	284.85	20	7.727	280.156	6.47		
9	6/ผืนผ้า	32x30.7x23	2/จัตุรัส	50x50	10	106.32	284.85	20	7.768	285.984	6.68		

10	6/ผืนผ้า	32x30.7x23	2/จัดรัส	50x50	10	116.32	284.85	20	7.794	285.969	6.76
11	6/ผืนผ้า	32x30.7x23	2/จัดรัส	50x50	10	86.32	264.85	20	6.457	262.562	6.36

ตารางที่ 4-31 ต่อ

แบบจำลอง	ทางเข้า (Gate ₁)		ทางเข้า (Gate ₂)				ทางวิ่ง (Runner)			Fill Time (sec)	Solidification Time (sec)	Total Shrinkage (cm ³)
	จำนวน/หน้าตัด	G ₁ (mm ²)	จำนวน/หน้าตัด	G ₂ (mm ²)	H _{G2} (mm ²)	W _R (mm ²)	H _R (mm ²)	D _R (mm ²)				
12	6/ผืนผ้า	32x30.7x23	2/จัดรัส	50x50	10	86.32	245.65	20	6.165	258.312	6.49	
13	6/ผืนผ้า	32x30.7x23	2/จัดรัส	50x50	10	86.32	284.85	0	7.836	283.531	6.52	
14	6/ผืนผ้า	32x30.7x23	2/จัดรัส	50x50	10	86.32	284.85	10	7.347	264.141	6.07	
15	6/ผืนผ้า	32x30.7x23	2/จัดรัส	50x50	10	86.32	284.85	30	7.775	283.859	6.49	
CML	2/จัดรัส	50x50x30	2/จัดรัส	50x50	30	80.77	265, 300	0	5.158	433.797	13.04	

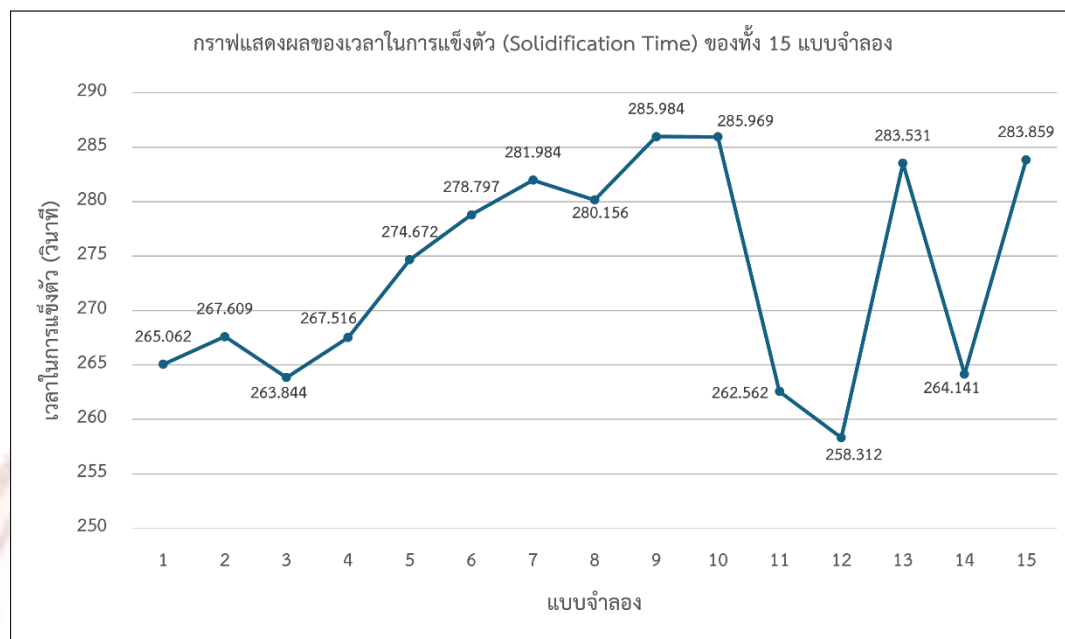
4.2.2 กราฟแสดงผลของเวลาในการเติมเต็ม (Fill Time) ของทั้ง 15 การทดลอง



ภาพที่ 4-16 กราฟแสดงผลของเวลาในการเติมเต็ม (Fill Time) ของทั้ง 15 การทดลอง

กราฟนี้แสดงค่าเวลาในการเติมเต็ม (Fill Time) ของแบบจำลอง 1-15 แต่ละแบบจำลองแสดงให้เห็นแนวโน้มการเปลี่ยนแปลง โดยแบบจำลองส่วนใหญ่มีค่าเวลาในการเติมเต็ม (Fill Time) ใกล้เคียงกัน แต่แบบจำลองที่ 11 และ 12 มีค่าเวลาในการเติมเต็ม (Fill Time) ต่ำกว่าแบบจำลองอื่นอย่างชัดเจน

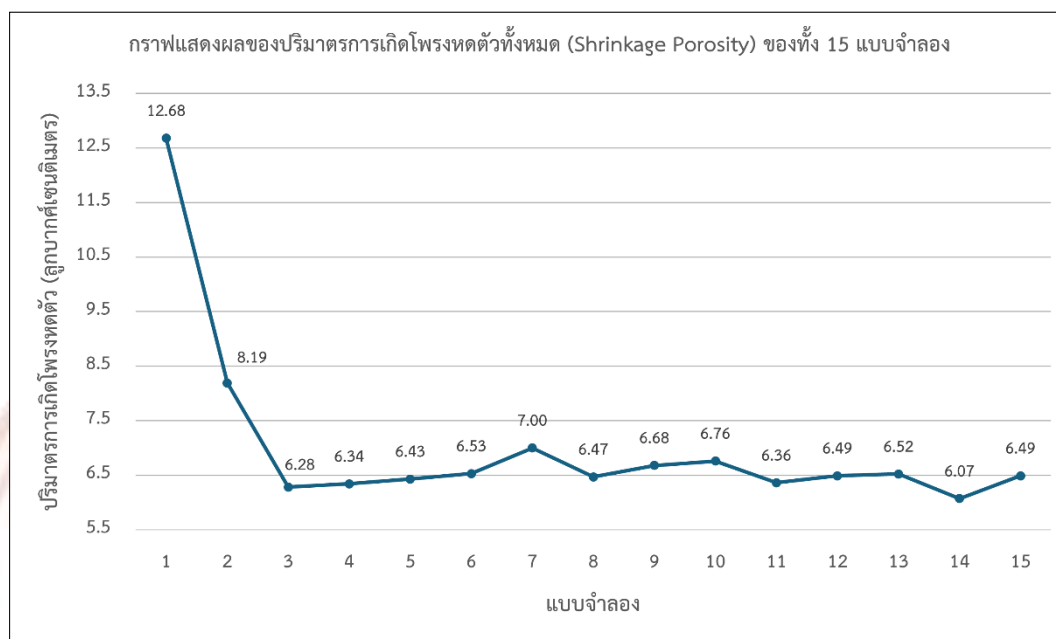
4.2.3 กราฟแสดงผลของเวลาในการแข็งตัว (Solidification Time) ของทั้ง 15 การทดลอง



ภาพที่ 4-17 กราฟแสดงผลของเวลาในการแข็งตัว (Solidification Time) ของทั้ง 15 การทดลอง

กราฟนี้แสดงค่าเวลาในการแข็งตัว (Solidification Time) ของแบบจำลอง 1-15 การกระจายค่าเวลาในการแข็งตัว (Solidification Time) มีแนวโน้มค่อนข้างคงที่ กราฟแสดงให้เห็นถึงความแปรผันของเวลาในการแข็งตัว (Solidification Time) ในแต่ละแบบจำลอง โดยแบบจำลองที่ 12 มีค่าเวลาในการแข็งตัว (Solidification Time) ต่ำสุดที่ 258.312 วินาที และแบบจำลองที่ 9 มีค่าเวลาในการแข็งตัว (Solidification Time) สูงสุดที่ 285.984 วินาที

4.2.4 กราฟแสดงผลของปริมาตรการเกิดโพรงหดตัว (Shrinkage Porosity) ของทั้ง 15 การทดลอง



ภาพที่ 4-18 กราฟแสดงผลของปริมาตรการเกิดโพรงหดตัว (Shrinkage Porosity) ของทั้ง 15 การทดลอง

กราฟนี้แสดงค่าปริมาตรการเกิดโพรงหดตัว (Shrinkage Porosity) ของแบบจำลอง 1-15 โดยแบบจำลองส่วนใหญ่มีค่าปริมาตรการเกิดโพรงหดตัว (Shrinkage Porosity) ใกล้เคียงกัน แบบจำลองที่ 14 มีปริมาตรการเกิดโพรงหดตัว (Shrinkage Porosity) ต่ำสุดที่ 6.07 ลูกบาศก์เซนติเมตร และแบบจำลองที่ 1 มีค่าปริมาตรการเกิดโพรงหดตัว (Shrinkage Porosity) สูงสุดที่ 12.68 ลูกบาศก์เซนติเมตร

4.2.5 ปริมาตรของชิ้นงานและระบบป้อนเติมของทั้ง 16 แบบจำลอง แสดงดังตารางที่ 4-32

ตารางที่ 4-32 ปริมาตรของชิ้นงานและระบบป้อนเติม

แบบจำลอง	ปริมาตรของชิ้นงาน (cm ³)	ปริมาตรของระบบป้อนเติม (cm ³)	ปริมาตรรวม (cm ³)
CML	2165.5	4590.29	6755.79
1	2165.5	2886.95	5052.45
2	2165.5	2887.09	5052.59
3	2165.5	2937.09	5102.59
4	2165.5	2937.09	5102.59
5	2165.5	2991.54	5157.04

ตารางที่ 4-32 ต่อ

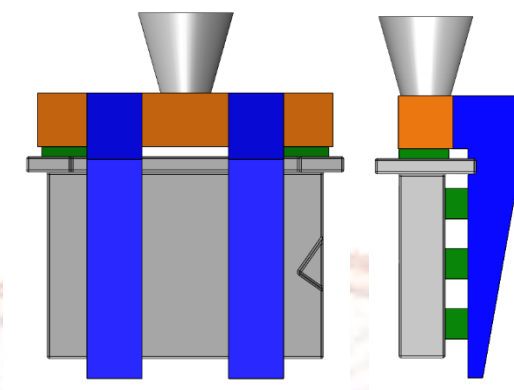
แบบจำลอง	ปริมาตรของชิ้นงาน (cm ³)	ปริมาตรของระบบป้อนเติม (cm ³)	ปริมาตรรวม (cm ³)
6	2165.5	3045.99	5211.49
7	2165.5	3100.45	5265.95
8	2165.5	2937.09	5102.59
9	2165.5	2937.09	5102.59
10	2165.5	2937.09	5102.59
11	2165.5	2819.28	4984.78
12	2165.5	2706.18	4871.68
13	2165.5	3161.66	5327.16
14	2165.5	2698.11	4863.61
15	2165.5	3020.09	5185.59

4.3 ผลการทดลองชิ้นงานจริง

4.3.1 ชิ้นงานที่ดีที่สุดที่ได้จากวิเคราะห์การออกแบบระบบป้อนเติมโลหะเหลวของตัวแปรทั้ง 5 ตัว ที่ส่งผลทำให้มีปริมาตรการเกิดโพรงหดตัวน้อยที่สุดจึงได้ระบบป้อนเติมโลหะเหลวรูปแบบใหม่ (New Model: NML) ดังภาพที่ 4-19 ที่ทำให้ชิ้นงาน Body OTC Steady Casting มีปริมาตรการเกิดโพรงหดตัวน้อยที่สุด ซึ่งตัวแปรที่ใช้ในระบบป้อนเติมนี้สรุปไว้ดังตารางที่ 4-33

ตารางที่ 4-33 ตัวแปรที่ใช้ในระบบป้อนเติมรูปแบบใหม่ (NML)

ตัวแปร (สัญลักษณ์)	ค่าที่กำหนด (หน่วย)
จำนวน/หน้าตัดฐานรูปเท	1/ผืนผ้า
พื้นที่ของฐานรูปเท (A_B)	50x50x295 (mm ²)
จำนวน/หน้าตัดทางวิ่ง	2/ผืนผ้า
พื้นที่ของทางวิ่ง (A_R)	55x53.55 (mm ²)
ระยะห่างทางวิ่ง (W_R)	86.32 (mm ²)
ความสูงทางวิ่ง (H_R)	284.85 (mm ²)
องศามุมของทางวิ่ง (D_R)	10 (°)
จำนวน/หน้าตัดทางเข้า	6/ผืนผ้า
พื้นที่ของทางเข้า (G_1)	32x30.7x23 (mm ²)
จำนวน/หน้าตัดทางเข้า	2/จัดรัส
พื้นที่ของทางเข้า (G_2)	50x50 (mm ²)
ความสูงของพื้นที่ทางเข้า (H_{G2})	10 (mm ²)
ปริมาตรรวม: ปริมาตรของชิ้นงาน+ปริมาตรของระบบป้อนเติม	4863.61: 2165.5+2698.11 (cm ³)



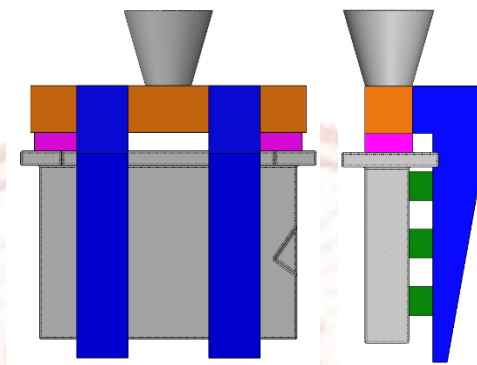
ภาพที่ 4-19 รูปร่างโดยรวมของระบบป้อนเต็มรูปแบบใหม่ (NML)

ผู้วิจัยจึงได้นำระบบป้อนเต็มรูปแบบใหม่ (NML) เสนอให้ทางบริษัทนำมาสร้างเป็นแบบแม่พิมพ์หล่อจริงขึ้น ซึ่งทางบริษัทเห็นสมควรให้มีการปรับตัวแปรบางตัวของระบบป้อนเต็มให้เป็นไปตามมาตรฐานของบริษัท จึงได้มาเป็นระบบป้อนเต็มโลหะเหลวที่มีการปรับปรุงใหม่ (Improve Model: IML) ดังภาพที่ 4-20 โดยตัวแปรที่มีการปรับแสดงดังตารางที่ 4-34 และมีผลของการหล่อขึ้นงานจริงดังนี้

ตารางที่ 4-34 ตัวแปรที่ใช้ในระบบป้อนเต็มที่ปรับปรุงใหม่ (IML)

ตัวแปร (สัญลักษณ์)	ค่าที่กำหนด (หน่วย)
จำนวน/หน้าตัดฐานรูเท	1/ผืนผ้า
พื้นที่ของฐานรูเท (A_B)	50x50x295 (mm^2)
จำนวน/หน้าตัดทางวิ่ง	2/ผืนผ้า
พื้นที่ของทางวิ่ง (A_R)	55x53.55 (mm^2)
ระยะห่างทางวิ่ง (W_R)	86.32 (mm^2)
ความสูงทางวิ่ง (H_R)	284.85 (mm^2)
องศามุมของทางวิ่ง (D_R)	10 ($^{\circ}$)
จำนวน/หน้าตัดทางเข้า	6/ผืนผ้า
พื้นที่ของทางเข้า (G_1)	32x30.7x25 (mm^2)
จำนวน/หน้าตัดทางเข้า	2/จตุรัส
พื้นที่ของทางเข้า (G_2)	50x50 (mm^2)
ความสูงของพื้นที่ทางเข้า (H_{G2})	20 (mm^2)

ปริมาตรรวม: ปริมาตรของชิ้นงาน+ปริมาตรของระบบป้อนเติม	4856.65: 2165.5+2691.15 (cm ³)
--	--



ภาพที่ 4-20 รูปร่างโดยรวมของระบบป้อนเติมที่ปรับปรุงใหม่ (IML)

ผลการเทหล่อชิ้นงานจริงของระบบป้อนเติมที่ปรับปรุงใหม่ (IML) ปรากฏว่าลักษณะภายนอกของชิ้นงานไม่พบข้อบกพร่องใด ๆ ดังแสดงในภาพที่ 4-21 ส่วนข้อบกพร่องภายในชิ้นงานจะทดสอบโดยใช้ภาพถ่ายรังสี (Radiographic Testing: RT)



ภาพที่ 4-21 ชิ้นงานหล่อที่ได้หล่อจริง

4.3.2 การทดสอบโดยใช้ภาพถ่ายรังสี (Radiographic Testing: RT) เป็นเทคนิคหนึ่งในกลุ่มการทดสอบโดยไม่ทำลาย (Non-Destructive Testing: NDT) ที่ใช้ในการตรวจสอบโครงสร้างภายในของชิ้นงานหรือวัสดุ โดยไม่ทำลายหรือเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของมัน เทคนิคนี้ใช้รังสีที่สามารถทะลุผ่านวัสดุ เช่น รังสีเอกซ์ (X-rays) หรือรังสีแกมมา (Gamma rays) เพื่อสร้างภาพของโครงสร้างภายใน โดยในการตรวจสอบภาพถ่ายรังสี (Radiographic Inspection) ของชิ้นงานหล่อเหล็กหรือวัสดุอื่น ๆ ข้อบกพร่องที่พบได้ทั่วไปมีหลายประเภทแต่ละประเภทสามารถบ่งชี้ถึงปัญหาที่แตกต่างกันในกระบวนการผลิตหรือคุณภาพของวัสดุ ข้อบกพร่องหลัก ๆ ที่พบได้ในภาพถ่ายรังสี ได้แก่

4.3.2.1 รูพรุนจากแก๊ส (Gas Porosity) เป็นฟองอากาศหรือรูพรุนที่เกิดจากแก๊สที่ถูกกักขังในวัสดุเมื่อหล่อเสร็จ สามารถเป็นรูพรุนเดี่ยวหรือกระจายตัวเป็นกลุ่ม

4.3.2.2 สิ่งแปลกปลอมจากตะกั่วและทราย (Slag and Sand Inclusions) เกิดจากสิ่งสกปรกที่มากจากการหลอมโลหะ เช่น ตะกั่วหรือทรายที่ใช้ในการทำแม่พิมพ์หล่อติดเข้ามาในชิ้นงานหล่อ

4.3.2.3 การยุบตัว (Shrinkage) เกิดจากการหดตัวของโลหะเหลวเมื่อเย็นตัว มีหลายรูปแบบ เช่น รูพรุนจากการหดตัว (Shrinkage Porosity) การแตกหักจากการหดตัว (Shrinkage Cracks) หรือการเกิดช่องว่างภายใน (Voids)

4.3.2.4 การฉีกขาดจากความร้อน (Hot Tears) เกิดจากการแตกหักในขณะที่โลหะกำลังแข็งตัว มีลักษณะคล้ายรอยแตกและอาจส่งผลกระทบต่อความแข็งแรงของชิ้นงาน

4.3.2.5 รอยแตก (Cracks) เป็นรอยแตกในวัสดุที่อาจเกิดขึ้นระหว่างกระบวนการหล่อหรือการแปรรูป เป็นข้อบกพร่องที่สำคัญเนื่องจากอาจทำให้โครงสร้างอ่อนแอ

4.3.2.6 สิ่งแปลกปลอม (Inclusions) หมายถึงสิ่งแปลกปลอมใด ๆ ที่ถูกกักขังในวัสดุหลอม เช่น สารจากแม่พิมพ์หรือสารจากกระบวนการหลอม

4.3.2.7 ลักษณะของความไม่สม่ำเสมอหรือความไม่เรียบเนียนในเนื้อวัสดุ (Mottling) ซึ่งปรากฏเป็นบริเวณที่มีความเข้มหรือความสว่างต่างกันในภาพถ่ายรังสี อาจเกิดจากการกระจายตัวที่ไม่สม่ำเสมอของสารต่าง ๆ หรือข้อบกพร่องในกระบวนการผลิต ซึ่งส่งผลให้เกิดความไม่สม่ำเสมอที่มองเห็นได้ในโครงสร้างภายในของวัสดุ

4.3.3 ระดับความรุนแรงของการเกิดข้อบกพร่องถูกกำหนดโดยมาตรฐานสากล เช่น ASTM หรือ ASME ซึ่งกำหนดเกณฑ์และภาพตัวอย่างสำหรับแต่ละระดับ ขึ้นอยู่กับประเภทของข้อบกพร่องและลักษณะของชิ้นงานที่ตรวจสอบ โดยระดับทั่วไปของข้อบกพร่องในภาพถ่ายรังสีมีดังนี้

4.3.3.1 ระดับ 1 ข้อบกพร่องมีขนาดเล็กมากหรือพบได้น้อยมาก ไม่ส่งผลกระทบต่อความสมบูรณ์หรือการใช้งานของชิ้นงาน

4.3.3.2 ระดับ 2 ข้อบกพร่องมีขนาดปานกลางและพบได้บ่อยขึ้น อาจส่งผลกระทบต่อคุณภาพของชิ้นงาน แต่ยังคงอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้สำหรับการใช้งานทั่วไป

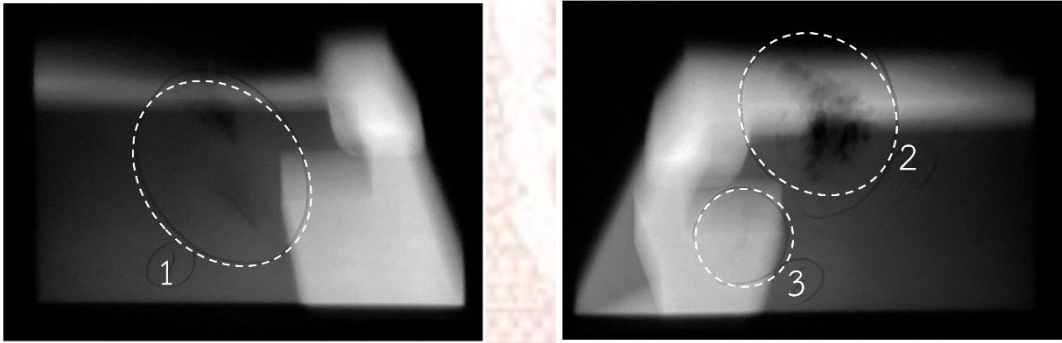
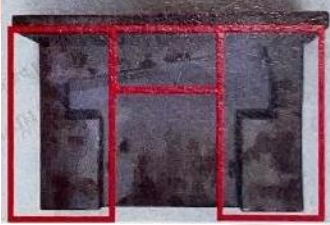
4.3.3.3 ระดับ 3 ข้อบกพร่องมีขนาดใหญ่หรือมีจำนวนมาก ส่งผลกระทบต่อความแข็งแรงและความสมบูรณ์ของชิ้นงาน ชิ้นงานที่มีข้อบกพร่องระดับนี้มักจะต้องมีการพิจารณาเพิ่มเติมว่าจะใช้ได้หรือไม่

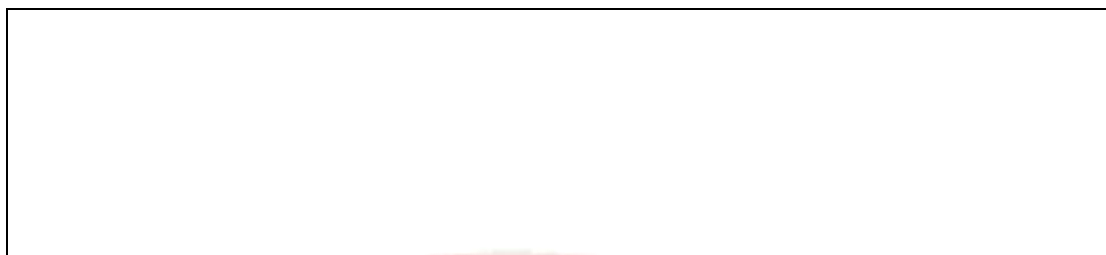
4.3.3.4 ระดับ 4 ข้อบกพร่องรุนแรงมาก มักจะไม่ใช่ที่ยอมรับสำหรับการใช้งานเนื่องจากอาจมีผลต่อความปลอดภัยหรือความแข็งแรงของชิ้นงาน

4.3.3.5 ระดับ 5 ข้อบกพร่องที่มีความรุนแรงมากที่สุด ซึ่งไม่สามารถยอมรับได้สำหรับการใช้งานเนื่องจากอาจส่งผลต่อความปลอดภัย ความแข็งแรง หรือความสมบูรณ์ของโครงสร้าง

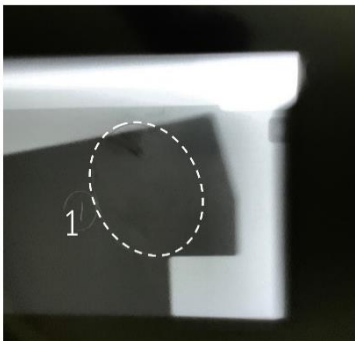
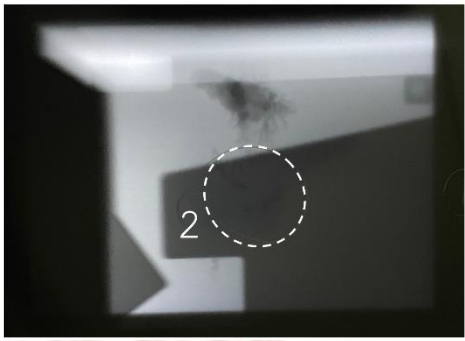
โดยชิ้นงานที่นำมาทดสอบเป็นเหล็กเกรด AISI 4140 ใช้การตรวจสอบด้วยการเอ็กซเรย์ตามมาตรฐาน ASTM E446 ผลการทดสอบพบข้อบกพร่อง 3 ชนิด จำแนกเป็น รูพรุนจากแก๊ส (Gas Porosity: CA) ระดับ 4-5 สิ่งแปลกปลอมจากตะกรันและทราย (Slag and Sand Inclusions: CB) ระดับ 5 และข้อบกพร่องที่ผิว (Surface Defect) ซึ่งข้อบกพร่องเหล่านี้สรุปไว้ดังตารางที่ 4-35

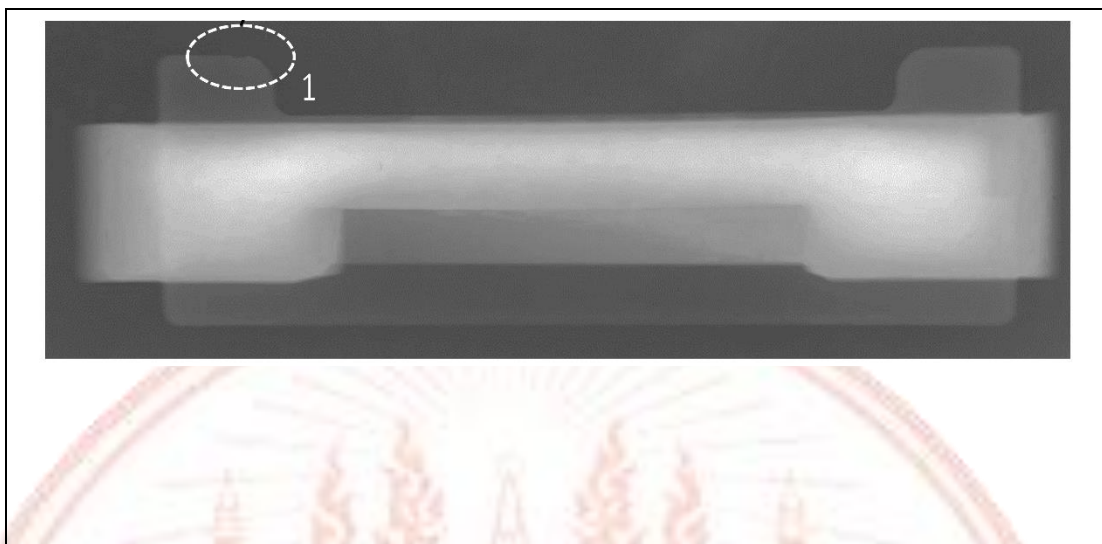
ตารางที่ 4-35 รายงานผลการทดสอบด้วยภาพถ่ายรังสี

ตำแหน่ง	ประเภทของข้อบกพร่อง	ตำแหน่งของข้อบกพร่อง
มุมที่ 1 	Gas Porosity (CA)-5	จุดที่ 1
	Slag and sand inclusions (CB)-5	จุดที่ 2
	Gas Porosity (CA)-4	จุดที่ 3
		
มุมที่ 2 	Gas Porosity (CA)-5	จุดที่ 1
	Slag and sand inclusions (CB)-5	จุดที่ 2
	Gas Porosity (CA)-4	จุดที่ 3
		



ตารางที่ 4-35 (ต่อ)

ตำแหน่ง	ประเภทของข้อบกพร่อง	ตำแหน่งของข้อบกพร่อง
มุมที่ 3 	Gas Porosity (CA)-5	จุดที่ 1
	Gas Porosity (CA)-4	จุดที่ 2
 		
มุมที่ 4 	Surface Defect	จุดที่ 1



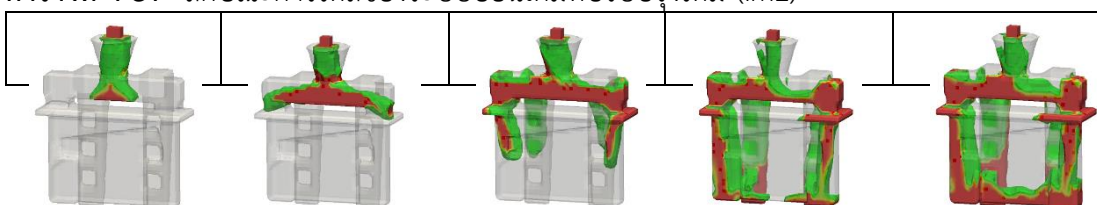
4.4 การเปรียบเทียบผลการจำลองสถานการณ์ของระบบป้อนเติมรูปแบบเดิมและรูปแบบใหม่

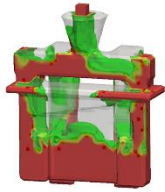
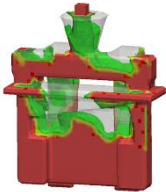
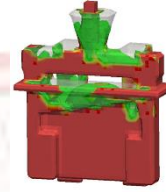
4.4.1 การเปรียบเทียบผลการจำลองลักษณะการไหล (Fluid Fraction) และเวลาในการเติมเต็ม (Fill Time) ของระบบป้อนเติมรูปแบบเดิม (CML) และระบบป้อนเติมที่ปรับปรุงใหม่ (IML) มีลักษณะการไหลที่ต่างกันเล็กน้อย ในส่วนของระบบป้อนเติมรูปแบบเดิม (CML) จะมีลักษณะการไหลจากด้านบนลงมาทางด้านข้างของชิ้นงานแล้วค่อย ๆ ไหลเติมเต็มมาจากด้านหลังเป็นส่วนสุดท้าย และค่อย ๆ เติบโตขึ้นงาน ในส่วนของระบบป้อนเติมที่ปรับปรุงใหม่ (IML) จะมีลักษณะการไหลจากด้านบนลงมาทางด้านข้างชิ้นงานพร้อม ๆ กับไหลเติมเต็มในส่วนด้านหลังจนเต็มชิ้นงาน ดังตารางที่ 4-36 ถึง 4-37 โดยระบบป้อนเติมรูปแบบเดิมใช้เวลาในการเติมเต็ม 5.158 วินาที ระบบป้อนเติมที่ปรับปรุงใหม่ใช้เวลาในการเติมเต็ม 7.745 วินาที

ตารางที่ 4-36 ลักษณะการไหลของระบบป้อนเติมรูปแบบเดิม (CML)

10% / 0.516 วินาที	20% / 1.032 วินาที	30% / 1.547 วินาที	40% / 2.063 วินาที	50% / 2.579 วินาที
60% / 3.095 วินาที	70% / 3.611 วินาที	80% / 4.126 วินาที	90% / 4.642 วินาที	100% / 5.158 วินาที

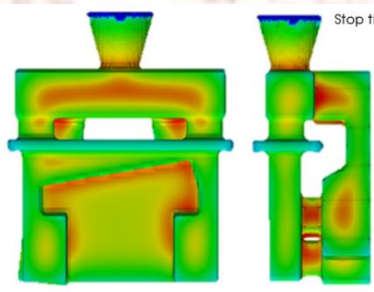
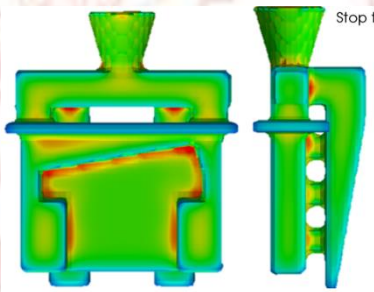
ตารางที่ 4-37 ลักษณะการไหลของระบบป้อนเติมที่ปรับปรุงใหม่ (IML)



10% / 0.735 วินาที	20% / 1.471 วินาที	30% / 2.206 วินาที	40% / 2.942 วินาที	50% / 3.677 วินาที
				
60% / 4.413 วินาที	70% / 5.148 วินาที	80% / 5.883 วินาที	90% / 6.619 วินาที	100% / 7.745 วินาที

4.4.2 การเปรียบเทียบผลการจำลองลักษณะการแข็งตัว (Solidification Time) ของระบบป้อนเต็มรูปแบบเดิม (CML) และระบบป้อนเต็มรูปแบบที่ปรับปรุงใหม่ (IML) มีลักษณะแตกต่างกันเล็กน้อย เริ่มจากระบบป้อนเต็มรูปแบบเดิม (CML) ซึ่งจะมีการแข็งตัวตำแหน่งสุดท้ายอยู่ที่บริเวณร่องกลางชิ้นงาน บริเวณทางเข้า (Gate₁) และบริเวณทางวิ่ง (Runner) และในส่วนของการระบบป้อนเต็มรูปแบบที่ปรับปรุงใหม่ (IML) มีการแข็งตัวอยู่ที่บริเวณเดียวกันกับระบบป้อนเต็มรูปแบบเดิม (CML) และใช้เวลาในการแข็งตัวน้อยลง 157.044 วินาที เนื่องจากมีปริมาตรลดลงถึง 1899.14 ลูกบาศก์เซนติเมตร แต่สังเกตจากสีในตารางที่ 4-38 จะเห็นได้ว่าระบบป้อนเต็มรูปแบบเดิมจะมีความร้อนสะสมมากกว่าระบบป้อนเต็มรูปแบบที่ปรับปรุงใหม่ (IML) ซึ่งวิเคราะห์ได้ว่าระบบป้อนเต็มรูปแบบเดิม (CML) จะแข็งตัวช้ากว่าและอาจเกิดข้อบกพร่องที่ชิ้นงานมากกว่าระบบป้อนเต็มรูปแบบที่ปรับปรุงใหม่ (IML)

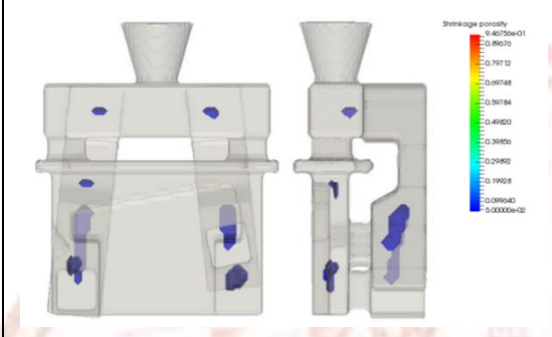
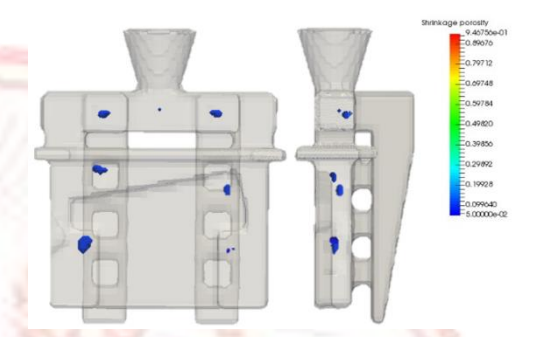
ตารางที่ 4-38 การเปรียบเทียบผลการจำลองลักษณะการแข็งตัว (Solidification) ของระบบป้อนเต็มรูปแบบเดิมและระบบป้อนเต็มรูปแบบที่ปรับปรุงใหม่

ระบบป้อนเต็มรูปแบบเดิม (CML)	ระบบป้อนเต็มรูปแบบที่ปรับปรุงใหม่ (IML)
 Stop time of solidification (s) 4.33797e+02 385.60 337.40 289.20 241.00 192.80 144.60 93.399 48.200 0.00000e+00	 Stop time of solidification (s) 2.76753e+02 246.00 215.25 184.50 153.75 123.00 92.251 61.501 30.750 0.00000e+00
433.797 วินาที	276.753 วินาที

4.4.3 การเปรียบเทียบผลการจำลองลักษณะการเกิดโพรงหดตัว (Shrinkage Porosity) ของระบบป้อนเต็มรูปแบบเดิม (CML) และระบบป้อนเต็มรูปแบบที่ปรับปรุงใหม่ (IML) มีลักษณะการเกิดโพรงหดตัวแตกต่างกันโดยเริ่มจากระบบป้อนเต็มรูปแบบเดิม (CML) มีตำแหน่งที่เกิดโพรงหดตัวอยู่ที่บริเวณทางวิ่ง (Runner) และในเนื้อชิ้นงาน ส่วนของการระบบป้อนเต็มรูปแบบที่ปรับปรุงใหม่ (IML) มีตำแหน่งการเกิดโพรงหดตัวขนาดใหญ่ที่บริเวณด้านบนซ้าย ด้านขวาและบริเวณด้านล่างซ้ายและเกิดโพรงหดตัวขนาดเล็ก

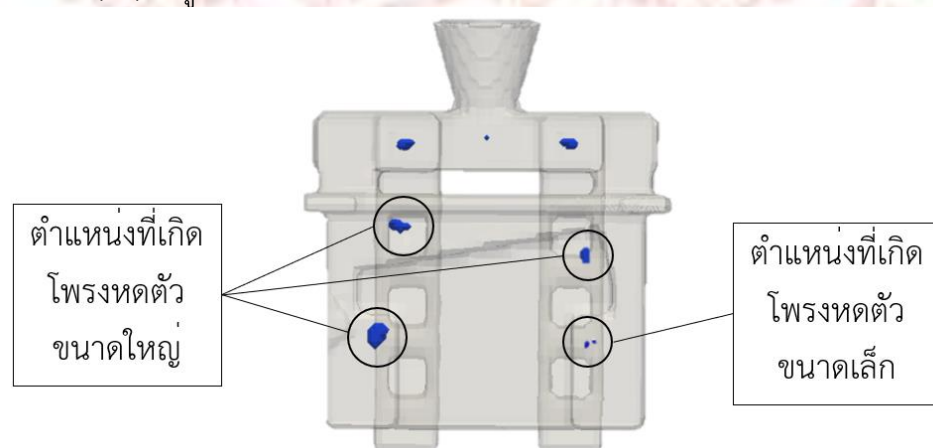
เล็กบริเวณด้านขวาของชิ้นงาน ดังตารางที่ 4-39 โดยระบบป้อนเดิมที่ปรับปรุงใหม่ (IML) สามารถลด ปริมาณการเกิดโพรงหดตัวได้ถึง 25.12 ลูกบาศก์เซนติเมตร

ตารางที่ 4-39 การเปรียบเทียบผลการจำลองการเกิดโพรงหดตัว (Shrinkage Porosity)

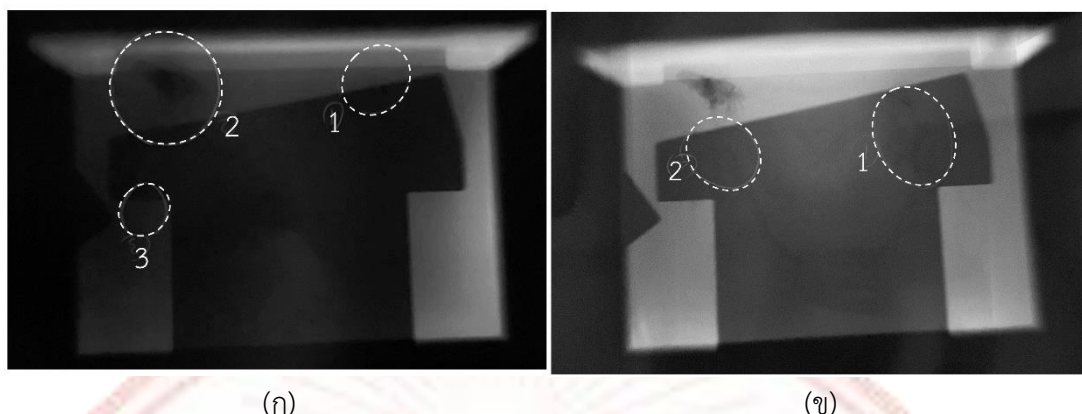
ระบบป้อนเดิมรูปแบบเดิม (CML)	ระบบป้อนเดิมที่ปรับปรุงใหม่ (IML)
	
41.25 ลูกบาศก์เซนติเมตร	16.13 ลูกบาศก์เซนติเมตร

4.4.4 การเปรียบเทียบผลการจำลองกับข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นจริง

ผลของการจำลองข้อบกพร่องภายในของชิ้นงานจากโปรแกรมที่เกิดขึ้นพบว่าเกิดโพรงหดตัว ขนาดใหญ่ที่บริเวณด้านบนซ้าย ด้านขวาและบริเวณด้านล่างซ้ายและเกิดโพรงหดตัวขนาดเล็กบริเวณ ด้านขวาของชิ้นงานและมีปริมาณการเกิดโพรงหดตัวอยู่ที่ 16.13 ลูกบาศก์เซนติเมตร ดังรูปที่ 4-22 ซึ่งผลจากการจำลองจากโปรแกรมมีตำแหน่งและขนาดของโพรงหดตัวใกล้เคียงกับผลการทดสอบโดยใช้ภาพถ่ายรังสี (RT) ดังรูปที่ 4-23



รูปที่ 4-22 ผลการจำลองการเกิดโพรงหดตัวจากโปรแกรมแสดงตำแหน่งโพรงหดตัว



รูปที่ 4-23 (ก) ภาพถ่ายรังสีด้านหน้าของชิ้นงาน (ข) ภาพถ่ายรังสีด้านหลังของชิ้นงาน

4.5 ผลการทดลองตัวแปรอุณหภูมิการเทเพื่อแก้ไขปัญหาการลดข้อบกพร่องของโพรงหดตัว

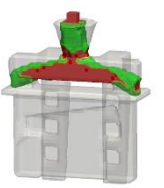
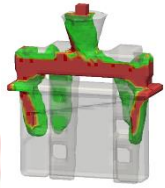
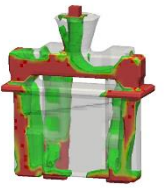
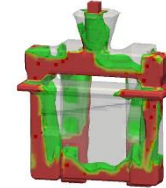
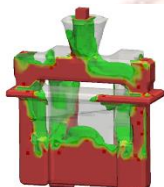
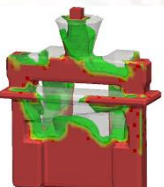
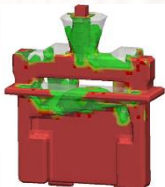
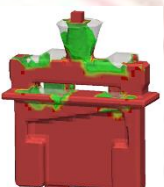
4.5.1 ในการทดลองครั้งนี้จะเป็นการปรับอุณหภูมิการเทจำนวน 4 เงื่อนไข ได้แก่ 1680, 1670, 1660 และ 1650 องศาเซลเซียส ($^{\circ}\text{C}$) โดยมีระบบป้อนเติมที่ปรับปรุงใหม่ (IML) เป็นแม่พิมพ์ในการทดลอง และผลลัพธ์ที่ได้จากโปรแกรมมีดังนี้ ลักษณะการไหล (Fluid Fraction) เวลาในการเติมเต็ม (Fill Time) ลักษณะการแข็งตัว (Solidification) ลักษณะของการเกิดโพรงหดตัว (Shrinkage Porosity)

- ลักษณะการไหล (Fluid Fraction) และเวลาในการเติมเต็ม (Fill Time) ในการพิจารณานั้นจะพิจารณาการป้อนเติมในปริมาณต่าง ๆ ของทั้ง 4 แบบจำลอง พบว่ามีลักษณะการไหลเหมือนกันคือ ไหลจากด้านบนลงมาทางด้านข้างของชิ้นงานแล้วค่อย ๆ ไหลเติมเต็มจากด้านหลังจนเต็มชิ้นงาน เมื่อลดอุณหภูมิการเท ลักษณะการไหลของทั้ง 4 แบบจำลองไม่มีความแตกต่างกัน ความเร็วในการไหลของโลหะเหลวค่อนข้างสม่ำเสมอและทั้ง 4 แบบจำลองเกิดการไหลแบบปั่นป่วนค่อนข้างน้อยดังตารางที่ 4-40 ถึง 4-43 แสดงลำดับการไหลเข้าโพรงแบบของโลหะเหลว ใช้เวลาในการเติมเต็มใกล้เคียงกันดังตารางที่ 4-44

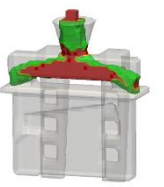
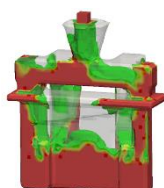
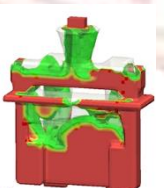
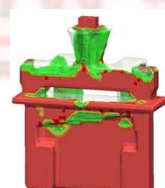
ตารางที่ 4-40 ลักษณะการไหลของแบบจำลอง IMP1680

10% / 0.788 วินาที	20% / 1.576 วินาที	30% / 2.363 วินาที	40% / 3.151 วินาที	50% / 3.939 วินาที
60% / 4.727 วินาที	70% / 5.515 วินาที	80% / 6.302 วินาที	90% / 7.090 วินาที	100% / 7.878 วินาที

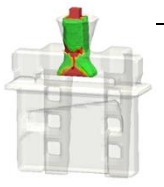
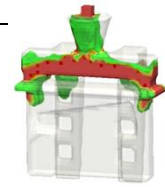
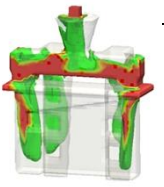
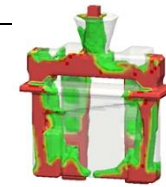
ตารางที่ 4-41 ลักษณะการไหลของแบบจำลอง IMP

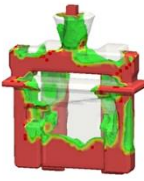
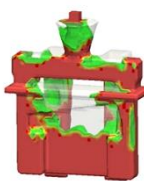
				
10% / 0.735 วินาที	20% / 1.471 วินาที	30% / 2.206 วินาที	40% / 2.942 วินาที	50% / 3.677 วินาที
				
60% / 4.413 วินาที	70% / 5.148 วินาที	80% / 5.883 วินาที	90% / 6.619 วินาที	100% / 7.745 วินาที

ตารางที่ 4-42 ลักษณะการไหลของแบบจำลอง IMP1660

				
10% / 0.789 วินาที	20% / 1.578 วินาที	30% / 2.367 วินาที	40% / 3.156 วินาที	50% / 3.945 วินาที
				
60% / 4.733 วินาที	70% / 5.522 วินาที	80% / 6.311 วินาที	90% / 7.100 วินาที	100% / 7.723 วินาที

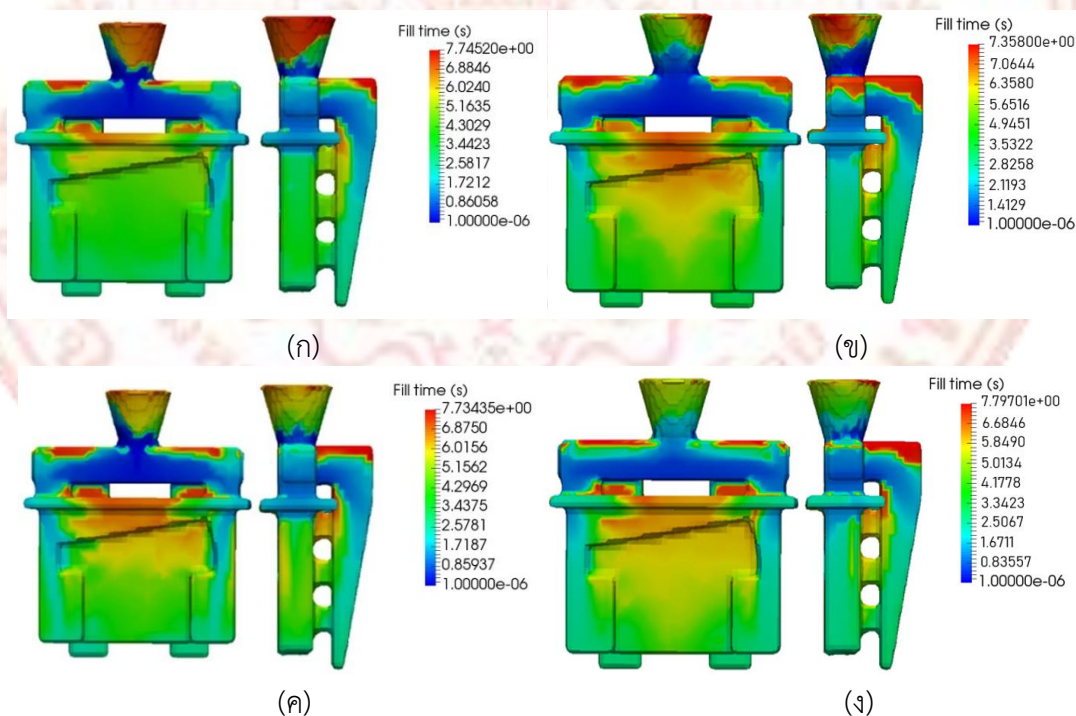
ตารางที่ 4-43 ลักษณะการไหลของแบบจำลอง IMP1650

				
---	---	---	--	---

10% / 0.780 วินาที	20% / 1.599 วินาที	30% / 2.339 วินาที	40% / 3.119 วินาที	50% / 3.899 วินาที
				
60% / 4.678 วินาที	70% / 5.458 วินาที	80% / 6.238 วินาที	90% / 7.017 วินาที	100% / 7.797 วินาที

ตารางที่ 4-44 เวลาที่ใช้ในการเติมเต็มของการปรับอุณหภูมิเท

ผลการจำลอง	แบบจำลอง	IMP1680	IMP	IMP1660	IMP1650
เวลาในการเติมเต็ม (วินาที)		7.878	7.745	7.734	7.797



ภาพที่ 4-24 ผลการจำลองเวลาในการเติมเต็ม (ก) แบบจำลอง IMP1680 (ข) แบบจำลอง IMP (ค) แบบจำลอง IMP1660 (ง) แบบจำลอง IMP1650

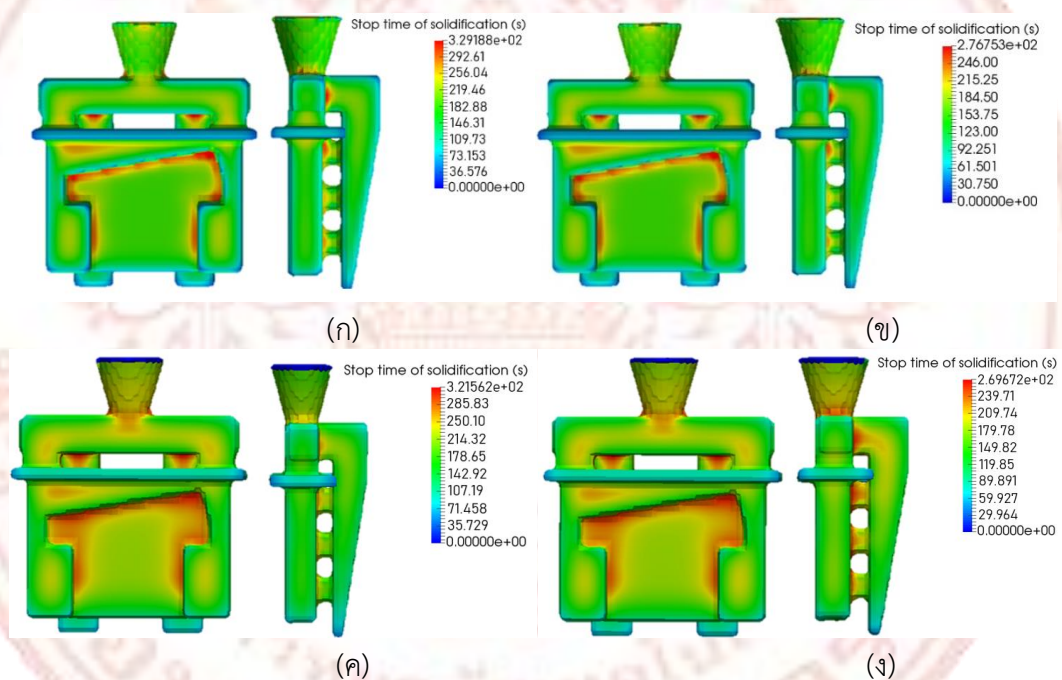
ผลจากการจำลองด้วยโปรแกรม Cast-Designer สามารถจำลองเวลาในการเติมเต็มของโลหะเหลว (Fill Time) ของแบบจำลองการปรับอุณหภูมิเททั้งหมด 4 แบบจำลอง พบว่าแบบจำลอง

IMP1660 ใช้เวลาน้อยสุดคือ 7.734 วินาที ตามด้วยแบบจำลอง IMP และแบบจำลอง IMP1650 ใช้เวลา 7.745 วินาที และ 7.797 วินาที ตามลำดับ และแบบจำลอง IMP1680 ใช้เวลามากที่สุดคือ 7.878 วินาที

- ลักษณะการแข็งตัว (Solidification) พิจารณาลักษณะการแข็งตัวจากการแข็งตัวในช่วงเวลาสุดท้ายของทั้ง 4 แบบจำลอง ปรากฏว่าบริเวณที่แข็งตัวช้าที่สุดคือบริเวณร่องตรงกลางชิ้นงาน ซึ่งลักษณะการแข็งตัวสามารถบอกถึงตำแหน่งที่แข็งตัวล่าช้าที่สุดท้ายและยังสามารถทำนายถึงจุดที่จะเกิดโพรงหดตัวที่ชิ้นงานได้อีกด้วย ดังภาพที่ 4-25 โดยทั้ง 4 แบบจำลองใช้เวลาในการแข็งตัวดังตารางที่ 4-45

ตารางที่ 4-45 เวลาที่ใช้ในการแข็งตัวของการปรับอุณหภูมิเท

ผลการจำลอง \ แบบจำลอง	IMP1680	IMP	IMP1660	IMP1650
เวลาในการแข็งตัว (วินาที)	329.188	276.753	275.094	269.672



ภาพที่ 4-25 ผลการจำลองการแข็งตัว (ก) แบบจำลอง IMP1680 (ข) แบบจำลอง IMP (ค) แบบจำลอง IMP1660 (ง) แบบจำลอง IMP1650

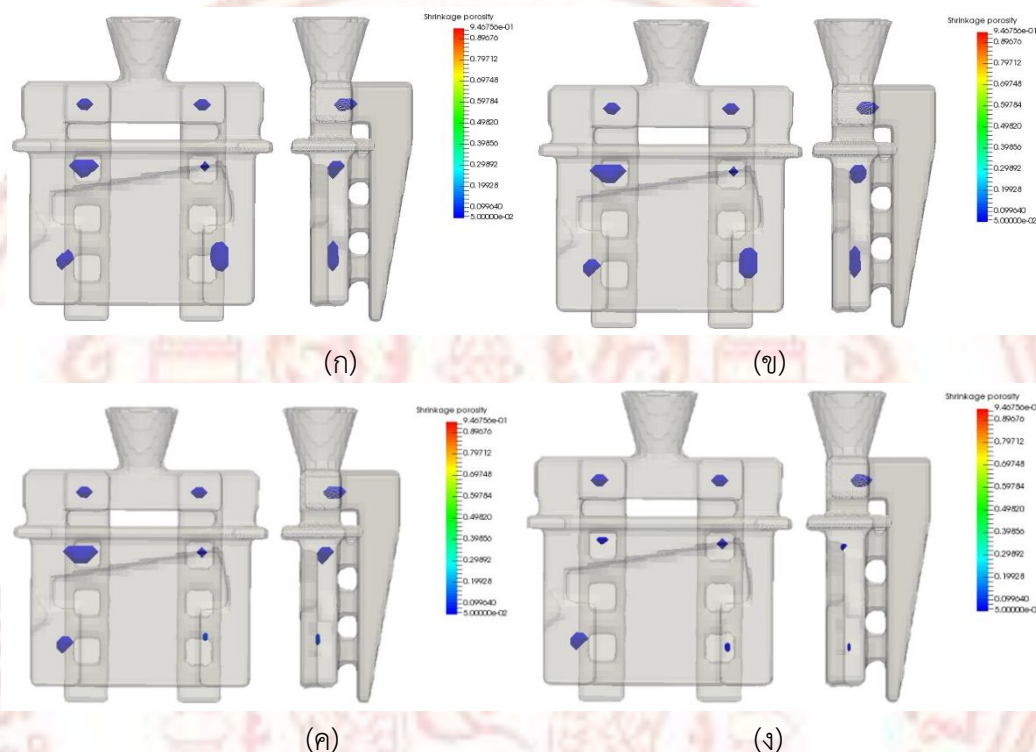
ผลจากการจำลองด้วยโปรแกรม Cast-Designer สามารถจำลองเวลาในการแข็งตัว (Solidification Time) ของแบบจำลองการปรับอุณหภูมิเททั้งหมด 4 แบบจำลอง พบว่าแบบจำลอง IMP1650 ใช้เวลาน้อยสุดคือ 269.672 วินาที ตามด้วยแบบจำลอง IMP1660 และแบบจำลอง IMP ใช้เวลา 275.094 วินาที และ 276.753 วินาที ตามลำดับ และแบบจำลอง IMP1680 ใช้เวลามากที่สุดคือ 329.188 วินาที

- ลักษณะการเกิดโพรงหดตัว (Shrinkage Porosity) การพิจารณาในเงื่อนไขนี้จะสังเกตบริเวณที่มีการเกิดโพรงหดตัวของแบบจำลองทั้ง 4 แบบ ปรากฏว่าชิ้นงานมีปริมาตรโพรงหดตัวในเนื้อชิ้นงาน

และบริเวณทางวิ่ง (Runner) ดังภาพที่ 4-26 โดยทั้ง 4 แบบจำลองมีปริมาตรการเกิดโพรงหดตัวดังตารางที่ 4-46

ตารางที่ 4-46 ปริมาตรการเกิดโพรงหดตัวของการปรับอุณหภูมิเท

ผลการจำลอง / แบบจำลอง	IMP1680	IMP	IMP1660	IMP1650
ปริมาตรการเกิดโพรงหดตัว (ลูกบาศก์เซนติเมตร)	18.74	16.13	13.79	12.29



ภาพที่ 4-26 ผลการจำลองการเกิดโพรงหดตัว (ก) แบบจำลอง IMP1680 (ข) แบบจำลอง IMP (ค) แบบจำลอง IMP1660 (ง) แบบจำลอง IMP1650

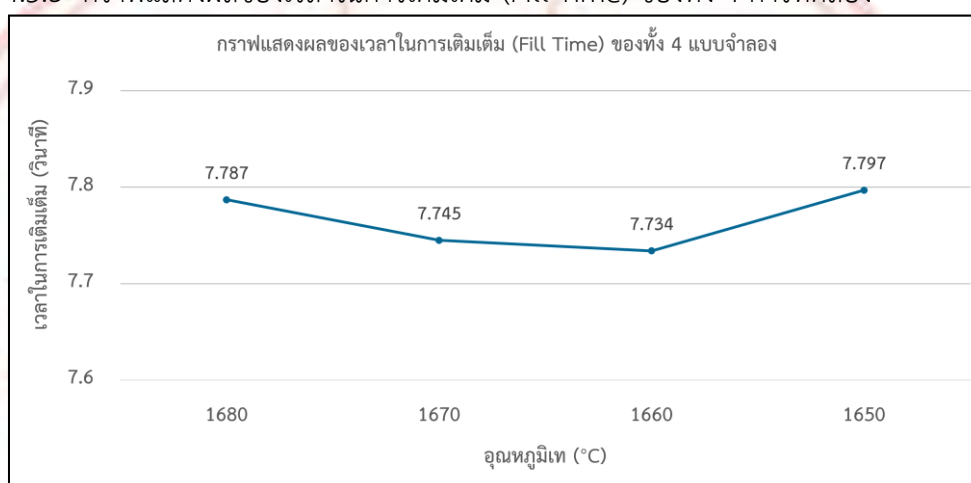
ผลจากการจำลองด้วยโปรแกรม Cast-Designer สามารถจำลองการเกิดโพรงหดตัว (Shrinkage Porosity) ของแบบจำลองการปรับอุณหภูมิเททั้งหมด 4 แบบจำลอง พบว่าแบบจำลอง IMP1650 มีปริมาตรโพรงหดตัวน้อยสุดคือ 12.29 ลูกบาศก์เซนติเมตร ตามด้วยแบบจำลอง IMP1660 และแบบจำลอง IMP มีปริมาตรโพรงหดตัว 13.79 ลูกบาศก์เซนติเมตร และ 16.13 ลูกบาศก์เซนติเมตร ตามลำดับ และแบบจำลอง IMP1680 มีปริมาตรโพรงหดตัวมากที่สุดคือ 18.74 ลูกบาศก์เซนติเมตร

4.5.2 ผลการทดลองการปรับอุณหภูมิเทจากการจำลองด้วยโปรแกรม Cast-Designer ทั้ง 4 การทดลอง สรุปผลของเวลาในการเติมเต็ม (Fill Time) เวลาในการแข็งตัว (Solidification Time) และปริมาตรการเกิดโพรงหดในชิ้นงาน (Shrinkage Porosity) ได้ดังนี้

ตารางที่ 4-47 ตารางสรุปผลการทดลองทั้ง 4 การทดลอง

แบบจำลอง	อุณหภูมิเท (°C)	Fill Time (sec)	Solidification Time (sec)	Total Shrinkage (cm ³)
IMP1680	1680	7.787	329.188	18.74
IMP	1670	7.745	276.753	16.13
IMP1660	1660	7.734	275.094	13.79
IMP1650	1650	7.797	269.672	12.29

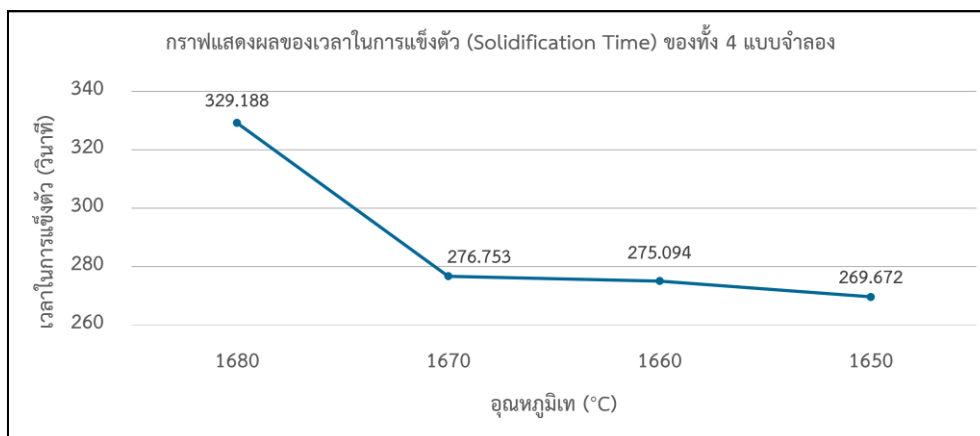
4.5.3 กราฟแสดงผลของเวลาในการเติมเต็ม (Fill Time) ของทั้ง 4 การทดลอง



ภาพที่ 4-27 กราฟแสดงผลของเวลาในการเติมเต็ม (Fill Time) ของทั้ง 4 การทดลอง

กราฟนี้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิเท (°C) กับเวลาในการเติมเต็ม (Fill Time) ของแบบจำลองทั้ง 4 การทดลอง โดยมีการเปรียบเทียบเวลาที่ใช้ในการเติมเต็มที่อุณหภูมิต่าง ๆ ได้แก่ 1680°C, 1670°C, 1660°C และ 1650°C กราฟแสดงให้เห็นว่าเวลาการเติมเต็มจะลดลงเมื่ออุณหภูมิลดลงจาก 1680°C ไปถึง 1660°C แต่เมื่ออุณหภูมิลดลงอีกที่ 1650°C เวลาในการเติมเต็มกลับเพิ่มขึ้นเล็กน้อย

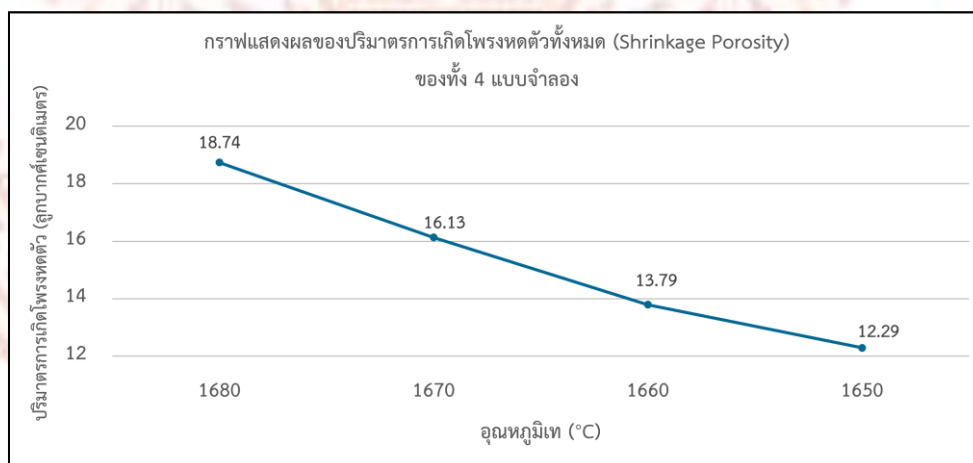
4.5.4 กราฟแสดงผลของเวลาในการแข็งตัว (Solidification Time) ของทั้ง 4 การทดลอง



ภาพที่ 4-28 กราฟแสดงผลของเวลาในการแข็งตัว (Solidification Time) ของทั้ง 4 การทดลอง

กราฟนี้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิเท (°C) กับเวลาในการแข็งตัว (Solidification Time) ของแบบจำลองทั้ง 4 การทดลอง โดยมีการเปรียบเทียบเวลาที่ใช้ในการแข็งตัวที่อุณหภูมิต่างๆ ได้แก่ 1680°C, 1670°C, 1660°C และ 1650°C กราฟแสดงให้เห็นว่าเวลาในการแข็งตัวของโลหะลดลงเมื่อ อุณหภูมิเทของโลหะที่ใช้ลดลงจาก 1680°C ไปยัง 1650°C โดยเวลาในการแข็งตัวลดลงอย่างมีนัยสำคัญในช่วงเริ่มต้นแต่หลังจากนั้นการลดลงค่อย ๆ น้อยลง

4.5.5 กราฟแสดงผลของปริมาตรการเกิดโพรงหดตัว (Shrinkage Porosity) ของทั้ง 4 การทดลอง



ภาพที่ 4-29 กราฟแสดงผลของปริมาตรการเกิดโพรงหดตัว (Shrinkage Porosity) ของทั้ง 4 การทดลอง

กราฟนี้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิเท (°C) กับปริมาตรการเกิดโพรงหดตัวทั้งหมด (Shrinkage Porosity) ของแบบจำลองทั้ง 4 การทดลอง โดยมีการเปรียบเทียบปริมาตรโพรงหดตัวที่อุณหภูมิต่างๆ ได้แก่ 1680°C, 1670°C, 1660°C และ 1650°C กราฟแสดงให้เห็นว่าปริมาตรการเกิดโพรงหดตัวมีแนวโน้มลดลงอย่างต่อเนื่องเมื่ออุณหภูมิเทของโลหะที่ใช้ลดลงจาก 1680°C ไปยัง 1650°C โดยการลดลงมีลักษณะเป็นเส้นตรง

4.6 ผลการทดลองการเกิดโพรงหดตัวที่ชิ้นงานและระบบป้อนเต็ม

จากการวิเคราะห์ปริมาณการเกิดโพรงหดตัวของการทดลองทั้ง 21 การทดลอง ประกอบไปด้วยระบบป้อนเต็มรูปแบบเดิม (CML) 1 การทดลอง ระบบป้อนเต็มที่มีการปรับตัวแปร 15 การทดลอง ระบบป้อนเต็มรูปแบบใหม่ (NML) 1 การทดลอง ระบบป้อนเต็มปรับปรุงใหม่ (IML) 1 การทดลองและระบบป้อนเต็มที่ปรับอุณหภูมิเท 3 การทดลอง สามารถแบ่งปริมาณการเกิดโพรงหดตัวในการพิจารณาได้ 2 ส่วน ได้แก่ปริมาณการเกิดโพรงหดตัวในระบบป้อนเต็มและปริมาณการเกิดโพรงหดตัวในชิ้นงานได้ดังตารางที่ 4-48 ซึ่งจากตารางจะเห็นได้ว่าผลของการเกิดโพรงหดตัวมีแนวโน้มที่ดีขึ้น เนื่องจากเมื่อพิจารณาปริมาณโพรงหดตัวที่เกิดขึ้นทั้งในระบบป้อนเต็มและในชิ้นงานแสดงให้เห็นว่าปริมาณโพรงหดตัวที่เกิดขึ้นในชิ้นงานน้อยกว่าปริมาณโพรงหดที่เกิดขึ้นในระบบป้อนเต็ม ซึ่งขั้นตอนสุดท้ายของการหล่อนั้นจะตัดระบบป้อนเต็มโลหะเหลวออกจึงไม่ส่งผลกระทบต่อคุณภาพของชิ้นงาน

ตารางที่ 4-48 ปริมาณการเกิดโพรงหดตัวที่ชิ้นงานและระบบป้อนเต็ม

แบบจำลอง	ปริมาณการเกิดโพรงหดตัวในชิ้นงาน (cm ³)	ปริมาณการเกิดโพรงหดตัวในระบบป้อนเต็ม (cm ³)	เปอร์เซ็นต์การเกิดโพรงหดตัวทั้งหมด (เปอร์เซ็นต์)
CML	13.04	27.07	0.603
1	12.68	16.92	0.586
2	8.19	10.91	0.378
3	6.28	8.57	0.291
4	6.53	8.88	0.302
5	6.34	8.72	0.292
6	6.93	9.69	0.319
7	7.00	10.06	0.324
8	6.47	9.18	0.312
9	6.68	9.13	0.311
10	6.76	8.98	0.306
11	6.36	8.67	0.307
12	6.49	9.45	0.275
13	6.07	8.84	0.280
14	6.52	8.17	0.302
15	6.17	8.61	0.285
NML	7.15	8.95	0.331
IML	7.19	8.94	0.332

IML1680	8.35	10.39	0.386
IML1660	6.17	7.62	0.284
IML1650	5.49	6.80	0.253

ในบทที่ 4 ได้ทำการจำลองและนำเสนอผลลัพธ์ของการทดลอง โดยแบ่งผลลัพธ์เป็นเวลาในการเติมเต็ม (Fill Time) เวลาในการแข็งตัว (Solidification Time) และปริมาตรการเกิดโพรงหดตัว (Shrinkage Porosity) ของแต่ละแบบจำลอง ผลการจำลองแสดงให้เห็นถึงความแตกต่างระหว่างแบบจำลองที่ชัดเจนในเรื่องของเวลาในการเติมเต็มโลหะ (Fill Time) เวลาการแข็งตัว (Solidification Time) และปริมาตรการเกิดโพรงหดตัว (Shrinkage Porosity) ซึ่งสามารถนำข้อมูลเหล่านี้ไปใช้ในการประเมินประสิทธิภาพของกระบวนการหล่อโลหะและพิจารณาตัวแปรที่เหมาะสมสำหรับการออกแบบที่ต้องการความแม่นยำและประสิทธิภาพสูงสุดในบทต่อไป



บทที่ 5

สรุปผลและข้อเสนอแนะ

ในการดำเนินการวิเคราะห์การไหลของระบบป้อนเดิมของชิ้นงาน Body OTC Steady ซึ่งเป็นชิ้นงานจาก บริษัท พรซิชั่น แมนูแฟคเจอร์ริง จำกัด ซึ่งผู้วิจัยได้นำชิ้นงานมาทำการออกแบบระบบป้อนเดิมของโลหะเหลวขึ้นใหม่เพื่อลดข้อบกพร่องของชิ้นงานที่เกิดจากโพรงหดตัว (Shrinkage Porosity) และลดต้นทุนด้านการผลิต โดยนำไปจำลองพฤติกรรมด้วยโปรแกรม CAST-DESIGNER และนำผลที่ได้มาทำการสรุปได้ดังนี้

5.1 สรุปผลการทดลอง

5.2 อภิปรายผล

5.3 ข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

จากการจำลองพฤติกรรมการไหลของระบบป้อนเดิมรูปแบบเดิม (CML) และการจำลองพฤติกรรมการไหลของการปรับตัวแปรระบบป้อนเดิมทั้ง 15 การทดลอง สามารถสรุปได้ว่าตัวแปรที่ทำให้มีปริมาตรการเกิดโพรงหดตัวน้อยที่สุด คือ ระบบป้อนเดิมที่มีการปรับปรุงใหม่ (IML) โดยผลจากการจำลองจะแบ่งเป็น 4 หัวข้อได้แก่ พฤติกรรมการไหลตัวของโลหะเหลว (Fluid Fraction) เวลาในการเติมเต็มของโลหะเหลว (Fill Time) เวลาในการแข็งตัวของโลหะเหลว (Solidification Time) และการเกิดโพรงหดตัว (Shrinkage Porosity) ซึ่งจะเป็นการเปรียบเทียบผลระหว่างระบบป้อนเดิมรูปแบบเดิม (CML) กับระบบป้อนเดิมที่มีการปรับปรุงใหม่ (IML) ได้ดังนี้

5.1.1 พฤติกรรมการไหลตัวของโลหะเหลว (Fluid Fraction) และเวลาในการเติมเต็มของโลหะเหลว (Fill Time) ระหว่างระบบป้อนเดิมรูปแบบเดิม (CML) กับระบบป้อนเดิมที่มีการปรับปรุงใหม่ (IML) จากผลการจำลองมีลักษณะการไหลที่แตกต่างกันเล็กน้อย ในส่วนของระบบป้อนเดิมรูปแบบเดิม (CML) จะมีลักษณะการไหลจากด้านบนลงมาทางด้านข้างของชิ้นงานแล้วค่อย ๆ ไหลเติมเต็มมาจากด้านหลังเป็นส่วนสุดท้าย ซึ่งพบว่าระบบป้อนเดิมรูปแบบเดิม (CML) มีการไหลที่ไม่ค่อยสม่ำเสมอและเกิดการไหลแบบปั่นป่วน ในส่วนของระบบป้อนเดิมที่มีการปรับปรุงใหม่ (IML) จะมีลักษณะการไหลจากด้านบนลงมาด้านข้างชิ้นงานพร้อม ๆ กับไหลเติมเต็มในส่วนด้านหลังจนเต็มชิ้นงาน ซึ่งพบว่าระบบป้อนเดิมที่มีการปรับปรุง (IML) มีการไหลที่ค่อนข้างสม่ำเสมอและมีการไหลแบบปั่นป่วนที่น้อยกว่าระบบป้อนเดิมรูปแบบเดิม (CML) โดยระบบป้อนเดิมรูปแบบเดิม (CML) ใช้เวลาในการเติมเต็ม 5.158 วินาที ระบบป้อนเดิมที่มีการปรับปรุงใหม่ (IML) ใช้เวลาในการเติมเต็ม 7.354 วินาที

5.1.2 เวลาในการแข็งตัวของโลหะเหลว (Solidification Time) ระหว่างระบบป้อนเดิมรูปแบบเดิม (CML) กับระบบป้อนเดิมที่มีการปรับปรุงใหม่ (IML) จากผลการจำลองแสดงให้เห็นถึงลำดับการแข็งตัวและบริเวณที่มีความร้อนสะสมซึ่งเป็นสาเหตุของการเกิดโพรงหดตัว โดยระบบป้อนเดิมรูปแบบเดิม (CML) และระบบป้อนเดิมที่มีการปรับปรุงใหม่ (IML) มีลำดับการแข็งตัวที่เป็นไปตามลำดับคือเริ่มแข็งตัวจากผิวด้านนอกเข้าสู่ด้านในชิ้นงานและการแข็งตัวตำแหน่งสุดท้ายของทั้ง 2 ระบบ เกิดที่บริเวณเดียวกันคือร่องกลางชิ้นงานบริเวณทางเข้า (Gate₁) และบริเวณทางวิ่ง (Runner) โดยระบบป้อนเดิมรูปแบบเดิม (CML) ใช้เวลาในการแข็งตัว 433.797 วินาที ระบบป้อนเดิมที่มีการปรับปรุงใหม่ (IML) ใช้เวลาในการแข็งตัว 104.753 วินาที ลดลง 75.86 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งระบบป้อนเดิมที่มีการปรับปรุงใหม่ (IML) ใช้เวลาในการแข็งตัวน้อยกว่าเนื่องจากปริมาตรของระบบป้อนเดิมที่ลดลงถึง 1899.14 ลูกบาศก์เซนติเมตร คิดเป็น 41.37 เปอร์เซ็นต์ จึงทำให้ความร้อนที่สะสมอยู่ในชิ้นงานสามารถคายความร้อนได้เร็วขึ้นซึ่งเป็นผลให้มีเวลาในการแข็งตัวลดลง

5.1.3 การเกิดโพรงหดตัว (Shrinkage Porosity) ระหว่างระบบป้อนเดิมรูปแบบเดิม (CML) กับระบบป้อนเดิมที่มีการปรับปรุงใหม่ (IML) จะมีตำแหน่งการเกิดโพรงหดตัวที่ใกล้เคียงกันคือบริเวณทางวิ่ง (Runner) และในเนื้อชิ้นงาน โดยแบ่งหัวข้อการพิจารณา ดังนี้

5.1.3.1 ปริมาณการเกิดโพรงหดตัวในชิ้นงานและในระบบป้อนเดิม จากตารางที่ 4-80 ผลจากการจำลองการเกิดโพรงหดตัวของระบบป้อนเดิมรูปแบบเดิม (CML) มีปริมาณการเกิดโพรงหดตัวที่ชิ้นงาน 13.04 ลูกบาศก์เซนติเมตร และมีปริมาณการเกิดโพรงหดตัวที่ระบบป้อนเดิมอยู่ที่ 27.07 ลูกบาศก์เซนติเมตร และระบบป้อนเดิมที่มีการปรับปรุง (IML) มีปริมาณการเกิดโพรงหดตัวที่ชิ้นงาน 7.19 ลูกบาศก์เซนติเมตร และมีปริมาณการเกิดโพรงหดตัวที่ระบบป้อนเดิมอยู่ที่ 8.94 ลูกบาศก์เซนติเมตร จะเห็นได้ว่าระบบป้อนเดิมทั้ง 2 แบบ มีปริมาณการเกิดโพรงหดตัวในชิ้นงานน้อยกว่าปริมาณการเกิดโพรงหดตัวในระบบป้อนเดิมและยังมีแนวโน้มการเกิดโพรงหดตัวที่ดีขึ้นเนื่องจากผลของการเกิดปริมาตรโพรงหดตัวในชิ้นงานจากเดิมลดลงเหลือ 7.19 ลูกบาศก์เซนติเมตร คิดเป็น 44.86 เปอร์เซ็นต์ โดยระบบป้อนเดิมที่ได้ออกแบบนั้นส่งผลดีต่อคุณภาพของชิ้นงาน

5.1.3.2 เปอร์เซ็นต์การเกิดโพรงหดตัวทั้งหมดและการตรวจสอบชิ้นงาน จากตารางที่ 4-80 ผลจากการจำลองการเกิดโพรงหดตัวของระบบป้อนเดิมรูปแบบเดิม (CML) และระบบป้อนเดิมที่มีการปรับปรุง (IML) พบว่ามีเปอร์เซ็นต์การเกิดโพรงหดตัวที่ลดลง 0.271 เปอร์เซ็นต์ ผลการตรวจสอบชิ้นงานภายนอกพบว่าที่ระบบป้อนเดิมโลหะเหลวรูปแบบเดิม (CML) เกิดการโพรงหดตัวที่ตำแหน่งใกล้กับทางเข้า (Gate₁) มีลักษณะการเกิดข้อบกพร่องไม่ลึกมากแต่กว้างและกระจายหลายจุด ในส่วนของระบบป้อนเดิมที่มีการปรับปรุง (IML) เกิดโพรงหดตัวที่ตำแหน่งทางเข้า (Gate₁) มีลักษณะการเกิดข้อบกพร่องค่อนข้างลึกและกว้างโดยรวมตัวกันเป็นกลุ่มขนาดใหญ่อยู่บริเวณเดียวกัน

5.1.4 ผลการตรวจสอบชิ้นงานด้วยผลวิเคราะห์การทดสอบโดยใช้ภาพถ่ายรังสี (RT) ของระบบป้อนเดิมที่มีการปรับปรุง (IML) พบข้อบกพร่องที่เกิดขึ้น 3 ประเภท ได้แก่ โพรงหดตัวประเภทรูพรุนจากแก๊ส (Gas Porosity) อยู่ที่ระดับ 4-5 สิ่งแปลกปลอมจากตะกรันและทราย (Slag and sand inclusions) อยู่ที่ระดับ 5 และข้อบกพร่องที่ผิว (Surface Defect)

5.2 อภิปรายผล

ผลการวิเคราะห์การออกแบบโดยการปรับตัวแปรทั้ง 5 ตัว ล้วนเป็นปัจจัยที่ผลกระทบต่อคุณภาพของชิ้นงานแต่ละตัวแปรจะมีอิทธิพลในลักษณะที่แตกต่างกัน จึงได้สรุปตัวแปรที่มีผลกระทบกับการเกิดโพรงหดตัว (Shrinkage Porosity) มากที่สุดเป็น 2 ประเด็นหลัก ได้แก่ ทางวิ่ง (Runner) และทางเข้า (Gate) ดังนี้

ประเด็นที่ 1 การออกแบบทางวิ่ง (Runner) ได้แก่ การปรับความยาวของทางวิ่ง (H_R) การปรับระยะห่างของทางวิ่ง (W_R) และการปรับช่องสามุมของทางวิ่ง (D_R) ซึ่งตัวแปรทั้ง 3 ตัวนี้ มีผลโดยตรงต่อการเกิดโพรงหดตัว (Shrinkage Porosity) เนื่องจากตัวแปรเหล่านี้ส่งผลต่อลักษณะการไหลของโลหะเหลว (Fluid Fraction) และเวลาในการแข็งตัว (Solidification Time) หรือการสูญเสียความร้อนของโลหะเหลว โดยลักษณะการไหลและการดักจับอากาศที่ไม่มีประสิทธิภาพอาจส่งผลให้เกิดโพรงหดตัวได้และการสูญเสียความร้อนของโลหะเหลวที่เร็วเกินไปทำให้โลหะเหลวบางส่วนอาจเย็นตัวก่อนส่งผลให้เกิดโพรงหดตัวหรือข้อบกพร่องประเภทอื่น ๆ ได้

ประเด็นที่ 2 การออกแบบทางเข้า (Gate) ได้แก่ การปรับความสูงของทางเข้า (H_{G2}) ลักษณะหน้าตัดของทางเข้า ($Gate_1$) และการเพิ่มทางเข้า ($Gate_2$) ส่งผลต่อการเกิดโพรงหดตัว (Shrinkage Porosity) น้อยที่สุด เนื่องจากตัวแปรเหล่านี้มีผลต่อเวลาในการเติมเต็ม (Fill Time) ช่วยทำให้โลหะเหลวไหลเข้าแม่พิมพ์ได้อย่างทั่วถึง เพิ่มการกระจายตัวของโลหะเหลวในพื้นที่ต่าง ๆ และทำให้มีเวลาในการเติมเต็มรวดเร็วยิ่งขึ้น ซึ่งการเข้าใจลำดับความสำคัญของตัวแปรเหล่านี้ช่วยให้สามารถปรับปรุงการออกแบบและกระบวนการหล่อได้อย่างมีประสิทธิภาพเพื่อลดการเกิดโพรงหดตัว (Shrinkage Porosity) และเพิ่มคุณภาพของชิ้นงานหล่อได้

โดยจากการวิเคราะห์การออกแบบทั้งหมดนี้พบว่าระบบป้อนเติมที่มีการปรับปรุง (IML) สามารถลดปริมาณการเกิดโพรงหดตัวในชิ้นงานได้ 44.86 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งยังมีจุดที่น่าสนใจในการปรับปรุงคุณภาพของชิ้นงานด้านอื่นอีก ผู้วิจัยจึงสนใจวิเคราะห์เพิ่มเติมเกี่ยวกับการควบคุมตัวแปรด้านการผลิต ได้แก่ อุณหภูมิของโลหะเหลว โดยวิเคราะห์การปรับอุณหภูมิของโลหะเหลวที่ 1680 1660 และ 1650 องศาเซลเซียส พบว่าอุณหภูมิในช่วง 1660-1650 องศาเซลเซียส เป็นช่วงของอุณหภูมิที่มีปริมาณการเกิดโพรงหดตัวลดลงอย่างเห็นได้ชัด โดยปริมาณการเกิดโพรงหดตัวลดลงจากเดิมอีก 1.7 ลูกบาศก์เซนติเมตร หรือคิดเป็น 57.91 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งการควบคุมตัวแปรด้านการผลิตให้เหมาะสมนั้นจะช่วยให้สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตและคุณภาพของชิ้นงานได้แต่สิ่งที่น่าสนใจอีกประการคือ ความท้าทายในการควบคุมตัวแปรด้านการผลิตซึ่งอาจเกิดจากปัจจัยต่าง ๆ เช่น ความไม่แน่นอนในการรักษาอุณหภูมิที่สม่ำเสมอหรือการเปลี่ยนแปลงสภาพแวดล้อมในกระบวนการผลิต แม้ว่าผลลัพธ์จากการควบคุมอุณหภูมิจะเป็นประโยชน์อย่างมากต่อการลดปริมาณของข้อบกพร่องในชิ้นงานแต่การบ่งบอกถึงความยากลำบากในการควบคุมตัวแปรเหล่านี้ถือเป็นจุดที่ควรได้รับการพิจารณาต่อไป

5.3 ข้อเสนอแนะ

5.3.1 งานวิจัยในขั้นต่อไปสามารถวิเคราะห์ตัวแปรหลักหรือตัวแปรอื่น ๆ ที่เกิดขึ้นในกระบวนการหล่อ เช่น อุณหภูมิ รูปร่างชิ้นงาน เวลาในการเท ชนิดวัสดุ เป็นต้น เพื่อความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยเหล่านี้กับคุณภาพของชิ้นงานที่ได้

5.3.2 การออกแบบรูปแบบของระบบทางเข้าควรคำนึงถึงผลกระทบที่เกิดขึ้นต่อทั้งต้นทุนการผลิตและระยะเวลาการผลิต เพื่อให้แน่ใจว่าการออกแบบนั้นสามารถเพิ่มประสิทธิภาพและลดต้นทุนได้จริง เพื่อหาการออกแบบที่เหมาะสมที่สุด

5.3.3 การตั้งค่าตัวแปรในการจำลองสถานการณ์ เช่น อุณหภูมิของโลหะเหลว ความเร็วในการไหล คุณสมบัติของวัสดุ และความละเอียดของตาข่าย (Mesh) ควรใกล้เคียงกับกระบวนการจริงเพื่อความแม่นยำของผลลัพธ์

5.3.4 การจำลองการหล่อสำหรับชิ้นงานที่มีความหนาอาจใช้เวลานานขึ้น ควรจัดสรรเวลาที่เหมาะสมในการรันการจำลองให้ได้ผลลัพธ์ที่แม่นยำ

5.3.5 ในกระบวนการผลิตจริงควรทำงานร่วมกับทีมผลิตหรือผู้ที่มีประสบการณ์ในการแก้ไขข้อบกพร่องของชิ้นงานหล่อเพื่อให้แน่ใจว่าการออกแบบสามารถทำได้ในเชิงเทคนิคและสามารถนำไปใช้งานได้ในอุตสาหกรรม

5.3.6 ควรพิจารณาถึงกระบวนการผลิตที่ให้ผลเชิงคุณภาพกับชิ้นงานได้ดีขึ้น

บรรณานุกรม

ภาษาไทย

- กันติทัต ไพบูลย์ และคณะ. การวิเคราะห์ระบบทางเข้าของชิ้นงานหล่ออลูมิเนียมกรณีศึกษา
ชิ้นงานรูปถัง. สาขาวิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมเครื่องกลและผลิตเครื่องจักรกล. ภาควิชา
เทคโนโลยีวิศวกรรมเครื่องกล. วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี
พระจอมเกล้าพระนครเหนือ, 2563
- ณรงค์ศักดิ์ ธรรมโชติ. “วิศวกรรมการหล่อโลหะ.” กรุงเทพฯ : ซีเอ็ดดูเคชั่น, 2562.
- เทพนารินทร์ ประพันธ์พัฒน์. “กรรมวิธีหล่อโลหะ.” กรุงเทพฯ : ศูนย์ส่งเสริมอาชีพ, 2545
- ธนพล ชัยชูวิบูลย์ และวรชาติ ลักษณะพินิจ. การลดของเสียจากกระบวนการหล่อโลหะกรณีศึกษา
โรงงานอุตสาหกรรมการหล่อโลหะ บริษัท แคสท์เทค จำกัด. สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาห-
การ. ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ,
2553.
- นันทวัฒน์ อภิกรมกุล และกรรณชัย กัลยาศิริ. “การลดต้นทุนในเงินสีชมพูที่หล่อด้วยวิธีการหล่อแบบ
ประณีต: กรณีศึกษาของบริษัทเครื่องประดับแห่งหนึ่ง.” วารสารวิชาการเทคโนโลยี
อุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology). ปีที่ 16 ฉบับที่ 3 : 80-89,
2563.
- บัณฑิต ใจชื่น. “การออกแบบงานหล่อโลหะ.” พิมพ์ครั้งที่ 2. จำนวน 1000 เล่ม. กรุงเทพฯ :
สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น), 2529.
- ประเสริฐ ศรีบุญจันทร์. การศึกษาเปรียบเทียบวิธีการออกแบบงานหล่อของเหล็กกล้าคาร์บอน.
สาขาวิชาเทคโนโลยีวัสดุ. คณะพลังงานและวัสดุ. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า
ธนบุรี, 2544
- พัทธ์พิมล สุวรรณกาญจน์, ณัฐพงศ์ สอนสุวิทย์ และ พิมพ์ภัส งามสันติวงศ์. “การศึกษาพฤติกรรม
การไหลของน้ำโลหะเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 430 ในแม่พิมพ์งานหล่ออินเวสต์เมนต์.”
วารสารวิชาการเทคโนโลยีป้องกันประเทศ. ปีที่ 3 ฉบับที่ 9 : 72-79, 2565.
- พัทธ์พิมล สุวรรณกาญจน์. การออกแบบระบบป้อนเติมน้ำโลหะสำหรับเหล็กกล้าไร้สนิมที่หล่อด้วย
กระบวนการอินเวสต์เมนต์. สาขาวิชาวิศวกรรมวัสดุ. ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุและเทคโนโลยี
การผลิต. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, 2557
- พิมพ์เพชร สระทองอุ่น และคณะ. การลดปัญหาความบกพร่องของชิ้นงานตัวเรือนสูบที่เกิดจากโพรง
อากาศในระหว่างกระบวนการหล่อขึ้นรูป. สาขาวิชาวิศวกรรมยานยนต์. คณะ
วิศวกรรมศาสตร์. สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น, 2557.
- ศุภฤทธิ์ ล้วนโกศลชัย. การออกแบบระบบจ่ายน้ำโลหะและรู้ล้นสำหรับงานหล่ออลูมิเนียม.
สาขาวิชาเทคโนโลยีวัสดุ. คณะพลังงานและวัสดุ. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า
ธนบุรี, 2544.

สันติรัฐ นันสะอาจ. การศึกษาเปรียบเทียบวิธีการออกแบบงานหล่อเหล็กหล่อ. สาขาวิชาเทคโนโลยีวัสดุ. คณะพลังงานและวัสดุ. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2544.

หริส สุตะบุตร และเคนจิ จิยิอิว่า. “หล่อโลหะ.” พิมพ์ครั้งที่ 5. จำนวน 2000 เล่ม. กรุงเทพฯ : บริษัท สำนักพิมพ์ดวงกมล (2520) จำกัด, 2543

ภาษาอังกฤษ

- A.K.Gajbhiye, et al. “Minimization of Shrinkage Porosity in a Sand-Casting Process by Simulation in AUTOCAD-X Software with Experimental Validation by Destructive Testing.” International Journal of Modern Engineering Research (IJMER). Vol.4 Iss.5 : 18-27, 2014.
- Arno Louvo. “Casting Simulation as a Tool in Concurrent Engineering.” In International ADI and Simulation Conference. May 28-30. p.12, 1997.
- ASM International. “ASM Handbook Volume 15: Casting fourth printing.” United States of America, 1988.
- Cambell J. “Casting.” London: Butterworth-Heinemann, 1998.
- Campbell J. “Foundry Technology.” 2nd Edition. Butterworth-Heinemann. India, 2015.
- Cline Limited Partnership. Machinery Steel 4140. [Online] 2561. [สืบค้นวันที่ 30 พฤษภาคม 2561]. จาก <https://www.clinemetal.com>.
- Foseco International Ltd., Foseco Foundryman’s Handbook, 10th Edition, Butterworth-Heinemann, England. 1994
- Fushun Special Steel Co., Ltd. AISI 4140 Alloy Steel-Quality Products & Best Prices. [Online] 2023. [สืบค้นวันที่ 29 มิถุนายน 2566]. จาก <http://rrr.fushunspecialsteel.com/aisi-4140-alloy-steel>.
- Harshil Bhatt, et al. “Design Optimization of Feeding System and Solidification Simulation for Cast Iron.” International Conference on Innovation in Automation and Mechanical Engineering (ICIAME) 2014. : 357-364, 2014.
- Hyung-Yoon Seo, Chul-Kyu Jin., & Chung-Gil Kang. “Design of a Gate System and Riser Optimization for Turbine Housing and the Experimentation and Simulation of a Sand-Casting Process.” In Mechanical Engineering. 2018.
- Jiang Wenming., & Fan Zitian. “Gating System Optimization of Low-Pressure Casting A356 Aluminum Alloy Intake Manifold Based on Numerical Simulation.” China Foundry, 2014.
- John T. H. Pearce, & METALS Group. ข้อบกพร่องในงานหล่อ: สาเหตุและวิธีการแก้ไข. พิมพ์ครั้งที่ 1. ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (MTEC) สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.), 2001.

- Lee, S., Choi, Y., & Kim, J. "Optimization of Gating System Design for Improved Flow Behavior and Solidification." Journal of Materials Processing Technology. 258(1), 45-53. (2018).
- Mahamad Riyaz S H, & Prasad U Raikar. "Yield Improvement if Casting Part Using Computer Aided Casting Simulation." In International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET). Vol.02 Issue.04 :858-862, 2015.
- N. K. Srinivasan. "Foundry Engineering." Khanna Publisher. Delhi. pp.80-148, 1996.
- Navee Hebsur, & Sunil Mangshetty. "Casting Simulation for Sand Casting of Flywheel." International Journal of Research in Advent Technology. Vol.2 No.8 : 82-86, 2014.
- Ondrej V., & Ales H. "Importance of a Type of Gating System in Investment Casting Technology." Acta Polytechnica. Vol.59 No.6.
- Pei-Hsing Huang, & Chi-Ju Lin. "Computer-aided Modeling and Experimental Verification of Optimal Gating System Design for Investment Casting of Precision Rotor." Springer-Verlag. London, 2015.
- Precision Manufacturing Co., Ltd. About PMC. [Online] 2017. [สืบค้นวันที่ 26 สิงหาคม 2561]. จาก <https://www.pmc-th.com/about-pmc/our-story>.
- Ruddle, R. W. trans. AFS. p.87, 1979.
- Sachin, L. N., & Rajendra, S. D. "Design and Optimization of Gating and Feeding System for Casting: A Review." In Conference on Advances in Civil and Mechanical Engineering System. 23-24. 2015.
- Smith, J., & Gupta, R. "Simulation and Experimental Study of Short Gating System in Steel Casting." International Journal of Metal Casting, 14(2), 123-135. 2020.
- Taylor H.F., Flemings M.C. & Wulff J. "Foundry Engineering." Jonh Wiley & Sons Inc. USA, 1966.
- Tong Wang. et al. "Optimal Gating System Design of Steel Casting by Fruit Fly Optimization Algorithm Based on Casting Simulation Technology." International Journal of Metalcasting. Vol.13 Issue.3. 2019.
- Tony C. M., & David S. "1999 Casting Simulation Software Survey." AFS Process Design & Molding Committee (1-F), 1999.
- Wang, R. et al. "Effect of Cooling Process on Porosity in Aluminum Alloy Automotive Wheels During Low-pressure Die Casting." International Journal of Metal Casting, 13(1), 32-42, 2019.

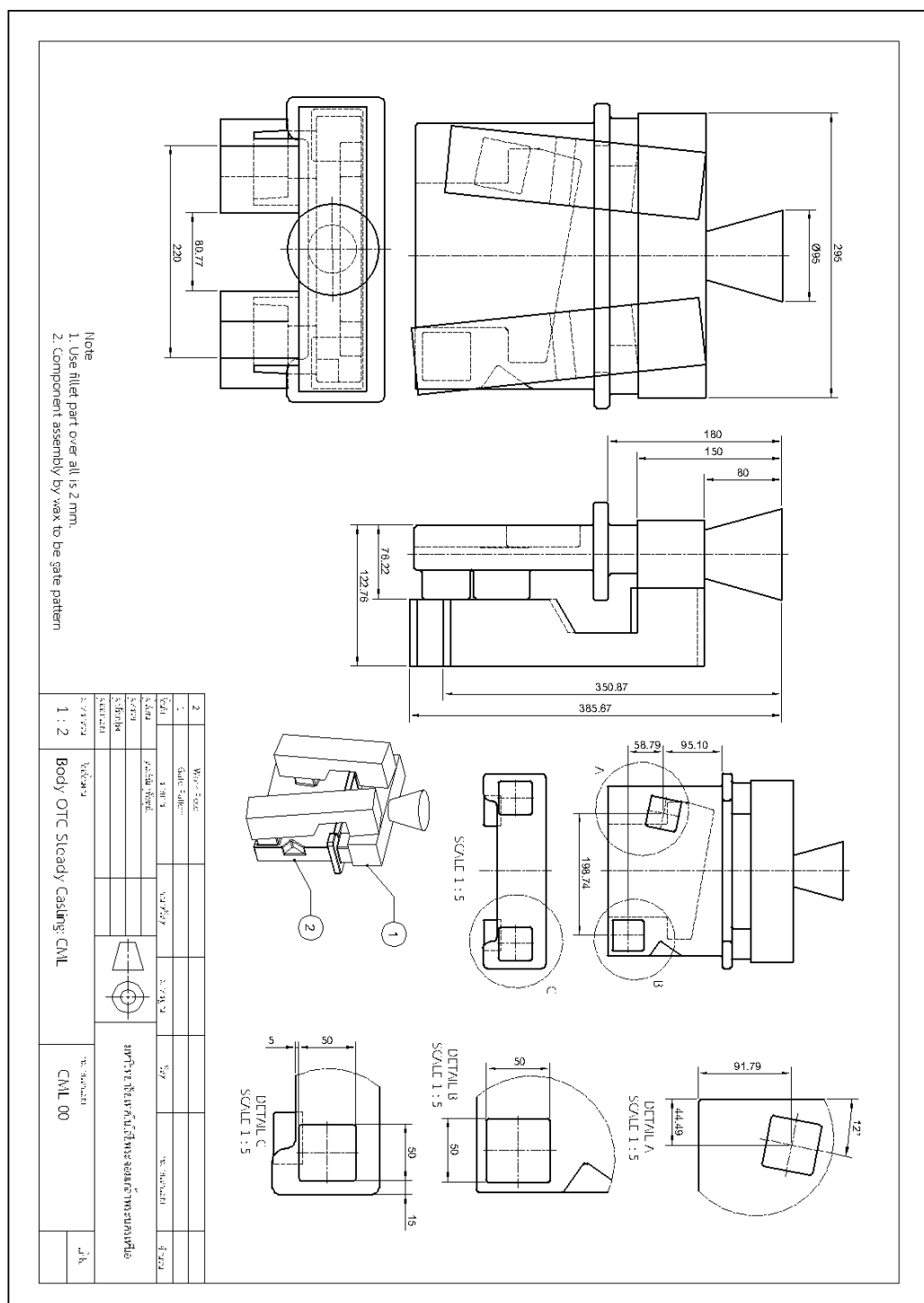
- Zhang, X. et al. "Optimization of Gating System Design for Improved Casting Quality Using Simulation Technology." Journal of Advanced Manufacturing Technology, 91(5), 2089-2101, 2017.
- Zhao, X., Li, Y., Wang, J., & Zhang, H. "Effect of Increasing Runner Height on Heat Distribution and Solidification Control in Complex Mold Casting." Journal of Manufacturing Processes, 29(3), 101-109. 2017.

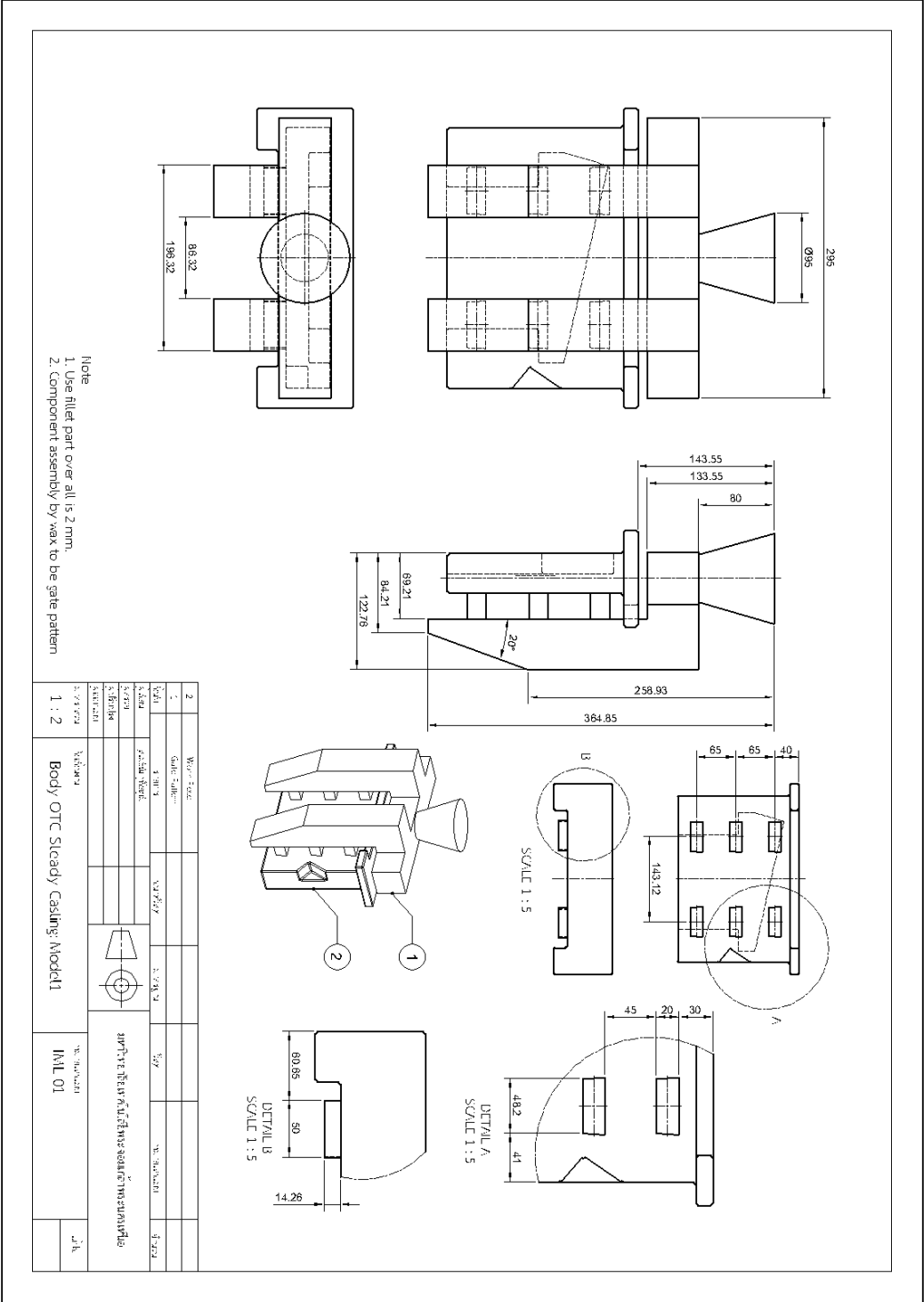


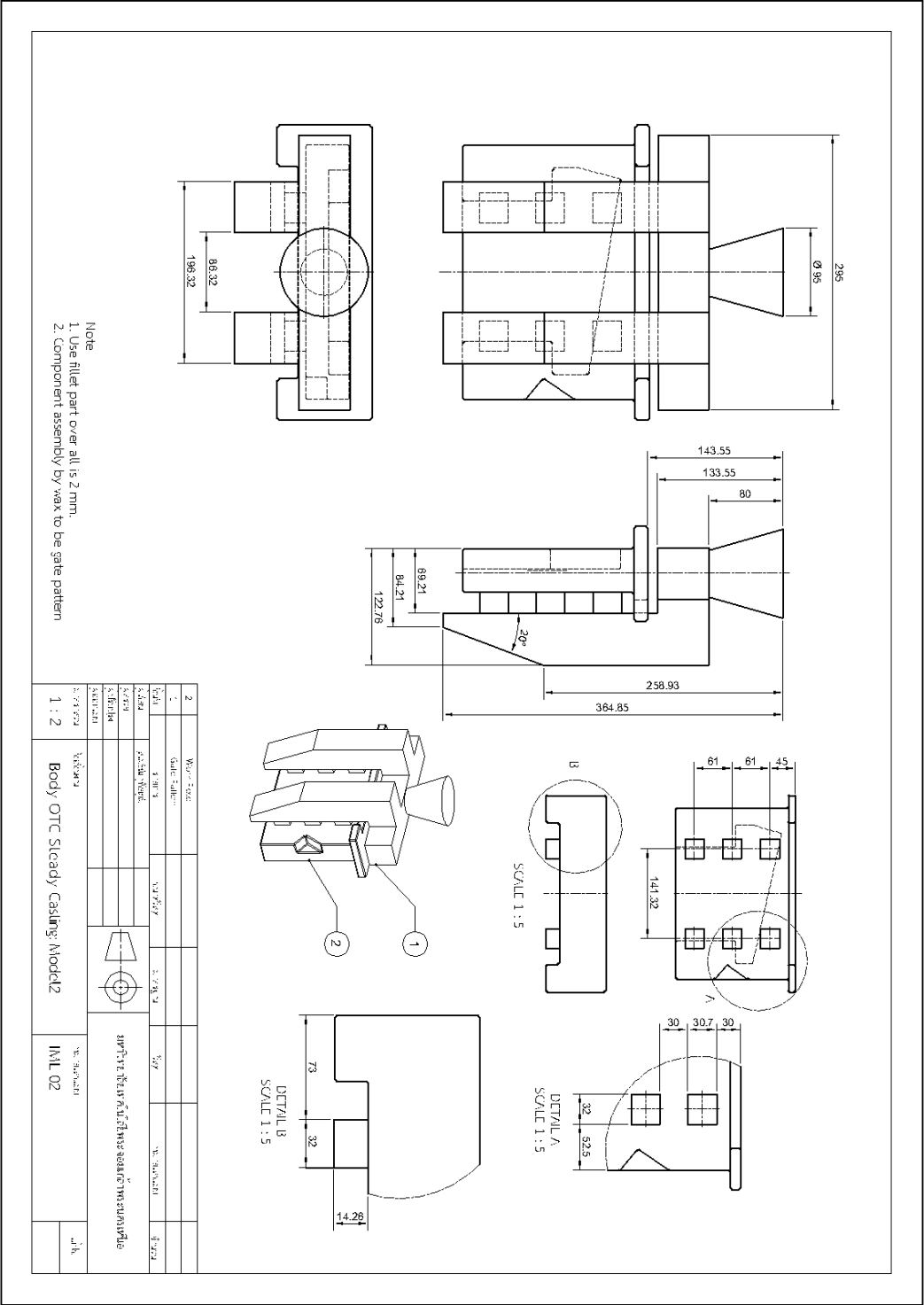


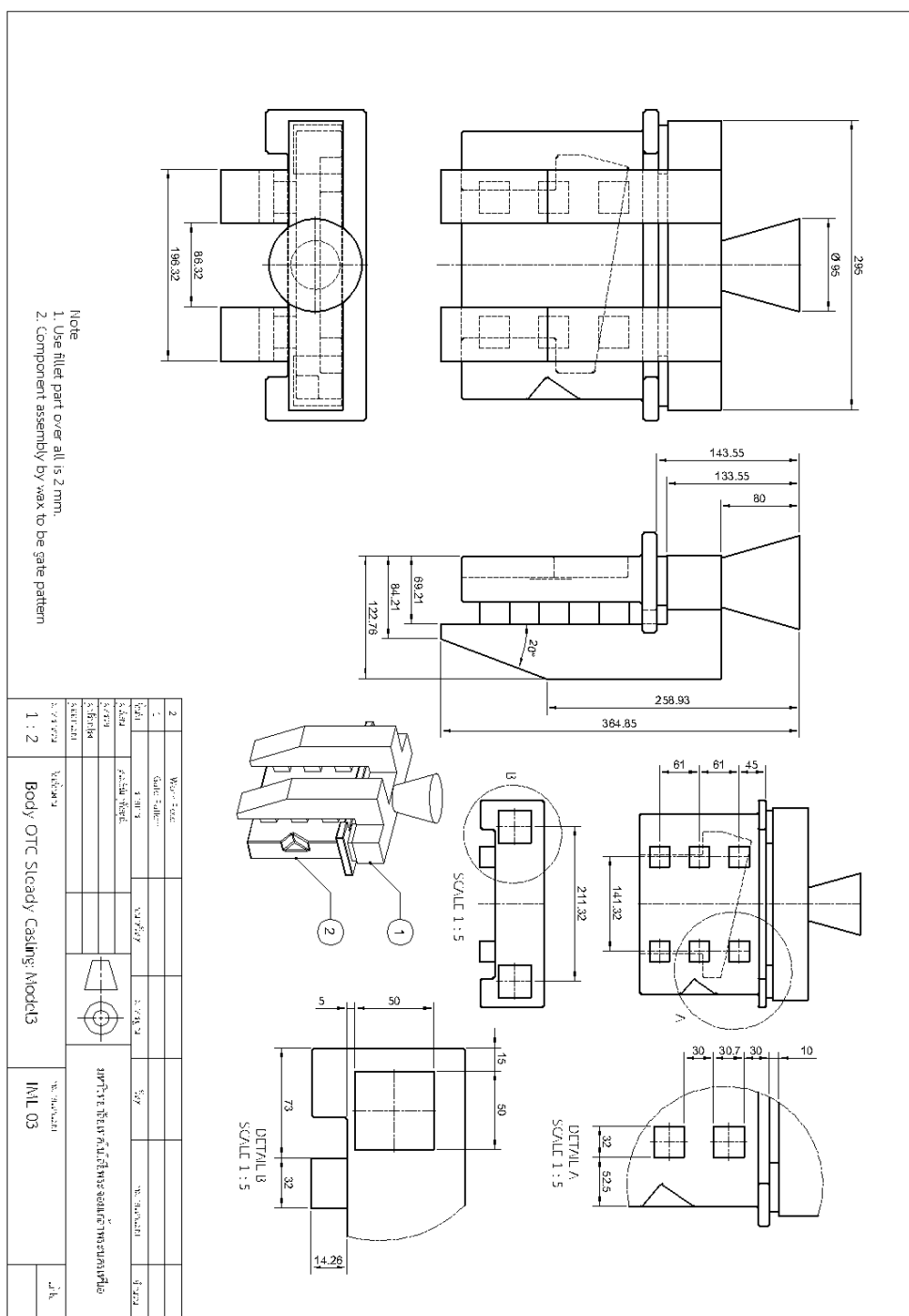
ภาคผนวก ก.

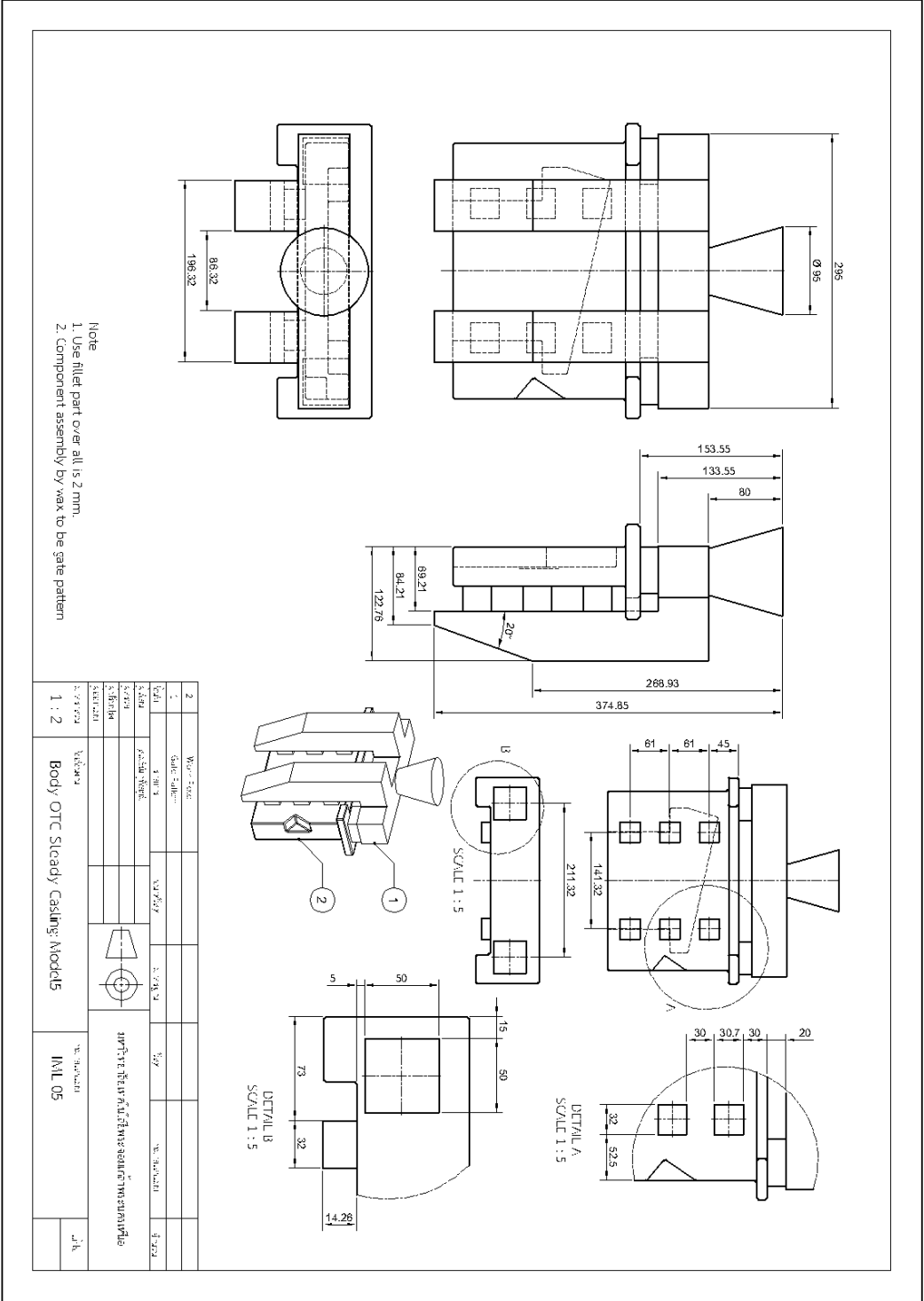
แบบของชิ้นงานและแม่พิมพ์หล่อ

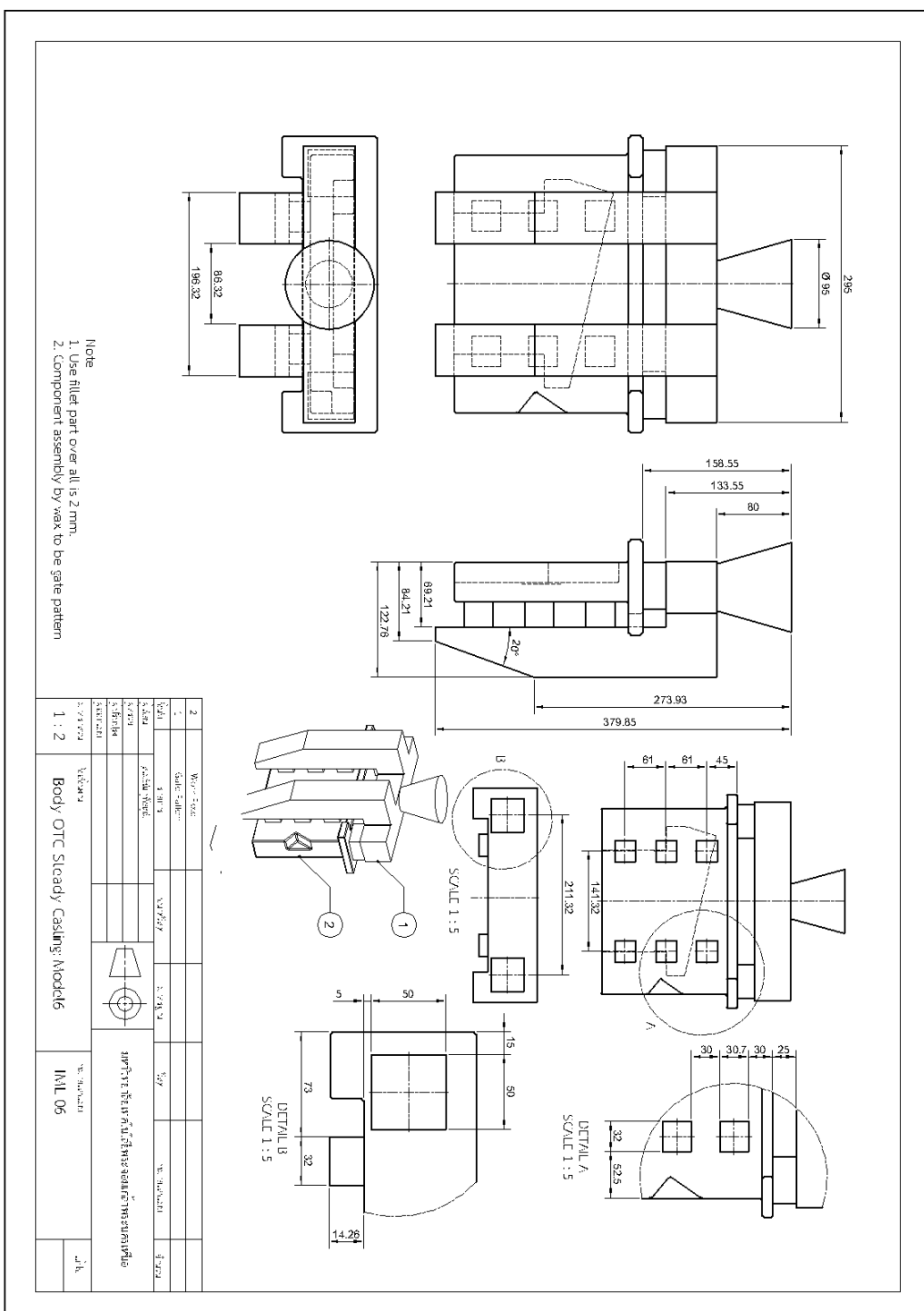


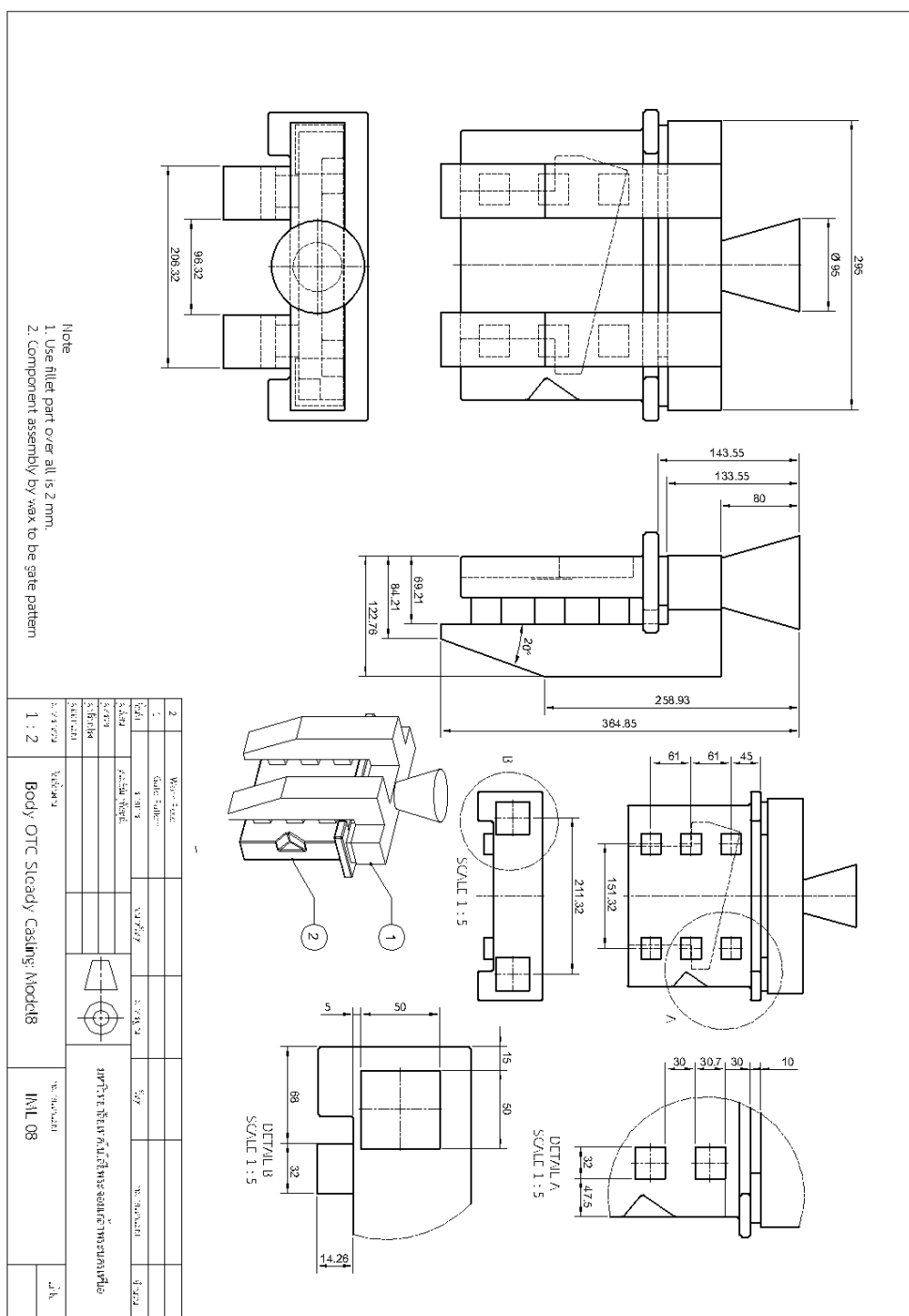


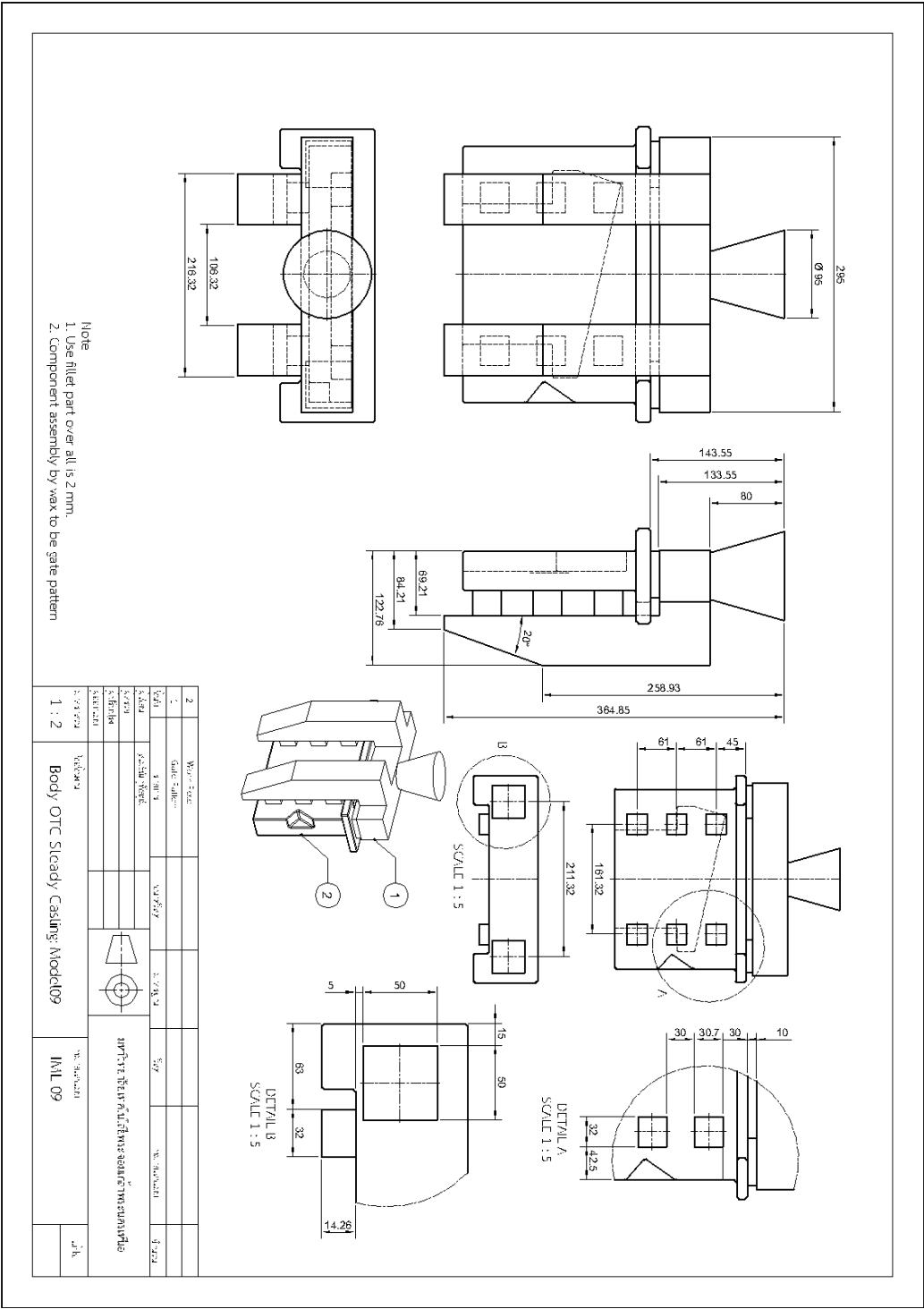


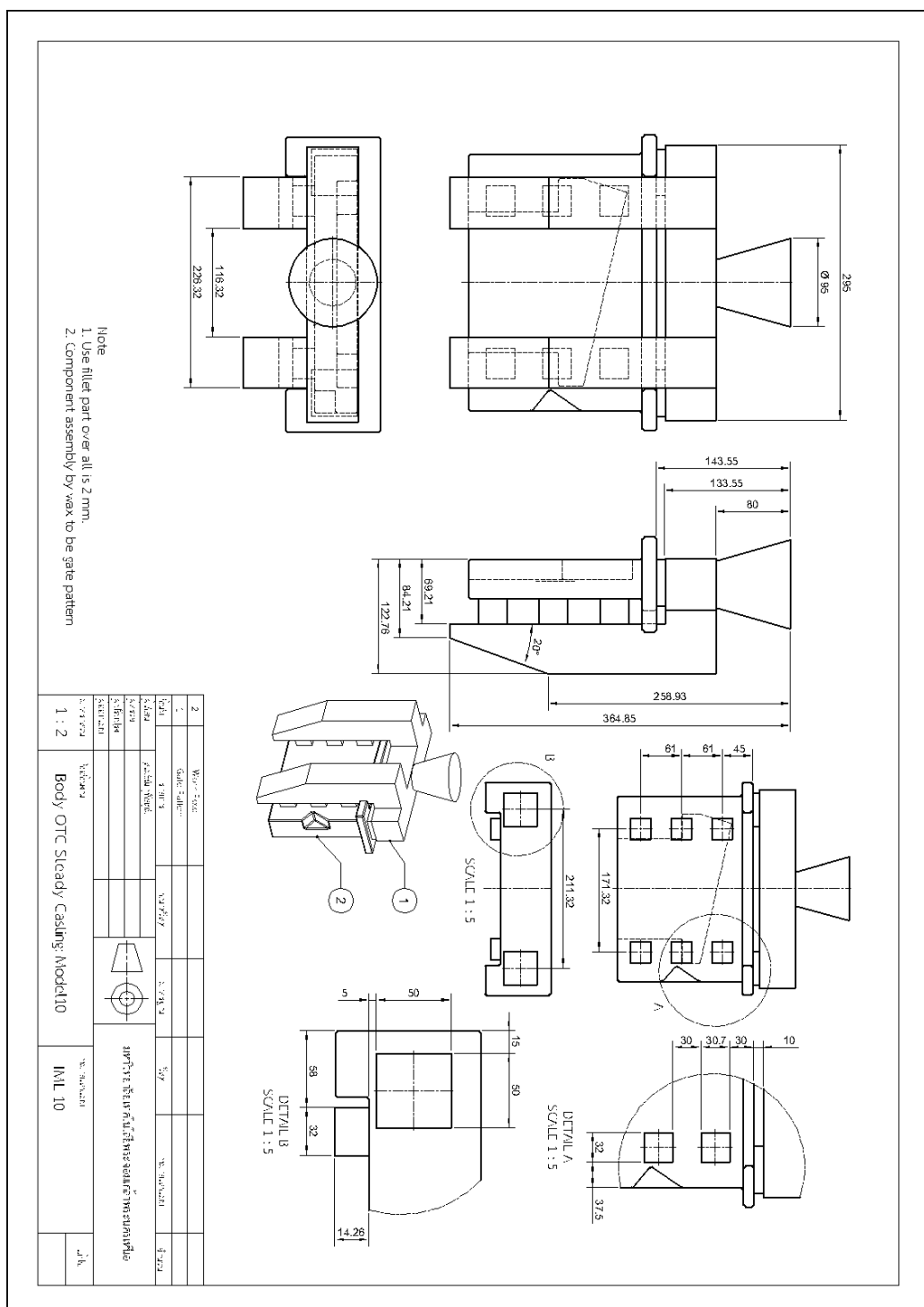


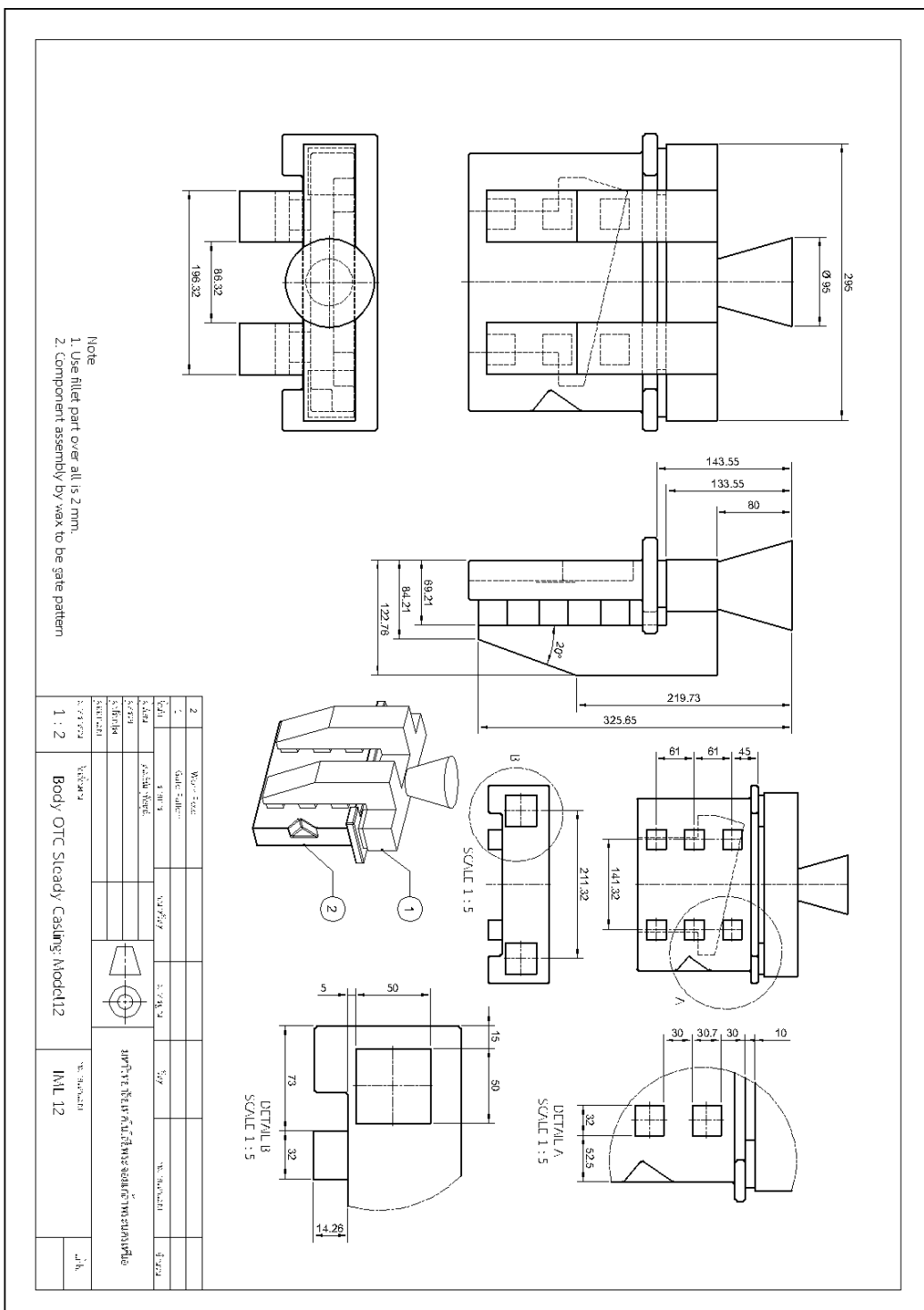


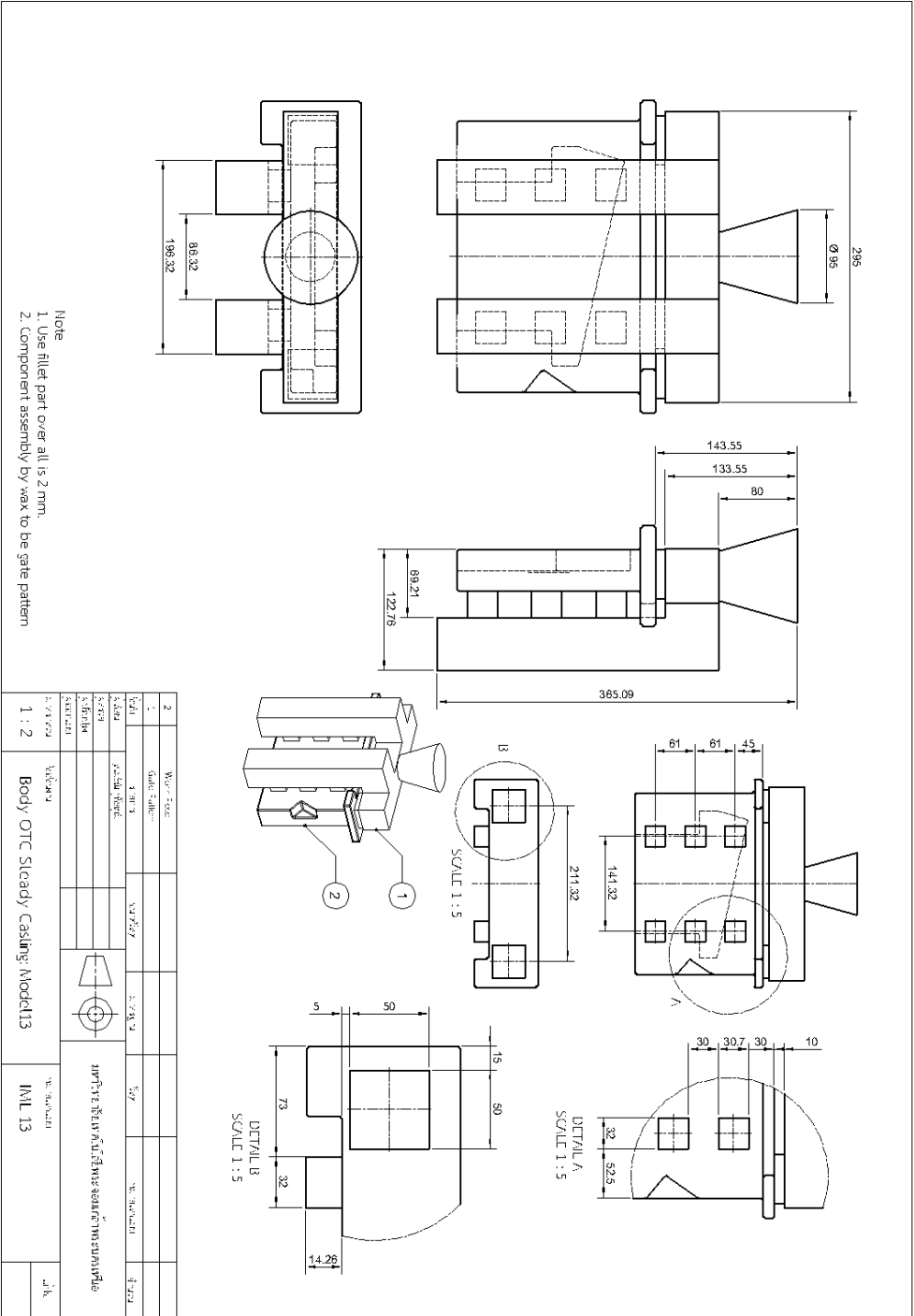


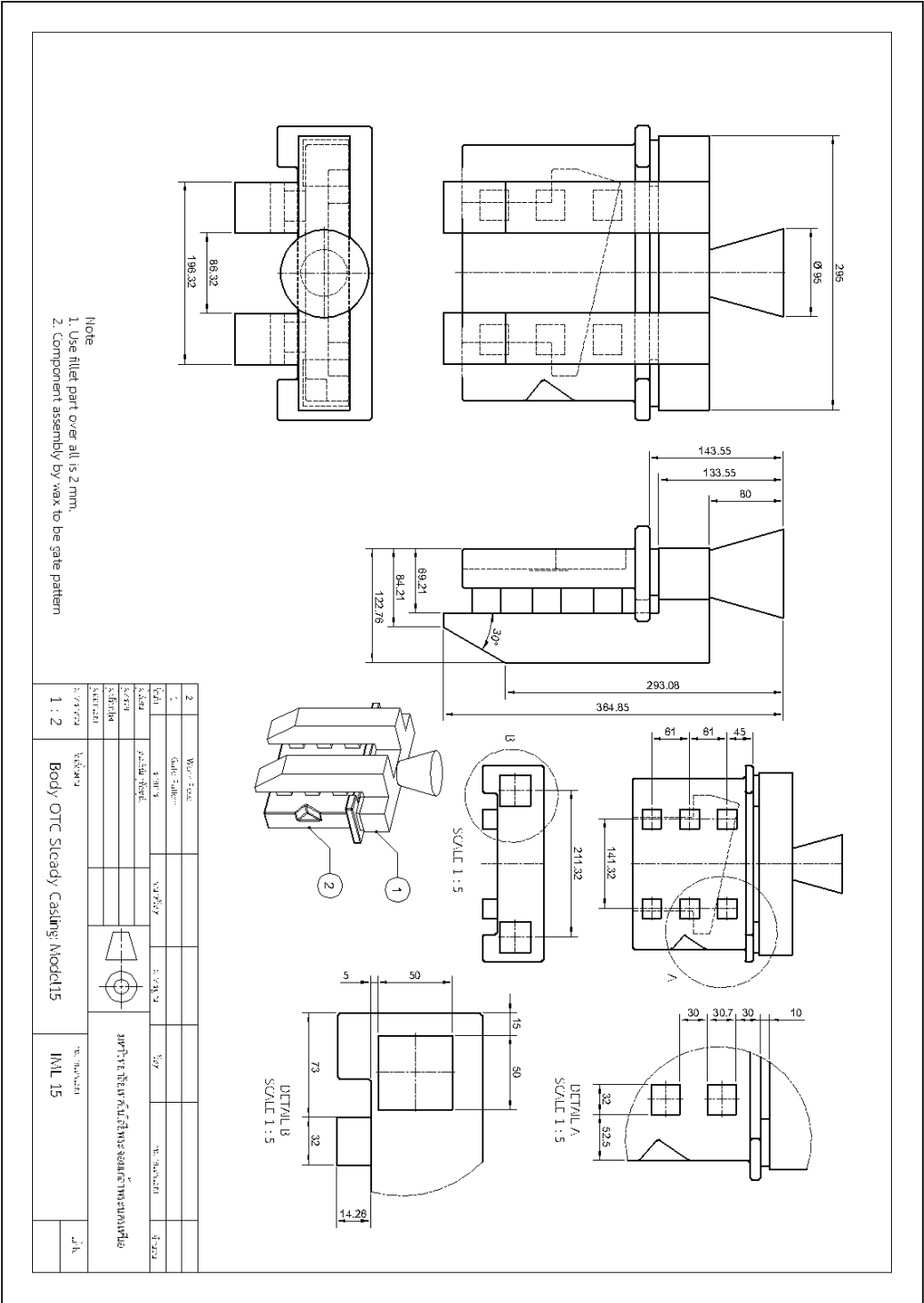


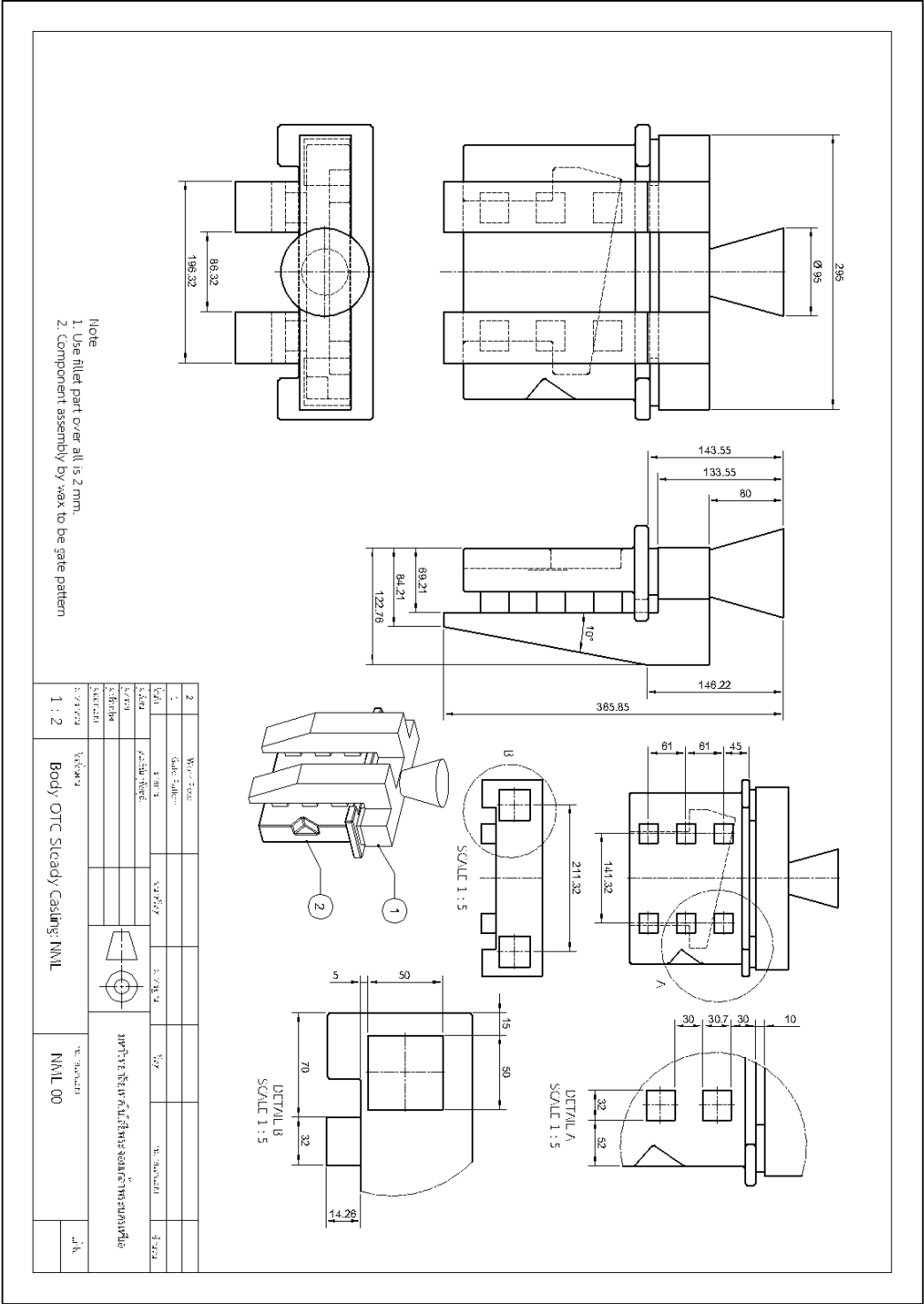


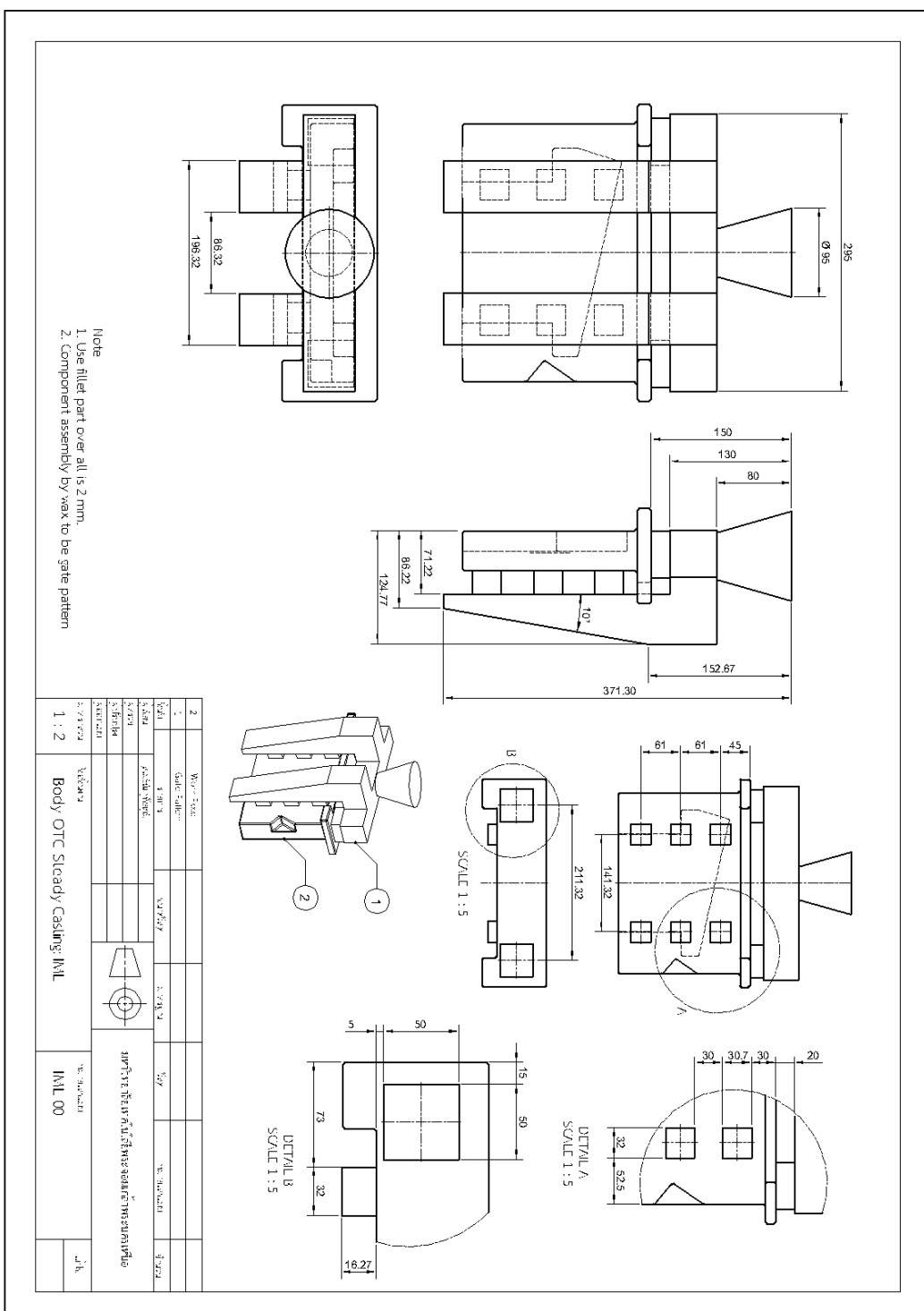














ภาคผนวก ข.

ส่วนหนึ่งของวิทยานิพนธ์ได้รับการตอบรับตีพิมพ์เผยแพร่

ที่ สทท.ว. ๐๒๓/ ๒๕๖๗

แบบตอบรับการตีพิมพ์บทความ
ลงวารสารวิชาการ มหาวิทยาลัยอีสเทิร์นเอเซีย (EAU Heritage Journal)

วันที่ ๖ สิงหาคม ๒๕๖๗

เรียน คุณสุเมธินี หุชัยภูมิ
 อาจารย์พัชรพิมล สุวรรณกาญจน์

ตามที่ท่านได้ส่งบทความเรื่อง “การออกแบบและวิเคราะห์ข้อบกพร่องในการตัดตัวของชิ้นงานหล่ออินเวสต์เมนต์ด้วยซอฟต์แวร์ Cast-Designer” เพื่อเสนอตีพิมพ์ลงในวารสารวิชาการมหาวิทยาลัยอีสเทิร์นเอเซีย โดยผ่านการกลั่นกรองจากผู้ทรงคุณวุฒิ (Peer Reviewers) จำนวน 3 ท่าน ซึ่งเป็นบุคคลภายนอกจากหลากหลายสถาบันและกองบรรณาธิการได้พิจารณา ดังนี้

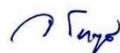
มีความยินดี (✓) ตีพิมพ์บทความลงในวารสารวิชาการ มหาวิทยาลัยอีสเทิร์นเอเซีย
 ฉบับวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

ปีที่ ๑๘ ฉบับที่ ๓ เดือน กันยายน - ธันวาคม พ.ศ. ๒๕๖๗

() ไม่สามารถตีพิมพ์บทความลงในวารสารวิชาการ มหาวิทยาลัยอีสเทิร์นเอเซีย
 เนื่องจาก ผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณาแล้ว ยังไม่มีความเหมาะสม

จึงเรียนมาเพื่อโปรดทราบ

ขอแสดงความนับถือ



(อาจารย์ ดร.กัญจน์นิชา โกคุดอม)

บรรณาธิการวารสารวิชาการมหาวิทยาลัยอีสเทิร์นเอเซีย

ฉบับวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

กองบรรณาธิการวารสาร EAU Heritage

โทรศัพท์ ๐-๒๕๕๗-๑๐๒๘ ถึง ๓๑ ต่อ ๓๗๗, ๓๗๘

โทรสาร ๐-๒๕๕๗-๑๐๕๓

การออกแบบและวิเคราะห์ข้อบกพร่องในการหดตัวของชิ้นงานหล่ออินเวสต์ เมนต์ด้วยซอฟต์แวร์ Cast-Designer

Design and Analysis of Shrinkage Defect for an Investment Casting Piece by Cast-Designer Software

สุเมธิณี หุชัยภูมิ¹ และ พัชรพิมล สุวรรณกาญจน์¹

Sumethinee Hoochaiyaphum¹ and Patpimol Suwankan¹

¹ภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมเครื่องกล, วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, 1518 ถนนประชากราษฎร์ 1,

แขวงวงศ์สว่าง, เขตบางซื่อ, กรุงเทพมหานคร, 10800, ประเทศไทย

1Department of Mechanical Engineering Technology, College of Industrial
Technology,

King 's Mongkut University of Technology North Bangkok, 1518, Pracharat 1 Road,

Wongsawang, Bangsue, Bangkok, 10800, Thailand

บทคัดย่อ

จากการตรวจสอบความบกพร่องของชิ้นงาน Body OTC Steady ซึ่งเป็นส่วนประกอบของเครื่องจักรซีเอ็นซี ที่ผ่านการขึ้นรูปด้วยกระบวนการหล่ออินเวสต์เมนต์ (Investment Casting) พบว่าปัญหาความบกพร่องของ ชิ้นงานส่วนใหญ่คือ การเกิดโพรงหดตัวในกระบวนการแข็งตัวของโลหะเหลวในแม่พิมพ์ เพื่อที่จะลดปัญหา ความบกพร่องดังกล่าว งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นการลดปริมาณการเกิดโพรงหดตัวที่เกิดขึ้นในชิ้นงาน Body OTC Steady โดยการจำลองกระบวนการหล่อขึ้นรูปด้วยโปรแกรม Cast-Designer เพื่อเป็นการช่วยเพิ่ม ประสิทธิภาพในการทำงานและลดความสูญเสียที่ไม่จำเป็น รวมไปถึงการช่วยวิเคราะห์แนวโน้มในการผลิตที่ ทำได้อย่างแม่นยำ ซึ่งการจำลองพฤติกรรมไหลแบ่งออกเป็น 2 กรณีศึกษา คือ กรณีที่หนึ่งเงื่อนไขต่าง ๆ ที่ใช้ในปัจจุบัน กรณีที่สองศึกษาการออกแบบระบบป้อนเติมโลหะเหลวขึ้นใหม่ทั้งหมด 3 โมเดล จากผล การศึกษาพบว่าในกรณีที่สองการออกแบบระบบป้อนเติมโลหะเหลวทำให้ชิ้นงานเกิดปริมาตรการเกิดโพรง หดตัวน้อยที่สุดคือ มีทางวิ่ง (runner) หน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้า 2 อัน ทางเข้า (gate₁) หน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้า 6 อัน และทางเข้า (gate₂) หน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส 2 อัน โดยพบข้อบกพร่องประเภทการหดตัวในระบบป้อน เติมรูปแบบใหม่ที่ 0.685 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งน้อยกว่าระบบป้อนเติมรูปแบบเดิมถึง 1.220 เปอร์เซ็นต์

คำสำคัญ: กระบวนการหล่ออินเวสต์เมนต์ การหดตัว โปรแกรมแคสดีไซน์เนอร์ การจำลองการหล่อโลหะ

Abstract

From quality inspection the defect of Body OTC Steady components, which are part of CNC machines manufactured by the investment casting process, it was found that the major issue is the occurrence of shrinkage porosity during the solidification of the metal alloy in the mold. To mitigate the problem, this research focuses on reducing the volume of shrinkage porosity in the Body OTC Steady components by simulating the casting process using Cast-Designer software. This aims to enhance efficiency, reduce unnecessary losses, and provide accurate production trend analysis. The flow behavior simulation is divided into two case studies: the first involves current conditions, while the second redesigns the gating system into three models. The study reveals that in the second case, the design of the gating system with the least shrinkage porosity volume includes two rectangular runners, six rectangular gate₁, and two square gate₂, resulting in a shrinkage porosity defect in the new model rate of 0.685%, which is lower than the current model by 1.220%.

Keywords: investment casting, shrinkage, cast-designer, casting simulation

บทนำ

การหล่ออินเวสต์เมนต์ (Investment Casting) เป็นเทคนิคการผลิตที่ใช้กันอย่างแพร่หลายเพื่อสร้างชิ้นส่วนโลหะที่ซับซ้อน ความแม่นยำสูงและผิวละเอียด (Cherdsak & Chanyut, 2004) โดยที่ในกระบวนการผลิตจะมีปัจจัยต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องที่ทำให้ได้ชิ้นงานหล่อที่ดีที่สุด ปัจจัยต่าง ๆ ได้แก่ รูปร่างของชิ้นงาน อุณหภูมิของโลหะเหลว (melt temperature) อุณหภูมิของแม่พิมพ์ (mold temperature) อุณหภูมิขณะเทหล่อ (pouring temperature) และความเร็วในการไหลของโลหะเหลว (velocity) โดยปัจจัยที่กล่าวมานั้นล้วนส่งผลต่อข้อบกพร่อง (defect) ของชิ้นงาน ความต้องการชิ้นงานหล่อที่มีความแม่นยำสูงยังเพิ่มขึ้นเนื่องจากความต้องการที่เข้มงวดของอุตสาหกรรมต่าง ๆ โดยบริษัท พรินซ์แมนูแฟกเจอร์ จำกัด เป็นผู้เชี่ยวชาญในการผลิตงานหล่ออินเวสต์เมนต์ (Investment Casting) ที่มีคุณภาพสูง ผลิตภัณฑ์มีตั้งแต่

ชิ้นส่วนขนาดเล็กมากจนไปถึงชิ้นส่วนขนาดใหญ่และหนัก ซึ่งครอบคลุมอุตสาหกรรมส่วนใหญ่ ตั้งแต่ภาคพื้นดินถึงบนฟ้า ในทุกกระบวนการผลิตจะพิจารณาการคำนวณวัสดุอย่างเหมาะสมเพื่อใช้วัสดุในการผลิตอย่างดีที่สุด วัสดุเหลือใช้น้อยที่สุดและยังคงรักษาผลิตภัณฑ์สำเร็จรูปให้มีคุณภาพสูงและตรงตามความต้องการของลูกค้า ซึ่งในช่วงไม่กี่ปีที่ผ่านมาการหล่ออินเวสต์เมนต์ (Investment Casting) ได้ให้ความสำคัญกับการรวมเทคนิคการจำลองด้วยคอมพิวเตอร์เข้ากับอุตสาหกรรมการผลิตมากขึ้น โดยการจำลองจะเกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์ในการเพิ่มประสิทธิภาพด้านต่าง ๆ ของกระบวนการหล่ออินเวสต์เมนต์ (Investment Casting) รวมทั้งการจำลองเหล่านี้ช่วยให้ผู้ผลิตสามารถคาดการณ์และลดข้อบกพร่องของชิ้นงานหล่อให้มีคุณภาพดีขึ้น โดยใช้เทคนิคการจำลองสถานการณ์การไหลของโลหะมีความก้าวหน้าและแม่นยำสูงขึ้นส่งผลให้มีความน่าเชื่อถือสามารถนำไปใช้ในการตัดสินใจได้ดีขึ้น (Campbell, 2015) จากปัญหาการผลิตชิ้นงาน

Body OTC Steady เป็นชิ้นส่วนของเครื่องจักรซีเอ็นซี มักพบข้อบกพร่อง (defect) ที่อาจจะเกิดขึ้นกับชิ้นงานได้จากขั้นตอนการหล่อโลหะ ยกตัวอย่างเช่น การเกิดโพรงอากาศ (gas porosity) รูพรุน (void) โลหะหลอมเหลวไม่เต็มแม่พิมพ์ (misrun) การเย็นตัวที่ไม่ประสานกัน (cold shut) การหดตัวของชิ้นงานหล่อ (shrinkage) เป็นต้น

โดยจากการศึกษาพบว่าซอฟต์แวร์จำลองกระบวนการหล่อเป็นเครื่องมือที่มีความแม่นยำในการวิเคราะห์ข้อบกพร่องและเพื่อให้ได้ระบบป้อนเติมโลหะเหลวที่เหมาะสม เพื่อผลิตชิ้นงานหล่อที่มีคุณภาพ การศึกษานี้ใช้ AutoCAST-X ในการจำลองการหล่ออลูมิเนียมลิเทียม LM6 ที่มีรูปร่างซับซ้อนเพื่อลดข้อบกพร่องรูพรุนจากการหดตัว การหล่อด้วยรูล้นขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร ไม่พบตำหนิที่ผิวชิ้นงานแต่พบรูพรุนจากการหดตัวภายใน มีการแก้ไขโดยการใส่ฉนวนหนา 10 มิลลิเมตรรอบรูล้นขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร ทำให้ไม่พบรูพรุนทั้งภายในและภายนอกหลังการหล่อ (Gajbhiye, Choudhari, Raut, Narkhede & Bhandarkar, 2014) โดยอีกหนึ่งงานวิจัยที่มีรูปแบบในการวิเคราะห์ที่คล้ายคลึงกันอย่าง การศึกษาการจำลองกระบวนการแข็งตัวและการพยากรณ์รูพรุนจากการหดตัวในแบบหล่อสำหรับกระบอกสูบเครื่องยนต์ โดยทำการจำลองเพื่อวิเคราะห์กระบวนการแข็งตัวและพยากรณ์การเกิดรูพรุนจากการหดตัวในชิ้นส่วนที่หล่อด้วยอลูมิเนียมสำหรับกระบอกสูบเครื่องยนต์ โดยใช้โปรแกรม ProCAST ผลการจำลองกระบวนการแข็งตัวแสดงให้เห็นถึงการแข็งตัวที่ละส่วนของชิ้นงานและพบแนวโน้มการเกิดปัญหาการเติมของเหลวไม่ทันและเกิดรูพรุน (Liu, Liao & Zuo, 2010) งานวิจัยที่สำคัญอีกชิ้นหนึ่ง ผู้วิจัยได้ศึกษาการวิเคราะห์ทางความร้อนของกระบวนการหล่อสำหรับโลหะโดยใช้ด้วยโปรแกรม ANSYS เพื่อจำลองรูปแบบการแข็งตัว

ผลการจำลองทำให้เข้าใจถึงลำดับการแข็งตัวภายในชิ้นงาน ทำให้ระบุจุดร้อนที่แข็งตัวทีหลังสุดได้ ดังนั้นงานวิจัยจึงแสดงประโยชน์ของการจำลองเชิงตัวเลขในการยกระดับกระบวนการหล่อให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น (Sankalp, Sankalp, Jaiswal & Verma, 2019) ยังมีงานวิจัยที่น่าสนใจอีกชิ้นหนึ่งที่เกี่ยวข้องกับงานหล่อคือการศึกษาการจำลองเชิงตัวเลขของกระบวนการเติมและการแข็งตัวของการหล่อต่อรวมไอตือลูมิเนียมอัลลอยด์ A356 ด้วยแรงดันต่ำได้ดำเนินการโดยใช้ซอฟต์แวร์ ProCAST โดยมีการปรับปรุงระบบทางเข้า (gating system) ให้เหมาะสมเพื่อกำจัดโพรงหดตัว (shrinkage porosity) ผลปรากฏว่าระบบทางเข้าที่มีรูเทเพียงหนึ่งอันพบว่าการเติมเต็มไม่เสถียร เกิดการแข็งตัวไม่เป็นไปตามลำดับและพบโพรงหดตัว (shrinkage porosity) จำนวนมาก ได้มีการปรับปรุงระบบทางเข้า (gating system) โดยการเพิ่มทางวิ่ง (runner) หนึ่งอันและทางเข้า (ingate) สองอัน เวลาในการเติมเพิ่มจาก 4 วินาที เป็น 4.5 วินาที การเติมเต็มมีความเสถียรมากขึ้นแต่มีการแข็งตัวไม่เป็นไปตามลำดับ นอกจากนี้ยังมีโพรงหดตัว (shrinkage porosity) ที่จุดร้อนของชิ้นงาน จึงได้มีการปรับปรุงระบบทางเข้า (gating system) อีกครั้ง โดยการเพิ่มรูล้น (riser) และทุนเย็น (chill) ทำให้ชิ้นงานมีคุณภาพภายในที่ดีและไม่พบข้อบกพร่องใด ๆ (Jiang & Fan, 2014) งานวิจัยที่น่าสนใจอีกชิ้นหนึ่ง ผู้วิจัยได้ศึกษาการจำลองการผลิต Steel Flywheel ที่พัฒนาขึ้นใหม่เพื่อเป็นต้นแบบในการหล่อทราย ผลการจำลองสามารถนำมาใช้คาดการณ์ข้อบกพร่องในการหล่อ เช่น Shrinkage Porosity, Blow Holes, and Cold Shut โดยใช้ซอฟต์แวร์ ADSTEFAN ในการจำลองผลของการจำลองลักษณะการไหล (fluid flow) ของแบบจำลองสามารถคาดการณ์ได้ว่าโลหะเหลวเติมเต็มได้อย่างราบเรียบสม่ำเสมอ ผลการจำลองการแข็งตัว (solidification) เริ่มต้นการแข็งตัวจากส่วนที่บางที่สุดไปยังส่วนที่หนาที่สุด

และสิ้นสุดที่รูกลั่น โดยแบบจำลองที่มีการปรับแก้ไขมีแนวโน้มว่าจะเกิดข้อบกพร่องน้อยกว่าแบบจำลองต้นแบบและผลการจำลองการเกิดโพรงหดตัว (shrinkage porosity) พบว่าการเพิ่มขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูกลั่นจาก 50 เป็น 60 มิลลิเมตร มีการเกิดโพรงหดตัว (shrinkage porosity) ลดลงอย่างมากถึง 98 เปอร์เซ็นต์ (Navee & Sunil, 2014) งานวิจัยที่น่าสนใจอีกชิ้นหนึ่งคือ การศึกษาการจำลองตัวเลขของพารามิเตอร์ของระบบทางเข้า (gating system) สำหรับการหล่อโลหะแมกนีเซียม เพื่อวิเคราะห์ผลของการออกแบบระบบทางเข้า (gating system) ที่แตกต่างกัน พร้อมทั้งการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ของระบบทางเข้า (gating system) ทั้งสี่อย่างคือ ความสูงของทางเข้า ความกว้างของทางเข้า ความสูงของทางวิ่ง และความกว้างของทางวิ่ง โดยจำลองกระบวนการเติมเต็มและการแข็งตัวผ่านซอฟต์แวร์ MAGMASOFT และผลลัพธ์ที่ได้เป็นที่น่าพอใจด้วยผลผลิตที่สูงและปริมาตรโพรงหดตัว (shrinkage porosity) ลดลงซึ่งปัจจัยที่มีผลต่อคุณภาพการหล่อได้แก่ ความสูงของทางวิ่ง (Zhizhong, Henry & Xiang, 2008) นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยที่น่าสนใจอีกเรื่องหนึ่งงานวิจัยเรื่องนี้เกี่ยวกับการเติมเต็มเปลือกเซรามิกจุดมุ่งหมายคือ การเปรียบเทียบระบบทางเข้า (gating system) ที่มีการเติมเต็มจากด้านบนและการเติมเต็มจากด้านล่างว่ามีผลอย่างไรต่อชิ้นงานด้วยการจำลองจากซอฟต์แวร์ ProCAST ผลการจำลองพบว่า การเติมเต็มจากด้านล่างขึ้นด้านบนมีการเติมเต็มที่เหมาะสมและราบเรียบกว่าการเติมเต็มจากด้านบนลงด้านล่าง (Ondrej & Ales, 2019) งานวิจัยเกี่ยวกับการออกแบบระบบป้อนเติมโลหะเหลวที่น่าสนใจได้แก่ การวิเคราะห์ระบบทางเข้าของชิ้นงานหล่ออลูมิเนียมกรณีศึกษาชิ้นงานรูปถัง งานวิจัยนี้ศึกษารูปร่างลักษณะทางเข้าที่มีผลต่อการเกิดโพรงหดตัวโดยใช้โปรแกรม Cast-Designer ในการจำลองพฤติกรรมในงานหล่อ พบว่าทางเข้าสี่เหลี่ยมคางหมูที่มีรูปทรงแบนและทางเข้าสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มี

รูปทรงป้อมทำให้ชิ้นงานมีปริมาตรการเกิดโพรงหดตัวน้อย (Kantithat, Nuttaporn & Sumethinee, 2020) อีกหนึ่งงานวิจัยที่มีรูปแบบในการวิเคราะห์ที่คล้ายคลึงกันอย่างมาก การศึกษาตัวแปรในกระบวนการผลิตสายพานดินตะขาคด้วยโปรแกรม Cast-Designer สำหรับแบบหล่ออินเวสต์เมนต์เพื่อลดการหดตัว ศึกษาการจำลองพฤติกรรมการไหลของโลหะเหลวสำหรับขึ้นรูปชิ้นส่วนสายพานดินตะขาคที่มีลักษณะเฉพาะเพื่อเป็นการช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการทำงานลดความสูญเสียที่ไม่จำเป็น รวมไปถึงการช่วยวิเคราะห์แนวโน้มในการผลิตที่ทำได้อย่างแม่นยำ (Tinnagorn, Khanittha & Patpimol, 2023) นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยที่น่าสนใจอีกเรื่องหนึ่งงานวิจัยเกี่ยวกับการศึกษาพฤติกรรมการไหลของน้ำโลหะเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 430 ในแม่พิมพ์งานหล่ออินเวสต์เมนต์ ศึกษาการออกแบบชุดแม่พิมพ์สำหรับชิ้นงานตะขอ 3 แบบ โดยแม่พิมพ์เป็นแบบมีทางเข้าของโลหะเหลวทางเดียว มีการจัดวางเรียงชิ้นงานเป็นมุมเอียงลงกับระนาบแนวนอน 30, 45 และ 60 องศา โดยใช้โปรแกรม Cast-Designer (Patpimol, Nuttaphong & Phimraphas, 2022) งานวิจัยที่น่าสนใจอีกเรื่องได้แก่ การศึกษาเกี่ยวกับการออกแบบและปรับปรุงระบบ ทางเข้าและจ่ายโลหะเหลวพบว่าพื้นที่หน้าตัดของทางเข้าที่เหมาะสมคือ สี่เหลี่ยมจัตุรัส สี่เหลี่ยมผืนผ้า และสี่เหลี่ยมคางหมู (Sachin & Rajendra, 2014)

ในการศึกษานี้ได้ศึกษาการออกแบบระบบทางเข้า (gating system) สำหรับชิ้นงานด้วยกระบวนการหล่ออินเวสต์เมนต์ (Investment Casting) โดยจะกล่าวถึงวิธีการแก้ปัญหาการเกิดข้อบกพร่อง ได้แก่ การหดตัวของชิ้นงานหล่อ (shrinkage porosity) และชิ้นงานไม่สมบูรณ์ในการหล่อที่ผลิตจากวัสดุเหล็กเกรด AISI 4140 โดยใช้ซอฟต์แวร์ในการจำลองพฤติกรรมที่เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการเติมเต็มของโลหะเหลวในแม่พิมพ์ ขอบเขตการศึกษาคือปัจจัยที่ส่งผลให้

เกิดการปรับปรุงคุณภาพของการหล่อ เช่น ลด การเกิดการหดตัว (shrinkage porosity) และลด ต้นทุนการผลิตในกระบวนการหล่อ โดยมี การศึกษาปริมาตรการเกิดการหดตัว (shrinkage porosity) เพื่อพัฒนากระบวนการผลิตชิ้นงาน หล่อคุณภาพสูง

วัตถุประสงค์การวิจัย

เพื่อปรับปรุงคุณภาพของชิ้นงานหล่อ สามารถลดข้อบกพร่องของชิ้นงานจากการเกิด โพรงหดตัว (shrinkage porosity) และลดต้นทุน การผลิตในกระบวนการหล่อ

สมมติฐานการวิจัย

ตำแหน่งของทางเข้าของโลหะเหลวมีผล ต่อการไหลที่ไม่ราบเรียบ ซึ่งเป็นที่มาของ ข้อบกพร่องตามดและรูพรุนในชิ้นงานหล่อ

วิธีการดำเนินการวิจัย

กระบวนการหล่อโลหะคือ การขึ้นรูป ชิ้นงานจากโลหะเหลวโดยการเทโลหะเหลวใส่ใน แม่พิมพ์ (Groover, 2007) ส่วนประกอบของ แม่พิมพ์ที่สำคัญคือ รูเท (sprue) ทางวิ่ง (runner) ทางเข้า (gate) รูลัน (riser) ตามลำดับ ซึ่งการ ออกแบบส่วนประกอบเหล่านี้อาศัยทฤษฎี พื้นฐานของกลศาสตร์ของไหล (Cengel & Cimbala, 2006) ในปัจจุบันโปรแกรม Cast-Designer เป็นโปรแกรมหนึ่งที่นิยมใช้เพื่อจำลอง กระบวนการหล่อโลหะโดยเฉพาะ ซึ่งได้ถูก นำมาใช้ในงานวิจัยนี้ด้วย

1. ศึกษาปัญหาจากระบบป้อนเติมรูปแบบเดิม

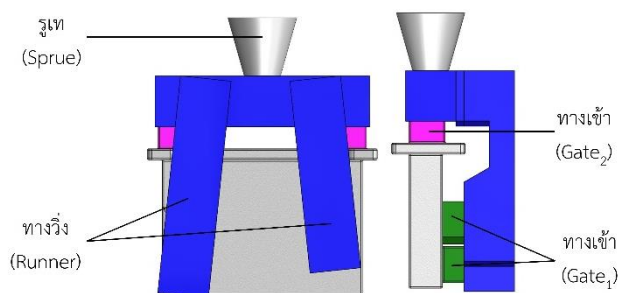
จากการตรวจสอบชิ้นงานที่ผ่านการหล่อ ขึ้นรูปโดยบริษัท พรซิชั่น แมนูแฟคเจอร์ริง จำกัด พบว่าหลังจากการเทหล่อขึ้นรูปชิ้นงานเสร็จแล้ว

ชิ้นงานส่วนใหญ่จะยุบตัวและมีข้อบกพร่อง ภายนอก ดังภาพ 1 จากการวิเคราะห์สาเหตุของ ปัญหาพบว่าโพรงหดตัวที่เกิดขึ้นนั้นมีสาเหตุมา จากตำแหน่งทางเข้าของโลหะเหลวไม่เหมาะสม ทำให้โลหะเหลวไม่สามารถไหลเพื่อไล่อากาศออก จากแม่พิมพ์ได้อย่างราบรื่น เพื่อแก้ไขปัญหา ดังกล่าวนี้นี้ ผู้วิจัยจึงได้มีการนำโปรแกรม Cast-Designer มาช่วยในการจำลองพฤติกรรมงาน หล่อเพื่อทำนายลักษณะการเกิดความผิดพลาดที่ เกิดขึ้นโดยจะพิจารณาผลที่เกิดขึ้นจากลักษณะ การเกิดโพรงหดตัว (shrinkage porosity) ทาง ผู้วิจัยจึงจำลองกระบวนการหล่อขึ้นรูปชิ้นงาน ดังกล่าวโดยแบ่งกรณีศึกษาออกเป็น 2 กรณีคือ กรณีที่หนึ่งเงื่อนไขต่าง ๆ ที่ใช้ในปัจจุบัน กรณีที่ สองศึกษาออกแบบการจำลองสถานการณ์ระบบ ป้อนเติมโลหะเหลวขึ้นรูปแบบใหม่ (new model)



ภาพ 1 ข้อบกพร่องประเภทโพรงหดตัว

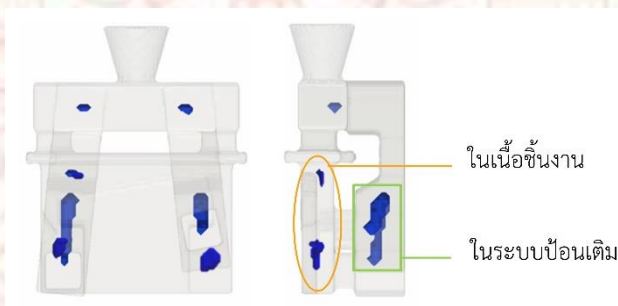
โดยระบบป้อนเติมโลหะเหลวรูปแบบเดิมที่เกิดความบกพร่องจะประกอบไปด้วย รูเท 1 อัน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 95 มิลลิเมตร สูง 80 มิลลิเมตร ทางวิ่ง (runner) 2 อัน หน้าตัด สี่เหลี่ยมผืนผ้า ขนาด 70x70 มิลลิเมตร ทางเข้า (gate₁) 2 อัน และทางเข้า (gate₂) 2 อัน หน้าตัด สี่เหลี่ยมผืนผ้า ขนาด 50x50 มิลลิเมตร แบบจำลองสามมิติของระบบป้อนเติมโลหะเหลว รูปแบบเดิม ดังแสดงภาพ 2



ภาพ 2 แบบจำลองระบบป้อนเดิมโลหะเหลวของระบบป้อนเดิมรูปแบบเดิม

ซึ่งในการจำลองด้วยซอฟต์แวร์ปรากฏว่าชิ้นงานมีการเกิดโพรงหดตัว (shrinkage porosity) อยู่ที่ 1.905 เปอร์เซ็นต์ และมีตำแหน่งที่เกิดโพรงหดตัวที่บริเวณเนื้อชิ้นงานและบริเวณระบบป้อนเดิม ดังภาพ 3 การพิจารณาในเงื่อนไขนี้จะสังเกตบริเวณที่มีการเกิดโพรงหดตัว ซึ่งผลการจำลองพบว่าตำแหน่งการเกิดโพรงหดตัวใน

โปรแกรมจำลองเกิดโพรงหดตัวในเนื้อชิ้นงานและทางวิ่ง (runner) ซึ่งทำให้เนื้อชิ้นงานบริเวณทางเข้า (gate₁) มีโลหะเหลวไม่เพียงพอสำหรับการเติมเต็ม จึงทำให้เกิดเป็นโพรงภายหลังการเย็นตัวเพิ่มขึ้นได้ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองข้างต้น



ภาพ 3 ผลการจำลองลักษณะการเกิดโพรงหดตัวของระบบป้อนเดิมรูปแบบเดิม

2. ขั้นตอนการออกแบบระบบป้อนเดิมโลหะเหลว

การจำลองเพื่อศึกษากระบวนการเทหล่อโลหะเหลวมีตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อการเกิดข้อบกพร่องของชิ้นงานหล่อจำนวนมาก การทดลองนี้ถูกกำหนดอุณหภูมิเทหล่อโลหะเหลว 1700 องศาเซลเซียส มีวัสดุที่ใช้ในการหล่อเป็น AISI4140 และกำหนดตัวแปร (variable) ที่มีอิทธิพลต่อการเกิดข้อบกพร่องของชิ้นงานประเภทการหดตัว การคำนวณหาเวลาในการเทนั้น (Narongsak, 2019) สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 1 เวลาในการเทหล่อ (t)

$$t = K_1 \sqrt{W} \quad (1)$$

โดย t คือ เวลาในการเท หน่วย วินาที
W คือ น้ำหนักของชิ้นงาน หน่วย กิโลกรัม

$K_1 = 2.0$ สำหรับงานที่มีหน้าตัดหนา ๆ

ตาราง 1 แสดงน้ำหนักของระบบป้อนเดิมทั้ง 4 แบบ

แบบจำลอง	น้ำหนักของชิ้นงาน
รูปแบบเดิม	
โมเดลที่ 1	15.95 กิโลกรัม
โมเดลที่ 2	
โมเดลที่ 3	

$$\text{แทนค่าในสมการที่ 1 } t = 2\sqrt{15.95} \\ = 7.987 \text{ sec}$$

และสมการที่ 2 คือ ความเร็วในการไหลของโลหะเหลว (v)

$$v = \sqrt{2gh} \quad (2)$$

โดย v คือ ความเร็วในการไหล หน่วย เมตรต่อวินาที

g คือ ค่าแรงโน้มถ่วง หน่วย เมตรต่อวินาทีกำลังสอง

h คือ ความสูงของรูเท หน่วย มิลลิเมตร และสมการที่ 3 คือ การคำนวณเพื่อออกแบบพื้นที่หน้าตัดรูเท

$$A_1 = \pi(r)^2 \quad (3)$$

โดย A_1 คือ พื้นที่หน้าตัดรูเท หน่วย ตารางมิลลิเมตร

r คือ รัศมีของรูเท หน่วย มิลลิเมตร

$$\text{แทนค่า } A_1 = \pi(r)^2 \\ = \pi(25)^2 \\ = 1963.5 \text{ ตารางมิลลิเมตร}$$

การคำนวณอัตราส่วนพื้นที่หน้าตัดของระบบแบบไร้ความดัน ซึ่งเหมาะสำหรับการหล่อที่ทำให้เกิดความปั่นป่วนของโลหะเหลวน้อยที่สุด อัตราส่วนพื้นที่หน้าตัดจะเป็น รูเท : ทางวิ่ง : ทางเข้า เป็น 1 : 3 : 3 จะได้

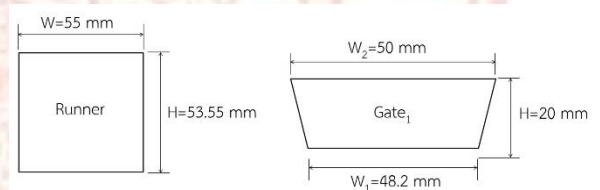
$$\text{รูเท } 1963.5 \times 1 = 1963.5 \text{ ตารางมิลลิเมตร}$$

$$\text{ทางวิ่ง } 1963.5 \times 3 = 5891 \text{ ตารางมิลลิเมตร ซึ่งทางวิ่งจะถูกแบ่งเป็น 2 ทาง จะได้ } 2945.5 \text{ ตารางมิลลิเมตร}$$

$$\text{ทางเข้า } 1963.5 \times 3 = 5891 \text{ ตารางมิลลิเมตร ซึ่งทางเข้าจะถูกแบ่งเป็น 6 ทาง จะได้ } 982 \text{ ตารางมิลลิเมตร}$$

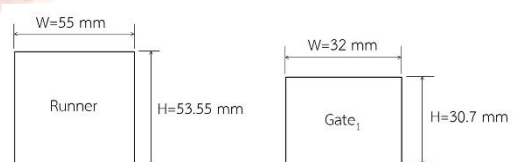
3. ออกแบบการจำลองสถานการณ์ระบบป้อนเติมโลหะเหลวรูปแบบใหม่ (new model)

โดยจากผลการจำลองระบบป้อนเติมรูปแบบเดิมในครั้งแรกปรากฏว่าชิ้นงาน Body OTC Steady นั้นปรากฏโพรงหดตัวจำนวนมากและทางบริษัทมีความต้องการให้ศึกษาการออกแบบระบบป้อนเติมโลหะเหลว ดังนั้นผู้วิจัยจึงทำการปรับปรุงแก้ไขโดยการศึกษาการออกแบบระบบป้อนเติมโลหะเหลวขึ้นมาใหม่ซึ่งเป็นการปรับปรุงเพื่อลดปริมาณการเกิดโพรงหดตัว โดยการออกแบบและแก้ไขในครั้งนี้ได้แนวคิดในการออกแบบทางวิ่งและทางเข้าได้มาจากการศึกษาทฤษฎีเบอร์นูลลีและงานวิจัยข้างต้นจึงได้แบบจำลองสามมิติขึ้นมาใหม่ 2 โมเดล ได้แก่ โมเดลที่ 1 ดังภาพ 8 (ก) มีการออกแบบทางวิ่ง (runner) เป็นหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาด 55x53.55 มิลลิเมตร จำนวน 2 อัน ทางเข้า (gate₁) หน้าตัดสี่เหลี่ยมคางหมู ขนาด 48.2x50x20 มิลลิเมตร จำนวน 6 อัน



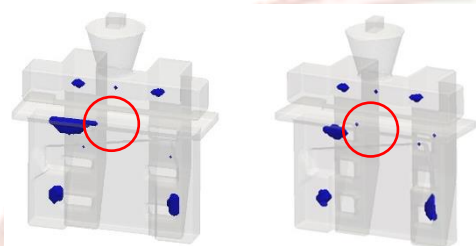
ภาพ 4 ขนาดของทางวิ่ง (runner) และทางเข้า (gate₁) ของโมเดลที่ 1

โมเดลที่ 2 ดังภาพ 8 (ข) มีการออกแบบทางวิ่ง (runner) หน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้า ขนาด 55x53.55 มิลลิเมตร จำนวน 2 อัน ทางเข้า (gate₁) หน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้า ขนาด 32x30.7 มิลลิเมตร จำนวน 6 อัน



ภาพ 5 ขนาดของทางวิ่ง (runner) และทางเข้า (gate₁) ของโมเดลที่ 2

และได้นำโมเดลดังกล่าวมาจำลองด้วยซอฟต์แวร์จากผลการจำลองพบว่าโมเดลที่ 1 มีปริมาตรการเกิดโพรงหดตัวอยู่ที่ 1.367 เปอร์เซ็นต์ และโมเดลที่ 2 มีปริมาตรการเกิดโพรงหดตัวอยู่ที่ 0.881 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งทั้งสองโมเดลมีโพรงหดตัวเกิดที่บริเวณด้านบนของชิ้นงานเป็นจำนวนมาก ดังภาพ 6



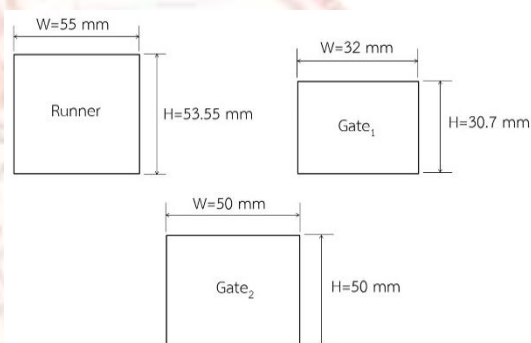
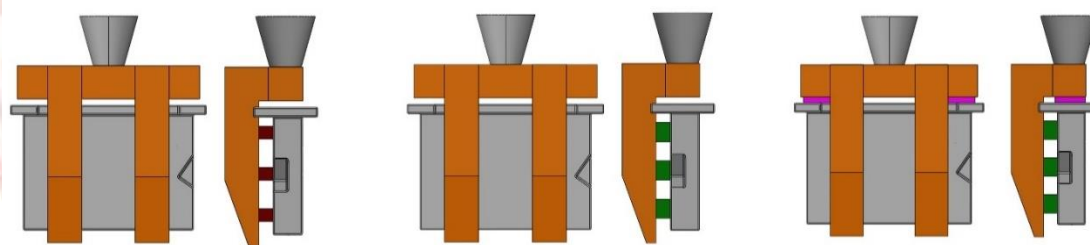
(ก) โมเดลที่ 1

(ข) โมเดลที่ 2

ภาพ 6 ผลการจำลองการเกิดโพรงหดตัว

ซึ่งผู้วิจัยมีความต้องการในการลดปริมาตรการเกิดโพรงหดตัว ซึ่งผลการจำลองการเกิดโพรงหดตัวของ 2 โมเดลแรก พบว่าโมเดลที่ 2 มีปริมาตรการเกิดโพรงหดตัวน้อยกว่าโมเดลที่ 1 จึงมีแนวคิดในการนำระบบป้อนเติมของโมเดลที่ 2 มาศึกษาต่อโดยการ

ใส่ทางเข้า (gate₂) เพิ่ม เพื่อช่วยในการเติมเนื้อโลหะบริเวณนั้น จึงเป็นที่มาของโมเดลที่ 3 ดังภาพ 8 (ค) มีการออกแบบทางวิ่ง (runner) หน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้า ขนาด 55x53.55 มิลลิเมตร จำนวน 2 อัน ทางเข้า (gate₁) หน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้า ขนาด 32x30.7 มิลลิเมตร จำนวน 6 อัน ซึ่งจะเหมือนกับในโมเดลที่ 2 และเพิ่มทางเข้า (gate₂) หน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส ขนาด 50x50x10 มิลลิเมตร จำนวน 2 อัน

ภาพ 7 ขนาดของทางวิ่ง (runner) และทางเข้า (gate₁) ของโมเดลที่ 3

(ก)

(ข)

(ค)

ภาพ 8 แบบจำลองระบบป้อนเติมโลหะเหลวของโมเดลใหม่ทั้ง 3 โมเดล (ก) โมเดลที่ 1 (ข) โมเดลที่ 2 (ค) โมเดลที่ 3

ผลการวิจัย

ผลการจำลองพฤติกรรมของระบบป้อนเติมโลหะเหลวของทั้ง 3 โมเดล ที่ได้ออกแบบขึ้นใหม่นั้น สามารถสรุปผลได้ดังนี้ ลักษณะการไหล (fluid fraction) การจำลองลักษณะการไหลของโมเดลที่ 1 โมเดลที่ 2 และโมเดลที่ 3 จะแสดง

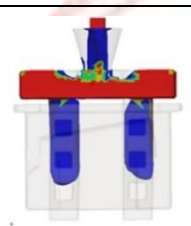
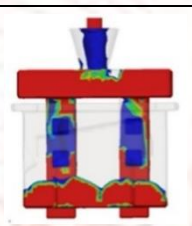
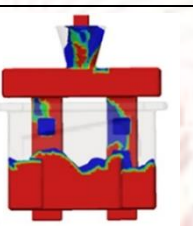
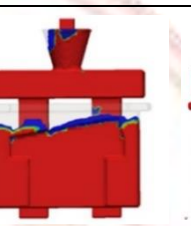
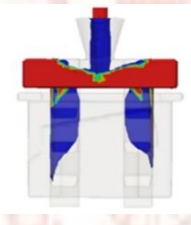
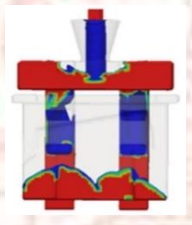
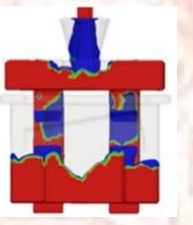
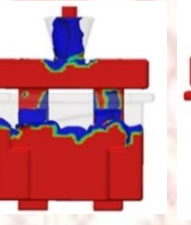
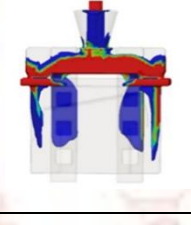
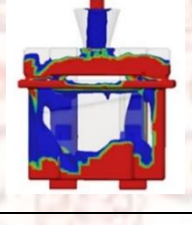
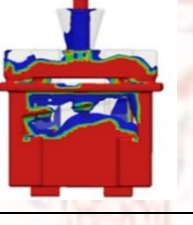
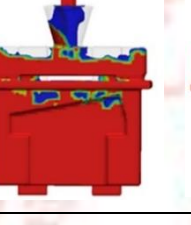
แบบจำลองลักษณะการไหลดังตาราง 2 ซึ่งลักษณะการไหลของโมเดลที่ 1 และโมเดลที่ 2 ณ ช่วงเวลาที่ 40 เปอร์เซ็นต์ จะมีการไหลเข้าโพรงแบบทั้งด้านซ้ายและขวาของชิ้นงาน การไหลเติมเต็มจึงมีลักษณะใกล้เคียงกัน ณ ช่วงเวลาที่ 60 เปอร์เซ็นต์ มีการไหลเติมเต็มจากทางด้านหลังทำ

ให้เกิดการไหลแบบปั่นป่วนขึ้น และค่อย ๆ ลดลง ณ ช่วงเวลาที่ 80 ถึง 100 เปอร์เซ็นต์ ในส่วนของ โมเดลที่ 3 ณ ช่วงเวลาที่ 40 เปอร์เซ็นต์ จะมีการ ไหลเข้าโพรงแบบทั้งด้านบนและด้านหลังของ

ชิ้นงานทำให้เกิดการไหลแบบปั่นป่วนตั้งแต่ ช่วงแรก และค่อย ๆ ลดลง ณ ช่วงเวลาที่ 40 ถึง 100 เปอร์เซ็นต์

ตาราง 2

แบบจำลองลักษณะการไหลของโมเดลทั้ง 3 โมเดล ณ ช่วงเวลาต่าง ๆ

M.	ลักษณะการไหล (Fluid Fraction)				
	20 เปอร์เซ็นต์	40 เปอร์เซ็นต์	60 เปอร์เซ็นต์	80 เปอร์เซ็นต์	100 เปอร์เซ็นต์
1					
2					
3					

เวลาในการเติมเต็ม (fill time) ในการ พิจารณาการป้อนเติมในปริมาณต่าง ๆ ของทั้ง 3 โมเดล พบว่าการไหลป้อนเติมทำได้ดี มีพฤติกรรม การไหลที่ใกล้เคียงกันทั้งหมดและสามารถป้อน เติมได้เต็มแม่พิมพ์ทั้ง 3 โมเดล ลักษณะการ แข็งตัว (solidification) ผลการจำลองนี้จะ พิจารณาลักษณะการแข็งตัวในช่วงเวลาสุดท้าย ของทั้ง 3 โมเดล โดยผลในการจำลองปรากฏว่า บริเวณที่แข็งตัวช้าที่สุดคือ บริเวณร่องตรงกลาง ชิ้นงาน ซึ่งเป็นตำแหน่งเดียวกันกับผลการจำลอง ระบบป้อนเติมรูปแบบเดิม โดยลักษณะการ แข็งตัวสามารถบอกถึงตำแหน่งที่แข็งตัวลำดับ

สุดท้ายและยังสามารถทำนายถึงจุดที่จะเกิดโพรง หดตัวที่ชิ้นงานได้อีกด้วย และลักษณะของการ เกิดโพรงหดตัว (shrinkage porosity) ในการ จำลองปรากฏว่าชิ้นงานมีการเกิดโพรงหดตัวใน เนื้อชิ้นงานและบริเวณระบบป้อนเติม ซึ่งเป็น ตำแหน่งที่ใกล้เคียงกับผลการจำลองของระบบ ป้อนเติมรูปแบบเดิม ผลของการจำลองทั้ง 3 หัวข้อแสดงในตาราง 3

จากผลการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Cast-Designer ของทั้ง 3 โมเดลพบว่าระบบจ่ายโลหะ เหลวที่ออกแบบขึ้นมาใหม่นั้นมีประสิทธิภาพใน การจ่ายโลหะเหลวได้ดี สามารถลดปริมาณการ

เกิดโพรงหดตัวได้ทั้ง 3 โมเดล แต่เมื่อพิจารณาจากผลของทั้ง 4 หัวข้อแล้ว พบว่า โมเดลที่ 3 สามารถลดปริมาตรการเกิดโพรงหดตัวได้มากถึง 1.220 เปอร์เซ็นต์ มีลักษณะการไหล (fluid fraction) ที่เกิดการตีวนน้อย อากาศจึงเข้าไปปะปนกับเนื้อโลหะเหลวน้อยทำให้เกิด

ข้อบกพร่องประเภทโพรงหดตัวน้อยไปด้วย เวลาในการเติมเต็ม (fill time) ของโมเดลที่ 3 ใช้เวลาอยู่ที่ 7.647 วินาที และเวลาในการแข็งตัวของโมเดลที่ 3 ใช้เวลาอยู่ที่ 263.844 วินาที

ตาราง 3

ผลการจำลองเวลาในการเติมเต็ม เวลาในการแข็งตัว และปริมาตรการเกิดโพรงหดตัวของโมเดลใหม่ทั้ง 3 แบบ

ผลการจำลอง	โมเดล		
	โมเดลที่ 1	โมเดลที่ 2	โมเดลที่ 3
เวลาในการเติมเต็ม (วินาที)	7.365	6.870	7.647
เวลาในการแข็งตัว (วินาที)	265.062	257.609	263.844
ปริมาตรโพรงหดตัว (เปอร์เซ็นต์)	1.367	0.881	0.685

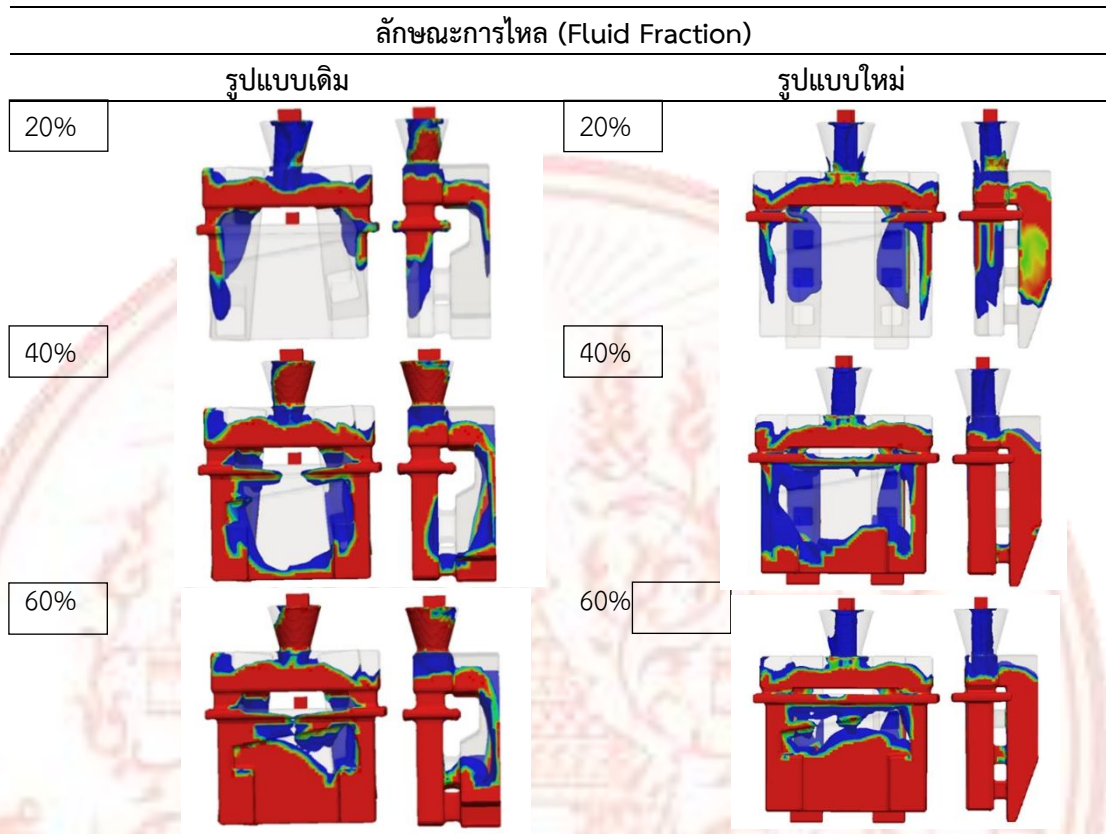
1. การเปรียบเทียบผลการจำลองสถานการณ์ของระบบป้อนเติมรูปแบบเดิมและรูปแบบใหม่

- ลักษณะการไหล (fluid fraction) ของทั้ง 2 โมเดลจะพิจารณาในช่วง 20 40 และ 60 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งมีลักษณะการไหลที่ใกล้เคียงกันคือเติมเต็มมาจากด้านบนและด้านหลังพร้อม ๆ กัน ดังตาราง 4 เมื่อพิจารณาในช่วงเวลาที่ 40 เปอร์เซ็นต์ พบว่าระบบป้อนเติมรูปแบบเดิมที่

บริเวณทางวิ่ง (runner) จะมีการปะปนของอากาศอยู่ในโพรงแบบมากกว่าระบบป้อนเติมรูปแบบใหม่ ซึ่งทำให้การไล่อากาศออกจากโพรงแบบเป็นไปได้อย่างส่งผลทำให้เกิดข้อบกพร่องประเภทโพรงหดตัวได้ง่ายและระบบป้อนเติมรูปแบบใหม่จะมีลักษณะการไหลเติมเต็มที่ราบเรียบกว่าระบบป้อนเติมรูปแบบเดิม

ตาราง 4

การเปรียบเทียบผลลักษณะการไหล (fluid fraction)



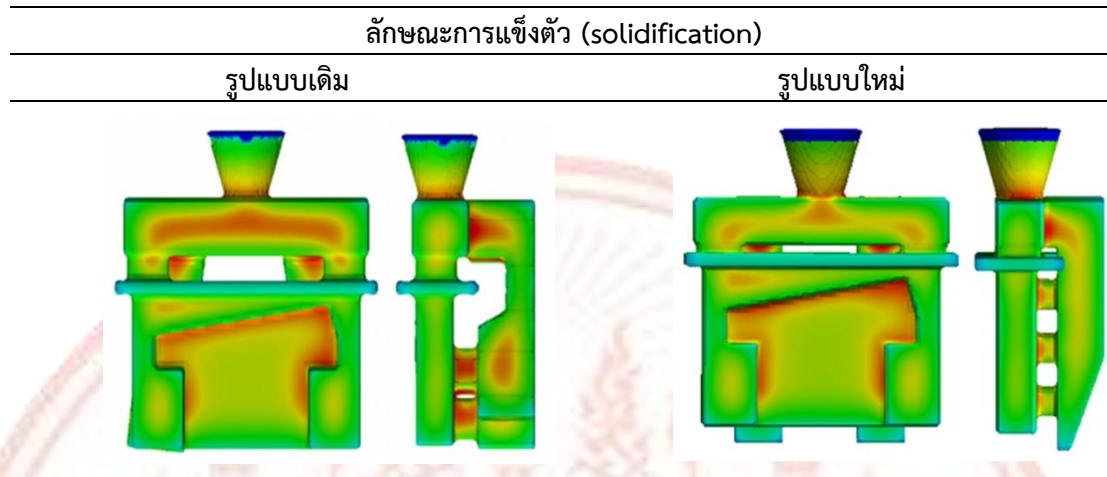
- เวลาในการเติมเต็ม (fill time) ของทั้ง 2 โมเดล มีเวลาในการเติมเต็มที่แตกต่างกันเล็กน้อย ระบบป้อนเต็มรูปแบบเดิมใช้เวลาในการเติมเต็ม น้อยกว่ากว่าระบบป้อนเต็มรูปแบบใหม่ แสดงใน ตาราง 7

- ลักษณะการแข็งตัว (solidification) ของทั้ง 2 โมเดล มีลักษณะแตกต่างกันเล็กน้อย เริ่มจากระบบป้อนเต็มรูปแบบเดิมซึ่งจะมีการ แข็งตัวตำแหน่งสุดท้ายอยู่ที่บริเวณร่องกลาง ขึ้นงาน บริเวณทางเข้า (gate) และบริเวณทางวิ่ง (runner) และในส่วนจากระบบป้อนเต็มรูปแบบ ใหม่มีการแข็งตัวอยู่ที่บริเวณเดียวกันกับระบบ

ป้อนเต็มรูปแบบเดิมแต่สังเกตจากสีในตาราง 5 จะเห็นได้ว่าระบบป้อนเต็มรูปแบบเดิมมีปริมาตร มากกว่าระบบป้อนเต็มรูปแบบใหม่ ความร้อน สะสมในชิ้นงานจึงมากกว่าระบบป้อนเต็มรูปแบบ ใหม่ ซึ่งส่งผลให้การเย็นตัวของระบบป้อนเต็ม รูปแบบเดิมช้ากว่าระบบป้อนเต็มรูปแบบใหม่ ถึง 150 วินาที ซึ่งวิเคราะห์ได้ว่าระบบป้อนเต็มรูปแบบเดิมอาจจะเกิดข้อบกพร่องที่ชิ้นงานมากกว่า ระบบป้อนเต็มรูปแบบใหม่ โดยเวลาในการแข็งตัว ของระบบป้อนเต็มรูปแบบเดิมใช้เวลาในการ แข็งตัวมากกว่าระบบป้อนเต็มรูปแบบใหม่ แสดง ในตาราง 7

ตาราง 5

การเปรียบเทียบผลการจำลองลักษณะการแข็งตัว (solidification)

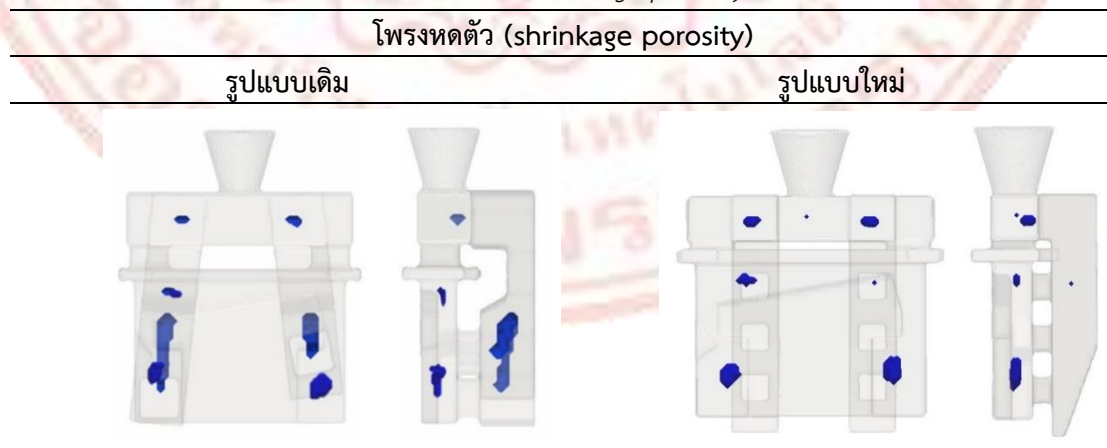


- ลักษณะการเกิดโพรงหดตัว (shrinkage porosity) ของทั้ง 2 โมเดล ในการเปรียบเทียบปริมาณการเกิดโพรงหดตัวนี้จะเปรียบเทียบการเกิดโพรงหดตัวเฉพาะในเนื้อชิ้นงาน ไม่ได้นำปริมาณการเกิดโพรงหดตัวในระบบป้อนเติมมาทำการเปรียบเทียบด้วย โดยทั้ง 2 โมเดล มีลักษณะแตกต่างกันอย่างมาก เริ่มจากระบบป้อนเติมรูปแบบเดิมมีตำแหน่งที่เกิดโพรง

หดตัวอยู่ที่บริเวณทางวิ่ง (runner) และในเนื้อชิ้นงาน และส่วนของระบบป้อนเติมรูปแบบใหม่มีตำแหน่งที่เกิดโพรงหดตัวอยู่ที่บริเวณทางวิ่ง (runner) และในเนื้อชิ้นงานแต่เกิดในปริมาณที่ลดลง ดังแสดงในตาราง 6 โดยระบบป้อนเติมรูปแบบเดิมมีปริมาณการเกิดโพรงหดตัวมากกว่าระบบป้อนเติมรูปแบบใหม่ ดังแสดงในตาราง 7

ตาราง 6

การเปรียบเทียบผลการจำลองการเกิดโพรงหดตัว (shrinkage porosity)



ตาราง 7

การเปรียบเทียบผลการจำลองเวลาในการเติมเต็ม เวลาในการแข็งตัว และปริมาตรการเกิดโพรงหดตัวของทั้ง 2 รูปแบบ

ผลการจำลอง	ระบบป้อนเติม	
	รูปแบบเดิม	รูปแบบใหม่
เวลาในการเติมเต็ม (วินาที)	7.288	7.647
เวลาในการแข็งตัว (วินาที)	433.797	281.578
ปริมาตรการเกิดโพรงหดตัว (เปอร์เซ็นต์)	1.905	0.685

สรุปผล

เมื่อพิจารณาการออกแบบและการจำลองสถานการณ์การไหลของโลหะเหลวเพื่อแก้ไขปัญหาประเภทการหดตัว สามารถสรุปได้ว่าระบบป้อนเติมโลหะเหลวรูปแบบใหม่ทำให้ชิ้นงานเกิดความสมบูรณ์มากที่สุดคือ ระบบป้อนเติมโลหะเหลวที่มีทางวิ่ง (runner) หน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้า 2 อัน ทางเข้า (gate₁) หน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้า 6 อัน และทางเข้า (gate₂) หน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส 2 อัน และแบ่งการพิจารณาผลออกเป็น 4 หัวข้อดังนี้ หัวข้อที่หนึ่ง ลักษณะการไหล (fluid fraction) พบว่าระบบป้อนเติมโลหะเหลวรูปแบบใหม่มีการไหลที่ดีกว่ารูปแบบเดิมเนื่องจากเกิดการตีวนน้อย เมื่อเกิดการตีวนน้อยการแทรกตัวของอากาศภายในโลหะเหลวก็จะมีปริมาณน้อย ซึ่งเป็นลักษณะการไหล (fluid fraction) ที่ดี หัวข้อที่สอง ผลของเวลาในการเติมเต็ม (fill time) พบว่าระบบป้อนเติมรูปแบบใหม่มีเวลาในการเติมเต็มที่เหมาะสมกว่ารูปแบบเดิมเนื่องจากทำให้เกิดลักษณะการไหลที่ดี โพรงแบบจึงมีอุณหภูมิภายในค่อนข้างสม่ำเสมอสำหรับการเย็นตัว ซึ่งมีเวลาในการเติมเต็ม 7.647 วินาที หัวข้อที่สาม ผลของเวลาในการแข็งตัว (solidification time) พบว่าระบบป้อนเติมรูปแบบใหม่มีการสะสมความร้อนน้อยกว่ารูปแบบเดิม โดยเวลาในการแข็งตัวของระบบป้อน

เติมรูปแบบใหม่ใช้เวลา 281.578 วินาที ซึ่งการสะสมความร้อนภายในชิ้นงานจะมีผลต่อการเกิดข้อบกพร่องประเภทการหดตัว และหัวข้อสุดท้าย ผลของการเกิดโพรงหดตัว (shrinkage porosity) พบว่าระบบป้อนเติมรูปแบบเดิมและระบบป้อนเติมรูปแบบใหม่มีตำแหน่งการเกิดโพรงหดตัวที่คล้ายกัน แต่ระบบป้อนเติมโลหะเหลวรูปแบบใหม่มีปริมาตรการเกิดโพรงหดตัวอยู่ที่ 0.685 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งน้อยกว่าระบบป้อนเติมรูปแบบเดิมถึง 1.220 เปอร์เซ็นต์ สำหรับประโยชน์ของการใช้เทคนิคการจำลองพฤติกรรมที่เห็นได้ชัดคือ ลดเวลาการแก้ไขด้วยวิธีการเติม ลดค่าใช้จ่าย ลดการสูญเสียวัสดุโดยไม่จำเป็น โดยระบบป้อนเติมรูปแบบใหม่มีปริมาตรชิ้นงานลดลงจาก 6758 ลูกบาศก์เซนติเมตร เป็น 5103 ลูกบาศก์เซนติเมตร ลดลงถึง 1655 ลูกบาศก์เซนติเมตร การแก้ไขจุดบกพร่องทำได้ง่ายขึ้น เมื่อได้ผลรูปที่ดีที่สุดแล้วจึงนำพารามิเตอร์นั้นมาแก้ไขที่แม่พิมพ์และการใช้เทคนิคการจำลองพฤติกรรมยังเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตได้อีกด้วย

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากวิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ตามสัญญาเลขที่ CIT-2022-GRAD-20 และบริษัท

โพธิ์ คอปรอเรนซ์ จำกัดที่ให้ความอนุเคราะห์
สนับสนุนโปรแกรม Cast Designer เป็น
เครื่องมือสำหรับการทำวิจัยในครั้งนี้ และบริษัท
พรธิชัย แมนูแฟคเจอร์ จำกัดที่ให้ความ
อนุเคราะห์ในการศึกษาชิ้นงานตัวอย่างและการ
ผลิตชิ้นงานด้วยกระบวนการหล่ออินเวสต์เมนต์
(Investment Casting)



References

- Campbell J. (2015). *Foundry technology*. London: Butterworth.
- Cengel, Y. A., & Cimbala, J. M. (2006). *Fluid mechanics fundamentals and applications*. Singapore: McGraw hill
- Cherdsak, A., & Chanyut, K. (2004). The study of basic rules and principles for designing gate and runner of locking knob in lighting industries using casting process simulation technique. The Conference on Mechanical Engineering. Network of Thailand: ME-NETT.18 (pp. 18-45). Khon Kaen: ME-NETT. <https://bit.ly/3UUAa1W> (in Thai)
- Hebsur, N., & Mangshetty, S. (2014). *Casting simulation for sand casting of flywheel*. *International Journal of Research in Advent Technology*, 2(8), 82-86.
- Groover, M. P. (2007). *Fundamentals of modern manufacturing*. USA: John Wiley and Sons.
- Gajbhiye, A. K., Choudhari, C. M., Raut, D. N., Narkhede, B. E., & Bhandarkar, B. M. (2014). minimization of shrinkage porosity in a sand-casting process by simulation in AUTOCAST-X Software with Experimental Validation by Destructive testing. *International Journal of Modern Engineering Research (IJMER)*, 4(5), 18-27. <https://www.slideshare.net/slideshow/ijmer-45061827/35832830>
- Jiang, W., & Fan, Z. (2014). Gating system optimization of low-pressure casting A356 aluminum alloy intake manifold based on numerical simulation. *China Foundry*, 11(2), 119-124. <https://bit.ly/3yGfgvY>
- Kantithat P., Nuttaporn P., & Sumethinee H. (2020). *Analysis of Gating System for Anvil Casting: a Case Study*. Bachelor's Degree of Engineering in Machine Design and Manufacturing Engineering Technology, King Mongkut's University of Technology North Bangkok.
- Liu, J. X., Liao, R. D., & Zuo, Z. X. (2010). Numerical Study on Solidification Process and Shrinkage Porosity for Engine Block Casting. *Applied Mechanics and Materials*, 37-38, 753-757. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.37-38.753>
- Narongsak Thammachote. (2562). *Foundry engineering*. Bangkok: Se-ed Education.
- Patpimol, S., Nuttaphong, S., & Phimraphas, N. (2022). A Study of Flow Behavior of AISI 430 Stainless Steel in Investment Casting by Analysis Program. *Defence Technology Academic Journal*, 3(9).
- Sachin, L.N., & Rajendra S.D. (2014). Design and Optimization of Gating and Feeding System for Casting: A Review. *In Conference on Advances in Civil and Mechanical Engineering System*, 23-24.
- Sankalp, J., & Sankalp, V. Jaiswal, S., & Verma, S. (2019). Thermal analysis of casting using ANSYS. *International Journal for Research in Applied Science & Engineering Technology (IJRASET)*, 7(8), 671-679. <https://www.ijraset.com/fileserve.php?FID=24839>

- Sun, Z., Hu, H., & Chen, X. (2008). Numerical Optimization of Gating System Parameters for a Magnesium Alloy Casting with Multiple Performance Characteristics. *Journal of Materials Processing Technology*, 199, 256-264.
- Tinnagorn, S., Khanittha, W., & Patpimol, S. (2023). The Study of Factors in Track Shoe Manufacturing Process with Cast Designer Program for Investment Casting to Reduce Shrinkage. *The Journal of Industrial Technology* (2023), 19(3).
- Vratny, O., & Herman, A. (2019). Importance of a type of gating system in investment casting technology. *Acta Polytechnica*, 59(6), 601-610.
doi:[10.14311/AP.2019.59.0601](https://doi.org/10.14311/AP.2019.59.0601).



ประวัติผู้เขียน

ชื่อ	นางสาวสุเมธินี หุชัยภูมิ
ชื่อวิทยานิพนธ์	การออกแบบและวิเคราะห์ข้อบกพร่องในการหดตัวของชิ้นงานหล่อ อินเวสต์เมนต์ด้วยซอฟต์แวร์ Cast-Designer
สาขาวิชา	เทคโนโลยีวิศวกรรมเครื่องกล
ประวัติ	ประวัติส่วนตัว เกิดวันที่ 9 พฤศจิกายน 2541 สถานที่เกิด อำเภอมะนัง จังหวัดลำปาง เป็นบุตรคนที่ 1 ของนายสุเมธ หุชัยภูมิ และนางจรรณี หุชัยภูมิ ที่อยู่ปัจจุบัน 144/42 หมู่ที่ 7 ตำบลบางโกล้ง อำเภอบางพลี จังหวัดสมุทรปราการ รหัสไปรษณีย์ 10540 ประวัติการศึกษา สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษา โรงเรียนนวมินทราชินูทิศ เตรียมอุดมศึกษาพัฒนาการ ปี พ.ศ. 2559 และสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาเทคโนโลยีวิศวกรรมการออกแบบและผลิตเครื่องจักรกล วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรมมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ปีพ.ศ. 2563