



การวิเคราะห์ข้อบกพร่องงานหล่อทรายจากการจำลองสถานการณ์ การถ่ายเทความร้อนด้วยโปรแกรม

Cast Designer

นายพงศกร ขวัญทอง

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมเครื่องกล

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

ปีการศึกษา 2567

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

การวิเคราะห์ข้อบกพร่องงานหล่อทรายจากการจำลองสถานการณ์ การถ่ายเทความร้อนด้วยโปรแกรม
Cast Designer



นายพงศกร ขวัญทอง

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาหลักสูตร

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมเครื่องกล

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

ปีการศึกษา 2567

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ



ใบรับรองโครงงานวิทยานิพนธ์

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

เรื่อง การวิเคราะห์ข้อบกพร่องงานหล่อทรายจากการจำลองสถานการณ์ การถ่ายเทความร้อนด้วยโปรแกรม Cast Designer

โดย นายพงศกร ขวัญทอง

ได้รับอนุมัติให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมเครื่องกล

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย / หัวหน้าภาควิชา

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

ประธานกรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นุชนา พูลทอง)

อาจารย์ที่ปรึกษา

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พัทธ์พิมล สุวรรณกาญจน์)

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

(รองศาสตราจารย์ ดร.เพ็ญญรัตน์ สายสิริรัตน์)

กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วรรณลักษณ์ เหล่าทวีทรัพย์)

ชื่อ : นายพงศกร ขวัญทอง
 ชื่อวิทยานิพนธ์ : การวิเคราะห์ข้อบกพร่องงานหล่อทรายจากการจำลอง
 สถานการณ์ การถ่ายเทความร้อนด้วยโปรแกรม Cast
 Designer
 สาขาวิชา : เทคโนโลยีวิศวกรรมเครื่องกล
 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
 อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พัทธ์พิมล สุวรรณกาญจน์
 อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม : รองศาสตราจารย์ ดร.เพ็ญญารัตน์ สายสิริรัตน์
 ปีการศึกษา : 2567

หน้าปก วิชาไทย

บทคัดย่อ

ในกระบวนการหล่อโลหะ ปัญหาหนึ่งที่พบบ่อยคือการเกิดโพรงหดตัวภายในชิ้นงานหล่อ ซึ่งมีสาเหตุมาจากการกระจายความร้อนที่ไม่สม่ำเสมอในชิ้นงาน ทำให้เกิดบางบริเวณมีการสะสมความร้อนมากกว่าบริเวณอื่นๆ เมื่อความร้อนถูกสะสมจนถึงจุดสูงสุด ส่งผลให้เกิดโพรงหรือรูพรุนขนาดเล็กขึ้นภายในโครงสร้างของชิ้นงาน ซึ่งส่งผลกระทบต่อคุณภาพและความแข็งแรงของชิ้นงานหล่อ เพื่อแก้ไขปัญหานี้ ทางผู้วิจัยได้นำโปรแกรม Cast Designer มาใช้ในการวิเคราะห์พฤติกรรมของความร้อนภายในชิ้นงาน เพื่อช่วยระบุได้ว่าบริเวณใดของชิ้นงานมีการสะสมความร้อนสูงที่สุด

การศึกษานี้วิเคราะห์ผลกระทบของความร้อนต่อการเกิดโพรงหดตัวในกระบวนการหล่อโลหะ ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลกระทบต่อคุณภาพของชิ้นงาน พบว่าบริเวณกลางชิ้นงานมักเกิดการสะสมความร้อน ทำให้การแข็งตัวล่าช้าและนำไปสู่การเกิดโพรงหดตัว ผลการทดลองและการจำลองแสดงให้เห็นว่า รูสันทรงกระบอกตันที่วางตำแหน่งใกล้บริเวณที่มีความร้อนสะสมสูงสุดสามารถช่วยนำความร้อนออกจากชิ้นงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยการวางบนตำแหน่งที่เหมาะสมบนชิ้นงานสามารถที่จะลดปริมาณการเกิดโพรงหดภายในชิ้นงานให้หมดไปและได้งานหล่อที่มีคุณภาพที่ดี

ดังนั้น การใช้โปรแกรมจำลองกับการใช้วิธีการออกแบบที่เหมาะสมนั้นสามารถแก้ไขปัญหาการเกิดโพรงหดตัวได้จริงในอุตสาหกรรมงานหล่อโลหะ

(มีจำนวนทั้งสิ้น 345 หน้า)

คำสำคัญ : การหล่อทราย, การหดตัว, โปรแกรมแคสดีไซน์เนอร์, การถ่ายเทความร้อน, รูสัน

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

Name : Mr. Phongsakorn Kwanthong
Thesis Title : Analysis Sand Casting Defects from Heat Transfer
Simulation By Cast Designer
Major Field : Mechanical Engineering Technology
King Mongkut's University of Technology North
Bangkok
Thesis Advisor : Assistant Professor Dr. Patpimol Suwankan
Co-Advisor : Associate Professor Dr. Penyarat Saisirirat
Academic Year : 2024

ABSTRACT

Shrinkage porosity is a common defect in metal casting, caused by uneven heat distribution during solidification. Areas with excessive heat solidify more slowly, leading to internal voids that reduce the strength and overall quality of the casting. This issue typically occurs in thick sections that are far from heat-dissipating surfaces.

This study analyzes the effect of heat on the formation of shrinkage porosity in the metal casting process, which is a key factor affecting the quality of the final product. It was found that heat tends to accumulate in the central area of the casting, leading to delayed solidification and the formation of shrinkage cavities. Experimental and simulation results show that a solid cylindrical overflow placed near the area with the highest heat accumulation can effectively dissipate heat from the workpiece. By positioning it appropriately, the occurrence of shrinkage porosity can be significantly reduced or completely eliminated, resulting in higher-quality castings.

Therefore, the use of simulation software combined with proper design methods can effectively solve the problem of shrinkage cavity formation in the metal casting industry.

(Total 345 Pages)

Keywords: Sand Casting, Shrinkage, Cast-Designer Program, Heat Transfer, Riser

Advisor

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้ได้รับทุนสนับสนุนจากวิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ตามสัญญาเลขที่ CIT-2022-GRAD-32 ผู้จัดทำขอขอบพระคุณ ท่านผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พัตร์พิมล สุวรรณกาญจน์ ที่ปรึกษาหลักของวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร. เพ็ญญารัตน์ สายสิริรัตน์ และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วรณลักษณ์ เหล่าทวีทรัพย์ ที่ได้ให้แนวคิดและคำแนะนำที่ใช้ในการทำงานวิจัยครั้งนี้มาโดยตลอด ขอขอบคุณสาขาวิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมเครื่องกล วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ที่อำนวยความสะดวกในการทำงานวิจัยในครั้งนี้และบริษัท โฟร์ดี คอร์ปอเรชั่น จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์สนับสนุนโปรแกรม Cast Designer เป็นเครื่องมือสำหรับการทำวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้

ท้ายนี้ผู้วิจัยขอขอบคุณบิดามารดา ผู้ปกครองทุกท่านที่คอยให้กำลังใจ ต้องขอภัยที่ไม่ได้กล่าวถึงผู้มีพระคุณอีกหลายท่าน ทางคณะผู้จัดทำหวังเป็นอย่างยิ่งว่าวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะเป็นประโยชน์แก่ผู้ที่สนใจไม่มากนักน้อย และหากมีข้อผิดพลาดประการใดทางคณะผู้จัดทำต้องขอภัยไว้ ณ ที่นี้ด้วย

พงศกร ขวัญทอง

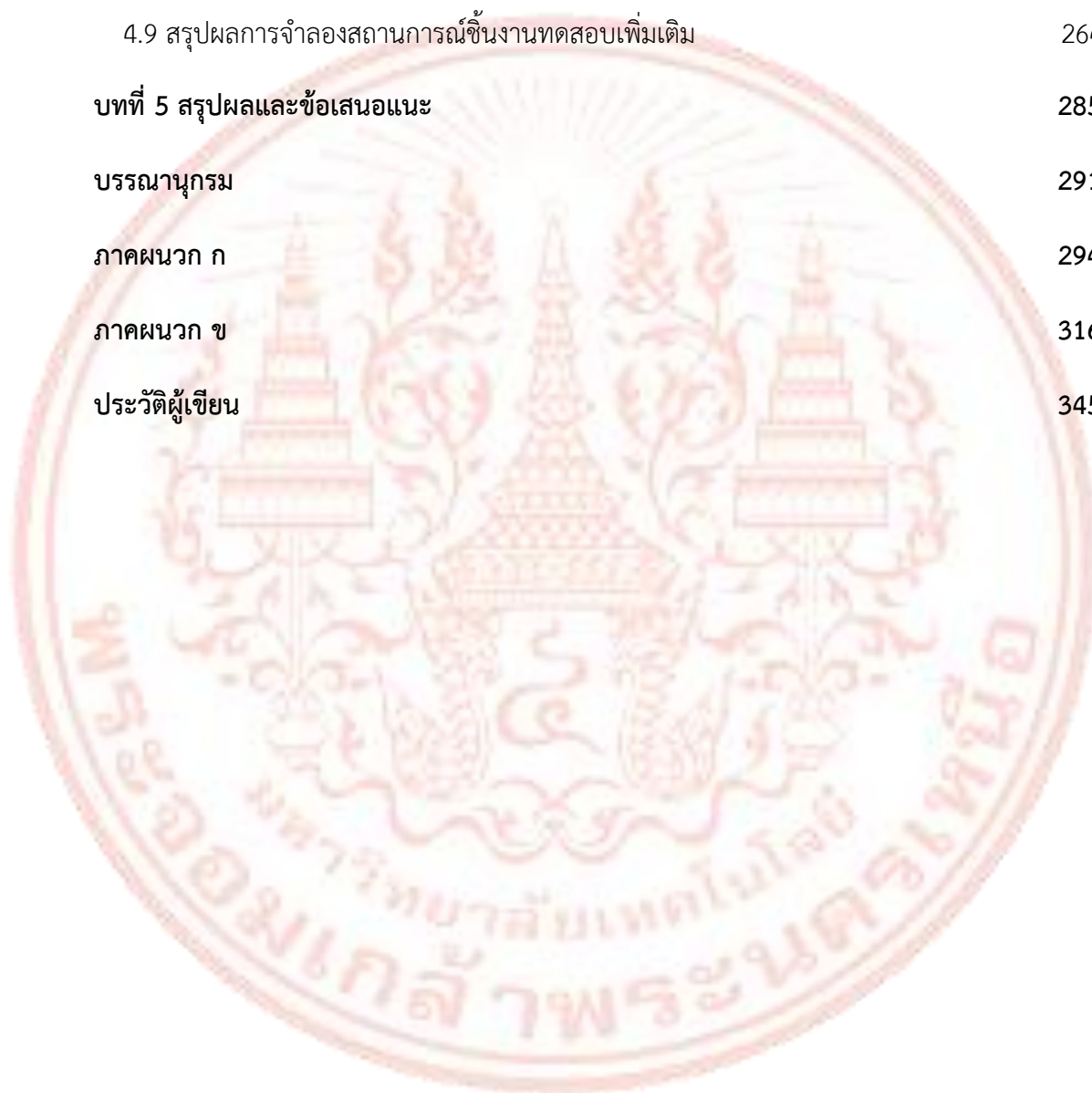
สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ	ฉ
สารบัญ	ช
สารบัญตาราง	ญ
สารบัญภาพ	ท
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์	2
1.3 ขอบเขตการศึกษา	2
1.4 สมมติฐาน	2
1.5 นิยามศัพท์เฉพาะ	2
1.6 วิธีการดำเนินงาน	4
1.7 เครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย	5
1.8 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	5
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	6
2.1 ทฤษฎีการหล่อขึ้นงานเบื้องต้น (ประวัติศาสตร์, 2520)	7
2.2 ทฤษฎีที่หล่อ (ประวัติศาสตร์, 2520)	10

2.3 ทฤษฎีกระสวน (ประศาสตร์, 2520)	13
2.4 ทฤษฎีไส้แบบ (ประศาสตร์, 2520)	15
2.5 ทฤษฎีระบบป้อนจ่ายน้ำโลหะ (ประศาสตร์, 2520)	17
2.6 ทฤษฎีวัสดุงานหล่อ (ประศาสตร์, 2520)	26
2.7 ทฤษฎีข้อบกพร่องงานหล่อ (สุรเชษฐ์, 2551)	29
2.8 ทฤษฎีการแก้ปัญหาการหดตัว (ศุภฤทธิ์, 2544)	30
2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	35
บทที่ 3 การดำเนินการวิจัย	46
3.1 ศึกษางานหล่อทรายขึ้นงานกระสวนขึ้นเดียวหน้าผาราบมีไส้แบบในตัวไม่มีรูล้นและการ ออกแบบแม่พิมพ์สำหรับเทหล่อขึ้นงาน (No Riser)	47
3.2 ปัจจัยที่มีผลต่อการเทหล่อขึ้นงานกระสวนขึ้นเดียวหน้าผาราบแบบเดิม (No Riser)	59
3.3 ออกแบบวิธีการทดลองเพื่อแก้ไขปัญหาข้อบกพร่องของขึ้นงานหล่อ	70
3.4 การใช้โปรแกรมจำลองสถานการณ์การเทหล่อขึ้นงาน	76
3.5 การเทหล่อขึ้นงานจริง	86
3.6 การออกแบบวิธีการแก้ไขปัญหาหลังจากการเทหล่อขึ้นงานจริง	90
3.7 แสดงข้อมูลผลการทดสอบการจำลองขึ้นงาน	96
บทที่ 4 ผลการดำเนินงาน	106
4.1 แสดงผลการจำลองการเติมเต็มของโลหะเหลว (Fill Time)	107
4.2 แสดงผลการจำลองพฤติกรรมการไหลของโลหะเหลว (Fluid Fraction)	110
4.3 แสดงผลการจำลองเวลาในการแข็งตัวของโลหะ (Solidification Time)	122
4.4 แสดงผลการเกิดโพรงหดตัว (Shrinkage Porosity)	128
4.5 แสดงผลการจำลองอุณหภูมิของขึ้นงาน (Temperature)	135

4.6 แสดงกราฟการเฝ้าตัวของชิ้นงาน	151
4.7 แสดงผลการเทหล่อชิ้นงานจริง	163
4.8 แสดงผลการจำลองวิธีการแก้ไขปัญหาหลังจากการเทหล่อชิ้นงานจริง	166
4.9 สรุปผลการจำลองสถานการณ์ชิ้นงานทดสอบเพิ่มเติม	264
บทที่ 5 สรุปผลและข้อเสนอแนะ	285
บรรณานุกรม	291
ภาคผนวก ก	294
ภาคผนวก ข	316
ประวัติผู้เขียน	345



สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2-1 ขนาดแอ่งพักโลหะเหลว	19
2-2 คุณสมบัติของลูนีเยียมเทียบกับเหล็ก	26
2-3 ค่าการหดตัวจำเพาะ (Specific Shrinkage) ของโลหะต่างๆ	34
3-1 ธาตุประกอบของอะลูมิเนียมผสมเกรด A1100 ที่ใช้ในการหล่อขึ้นงาน	47
3-2 เงื่อนไขที่ใช้ในการทดลอง	48
3-3 ข้อมูลของกระสวน	49
3-4 แสดงค่าแรงดันทั้งหมดที่ส่งผลต่อโพรงแบบ	58
3-5 เปรียบเทียบอุณหภูมิ ณ เวลา อุณหภูมิสิ้นสุดการเทน้ำโลหะ อุณหภูมิเริ่มต้นการแข็งตัว และอุณหภูมิสิ้นสุดการแข็งตัว ขึ้นงานหล่อกระสวนขึ้นเดียวหน้าผาราบมีไส้แบบในตัวไม่มีรูล้น (No Riser)	68
3-6 การออกแบบแนวคิดในการวางรูล้น	63
3-7 แสดงขึ้นงานที่มีรูล้นขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 35 มิลลิเมตร สูง 70 มิลลิเมตรกับระยะห่างระหว่างรูถึงรูล้น	96
3-8 แสดงขนาดของรูล้นทรงกระบอกตัน เฉพาะขึ้นงานวางรูล้นตำแหน่งที่ 4	97
3-9 แสดงขึ้นงานที่มีการปรับความสูงหีบหล่อแบบไม่มีรูล้น	97
3-10 เปรียบเทียบการเกิดโพรงหดตัวกับการปรับความสูงหีบแบบปรับรูล้น	97
3-11 เปรียบเทียบการเกิดโพรงหดตัวกับการปรับความสูงหีบแบบไม่ปรับรูล้น	98
4-1 สรุปผลการเกิดโพรงหดตัวของขึ้นงานจำลองทั้ง 7 รูปแบบ	134
4-2 เปรียบเทียบอุณหภูมิ ณ เวลา อุณหภูมิสิ้นสุดการเทน้ำโลหะ อุณหภูมิเริ่มต้นการแข็งตัว และ อุณหภูมิสิ้นสุดการแข็งตัว ขึ้นงานหล่อกระสวนขึ้นเดียวหน้าผาราบมีไส้แบบรูล้นทรงกระบอกกลวงหนา 8 มิลลิเมตร (Tube 8mm. Riser)	151
4-3 เปรียบเทียบอุณหภูมิ ณ เวลา อุณหภูมิสิ้นสุดการเทน้ำโลหะ อุณหภูมิเริ่มต้นการแข็งตัว และ อุณหภูมิสิ้นสุดการแข็งตัว ขึ้นงานหล่อกระสวนขึ้นเดียวหน้าผาราบมีไส้แบบรูล้นทรงกระบอกกลวงหนา 15 มิลลิเมตร (Tube 15mm. Riser)	153

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4-4 เปรียบเทียบอุณหภูมิ ณ เวลา อุณหภูมิสิ้นสุดการเทน้ำโลหะ อุณหภูมิเริ่มต้นการ แข็งตัว และ อุณหภูมิสิ้นสุดการแข็งตัว ชิ้นงานหล่อทรายกระสวนขึ้นเดียวหน้า ผ่าราบมีไส้แบบในตัวรูล้นทรงกระบอกตัน ตำแหน่งการวางรูล้นตำแหน่งที่ 1 (Cylinder_Q1 Riser)	155
4-5 เปรียบเทียบอุณหภูมิ ณ เวลา อุณหภูมิสิ้นสุดการเทน้ำโลหะ อุณหภูมิเริ่มต้นการ แข็งตัว และ อุณหภูมิสิ้นสุดการแข็งตัว ชิ้นงานหล่อทรายกระสวนขึ้นเดียวหน้า ผ่าราบมีไส้แบบในตัวรูล้นทรงกระบอกตัน ตำแหน่งการวางรูล้นตำแหน่งที่ 3 (Cylinder_Q3 Riser)	157
4-6 เปรียบเทียบอุณหภูมิ ณ เวลา อุณหภูมิสิ้นสุดการเทน้ำโลหะ อุณหภูมิเริ่มต้นการ แข็งตัว และ อุณหภูมิสิ้นสุดการแข็งตัว ชิ้นงานหล่อทรายกระสวนขึ้นเดียวหน้า ผ่าราบมีไส้แบบในตัวรูล้นทรงกระบอกตัน ตำแหน่งการวางรูล้นตำแหน่งที่ 3 (Cylinder_Q3 Riser)	159
4-7 เปรียบเทียบอุณหภูมิ ณ เวลา อุณหภูมิสิ้นสุดการเทน้ำโลหะ อุณหภูมิเริ่มต้นการ แข็งตัว และ อุณหภูมิสิ้นสุดการแข็งตัว ชิ้นงานหล่อทรายกระสวนขึ้นเดียวหน้า ผ่าราบมีไส้แบบในตัวรูล้นทรงกระบอกตัน ตำแหน่งการวางรูล้นตำแหน่งที่ 4 (Cylinder_Q4 Riser)	161
4-8 แสดงระยะห่างระหว่างรูเทถึงรูล้นทรงกระบอกตันเส้นผ่านศูนย์กลางรูล้น 35 มิลลิเมตร สูง 70 มิลลิเมตรและการเกิดโพรงหดตัวในชิ้นงาน	264
4-9 แสดงการปรับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูล้นของชิ้นงาน Cylinder_Q4 Riser กับ ผลของการเกิดโพรงหดตัวในชิ้นงาน	266
4-10 แสดงการปรับขนาดความสูงหีบแบบไม่มีรูล้นกับการเกิดโพรงหดตัวของ ชิ้นงาน	267
4-11 แสดงการปรับขนาดความสูงหีบแบบมีรูล้นกับการเกิดโพรงหดตัวของชิ้นงาน	269
4-12 เปรียบเทียบอุณหภูมิ ณ เวลา อุณหภูมิสิ้นสุดการเทน้ำโลหะ อุณหภูมิเริ่มต้นการ แข็งตัว และ อุณหภูมิสิ้นสุดการแข็งตัว ชิ้นงานปรับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูล้น 30 มิลลิเมตร (Cylinder_Q4 Riser D30)	271

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4-13 เปรียบเทียบอุณหภูมิ ณ เวลา อุณหภูมิสิ้นสุดการเทน้ำโลหะ อุณหภูมิเริ่มต้นการ แข็งตัว และ อุณหภูมิสิ้นสุดการแข็งตัว ชิ้นงานปรับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูล้น 40 มิลลิเมตร (Cylinder_Q4 Riser D40)	272
4-14 เปรียบเทียบอุณหภูมิ ณ เวลา อุณหภูมิสิ้นสุดการเทน้ำโลหะ อุณหภูมิเริ่มต้นการ แข็งตัว และ อุณหภูมิสิ้นสุดการแข็งตัว ชิ้นงานปรับตำแหน่งการวางรูล้นจาก ศูนย์กลาง 20 มิลลิเมตร (Cylinder_Q4 Position 20)	273
4-15 เปรียบเทียบอุณหภูมิ ณ เวลา อุณหภูมิสิ้นสุดการเทน้ำโลหะ อุณหภูมิเริ่มต้นการ แข็งตัว และ อุณหภูมิสิ้นสุดการแข็งตัว ชิ้นงานปรับตำแหน่งการวางรูล้นจาก ศูนย์กลาง 30 มิลลิเมตร (Cylinder_Q4 Position 30)	274
4-16 เปรียบเทียบอุณหภูมิ ณ เวลา อุณหภูมิสิ้นสุดการเทน้ำโลหะ อุณหภูมิเริ่มต้นการ แข็งตัว และ อุณหภูมิสิ้นสุดการแข็งตัว ชิ้นงานปรับขนาดทึบหล่อบนสูง 50 ไม่มี รูล้น (Mould H50 No_Riser)	275
4-17 เปรียบเทียบอุณหภูมิ ณ เวลา อุณหภูมิสิ้นสุดการเทน้ำโลหะ อุณหภูมิเริ่มต้นการ แข็งตัว และ อุณหภูมิสิ้นสุดการแข็งตัว ชิ้นงานปรับขนาดทึบหล่อบนสูง 40 ไม่มี รูล้น (Mould H40 No_Riser)	276
4-18 เปรียบเทียบอุณหภูมิ ณ เวลา อุณหภูมิสิ้นสุดการเทน้ำโลหะ อุณหภูมิเริ่มต้นการ แข็งตัว และ อุณหภูมิสิ้นสุดการแข็งตัว ชิ้นงานปรับขนาดทึบหล่อบนสูง 50 ไม่มี รูล้น (Mould H30 No_Riser)	277
4-19 เปรียบเทียบอุณหภูมิ ณ เวลา อุณหภูมิสิ้นสุดการเทน้ำโลหะ อุณหภูมิเริ่มต้นการ แข็งตัว และ อุณหภูมิสิ้นสุดการแข็งตัว ชิ้นงานปรับขนาดทึบหล่อบนสูง 50 รูล้น 50 (MouldH50_RiserH50)	278
4-20 เปรียบเทียบอุณหภูมิ ณ เวลา อุณหภูมิสิ้นสุดการเทน้ำโลหะ อุณหภูมิเริ่มต้นการ แข็งตัว และ อุณหภูมิสิ้นสุดการแข็งตัว ชิ้นงานปรับขนาดทึบหล่อบนสูง 40 รูล้น 40 (MouldH40_RiserH40)	279
4-21 เปรียบเทียบอุณหภูมิ ณ เวลา อุณหภูมิสิ้นสุดการเทน้ำโลหะ อุณหภูมิเริ่มต้นการ แข็งตัว และ อุณหภูมิสิ้นสุดการแข็งตัว ชิ้นงานปรับขนาดทึบหล่อบนสูง 30 รูล้น 30 (MouldH30_RiserH30)	280

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4-22 เปรียบเทียบอุณหภูมิ ณ เวลา อุณหภูมิสิ้นสุดการเทน้ำโลหะ อุณหภูมิเริ่มต้นการ แข็งตัว และ อุณหภูมิสิ้นสุดการแข็งตัว ชิ้นงานปรับขนาดหีบหล่อบนสูง 30 รูลัน 70 (MouldH30_RiserH70)	281
4-23 เปรียบเทียบอุณหภูมิ ณ เวลา อุณหภูมิสิ้นสุดการเทน้ำโลหะ อุณหภูมิเริ่มต้นการ แข็งตัว และ อุณหภูมิสิ้นสุดการแข็งตัว ชิ้นงานปรับขนาดหีบหล่อบนสูง 30 รูลัน 70 (MouldH40_RiserH70)	282
4-24 เปรียบเทียบอุณหภูมิ ณ เวลา อุณหภูมิสิ้นสุดการเทน้ำโลหะ อุณหภูมิเริ่มต้นการ แข็งตัว และ อุณหภูมิสิ้นสุดการแข็งตัว ชิ้นงานปรับขนาดหีบหล่อบนสูง 30 รูลัน 70 (MouldH30_RiserH70)	283

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2-1 กระบวนการงานหล่อ	7
2-2 อุปกรณ์ในการสร้างโพรงแบบ	8
2-3 หีบหล่อที่ทำจากไม้	10
2-4 หีบหล่อที่ทำจากโลหะ	11
2-5 แสดงความดันของโลหะเหลวในโพรงแบบ	12
2-6 กระสวนขึ้นเดียว	15
2-7 กระสวนแยกชิ้น	15
2-8 ระบบรูปเทของโพรงแบบ	18
2-9 ลักษณะของถ้วยเทแบบต่างๆ	18
2-10 ช่องทางไหลระหว่างรูเทกับรูวิ่ง	20
2-11 แสดงลักษณะรูปเข้าน้ำมันของโพรงแบบ	21
2-12 กราฟเวลาแข็งตัวของโลหะเหลวเทียบกับโมดูลัส	22
2-13 แสดงลักษณะรูเข้าน้ำมันของโพรงแบบ	23
2-14 ระบบรูปเทที่แสดงให้เห็นส่วนคอคอด	23
2-15 ผงกราฟไฟต์	28
2-16 ลักษณะการหดตัว	29
2-17 การหาขนาดของรูล้นด้วยวิธี Shape Factor Method	31
2-18 รูปร่างของโพรงหดตัว	31
2-19 รูปร่างและขนาดรูล้นด้านข้าง	32
2-20 การหาค่า Modulus สำหรับชิ้นงานที่มีรูปทรงอย่างง่าย	33
2-21 แสดงปริมาณการหดตัวของรูปทรงรูล้น	35
3-1 ชิ้นงานกระสวนขึ้นเดียวหน้าผาราบมีใส่แบบในตัวไม่มีรูล้น (ก) ขนาดกำหนดของ ชิ้นงาน (ข)	47
3-2 แสดงตัวแปรต่าง ๆ ของโพรงแบบ	49
3-3 แสดงตำแหน่งพื้นที่หน้าตัดกับความเร็ว	50
3-4 รูเทมีพื้นที่หน้าตัดเป็นทรงกลม	52
3-5 รูวิ่งและทางเข้ามีลักษณะเป็นครึ่งวงกลม	54

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
3-6 แสดงขนาดของหีบหล่อทั้งหมดที่ได้จากการคำนวณ	58
3-7 ขึ้นงานหล่อจริงกระสวนขึ้นเดียวหน้าผ่าราบมีไส้แบบในตัวแบบไม่มีรูล้น	59
3-8 การผ่าขึ้นงานหล่อจริงกระสวนขึ้นเดียวหน้าผ่าราบมีไส้แบบในตัวแบบไม่มีรูล้น	59
3-9 แสดงการจำลองเวลาในการเติมเต็มโลหะเหลวขึ้นงานหล่อกระสวนขึ้นเดียวหน้าผ่าราบมีไส้แบบในตัวไม่มีรูล้น Fill Time = 4.16 วินาที	60
3-10 แสดงลักษณะการไหลของโลหะเหลวของขึ้นงาน	61
3-11 (ต่อ) แสดงลักษณะการไหลของโลหะเหลวของขึ้นงาน	62
3-12 แสดงการจำลองเวลาในการแข็งตัวของขึ้นงานหล่อกระสวนขึ้นเดียวหน้าผ่าราบมีไส้แบบในตัวไม่มีรูล้น	63
3-13 แสดงการจำลองการเกิดโพรงหดตัวภายในขึ้นงานหล่อกระสวนขึ้นเดียวหน้าผ่าราบมีไส้แบบในตัวไม่มีรูล้น	64
3-14 แสดงผลของการสะสมของอุณหภูมิ ณ ช่วงเวลาต่าง ๆ	66
3-15 แสดงตำแหน่งจุด P1 ถึง P8	67
3-16 กราฟแสดงอุณหภูมิ ณ P1 ถึง P8 ของขึ้นงาน No Riser	68
3-17 แสดงตำแหน่งของโพรงหดตัวที่เกิดขึ้นภายในขึ้นงาน	71
3-18 แสดงการออกแบบรูล้นทรงกระบอกกลางหนา 8 มิลลิเมตร (ก) และ 15 มิลลิเมตร (ข)	71
3-19 แสดงจุดสะสมอุณหภูมิของขึ้นงาน ที่อุณหภูมิตั้งแต่ 643.24 ถึง 657.72 องศาเซลเซียส	72
3-20 แสดงภาพตัวอย่างการทดลองวางรูล้น (ก) ตำแหน่งที่ 1 (ข) ตำแหน่งที่ 2 (ค) ตำแหน่งที่ 3 (ง) ตำแหน่งที่ 4	74
3-21 แสดงภาพตัวอย่างขึ้นงานสามมิติการทดลองวางรูล้น (ก) ตำแหน่งที่ 1 (ข) ตำแหน่งที่ 2 (ค) ตำแหน่งที่ 3 (ง) ตำแหน่งที่ 4	75
3-22 ขั้นตอนการจำลองพฤติกรรมโดยใช้โปรแกรม Cast Designer	76
3-23 ขั้นตอนการสร้าง Mesh ด้วย Cast Designer	77
3-24 ขั้นตอนการตรวจสอบ Mesh ด้วย 3D Mesh Jacobian	77

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
3-25 แสดงการกำหนดค่า หมายเลข 1) ประเภทและอุณหภูมิของวัสดุ 2) อุณหภูมิของแม่พิมพ์ 3) ทิศทางแรงโน้มถ่วง 4) ทิศทางและความเร็วในการเท 5) อุณหภูมิเท	78
3-26 แบบจำลองพฤติกรรมเวลาในการเติมเต็มโลหะเหลว	79
3-27 แสดงพฤติกรรมการไหลของโลหะเหลวจาก 0 % ถึง 100 %	80
3-28 แสดงพฤติกรรมการแข่งขันตัวของขึ้นงาน	81
3-29 แสดงพฤติกรรมการเกิดโพรงหดตัวของขึ้นงาน	81
3-30 ตัวอย่างการแสดงผลอุณหภูมิของขึ้นงาน ณ ช่วงเวลาต่าง ๆ	82
3-31 แสดงตำแหน่งจุด P1 ถึง P12 ของขึ้นงาน Tube 8mm. Riser	83
3-32 แสดงตำแหน่งจุด P1 ถึง P12 ของขึ้นงาน Tube 15mm. Riser	82
3-33 แสดงตำแหน่งจุด P1 ถึง P11 ของขึ้นงาน Cylinder_Q1 Riser	84
3-34 แสดงตำแหน่งจุด P1 ถึง P11 ของขึ้นงาน Cylinder_Q2 Riser	84
3-35 แสดงตำแหน่งจุด P1 ถึง P11 ของขึ้นงาน Cylinder_Q3 Riser	85
3-36 แสดงตำแหน่งจุด P1 ถึง P11 ของขึ้นงาน Cylinder_Q4 Riser	85
3-37 ทรายที่ใช้ในการทดลอง	86
3-38 แสดงลักษณะของเตาหลอมโลหะ	87
3-39 แสดงลักษณะแม่พิมพ์ที่ใช้ในกระบวนการผลิต	87
3-40 แสดงลักษณะของรูเทและทางเข้า	88
3-41 แสดงลักษณะของรูล้น	88
3-42 แสดงลักษณะการประกอบรูเท ทางเข้า รูล้น และกระสวน	89
3-43 แสดงตัวอย่างขึ้นงานทดสอบปรับลดขนาดรูล้นเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 30 มิลลิเมตรและ 40 มิลลิเมตร	91
3-44 แสดงตัวอย่างขึ้นงานทดสอบปรับตำแหน่งรูล้นห่างจากจุดศูนย์กลาง 20 และ 30 มิลลิเมตร	92
3-45 แสดงขึ้นงานจำลองสถานการณ์การลดขนาดทึบบนที่ใช้ในการเทหล่อแบบไม่มีรูล้น ขนาดความสูงทึบหล่อบน 50, 40 และ 30 มิลลิเมตร	93

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
3-46 แสดงชิ้นงานจำลองสถานการณ์การลดขนาดทึบบนที่ใช้ในการเทหล่อแบบปรับ ความสูงรูล้น ขนาดความสูงทึบหล่อบน 50, 40 และ 30 มิลลิเมตร	94
3-47 แสดงชิ้นงานจำลองสถานการณ์การลดขนาดทึบบนที่ใช้ในการเทหล่อแบบไม่ปรับ ความสูงรูล้น ขนาดความสูงทึบหล่อบน 50, 40 และ 30 มิลลิเมตร	95
3-48 แสดงตำแหน่งจุด P1 ถึง P8 ของชิ้นงาน Cylinder_Q4 Riser D30	99
3-49 แสดงตำแหน่งจุด P1 ถึง P8 ของชิ้นงาน Cylinder_Q4 Riser D40	99
3-45 แสดงตำแหน่งจุด P1 ถึง P8 ของชิ้นงาน Cylinder_Q4 Position 20	100
3-51 แสดงตำแหน่งจุด P1 ถึง P8 ของชิ้นงาน Cylinder_Q4 Position 30	100
3-52 แสดงตำแหน่งจุด P1 ถึง P8 ของชิ้นงาน Mould H50 No_Riser	101
3-53 แสดงตำแหน่งจุด P1 ถึง P8 ของชิ้นงาน Mould H40 No_Riser	101
3-54 แสดงตำแหน่งจุด P1 ถึง P8 ของชิ้นงาน Mould H30 No_Riser	102
3-55 แสดงตำแหน่งจุด P1 ถึง P8 ของชิ้นงาน MouldH50_RiserH50	102
3-56 แสดงตำแหน่งจุด P1 ถึง P8 ของชิ้นงาน MouldH40_RiserH40	103
3-57 แสดงตำแหน่งจุด P1 ถึง P8 ของชิ้นงาน MouldH30_RiserH30	103
3-58 แสดงตำแหน่งจุด P1 ถึง P8 ของชิ้นงาน MouldH50_RiserH70	104
3-59 แสดงตำแหน่งจุด P1 ถึง P8 ของชิ้นงาน MouldH40_RiserH70	104
3-60 แสดงตำแหน่งจุด P1 ถึง P8 ของชิ้นงาน MouldH30_RiserH70	105
4-1 แสดงการจำลองเวลาในการเติมเต็มโลหะเหลวชิ้นงาน Tube 8mm. Riser	107
4-2 แสดงการจำลองเวลาในการเติมเต็มโลหะเหลวชิ้นงาน Tube 15mm. Riser	107
4-3 แสดงการจำลองเวลาในการเติมเต็มโลหะเหลวชิ้นงาน Cylinder_Q1 Riser	108
4-4 แสดงการจำลองเวลาในการเติมเต็มโลหะเหลวชิ้นงาน Cylinder_Q2 Riser	108
4-5 แสดงการจำลองเวลาในการเติมเต็มโลหะเหลวชิ้นงาน Cylinder_Q3 Riser	109
4-6 แสดงการจำลองเวลาในการเติมเต็มโลหะเหลวชิ้นงาน Cylinder_Q4 Riser	109
4-7 แสดงลักษณะการไหลของโลหะเหลวของชิ้นงาน Tube 8mm. Riser	110
4-8 (ต่อ) แสดงลักษณะการไหลของโลหะเหลวของชิ้นงาน (Tube 8mm. Riser)	111
4-9 แสดงลักษณะการไหลของโลหะเหลวของชิ้นงาน Tube 15mm. Riser	112
4-10 (ต่อ) แสดงลักษณะการไหลของโลหะเหลวของชิ้นงาน Tube 15mm. Riser	113

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4-11 แสดงลักษณะการไหลของโลหะเหลวของขึ้นงาน Cylinder_Q1 Riser	114
4-12 (ต่อ) แสดงลักษณะการไหลของโลหะเหลวของขึ้นงาน Cylinder_Q1 Riser	115
4-13 แสดงลักษณะการไหลของโลหะเหลวของขึ้นงาน Cylinder_Q2 Riser	116
4-14 (ต่อ) แสดงลักษณะการไหลของโลหะเหลวของขึ้นงาน Cylinder_Q2 Riser	117
4-15 แสดงลักษณะการไหลของโลหะเหลวของขึ้นงาน Cylinder_Q3 Riser	118
4-16 (ต่อ) แสดงลักษณะการไหลของโลหะเหลวของขึ้นงาน Cylinder_Q3 Riser	119
4-17 แสดงลักษณะการไหลของโลหะเหลวของขึ้นงาน Cylinder_Q4 Riser	120
4-18 (ต่อ) แสดงลักษณะการไหลของโลหะเหลวของขึ้นงาน Cylinder_Q4 Riser	121
4-19 แสดงการจำลองเวลาในการแข็งตัวขึ้นงาน Tube 8mm. Riser	122
4-20 แสดงการจำลองเวลาในการแข็งตัวขึ้นงาน Tube 15mm. Riser	123
4-21 แสดงการจำลองเวลาในการแข็งตัวขึ้นงาน Cylinder_Q1 Riser	124
4-22 แสดงการจำลองเวลาในการแข็งตัวขึ้นงาน Cylinder_Q2 Riser	125
4-23 แสดงการจำลองเวลาในการแข็งตัวขึ้นงาน Cylinder_Q3 Riser	126
4-24 แสดงการจำลองเวลาในการแข็งตัวขึ้นงาน Cylinder_Q4 Riser	127
4-25 แสดงการจำลองการเกิดโพรงหดตัวภายในขึ้นงาน Tube 8mm. Riser	128
4-26 แสดงการจำลองการเกิดโพรงหดตัวภายในขึ้นงาน Tube 15mm. Riser	129
4-27 แสดงการจำลองการเกิดโพรงหดตัวภายในขึ้นงาน Cylinder_Q1 Riser	130
4-28 แสดงการจำลองการเกิดโพรงหดตัวภายในขึ้นงาน Cylinder_Q2 Riser	131
4-29 แสดงการจำลองการเกิดโพรงหดตัวภายในขึ้นงาน Cylinder_Q3 Riser	132
4-30 แสดงการจำลองการเกิดโพรงหดตัวภายในขึ้นงาน Cylinder_Q4 Riser	133
4-31 แสดงการจำลองอุณหภูมิ ณ ช่วงเวลา Fill Time, Start Solidification Time และ End Solidification Time ของขึ้นงาน Tube 8mm. Riser	135
4-32 (ต่อ) แสดงการจำลองอุณหภูมิ ณ ช่วงเวลา Fill Time, Start Solidification Time และ End Solidification Time ของขึ้นงาน Tube 8mm. Riser	136
4-33 แสดงการจำลองอุณหภูมิ ณ ช่วงเวลา Fill Time, Start Solidification Time และ End Solidification Time ของขึ้นงาน Tube 15mm. Riser	137
4-34 (ต่อ) แสดงการจำลองอุณหภูมิ ณ ช่วงเวลา Fill Time, Start Solidification Time และ End Solidification Time ของขึ้นงาน Tube 15mm. Riser	138

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4-35 แสดงการจำลองอุณหภูมิ ณ ช่วงเวลา Fill Time ของชิ้นงาน Cylinder_Q1 Riser	139
4-36 แสดงการจำลองอุณหภูมิ ณ ช่วงเวลา Start Solidification Time ของชิ้นงาน Cylinder_Q1 Riser	140
4-37 แสดงการจำลองอุณหภูมิ ณ ช่วงเวลา End Solidification Time ของชิ้นงาน Cylinder_Q1 Riser	141
4-38 แสดงการจำลองอุณหภูมิ ณ ช่วงเวลา Fill Time ของชิ้นงาน Cylinder_Q2 Riser	142
4-39 แสดงการจำลองอุณหภูมิ ณ ช่วงเวลา Start Solidification Time ของชิ้นงาน Cylinder_Q2 Riser	143
4-40 แสดงการจำลองอุณหภูมิ ณ ช่วงเวลา End Solidification Time ของชิ้นงาน Cylinder_Q2 Riser	144
4-41 แสดงการจำลองอุณหภูมิ ณ ช่วงเวลา Fill Time ของชิ้นงาน Cylinder_Q3 Riser	145
4-42 แสดงการจำลองอุณหภูมิ ณ ช่วงเวลา Start Solidification Time ของชิ้นงาน Cylinder_Q3 Riser	146
4-43 แสดงการจำลองอุณหภูมิ ณ ช่วงเวลา End Solidification Time ของชิ้นงาน Cylinder_Q3 Riser	147
4-44 แสดงการจำลองอุณหภูมิ ณ ช่วงเวลา Fill Time ของชิ้นงาน Cylinder_Q4 Riser	148
4-45 แสดงการจำลองอุณหภูมิ ณ ช่วงเวลา Start Solidification Time ของชิ้นงาน Cylinder_Q4 Riser	149
4-46 แสดงการจำลองอุณหภูมิ ณ ช่วงเวลา End Solidification Time ของชิ้นงาน Cylinder_Q4 Riser	150
4-47 กราฟแสดงอุณหภูมิ ณ P1 ถึง P12 ของชิ้นงาน Tube 8mm. Riser	152
4-48 กราฟแสดงอุณหภูมิ ณ P1 ถึง P12 ของชิ้นงาน Tube 15mm. Riser	154
4-49 กราฟแสดงอุณหภูมิ ณ P1 ถึง P11 ของชิ้นงาน Cylinder_Q1 Riser	156

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4-50 กราฟแสดงอุณหภูมิ ณ P1 ถึง P11 ของชิ้นงาน Cylinder_Q2 Riser	158
4-51 กราฟแสดงอุณหภูมิ ณ P1 ถึง P11 ของชิ้นงาน Cylinder_Q3 Riser	160
4-52 กราฟแสดงอุณหภูมิ ณ P1 ถึง P11 ของชิ้นงาน Cylinder_Q4 Riser	162
4-53 แสดงงานเทหล่อจริงของชิ้นงาน Cylinder_Q4 Riser	163
4-54 แสดงงานเทหล่อจริงของชิ้นงาน Cylinder_Q4 Riser (Top View)	164
4-55 แสดงงานเทหล่อจริงของชิ้นงาน Cylinder_Q4 Riser (Front View)	164
4-56 แสดงงานเทหล่อจริงของชิ้นงาน Cylinder_Q4 Riser ที่ผ่าเพื่อตรวจสอบเนื้อ ด้านใน	165
4-57 แสดงการจำลองเวลาในการเติมเต็มโลหะเหลวชิ้นงานทดสอบปรับขนาดรูล้นเส้น ผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 30 มิลลิเมตร	166
4-58 แสดงการจำลองเวลาในการเติมเต็มโลหะเหลวชิ้นงานทดสอบปรับขนาดรูล้นเส้น ผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 40 มิลลิเมตร	166
4-59 แสดงการจำลองเวลาในการเติมเต็มโลหะเหลวชิ้นงานทดสอบปรับตำแหน่งรูล้น ห่างจากจุดศูนย์กลาง 20 มิลลิเมตร	167
4-60 แสดงการจำลองเวลาในการเติมเต็มโลหะเหลวชิ้นงานทดสอบปรับตำแหน่งรูล้น ห่างจากจุดศูนย์กลาง 30 มิลลิเมตร	167
4-61 แสดงการจำลองเวลาในการเติมเต็มโลหะเหลวชิ้นงานทดสอบการลดขนาดหีบบน ที่ใช้ในการเทหล่อแบบไม่มีรูล้นสูง 50 มิลลิเมตร	168
4-62 แสดงการจำลองเวลาในการเติมเต็มโลหะเหลวชิ้นงานทดสอบการลดขนาดหีบบน ที่ใช้ในการเทหล่อแบบไม่มีรูล้นสูง 40 มิลลิเมตร	168
4-63 แสดงการจำลองเวลาในการเติมเต็มโลหะเหลวชิ้นงานทดสอบการลดขนาดหีบบน ที่ใช้ในการเทหล่อแบบไม่มีรูล้นสูง 30 มิลลิเมตร	169
4-64 แสดงการจำลองเวลาในการเติมเต็มโลหะเหลวชิ้นงานทดสอบการลดขนาดหีบบน ที่ใช้ในการเทหล่อแบบปรับรูล้นสูง 50 มิลลิเมตร	169
4-65 แสดงการจำลองเวลาในการเติมเต็มโลหะเหลวชิ้นงานทดสอบการลดขนาดหีบบน ที่ใช้ในการเทหล่อแบบปรับรูล้นสูง 40 มิลลิเมตร	170

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4-66 แสดงการจำลองเวลาในการเติมเต็มโลหะเหลวชิ้นงานทดสอบการลดขนาดหีบบนที่ใช้ในการเทหล่อแบบปรับรู้นสูง 30 มิลลิเมตร	170
4-67 แสดงการจำลองเวลาในการเติมเต็มโลหะเหลวชิ้นงานทดสอบการลดขนาดหีบบนที่ใช้ในการเทหล่อแบบไม่ปรับรู้นสูง 50 มิลลิเมตร	171
4-68 แสดงการจำลองเวลาในการเติมเต็มโลหะเหลวชิ้นงานทดสอบการลดขนาดหีบบนที่ใช้ในการเทหล่อแบบไม่ปรับรู้นสูง 40 มิลลิเมตร	171
4-69 แสดงการจำลองเวลาในการเติมเต็มโลหะเหลวชิ้นงานทดสอบการลดขนาดหีบบนที่ใช้ในการเทหล่อแบบไม่ปรับรู้นสูง 30 มิลลิเมตร	172
4-70 แสดงลักษณะการไหลของโลหะเหลวของชิ้นงานทดสอบปรับขนาดรู้นเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 30 มิลลิเมตร	173
4-71 (ต่อ) แสดงลักษณะการไหลของโลหะเหลวของชิ้นงานทดสอบปรับขนาดรู้นเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 30 มิลลิเมตร	174
4-72 แสดงลักษณะการไหลของโลหะเหลวของชิ้นงานทดสอบปรับขนาดรู้นเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 40 มิลลิเมตร	175
4-73 (ต่อ) แสดงลักษณะการไหลของโลหะเหลวของชิ้นงานทดสอบปรับขนาดรู้นเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 40 มิลลิเมตร	176
4-74 แสดงลักษณะการไหลของโลหะเหลวของชิ้นงานทดสอบปรับตำแหน่งรู้นห่างจากจุดศูนย์กลาง 20 มิลลิเมตร	177
4-75 (ต่อ) แสดงลักษณะการไหลของโลหะเหลวของชิ้นงานทดสอบปรับตำแหน่งรู้นห่างจากจุดศูนย์กลาง 20 มิลลิเมตร	178
4-76 แสดงลักษณะการไหลของโลหะเหลวของชิ้นงานทดสอบปรับตำแหน่งรู้นห่างจากจุดศูนย์กลาง 30 มิลลิเมตร	179
4-77 (ต่อ) แสดงลักษณะการไหลของโลหะเหลวของชิ้นงานทดสอบปรับตำแหน่งรู้นห่างจากจุดศูนย์กลาง 30 มิลลิเมตร	180
4-78 แสดงลักษณะการไหลของโลหะเหลวของชิ้นงานทดสอบการลดขนาดหีบบนที่ใช้ในการเทหล่อแบบไม่มีรู้นสูง 50 มิลลิเมตร	181

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4-92 แสดงลักษณะการไหลของโลหะเหลวของชิ้นงานทดสอบการลดขนาดหีบแบนที่ใช้ในการเทหล่อแบบไม่ปรับรู้นสูง 40 มิลลิเมตร	195
4-93 (ต่อ) แสดงลักษณะการไหลของโลหะเหลวของชิ้นงานทดสอบการลดขนาดหีบแบนที่ใช้ในการเทหล่อแบบไม่ปรับรู้นสูง 40 มิลลิเมตร	196
4-94 แสดงลักษณะการไหลของโลหะเหลวของชิ้นงานทดสอบการลดขนาดหีบแบนที่ใช้ในการเทหล่อแบบไม่ปรับรู้นสูง 30 มิลลิเมตร	197
4-95 (ต่อ) แสดงลักษณะการไหลของโลหะเหลวของชิ้นงานทดสอบการลดขนาดหีบแบนที่ใช้ในการเทหล่อแบบไม่ปรับรู้นสูง 30 มิลลิเมตร	198
4-96 แสดงการจำลองเวลาในการแข็งตัวของชิ้นงานทดสอบปรับขนาดรู้นเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 30 มิลลิเมตร	199
4-97 แสดงการจำลองเวลาในการแข็งตัวของชิ้นงานทดสอบปรับขนาดรู้นเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 40 มิลลิเมตร	200
4-98 แสดงการจำลองเวลาในการแข็งตัวของชิ้นงานทดสอบปรับตำแหน่งรู้นห่างจากจุดศูนย์กลาง 20 มิลลิเมตร	201
4-99 แสดงการจำลองเวลาในการแข็งตัวของชิ้นงานทดสอบปรับตำแหน่งรู้นห่างจากจุดศูนย์กลาง 30 มิลลิเมตร	202
4-100 แสดงการจำลองเวลาในการแข็งตัวของชิ้นงานทดสอบการลดขนาดหีบแบนที่ใช้ในการเทหล่อแบบไม่มีรู้นสูง 50 มิลลิเมตร	203
4-101 แสดงการจำลองเวลาในการแข็งตัวของชิ้นงานทดสอบการลดขนาดหีบแบนที่ใช้ในการเทหล่อแบบไม่มีรู้นสูง 40 มิลลิเมตร	204
4-102 แสดงการจำลองเวลาในการแข็งตัวของชิ้นงานทดสอบการลดขนาดหีบแบนที่ใช้ในการเทหล่อแบบไม่มีรู้นสูง 30 มิลลิเมตร	205
4-103 แสดงการจำลองเวลาในการแข็งตัวของชิ้นงานทดสอบการลดขนาดหีบแบนที่ใช้ในการเทหล่อแบบปรับรู้นสูง 50 มิลลิเมตร	206
4-104 แสดงการจำลองเวลาในการแข็งตัวของชิ้นงานทดสอบการลดขนาดหีบแบนที่ใช้ในการเทหล่อแบบปรับรู้นสูง 40 มิลลิเมตร	207

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4-105 แสดงการจำลองเวลาในการแข็งตัวของชิ้นงานทดสอบการลดขนาดหีบแบนที่ใช้ในการเทหล่อแบบปรับรูล้นสูง 30 มิลลิเมตร	208
4-106 แสดงการจำลองเวลาในการแข็งตัวของชิ้นงานทดสอบการลดขนาดหีบแบนที่ใช้ในการเทหล่อแบบไม่ปรับรูล้นสูง 50 มิลลิเมตร	209
4-107 แสดงการจำลองเวลาในการแข็งตัวของชิ้นงานทดสอบการลดขนาดหีบแบนที่ใช้ในการเทหล่อแบบไม่ปรับรูล้นสูง 40 มิลลิเมตร	210
4-108 แสดงการจำลองเวลาในการแข็งตัวของชิ้นงานทดสอบการลดขนาดหีบแบนที่ใช้ในการเทหล่อแบบไม่ปรับรูล้นสูง 30 มิลลิเมตร	211
4-109 แสดงการจำลองการเกิดโพรงหดตัวภายในชิ้นงานทดสอบปรับขนาดรูล้นเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 30 มิลลิเมตร	212
4-110 แสดงการจำลองการเกิดโพรงหดตัวภายในชิ้นงานทดสอบปรับขนาดรูล้นเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 40 มิลลิเมตร	213
4-111 แสดงการจำลองการเกิดโพรงหดตัวภายในชิ้นงานทดสอบปรับตำแหน่งรูล้นห่างจากจุดศูนย์กลาง 20 มิลลิเมตร	214
4-112 แสดงการจำลองการเกิดโพรงหดตัวภายในชิ้นงานทดสอบปรับตำแหน่งรูล้นห่างจากจุดศูนย์กลาง 30 มิลลิเมตร	215
4-113 แสดงการจำลองการเกิดโพรงหดตัวภายในชิ้นงานทดสอบการลดขนาดหีบแบนที่ใช้ในการเทหล่อแบบไม่มีรูล้นสูง 50 มิลลิเมตร	216
4-114 แสดงการจำลองการเกิดโพรงหดตัวภายในชิ้นงานทดสอบการลดขนาดหีบแบนที่ใช้ในการเทหล่อแบบไม่มีรูล้นสูง 40 มิลลิเมตร	217
4-115 แสดงการจำลองการเกิดโพรงหดตัวภายในชิ้นงานทดสอบการลดขนาดหีบแบนที่ใช้ในการเทหล่อแบบไม่มีรูล้นสูง 30 มิลลิเมตร	218
4-116 แสดงการจำลองการเกิดโพรงหดตัวภายในชิ้นงานทดสอบการลดขนาดหีบแบนที่ใช้ในการเทหล่อแบบปรับรูล้นสูง 50 มิลลิเมตร	219
4-117 แสดงการจำลองการเกิดโพรงหดตัวภายในชิ้นงานทดสอบการลดขนาดหีบแบนที่ใช้ในการเทหล่อแบบปรับรูล้นสูง 40 มิลลิเมตร	220

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4-118 แสดงการจำลองการเกิดโพรงหดตัวภายในชิ้นงานทดสอบการลดขนาดหีบแบนที่ใช้ในการเทหล่อแบบปรับรู้นสูง 30 มิลลิเมตร	221
4-119 แสดงการจำลองการเกิดโพรงหดตัวภายในชิ้นงานทดสอบการลดขนาดหีบแบนที่ใช้ในการเทหล่อแบบไม่ปรับรู้นสูง 50 มิลลิเมตร	222
4-120 แสดงการจำลองการเกิดโพรงหดตัวภายในชิ้นงานทดสอบการลดขนาดหีบแบนที่ใช้ในการเทหล่อแบบไม่ปรับรู้นสูง 40 มิลลิเมตร	223
4-121 แสดงการจำลองการเกิดโพรงหดตัวภายในชิ้นงานทดสอบการลดขนาดหีบแบนที่ใช้ในการเทหล่อแบบไม่ปรับรู้นสูง 30 มิลลิเมตร	224
4-122 แสดงการจำลองอุณหภูมิ ณ ช่วงเวลา Fill Time ของชิ้นงานทดสอบปรับขนาดรู้นเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 30 มิลลิเมตร	225
4-123 แสดงการจำลองอุณหภูมิ ณ ช่วงเวลา Start Solidification Time ของชิ้นงานทดสอบปรับขนาดรู้นเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 30 มิลลิเมตร	226
4-124 แสดงการจำลองอุณหภูมิ ณ ช่วงเวลา End Solidification Time ของชิ้นงานทดสอบปรับขนาดรู้นเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 30 มิลลิเมตร	227
4-125 แสดงการจำลองอุณหภูมิ ณ ช่วงเวลา Fill Time ของชิ้นงานทดสอบปรับขนาดรู้นเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 40 มิลลิเมตร	228
4-126 แสดงการจำลองอุณหภูมิ ณ ช่วงเวลา Start Solidification Time ของชิ้นงานทดสอบปรับขนาดรู้นเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 40 มิลลิเมตร	229
4-127 แสดงการจำลองอุณหภูมิ ณ ช่วงเวลา End Solidification Time ของชิ้นงานทดสอบปรับขนาดรู้นเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 40 มิลลิเมตร	230
4-128 แสดงการจำลองอุณหภูมิ ณ ช่วงเวลา Fill Time ของชิ้นงานทดสอบปรับตำแหน่งรู้นห่างจากจุดศูนย์กลาง 20 มิลลิเมตร	231
4-129 แสดงการจำลองอุณหภูมิ ณ ช่วงเวลา Start Solidification Time ของชิ้นงานทดสอบปรับตำแหน่งรู้นห่างจากจุดศูนย์กลาง 20 มิลลิเมตร	232
4-130 แสดงการจำลองอุณหภูมิ ณ ช่วงเวลา End Solidification Time ของชิ้นงานทดสอบปรับตำแหน่งรู้นห่างจากจุดศูนย์กลาง 20 มิลลิเมตร	233

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4-131 แสดงการจำลองอุณหภูมิ ณ ช่วงเวลา Fill Time ของชิ้นงานทดสอบปรับตำแหน่งรูล้นห่างจากจุดศูนย์กลาง 30 มิลลิเมตร	234
4-132 แสดงการจำลองอุณหภูมิ ณ ช่วงเวลา Start Solidification Time ของชิ้นงานทดสอบปรับตำแหน่งรูล้นห่างจากจุดศูนย์กลาง 30 มิลลิเมตร	235
4-133 แสดงการจำลองอุณหภูมิ ณ ช่วงเวลา End Solidification Time ของชิ้นงานทดสอบปรับตำแหน่งรูล้นห่างจากจุดศูนย์กลาง 30 มิลลิเมตร	236
4-134 แสดงการจำลองอุณหภูมิ ณ ช่วงเวลา Fill Time ของชิ้นงานทดสอบการลดขนาดหีบبنที่ใช้ในการเทหล่อแบบไม่มีรูล้นสูง 50 มิลลิเมตร	237
4-135 แสดงการจำลองอุณหภูมิ ณ ช่วงเวลา Start Solidification Time ของชิ้นงานทดสอบการลดขนาดหีบبنที่ใช้ในการเทหล่อแบบไม่มีรูล้นสูง 50 มิลลิเมตร	238
4-136 แสดงการจำลองอุณหภูมิ ณ ช่วงเวลา End Solidification Time ของชิ้นงานทดสอบการลดขนาดหีบبنที่ใช้ในการเทหล่อแบบไม่มีรูล้นสูง 50 มิลลิเมตร	239
4-137 แสดงการจำลองอุณหภูมิ ณ ช่วงเวลา Fill Time ของชิ้นงานทดสอบการลดขนาดหีบبنที่ใช้ในการเทหล่อแบบไม่มีรูล้นสูง 40 มิลลิเมตร	240
4-138 แสดงการจำลองอุณหภูมิ ณ ช่วงเวลา Start Solidification Time ของชิ้นงานทดสอบการลดขนาดหีบبنที่ใช้ในการเทหล่อแบบไม่มีรูล้นสูง 40 มิลลิเมตร	241
4-139 แสดงการจำลองอุณหภูมิ ณ ช่วงเวลา End Solidification Time ของชิ้นงานทดสอบการลดขนาดหีบبنที่ใช้ในการเทหล่อแบบไม่มีรูล้นสูง 40 มิลลิเมตร	242
4-140 แสดงการจำลองอุณหภูมิ ณ ช่วงเวลา Fill Time ของชิ้นงานทดสอบการลดขนาดหีบبنที่ใช้ในการเทหล่อแบบไม่มีรูล้นสูง 30 มิลลิเมตร	243
4-141 แสดงการจำลองอุณหภูมิ ณ ช่วงเวลา Start Solidification Time ของชิ้นงานทดสอบการลดขนาดหีบبنที่ใช้ในการเทหล่อแบบไม่มีรูล้นสูง 30 มิลลิเมตร	244
4-142 แสดงการจำลองอุณหภูมิ ณ ช่วงเวลา End Solidification Time ของชิ้นงานทดสอบการลดขนาดหีบبنที่ใช้ในการเทหล่อแบบไม่มีรูล้นสูง 30 มิลลิเมตร	245
4-143 แสดงการจำลองอุณหภูมิ ณ ช่วงเวลา Fill Time ของชิ้นงานทดสอบการลดขนาดหีบبنที่ใช้ในการเทหล่อแบบปรับรูล้นสูง 50 มิลลิเมตร	246

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4-157 แสดงการจำลองอุณหภูมิ ณ ช่วงเวลา End Solidification Time ของชิ้นงานทดสอบการลดขนาดหีบแบบที่ใช้ในการเทหล่อแบบไม่ปรับรูล้นสูง 40 มิลลิเมตร	260
4-158 แสดงการจำลองอุณหภูมิ ณ ช่วงเวลา Fill Time ของชิ้นงานทดสอบการลดขนาดหีบแบบที่ใช้ในการเทหล่อแบบไม่ปรับรูล้นสูง 30 มิลลิเมตร	261
4-159 แสดงการจำลองอุณหภูมิ ณ ช่วงเวลา Start Solidification Time ของชิ้นงานทดสอบการลดขนาดหีบแบบที่ใช้ในการเทหล่อแบบไม่ปรับรูล้นสูง 30 มิลลิเมตร	262
4-160 แสดงการจำลองอุณหภูมิ ณ ช่วงเวลา End Solidification Time ของชิ้นงานทดสอบการลดขนาดหีบแบบที่ใช้ในการเทหล่อแบบไม่ปรับรูล้นสูง 30 มิลลิเมตร	263
4-161 กราฟแสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างระยะห่างของรูเทถึงรูล้นต่อการเกิดโพรงหดตัวในชิ้นงาน	265
4-162 กราฟแสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างการปรับขนาดของรูล้นชิ้นงาน Cylinder_Q4 Riser กับการเกิดโพรงหดตัว	267
4-163 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการเกิดโพรงหดตัวกับความสูงของหีบแบบของชิ้นงานแบบไม่มีรูล้น	268
4-164 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการเกิดโพรงหดตัวกับความสูงของหีบแบบของชิ้นงานปรับมีรูล้น	269
4-165 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการเกิดโพรงหดตัวกับความสูงของหีบแบบของชิ้นงานไม่ปรับมีรูล้น	270
4-166 กราฟแสดงผลของอุณหภูมิ ณ จุด P1-P8 ชิ้นงาน Cylinder_Q4 Riser D30	272
4-167 กราฟแสดงผลของอุณหภูมิ ณ จุด P1-P8 ชิ้นงาน Cylinder_Q4 Riser D40	273
4-167 กราฟแสดงผลของอุณหภูมิ ณ จุด P1-P8 ชิ้นงาน Cylinder_Q4 Position 20	274
4-169 กราฟแสดงผลของอุณหภูมิ ณ จุด P1-P8 ชิ้นงาน Cylinder_Q4 Position 30	275
4-170 กราฟแสดงผลของอุณหภูมิ ณ จุด P1-P8 ชิ้นงาน Mould H50 No_Riser	276
4-171 กราฟแสดงผลของอุณหภูมิ ณ จุด P1-P8 ชิ้นงาน Mould H40 No_Riser	277
4-172 กราฟแสดงผลของอุณหภูมิ ณ จุด P1-P8 ชิ้นงาน Mould H30 No_Riser	278
4-173 กราฟแสดงผลของอุณหภูมิ ณ จุด P1-P8 ชิ้นงาน MouldH50_RiserH50	279
4-174 กราฟแสดงผลของอุณหภูมิ ณ จุด P1-P8 ชิ้นงาน MouldH40_RiserH40	280

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4-175 กราฟแสดงผลของอุณหภูมิ ณ จุด P1-P8 ชิ้นงาน MouldH30_RiserH30	281
4-176 กราฟแสดงผลของอุณหภูมิ ณ จุด P1-P8 ชิ้นงาน MouldH50_RiserH70	282
4-177 กราฟแสดงผลของอุณหภูมิ ณ จุด P1-P8 ชิ้นงาน MouldH40_RiserH70	283
4-178 กราฟแสดงผลของอุณหภูมิ ณ จุด P1-P8 ชิ้นงาน MouldH30_RiserH70	284



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

กระบวนการหล่อโลหะ (Casting) เป็นเทคนิคการผลิตที่สำคัญและหลากหลาย ที่ใช้ในการสร้างชิ้นงานโลหะที่มีความซับซ้อน สำหรับอุตสาหกรรมต่าง ๆ โดยเฉพาะเรื่องการส่งผ่านความร้อน (Heat Transfer) และกระจายความร้อน (Distribution of Heat) ในระหว่างกระบวนการหล่อ เป็นหนึ่งในปัจจัยที่สำคัญที่มีผลต่อคุณภาพและความแม่นยำของผลิตภัณฑ์ของงานหล่อโลหะ โดยการหดตัวของโลหะ (Metal Shrinkage) เป็นหนึ่งในปัญหาสำคัญในกระบวนการนี้ ภาวะการหดตัวของโลหะในระหว่างกระบวนการหล่อเป็นปรากฏการณ์ที่ซับซ้อน ซึ่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงขนาดของชิ้นงาน นำไปสู่ข้อบกพร่องและปัญหาในด้านความแข็งแรงของผลิตภัณฑ์ การศึกษาให้เข้าใจความสัมพันธ์ระหว่างการกระจายความร้อนและการหดตัวของโลหะมีความสำคัญสำหรับการปรับแต่งกระบวนการหล่อ และเพิ่มคุณภาพผลิตภัณฑ์ให้ดียิ่งขึ้น

ผลของความร้อนต่อกระบวนการหล่อมีความซับซ้อน แรกสิ่งที่มีผลก็คือสถานะทางกายภาพของโลหะ เมื่อโลหะถูกเทหล่อในแม่พิมพ์ จะเปลี่ยนแปลงจากสถานะของเหลวเป็นสถานะของแข็งโดยมีอุณหภูมิเป็นปัจจัยสำคัญ เนื่องจากอุณหภูมิที่เกิดขึ้นนี้มีผลต่อพฤติกรรมการไหลของโลหะที่ละลาย อย่างไรก็ตาม การกระจายความร้อนภายในแม่พิมพ์และอัตราการสูญเสียความร้อนก็เป็นสิ่งสำคัญเช่นกัน โลหะจะเริ่มเย็นลงทันทีที่สัมผัสกับพื้นผิวแม่พิมพ์ และเมื่อเย็นลง จะเริ่มแข็งตัว กระบวนการเย็นลงและการกลายเป็นของแข็งนี้ไม่ได้เกิดขึ้นในทุกบริเวณของแม่พิมพ์โดยอัตราความเร็วที่เท่ากัน และโลหะหล่ออาจมีเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่ไม่สม่ำเสมอ การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเช่นนี้มีผลลัพธ์ที่สำคัญต่อกระบวนการหล่อ การเย็นลงที่ไม่สม่ำเสมอสามารถนำไปสู่อัตราการหดตัวที่แตกต่างกันภายในชิ้นส่วน มีข้อบกพร่องเช่นรอยแตก หรือโพรงหดตัว นอกจากนี้ กระบวนการการกลายเป็นของแข็งเป็นกระบวนการที่มีการคายความร้อนภายในตัวเอง ซึ่งหมายความว่าสามารถส่งผลต่อเงื่อนไขทางความร้อนโดยทั่วไปภายในแม่พิมพ์ ซึ่งเป็นความซับซ้อนระหว่างโลหะที่กำลังเย็นลงและความร้อนที่สร้างขึ้นต่อแม่พิมพ์ ซึ่งมีผลสุดท้ายต่อคุณสมบัติของผลิตภัณฑ์ที่ถูกหล่อ

สำหรับกระบวนการทดสอบการหล่อชิ้นงาน ซอฟต์แวร์จำลอง (Simulation Software) คือเครื่องมือที่จำเป็น ความสามารถของซอฟต์แวร์ในการจำลองการกระจายความร้อนภายในแม่พิมพ์หล่อเป็นสิ่งสำคัญมากสำหรับงานหล่อ ความสามารถนี้ไม่เพียงเพิ่มความเร็วในการออกแบบและการ

ทดสอบเท่านั้น แต่ยังทำให้วิศวกรสามารถทำนายข้อบกพร่อง ปรับพารามิเตอร์ และสุดท้ายเรียบเรียงกระบวนการได้อย่างมีประสิทธิภาพ ผลกระทบของซอฟต์แวร์ ต่องานหล่อนั้นกว้างไกลกว่าเพียงแค่ประสิทธิภาพในการจำลองเท่านั้น เมื่อนำมาประยุกต์ใช้สามารถทำให้เกิดในเรื่องของการประหยัดทั้งต้นทุนและคุณภาพของผลิตภัณฑ์ได้

ดังนั้นงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ในการใช้ซอฟต์แวร์จำลองขั้นสูงร่วมกับการแก้ไขปัญหาโดยการออกแบบแนวคิด เพื่อที่จะวิเคราะห์หาวิธีการแก้ไขปัญหาที่ดี และสามารถนำไปใช้งานได้จริง ผ่านการทดลองปรับแต่งส่วนประกอบที่เกี่ยวข้องอย่างรูลัน (Riser) ในเรื่องของขนาดที่เหมาะสม ตำแหน่งวางรูลัน และพฤติกรรมของความร้อนที่อาจจะส่งผลให้เกิดข้อบกพร่องต่อชิ้นงาน โดยพัฒนาความเข้าใจเกี่ยวกับกลไกพื้นฐานด้านที่ควบคุมปรากฏการณ์นี้ สามารถช่วยในการออกแบบและควบคุมกระบวนการหล่อ ซึ่งในที่สุดจะช่วยให้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้จริง ช่วยลดต้นทุนและทรัพยากรในอุตสาหกรรมงานหล่อได้อย่างมีประสิทธิภาพนั่นเอง

1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 เพื่อวิเคราะห์ผลของความร้อนที่มีผลต่องานหล่อ ในเรื่องของข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นจากพฤติกรรมของความร้อน โดยใช้โปรแกรมวิเคราะห์จำลองสถานการณ์ การหดตัวและการพฤติกรรมของความร้อนในชิ้นงานทดสอบ

1.2.2 เพื่อลดข้อบกพร่องของการหดตัวที่เกิดขึ้นภายในชิ้นงาน

1.3 ขอบเขตการศึกษา

1.3.1 ชิ้นงาน กระสวนขึ้นเดียวหน้าผ่าราบมีไส้แบบในตัว

1.3.2 วัสดุที่ใช้คือ เหล็กอลูมิเนียมเกรด A1100

1.3.3 โปรแกรมสร้างแบบจำลองสามมิติ TopSolid

1.3.4 โปรแกรมจำลองสถานการณ์การไหลและความร้อนของโลหะเหลว CAST-DESIGNER

Version 7.8

1.4 สมมติฐาน

การจำลองผ่านโปรแกรมวิเคราะห์ การศึกษาและวิเคราะห์จากทฤษฎีทางความร้อนเกี่ยวกับงานหล่อ สามารถช่วยปรับปรุงคุณภาพชิ้นงานหล่อได้จริง

1.5 นิยามศัพท์เฉพาะ

1.5.1 การหล่อ (Casting) กระบวนการผลิตที่มีรากฐานและหลากหลาย ซึ่งใช้เทคนิคการขึ้นโลหะหลอมให้เป็นชิ้นส่วนที่ซับซ้อนสำหรับการประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมต่าง ๆ

1.5.2 กระสวน (Pattern) หมายถึงแบบจำลองของชิ้นส่วนสุดท้ายที่จะหล่อ มักทำจากขี้ผึ้ง พลาสติกหรือวัสดุอื่น ๆ

1.5.3 การกระจายความร้อน (Distribution of Heat) หมายถึงกระบวนการกระจายและการจัดเรียงพลังงานความร้อนภายในแม่พิมพ์หล่อระหว่างกระบวนการหล่อ ซึ่งสามารถมีผลต่อขนาดสุดท้ายและความคงทนโครงสร้างของโลหะที่ถูกหล่อ

1.5.4 แบบหล่อ (Mold) หมายถึงวัสดุหรือเครื่องมือที่ใช้ในการสร้างรูปทรงของชิ้นงานที่ต้องการหล่อ โดยโลหะเหลวจะถูกเทในแบบหล่อนี้

1.5.5 การหดตัวของโลหะ (Metal Shrinkage) คำนี้แสดงถึงปรากฏการณ์ที่โลหะละลายตัวลงและลดขนาดเมื่อเย็นและกลายเป็นของแข็งภายในแม่พิมพ์หล่อ ซึ่งอาจการเปลี่ยนแปลงในมิติและข้อบกพร่องโครงสร้างในผลิตภัณฑ์สุดท้าย

1.5.6 การถ่ายเทความร้อน (Heat Transfer) การถ่ายโอนพลังงานความร้อนจากพื้นที่หนึ่งไปยังพื้นที่อื่น ๆ โดยบ่อยครั้งเป็นจากโลหะละลายไปยังแม่พิมพ์ในระหว่างกระบวนการหล่อ ซึ่งทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงในอุณหภูมิและสถานะของวัสดุ

1.5.7 ซอฟต์แวร์จำลอง (Simulation Software) เครื่องมือซอฟต์แวร์ขั้นสูงที่ใช้ในการจำลองและวิเคราะห์กระบวนการทางกายภาพที่ซับซ้อน เช่น การถ่ายเทความร้อนและการหดตัวของโลหะในระหว่างกระบวนการหล่อ เพื่อช่วยวิศวกรทำนายผลลัพธ์และปรับพารามิเตอร์เพื่อประสิทธิภาพ

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

1.5.9 ทางเข้า (Gate or Ingate) หมายถึงช่องที่ทำไว้สำหรับให้โลหะเหลวไหลจากทางวิ่งหลักเข้าสู่แบบหล่อ

1.5.10 ทางวิ่ง (Runner) หมายถึงช่องทางที่ทำขึ้นเพื่อให้โลหะเหลวไหลผ่านจากจุดเทไปยังจุดต่าง ๆ ของแบบหล่อ

1.5.11 รูเท (Sprue) หมายถึงจุดที่เทโลหะเหลวลงสู่แบบหล่อผ่านช่องทางทางวิ่งหรือช่องทางเข้า

1.5.12 รูล้น (Riser) หมายถึงช่องทางที่ออกแบบไว้เพื่อระบายโลหะเหลวส่วนเกินที่ไม่สามารถเติมเต็มแบบหล่อได้อย่างสมบูรณ์ในกระบวนการหล่อ

1.5.13 อุณหภูมิเท (Pouring Temperature) หมายถึงอุณหภูมิที่ใช้ในการเทโลหะเหลวลงในแบบหล่อ กระบวนการเทจะต้องควบคุมอุณหภูมิของโลหะให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสม เพื่อให้โลหะสามารถไหลลงแบบหล่อได้ดีและเกิดการแข็งตัวตามต้องการ

1.5.14 วิธีโมดูลัส (Modulus Method) หมายถึงวิธีที่ใช้ในการวิเคราะห์และออกแบบระบบหล่อโลหะ โดยเฉพาะในการคำนวณปริมาตรของแบบหล่อและการออกแบบระบบทางเข้า (Gate System) เพื่อให้การกระจายของโลหะเหลวเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ

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

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

1.5.17 วิธีเรขาคณิต (Geometric Method) หมายถึงวิธีการที่ใช้หลักการและเทคนิคจากเรขาคณิตในการวิเคราะห์หรือออกแบบระบบหล่อโลหะหรือในกระบวนการทางวิศวกรรมและการผลิตอื่น ๆ

1.5.18 เวลาที่ใช้ในการเติมโลหะเหลวลงแบบหล่อ (Fill Time) หมายถึงระยะเวลาในการเทโลหะเหลวลงในแบบหล่อจนเต็มรูปทรงที่ต้องการ

1.5.19 เวลาที่ใช้ในการแข็งตัว (Solidification Time) หมายถึงระยะเวลาในการที่โลหะเหลวเย็นตัวลงและแข็งตัวเป็นรูปทรงที่ต้องการหลังจากที่เทลงในแบบหล่อ

1.5.20 การเกิดโพรงหดตัว (Shrinkage Porosity) หมายถึงการเกิดช่องว่างหรือโพรงในชิ้นงานหลังจากที่มันแข็งตัวและเย็นตัวลง ซึ่งเกิดจากการหดตัวของโลหะเหลวในระหว่างกระบวนการหล่อ

1.6 วิธีการดำเนินงาน

1.6.1 ตรวจสอบปัญหาที่เกิดขึ้น กำหนดขอบเขต วัตถุประสงค์ วิธีการและเครื่องมือสำหรับใช้ในการศึกษา รวมไปถึงการทดสอบ

1.6.2 ศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1.6.3 จำลองสถานการณ์การไหลของโลหะเหลว ตามเงื่อนไขที่กำหนดโดยใช้โปรแกรมวิเคราะห์งานหล่อ Cast-Designer Version 7.8 โดยใช้โมเดลที่กำหนด เพื่อหาปัจจัยที่อาจทำให้เกิดปัญหา

1.6.4 ออกแบบแนวคิดเพื่อแก้ไขปัญหา

1.6.5 จำลองสถานการณ์การไหลของโลหะเหลวกับแนวคิดที่ออกแบบมาเพื่อแก้ไขปัญหา ตามเงื่อนไขที่กำหนดโดยใช้โปรแกรมวิเคราะห์งานหล่อ Cast-Designer Version 7.8

1.6.6 ทำการทดสอบหล่อชิ้นงานจริงเพื่อเปรียบเทียบผลลัพธ์

1.6.7 สรุปผลการทำงานวิจัยและข้อเสนอแนะ

1.7 เครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย

- 1.7.1 เครื่องคอมพิวเตอร์และเครื่องพิมพ์รายงาน
- 1.7.2 โปรแกรม TopSolid 7.18
- 1.7.3 โปรแกรม Cast-Designer Version 7.8
- 1.7.4 อุปกรณ์หล่อขึ้นงานจริง เช่น แม่พิมพ์ กระสวน

1.8 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.8.1 สามารถคาดการณ์ข้อบกพร่องของงานหล่อ ผ่านซอฟต์แวร์จำลองได้อย่างแม่นยำ ถูกต้อง และสามารถลดข้อผิดพลาดที่อาจจะเกิดขึ้น
- 1.8.2 สามารถหาแนวทางการแก้ไขการเกิดข้อบกพร่องของชิ้นงาน ผ่านการใช้งานซอฟต์แวร์จำลองได้
- 1.8.3 สามารถลดเวลาดำเนินการและข้อบกพร่องในกระบวนการหล่อได้
- 1.8.4 สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการผลิตเพื่อลดข้อบกพร่องของชิ้นงานหล่อ

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

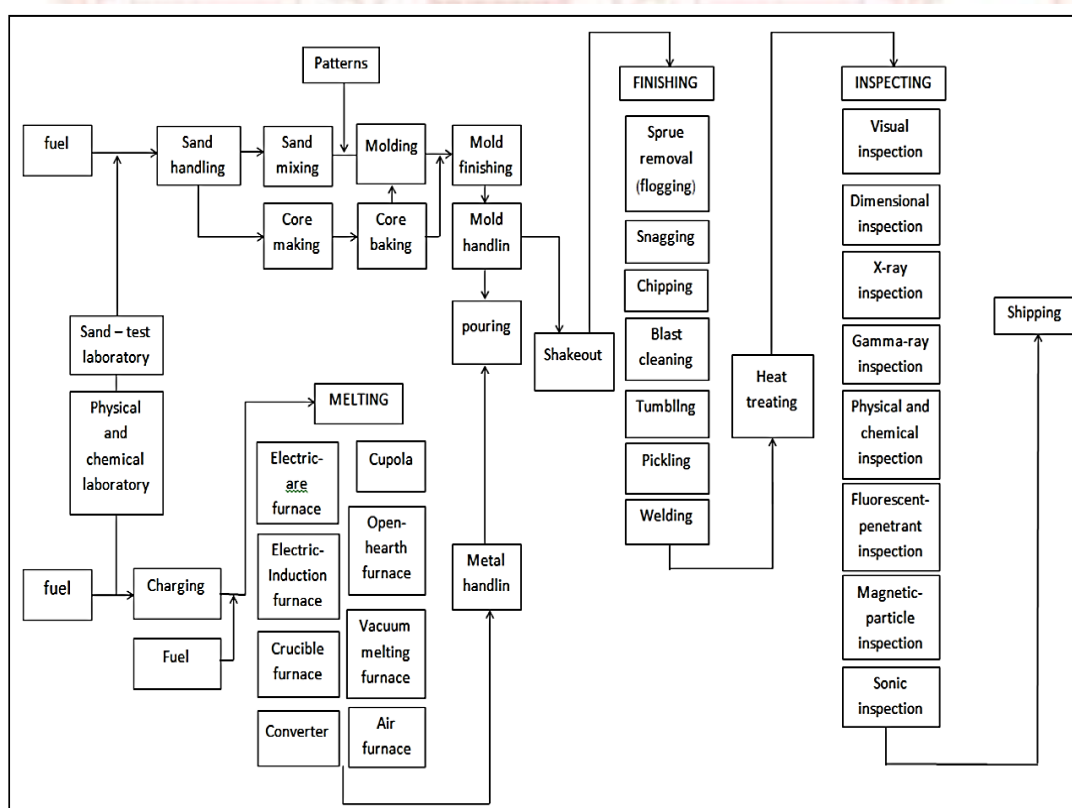
ในกระบวนการขึ้นรูปโลหะในอุตสาหกรรม เป็นจุดเริ่มต้นของการผลิตชิ้นงานหลายรูปแบบ ทั้งอุตสาหกรรมยานยนต์ อุตสาหกรรมผลิตชิ้นส่วนเครื่องจักรกล และอุตสาหกรรมอื่นๆ ดังนั้นจึงต้องมีการออกแบบและคำนวณเพื่อความเหมาะสมในกระบวนการขึ้นรูปโลหะของชิ้นงานแต่ละรูปแบบ ทฤษฎีที่ใช้ในการออกแบบและคำนวณเพื่อให้เกิดความสมบูรณ์ในกระบวนการขึ้นรูปโลหะสูงสุดโดยใช้ทฤษฎีต่างๆดังนี้

- 2.1 ทฤษฎีการหล่อชิ้นงานเบื้องต้น
- 2.2 ทฤษฎีหีบหล่อ
- 2.3 ทฤษฎีกระสวน
- 2.4 ทฤษฎีไส้แบบ
- 2.5 ทฤษฎีระบบป้อนจ่ายน้ำโลหะ
- 2.6 ทฤษฎีวัสดุงานหล่อ
- 2.7 ทฤษฎีข้อบกพร่องงานหล่อ
- 2.8 ทฤษฎีการแก้ปัญหาคาการหดตัว
- 2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎีการหล่อชิ้นงานเบื้องต้น (ประวัติศาสตร์, 2520)

กรรมวิธีการหล่อโลหะเป็นงานทางช่างที่สำคัญมาก ยิ่งในทุกวันนี้มีสิ่งจำเป็นเกี่ยวกับเครื่องมือ เครื่องใช้ และเครื่องจักรกลต่างๆ ดูแล้วต้องทำการสร้างขึ้นมา และสำเร็จเป็นรูปร่างขึ้นมา ได้ก็จะต้องมีงานหล่อเข้ามาเกี่ยวข้องสัมพันธ์กันอยู่เสมอ เช่น ในโรงงานอุตสาหกรรมผลิตรถยนต์ขนาดใหญ่ทั้งในและต่างประเทศที่จำเป็นต้องมี เพล่า เสื้อสูบ เฟือง กะโหลกเพล่า เป็นต้น ได้ถูกขึ้นรูปออกมาจากโรงงานหล่อโลหะก่อน แล้วจึงทำการจัดส่งไปยังโรงงานกลึง ใส เจาะแล้วปรับแต่ง เพื่อทำการตกแต่งให้เป็นรูปร่างลักษณะออกมาตามที่เรานำไปใช้งาน กรรมวิธีการหล่อโลหะจะแบ่งออกเป็นกระบวนการใหญ่ๆได้ดังนี้

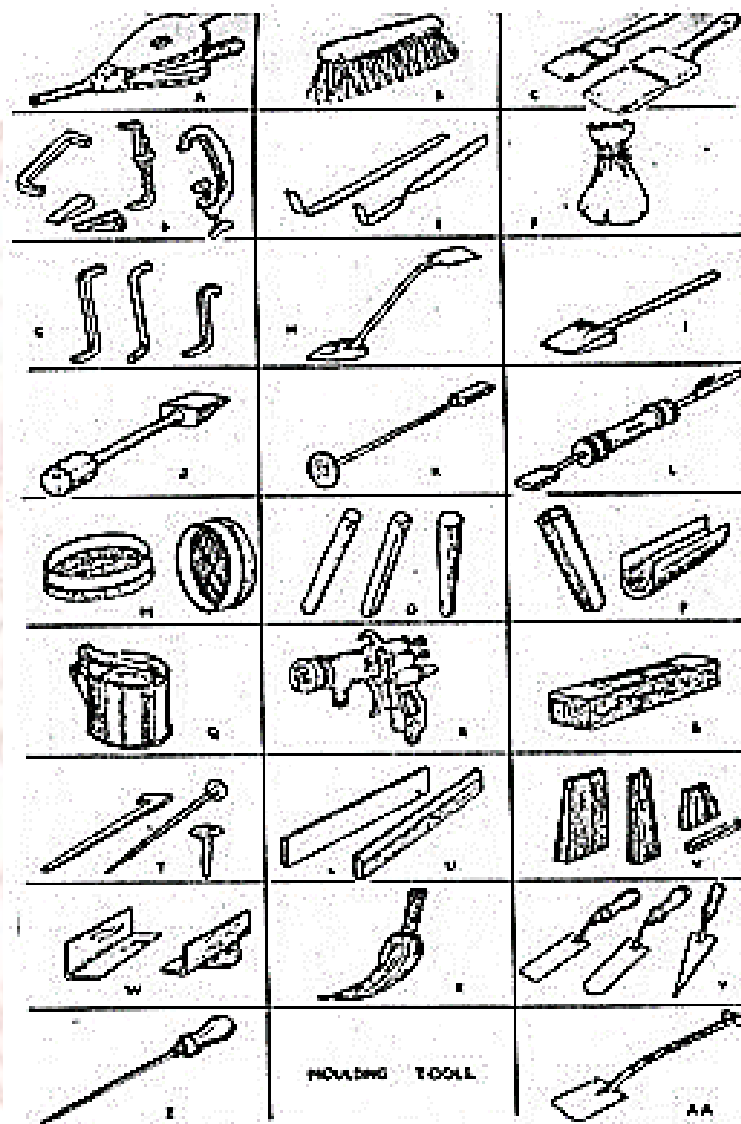
- (ก) แผนกสร้างกระสวยและกล่องใส่แบบ (Pattern & Core box making)
- (ข) แผนกสร้างโพรงแบบและก้อนใส่แบบ (Mold & Core making)
- (ค) แผนกหลอมโลหะและเทหล่อ (Melting & Pouring)
- (ง) แผนกทำความสะอาด (Cleaning)
- (จ) แผนกควบคุมคุณภาพ (Quality Control)



ภาพที่ 2-1 กระบวนการงานหล่อ (ประวัติศาสตร์, 2520)

สิ่งสำคัญของกรรมวิธีการหล่อโลหะ ชิ้นงานหล่อโลหะ ชิ้นงานที่เราได้จากการเทน้ำโลหะที่กำลังหลอมละลายลงไปในโพรงของแบบหล่อที่ได้จัดเตรียมไว้ล่วงหน้าแล้ว หลังจากนั้นก็ปล่อยให้เย็นตัวลงมาจนถึงอุณหภูมิปกติ ก็จะได้รูปร่างของชิ้นงานหล่อที่มีลักษณะเหมือนกับโพรงแบบ

2.1.1 เครื่องและอุปกรณ์ในการทำโพรงแบบ



ภาพที่ 2-2 อุปกรณ์ในการสร้างโพรงแบบ (ประศาสตร์, 2520)

2.1.1.1 ซ่องเป่าลม (Bellow) ใช้สำหรับเป่าทรายหรือผงแกรไฟต์ภายในโพรงแบบหล่อ

2.1.1.2 แปรงขนอ่อน (Brush) ใช้เป่าสิ่งสกปรกออกจากโพรงแบบ หรือใช้ปัดทรายออกจากหน้าฝาระหว่างหีบบนกับหีบล่าง ซึ่งเป็นทรายแยกโพรงแบบ

2.1.1.3 ขอเหล็กดักทราย (Lifter) เหมาะสำหรับใช้ซ่อมแซมผิวหน้า หรือส่วนเล็กๆตาม ซอกมุมของแบบหล่อ หรือใช้ดักทราย หรือสิ่งสกปรกออกจากแบบหล่อส่วนใหญ่จะนิยมทำจากเหล็ก แข็งแล้วงอปลายให้เป็นมุมฉาก

2.1.1.4 ถุงฝุ่นผง (Dust Bag) เป็นถุงใส่ผงแกรไฟต์ ทรายละเอียดหรือทรายแยกแบบ โรย ตามผิวหน้าแบบ นิยมทำมาจากผ้าที่มีรูให้เม็ดทรายผ่านได้สะดวก

2.1.1.5 เหล็กยึดทราย (Gaggers) เป็นแท่งเหล็กทรงแบนหรือทรงกลมก็ได้ ที่ปลายข้าง เดียวหรือปลายทั้งสองข้างนิยมติดตั้ง ไว้สำหรับยึดทรายส่วนบนของแบบหล่อให้ยึดติดแน่นอยู่ ภายในหีบต้องทาน้ำโคลนก่อนใช้งานทุกครั้ง เพื่อผลในการยึดได้ดีนั่นเอง

2.1.1.6 ซ้อนใบไม้ (Heart and Square) ลักษณะปลายด้านหนึ่งจะทำเป็นรูปใบไม้ อีก ด้านหนึ่งที่เหลือจะทำเป็นลักษณะสี่เหลี่ยม หรือบางทีก็ทำลักษณะคล้ายหัวใจ นิยมใช้แต่งผิวแบบหล่อ เมื่อทำการถอดกระสวนเสร็จเรียบร้อยแล้ว

2.1.1.7 ที่กระทุ้งทรายแบบลิ้ม (Peen Rammer) นิยมใช้กระทุ้งทรายตามซอกตามมุม เล็กๆ

2.1.1.8 ที่กระทุ้งทรายด้วยมือ (Hand Rammer) นิยมใช้ทำแบบบนโต๊ะ ส่วนใหญ่จะมี ขนาดสั้นๆ

2.1.1.9 ที่กระทุ้งทรายบนพื้น (Floor Rammer) ใช้ทำแบบขนาดใหญ่บนพื้นโรงหล่อและ มักจะมีขนาดยาวกว่าที่กระทุ้งทรายด้วยมือ

2.1.1.10 ตะแกรง (Hand Riddles) ตะแกรงลักษณะกลม มีกรอบ ทำด้วยโลหะหรือไม้ก็ได้ จะใช้ในการร่อนทราย

2.1.1.11 กระสวนรูเท (Sprue Pin) เป็นไม้กลมๆผิวลาดเอียงลงมา ใช้วางในหีบหล่อชั้น บนเมื่อใส่ทรายลงไปรอบๆ หลังจากกระทุ้งเสร็จก็จะทำการดึงออก

2.1.1.12 ที่ตัดรูเท (Sprue Cutter) ลักษณะเป็นท่อทำด้วยยาง พลาสติก หรือเหล็กก็ได้ นิยมใช้แทงลงไปบนแบบหล่อชั้นบน ตรงจุดที่วางตำแหน่งรูเท

2.1.1.13 กระบองพ่น (Spray Gun) เป็นที่พ่นขนาดพอมือ ใช้สำหรับพ่นสารฉาบผิวให้แก่ แบบหรือไส้แบบ

2.1.1.14 ระดับน้ำ (Spirt Level) ใช้วัดระดับของผิวหน้าแบบหล่อ ให้ได้ระดับที่แน่นอน

2.1.1.15 เหล็กเสริมและตะปู (Sprigs and Nails) ใช้ยึดทรายไม่ให้หลุดออกจากแบบ เมื่อ มีการเคลื่อนย้าย หรือ ใช้ยึดไส้แบบให้ติดอยู่กับแบบหล่อ

2.1.1.16 แปรงน้ำ (Swab) ใช้ปัดรอบๆกระสวนก่อนที่จะทำการถอดออกจากแบบทราย หรือใช้ปัดรอบๆกระสวนรูเทก่อนถอดออกจากหีบบน บางทีใช้ทาผงแกรไฟต์ก็ย่อมได้เช่นกัน

2.1.1.17 เกียง (Trowels) ตกแต่งผิวหน้าแบบบริเวณที่เป็นกว้างๆ

2.1.1.18 พลั่ว (Shovel) ใช้ในการปรับทรายและผสมทราย

2.1.1.19 เหล็กแทงรูโหว่ (Vent Wire) ใช้แทงบนแบบหล่อขึ้นบนเพื่อให้เป็นรูก๊าซ

2.1.1.20 เหล็กปาดแบบ (Strike off Bar) นิยมทำมาจากไม้หรือเหล็ก เป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้า ความยาวประมาณ 1 ฟุต ใช้ปาดทรายเพื่อให้ผิวแบบได้ระดับ

2.1.1.21 เหล็กถอดแบบ (Draw Spike) ทำปลายแหลมหรือลาดเรียว เพื่อใช้ในการถอดกระสวนออกจากแบบทราย

2.1.1.22 ที่ถอดแบบขนาดใหญ่ๆ (Draw Screws and Rapping Plate) ใช้สำหรับถอดกระสวนขนาดใหญ่ๆออกจากแบบทราย

2.1.1.24 ที่ตัดทางเข้าน้ำโลหะ (Gate Cutter) เป็นแผ่นโลหะงอๆใช้ในการตัด In gate เข้าน้ำพุแบบ

2.2 ทฤษฎีหีบหล่อ (ประศาสตร์, 2520)

2.2.1 วัสดุที่นิยมนำมาใช้ทำหีบหล่อ

2.2.1.1 ไม้ หาได้ง่าย ราคาถูก อายุสั้น

2.2.1.2 เหล็กหล่อ นิยมใช้มาก มีทั้งขนาดเล็กและใหญ่

2.2.1.3 เหล็กกล้า เหมาะสำหรับทำให้สำเร็จรูป มีความแข็งแรงสูง ทนความร้อนสูง ราคาปานกลาง และมีน้ำหนักเบาสะดวกในการยกหรือพลิกหีบหล่อ

2.2.1.4 ไฟเบอร์กลาส พลาสติกแข็ง ความแข็งแรงน้อย ราคาแพง ไม่ค่อยนิยมใช้

2.2.1.5 อลูมิเนียมผสม ความแข็งแรงสูง และมีน้ำหนักเบามาก ใช้ได้อย่างสะดวกสบาย



ภาพที่ 2-3 หีบหล่อที่ทำจากไม้



ภาพที่ 2-4 ทีบหล่อที่ทำจากโลหะ

2.2.2 หน้าที่ของทีบหล่อ

ทีบหล่อเป็นกล่องหรือภาชนะที่ใช้ใส่ทรายไว้ ซึ่งจะเป็นตัวช่วยหล่อหรือช่วยพยุงทรายที่กำลังถูกกระทุ้งรอบๆ กระสวนไว้อีกที และจะมีทีบครอบแบบมาช่วยในกรณีที่ถอดทีบหล่อออก ก่อนเทน้ำโลหะ เครื่องทีบครอบแบบจะทำหน้าที่เป็นตัวครอบก้นทรายไม่ให้เคลื่อนไหวหรือเกิดการพังในขณะเทน้ำโลหะ

2.2.2.1 ส่วนประกอบของชุดทีบหล่อ

2.2.2.1.1 ทีบหล่อชั้นบน (Cope)

2.2.2.1.2 ทีบหล่อชั้นกลาง (Cheek) ใช้ในกรณีที่ม่มีกระสวนชนิดหลายๆชั้น หรือทำทีบหล่อแบบหลายๆชั้น

2.2.2.1.3 ทีบหล่อชั้นล่าง (Drag)

2.2.2.1.4 กรอบ (Frame) ของทีบบนและทีบล่าง

2.2.2.1.5 ทียก (Handle) ของทีบบนทีบล่าง

2.2.2.1.6 สลักนำศูนย์ (Guide Pin) ของทีบบนทีบล่าง โดยส่วนใหญ่ทีบชั้นล่างจะเป็นเตี้ยยื่นขึ้นไป และทีบชั้นบนนั้นจะทำรูไว้รับเตี้ยของทีบชั้นล่าง

2.2.2.2 คุณสมบัติของทีบหล่อ

2.2.2.2.1 แข็งแรงพอที่จะทนทานต่อน้ำหนักที่ทรายถูกกระทุ้งลงมา

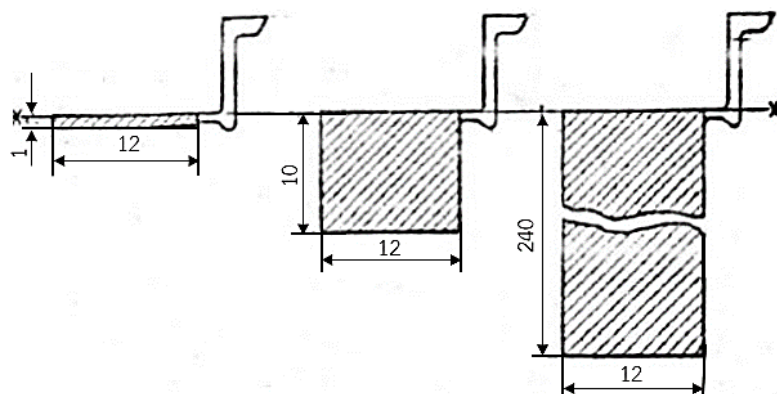
2.2.2.2.2 สามารถยึดทรายให้อยู่ทรงได้ดี

2.2.2.2.3 เนื่อแน่น ไม่บิดตัว

2.2.2.2.4 ทนอุณหภูมิสูงๆได้ดี รวมทั้งแรงดันของน้ำโลหะร้อนๆด้วย

2.2.3 เนื่องจากโลหะเหลวมีแรงดันเกิดขึ้นทุกทิศทุกทางภายในโพรงแบบ ซึ่งมีผลต่อทีบหล่อเช่นกัน จึงสามารถแยกแรงดันนี้ออกได้เป็น 3 อย่างรวมกัน คือ

2.2.3.1 แรงดันขึ้น เป็นแรงดันที่ทำให้ไส้แบบยกลอยและยังกระทำต่อเพดานของโพรงแบบ (หีบบน) แรงดันนี้เกิดขึ้นจาก แรงดันภายในโลหะเหลวนั่นเอง (Metallic Pressure) ที่กระทำในทิศทางขึ้นข้างบน จึงอาจทำให้โลหะเหลวไหลทะลักออกตามรอยหน้าผ้าของหีบได้ หากมีน้ำหนักกดทับที่หีบบนเพื่อต่อต้านแรงยกลอยนี้ไม่พอเพียง



ภาพที่ 2-5 แสดงความดันของโลหะเหลวในโพรงแบบ (ประศาสตร์, 2520)

ตัวอย่างที่แสดงในภาพที่ 2-5 เป็นชิ้นงานหล่อสามรูปร่าง มีพื้นที่หน้าตัด 12 x 12 ตารางนิ้ว เท่ากัน แต่มีความหนาแตกต่างกัน คือ 1, 10, 240 นิ้ว ตามลำดับ เทหล่อในโพรงแบบทรายและมีความสูงของรูเท 8 นิ้วเท่ากัน

ดังนั้นจะเห็นว่าชิ้นงานทั้งสามมีน้ำหนักแตกต่างกันตามลำดับ (เทหล่อด้วยเครื่องเหล็กหล่อ) แรงดันขึ้น ของชิ้นงานทั้งสามนี้จะมีค่าเท่ากับ ความสูง X ความหนาแน่น นั่นคือ $8 \times 0.25 = 2 \text{ lb/in}^3$ แรงดันนี้จะกระทำต่อเพดานของโพรงแบบ 12 x 12 ตารางนิ้ว จึงกลายเป็นน้ำหนักที่ยกลอยต่อหีบบนเท่ากับ $2 \times 144 = 288$ ปอนด์

จุดสำคัญของเรื่องนี้ก็คือ การเทหล่อชิ้นงานที่มีพื้นที่หน้าผ้าและความสูงของรูเทเท่ากัน จะมีแรงยกลอยกระทำต่อหีบบนเท่ากัน ถึงแม้ว่าจะมีน้ำหนักแตกต่างกันมากก็ตาม อนึ่งหากเทหล่อชิ้นงานที่มีหน้าผาราบแบนกว้าง เช่น $24 \times 24 \times 8 \times 0.25 = 1152$ ปอนด์ ซึ่งเป็นชิ้นงานที่หน้าผากว้างถึงจะมีน้ำหนักน้อย แต่ก็จะมีแรงยกลอยเกิดขึ้นอย่างมาก

2.2.3.2 แรงดันกดลง จะเห็นว่าแรงดันของโลหะเหลวนั้นขึ้นอยู่กับระดับความสูง นั่นคือที่ด้านล่างของผนังโพรงแบบ จะมีความดันเกิดขึ้นอย่างมาก ซึ่งจำเป็นจะต้องสร้างฐานที่มั่นคงรองรับน้ำหนักกดนี้ไว้ ในทางปฏิบัติได้อาศัยพื้นโรงงานนั่นเอง และจะคำนวณหาแรงดันกดที่กระทำต่อกันโพรงแบบได้จากสูตรดังนี้

$$\text{แรงดันกด} = H \times \rho \times A \quad (2-1)$$

โดยที่ H = ความสูงของโลหะ (in)

ρ = ความหนาแน่นโลหะ (lb/in³)

A = พื้นที่หน้าตัดกันโพรงแบบ (in²)

2.3 ทฤษฎีกระสวน (ประศาสตร์, 2520)

เป็นต้นแบบที่ใช้สำหรับทำแบบหล่อ (Mold) เมื่อเทน้ำโลหะเข้าในแบบหล่อจะได้ชิ้นงานหล่อที่มีรูปร่างและขนาดเหมือนกับกระสวน วัสดุที่นำมาใช้ทำกระสวนงานต้องพิจารณาจากงานหล่อ เช่น กระสวนที่ใช้ในการผลิตปริมาณมากจำเป็นต้องใช้กระสวนโลหะเพราะต้องการให้กระสวนมีความคงทนใช้งานได้นาน สำหรับวัสดุที่ใช้ทำกระสวนโลหะที่ทนความร้อนสูงเช่นเหล็กหล่อ ใช้สำหรับทำกระสวนในกระบวนการทำแบบหล่อเปลือก (Shell Molding) สำหรับโลหะเบา (Light Alloys) ใช้ทำแบบกระสวนง่ายและใช้ในการผลิตได้เป็นจำนวนมากๆ กระสวนไม้ เป็นวัสดุที่ขึ้นรูปง่าย ทำได้รวดเร็วเมื่อเทียบกับกระสวนโลหะ และราคาค่อนข้างถูกกว่าแบบในทรายหล่อทั่วไป ปัจจุบันได้มีการเคลือบผิวกระสวนไม้ด้วยเรซินเพื่อให้ผิวแข็งแรงขึ้น การเลือกใช้วัสดุทำกระสวนจะต้องคำนึงถึงค่าใช้จ่ายในการทำกระสวนและค่าทำแบบหล่อ (Mold) ให้ต่ำสุด ก่อนที่จะทำกระสวนจะต้องมีรูปแบบ (Drawing) เป็นรูปแบบเครื่องกล (Machine) แล้วนำมาออกแบบ (Design) ให้เป็นรูปแบบกระสวน (Pattern) การทำกระสวนจะต้องคำนึงถึง ประเด็นต่างๆ เช่นทำอย่างไรจึงจะทำกระสวนได้ง่าย การกำหนดทิศทางของแบบหล่อส่วนบน แล้วแบบหล่อส่วนล่าง กำหนดตำแหน่งของหน้าผ้าได้อย่างตามที่กำหนดขนาดเพื่อหดตัวของโลหะ (Shrink Allowance) การเผื่อการแต่งผิวด้วยเครื่องมือกล (Machine Finish Allowance) พร้อมทั้งการกำหนดความลาดเอียงของแบบ (Pattern Draft) เพื่อให้ชิ้นงานที่หล่อออกมาแล้วได้ชิ้นงานหล่อที่มีคุณภาพ

2.3.1 ประเภทของของวัสดุที่ทำกระสวน

การเลือกใช้คำนึงถึงการหดตัวของโลหะ (Shrinkage) การตกแต่งผิว (Machine Finish Allowance) การเผื่อความลาด (Draft Allowance) การเผื่อการบิดตัว (Distortion Allowance)

2.3.1.1 กระสวนไม้ (Wood Pattern) เป็นที่นิยมใช้กันมากเพราะหาง่ายได้ราคาถูก ในปัจจุบันเรานิยมใช้ไม้สักเพราะมีความคงทนสูง ตกแต่งด้วยเครื่องมือเครื่องจักรได้ง่าย รวมทั้งเกิดการบิดตัวได้น้อยมาก และขึ้นรูปได้ง่าย แต่ไม่ทนต่อการเสียดสีและความชื้น มีความแข็งแรงน้อยกว่ากระสวนโลหะ ไม่ทนทานต่อแรงกระแทกจากการตำทรายหล่อ

2.3.1.2 กระสวนโลหะ (Metal Pattern) เป็นที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย ส่วนมากจะได้แก่ อลูมิเนียม เหล็กหล่อ เหล็กกล้า โลหะผสมดีบุก ทองเหลือง มีความแข็งแรงและความเที่ยงตรงและอายุการใช้งานที่นานมากกว่ากระสวนไม้ ทนแรงเสียดสีได้ดีผิวสามารถตกแต่งให้เรียบได้ดียิ่ง แต่

คุณสมบัติเหล็กนั้นสามารถเกิดสนิมขึ้นได้ ปรับแต่งรูปทรงหรือซ่อมแซมได้ยากกว่ากระสวนไม้ มีน้ำหนักมากกว่ากระสวนไม้และราคาสูงกว่า

2.3.1.3 กระสวนพลาสติก (Plastic Pattern) ส่วนใหญ่ทำมาจาก Thermosetting Plastic นิยมใช้แทนกับสวโลหะ (Metal Pattern) เนื่องจากได้ขนาดที่แน่นอนมาก กระบวนการทำก็ทำได้ง่ายไม่ดูตความขึ้น รวมทั้งต้นทุนต่ำอีกด้วยชนิด Thermosetting Plastic ที่ใช้นั้นก็คือ Epoxy นั้นเอง

2.3.1.4 กระสวนปูนปลาสเตอร์ (Plaster Pattern) เป็นกระสวนที่ทำจากปูนปลาสเตอร์ (Plaster) หรือยิปซัม มีความแข็งแรง ผลต่อแรงกดหรือแรงอัดได้ดี ตกแต่งผิวได้ง่ายและเรียบดียิ่ง นิยมนำมาใช้กับงานที่เราต้องการความละเอียดผิวสูงได้ดี

2.3.1.5 กระสวนขี้ผึ้ง (Loss Wax Pattern) เรานิยมใช้ในกระบวนการ Investment Casting ซึ่งได้ใช้งานที่มีความประณีตสูง ส่วนมากใช้หล่อพระพุทธรูปต่างๆ เป็นต้น ขี้ผึ้ง ที่ใช้ส่วนมากจะเป็นขี้ผึ้งสารประกอบ และพวกยางสังเคราะห์ต่างๆ ทำโดยการฉีดขี้ผึ้งเข้าสู่โพรงแบบของแม่พิมพ์ที่เตรียมไว้ แล้วปล่อยให้แข็งตัวแล้วจึงทำการแยกออกจากแม่พิมพ์ออกมา

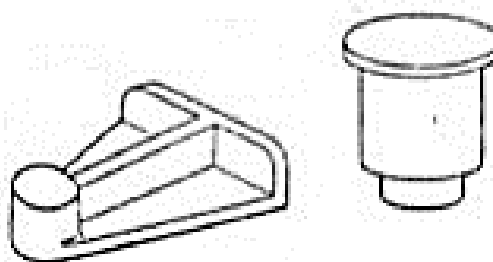
2.3.1.6 กระสวนปรอท (Hg pattern) สามารถนำปรอท (Hg) มาทำเป็นกระสวนได้โดยเทปรอทลงใต้แม่พิมพ์กระสวน (Molds) ที่มีอุณหภูมิ -70°F หรือต่ำกว่าก็ได้ แล้วปล่อยให้แข็งตัวในตู้กลางที่เป็นอะซิโตนจนปรอทน้ำเกิดการแข็งตัวแล้วจึงทำการแยกปรอทที่แข็งตัวแล้ว

2.3.1.7 กระสวนโฟม (Polystyrene Pattern) เรียกกันอีกอย่างหนึ่งว่า Full Mold Process เหมาะสำหรับหล่อชิ้นงานเป็นรายชิ้น ชิ้นเดียวเท่านั้น โดยก่อนใช้งานต้องทาหรืออบผิวกระสวนให้ทั่วก่อน แล้วจึงนำไปทำแบบหล่อโดยโฟม (Polystyrene) จะถูกอัดตัวอยู่ในโพรงแบบ เมื่อทำการเทน้ำโลหะลงไป กระสวนจะละลายกลายเป็นก๊าซออกไป น้ำโลหะจะเข้าแทนที่กระสวน เมื่อแข็งตัว ก็จะได้ชิ้นงานออกมาตามความต้องการ

2.3.2 ชนิดของกระสวน

2.3.2.1 กระสวนขึ้นเดียว

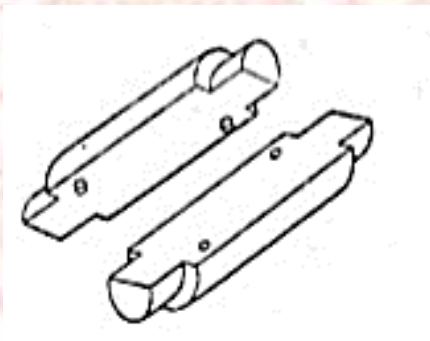
เป็นกระสวนที่มีรูปร่างธรรมดาๆ นำไปสร้างโพรงแบบด้วยมือได้ง่ายมีรูปร่างทั่วไปเหมือนชิ้นงานจริง แตกต่างเพราะที่ต้องการเผื่อขนาดตามกรณีต่างๆ ดังที่กล่าวผ่านมาแล้ว โดยอาจมีไส้แบบติดอยู่ด้วย ซึ่งโดยทั่วไปนั้นกระสวนชนิดนี้จะมีด้านใด หน้าเรียบจึงเหมาะสำหรับใช้กำหนดเป็นหน้าผ่าระหว่างหีบ (Parting Line) โดยทั่วไปนั้นโพรงแบบทรายที่ใช้ กระสวนชนิดนี้มักจะสร้างระบบรูเทด้วยมือ เว้นแต่หากต้องการความสะอาดและคุณภาพของงานสูงแล้ว กระสวนจึงจะสร้างระบบรูเทและหัวป้อนติดไว้ด้วย โดยเลือกกระสวนที่มีส่วนประกอบต่างๆครอบคลุมชนิดหลังนี้ว่า กระสวนติระบบรูเท (Gate Pattern)



ภาพที่ 2-6 กระสวนชั้นเดียว

2.3.2.2 กระสวนแยกชิ้น

การสร้างโครงแบบทรายจากกระสวนชั้นเดียวที่มีด้านใดไม่เรียบ มีความจำเป็นต้องสร้างหน้าผาระหว่างหีบโดยการตัดแต่งผิวหน้าทรายด้วยมือเอาเอง จึงทำให้เกิดความยุ่งยากและเสียเวลา ดังนั้นการสร้าง กระสวนสำหรับขึ้นงานดังกล่าวจึงมักแยกกระสวนออกจากกันอย่างน้อย 2 ชั้นหน้าประกบที่แยกออกจากกัน จะถูกสร้างให้แบนเรียบจึงใช้เป็นหน้าผาระหว่างหีบได้สะดวกแต่ละชิ้นงานของกระสวนที่แยกออกจากกัน จะต้องประกบกันตรงตำแหน่งเดิมด้วยรู (Hole) และเดือยสลัก (Dowel & Pin) ซึ่งจะสวมกันได้พอดีโดย สะดวกไม่หลวมคลอนกระสวนชนิดนี้สามารถติดระบบรูเทและหัวป้อนเข้าไปด้วยก็ได้



ภาพที่ 2-7 กระสวนแยกชิ้น

2.4 ทฤษฎีไส้แบบ (ประศาสตร์, 2520)

ไส้แบบ คือ แท่งหรือก้อนวัสดุทนไฟที่สอดใส่ไว้ในโครงแบบก่อนเทหล่อโลหะเหลว ไส้แบบทำให้รูปร่างของชิ้นงานหล่อแตกต่างไปจากโครงแบบที่สร้างจากกระสวน ดังที่ทราบมาแล้วว่ารูปร่างภายนอกของชิ้นงานจะมีลักษณะคล้ายคลึงกระสวน แต่โครงรูปร่างภายในของชิ้นงานจะเกิดขึ้นได้จากไส้แบบเท่านั้น และไส้แบบยังสามารถทำให้ชิ้นงานมีโครงรูปร่างภายในซับซ้อนเพียงใดก็ได้ ทั้งนี้บางโครงรูปร่าง ภายในของชิ้นงานอาจไม่มีเครื่องมือหรืออุปกรณ์อื่นใดสามารถขึ้นรูปพรรณได้ ดังเช่น ช่องน้ำระบายความร้อน ของห้องเผาไหม้ของเครื่องยนต์

ไส้แบบสามารถสร้างได้จากโลหะ ททราย ปูนพลาสติก และวัสดุทนไฟอื่นๆ โครงสร้างภายในของ ชิ้นงานที่มีความซับซ้อน ไส้แบบจะต้องสลายตัวได้ (Collapse) ภายหลังจากชิ้นงานหล่อแข็งตัวแล้ว ทั้งนี้เพื่อ สะดวกในการทำความสะอาดโดยแยกเอาวัสดุไส้แบบออกจากชิ้นงานได้ง่าย และ ป้องกันการฉีกกร้าวขณะร้อน (Tear) ของชิ้นงาน เนื่องจากการหดตัวของโลหะ เหตุนี้เองไส้แบบที่คงทนถาวร เช่น โลหะ จึงถูกจำกัดในเรื่อง ขนาดและรูปร่าง ซึ่งโดยส่วนมากแล้วไส้แบบโลหะจะมีรูปพรรณธรรมดาๆ เช่น เป็นแท่งตรงและต้องมีความเรียบด้วย

2.4.1 ไส้แบบทรายขึ้น (Green Sand Core) คือ ไส้แบบ (Core) ที่ทำด้วยทรายขึ้น (Green Sand) เป็นส่วนหนึ่งของแบบหล่อที่ทำขึ้นมาพร้อมกันก็ได้ เพราะใช้ทรายชนิดเดียวกันนั่นเอง หรือนำมาประกอบกันภายหลังก่อนเทน้ำโลหะก็ย่อมได้

2.4.2 ไส้แบบทรายแห้ง (Dry Sand Core) ทำจากทรายซิลิกา โดยจัดสิ่งสกปรกออกให้หมดก่อน เรียกอีกอย่างหนึ่งว่า Sharp Sand โดยผสมกับตัวผสมและน้ำลงไปให้เข้ากัน ตัวรับสายจะเพิ่มความแข็งแรงในขณะขึ้น (Green) หรือขณะแห้ง (Dry) อาจจะเติมเบนโทไนท์ลงไปอีกเพื่อเพิ่มความแข็งแรงขนาดขึ้น (Green Strength) ตัวภาษาที่ใช้กันคือ ยางธรรมชาติ ยางสังเคราะห์ หรือน้ำมันไส้แบบ เป็นต้น

2.4.3 ส่วนประกอบของไส้แบบ

2.4.3.1 ทราย จะมีปริมาณดินเหนียวน้อยที่สุด ขนาดเม็ดทรายจะโตกว่าทรายแบบหล่อเพื่อให้มีอัตราการผ่านสูง

2.4.3.2 ตัวประสาน เป็นส่วนที่สำคัญในการก่อยึดเม็ดทรายในแต่ละเม็ดให้เกาะแน่นรวมตัวกันเป็นรูปร่างขึ้นได้ตามความต้องการ ได้แก่ น้ำแก้ว ยางสังเคราะห์ ซีเมนต์ ปูนพลาสติก น้ำมันต่างๆ แป้งมัน แป้งข้าวโพด เป็นต้น

2.4.3.3 น้ำ เราถือเป็นว่าตัวประสานด้วยเช่นกัน แต่ที่ต้องแยกมาให้เห็นชัดเจนก็เพราะว่าน้ำนั้นเป็นตัวประสานราคาถูก หาได้ง่าย มีผลกับไส้แบบมากที่สุด ทั้งยังเป็นหัวใจสำคัญในกระบวนการทำไส้แบบอีกด้วย ซึ่งเราจะมองข้ามไม่ได้เลย คุณสมบัติของไส้แบบ มี Green Strength (เมื่อเข้าเตาอบ) และ Dry Strength (เพื่อคงรูปร่างขณะอบ) และ มี Baked Strength (เพื่อคงรูปร่างหลังอบ) มีอัตราการผ่านและผิวเรียบสูง

2.4.4 กล่องไส้แบบ (Core Boxes) จะทำโดยไม้หรือโลหะก็ได้แล้วแต่จะสะดวก ภายในจะมีโครงเป็นรูปร่างต่างๆ เมื่อใส่ทรายที่ผ่านกรรมวิธีผสมในสัดส่วนที่ถูกต้องแล้วทำการดำหรือกระทุ้งทรายทรายจะเกาะยึดตัวกันเป็นรูปร่างตามกล่องไส้แบบนั้นตามความต้องการ หลังจากนั้นก็ทำการถอดไส้แบบนั้นออกแล้วนำไปเข้าเตาอบต่อไป มีอยู่ 7 ชนิด

2.4.4.1 Half Core Box ทำเป็นรูปทรงกระบอก มีอยู่ซีกเดียวไม่มีฝาปิด

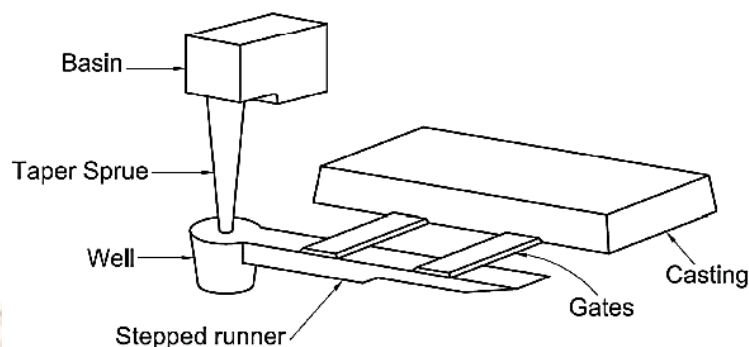
2.4.4.2 Slab or Dump Core Box มีอยู่ซีกเดียวเช่นกันและไม่มีฝาปิด เมื่อใส่ทรายลงไปให้กระทุ้งให้ได้ระดับของทึบบน แล้วทำการปรับอัตราส่วนเกินให้เรียบ แล้วนำแผ่นรองมาประกบด้านบนอีกทีก่อนที่จะทำการพลิกกล่องใส่แบบคว่ำลง แบบนี้นิยมทำเป็นรูปสี่เหลี่ยม สามเหลี่ยม หรืออื่นๆก็ได้

2.4.4.3 Split Core Box เป็นกล่องแบบ 2 ซีกมีฝาปิด-เปิดอยู่ด้านใน และใช้ C-Clamp ยึดประกบกันหรือใช้สลักประกบกันก็ย่อมได้

2.5 ทฤษฎีระบบป้อนจ่ายน้ำโลหะ (ประศาสตร์, 2520)

งานหล่อโลหะจะมีคุณภาพดีหรือไม่ขึ้นอยู่กับความสำเร็จในการบรรจุโลหะเหลวเข้าสู่โพรงแบบ มืองค์ประกอบสำคัญหลายประการที่ต้องคอยควบคุมในการเทหล่อ เช่น ต้องพิจารณาถึงธรรมชาติ และชนิดของโลหะขณะที่มันอยู่ในสถานะเป็นของเหลว เป็นต้นว่า คุณสมบัติการไหล การแข็งตัว การหดตัว การดูดกลืนแก๊ส และอื่นๆ หากโลหะที่นำมาเทหล่อไม่เกิดออกไซด์ ไม่ดูดกลืนแก๊ส ไม่หดตัว เป็นโลหะเหลวที่มีเนื้อผสมเดียวกันตลอด และอื่นๆ ซึ่งถ้าได้โลหะเหลวที่มีคุณสมบัติดังกล่าวนี้ จะทำให้สามารถผลิตชิ้นงานหล่อได้ง่ายมีคุณภาพสูง แต่แท้ที่จริงนั้นโลหะเหลวจะมีคุณสมบัติที่ดีดังกล่าว ครบถ้วนทุกประการ นั่นคือ ชิ้นงานหล่อจะมีคุณภาพสมบูรณ์ดีหรือไม่จำเป็นต้องควบคุมการปฏิบัติงานที่สำคัญ 3 ประการด้วยกันคือ การควบคุมการเทให้ถูกต้อง การป้อนเติมให้เพียงพอ การคุมการแข็งตัวให้เหมาะสม การเทโลหะ การขนย้ายโลหะเหลวจากเตาหลอมแล้วนำไปบรรจุเข้าสู่โพรงแบบด้วยเทคนิคและกรรมวิธีที่ถูกต้องนั่นเอง

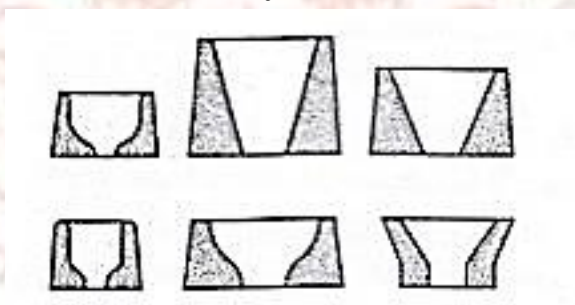
2.5.1 ระบบรูเทของโพรงแบบ (Gating System) คุณสมบัติประจำตัวของโลหะเหลวเป็นต้นว่า การแข็งตัว การหดตัว การเกิดออกไซด์ การดูดกลืนแก๊ส อื่นๆ คุณสมบัติเหล่านี้จะมีอิทธิพลต่อการออกแบบของระบบรูเท หากพิจารณาการแข็งตัวของชิ้นงานจะพบว่าโลหะเริ่มแข็งตัวจากส่วนนอกที่ติดกับผนังโพรงแบบก่อนแล้วจึงมุ่งตรงเข้าสู่ใจกลางหรือการแข็งตัวของชิ้นงานจะเริ่มจากส่วนที่บางที่สามารถคายความร้อนได้เร็วเพราะพื้นที่ผิวมาก แล้วจะแผ่ขยายการแข็งตัวมุ่งสู่เข้าหาส่วนซึ่งเป็นจุดร้อนและคายความร้อนได้น้อยกว่า ดังนั้นการออกแบบระบบรูเทจะต้องจัดไว้ในตำแหน่งที่เหมาะสม เช่นตำแหน่งที่แข็งตัวช้า ในบางครั้งอาจจะต้องใช้อิทธิพลจากสิ่งอื่นมาช่วยในการควบคุมการแข็งของโลหะ เป็นต้นว่า หัวป้อน ทุ่นเย็น สารฉนวนและสารคายความร้อน การออกแบบระบบรูเทจะต้องสามารถป้องกันการแทรกผ่านของแก๊สและดักกรองสิ่งสกปรกไว้ไม่ให้ไหลรวมโลหะเข้าสู่โพรงแบบส่วนต่างๆของระบบรูเททั้งหมด



ภาพที่ 2-8 ระบบรูเทของโพรงแบบ (ศุภฤทธิ์, 2544)

โลหะเหลวจะถูกเทลงที่ถ้วยเทหรือแอ่งเทซึ่งวางมันไว้เหนือปากรูเท แล้วโลหะเหลวไหลลงผ่านตลอดรูเทหักมุมติดตามแนวราบของรูวิ่ง ไหลผ่านรูเข้าเลยไปบรรจุในโพรงแบบ

2.5.1.1 ถ้วยเท โลหะเหลวจากเบ้าเทไหลตกกระทบที่ตำแหน่งนี้ก่อนผ่านไปบรรจุโพรงแบบเพื่อช่วยให้ชิ้นงานมีคุณภาพดีการออกแบบแอ่งเท จะต้องให้สามารถกันดักกรองสิ่งสกปรกต่างๆ กากขี้ตะกรัน ออกจากโลหะเหลวไว้ให้ได้และลักษณะของถ้วยเททางแยกต่างหากหรือแต่งทรายที่ปากรูเทบนหีบให้มีลักษณะเป็นรูปกรวย หรือรูปอย่างอื่น ดังแสดงในภาพที่ 2-12 ถ้วยเทนี้สามารถช่วยให้เทโลหะได้สะดวกไม่หกเลอะเทอะ โลหะจะลงสู่โพรงแบบโดยตรง



ภาพที่ 2-9 ลักษณะของถ้วยเทแบบต่างๆ (ประศาสน์, 2520)

2.5.1.2 รูเท เป็นส่วนที่สองของระบบที่โลหะต้องไหลผ่านไปบรรจุโพรงแบบ โดยธรรมชาตินั้นกระแสไหลของของเหลวจะลดพื้นที่หน้าตัดลงเรื่อยๆ และมีความเร็วเพิ่มขึ้น และมีขนาดไม่พื้ตพอดีกับขนาดของลำกระแสไหลตกของโลหะแล้วทำให้แก๊สสามารถแทรกเข้าไปในกระแสโลหะเหล่านั้นได้

จากสมการ

$$H_s = h - \frac{p^2}{2Hc} \quad (2-2)$$

H_c = ความสูงของชิ้นงานหล่อ หรือความหนาของชิ้นงานหล่อ (mm)

H_s = ความสูงของรูเท (mm)

h = ความสูงทั้งหมด (mm)

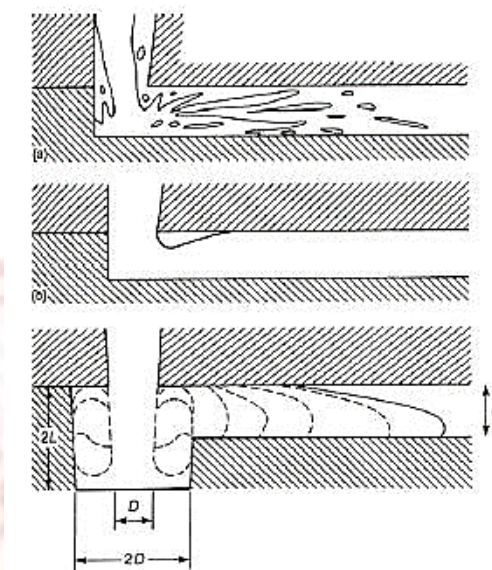
p = ความสูงของโพรงแบบจากหน้าผา (mm)

2.5.1.3 ที่กันรู (Sprue Base) จะมีบ่อพัก (Well) ซึ่งทำหน้าที่เป็นเบาะรองรับแรงกระแทกของโลหะเหลวจึงทำให้เกิดการกัดเซาะที่กันรูเท และช่วยตัดปัญหาเรื่องความดันต่ำในกระแสโลหะนั้น ซึ่งช่วยยับยั้งการแทรกผ่านของแก๊สได้บ้าง เพราะบ่อพักที่กันรูเทนี้สามารถลดความเร็วของกระแสโลหะที่ผ่านรูวิ่งลงได้ถึง 10% ขนาดของบ่อพักที่กันรูเทนี้สามารถกำหนดได้จากประสบการณ์และความชำนาญ หรืออาจใช้ตัวเลขง่ายๆดังนี้

ตารางที่ 2-1 ขนาดแอ่งพักโลหะเหลว (ประศาสน์, 2520)

หน้าตัดรูวิ่ง	รูวิ่งหน้าตัดแคบและลึก	รูวิ่งมีหน้าตัดกว้างตื้นหรือรูปสี่เหลี่ยม
ความโต	2.5 เท่าของความกว้างรูวิ่ง (รูวิ่งคู่, รูวิ่งเดี่ยว)	2.24 เท่าของ(ขนาดโตที่กันรูเท) (ใช้ได้ทั้งรูวิ่งคู่และเดี่ยว)
ความลึก	เท่ากับความลึกของรูวิ่ง	เท่ากับความลึกของรูวิ่ง

2.5.1.4 โดยทั่วไปรูเทโลหะเหลวจะมีหน้าตัดเป็นวงกลมและถูกจัดวางให้อยู่ในแนวตั้งปกติจะมีรูเทสองชนิดที่นิยมนำมาใช้กัน คือ รูเทแบบเท่ากันหรือทรงกระบอกกับรูเทแบบกรวยเรียวเล็กลง ทRAYที่ใช้ทำรูเทต้องทำการอัดให้แน่นมากที่สุด และถ้าจำเป็นก็ควรทำแอ่งพักน้ำโลหะ ดังแสดงในภาพที่ 2-10 การออกแบบทางวิ่ง (Runner) และทางเข้า (Ingate หรือ Gate) ทางวิ่งน้ำโลหะควรเป็นแบบสี่เหลี่ยมคางหมูหรือรูปครึ่งวงกลม เพื่อให้เกิดความสะดวกในการวางที่หน้าผาของหีบ ในขณะที่ทำแบบหล่อทราย พื้นที่หน้าตัดยังมีขนาดโตมากจะยิ่งช่วยลดอุณหภูมิของน้ำโลหะลงได้มากขึ้น และยังช่วยดักสิ่งสกปรกที่มากับน้ำโลหะก่อนเข้าสู่แบบหล่อแต่ทำให้สิ้นเปลืองน้ำโลหะมากขึ้น



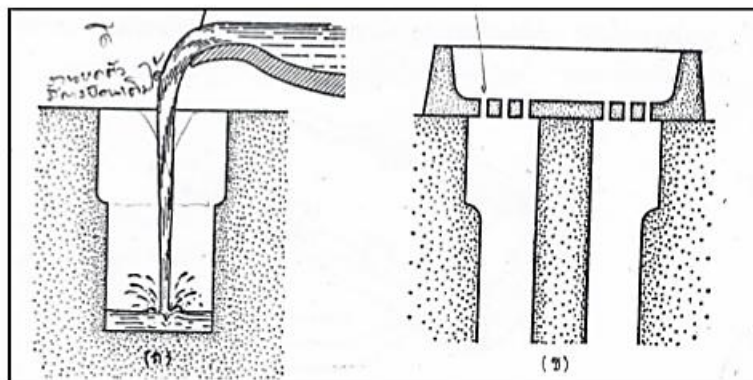
ภาพที่ 2-10 ช่องทางไหลระหว่างรูเทกับรูวิ่ง (John Cambell, 2011)

เมื่อเทโลหะลงรูเทจะไหลเข้ามู่มู่รูวิ่งภายในโลหะเหลวมีแรงเฉื่อยหรือพลังงานจลน์ของการไหลเกิดขึ้น จึงทำให้กระแสโลหะไหลเตลิดไปยังปลายสุดของรูวิ่งซึ่งเรียกว่า ส่วนขยายรูวิ่ง (runner extension) ฉะนั้นส่วนปลายยื่นนี้จึงทำหน้าที่กักเก็บหรือบรรจุโลหะเหลวที่เย็น สิ่งสกปรกต่างๆ เช่น กากโลหะ ออกไซด์ ฟองอากาศ และเศษทรายร่วงเนื่องจากการไหลของกระแสโลหะ อีกทั้งยังช่วยรับแรงดันของกระแสไหลของโลหะไว้ จึงทำให้แรงดันลดลงก่อนเข้าบรรจุโพรงแบบ ดังนั้นระบบรูเทที่สมบูรณ์จะต้องมีปลายยื่นเข้ารูวิ่งนี้อยู่ด้วย แต่ชิ้นงานหล่อบางรูปอาจไม่มีรูวิ่งเลยก็ได้ เช่น งานหล่อที่ใช้รูเข้าด้านบน

2.5.2 การวางตำแหน่งรูเข้าในโพรงแบบ

การออกแบบตำแหน่งของรูเข้าในโพรงแบบ จะแบ่งออกได้เป็น คือ รูเข้าด้านบน (Top Gate) รูเข้าที่ด้านล่าง (Bottom Gate)

2.5.2.1 รูเข้าด้านบน โดยปกติชิ้นงานหล่อที่ใช้รูเข้าด้านบนมักจะมีลักษณะเป็นชิ้นเล็ก ๆ หรือบางถ้าหากเป็น ชิ้นงานใหญ่โตที่ใช้โลหะจำนวนมาก ๆ แล้วโพรงแบบจะต้องมีความแข็งแรงมากเป็นพิเศษเพราะต้องต้านทาน การไหลเซาะและแรงดันกระแทกของโลหะ โลหะที่ไหลเข้าโพรงแบบทางด้านบน จะเกิดการไหลวนมาก จึงมีแก๊สแทรกผ่านและไหลเซาะรุนแรงการสร้างโพรงแบบต้องเลือกใช้วัสดุที่แข็งแรงมากกว่ารูเข้าด้านบนอาจออกแบบใช้พิเศษขึ้น เพื่อลดความดันและช่วยกรองกากโลหะและสิ่งสกปรกอื่น ๆ โดยการออกแบบให้รูเข้า มีขนาดเล็กลงแต่ใช้จำนวนหลายอันรวมกัน เรียกว่า รูเข้าแท่งดินสอ (Pencil Gate) ดังแสดงในภาพที่ 2-11 รูเข้าแท่งดินสอนี้จะทำให้การไหลวนมากยิ่งขึ้น จึงไม่เหมาะกับโลหะที่เป็นออกไซด์และการดูดกลืนแก๊สได้ง่าย



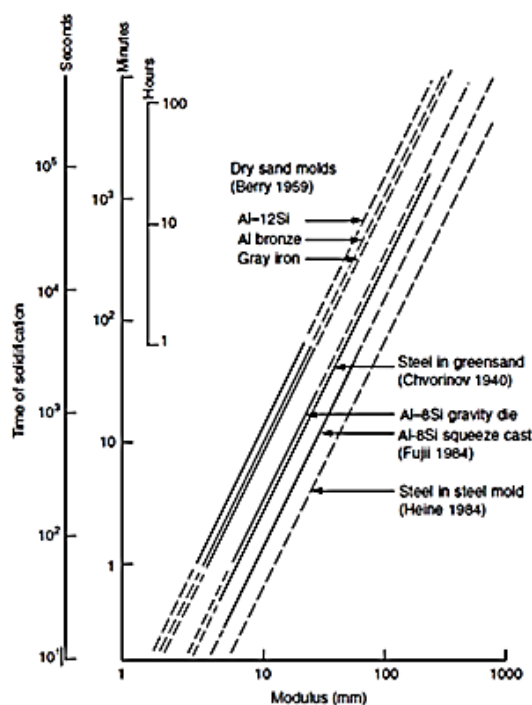
ภาพที่ 2-11 แสดงลักษณะรูปเขื่อนหน้าของโพรงแบบ (ประศาสตร์, 2520)

2.5.2.2 รูเขื่อนหน้าหรือเขื่อนล่าง พื้นทรายระหว่างหน้าผาของหีบสามารถสร้างรูเขื่อนได้ง่ายและสะดวกทั้งยังสามารถเพิ่มเติมส่วนพิเศษอื่น ๆ เช่น Skim Bob , Relief Sprues , Atmo Spheric Head, Whirlgate, Strainer และอื่น ๆ อีกได้โดยง่าย ดังแสดงในภาพที่ 2-13 และรูเขื่อนหน้าผาได้แสดงในภาพที่ 2-13 (ยกเว้นเฉพาะที่โพรงแบบ ทั้งหมดฝังอยู่ในหีบบนทั้งหมด ซึ่งตำแหน่งของรูเขื่อนจะอยู่ด้านล่างของโพรงแบบ) โลหะเหลวที่ไหลผ่านรูเขื่อนหน้าผาไหลตกคล้ายน้ำตก โลหะเหลวล้นซึ่งอาจเกิดการวนขึ้นได้ง่าย แต่สามารถทำลดลงได้บ้างด้วยการออกแบบให้รูเขื่อนมีพื้นที่หน้าตัดแบนกว้าง ซึ่งจะทำให้โลหะเหลวไหลอาบผนังโพรงแบบมีความเร็วต่ำ จึงช่วยให้สามารถลดแรงกระแทกของกระแสไหลตกของโลหะต่อผนังโพรงแบบหรือก้อนใส่แบบส่วนใหญ่ได้ ลักษณะการออกแบบเช่นนี้คงยังจำได้ว่าเป็นระบบรูเทกลุ่มรั่วความดันกด

ก่อนที่จะออกแบบรูเทนั้นจะต้องทราบเวลาในการเท โดยปกติเวลาที่ใช้ในการเทโลหะเหลวเข้าแบบหล่อทราย (t)

$$\text{สมการ} \quad t = (0.05 - 0.1) \times t_f \times (H_c / H_s) \quad (2-3)$$

โดยที่ t_f = เวลาของการแข็งตัวของโลหะเหลว (sec.)
 H_c = ความสูงของชิ้นงานหล่อ หรือความหนาของชิ้นงานหล่อ (mm)
 H_s = ความสูงของรูเท (mm)
 t = เวลาที่ใช้เทน้ำโลหะโดยประมาณ (sec)

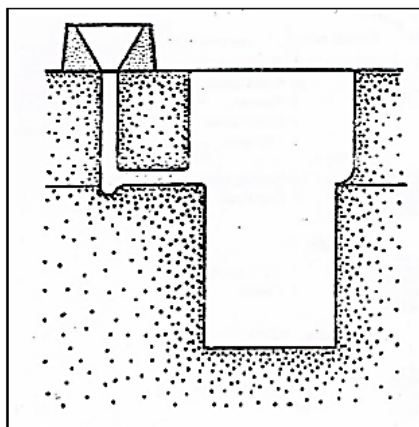


ภาพที่ 2-12 กราฟเวลาแข็งตัวของโลหะเหลวเทียบกับโมดูลัส (ประศาสตร์, 2520)

เวลาในการแข็งตัวของโลหะเหลวแต่ละชนิดไม่เท่ากัน สามารถหาค่า Modulus จากสมการด้านล่างเพื่อเปรียบเทียบในกราฟเวลาในการแข็งตัวของโลหะเหลว

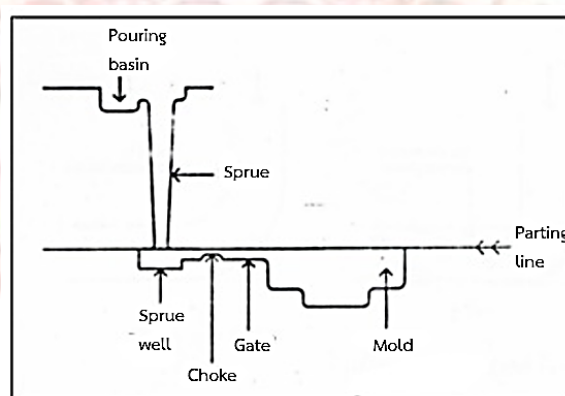
จากสมการ
$$\text{Modulus} = \text{Casting Volume (mm}^3\text{)} / \text{Surface Area (mm}^2\text{)} \quad (2-4)$$

ดังนั้นระบบรูเทที่มีตำแหน่งรูเข้าด้านล่างของโพรงแบบ จะต้องกำหนดให้ปากรูเข้ามีพื้นที่หน้าตัดโตขึ้นเพื่อป้องกันการเทโลหะเหลวไม่เต็มโพรงแบบ เพราะโลหะภายในโพรงแบบจะแข็งตัวก่อน



ภาพที่ 2-13 แสดงลักษณะรูเข้าหน้าผ้าของโพรงแบบ (ประศาสตร์, 2520)

2.5.3 ในระบบรูเทตรงส่วนที่ติดกับชิ้นงานมักมีพื้นที่หน้าตัด เพื่อใช้เป็นตำแหน่งบังคับหรือควบคุมการไหลของโลหะที่ผ่านเข้าสู่โพรงแบบ พื้นที่หน้าตัดส่วนแคบนี้เรียกว่า คอคอด (Choke) ดังแสดงให้เห็นชัดเจน ในภาพที่ 2-14 โลหะที่ไหลผ่านคอคอดนี้จะมีความเร็วสูงขึ้นจึงทำให้การไหลนั้นเกิดการวนขึ้นภายในโพรงแบบ แต่การมีข้อนั้นจะช่วยให้โลหะเหลวล้นเอ่อขึ้นไป ตลอดเวลาทำให้ภายในระบบรูเทเกิดความดันกดลง (Back Pressure) จึงมั่นใจได้ว่าโลหะเหลวไหลผ่านระบบรูเทเข้าบรรจุเต็มโพรงแบบอย่างแน่นอน นอกจากนั้นยังทำให้การไหลของโลหะภายในระบบมีความเร็วต่ำ อาจทำให้กากโลหะ ชี้ตะกรัน และสิ่งสกปรกอื่นๆ ที่มีความหนาแน่นต่ำจะได้ลอยตัวออกไปเกาะติดกับผนังด้านข้างหรือเพดานของรูวิ่งและการไหลมีความเร็วต่ำจะทำให้การเซาะกร่อนผนังทรายของระบบรูเทลดน้อยลง



ภาพที่ 2-14 ระบบรูเทที่แสดงให้เห็นส่วนคอคอด (ประศาสตร์, 2520)

แต่เนื่องจากความเร็วของโลหะเหลวจริงจะไม่เท่ากับความเร็วที่คำนวณได้เนื่องจากแรงเสียดทานของโลหะเหลวที่ผนังแม่พิมพ์ การแข็งตัวของโลหะเหลวในขณะที่ไหลเข้าสู่แม่พิมพ์ความหนาของขนาดแม่พิมพ์และตัวแปรอื่นๆ

$$V = c\sqrt{2gH_s} \quad (2-5)$$

โดย V = ค่าความเร็วของโลหะเหลว ณ ใดๆ
 c = สัมประสิทธิ์ของการสูญเสีย ($C = 0.3-0.5$)
 g = ค่าแรงโน้มถ่วง (9810 mm/s^2 หรือ 9.810 m/s^2)
 H_s = ความสูงของรูเท (mm)

ในระบบรูเทอาจมีส่วนคอคอยู่ตำแหน่งใดก็ได้เพื่อทำหน้าที่ควบคุมการไหลของโลหะเหลว ดังนั้นตำแหน่งคอคอยังจึงควบคุมเวลาในการเทโลหะด้วยการคำนวณพื้นที่หน้าตัดของคอคอย่อยอาศัยทฤษฎีของ bernoulli's สรุปออกมาเป็นสูตรคำนวณได้ดังนี้

สมการในการหาพื้นที่หน้าตัดรูเท A

$$\text{จากสมการ} \quad A = \frac{W_c}{\rho \times t \times c \sqrt{2gH_s}} = \frac{V_c}{t \times c \times \sqrt{2gH_s}} \quad (2-6)$$

โดยที่ V_c = ปริมาตรของชิ้นงานหล่อ (mm^3)
 W_c = น้ำหนักของชิ้นงานหล่อ (Kg)
 t = เวลาที่ใช้ในการเท (sec.)
 g = ค่าแรงโน้มถ่วง (9810 mm/s^2)
 c = สัมประสิทธิ์ของการสูญเสีย ($C=0.3-0.5$)
 H_s = ความสูงของรูเท (mm)
 A = ขนาดหน้าตัดของรูเท (mm^2)
 ρ = ความหนาแน่นของโลหะเหลว (Melt Density: g/mm^3)

พื้นที่หน้าตัดของคอคอด (A) หาได้จากสูตรนี้นั้น อย่าลืมว่าเป็นพื้นที่หน้าตัดรวมของคอคอดทั้งหมด บางทีการออกแบบระบบรูเทอาจต้องใช้รู เข้าหลายอันเพื่อกระจายโลหะเหลวเข้าสู่โพรงแบบได้ทั่วถึงทุกทิศทางเพื่อตัดปัญหาตำแหน่งจุดร้อน นั่นคือถ้าระบบรูเทมีรูเข้า 4 อัน รูเข้าแต่ละอันจึงควรมีพื้นที่หน้าตัดเท่ากัน

2.5.4 อัตราส่วนของระบบรูเท

อัตราส่วนของระบบรูเท หมายถึง ความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่หน้าตัดของ รูเทต่อรูวิ่งต่อรูเข้า (Spure Area : Total Runner Area : Total Ingate Area) เช่นระบบรูเทชุดหนึ่งมีรูเท 1 ตารางนิ้ว รูวิ่งเข้าสองทาง ทางละ 1 ตารางนิ้ว นั่นคือระบบรูเทชุดนี้มีอัตราส่วนของระบบเป็น 1 : 2 : 2

ระบบรูเทที่กล่าวมานี้สามารถแบ่งกลุ่มตามอัตราส่วนของระบบได้เป็น 2 กลุ่มด้วยกัน คือ ระบบมีความดัน และระบบไร้ความดัน

2.5.4.1 ระบบรูเทมีความดัน รูเข้าของระบบจะเป็นคอคอด ดังนั้นภายในระบบจึงเต็มไปด้วยโลหะเหลวตลอดเวลา จึงเกิดมีความดัน (Back Pressure) ช่วยดันโลหะให้ไหลบรรจุเต็มโพรงแบบทุกซอกทุกมุม ระบบรูเทกลุ่มนี้มีลักษณะจำเพาะคือ พื้นที่หน้าตัดรวมของรูเข้าต้องมีขนาดเท่ากับหรือเล็กกว่าพื้นที่หน้าตัด รวมของรูวิ่งหรือของรูเท ดังเช่น 1 : 2 : 1 หรือ 1 : 0.75 : 0.5

2.5.4.2 ระบบรูเทกลุ่มไร้ความดันกด โลหะเหลวจะถูกบังคับหรือจำกัดการไหลด้วยคอคอดอยู่ตำแหน่งในช่วงต้นของระบบ หรืออาจกล่าวว่าคอคอดอยู่ที่ก้นของรูเท อัตราส่วนของระบบนี้จะมีสัดส่วนเป็น 1 : 2 : 4 หรือ 1 : 3 : 3 นั่นคือ พื้นที่หน้าตัดของรูเทจะต้องมีขนาดเล็กกว่าพื้นที่หน้าตัดของรูวิ่งหรือรูเข้า การไหลของโลหะภายในระบบนี้จะมีความเร็วต่ำ ไหลราบเรียบไม่เกิดการตีวน ระบบรูเทกลุ่มไร้ความดันกดจะมีสิ่งที่ดีกว่าขึ้นเวลาในการป้อนเต็มโลหะเหลวที่ช้ากว่า

2.5.4.2.1 การออกแบบของระบบนี้จะต้องมั่นใจว่า สามารถใช้โลหะเหลวไหลผ่านไปบรรจุโพรงแบบได้เต็ม ทั้งนี้ เนื่องจากว่าที่ปากรูเข้านั้นโลหะเหลวจะไม่มี ความดันกดช่วยผลักดัน เพราะความดันถูกยับยั้งไว้โดยคอคอดที่ก้นรูเทนั่นเอง

2.5.4.2.2 ระบบรูเทนี้ไม่สามารถควบคุมปริมาณของโลหะเหลวที่ไหลผ่านรูเข้าหลายอันให้มีปริมาณเท่ากันได้ เนื่องจากว่าพลังงานจลน์ของกระแสไหลทำให้โลหะเหลวไหลไปตามความยาวของรูวิ่ง และจะผ่านรูเข้าสู่ โพรงแบบในอันที่อยู่ห่างไกล

2.5.4.3 ในการเทน้ำโลหะลงสู่แบบหล่อ น้ำโลหะแรกที่เข้าสู่แบบส่วนมากจะมีสิ่งแปลกปลอมปนอยู่สูง ดังนั้นต้องทำการป้องกันไม่ให้น้ำโลหะแรกเข้าสู่แบบ ตัวอย่างเช่น การใช้รูวิ่งที่ยาวออกไป (Runner Extension)

2.5.4.3.1 การกำหนดเวลาในการเทที่ไม่เหมาะสม ถ้าหากเวลาในการเทมากหรือน้อยเกินไป จะส่งผลทำให้เกิดข้อบกพร่องหรือสิ่งปลอมปนขึ้น

2.5.4.3.2 การทำรูโอ (Venting) ถ้าหากทำไม่เหมาะสมหรือมีจำนวนไม่เพียงพอ จะส่งผลทำให้แก๊สที่เกิดขึ้นภายในแบบไม่สามารถระบายออกได้หมด ซึ่งทำให้แก๊สส่วน ที่เหลือทำปฏิกิริยากับน้ำโลหะได้

2.5.4.3.3 ในกรณีที่ชิ้นงานมีขนาดใหญ่ การกำหนดขนาดและรูปร่าง ของรูวิ่งและรูเข้าที่ไม่เหมาะสม อาจทำให้น้ำโลหะเข้าสู่แบบไม่สม่ำเสมอ เกิดการไหลแบบไหลวนขึ้นได้

2.6 ทฤษฎีวัสดุงานหล่อ (ประศาสตร์, 2520)

2.6.1 อะลูมิเนียม เป็นโลหะที่มีการใช้อย่างกว้างขวาง ในอุตสาหกรรมก่อสร้าง บรรจุภัณฑ์ และวิศวกรรม ทั่วไป เนื่องจากมีน้ำหนักเบา (Light Metals) อะลูมิเนียมมีความหนาแน่นน้อย และมีกำลังวัสดุต่อน้ำหนักสูง จึงนิยมใช้เป็นเครื่องใช้ต่างๆ ตลอดจนชิ้นส่วนบางอย่างในเครื่องบิน จรวด ชีปนาอู และอุปกรณ์ในรถยนต์ เพื่อลดน้ำหนักของรถให้น้อยลง ส่งผลให้เกิดการประหยัดเชื้อเพลิง อะลูมิเนียมมีความสามารถในการยืดตัวสูง สามารถขึ้นรูปด้วยกรรมวิธีต่างๆโดยไม่เสี่ยงต่อการแตกหัก มีจุดหลอมเหลวต่ำ หล่อหลอมง่ายและมีอัตราการไหลตัวสูง

อะลูมิเนียมเป็นโลหะที่ไม่เป็นพิษต่อร่างกายมนุษย์ จึงใช้ทำภาชนะหุงต้มอาหารได้เป็นอย่างดี และสามารถแทนที่ทองแดงได้เพราะมีความต้านทานไฟฟ้าอยู่ในเกณฑ์ต่ำ ผิวหน้าของอะลูมิเนียมบริสุทธิ์มีดัชนีการสะท้อนแสงสูง จึงใช้ทำแผ่นสะท้อนในแฟลชถ่ายรูปจานสะท้อนแสงในคอมพิวเตอร์ ไฟหน้ารถยนต์ มีความทนทานต่อการเกิดเป็นสนิมและการผุกร่อนในบรรยากาศที่ใช้งานโดยทั่วไปได้ดี

ตารางที่ 2-2 คุณสมบัติของอะลูมิเนียมเทียบกับเหล็ก

คุณสมบัติทางฟิสิกส์		
สัญลักษณ์ทางเคมี	Al	Fe
ความหนาแน่น	2.70 g/cm ³	7.874 g/cm ³
จุดหลอมเหลว	660.32 °C	1538 °C
ความร้อนของการกลายเป็นไอ	1800 °C	2861°C
ความร้อนจำเพาะ	(25 °C) 24.200 J/(mol.K)	25.10 J/(mol.K)

2.6.2 ทรายธรรมชาติ สำหรับหล่ออลูมิเนียมผสมทุกชนิด มีส่วนผสมและคุณสมบัติดังนี้

2.6.2.1 ทรายขนาดตาม A.F.S Fineness No. 130-200

2.6.2.2 ดินเหนียว 12-18%

2.6.2.3 ความชื้น (น้ำ) 5-7%

2.6.2.4 อัตราลมผ่าน (ขณะขึ้น) 10-25%

2.6.2.5 ทนแรงอัด (ขณะขึ้น) 5-10 PSI

2.6.3 ทรายสังเคราะห์ สำหรับอลูมิเนียมผสมที่ต้องการผิวเรียบมาก มีส่วนผสมและคุณภาพดังนี้

2.6.3.1 ทรายขนาดตาม A.F.S Fineness No. 100-170

2.6.3.2 เป็นไทโทไนท์ 6-12 %

2.6.3.3 ความชื้น (น้ำ) 3-5%

2.6.3.4 อัตราลมผ่าน (ขณะขึ้น) 30-60%

2.6.3.5 ทนแรงอัด (ขณะขึ้น) 6-9 PSI

2.6.4 ดินเหนียว

ดินเหนียว เป็นดินที่เกิดจากตะกอนที่พัดพามาทับถมกัน ธรรมชาติของดินเหนียวจะประกอบด้วย แร่เคลโอไลไนท์ (Kaolinite) เป็นส่วนใหญ่โดยแร่เคลโอไลไนท์ที่พบในดินเหนียว มักมีผลึกที่ไม่สมบูรณ์และมีขนาดเล็กนอกจากนี้ยังพบแร่ดินชนิดอื่นๆ อาทิ มอนมอริลโลไนท์ (Monmorillonite) อิลไลต์ (Illite) ควอร์ทซ์ (Quartz) แร่ไมกา (Mica) แร่เหล็กออกไซด์ (Iron Oxide) รวมทั้งมักมีสารอินทรีย์ปะปนอยู่เสมอ ดินเหนียวมีสีต่างๆเกิดจากการมีแร่ธาตุชนิดต่างๆ ในปริมาณที่แตกต่างกัน อาทิ สีดำ เทา ครีม และน้ำตาลดินเหนียวที่มีสีเทาหรือดำนั้น จะมีอินทรีย์วัตถุปนมากส่วนดินเหนียวสีครีมหรือน้ำตาล มาจากแร่เหล็กที่ปะปนอยู่ดินเหนียวมีสมบัติเด่นในการนำมาขึ้นรูปคือ มีความเหนียวและเมื่อแห้งมีความแข็งแรงสูง ทำให้ผลิตภัณฑ์หลังแห้งมีความแข็งแรง แต่อย่างไรก็ตามเมื่อแห้ง ดินเหนียวมักมีการหดตัวสูงซึ่งเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้ผลิตภัณฑ์มีการแตกร้าวดังนั้นจึงไม่นิยมใช้เนื้อดินเหนียวล้วนๆ ในการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์แต่ต้องมีการผสมวัสดุที่ไม่มีความเหนียว อาทิ ดินเชื้อ หรือทรายเพื่อลดการดึงตัวและหดตัว ซึ่งจะช่วยลดปัญหาการแตกร้าว เนื่องจากการหดตัวของดินได้ดินเหนียวหลายชนิด มีช่วงอุณหภูมิที่จะเปลี่ยนไปเป็นเนื้อแก้วว้างซึ่งจะเป็นประโยชน์ คือ ช่วยปรับปรุงเนื้อผลิตภัณฑ์หลังการเผาให้ดีขึ้น

2.6.5 กราไฟต์ (Graphite)

เป็นแร่ธาตุคาร์บอนคริสตัลไลน์โครงสร้างผลึกเป็นโครงสร้างชั้นหกเหลี่ยมการนำไฟฟ้าและเพชรคาร์บอนและท่อนาโนคาร์บอนเป็นธาตุคาร์บอน 60 ธาตุพวกเขาเป็น Allotropes กราไฟต์ มีการใช้กันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมสำหรับการผลิตเตาหลอมที่อุณหภูมิสูงในการถลุงสารหล่อลื่นสำหรับอุตสาหกรรมเครื่องจักรกลขั้วไฟฟ้าและดินสอ วัสดุทนไฟคุณภาพสูงและเคลือบถูกนำมาใช้กันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมโลหะ อุตสาหกรรมไฟฟ้าของตัวเร่งปฏิกิริยาของการแปลงคาร์บอนอิเล็กโทรดของอุตสาหกรรมแบตเตอรี่ อุตสาหกรรมปุ๋ย ฯลฯ วิธีการออกซิเดชันแบบ Graphite Electrolytic Expandable และวิธี Oxide Anode เป็นส่วนผสมของกรดซัลฟิวริกหรือซัลเฟตที่มีสารเติมแต่งเป็นอิเล็กโทรไลต์จำนวนเล็กน้อยในอิเล็กโทรไลต์กราไฟต์ขยายได้โดยใช้วิธีขั้วไฟฟ้าสองแบบของการเกิดออกซิเดชันแบบ Anodic ซึ่งขึ้นอยู่กับกราไฟต์ที่ขยายตัวได้ การเกิดออกซิเดชันของแอโนดและศักย์ภาพสามารถเอาชนะในสนามไฟฟ้าของชั้นกราไฟต์ ขยายระหว่างพลังงานผูกพัน, การแก้ไขระหว่างไอออนในชั้น Cambium ระหว่างสาร หลักการทำงานของกระบวนการออกซิเดชันแบบอิเล็กโทรไลต์แบบขยายกำลังการผลิตไฟฟ้าเป็นส่วนใหญ่ ภายใต้การดำเนินการของสนามไฟฟ้ารวบรวมไอออนจำนวนมากรอบๆกราไฟต์ ที่ขยายได้ทั้งภายในและภายนอกชั้นกราไฟต์ แบบขยายได้ซึ่งมีความเข้มข้นมากขึ้นด้วยความช่วยเหลือจากบทบาทของแรงภายนอกในชั้นกราไฟต์ ขยายตัวขึ้นระหว่างปฏิกิริยาการเกิดออกซิเดชันสร้างกรดกำมะถันกฎหมายไม่เข้มงวดกับความเข้มข้นของออกซิแดนที่สารละลายเข้มข้นออกซิเดชันความเข้มข้นต่ำมีอยู่และผลิตก๊าซที่เป็นอันตรายน้อยลงสารละลายอิเล็กโทรไลต์และน้ำสามารถนำมารีไซเคิล

2.6.5.1 ความต้านทานต่ออุณหภูมิสูง จุดหลอมเหลว คือ 3,850 และจุดเดือด 4,250 องศา แม้โดยการเผาไหม้ที่มีอุณหภูมิสูงพิเศษการสูญเสียน้ำหนักมีขนาดเล็กค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนมีขนาดเล็กกราไฟต์ ที่สามารถขยายได้โดยมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นที่ 2,000 องศา ความสามารถในการขยายตัวของกราไฟต์ได้

2.6.5.2 การเหนี่ยวนำและการนำความร้อน การนำไฟฟ้าของกราไฟต์ ที่สามารถขยายได้นั้นสูงกว่าแร่โลหะที่ไม่ใช่โลหะทั่วไปเป็นร้อยเท่า การนำความร้อนสูงกว่าเหล็กตะกั่วและวัสดุโลหะอื่นๆ ค่าการนำความร้อนลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นแม้ในอุณหภูมิที่สูงมากสามารถขยายกราไฟต์

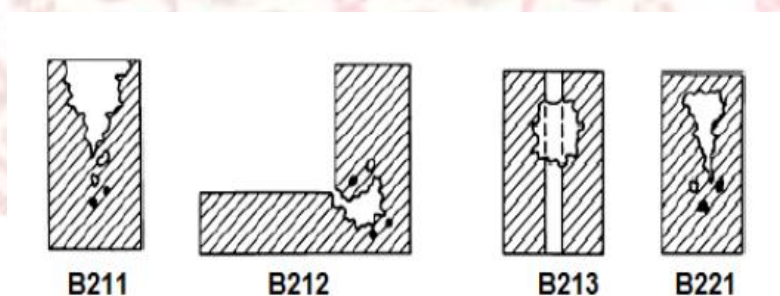


ภาพที่ 2-15 ผงกราไฟต์

2.7 ทฤษฎีข้อบกพร่องงานหล่อ (สุรเชษฐ์, 2551)

งานหล่อโลหะที่ใช้ก่อนทรายแบบหล่อเป็นต้นแบบในการขึ้นรูปนั้น มักจะสามารถพบตำหนิขึ้นงานหล่อได้หลากหลายรูปแบบและเนื่องจากสาเหตุหลายๆ อย่างตำหนิบางชนิดอาจเกิดขึ้นจากสาเหตุหลายอย่าง ซึ่งในบางครั้งอาจเกิดจากสาเหตุเพียงอย่างเดียวและในบางครั้งอาจจะเกิดขึ้นจากหลายๆ สาเหตุพร้อมๆ กัน ในกรณีนี้ขอกล่าวเฉพาะตำหนิที่เกี่ยวข้องเท่านั้น

การหดตัว (Shrinkage) ลักษณะทั่วไปของตำหนิ เป็นโพรงหดตัวของน้ำโลหะส่วนที่แข็งตัวช้าที่สุดเช่นบริเวณทางเข้าน้ำโลหะ มุมเหลี่ยม ของชิ้นงาน ใต้แบบ อาจจะเป็นโพรงเปิดหรือปิดก็ได้ภายในโพรงหยาบและมีลักษณะเป็น Dendrite ยกเว้นในกรณีที่เป็โลหะผสม Eutectic ผงังโพรงจะเรียบ ถ้าเป็นโพรงขนาดใหญ่จะเป็นโพรงเดียว แต่ถ้ามีขนาดเล็กจะกระจาย แสดงไว้ดังภาพที่ 2-16



ภาพที่ 2-16 ลักษณะการหดตัว (สุรเชษฐ์, 2551)

สาเหตุ หลักเกิดจากการลดปริมาตรของน้ำโลหะในระหว่าง การแข็งตัวของน้ำโลหะและบริเวณดังกล่าวน้ำโลหะใหม่ไม่สามารถไหลบ่อนเติมเข้าไปได้ จึงทำให้เกิดการหดตัว และยังมีปัจจัยอื่นดังนี้

2.7.1 อุณหภูมิเทน้ำเหล็กไม่เหมาะสมกับขนาดของรูล้น

2.7.2 ก๊าซที่เกิดจากแบบหล่อ ความดันบรรยากาศ

2.7.3 ผนังโพรงแบบหล่อเกิดการขยายตัว (Deformation)

เนื่องจากได้รับความร้อนจนมีระดับอุณหภูมิสูง หรือเกิดจากความดันของน้ำโลหะในโพรงแบบหล่อ (Static Pressure หรือ Solidification Expansion)

2.8 ทฤษฎีการแก้ปัญหาการหดตัว (ศุภฤทธิ์, 2544)

2.8.1 ปัจจัยประกอบการออกแบบ

2.8.1.1 ออกแบบขึ้นส่วนต่างๆ ให้มีความหนาสม่ำเสมอ เพื่อให้ทำให้มีค่า Modulus (อัตราส่วนพื้นที่ผิวต่อปริมาตร) เท่าๆ กันหรือออกแบบให้ความหนาขึ้นงานค่อยๆ เพิ่มขนาดเข้าหาตำแหน่งที่จะจัดวางรูล้น เพื่อทำให้เกิดการแข็งตัวของน้ำโลหะในทิศทางเดียว (Directional Solidification)

2.8.1.2 ในกรณีที่จำเป็นควรแก้ไขแบบโดยการเพิ่ม Padding เพื่อทำให้เกิดการเย็นตัวอย่างมีทิศทาง และการใช้การกลึงเนื้อโลหะส่วนเกินทิ้งไปในภายหลังการเทน้ำโลหะ

2.8.1.3 เลือกใช้ระดับอุณหภูมิเทน้ำโลหะที่เหมาะสมกับขนาดของรูล้น เพราะว่าถ้าอุณหภูมิ สูงเกินไปก็จะเกิดโพรงหดตัวจากรูล้นเข้าไปจนถึงชิ้นงาน แต่ถ้าอุณหภูมิต่ำเกินไปก็จะทำให้รูล้นเย็นตัวก่อนที่จะขึ้นงานจะเย็นตัว

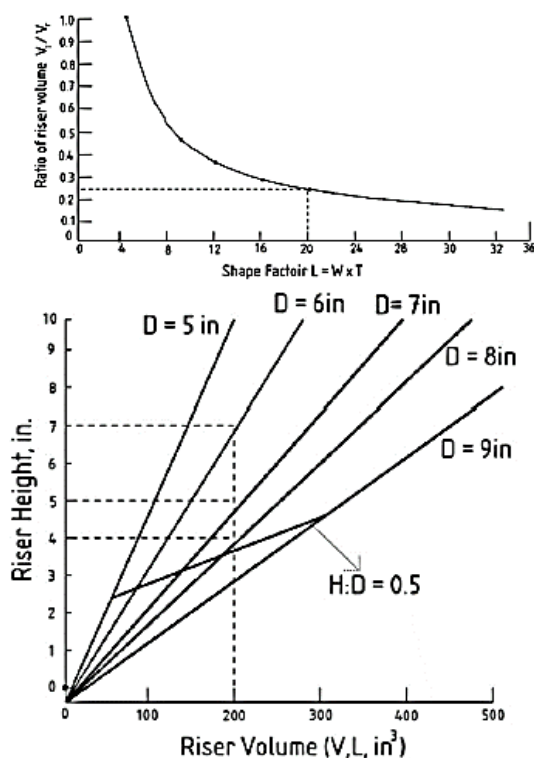
2.8.2 การออกแบบรูล้น (Riser Design) สำหรับตำแหน่งติดตั้งรูล้นนั้นโดยทั่วไปนิยมติดตั้งในบริเวณที่มีความหนา หรือบริเวณจุดต่อต่างๆ เช่น จุดต่อรูปตัว T จุดต่อรูปตัว L เป็นต้น อย่างไรก็ตาม การเลือกตำแหน่งติดตั้งให้ถูกต้องเหมาะสม ต้องอาศัยประสบการณ์อย่างมาก ทั้งนี้ เพื่อให้รูล้นสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ การหาขนาดรูล้น เราสามารถทำการคำนวณหาขนาดของรูล้นได้ด้วยวิธีต่างๆ

2.8.2.1 Shape Factor Method เป็นวิธีการหาขนาดของรูล้น โดยทำการคำนวณหาค่า Shape Factor ซึ่งหาได้จากผลรวมของความยาวกับความกว้างของหน้าตัดชิ้นงานหารด้วยความหนา แล้ว นำค่า Shape Factor ไปเปรียบเทียบกับกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Shape Factor กับสัดส่วนของปริมาตรรูล้นต่อปริมาตรของชิ้นงาน ซึ่งจากสัดส่วนนี้ทำให้เราสามารถนำไปคำนวณหา ขนาดของรูล้นได้ ดังภาพที่ 2-17

เมื่อ	L	คือ ความยาวของหน้าตัดชิ้นงาน
	W	คือ ความกว้างของหน้าตัดชิ้นงาน
	T	คือ ความหนาของชิ้นงาน

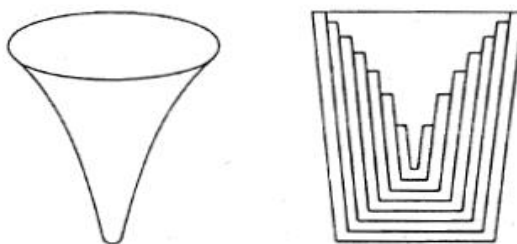
V_r คือ ปริมาตรของรูล้น

V_c คือ ปริมาตรของชิ้นงาน

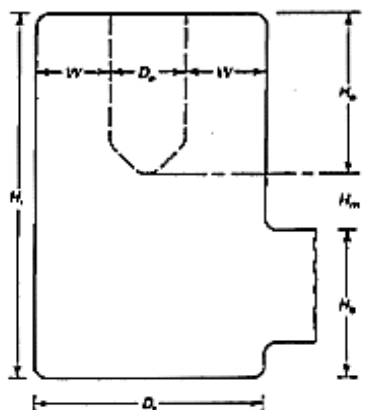


ภาพที่ 2-17 การหาขนาดของรูล้นด้วยวิธี Shape Factor Method (ศุภฤทธิ์, 2544)

2.8.2.2 Geometric Method แต่เดิมนั้นวิธีการนี้ใช้สำหรับการคำนวณหาขนาดของรูล้นด้านข้าง (Side Riser) สำหรับเหล็กหล่ออบเหนียว (Malleable Iron Casting) โดยตั้งอยู่บนสมมติฐานที่ว่า “โพรงหดตัวที่เกิดขึ้นเป็นรูปกรวย (Conical Shape” ดังภาพที่ 2-18 โดยขนาดของโพรงหดตัวขึ้นอยู่กับน้ำหนักของชิ้นงาน และเปอร์เซ็นต์การหดตัว (Shrinkage Percentage) ซึ่งรวมทั้ง การหดตัวของของเหลวและการหดตัวขณะแข็งตัวของโลหะนั้นๆ เราสามารถหาขนาดของรูล้นดัง ภาพที่ 2-19 โดยการเปิดตารางหรือจากโนโมแกรม (Nomogram)



ภาพที่ 2-18 รูปร่างของโพรงหดตัว (ศุภฤทธิ์, 2544)



ภาพที่ 2-19 รูปร่างและขนาดรูล้นด้านข้าง (ศุภฤทธิ์, 2544)

2.8.2.3 Modulus Method วิธีการนี้มีรากฐานมาจาก การคำนวณหาเวลาในการแข็งตัว (Freezing Time) ของชิ้นงานซึ่งสามารถหาได้จากสมการของ Chvorinov

$$t = k^2 \left[\frac{V_c}{A_c} \right]^2 \quad (2-7)$$

เมื่อกำหนดให้ t คือ เวลาในการแข็งตัว

V_c คือ ปริมาตรของงาน

A_c คือ พื้นที่ผิวของงานที่มีการถ่ายเทความร้อน

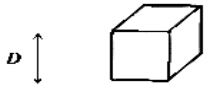
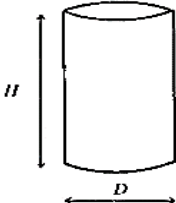
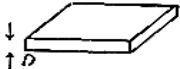
K คือ ค่าคงที่ ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของโลหะและสมบัติของแบบหล่อ

ซึ่งต่อมาได้พัฒนาเพื่อใช้ในการคำนวณหาขนาดของรูล้น โดยใช้ค่า Modulus; M_c

$$M_c = \frac{V_c}{A_c} \quad (2-8)$$

พบว่าเวลาในการแข็งตัวของชิ้นงานนั้นแปรผันตามค่าของ Modulus ดังนั้นถ้าเราทำการออกแบบให้รู ล้นมีค่า Modulus ; M_R สูงกว่าค่า Modulus ของงาน ; M_c แสดงว่ารูล้นจะใช้เวลาในการแข็งตัวนานกว่าชิ้นงาน ส่งผลทำให้รูล้นสามารถป้อนเดิมน้ำโลหะเพื่อชดเชยการหดตัวของงานได้ สำหรับอะลูมิเนียมกำหนดให้ $M_R = 1.2M_c$ (ซึ่งตัวเลขที่ได้นั้นมาจากประสบการณ์) โดยสามารถ สรุปสูตรการหาค่า Modulus สำหรับชิ้นงานที่มีรูปทรงอย่างง่ายได้ดังภาพที่ 2-20

Table 5.2 Modulus of some common shapes

Shape		Modulus			
		100% Cooled area		Base uncooled	
Sphere		$\frac{D}{6}$	$0.167D$	—	—
Cube		$\frac{D}{6}$	$0.167D$	$\frac{D}{5}$	$0.200D$
Cylinder		<i>H/D</i>			
		1.0	$\frac{D}{6}$	$0.167D$	$\frac{D}{5}$
		1.5	$\frac{3D}{16}$	$0.188D$	$\frac{3D}{14}$
		2.0	$\frac{D}{5}$	$0.200D$	$\frac{2D}{9}$
Infinite cylinder	∞	$\frac{D}{4}$	$0.250D$	—	—
Infinite plate		$\frac{D}{2}$	$500D$	—	—

ภาพที่ 2-20 การหาค่า Modulus สำหรับชิ้นงานที่มีรูปร่างอย่างง่าย (ศุภฤทธิ์, 2544)

นอกจากนี้รูปร่างที่ออกแบบไว้ต้องมีปริมาณน้ำโลหะเพียงพอต่อการป้อน เติมน้ำหรือชดเชยการหดตัวที่เกิดขึ้น โดยทั่วไปพบว่าการหดตัวที่เกิดขึ้นกับรูปร่างทรงกระบอกมี ปริมาณประมาณ 14% ของปริมาตรแรกเริ่ม ดังภาพที่ 2-23 (ก) ดังนั้นเราสามารถทำการ คำนวณหาปริมาตรมากที่สุดของชิ้นงานที่รูปร่างทรงกระบอกสามารถป้อนเต็มได้ โดยปราศจากการใช้สารให้ความร้อน (Exothermic)

$$V_{\max (\text{casting})} = V_{\text{Riser}} \times \left(\frac{14 - S}{S} \right) \quad (2-9)$$

เมื่อ $V_{\max (\text{casting})}$ คือ ปริมาตรมากที่สุดของชิ้นงาน

V_{head} คือ ปริมาตรของรูต้น

S คือ ค่าการหดตัวจำเพาะ (Specific Shrinkage) ของโลหะต่างๆ สามารถ

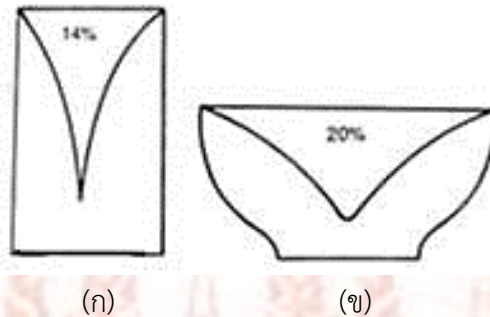
แสดงได้ดังตารางที่ 2-3

ตารางที่ 2-3 ค่าการหดตัวจำเพาะ (Specific Shrinkage) ของโลหะต่างๆ

Casting Alloy	Shrinkage %
Carbon Steel	6.0
Alloy Steel	9.0
Hight Alloy Steel	10.0
Malleable Iron	5.0
Al	8.0
AlCu ₄ Ni ₂ Mg	5.3
AlSi ₁₂	3.5
AlSi ₅ Cu ₂ Mg	4.2
AlSi ₉ Mg	3.4
AlSi ₅ Cu ₁	4.9
AlSi ₅ Cu ₂	5.2
AlCu ₄	8.8
AlSi ₁₀	5.0
AlSi ₇ NiMg	4.5
AlMg ₅ Si	6.7
AlSi ₇ Cu ₂ Mg	6.5
AlCu ₅	6.0
AlMg ₁ Si	4.7
AlZn ₅ Mg	4.7
Cu (Pure)	4.0
Brass	6.5

แต่หากเราเปลี่ยนรูปล้นให้เป็นรูปครึ่งทรงกลม พบว่าการหดตัวที่เกิดขึ้น กับรูปล้นรูปครึ่งทรงกลมมีปริมาณประมาณ 20% ของปริมาตรแรกเริ่ม ดังภาพที่ 2-22 (ข) ดังนั้นเราสามารถทำการคำนวณหาปริมาตรมากที่สุดของชิ้นงานที่รูปล้นรูปครึ่งทรงกลมสามารถป้อนเต็มได้

$$V_{\max(\text{casting})} = V_{\text{Riser}} \times \left(\frac{20 - S}{S} \right) \quad (2-10)$$



ภาพที่ 2-21 แสดงปริมาณการหดตัวของรูปทรงรูลัน

(ก) รูลันทรงกระบอก

(ข) รูลันครึ่งวงกลม (ศุภฤทธิ์, 2544)

2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

T. Kanno (2008) งานวิจัยเรื่อง "ผลของอุณหภูมิการเท องค์ประกอบ ความแข็งแรงของแบบหล่อ และความต้านทานการไหลของโลหะ ต่อโพรงหดตัว (Shrinkage Porosity) ในการหล่อเหล็กกล้าความเหนียวสูงรูปทรงกลม งานวิจัยนี้ศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อการเกิดโพรงหดตัว (Shrinkage Porosity) ในการหล่อเหล็กกล้าความเหนียวสูงรูปทรงกลม ได้แก่ อุณหภูมิการเท องค์ประกอบทางเคมี ความแข็งแรงของแบบหล่อ และความต้านทานการไหลของโลหะ ผลการศึกษาพบว่า การเพิ่มอุณหภูมิการเททำให้เกิดรูพรุนมากขึ้น เนื่องจากการขยายตัวของกราไฟต์ลดลงและการแข็งตัวแบบมัชชี (mushy) เพิ่มขึ้น ปริมาณโพรงหดตัว (Shrinkage Porosity) ต่ำสุดที่องค์ประกอบคาร์บอนเท่ากับ 4.3% ซึ่งเป็นองค์ประกอบยูเทคติกที่การเจริญเติบโตของกราไฟต์สูงสุด นอกจากนี้ ความต้านทานในการจ่ายโลหะเป็นตัวแปรสำคัญที่บ่งชี้การเกิดรูพรุนอย่างแม่นยำ โดยจะเกิดรูพรุนเมื่อค่านี้นี้สูงกว่า 0.7 atm สำหรับแบบหล่อที่มีความแข็งแรงต่ำ เช่น ทรายซิลิกา การผิดรูปของแบบหล่อเป็นสาเหตุหลักของการหดตัว ในขณะที่แบบหล่อที่แข็งแรง เช่น ทรายฟูแรน มีโอกาสเกิดการหดตัวน้อยกว่า งานวิจัยนี้สรุปว่า การควบคุมองค์ประกอบทางเคมี อุณหภูมิการเท โครงสร้างแบบหล่อ ตลอดจนการใช้สารเร่ง เป็นปัจจัยสำคัญในการลดโอกาสเกิดโพรงหดตัว (Shrinkage Porosity)

Zhengxi (2010) งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อจำลองกระบวนการทำให้แข็งตัวและพยากรณ์การเกิดโพรงหดตัว (Shrinkage Porosity) ของโลหะ ในการหล่อบล็อกเครื่องยนต์ที่ทำจากอะลูมิเนียม A356 โดยใช้วิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ ผลการศึกษาพบว่า การทำให้แข็งตัวเริ่มจากบนลงล่าง ซึ่งช่วยในการเลี้ยงโลหะ แต่บางบริเวณมีการพยากรณ์ว่าจะเกิดโพรงหดตัวเนื่องจากการเลี้ยงโลหะไม่เพียงพอ จากการเปรียบเทียบกับชิ้นงานจริง พบว่ามีโพรงหดตัว (Shrinkage Porosity) เกิดขึ้นในบางบริเวณผิว แต่โดยรวมคุณภาพการหล่ออยู่ในเกณฑ์ดี ดังนั้นการจำลองทางตัวเลขนี้สามารถช่วยให้เห็นกระบวนการทำให้แข็งตัวได้ชัดเจนขึ้น และใช้เป็นแนวทางในการปรับปรุงกระบวนการหล่อเพื่อลดการเกิดตำหนิต่อไป

A.K.Gajbhiye, C.M.Choudhari, D.N.Raut (2014) และคณะ กล่าวว่า การหล่ออะลูมิเนียมมีความสำคัญในการใช้งานด้านการผลิตหลายประเภท แต่มักประสบกับข้อบกพร่อง เช่น โพรงหดตัว (Shrinkage porosity) ซึ่งจะลดผลผลิตและเพิ่มต้นทุน เทคนิคการจำลองแบบใหม่ช่วยให้โรงหล่อสามารถจำลองการหล่อและเพิ่มประสิทธิภาพการออกแบบเพื่อลดข้อบกพร่องได้ โพรงหดตัว (Shrinkage porosity) ตัวเกิดขึ้นเนื่องจากอะลูมิเนียมหดตัวเมื่อแข็งตัว อะลูมิเนียมเหลวใช้ปริมาณมากกว่าอะลูมิเนียมแข็ง เมื่อเย็นลง ปริมาตรที่ลดลงจะทำให้เกิดช่องว่างในการหล่อ สิ่งนี้สามารถนำไปสู่จุดอ่อนหรือรอยแตกได้ เดิมทีโรงหล่อใช้การทดลองและข้อผิดพลาดในการออกแบบระบบป้อนเพื่อจัดหาโลหะหลอมเหลวเพิ่มเติม แต่ใช้เวลาและค่าใช้จ่ายสูง การจำลองด้วยคอมพิวเตอร์เป็นทางเลือกที่ดีกว่า นักวิจัยจากอินเดียสร้างแบบจำลองการหล่ออะลูมิเนียมอัลลอยด์ LM6 โดยใช้ซอฟต์แวร์ AutoCAST-X เป้าหมายของพวกเขาคือการลดโพรงหดตัว (Shrinkage porosity) ให้เหลือน้อยที่สุดด้วยการจำลอง ขั้นแรก พวกเขานำเข้าโมเดล 3 มิติลงในซอฟต์แวร์ มันจะสร้างแม่พิมพ์โดยอัตโนมัติและนำไปวิเคราะห์ จากนั้น พวกเขาจำลองการแข็งตัวเพื่อระบุ "จุดร้อน" ซึ่งเป็นพื้นที่สุดท้ายที่จะแข็งตัว จุดร้อนเหล่านี้เป็นจุดที่มีโอกาสเกิดข้อบกพร่องจากการหดตัวมากที่สุด พวกเขาออกแบบระบบตัวป้อนเพื่อป้อนจุดร้อนเหล่านี้ไว้ล่าสุด เครื่องป้อนทรงกระบอกได้รับการปรับให้เหมาะสมทั้งขนาดและตำแหน่งตามการจำลอง การเพิ่มปลอกคายความร้อนช่วยให้ตัวป้อนร้อนขึ้นได้นานขึ้น การจำลองทำนายการลดลงอย่างมีนัยสำคัญของความพรุนในการหดตัว - จาก 3.12 ลูกบาศก์เซนติเมตรเป็นศูนย์ การออกแบบตัวป้อน/ปลอกกรรมช่วยปรับปรุงการแข็งตัวของทิศทางในตัวป้อน การทดลองคัดเลือกนักแสดงยืนยันคำทำนายแล้ว การหล่อแสดงให้เห็นการหดตัวอย่างมากโดยไม่มีตัวป้อน และ

มีความพรุนอยู่บ้างแม้ว่าจะไม่มีตัวป้อนก็ตาม แต่ตัวอย่างที่มีตัวป้อนและบล็อกที่ปรับให้เหมาะสมนั้นปราศจากข้อบกพร่อง สิ่งนี้แสดงให้เห็นว่าการจำลองสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการออกแบบเพื่อลดข้อบกพร่องได้อย่างไร โรงหล่อสามารถปรับปรุงคุณภาพและลดของเสียได้โดยไม่ต้องลองผิดลองถูกทั้งหมด เทคนิคที่ล้ำสมัยนี้จะมีความสำคัญมากขึ้นสำหรับการหล่อที่มีมูลค่าสูง

S.santhi, S. B. Sakri, D. Hanumantha rao and S.sundarrajan (2015) ข้อบกพร่องในการหล่อ เช่น โพรหดตัว (Shrinkage porosity) ยังคงเป็นความท้าทายที่สำคัญสำหรับโรงหล่ออะลูมิเนียม ส่งผลให้คุณสมบัติทางกลลดลง ในการศึกษาเมื่อเร็วๆ นี้ นักวิจัยได้ตรวจสอบวิธีการทำนายและลดโพรหดตัว (Shrinkage porosity) ตัวในการหล่ออะลูมิเนียมอัลลอยด์ A356 โดยใช้การจำลองและการทดลอง การวิจัยพบว่ารูปร่างการหลอมมีบทบาทสำคัญในการก่อตัวของโพรหดตัว (Shrinkage Porosity) ระหว่างการแข็งตัว การจำลองรูปร่างทรงกระบอก ลูกบาศก์ และสี่เหลี่ยม พบว่าการหล่อทรงกระบอกมีความพรุนในการหดตัวสูงสุดที่ประมาณ 3.5% นี่เป็นสาเหตุมาจากการระบายความร้อนที่ช้าลงที่ขอบซึ่งส่งผลต่อรูปแบบการแข็งตัว ในการหาปริมาณรูพรุนที่หดตัว ทีมงานใช้ซอฟต์แวร์ CAD เพื่อสร้างแบบจำลอง 3 มิติจากผลการจำลอง 2 มิติ สิ่งนี้ทำให้มีการแสดงภาพและการประมาณค่าปริมาณข้อบกพร่องในภูมิภาคต่างๆ ได้ดียิ่งขึ้น การจำลองเข้ากันได้ดีกับการทดลองหล่อแบบทดลองในการทำนายเปอร์เซ็นต์โพรหดตัว (Shrinkage porosity) ตัว ด้วยการระบุการออกแบบรูปร่างและสภาวะกระบวนการที่มีแนวโน้มที่จะเกิดรูพรุน โรงหล่อสามารถปรับระบบป้อนและการระบายความร้อนให้เหมาะสมเพื่อลดการหดตัวให้เหลือน้อยที่สุด การจำลองแบบผสมผสานและวิธีการทดลองแสดงให้เห็นถึงความเป็นไปได้ในการทำนายระดับข้อบกพร่องในระหว่างการออกแบบการหล่อ การลดการทดลองในโรงหล่อแบบลองผิดลองถูกส่งผลให้ได้ผลผลิตและคุณภาพที่สูงขึ้น การหาปริมาณรูพรุนการหดตัวที่แม่นยำจะช่วยให้โรงหล่ออะลูมิเนียมสามารถควบคุมปัญหาคุณภาพการหล่อทั่วไปได้ดีขึ้น ด้วยการวิจัยอย่างต่อเนื่อง โรงหล่อสามารถใช้ประโยชน์จากการจำลองกระบวนการหล่อเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการออกแบบและกระบวนการสำหรับส่วนประกอบอะลูมิเนียมที่ปราศจากข้อบกพร่อง

P. Lakum, R.D.Gondaliya และ H.N.Chauhan (2016) การหล่อเป็นกระบวนการที่ซับซ้อนซึ่งมีตัวแปรมากมายที่อาจทำให้เกิดข้อบกพร่องในผลิตภัณฑ์ขั้นสุดท้ายได้ ซอฟต์แวร์จำลองช่วยให้สามารถจำลองกระบวนการหล่อและคาดการณ์ปัญหาที่อาจเกิดขึ้นได้ก่อนที่จะสร้างเครื่องมือ

และแม่พิมพ์ราคาแพง ช่วยให้นักออกแบบสามารถปรับกระบวนการให้เหมาะสมด้วยระบบดิจิทัล ซึ่งช่วยประหยัดเวลาและต้นทุน การศึกษาล่าสุดใช้การจำลองเพื่อวิเคราะห์การหล่อซึบระบายความร้อนด้วยอากาศสำหรับเครื่องยนต์ Volkswagen Beetle เป้าหมายคือการทำนายข้อบกพร่องที่มีโพรงหดตัวและทำความเข้าใจการกระจายตัวของอุณหภูมิระหว่างการแข็งตัว มีข้อบกพร่องด้านความพรุนอย่างมาก ซอฟต์แวร์ ProCast ใช้เพื่อจำลองกระบวนการหล่อทั้งหมด โมเดล 3 มิติของระบบการหล่อและประตูนำเข้ามาจาก Creo ป้อนคุณสมบัติวัสดุของเหล็กหล่อสีเทาและแม่พิมพ์ทรายซิลิกา ProCast จำลองการเติมแม่พิมพ์ด้วยโลหะหลอมเหลว การกระจายอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลง การแข็งตัว และสุดท้ายคือตำแหน่งที่คาดการณ์ไว้และปริมาณโพรงหดตัว (Shrinkage porosity) ตัว ผลการจำลองประสบความสำเร็จแสดงให้เห็นเปอร์เซ็นต์ความพรุน 2.69% ที่กระจุกตัวอยู่รอบๆ รูด้านใน ซึ่งตรงกับข้อบกพร่องในการหล่อจริง เวลาในการแข็งตัวถูกคาดการณ์ไว้ที่ 159.56 วินาที วิเคราะห์สนามอุณหภูมิตลอดกระบวนการด้วย การศึกษานี้แสดงให้เห็นถึงความสามารถของ ProCast ในการคาดการณ์ข้อบกพร่องในการหล่อและพฤติกรรมทางความร้อนก่อนกระบวนการลองผิดลองถูกที่มีค่าใช้จ่ายสูงของการหล่อทางกายภาพ การจำลองแบบดิจิทัลให้ข้อมูลที่สำคัญเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการออกแบบแม่พิมพ์และพารามิเตอร์กระบวนการเพื่อลดความพรุนให้เหลือน้อยที่สุด การใช้การจำลองช่วยให้การหล่อมีประสิทธิภาพและปราศจากข้อบกพร่องมากขึ้น ช่วยประหยัดเวลา แรงงาน และวัสดุของโรงหล่อ เมื่อซอฟต์แวร์จำลองได้รับการปรับปรุง ซอฟต์แวร์ดังกล่าวจะกลายเป็นเครื่องมือที่ขาดไม่ได้สำหรับการออกแบบกระบวนการหล่อ

j. Hardik , K. Nirav และ P. Maniar (2017) โพรงหดตัว (Shrinkage porosity) ตัวเป็นข้อบกพร่องที่พบบ่อย แต่เป็นอันตรายซึ่งเกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการแข็งตัวในการหล่อโลหะ ข้อบกพร่องประเภทนี้จะลดคุณสมบัติทางกลของชิ้นส่วนหล่อ และอาจนำไปสู่ความเสียหายก่อนเวลาอันควรได้ เมื่อเร็วๆ นี้ นักวิจัย Hardik Rathod, Jay K. Dhulia และ Nirav P. Maniar ได้ทำการศึกษาเพื่อคาดการณ์และวิเคราะห์ข้อบกพร่องในการหดตัวในชิ้นส่วนหล่อทรายที่ทำจากอลูมิเนียมอัลลอยด์ LM25 นักวิจัยทำการทดลองกับการหล่อแบบแยกรูปตัว Y ที่แตกต่างกัน 9 แบบซึ่งทำจาก LM25 ทางแยกเหล่านี้ซึ่งมีรูปทรงที่ตัดกันมีแนวโน้มที่จะหดตัวของข้อบกพร่องที่มีรูพรุนในระหว่างการแข็งตัว การหล่อถูกผลิตขึ้นในแม่พิมพ์ทรายสีเขียวโดยใช้วิธีปฏิบัติมาตรฐานในการหล่อเพื่อประเมินผลกระทบของอุณหภูมิการเท โลหะผสม LM25 ถูกเทลงในแม่พิมพ์ที่อุณหภูมิที่แตกต่างกัน

กันสามแบบ ได้แก่ 700C, 725C และ 750C หลังจากการหล่อ ตัวอย่างจะถูกตรวจสอบเพื่อระบุตำแหน่งและขอบเขตของโพรงหดตัว (Shrinkage porosity) ตัวในส่วนประกอบแต่ละส่วนของจุดเชื่อมต่อ ตามที่คาดไว้ ข้อบกพร่องในการหดตัวมีแนวโน้มที่จะก่อตัวใกล้กับศูนย์กลางของทางแยก Y สำหรับอุณหภูมิการเททั้งหมด จากนั้นนักวิจัยได้ใช้ซอฟต์แวร์จำลอง ANSYS เพื่อสร้างแบบจำลองกระบวนการแข็งตัวและคาดการณ์พื้นที่ที่มีโพรงหดตัวผลการจำลองเข้ากันได้ดีกับผลการทดลอง โดยคาดการณ์ตำแหน่งของข้อบกพร่องได้อย่างแม่นยำ งานวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่าการจำลองด้วยคอมพิวเตอร์สามารถเป็นเครื่องมือที่มีประสิทธิภาพในการคาดการณ์ข้อบกพร่องในการหดตัวในการหล่อโลหะ เทคนิคที่ใช้ในที่นี้สามารถนำมาใช้เพื่อศึกษาพฤติกรรมความพูนในระบบโลหะผสมอื่นๆ และรูปทรงการหล่อได้ ด้วยการคาดการณ์การก่อตัวของข้อบกพร่อง วิธีการที่ใช้การจำลองจะช่วยให้โรงหล่อเพิ่มประสิทธิภาพการออกแบบและกระบวนการหล่อเพื่อลดการหดตัวให้เหลือน้อยที่สุด ซึ่งจะช่วยลดอัตราของเสียและปรับปรุงคุณสมบัติทางกล โดยรวมแล้ว งานนี้ช่วยเพิ่มความสามารถในการสร้างแบบจำลอง การคาดการณ์ และควบคุมโพรงหดตัว (Shrinkage porosity) ตัวในระหว่างการหล่อโลหะ

V. Muthuraman, S. Arunkumar และ V. P. M. Baskarlal (2017) การศึกษาใหม่ที่ดีพิมพ์ใน ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences ได้ใช้การวิเคราะห์องค์ประกอบไฟไนต์เพื่อสร้างแบบจำลองกระบวนการแข็งตัวในการหล่อลูกสูบโลหะผสมอะลูมิเนียม-ซิลิคอน การแข็งตัวเป็นส่วนสำคัญของการหล่อโลหะ เนื่องจากการเปลี่ยนจากของเหลวไปเป็นของแข็งจะส่งผลกระทบต่อคุณสมบัติต่างๆ เช่น การหดตัวและความพูนในชิ้นงานหล่อขั้นสุดท้าย การสร้างแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์เป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพในการจำลองกระบวนการที่ซับซ้อนนี้และปรับพารามิเตอร์การผลิตให้เหมาะสม ในงานนี้ นักวิจัยได้พัฒนาแบบจำลองสองมิติของการหล่อและแม่พิมพ์ลูกสูบโลหะผสมอะลูมิเนียม-ซิลิคอนโดยใช้ซอฟต์แวร์ ANSYS แบบจำลองมีเส้นผ่านศูนย์กลางลูกสูบ 0.11 ม. สูง 0.148 ม. ล้อมรอบด้วยแม่พิมพ์ขนาด 0.225×0.24 ม. เมื่อใช้แบบจำลองนี้ ทีมงานจำลองการแข็งตัวภายใต้อุณหภูมิการหล่อเริ่มต้น (700°C และ 800°C) และอุณหภูมิแม่พิมพ์ (100°C, 200°C และ 400°C) ที่แตกต่างกัน การวิเคราะห์ติดตามเส้นโค้งการทำความเย็นและโปรไฟล์อุณหภูมิที่ส่วนบนกลาง และล่างของการหล่อในระหว่างการแข็งตัว ผลลัพธ์แสดงให้เห็นว่าเวลาแข็งตัวขั้นต่ำ 46 วินาทีเกิดขึ้นโดยมีอุณหภูมิเทหล่อ 700°C และอุณหภูมิแม่พิมพ์ 100°C อุณหภูมิเริ่มต้นที่สูงขึ้นจะเพิ่มเวลา

ในการแข็งตัว โดยที่ 800°C และ 400°C อยู่ที่ 285 วินาที ตรงกลางของการหล่อแข็งตัวครั้งสุดท้าย โดยใช้เวลา 46 วินาทีที่อุณหภูมิต่ำสุด นี่แสดงว่าตรงกลางเป็นจุดที่ร้อนที่สุด ส่วนปลายแข็งตัวอย่างรวดเร็วภายใน 1 วินาทีเนื่องจากแม่พิมพ์สูญเสียความร้อนมากขึ้น โดยสรุป แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ให้ข้อมูลเชิงลึกโดยละเอียดเกี่ยวกับผลกระทบของพารามิเตอร์กระบวนการที่มีต่อการแข็งตัว ผลลัพธ์ที่จำลองสามารถเป็นแนวทางในการเพิ่มประสิทธิภาพกระบวนการหล่อจริงเพื่อลดข้อบกพร่องและปรับปรุงคุณภาพในการหล่อโลหะผสมอะลูมิเนียม การศึกษาเพิ่มเติมสามารถขยายความซับซ้อนของโมเดลและความสามารถในการคาดการณ์ได้

D.R. Gunasegarama, D.J. Farnsworthb และ T.T. Nguyena (2019) วิศวกรที่โรงหล่อการผลิตยานยนต์กำลังดิ้นรนกับอัตราของเสียที่สูง เนื่องจากข้อบกพร่องที่มีโพรงหดตัว (Shrinkage Porosity) ในท่อร่วมไอดีอะลูมิเนียมอัลลอยด์ การขัดจังหวะการผลิตเพื่อแก้ไขปัญหาไม่ใช่ทางเลือก ดังนั้นทีมงานจึงหันมาใช้ในการจำลองเชิงตัวเลขและการออกแบบการทดลอง (DOE) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพกระบวนการหล่อแม่พิมพ์ถาวรแบบเสมือนจริง นักวิจัยสร้างแบบจำลองกระบวนการที่มีอยู่เป็นครั้งแรกโดยใช้ซอฟต์แวร์จำลองการหล่อ จากนั้น พวกเขาใช้วิธีการ DOE แบบแฟคทอเรียลเศษส่วน โดยทดสอบพารามิเตอร์กระบวนการที่เป็นไปได้ห้าพารามิเตอร์ที่แต่ละระดับสองระดับ จำเป็นต้องมีการจำลองเพียง 20 ครั้งแทนที่จะเป็น 32 แฟกทอเรียลแบบเต็ม ความหนาของชั้นเคลือบแม่พิมพ์และอุณหภูมิของแม่พิมพ์ถูกระบุว่าเป็นสองปัจจัยที่มีอิทธิพลมากที่สุดในการลดโพรงหดตัว (Shrinkage porosity) ตัว การเพิ่มความหนาของชั้นเคลือบแม่พิมพ์ทำให้อัตราการเย็นตัวและเวลาในการแข็งตัวช้าลง ซึ่งช่วยให้มีเวลามากขึ้นในการไล่ระดับอุณหภูมิภายในให้เท่ากัน ป้องกันไม่ให้จุดร้อนที่แยกออกจากกันซึ่งเกิดโพรงหดตัว (Shrinkage Porosity) การอุ่นแม่พิมพ์ที่อุณหภูมิสูงขึ้นยังช่วยลดอุณหภูมิที่ลดลงในส่วนต่อประสานการหล่อแม่พิมพ์ และลดข้อบกพร่อง โรงหล่อได้ปฏิบัติตามคำแนะนำสูงสุด โดยการเคลือบแม่พิมพ์ให้หนาขึ้น แม้ว่าจะไม่มีการเปลี่ยนแปลงอื่นๆ เพียงอย่างเดียว การทำเช่นนี้เพียงอย่างเดียวก็ลดอัตราเศษของการหล่อที่มีปัญหาได้มากกว่า 13% ต่อปี วิธีการของ DOE ลดเวลาและความพยายามในการจำลองทั้งหมดลง 40% เมื่อเทียบกับวิธีการแบบเดิม งานวิจัยนี้แสดงให้เห็นถึงวิธีการที่มีประสิทธิภาพในการแก้ไขปัญหาการผลิตแบบเสมือนจริง การผสมผสานระหว่างการจำลองเชิงตัวเลขและ DOE ระบุพารามิเตอร์กระบวนการที่ได้รับการปรับปรุงพร้อมทั้งลดต้นทุน เทคนิคดังกล่าวช่วยให้วิศวกรสามารถลดข้อบกพร่องและของเสียได้โดยไม่รบกวนการผลิต

การทดลองเสมือนจริงและ DOE ทางสถิติช่วยให้สามารถปรับปรุงกระบวนการหล่อทางอุตสาหกรรมได้จริง

S. Li, K. Mine, S. Sanakanishi และคณะ (2019) อลูมิเนียมอัลลอยด์มักใช้ในชิ้นส่วนยานยนต์ เช่น ส่วนประกอบของระบบกันสะเทือน เนื่องจากมีอัตราส่วนความแข็งแรงต่อน้ำหนักสูง อย่างไรก็ตาม โพรงหดตัว (Shrinkage porosity) ในระหว่างการหล่อสามารถลดความแข็งแรงและการยึดตัวของชิ้นส่วนสุดท้ายได้ การหล่อแบบ Squeeze เป็นกระบวนการที่ใช้ในการปรับปรุงคุณสมบัติเหล่านี้โดยการใช้แรงดันระหว่างการแข็งตัวเพื่อป้อนโลหะหลอมเหลวไปยังบริเวณที่หดตัว อย่างไรก็ตาม การคาดการณ์ในเชิงปริมาณว่าจะมีโพรงหดตัว (Shrinkage Porosity) มากน้อยเพียงใดสำหรับสภาวะกระบวนการที่กำหนดยังคงเป็นเรื่องที่ท้าทาย นักวิจัยจาก Ahresty Corporation และมหาวิทยาลัย Tohoku ได้พัฒนาวิธีการจำลองแบบใหม่เพื่อคาดการณ์โพรงหดตัว (Shrinkage porosity) ตัวในชิ้นส่วนอะลูมิเนียมหล่อแบบ Squeeze ในเชิงปริมาณ วิธีการของพวกเขาจำลองปริมาตรของโลหะหลอมเหลวที่ไหลลงในแต่ละส่วนของการหล่อในระหว่างการแข็งตัว และเปรียบเทียบกับปริมาตรการหดตัวในพื้นที่นั้น ความดันที่ใช้ระหว่างการหล่อจะถูกนำมาพิจารณาในการคำนวณปริมาตรการไหล นักวิจัยได้ทดสอบวิธีการนี้กับแบบจำลองของการหล่อเพลทด้วยแรงกดที่ต่างกัน ผลการจำลองสามารถคาดการณ์แนวโน้มโดยรวมของขนาดและปริมาณรูพรุนของการหดตัวที่ลดลงที่แรงกดดันที่สูงขึ้นได้สำเร็จ ซึ่งสอดคล้องกับพฤติกรรมในโลกแห่งความเป็นจริง เนื่องจากแรงดันสูงจะทำให้ป้อนได้มากขึ้นเพื่อชดเชยการหดตัว แม้ว่าจะมีแนวโน้มที่ดี แต่การคาดการณ์เชิงปริมาณยังคงต้องได้รับการตรวจสอบด้วยการทดลองหล่อ นักวิจัยวางแผนที่จะประยุกต์วิธีการนี้กับชิ้นส่วนยานยนต์ที่เกิดขึ้นจริงโดยการหล่อแบบบีบ ด้วยการพัฒนาเพิ่มเติม เทคนิคการจำลองนี้อาจกลายเป็นเครื่องมืออันทรงคุณค่าในการปรับพารามิเตอร์กระบวนการให้เหมาะสมและลดข้อบกพร่องในการหดตัวให้เหลือน้อยที่สุด ผลลัพธ์ที่ได้คือการหล่ออลูมิเนียมคุณภาพสูงขึ้นพร้อมคุณสมบัติทางกลที่ดีขึ้น

Z. Jalouli, A. Caillaud และ J. Artozoul (2020) แบบจำลองการคำนวณใหม่ที่ใช้วิธีฟิลต์เฟสสามารถจำลองการก่อตัวของข้อบกพร่องในการหดตัวระหว่างการแข็งตัวของโลหะ นักวิจัยจากสถาบันเทคโนโลยี Arts et Metiers ในฝรั่งเศสได้พัฒนาแบบจำลองเพื่อเชื่อมโยงพารามิเตอร์กระบวนการกับลักษณะทางสัณฐานวิทยาของรูชุมชนที่หดตัวใหญ่ แบบจำลองนี้แสดงถึง

เฟสโลหะเหลวและก๊าซโดยใช้ตัวแปรสนามเฟส C วิวัฒนาการของ C อยู่ภายใต้สมการของ Cahn-Hilliard ที่ได้รับการแก้ไขพร้อมคำตันทางเพื่อจำลองการเกิดนิวเคลียสของช่องว่างก๊าซเมื่อโลหะเย็นตัวลง สมการนี้ใช้ร่วมกับสมการการไหลของของไหลและการถ่ายเทความร้อนเพื่อจับฟิสิกส์ของการแข็งตัว พารามิเตอร์หลักที่ระบุผ่านการไม่กำหนดมิติของสมการควบคุม ได้แก่ แรงโน้มถ่วงและความดันโลหะ ซึ่งควบคุมขนาดและตำแหน่งของการหดตัว การระบายความร้อนที่ช้าลงแสดงให้เห็นว่าทำให้เกิดช่องว่างใกล้พื้นผิว ในขณะที่แรงโน้มถ่วงทำให้ช่องว่างลอยขึ้นด้านบน การจำลองแสดงให้เห็นถึงนิวเคลียสที่เป็นโมฆะ การเติบโต และการรวมตัวกันเป็นการหดตัวขนาดใหญ่ซึ่งคล้ายกับการหล่อแบบทดลอง แบบจำลองนี้ให้ข้อมูลเชิงลึกว่าสถานะของกระบวนการนำไปสู่ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของการหดตัวที่แตกต่างกันอย่างไร วิธีการสนามเฟสแบบใหม่นี้เป็นเครื่องมือจำลองที่มีประสิทธิภาพในการทำความเข้าใจและคาดการณ์ข้อบกพร่องในการหดตัวในโลหะหล่อ ด้วยการเชื่อมโยงพารามิเตอร์กระบวนการเข้ากับสัณฐานวิทยาของการหดตัว แบบจำลองนี้สามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพกระบวนการหล่อและลดข้อบกพร่องได้ วิธีการนี้สามารถปรับปรุงเพิ่มเติมได้โดยใช้ฟิสิกส์ที่ซับซ้อนมากขึ้นและการตรวจสอบกับการทดลอง

A. Alagarsamy และ S. Kumar (2020) การทำความเข้าใจและการป้องกันข้อบกพร่องในการหดตัวในการหล่อเหล็กเหนียว (Ductile Iron) มีแนวโน้มที่จะเกิดข้อบกพร่องเรื่องโพรงหดตัว (Shrinkage Porosity) ซึ่งเกิดขึ้นระหว่างการแข็งตัว การวิจัยล่าสุดได้ให้ข้อมูลเชิงลึกเกี่ยวกับสาเหตุและแนวทางแก้ไขที่เป็นไปได้สำหรับปัญหาทั่วไปนี้ ข้อบกพร่องในการหดตัวมีสองประเภทหลัก หนึ่งคือการหดตัวของของเหลวเมื่อเหล็กหลอมเหลวเย็นลงจากอุณหภูมิการเทไปจนถึงอุณหภูมิการแข็งตัว การหดตัวของของเหลวจึงเกิดขึ้น สิ่งนี้สามารถนำไปสู่การกีดกันของพื้นผิว รอยจม และการหดตัวแบบเปิด หากการหดตัวไม่ได้รับการชดเชย การออกแบบระบบเกตอย่างระมัดระวังเป็นสิ่งสำคัญอย่างยิ่งในการจัดหาโลหะเหลวให้เพียงพอต่อการหดตัวนี้ สองคือ การหดตัวของการแข็งตัวในระหว่างการแข็งตัวแบบยูเทคติก การเปลี่ยนแปลงปริมาตรเกิดขึ้นเมื่อออสเทนไนต์และกราไฟต์ตกตะกอน โพรงหดตัวเพียงเล็กน้อยอาจก่อตัวขึ้นในบริเวณจุดสุดท้ายหรือบริเวณปลายเพื่อแข็งตัว หากการขยายตัวของกราไฟต์ไม่สามารถต้านทานการหดตัวของออสเทนไนต์ได้เต็มที่ การวิเคราะห์ไรเซอร์การ ตัดผ้าไรเซอร์หลังจากการแข็งตัว จะให้ผลการเปลี่ยนแปลงปริมาตรระหว่างการทำความเย็นและการแข็งตัว ข้อมูลนี้สามารถเปิดเผยปัญหาเกี่ยวกับการออกแบบระบบเกตติ้งและไรเซอร์ได้ การ

การแข็งตัวให้เหมาะสมตามหลักการแล้ว เหล็กจะแข็งตัวเต็มที่ในลักษณะยูเทคติก ส่งผลให้มีการแยก และการหดตัวน้อยที่สุด อย่างไรก็ตาม ปัจจัยต่างๆ เช่น อัตราการเย็นตัว การปฏิบัติในการฉีดวัคซีน และปริมาณโลหะผสม ส่งผลต่อการแข็งตัว การควบคุมขนาดเกรนเกรนอสเทนไนต์ที่มีขนาดเล็กลง จะช่วยลดปัญหาการแยกตัวและการหดตัวให้เหลือน้อยที่สุด เคมีของธาตุเหล็กไฮเปอร์ยูเทคติก สามารถช่วยเพิ่มจำนวนเมล็ดพืชและความประณีตได้ Alloying Effects Silicon มีส่วนช่วยในการหดตัวในระดับที่สูงขึ้น คาร์บอนเป็นสิ่งจำเป็นสำหรับการขยายตัวของกราฟไฟต์ แต่ปริมาณที่มากเกินไป อาจทำให้เกิดปัญหาได้ การจำกัดปริมาณโลหะผสมโดยรวม โดยเฉพาะองค์ประกอบที่ขึ้นรูปด้วยคาร์ไบด์ จะช่วยลดแนวโน้มการหดตัว ท้ายที่สุด ข้อบกพร่องในการหดตัวสามารถแก้ไขได้ด้วยการควบคุมอย่างระมัดระวังเกี่ยวกับสารประกอบของเหล็กหล่อเหนียว โครงสร้างจุลภาค และความเข้าใจทางเทคนิคที่ดี การวิจัยและการศึกษาอย่างต่อเนื่องจะช่วยปรับปรุงความสม่ำเสมอและคุณภาพของการหล่อเหล็กเหนียวให้ดียิ่งขึ้น

N. Mahomed (2021) โพรงหดตัว (Shrinkage porosity) ตัวเป็นหนึ่งในข้อบกพร่องที่พบบ่อยที่สุดที่พบในการหล่อโลหะที่ผลิตโดยกระบวนการเช่นการหล่อทราย ความพรุนประเภทนี้เกิดขึ้นเมื่อโลหะที่แข็งตัวไม่สามารถป้อนเติมทดแทนการหดตัวที่เกิดขึ้นเมื่อโลหะเปลี่ยนจากของเหลวเป็นสถานะของแข็ง ผลลัพธ์ที่ได้คือการก่อตัวของช่องว่างหรือรูพรุนภายในการหล่อ ในการหล่อทรายด้วยเหล็ก โพรงหดตัว (Shrinkage porosity) สามารถส่งผลกระทบต่อคุณสมบัติด้านประสิทธิภาพ เช่น ความแข็งแรง อายุการใช้งานความล้า และความต้านทานการกัดกร่อน ดังนั้นโรงหล่อจึงมุ่งหวังที่จะลดความพรุนประเภทนี้ให้เหลือน้อยที่สุดโดยการควบคุมการออกแบบการหล่อ องค์ประกอบของโลหะผสม และพารามิเตอร์กระบวนการอย่างเหมาะสม สาเหตุหลักของโพรงหดตัว (Shrinkage porosity) ตัวคือการหดตัวของการแข็งตัวที่เกิดขึ้นในบริเวณที่โลหะเหลวเมื่อโลหะผสมเหล็กแข็งตัว โลหะเหลวจะหดตัวประมาณ 3-5% เมื่อเปลี่ยนเป็นของแข็ง จำเป็นต้องมีการป้อนวัสดุหลอมเหลวที่มีประสิทธิภาพเพื่อชดเชยการหดตัวนี้ การออกแบบระบบป้อนที่เหมาะสมจะทำให้เหล็กหลอมเหลวเพิ่มขึ้นเพื่อป้อนเข้าสู่บริเวณที่กำลังแข็งตัว ในระหว่างการแข็งตัว เหล็กจะเกิดการเปลี่ยนแปลงเฟส เช่น การก่อตัวของเฟสเฟอร์ไรต์และอสเทนไนต์ การแยกแยะระหว่างเฟสของโครงสร้างจุลภาคที่เกิดขึ้นจริง และความพรุนภายใต้กล้องจุลทรรศน์นั้นจำเป็นต้องเข้าใจวิวัฒนาการของเฟสของเกรนเหล็ก ในบริเวณที่โลหะเหลว แบบจำลอง เช่น เกณฑ์ Niyama ช่วยทำนายการเกิดรู

พรมขนาดเล็กระหว่างเดนไดรต์ ปัจจัยต่างๆ เช่น องค์ประกอบของโลหะผสมและอัตราการเย็นตัว ส่งผลโพรงหดตัวมาตรฐานใช้เพื่อระบุลักษณะโพรงหดตัว (Shrinkage porosity) โพรงเหล่านี้สามารถปรับปรุงแก้ไขปัญหาการหดตัวได้ดีขึ้น เพื่อลดการเกิดโพรงหดตัวซึ่งช่วยให้สามารถผลิตส่วนประกอบเหล็กประสิทธิภาพสูง เช่น วาล์วและปั๊มได้

L. Anna Gowsalya และ E. Afshan (2021) การถ่ายเทความร้อนระหว่างการหล่อโลหะ และ กระบวนการแข็งตัวของโลหะหลอมเหลวถูกทดลองในโพรงแม่พิมพ์นั้นซับซ้อนมาก ในการหล่อทรายซึ่งมักใช้ในการสร้างชิ้นงานที่รูปทรงที่ซับซ้อน ทั้งโลหะและแม่พิมพ์ทรายมีส่วนร่วมในการแลกเปลี่ยนความร้อนผ่านการนำความร้อน การพาความร้อน และการแผ่รังสี เมื่อโลหะเริ่มแข็งตัว ช่องว่างอากาศจะเกิดขึ้นระหว่างโลหะกับแม่พิมพ์ ซึ่งส่งผลต่ออัตราการถ่ายเทความร้อน ดังนั้นการทำความเข้าใจกับการหดตัวของโลหะเมื่อโลหะเปลี่ยนจากของเหลวเป็นสถานะของแข็งจึงทำให้ทราบว่าปริมาณจำเพาะของโลหะจะลดลงอย่างมาก ซึ่งส่งผลให้ชิ้นงานหล่อหดตัวเมื่อแข็งตัว โดยการหดตัวมีสามขั้นตอน: การหดตัวของของเหลว - โลหะเหลวหดตัวเมื่อเย็นลงก่อนที่จะเริ่มแข็งตัว การหดตัวของของเหลว-ของแข็ง - ในช่วงโซนอ่อนซึ่งมีทั้งเฟสของแข็งและของเหลวอยู่ การลดปริมาตรจะเกิดขึ้นทำให้เกิดการหดตัว การหดตัวแบบแข็ง - โลหะแข็งยังคงหดตัวต่อไปเมื่อเย็นตัวลง ซึ่งนำไปสู่การหดตัวแบบลวดลาย พฤติกรรมการหดตัวมีความสำคัญเนื่องจากสามารถนำไปสู่ข้อบกพร่อง เช่น ความพรุนและการฉีกขาดจากความร้อนในการหล่อขั้นสุดท้าย บทบาทของค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนระหว่างผิว (IHTC) IHTC กำหนดการถ่ายเทความร้อนผ่านส่วนต่อประสานระหว่างแม่พิมพ์โลหะ เป็นพารามิเตอร์ที่ซับซ้อนซึ่งได้รับผลกระทบจากปัจจัยต่างๆ เช่น ความร้อนยิ่งยวดของโลหะ อุณหภูมิแม่พิมพ์ ความหยาบของพื้นผิว คุณสมบัติของโลหะผสม ความหนาของชั้นเคลือบ ฯลฯ เทคนิคการทดลอง เช่น การวัดช่องว่างอากาศ วิธีการวิเคราะห์ และการวิเคราะห์ผกผันเชิงตัวเลข ถูกนำมาใช้ในการประมาณค่า IHTC แต่ละวิธีมีข้อจำกัดในเรื่องความแม่นยำและการนำไปประยุกต์ใช้สำหรับอลูมิเนียมอัลลอยด์ที่หล่อในแม่พิมพ์ทราย IHTC แสดงค่าเริ่มต้นสูงในระหว่างการเทเนื่องจากความชื้นของโลหะ จากนั้นจะมีความผันผวนที่ค่าที่ต่ำกว่าเมื่อช่องว่างอากาศเพิ่มความต้านทาน IHTC ขึ้นสูงสุดเป็นระยะๆ เนื่องจากความร้อนแฝงที่ปล่อยออกมาขณะการแข็งตัวดำเนินไป การควบคุมการแข็งตัวการทำความเข้าใจพฤติกรรมของการถ่ายเทความร้อนชั่วคราวและแนวโน้มของ IHTC ช่วยเพิ่ม

ประสิทธิภาพกระบวนการแข็งตัวโดยการควบคุมความเย็น ซึ่งจะช่วยลดข้อบกพร่องและปรับปรุงโครงสร้างจุลภาคขั้นสุดท้ายและคุณสมบัติของโลหะผสมหล่อ

G. Li, S. Wang และ G. Zheng (2023) การจำลองการไหลเวียนและการถ่ายเทความร้อนของชั้นสแลกปกป้องบนผิวเหล็กหล่อในกระบวนการหล่อเหล็ก งานวิจัยนี้นำเสนอแบบจำลองตัวเลข 2 มิติ เพื่อจำลองการไหลเวียนและการถ่ายเทความร้อนของชั้นสแลกปกป้องเหลวบนผิวเหล็กหล่อ ซึ่งป็นปัจจัยสำคัญในกระบวนการหล่อเหล็กต่อเนื่อง แบบจำลองนี้อาศัยการแก้สมการ Navier-Stokes และสมการพลังงาน โดยคำนึงถึงผลของการเคลื่อนที่ตามธรรมชาติในชั้นสแลกและแรงเฉือนที่รอยต่อสแลก-เหล็ก จากนั้นจึงคำนวณหาสนามการไหลเวียนและอุณหภูมิ ผลการศึกษาพบว่า เมื่อไม่มีแรงเฉือน การเพิ่มความหนาของชั้นสแลกทำให้เกิดการหมุนเวียนตามธรรมชาติและ การถ่ายเทความร้อนที่รุนแรงขึ้นในชั้น ขณะที่ภายใต้แรงเฉือนจากการไหลของเหล็ก เกิดโซนหมุนวนทวนเข็มนาฬิกา ซึ่งเพิ่มการนำความร้อนและการพาความร้อน เมื่อความเร็วเฉือนเพิ่มขึ้น ความเร็วการไหลของสแลกและอัตราการถ่ายเทความร้อนจะเพิ่มสูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ดังนั้นความเร็วเฉือนจึงมีบทบาทสำคัญต่อพฤติกรรมของชั้นสแลก แบบจำลองที่พัฒนาขึ้นสามารถช่วยอธิบายการไหลเวียนและการถ่ายเทความร้อนที่ซับซ้อนของชั้นสแลกปกป้อง อันเป็นประโยชน์ต่อการควบคุมกระบวนการหล่อเหล็กให้มีเสถียรภาพและคุณภาพดียิ่งขึ้น

โดยสำหรับการศึกษางานวิจัยทั้งหมดนั้น ผู้วิจัยจะนำทฤษฎีเกี่ยวกับการถ่ายเทความร้อนระหว่างการหล่อโลหะในเรื่องของเฟสการหดในช่วงเวลาต่าง ๆ มาใช้ร่วมกับการศึกษาพฤติกรรมของอุณหภูมิในแต่ละช่วงเวลาของเฟสการหดตัว ร่วมกับการวิเคราะห์ทางไฟต์ไนต์อีลิเมนต์ และทฤษฎีเกี่ยวกับการออกแบบรูปล้นมาช่วยในการแก้ไขปัญหาที่กำลังศึกษาถัดไป

บทที่ 3

การดำเนินการวิจัย

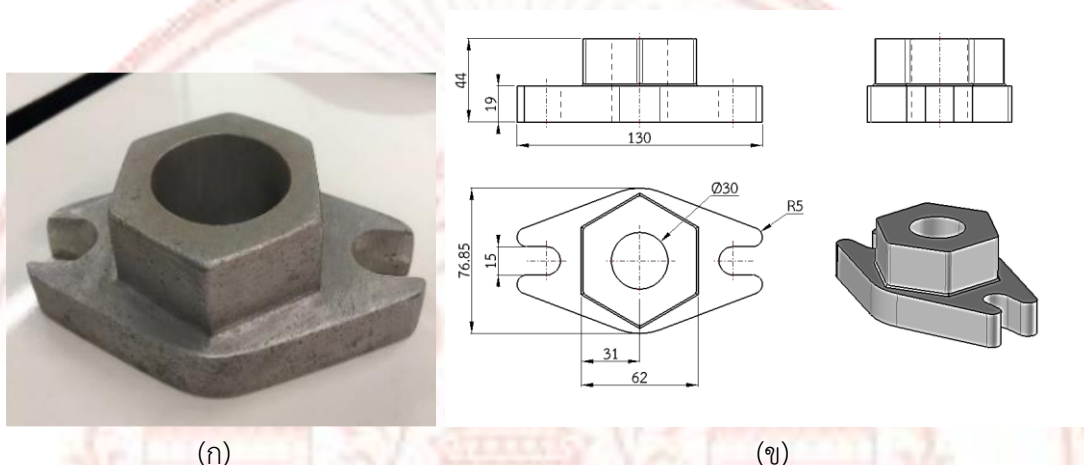
การดำเนินการวิจัยได้ออกแบบการทดลองเพื่อศึกษาพฤติกรรมอุณหภูมิของโลหะเหลวในแม่พิมพ์เหล็กกล้าไร้สนิมจากกระบวนการหล่อทราย (Sand Casting) ชิ้นงานหล่อทรายชิ้นงานกระสวนขึ้นเดียวหน้าผาราบมีไส้แบบในตัวไม่มีรูล้น โดยใช้ผลลัพธ์และวิธีการที่จากงานวิจัยเรื่องการออกแบบระบบรูเทในงานหล่ออะลูมิเนียมสำหรับโพรงแบบทราย (Watthanabupa, 2020) การออกแบบระบบรูเทในงานหล่ออะลูมิเนียมสำหรับโพรงแบบทราย, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ) จึงได้ดำเนินการวิจัยตามขั้นตอนดังต่อไปนี้

- 3.1 ศึกษาชิ้นงานหล่อทรายชิ้นงานกระสวนขึ้นเดียวหน้าผาราบมีไส้แบบในตัวไม่มีรูล้นและการคำนวณออกแบบแม่พิมพ์สำหรับเทหล่อชิ้นงาน
- 3.2 ศึกษาผลลัพธ์การเทหล่อและปัจจัยที่มีผลต่อชิ้นงานกระสวนขึ้นเดียวหน้าผาราบไม่มีรูล้น
- 3.3 ออกแบบวิธีการทดลองเพื่อแก้ไขปัญหาข้อบกพร่องของชิ้นงานหล่อ
- 3.4 การออกแบบการจำลอง Simulation ด้วยโปรแกรม Cast Designer
- 3.5 การเทหล่อชิ้นงานจริง
- 3.6 การออกแบบวิธีการแก้ไขปัญหาหลังจากการเทหล่อชิ้นงานจริง
- 3.7 แสดงข้อมูลผลการทดสอบการจำลองชิ้นงาน

3.1 ศึกษางานหล่อทรายขึ้นงานกระสวนขึ้นเดี่ยวหน้าผ่าราบมีไส้แบบในตัวไม่มีรูล้นและการออกแบบแม่พิมพ์สำหรับเทหล่อขึ้นงาน (No Riser)

3.1.1 ลักษณะและคุณสมบัติของขึ้นงาน

ในหัวข้อนี้ผู้วิจัยได้เริ่มต้นศึกษารูปร่างและลักษณะของขึ้นงาน โดยขึ้นงานจะมีลักษณะเป็นขึ้นงานหน้าผ่าราบมีไส้แบบในตัวโดยไม่มีรูล้น โดยแสดงรูปร่างรูปทรงของขึ้นงาน และขนาดกำหนดของขึ้นงานดังภาพที่ 3-1



ภาพที่ 3-1 ขึ้นงานกระสวนขึ้นเดี่ยวหน้าผ่าราบมีไส้แบบในตัวไม่มีรูล้น (ก) ขนาดของขึ้นงาน (ข)

โดยสำหรับวัสดุที่ใช้ในการหล่อขึ้นงาน คือ โลหะผสมอะลูมิเนียมเกรด A1100 ซึ่งมีส่วนผสมทางเคมีดังแสดงในตารางที่ 3-1

ตารางที่ 3-1 ธาตุประกอบของอะลูมิเนียมผสมเกรด A1100 ที่ใช้ในการหล่อขึ้นงาน

เกรด	องค์ประกอบทางเคมี (wt.%)						
	ซิลิกอน	เหล็ก	ทองแดง	แมงกานีส	สังกะสี	อะลูมิเนียม	อื่น ๆ
A1100	ซิลิกอน+เหล็ก 0.95 max.	0.05- 0.02	0.05 max.	0.10 max.	99.00 min.	-	-

3.1.2 การออกแบบแม่พิมพ์สำหรับเทหล่อชิ้นงาน

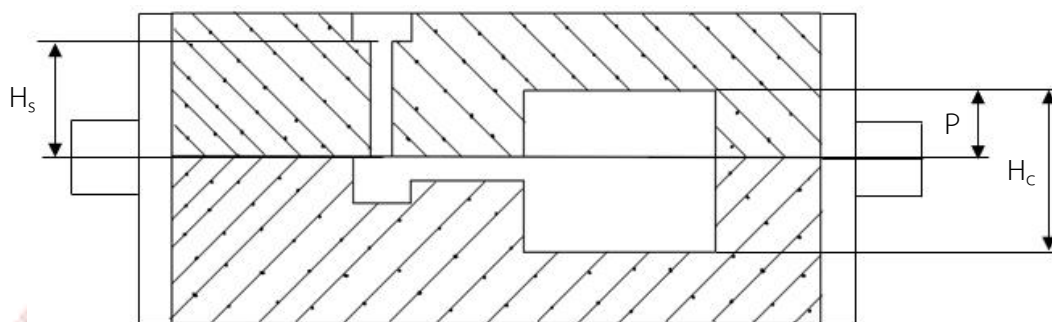
เงื่อนไขการทดลองที่กำหนดขึ้นสำหรับงานวิจัย โดยกำหนดเงื่อนไขดังแสดงในตารางที่ 3-2

ตารางที่ 3-2 เงื่อนไขที่ใช้ในการทดลอง

ตัวแปร	ค่าที่กำหนด	หน่วย
วัสดุที่ใช้หล่อ	A1100	
ชนิดของหีบหล่อ	ไม้	
ขนาดของหีบหล่อ	220 x 200 x 70	mm
อุณหภูมิ	750	°C
อุณหภูมิทราย	25	°C
ความชื้นในทราย	7-8	%
จำนวนทางเข้า	1	
ตำแหน่งทางเข้า	ทางเข้าด้านล่างบริเวณหน้าผ้าชิ้นงาน	
ลักษณะพื้นที่หน้าตัดรูเท	วงกลม	
ลักษณะพื้นที่หน้าตัดแอ่งพัก	วงกลม	
ลักษณะพื้นที่หน้าตัดทางเข้า	ครึ่งวงกลม	

จากตัวแปรที่ได้กำหนดมาข้างต้นได้นำมาพิจารณาต่อถึงขั้นตอนของการออกแบบระบบทางเข้า เริ่มต้นโดย ตำแหน่งทางเข้าโลหะเหลวที่เราเลือกใช้คือ หน้าผ้าของชิ้นงาน เนื่องจาก อะลูมิเนียมเป็นโลหะประเภทเบาจึงเกิดออกไซด์ หรือเกิดการไหลวนขึ้นในขณะโลหะเหลวไหลผ่านระบบรูเทเข้าสู่โพรงแบบ ดังนั้นภายในระบบรูเทต้องออกแบบให้โลหะไหลผ่านมีความเร็วต่ำและราบเรียบที่สุด และจะต้องกำหนดอัตราส่วนของระบบเป็นประเภทระบบปราศจากความกดดัน (Unpressurized)

3.1.2.1 ความสูงรูเทโลหะเหลวสามารถหาได้จากสมการที่ (3-1) และเวลาในการเทสามารถหาได้จากสมการที่ (3-2)



ภาพที่ 3-2 แสดงตัวแปรต่าง ๆ ของโพรงแบบ

ตารางที่ 3-3 ข้อมูลของกระสวน

ปริมาตร ของกระสวน (V) (mm ³)	ความสูงหน้า ผ้าของชิ้นงาน (P) (mm)	ความหนาของ ชิ้นงาน (Hc) (mm)	เวลาแข็งตัวของ โลหะเหลว (Tf) (s)
1729111.8	44	44	60

คำนวณหาความสูงรูเทโลหะเหลว และเวลาในการเทน้ำโลหะโดยประมาณ (Hs)

จากสมการ
$$H_s = h - \frac{p^2}{2H_c} \quad (3-1)$$

$$t \approx (0.05-0.1) \times t_f \times (H_c/H_s) \quad (3-2)$$

โดยที่

- t_f = เวลาของการแข็งตัวของโลหะเหลว (sec.)
- H_c = ความสูงของชิ้นงานหล่อ หรือความหนาของชิ้นงานหล่อ (mm)
- H_s = ความสูงของรูเท (mm)
- t = เวลาที่ใช้เทน้ำโลหะโดยประมาณ (sec.)
- h = ความสูงทั้งหมด (mm)
- p = ความสูงของโพรงแบบจากหน้าผ้า (mm)

เมื่อ $t_f = 60 \text{ sec.}$
 $H_c = 44 \text{ mm}$
 $h = 140 \text{ mm}$
 $p = 44 \text{ mm}$

แทนค่าลงในสมการที่ 3-1 เพื่อหาความสูงของรูเท (Hs)

$$H_s = 70 - \frac{19^2}{2 \times 44}$$

$$H_s = 48 \text{ mm}$$

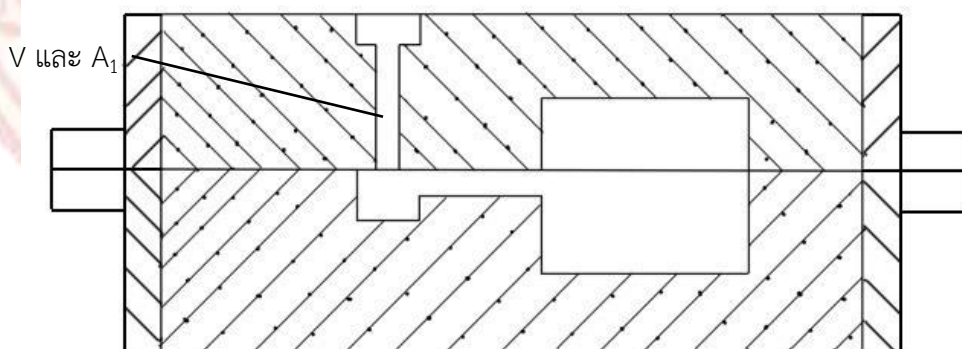
ดังนั้นความสูงของรูเทจึงเท่ากับ 48 มิลลิเมตร

แทนค่าลงในสมการที่ 3-2 เพื่อหาเวลาที่ใช้เทน้ำโลหะโดยประมาณ (t)

$$t \approx (0.05-0.1) \times 60 \times (44/48)$$

$$t \approx 4.1 \text{ s}$$

เวลาในการเทน้ำโลหะโดยประมาณเท่ากับ 4.1 วินาที



ภาพที่ 3-3 แสดงตำแหน่งพื้นที่หน้าตัดกับความเร็ว

3.1.2.2 ความเร็วของโลหะเหลว ณ ตำแหน่งก่อนเข้าแอ่งพัก

จากสมการ
$$V = c\sqrt{2gH_s} \quad (3-3)$$

โดยที่ V = ค่าความเร็วของโลหะเหลวก่อนเข้าแอ่งพัก

c = สัมประสิทธิ์ของการสูญเสีย ($C = 0.3-0.5$)

g = ค่าแรงโน้มถ่วง (9810 mm/s^2)

H_s = ความสูงของรูเท (mm)

เมื่อ V = ค่าความเร็วของโลหะเหลวก่อนเข้าแอ่งพัก

$c = 0.3 - 0.5$

$g = 9810 \text{ mm/s}^2$

$H_s = 48 \text{ mm}$

แทนค่าตัวแปรลงในสมการที่ 3-3 เพื่อหาความเร็วการเทของน้ำโลหะ (V)

$$V = 0.3\sqrt{2 \times 9810 \times 48}$$

$$V = 388.1 \text{ mm/s}$$

ความเร็วการเทของกระสวนเท่ากับ 388.1 มิลลิเมตรต่อวินาที

3.1.2.3 การหาพื้นที่หน้าตัดรูเท

จากสมการ
$$A = \frac{W_c}{\rho \times t \times c\sqrt{2gH_s}} = \frac{V_c}{t \times c \times \sqrt{2gH_s}} \quad (3-4)$$

โดยที่ V_c = ปริมาตรของชิ้นงานหล่อ (mm^3)

W_c = น้ำหนักของชิ้นงานหล่อ (Kg)

T = เวลาที่ใช้ในการเท (sec.)

g = ค่าแรงโน้มถ่วง (9810 mm/s^2)

c = สัมประสิทธิ์ของการสูญเสีย ($C = 0.3-0.5$)

H_s = ความสูงของรูเท (mm)

A = ขนาดหน้าตัดของรูเท (mm^2)

ρ = ความหนาแน่นของโลหะเหลว (Melt Density: g/mm^3)

$$\begin{aligned}
 \text{เมื่อ } V_c &= 171655.8 \text{ mm}^3 \\
 t &= 4.1 \text{ sec} \\
 g &= 9810 \text{ mm/s}^2 \\
 c &= C = 0.4 \\
 H_s &= 48 \text{ mm} \\
 A &= \text{ขนาดหน้าตัดของรูเท (mm}^2\text{)}
 \end{aligned}$$

แทนค่าลงในสมการที่ 3-4

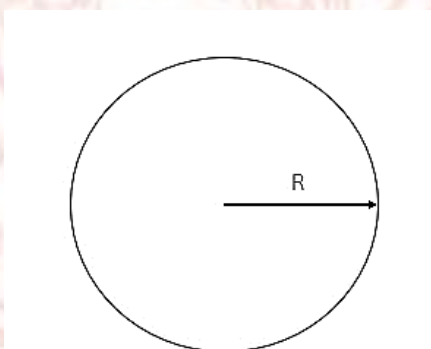
$$\begin{aligned}
 A &= \frac{171655.8}{4.1 \times 0.4 \times \sqrt{2 \times 9810 \times 48}} \\
 A &= 109 \text{ mm}^2
 \end{aligned}$$

ขนาดหน้าตัดของรูเท่ากับ 109 ตารางมิลลิเมตร

3.1.2.4 รัศมีพื้นที่หน้าตัดรูเท

จากสมการ $A = \pi R^2$ (3-5)

$$\begin{aligned}
 \text{โดยที่ } A &= \text{พื้นที่วงกลม (mm}^2\text{)} \\
 \pi &= \text{ค่าคงที่ 3.14} \\
 R &= \text{รัศมีวงกลม (mm)}
 \end{aligned}$$



ภาพที่ 3-4 รูเทมีพื้นที่หน้าตัดเป็นทรงกลม

$$\begin{aligned}
 \text{เมื่อ } A &= 109 \text{ mm}^2 \\
 \pi &= \text{ค่าคงที่ 3.14} \\
 R &= \text{รัศมีวงกลม (mm)}
 \end{aligned}$$

แทนค่าลงในสมการที่ 3-5

$$109 = \pi R^2$$

$$R = 8 \text{ mm}$$

รัศมีพื้นที่หน้าตัดรูเทเท่ากับ 8 มิลลิเมตร

3.1.2.5 อัตราส่วนของหน้าตัดทางเดินโลหะเหลวในระบบรูเทแบบไร้ความดัน ซึ่งเหมาะสมสำหรับงานหล่ออะลูมิเนียมที่ทำให้เกิดการไหลวนของโลหะเหลวน้อยที่สุด

รูเท : รูวิ่ง : ทางเข้า

1 : 3 : 3

จากอัตรา 1:3:3 จะได้อัตราตามนี้

$$A_1 \times 1 : A_1 \times 3 : A_1 \times 3 \quad \text{ค่าที่ได้จะคือพื้นที่หน้าตัด } A_2$$

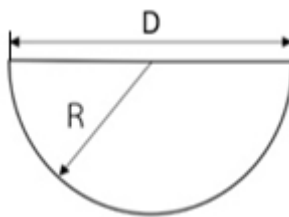
3.1.2.6 รัศมีพื้นที่หน้าตัดรูวิ่งและทางเข้า โดยพื้นที่บริเวณนี้เป็นจุดต่อจากแอ่งพักโลหะเหลวและเป็นจุดที่โลหะเหลวเข้าสู่โพรงแบบ รูปร่างที่ใช้เป็นครึ่งวงกลมเพื่อไม่ให้เกิดมุมภายในรูวิ่งและทางเข้าให้หน้อยที่สุดเพื่อลดอัตราการไหลวนของโลหะเหลว และความสะดวกในการวางที่หน้าผ้าของหีบในขณะที่ทำแบบหล่อทราย ซึ่งคำนวณได้จากสมการ (3-6) และระยะความยาวจากจุดกึ่งกลางแอ่งพักโลหะเหลวถึงปากทางเข้าโลหะเหลวของกระสวนอยู่ที่ 40 มิลลิเมตร

จากสมการ
$$A = \frac{\pi R^2}{2} \quad (3-6)$$

โดยที่ $A =$ พื้นที่วงกลม (mm^2)

$\pi =$ ค่าคงที่ 3.14

$R =$ รัศมีวงกลม (mm)



ภาพที่ 3-5 รูว้างและทางเข้ามีลักษณะเป็นครึ่งวงกลม

ดังนั้น จากอัตราส่วน รูเท : รูว้าง : ทางเข้า เท่ากับ 1 : 3 : 3 เมื่อรูเทมีค่าเท่ากับ 109 mm^2

ดังนั้น จึงคำนวณ รูว้างและทางเข้าได้ดังนี้

จากสมการ $A_1 \times 1 : A_1 \times 3 : A_1 \times 3$ (3-7)

โดย $A_1 =$ พื้นที่หน้าตัดทางเข้ารูเท

$A_2 =$ พื้นที่หน้าตัดทางเข้ารูว้าง

$A_3 =$ พื้นที่หน้าตัดทางเข้าทางเข้า

เมื่อ $A_1 = 109 \text{ mm}^2$

แทนค่าลงในสมการที่ 3-7 $A_2 = 109 \text{ mm}^2 \times 3$

$A_3 = 109 \text{ mm}^2 \times 3$

ดังนั้น $A_2 = 327 \text{ mm}^2$

$A_3 = 327 \text{ mm}^2$

รัศมีพื้นที่หน้าตัดครึ่งวงกลม แทนค่าลงในสมการที่ 3-6

เมื่อ $A_2 = 327 \text{ mm}^2$

$A_3 = 327 \text{ mm}^2$

$\pi =$ ค่าคงที่ 3.14

แทนค่าในสมการที่ 3-7 เพื่อหาพื้นที่หน้าตัดครึ่งวงกลมของรูวิ่ง

$$A_2 = \frac{\pi R^2}{2}$$

$$327 \text{ mm}^2 = \frac{\pi R^2}{2}$$

$$R_{\text{รูวิ่ง}} = 14 \text{ mm}$$

พื้นที่หน้าตัดครึ่งวงกลมของรูวิ่ง 14 มิลลิเมตร

$$A_3 = \frac{\pi R^2}{2}$$

$$327 \text{ mm}^2 = \frac{\pi R^2}{2}$$

$$R_{\text{ทางเข้า}} = 14 \text{ mm}$$

พื้นที่หน้าตัดครึ่งวงกลมของทางเข้า 14 มิลลิเมตร

3.1.2.7 หน้าตัดแองก์โลหะเหลว

จากสมการ $A_2 \times 2.5$ (3-8)

โดยที่ $A_2 =$ พื้นที่หน้าตัดครึ่งวงกลมของรูวิ่ง

เมื่อ $A_2 = 327 \text{ mm}^2$

แทนค่าลงในสมการที่ 3-7 $A_2 = 327 \text{ mm}^2 \times 2.5$
 $A_2 = 817.5 \text{ mm}^2$

และแทนค่าลงในสมการที่ 3-6 เพื่อหารัศมีหน้าตัดวงกลม

$$817.5 \text{ mm}^2 = \frac{\pi R^2}{2}$$

$$R = 16.1 \text{ mm}$$

ดังนั้น รัศมีหน้าตัดวงกลมของแองก์โลหะเหลวเท่ากับ 16.1 มิลลิเมตร

3.1.2.8 แรงดันของโลหะเหลวที่ส่งผลต่อโพรงแบบ

หลังจากการออกแบบระบบทางเข้าแบบไร้ความดันเพื่อลดการไหลวนของโลหะเหลวที่จะส่งผลต่อโพรงแบบและชิ้นงาน แต่เราจะต้องพิจารณาในส่วนของความดันจากตัวอะลูมิเนียมเหลว (Metallstatic Pressure) ซึ่งแรงดันที่ส่งผลต่อโพรงแบบนี้คือ แรงดันขึ้น

3.1.2.8.1 แรงดันขึ้น เป็นแรงดันที่ทำให้ไส้แบบยกลอยและยังกระทำต่อเพดานของโพรงแบบ (หีบบน) ที่กระทำในทิศทางขึ้นข้างบน จึงอาจทำให้โลหะเหลวไหลทะลักออกตามรอยหน้าผาของหีบ หากมีน้ำหนักกดทับที่หีบบนเพื่อต่อต้านแรงยกลอยนี้ไม่เพียงพอ ซึ่งค่าแรงดันขึ้นสามารถหาได้จาก สมการที่ (3-9)

$$\text{จากสมการ} \quad \text{แรงดันขึ้น} = H_s \times \rho \times A_{\text{ด้านบน}} \quad (3-9)$$

โดยที่ H_s = ความสูงของรูเท (cm)
 ρ = ความหนาแน่นของโลหะเหลว (Melt Density: 2.7 g/cm³)
 $A_{\text{ด้านบน}}$ = พื้นที่หน้าตัดด้านบนที่สัมผัสโพรงแบบ (cm²)

พื้นที่หน้าที่สัมผัสเพดานของโพรงได้จาก โปรแกรม TopSolid ในการตรวจสอบพื้นที่ในบริเวณที่เราสนใจ มีค่าเท่ากับ 59.26 ตารางเซนติเมตร

เมื่อ H_s = 48 cm
 ρ = 2.7 g/cm³
 $A_{\text{ด้านบน}}$ = 59.26 cm²

แทนค่าลงในสมการที่ 3-9

$$\begin{aligned} \text{แรงดันขึ้น} &= 48 \text{ cm} \times 2.7 \text{ g/cm}^3 \times 59.26 \text{ cm}^2 \\ \text{แรงดันขึ้น} &= 768 \text{ g/cm}^2 \end{aligned}$$

ดังนั้นค่าแรงดันขึ้นโพรงแบบจึงมีค่าเท่ากับ 768 กรัมต่อตารางเซนติเมตร

3.1.2.8.2 แรงดันกดลงของทรายที่หีบหล่อด้านบนที่กระทำต่อโพรงแบบ

หลังจากได้ค่าแรงดันขึ้นของตัวชิ้นงานมาแล้ว ได้ทำการเปรียบเทียบกับแรงดันกดลงจากทรายในหีบหล่อด้านบน ได้จากสมการ (3-10)

จากสมการ $\text{แรงดันกดลง} = H \times \rho \times A$ (3-10)

โดยที่ H = ความสูงทั้งหมด (cm)
 ρ = ความหนาแน่นของทราย (Melt density: 2.648 g/cm^3)
 A = พื้นที่หน้าตัดของหีบبن (cm^2)

เมื่อ $H = 7 \text{ cm}$
 $\rho = 2.648 \text{ g/cm}^3$
 $A = 440 \text{ cm}^2$

แทนค่าลงในสมการที่ 3-10 $\text{แรงดันกดลง} = H \times \rho \times A$
 $\text{แรงดันกดลง} = 7 \times 2.648 \times 440$
 $= 8155.84 \text{ g/cm}^2$

ดังนั้นค่าแรงดันกดลงมีค่าเท่ากับ 8155.84 กรัมต่อตารางเซนติเมตร

3.1.2.8.3 แรงดันด้านข้างของโลหะที่กระทำต่อด้านข้างของโพรงแบบ

จากสมการ $\text{แรงดันด้านข้าง} = (H_s + H_{\text{(เฉลี่ยโพรงแบบ)}}) \times \rho \times A$ (3-11)

โดย A = พื้นที่หน้าตัดด้านข้างขึ้นงาน
 H_s = ความสูงของรูเท (cm)
 H_s = ความสูงเฉลี่ยโพรงแบบ (cm)
 $\rho = 2.648 \text{ g/cm}^3$

เมื่อ $A = 53.04 \text{ cm}^2$
 $H_s = 4.8 \text{ cm}$
 $H_s = 2 \text{ cm}$
 $\rho = 2.648 \text{ g/cm}^3$

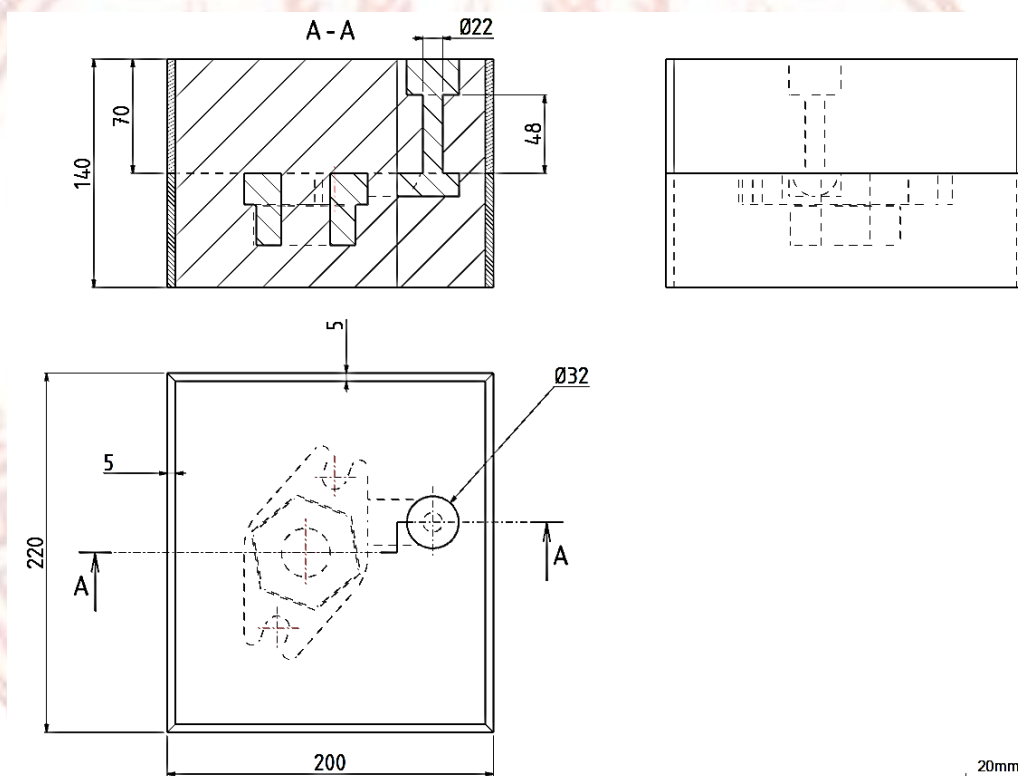
แทนค่าลงในสมการที่ 3-11 $\text{แรงดันด้านข้าง} = (4.8 \text{ cm} + 2 \text{ cm}) \times 2.648 \text{ g/cm}^3 \times 53.04 \text{ cm}^2$
 $\text{แรงดันด้านข้าง} = 954.72 \text{ g/cm}^2$

ดังนั้นค่าแรงดันกดลงมีค่าเท่ากับ 954.72 กรัมต่อตารางเซนติเมตร และสามารถสรุปผลของแรงดันทั้งหมดในโพรงแบบได้ดังตารางที่ 3- 4

ตารางที่ 3-4 แสดงค่าแรงดันทั้งหมดที่ส่งผลต่อโพรงแบบ

แรงดัน	ค่าที่ได้
แรงดันขึ้น (g/cm^2)	768
แรงดันกดลง (g/cm^2)	8155.84
แรงดันด้านข้าง (g/cm^2)	954.72

ดังนั้นสรุปได้ว่าแรงดันขึ้นและแรงดันด้านข้างของชิ้นงานของกระสวนทั้ง 3 รูปแบบ น้อยกว่าแรงดันกดของหีบหล่อ จึงไม่ทำให้เกิดการแยกของหีบหล่อบนและหีบหล่อล่าง



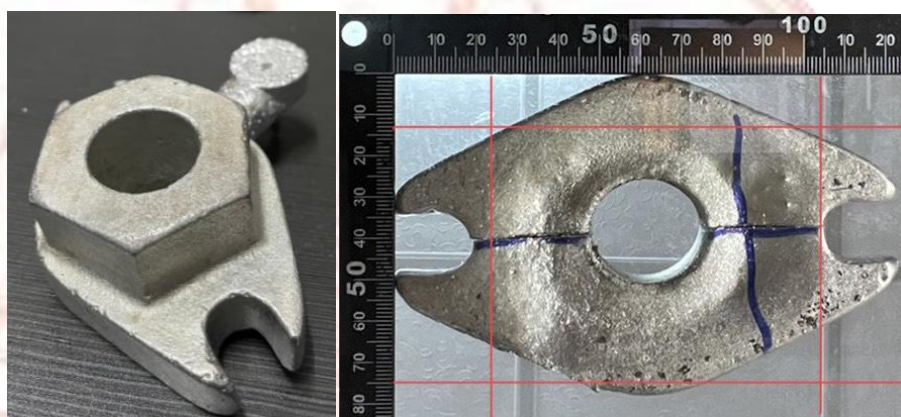
ภาพที่ 3-6 แสดงขนาดของหีบหล่อทั้งหมดที่ได้จากการคำนวณ

ภาพที่ 3-6 แสดงขนาดของหีบหล่อจากการคำนวณโดยใช้หีบหล่อขนาด กว้าง 200 มิลลิเมตร ยาว 220 มิลลิเมตร สูงรวม 140 มิลลิเมตร โดยสำหรับกระสวนจะใช้รูเทขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 22 มิลลิเมตร โดยจากการคำนวณได้ค่ารัศมีของรูอยู่ที่ 8 มิลลิเมตร แต่จากคำแนะนำของอาจารย์ของผู้เชี่ยวชาญ ผู้วิจัยจึงปรับเป็นรูเทขนาด 22 มิลลิเมตรนั่นเอง

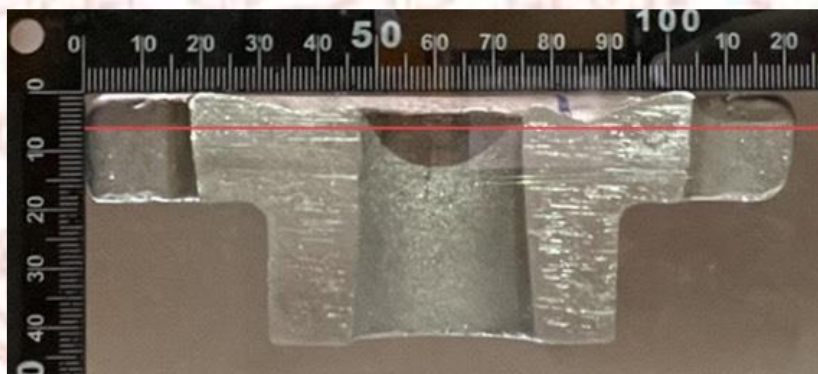
3.2 ปัจจัยที่มีผลต่อการหล่อชิ้นงานกระสวนขึ้นเดียวหน้าผ่าราบแบบเดิม (No Riser)

3.2.1 การตรวจสอบด้วยตาเปล่าและการผ่าชิ้นงานเทหล่อจริง

ลักษณะชิ้นงานขึ้นงานกระสวนขึ้นเดียวหน้าผ่าราบไม่มีรูล้น (No Riser) หลังจากเทหล่อจริง พบตำแหน่งของการเกิดโพรงหดตัว (Shrinkage Porosity Position) ชิ้นงานมีการหดตัวบริเวณตรงกลางรอบๆไส้แบบของชิ้นงาน ซึ่งบริเวณตรงกลางเป็นจุดที่มีความหนาสูงสุดของชิ้นงานจึงทำให้บริเวณตรงกลางรอบๆไส้แบบเป็นจุดร้อนของชิ้นงาน ดังภาพที่ 3-7 และ 3-8 เพื่อศึกษาสิ่งที่มีผลทำให้เกิดการยุบตัวของชิ้นงานผู้วิจัย จึงทำการตรวจสอบผลลัพธ์ต่อยด้วยโปรแกรม Cast Designer



ภาพที่ 3-7 ชิ้นงานหล่อจริงกระสวนขึ้นเดียวหน้าผ่าราบมีไส้แบบในตัวแบบไม่มีรูล้น



ภาพที่ 3-8 การผ่าชิ้นงานหล่อจริงกระสวนขึ้นเดียวหน้าผ่าราบมีไส้แบบในตัวแบบไม่มีรูล้น

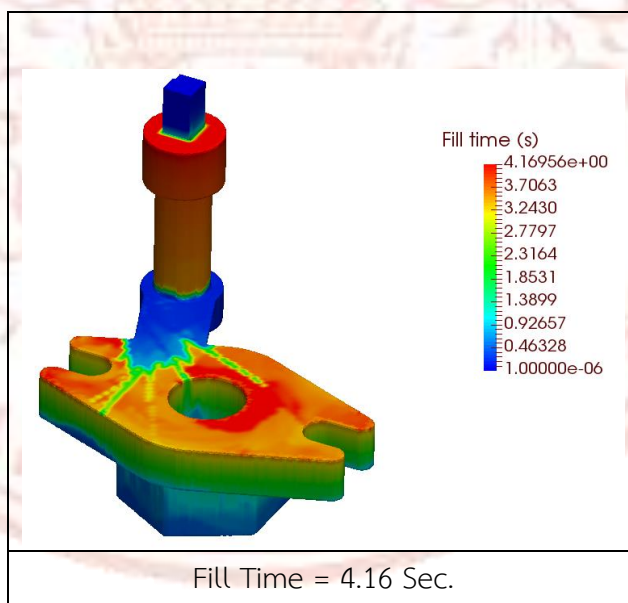
3.2.2 ศึกษาปัจจัยที่อาจจะมีผลต่อการเกิดโพรงหดตัวโดยใช้โปรแกรมจำลอง

ในการศึกษาปัจจัยที่ส่งผลให้เกิดรอยยุบของชิ้นงานนั้น ทางผู้วิจัยจะใช้โปรแกรม Cast Designer ช่วยในการจำลองเพื่อดูผลลัพธ์ในการหล่อชิ้นงาน โดยจะศึกษาในเรื่องของ

- ผลการจำลองการเติมเต็มของโลหะเหลว (Fill Time)
- ผลการจำลองพฤติกรรมไหลของโลหะเหลว (Fluid fraction)
- ผลการจำลองเวลาในการแข็งตัวของโลหะ (Solidification Time)
- ผลการจำลองการเกิดโพรงหดตัว (Shrinkage Porosity)
- ผลการจำลองอุณหภูมิของชิ้นงาน (Temperature)
- กราฟการเย็นตัวของชิ้นงาน

3.2.2.1 ผลการจำลองการเติมเต็มของโลหะเหลว (Fill Time)

ผลการจำลอง Fill Time ของโปรแกรม Cast Designer หมายถึงการแสดงผลของช่วงเวลาที่โลหะเหลวไหลเข้าไปเติมเต็มแบบหล่อ (Mold Cavity) ในกระบวนการหล่อโลหะ (Casting Process) ซึ่งช่วยให้วิศวกรสามารถวิเคราะห์และปรับปรุงกระบวนการเทได้ดียิ่งขึ้น

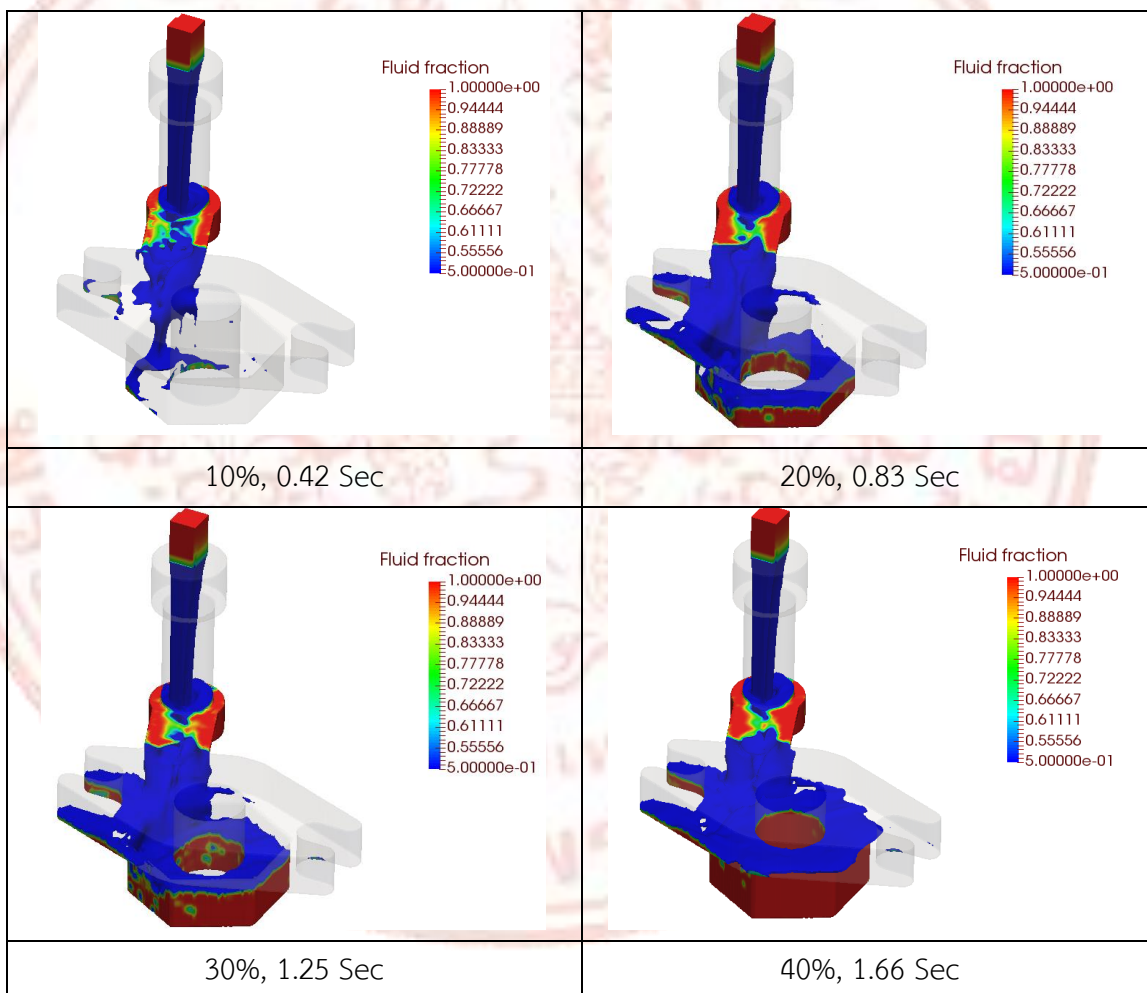


ภาพที่ 3-9 แสดงการจำลองเวลาในการเติมเต็มโลหะเหลวชิ้นงานหล่อกระสวนขึ้น
เดียวหน้าผ่าราบมีไส้แบบในตัวไม่มีรูล้น Fill Time = 4.16 วินาที

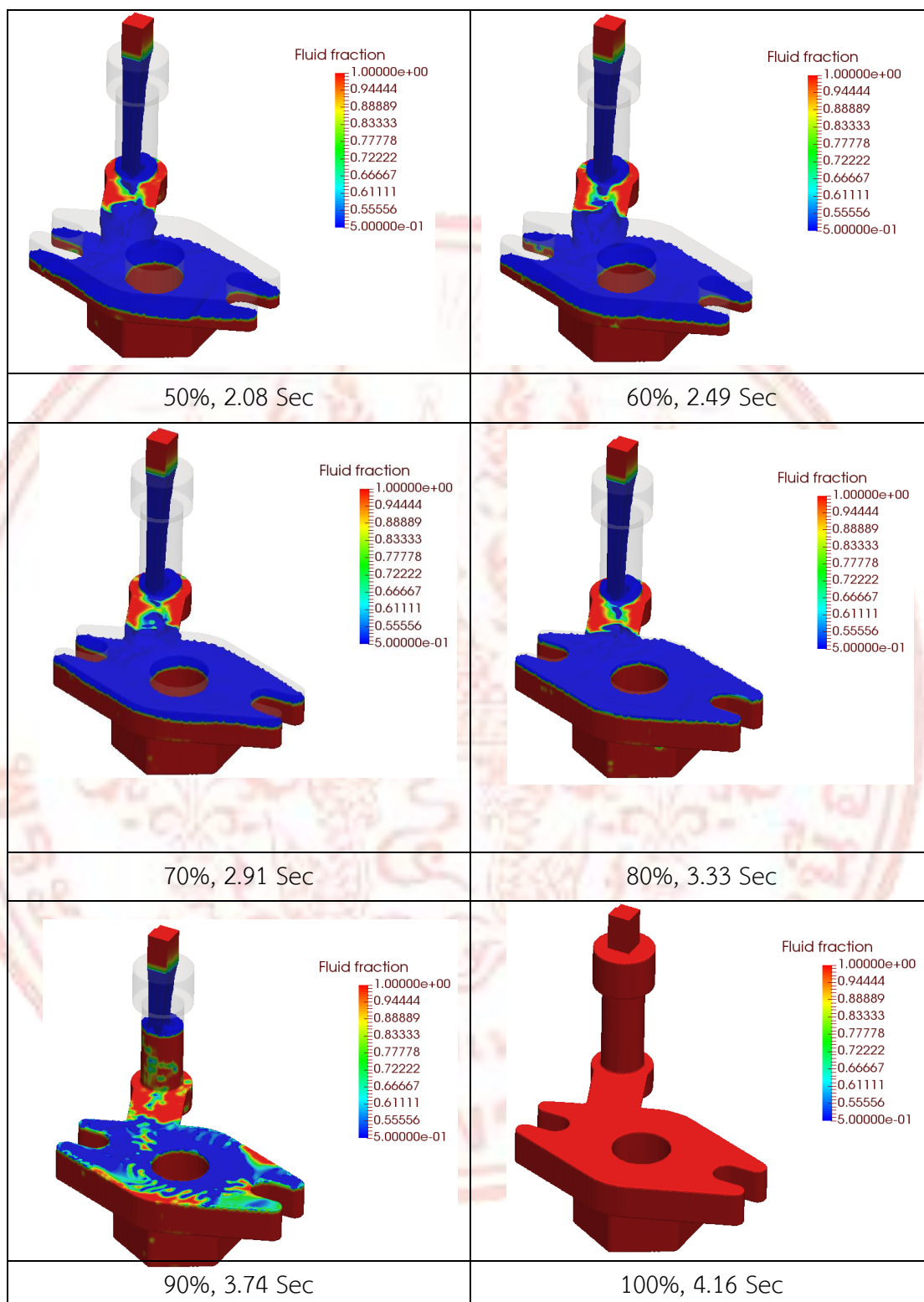
ผลการจำลองการเติมเต็มของน้ำโลหะเหลวแสดงให้เห็นเวลาในการเติมน้ำโลหะเหลวภายในชิ้นงานโดยใช้เวลาทั้งหมด 4.16 วินาที โดยจุดที่ใช้เวลาในการเติมน้ำโลหะน้อยที่สุดคือบริเวณด้านล่างของชิ้นงาน และจุดที่ใช้เวลาเติมมากที่สุดจะเป็นบริเวณหน้าราบของชิ้นงานด้านบนซึ่งแสดงเป็นโซนสีแดงในภาพที่ 3-9

3.2.2.2 ผลการจำลองพฤติกรรมการไหลของโลหะเหลว (Fluid fraction)

ผลการจำลองพฤติกรรมการไหลของโลหะเหลว แสดงให้เห็นถึงลำดับในการเติมเต็มก่อนหลัง โดย Fluid Fraction เป็นค่าที่ใช้ในการวิเคราะห์ สัดส่วนของโลหะเหลวที่ยังคงอยู่ในสถานะของเหลว ในแต่ละช่วงเวลาของกระบวนการเท (Filling) และการแข็งตัว (Solidification)



ภาพที่ 3-10 แสดงลักษณะการไหลของโลหะเหลวของชิ้นงาน

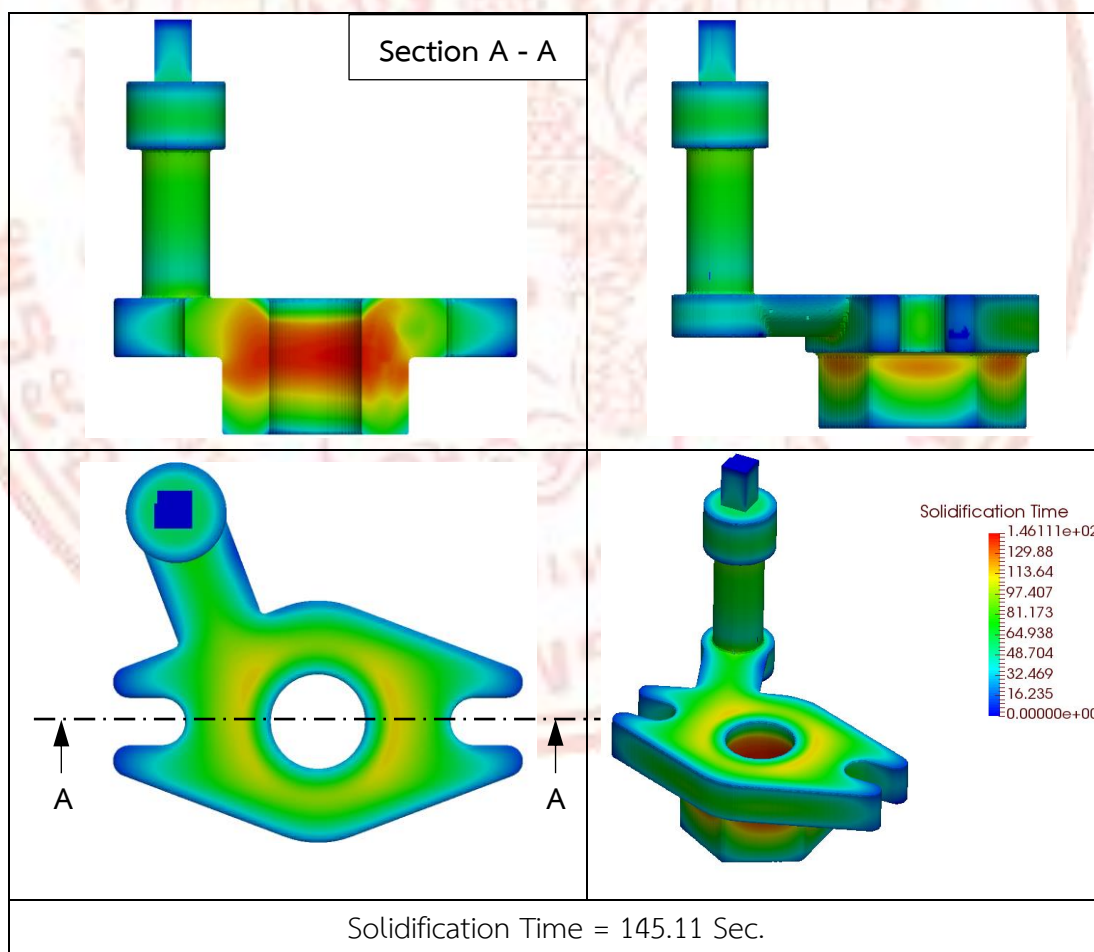


ภาพที่ 3-11 (ต่อ) แสดงลักษณะการไหลของโลหะเหลวของชิ้นงาน

การไหลของน้ำโลหะเหลวแสดงให้เห็นลักษณะการเติมเต็มโลหะเหลวของชิ้นงานที่ 10% จนถึง 100% จะเห็นลักษณะการเติมเต็มที่มีความปั่นป่วนของน้ำโลหะบริเวณใจกลางของชิ้นงานในลักษณะการไหลเป็นเกลียว การไหลของน้ำโลหะเหลวที่มีลักษณะหมุนวน (Vortex Flow) สามารถส่งผลให้เกิดการหดตัวและเกิดรูพรุน (Shrinkage Porosity) ได้ ลักษณะการไหลที่มีการหมุนวนจะทำให้เกิดการกระจายตัวและการเย็นตัวที่ไม่สม่ำเสมอภายในแม่พิมพ์ การเย็นตัวที่ไม่สม่ำเสมอนี้จะสร้างพื้นที่ที่มีแรงดันต่ำในระหว่างกระบวนการแข็งตัว ซึ่งเป็นสาเหตุหลักของการเกิดรูพรุนจากการหดตัว (Nawaz, 2020)

3.2.2.3 ผลการจำลองเวลาในการแข็งตัวของโลหะ (Solidification Time)

Solidification Time คือระยะเวลาที่โลหะเหลวใช้ในการแข็งตัว (จากสถานะของเหลวเป็นของแข็ง) หลังจากถูกเทเข้าไปในแบบหล่อ โดยการจำลองนี้ช่วยให้สามารถวิเคราะห์กระบวนการแข็งตัวของโลหะและระบุปัญหาที่อาจเกิดขึ้น เช่น Shrinkage Porosity, Hot Spots, Micro-porosity

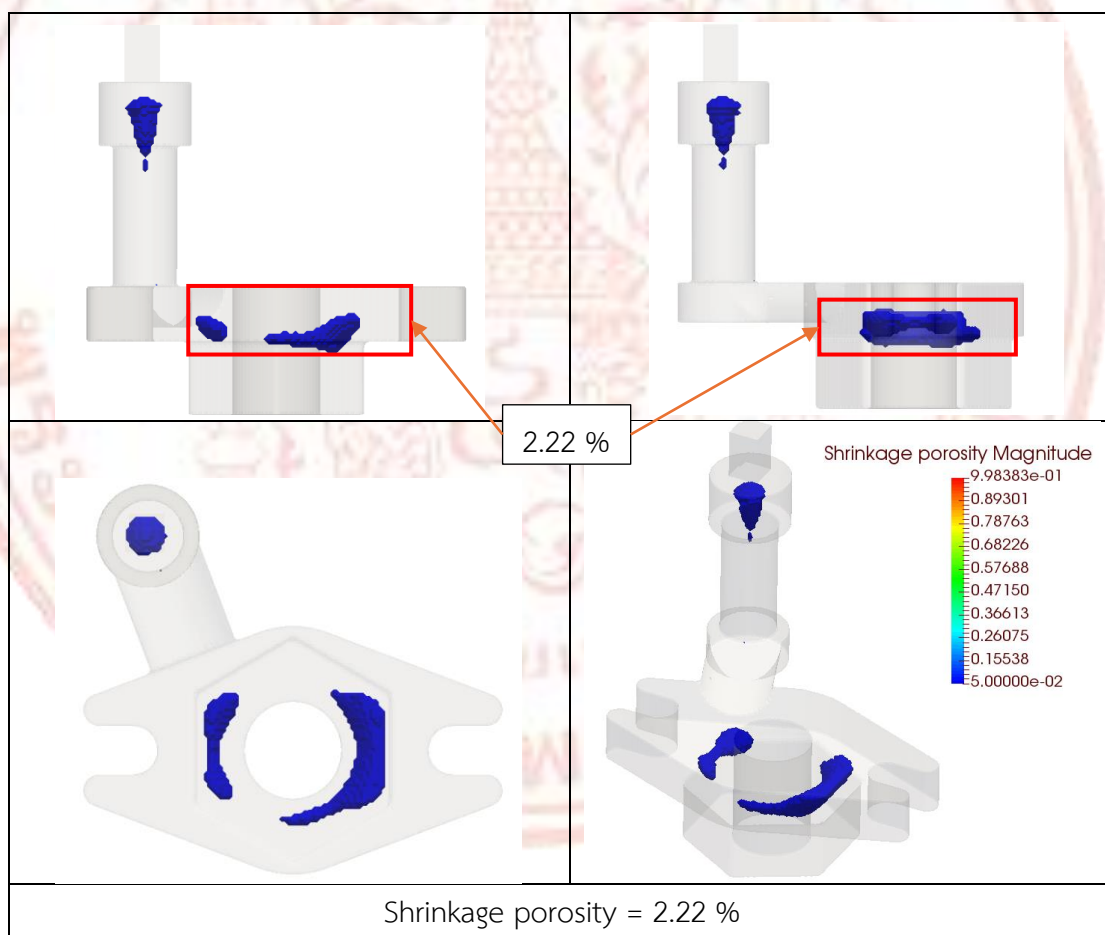


ภาพที่ 3-12 แสดงการจำลองเวลาในการแข็งตัวชิ้นงานหล่อกระสวยขึ้นเดียวหน้าผ่าราบมีไส้แบบในตัวไม่มีรูล้น

ภาพที่ 3-12 จะแสดงให้เห็นถึงเวลาทั้งหมดในการแข็งตัวของชิ้นงาน โดยใช้เวลา 146.11 วินาที โดยจุดที่มีการแข็งตัวช้าที่สุดจะเป็นโซนสีแดงซึ่งอยู่บริเวณกลางชิ้นงาน ซึ่งเป็นบริเวณที่เนื้อชิ้นงานมีความหนาแน่นมาก และจุดที่แข็งตัวเร็วที่สุดจะเป็นบริเวณโซนสีฟ้าขอบของชิ้นงาน เวลาในการแข็งตัวที่ไม่เท่ากันในชิ้นงานหล่อเกิดจากหลายปัจจัย เช่น ความหนาของชิ้นงานที่แตกต่างกัน ทำให้ส่วนที่หนาแข็งตัวช้ากว่าส่วนที่บาง อุณหภูมิของแม่พิมพ์ที่ไม่สม่ำเสมอส่งผลให้บางจุดเย็นตัวเร็วกว่าจุดอื่น

3.2.2.4 ผลการจำลองการเกิดโพรงหดตัว (Shrinkage Porosity)

Shrinkage Porosity เป็นข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นเมื่อโลหะเหลวหดตัวในระหว่างการแข็งตัว แต่ไม่มีโลหะเหลวเพิ่มเติมเข้ามาชดเชย ทำให้เกิดโพรงอากาศหรือช่องว่างภายในชิ้นงาน



ภาพที่ 3-13 แสดงการจำลองการเกิดโพรงหดตัวภายในชิ้นงานหล่อกระสวนขึ้นเดียวหน้าผ่าราบมีได้แบบในตัวไม่มีรูล้น

จากภาพที่ 3-13 จะแสดงให้เห็นถึงตำแหน่งของการเกิดโพรงหดตัวภายในชิ้นงาน เมื่อเทียบกับชิ้นงานที่มีปริมาตร 172.91 cm^3 โดยไม่นับรูลัน ทางเข้า และรูเท จะมีเปอร์เซ็นต์ของการเกิดโพรงหดตัวอยู่ที่ 3.84 cm^3 หรือ 2.22 เปอร์เซ็นต์ของปริมาตรเฉพาะชิ้นงาน โดยโพรงหดตัวเกิดจากการแข็งตัวของโลหะที่ไม่สม่ำเสมอ โดยมีกพบในบริเวณที่แข็งตัวสุดท้าย

3.2.2.5 ผลการจำลองอุณหภูมิของชิ้นงาน (Temperature)

การสะสมของความร้อนในงานหล่อขณะเทหล่อมีบทบาทสำคัญในการเกิดโพรงหดตัว (shrinkage porosity) ในกระบวนการหล่อโลหะ เมื่อโลหะที่หลอมเหลวถูกเทลงในแม่พิมพ์ทราย ความร้อนที่สะสมจะส่งผลต่อการเย็นตัวของโลหะ หากความร้อนในบริเวณหนึ่งไม่สามารถกระจายออกได้อย่างเหมาะสม จะทำให้บริเวณนั้นเกิดการเย็นตัวอย่างช้าๆ ซึ่งอาจนำไปสู่การเกิดโพรงหดตัว ในส่วนของผลการจำลองเพื่อสังเกตพฤติกรรมของการสะสมความร้อนภายในตัวชิ้นงาน ผู้วิจัยจะแบ่งช่วงของการสังเกตเป็นสามช่วงเวลาคือ

1. อุณหภูมิช่วงเวลาดำเนินการเติมน้ำโลหะเหลว (Temperature at End Filling Time)

- เป็นช่วงที่โลหะเหลวถูกเติมเข้าแม่พิมพ์จนเสร็จสมบูรณ์
- อุณหภูมิในช่วงนี้ส่งผลต่อการไหลของโลหะและการเติมเต็มโพรงแม่พิมพ์ หากอุณหภูมิสูงเกินไป อาจทำให้เกิดการไหลย้อนกลับหรือก๊าซแทรกซึมได้
- อย่างไรก็ตาม ช่วงเวลานี้ ยังไม่มีผลโดยตรงต่อการเกิดโพรงหดตัว เนื่องจากโลหะยังคงอยู่ในสถานะของเหลว

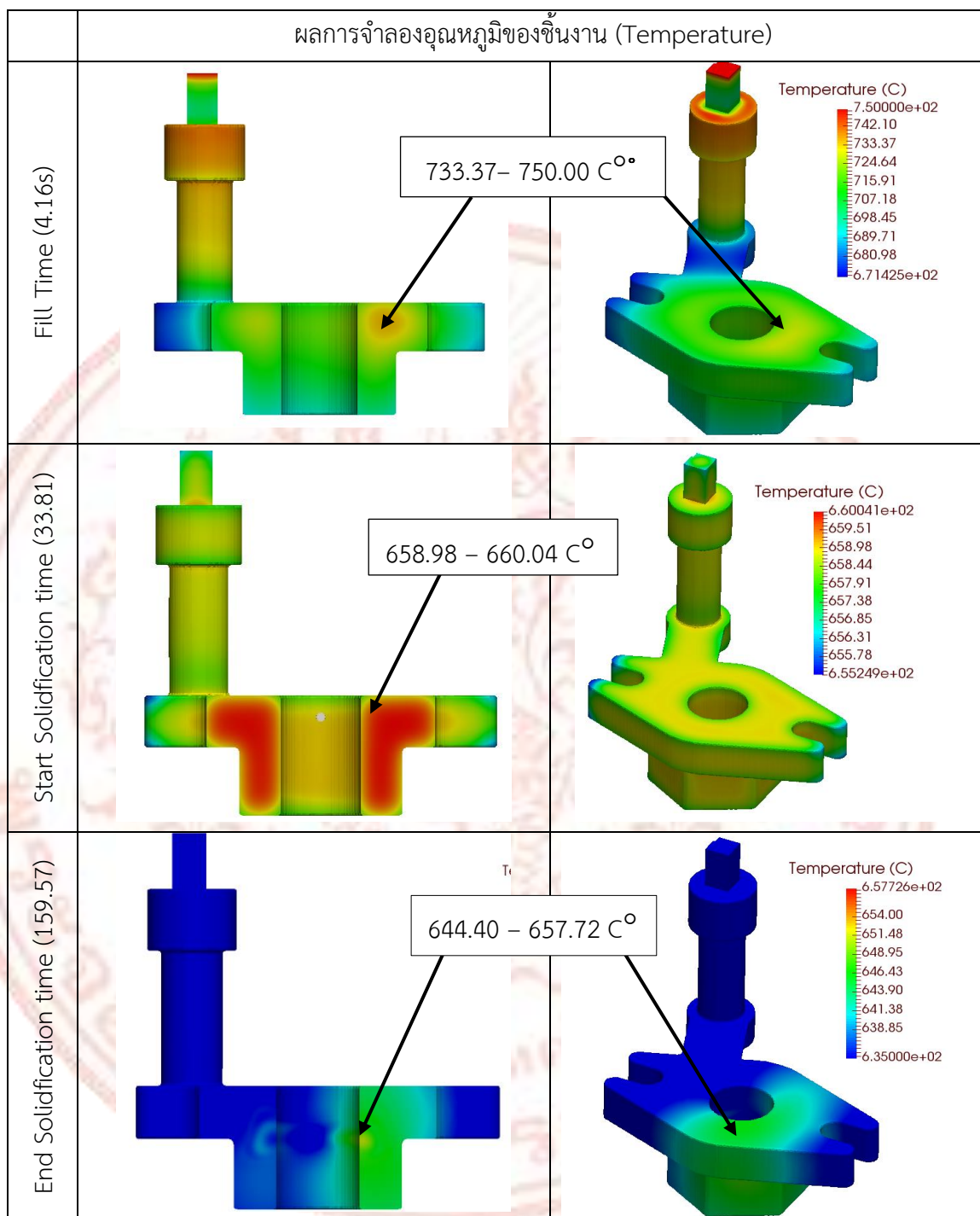
2. อุณหภูมิช่วงเวลาดำเนินการแข็งตัว (Temperature at Start Solidification Time)

- เป็นช่วงที่โลหะเริ่มเปลี่ยนจากของเหลวเป็นของแข็ง
- แต่โดยรวมแล้ว ช่วงนี้ยังไม่ใช่วัสดุที่โพรงหดตัวเกิดขึ้นอย่างชัดเจน
- โครงสร้างผลึกเริ่มก่อตัว และอัตราการเย็นตัวส่งผลต่อขนาดของผลึก (Grain Structure)

3. อุณหภูมิช่วงเวลาดำเนินการแข็งตัว (Temperature at End Solidification Time)

- เป็นช่วงที่มีผลต่อการเกิดโพรงหดตัวมากที่สุด
- เมื่อโลหะแข็งตัวเกือบหมด ปริมาตรจะลดลง หากไม่มีโลหะเหลวไหลมาเติมเต็มช่องว่าง จะทำให้เกิดโพรงหดตัว

- บริเวณที่แข็งตัวเป็นลำดับสุดท้าย (Last Solidified Region) มักเป็นจุดที่เกิดโพรงหดตัว เช่น บริเวณที่โลหะเย็นตัวช้า หรือบริเวณที่ห่างจากตัวป้อน (Riser)



ภาพที่ 3-14 แสดงผลของการสะสมของอุณหภูมิ ณ ช่วงเวลาต่าง ๆ

จากภาพที่ 3-14 ที่เวลา 4.16 วินาทีหลังเริ่มการเทหล่อ อุณหภูมิสูงสุดอยู่ที่ 750°C บริเวณใจกลางชิ้นงาน โดยมีอุณหภูมิในโซนสีแดงประมาณ $733.37\text{--}750.00^{\circ}\text{C}$ และลดลงรอบๆ ส่วนที่อุณหภูมิต่ำที่สุดคือบริเวณทางเข้า ($671.42\text{--}689.71^{\circ}\text{C}$). ที่เวลา 33.81 วินาทีหลังการเทหล่อ อุณหภูมิสูงสุดอยู่ที่ 660.04°C และแพร่กระจายลดลงรอบๆ ขณะที่เวลา 159.57 วินาทีหลังการเทหล่อ อุณหภูมิสูงสุดที่ศูนย์กลางชิ้นงานอยู่ที่ 657.72°C และแพร่กระจายลดลง

โดยจากทั้งสามช่วงเวลา ช่วงเวลาสิ้นสุดการแข็งตัว (End Solidification Time) เป็นช่วงที่มีผลต่อการเกิดโพรงหดตัวมากที่สุด เนื่องจากเป็นช่วงที่โลหะเหลวกำลังเปลี่ยนเป็นของแข็ง และหากไม่มีโลหะเหลวไหลเข้ามาเติมเต็มช่องว่างที่เกิดขึ้นจากการหดตัวของปริมาตร จะทำให้เกิดโพรงหดตัวในชิ้นงานหล่อ

ดังนั้น ในการลดปัญหานี้ การออกแบบระบบรูลัน (Riser Design), การควบคุมอุณหภูมิการเท และการจำลองกระบวนการแข็งตัว เป็นสิ่งสำคัญที่ต้องพิจารณาในการผลิตชิ้นงานหล่อคุณภาพ

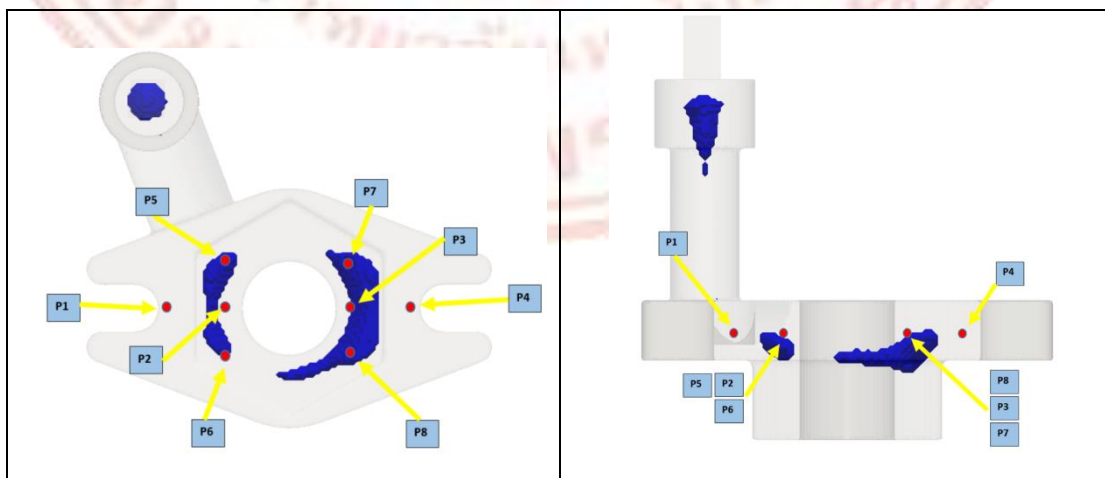
3.2.2.6 แสดงกราฟการเย็นตัวของชิ้นงาน

กราฟการเย็นตัวของชิ้นงานจะแสดงความแตกต่างของอุณหภูมิของชิ้นงาน ณ จุดที่กำหนด เพื่อที่จะดูการเย็นตัวที่แตกต่างกันมีผลอย่างไรต่อการเกิดโพรงหดตัวของชิ้นงาน โดยผู้วิจัยได้กำหนดตำแหน่งสำหรับวางจุดวัดไว้ ในตำแหน่งที่ P1, P2, P3, P4, P5, P6, P7, และ P8 ดังภาพที่ 3-15

โดยในการวัดมีจุดประสงค์เพื่อตรวจสอบความแตกต่างของอุณหภูมิในจุดต่าง ๆ ในแต่ละช่วงเวลาที่สำคัญ คือ

- อุณหภูมิช่วงเวลาสิ้นสุดการเติมน้ำโลหะเหลว (Temperature at End Filling Time)
- อุณหภูมิช่วงเวลาเริ่มต้นการแข็งตัว (Temperature at Start Solidification Time)
- อุณหภูมิช่วงเวลาสิ้นสุดการแข็งตัว (Temperature at End Solidification Time)

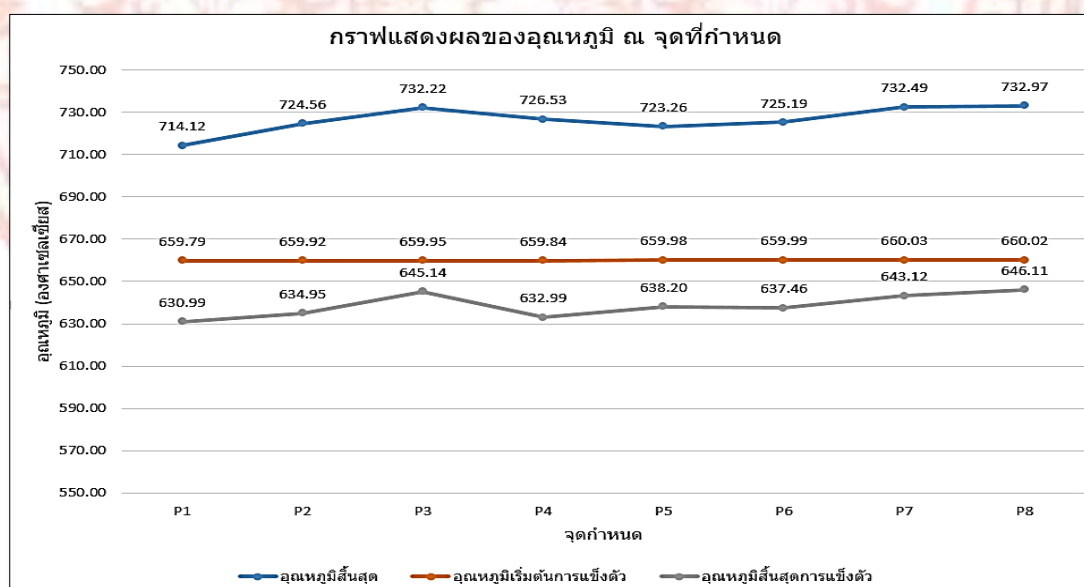
โดยผลการตรวจสอบเป็นดังตารางที่ 3-15



ภาพที่ 3-15 แสดงตำแหน่งจุด P1 ถึง P8

ตารางที่ 3-5 อุณหภูมิ ณ เวลา อุณหภูมิสิ้นสุดการเทน้ำโลหะ อุณหภูมิเริ่มต้นการแข็งตัว และ อุณหภูมิสิ้นสุดการแข็งตัว ขึ้นงานหล่อกระสวนขึ้นเดียวหน้าฝารายมีไส้แบบในตัวไม่มีรูล้น (No Riser)

ตารางเปรียบเทียบอุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)					
จุด	อุณหภูมิสิ้นสุดการเทน้ำโลหะ (4.16s)	อุณหภูมิเริ่มต้นการแข็งตัว (33.81s)	อุณหภูมิสิ้นสุดการแข็งตัว (159.57s)	การเกิดโพรงหดตัว	ตำแหน่งบนชิ้นงาน
P1	714.12	659.79	630.99	ไม่เกิดโพรงหดตัว	ในชิ้นงาน
P2	724.56	659.92	634.95	เกิดโพรงหดตัว	ในชิ้นงาน
P3	732.22	659.95	645.14	เกิดโพรงหดตัว	ในชิ้นงาน
P4	726.53	659.84	641.06	ไม่เกิดโพรงหดตัว	ในชิ้นงาน
P5	723.26	659.98	632.81	เกิดโพรงหดตัว	ในชิ้นงาน
P6	725.19	659.99	637.46	เกิดโพรงหดตัว	ในชิ้นงาน
P7	732.49	660.03	643.12	เกิดโพรงหดตัว	ในชิ้นงาน
P8	732.97	660.02	646.11	เกิดโพรงหดตัว	ในชิ้นงาน



ภาพที่ 3-16 กราฟแสดงอุณหภูมิ ณ P1 ถึง P8 ของชิ้นงาน No Riser

จากตารางที่ 3-5 และ ภาพที่ 3-16 แสดงให้เห็นถึงความแตกต่าง ๆ ของอุณหภูมิในช่วงเวลาต่าง ๆ ณ จุด P1, P2, P3, P4, P5, P6, P7, และ P8 คือ ช่วงอุณหภูมิสิ้นสุดการเทน้ำโลหะที่เวลา

4.16 วินาที อุณหภูมิเริ่มต้นการแข็งตัวที่เวลา 33.81 วินาที และอุณหภูมิสิ้นสุดการแข็งตัวที่เวลา 159.57 วินาที

โดยจากผลการจำลองทั้งหมดสามารถสรุปได้ดังนี้

1. จากผลการจำลองการเวลาการแข็งตัวของโลหะเหลว (Solidification Time) เมื่อเปรียบเทียบกับ การเกิดโพรงหดตัว (Shrinkage Porosity) แสดงให้เห็นว่าตำแหน่งที่มีการแข็งตัวช้าที่สุดของชิ้นงาน เป็นตำแหน่งที่ใกล้เคียงกับผลการจำลองการเกิดโพรงหดตัวที่เกิดขึ้น

2. ตำแหน่งที่มีการแข็งตัวของโลหะเหลวช้าที่สุด เป็นบริเวณเดียวกับตำแหน่งที่มักจะมีการสะสมของอุณหภูมิจากการจำลองอุณหภูมิของชิ้นงาน (Temperature) ซึ่งสอดคล้องกับทฤษฎีที่กล่าวว่า บริเวณที่เย็นตัวช้า (Slow Cooling Zone) มักเป็นจุดที่ความร้อนสะสมมากที่สุด และเป็นตำแหน่งที่เสี่ยงต่อการเกิดโพรงหดตัว เนื่องจากโลหะบริเวณนั้นยังคงอยู่ในสถานะของเหลวในขณะที่บริเวณอื่นเริ่มแข็งตัวแล้ว โพรงหดตัวที่เกิดขึ้นบริเวณใจกลางชิ้นงานมีสาเหตุหลักมาจาก ความร้อนที่สะสมในบริเวณนั้น ซึ่งทำให้เกิดการเย็นตัวช้าและไม่สม่ำเสมอ

จากที่กล่าวมาจึงสรุปปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดโพรงหดตัวของชิ้นงานนี้ ได้ดังนี้

1. เวลาในการแข็งตัวที่ไม่เท่ากันภายในชิ้นงาน
2. การสะสมของอุณหภูมิบริเวณกลางชิ้นงาน

สำหรับวิธีการบรรเทาการแก้ไข อาจต้องพิจารณาปรับปรุงกระบวนการหล่อ เช่น 1. เลือกใช้ระดับอุณหภูมิเทน้ำโลหะที่เหมาะสม 2. ควบคุมอัตราการเย็นตัวให้สม่ำเสมอทั่วทั้งชิ้นงาน 3. การออกแบบรูปร่างและตำแหน่งวางรูสัน (Riser) เพื่อให้โลหะเหลวสามารถไหลเติมเต็มช่องว่างที่เกิดจากการหดตัวได้ทันเวลา (ศุภฤทธิ, 2544)

โดยสำหรับในการแก้ไขการยุบตัวของชิ้นงานนี้นั้น ทางผู้วิจัยจะเลือกใช้วิธีการเพิ่มรูสัน (Riser) เนื่องจากออกแบบได้ง่าย เหมาะกับชิ้นงานที่ไม่ซับซ้อน และเป็นวิธีการแก้ปัญหารูปแบบเดิมกับปริญญานิพนธ์ที่ใช้ในการศึกษาต่อในงานวิจัยนี้

3.3 ออกแบบวิธีการทดลองเพื่อแก้ไขปัญหาคอขวดของชิ้นงานหล่อ

สำหรับการออกแบบวิธีการแก้ไขปัญหานั้น ผู้วิจัยจะใช้วิธีการแก้ไขปัญหโดยการวางรูล้นลงไปเพื่อแก้ไขปัญหของชิ้นงาน การวางรูล้น (Riser) ในงานหล่มีความสำคัญต่อการควบคุมกระบวนการแข็งตัวของโลหะและการป้องกันปัญหาในการหล่อ โดยเฉพาะเรื่องการสะสมความร้อนและการเกิด โพรงหดตัว (Shrinkage) ซึ่งมี ผลต่อการสะสมความร้อนในตัวชิ้นงาน โดยการสะสมความร้อน เกิดขึ้นเมื่อโลหะในส่วนต่าง ๆ ของชิ้นงานหล่อแข็งตัวไม่พร้อมกัน โดยปกติชิ้นส่วนที่มีขนาดหนาจะสะสมความร้อนได้นานกว่า ส่งผลให้เกิดการหดตัวหลังจากการแข็งตัว รูล้นจึงถูกออกแบบเพื่อให้โลหะเหลวเพิ่มเติมอยู่ในระบบ เมื่อโลหะในชิ้นงานหลักเริ่มแข็งตัว ส่วนที่เป็นรูล้นจะยังคงมีโลหะเหลวซึ่งสามารถเติมเต็มบริเวณที่เกิดการหดตัวของชิ้นงานได้ ทำให้การสะสมความร้อนในชิ้นงานลดลงและแข็งตัวได้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น (Campbell. J ,2015)

ในการออกแบบแนวคิด ผู้วิจัยได้ออกแบบวิธีการแก้ไขปัญหเป็น 2 แนวคิดด้วยกัน คือ

- แนวคิดที่ 1 รูล้นทรงกระบอกกลาง
- แนวคิดที่ 2 รูล้นทรงกระบอกตัน

โดยสรุป หลักพิจารณาในการออกแบบ และข้อดี ข้อเสีย ไว้ดังตารางที่ 3-6

ตารางที่ 3-6 การออกแบบแนวคิดในการวางรูล้น

แนวคิด	หลักพิจารณาในการออกแบบ	ข้อดี	ข้อเสีย
1. รูล้นทรงกระบอกกลาง (ตรงกลาง) (Tube Riser)	- การเกิดโพรงหดตัวเกิดขึ้นบริเวณรอบ ๆ กึ่งกลางชิ้นงานและ ณ ช่วงเวลาเริ่มต้นการแข็งตัว อุณหภูมิถูกสะสมบริเวณ รอบ ๆ กึ่งกลางชิ้นงาน จึงทดสอบนำรูล้นประเภทนี้มาวางครอบไว้เหนือจุดที่เกิดคอขวด	- วางอยู่เหนือโพรงหดตัว มีโอกาสที่จะเติมเต็มเนื้อโลหะได้ดี	- สามารถวางได้ตำแหน่งเดียวบนชิ้นงาน
2. รูล้นทรงกระบอกตัน (ด้านข้าง) (Cylinder Riser)	- สามารถวางไว้เหนือจุดสะสมของอุณหภูมิ ณ ช่วงเวลาการสิ้นสุดการแข็งตัวได้ เพื่อทดสอบว่าแก้ปัญหได้หรือไม่	- วางตำแหน่งได้ยืดหยุ่น	- ต้องกำหนดตำแหน่งที่เหมาะสม

3.3.1 การออกแบบรูล้น

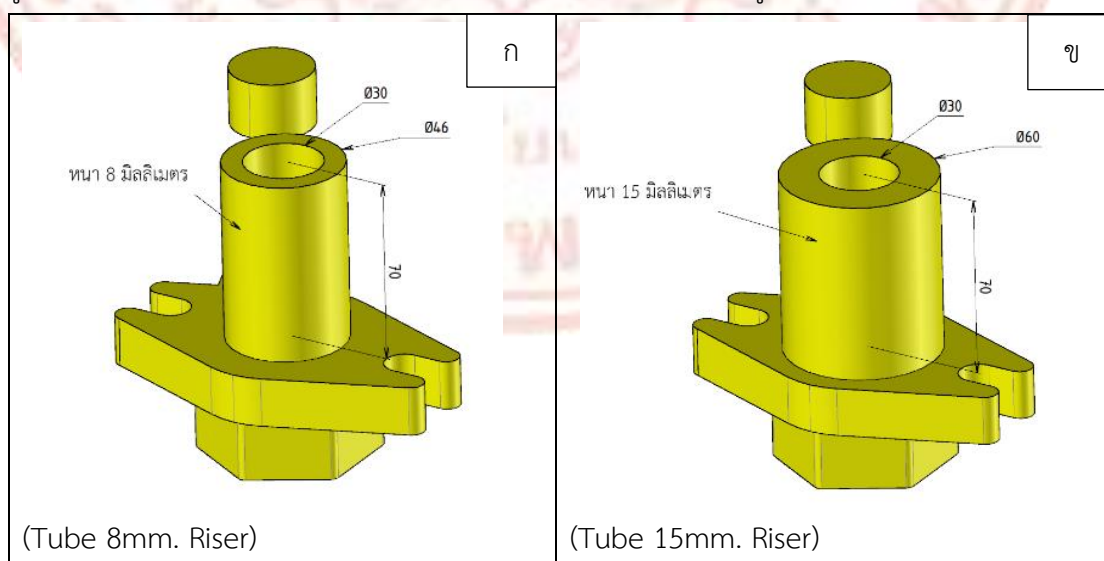
3.3.1.1 แนวคิดที่ 1 รูปแบบรูล้นทรงกระบอกกลวง (Tube Riser)

สำหรับตำแหน่งการวางรูล้นทรงกระบอกกลวงทั้งสองขนาดคือ รูล้นทรงกระบอกกลวงหนา 8 มิลลิเมตร (Tube 8mm. Riser) และรูล้นทรงกระบอกกลวงหนา 15 มิลลิเมตร (Tube 15mm. Riser) โดยอ้างอิงแนวคิดรูปแบบการแก้ไขมาจากการวิจัยเรื่องการออกแบบระบบรูเทในงานหล่ออะลูมิเนียมสำหรับโครงแบบทราย (Watthanabupa, 2020) โดยผู้วิจัยจะวางจุดกึ่งกลางของชิ้นงานทั้งสองขนาด



ภาพที่ 3-17 แสดงตำแหน่งของโครงหดตัวที่เกิดขึ้นภายในชิ้นงาน

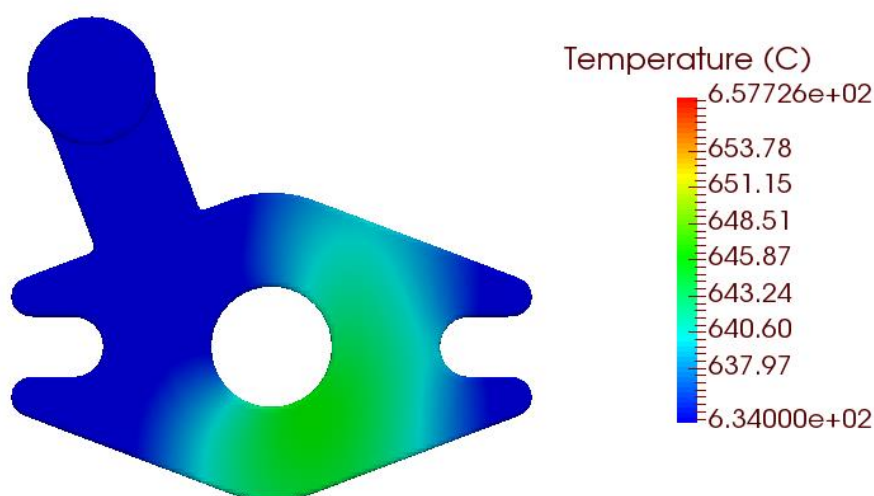
ในภาพที่ 3-17 จะแสดงลักษณะของโครงหดตัวที่เกิดขึ้นในตัวชิ้นงาน ซึ่งเป็นตำแหน่งที่จะใช้รูล้นทรงกระบอกทรงแนวคิดที่ 1 ในการแก้ปัญหา โดยลักษณะของรูล้น แสดงดังภาพที่ 3-18



ภาพที่ 3-18 แสดงการออกแบบรูล้นทรงกระบอกกลวงหนา 8 มิลลิเมตร (ก) และ 15 มิลลิเมตร (ข)

3.3.1.2 แนวคิดที่ 2 รูปแบบรูล้นทรงกระบอกตัน (Cylinder Riser)

สำหรับตำแหน่งการวางรูล้นทรงกระบอกตันนั้น ในภาพที่ 3-19 จะแสดงให้เห็นถึงลักษณะของพฤติกรรมความร้อนในตัวขึ้นงาน ณ ช่วงเวลาสิ้นสุดการแข็งตัวของโลหะเหลว ซึ่งเป็นช่วงเวลาที่มียโอกาสสร้างการเกิดโพรงหดตัวมากที่สุด โดยจะสังเกตเห็นว่าช่วงที่มีอุณหภูมิมากกว่า 658.88 องศาเซลเซียสขึ้นมานั้นจะอยู่ในโซนในกรอบสีแดง บริเวณด้านขาล่างของขึ้นงานเป็นจุดสะสมอุณหภูมิ



ภาพที่ 3-19 แสดงจุดสะสมอุณหภูมิของขึ้นงาน ที่อุณหภูมิตั้งแต่ 643.24 ถึง 657.72 องศาเซลเซียส

จากทฤษฎีกล่าวว่าจุดที่มีการสะสมความร้อนของตัวขึ้นงาน มักจะเป็นส่วนที่มีการแข็งตัวช้าที่สุด ดังนั้นทดสอบผู้วิจัยจะทดสอบโดยการวางรูล้นไปที่ตัวขึ้นงาน รูล้นจะช่วยให้โลหะเหลวไหลออกจากบริเวณที่มีความร้อนสะสมมากเกินไป ทำให้ลดโอกาสเกิด การโอเวอร์ฮีต (overheating) ซึ่งอาจทำให้เกิดโครงสร้างจุลภาคที่หยาบและไม่พึงประสงค์ เมื่อโลหะบางส่วนถูกดึงออกจากจุดที่มีความร้อนสะสม จะช่วยให้บริเวณนั้นเย็นตัวเร็วขึ้น และอาจช่วยลดโอกาสเกิด โพรงหดตัว โดยคำนวณขนาดรูล้นได้จากสมการที่ 3-12

โดยในการดำเนินการทดลอง ผู้วิจัยจะกำหนดรูปร่างของรูล้นเป็นรูล้นตันทรงกระบอก โดยจะคำนวณหาขนาดของรูล้นจากวิธีการ Modulus Method โดยสมการคือ Modulus; Mc (Loankosonchai, 2001)

$$M_c = V_c / A_c \quad (3-12)$$

เมื่อกำหนดให้

V_c คือ ปริมาตรของงาน

A_c คือ พื้นที่ผิวของงานที่มีการถ่ายเทความร้อน

โดยสำหรับค่า V_c และ A_c ของชิ้นงานกระสวนขึ้นเดียวหน้าผาราบมีไส้แบบในตัวแบบไม่มีรู
ล้น สามารถคำนวณได้จากโปรแกรม Cast Designer โดยค่า

$$V_c = 171655.8 \text{ mm}^3.$$

$$A_c = 38477.73 \text{ mm}^2.$$

ดังนั้นเมื่อแทนค่าในสมการที่ 3-10

$$M_c = 171655.8 / 38477.73$$

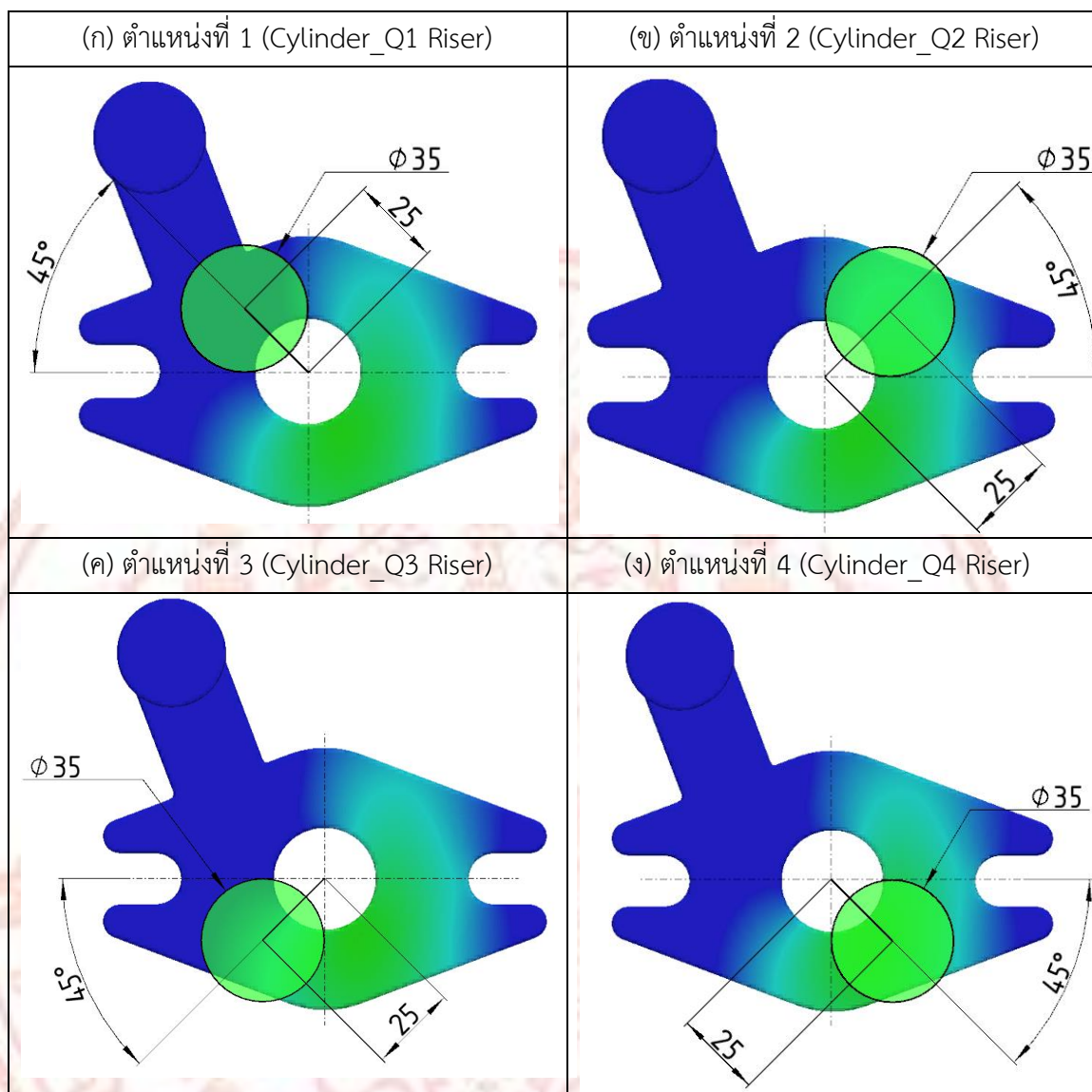
ค่า M_c จึงเท่ากับ 5.567 และสำหรับค่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูล้นทรงกระบอกนั้น
สามารถหาได้จากสมการ 3-13

$$D = 6 M_c \quad (3-13)$$

13)

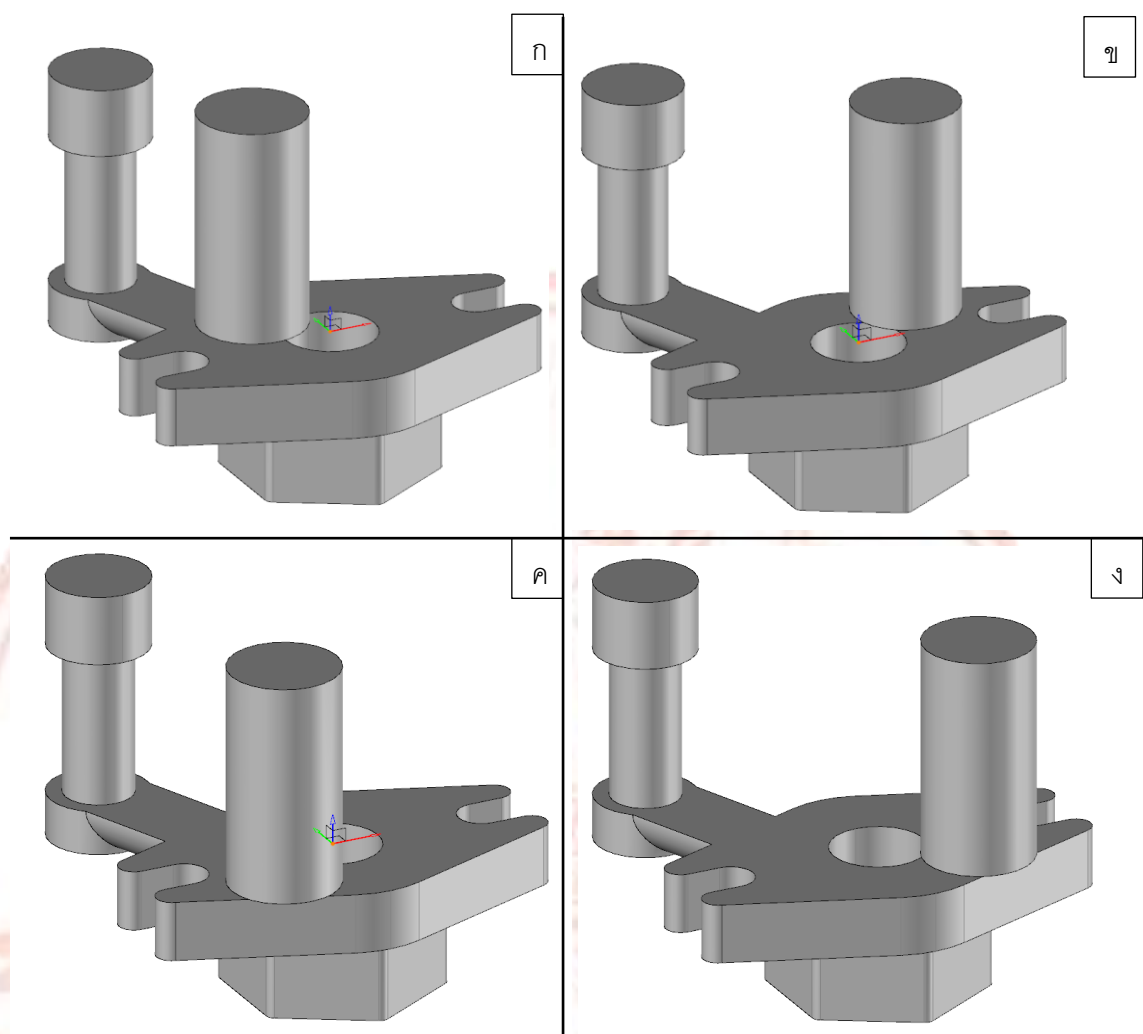
$$D \text{ จึงเท่ากับ } 34.4 \text{ mm. หรือประมาณ } 35 \text{ mm}$$

ดังนั้นจึงกำหนดให้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูล้นทรงกระบอกตันเท่ากับ 35 มิลลิเมตร
และสูงเท่ากับ 70 มิลลิเมตรเท่ากับความสูงของรูตนเอง ต่อมาคือกำหนดตำแหน่งในการวางรูล้น
โดยผู้วิจัยจะทำการทดลองโดยการ วางตำแหน่งรูล้นไปในจุดที่แตกต่างกัน 4 ดังภาพที่ 3-20



ภาพที่ 3-20 แสดงภาพตัวอย่างการทดลองวางรูล้น (ก) ตำแหน่งที่ 1 (ข) ตำแหน่งที่ 2 (ค) ตำแหน่งที่ 3 (ง) ตำแหน่งที่ 4

โดยภาพที่ 3-21 แสดงให้เห็นถึงภาพ 3 มิติของชิ้นงานจากโปรแกรม TopSolid โดยแสดงตำแหน่งการวางรูล้นทั้ง 4 แนวคิด



ภาพที่ 3-21 แสดงภาพตัวอย่างชิ้นงานสามมิติการทดลองวางรูล้น (ก) ตำแหน่งที่ 1 (ข) ตำแหน่งที่ 2 (ค) ตำแหน่งที่ 3 (ง) ตำแหน่งที่ 4

โดยผลของการทดสอบของทั้งสองรูปแบบการทดลอง 1. รูปแบบรูล้นทรงกระบอกกลาง และ 2. รูล้นทรงกระบอกตัน จะแสดงต่อไปในบทที่ 4

3.4 การใช้โปรแกรมจำลองสถานการณ์การไหลของงาน

เริ่มต้นทำการทดสอบการจำลอง โดยใช้โปรแกรม TopSolid สร้างโมเดล CAD จากนั้นเตรียมข้อมูล CAD เพื่อนำเข้าไปสู่ขั้นตอนของการจำลองพฤติกรรมไหลของงานโดยในงานวิจัยนี้จะใช้โปรแกรม Cast-Designer

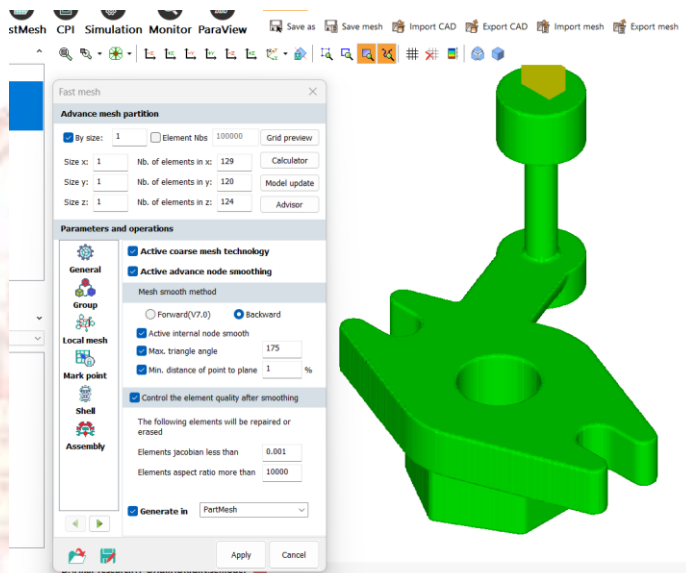


ภาพที่ 3-22 ขั้นตอนการจำลองพฤติกรรมโดยใช้โปรแกรม Cast Designer

โดยอธิบายขั้นตอนการจำลองพฤติกรรมโดยใช้โปรแกรม Cast Designer ดังนี้ คือ เริ่มต้นด้วยการสร้างชิ้นงาน 3D ด้วยโปรแกรม TopSolid จากนั้นนำชิ้นงาน 3D นั้นมาเข้าในส่วนของการจำลองสถานการณ์ในโปรแกรม Cast Designer โดยเริ่มต้นด้วยการสร้าง Mesh และตรวจสอบคุณภาพของ Mesh จากนั้นจึงทำการกำหนดข้อกำหนดต่าง ๆ ลงไปในคำสั่ง CPI และประมวลผล จากนั้นตรวจสอบผลการจำลองในคำสั่ง ParaView ของโปรแกรม Cast Designer และ สรุปผล

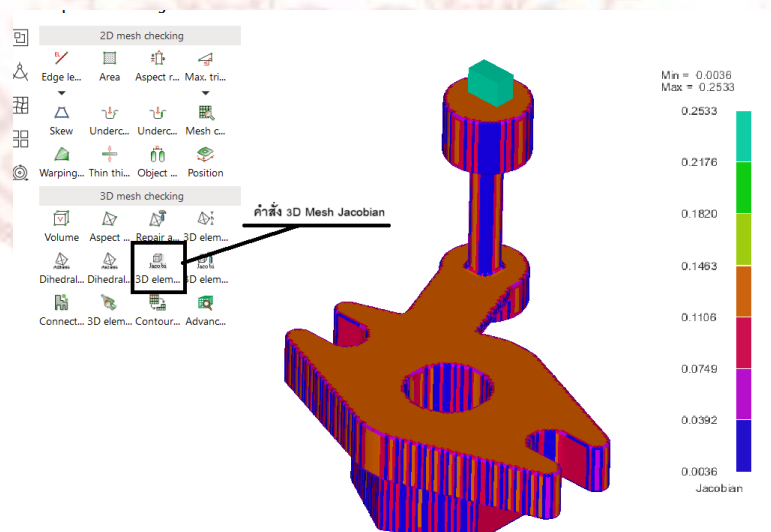
3.4.1 ขั้นตอนในการจำลองพฤติกรรมโดยใช้โปรแกรม Cast-Designer

3.4.1.1 นำ CAD ที่สร้างจาก TopSolid ดังภาพที่ 3-20 เข้าไปในโปรแกรม Cast-Designer เพื่อทำให้เกิด Finite Element Method Mesh ดังภาพที่ 3-23



ภาพที่ 3-23 ขั้นตอนการสร้าง Mesh ด้วย Cast Designer

3.4.2 นำ Mesh ไฟล์ที่ได้ ทำการ Check Mesh Quality ด้วยโปรแกรม Cast Designer ด้วยคำสั่ง 3D mesh jacobian ถ้าค่าที่ Max และ min ไม่ติดลบ หมายถึง mesh มีคุณภาพที่ดี สามารถใช้งานได้



ภาพที่ 3-24 ขั้นตอนการตรวจสอบ Mesh ด้วย 3D Mesh Jacobian

3.4.3 กำหนดค่า CPI ลงในโปรแกรม Cast Designer เพื่อจำลองผลลัพธ์ ของกระบวนการหล่อแบบทรายลงใน CPI Setup เช่น ชนิดของวัสดุ (Material) ชนิดของวัสดุที่ใช้ในการทำเปลือก (Shell Mold) สัมประสิทธิ์ในการถ่ายเทความร้อน (Heat Transfer) อุณหภูมิแม่พิมพ์ (Mold Temperature) อุณหภูมิการเท (Pouring Temperature) ทิศทางการไหล

Modify CPI setup parameters also

Casting material define	Mould material define	Core material define
Al_Pure	GREEN_SAND_MACHINE_MOLDED	<Undefined>
Liquidus: 660.05 C Solidus: 658.05 C		
Initial conditions Initial temperature: 750	Initial conditions Initial temperature: 25	Initial conditions Initial temperature:
Standard gravity direction +X +Y +Z -X -Y -Z	Velocity direction and constant value X: 0 Y: 0 Z: -0.388 m/sec	Temperature BC constant value Temperature: 750 C

OK Cancel

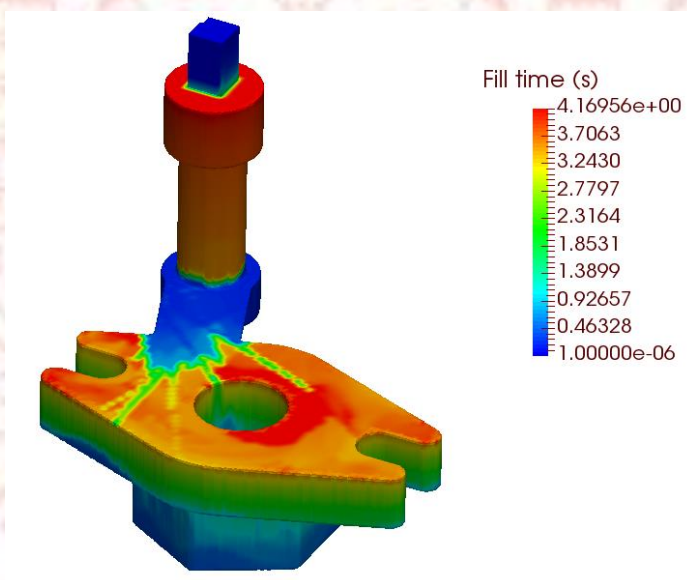
ภาพที่ 3-25 แสดงการกำหนดค่า หมายเลข 1) ประเภทและอุณหภูมิของวัสดุ 2) ประเภทและอุณหภูมิของแม่พิมพ์ 3) ทิศทางแรงโน้มถ่วง 4) ทิศทางและความเร็วในการเท 5) อุณหภูมิขณะเท

3.4.4 การจำลองการไหลของโลหะเหลวเข้าสู่แม่พิมพ์หล่อชิ้นงานในขั้นตอน ParaView เพื่อแสดงผลวิเคราะห์ของพฤติกรรมต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นในโปรแกรม Cast-Designer ซึ่งมีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์และตรวจสอบผลลัพธ์จากข้อกำหนดต่าง ๆ ที่ได้กำหนดไว้โดยผลลัพธ์ที่ได้จากการจำลองนี้คือการแสดงผลของพฤติกรรมต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นในโปรแกรมอย่างละเอียดและครอบคลุมทุกด้าน โดยผลการจำลองที่ได้รับจะประกอบไปด้วย 5 อย่าง คือ

1. ผลการจำลองของพฤติกรรมเวลาเติมเต็มในโพรงแบบ (Fill Time)
2. ผลการจำลองของพฤติกรรมการไหลของโลหะเหลว (Fluid Fraction)
3. ผลการจำลองของเวลาในการแข็งตัวของตัวขึ้นงาน (Solidification Time)
4. ผลการจำลองของโพรงหดตัวที่เกิดในตัวขึ้นงาน (Shrinkage Porosity)
5. ผลการจำลองพฤติกรรมของอุณหภูมิในตัวขึ้นงาน (Temperature)

3.4.4.1 ศึกษาผลการจำลองพฤติกรรมเวลาในการเติมเต็ม (Fill Time)

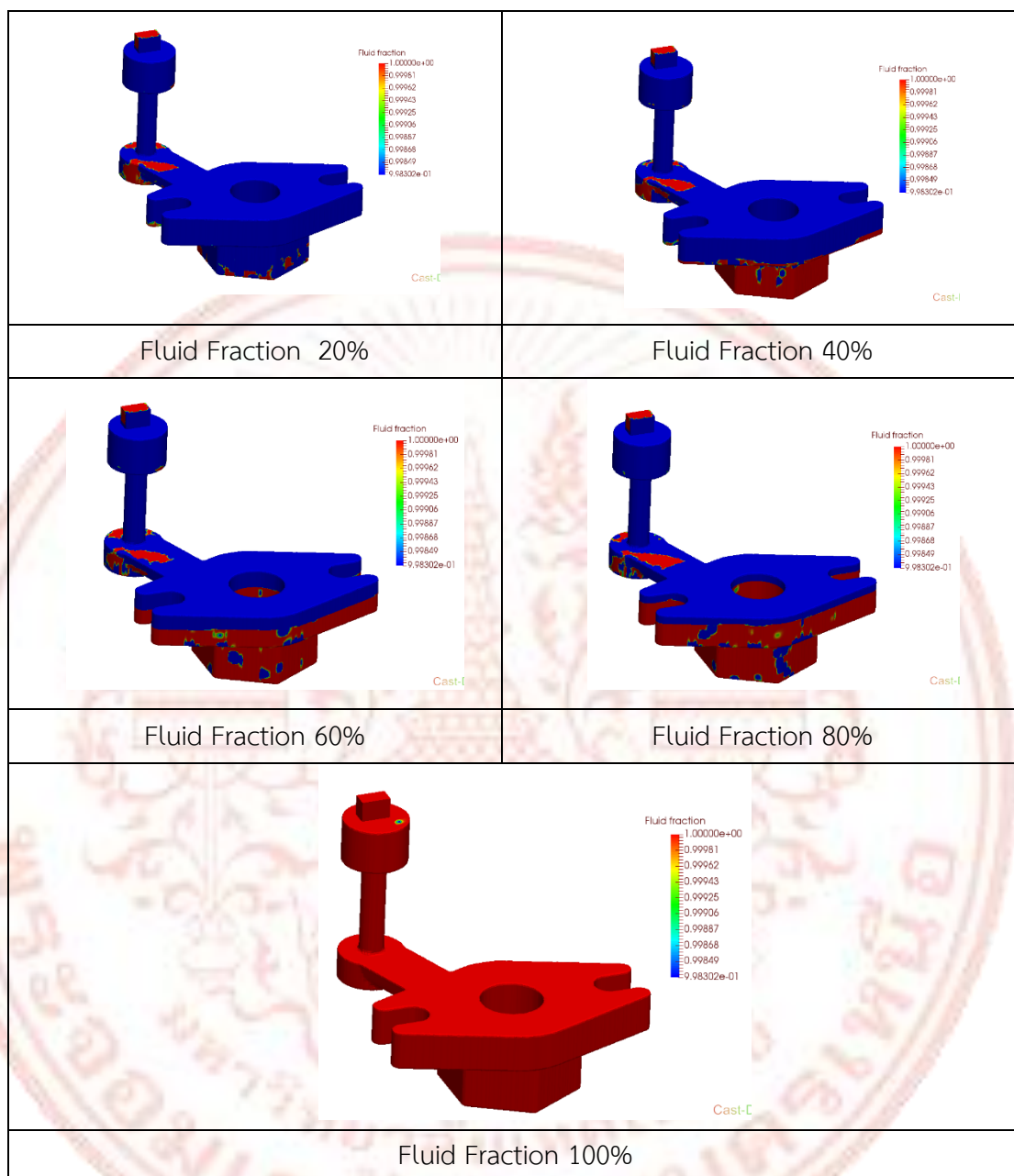
โดยทำการศึกษาเวลาในการเติมเต็มของโลหะเหลว (Fill Time) จากการออกแบบระบบป้อนเติมโลหะเหลว (Gating System) โดยมีทางวิ่งโลหะเหลว (Runner) เข้าสู่ชิ้นงาน ส่งผลต่อเวลาในการไหลเติมโลหะเหลว (Fill Time) การเทโลหะเหลวเข้าแบบแม่พิมพ์อาจเป็นปัจจัยให้มีความเสียหายในงานหล่อที่เกิดขึ้น



ภาพที่ 3-26 แบบจำลองพฤติกรรมเวลาในการเติมเต็มโลหะเหลว

3.4.4.2 ศึกษาผลการจำลองพฤติกรรมการไหลของโลหะเหลว (Fluid Fraction)

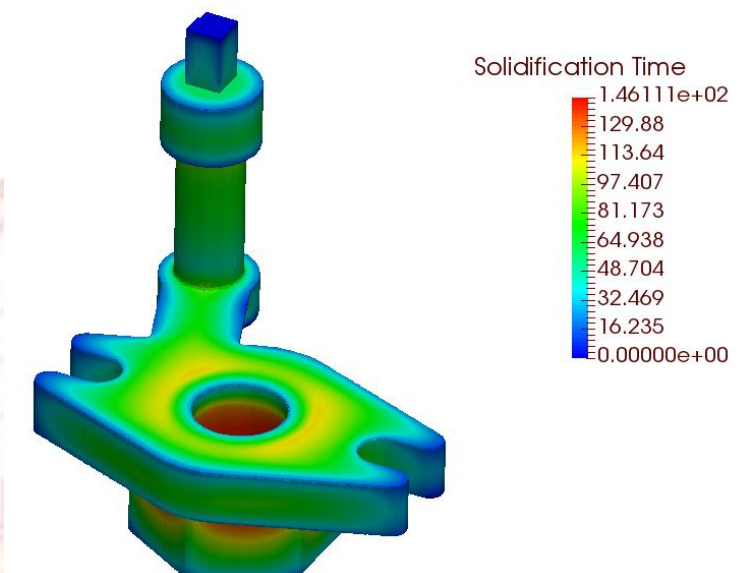
โดยทำการศึกษาการไหลของโลหะเหลวเข้าสู่โพรงแบบ จากการออกแบบระบบป้อนเติมโลหะเหลว (Gating System) โดยมีทางวิ่งโลหะเหลว (Runner) เข้าสู่ชิ้นงาน โดยดูพฤติกรรมการไหลทั้งหมด 10 ช่วง ระยะเวลาต่างๆ



ภาพที่ 3-27 แสดงพฤติกรรมของการไหลของโลหะเหลวจาก 0 % ถึง 100 %

3.4.4.3 ศึกษาการแข็งตัวของโลหะเหลว (Solidification Time)

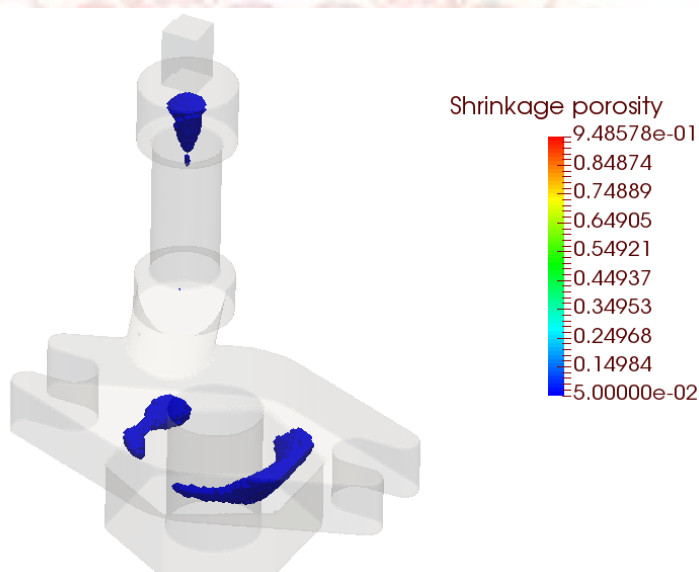
โดยทำการศึกษาจากการวิเคราะห์ชิ้นงาน โดยการทำแบบจำลองการแข็งตัวของโลหะเหลว ในแม่พิมพ์จากการวิเคราะห์ผ่านโปรแกรม เพื่อศึกษาลำดับการเย็นตัวของชิ้นงาน และเวลาที่ใช้



ภาพที่ 3-28 แสดงพฤติกรรมของการแข็งตัวของชิ้นงาน

3.4.4.4 ศึกษาการเกิดโพรงหดตัว (Shrinkage Porosity)

เนื่องจากในช่วงเวลาระหว่างที่อะลูมิเนียมเริ่มกลายเป็นของแข็ง ซึ่งจะเริ่มเย็นตัวจากผิวด้านนอกและเนื้อด้านในจะเย็นตัวช้ากว่า ทำให้เกิดเป็นโพรงหดตัวจึงต้องทำการออกแบบระบบป้อนเติมโลหะเหลวให้อะลูมิเนียมเหลวสามารถชดเชยในส่วนที่เป็นโพรงหดตัวได้อย่างสมบูรณ์

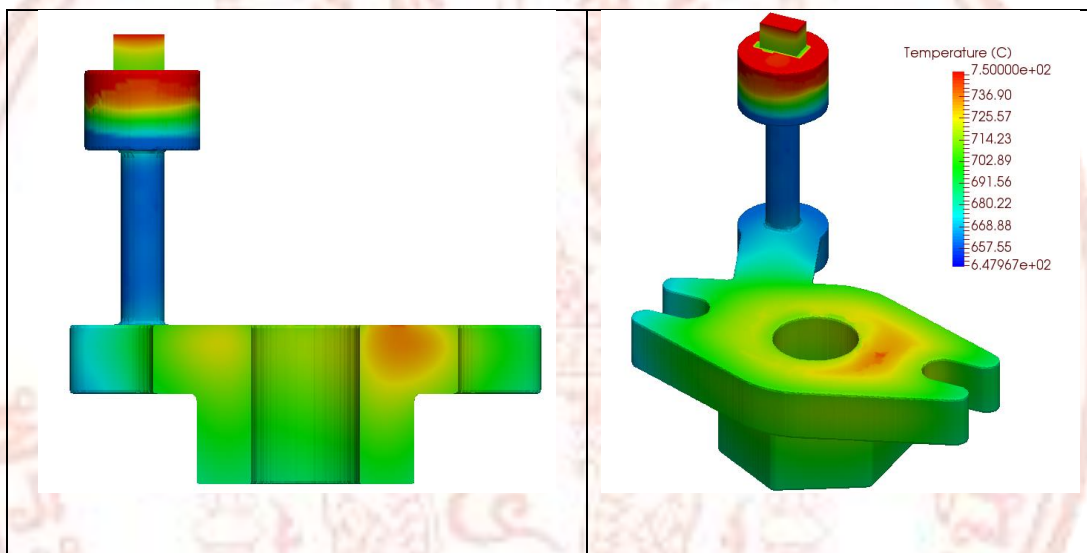


ภาพที่ 3-29 แสดงพฤติกรรมของการเกิดโพรงหดตัวของชิ้นงาน

จากการดำเนินงานวิจัยในบทที่ 3 แสดงให้เห็นถึงปัญหาที่เกิดขึ้นของชิ้นงานหล่อทราย กระสวนขึ้นเดียวหน้าผ่าราบมีไส้แบบในตัวไม่มีรูล้น โดยผู้วิจัยได้ทำการออกแบบวิธีการแก้ไขโดยใช้ อุณหภูมิที่เกิดขึ้นในตัวชิ้นงานเป็นแนวคิด โดยสำหรับผลลัพธ์ของการจำลองผู้วิจัยจะกล่าวในบทที่ 4 ต่อไป

3.4.4.5 แสดงพฤติกรรมของอุณหภูมิบนชิ้นงาน (Temperature)

ศึกษาทั้งหมดสามช่วงเวลา คือ อุณหภูมิช่วงเวลาดิ้นสุดการเติมน้ำโลหะเหลว (Temperature at End Filling Time) , อุณหภูมิช่วงเวลาเริ่มต้นการแข็งตัว (Temperature at Start Solidification Time) และอุณหภูมิช่วงเวลาดิ้นสุดการแข็งตัว (Temperature at End Solidification Time)



ภาพที่ 3-30 ตัวอย่างการแสดงผลของอุณหภูมิของชิ้นงาน ณ ช่วงเวลาต่าง ๆ

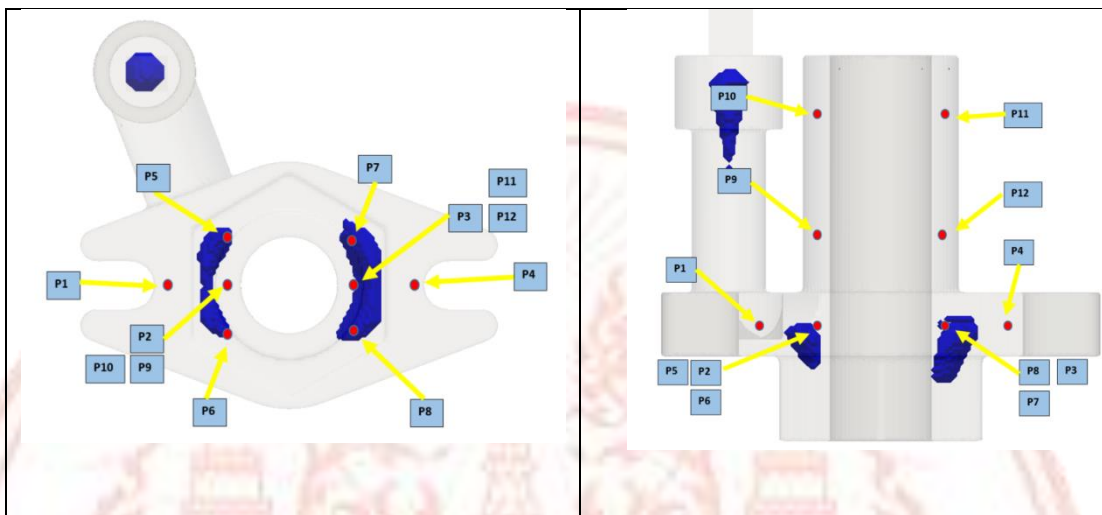
โดยในส่วนของการดูพฤติกรรมของอุณหภูมินั้น จะมีการตรวจสอบเพิ่มเติมโดยการเพิ่มจุดวัดลงไปไปในเนื้อของชิ้นงานที่ผ่านการจำลอง เพื่อที่จะใช้ในการดูความแตกต่างของอุณหภูมิโดยรอบของตัวชิ้นงาน

3.4.4.6 แสดงผลของอุณหภูมิ ณ จุดต่าง ๆ ของชิ้นงาน โดยการกำหนดจุดวัดลงไปเนื้อของชิ้นงานที่ผ่านการจำลอง

การกำหนดจุดวัดอุณหภูมิมีเหตุผลเพื่อนำมาวิเคราะห์ผลลัพธ์ ณ จุดต่าง ๆ โดยเทียบอุณหภูมิต่อช่วงเวลา เพื่อดูข้อแตกต่างระหว่างจุดที่เกิดโพรงหดตัว และไม่เกิดโพรงหดตัวว่ามีความแตกต่างกันอย่างไร เพื่อตรวจสอบอัตราการเย็นตัวโดยภาพรวมทั้งหมดของจุด ณ จุด ที่กำหนดทั้งหมด

3.4.4.6.1 ชิ้นงานหล่อทรายกระสวนขึ้นเดี่ยวหน้าผ่าราบมีไส้แบบในตัวรูล้น

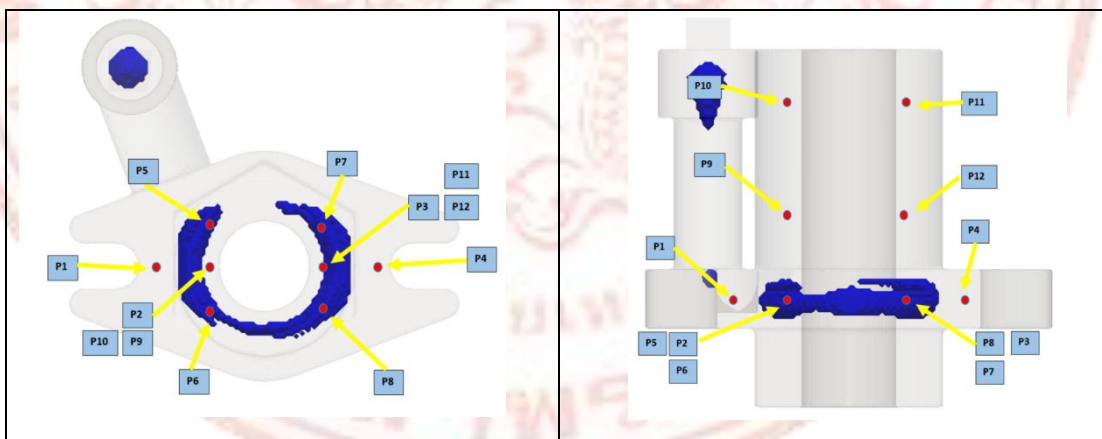
ทรงกระบอกกลางหนา 8 มิลลิเมตร (Tube 8mm. Riser)



ภาพที่ 3-31 แสดงตำแหน่งจุด P1 ถึง P12 ของชิ้นงาน Tube 8mm. Riser

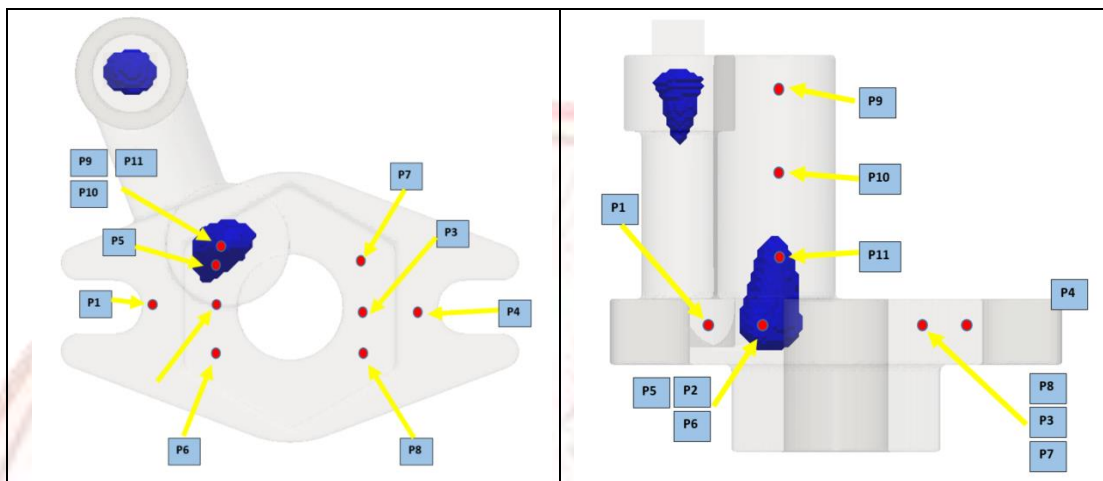
3.4.4.6.2 ชิ้นงานหล่อทรายกระสวนขึ้นเดี่ยวหน้าผ่าราบมีไส้แบบในตัวรูล้น

ทรงกระบอกกลางหนา 15 มิลลิเมตร (Tube 15mm. Riser)



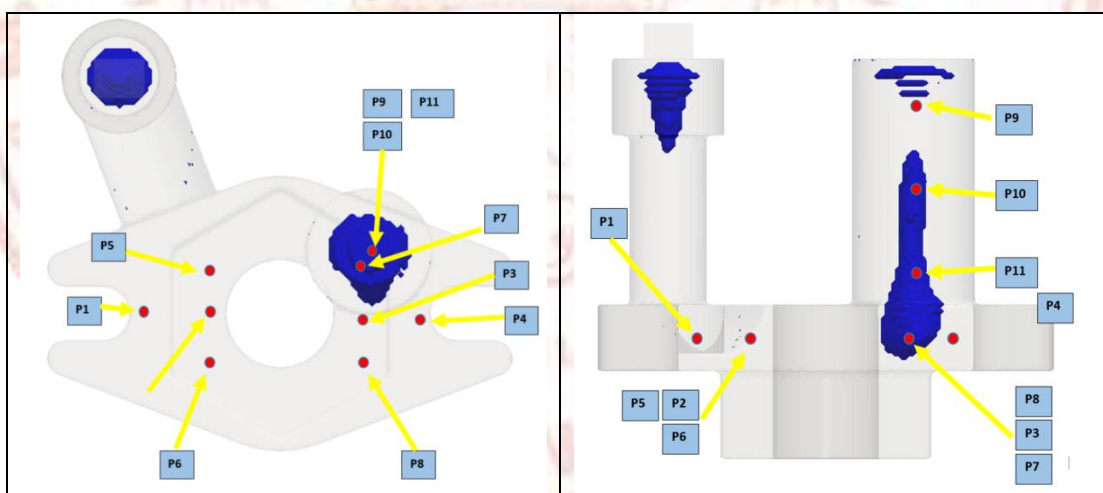
ภาพที่ 3-32 แสดงตำแหน่งจุด P1 ถึง P12 ของชิ้นงาน Tube 15mm. Riser

3.4.4.6.3 ชิ้นงานหล่อทรายชิ้นงานกระสวนขึ้นเดียวหน้าผ่าราบมีไส้แบบในตัวรูล้น
ทรงกระบอกตัน ตำแหน่งวางรูล้นที่ 1 (Cylinder_Q1 Riser)



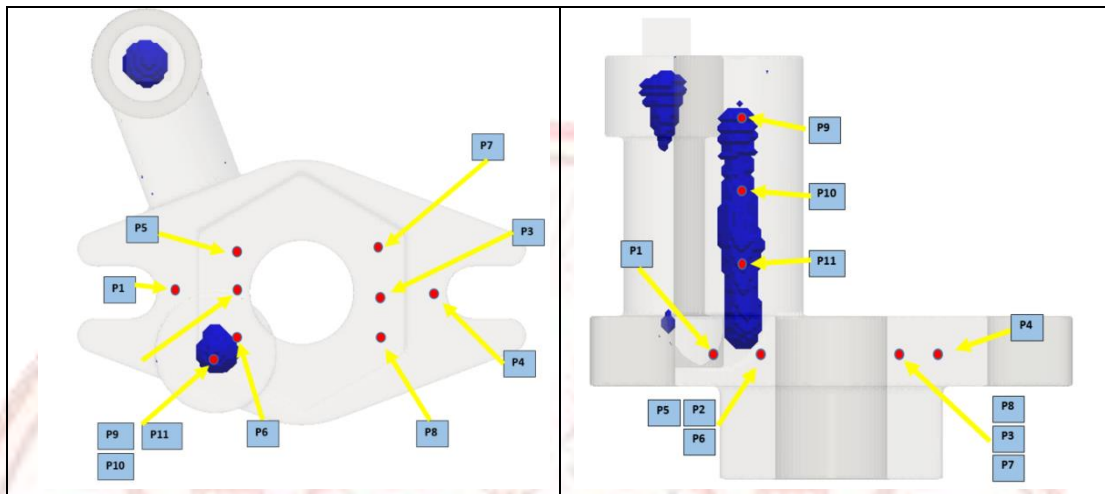
ภาพที่ 3-33 แสดงตำแหน่งจุด P1 ถึง P11 ของชิ้นงาน Cylinder_Q1 Riser

3.4.4.6.4 ชิ้นงานหล่อทรายชิ้นงานกระสวนขึ้นเดียวหน้าผ่าราบมีไส้แบบในตัวรูล้น
ทรงกระบอกตัน ตำแหน่งวางรูล้นที่ 2 (Cylinder_Q2 Riser)



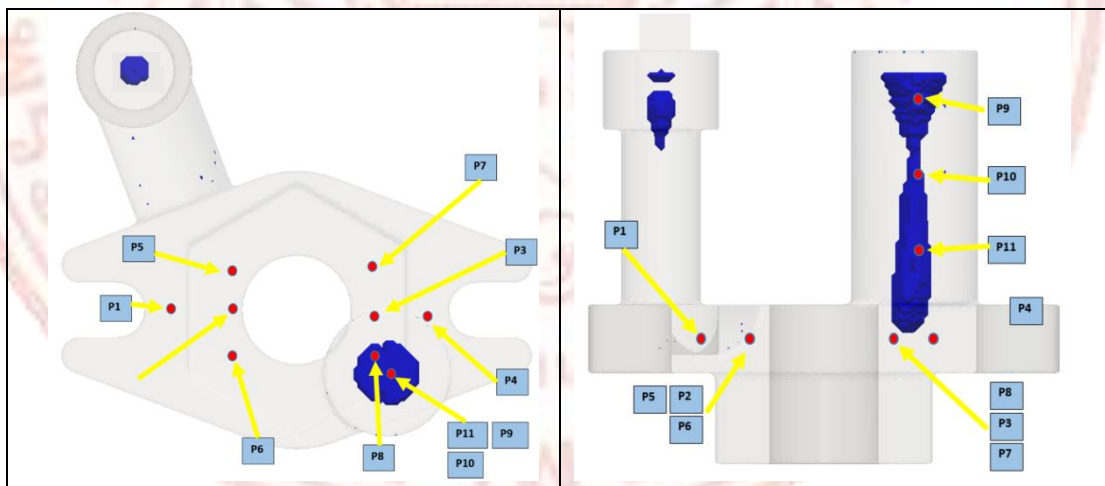
ภาพที่ 3-34 แสดงตำแหน่งจุด P1 ถึง P11 ของชิ้นงาน Cylinder_Q2 Riser

3.4.4.6.5 ชิ้นงานหล่อทรายชิ้นงานกระสวนขึ้นเดียวหน้าผ่าราบมีไส้แบบในตัวรูกลั่น
ทรงกระบอกตันตำแหน่งวางรูกลั่นที่ 3 (Cylinder_Q3 Riser)



ภาพที่ 3-35 แสดงตำแหน่งจุด P1 ถึง P11 ของชิ้นงาน Cylinder_Q3 Riser

3.4.4.6.6 ชิ้นงานหล่อทรายชิ้นงานกระสวนขึ้นเดียวหน้าผ่าราบมีไส้แบบในตัวรูกลั่น
ทรงกระบอกตัน ตำแหน่งวางรูกลั่นที่ 4 (Cylinder_Q4 Riser)



ภาพที่ 3-36 แสดงตำแหน่งจุด P1 ถึง P11 ของชิ้นงาน Cylinder_Q4 Riser

ผลลัพธ์ที่ได้ในแต่ละจุดวัด ในแต่ละชิ้นงานทดสอบผู้วิจัยจะนำมาแสดงเป็นกราฟ และสำหรับ
ผลลัพธ์ของการจำลองจะแสดงไว้ในบทที่ 4 ต่อไป

3.5 การเทหล่อชิ้นงานจริง

ในส่วนของการขั้นตอนการเทหล่อชิ้นงานจริงนั้น ผู้วิจัยจะเลือกชิ้นงานเทหล่อจากผลการจำลองด้วยโปรแกรม Cast designer โดยเลือกแนวคิดที่สามารถที่จะแก้ไขปัญหาโพรงหดตัวได้ดีที่สุด นั่นคือแนวคิดที่มีค่าการเกิด Shrinkage Porosity ในตัวชิ้นงานน้อยที่สุดนั่นเอง ในส่วนของขั้นตอนวิธีการผู้วิจัยได้เตรียมอุปกรณ์ต่าง ๆ ไว้ดังนี้

3.5.1 การเตรียมแม่พิมพ์

3.5.1.1 การเตรียมทราย ทรายที่ใช้ทดลองเป็นทรายที่มีส่วนผสมของเบนโทไนต์ที่ใช้งานจริงอยู่ในห้องทดลองงานหล่อโลหะของมหาวิทยาลัยพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ซึ่งใช้ปริมาณน้ำในการควบคุมความชื้นในการทดลองอยู่ที่ 7-8% ขึ้นอยู่กับปริมาณของทรายในการทดลอง



ภาพที่ 3-37 ทรายที่ใช้ในการทดลอง

3.5.1.2 กระบวนการหลอม

อุณหภูมิในการเทหลอมมีจุดมุ่งหมายเพื่อให้โลหะเหลวไหลเข้าสู่โพรงแบบ ถ้าใช้อุณหภูมิที่สูงมากเกินไปจะทำให้เกิดการแข็งตัวช้าและระยะเวลาในการแข็งตัวที่นานขึ้น ซึ่งอาจทำให้เกิดการหดตัวของชิ้นงานได้ ซึ่งการทดลองควบคุมอุณหภูมิอยู่ที่ 690-750 องศาเซลเซียส



ภาพที่ 3-38 แสดงลักษณะของเตาหลอมโลหะ

3.5.1.3 กระบวนการสร้างโพรงแบบทราย

ในการศึกษากระบวนการผลิตชิ้นงาน จะใช้กระบวนการหล่อแบบทรายโดยใช้แม่พิมพ์แบบทราย โดยการสร้างโพรงแบบที่พร้อมสำหรับรองรับโลหะเหลวโดยต้องมีกำหนดหน้าผา การออกแบบระบบทางเข้าโลหะเหลว เช่น รูเท ทางเข้า ทางวิ่ง และ รูล้น การวางตำแหน่งหัวป้อน เพื่อให้โลหะเหลวไหลเข้าสู่โพรงแบบโดยสมบูรณ์

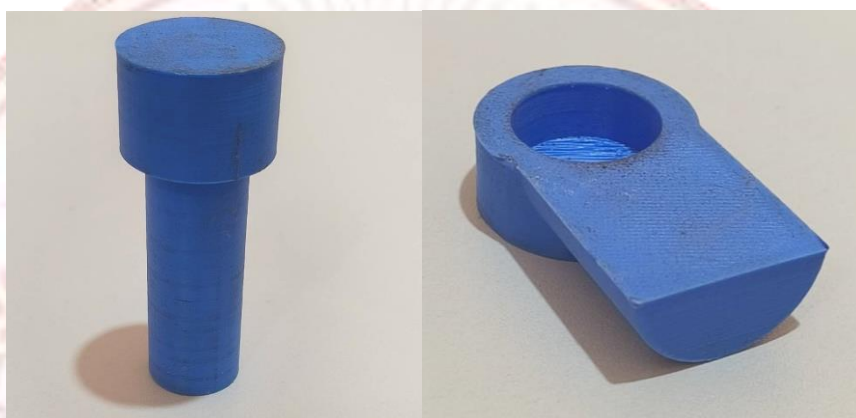


ภาพที่ 3-39 แสดงลักษณะแม่พิมพ์ที่ใช้ในกระบวนการผลิต

3.5.2 การเตรียมรูเท ทางเข้า และรูล้น

ในการเตรียมอุปกรณ์สำหรับสร้างรูเท ทางเข้า และ รูล้นสำหรับการเตรียมหล่อขึ้นงานนั้น ทางผู้วิจัยจะใช้วิธีการสร้างด้วยเครื่องพิมพ์สามมิติ ณ สาขาวิชาเขียนแบบเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ โดยลักษณะของรูเท ทางเข้า และรูล้นเป็นดังต่อไปนี้

3.5.2.1 ลักษณะของรูเทและทางเข้า



ภาพที่ 3-40 แสดงลักษณะของรูเทและทางเข้า

รูเทมีความสูง 80 มิลลิเมตร พื้นที่หน้าตัดวงกลม 22 มิลลิเมตร และรูวิ่งกับหน้าตัดทางเข้า มีรัศมีครึ่งวงกลม 14 มิลลิเมตร ในส่วนของทางเข้า แอ่งพักโลหะเหลวมีพื้นที่หน้าตัดวงกลม 32 มิลลิเมตร และมีรูพื้นที่หน้าตัดวงกลม 22 มิลลิเมตร ลึก 10 มิลลิเมตรสำหรับการประกอบรูเทกับรูล้น

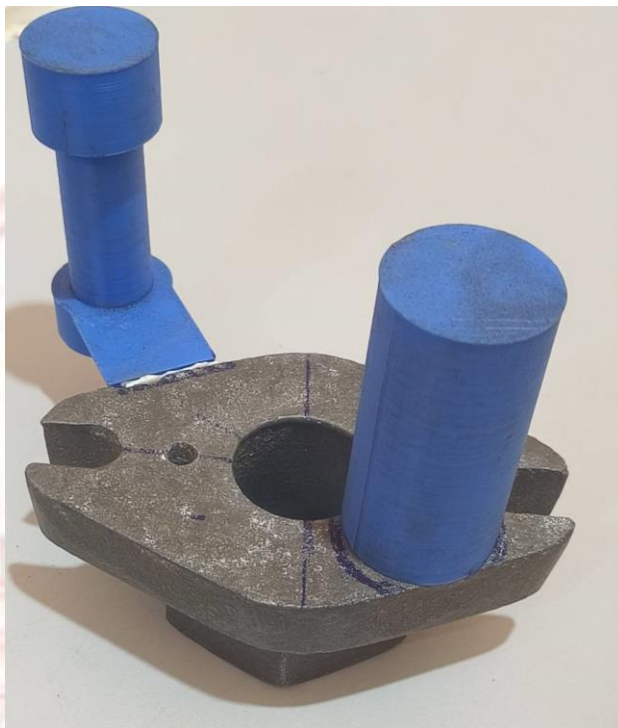
3.5.2.2 ลักษณะของรูล้น



ภาพที่ 3-41 แสดงลักษณะของรูล้น

สำหรับรูล้นนั้น ผู้วิจัยได้ออกแบบโดยใช้ค่าจากการคำนวณที่เหมาะสม โดยรูล้นจะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 35 มิลลิเมตร สูง 70 มิลลิเมตร โดยจะนำไปวางไว้บนชิ้นงาน

3.5.2.3 การประกอบรูเท ทางเข้า รูล้น และ กระสวน



ภาพที่ 3-42 แสดงลักษณะการประกอบรูเท ทางเข้า รูล้น และกระสวน

ในการประกอบรูเท ทางเข้า และรูล้นเข้ากับกระสวนนั้นแสดงไว้ในภาพที่ 3-42 ตำแหน่งในการวางจะเป็นไปตามรูปแบบที่กำหนดไว้ในบทที่ 3 ทั้งหมด โดยหลังจากกำหนดตำแหน่งเสร็จสิ้นก็จะนำไปทำเป็นโพรงแบบเพื่อเตรียมสำหรับการเทหล่อโลหะต่อไป สำหรับผลการจำลองสถานการณ์ด้วยโปรแกรม Cast Designer ของชิ้นงานทั้ง 6 แนวคิด และผลลัพธ์การเทหล่อจริงจะแสดงในบทที่ 4 ถัดไป

3.6 การออกแบบวิธีการแก้ไขปัญหาล้างจากการหล่อขึ้นงานจริง

ในส่วนถัดมาจะเป็นการศึกษาวិธีการแก้ไขปัญหาล้างเพิ่มเติม โดยใช้ข้อมูลของผลลัพธ์การจำลองที่ให้ผลลัพธ์ในการแก้ไขปัญหาล้างที่ดีที่สุดจากหัวข้อที่ 3.4 และ 3.5 มาทำการศึกษารายละเอียดขั้นตอนของการจำลองสถานการณ์การหล่อเพิ่มเติม เพื่อหาวิธีการหล่อที่ดีที่สุดที่สามารถแก้ไขปัญหาล้างที่เกิดโพรงหดตัวได้อย่างสมบูรณ์ โดยสำหรับการออกแบบวิธีการจำลองเพิ่มเติม โดยใช้รูลันขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 35 มิลลิเมตรเป็นอ้างอิง ผู้วิจัยจะออกแบบแนวคิดการจำลองเป็น 3 รูปแบบ ดังนี้

3.6.1 การปรับขนาดรูลันเป็นขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 30 และ 40 มิลลิเมตร

การเปลี่ยนขนาดรูลันส่งผลโดยตรงต่อการระบายโลหะส่วนเกินและการควบคุมทิศทางการไหลของโลหะหลอมภายในแบบหล่อ โดยรูลันขนาด 30 มิลลิเมตรอาจเล็กเกินไปสำหรับการระบายโลหะอย่างมีประสิทธิภาพ ส่งผลให้แรงดันภายในระบบเพิ่มขึ้น และอาจเกิดการอันของโลหะหลอมในบางบริเวณ ซึ่งทำให้โลหะไม่สามารถไหลเข้าไปเติมเต็มแบบหล่อได้อย่างทั่วถึง และเพิ่มโอกาสเกิดโพรงหดตัว

ในทางตรงกันข้าม หากขยายขนาดรูลันเป็น 40 มิลลิเมตร จะสามารถรองรับการไหลของโลหะส่วนเกินได้ดีกว่า ช่วยลดความเสี่ยงการหดตัวของโลหะในช่วงเย็นตัว ทำให้ลดโอกาสเกิดโพรงหดตัวในชิ้นงาน โดยเฉพาะในบริเวณที่อยู่ใกล้รูลัน ดังนั้น การเพิ่มขนาดรูลันจึงเป็นทางเลือกหนึ่งที่น่าพิจารณาในการลดปัญหานี้

3.6.2 การปรับตำแหน่งการวางรูลัน

ตำแหน่งของรูลันมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อการควบคุมทิศทางการไหลของโลหะหลอม และส่งผลต่อการแข็งตัวของโลหะในชิ้นงาน หากรูลันถูกวางไว้ในตำแหน่งที่ไม่เหมาะสม เช่น ไกลเกินไปจากจุดที่เกิดโพรงหดตัว หรืออยู่ในทิศทางที่โลหะไม่สามารถไหลไปถึงได้อย่างทั่วถึง ก็จะไม่สามารถทำหน้าที่รองรับโลหะส่วนเกินเพื่อลดความเสี่ยงการหดตัวได้ ในทางกลับกัน หากทำการปรับตำแหน่งรูลันให้อยู่ใกล้กับบริเวณที่มักเกิดโพรงหดตัว หรือปลายทางของการไหลของโลหะ จะช่วยให้โลหะหลอมสามารถเติมเต็มช่องว่างได้ดียิ่งขึ้น

3.6.3 การลดขนาดหีบบนที่ใช้ในการหล่อแบบไม่มีรูลัน แบบปรับความสูงรูลัน และไม่ปรับความสูงรูลัน

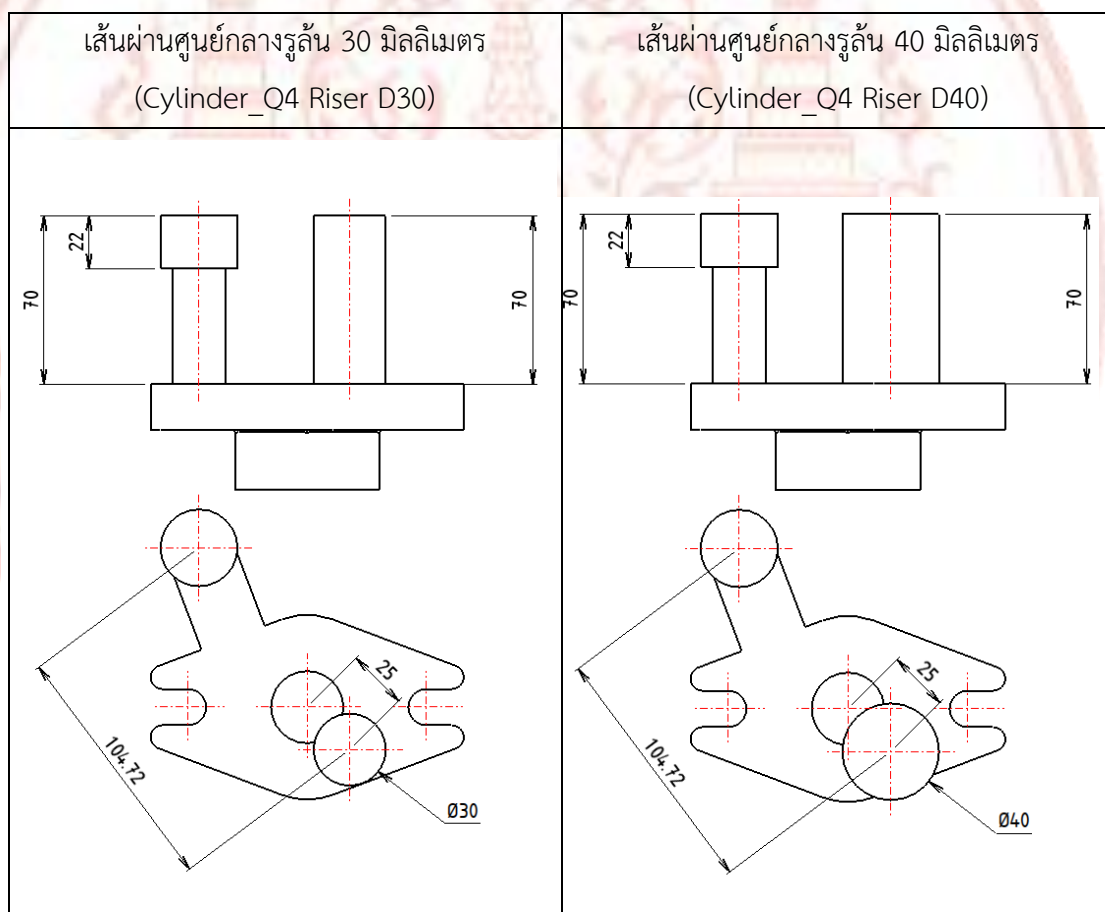
การลดความสูงของหีบบนจะช่วยให้ปริมาณโลหะหลอมที่อยู่เหนือแบบลดลง ส่งผลให้พลังงานความร้อนสะสมในระบบน้อยลง และลดเวลาในการถ่ายเทความร้อนจากโลหะไปยังทรายแบบ ช่วยให้การแข็งตัวของโลหะเกิดขึ้นเร็วขึ้นและสม่ำเสมอขึ้น จึงช่วยลดการเกิดโพรงหดตัวได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยเฉพาะเมื่อใช้ร่วมกับรูลัน

โดยทั้ง 3 รูปแบบจำลองสถานการณ์การไหลโดยใช้โปรแกรม Cast Designer เพื่อหาผลการจำลองทั้งหมด 5 ผลการจำลอง คือ

- ผลการจำลองของพฤติกรรมเวลาเต็มเต็มในโพรงแบบ (Fill Time)
- ผลการจำลองของพฤติกรรมการไหลของโลหะเหลว (Fluid Fraction)
- ผลการจำลองของเวลาในการแข็งตัวของตัวขึ้นงาน (Solidification Time)
- ผลการจำลองของโพรงหดตัวที่เกิดในตัวขึ้นงาน (Shrinkage Porosity)
- ผลการจำลองพฤติกรรมของอุณหภูมิในตัวขึ้นงาน (Temperature)

3.6.1 การปรับขนาดรูล้นเป็นขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 30 และ 40 มิลลิเมตร

ในการทดลองนี้ ผู้วิจัยจะทำการทดสอบโดยการปรับขนาดของรูล้นจากเส้นผ่านศูนย์กลาง 35 มิลลิเมตร ตำแหน่งการวางที่ 4 เป็นขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 30 มิลลิเมตร และ 40 มิลลิเมตร โดยยังคงความสูงไว้ที่ 70 มิลลิเมตร โดยออกแบบขึ้นงานลักษณะดังภาพที่ 3-43

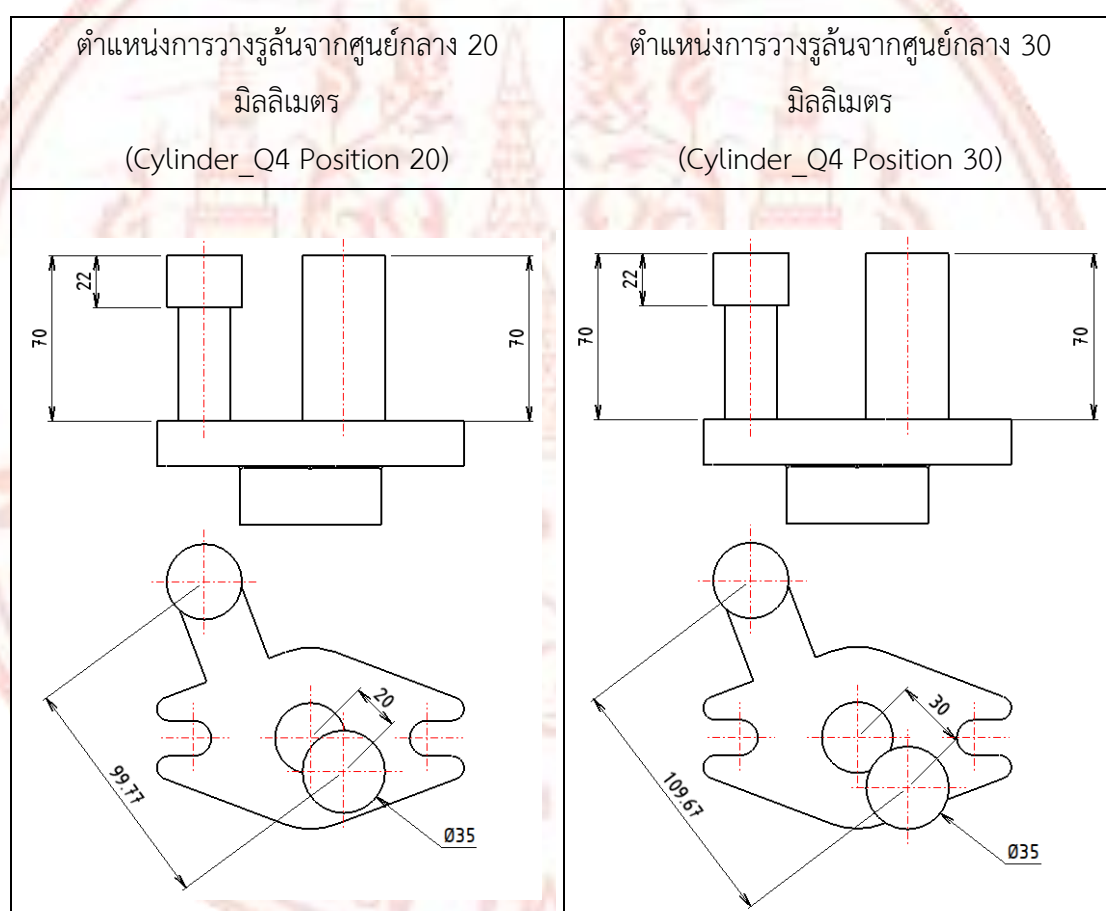


ภาพที่ 3-43 แสดงตัวอย่างขึ้นงานทดสอบปรับลดขนาดรูล้นเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 30 มิลลิเมตร และ 40 มิลลิเมตร

โดยการจำลองทั้งสองรูปแบบจะใช้อุณหภูมิ ความเร็วในการเท และวัสดุในการเทแบบเดียวกันของชิ้นงานต้นแบบทั้งหมด ต่อไปจะเป็นการออกแบบในอีกหนึ่งแนวคิดคือ การปรับตำแหน่งการวางรูล้น

3.6.2 การปรับตำแหน่งการวางรูล้น

สำหรับการปรับตำแหน่งการวางรูล้นนั้น ปรับจากแนวคิดการแก้ไขปัญหาโดยใช้รูล้นทรงกระบอกตันขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 35 มิลลิเมตร โดยจะปรับระยะห่างการวางรูล้นจากจุดศูนย์กลางชิ้นงานเป็นระยะเท่ากับ 20 มิลลิเมตร และ 30 มิลลิเมตร ตามลำดับ ดังภาพที่ 3-44



ภาพที่ 3-44 แสดงตัวอย่างชิ้นงานทดสอบปรับตำแหน่งรูล้นห่างจากจุดศูนย์กลาง 20 และ 30 มิลลิเมตร

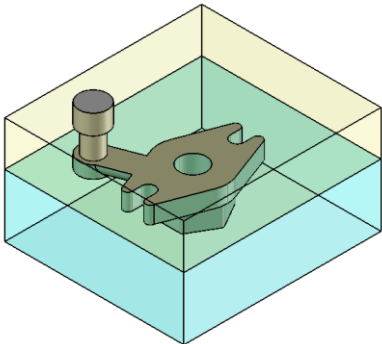
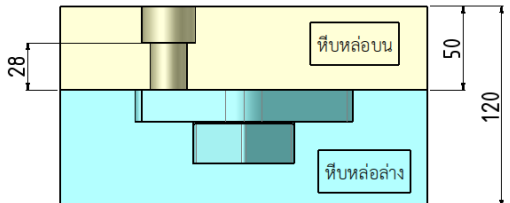
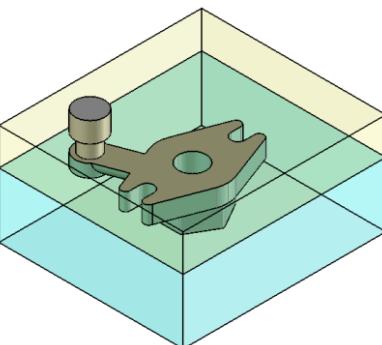
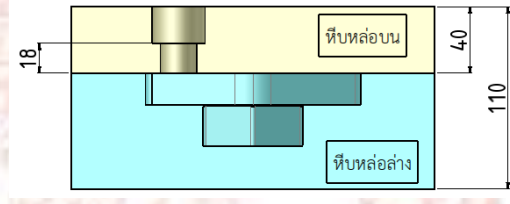
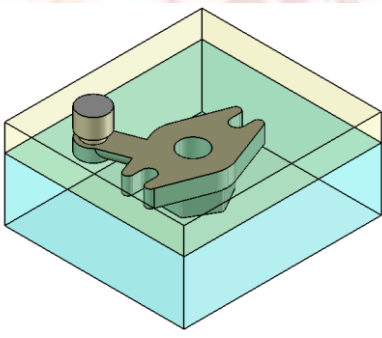
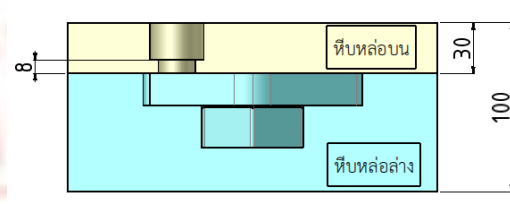
โดยการจำลองทั้งสองรูปแบบจะใช้อุณหภูมิ และวัสดุในการเทแบบเดียวกันของชิ้นงานต้นแบบทั้งหมด ต่อไปจะเป็นการออกแบบในอีกหนึ่งแนวคิดคือ การลดความสูงของหีบ

3.6.3 การลดขนาดหีบبنที่ใช้ในการเทหล่อแบบไม่มีรูล้น และมีรูล้น

ในการจำลองสถานการณ์นี้ ผู้วิจัยจะทดลองลดขนาดของหีบبنลงจากขนาดความสูง 70 มิลลิเมตรเป็น 50, 40 และ 30 มิลลิเมตรตามลำดับ โดยทดสอบทั้งรูปแบบที่ไม่มีรูล้น และมีรูล้น เพื่อทดสอบผลลัพธ์ของการเกิดโพรงหดตัว

3.6.3.1 การลดขนาดหีบبنที่ใช้ในการเทหล่อแบบไม่มีรูล้น

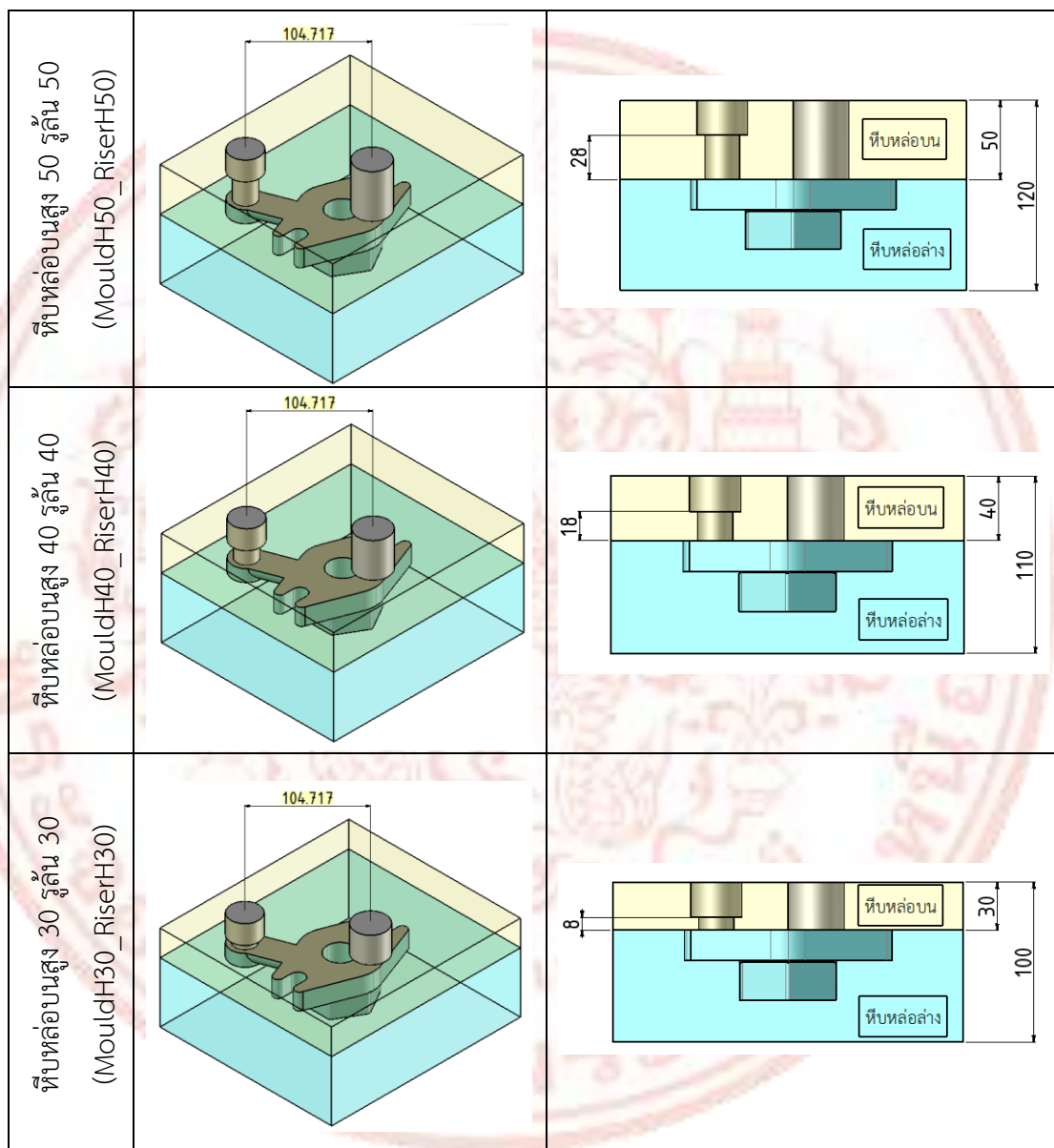
โดยสำหรับแบบจำลองที่ใช้ในการลดขนาด จะเป็นดังภาพที่ 3-45

หีบหมอลบสูง 50 ไม่นรูล้น (Mould H50 No_Riser)		
หีบหมอลบสูง 40 ไม่นรูล้น (Mould H40 No_Riser)		
หีบหมอลบสูง 30 ไม่นรูล้น (Mould H30 No_Riser)		

ภาพที่ 3-45 แสดงชิ้นงานจำลองสถานการณ์การลดขนาดหีบبنที่ใช้ในการเทหล่อแบบไม่มีรูล้น ขนาดความสูงหีบหมอลบ 50, 40 และ 30 มิลลิเมตร

3.6.3.2 การลดขนาดทึบบนที่ใช้ในการเทหล่อแบบปรับความสูงรูลัน

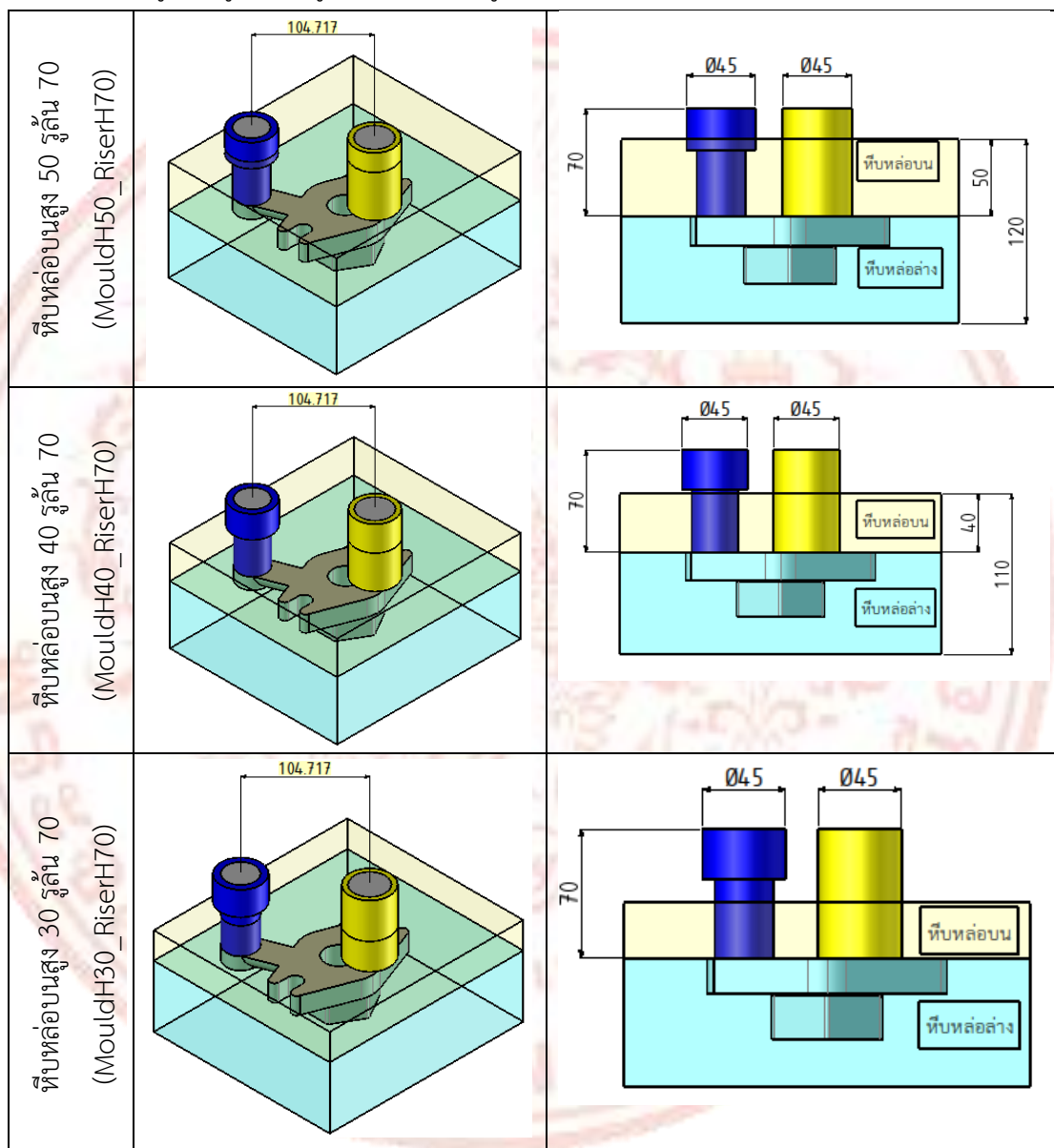
ในรูปแบบการจำลองลดขนาดทึบบนที่ใช้ในการเทหล่อแบบมีรูลันนั้น ผู้วิจัยจะลดขนาดทึบและปรับความสูงของรูลันและรูเทหล่อลง โดยปรับจากแนวคิดการวางรูลันทรงกระบอกตันตำแหน่งการวางที่ 4 (Cylinder_Q4) โดยสำหรับแบบจำลองที่ใช้ในการลดขนาด จะเป็นดังภาพที่ 3-46



ภาพที่ 3-46 แสดงชิ้นงานจำลองสถานการณ์การลดขนาดทึบบนที่ใช้ในการเทหล่อแบบปรับความสูงรูลัน ขนาดความสูงทึบหล่อบน 50,40 และ 30 มิลลิเมตร

3.6.3.3 การลดขนาดทึบบนที่ใช้ในการเทหล่อแบบไม่ปรับความสูงรูลัน

ในรูปแบบการจำลองลดขนาดทึบบนที่ใช้ในการเทหล่อแบบไม่ปรับความสูงรูลัน ผู้วิจัยจะลดขนาดทึบโดยปรับจากแนวคิดการวางรูลันทรงกระบอกตันตำแหน่งการวางที่ 4 (Cylinder_Q4) โดยจะยังคงความสูงของรูลันและรูเทที่ระยะความสูง 70 มิลลิเมตรไว้ แสดงแบบแนวคิดในภาพที่ 3-47



ภาพที่ 3-47 แสดงชิ้นงานจำลองสถานการณ์การลดขนาดทึบบนที่ใช้ในการเทหล่อแบบไม่ปรับความสูงรูลัน ขนาดความสูงทึบหล่อบน 50, 40 และ 30 มิลลิเมตร

หลังจากทำการจำลองสถานการณ์ของชิ้นงานทั้งหมดเสร็จสิ้นแล้วนั้น ในขั้นตอนถัดไปจะเป็นการทำข้อมูลสรุปในรูปแบบของตารางและกราฟ โดยรายละเอียดจะกล่าวไว้ในหัวข้อที่ 3.7

3.7 แสดงข้อมูลผลการทดสอบการจำลองชิ้นงาน

สำหรับในหัวข้อนี้จะเป็นการนำชิ้นงานที่ทำการจำลองสถานการณ์ มาทำการสรุปเป็นข้อมูลในรูปแบบตารางและกราฟ โดยหัวข้อที่จะนำมาสรุปและเปรียบเทียบจะเป็นดังต่อไปนี้

3.7.1 เปรียบเทียบการเกิดโพรงหดตัวกับตำแหน่งการวางรูล้นทรงกระบอกตันของชิ้นงานหล่อทราย ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูล้น 35 มิลลิเมตร สูง 70 มิลลิเมตร

ในหัวข้อนี้ผู้วิจัยจะเปรียบเทียบการเกิดโพรงหดตัวกับชิ้นงานหล่อทราย ตำแหน่งการวางรูล้นทรงกระบอกตัน ตำแหน่งต่างๆ เฉพาะชิ้นงานที่ใช้รูล้นขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 35 มิลลิเมตร สูง 70 มิลลิเมตร โดยประกอบด้วยชิ้นงานดังต่อไปนี้

ตารางที่ 3-7 แสดงชิ้นงานที่มีรูล้นขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 35 มิลลิเมตร สูง 70 มิลลิเมตรกับระยะห่างระหว่างรูถึงรูล้น

ชิ้นงาน	ระยะห่างระหว่างรูถึงรูล้น
Cylinder_Q1 Riser	55.70
Cylinder_Q2 Riser	79.24
Cylinder_Q3 Riser	88.25
Cylinder_Q4 Position 20	99.77
Cylinder_Q4 Riser	104.71
Cylinder_Q4 Position 30	109.66

3.7.2 เปรียบเทียบการเกิดโพรงหดตัวกับขนาดของรูล้นทรงกระบอกตัน เฉพาะชิ้นงานวางรูล้นตำแหน่งที่ 4

ในหัวข้อนี้ผู้วิจัยจะเปรียบเทียบการเกิดโพรงหดตัวกับขนาดของรูล้นทรงกระบอกตัน เฉพาะชิ้นงานวางรูล้นตำแหน่งที่ 4 เท่านั้น โดยประกอบด้วยชิ้นงานดังต่อไปนี้

ตารางที่ 3-8 แสดงขนาดของรูล้นทรงกระบอกตัน เฉพาะชิ้นงานวางรูล้นตำแหน่งที่ 4

ชิ้นงาน	ขนาดรูล้นทรงกระบอกตัน (mm)
Cylinder_Q4 Riser D30	30.00
Cylinder_Q4 Riser	35.00
Cylinder_Q4 Riser D40	40.00

3.7.3 เปรียบเทียบการเกิดโพรงหดตัวกับการปรับความสูงหีบแบบไม่มีรูล้น

ในหัวข้อนี้ผู้วิจัยจะเปรียบเทียบการเกิดโพรงหดตัวกับชิ้นงานที่มีการปรับความสูงหีบแบบไม่มีรูล้นเท่านั้น โดยประกอบด้วชิ้นงานต่อไปนี้

ตารางที่ 3-9 แสดงชิ้นงานที่มีการปรับความสูงหีบหล่อแบบไม่มีรูล้น

ชิ้นงาน	ความสูงหีบแบบ (mm)
No Riser	70
Mould H50 No_Riser	50
Mould H40 No_Riser	40
Mould H30 No_Riser	30

3.7.4 เปรียบเทียบการเกิดโพรงหดตัวกับการปรับความสูงหีบแบบปรับรูล้น

ในหัวข้อนี้ผู้วิจัยจะเปรียบเทียบการเกิดโพรงหดตัวกับชิ้นงานที่มีการปรับความสูงหีบแบบปรับรูล้น โดยลดความสูงของรูเทและรูล้นตามความสูงของหีบแบบ เฉพาะชิ้นงานวางรูล้นตำแหน่งที่ 4 เท่านั้น โดยประกอบด้วยชิ้นงานต่อไปนี้

ตารางที่ 3-10 แสดงชิ้นงานที่มีการปรับความสูงหีบหล่อแบบปรับรูล้น

ชิ้นงาน	ความสูงหีบแบบ (mm)
Cylinder_Q4 Riser	70
MouldH50_RiserH50	50
MouldH40_RiserH40	40
MouldH30_RiserH30	30

3.7.5 เปรียบเทียบการเกิดโพรงหดตัวกับการปรับความสูงหีบแบบไม่ปรับรูปร่าง

ในหัวข้อนี้ผู้วิจัยจะเปรียบเทียบการเกิดโพรงหดตัวกับชิ้นงานที่มีการการปรับความสูงหีบแบบไม่ปรับรูปร่าง โดยใช้ความสูงรูเทและรูล้นเท่ากับ 70 มิลลิเมตร เฉพาะชิ้นงานวางรูล้นตำแหน่งที่ 4 เท่านั้น โดยประกอบด้วยชิ้นงานต่อไปนี้

ตารางที่ 3-11 แสดงชิ้นงานที่มีการปรับความสูงหีบหล่อแบบไม่ปรับรูปร่าง

ชิ้นงาน	ความสูงหีบแบบ (mm)
Cylinder_Q4 Riser	70
MouldH50_RiserH70	50
MouldH40_RiserH70	40
MouldH30_RiserH70	30

สำหรับผลการวิเคราะห์ทั้งหมดในหัวข้อที่ 3.7.4 นั้นผู้วิจัยจะนำมาสรุปเป็นข้อมูลโดยเปรียบเทียบการผลการทดสอบกับการเกิดโพรงหดตัวในชิ้นงานของแต่ละรูปแบบ โดยจะกล่าวไว้ในบทที่ 4

3.7.6 แสดงกราฟอุณหภูมิภายในชิ้นงาน

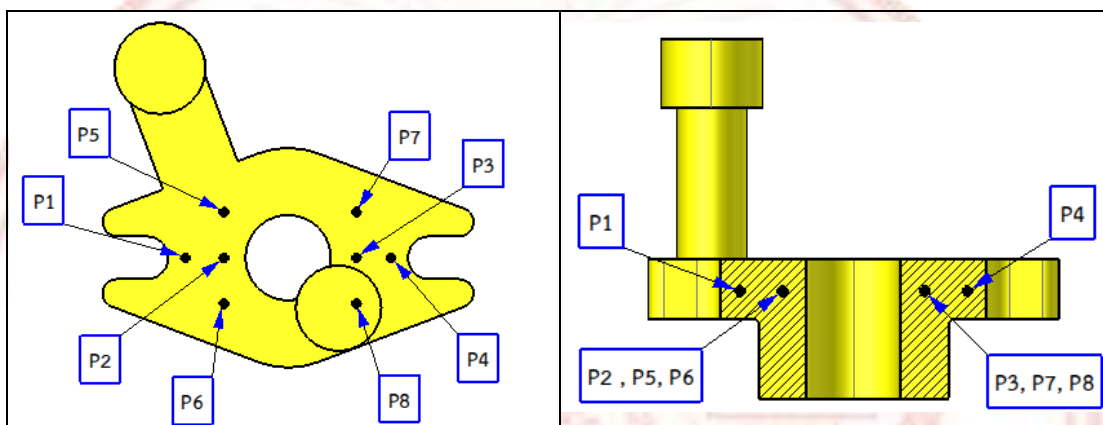
ในหัวข้อนี้ ผู้วิจัยจะสรุปข้อมูลเป็นตารางอุณหภูมิภายในชิ้นงานและกราฟอุณหภูมิ โดยเฉพาะชิ้นงานที่จำลองสถานการณ์เพิ่มเติมในหัวข้อที่ 3.6 เท่านั้น โดยใช้ลักษณะการวัดอุณหภูมิชิ้นงานเป็นจุด เพื่อดูความสม่ำเสมอของอุณหภูมิภายในชิ้นงานแต่ละช่วงเวลาหลังจากการจำลอง เช่นเดียวกับหัวข้อที่ 3.4.4.6 ประกอบไปด้วยชิ้นงานและตำแหน่งการวัดอุณหภูมิดังต่อไปนี้

3.7.6.1 การปรับขนาดรูล้นเป็นขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 30 และ 40 มิลลิเมตร

3.7.6.1.1 ชิ้นงานปรับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูล้น 30 มิลลิเมตร

(Cylinder_Q4 Riser D30)

ในการศึกษาจะทำการกำหนดจุด Point ลงบนชิ้นงานทั้งหมด 8 จุด คือจุด P1, P2, P3, P4, P5, P6, P7 และ P8 ตามที่แสดงในภาพที่ 3-48

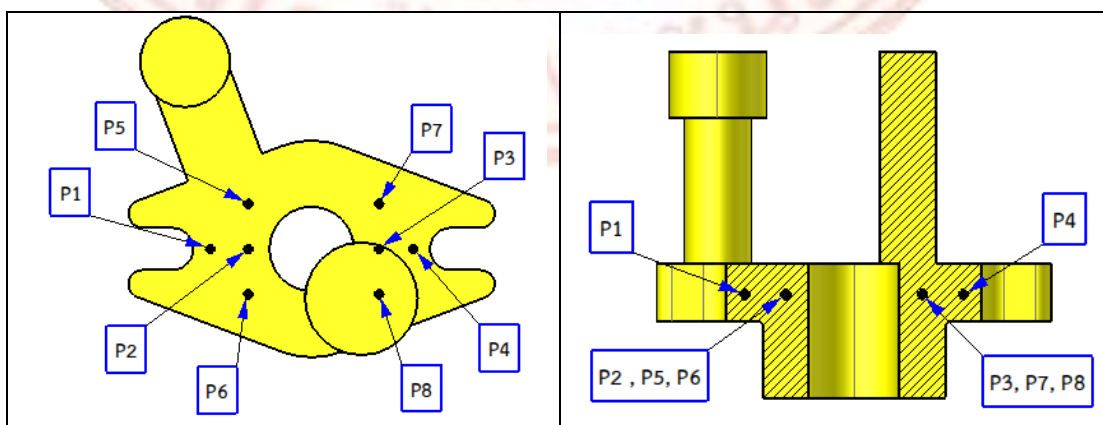


ภาพที่ 3-48 แสดงตำแหน่งจุด P1 ถึง P8 ของชิ้นงาน Cylinder_Q4 Riser D30

3.7.6.1.2 ชิ้นงานปรับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูล้น 40 มิลลิเมตร

(Cylinder_Q4 Riser D40)

ในการศึกษาจะทำการกำหนดจุด Point ลงบนชิ้นงานทั้งหมด 8 จุด คือจุด P1, P2, P3, P4, P5, P6, P7 และ P8 ตามที่แสดงในภาพที่ 3-49



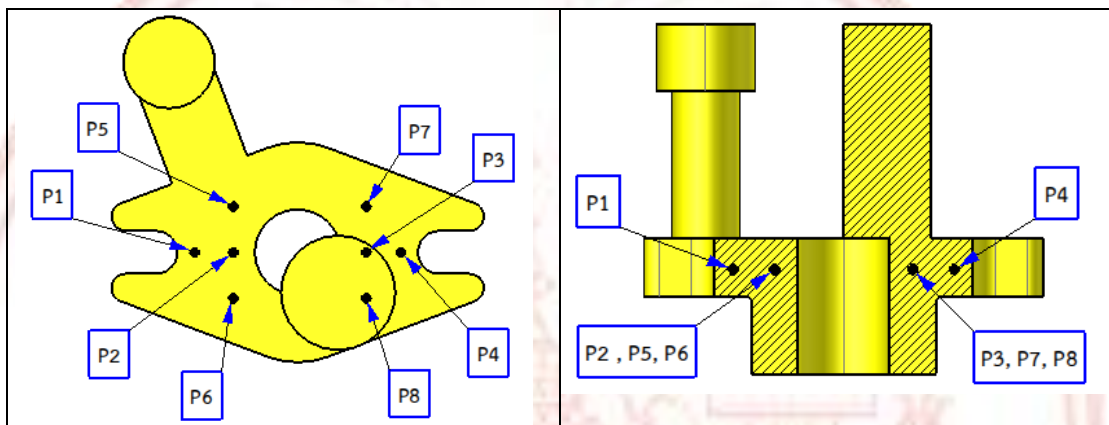
ภาพที่ 3-49 แสดงตำแหน่งจุด P1 ถึง P8 ของชิ้นงาน Cylinder_Q4 Riser D40

3.7.6.2 การปรับตำแหน่งการวางรูล้น

3.7.6.2.1 ชิ้นงานปรับตำแหน่งการวางรูล้นจากศูนย์กลาง 20 มิลลิเมตร

(Cylinder_Q4 Position 20)

ในการศึกษาจะทำการกำหนดจุด Point ลงบนชิ้นงานทั้งหมด 8 จุด คือจุด P1, P2, P3, P4, P5, P6, P7 และ P8 ตามที่แสดงในภาพที่ 3-50

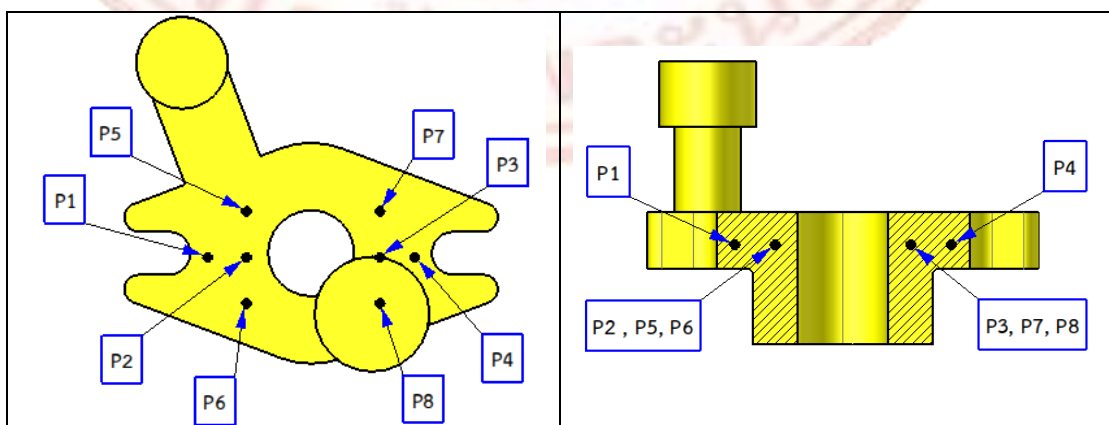


ภาพที่ 3-50 แสดงตำแหน่งจุด P1 ถึง P8 ของชิ้นงาน Cylinder_Q4 Position 20

3.7.6.2.2 ชิ้นงานปรับตำแหน่งการวางรูล้นจากศูนย์กลาง 30 มิลลิเมตร

(Cylinder_Q4 Position 30)

ในการศึกษาจะทำการกำหนดจุด Point ลงบนชิ้นงานทั้งหมด 8 จุด คือจุด P1, P2, P3, P4, P5, P6, P7 และ P8 ตามที่แสดงในภาพที่ 3-51

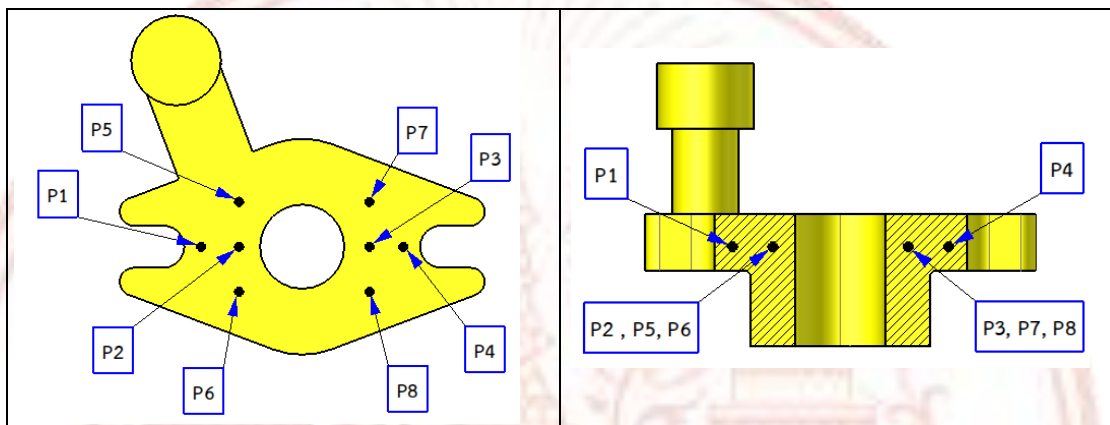


ภาพที่ 3-51 แสดงตำแหน่งจุด P1 ถึง P8 ของชิ้นงาน Cylinder_Q4 Position 30

3.7.6.3 การลดขนาดหีบแบบที่ใช้ในการเทหล่อแบบไม่มีรูล้น และมีรูล้น

3.7.6.3.1 ชิ้นงานปรับขนาดหีบหล่อบนสูง 50 ไม่มีรูล้น (Mould H50 No_Riser)

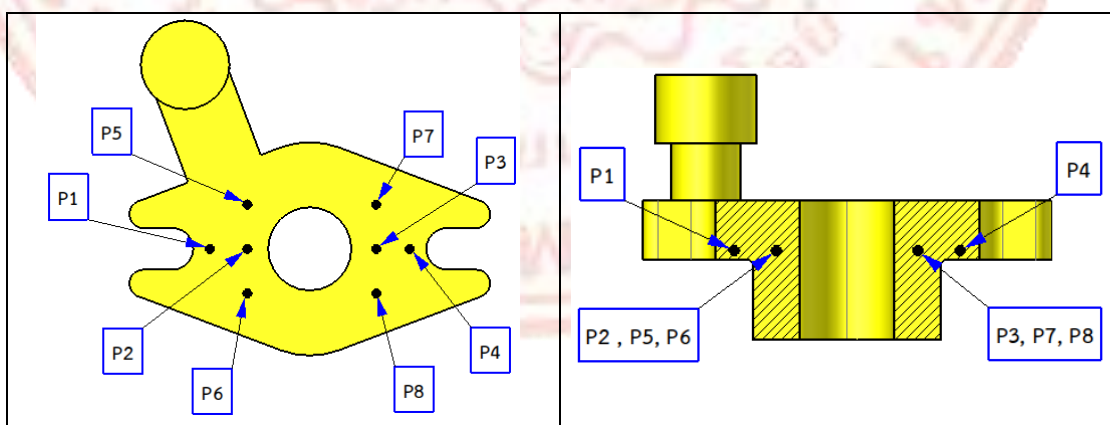
ในการศึกษาจะทำการกำหนดจุด Point ลงบนชิ้นงานทั้งหมด 8 จุด คือจุด P1, P2, P3, P4, P5, P6, P7 และ P8 ตามที่แสดงในภาพที่ 3-52



ภาพที่ 3-52 แสดงตำแหน่งจุด P1 ถึง P8 ของชิ้นงาน Mould H50 No_Riser

3.7.6.3.2 ชิ้นงานปรับขนาดหีบหล่อบนสูง 40 ไม่มีรูล้น (Mould H40 No_Riser)

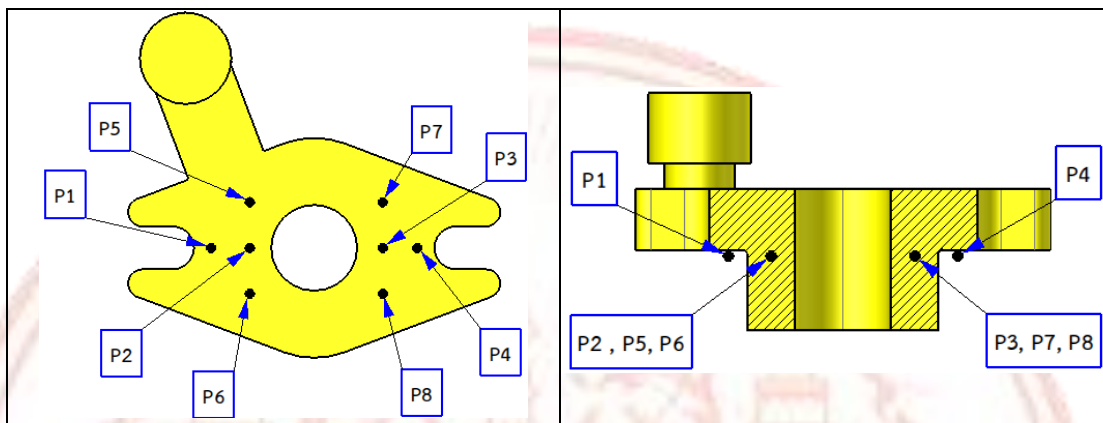
ในการศึกษาจะทำการกำหนดจุด Point ลงบนชิ้นงานทั้งหมด 8 จุด คือจุด P1, P2, P3, P4, P5, P6, P7 และ P8 ตามที่แสดงในภาพที่ 3-53



ภาพที่ 3-53 แสดงตำแหน่งจุด P1 ถึง P8 ของชิ้นงาน Mould H40 No_Riser

3.7.6.3.3 ชิ้นงานปรับขนาดหีบหล่อบนสูง 30 ไม่มีรูล้น (Mould H30 No_Riser)

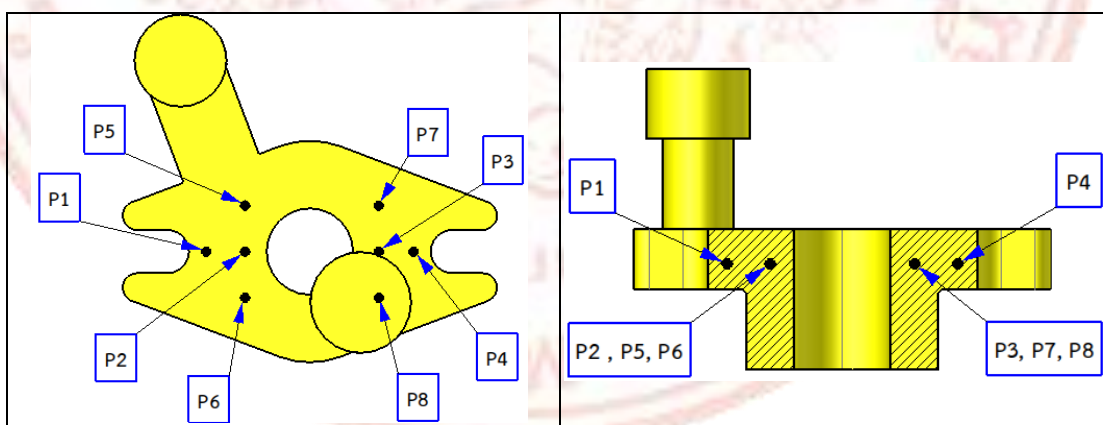
ในการศึกษาจะทำการกำหนดจุด Point ลงบนชิ้นงานทั้งหมด 8 จุด คือจุด P1, P2, P3, P4, P5, P6, P7 และ P8 ตามที่แสดงในภาพที่ 3-54



ภาพที่ 3-54 แสดงตำแหน่งจุด P1 ถึง P8 ของชิ้นงาน Mould H30 No_Riser

3.7.6.3.4 ชิ้นงานปรับขนาดหีบหล่อบนสูง 50 รูล้น 50 (MouldH50_RiserH50)

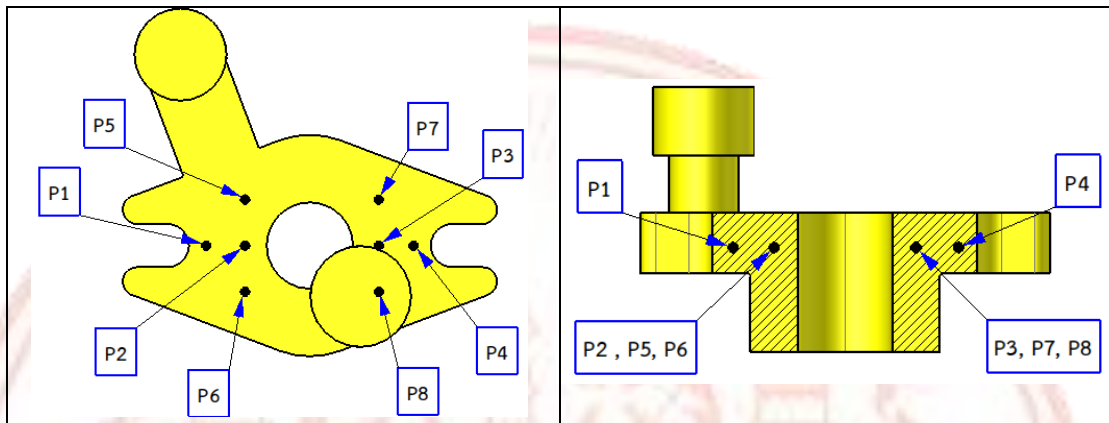
ในการศึกษาจะทำการกำหนดจุด Point ลงบนชิ้นงานทั้งหมด 8 จุด คือจุด P1, P2, P3, P4, P5, P6, P7 และ P8 ตามที่แสดงในภาพที่ 3-55



ภาพที่ 3-55 แสดงตำแหน่งจุด P1 ถึง P8 ของชิ้นงาน MouldH50_RiserH50

3.7.6.3.5 ชิ้นงานปรับขนาดหีบหล่อบนสูง 40 รูกลั่น 40 (MouldH40_RiserH40)

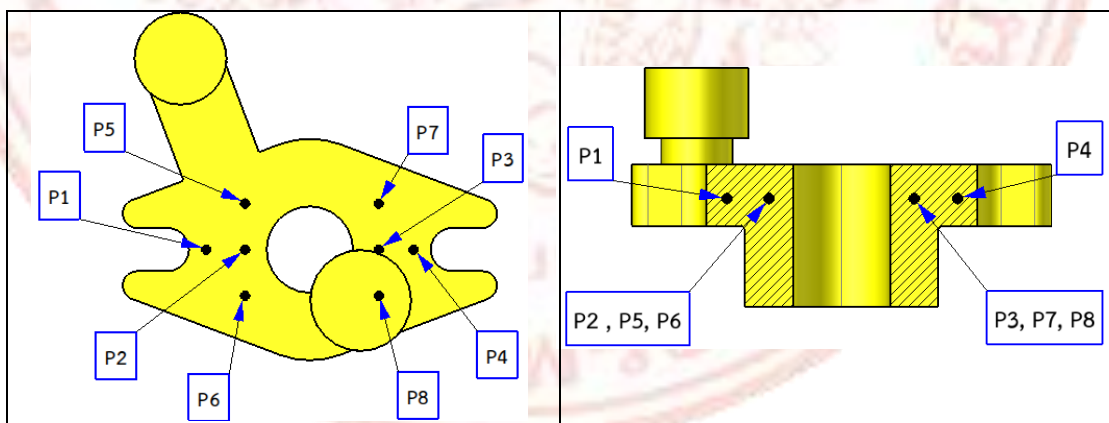
ในการศึกษาจะทำการกำหนดจุด Point ลงบนชิ้นงานทั้งหมด 8 จุด คือจุด P1, P2, P3, P4, P5, P6, P7 และ P8 ตามที่แสดงในภาพที่ 3-56



ภาพที่ 3-56 แสดงตำแหน่งจุด P1 ถึง P8 ของชิ้นงาน MouldH40_RiserH40

3.7.6.3.6 ชิ้นงานปรับขนาดหีบหล่อบนสูง 30 รูกลั่น 30 (MouldH30_RiserH30)

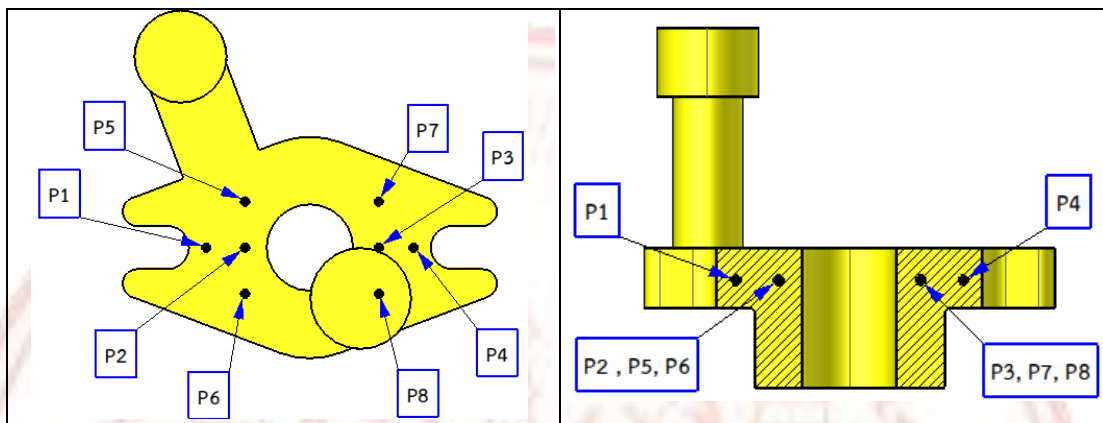
ในการศึกษาจะทำการกำหนดจุด Point ลงบนชิ้นงานทั้งหมด 8 จุด คือจุด P1, P2, P3, P4, P5, P6, P7 และ P8 ตามที่แสดงในภาพที่ 3-57



ภาพที่ 3-57 แสดงตำแหน่งจุด P1 ถึง P8 ของชิ้นงาน MouldH30_RiserH30

3.7.6.3.7 ชิ้นงานปรับขนาดหีบหล่อบนสูง 50 รูกลั่น 30 (MouldH50_RiserH70)

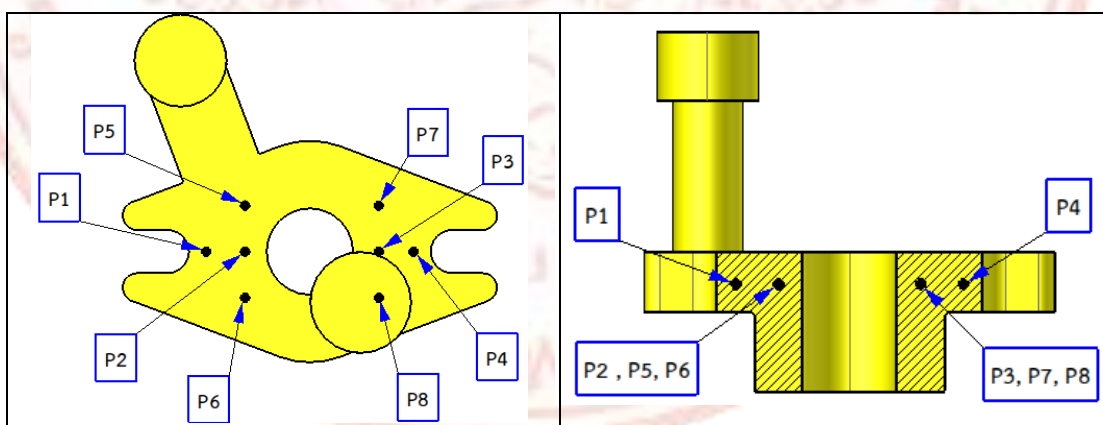
ในการศึกษาจะทำการกำหนดจุด Point ลงบนชิ้นงานทั้งหมด 8 จุด คือจุด P1, P2, P3, P4, P5, P6, P7 และ P8 ตามที่แสดงในภาพที่ 3-58



ภาพที่ 3-58 แสดงตำแหน่งจุด P1 ถึง P8 ของชิ้นงาน MouldH50_RiserH70

3.7.6.3.8 ชิ้นงานปรับขนาดหีบหล่อบนสูง 40 รูกลั่น 70 (MouldH40_RiserH70)

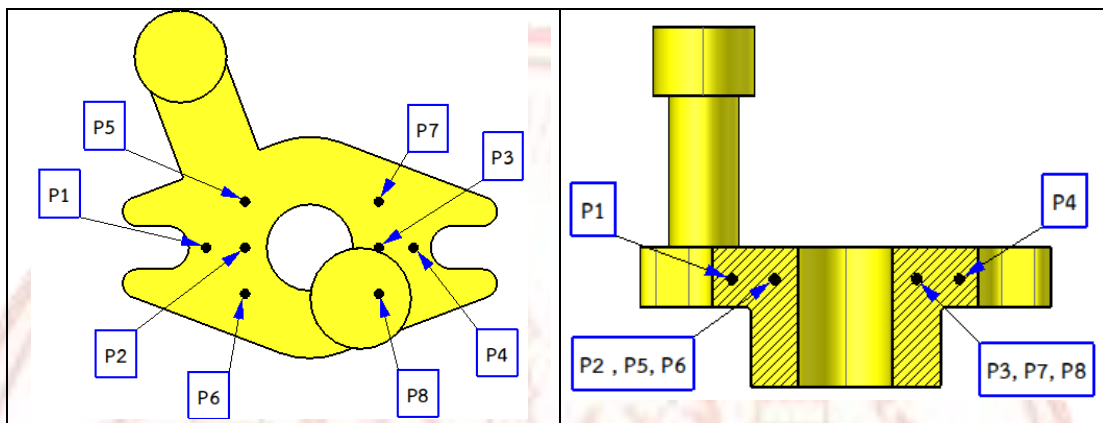
ในการศึกษาจะทำการกำหนดจุด Point ลงบนชิ้นงานทั้งหมด 8 จุด คือจุด P1, P2, P3, P4, P5, P6, P7 และ P8 ตามที่แสดงในภาพที่ 3-59



ภาพที่ 3-59 แสดงตำแหน่งจุด P1 ถึง P8 ของชิ้นงาน MouldH40_RiserH70

3.7.6.3.9 ชิ้นงานปรับขนาดหีบหล่อบนสูง 30 รูล้น 70 (MouldH30_RiserH70)

ในการศึกษาจะทำการกำหนดจุด Point ลงบนชิ้นงานทั้งหมด 8 จุด คือจุด P1, P2, P3, P4, P5, P6, P7 และ P8 ตามที่แสดงในภาพที่ 3-60



ภาพที่ 3-60 แสดงตำแหน่งจุด P1 ถึง P8 ของชิ้นงาน MouldH30_RiserH70

เมื่อกำหนดตำแหน่งของจุด P ชิ้นงานทั้งหมดที่กล่าวในหัวข้อที่ 3.7.6 แล้วนั้น ถัดไปจะเป็นการแสดงผลการทดสอบและจำลองสถานการณ์ทั้งหมดโดยจะกล่าวไว้ในบทที่ 4

บทที่ 4

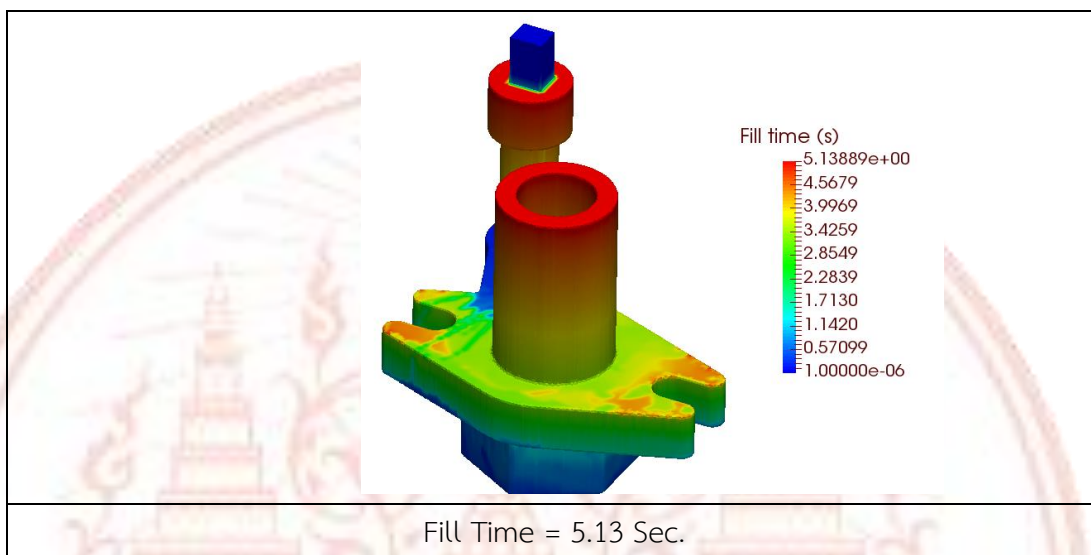
ผลการดำเนินงาน

ในบทนี้ผู้วิจัยจะแสดงผลการจำลองทั้งหมดของงานวิจัย สำหรับการดำเนินงานเพื่อวิเคราะห์เพื่อการศึกษาสาเหตุของการเกิดข้อบกพร่องในเรื่องการเกิดโพรงหดตัว (Shrinkage Porosity) ชิ้นงานหล่อทรายกระสวนขึ้นเดียวหน้าผาราบมีไส้แบบในตัวรูล้นทรงกระบอกกลางหนา 8 มิลลิเมตร ชิ้นงานหล่อทรายขึ้นงานกระสวนขึ้นเดียวหน้าผาราบมีไส้แบบในตัวรูล้นทรงกระบอกกลางหนา 15 มิลลิเมตร และชิ้นงานหล่อทรายขึ้นงานกระสวนขึ้นเดียวหน้าผาราบมีไส้แบบในตัวรูล้นทรงกระบอกตัน ทางผู้วิจัยจะแสดงผลในการเติมเต็มของโลหะเหลว (Fill Time) จำลองพฤติกรรมไหลของโลหะเหลว (Fluid fraction) เวลาในการแข็งตัวของโลหะ (Solidification Time) โพรงหดตัว (Shrinkage Porosity) และพฤติกรรมของอุณหภูมิของชิ้นงาน (Temperature) มาเป็นข้อมูลในการวิเคราะห์ข้อบกพร่องงานหล่อทราย โดยมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

- 4.1 แสดงผลการจำลองการเติมเต็มของโลหะเหลว (Fill Time)
- 4.2 แสดงผลการจำลองพฤติกรรมไหลของโลหะเหลว (Fluid fraction)
- 4.3 แสดงผลการจำลองเวลาในการแข็งตัวของโลหะ (Solidification Time)
- 4.4 แสดงผลการจำลองการเกิดโพรงหดตัว (Shrinkage Porosity)
- 4.5 แสดงผลการจำลองอุณหภูมิของชิ้นงาน (Temperature)
- 4.6 แสดงกราฟการเย็นตัวของชิ้นงาน
- 4.7 แสดงผลการเทหล่อชิ้นงานจริง
- 4.8 แสดงผลการจำลองวิธีการแก้ไขปัญหาหลังจากการเทหล่อชิ้นงานจริง
- 4.9 สรุปผลการจำลองสถานการณ์ชิ้นงานทดสอบเพิ่มเติม

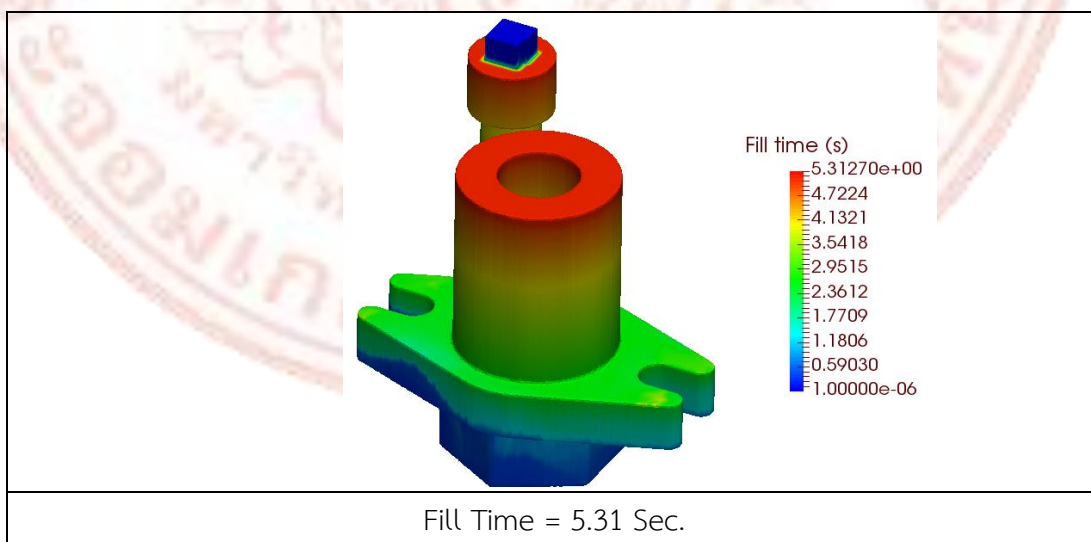
4.1 แสดงผลการจำลองการเติมเต็มของโลหะเหลว (Fill Time)

4.1.1 ชิ้นงานหล่อทรายกระสวนขึ้นเดียวหน้าผ่าราบมีไส้แบบในตัวรูล้นทรงกระบอกกลางหนา 8 มิลลิเมตร (Tube 8mm. Riser)



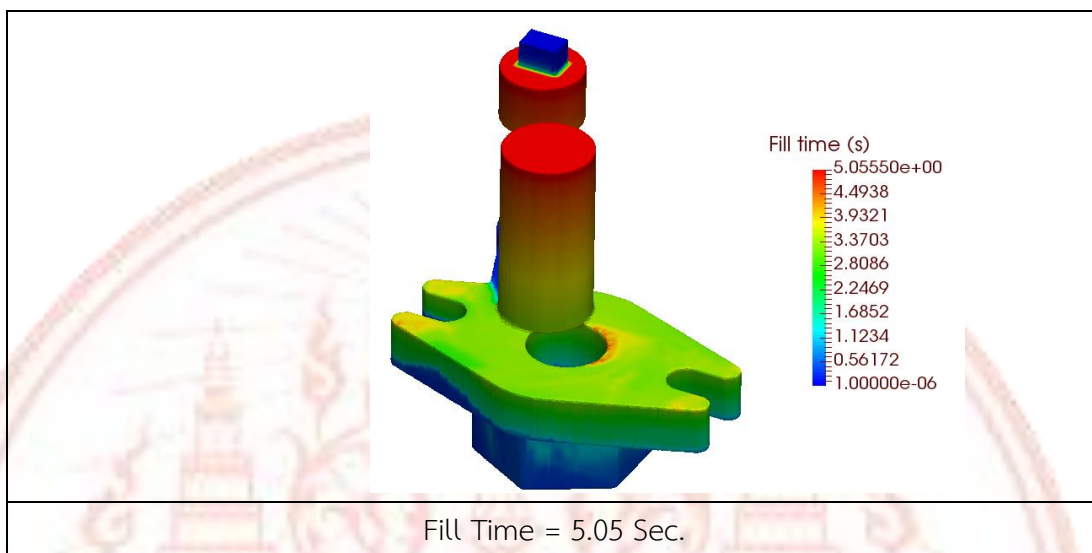
ภาพที่ 4-1 แสดงการจำลองเวลาในการเติมเต็มโลหะเหลวชิ้นงาน Tube 8mm. Riser

4.1.2 ชิ้นงานหล่อทรายกระสวนขึ้นเดียวหน้าผ่าราบมีไส้แบบในตัวรูล้นทรงกระบอกกลางหนา 15 มิลลิเมตร (Tube 15mm. Riser)



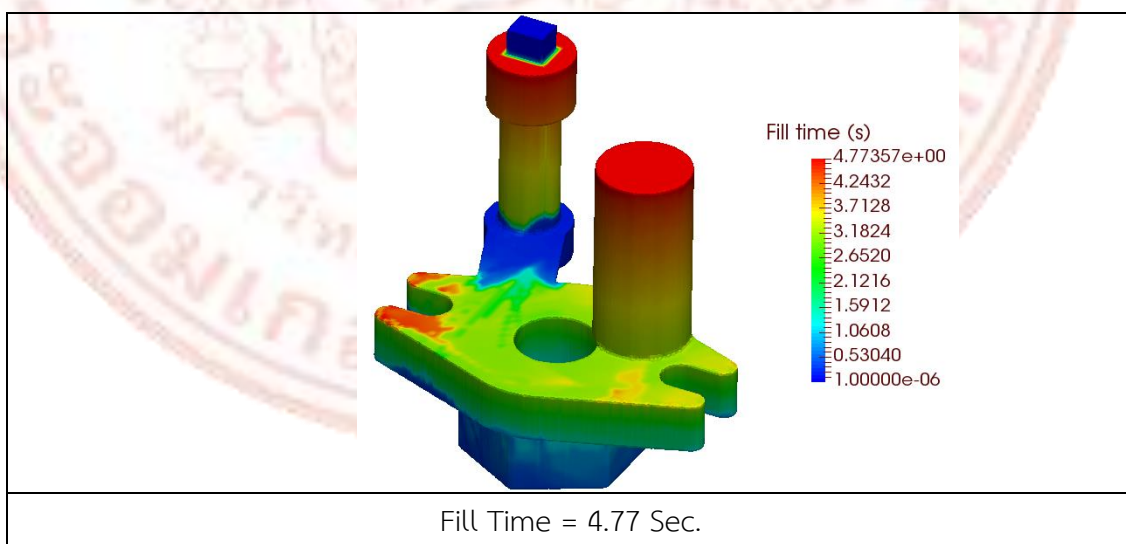
ภาพที่ 4-2 แสดงการจำลองเวลาในการเติมเต็มโลหะเหลวชิ้นงาน Tube 15mm. Riser

4.1.3 ชิ้นงานหล่อทรายชิ้นงานกระสวนขึ้นเดียวหน้าผ่าราบมีไส้แบบในตัวรูล้นทรงกระบอก
 ต้น ตำแหน่งวางรูล้นที่ 1 (Cylinder_Q1 Riser)



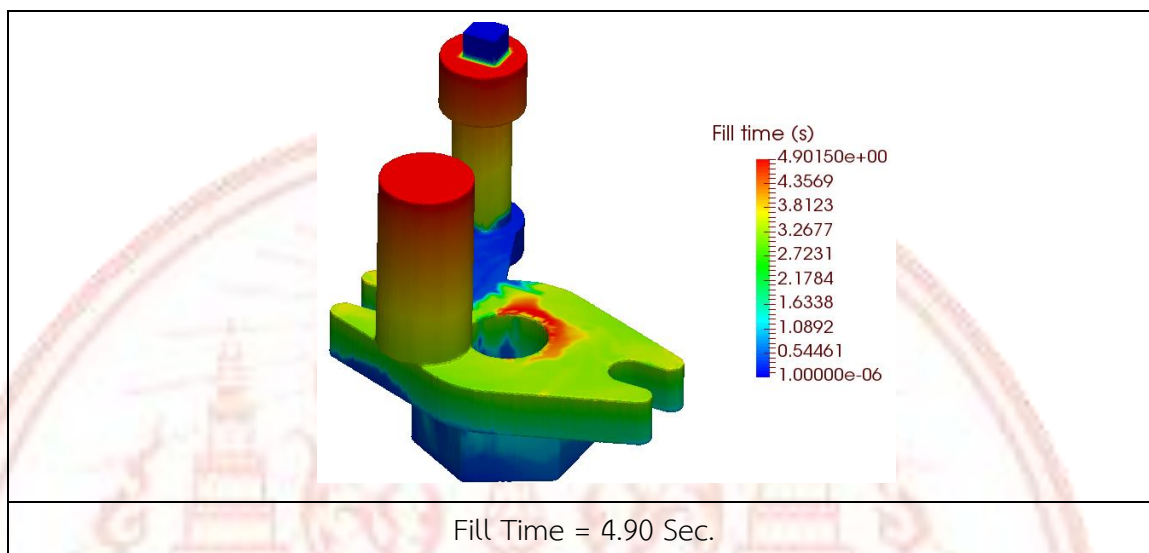
ภาพที่ 4-3 แสดงการจำลองเวลาในการเติมเต็มโลหะเหลวชิ้นงาน Cylinder_Q1 Riser

4.1.4 ชิ้นงานหล่อทรายชิ้นงานกระสวนขึ้นเดียวหน้าผ่าราบมีไส้แบบในตัวรูล้นทรงกระบอก
 ต้น ตำแหน่งวางรูล้นที่ 2 (Cylinder_Q2 Riser)



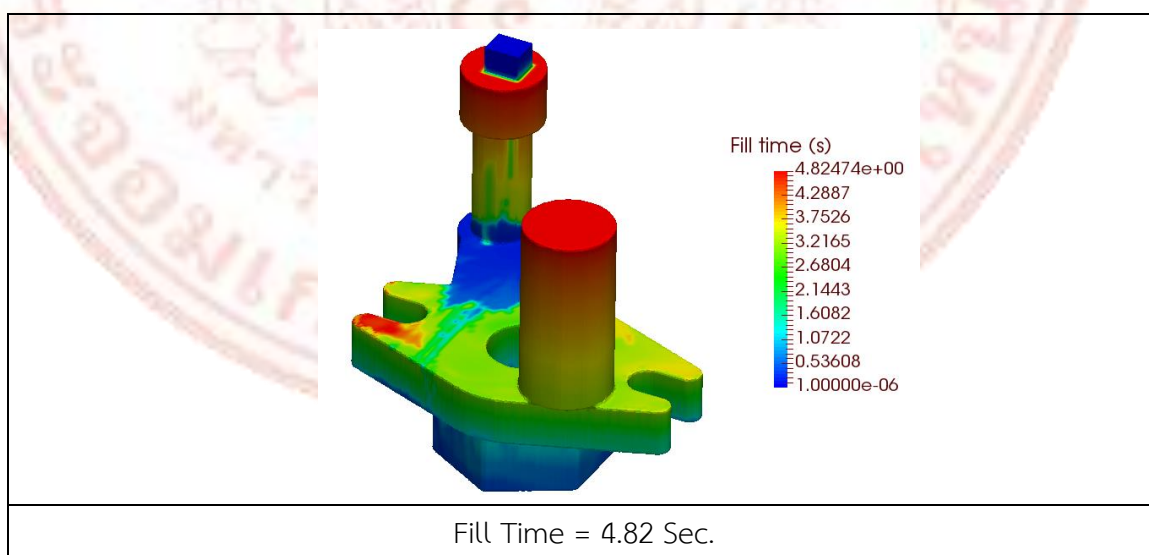
ภาพที่ 4-4 แสดงการจำลองเวลาในการเติมเต็มโลหะเหลวชิ้นงาน Cylinder_Q2 Riser

4.1.5 ชิ้นงานหล่อทรายชิ้นงานกระสวนขึ้นเดียวหน้าผ่าราบมีไส้แบบในตัวรูล้นทรงกระบอก
ต้น ตำแหน่งวางรูล้นที่ 3 (Cylinder_Q3 Riser)



ภาพที่ 4-5 แสดงการจำลองเวลาในการเติมเต็มโลหะเหลวชิ้นงาน Cylinder_Q3 Riser

4.1.6 ชิ้นงานหล่อทรายชิ้นงานกระสวนขึ้นเดียวหน้าผ่าราบมีไส้แบบในตัวรูล้นทรงกระบอก
ต้น ตำแหน่งวางรูล้นที่ 4 (Cylinder_Q4 Riser)

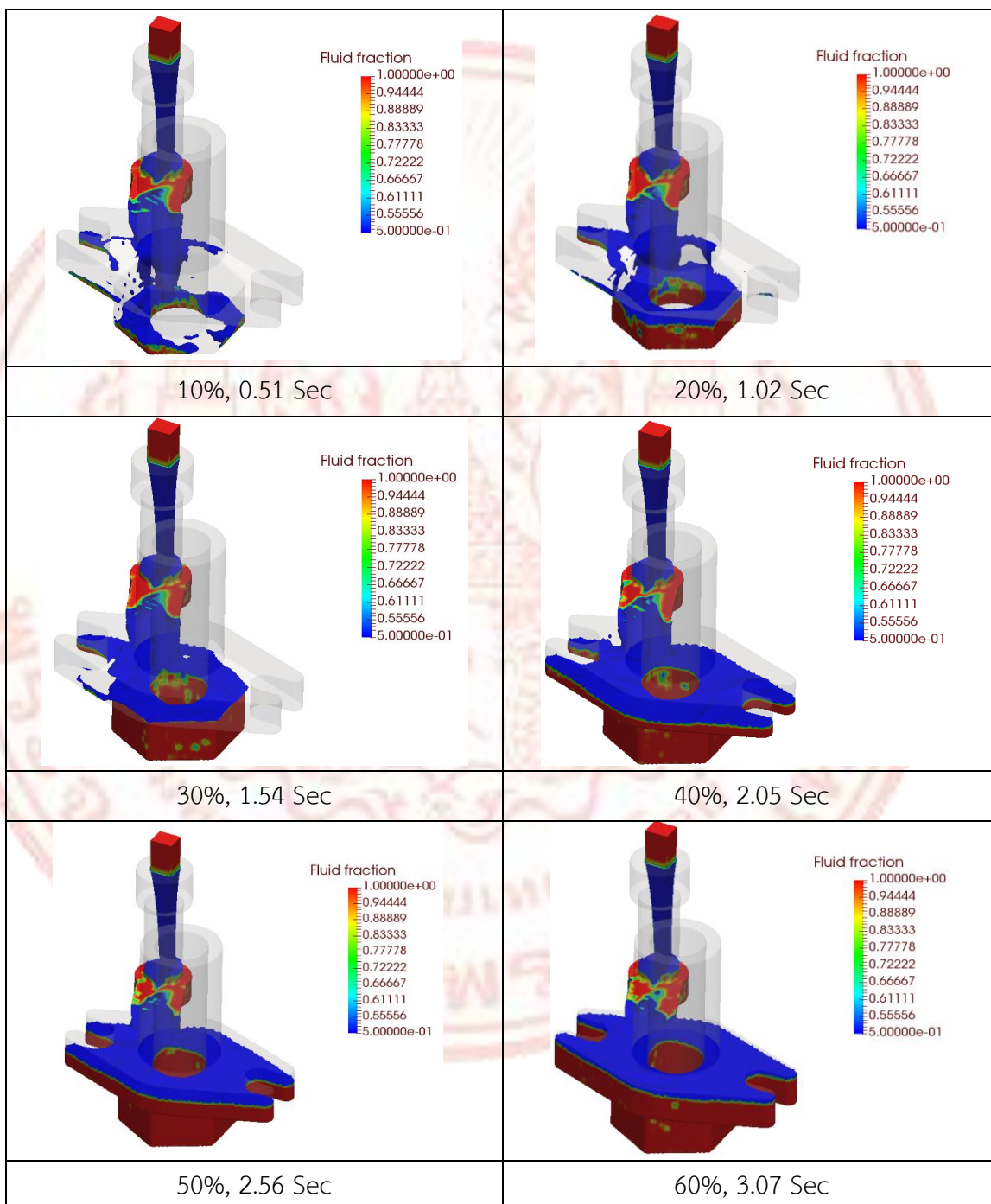


ภาพที่ 4-6 แสดงการจำลองเวลาในการเติมเต็มโลหะเหลวชิ้นงาน Cylinder_Q4 Riser

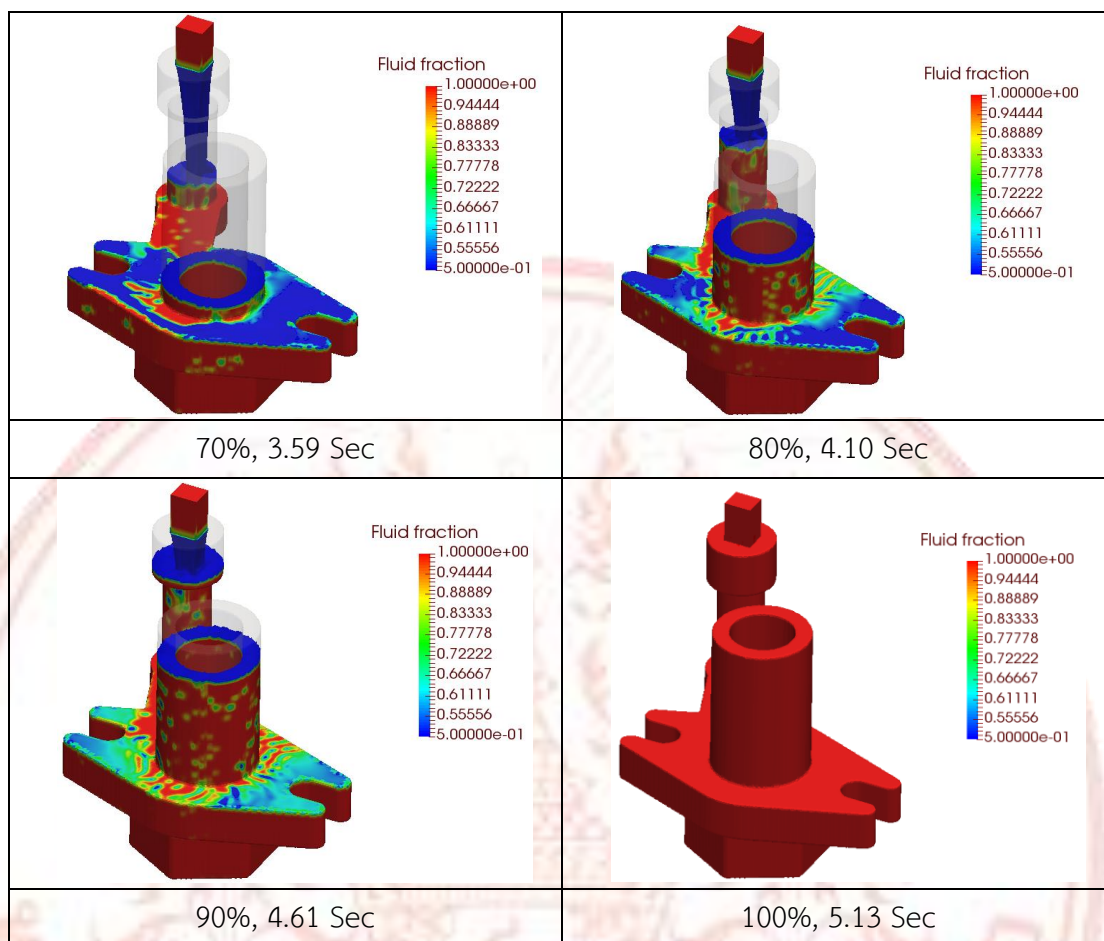
4.2 แสดงผลการจำลองพฤติกรรมการไหลของโลหะเหลว (Fluid Fraction)

4.2.1 ชิ้นงานหล่อทรายกระสวนขึ้นเดียวหน้าผาราบมีไส้แบบในตัวรูล้นทรงกระบอกกลางหนา 8

มิลลิเมตร (Tube 8mm. Riser)



ภาพที่ 4-7 แสดงลักษณะการไหลของโลหะเหลวของชิ้นงาน Tube 8mm. Riser

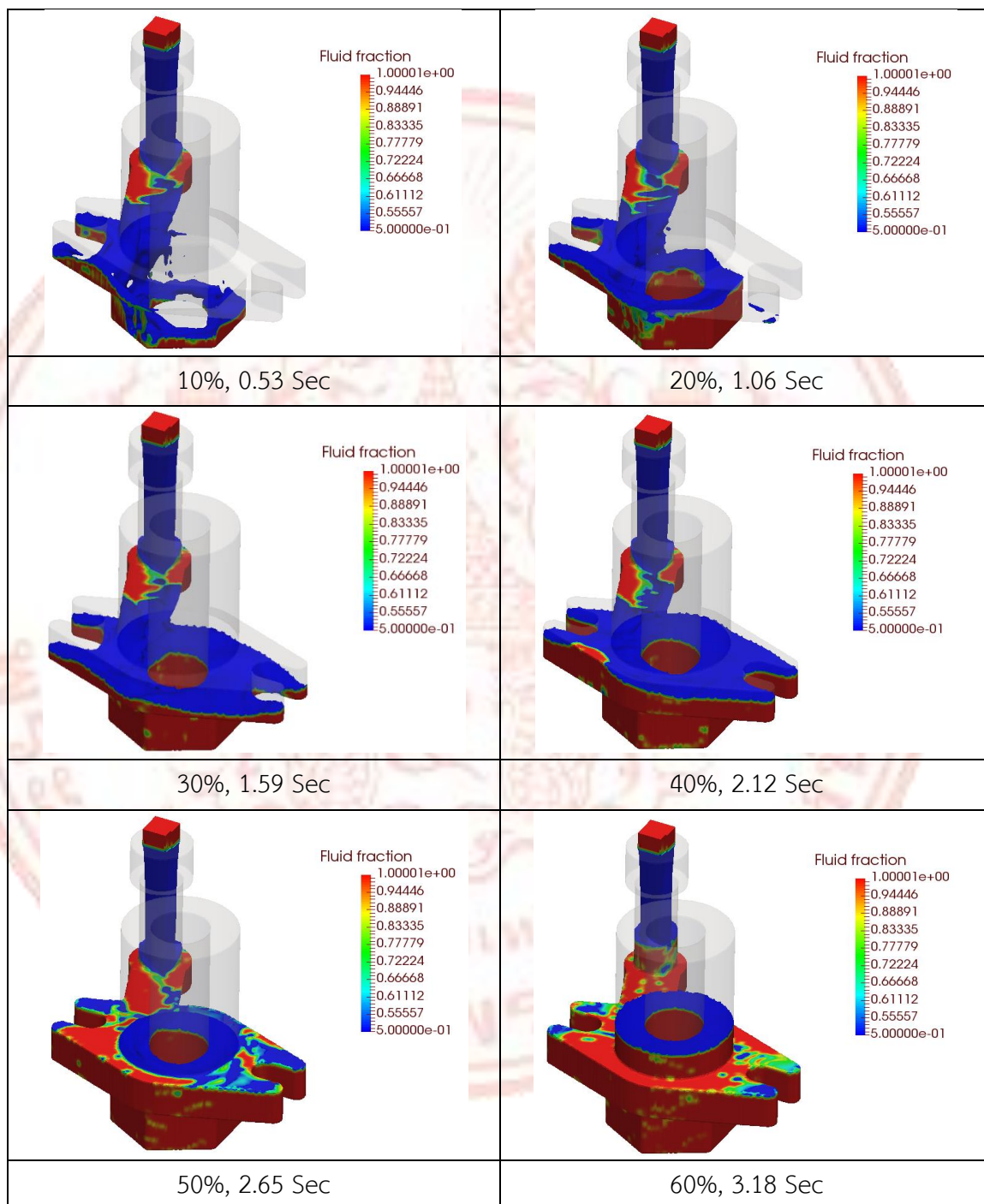


ภาพที่ 4-8 (ต่อ) แสดงลักษณะการไหลของโลหะเหลวของขึ้นงาน (Tube 8mm. Riser)

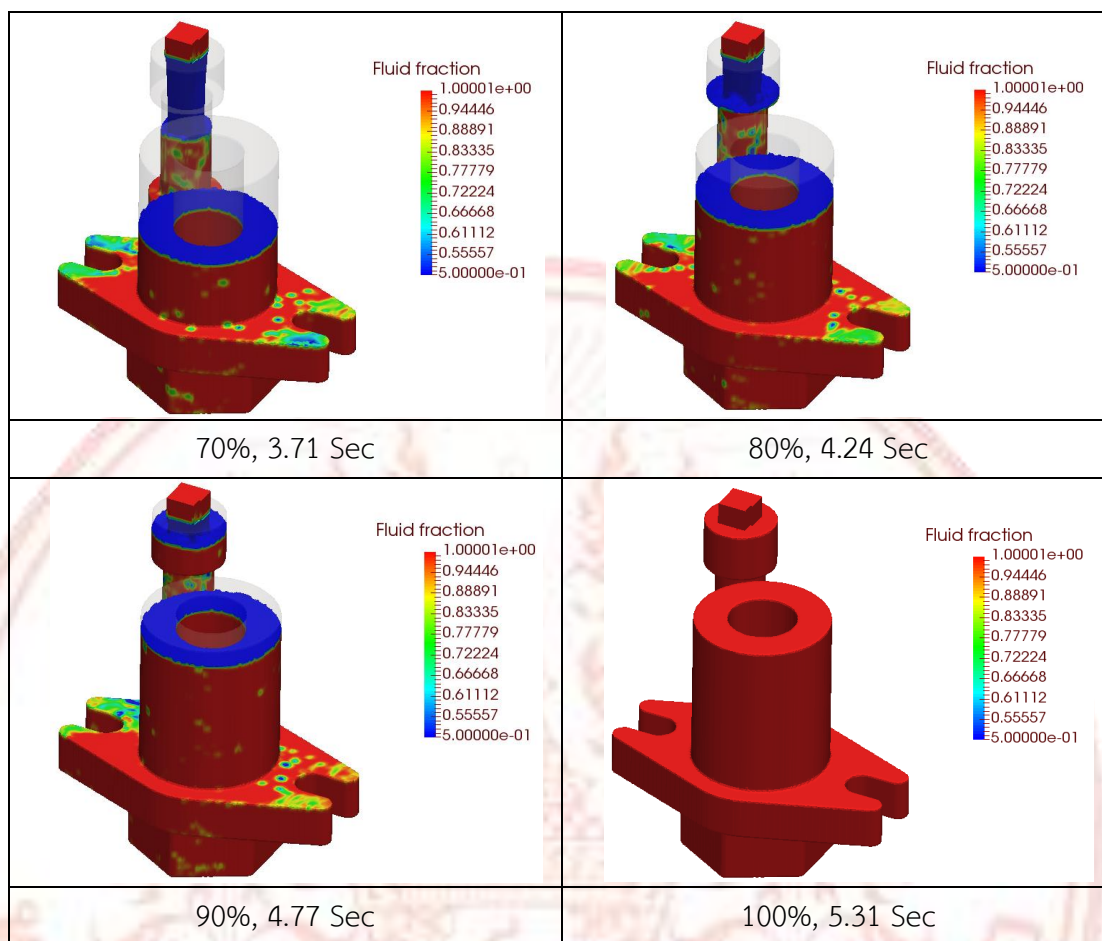
การไหลของน้ำโลหะเหลวสำหรับขึ้นงานหล่อทรายกระสวนขึ้นเดียวหน้าผาราบมีไส้แบบในตัวรูล้นทรงกระบอกกลางหนา 8 มิลลิเมตรนั้น ใช้เวลาในการเติมเต็มทั้งหมด 5.13 วินาที โดยน้ำโลหะเหลวเติมเต็มบริเวณจุดศูนย์กลางของขึ้นงานก่อน มีลักษณะการไหลแบบวนทวนเข็มนาฬิกา ขึ้นมาตามความสูงของขึ้นงาน เมื่อน้ำโลหะเริ่มเติมเต็มรูล้น การไหลของน้ำโลหะเหลวจะมีความปั่นป่วนบริเวณรอบ ๆ รูล้น ก่อนที่สุดท้ายจะเติมเต็มในที่สุด

4.2.2 ชิ้นงานหล่อทรายกระสวนขึ้นเดียวหน้าผ่าราบมีไส้แบบในตัวรูล้นทรงกระบอกกลาง

หนา 15 มิลลิเมตร (Tube 15mm. Riser)



ภาพที่ 4-9 แสดงลักษณะการไหลของโลหะเหลวของชิ้นงาน Tube 15mm. Riser

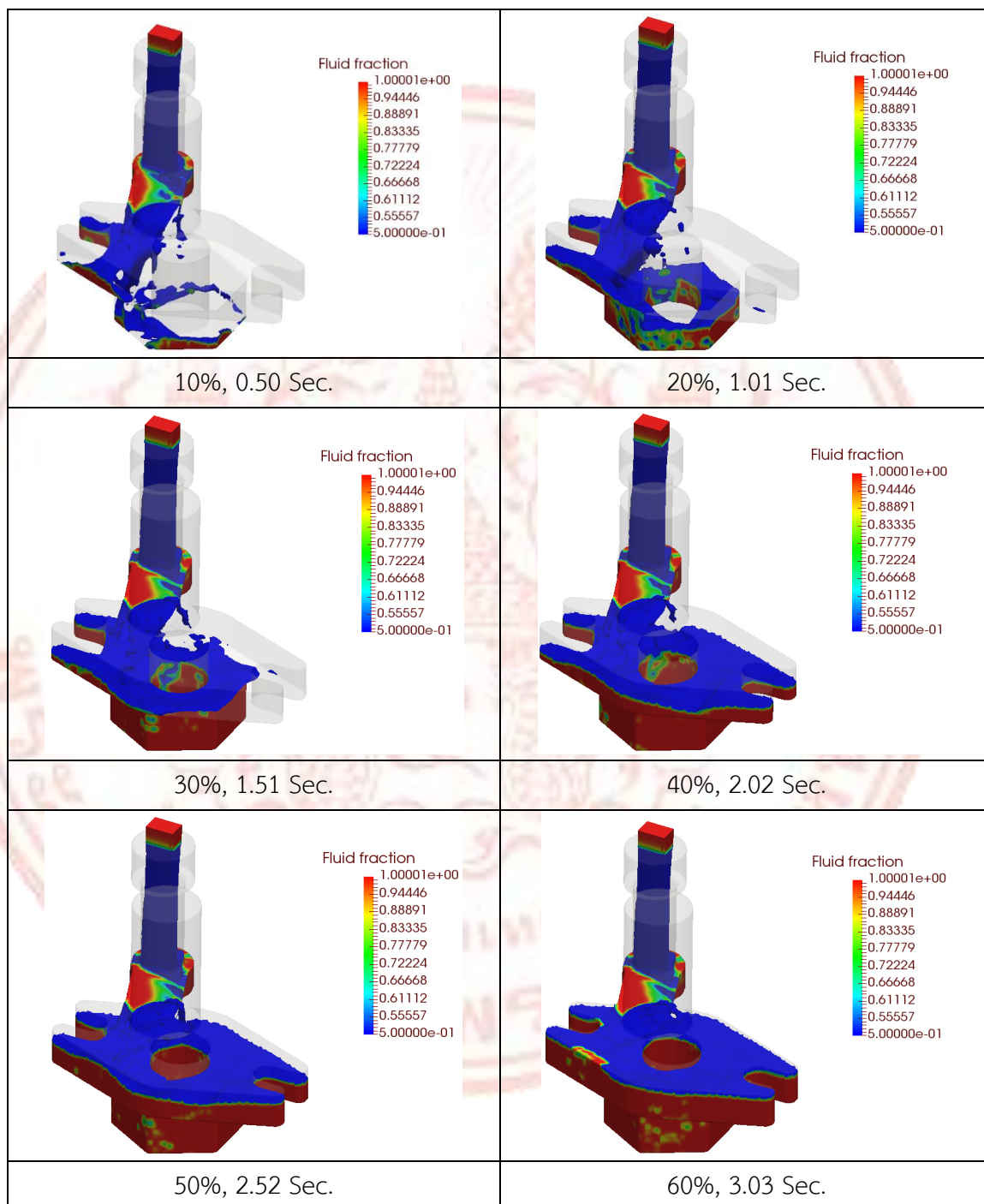


ภาพที่ 4-10 (ต่อ) แสดงลักษณะการไหลของโลหะเหลวของชิ้นงาน Tube 15mm. Riser

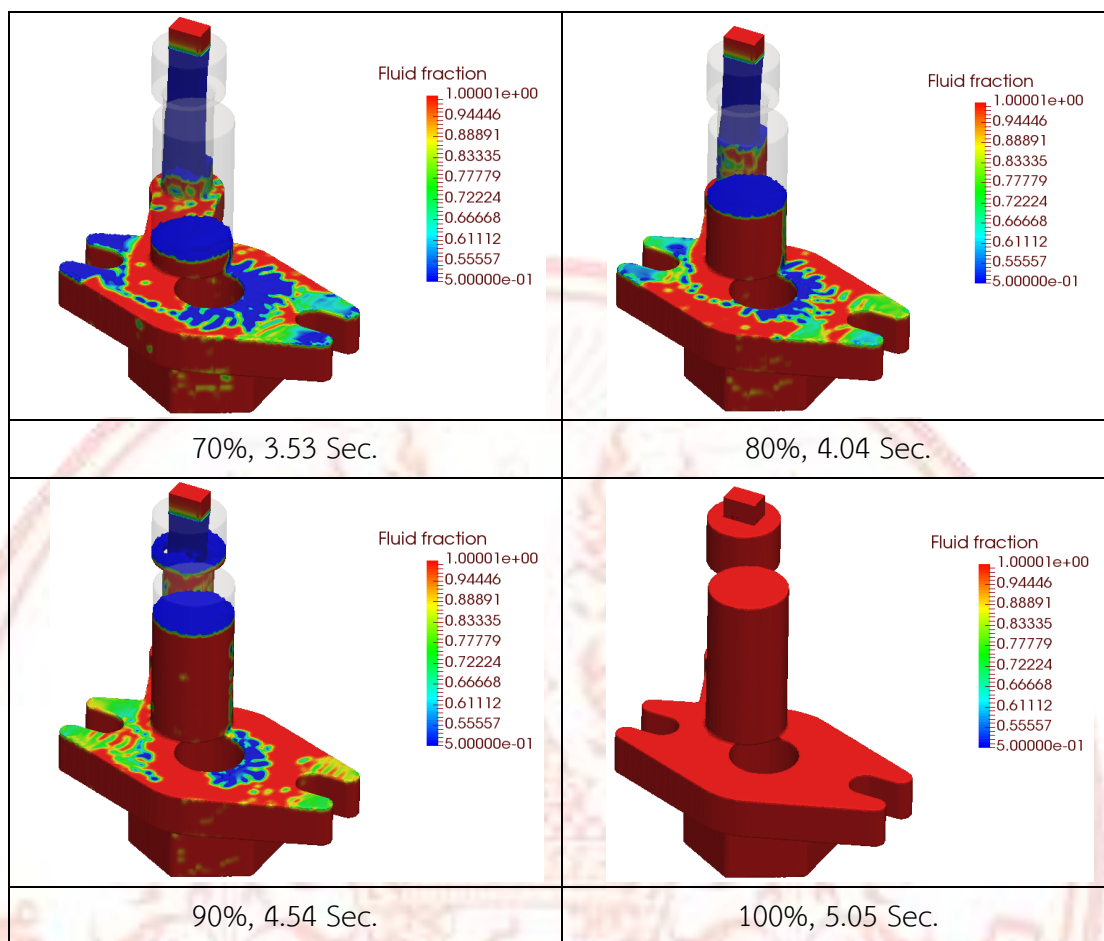
การไหลของน้ำโลหะเหลวสำหรับชิ้นงานหล่อทรายกระสวนขึ้นเดียวหน้าผาราบมีไส้แบบในตัวรูล้นทรงกระบอกกลางหนา 15 มิลลิเมตรนั้น ใช้เวลาในการเติมเต็มทั้งหมด 5.31 วินาที โดยน้ำโลหะเหลวเติมเต็มบริเวณจุดศูนย์กลางของชิ้นงานก่อน มีลักษณะการไหลแบบวนทวนเข็มนาฬิกา ขึ้นมาตามความสูงของชิ้นงานจนเติมเต็มรูล้น

4.2.3 ชิ้นงานหล่อทรายขึ้นงานกระสวนขึ้นเดียวหน้าฝารอบมีไส้แบบในตัวรูล้นทรงกระบอก

ต้น ตำแหน่งวางรูล้นที่ 1 (Cylinder_Q1 Riser)



ภาพที่ 4-11 แสดงลักษณะการไหลของโลหะเหลวของชิ้นงาน Cylinder_Q1 Riser

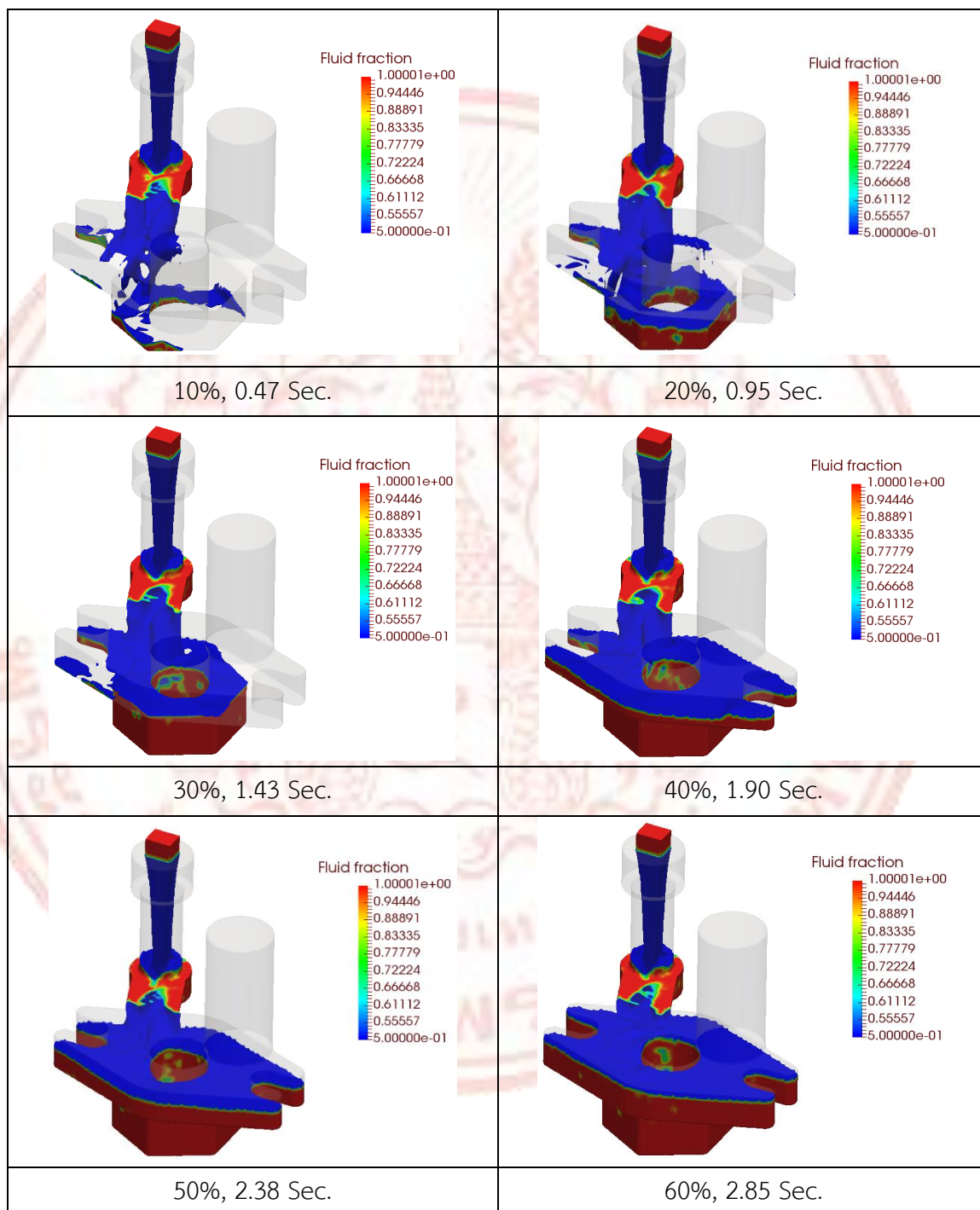


ภาพที่ 4-12 (ต่อ) แสดงลักษณะการไหลของโลหะเหลวของชิ้นงาน Cylinder_Q1 Riser

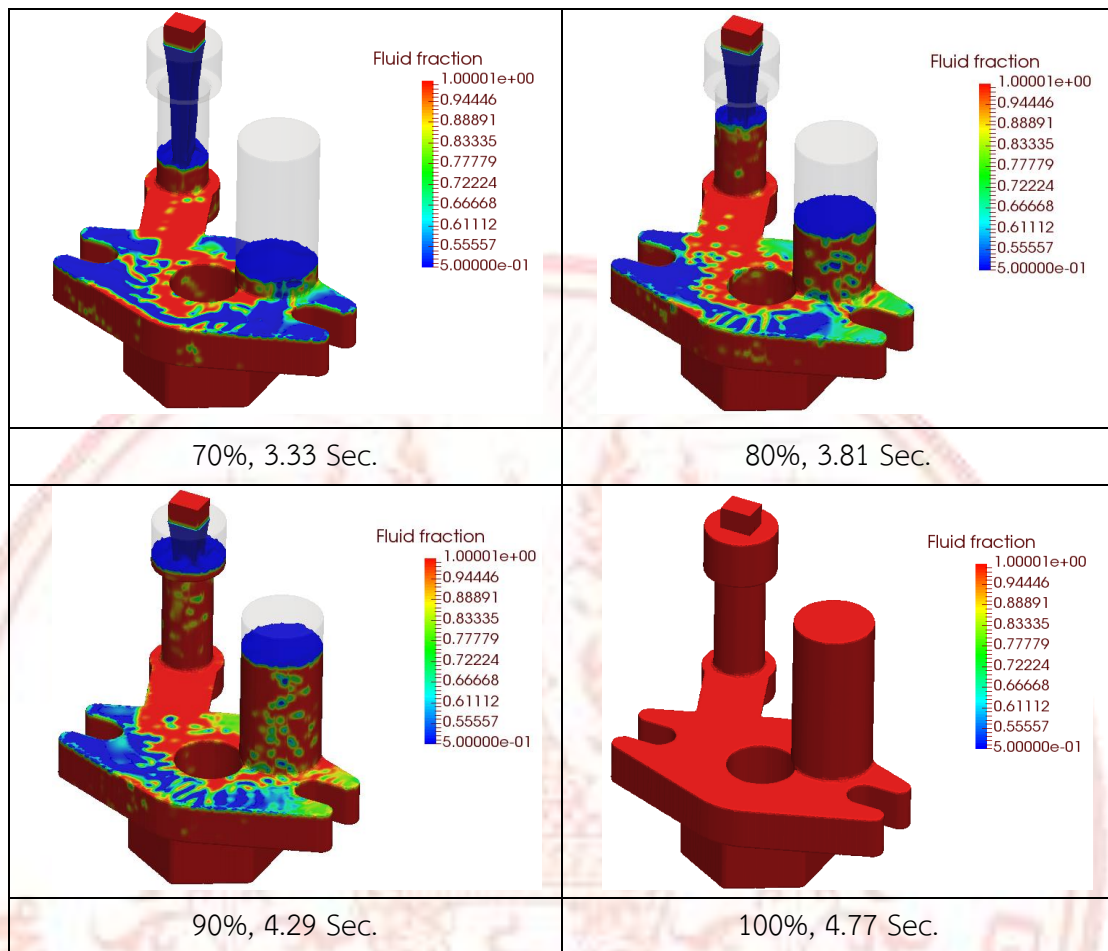
การไหลของน้ำโลหะเหลวสำหรับชิ้นงานหล่อทรายชิ้นงานกระสวนขึ้นเดียวหน้าผ่าราบมีได้แบบในตัวรูล้นทรงกระบอกตัน ตำแหน่งวางรูล้นที่ 1 นั้น ใช้เวลาในการเติมเต็มทั้งหมด 5.05 วินาที โดยน้ำโลหะเหลวเติมเต็มบริเวณจุดศูนย์กลางของชิ้นงานก่อน มีลักษณะการไหลแบบวนทวนเข็มนาฬิกาขึ้นมาตามความสูงของชิ้นงานจนเติมเต็มรูล้น

4.2.4 ชิ้นงานหล่อทรายขึ้นงานกระสวนขึ้นเดียวหน้าฝารอบมีไส้แบบในตัวรูล้นทรงกระบอก

ต้น ตำแหน่งวางรูล้นที่ 2 (Cylinder_Q2 Riser)



ภาพที่ 4-13 แสดงลักษณะการไหลของโลหะเหลวของชิ้นงาน Cylinder_Q2 Riser

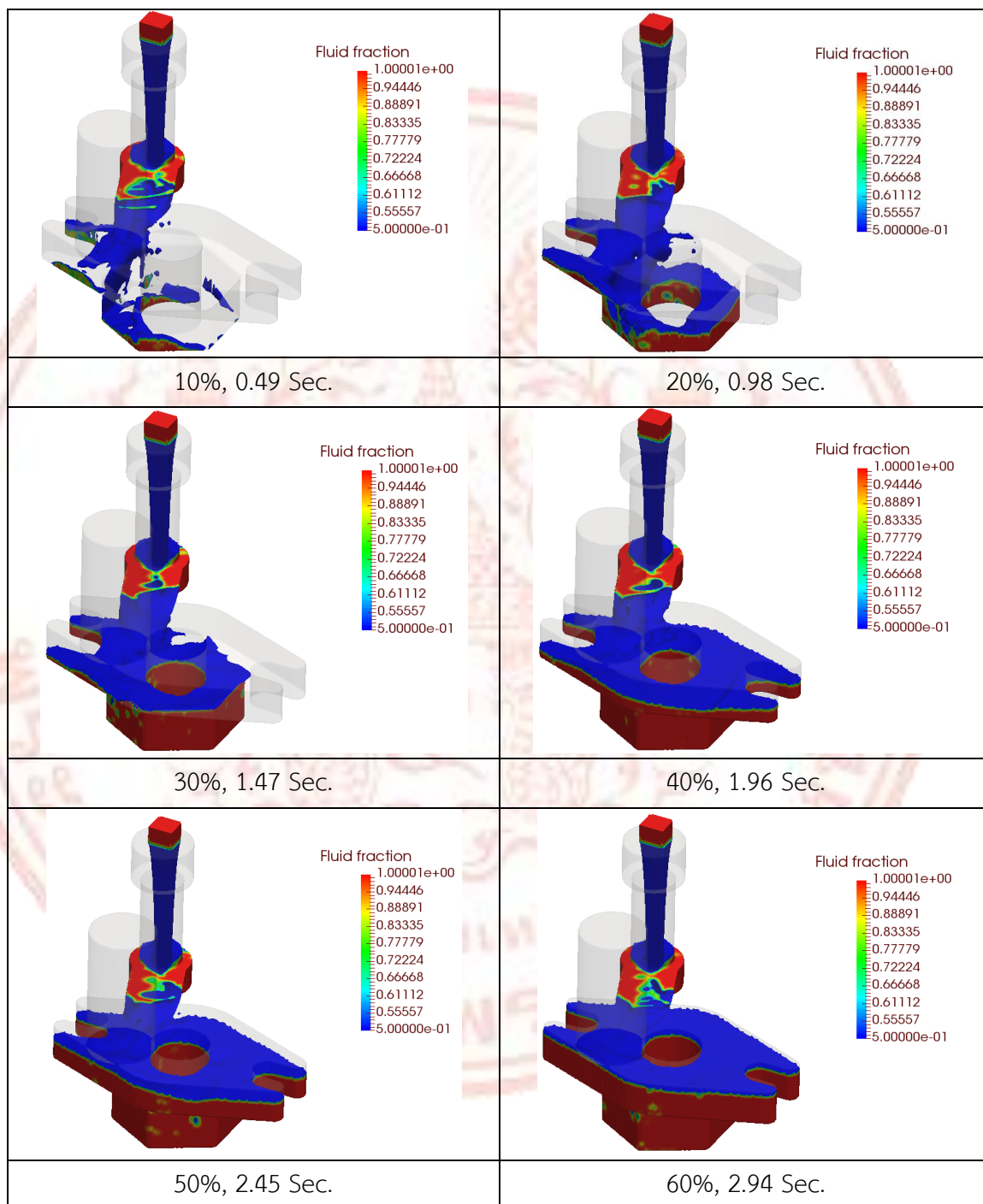


ภาพที่ 4-14 (ต่อ) แสดงลักษณะการไหลของโลหะเหลวของชิ้นงาน Cylinder_Q2 Riser

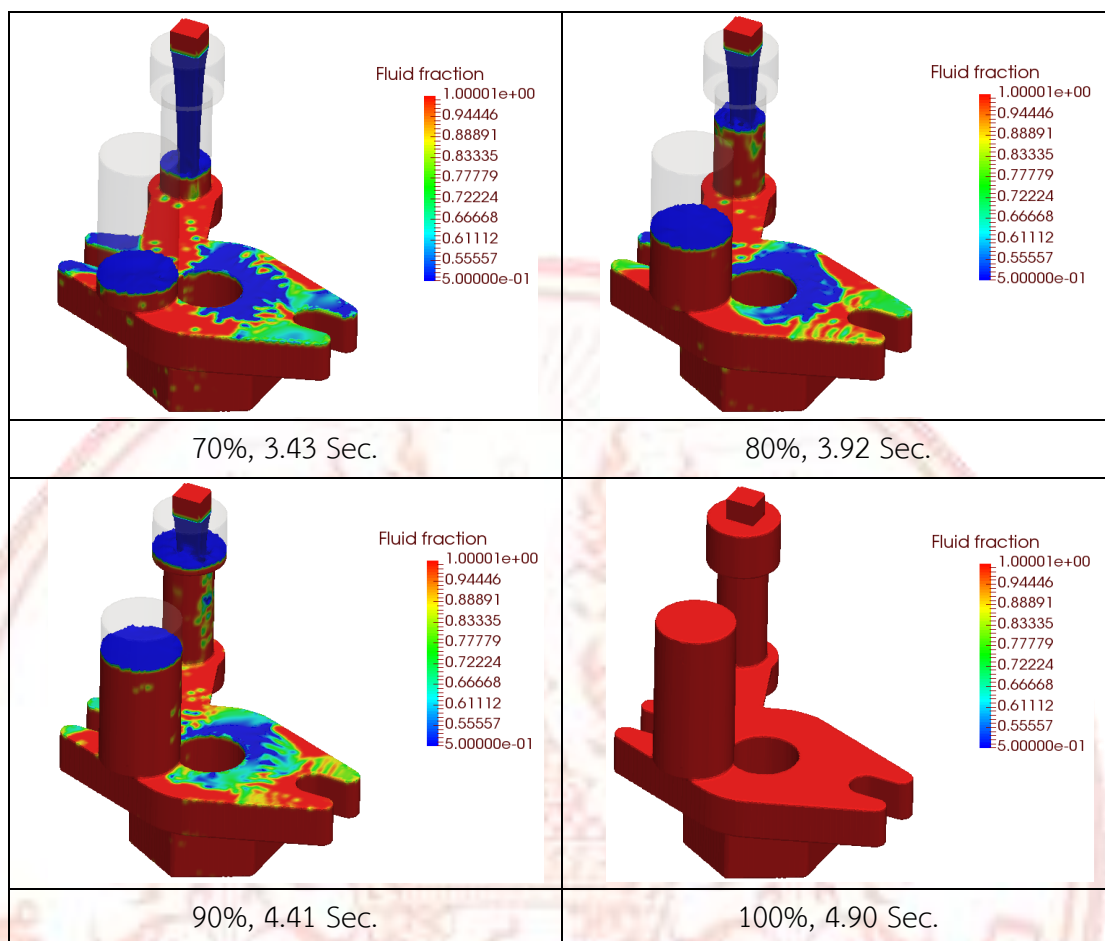
การไหลของน้ำโลหะเหลวสำหรับชิ้นงานหล่อทรายชิ้นงานกระสวนขึ้นเดียวหน้าผ่าราบมีได้แบบในตัวรูล้นทรงกระบอกตัน ตำแหน่งวางรูล้นที่ 2 นั้น ใช้เวลาในการเต็มเต็มทั้งหมด 4.77 วินาที โดยน้ำโลหะเหลวเต็มเต็มบริเวณจุดศูนย์กลางของชิ้นงานก่อน มีลักษณะการไหลแบบวนทวนเข็มนาฬิกาขึ้นตามความสูงของชิ้นงานจนเต็มเต็มรูล้น

4.2.5 ชิ้นงานหล่อทรายขึ้นงานกระสวนขึ้นเดียวหน้าฝารอบมีไส้แบบในตัวรูล้นทรงกระบอก

ต้น ตำแหน่งวางรูล้นที่ 3 (Cylinder_Q3 Riser)



ภาพที่ 4-15 แสดงลักษณะการไหลของโลหะเหลวของชิ้นงาน Cylinder_Q3 Riser

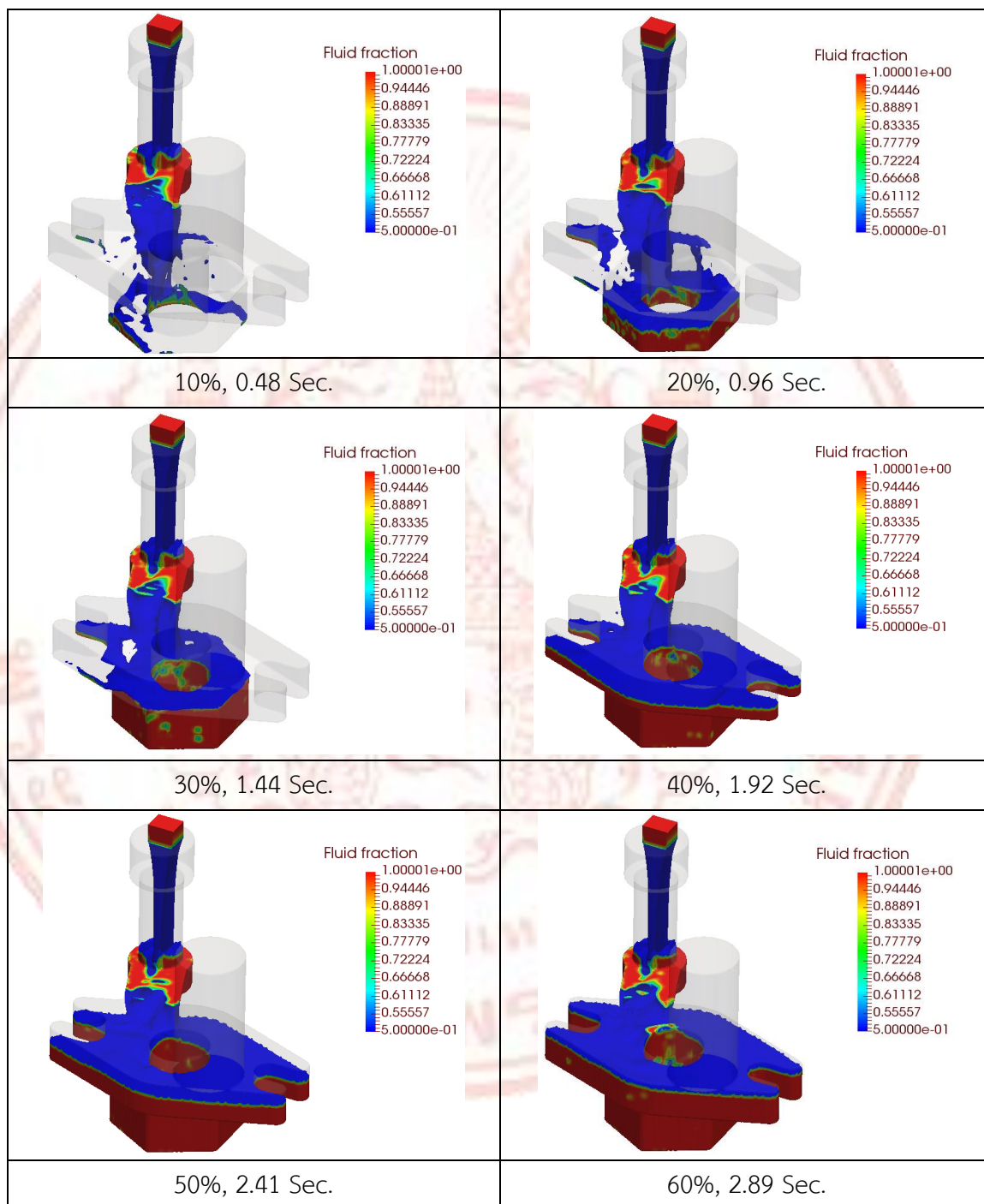


ภาพที่ 4-16 (ต่อ) แสดงลักษณะการไหลของโลหะเหลวของขึ้นงาน Cylinder_Q3 Riser

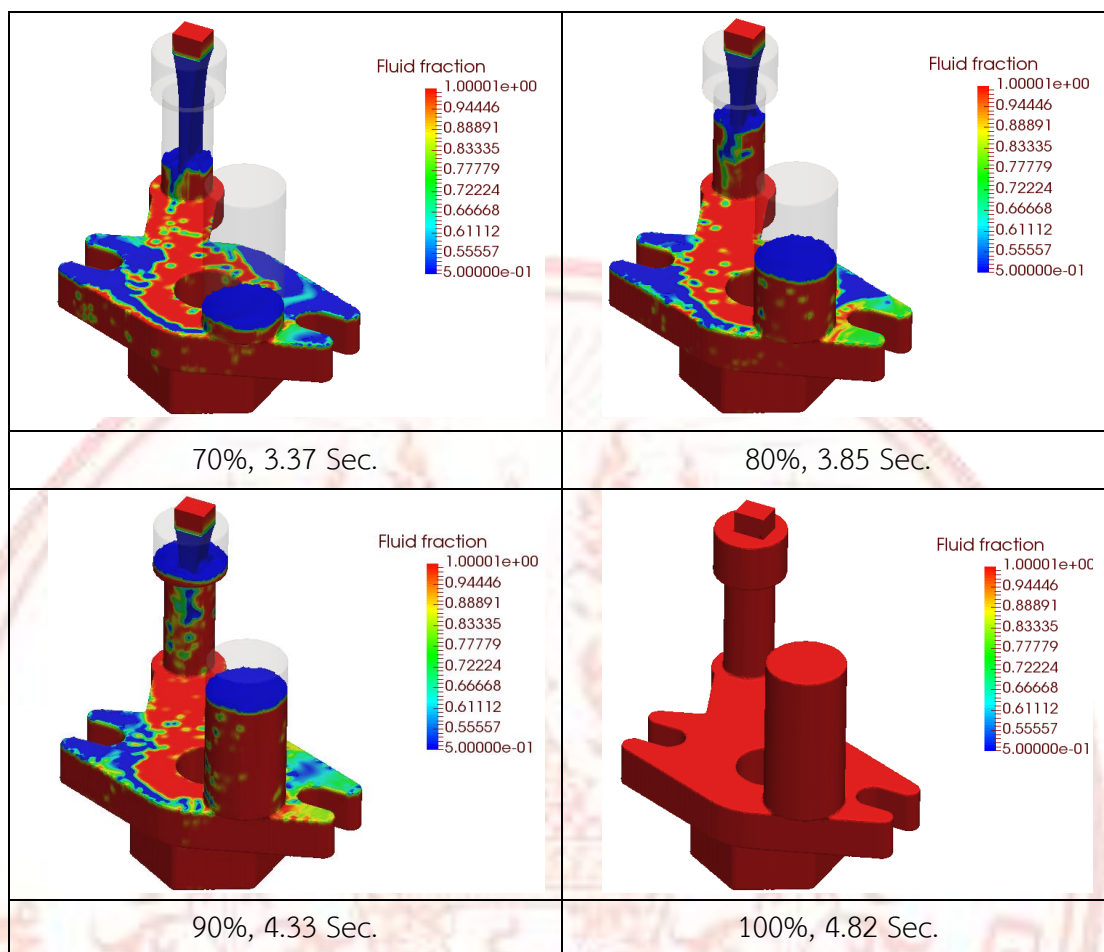
การไหลของน้ำโลหะเหลวสำหรับขึ้นงานหล่อทรายขึ้นงานกระสวนขึ้นเดียวหน้าผ่าราบมีได้แบบในตัวรูล้นทรงกระบอกตัน ตำแหน่งวางรูล้นที่ 3 นั้น ใช้เวลาในการเติมเต็มทั้งหมด 4.90 วินาที โดยน้ำโลหะเหลวเติมเต็มบริเวณจุดศูนย์กลางของขึ้นงานก่อน มีลักษณะการไหลแบบวนทวนเข็มนาฬิกาขึ้นมาตามความสูงของขึ้นงานจนเติมเต็มรูล้น

4.2.6 ชิ้นงานหล่อทรายขึ้นงานกระสวนขึ้นเดียวหน้าฝารอบมีไส้แบบในตัวรูล้นทรงกระบอก

ต้น ตำแหน่งวางรูล้นที่ 4 (Cylinder_Q4 Riser)



ภาพที่ 4-17 แสดงลักษณะการไหลของโลหะเหลวของชิ้นงาน Cylinder_Q4 Riser



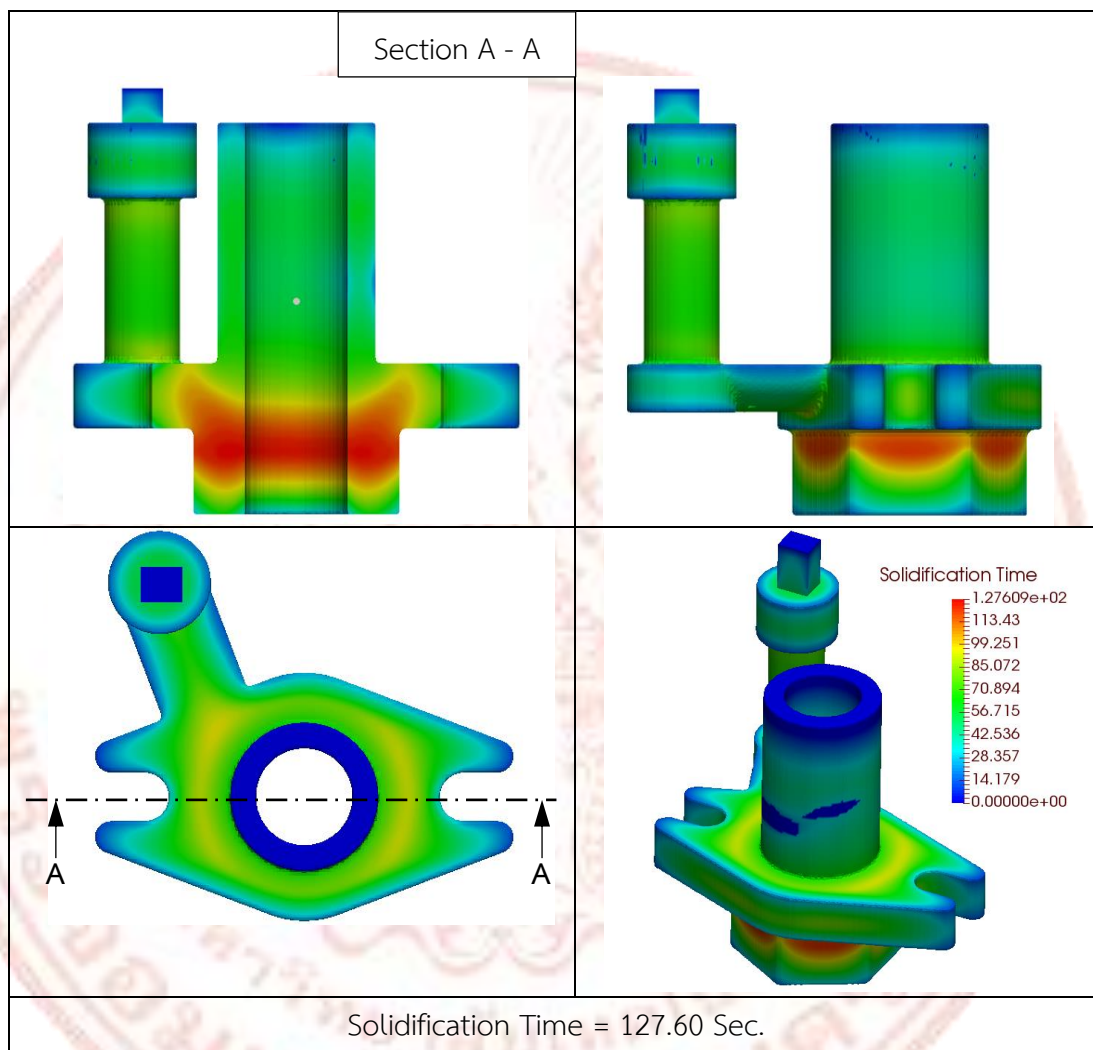
ภาพที่ 4-18 (ต่อ) แสดงลักษณะการไหลของโลหะเหลวของชิ้นงาน Cylinder_Q4 Riser

การไหลของน้ำโลหะเหลวสำหรับชิ้นงานหล่อทรายชิ้นงานกระสวนขึ้นเดียวหน้าผ่าราบมีได้แบบในตัวรูล้นทรงกระบอกตัน ตำแหน่งวางรูล้นที่ 4 นั้น ใช้เวลาในการเต็มเต็มทั้งหมด 4.82 วินาที โดยน้ำโลหะเหลวเต็มเต็มบริเวณจุดศูนย์กลางของชิ้นงานก่อน มีลักษณะการไหลแบบวนทวนเข็มนาฬิกาขึ้นตามความสูงของชิ้นงานจนเต็มเต็มรูล้น

4.3 แสดงผลการจำลองเวลาในการแข็งตัวของโลหะ (Solidification Time)

4.3.1 ชิ้นงานหล่อทรายกระสวนขึ้นเดียวหน้าผ่าราบมีไส้แบบในตัวรูล้นทรงกระบอกกลาง

หนา 8 มิลลิเมตร (Tube 8mm. Riser)

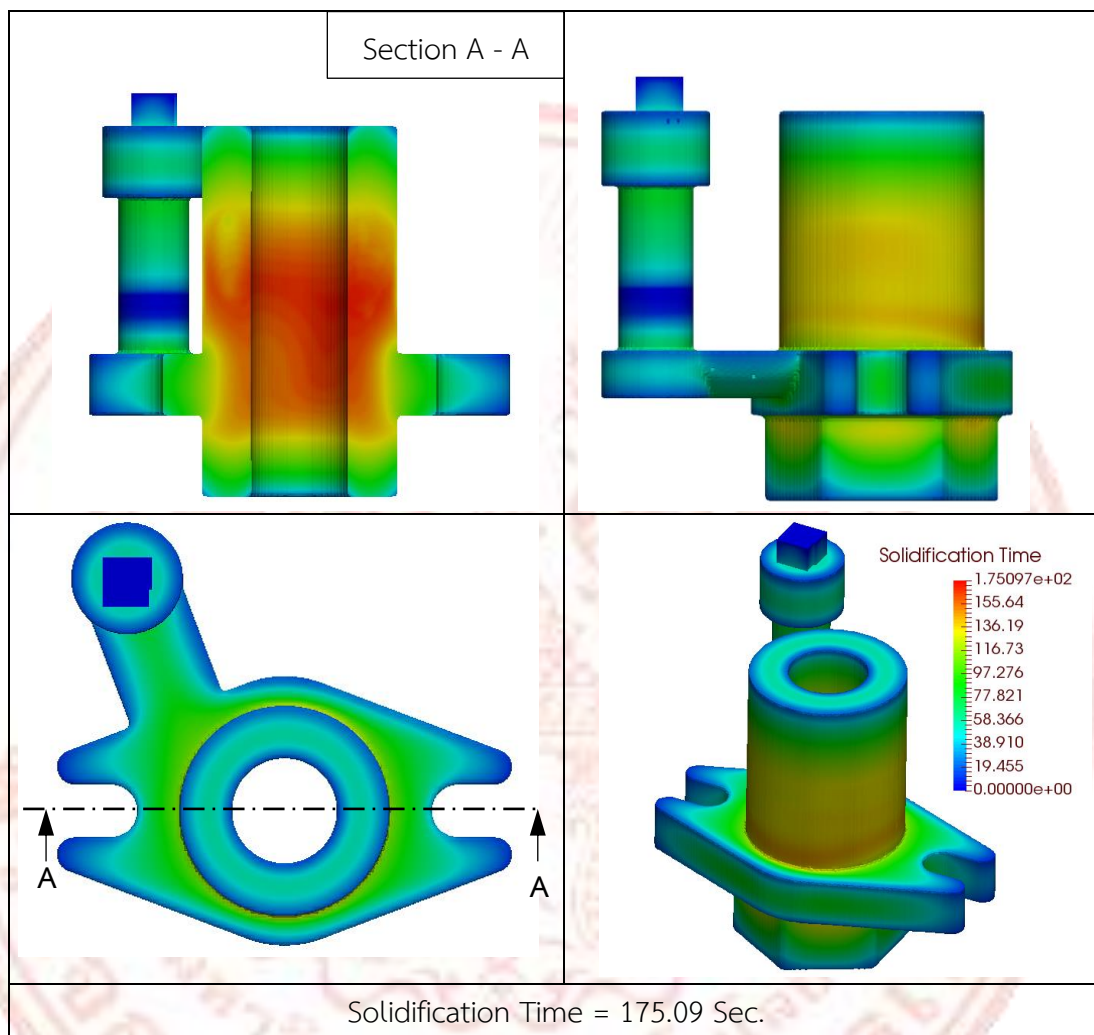


ภาพที่ 4-19 แสดงการจำลองเวลาในการแข็งตัวของชิ้นงาน Tube 8mm. Riser

ภาพที่ 4-19 จะแสดงให้เห็นถึงเวลาทั้งหมดในการแข็งตัวของชิ้นงาน โดยใช้เวลา 127.60 วินาที โดยจุดที่มีการแข็งตัวช้าที่สุดจะเป็นโซนสีแดงซึ่งอยู่บริเวณกลางชิ้นงาน และจุดที่แข็งตัวเร็วที่สุดจะเป็นบริเวณโซนสีฟ้าขอบของชิ้นงาน

4.3.2 ชิ้นงานหล่อทรายกระสวนขึ้นเดียวหน้าผ่าราบมีไส้แบบในตัวรูล้นทรงกระบอกกลาง

หนา 15 มิลลิเมตร (Tube 15mm. Riser)

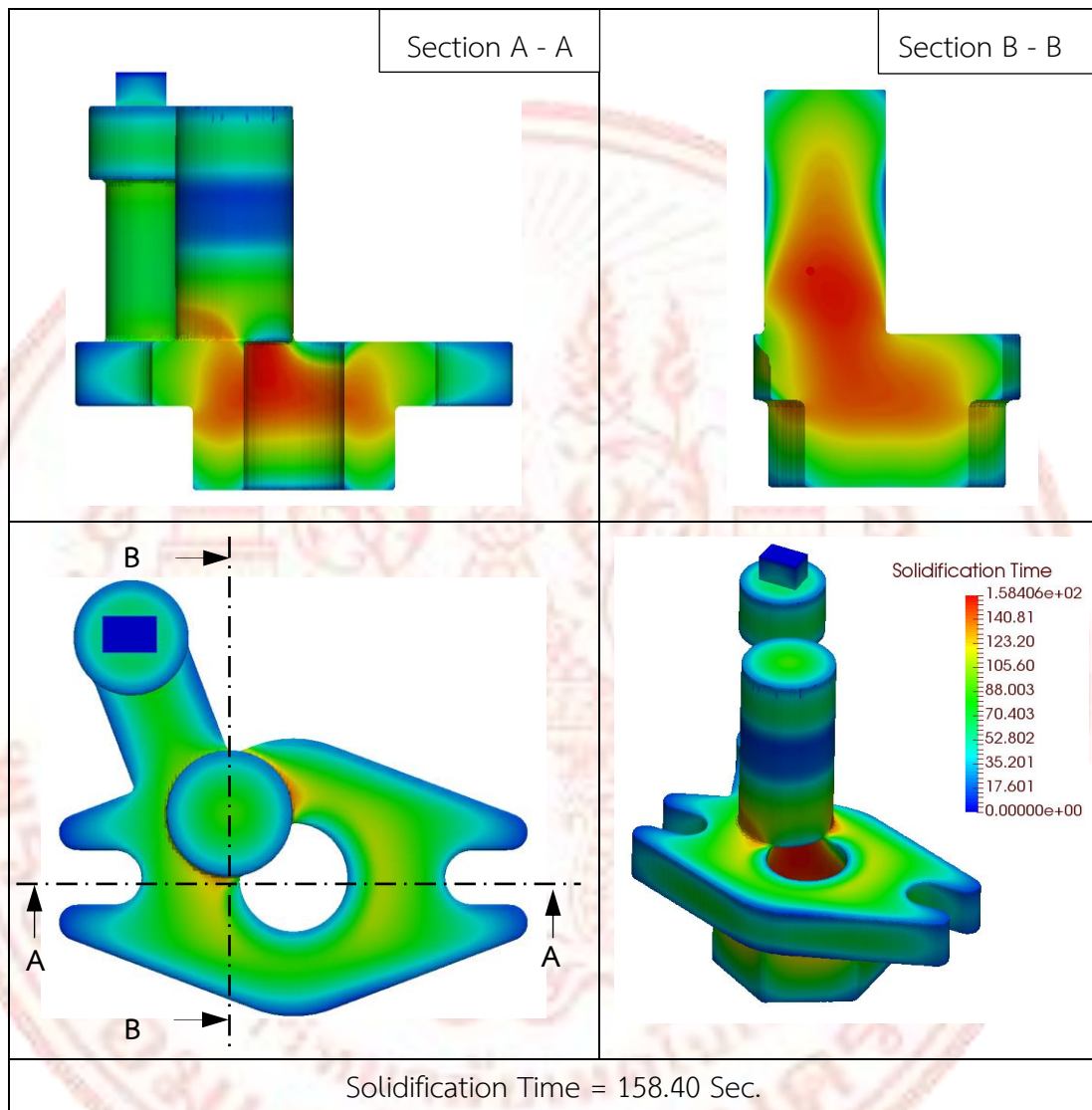


ภาพที่ 4-20 แสดงการจำลองเวลาในการแข็งตัวของชิ้นงาน Tube 15mm. Riser

ภาพที่ 4-20 จะแสดงให้เห็นถึงเวลาทั้งหมดในการแข็งตัวของชิ้นงาน โดยใช้เวลา 175.09 วินาที โดยจุดที่มีการแข็งตัวช้าที่สุดจะเป็นโซนสีแดงซึ่งอยู่บริเวณกลางชิ้นงาน และจุดที่แข็งตัวเร็วที่สุดจะเป็นบริเวณโซนสีฟ้าขอบของชิ้นงาน

4.3.3 ชิ้นงานหล่อทรายชิ้นงานกระสวนขึ้นเดียวหน้าผ่าราบมีไส้แบบในตัวรูล้นทรงกระบอก

ต้น ตำแหน่งวางรูล้นที่ 1 (Cylinder_Q1 Riser)

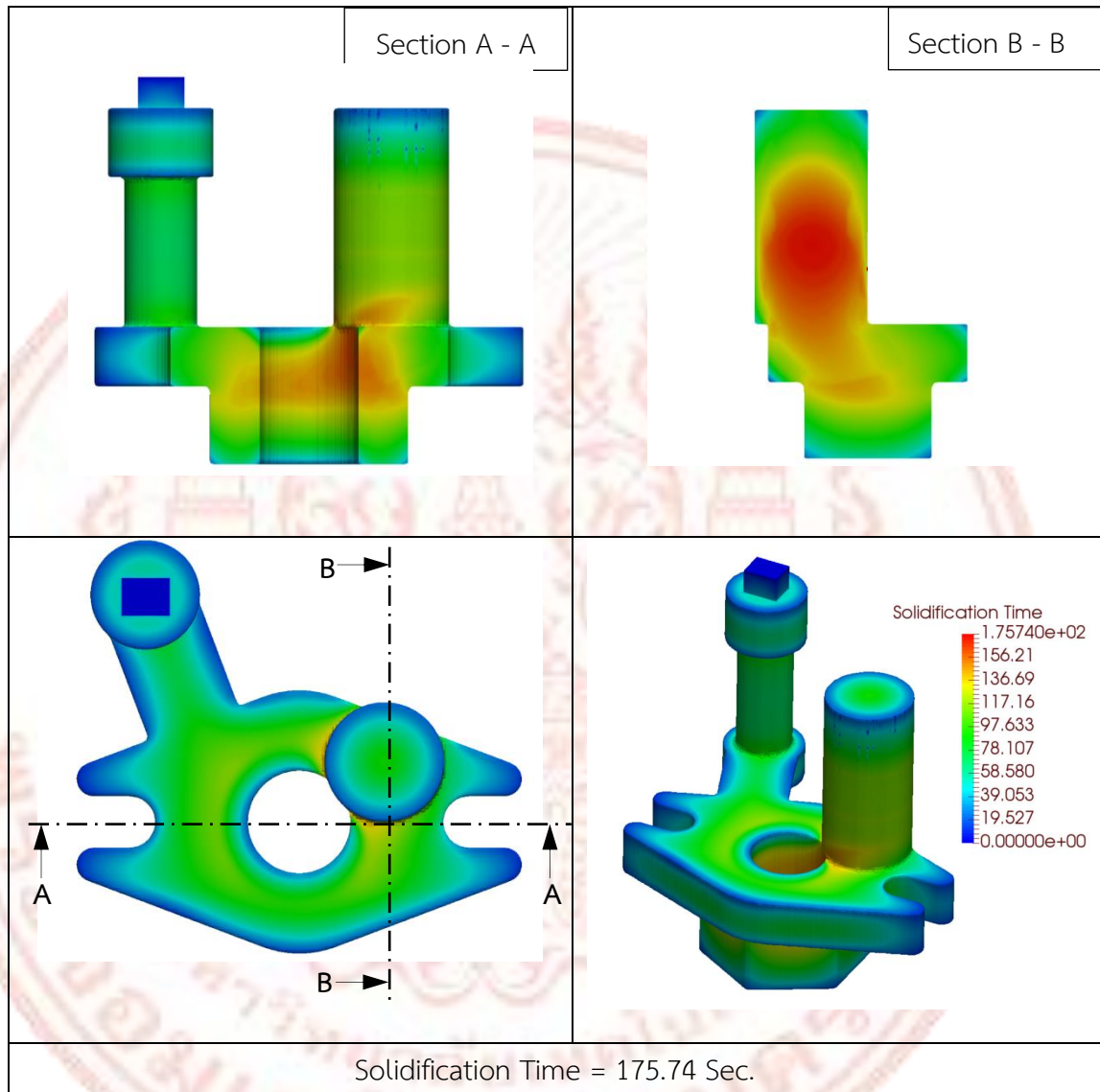


ภาพที่ 4-21 แสดงการจำลองเวลาในการแข็งตัวของชิ้นงาน Cylinder_Q1 Riser

ภาพที่ 4-21 จะแสดงให้เห็นถึงเวลาทั้งหมดในการแข็งตัวของชิ้นงาน โดยใช้เวลา 158.40 วินาที โดยจุดที่มีการแข็งตัวช้าที่สุดจะเป็นโซนสีแดงซึ่งอยู่บริเวณกลางชิ้นงานไปจนถึงบริเวณเนื้อของรูล้น และจุดที่แข็งตัวเร็วที่สุดจะเป็นบริเวณโซนสีฟ้าขอบของชิ้นงาน

4.3.4 ชิ้นงานหล่อทรายชิ้นงานกระสวนชิ้นเดียวหน้าผ่าราบมีไส้แบบในตัวรูกลั่นทรงกระบอก

ต้น ตำแหน่งวางรูกลั่นที่ 2 (Cylinder_Q2 Riser)

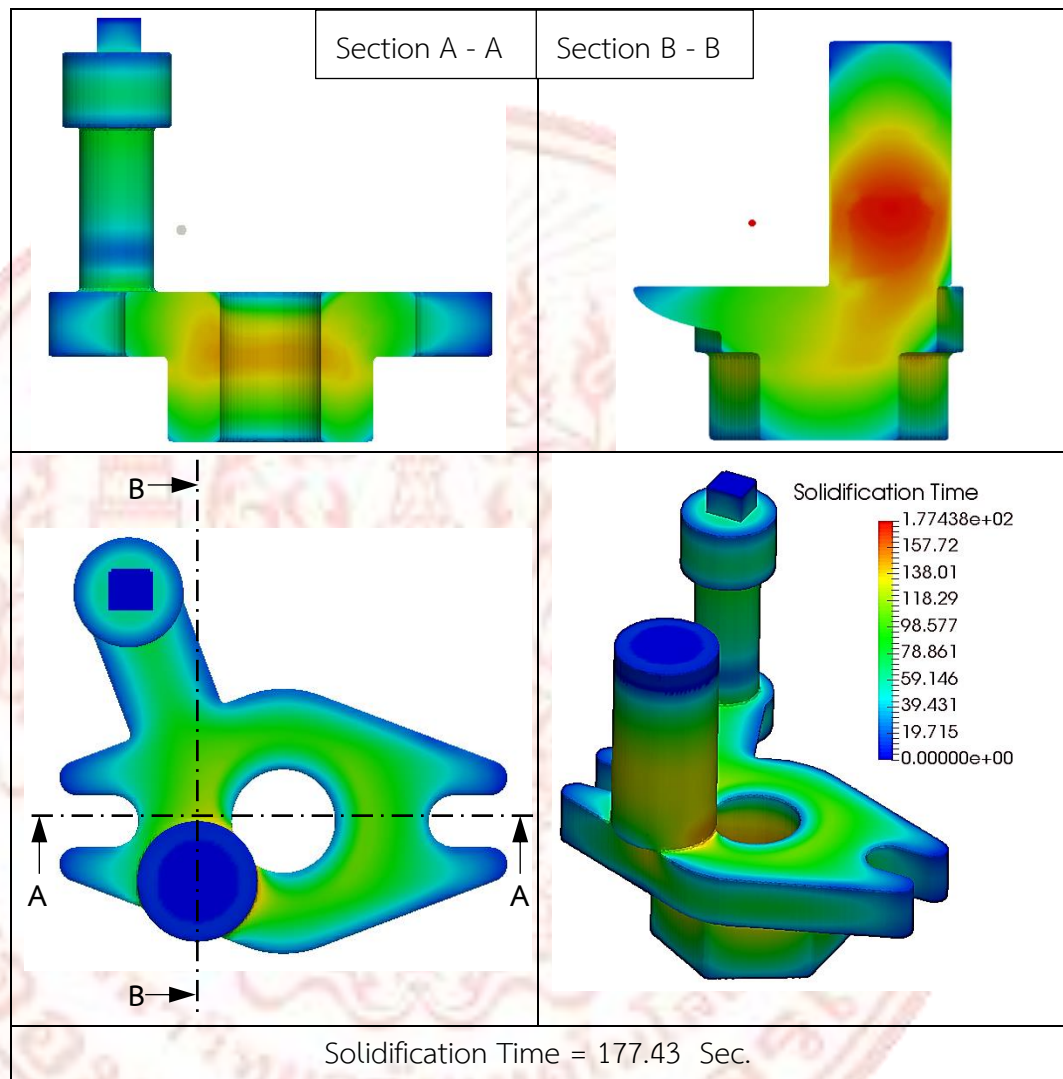


ภาพที่ 4-22 แสดงการจำลองเวลาในการแข็งตัวของชิ้นงาน Cylinder_Q2 Riser

ภาพที่ 4-22 จะแสดงให้เห็นถึงเวลาทั้งหมดในการแข็งตัวของชิ้นงาน โดยใช้เวลา 175.74 วินาที โดยจุดที่มีการแข็งตัวช้าที่สุดจะเป็นโซนสีแดงซึ่งอยู่บริเวณกลางชิ้นงานไปจนถึงบริเวณเนื้อของรูกลั่น และจุดที่แข็งตัวเร็วที่สุดจะเป็นบริเวณโซนสีฟ้าขอบของชิ้นงาน

4.3.5 ชิ้นงานหล่อทรายชิ้นงานกระสวนขึ้นเดียวหน้าผ่าราบมีไส้แบบในตัวรูล้นทรงกระบอก

ต้น ตำแหน่งวางรูล้นที่ 3 (Cylinder_Q3 Riser)

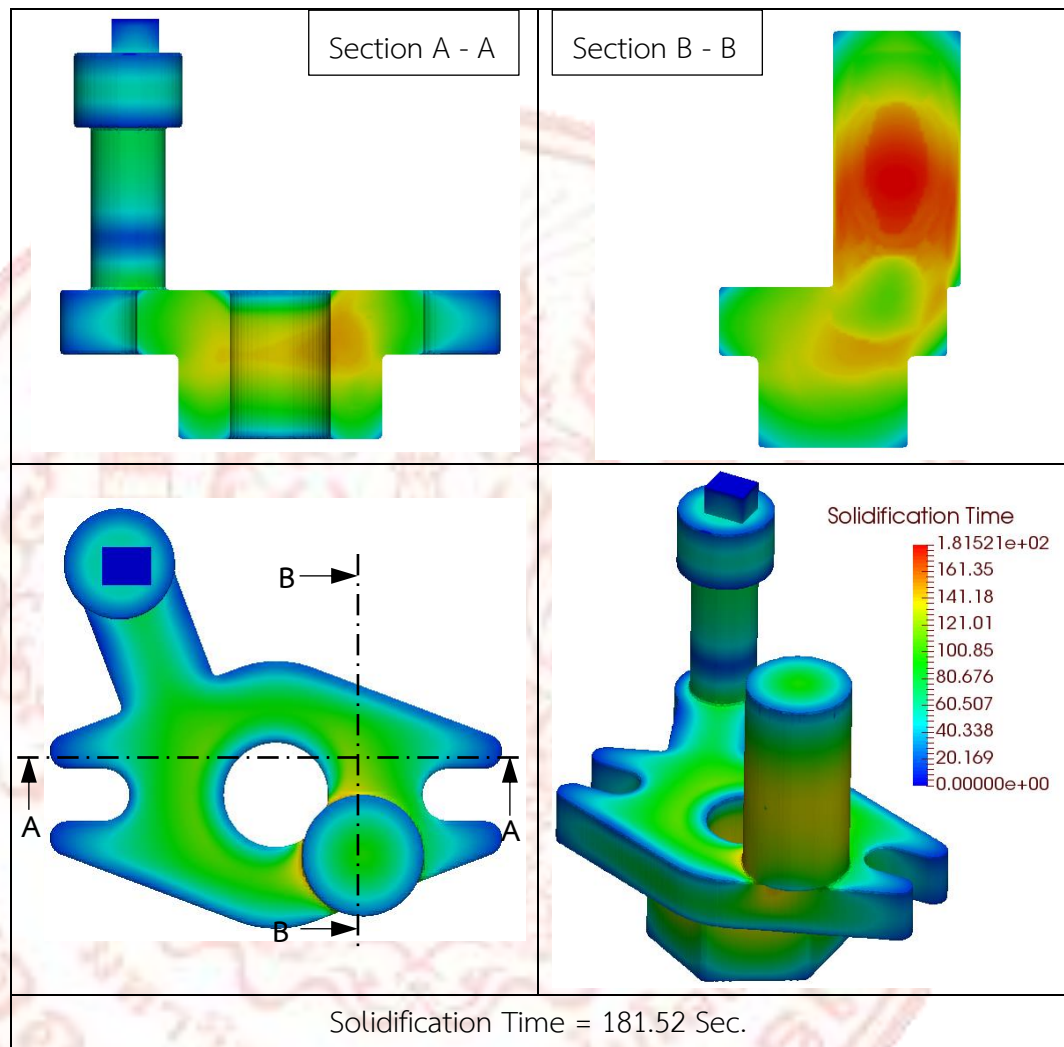


ภาพที่ 4-23 แสดงการจำลองเวลาในการแข็งตัวของชิ้นงาน Cylinder_Q3 Riser

ภาพที่ 4-23 จะแสดงให้เห็นถึงเวลาทั้งหมดในการแข็งตัวของชิ้นงาน โดยใช้เวลา 177.43 วินาที โดยจุดที่มีการแข็งตัวช้าที่สุดจะเป็นโซนสีแดงซึ่งอยู่บริเวณกลางชิ้นงานไปจนถึงบริเวณเนื้อของรูล้น และจุดที่แข็งตัวเร็วที่สุดจะเป็นบริเวณโซนสีฟ้าขอบของชิ้นงาน

4.3.6 ชิ้นงานหล่อทรายชิ้นงานกระสวนขึ้นเดียวหน้าผ่าราบมีไส้แบบในตัวรูล้นทรงกระบอก

ต้น ตำแหน่งวางรูล้นที่ 4 (Cylinder_Q4 Riser)

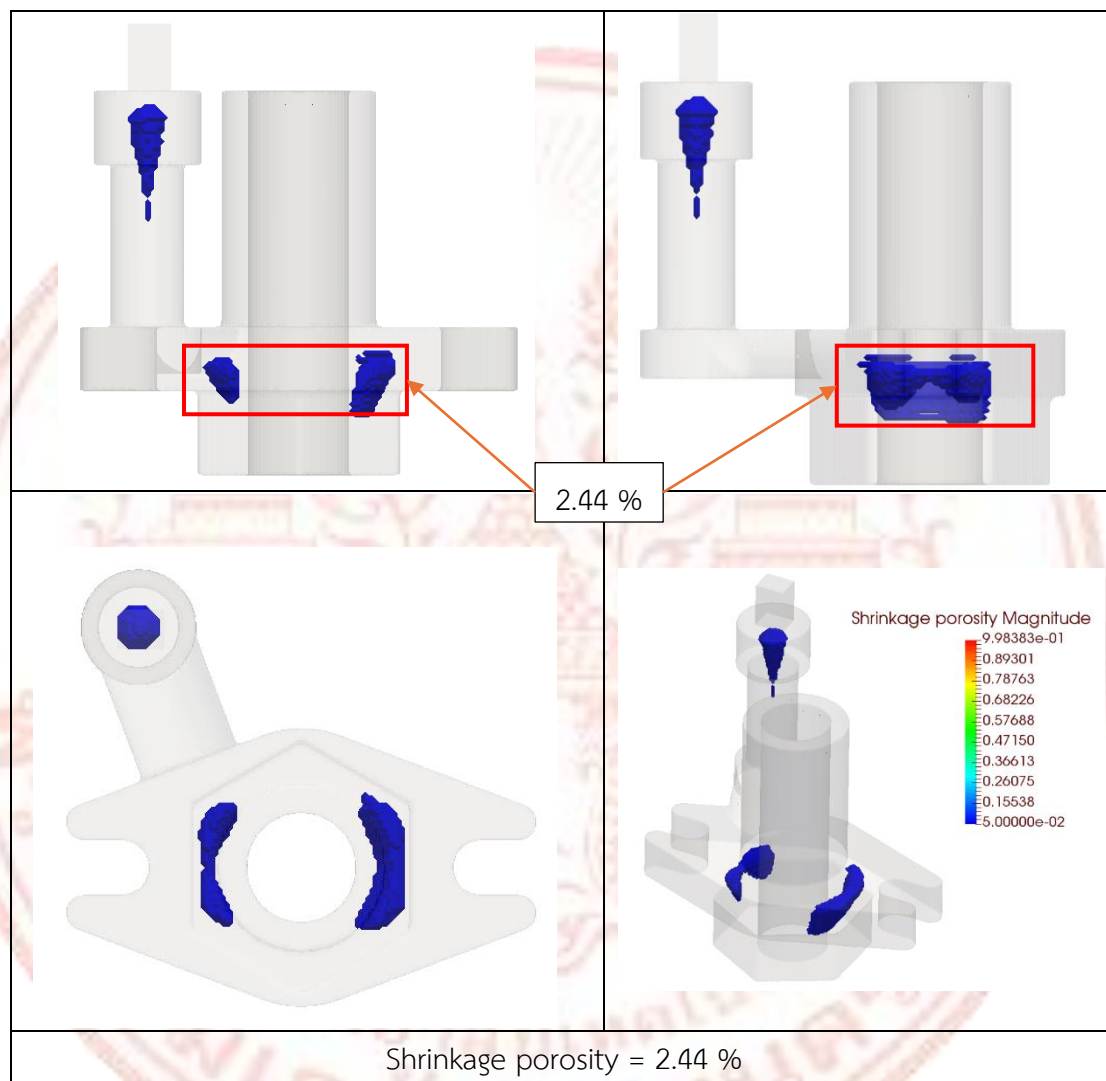


ภาพที่ 4-24 แสดงการจำลองเวลาในการแข็งตัวของชิ้นงาน Cylinder_Q4 Riser

ภาพที่ 4-24 จะแสดงให้เห็นถึงเวลาทั้งหมดในการแข็งตัวของชิ้นงาน โดยใช้เวลา 181.52 วินาที โดยจุดที่มีการแข็งตัวช้าที่สุดจะเป็นโซนสีแดงซึ่งอยู่บริเวณกลางชิ้นงานไปจนถึงบริเวณเนื้อของรูล้น และจุดที่แข็งตัวเร็วที่สุดจะเป็นบริเวณโซนสีฟ้าขอบของชิ้นงาน

4.4 แสดงผลการเกิดโพรงหดตัว (Shrinkage Porosity)

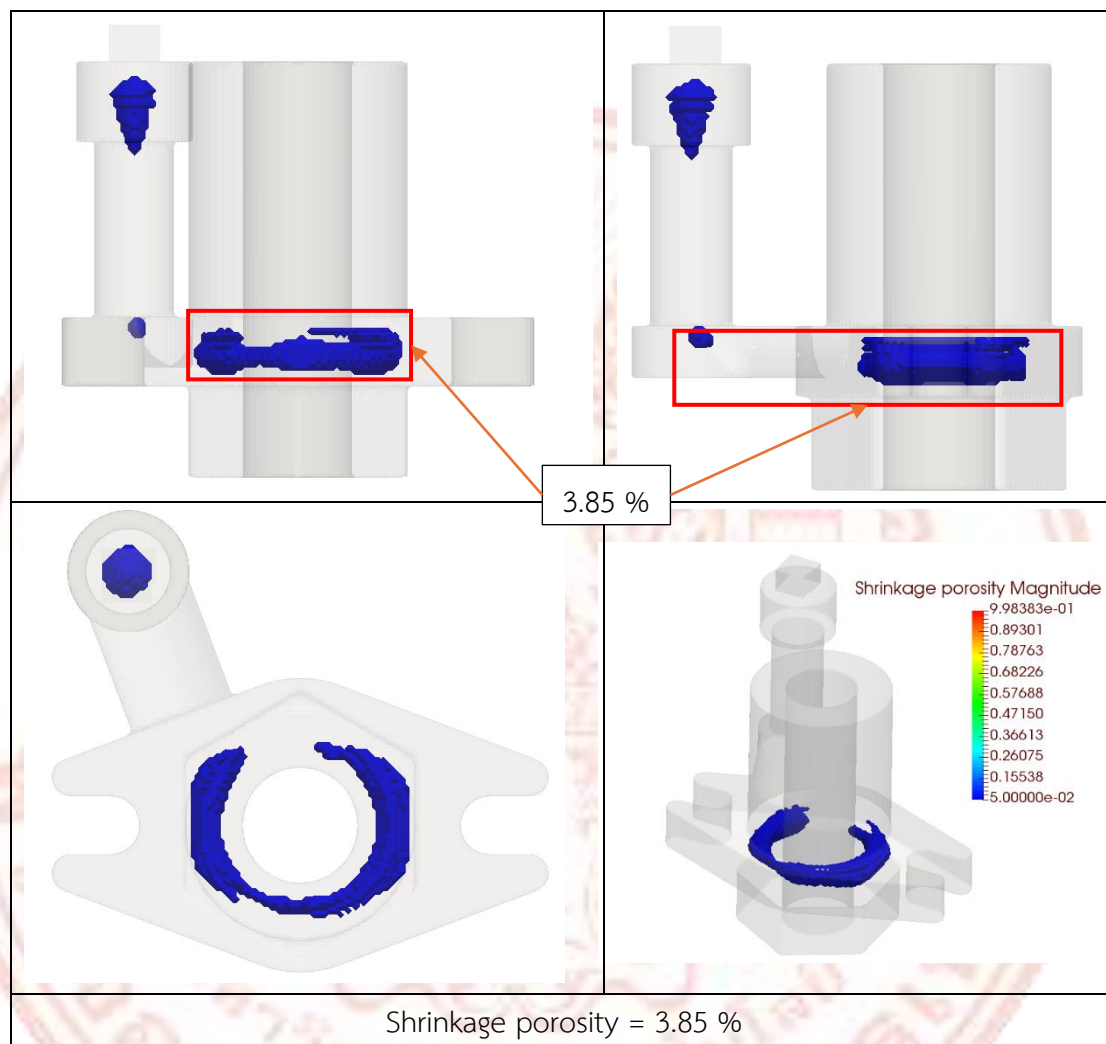
4.4.1 ชิ้นงานหล่อทรายกระสวนขึ้นเดียวหน้าผาราบมีไส้แบบในตัวรูล้นทรงกระบอกกลางหนา 8 มิลลิเมตร (Tube 8mm. Riser)



ภาพที่ 4-25 แสดงการจำลองการเกิดโพรงหดตัวภายในชิ้นงาน Tube 8mm. Riser

จากภาพที่ 4-25 จะแสดงให้เห็นถึงตำแหน่งของการเกิดโพรงหดตัวภายในชิ้นงาน เมื่อเทียบกับกับชิ้นงานที่มีปริมาตร 172.91 cm^3 โดยไม่นับรูล้น ทางเข้า และรูเท จะมีเปอร์เซ็นต์ของการเกิดโพรงหดตัวอยู่ที่ 4.226 cm^3 หรือ 2.44 เปอร์เซ็นต์ของปริมาตรเฉพาะชิ้นงาน

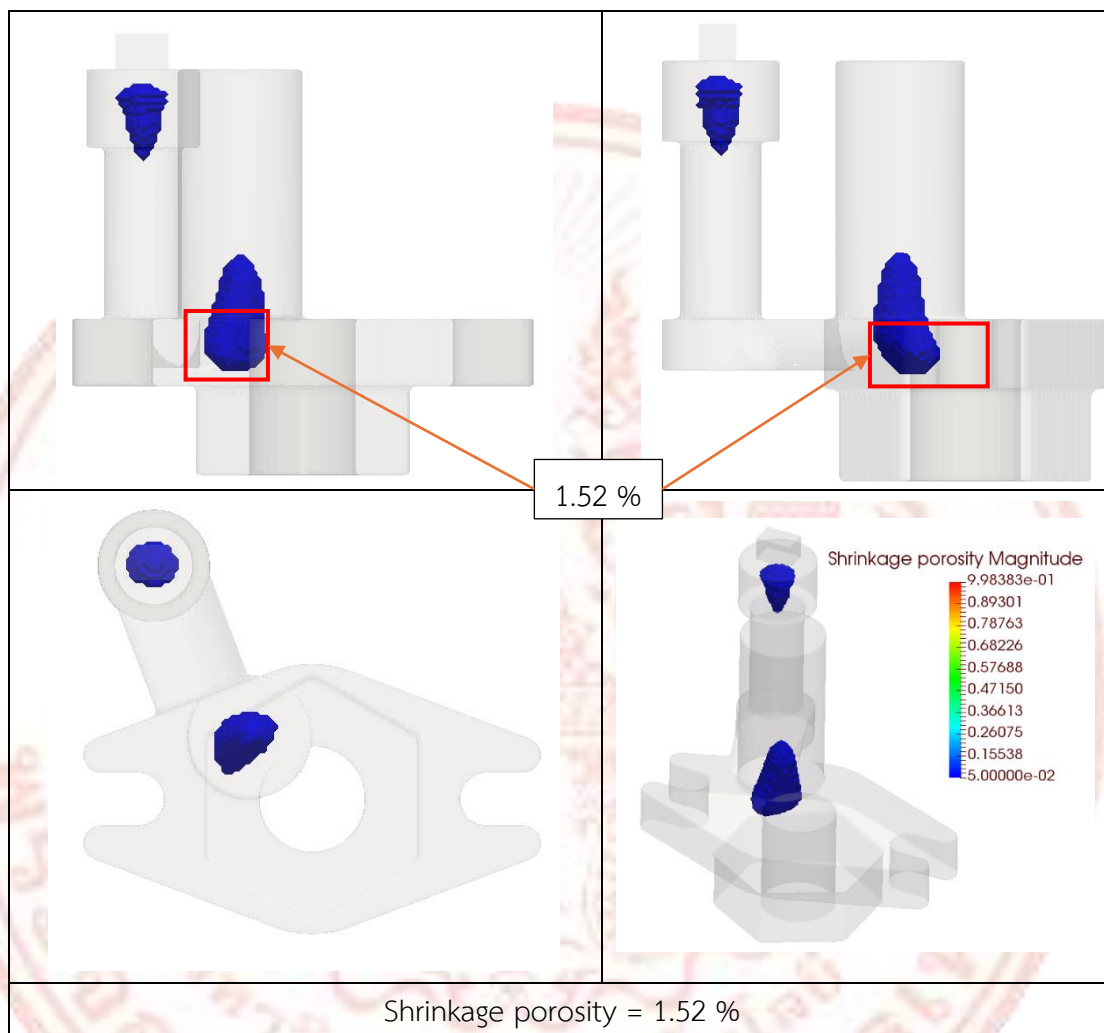
4.4.2 ชิ้นงานหล่อทรายกระสวนขึ้นเดี่ยวหน้าผ่าราบมีไส้แบบในตัวรูล้นทรงกระบอกกลางหนา 15 มิลลิเมตร (Tube 15mm. Riser)



ภาพที่ 4-26 แสดงการจำลองการเกิดโพรงหดตัวภายในชิ้นงาน Tube 15mm. Riser

จากภาพที่ 4-26 จะแสดงให้เห็นถึงตำแหน่งของการเกิดโพรงหดตัวภายในชิ้นงาน เมื่อเทียบกับชิ้นงานที่มีปริมาตร 172.91 cm^3 โดยไม่เน้นรูล้น ทางเข้า และรูเท จะมีเปอร์เซ็นต์ของการเกิดโพรงหดตัวอยู่ที่ 6.66 cm^3 หรือ 3.85 เปอร์เซ็นต์ของปริมาตรเฉพาะชิ้นงาน

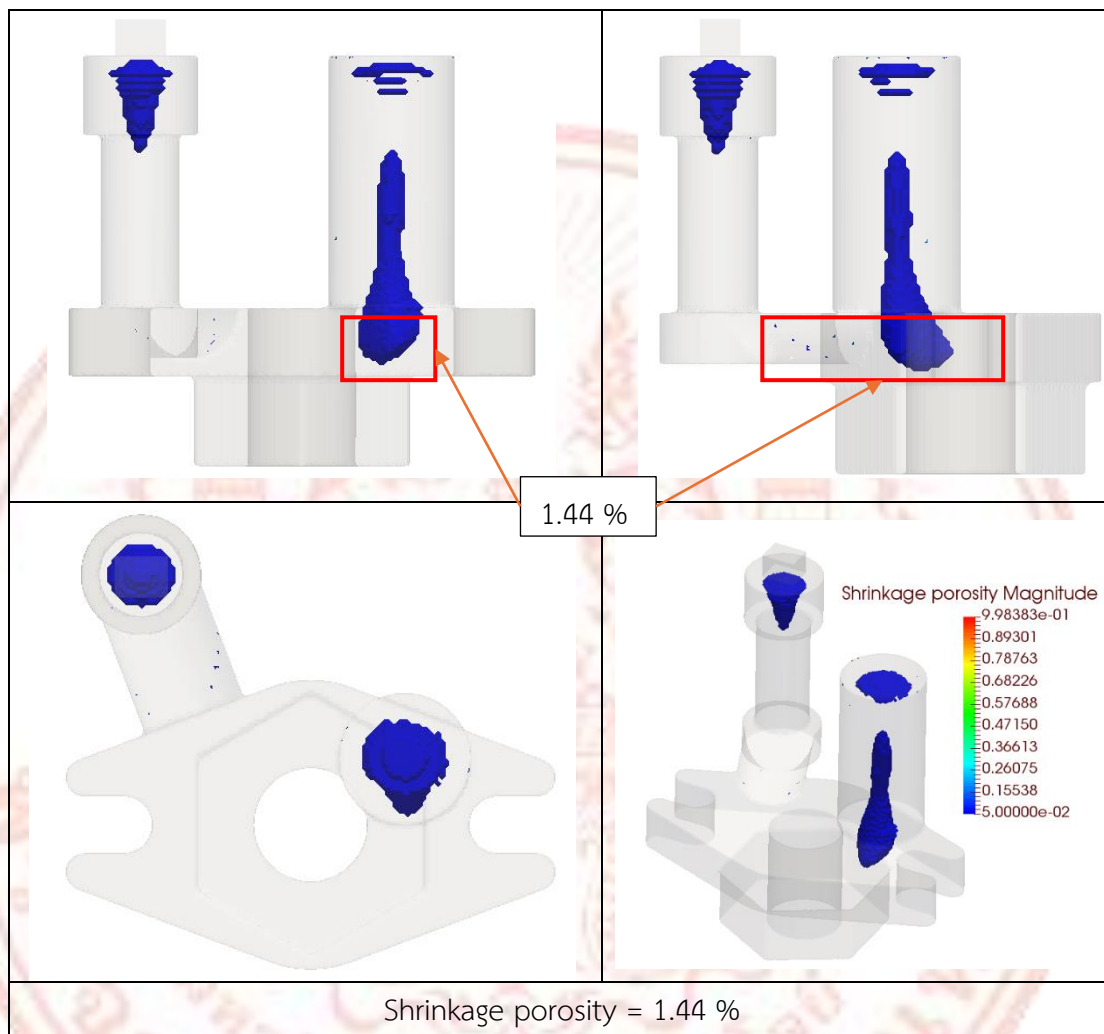
4.4.3 ชิ้นงานหล่อทรายชิ้นงานกระสวนชิ้นเดียวหน้าผ่าราบมีไส้แบบในตัวรูล้นทรงกระบอกตัน
ตำแหน่งวางรูล้นที่ 1 (Cylinder_Q1 Riser)



ภาพที่ 4-27 แสดงการจำลองการเกิดโพรงหดตัวภายในชิ้นงาน Cylinder_Q1 Riser

จากภาพที่ 4-27 จะแสดงให้เห็นถึงตำแหน่งของการเกิดโพรงหดตัวภายในชิ้นงาน เมื่อเทียบกับ
กับชิ้นงานที่มีปริมาตร 172.91 cm^3 โดยไม่นับรูล้น ทางเข้า และรูเท จะมีเปอร์เซ็นต์ของการเกิดโพรง
หดตัวอยู่ที่ 2.615 cm^3 หรือ 1.52 เปอร์เซ็นต์ของปริมาตรเฉพาะชิ้นงาน

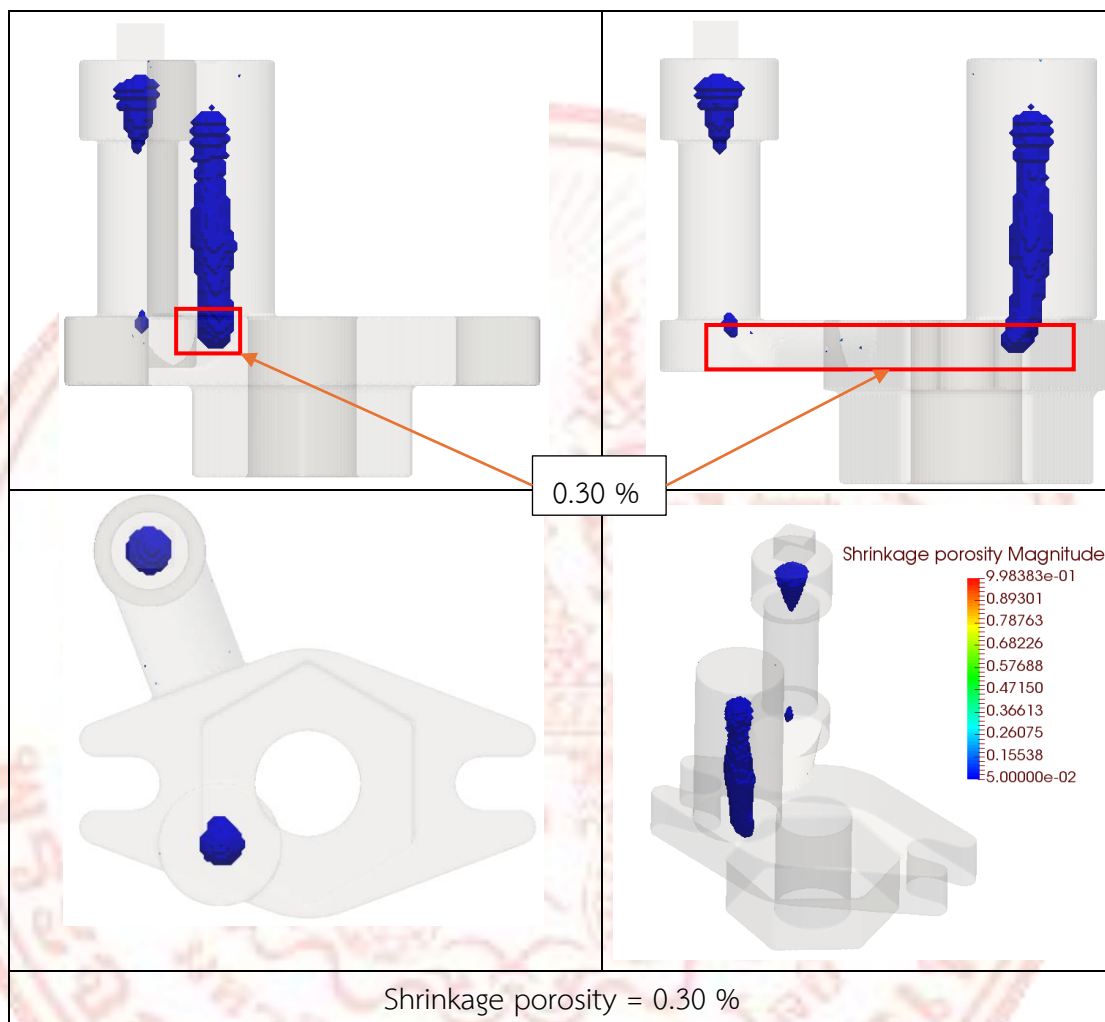
4.4.4 ชิ้นงานหล่อทรายชิ้นงานกระสวนขึ้นเดียวหน้าผ่าราบมีไส้แบบในตัวรูล้นทรงกระบอกตัน
ตำแหน่งวางรูล้นที่ 2 (Cylinder_Q2 Riser)



ภาพที่ 4-28 แสดงการจำลองการเกิดโพรงหดตัวภายในชิ้นงาน Cylinder_Q2 Riser

จากภาพที่ 4-28 จะแสดงให้เห็นถึงตำแหน่งของการเกิดโพรงหดตัวภายในชิ้นงาน เมื่อเทียบกับชิ้นงานที่มีปริมาตร 172.91 cm^3 โดยไม่นับรูล้น ทางเข้า และรูเท จะมีเปอร์เซ็นต์ของการเกิดโพรงหดตัวอยู่ที่ 2.499 cm^3 หรือ 1.44 เปอร์เซ็นต์ของปริมาตรเฉพาะชิ้นงาน

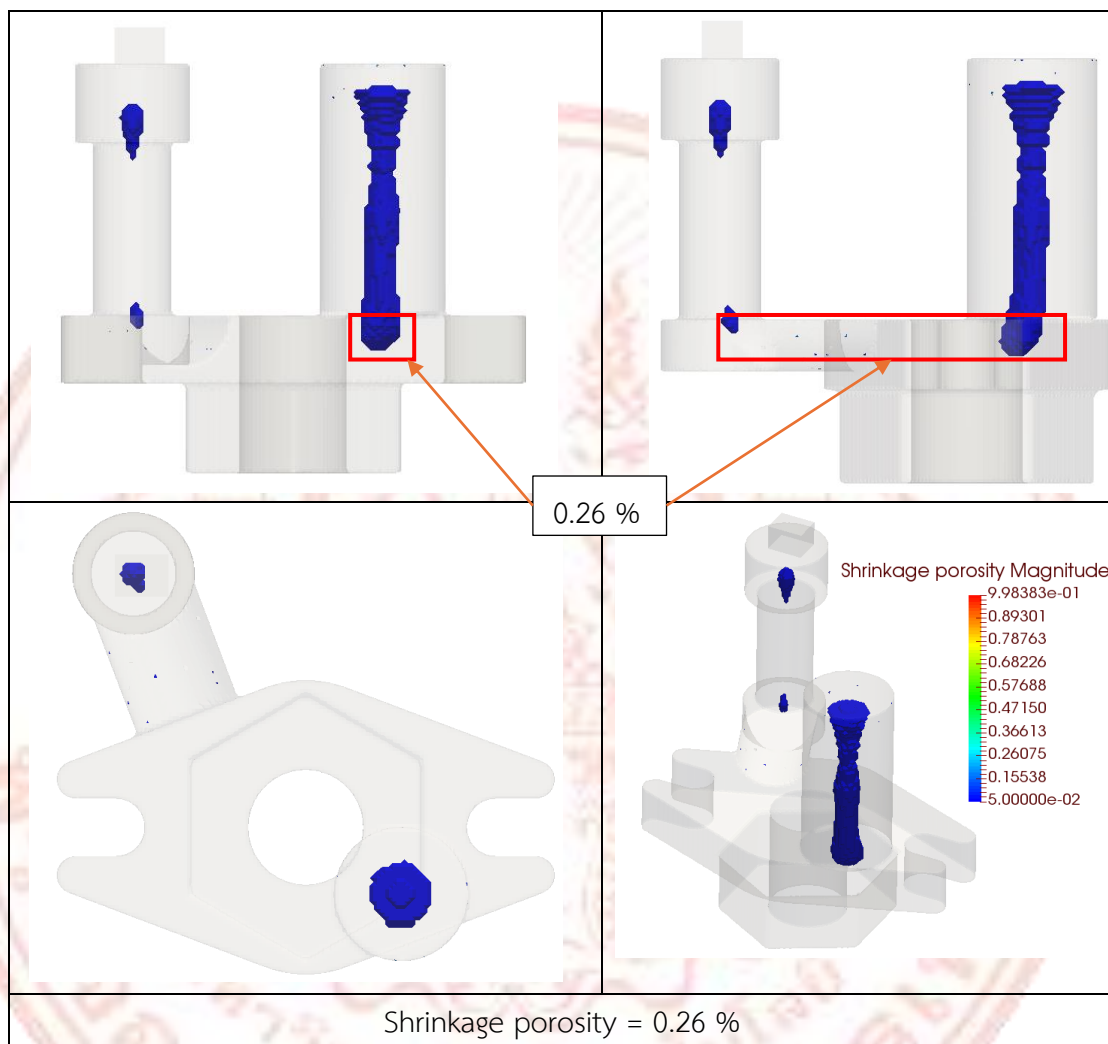
4.4.5 ชิ้นงานหล่อทรายชิ้นงานกระสวนชิ้นเดียวหน้าผ่าราบมีไส้แบบในตัวรูล้นทรงกระบอกตัน
ตำแหน่งวางรูล้นที่ 3 (Cylinder_Q3 Riser)



ภาพที่ 4-29 แสดงการจำลองการเกิดโพรงหดตัวภายในชิ้นงาน Cylinder_Q3 Riser

จากภาพที่ 4-29 จะแสดงให้เห็นถึงตำแหน่งของการเกิดโพรงหดตัวภายในชิ้นงาน เมื่อเทียบกับชิ้นงานที่มีปริมาตร 172.91 cm^3 โดยไม่นับรูล้น ทางเข้า และรูเท จะมีเปอร์เซ็นต์ของการเกิดโพรงหดตัวอยู่ที่ 0.526 cm^3 หรือ 0.30 เปอร์เซ็นต์ของปริมาตรเฉพาะชิ้นงาน

4.4.6 ชิ้นงานหล่อทรายชิ้นงานกระสวนชิ้นเดียวหน้าผ่าราบมีไส้แบบในตัวรูล้นทรงกระบอกตัน
ตำแหน่งวางรูล้นที่ 4 (Cylinder_Q4 Riser)



ภาพที่ 4-30 แสดงการจำลองการเกิดโพรงหดตัวภายในชิ้นงาน Cylinder_Q4 Riser

จากภาพที่ 4-30 จะแสดงให้เห็นถึงตำแหน่งของการเกิดโพรงหดตัวภายในชิ้นงาน เมื่อเทียบกับชิ้นงานที่มีปริมาตร 172.91 cm^3 โดยไม่นับรูล้น ทางเข้า และรูเท จะมีเปอร์เซ็นต์ของการเกิดโพรงหดตัวอยู่ที่ 0.458 cm^3 หรือ 0.26 เปอร์เซ็นต์ของปริมาตรเฉพาะชิ้นงาน

ตารางที่ 4-1 สรุปผลการเกิดโพรงหดตัวของชิ้นงานจำลองทั้ง 7 รูปแบบ

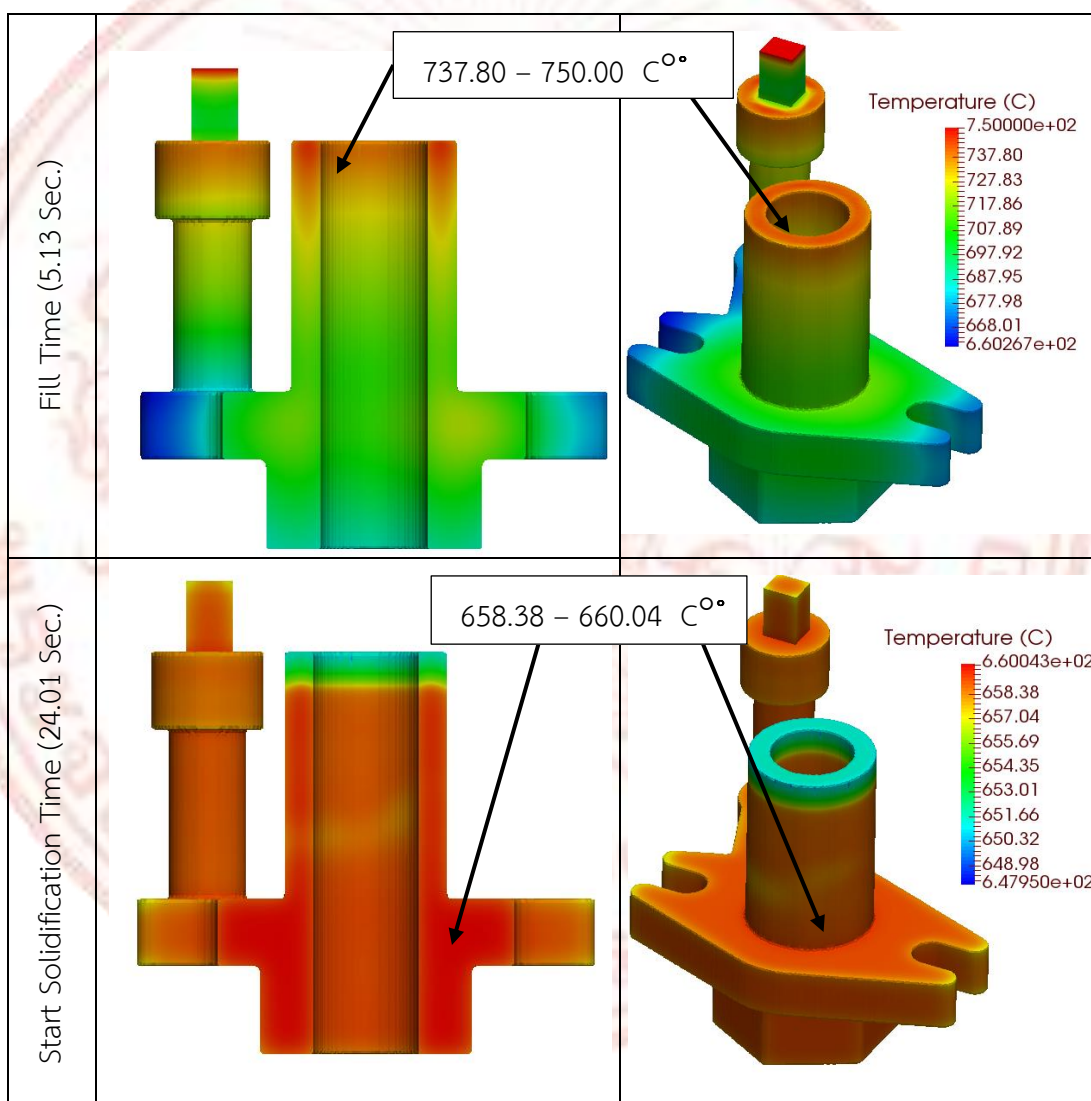
ลำดับ	ชื่อชิ้นงาน	เปอร์เซ็นต์ของโพรงหดตัว
1	No Riser	2.22%
2	Tube 8mm. Riser	2.44%
3	Tube 15mm. Riser	3.85%
4	Cylinder_Q1 Riser	1.52%
5	Cylinder_Q2 Riser	1.44%
6	Cylinder_Q3 Riser	0.30%
7	Cylinder_Q4 Riser	0.26%

จากผลการจำลองจะพบว่า ชิ้นงานหล่อทรายกระสวนขึ้นเดียวหน้าผ่าราบมีไส้แบบในตัวรูกลั่นทรงกระบอกกลางหนา 15 มิลลิเมตร มีเปอร์เซ็นต์ของโพรงหดตัวมากที่สุดที่ 3.85 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเทียบกับของชิ้นงานหล่อทรายกระสวนขึ้นเดียวหน้าผ่าราบมีไส้แบบในตัวไม่มีรูกลั่น พบว่ามีโพรงหดตัวเพิ่มขึ้น 73.42 เปอร์เซ็นต์ และชิ้นงานหล่อทรายชิ้นงานกระสวนขึ้นเดียวหน้าผ่าราบมีไส้แบบในตัวรูกลั่นทรงกระบอกตัน ตำแหน่งวางรูกลั่นที่ 4 มีเปอร์เซ็นต์ของโพรงหดตัวน้อยที่สุดที่ 0.26 เปอร์เซ็นต์ เทียบกับชิ้นงานหล่อทรายกระสวนขึ้นเดียวหน้าผ่าราบมีไส้แบบในตัวไม่มีรูกลั่นพบว่าลดลงถึง 88.29 เปอร์เซ็นต์

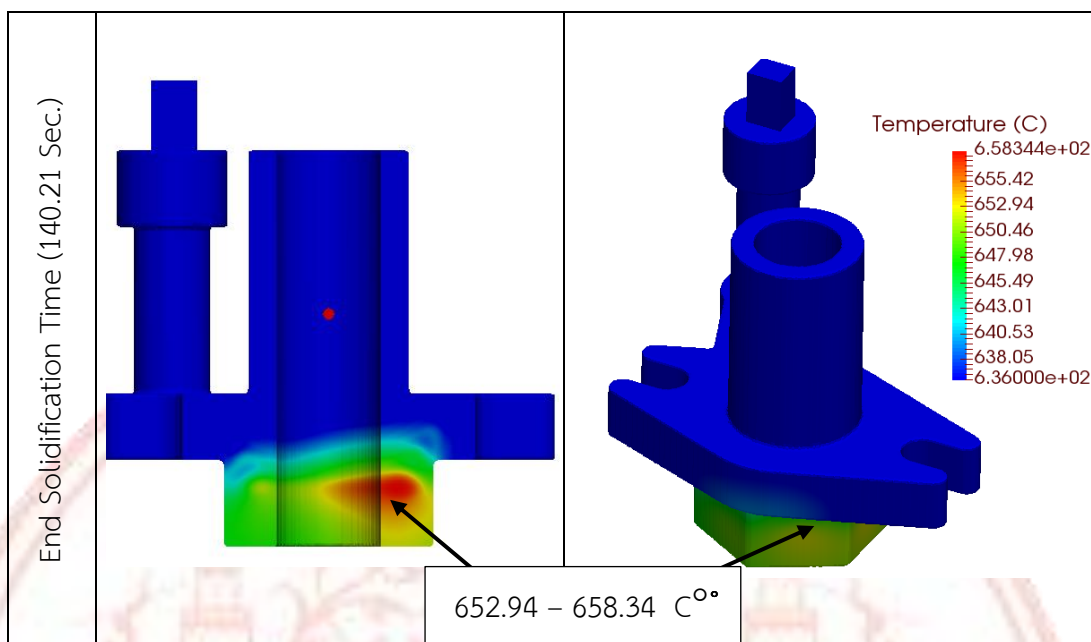
4.5 แสดงผลการจำลองอุณหภูมิของชิ้นงาน (Temperature)

ศึกษาทั้งหมดสามช่วงเวลา คือ อุณหภูมิช่วงเวลาดำเนินการเติมน้ำโลหะเหลว (temperature at end filling time) , อุณหภูมิช่วงเวลาเริ่มต้นการแข็งตัว (temperature at start solidification time) และอุณหภูมิช่วงเวลาดำเนินการแข็งตัว (temperature at end solidification time)

4.5.1 ชิ้นงานหล่อทรายกระสวนชิ้นเดียวหน้าผ่าราบมีไส้แบบในตัวรูล้นทรงกระบอกกลางหนา 8 มิลลิเมตร (Tube 8mm. Riser)



ภาพที่ 4-31 แสดงการจำลองอุณหภูมิ ณ ช่วงเวลา Fill Time, Start Solidification Time และ End Solidification Time ของชิ้นงาน Tube 8mm. Riser

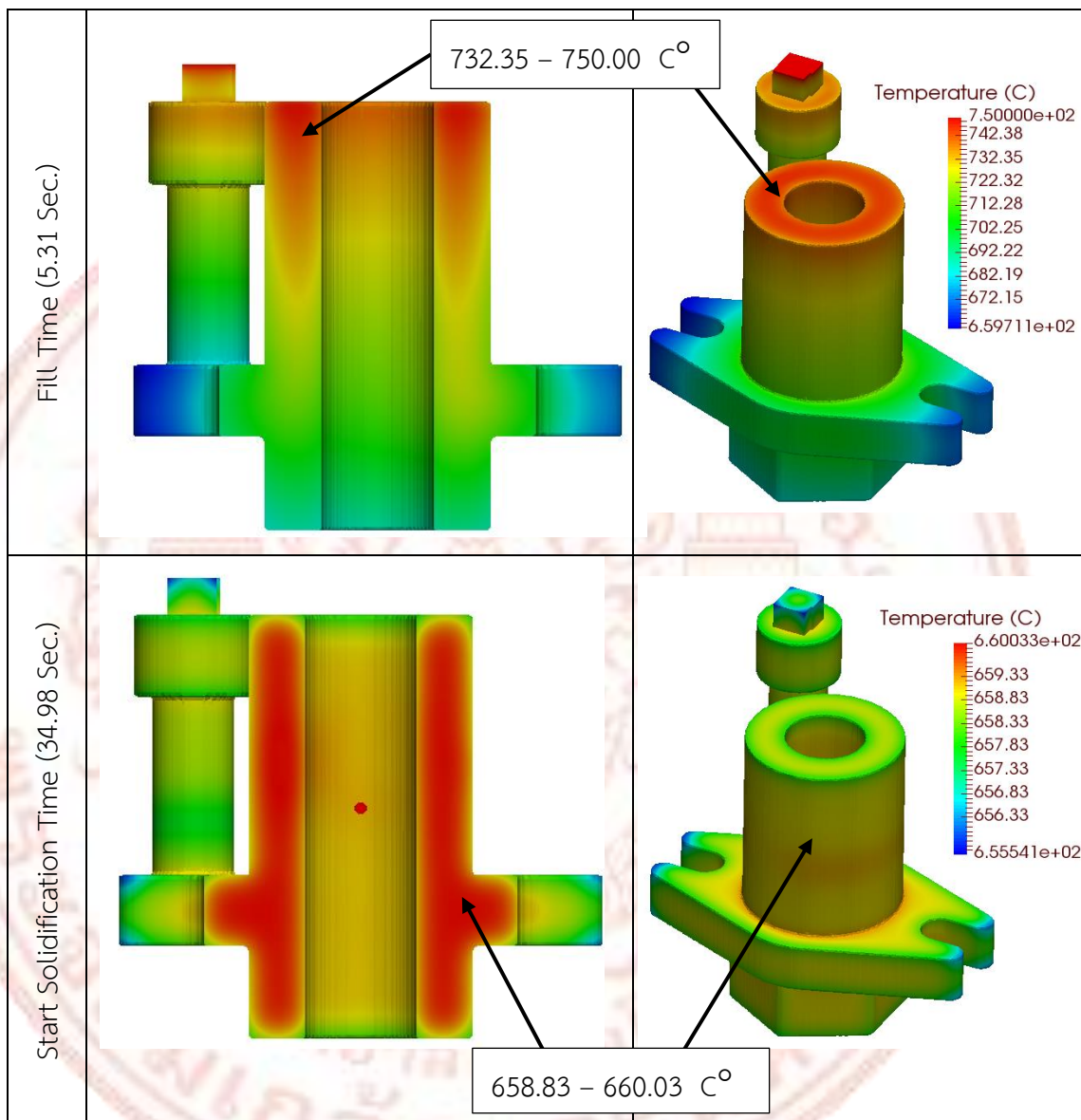


ภาพที่ 4-32 (ต่อ) แสดงการจำลองอุณหภูมิ ณ ช่วงเวลา Fill Time, Start Solidification Time และ End Solidification Time ของชิ้นงาน Tube 8mm. Riser

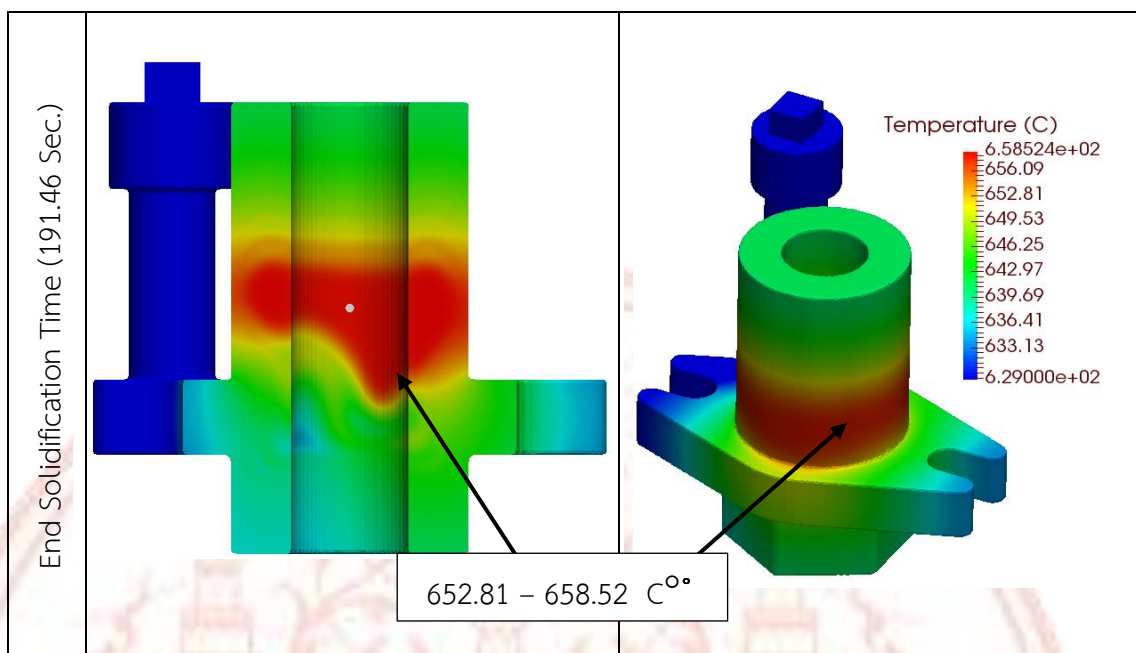
โดยสรุปจากผลการจำลองด้านอุณหภูมิทั้งสามช่วงเวลาของชิ้นงานหล่อทรายกระสวนขึ้นเดียวหน้าผาราบมีไส้แบบในตัวรูล้นทรงกระบอกกลางหนา 8 มิลลิเมตรแสดงให้เห็นว่า ณ ช่วงเวลาสิ้นสุดการเติมน้ำโลหะ อุณหภูมิที่สูงที่สุดโดยไม่นับรูเทจจะอยู่ที่บริเวณรูล้น 737.80 – 750.00 องศาเซลเซียสโดยประมาณ ซึ่งต่อมาเมื่อเข้าสู่ช่วงเริ่มต้นการแข็งตัว อุณหภูมิโดยเฉลี่ยทั่วชิ้นงานยกเว้นบริเวณผิวจะมีค่าใกล้เคียงกันอยู่ที่ประมาณ 658.38 – 660.04 องศาเซลเซียส แต่จะมีเฉพาะบริเวณรูล้นเท่านั้นที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าบริเวณอื่น แสดงให้เห็นถึงการเย็นตัวของรูล้นที่เร็วกว่าชิ้นงาน จนเมื่อถึงช่วงเวลาสิ้นสุดการแข็งตัว จะสังเกตได้ว่าอุณหภูมิส่วนใหญ่ของชิ้นงานจะลดลงมาใกล้เคียงกันอยู่ที่ประมาณ 636.00 องศาเซลเซียส ยกเว้นแต่บริเวณส่วนกลางชิ้นงานส่วนฐานหกเหลี่ยม ที่มีอุณหภูมิสูงกว่าเฉลี่ยของชิ้นงานที่ประมาณ 652.94 – 658.34 องศาเซลเซียสแสดงให้เห็นว่าชิ้นงานไม่สามารถถ่ายเทความร้อนออกจากบริเวณกลางชิ้นงานได้ดี ทำให้อุณหภูมิยังสะสมอยู่ที่บริเวณนั้น

4.5.2 ชิ้นงานหล่อทรายกระสวนขึ้นเดียวหน้าผ่าราบมีไส้แบบในตัวรูสันทรงกระบอกกลาง

หนา 15 มิลลิเมตร (Tube 15mm. Riser)



ภาพที่ 4-33 แสดงการจำลองอุณหภูมิ ณ ช่วงเวลา Fill Time, Start Solidification Time และ End Solidification Time ของชิ้นงาน Tube 15mm. Riser

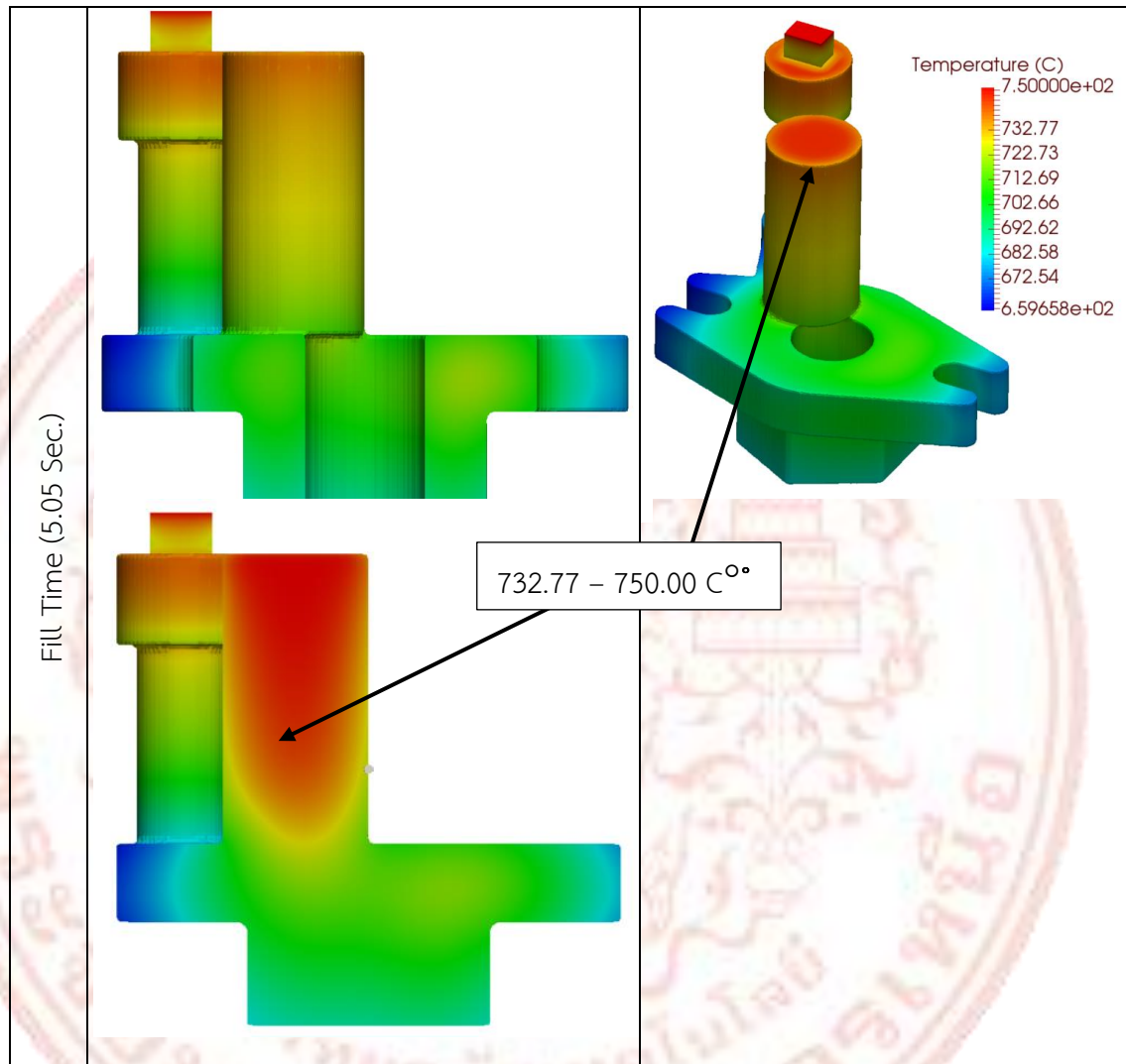


ภาพที่ 4-34 (ต่อ) แสดงการจำลองอุณหภูมิ ณ ช่วงเวลา Fill Time, Start Solidification Time และ End Solidification Time ของชิ้นงาน Tube 15mm. Riser

โดยสรุปจากผลการจำลองด้านอุณหภูมิทั้งสามช่วงเวลาของชิ้นงานหล่อทรายกระสวนขึ้นเดียวหน้าผ่าราบมีได้แบบในตัวรูสันทรงกระบอกกลางหนา 15 มิลลิเมตรแสดงให้เห็นว่า ณ ช่วงเวลาสิ้นสุดการเติมน้ำโลหะ อุณหภูมิที่สูงที่สุดโดยไม่นับรูเทจะอยู่ที่บริเวณรูสัน 732.35 – 750.00 องศาเซลเซียสโดยประมาณ ซึ่งต่อมาเมื่อเข้าสู่ช่วงเริ่มต้นการแข็งตัว อุณหภูมิโดยเฉลี่ยทั่วชิ้นงานยกเว้นบริเวณผิวจะมีค่าใกล้เคียงกันอยู่ที่ประมาณ 658.83 – 660.03 องศาเซลเซียส จนเมื่อถึงช่วงเวลาสิ้นสุดการแข็งตัว จะสังเกตเห็นว่าบริเวณกลางชิ้นงานยังมีอุณหภูมิสูงกว่าเฉลี่ยของชิ้นงานที่ประมาณ 652.81 – 658.52 องศาเซลเซียสแสดงให้เห็นว่าชิ้นงานไม่สามารถถ่ายเทความร้อนออกจากบริเวณกลางชิ้นงานได้ดี ทำให้อุณหภูมียังสะสมอยู่ที่บริเวณนั้น

4.5.3 ชิ้นงานหล่อทรายชิ้นงานกระสวนขึ้นเดียวหน้าผ่าราบมีไส้แบบในตัวรูล้นทรงกระบอก

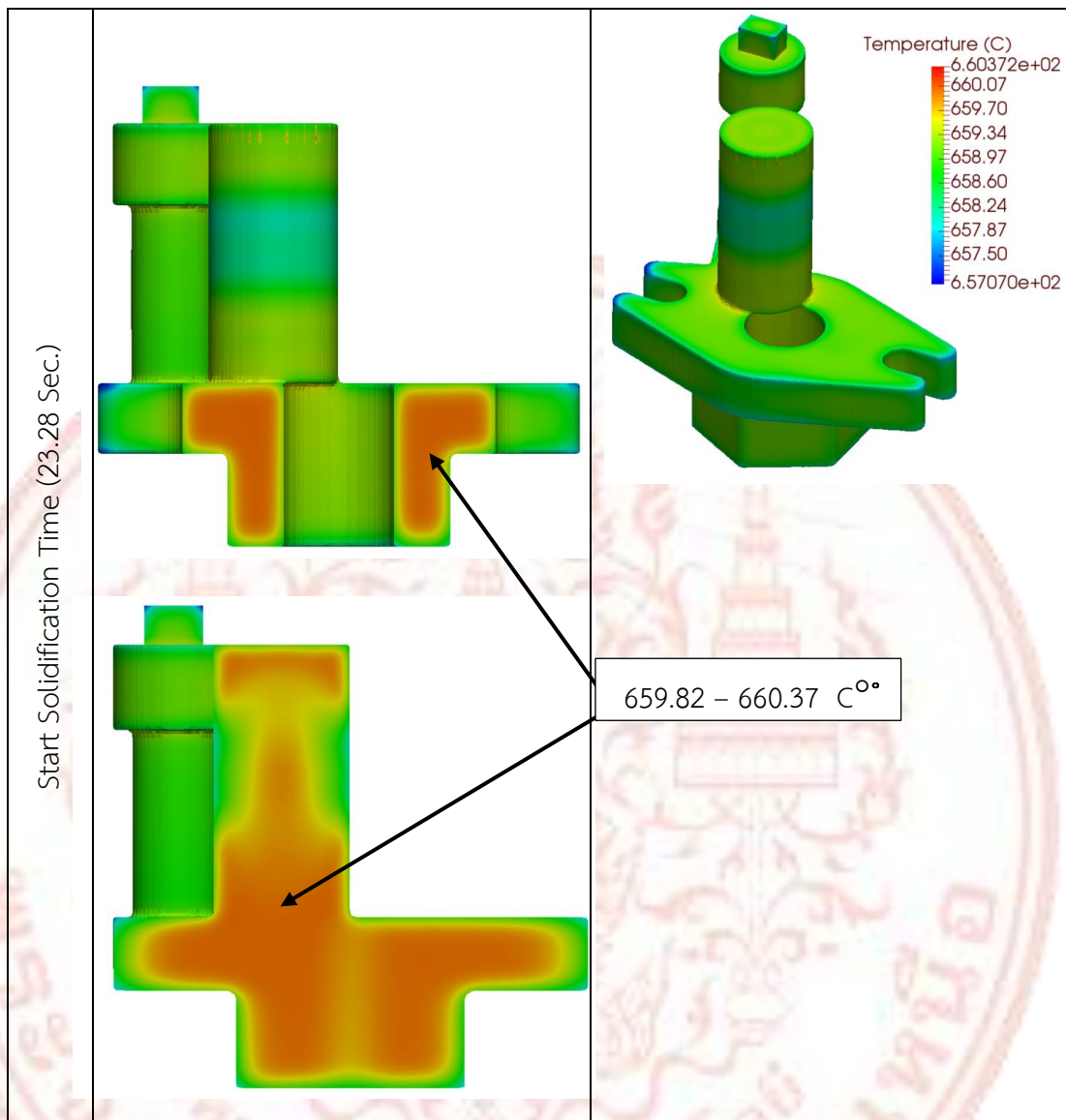
ต้น ตำแหน่งวางรูล้นที่ 1 (Cylinder_Q1 Riser)



ภาพที่ 4-35 แสดงการจำลองอุณหภูมิ ณ ช่วงเวลา Fill Time ของชิ้นงาน Cylinder_Q1

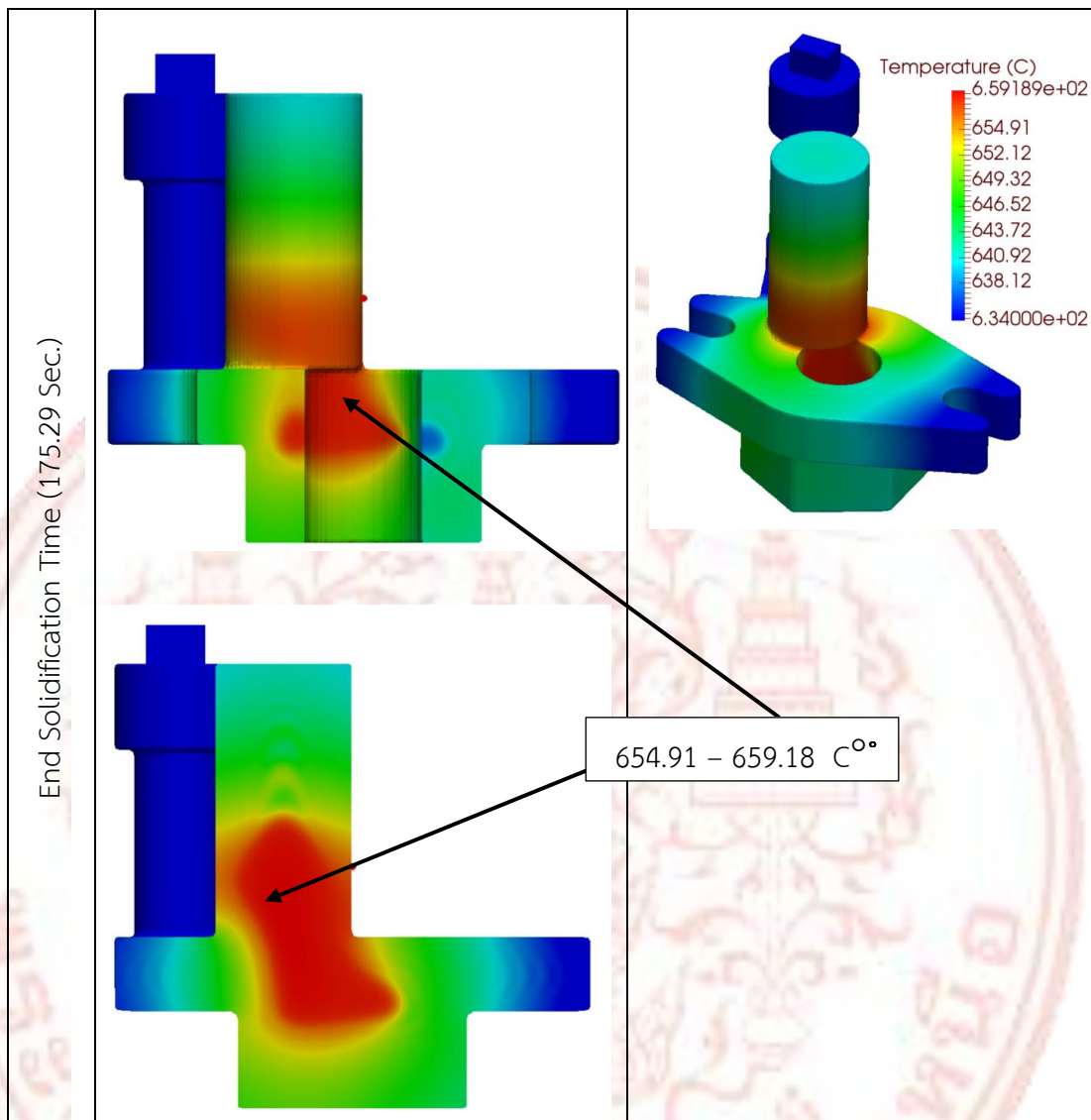
Riser

โดยสรุปจากผลการจำลองด้านอุณหภูมิทั้งสามช่วงเวลาของชิ้นงานหล่อทรายชิ้นงานกระสวนขึ้นเดียวหน้าผ่าราบมีไส้แบบในตัวรูล้นทรงกระบอกต้น ตำแหน่งวางรูล้นที่ 1 แสดงให้เห็นว่า ณ ช่วงเวลาสิ้นสุดการเติมน้ำโลหะ อุณหภูมิที่สูงที่สุดจะอยู่ที่บริเวณรูล้นโดยมีอุณหภูมิประมาณ 732.77 – 750.00 องศาเซลเซียส ดังภาพที่ 4-35



ภาพที่ 4-36 แสดงการจำลองอุณหภูมิ ณ ช่วงเวลา Start Solidification Time ของชิ้นงาน Cylinder_Q1 Riser

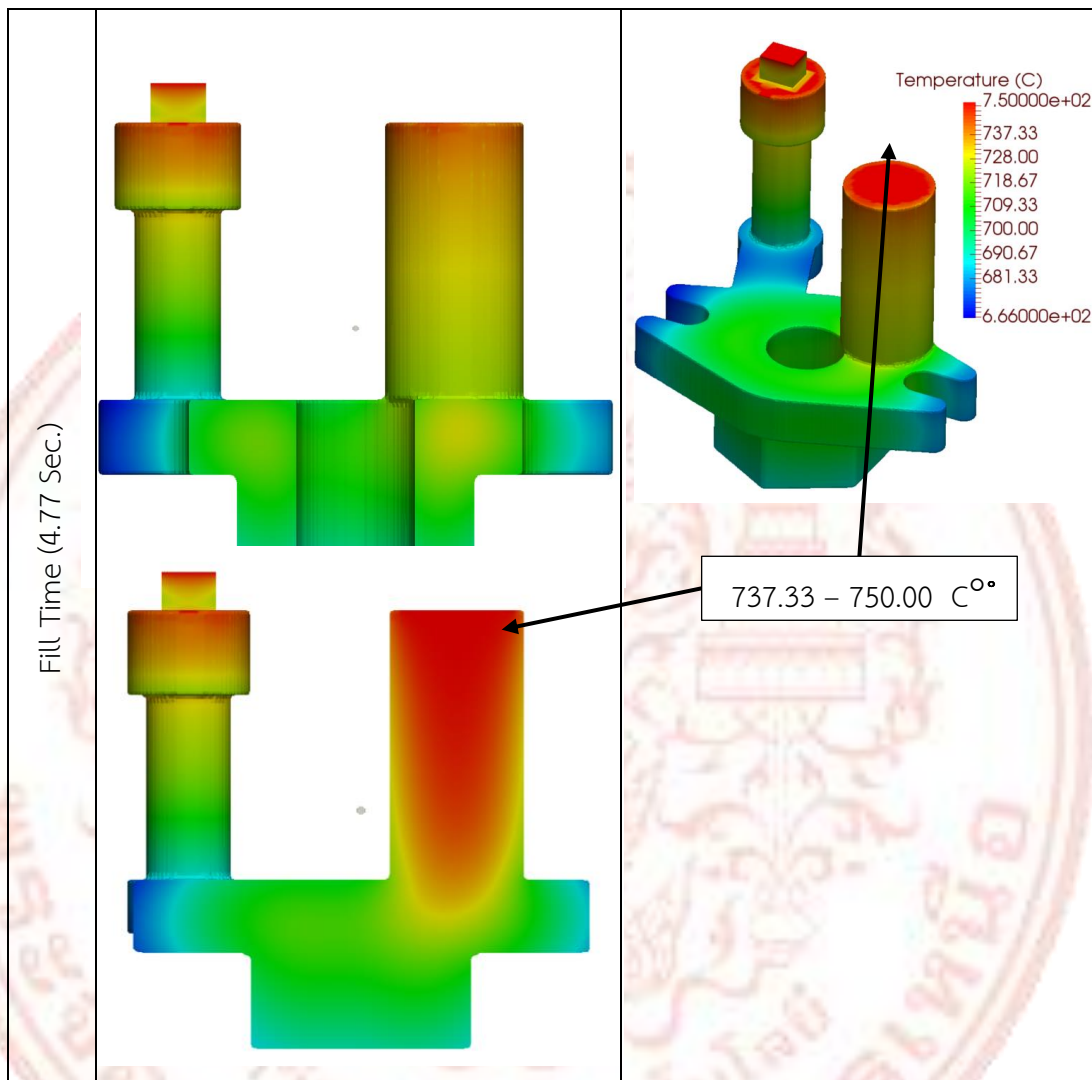
ต่อมาเมื่อเข้าสู่ช่วงเริ่มต้นการแข็งตัว อุณหภูมิโดยเฉลี่ยทั่วชิ้นงานยกเว้นบริเวณผิวจะมีค่าใกล้เคียงกันอยู่ที่ประมาณ 659.92 – 660.37 องศาเซลเซียส แต่จะมีเฉพาะบริเวณรูล้นเท่านั้นที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า แสดงให้เห็นการเย็นตัวของรูล้นที่เร็วกว่าชิ้นงาน ดังภาพที่ 4-36



ภาพที่ 4-37 แสดงการจำลองอุณหภูมิ ณ ช่วงเวลา End Solidification Time ของชิ้นงาน Cylinder_Q1 Riser

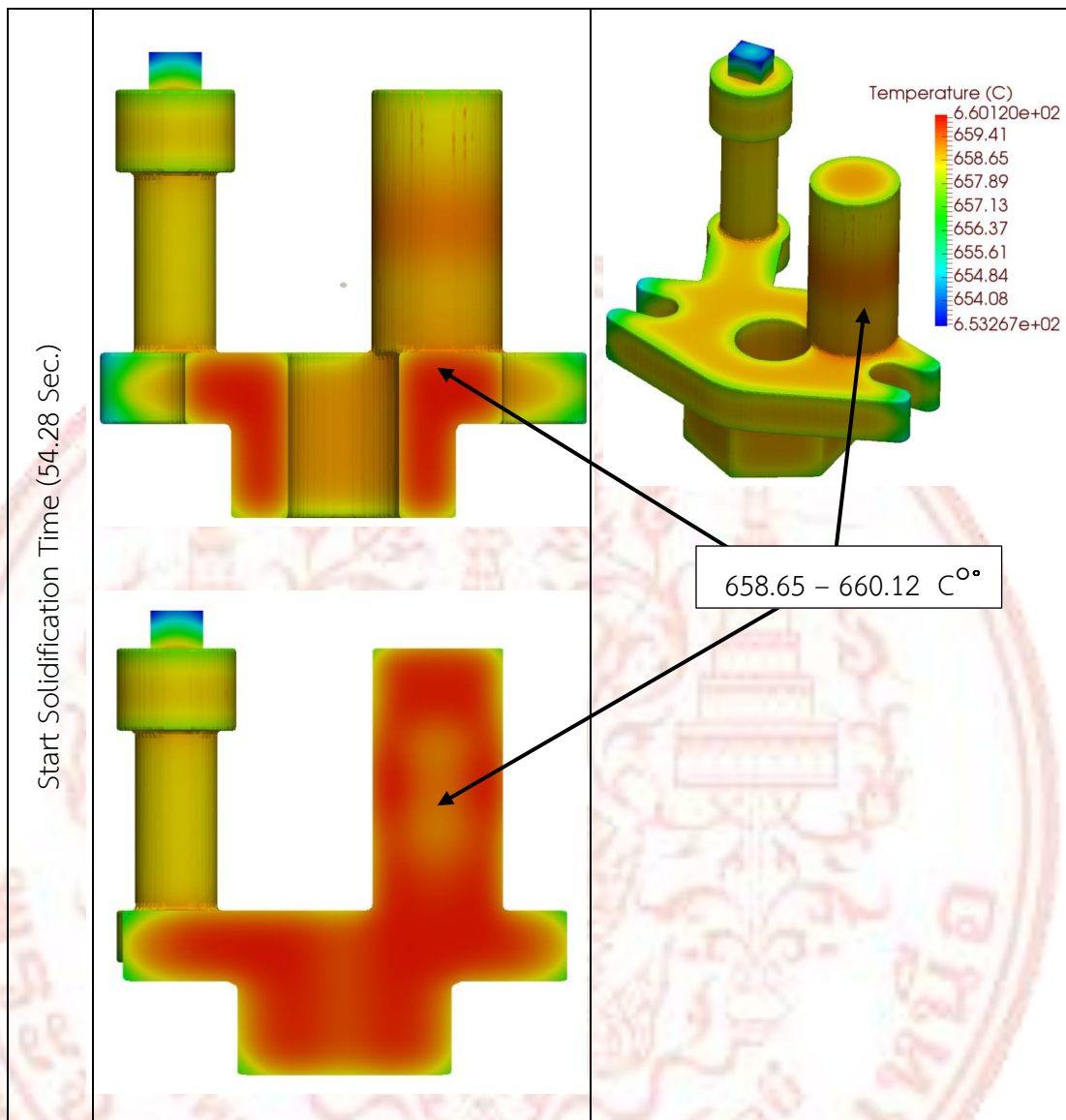
จนเมื่อถึงช่วงเวลาสิ้นสุดการแข็งตัว จะสังเกตได้ว่าอุณหภูมิส่วนใหญ่ของชิ้นงานจะลดลงมาใกล้เคียงกันอยู่ที่ประมาณ 634.00 - 638.12 องศาเซลเซียส ยกเว้นแต่บริเวณส่วนกลางชิ้นงานที่มีอุณหภูมิสูงกว่าเฉลี่ยของชิ้นงานที่ประมาณ 654.91 – 659.18 องศาเซลเซียสแสดงให้เห็นว่าชิ้นงานไม่สามารถถ่ายเทความร้อนออกจากบริเวณกลางชิ้นงานได้ดี ทำให้อุณหภูมิยังสะสมอยู่ที่บริเวณนั้น ดังภาพที่ 4-37

4.5.4 ชิ้นงานหล่อทรายชิ้นงานกระสวนขึ้นเดี่ยวหน้าผ่าราบมีไส้แบบในตัวรูล้นทรงกระบอกตัน
ตำแหน่งวางรูล้นที่ 2 (Cylinder_Q2 Riser)



ภาพที่ 4-38 แสดงการจำลองอุณหภูมิ ณ ช่วงเวลา Fill Time ของชิ้นงาน Cylinder_Q2 Riser

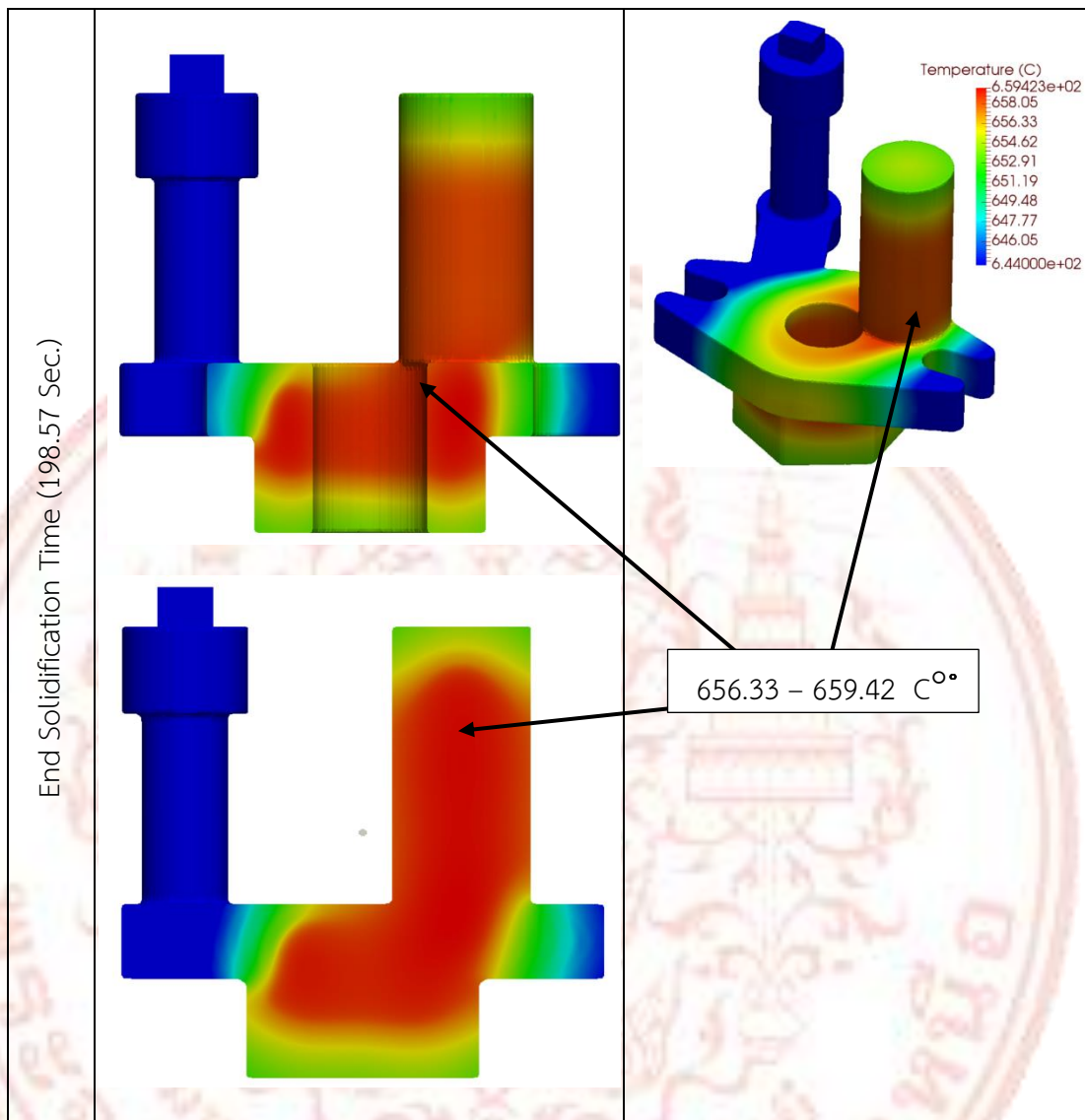
โดยสรุปจากผลการจำลองด้านอุณหภูมิทั้งสามช่วงเวลาของชิ้นงานหล่อทรายชิ้นงานกระสวนขึ้นเดี่ยวหน้าผ่าราบมีไส้แบบในตัวรูล้นทรงกระบอกตัน ตำแหน่งวางรูล้นที่ 2 แสดงให้เห็นว่า ณ ช่วงเวลาสิ้นสุดการเติมน้ำโลหะ อุณหภูมิที่สูงที่สุดจะอยู่ที่บริเวณรูล้นโดยมีอุณหภูมิประมาณ 737.33 – 750.00 องศาเซลเซียส ดังภาพที่ 4-38



ภาพที่ 4-39 แสดงการจำลองอุณหภูมิ ณ ช่วงเวลา Start Solidification Time ของชิ้นงาน

Cylinder_Q2 Riser

ต่อมาเมื่อเข้าสู่ช่วงเริ่มต้นการแข็งตัว อุณหภูมิโดยเฉลี่ยทั่วชิ้นงานยกเว้นบริเวณผิวจะมีค่าใกล้เคียงกันอยู่ที่ประมาณ 658.65 – 660.12 องศาเซลเซียส แต่จะมีเฉพาะบริเวณรูล้นเท่านั้นที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า แสดงให้เห็นการเย็นตัวของรูล้นที่เร็วกว่าชิ้นงาน ดังภาพที่ 4-39

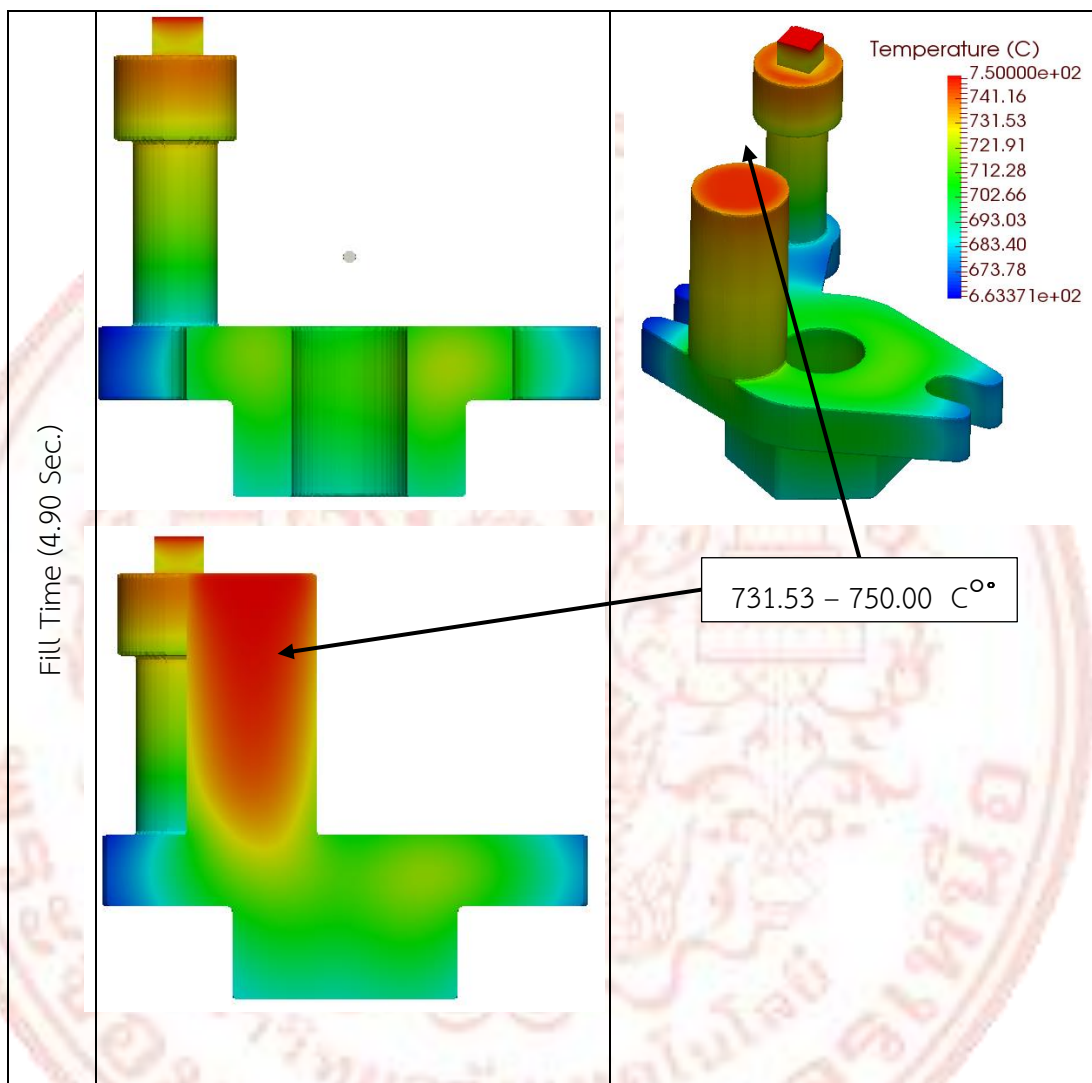


ภาพที่ 4-40 แสดงการจำลองอุณหภูมิ ณ ช่วงเวลา End Solidification Time ของชิ้นงาน

Cylinder_Q2 Riser

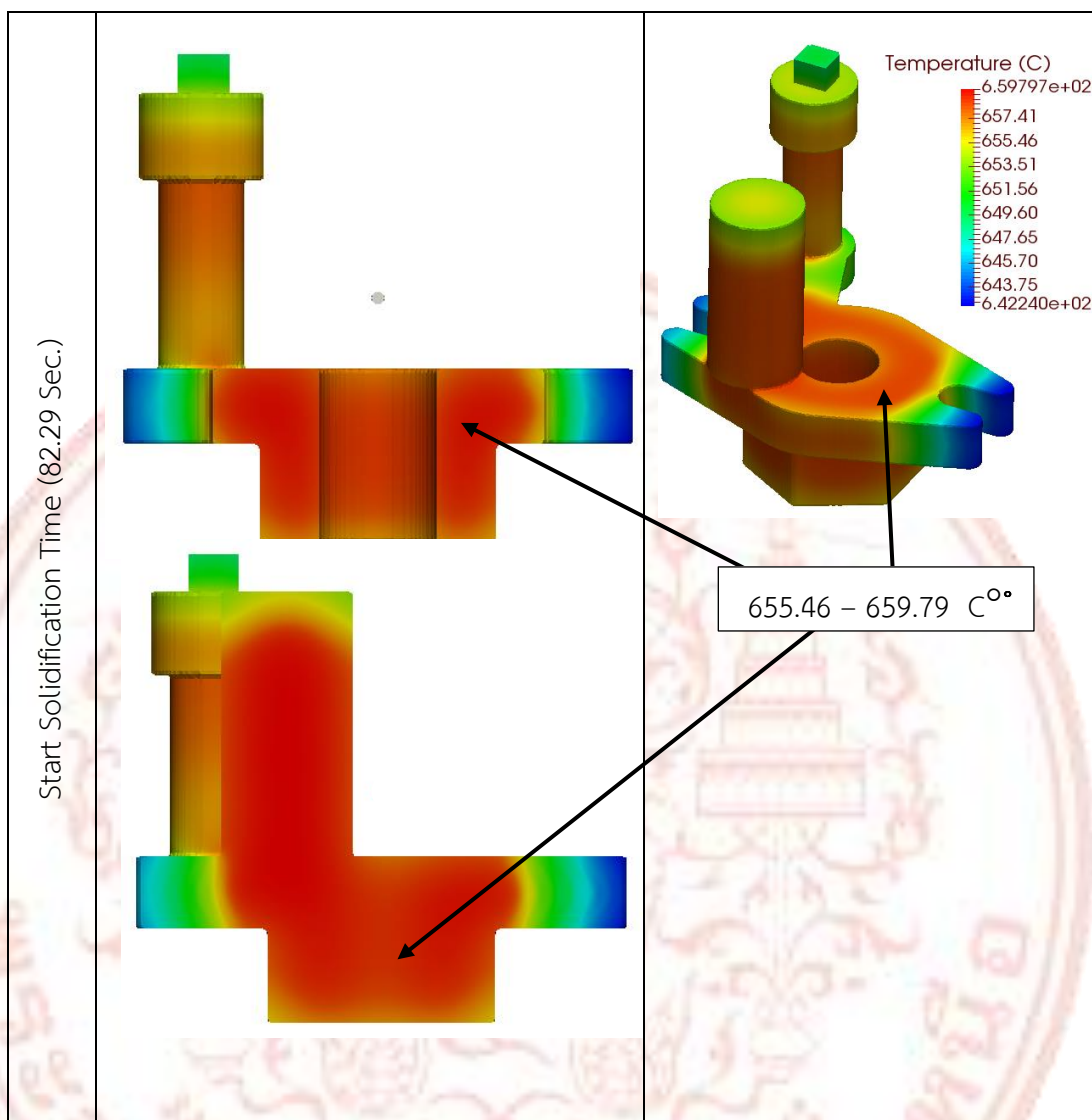
จนเมื่อถึงช่วงเวลาสิ้นสุดการแข็งตัว จะสังเกตได้ว่าอุณหภูมิส่วนใหญ่ของชิ้นงานจะลดลงมาใกล้เคียงกันอยู่ที่ประมาณ 644.00 – 647.77 องศาเซลเซียส ยกเว้นแต่บริเวณส่วนกลางชิ้นงานที่มีอุณหภูมิสูงกว่าเฉลี่ยของชิ้นงานที่ประมาณ 656.33 – 659.42 องศาเซลเซียสแสดงให้เห็นว่าชิ้นงานไม่สามารถถ่ายเทความร้อนออกจากบริเวณกลางชิ้นงานได้ดี ทำให้อุณหภูมิยังสะสมอยู่ที่บริเวณนั้น ดังภาพที่ 4-40

4.5.5 ชิ้นงานหล่อทรายชิ้นงานกระสวนขึ้นเดียวหน้าผ่าราบมีไส้แบบในตัวรูล้นทรงกระบอกตัน
ตำแหน่งวางรูล้นที่ 3 (Cylinder_Q3 Riser)



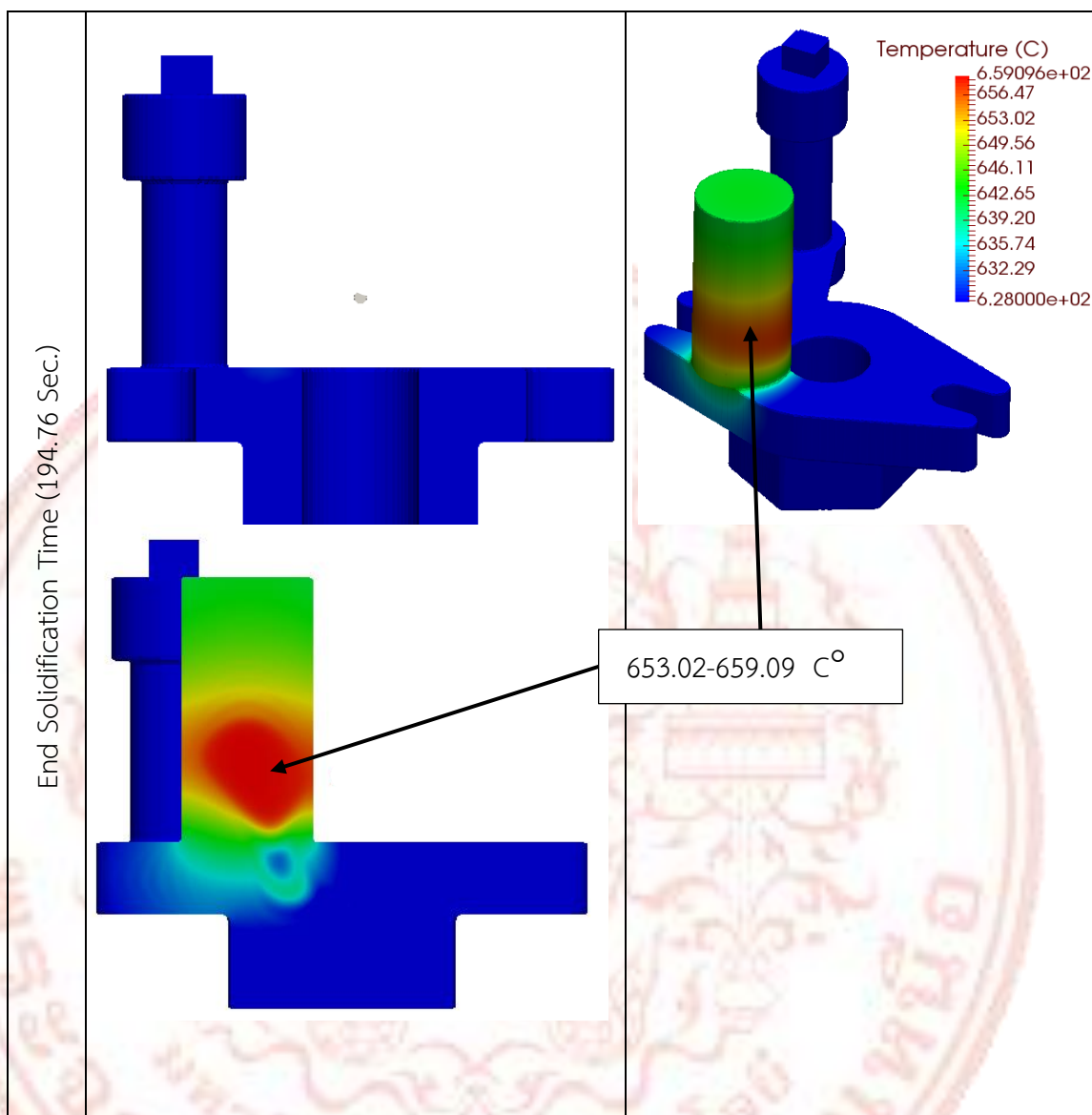
ภาพที่ 4-41 แสดงการจำลองอุณหภูมิ ณ ช่วงเวลา Fill Time ของชิ้นงาน Cylinder_Q3 Riser

โดยสรุปจากผลการจำลองด้านอุณหภูมิทั้งสามช่วงเวลาของชิ้นงานหล่อทรายชิ้นงานกระสวนขึ้นเดียวหน้าผ่าราบมีไส้แบบในตัวรูล้นทรงกระบอกตัน ตำแหน่งวางรูล้นที่ 3 แสดงให้เห็นว่า ณ ช่วงเวลาสิ้นสุดการเติมน้ำโลหะ อุณหภูมิที่สูงที่สุดจะอยู่ที่บริเวณรูล้นโดยมีอุณหภูมิประมาณ 731.53 – 750.00 องศาเซลเซียส ดังภาพที่ 4-41



ภาพที่ 4-42 แสดงการจำลองอุณหภูมิ ณ ช่วงเวลา Start Solidification Time ของชิ้นงาน
Cylinder_Q3 Riser

ต่อมาเมื่อเข้าสู่ช่วงเริ่มต้นการแข็งตัว อุณหภูมิโดยเฉลี่ยทั่วชิ้นงานยกเว้นบริเวณผิวจะมีค่าใกล้เคียงกันอยู่ที่ประมาณ 655.46 – 659.79 องศาเซลเซียส แสดงให้เห็นว่าชิ้นงานสามารถกระจายความร้อนได้ดี ดังภาพที่ 4-42

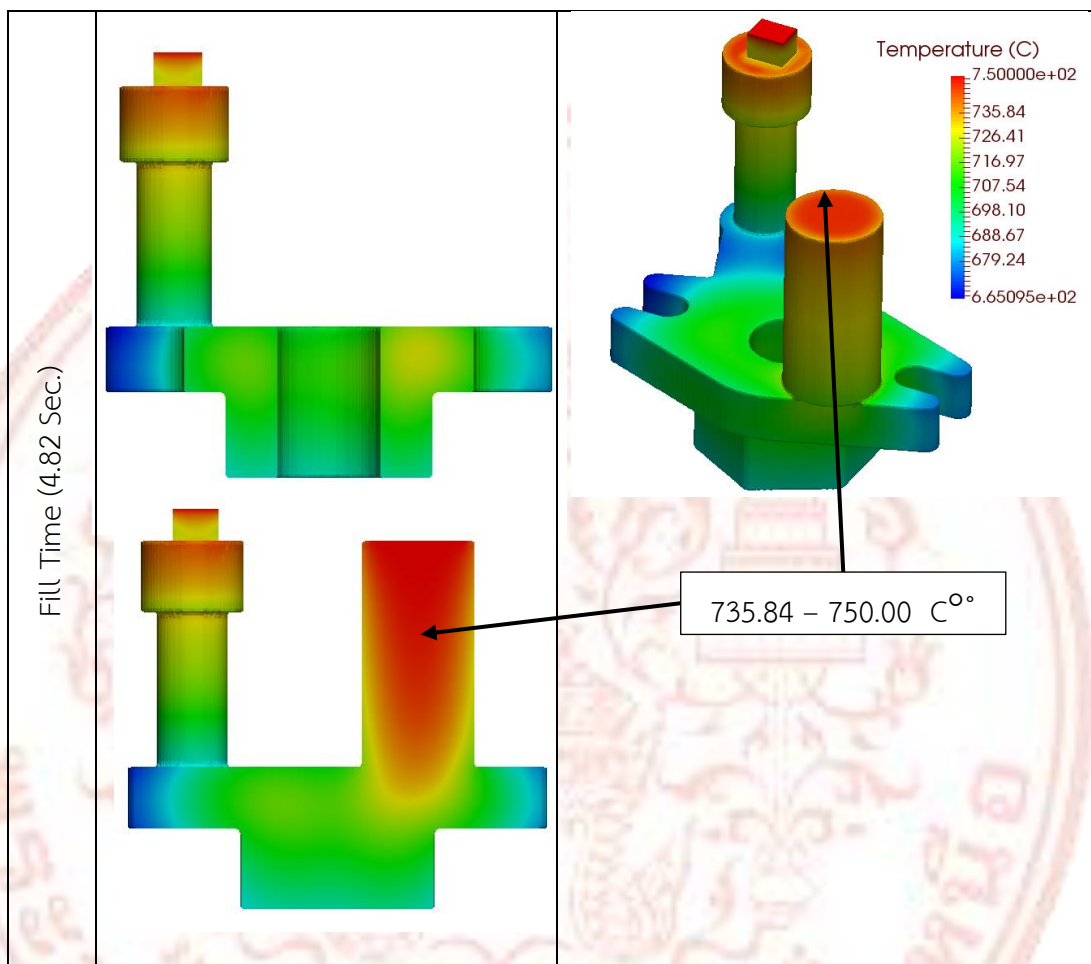


ภาพที่ 4-43 แสดงการจำลองอุณหภูมิ ณ ช่วงเวลา End Solidification Time ของชิ้นงาน Cylinder_Q3 Riser

จนเมื่อถึงช่วงเวลาสิ้นสุดการแข็งตัว จะสังเกตได้ว่าอุณหภูมิส่วนใหญ่ของชิ้นงานจะลดลงมาใกล้เคียงกันอยู่ที่ประมาณ 628.00 องศาเซลเซียส ยกเว้นแต่บริเวณรูล้นของชิ้นงานที่อุณหภูมิสูงกว่าเฉลี่ยของชิ้นงานที่ประมาณ 653.02-659.09 องศาเซลเซียสแสดงให้เห็นว่าชิ้นงานสามารถถ่ายเทความร้อนออกจากบริเวณกลางชิ้นงานได้ดี ทำให้อุณหภูมิไปสะสมอยู่ที่บริเวณรูล้น ดังภาพที่ 4-43

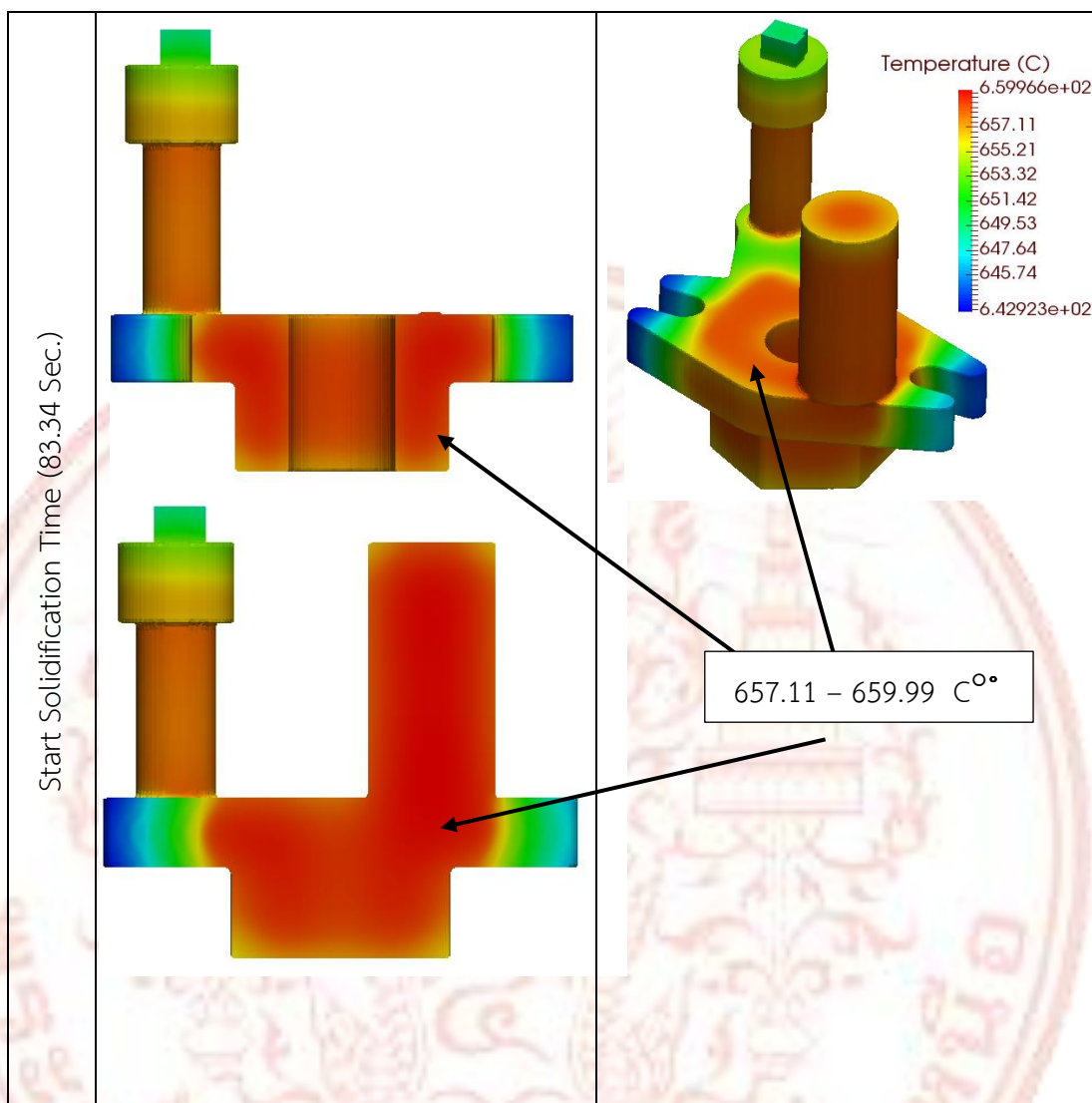
4.5.6 ชิ้นงานหล่อทรายชิ้นงานกระสวนขึ้นเดียวหน้าผ่าราบมีไส้แบบในตัวรูล้นทรงกระบอก

ต้น ตำแหน่งวางรูล้นที่ 4 (Cylinder_Q4 Riser)



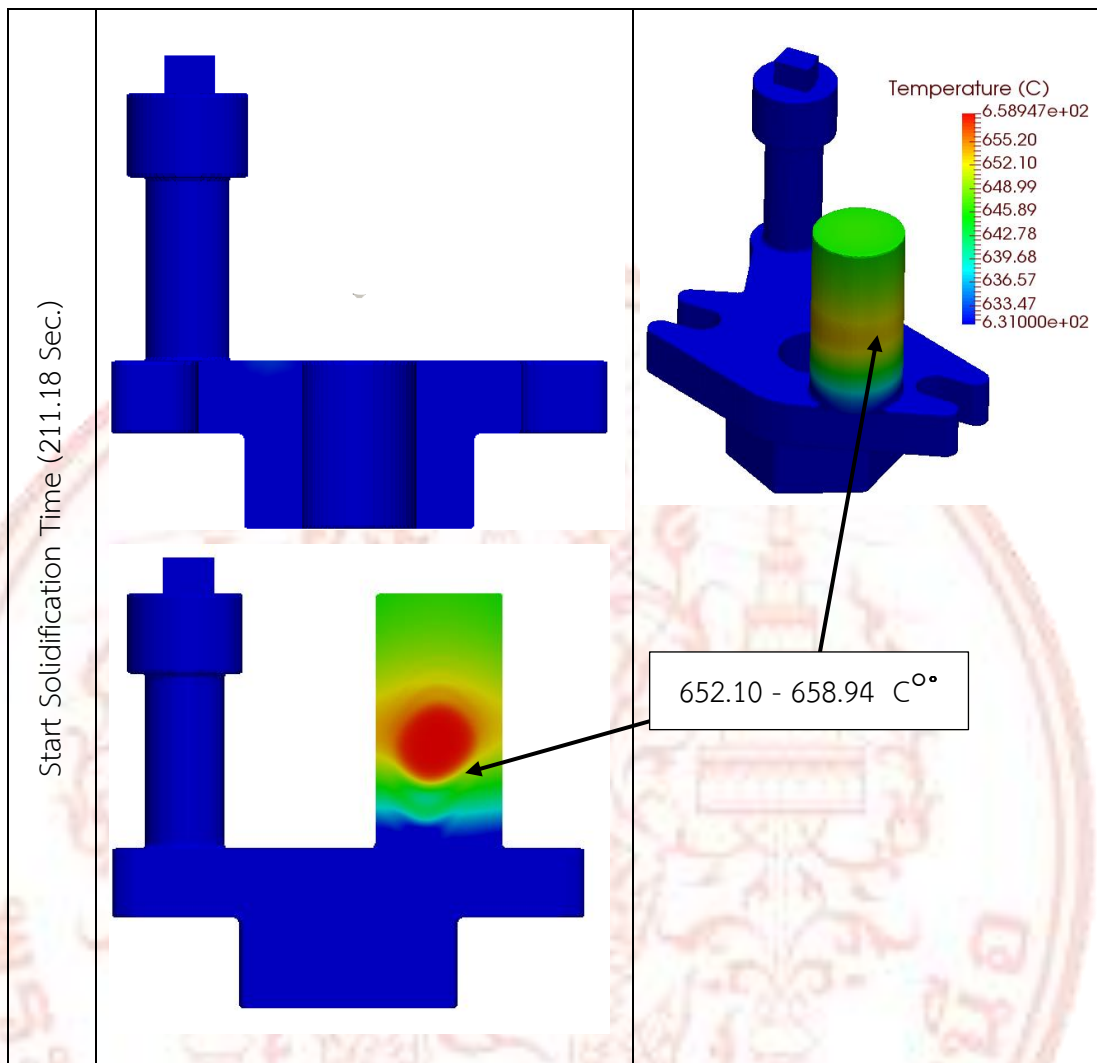
ภาพที่ 4-44 แสดงการจำลองอุณหภูมิ ณ ช่วงเวลา Fill Time ของชิ้นงาน Cylinder_Q4 Riser

โดยสรุปจากผลการจำลองด้านอุณหภูมิทั้งสามช่วงเวลาของชิ้นงานหล่อทรายชิ้นงานกระสวนขึ้นเดียวหน้าผ่าราบมีไส้แบบในตัวรูล้นทรงกระบอกต้น ตำแหน่งวางรูล้นที่ 4 แสดงให้เห็นว่า ณ ช่วงเวลาสิ้นสุดการเติมน้ำโลหะ อุณหภูมิที่สูงที่สุดจะอยู่ที่บริเวณรูล้นโดยมีอุณหภูมิประมาณ 735.84 – 750.00 องศาเซลเซียส ดังภาพที่ 4-44



ภาพที่ 4-45 แสดงการจำลองอุณหภูมิ ณ ช่วงเวลา Start Solidification Time ของชิ้นงาน
Cylinder_Q4 Riser

ต่อมาเมื่อเข้าสู่ช่วงเริ่มต้นการแข็งตัว อุณหภูมิโดยเฉลี่ยทั่วชิ้นงานยกเว้นบริเวณผิวจะมีค่าใกล้เคียงกันอยู่ที่ประมาณ 657.11 – 659.99 องศาเซลเซียส แสดงให้เห็นว่าชิ้นงานสามารถกระจายความร้อนได้ดี ดังภาพที่ 4-45



ภาพที่ 4-46 แสดงการจำลองอุณหภูมิ ณ ช่วงเวลา End Solidification Time ของชิ้นงาน
Cylinder_Q4 Riser

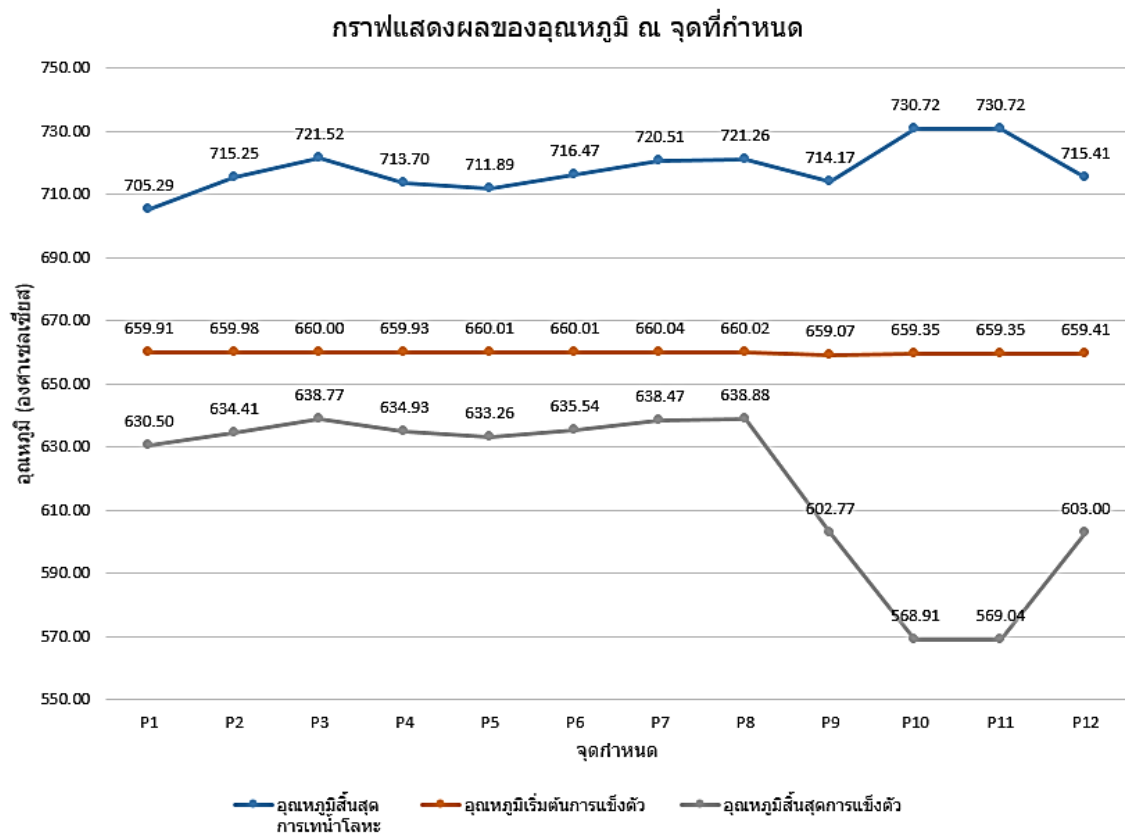
จนเมื่อถึงช่วงเวลาสิ้นสุดการแข็งตัว จะสังเกตได้ว่าอุณหภูมิส่วนใหญ่ของชิ้นงานจะลดลงมาใกล้เคียงกันอยู่ที่ประมาณ 631.00 องศาเซลเซียส ยกเว้นแต่บริเวณรูล้นของชิ้นงานที่อุณหภูมิสูงกว่าเฉลี่ยของชิ้นงานที่ประมาณ 652.10 - 658.94 องศาเซลเซียสแสดงให้เห็นว่าชิ้นงานสามารถถ่ายเทความร้อนออกจากบริเวณกลางชิ้นงานได้ดี ทำให้อุณหภูมิไปสะสมอยู่ที่บริเวณรูล้น ดังภาพที่ 4-52

4.6 แสดงกราฟการเย็นตัวของชิ้นงาน

4.6.1 ชิ้นงานหล่อทรายกระสวนขึ้นเดียวหน้าผ่าราบมีไส้แบบในตัวรูล้นทรงกระบอกกลวงหนา 8 มิลลิเมตร (Tube 8mm. Riser)

ตารางที่ 4-2 เปรียบเทียบอุณหภูมิ ณ เวลา อุณหภูมิสิ้นสุดการเทน้ำโลหะ อุณหภูมิเริ่มต้นการแข็งตัว และ อุณหภูมิสิ้นสุดการแข็งตัว ชิ้นงานหล่อทรายกระสวนขึ้นเดียวหน้าผ่าราบมีไส้แบบรูล้นทรงกระบอกกลวงหนา 8 มิลลิเมตร (Tube 8mm. Riser)

ตารางเปรียบเทียบอุณหภูมิ Tube 8mm. Riser (องศาเซลเซียส)					
จุด	อุณหภูมิสิ้นสุด การเทน้ำโลหะ (5.13s)	อุณหภูมิ เริ่มต้น การแข็งตัว (24.01s)	อุณหภูมิสิ้นสุด การแข็งตัว (140.21s)	การเกิดโพรงหดตัว	ตำแหน่ง บนชิ้นงาน
P1	705.29	659.91	630.50	ไม่เกิดโพรงหดตัว	ในชิ้นงาน
P2	715.25	659.98	634.41	เกิดโพรงหดตัว	ในชิ้นงาน
P3	721.52	660.00	638.77	เกิดโพรงหดตัว	ในชิ้นงาน
P4	713.70	659.93	634.93	ไม่เกิดโพรงหดตัว	ในชิ้นงาน
P5	711.89	660.01	633.26	เกิดโพรงหดตัว	ในชิ้นงาน
P6	716.47	660.01	635.54	เกิดโพรงหดตัว	ในชิ้นงาน
P7	720.51	660.04	638.47	เกิดโพรงหดตัว	ในชิ้นงาน
P8	721.26	660.02	638.88	เกิดโพรงหดตัว	ในชิ้นงาน
P9	714.17	659.07	602.77	ไม่เกิดโพรงหดตัว	ในรูล้น
P10	730.72	659.35	568.91	ไม่เกิดโพรงหดตัว	ในรูล้น
P11	730.72	659.35	569.04	ไม่เกิดโพรงหดตัว	ในรูล้น
P12	715.41	659.41	603.00	ไม่เกิดโพรงหดตัว	ในรูล้น



ภาพที่ 4-47 กราฟแสดงอุณหภูมิ ณ P1 ถึง P12 ของชิ้นงาน Tube 8mm. Riser

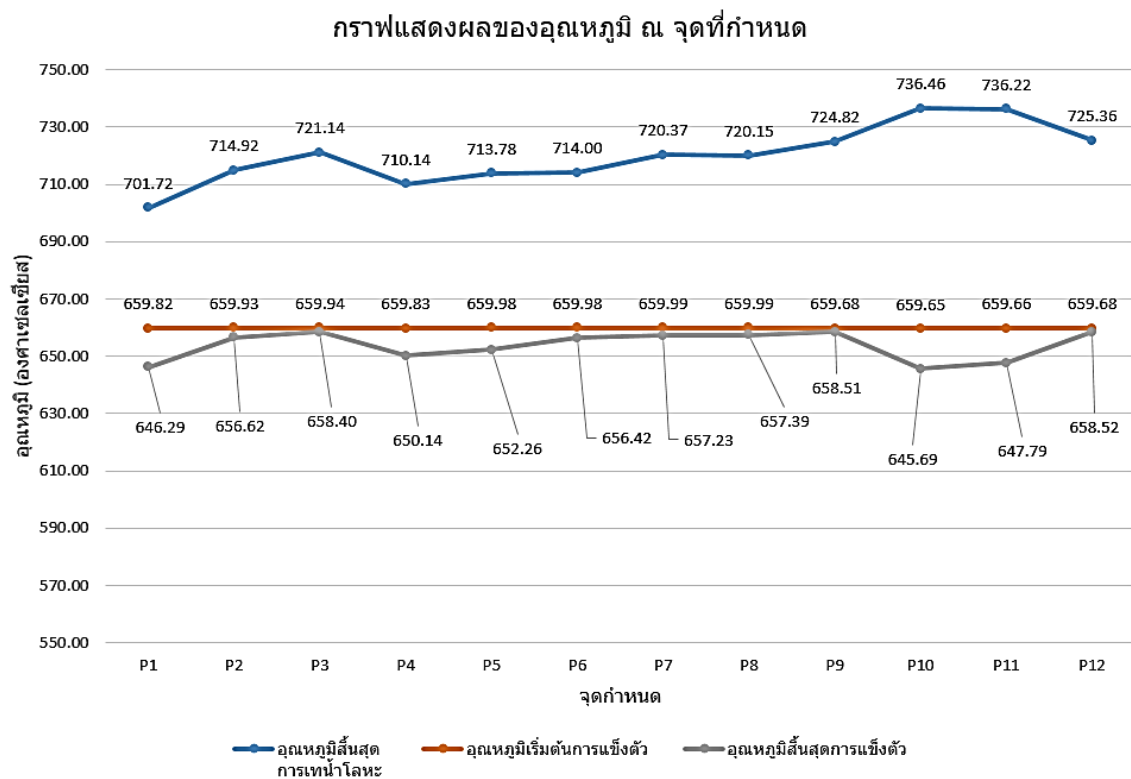
จากตารางที่ 4-2 และ ภาพที่ 4-47 จะแสดงให้เห็นถึงความแตกต่าง ๆ ของอุณหภูมิในช่วงเวลาต่าง ๆ ณ จุด P1, P2, P3, P4, P5, P6, P7, P8, P9, P10, P11 และ P12 คือ ช่วง อุณหภูมิสิ้นสุด การเทน้ำโลหะที่เวลา 5.13 วินาที อุณหภูมิเริ่มต้นการแข็งตัวที่เวลา 24.01 วินาที และอุณหภูมิสิ้นสุดการแข็งตัวที่เวลา 140.21 วินาที โดยจะเห็นว่าจุดที่เกิดโพรงหดตัวมักจะเป็นจุดที่มีอุณหภูมิสูงกว่าจุดที่ไม่เกิดโพรงหดตัว ณ ช่วงเวลาสิ้นสุดการแข็งตัวของชิ้นงาน

4.6.2 ชิ้นงานหล่อทรายกระสวนขึ้นเดียวหน้าผาราบมีไส้แบบในตัวรูล้นทรงกระบอกกลวงหนา

15 มิลลิเมตร (Tube 15mm. Riser)

ตารางที่ 4-3 เปรียบเทียบอุณหภูมิ ณ เวลา อุณหภูมิสิ้นสุดการเทน้ำโลหะ อุณหภูมิเริ่มต้นการแข็งตัว และ อุณหภูมิสิ้นสุดการแข็งตัว ชิ้นงานหล่อทรายกระสวนขึ้นเดียวหน้าผาราบมีไส้แบบในตัวรูล้นทรงกระบอกกลวงหนา 15 มิลลิเมตร (Tube 15mm. Riser)

ตารางเปรียบเทียบอุณหภูมิ Tube 15mm. Riser (องศาเซลเซียส)					
จุด	อุณหภูมิสิ้นสุดการเทน้ำโลหะ (5.31s)	อุณหภูมิเริ่มต้นการแข็งตัว (34.98s)	อุณหภูมิสิ้นสุดการแข็งตัว (191.46s)	การเกิดโพรงหดตัว	ตำแหน่งบนชิ้นงาน
P1	701.72	659.82	646.29	ไม่เกิดโพรงหดตัว	ในชิ้นงาน
P2	714.92	659.93	656.62	เกิดโพรงหดตัว	ในชิ้นงาน
P3	721.14	659.94	658.40	เกิดโพรงหดตัว	ในชิ้นงาน
P4	710.14	659.83	650.14	ไม่เกิดโพรงหดตัว	ในชิ้นงาน
P5	713.78	659.98	652.26	เกิดโพรงหดตัว	ในชิ้นงาน
P6	714.00	659.98	656.42	เกิดโพรงหดตัว	ในชิ้นงาน
P7	720.37	659.99	657.23	เกิดโพรงหดตัว	ในชิ้นงาน
P8	720.15	659.99	657.39	เกิดโพรงหดตัว	ในชิ้นงาน
P9	724.82	659.68	658.51	ไม่เกิดโพรงหดตัว	ในรูล้น
P10	736.46	659.65	645.69	ไม่เกิดโพรงหดตัว	ในรูล้น
P11	736.22	659.66	647.79	ไม่เกิดโพรงหดตัว	ในรูล้น
P12	725.36	659.68	658.52	ไม่เกิดโพรงหดตัว	ในรูล้น



ภาพที่ 4-48 กราฟแสดงอุณหภูมิ ณ จุด P1 ถึง P12 ของชิ้นงาน Tube 15mm. Riser

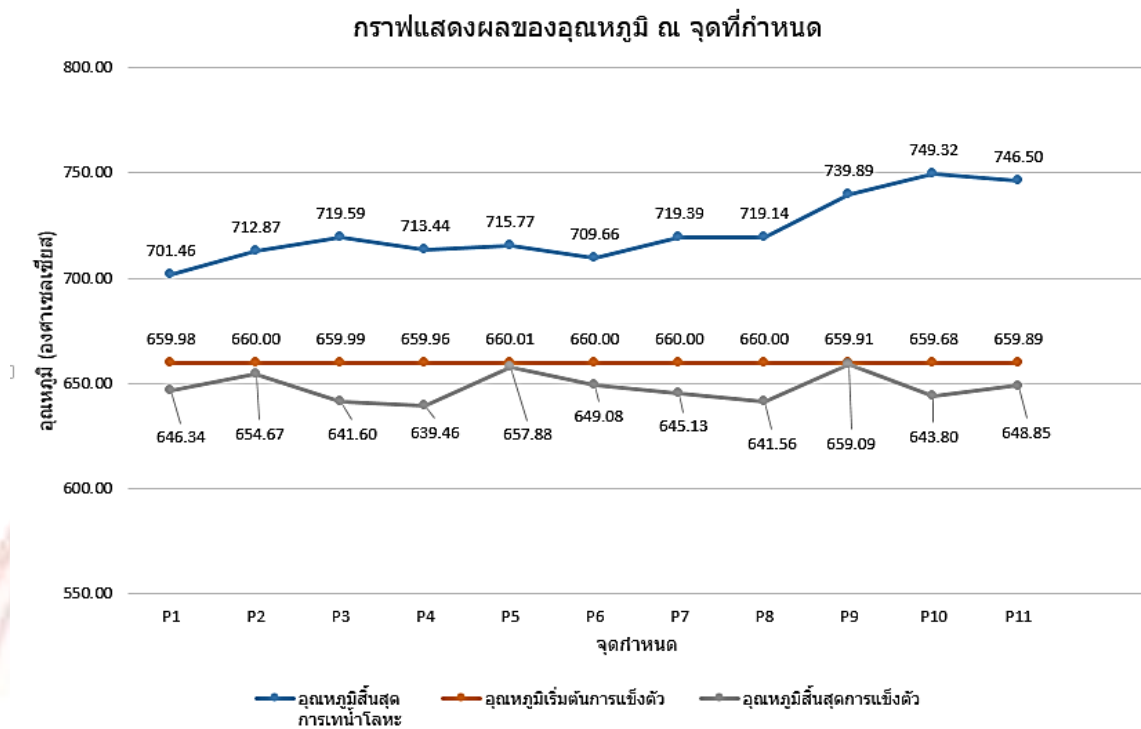
จากตารางที่ 4-3 และ ภาพที่ 4-48 จะแสดงให้เห็นถึงความแตกต่าง ๆ ของอุณหภูมิในช่วงเวลาต่าง ๆ ณ จุด P1, P2, P3, P4, P5, P6, P7, P8, P9, P10, P11 และ P12 คือ ช่วง อุณหภูมิสิ้นสุด การเทน้ำโลหะที่เวลา 5.31 วินาที อุณหภูมิเริ่มต้นการแข็งตัวที่เวลา 32.98 วินาที และอุณหภูมิสิ้นสุดการแข็งตัวที่เวลา 191.46 วินาที โดยจะเห็นว่าจุดที่เกิดโพรงหดตัวมักจะเป็นจุดที่มีอุณหภูมิสูงกว่าจุดที่ไม่เกิดโพรงหดตัว ณ ช่วงเวลาสิ้นสุดการแข็งตัวของชิ้นงาน

4.6.3 ชิ้นงานหล่อทรายชิ้นงานกระสวนขึ้นเดียวหน้าผ่าราบมีไส้แบบในตัวรูล้นทรงกระบอ

ตัน ตำแหน่งวางรูล้นที่ 1 (Cylinder_Q1 Riser)

ตารางที่ 4-4 เปรียบเทียบอุณหภูมิ ณ เวลา อุณหภูมิสิ้นสุดการเทน้ำโลหะ อุณหภูมิเริ่มต้นการแข็งตัว และ อุณหภูมิสิ้นสุดการแข็งตัว ชิ้นงานหล่อทรายกระสวนขึ้นเดียวหน้าผ่าราบมีไส้แบบในตัวรูล้น ทรงกระบอตัน ตำแหน่งการวางรูล้นตำแหน่งที่ 1 (Cylinder_Q1 Riser)

ตารางเปรียบเทียบอุณหภูมิ Cylinder_Q1 Riser (องศาเซลเซียส)					
จุด	อุณหภูมิสิ้นสุด การเทน้ำโลหะ (5.05s)	อุณหภูมิ เริ่มต้น การแข็งตัว (23.28s)	อุณหภูมิสิ้นสุด การแข็งตัว (175.29s)	การเกิดโพรงหดตัว	ตำแหน่ง บนชิ้นงาน
P1	701.46	659.98	646.34	ไม่เกิดโพรงหดตัว	ในชิ้นงาน
P2	712.87	660.00	654.67	ไม่เกิดโพรงหดตัว	ในชิ้นงาน
P3	719.59	659.99	641.60	ไม่เกิดโพรงหดตัว	ในชิ้นงาน
P4	713.44	659.96	639.46	ไม่เกิดโพรงหดตัว	ในชิ้นงาน
P5	715.77	660.01	657.88	เกิดโพรงหดตัว	ในชิ้นงาน
P6	709.66	660.00	649.08	ไม่เกิดโพรงหดตัว	ในชิ้นงาน
P7	719.39	660.00	645.13	ไม่เกิดโพรงหดตัว	ในชิ้นงาน
P8	719.14	660.00	641.56	ไม่เกิดโพรงหดตัว	ในชิ้นงาน
P9	739.89	659.91	659.09	เกิดโพรงหดตัว	ในรูล้น
P10	749.32	659.68	643.80	เกิดโพรงหดตัว	ในรูล้น
P11	746.50	659.89	648.85	เกิดโพรงหดตัว	ในรูล้น



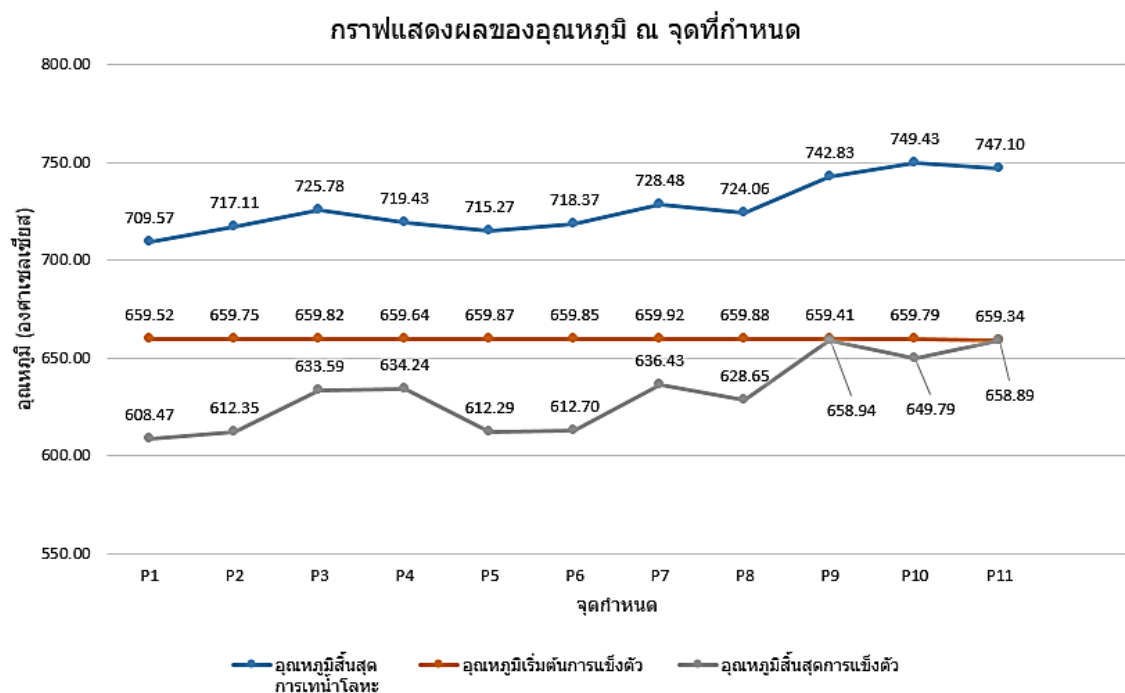
ภาพที่ 4-49 กราฟแสดงอุณหภูมิ ณ P1 ถึง P11 ของชิ้นงาน Cylinder_Q1 Riser

จากตารางที่ 4-4 และ ภาพที่ 4-49 จะแสดงให้เห็นถึงความแตกต่าง ๆ ของอุณหภูมิในช่วงเวลาต่าง ๆ ณ จุด P1, P2, P3, P4, P5, P6, P7, P8, P9, P10, P11 คือ ช่วง อุณหภูมิสิ้นสุด การเติมน้ำโลหะที่เวลา 5.05 วินาที อุณหภูมิเริ่มต้นการแข่งตัวที่เวลา 23.28 วินาที และ อุณหภูมิสิ้นสุดการแข่งตัวที่เวลา 175.29 วินาที โดยจะเห็นได้ว่าจุดที่เกิดโพรงหดตัวมักจะเป็นจุดที่มีอุณหภูมิสูงกว่าจุดที่ไม่เกิดโพรงหดตัว ณ ช่วงเวลาสิ้นสุดการแข่งตัวของชิ้นงาน

4.5.4 ชิ้นงานหล่อทรายชิ้นงานกระสวนขึ้นเดียวหน้าฝาราบมีไส้แบบในตัวรูล้นทรงกระบอกตัน
ตำแหน่งวางรูล้นที่ 2 (Cylinder_Q2 Riser)

ตารางที่ 4-5 เปรียบเทียบอุณหภูมิ ณ เวลา อุณหภูมิสิ้นสุดการเทน้ำโลหะ อุณหภูมิเริ่มต้นการแข็งตัว และ อุณหภูมิสิ้นสุดการแข็งตัว ชิ้นงานหล่อทรายชิ้นงานกระสวนขึ้นเดียวหน้าฝาราบมีไส้แบบในตัวรูล้นทรงกระบอกตัน ตำแหน่งวางรูล้นที่ 2 (Cylinder_Q2 Riser)

ตารางเปรียบเทียบอุณหภูมิ Cylinder_Q2 Riser (องศาเซลเซียส)					
จุด	อุณหภูมิสิ้นสุด การเทน้ำโลหะ (4.77s)	อุณหภูมิ เริ่มต้น การแข็งตัว (54.28s)	อุณหภูมิสิ้นสุด การแข็งตัว (198.57s)	การเกิดโพรงหดตัว	ตำแหน่ง บนชิ้นงาน
P1	709.57	659.52	608.47	ไม่เกิดโพรงหดตัว	ในชิ้นงาน
P2	717.11	659.75	612.35	ไม่เกิดโพรงหดตัว	ในชิ้นงาน
P3	725.78	659.82	633.59	ไม่เกิดโพรงหดตัว	ในชิ้นงาน
P4	719.43	659.64	634.24	ไม่เกิดโพรงหดตัว	ในชิ้นงาน
P5	715.27	659.87	612.29	ไม่เกิดโพรงหดตัว	ในชิ้นงาน
P6	718.37	659.85	612.70	ไม่เกิดโพรงหดตัว	ในชิ้นงาน
P7	728.48	659.92	636.43	ไม่เกิดโพรงหดตัว	ในชิ้นงาน
P8	724.06	659.88	628.65	ไม่เกิดโพรงหดตัว	ในชิ้นงาน
P9	742.83	659.41	658.94	เกิดโพรงหดตัว	ในรูล้น
P10	749.43	659.79	649.79	เกิดโพรงหดตัว	ในรูล้น
P11	747.10	659.34	658.89	เกิดโพรงหดตัว	ในรูล้น



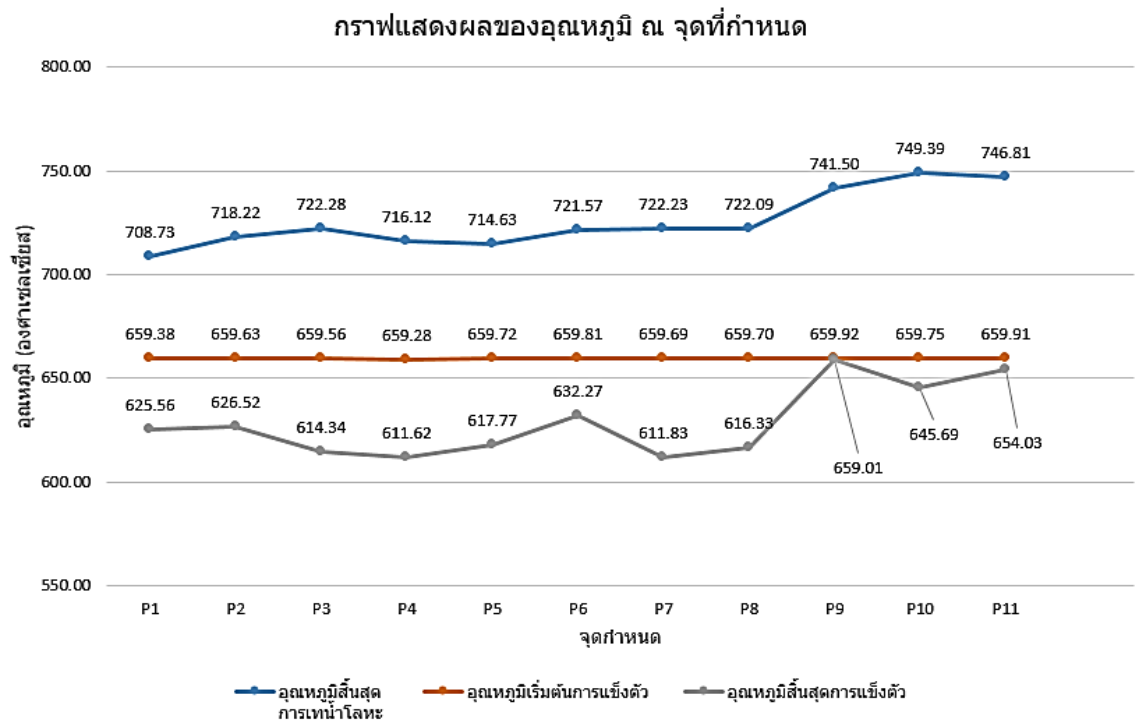
ภาพที่ 4-50 กราฟแสดงอุณหภูมิ ณ P1 ถึง P11 ของชิ้นงาน Cylinder_Q2 Riser

จากตารางที่ 4-5 และ ภาพที่ 4-50 จะแสดงให้เห็นถึงความแตกต่าง ๆ ของอุณหภูมิในช่วงเวลาต่าง ๆ ณ จุด P1, P2, P3, P4, P5, P6, P7, P8, P9, P10, P11 คือ ช่วง อุณหภูมิสิ้นสุดการเผาไหม้ที่เวลา 4.77 วินาที อุณหภูมิเริ่มต้นการแข่งขันที่เวลา 54.28 วินาที และ อุณหภูมิสิ้นสุดการแข่งขันที่เวลา 198.57 วินาที โดยจะเห็นได้ว่าจุดที่เกิดโพรงหดตัวมักจะเป็นจุดที่มีอุณหภูมิสูงกว่าจุดที่ไม่เกิดโพรงหดตัว ณ ช่วงเวลาสิ้นสุดการแข่งขันของชิ้นงาน

4.6.5 ชิ้นงานหล่อทรายชิ้นงานกระสวนขึ้นเดียวหน้าผ่าราบมีไส้แบบในตัวรูล้นทรงกระบอกตัน
ตำแหน่งวางรูล้นที่ 3 (Cylinder_Q3 Riser)

ตารางที่ 4-6 เปรียบเทียบอุณหภูมิ ณ เวลา อุณหภูมิสิ้นสุดการเทน้ำโลหะ อุณหภูมิเริ่มต้นการแข็งตัว และ อุณหภูมิสิ้นสุดการแข็งตัว ชิ้นงานหล่อทรายชิ้นงานกระสวนขึ้นเดียวหน้าผ่าราบมีไส้แบบในตัวรูล้นทรงกระบอกตันตำแหน่งวางรูล้นที่ 3 (Cylinder_Q3 Riser)

ตารางเปรียบเทียบอุณหภูมิ Cylinder_Q3 Riser (องศาเซลเซียส)					
จุด	อุณหภูมิสิ้นสุด การเทน้ำโลหะ (4.90s)	อุณหภูมิ เริ่มต้น การแข็งตัว (82.29s)	อุณหภูมิสิ้นสุด การแข็งตัว (194.76s)	การเกิดโพรงหดตัว	ตำแหน่ง บนชิ้นงาน
P1	708.73	659.38	625.56	ไม่เกิดโพรงหดตัว	ในชิ้นงาน
P2	718.22	659.63	626.52	ไม่เกิดโพรงหดตัว	ในชิ้นงาน
P3	722.28	659.56	614.34	ไม่เกิดโพรงหดตัว	ในชิ้นงาน
P4	716.12	659.28	611.62	ไม่เกิดโพรงหดตัว	ในชิ้นงาน
P5	714.63	659.72	617.77	ไม่เกิดโพรงหดตัว	ในชิ้นงาน
P6	721.57	659.81	632.27	เกิดโพรงหดตัว	ในชิ้นงาน
P7	722.23	659.69	611.83	เกิดโพรงหดตัว	ในชิ้นงาน
P8	722.09	659.70	616.33	ไม่เกิดโพรงหดตัว	ในชิ้นงาน
P9	741.50	659.92	659.01	เกิดโพรงหดตัว	ในรูล้น
P10	749.39	659.75	645.69	เกิดโพรงหดตัว	ในรูล้น
P11	746.81	659.91	654.03	เกิดโพรงหดตัว	ในรูล้น



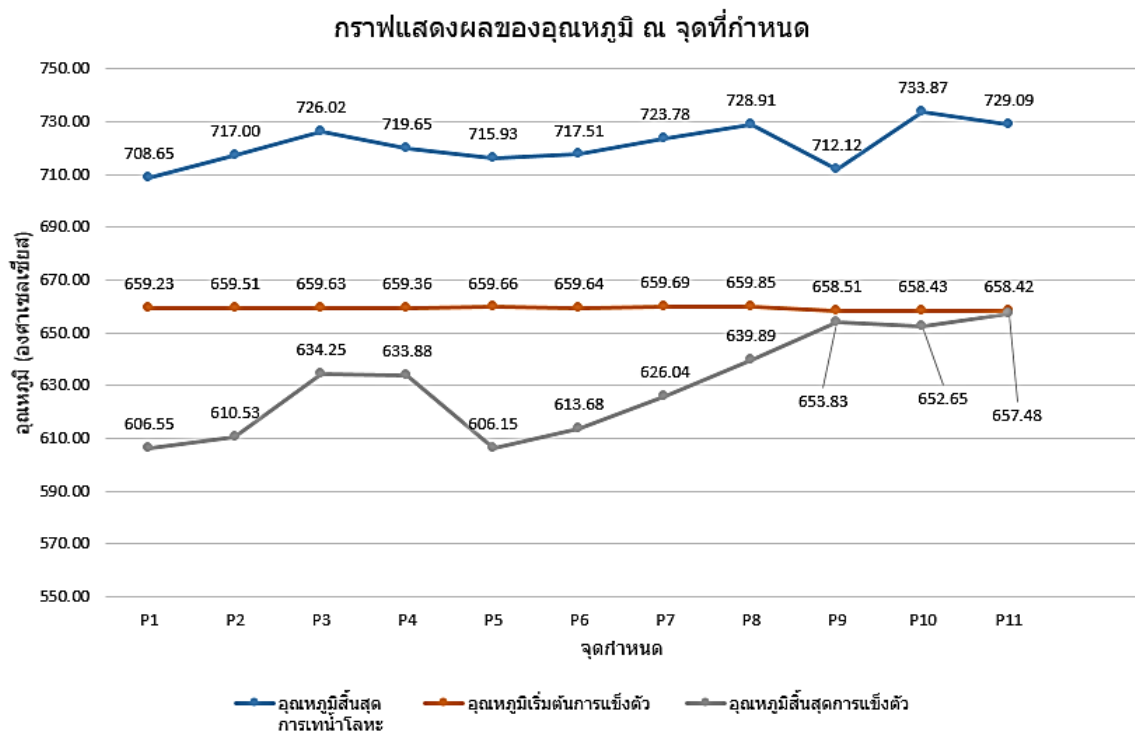
ภาพที่ 4-51 กราฟแสดงอุณหภูมิ ณ P1 ถึง P11 ของชิ้นงาน Cylinder_Q3 Riser

จากตารางที่ 4-6 และ ภาพที่ 4-51 จะแสดงให้เห็นถึงความแตกต่าง ๆ ของอุณหภูมิในช่วงเวลาต่าง ๆ ณ จุด P1, P2, P3, P4, P5, P6, P7, P8, P9, P10, P11 คือ ช่วง อุณหภูมิสิ้นสุด การเทน้ำโลหะที่เวลา 4.90 วินาที อุณหภูมิเริ่มต้นการแข่งขันตัวที่เวลา 82.29 วินาที และ อุณหภูมิสิ้นสุดการแข่งขันตัวที่เวลา 211.18 วินาที โดยจะเห็นได้ว่าจุดที่เกิดโพรงหดตัวมักจะเป็นจุดที่มีอุณหภูมิสูงกว่าจุดที่ไม่เกิดโพรงหดตัว ณ ช่วงเวลาสิ้นสุดการแข่งขันตัวของชิ้นงาน

4.6.6 ชิ้นงานหล่อทรายชิ้นงานกระสวนขึ้นเดียวหน้าฝาราบมีไส้แบบในตัวรูล้นทรงกระบอกตัน
ตำแหน่งวางรูล้นที่ 4 (Cylinder_Q4 Riser)

ตารางที่ 4-7 เปรียบเทียบอุณหภูมิ ณ เวลา อุณหภูมิสิ้นสุดการเทน้ำโลหะ อุณหภูมิเริ่มต้นการแข็งตัว และ อุณหภูมิสิ้นสุดการแข็งตัว ชิ้นงานหล่อทรายชิ้นงานกระสวนขึ้นเดียวหน้าฝาราบมีไส้แบบในตัวรูล้นทรงกระบอกตัน ตำแหน่งวางรูล้นที่ 4 (Cylinder_Q4 Riser)

ตารางเปรียบเทียบอุณหภูมิ Cylinder_Q4 Riser (องศาเซลเซียส)					
จุด	อุณหภูมิสิ้นสุด การเทน้ำโลหะ (4.82s)	อุณหภูมิ เริ่มต้น การแข็งตัว (83.34s)	อุณหภูมิสิ้นสุด การแข็งตัว (211.18s)	การเกิดโพรงหดตัว	ตำแหน่ง บนชิ้นงาน
P1	708.65	659.23	606.55	ไม่เกิดโพรงหดตัว	ในชิ้นงาน
P2	717.00	659.51	610.53	ไม่เกิดโพรงหดตัว	ในชิ้นงาน
P3	726.02	659.63	634.25	ไม่เกิดโพรงหดตัว	ในชิ้นงาน
P4	719.65	659.36	633.88	ไม่เกิดโพรงหดตัว	ในชิ้นงาน
P5	715.93	659.66	606.15	ไม่เกิดโพรงหดตัว	ในชิ้นงาน
P6	717.51	659.64	613.68	ไม่เกิดโพรงหดตัว	ในชิ้นงาน
P7	723.78	659.69	626.04	ไม่เกิดโพรงหดตัว	ในชิ้นงาน
P8	728.91	659.85	639.89	ไม่เกิดโพรงหดตัว	ในชิ้นงาน
P9	712.12	658.51	653.83	เกิดโพรงหดตัว	ในรูล้น
P10	733.87	658.43	652.65	เกิดโพรงหดตัว	ในรูล้น
P11	729.09	658.42	657.48	เกิดโพรงหดตัว	ในรูล้น



ภาพที่ 4-52 กราฟแสดงอุณหภูมิ ณ P1 ถึง P11 ของชิ้นงาน Cylinder_Q4 Riser

จากตารางที่ 4-7 และ ภาพที่ 4-52 จะแสดงให้เห็นถึงความแตกต่าง ๆ ของอุณหภูมิในช่วงเวลาต่าง ๆ ณ จุด P1, P2, P3, P4, P5, P6, P7, P8, P9, P10, P11 คือ ช่วง อุณหภูมิสิ้นสุดการเติมน้ำโลหะที่เวลา 4.82 วินาที อุณหภูมิเริ่มต้นการแข่งขันที่เวลา 83.34 วินาที และ อุณหภูมิสิ้นสุดการแข่งขันที่เวลา 211.18 วินาที โดยจะเห็นได้ว่าจุดที่เกิดโพรงหดตัวมักจะเป็นจุดที่มีอุณหภูมิสูงกว่าจุดที่ไม่เกิดโพรงหดตัว ณ ช่วงเวลาสิ้นสุดการแข่งขันของชิ้นงาน

4.7 แสดงผลการเทหล่อชิ้นงานจริง

สำหรับการเทหล่อชิ้นงานจริงนั้น ผู้วิจัยได้ทำการคัดเลือกตัวอย่างในการหล่อโดยเลือกจากการทดลองที่ให้ผลลัพธ์การเกิดโพรงหดตัวน้อยที่สุด โดยจากหัวข้อที่ 4.4 ตารางที่ 4-1 สรุปผลการทดลองให้เห็นว่า ชิ้นงานหล่อทรายชิ้นงานกระสวนขึ้นเดียวหน้าผาราบมีไส้แบบในตัวรูล้นทรงกระบอกตัน ตำแหน่งวางรูล้นที่ 4 มีเปอร์เซ็นต์โพรงหดตัวอยู่ที่ 0.26 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้นผู้วิจัยจึงเลือกชิ้นงานนี้ทำการทดสอบเทหล่อจริง โดยสำหรับผลของการเทหล่อชิ้นงานเป็นดังต่อไปนี้



ภาพที่ 4-53 แสดงงานเทหล่อจริงของชิ้นงาน Cylinder_Q4 Riser

ภาพที่ 4 -53 แสดงให้เห็นถึงชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการหล่อมาเรียบร้อยแล้ว โดยจุดที่มีรอยยุบจะแสดงให้เห็น ณ บริเวณที่เป็นรูล้นทรงกระบอกตันขนาด 35 มิลลิเมตร สูง 70 มิลลิเมตรโดยถ้าสังเกตโดยภาพรวมจะไม่ปรากฏรอยยุบอยู่ที่บริเวณกลางชิ้นงาน



ภาพที่ 4-54 แสดงงานเทหล่อจริงของชิ้นงาน Cylinder_Q4 Riser (Top View)

ภาพที่ 4 -54 สังเกตภาพในท็อปปริวิจะเห็นว่าชิ้นงานไม่ปรากฏรอยยุบ เกิดขึ้นที่บริเวณกลางชิ้นงาน โดยรอยยุบจะไปปรากฏอยู่ที่บริเวณรูรั้น ที่เตรียมไว้



ภาพที่ 4-55 แสดงงานเทหล่อจริงของชิ้นงาน Cylinder_Q4 Riser (Front View)



ภาพที่ 4-56 แสดงงานเทหล่อจริงของชิ้นงาน Cylinder_Q4 Riser ที่ผ่าเพื่อตรวจสอบเนื้อด้านใน

ภาพที่ 4-56 แสดงให้เห็นถึงภาพการพาชิ้นงานกึ่งกลางเพื่อสังเกตรอยยุบที่เกิดขึ้นภายในชิ้นงาน ผลปรากฏว่าไม่พบรอยยุบที่เกิดขึ้นภายในเนื้อชิ้นงาน

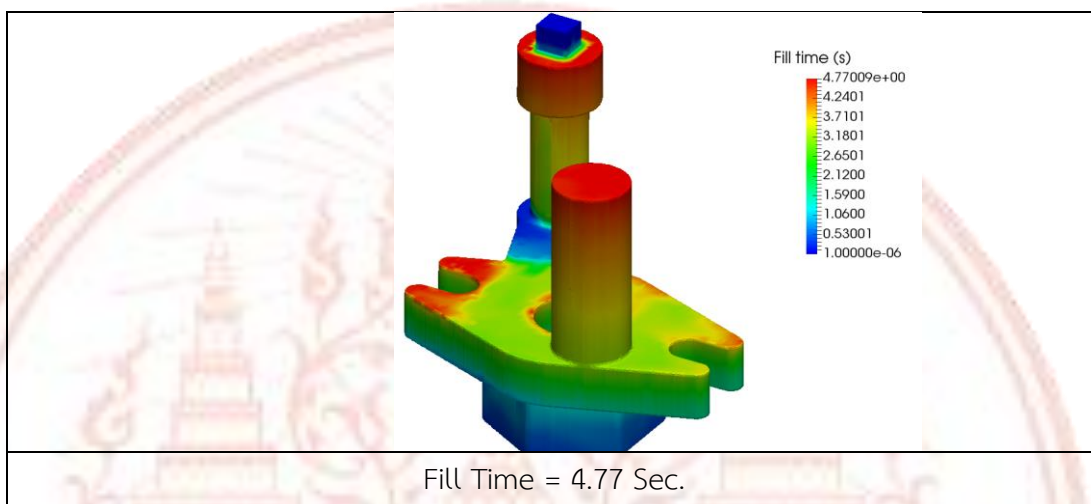
ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าชิ้นงานที่ผ่านการหล่อ โดยใช้แนวคิดในการออกแบบเป็นชิ้นงานรูกลั่นทรงกระบอกตันตำแหน่ง การวางรูกลั่น ที่ 4 นั้น สามารถที่จะแก้ไขการเกิดโพรงหดตัวภายในเนื้อชิ้นงานได้จริง สำหรับการสรุปผลการจำลองสถานการณ์ทั้งหมดและการวิเคราะห์จะกล่าวไว้ในบทที่ 5 ถัดไป

4.8 แสดงผลการจำลองวิธีการแก้ไขปัญหาล้างจากการเทหล่อขึ้นงานจริง

4.8.1 แสดงผลการจำลองเวลาในการเทหล่อ (Fill Time)

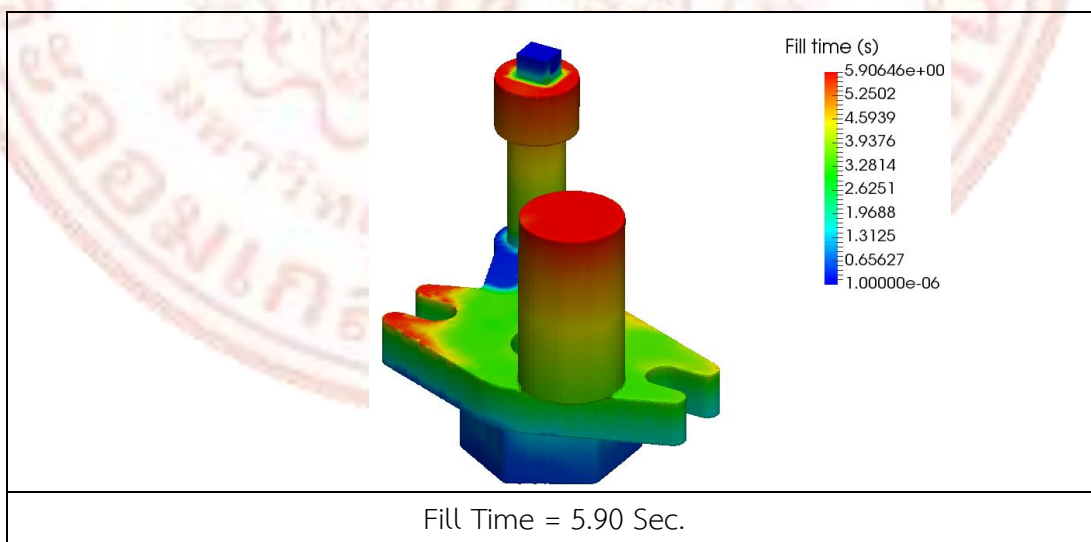
4.8.1.1 การจำลองการปรับขนาดรูล้น

4.8.1.1.1 ทดสอบปรับขนาดรูล้นเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 30 มิลลิเมตร



ภาพที่ 4-57 แสดงการจำลองเวลาในการเติมเต็มโลหะเหลวขึ้นงานทดสอบปรับขนาดรูล้น
เส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 30 มิลลิเมตร

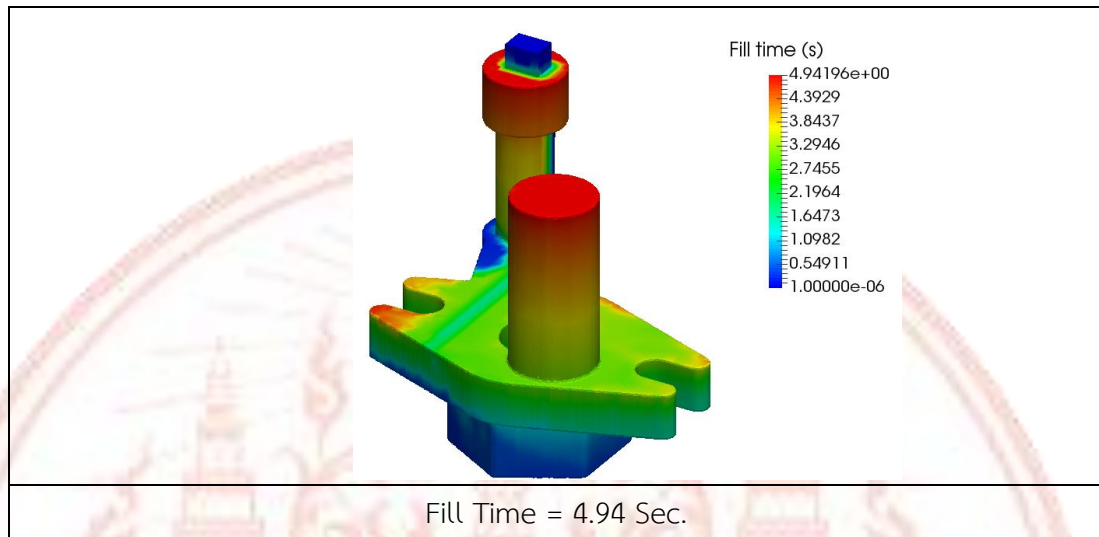
4.8.1.1.2 ทดสอบปรับขนาดรูล้นเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 40 มิลลิเมตร



ภาพที่ 4-58 แสดงการจำลองเวลาในการเติมเต็มโลหะเหลวขึ้นงานทดสอบปรับขนาดรูล้น
เส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 40 มิลลิเมตร

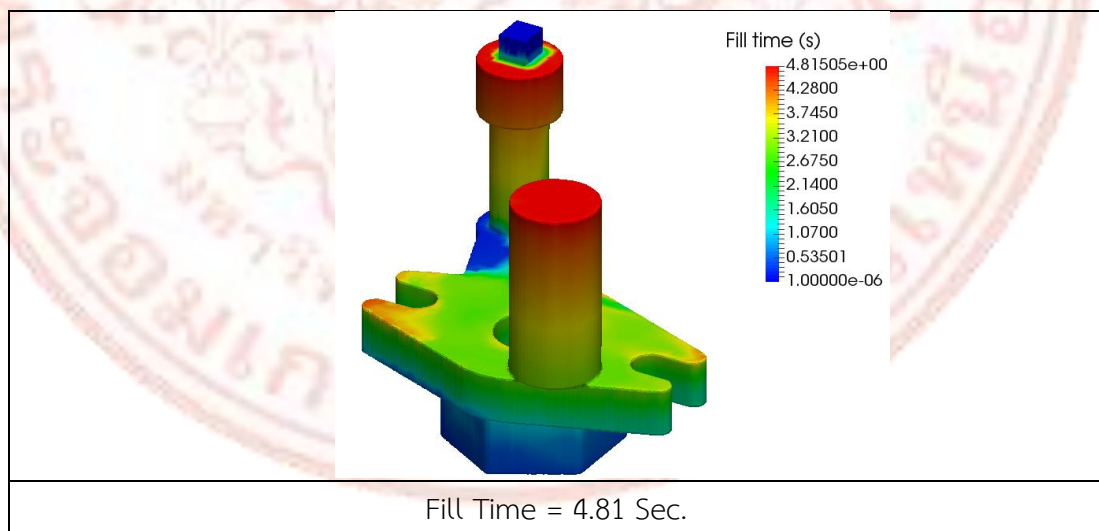
4.8.1.2 การปรับตำแหน่งการวางรูล้น

4.8.1.2.1 ทดสอบปรับตำแหน่งรูล้นห่างจากจุดศูนย์กลาง 20 มิลลิเมตร



ภาพที่ 4-59 แสดงการจำลองเวลาในการเติมเต็มโลหะเหลวชิ้นงานทดสอบปรับตำแหน่งรูล้น
ห่างจากจุดศูนย์กลาง 20 มิลลิเมตร

4.8.1.2.2 ทดสอบปรับตำแหน่งรูล้นห่างจากจุดศูนย์กลาง 30 มิลลิเมตร

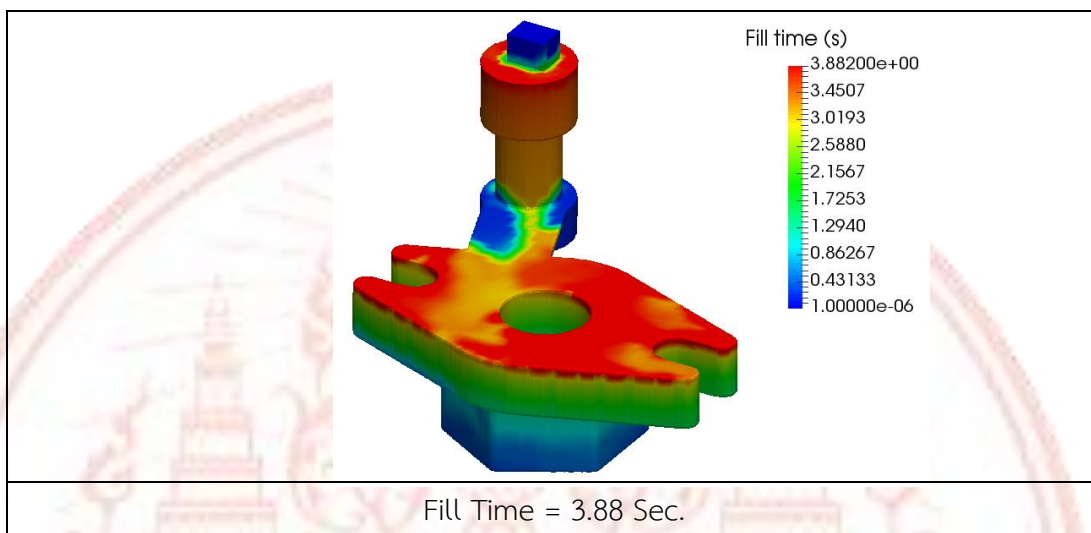


ภาพที่ 4-60 แสดงการจำลองเวลาในการเติมเต็มโลหะเหลวชิ้นงานทดสอบปรับตำแหน่งรูล้น
ห่างจากจุดศูนย์กลาง 30 มิลลิเมตร

4.8.1.3 การลดขนาดหีบบน

4.8.1.3.1 ทดสอบการลดขนาดหีบบนที่ใช้ในการเทหล่อแบบไม่มีรูล้น

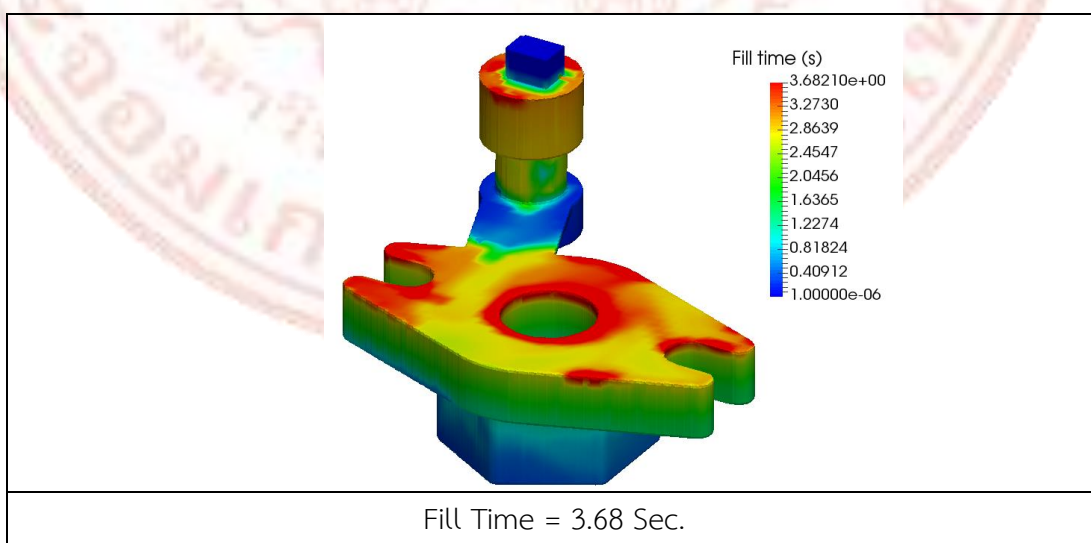
สูง 50 มิลลิเมตร



ภาพที่ 4-61 แสดงการจำลองเวลาในการเติมเต็มโลหะเหลวขึ้นงานทดสอบการลดขนาดหีบบนที่ใช้ในการเทหล่อแบบไม่มีรูล้นสูง 50 มิลลิเมตร

4.8.1.3.2 ทดสอบการลดขนาดหีบบนที่ใช้ในการเทหล่อแบบไม่มีรูล้น

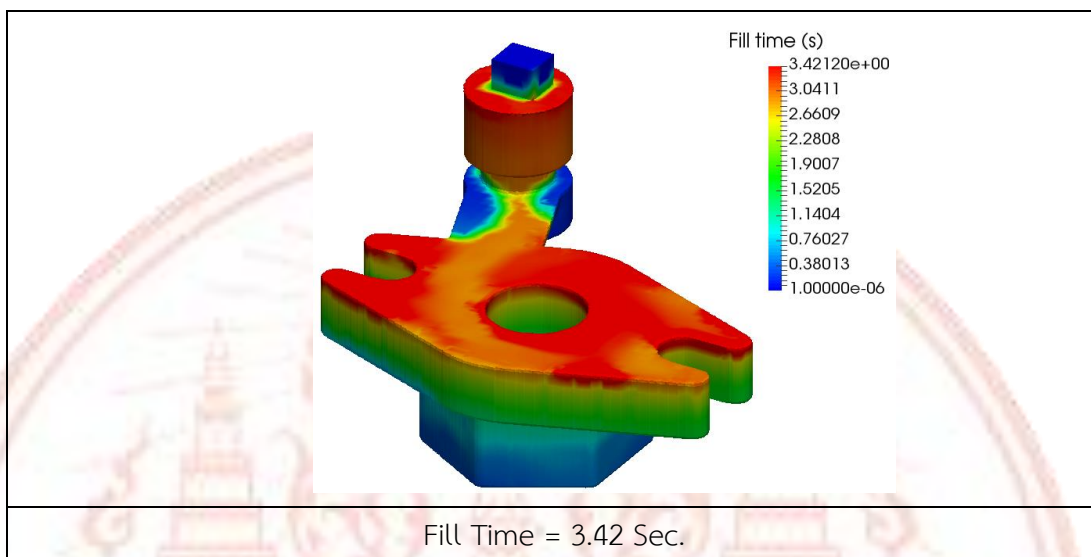
สูง 40 มิลลิเมตร



ภาพที่ 4-62 แสดงการจำลองเวลาในการเติมเต็มโลหะเหลวขึ้นงานทดสอบการลดขนาดหีบบนที่ใช้ในการเทหล่อแบบไม่มีรูล้นสูง 40 มิลลิเมตร

4.8.1.3.3 ทดสอบการลดขนาดหีบبنที่ใช้ในการเทหล่อแบบไม่มีรูล้น

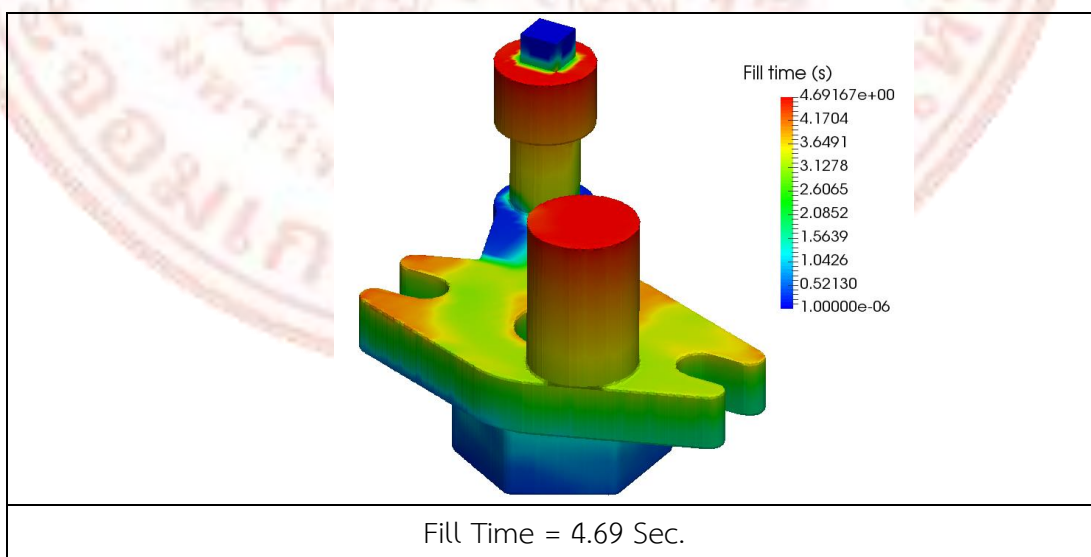
สูง 30 มิลลิเมตร



ภาพที่ 4-63 แสดงการจำลองเวลาในการเติมเต็มโลหะเหลวชิ้นงานทดสอบการลดขนาดหีบبنที่ใช้ในการเทหล่อแบบไม่มีรูล้นสูง 30 มิลลิเมตร

4.8.1.3.4 ทดสอบการลดขนาดหีบبنที่ใช้ในการเทหล่อแบบปรับรูล้น

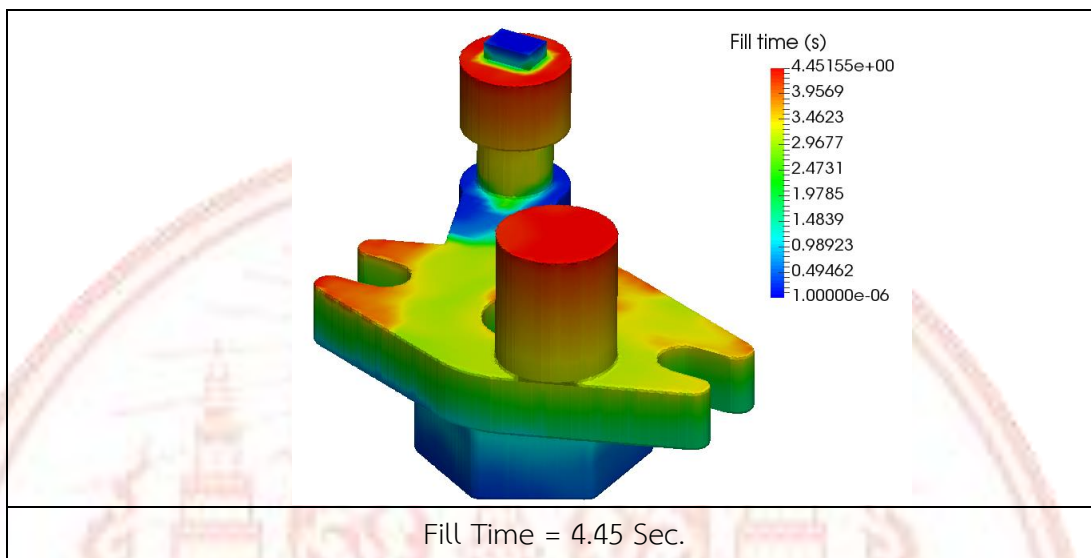
สูง 50 มิลลิเมตร



ภาพที่ 4-64 แสดงการจำลองเวลาในการเติมเต็มโลหะเหลวชิ้นงานทดสอบการลดขนาดหีบبنที่ใช้ในการเทหล่อแบบปรับรูล้นสูง 50 มิลลิเมตร

4.8.1.3.5 ทดสอบการลดขนาดหีบبنที่ใช้ในการเทหล่อแบบปรับรู้น

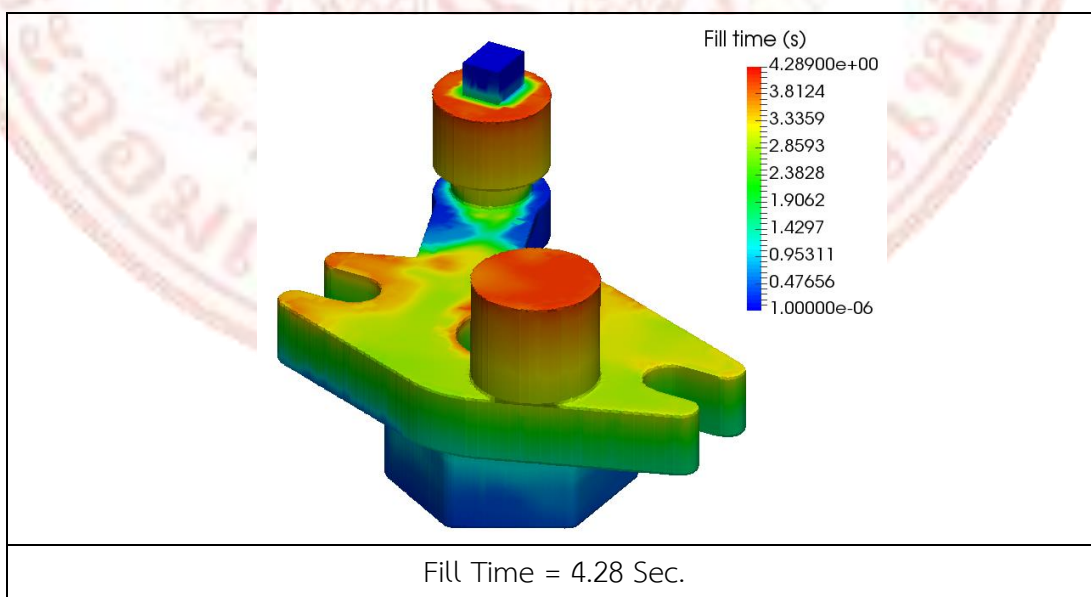
40 มิลลิเมตร



ภาพที่ 4-65 แสดงการจำลองเวลาในการเติมเต็มโลหะเหลวขึ้นงานทดสอบการลดขนาดหีบبنที่ใช้ในการเทหล่อแบบปรับรู้นสูง 40 มิลลิเมตร

4.8.1.3.6 ทดสอบการลดขนาดหีบبنที่ใช้ในการเทหล่อแบบปรับรู้น

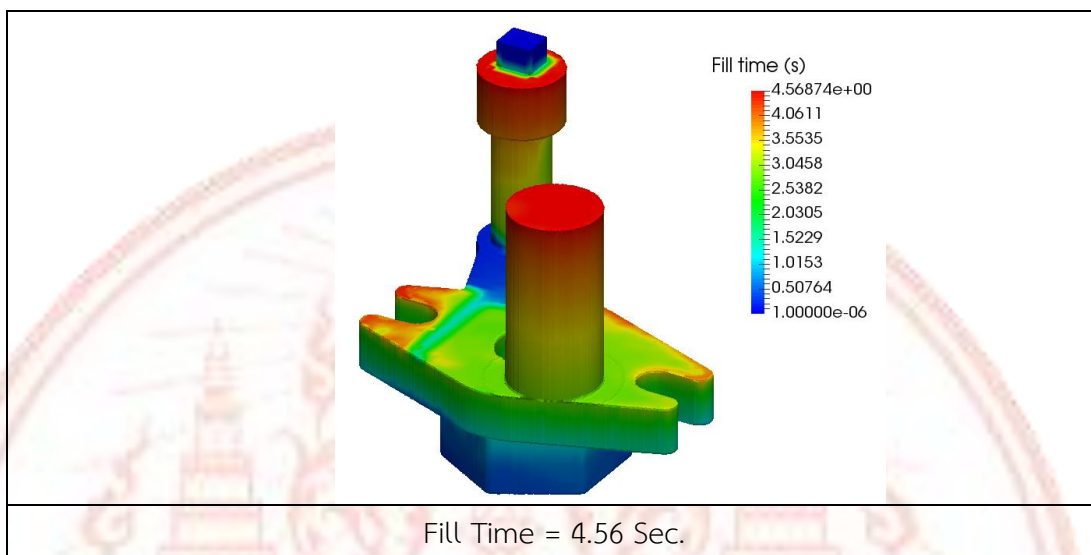
สูง 30 มิลลิเมตร



ภาพที่ 4-66 แสดงการจำลองเวลาในการเติมเต็มโลหะเหลวขึ้นงานทดสอบการลดขนาดหีบبنที่ใช้ในการเทหล่อแบบปรับรู้นสูง 30 มิลลิเมตร

4.8.1.3.7 ทดสอบการลดขนาดหีบبنที่ใช้ในการเทหล่อแบบไม่ปรับรูล้น สูง

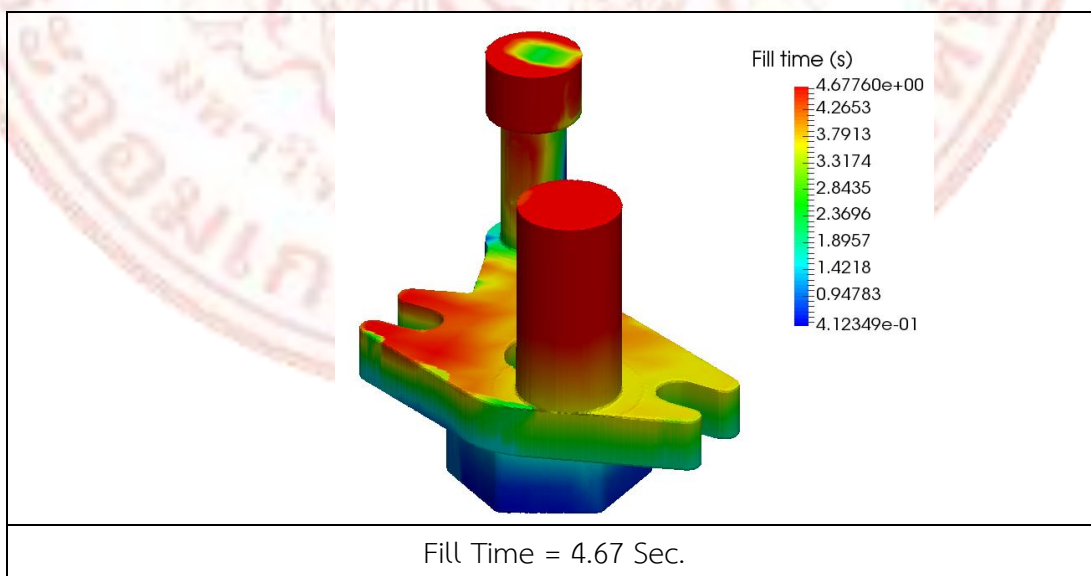
50 มิลลิเมตร



ภาพที่ 4-67 แสดงการจำลองเวลาในการเติมเต็มโลหะเหลวขึ้นงานทดสอบการลดขนาดหีบبنที่ใช้ในการเทหล่อแบบไม่ปรับรูล้นสูง 50 มิลลิเมตร

4.8.1.3.8 ทดสอบการลดขนาดหีบبنที่ใช้ในการเทหล่อแบบไม่ปรับรูล้น

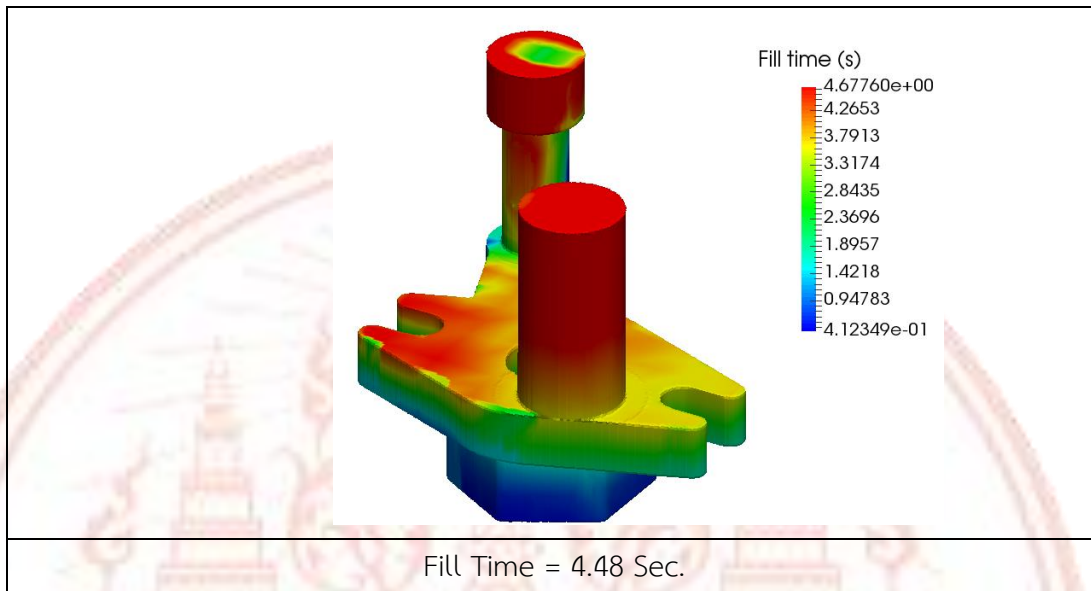
สูง 40 มิลลิเมตร



ภาพที่ 4-68 แสดงการจำลองเวลาในการเติมเต็มโลหะเหลวขึ้นงานทดสอบการลดขนาดหีบبنที่ใช้ในการเทหล่อแบบไม่ปรับรูล้น 40 มิลลิเมตร

4.8.1.3.9 ทดสอบการลดขนาดหีบبنที่ใช้ในการเทหล่อแบบไม่ปรับรู้น

สูง 30 มิลลิเมตร



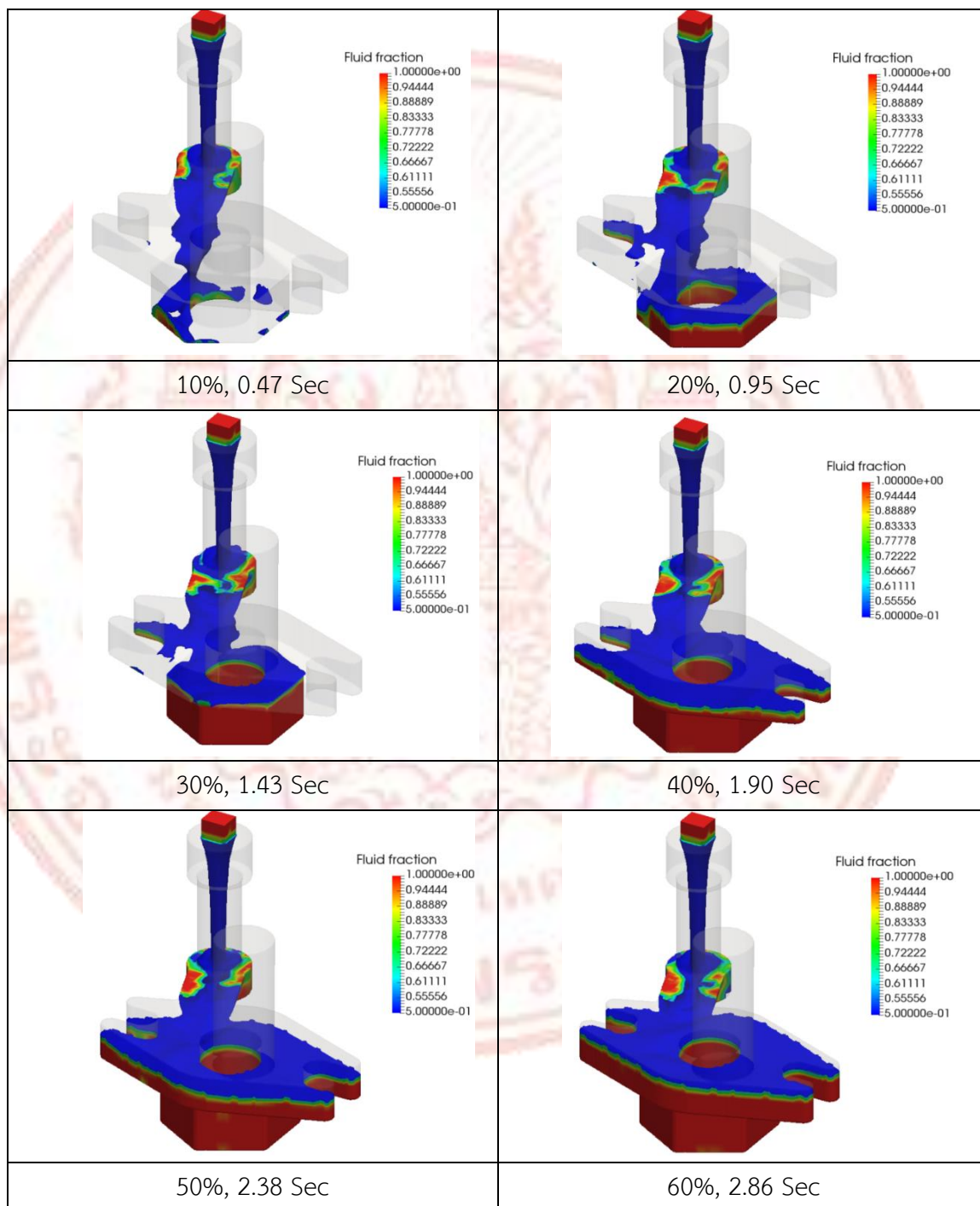
ภาพที่ 4-69 แสดงการจำลองเวลาในการเติมเต็มโลหะเหลวขึ้นงานทดสอบการลดขนาดหีบبنที่ใช้ในการเทหล่อแบบไม่ปรับรู้นสูง 30 มิลลิเมตร

หัวข้อ 4.8.1 จะแสดงผลลัพธ์ของ Fill Time ของขึ้นงานจำลองวิธีการแก้ไขปัญหาล้างจากการเทหล่อทั้งหมด 13 รูปแบบ ดังที่กล่าวไว้ในหัวข้อ 3.7 สำหรับหัวข้อต่อไปจะแสดงผลการจำลองของ Fluid Fraction

4.8.2 แสดงผลการจำลองพฤติกรรมการไหลของโลหะเหลว (Fluid fraction)

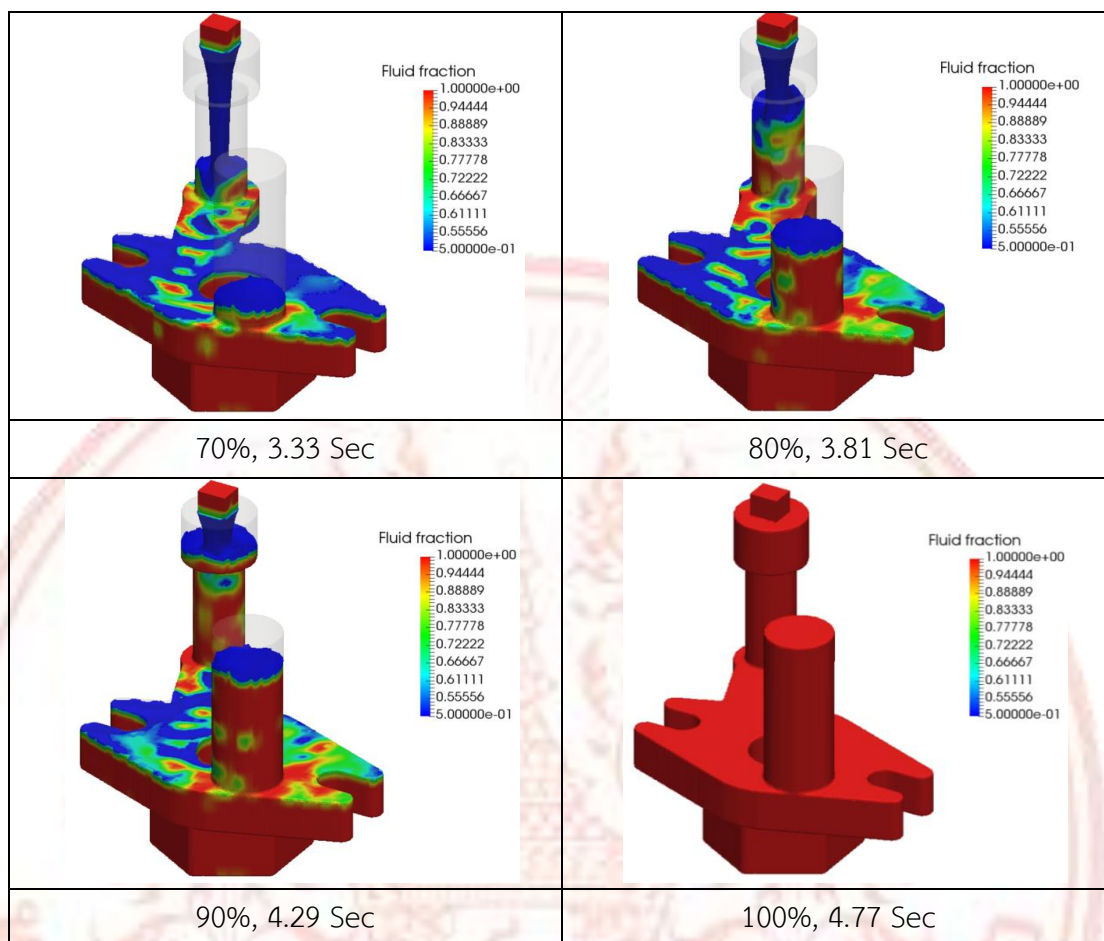
4.8.2.1 การจำลองการปรับขนาดรูล้น

4.8.2.1.1 ทดสอบปรับขนาดรูล้นเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 30 มิลลิเมตร



ภาพที่ 4-70 แสดงลักษณะการไหลของโลหะเหลวของชิ้นงานทดสอบปรับขนาดรูล้นเส้นผ่าน

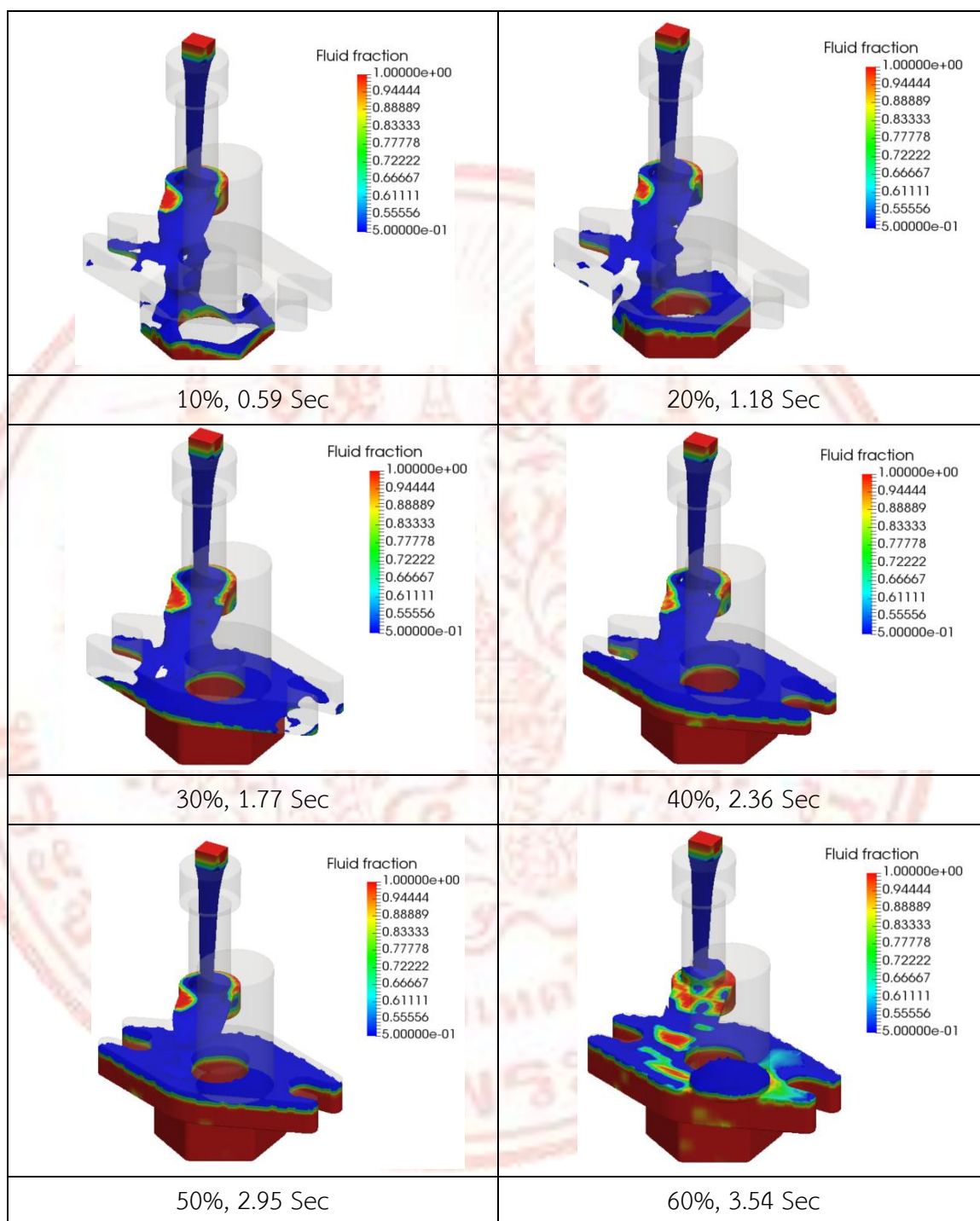
ศูนย์กลางเท่ากับ 30 มิลลิเมตร



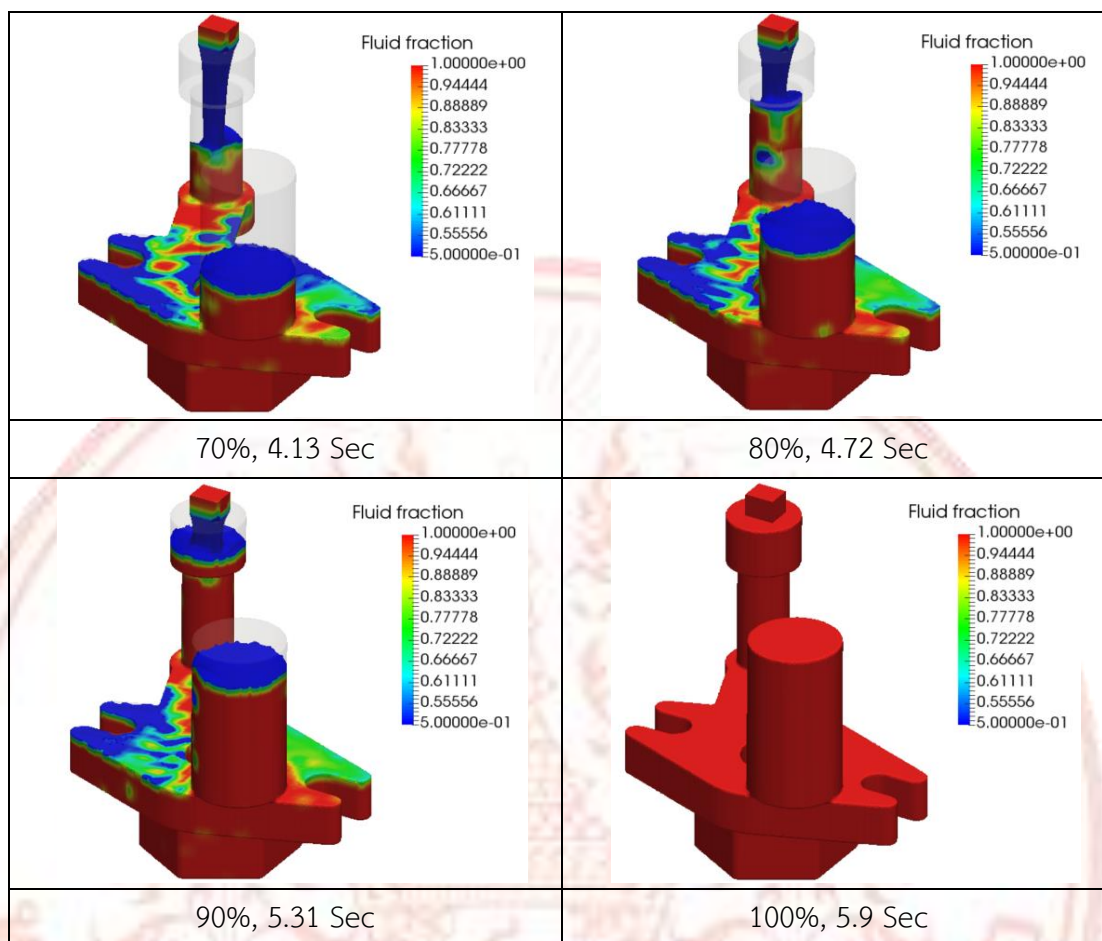
ภาพที่ 4-71 (ต่อ) แสดงลักษณะการไหลของโลหะเหลวของชิ้นงานทดสอบปรับขนาดรูเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 30 มิลลิเมตร

การไหลของน้ำโลหะเหลวสำหรับชิ้นงานทดสอบปรับขนาดรูเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 30 มิลลิเมตร ใช้เวลาในการเติมเต็มทั้งหมด 4.77 วินาที โดยน้ำโลหะเหลวเติมเต็มบริเวณจุดศูนย์กลางของชิ้นงานก่อน มีลักษณะการไหลแบบวนทวนเข็มนาฬิกาขึ้นตามความสูงของชิ้นงาน เมื่อน้ำโลหะเริ่มเติมเต็มรูเส้น การไหลของน้ำโลหะเหลวจะมีความปั่นป่วนบริเวณรอบ ๆ รูเส้น ก่อนที่สุดท้ายจะเติมเต็มในที่สุด

4.8.2.1.2 ทดสอบปรับขนาดรูเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 40 มิลลิเมตร



ภาพที่ 4-72 แสดงลักษณะการไหลของโลหะเหลวของชิ้นงานทดสอบปรับขนาดรูเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 40 มิลลิเมตร

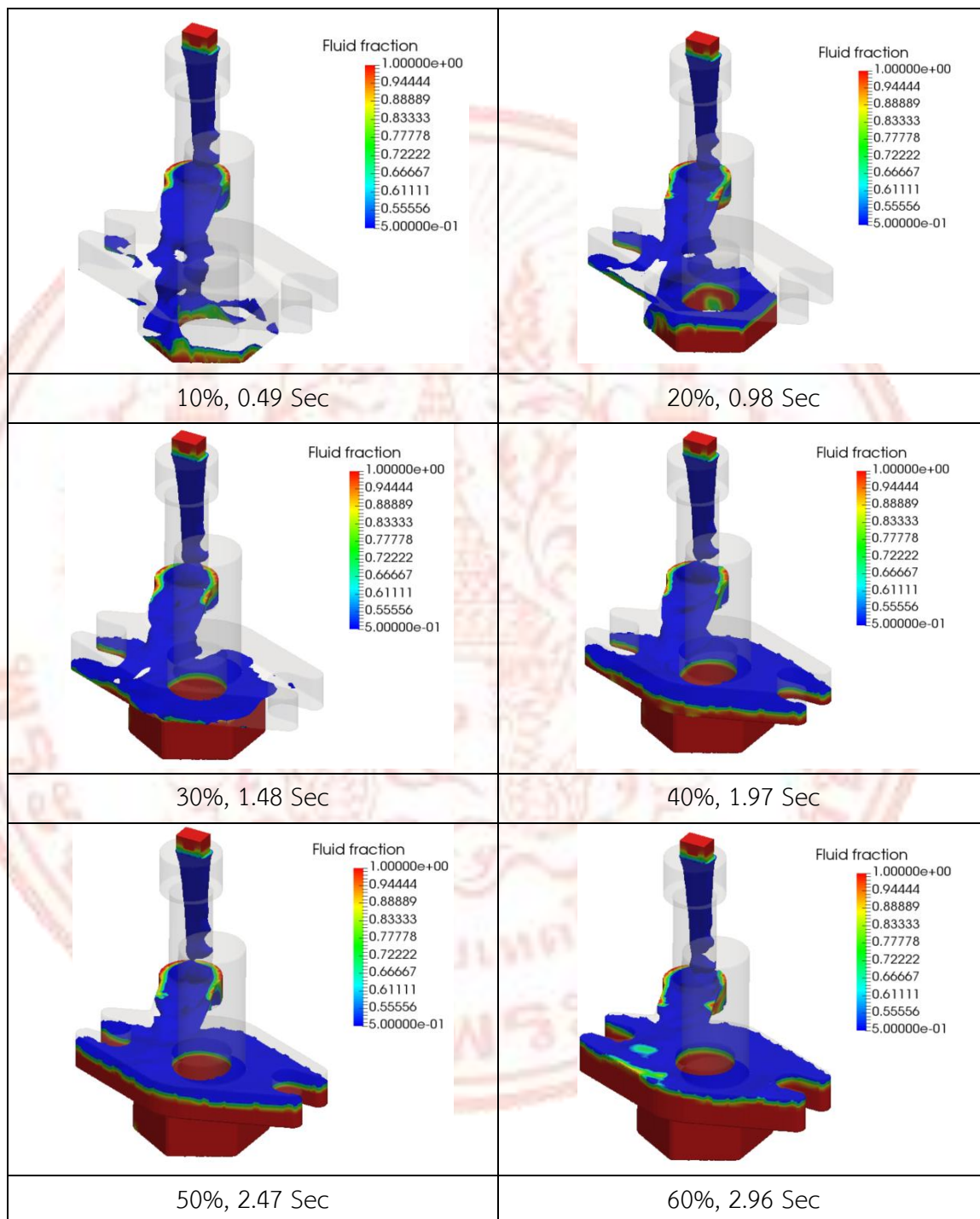


ภาพที่ 4-73 (ต่อ) แสดงลักษณะการไหลของโลหะเหลวของชิ้นงานทดสอบปรับขนาดรูเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 40 มิลลิเมตร

การไหลของน้ำโลหะเหลวสำหรับชิ้นงานทดสอบปรับขนาดรูเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 40 มิลลิเมตร ใช้เวลาในการเติมเต็มทั้งหมด 5.90 วินาที โดยน้ำโลหะเหลวเติมเต็มบริเวณจุดศูนย์กลางของชิ้นงานก่อน มีลักษณะการไหลแบบวนวนเข้มนาคีขึ้นตามความสูงของชิ้นงาน เมื่อน้ำโลหะเริ่มเติมเต็มรูเส้น การไหลของน้ำโลหะเหลวจะมีความปั่นป่วนบริเวณรอบ ๆ รูเส้น ก่อนที่สุดท้ายจะเติมเต็มในที่สุด

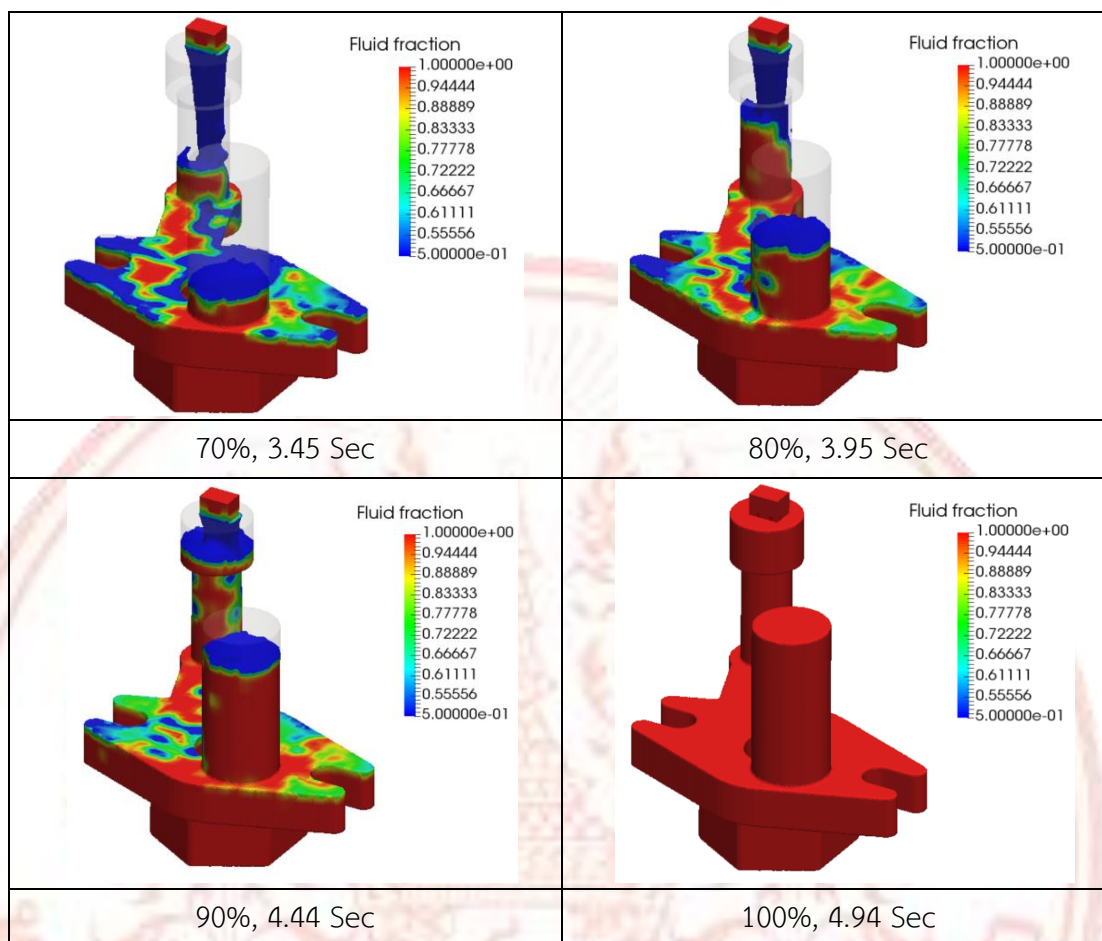
4.8.2.2 การจำลองการปรับตำแหน่งรูล้น

4.8.2.2.1 ทดสอบปรับตำแหน่งรูล้นห่างจากจุดศูนย์กลาง 20 มิลลิเมตร



ภาพที่ 4-74 แสดงลักษณะการไหลของโลหะเหลวของชิ้นงานทดสอบปรับตำแหน่งรูล้นห่างจากจุด

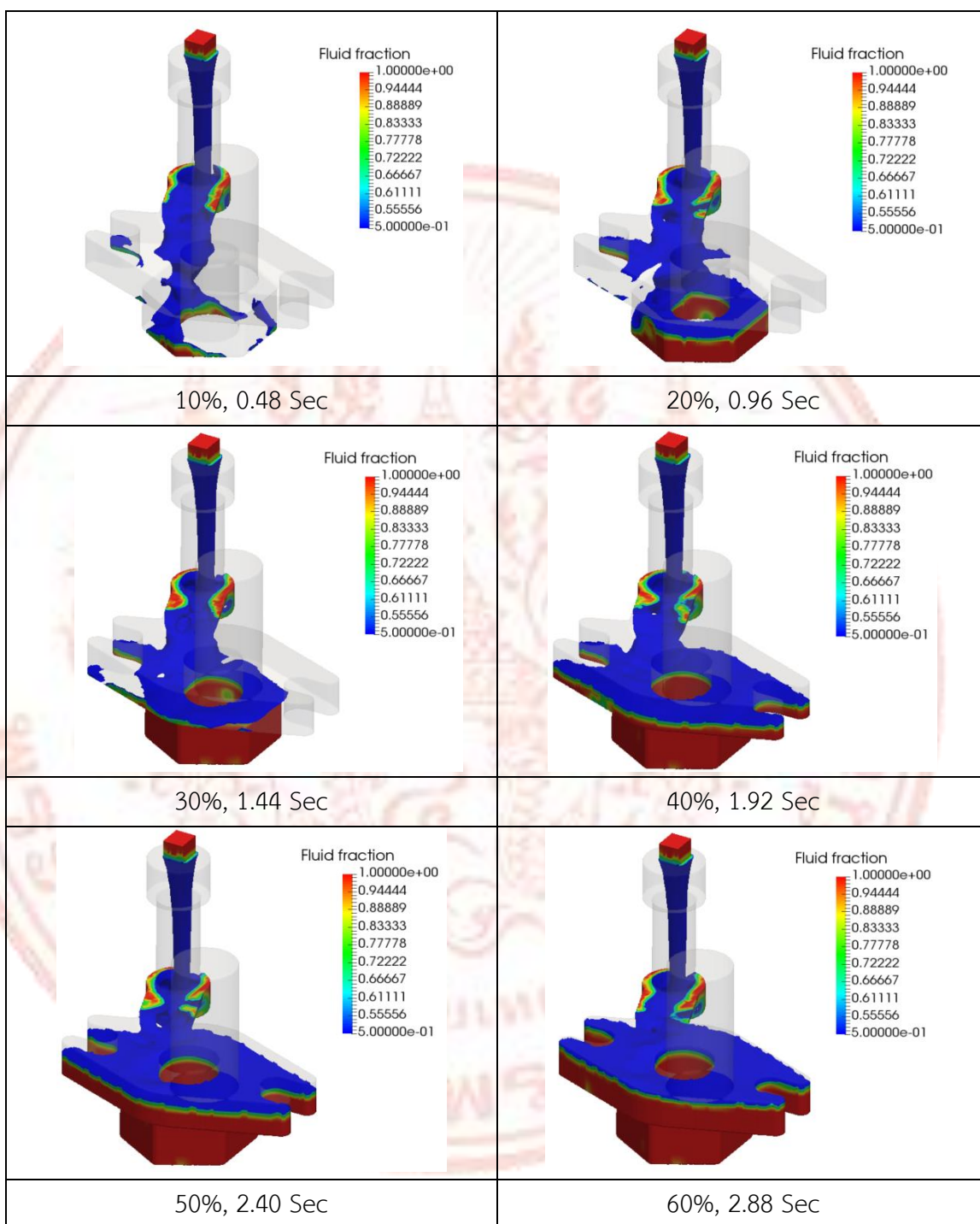
ศูนย์กลาง 20 มิลลิเมตร



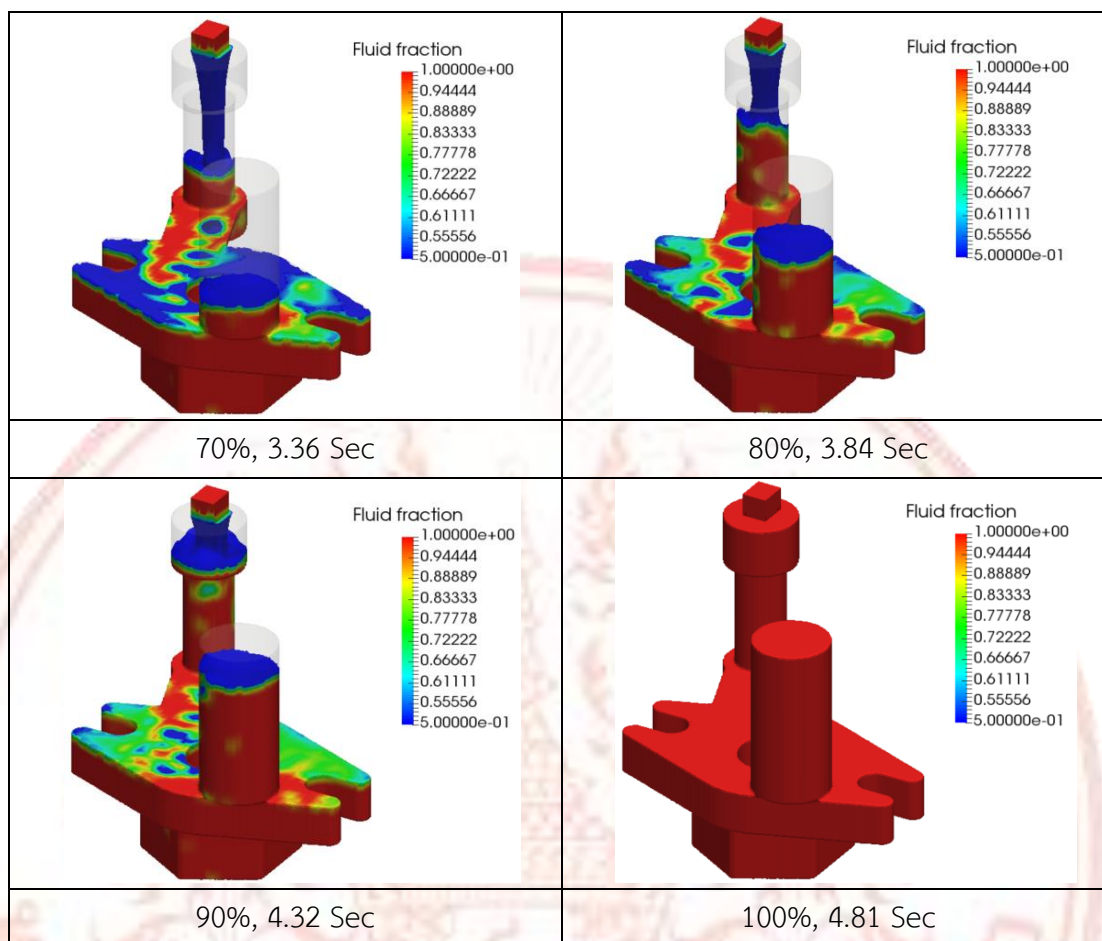
ภาพที่ 4-75 (ต่อ) แสดงลักษณะการไหลของโลหะเหลวของชิ้นงานทดสอบปรับตำแหน่งรูล้นห่างจากจุดศูนย์กลาง 20 มิลลิเมตร

การไหลของน้ำโลหะเหลวสำหรับชิ้นงานทดสอบปรับตำแหน่งรูล้นห่างจากจุดศูนย์กลาง 20 มิลลิเมตร ใช้เวลาในการเติมเต็มทั้งหมด 4.94 วินาที โดยน้ำโลหะเหลวเติมเต็มบริเวณจุดศูนย์กลางของชิ้นงานก่อน มีลักษณะการไหลแบบวนวนเพิ่มนาฬิกาขึ้นตามความสูงของชิ้นงาน เมื่อน้ำโลหะเริ่มเติมเต็มรูล้น การไหลของน้ำโลหะเหลวจะมีความปั่นป่วนบริเวณรอบ ๆ รูล้น ก่อนที่สุดท้ายจะเติมเต็มในที่สุด

4.8.2.2 ทดสอบปรับตำแหน่งรูล้นห่างจากจุดศูนย์กลาง 30 มิลลิเมตร



ภาพที่ 4-76 แสดงลักษณะการไหลของโลหะเหลวของชิ้นงานทดสอบปรับตำแหน่งรูล้นห่างจากจุดศูนย์กลาง 30 มิลลิเมตร



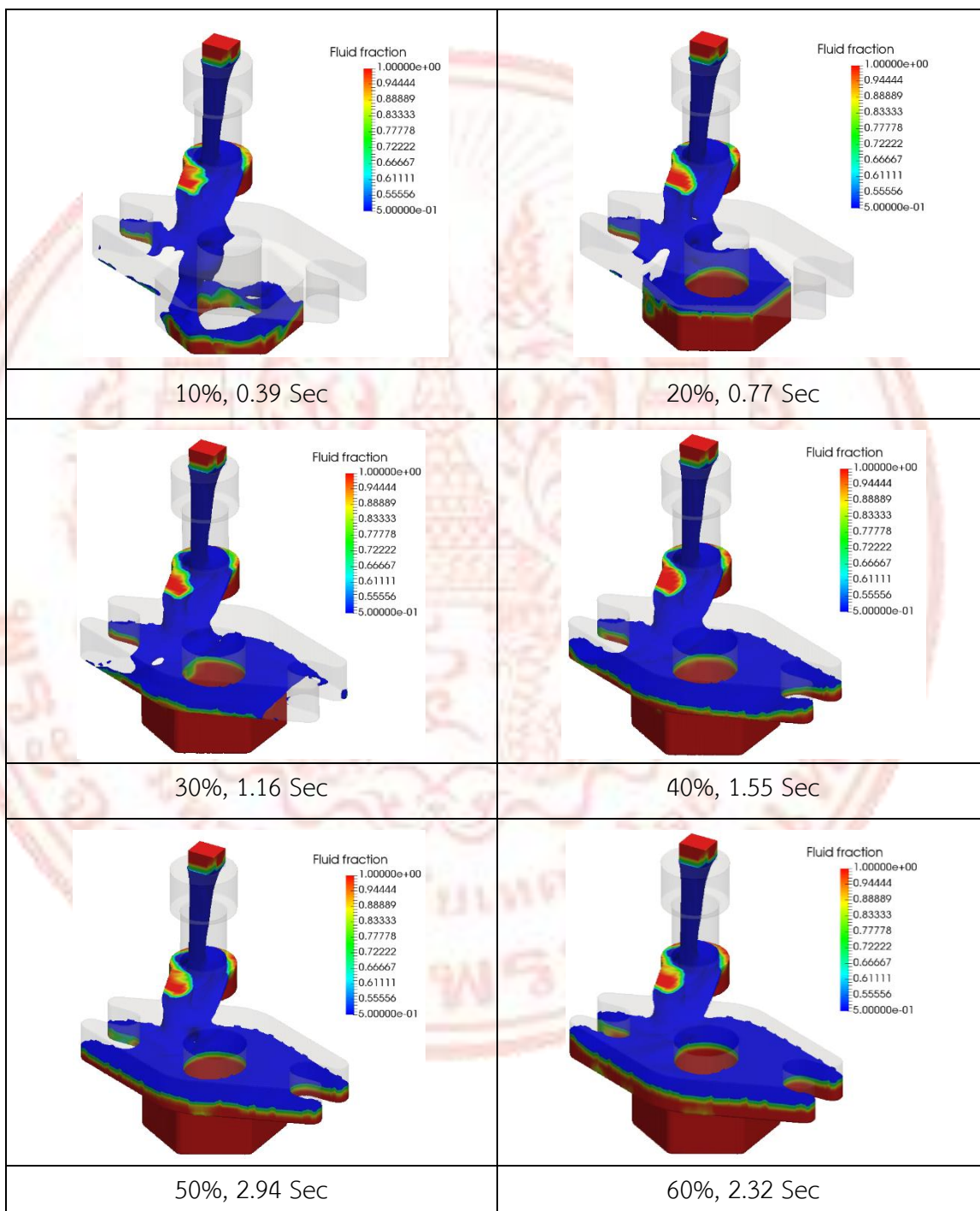
ภาพที่ 4-77 (ต่อ) แสดงลักษณะการไหลของโลหะเหลวของชิ้นงานทดสอบปรับตำแหน่งรูล้นห่างจากจุดศูนย์กลาง 30 มิลลิเมตร

การไหลของน้ำโลหะเหลวสำหรับชิ้นงานทดสอบปรับตำแหน่งรูล้นห่างจากจุดศูนย์กลาง 30 มิลลิเมตร ใช้เวลาในการเติมเต็มทั้งหมด 4.81 วินาที โดยน้ำโลหะเหลวเติมเต็มบริเวณจุดศูนย์กลางของชิ้นงานก่อน มีลักษณะการไหลแบบวนวนเพิ่มนาฬิกาขึ้นตามความสูงของชิ้นงาน เมื่อน้ำโลหะเริ่มเติมเต็มรูล้น การไหลของน้ำโลหะเหลวจะมีความปั่นป่วนบริเวณรอบ ๆ รูล้น ก่อนที่สุดท้ายจะเติมเต็มในที่สุด

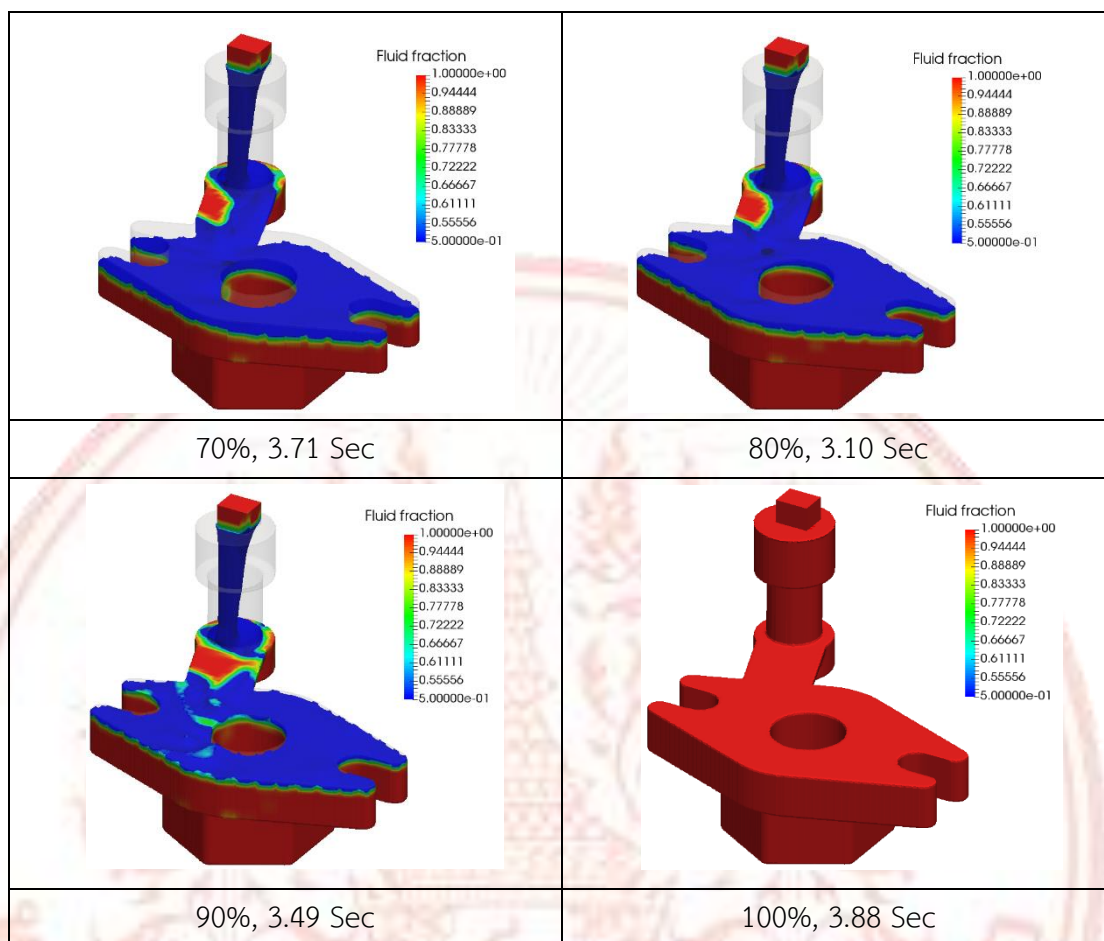
4.8.2.3 การลดขนาดหีบبنที่ใช้ในการเทหล่อแบบไม่มีรูสัน และมีรูสัน

4.8.2.3.1 ทดสอบการลดขนาดหีบبنที่ใช้ในการเทหล่อแบบไม่มีรูสันสูง

50 มิลลิเมตร



ภาพที่ 4-78 แสดงลักษณะการไหลของโลหะเหลวของชิ้นงานทดสอบการลดขนาดหีบبنที่ใช้ในการเทหล่อแบบไม่มีรูสันสูง 50 มิลลิเมตร

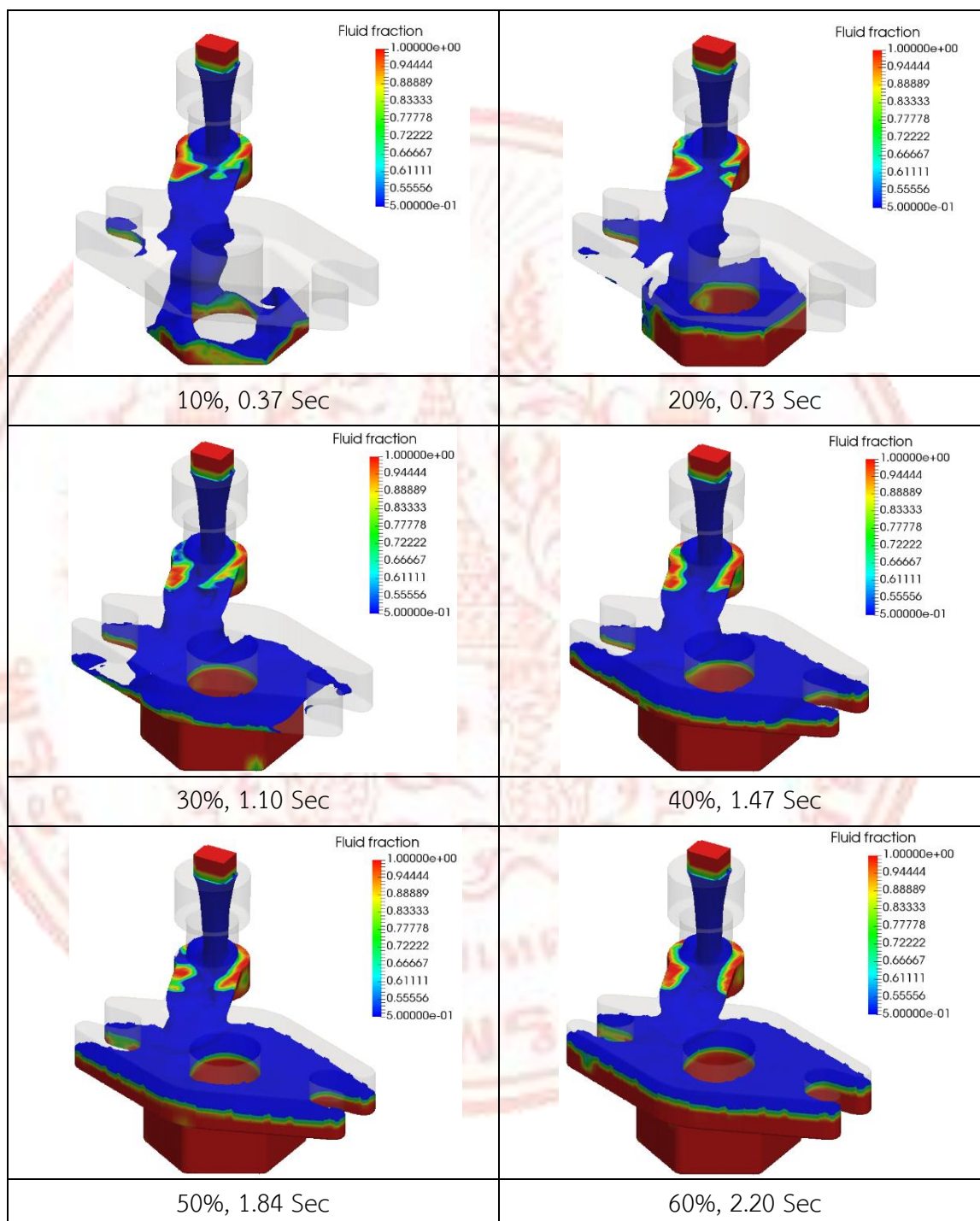


ภาพที่ 4-79 (ต่อ) แสดงลักษณะการไหลของโลหะเหลวของชิ้นงานทดสอบการลดขนาดที่บบนที่ใช้ในการเทหล่อแบบไม่มีรูล้นสูง 50 มิลลิเมตร

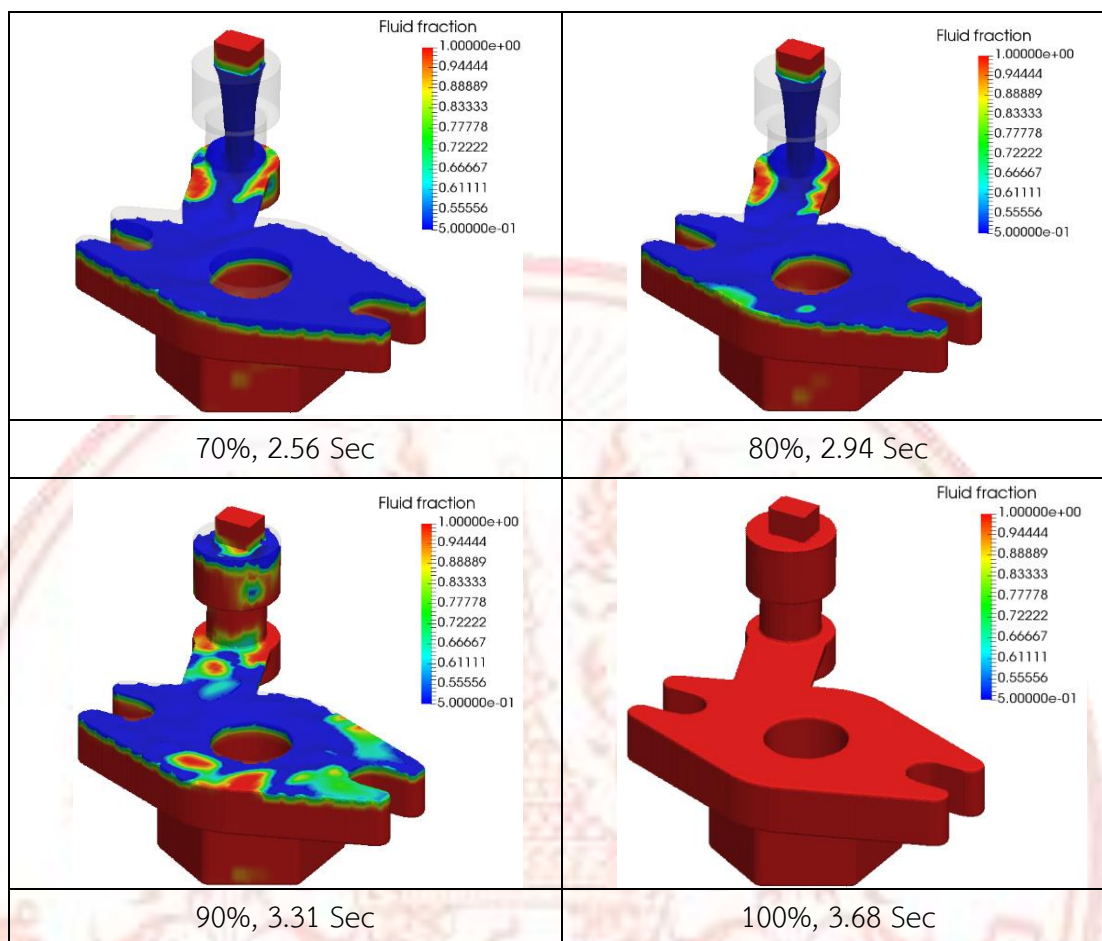
การไหลของน้ำโลหะเหลวสำหรับชิ้นงานทดสอบการลดขนาดที่บบนที่ใช้ในการเทหล่อแบบไม่มีรูล้นสูง 50 มิลลิเมตร ใช้เวลาในการเติมเต็มทั้งหมด 3.88 วินาที โดยน้ำโลหะเหลวเติมเต็มบริเวณจุดศูนย์กลางของชิ้นงานก่อน มีลักษณะการไหลแบบวนทวนเข็มนาฬิกาขึ้นตามความสูงของชิ้นงาน เมื่อน้ำโลหะเริ่มเติมเต็มรูล้น การไหลของน้ำโลหะเหลวจะมีความปั่นป่วนบริเวณรอบ ๆ รูล้น ก่อนที่สุดท้ายจะเติมเต็มในที่สุด

4.8.2.3.2 ทดสอบการลดขนาดหีบبنที่ใช้ในการเทหล่อแบบไม่มีรูล้นสูง

40 มิลลิเมตร



ภาพที่ 4-80 แสดงลักษณะการไหลของโลหะเหลวของชิ้นงานทดสอบการลดขนาดหีบبنที่ใช้ในการเทหล่อแบบไม่มีรูล้นสูง 40 มิลลิเมตร

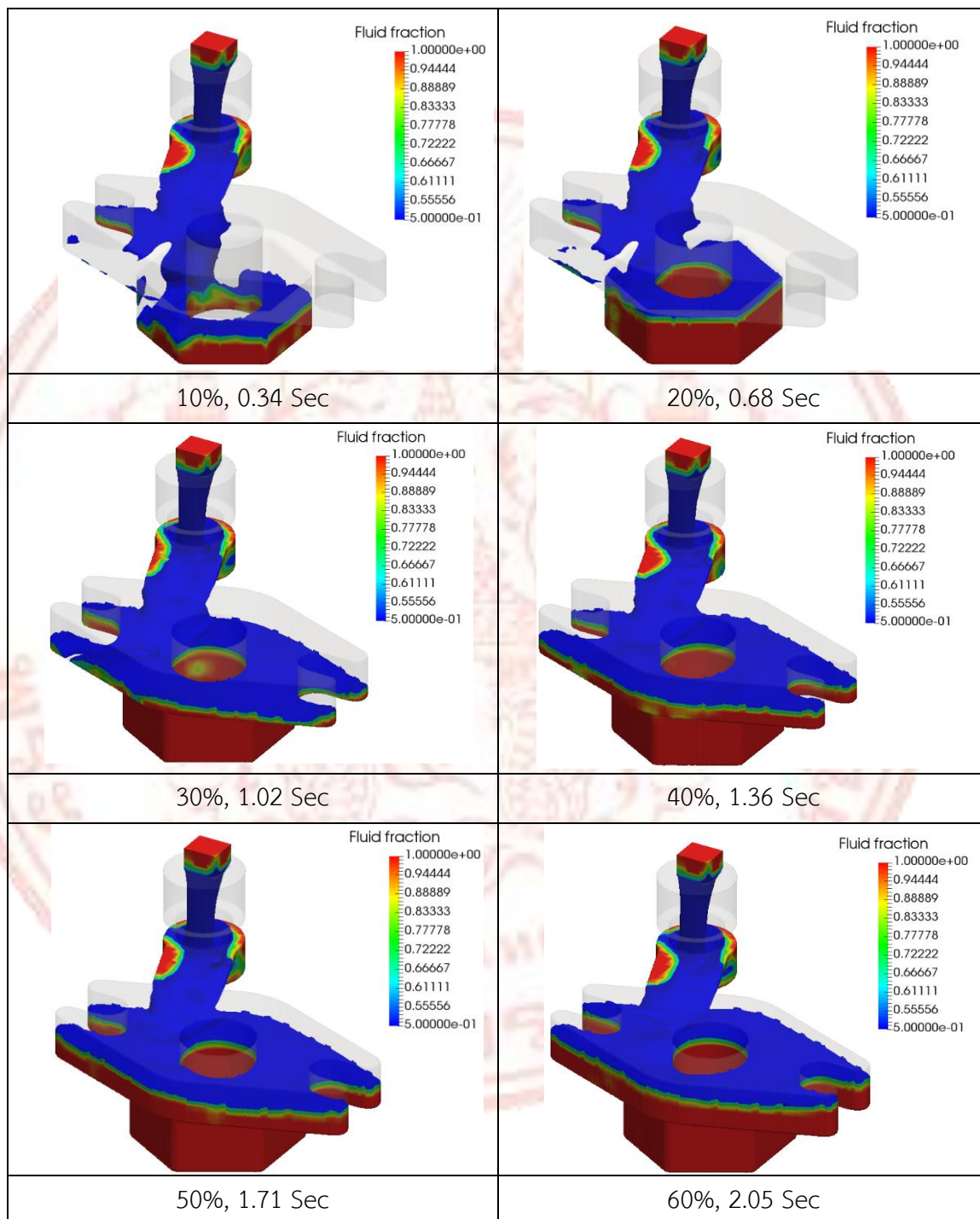


ภาพที่ 4-81 (ต่อ) แสดงลักษณะการไหลของโลหะเหลวของชิ้นงานทดสอบการลดขนาดที่บับนที่ใช้ในการเทหล่อแบบไม่มีรูล้นสูง 40 มิลลิเมตร

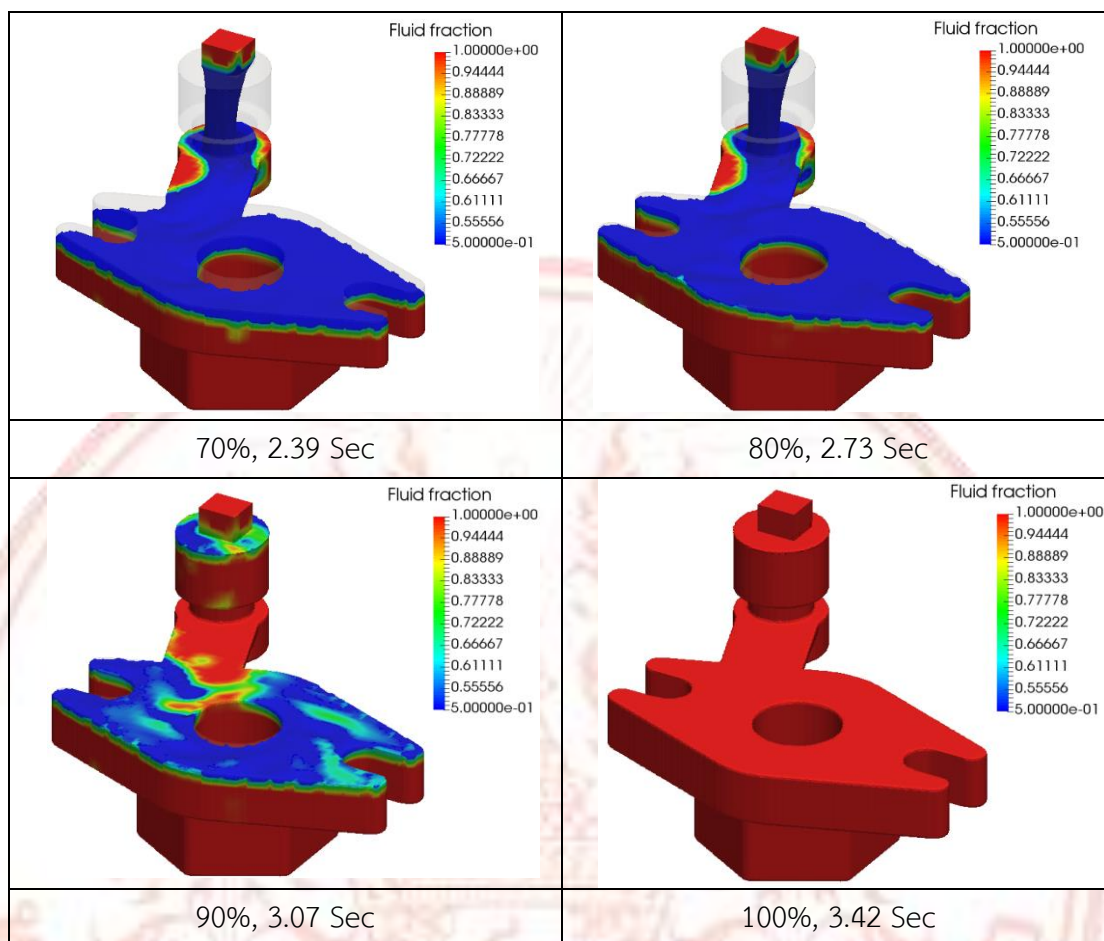
การไหลของน้ำโลหะเหลวสำหรับชิ้นงานทดสอบการลดขนาดที่บับนที่ใช้ในการเทหล่อแบบไม่มีรูล้นสูง 40 มิลลิเมตร ใช้เวลาในการเติมเต็มทั้งหมด 3.68 วินาที โดยน้ำโลหะเหลวเติมเต็มบริเวณจุดศูนย์กลางของชิ้นงานก่อน มีลักษณะการไหลแบบวนทวนเข็มนาฬิกาขึ้นตามความสูงของชิ้นงาน เมื่อน้ำโลหะเริ่มเติมเต็มรูล้น การไหลของน้ำโลหะเหลวจะมีความปั่นป่วนบริเวณรอบ ๆ รูล้น ก่อนที่สุดท้ายจะเติมเต็มในที่สุด

4.8.2.3.3 ทดสอบการลดขนาดหีบبنที่ใช้ในการเทหล่อแบบไม่มีรูล้นสูง

30 มิลลิเมตร



ภาพที่ 4-82 แสดงลักษณะการไหลของโลหะเหลวของชิ้นงานทดสอบการลดขนาดหีบبنที่ใช้ในการเทหล่อแบบไม่มีรูล้นสูง 30 มิลลิเมตร

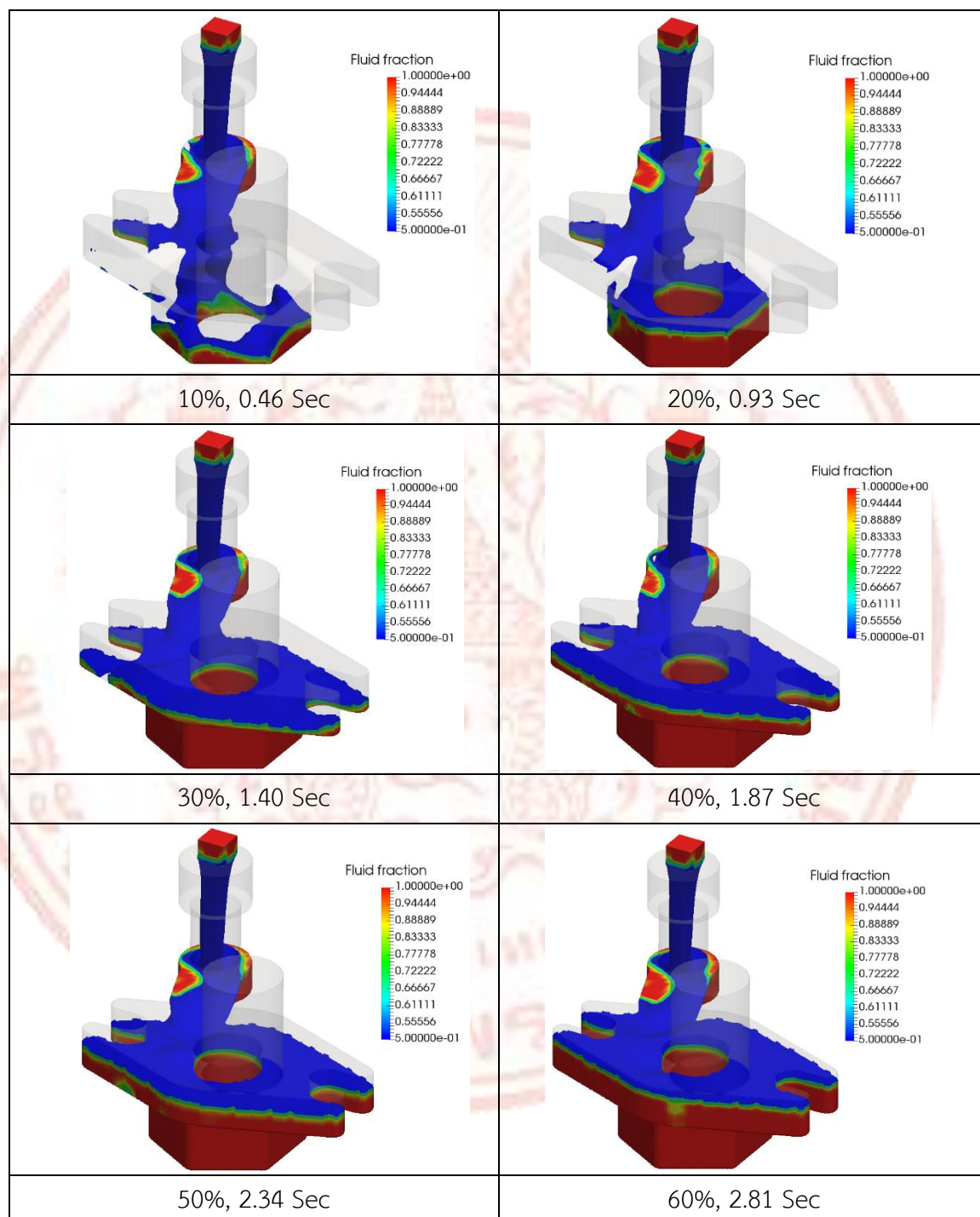


ภาพที่ 4-83 (ต่อ) แสดงลักษณะการไหลของโลหะเหลวของชิ้นงานทดสอบการลดขนาดที่บับนที่ใช้ในการเทหล่อแบบไม่มีรูล้นสูง 30 มิลลิเมตร

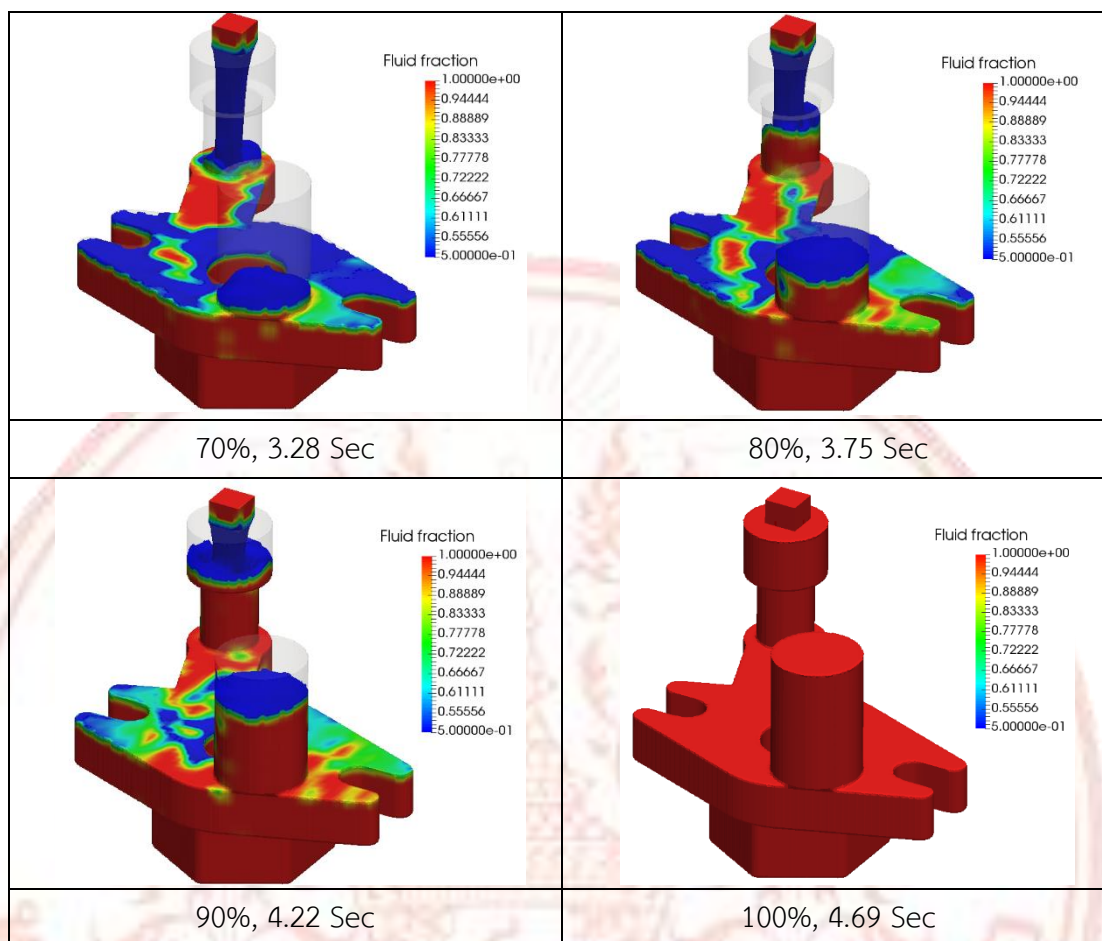
การไหลของน้ำโลหะเหลวสำหรับชิ้นงานทดสอบการลดขนาดที่บับนที่ใช้ในการเทหล่อแบบไม่มีรูล้นสูง 30 มิลลิเมตร ใช้เวลาในการเติมเต็มทั้งหมด 3.42 วินาที โดยน้ำโลหะเหลวเติมเต็มบริเวณจุดศูนย์กลางของชิ้นงานก่อน มีลักษณะการไหลแบบวนทวนเข็มนาฬิกาขึ้นตามความสูงของชิ้นงาน เมื่อน้ำโลหะเริ่มเติมเต็มรูล้น การไหลของน้ำโลหะเหลวจะมีความปั่นป่วนบริเวณรอบ ๆ รูล้น ก่อนที่สุดท้ายจะเติมเต็มในที่สุด

4.8.2.3.4 ทดสอบการลดขนาดหีบبنที่ใช้ในการเทหล่อแบบปรับรู้นสูง

50 มิลลิเมตร



ภาพที่ 4-84 แสดงลักษณะการไหลของโลหะเหลวของชิ้นงานทดสอบการลดขนาดหีบبنที่ใช้ในการเทหล่อแบบปรับรู้นสูง 50 มิลลิเมตร

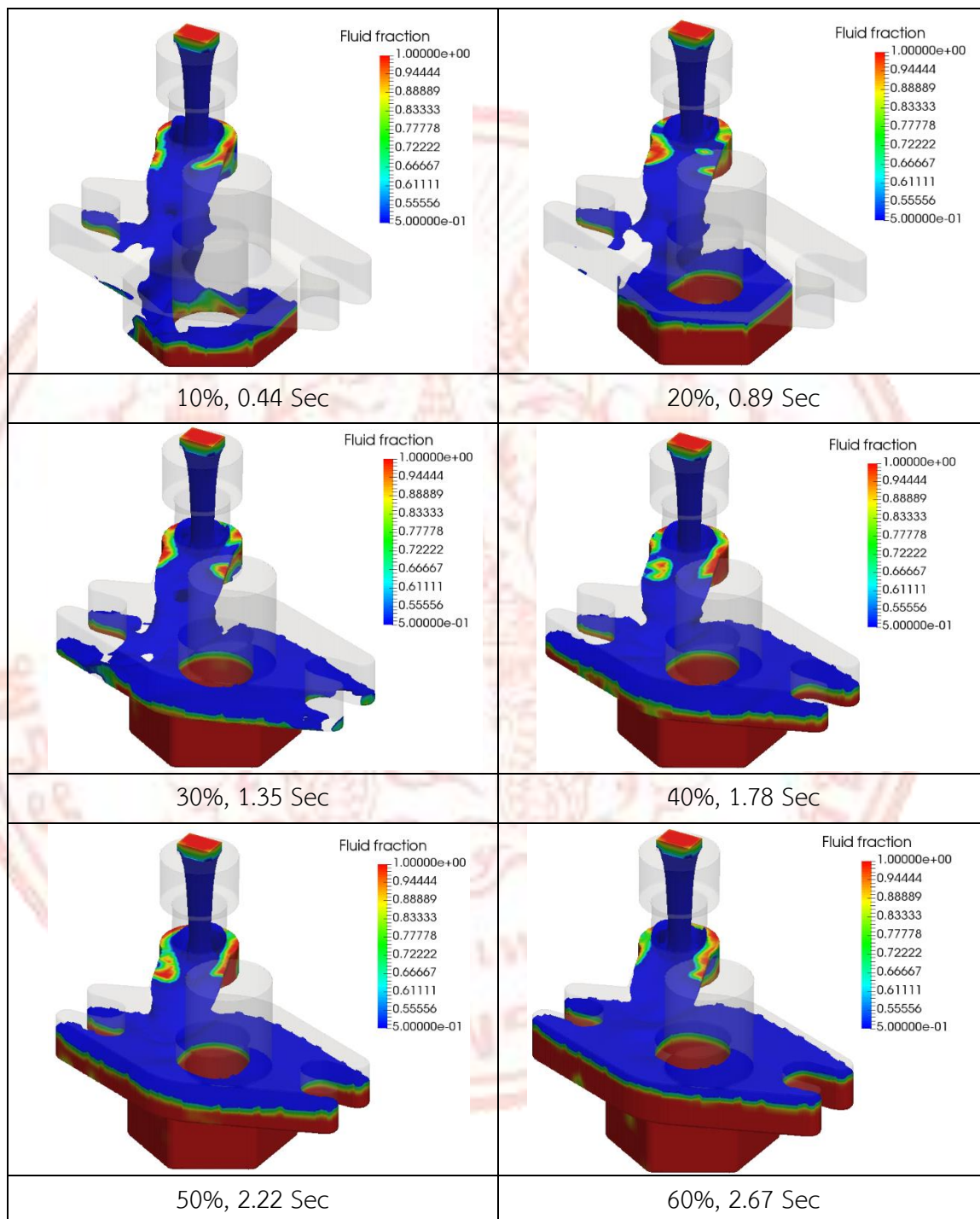


ภาพที่ 4-85 (ต่อ) แสดงลักษณะการไหลของโลหะเหลวของชิ้นงานทดสอบการลดขนาดที่บนที่ใช้ในการเทหล่อแบบปรับรู้นสูง 50 มิลลิเมตร

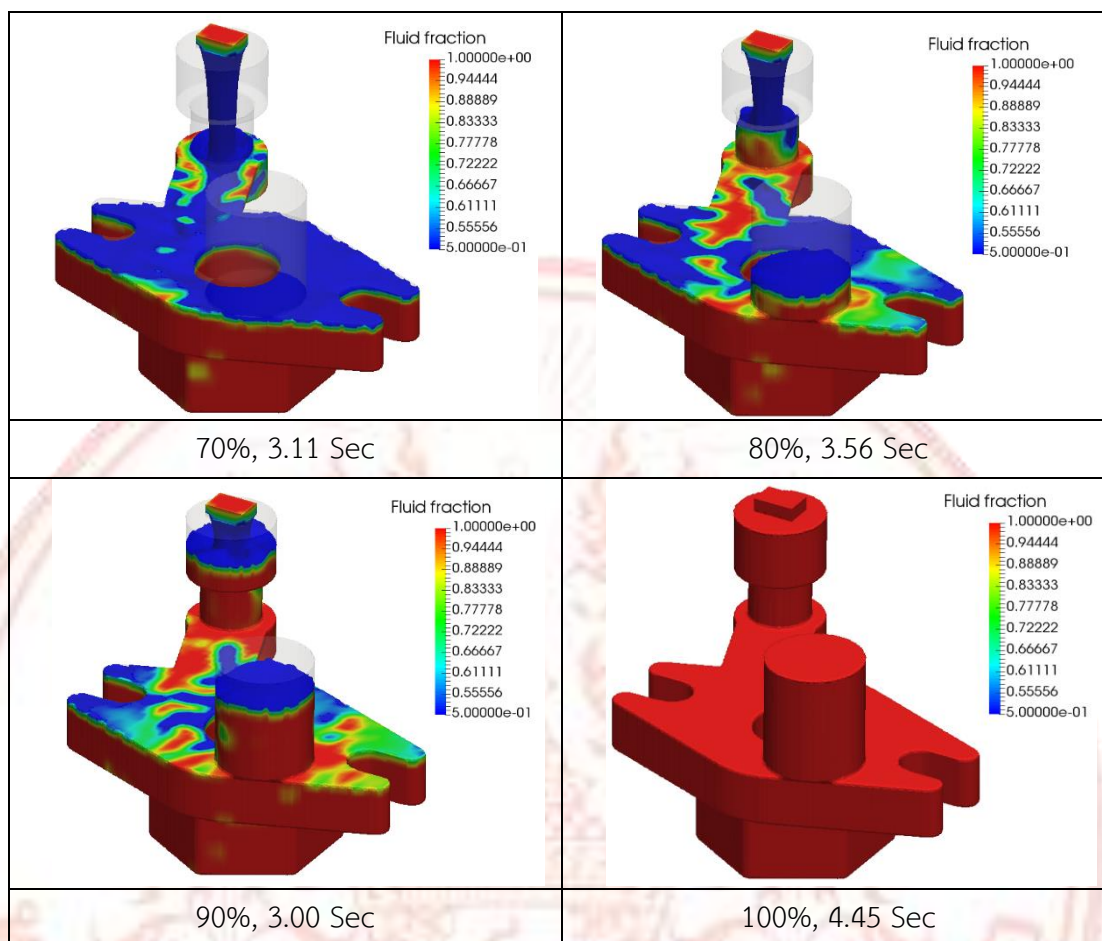
การไหลของน้ำโลหะเหลวสำหรับชิ้นงานทดสอบการลดขนาดที่บนที่ใช้ในการเทหล่อแบบปรับรู้นสูง 50 มิลลิเมตรใช้เวลาในการเติมเต็มทั้งหมด 4.69 วินาที โดยน้ำโลหะเหลวเติมเต็มบริเวณจุดศูนย์กลางของชิ้นงานก่อน มีลักษณะการไหลแบบวนทวนเข็มนาฬิกาขึ้นตามความสูงของชิ้นงานเมื่อน้ำโลหะเริ่มเติมเต็มรู้น การไหลของน้ำโลหะเหลวจะมีความปั่นป่วนบริเวณรอบ ๆ รู้น ก่อนที่สุดท้ายจะเติมเต็มในที่สุด

4.8.2.3.5 ทดสอบการลดขนาดหีบبنที่ใช้ในการเทหล่อแบบปรับรู้นสูง

40 มิลลิเมตร



ภาพที่ 4-86 แสดงลักษณะการไหลของโลหะเหลวของชิ้นงานทดสอบการลดขนาดหีบبنที่ใช้ในการเทหล่อแบบปรับรู้นสูง 40 มิลลิเมตร

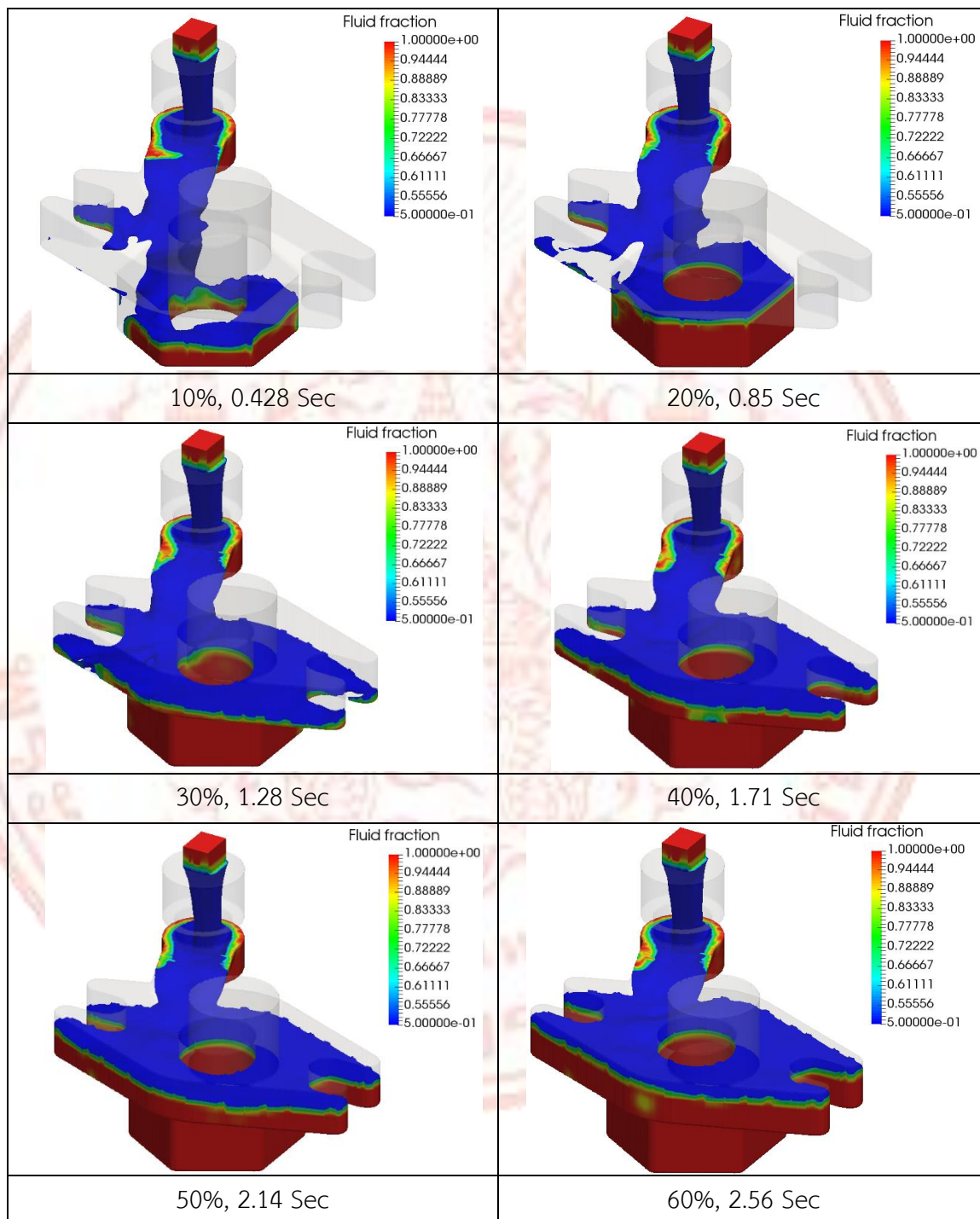


ภาพที่ 4-87 (ต่อ) แสดงลักษณะการไหลของโลหะเหลวของชิ้นงานทดสอบการลดขนาดที่บบนที่ใช้ในการเทหล่อแบบปรับรู้นสูง 40 มิลลิเมตร

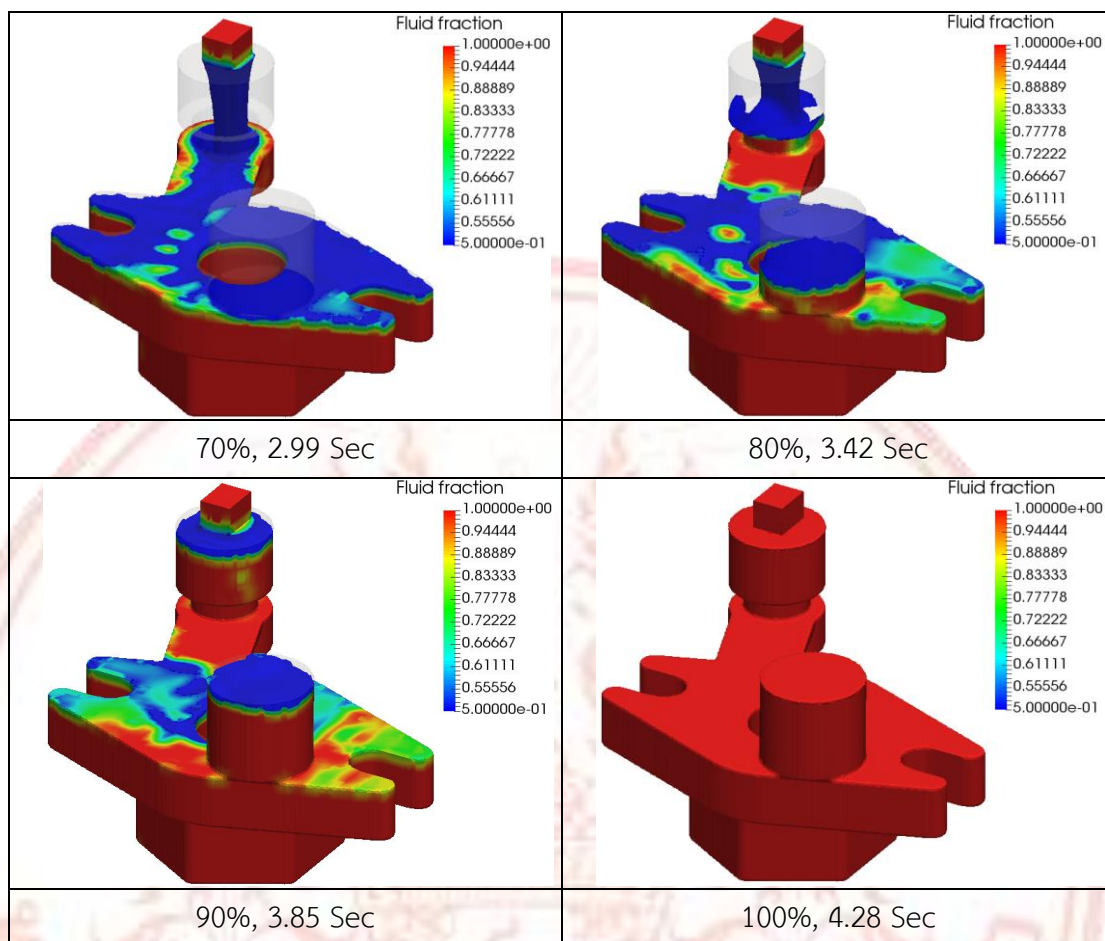
การไหลของน้ำโลหะเหลวสำหรับชิ้นงานทดสอบการลดขนาดที่บบนที่ใช้ในการเทหล่อแบบปรับรู้นสูง 40 มิลลิเมตรใช้เวลาในการเติมเต็มทั้งหมด 4.45 วินาที โดยน้ำโลหะเหลวเติมเต็มบริเวณจุดศูนย์กลางของชิ้นงานก่อน มีลักษณะการไหลแบบวนทวนเข็มนาฬิกาขึ้นตามความสูงของชิ้นงาน เมื่อน้ำโลหะเริ่มเติมเต็มรู้น การไหลของน้ำโลหะเหลวจะมีความปั่นป่วนบริเวณรอบ ๆ รู้น ก่อนที่สุดท้ายจะเติมเต็มในที่สุด

4.8.2.3.6 ทดสอบการลดขนาดหีบبنที่ใช้ในการเทหล่อแบบปรับรู้นสูง

30 มิลลิเมตร



ภาพที่ 4-88 แสดงลักษณะการไหลของโลหะเหลวของชิ้นงานทดสอบการลดขนาดหีบبنที่ใช้ในการเทหล่อแบบปรับรู้นสูง 30 มิลลิเมตร

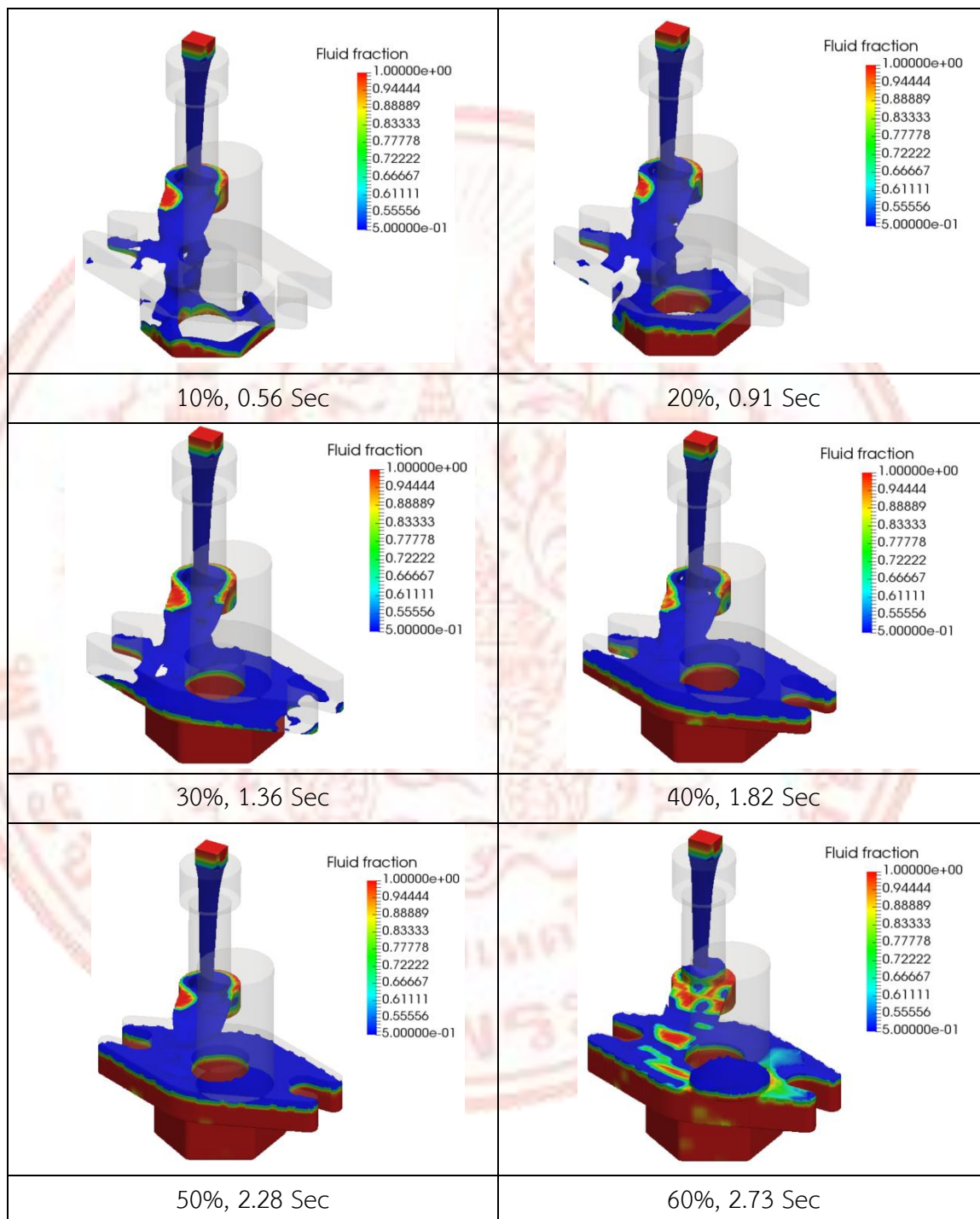


ภาพที่ 4-89 (ต่อ) แสดงลักษณะการไหลของโลหะเหลวของชิ้นงานทดสอบการลดขนาดที่บับนที่ใช้ในการเทหล่อแบบปรับรู้นสูง 30 มิลลิเมตร

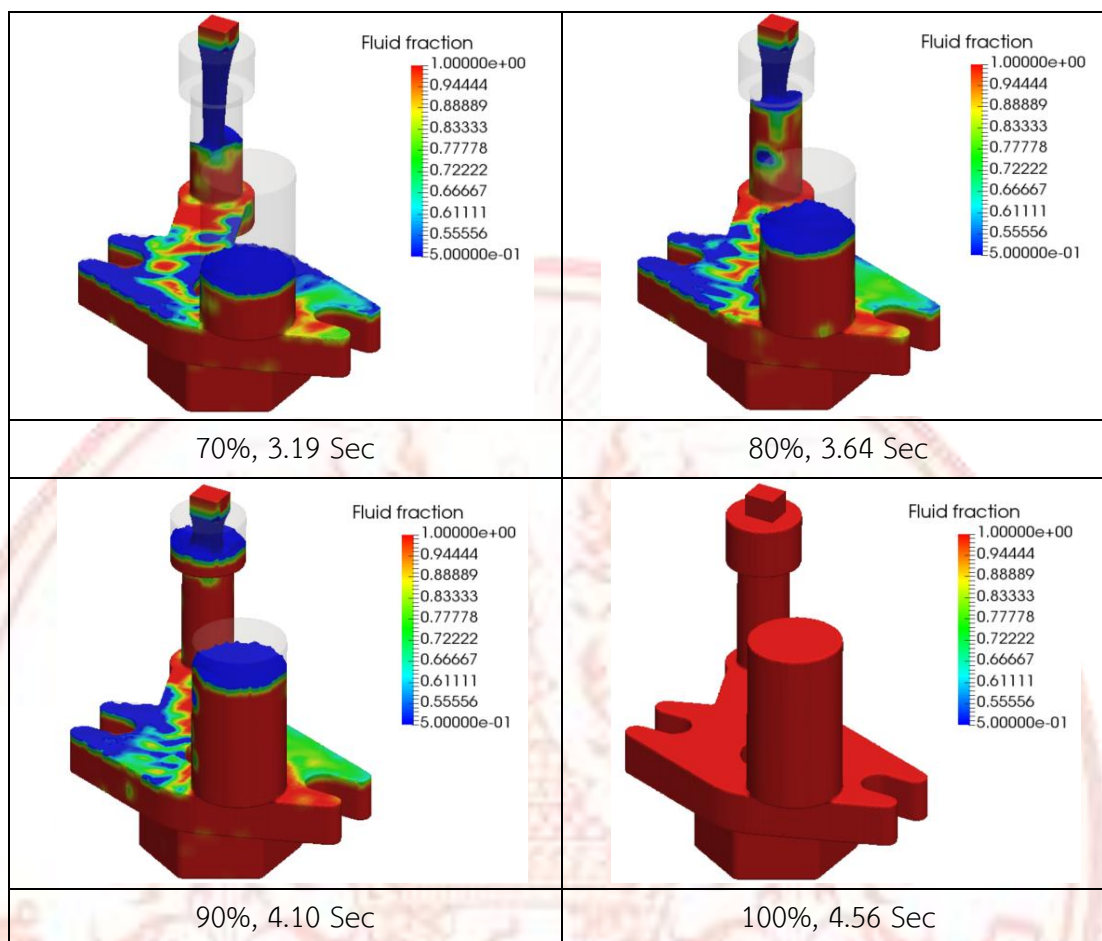
การไหลของน้ำโลหะเหลวสำหรับชิ้นงานทดสอบการลดขนาดที่บับนที่ใช้ในการเทหล่อแบบปรับรู้นสูง 30 มิลลิเมตรใช้เวลาในการเต็มเต็มทั้งหมด 4.28 วินาที โดยน้ำโลหะเหลวเต็มเต็มบริเวณจุดศูนย์กลางของชิ้นงานก่อน มีลักษณะการไหลแบบวนทวนเข็มนาฬิกาขึ้นตามความสูงของชิ้นงานเมื่อน้ำโลหะเริ่มเต็มเต็มรู้น การไหลของน้ำโลหะเหลวจะมีความปั่นป่วนบริเวณรอบ ๆ รู้น ก่อนที่สุดท้ายจะเต็มเต็มในที่สุด

4.8.2.3.7 ทดสอบการลดขนาดหีบبنที่ใช้ในการเทหล่อแบบไม่ปรับรู้นสูง

50 มิลลิเมตร



ภาพที่ 4-90 แสดงลักษณะการไหลของโลหะเหลวของชิ้นงานทดสอบการลดขนาดหีบبنที่ใช้ในการเทหล่อแบบไม่ปรับรู้นสูง 50 มิลลิเมตร

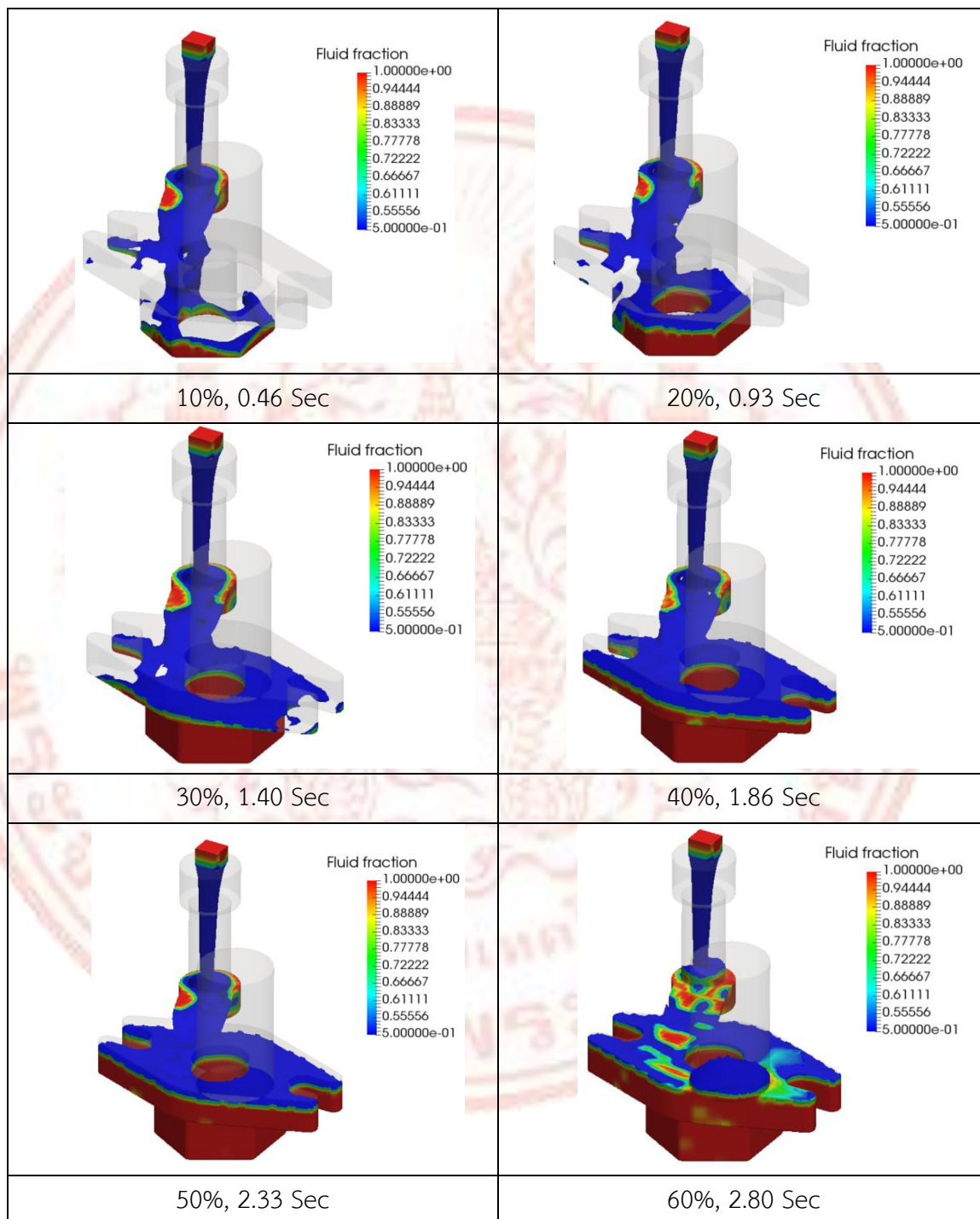


ภาพที่ 4-91 (ต่อ) แสดงลักษณะการไหลของโลหะเหลวของชิ้นงานทดสอบการลดขนาดที่บับนที่ใช้ในการเทหล่อแบบไม่ปรับรู้นสูง 50 มิลลิเมตร

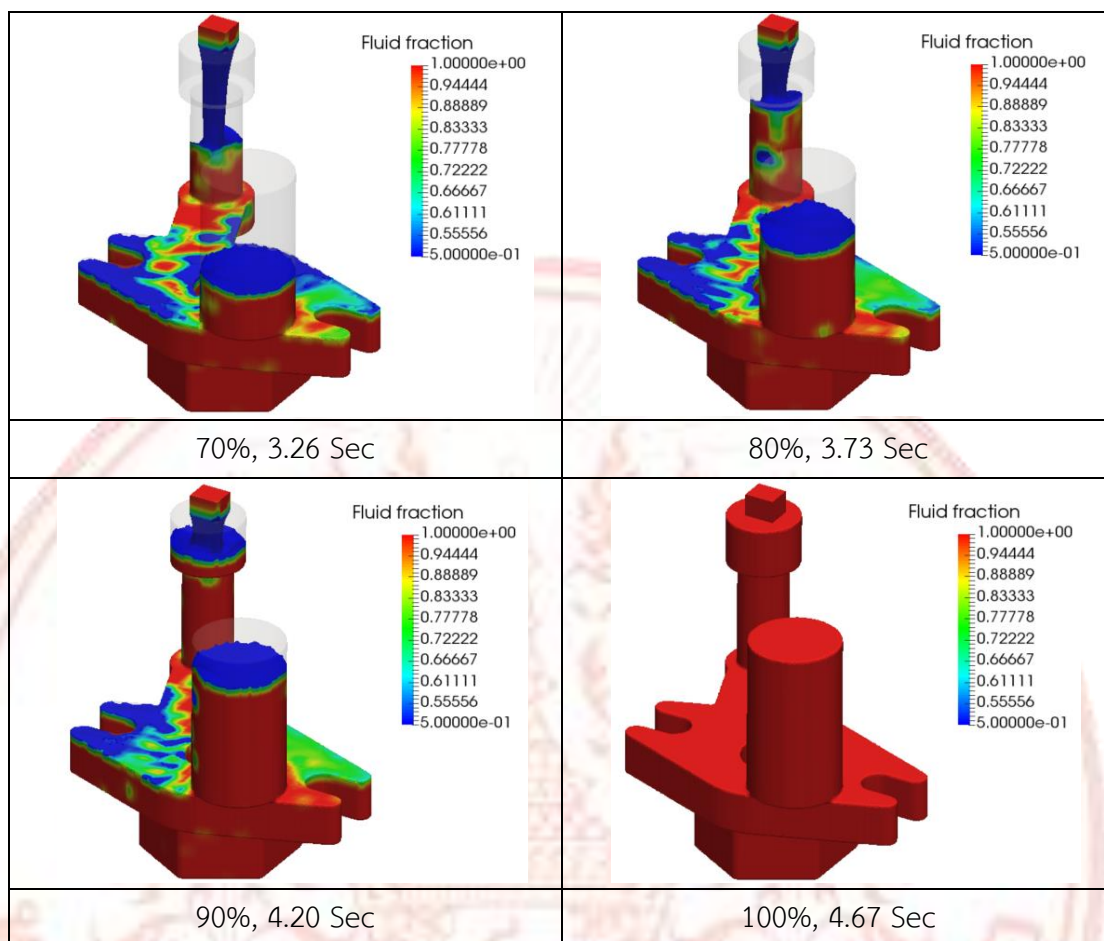
การไหลของน้ำโลหะเหลวสำหรับชิ้นงานทดสอบการลดขนาดที่บับนที่ใช้ในการเทหล่อแบบไม่ปรับรู้นสูง 50 มิลลิเมตรใช้เวลาในการเต็มเต็มทั้งหมด 4.56 วินาที โดยน้ำโลหะเหลวเต็มเต็มบริเวณจุดศูนย์กลางของชิ้นงานก่อน มีลักษณะการไหลแบบวนทวนเข็มนาฬิกาขึ้นตามความสูงของชิ้นงานเมื่อน้ำโลหะเริ่มเต็มเต็มรู้น การไหลของน้ำโลหะเหลวจะมีความปั่นป่วนบริเวณรอบ ๆ รู้น ก่อนที่สุดท้ายจะเต็มเต็มในที่สุด

4.8.2.3.8 ทดสอบการลดขนาดหีบبنที่ใช้ในการเทหล่อแบบไม่ปรับรู้นสูง

40 มิลลิเมตร



ภาพที่ 4-92 แสดงลักษณะการไหลของโลหะเหลวของชิ้นงานทดสอบการลดขนาดหีบبنที่ใช้ในการเทหล่อแบบไม่ปรับรู้นสูง 40 มิลลิเมตร

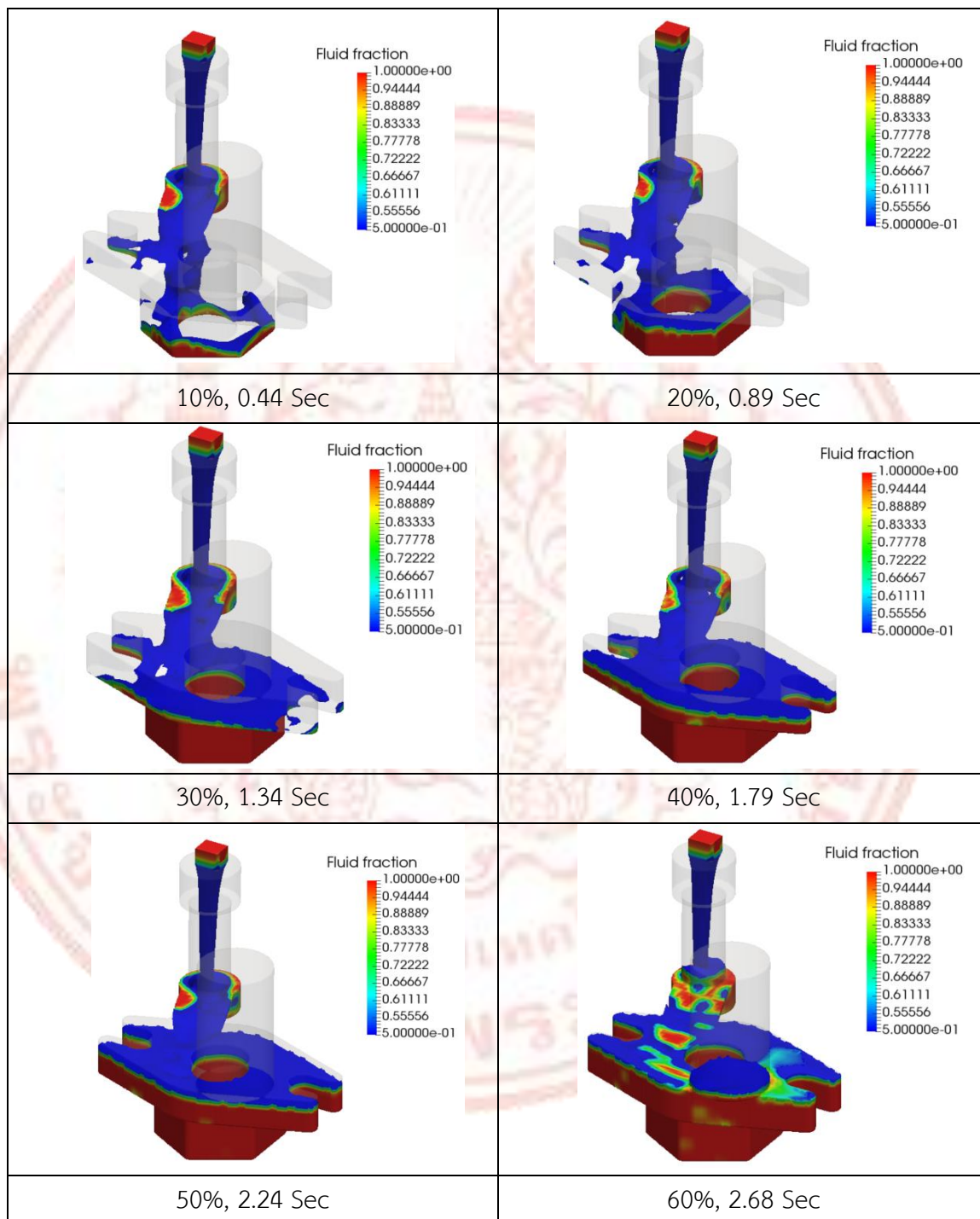


ภาพที่ 4-93 (ต่อ) แสดงลักษณะการไหลของโลหะเหลวของชิ้นงานทดสอบการลดขนาดที่บับนที่ใช้ในการเทหล่อแบบไม่ปรับรู้นสูง 40 มิลลิเมตร

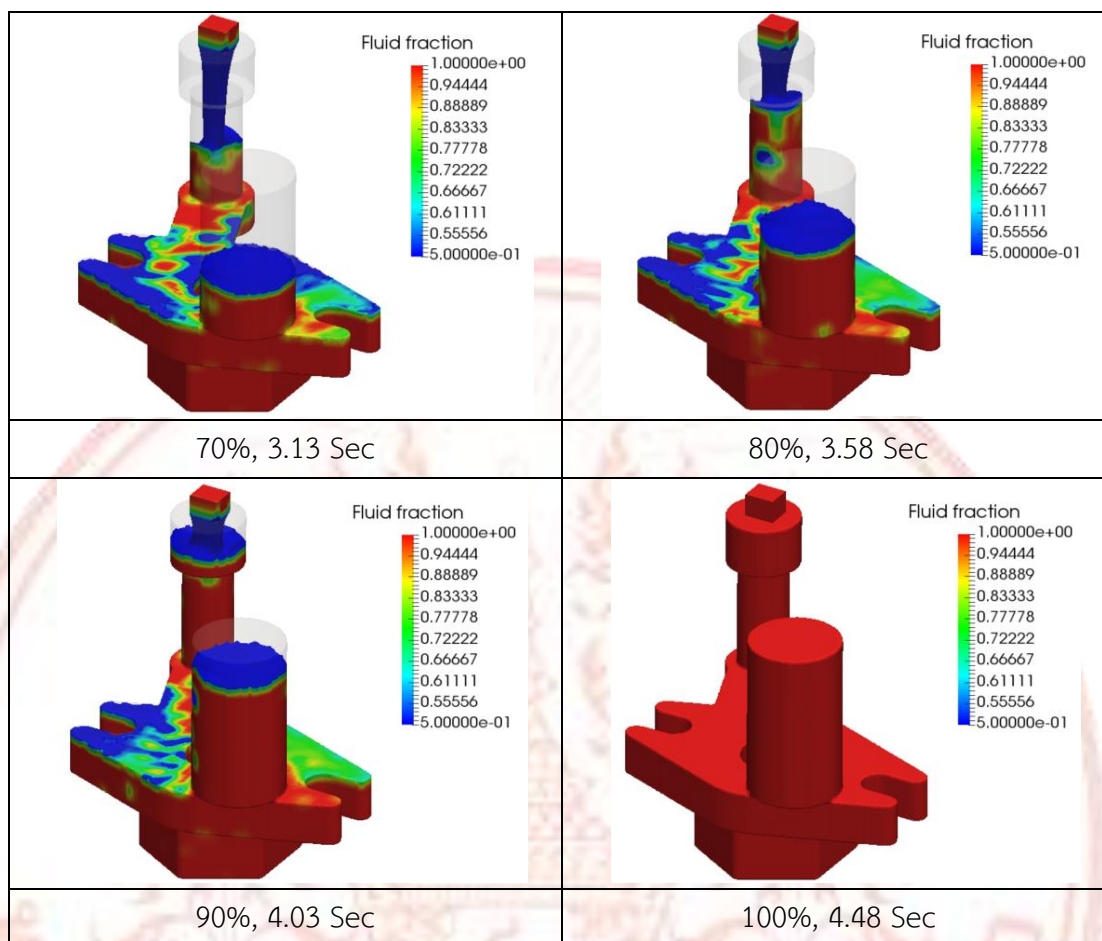
การไหลของน้ำโลหะเหลวสำหรับชิ้นงานทดสอบการลดขนาดที่บับนที่ใช้ในการเทหล่อแบบไม่ปรับรู้นสูง 40 มิลลิเมตรใช้เวลาในการเติมเต็มทั้งหมด 4.67 วินาที โดยน้ำโลหะเหลวเติมเต็มบริเวณจุดศูนย์กลางของชิ้นงานก่อน มีลักษณะการไหลแบบวนทวนเข็มนาฬิกาขึ้นตามความสูงของชิ้นงานเมื่อน้ำโลหะเริ่มเติมเต็มรู้น การไหลของน้ำโลหะเหลวจะมีความปั่นป่วนบริเวณรอบ ๆ รู้น ก่อนที่สุดท้ายจะเติมเต็มในที่สุด

4.8.2.3.9 ทดสอบการลดขนาดหีบبنที่ใช้ในการเทหล่อแบบไม่ปรับรู้นสูง

30 มิลลิเมตร



ภาพที่ 4-94 แสดงลักษณะการไหลของโลหะเหลวของชิ้นงานทดสอบการลดขนาดหีบبنที่ใช้ในการเทหล่อแบบไม่ปรับรู้นสูง 30 มิลลิเมตร



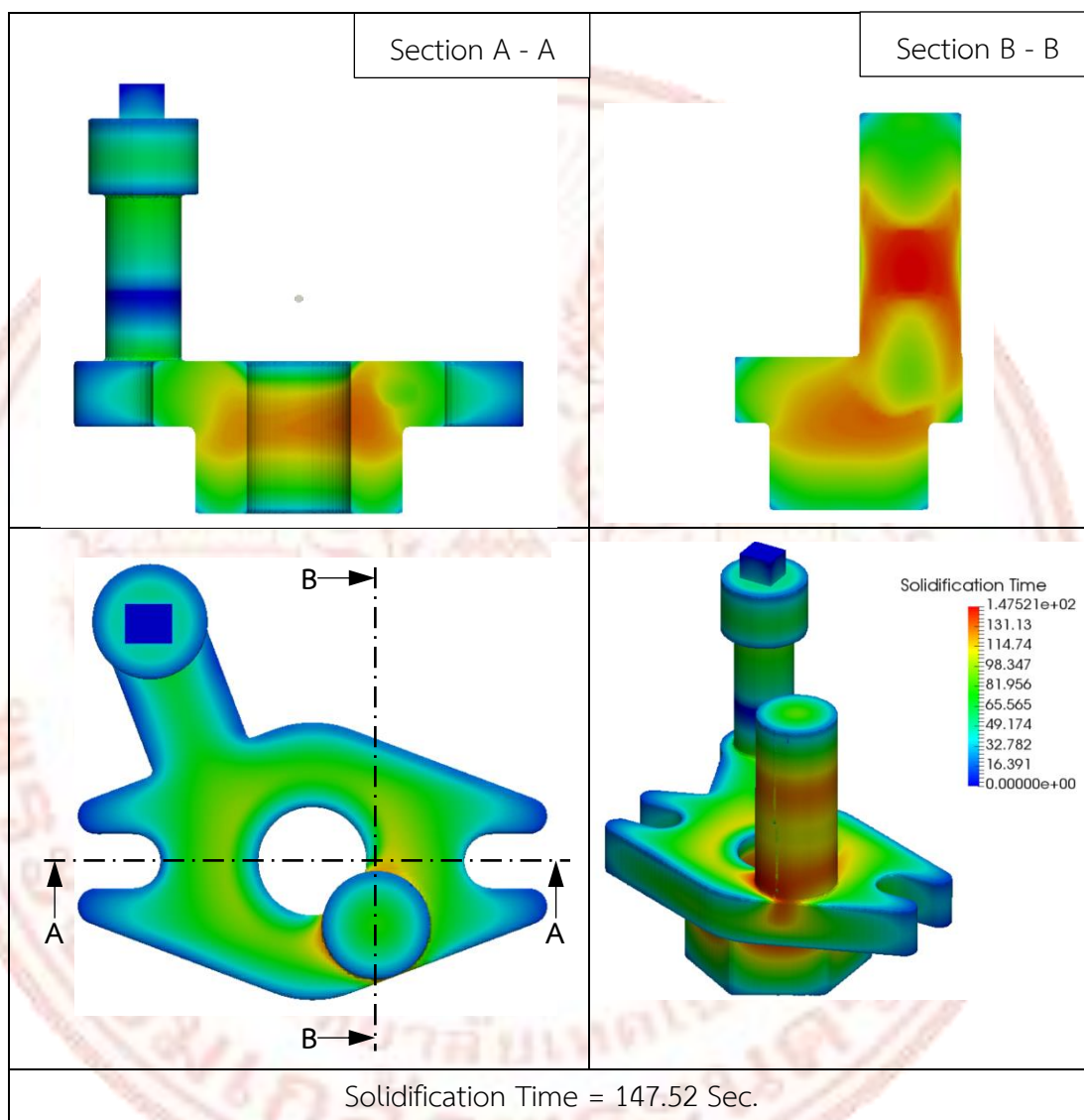
ภาพที่ 4-95 (ต่อ) แสดงลักษณะการไหลของโลหะเหลวของชิ้นงานทดสอบการลดขนาดที่บับนที่ใช้ในการเทหล่อแบบไม่ปรับรู้นสูง 30 มิลลิเมตร

การไหลของน้ำโลหะเหลวสำหรับชิ้นงานทดสอบการลดขนาดที่บับนที่ใช้ในการเทหล่อแบบไม่ปรับรู้นสูง 30 มิลลิเมตรใช้เวลาในการเต็มเต็มทั้งหมด 4.48 วินาที โดยน้ำโลหะเหลวเต็มเต็มบริเวณจุดศูนย์กลางของชิ้นงานก่อน มีลักษณะการไหลแบบวนทวนเข็มนาฬิกาขึ้นมาตามความสูงของชิ้นงานเมื่อน้ำโลหะเริ่มเต็มเต็มรู้น การไหลของน้ำโลหะเหลวจะมีความปั่นป่วนบริเวณรอบ ๆ รู้น ก่อนที่สุดท้ายจะเต็มเต็มในที่สุด

4.8.3 แสดงผลการจำลองเวลาในการแข็งตัวของโลหะ (Solidification Time)

4.8.3.1 การจำลองการปรับขนาดรูกลั่น

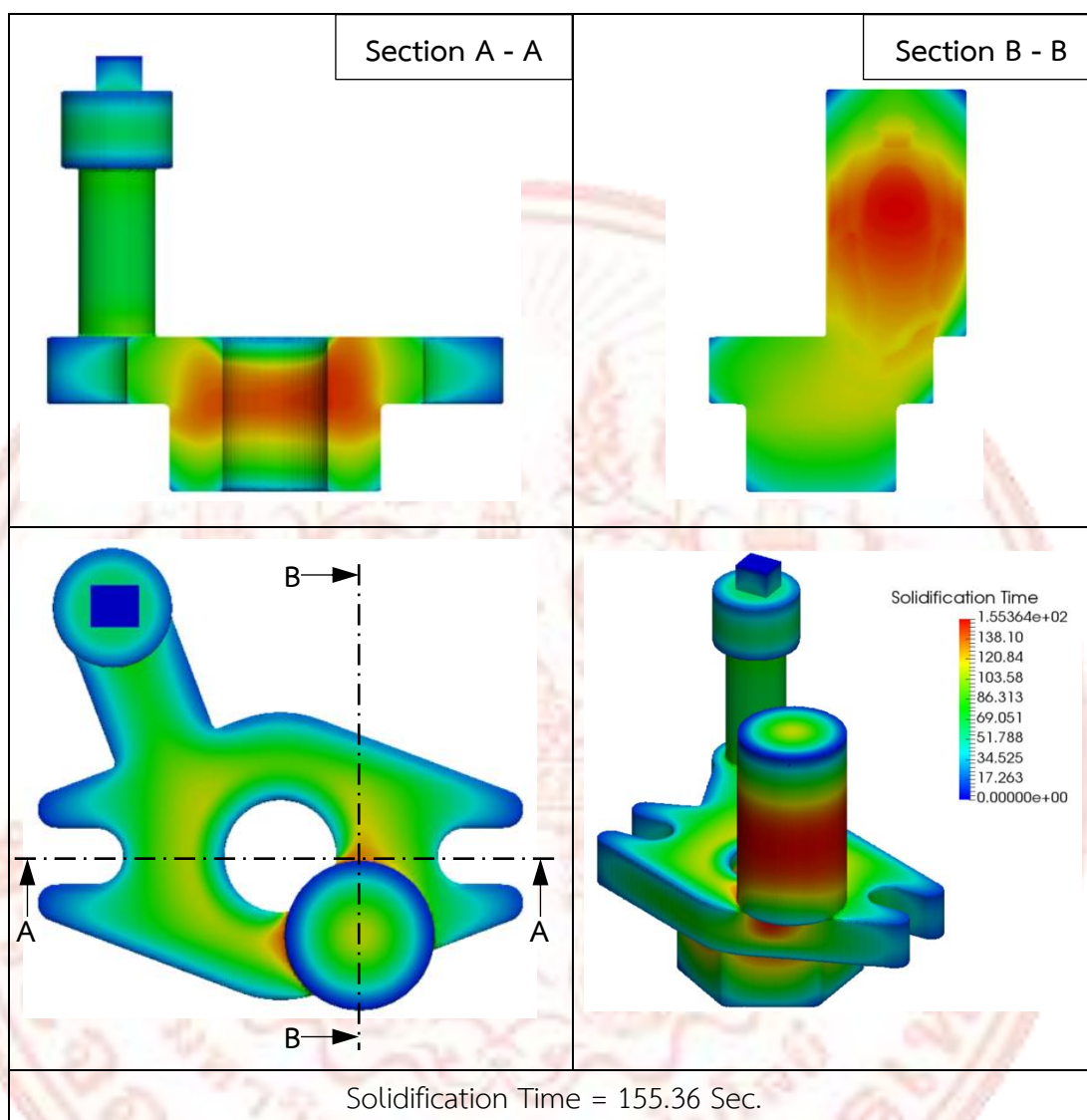
4.8.3.1.1 ทดสอบปรับขนาดรูกลั่นเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 30 มิลลิเมตร



ภาพที่ 4-96 แสดงการจำลองเวลาในการแข็งตัวของชิ้นงานทดสอบปรับขนาดรูกลั่นเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 30 มิลลิเมตร

ภาพที่ 4-96 จะแสดงให้เห็นถึงเวลาทั้งหมดในการแข็งตัวของชิ้นงาน โดยใช้เวลา 127.60 วินาที โดยจุดที่มีการแข็งตัวช้าที่สุดจะเป็นโซนสีแดงซึ่งอยู่บริเวณกลางชิ้นงาน และจุดที่แข็งตัวเร็วที่สุดจะเป็นบริเวณโซนสีฟ้าขอบของชิ้นงาน

4.8.3.1.2 ทดสอบปรับขนาดรูเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 40 มิลลิเมตร

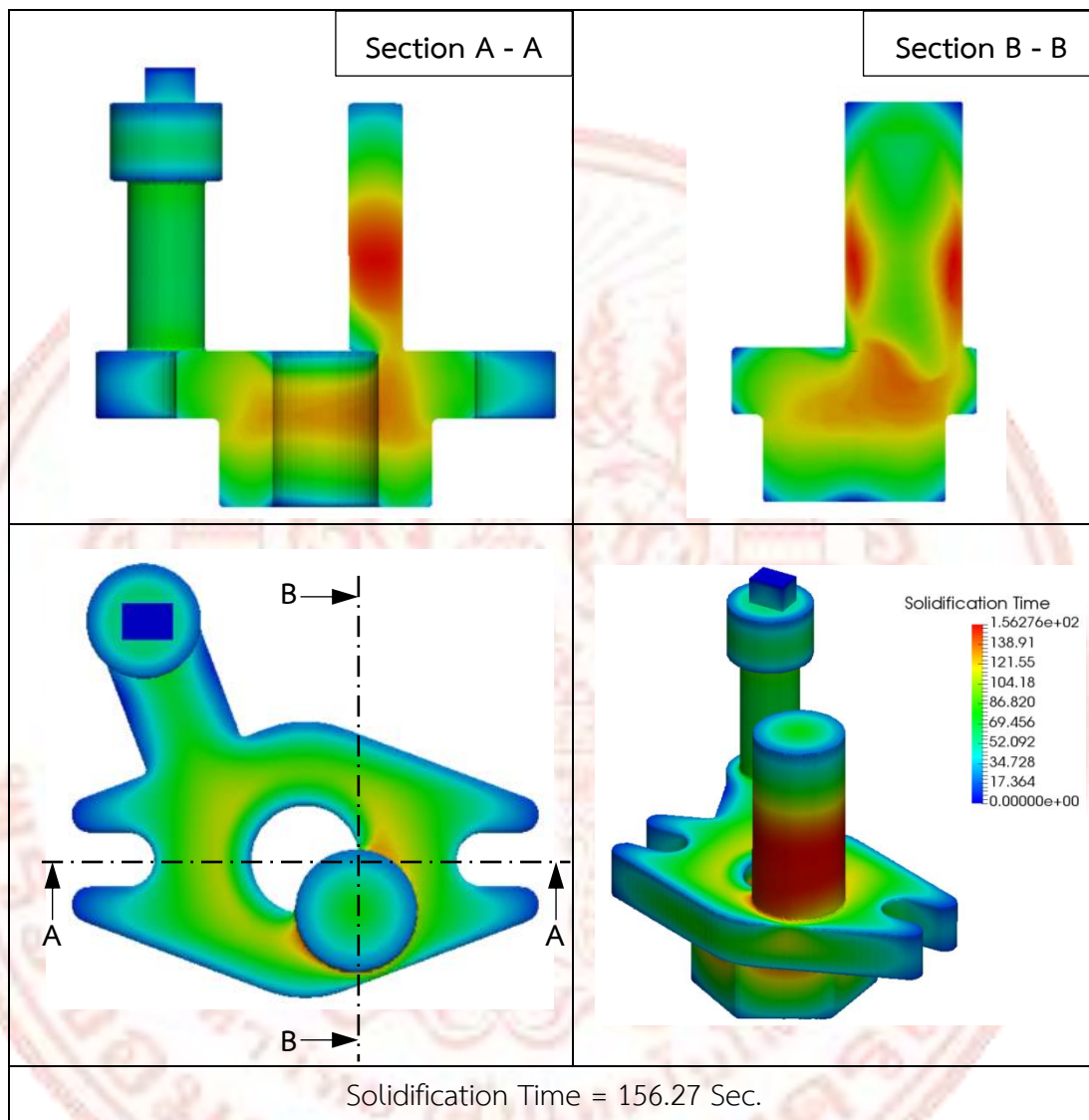


ภาพที่ 4-97 แสดงการจำลองเวลาในการแข็งตัวของชิ้นงานทดสอบปรับขนาดรูเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 40 มิลลิเมตร

ภาพที่ 4-97 จะแสดงให้เห็นถึงเวลาทั้งหมดในการแข็งตัวของชิ้นงาน โดยใช้เวลา 155.36 วินาที โดยจุดที่มีการแข็งตัวช้าที่สุดจะเป็นโซนสีแดงซึ่งอยู่บริเวณกลางชิ้นงาน และจุดที่แข็งตัวเร็วที่สุดจะเป็นบริเวณโซนสีฟ้าขอบของชิ้นงาน

4.8.3.2 การจำลองการปรับตำแหน่งรูล้น

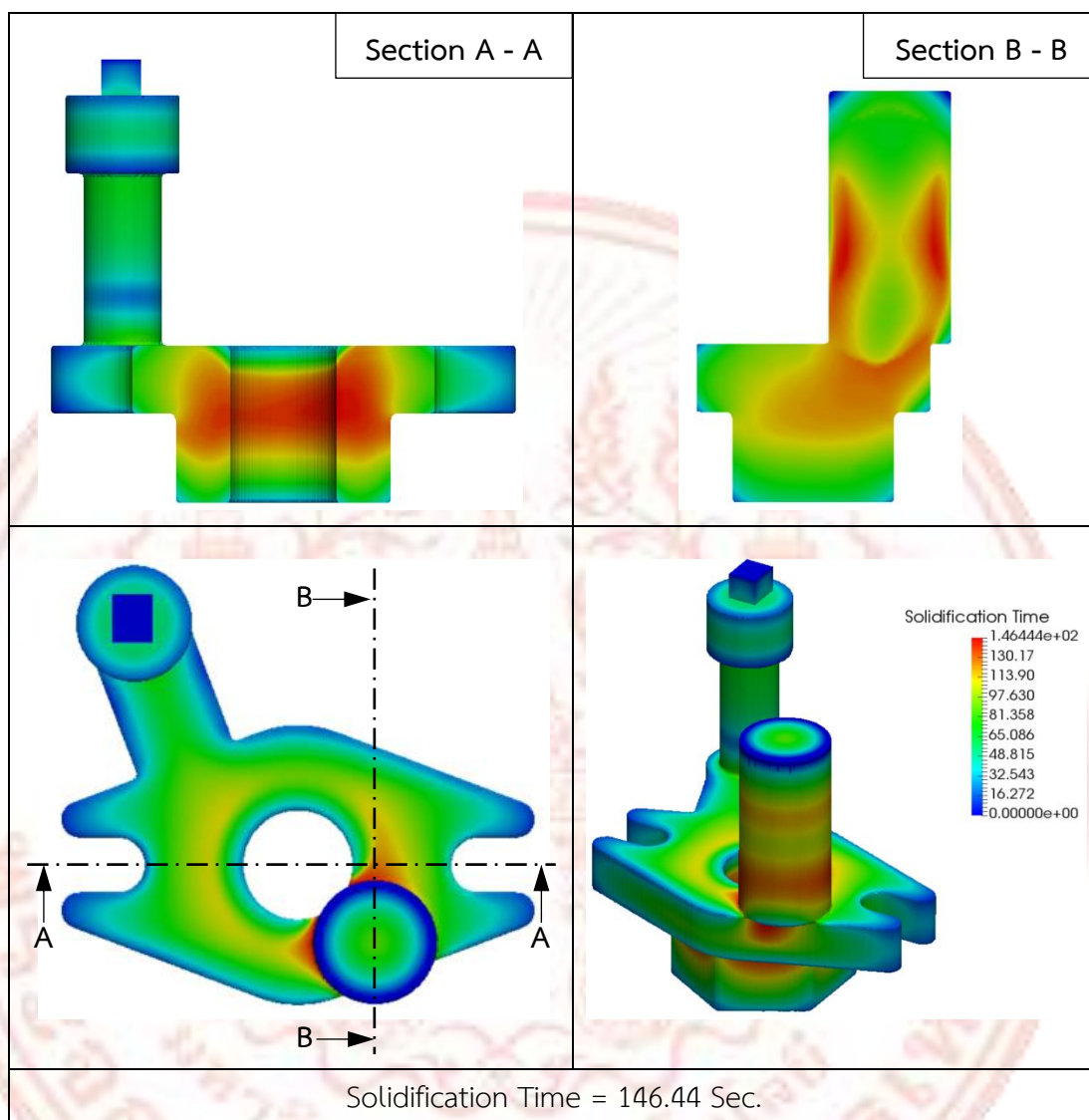
4.8.3.2.1 ทดสอบปรับตำแหน่งรูล้นห่างจากจุดศูนย์กลาง 20 มิลลิเมตร



ภาพที่ 4-98 แสดงการจำลองเวลาในการแข็งตัวของชิ้นงานทดสอบปรับตำแหน่งรูล้นห่างจากจุดศูนย์กลาง 20 มิลลิเมตร

ภาพที่ 4-98 จะแสดงให้เห็นถึงเวลาทั้งหมดในการแข็งตัวของชิ้นงาน โดยใช้เวลา 156.27 วินาที โดยจุดที่มีการแข็งตัวช้าที่สุดจะเป็นโซนสีแดงซึ่งอยู่บริเวณกลางชิ้นงาน และจุดที่แข็งตัวเร็วที่สุดจะเป็นบริเวณโซนสีฟ้าขอบของชิ้นงาน

4.8.3.2.2 ทดสอบปรับตำแหน่งรูล้นห่างจากจุดศูนย์กลาง 30 มิลลิเมตร



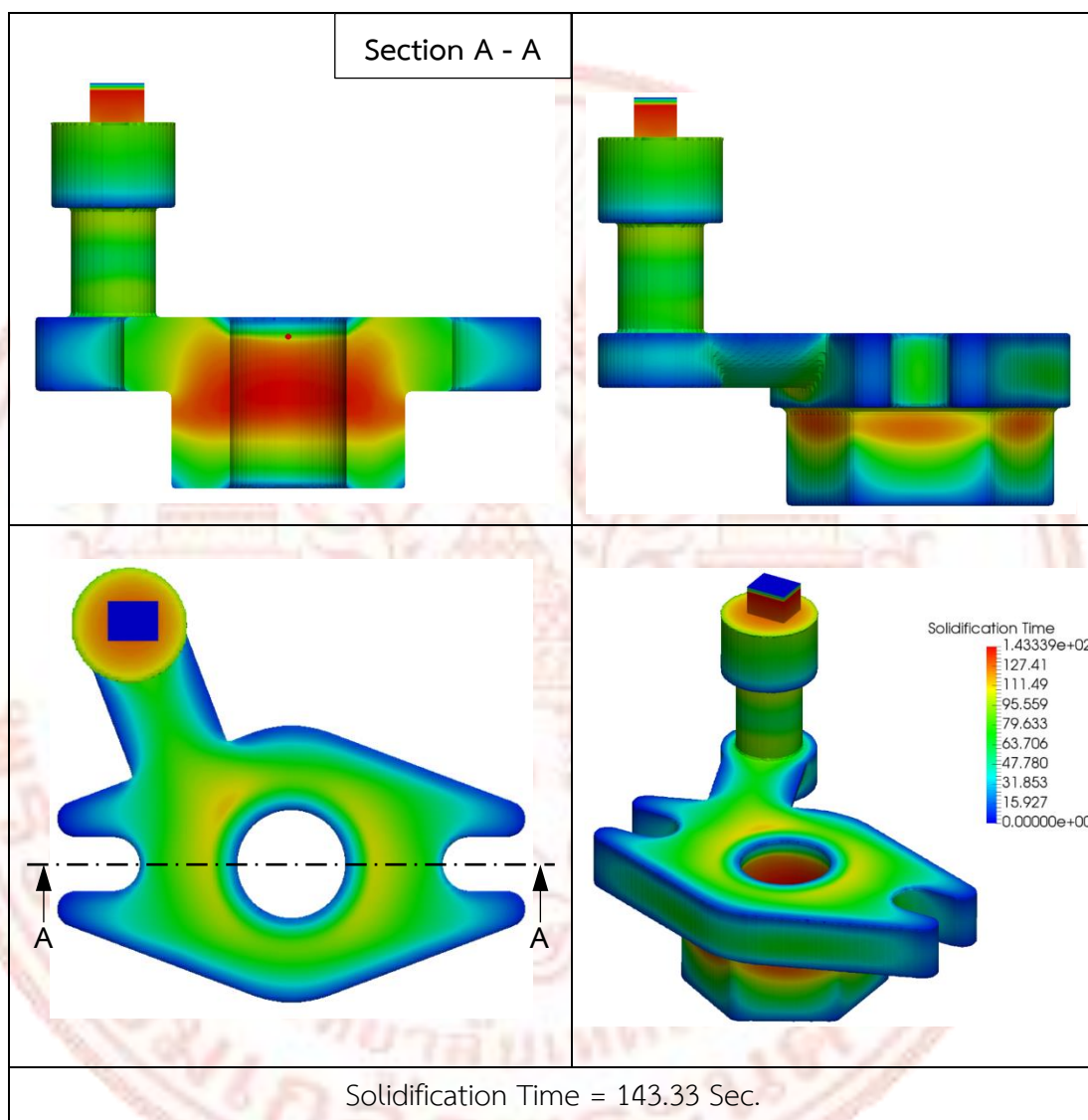
ภาพที่ 4-99 แสดงการจำลองเวลาในการแข็งตัวของชิ้นงานทดสอบปรับตำแหน่งรูล้นห่างจากจุดศูนย์กลาง 30 มิลลิเมตร

ภาพที่ 4-99 จะแสดงให้เห็นถึงเวลาทั้งหมดในการแข็งตัวของชิ้นงาน โดยใช้เวลา 146.44 วินาที โดยจุดที่มีการแข็งตัวช้าที่สุดจะเป็นโซนสีแดงซึ่งอยู่บริเวณกลางชิ้นงาน และจุดที่แข็งตัวเร็วที่สุดจะเป็นบริเวณโซนสีฟ้าขอบของชิ้นงาน

4.8.3.3 การลดขนาดหีบแบบที่ใช้ในการเทหล่อแบบไม่มีรูล้น และมีรูล้น

4.8.3.3.1 ทดสอบการลดขนาดหีบแบบที่ใช้ในการเทหล่อแบบไม่มีรูล้นสูง

50 มิลลิเมตร

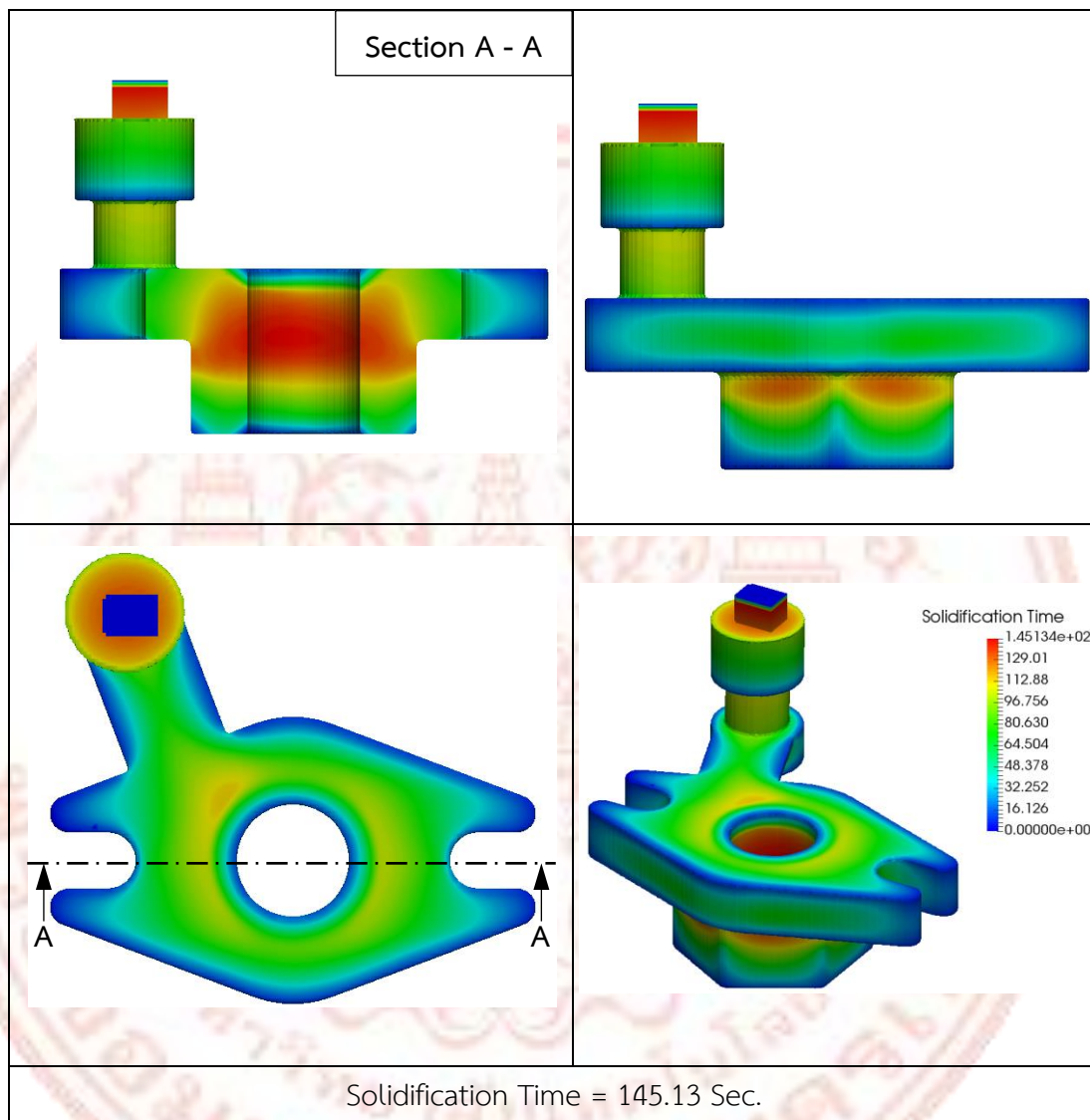


ภาพที่ 4-100 แสดงการจำลองเวลาในการแข็งตัวของชิ้นงานทดสอบการลดขนาดหีบแบบที่ใช้ในการเทหล่อแบบไม่มีรูล้นสูง 50 มิลลิเมตร

ภาพที่ 4-100 จะแสดงให้เห็นถึงเวลาทั้งหมดในการแข็งตัวของชิ้นงาน โดยใช้เวลา 143.33 วินาที โดยจุดที่มีการแข็งตัวช้าที่สุดจะเป็นโซนสีแดงซึ่งอยู่บริเวณกลางชิ้นงาน และจุดที่แข็งตัวเร็วที่สุดจะเป็นบริเวณโซนสีฟ้าขอบของชิ้นงาน

4.8.3.3.2 ทดสอบการลดขนาดหีบแบบที่ใช้ในการเทหล่อแบบไม่มีรูล้นสูง

40 มิลลิเมตร

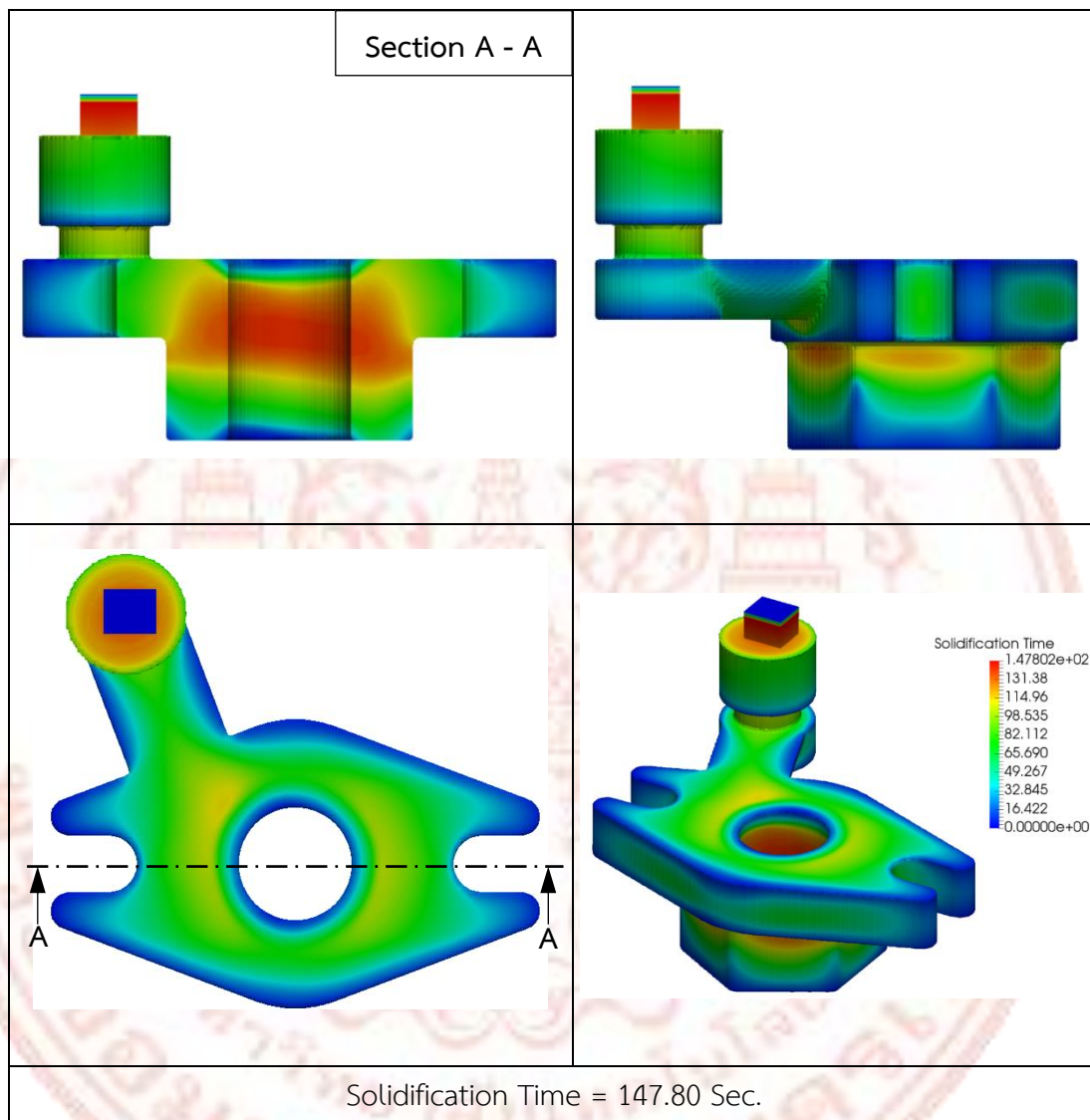


ภาพที่ 4-101 แสดงการจำลองเวลาในการแข็งตัวของชิ้นงานทดสอบการลดขนาดหีบแบบที่ใช้ในการเทหล่อแบบไม่มีรูล้นสูง 40 มิลลิเมตร

ภาพที่ 4-101 จะแสดงให้เห็นถึงเวลาทั้งหมดในการแข็งตัวของชิ้นงาน โดยใช้เวลา 143.13 วินาที โดยจุดที่มีการแข็งตัวช้าที่สุดจะเป็นโซนสีแดงซึ่งอยู่บริเวณกลางชิ้นงาน และจุดที่แข็งตัวเร็วที่สุดจะเป็นบริเวณโซนสีฟ้าขอบของชิ้นงาน

4.8.3.3 ทดสอบการลดขนาดหีบแบบที่ใช้ในการเทหล่อแบบไม่มีรูล้นสูง

30 มิลลิเมตร

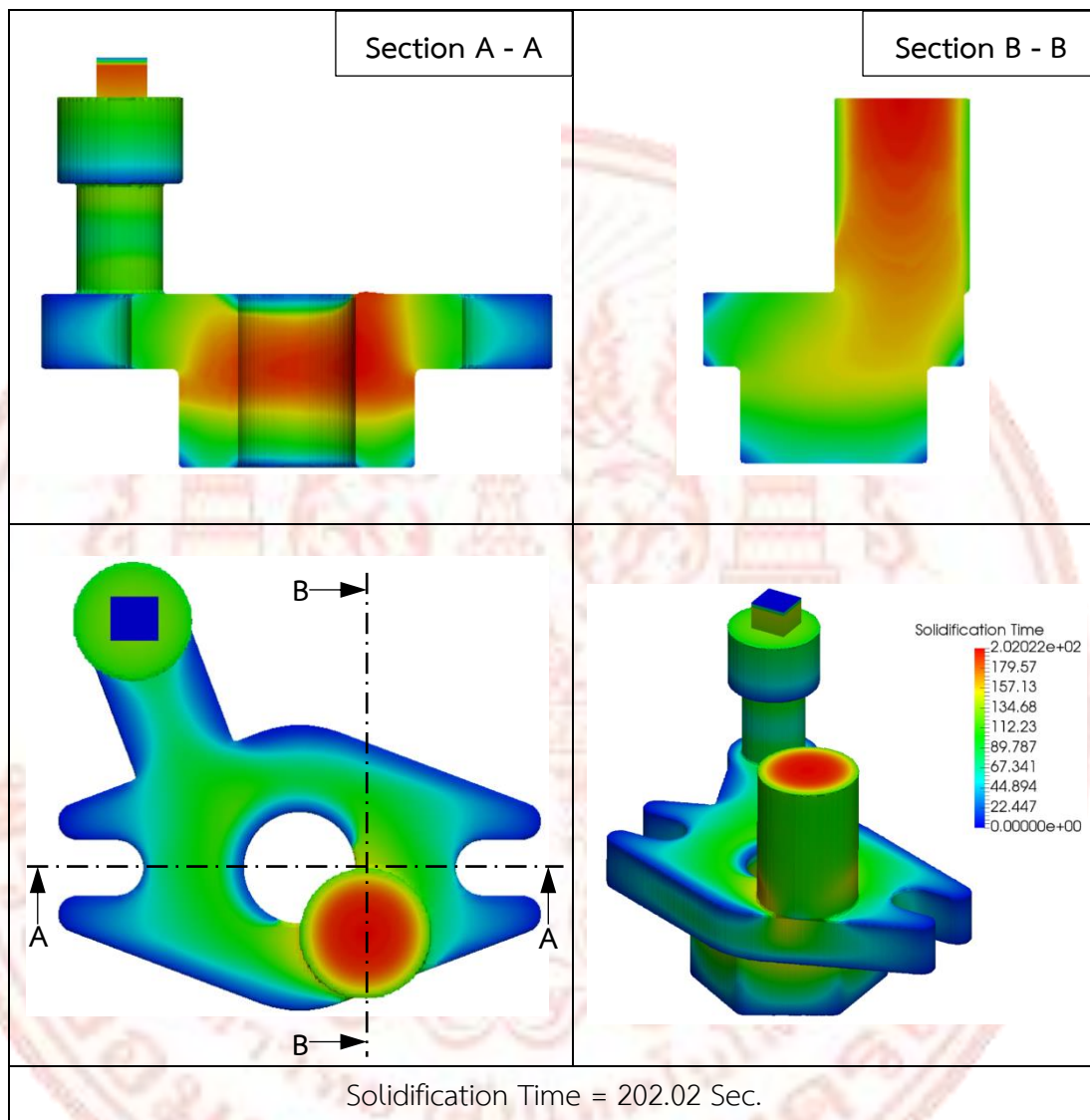


ภาพที่ 4-102 แสดงการจำลองเวลาในการแข็งตัวของชิ้นงานทดสอบการลดขนาดหีบแบบที่ใช้ในการเทหล่อแบบไม่มีรูล้นสูง 30 มิลลิเมตร

ภาพที่ 4-102 จะแสดงให้เห็นถึงเวลาทั้งหมดในการแข็งตัวของชิ้นงาน โดยใช้เวลา 147.80 วินาที โดยจุดที่มีการแข็งตัวช้าที่สุดจะเป็นโซนสีแดงซึ่งอยู่บริเวณกลางชิ้นงาน และจุดที่แข็งตัวเร็วที่สุดจะเป็นบริเวณโซนสีฟ้าขอบของชิ้นงาน

4.8.3.3.4 ทดสอบการลดขนาดหีบแบบที่ใช้ในการเทหล่อแบบปรับรูล้น

สูง 50 มิลลิเมตร

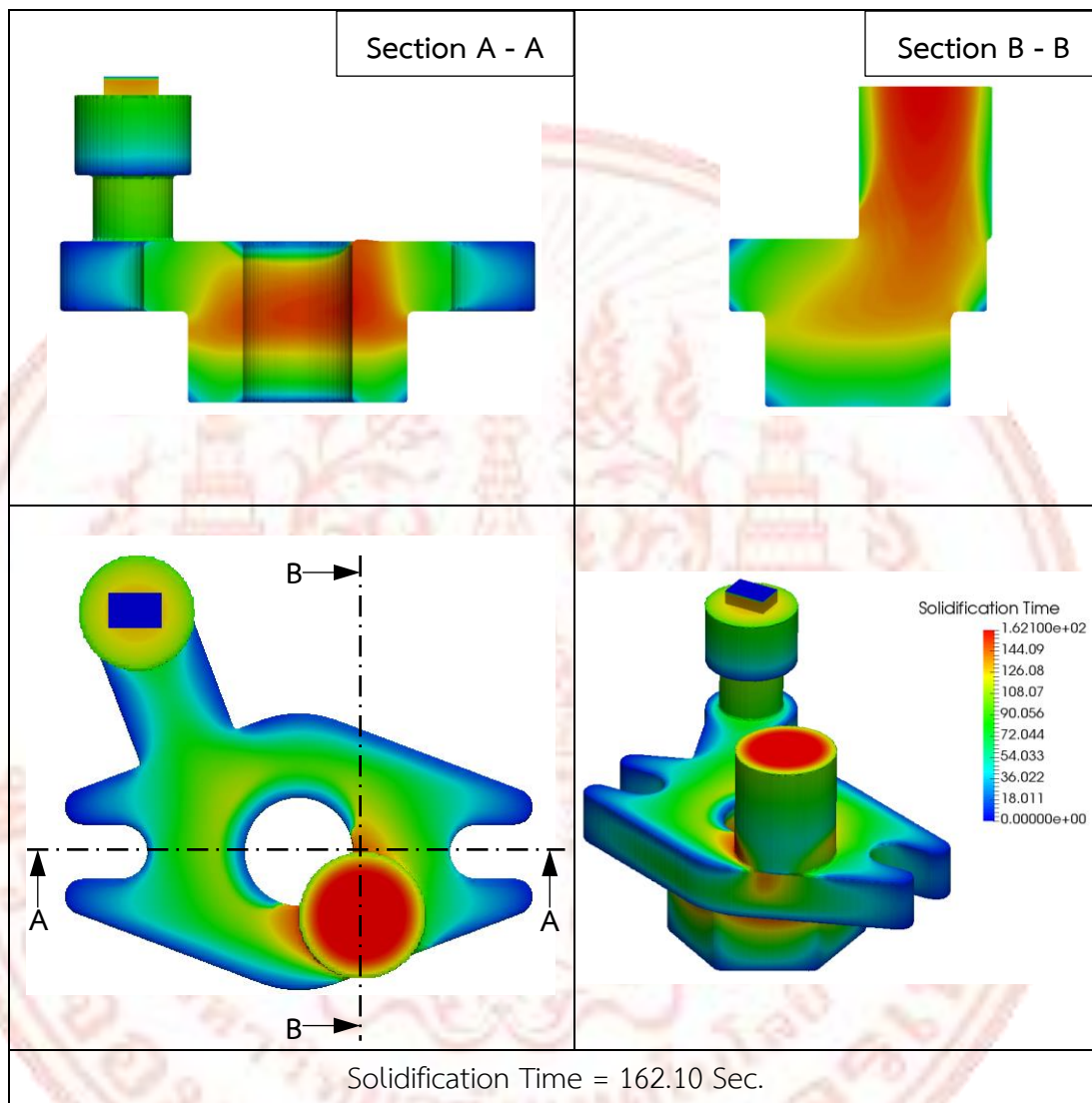


ภาพที่ 4-103 แสดงการจำลองเวลาในการแข็งตัวของชิ้นงานทดสอบการลดขนาดหีบแบบที่ใช้ในการเทหล่อแบบปรับรูล้นสูง 50 มิลลิเมตร

ภาพที่ 4-103 จะแสดงให้เห็นถึงเวลาทั้งหมดในการแข็งตัวของชิ้นงาน โดยใช้เวลา 202.02 วินาที โดยจุดที่มีการแข็งตัวช้าที่สุดจะเป็นโซนสีแดงซึ่งอยู่บริเวณกลางชิ้นงานและรูล้น และจุดที่แข็งตัวเร็วที่สุดจะเป็นบริเวณโซนสีฟ้าขอบของชิ้นงาน

4.8.3.3.5 ทดสอบการลดขนาดหีบแบบที่ใช้ในการเทหล่อแบบปรับรูล้น

สูง 40 มิลลิเมตร

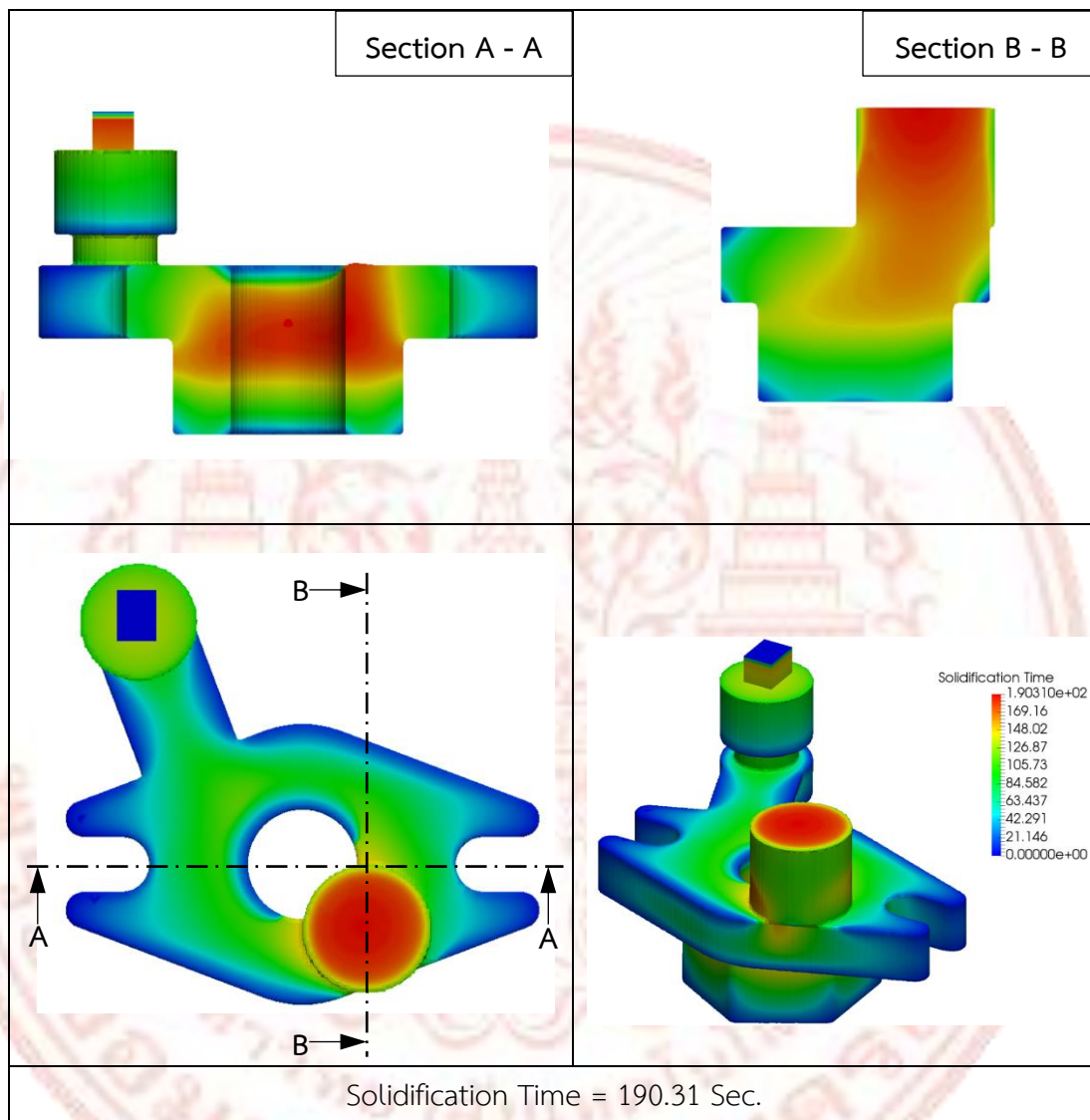


ภาพที่ 4-104 แสดงการจำลองเวลาในการแข็งตัวของชิ้นงานทดสอบการลดขนาดหีบแบบที่ใช้ในการเทหล่อแบบปรับรูล้นสูง 40 มิลลิเมตร

ภาพที่ 4-104 จะแสดงให้เห็นถึงเวลาทั้งหมดในการแข็งตัวของชิ้นงาน โดยใช้เวลา 162.10 วินาที โดยจุดที่มีการแข็งตัวช้าที่สุดจะเป็นโซนสีแดงซึ่งอยู่บริเวณกลางชิ้นงานและรูล้น และจุดที่แข็งตัวเร็วที่สุดจะเป็นบริเวณโซนสีฟ้าขอบของชิ้นงาน

4.8.3.3.6 ทดสอบการลดขนาดหีบแบบที่ใช้ในการเทหล่อแบบปรับรูล้น

สูง 30 มิลลิเมตร

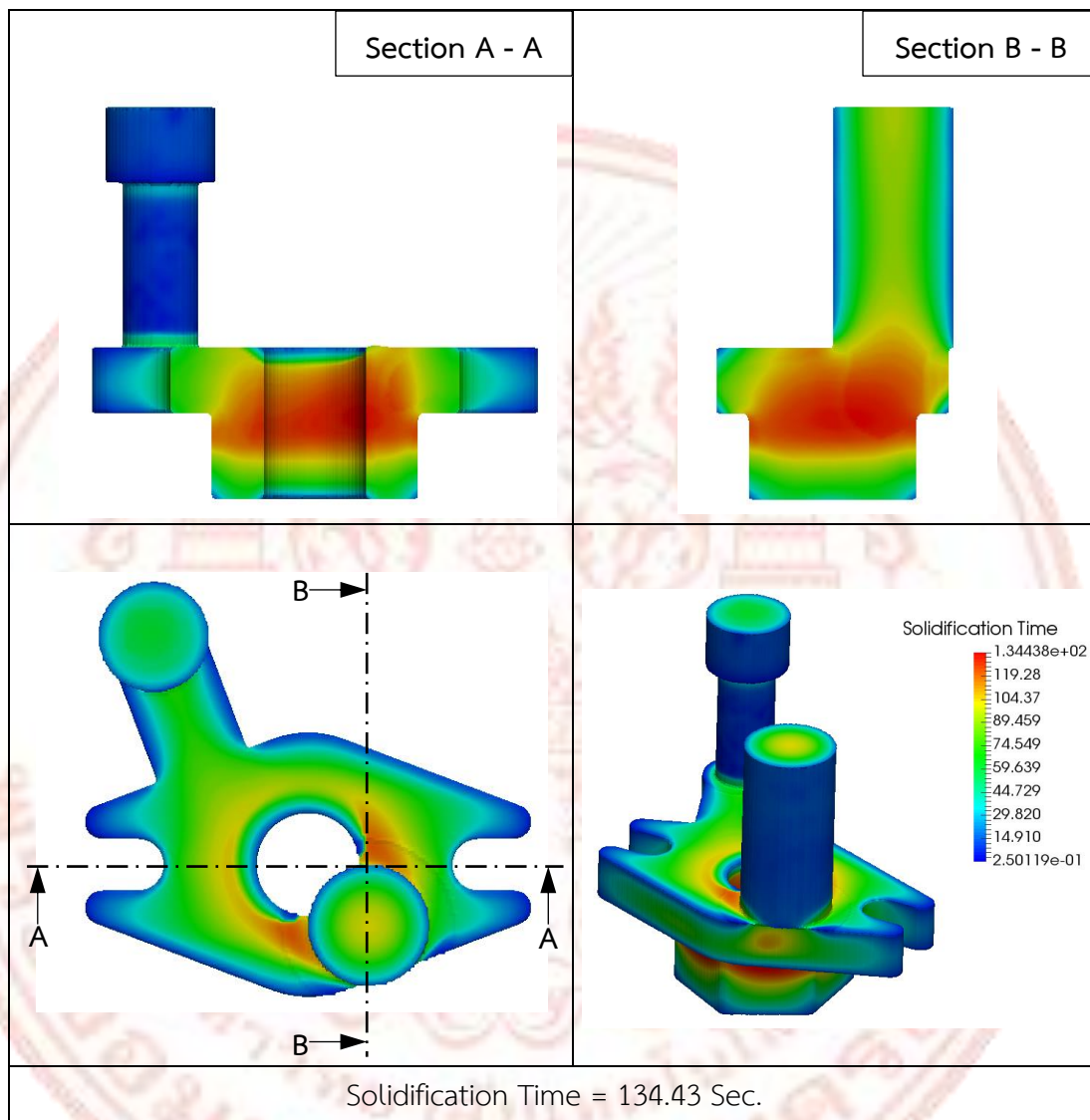


ภาพที่ 4-105 แสดงการจำลองเวลาในการแข็งตัวของชิ้นงานทดสอบการลดขนาดหีบแบบที่ใช้ในการเทหล่อแบบปรับรูล้นสูง 30 มิลลิเมตร

ภาพที่ 4-105 จะแสดงให้เห็นถึงเวลาทั้งหมดในการแข็งตัวของชิ้นงาน โดยใช้เวลา 190.31 วินาที โดยจุดที่มีการแข็งตัวช้าที่สุดจะเป็นโซนสีแดงซึ่งอยู่บริเวณกลางชิ้นงานและรูล้น และจุดที่แข็งตัวเร็วที่สุดจะเป็นบริเวณโซนสีฟ้าขอบของชิ้นงาน

4.8.3.3.7 ทดสอบการลดขนาดหีบแบบที่ใช้ในการเทหล่อแบบไม่ปรับรูส้น

สูง 50 มิลลิเมตร

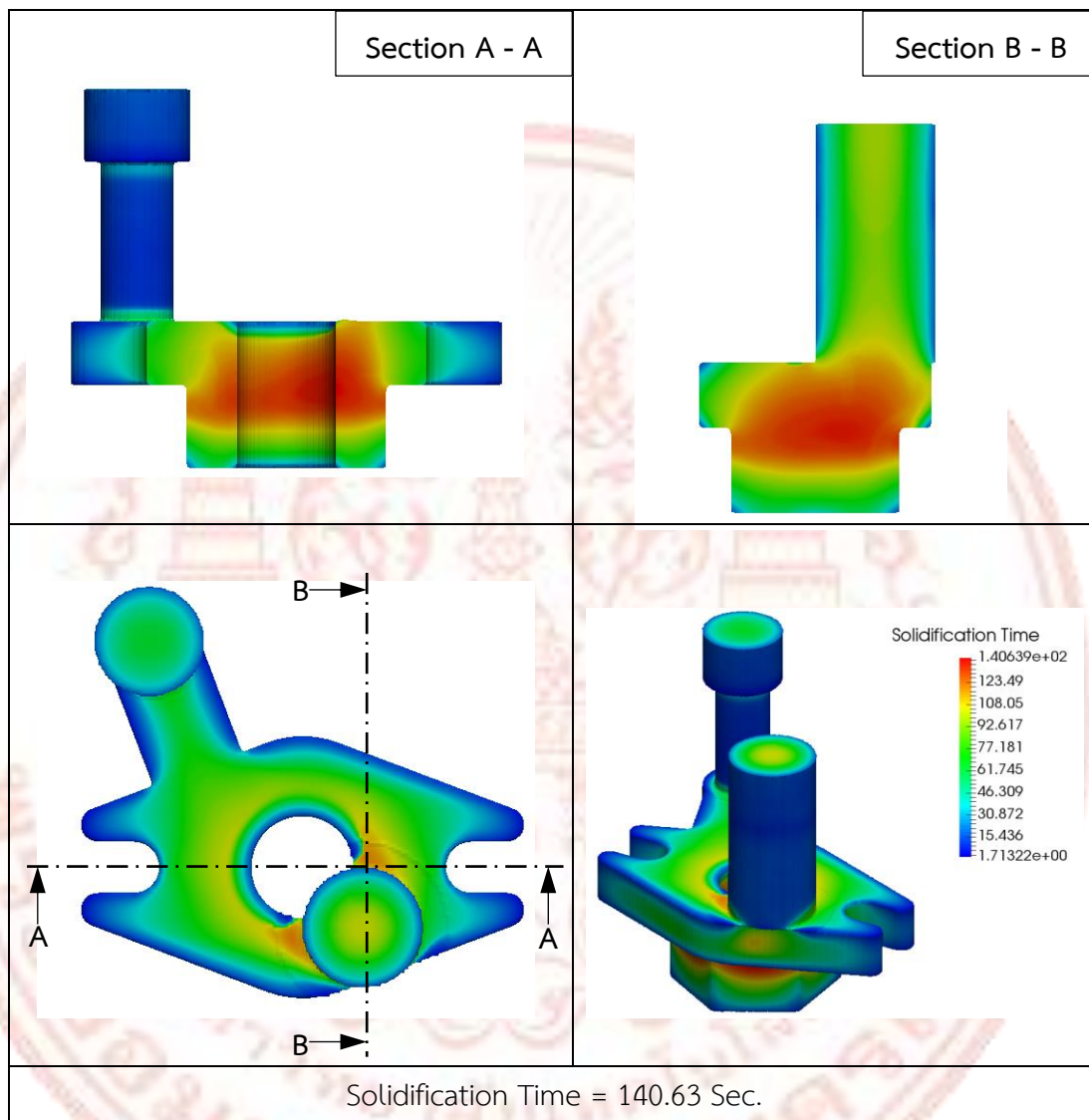


ภาพที่ 4-106 แสดงการจำลองเวลาในการแข็งตัวของชิ้นงานทดสอบการลดขนาดหีบแบบที่ใช้ในการเทหล่อแบบไม่ปรับรูส้นสูง 50 มิลลิเมตร

ภาพที่ 4-106 จะแสดงให้เห็นถึงเวลาทั้งหมดในการแข็งตัวของชิ้นงาน โดยใช้เวลา 134.43 วินาที โดยจุดที่มีการแข็งตัวช้าที่สุดจะเป็นโซนสีแดงซึ่งอยู่บริเวณกลางชิ้นงานและรูส้น และจุดที่แข็งตัวเร็วที่สุดจะเป็นบริเวณโซนสีฟ้าขอบของชิ้นงาน

4.8.3.3.8 ทดสอบการลดขนาดที่บนที่ใช้ในการเทหล่อแบบไม่ปรับรู้น

สูง 40 มิลลิเมตร

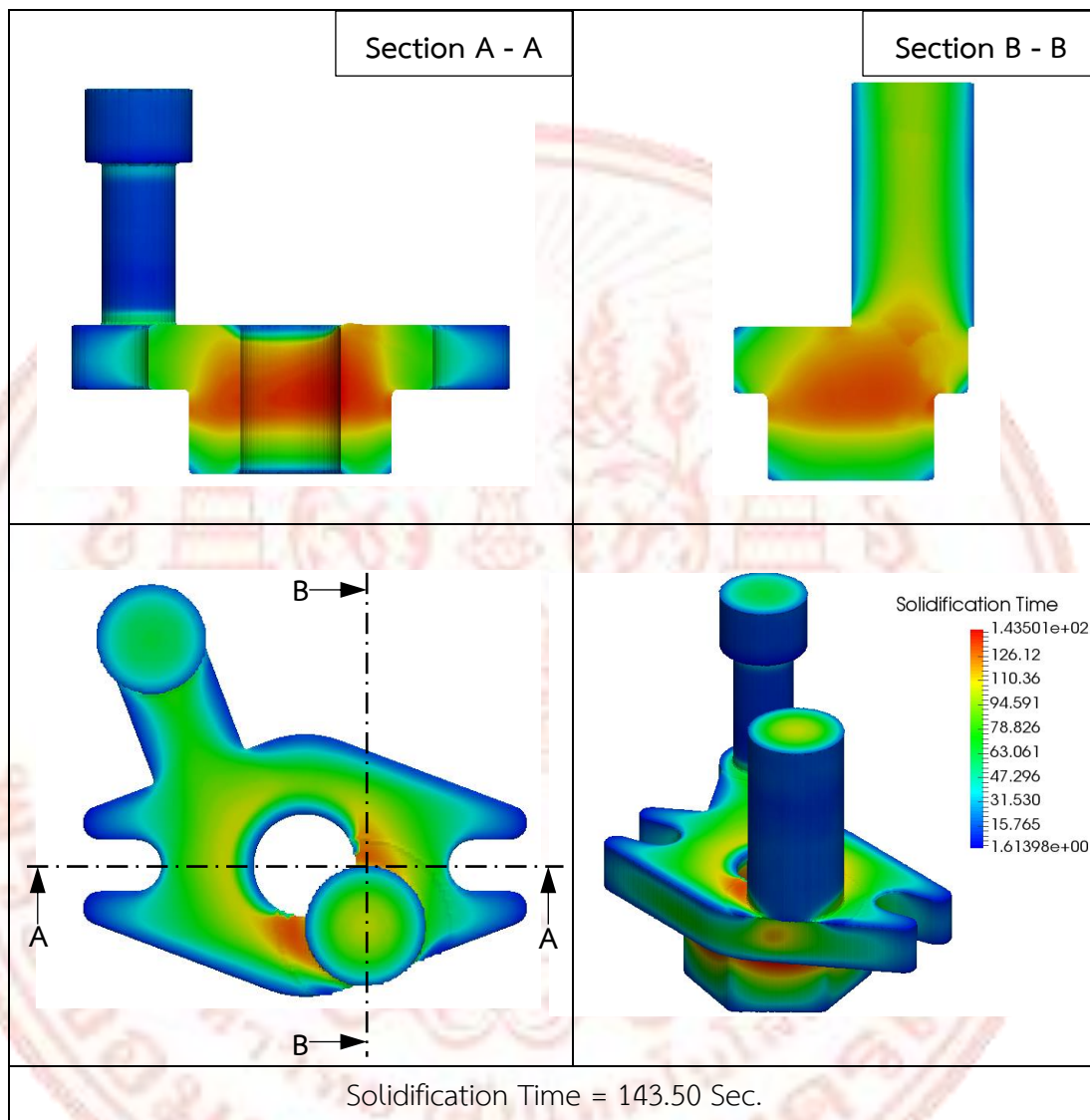


ภาพที่ 4-107 แสดงการจำลองเวลาในการแข็งตัวของชิ้นงานทดสอบการลดขนาดที่บนที่ใช้ในการเทหล่อแบบปรับรู้นสูง 40 มิลลิเมตร

ภาพที่ 4-107 จะแสดงให้เห็นถึงเวลาทั้งหมดในการแข็งตัวของชิ้นงาน โดยใช้เวลา 140.63 วินาที โดยจุดที่มีการแข็งตัวช้าที่สุดจะเป็นโซนสีแดงซึ่งอยู่บริเวณกลางชิ้นงานและรู้น และจุดที่แข็งตัวเร็วที่สุดจะเป็นบริเวณโซนสีฟ้าขอบของชิ้นงาน

4.8.3.3.9 ทดสอบการลดขนาดหีบแบบที่ใช้ในการเทหล่อแบบไม่ปรับรูล้น

สูง 30 มิลลิเมตร



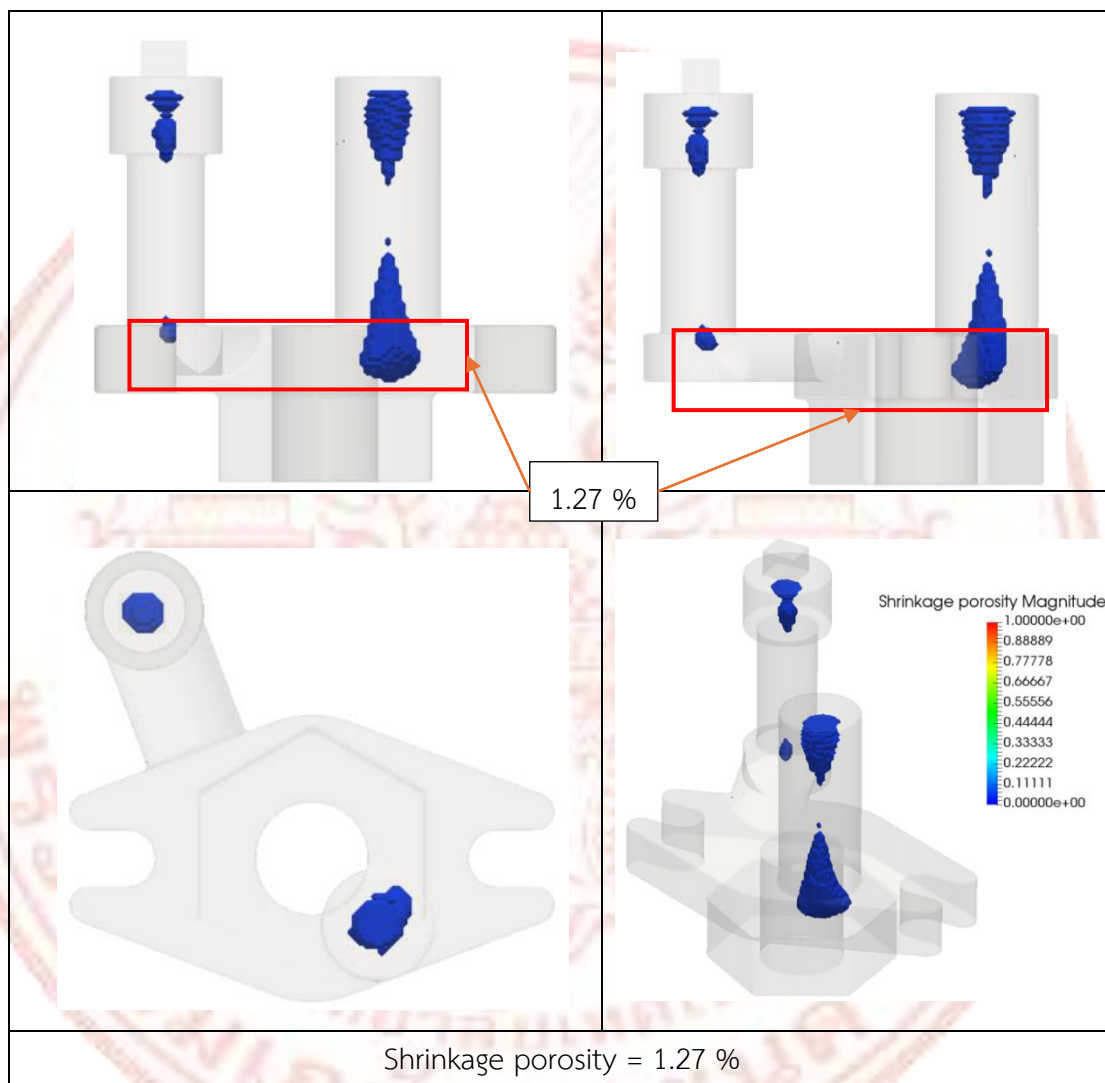
ภาพที่ 4-108 แสดงการจำลองเวลาในการแข็งตัวของชิ้นงานทดสอบการลดขนาดหีบแบบที่ใช้ในการเทหล่อแบบไม่ปรับรูล้นสูง 30 มิลลิเมตร

ภาพที่ 4-108 จะแสดงให้เห็นถึงเวลาทั้งหมดในการแข็งตัวของชิ้นงาน โดยใช้เวลา 143.50 วินาที โดยจุดที่มีการแข็งตัวช้าที่สุดจะเป็นโซนสีแดงซึ่งอยู่บริเวณกลางชิ้นงานและรูล้น และจุดที่แข็งตัวเร็วที่สุดจะเป็นบริเวณโซนสีฟ้าขอบของชิ้นงาน

4.8.4 แสดงผลการเกิดโพรงหดตัว (Shrinkage Porosity)

4.8.4.1 การจำลองการปรับขนาดรูล้น

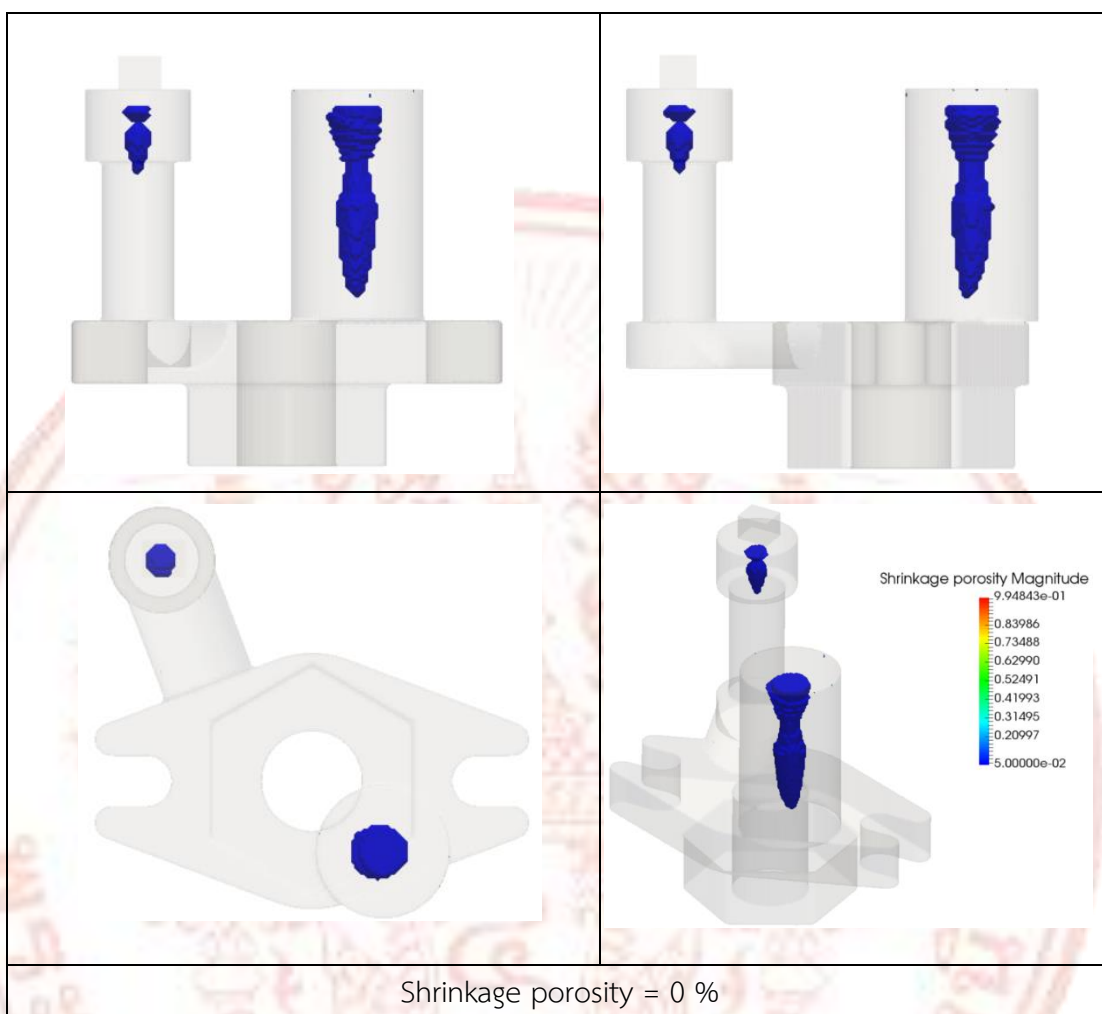
4.8.4.1.1 ทดสอบปรับขนาดรูล้นเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 30 มิลลิเมตร



ภาพที่ 4-109 แสดงการจำลองการเกิดโพรงหดตัวภายในชิ้นงานทดสอบปรับขนาดรูล้นเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 30 มิลลิเมตร

จากภาพที่ 4-109 จะแสดงให้เห็นถึงตำแหน่งของการเกิดโพรงหดตัวภายในชิ้นงาน เมื่อเทียบกับชิ้นงานที่มีปริมาตร 172.91 cm^3 โดยไม่นับรูล้น ทางเข้า และรูเท จะมีเปอร์เซ็นต์ของการเกิดโพรงหดตัวอยู่ที่ 2.201 cm^3 หรือ 1.27 เปอร์เซ็นต์ของปริมาตรเฉพาะชิ้นงาน

4.8.4.1.2 ทดสอบปรับขนาดรูเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 40 มิลลิเมตร

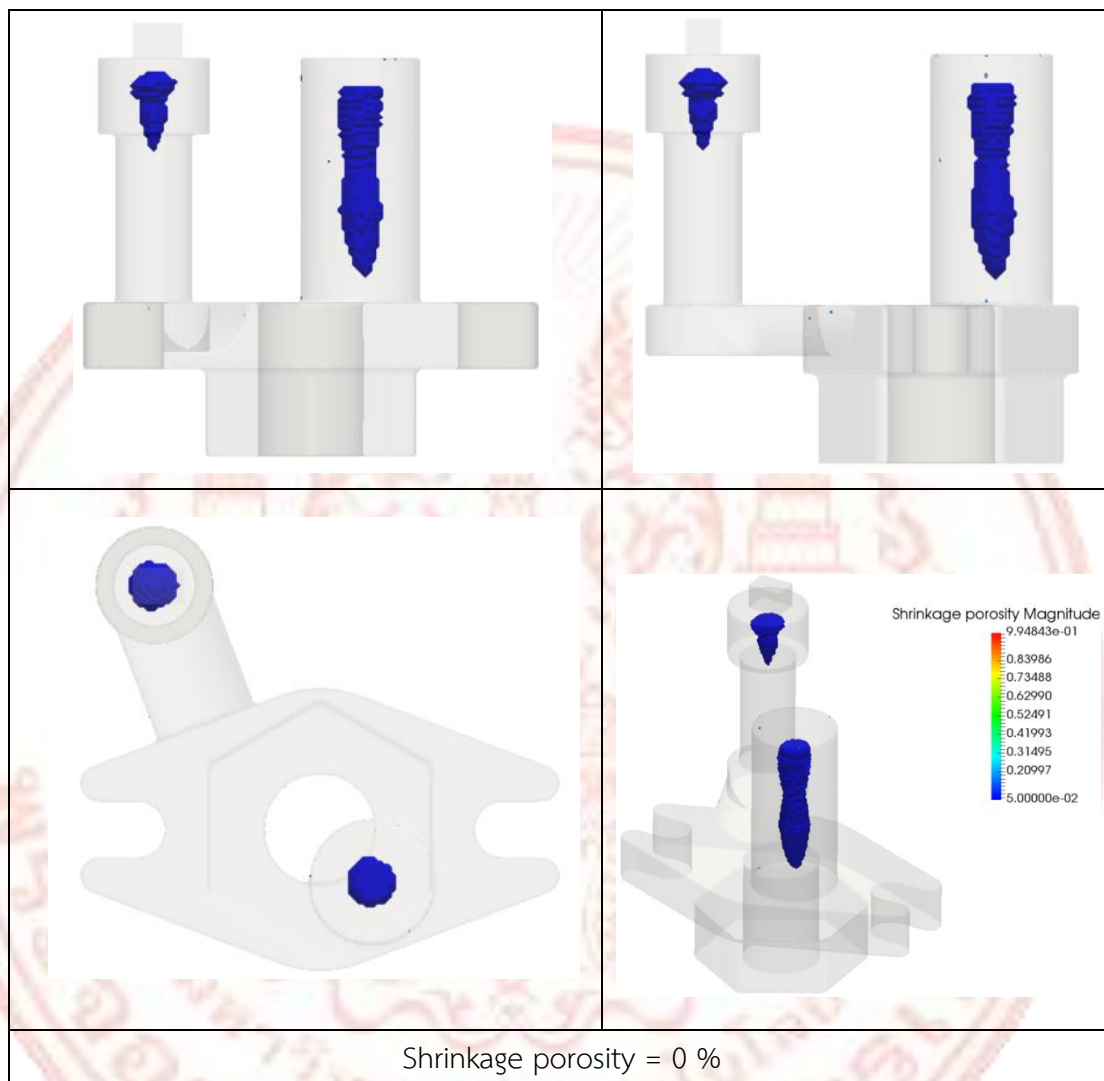


ภาพที่ 4-110 แสดงการจำลองการเกิดโพรงหดตัวภายในชิ้นงานทดสอบปรับขนาดรูเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 40 มิลลิเมตร

จากภาพที่ 4-110 จะแสดงให้เห็นถึงตำแหน่งของการเกิดโพรงหดตัวภายในชิ้นงาน เมื่อเทียบกับชิ้นงานที่มีปริมาตร 172.91 cm^3 โดยไม่นับรูเส้น ทางเข้า และรูเท โดยไม่พบโพรงหดตัว

4.8.4.2 การจำลองการปรับตำแหน่งรูล้น

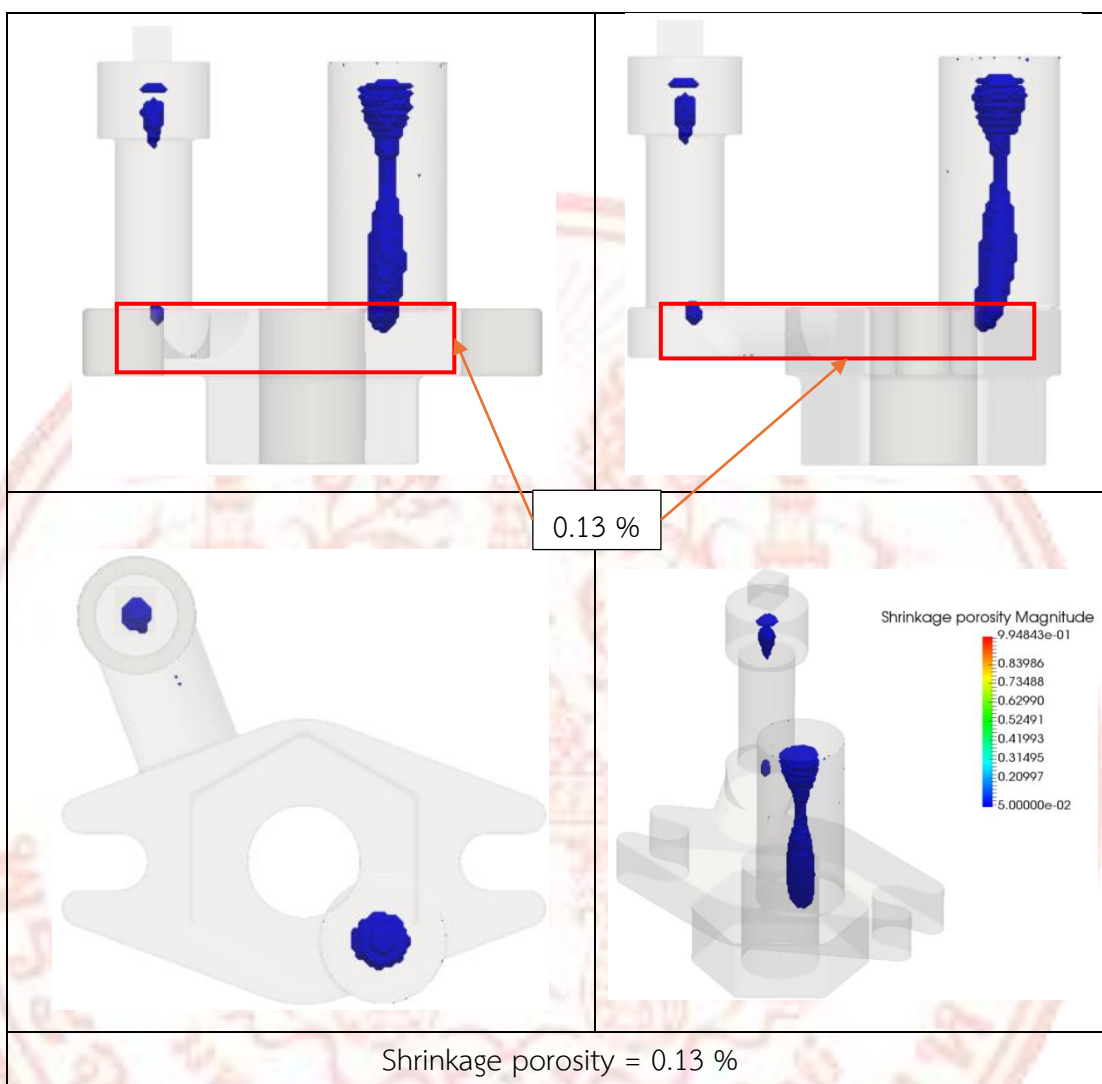
4.8.4.2.1 ทดสอบปรับตำแหน่งรูล้นห่างจากจุดศูนย์กลาง 20 มิลลิเมตร



ภาพที่ 4-111 แสดงการจำลองการเกิดโพรงหดตัวภายในชิ้นงานทดสอบปรับตำแหน่งรูล้นห่างจากจุดศูนย์กลาง 20 มิลลิเมตร

จากภาพที่ 4-111 จะแสดงให้เห็นถึงตำแหน่งของการเกิดโพรงหดตัวภายในชิ้นงาน เมื่อเทียบกับชิ้นงานที่มีปริมาตร 172.91 cm^3 โดยไม่นับรูล้น ทางเข้า และรูเท โดยไม่พบโพรงหดตัว

4.8.4.2.2 ทดสอบปรับตำแหน่งรูล้นห่างจากจุดศูนย์กลาง 30 มิลลิเมตร



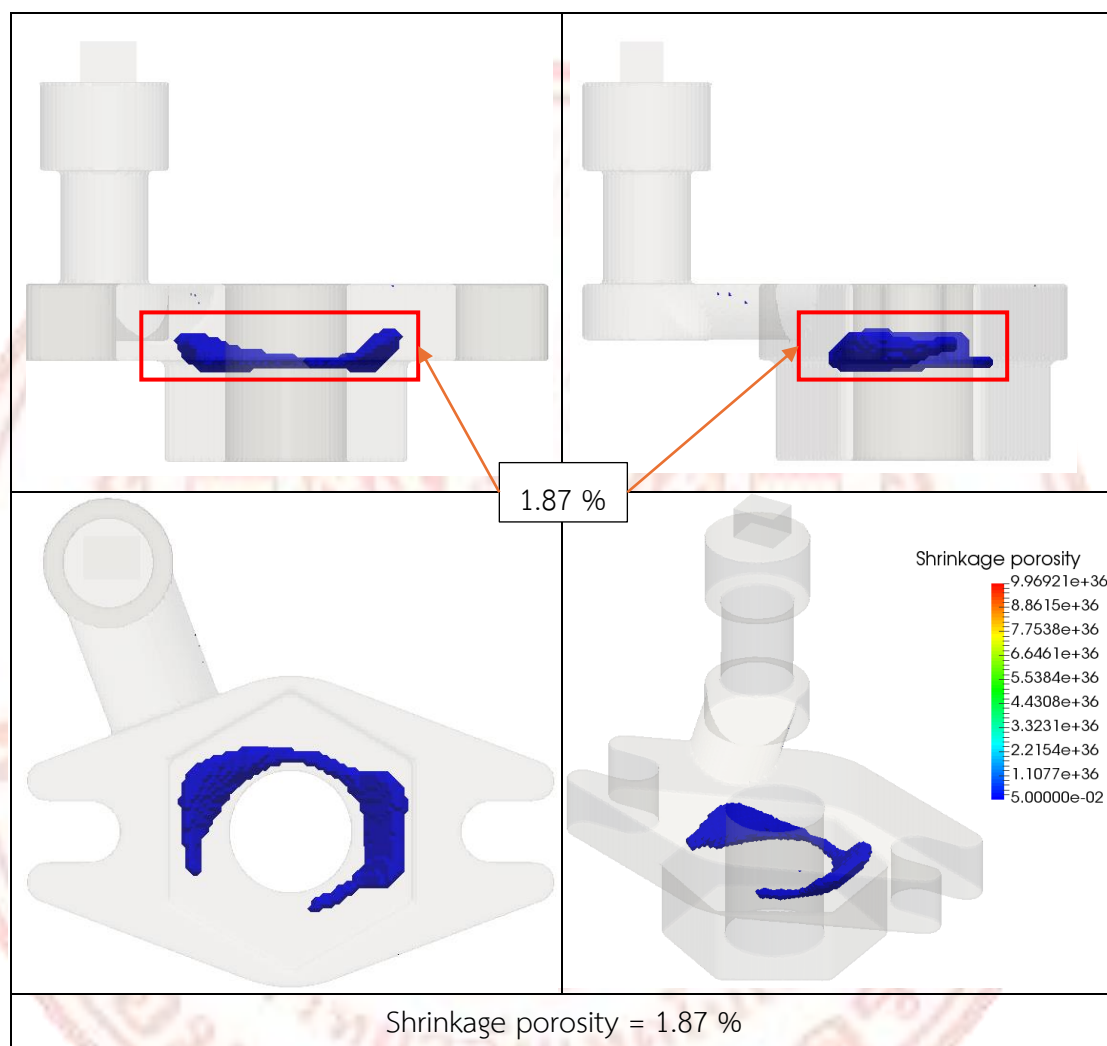
ภาพที่ 4-112 แสดงการจำลองการเกิดโพรงหดตัวภายในชิ้นงานทดสอบปรับตำแหน่งรูล้นห่างจากจุดศูนย์กลาง 30 มิลลิเมตร

จากภาพที่ 4-112 จะแสดงให้เห็นถึงตำแหน่งของการเกิดโพรงหดตัวภายในชิ้นงาน เมื่อเทียบกับชิ้นงานที่มีปริมาตร 172.91 cm^3 โดยไม่เน้นรูล้น ทางเข้า และรูเท จะมีเปอร์เซ็นต์ของการเกิดโพรงหดตัวอยู่ที่ 0.235 cm^3 หรือ 0.13 เปอร์เซ็นต์ของปริมาตรเฉพาะชิ้นงาน

4.8.4.3 การลดขนาดหีบبنที่ใช้ในการเทหล่อแบบไม่มีรูล้น และมีรูล้น

4.8.4.3.1 ทดสอบการลดขนาดหีบبنที่ใช้ในการเทหล่อแบบไม่มีรูล้นสูง

50 มิลลิเมตร

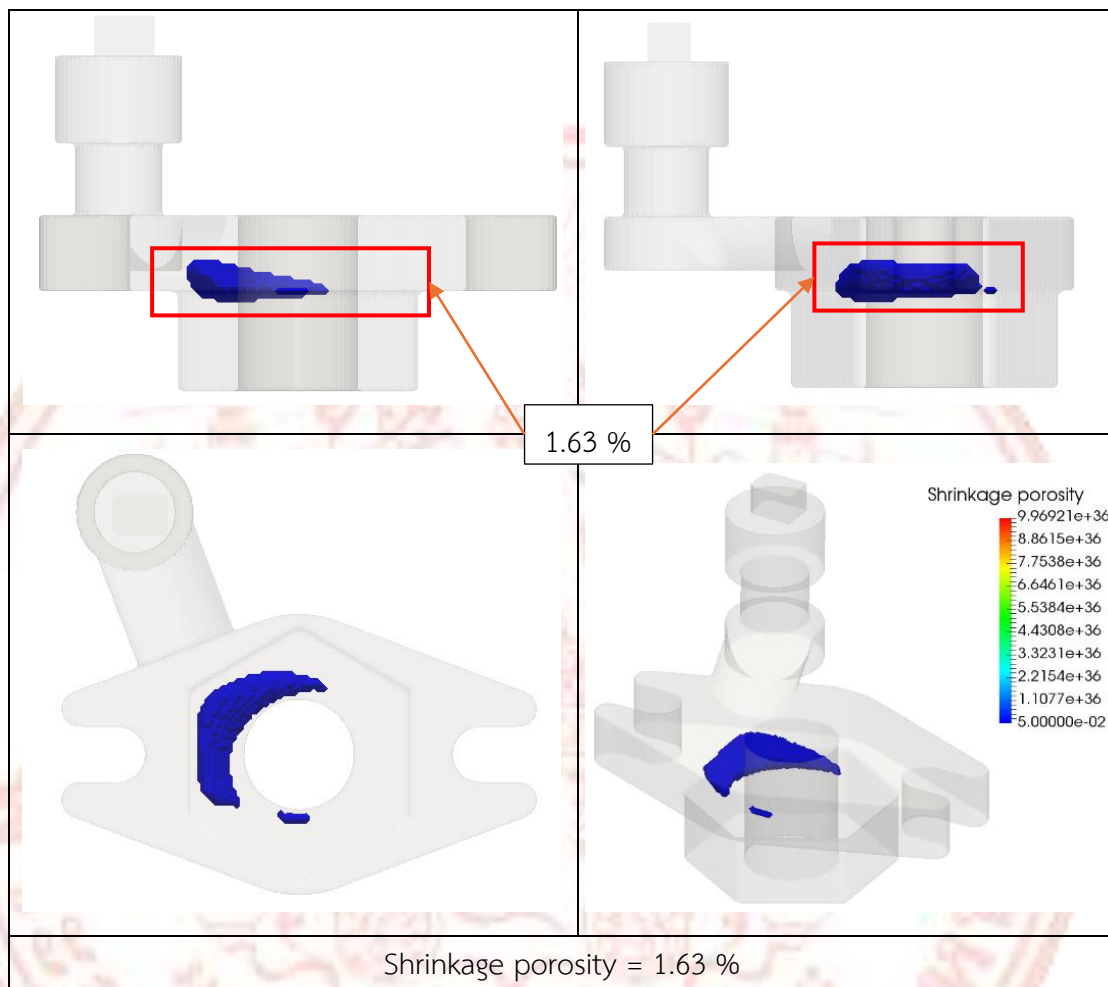


ภาพที่ 4-113 แสดงการจำลองการเกิดโพรงหดตัวภายในชิ้นงานทดสอบการลดขนาดหีบبنที่ใช้ในการเทหล่อแบบไม่มีรูล้นสูง 50 มิลลิเมตร

จากภาพที่ 4-113 จะแสดงให้เห็นถึงตำแหน่งของการเกิดโพรงหดตัวภายในชิ้นงาน เมื่อเทียบกับชิ้นงานที่มีปริมาตร 172.91 cm^3 โดยไม่นับรูล้น ทางเข้า และรูเท จะมีเปอร์เซ็นต์ของการเกิดโพรงหดตัวอยู่ที่ 3.24 cm^3 หรือ 1.87 เปอร์เซ็นต์ของปริมาตรเฉพาะชิ้นงาน

4.8.4.3.2 ทดสอบการลดขนาดหีบبنที่ใช้ในการเทหล่อแบบไม่มีรูล้นสูง

40 มิลลิเมตร

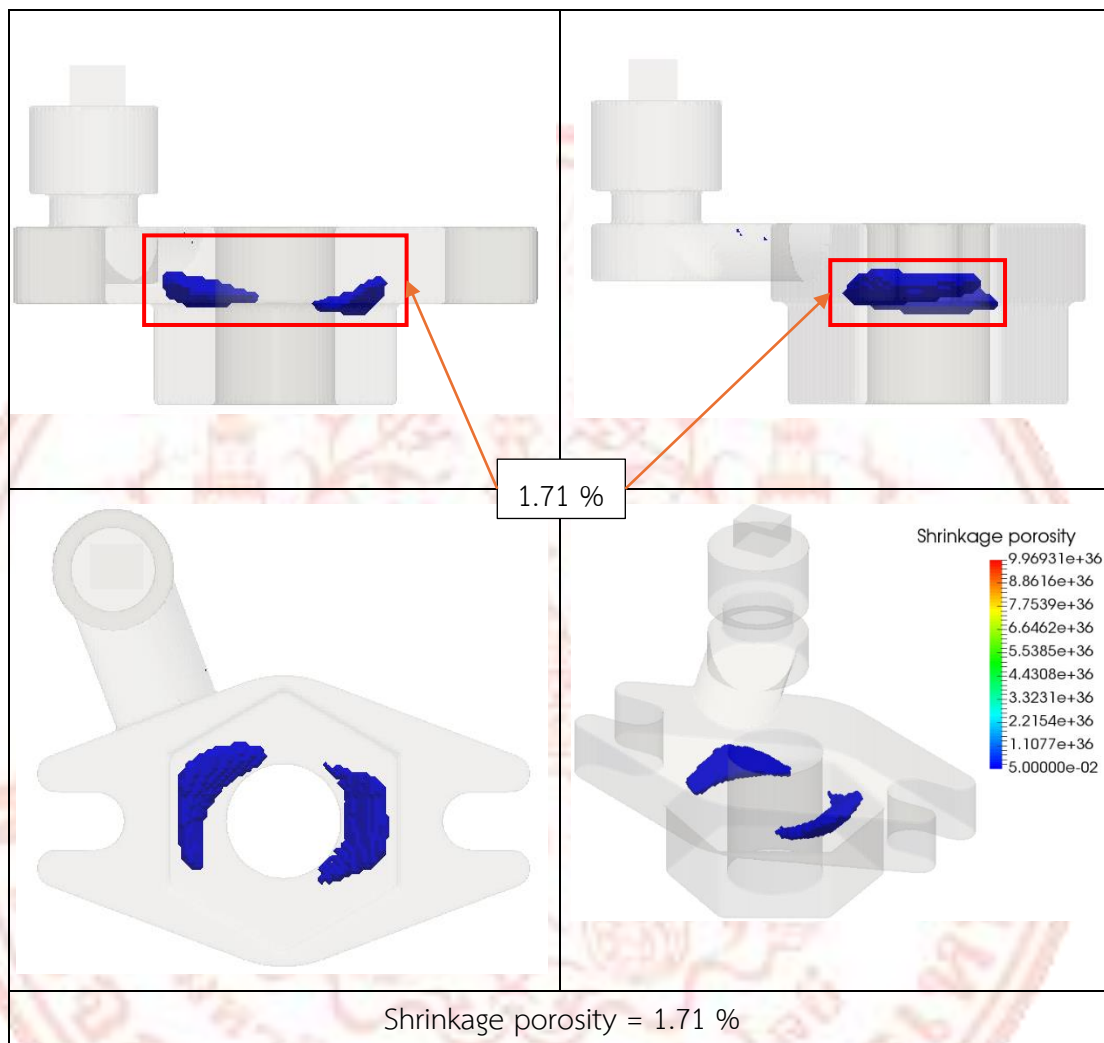


ภาพที่ 4-114 แสดงการจำลองการเกิดโพรงหดตัวภายในชิ้นงานทดสอบการลดขนาดหีบبنที่ใช้ในการเทหล่อแบบไม่มีรูล้นสูง 40 มิลลิเมตร

จากภาพที่ 4-114 จะแสดงให้เห็นถึงตำแหน่งของการเกิดโพรงหดตัวภายในชิ้นงาน เมื่อเทียบกับชิ้นงานที่มีปริมาตร 172.91 cm^3 โดยไม่นับรูล้น ทางเข้า และรูเท จะมีเปอร์เซ็นต์ของการเกิดโพรงหดตัวอยู่ที่ 2.80 cm^3 หรือ 1.63 เปอร์เซ็นต์ของปริมาตรเฉพาะชิ้นงาน

4.8.4.3.3 ทดสอบการลดขนาดที่แบบที่ใช้ในการเทหล่อแบบไม่มีรูล้นสูง

30 มิลลิเมตร

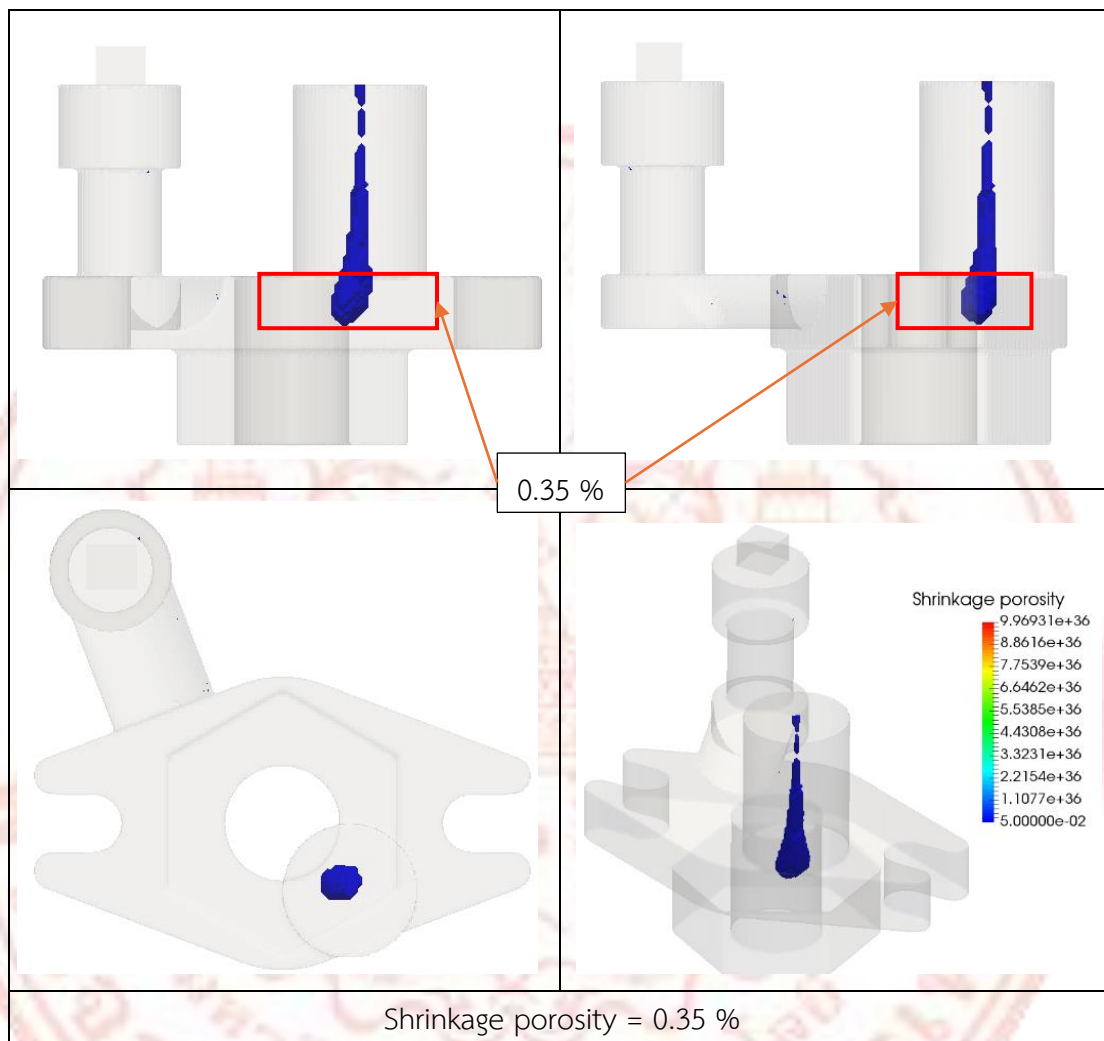


ภาพที่ 4-115 แสดงการจำลองการเกิดโพรงหดตัวภายในชิ้นงานทดสอบการลดขนาดที่แบบที่ใช้ในการเทหล่อแบบไม่มีรูล้นสูง 30 มิลลิเมตร

จากภาพที่ 4-115 จะแสดงให้เห็นถึงตำแหน่งของการเกิดโพรงหดตัวภายในชิ้นงาน เมื่อเทียบกับชิ้นงานที่มีปริมาตร 172.91 cm^3 โดยไม่นับรูล้น ทางเข้า และรูเท จะมีเปอร์เซ็นต์ของการเกิดโพรงหดตัวอยู่ที่ 2.96 cm^3 หรือ 1.71 เปอร์เซ็นต์ของปริมาตรเฉพาะชิ้นงาน

4.8.4.3.4 ทดสอบการลดขนาดที่แบบที่ใช้ในการเทหล่อแบบปรับรู้นสูง

50 มิลลิเมตร



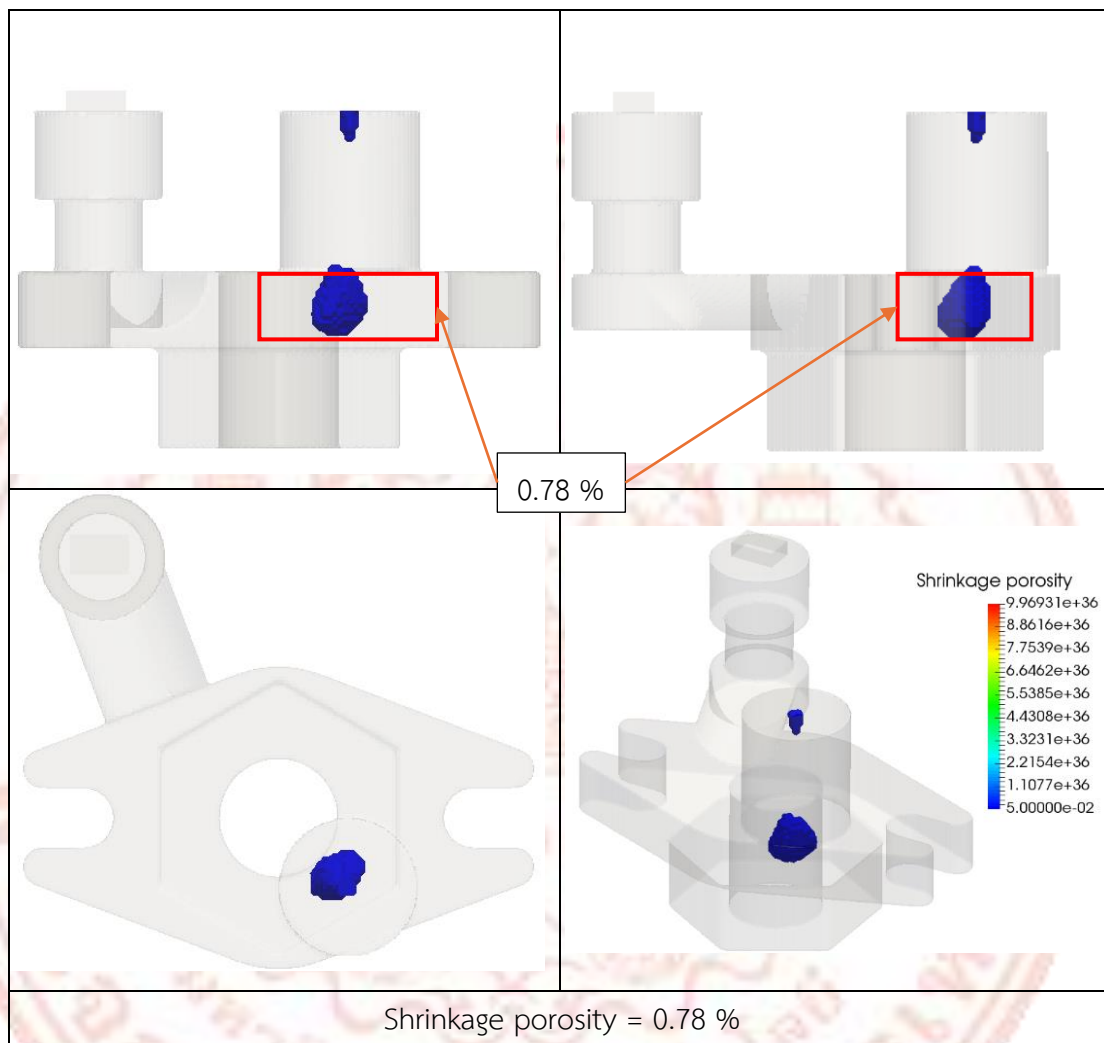
ภาพที่ 4-116 แสดงการจำลองการเกิดโพรงหดตัวภายในชิ้นงานทดสอบการลดขนาดที่แบบที่ใช้ใน

การเทหล่อแบบปรับรู้นสูง 50 มิลลิเมตร

จากภาพที่ 4-116 จะแสดงให้เห็นถึงตำแหน่งของการเกิดโพรงหดตัวภายในชิ้นงาน เมื่อเทียบกับชิ้นงานที่มีปริมาตร 172.91 cm^3 โดยไม่นับรู้น ทางเข้า และรูเท จะมีเปอร์เซ็นต์ของการเกิดโพรงหดตัวอยู่ที่ 0.622 cm^3 หรือ 0.35 เปอร์เซ็นต์ของปริมาตรเฉพาะชิ้นงาน

4.8.4.3.5 ทดสอบการลดขนาดที่แบบที่ใช้ในการเทหล่อแบบปรับรูล้นสูง

40 มิลลิเมตร

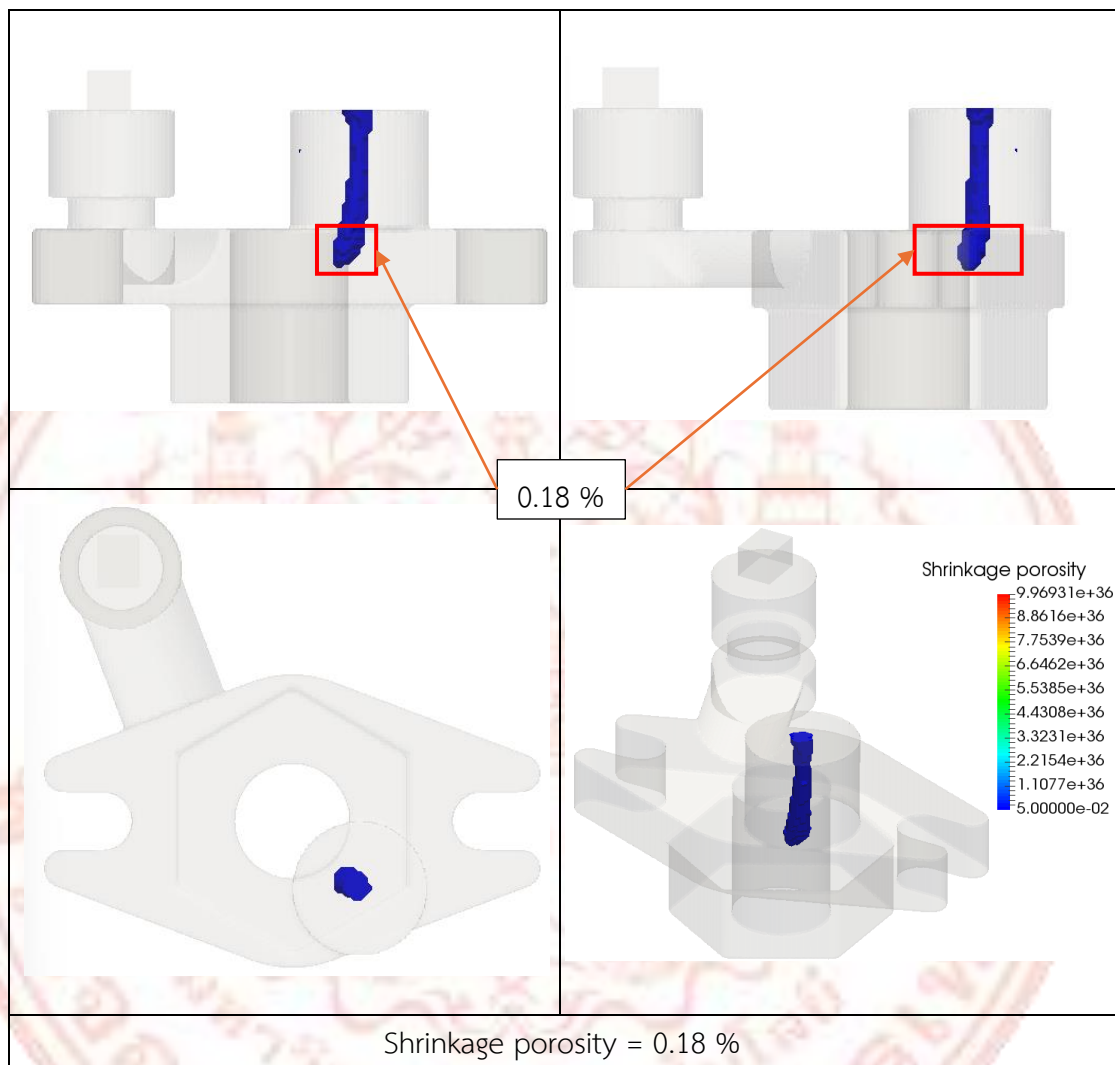


ภาพที่ 4-117 แสดงการจำลองการเกิดโพรงหดตัวภายในชิ้นงานทดสอบการลดขนาดที่แบบที่ใช้ในการเทหล่อแบบปรับรูล้นสูง 40 มิลลิเมตร

จากภาพที่ 4-117 จะแสดงให้เห็นถึงตำแหน่งของการเกิดโพรงหดตัวภายในชิ้นงาน เมื่อเทียบกับชิ้นงานที่มีปริมาตร 172.91 cm^3 โดยไม่นับรูล้น ทางเข้า และรูเท จะมีเปอร์เซ็นต์ของการเกิดโพรงหดตัวอยู่ที่ 1.39 cm^3 หรือ 0.78 เปอร์เซ็นต์ของปริมาตรเฉพาะชิ้นงาน

4.8.4.3.6 ทดสอบการลดขนาดที่บนที่ใช้ในการเทหล่อแบบปรับรูล้นสูง

30 มิลลิเมตร

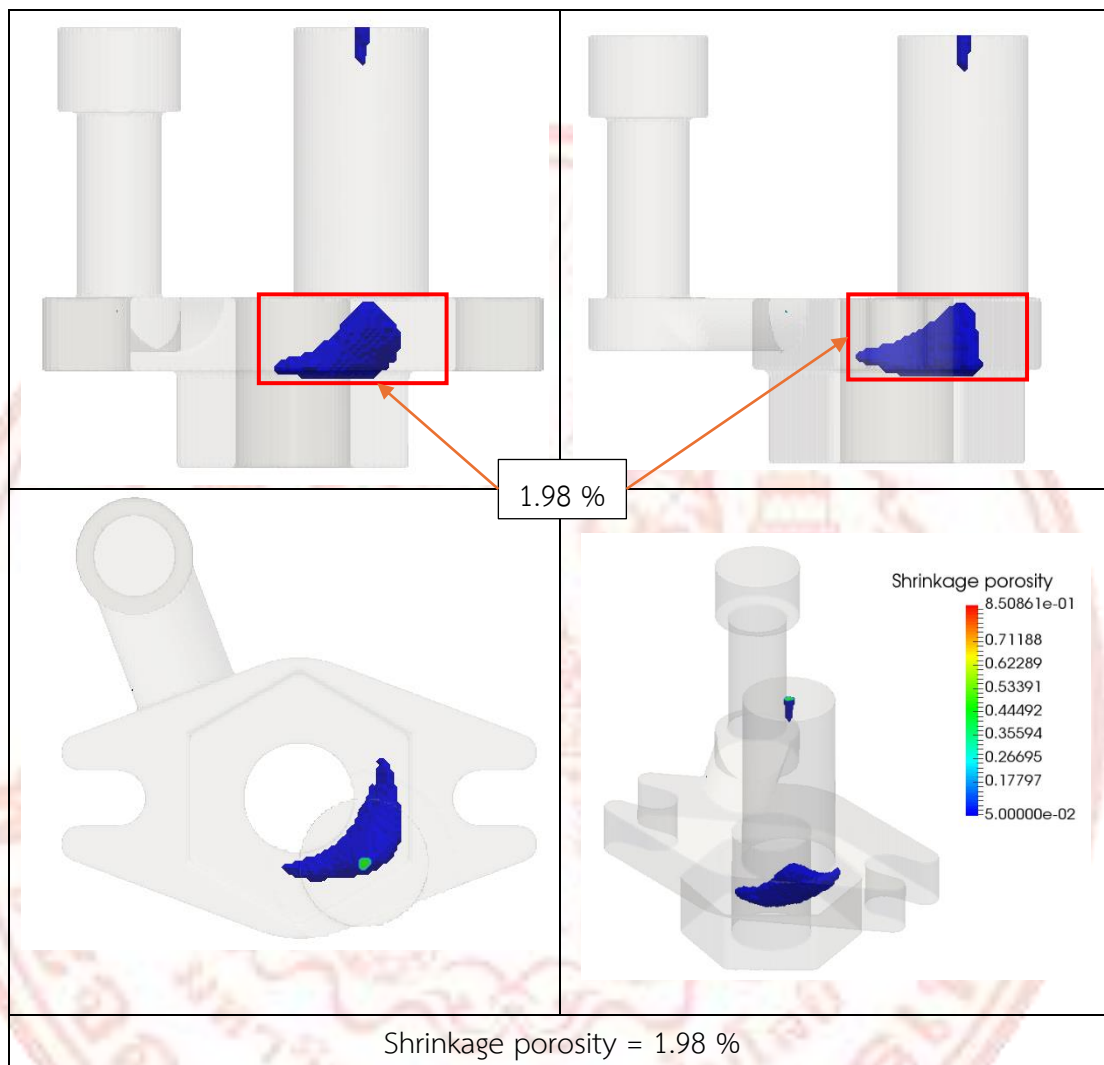


ภาพที่ 4-118 แสดงการจำลองการเกิดโพรงหดตัวภายในชิ้นงานทดสอบการลดขนาดที่บนที่ใช้ในการเทหล่อแบบปรับรูล้นสูง 30 มิลลิเมตร

จากภาพที่ 4-118 จะแสดงให้เห็นถึงตำแหน่งของการเกิดโพรงหดตัวภายในชิ้นงาน เมื่อเทียบกับชิ้นงานที่มีปริมาตร 172.91 cm^3 โดยไม่นับรูล้น ทางเข้า และรูเท จะมีเปอร์เซ็นต์ของการเกิดโพรงหดตัวอยู่ที่ 0.319 cm^3 หรือ 0.18 เปอร์เซ็นต์ของปริมาตรเฉพาะชิ้นงาน

4.8.4.3.7 ทดสอบการลดขนาดที่แบบที่ใช้ในการเทหล่อแบบไม่ปรับรูล้นสูง

50 มิลลิเมตร

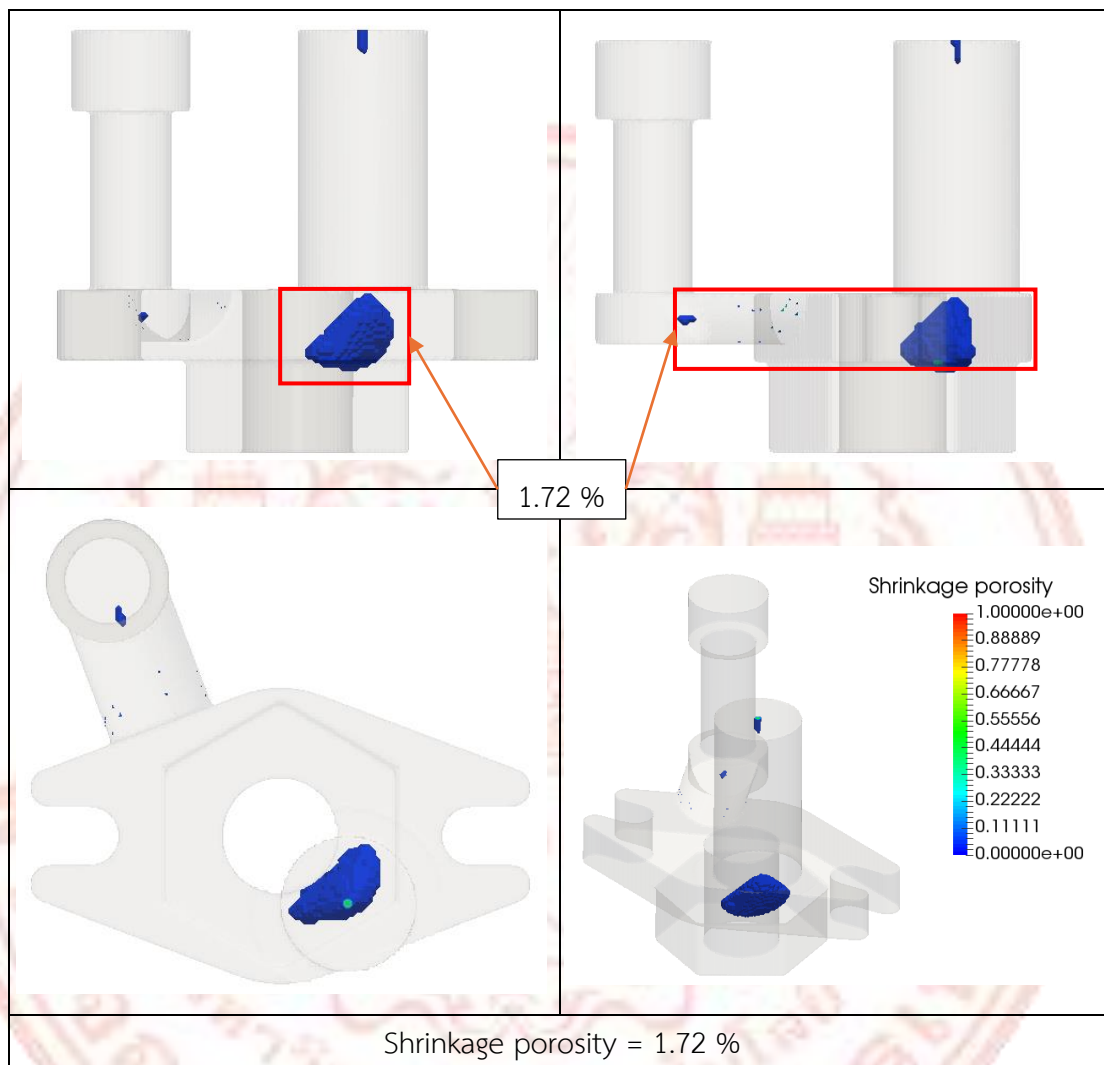


ภาพที่ 4-119 แสดงการจำลองการเกิดโพรงหดตัวภายในชิ้นงานทดสอบการลดขนาดที่แบบที่ใช้ในการเทหล่อแบบปรับรูล้นสูง 50 มิลลิเมตร

จากภาพที่ 4-119 จะแสดงให้เห็นถึงตำแหน่งของการเกิดโพรงหดตัวภายในชิ้นงาน เมื่อเทียบกับชิ้นงานที่มีปริมาตร 172.91 cm^3 โดยไม่นับรูล้น ทางเข้า และรูเท จะมีเปอร์เซ็นต์ของการเกิดโพรงหดตัวอยู่ที่ 1.619 cm^3 หรือ 1.98 เปอร์เซ็นต์ของปริมาตรเฉพาะชิ้นงาน

4.8.4.3.8 ทดสอบการลดขนาดที่แบบที่ใช้ในการเทหล่อแบบปรับรูล้นสูง

40 มิลลิเมตร

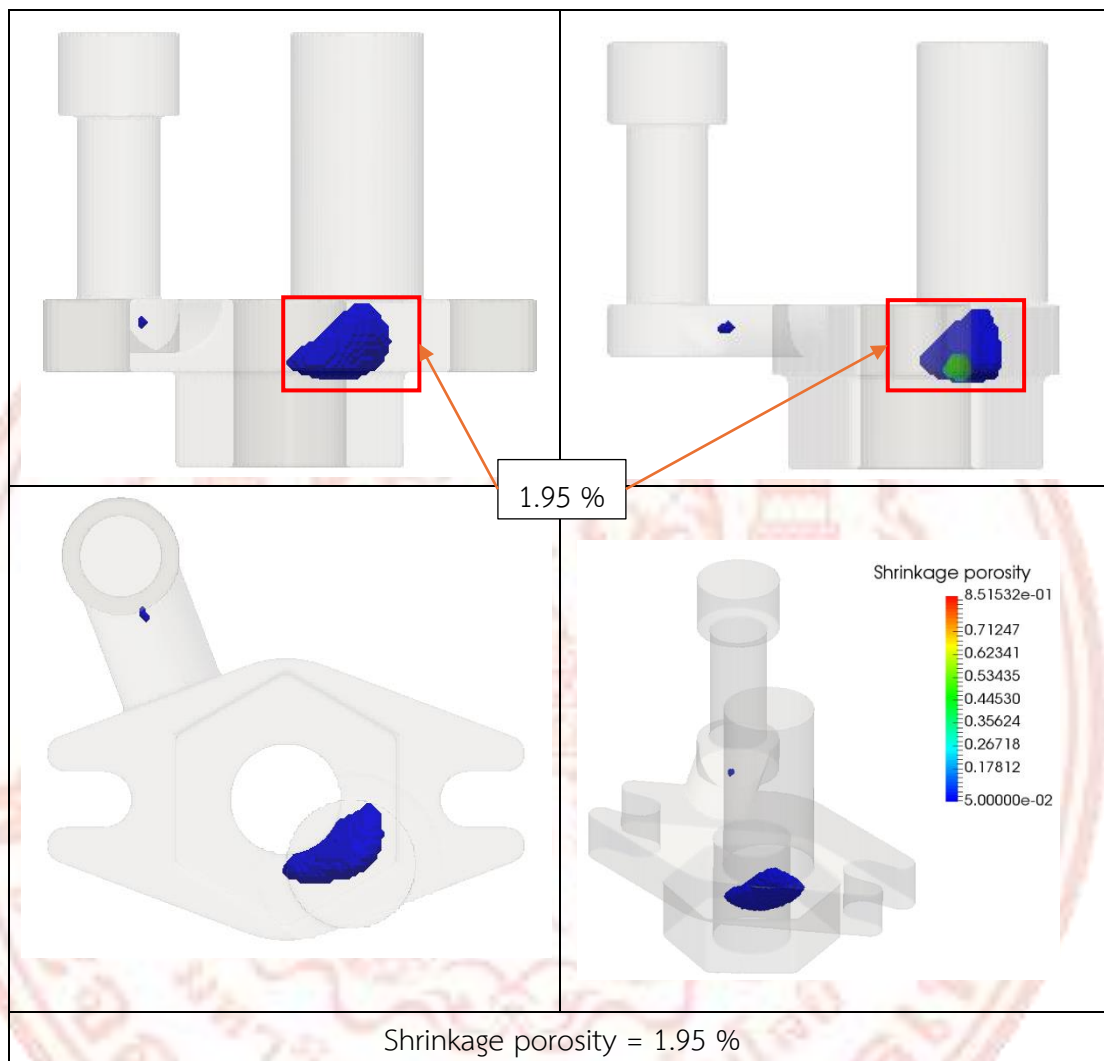


ภาพที่ 4-120 แสดงการจำลองการเกิดโพรงหดตัวภายในชิ้นงานทดสอบการลดขนาดที่แบบที่ใช้ในการเทหล่อแบบไม่ปรับรูล้นสูง 40 มิลลิเมตร

จากภาพที่ 4-120 จะแสดงให้เห็นถึงตำแหน่งของการเกิดโพรงหดตัวภายในชิ้นงาน เมื่อเทียบกับชิ้นงานที่มีปริมาตร 172.91 cm^3 โดยไม่นับรูล้น ทางเข้า และรูเท จะมีเปอร์เซ็นต์ของการเกิดโพรงหดตัวอยู่ที่ 1.549 cm^3 หรือ 1.72 เปอร์เซ็นต์ของปริมาตรเฉพาะชิ้นงาน

4.8.4.3.9 ทดสอบการลดขนาดที่แบบที่ใช้ในการเทหล่อแบบไม่ปรับรู้นสูง

30 มิลลิเมตร



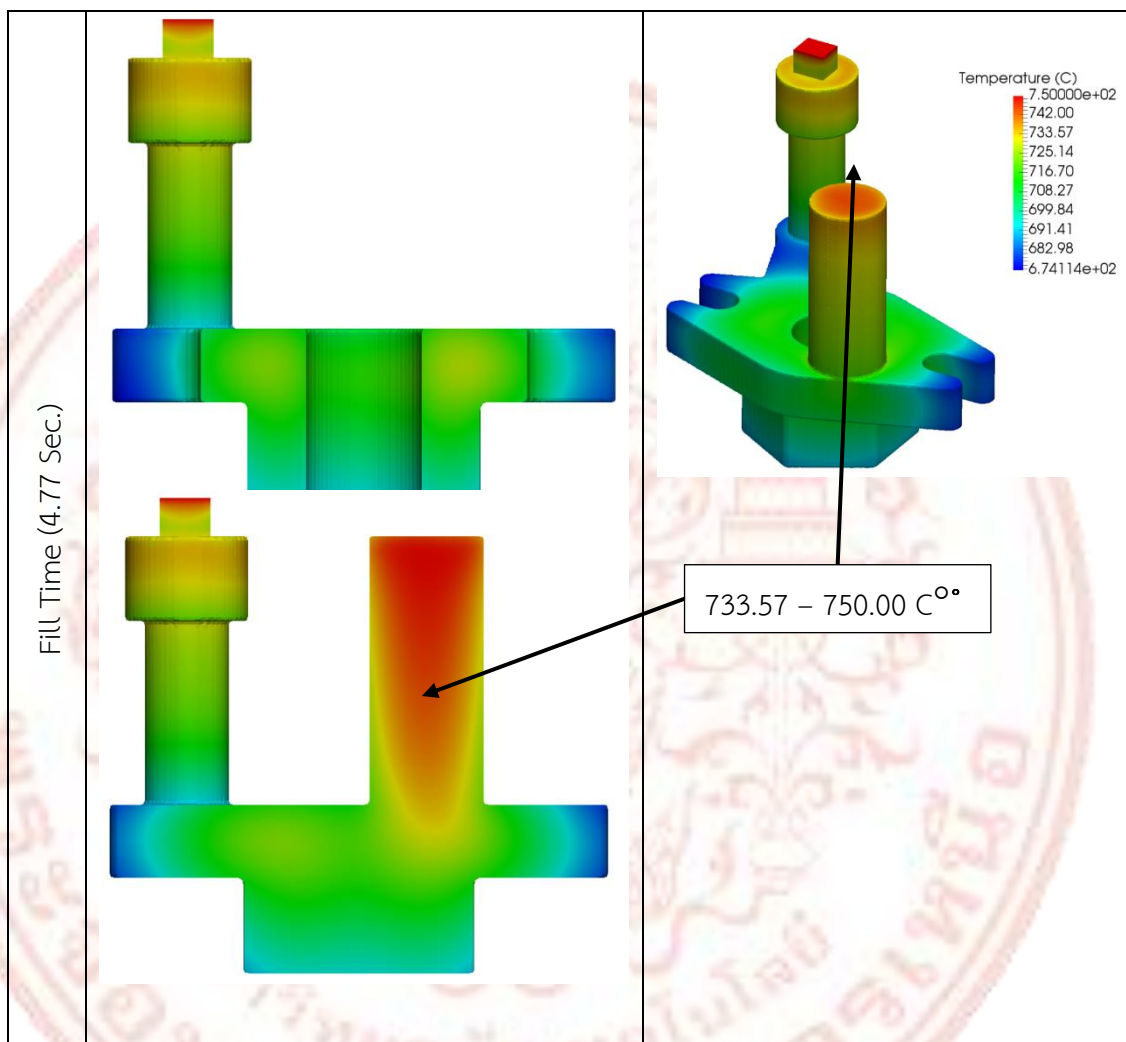
ภาพที่ 4-121 แสดงการจำลองการเกิดโพรงหดตัวภายในชิ้นงานทดสอบการลดขนาดที่แบบที่ใช้ในการเทหล่อแบบไม่ปรับรู้นสูง 30 มิลลิเมตร

จากภาพที่ 4-121 จะแสดงให้เห็นถึงตำแหน่งของการเกิดโพรงหดตัวภายในชิ้นงาน เมื่อเทียบกับชิ้นงานที่มีปริมาตร 172.91 cm^3 โดยไม่ปรับรู้นสูง ทางเข้า และรูเท จะมีเปอร์เซ็นต์ของการเกิดโพรงหดตัวอยู่ที่ 1.642 cm^3 หรือ 1.95 เปอร์เซ็นต์ของปริมาตรเฉพาะชิ้นงาน

4.8.5 แสดงผลการจำลองอุณหภูมิของชิ้นงาน (Temperature)

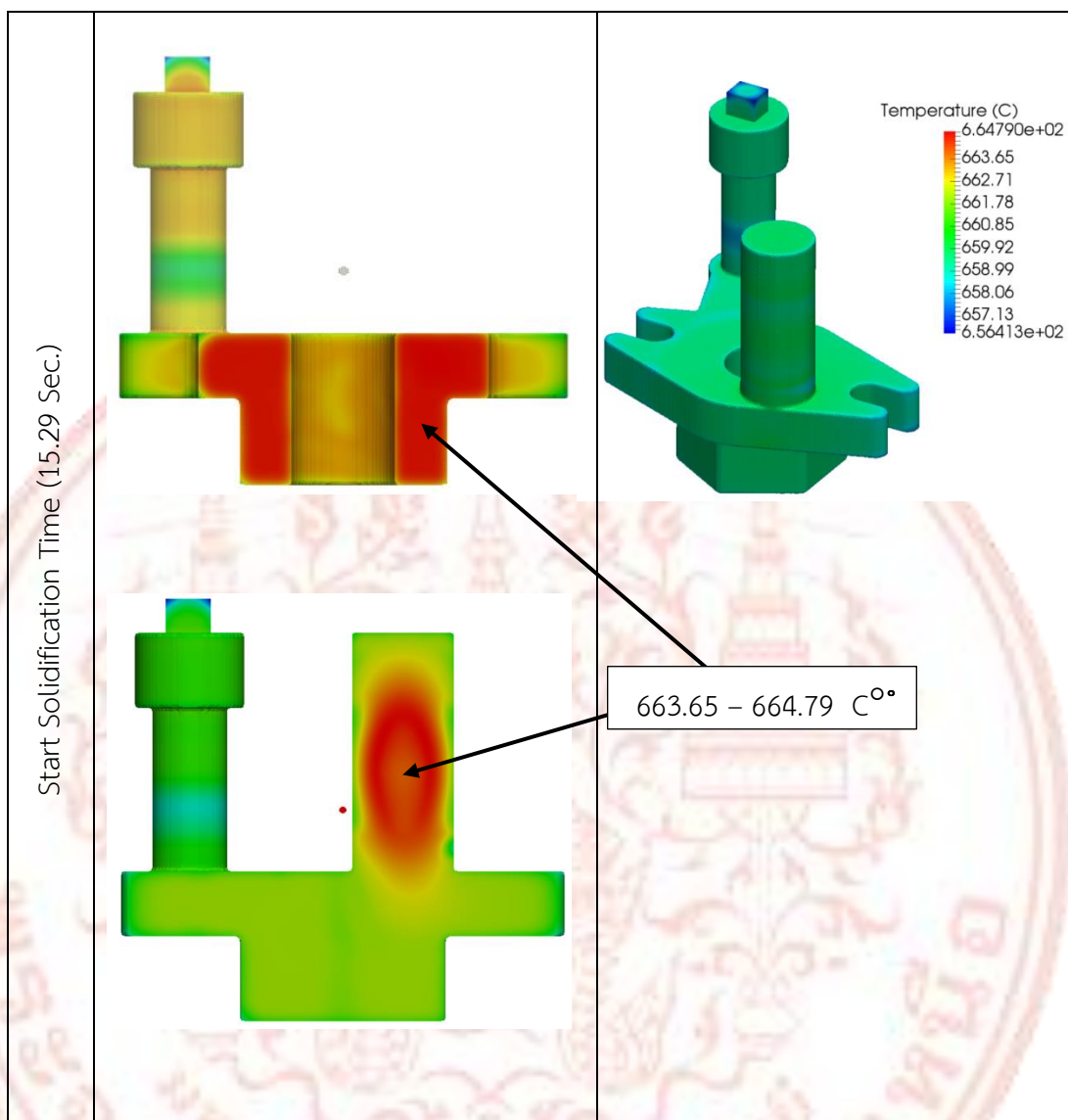
4.8.5.1 การจำลองการปรับขนาดรูล้น

4.8.5.1.1 ทดสอบปรับขนาดรูล้นเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 30 มิลลิเมตร



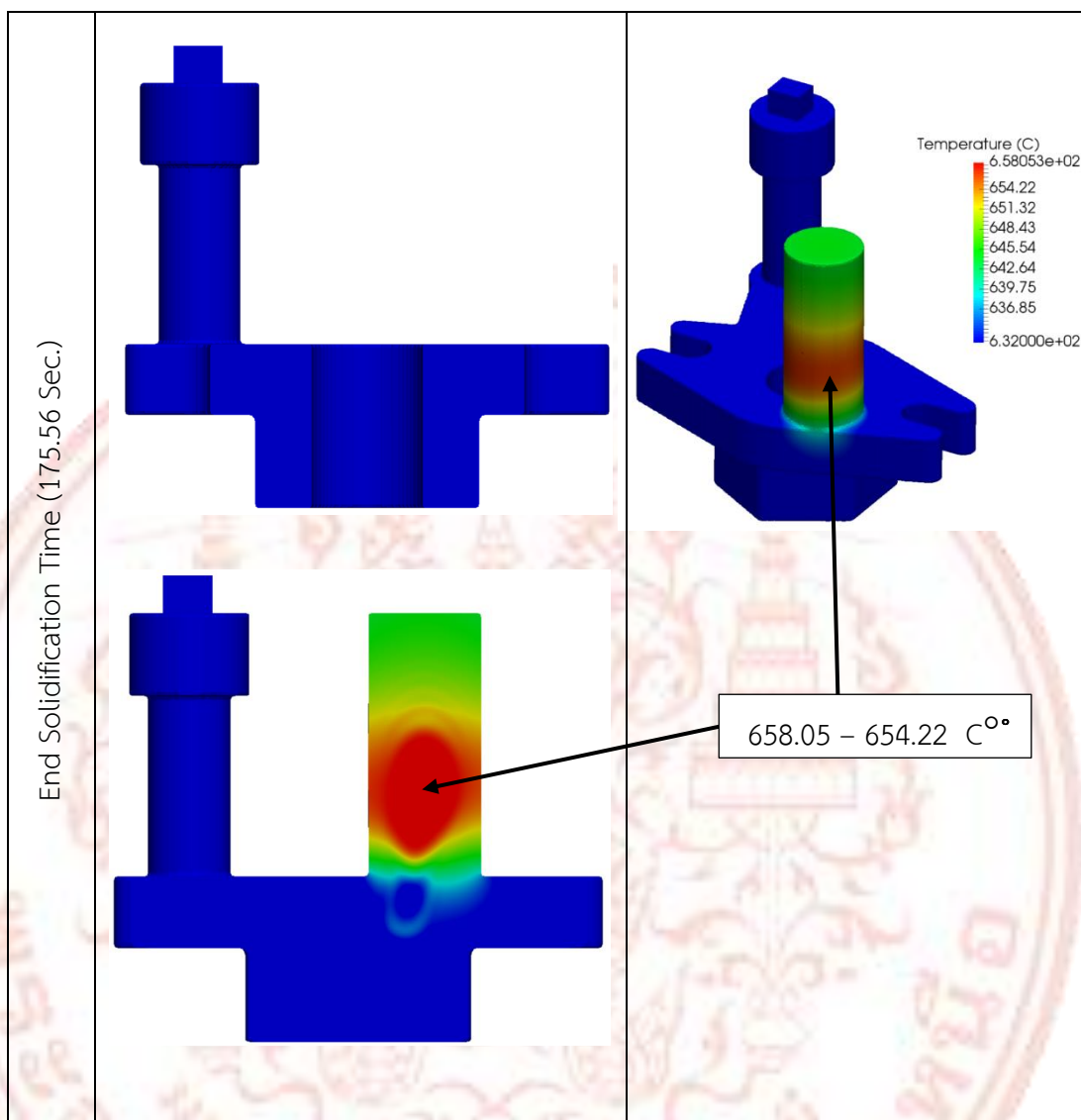
ภาพที่ 4-122 แสดงการจำลองอุณหภูมิ ณ ช่วงเวลา Fill Time ของชิ้นงานทดสอบปรับขนาดรูล้นเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 30 มิลลิเมตร

โดยสรุปจากผลการจำลองด้านอุณหภูมิทั้งสามช่วงเวลาของชิ้นงานทดสอบปรับขนาดรูล้นเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 30 มิลลิเมตร แสดงให้เห็นว่า ณ ช่วงเวลาสิ้นสุดการเติมน้ำโลหะ อุณหภูมิที่สูงที่สุดจะอยู่ที่บริเวณรูล้นโดยมีอุณหภูมิประมาณ 733.57 – 750.00 องศาเซลเซียส ดังภาพที่ 4-122



ภาพที่ 4-123 แสดงการจำลองอุณหภูมิ ณ ช่วงเวลา Start Solidification Time ของชิ้นงานทดสอบปรับขนาดรูกลั่นเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 30 มิลลิเมตร

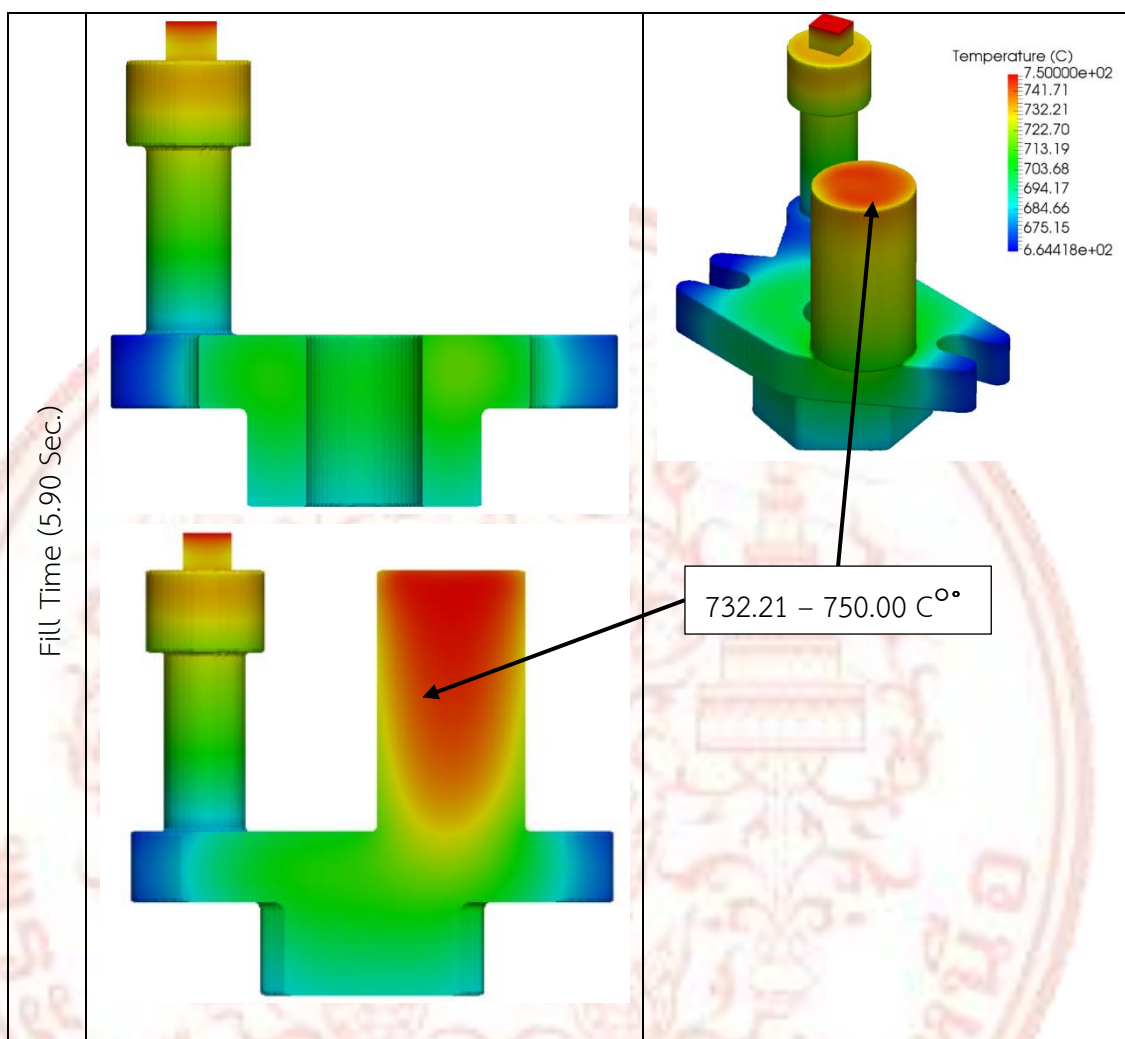
ต่อมาเมื่อเข้าสู่ช่วงเริ่มต้นการแข็งตัว อุณหภูมิโดยเฉลี่ยทั่วชิ้นงานยกเว้นบริเวณผิวจะมีค่าใกล้เคียงกันอยู่ที่ประมาณ 663.65 – 664.79 องศาเซลเซียส แต่จะมีเฉพาะผิวเท่านั้นที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า แสดงให้เห็นถึงการเย็นตัวของรูกลั่นที่เร็วกว่าชิ้นงาน ดังภาพที่ 4-123



ภาพที่ 4-124 แสดงการจำลองอุณหภูมิ ณ ช่วงเวลา End Solidification Time ของชิ้นงานทดสอบปรับขนาดรูเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 30 มิลลิเมตร

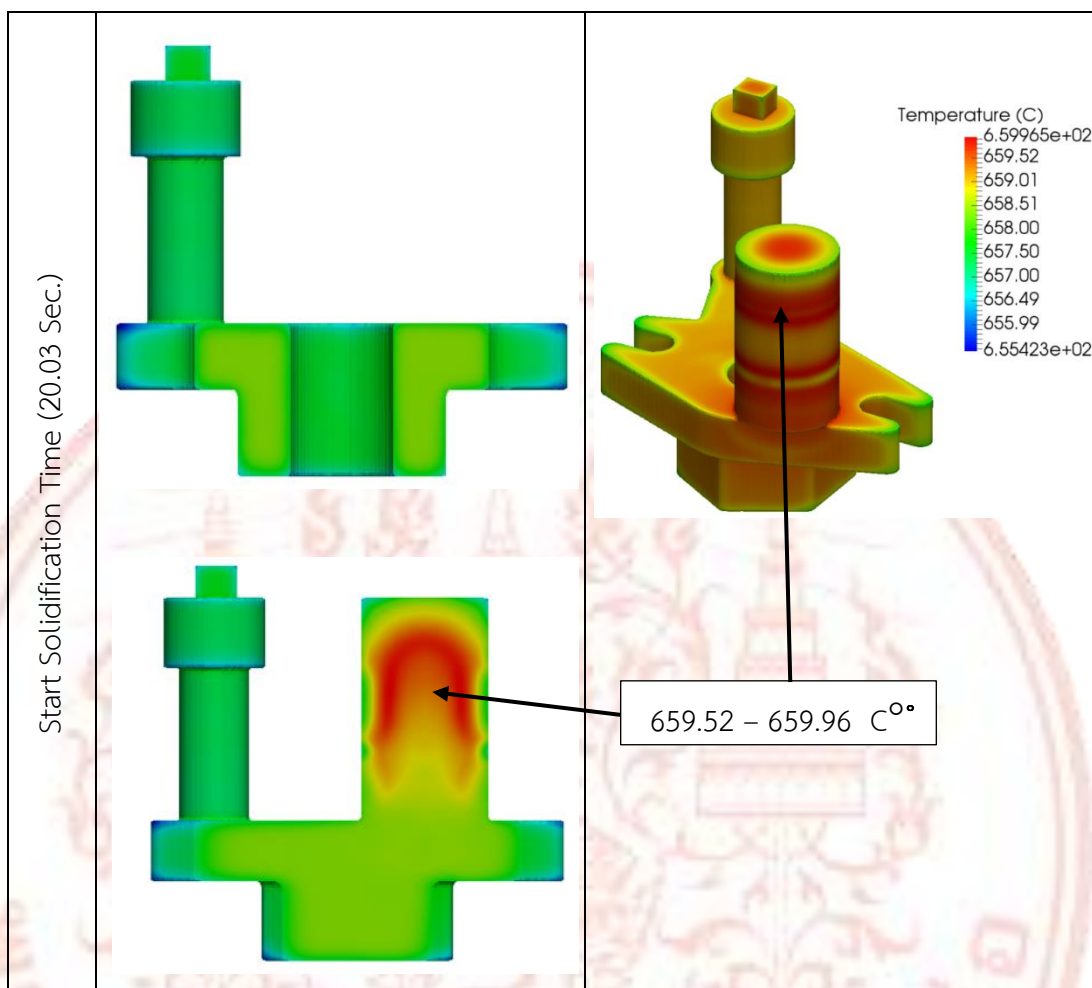
จนเมื่อถึงช่วงเวลาสิ้นสุดการแข็งตัว จะสังเกตได้ว่าอุณหภูมิส่วนใหญ่ของชิ้นงานจะลดลงมาใกล้เคียงกันอยู่ที่ประมาณ 632.00 - 636.85 องศาเซลเซียส ยกเว้นแต่บริเวณรูชิ้นงานที่มีอุณหภูมิสูงกว่าเฉลี่ยของชิ้นงานที่ประมาณ 658.05 - 654.22 องศาเซลเซียสแสดงให้เห็นว่าชิ้นงานสามารถถ่ายเทความร้อนออกจากบริเวณกลางชิ้นงานได้ดี ทำให้อุณหภูมิสะสมอยู่ที่บริเวณรู ดังนั้น ภาพที่ 4-

4.8.5.1.1 ทดสอบปรับขนาดรูเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 40 มิลลิเมตร



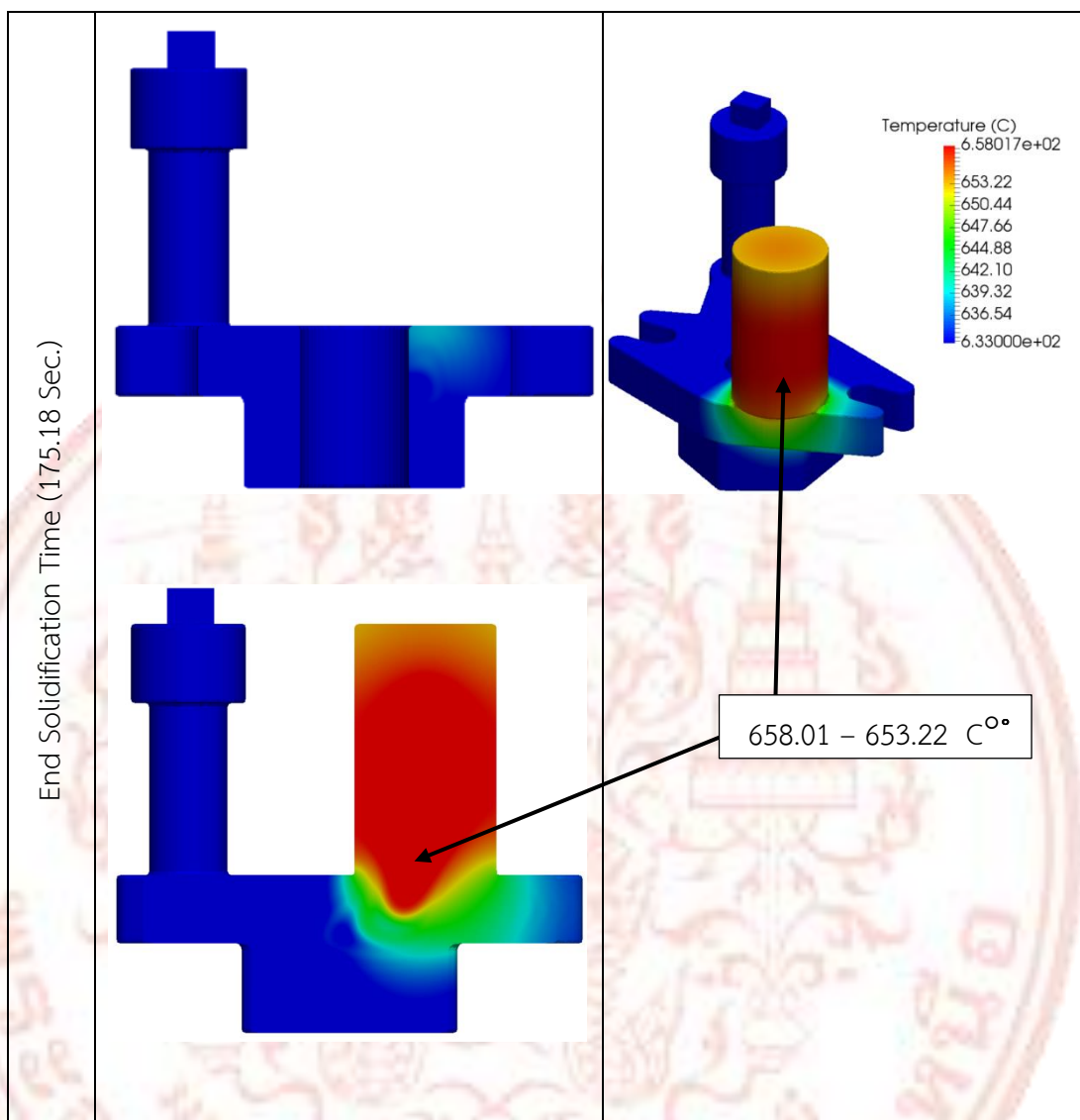
ภาพที่ 4-125 แสดงการจำลองอุณหภูมิ ณ ช่วงเวลา Fill Time ของชิ้นงานทดสอบปรับขนาดรูเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 40 มิลลิเมตร

โดยสรุปจากผลการจำลองด้านอุณหภูมิทั้งสามช่วงเวลาของชิ้นงานทดสอบปรับขนาดรูเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 40 มิลลิเมตร แสดงให้เห็นว่า ณ ช่วงเวลาสิ้นสุดการเติมน้ำโลหะ อุณหภูมิที่สูงที่สุดจะอยู่ที่บริเวณรูเส้นโดยมีอุณหภูมิประมาณ 732.21 – 750.00 องศาเซลเซียส ดังภาพที่ 4-125



ภาพที่ 4-126 แสดงการจำลองอุณหภูมิ ณ ช่วงเวลา Start Solidification Time ของชิ้นงานทดสอบปรับขนาดรูเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 40 มิลลิเมตร

ต่อมาเมื่อเข้าสู่ช่วงเริ่มต้นการแข็งตัว อุณหภูมิโดยเฉลี่ยทั่วชิ้นงานจะมีค่าใกล้เคียงกันอยู่ที่ประมาณ 659.52 – 659.96 องศาเซลเซียส มีเฉพาะผิวเท่านั้นที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า แสดงให้เห็นการเย็นดังภาพที่ 4-126

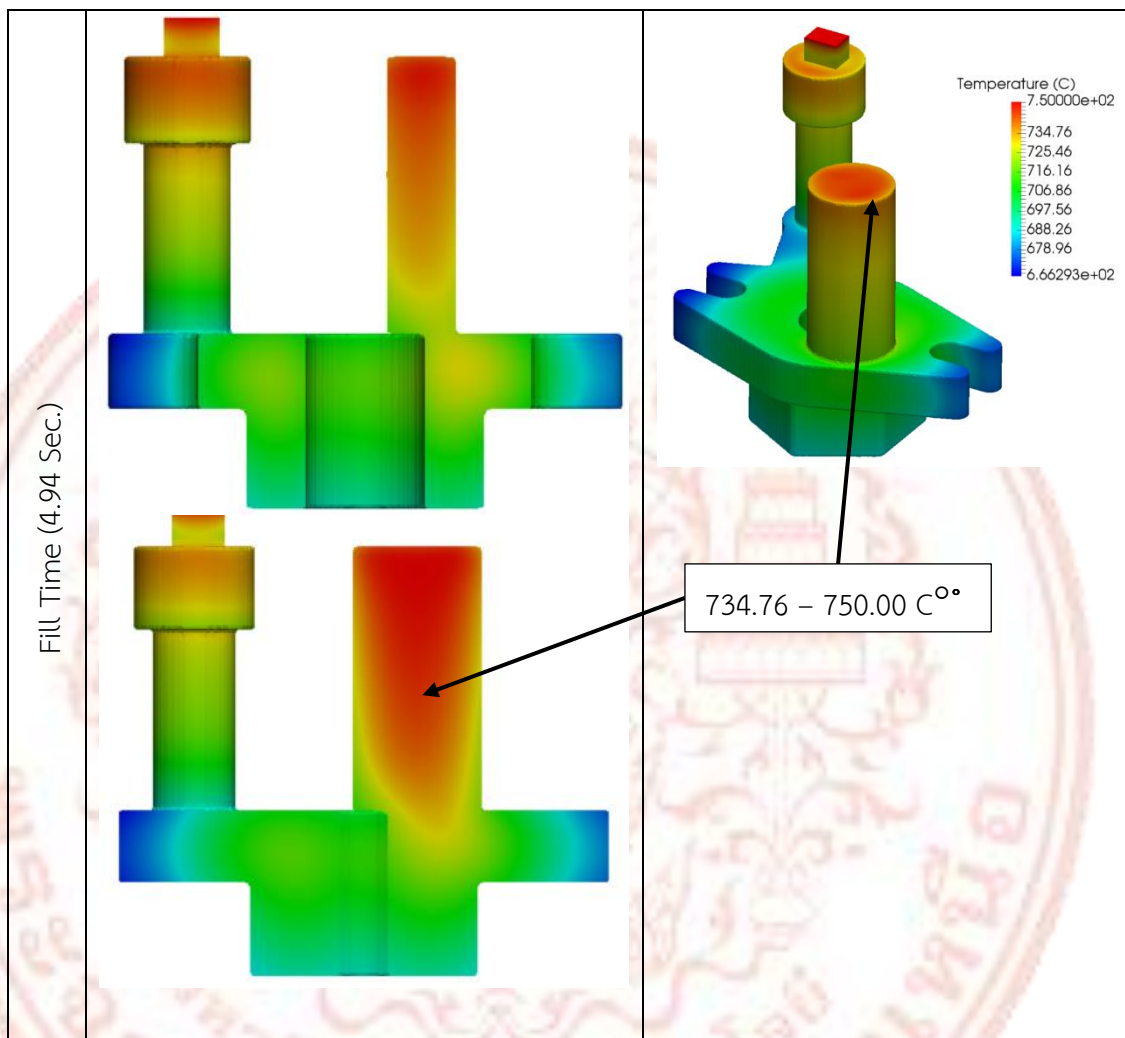


ภาพที่ 4-127 แสดงการจำลองอุณหภูมิ ณ ช่วงเวลา End Solidification Time ของชิ้นงานทดสอบปรับขนาดรูเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 40 มิลลิเมตร

จนเมื่อถึงช่วงเวลาสิ้นสุดการแข็งตัว จะสังเกตได้ว่าอุณหภูมิส่วนใหญ่ของชิ้นงานจะลดลงมาใกล้เคียงกันอยู่ที่ประมาณ 633 องศาเซลเซียส ยกเว้นแต่บริเวณรูชิ้นงานที่มีอุณหภูมิสูงกว่าเฉลี่ยของชิ้นงานที่ประมาณ 653.22 - 658.01 องศาเซลเซียสแสดงให้เห็นว่าชิ้นงานสามารถถ่ายเทความร้อนออกจากบริเวณกลางชิ้นงานได้ดี ทำให้อุณหภูมิสะสมอยู่ที่บริเวณรู ดังภาพที่ 4-127

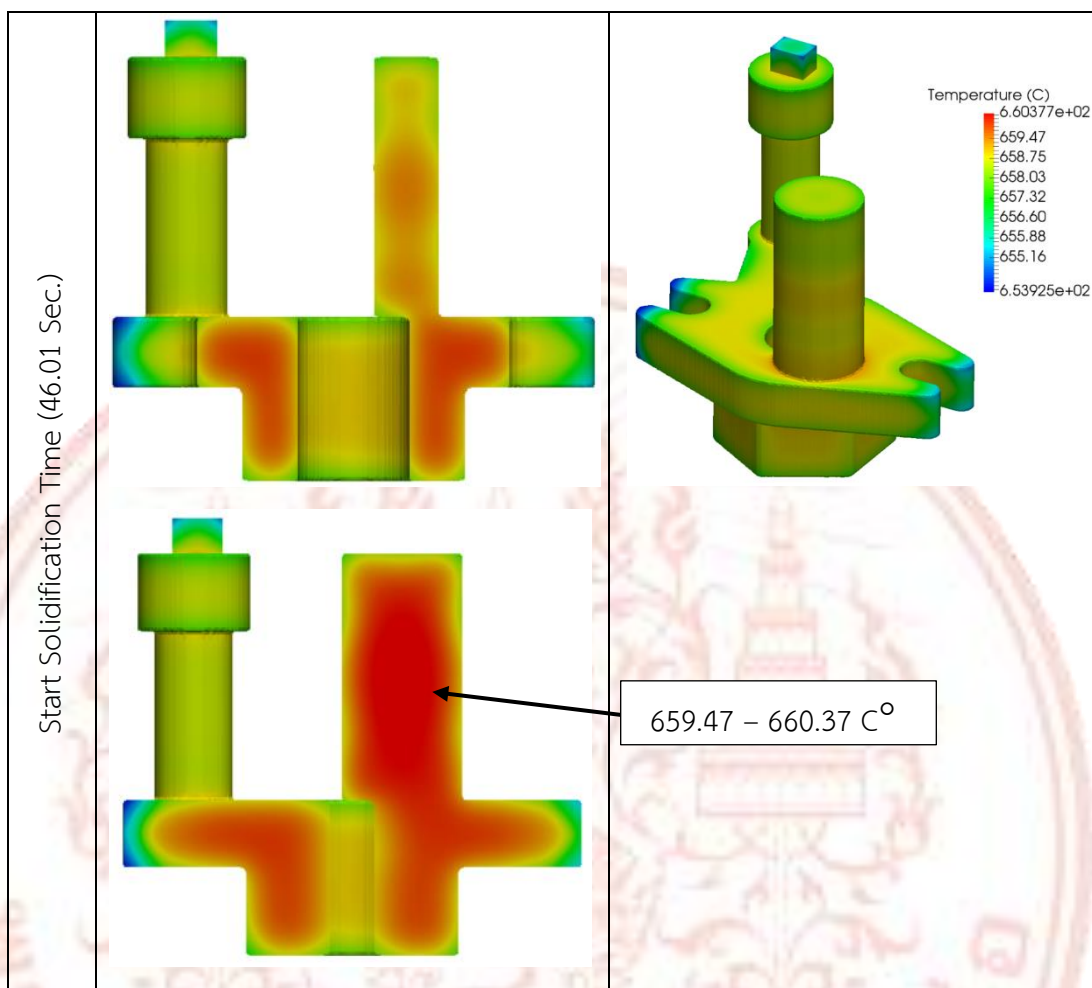
4.8.5.2 การจำลองการปรับตำแหน่งรูล้น

4.8.4.2.1 ทดสอบปรับตำแหน่งรูล้นห่างจากจุดศูนย์กลาง 20 มิลลิเมตร



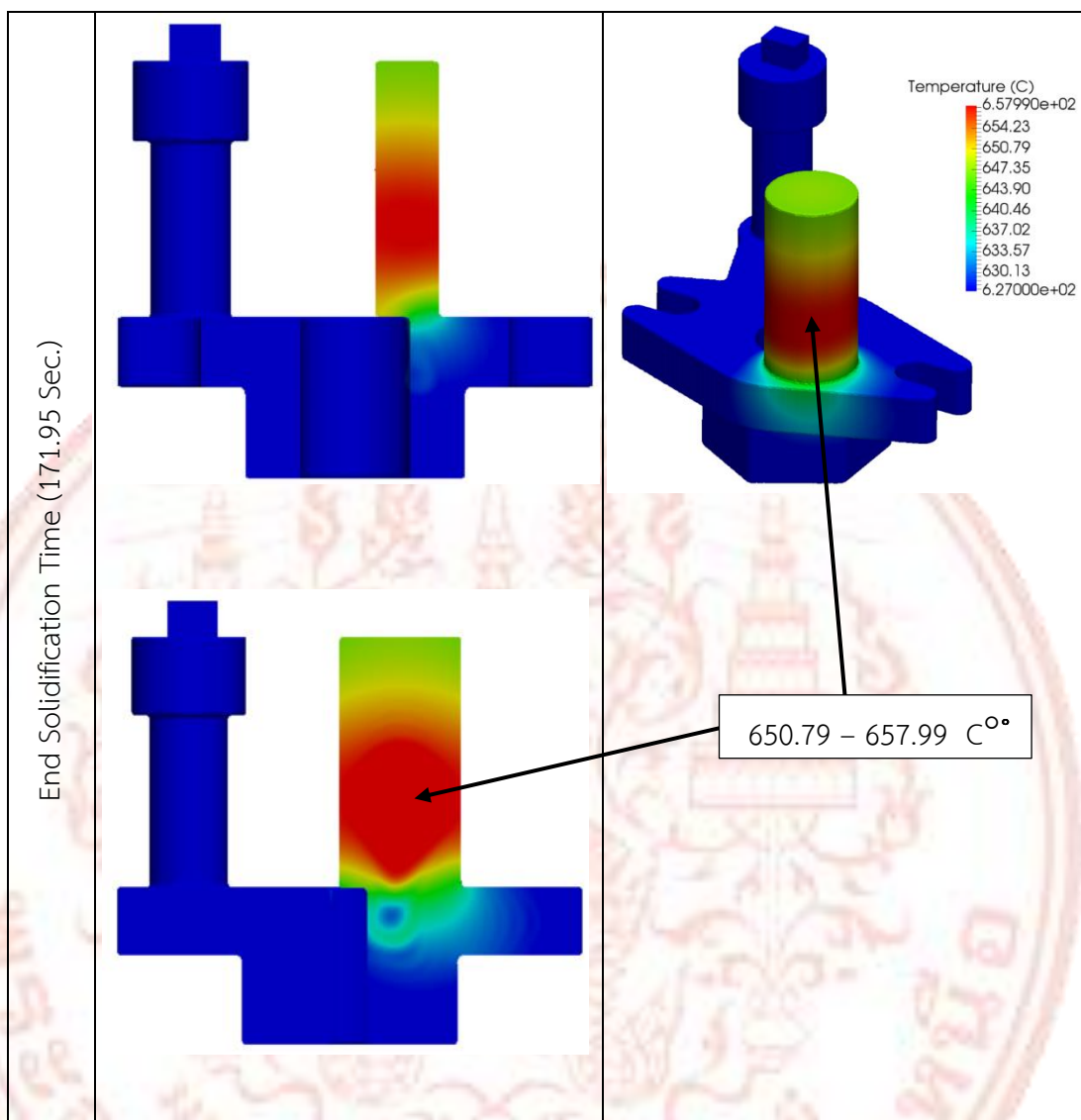
ภาพที่ 4-128 แสดงการจำลองอุณหภูมิ ณ ช่วงเวลา Fill Time ของชิ้นงานทดสอบปรับตำแหน่งรูล้นห่างจากจุดศูนย์กลาง 20 มิลลิเมตร

โดยสรุปจากผลการจำลองด้านอุณหภูมิทั้งสามช่วงเวลาของชิ้นงานทดสอบปรับตำแหน่งรูล้นห่างจากจุดศูนย์กลาง 20 มิลลิเมตร แสดงให้เห็นว่า ณ ช่วงเวลาสิ้นสุดการเติมน้ำโลหะ อุณหภูมิที่สูงที่สุดจะอยู่ที่บริเวณรูล้นโดยมีอุณหภูมิประมาณ 732.21 – 750.00 องศาเซลเซียส ดังภาพที่ 4-128



ภาพที่ 4-129 แสดงการจำลองอุณหภูมิ ณ ช่วงเวลา Start Solidification Time ของชิ้นงานทดสอบปรับตำแหน่งรูลึ้นห่างจากจุดศูนย์กลาง 20 มิลลิเมตร

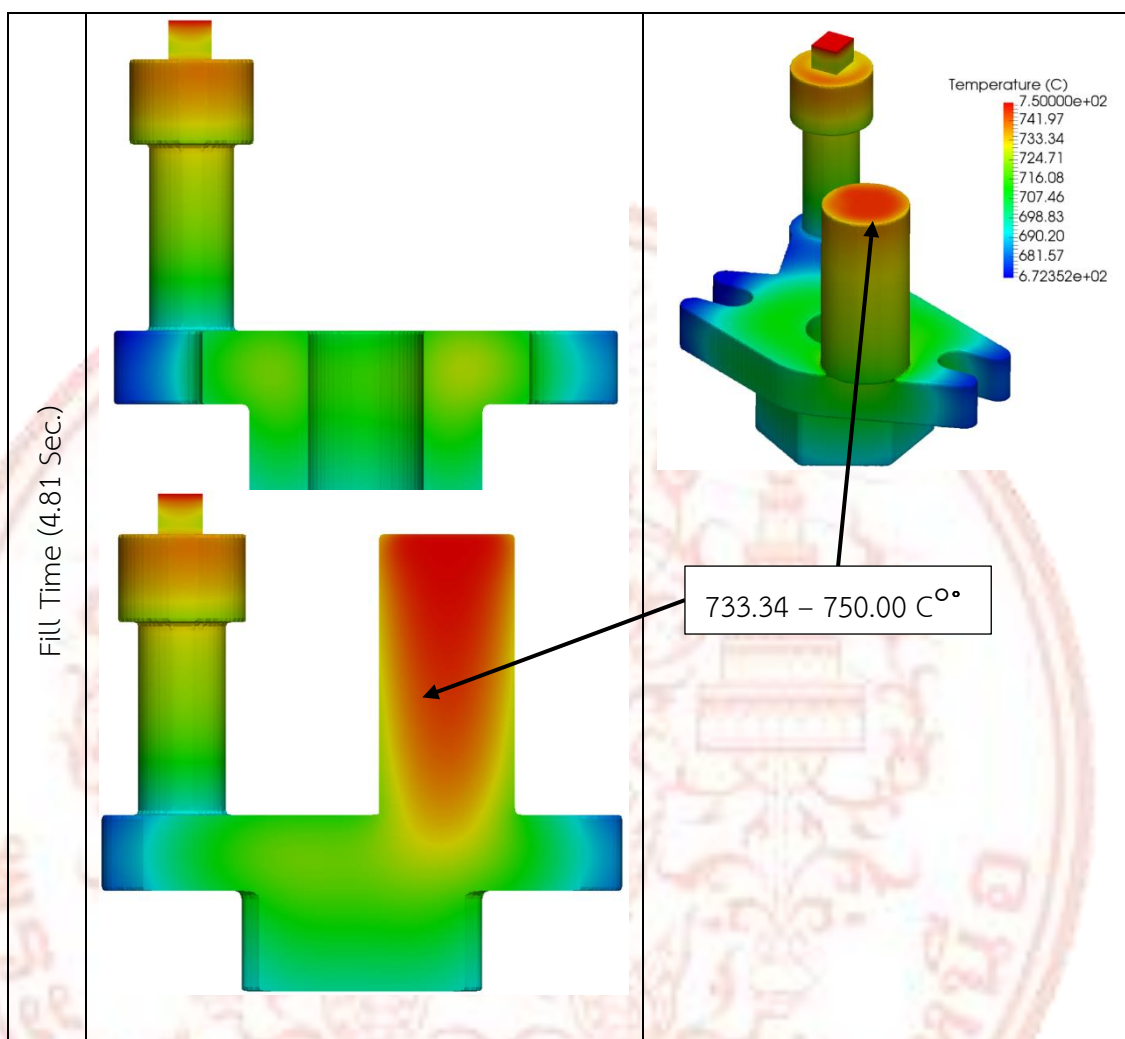
ต่อมาเมื่อเข้าสู่ช่วงเริ่มต้นการแข็งตัว อุณหภูมิโดยเฉลี่ยทั่วชิ้นงานจะมีค่าใกล้เคียงกันอยู่ที่ประมาณ 659.47 – 660.37 องศาเซลเซียส มีเฉพาะผิวเท่านั้นที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า แสดงให้เห็นการเย็นดังภาพที่ 4-129



ภาพที่ 4-130 แสดงการจำลองอุณหภูมิ ณ ช่วงเวลา End Solidification Time ของชิ้นงานทดสอบปรับตำแหน่งรูล้นห่างจากจุดศูนย์กลาง 20 มิลลิเมตร

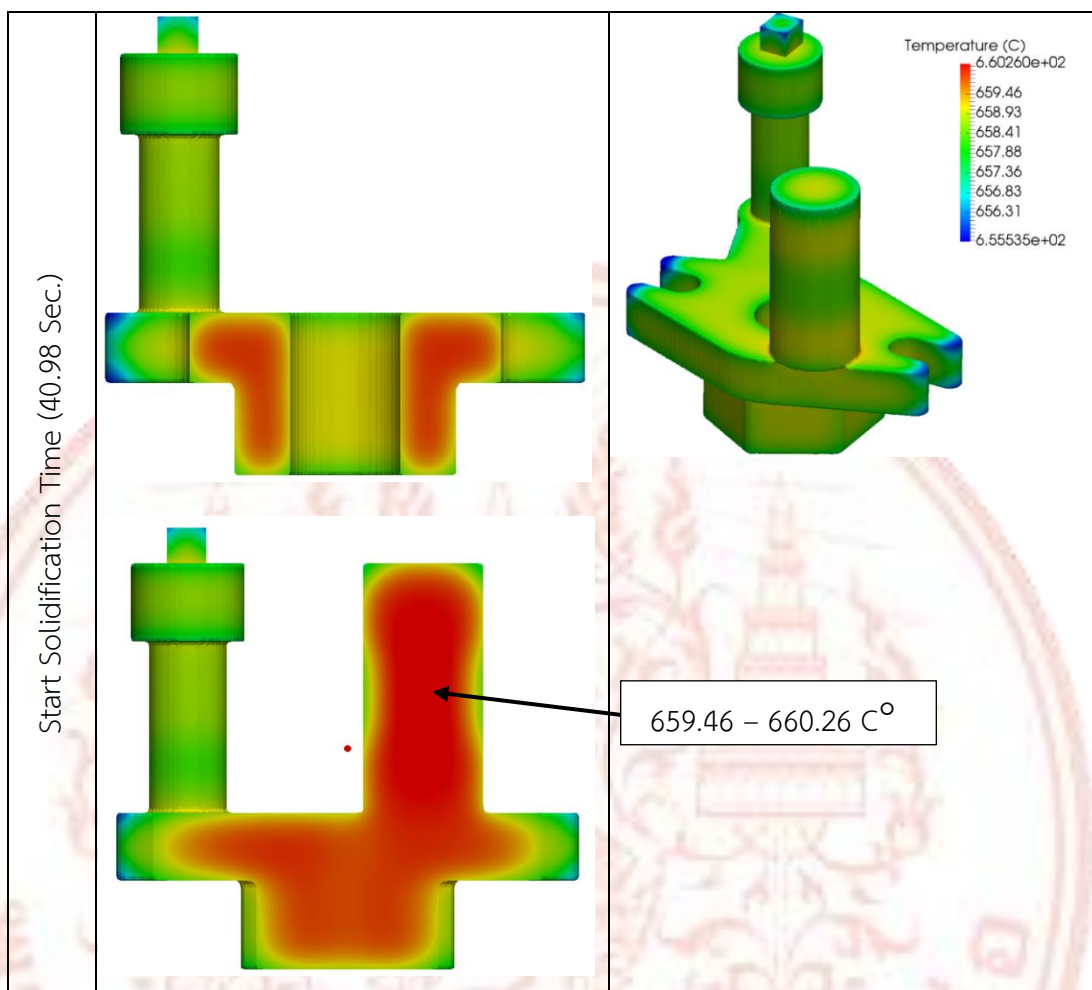
จนเมื่อถึงช่วงเวลาสิ้นสุดการแข็งตัว จะสังเกตได้ว่าอุณหภูมิส่วนใหญ่ของชิ้นงานจะลดลงมาใกล้เคียงกันอยู่ที่ประมาณ 633 องศาเซลเซียส ยกเว้นแต่บริเวณรูล้นชิ้นงานที่มีอุณหภูมิสูงกว่าเฉลี่ยของชิ้นงานที่ประมาณ 650.79 – 657.99 องศาเซลเซียสแสดงให้เห็นว่าชิ้นงานสามารถถ่ายเทความร้อนออกจากบริเวณกลางชิ้นงานได้ดี ทำให้อุณหภูมิสะสมอยู่ที่บริเวณรูล้น ดังภาพที่ 4-130

4.8.4.2.2 ทดสอบปรับตำแหน่งรูล้นห่างจากจุดศูนย์กลาง 30 มิลลิเมตร



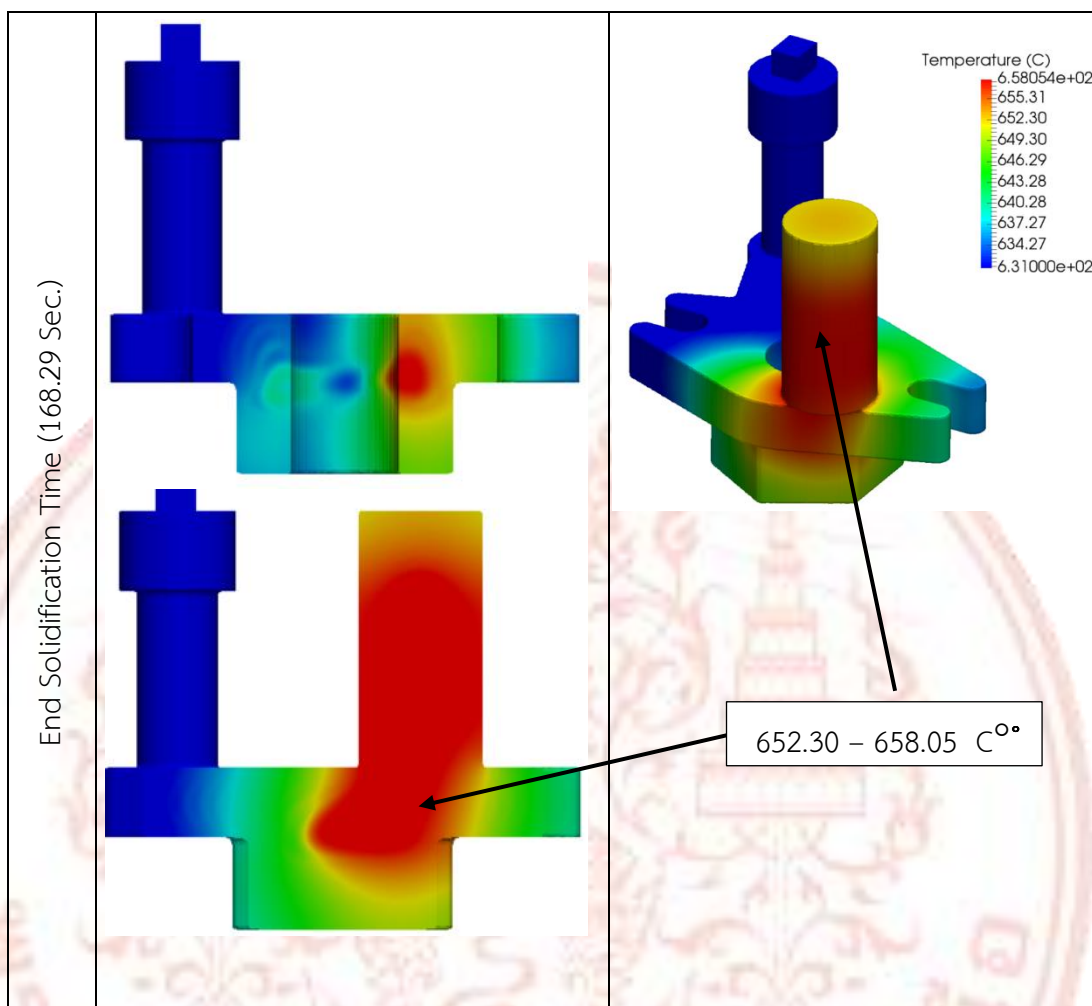
ภาพที่ 4-131 แสดงการจำลองอุณหภูมิ ณ ช่วงเวลา Fill Time ของชิ้นงานทดสอบปรับตำแหน่งรูล้นห่างจากจุดศูนย์กลาง 30 มิลลิเมตร

โดยสรุปจากผลการจำลองด้านอุณหภูมิทั้งสามช่วงเวลาของชิ้นงานทดสอบปรับตำแหน่งรูล้นห่างจากจุดศูนย์กลาง 30 มิลลิเมตร แสดงให้เห็นว่า ณ ช่วงเวลาสิ้นสุดการเติมน้ำโลหะ อุณหภูมิที่สูงที่สุดจะอยู่ที่บริเวณรูล้นโดยมีอุณหภูมิประมาณ 733.34 – 750.00 องศาเซลเซียส ดังภาพที่ 4-131



ภาพที่ 4-132 แสดงการจำลองอุณหภูมิ ณ ช่วงเวลา Start Solidification Time ของชิ้นงานทดสอบปรับตำแหน่งรูล้นห่างจากจุดศูนย์กลาง 30 มิลลิเมตร

ต่อมาเมื่อเข้าสู่ช่วงเริ่มต้นการแข็งตัว อุณหภูมิโดยเฉลี่ยทั่วชิ้นงานจะมีค่าใกล้เคียงกันอยู่ที่ประมาณ 659.46 – 660.26 องศาเซลเซียส มีเฉพาะผิวเท่านั้นที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า แสดงให้เห็นการเย็นดังภาพที่ 4-132



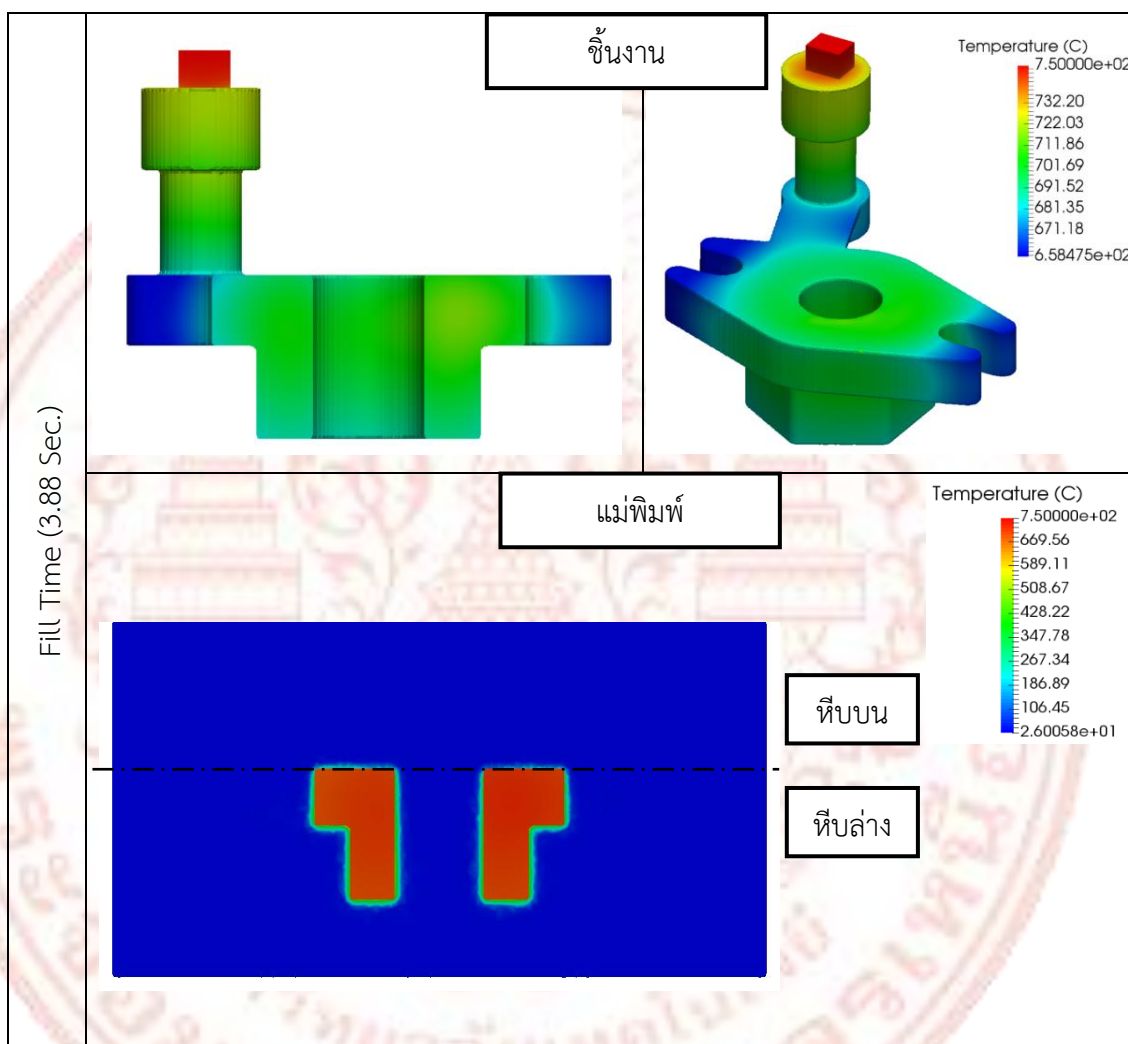
ภาพที่ 4-133 แสดงการจำลองอุณหภูมิ ณ ช่วงเวลา End Solidification Time ของชิ้นงานทดสอบปรับตำแหน่งรูล้นห่างจากจุดศูนย์กลาง 30 มิลลิเมตร

จนเมื่อถึงช่วงเวลาสิ้นสุดการแข็งตัว จะสังเกตได้ว่าอุณหภูมิส่วนใหญ่ของชิ้นงานจะลดลงมาใกล้เคียงกันอยู่ที่ประมาณ 631 – 637.27 หรือประมาณ องศาเซลเซียส ยกเว้นแต่บริเวณรูล้นชิ้นงานที่มีอุณหภูมิสูงกว่าเฉลี่ยของชิ้นงานที่ประมาณ 652.30 – 658.05 องศาเซลเซียสแสดงให้เห็นว่าชิ้นงานสามารถถ่ายเทความร้อนออกจากบริเวณกลางชิ้นงานได้ดี ทำให้อุณหภูมิสะสมอยู่ที่บริเวณรูล้นดังภาพที่ 4-133

4.8.5.3 การลดขนาดหีบبنที่ใช้ในการเทหล่อแบบไม่มีรูล้น และมีรูล้น

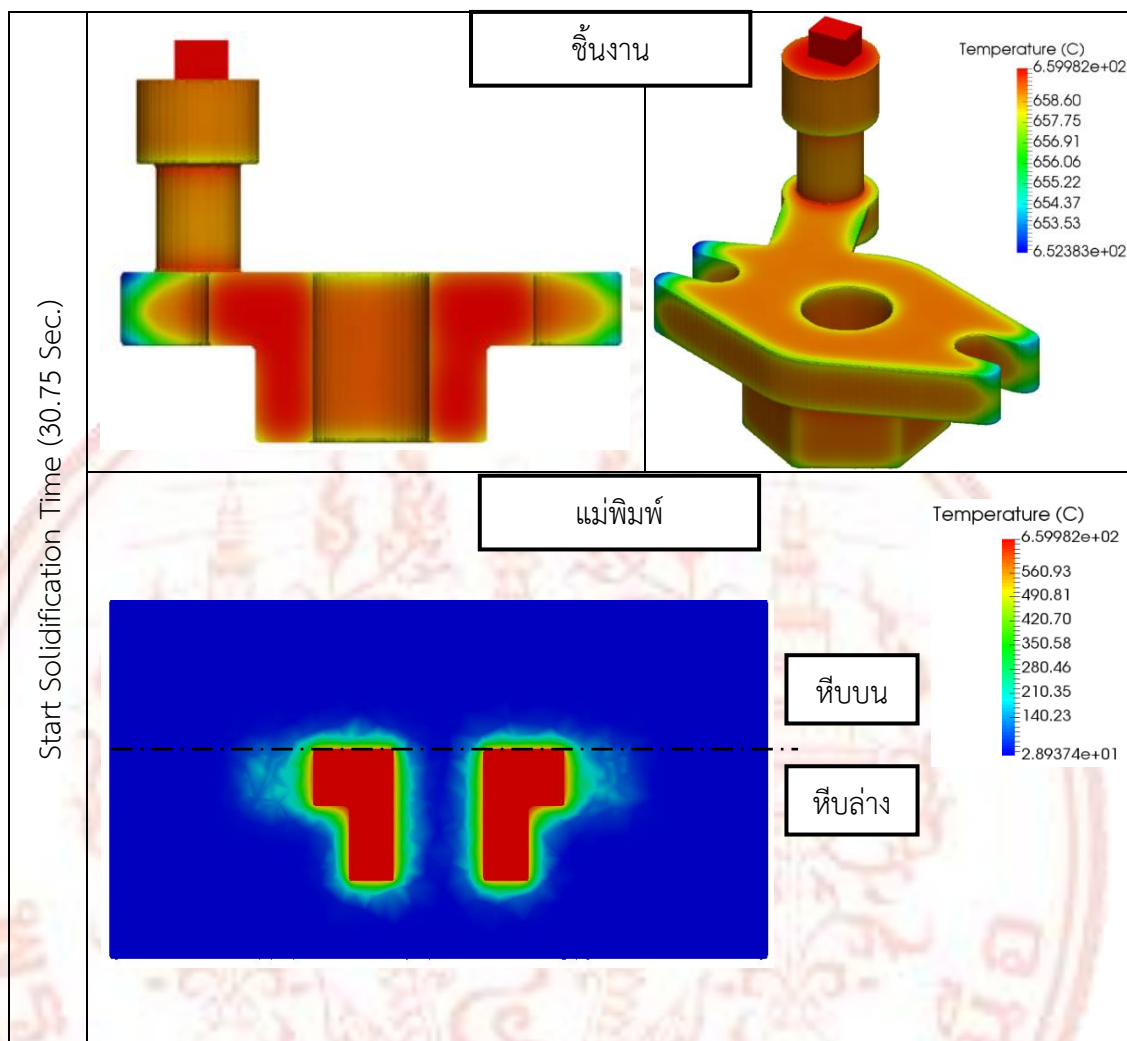
4.8.5.3.1 ทดสอบการลดขนาดหีบبنที่ใช้ในการเทหล่อแบบไม่มีรูล้นสูง 50

มิลลิเมตร



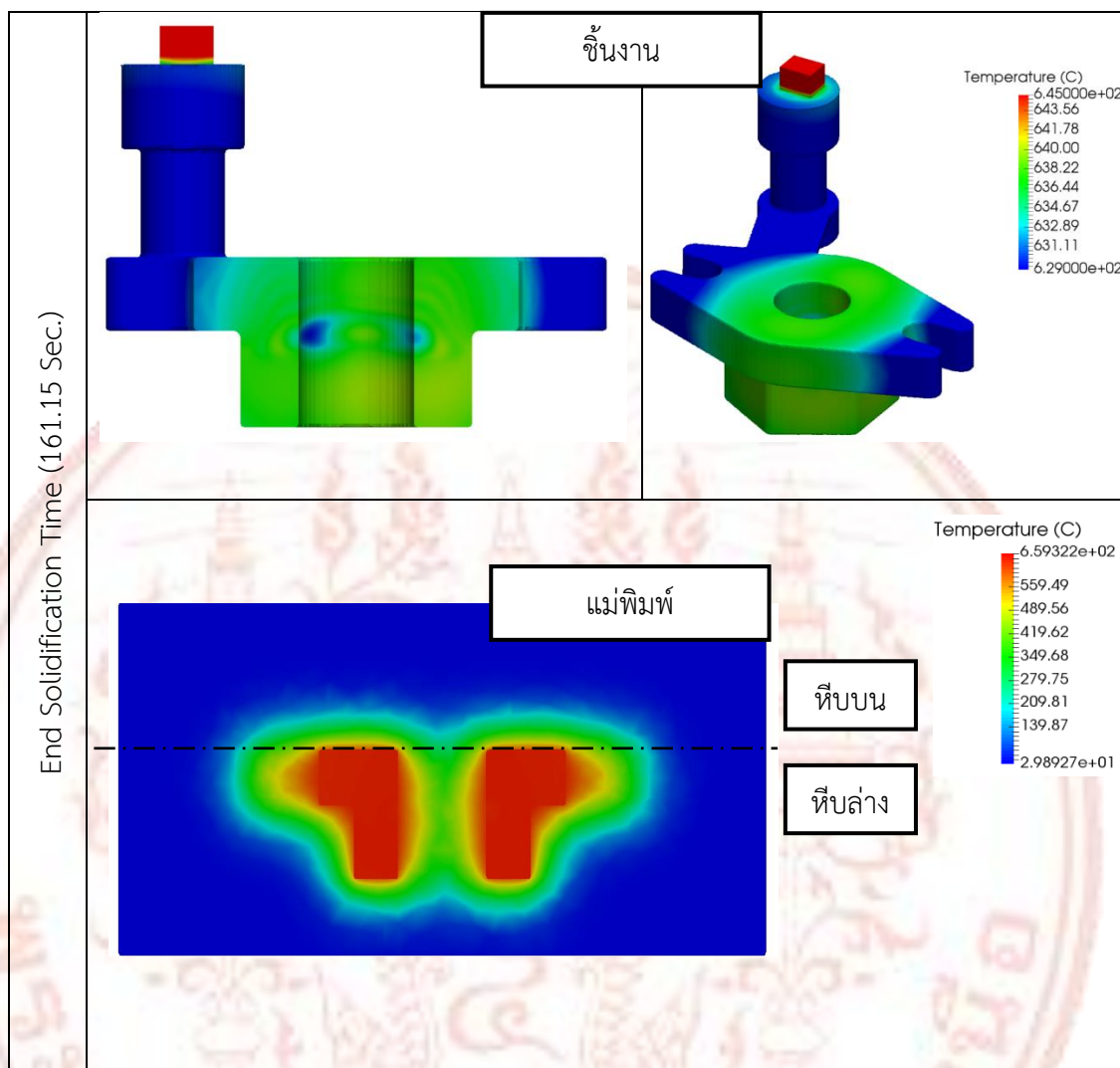
ภาพที่ 4-134 แสดงการจำลองอุณหภูมิ ณ ช่วงเวลา Fill Time ของชิ้นงานทดสอบการลดขนาดหีบبنที่ใช้ในการเทหล่อแบบไม่มีรูล้นสูง 50 มิลลิเมตร

โดยสรุปจากผลการจำลองด้านอุณหภูมิทั้งสามช่วงเวลาของชิ้นงานทดสอบการลดขนาดหีบبنที่ใช้ในการเทหล่อแบบไม่มีรูล้นสูง 50 มิลลิเมตร แสดงให้เห็นว่า ณ ช่วงเวลาสิ้นสุดการเติมน้ำโลหะ อุณหภูมิที่สูงที่สุดจะอยู่ที่บริเวณกลางชิ้นงานโดยมีอุณหภูมิประมาณ 733.34 – 750.00 องศาเซลเซียส ดังภาพที่ 4-134 โดยที่แม่พิมพ์มีอุณหภูมิอยู่ที่ประมาณ 29.57 องศาเซลเซียส



ภาพที่ 4-135 แสดงการจำลองอุณหภูมิ ณ ช่วงเวลา Start Solidification Time ของชิ้นงาน ทดสอบการลดขนาดหีบบนที่ใช้ในการเทหล่อแบบไม่มีรูล้นสูง 50 มิลลิเมตร

ต่อมาเมื่อเข้าสู่ช่วงเริ่มต้นการแข็งตัว อุณหภูมิโดยเฉลี่ยทั่วชิ้นงานจะมีค่าใกล้เคียงกันอยู่ที่ ประมาณ 658.58 – 660.38 องศาเซลเซียส มีเฉพาะผิวเท่านั้นที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า และอุณหภูมิเริ่มมีการแพร่ไปยังแม่พิมพ์ทรายแล้ว ดังภาพที่ 4-135

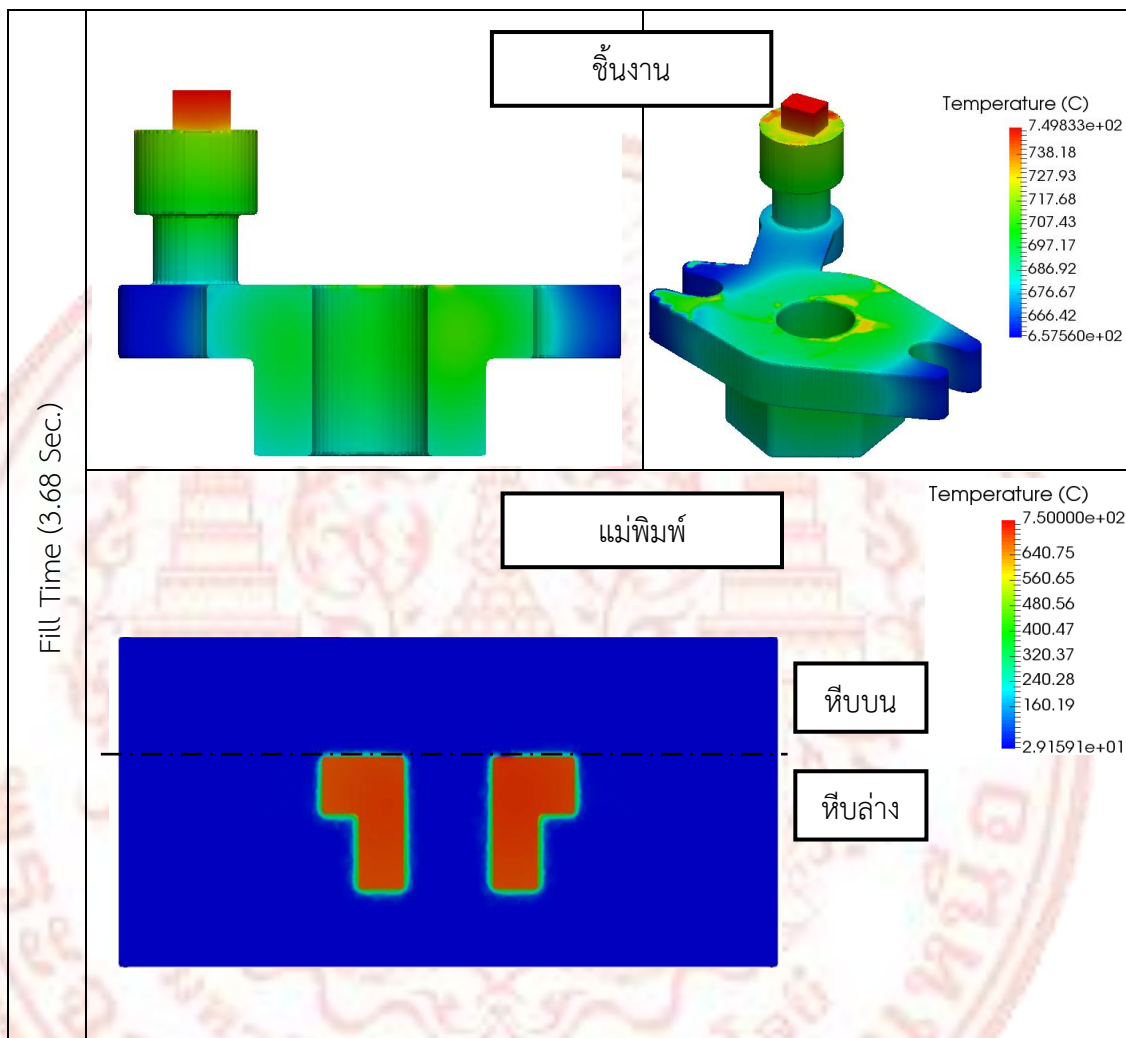


ภาพที่ 4-136 แสดงการจำลองอุณหภูมิ ณ ช่วงเวลา End Solidification Time ของชิ้นงาน ทดสอบการลดขนาดหีบบนที่ใช้ในการเทหล่อแบบไม่มีรูล้นสูง 50 มิลลิเมตร

จนเมื่อถึงช่วงเวลาสิ้นสุดการแข็งตัว จะสังเกตได้ว่าอุณหภูมิส่วนใหญ่ของชิ้นงานจะลดลงมาใกล้เคียงกันอยู่ที่ประมาณ 634.67 – 640.00 องศาเซลเซียส หรือประมาณ 637 องศาเซลเซียส โดยชั้นบริเวณกลางชิ้นงานจะยังเป็นส่วนที่มีอุณหภูมิสะสมสูงที่สุด ในส่วนของอุณหภูมิที่ถูกแพร่ออกจากชิ้นงานสู่แม่พิมพ์นั้นจะมีค่าอุณหภูมิอยู่ที่ 209.81 – 489.56 องศาเซลเซียส โดยช่วงเวลานี้อุณหภูมิยังอยู่ในแม่พิมพ์เป็นหลัก

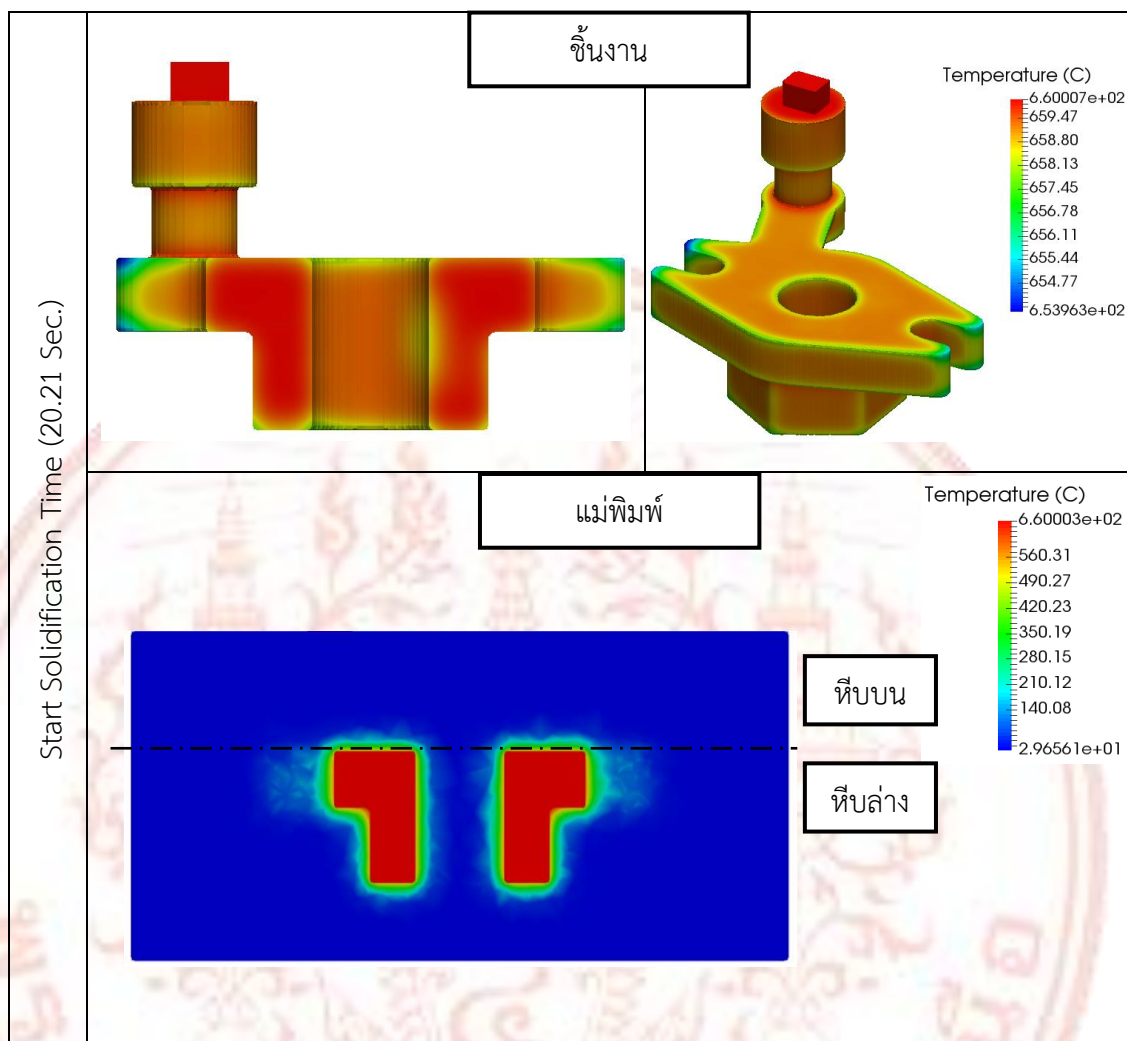
4.8.5.3.2 ทดสอบการลดขนาดหีบبنที่ใช้ในการเทหล่อแบบไม่มีรูล้นสูง 40

มิลลิเมตร



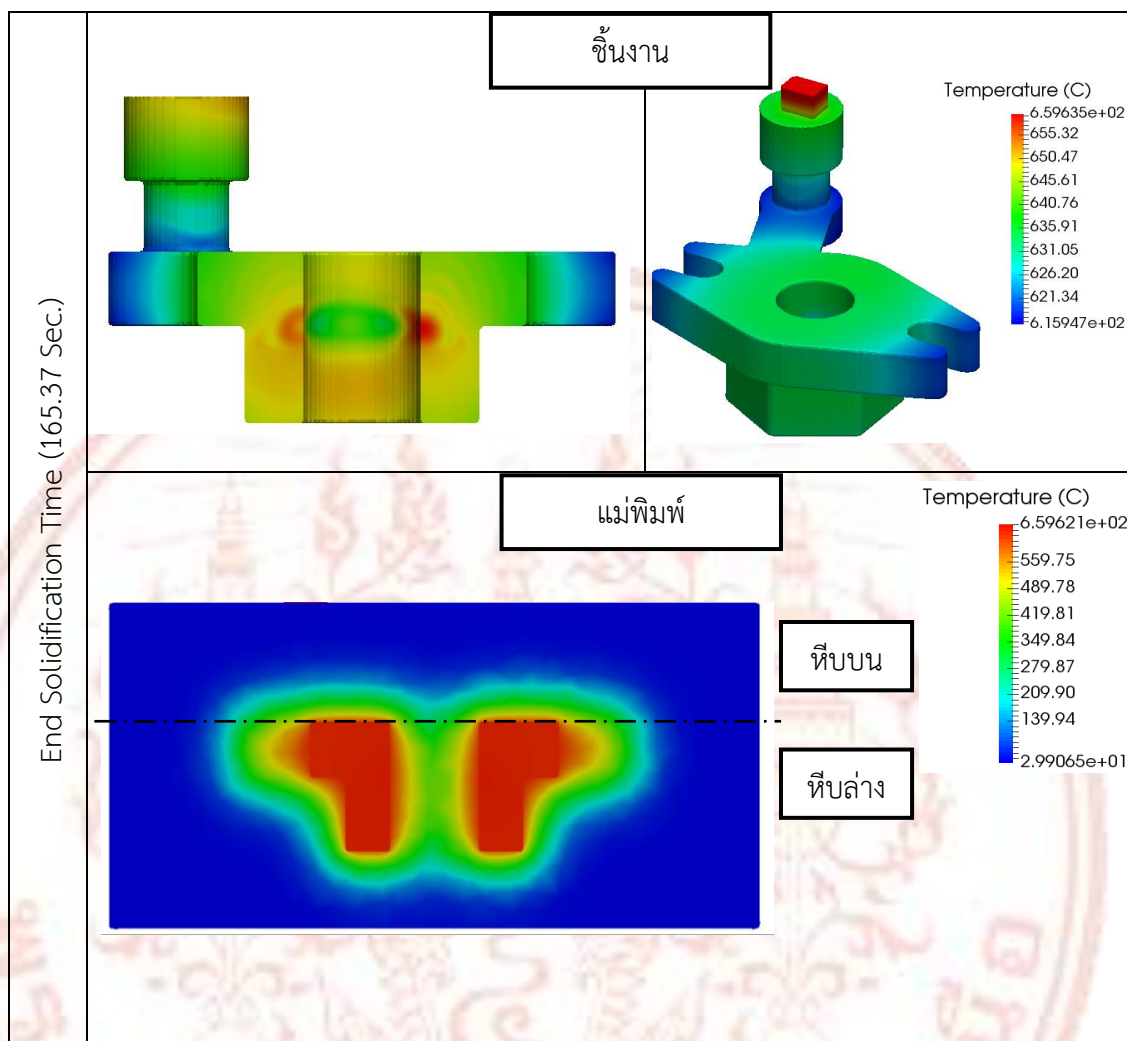
ภาพที่ 4-137 แสดงการจำลองอุณหภูมิ ณ ช่วงเวลา Fill Time ของชิ้นงานทดสอบการลดขนาดหีบبنที่ใช้ในการเทหล่อแบบไม่มีรูล้นสูง 40 มิลลิเมตร

โดยสรุปจากผลการจำลองด้านอุณหภูมิทั้งสามช่วงเวลาของชิ้นงานทดสอบการลดขนาดหีบبنที่ใช้ในการเทหล่อแบบไม่มีรูล้นสูง 50 มิลลิเมตร แสดงให้เห็นว่า ณ ช่วงเวลาสิ้นสุดการเติมน้ำโลหะ อุณหภูมิที่สูงที่สุดจะอยู่ที่บริเวณกลางชิ้นงานโดยมีอุณหภูมิประมาณ 72793 – 750.00 องศาเซลเซียส ดังภาพที่ 4-137 โดยที่แม่พิมพ์มีอุณหภูมิอยู่ที่ประมาณ 29.15 องศาเซลเซียส



ภาพที่ 4-138 แสดงการจำลองอุณหภูมิ ณ ช่วงเวลา Start Solidification Time ของชิ้นงาน ทดสอบการลดขนาดหีบบนที่ใช้ในการเทหล่อแบบไม่มีรูล้นสูง 40 มิลลิเมตร

ต่อมาเมื่อเข้าสู่ช่วงเริ่มต้นการแข็งตัว อุณหภูมิโดยเฉลี่ยทั่วชิ้นงานจะมีค่าใกล้เคียงกันอยู่ที่ประมาณ 658.80 – 660.00 องศาเซลเซียส มีเฉพาะผิวเท่านั้นที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า และอุณหภูมิเริ่มมีการแพร่ไปยังแม่พิมพ์ทรายแล้ว ดังภาพที่ 4-138

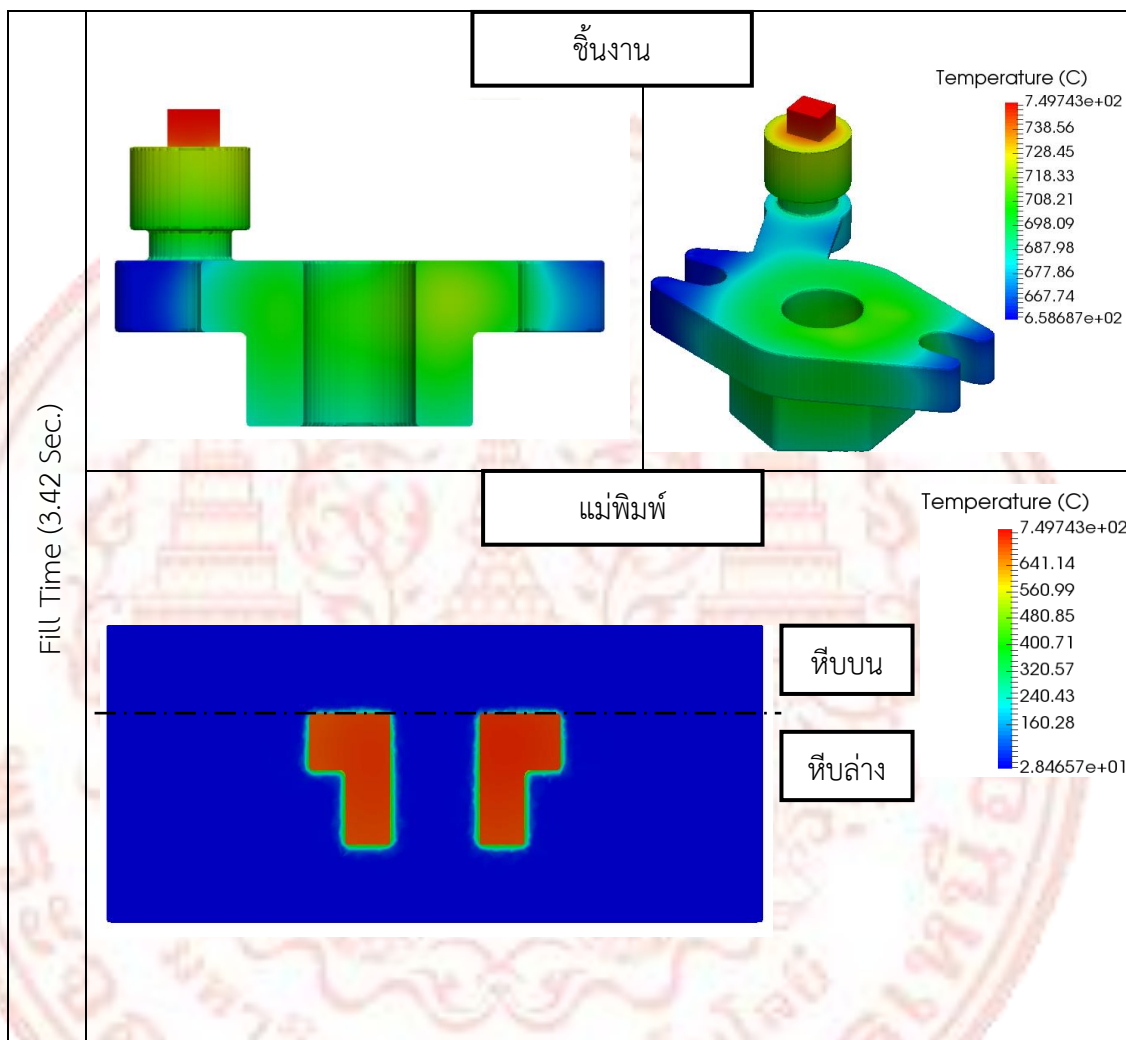


ภาพที่ 4-139 แสดงการจำลองอุณหภูมิ ณ ช่วงเวลา End Solidification Time ของชิ้นงานทดสอบการลดขนาดหีบบนที่ใช้ในการเทหล่อแบบไม่มีรูล้นสูง 40 มิลลิเมตร

จนเมื่อถึงช่วงเวลาสิ้นสุดการแข็งตัว สังเกตได้บริเวณกลางชิ้นงานจะยังเป็นส่วนที่มีอุณหภูมิสะสมสูงที่สุดที่ประมาณ 631.05 – 645.61 องศาเซลเซียส หรือประมาณ 638 องศาเซลเซียส ในส่วนของอุณหภูมิที่ถูกแพร่ออกจากชิ้นงานสู่แม่พิมพ์นั้นจะมีค่าอุณหภูมิอยู่ที่ 209.90 – 489.78 องศาเซลเซียส โดยช่วงเวลานี้อุณหภูมิยังอยู่ในแม่พิมพ์เป็นหลัก

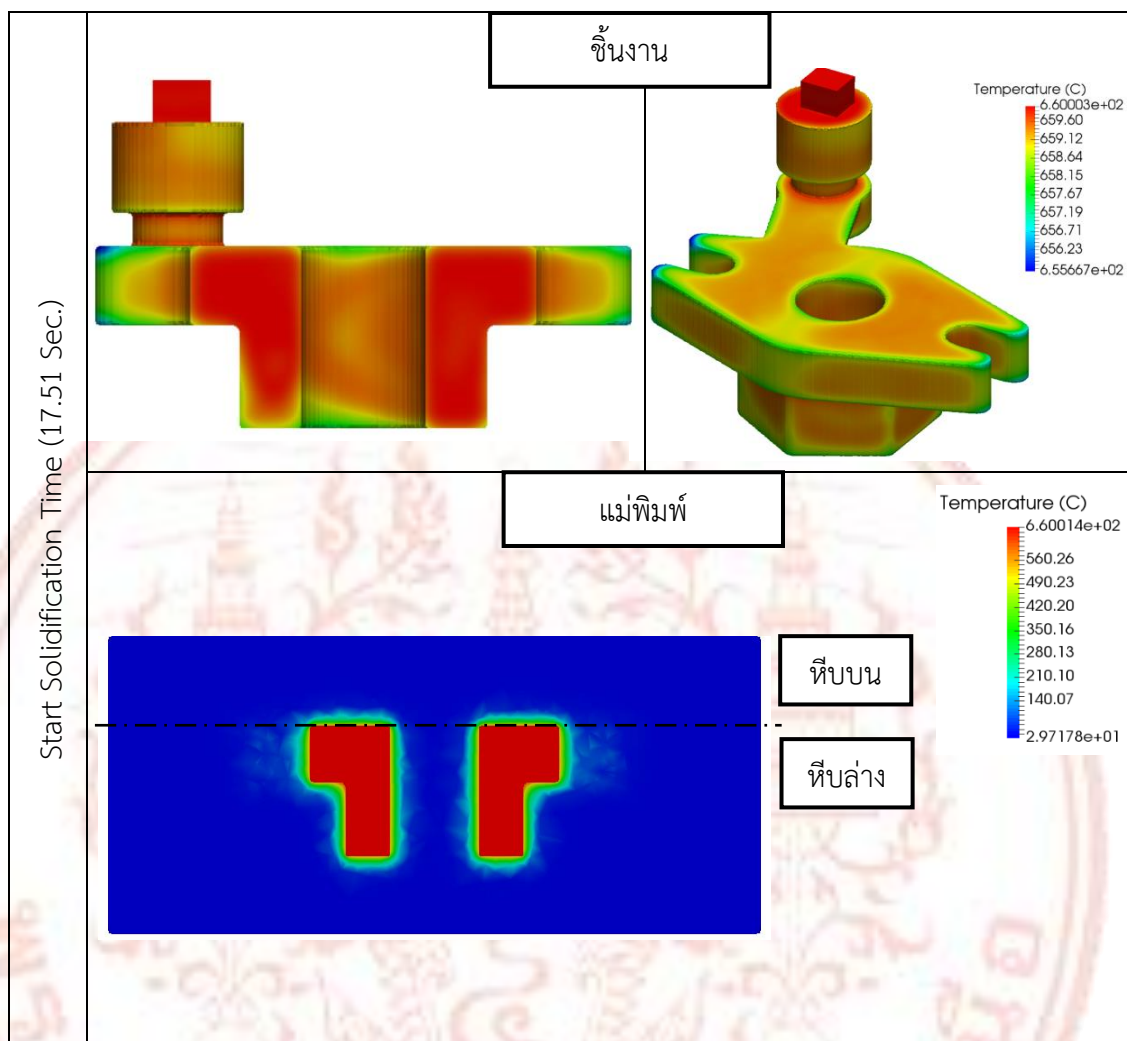
4.8.5.3.3 ทดสอบการลดขนาดหีบบนที่ใช้ในการเทหล่อแบบไม่มีรูล้นสูง 30

มิลลิเมตร



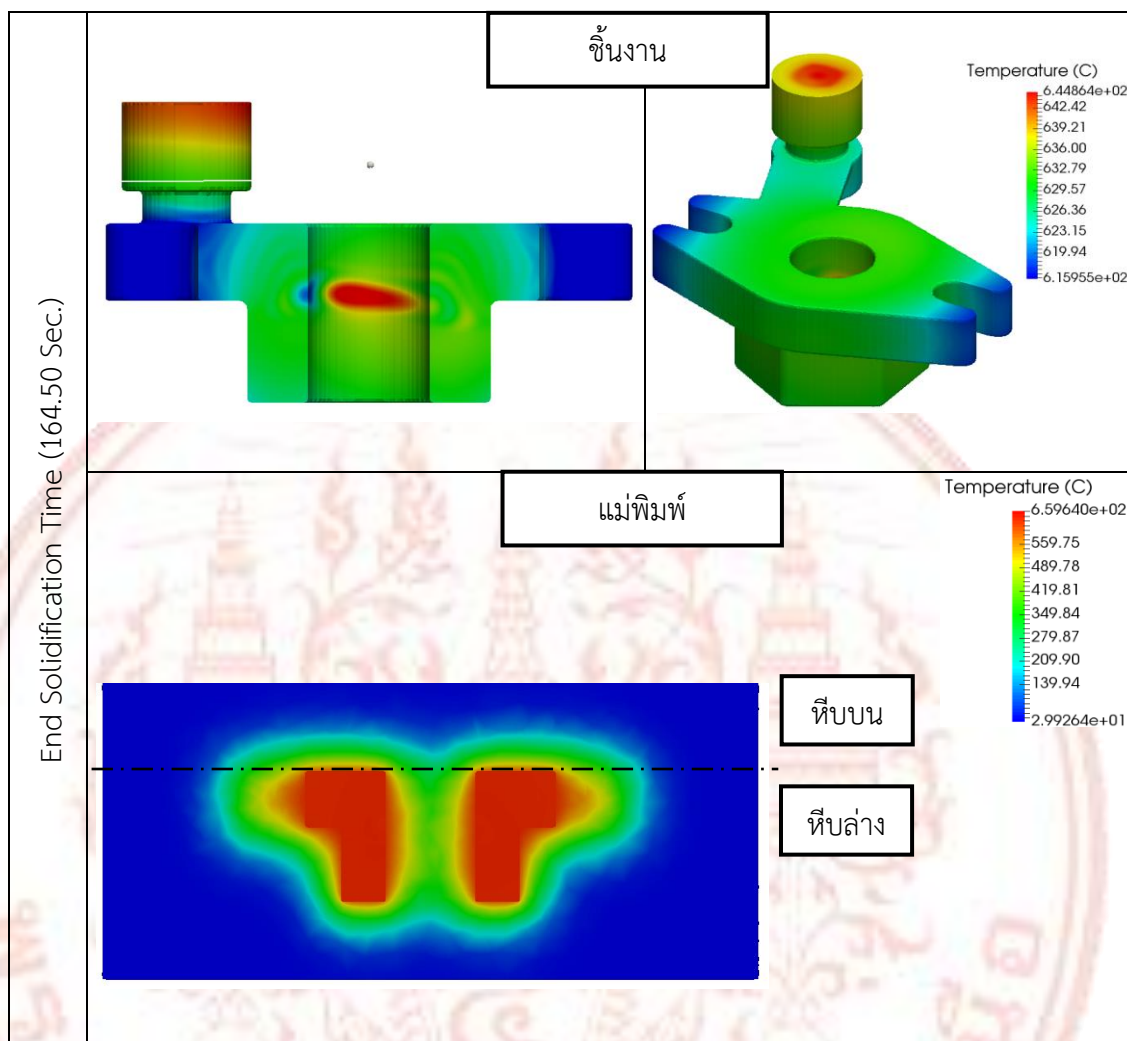
ภาพที่ 4-140 แสดงการจำลองอุณหภูมิ ณ ช่วงเวลา Fill Time ของชิ้นงานทดสอบการลดขนาดหีบบนที่ใช้ในการเทหล่อแบบไม่มีรูล้นสูง 30 มิลลิเมตร

โดยสรุปจากผลการจำลองด้านอุณหภูมิทั้งสามช่วงเวลาของชิ้นงานทดสอบการลดขนาดหีบบนที่ใช้ในการเทหล่อแบบไม่มีรูล้นสูง 30 มิลลิเมตร แสดงให้เห็นว่า ณ ช่วงเวลาสิ้นสุดการเติมน้ำโลหะ อุณหภูมิที่สูงที่สุดจะอยู่ที่บริเวณกลางชิ้นงานโดยมีอุณหภูมิประมาณ 728.45 – 749.75 องศาเซลเซียส ดังภาพที่ 4-140 โดยที่แม่พิมพ์มีอุณหภูมิอยู่ที่ประมาณ 28.46 องศาเซลเซียส



ภาพที่ 4-141 แสดงการจำลองอุณหภูมิ ณ ช่วงเวลา Start Solidification Time ของชิ้นงาน ทดสอบการลดขนาดหีบบนที่ใช้ในการเทหล่อแบบไม่มีรูล้นสูง 30 มิลลิเมตร

ต่อมาเมื่อเข้าสู่ช่วงเริ่มต้นการแข็งตัว อุณหภูมิโดยเฉลี่ยทั่วชิ้นงานจะมีค่าใกล้เคียงกันอยู่ที่ประมาณ 656.76 – 660.00 องศาเซลเซียส มีเฉพาะผิวเท่านั้นที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า และอุณหภูมิเริ่มมีการแพร่ไปยังแม่พิมพ์ทรายแล้ว ดังภาพที่ 4-141

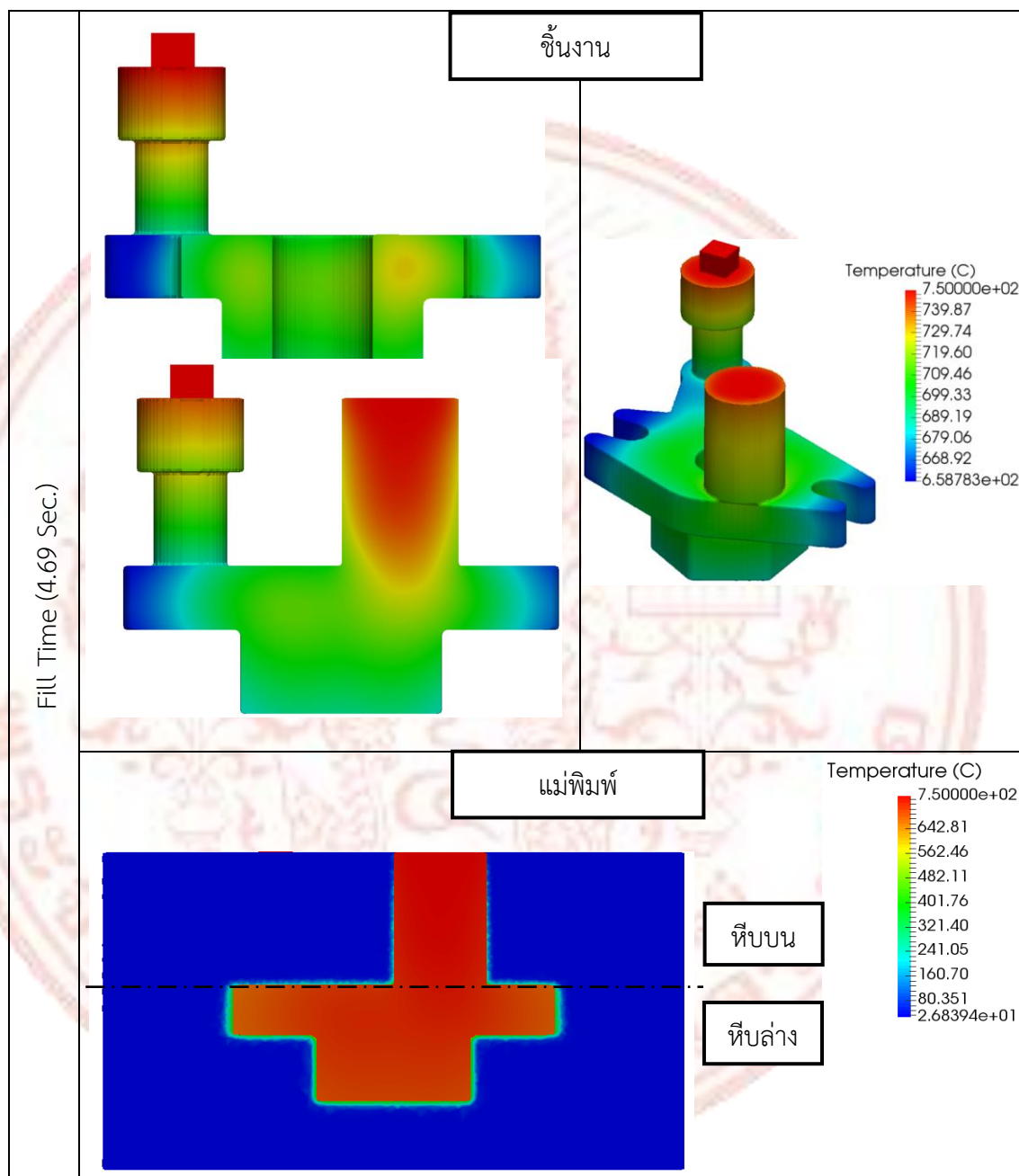


ภาพที่ 4-142 แสดงการจำลองอุณหภูมิ ณ ช่วงเวลา End Solidification Time ของชิ้นงานทดสอบการลดขนาดหีบบนที่ใช้ในการเทหล่อแบบไม่มีรูล้นสูง 30 มิลลิเมตร

จนเมื่อถึงช่วงเวลาสิ้นสุดการแข็งตัว จะสังเกตได้ว่าชิ้นบริเวณกลางชิ้นงานจะยังเป็นส่วนที่มีอุณหภูมิสะสมสูงที่สุด ในช่วง 626.26 – 636.00 หรือประมาณ 631 องศาเซลเซียส ในส่วนของอุณหภูมิที่ถูกแพร่ออกจากชิ้นงานสู่แม่พิมพ์นั้นจะมีค่าอุณหภูมิอยู่ที่ 209.90 – 489.78 องศาเซลเซียส โดยช่วงเวลานี้อุณหภูมิยังอยู่ในแม่พิมพ์เป็นหลัก

4.8.5.3.4 ทดสอบการลดขนาดหีบบนที่ใช้ในการเทหล่อแบบปรับรู้นสูง 50

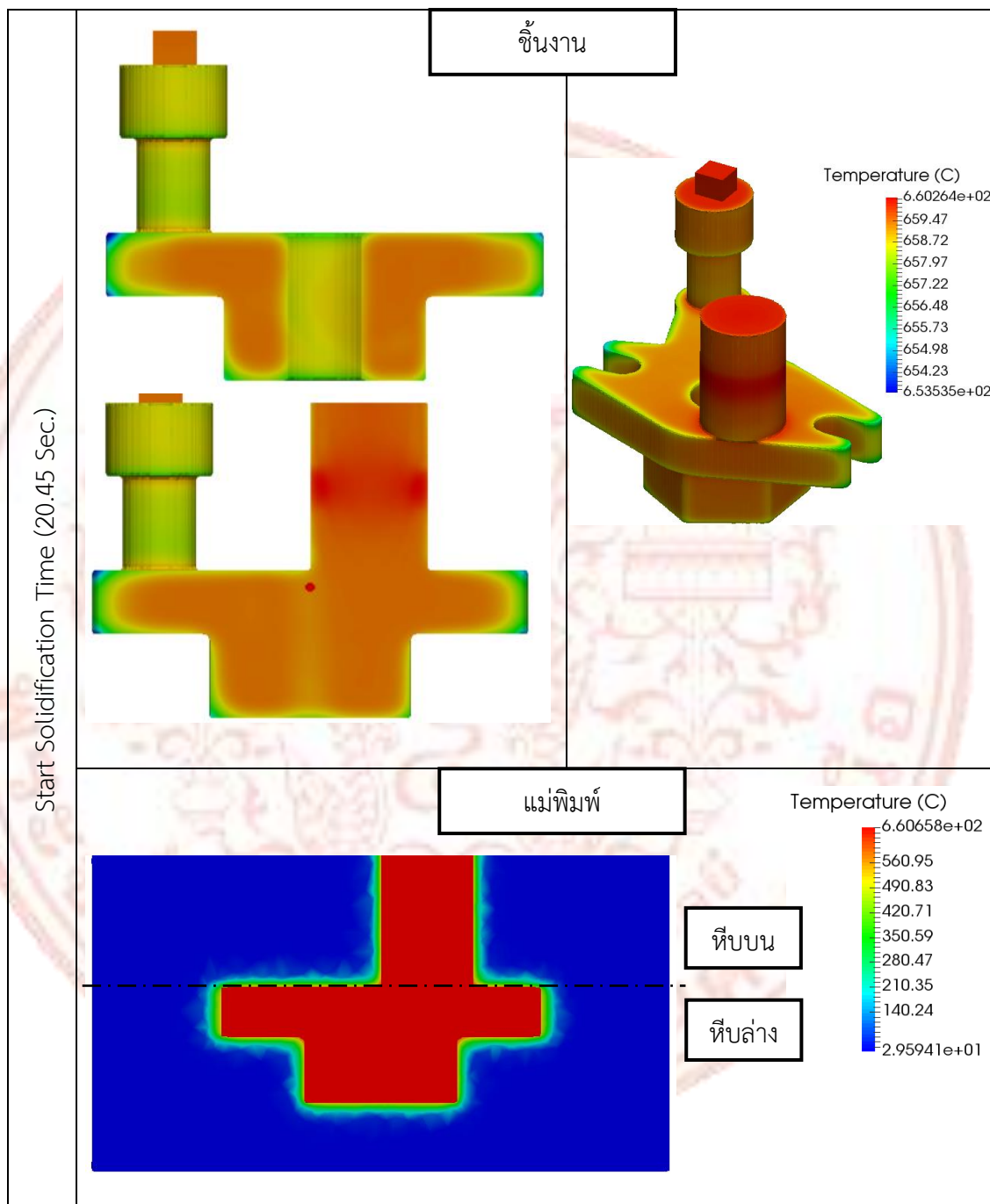
มิลลิเมตร



ภาพที่ 4-143 แสดงการจำลองอุณหภูมิ ณ ช่วงเวลา Fill Time ของชิ้นงานทดสอบการลดขนาดหีบบนที่ใช้ในการเทหล่อแบบปรับรู้นสูง 50 มิลลิเมตร

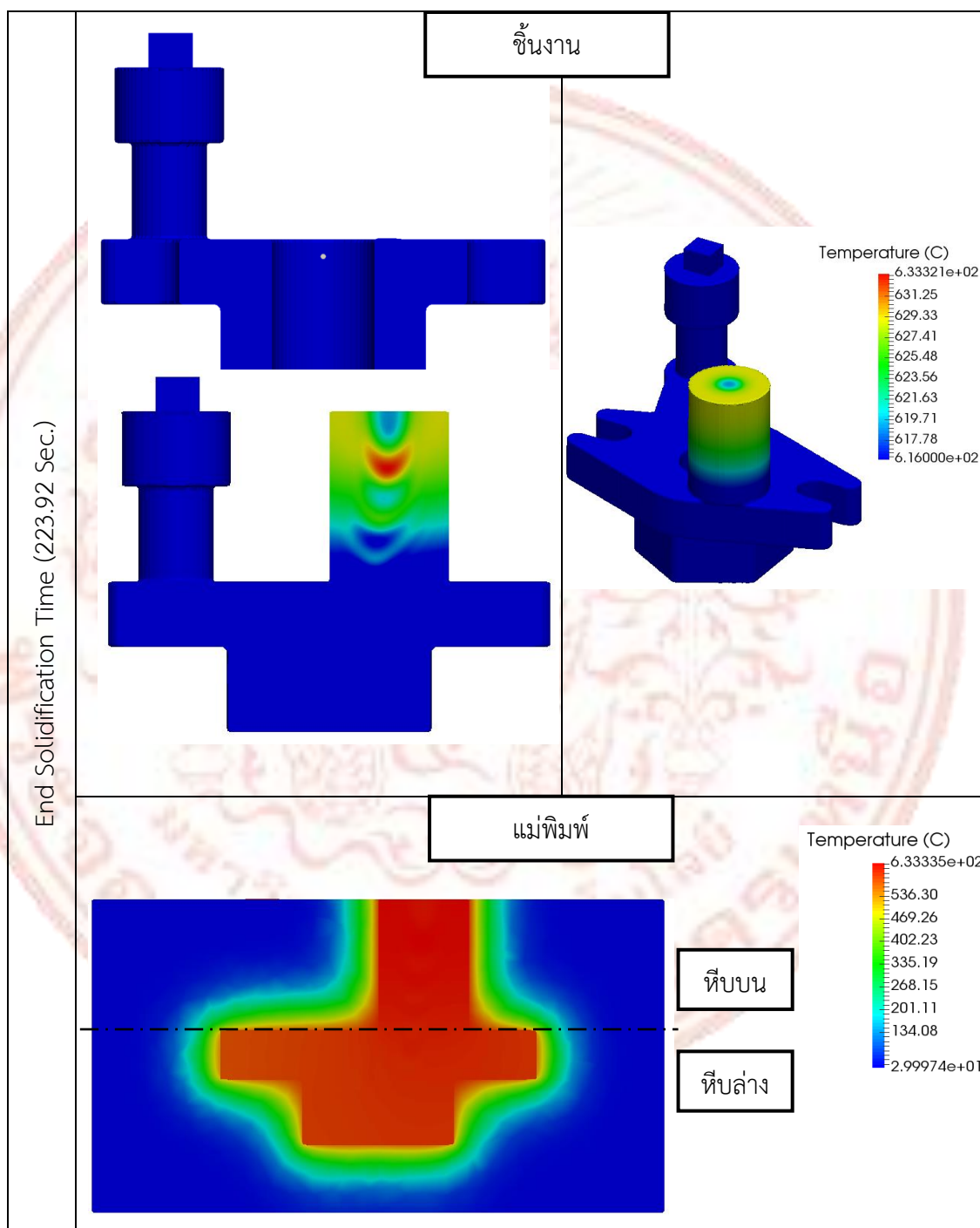
โดยสรุปจากผลการจำลองด้านอุณหภูมิทั้งสามช่วงเวลาของชิ้นงานทดสอบการลดขนาดหีบบนที่ใช้ในการเทหล่อแบบปรับรู้นสูง 50 มิลลิเมตร แสดงให้เห็นว่า ณ ช่วงเวลาสิ้นสุดการเติมน้ำ

โลหะ อุณหภูมิที่สูงที่สุดจะอยู่ที่บริเวณรูสันโดยมีอุณหภูมิประมาณ 729.74 – 750.00 องศาเซลเซียส
 ดังภาพที่ 4-143 โดยที่แม่พิมพ์มีอุณหภูมิอยู่ที่ประมาณ 29.50 องศาเซลเซียส



ภาพที่ 4-144 แสดงการจำลองอุณหภูมิ ณ ช่วงเวลา Start Solidification Time ของชิ้นงาน
 ทดสอบการลดขนาดหีบบนที่ใช้ในการเทหล่อแบบปรับรูสันสูง 50 มิลลิเมตร

ต่อมาเมื่อเข้าสู่ช่วงเริ่มต้นการแข็งตัว อุณหภูมิโดยเฉลี่ยทั่วชิ้นงานจะมีค่าใกล้เคียงกันอยู่ที่ประมาณ 655.55 – 660.65 องศาเซลเซียส มีเฉพาะผิวเท่านั้นที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า และอุณหภูมิเริ่มมีการแพร่ไปยังแม่พิมพ์ทรายแล้ว ดังภาพที่ 4-144

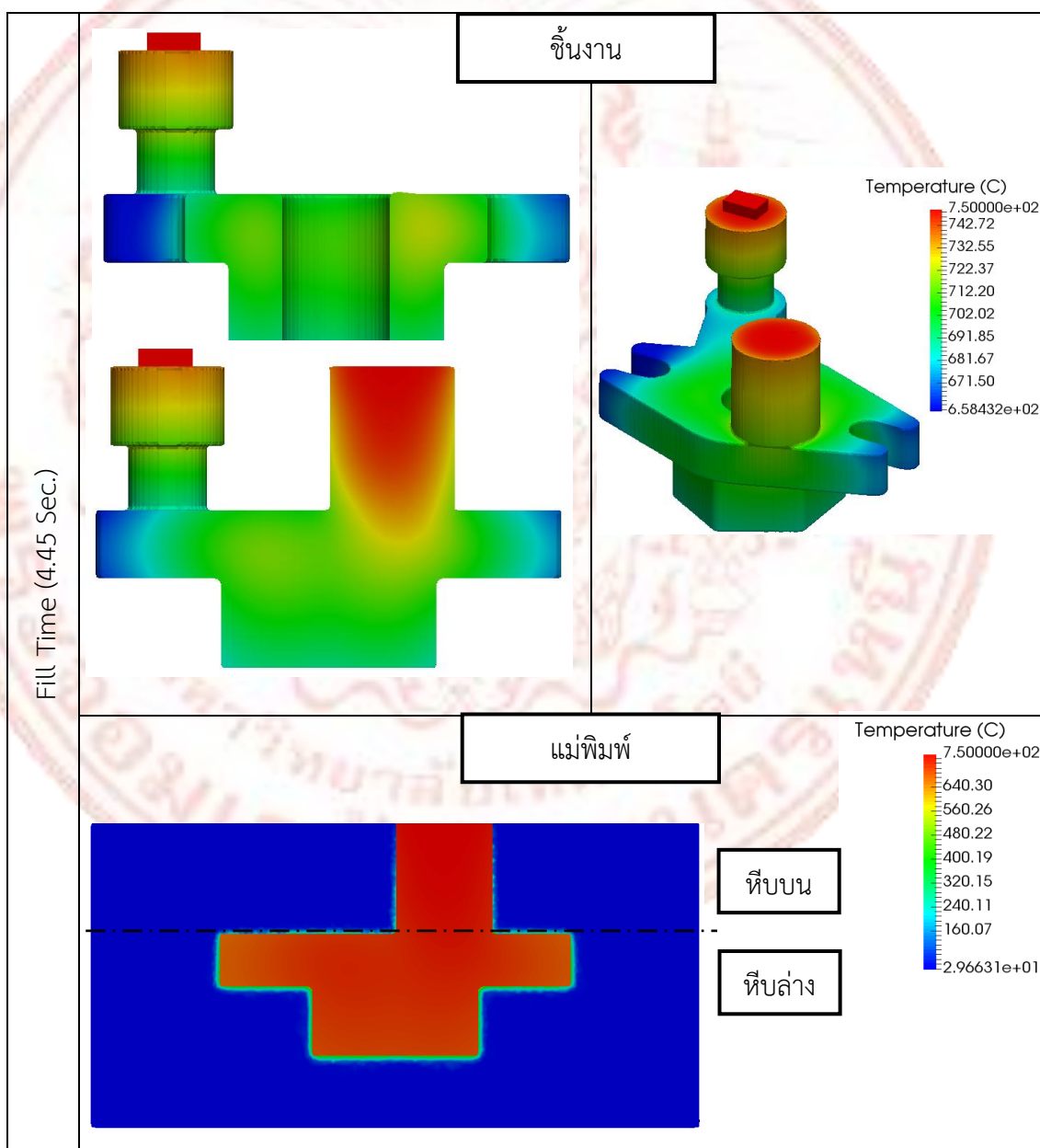


ภาพที่ 4-145 แสดงการจำลองอุณหภูมิ ณ ช่วงเวลา End Solidification Time ของชิ้นงาน ทดสอบการลดขนาดหีบบนที่ใช้ในการเทหล่อแบบปรับรูสูง 50 มิลลิเมตร

จนเมื่อถึงช่วงเวลาสิ้นสุดการแข็งตัว จะสังเกตได้ว่าอุณหภูมิส่วนใหญ่ของชิ้นงานจะลดลงมาใกล้เคียงกันอยู่ที่ประมาณ 619.71 องศาเซลเซียสลงมา โดยรูกลันจะยัง有一部分ที่มีอุณหภูมิสะสมสูงที่สุด ในส่วนของอุณหภูมิที่ถูกแพร่ออกจากชิ้นงานสู่แม่พิมพ์นั้นจะมีค่าอุณหภูมิอยู่ที่ 201.11 – 469.26 องศาเซลเซียส โดยช่วงเวลานี้อุณหภูมิยังอยู่ในแม่พิมพ์เป็นหลัก

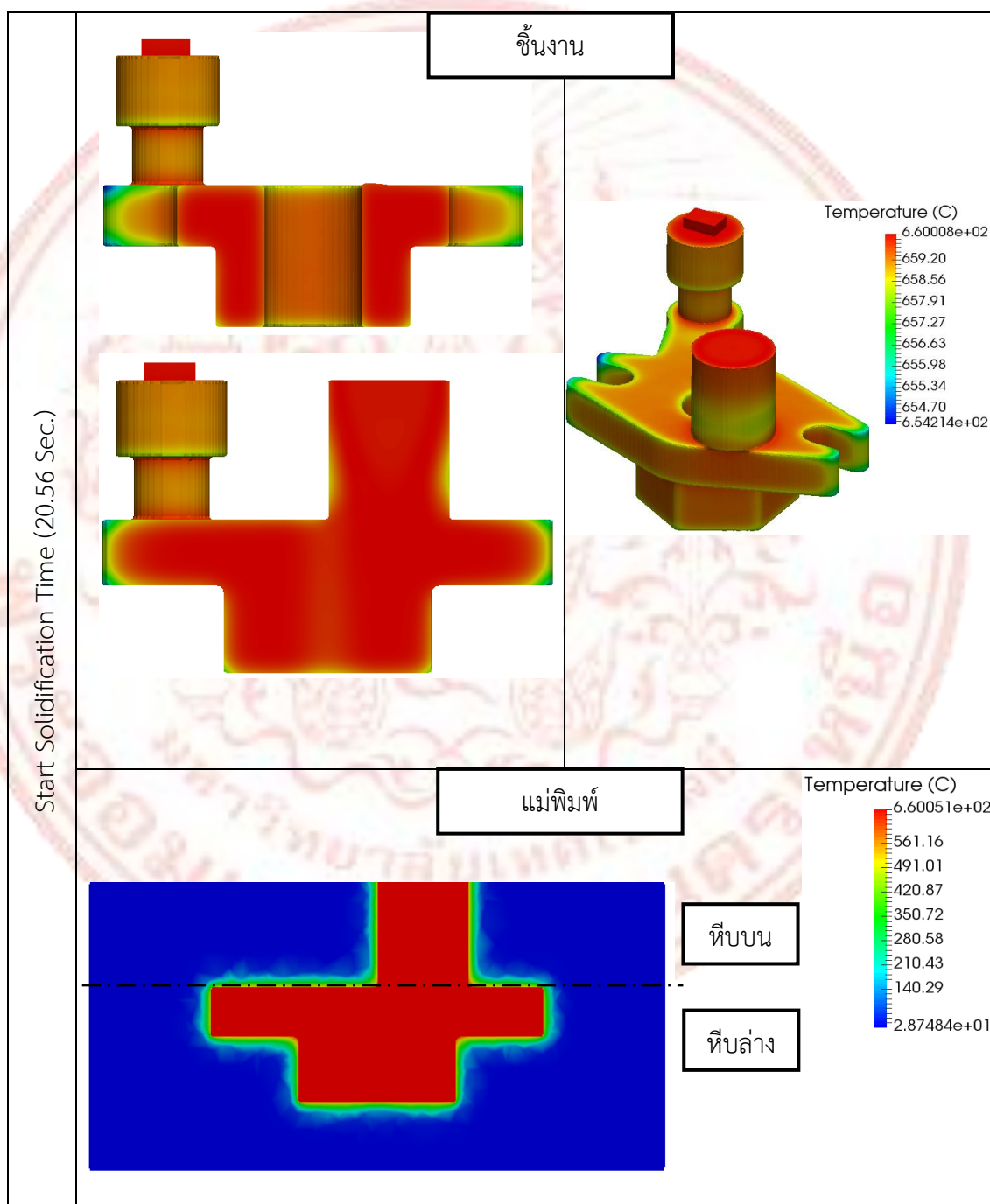
4.8.5.3.5 ทดสอบการลดขนาดหีบبنที่ใช้ในการเทหล่อแบบปรับรูกลันสูง 40

มิลลิเมตร



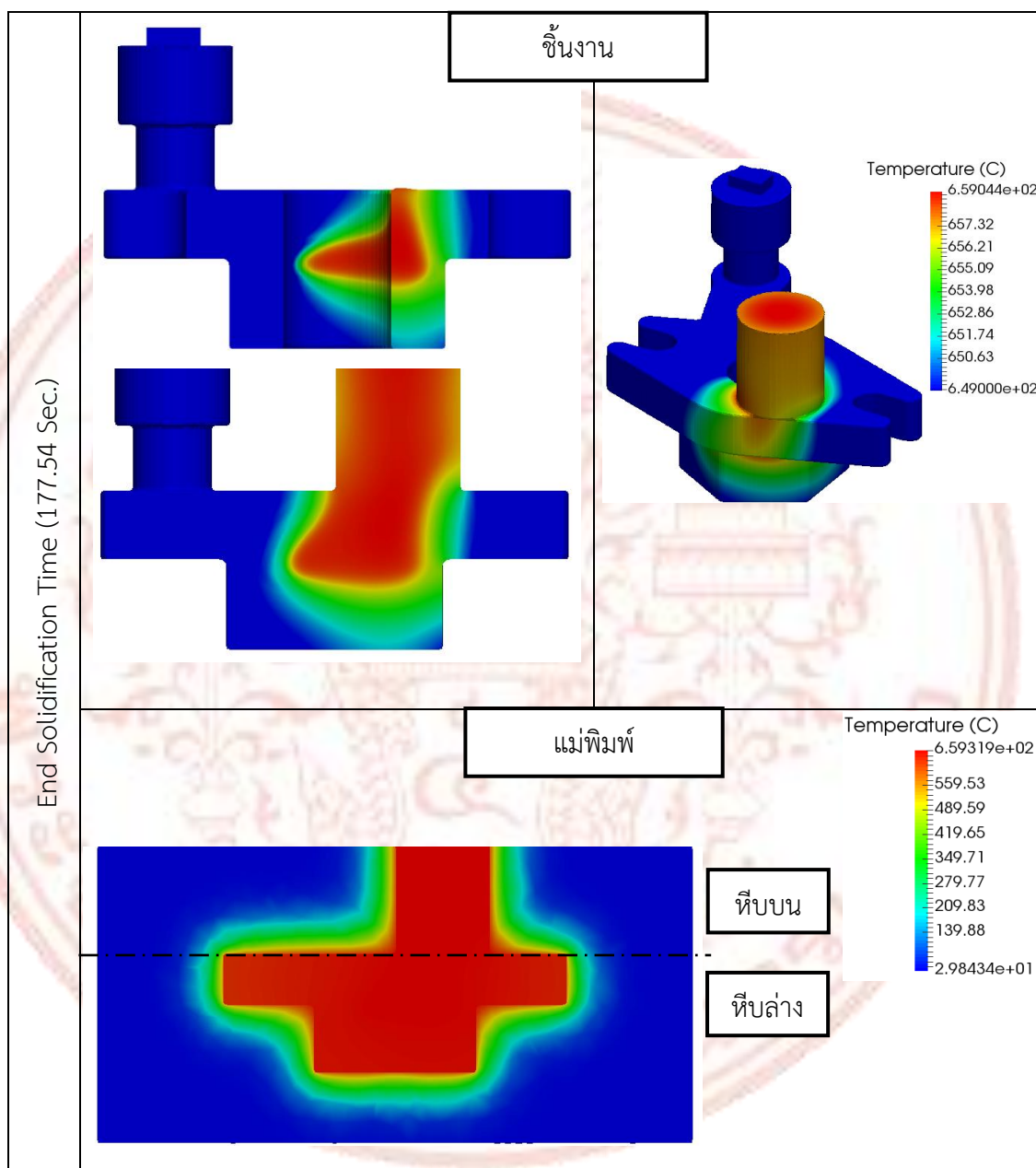
ภาพที่ 4-146 แสดงการจำลองอุณหภูมิ ณ ช่วงเวลา Fill Time ของชิ้นงานทดสอบการลดขนาดหีบบนที่ใช้ในการเทหล่อแบบปรับรูกลันสูง 40 มิลลิเมตร

โดยสรุปจากผลการจำลองด้านอุณหภูมิทั้งสามช่วงเวลาของชิ้นงานทดสอบการลดขนาดทึบ
บนที่ใช้ในการเทหล่อแบบปรับรู้นสูง 40 มิลลิเมตร แสดงให้เห็นว่า ณ ช่วงเวลาสิ้นสุดการเติมน้ำ
โลหะ อุณหภูมิที่สูงที่สุดจะอยู่ที่บริเวณรู้นโดยมีอุณหภูมิประมาณ 732.55 – 750.00 องศาเซลเซียส
ดังภาพที่ 4-146 โดยที่แม่พิมพ์มีอุณหภูมิอยู่ที่ประมาณ 29.66 องศาเซลเซียส



ภาพที่ 4-147 แสดงการจำลองอุณหภูมิ ณ ช่วงเวลา Start Solidification Time ของชิ้นงาน
ทดสอบการลดขนาดทึบบนที่ใช้ในการเทหล่อแบบปรับรู้นสูง 40 มิลลิเมตร

ต่อมาเมื่อเข้าสู่ช่วงเริ่มต้นการแข็งตัว อุณหภูมิโดยเฉลี่ยทั่วชิ้นงานจะมีค่าใกล้เคียงกันอยู่ที่ประมาณ 655.34 – 660.00 องศาเซลเซียส มีเฉพาะผิวเท่านั้นที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า และอุณหภูมิเริ่มมีการแพร่ไปยังแม่พิมพ์ทรายแล้ว ดังภาพที่ 4-147



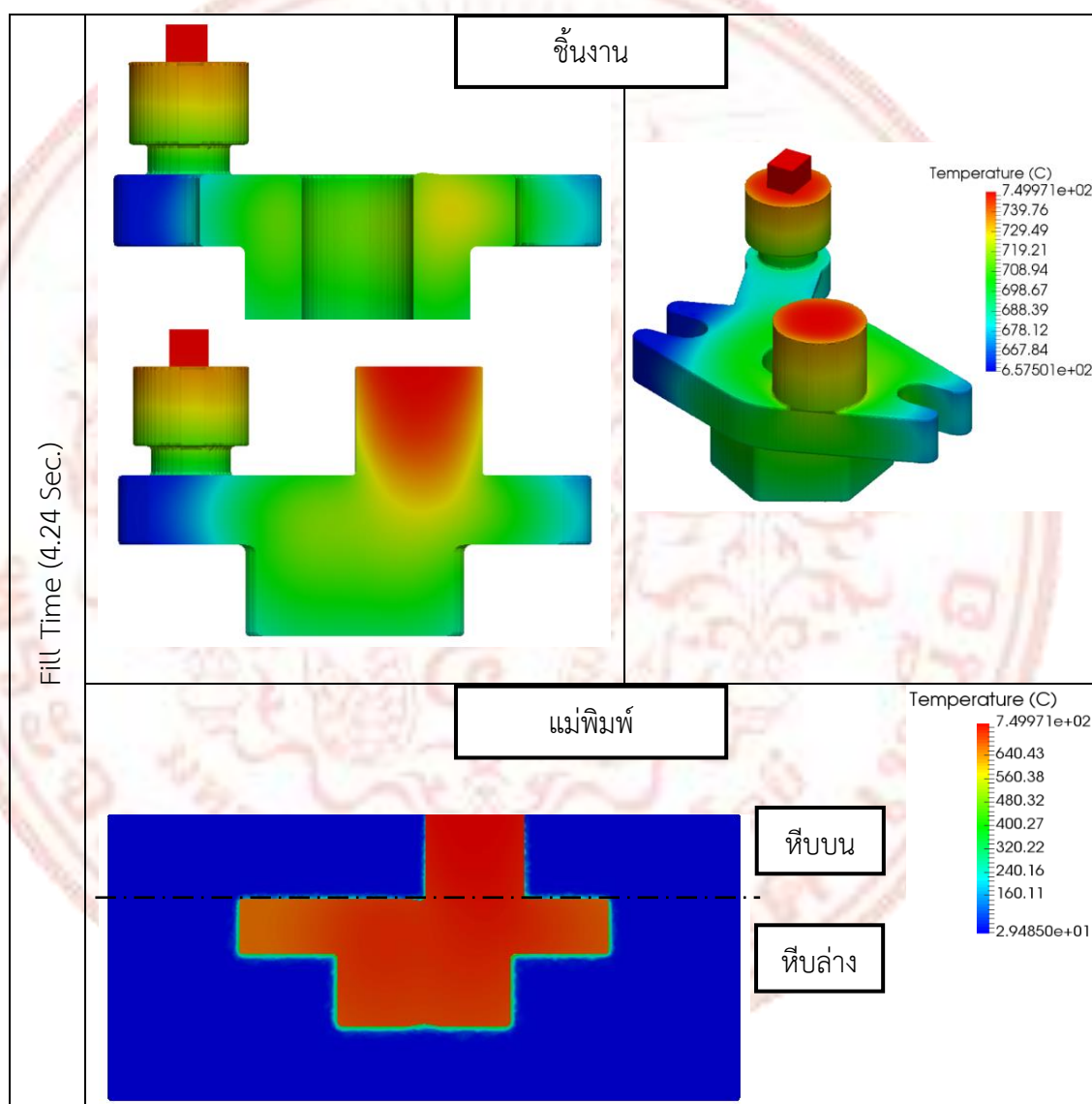
ภาพที่ 4-148 แสดงการจำลองอุณหภูมิ ณ ช่วงเวลา End Solidification Time ของชิ้นงาน ทดสอบการลดขนาดหีบบนที่ใช้ในการเทหล่อแบบปรับรูล้นสูง 40 มิลลิเมตร

จนเมื่อถึงช่วงเวลาดสิ้นสุดการแข็งตัว จะสังเกตได้ว่า รูล้นจะยังเป็นส่วนที่มีอุณหภูมิสะสมสูงที่สุด ประมาณ 651.74 – 659.04 องศาเซลเซียส ส่วนอุณหภูมิภายในชิ้นงานจะอยู่ที่ประมาณ 649 –

650.63 องศาเซลเซียส หรือ ประมาณ 650 องศาเซลเซียส ในส่วนของอุณหภูมิที่ถูกแพร่ออกจากชิ้นงานสู่แม่พิมพ์นั้นจะมีค่าอุณหภูมิอยู่ที่ 209.83 – 489.59 องศาเซลเซียส โดยช่วงเวลานี้อุณหภูมิยังอยู่ในแม่พิมพ์เป็นหลัก

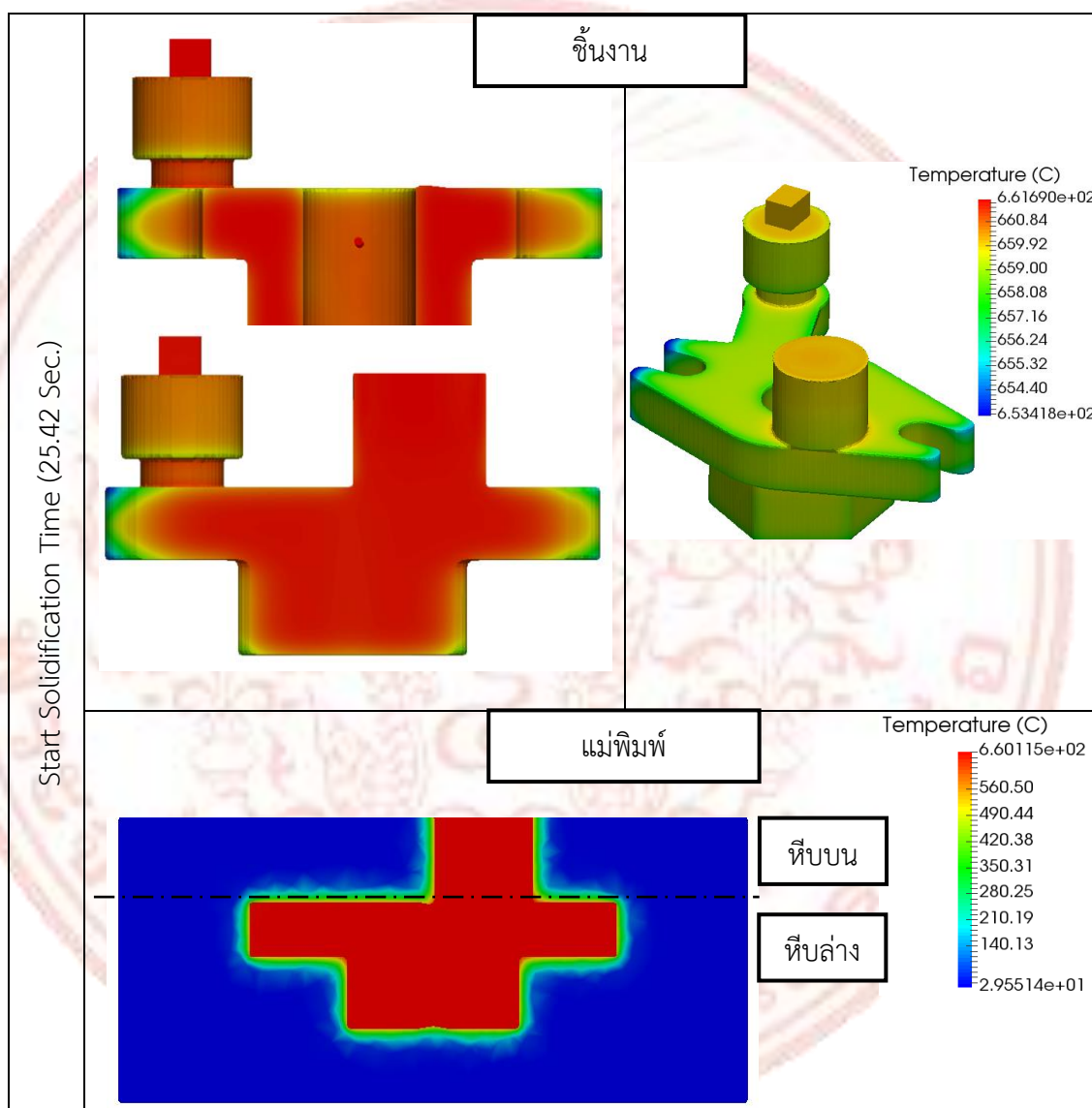
4.8.5.3.6 ทดสอบการลดขนาดหีบบนที่ใช้ในการเทหล่อแบบปรับรู้นสูง 30

มิลลิเมตร



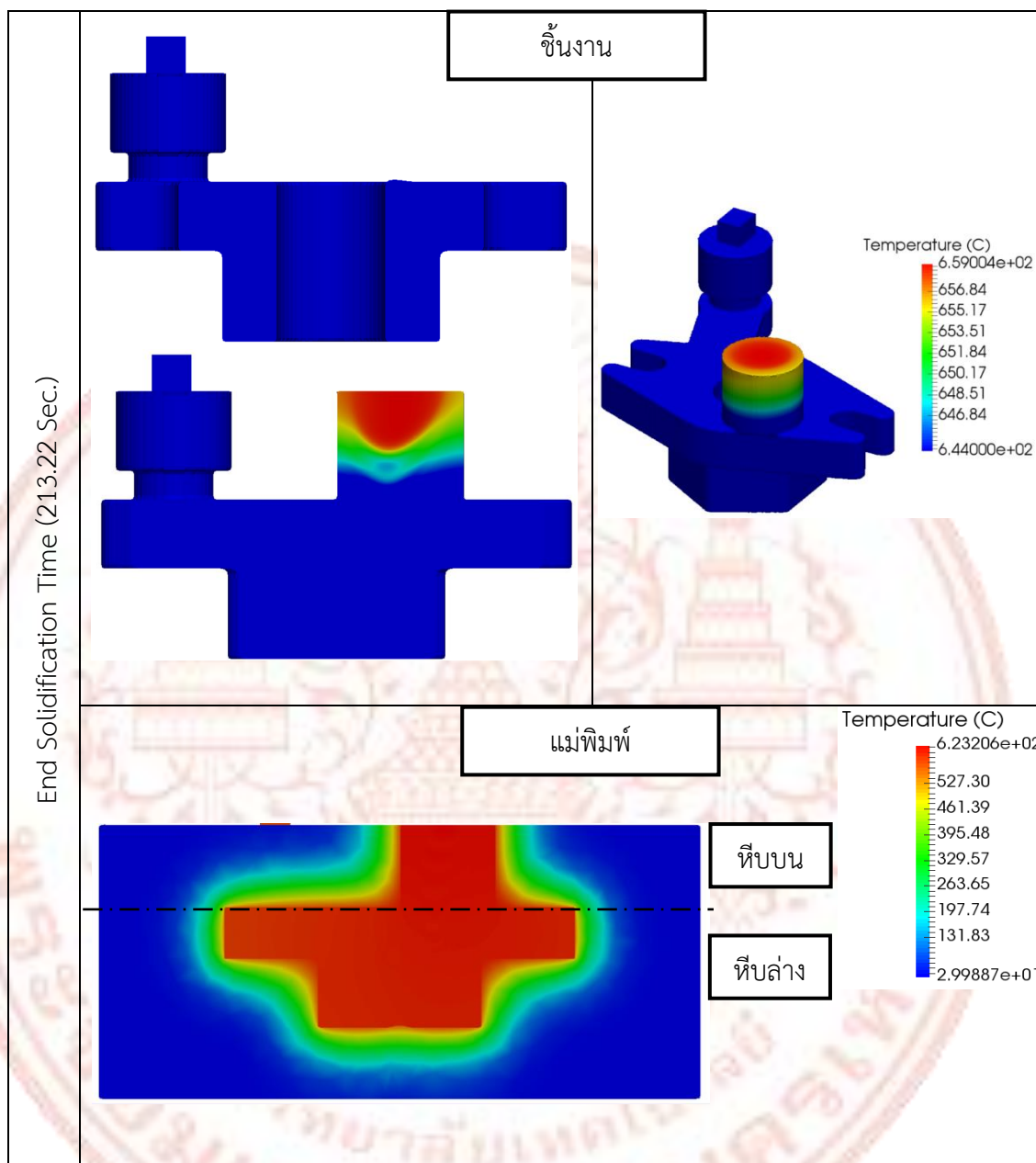
ภาพที่ 4-149 แสดงการจำลองอุณหภูมิ ณ ช่วงเวลา Fill Time ของชิ้นงานทดสอบการลดขนาดหีบบนที่ใช้ในการเทหล่อแบบปรับรู้นสูง 30 มิลลิเมตร

โดยสรุปจากผลการจำลองด้านอุณหภูมิทั้งสามช่วงเวลาของชิ้นงานทดสอบการลดขนาดทึบ
บนที่ใช้ในการเทหล่อแบบปรับรู้นสูง 30 มิลลิเมตร แสดงให้เห็นว่า ณ ช่วงเวลาสิ้นสุดการเติมน้ำ
โลหะ อุณหภูมิที่สูงที่สุดจะอยู่ที่บริเวณรู้นโดยมีอุณหภูมิประมาณ 729.74 – 749.97 องศาเซลเซียส
ดังภาพที่ 4-149 โดยที่แม่พิมพ์มีอุณหภูมิอยู่ที่ประมาณ 29.73 องศาเซลเซียส



ภาพที่ 4-150 แสดงการจำลองอุณหภูมิ ณ ช่วงเวลา Start Solidification Time ของชิ้นงาน
ทดสอบการลดขนาดทึบบนที่ใช้ในการเทหล่อแบบปรับรู้นสูง 30 มิลลิเมตร

ต่อมาเมื่อเข้าสู่ช่วงเริ่มต้นการแข็งตัว อุณหภูมิโดยเฉลี่ยทั่วชิ้นงานจะมีค่าใกล้เคียงกันอยู่ที่
ประมาณ 653.32 – 661.16 องศาเซลเซียส มีเฉพาะผิวเท่านั้นที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า และอุณหภูมิเริ่มมี
การแพร่ไปยังแม่พิมพ์ทรายแล้ว ดังภาพที่ 4-150

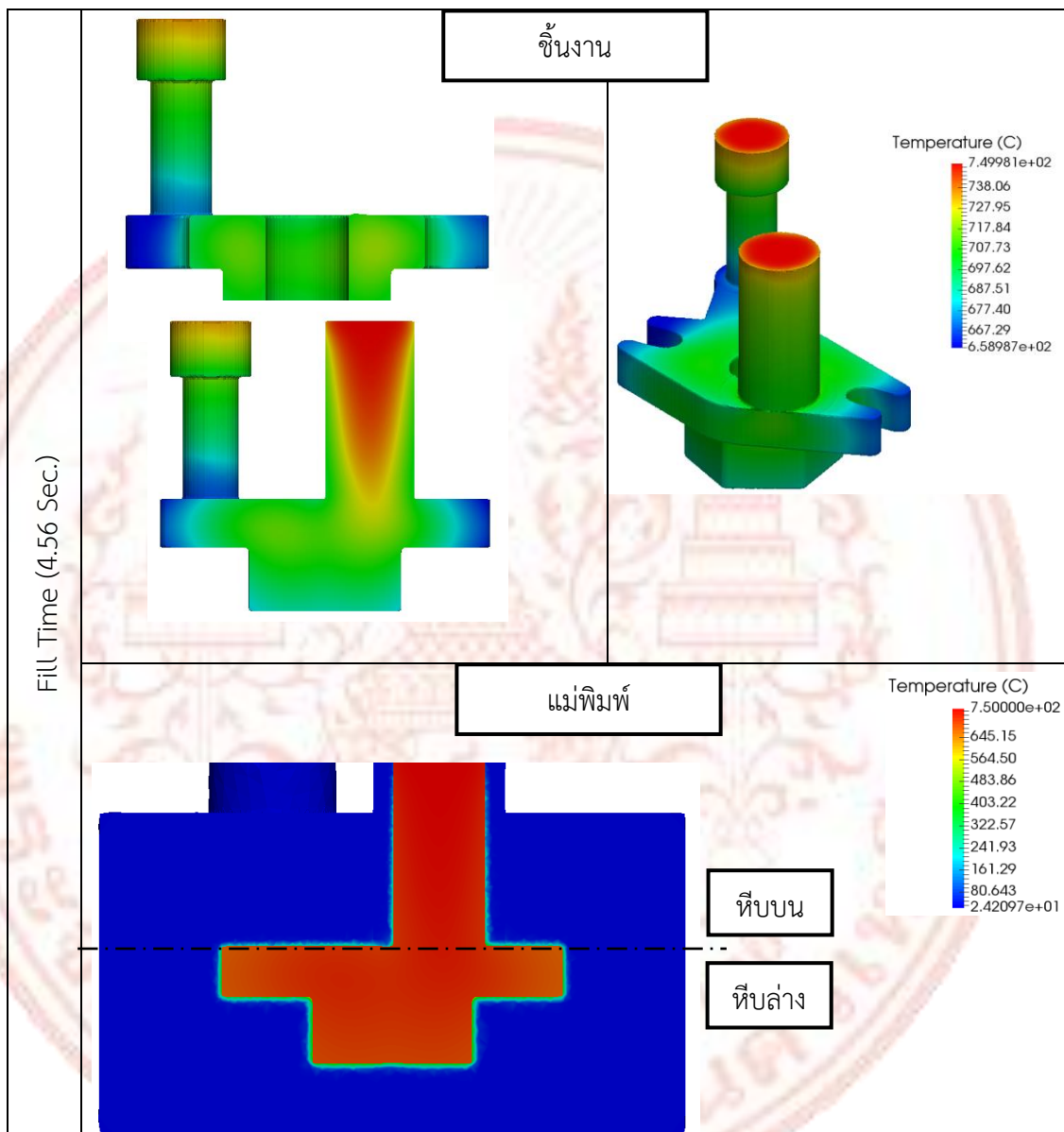


ภาพที่ 4-151 แสดงการจำลองอุณหภูมิ ณ ช่วงเวลา End Solidification Time ของชิ้นงาน ทดสอบการลดขนาดหีบบนที่ใช้ในการเทหล่อแบบปรับรูล้นสูง 30 มิลลิเมตร

จนเมื่อถึงช่วงเวลาสิ้นสุดการแข็งตัว จะสังเกตได้ว่ารูล้นจะยังเป็นส่วนที่มีอุณหภูมิสะสมสูงที่สุด ส่วนอุณหภูมิภายในชิ้นงานจะอยู่ที่ประมาณ 644 – 646.84 องศาเซลเซียส หรือ ประมาณ 645 องศาเซลเซียส ในส่วนของอุณหภูมิที่ถูกแพร่ออกจากชิ้นงานสู่แม่พิมพ์นั้นจะมีค่าอุณหภูมิอยู่ที่ 209.66 – 489.22 องศาเซลเซียส โดยช่วงเวลานี้อุณหภูมิยังอยู่ในแม่พิมพ์เป็นหลัก

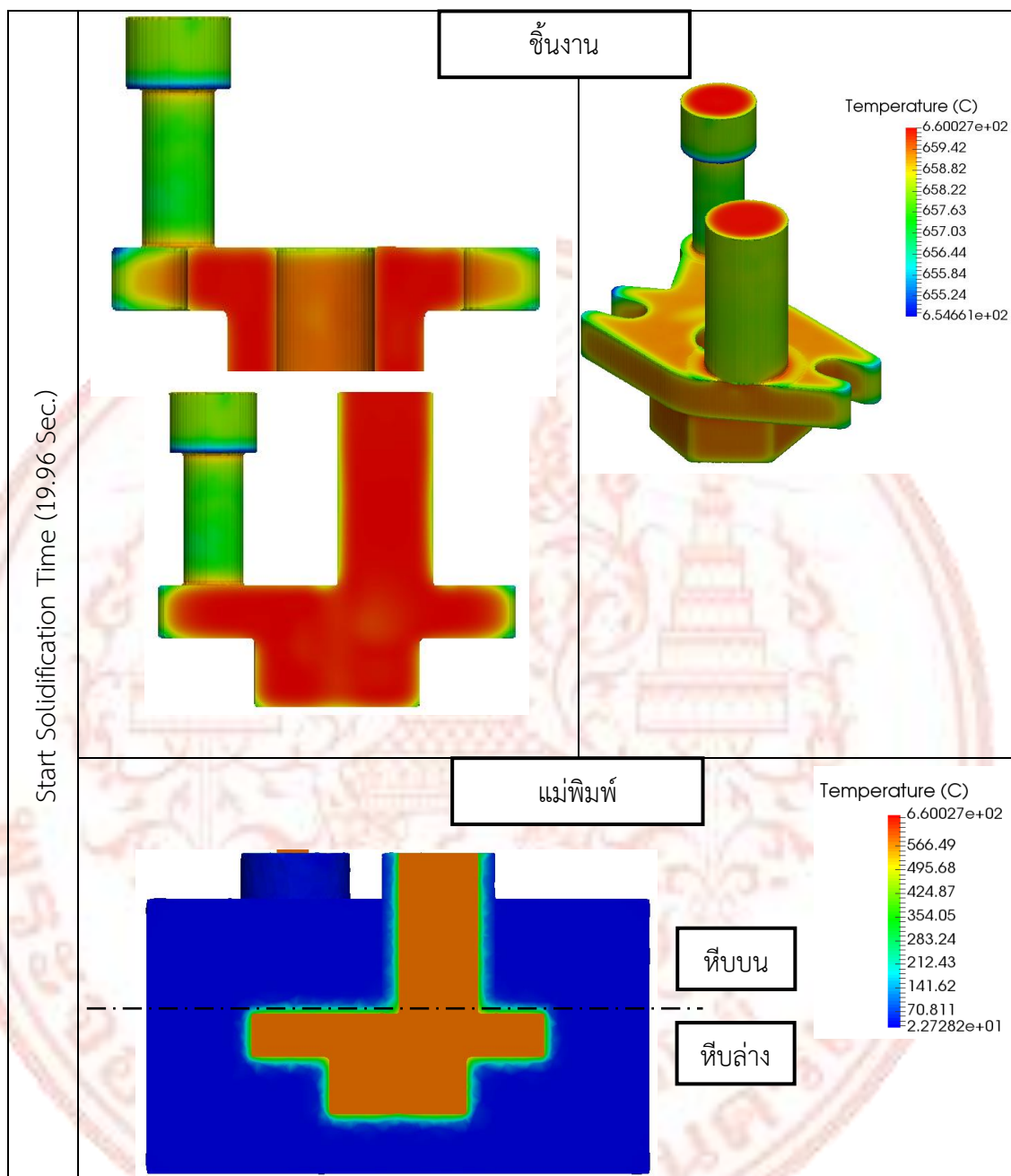
4.8.5.3.7 ทดสอบการลดขนาดหีบبنที่ใช้ในการเทหล่อแบบไม่ปรับรู้นสูง 50

มิลลิเมตร



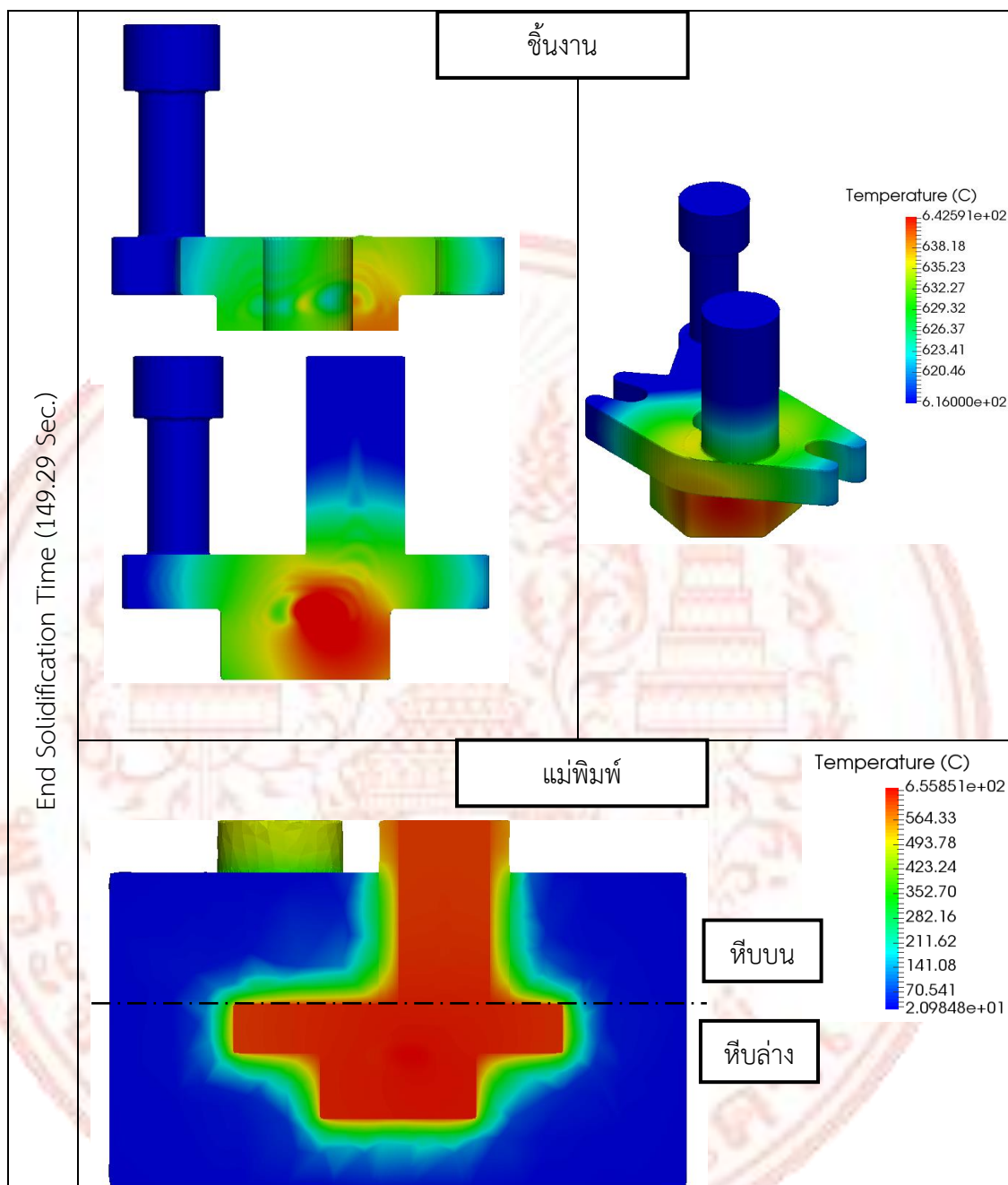
ภาพที่ 4-152 แสดงการจำลองอุณหภูมิ ณ ช่วงเวลา Fill Time ของชิ้นงานทดสอบการลดขนาดหีบبنที่ใช้ในการเทหล่อแบบปรับรู้นสูง 50 มิลลิเมตร

โดยสรุปจากผลการจำลองด้านอุณหภูมิทั้งสามช่วงเวลาของชิ้นงานทดสอบการลดขนาดหีบبنที่ใช้ในการเทหล่อแบบไม่ปรับรู้นสูง 50 มิลลิเมตร แสดงให้เห็นว่า ณ ช่วงเวลาสิ้นสุดการเติมน้ำโลหะ อุณหภูมิที่สูงที่สุดจะอยู่ที่บริเวณรู้นโดยมีอุณหภูมิประมาณ 738.06 – 749.98 องศาเซลเซียส ดังภาพที่ 4-152 โดยที่แม่พิมพ์มีอุณหภูมิอยู่ที่ประมาณ 24.20 องศาเซลเซียส



ภาพที่ 4-153 แสดงการจำลองอุณหภูมิ ณ ช่วงเวลา Start Solidification Time ของชิ้นงาน ทดสอบการลดขนาดหีบบนที่ใช้ในการเทหล่อแบบปรับรูล้นสูง 50 มิลลิเมตร

ต่อมาเมื่อเข้าสู่ช่วงเริ่มต้นการแข็งตัว อุณหภูมิโดยเฉลี่ยทั่วชิ้นงานจะมีค่าใกล้เคียงกันอยู่ที่ประมาณ 654.66 – 660.02 องศาเซลเซียส มีเฉพาะผิวเท่านั้นที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า และอุณหภูมิเริ่มมีการแพร่ไปยังแม่พิมพ์ทรายแล้ว ดังภาพที่ 4-153

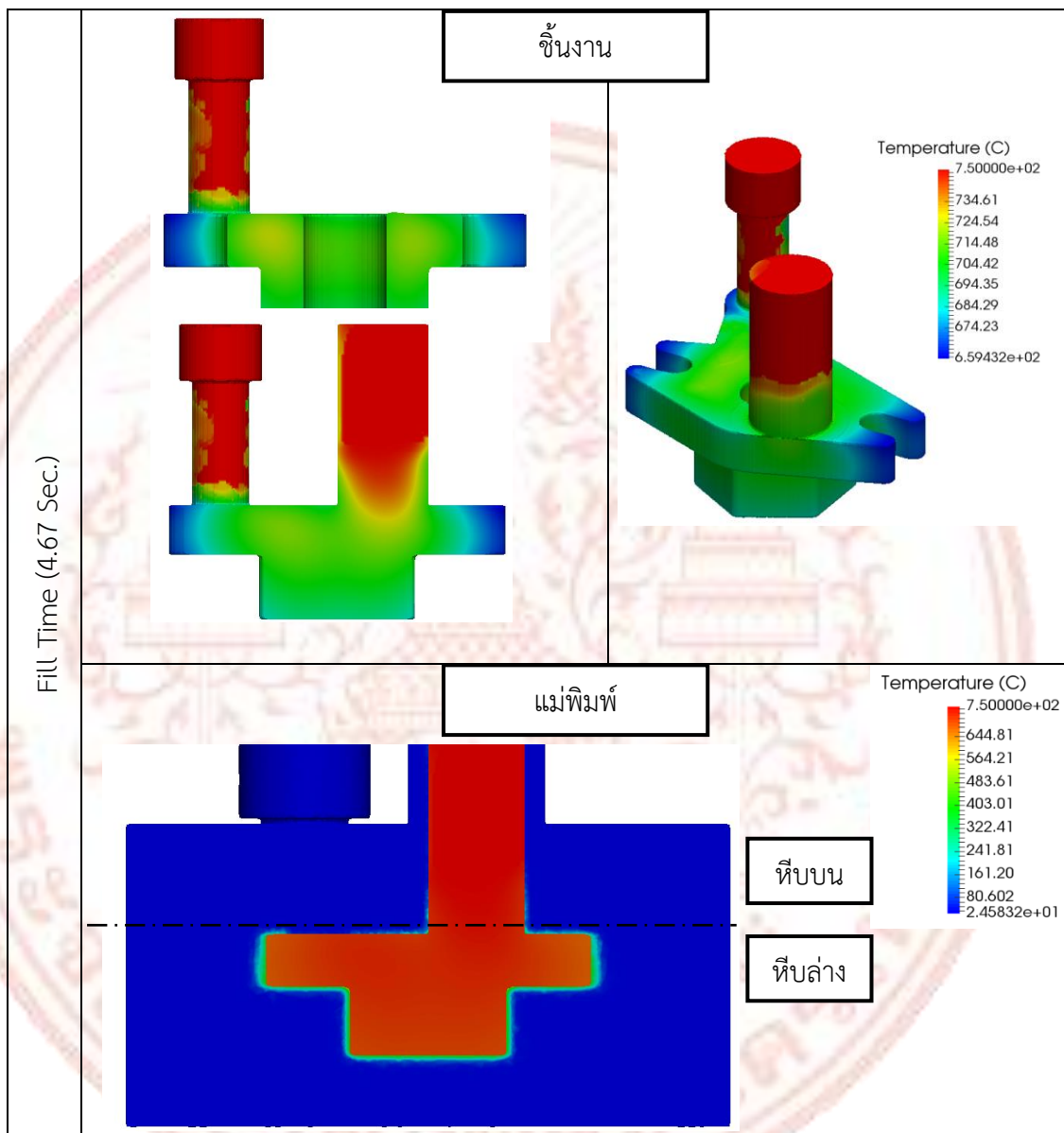


ภาพที่ 4-154 แสดงการจำลองอุณหภูมิ ณ ช่วงเวลา End Solidification Time ของชิ้นงาน ทดสอบการลดขนาดหีบบนที่ใช้ในการหล่อแบบปรับรู้นสูง 50 มิลลิเมตร

จนเมื่อถึงช่วงเวลาสิ้นสุดการแข็งตัว จะสังเกตได้ว่าภายในเนื้อชิ้นงานเป็นส่วนที่มีอุณหภูมิสะสมสูงที่สุด อยู่ที่ประมาณ 638 – 642.59 องศาเซลเซียส ในส่วนของอุณหภูมิที่ถูกแพร่ออกจากชิ้นงานสู่แม่พิมพ์นั้นจะมีค่าอุณหภูมิตั้งที่ 209.84 – 493.78 องศาเซลเซียส โดยช่วงเวลานี้อุณหภูมิยังอยู่ในแม่พิมพ์เป็นหลัก

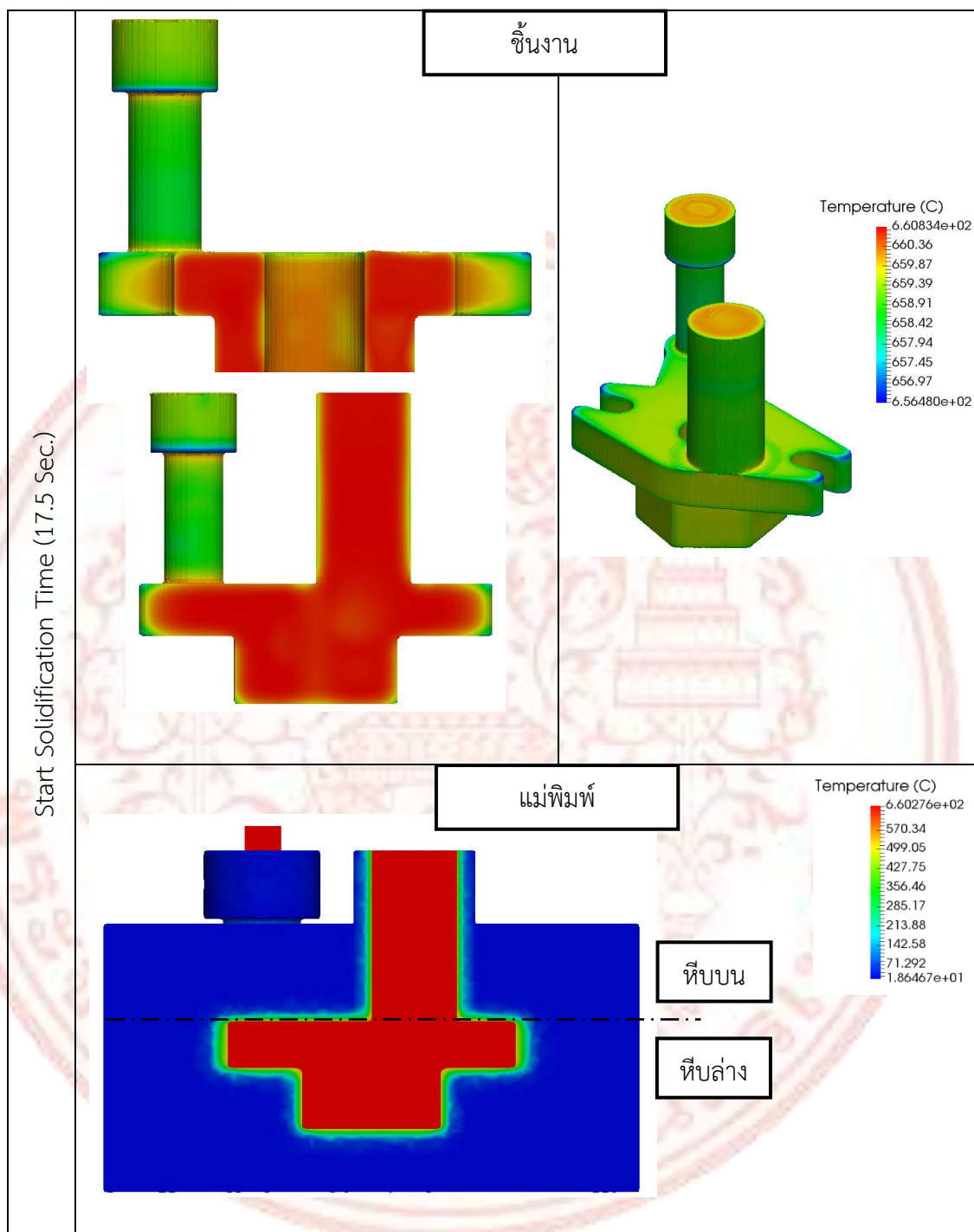
4.8.5.3.8 ทดสอบการลดขนาดหีบبنที่ใช้ในการเทหล่อแบบไม่ปรับรู้นสูง 40

มิลลิเมตร



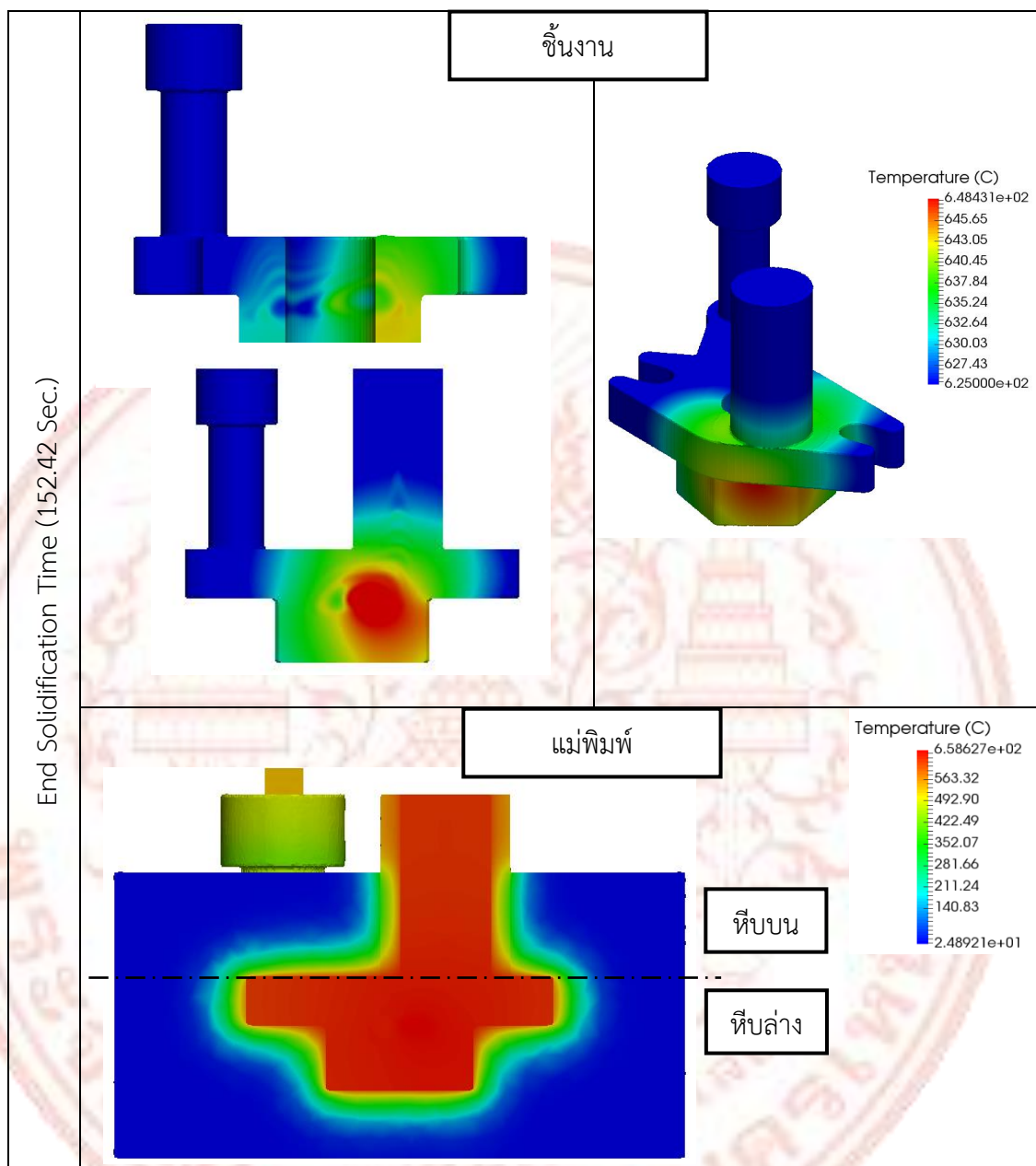
ภาพที่ 4-155 แสดงการจำลองอุณหภูมิ ณ ช่วงเวลา Fill Time ของชิ้นงานทดสอบการลดขนาดหีบبنที่ใช้ในการเทหล่อแบบไม่ปรับรู้นสูง 40 มิลลิเมตร

โดยสรุปจากผลการจำลองด้านอุณหภูมิทั้งสามช่วงเวลาของชิ้นงานทดสอบการลดขนาดหีบبنที่ใช้ในการเทหล่อแบบไม่ปรับรู้นสูง 40 มิลลิเมตร แสดงให้เห็นว่า ณ ช่วงเวลาสิ้นสุดการเติมน้ำโลหะ อุณหภูมิที่สูงที่สุดจะอยู่ที่บริเวณรู้นโดยมีอุณหภูมิประมาณ 734.61 – 750.00 องศาเซลเซียส ดังภาพที่ 4-134 โดยที่แม่พิมพ์มีอุณหภูมิอยู่ที่ประมาณ 24.58 องศาเซลเซียส



ภาพที่ 4-156 แสดงการจำลองอุณหภูมิ ณ ช่วงเวลา Start Solidification Time ของชิ้นงาน ทดสอบการลดขนาดหีบบนที่ใช้ในการเทหล่อแบบปรับรู้นสูง 40 มิลลิเมตร

ต่อมาเมื่อเข้าสู่ช่วงเริ่มต้นการแข็งตัว อุณหภูมิโดยเฉลี่ยทั่วชิ้นงานจะมีค่าใกล้เคียงกันอยู่ที่ประมาณ 656.48 – 660.83 องศาเซลเซียส มีเฉพาะผิวเท่านั้นที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า และอุณหภูมิเริ่มมีการแพร่ไปยังแม่พิมพ์ทรายแล้ว ดังภาพที่ 4-156

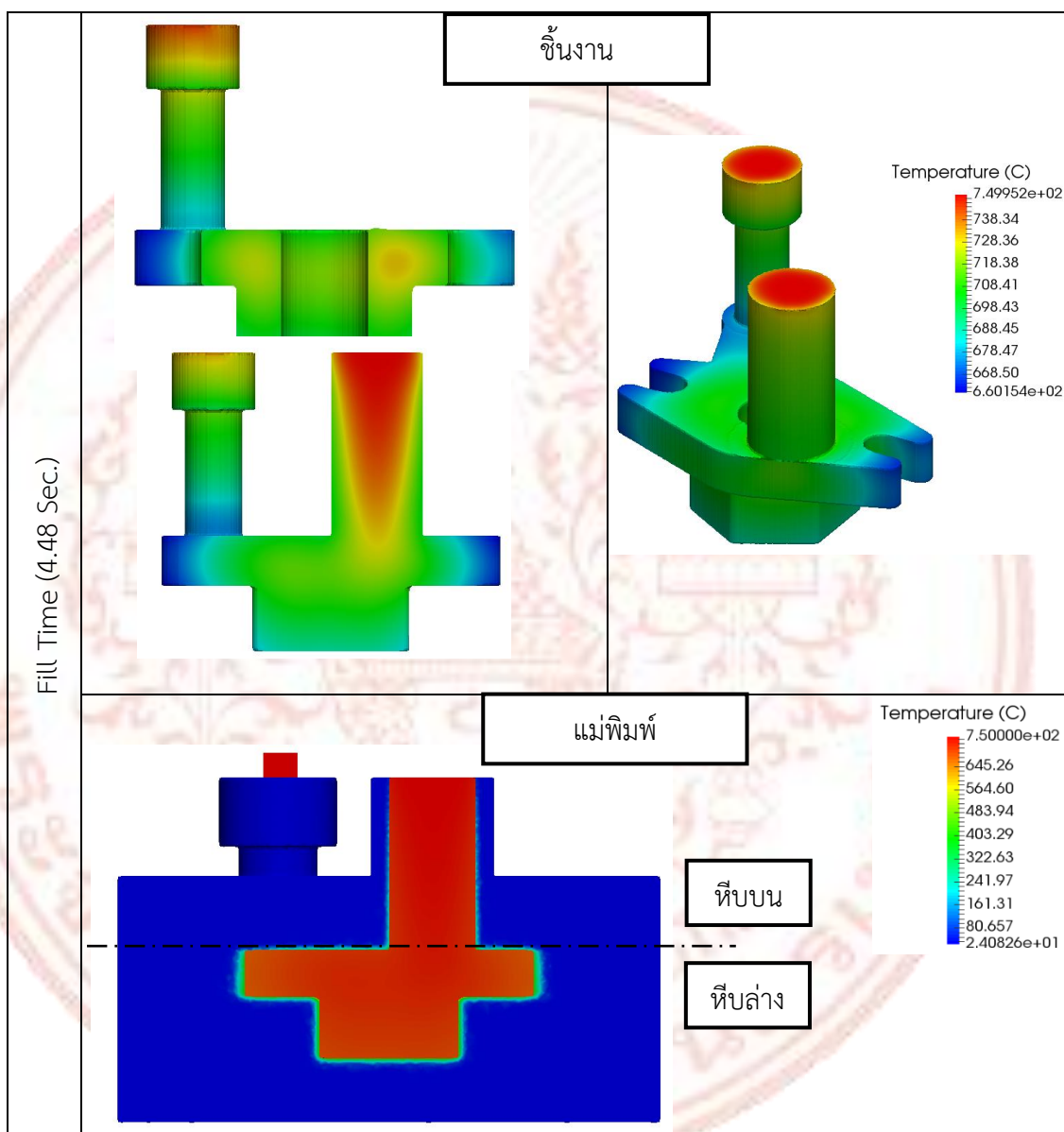


ภาพที่ 4-157 แสดงการจำลองอุณหภูมิ ณ ช่วงเวลา End Solidification Time ของชิ้นงาน ทดสอบการลดขนาดหีบบนที่ใช้ในการเทหล่อแบบไม่ปรับรู้นสูง 40 มิลลิเมตร

จนเมื่อถึงช่วงเวลาสิ้นสุดการแข็งตัว จะสังเกตได้ว่าภายในเนื้อชิ้นงานเป็นส่วนที่มีอุณหภูมิสะสมสูงที่สุด อยู่ที่ประมาณ 643.05 – 648.43 องศาเซลเซียส ในส่วนของอุณหภูมิที่ถูกระบายออกจากชิ้นงานสู่แม่พิมพ์นั้นจะมีค่าอุณหภูมิลดลงอยู่ที่ 248.92 – 492.90 องศาเซลเซียส โดยช่วงเวลานี้อุณหภูมิยังอยู่ในแม่พิมพ์เป็นหลัก

4.8.5.3.9 ทดสอบการลดขนาดหีบبنที่ใช้ในการเทหล่อแบบไม่ปรับรู้นสูง 30

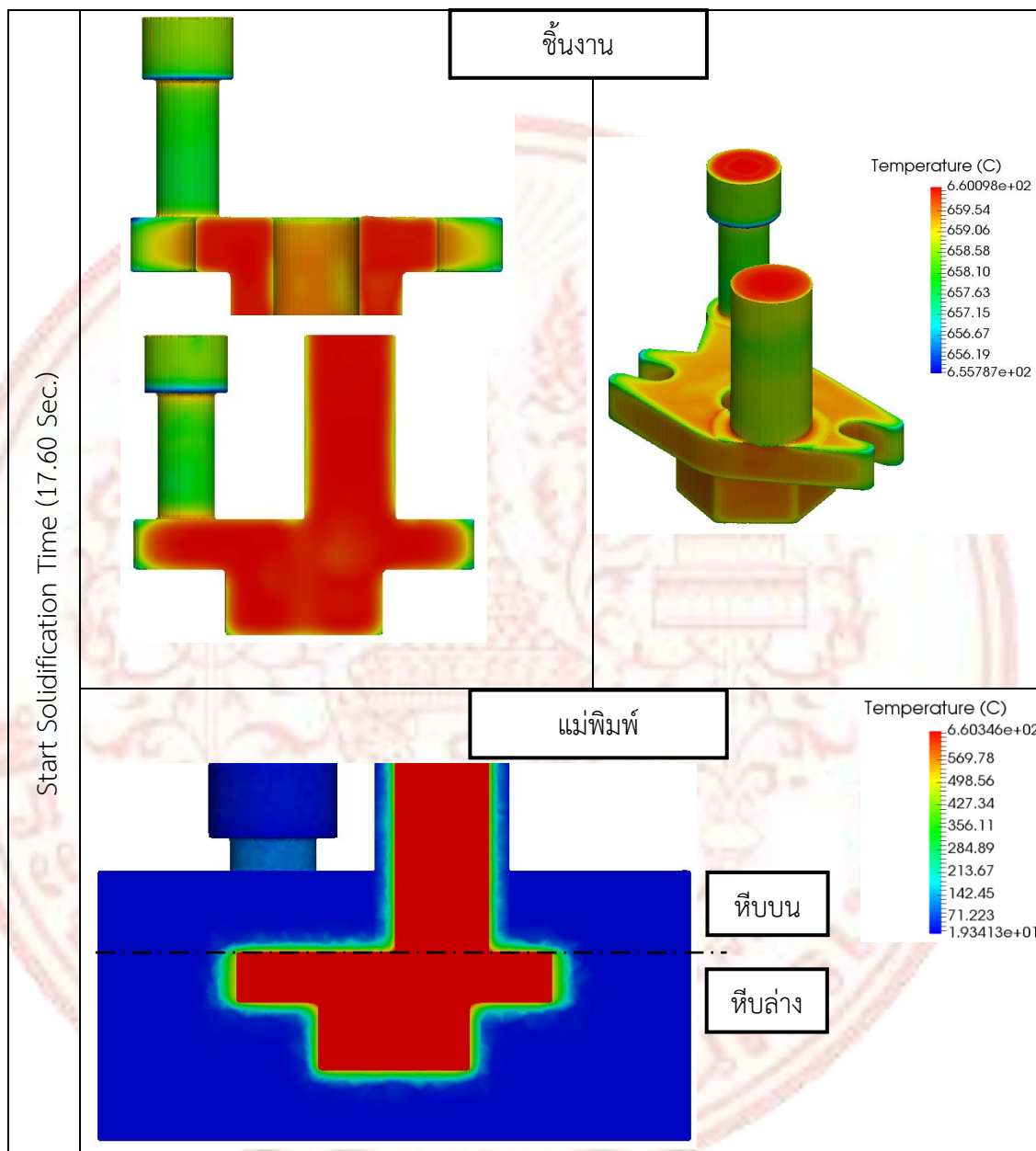
มิลลิเมตร



ภาพที่ 4-158 แสดงการจำลองอุณหภูมิ ณ ช่วงเวลา Fill Time ของขึ้นงานทดสอบการลดขนาดหีบبنที่ใช้ในการเทหล่อแบบไม่ปรับรู้นสูง 30 มิลลิเมตร

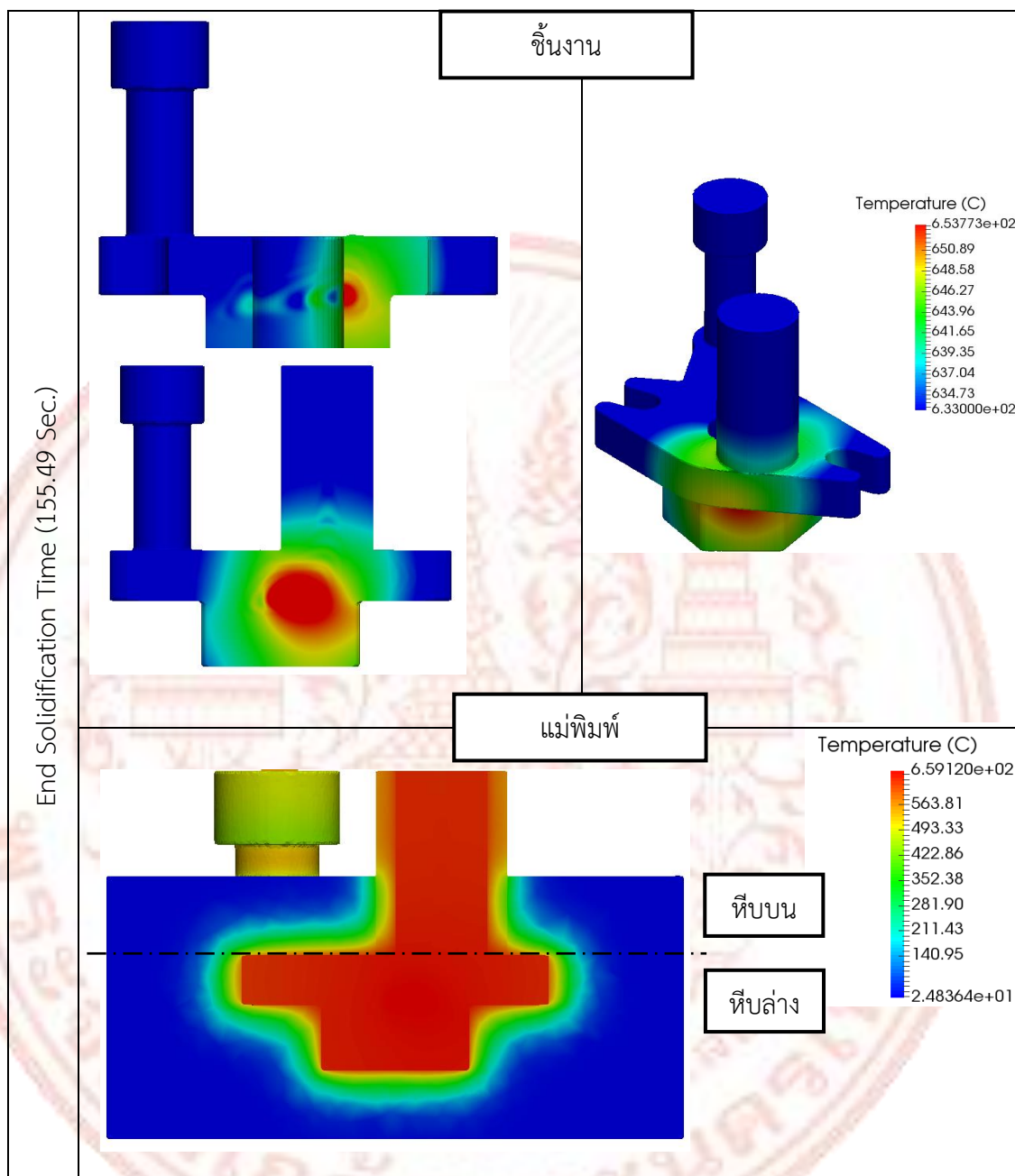
โดยสรุปจากผลการจำลองด้านอุณหภูมิทั้งสามช่วงเวลาของขึ้นงานทดสอบการลดขนาดหีบبنที่ใช้ในการเทหล่อแบบไม่ปรับรู้นสูง 30 มิลลิเมตร แสดงให้เห็นว่า ณ ช่วงเวลาสิ้นสุดการเติมน้ำ

โลหะ อุณหภูมิที่สูงที่สุดจะอยู่ที่บริเวณรูสันโดยมีอุณหภูมิประมาณ 728.36 – 749.95 องศาเซลเซียส
 ดังภาพที่ 4-158 โดยที่แม่พิมพ์มีอุณหภูมิอยู่ที่ประมาณ 24.08 องศาเซลเซียส



ภาพที่ 4-159 แสดงการจำลองอุณหภูมิ ณ ช่วงเวลา Start Solidification Time ของชิ้นงาน
 ทดสอบการลดขนาดหีบบนที่ใช้ในการเทหล่อแบบไม่ปรับรูสันสูง 30 มิลลิเมตร

ต่อมาเมื่อเข้าสู่ช่วงเริ่มต้นการแข็งตัว อุณหภูมิโดยเฉลี่ยทั่วชิ้นงานจะมีค่าใกล้เคียงกันอยู่ที่
 ประมาณ 655.78 – 660.09 องศาเซลเซียส มีเฉพาะผิวเท่านั้นที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า และอุณหภูมิเริ่มมี
 การแพร่ไปยังแม่พิมพ์ทรายแล้ว ดังภาพที่ 4-159



ภาพที่ 4-160 แสดงการจำลองอุณหภูมิ ณ ช่วงเวลา End Solidification Time ของชิ้นงาน ทดสอบการลดขนาดที่บบนที่ใช้ในการเทหล่อแบบไม่ปรับรู้นสูง 30 มิลลิเมตร

จนเมื่อถึงเวลาสิ้นสุดการแข็งตัว จะสังเกตได้ว่าภายในเนื้อชิ้นงานเป็นส่วนของอุณหภูมิ สะสมสูงที่สุด อยู่ที่ประมาณ 650.89 – 653.77 องศาเซลเซียส องศาเซลเซียส ในส่วนของอุณหภูมิที่ ถูกแพร่ออกจากชิ้นงานสู่แม่พิมพ์นั้นจะมีค่าอุณหภูมิอยู่ที่ 248.36 – 483.33 องศาเซลเซียส โดย ช่วงเวลานี้อุณหภูมิยังอยู่ในแม่พิมพ์เป็นหลัก

4.9 สรุปผลการจำลองสถานการณ์ชิ้นงานทดสอบเพิ่มเติม

หัวข้อนี้จะสรุปผลเป็นกราฟข้อมูล โดยศึกษาข้อมูลเฉพาะในส่วนของชิ้นงานที่ใช้รูลันทรงกระบอกตัน และชิ้นงานที่ไม่มีรูลันท่อนั้น โดยจะนำข้อมูลมาสรุปเป็นกราฟเปรียบเทียบตามหัวข้อที่กล่าวไว้ในบทที่ 3 หัวข้อที่ 3.7

4.9.1 เปรียบเทียบการการเกิดโพรงหดตัวกับการปรับเปลี่ยนตำแหน่งการวางรูลันทรงกระบอกตัน โดยใช้รูลันขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูลัน 35 มิลลิเมตร สูง 70 มิลลิเมตร

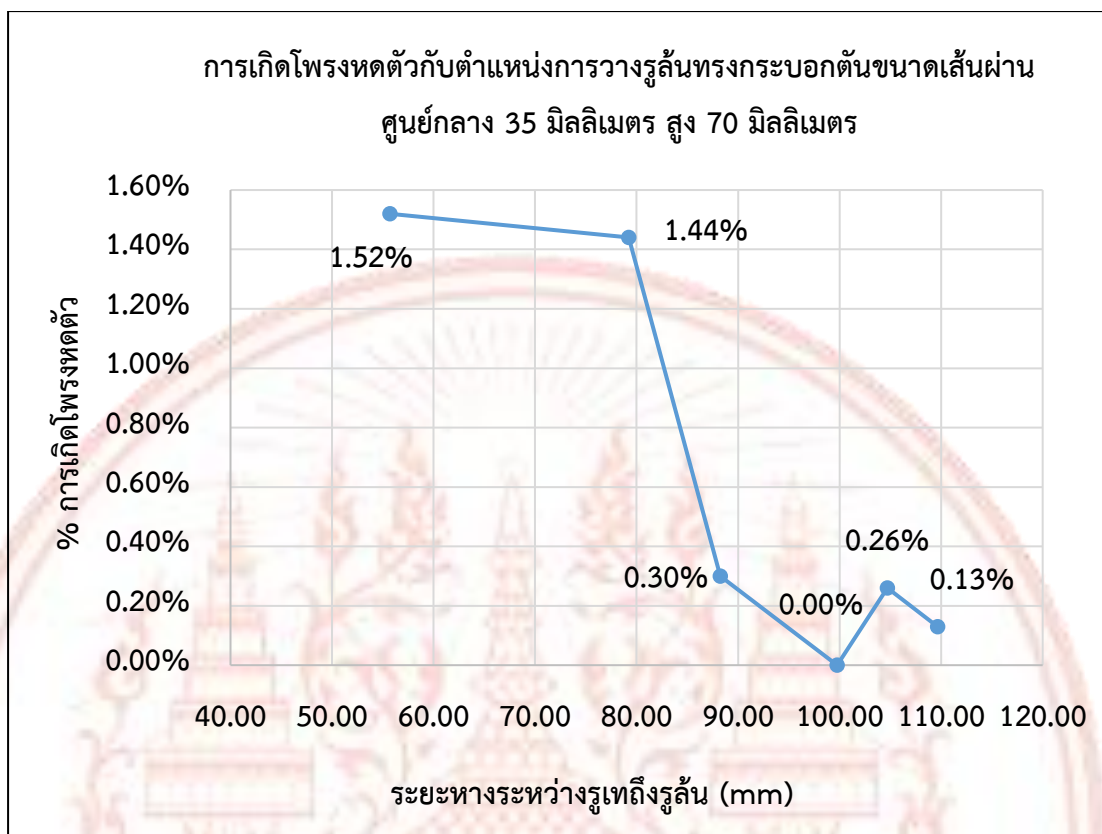
หัวข้อนี้จะเปรียบเทียบการเกิดโพรงหดตัวกับตำแหน่งการวางรูลันทรงกระบอกตัน เพื่อศึกษาว่าระยะห่างระหว่างรูเทและรูลันมีผลอย่างไรต่อการเกิดโพรงหดตัวในชิ้นงาน

ตารางที่ 4-8 แสดงระยะห่างระหว่างรูเทถึงรูลันทรงกระบอกตันเส้นผ่านศูนย์กลางรูลัน 35 มิลลิเมตร สูง 70 มิลลิเมตรและการเกิดโพรงหดตัวในชิ้นงาน

ชิ้นงาน	ระยะห่างระหว่างรูเทถึงรูลัน (mm)	การเกิดโพรงหดตัว
Cylinder_Q1 Riser	55.70	1.52%
Cylinder_Q2 Riser	79.24	1.44%
Cylinder_Q3 Riser	88.25	0.30%
Cylinder_Q4 Position 20	99.77	0.00%
Cylinder_Q4 Riser	104.71	0.26%
Cylinder_Q4 Position 30	109.66	0.13%

โดยสำหรับข้อมูลจากตารางที่ 4-8 สำหรับชิ้นงานที่เกิดโพรงหดตัวน้อยที่สุดคือชิ้นงาน Cylinder_Q4 Position 20 โดยระยะห่างจากรูเทถึงรูลันทรงกระบอกคือ 99.77 มิลลิเมตร ซึ่งมีโพรงหดตัวเกิดขึ้น 0.00% หรือไม่เกิดโพรงหดตัวเลย ส่วนชิ้นงานที่เกิดโพรงหดตัวมากที่สุด คือ Cylinder_Q1 Riser มีโพรงหดตัวอยู่ที่ 1.52 % โดยระยะห่างระหว่างเทถึงรูลันทรงกระบอกคือ 55.7 มิลลิเมตร

ในส่วนของกราฟ ผู้วิจัยแสดงไว้ในภาพ 4-161 โดยกราฟจะแสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างระยะห่างของรูเทถึงรูลัน มีผลอย่างไรต่อการเกิดโพรงหดตัว



ภาพที่ 4-161 กราฟแสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างระยะห่างของรูเทถึงรูล้นต่อการเกิดโพรงหดตัวในชิ้นงาน

จากข้อมูลการทดลองชิ้นงานในรูปแบบต่าง ๆ พบว่า ระยะห่างระหว่างรูเทถึงรูล้นมีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อการเกิดโพรงหดตัวในชิ้นงานหล่อ โดยมีแนวโน้มชัดเจนว่า เมื่อระยะห่างเพิ่มขึ้น การเกิดโพรงหดตัวจะลดลง ตัวอย่างที่ชัดเจนคือ ชิ้นงาน Cylinder_Q1 Riser ซึ่งมีระยะห่างเพียง 55.7 มม. มีเปอร์เซ็นต์โพรงหดตัวสูงถึง 1.52% ขณะที่ Cylinder_Q4 Riser มีระยะห่างมากที่สุดที่ 104.71 มม. และให้ค่าโพรงหดตัวลดลงเหลือเพียง 0.26% เท่านั้น นอกจากนี้ ยังพบว่า แม้ชิ้นงานในชุด Q4 จะมีระยะห่างที่ใกล้เคียงกัน แต่เมื่อมีการปรับตำแหน่งให้ระยะห่างเพิ่มขึ้นเล็กน้อย เช่น Cylinder_Q4 Position 30 ที่มีระยะ 109.66 มม. ค่าโพรงหดตัวยังลดลงเหลือเพียง 0.13% ขณะที่ระยะห่างน้อยลงเล็กน้อยใน Cylinder_Q4 Position 20 (99.77 มม.) ก็ให้ผลที่ดีเช่นกันคือไม่มีโพรงหดตัวเลย (0.00%)

4.9.2 เปรียบเทียบการเกิดโพรงหดตัวกับการปรับขนาดของรูล้นทรงกระบอกตัน เฉพาะชิ้นงานวางรูล้นตำแหน่งที่ 4

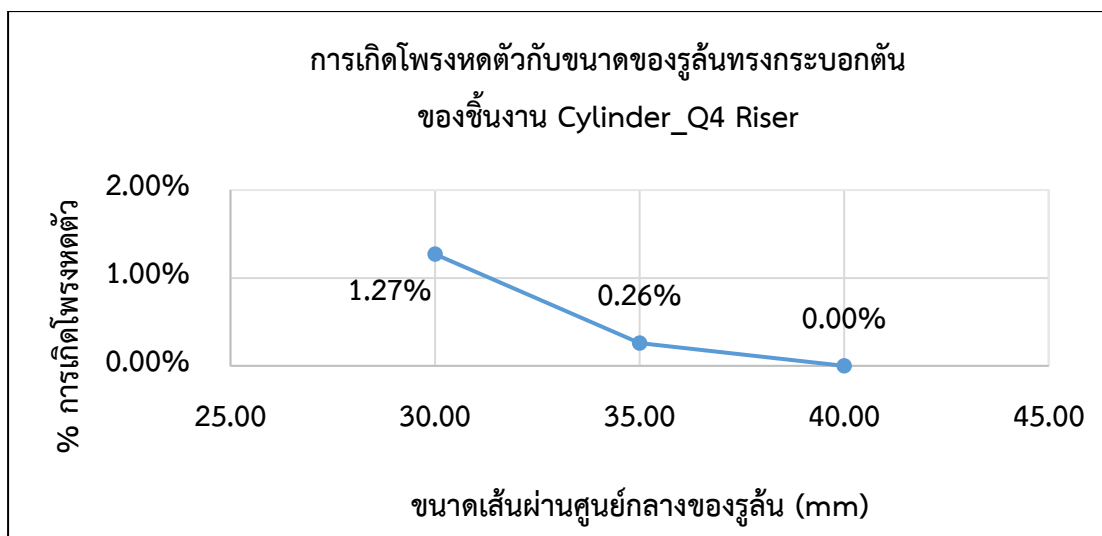
หัวข้อนี้จะเปรียบเทียบการเกิดโพรงหดตัวกับการทดสอบปรับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูล้นทรงกระบอกตัน เพื่อศึกษาว่าขนาดของรูล้นทรงกระบอกตันมีผลต่อการเกิดโพรงหดตัวในชิ้นงาน โดยปรับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของชิ้นงาน Cylinder_Q4 Riser

ตารางที่ 4-9 แสดงการปรับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูล้นของชิ้นงาน Cylinder_Q4 Riser กับผลของการเกิดโพรงหดตัวในชิ้นงาน

ชิ้นงาน	ขนาดรูล้นทรงกระบอกตัน (mm)	การเกิดโพรงหดตัว
Cylinder_Q4 Riser D30	30.00	1.27%
Cylinder_Q4 Riser	35.00	0.26%
Cylinder_Q4 Riser D40	40.00	0.00%

โดยสำหรับข้อมูลจากตารางที่ 4-9 สำหรับชิ้นงานที่เกิดโพรงหดตัวน้อยที่สุดคือชิ้นงาน Cylinder_Q4 Riser D40 ซึ่งมีขนาดรูล้นทรงกระบอกตันเท่ากับ 40 ตามลำดับ โดยไม่มีการเกิดโพรงหดตัวเลย ส่วนชิ้นงานที่เกิดโพรงหดตัวมากที่สุด คือ Cylinder_Q4 Riser D30 ซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูล้นทรงกระบอกตันเท่ากับ 30 มิลลิเมตร มีเปอร์เซ็นต์เกิดโพรงหดตัวสูงสุดอยู่ที่ 1.27%

ในส่วนของกราฟ ผู้วิจัยแสดงไว้ในภาพ 4-138 โดยกราฟจะแสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างการเกิดโพรงหดตัวกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูล้นทรงกระบอกตัน ตำแหน่งการวางที่ 4 มีผลอย่างไรต่อการเกิดโพรงหดตัว



ภาพที่ 4-162 กราฟแสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างการปรับขนาดของรูล้นชิ้นงาน
Cylinder_Q4 Riser กับการเกิดโพรงหดตัว

จากข้อมูลในตารางที่ 4-9 พบว่าขนาดของรูล้นทรงกระบอกตันมีผลโดยตรงต่อการเกิดโพรงหดตัวในชิ้นงานหล่อ โดยชิ้นงานที่มีขนาดรูล้นใหญ่ที่สุดคือ 40 มิลลิเมตร (Cylinder_Q4 Riser D40) ไม่พบการเกิดโพรงหดตัวเลย (0.00%) ขณะที่ชิ้นงานที่มีขนาดรูล้นเล็กกว่าที่ 30 มิลลิเมตร (Cylinder_Q4 Riser D30) กลับพบการเกิดโพรงหดตัวสูงถึง 1.27% แสดงให้เห็นว่าเมื่อขนาดของรูล้นมีขนาดเล็กเกินไป ทำให้เกิดโพรงหดตัวมากขึ้น ในขณะที่การเพิ่มขนาดรูล้นสามารถช่วยลดหรือขจัดการเกิดโพรงหดตัวได้อย่างชัดเจน

4.9.3 เปรียบเทียบการเกิดโพรงหดตัวกับการปรับความสูงหีบแบบไม่มีรูล้น

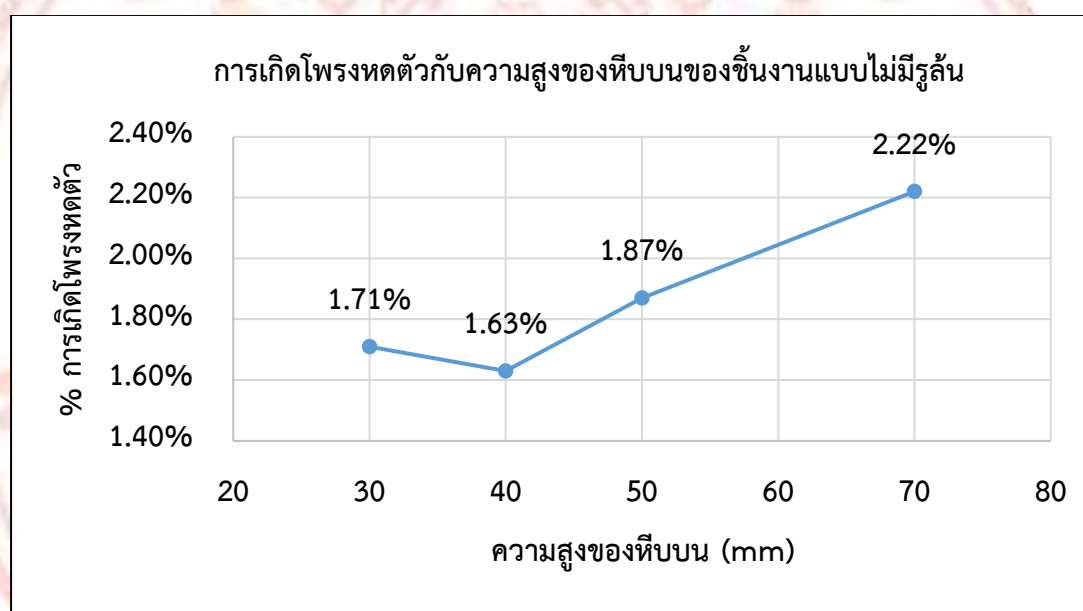
หัวข้อนี้จะเปรียบเทียบการเกิดโพรงหดตัวกับขนาดของรูล้นทรงกระบอกตัน เพื่อศึกษาว่าความสูงของหีบมีผลต่อการเกิดโพรงหดตัวในชิ้นงาน โดยศึกษาเฉพาะชิ้นงานที่ไม่มีรูล้น

ตารางที่ 4-10 แสดงการปรับขนาดความสูงหีบแบบไม่มีรูล้นกับการเกิดโพรงหดตัวของชิ้นงาน

ชิ้นงาน	ความสูงหีบแบบ (mm)	โพรงหดตัว
No Riser	70	2.22%
Mould H50 No_Riser	50	1.87%
Mould H40 No_Riser	40	1.63%
Mould H30 No_Riser	30	1.71%

จากข้อมูลในตารางที่ 4-10 ซึ่งเปรียบเทียบการเกิดโพรงหดตัวกับความสูงของหีบبنในกรณีที่ไม่มีรูล้น พบว่าชิ้นงานที่เกิดโพรงหดตัวน้อยที่สุดคือ Mould H40 No_Riser ซึ่งมีความสูงหีบبن 40 มิลลิเมตร โดยมีเปอร์เซ็นต์โพรงหดตัว 1.63% ส่วนชิ้นงานที่เกิดโพรงหดตัวมากที่สุดคือ No Riser ซึ่งมีความสูงหีบبن 70 มิลลิเมตร โดยมีเปอร์เซ็นต์โพรงหดตัวสูงถึง 2.22% แสดงให้เห็นว่าความสูงของหีบبنมีผลต่อการเกิดโพรงหดตัวในชิ้นงานหล่อแบบไม่มีรูล้น และความสูงที่เหมาะสมสามารถช่วยลดปัญหานี้ได้

ในส่วนของกราฟ ผู้วิจัยแสดงไว้ในภาพ 4-139 โดยกราฟจะแสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างการเกิดโพรงหดตัวกับความสูงของหีบبنหล่อแบบไม่มีรูล้น มีผลอย่างไรต่อการเกิดโพรงหดตัว



ภาพที่ 4-163 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการเกิดโพรงหดตัวกับความสูงของหีบبنของชิ้นงานแบบไม่มีรูล้น

จากข้อมูลในภาพที่ 4-163 พบว่าความสูงของหีบبنส่งผลต่อการเกิดโพรงหดตัวในชิ้นงานหล่อที่ไม่มีรูล้น โดยเมื่อความสูงหีบبنลดลงจาก 70 มิลลิเมตร (No Riser) เป็น 40 มิลลิเมตร (Mould H40 No_Riser) พบว่าการเกิดโพรงหดตัวลดลงจาก 2.22% เหลือเพียง 1.63% อย่างไรก็ตาม เมื่อความสูงลดลงต่อไปถึง 30 มิลลิเมตร (Mould H30 No_Riser) ค่าโพรงหดตัวกลับเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเป็น 1.71% แสดงให้เห็นว่าความสูงของหีบبنที่เหมาะสมที่สุดในกรณีนี้อาจอยู่ที่ระดับ 40 มิลลิเมตร ซึ่งช่วยลดการเกิดโพรงหดตัวได้ดีที่สุด

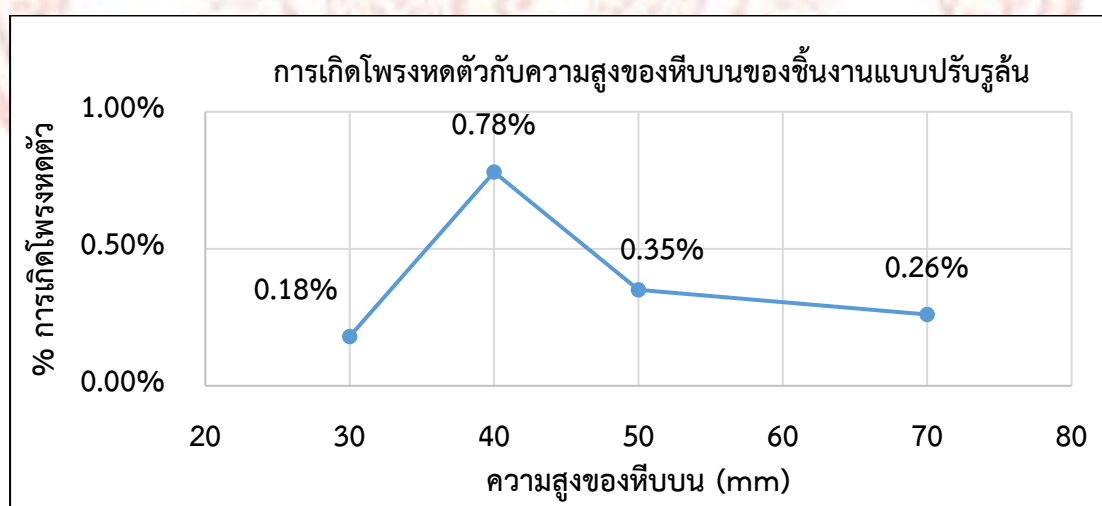
4.9.4 เปรียบเทียบการเกิดโพรงหดตัวกับการปรับความสูงหีบبنแบบปรับรูล้น

หัวข้อนี้จะเปรียบเทียบการเกิดโพรงหดตัวกับการปรับขนาดความสูงของทึบหล่อของชิ้นงาน Cylinder_Q4 Riser เพื่อศึกษาว่าความสูงของทึบมีผลต่อการเกิดโพรงหดตัวในชิ้นงานที่มีรูล้นหรือไม่

ตารางที่ 4-11 แสดงการปรับขนาดความสูงทึบแบบมีรูล้นกับการเกิดโพรงหดตัวของชิ้นงาน

ชิ้นงาน	ความสูงทึบบน (mm)	โพรงหดตัว
Cylinder_Q4 Riser	70	0.26%
MouldH50_RiserH50	50	0.35%
MouldH40_RiserH40	40	0.78%
MouldH30_RiserH30	30	0.18%

โดยสำหรับข้อมูลจากตารางที่ 4-11 ซึ่งเปรียบเทียบการเกิดโพรงหดตัวกับความสูงของทึบบน ในกรณีที่มีรูล้น พบว่าชิ้นงานที่เกิดโพรงหดตัวน้อยที่สุดคือ MouldH30_RiserH30 ซึ่งมีความสูงทึบบน 30 มิลลิเมตร โดยมีเปอร์เซ็นต์โพรงหดตัวเพียง 0.18% ส่วนชิ้นงานที่เกิดโพรงหดตัวมากที่สุดคือ MouldH40_RiserH40 ซึ่งมีความสูงทึบบน 40 มิลลิเมตร โดยมีเปอร์เซ็นต์โพรงหดตัวสูงถึง 0.78% แสดงให้เห็นว่าความสูงของทึบบนอาจส่งผลต่อการไหลและแข็งตัวของโลหะ โดยความสูงที่เหมาะสมสามารถช่วยลดการเกิดโพรงหดตัวได้อย่างชัดเจน



ภาพที่ 4-164 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการเกิดโพรงหดตัวกับความสูงของทึบบนของชิ้นงานแบบมีรูล้น

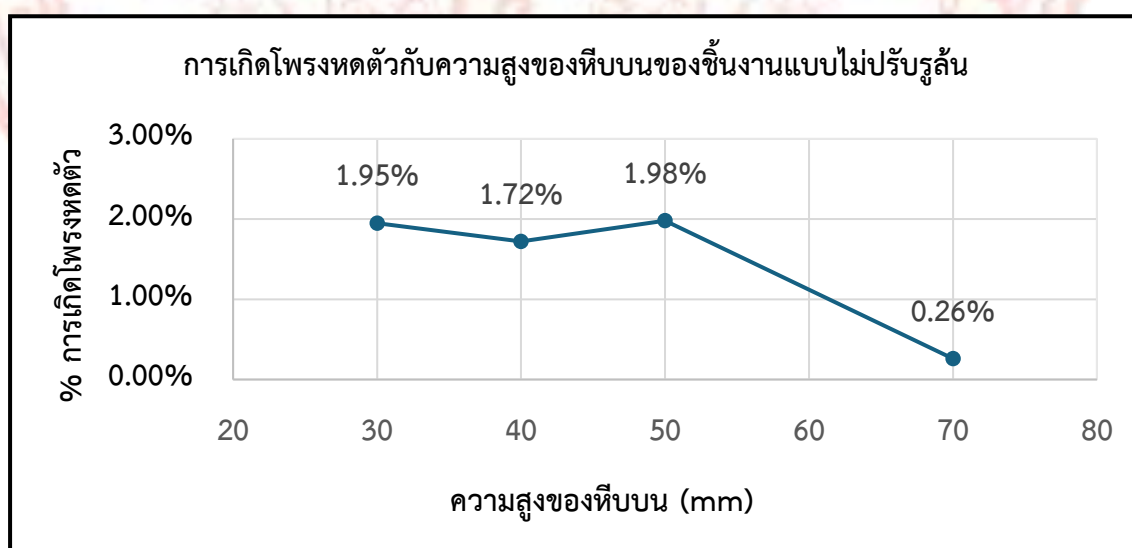
4.9.4 เปรียบเทียบการเกิดโพรงหดตัวกับการปรับความสูงทึบบนแบบไม่ปรับรูล้น

หัวข้อนี้จะเปรียบเทียบการเกิดโพรงหดตัวกับการปรับขนาดความสูงของทึบหล่อของชิ้นงาน Cylinder_Q4 Riser เพื่อศึกษาว่าความสูงของทึบมีผลต่อการเกิดโพรงหดตัวในชิ้นงานที่ไม่ปรับความสูงรูขึ้นหรือไม่

ตารางที่ 4-12 แสดงการปรับขนาดความสูงทึบแบบปรับรูขึ้นกับการเกิดโพรงหดตัวของชิ้นงาน

ชิ้นงาน	ความสูงทึบบน (mm)	โพรงหดตัว
Cylinder_Q4 Riser	70	0.26%
MouldH50_RiserH70	50	1.98%
MouldH40_RiserH70	40	1.72%
MouldH30_RiserH70	30	1.95%

โดยสำหรับข้อมูลจากตารางที่ 4-11 ซึ่งเปรียบเทียบการเกิดโพรงหดตัวกับความสูงของทึบบน ในกรณีที่ไมปรับรูขึ้น พบว่าชิ้นงานที่เกิดโพรงหดตัวน้อยที่สุดคือ Cylinder_Q4 Riser ซึ่งมีความสูงทึบบน 70 มิลลิเมตร โดยมีเปอร์เซ็นต์โพรงหดตัว 0.26% ส่วนชิ้นงานที่เกิดโพรงหดตัวมากที่สุดคือ MouldH50_RiserH70 ซึ่งมีความสูงทึบบน 50 มิลลิเมตร โดยมีเปอร์เซ็นต์โพรงหดตัวสูงถึง 1.98% แสดงให้เห็นว่าความสูงของทึบบนอาจส่งผลต่อแข็งตัวของโลหะ



ภาพที่ 4-165 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการเกิดโพรงหดตัวกับความสูงของทึบบนของชิ้นงานแบบไม่ปรับรูขึ้น

จากข้อมูลภาพที่ 4-164 และ 4-165 พบว่า ความสูงของหีบبنมีผลต่อการเกิดโพรงหดตัวในชิ้นงานหล่อที่ปรับรูลันและไม่ปรับรูลัน โดยชิ้นงานที่มีความสูงหีบبن 50, 40 และ 30 มิลลิเมตร จะพบว่าค่าโพรงหดตัวมีการเปลี่ยนแปลง ความแตกต่างของสองรูปแบบการทดลองคือ แบบที่ปรับขนาดรูลันลงตามความสูงแม่พิมพ์ มีแนวโน้มที่จะลดการเกิดโพรงหดตัวได้ดีกว่าแบบที่ไม่มีการปรับขนาดรูลันลงตามแม่พิมพ์ เนื่องด้วยการเย็นตัวรูลันของทั้งสองรูปแบบแตกต่างกัน หากดูจากผลการทดลองอุณหภูมิจะเห็นได้ว่า แบบที่ไม่ปรับความสูงรูลันลงมา อุณหภูมิในรูลัน ณ ช่วงสิ้นสุดเวลาการแข็งตัวมักจะเย็นตัวก่อนในเนื้อชิ้นงานนั่นเอง ทำให้เนื้อชิ้นงานยังร้อนกว่าและเกิดโพรงหดตัวขึ้น

4.9.5 แสดงกราฟอุณหภูมิภายในชิ้นงาน

ในหัวข้อนี้จะแสดงผลของอุณหภูมิชิ้นงานทดสอบที่ออกแบบในหัวข้อที่ 3.6 โดยผลลัพธ์เป็นดังต่อไปนี้

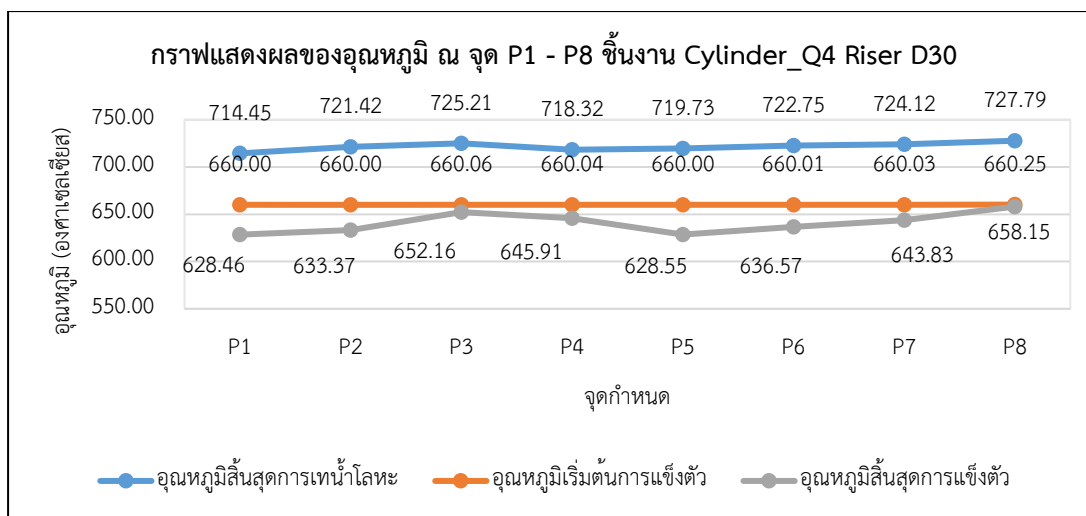
4.9.5.1 การปรับขนาดรูลันเป็นขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 30 และ 40 มิลลิเมตร

4.9.5.1.1 ชิ้นงานปรับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูลัน 30 มิลลิเมตร

(Cylinder_Q4 Riser D30)

ตารางที่ 4-12 เปรียบเทียบอุณหภูมิ ณ เวลา อุณหภูมิสิ้นสุดการเทน้ำโลหะ อุณหภูมิเริ่มต้นการแข็งตัว และ อุณหภูมิสิ้นสุดการแข็งตัว ชิ้นงานปรับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูลัน 30 มิลลิเมตร (Cylinder_Q4 Riser D30)

แสดงอุณหภูมิภายในชิ้นงาน Cylinder_Q4 Riser D30 (องศาเซลเซียส)			
จุด	อุณหภูมิสิ้นสุดการเทน้ำโลหะ (4.77s)	อุณหภูมิเริ่มต้นการแข็งตัว (15.29s)	อุณหภูมิสิ้นสุดการแข็งตัว (175.56s)
P1	714.45	660.00	628.46
P2	721.42	660.00	633.37
P3	725.21	660.06	652.16
P4	718.32	660.04	645.91
P5	719.73	660.00	628.55
P6	722.75	660.01	636.57
P7	724.12	660.03	643.83
P8	727.79	660.25	658.15



ภาพที่ 4-166 กราฟแสดงผลของอุณหภูมิ ณ จุด P1-P8 ชั้นงาน Cylinder_Q4 Riser D30

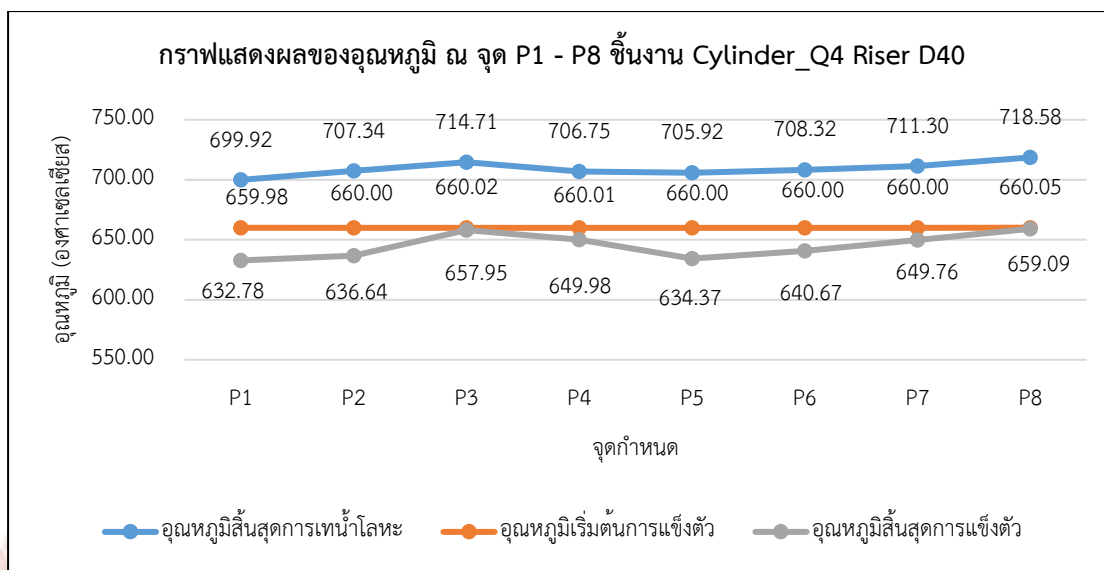
4.9.5.1.2 ชั้นงานปรับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูล้น 40 มิลลิเมตร

(Cylinder_Q4 Riser D40)

ตารางที่ 4-13 เปรียบเทียบอุณหภูมิ ณ เวลา อุณหภูมิสิ้นสุดการเทน้ำโลหะ อุณหภูมิเริ่มต้นการแข็งตัว และ อุณหภูมิสิ้นสุดการแข็งตัว ชั้นงานปรับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูล้น 40 มิลลิเมตร (Cylinder_Q4 Riser D40)

แสดงอุณหภูมิภายในชั้นงาน Cylinder_Q4 Riser D40 (องศาเซลเซียส)			
จุด	อุณหภูมิสิ้นสุดการเทน้ำโลหะ (15.90s)	อุณหภูมิเริ่มต้นการแข็งตัว (20.03s)	อุณหภูมิสิ้นสุดการแข็งตัว (175.18s)
P1	699.92	659.98	632.78
P2	707.34	660.00	636.64
P3	714.71	660.02	657.95
P4	706.75	660.01	649.98
P5	705.92	660.00	634.37
P6	708.32	660.00	640.67
P7	711.30	660.00	649.76
P8	718.58	660.05	659.09

ตารางที่ 4-13 แสดงให้เห็นถึงอุณหภูมิ ณ ช่วงเวลาต่าง ๆ ที่สำคัญของชั้นงาน Cylinder_Q4 Riser D40 เพื่อที่จะดูแนวโน้มของอุณหภูมิภายในชั้นงาน จะแสดงเป็นข้อมูลกราฟในภาพที่ 4-142



ภาพที่ 4-167 กราฟแสดงผลของอุณหภูมิ ณ จุด P1-P8 ชั้นงาน Cylinder_Q4 Riser D40

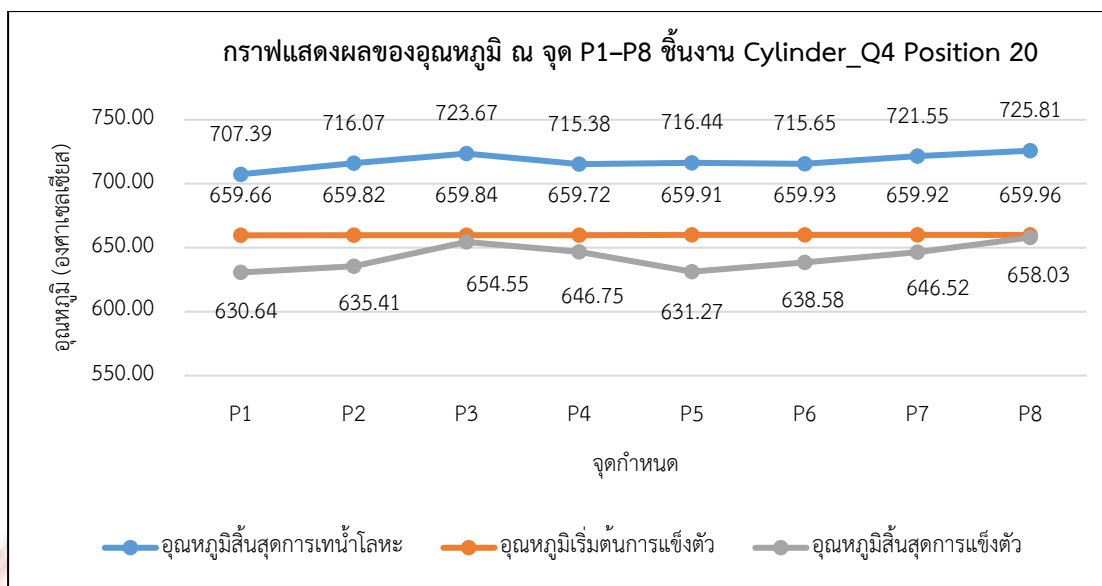
4.9.5.2 การปรับตำแหน่งการวางรูลัน

4.9.5.2.1 ชั้นงานปรับตำแหน่งการวางรูลันจากศูนย์กลาง 20 มิลลิเมตร

(Cylinder_Q4 Position 20)

ตารางที่ 4-14 เปรียบเทียบอุณหภูมิ ณ เวลา อุณหภูมิสิ้นสุดการเทน้ำโลหะ อุณหภูมิเริ่มต้นการแข็งตัว และ อุณหภูมิสิ้นสุดการแข็งตัว ชั้นงานปรับตำแหน่งการวางรูลันจากศูนย์กลาง 20 มิลลิเมตร (Cylinder_Q4 Position 20)

แสดงอุณหภูมิภายในชั้นงาน Cylinder_Q4 Position 20 (องศาเซลเซียส)			
จุด	อุณหภูมิสิ้นสุดการเทน้ำโลหะ (4.94s)	อุณหภูมิเริ่มต้นการแข็งตัว (46.01s)	อุณหภูมิสิ้นสุดการแข็งตัว (171.95s)
P1	707.39	659.66	630.64
P2	716.07	659.82	635.41
P3	723.67	659.84	654.55
P4	715.38	659.72	646.75
P5	716.44	659.91	631.27
P6	715.65	659.93	638.58
P7	721.55	659.92	646.52
P8	725.81	659.96	658.03



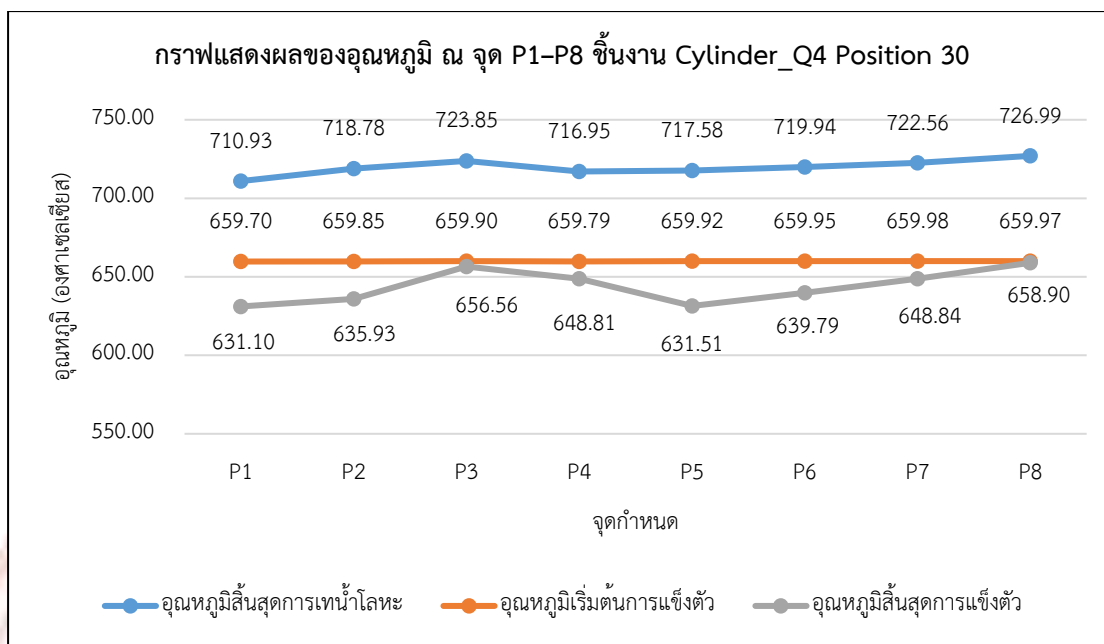
ภาพที่ 4-168 กราฟแสดงผลของอุณหภูมิ ณ จุด P1-P8 ชิ้นงาน Cylinder_Q4 Position 20

4.9.5.2.2 ชิ้นงานปรับตำแหน่งการวางรูล้นจากศูนย์กลาง 30 มิลลิเมตร

(Cylinder_Q4 Position 30)

ตารางที่ 4-15 เปรียบเทียบอุณหภูมิ ณ เวลา อุณหภูมิสิ้นสุดการเทน้ำโลหะ อุณหภูมิเริ่มต้นการแข็งตัว และ อุณหภูมิสิ้นสุดการแข็งตัว ชิ้นงานปรับตำแหน่งการวางรูล้นจากศูนย์กลาง 30 มิลลิเมตร (Cylinder_Q4 Position 30)

แสดงอุณหภูมิภายในชิ้นงาน Cylinder_Q4 Position 30 (องศาเซลเซียส)			
จุด	อุณหภูมิสิ้นสุดการเทน้ำโลหะ (4.81s)	อุณหภูมิเริ่มต้นการแข็งตัว (40.98s)	อุณหภูมิสิ้นสุดการแข็งตัว (168.29s)
P1	710.93	659.70	631.10
P2	718.78	659.85	635.93
P3	723.85	659.90	656.56
P4	716.95	659.79	648.81
P5	717.58	659.92	631.51
P6	719.94	659.95	639.79
P7	722.56	659.98	648.84
P8	726.99	659.97	658.90



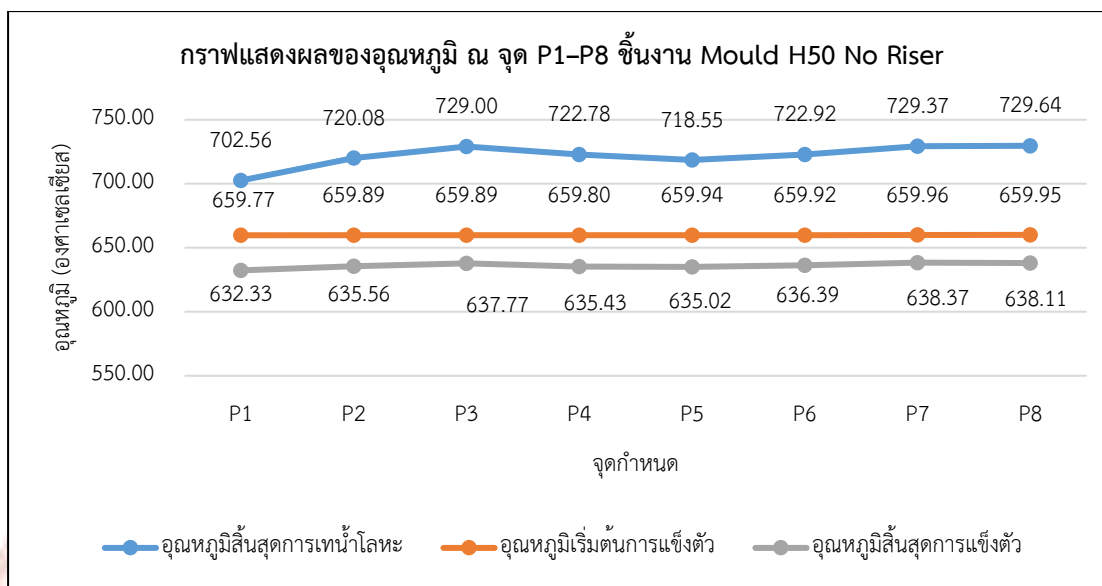
ภาพที่ 4-169 กราฟแสดงผลของอุณหภูมิ ณ จุด P1-P8 ชิ้นงาน Cylinder_Q4 Position 30

4.9.5.3 การลดขนาดหีบแบบที่ใช้ในการเทหล่อแบบไม่มีรูสัน และมีรูสัน

4.9.5.3.1 ชิ้นงานปรับขนาดหีบหล่อบนสูง 50 ไม่มีรูสัน (Mould H50 No_Riser)

ตารางที่ 4-16 เปรียบเทียบอุณหภูมิ ณ เวลา อุณหภูมิสิ้นสุดการเทน้ำโลหะ อุณหภูมิเริ่มต้นการแข็งตัว และ อุณหภูมิสิ้นสุดการแข็งตัว ชิ้นงานปรับขนาดหีบหล่อบนสูง 50 ไม่มีรูสัน (Mould H50 No_Riser)

แสดงอุณหภูมิภายในชิ้นงาน Mould H50 No_Riser (องศาเซลเซียส)			
จุด	อุณหภูมิสิ้นสุดการเทน้ำโลหะ (3.88s)	อุณหภูมิเริ่มต้นการแข็งตัว (30.75s)	อุณหภูมิสิ้นสุดการแข็งตัว (161.15s)
P1	702.56	659.77	632.33
P2	720.08	659.89	635.56
P3	729.00	659.89	637.77
P4	722.78	659.80	635.43
P5	718.55	659.94	635.02
P6	722.92	659.92	636.39
P7	729.37	659.96	638.37
P8	729.64	659.95	638.11

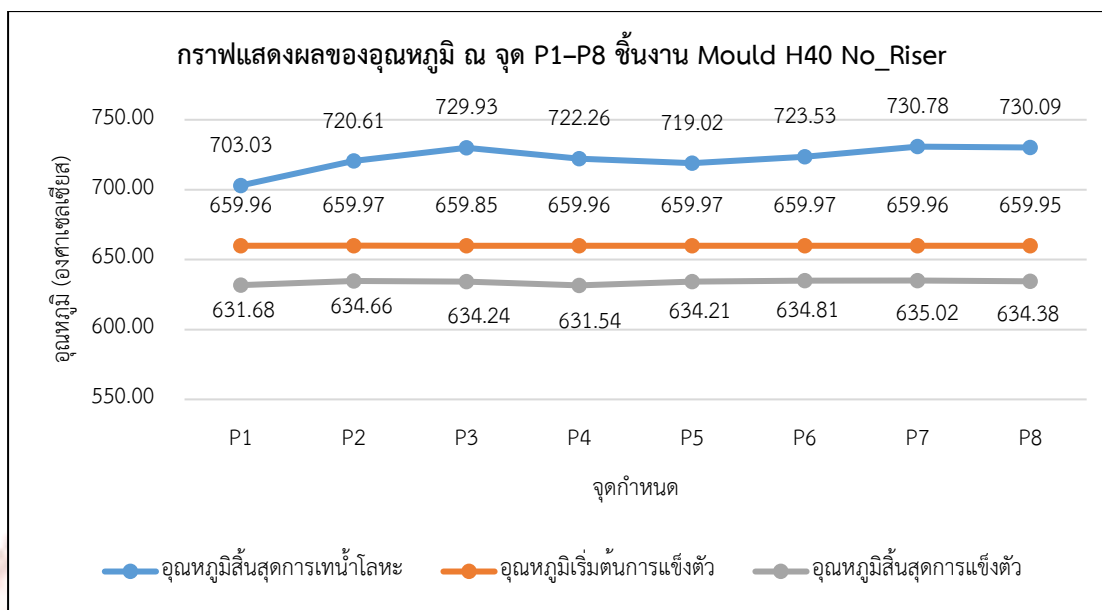


ภาพที่ 4-170 กราฟแสดงผลของอุณหภูมิ ณ จุด P1-P8 ชิ้นงาน Mould H50 No_Riser

4.9.5.3.2 ชิ้นงานปรับขนาดหีบหล่อบนสูง 40 ไม่มีรูลิ้น (No Riser 40)

ตารางที่ 4-17 เปรียบเทียบอุณหภูมิ ณ เวลา อุณหภูมิสิ้นสุดการเทน้ำโลหะ อุณหภูมิเริ่มต้นการแข็งตัว และ อุณหภูมิสิ้นสุดการแข็งตัว ชิ้นงานปรับขนาดหีบหล่อบนสูง 40 ไม่มีรูลิ้น (Mould H40 No_Riser)

แสดงอุณหภูมิภายในชิ้นงาน Mould H40 No_Riser (องศาเซลเซียส)			
จุด	อุณหภูมิสิ้นสุดการเทน้ำโลหะ (3.68s)	อุณหภูมิเริ่มต้นการแข็งตัว (20.21s)	อุณหภูมิสิ้นสุดการแข็งตัว (165.37s)
P1	703.03	659.96	631.68
P2	720.61	659.97	634.66
P3	729.93	659.85	634.24
P4	722.26	659.96	631.54
P5	719.02	659.97	634.21
P6	723.53	659.97	634.81
P7	730.78	659.96	635.02
P8	730.09	659.95	634.38

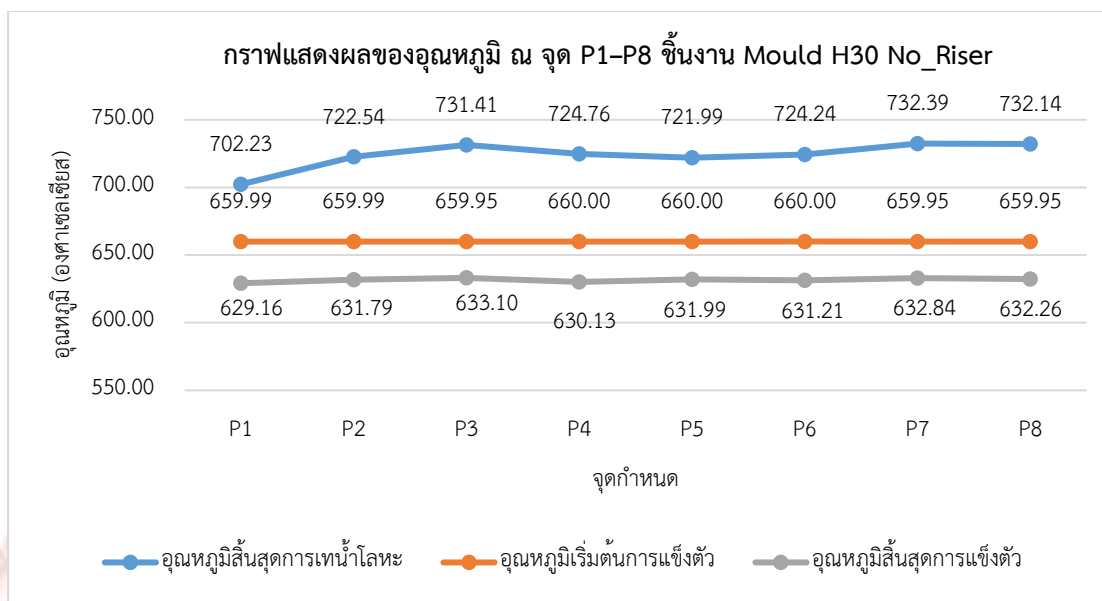


ภาพที่ 4-171 กราฟแสดงผลของอุณหภูมิ ณ จุด P1-P8 ชิ้นงาน Mould H40 No_Riser

4.9.5.3.3 ชิ้นงานปรับขนาดหีบหล่อบนสูง 30 ไม่มีรูสัน (No Riser 30)

ตารางที่ 4-18 เปรียบเทียบอุณหภูมิ ณ เวลา อุณหภูมิสิ้นสุดการเทน้ำโลหะ อุณหภูมิเริ่มต้นการแข็งตัว และ อุณหภูมิสิ้นสุดการแข็งตัว ชิ้นงานปรับขนาดหีบหล่อบนสูง 30 ไม่มีรูสัน (Mould H30 No_Riser)

แสดงอุณหภูมิภายในชิ้นงาน Mould H30 No_Riser (องศาเซลเซียส)			
จุด	อุณหภูมิสิ้นสุดการเทน้ำโลหะ (3.42s)	อุณหภูมิเริ่มต้นการแข็งตัว (17.51s)	อุณหภูมิสิ้นสุดการแข็งตัว (164.50s)
P1	702.23	659.99	629.16
P2	722.54	659.99	631.79
P3	731.41	659.95	633.10
P4	724.76	660.00	630.13
P5	721.99	660.00	631.99
P6	724.24	660.00	631.21
P7	732.39	659.95	632.84
P8	732.14	659.95	632.26

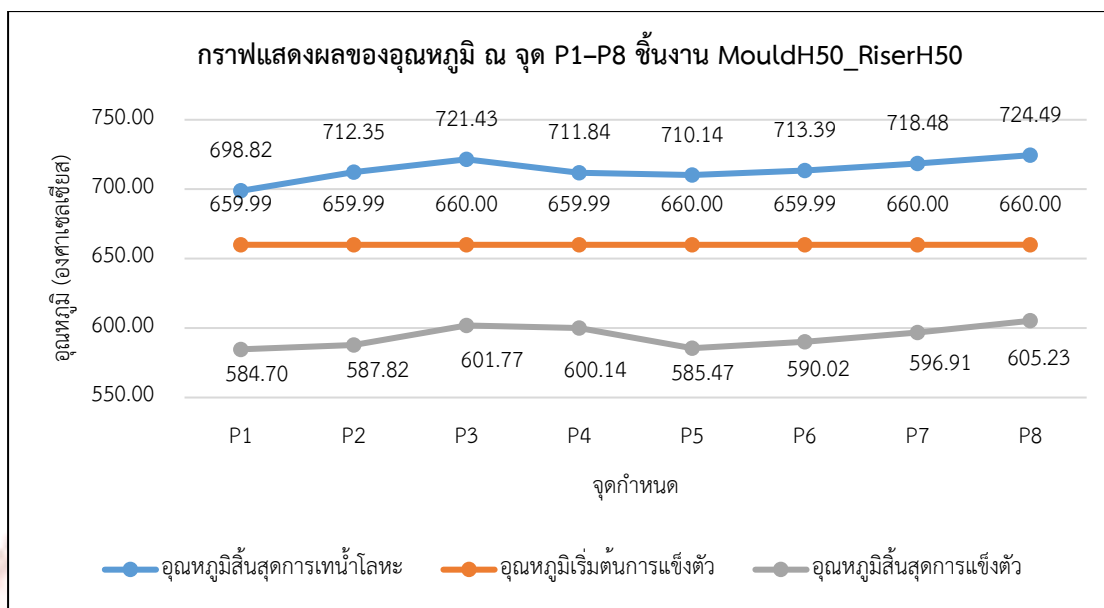


ภาพที่ 4-172 กราฟแสดงผลของอุณหภูมิ ณ จุด P1-P8 ขึ้นงาน Mould H30 No_Riser

4.9.5.3.4 ขึ้นงานปรับขนาดหีบหล่อบนสูง 50 รูลัน 50 (MouldH50_RiserH50)

ตารางที่ 4-19 เปรียบเทียบอุณหภูมิ ณ เวลา อุณหภูมิสิ้นสุดการเทน้ำโลหะ อุณหภูมิเริ่มต้นการแข็งตัว และ อุณหภูมิสิ้นสุดการแข็งตัว ขึ้นงานปรับขนาดหีบหล่อบนสูง 50 รูลัน 50 (MouldH50_RiserH50)

แสดงอุณหภูมิภายในขึ้นงาน MouldH50_RiserH50 (องศาเซลเซียส)			
จุด	อุณหภูมิสิ้นสุดการเทน้ำโลหะ (4.69s)	อุณหภูมิเริ่มต้นการแข็งตัว (20.45s)	อุณหภูมิสิ้นสุดการแข็งตัว (223.92s)
P1	698.82	659.99	584.70
P2	712.35	659.99	587.82
P3	721.43	660.00	601.77
P4	711.84	659.99	600.14
P5	710.14	660.00	585.47
P6	713.39	659.99	590.02
P7	718.48	660.00	596.91
P8	724.49	660.00	605.23

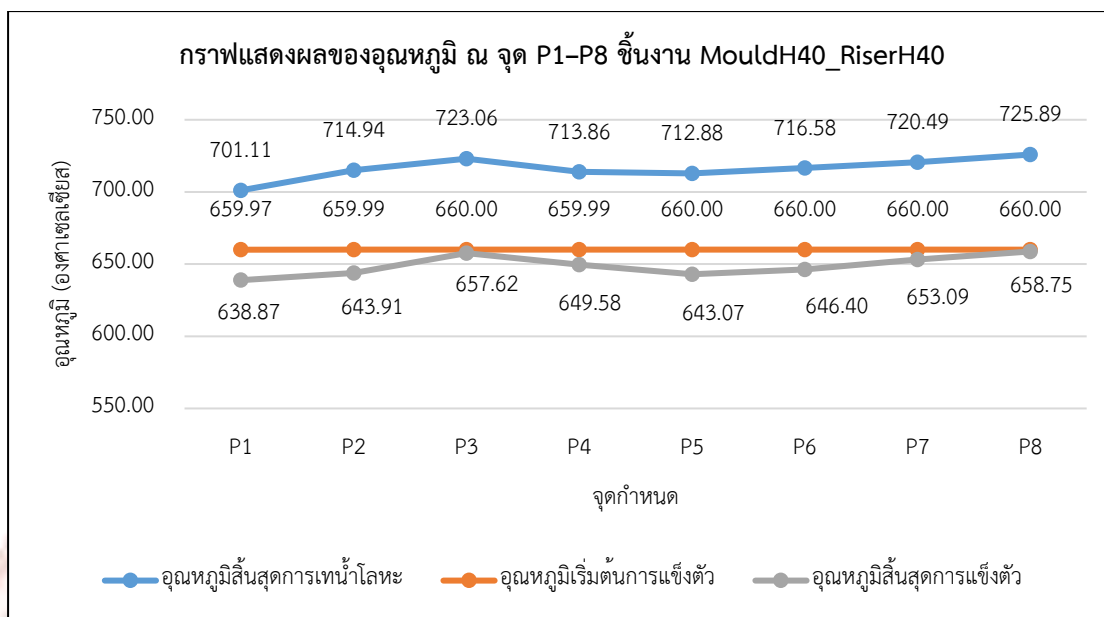


ภาพที่ 4-173 กราฟแสดงผลของอุณหภูมิ ณ จุด P1-P8 ชิ้นงาน MouldH50_RiserH50

4.9.5.3.5 ชิ้นงานปรับขนาดหีบหล่อบนสูง 40 รูสัน 40 (MouldH40_RiserH40)

ตารางที่ 4-20 เปรียบเทียบอุณหภูมิ ณ เวลา อุณหภูมิสิ้นสุดการเทน้ำโลหะ อุณหภูมิเริ่มต้นการแข็งตัว และ อุณหภูมิสิ้นสุดการแข็งตัว ชิ้นงานปรับขนาดหีบหล่อบนสูง 40 รูสัน 40 (MouldH40_RiserH40)

แสดงอุณหภูมิภายในชิ้นงาน MouldH40_RiserH40 (องศาเซลเซียส)			
จุด	อุณหภูมิสิ้นสุดการเทน้ำโลหะ (4.45s)	อุณหภูมิเริ่มต้นการแข็งตัว (20.56s)	อุณหภูมิสิ้นสุดการแข็งตัว (177.54s)
P1	701.11	659.97	638.87
P2	714.94	659.99	643.91
P3	723.06	660.00	657.62
P4	713.86	659.99	649.58
P5	712.88	660.00	643.07
P6	716.58	660.00	646.40
P7	720.49	660.00	653.09
P8	725.89	660.00	658.75

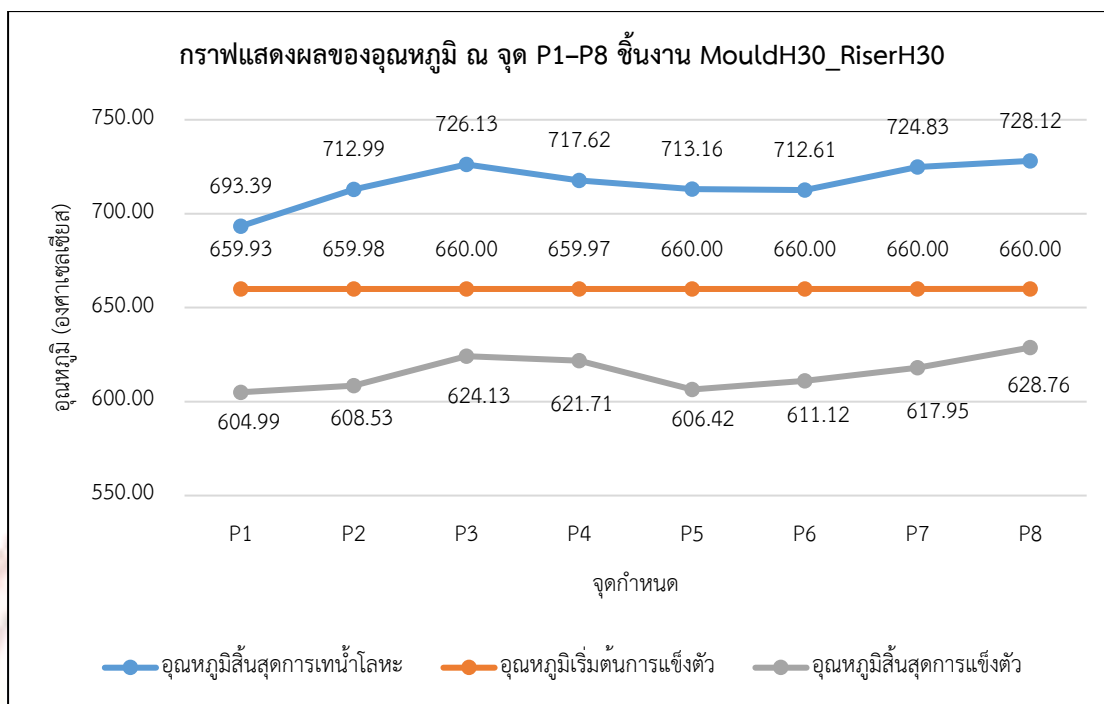


ภาพที่ 4-174 กราฟแสดงผลของอุณหภูมิ ณ จุด P1-P8 ชิ้นงาน MouldH40_RiserH40

4.9.5.3.6 ชิ้นงานปรับขนาดหีบหล่อบนสูง 40 รูลัน 40 (MouldH30_RiserH30)

ตารางที่ 4-21 เปรียบเทียบอุณหภูมิ ณ เวลา อุณหภูมิสิ้นสุดการเทน้ำโลหะ อุณหภูมิเริ่มต้นการแข็งตัว และ อุณหภูมิสิ้นสุดการแข็งตัว ชิ้นงานปรับขนาดหีบหล่อบนสูง 30 รูลัน 30 (MouldH30_RiserH30)

แสดงอุณหภูมิภายในชิ้นงาน MouldH30_RiserH30 (องศาเซลเซียส)			
จุด	อุณหภูมิสิ้นสุดการเทน้ำโลหะ (4.24s)	อุณหภูมิเริ่มต้นการแข็งตัว (25.42s)	อุณหภูมิสิ้นสุดการแข็งตัว (213.22s)
P1	693.39	659.93	604.99
P2	712.99	659.98	608.53
P3	726.13	660.00	624.13
P4	717.62	659.97	621.71
P5	713.16	660.00	606.42
P6	712.61	660.00	611.12
P7	724.83	660.00	617.95
P8	728.12	660.00	628.76

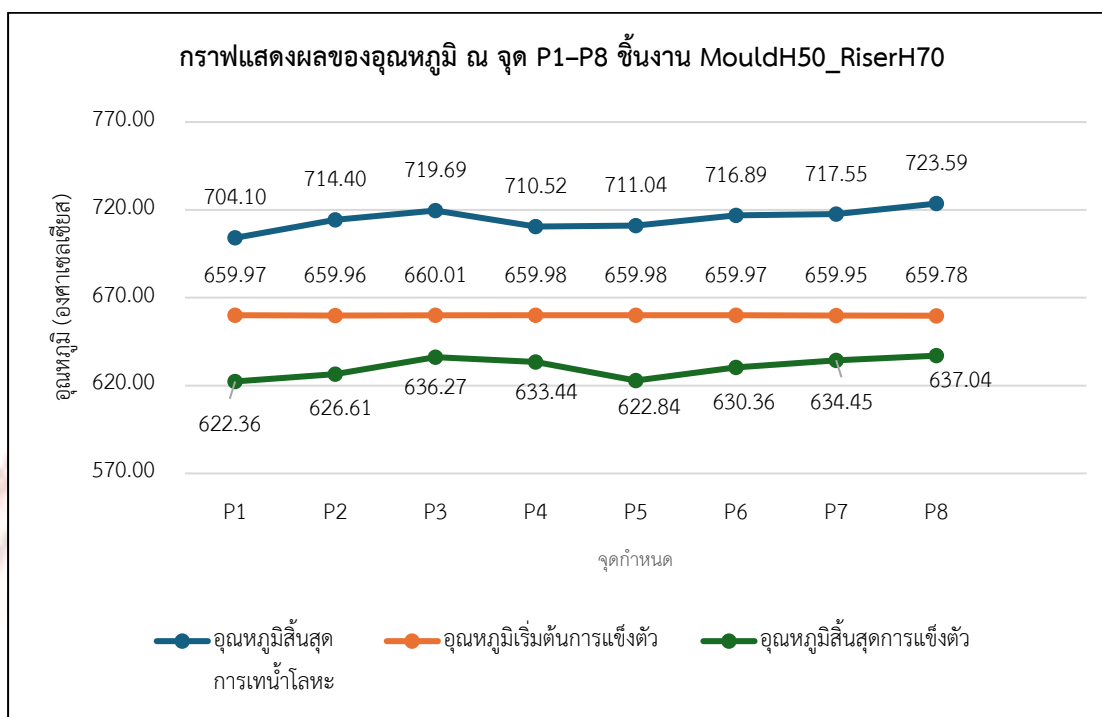


ภาพที่ 4-175 กราฟแสดงผลของอุณหภูมิ ณ จุด P1-P8 ชิ้นงาน MouldH30_RiserH30

4.9.5.3.7 ชิ้นงานปรับขนาดหีบหล่อบนสูง 40 รูสัน 40 (MouldH30_RiserH30)

ตารางที่ 4-22 เปรียบเทียบอุณหภูมิ ณ เวลา อุณหภูมิสิ้นสุดการเทน้ำโลหะ อุณหภูมิเริ่มต้นการแข็งตัว และ อุณหภูมิสิ้นสุดการแข็งตัว ชิ้นงานปรับขนาดหีบหล่อบนสูง 50 รูสัน 70 (MouldH50_RiserH70)

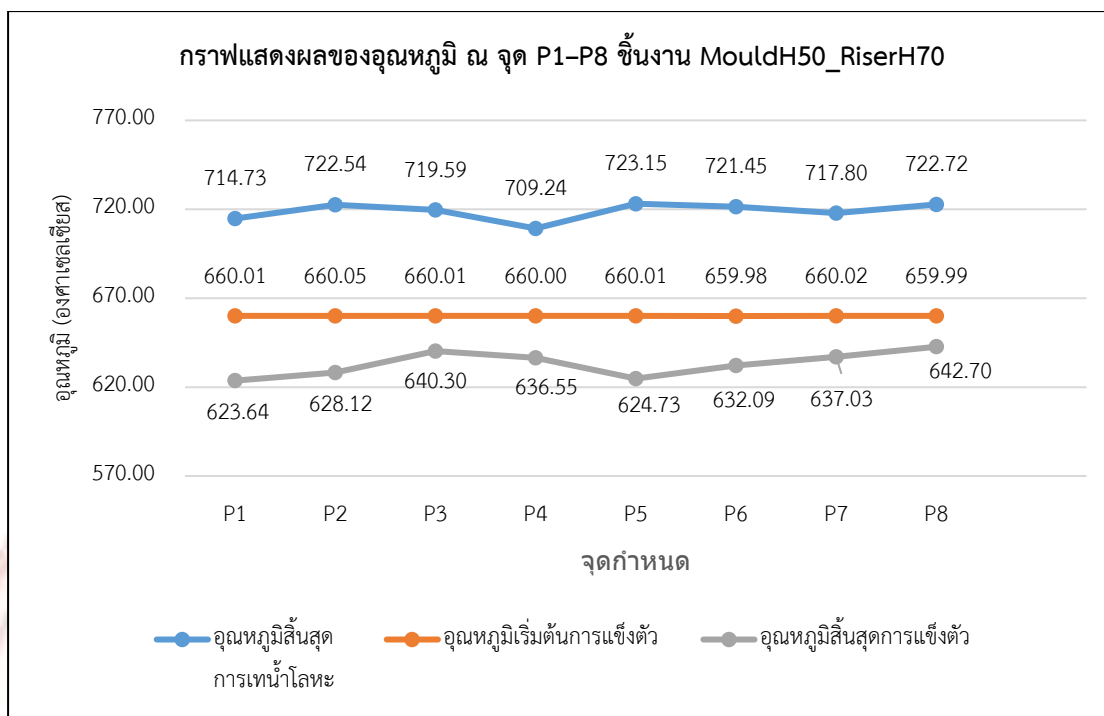
แสดงอุณหภูมิภายในชิ้นงาน MouldH50_RiserH70 (องศาเซลเซียส)			
จุด	อุณหภูมิสิ้นสุดการเทน้ำโลหะ (4.24s)	อุณหภูมิเริ่มต้นการแข็งตัว (25.42s)	อุณหภูมิสิ้นสุดการแข็งตัว (213.22s)
P1	704.10	659.97	622.36
P2	714.40	659.96	626.61
P3	719.69	660.01	636.27
P4	710.52	659.98	633.44
P5	711.04	659.98	622.84
P6	716.89	659.97	630.36
P7	717.55	659.95	634.45
P8	723.59	659.78	637.04



ภาพที่ 4-176 กราฟแสดงผลของอุณหภูมิ ณ จุด P1-P8 ชิ้นงาน MouldH50_RiserH70

ตารางที่ 4-23 เปรียบเทียบอุณหภูมิ ณ เวลา อุณหภูมิสิ้นสุดการเทน้ำโลหะ อุณหภูมิเริ่มต้นการแข็งตัว และ อุณหภูมิสิ้นสุดการแข็งตัว ชิ้นงานปรับขนาดหีบหล่อบนสูง 40 รู ล้น 70 (MouldH40_RiserH70)

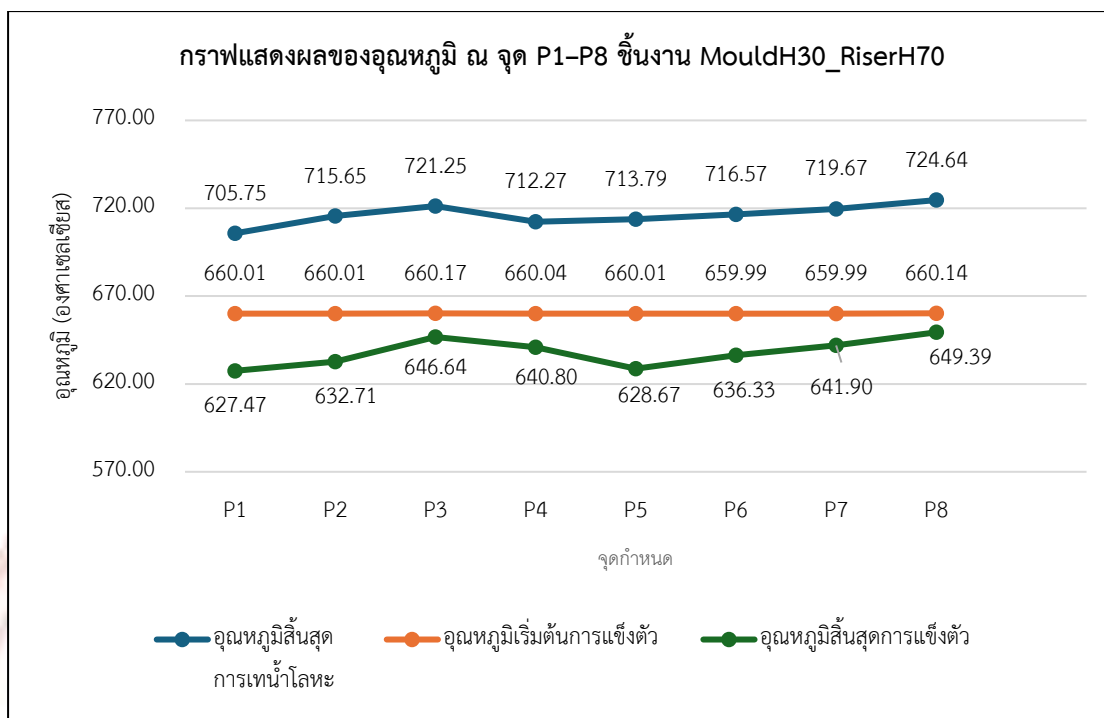
แสดงอุณหภูมิภายในชิ้นงาน Mould40_RiserH70 (องศาเซลเซียส)			
จุด	อุณหภูมิสิ้นสุดการเทน้ำโลหะ (4.24s)	อุณหภูมิเริ่มต้นการแข็งตัว (25.42s)	อุณหภูมิสิ้นสุดการแข็งตัว (213.22s)
P1	714.73	660.01	623.64
P2	722.54	660.05	628.12
P3	719.59	660.01	640.30
P4	709.24	660.00	636.55
P5	723.15	660.01	624.73
P6	721.45	659.98	632.09
P7	717.80	660.02	637.03
P8	722.72	659.99	642.70



ภาพที่ 4-177 กราฟแสดงผลของอุณหภูมิ ณ จุด P1-P8 ชิ้นงาน MouldH40_RiserH70

ตารางที่ 4-24 เปรียบเทียบอุณหภูมิ ณ เวลา อุณหภูมิสิ้นสุดการเทน้ำโลหะ อุณหภูมิเริ่มต้นการแข็งตัว และ อุณหภูมิสิ้นสุดการแข็งตัว ชิ้นงานปรับขนาดหีบหล่อบนสูง 30 รู ล้น 70 (MouldH30_RiserH70)

แสดงอุณหภูมิภายในชิ้นงาน MouldH30_RiserH70 (องศาเซลเซียส)			
จุด	อุณหภูมิสิ้นสุดการเทน้ำโลหะ (4.24s)	อุณหภูมิเริ่มต้นการแข็งตัว (25.42s)	อุณหภูมิสิ้นสุดการแข็งตัว (213.22s)
P1	705.75	660.01	627.47
P2	715.65	660.01	632.71
P3	721.25	660.17	646.64
P4	712.27	660.04	640.80
P5	713.79	660.01	628.67
P6	716.57	659.99	636.33
P7	719.67	659.99	641.90
P8	724.64	660.14	649.39



ภาพที่ 4-178 กราฟแสดงผลของอุณหภูมิ ณ จุด P1-P8 ชิ้นงาน MouldH30_RiserH70

ผลของอุณหภูมิทั้งหมดที่แสดงในหัวข้อที่ 4.9.5 นั้นจะทำให้เห็นถึงพฤติกรรมของอุณหภูมิภายในชิ้นงานทั้งหมด 10 รูปแบบที่ออกแบบเพิ่มเติมในหัวข้อที่ 3.6 เพื่อศึกษาว่า การปรับปรุงรูปแบบของชิ้นงานในรูปแบบการปรับระยะห่างระหว่างรูเทถึงรูล้น การปรับขนาดของรูล้น และการปรับขนาดความสูงที่บนของแม่พิมพ์นั้นจะส่งผลต่อพฤติกรรมของอุณหภูมิอย่างไร แตกต่างกับชิ้นงานที่เดิมหรือไม่

และสำหรับผลการจำลองสถานการณ์ทั้งหมดของชิ้นงาน 17 รูปแบบ ซึ่งประกอบด้วยชิ้นงานจำลองสถานการณ์ก่อนการเทหล่อจริง 7 รูปแบบ และชิ้นงานจำลองสถานการณ์หลังการเทหล่อจริง 13 รูปแบบ ที่กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 3 ในเรื่องของ Fill Time, Solidification, Shrinkage Porosity และ Temperature นั้น ผู้วิจัยจะกล่าวสรุปไว้ในบทที่ 5

บทที่ 5

สรุปผลและข้อเสนอแนะ

ในการดำเนินการวิจัยการวิเคราะห์ข้อบกพร่องงานหล่อทรายจากการจำลองสถานการณ์การถ่ายเทความร้อนด้วยโปรแกรม Cast Designer ได้มีการจำลองสถานการณ์ด้วยโปรแกรมแล้วนำไปเปรียบเทียบกับงานหล่อจริง ซึ่งผลการทดลองที่เกิดขึ้นสรุปได้ดังนี้

5.1 สรุปผลการทดลอง

จากการจำลองสถานการณ์เพื่อแก้ไขปัญหาการเกิดโพรงหดตัวของชิ้นงานหล่อทรายชิ้นงานกระสวนขึ้นเดียวหน้าผ่าราบมีไส้แบบในตัวไม่มีรูล้น โดยมีการจำลองสถานการณ์ของชิ้นงานทั้งหมด 20 รูปแบบ โดยแบ่งเป็น

- ชิ้นงานจำลองสถานการณ์ก่อนการเทหล่อชิ้นงานจริง ทั้งหมด 7 รูปแบบ คือ ชิ้นงานเดิม (Origin) ชิ้นงานรูล้นทรงกระบอกกลางขนาด 8 และ 15 มิลลิเมตร (Tube 8mm. Riser, Tube 15mm. Riser) และชิ้นงานรูล้นทรงกระบอกตันทั้งหมด 4 รูปแบบการวาง (Cylinder_Q1 Riser, Cylinder_Q2 Riser, Cylinder_Q3 Riser และ Cylinder_Q4 Riser)

- ชิ้นงานจำลองสถานการณ์หลังการเทหล่อชิ้นงานจริง ทั้งหมด 13 รูปแบบ คือชิ้นงานปรับขนาดรูล้นทรงกระบอกตัน 2 ขนาด คือ ขนาด 30 และ 40 มิลลิเมตร (Cylinder_Q4 Riser D30 และ Cylinder_Q4 Riser D40) ชิ้นงานปรับตำแหน่งการวางรูล้น 2 ตำแหน่ง โดยอ้างอิงตำแหน่งจากชิ้นงานรูล้นทรงกระบอกกลาง ตำแหน่งวางรูล้นที่ 4 เป็นระยะ 20 และ 30 มิลลิเมตรจากจุดศูนย์กลางชิ้นงาน (Cylinder_Q4 Position 20, Cylinder_Q4 Position 30) ชิ้นงานปรับความสูงหีบหล่อแบบไม่มีรูล้น 3 รูปแบบ คือ ความสูงหีบ 50, 40 และ 30 (Mould H50 No_Riser, Mould H40 No_Riser และ Mould H30 No_Riser) และชิ้นงานปรับความสูงหีบหล่อแบบปรับรูล้น 3 รูปแบบ คือ ความสูงหีบ 50, 40 และ 30 (MouldH50_RiserH50, MouldH40_RiserH40 และ MouldH30_RiserH30) และชิ้นงานปรับความสูงหีบหล่อแบบไม่ปรับรูล้นอีก 3 รูปแบบ คือ ความสูงหีบ 50, 40 และ 30 โดยคงความสูงรูล้นไว้ที่ 70 มิลลิเมตร (MouldH50_RiserH70, MouldH40_RiserH70 และ MouldH30_RiserH70) โดยผลลัพธ์การจำลองสถานการณ์ทั้งหมด สรุปได้ดังนี้

5.1.1 เวลาในการเติมเต็มของน้ำโลหะเหลว (Fill Time) พบว่า ชิ้นงานเดิมซึ่งเป็นชิ้นงานที่ไม่มีรูล้นนั้น ใช้เวลาในการเติมเติมน้ำโลหะ 4.16 วินาที ซึ่งเร็วที่สุดในการจำลองสถานการณ์ของชิ้นงานที่

ทดสอบทั้งหมด และในส่วนของชิ้นงานที่ออกแบบเพื่อปรับปรุงแก้ไขปัญหานั้น ชิ้นงานที่เติมเต็มได้เร็วที่สุดคือ ทดสอบการลดขนาดที่บนที่ใช้ในการเทหล่อแบบไม่มีรูล้นสูง 30 มิลลิเมตร (Mould H30 No_Riser) โดยใช้เวลา 3.42 วินาที ส่วนชิ้นงานที่ใช้เวลามากที่สุดคือ ชิ้นงานรูล้นทรงกระบอกกลวงหน้า 15 มิลลิเมตร (Tube 15mm) โดยใช้เวลา 5.31 วินาที

5.1.2 ลักษณะการไหลตัวของโลหะเหลว (Fluid Fraction) ในชิ้นงานทั้ง 17 รูปแบบที่ทำการจำลองสถานการณ์นั้น มีรูปแบบการไหลของน้ำโลหะไปในทิศทางเดียวกัน โดยเติมเต็มส่วนล่างสุดของแม่พิมพ์ก่อน โดยพบว่าโลหะเหลวจะเริ่มไหลจากทางวิ่งเข้าของโลหะเหลว ไหลจนถึงส่วนล่างสุดของชิ้นงาน น้ำโลหะจะลักษณะการไหลแบบหมุนวนวนเข้มนาฬิกา ก่อนจะเติมเต็มไปที่ผนังด้านบนสุด และไปจุดสุดท้ายที่รูล้นในที่สุด

5.1.3 เวลาที่ใช้ในการแข็งตัวของโลหะเหลว (Solidification Time) จากผลการจำลอง พบว่าชิ้นงานเดิม (Origin) มีเวลาในการแข็งตัวที่ 145.11 วินาที โดยตำแหน่งที่แข็งตัวช้าที่สุดอยู่บริเวณใจกลางของชิ้นงาน และสำหรับรูปแบบที่ใช้รูล้นทรงกระบอกกลวง ขนาด 8 มิลลิเมตร และ 15 มิลลิเมตร พบว่าตำแหน่งที่ใช้เวลาในการแข็งตัวมากที่สุดยังคงอยู่บริเวณใจกลางของชิ้นงานเช่นกัน โดยมีค่าเท่ากับ 127.60 วินาที และ 175.09 วินาที แต่เมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นงานที่ใช้รูล้นทรงกระบอกตันจะพบว่า รูปแบบทรงกระบอกตันทั้งหมดนั้น (Cylinder Riser) จุดที่ใช้เวลาในการแข็งตัวมากที่สุดจะอยู่ที่บริเวณรูล้น โดยชิ้นงานที่ใช้เวลาในการแข็งตัวน้อยที่สุดสำหรับรูปแบบทรงกระบอกตันคือ ชิ้นงานทดสอบปรับตำแหน่งรูล้นห่างจากจุดศูนย์กลาง 30 มิลลิเมตร (Cylinder_Q4 Position 30) ใช้เวลา 146.44 วินาที

5.1.4 การเกิดของโพรงหดตัว (Shrinkage Porosity) จากการจำลองสถานการณ์ของการเกิดโพรงหดตัวของชิ้นงานทั้ง 20 รูปแบบ ชิ้นงานที่พบโพรงหดตัวบริเวณรูล้น จะเป็นชิ้นงานที่ใช้รูปแบบรูล้นเป็นทรงกระบอกตัน (รูปแบบ Cylinder ทั้งรูปแบบปรับตำแหน่งวาง ปรับขนาดที่บน และแบบไม่ปรับขนาดที่บน) โดยชิ้นงานที่มีโพรงหดตัวน้อยที่สุดคือ ชิ้นงานปรับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูล้น 40 มิลลิเมตร (Cylinder_Q4 Riser D40) และชิ้นงานปรับตำแหน่งการวางรูล้นจากศูนย์กลาง 20 มิลลิเมตร (Cylinder_Q4 Position 20) โดยทั้งสองรูปแบบมีโพรงหดตัวอยู่ที่ 0 เปอร์เซนต์ หมายความว่าชิ้นงานที่ยังพบโพรงหดตัวอยู่กึ่งกลางชิ้นงานจะเป็นชิ้นงานที่ใช้รูล้นทรงกระบอกกลวง กับชิ้นงานที่ไม่มีการใส่รูล้น (Origin, No Riser 50, No Riser 40 และ No Riser 30) โดยชิ้นงานที่มีโพรงหดตัวมากที่สุด คือ รูล้นทรงกระบอกกลวงหน้า 15 มิลลิเมตร มีเปอร์เซนต์โพรงหดตัว 3.85 เปอร์เซนต์

5.1.5 การจำลองอุณหภูมิชิ้นงานหล่อทราย วิเคราะห์พฤติกรรมกระจายความร้อนในสามช่วงเวลา พบว่าในช่วงเติมโลหะและเริ่มแข็งตัว อุณหภูมิมีค่าต่ำกว่ากลางชิ้นงาน แต่ในช่วงสิ้นสุดการแข็งตัว ความแตกต่างของอุณหภูมิส่งผลต่อการเกิดโพรงหดตัว

5.1.5.1 อุณหภูมิช่วงสิ้นสุดการเทน้ำโลหะ ในช่วงเวลานี้ชิ้นงานทั้ง 20 รูปแบบที่ทำการจำลองจะมีอุณหภูมิภายในชิ้นงานเฉลี่ยใกล้เคียงกันอยู่ในช่วงระหว่าง $700\text{ }^{\circ}\text{C}$ จนถึง $750\text{ }^{\circ}\text{C}$ ทั้งชิ้นงานโดยอุณหภูมิจะน้อยที่สุดที่บริเวณผิวชิ้นงาน

5.1.5.2 อุณหภูมิช่วงเริ่มต้นการแข็งตัวของชิ้นงาน ในช่วงเวลานี้ชิ้นงานทั้ง 20 รูปแบบจะเริ่มมีอุณหภูมิภายในชิ้นงานที่ลดลง โดยอุณหภูมิเฉลี่ยของชิ้นงานทั้ง 20 รูปแบบจะมีอุณหภูมิเฉลี่ยโดยทั่วชิ้นงานที่ใกล้เคียงกันอยู่ที่ประมาณ $650\text{ }^{\circ}\text{C}$ จนถึง $660\text{ }^{\circ}\text{C}$

5.1.5.3 อุณหภูมิช่วงสิ้นสุดการแข็งตัวของชิ้นงาน ในช่วงเวลานี้ชิ้นงานทั้ง 20 รูปแบบจะมีความแตกต่างของอุณหภูมิอย่างชัดเจนถ้าพิจารณาเฉพาะภายในเนื้อชิ้นงานเท่านั้น

5.1.5.3.1 สำหรับชิ้นงานที่ไม่มีรูล้นทั้งหมด ชิ้นงานที่มีอุณหภูมิภายในเนื้อชิ้นงานสูงสุดคือชิ้นงานเดิม (Origin) ที่ 657.72 องศาเซลเซียส และชิ้นงานที่มีอุณหภูมิภายในเนื้อชิ้นงานต่ำที่สุด คือชิ้นงานรูปแบบปรับขนาดความสูงหีบหล่อแบบไม่มีรูล้น 30 มิลลิเมตร มีอุณหภูมิในเนื้อชิ้นงาน 644.86 องศาเซลเซียส

5.1.5.3.2 สำหรับชิ้นงานรูล้นทรงกระบอกกลวงนั้น พบว่า อุณหภูมิภายในเนื้อชิ้นงานจะมีค่าต่ำกว่าอุณหภูมิภายในรูล้น ซึ่งหมายถึงอุณหภูมิไม่ได้ถูกถ่ายเทไปที่รูล้น โดยยกตัวอย่างอุณหภูมิภายในชิ้นงาน Tube 8 mm จะมีค่าสูงสุดอยู่ที่ 658.34 องศาเซลเซียส แต่ในขณะที่รูล้นของชิ้นงาน Tube 8 mm จะมีอุณหภูมิเฉลี่ยเพียง 636.00 องศาเซลเซียส

5.1.5.3.3 สำหรับชิ้นงานรูปแบบที่ใช้รูล้นทรงกระบอกตัน (รูปแบบ Cylinder ทั้งรูปแบบปรับตำแหน่งวาง ปรับขนาดรูล้น และแบบปรับขนาดหีบ) จะพบว่าอุณหภูมิภายในชิ้นงาน จะมีค่าต่ำกว่าอุณหภูมิภายในรูล้น ซึ่งเป็นลักษณะเดียวกันทั้งหมดของชิ้นงานที่ใช้รูล้นทรงกระบอกตัน เช่น ชิ้นงานรูล้นทรงกระบอกตัน ตำแหน่งวางรูล้นที่ 4 จะพบว่าอุณหภูมิสูงสุดภายในชิ้นงานจะมีค่าเฉลี่ยประมาณ 631.00 องศาเซลเซียส โดยขณะที่อุณหภูมิสูงสุดภายในรูล้นจะมีอยู่ที่ 658.94 องศาเซลเซียส ซึ่งมีอุณหภูมิสูงกว่า

5.1.5.3.4 สำหรับชิ้นงานรูปแบบที่มีการปรับความสูงหีบหล่อแต่ไม่ปรับความสูงของรูล้นนั้น พบว่าเมื่อถึง ณ ช่วงเวลาสิ้นสุดการแข็งตัว รูล้นจะมีอุณหภูมิในบางจุดที่ต่ำกว่าในตัวชิ้นงาน โดยจะพบว่าเมื่อการแข็งตัวเสร็จสิ้น โครงห่อตัวจะเกิดขึ้นภายในชิ้นงาน และมีเปอร์เซ็นต์ที่มากกว่าแบบที่มีการปรับรูล้นลงตามความสูง

5.1.6 กราฟแสดงอัตราการเย็นตัว แสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อการเกิดโพรงหดตัว โดยเฉพาะช่วงสิ้นสุดการแข็งตัว ซึ่งบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงมักเกิดโพรงหดตัวมากที่สุดเนื่องจากโลหะเหลวยังคงสะสมความร้อนและแข็งตัวช้า

ผลการจำลองพบว่า บริเวณจุด P2, P3, P5, P6, P7 และ P8 ในชิ้นงานที่ใช้รูล้นทรงกระบอกกลวงขนาด 8 และ 15 มิลลิเมตร นั้น เป็นจุดที่มีอุณหภูมิสูงและเกิดโพรงหดตัว เนื่องจากความร้อน

สะสมไม่สามารถถ่ายเทออกไปยังรู้นได้อย่างมีประสิทธิภาพ ในบางกรณี รู้นขนาดใหญ่ขึ้นกลับทำให้โพรงหดตัวเพิ่มขึ้น เนื่องจากโลหะภายในยังคงแข็งตัวซ้ำ

ขณะที่รู้นทรงกระบอกตัน (รูปแบบ Cylinder ทั้งรูปแบบปรับตำแหน่งวาง ปรับขนาดหีบแบน และแบบไม่ปรับขนาดหีบ) ช่วยกระจายความร้อนได้ดีขึ้น การออกแบบตำแหน่งรู้นให้เหมาะสมช่วยลดอุณหภูมิบริเวณกลางชิ้นงาน โดยเฉพาะในช่วงเวลาสิ้นสุดการแข็งตัวจะเห็นได้อย่างชัดเจนว่าอุณหภูมิภายในรู้นจะมีค่าสูงกว่าภายในชิ้นงาน

5.1.7 การเทหล่อชิ้นงานจริง

สำหรับการเทหล่อชิ้นงานจริงนั้น ผู้วิจัยเลือกชิ้นงานหล่อทรายชิ้นงานกระสวนขึ้นเดียวหน้าผ่าราบมีไส้แบบในตัวรู้นทรงกระบอกตัน ตำแหน่งวางรู้นที่ 4 ขนาดรู้น 35 มิลลิเมตร สูง 70 มิลลิเมตร เป็นรูปแบบในการเทหล่อจริง โดยพิจารณาจากเปอร์เซ็นต์การเกิดโพรงหดตัวน้อยที่สุดจากผลการจำลองรูปแบบชิ้นงานก่อนการเทหล่อ 7 รูปแบบ โดยภายในเนื้อชิ้นงานไม่ปรากฏโพรงหดตัวโดยโพรงหดตัวจะปรากฏอยู่ที่บริเวณรู้น

5.1.8 การศึกษาเพิ่มเติมเพื่อแก้ไขปัญหาการเกิดโพรงหดตัวของชิ้นงานกระสวนขึ้นเดียวหน้าผ่าราบมีไส้แบบในตัวรู้นทรงกระบอกตัน ตำแหน่งวางรู้นที่ 4 จากการจำลองสถานการณ์เพิ่มเติมโดยมีการทดลองปรับในส่วนของขนาดรู้น ตำแหน่งการวางรู้น และความสูงหีบแบนของแม่พิมพ์สรุปได้ว่าการออกแบบที่สามารถแก้ไขปัญหาดีที่สุดมีสองรูปแบบคือ การเพิ่มขนาดรู้นเป็นขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 40 มิลลิเมตรบนตำแหน่งวางเดิม หรือการปรับตำแหน่งการวางให้รู้นอยู่เหนือจุดที่หนาที่สุดของชิ้นงานโดยการขยับเข้าใกล้จุดศูนย์กลางอีก 5 มิลลิเมตร ซึ่งทั้งสองวิธีสามารถแก้ไขปัญหาการเกิดโพรงหดตัวให้เหลือศูนย์เปอร์เซ็นต์ได้ โดยจะสรุปได้ดังนี้

5.1.8.1 จากการเปรียบเทียบระยะทางระหว่างรู้นกับการเกิดโพรงหดตัว โดยใช้รู้นทรงกระบอกตัน ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 35 สูง 70 เท่านั้นจะพบว่า ยิ่งระยะทางระหว่างรู้นถึงรู้นมีค่ามาก จะส่งผลให้อัตราการเกิดโพรงหดตัวลดลงอย่างชัดเจน โดยจุดที่มีโพรงหดตัวน้อยที่สุดจะอยู่ที่ระยะทางระหว่างรู้นถึงรู้นเท่ากับ 99.72 มิลลิเมตร โดยไม่พบโพรงหดตัวเกิดขึ้นเลย และจุดที่มีโพรงหดตัวมากที่สุดจะอยู่ในจุดที่ระยะทางระหว่างรู้นถึงรู้นเท่ากับ 55.70 มิลลิเมตรจากรู้นซึ่งเป็นค่าที่น้อยที่สุดในการทดสอบ โดยมีค่าโพรงหดตัวที่ 1.52 % แสดงให้เห็นว่าระยะทางระหว่างรู้นถึงรู้นนั้นมีผลต่อการเกิดโพรงหดตัวด้วย

5.1.8.2 จากการเปรียบเทียบผลของขนาดรู้นกับการเกิดโพรงหดตัวโดยกำหนดตำแหน่งวางรู้นทรงกระบอกตันลงในตำแหน่งเดียวกับรู้นของชิ้นงาน Cylinder_Q4 โดยการปรับลด-เพิ่มจากขนาดเดิมที่ 35 มิลลิเมตรนั้น พบว่า รู้นขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 30 มิลลิเมตร ไม่สามารถที่จะแก้ไขการเกิดปัญหาโพรงหดตัวได้ โดยพบการเกิดโพรงหดตัวสูงถึง 1.27% ในขณะที่รู้นที่มีการปรับขนาดให้ใหญ่ขึ้น คือรู้นขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 40 มิลลิเมตร สามารถแก้ไขปัญหาการ

เกิดโพรงหดตัวเป็นศูนย์เปอร์เซ็นต์ได้นั่นเอง แสดงให้เห็นว่าขนาดของรูล้นที่ใหญ่ขึ้นสามารถแก้ไข ปัญหาโพรงหดตัวได้

5.1.8.3 การเปรียบเทียบผลของการลดขนาดของหีบหล่อโดยแบ่งเป็น 3 รูปแบบคือ แบบไม่มีรูล้น (Mould H50 No_Riser, Mould H40 No_Riser และ Mould H30 No_Riser) แบบ ปรับรูล้น (MouldH50_RiserH50, MouldH40_RiserH40 และ MouldH30_RiserH30) และแบบ ปรับรูล้น (MouldH50_RiserH70, MouldH40_RiserH70 และ MouldH30_RiserH70) สามารถ สรุปได้ดังนี้

5.1.9.3.1 การลดความสูงหีบหล่อแบบไม่มีรูล้นจาก 70 เหลือ 50, 40 และ 30 มม. พบว่าโพรงหดตัวลดลงตามลำดับ ต่ำสุดที่ 1.63% เมื่อเทียบกับชิ้นงานเดิมที่ 2.22% แสดงว่า การลดขนาดหีบหล่อช่วยลดโพรงหดตัวได้

5.1.9.3.2 สำหรับหีบหล่อแบบมีรูล้น ความสูงที่ 50 และ 40 มม. มีโพรงหด ตัวเพิ่มขึ้นเป็น 0.35% และ 0.78% เทียบกับต้นแบบ Cylinder_Q4 ที่ 0.26% แต่เมื่อความสูงลด เหลือ 30 มม. โพรงหดตัวลดลงเหลือ 0.18% แสดงว่าขนาดหีบหล่อและรูล้นต้องเหมาะสมร่วมกันจึง จะลดโพรงหดตัวได้

5.1.9.3.3 หีบหล่อแบบไม่ปรับรูล้นที่ความสูง 50, 40 และ 30 มม. มีโพรงหด ตัวที่ 1.98%, 1.72% และ 1.95% ตามลำดับ ซึ่งไม่ได้ลดลงอย่างชัดเจน เนื่องจากรูล้นเย็นเร็วกว่า ชิ้นงานแม้จะมีปลอกเซรามิกคลุมอยู่ จึงอาจต้องเพิ่มขนาดปลอกเซรามิกเพื่อชะลอการเย็นตัวของรูล้น

5.2 อภิปรายผล

จากการศึกษาพบว่า ความร้อนมีบทบาทสำคัญต่อคุณภาพของชิ้นงานหล่อ โดยเฉพาะอย่างยิ่งใน กระบวนการแข็งตัวของโลหะเหลวภายในแม่พิมพ์ ความร้อนที่สะสมภายในตัวชิ้นงาน ส่งผลโดยตรง ต่อการเกิดโพรงหดตัวในชิ้นงานหล่อ และมักเกิดในบริเวณที่มีปริมาตรของเนื้อชิ้นงานมาก เป็นจุดที่มีความหนา ซึ่งหมายความว่าบริเวณนี้จะเป็นจุดที่มีการสะสมความร้อน และมีการแข็งตัวที่ช้ากว่าส่วน อื่น ๆ การใช้รูล้นในการแก้ไขปัญหานี้จึงเป็นการช่วยนำความร้อนออกจากบริเวณที่เคยเป็นจุดสะสม ความร้อนของชิ้นงาน ช่วยเติมเต็มเนื้อโลหะเมื่อโลหะเหลวมีการยุบตัวจากปริมาตรของรูล้นเองได้ และเมื่อศึกษากราฟอุณหภูมิจากการทดลองจะพบว่าของชิ้นงาน อุณหภูมิภายในชิ้นงานสามารถที่จะ เปลี่ยนแปลงได้ตามลักษณะการออกแบบรูล้น โดยสิ่งสำคัญในการออกแบบคือ ขนาดรูล้นที่เหมาะสม เพราะจากการทดสอบพบว่ารูล้นที่มีขนาดเล็กเกินไปไม่สามารถแก้ไขการเกิดโพรงหดตัวภายใน ชิ้นงานได้เนื่องจากปริมาตรของรูล้นไม่เหมาะสมกับปริมาตรของชิ้นงาน ในส่วนของตำแหน่งวางที่ดี ควรจะอยู่ห่างจากจุดเทามากพอและอยู่บนจุดที่มีความหนาของชิ้นงาน

ดังนั้น การควบคุมและออกแบบระบบหล่อให้สามารถถ่ายเทความร้อนได้อย่างมีประสิทธิภาพจึงเป็นสิ่งสำคัญในการลดผลกระทบจากปัญหานี้ การใช้รูล้นทรงกระบอกตันที่มีขนาดและตำแหน่งเหมาะสมกับชิ้นงานจะช่วยให้ความร้อนภายในสามารถระบายออกได้ดีขึ้น ส่งผลให้บริเวณกลางชิ้นงานแข็งตัวอย่างสม่ำเสมอ และแก้ไขปัญหาโพรงหดตัวได้นั่นเอง

5.3 ข้อเสนอแนะ

5.3.1. การวางปรับขนาดรูล้นให้ใหญ่ขึ้นจากการคำนวณสามารถช่วยลดการเกิดโพรงหดตัวได้แต่จะใช้ปริมาณเนื้อโลหะเพิ่มขึ้น ในขณะที่เดียวกันการปรับตำแหน่งการวางให้อยู่เหนือจุดที่หนาที่สุดบนชิ้นงานและห่างจากรูเทมากที่สุด โดยใช้รูล้นขนาดเดิมกับการคำนวณก็สามารถแก้ไขปัญหาดังกล่าวได้เช่นกัน และสามารถลดต้นทุนในการผลิตได้

5.3.1 การปรับลดขนาดของแม่พิมพ์ลง ขณะยังคงความสูงของรูล้นให้อยู่ในระดับที่เหมาะสมสามารถช่วยลดการเกิดโพรงหดตัวได้ อย่างไรก็ตาม จำเป็นต้องมีการควบคุมอุณหภูมิของรูล้นไม่ให้เย็นตัวเร็วกว่าชิ้นงาน เพื่อให้ระบบหล่อทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ

5.3.2 การจำลองการไหลของโลหะสามารถช่วยให้เห็นจุดสะสมความร้อนและพยากรณ์ตำแหน่งที่เหมาะสมของรูล้นได้แม่นยำยิ่งขึ้น โดยลดเวลาและลดต้นทุนในการขึ้นรูปชิ้นงานหล่อได้

บรรณานุกรม

ภาษาไทย

- ปิยพงศ์ วัฒนะบุปผา. การออกแบบระบบบูรเทในงานหล่ออลูมิเนียมสำหรับโพรงแบบทราย.ปริญญา
นิพนธ์. สาขาวิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมออกแบบและผลิตเครื่องจักรกล. มหาวิทยาลัย
เทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, 2563.
- พัทธ์พิมล สุวรรณกาญจน์. การออกแบบระบบป้อนเติมน้ำโลหะสำหรับเหล็กกล้าไร้สนิมที่หล่อด้วย
กระบวนการอินเวสต์เมนต์.ปริญญาดุษฎีบัณฑิต. สาขาวิชาวิศวกรรมวัสดุ. มหาวิทยาลัย
เทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, 2557.
- วิโรจน์ ศรีวิศวาณิชย์. วิทยานิพนธ์การจำลองพฤติกรรมการแข็งตัวของงานหล่อ. วิทยานิพนธ์ตาม
หลักสูตรปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต. สาขาวิชาเทคโนโลยีวัสดุ. คณะพลังงาน
และวัสดุ. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2539.
- ศุภฤทธิ ล้วนโกศลชัย. วิทยานิพนธ์การออกแบบระบบจ่ายน้ำโลหะและรูลันสำหรับอลูมิเนียม.
วิทยานิพนธ์ตามหลักสูตรปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต. สาขาวิชาเทคโนโลยี
วัสดุ. คณะพลังงานและวัสดุ. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2544.
- สุรเชษฐ์ อัจจิมารังสี. การลดข้อบกพร่องประเภทการหดตัวในชิ้นส่วนงานหล่อของช่วงล่างรถบรรทุก.
วิทยานิพนธ์ตามหลักสูตรปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต. สาขาวิชาวิศวกรรม
จัดการอุตสาหกรรม. ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระ
นครเหนือ, 2551.
- เสริมศักดิ์ เวียงวิเศษ. การหาส่วนผสมแบบหล่อทรายในอุตสาหกรรมเหล็กหล่อ โดยใช้หลักการ
ออกแบบการทดลอง. วิทยานิพนธ์ปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต. สาขาวิชา
วิศวกรรมอุตสาหกรรม. บัณฑิตวิทยาลัยขอนแก่น, 2553
- ประศาสตร์ วรามิตร. เทคโนโลยีงานหล่อโลหะ เล่ม 1. กรุงเทพมหานคร. สถาบันเทคโนโลยีพระจอม
เกล้าพระนครเหนือ, 2520.

ภาษาอังกฤษ

Mahomed, N. Shrinkage porosity in steel sand castings: Formation, classification and inspection. IntechOpen Limited. : London. UK, 2020.

Anna Gowsalya. Heat Transfer Studies on Solidification of Casting Process. IntechOpen Limited. : London. UK, 2020.

Anna Gowsalya. “DEMYSTIFYING SHRINKAGE POROSITY IN DUCTILE IRON CASTINGS.” International Journal of Metalcasting. : Paramount Blvd, Medina, USA, 2020.

T. Kanno.“ Effect of pouring temperature, composition.” In International Journal of Cast Metals Research. Vol.21 No.1-4 : 2-6, 2008.

ParthLakum. “Shrinkage Porosity & Temperature Distribution analysis of air cooled Cylinder liner block of Grey cast iron.” International Journal of Advance Research and Innovative Ideas in Education. Vol.2 Issue-3 : 596-557, 2016.

D.R. Gunasegaram “Identification of critical factors affecting shrinkage porosity in permanent mold casting using numerical simulations based on design of experiments”. journal of materials processing technology. 1209-1219, 2008.

Guohui Li, Shanjiao Wang and Gengtao Zheng. “Flow and Heat Transfer on the Surface of Molten Steel Slag Layer in Continuous Casting Mold.” In MDPI: Basel, Switzerland. 2023. <https://doi.org/10.3390/coatings13091551>

Jinxiang Liu, Ridong Liao and Zhengxi Zuo. “Numerical Study on Solidification Process and Shrinkage Porosity for Engine Block Casting.” In Applied Mechanics and Materials. 2023. Vol.37-38: 753-756 (2010)

Santhi, Hanumantha Rao. “Estimation of shrinkage porosity of a cast aluminium alloy..” In I-manager’s Journal on Mechanical Engineering. Vol.2 No.2 : 18-24, 2023.

A.K.Gajbhiye and et al. “Minimization of Shrinkage Porosity in A Sand Casting ProcessBy Simulation In AUTOCast-X Software with Experimental Validation by Destructive testing.” Of Modern Engineering Research (IJMER). Vol.4 Issue.5. 2014.

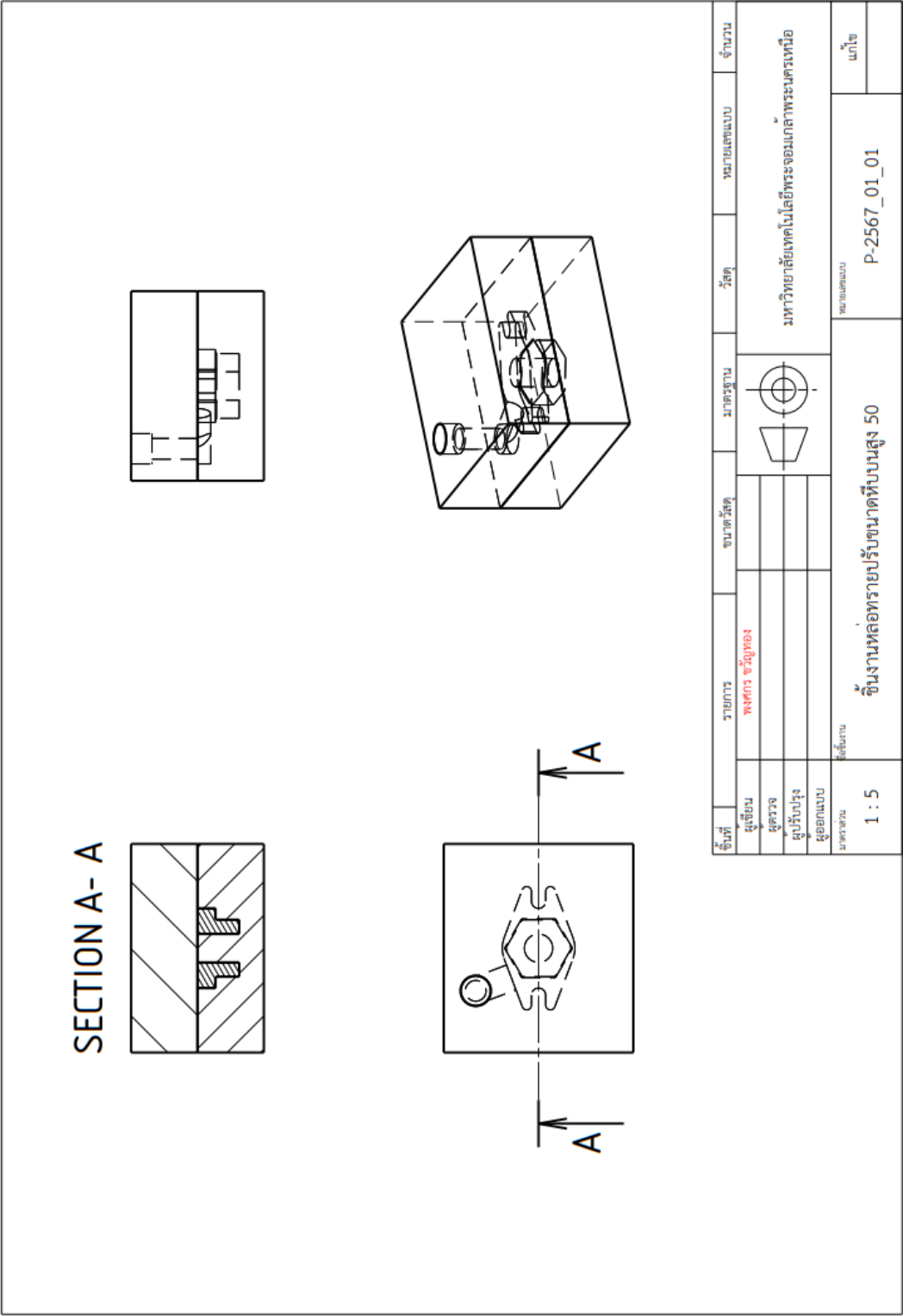
Shaomin Li, Kenichiro Mine and et.al. “To develop a quantitative method for predicting shrinkage porosity in squeeze casting.” In Overseas Foundry :Ahresty Corporation, Toyohashi, Japan. 2010

Hardik Rathod, Jay K. Dhulia and Nirav P. Maniar. “Prediction of Shrinkage Porosity Defect in Sand Casting Process of LM25.” In IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 225 : 2017 doi:10.1088/1757-899X/225/1/012237

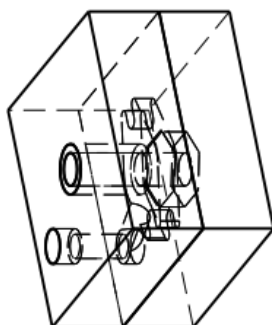
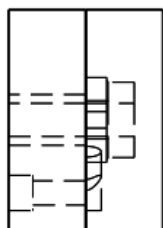
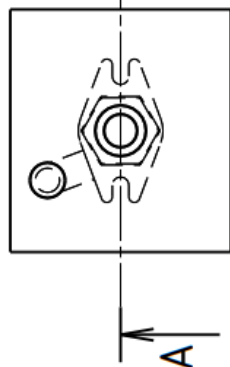
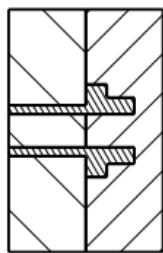




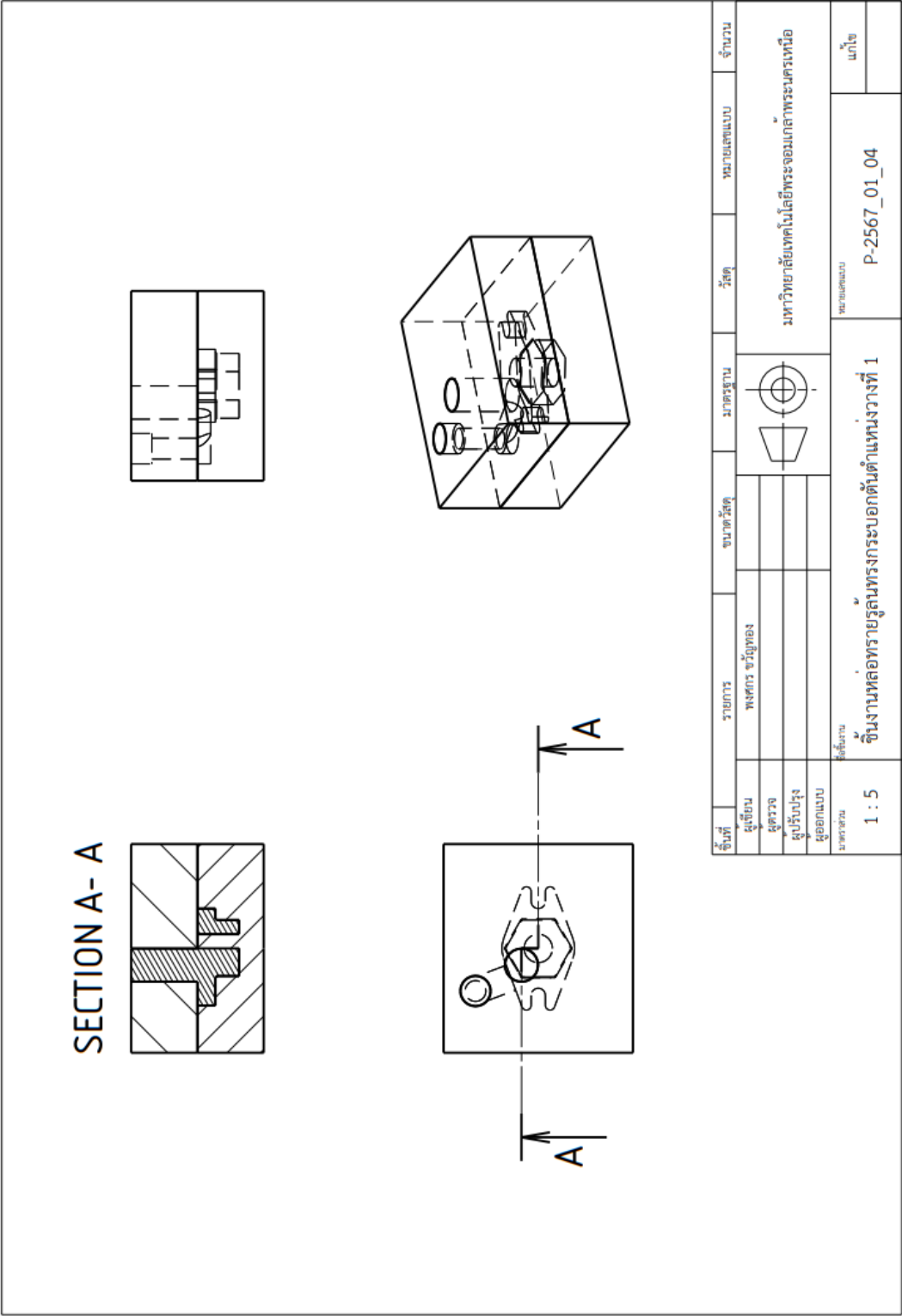
ภาคผนวก ก
แบบของชิ้นงานและแม่พิมพ์หล่อ

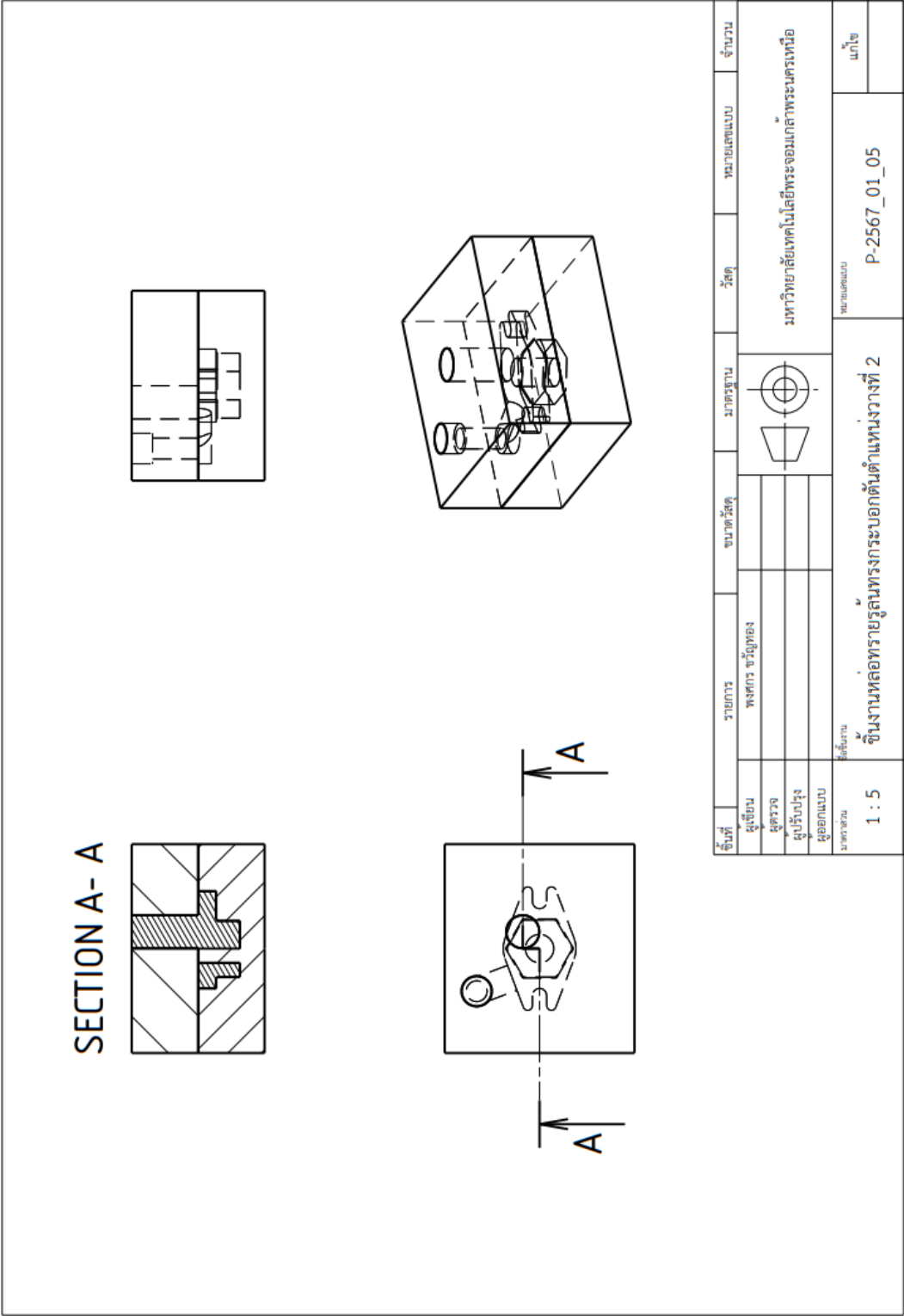


SECTION A- A

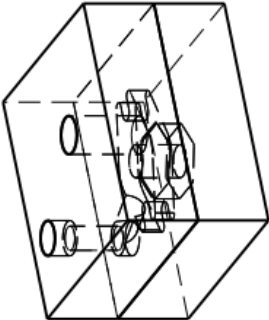
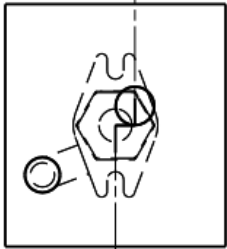
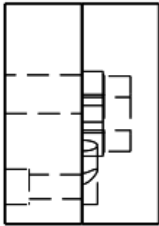
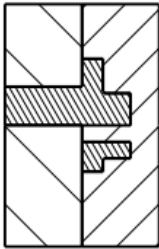


ชื่อที่	รายการ	ขนาดวัตถุ	มาตรฐาน	วัสดุ	หมายเลขแบบ	จำนวน
ผู้เขียน	พงศกร ขวัญทอง					
ผู้ตรวจ						
ผู้ปรับปรุง						
ผู้ออกแบบ						
มาตราส่วน	ชี้แจงขนาดทอรายยปรับขนาดที่บนบนสูง 50 P-2567_01_02 หมายเลขแบบ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ					
1 : 5	แก้ไข					



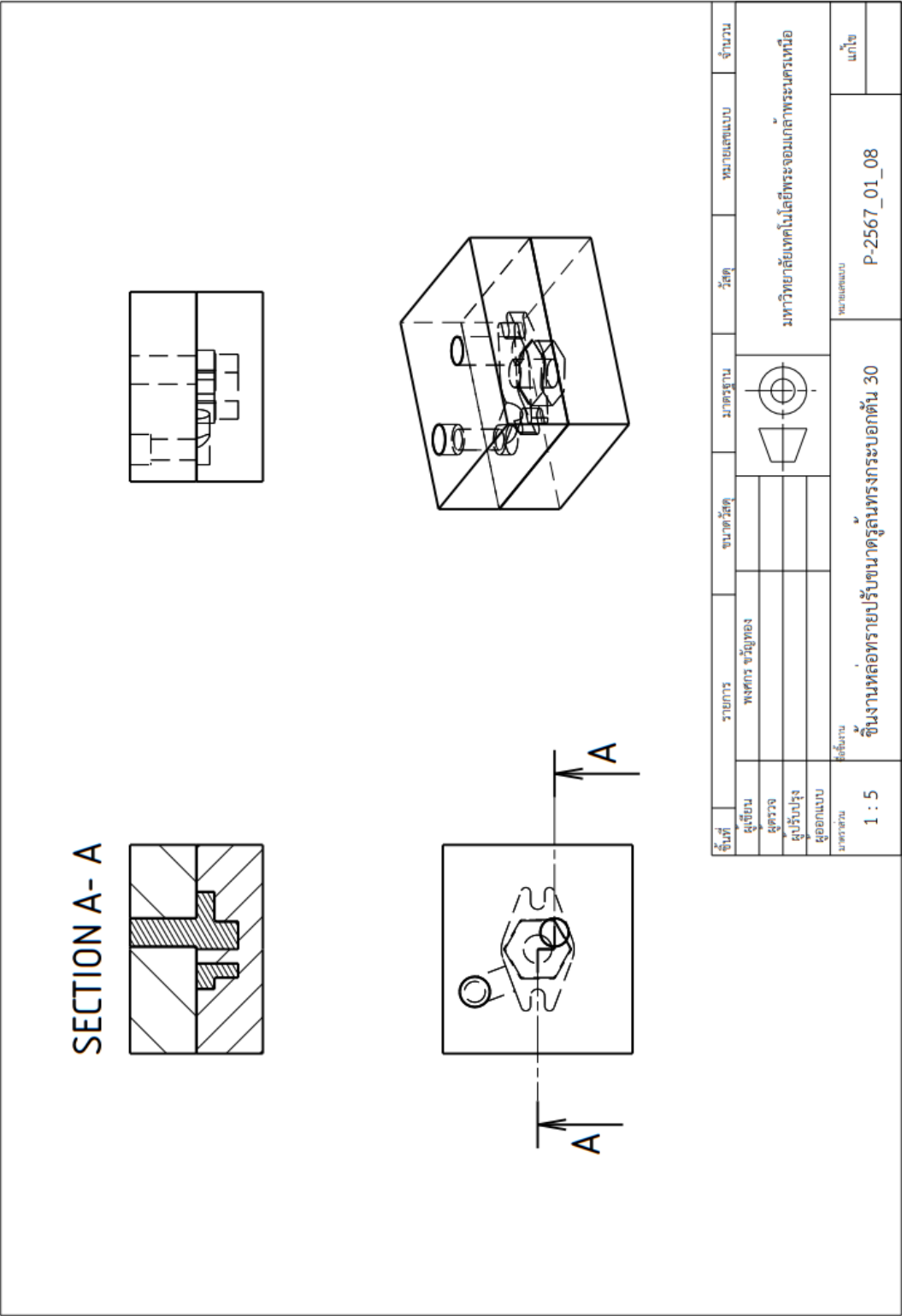


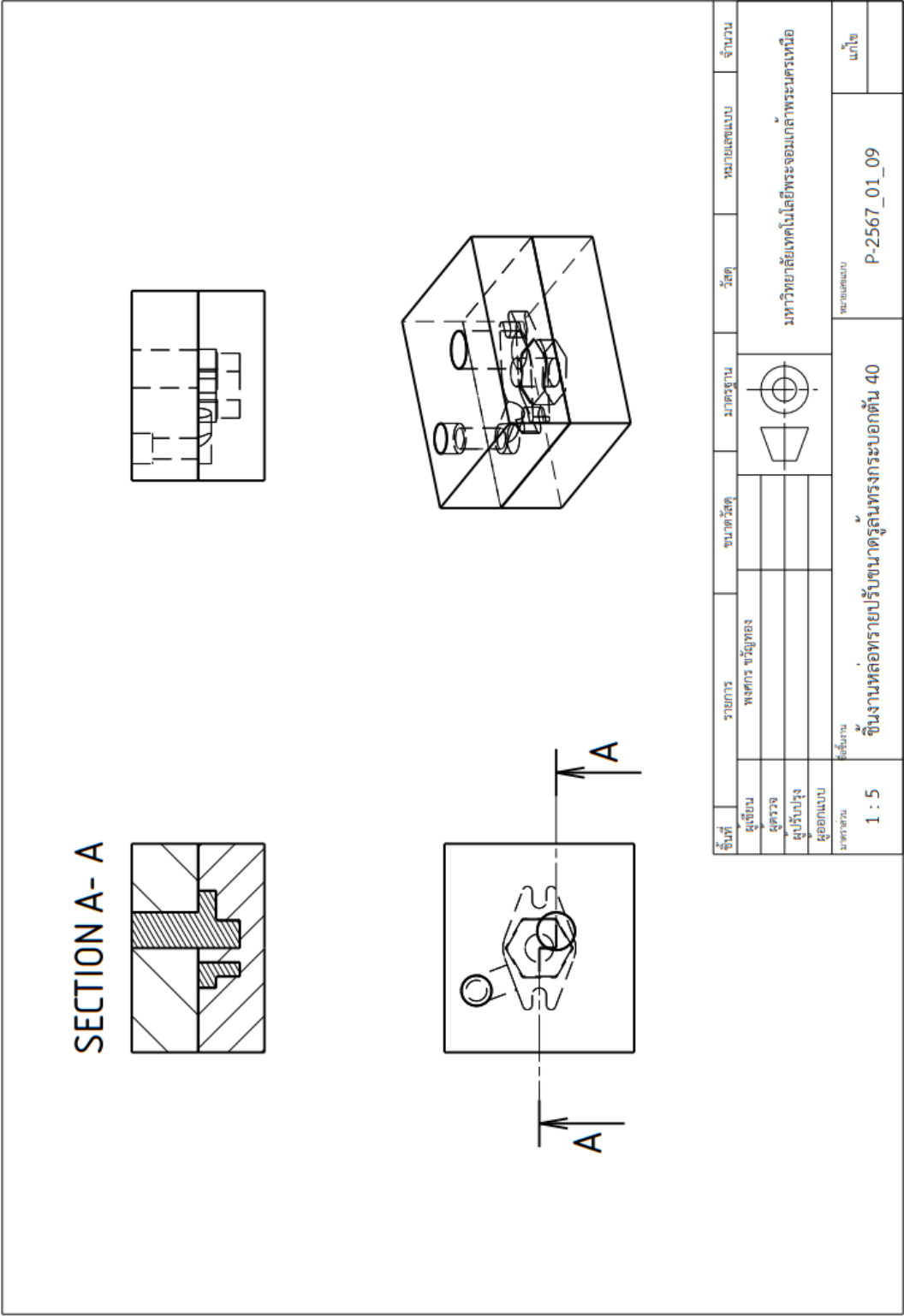
SECTION A- A

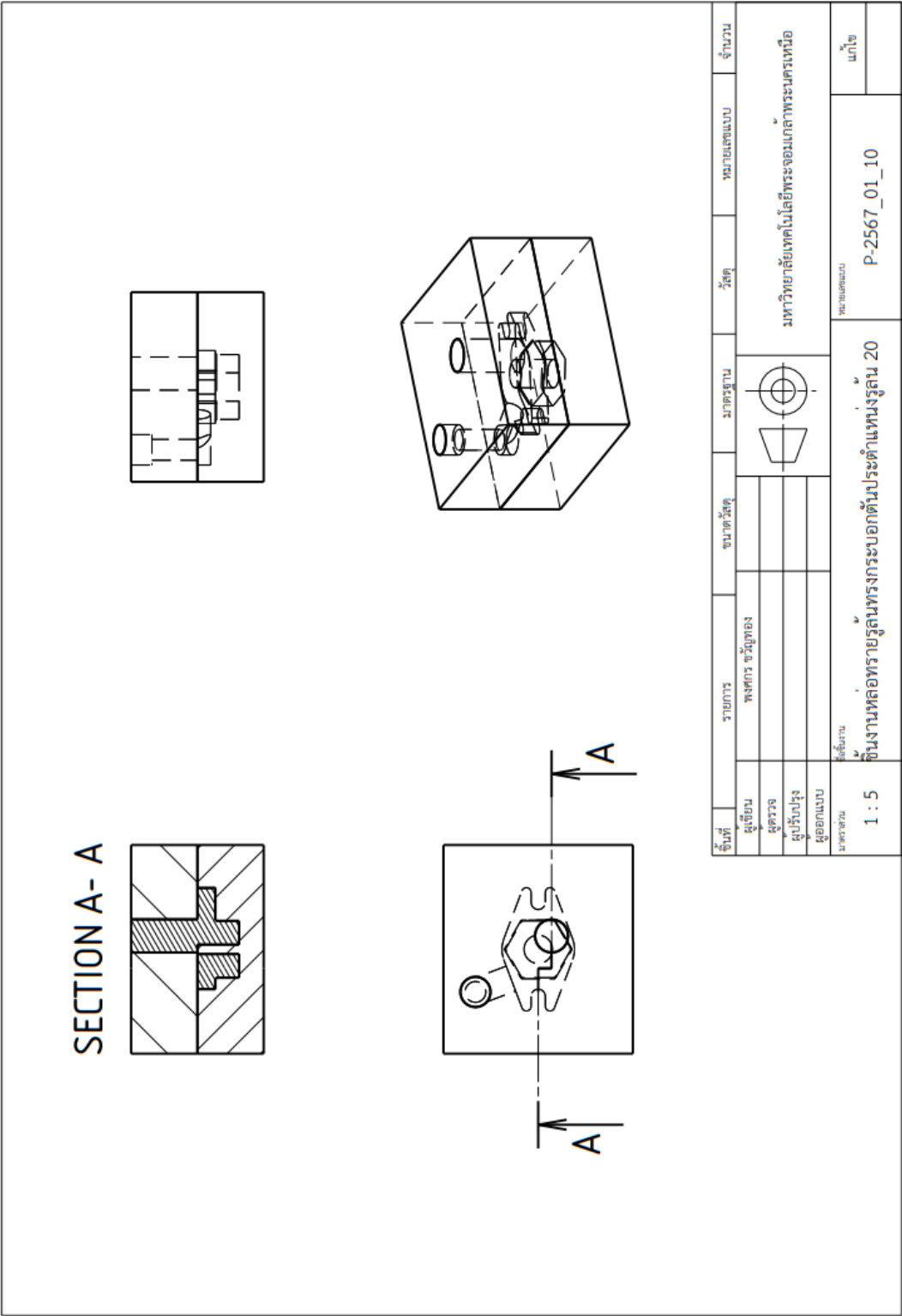


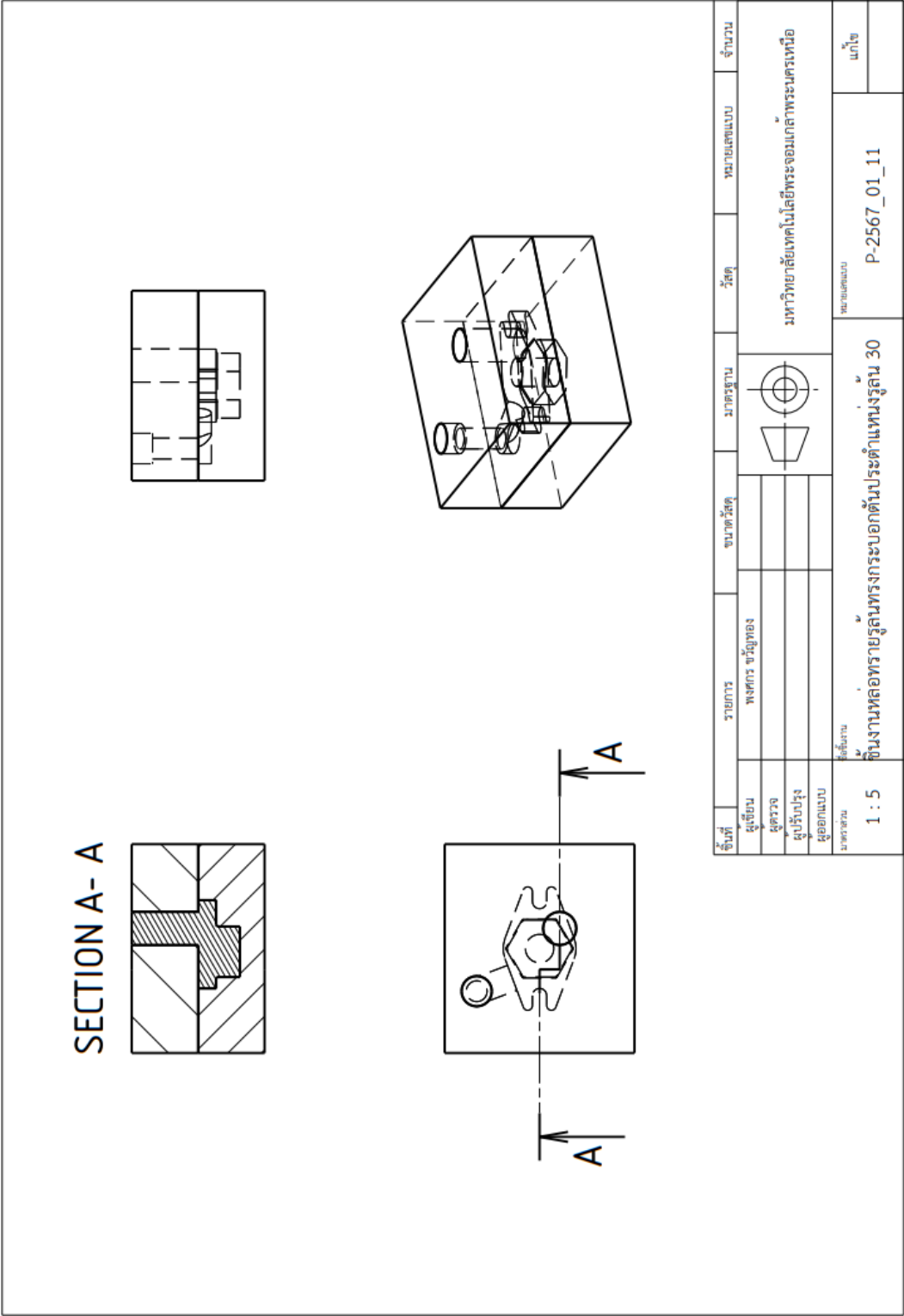
ชั้นที่	รายการ	ขนาดวัสดุ	มาตรฐาน	วัสดุ	หมายเหตุ	จำนวน
	ผู้เขียน					
	ผู้ตรวจ					
	ผู้ปรับปรุง					
ขนาดชิ้น	ผู้ออกแบบ	ชื่อชิ้นงาน	ชิ้นงานหล่อทรายรุ่นทรงกระบอกตันตำแหน่งที่ 4	หมายเลขแบบ	P-2567_01_07	แก้ไข
	1 : 5					

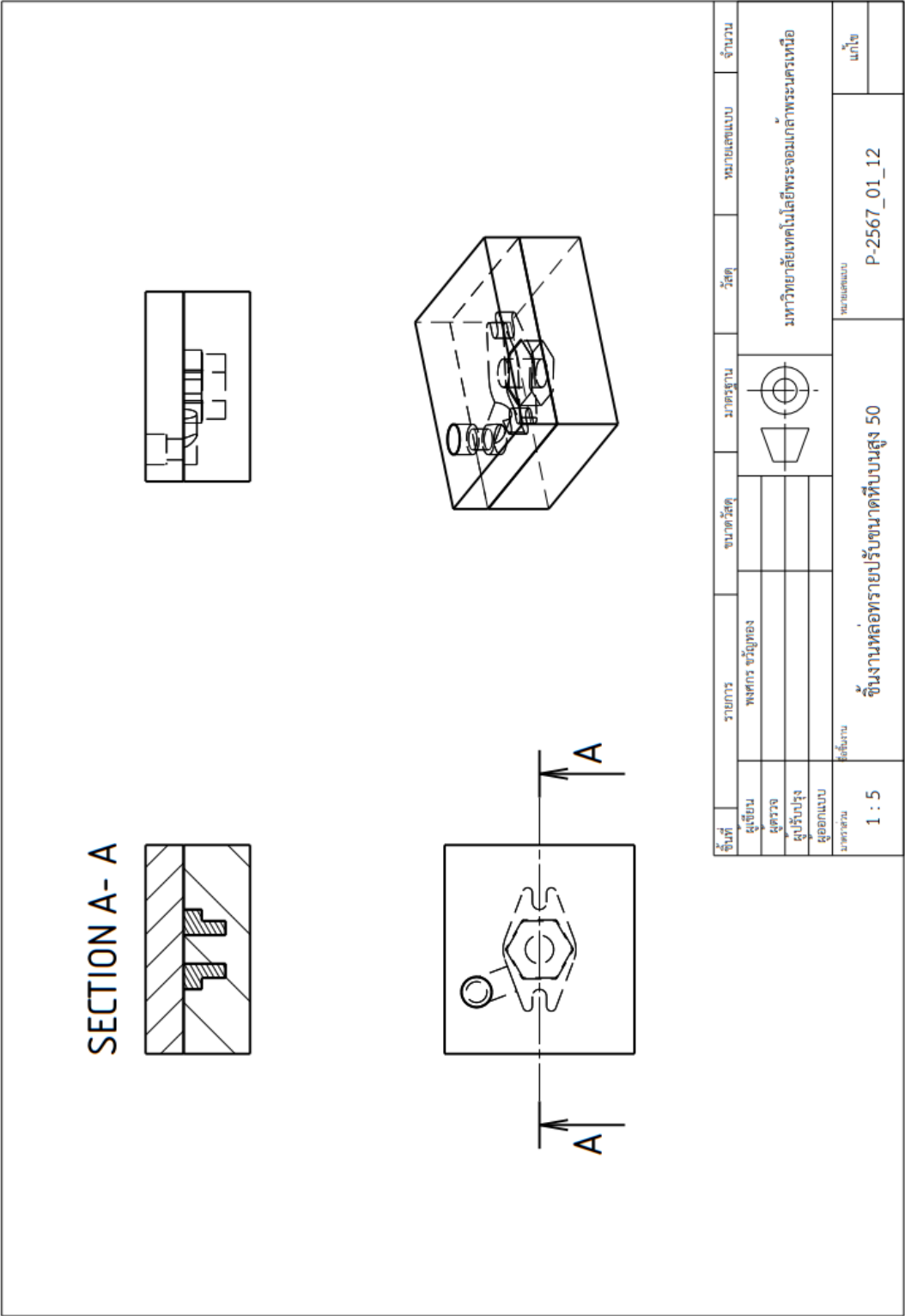
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

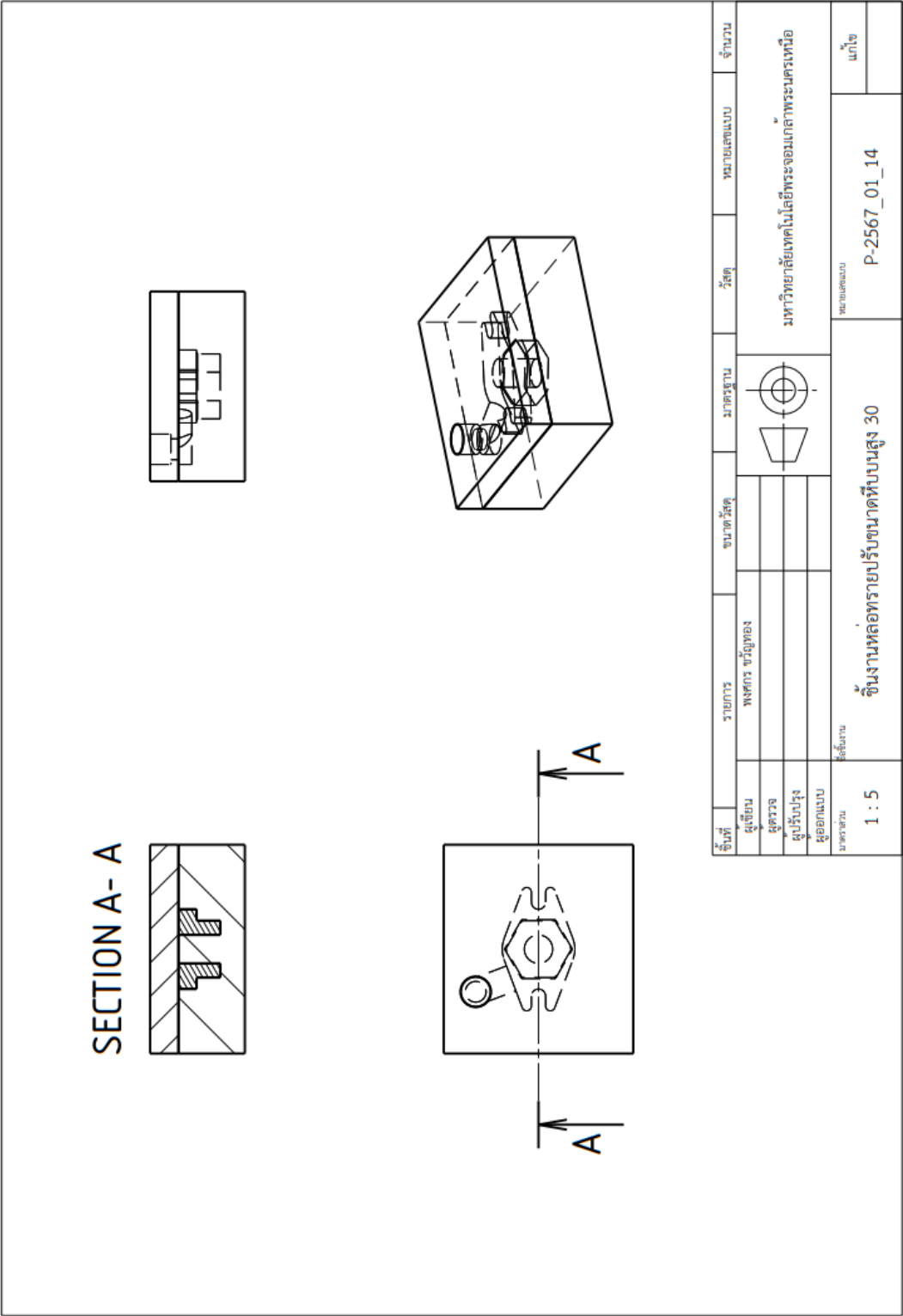


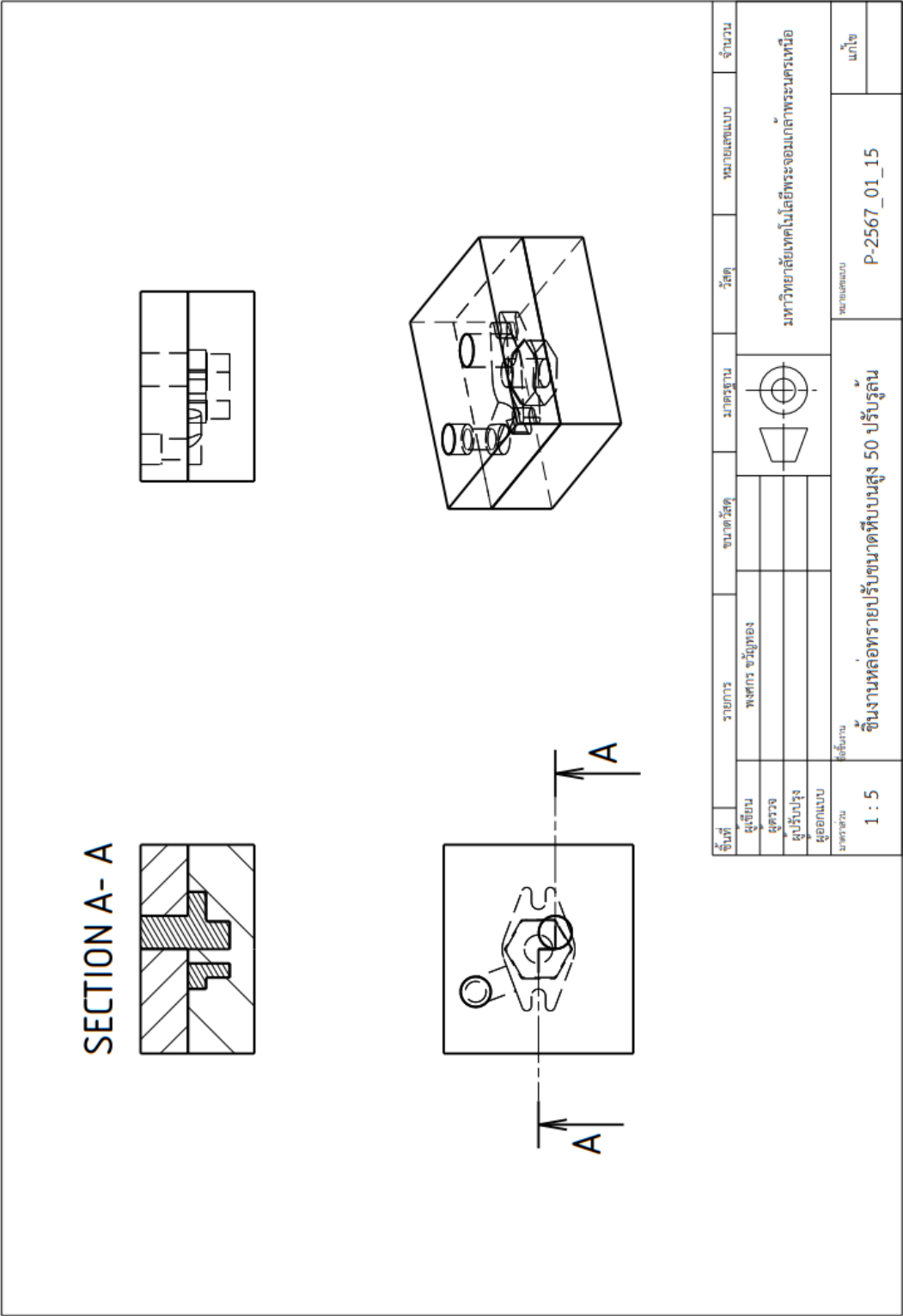


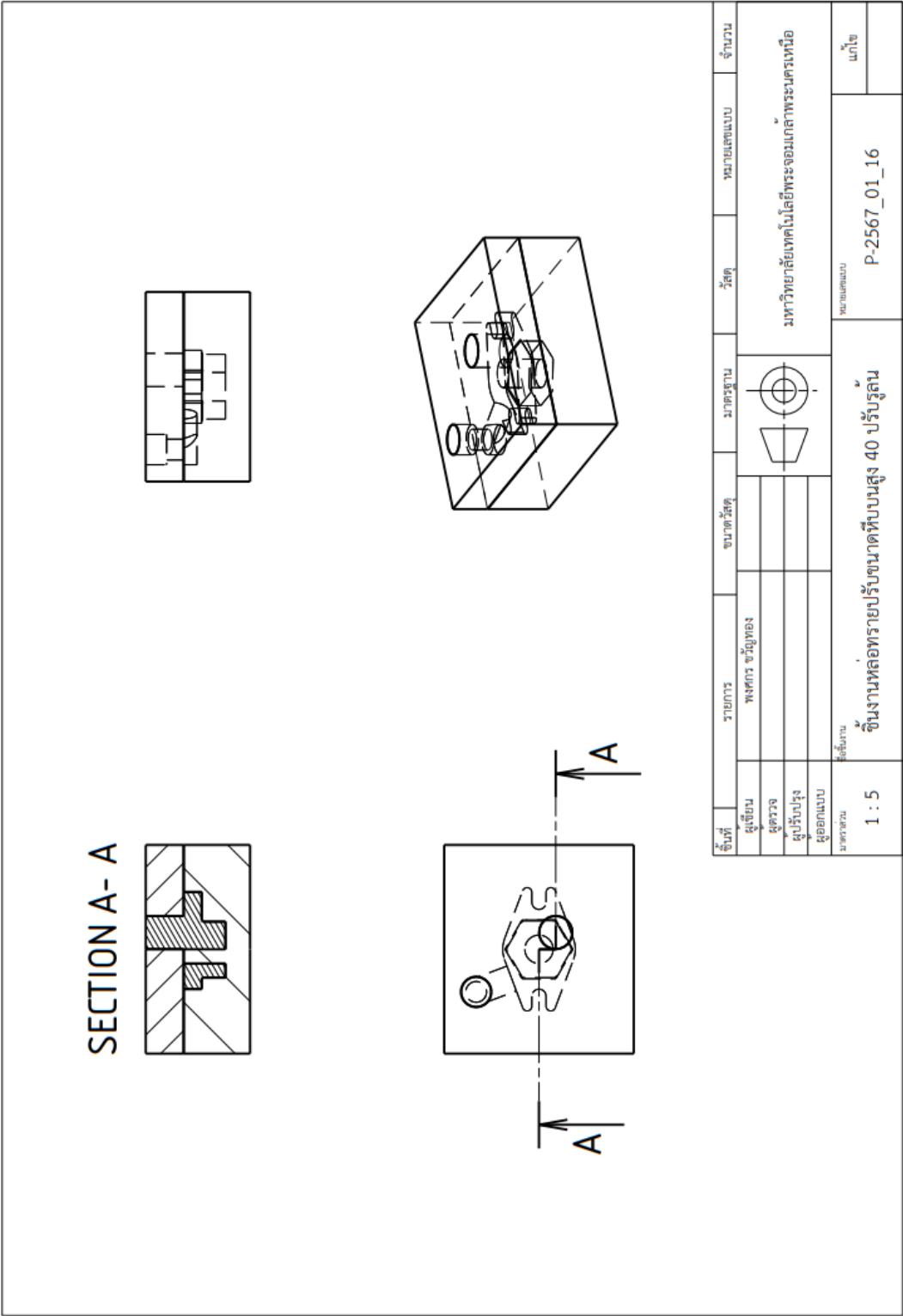


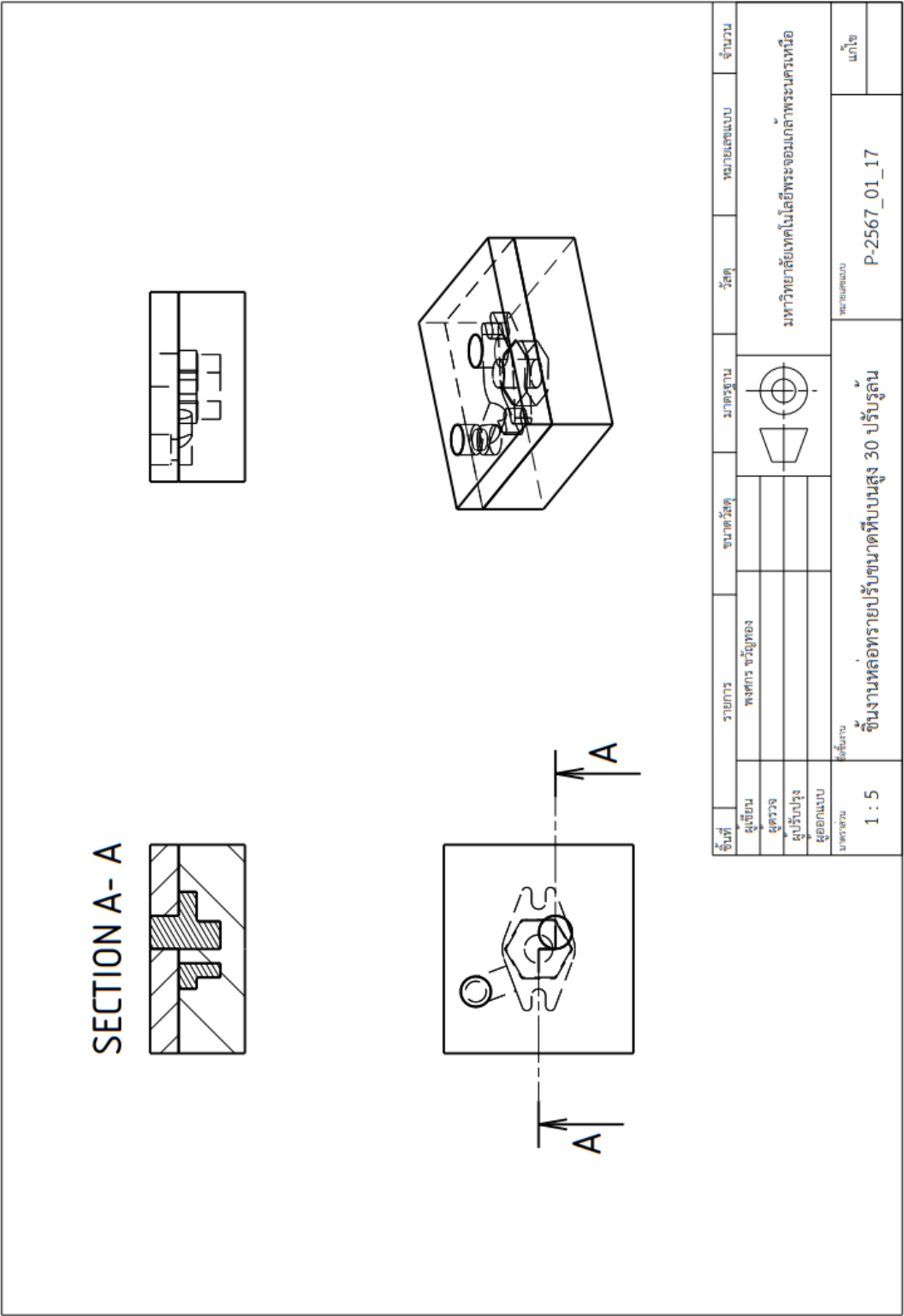


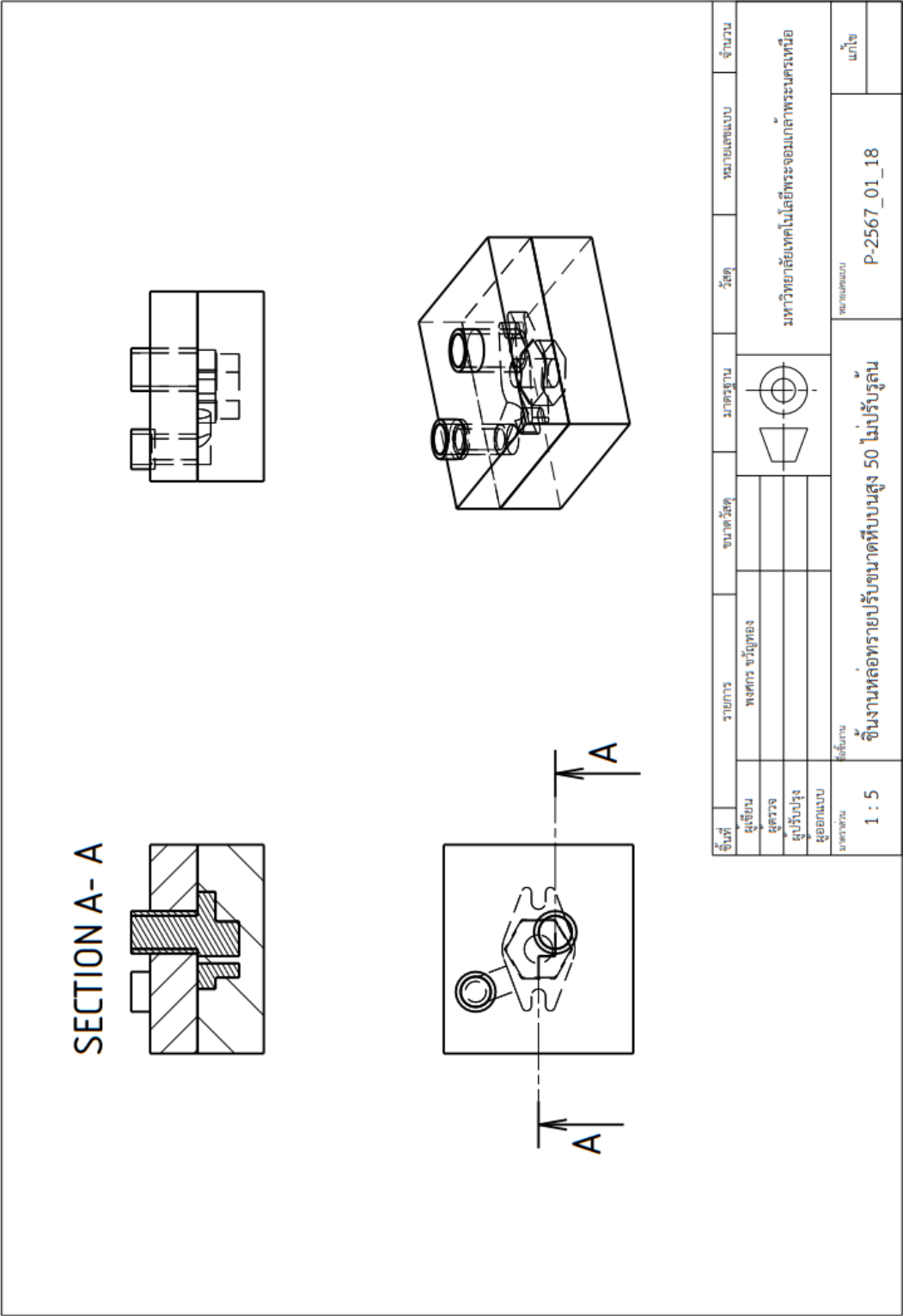


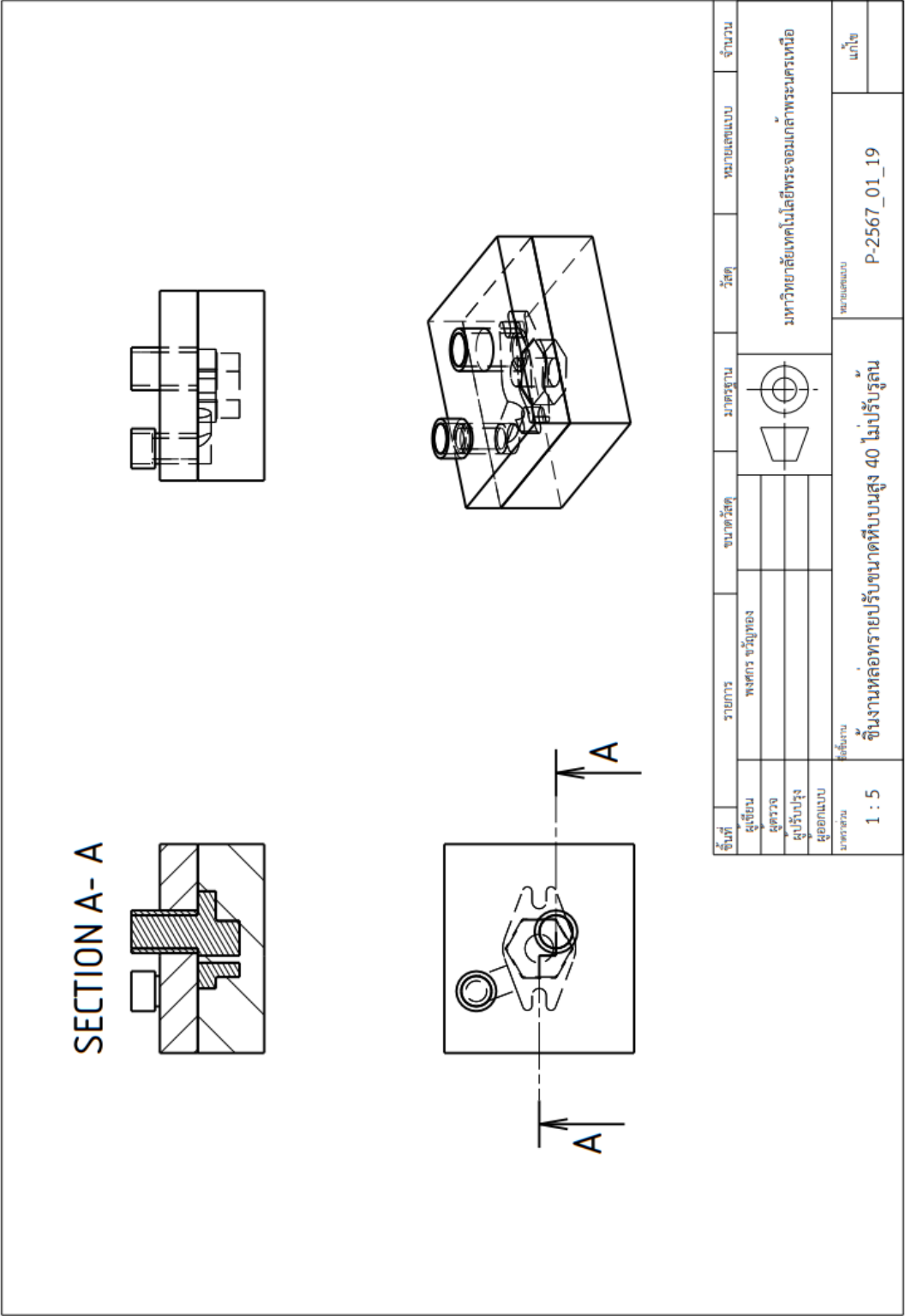




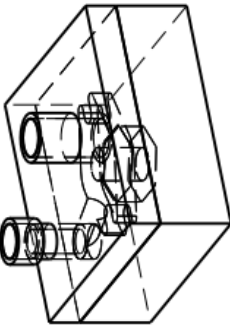
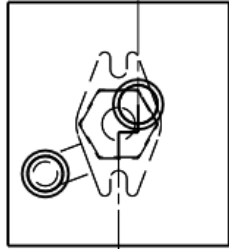
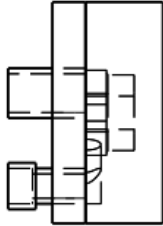
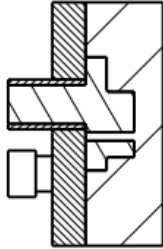








SECTION A- A



ชั้นที่	รายการ	ขนาดวัสดุ	มาตรฐาน	วัสดุ	หมายเหตุ	จำนวน
ผู้เขียน	พงศกร ขวัญทอง				มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ	
ผู้ตรวจ						
ผู้ปรับปรุง						
ผู้ออกแบบ						
ขนาดรวม	ผู้เขียน		30 ไม่ปรับรุ่น		หมายเลขแบบ	แก้ไข
1 : 5	ชิ้นงานหล่อทรายปรับขนาดที่บนสูง		P-2567_01_20			



ภาคผนวก ข

ส่วนหนึ่งของวิทยานิพนธ์ได้รับการตอบรับให้ตีพิมพ์เผยแพร่

ที่ สทท.ว. ๐๒๖/ ๒๕๖๗

แบบตอบรับการตีพิมพ์บทความ
ลงวารสารวิชาการ มหาวิทยาลัยอีสเทิร์นเอเซีย (EAU Heritage Journal)

วันที่ ๑๗ กันยายน ๒๕๖๗

เรียน คุณพงศกร ขวัญทอง
 ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พัชรพัมล สุวรรณกาญจน์
 รองศาสตราจารย์ ดร.เพ็ญญารัตน์ สายสิริรัตน์

ตามที่ท่านได้ส่งบทความเรื่อง “การวิเคราะห์ข้อบกพร่องงานหล่อทรายจากการจำลองสถานการณ์ การถ่ายเทความร้อนด้วยโปรแกรม Cast Designer” เพื่อเสนอตีพิมพ์ลงในวารสารวิชาการมหาวิทยาลัยอีสเทิร์นเอเซีย โดยผ่านการกลั่นกรองจากผู้ทรงคุณวุฒิ (Peer Reviewers) จำนวน ๓ ท่าน ในสาขาวิชาที่เกี่ยวข้องกับบทความ ซึ่งเป็นบุคคลภายนอกจากหลากหลายสถาบัน และไม่ได้อยู่ในสถาบันเดียวกันกับผู้ตีพิมพ์บทความ กองบรรณาธิการขอแจ้งผลการพิจารณา ดังนี้

มีความยินดี (✓) ตีพิมพ์บทความลงในวารสารวิชาการ มหาวิทยาลัยอีสเทิร์นเอเซีย

ฉบับวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

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

() ไม่สามารถตีพิมพ์บทความลงในวารสารวิชาการ มหาวิทยาลัยอีสเทิร์นเอเซีย

เนื่องจาก ผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณาแล้ว ยังไม่มีความเหมาะสม

จึงเรียนมาเพื่อโปรดทราบ

ขอแสดงความนับถือ



(อาจารย์ ดร.กัญจน์นิสา โภคอุดม)

บรรณาธิการวารสารวิชาการมหาวิทยาลัยอีสเทิร์นเอเซีย

ฉบับวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

กองบรรณาธิการวารสาร EAU Heritage

โทรศัพท์ ๐-๒๕๗๗-๑๐๒๘ ถึง ๓๑ ต่อ ๓๗๗, ๓๗๘

โทรสาร ๐-๒๕๗๗-๑๐๕๓

การวิเคราะห์ข้อบกพร่องงานหล่อทรายจากการจำลองสถานการณ์ การถ่ายเทความร้อน
ด้วยโปรแกรม Cast Designer
Sand Casting Defects Analysis from Heat Transfer Simulation
by Using Cast Designer

พงศกร ขวัญทอง¹ พัทธ์พิมล สุวรรณกาญจน์¹ และเพ็ญญารัตน์ สายสิริรัตน์¹
Phongsakorn Khwanthong¹, Patpimol Suwankan¹ and Penyarat Saisirirat¹

¹ภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมเครื่องกล วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

¹Department of Mechanical Engineering Technology, College of Industrial Technology,
King Mongkut's University of Technology North Bangkok

Received: June 14, 2024

Revised: September 11, 2024

Accepted: September 17, 2024

บทคัดย่อ

ในกระบวนการหล่อ ปัญหาหนึ่งที่พบบ่อย คือ การเกิดโพรงหดตัวภายในชิ้นงานหล่อ ซึ่งมีสาเหตุมาจากการกระจายความร้อนที่ไม่สม่ำเสมอในชิ้นงาน ทำให้เกิดบางบริเวณมีการสะสมความร้อนมากกว่าบริเวณอื่น ๆ เมื่อความร้อนถูกสะสมจนถึงจุดสูงสุด บริเวณดังกล่าวจะหดตัวลงอย่างรวดเร็ว ในงานวิจัยนี้จะวิเคราะห์ชิ้นงานหล่อทรายขึ้นงานกระสวนขึ้นเดียวหน้าผารามมีไส้แบบในตัวไม่มีรูสัน โดยการออกแบบรูสันเพื่อแก้ไขปัญหาเป็นลักษณะทรงกระบอกกลวงขนาด 8 มิลลิเมตร และ 15 มิลลิเมตร แต่การแก้ไขปัญหานี้ไม่เป็นผลสำเร็จ ทางผู้วิจัยจึงได้นำซอฟต์แวร์ Cast Designer มาใช้ในการวิเคราะห์พฤติกรรมการไหลของความร้อนภายในชิ้นงานหล่อทรายขึ้นงานกระสวนขึ้นเดียวหน้าผารามมีไส้แบบในตัวแบบไม่มีรูสัน โดยใช้วัสดุเป็นอลูมิเนียมผสม A110 โดยใช้โปรแกรมจะคำนวณและแสดงผลการกระจายของความร้อนในรูปแบบจำลองสามมิติ เพื่อระบุได้ว่าบริเวณใดของชิ้นงานมีการสะสมความร้อนสูงสุด โดยจากการวิจัยพบว่า การออกแบบรูสันในตำแหน่งที่มีการสะสมของความร้อนสูงสุดจะช่วยลดปริมาณการเกิดโพรงหดตัวของชิ้นงานลงได้เหลือเพียง 0.16 เปอร์เซ็นต์เท่านั้น

คำสำคัญ: งานหล่อทราย จำลองพฤติกรรมความร้อน โพรงหดตัว รูสัน

Abstract

In sand casting processes, one of the most common defects is shrinkage porosity, which is caused by uneven heat distribution during solidification. Areas with higher heat accumulation cool more slowly, leading to rapid contraction and void formation in the material. This study investigates a single-pattern sand casting model without a riser, analyzing the heat flow using Cast Designer software. Initial attempts to resolve shrinkage by adding cylindrical hollow vents with diameters of 8 mm and 15 mm were unsuccessful. Cast Designer was employed to simulate heat transfer in the casting to identify areas with excessive heat accumulation. The results showed that the shrinkage porosity can be reduced to only 0.16% by placing vents in the areas with the highest heat concentration. The study concludes that optimizing the venting system in these specific areas is essential for minimizing shrinkage porosity.

Keywords: sand casting, heat transfer, shrinkage porosity, pouring



บทนำ

การหล่อเป็นหนึ่งขั้นตอนการผลิตที่พบข้อบกพร่องที่สุดที่พบในการหล่อโลหะที่ผลิตโดยกระบวนการ เช่น การหล่อทราย ความพรุนประเภทนี้เกิดขึ้นเมื่อโลหะที่แข็งตัวไม่สามารถป้องกันการหดตัวที่เกิดขึ้นเมื่อโลหะเปลี่ยนจากของเหลวเป็นสถานะของแข็ง ผลลัพธ์ที่ได้ คือ การก่อตัวของช่องว่างหรือรูพรุนภายในการหล่อ สาเหตุหลักของความพรุนของการหล่อคือการหดตัวของการแข็งตัวที่เกิดขึ้นในบริเวณที่โลหะเมื่อโลหะผสมเหล็กแข็งตัว เหล็กเหลวจะหดตัวประมาณ 3-5% เมื่อเปลี่ยนเป็นของแข็ง จำเป็นต้องมีการป้องกันวัสดุหลอมที่มีประสิทธิภาพเพื่อลดความเสี่ยงการหดตัวนี้ (Nawaz Mahomed, 2021) การหดตัวมีสามขั้นตอน คือการหดตัวของของเหลว โลหะเหลวหดตัวเมื่อเย็นลงก่อนที่จะเริ่มแข็งตัว การหดตัวของของเหลว-ของแข็ง ในช่วงโซนอ่อนซึ่งมีทั้งเฟสของแข็งและของเหลวอยู่ การลดปริมาตรจะเกิดขึ้นทำให้เกิดการหดตัว การหดตัวแบบแข็ง โลหะแข็งยังคงหดตัวต่อไปเมื่อเย็นตัวลง ซึ่งนำไปสู่การหดตัวแบบรวดเร็ว พฤติกรรมการหดตัวมีความสำคัญเนื่องจากสามารถไปสู่ข้อบกพร่อง (Anna Gowsalya & E. Afshan, 2021) การวิจัยล่าสุดได้ให้ข้อมูลเชิงลึกเกี่ยวกับสาเหตุและแนวทางแก้ไขที่เป็นไปได้สำหรับปัญหาทั่วไปนี้ ข้อบกพร่องในการหล่อที่มีสองประเภทหลักคือการหดตัวของของเหลวเมื่อเหล็กหลอมเหลวเย็นลงจากอุณหภูมิการเทไปจนถึงอุณหภูมิการแข็งตัว การหดตัวของของเหลว

จึงเกิดขึ้น อย่างไรก็ตาม ปัจจัยต่าง ๆ เช่น อัตราการเย็นตัว การปฏิบัติในการฉีดวัคซีน และปริมาณโลหะผสม ส่งผลต่อโหมดการแข็งตัว การควบคุมขนาดเกรนเกรนออกสเตนไนต์ที่มีขนาดเล็กจะช่วยลดปัญหาการแยกตัวของเนื้อวัสดุและการหดตัวให้เหลือน้อยที่สุด (Alagarsamy & Kumar, 2021) หนึ่งในงานวิจัยที่ศึกษามีการทำนายหาข้อบกพร่องในการหล่อโลหะ โดยกล่าวถึงข้อจำกัดในเกณฑ์ที่มีอยู่ เช่น Pellini และ Niyama การศึกษาพบพบเกณฑ์เหล่านี้และเน้นย้ำถึงข้อเสียที่เกี่ยวข้องกับขนาดและรูปร่างของการหล่อ โดยให้เหตุผลทางทฤษฎีสำหรับเกณฑ์ Niyama และนำเสนอเกณฑ์ใหม่ที่ไม่ขึ้นกับรูปร่าง โดยพิจารณาจากคุณสมบัติของส่วนต่อประสานการแข็งตัวเฉพาะที่ การวิเคราะห์เชิงทฤษฎีใช้กฎการแข็งตัวของ Chvorinov (Tavakoli, 2014)

สำหรับในภาคอุตสาหกรรมเองนั้นก็มีมีการวิจัยเกี่ยวกับการเกิดโพรงหดตัวเช่นกัน โดยวิศวกรที่โรงหล่อการผลิตยานยนต์กำลังค้นคว้าอัตราของเสียที่สูงเนื่องจากข้อบกพร่องที่มีรูพรุนจากการหล่อในท่อร่วมไอตืออะลูมิเนียมอัลลอยด์ การจัดจังหวะการผลิตเพื่อแก้ไขปัญหานี้ไม่ใช่งานง่าย ดังนั้นทีมงานจึงหันมาพิจารณาการจำลองเชิงตัวเลขและการออกแบบการทดลอง (DOE) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพกระบวนการหล่อแม่พิมพ์ถาวรแบบเสมือนจริง นักวิจัยสร้างแบบจำลองกระบวนการที่มีอยู่เป็นครั้งแรก

แรกโดยใช้ซอฟต์แวร์จำลองการหล่อ เทคนิคดังกล่าวช่วยให้วิศวกรสามารถลดข้อบกพร่องและของเสียได้โดยไม่รบกวนการผลิต การทดลองเสมือนจริงและ DOE ทางสถิติช่วยให้สามารถปรับปรุงกระบวนการหล่อทางอุตสาหกรรมได้จริง (Gunasegaram, 2008) เดิมทีโรงหล่อใช้การทดลองและข้อผิดพลาดในการออกแบบระบบป้อนเพื่อจัดหาโลหะหล่อเหลวเพิ่มเติม แต่นี้ใช้เวลานานและมีค่าใช้จ่ายสูง การจำลองด้วยคอมพิวเตอร์เป็นทางออกที่ดีกว่า นักวิจัยจากอินเดียสร้างแบบจำลองการหล่อลูมิเนียมอัลลอยด์ LM6 โดยใช้ซอฟต์แวร์ AutoCAST-X เป้าหมายของพวกเขา คือ การลดความพຽນจากการหดตัวให้เหลือน้อยที่สุดด้วยการจำลอง ขั้นแรก พวกเขานำเข้าโมเดล 3 มิติลงในซอฟต์แวร์ มันจะสร้างแม่พิมพ์โดยอัตโนมัติและนำไปวิเคราะห์ จากนั้นพวกเขาจำลองการแข็งตัวเพื่อระบุ “จุดร้อน” ซึ่งเป็นพื้นที่สุดท้ายที่จะแข็งตัว จุดร้อนเหล่านี้เป็นจุดที่มีโอกาสเกิดข้อบกพร่องจากการหดตัวมากที่สุด (Gajbhiye, Choudhari, Raut, Narkhede & Bhandarkar, 2014)

สำหรับการใช้โปรแกรมในการจำลองเพื่อปรับปรุงแก้ไขงานหล่อนั้น มีหนึ่งตัวอย่างที่น่าสนใจ คือ เมื่อเร็ว ๆ นี้ นักวิจัย Hardik Rathod, Jay K. Dhulia และ Nirav P. Maniar ได้ทำการศึกษาเพื่อคาดการณ์และวิเคราะห์ข้อบกพร่องในการหดตัวในชิ้นส่วนหล่อทรายที่ทำจากลูมิเนียมอัลลอยด์ LM25 จากนั้นนักวิจัยได้ใช้ซอฟต์แวร์จำลอง ANSYS เพื่อสร้างแบบจำลองกระบวนการแข็งตัวและคาดการณ์พื้นที่ที่มีรูพຽนจากการหดตัว ผลการจำลองเข้ากันได้ดีกับผลการทดลอง โดยคาดการณ์ตำแหน่งของข้อบกพร่องได้อย่างแม่นยำ งานวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่า การจำลองด้วยคอมพิวเตอร์สามารถเป็นเครื่องมือที่มีประสิทธิภาพในการคาดการณ์ข้อบกพร่องในการหดตัวในการหล่อโลหะ (Rathod, Dhulia & Maniar, 2017) หรือการจำลองชิ้นส่วนเครื่องยนต์บริษัทชั้นนำอย่าง Volksawaken ก็มีการใช้ ProCast เพื่อวิเคราะห์การหล่อซับซ้อนระบายความร้อนด้วยอากาศและการเติมแม่พิมพ์ด้วยโลหะหล่อเหลว การกระจายอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลง การแข็งตัว และสุดท้ายคือ ตำแหน่งที่คาดการณ์ไว้และปริมาณความพຽนของการหดตัว ผลการจำลองประสบความสำเร็จแสดงให้เห็นเปอร์เซ็นต์ความพຽน 2.69% ที่กระจุกตัวอยู่รอบ ๆ รูด้านใน ซึ่งตรงกับข้อบกพร่องในการหล่อจริง เวลาในการแข็งตัว

ถูกคาดการณ์ไว้ที่ 159.56 วินาที นอกจากนี้ การศึกษาใหม่ที่ตีพิมพ์ใน ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences ได้ใช้การวิเคราะห์องค์ประกอบไฟไนต์เพื่อสร้างแบบจำลองกระบวนการแข็งตัว โดยใช้ซอฟต์แวร์ ANSYS แบบจำลองมีเส้นผ่านศูนย์กลางลูกสูบ 0.11 ม. สูง 0.148 ม. ล้อมรอบด้วยแม่พิมพ์ขนาด 0.225x0.24 ม. เมื่อใช้แบบจำลองนี้ ทีมงานจำลองการแข็งตัวภายใต้อุณหภูมิการหล่อเริ่มต้น (700°C และ 800°C) และอุณหภูมิแม่พิมพ์ (100°C 200°C และ 400°C) ที่แตกต่างกันในการใช้งานด้านการบินและอวกาศและยานยนต์ เนื่องจากไม่มีข้อมูลใหม่ที่ครอบคลุมเกี่ยวกับพฤติกรรมการเติมแม่พิมพ์และการแข็งตัวของ EV31A ทีมงานใช้ซอฟต์แวร์จำลองการหล่อ MAGMASoft เพื่อประเมินส่วนประกอบเครื่องยนต์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีโครงสร้างซึ่งทำจากโลหะผสม EV31A พวกเขาสร้างโมเดล 3 มิติที่รวมเอารูปร่างที่ซับซ้อน รวมถึงรายละเอียดของระบบเกตและระบบท่าความเย็น จากนั้นจึงใช้โมดูลการเติมและการแข็งตัวของ MAGMASoft (Jarosz, Kietbus & Gryc, 2018)

สุดท้ายนี้ผู้วิจัยมุ่งหวังที่จะศึกษาผลความร้อนต่อการหดตัวของโลหะ และดูพฤติกรรมของความร้อนที่อาจจะส่งผลให้เกิดข้อบกพร่องต่อชิ้นงาน โดยใช้โปรแกรม Cast Designer ในการจำลองหาจุดสะสมของชิ้นงานหล่อ และวิธีการแก้ปัญหาผ่านการทดลองปรับแต่งส่วนประกอบที่เกี่ยวข้องอย่างรู้ส้น โดยการหาค่าขนาดและตำแหน่งการวางที่เหมาะสมโดยใช้การสะสมความร้อนเป็นตัวแปร ซึ่งในที่สุดจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพและความเชื่อถือของโลหะที่ถูกหล่อในหลาย ๆ อุตสาหกรรม การลดการสูญเสียวัสดุและการปรับปรุงคุณภาพและประสิทธิภาพ งานหล่อในอุตสาหกรรม และยืนยันความสำคัญของซอฟต์แวร์จำลองว่าเป็นเครื่องมือที่สำคัญและทรงพลังในงานอุตสาหกรรมในยุคปัจจุบันนั่นเอง

วัตถุประสงค์การวิจัย

1. เพื่อศึกษาผลของความร้อนที่มีผลต่องานหล่อในเรื่องของข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นจากพฤติกรรมของความร้อน โดยใช้โปรแกรมวิเคราะห์จำลองสถานการณ์ การหดตัวและการพฤติกรรมของความร้อนในชิ้นงานทดสอบ

2. เพื่อลดข้อบกพร่องของการหดตัวที่เกิดขึ้น
ภายในชิ้นงาน

สมมติฐานงานวิจัย

การสะสมของความร้อนใน การออกแบบรูกลั่น
และวางตำแหน่งไม่เหมาะสมเป็นที่มาของการเกิดโพรง
หดตัวในชิ้นงานหล่อ

วิธีดำเนินงานวิจัย

การดำเนินการวิจัยได้ออกแบบการทดลองเพื่อ
ศึกษาพฤติกรรมอุณหภูมิของโลหะเหลวในแม่พิมพ์เหล็กกล้า
ไร้สนิมจากกระบวนการหล่อทราย (sand casting) ชิ้นงาน
หล่อทรายชิ้นงานกระสวยขึ้นเดียวหน้าผ่าราบมีไส้แบบ
ในตัวไม่มีรูกลั่น โดยใช้ผลลัพธ์และวิธีการที่จากงานวิจัย
เรื่องการออกแบบระบบรูเทในงานหล่ออลูมิเนียมสำหรับ
โพรงแบบทราย (Wattananabupa, 2020) การออกแบบ
ระบบรูเทในงานหล่ออลูมิเนียมสำหรับโพรงแบบทราย
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ จึง
ได้ดำเนินการวิจัยตามขั้นตอน ดังต่อไปนี้

1. ศึกษาปัญหาดั้งเดิมและวิเคราะห์เกี่ยวกับการเกิด
โพรงหดตัว (shrinkage porosity) ที่เกิดขึ้นในชิ้นงานหล่อ
ทรายชิ้นงานกระสวยขึ้นเดียวหน้าผ่าราบมีไส้แบบในตัว

2. ศึกษาวิธีการการแก้ไขปัญหาดั้งเดิมของงาน
เรื่องการออกแบบระบบรูเทในงานหล่ออลูมิเนียมสำหรับ
โพรงแบบทราย ในการแก้ไขปัญหการเกิดโพรงหดตัว
(shrinkage porosity) ของชิ้นงาน

3. ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดโพรงหดตัว
โดยการใช้โปรแกรม Cast Designer ช่วยในการจำลอง
พฤติกรรมต่าง ๆ ของ ชิ้นงานในแบบหล่อโดยมีตัวแปรที่
ศึกษา ดังนี้ คือ (1) เวลาในการเติมเต็มของโลหะเหลว
(2) ลักษณะการไหลของโลหะเหลว (3) เวลาที่ใช้ในการแข็งตัว
(4) การจำลองการเกิดโพรงหดตัว (5) อุณหภูมิ

4. ออกแบบแนวทางการแก้ไขปัญหและสรุปผล

ศึกษาปัญหาดั้งเดิมของชิ้นงาน

เริ่มต้นศึกษาปัญหาดั้งเดิมและวิเคราะห์เกี่ยวกับ
การเกิดโพรงหดตัว (shrinkage porosity) ที่เกิดขึ้นในชิ้นงาน
หล่อทรายชิ้นงานกระสวยขึ้นเดียวหน้าผ่าราบมีไส้แบบในตัว
ไม่มีรูกลั่น สำหรับการพิจารณาและวิเคราะห์ผลการจำลองของ
ชิ้นงาน โดยภาพ 1 แสดงลักษณะของชิ้นงานที่ทำการศึกษา
วิจัย สำหรับค่าพารามิเตอร์ที่ใช้จะกำหนดไว้ดังตาราง 1
และขนาดของชิ้นงานแสดงไว้ในภาพ 2

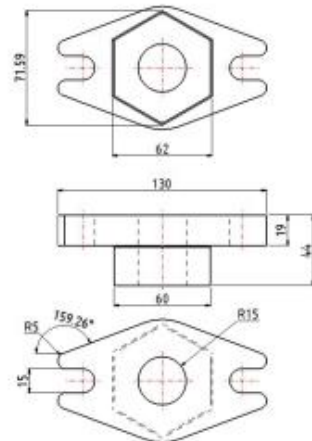


ภาพ 1 ชิ้นงานกระสวยขึ้นเดียวหน้าผ่าราบมีไส้แบบใน
ตัวแบบไม่มีรูกลั่น

ตาราง 1

ค่าพารามิเตอร์สำหรับการหล่อ

ตัวแปร	ค่าที่กำหนด	หน่วย
อุณหภูมิในการเท	750	°C
อุณหภูมิของกระสวย	25	°C
วัสดุโลหะเหลว	A1100	
วัสดุของทราย	Sand_Green	



ภาพ 2 แสดงขนาดของชิ้นงานกระสวนชิ้นเดียวหน้าผ้าราบมีไส้แบบในตัวแบบไม่มีรูลัน

ต่อไปจะเป็นขั้นตอนของการตรวจสอบปัญหาที่เกิดขึ้นของชิ้นงาน โดยจะตรวจสอบด้วยการผ่าชิ้นงานเพื่อดูลักษณะของการยุบตัว จากนั้นตรวจสอบด้วยโปรแกรม Cast Designer เพื่อทำการเปรียบเทียบผลการจำลองกับปัญหาที่เกิดขึ้นจริง

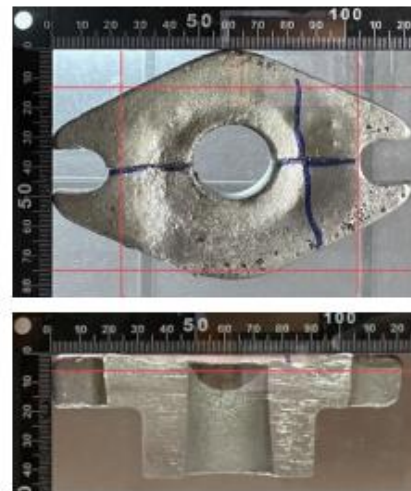
1. ตรวจสอบปัญหาของชิ้นงาน

ลักษณะชิ้นงานเทหล่อจริงชิ้นที่ 3 หลังจากเทหล่อจริงพบตำแหน่งของการเกิดโพรงหดตัว (shrinkage porosity position) ชิ้นงานมีการหดตัวบริเวณตรงกลางรอบ ๆ ไส้แบบของชิ้นงาน ซึ่งบริเวณตรงกลางเป็นจุดที่มีความหนาสูงสุดของชิ้นงานจึงทำให้บริเวณตรงกลางรอบ ๆ ไส้แบบเป็นจุดร้อนของชิ้นงาน เนื่องจากสาเหตุการหดตัวของชิ้นงานนั้นเกิดจากการเย็นตัวของชิ้นงานดังภาพ 3

2. การตรวจสอบด้วยโปรแกรม Cast Designer

หลังจากพบปัญหาในการหล่อจากการตรวจสอบด้วยตาเปล่าและการผ่าชิ้นงานพบว่า เกิดการหดตัวที่บริเวณ

กึ่งกลางที่มีเนื้อหนา ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้นำค่าพารามิเตอร์ในตาราง 1 กำหนดลงในโปรแกรม การตรวจสอบด้วยโปรแกรม Cast Designer โดยใช้ค่าตั้ง CPI ของโปรแกรมเพื่อทำการวิเคราะห์ ดังภาพ 4



ภาพ 3 แสดงลักษณะการหดตัวของชิ้นงานกระสวนชิ้นเดียวหน้าผ้าราบมีไส้แบบในตัวแบบไม่มีรูลัน



ภาพ 4 แสดงการกำหนดค่า หมายเลข (1) ประเภทและอุณหภูมิของวัสดุ (2) ประเภทและอุณหภูมิของแม่พิมพ์ (3) ทิศทางแรงโน้มถ่วง (4) ทิศทางและความเร็วในการเท (5) อุณหภูมิขณะเท

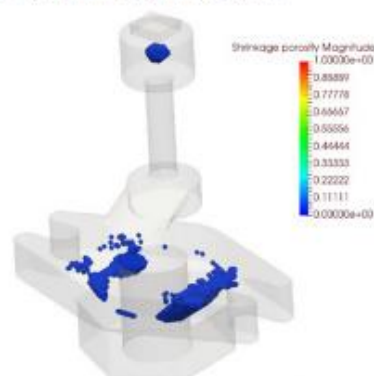
ผลการจำลองการเกิดโพรงหดตัว (shrinkage porosity) เราสามารถที่จะตรวจสอบเปอร์เซ็นต์การเกิดโพรงหดตัวได้ด้วยโปรแกรม Cast designer จะพบว่า มีการเกิดโพรงในหดตัวในตำแหน่งที่ใกล้เคียงกับภาพแสดงการผ่าชิ้นงานหล่อจริง ดังภาพ 5 พบว่า มีเปอร์เซ็นต์ของการเกิดโพรงหดตัว 2.74 %

ต่อไป ผู้วิจัยจะทำการศึกษาแนวทางการแก้ไขปัญหาดังเดิมของชิ้นงานนี้ เพื่อจะศึกษาผลลัพธ์ของการออกแบบแก้ไข และนำวิเคราะห์หาวิธีและแนวทางในการแก้ไขปัญหาดังต่อไป

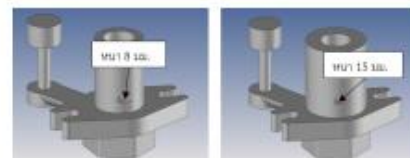
ศึกษาแนวทางการแก้ไขดั้งเดิม

โดยรูปแบบการแก้ไขดั้งเดิมมี 2 รูปแบบ โดยจะทำการจำลองผลลัพธ์ด้วยโปรแกรม Cast Designer โดยใช้ค่าพารามิเตอร์ ดังตาราง 1 ตามลำดับ คือ (1) ชิ้นงานหล่อทรายชิ้นงานกระสวนชิ้นเดียวหน้าผ่าราบมีไส้แบบในตัวรูสันทรงกระบอกกลางหนา 8 มิลลิเมตร และ (2) ชิ้นงานหล่อทรายชิ้นงานกระสวนชิ้นเดียวหน้าผ่าราบมีไส้แบบในตัวรูสันทรงกระบอกกลางหนา 15 มิลลิเมตร ดังภาพ 5 และภาพ 6

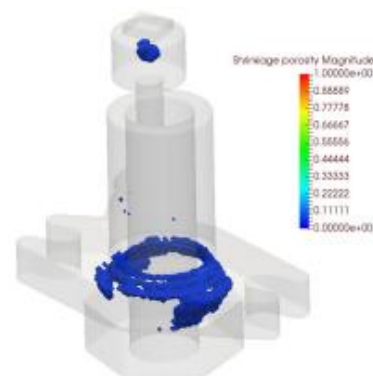
จากผลการจำลองการเกิดโพรงหดตัว (shrinkage porosity) ชิ้นงานกระสวนชิ้นเดียวหน้าผ่าราบมีไส้แบบในตัวรูสันทรงกระบอกกลางหนา 8 มิลลิเมตร และ 15 มิลลิเมตร จะพบว่า มีการเกิดโพรงหดตัว 2.68 % และ 2.13 % ดังภาพ 7 และภาพ 8 ตามลำดับ



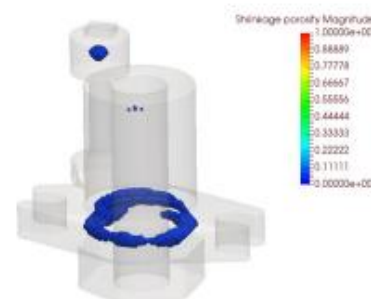
ภาพ 5 แสดงลักษณะการเกิดโพรงหดตัวที่ชิ้นงาน



ภาพ 6 แสดงชิ้นงานทั้งสองรูปแบบ



ภาพ 7 ภาพจำลองการเกิด Shrinkage Porosity ชิ้นงานกระสวนชิ้นเดียวหน้าผ่าราบมีไส้แบบในตัวรูสันทรงกระบอกกลางหนา 8 มิลลิเมตร



ภาพ 8 ภาพจำลองการเกิดโพรงหดตัวชิ้นงานกระสวนชิ้นเดียวหน้าผ่าราบมีไส้แบบในตัวรูสันทรงกระบอกกลางหนา 15 มิลลิเมตร

ดังนั้นจึงสรุปผล ได้ว่าผลของการจำลองชิ้นงาน แนวทางการแก้ไขปัญหาดังเดิม โดยรูปแบบการแก้ไขดังเดิมมี 2 รูปแบบ คือ (1) ชิ้นงานหล่อทรายชิ้นงานกระสวนชิ้นเดียว หน้าผารามมีไส้แบบในตัวรูสันทรงกระบอกกลวงหนา 8 มิลลิเมตร และ (2) ชิ้นงานหล่อทรายชิ้นงานกระสวนชิ้นเดียว หน้าผารามมีไส้แบบในตัวรูสันทรงกระบอกกลวงหนา 15 มิลลิเมตร ไม่สามารถแก้ไขปัญหที่เกิดขึ้นได้เนื่องจากยังพบโพรงหดตัวอยู่ที่บริเวณกึ่งกลางของชิ้นงาน ดังนั้น ผู้วิจัยจะทำการวิเคราะห์ปัญหาของการเกิดโพรงหดตัวของชิ้นงาน เพื่อแก้ไขปัญหาคือการเกิดโพรงหดตัวของชิ้นงานนี้ให้ลดลง

ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดโพรงหดตัว โดยการใช่โปรแกรม Cast Designer

การสะสมของความร้อนในแกนหล่อขณะเทหล่อมีบทบาทสำคัญในการเกิดโพรงหดตัว (shrinkage porosity) ในกระบวนการหล่อโลหะ เมื่อโลหะที่หลอมเหลวถูกเทลงในแม่พิมพ์ทราย ความร้อนที่สะสมจะส่งผลต่อการเย็นตัวของโลหะ หากความร้อนในบริเวณหนึ่งไม่สามารถกระจายออกได้อย่างเหมาะสม จะทำให้บริเวณนั้นเกิดการเย็นตัวอย่างช้า ๆ ซึ่งอาจนำไปสู่การเกิดโพรงหดตัว เนื่องจากโลหะมีการหดตัวเมื่อเย็นตัวลง การสะสมของความร้อนที่มากเกินไปจะทำให้โลหะในบริเวณนั้นคงสถานะหลอมเหลวอยู่นานกว่าบริเวณอื่น เมื่อโลหะเย็นตัวและแข็งตัวในที่สุด บริเวณที่มีความร้อนสะสมจะไม่มีโลหะเพียงพอเติมเต็มช่องว่างที่เกิดจากการหดตัว ส่งผลให้เกิดโพรงหดตัวภายในชิ้นงานหล่อ (Atchimarangsi, 2008)

สำหรับการดำเนินงานเพื่อวิเคราะห์เพื่อการศึกษาสาเหตุของการเกิดข้อบกพร่องในเรื่องการเกิดโพรงหดตัว (shrinkage porosity) ของงานหล่อทรายทั้ง 3 รูปแบบนั้น คือ (1) ชิ้นงานหล่อทรายกระสวนชิ้นเดียวหน้าผารามมีไส้แบบในตัวไม่มีรูสัน (2) ชิ้นงานหล่อทรายกระสวนชิ้นเดียวหน้าผารามมีไส้แบบในตัวรูสันทรงกระบอกกลวงหนา 8 มิลลิเมตร และ (3) ชิ้นงานหล่อทรายชิ้นงานกระสวนชิ้นเดียวหน้าผารามมีไส้แบบในตัวรูสันทรงกระบอกกลวงหนา 15 มิลลิเมตร ทางผู้วิจัยจะวิเคราะห์เปรียบเทียบผลด้วยเวลาในการเติมเต็มของโลหะเหลว (fill time) เวลาในการแข็งตัว

ของโลหะ (solidification time) และเวลาสิ้นสุดการแข็งตัว ซึ่งสภาวะทั้งสามที่เป็นสภาวะที่มีผลต่อการเกิดโพรงหดตัว (shrinkage porosity) (Anna Gowsalya & E. Afshan, 2021) และจำลองผลของอุณหภูมิของชิ้นงาน (temperature) มาเป็นข้อมูลในการวิเคราะห์ข้อบกพร่องงานหล่อทราย

การจำลองพฤติกรรมชิ้นงานหล่อ

1. การจำลองเวลาในการเติมเต็มโลหะเหลว และการจำลองเวลาในการแข็งตัวของชิ้นงาน และ โพรงหดตัวทั้งสามชิ้นงาน คือ ชิ้นงานหล่อทรายกระสวนชิ้นเดียวหน้าผารามมีไส้แบบในตัวไม่มีรูสัน ชิ้นงานหล่อทรายกระสวนชิ้นเดียวหน้าผารามมีไส้แบบ ในตัวรูสันทรงกระบอกกลวงหนา 8 มิลลิเมตร และ แบบ 15 มิลลิเมตร ดังตาราง 2

2. การจำลองอุณหภูมิช่วงเวลาดำเนินการเติมเต็มโลหะเหลว อุณหภูมิช่วงเวลาดำเนินการเติมเต็ม และ อุณหภูมิช่วงเวลาดำเนินการแข็งตัว ทั้งสามชิ้นงาน คือ ชิ้นงานหล่อทรายกระสวนชิ้นเดียวหน้าผารามมีไส้แบบในตัวไม่มีรูสัน ชิ้นงานหล่อทรายกระสวนชิ้นเดียวหน้าผารามมีไส้แบบในตัวรูสันทรงกระบอกกลวงหนา 8 มิลลิเมตร และ แบบ 15 มิลลิเมตร ดังตาราง 3

3. การวัดอุณหภูมิภายใน โดยจะกำหนดตำแหน่งสำหรับการวัดในตำแหน่งต่าง ๆ ของทั้งสามชิ้นงาน และ แสดงค่าออกมาเป็นตารางข้อมูล เพื่อทำการวิเคราะห์ผลลัพธ์จากการจำลอง โดยตำแหน่งที่จะใช้ในการวัด ผู้วิจัยจะกำหนดเป็นจุด P หมายเลขต่าง ๆ ไว้ในเนื้อชิ้นงาน

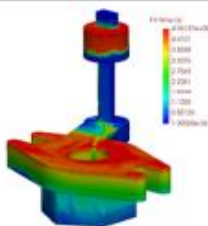
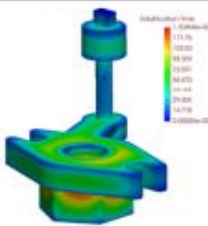
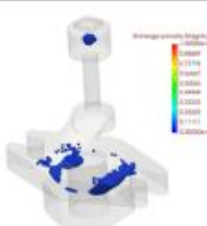
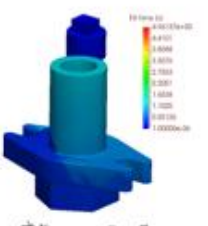
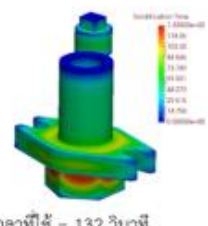
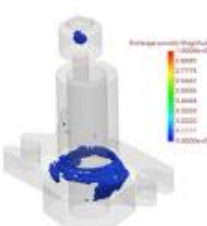
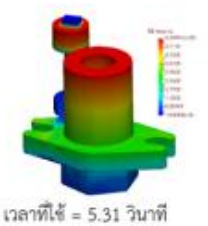
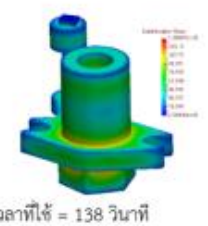
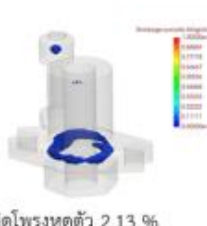
3.2 ชิ้นงานกระสวนชิ้นเดียวหน้าผารามมีไส้แบบในตัวไม่มีรูสัน ดังภาพ 9 และภาพ 10 แสดงค่าอุณหภูมิที่เกิดขึ้น ดังตาราง 4

3.3 ชิ้นงานกระสวนชิ้นเดียวหน้าผารามมีไส้แบบในตัวรูสันทรงกระบอกกลวงหนา 8 มิลลิเมตร ดังภาพ 11 และภาพ 12 แสดงค่าอุณหภูมิที่เกิดขึ้น ดังตาราง 5

3.4 ชิ้นงานกระสวนชิ้นเดียวหน้าผารามมีไส้แบบในตัวรูสันทรงกระบอกกลวงหนา 15 มิลลิเมตร ดังภาพ 13 และภาพ 14 แสดงค่าอุณหภูมิที่เกิดขึ้น ดังตาราง 6

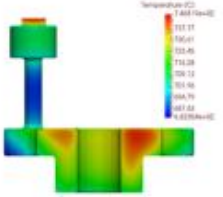
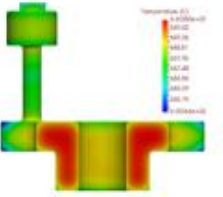
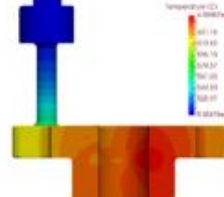
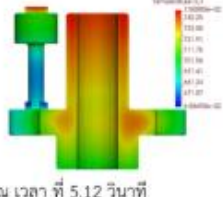
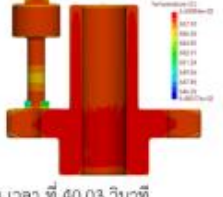
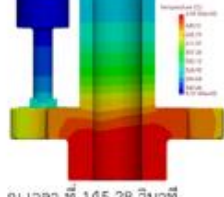
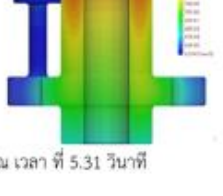
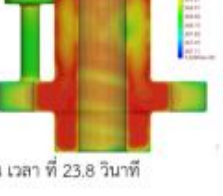
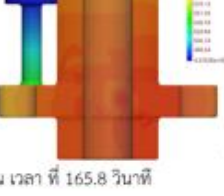
ตาราง 2

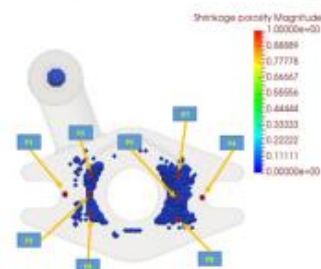
แสดงผลการจำลองเวลาในการเติมเต็มโลหะเหลว (fill time) การจำลองเวลาในการแข็งตัวของชิ้นงาน (solidification time) ทั้งสามชิ้นงาน และโพรงหดตัว (shrinkage porosity)

ชื่อชิ้นงาน/ การจำลอง	การจำลองเวลาใน การเติมเต็มโลหะเหลว (fill time)	การจำลองเวลาใน การแข็งตัวของชิ้นงาน (solidification time)	โพรงหดตัว (shrinkage porosity)
ชิ้นงานที่ 1	 เวลาที่ใช้ = 4.96 วินาที	 เวลาที่ใช้ = 132 วินาที	 เกิดโพรงหดตัว 2.74 %
ชิ้นงานที่ 2	 เวลาที่ใช้ = 4.96 วินาที	 เวลาที่ใช้ = 132 วินาที	 เกิดโพรงหดตัว 2.68 %
ชิ้นงานที่ 3	 เวลาที่ใช้ = 5.31 วินาที	 เวลาที่ใช้ = 138 วินาที	 เกิดโพรงหดตัว 2.13 %

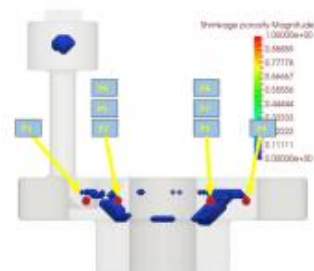
ตาราง 3

แสดงผลการจำลองอุณหภูมิช่วงเวลาสิ้นสุดการเติมน้ำโลหะเหลว อุณหภูมิช่วงเวลาเริ่มต้นการแข็งตัว และอุณหภูมิช่วงเวลาสิ้นสุดการแข็งตัว

ชื่อชิ้นงาน/ การจำลอง	อุณหภูมิช่วงเวลาสิ้นสุดการเติมน้ำโลหะเหลว (temperature at end filling time)	อุณหภูมิช่วงเวลาเริ่มต้นการแข็งตัว (temperature at start solidification time)	อุณหภูมิช่วงเวลาสิ้นสุดการแข็งตัว (temperature at end solidification time)
ชิ้นงานที่ 1	 ณ เวลา ที่ 4.96 วินาที	 ณ เวลา ที่ 67.03 วินาที	 ณ เวลา ที่ 143.87 วินาที
ชิ้นงานที่ 2	 ณ เวลา ที่ 5.12 วินาที	 ณ เวลา ที่ 40.03 วินาที	 ณ เวลา ที่ 145.28 วินาที
ชิ้นงานที่ 3	 ณ เวลา ที่ 5.31 วินาที	 ณ เวลา ที่ 23.8 วินาที	 ณ เวลา ที่ 165.8 วินาที



ภาพ 9 แสดงตำแหน่งจุด P1 P2 P3 P4 P5 P6 P7 และ P8

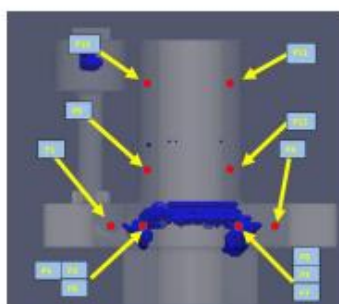


ภาพ 10 แสดงตำแหน่งจุด P1 P2 P3 P4 P5 P6 P7 และ P8

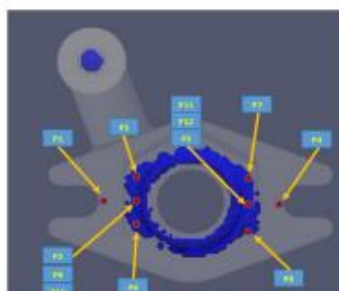
ตาราง 4

เปรียบเทียบอุณหภูมิ ณ เวลา อุณหภูมิสิ้นสุดการเหน้าโลหะ อุณหภูมิเริ่มต้นการแข็งตัว และ อุณหภูมิสิ้นสุดการแข็งตัว
ชิ้นงานหล่อกระสวนขึ้นเคียวหน้าผ่าราบมีไส้แบบในตัวไม่มีรูสัน

จุด	ตารางเปรียบเทียบอุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)				ตำแหน่งบน ชิ้นงาน
	อุณหภูมิสิ้นสุด การเหน้าโลหะ (4.96)	อุณหภูมิเริ่มต้น การแข็งตัว (67.03s)	อุณหภูมิสิ้นสุด การแข็งตัว (143.87s)	การเกิดโพรง หดตัว	
P1	719.48	659.71	632.06	ไม่เกิดโพรงหดตัว	โนชิ้นงาน
P2	734.56	659.98	643.43	เกิดโพรงหดตัว	โนชิ้นงาน
P3	741.77	659.98	651.01	เกิดโพรงหดตัว	โนชิ้นงาน
P4	735.27	659.89	636.27	ไม่เกิดโพรงหดตัว	โนชิ้นงาน
P5	733.86	660.02	633.68	เกิดโพรงหดตัว	โนชิ้นงาน
P6	734.61	660.02	640.76	เกิดโพรงหดตัว	โนชิ้นงาน
P7	742.37	660.03	648.47	เกิดโพรงหดตัว	โนชิ้นงาน
P8	742.11	660.03	650.13	เกิดโพรงหดตัว	โนชิ้นงาน



ภาพ 11 แสดงตำแหน่งจุด P1 P2 P3 P4 P5 P6 P7 P8 P9 P10 P11 และ P12

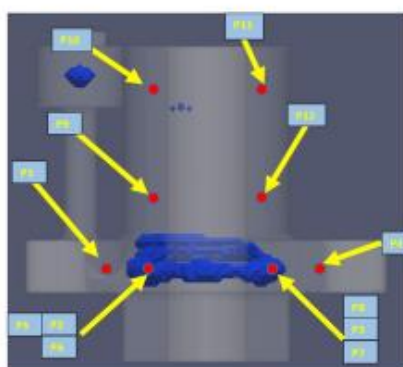


ภาพ 12 แสดงตำแหน่งจุด P1 P2 P3 P4 P5 P6 P7 P8 P9 P10 P11 และ P12

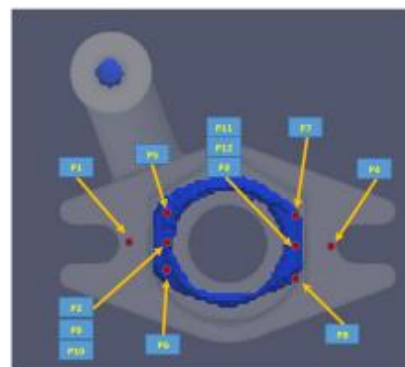
ตาราง 5

เปรียบเทียบอุณหภูมิ ณ เวลา อุณหภูมิสิ้นสุดการเทน้ำโลหะ อุณหภูมิเริ่มต้นการแข็งตัว และ อุณหภูมิสิ้นสุดการแข็งตัว
ชิ้นงานกระสวยขึ้นเตียวน้ำผ่าราบมีไส้แบบในตัวรูล้นทรงกระบอกกลวงหนา 8 มิลลิเมตร

จุด	อุณหภูมิสิ้นสุด การเทน้ำโลหะ (5.12s)	อุณหภูมิเริ่มต้น การแข็งตัว (40.03s)	อุณหภูมิสิ้นสุด การแข็งตัว (145.28s)	การเกิดโพรง หดตัว	ตำแหน่งบน ชิ้นงาน
P1	719.55	659.92	634.58	ไม่เกิดโพรงหดตัว	โนชิ้นงาน
P2	732.79	660.04	647.40	เกิดโพรงหดตัว	โนชิ้นงาน
P3	737.29	660.03	652.79	เกิดโพรงหดตัว	โนชิ้นงาน
P4	731.53	660.00	634.82	ไม่เกิดโพรงหดตัว	โนชิ้นงาน
P5	731.38	660.03	642.93	เกิดโพรงหดตัว	โนชิ้นงาน
P6	733.20	660.03	649.08	เกิดโพรงหดตัว	โนชิ้นงาน
P7	737.72	660.00	652.79	เกิดโพรงหดตัว	โนชิ้นงาน
P8	737.82	660.02	653.28	เกิดโพรงหดตัว	โนชิ้นงาน
P9	731.624	659.64	606.147	ไม่เกิดโพรงหดตัว	โนรูล้น
P10	741.63	659.54	567.72	ไม่เกิดโพรงหดตัว	โนรูล้น
P11	741.54	659.746	567.78	ไม่เกิดโพรงหดตัว	โนรูล้น
P12	731.6	659.65	607.81	ไม่เกิดโพรงหดตัว	โนรูล้น



ภาพ 13 แสดงตำแหน่งจุด P1 P2 P3 P4 P5 P6 P7 P8
P9 P10 P11 และ P12



ภาพ 14 แสดงตำแหน่งจุด P1 P2 P3 P4 P5 P6 P7 P8
P9 P10 P11 และ P12

ตาราง 6

เปรียบเทียบอุณหภูมิ ณ เวลา อุณหภูมิสิ้นสุดการเหนี่ยาโลหะ อุณหภูมิเริ่มต้นการแข็งตัว และ อุณหภูมิสิ้นสุดการแข็งตัว
ชิ้นงานกระสวนขึ้นเดียวหน้าผารามมีไส้แบบในตัวรูล้นทรงกระบอกกลางหนา 15 มิลลิเมตร

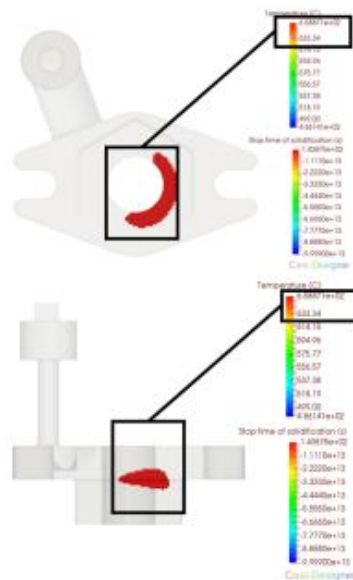
จุด	อุณหภูมิสิ้นสุด การเหนี่ยาโลหะ (5.31s)	อุณหภูมิเริ่มต้น การแข็งตัว (23.8)	อุณหภูมิสิ้นสุด การแข็งตัว (165.8s)	การเกิดโพรง หดตัว	ตำแหน่งบน ชิ้นงาน
P1	696.98	660.00	614.03595	ไม่เกิดโพรงหดตัว	โนชิ้นงาน
P2	711.49	660.00	617.375427	เกิดโพรงหดตัว	โนชิ้นงาน
P3	716.99	659.95	622.123413	เกิดโพรงหดตัว	โนชิ้นงาน
P4	706.33	659.98	613.070007	ไม่เกิดโพรงหดตัว	โนชิ้นงาน
P5	708.45	659.98	614.68103	เกิดโพรงหดตัว	โนชิ้นงาน
P6	711.95	659.96	618.757019	เกิดโพรงหดตัว	โนชิ้นงาน
P7	715.48	659.94	621.425964	เกิดโพรงหดตัว	โนชิ้นงาน
P8	716.10	659.92	622.633972	เกิดโพรงหดตัว	โนชิ้นงาน
P9	721.58	659.76	613.829041	ไม่เกิดโพรงหดตัว	โนรูล้น
P10	734.49	659.65	610.328979	ไม่เกิดโพรงหดตัว	โนรูล้น
P11	734.52	659.43	612.231628	ไม่เกิดโพรงหดตัว	โนรูล้น
P12	722.45	659.54	617.980347	ไม่เกิดโพรงหดตัว	โนรูล้น

การวิเคราะห์ผลลัพธ์จากการจำลอง

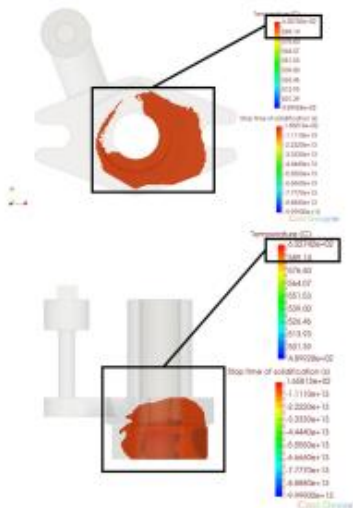
การวิเคราะห์ผลการจำลองที่เกิดขึ้นของ เมื่อพิจารณาจากตาราง 4 5 และ 6 พบว่า สำหรับชิ้นงานหล่อกระสวนขึ้นเดียวหน้าผารามมีไส้แบบในตัวไม่มีรูล้น โดยผลที่เกิดขึ้นในตาราง 4 แสดงให้เห็นว่าภาพแสดงอุณหภูมิในกระบวนการหล่อ เป็นการที่ให้องเห็นภาพรวมของกระบวนการและปัญหาที่อาจเกิดขึ้นในกระบวนการหล่อ ออกแบบนั้น ๆ อย่างชัดเจน โดยจากจุดวัดอุณหภูมิ ณ P3 P7 และ P8 นั้นมีช่วงอุณหภูมิอยู่ในระดับที่สูงเมื่อเทียบกับจุดอื่น ๆ ซึ่งเมื่อตรวจสอบด้วยโปรแกรม Cast designer จะเห็นได้ว่า เป็นบริเวณที่มีการสะสมของความร้อนมากที่สุด โดยเฉพาะในช่วงสภาวะกำลังจะสิ้นสุดการแข็งตัว โดยจากโปรแกรม Cast Designer แสดงผลอุณหภูมิในบริเวณ P3 P7 และ P8 ได้ดังภาพ 15

แต่สำหรับชิ้นงานหล่อทรายขึ้นงานกระสวนขึ้นเดียวหน้าผารามมีไส้แบบในตัวรูล้นทรงกระบอกกลางหนา 8 มิลลิเมตร โดยผลที่เกิดขึ้นในตาราง 5 แสดงให้เห็นว่า ภาพแสดงอุณหภูมิในกระบวนการหล่อ จากจุด วัดอุณหภูมิ ณ P2 P3 P5 P6 P7 และ P8 มีอุณหภูมิสูงกว่าจุดอื่น ๆ ของชิ้นงาน ดังภาพ 16

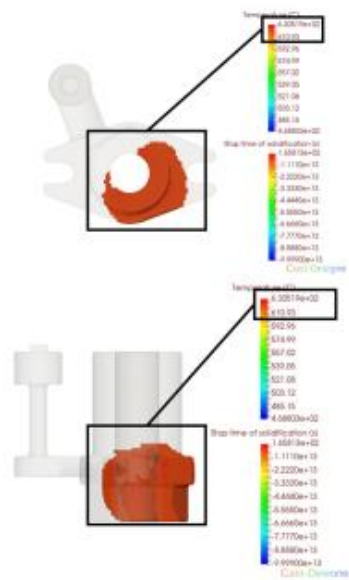
โดยเฉพาะในช่วงสภาวะกำลังจะสิ้นสุดการแข็งตัว แต่ในขณะเดียวกันรูล้นทรงกระบอกกลางหนา 8 มิลลิเมตร ที่ถูกออกแบบมาเพื่อแก้ปัญหาการล้นมีอุณหภูมิที่ต่ำกว่า ซึ่งก็หมายความว่า รูล้นมีการแข็งตัวที่เร็วกว่าชิ้นงาน ทำให้ไม่สามารถแก้ไขปัญหาได้ ซึ่งลักษณะแบบนี้เกิดขึ้นคล้ายคลึงกันกับชิ้นงานกระสวนขึ้นเดียวหน้าผารามมีไส้แบบในตัวรูล้นทรงกระบอกกลางหนา 15 มิลลิเมตร ดังภาพ 17 ซึ่งแสดงผลของอุณหภูมิให้เห็น ดังตาราง 6



ภาพ 15 จุดที่มีการสะสมความร้อนในโซนสีแดงในช่วงการเติมเต็มของโลหะเหลวช่วงอุณหภูมิระหว่าง 633.4 ถึง 658.8 องศา



ภาพ 16 จุดที่มีการสะสมความร้อนในโซนสีแดงในช่วงการเติมเต็มของโลหะเหลวช่วงอุณหภูมิระหว่าง 589.14 ถึง 602.74 องศา



ภาพ 17 จุดที่มีการสะสมความร้อนในโซนสีแดงในช่วงการเติมเต็มของโลหะเหลวช่วงอุณหภูมิระหว่าง 610.93 ถึง 630.51 องศา

จึงสรุปได้ว่าวิธีการแก้ไขปัญหาดังเดิมด้วยการออกแบบรูสันทรงกระบอกกลางทั้งสองขนาดขึ้นมานั้นไม่สามารถที่จะแก้ไขการเกิดโพรงหดตัวในตัวชิ้นงานได้ อันเนื่องมาจากอัตราการเย็นตัวของรูสันมีมากกว่าเนื้อชิ้นงานเอง ดังนั้นในหัวข้อถัดไปผู้วิจัยจะทำการออกแบบวิธีการแก้ปัญหาเพื่อลดปัญหาการเกิดโพรงหดตัวให้ได้นั่นเอง

ออกแบบวิธีการแก้ปัญหา

จากผลการจำลองจะเห็นได้ว่าในทุกสภาวะการหล่อจะมีบริเวณที่มีอุณหภูมิสะสมมากที่สุดอยู่บริเวณใกล้เคียงกัน ซึ่งเป็นส่วนที่มีความหนาของชิ้นงานมากที่สุดเช่นกัน ทำให้เป็นจุดที่มีการเย็นตัวช้าที่สุด เพราะผลในส่วนนี้เองจึงทำให้เกิดการยุบตัวของชิ้นงานเกิดขึ้นด้วย (Muthuraman, Arunkumar & Baskaral, 2017)

ผู้วิจัยจะทำการออกแบบวิธีการแก้ไขปัญหามาโดยการใช้รูสัน (riser) ซึ่งมีบทบาทสำคัญในการจัดการกับ

การหดตัวที่เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการเย็นตัวของชิ้นงานหล่อ โดยรูลันจะช่วยเก็บโลหะหลอมเหลวไว้และปล่อยให้ไหลเข้าสู่ชิ้นงานเมื่อเกิดการหดตัว ซึ่งจะช่วยป้องกันการเกิดโพรงหดตัวภายในชิ้นงานหล่อ โดยเฉพาะในบริเวณที่มีความหนาหรือบริเวณที่ยึดตัวซ้ำกว่าบริเวณอื่น ๆ ประโยชน์ของการใช้รูลันคือการรักษาสกุลของมวลโลหะในระหว่างการหล่อ ซึ่งเมื่อโลหะเย็นตัวและแข็งตัว การหดตัวที่เกิดขึ้นอาจทำให้เกิดช่องว่างภายในชิ้นงานได้ รูลันช่วยเติมเต็มช่องว่างนี้ด้วยโลหะหลอมเหลวที่เก็บอยู่ ทำให้ชิ้นงานไม่มีข้อบกพร่องและมีความแข็งแรงสูงขึ้น นอกจากนี้ รูลันยังช่วยลดการเกิดข้อบกพร่องอื่น ๆ ในชิ้นงานหล่อโดยการควบคุมการหดตัวอย่างมีประสิทธิภาพ การออกแบบและการวางตำแหน่งของรูลันที่เหมาะสมช่วยให้การหล่อเป็นไปอย่างราบรื่น (Loankosonchai, 2001) ลดการสูญเสียวัสดุและเวลาที่ใช้ในการผลิต ทำให้ได้ชิ้นงานที่มีคุณภาพสูงขึ้น ในระยะเวลาที่สั้นลง ดังนั้นรูลันจึงเป็นเครื่องมือสำคัญในการแก้ไขปัญหาการหดตัวในงานหล่อ ทำให้กระบวนการผลิตมีประสิทธิภาพมากขึ้นและช่วยให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพดีขึ้น โดยมีขั้นตอน ดังนี้

1. ออกแบบขนาดของรูลันทรงกระบอกตัน

โดยในการดำเนินการทดลอง ผู้วิจัยจะกำหนดรูปร่างของรูลันเป็นรูลันตันทรงกระบอก โดยจะคำนวณหาขนาดของรูลันจากวิธีการ Modulus Method โดยสมการคือ Modulus-Mc (Loankosonchai, 2001)

$$M_c = V_c / A_c \quad (1)$$

เมื่อกำหนดให้

V_c คือ ปริมาตรของงาน

A_c คือ พื้นที่ผิวของงานที่มีการถ่ายเทความร้อน

โดยสำหรับค่า V_c และ A_c ของชิ้นงานกระสวนขึ้นเดียนหน้าผารามมีไส้แบบในตัวแบบไม่มีรูลัน สามารถคำนวณได้จากโปรแกรม Cast Designer โดยค่า

$$V_c = 215223.89 \text{ mm}^3$$

$$A_c = 38477.73 \text{ mm}^2$$

ดังนั้น ค่า M_c จึงเท่ากับ 5.567 และสำหรับค่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูลันทรงกระบอกนั้นสามารถหาได้

จากสมการ

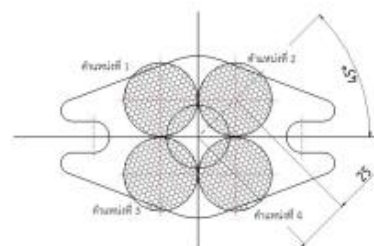
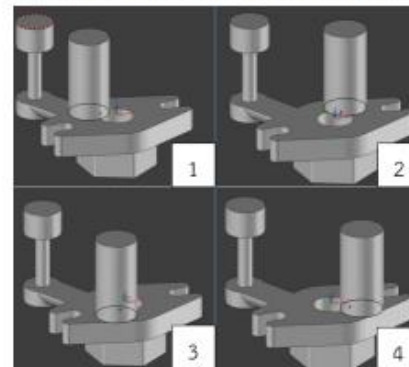
$$D = 6 M_c$$

D จึงเท่ากับ 33.4 mm.

ดังนั้นจึงกำหนดให้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูลันทรงกระบอกตันเท่ากับ 35 มิลลิเมตร และสูงเท่ากับ 70 มิลลิเมตรเท่ากับความสูงของรูเท้นเอง

2. กำหนดตำแหน่งการวางรูลัน

ในการวางตำแหน่งของรูลันนั้น ผู้วิจัยจะทำการจำลองทดสอบทั้งหมด 4 การทดสอบ โดยได้กำหนดตำแหน่งเปรียบเทียบผลลัพธ์ ของตำแหน่งการวางรูลันที่เปลี่ยนไป ตรวจสอบการเกิดโพรงหดตัวที่ชิ้นงาน เริ่มตั้งแต่ ตำแหน่งที่ 1 ตำแหน่งที่ 2 ตำแหน่งที่ 3 และตำแหน่งที่ 4 โดยตรวจสอบโพรงหดตัวที่เกิดขึ้น แบ่งเป็นทั้งหมด 4 ตำแหน่ง ดังภาพ 18



ภาพ 18 แสดงตำแหน่งของการวางรูลันในตำแหน่งที่ 1 ตำแหน่งที่ 2 ตำแหน่งที่ 3 และตำแหน่งที่ 4

ต่อมาจะกำหนดค่าลงใน CPI ของโปรแกรม Cast Designer เพื่อที่จะทำการจำลองผลการทดสอบของทั้ง 4 การทดลอง โดยกำหนดค่าพารามิเตอร์เป็นค่าเดิมเหมือนกับการจำลองชิ้นงานกระสวยขึ้นเตี้ยหน้าผารามมีไส้แบบในตัวอย่างไม่มีรูล้น โดยค่าที่กำหนดทั้งหมดเป็นดังภาพ 19

ผลลัพธ์ของการจำลอง

หลังจากการจำลองได้ผลลัพธ์การเกิดโพรงหดตัวของของการออกแบบรูล้นทั้ง 4 ตำแหน่งนั้นสำหรับการหาค่าโพรงหดตัว ผู้วิจัยจะใช้โปรแกรม Cast Designer ช่วยในการหาอัตราส่วนระหว่างปริมาตรของชิ้นงาน: ปริมาตรของโพรงหดตัวโดย

โดยสำหรับปริมาตรของชิ้นงานนั้นผู้วิจัยได้ใช้โปรแกรม Cast Designer ช่วยในการคำนวณ ได้ค่าปริมาตรของชิ้นงาน โดยไม่รวมรูและทางเข้าเท่ากับ 171.655 cm^3

และสำหรับในการหาค่า Shrinkage Porosity นั้นเราสามารถหาได้ด้วยการใช้โปรแกรม Cast Designer โดยใช้ค่าปริมาตรที่หาได้มากำหนดลงในโปรแกรมในช่องของ Total Volume โดยเราจะคิดเพียงในส่วนของโพรงหดตัวที่เกิดขึ้นในเนื้อชิ้นงานเท่านั้น โดยไม่รวมรู ล้น และทางเข้า จึงสามารถที่จะสรุปผลการหาค่าการเกิดโพรงหดตัวของ การวางรูล้นในแต่ละตำแหน่งออกมา ได้ดังนี้ ดังตาราง 7

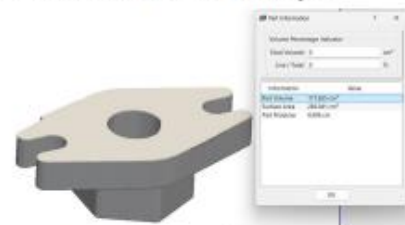
จากตาราง 7 สรุปได้ว่าตำแหน่งของการวางรูล้นตำแหน่งที่ 4 เป็นตำแหน่งที่เกิดโพรงหดตัวน้อยที่สุด โดยมีเปอร์เซ็นต์การเกิดโพรงหดตัวภายในเนื้อชิ้นงานเพียง 0.160 % โดยการผลการจำลองในส่วนของรูล้นตำแหน่งที่ 4 จะแสดงไว้ดังตาราง 8 และตาราง 9

1. การวัดอุณหภูมิภายใน กำหนดเป็นจุด P มีตำแหน่งในการวัดดังต่อไปนี้

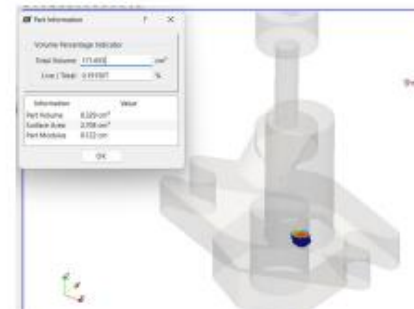
ชิ้นงานรูล้นทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 35 มิลลิเมตร สูง 70 มิลลิเมตร ดังภาพ 22 และภาพ 23 แสดงค่าอุณหภูมิที่เกิดขึ้น ดังตาราง 10



ภาพ 19 แสดงลักษณะการหดตัวของชิ้นงานกระสวยขึ้นเตี้ยหน้าผารามมีไส้แบบในตัวอย่างไม่มีรูล้น



ภาพ 20 แสดงปริมาตรของชิ้นงานจากโปรแกรม Cast Designer=171.655cm3



ภาพ 21 แสดงวิธีการหาค่าโพรงหดตัวด้วยโปรแกรม Cast Designer

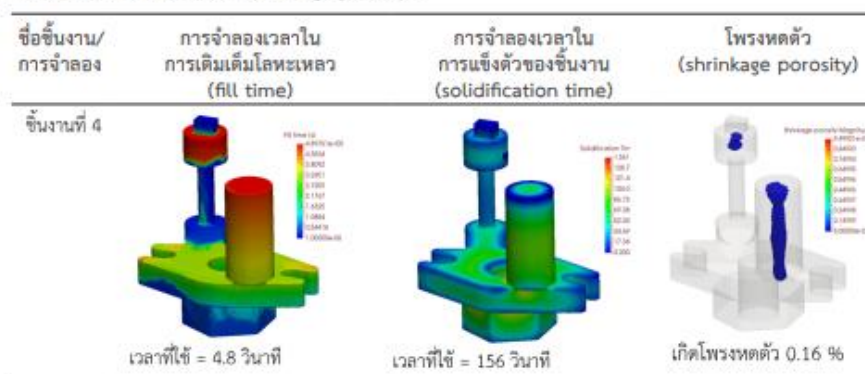
ตาราง 7

สรุปผลการจำลองผลวิเคราะห์การเกิดโพรงหดตัวของชิ้นงานปรับตำแหน่งรูล้น

ตำแหน่งของรูล้น	% เกิดโพรงหดตัว
ตำแหน่งที่ 1	0.69%
ตำแหน่งที่ 2	0.169%
ตำแหน่งที่ 3	0.513%
ตำแหน่งที่ 4	0.160%

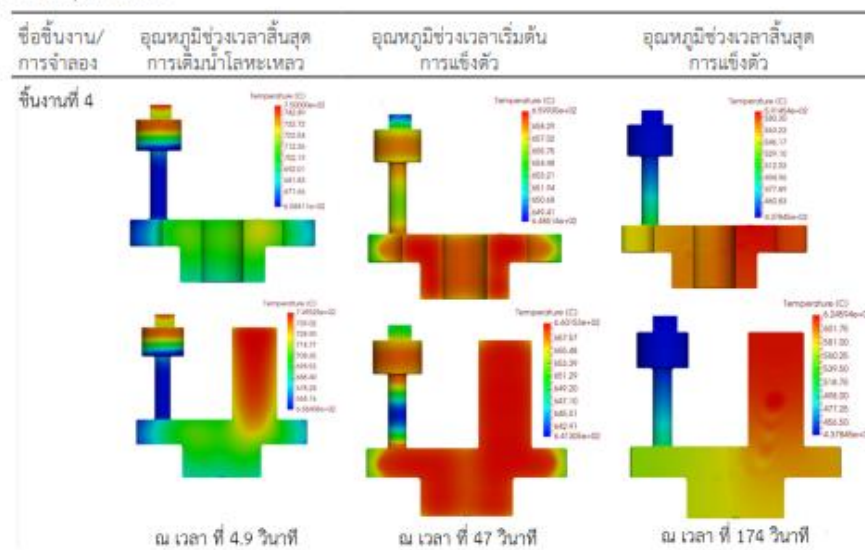
ตาราง 8

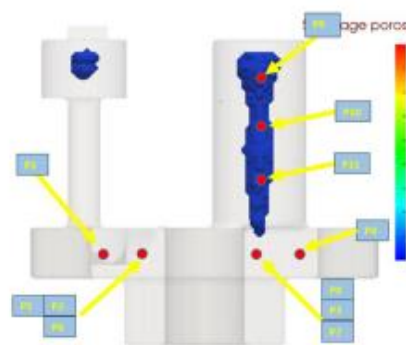
แสดงผลการจำลองเวลาในการเติมเต็มโลหะเหลว (fill time) การจำลองเวลาในการแข็งตัวของชิ้นงาน (solidification time) ทั้งสามชิ้นงาน และ โพรงหดตัว (shrinkage porosity)



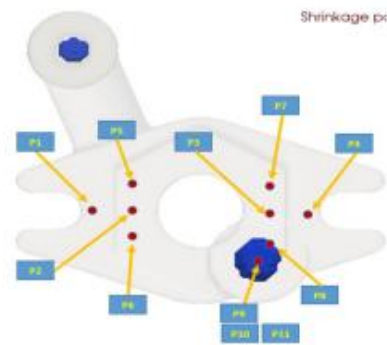
ตาราง 9

แสดงผลการจำลองอุณหภูมิช่วงเวลาดำเนินการเติมน้ำโลหะเหลว อุณหภูมิช่วงเวลาเริ่มต้นการแข็งตัว และอุณหภูมิช่วงเวลาดำเนินการแข็งตัว





ภาพ 22 ตำแหน่งจุด P1 P2 P3 P4 P5 P6 P7 P8 P9 และ P10



ภาพ 23 ตำแหน่งจุด P1 P2 P3 P4 P5 P6 P7 P8 P9 และ P10

ตาราง 10

เปรียบเทียบอุณหภูมิ ณ เวลา อุณหภูมิสิ้นสุดการเทน้ำโลหะ อุณหภูมิเริ่มต้นการแข็งตัว และ อุณหภูมิสิ้นสุดการแข็งตัวชิ้นงาน กระสวนขึ้นเดียวหน้าผ่าราบมีไส้แบบใบตัวรูล้นทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 35 มิลลิเมตร สูง 70 มิลลิเมตร

จุด	ตารางเปรียบเทียบอุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)				ตำแหน่งบนชิ้นงาน
	อุณหภูมิสิ้นสุดการเทน้ำโลหะ (4.9s)	อุณหภูมิเริ่มต้นการแข็งตัว (48.5s)	อุณหภูมิสิ้นสุดการแข็งตัว (183.2s)	การเกิดโพรงหดตัว	
P1	704.70	659.59	564.14	ไม่เกิดโพรงหดตัว	โนชิ้นงาน
P2	714.01	659.71	568.47	ไม่เกิดโพรงหดตัว	โนชิ้นงาน
P3	724.61	659.75	588.69	ไม่เกิดโพรงหดตัว	โนชิ้นงาน
P4	718.00	659.62	588.20	ไม่เกิดโพรงหดตัว	โนชิ้นงาน
P5	714.05	659.85	563.51	ไม่เกิดโพรงหดตัว	โนชิ้นงาน
P6	713.47	659.82	571.24	ไม่เกิดโพรงหดตัว	โนชิ้นงาน
P7	722.56	659.76	581.74	ไม่เกิดโพรงหดตัว	โนชิ้นงาน
P8	727.22	659.94	591.65	ไม่เกิดโพรงหดตัว	โนชิ้นงาน
P9	741.81	659.90	607.40	เกิดโพรงหดตัว	รูล้น
P10	748.74	659.86	619.91	เกิดโพรงหดตัว	รูล้น
P11	745.99	660.00	616.78	เกิดโพรงหดตัว	รูล้น

2. สรุปผลการทดลองขึ้นงานหล่อรูสันทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 35 มิลลิเมตร สูง 70 มิลลิเมตร

เมื่อพิจารณาจากตาราง 10 โดยผู้วิจัยจะทำการเปรียบเทียบอุณหภูมิ ณ เวลา อุณหภูมิสิ้นสุดการเทน้ำโลหะ อุณหภูมิเริ่มต้นการแข็งตัว และ อุณหภูมิสิ้นสุดการแข็งตัว เพื่อทำการวิเคราะห์พฤติกรรมของความร้อนที่เกิดขึ้น

โดยผลที่เกิดขึ้นในตาราง 10 แสดงให้เห็นว่า ภาพแสดงอุณหภูมิในกระบวนการหล่อ จากจุด วัดอุณหภูมิ ณ P1 P2 P3 P4 P5 P6 P7 P8 P9 P10 และ P11 จะแสดงให้เห็นความแตกต่างในการเย็นตัวของชิ้นงานหล่อ ที่มีผลต่อเวลาที่เกิดการแข็งตัวและการเกิดโพรงหดตัว โดยที่บริเวณที่เกิดการเกิดโพรงหดตัว จะมีการเย็นตัวที่ช้ากว่าจุดที่ไม่เกิด คือ จุด P9 P10 โดยเฉพาะในช่วงเวลาสิ้นสุดการแข็งตัว ซึ่งผลการจำลองออกมาแสดงให้เห็นถึง “จุดร้อน” ซึ่งมีการกล่าวถึงผลของจุดร้อน ในงานวิจัยเรื่อง Minimization of Shrinkage Porosity in A Sand Casting Process By Simulation In AUTOCAD-X Software with Experimental Validation by Destructive testing Gajbhiye, Choudhari, Raut, Narkhede and Bhandarkar (2014) ว่า “จุดร้อน” มีผลต่อการเกิดโพรงหดตัวและแก้ไขได้โดยการวางอุปกรณ์คลายความร้อนไว้บริเวณนั้น Gajbhiye, Choudhari, Raut, Narkhede and Bhandarkar (2014) จึงช่วยแก้ไขปัญหาการเกิดโพรงหดตัวของชิ้นงานได้นั่นเอง แตกต่างจากวิธีของงานวิจัยนี้ที่ใช้รูสันในการย้ายจุดร้อนจากในเนื้อชิ้นงานมาไว้ที่รูสันเพื่อแก้ไขปัญหา

สำหรับการแก้ไขโดยการออกแบบรูสันไว้ที่ตำแหน่งที่ 4 ผลลัพธ์ของการเกิดโพรงหดตัวเหลือเพียง เกิดโพรงหดตัว 0.16 % เท่านั้น และหากพิจารณาจากตาราง 7 ซึ่งเป็นสรุปการเกิดโพรงหดตัวของชิ้นงานเมื่อวางรูสันในตำแหน่งที่แตกต่างกันแล้วนั้นจะเห็นได้ว่า รูสันที่อยู่ใกล้จุดสะสมความร้อนของชิ้นงานนั้น มีแนวโน้มที่จะเกิดโพรงหดตัวน้อยกว่า จุดที่อยู่ห่างจากจุดสะสมความร้อนมากกว่า เปรียบเทียบได้ระหว่างตำแหน่งการวางรูสันที่ 1 และ ตำแหน่งการวางรูสันที่ 3 จะมีค่าเปอร์เซ็นต์การเกิดโพรงหดตัวที่มากกว่า ตำแหน่งการวางที่ 2 และที่ 4 เนื่องจากอยู่ห่างจากจุดสะสมความร้อนมากกว่านั่นเอง

การอภิปรายผลและสรุปผล

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของความร้อนที่มีผลต่องานหล่อ ในเรื่องของข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นจากพฤติกรรมของความร้อน โดยใช้โปรแกรมวิเคราะห์จำลองสถานการณ์ การหดตัวและการพฤติกรรมของความร้อนในชิ้นงานทดสอบ และเพื่อลดข้อบกพร่องของการหดตัวที่เกิดขึ้นภายในชิ้นงาน โดยผลจากการวิจัยที่เกิดขึ้นทำให้สามารถยืนยันได้ว่า การเกิดโพรงหดตัวและพฤติกรรมของความร้อนภายในตัวชิ้นงานมีความเกี่ยวข้องกัน

งานวิจัยนี้ได้นำเสนอผลลัพธ์การทดสอบเปรียบเทียบกันสองรูปแบบระหว่างชิ้นงานออกแบบดั้งเดิม คือ ชิ้นงานหล่อทรายกระสวนขึ้นเดียวหน้าผารามีไส้แบบในตัวไม่มีรูสัน ชิ้นงานหล่อทรายกระสวนขึ้นเดียวหน้าผารามีไส้แบบในตัวรูสันทรงกระบอกกลางหนา 8 มิลลิเมตร และชิ้นงานหล่อทรายขึ้นงานกระสวนขึ้นเดียวหน้าผารามีไส้แบบในตัวรูสันทรงกระบอกกลางหนา 15 มิลลิเมตร และชิ้นงานปรับปรุงแก้ไขรูสันรูปแบบใหม่ คือ ชิ้นงานรูสันทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 35 มิลลิเมตร สูง 70 มิลลิเมตร โดยจากผลการจำลองทั้งหมดจะเห็นได้ว่า อุณหภูมิภายในตัวชิ้นงานที่ไม่เท่ากันภายในชิ้นงานทั้งหมดนั้น ส่งผลต่อตำแหน่งของการเกิดโพรงหดตัวอย่างเห็นได้ชัดเจน และการออกแบบรูสันที่ขนาดและตำแหน่งการวางที่ไม่ถูกต้องนั้น ไม่สามารถที่จะแก้ไขปัญหาการเกิดโพรงหดตัวได้

โดยภาพรวมแล้วการใช้โปรแกรมจำลอง Cast Designer ช่วยให้ผู้วิจัยหรือวิศวกร สามารถวิเคราะห์ผลลัพธ์จากการหล่อทรายขึ้นงานได้ดีขึ้น ลดข้อบกพร่อง อีกทั้งยังช่วยให้ออกแบบรูสันในตำแหน่ง และขนาดที่เหมาะสม จะช่วยแก้ไขปัญหาการเกิดโพรงหดตัวภายในตัวชิ้นงานได้ ประโยชน์ที่ตามมา คือ สามารถช่วยลดเวลา ลดต้นทุนในการทดสอบและผลิตชิ้นงานได้มีคุณภาพมากขึ้นนั่นเอง โดยภาพรวมแล้วการใช้โปรแกรมจำลอง Cast Designer ช่วยให้ผู้วิจัยหรือวิศวกร สามารถวิเคราะห์ผลลัพธ์จากการหล่อทรายขึ้นงานได้ดีขึ้น ลดข้อบกพร่อง อีกทั้งยังช่วยให้ออกแบบรูสันในตำแหน่ง และขนาดที่เหมาะสม จะช่วยแก้ไขปัญหาการเกิดโพรงหดตัวภายในตัวชิ้นงานได้ ผลผลิตชิ้นงานได้มีคุณภาพมากขึ้นนั่นเอง

กิตติกรรมประกาศ

สำหรับงานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากวิทยาลัย
เทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า
พระนครเหนือ ตามสัญญาเลขที่ CIT-2023-GRAD-32

และบริษัท ไพร์ตี คอร์ปอเรชั่น จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์
สนับสนุนโปรแกรม Cast Designer เป็นเครื่องมือสำหรับ
การทำวิจัยในครั้งนี้



References

- Anna Gowsalya, L., & E. Afshan, M. (2021). *Heat Transfer Studies on Solidification of Casting Process*. London: IntechOpen Limited.
- Atchimarangsi, S. (2008). *Reduction of shrinkage defects in cast components for truck frames* (Master's thesis). King Mongkut's University of Technology Thonburi. Bangkok. (in Thai)
- 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 AUTOCST-X Software with experimental validation by destructive testing. *International journal of modern engineering research (IJMER)*, 4(5), 18–27. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:197645910>
- Gunasegaram, D. (2009). Identification of critical factors affecting shrinkage porosity in permanent mold casting using numerical simulations based on design of experiments. *Journal of Materials Processing Technology*, 209(3), 1209–1219. doi:10.1016/j.jmatprotec.2008.03.044
- Jalouli, Z., Caillaud, A., Artozoul, J., Ammar, A., & El-Abidi, A., (2021). Modelling of shrinkage formation in casting by the phase field method. *International Journal of Material Forming*, 14(5), 885-899. doi: 10.1007/s12289-020-01602-8
- Jarosz, R., Kietbus, A., & Gryc, A. (2018). Application of computer simulation in EV31A magnesium alloy casting process using MAGMASoft software. *Preprints, 2018*, 2018040108. <https://doi.org/10.20944/preprints201804.0108.v1>
- Loankosonchai, S. (2001). *Design of gating and riser system for aluminium casting* (Master's thesis). King Mongkut's University of Technology Thonburi. Bangkok. (in Thai)
- Mahomed, N. (2020). *Shrinkage porosity in steel sand castings: Formation, classification and inspection*. London: IntechOpen Limited.
- Muthuraman, V., Arunkumar, S., & Baskarlal, V. P. M. (2017). Modelling and simulation analysis of metal castings. *ARPJ Journal of Engineering and Applied Sciences*, 12(6), 1877-1879. <https://bit.ly/3YYCqs4>

- ParthLakum, Gondaliya, R. D., & Chauhan, H. N. (2016). Shrinkage porosity & temperature distribution analysis of air cooled cylinder liner block of Grey cast iron –ASTM class 35. *International Journal of Advance Research and Innovative Ideas in Education*, 2(3), 596-557.
<https://bit.ly/3AM7bap>
- Rathod, H., Jay K. Dhulia, J. K., & Maniar, N. P. (2017). Prediction of shrinkage porosity defect in sand casting process of LM25. *IOP Conference Series Materials Science and Engineering*, 225(1), 012237. doi:10.1088/1757-899X/225/1/012237
- 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/files/serve.php?FID=24839>
- Santhi, S., Sakri, S. B., Hanumantha Rao, D., & Sundararajan, S. (2012). Estimation of shrinkage porosity of a cast aluminium alloy. *I-manager's Journal on Mechanical Engineering*, 2(2), 19-25.
<https://doi.org/10.26634/jme.2.2.1567>
- Tavakoli, R. (2014). On the prediction of shrinkage defects by thermal criterion functions. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 74, 569–579.
<https://doi.org/10.1007/s00170-014-5995-0>
- Wattanabupa, S. (2020). *Design of gating systems in aluminium casting for sand mold* (Bachelor's thesis). King Mongkut's University of Technology North. Bangkok. (in Thai)



การออกแบบระบบรูเทในงานหล่ออลูมิเนียมสำหรับโพรงแบบทราย (Spure System Design In Aluminum Casting For Sand Burrows)

ภาวิชัย จันทสร, สอพร ชatakอม, พติพร พิมล, สุวรรณกาญจน์, เพ็ญจารัตน์ สายศิริรัตน์*, พงศกร ขวัญทอง
ภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมเครื่องกล วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
อีเมล: penyarat.s@cit.kmutnb.ac.th*

Pawat Chantasorn, Sathaporn Chatakorn, Patpimol Suwankan, Penyarat Saisirirat*, Phongsakorn Kwanthong
Department of Mechanical Engineering Technology College of Industrial Technology,
King 's Mongkut University of Technology North Bangkok
E-mail: penyarat.s@cit.kmutnb.ac.th*

บทคัดย่อ

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์ เพื่อออกแบบระบบรูเทในงานหล่ออลูมิเนียมในโพรงแบบทราย สำหรับกระบวนการขึ้นรูปพื้นฐานในงานหล่อโลหะ โดยตัวแปรที่ได้กำหนดในการออกแบบ คือ ความสูงของรูเท พื้นที่หน้าตัดรูเท พื้นที่หน้าตัดแอ่งพัก การศึกษาได้ทำการทดลองเทหล่อขึ้นงานจริงและวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Cast-Designer ซึ่งค่าผลการจำลองได้แก่ เวลาในการบ่มเติมโลหะเหลว พฤติกรรมการไหลของโลหะเหลว เวลาการแข็งตัวของโลหะและการเกิดโพรงหดตัวของขึ้นงาน ผู้วิจัยได้ทำการวางรูเททรงกระบอกกวางในตำแหน่งบริเวณที่เกิดการหดตัวคือรอบๆ โต้แบบ เพื่อเป็นแนวทางลดการหดตัวของขึ้นงานหล่อจริง โดยปรับเปลี่ยนขนาดของรูสลับ แบ่งเป็น รูสลับทรงกระบอกกวางหนา 8 และ 15 มิลลิเมตร ซึ่งผลการจำลองด้วยโปรแกรม Cast-Designer ทั้ง 2 รูปแบบนั้น มีผลแตกต่างกัน คือ ผลการจำลองพฤติกรรมการไหลในการเติมเติมของโลหะเหลวในรูแบบรูสลับทรงกระบอกกวางหนา 8 และ 15 มิลลิเมตร มีค่าเวลาที่เติมเติมที่ 4.03 และ 4.12 วินาที ตามลำดับ จากผลการจำลองพฤติกรรมการไหลให้เพิ่มจำนวนรูสลับทรงกระบอกกวางขนาด 15 มิลลิเมตร มีเวลาในการเติมเติมช้า เนื่องจากมีปริมาตรขึ้นงานมาก ผลการจำลองพฤติกรรมการแข็งตัว ในรูแบบรูสลับทรงกระบอกกวางหนา 8 และ 15 มิลลิเมตร มีค่าเวลาในการแข็งตัวที่ 458 และ 450 วินาที ตามลำดับ เนื่องจากรูสลับทรงกระบอกกวางหนา 15 มิลลิเมตร มีผิวที่สัมผัสกับอากาศมากขึ้นทำให้การถ่ายเทความร้อนได้มากขึ้นตาม มีผลให้ใช้เวลาในการแข็งตัวลดลง ผลการจำลองพฤติกรรมการหดตัวในรูแบบรูสลับทรงกระบอกกวางหนา 8 และ 15 มิลลิเมตร มีค่าการหดตัวที่ 1.92 และ 0.44 เปอร์เซ็นต์

คำสำคัญ: งานหล่อ, จำลองพฤติกรรม, โพรงแบบทราย, ระบบรูเท

Abstract

This work aims to design gating systems in aluminum sand casting for the prototypes of the basic shape of self-core type solid pattern. The design variables are sprue height, pouring basin cross sectional area and cross-sectional areas of sprue. In this research, a challenge is taken to remodel a gating system by design of casting experiments on real specimens and analyzing behavioral simulations with Casting-Designer software. The simulation result values all the time to fill the liquid metal, liquid metal flow behavior, solidification time and shrinkage porosity. The researchers placed a hollow cylindrical overflow in the position of the contractile region around the filament to reduce the shrinkage of the actual casting. By changing the size of the overflow hole, it is divided into hollow cylinder overflow holes with thickness 8 and 15 mm. The results of the simulation with the program Cast-Designer both types have different. The simulations results of filling time behavior of liquid metal in form of hollow cylinder overflow holes 8 and 15 mm thick had filling times of 4.03 and 4.12, respectively. The simulation results showed that the 15 mm hollow cylindrical overflow bore specimen had a slow filling time due to the large volume of work pieces. The results of the simulation of coagulation behavior in the hollow cylinder overflow form 8 and 15 mm thick, the solidification times were 458 and 450 sec, respectively. Due to the hollow cylinder overflow hole 15 mm thick, the surface is exposed to more air, thus a result, the time for hardening is reduced. The results of simulation of shrinkage behavior in hollow cylinder overflow holes 8 and 15 mm thick had shrinkage values of 1.92 and 0.44 percent..

Keywords: Casting, Sprue system, Sand casting, Simulation behavior

1. บทนำ

กระบวนการขึ้นรูปโลหะในอุตสาหกรรม โดยมีกรรมวิธีผลิตงานหล่อโลหะเป็นกระบวนการผลิตอย่างหนึ่งของวงการอุตสาหกรรม ที่มีบทบาทและความสำคัญมาอย่างยาวนาน ในการผลิตชิ้นส่วนอะไหล่ อุปกรณ์เครื่องมือต่างๆ สิ่งเกิดได้ว่าอุตสาหกรรมต่างๆ ไม่ว่าจะเป็นอุตสาหกรรมยานยนต์ อุตสาหกรรมผลิตชิ้นส่วนประกอบเครื่องมือเครื่องจักรกล ก็ต้องพึ่งพาเทคโนโลยีต่างๆ ของอุตสาหกรรมงานหล่อโลหะเป็นลำดับแรกทั้งสิ้น เนื่องจากเป็นกระบวนการผลิตพื้นฐานที่จะมารองรับการพัฒนาการขยายตัวให้กับอุตสาหกรรมหลักและประเภทอื่นๆ จากสภาพงานหล่อโลหะในอุตสาหกรรม พบว่ายังใช้แบบกระสวยหล่อในพื้นหล่อทรายด้วยรูปแบบกระสวยชนิดต่างๆ ซึ่งแต่ละชนิด ใช้วัสดุในการสร้างกระสวยแตกต่างกัน เช่น กระสวยขึ้นเดียว กระสวยแยกชิ้น กระสวยแยกชิ้นที่มีไส้แบบ กระสวยชนิดพิเศษต่างๆ มีผลต่อการกำหนดตำแหน่งและขนาดของรูเท ทางเดินโลหะเหลวเข้าสู่โพรงแบบขึ้นงาน รวมทั้งหน้าผาของชิ้นงาน วัสดุที่เลือกใช้หล่อเป็นอลูมิเนียม ซึ่งโดยทั้งหมดเป็นเรื่องของการออกแบบระบบทางเข้าโลหะเหลวจากการวางหน้าผาของกระสวยที่ดี ส่งผลให้สามารถเติมโลหะเหลวเข้าสู่โพรงแบบได้เต็มสมบูรณ์ ทำให้สามารถผลิตชิ้นงานตามที่ได้ออกแบบไว้ทางผู้วิจัยจึงได้นำหลักการในการออกแบบระบบรูเทของโลหะเหลวด้วยกระสวยต้นแบบพื้นฐาน เพื่อนำไปศึกษาวิเคราะห์หาวิธีการกำหนดระบบทางเข้าโลหะเหลวที่ดีของกระสวยนำมาใช้เป็นต้นแบบในการออกแบบงานหล่อทรายที่ดี เพื่อการศึกษาต่อไปในอนาคต โดยมีการวิจัยที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้ดังต่อไปนี้

พัชรพิมล สุวรรณกาญจน์ (1) ได้ทำการศึกษากการออกแบบระบบป้อนเติมโลหะเหลวสำหรับเหล็กกล้าไร้สนิมที่หล่อด้วยกระบวนการอินเวตเมนต์ เพื่อหาวิธีการผลิตที่มีคุณภาพดีและมีงานมีความละเอียดสูง โดยพบข้อบกพร่องในผลิตภัณฑ์ เช่น การไหลไม่เต็ม รูปทรง ตามดและโพรงหลุด เป็นต้น จากการศึกษานี้ยังชี้ให้เห็นถึงงานหล่อเช่น อลูมิเนียมในการหล่อ อลูมิเนียมการอบแม่พิมพ์ เวลาในการอบแม่พิมพ์ อัตราการเท และเวลาในการปล่อยให้เย็นตัว โดยใช้โปรแกรม Cast-Designer วิเคราะห์การไหลของโลหะเหลวเข้าสู่แม่พิมพ์หล่อ ซึ่งออกแบบหน้าตัดทางวิ่งของโลหะเหลวมี 4 แบบ คือ หน้าตัดสี่เหลี่ยม หน้าตัดหกเหลี่ยม หน้าตัดแปดเหลี่ยมและหน้าตัดกลม จากนั้นศึกษาความแตกต่างของมุมทางเข้าโลหะเหลวของชิ้นงานที่ 0, 30, 45 และ 80 องศา พบว่าแบบหล่อหน้าตัดกลมใช้เวลาในการเติมโลหะเหลวน้อยที่สุด การจำลองการเกิดโพรงอากาศหลุดตัวในแต่ละแบบไม่แตกต่างกัน ผลวิเคราะห์จากการไหลของโลหะเหลวให้เต็มแบบแม่พิมพ์ อลูมิเนียมการเทโลหะเหลวและเวลาการแข็งตัวของโลหะ พบว่าการเทโลหะเหลวไหลเข้าจนเต็มแบบแม่พิมพ์ เป็นปัจจัยสำคัญในการเกิดความเสี่ยงภายในชิ้นงานหล่อ ซึ่งเป็นผลมาจากการออกแบบระบบทางเข้าของโลหะเหลวทั้งสิ้น

ศุภฤทธิ์ ส่วนโกศลชัย (2) ได้ทำการศึกษากการออกแบบระบบจ่ายน้ำโลหะและรูสำหรับงานหล่ออลูมิเนียมใช้การจำลองด้วยคอมพิวเตอร์ช่วยในการวิเคราะห์และออกแบบระบบงานหล่อโดย

โปรแกรมที่นำมาใช้คือ MAGMASOFT ในการดำเนินการแบ่งเป็น 2 ส่วน ส่วนแรกเป็นการตรวจสอบฐานข้อมูลโปรแกรม MAGMASOFT สามารถนำมาใช้กับงานจริงได้หรือไม่ ชิ้นงานทดสอบที่เลือกคือ ชิ้นงานรูปทรงกระบอก โดยทำการเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิของงานหล่อจริงกับผลที่ได้จากการจำลอง และทำการเปรียบเทียบลักษณะของโพรงหลุดที่เกิดขึ้นจริงกับผลการจำลอง ส่วนที่ 2 เป็นการวิเคราะห์ชิ้นงานหล่อที่เลือก คือ ตั๋วน้ำหนัก โดยทำการเปรียบเทียบลักษณะของโพรงหลุดที่เกิดขึ้นจริงกับผลการจำลอง สำหรับการทดลองทั้งสองส่วนเราเลือกใช้วัสดุหล่อเป็นอลูมิเนียมเกรด A356 โดยใช้กระบวนการหล่อแบบหล่อทรายขึ้น นอกจากนี้ได้ทำการจำลองงานจริงจากภาคอุตสาหกรรม ซึ่งเป็นงานหล่ออลูมิเนียม โดยกระบวนการหล่อด้วยความดันต่ำ (low pressure die casting) แล้วใช้อลูมิเนียมเกรด A356 เพื่อทำการวิเคราะห์และปรับปรุงการออกแบบแม่พิมพ์ ผลของการศึกษาพบว่า ลักษณะของโพรงหลุดที่เกิดขึ้นจริงสอดคล้องกับผลการจำลองโดยใช้คอมพิวเตอร์และสามารถวิเคราะห์การเกิดข้อบกพร่องได้อย่างถูกต้อง สามารถปรับปรุงแม่พิมพ์เพื่อลดปัญหาได้อย่างถูกต้องรวดเร็ว

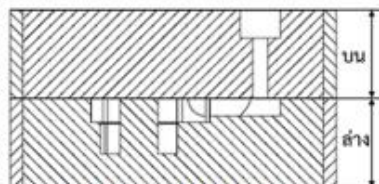
วิโรจน์ ศรีวิศวาณิชชัย (3) ได้ทำการศึกษากการแข็งตัวของงานหล่อสามารถจำลองได้โดยอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่สร้างขึ้นจากการสมการการถ่ายเทความร้อนและกฎการแข็งตัวของซึ่งมีประโยชน์ในการออกแบบงานหล่อและลดการลองผิดลองถูกได้อย่างมาก วิธีการคำนวณค่าจากแบบจำลองทำได้หลายอย่าง เช่น ไฟไนต์ดิฟเฟอเรนซ์ ไฟไนต์เอเลเมนต์หรือวิธีอื่นๆ ความก้าวหน้าของเทคโนโลยีคอมพิวเตอร์ทำให้มีการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับงานหล่อมากขึ้น ในการวิจัยครั้งนี้ได้สร้างแบบจำลองพฤติกรรมของแข็งตัวของงานหล่อโดยอาศัยสมการการถ่ายเทความร้อน 2 มิติ วิธีการจำลองได้อาศัยการแปลงสมการถ่ายเทความร้อนให้อลูมิเนียมอยู่ในรูปแบบของอุณหภูมิที่ดัดแปลง (modified temperature) และปริมาณความร้อน (heat content) หรือเอนทัลปี (enthalpy) ซึ่งจะทำให้แก้ปัญหาการแปรเปลี่ยนของคุณสมบัติของโลหะเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลงและทำให้สมการถ่ายเทความร้อนเป็นสมการอนุพันธ์เชิงเส้นง่ายต่อการคำนวณเชิงตัวเลข การแก้สมการอนุพันธ์เชิงเส้นไฟไนต์ดิฟเฟอเรนซ์แบบเอกซพลิต (explicit finite difference method) ผลที่ได้จากการคำนวณจะเป็นค่าอุณหภูมิที่มีค่าแตกต่างกัน ในงานหล่อและแบบหล่อที่ระยะเวลาต่างๆ หลังการเทการแสดงผลสามารถทำได้โดยเป็นตารางค่าอุณหภูมิหรือในรูปของกราฟแสดงค่าอุณหภูมิเทียบกับเวลา ณ ตำแหน่งที่ต้องการ เพื่อทดสอบความถูกต้องของแบบจำลองและการคำนวณในการวิจัยครั้งนี้ได้ทำการหล่อชิ้นงานและวัดอุณหภูมิ โดยใช้วัสดุโลหะในการทดลองคือ เหล็กกล้าสเตนเลส 300 และอลูมิเนียมผสมเบอร์ 356 จากการเปรียบเทียบผลจากการทดลอง และผลการทดลองพบว่ามีความใกล้เคียงกันจากการศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการสร้างชิ้นงานหล่อโลหะ ในด้านการออกแบบการคำนวณ และปัจจัยตัวแปรต่างๆ ทำให้สามารถออกแบบและตั้งขั้นตอนในการทดลองหล่อชิ้นงานของกระสวย

2. การดำเนินงาน

ในขั้นตอนในการออกแบบระบบรูปในงานหล่อลื่นมีแบบสำหรับ
โพรงแบบทรายที่เหมาะสมกับกระสวยต้นแบบรูป โดยได้มีวิธีการ
ดำเนินการวิจัยจากการศึกษาข้อมูลกระบวนการปฏิบัติงานหล่อโลหะ
พื้นฐาน จากนั้นนำมาวิเคราะห์และกำหนดระบบรูปให้มีการออกแบบ
ระบบรูปที่เหมาะสมงานหล่อลื่นมีแบบทั้งการคำนวณและกำหนดตัว
แปรที่ส่งผลต่องานหล่อด้วยโพรงแบบทราย แล้วทำการวิเคราะห์
ประสิทธิภาพของโพรงแบบทรายที่มีขนาดรูทรงแท่งทำให้ได้ชิ้นงาน
หล่อสมบูรณ์ที่สุด โดยใช้วัสดุลื่นมีแบบผสมเกรต 100 ในการทดลอง
ครั้งนี้ ใช้ข้อมูลภูมิโหลหะเหลวที่ 70 องศาเซลเซียส โดยรูปร่างชิ้นงาน
หล่อรูป มีปัญหาในการยุบตัว จึงได้กำหนดระบบรูปและรูสไลด์
รูปแบบต่างๆ เพื่อหาแนวทางแก้ไข โดยปัญหาชิ้นงานหล่อไม่สมบูรณ์
คือ ชิ้นงานมีผิวงานเกิดรอยยุบตัวบริเวณรอบๆ ใกล้กับรูของชิ้นงาน
เนื่องจากการหดตัว ดังรูปที่ 2



รูปที่ 1 กระสวยต้นแบบที่ใช้ทำการทดลอง



รูปที่ 2 ระบบทางเข้าของโลหะเหลวในพิมพ์หล่อ

จากการเทหล่อชิ้นงานจริงที่ได้จากการออกแบบระบบทางเข้าชิ้นงาน
ของกระสวยชิ้นเดียวหน้าม้าราบมีได้แบบในต้นแบบ สามารถแสดงผล
การทดลองเทหล่อจริงได้ทั้งหมด 3 แบบ โดยมีผลการทดลองออกมา
ดังนี้ ลักษณะชิ้นงานเทหล่อจริงกระสวยชิ้นเดียวหน้าม้าราบมีได้แบบใน
ตัวหลังจากเทหล่อจริง ชิ้นงานมีการหดตัวบริเวณตรงกลางรอบๆ ได้
แบบของชิ้นงาน ซึ่งบริเวณตรงกลางเป็นจุดที่มีความหนาสูงสุดของ
ชิ้นงานจึงทำให้บริเวณตรงกลางรอบๆ ได้ แบบเป็นจุดร้อนของชิ้นงาน
จากสาเหตุการหดตัวของชิ้นงานนั้นเกิดจากการเย็นตัวของชิ้นงานซึ่ง
การเย็นตัวของชิ้นงานจะเย็นตัวจากภายนอกเข้าสู่ภายในทำให้บริเวณ
ชิ้นงานที่มีความหนาที่สุดเย็นตัวช้าที่สุดจึงเกิดการหดตัวดังกล่าว



รูปที่ 3 ชิ้นงานหล่อจริงกระสวยชิ้นเดียวหน้าม้าราบมีได้แบบในตัว



รูปที่ 4 การผ่าชิ้นงานหล่อจริงกระสวยชิ้นเดียวหน้าม้าราบมีได้แบบในตัว

จากการผ่าชิ้นงานหล่อจริงกระสวยชิ้นเดียวหน้าม้าราบมีได้แบบในตัว
ทำให้เห็นระยะความยาวของการหดตัวอยู่ที่ ตำแหน่ง 24 ถึง 104 ใน
แนวแกน X คิดเป็น 80 มิลลิเมตร ระยะความกว้างที่ตำแหน่ง 13 ถึง 75
ในแนวแกน Y คิดเป็น 62 มิลลิเมตร ระยะความลึกในแนวแกน Z คิด
เป็น 6 มิลลิเมตร

2.1 การวิเคราะห์ผลหาสาเหตุของปัญหาจุดบกพร่องในงานหล่อ และแนวทางแก้ไข

แนวทางการแก้ไขจุดบกพร่อง จากผลการทดลองข้างต้นของ
กระสวยชิ้นเดียวหน้าม้าราบมีได้แบบในตัว จะเห็นได้ว่าชิ้นงานหลังจาก
การเทหล่อจริงแล้วเกิดปัญหาคือการหดตัวของชิ้นงาน ในบริเวณตรง
กลางชิ้นงาน ซึ่งเป็นจุดที่มีความหนาที่สุดของชิ้นงานหล่อกระสวยชิ้น
เดียวหน้าม้าราบมีได้แบบในตัว ซึ่งมีได้แบบในตัวบริเวณตรงกลาง
ชิ้นงานหล่อ ทำให้บริเวณตรงกลางชิ้นงานเป็นจุดรวมความร้อนที่สะสม
อยู่ซึ่งยิ่งถ่ายเทความร้อนออกไปอย่างช้าๆ จนทำให้เกิดการหดตัวเป็น
รูปร่างกลมรอบๆ ได้แบบ หากสังเกตให้ดูจะเห็นว่ารอบนอกเส้นเกิดการ
ยุบตัวเป็นขอบรูปทรงแปลกตึงรูปร่างของชิ้นงานที่อยู่ด้านล่าง การแก้ไข
ปัญหาคือการหดตัวของชิ้นงาน คือ วางเส้นตรงบริเวณการยุบตัวเป็น
รูปร่างตามรอยการหดตัวของชิ้นงานหล่อ เพื่อให้เกิดการดึงเนื้อ
ชิ้นงานของรูสไลด์ เป็นการป้อนเติมโลหะในขณะที่ยังมีอุณหภูมิการเย็น
ตัวอย่างช้าๆ จนเริ่มแข็งตัวอย่างสมบูรณ์ในที่สุด

2.2 หลังจากการทดลองหล่อชิ้นงานกระสวยต้นแบบ

หลังจากการหล่อชิ้นงานตามรูปแบบในรูปที่ 1 คือ กระสวยต้นแบบ
ที่ใช้ทำการทดลอง ได้เกิดข้อบกพร่องบริเวณรอบได้แบบชิ้นงานซึ่งอยู่

ตรงกลางของชิ้นงาน ลักษณะของการบพร่องคือ มีการหดตัวรอบๆ ได้ เป็นแนววงกลมด้านบนชิ้นงาน จึงได้กำหนดเงื่อนไขการทดลองในการหล่อชิ้นงานดังนี้ คือวางรูต้นทรงกระบอกลงตามแนวการหดตัวของชิ้นงานโดยให้มีขนาดความโค้งในเท่ากับขนาดได้แบบเส้นผ่านศูนย์กลาง 30 มิลลิเมตรเท่ากันทั้ง 2 รูปแบบ แตกต่างที่ความหนาที่ขนาดของรูต้นทรงกระบอกกลางหนา 8 มิลลิเมตร และรูต้นทรงกระบอกกลางหนา 15 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 5



(ก) รูต้นทรงกระบอกกลางหนา 8 มิลลิเมตร (ข) รูต้นทรงกระบอกกลางหนา 15 มิลลิเมตร

รูปที่ 5 ลักษณะชิ้นงานรูต้นทรงกระบอกกลางทั้ง 2 รูปแบบ

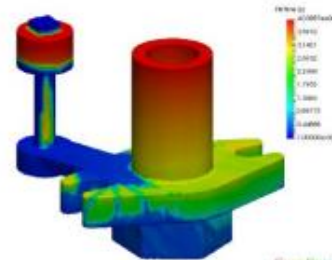
จากการออกแบบรูต้นเพิ่มเติมเพื่อปรับแก้ไขรอยยุบตัวของชิ้นงาน ได้ทำการใส่รูต้นในตำแหน่งที่เกิดการหดตัวของชิ้นงาน โดยกำหนดเงื่อนไขการทดลองแก้ไขปัญห โดยการวางรูต้นในลักษณะทรงกระบอกกลางตำแหน่งตรงกลางที่มีการหดตัวของชิ้นงาน โดยมีการปรับเปลี่ยนขนาดความหนาทั้งชิ้นงาน 2 รูปแบบ จึงนำมาศึกษาวิเคราะห์ผลทางการจำลองพฤติกรรม (simulation) ด้วยโปรแกรม Cast-Designer เพื่อพยากรณ์ผลการทดลองด้วยแนวทางแก้ไขจุดบกพร่องนั้นบนชิ้นงาน

3. ผลการจำลองสถานการณ์การไหลของโลหะเหลว (simulation)

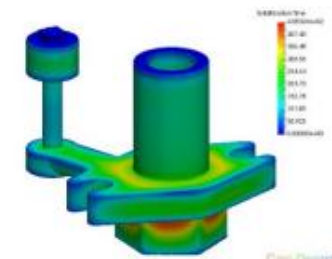
3.1 การจำลองพฤติกรรมของงานหล่อของชิ้นงาน

มีแนวทางการแก้ไขชิ้นงานอยู่ 2 รูปแบบ คือ ชิ้นงานรูต้นทรงกระบอกกลางหนา 8 มิลลิเมตร ชิ้นงานรูต้นทรงกระบอกกลางหนา 15 มิลลิเมตร โดยมีผลการทดลองด้วยโปรแกรม Cast-Designer ดังนี้

3.1.1 ชิ้นงานหล่อที่มีรูต้นทรงกระบอกกลางหนา 8 มิลลิเมตร ได้กำหนดความในตำแหน่งที่เกิดการหดตัวโดยรัศมีวงในจะเท่ากับขอบของรูได้แบบ ซึ่งผลการจำลองเวลาในการเติมโลหะเหลว (fill time) ได้ดังรูปที่ 6 แบบจำลองเวลาในการแข็งตัวของชิ้นงาน (solidification time) ดังรูปที่ 7 แบบจำลองการเกิดโพรงหดตัว (shrinkage porosity) ดังรูปที่ 8 แบบจำลองการไหลของโลหะเหลว (fluid fraction) ดังรูปที่ 9



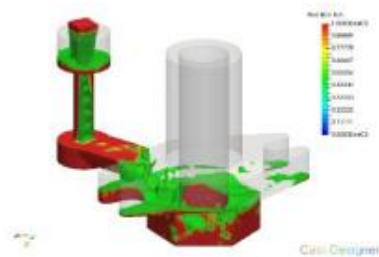
รูปที่ 6 แบบจำลองเวลาในการเติมชิ้นงานรูต้นทรงกระบอกกลางหนา 8 มิลลิเมตร (fill time = 4.03 sec)



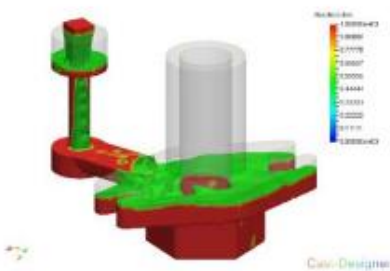
รูปที่ 7 แบบจำลองเวลาในการแข็งตัวของชิ้นงานรูต้นทรงกระบอกกลางหนา 8 มิลลิเมตร (solid time = 458 sec)



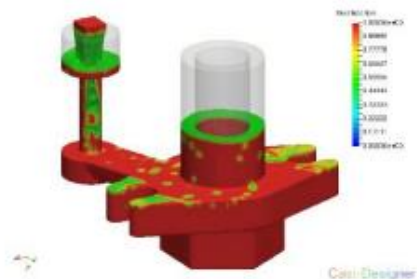
รูปที่ 8 แบบจำลองการเกิดโพรงหดตัวของชิ้นงานรูต้นทรงกระบอกกลางหนา 8 มิลลิเมตร (shrinkage porosity = 1.925 %)



(ก) 20% / 1.128 sec



(ข) 40% / 2.009 sec



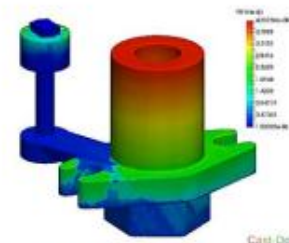
(ค) 80% / 3.206 sec



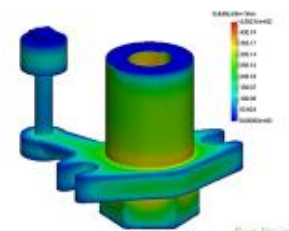
(ง) 100% / 4.03 sec

รูปที่ 9 แบบจำลองการไหลของโลหะเหลวขึ้นผ่านรูสั้น ทรงกระบอก
กลางหนา 8 มิลลิเมตร (fill time = 4.03 sec)

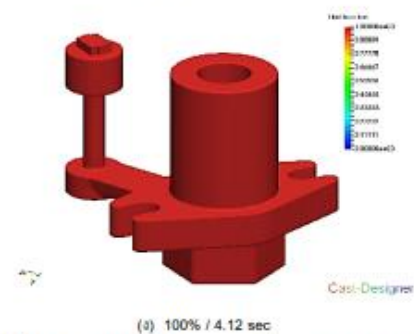
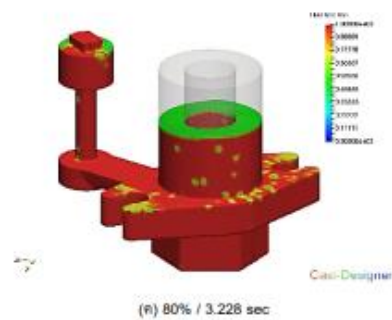
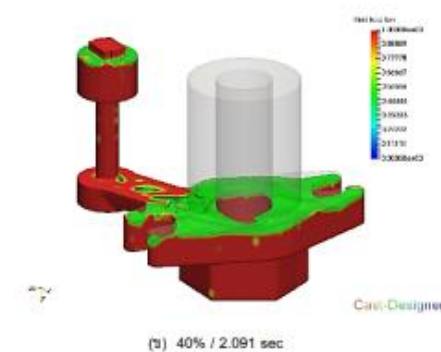
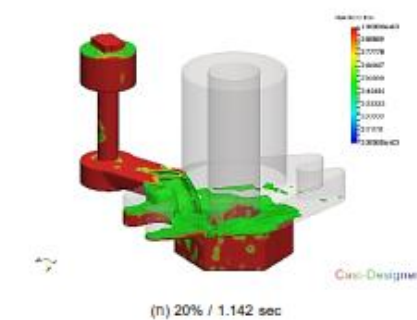
3.1.2 ชิ้นงานหล่อที่มีรูสั้นทรงกระบอกกลางหนา 15 มิลลิเมตร ได้กำหนดวางในตำแหน่งที่เกิดการหดตัวโดยรัศมีวงในจะเท่ากับขอบของรูได้แบบ ซึ่งผลการจำลองเวลาในการเติมเต็มโลหะเหลว (fill time) ได้ดังรูปที่ 10 แบบจำลองการแข็งตัวของโลหะเหลว (solidification time) ดังรูปที่ 11 แบบจำลองการเกิดโพรงหดตัว (Shrinkage porosity) ดังรูปที่ 12 แบบจำลองการไหลของโลหะเหลว (fluid fraction) ดังรูปที่ 13



รูปที่ 10 แบบจำลองเวลาในการเติมเต็มขึ้นผ่านรูสั้นทรง
หนา 15 มิลลิเมตร (fill time = 4.12 sec)



รูปที่ 11 แบบจำลองการแข็งตัวของโลหะเหลวของรูสั้นทรง
หนา 15 มิลลิเมตร (solid time = 450 sec)



รูปที่ 13 แบบจำลองการไหลโลหะเหลวของรูสันทรงกระบอกลวงหนา 15 มิลลิเมตร (fill time = 4.12 sec)

จากผลการเปรียบเทียบการจำลองพฤติกรรมแปรเปลี่ยนการหดตัวของกระสวยขึ้นเดียวหน้าราบมีได้แบบในคัมมีแนวโน้มนของการหดตัวที่ลดลงตามปริมาตรที่เพิ่มขึ้นของรูสัน ซึ่งได้ค่าการคำนวณปริมาตรของรูสันที่สามารถแก้ไขปัญหาคือ 74,108 ลูกบาศก์มิลลิเมตร รูปร่างรูสันทรงกระบอกลวงหนา 15 มิลลิเมตร ที่จะสามารถแก้ปัญหาคือการหดตัวของชิ้นงานได้

4. สรุปผล

การแก้ไขปัญหาคือการหดตัวของชิ้นงานกระสวย ทางผู้จัดทำได้วางรูสันรูปทรงกระบอกลวงในตำแหน่งบริเวณที่เกิดการหดตัวคือรอบๆใต้แบบ โดยจะต้องมีการปรับเปลี่ยนขนาดของรูสัน แบ่งเป็น รูสันทรงกระบอกลวงหนาขนาด 8 มิลลิเมตร และ รูสันทรงกระบอกลวงหนา 15 มิลลิเมตร ซึ่งผลการจำลองสถานการณ์ด้วยโปรแกรม Cast-Designer ทั้ง 2 รูปแบบนั้น ซึ่งมีผลแตกต่างกันดังนี้

4.1 ผลการจำลองพฤติกรรมเวลาในการเติมเต็มของโลหะเหลวในรูปแบบรูสันทรงกระบอกลวงหนา 8 มิลลิเมตร มีค่าเวลาที่เติมเต็มที่

4.03 วินาที และรูปแบบรูส้นทรงกระบอกกลางหนา 15 มิลลิเมตร มีค่าเวลาที่เดิมเดิมที่ 4.12 วินาที จากผลจากการจำลองพฤติกรรมทำให้เห็นว่าชิ้นงานรูส้นทรงกระบอกกลางขนาด 15 มิลลิเมตร มีเวลาในการเดิมเดิมช้าสุดเนื่องจากมีปริมาตรชิ้นงานมากที่สุด

4.2 ผลการจำลองพฤติกรรมการไหลของโลหะเหลวทั้ง 2 รูปแบบ มีลักษณะการไหลคือ เมื่อโลหะเหลวผ่านปากทางเข้าชิ้นงาน โลหะเหลวจะไหลสู่ที่หล่อลงไปในส่วนที่ลึกที่สุด ซึ่งคือส่วนที่มีลักษณะเป็นทรงแปดเหลี่ยม จนโลหะเหลวไหลเต็มเนื้อโพรงแบบ

4.3 ผลการจำลองพฤติกรรมการแข็งตัว ในรูปแบบรูส้นทรงกระบอกกลางหนา 8 มิลลิเมตร มีค่าเวลาในการแข็งตัวที่ 458 วินาที และรูปแบบรูส้นทรงกระบอกกลางหนา 15 มิลลิเมตร มีค่าเวลาในการแข็งตัวที่ 450 วินาที เนื่องจากรูส้นทรงกระบอกกลางหนา 15 มิลลิเมตร มีผิวที่สัมผัสกับอากาศมากขึ้นทำให้การถ่ายเทความร้อนได้มากขึ้นตาม มีผลให้ใช้เวลาในการแข็งตัวลดลง

4.4 ผลการจำลองพฤติกรรมการหดตัวในรูปแบบรูส้นทรงกระบอกกลางหนา 8 มิลลิเมตร มีค่าการหดตัวที่ 1.92 เปอร์เซ็นต์ และในรูปแบบรูส้นทรงกระบอกกลางหนา 15 มิลลิเมตร มีค่าหดตัวที่ 0.44 เปอร์เซ็นต์ จากผลการคำนวณการหาปริมาตรรูส้นจากทฤษฎีที่เหมาะสมกับชิ้นงานหล่อกระสวย ได้ค่าปริมาตรรูส้น 72,108 ลูกบาศก์มิลลิเมตร ซึ่งเท่ากับรูส้นทรงกระบอกกลางหนา 15 มิลลิเมตร ที่จะสามารถแก้ไขปัญหารูของชิ้นงานได้

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยฉบับนี้ได้รับความช่วยเหลือจาก นายมงคล เอกสินทร์กุล และบริษัท ไฟร์ดี คอร์ปอเรชั่น จำกัดที่ให้ความอนุเคราะห์สนับสนุนโปรแกรม Cast Designer เป็นเครื่องมือสำหรับการวิจัยเพื่อช่วยในการวิเคราะห์ ที่มีประสิทธิภาพสูงและค่าปริมาตรที่ต่ำ จนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีคณะที่มงานวิจัยจึงขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างยิ่ง

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Suwankan P. Metal Water Dosing System Design for Stainless Steel which Casting by Investment Process. Thesis according to the Doctor of Engineering Degree Program. Materials Engineering Department. Faculty of Engineering. KMUTNB 2016. Thailand (in Thai)
- [2] Luankosolchai S. Metal Water Supply and Overflow Hole Design for Aluminum. Thesis according to the Master of Engineering Degree Program. Material Technology Department. Faculty of Energy and Materials. KMUTT 2001. Thailand (in Thai)
- [3] Sriwisanwanich W. Simulation of the Hardening Behavior of the Casting. Thesis according to the Master of Engineering Degree Program. Material Technology Department. Faculty of Energy and Materials. KMUTT 1996. Thailand (in Thai)

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ	นายพงศกร ขวัญทอง
ชื่อวิทยานิพนธ์	การวิเคราะห์ข้อบกพร่องงานหล่อทรายจากการจำลองสถานการณ์ การถ่ายเทความร้อนด้วยโปรแกรม Cast Designer
สาขาวิชา	เทคโนโลยีวิศวกรรมเครื่องกล
ประวัติ	ประวัติส่วนตัว เกิดวันที่ 28 พฤศจิกายน 2539 สถานที่เกิด อำเภอเมือง จังหวัดหนองคาย เป็นบุตรคนที่ 1 ของนายธนชัย ขวัญทอง และนางเอื้อมพร ขวัญทอง ที่อยู่ปัจจุบัน 44 หมู่ที่ 4 ตำบลปากน้ำ อำเภอหลังสวน จังหวัดชุมพร รหัสไปรษณีย์ 86150 ประวัติการศึกษา สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษา โรงเรียนสวนศรีวิทยา ปี พ.ศ. 2556 และสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาเทคโนโลยีวิศวกรรมการออกแบบและผลิตเครื่องจักรกล วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ปี พ.ศ. 2562