



การศึกษาการพัฒนาแบบจำลองการหล่อเครื่องประดับ
ด้วยโปรแกรมพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ

THE STUDY OF DEVELOPMENT OF JEWELRY CASTING SIMULATION
USING COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS SOFTWARE

นางสาวทิตติยา เตจ๊ะน้อย รหัส 57361135
นางสาวสุพัตรา เสาแสง รหัส 57361661

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร
ปีการศึกษา 2560



ใบรับรองปริญญาโท

ชื่อหัวข้อโครงการ	การศึกษาการพัฒนาแบบจำลองการหล่อเครื่องประดับด้วยโปรแกรมพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ
ผู้ดำเนินโครงการ	นางสาวทิตติยา เตจันน้อย รหัส 57361135 นางสาวสุพัตรา เสาแสง รหัส 57361661
ที่ปรึกษาโครงการ	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมลักษณ์ วรรณฤมล กิเยลาโรว่า
สาขาวิชา	วิศวกรรมอุตสาหกรรม
ภาควิชา	วิศวกรรมอุตสาหกรรม
ปีการศึกษา	2560

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร อนุมัติให้ปริญญาโทฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม

.....ที่ปรึกษาโครงการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมลักษณ์ วรรณฤมล กิเยลาโรว่า)

.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ เสาวลักษณ์ ทองกลั่น)

.....กรรมการ
(อาจารย์กฤษณา พูลสวัสดิ์)

ชื่อหัวข้อโครงการ	การศึกษาการพัฒนาแบบจำลองการหล่อเครื่องประดับด้วยโปรแกรม พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ
ผู้ดำเนินโครงการ	นางสาวทิตติยา เตจ๊ะน้อย รหัส 57361135 นางสาวสุพัตรา เสาแสง รหัส 57361661
ที่ปรึกษาโครงการ	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมลักษณ์ วรรณฤมล กิเยลาโรว่า
สาขาวิชา	วิศวกรรมอุตสาหการ
ภาควิชา	วิศวกรรมอุตสาหการ
ปีการศึกษา	2560

บทคัดย่อ

ปฏิญานิพนธ์ฉบับนี้ เป็นการศึกษาการพัฒนาแบบจำลองการหล่อเครื่องประดับด้วยโปรแกรมพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ โดยมีวัตถุประสงค์ คือ ศึกษาปัจจัยที่เหมาะสมที่มีผลต่อปริมาณรูพรุน และศึกษาค่าที่เหมาะสมที่สุดของปัจจัย โดยทำการสร้างแบบจำลองการหล่อเครื่องประดับแบบขึ้นึงด้วยโปรแกรมพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ มาช่วยในการวิเคราะห์เรื่องของปริมาณรูพรุน โดยรูปแบบการทดลองนี้ใช้เทคนิคการออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียลเต็มรูป (Full Factorial) โดยมีปัจจัย 3 ปัจจัย ปัจจัยที่ 1 คือ อุณหภูมิในการเทน้ำโลหะ ที่อุณหภูมิ 1,050 1,100 และ 1,150 องศาเซลเซียส ปัจจัยที่ 2 คือ อุณหภูมิของแม่พิมพ์ ที่อุณหภูมิ 450 500 และ 550 องศาเซลเซียส และปัจจัยที่ 3 คือ รูปแบบของต้นเทียน รูปแบบที่ 1 2 3 4 5 และ 6 ในการทดลองหาระดับปัจจัยที่เหมาะสมทำการวิเคราะห์เชิงสถิติ ได้ค่าที่เหมาะสมที่สุด คือ อุณหภูมิในการเทน้ำโลหะ เท่ากับ 1,050 องศาเซลเซียส อุณหภูมิของแม่พิมพ์ เท่ากับ 450 องศาเซลเซียส และรูปแบบของต้นเทียน คือ รูปแบบต้นที่ 2 ประกอบไปด้วยแหวนประดับมุกที่ถูกติดในตำแหน่งสูงของต้นเทียน แหวนสัญลักษณ์ที่ถูกติดในตำแหน่งกลางของต้นเทียน และแหวนล้อมเพชรที่ถูกติดในตำแหน่งต่ำของต้นเทียน ซึ่งผลจากการศึกษาดังกล่าวสามารถนำไปเป็นแนวทางในการตั้งค่าปัจจัย คือ อุณหภูมิในการเทน้ำโลหะ อุณหภูมิของเข้าปูน และรูปแบบของต้นเทียน ในกระบวนการหล่อเครื่องประดับแบบขึ้นึงด้วย และสามารถช่วยให้ผู้ประกอบการประยุกต์ใช้แบบจำลองในอุตสาหกรรมการผลิตเครื่องประดับ

Project THE STUDY OF DEVELOPMENT OF JEWELRY CASTING
SIMULATION USING COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS
SOFTWARE

Name Miss Thittiya Tejanoi ID 57361135
Miss Suphattra Saosaeng ID 57361661

Project advisor Asst. Prof. Dr. Somlak Wannarumon Kielarova

Major Industrial Engineering

Department Industrial Engineering

Academic year 2017

Abstract

This thesis is about the development of jewelry casting simulation by using Computational Fluid Dynamics (CFD). The objective of this thesis are; to Optimizer the casting factors that affect the volume of porosity and to create lost wax jewelry casting simulation with Computational fluid Dynamics (CFD) for calculate the volume of porosity. Full factorial designs technique is used in this experiment, which involves 3 factors : 1) Pouring temperature at 1,050, 1,100 and 1,150 degree Celsius, 2) Mold temperature at 450, 500 and 550 Celsius 3) The pattern of different wax tree. The experiments were intended to determine the appropriate factors to analyzed statistical information. According to the results, the most appropriate temperatures of pouring are 1,050 degree Celsius, and 450 degree Celsius of the mold. The pattern of wax tree which consisted of a pearl ring that attached to a high position of the candle. where the ring symbol is attached to the center of the candle, and the diamond ring is attached to the lower position of the candle. The results of this study can be used as a guideline for determining the factors applicable to the lost wax jewelry casting process for which entrepreneurs can apply the wax treeing to the jewelry industry.

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์เรื่อง “การศึกษาการพัฒนาแบบจำลองการหล่อเครื่องประดับด้วยโปรแกรมพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ” ประสบความสำเร็จ และลุล่วงไปได้ด้วยดีนั้นต้องขอขอบคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมลักษณ์ วรรณฤมล ก็ยลาโรว่า อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการที่เสียสละเวลาส่วนตัว เพื่อให้คำปรึกษา แนะนำแนวทาง วิธีการแก้ปัญหา คอยติดตามการดำเนินงานอย่างต่อเนื่อง รวมถึงชี้แนวทางในการใช้ชีวิตถ่ายทอดประสบการณ์ที่สำคัญ เพื่อได้นำไปปรับใช้ในการทำงานร่วมกับผู้อื่น และคอยอบรมอย่างดีเสมอมา ซึ่งผู้ดำเนินโครงการรู้สึกซาบซึ้ง และเป็นพระคุณอย่างยิ่ง

ขอขอบคุณอาจารย์ บุคลากร ของภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยนเรศวรทุกท่าน ที่คอยให้คำแนะนำ คอยให้ความช่วยเหลือ และให้คำติชม เพื่อให้โครงการนี้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

นอกจากนี้ยังต้องขอบคุณ คุณสุรเชษฐ์ แสนทวีสุข ที่คอยช่วยเหลือ ให้คำแนะนำในเรื่องของการใช้โปรแกรม ProCAST และแนะนำแนวทางในการแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นระหว่างการทำงาน จนทำสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

สุดท้ายนี้ขอขอบคุณบิดา มารดา และเพื่อนๆ ที่ได้สนับสนุน และให้กำลังใจมาโดยตลอด ทางผู้ดำเนินโครงการจึงขอขอบคุณเป็นอย่างสูงมา ณ ที่นี้

ผู้ดำเนินโครงการ

นางสาวทิตติยา เตจ๊ะน้อย

นางสาวสุพัตรา เสาแสง

พฤษภาคม 2561

สารบัญ

หน้า

ใบรับรองปริญญาโท.....	ก
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูป.....	ฉ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของโครงการ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ.....	2
1.3 เกณฑ์ชี้วัดผลงาน (Output).....	2
1.4 เกณฑ์ชี้วัดผลสำเร็จ (Outcome).....	2
1.5 ขอบเขตการดำเนินงาน.....	2
1.6 สถานที่ในการดำเนินโครงการ.....	3
1.7 ระยะเวลาในการดำเนินโครงการ.....	3
1.8 ขั้นตอนและแผนการดำเนินโครงการ.....	4
บทที่ 2 หลักการและทฤษฎี.....	5
2.1 การหล่อเครื่องประดับ.....	5
2.1.1 กระบวนการหล่อเครื่องประดับแบบขึ้นฝักหอย.....	5
2.1.2 ข้อดีและข้อเสียของการหล่อแบบขึ้นฝักหอย.....	10
2.1.3 หลักการในการหล่อเครื่องประดับแบบสูญญากาศ.....	10
2.2 วัสดุที่ใช้ในการหล่อเครื่องประดับ.....	11
2.2.1 สมบัติของทองเหลือง.....	11
2.2.2 สมบัติของปูนสำหรับหล่อเครื่องประดับ.....	12
2.3 ปัญหาที่เกิดขึ้นในกระบวนการหล่อเครื่องประดับ.....	13
2.4 การออกแบบเครื่องประดับแหวน.....	17
2.4.1 องค์ประกอบของการออกแบบเครื่องประดับ.....	18
2.4.2 การออกแบบด้วยมือ.....	19

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.4.3 การออกแบบด้วยคอมพิวเตอร์.....	19
2.5 แบบจำลองกระบวนการหล่อ.....	20
2.5.1 โปรแกรมช่วยในการจำลอง.....	20
2.5.2 พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ.....	20
2.5.3 ระเบียบวิธี.....	21
2.5.4 ระเบียบวิธีการแบ่งช่วง.....	21
2.5.5 ทฤษฎีและลักษณะของระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์.....	22
2.5.6 หลักการทั่วไปสำหรับวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์.....	22
2.5.7 การใช้ไฟไนต์วิธีเอลิเมนต์ (Finite Element Method)	
ช่วยในการแก้ปัญหาทางด้านวิศวกรรม.....	24
2.5.8 โปรแกรมช่วยในการจำลองการหล่อ.....	24
2.6 ทฤษฎีการออกแบบการทดลอง.....	26
2.6.1 การออกแบบแผนการทดลอง.....	26
2.6.2 การออกแบบการผลิตหรือผลิตภัณฑ์.....	27
2.6.3 ประโยชน์ของการออกแบบการทดลอง.....	28
2.6.4 การทดลองแบบแฟคทอเรียล.....	28
2.7 ทฤษฎีสถิติฐาน และการทดสอบสมมติฐาน.....	30
2.7.1 สมมติฐานทางสถิติ.....	30
2.7.2 การทดสอบสมมติฐาน.....	31
2.7.3 ประเภทของการทดสอบสมมติฐาน.....	32
2.7.4 ค่า P-Value	33
2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	33
บทที่ 3 วิธีในการดำเนินโครงการ.....	37
3.1 วัสดุและอุปกรณ์.....	37
3.1.1 วัสดุที่ใช้ในการดำเนินโครงการ.....	37
3.1.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการดำเนินโครงการ.....	37
3.2 ขั้นตอนการดำเนินโครงการ.....	37
3.2.1 ศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	39

สารบัญ (ต่อ)

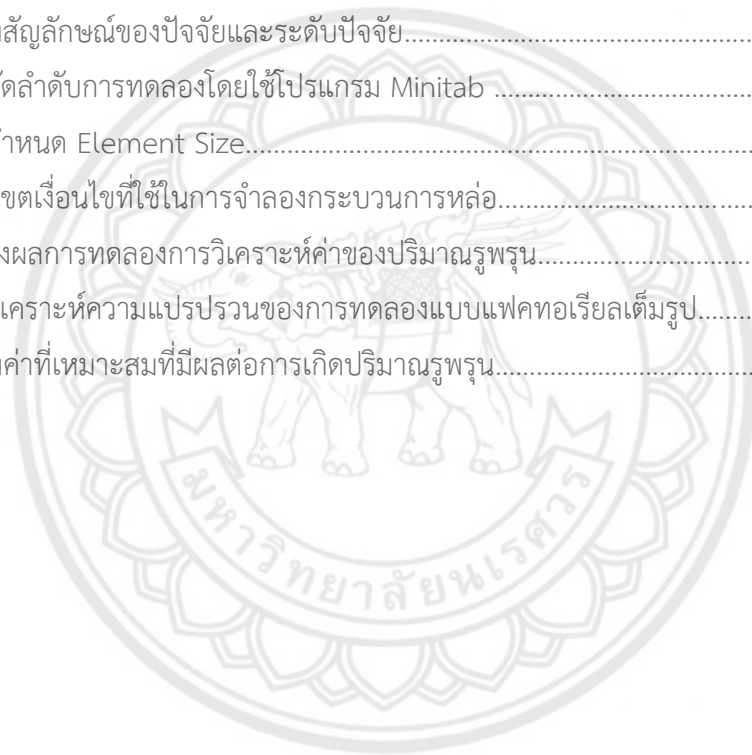
	หน้า
3.2.2 เก็บรวบรวมข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับการจำลองเครื่องประดับแหวน.....	40
3.2.3 สร้างแบบจำลองโดยวาดโมเดลแหวนแบบสามมิติและวาดต้น เทียนในการหล่อ ด้วยโปรแกรม Rhinoceros และ Grasshopper.....	40
3.2.4 การพัฒนาฐานข้อมูลของวัสดุโลหะที่ใช้ในการหล่อเครื่องประดับ และวัสดุที่ใช้ในการทำเข้าปูน.....	42
3.2.5 สรุปปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการหล่อ.....	42
3.2.6 การออกแบบการทดลอง.....	43
3.2.7 ขั้นตอนการจำลองการหล่อ.....	43
3.2.8 การวิเคราะห์ผลลัพธ์ของโปรแกรม CFD.....	43
3.2.9 การบันทึกผลการทดลอง.....	43
3.2.10 การวิเคราะห์ข้อมูลเชิงสถิติ.....	44
3.2.11 สรุปผลการดำเนินโครงการ.....	44
บทที่ 4 ผลการดำเนินโครงการ.....	45
4.1 ผลการศึกษาและรวบรวมข้อมูล.....	45
4.2 สร้างแบบจำลองแบบสามมิติด้วยโปรแกรม Rhinoceros และ Grasshopper.....	45
4.2.1 การวาดรูปโมเดลแหวนล้อมเพชร.....	45
4.2.2 การวาดรูปโมเดลแหวนประดับมุก.....	46
4.2.3 การวาดรูปโมเดลแหวนสัญลักษณ์.....	47
4.2.4 การวาดทางเดินน้ำโลหะหลัก.....	47
4.2.5 การนำแหวนประกอบเข้ากับก้านทางเดินน้ำโลหะ และทางเดินน้ำโลหะหลัก.....	48
4.3 ผลการออกแบบการทดลอง.....	50
4.3.1 ปัจจัยที่เหมาะสมที่มีผลต่อกระบวนการหล่อ	50
4.3.2 ระดับปัจจัยที่เหมาะสมที่มีผลต่อกระบวนการหล่อ.....	50
4.3.3 การตั้งสมมติฐานการทดลอง.....	54
4.4 ผลการศึกษากการวิเคราะห์การจำลองการหล่อด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์ เอลิเมนต์.....	56
4.4.1 การสร้างแบบจำลอง.....	57

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.4.2 การสร้างปริมาตร Mesh.....	58
4.4.3 การกำหนดสมบัติของวัสดุ.....	59
4.4.4 การกำหนดการสัมผัสระหว่างชิ้นงานกับเบ้าปูน.....	60
4.4.5 การตั้งค่ากระบวนการในการควบคุมการหล่อ.....	61
4.4.6 การวิเคราะห์ผลการจำลอง.....	63
4.5 ผลการทดลอง.....	65
4.6 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลเชิงสถิติ.....	67
4.6.1 ตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบการทดลอง.....	67
4.6.2 การตรวจสอบความแปรปรวนของข้อมูล.....	70
4.6.3 การวิเคราะห์หาระดับปัจจัยที่มีผลต่อปริมาณรูพรุน.....	73
4.6.4 การวิเคราะห์พื้นผิวตอบสนอง.....	76
4.6.5 การหาค่าที่เหมาะสมของปัจจัย.....	78
บทที่ 5 บทสรุปและข้อเสนอแนะ.....	80
5.1 สรุปผลการดำเนินโครงการ.....	80
5.2 อภิปรายผลผลการดำเนินโครงการ.....	80
5.3 ข้อเสนอแนะ.....	81
เอกสารอ้างอิง.....	82
ภาคผนวก ก คู่มือ การใช้งานโปรแกรม Minitab.....	84
ภาคผนวก ข คู่มือ การใช้งานโปรแกรม ProCAST.....	87
ภาคผนวก ค ผลการวิเคราะห์ค่าของปริมาณรูพรุนของแหวน.....	97
ภาคผนวก ง ผลการวิเคราะห์ค่าของปริมาณรูพรุนของทางเดินน้ำโลหะ.....	125
ภาคผนวก จ ผลการวิเคราะห์ค่าผลรวมของปริมาณรูพรุน.....	153

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 ขั้นตอนและแผนการดำเนินโครงการ.....	4
2.1 ขนาดของเข้าป้อนที่ใช้ในกระบวนการหล่อ.....	9
2.2 สมบัติวัสดุของเหลือง.....	11
2.3 สมบัติวัสดุปูนพลาสเตอร์.....	13
2.4 ข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นในงานหล่อเครื่องประดับ.....	13
2.5 Software ที่นิยมใช้ในงานหล่อโลหะในปัจจุบัน.....	25
2.6 แสดงสัญลักษณ์เปรียบเทียบระหว่างค่าสถิติกับค่าพารามิเตอร์.....	30
4.1 แสดงสัญลักษณ์ของปัจจัยและระดับปัจจัย.....	54
4.2 การจัดลำดับการทดลองโดยใช้โปรแกรม Minitab	55
4.3 การกำหนด Element Size.....	58
4.4 ขอบเขตเงื่อนไขที่ใช้ในการจำลองกระบวนการหล่อ.....	59
4.5 ตารางผลการทดลองการวิเคราะห์ค่าของปริมาณรูพรุน.....	65
4.6 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของการทดลองแบบแฟคทอเรียลเต็มรูป.....	71
4.7 แสดงค่าที่เหมาะสมที่มีผลต่อการเกิดปริมาณรูพรุน.....	79



สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 แสดงลำดับขั้นตอนของกระบวนการหล่อเครื่องประดับแบบขี้ผึ้งหาย.....	5
2.2 แสดงเครื่องหล่อโลหะโดยใช้ระบบสูญญากาศ.....	11
2.3 แสดงเอลิเมนต์ในมิติที่ประกอบด้วยจุดต่อต่างๆ.....	23
2.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต่างๆ ในกระบวนการหรือระบบที่สนใจ.....	26
2.5 แสดงหลักการสำคัญในการออกแบบการทดลอง.....	27
2.6 แสดงการออกแบบการทดลองแพคทอเรียลเต็มรูปแบบ 3^3	29
2.7 แสดงการทดสอบสมมติฐานแบบ 2 ทาง.....	32
2.8 แสดงการทดสอบสมมติฐานแบบทางเดียว.....	33
3.1 แผนผังการไหลแสดงขั้นตอนการดำเนินงานการศึกษาแบบจำลอง.....	38
3.2 แสดงแบบแหวน 3 แบบ คือ แหวนล้อมเพชร แหวนประดับมุก และแหวนสัญลักษณ์.....	40
3.3 สร้างแบบจำลองโดยวาดโมเดลแบบสามมิติ ในการหล่อด้วยโปรแกรม Rhinoceros และ Grasshopper.....	41
3.4 แสดงรูปต้นเทียนในการหล่อเครื่องประดับ.....	41
3.5 แสดงตำแหน่งในการติดต้นเทียน.....	42
4.1 แสดงการออกแบบแหวนล้อมเพชรด้วยโปรแกรม Rhinoceros.....	46
4.2 แสดงการออกแบบแหวนประดับมุกด้วยโปรแกรม Rhinoceros.....	46
4.3 แสดงการออกแบบแหวนสัญลักษณ์ด้วยโปรแกรม Rhinoceros.....	47
4.4 แสดงการออกแบบทางเดินน้ำโลหะ (Sprue).....	47
4.5 แสดงการจัดเรียงแหวนบนต้นเทียนด้วยโปรแกรม Plug – in เสริม Grasshopper.....	48
4.6 แสดงการจัดเรียงแหวนสัญลักษณ์บนต้นเทียนด้วยโปรแกรม Plug – in เสริม Grasshopper.....	49
4.7 แสดงการจัดเรียงแหวนประดับมุกบนต้นเทียนด้วยโปรแกรม Plug – in เสริม Grasshopper.....	49
4.8 แสดงการจัดเรียงแหวนล้อมเพชรบนต้นเทียนด้วยโปรแกรม Plug – in เสริม Grasshopper.....	49
4.9 แสดงต้นเทียนแบบที่ 1.....	52
4.10 แสดงต้นเทียนแบบที่ 2.....	52

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.11 แสดงต้นเทียนแบบที่ 3.....	53
4.12 แสดงต้นเทียนแบบที่ 4.....	53
4.13 แสดงต้นเทียนแบบที่ 5.....	53
4.14 แสดงต้นเทียนแบบที่ 6.....	53
4.15 แผนผังการไหลแสดงขั้นตอนการสร้างแบบจำลองการหล่อ.....	56
4.16 แสดงแบบจำลองโมเดลต้นเทียน.....	57
4.17 แสดงการสร้างเข้าปูนให้กับโมเดล.....	57
4.18 แสดงการสร้างปริมาตร Mesh.....	58
4.19 แสดงการกำหนดสมบัติวัสดุ.....	60
4.20 แสดงการกำหนด Interface Heat Transfer ของชิ้นงานกับเข้าปูน และแสดงการตั้งค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน.....	60
4.21 แสดงการเลือกการเย็นตัวในอากาศ.....	61
4.22 แสดงการกำหนดเวลาในการเทน้ำโลหะ.....	62
4.23 แสดงการกำหนดค่าความดัน.....	62
4.24 แสดงการกำหนดตำแหน่งและขนาดรูเทน้ำโลหะ.....	63
4.25 แสดงการดำเนินการจำลองการหล่อ.....	64
4.26 แสดงผลการวิเคราะห์ค่าของปริมาณรูพรุน.....	64
4.27 กราฟการกระจายแบบแจกแจงปกติของข้อมูล.....	67
4.28 กราฟฮิสโตแกรมแสดงการกระจายแบบปกติของข้อมูล.....	68
4.29 กราฟความเป็นอิสระของข้อมูล.....	69
4.30 กราฟความเสถียรของความแปรปรวนของข้อมูล.....	70
4.31 แสดงกราฟผลกระทบหลัก.....	73
4.32 แสดงกราฟผลกระทบร่วมระหว่างอุณหภูมิในการเทน้ำโลหะกับ อุณหภูมิของเข้าปูน.....	74
4.33 แสดงกราฟผลกระทบร่วมระหว่างอุณหภูมิในการเทน้ำโลหะกับ รูปแบบของต้นเทียน.....	75

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.34 แสดงกราฟผลกระทบร่วมระหว่างอุณหภูมิของเข้ากับ รูปแบบของต้นเทียน.....	75
4.35 แสดงโครงสร้างพื้นผิวตอบสนองผลกระทบร่วมระหว่างอุณหภูมิในการเหน้าโลหะ กับอุณหภูมิของเข้าปูน.....	76
4.36 แสดงโครงสร้างพื้นผิวตอบสนองผลกระทบร่วมระหว่างอุณหภูมิในการเหน้าโลหะ กับรูปแบบของต้นเทียน.....	77
4.37 แสดงพื้นโครงสร้างผิวตอบสนองผลกระทบร่วมระหว่างอุณหภูมิของเข้าปูนกับ รูปแบบของต้นเทียน.....	78
4.38 แสดงกราฟจุดที่เหมาะสมของแต่ละปัจจัย.....	79



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของโครงการ

อุตสาหกรรมอัญมณี และเครื่องประดับถือเป็นอุตสาหกรรมที่สร้างมูลค่าทางเศรษฐกิจแก่ประเทศไทยได้อย่างมหาศาลในแต่ละปี นับเป็นสินค้าส่งออกที่สำคัญอันดับ 3 ของประเทศ โดยสามารถสร้างมูลค่าการส่งออกอัญมณี และเครื่องประดับทั้งหมดของไทยในปี พ.ศ. 2559 ที่ผ่าน มา สูงถึง 230,789.13 ล้านบาท (กรมศุลกากร ประมวลผลโดยสถาบันวิจัย และพัฒนาอัญมณี เครื่องประดับแห่งชาติ) ถือได้ว่าอุตสาหกรรมเครื่องประดับนั้นเป็นปัจจัยสำคัญอย่างยิ่งในการขับเคลื่อนเศรษฐกิจของประเทศ

ในอุตสาหกรรมอัญมณีและเครื่องประดับ กระบวนการผลิตตัวเรือนเครื่องประดับที่สำคัญ ได้แก่ การหล่อ (Casting) โดยวิธีที่นิยมนำมาหล่อเครื่องประดับ คือ การหล่อขี้ผึ้งหาย (Lost Wax Casting) ซึ่งพบปัญหาที่สำคัญในกระบวนการหล่อ ได้แก่ ผิวชิ้นงานเครื่องประดับมีผิวหยาบ ผิวชิ้นงานเป็นรูตามด เกิดรอยแตกกร้าว ปัญหารูพรุนเกิดจากแก๊ส การหดตัวของชิ้นงาน และหล่อไม่เต็ม เป็นต้น ซึ่งปัญหาเหล่านี้ส่งผลให้คุณสมบัติเชิงกลของชิ้นงานลดลงเป็นอย่างมาก และทำให้คุณภาพในการผลิตลดลง โดยมีปริมาณของเสียในกระบวนการผลิตมาก สิ้นเปลืองพลังงานในการตรวจสอบซ่อมแซมชิ้นงาน หรือต้องนำมาหล่อใหม่ ทั้งยังต้องเสียค่าใช้จ่ายสูงหากเกิดข้อบกพร่องขึ้นในการผลิต เนื่องจากวัสดุที่นำมาหล่อนั้นส่วนมากจะเป็น เงิน ทองคำ แพลทินัม เป็นต้น ซึ่งวัสดุนี้มีราคาสูง ในกระบวนการหล่อนั้นจะมีการผสมสารอื่นๆ ลงไปด้วย เมื่อต้องนำมาหล่อขึ้นรูปใหม่วัสดุจะไม่ใช้วัสดุที่บริสุทธิ์เหมือนเดิม จึงทำให้ผู้ประกอบการสูญเสียต้นทุนเป็นจำนวนมาก

ในปัจจุบันมีการนำคอมพิวเตอร์มาช่วยในงานออกแบบ (Computer Aided Design : CAD) การออกแบบการคำนวณเชิงวิศวกรรม (Computer Aided Engineering) และช่วยในการผลิต (Computer Aided Manufacturing : CAM) มีการใช้งานอย่างแพร่หลาย และได้รับความนิยมในกระบวนการผลิต โดยเฉพาะอย่างยิ่งในโรงงานอุตสาหกรรมการผลิตต่างๆ เนื่องจากทำให้สามารถลดเวลาในกระบวนการผลิต ลดข้อผิดพลาด และของเสียจากกระบวนการผลิตได้อีกด้วย

ดังนั้น การจัดทำโครงการครั้งนี้ จึงทำการนำโปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยในการจำลองการหล่อ โดยใช้พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computation Fluid Dynamics: CFD) เพื่อนำมาประยุกต์ใช้ในการจำลองกระบวนการหล่อขี้ผึ้งหาย เพื่อที่จะได้ศึกษาถึงปัจจัยที่มีผลต่อคุณภาพของการหล่อชิ้นงานเครื่องประดับ ซึ่งจะนำไปสู่การลดหรือป้องกันการเกิดของเสียในกระบวนการหล่อเครื่องประดับ

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

1.2.1 เพื่อสร้างแบบจำลองการหล่อเครื่องประดับแบบซีฟิ่งหายด้วยโปรแกรม CFD

1.2.2 เพื่อศึกษาปัจจัยที่เหมาะสมที่มีผลต่อปริมาณรูพรุน สำหรับกระบวนการหล่อเครื่องประดับแบบซีฟิ่งหาย โดยการสร้างแบบจำลองขึ้นมาในโปรแกรม CFD

1.3 เกณฑ์การชี้วัดผลงาน (Outputs)

1.3.1 แบบจำลองการหล่อเครื่องประดับแบบซีฟิ่งหายโดยใช้โปรแกรม CFD

1.3.2 ปัจจัยที่เหมาะสมที่มีผลต่อปริมาณรูพรุน สำหรับกระบวนการหล่อเครื่องประดับแบบซีฟิ่งหายในการหล่อทองเหลือง ได้แก่ อุณหภูมิในการเทน้ำโลหะ อุณหภูมิของเบ้าปูน และรูปแบบของต้นเทียน

1.4 เกณฑ์ชี้วัดผลสำเร็จ (Outcomes)

1.4.1 ผู้ประกอบการอุตสาหกรรมการผลิตเครื่องประดับ ใช้เป็นแนวทางในการตั้งค่าปัจจัยที่ใช้ในกระบวนการหล่อเครื่องประดับแบบซีฟิ่งหาย

1.4.2 สามารถช่วยให้ผู้ประกอบการประยุกต์ใช้แบบจำลองในอุตสาหกรรมการผลิตเครื่องประดับ สามารถลดของเสีย ลดเวลาในกระบวนการหล่อ นำไปสู่การลดต้นทุนในการผลิต และเกิดความเข้าใจในกระบวนการหล่อ

1.5 ขอบเขตในการดำเนินโครงการ

1.5.1 การหล่อเครื่องประดับแบบซีฟิ่งหาย

1.5.2 วัสดุที่ใช้ในการทดลอง คือ ทองเหลือง (Leaded Naval Brass)

1.5.3 วัสดุที่ใช้ทำเบ้าปูน คือ ปูนพลาสเตอร์ (Plaster)

1.5.4 โปรแกรมเขียนแบบ (Rhinoceors และ Plug-in Grasshopper) เพื่อใช้ออกแบบโมเดลแหวน 3D และวาดต้นเทียน

1.5.5 โปรแกรมช่วยในการจำลอง (Computational Fluid Dynamics : CFD) ได้แก่ โปรแกรม ProCAST

1.5.6 จัดทำแผนการทดลองโดยใช้การทดลองแบบแฟคทอเรียลเต็มรูป (Full Factorial)

1.5.7 การวิเคราะห์ข้อมูลเชิงสถิติใช้โปรแกรม Minitab

1.5.8 ปัจจัยที่ใช้ในการทำการทดลอง

ก. อุณหภูมิในการเทน้ำโลหะ คือ 1,050 1,100 และ 1,150 องศาเซลเซียส

ข. อุณหภูมิของเบ้าปูน คือ 450 500 และ 550 องศาเซลเซียส

ค. รูปแบบของต้นเทียน

1.5.9 ศึกษาลักษณะของชิ้นงานที่เกิดข้อบกพร่อง คือ ปริมาณรูพรุน

1.5.10 การจัดทำโครงการนี้เป็นเพียงการออกแบบการจำลองการหล่อเครื่องประดับเท่านั้น ไม่ได้มีการทดลองหล่อชิ้นงานขึ้นมาจริง

1.5.11 ฐานข้อมูลวัสดุที่ใช้ในการจำลองการหล่อ คือ ข้อมูลของวัสดุทองเหลือง และปูนพลาสเตอร์ใช้ฐานข้อมูลในโปรแกรม ProCAST

1.5.12 มุมในการติดต้นเทียน คือ 45 องศา (สมลักษณ์ วรรณฤมล กิเยลาโรว่า และคณะ, 2009)

1.5.13 ขนาดของแหวนทั้งหมดจะเป็นขนาดเดียวกัน คือ ขนาด 5.5 (Size 5.5) หรือเส้นรอบวงของแหวนด้านในขนาด 50 มิลลิเมตร โดยอ้างอิงมาตรฐานของขนาดแหวนของประเทศอเมริกา (U.S.A Size) (ไดมอนด์แกรนด์เด, 2016)

1.5.14 ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน เท่ากับ $1,000 \text{ w/m}^2 \cdot \text{K}$ (ธน ทองกลม และคณะ, 2559)

1.6 สถานที่ในการดำเนินโครงการ

ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

1.7 ระยะเวลาในการดำเนินโครงการ

ตั้งแต่เดือนสิงหาคม พ.ศ. 2560 ถึง เดือนพฤษภาคม พ.ศ. 2561



บทที่ 2

หลักการและทฤษฎีเบื้องต้น

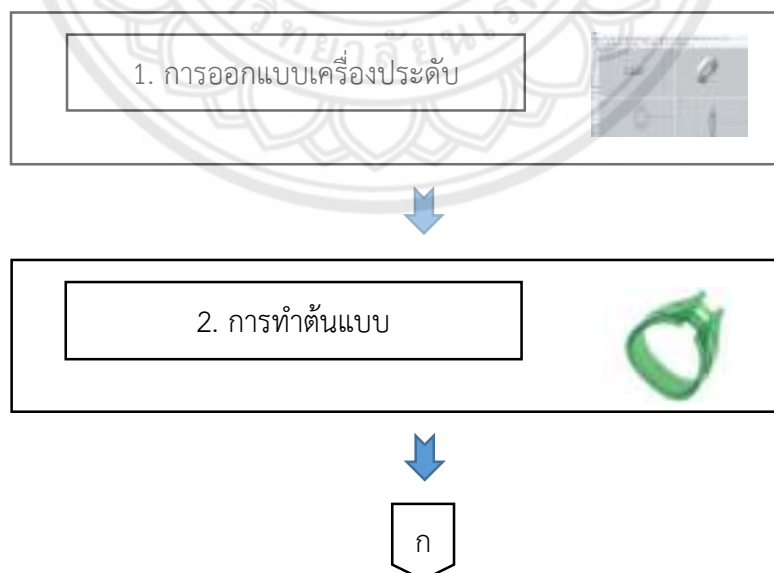
ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการหล่อเครื่องประดับ การออกแบบเครื่องประดับ การผลิตเครื่องประดับ ทฤษฎีทางสถิติที่ใช้ในการเก็บข้อมูล และได้ศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง โดยมีรายละเอียดดังนี้

2.1 การหล่อเครื่องประดับ

การหล่อเครื่องประดับ (Jewelry Casting) เป็นการหล่อที่จำเป็นต้องมีแบบโครงสร้าง ซึ่งวิธีการหล่อเป็นวิธีที่นิยมมาก โดยเฉพาะในงานเครื่องประดับที่ต้องการชิ้นงานเหมือนกันในปริมาณมาก เช่น การหล่อแหวน เหตุผลที่วิธีหล่อเป็นที่นิยม เนื่องจากสามารถเก็บรายละเอียดต่างๆ ของผลงานได้ทั้งหมด และได้ชิ้นงานที่เหมือนกัน โดยไม่ต้องเสียเวลามาก การหล่อเครื่องประดับจะต้องมีการใช้แม่พิมพ์ และการทำต้นแบบที่จะเป็นแม่พิมพ์ไว้ก่อน โดยแม่พิมพ์ที่ใช้มีทั้งชนิดถาวรและชั่วคราว ซึ่งในปัจจุบันแม่พิมพ์ถาวรเป็นที่นิยมในอุตสาหกรรมการผลิตเครื่องประดับ

2.1.1 กระบวนการหล่อเครื่องประดับแบบซีฟิ่งหาย

กระบวนการหล่อเครื่องประดับแบบซีฟิ่งหาย โดยวิธีการหล่อแบบซีฟิ่งหายในปัจจุบันแบ่งออกเป็น 11 ขั้นตอน สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.1

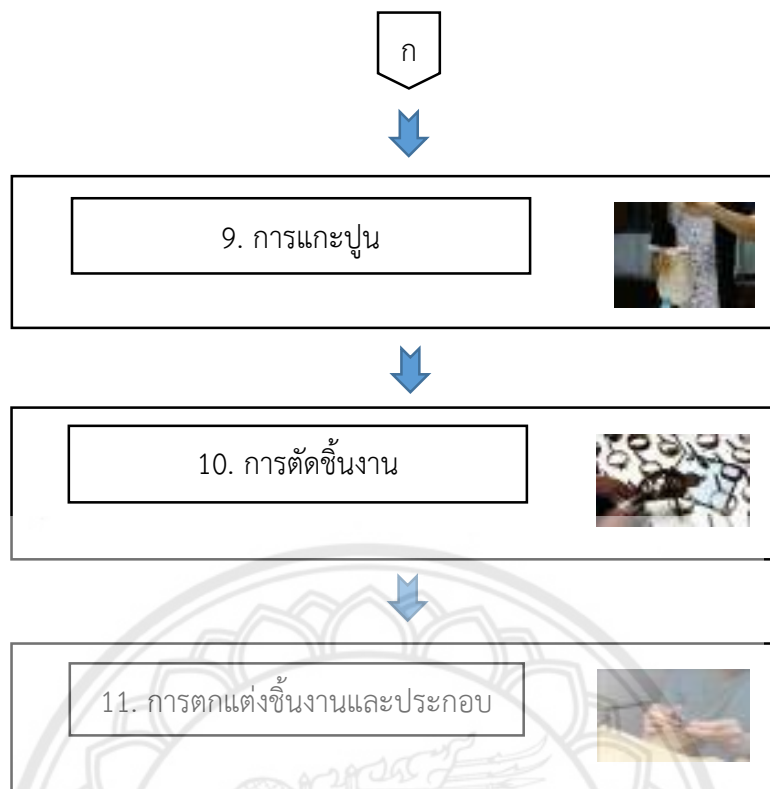


รูปที่ 2.1 แสดงลำดับขั้นตอนของกระบวนการหล่อเครื่องประดับแบบซีฟิ่งหาย

ที่มา : ไดมอนด์แกรนด์เด, 2016



รูปที่ 2.1 (ต่อ) แสดงลำดับขั้นตอนของกระบวนการหล่อเครื่องประดับแบบซีฟิ่งหาย
ที่มา : ไดมอนด์แกรนด์เด, 2016



รูปที่ 2.1 (ต่อ) แสดงลำดับขั้นตอนของกระบวนการหล่อเครื่องประดับแบบซี่ฝังหาย
ที่มา : ไคมอนด์แกรนด์เด, 2016

ขั้นตอนที่ 1 การออกแบบ

เป็นการกำหนดความคิดตามความต้องการที่จะแสดงออกในการสร้างสรรค์รูปร่างขึ้นมา เพื่อแสดงภาพจำลองของชิ้นงาน ซึ่งการออกแบบเครื่องประดับในปัจจุบันสามารถร่างแบบได้ 2 วิธี คือ การร่างแบบโดยการวาดด้วยมือ และการร่างแบบโดยการใช้คอมพิวเตอร์ (CAD) มาช่วยในการออกแบบ

ขั้นตอนที่ 2 การทำต้นแบบ

เป็นการสร้างต้นแบบที่ได้จากการออกแบบ เพื่อนำไปทำแม่พิมพ์ต่อไป การทำต้นแบบโดยทั่วไปมี 2 วิธีดังนี้ คือ การทำต้นแบบด้วยซี่ฝัง และการทำต้นแบบด้วยโลหะ โดยมีเกณฑ์ในการพิจารณาเครื่องประดับ แบ่งออกเป็น 3 ประการ คือ รูปทรงความซับซ้อนของแบบเครื่องประดับ เวลาในการผลิตเครื่องประดับ และต้นทุนในการผลิตเครื่องประดับ

ก. การทำต้นแบบด้วยซี่ฝัง ในปัจจุบันเป็นที่นิยมอย่างมากในอุตสาหกรรมเครื่องประดับ เนื่องจากสะดวกในการทำลวดลายที่ละเอียดซับซ้อนรวดเร็วในการทำต้นแบบ และประหยัดค่าใช้จ่าย เพราะซี่ฝังมีราคาถูกกว่าโลหะ

ก.1 ซี่ฝังที่มีเนื้อสีน้ำเงิน : จะมีความเหนียว ชัดและตะไบได้ยาก เหมาะกับการนำไปทำต้นแบบที่มีความบอบบาง

ก.2 ซึ่ผึ้งที่มีเนื้อสีเขียว : เนื้อซึ่ผึ้งจะมีความเปราะแตกหักง่าย และสลักเป็นรูปร่างต่างๆ ได้ง่ายและรวดเร็ว นิยมในการนำมาทำเป็นต้นแบบ

ข. ต้นแบบที่ทำด้วยโลหะ สามารถทำตัวเรือน สามารถนำไปอัดอย่างธรรมชาติ โดยไม่ต้องนำไปทำแม่พิมพ์ยาง ซึ่งโลหะที่นิยมนำมาทำต้นแบบโลหะ ได้แก่ ทองแดง เงิน ทองคำ และทองคำขาว

ขั้นตอนที่ 3 การทำแม่พิมพ์ยาง

แม่พิมพ์ยางจะถูกทำขึ้นเพื่อหุ้มต้นแบบก่อนจะนำเข้าเครื่องอัดที่ใช้ความร้อนในการบีบอัด จนแผ่นยางสามารถหุ้มต้นแบบทั้งหมด จากนั้นรอให้บล็อกยางเย็นตัวลง หลังจากแม่พิมพ์ยางจับตัวคงที่ แล้วจึงนำก้อนยางไปผ่า เพื่อได้ก้อนยางด้านบน และด้านล่างที่สามารถล็อกกันได้พอดี เตรียมสำหรับการฉีดซึ่ผึ้งต่อไป

ขั้นตอนที่ 4 การฉีดเทียน

เป็นการนำแม่พิมพ์ยางที่ได้มาฉีดเทียน เพื่อผลิตแบบตัวอย่างชิ้นงาน โดยทำให้ร้อนและถูกฉีดเข้าไปในแม่พิมพ์ยางไหลผ่านรูแคบๆ เข้าไปเติมเต็มเนื้อที่ช่องว่างข้างใน เมื่อเวลาผ่านไปซึ่ผึ้งก็จะเย็นตัวลง และพร้อมออกจากแม่พิมพ์

ขั้นตอนที่ 5 การติดต้นเทียน

แบบเทียนที่ได้จากการฉีด และแต่งเรียบร้อยแล้ว โดยรอบต้นทำมุมประมาณ 45 องศา และติดในลักษณะที่ห่างกันพอดี ใช้หัวแร้งไฟฟ้าช่วยในการประสาน หรือใช้ชุดหม้อพื้นเลนไฟตะเกียงแอลกอฮอล์ เมื่อติดต้นเสร็จแล้วก็นำต้นเทียนมาล้างด้วยน้ำยาล้างจำพวกแป้ง และซิลิโคนออก ซึ่งน้ำยาล้างจะทำหน้าที่เคลือบผิวเทียนให้เรียบเงา (การติดต้นเทียนต้องดูตามความสูงของเบ้าปูน ต้องติดให้ต่ำกว่าเบ้าปูนประมาณ 1 นิ้ว)

ขั้นตอนที่ 6 การหล่อเบ้าปูน

นำเบ้าปูนมาครอบกับต้นเทียน จากนั้นนำปูนหล่อทอง ซึ่งเป็นวัสดุที่คล้ายกับปูนพลาสติก แต่มีคุณสมบัติที่ทนความร้อนได้สูงกว่า ผ่านสุญญากาศเพื่อทำให้ฟองอากาศหายไปแล้วเทลงไปในเบ้าปูน หลังจากนั้นรอจนปูนหล่อทองแข็งตัว ซึ่งขนาดของเบ้าปูนที่ใช้ในกระบวนการหล่อดังแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ขนาดของเบ้าปูนที่ใช้ในกระบวนการหล่อ

ขนาดเบ้าปูนพลาสติก (เส้นผ่านศูนย์กลาง x สูง)
89 x127 มิลลิเมตร
89x152 มิลลิเมตร
89x178 มิลลิเมตร
89x203 มิลลิเมตร
102 x127 มิลลิเมตร
102x152 มิลลิเมตร
102x178 มิลลิเมตร
102x203 มิลลิเมตร
114 x127 มิลลิเมตร
114x152 มิลลิเมตร
114x178 มิลลิเมตร
114x203 มิลลิเมตร

ที่มา : จักรพล เร่บ้านเกาะ, 2554

ขั้นตอนที่ 7 การอบเบ้าปูน

การอบเบ้าปูน คือ การนำเบ้าปูนเข้าเตาอบ เพื่ออบไล่ให้ซี้ฟุ้งนั้นละลายไหลออกจากแบบหล่อ จากนั้นให้ความร้อนแก่เบ้าปูน เพื่อไล่ความชื้นให้เบ้าปูนแห้งสนิทแล้วให้ความร้อนอีกครั้งหนึ่ง ทั้งยังช่วยให้โลหะที่หลอมเหลวแล้วไหลเข้าสู่แม่พิมพ์ได้ง่ายขึ้น

ขั้นตอนที่ 8 การหลอมโลหะ และการหล่อโลหะ

การหลอมโลหะ คือ การให้ความร้อนแก่โลหะ โดยการเปลี่ยนสถานะจากของแข็งเป็นของเหลว และคงสถานะของเหลวในเบ้าปูนหลอมระยะหนึ่งก่อนเทไปยังเบ้าปูนการหล่อโลหะ

ขั้นตอนที่ 9 การแกะปูน

การแกะปูน คือ การฉีบน้ำเพื่อให้ปูนนั้นแตกออกจากเบ้าปูนจนหมด

ขั้นตอนที่ 10 การตัดชิ้นงานออกจากข้อ

เป็นการตัดชิ้นงานออกจากต้นเทียนจะใช้คีมในการตัด ซึ่งคีมมีหลากหลายลักษณะ เช่น

- ก. คีมตัดต้นข้อแบบธรรมดา ใช้ในการตัดชิ้นงานที่มีจำนวนขนาดเล็ก
- ข. คีมตัดต้นข้อแบบลม จะใช้แรงลมในการตัด
- ค. คีมตัดต้นข้อแบบไฟฟ้า

ขั้นตอนที่ 11 การตกแต่งชิ้นงาน และประกอบชิ้นงาน

เมื่อได้ชิ้นงานแล้วจะมีการนำไปเจียรระโนเอาส่วนเกินออก หลังจากนั้นจะทำความสะอาดชิ้นงาน โดยใช้ลื้อขัดแบบแปร่งทำความสะอาดก่อนทำการประกอบแหวน ซึ่งส่วนประกอบ

ต่างๆ จะต้องถูกขัดก่อน โดยเฉพาะเนื้อที่ส่วนที่ติดกับส่วนอื่นๆ ซึ่งจะมีความยากลำบากในการขัดแต่ง หลังจากทำการประกอบแล้ว

2.1.2 ข้อดีและข้อเสียของการหล่อแบบซีพิ้งหาย

2.1.2.1 ข้อดีของการหล่อแบบซีพิ้งหาย

- ก. สามารถหล่อชิ้นงานที่มีรูปร่างซับซ้อน หรือมีขนาดเล็กๆ ได้
- ข. ชิ้นงานที่ได้มีความประณีตของผิวชิ้นงาน และมีความแข็งแรงทนทาน
- ค. ชิ้นงานหล่อมีสมบัติสม่ำเสมอทั้งชิ้นงาน
- ง. ชิ้นงานสามารถนำไปตกแต่งด้วยเครื่องมือกลได้ง่าย
- จ. เป็นการหล่อที่สามารถควบคุมส่วนผสมทางเคมี และสมบัติได้ง่าย
- ฉ. สามารถผลิตในปริมาณมากๆ ได้ ซึ่งทำให้ต้นทุนการผลิตต่ำ
- ช. สามารถหล่อชิ้นงานให้เป็นชิ้นงานเดียวกันได้ ไม่จำเป็นต้องผลิตเป็นหลายชิ้นก่อนนำมาประกอบเป็นชิ้นงานเดียว

- ซ. สามารถหล่อชิ้นงานออกมาได้ตามขนาดที่ต้องการ
- ณ. สามารถลดเศษเสียจากการตัดแต่งด้วยเครื่องจักรได้มาก

2.1.2.2 ข้อเสียของการหล่อแบบซีพิ้งหาย

- ก. เหมาะกับงานหล่อชิ้นงานขนาดเล็ก
- ข. การหล่อแบบซีพิ้งหาย เป็นกรรมวิธีที่ค่อนข้างแพง
- ค. ต้องใช้พนักงานที่มีความชำนาญสูง

2.1.3 หลักการในการหล่อเครื่องประดับแบบสุญญากาศ

อุตสาหกรรมเครื่องประดับนิยมหล่อเครื่องประดับแบบสุญญากาศ (Vacuum Casting Process) ซึ่งการหล่อแบบสุญญากาศเบ้าปูนจะถูกเคลื่อนจากเตาเผา เพื่อนำมาวางไว้ในตัวแม่พิมพ์ที่มีช่องว่างเปิดไว้ด้านบน โลหะจะถูกทำให้ละลายในเบ้าปูนหลอมแล้วไหลลงแม่พิมพ์ที่เปิดไว้โดยใช้หลักการ การดึงดูดของโลก ขณะเดียวกันระบบสุญญากาศจะเริ่มทำงาน ซึ่งจะทำการสูบอากาศออกจากแม่พิมพ์ การหล่อเครื่องประดับแบบสุญญากาศจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในงานหล่อเครื่องประดับ และลดปัญหาการเกิดรูพรุนได้อีกด้วย



รูปที่ 2.2 เครื่องหล่อโลหะโดยใช้ระบบสุญญากาศ
ที่มา: ปริศนา บุญศักดิ์ , 2556

2.2 วัสดุที่ใช้ในการหล่อเครื่องประดับ

2.2.1 สมบัติของทองเหลือง

ทองเหลือง คือ โลหะผสมของทองแดง (Copper) โดยมีสังกะสีเป็นส่วนผสมหลัก มีปริมาณร้อยละ 5 - 40 และมีธาตุอื่นๆ ผสมในปริมาณที่น้อย เช่น ตะกั่ว (Lead) ร้อยละ 1.75, เหล็ก (Iron) ร้อยละ 0.01 เป็นต้น เพื่อให้ได้ทองเหลืองที่มีสมบัติที่เฉพาะตัว ทั้งยังช่วยให้สมบัติทางกายภาพให้ดีขึ้น เช่น สมบัติต้านทานแรงดึงและความเหนียวที่สูงขึ้น และสามารถต้านทานต่อการกัดกร่อน

สังกะสีจะเป็นตัวที่เพิ่มความเหนียวให้สูงขึ้น แต่เมื่อปริมาณสังกะสีมีมากเกินไป โดยเฉพาะเมื่อมากกว่า ร้อยละ 40 พบว่าความเหนียวของโลหะจะลดลงอย่างมาก ไม่เหมาะสมกับการใช้งาน ดังนั้น ทองเหลืองในงานวิศวกรรมจึงควรมีปริมาณไม่เกินร้อยละ 40

ทองเหลืองจะมีสีเหลือง มีสีคล้ายกับทองคำ สีของทองเหลืองจะแปรเปลี่ยนไปตามปริมาณส่วนผสมของสังกะสี หากปริมาณสังกะสีมีจำนวนน้อยสีของโลหะจะออกเป็นสีแดงชมพู และหากปริมาณสังกะสีมีจำนวนมากสีของโลหะ จะออกเป็นสีเหลืองและซีดลงตามลำดับ ผู้จัดทำโครงการได้สนใจวัสดุทองเหลือง ในการศึกษาการจำลองการหล่อในครั้งนี้ คือทองเหลือง (Lead Naval Brass)

ตารางที่ 2.2 สมบัติวัสดุทองเหลือง (Lead Naval Brass)

คุณสมบัติ (Properties)
อุณหภูมิเริ่มเกิดของแข็ง (Solidus) เท่ากับ 890 องศาเซลเซียส
ความร้อนจำเพาะ (Specific Heat) เท่ากับ 380 J/kg * K
การนำไฟฟ้า (Conductivity) เท่ากับ 120 W/m * K
จุดหลอมเหลว (Melting Point) เท่ากับ 900 องศาเซลเซียส

ที่มา : <https://www.makeitfrom.com>, 2009

2.2.2 สมบัติของปูนสำหรับหล่อเครื่องประดับ

การหล่อเครื่องประดับนิยมใช้วิธีการหล่อแบบขี้ผึ้งหาย (Lost Wax Casting) งานหล่อประเภทนี้จะได้ผิวชิ้นงานที่มีความละเอียดสูง เมื่อเปรียบเทียบกับงานหล่อประเภทอื่น การศึกษาสมบัติของปูนจึงมีความสำคัญกับการหล่ออย่างยิ่ง เช่น ปูนควรจะทนทานต่ออุณหภูมิของโลหะในระหว่างการหล่อ เนื้อปูนที่ละเอียดจะทำให้ผิวชิ้นงานคุณภาพดีจากการหล่อ เพื่อให้ได้ผิวเนื้อปูนที่ดีเหมาะสมสำหรับเป็นแม่พิมพ์ปูนที่สวยงาม ส่วนการควบคุมอุณหภูมิของปูนในระหว่างการหล่อ เพื่อให้หน้าโลหะไหลเข้าแบบได้อย่างเหมาะสม และการเลือกชนิดปูนที่ไม่ทำปฏิกิริยากับโลหะระหว่างการหล่อ เป็นต้น

ปูนพลาสเตอร์ คือ ปูนที่ผลิตเพื่อใช้ในการทำแม่พิมพ์ในการหล่อโลหะโดยเฉพาะเหมาะสำหรับงานหล่อโลหะเงิน ทอง ทองเหลือง มีลักษณะพิเศษ คือ ทนความร้อน มีความแข็งแรง แต่สามารถทุบทำลายได้ง่าย ผิวละเอียด และสามารถรับแรงอัดจากน้ำโลหะได้โดยไม่แตกร้าว ปูนพลาสเตอร์มีส่วนผสมที่สำคัญคือ

ก. ยิปซัม (Gypsum) เมื่อให้ความร้อนกับยิปซัม ยิปซัมจะเปลี่ยนคุณสมบัติเป็นปูนพลาสเตอร์ จะทำหน้าที่ช่วยประสานระหว่างส่วนประกอบต่างๆ ในการหล่อ

ข. คริสโตบาลไลต์ (Cristobalite) จะช่วยให้ปูนหล่อแบบมีการขยายตัวได้ดี โดยไม่เกิดการแตกร้าว ทั้งในขณะการอบแม่พิมพ์ และในขณะเทน้ำโลหะเข้าไปในแม่พิมพ์

ค. ซิลิกา (Silica) ช่วยในการรักษาคุณสมบัติต่างๆ ของปูนพลาสเตอร์ไม่ให้เปลี่ยนแปลงไป เมื่อขณะได้รับความร้อน (ผศ.ปริศนา บุญศักดิ์ และนายวิเชียร มหาวิน, 2556)

ตารางที่ 2.3 สมบัติวัสดุพูนพลาสติก

คุณสมบัติ
อุณหภูมิหลอมเหลวไม่เกิน (Melting Point) 1,200 องศาเซลเซียส
ความหนาแน่น (Density) เท่ากับ 1,257 kg/m ³
ความร้อนเฉพาะ (Specific Heat) เท่ากับ 1,000 J/(kg*K)

ที่มา : ผศ.ปริศนา บุญศักดิ์ และนายวิเชียร มหาวาน, 2556

2.3 ปัญหาที่เกิดขึ้นในกระบวนการหล่อเครื่องประดับ

จากการศึกษาเกี่ยวกับปัญหาที่เกิดขึ้นในกระบวนการหล่อเครื่องประดับนั้นจะพบว่า มีข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นจากหลายสาเหตุ ดังตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 ข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นในงานหล่อเครื่องประดับ

ชนิดของข้อบกพร่อง	ลักษณะของข้อบกพร่อง	สาเหตุของการเกิดรูพรุน	วิธีแก้ไข
1. รูพรุนเกิดจากการหดตัวของน้ำโลหะ (Shrinkage Porosities)		<ol style="list-style-type: none"> 1. ติดทางเดินน้ำโลหะในตำแหน่งที่ไม่ถูกต้อง 2. ใช้ขนาดของทางเดินน้ำโลหะที่ไม่ถูกต้อง 3. อุณหภูมิเข้าปูนสูงเกินไป 4. ชี้นงานอยู่ใกล้กับรูเท่มากเกินไป 	<ol style="list-style-type: none"> 1. เพิ่มขนาดทางเดินน้ำโลหะให้มีขนาดใหญ่ขึ้น 2. ลดอุณหภูมิเข้าปูนให้ต่ำลง 3. เว้นระยะห่างอย่างน้อย 1 นิ้ว ระหว่างปากทางเข้ารูเทกับแถวแรกของชี้นงาน

ที่มา: เอกสิทธิ์ นิสารัตน์, 2549

ตารางที่ 2.4 (ต่อ) ข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นในงานหล่อเครื่องประดับ

ชนิดของข้อบกพร่อง	ลักษณะของข้อบกพร่อง	สาเหตุของการเกิดรูพรุน	วิธีแก้ไข
2. รูพรุนเกิดจากแก๊ส (Gas Porosities)		<ol style="list-style-type: none"> 1. อุณหภูมิของโลหะสูงเกินไป 2. อากาศภายในเตาไม่ถ่ายเท 3. เวลาอบปูนหล่อไม่เพียงพอ 4. อบเข้าปูนที่อุณหภูมิสูงเกินไป 5. ใช้เศษโลหะจากงานหล่อเก่ามาหลอมใหม่บ่อยเกินไป 6. มีออกซิเจนมากเกินไปในเปลวไฟหลอมโลหะ 	<ol style="list-style-type: none"> 1. ลดอุณหภูมิของโลหะระหว่างการหล่อ 2. เพิ่มการระบายอากาศภายในเตาอบ 3. เพิ่มเวลาในการอบปูน 4. ลดอุณหภูมิเข้าปูนลง 5. ทำความสะอาดเศษโลหะก่อนนำมาหลอมใหม่ 6. ใช้เปลวไฟขนาดเล็กลงในการหลอมโลหะ
3. น้ำโลหะไหลเข้าโพรงแบบไม่สมบูรณ์		<ol style="list-style-type: none"> 1. น้ำโลหะมีอุณหภูมิต่ำเกินไป 2. อุณหภูมิเข้าปูนต่ำเกินไป 3. สภาวะสุญญากาศไม่เพียงพอ 4. ใช้ทางเดินน้ำโลหะที่ไม่เหมาะสม 5. การอบเข้าปูนหล่อที่ไม่สมบูรณ์ 	<ol style="list-style-type: none"> 1. เพิ่มอุณหภูมิ น้ำโลหะ 2. เพิ่มอุณหภูมิของเข้าปูน 3. ตรวจสอบการอยรั่วของเครื่องสุญญากาศ 4. ปรับปรุงทางเดินน้ำโลหะ 5. เพิ่มเวลาในการอบปูน

ที่มา: เอกสิทธิ์ นิสารัตน์, 2549

ตารางที่ 2.4 (ต่อ) ข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นในงานหล่อเครื่องประดับ

ชนิดของข้อบกพร่อง	ลักษณะของข้อบกพร่อง	สาเหตุของการเกิดรูพรุน	วิธีแก้ไข
4. ผิวของชิ้นงานหยาบ		<ol style="list-style-type: none"> 1. ผิวของชิ้นงานต้นแบบหยาบ 2. ผิวของชิ้นงานเทียนหยาบ 3. อุณหภูมิของเบ้าปูนสูงเกินไป 4. น้ำโลหะมีอุณหภูมิสูงเกินไป 5. ทางเดินของน้ำโลหะไม่เหมาะสม 6. ใช้เวลาในการละลายเทียนนานเกินไป 7. เบ้าปูนไม่ได้ถูกทิ้งให้แข็งตัว 8. ใช้อัตราส่วนผสมปูนหล่อกับน้ำไม่เหมาะสม 9. เบ้าปูนได้รับความร้อนเร็วเกินไป 	<ol style="list-style-type: none"> 1. สร้างชิ้นงานต้นแบบและแม่พิมพ์ขึ้นมาใหม่ 2. ลดผงแป้งที่ใช้ระหว่างการฉีดเทียน 3. ลดอุณหภูมิเบ้าปูน 4. ลดอุณหภูมิการหล่อ 5. ปรับระบบทางเดินน้ำโลหะ 6. ใช้เวลาในการละลายเทียนไม่เกิน 1 ชั่วโมง 7. วางเบ้าปูนทิ้งไว้อย่างน้อย 1 ชั่วโมง 8. ผสมอัตราส่วนปูนและน้ำตามที่ผู้ผลิตระบุไว้
5. ฟองโลหะบนชิ้นงานหล่อ (Bubble)		<ol style="list-style-type: none"> 1. ปูนหล่อกับน้ำไม่ผสมเป็นเนื้อเดียวกัน 2. ปูนหล่อหนาเกินไป 3. ปูนหล่อแข็งตัวขณะดูดอากาศภายในปูนหล่อ 4. เกิดข้อผิดพลาดของปั๊มสุญญากาศ 5. เคลื่อนย้ายเบ้าปูนขณะทำการอบ 	<ol style="list-style-type: none"> 1. ทำตามคำแนะนำ นำของผู้ผลิตปูน 2. ตรวจสอบข้อต่อและผลึกของปั๊ม 3. ไม่ควรเคลื่อนย้ายเบ้าปูนเมื่อทำการอบแล้ว

ที่มา: เอกสิทธิ์ นิสารัตน์, 2549

ตารางที่ 2.4 (ต่อ) ข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นในงานหล่อเครื่องประดับ

ชนิดของข้อบกพร่อง	ลักษณะของข้อบกพร่อง	สาเหตุของการเกิดรูพรุน	วิธีแก้ไข
6. คราบน้ำ		<ol style="list-style-type: none"> 1. ไม่ทำตามคำแนะนำของผู้ผลิตในขั้นตอนการหล่อปูน 2. ผสมน้ำมากเกินไป 	<ol style="list-style-type: none"> 1. ทำตามคำแนะนำของผู้ผลิต 2. ใช้อัตราส่วนของน้ำที่เหมาะสม
7. ชิ้นงานเปราะ		<ol style="list-style-type: none"> 1. ใช้โลหะอัลลอยที่ไม่เหมาะสม 2. อุณหภูมิของน้ำโลหะต่ำเกินไป 3. อุณหภูมิเข้าต่ำเกินไป 4. ใช้ปริมาณโลหะเกินในการหล่อมากเกินไป 	<ol style="list-style-type: none"> 1. ควรใช้โลหะผสมที่มีคุณภาพ 2. เพิ่มอุณหภูมิในการหล่อ 3. เพิ่มอุณหภูมิเข้าปูน 4. ควรใช้โลหะเกินในการหล่อไม่เกิน 50%
8. ชิ้นงานเป็นครีป		<ol style="list-style-type: none"> 1. ใช้อัตราส่วนผสมปูนกับน้ำไม่เหมาะสม 2. เริ่มทำการอบเข้าปูนเร็วเกินไป 3. เข้าปูนแห้งสนิท 4. ใช้ผงปูนหล่อที่หมดอายุ 5. เข้าปูนได้รับความร้อนเร็วเกินไป 	<ol style="list-style-type: none"> 1. ใช้อัตราส่วนของน้ำ และผงปูนหล่อตามที่ผู้ผลิตแนะนำ 2. ทิ้งเข้าปูนไว้อย่างน้อย 1 ชั่วโมง 3. อย่าปล่อยให้เข้าปูนแห้งสนิท 4. ตรวจสอบวันหมดอายุของผงปูน 5. ทำตามคำแนะนำการอบเข้าปูน

ที่มา: เอกสิทธิ์ นิสารัตน์, 2549

ตารางที่ 2.4 (ต่อ) ข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นในงานหล่อเครื่องประดับ

ชนิดของข้อบกพร่อง	ลักษณะของข้อบกพร่อง	สาเหตุของการเกิดรูพรุน	วิธีแก้ไข
9. ผิวชิ้นงานมีลักษณะหยาบ และดำ เนื่องจากออกซิไดซ์		<ol style="list-style-type: none"> อุณหภูมิที่ใช้อบสูงเกินไป การใช้ออกซิไดซ์ฟลักซ์ ความร้อนมากเกินไป 	<ol style="list-style-type: none"> อุณหภูมิอบไม่เกิน 730 องศาเซลเซียส ใช้น้ำยาประสานทองเท่านั้น ใช้อุณหภูมิหลอมที่ถูกต้อง
10. สิ่งแปลกปลอมในงานหล่อ		<ol style="list-style-type: none"> ทางน้ำโลหะมีเหลี่ยมมุม และลักษณะโค้งเกินไป เตาหลอมเก่า และไม่มีประสิทธิภาพ เกิดออกไซด์ในเตาหลอม มีสิ่งแปลกปลอม หรือ ออกไซด์ในโลหะ 	<ol style="list-style-type: none"> แก้ไขทางเดินน้ำโลหะให้มีมุมต่างๆ เปลี่ยนเตาหลอมใหม่ ทำความสะอาด หรือเปลี่ยนเตาหลอม ทำความสะอาดโลหะก่อนนำมาหลอม

ที่มา: เอกสิทธิ์ นิสารัตน์, 2549

ดังนั้น จึงเลือกศึกษาปัญหาข้อบกพร่องลักษณะการเกิดรูพรุนที่เกิดจากการหดตัว เพื่อใช้ในการทดลอง เพื่อลดข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นกับชิ้นงาน เนื่องจากข้อบกพร่องรูพรุนเกิดจากการหดตัวของน้ำโลหะนั้นพบเป็นจำนวนมากในการหล่อเครื่องประดับ (สุรศิษฐ์ โรจนันต์ และคณะ, 2560) ซึ่งรูพรุนที่เกิดจากการหดตัว (Shrinkage Porosity) เป็นรูพรุนที่มีลักษณะรูปร่างที่ไม่แน่นอน โดยมากจะพบในตำแหน่งที่ชิ้นงานที่มีความหนา เพราะการหดตัวของน้ำโลหะที่กำลังแข็งตัว ซึ่งเกิดจากโลหะอยู่ในสถานะของแข็ง ดังนั้น เมื่อเกิดการแข็งตัวของน้ำโลหะ รูพรุนจากการหดตัวนี้จะเกิดขึ้นในกระบวนการแข็งตัวของโลหะที่หดตัวขณะเปลี่ยนสถานะเป็นของแข็ง และมีการหดตัวของน้ำโลหะเข้าไปแทนที่ในส่วนนี้ไม่เพียงพอ

2.4 การออกแบบเครื่องประดับแหวน

การออกแบบเครื่องประดับแหวน คือ การกำหนดความคิด ความต้องการที่จะแสดงออกในการสร้างสรรค์สิ่งใหม่ๆ การปรับปรุงแก้ไขสิ่งเดิมให้เหมาะสมกับประโยชน์การใช้งาน และการเปลี่ยนแปลงตามยุคสมัย การออกแบบเครื่องประดับในปัจจุบันสามารถออกแบบได้ทั้งการวาดด้วยมือ และการใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ต่างๆ มาช่วยในการออกแบบ

2.4.1 องค์ประกอบของการออกแบบเครื่องประดับ

ในกระบวนการออกแบบจำเป็นต้องมีความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับองค์ประกอบของแบบเครื่องประดับ ได้แก่ จุด เส้น รูปร่างและรูปทรง ขนาดและมาตราส่วน ช่องว่าง ลักษณะผิว และความสมดุล (ธานี ภู่นพคุณ, 2560)

2.4.1.1 จุด (Point)

จุด คือ จุดแต่มีลักษณะกลมเป็นส่วนประกอบที่เล็กที่สุดเป็นพื้นฐานที่สำคัญในงานออกแบบทุกชนิด เมื่อนำจุดมาเรียงกันในตำแหน่งที่เหมาะสมก็จะเกิดเป็นรูปร่าง รูปทรง ระยะใกล้ ไกล สำหรับการออกแบบจุดควรจะคำนึงถึงการกำหนดตำแหน่ง (Position) ต่างๆ

2.4.1.2 เส้น (Lines)

เส้น คือ องค์ประกอบพื้นฐานของการออกแบบ คือ การเริ่มจากจุด หากนำจุดมาเรียงต่อกันไปอย่างต่อเนื่องจะเกิดเป็นเส้น และรูปร่างขึ้นองค์ประกอบของการออกแบบของรูปทรง รูปร่าง คือ การนำเส้นมาเรียงร้อยประกอบกันจนเป็นรูปทรงต่างๆโดยลักษณะของเส้นจะมี 2 ลักษณะ คือ เส้นตรง (Straight Line) และเส้นโค้ง (Curve Line) ซึ่งลักษณะเส้นแต่ละเส้นนั้นจะให้ความรู้สึกที่แตกต่างกันไป

2.4.1.3 รูปร่างและรูปทรง (Shape and Form)

รูปร่าง คือ องค์ประกอบต่อเนื่องมาจากเส้นเกิดจากการนำเส้นแบบต่าง ๆ มาต่อกันจนได้รูปร่าง 2 มิติที่มีความกว้างและความยาว (หรือความสูง) เช่น รูปวงกลม สามเหลี่ยม สี่เหลี่ยม และรูปร่างอิสระที่เนื้อที่ผิวที่ระนาบมากกว่าแสดงปริมาตร และมวล

รูปทรง คือ รูปร่างที่มีมิติเพิ่มขึ้นมากลายเป็นงาน 3 มิติ คือ มีความลึกเพิ่มเข้ามาด้วย เช่น รูปทรงกลม รูปทรงสามเหลี่ยม รูปทรงกระบอก ให้ความรู้สึกปริมาตร และความหนาแน่น มวลสาร ที่เกิดจากการใช้น้ำหนักหรือการจัดองค์ประกอบของรูปทรงหลายรูปรวมกัน ซึ่งสำหรับการออกแบบเครื่องประดับสามารถแบ่งได้เป็น 3 ประเภทหลัก ๆ ได้แก่ รูปทรงของธรรมชาติ (Organic Form) รูปทรงเรขาคณิต (Geometric Form) และรูปทรงอิสระ (Free Form)

2.4.1.4 ช่องว่าง (Space)

ช่องว่าง คือ ช่องว่างรอบๆ วัตถุ และช่องว่างของวัตถุ โดยการออกแบบจะต้องให้ความสัมพันธ์กัน หากมีการจัดวางเนื้อที่ หรือระยะของสิ่งของอย่างถูกต้องกลมกลืนกัน ไม่ว่าจะ เป็นรูปร่าง หรือช่องว่าง จะทำให้เกิดความเป็นระเบียบ และเห็นถึงความเด่นชัดของการออกแบบ ลักษณะของพื้นผิว

2.4.1.5 ขนาดและมาตราส่วน (Size and Scale)

ขนาด (Size) คือ พื้นที่ขอบเขตหนึ่ง ซึ่งพื้นที่นั้นจะเป็นแบบ 2 มิติ หรือแบบ 3 มิติก็ได้ มาตราส่วน (Scale) คือ ขนาดของสิ่ง 2 สิ่งขึ้นไป ที่มีความกลมกลืนกันอย่างเหมาะสม ความสัมพันธ์ของขนาด และมาตราส่วนในการออกแบบ

2.4.1.6 ความสมดุล (Balance)

ความสมดุล คือ องค์ประกอบที่ทำให้ความรู้สึกเท่ากันทั้งสองข้าง และความสัมพันธ์ความสมดุลกลมกลืนไปด้วยกัน ในงานออกแบบที่เกี่ยวข้องกับการมองเห็นสิ่งต่างๆ ตามหลักในงานออกแบบนั้น ความสมดุลแบ่งออกเป็น 3 แบบ คือ

- ก. ความสมดุล เท่ากันทั้งสองข้างทุกประการ
- ข. ความสมดุล ไม่เท่ากันทั้งสองข้างหนักไปข้างใดข้างหนึ่ง
- ค. ความสมดุล ที่เริ่มจากศูนย์กลางแล้วกระจายไปโดยรอบ

2.4.1.7 ลักษณะผิว (Texture)

พื้นผิว หมายถึง บริเวณผิวนอกของวัสดุต่างๆ ซึ่งมีผลต่อความรู้สึกในเรื่องของความงาม ระยะ น้ำหนัก และประโยชน์ตามการใช้งานลักษณะของพื้นผิวจะรับรู้ได้ ด้วยการสัมผัสผัสทางตา และสัมผัสทางกาย การนำเอาพื้นผิวในลักษณะต่างๆ มาใช้ เพื่อสร้างสรรค์ความงาม และประโยชน์ใช้ตามการใช้งาน โดยในการออกแบบ พื้นผิวจะถูกนำมาใช้ในลักษณะต่างๆ กัน

2.4.2 การออกแบบด้วยมือ

การออกแบบด้วยมือ หรือการวาดแบบร่างด้วยมือบนกระดาษ การวาดแบบบนกระดาษด้วยมือเป็นงานละเอียดต้องการความสามารถสูง และใช้เวลานาน เป็นวิธีที่นิยมใช้ของนักออกแบบในขั้นตอนเริ่มต้นของการออกแบบสิ่งต่างๆ และมักถูกใช้บ่อยในการบันทึกแนวความคิด วิธีนี้มักจะนิยมใช้เพราะต้นทุนต่ำและสะดวกในทุกที่

2.4.3 การออกแบบด้วยคอมพิวเตอร์

การออกแบบที่ใช้คอมพิวเตอร์ทำงาน หรือที่เราเรียกว่า คอมพิวเตอร์ช่วยในการออกแบบ (CAD) เป็นสิ่งที่เข้ามามีบทบาทต่อการออกแบบ และวาดแบบในปัจจุบันมากขึ้น เป็นเครื่องมือช่วยให้งานวาดแบบง่าย และรวดเร็วขึ้น เช่น เครื่องมือในการออกแบบ เครื่องมือในการคำนวณ และเขียนขนาดอัตโนมัติ เป็นต้น งานวาดแบบด้วยคอมพิวเตอร์จะถูกจัดเก็บในรูปของข้อมูลอิเล็กทรอนิกส์สามารถนำกลับมาแก้ไขปรับเปลี่ยนส่งผ่านระบบสื่อสารเครือข่ายหรือพิมพ์ออกเครื่องพิมพ์ได้อย่างสะดวกง่ายดาย ซึ่งขั้นตอนการจำลองงานหล่อ เริ่มต้นกระบวนการโดยการสร้างแบบจำลองชิ้นงานแบบ 3 มิติ การสร้างผิวของวัตถุ ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยในการออกแบบ ในการสร้างวัตถุแบบ 3 มิตินั้น สามารถสร้างขึ้นได้หลากหลายวิธีด้วยกัน แต่ละวิธีก็จะมีเทคนิคและความยากง่ายต่างกัน ดังนั้น การเลือกวิธีการสร้างพื้นผิววัตถุแบบ 3 มิติได้อย่างเหมาะสม จะทำให้การขึ้นรูปเป็นไปอย่างรวดเร็ว ซึ่งในการทำโครงงานที่สนใจการวาดแบบที่ใช้คอมพิวเตอร์ โดยใช้โปรแกรม Rhinoceros 5.0

2.5 แบบจำลองกระบวนการหล่อ

2.5.1 โปรแกรมช่วยในการจำลอง (Program Simulation)

เป็นการประยุกต์โปรแกรมทางคอมพิวเตอร์ใช้กับงานวิศวกรรม โดยใช้คอมพิวเตอร์ช่วยวิเคราะห์ปรากฏการณ์ และกระบวนการให้สามารถเห็นผลที่ดี หรือเห็นผลเสียก่อนทำการผลิตที่รู้จักกันทั่วไปในชื่อของคอมพิวเตอร์ช่วยวิเคราะห์ทางวิศวกรรม (CAE) ซึ่งจะช่วยให้สามารถเห็นผลจากการจำลอง (Simulation) และทำการวิเคราะห์สถานการณ์ของการผลิตล่วงหน้าทำให้ได้รู้ถึงจุดบกพร่องที่ควรแก้ไขทั้งในด้านการออกแบบ และตัวปัจจัย (Parameter) ที่ได้กำหนด แล้วป้อนใส่เข้าไปในโปรแกรมก่อนทำการวิเคราะห์ในโปรแกรมการจำลองทางวิศวกรรม สามารถที่จะเปลี่ยนแปลงตัวปัจจัยที่มีผลกระทบต่อกระบวนการออกแบบในขั้นตอนต่างๆ สามารถปรับเปลี่ยนได้โดยง่าย ไม่เกิดผลเสียกับงาน และปัจจัยเป็นค่าที่มีผลต่อการทำงานจริง ดังนั้น การใช้โปรแกรมช่วยในการจำลองนี้เป็นการช่วยเพิ่มคุณภาพของชิ้นงาน วิเคราะห์หาสาเหตุข้อบกพร่องต่างๆ ของชิ้นงานก่อนทำการหล่อจริง (เชิดศักดิ์, 2547)

2.5.2 พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational Fluid Dynamics: CFD)

เป็นวิธีการทางวิศวกรรมแบบหนึ่ง เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ปรากฏการณ์ที่เกี่ยวข้องกับการไหลต่างๆ การถ่ายเทความร้อน การแพร่กระจายของอนุภาค และการเกิดปฏิกิริยาเคมีต่างๆ โดยใช้คอมพิวเตอร์ช่วยหาผลลัพธ์ และจำลองกระบวนการที่เกิดขึ้น โดยวิธีเชิงตัวเลขสำหรับการไหล ซึ่งทำโดยการสร้างโครงตาข่ายของรูปทรงที่กำลังศึกษา และอาศัยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในการแบ่งช่วงให้เป็นเซลล์ขนาดเล็ก เพื่อก่อให้เกิดโครงตาข่ายเชิงปริมาตร (Volume Mesh) หรือกริด (Grid) แล้วใช้อัลกอริธึม (Algorithm) ที่เหมาะสมในการแก้สมการของการเคลื่อนที่ของของไหลจาก Mesh หนึ่งไปยังอีก Mesh หนึ่ง ซึ่งเป็นสมการออยเลอร์ (Euler Equation) และสมการนาเวียร์-สโตกส์ (Navier Stokes Equation)

เนื่องจาก CFD เป็นการนำความรู้ทางด้าน การเขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์มาประยุกต์ในการแก้ไขปัญหาทั้งทางด้านวิศวกรรม ซึ่งการทดลองปฏิบัติจริงจะต้องมีการจัดเตรียมเครื่องมืออุปกรณ์เป็นอย่างมาก และต้องมีการลงทุนในจำนวนเงินที่มาก แต่ CFD ทำให้สามารถวิเคราะห์การเคลื่อนที่ของของไหล และสามารถคาดการณ์ภาวะของเชิงความร้อน ความเร็ว หรือทิศทางได้อย่างแม่นยำ นำไปสู่การออกแบบที่ถูกต้อง และประหยัดค่าใช้จ่ายที่ไม่จำเป็นได้เป็นอย่างมาก

2.5.3 ระเบียบวิธี (Methodology)

ระเบียบวิธีสำหรับพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณมีวิธีการพื้นฐานในการคำนวณเหมือนกัน โดยมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

2.5.3.1 กำหนดรูปทรงหรือเรขาคณิต

2.5.3.2 ปริมาตรของของไหลถูกแบ่งออกเป็นเซลล์ขนาดเล็กแบบเป็นช่วง (โครงตาข่าย)

2.5.3.3 กำหนดสมการสำหรับการจำลองแบบทางกายภาพ เช่น สมการสำหรับการเคลื่อนที่ การอนุรักษ์มวล และการจำลองแบบทางด้านพลศาสตร์ของไหลที่เกี่ยวข้องกับสมการควบคุมหลักๆ

2.5.3.4 การกำหนดเงื่อนไขขอบเขต (Boundary Condition) ซึ่งจะเกี่ยวข้องกับพฤติกรรมของของไหล และขอบเขตของปัญหาที่ทำการศึกษา

2.5.3.5 สมการควบคุมจะถูกแก้โดยอาศัยระเบียบวิธีทำซ้ำ (Iteration)

2.5.3.6 ทำการวิเคราะห์ผล และแสดงผลภาพสำหรับผลลัพธ์ที่ได้

2.5.4 ระเบียบวิธีการแบ่งช่วง (Discretization Methods)

การเลือกใช้ระเบียบวิธีการแบ่งช่วงเกี่ยวข้องกับการแก้ระบบสมการเชิงเส้น โดยอาศัยระเบียบวิธีเชิงตัวเลข (Numerical Methods) มากกว่าที่จะเกิดขึ้นกับการแก้สมการ โดยอาศัยระเบียบวิธีวิเคราะห์ (Analytical Methods) ดังนั้น การเลือกใช้ระเบียบวิธีในการแบ่งช่วง สำหรับบางระเบียบวิธีจึงจำเป็นต้องระวังเรื่องเสถียรภาพ เพื่อให้ได้ผลลัพธ์สำหรับระเบียบวิธีที่ใช้ในการแบ่งช่วงในปัญหาพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณดังต่อไปนี้

2.5.4.1 ระเบียบวิธีปริมาตรแบบต่อเนื่อง (Finite Volume Method)

ระเบียบวิธีปริมาตรแบบต่อเนื่องเป็นระเบียบวิธีมาตรฐาน สำหรับใช้ในการพัฒนาซอฟต์แวร์เชิงพาณิชย์ และโปรแกรมสำหรับงานวิจัย สมการควบคุม (Governing Equation) โดยพิจารณาให้เป็นปริมาตรควบคุมแบบเป็นช่วง (Discrete Control Volumes) และอาศัยการอินทิกรัล เพื่อให้ได้ปริมาณที่มีการอนุรักษ์ แสดงดังสมการที่ 2.1

$$\frac{d}{dt} \int V Q dV + \int F dA = 0 \quad [2.1]$$

เมื่อ Q คือ เวกเตอร์ของตัวแปรที่มีการอนุรักษ์

F คือ เวกเตอร์ของฟลักซ์

V คือ ปริมาตรของเซลล์

A คือ พื้นที่ผิวของเซลล์

2.5.4.2 ระเบียบวิธีเอลิเมนต์แบบต่อเนื่อง (Finite Element Method)

ระเบียบวิธีเอลิเมนต์แบบต่อเนื่อง เป็นระเบียบวิธีที่นิยมใช้ในการหาคำตอบของสมการทางคณิตศาสตร์โดยการประมาณ และวิเคราะห์ปัญหาที่มีความซับซ้อนทางด้านรูปร่างในโครงสร้างของของแข็ง และของไหล

2.5.4.3 ระเบียบวิธีผลต่างแบบต่อเนื่อง (Finite Difference Method)

ระเบียบวิธีผลต่างแบบต่อเนื่อง ทำให้สะดวกในการเขียนโปรแกรม โดยปัจจุบันระเบียบวิธีนี้ถูกใช้ในการเขียนโปรแกรมเฉพาะทางในบางโปรแกรมเท่านั้น แต่ระเบียบวิธีแบบนี้มีข้อเสีย คือ ต้องการโครงตาข่ายที่มีโครงสร้าง (Structured Mesh) และต้องการการแปลงระบบพิกัดสำหรับรูปทรง หรือเรขาคณิตที่มีความสลับซับซ้อนสูง แสดงดังสมการที่ 2.2

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial F}{\partial x} + \frac{\partial G}{\partial y} + \frac{\partial H}{\partial z} = 0 \quad [2.2]$$

เมื่อ Q คือ เวกเตอร์ของปริมาณที่มีการอนุรักษ์

F, G, H คือ ฟลักซ์ในทิศทาง x, y และ z ตามลำดับ

2.5.4.4 ระเบียบวิธีเอลิเมนต์ขอบเขต (Boundary Element Method)

ระเบียบวิธีเอลิเมนต์ขอบเขต เป็นการพิจารณาขอบเขตของของไหลโดยแบ่งออกเป็นโครงตาข่ายพื้นผิว (Surface Mesh)

2.5.5 ทฤษฎีและลักษณะของระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ใช้สำหรับแก้สมการเชิงอนุพันธ์ (Differential Equations) นิยมใช้แก้ปัญหาทางวิศวกรรมศาสตร์อย่างแพร่หลาย ซึ่งสามารถใช้วิเคราะห์ปัญหาเรื่องการถ่ายเทความร้อน ปัญหาทางด้านกลศาสตร์ ทางด้านพลศาสตร์ และทางด้านสถิตศาสตร์

หลักการของไฟไนต์เอลิเมนต์เริ่มต้น ด้วยการแบ่งขอบเขตของปริมาตรที่ออกเซลล์ขนาดเล็กที่เรียกว่า Element ซึ่งมักจะอยู่ในรูปสี่เหลี่ยม หรือสามเหลี่ยม โดยมีจุดเชื่อมต่อกันแต่ละ Element จุดนั้นเรียกว่า Node เมื่อ Element ต่อกันจนได้เป็นรูปร่าง จะเรียกรูปร่างนั้นว่าแบบไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Model) วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จะมีการสร้างฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์ เพื่อหาคำตอบที่จุดเหล่านั้นพร้อมๆ กัน โดยอาศัยเครื่องคอมพิวเตอร์แทนการแก้สมการเชิงอนุพันธ์

2.5.6 หลักการทั่วไปสำหรับวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

การศึกษาวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จะต้องมีความเข้าใจหลักการงานเบื้องต้นเกี่ยวกับชนิดของเอลิเมนต์ วิธีในการแบ่งเอลิเมนต์ การกำหนดตำแหน่ง และการจำลองแบบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ รวมทั้งจะต้องมีพื้นฐานความรู้ทางด้านวิศวกรรมศาสตร์ เพื่อใช้ประกอบการหาสมการไฟไนต์

เอลิเมนต์ประยุกต์ใช้ในเครื่องคอมพิวเตอร์ และช่วยในการคำนวณปัญหาที่ซับซ้อน การแบ่งโครงสร้างหรือการแบ่งปริมาตรเป็นเซลล์ขนาดเล็กๆ จำเป็นต้องเลือกใช้ชนิดของเอลิเมนต์ที่เหมาะสมกับรูปร่างลักษณะของชิ้นงาน สามารถแบ่งชนิดของเอลิเมนต์ตามมิติได้เป็น 3 ประเภท ดังนี้

2.5.6.1 เอลิเมนต์มิติเดียว นำไปใช้ในการวิเคราะห์ปัญหามิติเดียว เช่น ชิ้นส่วนที่มีแรงมากระทำในแนวแกน ได้รับแรงบิดการโก่งของคานการนำความร้อนในทิศทางเดียว เป็นต้น

2.5.6.2 เอลิเมนต์สองมิติ ใช้วิเคราะห์ความเค้นความเครียด มีลักษณะเป็นรูปสามเหลี่ยมและสี่เหลี่ยมประกอบด้วยเส้นตรงและเส้นโค้ง เอลิเมนต์สี่เหลี่ยมประกอบด้วย 4 จุด เอลิเมนต์สามเหลี่ยมประกอบด้วย 3 จุด โดยทั่วไปนิยมใช้เอลิเมนต์แบบสี่เหลี่ยมมากกว่าเอลิเมนต์สามเหลี่ยม เพราะให้ผลเฉลยที่ถูกต้องแม่นยำกว่า แต่ในการเลือกก็ควรขึ้นอยู่กับลักษณะรูปร่างของชิ้นงานจริง

2.5.6.3 เอลิเมนต์สามมิติ ลักษณะของเอลิเมนต์จะเป็นสี่เหลี่ยมปริซึม และรูปกรวยสามเหลี่ยมเป็นสามมิติทรง 6 หน้า (Hexahedron) ชนิดด้านตรง ประกอบด้วย 8 จุด



รูปที่ 2.3 แสดงเอลิเมนต์ในมิติที่ประกอบด้วยจุดต่อต่างๆ

ที่มา : ดร. จอมภพ แวศักดิ์, 2549

หลักการของวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ คือ การสร้างสมการสำหรับแต่ละเอลิเมนต์ให้สอดคล้องกับสมการเชิงอนุพันธ์ของปัญหาที่ทำอยู่ แล้วรวมเข้าด้วยกันเป็นสมการชุดใหญ่ก่อให้เกิดเป็นรูปร่างทั้งหมดของปัญหา จากนั้นจึงทำการกำหนดค่าลงไปในสมการชุดใหญ่แล้วจึงทำการแก้สมการก่อให้เกิดผลลัพธ์ (ดร. จอมภพ แวศักดิ์, 2549)

2.5.7 การใช้ไฟไนต์วิธีเอลิเมนต์ (Finite Element Method) ช่วยในการแก้ปัญหาทางด้านวิศวกรรม

ในงานวิศวกรรมนั้นได้ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายในการหล่อ เพื่อที่จะศึกษาเกี่ยวกับความสัมพันธ์ที่ซับซ้อนระหว่างพื้นผิวในด้านการสัมผัส การถ่ายเทความร้อน การไหล และโครงสร้างของวัสดุ เนื่องจากการนำความสามารถในการจำลองกระบวนการต่างๆ ของระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มาประยุกต์ใช้กับความรู้ทางด้านวิศวกรรม จะช่วยทำให้เข้าใจกระบวนการที่ซับซ้อนได้ดีขึ้น และยังสามารถช่วยวิเคราะห์ข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นในการหล่อ การออกแบบ และการเลือกค่าปัจจัยในการผลิตให้มีประสิทธิภาพ ซึ่งกระบวนการแก้ปัญหาด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ซอฟต์แวร์มีดังนี้

2.5.7.1 การสร้าง Mesh (Mesh Generation) คือ การตี Mesh เพื่อประกอบเป็นโมเดล หากรูปร่างของโมเดลมีความซับซ้อนมาก จะต้องตี Mesh ให้มีความละเอียดเพื่อให้รูปแบบของไฟไนต์เอลิเมนต์มีรูปร่างเสมือนโมเดลต้นแบบมากที่สุด ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับประสบการณ์การใช้ซอฟต์แวร์ด้วยจึงสามารถสร้างโมเดลที่กำหนดอย่างถูกต้อง และมีประสิทธิภาพ

2.5.7.2 การประมวลผลเบื้องต้น (Pre-Processing) คือ การป้อนข้อมูล และกำหนดเงื่อนไขขอบเขตให้เป็นความจริง หรือใกล้เคียงกับของจริงให้มากที่สุด จึงนำไปสู่ผลลัพธ์ที่สอดคล้องกับความเป็นจริง

2.5.7.3 การประมวลผล (Processing) คือ โปรแกรมคอมพิวเตอร์จะสร้างสมการไฟไนต์เอลิเมนต์ให้สอดคล้องกับปัญหานั้นสำหรับทุกเอลิเมนต์ก่อนที่จะนำมาประกอบเข้าเป็นระบบสมการชุดใหญ่ โดยเวลาที่ใช้ในการคำนวณจะขึ้นอยู่กับจำนวนเอลิเมนต์ทั้งหมด จากนั้นสมการจะถูกประมวลผลข้อมูลต่างๆ ที่กรอกลงไปในโมเดล

2.5.7.4 สรุปผล (Post- Processing) คือ การแสดงผลลัพธ์ที่เกิดขึ้นจากการจำลอง และแสดงผลลัพธ์ในรูปแบบต่างๆ เช่น แสดงด้วยแถบสี (Fringe Plot) การแสดงด้วยเส้นชั้นสี (Contour Lines) การแสดงด้วยเวกเตอร์ (Vector Plot) เป็นต้น (Somlak Wannarumon, and Marco Actis Grande, 2009)

2.5.8 โปรแกรมช่วยในการจำลองการหล่อ (Program Simulation of Casting)

ในการจัดทำโครงการได้นำโปรแกรมคอมพิวเตอร์ทางพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational Fluid Dynamics : CFD) เป็นปรากฏการณ์ทางกายภาพ และจุลภาคที่เกิดขึ้นในกระบวนการหล่อเครื่องประดับ ซึ่งการจำลองกระบวนการหล่อเครื่องประดับบนคอมพิวเตอร์ช่วยวิเคราะห์การเคลื่อนที่ของของไหล ขณะถูกเทน้ำโลหะลงในเบ้าปูน จากนั้นจะเกิดการถ่ายเทความร้อนจากน้ำโลหะ ผ่านผิวของเบ้าปูน ทำให้น้ำโลหะมีอุณหภูมิลดลง จนเกิดการแข็งตัว พฤติกรรม และเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นในขณะที่น้ำโลหะเกิดการถ่ายเทความร้อนมีผลกระทบต่อคุณภาพของชิ้นงานเครื่องประดับอย่างมาก ช่วยในการแก้ปัญหา และวิเคราะห์ค่าปัจจัยที่เหมาะสมของกระบวนการหล่อ เช่น อุณหภูมิในการเทน้ำโลหะ อุณหภูมิของเบ้าปูน และรูปแบบของต้นเทียน

เมื่อเลือกใช้ชุดค่าปัจจัยที่เหมาะสม จะช่วยเพิ่มคุณภาพของชิ้นงานเครื่องประดับ ช่วยลดของเสียที่เกิดขึ้นในกระบวนการหล่อ สามารถหลีกเลี่ยงการลองผิดลองถูกที่ใช้กันในอดีตอย่างสิ้นเชิง และลดค่าใช้จ่ายในกระบวนการหล่อได้ในที่สุด

การวิเคราะห์ผลของการจำลองหลักๆ มีดังนี้

- 2.5.8.1 การไหลของน้ำโลหะในเบ้าปูน (Filling)
- 2.5.8.2 ความเร็วในการไหลของน้ำโลหะในเบ้าปูน (Melt Velocity)
- 2.5.8.3 แรงดันของน้ำโลหะในเบ้าปูน (Melt Pressure)
- 2.5.8.4 การแข็งตัวของน้ำโลหะในเบ้าปูน (Solidification)
- 2.5.8.5 ทิศทางการไหลของน้ำโลหะในเบ้าปูน (Flow Direction)
- 2.5.8.6 รูพรุนที่อาจเกิดขึ้นกับชิ้นงานหล่อ (Porosity)

ในการจำลองโดยใช้โปรแกรมช่วยในการหล่อนั้น การจะได้ผลลัพธ์ที่มีความเที่ยงตรงขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ ที่ป้อนเข้าไปในโปรแกรมในการศึกษานี้ผู้จัดทำโครงงาน จึงใช้หลักการพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (CFD) ในการจำลองการไหลแบบต่อเนื่องได้นำการจำลองเชิงตัวเลขไปใช้ในกระบวนการผลิตเครื่องประดับเป็นเครื่องมือช่วยบนคอมพิวเตอร์ แล้วใช้ปัจจัยที่เหมาะสมช่วยวิเคราะห์หาสาเหตุการเกิดข้อบกพร่องบนชิ้นงานหล่อ และช่วยในการออกแบบแบบหล่อ หรือเบ้าปูน (มงคล แก้วนพรัตน์, 2555)

ตารางที่ 2.5 Software ที่นิยมใช้ในงานหล่อโลหะในปัจจุบัน

ชื่อโปรแกรม
AFS Solidification System (3-D)
Castcae
EKK Metal Casting Simulation Software
Flow-3D Software
MAGMA Software
Novaflow and Solid
Simtec
ProCAST
ANYCAST

ที่มา : เชิดศักดิ์ อรัญมาลา, 2547

2.6 ทฤษฎีการออกแบบการทดลอง

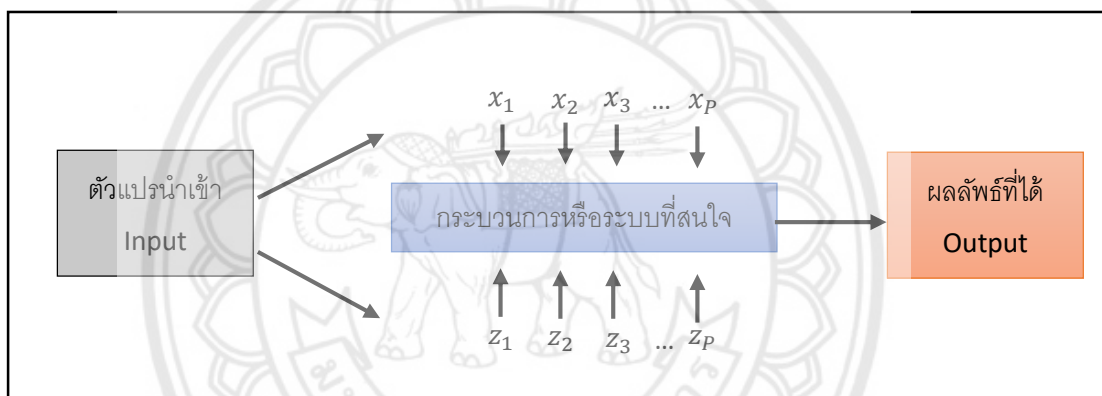
2.6.1 การออกแบบแผนการทดลอง

(Experimental Design or Design of Experiments)

การออกแบบแผนการทดลอง คือ การทดสอบแค่เพียงครั้งเดียว หรือหลายครั้งอย่างต่อเนื่อง โดยมีการกำหนดการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรนำเข้า (Input Variables) ในระบบ หรือกระบวนการใดๆ ที่สนใจ เพื่อจะทำให้สามารถสังเกต และแสดงให้เห็นถึงสาเหตุที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของผลลัพธ์ที่ได้ (Output or Responses) จากกระบวนการ โดยตัวแปรนำเข้าจะถูกจัดแบ่งเป็น 2 ปัจจัย (ประไพศรี สุกทัศน์ ณ อยุธยา, 2551) ได้แก่

2.6.1.1 ตัวแปร หรือปัจจัยที่สามารถควบคุมได้ (Controllable Variables or Factors)

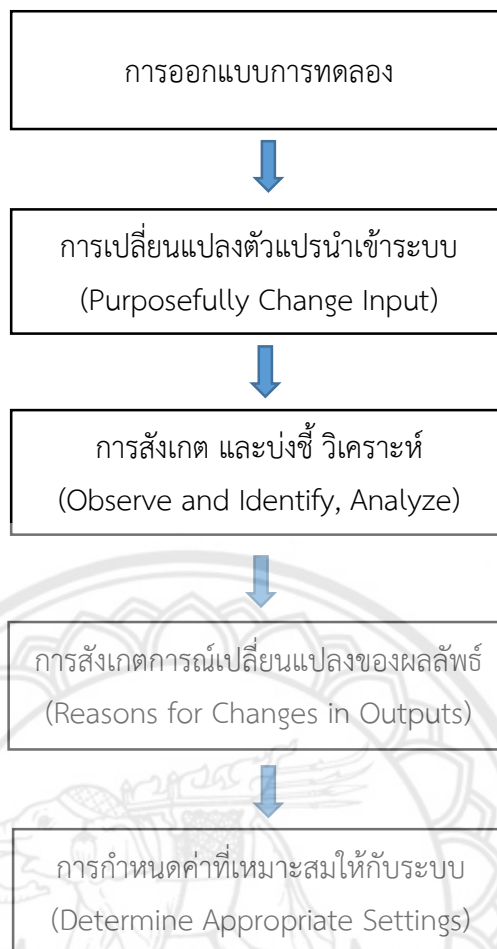
2.6.1.2 ตัวแปร หรือปัจจัยที่ไม่สามารถควบคุมได้ (Uncontrollable Variables or Factors)



รูปที่ 2.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต่างๆ ในกระบวนการหรือระบบที่สนใจ

ที่มา: ประไพศรี สุกทัศน์ ณ อยุธยา, 2551

การกำหนดตัวแปรที่สามารถควบคุมได้ และตัวแปรที่ไม่สามารถควบคุมได้ขึ้นอยู่กับระบบ ซึ่งโดยส่วนมากแล้วนั้นตัวแปรที่ไม่สามารถควบคุมได้ หรือตัวแปรรบกวน (Noise Variables) จะเกี่ยวข้องกับสิ่งแวดล้อมทางธรรมชาติ เช่น ความชื้นในอากาศ อุณหภูมิภายนอก หรือระบบที่ใช้การควบคุมแบบประมัตระวังสูง เพราะหากเสียหายจะทำให้สูญเสียค่าใช้จ่ายจำนวนมาก เป็นต้น ส่วนตัวแปรที่สามารถควบคุมได้ เช่น เครื่องจักรที่ใช้ในการผลิต อุณหภูมิที่ใช้ในการผลิต และวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิต เป็นต้น สามารถสรุปหลักการการออกแบบการทดลอง ดังแสดงในรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 หลักการสำคัญในการออกแบบการทดลอง
ที่มา: ประไพศรี สุทัศน์ ณ อยุธยา, 2551

ดังนั้น ภาพรวมหลักการลำดับในการออกแบบการทดลองนั้นมีความสำคัญอย่างยิ่งในส่วนของการออกแบบกระบวนการ กำหนดค่าเงื่อนไข หรือปัจจัยที่เหมาะสม เพื่อนำไปใช้ในระบบหรือกระบวนการ สามารถเรียกว่า Factor Design ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งในการออกแบบกระบวนการ (Design Process)

2.6.2 การออกแบบการผลิตหรือผลิตภัณฑ์ (Process or Product Design)

การออกแบบกระบวนการหรือผลิตภัณฑ์ แบ่งออกเป็น 3 ส่วน (ประไพศรี สุทัศน์ ณ อยุธยา, 2551) ดังนี้

2.6.2.1 การออกแบบระบบ (System Design)

เป็นการประยุกต์ความรู้ทางวิทยาศาสตร์ และวิศวกรรมเพื่อใช้ในกระบวนการเพื่อออกแบบตัวแบบเริ่มต้น หรือต้นแบบ (Basic Prototype) โดยตัวแบบกำหนดโดยค่าเริ่มต้นของลักษณะทางคุณภาพที่เป็นความต้องการของผลิตภัณฑ์ หรือกระบวนการ

2.6.2.2 การออกแบบปัจจัย (Factor Design)

เป็นการศึกษา เพื่อกำหนดและระบุค่าที่ดีที่สุดที่เหมาะสมภายใต้เงื่อนไขที่ต้องการป้อนให้กับกระบวนการ ซึ่งการออกแบบค่าพารามิเตอร์นั้นทำได้ 2 วิธี คือ

- ก. การกำหนดปัจจัยหาผลลัพธ์ที่ดีที่สุด
- ข. การกำหนดปัจจัย เพื่อหาผลลัพธ์ตามที่กำหนดไว้

2.6.2.3 การออกแบบค่าพิถีพิถัน (Tolerance Design)

เป็นการกำหนดค่าพิถีพิถันที่เหมาะสมที่สุดในกระบวนการผลิตที่จะทำให้คุณภาพของการผลิตสูง และค่าใช้จ่ายที่น้อยที่สุด

2.6.3 ประโยชน์ของการออกแบบการทดลอง

การออกแบบการทดลอง มีวัตถุประสงค์ที่สำคัญสามารถสรุป แบ่งออกเป็น 4 ส่วนดังนี้

2.6.3.1 กำหนดตัวแปรที่สามารถควบคุมได้ที่มีอิทธิพลสูงสุดต่อการเปลี่ยนแปลงของผลลัพธ์หรือตัวแปรตอบสนอง

2.6.3.2 กำหนดค่าของตัวแปรที่ไม่สามารถควบคุมได้ ที่มีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนแปลงผลลัพธ์หรือตัวแปรตอบสนอง เพื่อให้ค่าตัวแปรตอบสนองมีค่าใกล้เคียงกับค่าเป้าหมายที่ต้องการมากที่สุด

2.6.3.3 กำหนดตัวแปรที่สามารถควบคุมได้ที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงผลลัพธ์หรือตัวแปรตอบสนอง โดยกำหนดให้ค่าความแปรปรวนของตัวแปรตอบสนองมีค่าต่ำที่สุด

2.6.3.4 กำหนดค่าของปัจจัยที่สามารถควบคุมได้ที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงผลลัพธ์หรือตัวแปรตอบสนอง เพื่อให้ผลกระทบของตัวแปรที่ไม่สามารถควบคุมได้มีค่าป้อนน้อยที่สุด ซึ่งการทำการออกแบบการทดลองนั้นจะต้องกำหนดวัตถุประสงค์ขึ้นก่อน และวัตถุประสงค์ในลำดับที่สูงขึ้นจะบรรลุได้ต้องผ่านการวิเคราะห์ส่วนก่อนหน้าไปพร้อมๆ กัน

จากทฤษฎีการออกแบบการทดลองข้างต้น การทดลองในโครงการนี้เกี่ยวข้องกับการทดลองปัจจัยหลายปัจจัย เพื่อหาผลกระทบของแต่ละปัจจัย ซึ่งวิธีการออกแบบการทดลองมีหลายวิธีด้วยกัน ผู้จัดทำจึงทำการเลือกการวางแผน และดำเนินการทดลองด้วยวิธีการออกแบบแบบแฟคทอเรียลเต็มรูป

2.6.4 การทดลองแบบแฟคทอเรียล

การทดลองแบบแฟคทอเรียล คือ การทดลองที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในการออกแบบแผนการทดลอง เนื่องจากสามารถศึกษาปัจจัยได้หลายปัจจัยในเวลาเดียวกัน โดยมีวัตถุประสงค์หลัก คือ การศึกษาผลกระทบร่วมระหว่างปัจจัย หรือเรียกว่า อันตรกิริยา (Interactions) เช่น กรณีศึกษา 3 ปัจจัย คือ ปัจจัย A ปัจจัย B และปัจจัย C ผลกระทบที่เกิดขึ้นสามารถจำแนกได้เป็น 3 ประเภท ดังนี้

ผลกระทบหลัก หรือผลกระทบปัจจัยเดี่ยว (Main Effects) คือ พิจารณาผลกระทบที่เราสนใจปัจจัยเดี่ยว ได้แก่ ผลกระทบของปัจจัย A ผลกระทบของปัจจัย B และผลกระทบของปัจจัย C

ผลกระทบร่วมระหว่าง 2 ปัจจัย (Two Factors or 2 – Ways Interactions) คือ พิจารณาผลกระทบที่เกิดปัจจัยพร้อมกันเป็นคู่ (ครึ่งละ 2 ปัจจัย) ได้แก่ ผลกระทบของปัจจัยร่วม (อันตรกิริยา) AB, BC และ AC

ผลกระทบร่วม 3 ปัจจัย (Three Factors or 3 – Ways Interactions) คือ การพิจารณาผลกระทบที่เกิดปัจจัย 3 ปัจจัยพร้อมกัน ได้แก่ ผลกระทบร่วม ABC

2.6.4.1 การทดลองแฟคทอเรียลเต็มรูป (Full Factorial Experiment)

การทดลองแฟคทอเรียลเต็มรูป คือ การทดลองที่สร้างขึ้น เพื่อศึกษาผลกระทบการเกิดปัจจัยมากกว่า 2 ปัจจัยขึ้นไป โดยมีวัตถุประสงค์หลัก คือ เพื่อศึกษาผลกระทบร่วม (Interactions) จำนวนระดับของปัจจัยแต่ละระดับนั้นขึ้นอยู่กับความสำคัญของปัจจัย เพื่อศึกษาปัจจัยโดยละเอียดจะใช้จำนวนระดับที่มีค่ามาก ค่าจำนวนระดับที่ระบุจะต้องสอดคล้องกับวัตถุประสงค์ในการทดลอง เช่น กรณีศึกษา 2 ปัจจัย วัตถุประสงค์ของการทดลอง คือ ทำเพื่อคัดปัจจัยออก หรือทำการทดลองเพื่อศึกษาความสัมพันธ์เชิงเส้นตรง ในกรณีทำการศึกษาปัจจัยตั้งแต่ 3 ระดับขึ้นไป จะเป็นการศึกษาความสัมพันธ์ที่ไม่เป็นเส้นตรง การทำการทดลองแฟคทอเรียลเต็มรูปมีข้อดีดังนี้

- ก. ผลกระทบของปัจจัยในแต่ละปัจจัยเป็นอิสระต่อกัน โดยไม่มีผลกระทบแฝง
- ข. ไม่มีโครงสร้างที่ซ้ำซ้อน
- ค. สามารถศึกษาปัจจัยหลายๆ ปัจจัยได้ในเวลาเดียวกัน

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11	C12	C13	C14	C15	C16	C17	C18	C19	C20	
4	14	4	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
5	23	5	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
6	8	6	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
7	9	7	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
8	13	8	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	
9	22	9	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	
10	18	10	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	
11	7	11	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
12	1	12	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
13	20	13	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	
14	26	14	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	
15	17	15	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	
16	15	16	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	
17	6	17	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
18	25	18	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	
19	12	19	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	
20	16	20	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	
21	11	21	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
22	26	22	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	
23	3	23	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
24	24	24	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	
25	3	25	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
26	3	26	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	
27	18	27	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	
28																					
29																					

รูปที่ 2.6 แสดงการออกแบบการทดลองแฟคทอเรียลเต็มรูป แบบ 3^3

2.6.4.2 การทดลองแฟคทอเรียลแบบบางส่วน (Fractional Factorial Designs)

การทดลองแฟคทอเรียลแบบบางส่วน คือ การทำการทดลองวัดค่าตัวแปรแบบไม่ครบทุกเงื่อนไข การเปลี่ยนแปลงค่าของทุกปัจจัย เนื่องจากเงื่อนไขมีมากเกินไป หรือมีข้อจำกัดในเรื่องของเวลา งบประมาณ และทรัพยากร โดยวิธีการเลือกเงื่อนไขมาทำการทดลอง จะต้องเลือกจากการออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียลเต็มรูป ผู้ทดลองสามารถศึกษาผลกระทบหลักและผลกระทบร่วมได้ตามที่ต้องการ แต่ไม่ครบทุกเงื่อนไข

2.7 ทฤษฎีสมมติฐาน และการทดสอบสมมติฐาน (Hypothesis and Hypothesis Test) (ธานินทร์ ศิลป์จารุ, 2555)

2.7.1 สมมติฐานทางสถิติ (Statistical Hypothesis)

สมมติฐานทางสถิติ คือ สมมติฐานที่ใช้ในการทดสอบค่าทางสถิติ โดยการรวบรวมข้อมูลจากกลุ่มตัวอย่าง และอ้างอิงไปสู่กลุ่มประชากร ซึ่งจะสามารถอธิบายได้ในรูปแบบของสัญลักษณ์ทางคณิตศาสตร์เป็นค่าสถิติ ดังต่อไปนี้

ตารางที่ 2.6 แสดงสัญลักษณ์เปรียบเทียบระหว่างค่าสถิติกับค่าพารามิเตอร์

สถิติที่ใช้	ค่าสถิติ (กลุ่มตัวอย่าง)	ค่าพารามิเตอร์ (ประชากรทั้งหมด)
ค่าเฉลี่ย (Mean)	\bar{x}	μ
ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation)	S	σ
ค่าความแปรปรวน (Variance)	S^2	σ^2
ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Correlation)	r	ρ
ค่าสัดส่วน (Proportion)	P	π

ที่มา : ธานินทร์ ศิลป์จารุ, 2555

โดยสมมติฐานทางสถิตินั้น แบ่งออกเป็น 2 ประเภท ได้แก่

2.7.1.1 สมมติฐานหลัก (Null Hypothesis : H_0)

สมมติฐานหลัก เรียกว่าสมมติฐานไร้นัยสำคัญ สมมติฐานว่าง หรือสมมติฐานศูนย์ เขียนแทนด้วยสัญลักษณ์ H_0 สามารถเขียนเป็นสัญลักษณ์ทางสถิติได้ ดังนี้

กรณีค่าเฉลี่ยของประชากร 2 กลุ่ม ไม่แตกต่างกัน

$$H_0 : \bar{x}_1 = \bar{x}_2$$

กรณีค่าความสัมพันธ์เท่ากับศูนย์หรือตัวแปรไม่มีความสัมพันธ์กัน

$$H_0 : \rho = 0$$

2.7.1.2 สมมติฐานรอง (Alternative Hypothesis : H_1)

สมมติฐานรอง สามารถเขียนแทนด้วยสัญลักษณ์ H_1 เป็นสมมติฐานที่แสดงว่ามีความแตกต่างระหว่างตัวแปรหรือเป็นสมมติฐานที่เขียนให้มีความหมายที่ตรงข้ามกัน ซึ่งการเขียนสมมติฐานทางเลือกนี้เขียนได้ 2 แบบ สมมติฐานแบบไม่ระบุทิศทาง และสมมติฐานแบบระบุทิศทาง

ก. สมมติฐานแบบไม่ระบุทิศทาง (Non – Directional Hypothesis) เป็นสมมติฐานที่ไม่มีข้อมูล หรือเหตุผลที่เพียงพอในการกำหนดทิศทางของสมมติฐาน จะเป็นการเขียนสมมติฐานให้ตรงกันข้ามกับสมมติฐานหลัก ซึ่งทิศทางของสมมติฐานว่าทิศทางควรไปทางใดมากหรือน้อย แสดงดังตัวอย่างต่อไปนี้

$$H_0 : \bar{x}_1 = \bar{x}_2 \text{ (สมมติฐานหลัก)}$$

$$H_1 : \bar{x}_1 \neq \bar{x}_2 \text{ (สมมติฐานรองแบบไม่มีการระบุทิศทาง)}$$

ข. สมมติฐานแบบระบุทิศทาง เป็นสมมติฐานที่มีข้อมูล หรือเหตุผลเพียงพอที่จะกำหนดทิศทางของสมมติฐานได้

$$H_0 : \bar{x}_1 \leq \bar{x}_2 \text{ (สมมติฐานหลัก)}$$

2.7.2 การทดสอบสมมติฐาน (Hypothesis Test)

การทดสอบสมมติฐาน คือ การจัดทำโครงการได้ตั้งคำตอบของปัญหาไว้ล่วงหน้าแล้ว จึงนำมาทำการทดสอบสมมติฐานของโครงการ ว่าผลของโครงการที่ออกมาเป็นไปตามสมมติฐานที่ตั้งไว้หรือไม่ โดยพิจารณาดังต่อไปนี้

2.7.2.1 ระดับความมีนัยสำคัญ (Level of Significance)

ระดับความมีนัยสำคัญ (α) หรือค่าระดับนัยสำคัญทางสถิติ คือ ค่าความน่าจะเป็นในการปฏิเสธสมมติฐานหลัก (H_0) ถ้ากำหนดให้ค่าระดับนัยสำคัญทางสถิติเท่ากับ 0.5 แสดงว่ายอมรับค่าความคลาดเคลื่อน 5% และเมื่อนำเอาพื้นที่ใต้โค้งทั้งหมดซึ่งมีค่า 100% ไปลบค่าระดับนัยสำคัญ 0.5 จะได้ค่า เท่ากับ 95% ความน่าจะเป็นในการยอมรับสมมติฐานหลัก (H_0) มีความเชื่อมั่นถึง 95% ระดับนัยสำคัญที่ใช้ส่วนมาก คือ 0.05 และ 0.01

2.7.2.2 ระดับความเชื่อมั่น (Level of Confidence)

ระดับความเชื่อมั่น หมายถึง ความน่าจะเป็นในการยอมรับสมมติฐานหลัก (H_0) ระดับความเชื่อมั่นนี้จะอยู่ในเขตการยอมรับสมมติฐานหลัก (H_0)

2.7.2.3 ขอบเขตวิกฤต (Critical Region)

ขอบเขตวิกฤต หมายถึง ขอบเขตที่ปฏิเสธสมมติฐานหลัก (H_0) ซึ่งถูกกำหนดจากค่าระดับนัยสำคัญทางสถิติ ถ้าค่าความน่าจะเป็นของสถิติที่คำนวณได้ตกอยู่ในขอบเขตนี้ แสดงว่าการทดสอบสมมติฐานมีนัยสำคัญ (Significance) คือ จะปฏิเสธสมมติฐานหลัก (H_0) และยอมรับสมมติฐานรอง (H_1)

2.7.2.4 ค่าวิกฤต (Critical Value)

ค่าวิกฤต หมายถึง ค่าที่เปิดจากตารางแล้วนำมาวาดเป็นจุดแบ่งระหว่างขอบเขตการยอมรับกับขอบเขตปฏิเสธของสมมติฐานที่ตั้งไว้

2.7.3 ประเภทของการทดสอบสมมติฐาน

การทดสอบสมมติฐานทางสถิติมี 2 วิธี ดังนี้

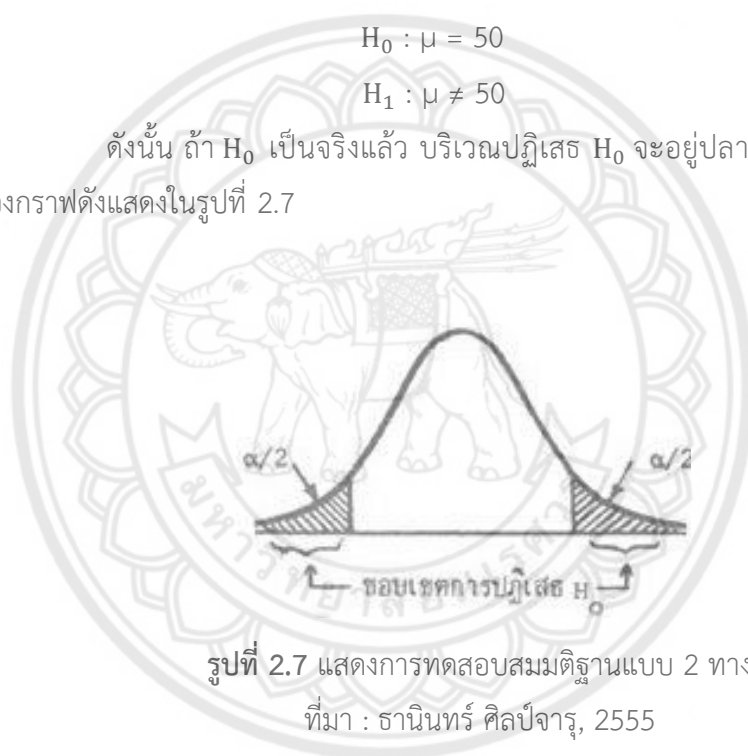
2.7.3.1 การทดสอบสมมติฐานแบบสองทาง (Two – Tail Test)

การทดสอบสมมติฐานแบบสองทาง เป็นการทดสอบสมมติฐานที่จะไม่ระบุทิศทาง จะใช้ทดสอบสมมติฐานการจัดทำโครงการ ในกรณีที่ผู้จัดทำโครงการแน่ใจว่าคำตอบจะเป็นไปในทิศทางใด สามารถเขียนด้วยสัญลักษณ์ดังนี้

$$H_0 : \mu = 50$$

$$H_1 : \mu \neq 50$$

ดังนั้น ถ้า H_0 เป็นจริงแล้ว บริเวณปฏิเสธ H_0 จะอยู่ปลายทางทั้งสองของการแจกแจงของกราฟดังแสดงในรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 แสดงการทดสอบสมมติฐานแบบ 2 ทาง

ที่มา : ธาณินทร์ ศิลป์จารุ, 2555

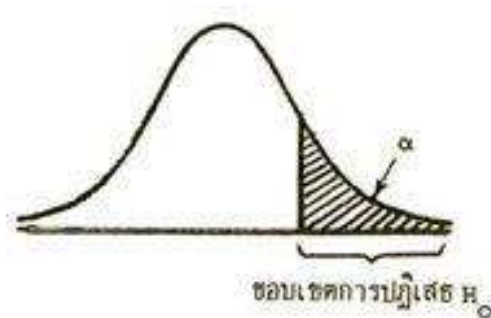
2.7.3.2 การทดสอบสมมติฐานแบบทางเดียว (One – Tail Test)

การทดสอบสมมติฐานแบบทางเดียว เป็นการทดสอบสมมติฐานที่ระบุทิศทาง ในกรณีที่ผู้จัดทำโครงการค่อนข้างมั่นใจว่าคำตอบจะเป็นไปในทิศทางใดทิศทางหนึ่ง

$$H_0 : \mu = 50$$

$$H_1 : \mu > 50$$

ดังนั้นถ้า H_0 เป็นจริงแล้ว บริเวณปฏิเสธ H_0 จะอยู่ปลายทางทางขวามือของกราฟ ดังแสดงในรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 แสดงการทดสอบสมมติฐานแบบทางเดียว

ที่มา : ธานีรินทร์ ศิลป์จารุ, 2555

2.7.3.3 ขั้นตอนการทดสอบสมมติฐาน

ขั้นตอนที่ 1 ตั้งสมมติฐานทางสถิติ

ขั้นตอนที่ 2 เลือกสถิติที่เหมาะสมสำหรับการทดสอบสมมติฐาน

ขั้นตอนที่ 3 กำหนดเขตวิกฤต ในการปฏิเสธสมมติฐาน โดยอาศัยการแจกแจงของตัวอย่างของสถิติที่ใช้ทดสอบ

ขั้นตอนที่ 4 คำนวณค่าสถิติ

ขั้นตอนที่ 5 ทำการตัดสินใจและสรุปผล

2.7.4 ค่า P-value

ค่า P-Value เป็นค่าความน่าจะเป็นของสมมติฐานที่กำลังศึกษา ในการทดสอบสมมติฐาน เมื่อค่า P-Value มีค่าน้อยกว่าค่าระดับนัยสำคัญ แสดงว่า ปฏิเสธ ค่า H_0 แต่เมื่อค่า P-Value มีค่ามากกว่าหรือเท่ากับค่าระดับนัยสำคัญ แสดงว่า ยอมรับ ค่า H_0

2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

มงคล แก้วนพรัตน์ (2555) ได้ทำการวิจัยเรื่องการลดปัญหาข้อบกพร่องในกระบวนการผลิตชิ้นส่วนยานยนต์จากอลูมิเนียมหล่อ โดยใช้โปรแกรมจำลองงานหล่อขึ้นรูป ได้ทำการวิจัยเกี่ยวกับการวิเคราะห์หาสาเหตุของข้อบกพร่องที่เกิดในงานหล่อโลหะอลูมิเนียม ด้วยการวิเคราะห์ทางโลหะวิทยาและการใช้ซอฟต์แวร์ ProCAST ในการจำลองกระบวนการหล่อขึ้นรูปชิ้นงาน ซึ่งมีสภาวะการหล่อขึ้นรูป คือ อุณหภูมิเทน้ำโลหะที่ 760 องศาเซลเซียส อุณหภูมิเป่าปูนโลหะที่ 350 องศาเซลเซียส จากผลการจำลอง พบว่าเมื่อทางเดินน้ำโลหะมีขนาดเพิ่มขึ้นทำให้ปริมาณลงทุนในชิ้นงานลดลงแต่ถ้าที่แม่พิมพ์โลหะมีทางเดินน้ำโลหะใหญ่เกินไปก็จะสูญเสียวัตถุดิบในการผลิตมากเกินไป ดังนั้น จึงเลือกทำการแก้ไขแม่พิมพ์โลหะให้มีทางเดินน้ำโลหะที่ง่าย

โอรส พิณจรัตน์พันธ์ (2556) ได้ทำวิจัยเรื่องการควบคุมคุณภาพการหล่อเครื่องประดับทองด้วยวิธีการออกแบบการจำลอง การศึกษานี้ทำการวิเคราะห์ และปรับปรุงคุณภาพงานหล่อเครื่องประดับทอง เพื่อลดข้อบกพร่องในงานหล่อตัวเรือนเครื่องประดับทอง โดยมีวัตถุประสงค์ คือ การศึกษาถึงปัจจัยใดที่ผลของตัวแปร ที่มีผลต่อค่าผลผลิตในกระบวนการหล่อเครื่องประดับทอง โดยใช้วิธีการของทากูชิ ในการสร้างสมการจำลองของปัจจัยและตัวแปร รวมถึงหาระดับปัจจัยที่เหมาะสม ที่มีผลต่อประสิทธิภาพค่าผลผลิตในกระบวนการหล่อเครื่องประดับทอง ผลของการทดลองชี้ให้เห็นว่าอุณหภูมิในการอบปูน อุดหนุนหล่อหลอมโลหะ และอุณหภูมิบอกปูน สำหรับการหล่อมีผลต่อการเสีย และงานซ่อมเครื่องประดับทองอย่างมีนัยสำคัญ

เพ็ญศรี ทองนพคุณ (2549) ได้ทำการวิจัยเรื่อง การวิจัยเพื่อพัฒนากระบวนการหล่อในอุตสาหกรรมอัญมณีและเครื่องประดับ กระบวนการผลิตเครื่องประดับที่สำคัญ คือ การหล่อ โดยวิธีที่เป็นที่นิยมใช้กันได้แก่ การหล่อแบบอินเวสต์เมนต์หรือการหล่อแทนซีผึ้ง มักจะพบประเด็นปัญหาพิเศษเฉพาะในเรื่องของเสีย เช่น ผิวชิ้นงานเครื่องประดับไม่ผุดผ่อง มัวหมอง ผิวงานผุ เป็นรูตามค ผิวงานเป็นคาน้ำ เป็นต้น โดยประเด็นปัญหาเหล่านี้ไม่มีการวิเคราะห์หาสาเหตุอย่างจริงจัง จะเป็นการทำงานประจำวันของผู้ผลิตที่แก้ปัญหาเฉพาะหน้า เมื่อมีของเสียจากการหล่อนำมาหล่อใหม่ โดยไม่คำนึงถึง ต้นทุนแรงงานพลังงาน และเวลาที่เพิ่มขึ้น งานวิจัยได้จัดทำขึ้น เพื่อศึกษาสภาพการผลิต ปัญหาการผลิตข้อบกพร่องในชิ้นงานการผลิตที่เกิดขึ้นจริงในกระบวนการหล่อ

ปริศนา บุญศักดิ์ (2556) ได้ทำการวิจัยเรื่อง การวิจัยปัญหาในการหล่อ และการพัฒนาแนวทางแก้ไขปัญหาในการหล่อเครื่องประดับสมัยใหม่ ในอุตสาหกรรมอัญมณี และเครื่องประดับ กระบวนการผลิตตัวเรือนเครื่องประดับที่สำคัญ คือ การหล่อ (Casting) โดยวิธีที่เป็นที่นิยมใช้กัน ได้แก่ การหล่อแทนซีผึ้ง (Lost – Wax Casting) มักจะพบประเด็นปัญหา พิเศษโดยเฉพาะในเรื่องของเสีย เช่น ผิวชิ้นงานเครื่องประดับมัวหมอง ผิวงานเป็นรูตามค ผิวงานเป็นคราบน้ำ เป็นต้น โดยประเด็นปัญหาเหล่านี้ไม่มีการวิเคราะห์หาสาเหตุอย่างจริงจัง จะเป็นการทำงานประจำวันของผู้ผลิตที่แก้ปัญหาเฉพาะหน้า เมื่อมีของเสียจากกระบวนการหล่อจะนำมาหล่อใหม่ โดยไม่คำนึงถึง ต้นทุนแรงงาน พลังงาน และเวลาที่เพิ่มขึ้น งานวิจัยนี้จึงได้จัดทำขึ้น เพื่อศึกษาปัญหาการผลิต ข้อบกพร่อง ในชิ้นงานการผลิตที่เกิดขึ้นจริงในกระบวนการหล่อ ของสถานประกอบการอุตสาหกรรมที่เป็นกลุ่ม ตัวอย่างการวิจัย 10 ราย เพื่อวิเคราะห์หาสาเหตุ ข้อบกพร่องและแนวทางในการแก้ไข ปัญหาการผลิตที่เกิดขึ้นในชิ้นงานการหล่อ เพื่อนำไปดำเนินการแก้ไขให้ได้ผล และรวบรวมปัญหาการผลิตข้อบกพร่องในชิ้นงานการหล่อตลอดจนแนวทางการแก้ไข สำหรับผู้ประกอบการอุตสาหกรรมอัญมณี และเครื่องประดับใช้เป็นแนวทางในการแก้ปัญหาชิ้นงานหล่อที่เกิดขึ้น และเป็นแนวคิดในการหาทางป้องกันปัญหาข้อบกพร่องที่อาจจะเกิดขึ้น เพื่อลดของเสีย ลดต้นทุนการผลิต และพัฒนาคุณภาพชิ้นงาน ซึ่งเป็นการพัฒนากระบวนการหล่อให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น

สมนึก วัฒนศรีกุล และคณะ (2549) ได้ทำการวิจัยเรื่องศึกษาวิเคราะห์อิทธิพลของสังกะสีที่มีผลต่อคุณภาพงานหล่อตัวเรือนเครื่องประดับ การศึกษาวิจัยนี้เป็นการหลอมโลหะเงินผสมทองแดง (5%) คงที่ และสังกะสีแปรผันที่อัตราส่วนผสมต่างๆ เพื่อนำมาทำการทดลองหล่อเหรียญขึ้นรูปเป็นขึ้นทดสอบที่อุณหภูมิ 3 ระดับคือ 950 องศาเซลเซียส 1,000 องศาเซลเซียส และ 1,050 องศาเซลเซียส โดยให้ความเร็วรอบหล่อเหรียญ และมุมทางเดินน้ำโลหะที่ทำกับรูเทเป็นตัวแปรคงที่ ขึ้นทดสอบที่ได้จากการหล่อขึ้นรูปนี้จะนำไปศึกษาวิเคราะห์ข้อบกพร่องภายนอกและภายใน เป็นการทดสอบหาส่วนผสมทางเคมี การทดสอบหาค่าความแข็ง และโครงสร้างจุลภาค ผลการศึกษาวิเคราะห์อิทธิพลของปริมาณการผสมสังกะสีที่มีผลต่อแนวโน้ม การเกิดข้อบกพร่องภายนอกสภาพหล่อขึ้นรูป และข้อบกพร่องภายในสภาพหลังขัดเงา มีเปอร์เซ็นต์การตรวจสอบพบใกล้เคียงกัน สำหรับผลการศึกษาวิเคราะห์อิทธิพลของอุณหภูมิที่มีผลต่อแนวโน้ม การเกิดข้อบกพร่องภายนอกสภาพหล่อขึ้นรูป และข้อบกพร่องภายในสภาพหลังขัดเงา พบว่าขึ้นทดสอบที่มีปริมาณการผสมสังกะสีทุกอัตราส่วนผสมของทุกอุณหภูมิหล่อ มีผลทำให้ร้อยละการเกิดข้อบกพร่องที่ผิวของชิ้นงานทั้งสภาพหล่อขึ้นรูป และหลังคาขัดเงา

Somlak Wanarumon, and Marco Actis Grande (2009) ได้ทำวิจัยในเรื่อง การเปรียบเทียบโปรแกรมพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ เพื่อประยุกต์ใช้กับกระบวนการหล่อเครื่องประดับแบบขึ้นขึ้นหาย (Comparisons of Computer Fluid Dynamic Software Programs applied to Jewelry Investment Casting Process) งานวิจัยนี้ได้ทำการเปรียบเทียบโปรแกรมการจำลอง โดยเปรียบเทียบโปรแกรม FLOW-3D ProCAST และ MAGMASoft ซึ่งเป็นโปรแกรมที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในการสร้างจำลองการหล่อ งานวิจัยนี้ให้ความสำคัญกับขั้นตอนในการจำลองการหล่อเครื่องประดับแบบขึ้นขึ้นหาย ในการจำลองการหล่อจะใช้ต้นเทียน คุณสมบัติวัสดุและปัจจัยแบบเดียวกันในการทำการทดลองทั้ง 3 โปรแกรม แล้วทำการทดสอบและวิเคราะห์การไหลภายในช่องว่างของแม่พิมพ์ โดยได้เปรียบเทียบข้อดีข้อเสียของแต่ละโปรแกรม และค่าที่เหมาะสมสำหรับการใช้ในการหล่อเครื่องประดับ เมื่อเปรียบเทียบที่ค่าเฉลี่ยของเวลาในการจำลองการหล่อกับการผลทดสอบเวลาในหล่อจริง พบว่าโปรแกรม FLOW-3D มีค่าเบี่ยงเบนของเวลาเท่ากับร้อยละ 15.63 โปรแกรม MAGMASoft มีค่าเบี่ยงเบนของเวลาเท่ากับร้อยละ 41.40 และโปรแกรม ProCAST มีค่าเบี่ยงเบนของเวลาเท่ากับร้อยละ 15.34 ซึ่งมีค่าเวลาใกล้เคียงกับการหล่อจริงมากที่สุด

สุทัศน์ ยอดเพชร (2546) ได้ทำการวิจัยเรื่องการศึกษาเทคนิคการผลิตทองแดงเจือ เพื่อเป็นโลหะเจือหลักสำหรับการผลิตตัวเรือนเครื่องประดับโลหะเงินเจือ โดยทำการศึกษาอิทธิพลของปัจจัยต่างๆ เช่น อุณหภูมิเทของน้ำโลหะก่อนหยดเม็ด อุณหภูมิของน้ำที่ใช้หยดเม็ด ที่มีอิทธิพลต่อขนาดน้ำหนัก ความกลม และการสูญเสียของธาตุผสมของเม็ดทองแดงเจือ ผลการทดลองพบว่า อุณหภูมิเทของน้ำโลหะก่อนหยด อยู่ที่ 1,050 – 1100 องศาเซลเซียส อุณหภูมิของน้ำที่ใช้หยดอยู่ที่ 45 องศาเซลเซียส ส่วนการหลอมหยดเม็ดทองแดงเจือสังกะสี อุณหภูมิเทก่อนหยดอยู่ที่ 1000 องศาเซลเซียส

และอุณหภูมิหยดอยู่ที่ 40 องศาเซลเซียส จากการทดลองสรุปได้ว่าทองแดงเจือทั้ง 2 ชนิด ถ้าหล่อด้วยเตาหล่อแบบสูญญากาศจะได้คุณภาพของชิ้นงานที่ดีกว่า และสูญเสียธาตุผสมน้อยที่สุด

ธน ทองกลม และคณะ (2559) ได้ทำการวิจัยเรื่อง การวิเคราะห์จุดเสียในการหล่อทองเหลืองวิธีขึ้นหยาบบนโบราณโดยการหล่อในแม่พิมพ์แบบปิด กรณีศึกษาการหล่อทองเหลืองบ้านปะอาว นำองค์ความรู้ทางวิศวกรรมศาสตร์และคอมพิวเตอร์ช่วยในการออกแบบ และสร้างแบบจำลองทางวิศวกรรม มาใช้ในการวิเคราะห์ระบบการป้อนจ่ายน้ำโลหะ ที่เกิดจากภูมิปัญญาของคนท้องถิ่น เพื่อหาแนวทางพัฒนาระบบป้อนจ่ายน้ำโลหะให้เหมาะสมกับขนาดชิ้นงาน และวิเคราะห์การกระจายตัวของน้ำโลหะขณะแข็งตัว ทำนายบริเวณที่อาจจะเกิดจุดเสียขณะเย็นตัว เพื่อหาแนวทางแก้ไขจุดเสีย และทำการทดลองเทหล่อทองเหลืองด้วยวิธีหล่อแบบขึ้นหยาบ จากการศึกษาพบว่า การไหลของน้ำโลหะของชิ้นงานขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 เซนติเมตรทั้งแบบ 1 ทางเข้า และ 2 ทางเข้ามีความต่อเนื่องกัน และใช้เวลาในการเติมเต็มชิ้นงานสั้น เมื่อแข็งตัวพบจุดเสียแบบโพรงหดตัวเล็กน้อย เมื่อพิจารณาการไหลของน้ำโลหะของชิ้นงานขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร พบว่าชิ้นงานที่มี 2 ทางเข้ามีโอกาสเกิดจุดเสียจากน้ำโลหะแข็งตัวก่อนเติมแบบ



บทที่ 3

วิธีการดำเนินโครงการ

ในบทนี้กล่าวถึงวิธีการดำเนินงาน ซึ่งประกอบด้วย 2 ส่วนหลัก ดังนี้ ส่วนที่ 1 อธิบายเกี่ยวกับวัสดุอุปกรณ์ และส่วนที่ 2 อธิบายถึงขั้นตอนการดำเนินการศึกษาการพัฒนาแบบจำลองการหล่อเครื่องประดับ ด้วยโปรแกรม CFD

3.1 วัสดุและอุปกรณ์

3.1.1 วัสดุที่ใช้ในการดำเนินโครงการ

3.1.1.1 โลหะที่ใช้ในการทดลอง คือ ทองเหลือง (Leaded Naval Brass)

3.1.1.2 วัสดุที่ใช้ทำเข้าปูน คือ ปูนพลาสเตอร์ (Plaster)

3.1.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการดำเนินโครงการ

3.1.2.1 คอมพิวเตอร์แบบพกพา ยี่ห้อ ACER

3.1.2.2 หน่วยประมวลผลกลาง (CPU) Intel® Core™ i5-2410M

3.1.2.3 หน่วยความจำหลัก (RAM) 4 GB

3.1.2.4 หน่วยความจำการ์ดจอ NVIDIA® GeForce® GT 540M

3.1.2.5 ความจุฮาร์ดดิสก์ (Hard Disk) 500 GB

3.1.2.6 โปรแกรมวาดแบบ Rhinoceros 5.0 Educational License

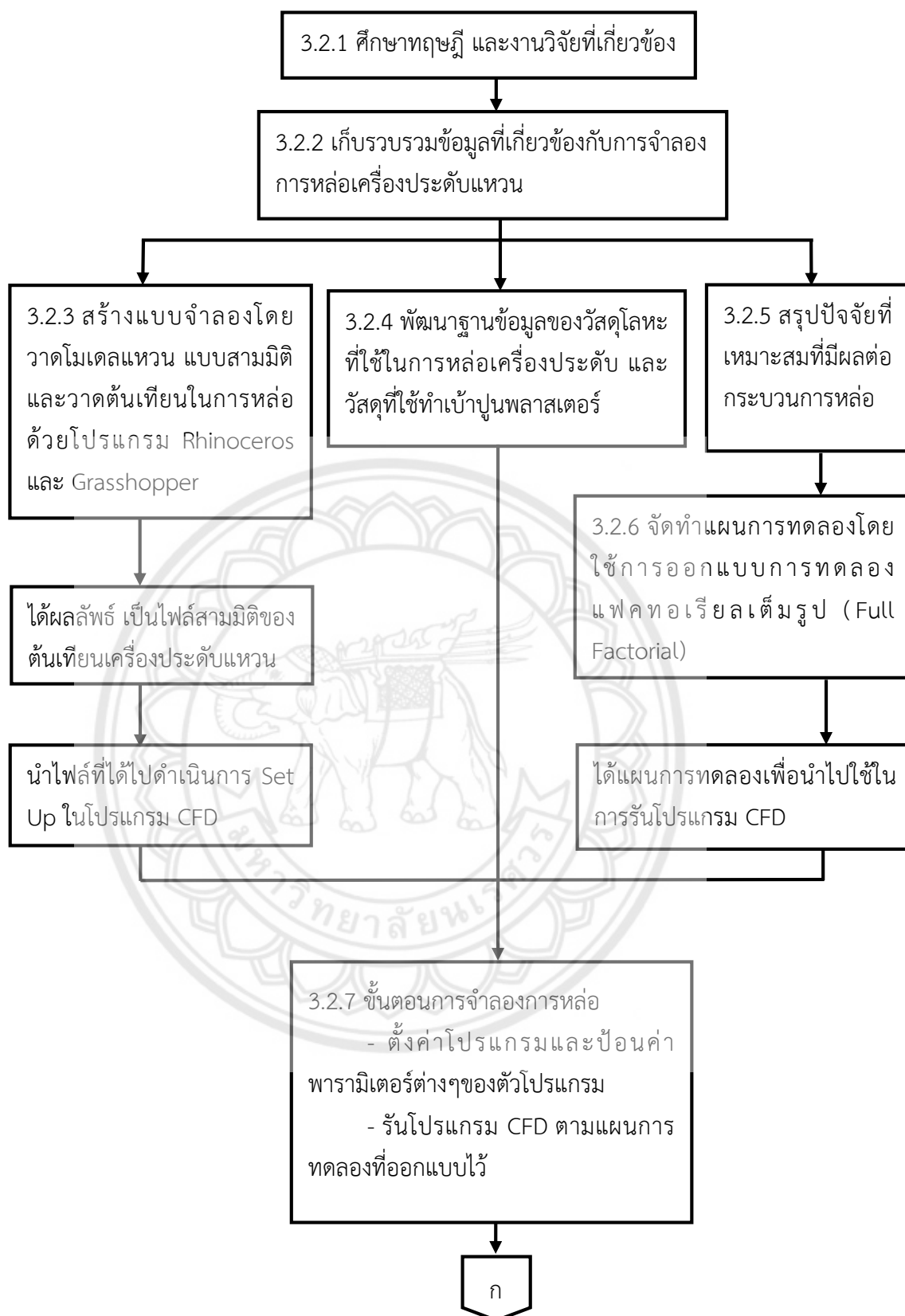
3.1.2.7 Plug - in เสริม Grasshopper ที่ติดตั้งใน Rhinoceros 5.0 Educational License

3.1.2.8 โปรแกรมวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ ได้แก่ MINITAB

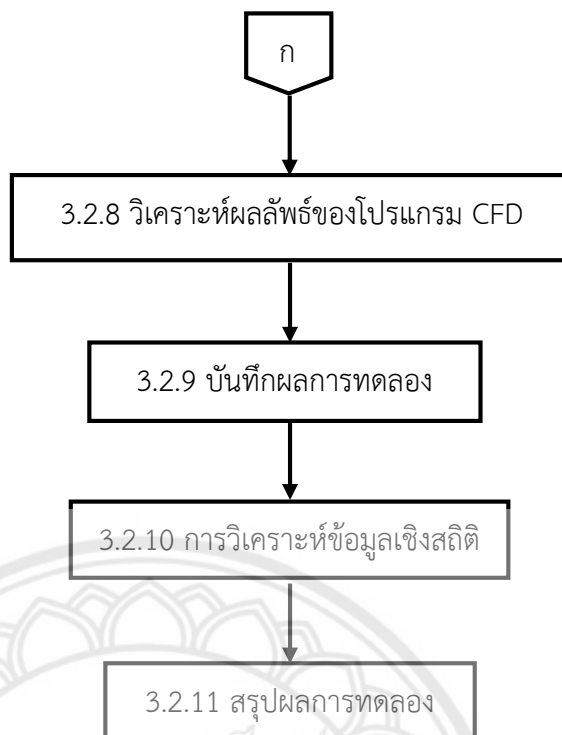
3.1.2.9 โปรแกรมช่วยในการจำลองการหล่อ ได้แก่ โปรแกรม ProCAST

3.2 ขั้นตอนการดำเนินโครงการ

การทำโครงการในครั้งนี้มีวัตถุประสงค์หลัก คือ เพื่อศึกษาการพัฒนาแบบจำลองการหล่อเครื่องประดับด้วยโปรแกรม CFD และเพื่อศึกษาปัจจัยที่เหมาะสมที่มีผลต่อปริมาณรูพรุน สำหรับกระบวนการหล่อเครื่องประดับแบบขึ้นผงหาย โดยการสร้างแบบจำลองขึ้นมาในโปรแกรม CFD ซึ่งมีขั้นตอนในการดำเนินโครงการ แสดงดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แผนผังการไหลแสดงขั้นตอนการดำเนินงานการศึกษาแบบจำลอง



รูปที่ 3.1 (ต่อ) แผนผังการไหลแสดงขั้นตอนการดำเนินงานการศึกษาแบบจำลอง

3.2.1 ศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบจำลองการหล่อเครื่องประดับ ปัญหาในการหล่อเครื่องประดับ กระบวนการหล่อเครื่องประดับ รวมถึงได้ศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง โดยรายละเอียดต่างๆ ได้กล่าวไว้แล้วในบทที่ 2 เอกสารที่เกี่ยวข้อง มีความสัมพันธ์ดังแสดงในรูปที่ 3.1 การศึกษาการพัฒนาแบบจำลองการหล่อเครื่องประดับด้วยโปรแกรม CFD นี้ขึ้นอาศัยความรู้พื้นฐานจากกระบวนการหล่อเครื่องประดับ กระบวนการหล่อแบบซีพิ้งหาย (Lost Wax Casting) บทบาทและความสำคัญของการหล่อโลหะ และการเกิดปัญหาในกระบวนการหล่อ ซึ่งได้เลือกศึกษา และแก้ไขปัญหาในด้านกระบวนการหล่อที่เกิดปัญหารูพรุนหรือรูตามด เพื่อทำการออกแบบจำลองในขั้นตอนต่อไป

3.2.2 เก็บรวบรวมข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับการจำลองการหล่อเครื่องประดับแหวน

ทำการศึกษาการออกแบบเครื่องประดับแหวน องค์ประกอบของการออกแบบเครื่องประดับในกระบวนการออกแบบจำเป็นต้องมีความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับองค์ประกอบของแบบเครื่องประดับ ได้แก่ จุด เส้น รูปร่างและรูปทรง ขนาดและมาตราส่วน ช่องว่าง ลักษณะผิว และความสมดุล เก็บรวบรวมขั้นตอนกระบวนการผลิตเครื่องประดับแหวนจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง และทำการเลือกแหวนที่มีลักษณะที่แตกต่างกัน ตามรูปทรงเครื่องประดับแหวนที่มีลักษณะความหนาบางของแหวนที่แตกต่างกัน ผู้จัดทำโครงการจึงได้กำหนดรูปแบบของแหวนออกเป็น 3 แบบ ได้แก่ แหวนล้อมเพชร แหวนประดับมุก และแหวนสัญลักษณ์



รูปที่ 3.2 แสดงแบบแหวน 3 แบบ คือ แหวนล้อมเพชร แหวนประดับมุก และแหวนสัญลักษณ์

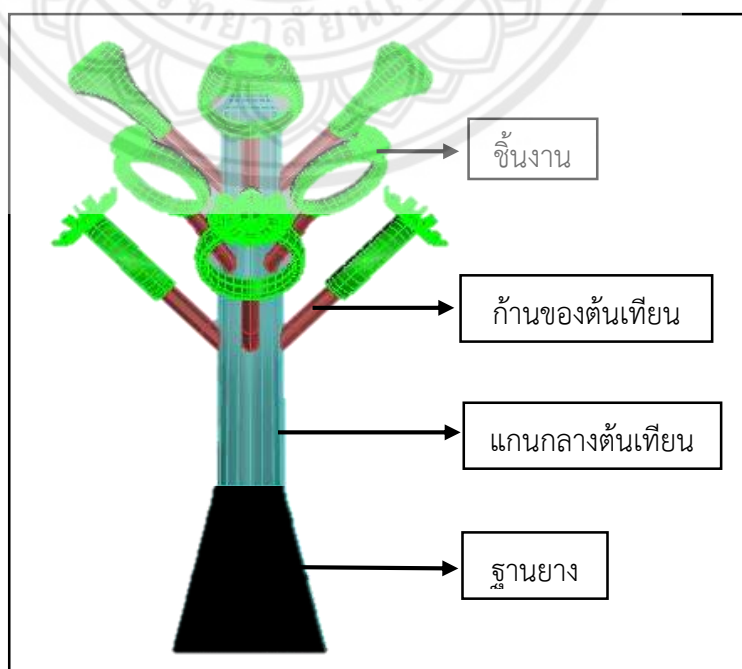
3.2.3 สร้างแบบจำลองโดยวาดโมเดลแหวนแบบสามมิติ และวาดต้นเทียนในการหล่อด้วยโปรแกรม Rhinoceros และGrasshopper

ทำการศึกษาในเรื่องคอมพิวเตอร์ช่วยในการวาดแบบ และศึกษากระบวนการสร้างรูปทรงในการจำลองการหล่อเครื่องประดับแหวนด้วยโปรแกรม Rhinoceros 5.0 ตามแหล่งข้อมูลต่าง ๆ เช่น เว็บไซต์ (Website) วิดีโอการใช้งานโปรแกรม Rhinoceros 5.0 และโปรแกรม Grasshopper เป็นต้น โดยสร้างแบบจำลองโดยวาดโมเดลแหวน และวาดต้นเทียน ที่วาดโดยใช้โปรแกรมวาดแบบ (Rhinoceros) ซึ่งใช้ Plug - in เป็นโปรแกรม Grasshopper เป็นโปรแกรมเสริมที่ช่วยให้โปรแกรมวาดแบบ (Rhinoceros) ทำงานได้ดีขึ้นเขียนแบบง่าย และรวดเร็วมากขึ้น

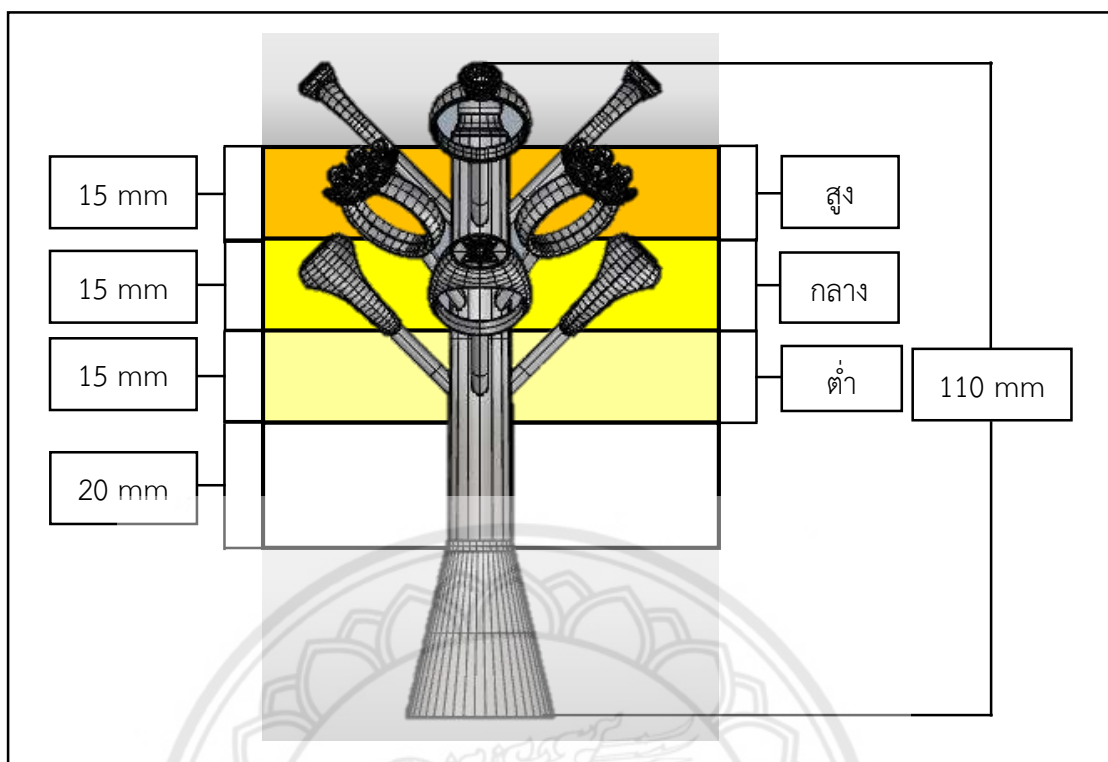


รูปที่ 3.3 สร้างแบบจำลองโดยวาดโมเดลแบบสามมิติ ในการหล่อด้วยโปรแกรม Rhinoceros และ Grasshopper

ซึ่งการวาดต้นเทียนจะประกอบไปด้วยชิ้นงานแหวน ก้านของต้นเทียน แขนกลางของต้น (Sprue) และฐานยาง (Sprue Base) ดังแสดงในรูปที่ 3.4 โดยความสูงทั้งหมดของต้นเทียนเท่ากับ 110 มิลลิเมตร และขนาดก้านของต้นเทียนมีขนาดความกว้างเท่ากับ 3 มิลลิเมตร และมีความยาวเท่ากับ 15 มิลลิเมตร นำมาติดที่แขนกลางของต้นเทียน โดยติดให้สูงจากฐานยางประมาณ 20 มิลลิเมตร และติดแบบสลับหว่างกัน ดังแสดงในรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.4 แสดงรูปต้นเทียนในการหล่อเครื่องประดับ



รูปที่ 3.5 แสดงตำแหน่งในการติดต้นเทียน

3.2.4 การพัฒนาฐานข้อมูลของวัสดุโลหะที่ใช้ในการหล่อเครื่องประดับและวัสดุที่ใช้ทำเข้าปูน

ขั้นตอนนี้ผู้จัดทำโครงการได้ทำการรวบรวมฐานข้อมูลจากสมบัติของทองเหลือง (Leaded Naval Brass) และปูนพลาสติก (Plaster) ที่ใช้ในการจำลองการหล่อเครื่องประดับ

3.2.5 สรุปปัจจัยที่เหมาะสมที่มีผลต่อกระบวนการหล่อ

จากการศึกษาเอกสารที่เกี่ยวข้อง หรืองานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ได้คัดเลือกปัจจัยที่มีผลต่อปริมาณรูพรุนที่เกิดขึ้นในกระบวนการหล่อเครื่องประดับ ทำให้ได้ปัจจัยที่ศึกษาที่มีผลต่อปริมาณรูพรุนได้ดังนี้

3.2.5.1 อุณหภูมิในการเทน้ำโลหะ

3.2.5.2 อุณหภูมิของเข้าปูน

3.2.5.3 รูปแบบของต้นเทียน

3.2.6 การออกแบบแผนการทดลอง

ในขั้นตอนนี้ผู้จัดทำโครงการได้ทำการศึกษาการออกแบบการทดลอง ทฤษฎีสมมติฐาน และการทดสอบสมมติฐาน ทฤษฎีทางสถิติ เพื่อหาปัจจัยที่มีผลกระทบ ที่ทำให้เกิดปัญหา รุพุนน้อยที่สุด โดยเลือกใช้การออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียลเต็มรูป ซึ่งการออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียลเต็มรูปนั้นสามารถศึกษาปัจจัยหลายๆ ปัจจัยได้ในเวลาเดียวกัน ทำการทดลองวัดค่าปัจจัยแบบครบทุกเงื่อนไข ผู้ทดลองสามารถศึกษาผลกระทบหลัก ผลกระทบร่วมได้ตามที่ต้องการครบทุกเงื่อนไข และผลกระทบของปัจจัยในแต่ละปัจจัยเป็นอิสระต่อกัน

3.2.7 ขั้นตอนการจำลองการหล่อ

การศึกษานี้จะใช้หลักการพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ การจำลองการไหลแบบต่อเนื่อง ได้นำการจำลองเชิงตัวเลขไปใช้ในกระบวนการผลิตเครื่องประดับเป็นเครื่องมือช่วยบนคอมพิวเตอร์ แล้วใช้ปัจจัยที่เหมาะสม เพื่อช่วยวิเคราะห์หาสาเหตุการเกิดข้อบกพร่องบนชิ้นงานหล่อ ขั้นตอนนี้เริ่มจากนำแบบจำลองชิ้นงาน 3 มิติ ที่วาดโดยใช้โปรแกรมวาดแบบ (Rhinceros) ซึ่งใช้ Plug - in โปรแกรม Grasshopper เป็นโปรแกรมเสริม หลังจากนั้นทำการส่งไฟล์ (igs) ของแบบที่วาดโดยโปรแกรม Rhinceros นำไปเปิดในโปรแกรม CFD และตั้งค่าโปรแกรม จากนั้นจึงทำการเปลี่ยนแปลงพื้นที่ให้เป็นปริมาตรขนาดเล็ก เพื่อสร้างปริมาตร Mesh จะมีลักษณะเป็นพีระมิดทรงสามเหลี่ยม และป้อนปัจจัยต่างๆ ลงไปในโปรแกรม เริ่มต้นจากการกำหนดฐานข้อมูลของวัสดุที่ใช้ในการหล่อ และวัสดุที่ใช้ทำเข้าปูน กำหนดค่าอุณหภูมิที่ใช้ในการหล่อ และอุณหภูมิของเข้าปูน กำหนดค่าการสัมผัสระหว่างชิ้นงานกับเข้าปูน กำหนดการเย็นตัว เวลาในการเท ตั้งค่าความดัน และกำหนดตำแหน่งทางเข้าของน้ำโลหะที่เข้าสู่เข้าปูน จากนั้นทำการรันโปรแกรม เพื่อคำนวณผลการวิเคราะห์ผลในการจำลองการหล่อ

3.2.8 การวิเคราะห์ผลลัพธ์ของโปรแกรม CFD

ทำการวิเคราะห์ปริมาณรูพุนที่เกิดขึ้นบนรูปแบบของต้นเทียน ที่ได้จากการทำการจำลองการหล่อ

3.2.9 การบันทึกผลการทดลอง

นำผลลัพธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์ปริมาณรูพุนมาบันทึกผลการทดลอง เพื่อนำผลที่ได้ไปวิเคราะห์ข้อมูลเชิงสถิติในขั้นตอนต่อไป

3.2.10 การวิเคราะห์ข้อมูลเชิงสถิติ

3.2.10.1 การตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบการทดลอง

เมื่อได้ผลการทดลองแล้วทำการตรวจสอบความถูกต้องของข้อมูลโดยใช้โปรแกรม Minitab ซึ่งผู้จัดทำโครงการมีการตรวจสอบดังนี้

- ก. การตรวจสอบการกระจายตัวแบบปกติของข้อมูล
- ข. การตรวจสอบความเป็นอิสระของข้อมูล
- ค. การตรวจสอบความเสถียรของความแปรปรวนของข้อมูล

ก่อนจะนำข้อมูลที่ได้จากการทดลองไปวิเคราะห์ข้อมูลเชิงสถิติ ต้องทำการตรวจสอบโดยพิจารณาจากกราฟของการกระจายตัวของข้อมูล กราฟการกระจายความเป็นอิสระของข้อมูล และกราฟความเสถียรของความแปรปรวนของข้อมูล

3.2.10.2 การทดสอบความแปรปรวน

การทดสอบความแปรปรวนทำเพื่อพิจารณาว่าอุณหภูมิในการเทน้ำโลหะอุณหภูมิของเข้าปูน รูปแบบของดินเตียนมีผลต่อปริมาณรูพรุนที่เกิดขึ้นในการหล่อเครื่องประดับแบบซีฟิ่งหาย

3.2.10.3 การวิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลต่อปริมาณรูพรุน

เมื่อหาปัจจัยที่มีผลต่อปริมาณรูพรุนแล้ว จึงทำการวิเคราะห์หาระดับที่ก่อให้เกิดปริมาณรูพรุนที่น้อยที่สุด จากกราฟผลกระทบหลักและผลกระทบร่วม เพื่อใช้เป็นแนวทางในการเลือกระดับที่เหมาะสม

3.2.10.4 การวิเคราะห์พื้นผิวตอบสนอง

การวิเคราะห์พื้นผิวตอบสนองเป็นการหาผลตอบสนองของปัจจัยต่างๆ เพื่อนำมาหาแนวโน้มที่เหมาะสมของระดับปัจจัยที่มีผลต่อที่ทำให้เกิดปริมาณรูพรุนน้อยที่สุด

3.2.10.5 การหาค่าที่เหมาะสมของปัจจัย

การวิเคราะห์หาค่าที่เหมาะสมที่สุดของปัจจัยที่มีผลต่อปริมาณรูพรุน เพื่อให้ได้ค่าที่เหมาะสมที่สุดของแต่ละปัจจัยที่ก่อให้เกิดปริมาณรูพรุนน้อยที่สุด

3.2.11 สรุปผลการดำเนินโครงการ

นำผลลัพธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์ข้อมูลเชิงสถิติมาหาข้อสรุปว่าปัจจัย และระดับปัจจัยใดมีผลที่ทำให้เกิดการเกิดปริมาณรูพรุนที่น้อยที่สุด แล้วทำการสรุปผลการดำเนินโครงการ และจัดทำรูปแบบโครงการ

บทที่ 4

ผลการดำเนินโครงการ

4.1 ผลการศึกษาและรวบรวมข้อมูล

ผู้จัดทำโครงการได้ศึกษาและรวบรวมข้อมูลจากงานวิจัย เอกสาร หนังสือ เว็บไซต์ ที่เกี่ยวข้องกับการจำลองการหล่อเครื่องประดับด้วยโปรแกรมพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ กระบวนการหล่อเครื่องประดับแบบซีพิงค์หาย ปัญหาที่เกิดขึ้นในกระบวนการหล่อ และการออกแบบการทดลองเพื่อศึกษาปัจจัยอุณหภูมิในการเทน้ำโลหะ อุณหภูมิของเบ้าปูน และรูปแบบของต้นเทียน ที่มีผลต่อการเกิดปริมาณรูพรุน ซึ่งได้รวบรวมข้อมูลดังต่อไปนี้

- 4.1.1 การหล่อเครื่องประดับ
- 4.1.2 วัสดุที่ใช้ในการหล่อเครื่องประดับ
- 4.1.3 ปัญหาที่เกิดขึ้นในกระบวนการหล่อเครื่องประดับ
- 4.1.4 แบบจำลองกระบวนการหล่อ
- 4.1.5 การออกแบบเครื่องประดับแหวน
- 4.1.6 ทฤษฎีการออกแบบการทดลอง
- 4.1.7 ทฤษฎีสันนิษฐาน และการทดสอบสันนิษฐาน (Hypothesis and Hypothesis Test)
- 4.1.8 ทฤษฎีทางสถิติ (Statistics)

นอกจากนี้ผู้จัดทำโครงการได้ศึกษาเกี่ยวกับงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ในเรื่องของการพัฒนาแนวทางแก้ไขปัญหาในการหล่อเครื่องประดับ เพื่อการลดปัญหาข้อบกพร่องในกระบวนการผลิตเครื่องประดับ และโปรแกรมพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ ประยุกต์ใช้กับกระบวนการหล่อเครื่องประดับแบบซีพิงค์หาย เพื่อนำมาเป็นแนวทางของการดำเนินโครงการ ซึ่งผู้จัดทำได้แสดงรายละเอียดไว้ในบทที่ 2 หลักการและทฤษฎีเบื้องต้น

4.2 สร้างแบบจำลองแบบสามมิติด้วยโปรแกรม Rhinoceros และ Grasshopper

จากการศึกษาในหัวข้อที่ 2.4 การออกแบบเครื่องประดับแหวน และกระบวนการวาดรูปทรงเครื่องประดับแหวน และแบบต้นเทียนแบบสามมิติ ด้วยโปรแกรม Rhinoceros และ Plug-in โปรแกรม Grasshopper ซึ่งการสร้างแบบจำลองมีดังนี้

4.2.1 การวาดรูปโมเดลแหวนล้อมเพชร

ทำการวาดรูปโมเดลแหวนล้อมเพชร ซึ่งแหวนล้อมเพชรมีลักษณะ คือ บริเวณตรงกลางหน้าแหวนประดับด้วยอัญมณีขนาดใหญ่ และมีอัญมณีขนาดเล็กล้อมรอบ ขนาดของวงแหวนมีขนาด

บาง ซึ่งแหวนล้อมเพชรมีองค์ประกอบทั้งหมด 4 ส่วน ได้แก่ อัญมณีเม็ดยอด อัญมณีเม็ดล้อม ก้านแหวน และกระเปาะอัญมณี ดังแสดงในรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 แสดงการออกแบบแหวนล้อมเพชรด้วยโปรแกรม Rhinoceros

4.2.2 การวาดรูปโมเดลแหวนประดับมุก

ทำการวาดโมเดลแหวนประดับมุก ซึ่งแหวนประดับมุกมีลักษณะ คือ บริเวณตรงกลางประดับด้วยมุก ขนาดของวงแหวนมีขนาดบาง มีเตยที่ขนาดเล็ก ซึ่งแหวนประดับมุกมีองค์ประกอบทั้งหมด 4 ส่วน ได้แก่ มุกเม็ดยอด กลีบดอก เตยแหวน และก้านแหวน ดังแสดงในรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 แสดงการออกแบบแหวนประดับมุกด้วยโปรแกรม Rhinoceros

4.2.3 การวาดรูปโมเดลแหวนสัญลักษณ์

ทำการวาดรูปโมเดลแหวนสัญลักษณ์ ซึ่งแหวนสัญลักษณ์มีลักษณะ คือ บริเวณหน้าแหวน มีบริเวณที่กว้างและหนา เพื่อสำหรับใส่ลายสัญลักษณ์ ขนาดของวงแหวนมีขนาดหนา ดังแสดงในรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 แสดงการออกแบบแหวนสัญลักษณ์ด้วยโปรแกรม Rhinoceros

4.2.4 การวาดทางเดินน้ำโลหะหลัก (Sprue)

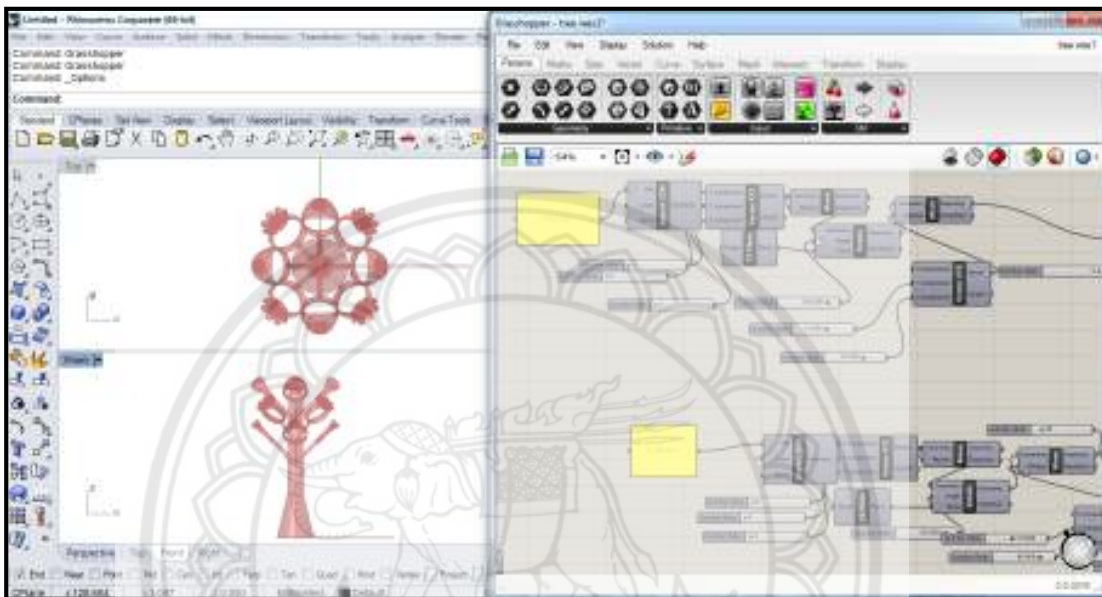
การวาดทางเดินน้ำโลหะ มีลักษณะคล้ายลำต้นของต้นไม้ ตรงบริเวณแกนกลางต้นมีลักษณะกลมกลวง เพื่อให้ น้ำโลหะไหลเข้าสู่ทางเดินน้ำโลหะ ดังแสดงในรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 แสดงการออกแบบทางเดินน้ำ (Sprue)

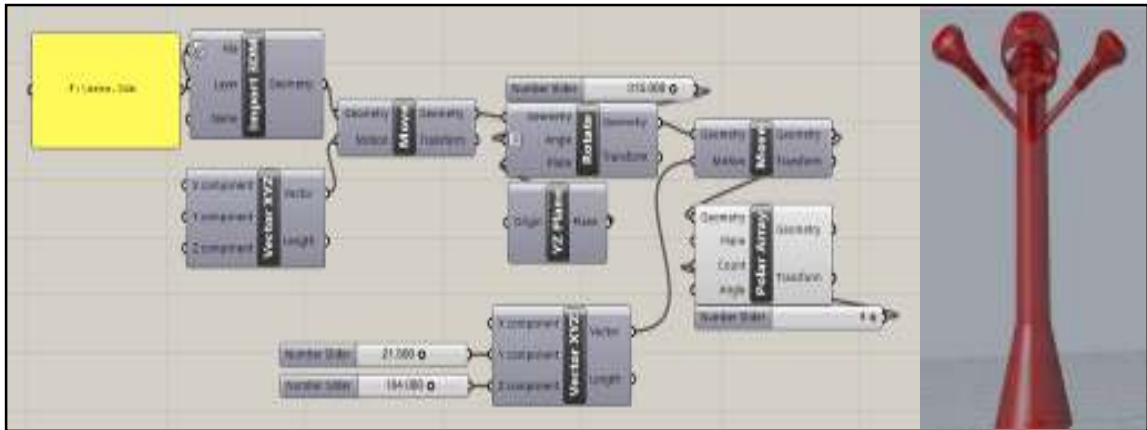
4.2.5 การนำแหวนทั้งสามรูปแบบมาประกอบเข้าด้วยกันกับก้านทางเดินน้ำโลหะ และทางเดินน้ำโลหะหลัก (แกนกลางของต้นเทียน)

โดยทำเป็นชั้นทั้งหมดสามชั้น แต่ละชั้นจะมีแหวนต่างชนิดกัน ชั้นละ 4 วง จัดเรียงแบบ สับหว่างกันในแต่ละชั้น และติดทำมุม 45 องศากับทางเดินน้ำโลหะหลัก ซึ่งการประกอบโมเดลเข้าด้วยกันจะใช้ Plug-in เสริม Grasshopper มาช่วยให้การประกอบและการจัดเรียง เพื่อสามารถปรับ โมเดลต่างๆ ได้สะดวกมากขึ้น

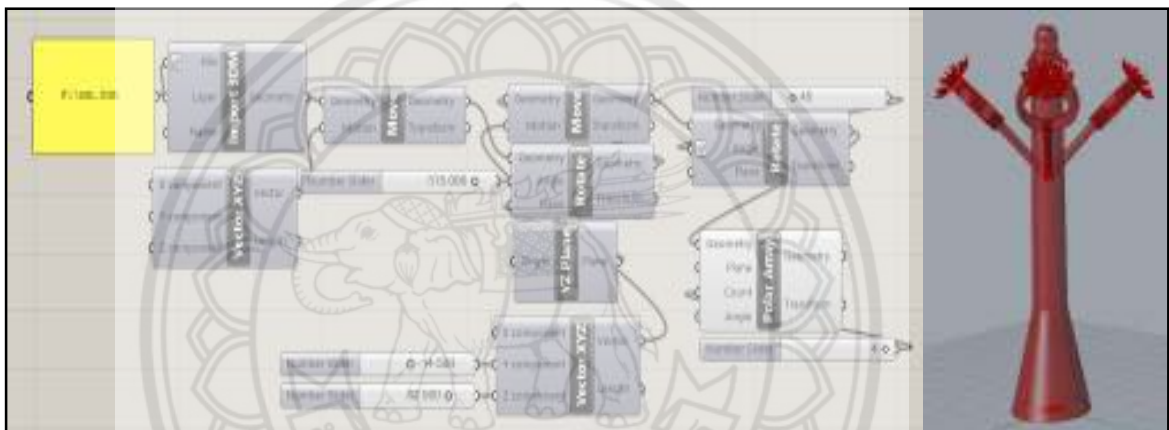


รูปที่ 4.5 แสดงการจัดเรียงแหวนบนต้นเทียนด้วยโปรแกรม Plug-in เสริม Grasshopper

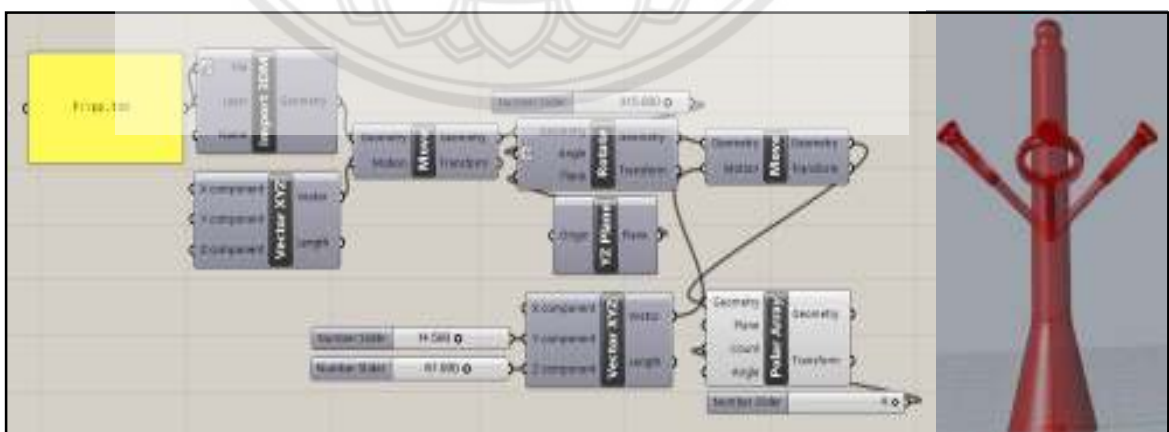
จากนั้นเปิดไฟล์แหวน 3 มิติ โดยใช้คำสั่ง 3DM และทำการ Move ขึ้นงานจากตำแหน่ง X เท่ากับศูนย์ Y เท่ากับศูนย์ ไปยังตำแหน่งที่ต้องการ จากนั้นทำการ Rotate ให้มีมุมเท่ากับ 45 องศา และทำการ Polar Array ให้คัดลอกแหวนที่ติดอยู่กับก้านหมุนตามแกนกลางเป็นวงกลมตามจำนวนที่ต้องการ โดยจะให้หมุนเป็น 4 มุมมีระยะห่างเท่ากับ 90 องศาทำมุมกับแนวแกน X ตามการจัดเรียง แหวนบนต้นระดับละ 4 วง ซึ่งผู้จัดทำโครงงานได้ออกแบบตำแหน่งในการติดแหวนเป็น 3 ระดับ จึง ทำให้รูปแบบของต้นเทียนหนึ่งต้นมีแหวนทั้งหมด 12 วง ดังแสดงในรูปที่ 4.6 ถึง รูปที่ 4.8



รูปที่ 4.6 แสดงการจัดเรียงแหวนสัญลักษณ์บนต้นเทียนด้วยโปรแกรม Plug-in เสริม Grasshopper



รูปที่ 4.7 แสดงการจัดเรียงแหวนประดับมุกบนต้นเทียนด้วยโปรแกรม Plug-in เสริม Grasshopper



รูปที่ 4.8 แสดงการจัดเรียงแหวนล้อมเพชรบนต้นเทียนด้วยโปรแกรม Plug-in เสริม Grasshopper

4.3 ผลการออกแบบการทดลอง

ในขั้นตอนนี้ผู้จัดทำโครงการได้ทำการศึกษาการออกแบบการทดลอง ทฤษฎีสมมติฐานและการทดสอบสมมติฐาน ทฤษฎีทางสถิติ เพื่อหาปัจจัยที่มีผลกระทบ ที่ทำให้เกิดปัญหา รุพุนน้อยที่สุด โดยเลือกใช้การออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียลเต็มรูปแบบ ซึ่งการออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียลเต็มรูปแบบนั้นสามารถศึกษาปัจจัยหลายๆ ปัจจัยได้ในเวลาเดียวกัน ทำการทดลองวัดค่าปัจจัยแบบครบทุกเงื่อนไข โดยในการออกแบบการทดลองแบ่งออกเป็น 3 ส่วน ได้แก่ ปัจจัยที่เหมาะสมที่มีผลต่อกระบวนการหล่อ ระดับปัจจัยที่เหมาะสมที่มีผลต่อกระบวนการหล่อ และตั้งสมมติฐานการทดลอง มีรายละเอียดดังนี้

4.3.1 ปัจจัยที่เหมาะสมที่มีผลต่อกระบวนการหล่อ

จากวิธีการดำเนินงานบทที่ 3 การกำหนดปัจจัยในกระบวนการผู้จัดทำโครงการได้กำหนดปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการการหล่อเครื่องประดับแบบขี้ผึ้งหาย มี 3 ปัจจัยหลัก ซึ่งปัจจัยเหล่านี้ที่มีผลต่อการเกิดปริมาณรุพุนในการหล่อเครื่องประดับแบบขี้ผึ้งหาย คือ อุณหภูมิในการเทน้ำโลหะ อุณหภูมิของเบ้าปูน และรูปแบบของต้นเทียน

4.3.2 ระดับปัจจัยที่เหมาะสมที่มีผลต่อกระบวนการหล่อ

จากการกำหนดปัจจัยในหัวข้อที่ 4.3.1 และศึกษาเอกสารที่เกี่ยวข้อง หรืองานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการการหล่อเครื่องประดับแบบขี้ผึ้งหาย โดยมีการกำหนดระดับปัจจัยดังนี้

ก. อุณหภูมิในการเทน้ำโลหะ กำหนดปัจจัยในการทดลองเป็น 3 ระดับ คือ 1,050 1,100 และ 1,150 องศาเซลเซียส (สุทัศน์ ยอดเพชร, 2546)

ข. อุณหภูมิของเบ้าปูน จึงกำหนดปัจจัยในการทดลองเป็น 3 ระดับ คือ 450 500 และ 550 องศาเซลเซียส (ไอรส พินิจรัตน์พันธ์, 2556)

ค. รูปแบบของต้นเทียน โดยติดแหวนบนตำแหน่งของต้นมีการจัดเรียงแบบที่ไม่ซ้ำกัน แต่ละต้นมีการจัดเรียงแหวนทั้งหมด 3 ชนิด ได้แก่ แหวนประดับมุก แหวนล้อมเพชร และแหวนสัญลักษณ์ โดยที่ตำแหน่งของต้นมี 3 ระดับ ได้แก่ ระดับสูง ระดับกลาง และระดับต่ำ

การจัดลำดับวัตถุที่แตกต่างกัน โดยมีการจัดเรียงแบบที่ไม่ซ้ำกัน ใช้สูตรการคำนวณทางสถิติในการสุ่มความน่าจะเป็น จึงได้รูปแบบของต้นเทียนทั้งหมด 6 รูปแบบ ดังแสดงในสมการ

$$n! = n(n-1) \quad [4.1]$$

โดยที่ n = จำนวนเต็มบวก

ในขั้นตอนนี้ผู้จัดทำโครงการได้ทำการศึกษารอบแบบการทดลอง เพื่อหาปัจจัยที่มีผลกระทบที่ทำให้เกิดปัญหารูพรุนน้อยที่สุด โดยเลือกใช้การออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียลเต็มรูป

ซึ่งทั่วไปการทดลองแฟคทอเรียลเต็มรูปจะต้องมีการตั้งข้อสมมติฐานเกี่ยวกับปริมาณรูพรุน เพื่อสามารถประมาณค่าปริมาณรูพรุน ซึ่งมีรายละเอียดปัจจัย สำหรับการหาปัจจัยที่เหมาะสมต่อกระบวนการหล่อที่ทำให้เกิดรูพรุนน้อยที่สุดประกอบด้วย 3 กลุ่ม ดังต่อไปนี้

ปัจจัยกลุ่มที่ 1 อุณหภูมิในการเทน้ำโลหะ แบ่งออกเป็น 3 ระดับ ได้แก่

ระดับที่ 1 อุณหภูมิในการเทน้ำโลหะ 1,050 องศาเซลเซียส

ระดับที่ 2 อุณหภูมิในการเทน้ำโลหะ 1,100 องศาเซลเซียส

ระดับที่ 3 อุณหภูมิในการเทน้ำโลหะ 1,150 องศาเซลเซียส

ปัจจัยกลุ่มที่ 2 อุณหภูมิของเบ้าปูน แบ่งออกเป็น 3 ระดับ ได้แก่

ระดับที่ 1 อุณหภูมิของเบ้าปูน 450 องศาเซลเซียส

ระดับที่ 2 อุณหภูมิของเบ้าปูน 500 องศาเซลเซียส

ระดับที่ 3 อุณหภูมิของเบ้าปูน 550 องศาเซลเซียส

ปัจจัยกลุ่มที่ 3 รูปแบบของต้นเทียน แบ่งออกเป็น 6 รูปแบบ รูปแบบละ 3 ระดับ

ได้แก่

รูปแบบที่ 1 ระดับที่ 1 แหวนสัญลักษณ์

ระดับที่ 2 แหวนประดับมุก

ระดับที่ 3 แหวนล้อมเพชร

โดยที่ ติดแหวนสัญลักษณ์ในตำแหน่งสูงของต้นเทียน แหวนประดับมุกในตำแหน่งกลางของต้นเทียน และแหวนล้อมเพชรในตำแหน่งต่ำของต้นเทียน ดังแสดงในรูปที่ 4.9

รูปแบบที่ 2 ระดับที่ 1 แหวนประดับมุก

ระดับที่ 2 แหวนสัญลักษณ์

ระดับที่ 3 แหวนล้อมเพชร

โดยที่ ติดแหวนประดับมุกในตำแหน่งสูงของต้นเทียน แหวนสัญลักษณ์ในตำแหน่งกลางของต้นเทียน และแหวนล้อมเพชรในตำแหน่งต่ำของต้นเทียน ดังแสดงในรูปที่ 4.10

รูปแบบที่ 3 ระดับที่ 1 แหวนสัญลักษณ์

ระดับที่ 2 แหวนล้อมเพชร

ระดับที่ 3 แหวนประดับมุก

โดยที่ ติดแหวนสัญลักษณ์ในตำแหน่งสูงของต้นเทียน แหวนล้อมเพชรในตำแหน่งกลางของต้นเทียน และแหวนประดับมุกในตำแหน่งต่ำของต้นเทียน ดังแสดงในรูปที่ 4.11

รูปแบบที่ 4 ระดับที่ 1 แหวนล้อมเพชร

ระดับที่ 2 แหวนสัญลักษณ์

ระดับที่ 3 แหวนประดับมุก

โดยที่ ติดแหวนล้อมเพชรในตำแหน่งสูงของต้นเทียน แหวนสัญลักษณ์ในตำแหน่งกลางของต้นเทียน และแหวนประดับมุกในตำแหน่งต่ำของต้นเทียน ดังแสดงในรูปที่ 4.12

รูปแบบที่ 5 ระดับที่ 1 แหวนล้อมเพชร

ระดับที่ 2 แหวนประดับมุก

ระดับที่ 3 แหวนสัญลักษณ์

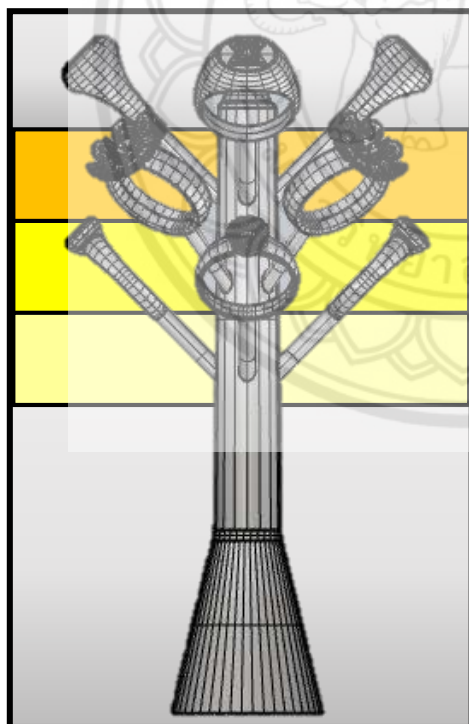
โดยที่ ติดแหวนล้อมเพชรในตำแหน่งสูงของต้นเทียน แหวนประดับมุกในตำแหน่งกลางของต้นเทียน และแหวนสัญลักษณ์ในตำแหน่งต่ำของต้นเทียน ดังแสดงในรูปที่ 4.13

รูปแบบที่ 6 ระดับที่ 1 แหวนประดับมุก

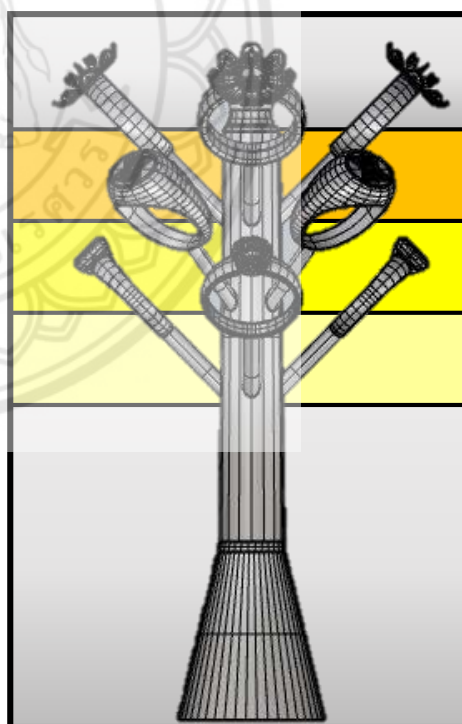
ระดับที่ 2 แหวนล้อมเพชร

ระดับที่ 3 แหวนสัญลักษณ์

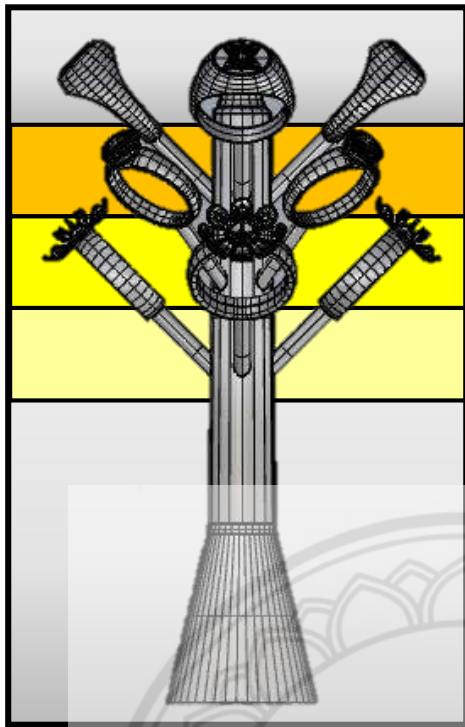
โดยที่ ติดแหวนประดับมุกในตำแหน่งสูงของต้นเทียน แหวนล้อมเพชรในตำแหน่งกลางของต้นเทียน และแหวนสัญลักษณ์ในตำแหน่งต่ำของต้นเทียน ดังแสดงในรูปที่ 4.14



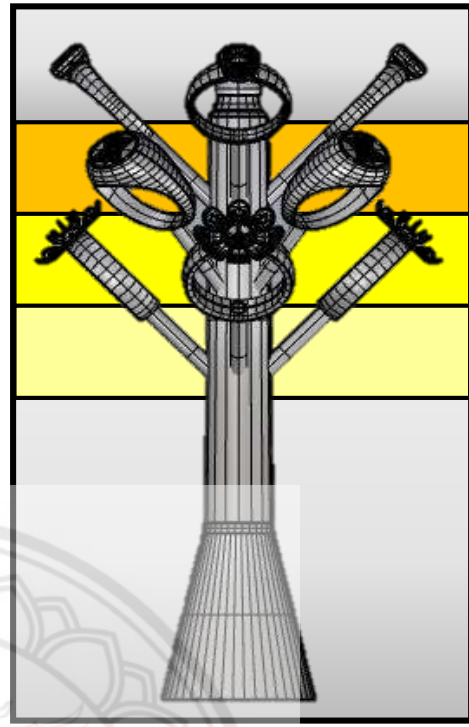
รูปที่ 4.9 แสดงต้นเทียนแบบที่ 1



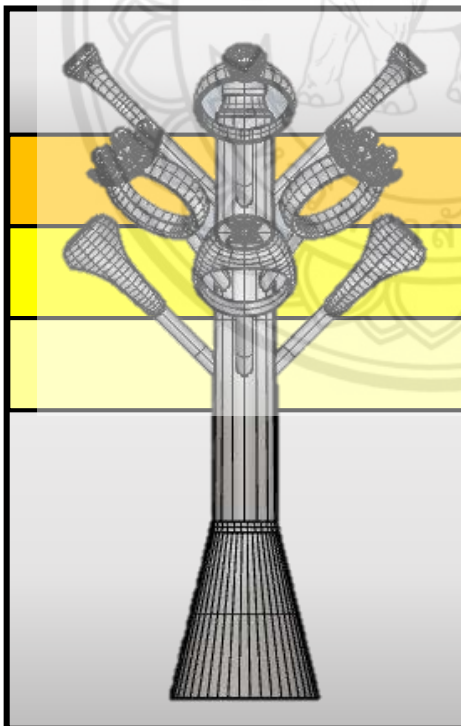
รูปที่ 4.10 แสดงต้นเทียนแบบที่ 2



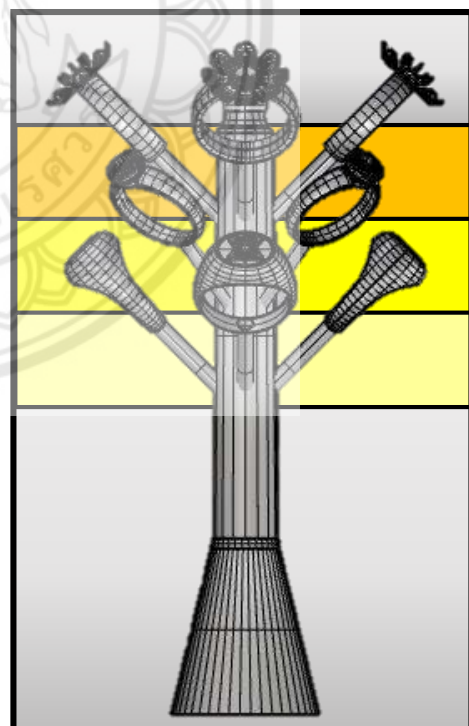
รูปที่ 4.11 แสดงต้นเทียนแบบที่ 3



รูปที่ 4.12 แสดงต้นเทียนแบบที่ 4



รูปที่ 4.13 แสดงต้นเทียนแบบที่ 5



รูปที่ 4.14 แสดงต้นเทียนแบบที่ 6

ตารางที่ 4.1 แสดงสัญลักษณ์ของปัจจัยและระดับปัจจัย

ปัจจัย	สัญลักษณ์	ระดับปัจจัย					
อุณหภูมิในการเทน้ำโลหะ	Pour Temp	1	2	3	-	-	-
อุณหภูมิของเบ้าปูน	Mold Temp	1	2	3	-	-	-
รูปแบบของต้นเทียน	Tree Model	1	2	3	4	5	6

4.3.3 การตั้งสมมติฐานการทดลอง

ผู้จัดทำโครงการได้ตั้งสมมติฐานก่อนการดำเนินการทดลอง เพื่อตรวจสอบผลกระทบแต่ละปัจจัย และระดับปัจจัยที่ระบุในหัวข้อ 4.5.1 และ หัวข้อ 4.5.2 ซึ่งได้ตั้งสมมติฐานโดยแสดงรายละเอียดดังนี้

4.3.3.1 การกำหนดสมมติฐานผลกระทบหลักของปัจจัยที่ 1 คือ อุณหภูมิในการเทน้ำโลหะ

H_0 : อุณหภูมิในการเทน้ำโลหะไม่มีผลต่อปริมาณรูพรุน

H_1 : อุณหภูมิในการเทน้ำโลหะมีผลต่อปริมาณรูพรุน

4.3.3.2 การกำหนดสมมติฐานผลกระทบหลักของปัจจัยที่ 2 คือ อุณหภูมิของเบ้าปูน

H_0 : อุณหภูมิของเบ้าปูนไม่มีผลต่อปริมาณรูพรุน

H_1 : อุณหภูมิของเบ้าปูนมีผลต่อปริมาณรูพรุน

4.3.3.3 การกำหนดสมมติฐานผลกระทบหลักของปัจจัยที่ 3 คือ รูปแบบของต้นเทียน

H_0 : รูปแบบของต้นเทียนไม่มีผลต่อปริมาณรูพรุน

H_1 : รูปแบบของต้นเทียนมีผลต่อปริมาณรูพรุน

4.3.3.4 การกำหนดสมมติฐานผลกระทบร่วมของปัจจัยที่ 1 และ ปัจจัยที่ 2

H_0 : อุณหภูมิในการเทน้ำโลหะและอุณหภูมิของเบ้าปูนไม่มีผลต่อปริมาณรูพรุน

H_1 : อุณหภูมิในการเทน้ำโลหะและอุณหภูมิของเบ้าปูนมีผลต่อปริมาณรูพรุน

4.3.3.5 การกำหนดสมมติฐานผลกระทบร่วมของปัจจัยที่ 1 และ ปัจจัยที่ 3

H_0 : อุณหภูมิในการเทน้ำโลหะและรูปแบบของต้นเทียนไม่มีผลต่อปริมาณรูพรุน

H_1 : อุณหภูมิในการเทน้ำโลหะและรูปแบบของต้นเทียนมีผลต่อปริมาณรูพรุน

4.3.3.6 การกำหนดสมมติฐานผลกระทบร่วมของปัจจัยที่ 2 และ ปัจจัยที่ 3

H_0 : อุณหภูมิของเบ้าปูนและรูปแบบของต้นเทียนไม่มีผลต่อปริมาณรูพรุน

H_1 : อุณหภูมิของเบ้าปูนและรูปแบบของต้นเทียนมีผลต่อปริมาณรูพรุน

4.3.3.7 การกำหนดสมมติฐานผลกระทบรวมของปัจจัยที่ 1 ปัจจัยที่ 2 และ ปัจจัยที่ 3

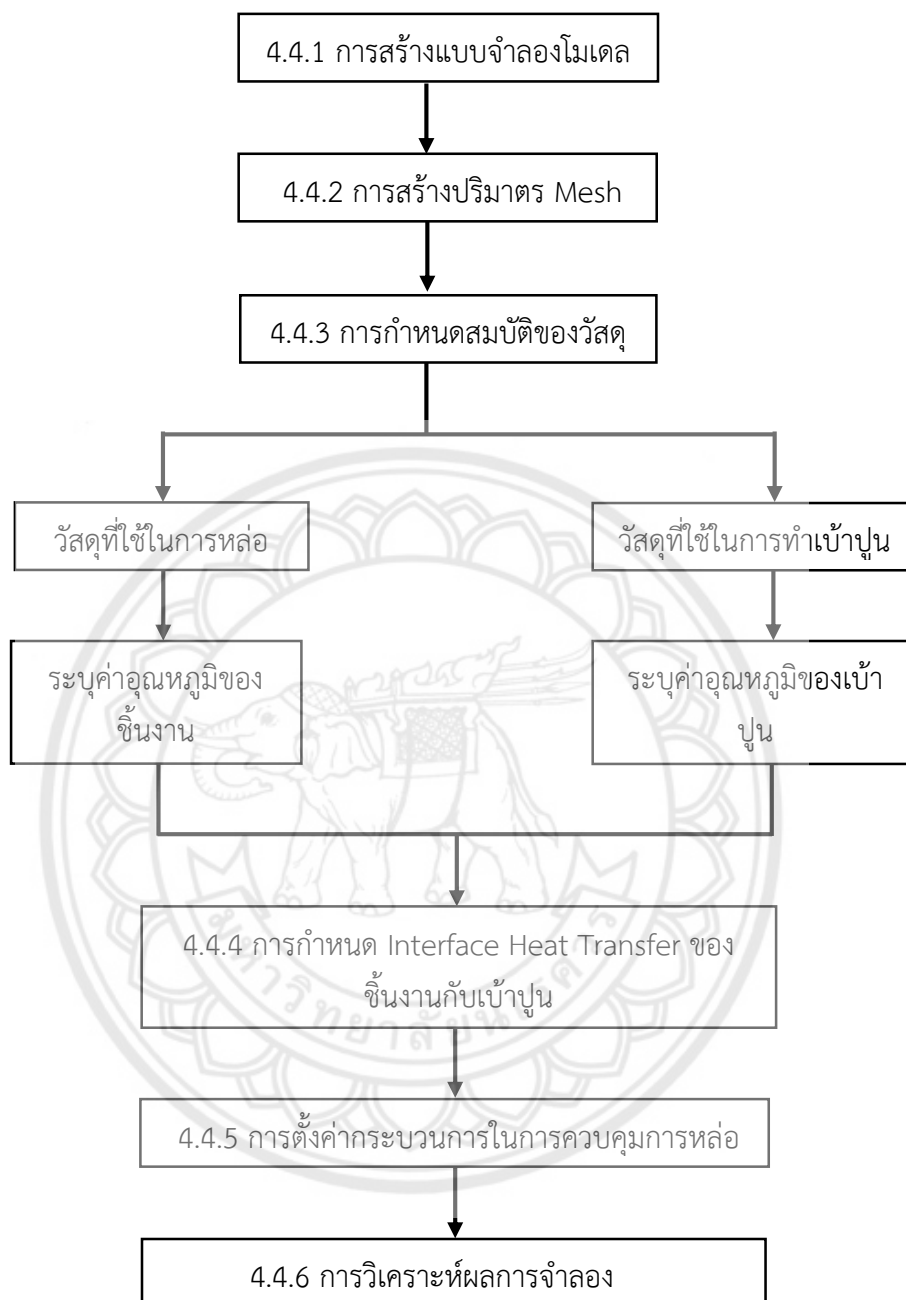
H_0 : อุณหภูมิในการเทน้ำโลหะ อุณหภูมิของเบ้าปูนและรูปแบบของต้นเทียนไม่มีผลต่อปริมาณรูพรุน

H_1 : อุณหภูมิในการเทน้ำโลหะ อุณหภูมิของเบ้าปูนและรูปแบบของต้นเทียนมีผลต่อปริมาณรูพรุน

ตารางที่ 4.2 การจัดลำดับการทดลองโดยใช้โปรแกรม Minitab

StdOrder	Pour Temp	Mold Temp	Tree Model	Porosity
1	1	1	1	
2	1	1	2	
3	1	1	3	
4	1	1	4	
:	:	:	:	
:	:	:	:	
:	:	:	:	
:	:	:	:	
105	1	2	3	
106	1	2	4	
107	1	2	5	
108	1	2	6	

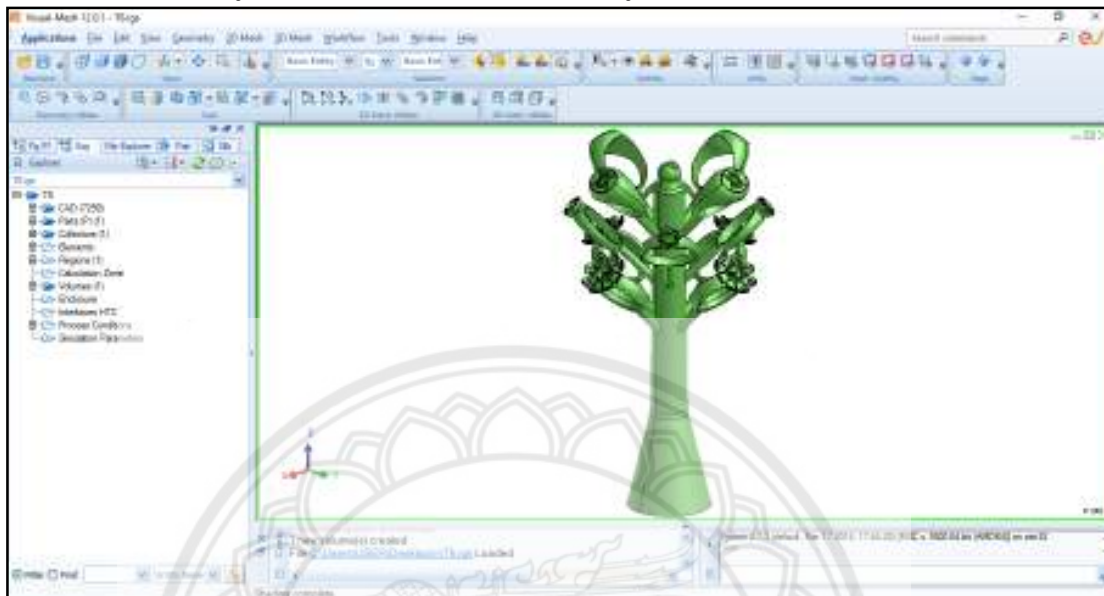
4.4 ผลการศึกษาการวิเคราะห์การจำลองการหล่อด้วยระบบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์



รูปที่ 4.15 แผนผังการไหลแสดงขั้นตอนการสร้างแบบจำลองการหล่อ

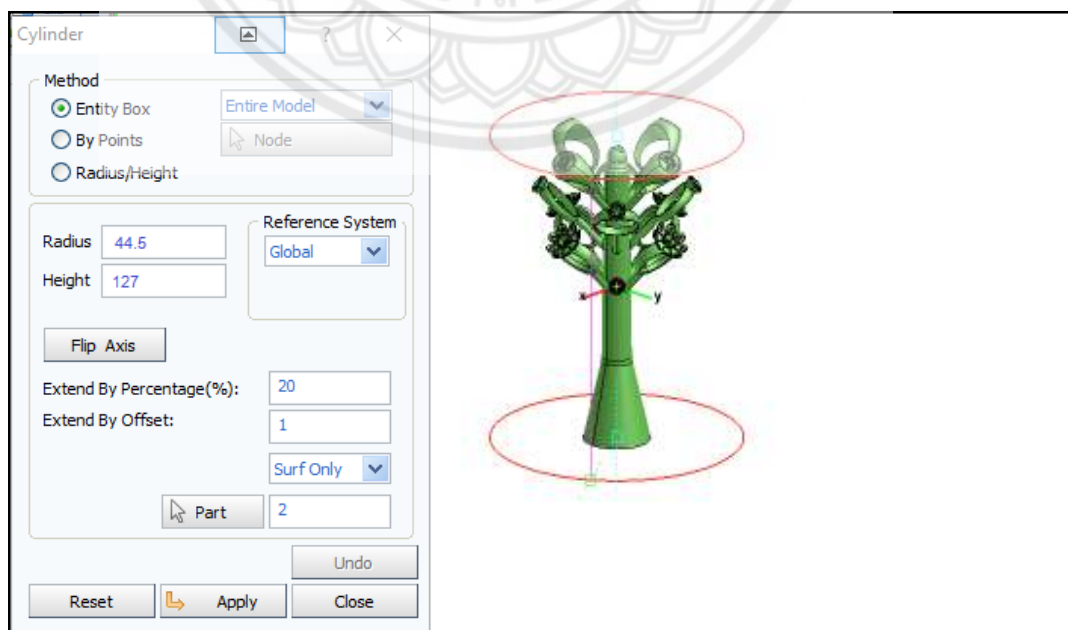
4.4.1 การสร้างแบบจำลองโมเดล

4.4.1.1 นำไฟล์ต้นเทียนที่วาดโดยใช้โปรแกรม Rhinoceros และ Plug – in เสริมโปรแกรม Grasshopper เปิดโปรแกรม ProCAST โดยต้นเทียนมีความสูงของต้น 110 มิลลิเมตร และมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 60 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 4.16



รูปที่ 4.16 แสดงแบบจำลองโมเดลต้นเทียน

4.4.1.2 การสร้างเข้าปุ่นให้กับแบบจำลองชิ้นงาน โดยผู้จัดทำโครงการได้อ้างอิงจากตารางที่ 2.1 จึงได้เลือกใช้ขนาดที่เหมาะสมกับโมเดลต้นเทียน ซึ่งเข้าปุ่นมีขนาดความสูง 127 มิลลิเมตร และมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 89 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 4.17



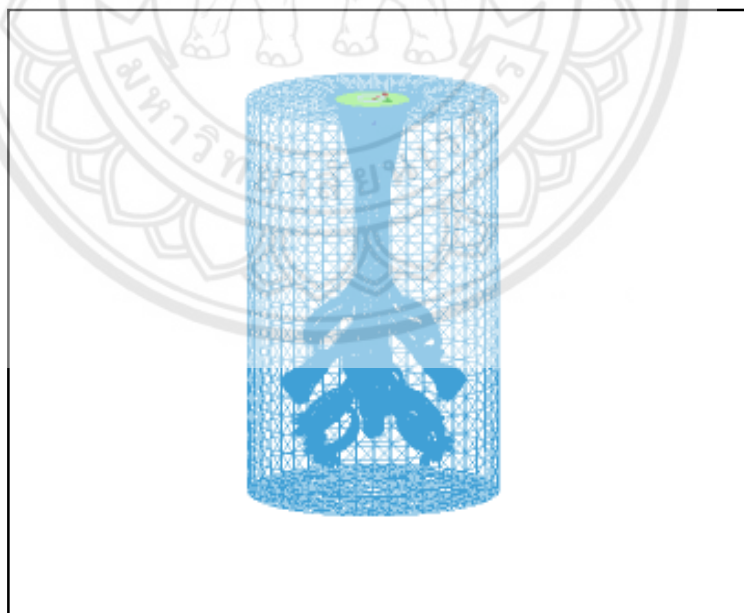
รูปที่ 4.17 แสดงการสร้างเข้าปุ่นให้กับโมเดล

4.4.2 การสร้างปริมาตร Mesh

การสร้าง Mesh มีลักษณะเป็นพีระมิดทรงสามเหลี่ยม การแบ่ง Mesh ต้องไม่ละเอียดจนเกินไป เพราะทำให้เสียเวลาในการคำนวณมาก และไม่ควรถ่ายแบบหยาบจนเกินไป เพราะทำให้ค่าจากการคำนวณคลาดเคลื่อนกว่าความเป็นจริงมาก ดังนั้น ควรออกแบบให้เหมาะสมไม่ละเอียดหรือหยาบจนเกินไป จึงแบ่งตามลักษณะความเหมาะสมของรูปร่างของโมเดล หากโมเดลมีความซับซ้อนมาก ต้องสร้าง Mesh ให้มีความละเอียด เพื่อให้รูปแบบของไฟไนต์เอลิเมนต์มีรูปร่างเหมือนโมเดลต้นแบบมากที่สุด ดังนั้น ผู้จัดทำโครงการจึงกำหนดขนาดของ Element ดังแสดงในตารางที่ 4.3 และจึงได้รูปแบบปริมาตร Mesh ดังแสดงในรูปที่ 4.18

ตารางที่ 4.3 การกำหนด Element Size

องค์ประกอบของการสร้าง Element	ขนาดของ Element
ทางเดินน้ำโลหะ	1
แหวน	1
ลายของแหวน	0.5
หนามเตย	0.2
เข้าปูน	6



รูปที่ 4.18 แสดงการสร้างปริมาตร Mesh

4.4.3 การกำหนดสมบัติของวัสดุ

4.4.3.1 วัสดุโลหะที่ใช้ในการหล่อเครื่องประดับ คือ ทองเหลือง มีคุณสมบัติ ดังนี้

ก. ความหนาแน่น (Density) เท่ากับ $8,100 \text{ kg/m}^3$

ข. ความร้อนจำเพาะ (Specific Heat) เท่ากับ $376 \text{ J/kg} \cdot \text{K}$

ค. ความร้อนแฝง (Latent Heat) เท่ากับ 168.2 kJ/kg

ง. อุณหภูมิเริ่มเกิดของแข็ง (Solidus Temperature) เท่ากับ 887 องศาเซลเซียส

จ. อุณหภูมิเริ่มเกิดของเหลว (liquidus Temperature) เท่ากับ 898 องศาเซลเซียส

4.4.3.2 วัสดุที่ใช้ทำเข้าปูน คือ ปูนพลาสติก ซึ่งมีคุณสมบัติ ดังนี้

ก. การนำความร้อน (Thermal Conductivity) เท่ากับ $0.2637 \text{ W/m} \cdot \text{K}$

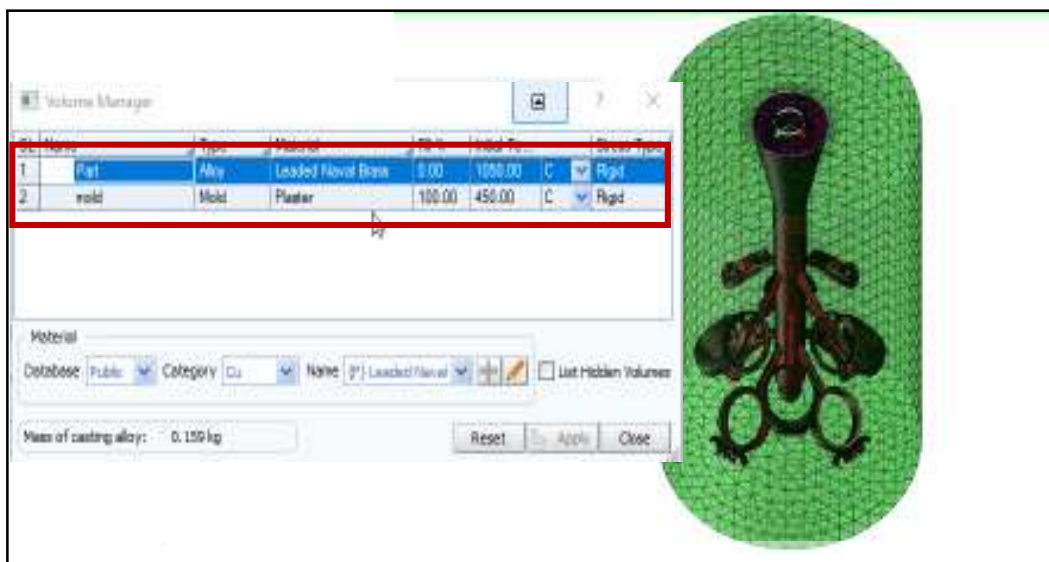
ข. ความหนาแน่น (Density) เท่ากับ $1,100 \text{ kg/m}^3$

ค. ความร้อนเฉพาะ (Specific Heat) ที่ $830 \text{ J/kg} \cdot \text{K}$

โดยการกำหนดสมบัติทางวัสดุ สามารถแบ่งสมบัติของวัสดุออกเป็น 2 วัสดุ คือ วัสดุที่ใช้ในการหล่อชิ้นงาน และวัสดุที่ใช้ในการทำเข้าปูน โดยการตั้งค่าต่างๆ สอดคล้องตามสมบัติของวัสดุ และแผนการทดลองที่ได้จากการออกแบบการทดลอง แสดงดังตารางที่ 4.2 ซึ่งขอบเขตเงื่อนไขของการกำหนดค่าที่ใช้ในการจำลองกระบวนการหล่อ แสดงดังตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 ขอบเขตเงื่อนไขที่ใช้ในการจำลองกระบวนการหล่อ

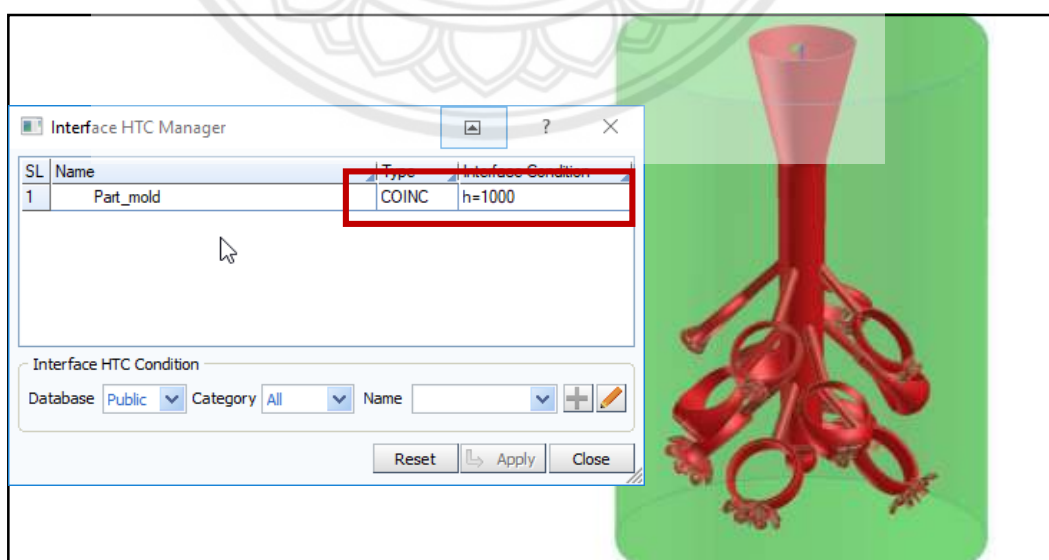
ขอบเขตเงื่อนไข	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
วัสดุที่ใช้ในการหล่อชิ้นงาน	ทองเหลือง (Leaded Naval Brass)
วัสดุที่ใช้ในการทำเข้าปูน	ปูนพลาสติก (Plaster)
อุณหภูมิของชิ้นงาน	1,050 1,100 และ 1,150 องศาเซลเซียส
อุณหภูมิของเข้าปูน	450 500 และ 550 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.19 แสดงการกำหนดสมบัติของวัสดุ

4.4.4 การกำหนด Interface Heat Transfer ของชิ้นงานกับเข้าปูน

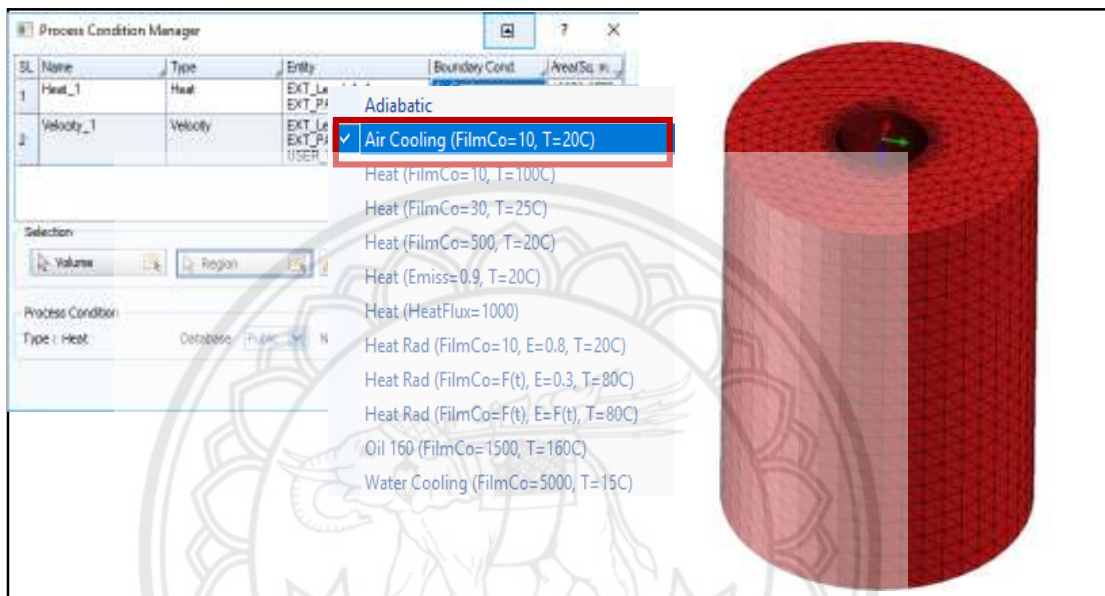
หลังจากการกำหนดค่าสมบัติของวัสดุแล้ว ขั้นตอนต่อมา กำหนด Interface Heat Transfer ของชิ้นงานกับเข้าปูน เนื่องจากอุณหภูมิของชิ้นงานและอุณหภูมิของเข้ามีอุณหภูมิที่ต่างกัน โดยผู้จัดทำโครงการได้กำหนด Interface Heat Transfer ของชิ้นงานกับเข้าปูนที่มีผลต่างของอุณหภูมิ กำหนดเป็น COINC และทำการตั้งค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนระหว่างทองเหลืองกับเข้าปูน เพื่อพาความร้อนที่เกิดขึ้นในการหล่อโลหะถ่ายเทไปยังเข้าปูนได้ดี ผู้จัดทำโครงการจึงได้กำหนดค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน เท่ากับ $1,000 \text{ w/m}^2 \cdot \text{K}$ (ชน ทองกลม และคณะ, 2559) ดังแสดงในรูปที่ 4.20



รูปที่ 4.20 แสดงการกำหนด Interface Heat Transfer ของชิ้นงานกับเข้าปูน และแสดงการตั้งค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน

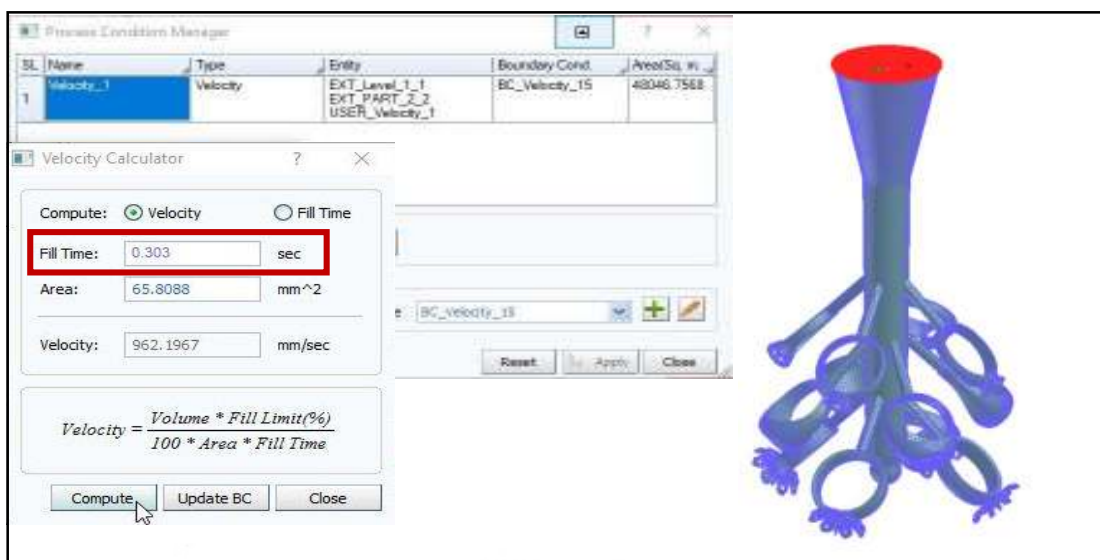
4.4.5 การตั้งค่ากระบวนการในการควบคุมการหล่อ

4.4.5.1 การกำหนดค่าการเย็นตัวของชิ้นงานและเข้าปูน ซึ่งในการทำการหล่อเครื่องประดับแบบซีฟิ่งหายในเครื่องสุญญากาศ เสร็จแล้วจะนำเข้าปูนออกจากเครื่องหล่อ และปล่อยให้เข้าปูนเย็นตัวในอากาศ ดังนั้น ผู้จัดทำโครงการจึงได้กำหนดค่าในการเย็นตัวของการจำลองการหล่อในโปรแกรม เป็นการเย็นตัวในอากาศ (Air Cooling) ดังแสดงในรูปที่ 4.21



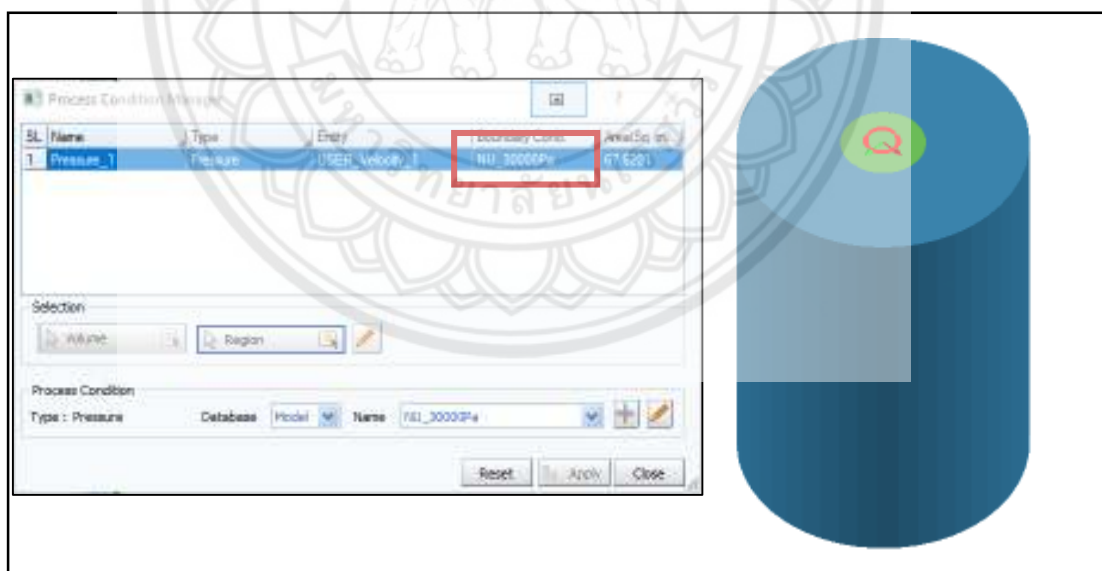
รูปที่ 4.21 แสดงการเลือกการเย็นตัวในอากาศ

4.4.5.2 การกำหนดเวลาในการเทน้ำโลหะ (Fill Time) คือ เวลาตั้งแต่เริ่มในการเทน้ำโลหะลงสู่ชิ้นงาน จนน้ำโลหะไหลเต็มชิ้นงาน ซึ่งผู้จัดทำโครงการได้กำหนดเวลาในการเทน้ำโลหะ เท่ากับ 0.303 วินาที (Somlak Wanarumon and Marco Actis Grande, 2009) ดังแสดงในรูปที่ 4.22



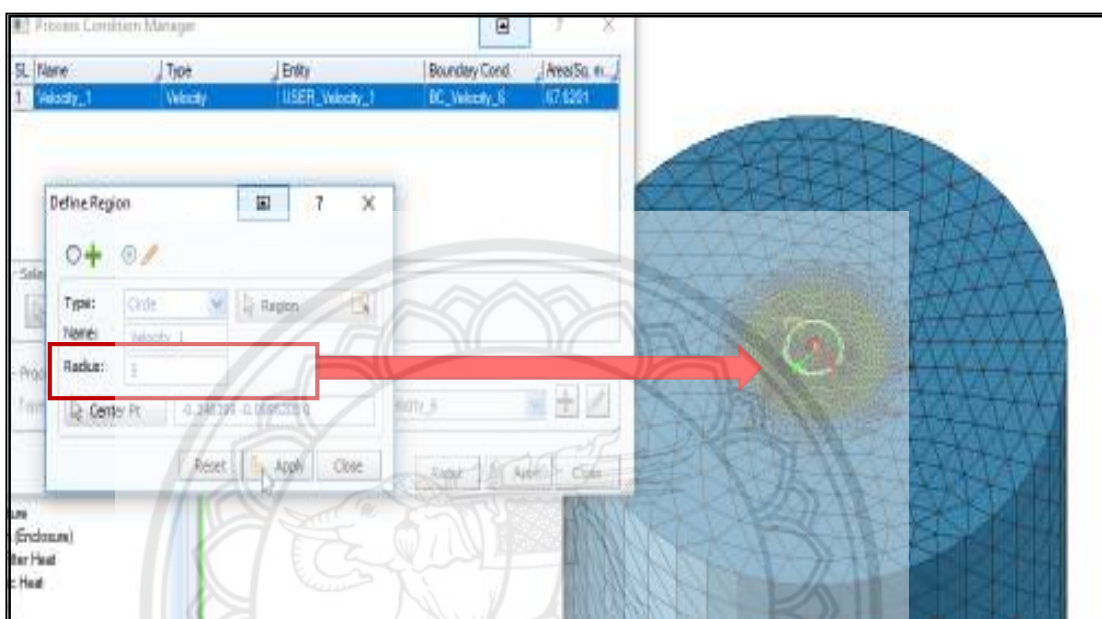
รูปที่ 4.22 แสดงการกำหนดเวลาในการเทน้ำโลหะ

4.4.5.3 การกำหนดค่าความดัน เนื่องจากการหล่อเครื่องประดับแบบซีฟิ่งหาย โดยใช้เครื่องหล่อสูญญากาศนั้น ในการหล่อก็มีความดันเข้ามาเกี่ยวข้องในขณะที่น้ำโลหะถูกเทลงมาจากเข้าปูนหลอม ผู้จัดทำโครงการจึงได้กำหนดความดันที่ใช้ในการหล่อ เท่ากับ 30,000 ปาสคาล (Somlak Wanarumon and Marco Actis Grande, 2009) ดังแสดงในรูปที่ 4.23



รูปที่ 4.23 แสดงการกำหนดค่าความดัน

4.4.5.4 การกำหนดตำแหน่ง และขนาดของรูเท ซึ่งตำแหน่งของรูเทจะอยู่ตรงบริเวณฐานของชิ้นงาน เพื่อที่น้ำโลหะจะถูกเทลงมาจากฐานสู่ปลายสุดของชิ้นงาน และกำหนดขนาดของรูเท เนื่องจากขนาดของรูเทที่เข้าปูนหลอมปล่อยน้ำโลหะลงสู่เข้าปูนมีขนาดรูเท เท่ากับ 10 มิลลิเมตร ผู้จัดทำโครงการจึงได้กำหนดขนาดของรูเทมีรัศมี เท่ากับ 5 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 4.24



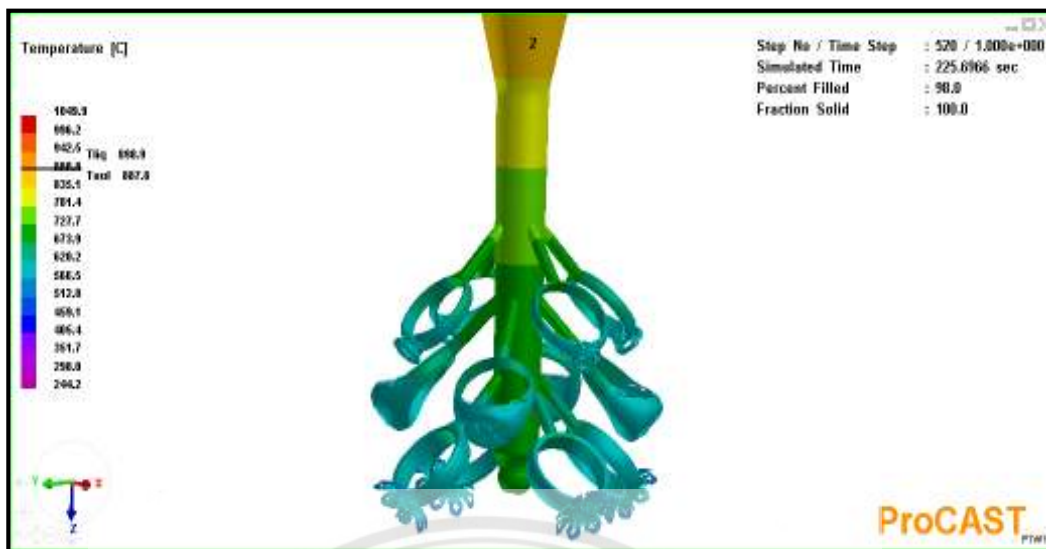
รูปที่ 4.24 แสดงการกำหนดตำแหน่งและขนาดรูเทน้ำโลหะ

4.4.6 การวิเคราะห์ผลการจำลอง

การวิเคราะห์ผลจากการจำลองหาปริมาณรูพรุนที่เกิดขึ้นบนต้นเทียน โดยอ่านค่าจากโปรแกรม ProCAST มีขั้นตอนดังนี้

4.4.6.1 การดำเนินการรันโปรแกรม

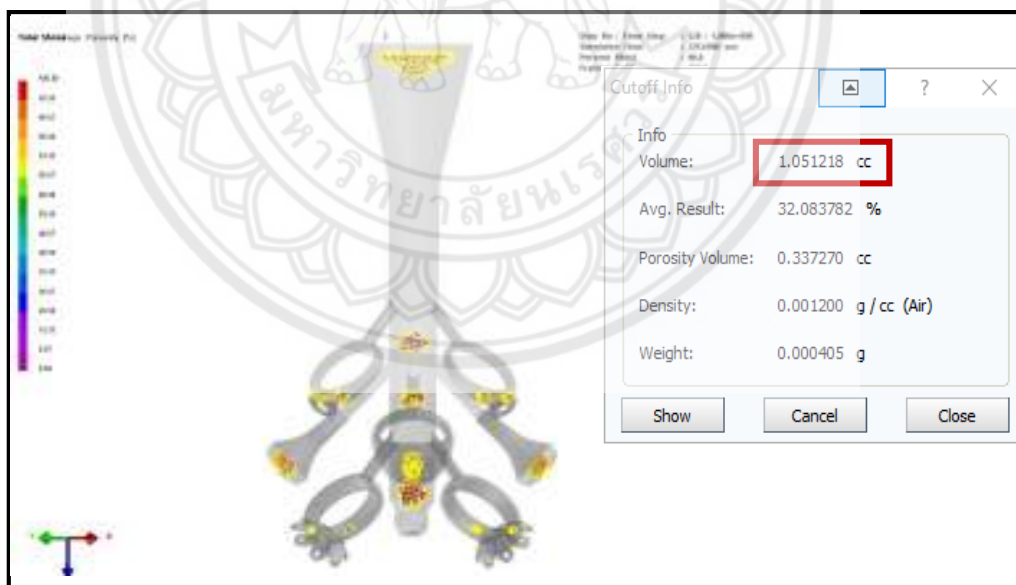
น้ำโลหะถูกเทลงไปในแม่พิมพ์จนเต็ม ทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อนจนกระทั่งเกิดการแข็งตัว ซึ่งแสดงค่าการเย็นตัวที่เกิดขึ้นในการจำลองเป็นแถบสี โดยแถบสีที่ค่าอุณหภูมิสูงสุด คือ สีแดง และแถบสีที่มีค่าอุณหภูมิต่ำสุด คือ สีม่วง ดังแสดงในรูปที่ 4.25



รูปที่ 4.25 แสดงการดำเนินการจำลองการหล่อ

4.4.6.2 การคำนวณผลลัพธ์ของโปรแกรม ProCAST

ทำการลากกรอบบริเวณที่เกิดรูพรุน โปรแกรมจะคำนวณ และแสดงค่าของปริมาณรูพรุนที่เกิดขึ้นบนชิ้นงาน ดังแสดงในรูปที่ 4.26



รูปที่ 4.26 แสดงผลการวิเคราะห์ค่าของปริมาณรูพรุน

4.5 ผลการทดลอง

นำผลลัพธ์จากการทดลองที่ได้จากการวิเคราะห์ค่าของปริมาณรูพรุน โดยใช้โปรแกรมช่วยในการหล่อ โปรแกรม CFD นำมาบันทึกผลการทดลอง โดยใช้ปัจจัย และระดับปัจจัยที่ระบุไว้ในหัวข้อ 4.3.1 และ 4.3.2 ซึ่งผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 ตารางผลการทดลองการวิเคราะห์ค่าของปริมาณรูพรุน

RunOrder	Pour Temp	Mold Temp	Tree Model	Porosity ของแหวน (ลูกบาศก์เซนติเมตร)
1	1	1	1	0.383
2	1	1	2	0.225
3	1	1	3	0.373
4	1	1	4	0.353
5	1	1	5	0.364
6	1	1	6	0.386
7	1	2	1	0.336
8	1	2	2	0.319
9	1	2	3	0.321
10	1	2	4	0.321
11	1	2	5	0.316
12	1	2	6	0.320
13	1	3	1	0.324
14	1	3	2	0.305
15	1	3	3	0.315
16	1	3	4	0.316
17	1	3	5	0.328
18	1	3	6	0.320
19	2	1	1	0.380
20	2	1	2	0.313
21	2	1	3	0.376
22	2	1	4	0.355
23	2	1	5	0.335

ตารางที่ 4.5 (ต่อ) ตารางผลการทดลองการวิเคราะห์ค่าของปริมาณรูพรุน

RunOrder	Pour Temp	Mold Temp	Tree Model	Porosity ของแหวน (ลูกบาศก์เซนติเมตร)
24	2	1	6	0.377
25	2	2	1	0.344
26	2	2	2	0.310
27	2	2	3	0.312
28	2	2	4	0.310
29	2	2	5	0.349
30	2	2	6	0.320
31	2	3	1	0.319
32	2	3	2	0.301
33	2	3	3	0.315
34	2	3	4	0.315
35	2	3	5	0.303
36	2	3	6	0.330
37	3	1	1	0.379
38	3	1	2	0.313
39	3	1	3	0.351
40	3	1	4	0.351
41	3	1	5	0.335
42	3	1	6	0.377
43	3	2	1	0.340
44	3	2	2	0.310
45	3	2	3	0.312
46	3	2	4	0.316
47	3	2	5	0.312
48	3	2	6	0.320
49	3	3	1	0.318
50	3	3	2	0.301
51	3	3	3	0.307
52	3	3	4	0.296

ตารางที่ 4.5 (ต่อ) ตารางผลการทดลองการวิเคราะห์ค่าของปริมาณรูพรุน

RunOrder	Pour Temp	Mold Temp	Tree Model	Porosity ของแหวน (ลูกบาศก์เซนติเมตร)
53	3	3	5	0.303
54	3	3	6	0.324

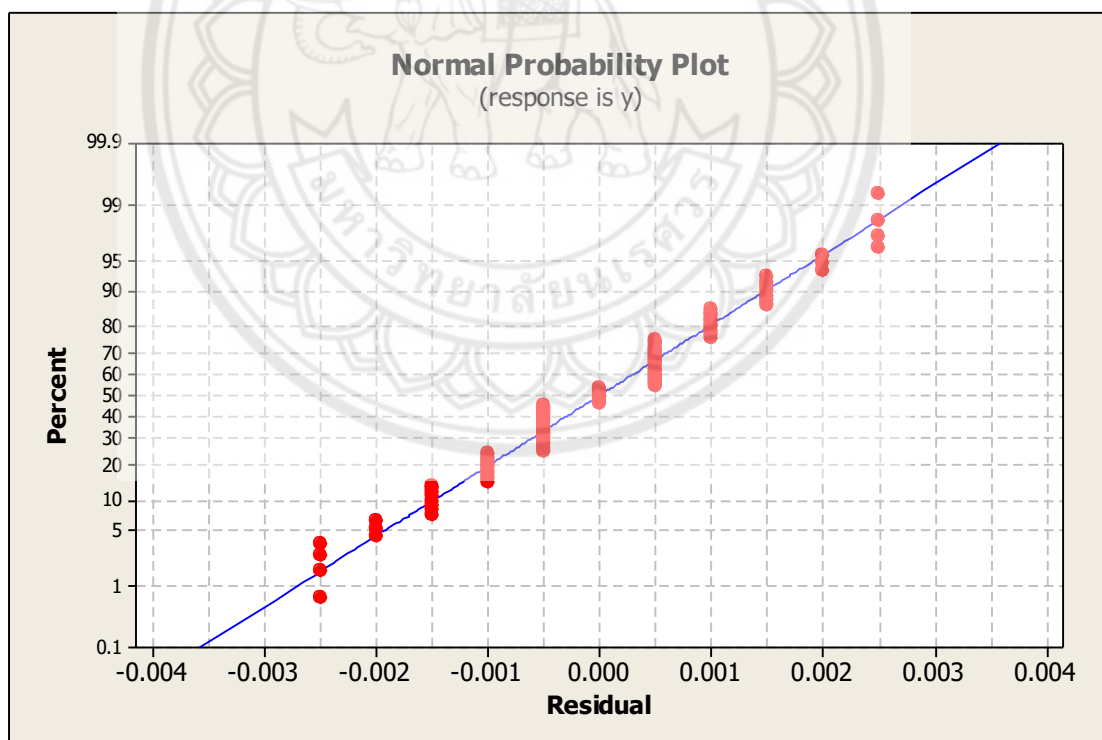
4.6 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลเชิงสถิติ

จากผลการทดลองจากการทดลองโปรแกรม โดยใช้โปรแกรมช่วยในการหล่อ โปรแกรม CFD ในตารางที่ 4.2 สามารถนำข้อมูลมาวิเคราะห์ข้อมูลเชิงสถิติดังนี้

4.6.1 การตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบการทดลอง

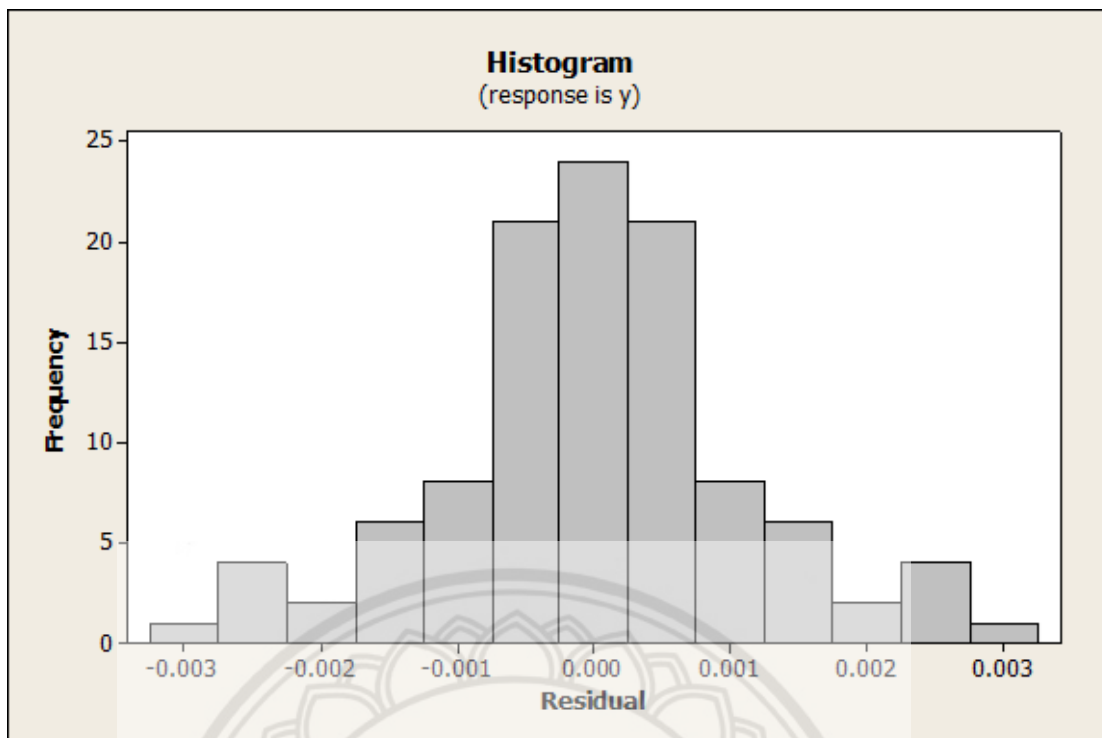
เมื่อได้ผลจากการทดลอง ผู้จัดทำโครงการจะนำผลการทดลองตรวจสอบความเหมาะสมของข้อมูลมีความเหมาะสมหรือไม่ โดยมีการตรวจสอบความเหมาะสมของข้อมูลดังนี้

4.6.1.1 การตรวจสอบการกระจายแบบปกติของข้อมูล



รูปที่ 4.27 กราฟการกระจายแบบแจกแจงปกติของข้อมูล

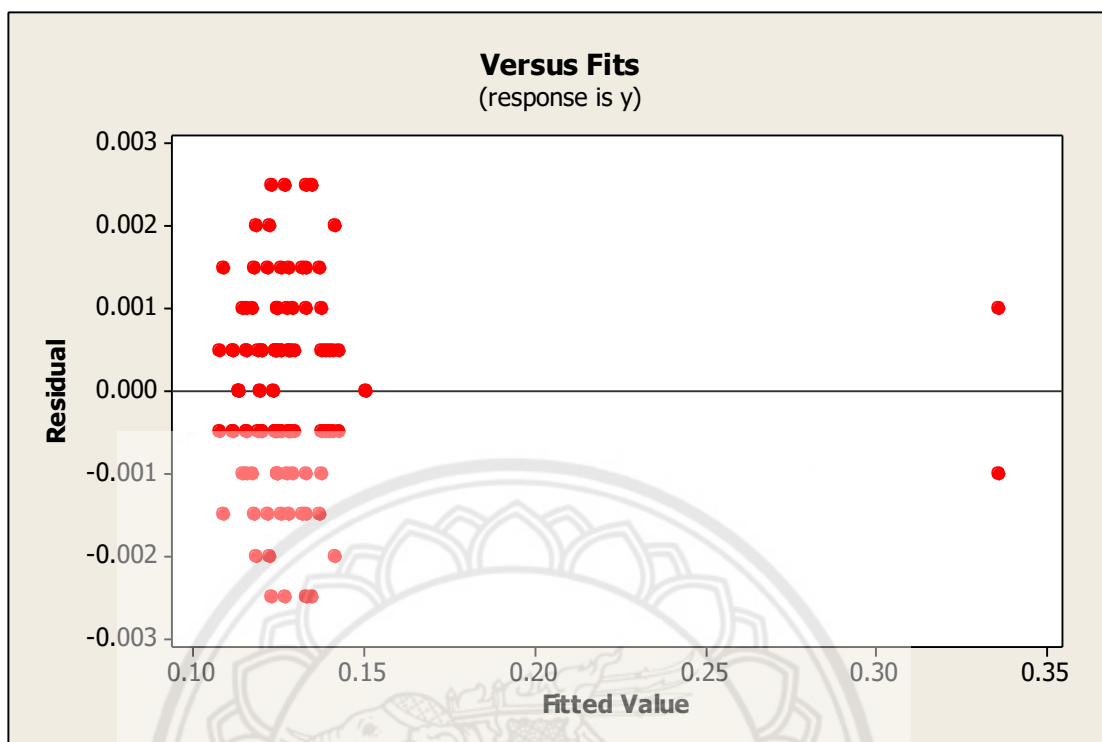
จากกราฟ พบว่า จุดตัดรวมตัวกันเป็นกลุ่มๆ การเรียงตัวกันเป็นแนวเส้นตรง จึงสามารถสรุปได้ว่าข้อมูลมีการแจกแจงแบบปกติ



รูปที่ 4.28 กราฟฮิสโตแกรมแสดงการกระจายแบบปกติของข้อมูล

จากกราฟ พบว่า ข้อมูลมีลักษณะเป็นระฆังคว่ำ มีลักษณะสมมาตร และมีค่าเฉลี่ยส่วน
ใหญ่อยู่ตรงกลาง จึงสามารถสรุปได้ว่าข้อมูลมีการแจกแจงแบบปกติ

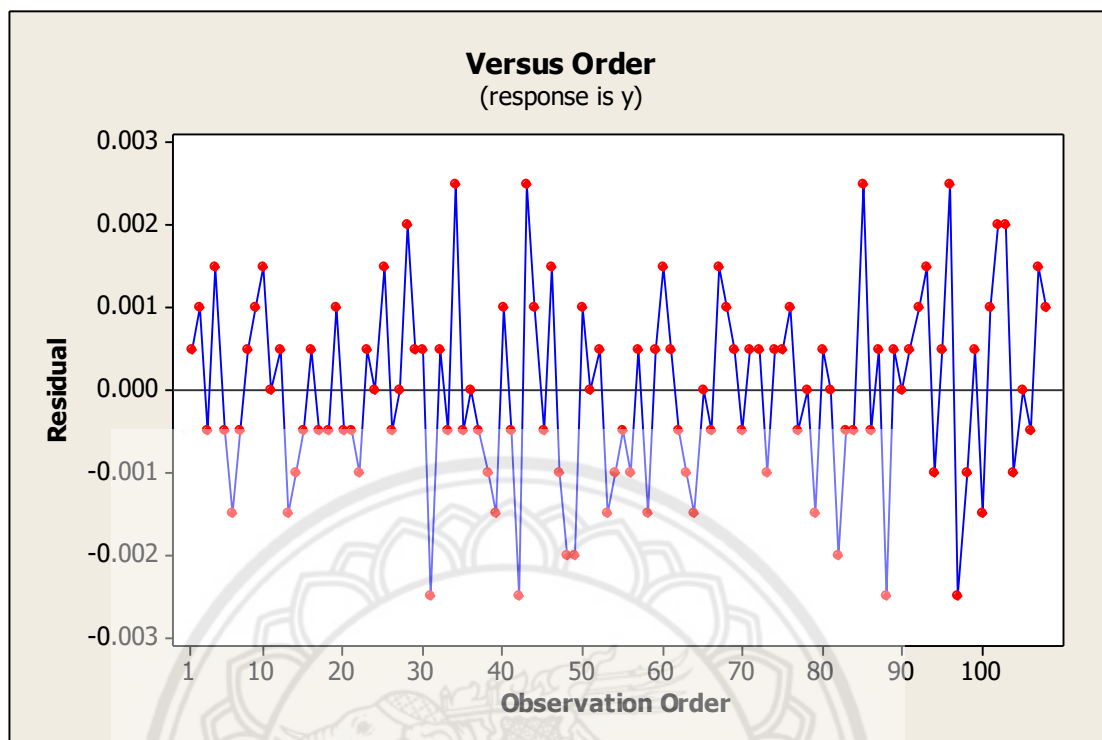
4.6.1.2 การตรวจสอบความเป็นอิสระของข้อมูล



รูปที่ 4.29 กราฟความเป็นอิสระของข้อมูล

จากกราฟ พบว่า จุดต่างๆ ของค่าความผิดพลาดของข้อมูลมีการกระจายตัวอยู่ในบริเวณที่มีค่าเป็นบวก และในบริเวณที่มีค่าเป็นลบในปริมาณที่เท่าๆ กัน ซึ่งไม่สามารถคลาดเตารูปแบบแนวโน้มของกราฟได้ จึงสรุปได้ว่าค่าเฉลี่ยของค่าความผิดพลาดของข้อมูลเท่ากับศูนย์ และค่าผิดพลาดเป็นอิสระต่อกัน

4.6.1.3 การตรวจสอบความเสถียรของความแปรปรวนของข้อมูล



รูปที่ 4.30 กราฟความเสถียรของความแปรปรวนของข้อมูล

จากกราฟ พบว่า จุดต่างๆ ของค่าความแปรปรวนมีการกระจายตัวอยู่ในบริเวณที่มีค่าเป็นบวก และในบริเวณที่มีค่าเป็นลบในปริมาณที่สม่ำเสมอ จึงสรุปได้ว่าข้อมูลมีค่าความแปรปรวนคงที่

4.6.2 การตรวจสอบความแปรปรวนของข้อมูล

ผู้จัดทำโครงการจึงนำข้อมูลมาทดสอบความแปรปรวนของข้อมูล เพื่อวิเคราะห์ว่าปัจจัยอุณหภูมิต่อการเหน้าโลหะ อุณหภูมิของเบ้าปูน และรูปแบบของต้นเทียน มีผลต่อการเกิดปริมาณรูปหุ่นขี้ผึ้งงานหรือไม่ ซึ่งแสดงผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูล ดังแสดงในตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของการทดลองแบบแฟคทอเรียลเต็มรูป

Source	Degree of Freedom	Sum of Squares	Mean Squares	F	P - Value
Pour Temp	2	0.0029939	0.0014970	563.31	0.000
Mold Temp	2	0.0141376	0.0070688	2660.03	0.000
Tree Model	5	0.0090826	0.0018165	683.57	0.000
Pour Temp * Mold Temp	4	0.0073157	0.0018289	688.24	0.000
Pour Temp * Tree Model	10	0.0199841	0.0019984	752.01	0.000
Mold Temp * Tree Model	10	0.0130334	0.0013033	490.46	0.000
Pour Temp * Mold Temp * Tree Model	20	0.0298966	0.0014948	562.51	0.000
Error	54	0.0001435	0.0000027		
Total	107	0.0965874			

จากตารางที่ 4.4 ผู้จัดทำโครงการจะพิจารณาค่า P-Value เปรียบเทียบกับค่านัยสำคัญเพื่อทดสอบว่าปัจจัยใดมีผลต่อการเกิดปริมาณรูพรุนบนชิ้นงานหรือไม่ ที่ระดับนัยสำคัญที่ 0.05

4.6.2.1 การกำหนดสมมติฐานผลกระทบหลักของปัจจัยที่ 1 คือ อุณหภูมิในการเทน้ำโลหะ

H_0 : อุณหภูมิในการเทน้ำโลหะไม่มีผลต่อปริมาณรูพรุน

H_1 : อุณหภูมิในการเทน้ำโลหะมีผลต่อปริมาณรูพรุน

ค่าระดับนัยสำคัญที่ได้จากการทดลอง มีค่า P-Value น้อยกว่า 0.05 จึงปฏิเสธ H_0 ระดับนัยสำคัญที่ 0.05 จึงสรุปได้ว่า อุณหภูมิเทน้ำโลหะมีผลต่อปริมาณรูพรุนระดับนัยสำคัญที่ 0.05

4.6.2.7 การกำหนดสมมติฐานผลกระทบร่วมของปัจจัยที่ 1 ปัจจัยที่ 2 และ ปัจจัยที่ 3

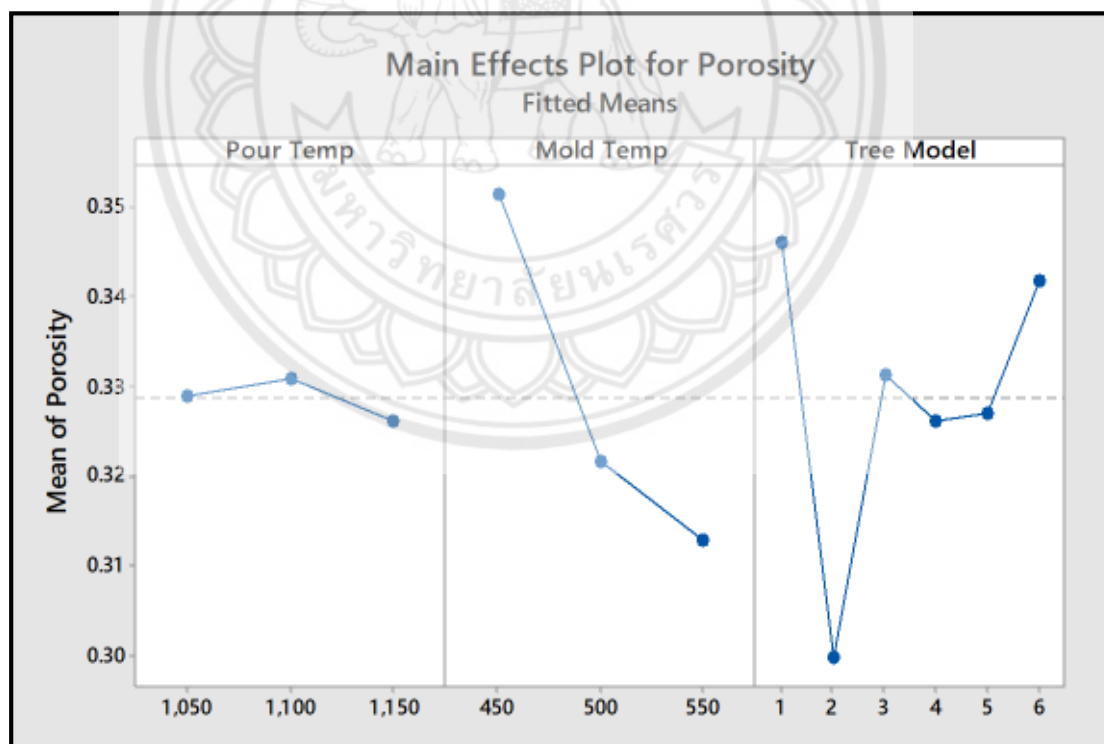
H_0 : อุณหภูมิในการเทน้ำโลหะ อุณหภูมิของเข้าปูน และรูปแบบของต้นเทียนไม่มีผลต่อปริมาณรูพรุน

H_1 : อุณหภูมิในการเทน้ำโลหะ อุณหภูมิของเข้าปูน และรูปแบบของต้นเทียนมีผลต่อปริมาณรูพรุน

ค่าระดับนัยสำคัญที่ได้จากการทดลอง มีค่า P-Value น้อยกว่า 0.05 จึงปฏิเสธ H_0 ระดับนัยสำคัญที่ 0.05 จึงสรุปได้ว่า อุณหภูมิในการเทน้ำโลหะ อุณหภูมิของเข้าปูน และรูปแบบของต้นเทียนมีผลต่อปริมาณรูพรุนระดับนัยสำคัญที่ 0.05

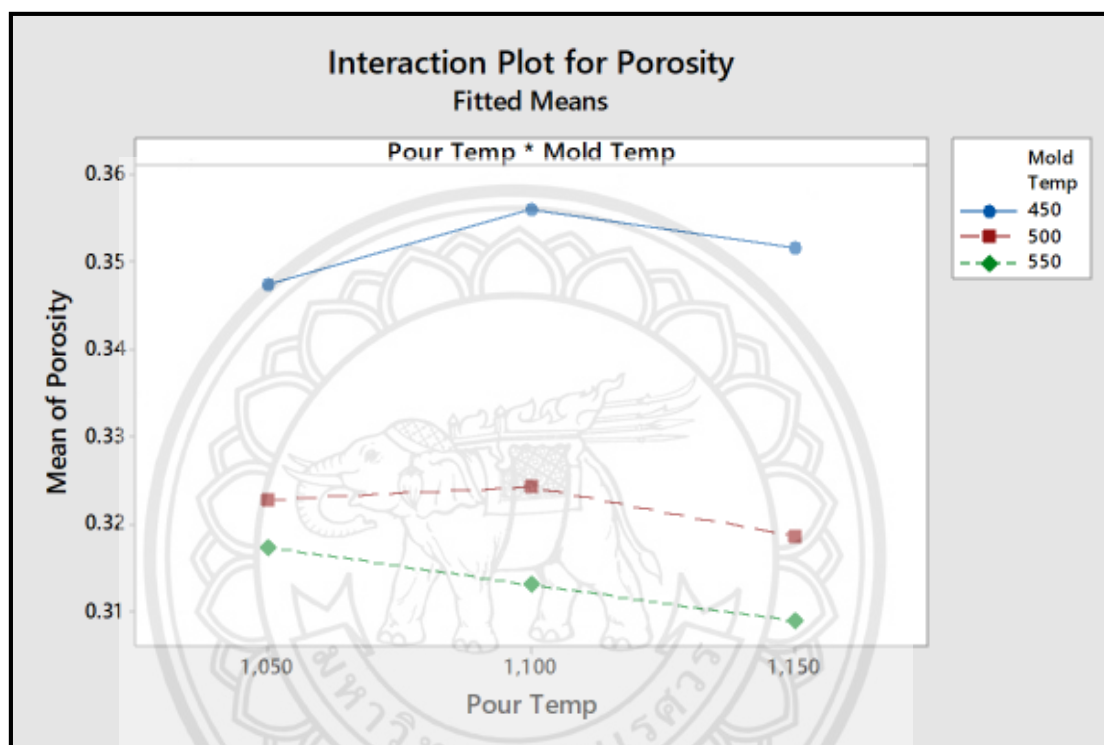
4.6.3 การวิเคราะห์หาระดับปัจจัยที่มีผลต่อปริมาณรูพรุน

ผู้จัดทำโครงการนำผลที่ได้จากการทดสอบความแปรปรวนของข้อมูลมาวิเคราะห์ พบว่า ปัจจัยอุณหภูมิในการเทน้ำโลหะ อุณหภูมิของเข้าปูน และรูปแบบของต้นเทียนมีผลต่อปริมาณรูพรุน จึงทำการวิเคราะห์หาระดับที่ก่อให้เกิดปริมาณรูพรุนที่น้อยที่สุด จากกราฟผลกระทบหลักและผลกระทบร่วม เพื่อใช้เลือกระดับปัจจัยที่เหมาะสม ซึ่งแสดงกราฟผลกระทบหลักและผลกระทบร่วม ดังแสดงในรูปที่ 4.31 และ รูปที่ 4.34



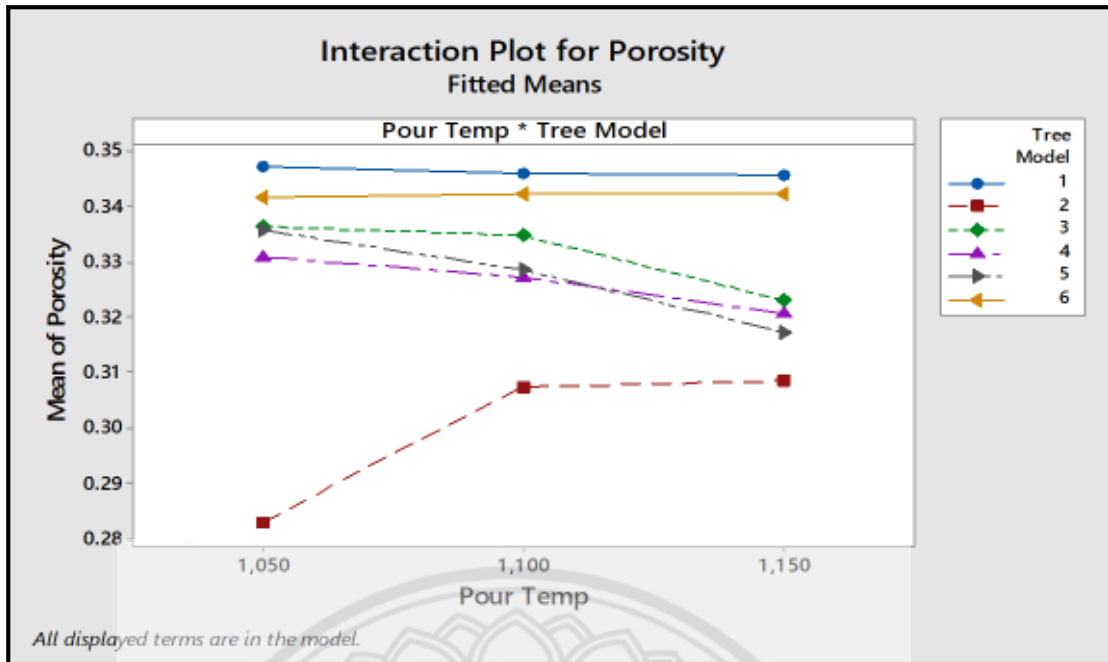
รูปที่ 4.31 แสดงกราฟผลกระทบหลัก

จากรูปที่ 4.31 ผลกระทบหลักแต่ละปัจจัย พบว่า อุณหภูมิในการเทน้ำโลหะ อุณหภูมิที่จะส่งผลให้ชิ้นงานมีปริมาณรูพรุนน้อยที่สุด ที่ อุณหภูมิ 1,150 องศาเซลเซียส ส่วนอุณหภูมิของเบ้าปูนสำหรับการหล่อ เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจะส่งผลให้ชิ้นงานหล่อเครื่องประดับมีปริมาณรูพรุนลดน้อยลง ซึ่งอุณหภูมิที่จะส่งผลให้ชิ้นงานมีปริมาณรูพรุนน้อยที่สุด ที่ อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส และในส่วนของรูปแบบของต้นเทียน พบว่า ต้นเทียนส่งผลให้ชิ้นงานหล่อเครื่องประดับ มีปริมาณรูพรุนน้อยที่สุด คือ ต้นเทียนรูปแบบที่ 2



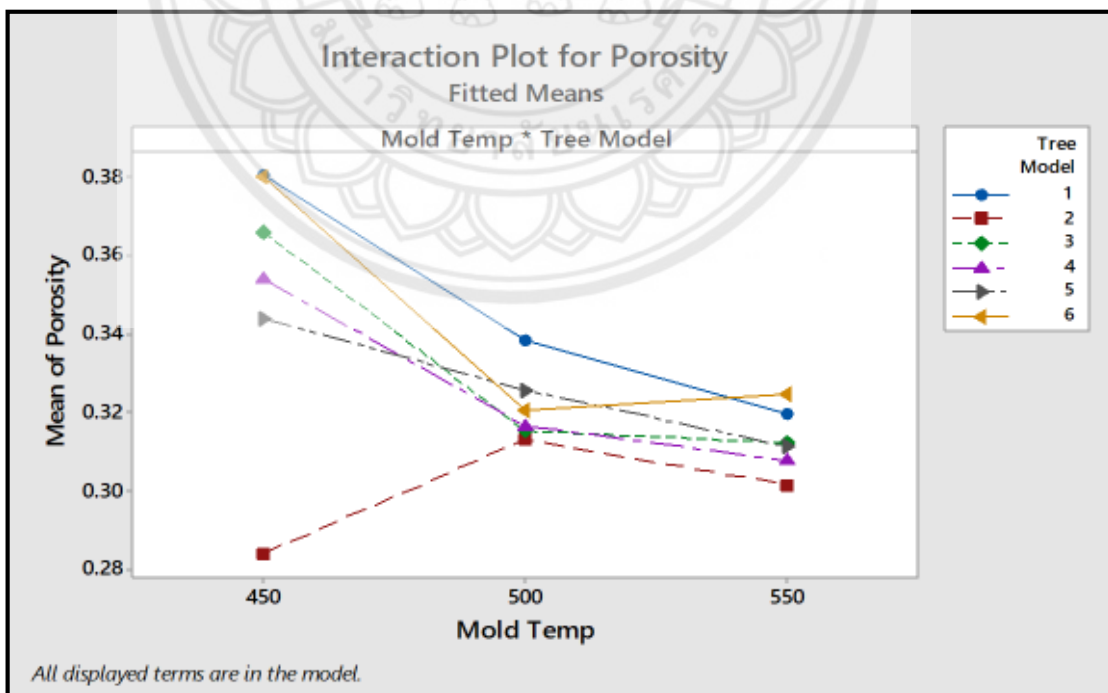
รูปที่ 4.32 แสดงกราฟผลกระทบร่วมระหว่างอุณหภูมิในการเทน้ำโลหะกับอุณหภูมิของเบ้าปูน

จากรูปที่ 4.32 พบว่า ผลกระทบร่วมระหว่างปัจจัยอุณหภูมิในการเทน้ำโลหะกับอุณหภูมิของเบ้าปูน ส่งผลให้ชิ้นงานหล่อเครื่องประดับมีปริมาณรูพรุนน้อยที่สุด คือ อุณหภูมิในการเทน้ำโลหะ ที่ 1,150 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิของเบ้าปูนที่ 550 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.33 แสดงกราฟผลกระทบร่วมระหว่างอุณหภูมิในการเทน้ำโลหะกับรูปแบบของต้นเทียน

จากรูปที่ 4.33 พบว่า ผลกระทบร่วมระหว่างปัจจัยอุณหภูมิในการเทน้ำโลหะกับรูปแบบของต้นเทียนที่ส่งผลให้ชิ้นงานหล่อเครื่องประดับมีปริมาณรูพรุนน้อยที่สุด คือ อุณหภูมิในการเทน้ำโลหะที่ 1,050 องศาเซลเซียส และเลือกรูปแบบของต้นเทียนรูปแบบที่ 2

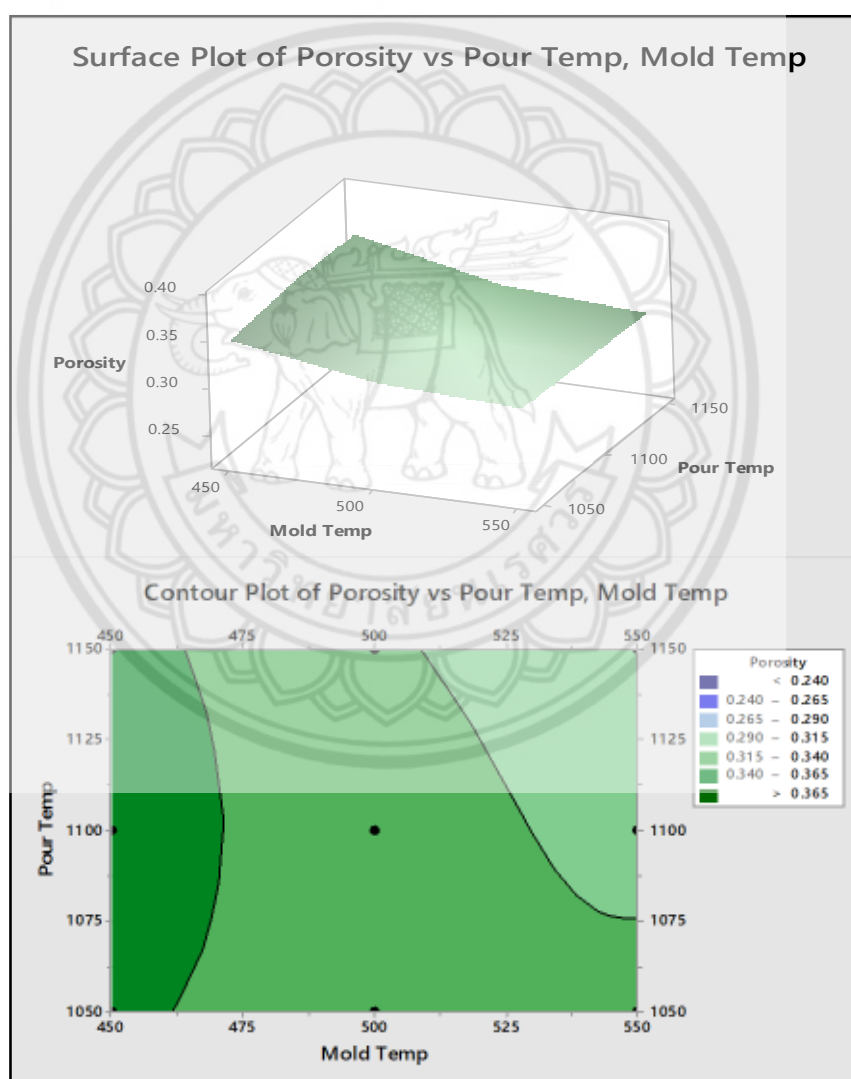


รูปที่ 4.34 แสดงกราฟผลกระทบร่วมระหว่างอุณหภูมิของเบ้าปูนกับรูปแบบของต้นเทียน

จากรูปที่ 4.34 พบว่า ผลกระทบร่วมระหว่างปัจจัยอุณหภูมิของเบ้าปูนกับรูปแบบของต้นเทียนที่ส่งผลให้ชิ้นงานหล่อเครื่องประดับมีปริมาณรูพรุนน้อยที่สุด คือ อุณหภูมิของเบ้าปูนที่ 450 องศาเซลเซียส และเลือกรูปแบบของต้นเทียนรูปแบบที่ 2

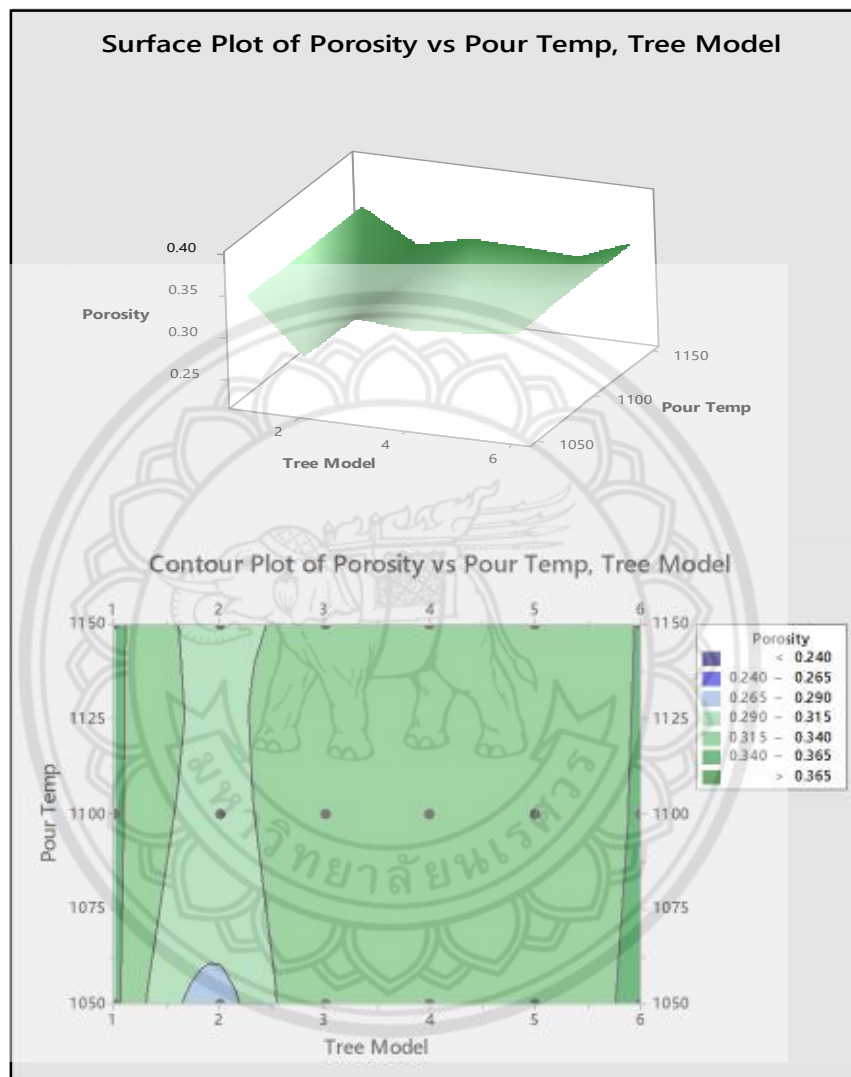
4.6.4 การวิเคราะห์พื้นผิวตอบสนอง

การวิเคราะห์พื้นผิวตอบสนอง (Response Surface) เป็นวิธีสถิติที่นำมาใช้ในการสร้างแบบจำลอง และวิเคราะห์ปริมาณรูพรุนที่เกิดขึ้นจากความสัมพันธ์ของปัจจัยหลายปัจจัย เพื่อหาค่าที่เหมาะสมของความสัมพัทธ์ระหว่างปัจจัย ซึ่งจะแสดงความสัมพันธ์ของปัจจัยในรูปกราฟสามมิติ ดังแสดงในรูปที่ 4.35 ถึง รูปที่ 4.37



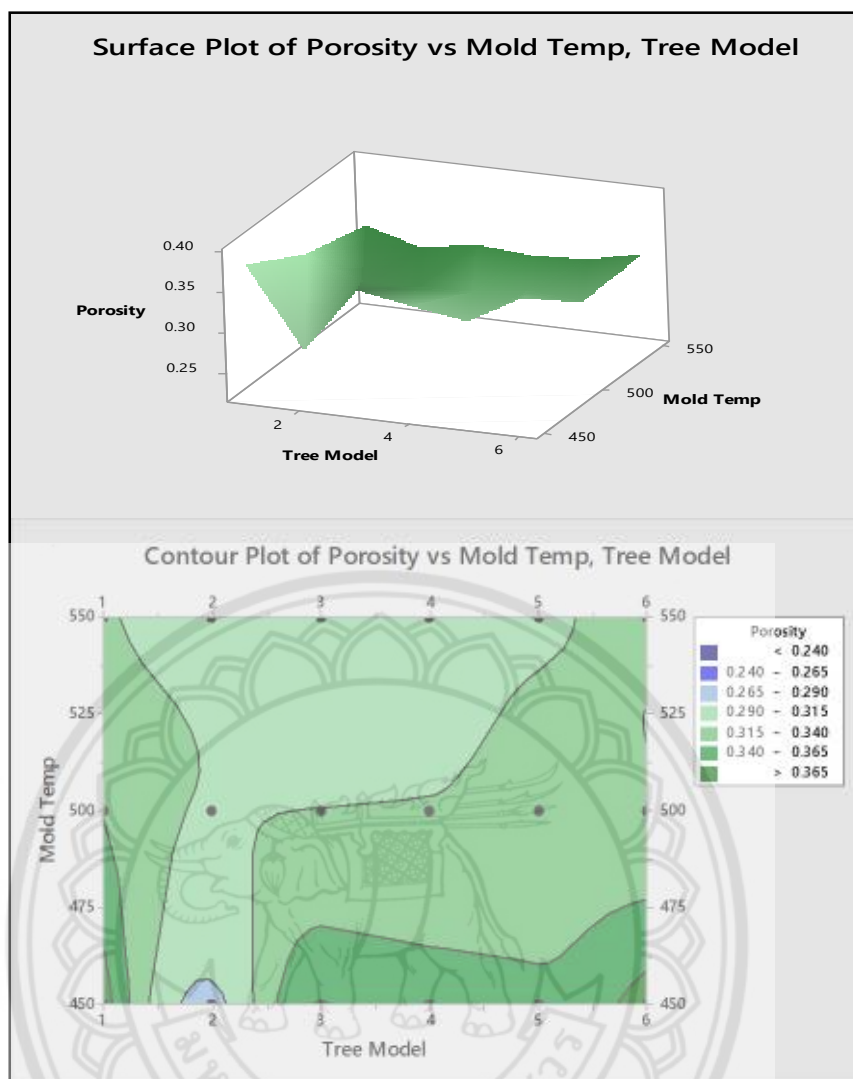
รูปที่ 4.35 แสดงพื้นผิวตอบสนองผลกระทบร่วมระหว่างอุณหภูมิในการเทน้ำโลหะกับอุณหภูมิของเบ้าปูน

จากรูปที่ 4.35 แสดงพื้นผิวตอบสนองผลกระทบร่วมระหว่างอุณหภูมิในการเทน้ำโลหะกับอุณหภูมิของเข้าปูน พบว่า ผลกระทบร่วมระหว่างปัจจัยอุณหภูมิในการเทน้ำโลหะกับอุณหภูมิของเข้าปูน ส่งผลให้ชิ้นงานหล่อเครื่องประดับมีปริมาณรูพรุนน้อยที่สุด ในช่วงอุณหภูมิในการเทน้ำโลหะที่ 1,150 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิของเข้าปูนที่ 550 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.36 แสดงพื้นผิวตอบสนองผลกระทบร่วมระหว่างอุณหภูมิในการเทน้ำโลหะกับรูปแบบของต้นเทียน

จากรูปที่ 4.36 แสดงพื้นผิวตอบสนองผลกระทบร่วมระหว่างอุณหภูมิในการเทน้ำโลหะกับรูปแบบของต้นเทียน พบว่า ผลกระทบร่วมระหว่างปัจจัยอุณหภูมิในการเทน้ำโลหะกับรูปแบบของต้นเทียนที่ส่งผลให้ชิ้นงานหล่อเครื่องประดับมีปริมาณรูพรุนน้อยที่สุด ในช่วงอุณหภูมิในการเทน้ำโลหะที่ 1,050 องศาเซลเซียส และเลือกรูปแบบของต้นเทียนรูปแบบที่ 2



รูปที่ 4.37 แสดงพื้นผิวตอบสนองผลกระทบร่วมระหว่างอุณหภูมิของเบ้าปูนกับรูปแบบของต้นเทียน

จากรูปที่ 4.37 แสดงพื้นผิวตอบสนองผลกระทบร่วมระหว่างอุณหภูมิของเบ้าปูน กับรูปแบบของต้นเทียน พบว่า ผลกระทบร่วมระหว่างปัจจัยอุณหภูมิของเบ้าปูนกับรูปแบบของต้นเทียน ที่ส่งผลให้ชิ้นงานหล่อเครื่องประดับมีปริมาณรูพรุนน้อยที่สุด ในช่วงอุณหภูมิของเบ้าปูนที่ 450 องศาเซลเซียส และเลือกรูปแบบของต้นเทียนรูปแบบที่ 2

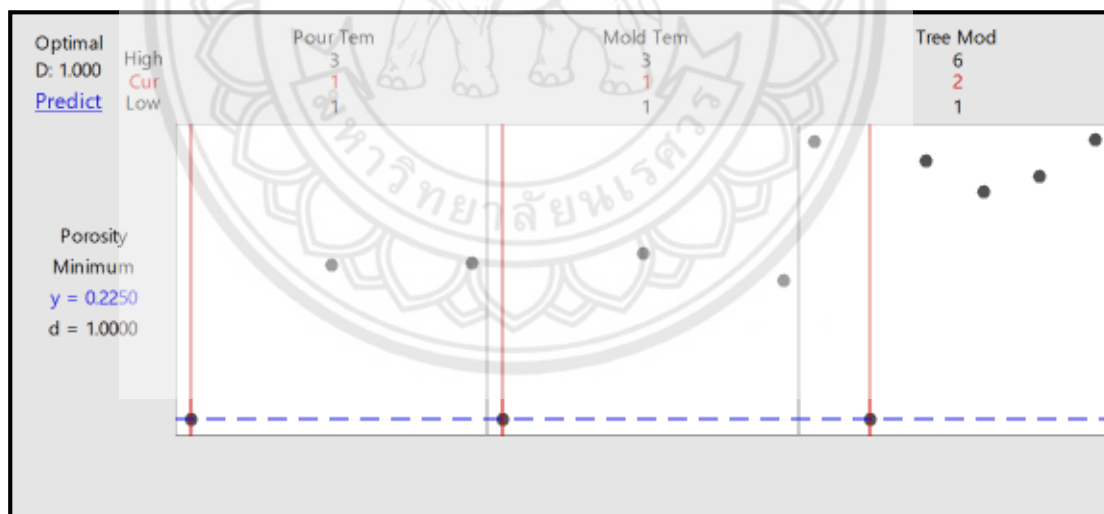
4.6.5 การหาค่าที่เหมาะสมของปัจจัย

การหาค่าปัจจัยที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการหล่อเครื่องประดับแบบขึ้นห้อย โดยใช้ฟังก์ชัน Response Optimizer ในโปรแกรม Minitab ซึ่งเป็นฟังก์ชันที่ใช้หาค่าที่เหมาะสมของปัจจัย และใช้วัดความพอใจโดยรวมของผลตอบสนอง (Composite Desirability : D) ซึ่งค่าความพอใจของผลตอบสนองมีค่าอยู่ระหว่าง 0 - 1 ถ้า D มีค่าเท่ากับ 1 หมายถึง ผลตอบสนองนั้นได้รับความพึงพอใจอย่างสมบูรณ์

โดยกำหนดค่าเป้าหมายของผลตอบสนอง (Goal) เป็นค่าน้อยที่สุดของผลตอบสนอง (Minimum) โดยค่าระดับต่ำของผล (Lower) = ปริมาณ 0 ลูกบาศก์เซนติเมตร ค่าระดับสูงสุดของผล (Upper) = ปริมาณ 0.389 ลูกบาศก์เซนติเมตร เนื่องจากผู้จัดทำโครงการต้องการไม่ให้เกิดปริมาณรูพรุนให้ได้ปริมาณรูพรุนที่น้อยที่สุด จึงกำหนดค่าเป้าหมาย (Target) เท่ากับค่าระดับต่ำ เพื่อให้ได้ค่าการเกิดปริมาณรูพรุนน้อยที่สุด

ตารางที่ 4.7 แสดงค่าที่เหมาะสมที่มีผลต่อการเกิดปริมาณรูพรุน

Response	Goal	lower	Target	Upper	Weight	Importance
Porosity	Minimum	0	0	0.386	1	1
Solution	Pour Temp	Mold Temp	Tree Model	Fit	Composite Desirability	
1	1	1	2	0.2250	1.000	
Multiple Response Prediction						
Variable	Setting					
Pour Temp	1					
Mold Temp	1					
Tree Model	2					



รูปที่ 4.38 แสดงกราฟจุดที่เหมาะสมของแต่ละปัจจัย

ดังนั้น สามารถสรุปได้ว่า ค่าปัจจัยที่เหมาะสมจากการทดลองนี้ คือ อุณหภูมิในการเทน้ำโลหะเท่ากับ 1,050 องศาเซลเซียส อุณหภูมิของเบ้าปูนเท่ากับ 450 องศาเซลเซียส และเลือกรูปแบบของต้นเทียนรูปแบบที่ 2 โดยมีค่าปริมาณรูพรุนที่น้อยที่สุดของการทดลองนี้ เท่ากับ 0.2250 ลูกบาศก์เซนติเมตร โดยความพึงพอใจโดยรวม (Composite Desirability) $D = 1.000$

บทที่ 5

บทสรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการดำเนินโครงการ

จากการดำเนินโครงการ การศึกษาการพัฒนาการจำลองการหล่อเครื่องประดับ โดยใช้โปรแกรมพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ สามารถสรุปได้ดังนี้

5.1.1 ผลจากการทดลองแพคทอเรียลเต็มรูป สามารถสรุปได้ว่า อุณหภูมิในการเทน้ำโลหะอุณหภูมิของเบ้าปูน และรูปแบบของต้นเทียน มีผลต่อปริมาณรูพรุนที่เกิดขึ้นในกระบวนการหล่อเครื่องประดับแหวนอย่างมีนัยสำคัญ และปัจจัยร่วมระหว่างอุณหภูมิในการเทน้ำโลหะ อุณหภูมิของเบ้าปูน และรูปแบบของต้นเทียน ส่งผลกระทบต่อปริมาณรูพรุนที่เกิดขึ้นในกระบวนการหล่อเครื่องประดับแหวนอย่างมีนัยสำคัญ

5.1.2 ค่าปัจจัยที่เหมาะสมที่ทำให้เกิดปริมาณรูพรุนน้อยที่สุด สามารถสรุปได้ว่า อุณหภูมิในการเทน้ำโลหะควรใช้อุณหภูมิเท่ากับ 1,050 องศาเซลเซียส อุณหภูมิของเบ้าปูนควรใช้อุณหภูมิ เท่ากับ 450 องศาเซลเซียส และรูปแบบของต้นเทียน รูปแบบที่ 2 ซึ่งรูปแบบต้นเทียนรูปแบบที่ 2 นั้น ประกอบไปด้วยแหวนประดับมุกที่ถูกติดในตำแหน่งสูงของต้นเทียน แหวนสัญลักษณ์ที่ถูกติดในตำแหน่งกลางของต้นเทียน และแหวนล้อมเพชรที่ถูกติดในตรงตำแหน่งต่ำของต้นเทียน

5.2 อภิปรายผลการดำเนินโครงการ

5.2.1 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลเชิงสถิติ วิเคราะห์ปริมาณรูพรุนที่เกิดขึ้นบนชิ้นงานด้วยอุณหภูมิในการเทน้ำโลหะ อุณหภูมิของเบ้าปูน และรูปแบบของต้นเทียน พบว่า การหล่อชิ้นงานด้วยอุณหภูมิในการเทน้ำโลหะ และอุณหภูมิของเบ้าปูนที่อุณหภูมิสูง บริเวณกึ่งกลางชิ้นงานถูกดึงเนื้อโลหะไปเติมช่องว่างบริเวณของชิ้นงาน ซึ่งเป็นบริเวณที่เย็นตัวก่อน บริเวณที่เย็นตัวภายหลังไม่มีโลหะเข้ามาเติมเต็มได้ ส่งผลให้เกิดปริมาณรูพรุนที่มาก เมื่อเทียบกับชิ้นงานที่หล่อด้วยอุณหภูมิในการเทน้ำโลหะ และอุณหภูมิของเบ้าปูนที่อุณหภูมิต่ำ

5.2.2 เนื่องจากการแข็งตัวที่ไม่เหมาะสมทำให้เกิดข้อบกพร่องขึ้นบนชิ้นงาน จึงได้ตั้งสมมติฐานไว้เบื้องต้นว่าอัตราการถ่ายเทความร้อนมีผลต่อปริมาณการเกิดรูพรุนขึ้นในกระบวนการหล่อเครื่องประดับแบบซีดีฝังหาย จากผลการจำลองการหล่อสามารถวิเคราะห์อัตราการถ่ายเทความร้อนได้ โดยวิเคราะห์อุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงต่อหนึ่งหน่วยเวลา จึงได้เปรียบเทียบทดลองที่ส่งผลทำให้รูพรุนน้อยที่สุด และการทดลองที่ส่งผลทำให้ปริมาณรูพรุนมากที่สุด พบว่า อัตราการถ่ายเทความร้อนของการทดลองที่ส่งผลทำให้ปริมาณรูพรุนน้อยที่สุด เท่ากับ $2.67 \text{ }^{\circ}\text{C} / \text{s}$ และอัตราการถ่ายเทความร้อน

ของการทดลองที่ส่งผลทำให้ปริมาณรูพรุนมากที่สุด เท่ากับ $3\text{ }^{\circ}\text{C} / \text{s}$ ซึ่งจะเห็นได้ว่าอัตราการถ่ายเทความร้อนที่มากจะทำให้เกิดปริมาณรูพรุนที่มากขึ้น เนื่องจากเกิดการแข็งตัวที่รวดเร็ว และไม่เหมาะสมทำให้น้ำโลหะไหลไปซดเซยบริเวณเย็นตัวภายหลังไม่ทัน จึงทำให้เกิดปริมาณรูพรุนที่มาก ดังนั้น สรุปได้ว่าอัตราการถ่ายเทความร้อนมีผลต่อปริมาณการเกิดรูพรุน

5.2.3 ผลจากการจำลองการหล่อ อาจป้องกันการเกิดรูพรุน ได้ด้วยการกำหนดอุณหภูมิในการเทน้ำโลหะ และอุณหภูมิของเบ้าปูน เพื่อช่วยให้โลหะสามารถไหลตัวได้เต็มโพรงแบบ นอกจากนี้การออกแบบการจัดเรียงแหวนบนต้น และกำหนดอุณหภูมิในการเทน้ำโลหะ และอุณหภูมิของเบ้าปูน สามารถป้องกันการเกิดข้อบกพร่องในการหล่อชิ้นงานแหวนได้ เช่น ปัญหารูพรุนเกิดจากการหดตัวของชิ้นงาน และหล่อไม่เต็ม เป็นต้น

5.3 ข้อเสนอแนะ

5.3.1 การออกแบบทางเดินน้ำโลหะ ควรออกแบบให้มีความหลากหลาย เช่น ขนาดทางเดินน้ำโลหะ มุมในการติดตั้งเทียน และการติดตั้งทางเดินน้ำโลหะ ให้มีความเหมาะสมกับรูปแบบชิ้นงาน เป็นต้น ถ้าหากผู้ที่มีความสนใจ ควรทำการศึกษาในเรื่องการออกแบบทางเดินน้ำโลหะเพิ่มเติม เพื่อหาความเหมาะสมของขนาดทางเดินน้ำโลหะ มุมในการติดตั้งเทียน และการติดตั้งทางเดินน้ำโลหะ

5.3.2 ควรศึกษาการทำงานของเครื่องหล่อสูญญากาศในกระบวนการหล่อเครื่องประดับแบบซีฟิ่ง หายให้มีความละเอียด เพื่อให้การจำลองการหล่อมีความถูกต้องแม่นยำมากขึ้น

เอกสารอ้างอิง

- จักรพล เร่บ้านเกาะ. (2554). การแกะ Wax และการหล่อฉีดตัวเรือนเครื่องประดับระดับพื้นฐาน. งานพัฒนาหลักสูตรการเรียนการสอน, กาญจนานิเทศวิทยาลัย, กรุงเทพมหานคร
- จอมภพ แวศักดิ์. (2549). พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ. วิทยาศาสตร์, มหาวิทยาลัยทักษิณ, พัทลุง
- เชิดศักดิ์ อรัญมาลา และ รศ.ดร.ชาญยุทธ โกลิตะวงษ์. (2547). การศึกษากฎพื้นฐาน และหลักการออกแบบ Gate และRunner ของชิ้นงาน Locking Knob ในอุตสาหกรรมคอมพิวเตอร์โดยใช้เทคนิคการจำลองวิธีการหล่อลุ่มิเนียม. วิทยานิพนธ์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, กรุงเทพมหานคร
- ไทมอนด์แกรนด์เด. (2560). กระบวนการหล่อเครื่องประดับ. สืบค้นเมื่อวันที่ 2 พฤศจิกายน 2560 <http://www.diamondgrande.com>
- ธานินทร์ ศิลป์จารุ. (2555). การวิจัยและวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติด้วย SPSS และ AMOS. กรุงเทพมหานคร :: ห้างหุ้นส่วนสามัญบิซิเนสอาร์แอนด์ดี.
- ธานี ภู่นพคุณ. (2560). ส่วนประกอบที่สำคัญของการออกแบบ. สืบค้นเมื่อวันที่ 2 พฤศจิกายน 2560, จาก <https://www.gotoknow.org/posts/155330>
- ธน ทองกลม และคณะ. (2559). การวิเคราะห์จุดเสียในการหล่อทองเหลืองวิธีขึ้นหยาบบนโบราณ โดยการหล่อในแม่พิมพ์แบบปิด กรณีศึกษาการหล่อทองเหลืองบ้านปะอ่าว. วิจัย, วิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี, อุบลราชธานี
- ประไพศรี สุทัศน์ ณ อยุธยา. (2551). การออกแบบและวิเคราะห์การทดลอง. กรุงเทพมหานคร : ที่อป
- ปริศนา บุญศักดิ์. (2556). การวิจัยปัญหาในงานหล่อและการพัฒนาแนวทางแก้ไขปัญหาในงานหล่อเครื่องประดับสมัยใหม่. วิทยานิพนธ์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนครเหนือ, กรุงเทพมหานคร

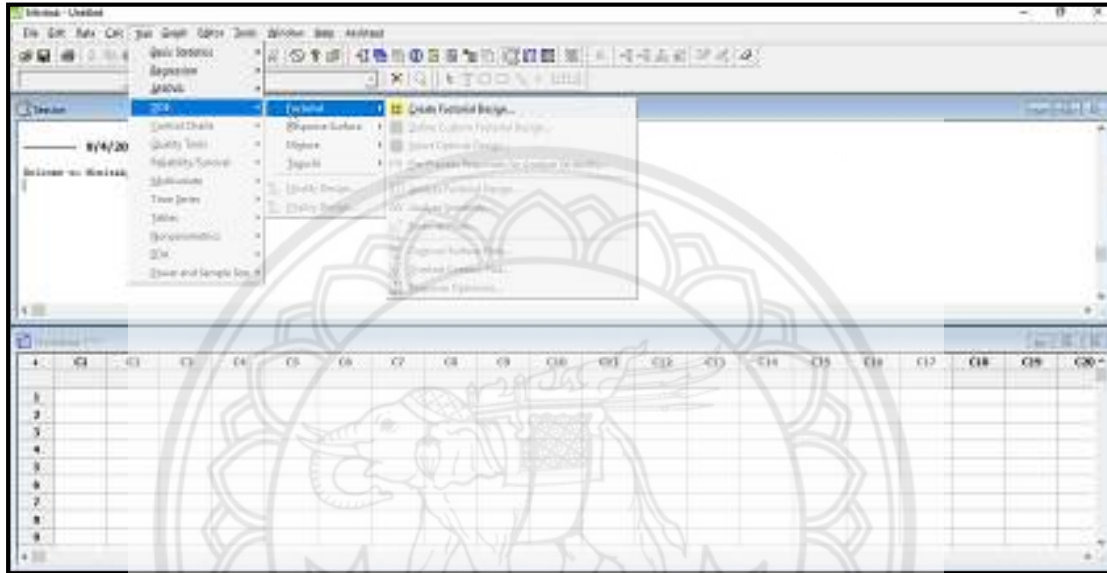
- เพ็ญศรี ทองนพคุณ. (2549). การวิจัยเพื่อพัฒนากระบวนการหล่อในอุตสาหกรรมอัญมณี และเครื่องประดับ. สำนักพัฒนาอุตสาหกรรมรายสาขา, กรมส่งเสริมอุตสาหกรรม, กรุงเทพมหานคร
- รัตน์ บริสุทธิ์กุล. (2550). กระบวนการหล่อโลหะ. สืบค้นเมื่อวันที่ 15 พฤษภาคม 2561, จาก <http://www.eng.sut.ac.th>
- มงคล แก้วนพรัตน์. (2012). การลดปัญหาข้อบกพร่องในกระบวนการผลิตชิ้นส่วนยานยนต์จากอะลูมิเนียมหล่อโดยใช้โปรแกรมจำลองงานหล่อขึ้นรูป. วิทยานิพนธ์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, นครราชสีมา
- สุทัศน์ ยอดเพชร. (2546). การศึกษาเทคนิคการผลิตทองแดงเจือ เพื่อเป็นโลหะหลักสำหรับการผลิตตัวเรือนเครื่องประดับโลหะเจือ. วิทยานิพนธ์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, กรุงเทพมหานคร
- สมนึก วัฒนศรีกุล และคณะ. (2549). ศึกษาวิเคราะห์อิทธิพลของสังกะสีที่มีผลต่อคุณภาพงานหล่อตัวเรือนเครื่องประดับ. กองทุนสนับสนุนการวิจัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, กรุงเทพมหานคร
- เอกสิทธิ์ นิสารัตนพร. (2559). การศึกษาความเหมาะสมของปูนในงานหล่อเครื่องประดับโลหะผสมทองและโลหะไทเทเนียม. วิศวกรรมศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพมหานคร
- โอรส พินิจรัตน์พันธ์. (2556). การควบคุมคุณภาพเครื่องประดับทองด้วยวิธีการออกแบบการทดลอง. วิทยานิพนธ์, มหาวิทยาลัยศิลปากร, กรุงเทพมหานคร
- Makel. (2009). Material Properties Database. สืบค้นเมื่อวันที่ 8 มีนาคม 2561, จาก <https://www.makeitfrom.com>
- Somlak Wanarumon and Marco Actis Grande. (2009). Comparisons of Computer Fluid Dynamic Soft Programs applied to Jewelry Investment Casting Process. World Academy of Science, Engineering and Technology, Australia



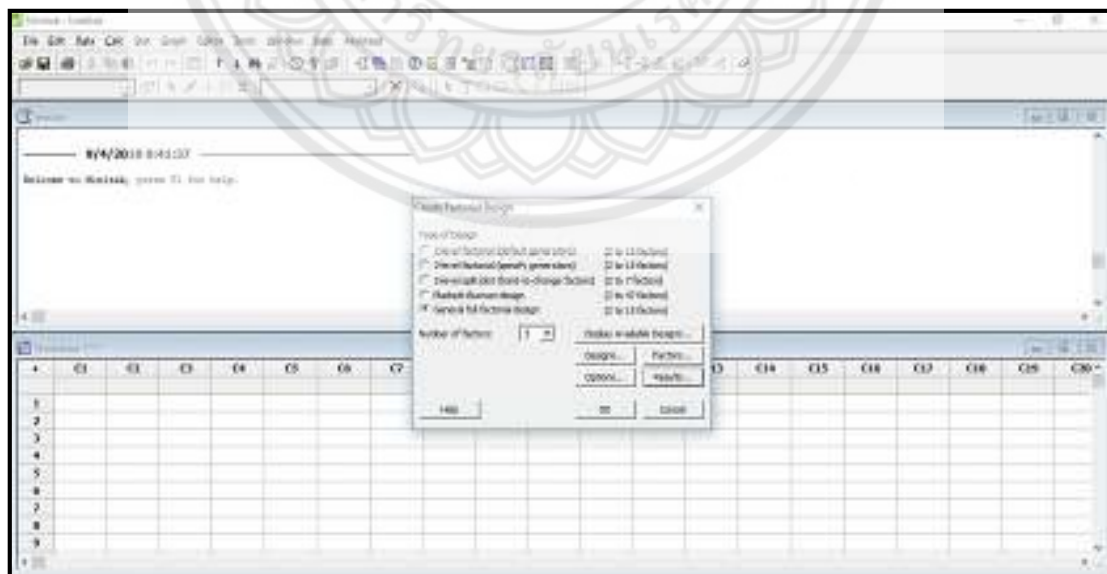
ภาคผนวก ก
คู่มือ การใช้งานโปรแกรม Minitab

1. การกำหนดค่าในการออกแบบการทดลอง

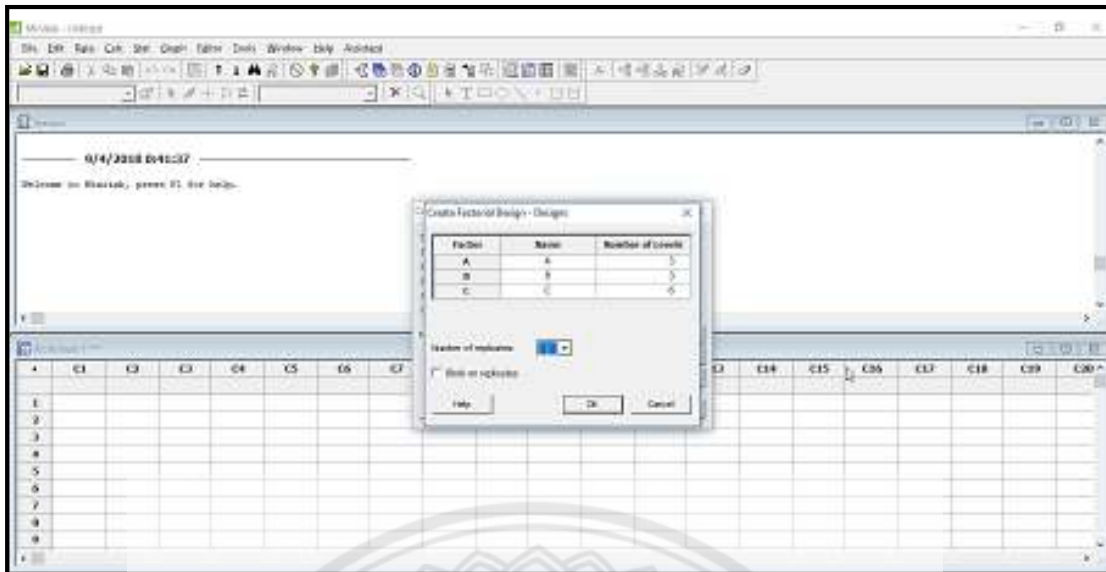
ดำเนินการโดยการใช้โปรแกรม Minitab ในการออกแบบแผนการทดลอง เพื่อเป็นเครื่องมือช่วยในการวิเคราะห์ และออกแบบการทดลอง โดยมีขั้นตอนการกำหนดค่าในการออกแบบการทดลอง โดยเปิดโปรแกรม Minitab ขึ้นมา จากนั้นเลือก DOE/ Factorial/ Create Factorial Design กำหนดค่าการทดลองดังรูปที่ ก.1 ถึง ก.5



รูปที่ ก.1 แสดงการตั้งค่าบนโปรแกรม Minitab ออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียลแบบเต็มรูปแบบ



รูปที่ ก.2 แสดงการตั้งค่าจำนวนปัจจัยบนโปรแกรม Minitab



รูปที่ ก.4 แสดงจำนวนระดับของปัจจัย ทั้ง 3 ปัจจัย และการทำซ้ำ 2

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
A	1	8.0881272	8.0881272	8.0881272	74.08	0.000
B	2	8.0095404	8.0095404	4.0047702	36.47	0.000
C	4	8.0041109	8.0041109	2.0010277	18.18	0.000
A*B	2	0.0000000	0.0000000	0.0000000	0.00	0.999
A*C	4	0.0000000	0.0000000	0.0000000	0.00	0.999
B*C	8	0.0000000	0.0000000	0.0000000	0.00	0.999
A*B*C	8	0.0000000	0.0000000	0.0000000	0.00	0.999
Error	24	8.0000000	8.0000000	0.3333333		
Total	30	8.0881272				

Source	Seq SS	DF	MS	F	P
Block	0.0000000	1	0.0000000	0.00	0.999
Factor					
A	8.0881272	1	8.0881272	74.08	0.000
B	8.0095404	2	4.0047702	36.47	0.000
C	8.0041109	4	2.0010277	18.18	0.000
A*B	0.0000000	2	0.0000000	0.00	0.999
A*C	0.0000000	4	0.0000000	0.00	0.999
B*C	0.0000000	8	0.0000000	0.00	0.999
A*B*C	0.0000000	8	0.0000000	0.00	0.999
Error	8.0000000	24	0.3333333		
Total	8.0881272	30			

รูปที่ ก.5 แสดงผลการวิเคราะห์ ANOVA

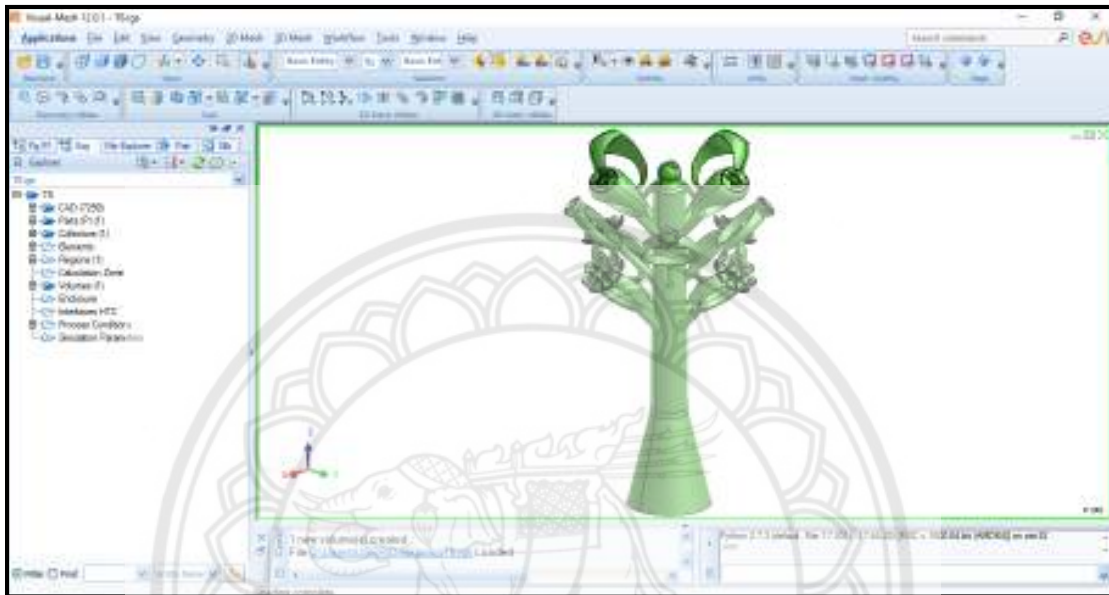
ภาคผนวก ข

คู่มือ การใช้งานโปรแกรม ProCAST

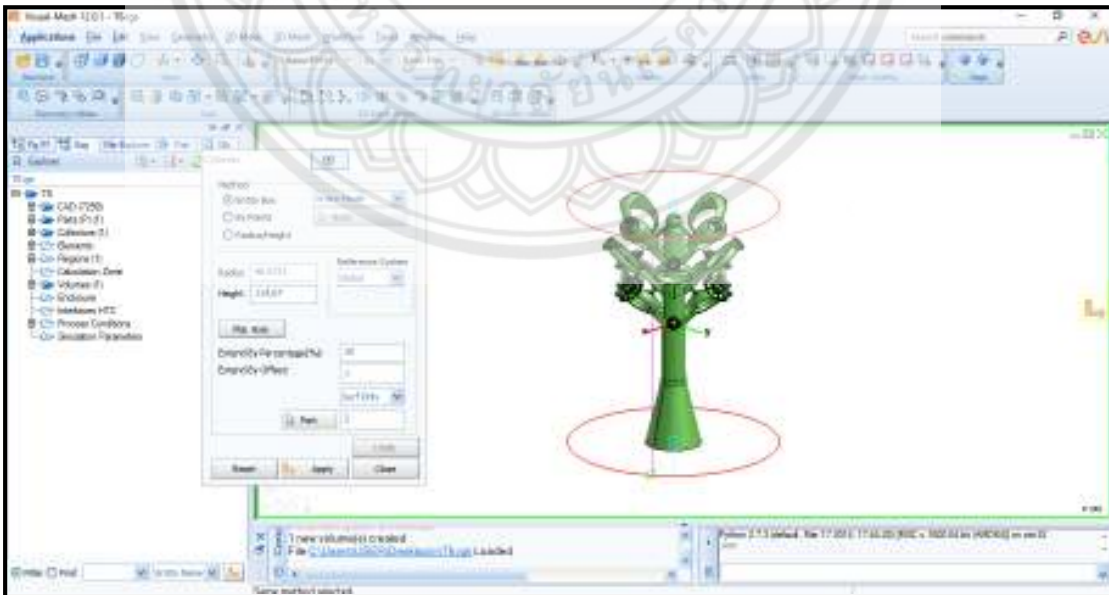


1. เปิดไฟล์แบบจำลองชิ้นงาน 3 มิติ

นำไฟล์ต้นเทียนที่วาดโดยใช้โปรแกรม Rhinoceros และ Plug – in เสริมโปรแกรม Grasshopper เปิดในโปรแกรม ProCAST และทำการสร้างเข้าให้กับแบบจำลองชิ้นงาน 3 มิติ ดังแสดงในรูปที่ ข.1 และ รูปที่ ข.2



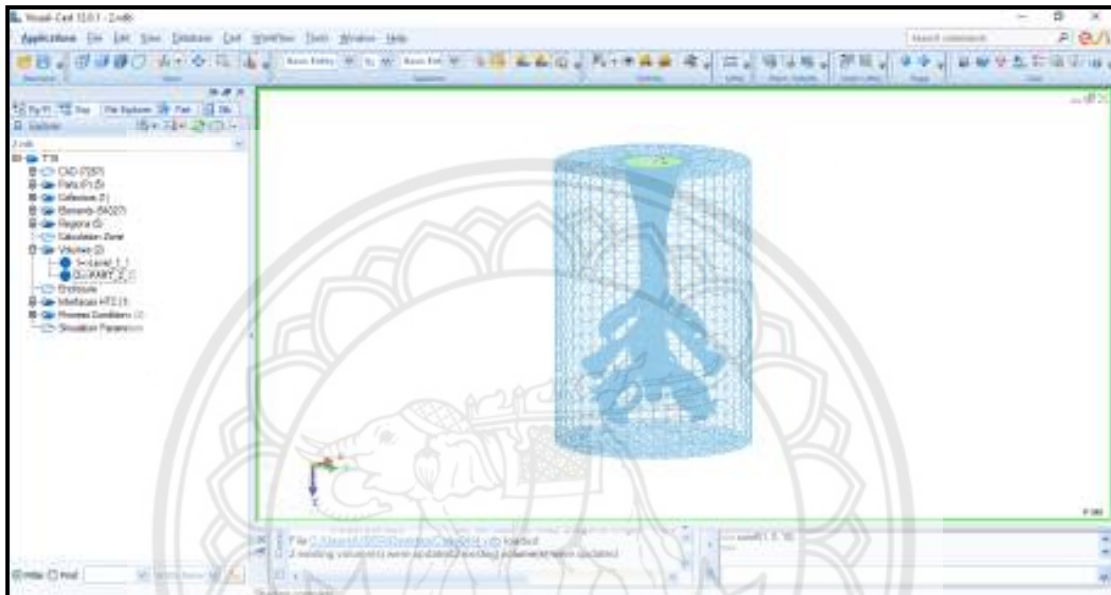
รูปที่ ข.1 แสดงการเปิดไฟล์แบบจำลองชิ้นงาน 3 มิติ



รูปที่ ข.2 แสดงการสร้างเข้า (Mold) ให้กับแบบจำลองชิ้นงาน 3 มิติ

2. การเปลี่ยนแปลงพื้นที่ให้เป็นพื้นที่ขนาดเล็ก

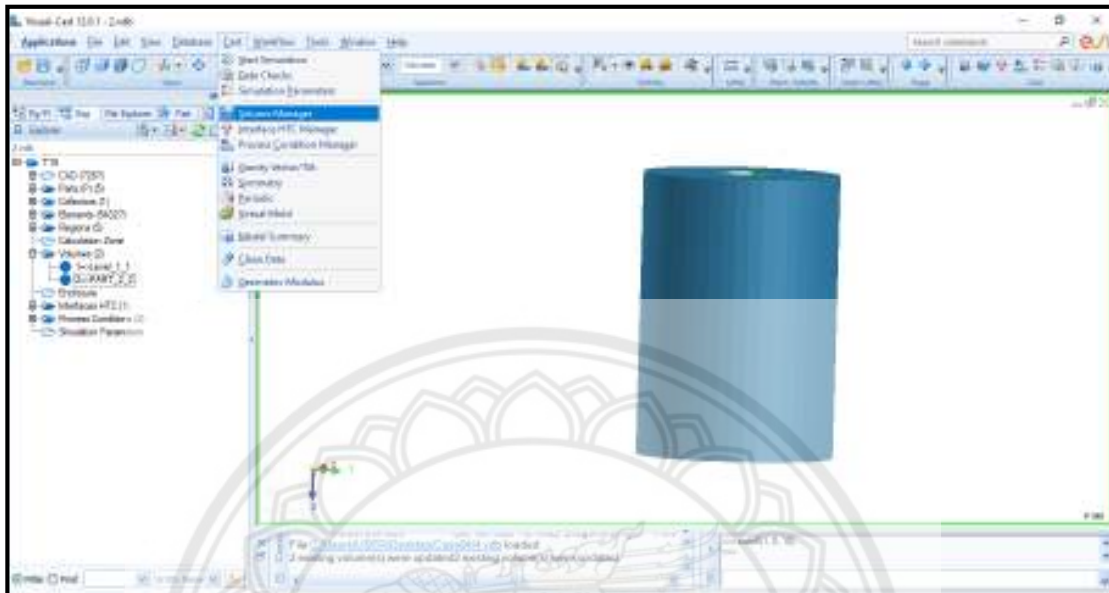
การสร้างปริมาตร Mesh จะมีลักษณะเป็นพีระมิดทรงสามเหลี่ยม การแบ่ง Mesh จะต้องไม่ละเอียดจนเกินไป เพราะจะทำให้เสียเวลาในการคำนวณมาก และไม่ควรถ่ายแบบหยาบจนเกินไปจะทำให้ค่าจากการคำนวณคลาดเคลื่อนกว่าความเป็นจริงมาก ดังนั้นควรออกแบบให้เหมาะสมไม่ละเอียดหรือหยาบจนเกินไป



รูปที่ ข.3 แสดงการแบ่ง Mesh 3D

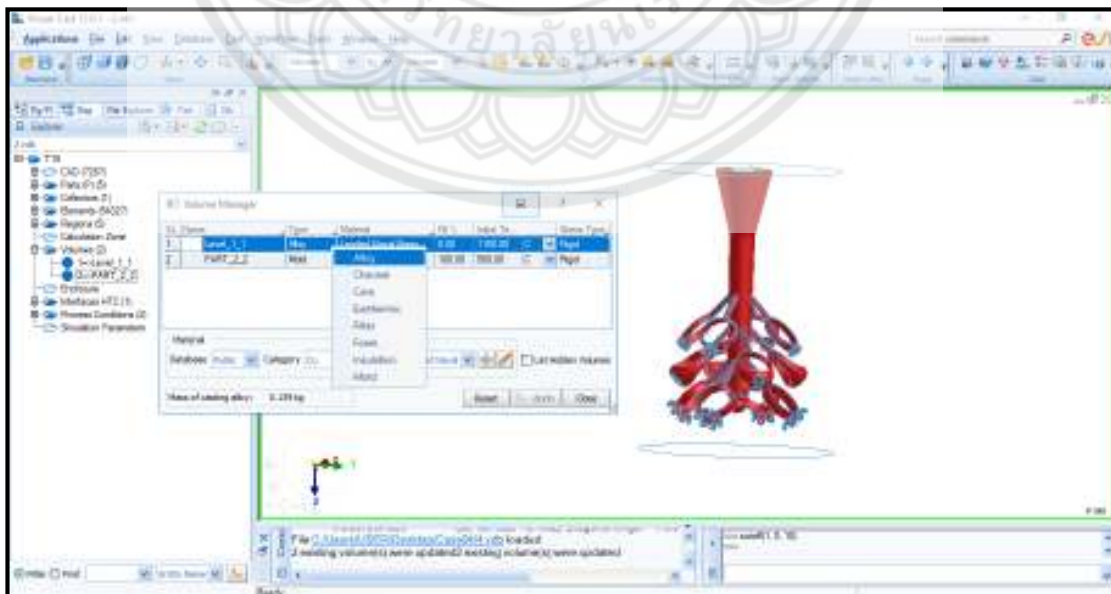
3. การตั้งค่าโปรแกรม และป้อนปัจจัยต่างๆ ลงไปในโปรแกรม

3.1 คลิกปุ่ม Cast > เลือก Volume Manager



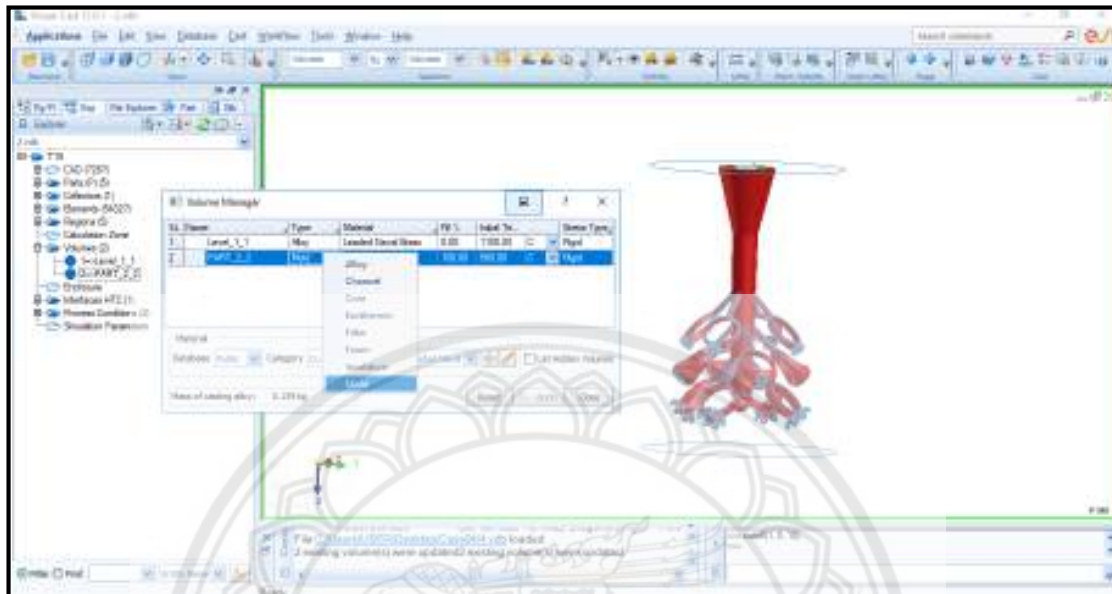
รูปที่ ข.4 แสดงการเปิดหน้าต่างตั้งค่าปัจจัยต่างๆ ให้กับชิ้นงาน

3.2 เลือกที่ช่อง Type แล้วคลิกเมาท์ด้านขวาทำการกำหนดชนิดของวัสดุให้แก่ชิ้นงานได้แก่ Alloy



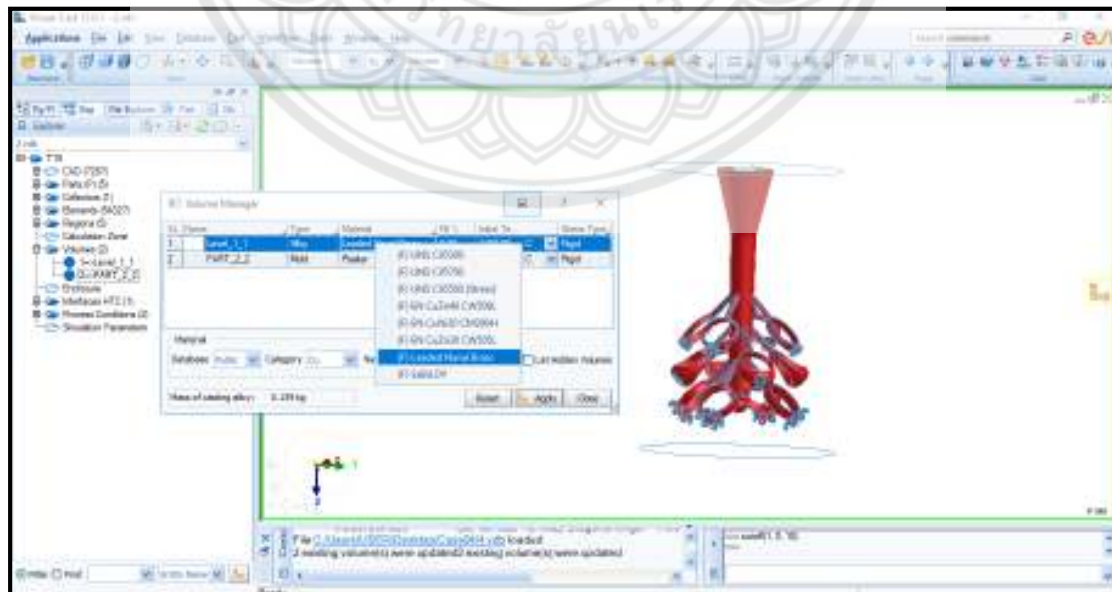
รูปที่ ข.5 แสดงการตั้งค่าปัจจัยต่างๆ ให้กับชิ้นงาน

3.3 เลือกที่ช่อง Type แล้วคลิกเมาท์ด้านขวาทำการกำหนดชนิดของวัสดุให้กับเบ้า ได้แก่ Mold



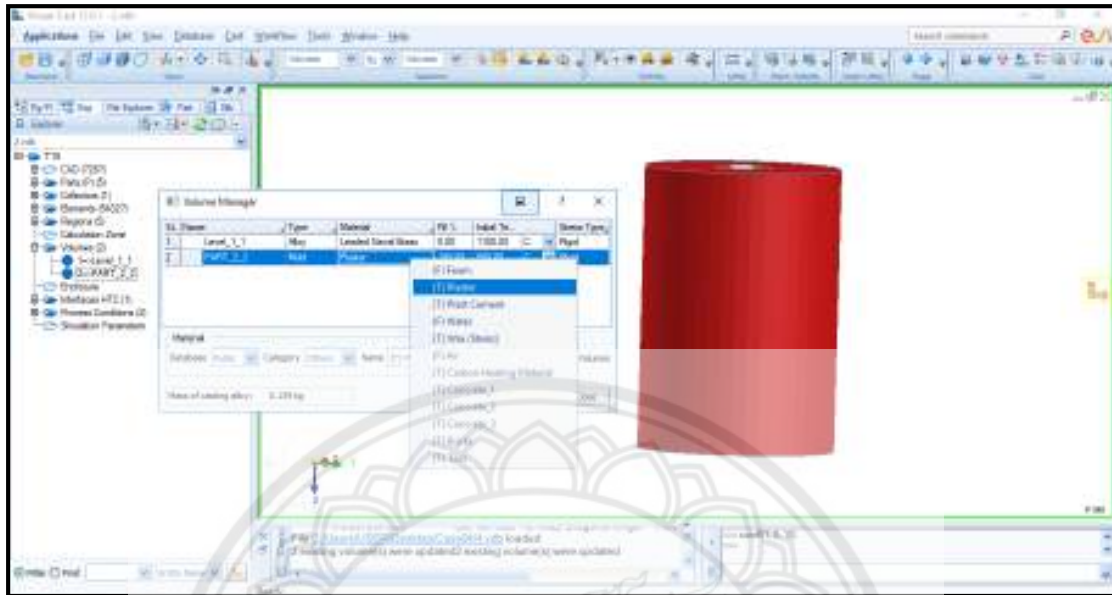
รูปที่ ข.6 แสดงการตั้งค่าปัจจัยต่างๆ ให้กับเบ้า

3.4 เลือกที่ช่อง Material ของ Alloy คลิกเมาท์ด้านขวา กำหนดเป็น Leaded Naval Brass



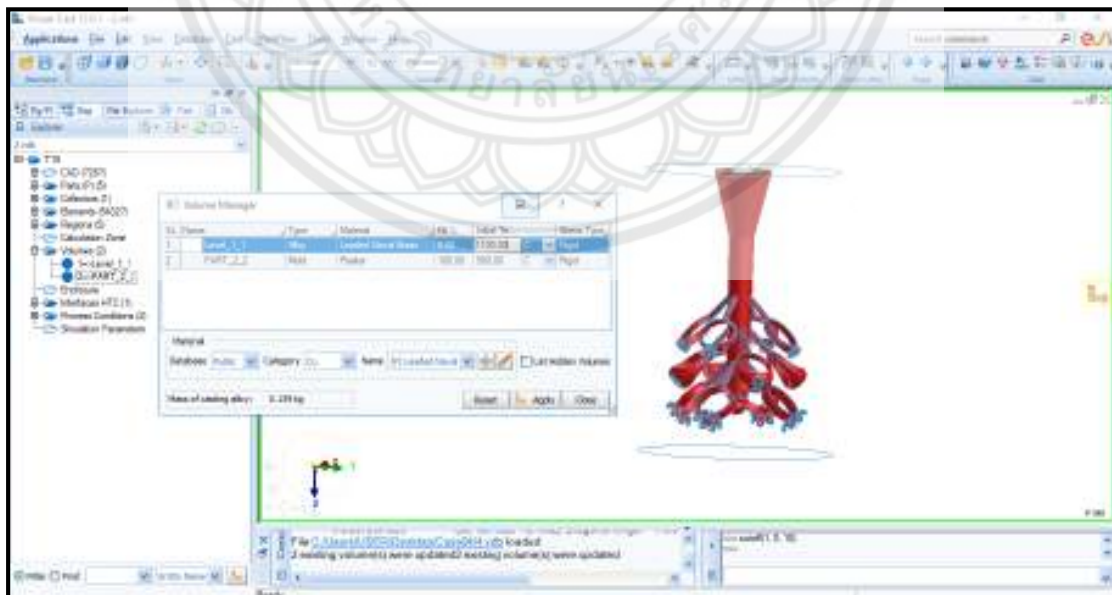
รูปที่ ข.7 แสดงการตั้งค่าข้อมูล Material ของน้ำโลหะ

3.5 เลือกที่ช่อง Material ของ Mold คลิกเมาท์ด้านขวา กำหนดเป็น Plaster



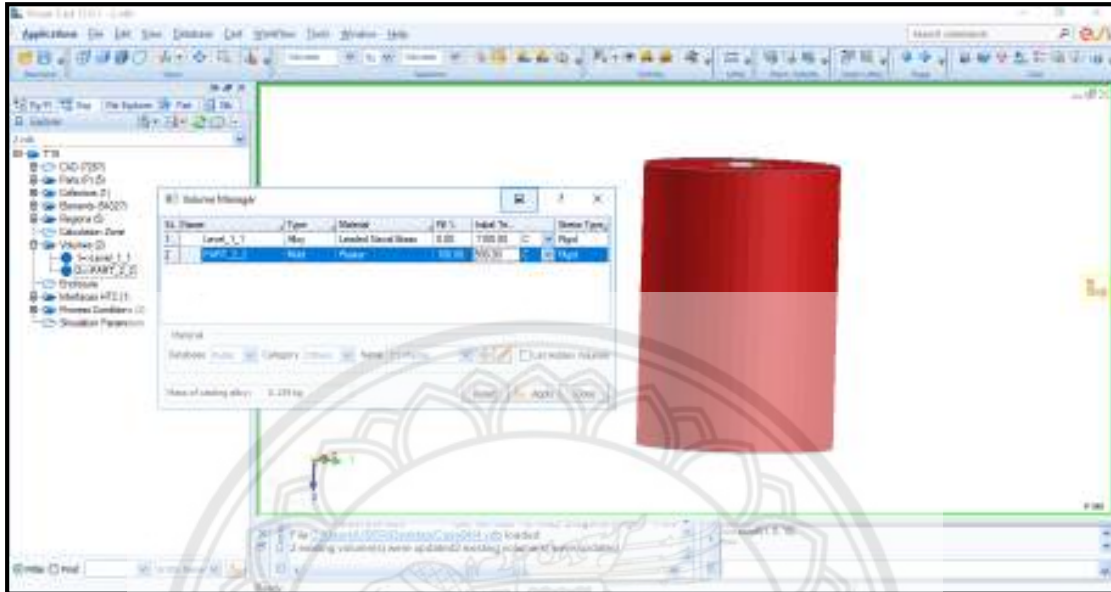
รูปที่ ข.8 แสดงการตั้งค่าข้อมูล Material ของ Mold

3.6 เลือกที่ช่อง Initial Temperature ของ Alloy คลิกเมาท์ด้านขวา เพื่อกำหนดอุณหภูมิในการเท



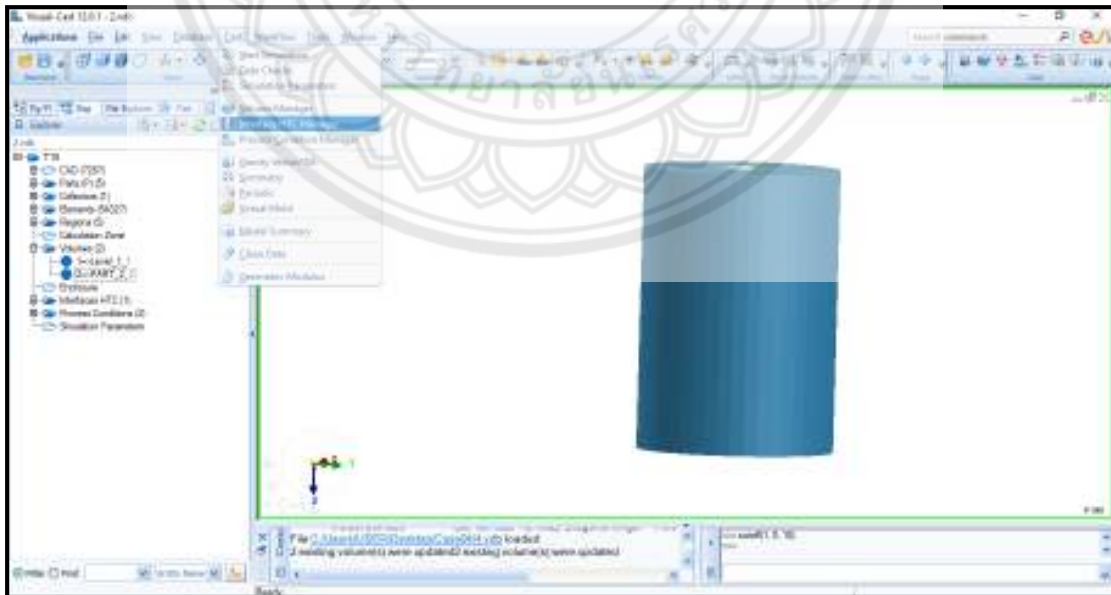
รูปที่ ข.9 แสดงการตั้งค่าอุณหภูมิในการเทน้ำโลหะ

3.7 เลือกที่ช่อง Initial Temperature ของ Mold คลิกเมาท์ด้านขวา เพื่อกำหนดอุณหภูมิของเบ้า



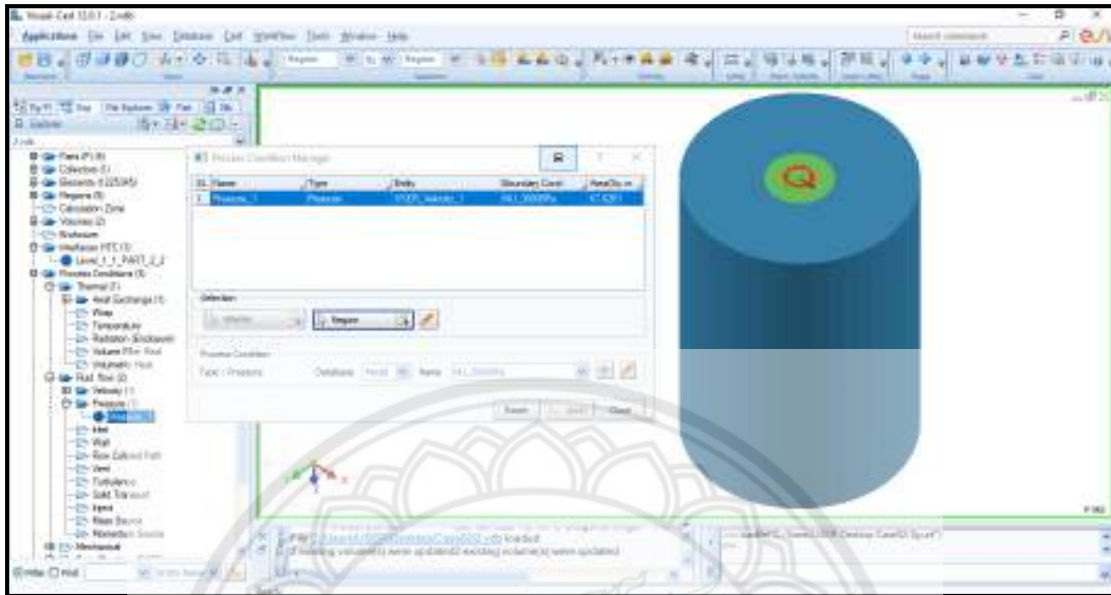
รูปที่ ข.10 แสดงการตั้งค่าอุณหภูมิของเบ้า

3.8 คลิกปุ่ม Cast > เลือก Interface HTC Manager



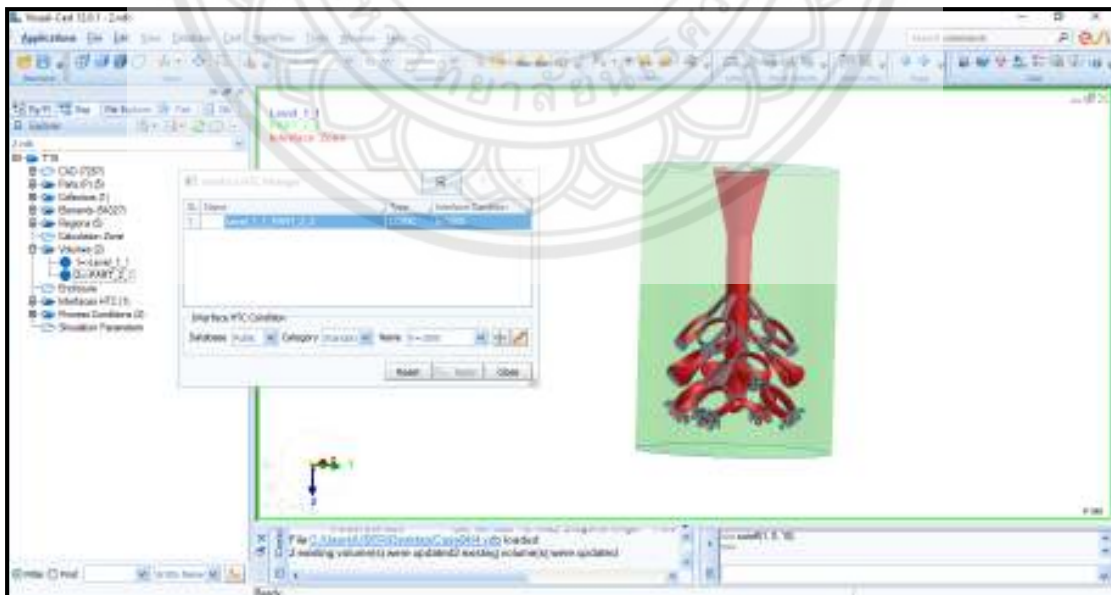
รูปที่ ข.11 แสดงการเปิดหน้าต่างกำหนดค่าสัมประสิทธิ์

3.9 เลือก Pressure คลิกเมาท์ด้านขวา > เลือก Edit > เลือก USER_Velocity



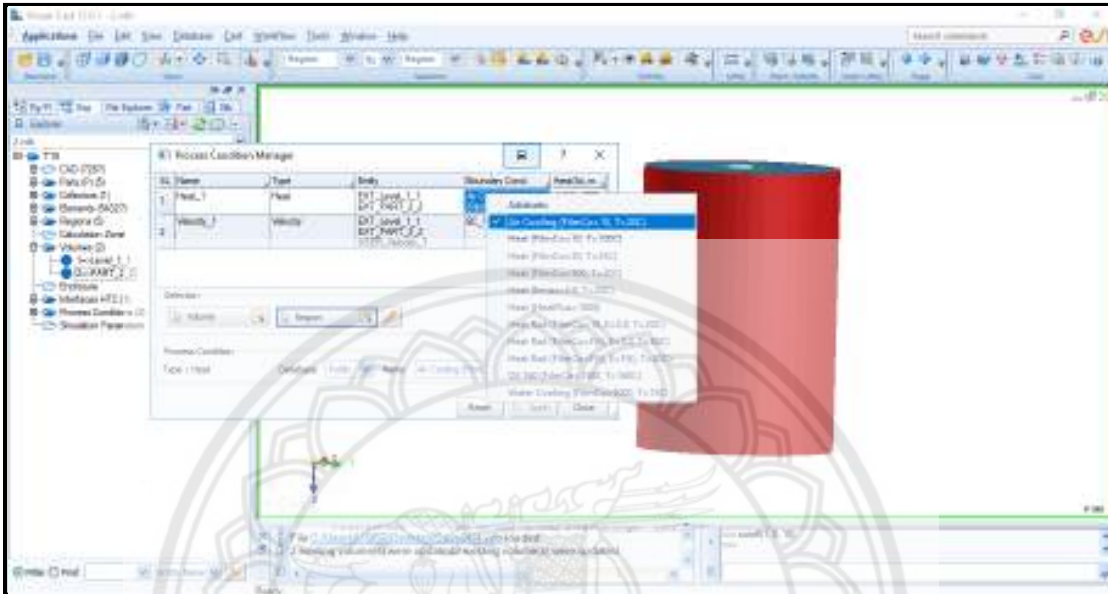
รูปที่ ข.12 แสดงการตั้งค่า Pressure

3.10 ดับเบิลคลิกปุ่ม Interface HTC Manager แล้วกำหนดค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน > Apply > Close



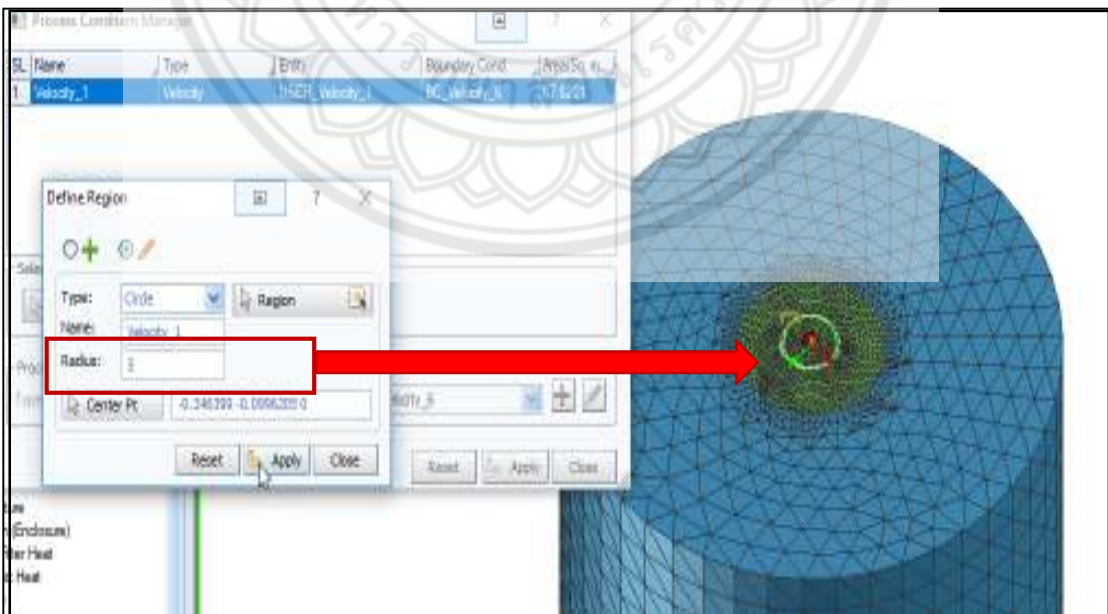
รูปที่ ข.13 แสดงการตั้งค่าการสัมผัสระหว่าง Mold กับแบบจำลองชิ้นงาน 3D และตั้งค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน

3.11 คลิกปุ่ม Cast > Process condition Manager ทำการ TYPE, ENTITY, BC, AREA



รูปที่ ข.14 แสดงการตั้งค่าการเย็นตัว

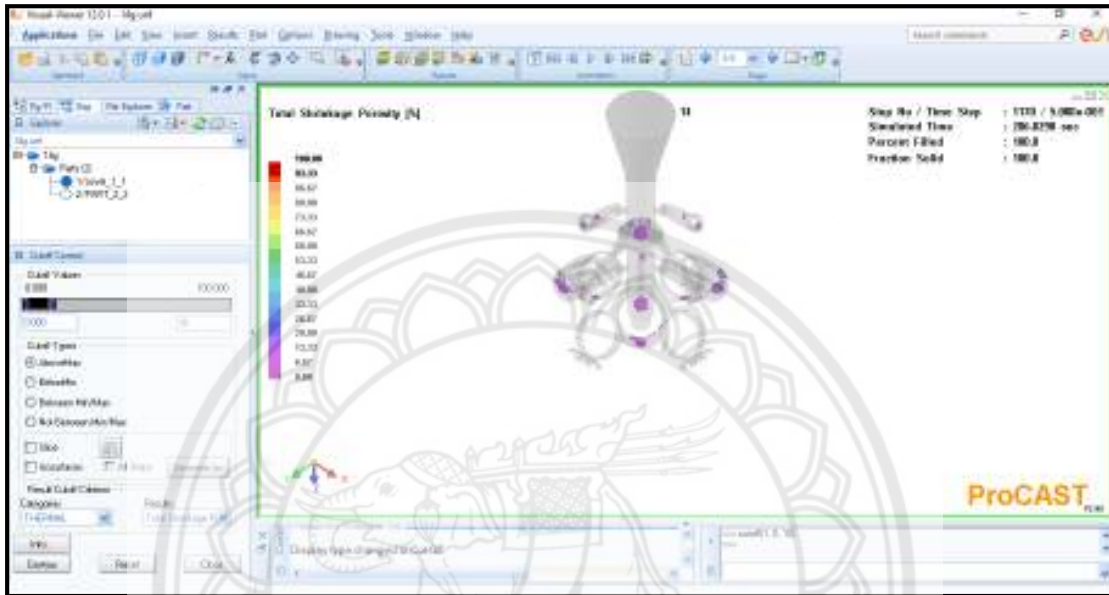
3.12 เลือกตำแหน่ง และตั้งค่าขนาดของรูเท



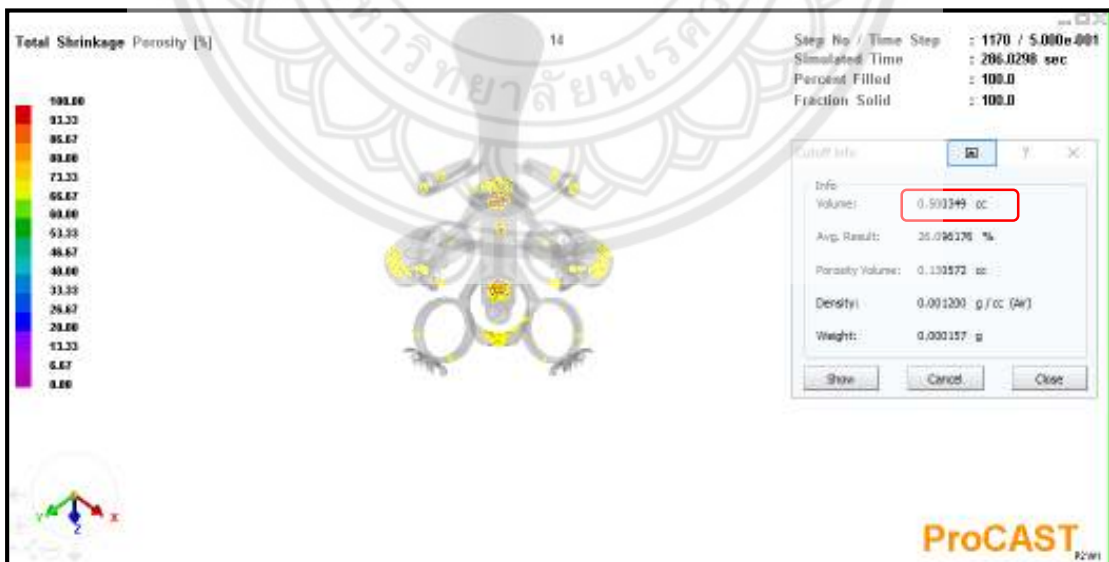
รูปที่ ข.15 แสดงการกำหนดตำแหน่งและขนาดรูเทน้ำโลหะ

4. การคำนวณผลลัพธ์ของโปรแกรม ProCAST

โดยเลือก Thermal / Total Shrinkage Porosity แล้วทำการลากกรอบบริเวณที่เกิดรูพรุน โปรแกรมจะคำนวณ และแสดงค่าของปริมาณรูพรุนที่เกิดขึ้นบนชิ้นงาน ดังแสดงในรูปที่ ข.16 และ รูปที่ ข.17



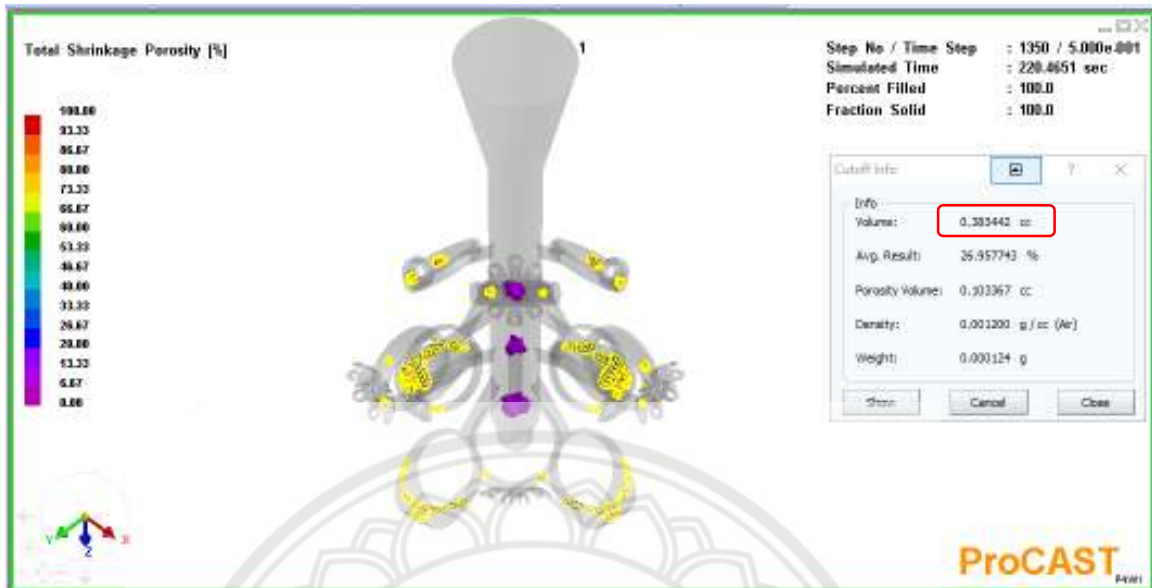
รูปที่ ข.16 แสดงผลการวิเคราะห์หาค่าของปริมาณรูพรุน



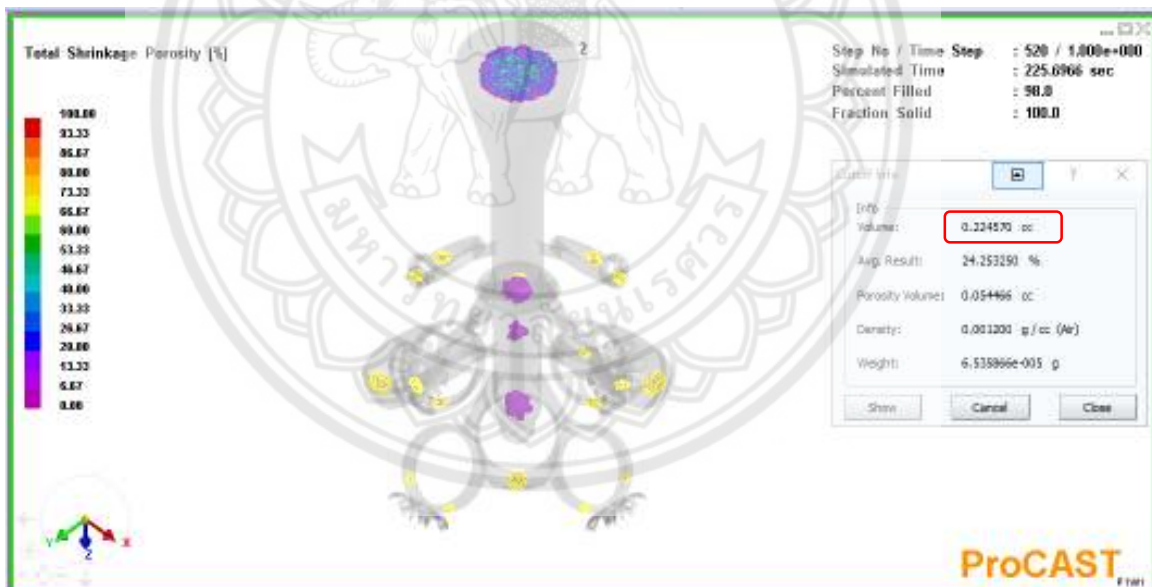
รูปที่ ข.17 แสดงผลการวิเคราะห์หาค่าของปริมาณรูพรุน

ภาคผนวก ค
ผลการวิเคราะห์ค่าของปริมาณรุกรานของแหวน

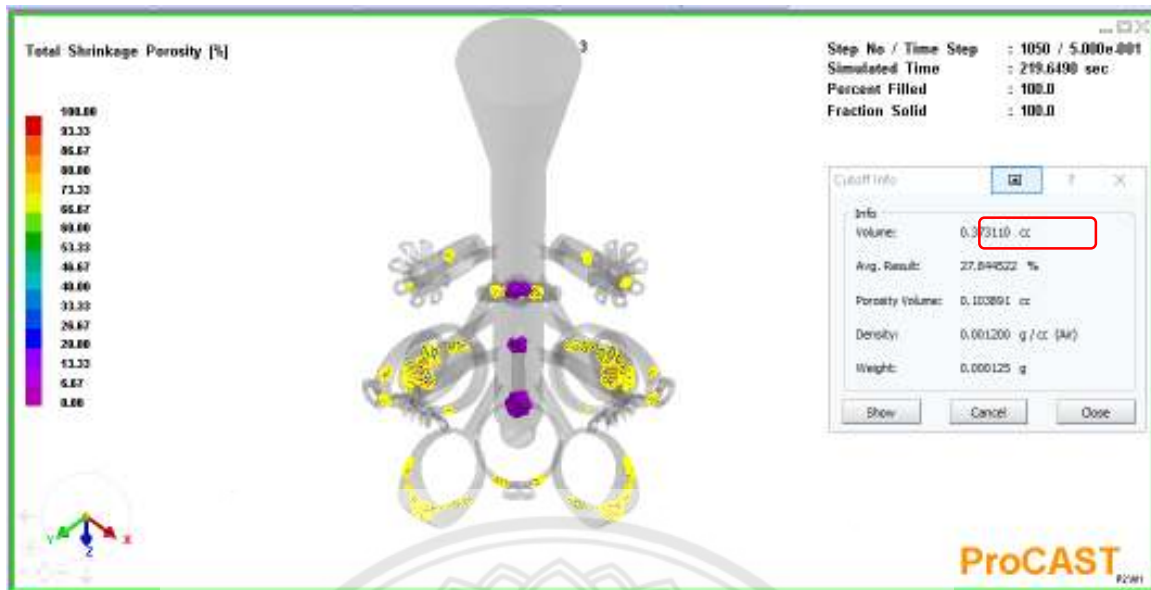




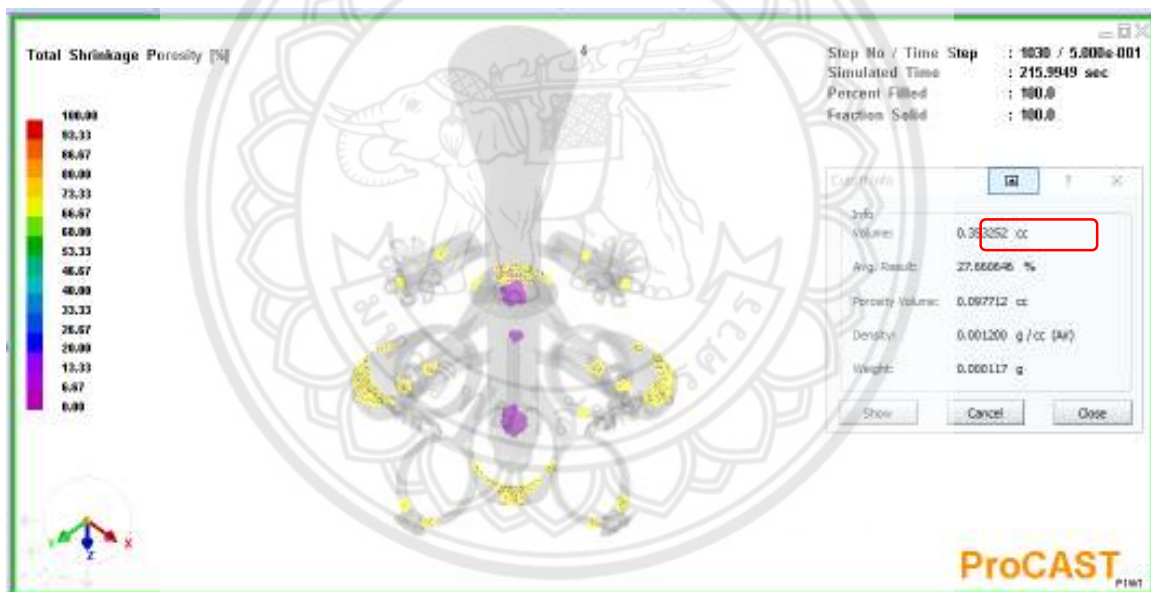
รูปที่ ค.1 แสดงผลการวิเคราะห์ค่าของปริมาณรูพรุนของแหวนการรันที่ 1



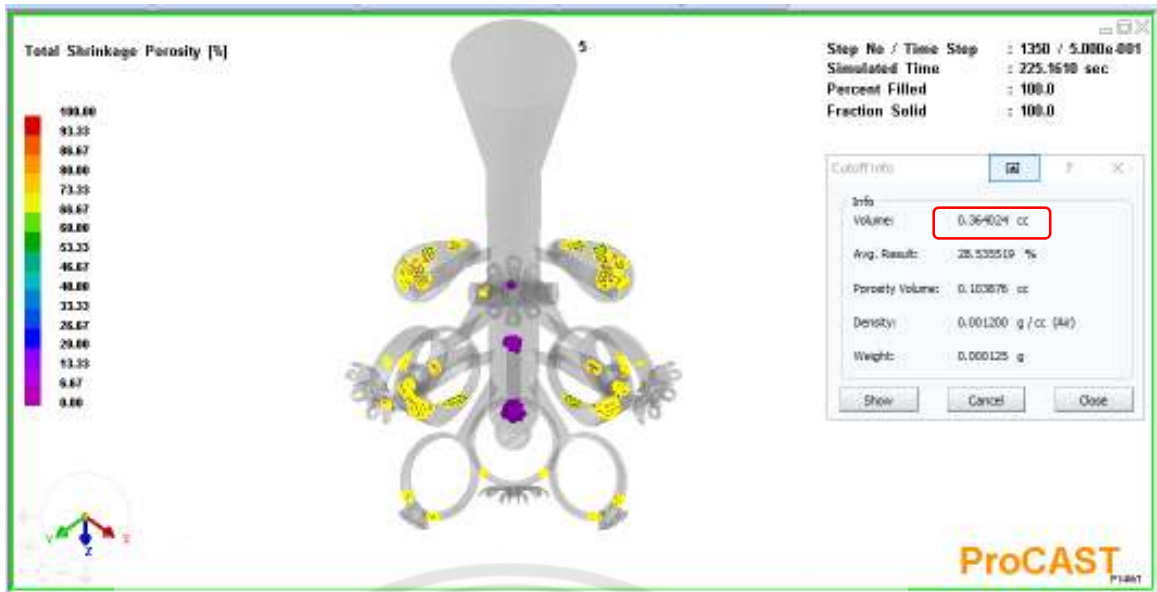
รูปที่ ค.2 แสดงผลการวิเคราะห์ค่าของปริมาณรูพรุนของของแหวนการรันที่ 2



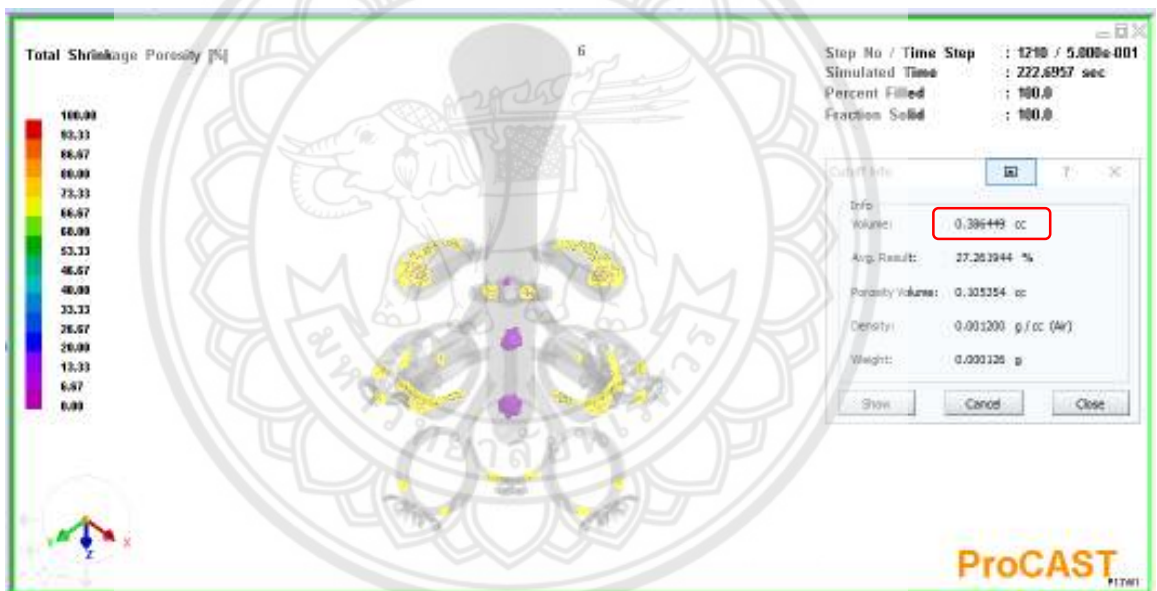
รูปที่ ค.3 แสดงผลการวิเคราะห์ค่าของปริมาณรูพรุนของของแหวนการรันที่ 3



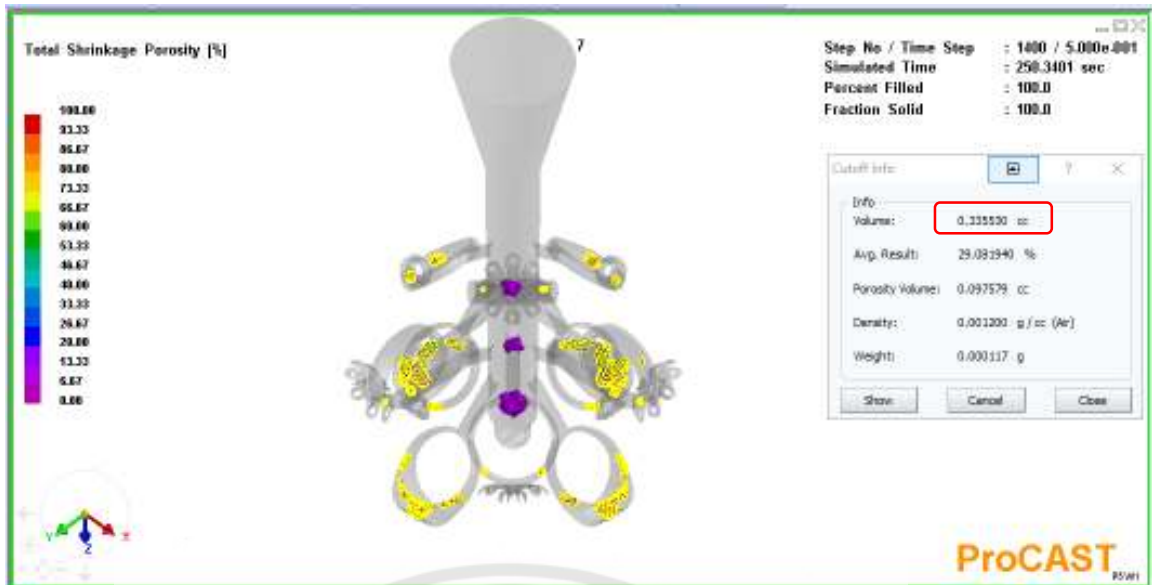
รูปที่ ค.4 แสดงผลการวิเคราะห์ค่าของปริมาณรูพรุนของแหวนการรันที่ 4



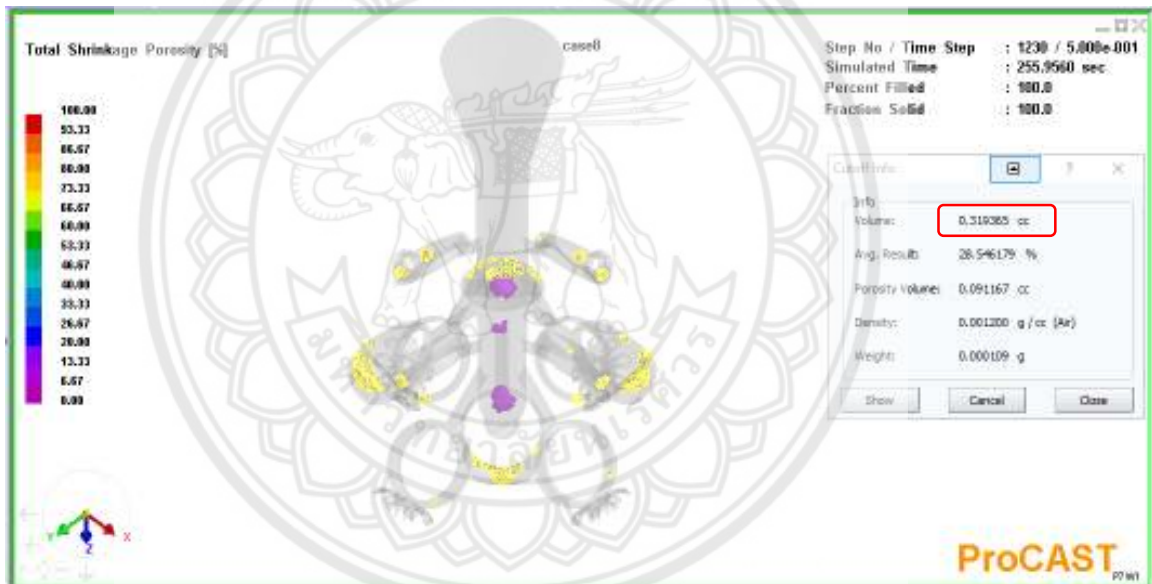
รูปที่ ค.5 แสดงผลการวิเคราะห์หาค่าของปริมาณรูพรุนของแหวนการรันที่ 5



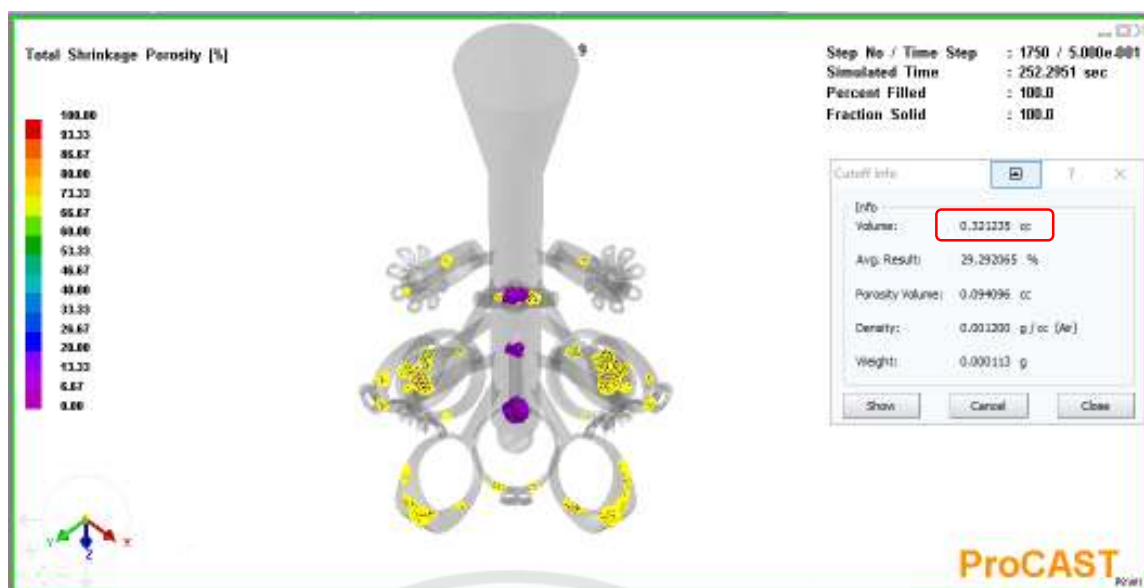
รูปที่ ค.6 แสดงผลการวิเคราะห์หาค่าของปริมาณรูพรุนของแหวนการรันที่ 6



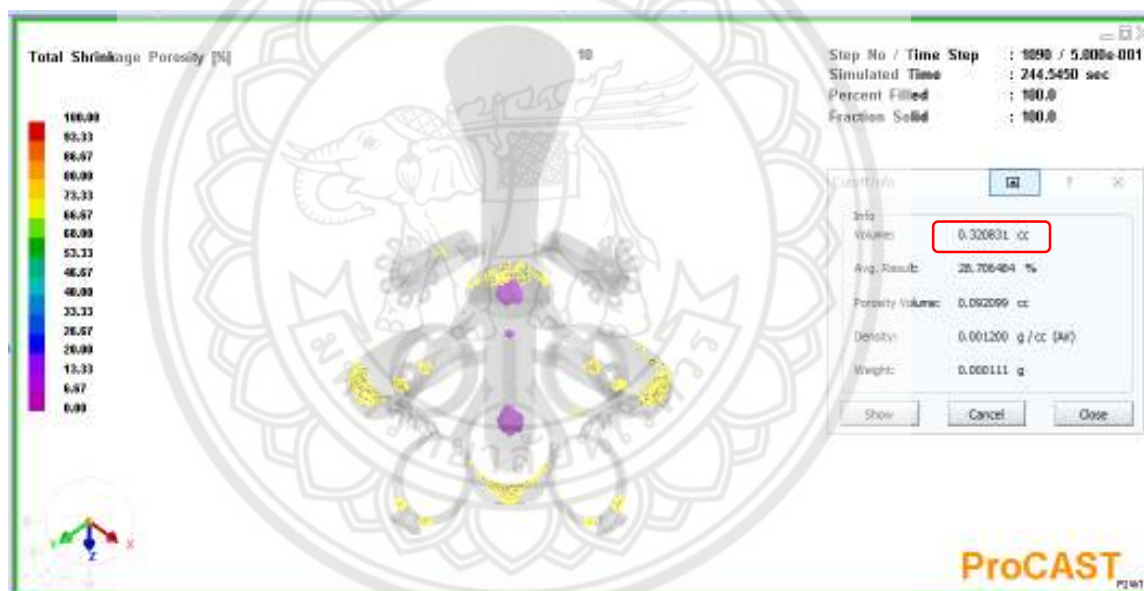
รูปที่ ค.7 แสดงผลการวิเคราะห์ค่าของปริมาณรูพรุนของแหวนการรันที่ 7



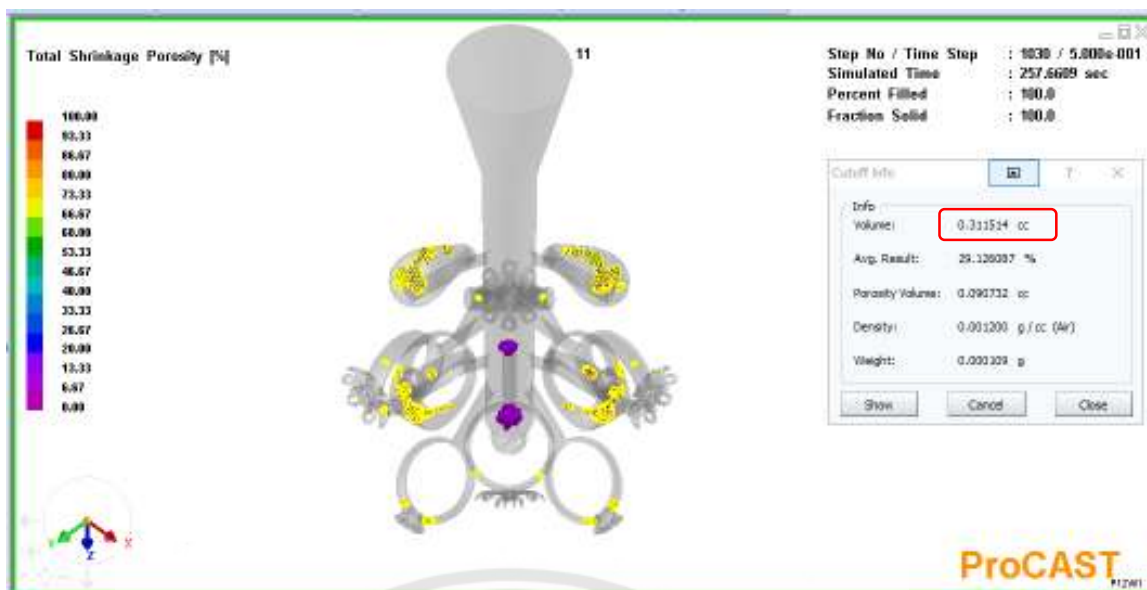
รูปที่ ค.8 แสดงผลการวิเคราะห์ค่าของปริมาณรูพรุนของแหวนการรันที่ 8



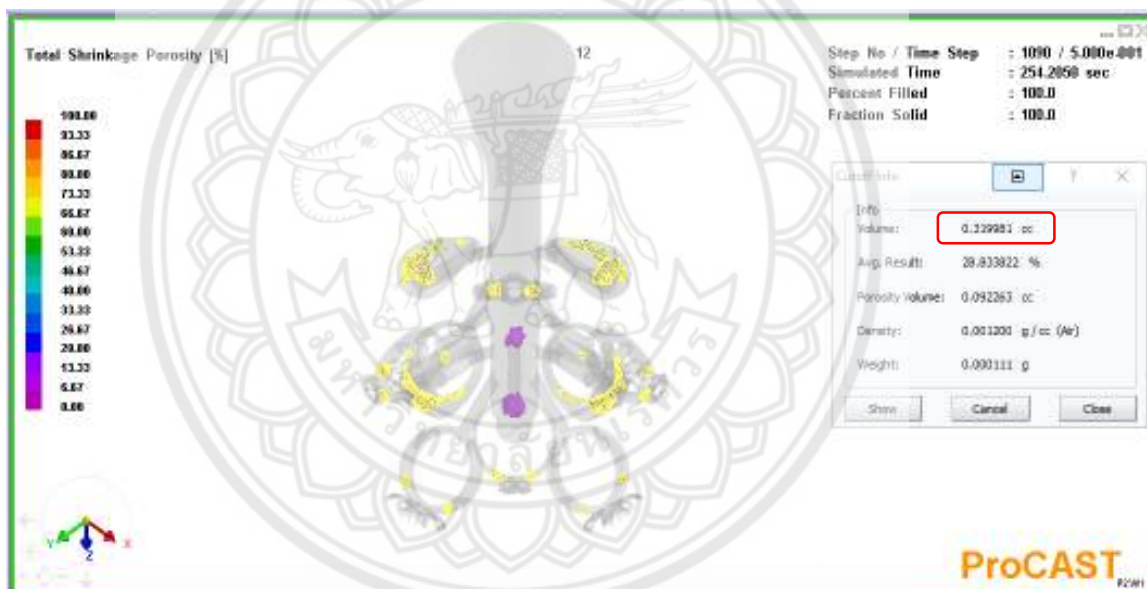
รูปที่ ค.9 แสดงผลการวิเคราะห์หาค่าของปริมาณรูพรุนของแหวนการรันที่ 9



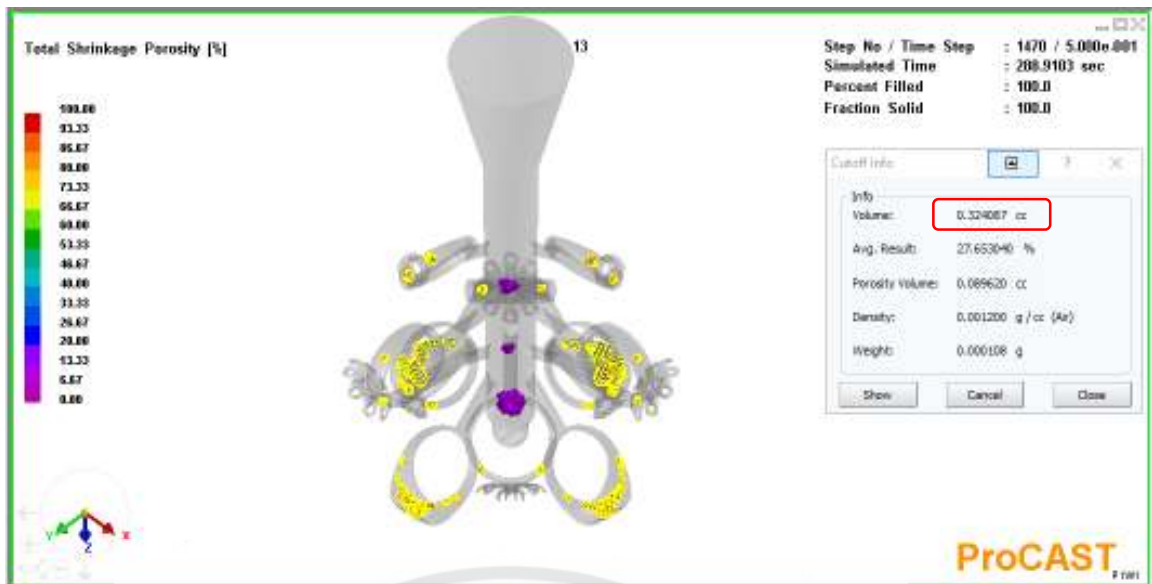
รูปที่ ค.10 แสดงผลการวิเคราะห์หาค่าของปริมาณรูพรุนของแหวนการรันที่ 10



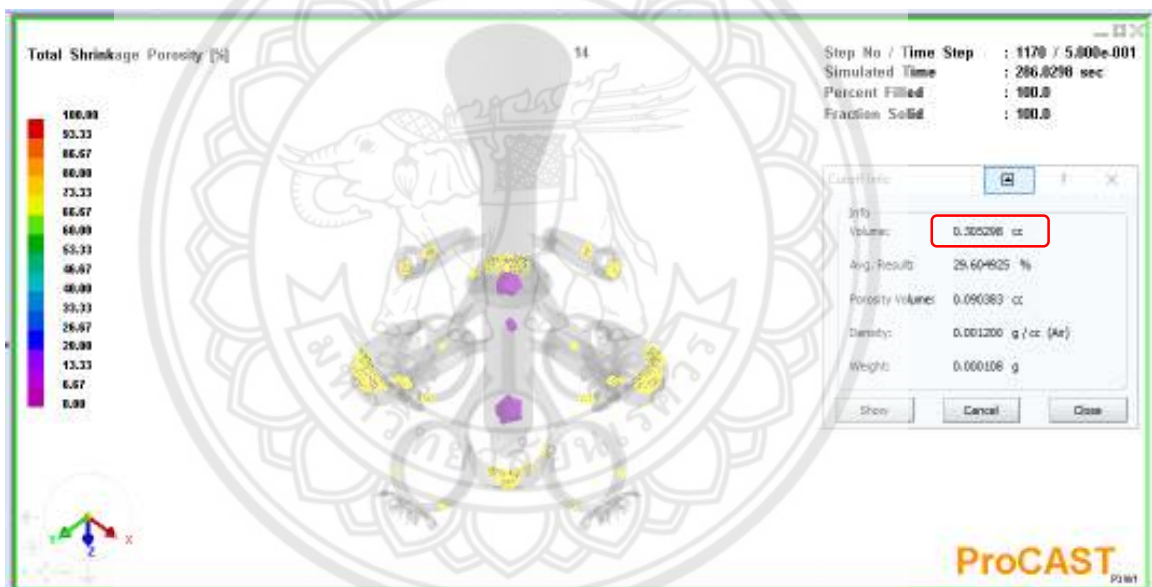
รูปที่ ค.11 แสดงผลการวิเคราะห์ค่าของปริมาณรูพรุนของแหวนการรันที่ 11



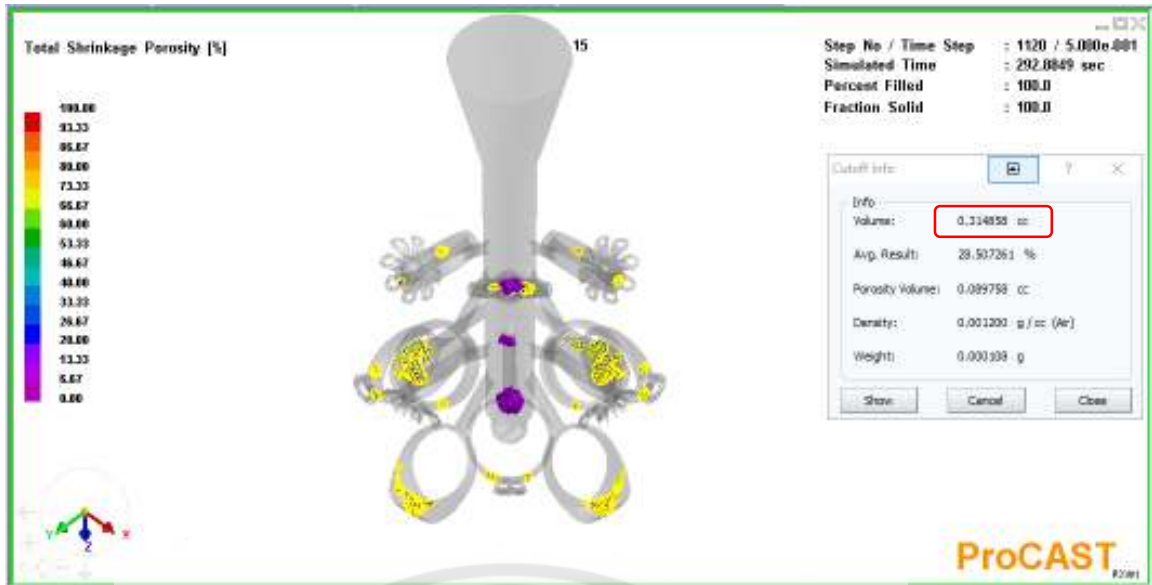
รูปที่ ค.12 แสดงผลการวิเคราะห์ค่าของปริมาณรูพรุนของแหวนการรันที่ 12



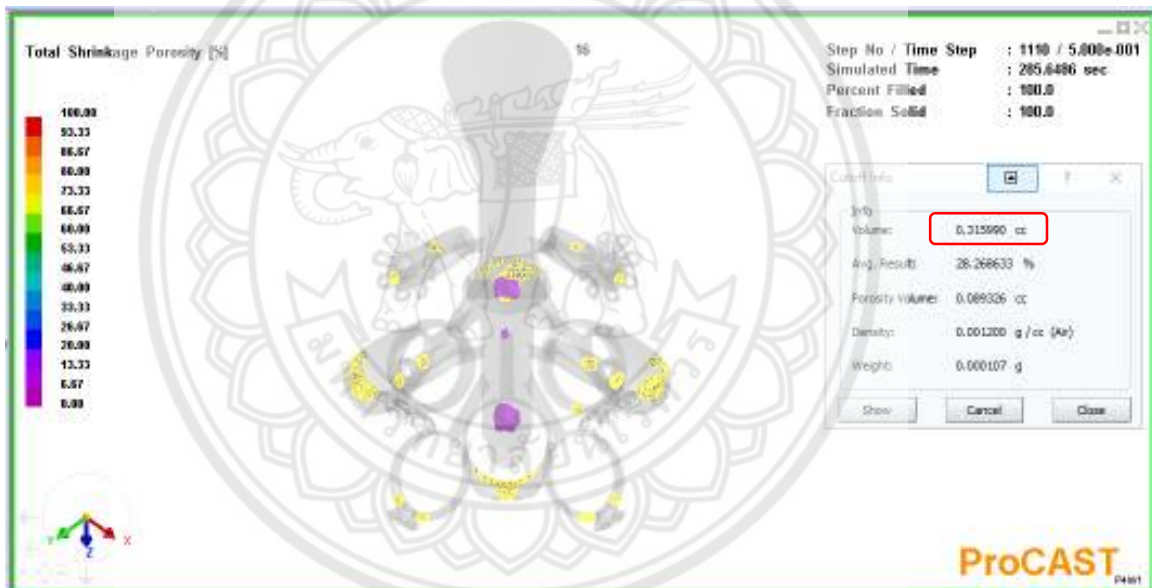
รูปที่ ค.13 แสดงผลการวิเคราะห์ค่าของปริมาณรูพรุนของแหวนการรันที่ 13



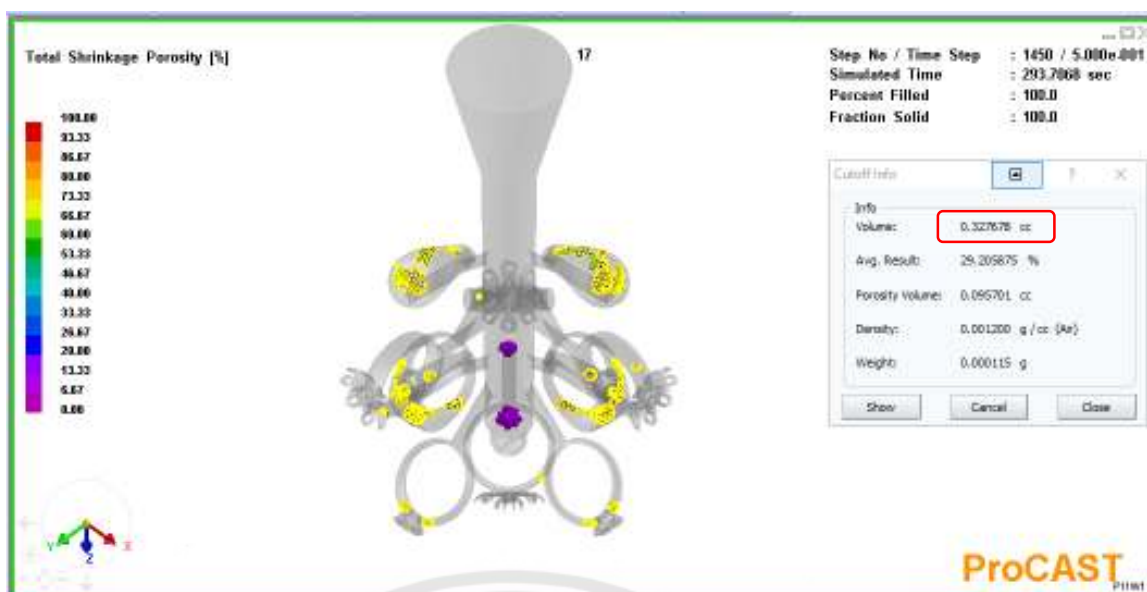
รูปที่ ค.14 แสดงผลการวิเคราะห์ค่าของปริมาณรูพรุนของแหวนการรันที่ 14



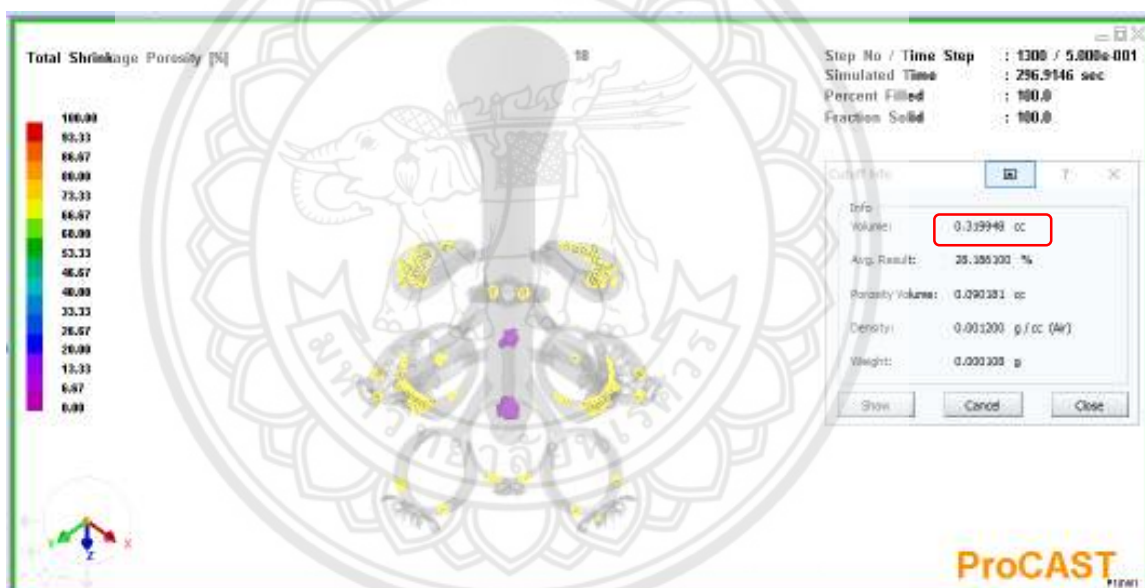
รูปที่ ค.15 แสดงผลการวิเคราะห์หาค่าของปริมาณรูพรุนของแหวนการรันที่ 15



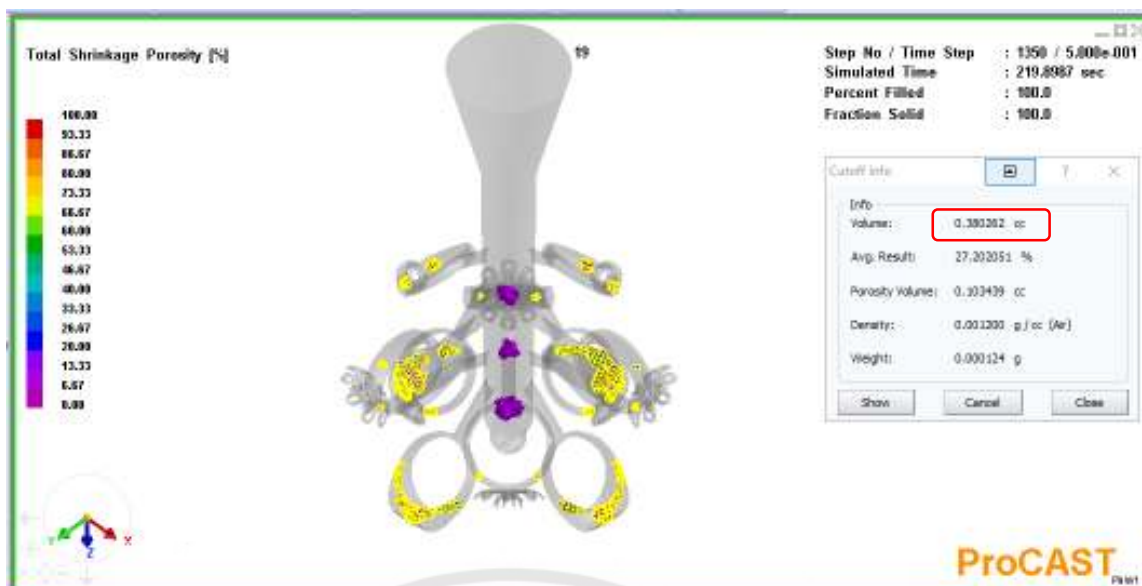
รูปที่ ค.16 แสดงผลการวิเคราะห์หาค่าของปริมาณรูพรุนของแหวนการรันที่ 16



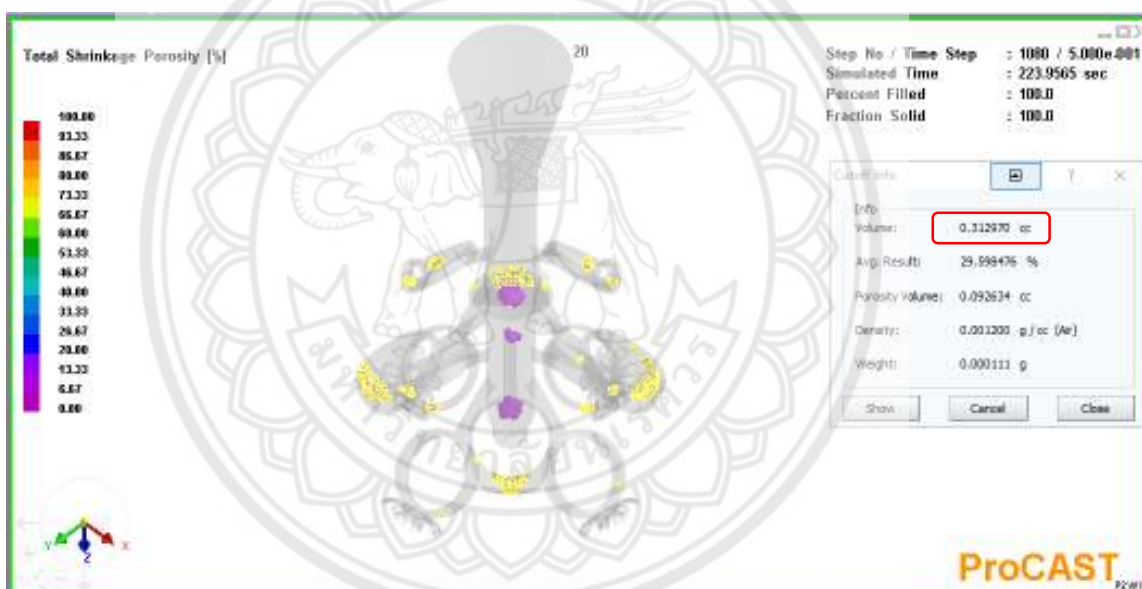
รูปที่ ค.17 แสดงผลการวิเคราะห์ค่าของปริมาณรูพรุนของแหวนการรันที่ 17



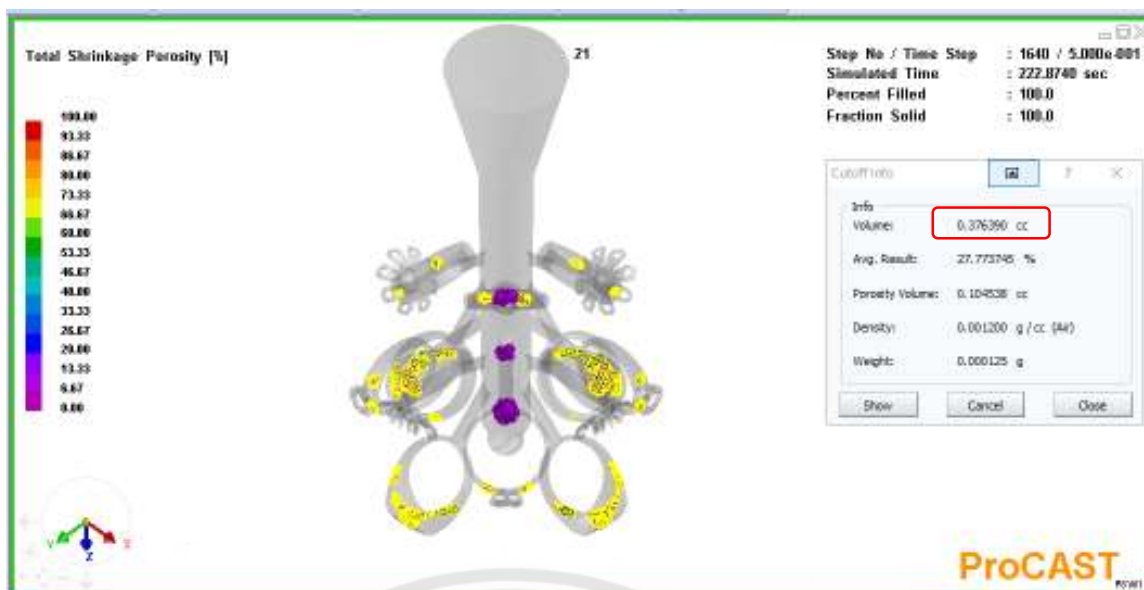
รูปที่ ค.18 แสดงผลการวิเคราะห์ค่าของปริมาณรูพรุนของแหวนการรันที่ 18



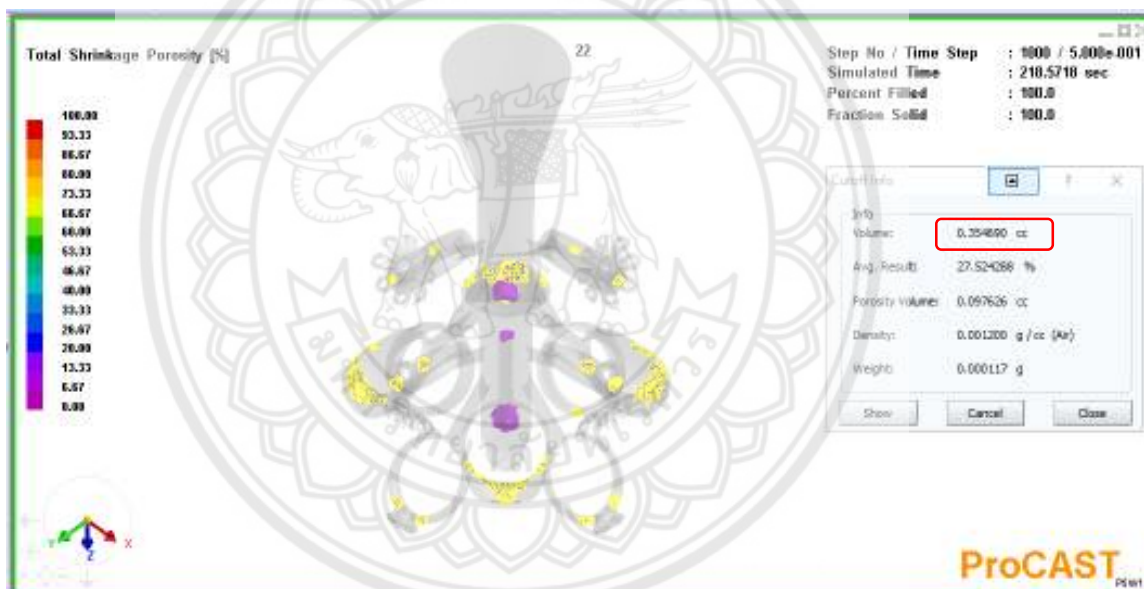
รูปที่ ค.19 แสดงผลการวิเคราะห์ค่าของปริมาณรูพรุนของแหวนการรันที่ 19



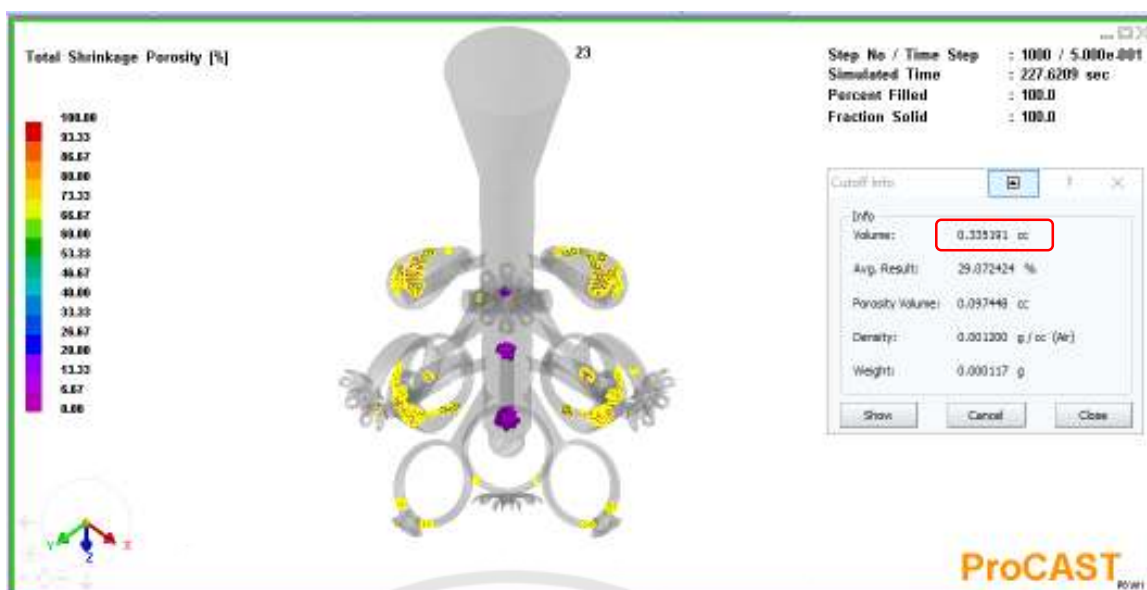
รูปที่ ค.20 แสดงผลการวิเคราะห์ค่าของปริมาณรูพรุนของแหวนการรันที่ 20



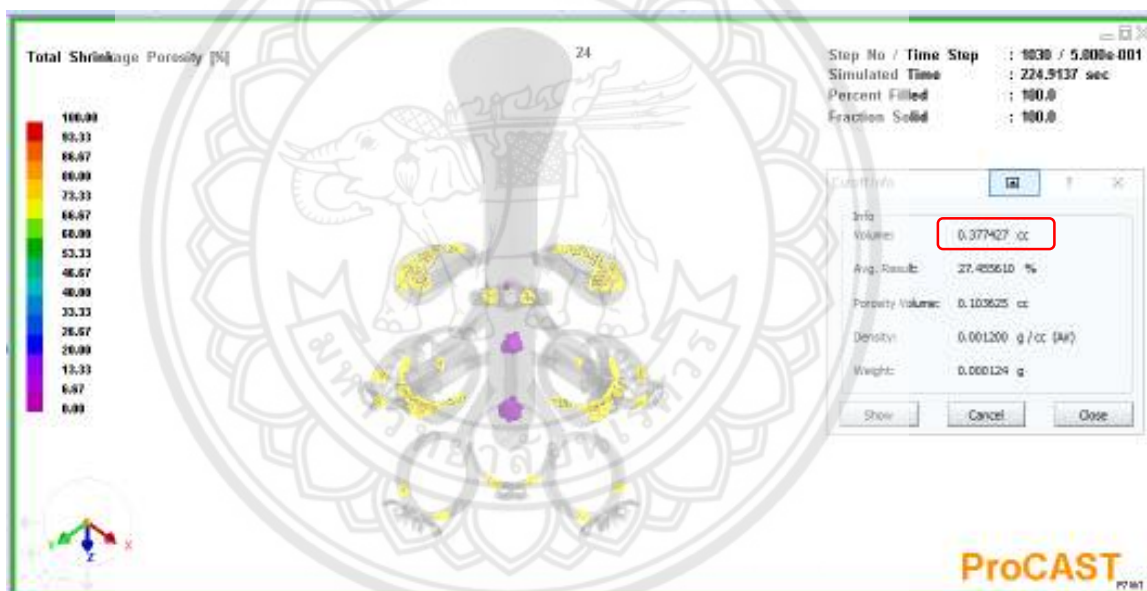
รูปที่ ค.21 แสดงผลการวิเคราะห์ค่าของปริมาณรูพรุนของแหวนการรันที่ 21



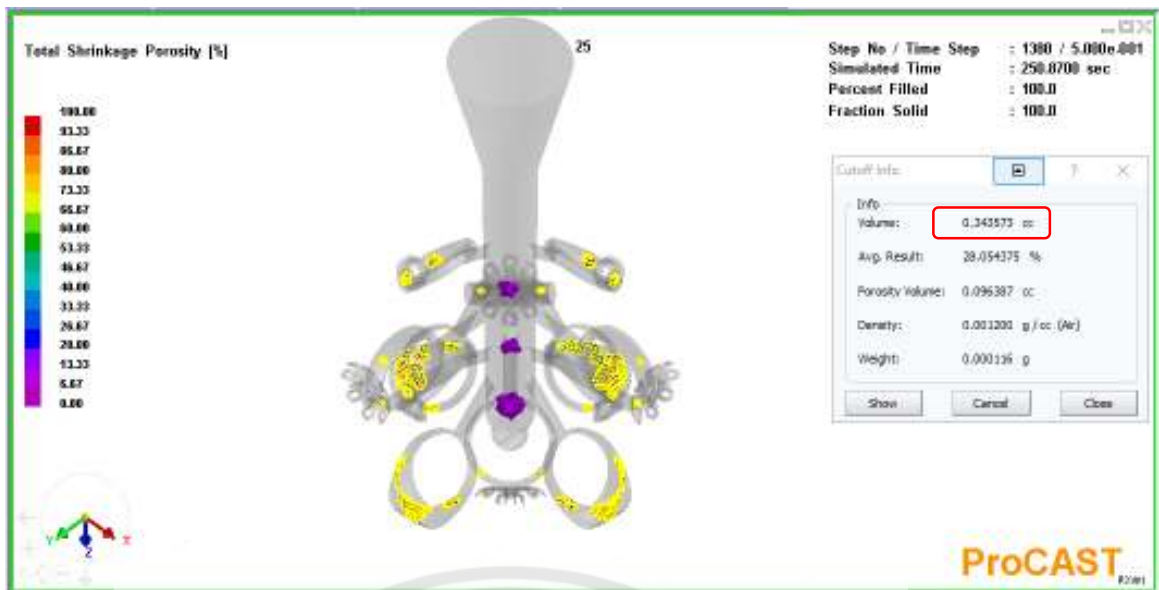
รูปที่ ค.22 แสดงผลการวิเคราะห์ค่าของปริมาณรูพรุนของแหวนการรันที่ 22



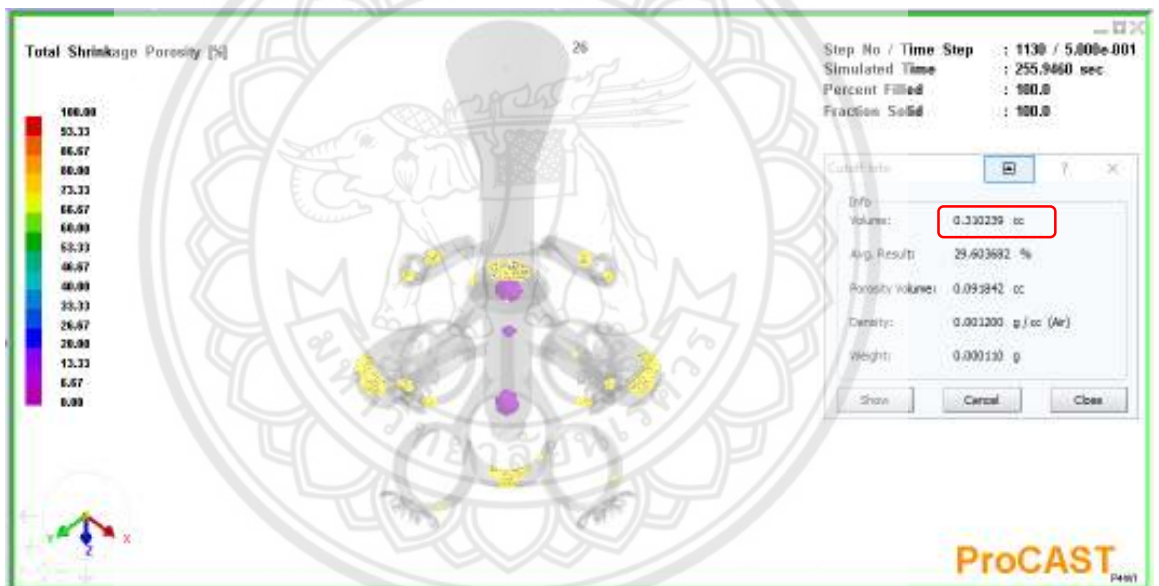
รูปที่ ค.23 แสดงผลการวิเคราะห์หาค่าของปริมาณรูพรุนของแหวนการรันที่ 23



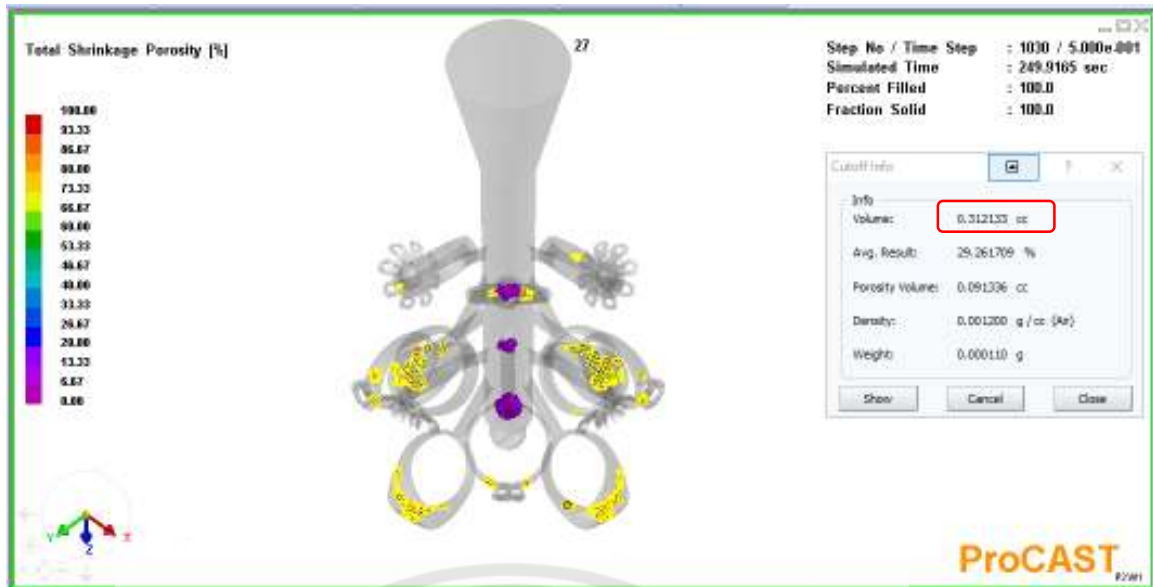
รูปที่ ค.24 แสดงผลการวิเคราะห์หาค่าของปริมาณรูพรุนของแหวนการรันที่ 24



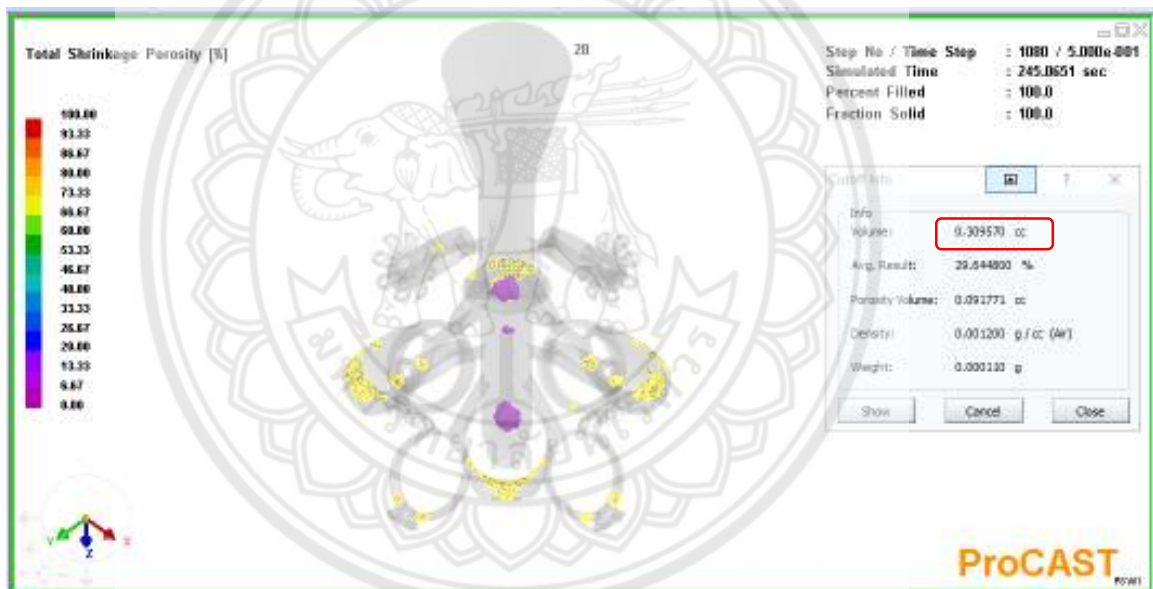
รูปที่ ค.25 แสดงผลการวิเคราะห์ค่าของปริมาณรูพรุนของแหวนการันที่ 25



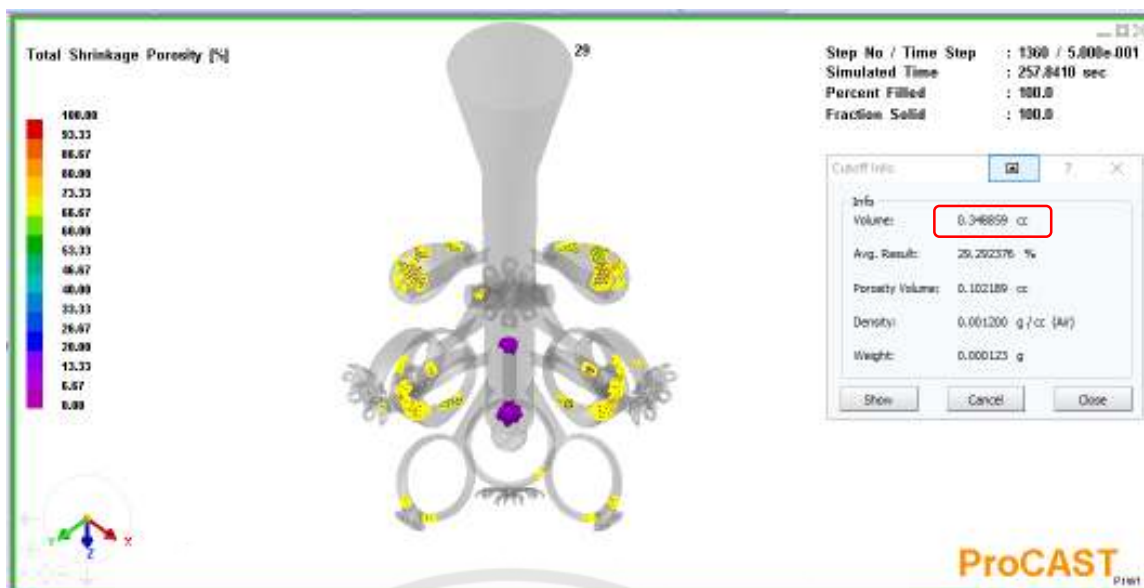
รูปที่ ค.26 แสดงผลการวิเคราะห์ค่าของปริมาณรูพรุนของแหวนการันที่ 26



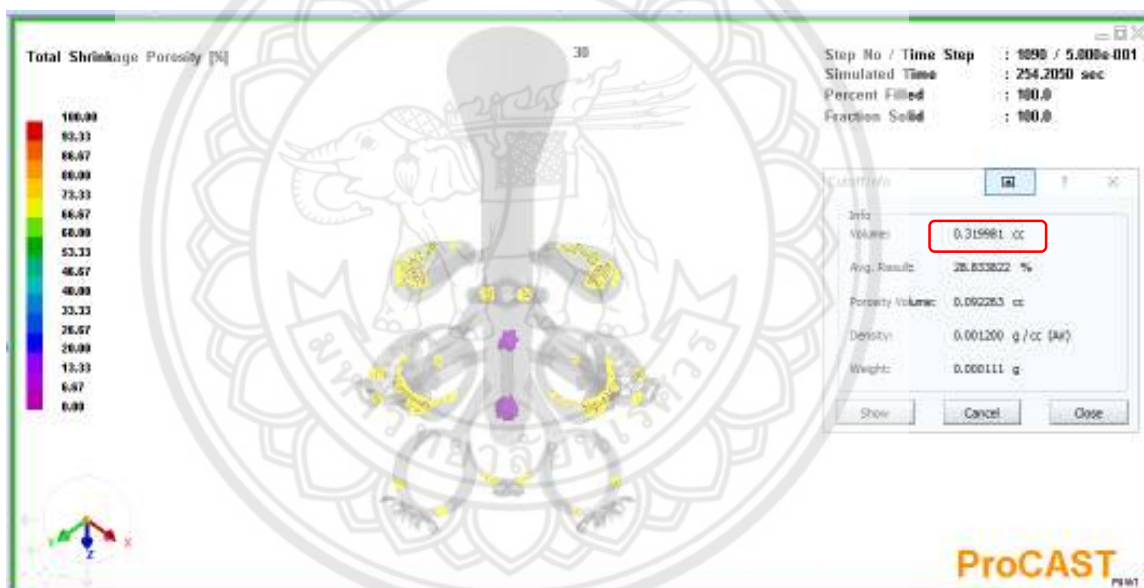
รูปที่ ค.27 แสดงผลการวิเคราะห์ค่าของปริมาณรูพรุนของแหวนการรันที่ 27



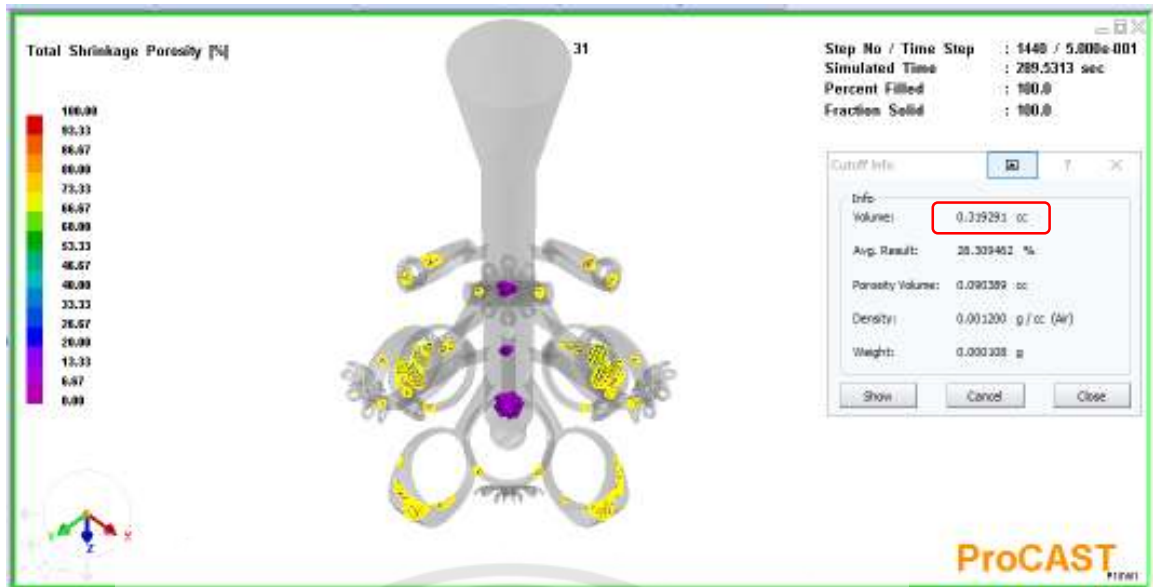
รูปที่ ค.28 แสดงผลการวิเคราะห์ค่าของปริมาณรูพรุนของแหวนการรันที่ 28



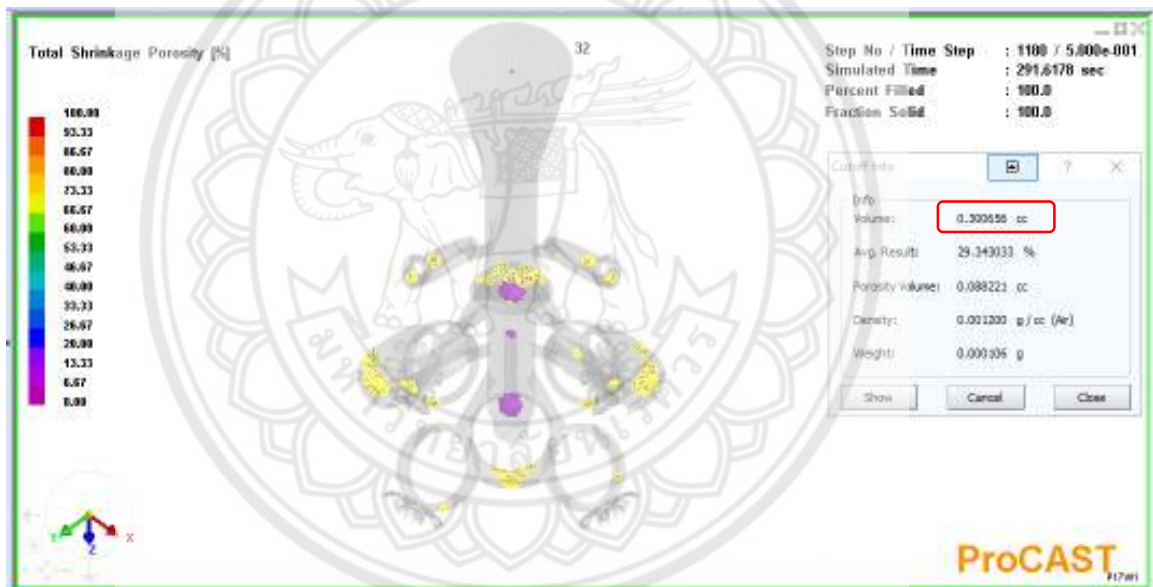
รูปที่ ค.29 แสดงผลการวิเคราะห์หาค่าของปริมาณรูพรุนของแหวนการรันที่ 29



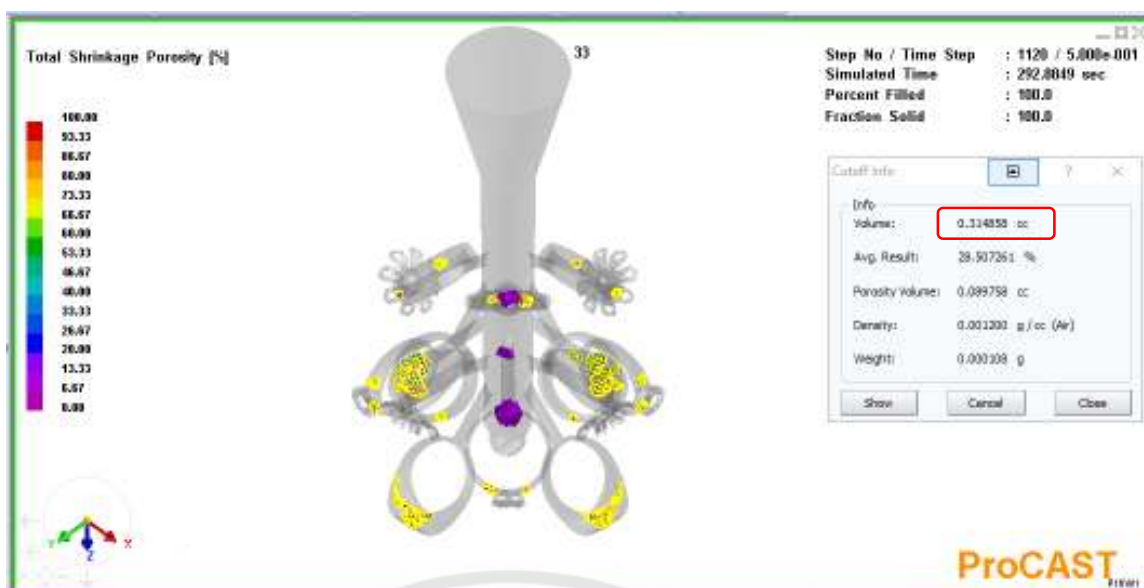
รูปที่ ค.30 แสดงผลการวิเคราะห์หาค่าของปริมาณรูพรุนของแหวนการรันที่ 30



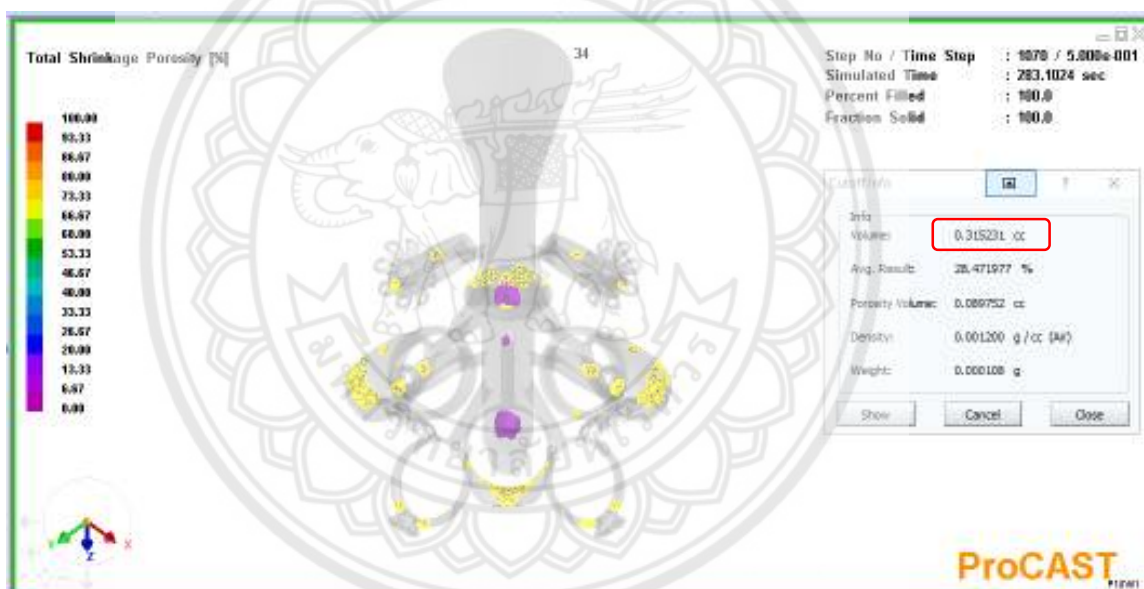
รูปที่ ค.31 แสดงผลการวิเคราะห์ค่าของปริมาณรูพรุนของแหวนการรันที่ 31



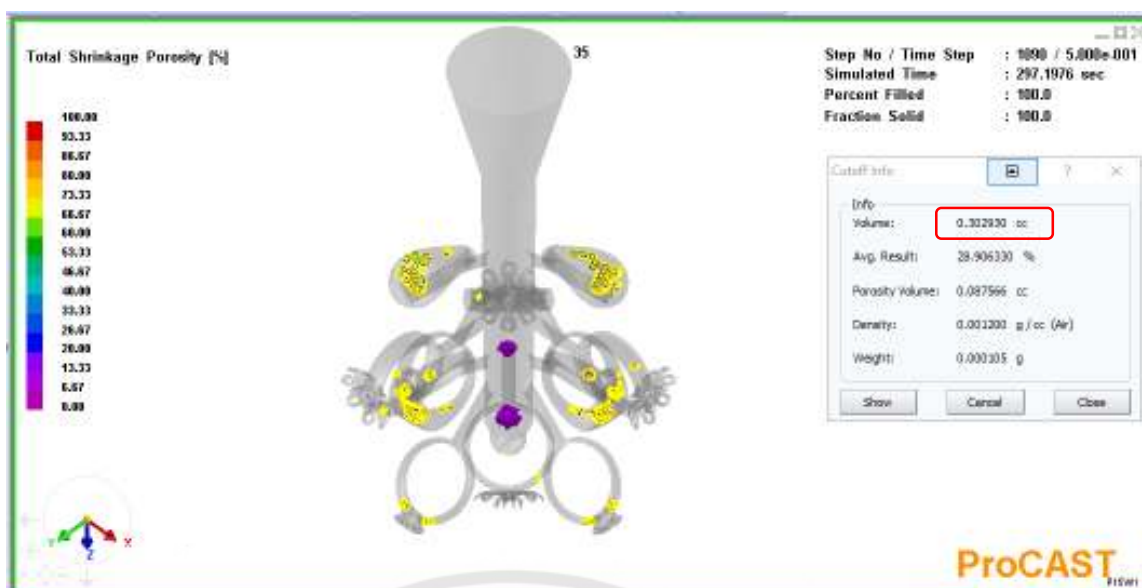
รูปที่ ค.32 แสดงผลการวิเคราะห์ค่าของปริมาณรูพรุนของแหวนการรันที่ 32



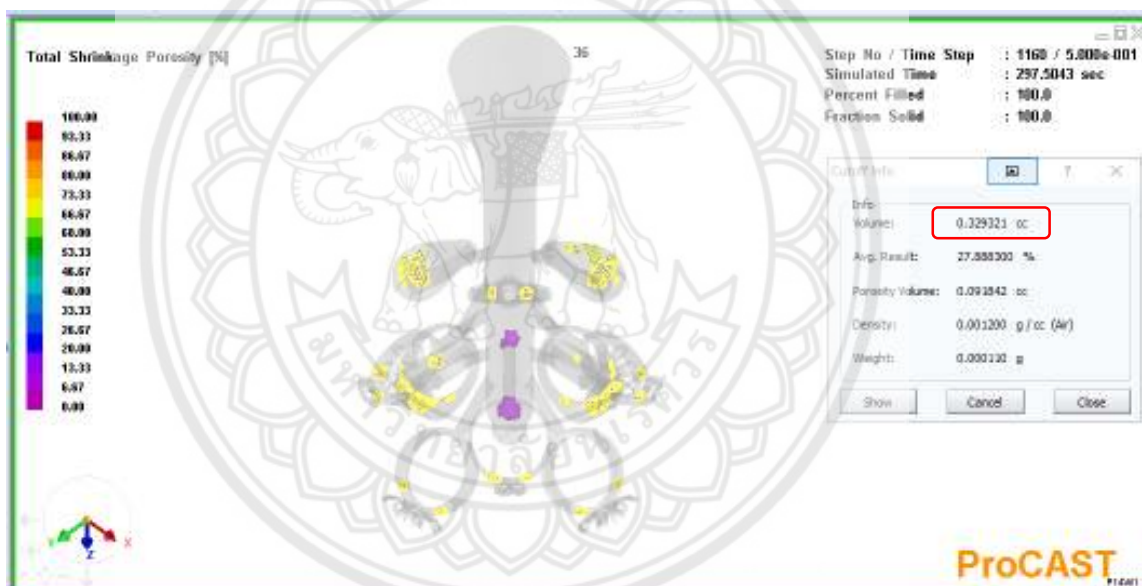
รูปที่ ค.33 แสดงผลการวิเคราะห์ค่าของปริมาณรูพรุนของแหวนการรันที่ 33



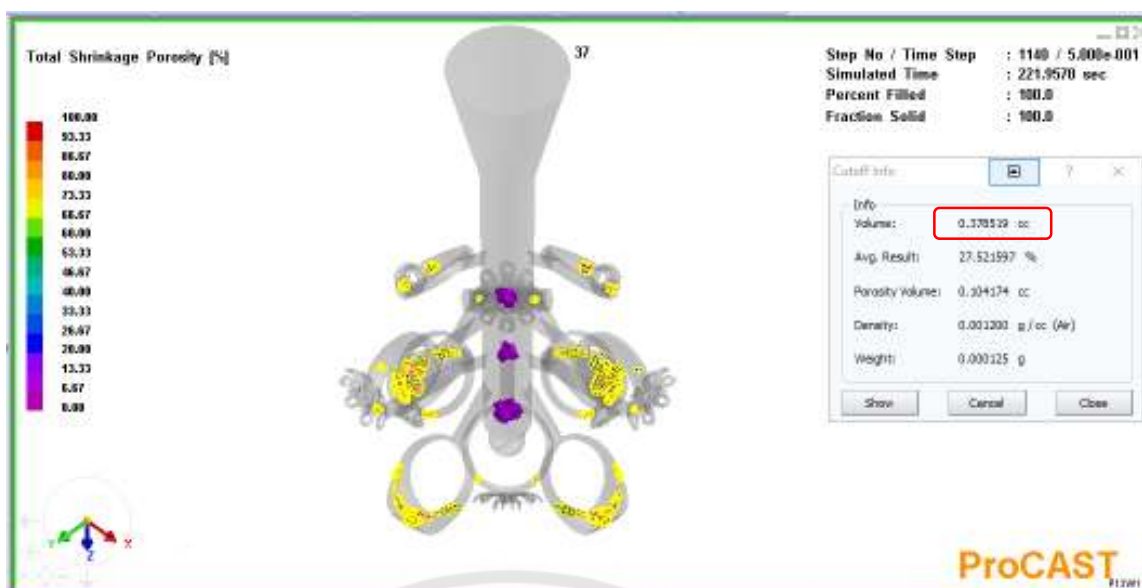
รูปที่ ค.34 แสดงผลการวิเคราะห์ค่าของปริมาณรูพรุนของแหวนการรันที่ 34



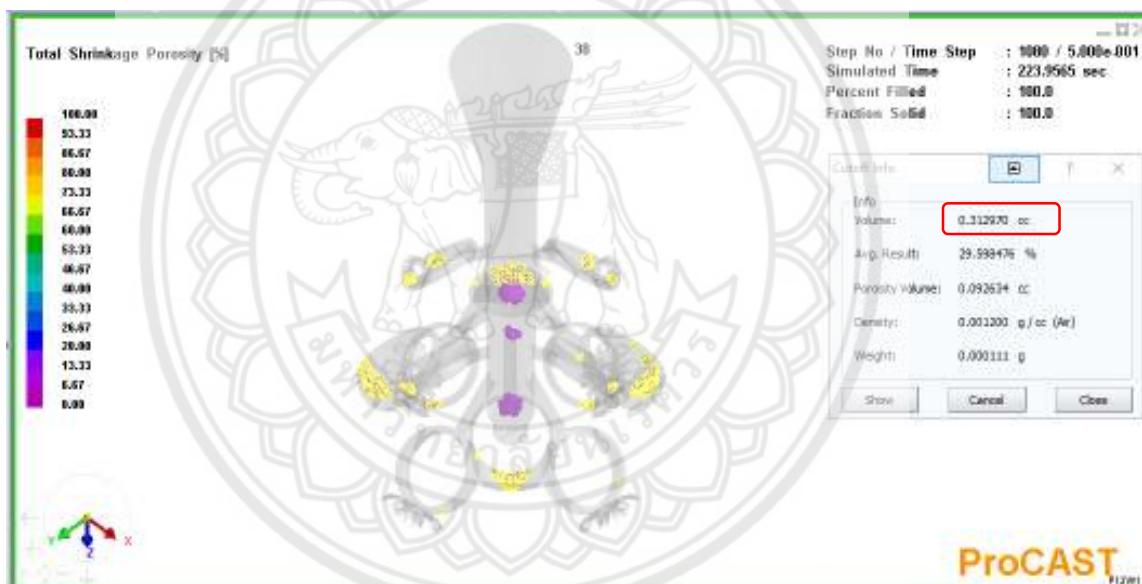
รูปที่ ค.35 แสดงผลการวิเคราะห์ค่าของปริมาณรูพรุนของแหวนการรันที่ 35



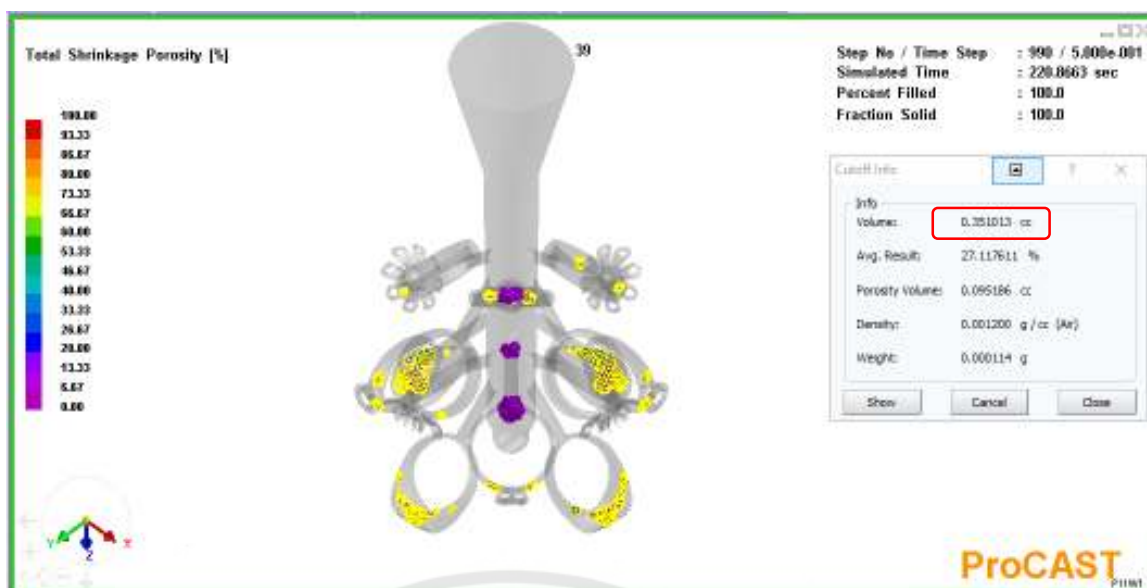
รูปที่ ค.36 แสดงผลการวิเคราะห์ค่าของปริมาณรูพรุนของแหวนการรันที่ 36



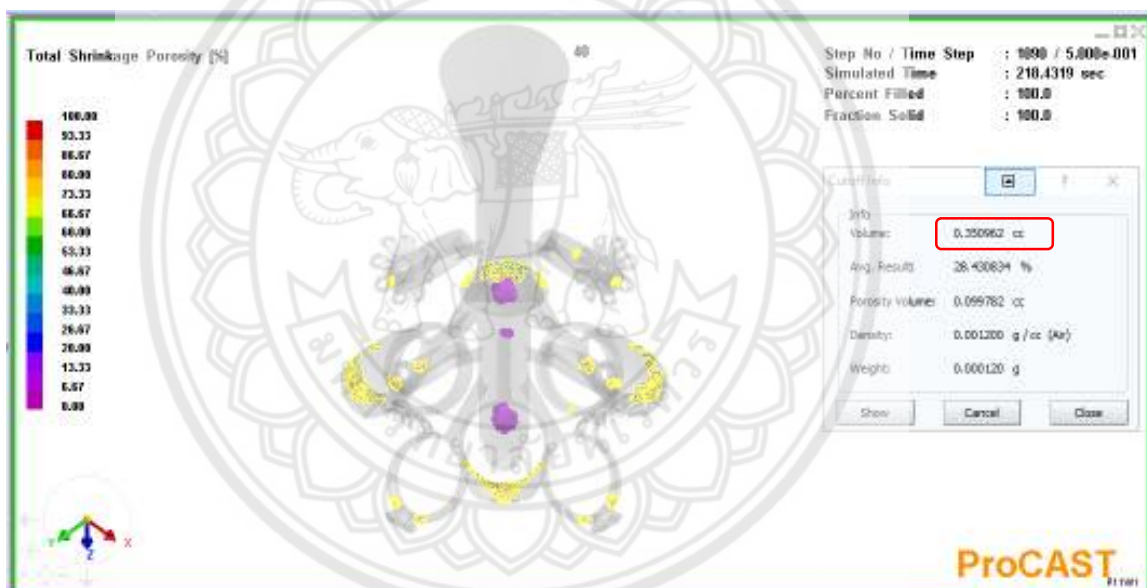
รูปที่ ค.37 แสดงผลการวิเคราะห์ค่าของปริมาณรูพรุนของแหวนการันที่ 37



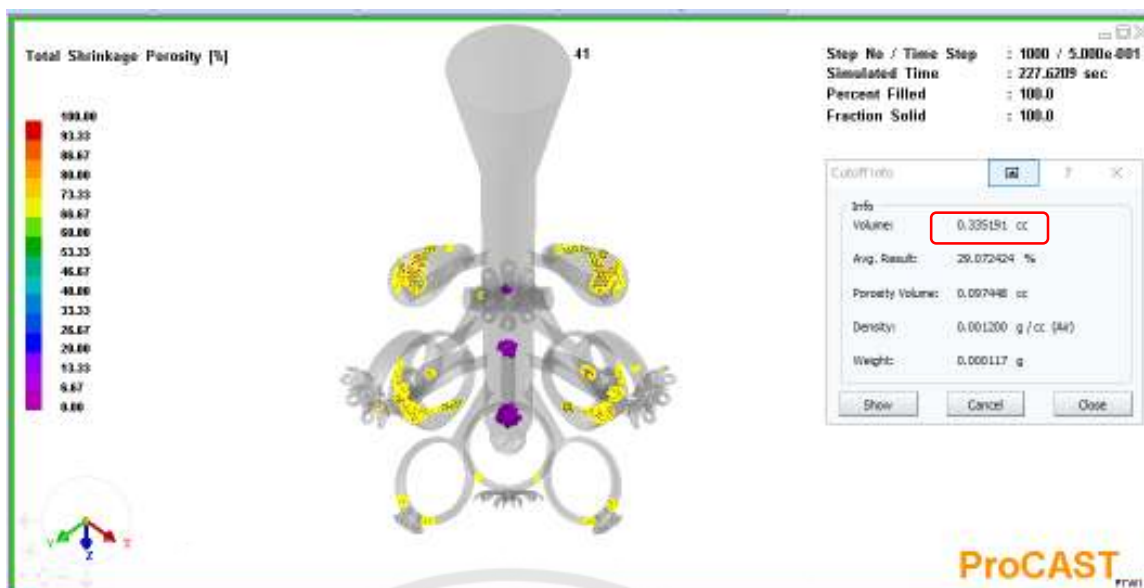
รูปที่ ค.38 แสดงผลการวิเคราะห์ค่าของปริมาณรูพรุนของแหวนการันที่ 38



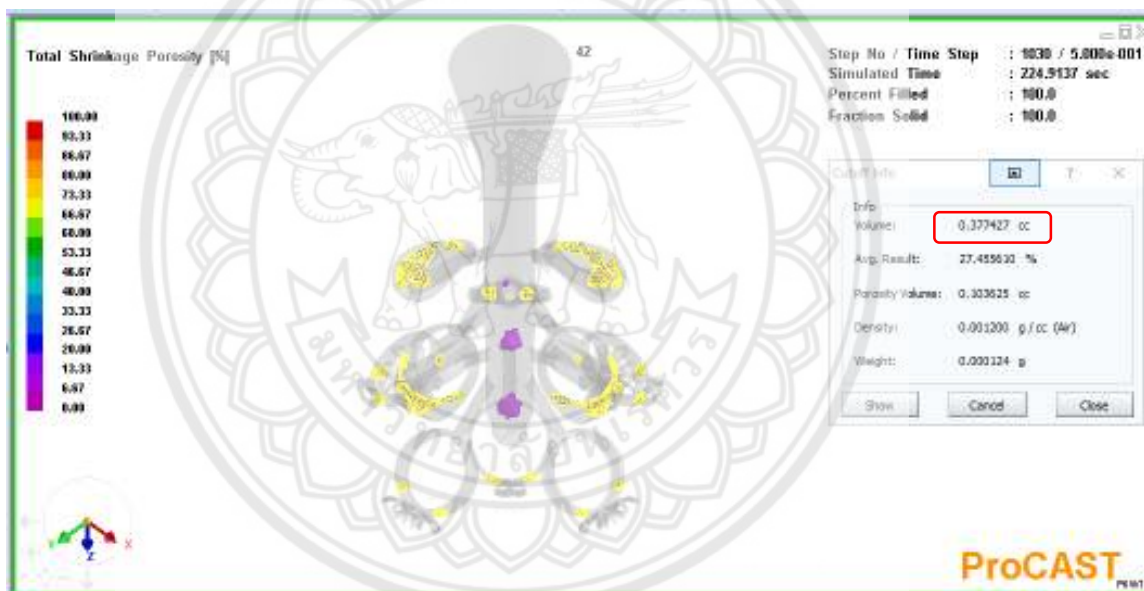
รูปที่ ค.39 แสดงผลการวิเคราะห์ค่าของปริมาณรูพรุนของแหวนการรันที่ 39



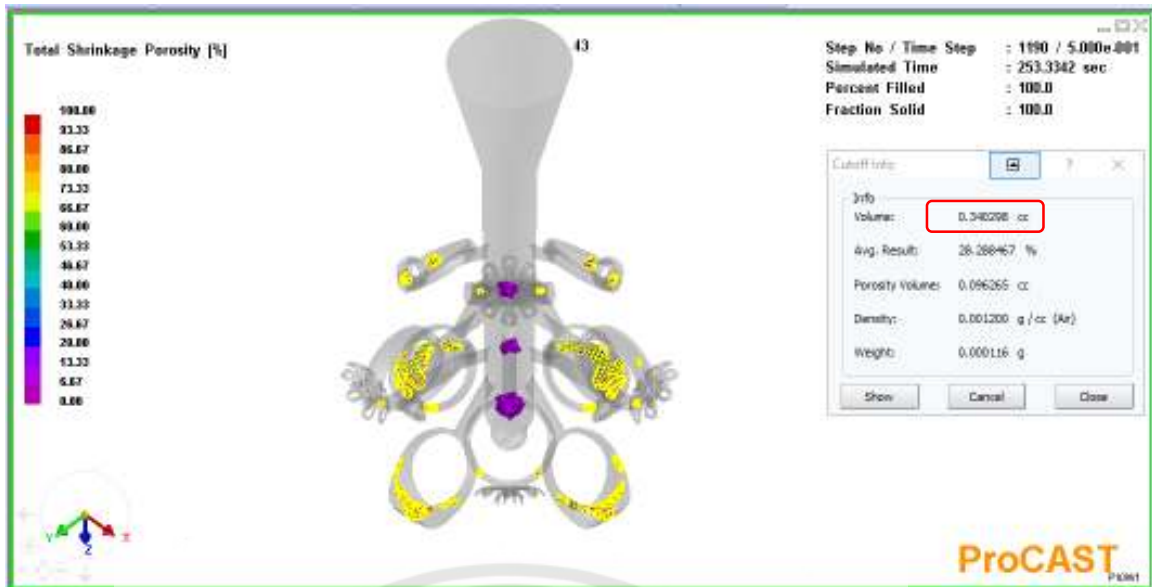
รูปที่ ค.40 แสดงผลการวิเคราะห์ค่าของปริมาณรูพรุนของแหวนการรันที่ 40



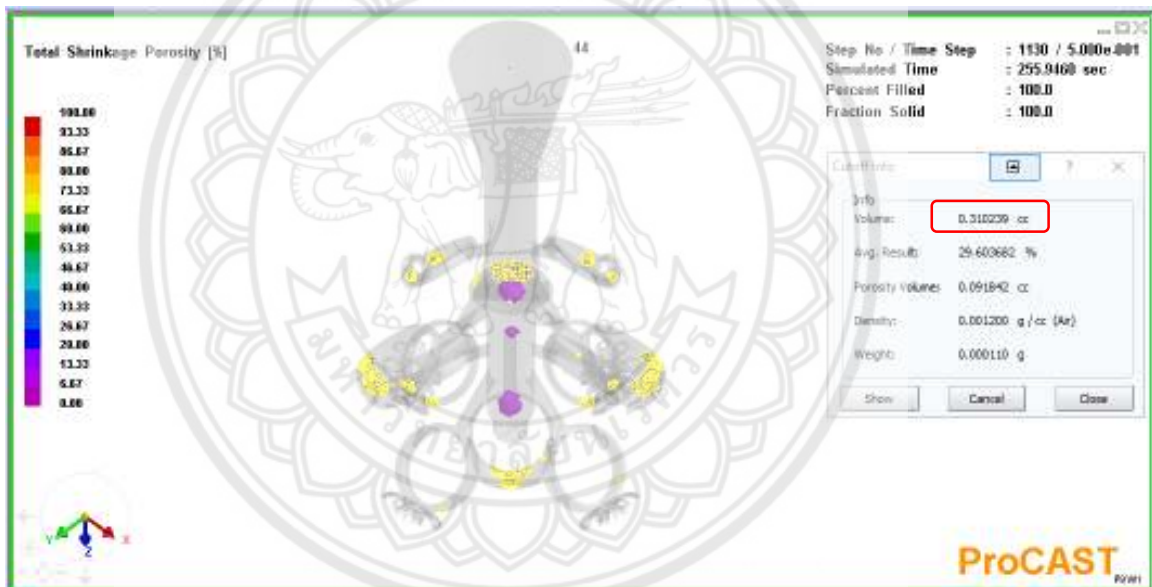
รูปที่ ค.41 แสดงผลการวิเคราะห์ค่าของปริมาณรูพรุนของแหวนการรันที่ 41



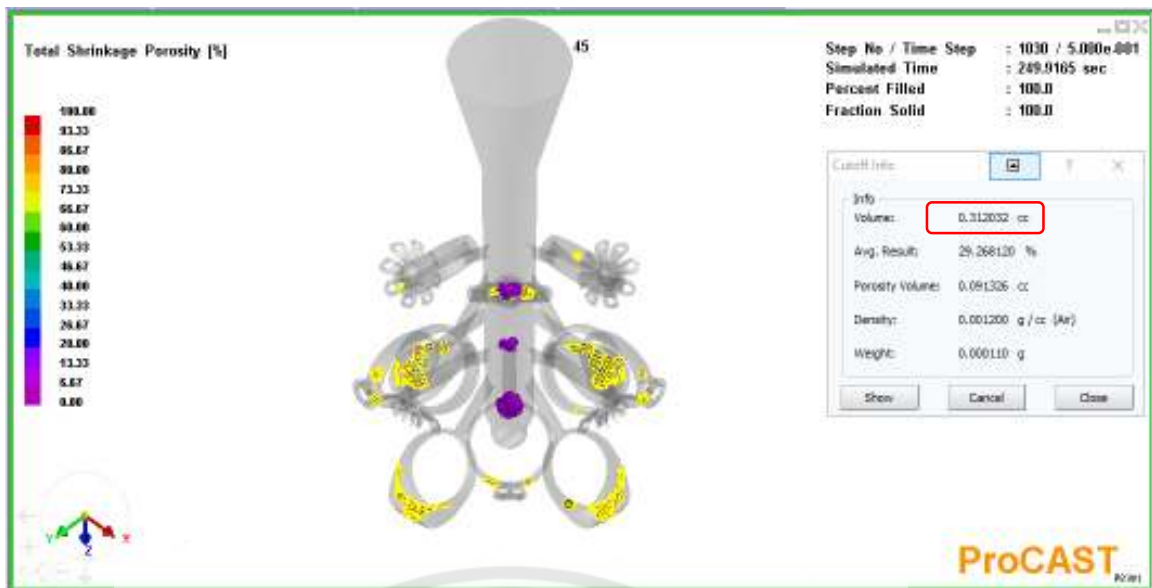
รูปที่ ค.42 แสดงผลการวิเคราะห์ค่าของปริมาณรูพรุนของแหวนการรันที่ 42



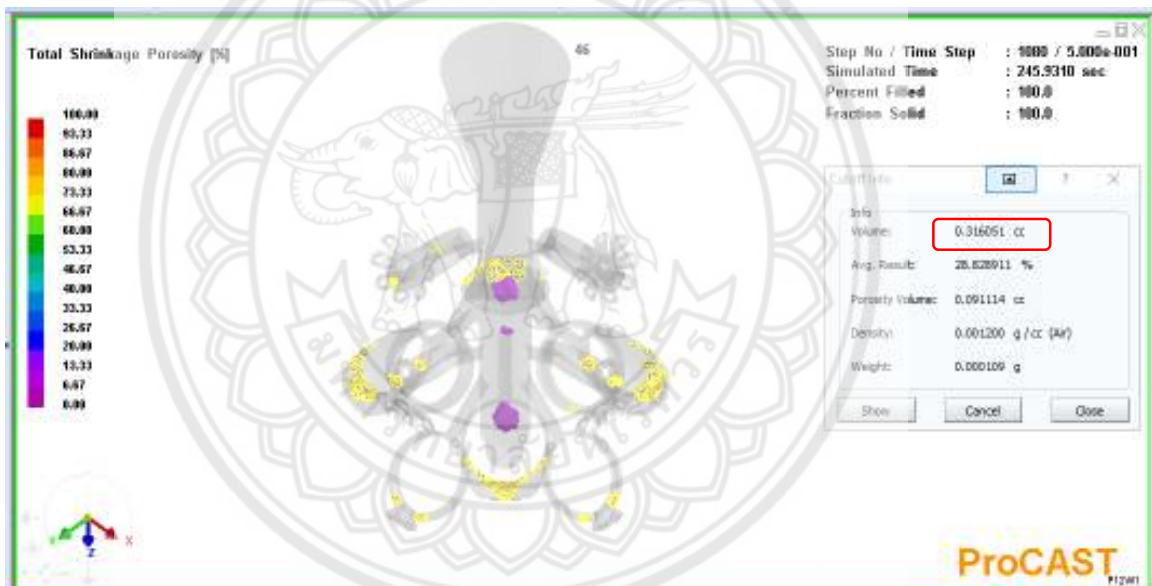
รูปที่ ค.43 แสดงผลการวิเคราะห์ค่าของปริมาณรูพรุนของแหวนการรันที่ 43



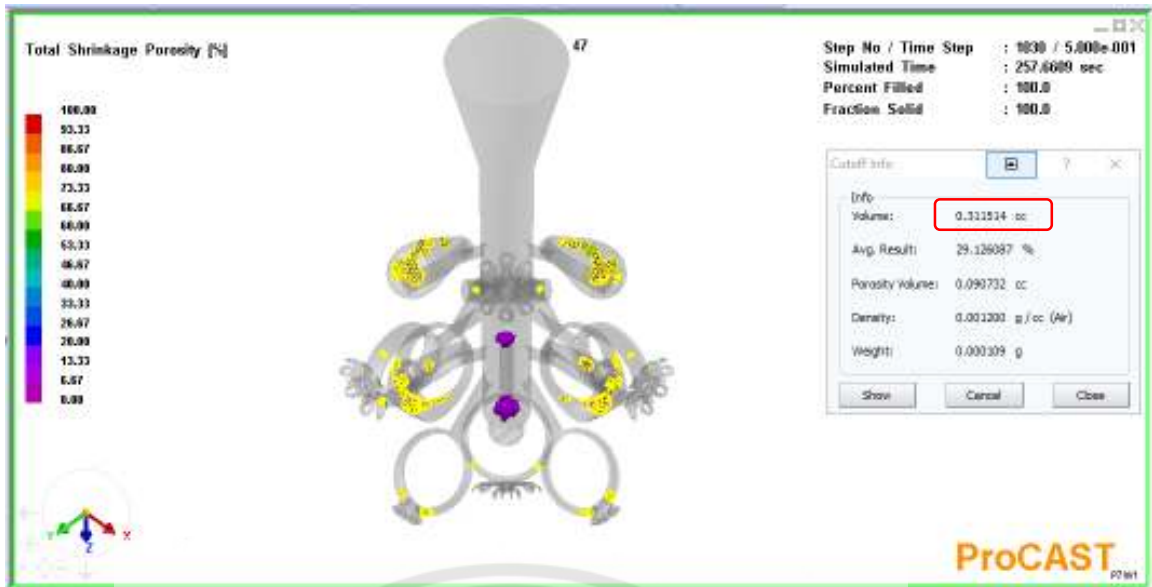
รูปที่ ค.44 แสดงผลการวิเคราะห์ค่าของปริมาณรูพรุนของแหวนการรันที่ 44



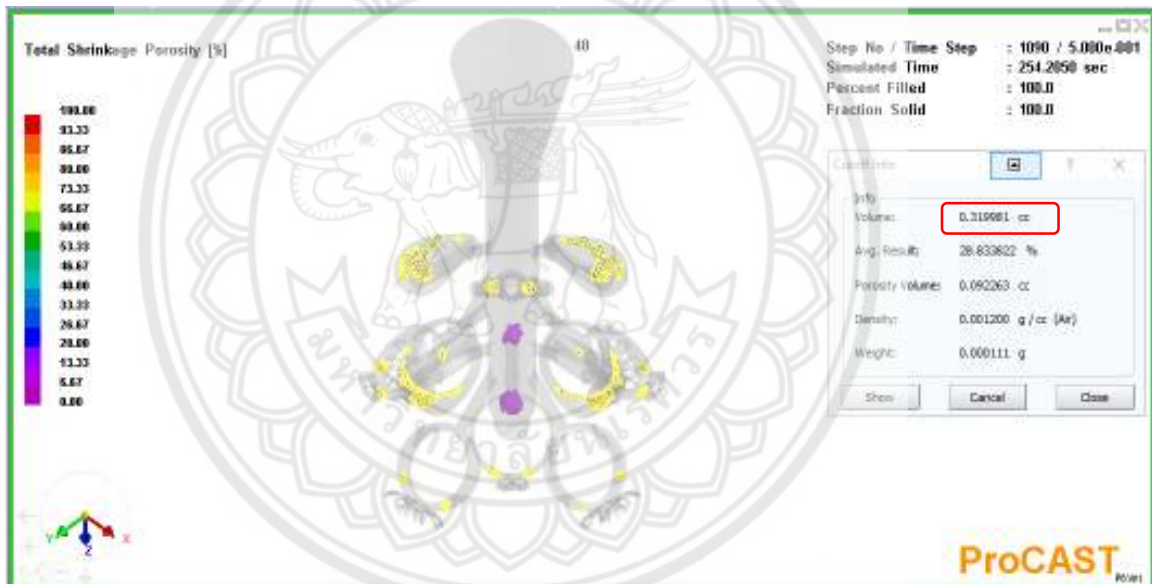
รูปที่ ค.45 แสดงผลการวิเคราะห์ค่าของปริมาณรูพรุนของแหวนการรันที่ 45



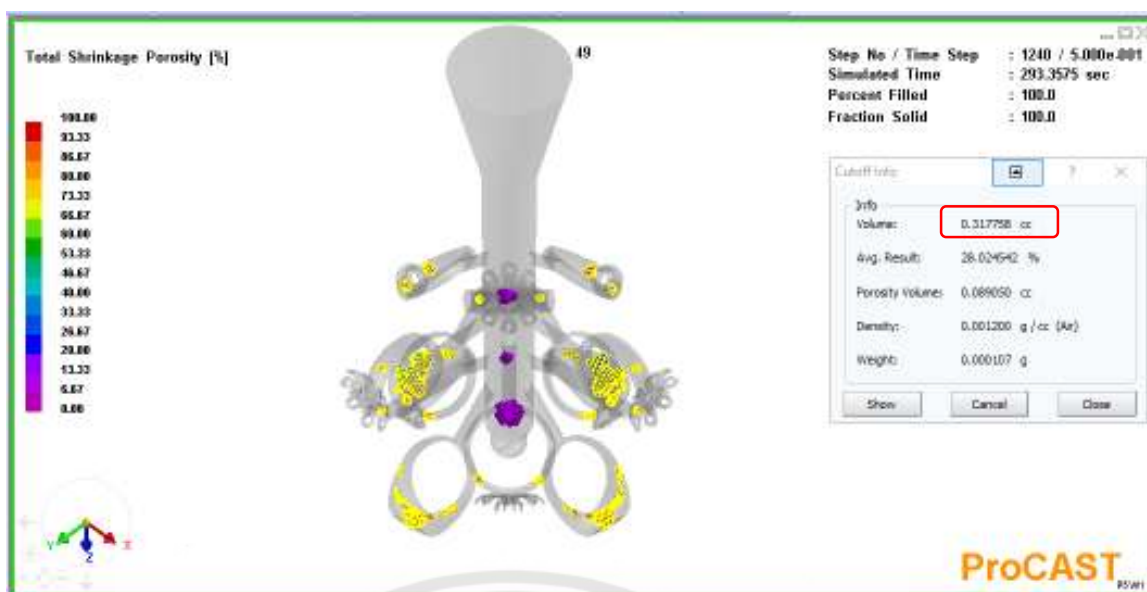
รูปที่ ค.46 แสดงผลการวิเคราะห์ค่าของปริมาณรูพรุนของแหวนการรันที่ 46



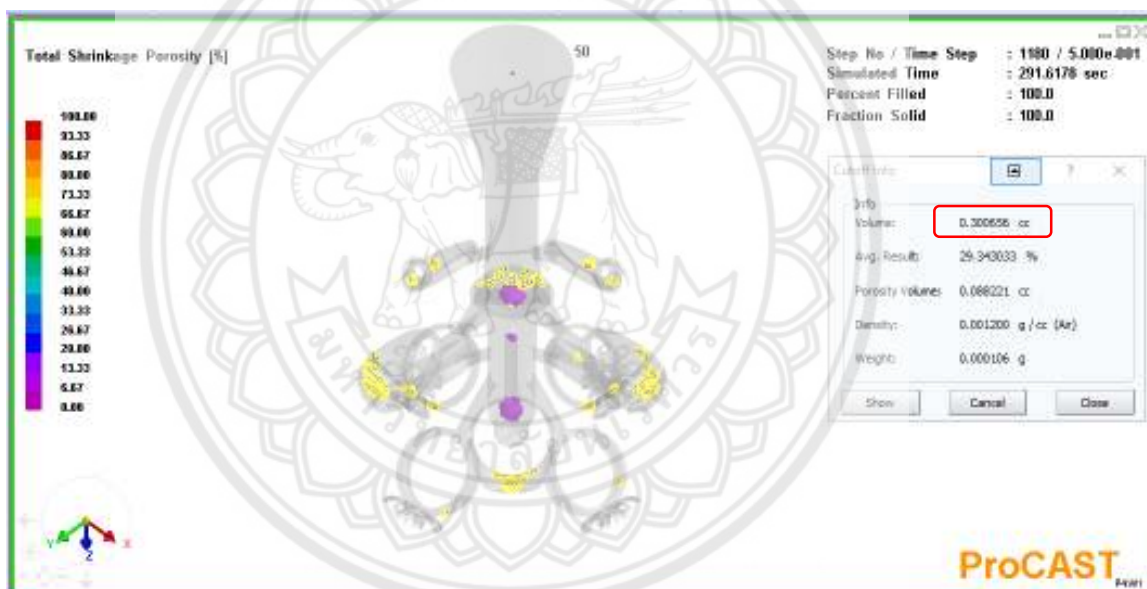
รูปที่ ค.47 แสดงผลการวิเคราะห์ค่าของปริมาณรูพรุนของแหวนการรันที่ 47



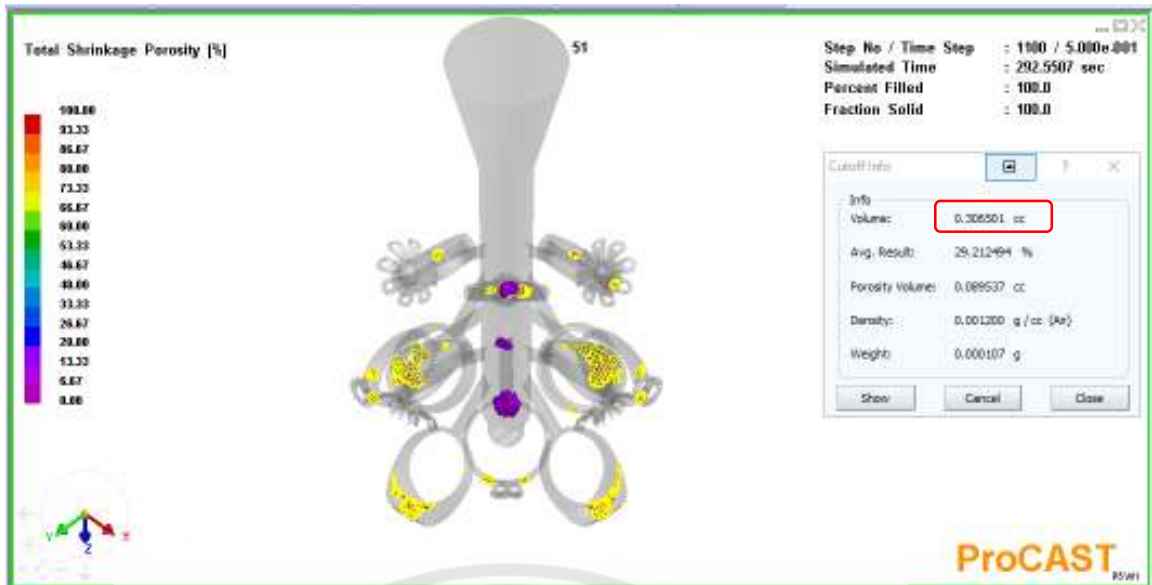
รูปที่ ค.48 แสดงผลการวิเคราะห์ค่าของปริมาณรูพรุนของแหวนการรันที่ 48



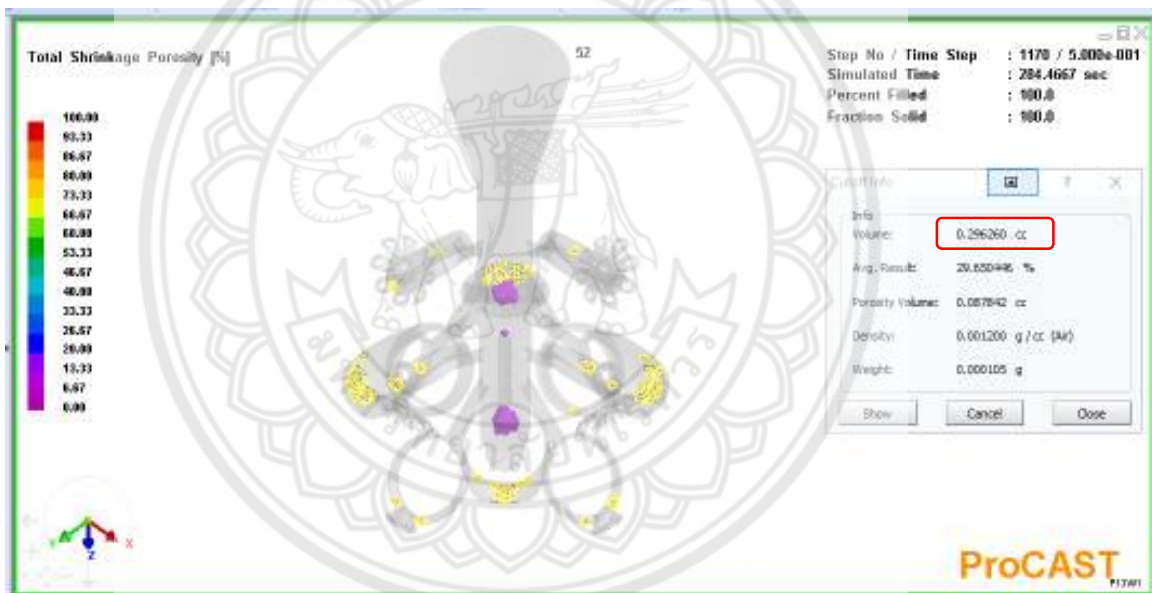
รูปที่ ค.49 แสดงผลการวิเคราะห์หาค่าของปริมาณรูพรุนของแหวนการรันที่ 49



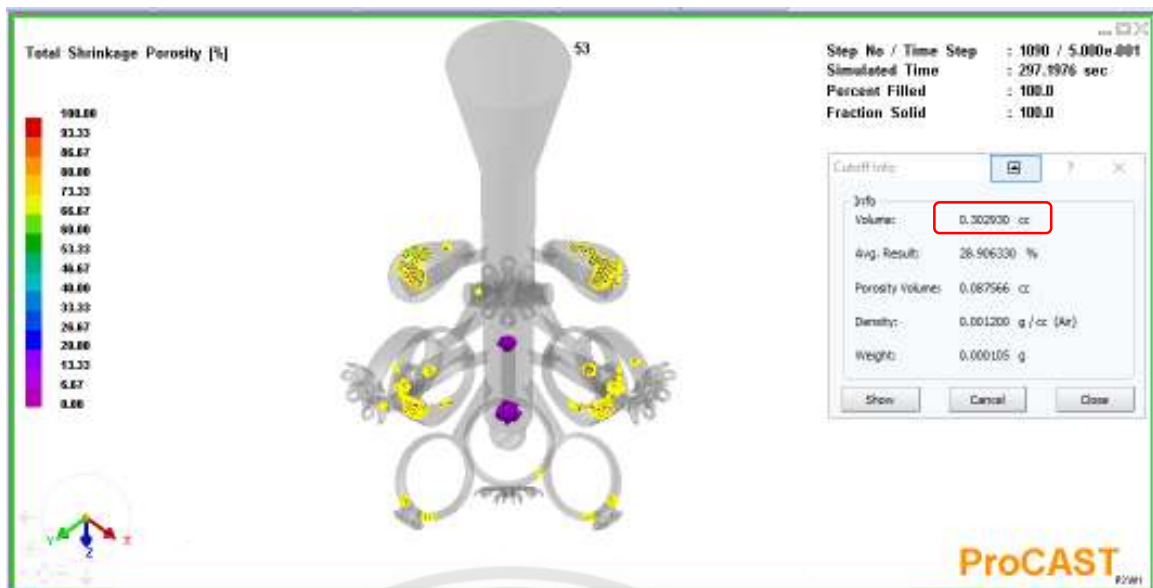
รูปที่ ค.50 แสดงผลการวิเคราะห์หาค่าของปริมาณรูพรุนของแหวนการรันที่ 50



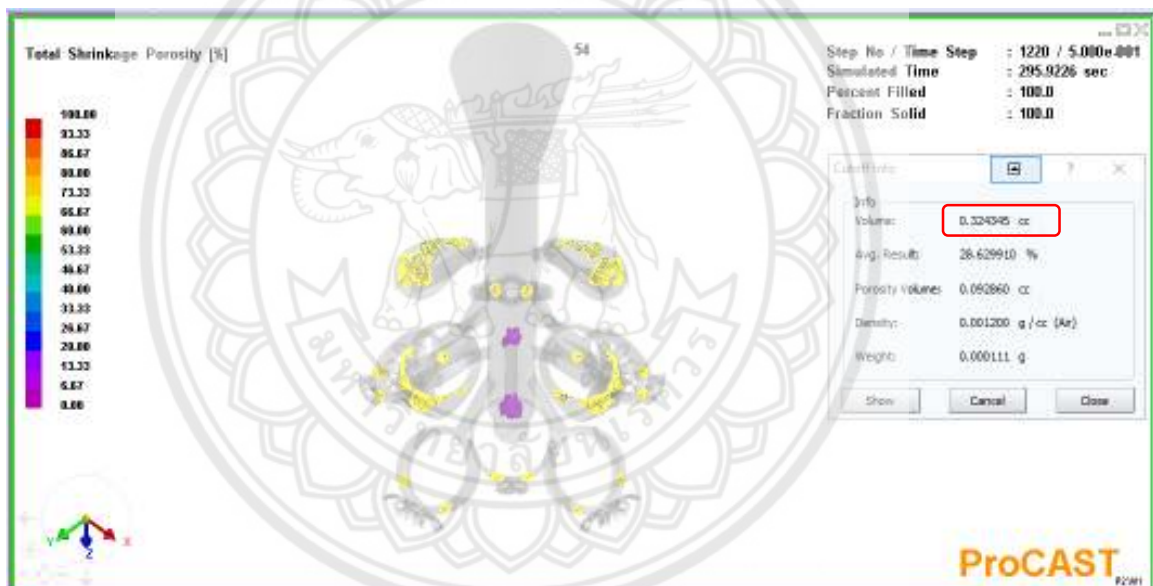
รูปที่ ค.51 แสดงผลการวิเคราะห์ค่าของปริมาณรูพรุนของแหวนการรันที่ 51



รูปที่ ค.52 แสดงผลการวิเคราะห์ค่าของปริมาณรูพรุนของแหวนการรันที่ 52

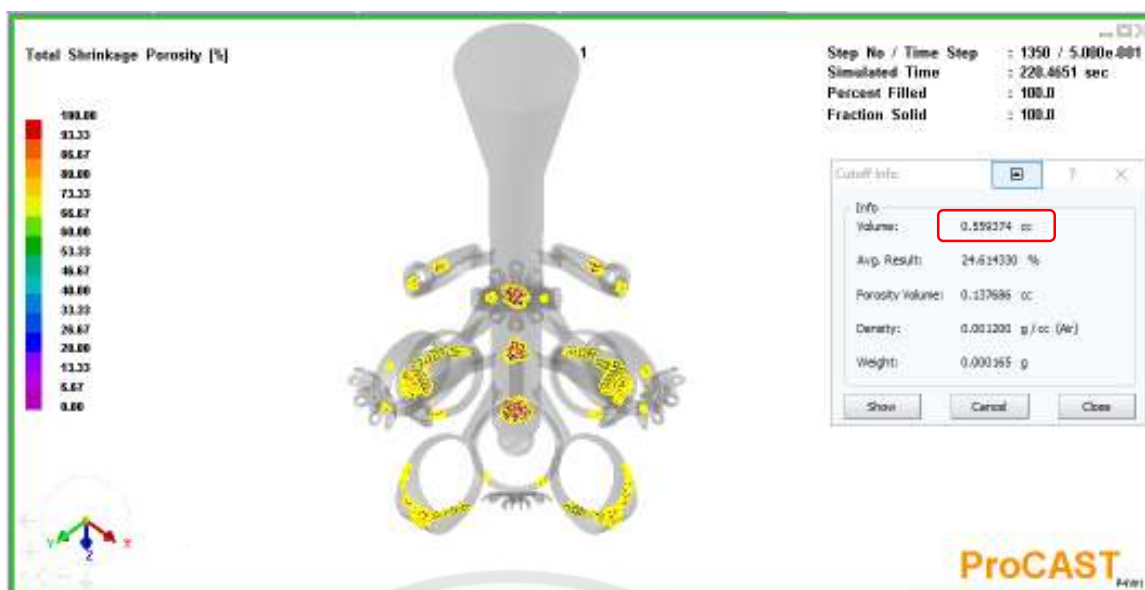


รูปที่ ค.53 แสดงผลการวิเคราะห์ค่าของปริมาณรูพรุนของแหวนการรันที่ 53

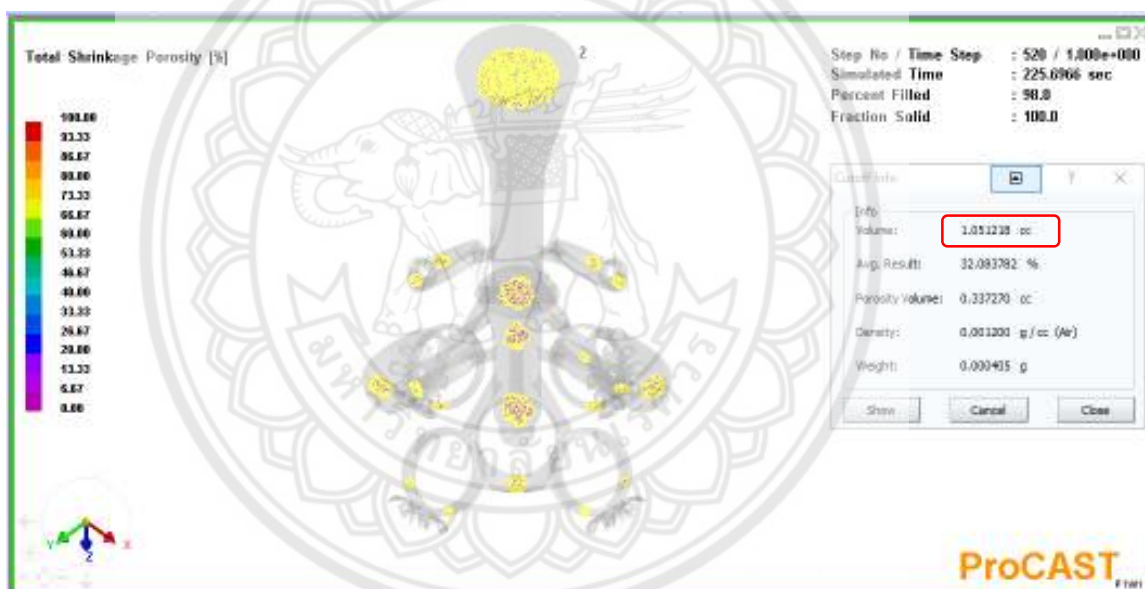


รูปที่ ค.54 แสดงผลการวิเคราะห์ค่าของปริมาณรูพรุนของแหวนการรันที่ 54

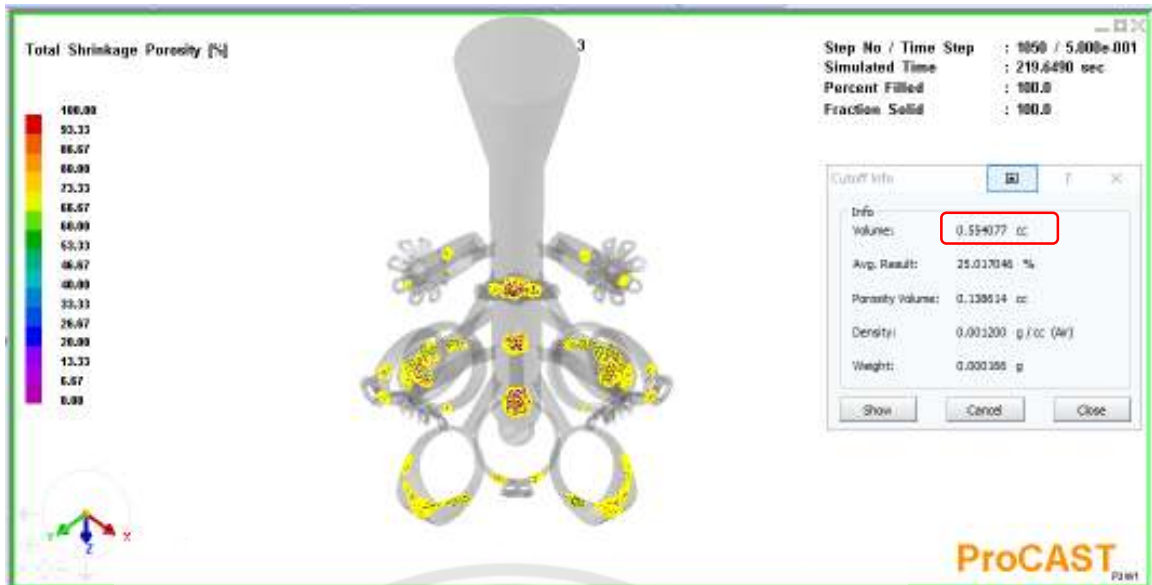




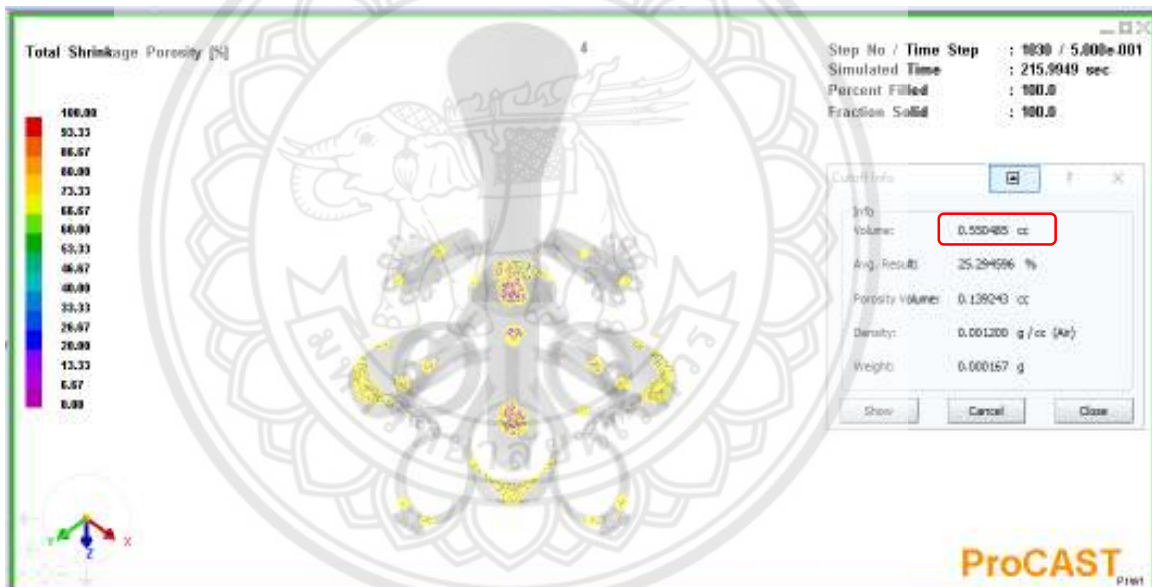
รูปที่ จ.1 แสดงผลการวิเคราะห์ค่าผลรวมของปริมาณรูพรุนการรันที่ 1



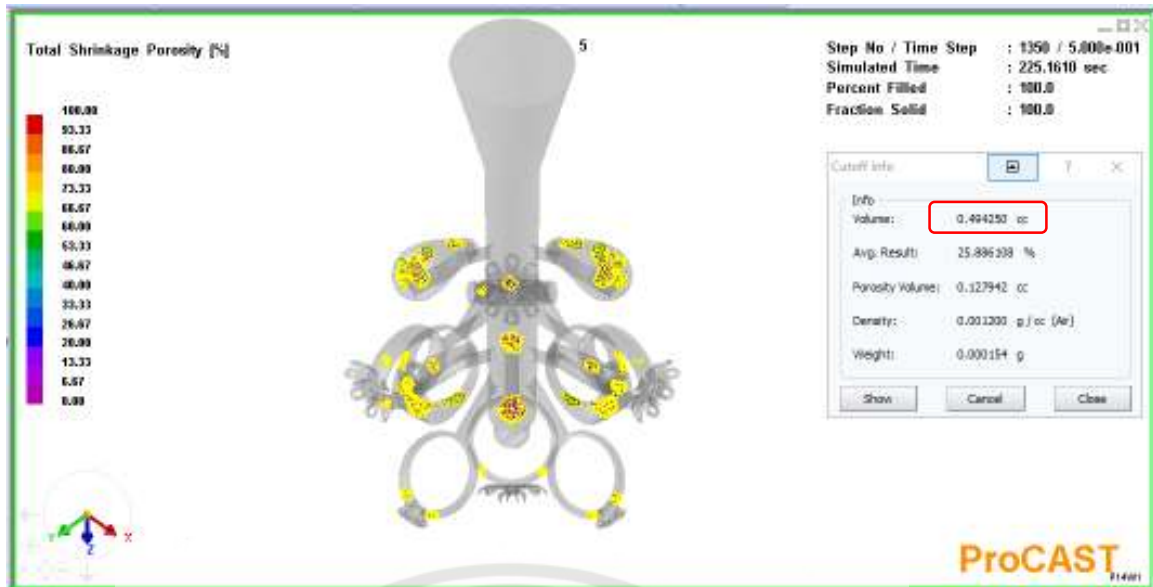
รูปที่ จ.2 แสดงผลการวิเคราะห์ค่าผลรวมของปริมาณรูพรุนการรันที่ 2



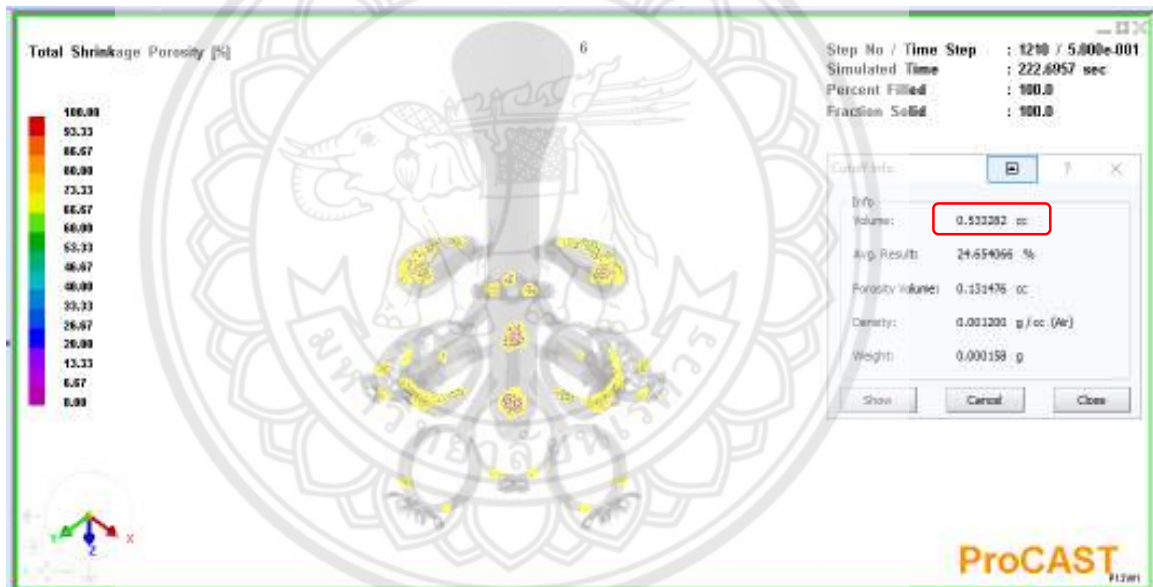
รูปที่ จ.3 แสดงผลการวิเคราะห์ค่าผลรวมของปริมาณรูพรุนการรันที่ 3



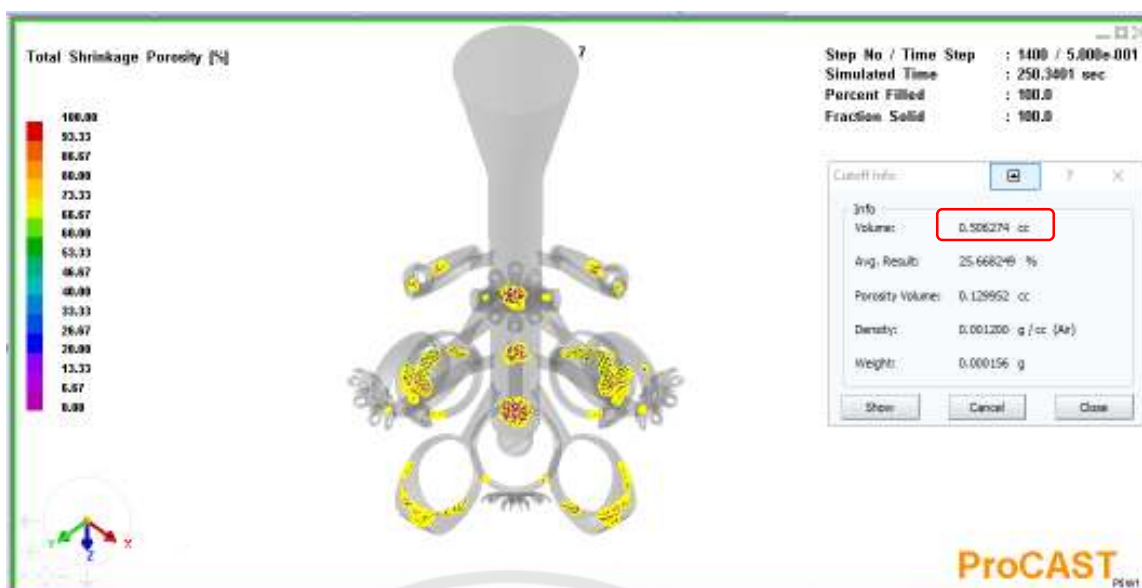
รูปที่ จ.4 แสดงผลการวิเคราะห์ค่าผลรวมของปริมาณรูพรุนการรันที่ 4



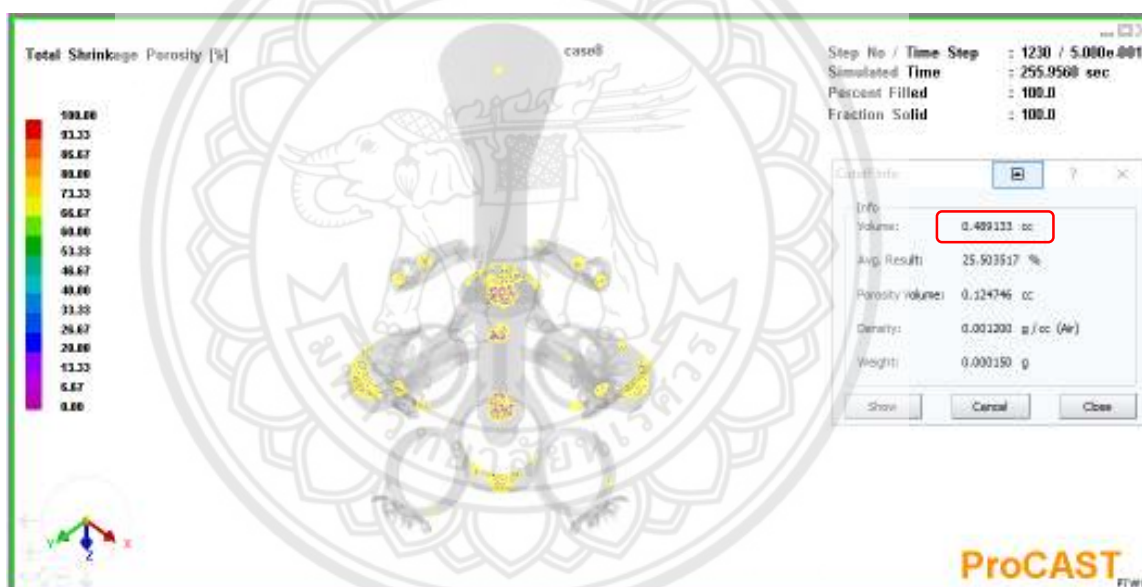
รูปที่ จ.5 แสดงผลการวิเคราะห์ค่าผลรวมของปริมาณรูพรุนการรันที่ 5



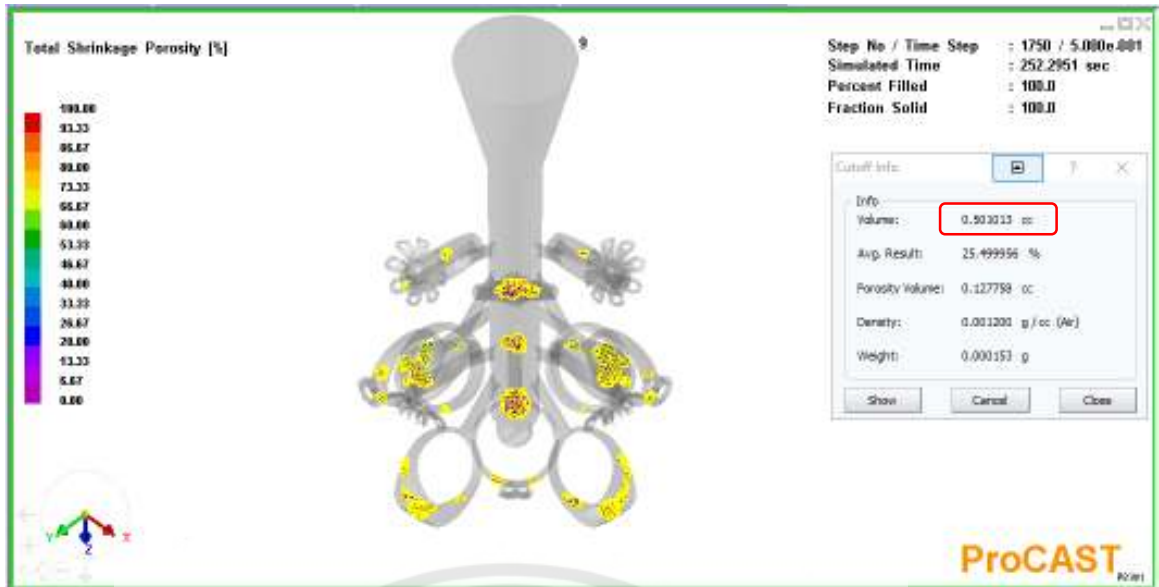
รูปที่ จ.6 แสดงผลการวิเคราะห์ค่าผลรวมของปริมาณรูพรุนการรันที่ 6



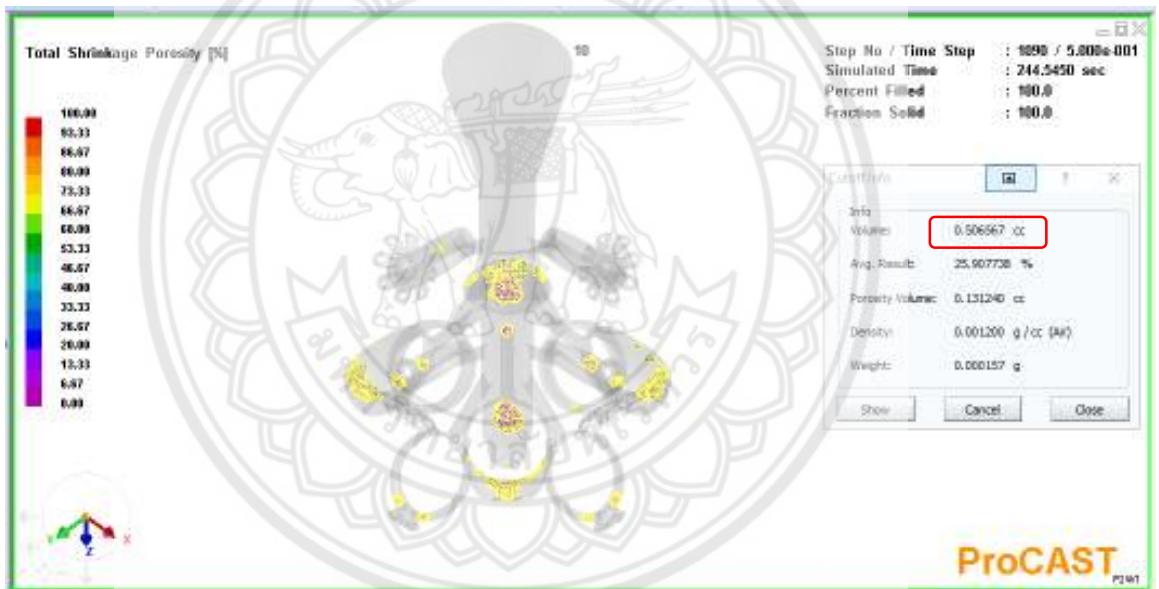
รูปที่ จ.7 แสดงผลการวิเคราะห์หาค่าผลรวมของปริมาณรูพรุนการรันที่ 7



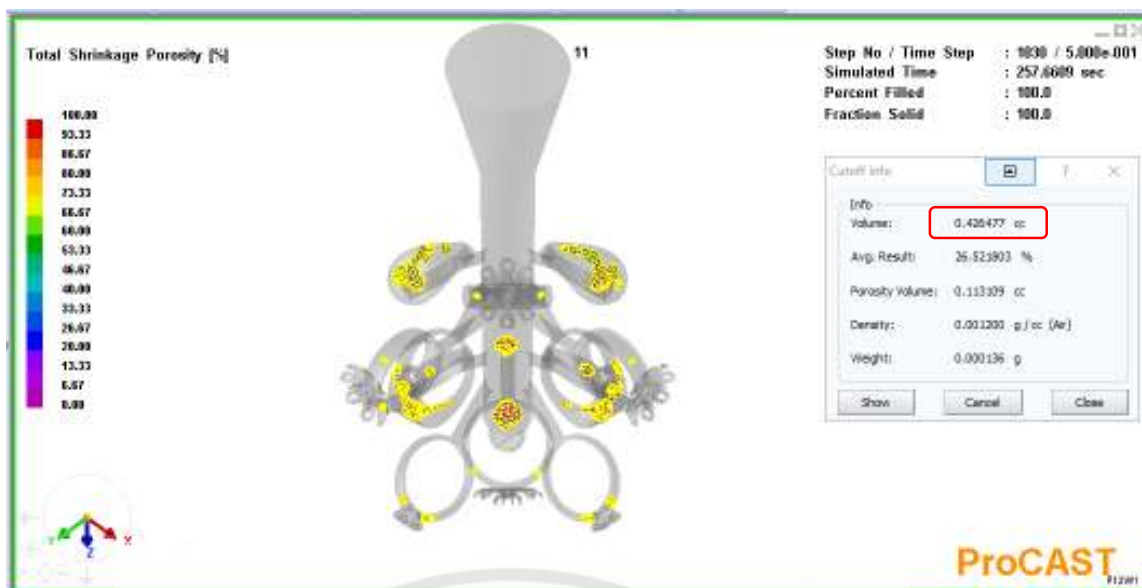
รูปที่ จ.8 แสดงผลการวิเคราะห์หาค่าผลรวมของปริมาณรูพรุนการรันที่ 8



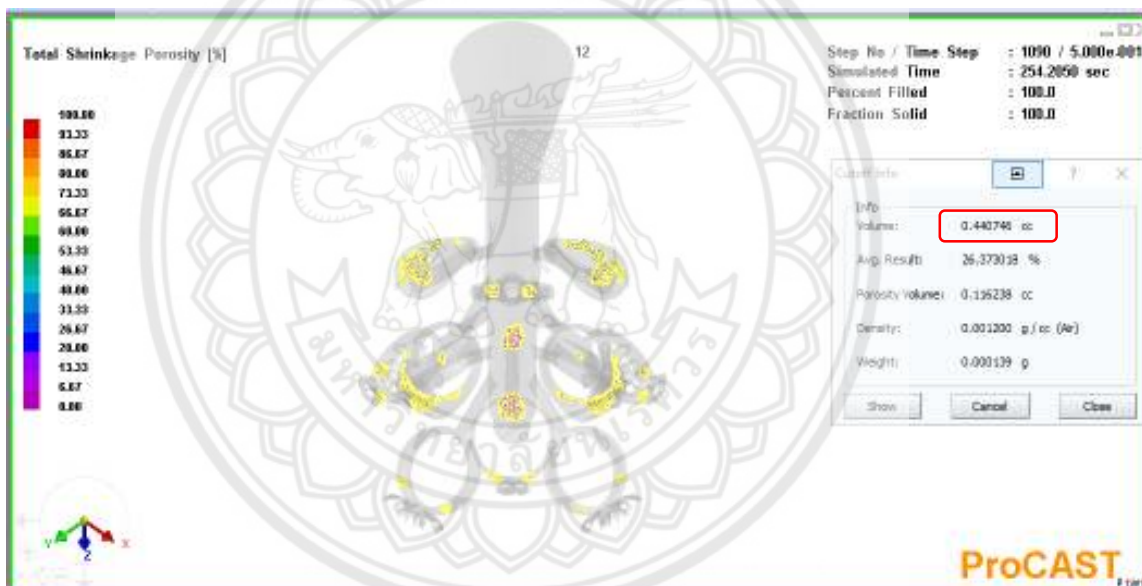
รูปที่ จ.9 แสดงผลการวิเคราะห์หาค่าผลรวมของปริมาณรูพรุนการรันที่ 9



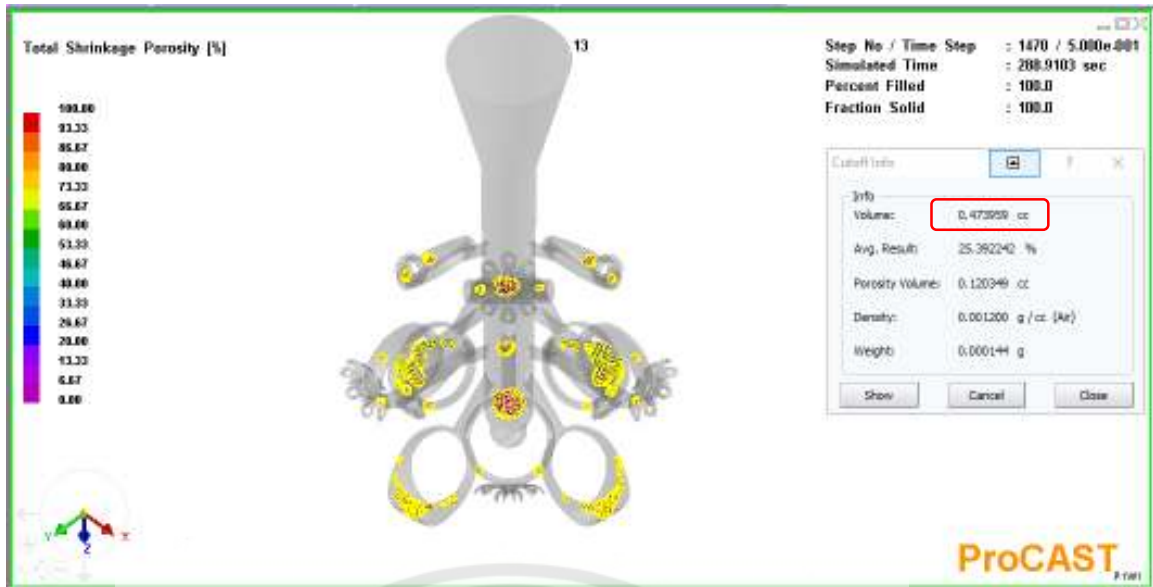
รูปที่ จ.10 แสดงผลการวิเคราะห์หาค่าผลรวมของปริมาณรูพรุนการรันที่ 10



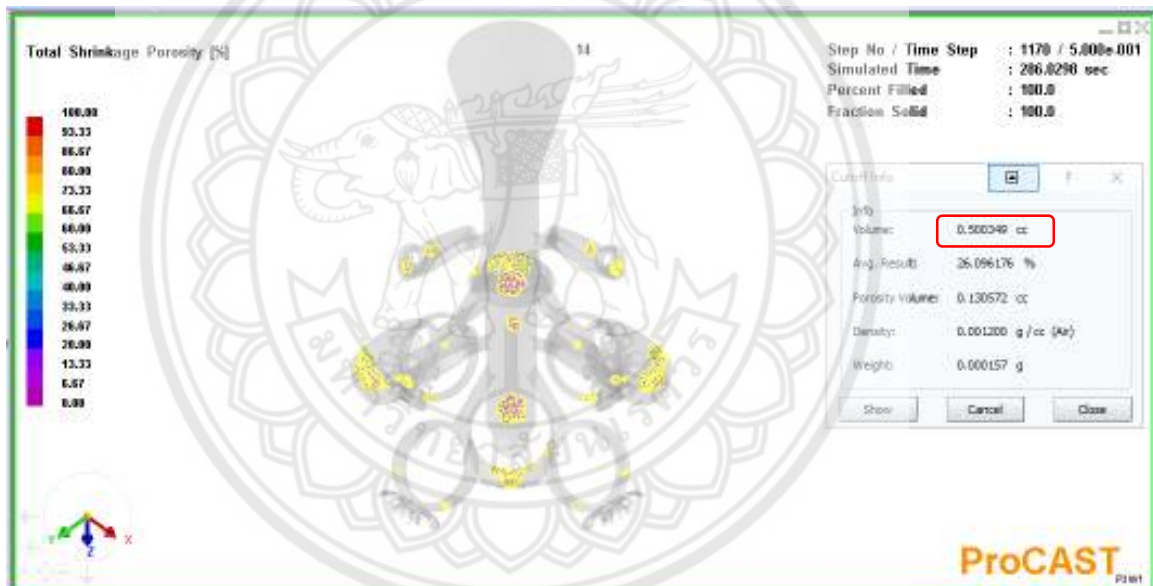
รูปที่ จ.11 แสดงผลการวิเคราะห์ค่าผลรวมของปริมาณรูพรุนการรันที่ 11



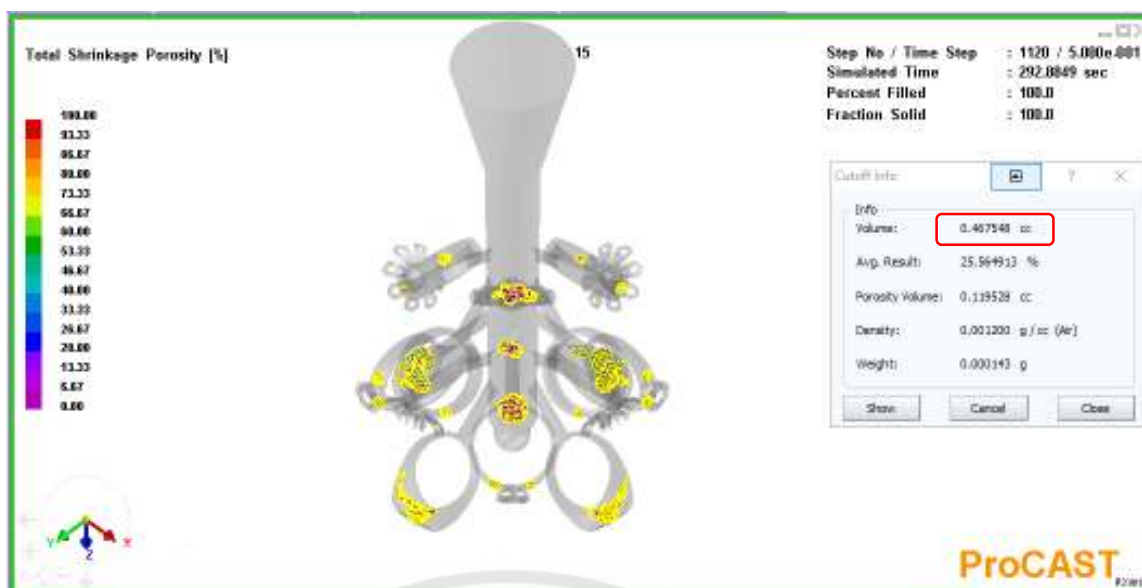
รูปที่ จ.12 แสดงผลการวิเคราะห์ค่าผลรวมของปริมาณรูพรุนการรันที่ 12



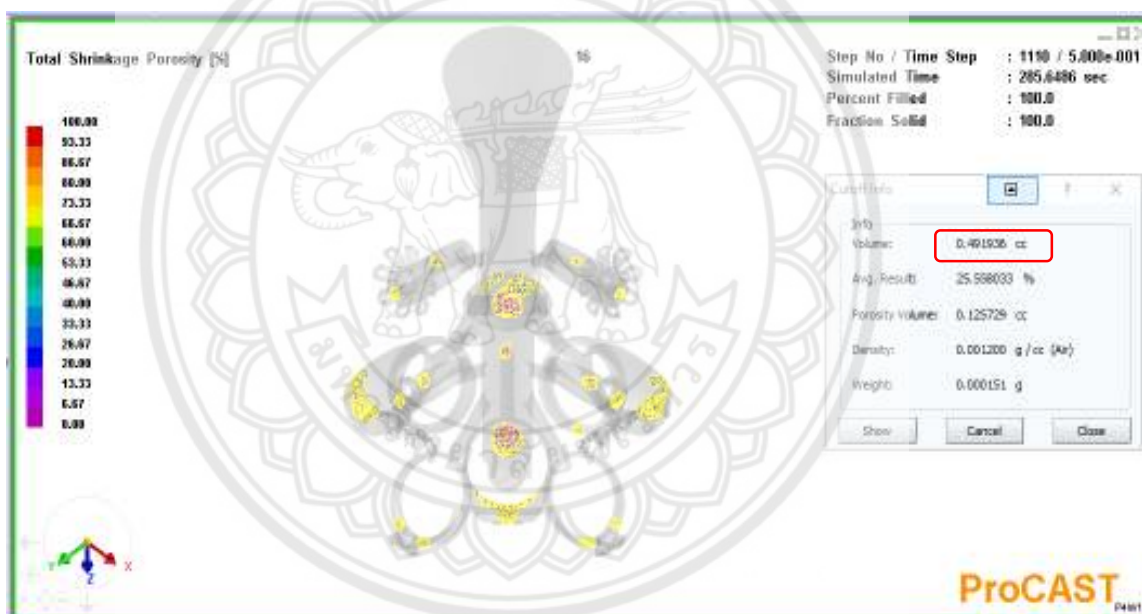
รูปที่ จ.13 แสดงผลการวิเคราะห์ค่าผลรวมของปริมาณรูพรุนการรันที่ 13



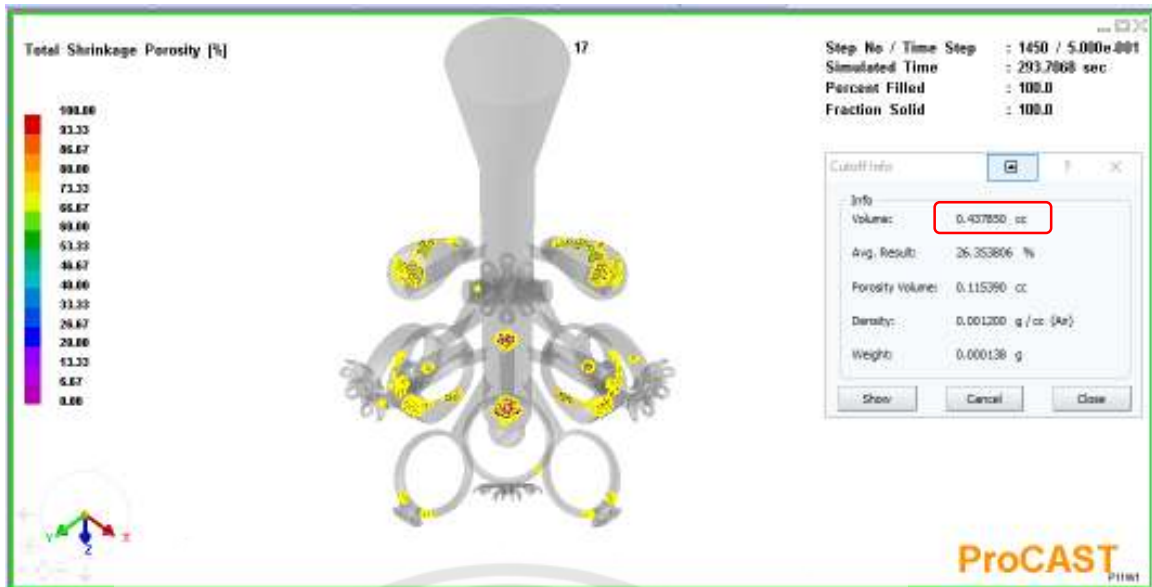
รูปที่ จ.14 แสดงผลการวิเคราะห์ค่าผลรวมของปริมาณรูพรุนการรันที่ 14



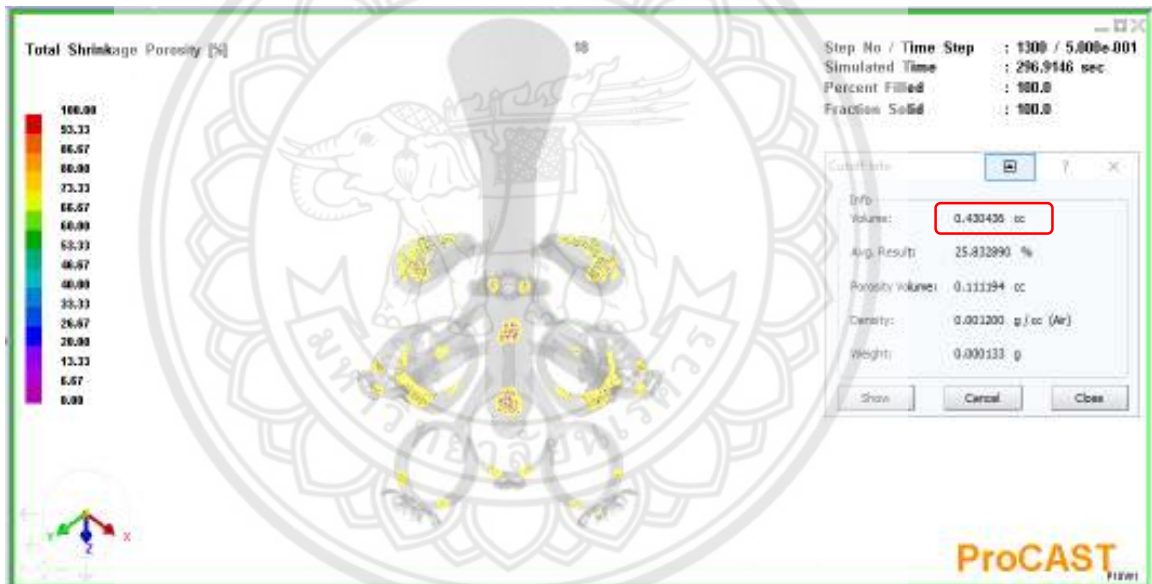
รูปที่ จ.15 แสดงผลการวิเคราะห์หาค่าผลรวมของปริมาณรูพรุนการรันที่ 15



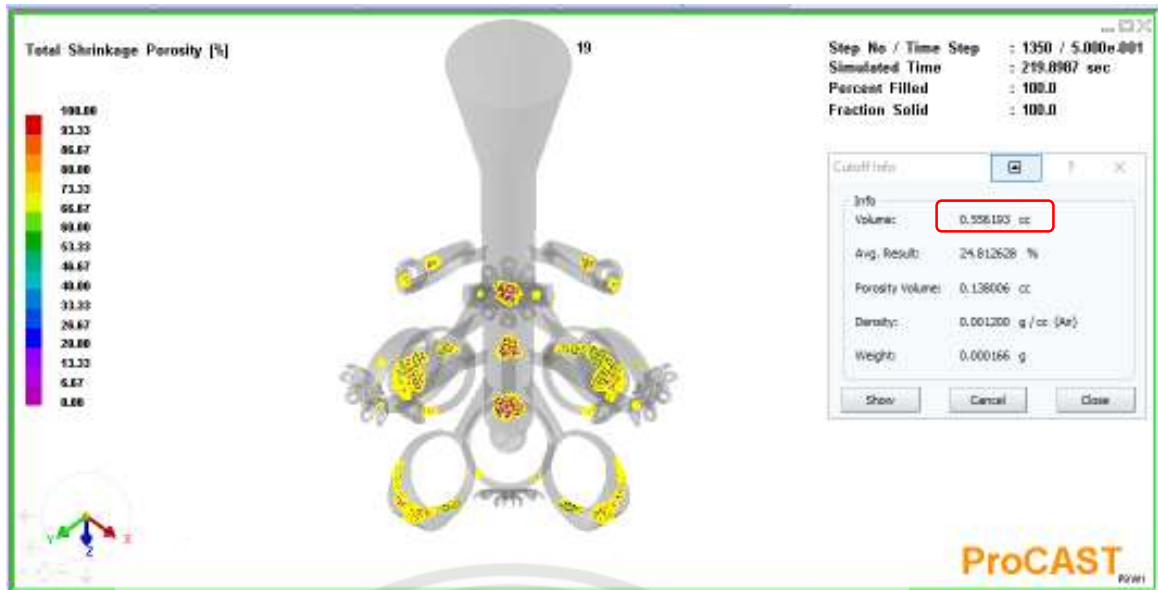
รูปที่ จ.16 แสดงผลการวิเคราะห์หาค่าผลรวมของปริมาณรูพรุนการรันที่ 16



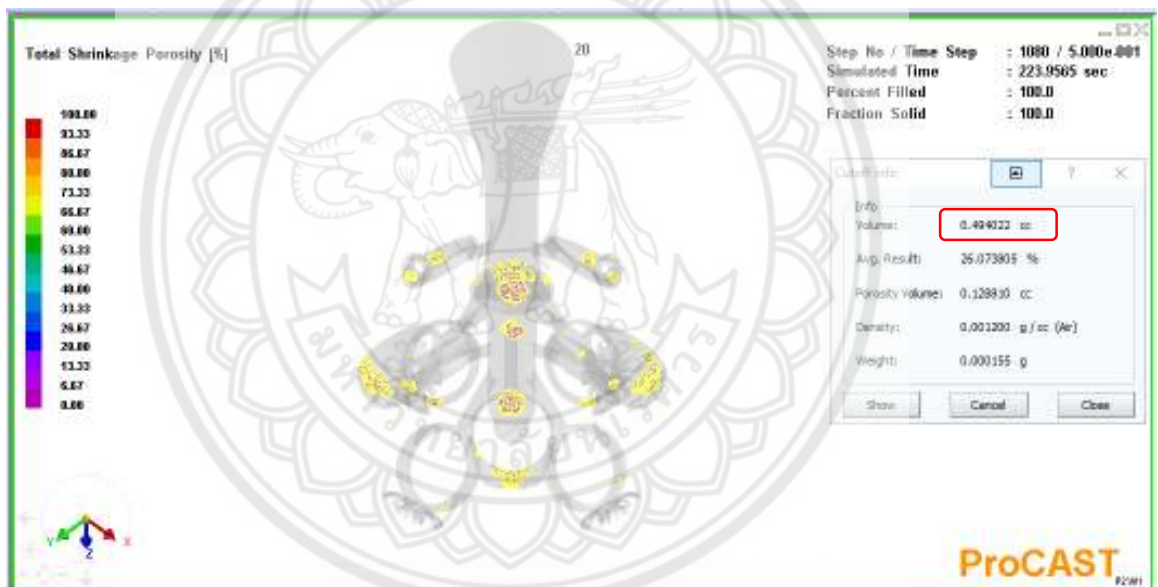
รูปที่ จ.17 แสดงผลการวิเคราะห์ค่าผลรวมของปริมาณรูพรุนการรันที่ 17



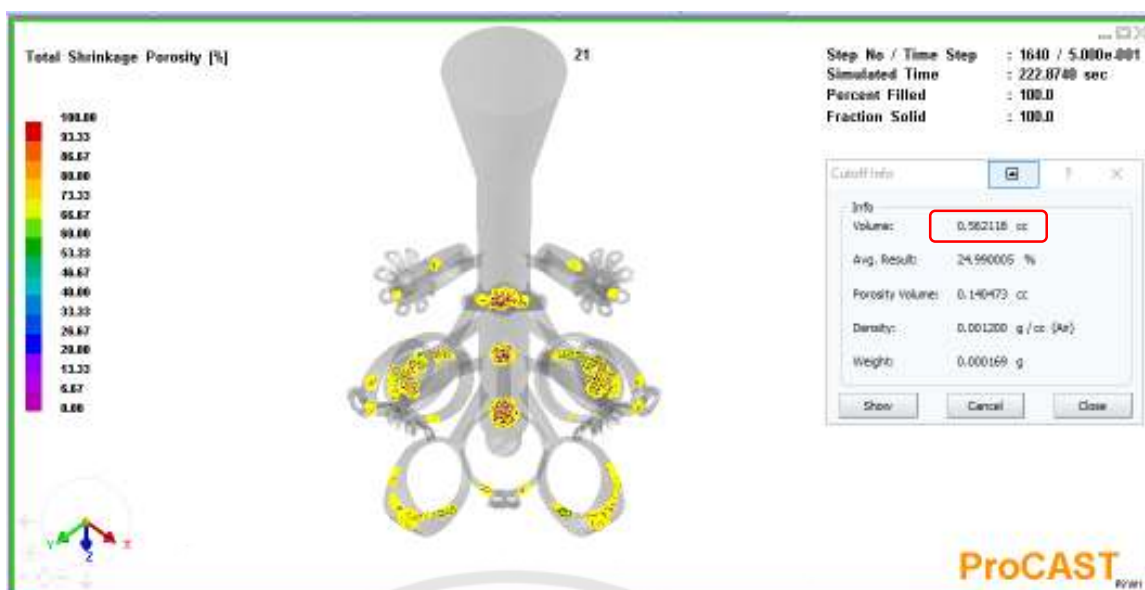
รูปที่ จ.18 แสดงผลการวิเคราะห์ค่าผลรวมของปริมาณรูพรุนการรันที่ 18



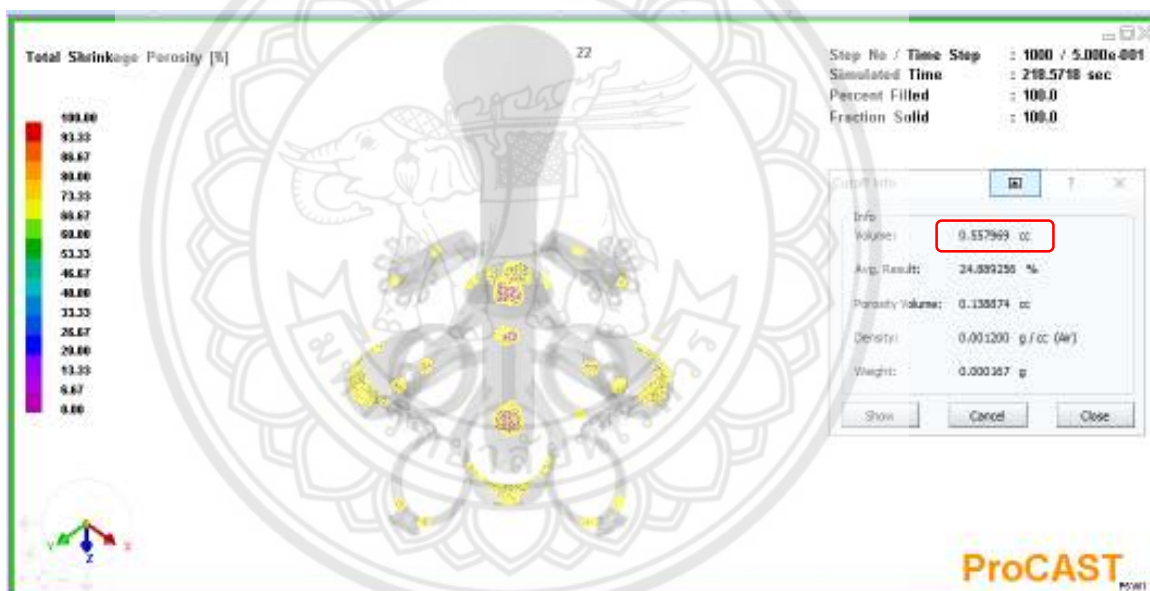
รูปที่ จ.19 แสดงผลการวิเคราะห์หาค่าผลรวมของปริมาณรูพรุนการรันที่ 19



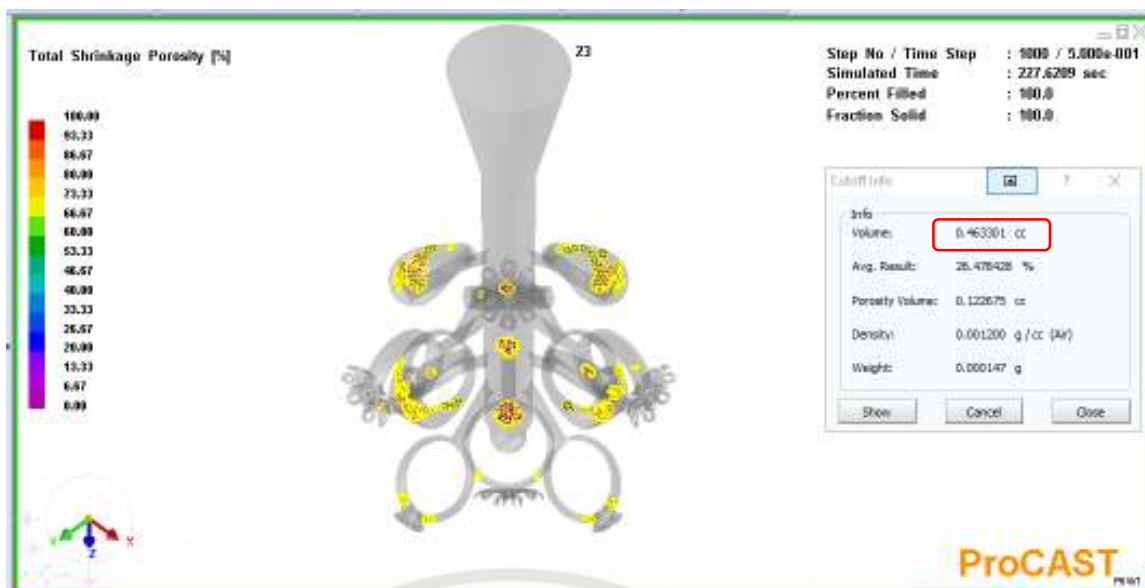
รูปที่ จ.20 แสดงผลการวิเคราะห์หาค่าผลรวมของปริมาณรูพรุนการรันที่ 20



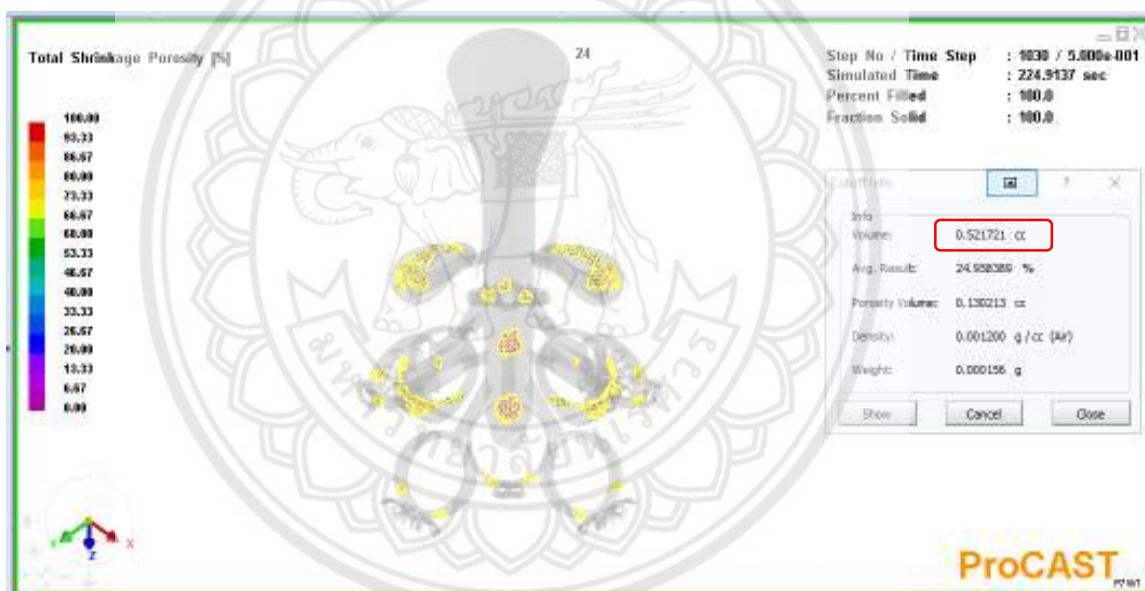
รูปที่ จ.21 แสดงผลการวิเคราะห์หาค่าผลรวมของปริมาณรูพรุนการรันที่ 21



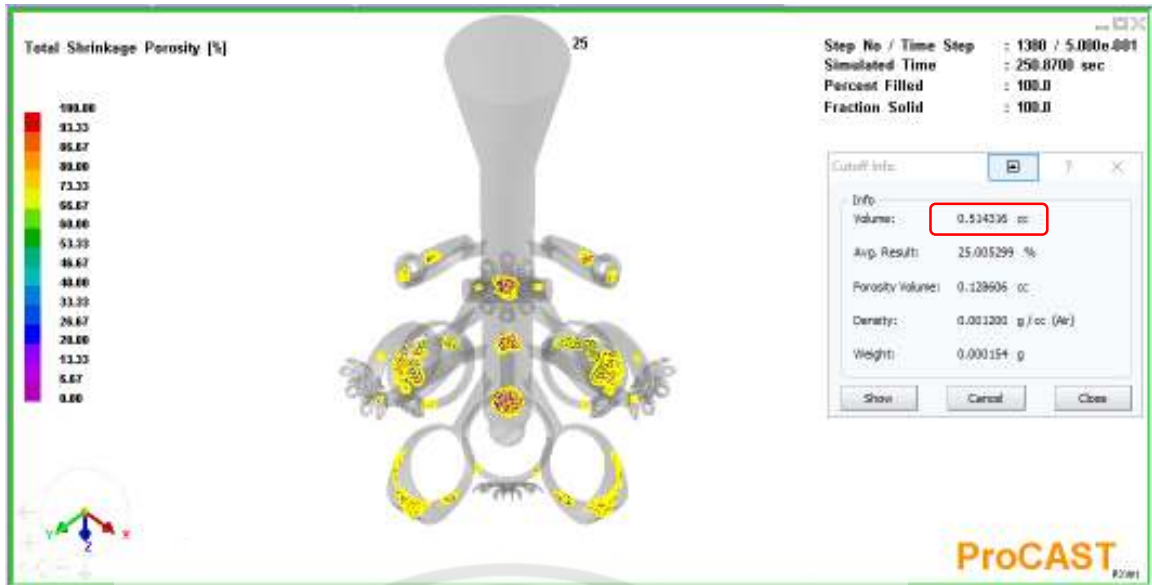
รูปที่ จ.22 แสดงผลการวิเคราะห์หาค่าผลรวมของปริมาณรูพรุนการรันที่ 22



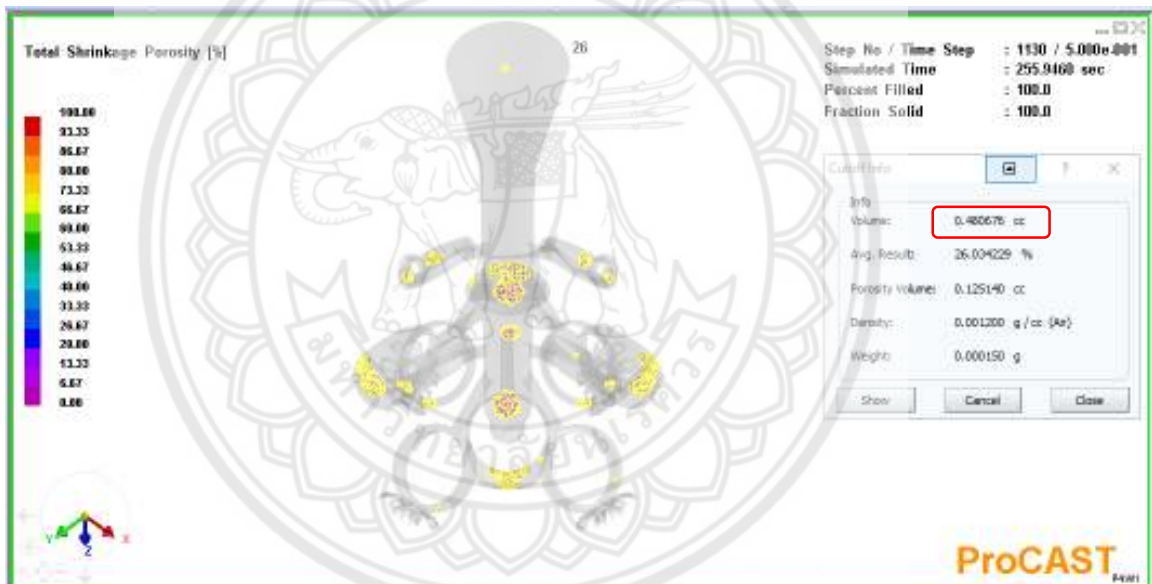
รูปที่ จ.23 แสดงผลการวิเคราะห์ค่าผลรวมของปริมาณรูพรุนการรันที่ 23



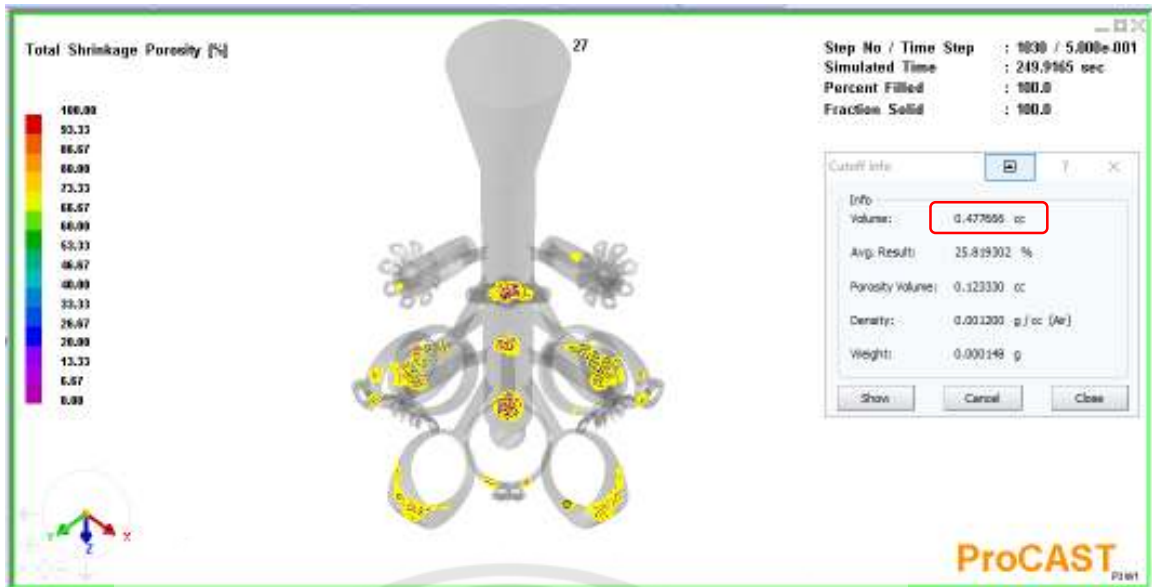
รูปที่ จ.24 แสดงผลการวิเคราะห์ค่าผลรวมของปริมาณรูพรุนการรันที่ 24



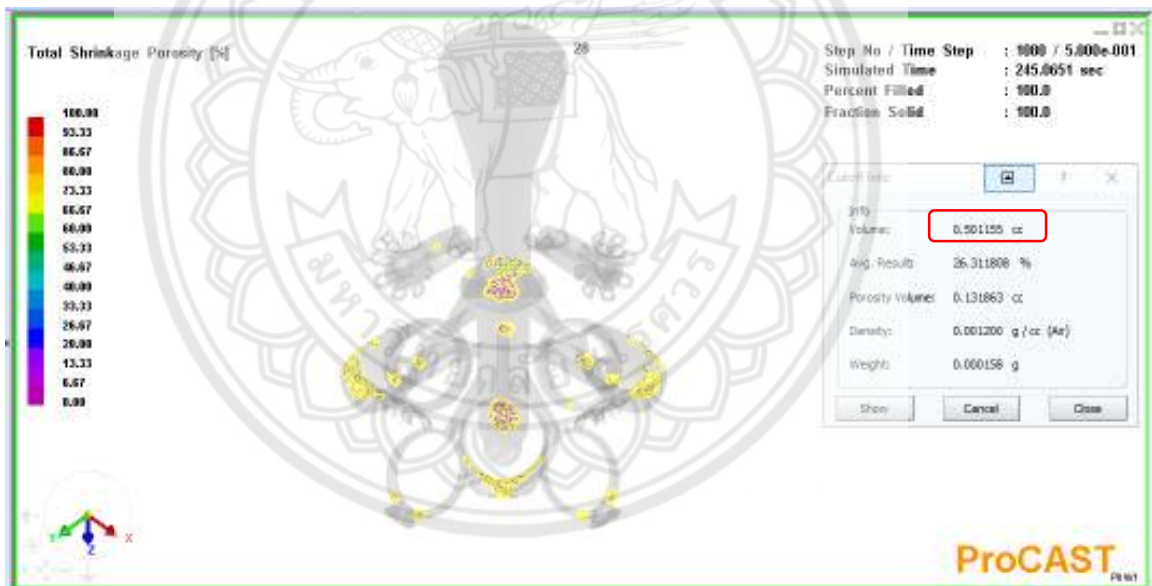
รูปที่ จ.25 แสดงผลการวิเคราะห์ค่าผลรวมของปริมาณรูพรุนการรันที่ 25



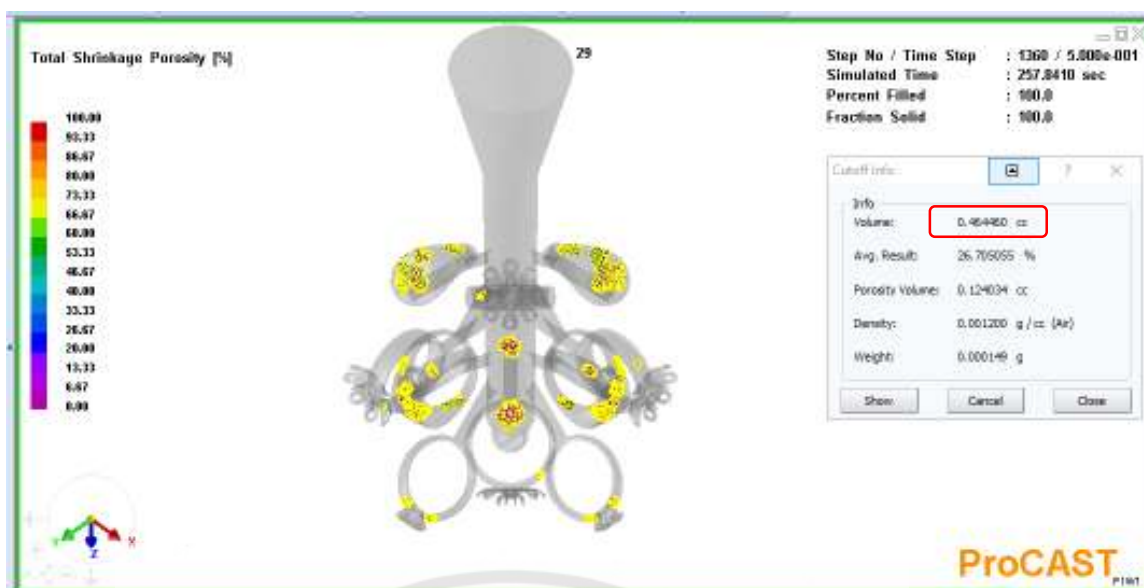
รูปที่ จ.26 แสดงผลการวิเคราะห์ค่าผลรวมของปริมาณรูพรุนการรันที่ 26



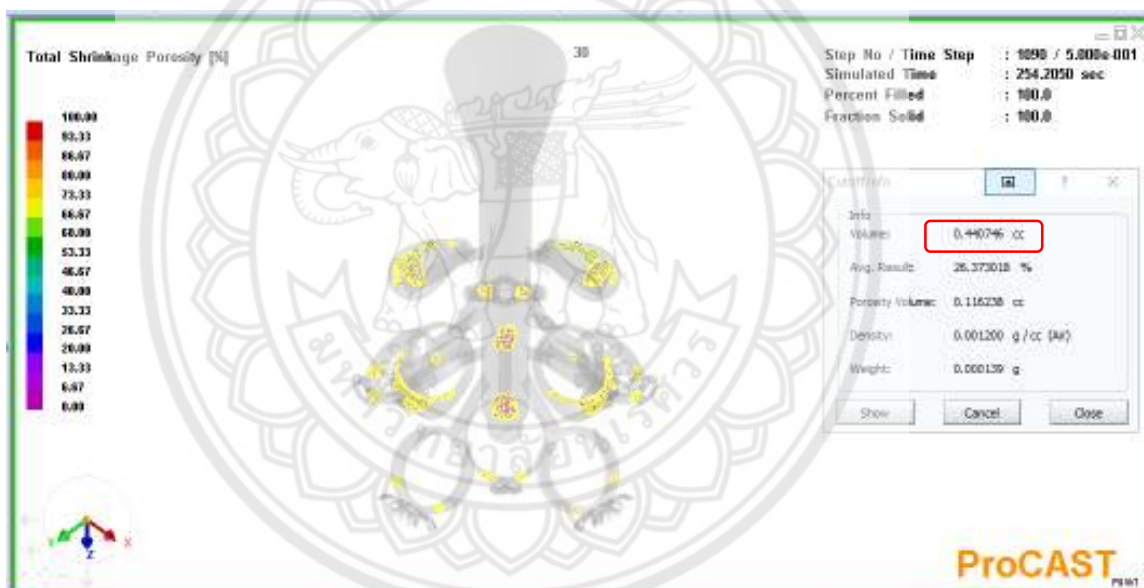
รูปที่ จ.27 แสดงผลการวิเคราะห์หาค่าผลรวมของปริมาณรูพรุนการรันที่ 27



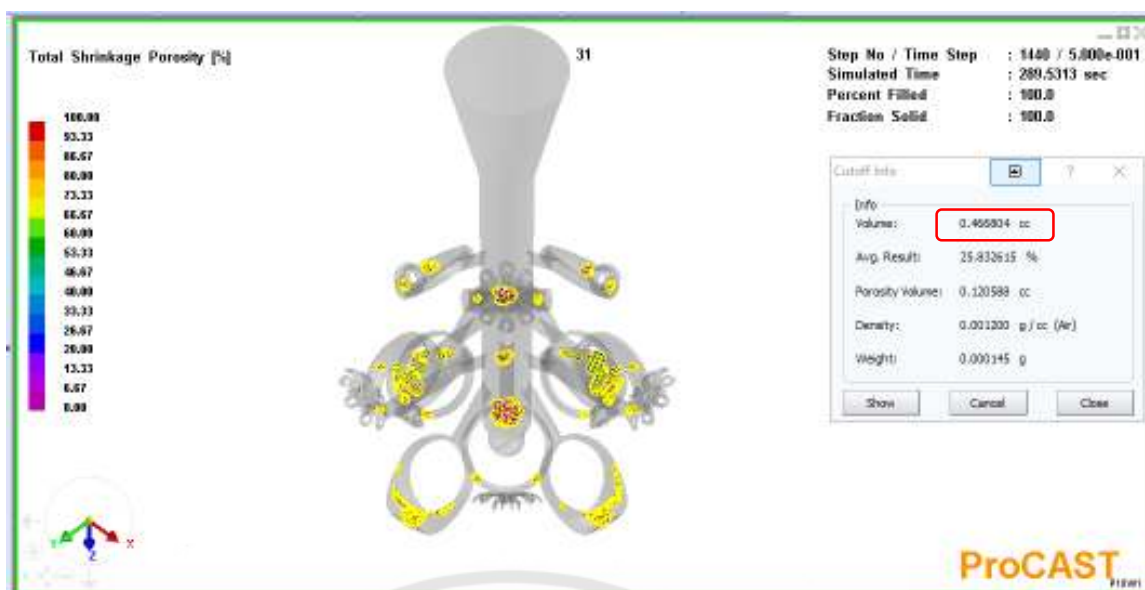
รูปที่ จ.28 แสดงผลการวิเคราะห์หาค่าผลรวมของปริมาณรูพรุนการรันที่ 28



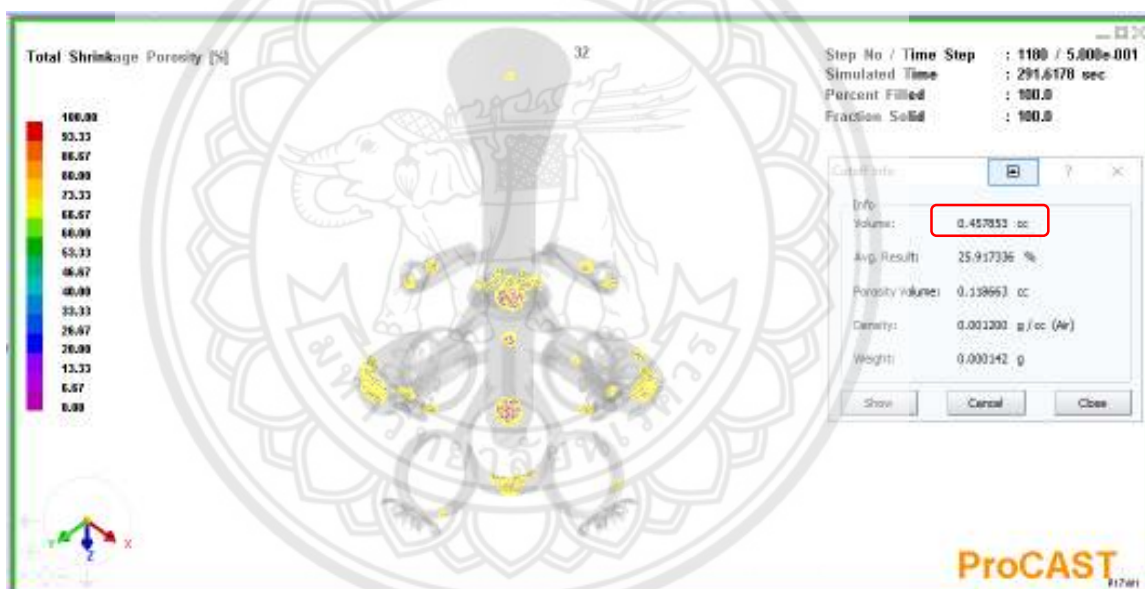
รูปที่ จ.29 แสดงผลการวิเคราะห์ค่าผลรวมของปริมาณรูพรุนการรันที่ 29



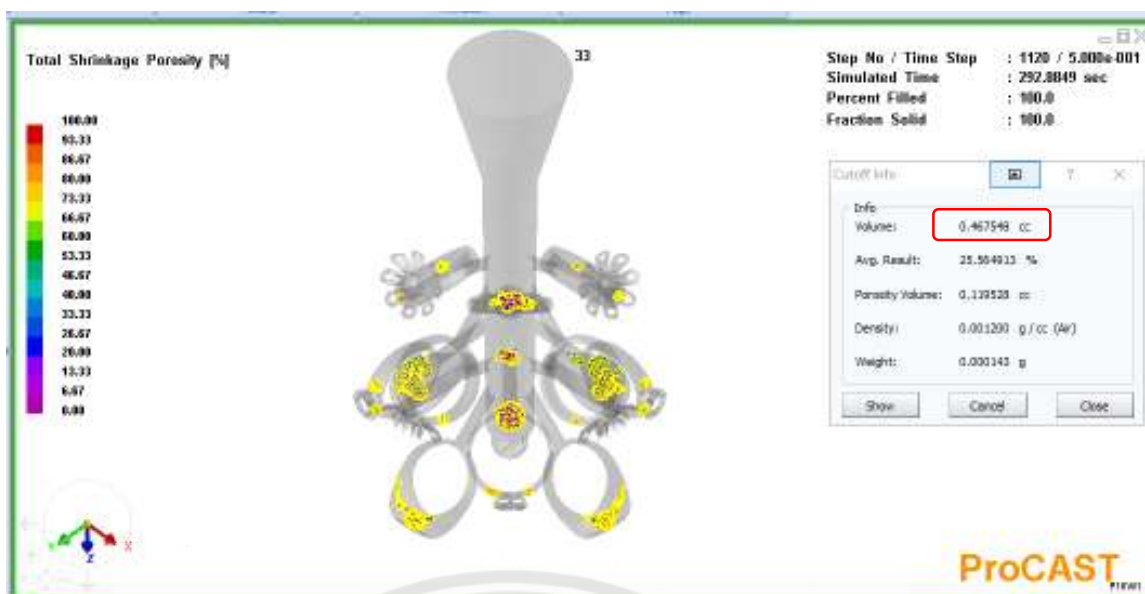
รูปที่ จ.30 แสดงผลการวิเคราะห์ค่าผลรวมของปริมาณรูพรุนการรันที่ 30



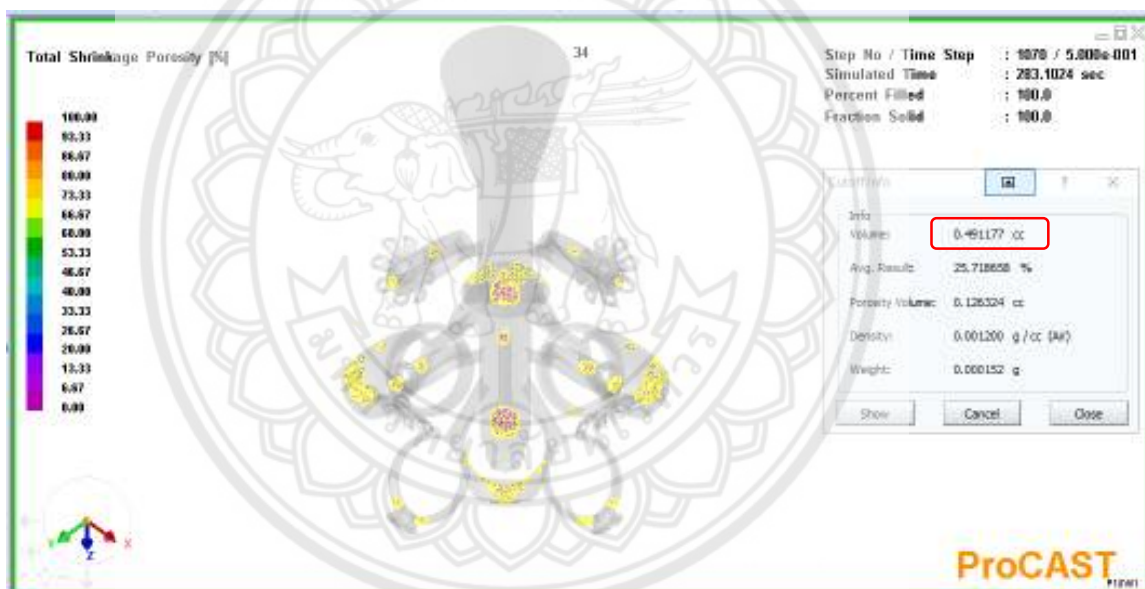
รูปที่ จ.31 แสดงผลการวิเคราะห์ค่าผลรวมของปริมาณรูพรุนการรันที่ 31



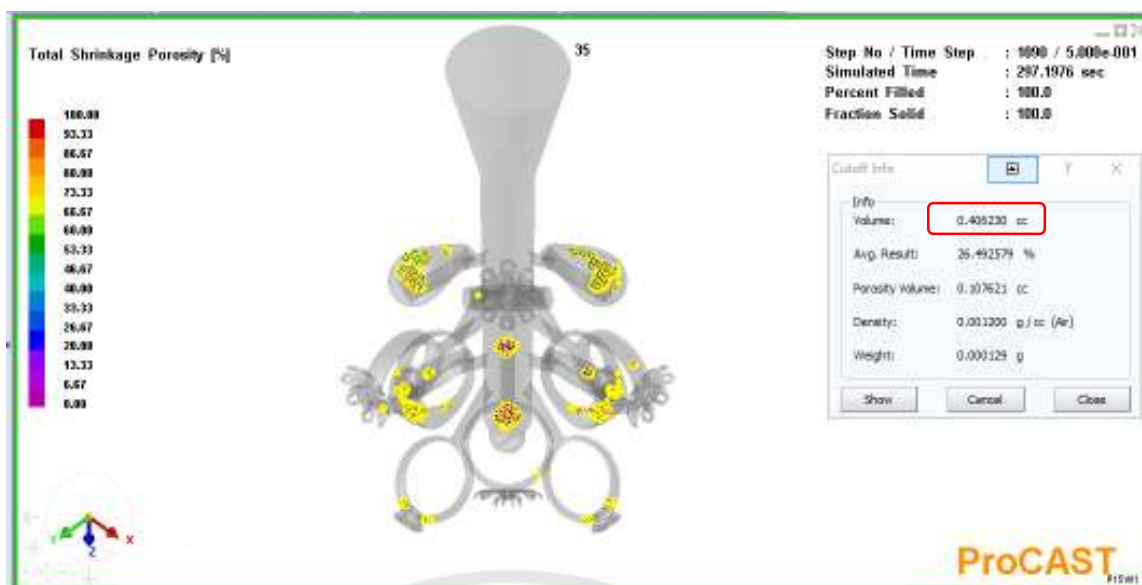
รูปที่ จ.32 แสดงผลการวิเคราะห์ค่าผลรวมของปริมาณรูพรุนการรันที่ 32



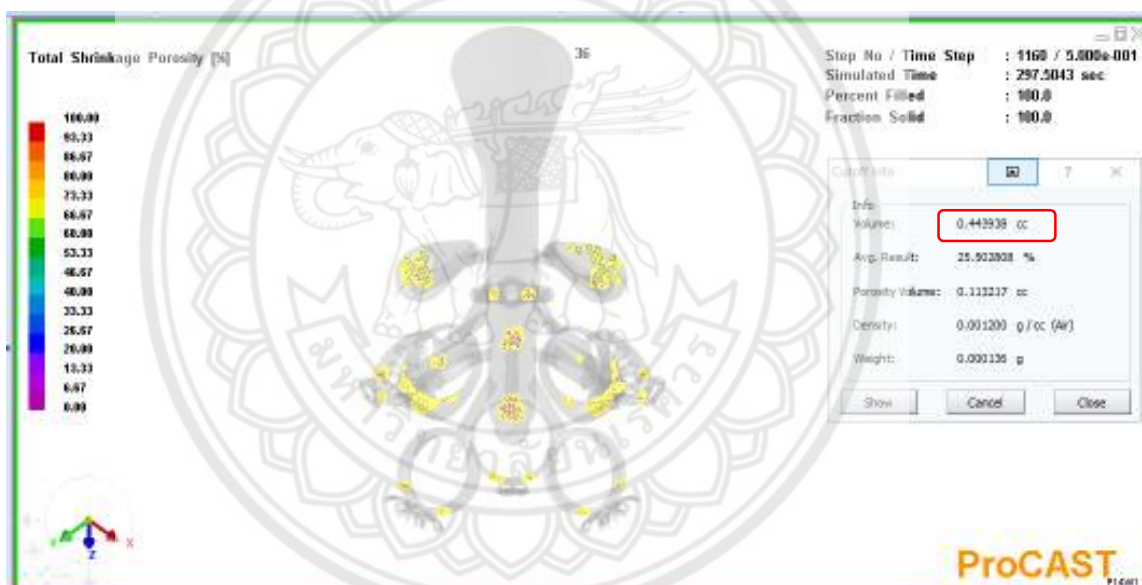
รูปที่ จ.33 แสดงผลการวิเคราะห์หาค่าผลรวมของปริมาณรูพรุนการรันที่ 33



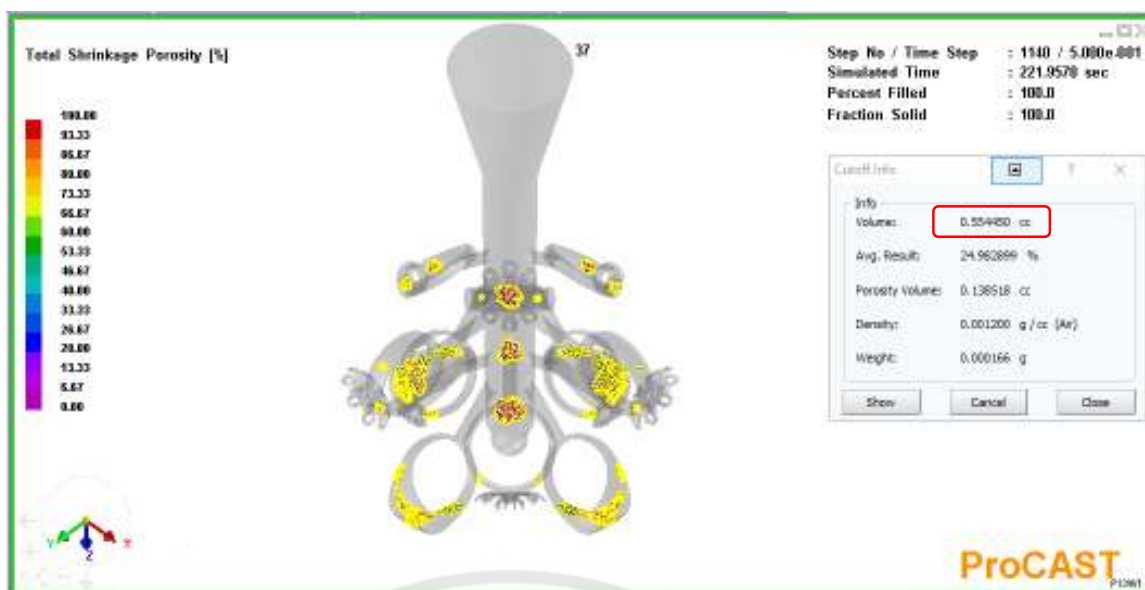
รูปที่ จ.34 แสดงผลการวิเคราะห์หาค่าผลรวมของปริมาณรูพรุนการรันที่ 34



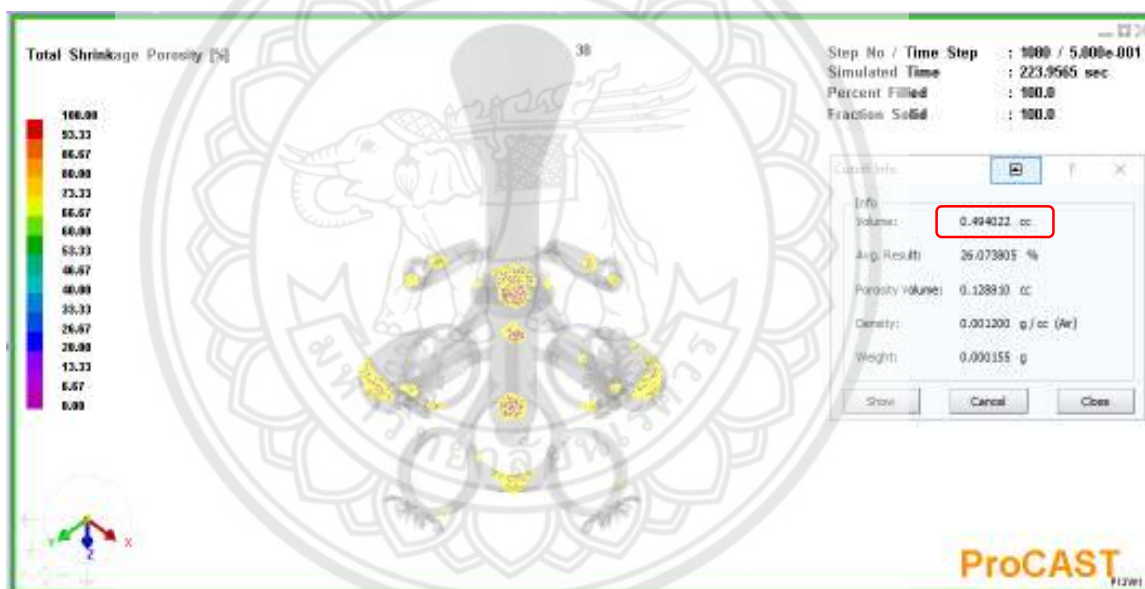
รูปที่ จ.35 แสดงผลการวิเคราะห์ค่าผลรวมของปริมาณรูพรุนการรันที่ 35



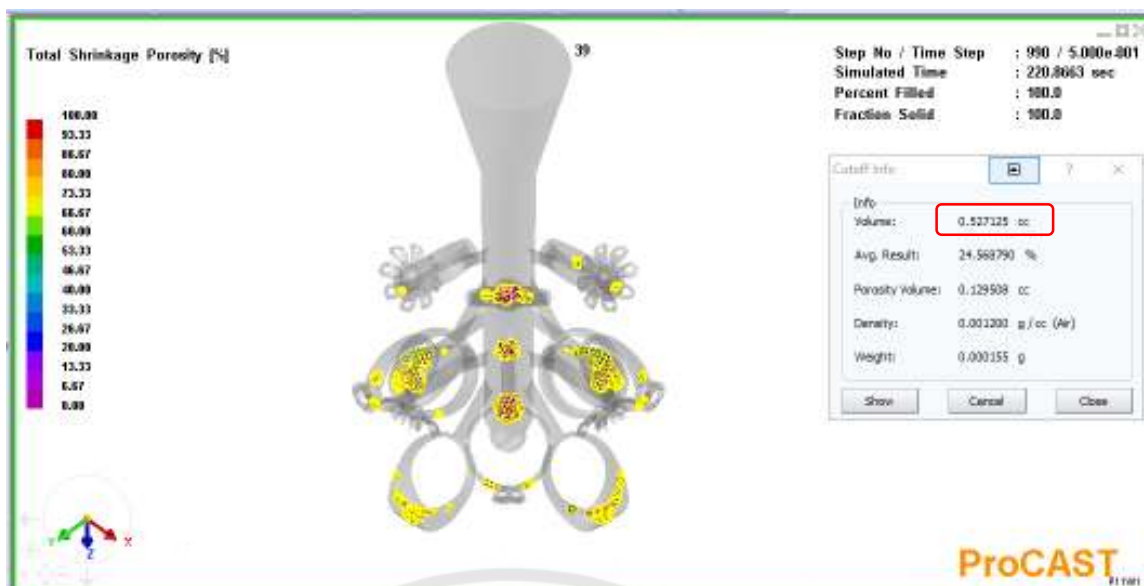
รูปที่ จ.36 แสดงผลการวิเคราะห์ค่าผลรวมของปริมาณรูพรุนการรันที่ 36



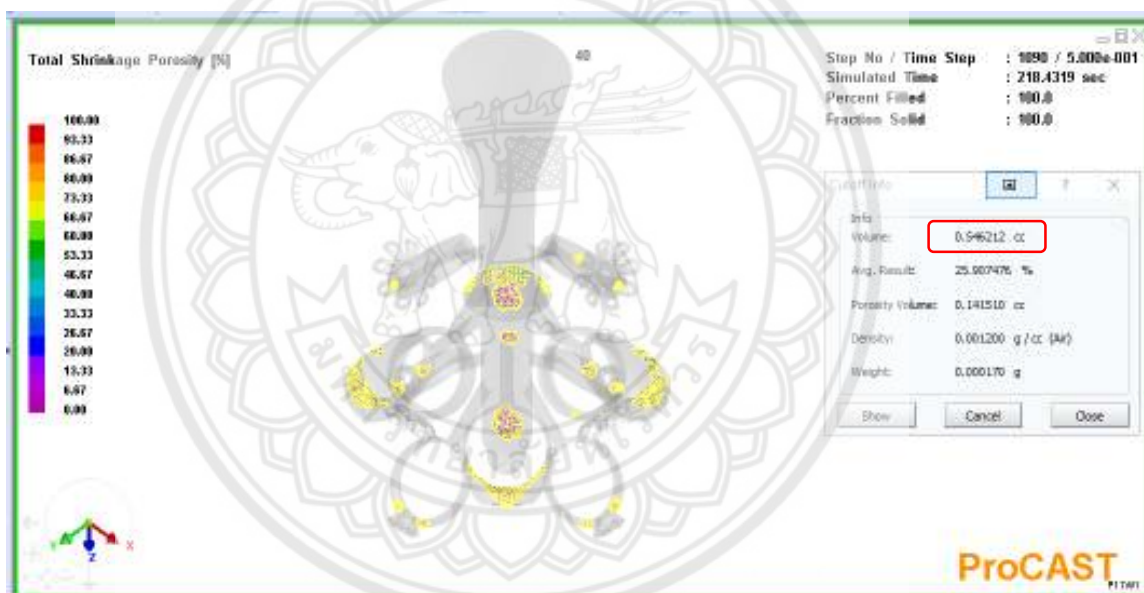
รูปที่ จ.37 แสดงผลการวิเคราะห์ค่าผลรวมของปริมาณรูพรุนการรันที่ 37



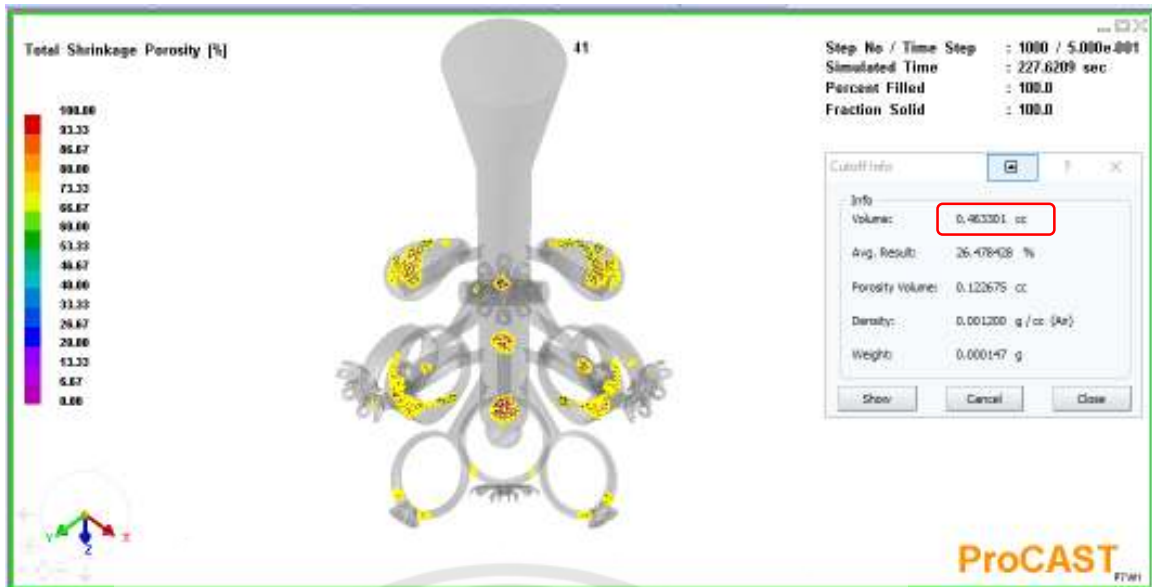
รูปที่ จ.38 แสดงผลการวิเคราะห์ค่าผลรวมของปริมาณรูพรุนการรันที่ 38



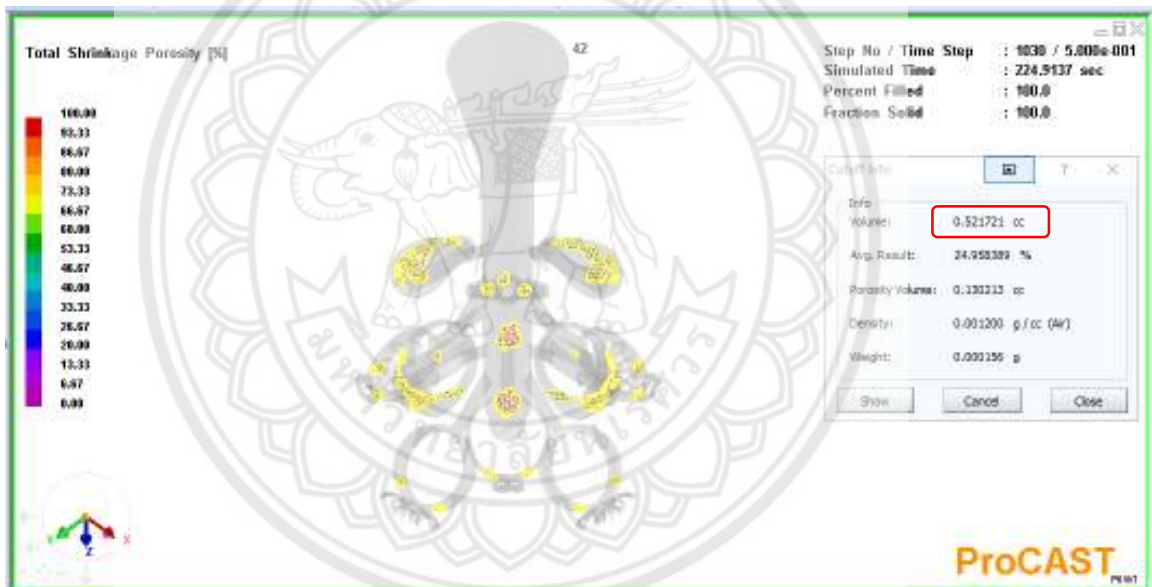
รูปที่ จ.39 แสดงผลการวิเคราะห์ค่าผลรวมของปริมาณรูพรุนการรันที่ 39



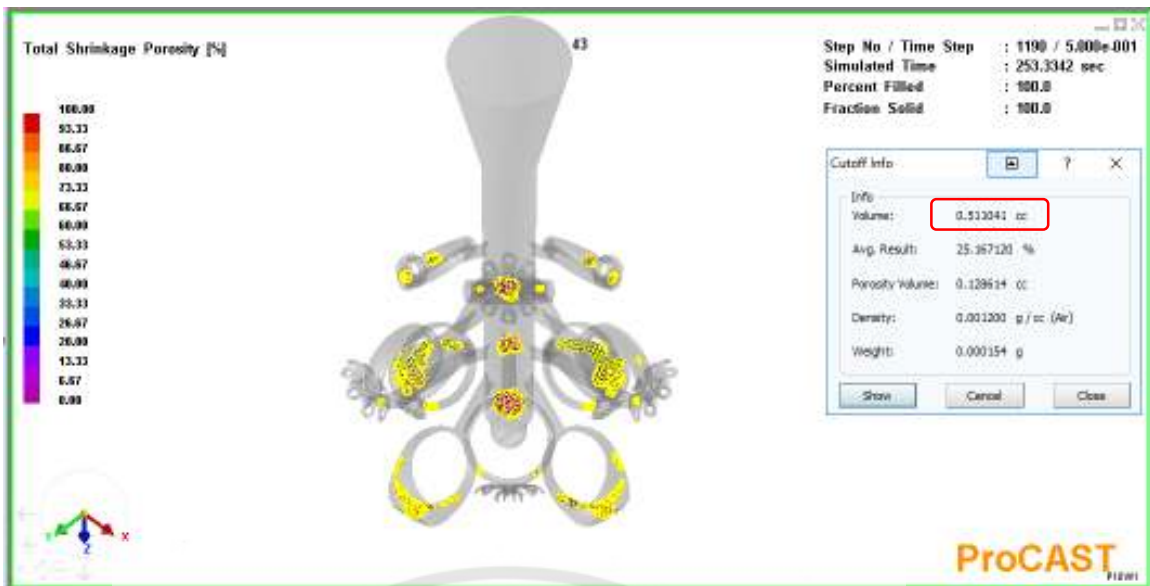
รูปที่ จ.40 แสดงผลการวิเคราะห์ค่าผลรวมของปริมาณรูพรุนการรันที่ 40



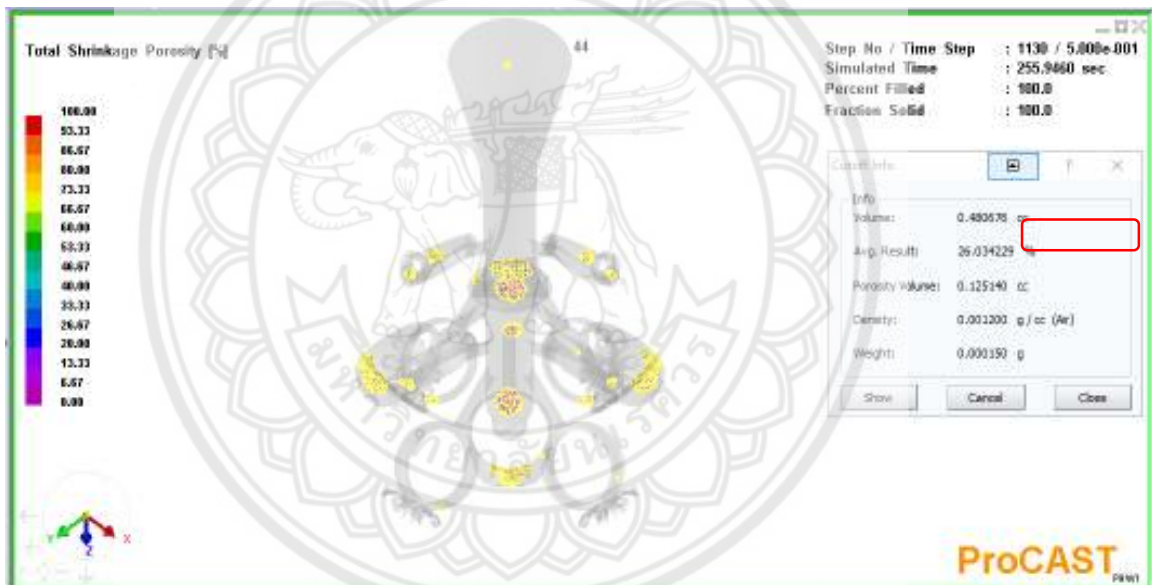
รูปที่ จ.41 แสดงผลการวิเคราะห์ค่าผลรวมของปริมาณรูพรุนการรันที่ 41



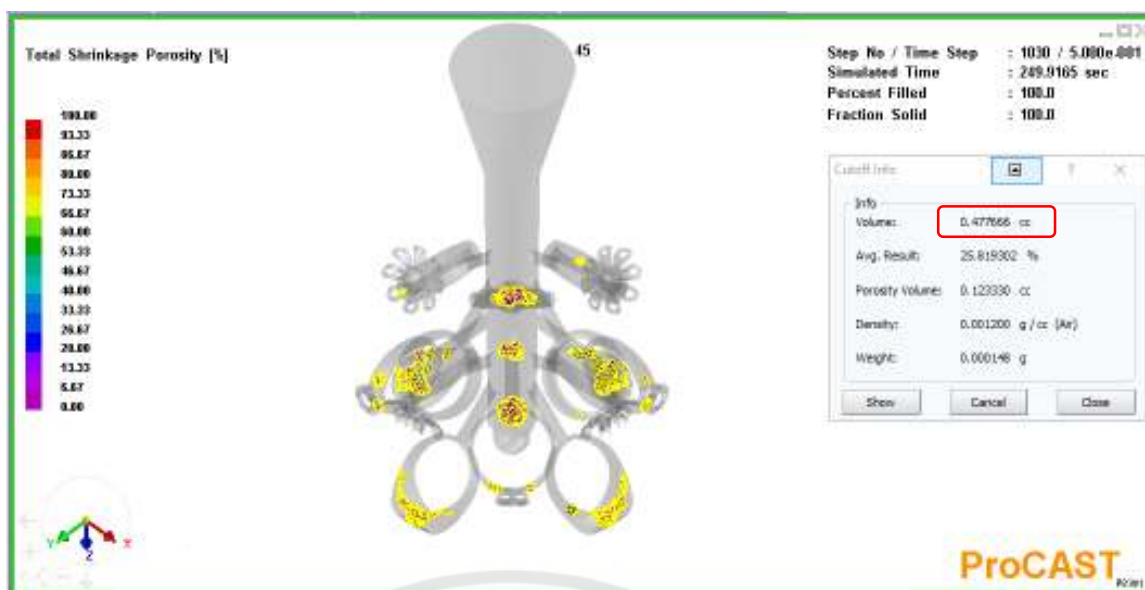
รูปที่ จ.42 แสดงผลการวิเคราะห์ค่าผลรวมของปริมาณรูพรุนการรันที่ 42



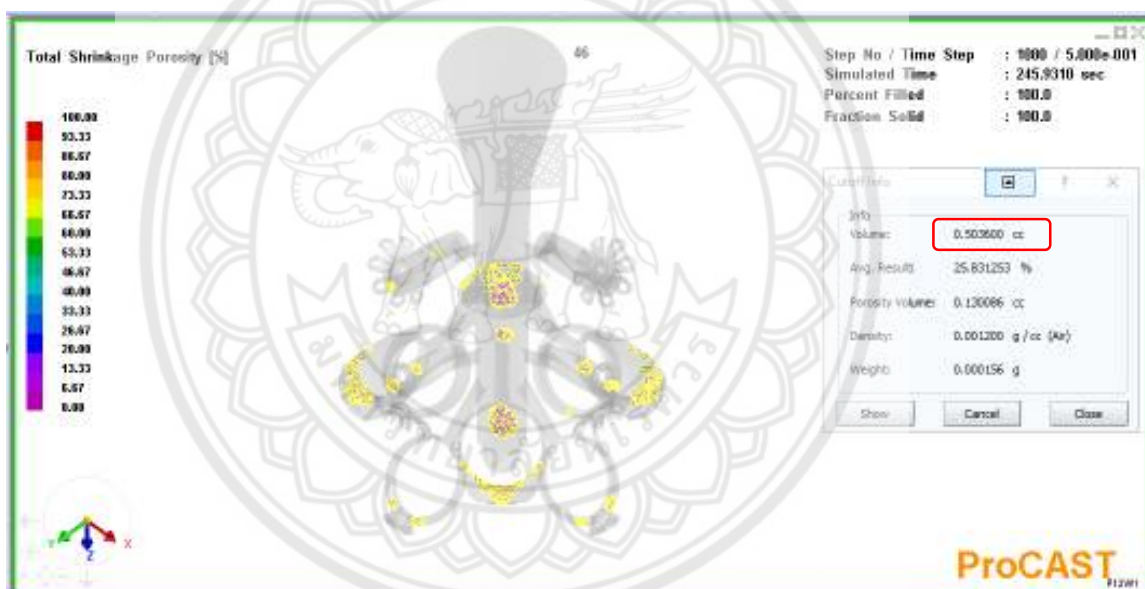
รูปที่ จ.43 แสดงผลการวิเคราะห์ค่าผลรวมของปริมาณรูพรุนการรันที่ 43



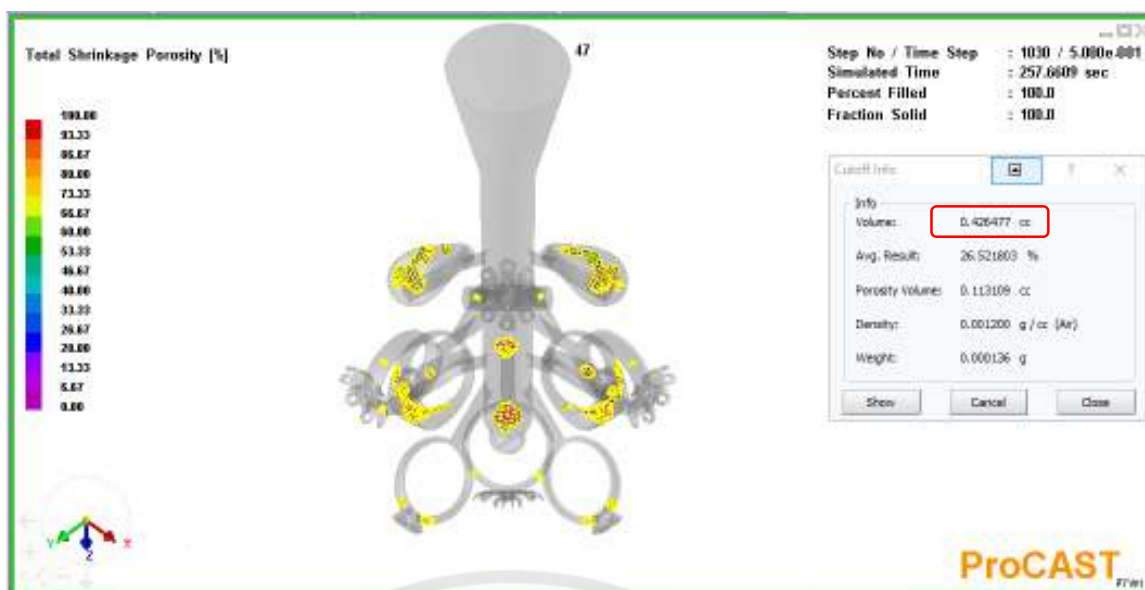
รูปที่ จ.44 แสดงผลการวิเคราะห์ค่าผลรวมของปริมาณรูพรุนการรันที่ 44



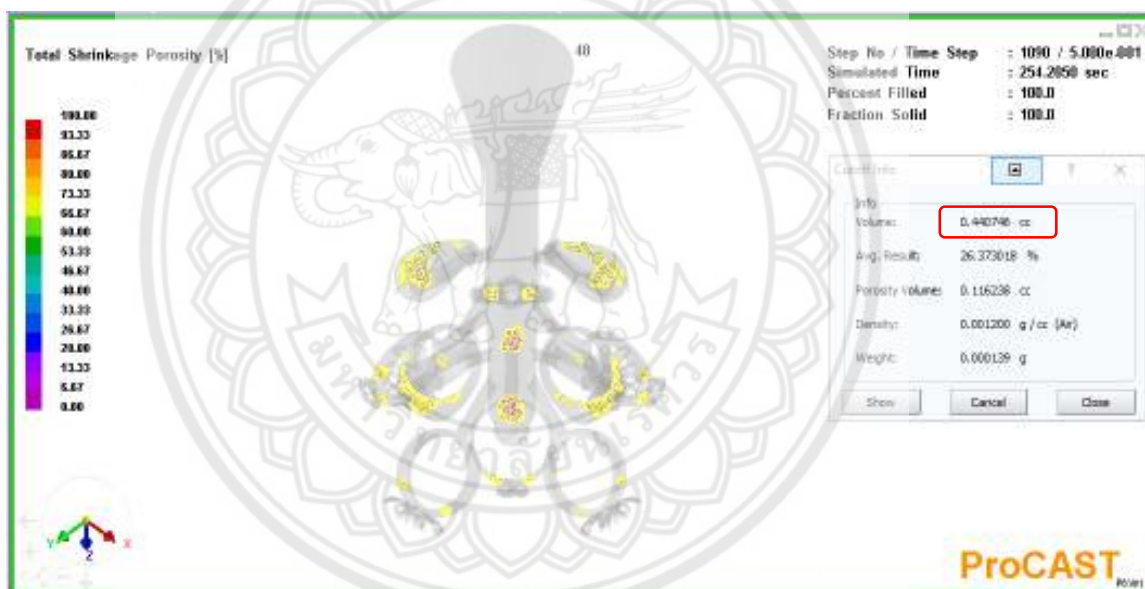
รูปที่ จ.45 แสดงผลการวิเคราะห์ค่าผลรวมของปริมาณรูพรุนการรันที่ 45



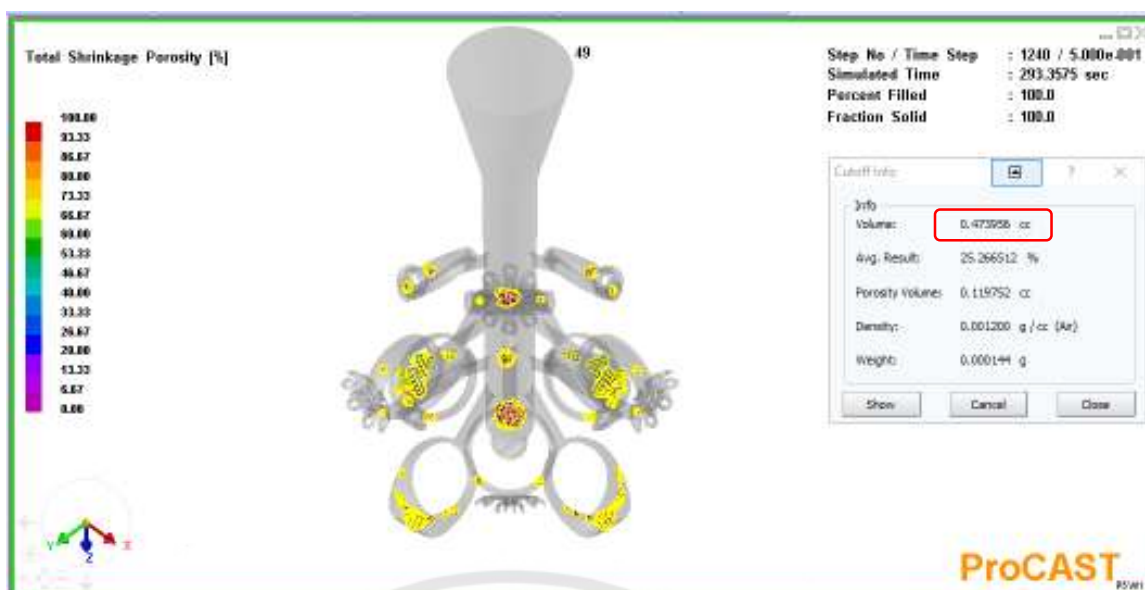
รูปที่ จ.46 แสดงผลการวิเคราะห์ค่าผลรวมของปริมาณรูพรุนการรันที่ 46



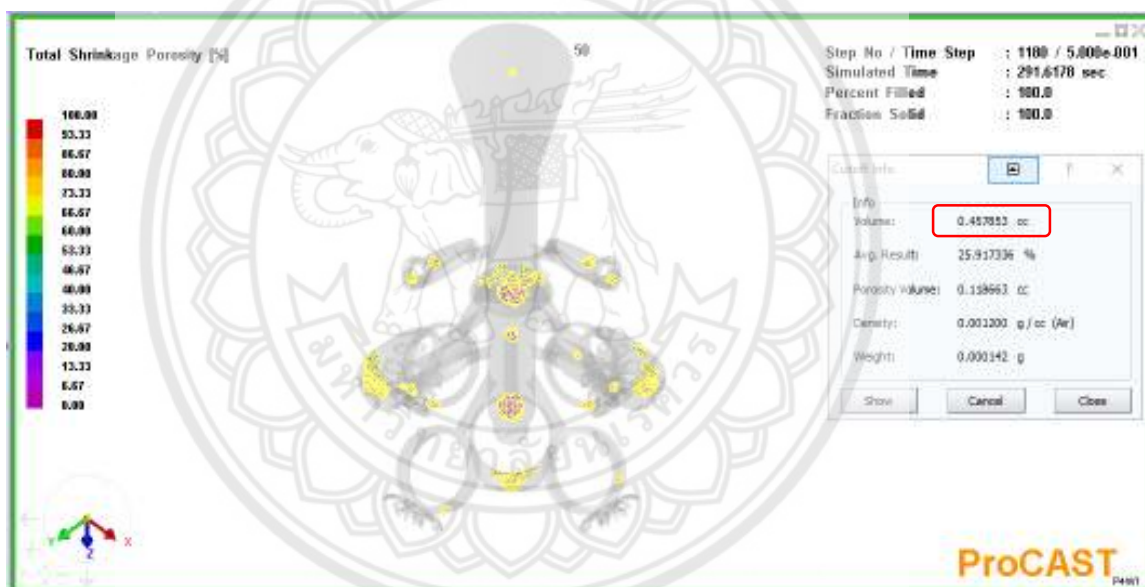
รูปที่ จ.47 แสดงผลการวิเคราะห์ค่าผลรวมของปริมาณรูพรุนการรันที่ 47



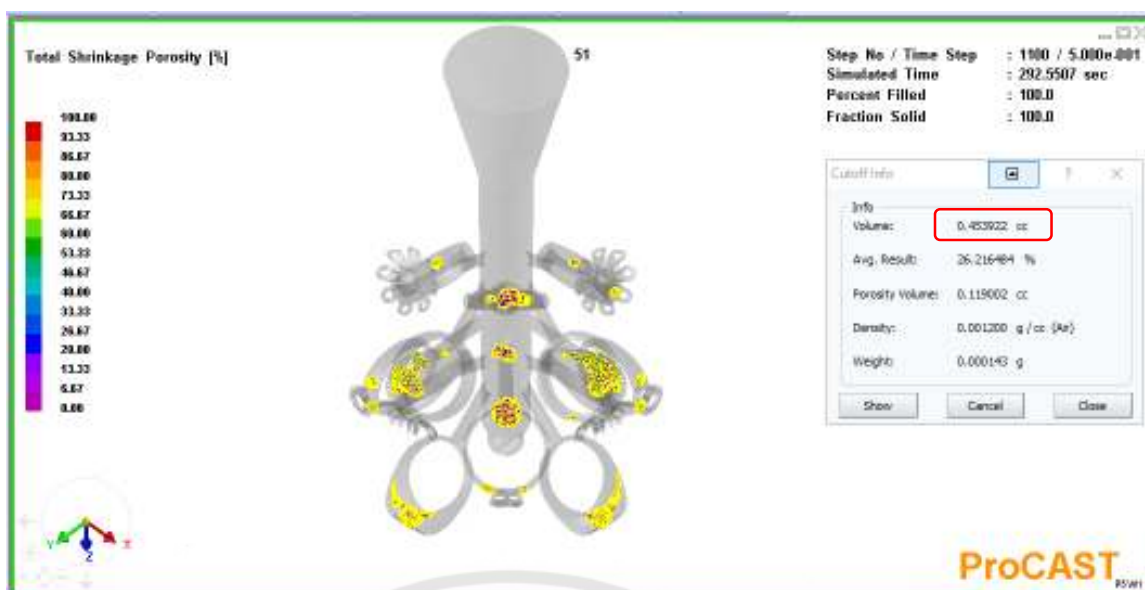
รูปที่ จ.48 แสดงผลการวิเคราะห์ค่าผลรวมของปริมาณรูพรุนการรันที่ 48



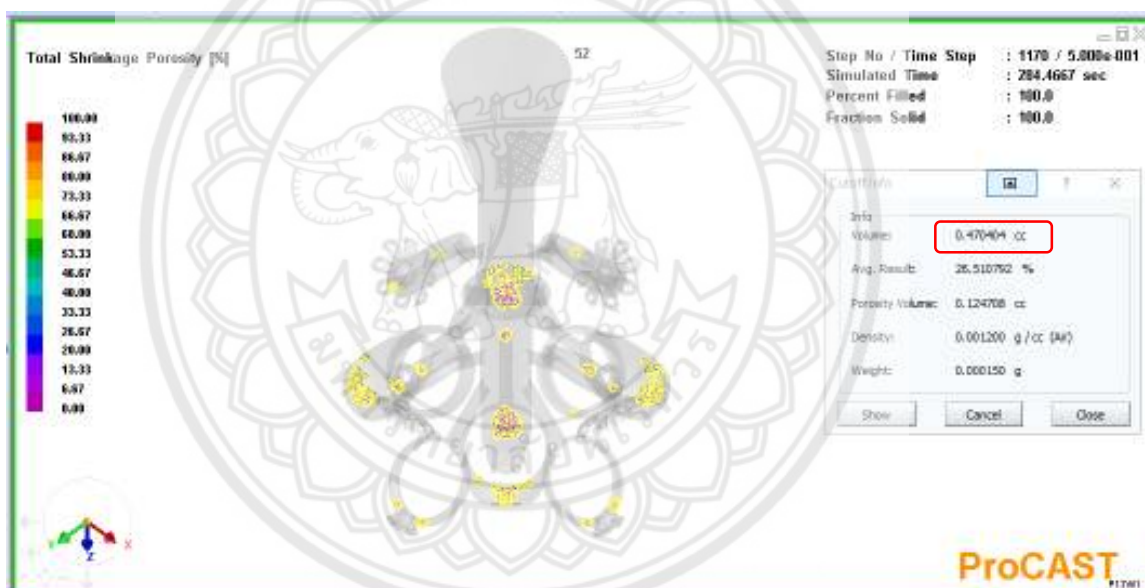
รูปที่ จ.49 แสดงผลการวิเคราะห์ค่าผลรวมของปริมาณรูพรุนการรันที่ 49



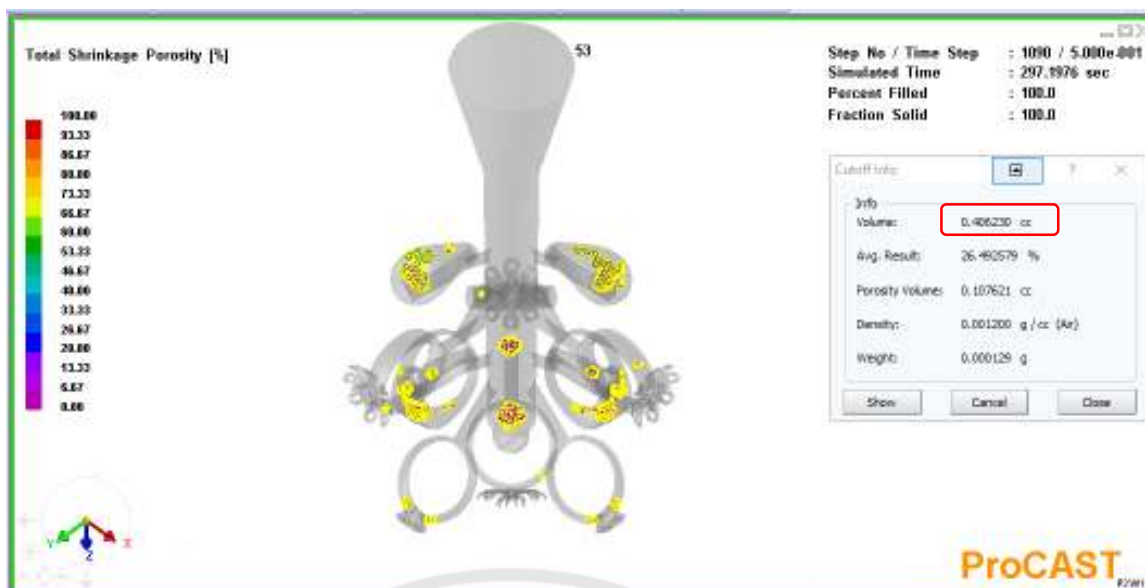
รูปที่ จ.50 แสดงผลการวิเคราะห์ค่าผลรวมของปริมาณรูพรุนการรันที่ 50



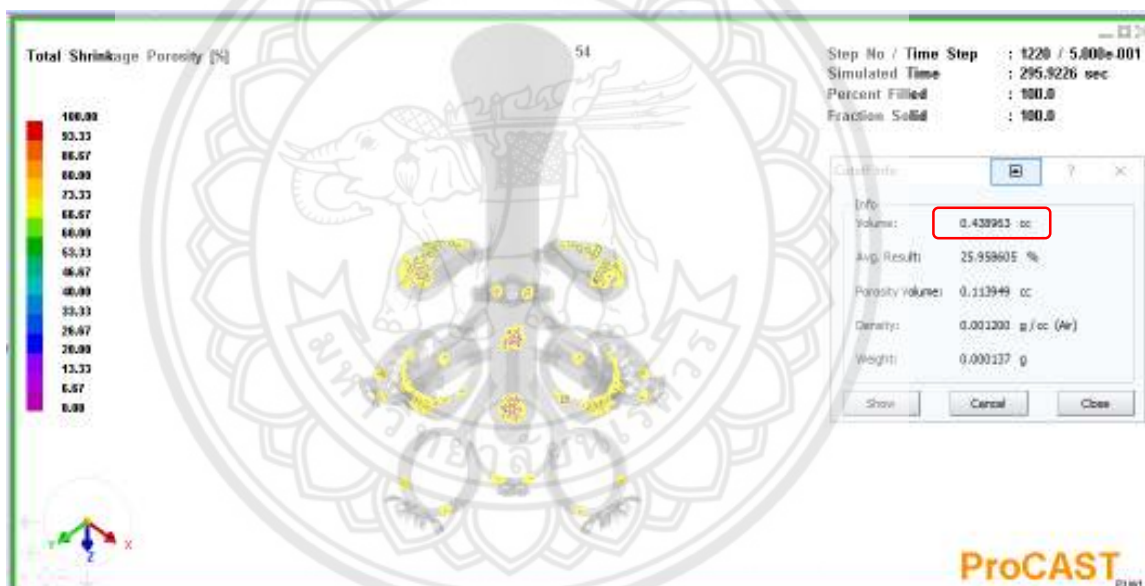
รูปที่ จ.51 แสดงผลการวิเคราะห์ค่าผลรวมของปริมาณรูพรุนการรันที่ 51



รูปที่ จ.52 แสดงผลการวิเคราะห์ค่าผลรวมของปริมาณรูพรุนการรันที่ 52



รูปที่ จ.53 แสดงผลการวิเคราะห์ค่าผลรวมของปริมาณรูพรุนการรันที่ 53



รูปที่ จ.54 แสดงผลการวิเคราะห์ค่าผลรวมของปริมาณรูพรุนการรันที่ 54