



## รายงานสหกิจศึกษาฉบับสมบูรณ์

การประยุกต์ใช้วิธีการ DMAIC สำหรับลดข้อบกพร่องบริเวณผิวชิ้นงาน  
จากกระบวนการหล่อ Pink Silver ด้วยวิธีการหล่อแบบอินเวสเมนต์

กรณีศึกษา บริษัท มิกิ ซิเมิส อินเตอร์เนชั่นแนล จำกัด

APPLICATION OF DMAIC METHOD FOR REDUCTION  
OF SURFACE DEFECTS OF INVESTMENT-CASTED PINK SILVER  
A CASE STUDY OF MIKI SIAMESE INTERNATIONAL CO.,LTD.

นาย นันทวัฒน์ อภิกมลกุล

ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2561



## รายงานสหกิจศึกษาฉบับสมบูรณ์

การประยุกต์ใช้วิธีการ DMAIC สำหรับลดข้อบกพร่องบริเวณผิวชิ้นงาน  
จากกระบวนการหล่อ Pink Silver ด้วยวิธีการหล่อแบบอินเวสเมนต์  
กรณีศึกษา บริษัท มิกิ ซิเมีส อินเตอร์เนชั่นแนล จำกัด  
APPLICATION OF DMAIC METHOD FOR REDUCTION  
OF SURFACE DEFECTS OF INVESTMENT-CASTED PINK SILVER  
A CASE STUDY OF MIKI SIAMESE INTERNATIONAL CO.,LTD.

นาย นันทวัฒน์ อภิภมลกกุล

ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2561

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชื่อโครงการสหกิจศึกษา การประยุกต์ใช้วิธีการ DMAIC สำหรับลดข้อบกพร่องบริเวณผิวชิ้นงาน  
จากกระบวนการหล่อ Pink Silver ด้วยวิธีการหล่อแบบอินเวสเมนต์  
กรณีศึกษา บริษัท มิگی ไซมีส อินเตอร์เนชั่นแนล จำกัด

ชื่อ-สกุล นักศึกษา นายณัฏวัฒน์ อภิภมมกุล

คณะ วิศวกรรมศาสตร์

ภาควิชา วิศวกรรมอุตสาหการ

ชื่อ-สกุล อาจารย์นิเทศ รศ.ดร. กรรณชัย กัลยาศิริ

ชื่อ-สกุล ผู้นิเทศงาน นายไอรส พินิจรัตนพันธ์ และ นายภูมิ กระจ่างโลก

ชื่อสถานประกอบการ บริษัท มิگی ไซมีส อินเตอร์เนชั่นแนล จำกัด

### บทคัดย่อ

จากการผลิตชิ้นงานเครื่องประดับแบบ Pink Silver ของบริษัทกรณีศึกษา พบการเกิดปัญหาคุณภาพชิ้นงานมากที่สุด คือ รูพรุนและโพรง ที่มีสาเหตุมาจากกระบวนการหล่อแบบอินเวสเมนต์ ทางผู้วิจัยจึงได้ทำการวิเคราะห์ปัญหาด้วยแผนผังก้างปลา สามารถสรุปปัจจัยของการเกิดปัญหาได้คือ อุณหภูมิอบแห้งและอุณหภูมิหล่อ จากนั้นนำมาหาความสัมพันธ์ของอุณหภูมิกับรูพรุนโดยการออกแบบการทดลองแฟคทอเรียลแบบเต็ม 2 ปัจจัย 3 ระดับ และทำซ้ำ 3 ครั้ง จากการทดลองพบว่า การใช้อุณหภูมิอบแห้ง 600 องศาเซลเซียสกับอุณหภูมิหล่อ 1030 องศาเซลเซียสหรือการใช้อุณหภูมิอบแห้ง 480 องศาเซลเซียสกับอุณหภูมิหล่อ 1060 องศาเซลเซียส มีเปอร์เซ็นต์ของการเกิดรูพรุนต่อพื้นที่ น้อยกว่าเงื่อนไขการผลิตอื่น ๆ เมื่อนำเงื่อนไขดังกล่าวมาใช้ในกระบวนการผลิตจริง ส่งผลให้ข้อบกพร่องลดลงจากเดิม 56 เปอร์เซ็นต์เหลือเพียง 30 เปอร์เซ็นต์

Cooperative Title: APPLICATION OF DMAIC METHOD FOR REDUCTION  
OF SURFACE DEFECTS OF INVESTMENT-CASTED PINK SILVER  
A CASE STUDY OF MIKI SIAMESE INTERNATIONAL CO.,LTD.

Student intern name: Mr. Nanthawat Apikamolkul

Faculty: Engineering

Department: Industrial Engineering

Advisor name: Assoc.Prof.Dr. Kannachai Kanlayasiri

Mentor name: Mr. Oros Pinitrattanapan and Mr.Pumee Krajangkok

Company: MIKI SIAMESE INTERNATIONAL CO.,LTD.

## ABSTRACT

The jewelry company's case study is faced with the quality problems of investment casting process causing shrinkage and porosity of Pink Silver. Fishbone diagram is used to define the factors causing the problems. Flask temperature and casting temperature are the factors summarized from the analysis. This project aims to define the optimal flask temperature and casting temperature by using design of experiments (DOE). The results of 3-time repeating of 2-factor 3-level full factorial of DOE show that 600 °C of flask temperature with 1030 °C of casting temperature or 480 °C of casting temperature with 1060 °C of flask temperature provide the porosity to area ratio less than the others, which can reduce shrinkage and porosity from 56 percent to 30 percent.

## กิตติกรรมประกาศ

โครงการสหกิจศึกษา “การประยุกต์ใช้วิธีการ DMAIC สำหรับลดข้อบกพร่องบริเวณผิวชิ้นงานจากกระบวนการหล่อ Pink Silver ด้วยการหล่อแบบอินเวสเมนต์ กรณีศึกษา บริษัท มิกิ ไซมีส อินเตอร์เนชั่นแนล จำกัด” สามารถสำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณผู้มีส่วนเกี่ยวข้องที่กรุณาให้ความรู้คำแนะนำ และตรวจทานแก้ไขข้อบกพร่อง จนโครงการฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์ ดังนี้

ขอขอบพระคุณ รศ. ดร. กรรณชัย กัลยาศิริ อาจารย์ที่ปรึกษาที่ได้สละเวลาในการให้คำแนะนำ ข้อเสนอแนะต่าง ๆ และแก้ไขข้อบกพร่องระหว่างการปฏิบัติงานสหกิจ ทำให้โครงการฉบับนี้มีความถูกต้องมากยิ่งขึ้น และสามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณ คุณโอรส หัวหน้างานแผนกรับประกันคุณภาพของบริษัทที่คอยชี้แนะแนวทางแก้ไขปัญหา ให้ข้อมูลที่จำเป็น และตรวจสอบความถูกต้อง ระหว่างการปฏิบัติงานสหกิจ และคุณภูมิ หัวหน้าแผนกเทียนและหล่อของบริษัทที่ให้โอกาสเข้าไปทำการทดลองและเรียนรู้ พร้อมคำปรึกษาและความช่วยเหลือในทุกด้านตลอดระยะเวลาดำเนินงานจนกระทั่งสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณผู้ให้ความรู้เกี่ยวกับการทำงานและช่วยให้คำแนะนำในการแก้ไขปัญหาต่าง ๆ ซึ่งประกอบไปด้วย หัวหน้างานของแผนกต่าง ๆ ที่คอยช่วยเหลือและสอบถามเกี่ยวกับโครงการสหกิจจนกระทั่งสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณ บริษัท มิกิ ไซมีส อินเตอร์เนชั่นแนล จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการศึกษาและดำเนินงานวิจัยในทุกกระบวนการผลิต รวมทั้งค่าใช้จ่ายในการศึกษาวิจัย และขอขอบพระคุณพนักงานหล่อทุกท่านที่ให้ความอนุเคราะห์ข้อมูลในการศึกษาเป็นอย่างดีจนกระทั่งการศึกษาวิจัยสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

นายณัฏวัฒน์ อภิกรมกุล

# สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย .....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญรูป .....	VII
สารบัญตาราง .....	VIII
บทที่ 1 บทนำ .....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา .....	3
1.3 ขอบเขตของการศึกษา .....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
1.5 วิธีการดำเนินการวิจัย.....	4
บทที่ 2 แนวคิด ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....	6
2.1 กระบวนการผลิตเครื่องประดับแบบหล่อและการหล่อแบบอินเวสเมนต์.....	7
2.1.1 การออกแบบ (Design).....	7
2.1.2 การทำแม่พิมพ์เงิน (Model Marking).....	7
2.1.3 การทำแม่พิมพ์ยาง (Rubber Mold Marking).....	7
2.1.3.1 การเตรียมบล็อกยาง .....	7
2.1.3.2 การอัดบล็อกยาง .....	7
2.1.3.3 การฝ้ายาง .....	8
2.1.4 การฉีดเทียน (Wax Injection).....	8
2.1.5 การหล่อตัวเรือน (Casting) .....	8
2.1.5.1 การหล่อเข้าปูน .....	8
2.1.5.2 การอบเข้าปูน.....	8
2.1.5.3 การหล่อแบบอินเวสเมนต์ .....	8

2.1.5.4 การแกะแบบปูน.....	9
2.1.5.5 การทำความสะอาดผิวชิ้นงาน.....	9
2.1.6 การแต่งชิ้นงาน (Filling).....	9
2.1.7 การขัดชิ้นงาน (Buffing).....	9
2.1.8 การตรวจสอบคุณภาพ (Inspection).....	9
2.2 ข้อบกพร่องในงานหล่อตัวเรือนเครื่องประดับ.....	10
2.2.1 รูพรุนเนื่องจากการหดตัวของโลหะ (Shrinkage Porosities).....	10
2.2.2 รูพรุนจากตามดจากฟองก๊าซ (Gas Porosity).....	12
2.3 เทคนิคซิกส์ ซิกม่า.....	13
2.4 การออกแบบการทดลอง (Design of Experiments, DOE).....	17
2.4.1 ขั้นตอนการออกแบบการทดลอง.....	17
2.4.2 ส่วนประกอบต่างๆของการทดลอง.....	18
2.4.3 หลักการพื้นฐาน 3 ประการ สำหรับการออกแบบการทดลอง.....	20
2.6 การออกแบบการทดลองแบบเชิงแฟคทอเรียล.....	21
<b>บทที่ 3 วิธีการดำเนินงาน.....</b>	<b>22</b>
3.1 การศึกษาอิทธิพลของปัจจัยที่ส่งผลต่อการเกิดข้อบกพร่องที่ผิวชิ้นงาน.....	23
3.1.1 การออกแบบการทดลองเพื่อหาค่าที่เหมาะสมที่สุด.....	23
3.1.1.1 เลือกปัจจัย ระดับ ขอบเขตของการศึกษา.....	24
3.1.1.2 เลือกตัวแปรตอบสนอง.....	25
3.1.1.3 เลือกการออกแบบการทดลอง.....	25
3.1.1.4 ทำการทดลองเพื่อหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของปัจจัย.....	27
3.1.2 การทดลองหล่อชิ้นงาน.....	27
3.1.3 การเตรียมชิ้นงานสำหรับการส่องดูโครงสร้างจุลภาค.....	28
3.1.4 การส่องดูโครงสร้างจุลภาค.....	29
3.1.5 การวิเคราะห์ข้อมูลเชิงสถิติและหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของแต่ละปัจจัย.....	29
<b>บทที่ 4 ผลการวิจัยและการวิเคราะห์ข้อมูล.....</b>	<b>31</b>
4.1 ขั้นตอนการกำหนดปัญหาของกระบวนการ (Define Phase).....	32
4.2 ขั้นตอนการตรวจวัดปัญหาที่เกิดขึ้นในกระบวนการ (Measure Phase).....	34

4.3	ขั้นตอนการวิเคราะห์สาเหตุของปัญหาในกระบวนการ (Analyse Phase).....	35
4.4	ขั้นตอนการปรับปรุงแก้ไขกระบวนการ (Improve Phase).....	40
4.4.1	ผลการทดลองเชิงแพคทอเรียลแบบเต็ม .....	41
4.4.2	ผลการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติการทดลองเชิงแพคทอเรียลแบบเต็ม .....	43
4.5	ขั้นตอนการควบคุมกระบวนการ (Control Phase) .....	51
4.5.1	การยืนยันผลการทดลอง.....	51
4.5.2	ผลการนำเงื่อนไขของอุณหภูมิอบแห้งและอุณหภูมิหล่อที่เหมาะสมมาใช้จริงในการผลิต .....	52
4.5.3	ผลการเปรียบเทียบสัดส่วนของเสียรุกรุนและโพรง .....	54
4.5.4	การปรับปรุงและการจัดทำคู่มือการตรวจสอบและคู่มือการติดตามน้ำโลหะ.....	55
บทที่ 5	สรุปผลการดำเนินงาน .....	59
5.1	สรุปผลผลการศึกษา.....	59
5.1.1	กระบวนการศึกษาและหาสาเหตุของปัญหา.....	59
5.1.2	กระบวนการออกแบบการทดลอง.....	60
5.1.3	กระบวนการจัดทำคู่มือมาตรฐานการปฏิบัติงาน .....	60
5.2	อุปสรรคและปัญหา.....	60
5.3	ข้อเสนอแนะจากผลการศึกษา .....	60
เอกสารอ้างอิง .....		62
ภาคผนวก.....		63
ภาคผนวก ก.....		64
ภาคผนวก ข.....		66

## สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 1.1 แผนการดำเนินการวิจัย .....	5
ตารางที่ 2.1 สรุปการปรับปรุงแก้ไขกระบวนการ และการออกแบบ/การแก้ไขแบบกระบวนการ โดยใช้เทคนิคซิกส์ ซิกมา.....	16
ตารางที่ 3.1 ปัจจัยและระดับการทดลอง Model PR-03-G014CZ.....	24
ตารางที่ 3.2 การออกแบบการทดลอง Factorial ของModel PR-03-G014CZ.....	25
ตารางที่ 4.1 แสดงจำนวนของเสียที่เกิดขึ้นจากกระบวนการหล่อเครื่องประดับ Pink Silver แบ่งตามประเภท .....	33
ตารางที่ 4.2 ปัจจัยและค่าที่ใช้ในการออกแบบการทดลอง Model PR-03-G014CZ .....	40
ตารางที่ 4.3 ผลการทดลองสำหรับกระบวนการหล่อเครื่องประดับ Model PR-03-G014CZ.....	42
ตารางที่ 4.4 Analysis of Variance .....	43
ตารางที่ 4.5 ค่าของความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิอบแห้งและอุณหภูมิหล่อที่มีสัดส่วนการเกิดเปอร์เซ็นต์รูพรุน น้อย.....	51
ตารางที่ 4.6 เปรียบเทียบผลก่อนและหลังการทดลอง.....	53
ตารางที่ 4.7 ผลการทดสอบสมมติฐานเปรียบเทียบสัดส่วนของเสียรูพรุนและโพรง .....	54

## สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 1.1 กราฟแสดงปริมาณชิ้นงานที่ตรวจพบข้อบกพร่อง.....	2
รูปที่ 2.1 ลักษณะของรูพรุนเนื่องจากการหดตัวเมื่อสังเกตด้วยตาเปล่า.....	10
รูปที่ 2.2 ลักษณะของรูพรุนเนื่องจากฟองก๊าซเมื่อสังเกตด้วยตาเปล่า.....	12
รูปที่ 2.3 ขั้นตอนการแก้ไขปัญหของกระบวนการเทคนิคซิกส์ ซิกม่า .....	14
รูปที่ 2.4 แบบจำลองทั่วไปของกระบวนการ.....	19
รูปที่ 3.1 ขั้นตอนในการศึกษาและทดลองเพื่อศึกษาปัจจัยส่งผลต่อการเกิดข้อบกพร่อง .....	22
รูปที่ 3.2 ขั้นตอนในการทดลองเพื่อศึกษาโครงสร้างจุลภาคและเปรียบเทียบผล .....	23
รูปที่ 3.3 เตาอบแก้ว ยี่ห้อ Yasui รุ่น RBF37 .....	27
รูปที่ 3.4 เครื่องหล่อแบบสูญญากาศ ยี่ห้อ Yasui รุ่น KT18C .....	27
รูปที่ 3.5 เครื่องตัดแรงโน้มถ่วงยี่ห้อ Struers รุ่น Minitom .....	28
รูปที่ 3.6 เครื่องขัดชิ้นงานทดลองยี่ห้อ Struers รุ่น LabolPol-1 .....	28
รูปที่ 3.7 กล้องจุลทรรศน์แบบแสง (Optical Microscope) ยี่ห้อ Zeiss รุ่น AxioLab .....	29
รูปที่ 3.8 ตัวอย่างการวิเคราะห์พื้นที่โดยใช้โปรแกรม ImageJ.....	29
รูปที่ 3.9 ชิ้นงานที่เกิดข้อบกพร่องแบบรูพรุนและสามารถเห็นได้ด้วยตาเปล่า .....	30
รูปที่ 3.10 ชิ้นงานที่เกิดข้อบกพร่องแบบรูพรุนเมื่อส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง .....	30
รูปที่ 4.1 แสดงตัวอย่างของชิ้นงานที่พบข้อบกพร่องแบบรูพรุน .....	32
รูปที่ 4.2 แผนภูมิพาเรโตแยกตามประเภทของเสียที่เกิดจากกระบวนการหล่อเครื่องประดับ .....	34
รูปที่ 4.3 แผนภูมิแก๊งปลาที่ได้จากการใช้วิธีระดมความคิด .....	36
รูปที่ 4.4 การติดชิ้นงานต่อหนึ่งต้นในการหล่อต่อครั้ง.....	41
รูปที่ 4.5 กราฟการแจกแจงแบบปกติสำหรับเปอร์เซ็นต์การเกิดรูพรุนต่อพื้นที่ .....	45
รูปที่ 4.6 กราฟแสดงสัดส่วนส่วนตค่างของเกิดรูพรุนต่อพื้นที่ .....	46
รูปที่ 4.7 กราฟแสดงค่าส่วนตค่างของการเกิดรูพรุนต่อพื้นที่เทียบกับลำดับการทดลอง .....	47
รูปที่ 4.8 กราฟแสดงผลกระทบของปัจจัย A (อุณหภูมิอบแก้ว) .....	48
รูปที่ 4.9 กราฟแสดงผลกระทบของปัจจัย B (อุณหภูมิหล่อ).....	49
รูปที่ 4.10 กราฟแสดงผลกระทบซึ่งกันและกันของปัจจัย A กับปัจจัย B.....	50
รูปที่ 4.11 แสดงสัดส่วนงานเสียในช่วงเดือน กรกฎาคม 2561 ถึง ตุลาคม 2561 .....	52

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.12 คู่มือการตรวจสอบชิ้นงาน Model PR-03-G014CZ หน้า 1.....	56
รูปที่ 4.13 คู่มือการตรวจสอบชิ้นงาน Model PR-03-G014CZ หน้า 2.....	57
รูปที่ 4.14 คู่มือการติดทางน้ำโลหะ Model PR-03-G014CZ.....	58



# บทที่ 1

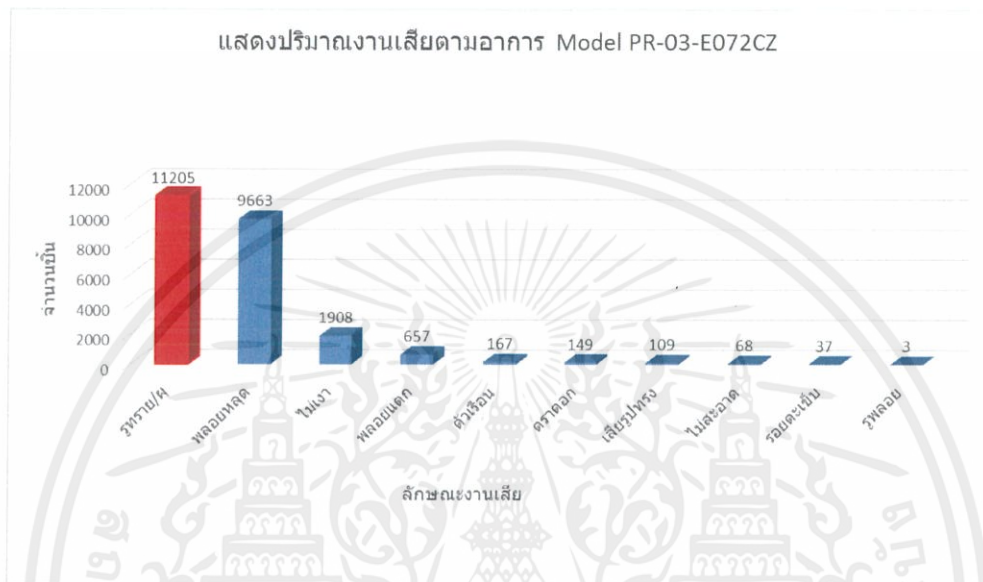
## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

อุตสาหกรรมอัญมณีและเครื่องประดับนับเป็นสินค้าที่สร้างชื่อเสียงให้กับประเทศไทยมาเป็นระยะเวลาอันยาวนาน ได้มีการพัฒนาอย่างรวดเร็วมากเนื่องจากประเทศไทยมีแหล่งวัตถุดิบที่อุดมสมบูรณ์ ทำให้อุตสาหกรรมอัญมณีและเครื่องประดับกลายเป็นอุตสาหกรรมที่มีความสำคัญต่อระบบเศรษฐกิจของประเทศไทยมากขึ้น เนื่องจากเป็นสินค้าส่งออกที่สำคัญในอันดับที่ 3 คิดเป็นสัดส่วนร้อยละ 5.18 ของสินค้าส่งออกโดยรวมของไทยนำรายได้เข้าสู่ประเทศไทยเป็นจำนวนปีละไม่ต่ำกว่าแสนล้านบาท[1] อีกทั้งยังเป็นอุตสาหกรรมที่ก่อให้เกิดการจ้างแรงงานเป็นจำนวนมาก เนื่องจากกระบวนการผลิตในอุตสาหกรรมยังต้องใช้ความประณีตที่มีความละเอียดอ่อนของมนุษย์ซึ่งเครื่องจักรไม่สามารถทดแทนได้ ในปัจจุบันอุตสาหกรรมอัญมณีและเครื่องประดับต้องเผชิญกับอุปสรรคทางการค้าและการแข่งขันที่เพิ่มมากขึ้นทั้งในด้านราคาและคุณภาพ เนื่องจากโรงงานเครื่องประดับในประเทศไทยส่วนใหญ่เป็นสถานประกอบการขนาดกลางและขนาดเล็ก (SMEs) กระบวนการผลิตยังต้องใช้ทักษะและความชำนาญของผู้ปฏิบัติงานมาก ทำให้โรงงานเครื่องประดับส่วนใหญ่ยังขาดประสิทธิภาพในการผลิต

โดยในปี 2561 ทางบริษัทได้มีการผลิตชิ้นงานโดยใช้เนื้องานแบบ Pink Silver ซึ่งมีส่วนประกอบของเงินสเตอร์ลิง (Ag) ทองแดง (Cu) และสังกะสี (Zn) มาใช้ผลิตชิ้นงานมากกว่าสิบล้านชิ้น คิดจากยอดการสั่งผลิตในช่วงเดือนกรกฎาคม พ.ศ. 2560 ถึงเดือนมิถุนายน พ.ศ. 2561 โดยการศึกษาที่มุ่งเน้นไปที่กระบวนการหล่อ เนื่องจากเป็นกระบวนการที่สำคัญที่ส่งผลให้เกิดของเสียในกระบวนการผลิต จากข้อมูลการตรวจสอบคุณภาพชิ้นงานดังรูปที่ 1.1 เมื่อผลิตโดยใช้เนื้องานแบบ Pink Silver จะพบชิ้นงานที่เกิดการบดพร่องที่พบบ่อยคือ รูพรุน (Porosity) และการหดตัว (Shrinkage) ในการหล่อแบบอินเวสเมนต์ (Investment Casting) เนื่องจากการเทโลหะหลอมเหลวลงในเบ้าปูน เบ้าปูนจะต้องผ่านการให้ความร้อนเพื่อเผาไล่เทียนต้นแบบออกและให้ความร้อนกับเบ้าปูนก่อนการหล่อ (Preheat) เพื่อให้อุณหภูมิระหว่างโลหะหลอมเหลวกับเบ้าปูนไม่ต่างกันมาก และช่วยให้โลหะหลอมเหลวไหลตัวในโพรงแบบหล่อได้ดีขึ้น

เมื่อโลหะเปลี่ยนสถานะจากของเหลวเป็นของแข็งและเย็นตัวสู่อุณหภูมิห้อง เนื้อโลหะจะเกิดการแข็งและหดตัวส่งผลต่อการหดตัวของน้ำโลหะจึงเกิดรูพรุนที่ผิวชิ้นงาน ด้วยสาเหตุดังกล่าวเมื่อทำการกระบวนการแต่งและขัดผิวชิ้นงานจะพบรูพรุนและโพรงส่งผลให้ต้องนำชิ้นงานที่ตรวจพบไปซ่อมแซมทำให้เกิดการทำงานที่ซ้ำซ้อนและการค้างของงานในกระบวนการผลิตซึ่งเป็นการกระทำที่สูญเปล่าและส่งผลกระทบต่อต้นทุนการผลิต



รูปที่ 1.1 กราฟแสดงปริมาณชิ้นงานที่ตรวจพบข้อบกพร่อง

ดังนั้นผู้ศึกษา จึงมีความสนใจที่จะศึกษา หัวข้อ การประยุกต์ใช้วิธีการ DMAIC สำหรับลดข้อบกพร่องบริเวณผิวชิ้นงานจากกระบวนการหล่อ Pink Silver ด้วยการหล่อแบบอินเวสเมนต์ เพื่อเป็นแนวทางในการแก้ไขปัญหาต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นในงานหล่อเครื่องประดับให้เกิดข้อบกพร่องน้อยที่สุดหรือไม่เกิดปัญหาอีกในอนาคต และช่วยลดต้นทุนในการผลิตเครื่องประดับ Pink Silver ที่เกิดจากการหลอมมีปัญหา

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อลดข้อบกพร่องบริเวณผิวชิ้นงานจากกระบวนการหล่อ Pink Silver ด้วยการหล่อแบบอินเวสเมนต์ เป็นไปตามที่บริษัทต้องการ

## 1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

1. เพื่อศึกษากระบวนการผลิตเครื่องประดับ และปรับปรุงกระบวนการเพื่อลดข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นที่ผิวชิ้นงาน Model PR-03-G014CZ
2. เพื่อศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิที่มีผลต่อผิวชิ้นงาน รวมถึงปัจจัยในกระบวนการผลิตที่มีผลต่อข้อบกพร่อง เช่น กระบวนการทำเข้าปูนและเครื่องจักร เป็นต้น
3. เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิอบแห้งและอุณหภูมิหล่อที่เหมาะสม และพิจารณาผลลัพธ์ของการทดลองหลังจากทำการผลิตจริง
4. เพื่อปรับปรุงคุณภาพผิวของเครื่องประดับ Model PR-03-G014CZ ให้อยู่ในมาตรฐานการตรวจสอบคุณภาพ และกำหนดเป็นมาตรฐานในการทำงานพร้อมจัดทำเป็นคู่มือการตรวจสอบและการติดตามน้ำโลหะ

## 1.3 ขอบเขตของการศึกษา

ศึกษากระบวนการผลิตเครื่องประดับ Model PR-03-G014CZ ในขั้นตอน การทำพิมพ์ การฉีดเทียน การทำปูน การหล่อ การแต่งผิว และการขัด พร้อมทำการปรับปรุงปัจจัยที่ส่งผลต่อการเกิดข้อบกพร่องที่ผิวชิ้นงานและกำหนดเป็นมาตรฐานในการทำงาน

## 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. เข้าใจกระบวนการผลิตเครื่องประดับ Pink Silver ด้วยการหล่อแบบอินเวสเมนต์
2. สามารถปรับปรุงข้อบกพร่องที่ผิวชิ้นงาน เพื่อให้เป็นประโยชน์กับทางบริษัท
3. จัดทำมาตรฐานการหล่อชิ้นงานเพื่อเป็นประโยชน์กับทางบริษัทในอนาคต

## 1.5 วิธีการดำเนินการวิจัย

วิธีการดำเนินการวิจัยสามารถเรียงลำดับขั้นตอนได้ดังนี้

1. กำหนดปัญหา วัตถุประสงค์ และขอบเขตการศึกษาภายในกระบวนการผลิตเครื่องประดับเนื้อเงินสเตอร์ลิงผสมกับเนื้อ Alloy ในขั้นตอน การทำพิมพ์ การฉีดยีน การทำปูน การหล่อ การแต่งผิว และการขัด
2. ทำการเก็บข้อมูลที่เกี่ยวข้องในกระบวนการผลิตเครื่องประดับ พร้อมศึกษาปัจจัยที่เกี่ยวข้องที่ส่งผลต่อการเกิดข้อบกพร่องโดย Cause & Effect Diagram ทำการวิเคราะห์เชิงสถิติแบบ Pareto Chart แสดงส่วนปัญหาที่แท้จริง
3. ศึกษาแนวคิดและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องเพื่อใช้ในการแก้ปัญหาที่พบ
4. วิเคราะห์การเกิดข้อบกพร่อง ทำการออกแบบการทดลองแบบ Factorial ศึกษาปัจจัยและระดับของปัจจัยที่ส่งผลต่อการเกิดข้อบกพร่อง
5. เก็บตัวอย่างชิ้นงานจากการทดลอง นำชิ้นงานไปส่องกล้องจุลทรรศน์แบบแสงดูโครงสร้างจุลภาค (Micro structure) ทำการวิเคราะห์ภาพการเกิด Shrinkage Porosity ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์
6. เปรียบเทียบผลและทำการวิเคราะห์ทางสถิติ
7. สรุปผลการดำเนินงาน พร้อมกำหนดเป็นมาตรฐานในการทำงาน ที่เหมาะสมที่สุดให้แก่ทางบริษัท มิททิ ไชมิส อินเตอร์เนชันแนล จำกัด

ระยะเวลาและวิธีการดำเนินการวิจัย เป็นไปตามลำดับ แสดงดังตารางที่ 1.1

ตารางที่ 1.1 แผนการดำเนินงานวิจัย ปี พ.ศ. 2561

วิธีดำเนินงาน	บทที่	สิงหาคม	กันยายน	ตุลาคม	พฤศจิกายน	ธันวาคม
1. กำหนดปัญหา วัตถุประสงค์ และขอบเขตการศึกษา	1					
2. ทำการเก็บข้อมูล ศึกษาปัจจัย ทำการวิเคราะห์เชิงสถิติ	1					
3. ศึกษาแนวคิดและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	2					
4. วิเคราะห์การเกิดข้อบกพร่อง ทำการออกแบบการทดลอง	3					
5. เก็บตัวอย่างชิ้นงานจากการทดลอง นำชิ้นงานไปส่องกล้องจุลทรรศน์แบบแสงทำ การวิเคราะห์ภาพด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์	3					
6. เปรียบเทียบผลและทำการวิเคราะห์ทางสถิติ	4					
7. สรุปผลการดำเนินงาน พร้อมกำหนดเป็นมาตรฐานในการทำงาน	5					

## บทที่ 2

### แนวคิด ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในการศึกษาวิทยานิพนธ์นี้จัดทำขึ้นเพื่อศึกษาปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการหล่อผลิตภัณฑ์เครื่องประดับจาก Pink Silver ที่เหมาะสม กรณีศึกษาบริษัท มิชิ โซมิส อินเตอร์เนชั่นแนล จำกัด และแก้ไข ปัญหาเรื่องคุณภาพของผลิตภัณฑ์ ลดข้อบกพร่องและงานซ่อมจากการผลิต โดยแบ่งเป็นหัวข้อที่เกี่ยวข้องดังนี้

1. กระบวนการผลิตเครื่องประดับแบบหล่อและการหล่อแบบอินเวสเมนต์
2. ข้อบกพร่องในงานหล่อตัวเรือนเครื่องประดับ
3. เทคนิคซิกส์ ซิกม่า
4. ทฤษฎีการออกแบบการทดลอง (Design of Experiments , DOE)
5. การออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียล

## 2.1 กระบวนการผลิตเครื่องประดับแบบหล่อและการหล่อแบบอินเวสเมนต์ [2]

กระบวนการผลิตเครื่องประดับแบบหล่อ มีกระบวนการผลิตหลายขั้นตอน มีความแตกต่างทั้งลำดับในการทำแต่ละขั้นตอนตามรูปแบบผลิตภัณฑ์ แต่กระบวนการผลิตหลัก ๆ นั้นมีรายละเอียดดังนี้

### 2.1.1 การออกแบบ (Design)

ฝ่ายการตลาดจะรับออเดอร์จากลูกค้า แล้วแจ้งรายละเอียดที่ลูกค้าต้องการแก่แผนกออกแบบ การออกแบบจะเป็นการวาดภาพชิ้นงานซึ่งยังไม่ได้พิจารณาความเป็นไปได้ในการผลิตจริง เมื่อออกแบบเสร็จจะส่งแบบให้ฝ่ายการตลาดพิจารณาว่าใช้ได้หรือไม่ ถ้าใช้ได้ฝ่ายการตลาดจะส่งแบบให้ลูกค้าดู ถ้าลูกค้าพอใจ แผนกออกแบบจะส่งให้แผนกทำพิมพ์นำไปพิจารณาทำเป็นข้อมูลรายละเอียดของการผลิต ถ้ามีรายละเอียดบางอย่างที่ไม่อาจผลิตได้จริง จะมีการแก้ไขแบบเพื่อให้มีความเป็นไปได้ที่จะผลิตจริง

### 2.1.2 การทำแม่พิมพ์เงิน (Model Marking)

เพื่อใช้เป็นต้นแบบของผลิตภัณฑ์ที่จะผลิต กรรมวิธีการขึ้นรูปแม่พิมพ์จะทำได้ด้วยมือ โดยใช้โลหะเงินแท่งซึ่งจะแยกทำชิ้นส่วนประกอบย่อยก่อน แล้วนำมาประกอบเป็นตัวเรือนของเครื่องประดับโดยวิธีการเชื่อม น้ำประสาน แบบแม่พิมพ์ที่ได้นี้เปรียบเสมือนกระสวนของงานหล่อทั่วไป ซึ่งทำขึ้นเพื่อใช้เป็นแบบของการทำแบบหล่อ

### 2.1.3 การทำแม่พิมพ์ยาง (Rubber Mold Marking)

วัตถุดิบที่ใช้ได้แก่ยางดิบ ซึ่งมี 2 แบบ คือ ยางนอกและยางใน โดยยางนอกจะใช้ในการเตรียมบล็อกยางบริเวณผิวชั้นนอก ยางนอกเป็นยางที่มีคุณภาพต่ำกว่ายางใน ซึ่งมีคุณสมบัติของการทนความร้อนและแรงดันที่สูงกว่า จึงใช้สำหรับอัดภายในบล็อกยาง ขั้นตอนการทำแบบแม่พิมพ์ยางมีดังนี้

2.1.3.1 การเตรียมบล็อกยาง โดยนำแผ่นยางนอกมาตัดให้มีขนาดเท่ากับบล็อกยาง แล้ววางยางนอกรองด้านล่างของบล็อก 1 – 2 ชั้น จากนั้นวางแม่พิมพ์เงินลงในบล็อก อัดยางในที่ตัดเป็นชั้นเล็ก ๆ ปิดทับแม่พิมพ์ให้แน่นและมีโพรงช่องว่างน้อยที่สุด แล้วปิดทับด้านบนด้วยแผ่นยางนอกอีกครั้ง

2.1.3.2 การอัดบล็อกยาง นำบล็อกยางไปอัดด้วยเตาอัดยางโดยตั้งอุณหภูมิประมาณ 60 – 140 องศาเซลเซียส ระยะเวลาที่ใช้ขึ้นกับขนาดของบล็อกพิมพ์ยาง เช่น บล็อกขนาดใหญ่ ขนาดกลาง และขนาดเล็ก ใช้เวลาประมาณ 30, 50 และ 60 นาที ตามลำดับ

2.1.3.3 การฝ่ายาง ทำได้โดยยึดบล็อกยางด้วยปากกาจับแบบหนีบ จากนั้นใช้มีดผ่าตัดกรีดบล็อกยางเพื่อเอาแบบพิมพ์เงินออกมา ขั้นตอนนี้ต้องอาศัยฝีมือและความชำนาญอย่างมาก เนื่องจากในการลงมีดกรีดยางแต่ละครั้งจะมีผลต่อความสนิทของรอยประกบระหว่างบล็อกพิมพ์ยางชั้นบนและชั้นล่าง อีกทั้งต้องกรีดยางภายในบล็อก ซึ่งประกอบไปด้วยส่วนของไส้แบบ และระบบจ่ายน้ำโลหะ

#### 2.1.4 การฉีดเทียน (Wax Injection)

ขั้นแรกต้องเตรียมขี้ผึ้งก่อน โดยหลอมละลายขี้ผึ้งในหม้อฉีดเทียนและปรับความดันลมและอุณหภูมิที่เหมาะสม ใช้แผ่นเหล็กหนา ผิวเรียบ ประกบทั้งด้านบนและด้านล่างของแบบพิมพ์ยาง เพื่อให้แรงกดกระจายสม่ำเสมอทั่วทั้งแบบพิมพ์ยาง ในการฉีดเทียนให้กดตรงส่วนที่ทำไว้ให้ขี้ผึ้งเหลวไหลผ่านเข้ากับหัวฉีดของหม้อ เสร็จแล้ววางทิ้งไว้ให้แข็งตัว

#### 2.1.5 การหล่อตัวเรือน (Casting)

เป็นกรรมวิธีการขึ้นรูปตัวเรือนของเครื่องประดับโดยอาศัยวิธีการหล่อแบบต่าง ๆ ร่วมกัน ได้แก่ การหล่อแบบขี้ผึ้งหาย การหล่อแบบปูนปลาสเตอร์ การหล่อแบบเหวียง และการหล่อแบบอินเวสเมนต์ ที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน การหล่อตัวเรือนเครื่องประดับมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

2.1.5.1 การหล่อเข้าปูน ผสมปูนกับน้ำในอัตราส่วนที่กำหนดในเครื่องผสมปูนสุญญากาศ โดยนำดินเทียนสวมเข้ากับเบ้าวางในเครื่องสุญญากาศ จากนั้นเทปูนลงในเบ้าเพื่อหล่อปูนทับพร้อมกับดูดอากาศไปด้วย

2.1.5.2 การอบเข้าปูน โดยอุ่นเตาอบที่อุณหภูมิประมาณ 300 องศาเซลเซียส ประมาณ 1 ชั่วโมง เพิ่มอุณหภูมิให้สูงขึ้นทีละ 100 องศาเซลเซียสทุก 1 ชั่วโมงจนถึงอุณหภูมิที่เหมาะสมกับโลหะที่ใช้หล่อ และรักษาระดับอุณหภูมิไว้นานประมาณ 6 ชั่วโมง แล้วลดอุณหภูมิของเตาอบลงมาอยู่ที่ระดับพอเหมาะกับประเภท ชนิด และขนาดของชิ้นงานที่ต้องการเป็นเวลานานประมาณ 1 ชั่วโมง

2.1.5.3 การหล่อแบบอินเวสเมนต์ เครื่องหล่อสุญญากาศ (Vacuum Assisted Casting Machine) มีระบบการหลอมด้วยอินดักชัน ทำให้โลหะหลอมเหลวและหล่อลงในกระบอกร โดยที่มีระบบสุญญากาศช่วยดูดน้ำโลหะเข้าสู่กระบอกรปูนจากนั้นจะทำการหล่อเป็นเวลาประมาณ 3-5 นาที เมื่อทำการหล่อเสร็จแล้วนำกระบอกรปูนออกจากเครื่องหล่อ มาผ่านกระบวนการทำให้เข้าปูนให้เย็นตัว การหล่อแบบนี้เป็นที่นิยมเนื่องจากมีความทันสมัยและสมบูรณ์มากที่สุดในการหล่อเครื่องประดับโลหะ

2.1.5.4 การแกะแบบปูน เพื่อนำต้นงานออกจากเบ้าปูน โดยวิธีการฉีดน้ำแรงดันสูงเข้าทำลายปูนปลาสเตอร์ พร้อมกับทำความสะอาดชิ้นงานไปด้วย

2.1.5.5 การทำความสะอาดผิวชิ้นงาน ใช้วิธีการแช่น้ำกรดที่มีความเข้มข้น 35 เปอร์เซ็นต์ นาน 15 นาที ตัวเรือนเครื่องประดับที่ได้จากกรรมวิธีการหล่อข้างต้นจะอยู่ในรูปของต้นงานหล่อที่มีตัวเรือนเครื่องประดับวางซ้อนเรียงเป็นชั้น ๆ ในลักษณะเช่นเดียวกับต้นเทียน

การหล่อตัวเรือนเครื่องประดับถือเป็นหัวใจที่สำคัญที่สุดในการผลิตเครื่องประดับ เพราะเมื่อหล่อเป็นตัวเรือนแล้ว หากชิ้นงานที่ได้มีความบกพร่องมากก็จำเป็นต้องหล่อใหม่ ซึ่งจะเกิดความสูญเสียหลายทาง ไม่ว่าจะเป็นการสูญเสียเนื้อเทียนของหุ่นขี้ผึ้งอันใหม่ การสูญเสียวัสดุสำหรับการหล่อ เสียเวลาและพลังงานค่อนข้างมาก ตลอดระยะเวลาไม่ต่ำกว่า 10 ชั่วโมง ดังนั้น ดังนั้นต้องปรับแต่งสภาพของการหล่อได้อย่างเหมาะสมเพื่อให้ได้ชิ้นงานที่ไม่เกิดข้อบกพร่อง

#### 2.1.6 การแต่งชิ้นงาน (Filling)

เป็นกรรมวิธีที่ทำให้ตัวเรือนมีขนาดรูปร่างและน้ำหนักตรงตามความต้องการ ขั้นตอนการตกแต่งตัวเรือนอาจแตกต่างกันตามชนิดของเครื่องประดับ อย่างไรก็ตามจะต้องควบคุมน้ำหนักของตัวเรือนให้อยู่ในเกณฑ์ที่ต้องการ ปกติมักจะยอมให้มีการสูญเสียวัสดุของตัวเรือนจากงานแต่งได้ไม่เกินเกณฑ์ที่กำหนด โดยอยู่ในรูปร้อยละของน้ำหนักตัวเรือน เช่น 1.5 เปอร์เซ็นต์ เป็นต้น

#### 2.1.7 การขัดชิ้นงาน (Buffing)

การขัดเงาเป็นกรรมวิธีการตกแต่งงานอย่างละเอียด เพื่อเพิ่มความเรียบ ความมันเงา และความสวยงามของผิวตัวเรือนเครื่องประดับ วัสดุที่ใช้ได้แก่ ลูกผ้า ลูกแปรง ยาดิน ยาขาว ยาแดง สำลี ผ้าดิบ และแปรงทองเหลือง เครื่องมือที่ใช้ ได้แก่ มอเตอร์ และสว่านมือ

#### 2.1.8 การตรวจสอบคุณภาพ (Inspection)

การตรวจสอบคุณภาพของชิ้นงาน แบ่งเป็น

1. การตรวจสอบคุณภาพในระหว่างการผลิต เป็นการตรวจสอบภายหลังการผลิตที่ผ่านขั้นตอนการผลิตหนึ่งๆ ซึ่งหากมีข้อบกพร่องในระดับที่สามารถนำชิ้นงานไปซ่อมแซมได้ ก็จะเข้าสู่ระบบการซ่อมแซม แต่ถ้าหากมีข้อบกพร่องในระดับที่ไม่สามารถนำชิ้นงานไปซ่อมแซมได้ จะต้องผลิตชิ้นงานชิ้นใหม่

2. การตรวจสอบคุณภาพขั้นสุดท้าย เป็นการตรวจสอบชิ้นงานขั้นสุดท้ายภายหลังการผลิตที่ผ่านกระบวนการผลิตทุกขั้นตอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.2 ข้อบกพร่องในงานหล่อตัวเรือนเครื่องประดับ [3]

### 2.2.1 รูพรุนเนื่องจากการหดตัวของโลหะ (Shrinkage Porosity)

รูพรุนที่เกิดจากการหดตัวของโลหะ (Shrinkage Porosity) โดยรูพรุนตามดที่เกิดขึ้นในชิ้นงานส่วนใหญ่มักเป็นรูพรุนในลักษณะนี้ โดยโลหะจะหดตัวในลักษณะ (Dendrite) ที่เรียกว่าการผ่นนั้นมักจะเกิดที่บริเวณส่วนหนาของชิ้นงาน เช่น หัวแหวนหรือบริเวณก้านที่มีความหนามาก ลักษณะรูพรุนแบบหดตัวนี้เกิดขึ้นจากก้านทางเดินน้ำโลหะมีขนาดเล็กเกินไปและติดติดตำแหน่ง ทำให้น้ำโลหะไหลได้ไม่ดีและขณะที่น้ำโลหะแข็งตัวเกิดการหดตัวของน้ำโลหะไม่พอเพียง บริเวณที่เกิดการหดตัวจึงเกิดโพรงลักษณะรูพรุนขึ้น นอกจากนี้ในบางกรณียังพบ รูพรุนหรือตามดจากการหดตัวตรงส่วนที่บางที่สุดของชิ้นงาน ซึ่งรูพรุนลักษณะนี้เกิดจากตรงบริเวณส่วนที่บางของชิ้นงานเกิดการหดตัวอย่างรวดเร็วทำให้ไปกั้นการไหลของน้ำโลหะที่จะเข้าไปซัดเซยตรงบริเวณที่หดตัว ทำให้น้ำโลหะไปซัดเซยบริเวณที่หดตัวไม่ทันจึงเกิดรูพรุนขึ้น

การหดตัวเนื่องจากการแข็งตัวของโลหะ มีลักษณะเป็นช่องว่างที่มีรูปร่างไม่แน่นอนของโครงสร้างแบบกิ่งไม้ (Dendrite) ซึ่งเกิดขึ้นในระหว่างการแข็งตัวของน้ำโลหะ โดยน้ำโลหะถูกปิดกั้นจากโลหะในส่วนบริเวณที่แข็งตัวก่อน ทำให้ไม่สามารถไหลเข้าไปซัดเซยในบริเวณที่เกิดการหดตัวที่หลัง ลักษณะเช่นนี้เป็นสมบัติเฉพาะตัวของโลหะ ไม่สามารถหลีกเลี่ยงหรือกำจัดได้โดยสมบูรณ์แต่สามารถลดปริมาณลงได้ รูพรุนจากการหดตัวของโลหะ มี 2 ลักษณะ คือ การหดตัวแบบโพรงและการหดตัวแบบแพ



รูปที่ 2.1 ลักษณะของรูพรุนเนื่องจากการหดตัวเมื่อสังเกตด้วยตาเปล่า

แนวทางการแก้ไขรูพรุนเนื่องจากการหดตัวของโลหะ

การติดทางน้ำโลหะที่ไม่ถูกต้อง

การแก้ไข ควรติดทางเดินน้ำโลหะโดยอาศัยหลักการที่ว่า “ควรติดทางน้ำตรงส่วนที่หนาที่สุดของชิ้นงาน” เพราะชิ้นงานบริเวณข้างเคียงที่บางกว่าจะแข็งตัวเร็วกว่าบริเวณส่วนหนาและเมื่อบริเวณส่วนที่บางกว่าแข็งตัวจนหมดก็เปรียบเสมือนเป็นตัวกั้นไม่ให้น้ำโลหะไหลออกจากก้านหรือจากทางเดินน้ำโลหะไหลเข้าบริเวณส่วนหนาได้ ซึ่งส่งผลให้เกิดรูพรุนหดตัวที่บริเวณส่วนหนานั้นเอง

ใช้ขนาดทางน้ำโลหะที่ไม่เหมาะสม

การแก้ไข เพิ่มทางน้ำโลหะหรือใช้ทางเดินน้ำโลหะที่มีขนาดใหญ่ขึ้น ทางเดินน้ำโลหะนั้นถูกออกแบบมา เพื่อป้องกันน้ำโลหะเข้าสู่โพรงแบบ ถ้าทางน้ำโลหะมีขนาดเล็กเกินไปจะส่งผลให้มีการแข็งตัวของน้ำโลหะก่อนที่ชิ้นงานจะได้รับน้ำโลหะที่พอเพียงในการหล่อ การปรับปรุงทางเดินน้ำโลหะสามารถแก้ไขที่แม่พิมพ์โลหะได้ โดยช่างพิมพ์จะเป็นผู้ออกแบบการติดทางน้ำก่อนที่จะนำไปอัดพิมพ์ยาง โดยก้านทางน้ำที่เสริมเข้ามาควรเป็นก้านกลมทรงกระบอก เพื่อให้ น้ำโลหะไหลเข้าโพรงแบบได้ง่าย ซึ่งช่างพิมพ์จำเป็นต้องใช้เวลาในการฝึกฝนและสร้างความชำนาญเพราะรูปแบบของงานเครื่องประดับมีความหลากหลาย

อุณหภูมิเข้าสู่เกินไป

การแก้ไข ลดอุณหภูมิเข้าให้ต่ำลง ถ้าอุณหภูมิเข้าสู่เกินไปจะทำให้เกิดรูพรุนเนื่องจากการหดตัวของโลหะสูงขึ้น โดยที่อุณหภูมิเข้าควรจะต่ำสุดเท่าที่จะเป็นไปได้ทราบเท่าที่จะสามารถเติมน้ำโลหะเข้าสู่โพรงแบบได้สมบูรณ์ ควรให้ชิ้นงานที่มีปริมาตรและน้ำหนักเท่ากันอยู่บนต้นเทียนเดียวกัน แต่ถ้าจำเป็นต้องติดชิ้นงานที่มีขนาดและน้ำหนักต่างกัน ควรให้ชิ้นงานที่มีปริมาตรมากที่สุดอยู่ใกล้กับทางเข้ารูเท และให้ชิ้นงานที่มีปริมาตรน้อยกว่าอยู่ใกล้ด้านบนของต้นเทียน

ชิ้นงานหล่ออยู่ใกล้กับรูเทมากเกินไป

การแก้ไข เว้นระยะห่างอย่างน้อย 1 นิ้วระหว่างปากรูเทกับแถวแรกของชิ้นงานหล่อ ปากรูเทนั้นจะสัมผัสกับอากาศและเย็นตัวอย่างรวดเร็ว การเย็นตัวนี้จะส่งผลกับชิ้นงานหล่อที่อยู่แถวแรกอย่างเห็นได้ชัด ดังนั้น ถ้าแถวแรกของชิ้นงานหล่ออยู่ใกล้กับปากรูเทมากเกินไปจะทำให้ น้ำโลหะบริเวณทางน้ำโลหะที่ติดกับชิ้นงานแข็งตัวและทำให้เกิดรูพรุน เนื่องจากการหดตัวของโลหะ

## 2.2.2 รูพรุนจากตามดจากฟองก๊าซ (Gas Porosity)

อาจมีสาเหตุจากปัญหาเทียนเดือดและเขม่าเทียนที่เกิดจากเทียนไหลออกไม่หมดหรือเผาเทียนออกไม่หมด การนำเทียนเก่ากลับมาใช้ซ้ำทำให้มีโอกาสที่น้ำเทียนไหลออกจากแบบไม่หมดและกลายเป็นคราบเขม่าของคาร์บอน ซึ่งเมื่อเทน้ำโลหะหลอมเหลวเข้าไปในโพรงแบบ น้ำโลหะจะสัมผัสกับเขม่าของคาร์บอน เกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์หรือคาร์บอนมอนอกไซด์ขึ้น ก๊าซที่เกิดขึ้นนี้ไม่สามารถไหลออกจากกระบอกปูนได้ทัน จึงทำให้เกิดปัญหารูพรุนจากฟองก๊าซตามมา โดยรูพรุนนี้จะมีลักษณะเป็นเม็ดกลมเหมือนฟองอากาศที่ค้างอยู่ในเนื้อโลหะ และมักเกิดเป็นเม็ดกลมเล็ก ๆ ทั่วผิวชิ้นงาน



รูปที่ 2.2 ลักษณะของรูพรุนเนื่องจากฟองก๊าซเมื่อสังเกตรด้วยตาเปล่า

แนวทางการแก้ไขรูพรุนเนื่องจากฟองก๊าซ

1. ควรนึ่งเทียนที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1.5-2 ชั่วโมง เพื่อให้เทียนไหลออกก่อนจะนำกระบอกปูนเข้าเตาอบ แต่ไม่ควรนึ่งเทียนนานเกินไปเพราะจะทำให้ไอน้ำที่ไปเกาะบนปูนและซึมเข้าผนังปูน หากปูนมีน้ำซึมมากเกินไปจะทำให้ปูนมีความแข็งแรงลดลงและกะเทาะหลุดออกได้ง่าย
2. ไม่ควรนำเทียนเก่ามาใช้ซ้ำอีก เพราะเทียนที่ใช้แล้วจะมีคุณสมบัติลดลงและมีความหนืดเพิ่มมากขึ้น ทำให้เทียนที่หนืดไหลออกได้ยาก ในบางตำแหน่งจะเกิดเทียนเดือดได้และมีโอกาสเกิดเป็นเขม่าคาร์บอนติดอยู่ เมื่อเทน้ำโลหะเข้าโพรงแบบจะเกิดเป็นฟองก๊าซขึ้น
3. ควรตรวจดูทางน้ำโลหะให้เหมาะสม เพื่อให้เทียนไหลออกได้สะดวก ลดปัญหาเทียนตกร้างและเกิดเขม่าภายในผนังปูน อันเป็นสาเหตุให้เกิดปัญหารูพรุนจากฟองก๊าซ

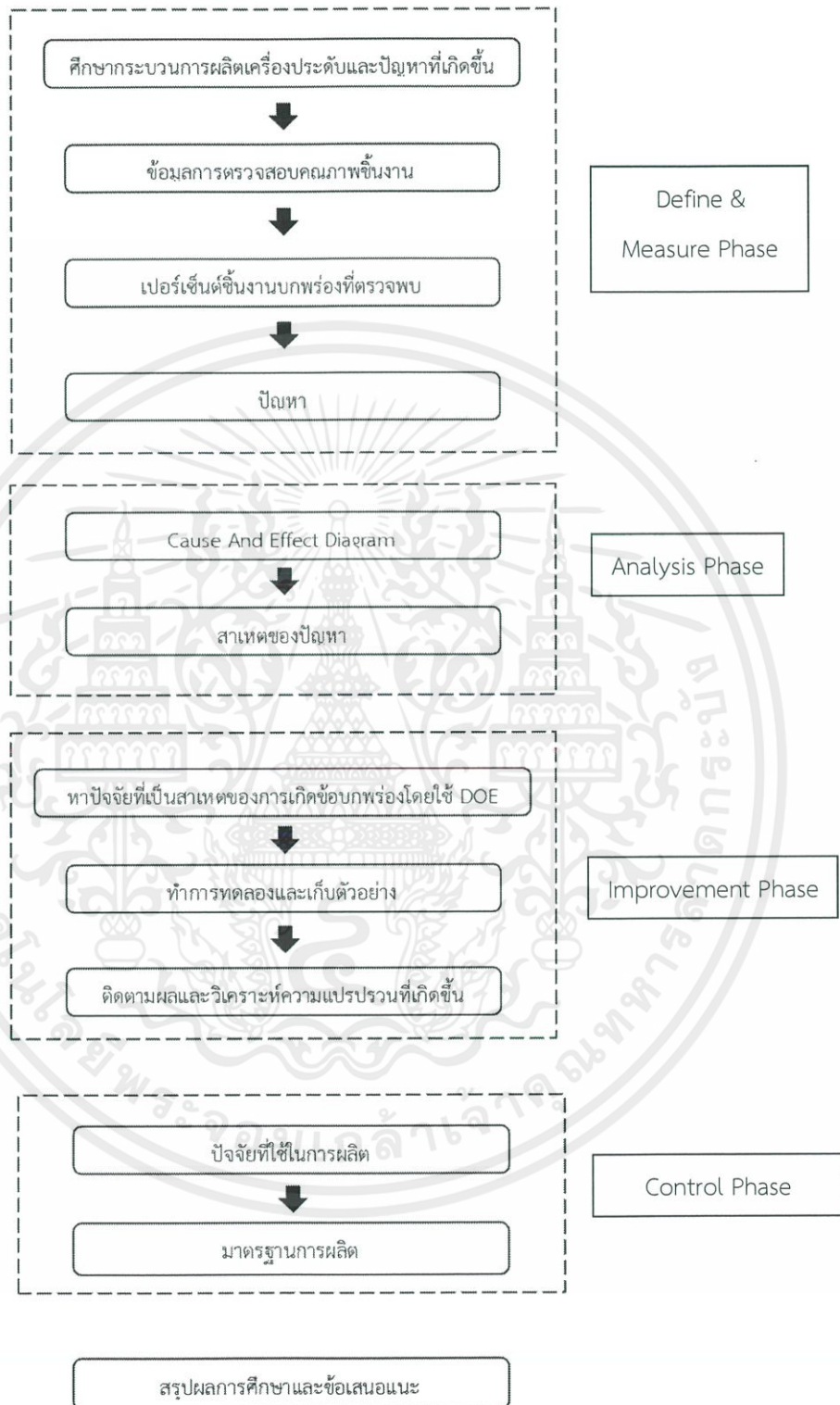
4. ควรหลีกเลี่ยงการติดทางน้ำ ที่มีแนวโน้มทำให้เกิดการดักจับอากาศจากการไหลวนของน้ำไหล (Turbulence) ที่ไหลเข้าไปในโพรงแบบขณะหล่ออันเป็นสาเหตุให้เกิดรูพรุนจากฟองก๊าซได้

5. ไม่ควรนำกระบอกปูนเข้าเตาอบมากเกินไปเพราะจะทำให้อากาศภายในเตาไหลเวียนไม่ดี ไม่ถ่ายเท ซึ่งทำให้เขม่าเทียนไม่สามารถไล่ออกได้หมด เมื่อเทน้ำโลหะไปสัมผัสกับเขม่าจะกลายเป็นก๊าซ ดังนั้นควรวางกระบอกปูนอยู่ห่างจากผนังเตาประมาณ 1 นิ้ว และระยะห่างระหว่างกระบอกไม่ควรต่ำกว่า 0.5 นิ้ว

## 2.3 เทคนิคซิกส์ ซิกม่า [4]

ณัฐพันธ์ เชนรพันธ์ (2545) อธิบายว่าซิกส์ ซิกม่า คือ กระบวนการปรับปรุงคุณภาพในองค์กร เพื่อลดข้อบกพร่อง (Defects) ที่เกิดขึ้นในกระบวนการต่างๆ โดยมุ่งเน้นให้เกิดความผิดพลาดน้อยที่สุด คือ ไม่เกิน 3.4 ชิ้น/ครั้งในล้านชิ้น/ครั้ง หรือเรียกอีกอย่างว่าลดความสูญเสียโอกาสลงให้เหลือเพียงแค่ 3.4 หน่วยในล้านหน่วยนั่นเอง (Defects per Million Opportunities, DPMO) วิธีการของซิกส์ ซิกม่า ได้เริ่มมีการประยุกต์ใช้ในบริษัทโมโตโรล่า ในช่วงปี ค.ศ.1980 โดยมุ่งเน้นที่การลดต้นทุนและการปรับปรุงกระบวนการทำงานให้สอดคล้องกับกลยุทธ์ที่บริษัทได้วางไว้ นอกจากนี้ ปัจจุบันบริษัทชั้นนำหลายบริษัททั่วโลกได้เล็งเห็นประโยชน์และได้นำมาประยุกต์ใช้ได้แก่ บริษัท General Electric บริษัท Sony บริษัท Allied Signal และบริษัท Kodak เป็นต้น เทคนิคซิกส์ ซิกม่า เป็นเทคนิควิธีการในการเพิ่มผลผลิตเป็นเครื่องมือทางการจัดการที่กำลังได้รับความสนใจมาก ทั้งนี้เนื่องจากผลสำเร็จของบริษัทชั้นนำของโลก ที่ได้นำเอาวิธีการดังกล่าวมาปรับปรุงคุณภาพกระบวนการภายในองค์กร จนสามารถเพิ่มรายได้หรือสร้างความสำเร็จให้กับบริษัทได้อย่างก้าวกระโดด เทคนิคซิกส์ ซิกม่า เป็นการวัดคุณภาพของสินค้าและบริการในระดับสูง โดยพยายามที่จะกำจัดข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นในทุกกระบวนการขององค์กร มีแนวคิดที่จะหาวิธีการที่แน่ชัดที่สามารถควบคุมป้องกันก่อนที่ปัญหาจะเกิดหรือเกิดขึ้นจริง (Risk Management) ผลของเทคนิคซิกส์ ซิกม่า จะตอบสนองความพึงพอใจของลูกค้าให้สูงขึ้นและช่วยลดต้นทุนขององค์กรลง (Customer-driven Organization) เป็นการบริหารระบบ (Management System) รองรับด้วยหลักการทางสถิติ นำไปสู่การปรับปรุงคุณภาพขนาดใหญ่ (Quantum Leap Improvement in Quality) และลดค่าใช้จ่ายให้ความสำคัญที่ลูกค้า (Customer Focus)

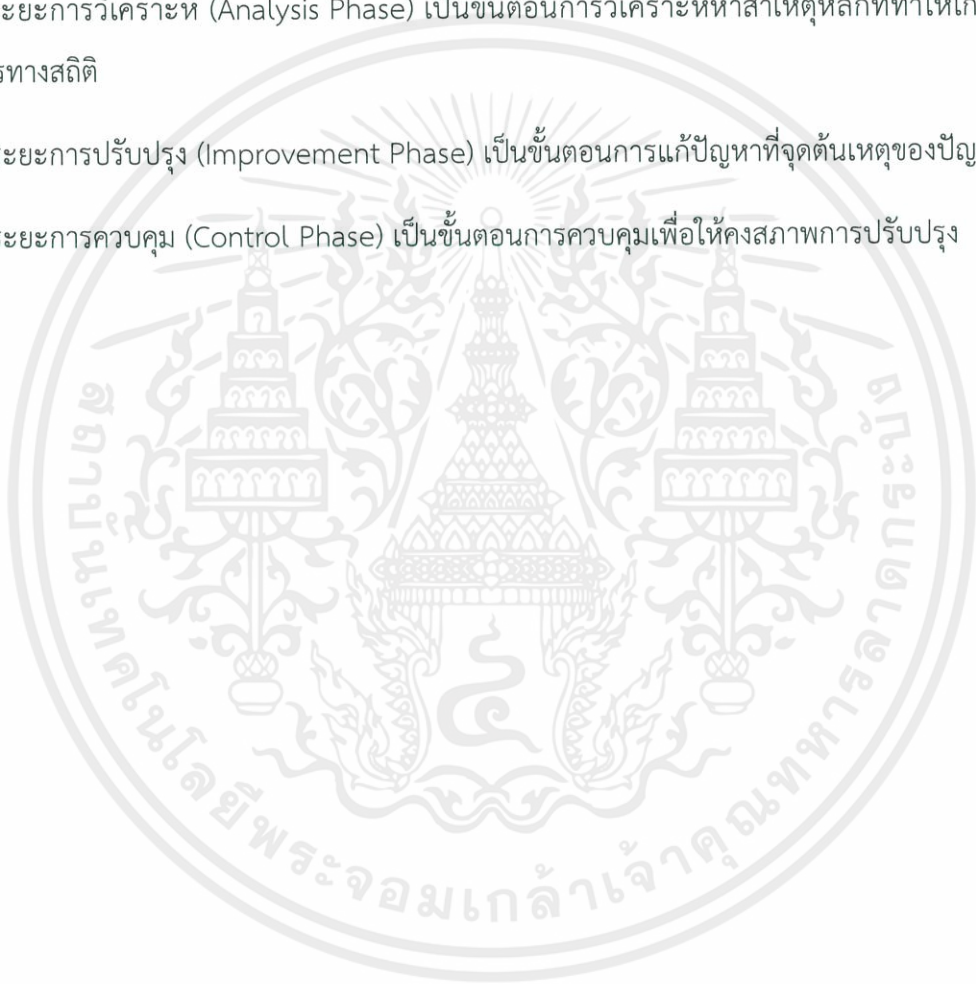
Flow Chart ขั้นตอนการแก้ไขปัญหาของกระบวนการเทคนิคซิกส์ ซิกม่า



รูปที่ 2.3 ขั้นตอนการแก้ไขปัญหาของกระบวนการเทคนิคซิกส์ ซิกม่า

เทคนิคซิกส์ ซิกมา กำหนดขั้นตอนการดำเนินงานที่แน่นอนสำหรับการใช้สำหรับการใช้แก้ปัญหาหรือปรับปรุงสมรรถนะของกระบวนการ โดยจะแบ่งออกเป็น 5 ระยะคือ

1. ระยะเตรียมการ (Define Phase) เป็นขั้นตอนการกำหนดวิสัยทัศน์หรือเป้าหมาย และขั้นตอนของกระบวนการหรือโครงการรวมถึงการทำความเข้าใจกับความต้องการของลูกค้า
2. ระยะการตรวจวัด (Measure Phase) เป็นขั้นตอนการทำความเข้าใจกับกระบวนการ เช่นการเก็บรวบรวมข้อมูลของเสียและสาเหตุที่เป็นไปได้ เป็นต้น
3. ระยะการวิเคราะห์ (Analysis Phase) เป็นขั้นตอนการวิเคราะห์หาสาเหตุหลักที่ทำให้เกิดปัญหาโดยใช้วิธีการทางสถิติ
4. ระยะการปรับปรุง (Improvement Phase) เป็นขั้นตอนการแก้ปัญหาที่จุดต้นเหตุของปัญหา
5. ระยะการควบคุม (Control Phase) เป็นขั้นตอนการควบคุมเพื่อให้คงสภาพการปรับปรุง



ตารางที่ 2.1 สรุปการปรับปรุงแก้ไขกระบวนการ และการออกแบบ/การแก้ไขแบบกระบวนการ

โดยใช้เทคนิคซิกม่า

DMAIC	การปรับปรุงกระบวนการ	การออกแบบ/แก้ไขแบบกระบวนการ
1. นิยาม Define	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ระบุปัญหา</li> <li>- นิยามข้อกำหนด</li> <li>- ตั้งเป้าหมาย</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ระบุปัญหาเฉพาะ หรือปัญหาทั่วไป</li> <li>- นิยามเป้าหมาย/เปลี่ยนวิสัยทัศน์</li> <li>- อธิบายขอบเขตและข้อกำหนดของลูกค้า</li> </ul>
2. วัดผล Measure	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ตรวจสอบปัญหา/กระบวนการให้ถูกต้อง</li> <li>- ตรวจสอบแก้ไขรายละเอียด ของปัญหา</li> <li>- วัดผลขั้นตอนหลักการนำเข้า</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- วัดการปฏิบัติงานตามข้อกำหนด</li> <li>- รวบรวมข้อมูลด้วยกระบวนการที่มีประสิทธิภาพ</li> </ul>
3. วิเคราะห์ Analysis	<ul style="list-style-type: none"> <li>- พัฒนาสมมุติฐานเชิงเหตุและผล</li> <li>- ระบุสาเหตุที่ไม่ร้ายแรงจนเกินไป</li> <li>- ตรวจสอบสมมุติฐานให้ถูกต้อง</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ระบุ “การปฏิบัติที่ดีที่สุด”</li> <li>- การเพิ่ม/ไม่เพิ่มมูลค่า</li> <li>- คอขวด /ไม่เชื่อมต่อ</li> <li>- ทางเลือก</li> <li>- ตรวจสอบแก้ไขรายละเอียดในข้อกำหนด</li> </ul>
4. ปรับปรุง Improvement	<ul style="list-style-type: none"> <li>- สร้างแนวคิดที่จะแก้ปัญหา รากเหง้าออกไป</li> <li>- ทดสอบวิธีการแก้ปัญหา</li> <li>- สร้างมาตรฐานวิธีแก้ ปัญหา/การวัดผลผลลัพธ์</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ออกแบบกระบวนการใหม่</li> <li>- ข้อเสนอพื้นฐานที่ท้าทาย</li> <li>- ใช้ประโยชน์จากความคิดริเริ่ม</li> <li>- หลักการในการไหลของงานนำกระบวนการใหม่ โครงสร้างและระบบมาทำให้เกิดผล</li> </ul>
5. ควบคุม Control	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ตั้งมาตรฐานการวัดผลเพื่อดูแล การปฏิบัติงานให้ต่อเนื่อง</li> <li>- แก้ไขปัญหาเมื่อมีความจำเป็น</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- สร้างมาตรฐานการวัดและทบทวนการวัด เพื่อดูแลการปฏิบัติงาน</li> <li>- การแก้ไขปัญหาเมื่อมีความจำเป็น</li> </ul>

## 2.4 การออกแบบการทดลอง (Design of Experiments, DOE) [5]

การออกแบบการทดลองเป็นกระบวนการในการวางแผนการทดลองเพื่อจะได้มาซึ่งข้อมูลที่เหมาะสมที่สามารถนำไปใช้ในการวิเคราะห์โดยวิธีการทางสถิติ ซึ่งจะทำให้สามารถหาข้อสรุปที่สมเหตุสมผลได้ ซึ่งวิธีการออกแบบการทดลองเชิงสถิติเป็นสิ่งจำเป็น หากต้องการหาข้อสรุปจากข้อมูลที่มีอยู่ และถ้าปัญหาที่สนใจนั้นเกี่ยวข้องกับความสัมพันธ์ในการทดลอง

### 2.4.1 ขั้นตอนการออกแบบการทดลอง

การใช้หลักการทางสถิติในการออกแบบและวิเคราะห์การทดลองเป็นสิ่งที่จำเป็นที่ผู้ทำการทดลองต้องมีความเข้าใจวิธีการเก็บข้อมูล ตลอดจนการวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้มา ซึ่งขั้นตอนของการออกแบบการทดลอง สามารถสรุปได้ดังนี้

1. การนิยามปัญหา (Statement of Problem) เป็นการระบุว่าความต้องการในการกระบวนการคืออะไรและต้องการรู้อะไรบ้างในกระบวนการ ซึ่งการนิยามปัญหานี้จะเกี่ยวข้องไปถึงวัตถุประสงค์ของการทดลอง

2. การเลือกปัจจัย และระดับของปัจจัย (Choice of Factor, Level and Ranges) เป็นการใชหลักการทางทฤษฎี และประสบการณ์จากงานวิจัยต่างๆ เพื่อระบุว่าเป็นปัจจัยใดบ้างที่นำจะมีผลต่อการทดลอง และในแต่ละปัจจัยนั้นควรจะมีช่วงในการทดลองอย่างไร (Range) การกำหนดระดับของปัจจัยสามารถแบ่งได้ 3 แบบดังนี้

2.1 แบบกำหนด (Fixed Effect) หมายถึง ระดับของปัจจัยที่สามารถควบคุมหรือกำหนดค่าได้แน่นอนโดยผู้ทดลองกำหนดเอง

2.2 แบบสุ่ม (Random Effect) หมายถึง ระดับของปัจจัยที่ไม่สามารถควบคุมหรือกำหนดค่าของปัจจัยได้แน่นอน ซึ่งผลการทดลองที่ได้จะเป็นตัวแทนของทั้งปัจจัยมิได้เป็นตัวแทนของระดับใดระดับหนึ่ง

2.3 แบบผสม (Mixed Effect) หมายถึง การผสมผสานระดับของปัจจัยที่เป็นทั้งแบบกำหนดและแบบสุ่มรวมกัน

3. การเลือกตัวแปรตอบสนอง (Selection of the Response Variable) ในการเลือกตัวแปรตอบสนอง ผู้วิจัยจะต้องเลือกตัวแปรที่สามารถให้ข้อมูลที่เป็นประโยชน์ในการศึกษา และการวัดค่านั้นจะต้องมีความแม่นยำและถูกต้อง ซึ่งหมายถึงเครื่องมือวัดจะต้องมีความแม่นยำและถูกต้อง

4. การเลือกแบบการทดลอง (Choice of Experimental Design) เมื่อกำหนดทรีทเมนต์ (Treatment) และตัวแปรตอบสนอง (Response Variables) แล้ว ต้องทำการตัดสินใจเกี่ยวกับขนาดของการทดลองซึ่ง หมายถึง จำนวนซ้ำของการทดลอง (Replicate) ความเหมาะสมของลำดับในการทดลองข้อจำกัดในการสุ่ม (Randomization) การบล็อก (Blocking) ที่เกี่ยวข้อง ทั้งนี้ต้องนำมาเกี่ยวโยงกันในด้านความเสี่ยงและต้นทุนในการทดลอง

5. การดำเนินการทดลอง (Performing the Experiment) ในระหว่างการดำเนินการทดลองผู้วิจัยจะต้องศึกษาดูแลอย่างใกล้ชิด ปฏิบัติตามหลักการที่ได้ออกแบบไว้ ข้อควรระวังในขณะที่ทำการทดลอง คือ ความถูกต้องของเครื่องมือวัดและความสม่ำเสมอในการทดลองเพื่อให้เกิดความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด ซึ่งจะมีเทคนิคแตกต่างกันไปในแต่ละสาขาวิจัย

6. การวิเคราะห์ข้อมูล (Statistical Analysis of Data) ในการวิเคราะห์ข้อมูล จะใช้ความรู้ทางด้านสถิติเข้ามาวิเคราะห์ และสรุปผลรวมทั้งตัดสินใจว่าความถูกต้องของข้อมูลที่เกิดขึ้นก่อนที่จะตีความข้อมูล และวิธีการทางสถิติไม่สามารถบอกได้ว่าปัจจัยมีผล (Effect) เท่าใดแน่นอน แต่เป็นเพียงเครื่องมือที่ให้แนวทางในการวิเคราะห์ภายใต้ช่วงของความเชื่อมั่นในการสรุปผล

7. การสรุปผลและข้อเสนอแนะ (Conclusions and Recommendations) เมื่อทำการวิเคราะห์ข้อมูลแล้วจะต้องสรุปผลการวิเคราะห์ อาจแสดงในรูปแบบ กราฟ ตาราง แผนภูมิ เป็นต้น และให้ข้อเสนอแนะเพื่อปรับปรุงกระบวนการผลิตให้ดีขึ้น เมื่อสรุปผลแล้วควรมีการทดสอบเพื่อยืนยันผลจากการทดลองอีกครั้งหนึ่ง

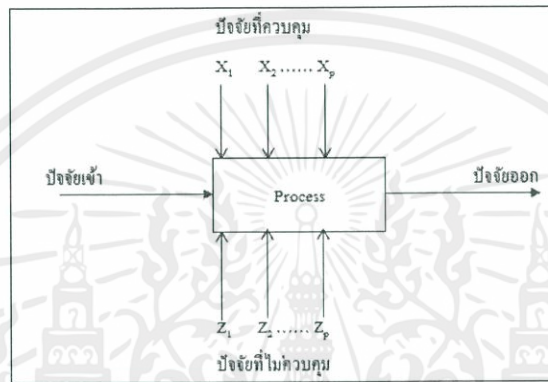
#### 2.4.2 ส่วนประกอบต่างๆของการทดลอง

1. วิธีปฏิบัติหรือทรีทเมนต์ (Treatment) คือ สิ่งหรือวิธีที่ผู้ดำเนินการทดลองปฏิบัติต่อสิ่งทดลองเพื่อวัดผลเปรียบเทียบกับวัตถุประสงค์ของการทดลอง

2. ปัจจัย (Factor) หมายถึง สิ่ง que คิดว่ามีผลต่อตัวแปรตอบสนองและนำมาพิจารณาในการทดลอง ปัจจัยอาจมีลักษณะเป็นเชิงคุณภาพหรือเชิงปริมาณ กลุ่มของทรีทเมนต์ทั้งหลายที่มีความเกี่ยวข้องกัน (A Particular Class of Related Treatment) อาจใช้คำว่าตัวแปรอิสระแทนก็ได้ โดยปัจจัยดังแสดงในรูปที่ 2.4 สามารถแบ่งออกได้เป็น

2.1 ปัจจัยที่ควบคุมได้ (Controllable Factors) หมายถึง ปัจจัยที่สามารถกำหนดค่าของปัจจัยนั้นได้ในการดำเนินการทดลอง ซึ่งเป็นผลดีต่อการทดลองเพราะโดยส่วนใหญ่ผู้ทำการทดลองต้องการกำหนดค่าต่าง ๆ ที่คิดว่ามีผลตอบสนองที่สนใจ

2.2 ปัจจัยที่ไม่สามารถควบคุมได้ (Uncontrollable Factors) หมายถึง ปัจจัยที่ไม่สามารถกำหนดค่าของปัจจัยนั้นได้อาจจะเนื่องมาจากมีข้อจำกัดทางด้านเทคโนโลยีและต้นทุนปัจจัยที่ไม่สามารถควบคุมได้แบ่งออกเป็นตัวแปรรบกวน (Noise Variable หรือ Background Variable) หมายถึง ตัวแปรที่มีผลต่อตัวแปรตอบสนอง (Response Variable) ในการทดลองแต่ไม่ใช่ปัจจัยที่เรา กำลังทำการศึกษาร่วมใหญ่ มัก ได้แก่ เวลาหรือเครื่องมืออุปกรณ์ เป็นต้น และ Nuisance Variable คือ ตัวแปรที่มีผลต่อตัวแปรตอบสนอง แต่เราไม่ทราบมาก่อน สามารถกำจัดอิทธิพลของ Nuisance Variable ได้โดยการสุ่ม



รูปที่ 2.4 แบบจำลองทั่วไปของกระบวนการ [6]

3. ตัวแปรตอบสนอง (Response Variable) คือ ตัวแปรที่ถูกสังเกตหรือวัดค่าในการทดลอง หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่าตัวแปรตาม ซึ่งเป็นตัวแปรที่สะท้อนให้เห็นถึงอิทธิพลของตัวแปรอิสระนั่นเอง ในการทดลองหนึ่งๆ อาจวัดค่าตัวแปรตามมากกว่า 1 ก็ได้ การเลือกตัวแปรตามที่ดีควรพิจารณาจากความไว (Sensitivity) ความเชื่อถือได้ (Reliability) การแจกแจงของตัวแปรนั้นและความเป็นไปได้ในทางปฏิบัติ นอกจากนี้ในการเลือกตัวแปรตามจะต้องพิจารณาว่า ค่าสังเกตที่ได้จากทริทเมนต์หนึ่ง ๆ ควรมีการแจกแจงแบบปกติโดยประมาณ ซึ่งข้อสมมติในเรื่องความเป็นปกติ (Normality) นี้เป็นสิ่งที่จำเป็นในการออกแบบทดลองซึ่งอาจจะใช้การแปลงข้อมูล (Transformation) ค่าสังเกตที่มีการแจกแจงไม่ปกติเป็นแบบปกติได้

### 2.4.3 หลักการพื้นฐาน 3 ประการ สำหรับการออกแบบการทดลอง

1. การทดลองซ้ำ (Replication) ซึ่งมีสมบัติที่สำคัญ 2 ประการ คือ ทำให้ทดลองสามารถหาค่าประมาณของความผิดพลาดในการทดลองได้ และถ้าค่าเฉลี่ยถูกนำมาใช้เพื่อประมาณผลที่เกิดจากปัจจัยหนึ่งการทดลองเรพลีเคชันทำให้ผู้ทดลองสามารถหาตัวประมาณที่ถูกต้องยิ่งขึ้นในการประมาณผลกระทบนี

2. การทำแบบสุ่ม (Randomization) หมายถึง การทดลองที่มีทั้งวัสดุที่ใช้ในการทดลองและลำดับของการทดลองแต่ละครั้งเป็นแบบสุ่ม (Random) วิธีการเชิงสถิติกำหนดว่าข้อมูลจะต้องเป็นปัจจัยแบบสุ่มที่มีการกระจายแบบสุ่มที่มีการกระจายแบบอิสระ การที่เราสุ่มการทดลองทำให้เราสามารถลดผลของปัจจัยภายนอกที่อาจปรากฏในการทดลองได้

3. บล็อกกิ้ง (Blocking) เป็นทางเทคนิคที่ใช้สำหรับเพิ่มความเที่ยงตรงให้แก่การทดลองบล็อกอันหนึ่งอาจจะหมายถึง ส่วนหนึ่งของวัสดุที่ใช้การทดลองที่ควรจะเป็นอันหนึ่งอันเดียวกันมากกว่าเซตทั้งหมดของวัตถุ การเปรียบเทียบเงื่อนไขที่น่าสนใจต่าง ๆ ภายในแต่ละบล็อกจะเกิดขึ้นได้จากการทำบล็อกกิ้ง



## 2.5 การออกแบบการทดลองแบบเชิงแฟคทอเรียล [7]

การออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียล (Experiment of Factorial Design) หมายถึง การทดลองที่พิจารณาถึงผลที่เกิดจากการรวมกันของระดับของปัจจัยทั้งหมดที่เป็นไปได้ในการทดลองนั้นโดยมีจุดประสงค์หลักคือ ศึกษาผลกระทบร่วมระหว่างปัจจัยหรือที่เรียกว่า “อันตรกิริยา” (Interactions) การออกแบบเชิงแฟคทอเรียลมีประโยชน์หลายประการ ได้แก่ ทำให้สามารถหลีกเลี่ยงปัญหาที่เกิดจากอันตรกิริยาของปัจจัยที่ก่อให้เกิดข้อสรุปที่ผิดพลาดได้ เนื่องจากการออกแบบการทดลองที่มีประสิทธิภาพเหนือกว่าการทดลองทีละปัจจัย และทำให้สามารถประมาณผลของปัจจัยหนึ่งที่ระดับต่าง ๆ ของปัจจัยอื่นได้ รวมทั้งทำให้สามารถหาข้อสรุปที่สมเหตุสมผลตลอดเงื่อนไขของการทดลองได้

การออกแบบเชิงแฟคทอเรียลใช้มากในการทดลองที่เกี่ยวข้องกับปัจจัยหลายปัจจัย ซึ่งต้องการศึกษาถึงผลรวมที่มีผลต่อผลลัพธ์ที่เกิดจากปัจจัยเหล่านั้น ซึ่งการออกแบบเชิงแฟคทอเรียลมีอยู่ 2 กรณีหลักคือ

### 1. การออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียลเต็มรูป (Full Factorial Experiment)

การออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียลเต็มรูปเป็นการทดลองที่ทำขึ้นเพื่อศึกษาผลกระทบระหว่างปัจจัยตั้งแต่ 2 ปัจจัยขึ้นไป ( $k \geq 2$ ) โดยมีวัตถุประสงค์คือ ต้องการศึกษามลกระทบร่วมซึ่งแต่ละปัจจัยจะมีระดับของปัจจัยอยู่ 2 ระดับคือ ระดับต่ำใช้สัญลักษณ์ -1 หรือ (-) หรือระดับสูงใช้สัญลักษณ์ 1 หรือ (+) การทดลองลักษณะนี้เหมาะกับการทดลองที่มีปัจจัยมาก ๆ เป็นการทดลองเพื่อหาปัจจัยที่มีอิทธิพลเบื้องต้น ซึ่งจะช่วยให้การทดลองที่เจาะลึกในขั้นตอนต่อไปมีความน่าเชื่อถือมากขึ้น

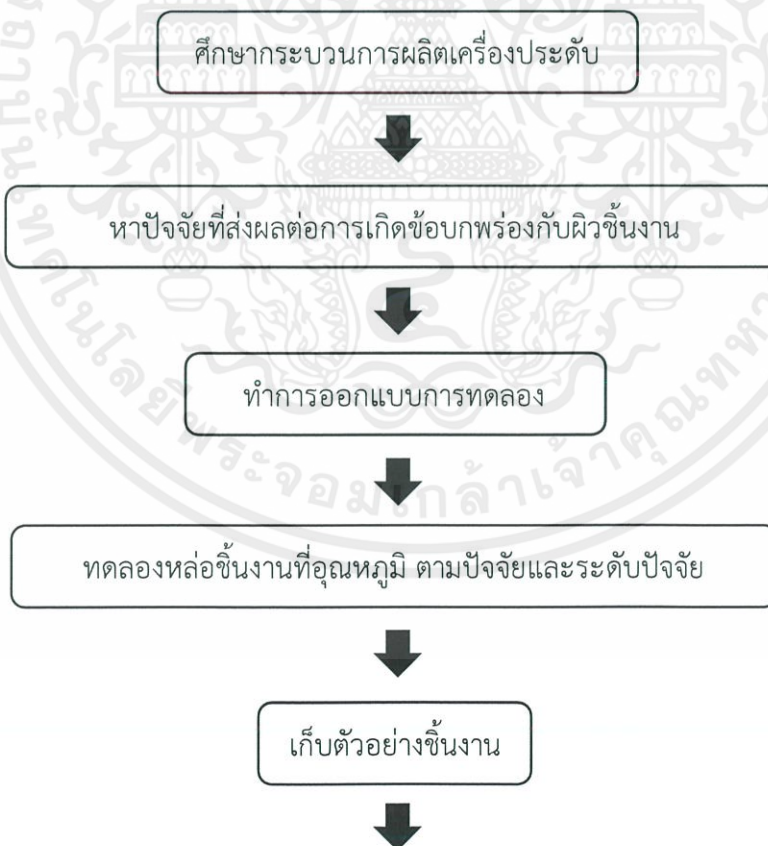
### 2. การออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียลบางส่วน (Fractional Factorial Experiment)

การออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียลบางส่วนเป็นการทดลองซึ่งใช้ในการพิจารณาปัจจัยต่าง ๆ ที่อยู่ในระบบทั้งหมดว่าปัจจัยใดให้ผลกระทบต่อผลตอบสนองของระบบมากที่สุด โดยการทดลองแบบแฟคทอเรียลบางส่วนถูกนำมาใช้มากสำหรับการกรองเพื่อหาปัจจัยที่มีอิทธิพล ส่วนใหญ่จะเรียกว่า การทดลองเพื่อการวิเคราะห์เบื้องต้น (Screening Experiment) โดยการทดลองจะลดรูปลงจากการทดลองแฟคทอเรียลเต็มรูปในสัดส่วนของจำนวนระดับปัจจัย แบบ  $2^{k-p}$

### บทที่ 3

## วิธีการดำเนินงาน

จากการศึกษาและติดตามกระบวนการผลิตเครื่องประดับ โดยศึกษาปัจจัยการเกิดข้อบกพร่องกับตัวชิ้นงาน Pink Silver แบบรูปวงและกรวดเหลี่ยม เพื่อทำการปรับปรุงราคาอนุมัติที่เหมาะสมที่สุดในการหล่อชิ้นงาน Model PR-03-G014CZ โดยใช้การออกแบบการทดลอง และทำการศึกษาโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่ผ่านการใช้อุณหภูมิเข้าและอุณหภูมิหล่อที่แตกต่างกัน เพื่อให้ได้อุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการผลิต และจัดทำเป็นมาตรฐานการทำงานของบริษัท ขั้นตอนในการศึกษาและทดลองเพื่อศึกษาปัจจัยในกระบวนการผลิตที่ส่งผลต่อการเกิดข้อบกพร่อง แสดงดังรูปที่ 3.1 ขั้นตอนในการทดลองเพื่อศึกษาโครงสร้างจุลภาคและเปรียบเทียบผล แสดงดังรูปที่ 3.2

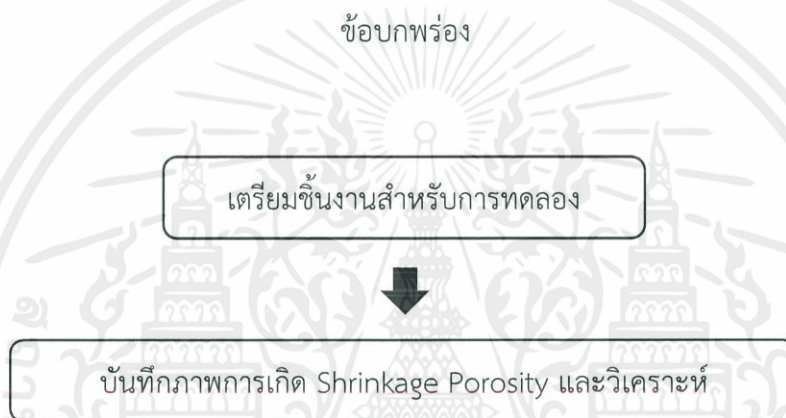


รูปที่ 3.1 ขั้นตอนในการศึกษาและทดลองเพื่อศึกษาปัจจัยในกระบวนการผลิตที่ส่งผลต่อการเกิดข้อบกพร่อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.1 (ต่อ) ขั้นตอนในการศึกษาและทดลองเพื่อศึกษาปัจจัยในกระบวนการผลิตที่ส่งผลต่อการเกิด



รูปที่ 3.2 ขั้นตอนในการทดลองเพื่อศึกษาโครงสร้างจุลภาคและเปรียบเทียบผล

### 3.1 การศึกษาอิทธิพลของปัจจัยที่ส่งผลต่อการเกิดข้อบกพร่องที่ผิวชิ้นงาน

#### 3.1.1 การออกแบบการทดลองเพื่อหาค่าที่เหมาะสมที่สุด

การออกแบบการทดลองเพื่อหาอุณหภูมิที่เหมาะสมที่สุด ในการหล่อชิ้นงาน Model PR-03-G014CZ จากเนื้องาน Pink Silver เพื่อหาค่าอุณหภูมิที่เหมาะสมที่สุดในการนำไปเป็นมาตรฐานการผลิตชิ้นงาน ผู้ศึกษามีปัจจัยที่สนใจอยู่ 2 ปัจจัยคือ อุณหภูมิอบแก้ว อุณหภูมิหล่อ ซึ่งการออกแบบการทดลองมี 4 ขั้นตอนดังนี้

### 3.1.1.1 เลือกปัจจัย ระดับ ขอบเขตของการศึกษา

โดยเบื้องต้นในกระบวนการผลิตเครื่องประดับส่วนใหญ่ในปัจจุบันจะเป็นการหล่อแบบอินเวสเมนต์ (Investment Casting) ในขั้นตอนก่อนการนำเข้าปูนเข้าหล่อจะต้องนำเข้าปูนที่ภายในเป็นต้นเทียนเข้าเตาอบโดยมีจุดประสงค์คือ ให้ความร้อนเพื่อละลายเทียนต้นแบบในเข้าปูนออกเป็นโพรงเพื่อรองรับน้ำโลหะเมื่อหล่อชิ้นงาน (Casting) และให้ความร้อนแก่เข้าปูน (Preheat) เพื่อให้อุณหภูมิระหว่างเข้าปูนกับโลหะหลอมเหลวไม่แตกต่างกันมากเราจึงเรียกอุณหภูมินี้ว่า อุณหภูมิอบเข้า (Flask Temperature) ส่วนอุณหภูมิหล่อ (Cast Temperature) จะเป็นอุณหภูมิที่เมื่อนำเนื้อโลหะเข้าเครื่องหล่อแล้วเนื้อโลหะเปลี่ยนสถานะจากของแข็งเป็นของเหลวและให้ความร้อนจนถึงอุณหภูมิที่เหมาะสมจึงเทน้ำโลหะเข้าสู่เข้าปูน ซึ่งก่อนการออกแบบการทดลองทางผู้ศึกษาได้ศึกษาปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับอุณหภูมิทั้งสองที่กล่าวมาจากการทดลองของทางบริษัท ประสบการณ์ของผู้ปฏิบัติงาน และการเก็บข้อมูลเชิงสถิติของบริษัทโดยผู้เชี่ยวชาญ ซึ่งเป็นพื้นฐานสำคัญในการนำไปสู่การออกแบบการทดลอง โดยจากตำราและงานวิจัยศึกษาที่เกี่ยวข้อง ผู้ศึกษาพบว่าปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดข้อบกพร่องแบบรูพรุน (Porosity) และการหดตัว (Shrinkage) จากกระบวนการหล่อแบบอินเวสเมนต์ มี 2 ปัจจัยคืออุณหภูมิอบเข้า (Flask Temperature) และอุณหภูมิหล่อ (Cast Temperature) ซึ่งเป็นปัจจัยที่ต้องการหาค่าที่เหมาะสม โดยปัจจัยทั้ง 2 ปัจจัยนี้จะประกอบด้วย 3 ระดับ โดยผู้ศึกษาได้กำหนดปัจจัย ระดับและสัญลักษณ์ แสดงดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ปัจจัยและระดับการทดลอง Model PR-03-G014CZ

ปัจจัย	ระดับ (Level)		
	-1	0	1
อุณหภูมิอบเข้า (องศาเซลเซียส)	480	540	600
อุณหภูมิหล่อ (องศาเซลเซียส)	1020	1030	1060

### 3.1.1.2 เลือกตัวแปรตอบสนอง

ตัวแปรที่ใช้ในการหาค่าที่เหมาะสมในการหล่อชิ้นงาน Model PR-03-G014CZ คืออุณหภูมิอบเบ้า (Flask Temperature) และอุณหภูมิหล่อ (Cast Temperature)

### 3.1.1.3 เลือกการออกแบบการทดลอง

การเลือกวิธีการออกแบบการทดลองนี้จะต้องครอบคลุมปัจจัยทั้งหมด 2 ปัจจัย 3 ระดับการศึกษา ตามตารางที่ 3.2 และต้องใช้วิธีการออกแบบการทดลองที่สามารถหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดข้อบกพร่อง จากการศึกษาการออกแบบการทดลองพบว่าวิธีที่เหมาะสมคือ การออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียล (Factorial) ซึ่งมีอยู่ 2 แบบคือ การออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียลทุกส่วน (Full Factorial) และ การออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียลบางส่วน (Fractional Factorial) ซึ่งงานนี้ผู้ศึกษา จะใช้การทดลองเชิงแฟคทอเรียลทุกส่วน เพราะช่วยให้ทราบถึงอิทธิพลของแต่ละปัจจัย และอิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัยด้วย ประกอบกับการใช้เทคนิคการ Blocking เข้ามาใช้ประกอบเพื่อช่วยในการจัดทริทเมนต์ ที่มาจากหลายปัจจัย โดยการออกแบบการทดลองนี้มีปัจจัยนำเข้า 2 ปัจจัย ตามตารางที่ 3.2 ตาม Model

ตารางที่ 3.2 การออกแบบการทดลอง Factorial ของ Model PR-03-G014CZ

ลำดับการทดลอง มาตรฐาน	ลำดับการทดลอง ตามการสุ่ม	Blocks	อุณหภูมิเบ้า (องศาเซลเซียส)	อุณหภูมิหล่อ (องศาเซลเซียส)
1	13	1	480	1020
2	16	1	480	1030
3	14	1	480	1060
4	17	1	540	1020
5	12	1	540	1030
6	15	1	540	1060
7	11	1	600	1020
8	18	1	600	1030

ตารางที่ 3.2 (ต่อ) การออกแบบการทดลอง Factorial ของ Model PR-03-G014CZ

ลำดับการทดลอง มาตรฐาน	ลำดับการทดลอง ตามการสุ่ม	Blocks	อุณหภูมิเข้า (องศาเซลเซียส)	อุณหภูมิหล่อ (องศาเซลเซียส)
9	10	1	600	1060
10	3	2	480	1020
11	2	2	480	1030
12	1	2	480	1060
13	8	2	540	1020
14	9	2	540	1030
15	7	2	540	1060
16	6	2	600	1020
17	5	2	600	1030
18	4	2	600	1060
19	25	3	480	1020
20	23	3	480	1030
21	26	3	480	1060
22	22	3	540	1020
23	19	3	540	1030
24	20	3	540	1060
25	27	3	600	1020
26	21	3	600	1030
27	24	3	600	1060

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

#### 3.1.1.4 ทำการทดลองเพื่อหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของปัจจัย

จากการออกแบบการทดลองเพื่อหาค่าที่เหมาะสมที่สุด ซึ่งใช้โปรแกรม Minitab 17 ทำการสุ่มลำดับ  
ชั้นการทดลอง และได้ทำการทดลองหล่อชิ้นงานตามทีออกแบบไว้

#### 3.1.2 การทดลองหล่อชิ้นงาน

การอบเข้าปูนก่อนการหล่อชิ้นงาน (Flask Temperature) ใช้เตาอบยี่ห้อ Yasui รุ่น RBF37

แสดงดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 เตาอบเข้า ยี่ห้อ Yasui รุ่น RBF37

การหล่อชิ้นงาน ใช้เครื่องหล่อแบบอินเวสเมนต์ ยี่ห้อ Yasui รุ่น KT18C แสดงดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 เครื่องหล่อแบบอินเวสเมนต์ ยี่ห้อ Yasui รุ่น KT18C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.1.3 การเตรียมชิ้นงานสำหรับการส่องดูโครงสร้างจุลภาค

การเตรียมชิ้นงานสำหรับการส่องการเกิดรูพรุน (Porosity) จะทำการตัดด้วยเครื่องตัดแรงโน้มถ่วง ยี่ห้อ Struers รุ่น Minitom ดังแสดงในรูปที่ 3.5 โดยตัดชิ้นงานบริเวณทางน้ำโลหะเข้าชิ้นงานเพื่อให้ง่ายต่อการหล่อเรซินและการดูโครงสร้างจุลภาค



รูปที่ 3.5 เครื่องตัดแรงโน้มถ่วงยี่ห้อ Struers รุ่น Minitom

นำทางน้ำโลหะไปหล่อเรซิน และนำไปขัดผิวหน้าด้วยกระดาษทรายเบอร์ 1500, 2000 และ 4000 โดยใช้เครื่องขัดยี่ห้อ Struers รุ่น LaboPol-1 ดังรูปที่ 3.6 และขัดด้วยผงขัดขนาด 1 ไมครอน และ 0.3 ไมครอนตามลำดับ



รูปที่ 3.6 เครื่องขัดชิ้นงานทดลองยี่ห้อ Struers รุ่น LaboPol-1

### 3.1.4 การส่องดูโครงสร้างจุลภาค

หลังจากขัดชิ้นงานแล้ว นำชิ้นงานไปส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง (Optical Microscope) ยี่ห้อ Zeiss รุ่น Axiolab ดังรูปที่ 3.7 บันทึกภาพการเกิด Shrinkage Porosity สำหรับใช้ในการวิเคราะห์พื้นที่

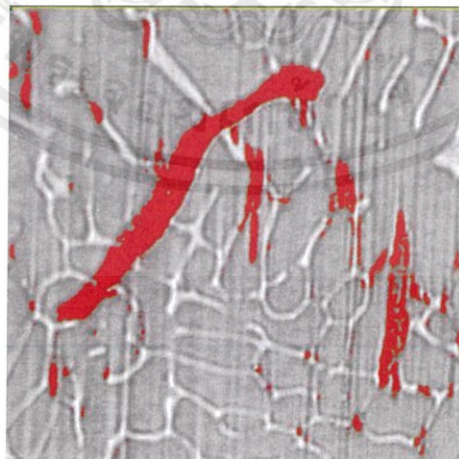


รูปที่ 3.7 กล้องจุลทรรศน์แบบแสง (Optical Microscope) ยี่ห้อ Zeiss รุ่น Axiolab

### 3.1.5 การวิเคราะห์ข้อมูลเชิงสถิติและหาค่าเหมาะสมที่สุดของแต่ละปัจจัย

นำภาพมาทำการวิเคราะห์พื้นที่การเกิด Shrinkage Porosity ด้วยโปรแกรม ImageJ ดังตัวอย่าง

รูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 ตัวอย่างการวิเคราะห์พื้นที่ที่ใช้โปรแกรม ImageJ

บันทึกข้อมูล พื้นที่รูพรุนทั้งหมด (กำหนดในตัวโปรแกรมศึกษารูพรุนที่มีขนาดใหญ่กว่า 50 ตารางไมโครเมตร) และ เปอร์เซ็นต์พื้นที่รูพรุนโดยคิดจากพื้นที่ทั้งหมด ยกตัวอย่างชิ้นงานที่เกิดรูพรุนที่สามารถเห็นได้ด้วยตาเปล่าหรือกล้องส่องขนาด  $\times 10$  ดังรูปที่ 3.9 และ 3.10 หากตรวจพบถือเป็นชิ้นงานที่ไม่ผ่านมาตรฐานการตรวจสอบของทางบริษัท มีขนาดพื้นที่ 405897.063 ตารางไมโครเมตร



รูปที่ 3.9 ชิ้นงานที่เกิดข้อบกพร่องแบบรูพรุนและสามารถเห็นได้ด้วยตาเปล่า



รูปที่ 3.10 ชิ้นงานที่เกิดข้อบกพร่องแบบรูพรุนเมื่อส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง

เมื่อวิเคราะห์พื้นที่รูพรุนจากโปรแกรม ImageJ แล้วบันทึกข้อมูลที่ไดลงในโปรแกรม Microsoft Excel และจะนำผลมาวิเคราะห์ผล โดยใช้เทคนิคทางสถิติ เพื่อให้ได้อุณหภูมิที่เหมาะสมที่สุด ซึ่งในขั้นตอนนี้จะใช้โปรแกรม Minitab Releases 17 ในการวิเคราะห์ข้อมูล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### ผลการวิจัยและการวิเคราะห์ข้อมูล

ในการศึกษาค้นคว้าอิสระนำเอาหลักการของซิกส์ ซิกม่าในส่วนของ DMAIC มาใช้ เพื่อลดชิ้นงานเสีย ในกระบวนการหล่อเครื่องประดับ เมื่อชิ้นงานที่บกพร่องลดลงจะทำให้บริษัทมีกำไรเพิ่มขึ้น โดยมีขั้นตอนการทำงาน 5 ขั้นตอนคือ 1) การกำหนดปัญหา 2) การวัดระดับปัญหา 3) การวิเคราะห์ปัญหา 4) การปรับปรุง และ 5) การควบคุม เมื่อปัญหาที่ตรวจพบข้อบกพร่องและนำข้อมูลจำนวนที่ตรวจพบมาทำกราฟพาเรโตจะพบว่า มีข้อบกพร่องอยู่ 10 ชนิดตามมาตรฐานการตรวจสอบชิ้นงานของทางบริษัทคือ รูพรุนและโพรงพลอย หลุด ไม่เงา พลอยแตก ทรายตก รอยตะเข็บ ไม่สะอาด เสียรูปทรง ตัวเรือน และรูพลอย ซึ่งปัญหาที่ตรวจพบมากที่สุดคือ รูพรุนและโพรง มีเปอร์เซ็นต์ของเสียสูงถึง 56 เปอร์เซ็นต์ของปัญหาทั้งหมดที่เกิดจากกระบวนการหล่อ Pink Silver จากข้อมูลงานเสียสรุปได้ว่า รูพรุนและโพรง เป็นปัญหาหลักที่เกิดขึ้นงานบกพร่องในกระบวนการ ดังนั้นจึงเลือกปัญหารูพรุนและโพรงมาแก้ไข หลังจากนั้นทำการระดมความคิดของผู้ที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการหล่อเครื่องประดับ Pink Silver เพื่อเขียนเป็นแผนผังก้างปลา ซึ่งสามารถมองเห็นปัญหาได้ชัดเจนมากยิ่งขึ้น เมื่อได้ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อกระบวนการหล่อเครื่องประดับ Pink Silver หลังจากนั้นได้นำปัจจัยต่าง ๆ มาทำการออกแบบการทดลอง เพื่อหาปัจจัยที่เป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดข้อบกพร่องบนชิ้นงานแบบรูพรุนและโพรง โดยเนื้อหาในบทนี้จะทำตามขั้นตอนทั้ง 5 ขั้นตอนของหลักการซิกส์ ซิกม่า

#### 4.1 ขั้นตอนการกำหนดปัญหาของกระบวนการ (Define Phase)

เนื่องจากในกระบวนการผลิตเครื่องประดับ Pink Silver พบว่ามีของเสียที่เกิดจากกระบวนการหล่อเครื่องประดับเป็นจำนวนมาก ซึ่งชิ้นงานที่บกพร่องที่พบทำให้เสียเวลาในการซ่อมแก้ไขและส่งผลกระทบต่อต้นทุนการผลิต จากการศึกษาพบว่า ชิ้นงานบกพร่องที่เกิดขึ้นในกระบวนการหล่อเครื่องประดับสูงสุดคือชิ้นงานเป็นรูปพรุนและโพรงสูงถึง 56 เปอร์เซ็นต์จากปริมาณการผลิตทั้งหมดตั้งแต่เดือน กรกฎาคม 2560 ถึง มิถุนายน 2561 ซึ่งตัวอย่างของเสียดังรูปที่ 4.1 และได้แสดงจำนวนและชนิดของเสียต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นของกระบวนการหล่อเครื่องประดับ ดังตารางที่ 4.1



รูปที่ 4.1 แสดงตัวอย่างของชิ้นงานที่พบข้อบกพร่องแบบรูพรุน

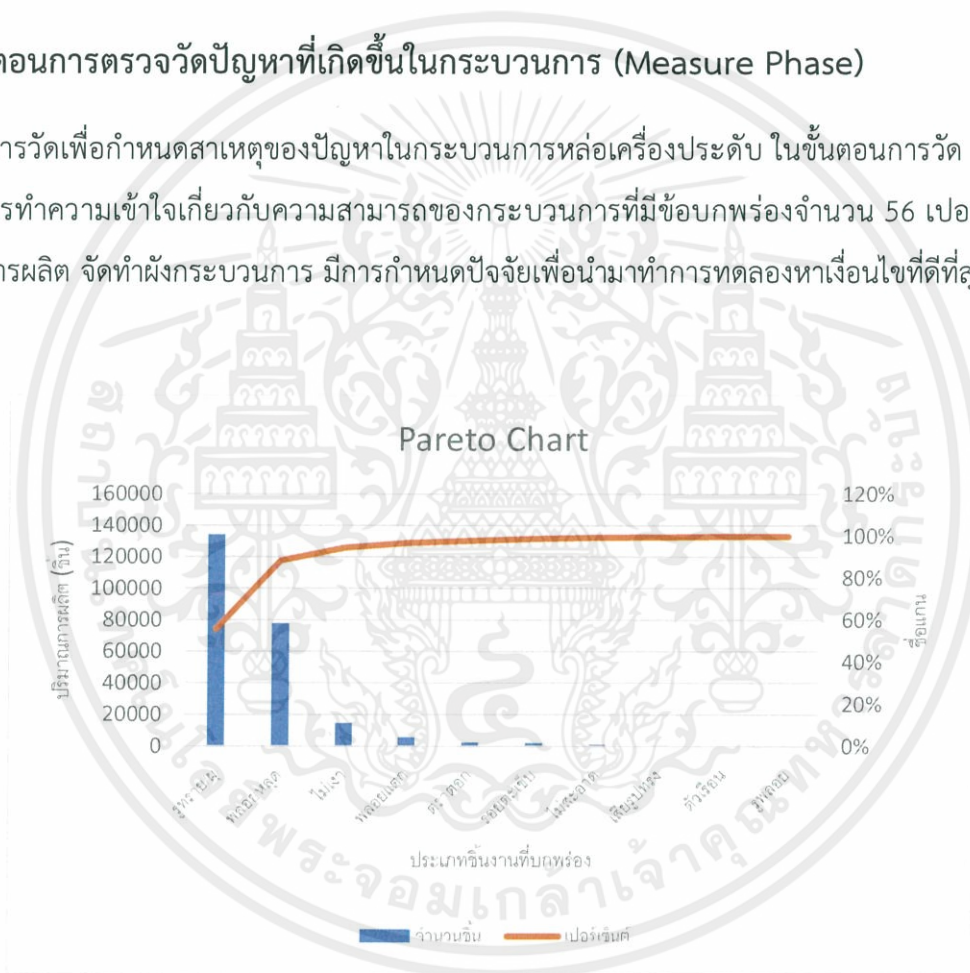
ตารางที่ 4.1 แสดงจำนวนของเสียที่เกิดขึ้นจากกระบวนการหล่อเครื่องประดับ Pink Silver แบ่งตามประเภทงานที่ตรวจพบ  
ของเดือน กรกฎาคม 2560 ถึง มิถุนายน 2561

ชนิด ข้อบกพร่อง	จำนวนข้อบกพร่องของชิ้นงานแต่ละเดือน (ชิ้น)												รวม
	ก.ค.-60	ส.ค.-60	ก.ย.-60	ต.ค.-60	พ.ย.-60	ธ.ค.-60	ม.ค.-61	ก.พ.-61	มี.ค.-61	เม.ย.-61	พ.ค.-61	มิ.ย.-61	
รูพูนและ โพรง	25791	7336	8058	10504	9113	4210	11085	13019	8873	5751	18217	12410	134367
พลอยหลุด	11191	11613	12878	9058	11216	3953	3159	4643	2820	2427	3449	1775	78182
ไม่เงา	4489	4881	3086	527	1381	23	0	257	0	0	60	0	14704
พลอยแตก	1502	1933	786	31	380	75	204	82	45	192	401	89	5720
ตัวเรือน	221	35	42	47	47	1	9	19	1	10	32	0	464
ตราตอก	85	136	183	119	131	227	378	264	171	233	465	248	2640
เสียรูปทรง	131	279	144	97	38	8	0	0	2	0	2	1	702
ไม่สะอาด	163	306	234	90	289	136	65	0	0	0	0	0	1283
รอยตะเข็บ	829	223	159	137	106	37	26	45	64	130	187	184	2127
รูพลอย	3	4	0	29	0	8	0	3	0	0	0	0	47
รวม	44405	26746	25570	20639	22701	8678	14926	18332	11976	8743	22813	14707	240236

จากตารางที่ 4.1 จะแสดงชิ้นงานบกพร่องที่เกิดจากกระบวนการหล่อเครื่องประดับ Pink Silver ซึ่งมีประเภทชิ้นงานที่บกพร่องอยู่ 10 ชนิด คือ รุพรุณและโพรงพลอยหลุด ไม่เงา พลอยแตก ตรารตก รอยตะเข็บไม่สะอาด เสียรูปทรง ตัวเรือน และรูปพลอย ซึ่งปัญหาที่เกิดขึ้นมากที่สุดคือ รุพรุณและโพรง มีชิ้นงานบกพร่องสูงถึง 56 เปอร์เซ็นต์ หรือ 134367 ชิ้นของปริมาณการผลิตทั้งหมดที่เกิดในกระบวนการหล่อเครื่องประดับ Pink Silver จากข้อมูลงานเสียสรุปได้ว่าปัญหา รุพรุณและโพรง เป็นปัญหาหลักที่เกิดของเสียในกระบวนการ ดังนั้นจึงเลือกปัญหา รุพรุณและโพรง มาแก้ไข

#### 4.2 ขั้นตอนการตรวจวัดปัญหาที่เกิดขึ้นในกระบวนการ (Measure Phase)

การวัดเพื่อกำหนดสาเหตุของปัญหาในกระบวนการหล่อเครื่องประดับ ในขั้นตอนการวัด (Measure) ซึ่งเป็นการทำความเข้าใจเกี่ยวกับความสามารถของกระบวนการที่มีข้อบกพร่องจำนวน 56 เปอร์เซ็นต์ของปริมาณการผลิต จัดทำผังกระบวนการ มีการกำหนดปัจจัยเพื่อนำมาทำการทดลองหาเงื่อนไขที่ดีที่สุด



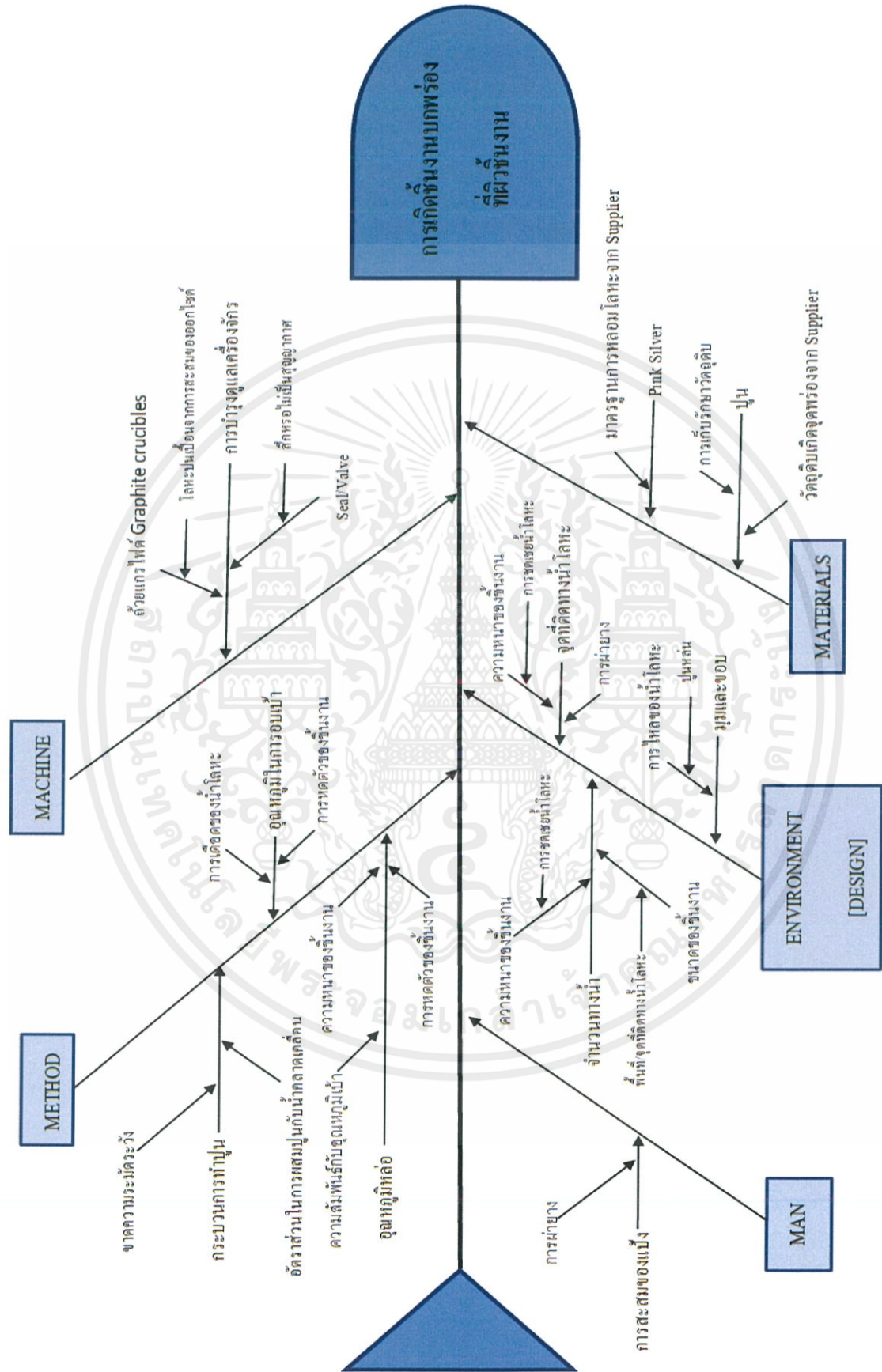
รูปที่ 4.2 แผนภูมิพารेटโต้แยกตามประเภทของเสียที่เกิดจากกระบวนการหล่อเครื่องประดับ

จากรูปที่ 4.2 แสดงของเสียที่เกิดจากกระบวนการหล่อ Pink Silver ซึ่งปัญหาที่เกิดขึ้นมากที่สุดคือ รุพรุณและโพรง มีเปอร์เซ็นต์สูงถึง 56 เปอร์เซ็นต์ ของปัญหาในกระบวนการหล่อเครื่องประดับ Pink Silver จากข้อมูลงานเสียสรุปได้ว่าปัญหา รุพรุณและโพรง เป็นปัญหาหลักที่เกิดของเสียในกระบวนการ

#### 4.3 ขั้นตอนการวิเคราะห์สาเหตุของปัญหาในกระบวนการ (Analysis Phase)

การระดมความคิดของพนักงานทั้งหัวหน้างานและพนักงานที่มีส่วนเกี่ยวข้องในการปฏิบัติงานในแผนกของกระบวนการหล่อเครื่องประดับ เพื่อแจกแจงสาเหตุและผลกระทบของข้อบกพร่องที่ทำให้เกิดของเสียแบบรพุนและโพรงโดยใช้แผนภูมิแก๊งปลา เพื่อกำหนดสาเหตุของปัญหาและแสดงไว้ในรูปที่ 4.3





รูปที่ 4.3 แสดงแผนภูมิแกงปลาที่ได้จากการใช้วิธีระดมความคิด

จากรูปที่ 4.3 จะเห็นได้ว่าการระดมความคิดเพื่อแจกแจงสาเหตุการเกิดข้อบกพร่อง โดยใช้แผนภูมิแก๊งปลา ซึ่งสามารถสรุปสาเหตุของปัญหาหรือปัจจัยที่ทำให้เกิดปัญหาได้หลายปัจจัย และสามารถอธิบายรายละเอียดได้ดังนี้

1. คนหรือพนักงาน (Man) ที่ปฏิบัติงานในกระบวนการหล่อเครื่องประดับ โดยมีเงื่อนไขที่จะทำให้เกิดข้อบกพร่อง 3 เงื่อนไข ดังนี้

ความเหนื่อยล้าจากความร้อน คือ พนักงานจะได้รับความร้อนจากเตาอบเบ้าส่งผลให้พนักงานมีความตั้งใจทำงานน้อย

เพศ (ชายหรือหญิง) คือ พนักงานผู้ชายหรือผู้หญิงจะทำงานหนักได้ต่างกัน ส่งผลให้พนักงานที่เป็นผู้หญิงทำงานได้ไม่เท่ากันพนักงานชาย

พนักงานใหม่-เก่า คือ พนักงานใหม่จะมีประสบการณ์การทำงานที่น้อยกว่าพนักงานเก่า ส่งผลให้มีข้อผิดพลาดในการทำงานได้

2. เครื่องจักร (Machine) ที่ใช้ในกระบวนการหล่อเครื่องประดับ โดยมีเงื่อนไขที่จะทำให้เกิดข้อบกพร่อง 4 เงื่อนไขดังนี้

อุณหภูมิเครื่องหล่อ คือ ต้องมีการกำหนดให้ชัดเจนแยกตามประเภทของชนิดงานให้เหมาะสม และถ้าไม่กำหนดจะส่งผลให้มีชิ้นงานที่บกพร่องขึ้นได้

เครื่องจักรขาดการบำรุงดูแลรักษาตามอายุการใช้งานทำให้ ความเป็นสุญญากาศของเครื่องหล่อ และเครื่องผสมปูนลดลง จะส่งผลให้มีของเสียเกิดขึ้นได้

ความเร็วรอบของเครื่องผสมปูน คือ ต้องมีความเร็วสม่ำเสมอไม่สูงเกินไป ถ้าตั้งไว้สูงหรือเร็วเกินไปจะส่งผลกระทบต่อทำให้ปูนกระเด็นไปติดผนังเครื่องผสมปูนทำให้อัตราส่วนผสมปูนกับน้ำไม่แน่นอนได้

อุณหภูมิของเตาอบเบ้า คือ ต้องมีการกำหนดไว้ให้แยกชัดเจนตามประเภทของงานให้เหมาะสม และถ้าไม่มีการกำหนดไว้จะส่งผลให้มีชิ้นงานที่บกพร่องเกิดขึ้นได้

3. วิธีการ (Method) ที่ใช้ในการปฏิบัติงานของกระบวนการหล่อเครื่องประดับโดยมีเงื่อนไขในการปฏิบัติงานที่อาจทำให้เกิดชิ้นงานที่บกพร่องได้ ซึ่งมี 4 วิธีการในการปฏิบัติงานดังนี้

อัตราส่วนผสมปูนกับน้ำ คือ ต้องมีการกำหนดไว้ให้ชัดเจนตามที่ระบุคู่มือการผสมปูนกับน้ำของบริษัทที่ขายปูนให้ และถ้าไม่มีการกำหนดไว้จะส่งผลทำให้มีชิ้นงานที่บกพร่องเกิดขึ้นได้

จำนวนชิ้นงานต่อเบ้า คือ การติดต้นเทียนจำนวนชิ้นงานต้องติดให้พอดีไม่แน่นเกินไป ถ้าติดแน่นมากจะส่งผลทำให้โครงสร้างของปูนในเบ้าหล่อไม่แข็งแรง และขณะที่เครื่องหล่อทำงานจะทำให้ปูนหักและชิ้นงานที่ได้ออกมาจะไม่มีคุณสมบัติถูกต้อง

การปรับอุณหภูมิเตาอบ คือ จะต้องปฏิบัติตามคู่มือการปรับเตาอบเบ้าเท่านั้น ถ้าไม่ตรงจะส่งผลให้การอบเบ้าหล่อไม่สมบูรณ์และมีชิ้นงานเสียเกิดขึ้นได้

การแบ่งประเภทงานหนา-บาง คือ จะต้องมีการแยกที่ชัดเจนและเวลานำไปติดต้นหล่อก็ต้องมีการแยกให้ถูกต้อง ถ้าไม่ถูกต้องหลังการหล่อชิ้นงานจะออกมาไม่สมบูรณ์ เพราะชิ้นงานที่หนาจะหล่อที่อุณหภูมิต่ำและชิ้นงานที่บางจะหล่อที่อุณหภูมิสูง

4. วัตถุดิบ (Material) ที่ใช้ในกระบวนการหล่อเครื่องประดับ 5 ชนิด โดยแต่ละชนิดต้องได้ตามคุณสมบัติที่ต้องการตามคู่มือการปฏิบัติงานของกระบวนการหล่อเครื่องประดับ โดยมีวัตถุดิบที่ใช้ในกระบวนการหล่อเครื่องประดับอยู่ 5 ชนิดดังนี้

ชนิดของอัลลอยด์ คือ คุณสมบัติของอัลลอยด์จะต้องเหมาะสมกับเงื่อนไขของการหล่อ เช่น อุณหภูมิการหลอมละลายเหมาะสมกับเงื่อนไขของการหล่อของเราที่ต้องการหรือไม่ ถ้าไม่ตรงจะส่งผลทำให้ต้องเสียเวลาหาเงื่อนไขใหม่อีกต้องมีการเสียต้นทุนเพิ่มในส่วนของการทดลองเพราะโลหะทั้งเงินและอัลลอยด์มีมูลค่าที่สูง ซึ่งในการทดลองแต่ละครั้งจะมีการสูญหายของโลหะทุกครั้ง

ปูน คือ คุณสมบัติของปูนจะต้องเหมาะสมกับเงื่อนไขของการอบเบ้าหล่อ เช่น การทนอุณหภูมิการอบเบ้าสูงสุดได้เท่าไรที่คุณสมบัติของปูนจะไม่เปลี่ยนแปลง ซึ่งมีผลกระทบโดยตรงกับคุณภาพของการหล่อชิ้นงาน

น้ำ คือ จะต้องมีความสะอาดเท่ากับน้ำดื่มและอุณหภูมิของน้ำต้องไม่เกิน 27 องศาเซลเซียสหรืออุณหภูมิห้องปกติ ถ้าคุณสมบัติของน้ำไม่ได้ตามเงื่อนไขนี้จะส่งผลกระทบต่อเวลาในการแข็งตัวของปูนไวหรือช้ากว่า 1-2 นาที จะทำให้ผิวชิ้นงานหลังการหล่อออกมาไม่เรียบสวยและจะเสียเวลาในการแต่งผิวชิ้นงานนาน

โลหะ คือ จะต้องมีความสะอาดก่อนการนำไปหล่อ เช่นต้องไม่มีคราบเขม่าจากกระบวนการผสมโลหะกับอัลลอยด์หรือเศษฝุ่น จะต้องมีการทำความสะอาดโลหะก่อนนำไปทำการหล่อทุกครั้งด้วยการขัดร่อนด้วยเครื่องทำความสะอาดผิวโลหะ ถ้าโลหะไม่มีความสะอาดจะส่งผลให้คุณภาพของชิ้นงานหลังการหล่อออกมาไม่ดี เช่นเป็นรูพรุนหรือผิวของชิ้นงานไม่เรียบสวย

กรด คือ กรดซัลฟิวริกใช้สำหรับล้างคราบเขม่าจากการหล่อใช้ในปริมาณที่ถูกต้อง คือ กรดซัลฟิวริก 1 ส่วนผสมกับน้ำ 10 ส่วน ถ้ากรดมากไปกว่านี้จะส่งผลทำให้ชิ้นงานผุกร่อนได้

จากการระดมความคิดร่วมกับผู้เกี่ยวข้องในกระบวนการหล่อเครื่องประดับสรุปลงได้เลือก 2 ปัจจัย คือ อุณหภูมิอบเบ้าและอุณหภูมิหล่อและจะนำเอาปัจจัยทั้ง 2 ปัจจัยไปทำการออกแบบการทดลองต่อไป โดยทั้ง 2 ปัจจัย สามารถอธิบายถึงผลกระทบกับชิ้นงานหล่อได้ดังนี้

ปัจจัยที่ 1 คือ อุณหภูมิอบเบ้า จะต้องมีการกำหนดไว้ชัดเจนแยกตามประเภทของชิ้นงานหนาและบางให้เหมาะสม เช่น ชิ้นงานที่บางใช้อุณหภูมิการอบเบ้าที่ 620-680 องศาเซลเซียส ชิ้นงานความหนาปานกลางใช้อุณหภูมิการอบเบ้าที่ 550-590 องศาเซลเซียสและชิ้นงานที่หนาใช้อุณหภูมิการอบเบ้าที่ 480-540 องศาเซลเซียส ถ้าไม่มีการกำหนดไว้จะส่งผลทำให้มีชิ้นงานบกพร่องเกิดขึ้นได้

ปัจจัยที่ 2 คือ อุณหภูมิหลอมโลหะของเครื่องหล่อ จะต้องมีการกำหนดไว้ชัดเจนแยกตามประเภทของชิ้นงานหนาและบางให้เหมาะสม เช่น ชิ้นงานที่หนาและไม่มีรายละเอียดมากจะใช้อุณหภูมิหล่อที่ 1060-1080 องศาเซลเซียส และถ้าเป็นชิ้นงานที่บางและมีรายละเอียดมากจะใช้อุณหภูมิหล่อที่ 1040-1060 องศาเซลเซียส ถ้าไม่มีการกำหนดไว้จะส่งผลทำให้มีชิ้นงานบกพร่องเกิดขึ้นได้

เหตุผลประกอบในการตัดสินใจของผู้ศึกษาที่เลือกทั้ง 2 ปัจจัย มาทำการทดลองนั้นเพราะได้ทำการศึกษาและทดลองมาก่อนที่จะเริ่มทำการศึกษาวิจัยครั้งนี้ และจากการศึกษาผลการวิจัยและการทดลองเกี่ยวกับการแก้ไขปัญหาคูณภาพงานหล่อของบุคคลอื่น ๆ ที่ได้มีการศึกษาวิจัยไว้ และคำแนะนำจากผู้เชี่ยวชาญ ที่เกี่ยวข้องกับการบวนการหล่อชิ้นงานเครื่องประดับ แต่ยังไม่สามารถที่จะแก้ไขปัญหาได้และยังมีชิ้นงานบกพร่องที่เป็นรูพรุนและโพรงเกิดขึ้นอีก โดยปัญหาสามารถตรวจพบหลังกระบวนการขัดเงา

#### 4.4 ขั้นตอนการปรับปรุงแก้ไขกระบวนการ (Improvement Phase)

การปรับปรุงแก้ไขกระบวนการเลือกศึกษาเฉพาะปัจจัยที่คาดว่าจะมีผลกระทบกับผลตอบของกระบวนการเท่านั้น และได้ใช้วิธีการออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียลแบบเต็มจำนวน  $3^2$  โดยแต่ละปัจจัยประกอบด้วย 3 ระดับ โดยแสดงในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ปัจจัยและค่าที่ใช้ในการออกแบบการทดลอง Model PR-03-G014CZ

ปัจจัยในการทดลอง		ระดับในการทดลอง		
ปัจจัย	ตัวแปร	-1	0	+1
A	อุณหภูมิเบา (องศาเซลเซียส)	480	540	600
B	อุณหภูมิหล่อ (องศาเซลเซียส)	1020	1030	1060

การกำหนดช่วงของปัจจัยในการทดลอง

ปัจจัย A คือ อุณหภูมิอบเบา จะมีการกำหนดให้ชัดเจนและจะแยกตามประเภทของความหนาชิ้นงาน ให้มีความเหมาะสม ชิ้นงานที่บางใช้อุณหภูมิการอบเบาที่ 620-680 องศาเซลเซียส ชิ้นงานความหนาปานกลางใช้อุณหภูมิการอบเบาที่ 550-590 องศาเซลเซียสและชิ้นงานที่หนาใช้อุณหภูมิการอบเบาที่ 480-540 องศาเซลเซียส

ปัจจัย B คือ อุณหภูมิหลอมโลหะของเครื่องหล่อ ซึ่งจะแยกตามคุณสมบัติจุดหลอมละลายของอัลลอยด์ที่นำมาผสมกับโลหะเงิน โดยจะอ้างอิงจากมาตรฐานการใช้ผลิตภัณฑ์ของผู้ขายที่กำหนดมาให้ และได้แยกอุณหภูมิการหลอมโลหะออกเป็นชิ้นงานหนาและไม่มีรายละเอียดมากจะใช้อุณหภูมิหล่อที่ 1060-1080 องศาเซลเซียส และถ้าเป็นชิ้นงานที่บางและมีรายละเอียดมากจะใช้อุณหภูมิหล่อที่ 1040-1060 องศาเซลเซียส

การออกแบบการทดลองมีลำดับขั้นตอนในการทดลองมีดังนี้คือ กำหนดขั้นตอนการทดลองและวิธีการเก็บข้อมูลหลังจากนั้นทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง และทำการวิเคราะห์และสรุปผลการทดลองที่ได้มา ซึ่งประกอบไปด้วย 1) ผลการทดลอง 2) การวิเคราะห์ผลการทดลอง 3) การหาเงื่อนไขที่เหมาะสม 4) ผลการนำเงื่อนไขที่เหมาะสมมาใช้จริงในกระบวนการผลิต และ 5) สรุปผลการทดลอง

#### 4.4.1 ผลการทดลองเชิงแพคทอเรียลแบบเต็ม

ในการทดลองเชิงแพคทอเรียลแบบเต็มจำนวน  $3^2$  และทำซ้ำ 3 ครั้งซึ่งได้ระบุนการศึกษาตามขั้นตอนการดำเนินการทดลองที่กล่าวไว้ในบทที่ 3 มีปัจจัยที่ต้องการศึกษาทั้งหมด 2 ปัจจัย คือ อุณหภูมิเตาอบแห้งและอุณหภูมิหล่อ โดยทำการทดลองจำนวนชิ้นงาน 60 ชิ้นต่อหนึ่งต้นในการหล่อต่อครั้งแสดงดังรูปที่ 4.4 โดยใช้วิธีการออกแบบการทดลองโดยทำซ้ำ 3 ครั้ง เพื่อยืนยันความน่าเชื่อถือของผลการทดลอง และบันทึกข้อมูลผลการทดลองในโปรแกรม Microsoft Excel ดังในตารางที่ 4.3



รูปที่ 4.4 การติดตั้งชิ้นงานต่อหนึ่งต้นในการหล่อต่อครั้ง

ตารางที่ 4.3 ผลการทดลองสำหรับกระบวนการหล่อเครื่องประดับ Model PR-03-G014CZ

Std Order	Run Order	ปัจจัย A อุณหภูมิเบา (องศาเซลเซียส)	ปัจจัย B อุณหภูมิหล่อ (องศาเซลเซียส)	เปอร์เซ็นต์ ของพื้นที่รูพรุน ต่อพื้นที่ทั้งหมด
1	24	480	1020	11.42%
2	19	480	1030	14.44%
3	8	480	1060	2.01%
4	26	540	1020	3.02%
5	9	540	1030	19.62%
6	15	540	1060	45.49%
7	16	600	1020	46.44%
8	7	600	1030	1.02%
9	20	600	1060	4.87%
10	18	480	1020	35.93%
11	23	480	1030	5.94%
12	10	480	1060	1.94%
13	1	540	1020	0.47%
14	17	540	1030	35%
15	6	540	1060	26.96%
16	14	600	1020	33.97%
17	13	600	1030	2.84%
18	3	600	1060	18.83%
19	2	480	1020	19.31%
20	4	480	1030	11.48%
21	27	480	1060	0.81%
22	11	540	1020	1.17%
23	22	540	1030	36.48%
24	21	540	1060	29.45%
25	5	600	1020	37.29%
26	12	600	1030	1.75%
27	25	600	1060	6.36%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

#### 4.4.2 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติการทดลองเชิงแฟคทอเรียลแบบเต็ม

##### การวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance: ANOVA)

การวิเคราะห์ผลการทดลองเชิงแฟคทอเรียลแบบเต็มจำนวน  $3^2$  พบว่ามีปัจจัยและผลกระทบร่วมระหว่างปัจจัยอย่างมีนัยสำคัญต่อการเปลี่ยนแปลงเปอร์เซ็นต์การเกิดพื้นที่รูพรุน (Shrinkage Porosity) ต่อพื้นที่ จากปัจจัยหลักทั้ง 2 ปัจจัย คือ อุณหภูมิอบแห้ง (A) และอุณหภูมิหล่อ (B) พบว่าทั้ง 2 ปัจจัยมีผลต่อเปอร์เซ็นต์การเกิดพื้นที่รูพรุน และการวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูล ซึ่งผลวิเคราะห์จะพิจารณาจากค่า P-Value หากค่า P-Value มีค่าน้อยกว่า 0.05 ( $\alpha = 0.05$ ) จะสรุปได้ปัจจัยนั้นมีผลต่อความแข็งของเงินสเตอร์ลิงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ซึ่งได้ผลการวิเคราะห์ดังตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj Ms	F-Value	P-Value
Model	8	5347.0	668.38	12.88	<0.001
Linear	4	734.6	183.65	3.54	0.027
A อุณหภูมิอบแห้ง	2	495.5	247.74	4.77	0.022
B อุณหภูมิหล่อ	2	239.1	119.55	2.30	0.129
2-Way Interaction	4	4612.4	1153.11	22.22	<0.001
A*B	4	4612.4	1153.11	22.22	<0.001
Error	18	933.9	51.88	-	-
Total	26	6281.0	-	-	-
Model Summary					
S = 7.20311    R-sq = 85.13%    R-sq (adj) = 78.52 %    R-sq (pred) = 66.54 %					

จากตารางที่ 4.4 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของเปอร์เซ็นต์การเกิดรูพรุนต่อพื้นที่ ตามเงื่อนไขการใช้อุณหภูมิอบแห้งและอุณหภูมิหล่อตามระดับ เมื่อวิเคราะห์ที่ค่า P-Value พบว่า

1. อุณหภูมิในการอบแห้ง
2. อันตรกิริยาระหว่างอุณหภูมิอบแห้งและอุณหภูมิหล่อ (A\*B)

เป็นตัวแปรที่มีค่า P-Value น้อยกว่า 0.05 ซึ่งบ่งบอกว่าตัวแปรเหล่านี้เป็นตัวแปรที่มีผลต่อการเกิด Shrinkage porosity ที่ระดับนัยสำคัญ  $\alpha = 0.05$  หรือที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์เมื่อวิเคราะห์เฉพาะปัจจัยที่มีค่า P-Value น้อยกว่า 0.05

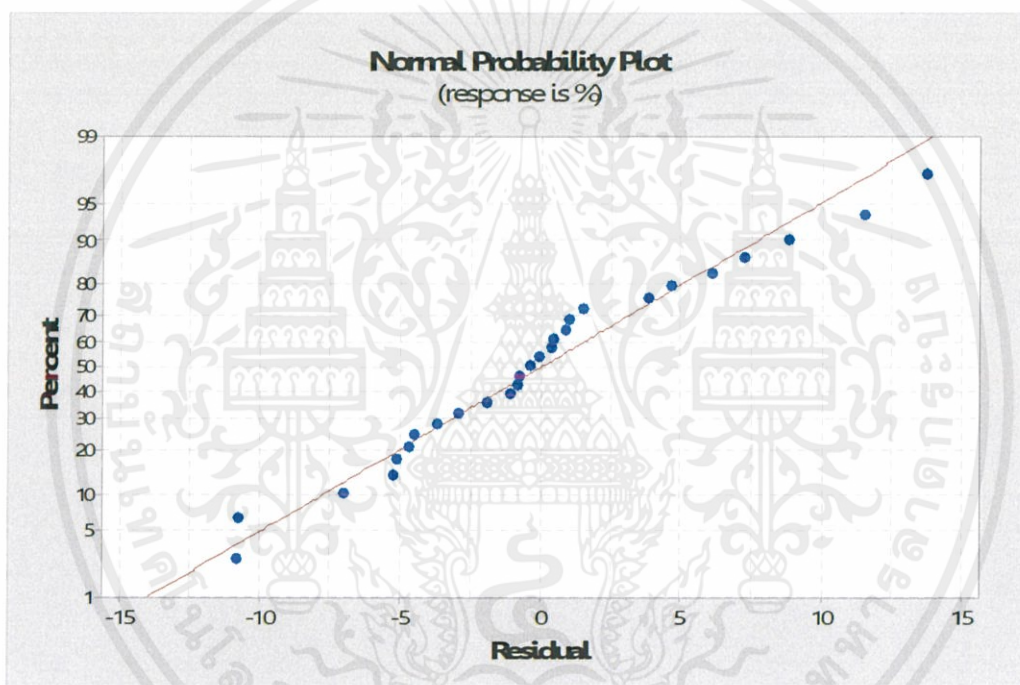
จากนั้นทำการวิเคราะห์สัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R-Sq) ซึ่งจากตารางที่ 4.4 จะเห็นว่า ค่า R-Sq มีค่าเท่ากับ 85.13 เปอร์เซ็นต์ และ R-Sq (adj) มีค่าเท่ากับ 78.52 เปอร์เซ็นต์



## การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง (Model Adequacy Checking)

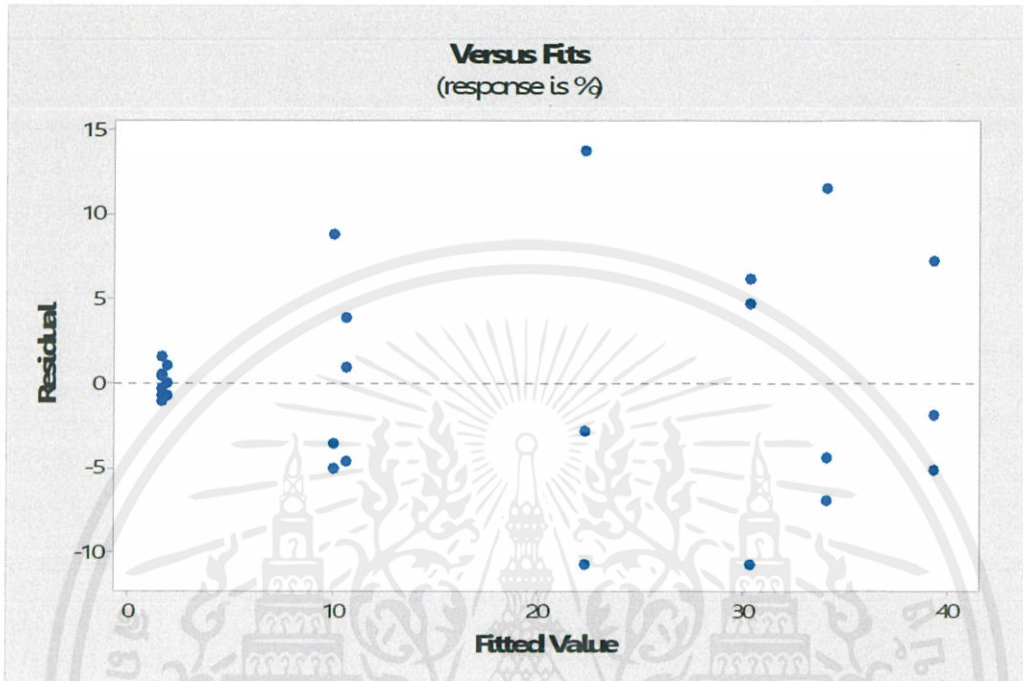
การตรวจสอบความถูกต้องของข้อมูลเป็นการตรวจสอบที่ทราบถึงผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนว่ามีความเหมาะสมหรือไม่ โดยมีการตรวจสอบดังนี้

1. การตรวจสอบการกระจายแบบแจกแจงปกติ (Normal Distribution) เป็นการตรวจสอบค่าส่วนตกค้าง (Residual) ของข้อมูลว่ามีการกระจายตัวแบบปกติหรือไม่ โดยจะตรวจสอบได้จากกราฟที่มีลักษณะเป็นเส้นตรงหรือใกล้เคียง จากรูปที่ 4.5 จะเห็นว่าลักษณะเป็นเส้นตรงหรือใกล้เคียงเป็นเส้นตรง ข้อมูลจากการทดลองมีลักษณะการกระจายตัวแบบปกติ



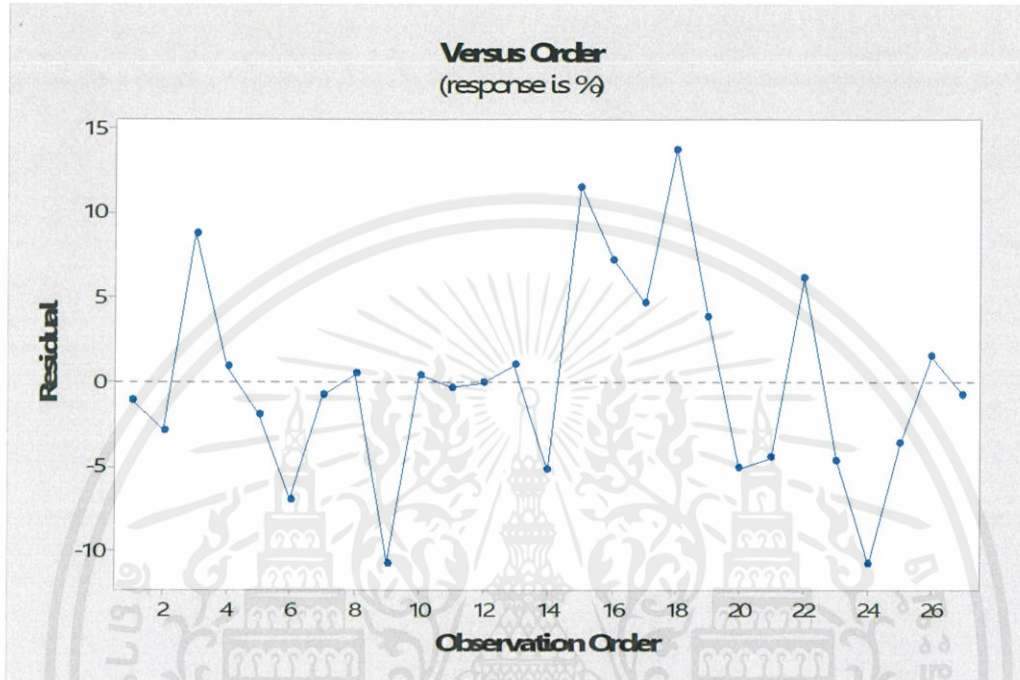
รูปที่ 4.5 กราฟการแจกแจงแบบปกติสำหรับเปอร์เซ็นต์การเกิดรูพรุนต่อพื้นที่

2. การตรวจสอบความเสถียรภาพของความแปรปรวน เป็นการตรวจสอบถึงความสม่ำเสมอของการกระจายของข้อมูล จากรูปที่ 4.6 ส่วนตกค้างมีการกระจายตัวแบบปกติ ไม่มีแนวโน้มเป็นรูปแบบใด ๆ มีการกระจายตัวสม่ำเสมอ นั้น หมายถึงข้อมูลของการเกิดรุกรุนต่อพื้นที่ที่นำมาวิเคราะห์สามารถเชื่อถือได้



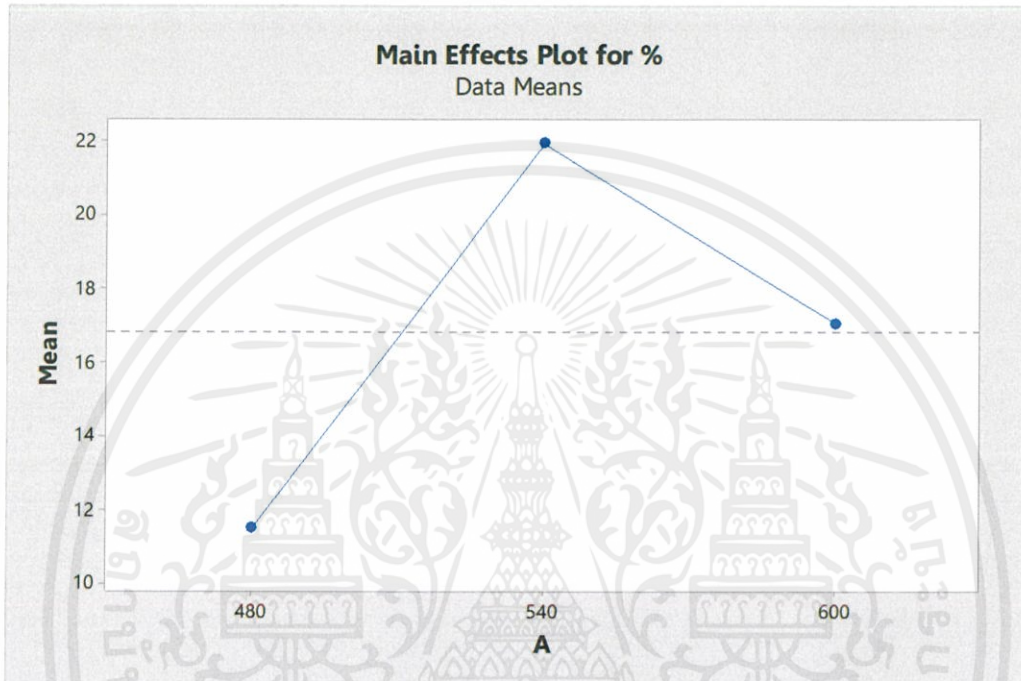
รูปที่ 4.6 กราฟแสดงสัดส่วนส่วนตกค้างของการเกิดรุกรุนต่อพื้นที่

3. การตรวจสอบความเป็นอิสระของข้อมูล เป็นการตรวจสอบความสัมพันธ์ระหว่างค่าส่วนตกค้างและเวลาที่เปลี่ยนไป โดยจะดูถึงจุดที่แทนข้อมูลว่ามีการกระจายแบบอิสระหรือไม่ จากรูปที่ 4.7 ส่วนตกค้างมีการกระจายตัวแบบสม่ำเสมอ แสดงว่าข้อมูลมีการกระจายตัวแบบเป็นอิสระ



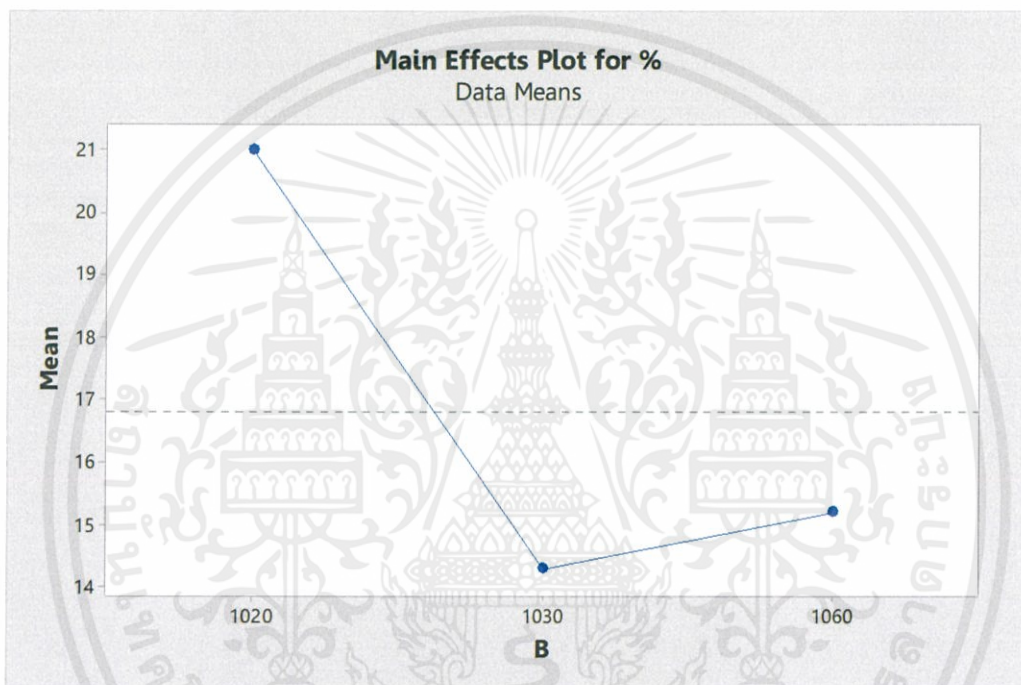
รูปที่ 4.7 กราฟแสดงค่าส่วนตกค้างของการเกิดรูพรุนต่อพื้นที่เทียบกับลำดับการทดลอง

4. ผลกระทบหลัก (Main Effect Plot) ของปัจจัย A (อุณหภูมิอบแห้ง) จากรูปที่ 4.8 จะเห็นได้ว่า ปัจจัย A (อุณหภูมิอบแห้ง) มีผลกระทบ (Main Effect) กับจำนวนการเกิดรูพรุนต่อพื้นที่ โดยการใช้อุณหภูมิอบแห้ง 480 องศาเซลเซียส มีสัดส่วนการเกิดรูพรุนน้อยกว่าการใช้อุณหภูมิอบแห้งที่ 540 และ 600 องศาเซลเซียส และเมื่อวิเคราะห์ตามลักษณะทางกายภาพของชิ้นงาน Model PR-03-G014CZ พบว่าชิ้นงานมีลักษณะหนาการใช้อุณหภูมิอบแห้งที่สูงเกินไปจะทำให้เกิดรูพรุนเนื่องจากการหดตัวของโลหะสูงขึ้น



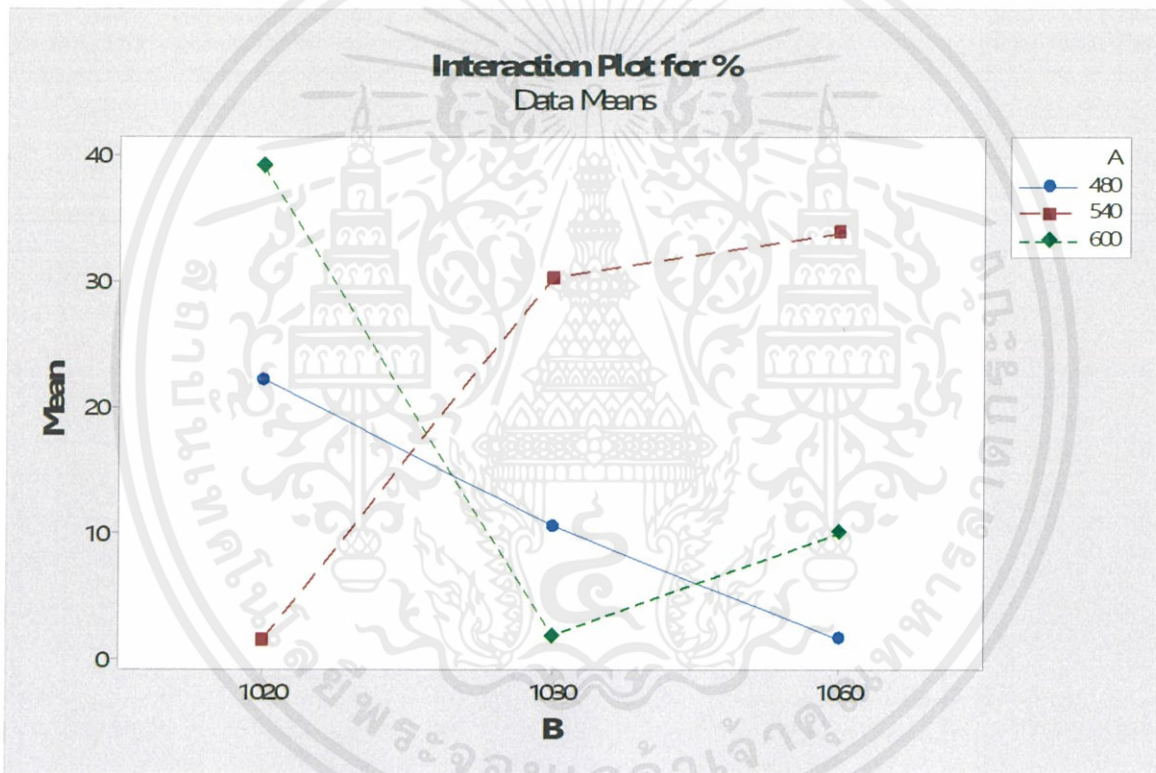
รูปที่ 4.8 กราฟแสดงผลกระทบของปัจจัย A (อุณหภูมิอบแห้ง)

5. ผลกระทบหลัก (Main Effect Plot) ของปัจจัย B (อุณหภูมิหล่อ) จากรูปที่ 4.9 จะเห็นได้ว่าปัจจัย B (อุณหภูมิหล่อ) มีผลกระทบ (Main Effect) กับจำนวนการเกิดรูพรุนต่อพื้นที่ โดยการใช้อุณหภูมิที่ 1030 องศาเซลเซียส มีสัดส่วนการเกิดรูพรุนน้อยกว่าการใช้อุณหภูมิที่ 1020 องศาเซลเซียส และจากการวิเคราะห์ตามลักษณะทางกายภาพของชิ้นงาน Model PR-03-G014CZ มีรายละเอียดมากหากใช้อุณหภูมิการหล่อที่ 1020 องศาเซลเซียส จะทำให้ชิ้นงานโลหะแข็งเร็วก่อนที่โลหะจะไหลเข้าไปเต็มโพรงแบบส่งผลให้ชิ้นงานไม่เต็ม



รูปที่ 4.9 กราฟแสดงผลกระทบของปัจจัย B (อุณหภูมิหล่อ)

6. ผลกระทบซึ่งกันและกัน (Interaction Plot) ของปัจจัย A (อุณหภูมิอบแห้ง) และปัจจัย B (อุณหภูมิหล่อ) จากรูปที่ 4.10 จะเห็นว่าปัจจัย A (อุณหภูมิอบแห้ง) มีผลกระทบซึ่งกันและกัน (Interaction) กับปัจจัย B (อุณหภูมิหล่อ) โดยจากกราฟจะเห็นว่า อุณหภูมิอบแห้ง 540 องศาเซลเซียสกับอุณหภูมิหล่อ 1020 องศาเซลเซียส หรืออุณหภูมิอบแห้ง 600 องศาเซลเซียสกับอุณหภูมิหล่อ 1030 องศาเซลเซียส หรืออุณหภูมิอบแห้ง 480 องศาเซลเซียสกับอุณหภูมิหล่อ 1060 องศาเซลเซียส จะมีเปอร์เซ็นต์การเกิดรูพรุนต่อพื้นที่ในสัดส่วนที่น้อยกว่าความสัมพันธ์ช่วงอุณหภูมิอื่น ๆ เนื่องจากชิ้นงาน Model PR-03-G014CZ มีลักษณะทางกายภาพที่หนาและรายละเอียดมาก หากใช้อุณหภูมิที่ใกล้กันเกินไปจะส่งผลให้ชิ้นงานหล่อได้ไม่เต็มโพรงแบบ และหากใช้อุณหภูมิที่ต่างกันมากจะส่งผลให้การหดตัวของโลหะสูงขึ้น



รูปที่ 4.10 กราฟแสดงผลกระทบซึ่งกันและกันของปัจจัย A กับปัจจัย B

## 4.5 ขั้นตอนการควบคุมกระบวนการ (Control Phase)

การควบคุมกระบวนการ (Control Phase) มีจุดมุ่งหมายเพื่อให้การแก้ไขปรับปรุงกระบวนการนั้นมาพัฒนาให้เป็นอย่างดีขึ้น เพื่อเพิ่มพูนผลที่ได้จากการแก้ไขและพัฒนากระบวนการ จากค่าปัจจัยที่ดีที่สุดจากการทดลองที่ได้มาและเพื่อค้นหาและระบุความเป็นไปได้ในการขยายผลไปยังกระบวนการอื่น ๆ

### 4.5.1 การยืนยันผลการทดลอง

หลังจากการทดลองผลิตในช่วงเดือนกรกฎาคม 2561 และเริ่มผลิตจริงในช่วงเดือนสิงหาคม 2561 จากนั้นทำการยืนยันผลการทดลองอีกครั้งด้วยการนำเอาผลความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิอบแห้งและอุณหภูมิหล่อที่มีสัดส่วนการเกิดเปอร์เซ็นต์พื้นที่รูพรุนน้อย มาใช้ในการผลิตจริงช่วงเดือนกันยายน 2561 ถึงเดือนตุลาคม 2561 เป็นระยะเวลา 2 เดือน โดยใช้ค่าในปัจจัยดังในตารางที่ 4.5 แต่ในการผลิตจริงได้ใช้อุณหภูมิอบแห้ง 600 องศาเซลเซียสกับอุณหภูมิหล่อ 1030 องศาเซลเซียสหรืออุณหภูมิอบแห้ง 480 องศาเซลเซียสกับอุณหภูมิหล่อ 1060 องศาเซลเซียสเพียง 2 เดือน เนื่องจากในช่วงเวลาดังกล่าวไม่มีชิ้นงานอื่นที่ใช้อุณหภูมิอบแห้งที่ 540 องศาเซลเซียส หากจะเปิดเครื่องอบแห้งเพิ่มจะมีภาระค่าใช้จ่ายกับทางบริษัทเพิ่มขึ้น

ตารางที่ 4.5 ค่าของความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิอบแห้งและอุณหภูมิหล่อที่มีสัดส่วนการเกิดเปอร์เซ็นต์รูพรุนน้อย

ปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง	ค่าของปัจจัย		
	ลำดับที่ 1	ลำดับที่ 2	ลำดับที่ 3
อุณหภูมิอบแห้ง (องศาเซลเซียส)	480	600	540
อุณหภูมิหล่อ (องศาเซลเซียส)	1060	1030	1020

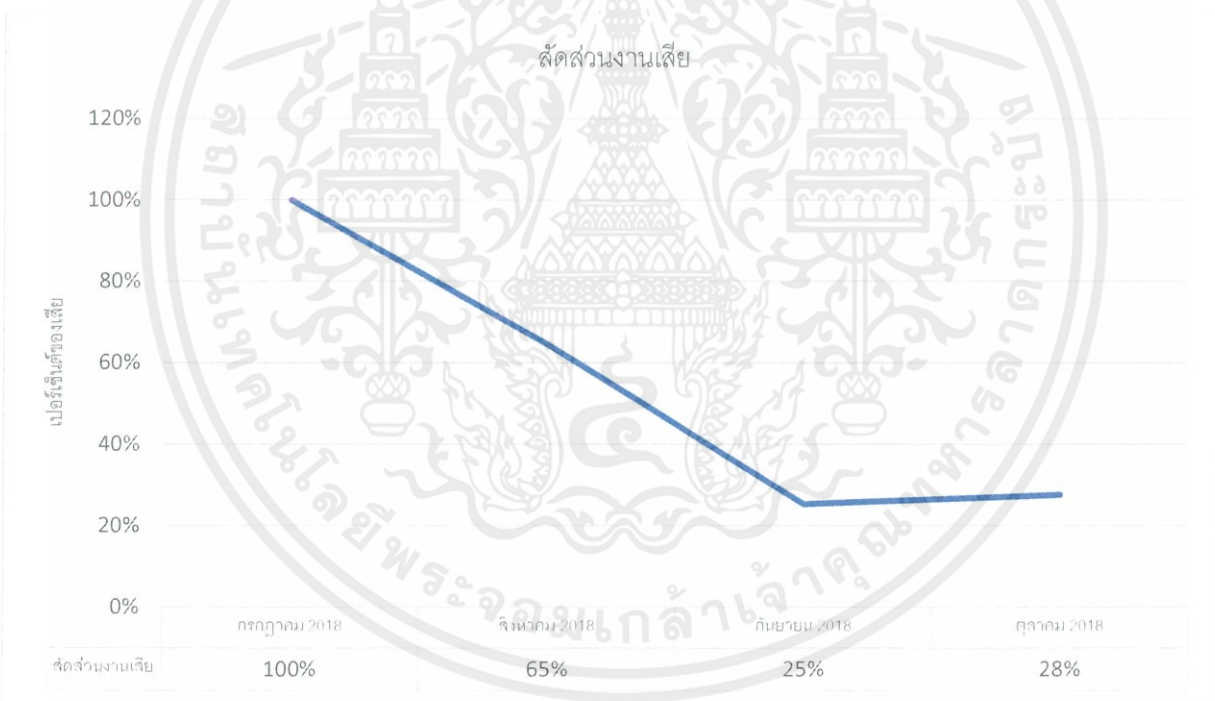
สาเหตุและที่มาของการเลือกเงื่อนไขของปัจจัยต่าง ๆ ที่นำไปทดลองใช้ในการทำงานมีดังนี้

ปัจจัยอุณหภูมิเตาอบแห้ง ก่อนการทดลองนั้นการกำหนดอุณหภูมิเตาอบแห้งจะมีหลายอุณหภูมิมากในการหาเงื่อนไขในการหล่อ เพื่อที่จะลดปัญหาชิ้นงานเป็นรูพรุน และหลังจากการทดลองจะเห็นได้ว่าควรจะกำหนด เพราะจะทำให้สามารถควบคุมปัญหาชิ้นงานเป็นรูพรุนได้ ซึ่งจากผลการทดลองที่ได้ออกมาจะเห็นว่าของเสียลดลงจริง

ปัจจัยอุณหภูมิหอลมโลหะ ก่อนการทดลองนั้นการกำหนดอุณหภูมิหอลมโลหะจะมีหลายอุณหภูมิมาก ในการหาเงื่อนไขในการหล่อ เพื่อที่จะลดปัญหาชิ้นงานเป็นรูพรุน และหลังจากการทดลองจะเห็นได้ว่าควรจะ กำหนดเพราะจะทำให้สามารถควบคุมปัญหาชิ้นงานเป็นรูพรุนได้ ซึ่งจากผลการทดลองที่ได้ออกมาจะเห็นได้ว่า ของเสียลดลงจริง และการกำหนดอุณหภูมิหอลมโลหะจะต้องสัมพันธ์กับการกำหนดอุณหภูมิเข้าหล่อด้วย

#### 4.5.2 ผลการนำเงื่อนไขอุณหภูมิอบเข้าและอุณหภูมิหล่อที่เหมาะสมมาใช้จริงในการผลิต

จากรูปที่ 4.11 แสดงสัดส่วนของเสียในช่วงของเดือนกรกฎาคม 2561 ถึงเดือนตุลาคม 2561 โดยใช้ ค่าความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิอบเข้าและอุณหภูมิหล่อที่มีสัดส่วนการเกิดเปอร์เซ็นต์รูพรุนน้อยมาผลิตจริง ในช่วงเดือนกันยายน 2561 ถึงเดือนตุลาคม 2561 พบว่ามีสัดส่วนของเสียไม่เกิน 30 เปอร์เซ็นต์จากทั้ง 2 เดือนและพบว่าเงื่อนไขที่นำมาผลิตนี้เหมาะสม เนื่องจากสัดส่วนของเสียแบบรูพรุนและโพรงลดลงเมื่อเทียบกับช่วงเดือนกรกฎาคม 2560 ถึงเดือนมิถุนายน 2561 ที่มีสัดส่วนของเสียมากกว่า 56 เปอร์เซ็นต์ และเปรียบเทียบผลก่อนและหลังการทดลองแสดงในตารางที่ 4.6



รูปที่ 4.11 กราฟแสดงแสดงสัดส่วนงานเสียในช่วงเดือนกรกฎาคม 2561 ถึงเดือนตุลาคม 2561

ตารางที่ 4.6 เปรียบเทียบผลก่อนและหลังการทดลอง

ก่อนการทดลอง	หลังการทดลอง
 <p>ก่อนการทดลอง จะพบการเกิดรูพรุนที่บริเวณส่วนที่หนาและเรียบของชิ้นงาน เนื่องจากใช้อุณหภูมิอบแห้งและอุณหภูมิหล่อที่แตกต่างกันมาก ส่งผลให้ชิ้นงานเกิดการหดตัวสูงจึงเกิดรูพรุน และพบชิ้นงานพลอยแตกเนื่องจากใช้อุณหภูมิอบแห้งที่สูงเกินไป</p>	 <p>หลังการทดลอง ไม่พบการเกิดรูพรุนที่บริเวณส่วนที่หนาและเรียบของชิ้นงาน และไม่พบชิ้นงานที่พลอยแตก</p>
 <p>ก่อนการทดลอง เมื่อส่องที่บริเวณทางน้ำเข้าชิ้นงานด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสงกำลังขยาย X10 พบ Porosity ขนาดใหญ่มากกว่า 100 ตารางไมโครเมตร จำนวน 3 จุด</p>	 <p>หลังการทดลอง เมื่อส่องที่บริเวณทางน้ำเข้าชิ้นงานด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสงกำลังขยาย X10 ไม่พบ Porosity ขนาดใหญ่มากกว่า 100 ตารางไมโครเมตร</p>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

#### 4.5.3 ผลการเปรียบเทียบสัดส่วนของเสียรูพรุนและโพรง

ทำการทดสอบสมมติฐานเปรียบเทียบความแตกต่างของสัดส่วนของเสียก่อนและหลังการปรับปรุง สามารถทดสอบด้วยสมมติฐานแบบ One –Sample t-test ได้ดังนี้

การตั้งสมมติฐาน

$H_0$  : ค่าเฉลี่ยของสัดส่วนของเสียก่อนและหลังการปรับปรุงเงื่อนไขในการผลิตไม่มีความแตกต่างกัน

$H_1$  : ค่าเฉลี่ยของสัดส่วนของเสียก่อนและหลังการปรับปรุงเงื่อนไขในการผลิตมีความแตกต่างกัน

เขียนสัญลักษณ์เชิงสถิติได้ดังนี้

$$H_0 : \mu_1 = \mu_2$$

$$H_1 : \mu_1 \neq \mu_2$$

จากผลวิเคราะห์ที่ได้ดังตารางที่ 4.7 พบว่าค่า P-value <0001 จึงปฏิเสธ  $H_0$  แสดงว่าสัดส่วนของเสียก่อนและหลังการปรับปรุงมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์


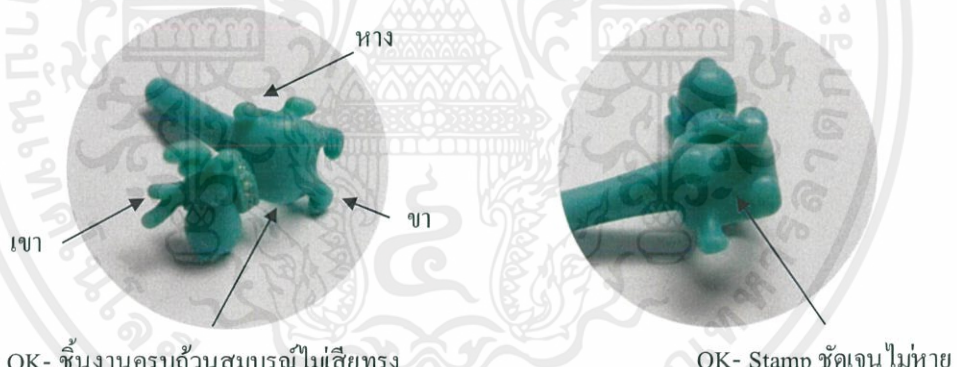
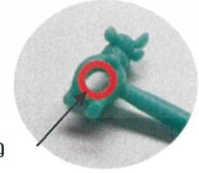
ตารางที่ 4.7 ผลการทดสอบสมมติฐานเปรียบเทียบสัดส่วนของเสียรูพรุนและโพรง

หัวข้อ	ผลการทดสอบ							
เปรียบเทียบ	One-Sample T: สัดส่วนของเสีย							
ค่าทำนาย	Test of mu = 56 vs not = 56							
กับสถานะที่	Variable	N	Mean	StDev	SE Mean	95% CI	T	P
เหมาะสม	สัดส่วนงานเสีย	2	0.2653	0.0166	0.0118	(0.1159, 0.4147)	-47.14	<0.001

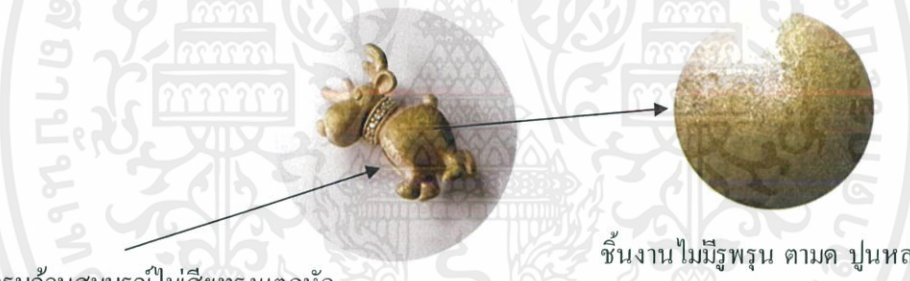
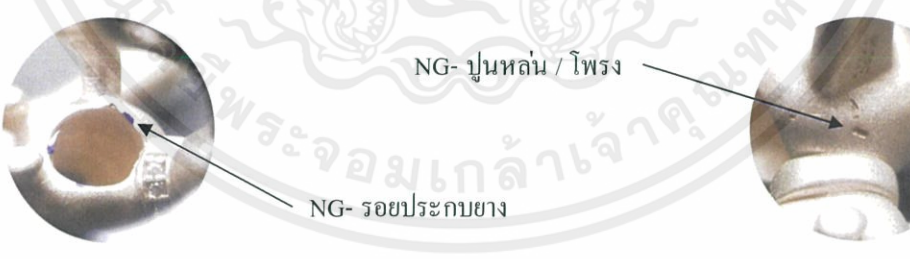
#### 4.5.4 การปรับปรุงและการจัดทำคู่มือการตรวจสอบและคู่มือการติดตามน้ำโลหะ

หลังจากที่ได้เงื่อนไขปัจจัยการทดลองที่มีผลทำให้เกิดของเสียน้อยที่สุดแล้วนำเอามาทำการปรับปรุงและจัดทำเป็นคู่มือในการตรวจสอบดังในรูป 4.12 และ 4.13 และคู่มือการติดตามน้ำโลหะดังในรูป 4.14 นำไปใช้ในส่วนของกระบวนการหล่อ และทำการอบรมชี้แจงให้พนักงานใช้เงื่อนไขนี้ในการปฏิบัติงานต่อไป


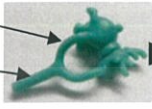



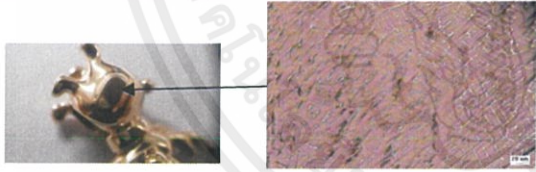
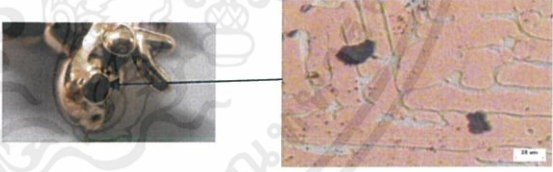


คู่มือการตรวจสอบ สำหรับงาน Model PR-03-G014CZ				
Model		PR-03-G014CZ	Material	Pink Silver
จัดทำโดย				
วัตถุประสงค์	1. เพื่อให้ผู้ปฏิบัติงานทราบลำดับการทำงาน วิธีการทำงานเป็นมาตรฐานเดียวกัน 2. เพื่อให้การปฏิบัติงานสอดคล้องกับ โยบาย วิสัยทัศน์และเป้าหมายขององค์กร			
แผนกเทียบ	ผู้รับผิดชอบ			
	การทำงานเครื่องฉีดเทียน	ค่าที่ใช้งาน	ค่าเผื่อ	หน่วยวัด
	อุณหภูมิหม้อเทียน	75	±1	องศา
	อุณหภูมิหัวฉีด	74	±1	องศา
	คู่อากาศ	1	±1	วินาที
	เวลาฉีด	10	±1	วินาที
	ลม	90	±5	kpa
	แรงบีบ	160	±5	kpa
	ตำแหน่งตัวจับก่อนยาง	30	±5	mm
	ตำแหน่งก่อนยาง	19	±1	mm
	ดันก่อนยาง	110	±5	kpa
เกณฑ์การยอมรับ				
OK				
NG	<p>ข้อควรระวัง</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>ชิ้นเทียนที่หักบิ่น เสียรูปทรงรวมถึงงานเบี้ยวศูนย์กลางไม่เป็นวงกลม</li> <li>ชิ้นงานเกิดครีบจากการประกบยาง</li> <li>รอย Stamp ไม่สมบูรณ์</li> </ol> <p>ระวังการเกิดรอยประกบยางและงานเบี้ยว</p> 			

รูปที่ 4.12 คู่มือการตรวจสอบชิ้นงาน Model PR-03-G014CZ หน้า 1

คู่มือการตรวจสอบ สำหรับงาน Model PR-03-G014CZ				
Model	PR-03-G014CZ	Material	Pink Silver	
แผนกหล่อ	ผู้รับผิดชอบ			
	กระบวนการทำปูน	ค่าที่ใช้งาน	หน่วยวัด	
	อัตราส่วนระหว่างน้ำกับปูน	39:61	-	
	รอบมอเตอร์ในการหมุน	225	rpm	
	เวลาในการปั้น	4 นาที 11 วินาที	นาที/วินาที	
	ระดับแรงดัน	1	bar	
	เวลาคูลปูน	1	นาที	
	กระบวนการหล่อ	ค่าที่ใช้งาน	หน่วยวัด	
	อัตราส่วนผสมเนื้องาน	PS	-	
	อุณหภูมิหลอมเม็ดโลหะ	1105-1110	องศาเซลเซียส	
	อุณหภูมิเตาอบ	480	องศาเซลเซียส	
	โปรแกรม	6	-	
	อุณหภูมิหล่อ	1060	องศาเซลเซียส	
	น้ำหนักเพชร	0.06	กรัม	
	เกณฑ์การยอมรับ			
	OK	 <p>ชิ้นงานครบถ้วนสมบูรณ์ไม่เสียทรงแตกหัก</p> <p>ชิ้นงานไม่มีรูพรุน ตามค ปูนหล่น</p>		
NG	 <p>NG- ปูนหล่น / โปรง</p> <p>NG- รอยประกบยาง</p>			

รูปที่ 4.13 คู่มือการตรวจสอบชิ้นงาน Model PR-03-G014CZ หน้า 2

คู่มือการติดทางน้ำโลหะ (Sprue Manual) สำหรับงาน Model PR-03-G014CZ	
ผู้รับผิดชอบ :	วันที่นำเสนอ : Material : Pink Silver
<b>PR-03-G014CZ 1 ทวน</b>	<b>PR-03-G014CZ 2 ทวน</b>
<p>3.5 มิลลิเมตร </p> <p>อุณหภูมิมอบเบ้า 480 องศาเซลเซียส อุณหภูมิมหล่อ 1060 องศาเซลเซียส</p>	<p>2 มิลลิเมตร </p> <p>2.65 มิลลิเมตร </p> <p>อุณหภูมิมอบเบ้า 600 องศาเซลเซียส อุณหภูมิมหล่อ 1030 องศาเซลเซียส</p>
<b>สรุปผลที่ได้รับ</b>	
<p>เก็บชิ้นงานตัวอย่างจากการหล่อ จำนวน 3 ชิ้นบริเวณ บนกลาง ล่าง ของต้นหลัการหล่อนำมาแต่งและขัดดูด้วยกล้อง 10X เกิดข้อบกพร่องแบบรู 1 จุดที่บริเวณหางกวาง เมื่อประเมินตามเกณฑ์ระดับความรุนแรงอยู่ในระดับ <b>ดี</b></p> 	<p>เกิดข้อบกพร่องแบบรูพรุนและตามด ที่บริเวณหัวและลำตัวเมื่อประเมินตามเกณฑ์ระดับความรุนแรงอยู่ในระดับ <b>พอใช้</b></p> 
 <p>ทำการขัดชิ้นงานและส่องบันทึกภาพในการเกิด Shrinkage Porosity งานแบบ 1 ทวน พบรูพรุนขนาดเล็กกระจายอยู่ทั่วผิวชิ้นงานอยู่เกณฑ์ปกติของการหล่อโลหะ</p>	 <p>ตัวชิ้นงานแบบ 2 ทวน พบการเกิดโพรงที่ขนาดใหญ่กว่าปกติ</p>
<b>แนวทางการแก้ไข</b>	<b>สรุป</b>
<p>ปรับขนาดของทางเดินน้ำ โลหะให้เหมาะสมกับขนาดและรูปทรงของชิ้นงาน</p>	<p>สามารถลดปัญหาการขยายขนาดจากการหดตัวของโลหะ โดยงานหล่อที่ใช้ทางเดินน้ำแบบทวนเดียวเหมาะสมกว่าการใช้ทางเดินน้ำ โลหะแบบสองทวน</p>

รูปที่ 4.14 คู่มือการติดทางน้ำโลหะ Model PR-03-G014CZ

## บทที่ 5

### สรุปผลการดำเนินงาน

การวิจัยเรื่อง การประยุกต์ใช้วิธีการ DMAIC สำหรับลดข้อบกพร่องบริเวณผิวชิ้นงานจากกระบวนการหล่อ Pink Silver ด้วยการหล่อแบบอินเวสเมนต์ กรณีศึกษา บริษัท มิگی โซมีส อินเตอร์เนชั่นแนล จำกัด มีวัตถุประสงค์เพื่อ ลดการเกิดข้อบกพร่องแบบ รูพรุนและโพรง ในกระบวนการหล่อ Pink Silver โดยดำเนินการตามขั้นตอนกระบวนการดีเอ็มเอไอซี (DMAIC) ซึ่งเริ่มจากการระบุปัญหา การวัดความสามารถของกระบวนการ การวิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลกระทบทำให้เกิดปัญหา ทำการออกแบบการทดลองเพื่อหาปัจจัยหลักที่มีผลกระทบกับกระบวนการและนำมาปรับปรุงกระบวนการให้ได้ตามเป้าหมายที่ได้วางไว้ และทำการควบคุมปัจจัยหลักที่มีผลกระทบกับกระบวนการนั้นให้อยู่ภายใต้ข้อกำหนด เพื่อให้ผลิตภัณฑ์ที่มีตำหนิมีสัดส่วนเป็นไปตามเป้าหมายที่วางไว้

#### 5.1 สรุปผลการศึกษา

จากงานวิจัยนี้ได้ศึกษาปัญหาที่เกิดขึ้นในอุตสาหกรรมการผลิตอัญมณีและเครื่องประดับ โดยได้ศึกษาปัญหาชิ้นงานที่เกิดรูพรุนและโพรงในกระบวนการหล่อเครื่องประดับ โดยแบ่งกระบวนการดำเนินงานออกเป็น 3 ขั้นตอนหลัก ได้แก่ ขั้นตอนกระบวนการศึกษาและสาเหตุของปัญหา ขั้นตอนกระบวนการออกแบบการทดลองและยืนยันผลการทดลอง และขั้นตอนกระบวนการจัดทำคู่มือปฏิบัติงาน

##### 5.1.1 กระบวนการศึกษาและสาเหตุของปัญหา

โดยอาศัยหลักการของซิกส์ ซิกม่า มาดำเนินการตามขั้นตอนกระบวนการดีเอ็มเอไอซี (DMAIC) ได้มีการสำรวจและศึกษาการดำเนินการของกระบวนการ เพื่อค้นหาสาเหตุของปัญหาหรือ Define Phase หลังจากนั้นทำการวัดระดับของเสียที่เกิดขึ้นในกระบวนการและนำข้อมูลของเสียที่เกิดขึ้นมาวิเคราะห์หรือ Analysis Phase โดยใช้แผนภูมิพาเรโตแยกของเสียที่เกิดขึ้นในกระบวนการ เพื่อวัดระดับของปัญหาหรือ Measure Phase และได้เลือกเอาปัญหาที่เกิดสูงสุดมาทำการศึกษา คือปัญหาชิ้นงานหล่อเป็นรูและโพรง จึงได้ทำการระดมความคิดร่วมกับพนักงานที่ปฏิบัติงานในแผนกและหัวหน้างานที่เกี่ยวข้องหาสาเหตุของปัญหา โดยใช้แผนภูมิแกมมากำหนดสาเหตุของปัญหาและสามารถแจกแจงปัจจัยของปัญหาทั้งหมดและได้เลือกปัจจัยที่น่าจะทำให้เกิดของเสียมา 2 ปัจจัย คือ อุณหภูมิอบเข้าและอุณหภูมิหล่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 5.1.2 กระบวนการออกแบบการทดลอง

ได้นำเอาสาเหตุของปัญหาที่ก่อให้เกิดของเสียทั้ง 2 ปัจจัย มาทำการออกแบบการทดลอง โดยใช้ Full Factorial Design  $3^2$  และทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง ซึ่งทำการทดลองทั้งหมด 27 การทดลอง และ ผลจากการวิเคราะห์ ANOVA พบว่าตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อเปอร์เซ็นต์การเกิดพื้นที่รูพรุนต่อพื้นที่ที่ระดับ  $\alpha = 0.05$  คือ อุณหภูมิในการอบแห้ง และอันตรกิริยาระหว่างอุณหภูมิอบแห้งและอุณหภูมิหล่อ ( $A*B$ ) ส่วนตัวแปรอื่น ๆ ไม่มีผลกระทบต่อความแข็งแรงของเงินสเตอร์ลิงที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์

### 5.1.3 ผลจากการทดลอง

จากการผลิตในช่วงเดือนกรกฎาคม 2561 ถึงเดือนสิงหาคม 2561 ได้มีการใช้อุณหภูมิอบแห้งที่ 630 องศาเซลเซียสและอุณหภูมิหล่อที่ 1060 องศาเซลเซียส ส่งผลให้มีสัดส่วนของเสียแบบรูพรุนและโพรง สูงถึง 56 เปอร์เซ็นต์ หลังจากทำการออกแบบการทดลองได้นำอุณหภูมิอบแห้ง 600 องศาเซลเซียสกับอุณหภูมิหล่อ 1030 องศาเซลเซียสหรืออุณหภูมิอบแห้ง 480 องศาเซลเซียสกับอุณหภูมิหล่อ 1060 องศาเซลเซียสมาใช้ในการผลิตจริงเดือนกันยายน 2561 ถึงเดือนตุลาคม 2561 พบว่าสัดส่วนของเสียแบบรูพรุนและโพรง ลดลงเหลือเพียงไม่เกิน 30 เปอร์เซ็นต์

### 5.1.4 กระบวนการจัดทำคู่มือมาตรฐานการปฏิบัติงาน

หลังจากกระบวนการหาสาเหตุของปัญหาและการออกแบบการทดลองเป็นที่สิ้นสุดและได้ผลการดำเนินงานตามวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้ คือ ลดการเกิดข้อบกพร่องแบบรูพรุนและโพรง และได้มีการปรับปรุงคู่มือปฏิบัติงานใหม่ โดยนำเอาปัจจัยที่ดีที่สุดในการทดลองไปแก้ไขไว้ในหัวข้อการปฏิบัติงานของกระบวนการหล่อขึ้นงาน ซึ่งกระบวนการดังกล่าวเรียกว่าการควบคุมกระบวนการหรือ Control Phase

## 5.2 อุปสรรคและปัญหา

1. ในการทดลองใช้งบประมาณสูง
2. การทดลองต้องทำหลายรอบในแต่ละการทดลอง ในกรณีที่เกิดความผิดพลาดต่าง ๆ
3. การสื่อสารกับพนักงานค่อนข้างยากในการตามงานทดลอง

### 5.3 ข้อเสนอแนะจากผลการศึกษา

1. จากการศึกษาในครั้งนี้ได้แสดงขั้นตอนและการดำเนินงานที่ชัดเจนในการหาแนวทางแก้ไขและปรับปรุงกระบวนการ ในแนวทางที่มีอยู่นี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับการแก้ไขปัญหาต่าง ๆ ในกระบวนการผลิตอื่น ๆ ได้เช่นกัน

2. การเพิ่มขีดความสามารถของกระบวนการผลิตให้มีการพัฒนาปรับปรุงไปอย่างต่อเนื่อง ผู้วิจัยมีความเห็นพร้อมในการนำแนวทางของซิกส์ ซิกมา ใช้เป็นแนวทางในการลดต้นทุนและเพิ่มผลผลิต รวมถึงการเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิต



## เอกสารอ้างอิง

- [1] ส่งออกอัญมณีและเครื่องประดับไตรมาสแรกปี 61 ขยายตัวเกือบ 4%.(2561).20 มิถุนายน พุทธศักราช 2561,จาก<http://www.tpa.or.th>
- [2] เอกสิทธิ์ นิสารัตน์. (2549). เทคนิคการหล่อเครื่องประดับ. กรุงเทพมหานคร : กรมส่งเสริมอุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม.
- [3] เอกสิทธิ์ นิสารัตน์. (2549). คู่มือแนวทางแก้ไขข้อบกพร่องในชิ้นงานหล่อเครื่องประดับ. กรุงเทพมหานคร: บางกอกบล็อก.
- [4] ณัฐพันธ์ เขจรนันท์. คู่มือปฏิบัติซิกม่า ซิกม่า ( Six Sigma) เพื่อสร้างความเป็นเลิศ สำนักพิมพ์ Be Bright Books พิมพ์ครั้งที่ 1 ตุลาคม, 2545
- [5] ประณีติ กาวารี, 2545. การศึกษากระบวนการถ่ายแบบกรณีหลายผลตบสนอง. วิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์.
- [6] ปารเมศ ชูติมา, 2545. การออกแบบการทดลองทางวิศวกรรม. กรุงเทพฯ : จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- [7] ประไพศรี สุทัศน์ ณ อยุธยา, พงศ์ชนัน เหลืองไพบูลย์, 2549. การออกแบบและวิเคราะห์การทดลอง. กรุงเทพฯ: ท็อป.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ก

ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับ Alloy Pink Silver

## ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับ Alloy Pink Silver



### UNITED ALLOY # 744

Be insured in quality, Be insured in service, Be insured in "United Alloys."

UNITED ALLOY is uniquely different from other available alloys. Combining the highest purity metals available, stringent quality control, special de-oxidizers and grain refiners, produce trouble-free, superior quality castings and fabrication or rolling (hand-made).

UNITED'S # 744 is a pink alloy designed for regular casting and stone set in place casting and limited to make Pandora Rose Collection jewelry only. It finishes to a pink color and easily solders with brass, sterling silver and low gold formulas. This alloy contained the technical metals to improve the quality casting, this alloy has no fine silver content and is to be added the fine silver. Note, is not recommended to hallmark or stamp "925" or "STERLING"

We do recommend pre-graining all alloy and fine silver before casting to assure a uniform mixture.

Solidus : 890°C Liquidus : 950°C

- 1.) Melt Temperature for Graining : 1,060 - 1,100°C
- 2.) Melt Temperature for Casting : 1,040 - 1,080°C
- 3.) Flask Temperature :

WEIGHT	VACUUM CAST
Light	620 - 680°C
Medium	550 - 590°C
Heavy	480 - 540°C

- 4.) Quench Time : - Regular Casting wait 15 - 20 minutes before quenching flask.  
- Stone Set in Place Casting wait 2 - 3 hours before remove the investment powder.
- 5.) Pickle : United's Brite-Cast™ (Ammonium Bi-fluoride), Sparex # 2 (sodium bisulfate), 10% - 20% Sulfuric Acid.  
Rubber gloves and safety glasses are recommended when using acid pickle.
- 6.) Reused : We recommend a 70% fresh : 30% Scrap mix, Cleans scrap well before re-melting.
- 7.) Specific Gravity : Alloy - 8.85, Added 17% of Fine Silver - 9.09
- 8.) Soldering : Ratio of Mixing : 50% United Silver Solder Alloy # SSA + 50% Fine Silver.  
Laser welding is recommendation for matching red/pink color.
- 9.) Note : Melt temperature may vary with type of unit.

Representative Office :

UNITED PM (THAILAND) CO., LTD. 427/15-16 Krungthoraburi Rd., Klongtong, Klongsan, Bangkok. 10600, Thailand.

Tel : (662) 4400643, 4400673 Fax : (662) 8622344 Mobile 081-6948866, 081-7517384 E-mail : sales@unitedpmthailand.com

รูปที่ ก 1 ข้อมูลเบื้องต้นการใช้งาน United alloy #744

ที่มา UNITED PM (THAILAND).CO,LTD

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

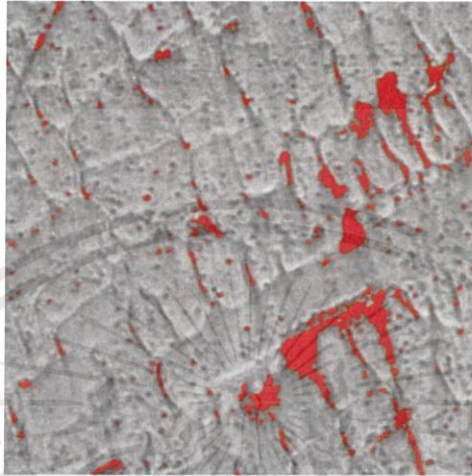


## ภาคผนวก ข

ข้อมูลการวิเคราะห์ผลด้วยโปรแกรม ImageJ จาก  
การส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง

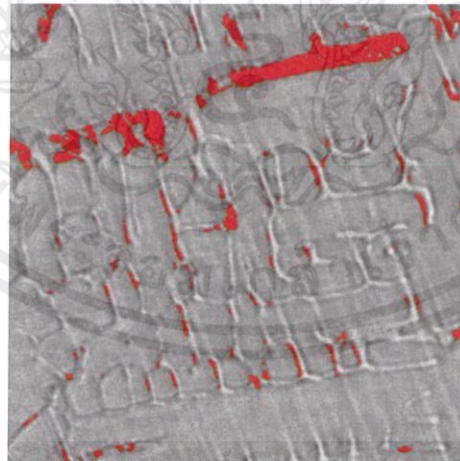
ข้อมูลการวิเคราะห์ผลด้วยโปรแกรม ImageJ จากการส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง

Model A อุณหภูมิอบเข้า 480 องศาเซลเซียสและอุณหภูมิหล่อ 1060 องศาเซลเซียส ทดลองครั้งที่ 1



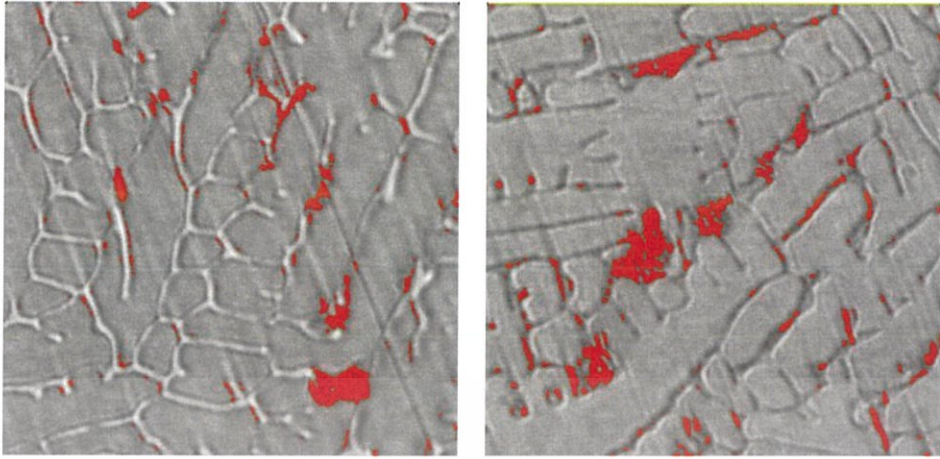
รูปที่ ข 1 รูปวิเคราะห์พื้นที่การเกิด Porosity Model A ทดลองครั้งที่ 1 ตำแหน่งที่ 1

จากรูป ข 1 จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม ImageJ พบว่ามีจุดที่ขนาดใหญ่กว่า 50 ตารางไมโครเมตรจำนวน 10 จุด คิดเป็นพื้นที่รูพรุนทั้งหมด 1958.226 ตารางไมโครเมตร



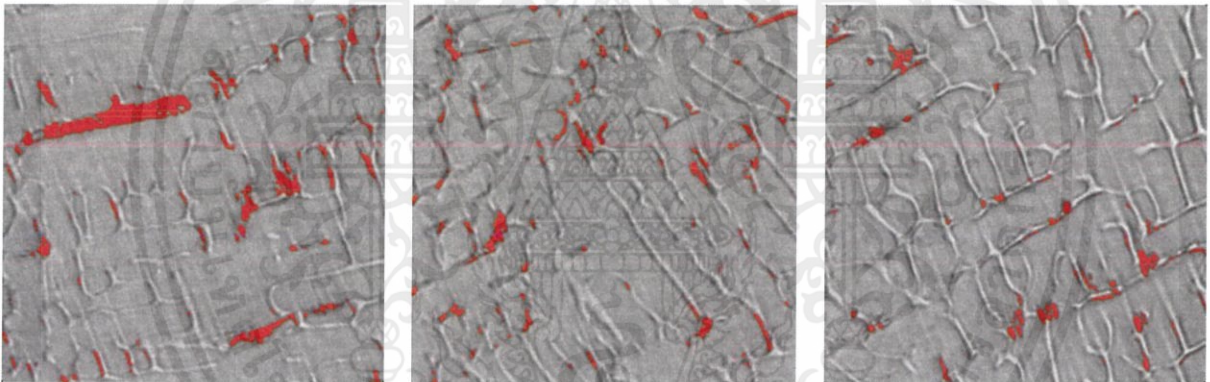
รูปที่ ข 2 รูปวิเคราะห์พื้นที่การเกิด Porosity Model A ทดลองครั้งที่ 1 ตำแหน่งที่ 2

จากรูป ข 2 จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม ImageJ พบว่ามีจุดที่ขนาดใหญ่กว่า 50 ตารางไมโครเมตรจำนวน 9 จุด คิดเป็นพื้นที่รูพรุนทั้งหมด 1954.783 ตารางไมโครเมตร



รูปที่ ข 3 รูปวิเคราะห์พื้นที่การเกิด Porosity Model A ทดลองครั้งที่ 1 ตำแหน่งที่ 3

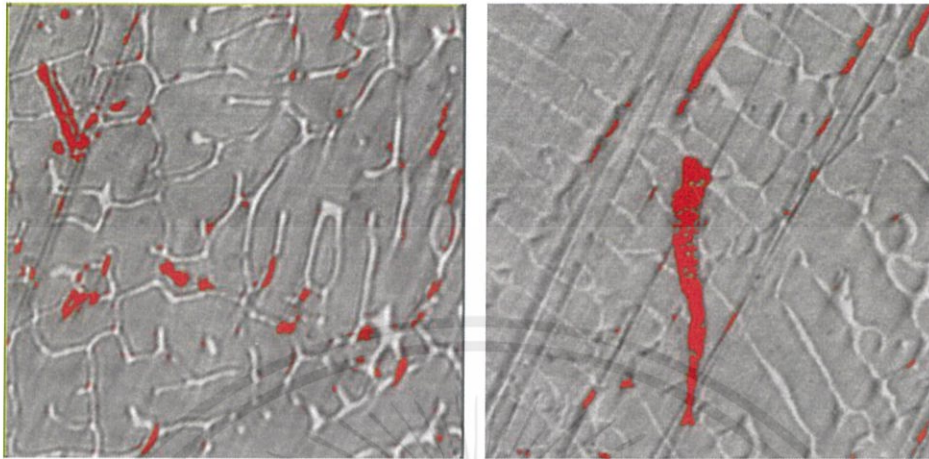
จากรูป ข 3 จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม ImageJ พบว่ามีจุดที่ขนาดใหญ่กว่า 50 ตารางไมโครเมตรจำนวน 16 จุด คิดเป็นพื้นที่รูพรุนทั้งหมด 2690.657 ตารางไมโครเมตร



รูปที่ ข 4 รูปวิเคราะห์พื้นที่การเกิด Porosity Model A ทดลองครั้งที่ 1 ตำแหน่งที่ 4

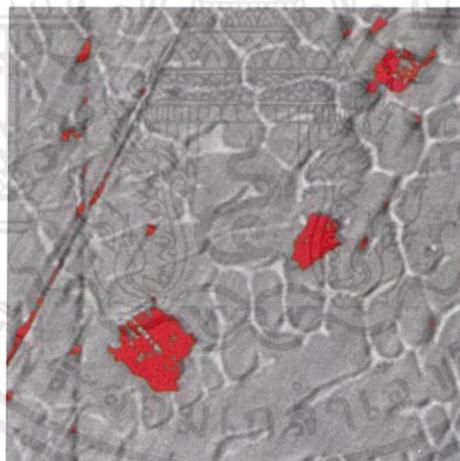
จากรูป ข 4 จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม ImageJ พบว่ามีจุดที่ขนาดใหญ่กว่า 50 ตารางไมโครเมตรจำนวน 15 จุด คิดเป็นพื้นที่รูพรุนทั้งหมด 2224.863 ตารางไมโครเมตร จากทั้ง 4 ตำแหน่งเป็นพื้นที่รูพรุนทั้งหมด 8828.529 ตารางไมโครเมตร คิดเป็น 2.01 เปอร์เซ็นต์ต่อพื้นที่ที่ทำการตรวจสอบทั้งหมด

Model A อุณหภูมิอบเบ้า 480 องศาเซลเซียสและอุณหภูมิหล่อ 1060 องศาเซลเซียส ทดลองครั้งที่ 2



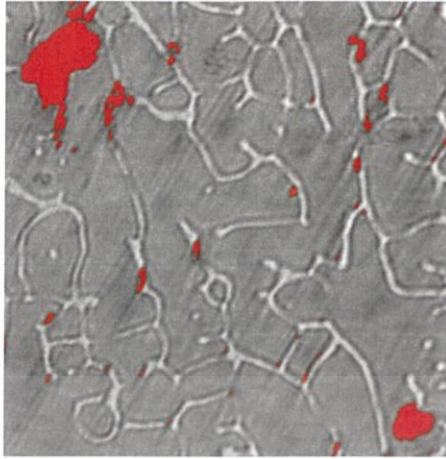
รูปที่ ข 5 รูปวิเคราะห์พื้นที่การเกิด Porosity Model A ทดลองครั้งที่ 2 ตำแหน่งที่ 1

จากรูป ข 5 จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม ImageJ พบว่ามีจุดที่ขนาดใหญ่กว่า 50 ตารางไมโครเมตรจำนวน 7 จุด คิดเป็นพื้นที่รูพรุนทั้งหมด 1899.349 ตารางไมโครเมตร



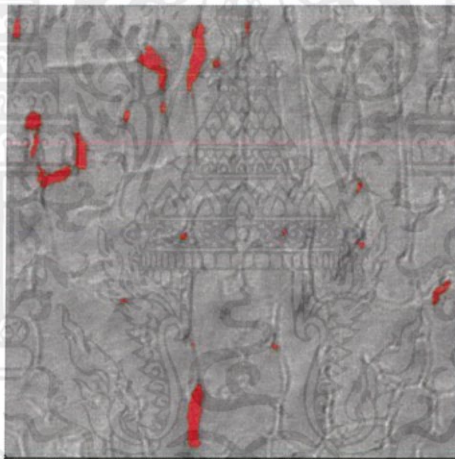
รูปที่ ข 6 รูปวิเคราะห์พื้นที่การเกิด Porosity Model A ทดลองครั้งที่ 2 ตำแหน่งที่ 2

จากรูป ข 6 จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม ImageJ พบว่ามีจุดที่ขนาดใหญ่กว่า 50 ตารางไมโครเมตรจำนวน 4 จุด คิดเป็นพื้นที่รูพรุนทั้งหมด 1753.403 ตารางไมโครเมตร



รูปที่ ข 7 รูปวิเคราะห์พื้นที่การเกิด Porosity Model A ทดลองครั้งที่ 2 ตำแหน่งที่ 3

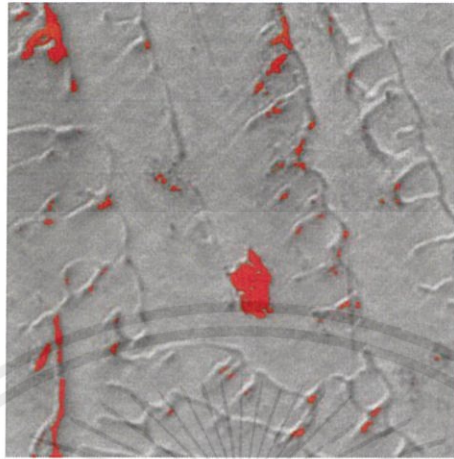
จากรูป ข 7 จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม ImageJ พบว่ามีจุดที่ขนาดใหญ่กว่า 50 ตารางไมโครเมตรจำนวน 4 จุด คิดเป็นพื้นที่รูพรุนทั้งหมด 1699.021 ตารางไมโครเมตร



รูปที่ ข 8 รูปวิเคราะห์พื้นที่การเกิด Porosity Model A ทดลองครั้งที่ 2 ตำแหน่งที่ 4

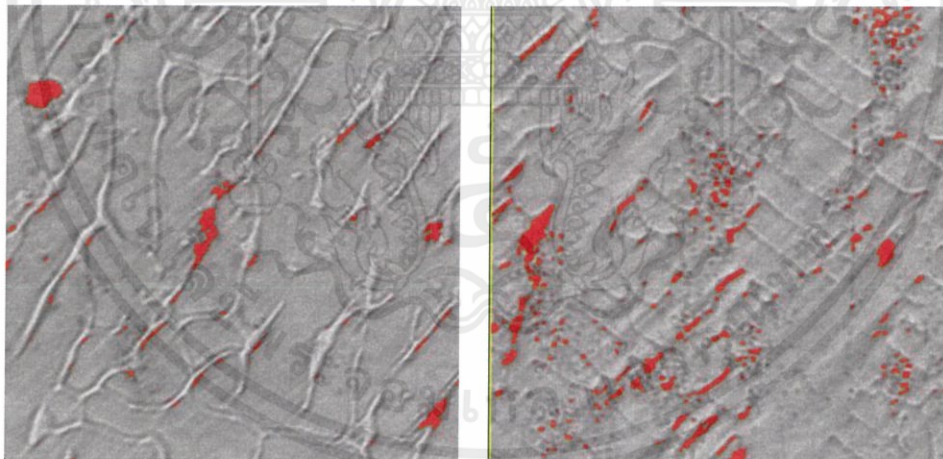
จากรูป ข 8 จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม ImageJ พบว่ามีจุดที่ขนาดใหญ่กว่า 50 ตารางไมโครเมตรจำนวน 6 จุด คิดเป็นพื้นที่รูพรุนทั้งหมด 730.317 ตารางไมโครเมตร จากทั้ง 4 ตำแหน่งเป็นพื้นที่รูพรุนทั้งหมด 6082.09 ตารางไมโครเมตร คิดเป็น 1.94 เปอร์เซ็นต์ต่อพื้นที่ที่ทำการตรวจสอบทั้งหมด

Model A อุณหภูมิอบเบ้า 480 องศาเซลเซียสและอุณหภูมิหล่อ 1060 องศาเซลเซียส ทดลองครั้งที่ 3



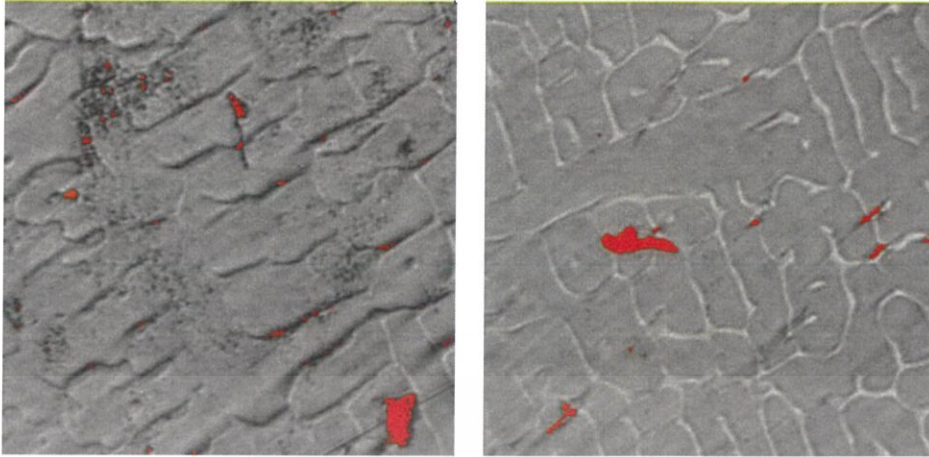
รูปที่ ข 9 รูปวิเคราะห์พื้นที่การเกิด Porosity Model A ทดลองครั้งที่ 3 ตำแหน่งที่ 1

จากรูป ข 9 จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม ImageJ พบว่ามีจุดที่ขนาดใหญ่กว่า 50 ตารางไมโครเมตรจำนวน 5 จุด คิดเป็นพื้นที่รูพรุนทั้งหมด 949.453 ตารางไมโครเมตร



รูปที่ ข 10 รูปวิเคราะห์พื้นที่การเกิด Porosity Model A ทดลองครั้งที่ 3 ตำแหน่งที่ 2

จากรูป ข 10 จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม ImageJ พบว่ามีจุดที่ขนาดใหญ่กว่า 50 ตารางไมโครเมตรจำนวน 9 จุด คิดเป็นพื้นที่รูพรุนทั้งหมด 993.277 ตารางไมโครเมตร

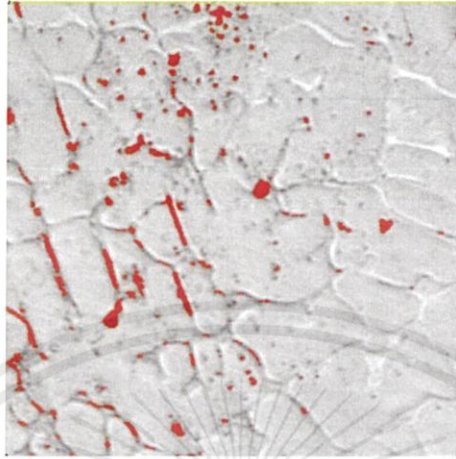


รูปที่ ข 11 รูปวิเคราะห์พื้นที่การเกิด Porosity Model A ทดลองครั้งที่ 3 ตำแหน่งที่ 3

จากรูป ข 11 จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม ImageJ พบว่ามีจุดที่ขนาดใหญ่กว่า 50 ตารางไมโครเมตรจำนวน 2 จุด คิดเป็นพื้นที่รูพรุนทั้งหมด 597.098 ตารางไมโครเมตร จากทั้ง 3 ตำแหน่งเป็นพื้นที่รูพรุนทั้งหมด 2539.828 ตารางไมโครเมตร คิดเป็น 0.81 เปอร์เซ็นต์ต่อพื้นที่ที่ทำการตรวจสอบทั้งหมด

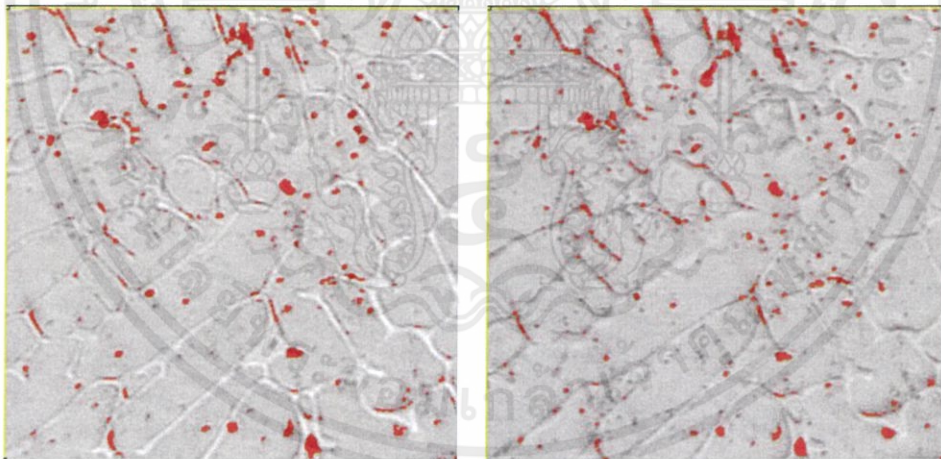


Model B อุณหภูมิอบเข้า 600 องศาเซลเซียสและอุณหภูมิหล่อ 1030 องศาเซลเซียส ทดลองครั้งที่ 1



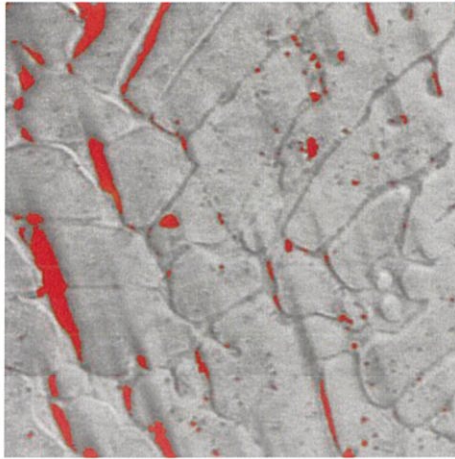
รูปที่ ข 12 รูปวิเคราะห์พื้นที่การเกิด Porosity Model B ทดลองครั้งที่ 1 ตำแหน่งที่ 1

จากรูป ข 12 จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม ImageJ พบว่ามีจุดที่ขนาดใหญ่กว่า 50 ตารางไมโครเมตรจำนวน 8 จุด คิดเป็นพื้นที่รูพรุนทั้งหมด 508.561 ตารางไมโครเมตร



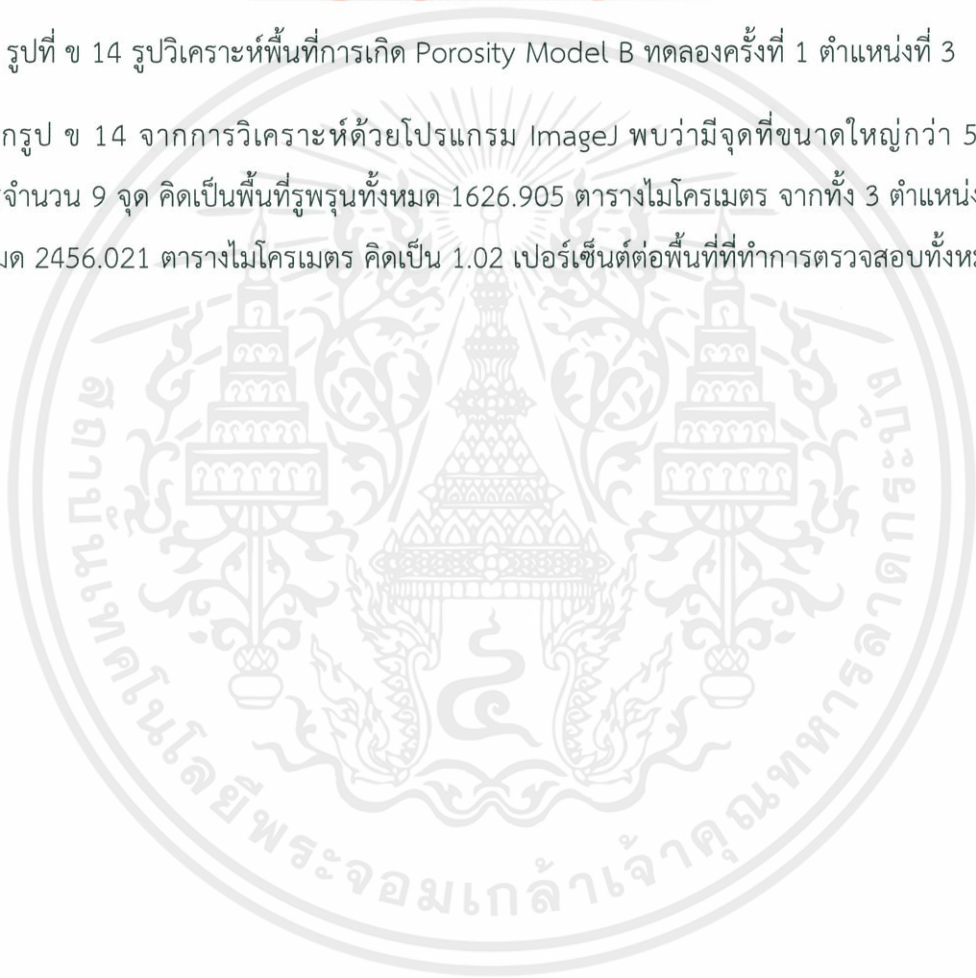
รูปที่ ข 13 รูปวิเคราะห์พื้นที่การเกิด Porosity Model B ทดลองครั้งที่ 1 ตำแหน่งที่ 2

จากรูป ข 13 จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม ImageJ พบว่ามีจุดที่ขนาดใหญ่กว่า 50 ตารางไมโครเมตรจำนวน 6 จุด คิดเป็นพื้นที่รูพรุนทั้งหมด 410.555 ตารางไมโครเมตร

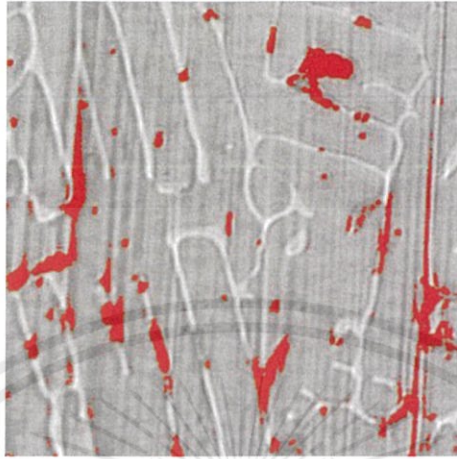


รูปที่ ข 14 รูปวิเคราะห์พื้นที่การเกิด Porosity Model B ทดลองครั้งที่ 1 ตำแหน่งที่ 3

จากรูป ข 14 จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม ImageJ พบว่ามีจุดที่ขนาดใหญ่กว่า 50 ตารางไมโครเมตรจำนวน 9 จุด คิดเป็นพื้นที่รูพรุนทั้งหมด 1626.905 ตารางไมโครเมตร จากทั้ง 3 ตำแหน่งเป็นพื้นที่รูพรุนทั้งหมด 2456.021 ตารางไมโครเมตร คิดเป็น 1.02 เปอร์เซ็นต์ต่อพื้นที่ที่ทำการตรวจสอบทั้งหมด

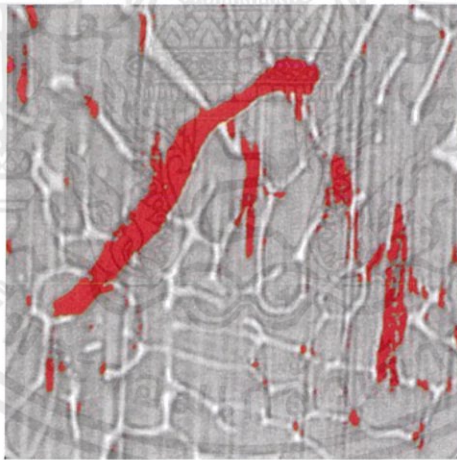


Model B อุณหภูมิอบเข้า 600 องศาเซลเซียสและอุณหภูมิหล่อ 1030 องศาเซลเซียส ทดลองครั้งที่ 2



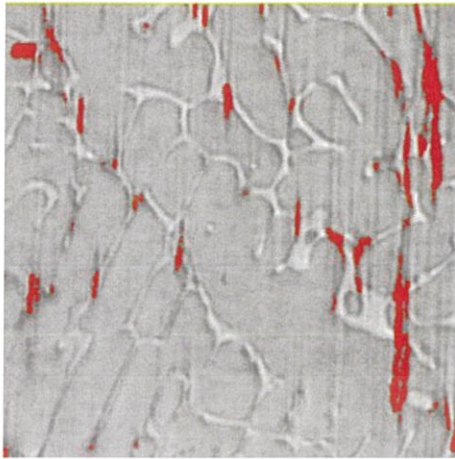
รูปที่ ข 15 รูปวิเคราะห์พื้นที่การเกิด Porosity Model B ทดลองครั้งที่ 2 ตำแหน่งที่ 1

จากรูป ข 15 จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม ImageJ พบว่ามีจุดที่ขนาดใหญ่กว่า 50 ตารางไมโครเมตรจำนวน 11 จุด คิดเป็นพื้นที่รูพรุนทั้งหมด 2966.538 ตารางไมโครเมตร



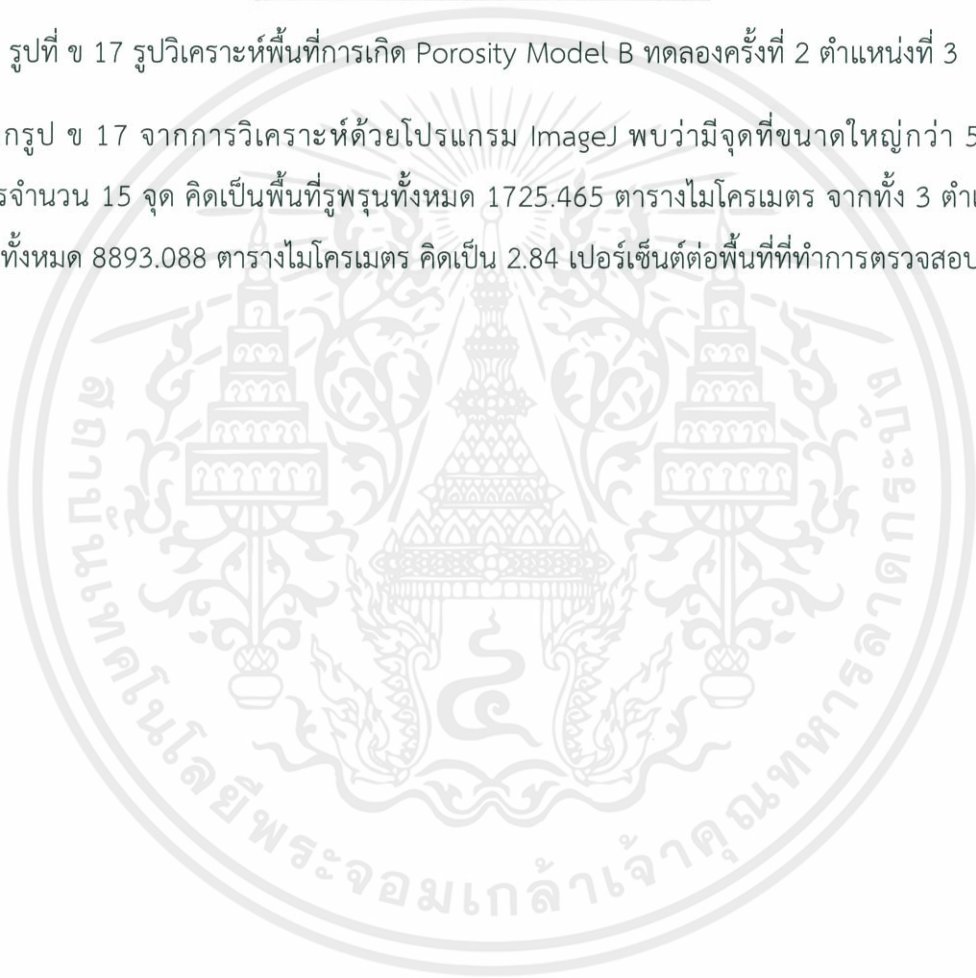
รูปที่ ข 16 รูปวิเคราะห์พื้นที่การเกิด Porosity Model B ทดลองครั้งที่ 2 ตำแหน่งที่ 2

จากรูป ข 16 จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม ImageJ พบว่ามีจุดที่ขนาดใหญ่กว่า 50 ตารางไมโครเมตรจำนวน 8 จุด คิดเป็นพื้นที่รูพรุนทั้งหมด 4201.085 ตารางไมโครเมตร

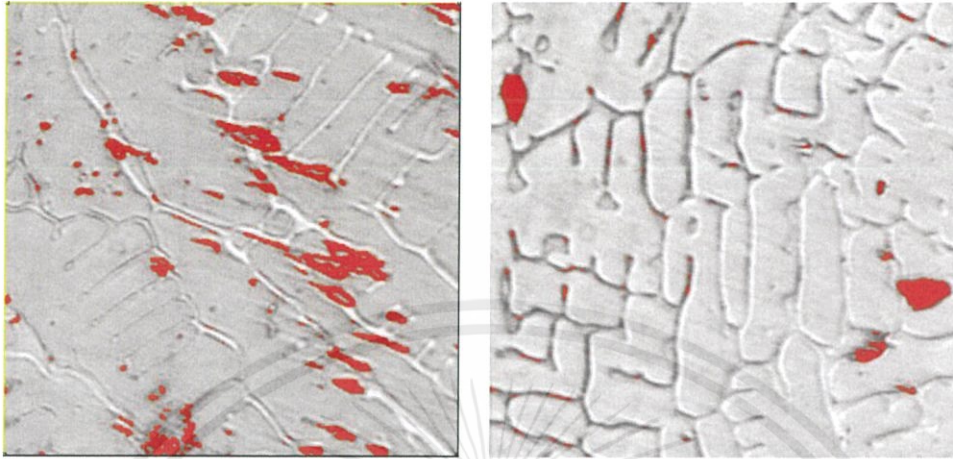


รูปที่ ข 17 รูปวิเคราะห์พื้นที่การเกิด Porosity Model B ทดลองครั้งที่ 2 ตำแหน่งที่ 3

จากรูป ข 17 จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม ImageJ พบว่ามีจุดที่ขนาดใหญ่กว่า 50 ตารางไมโครเมตรจำนวน 15 จุด คิดเป็นพื้นที่รูพรุนทั้งหมด 1725.465 ตารางไมโครเมตร จากทั้ง 3 ตำแหน่งเป็นพื้นที่รูพรุนทั้งหมด 8893.088 ตารางไมโครเมตร คิดเป็น 2.84 เปอร์เซ็นต์ต่อพื้นที่ที่ทำการตรวจสอบทั้งหมด

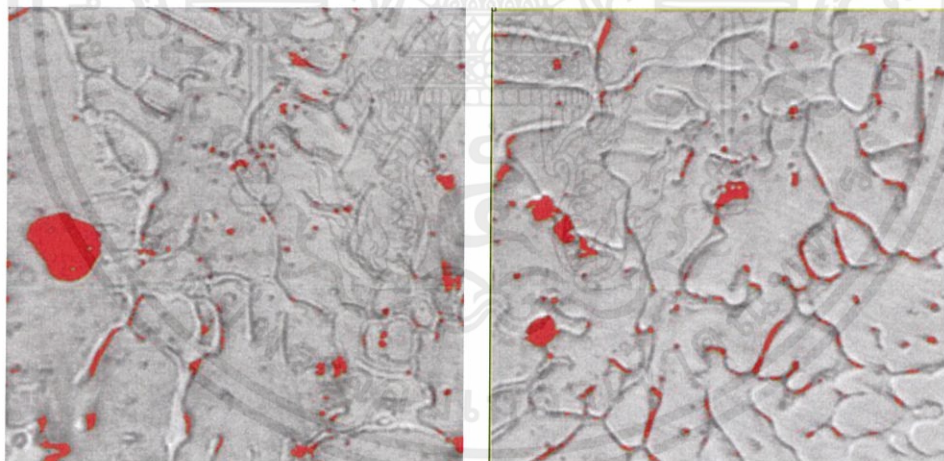


Model B อุณหภูมิอบเข้า 600 องศาเซลเซียสและอุณหภูมิหล่อ 1030 องศาเซลเซียส ทดลองครั้งที่ 3



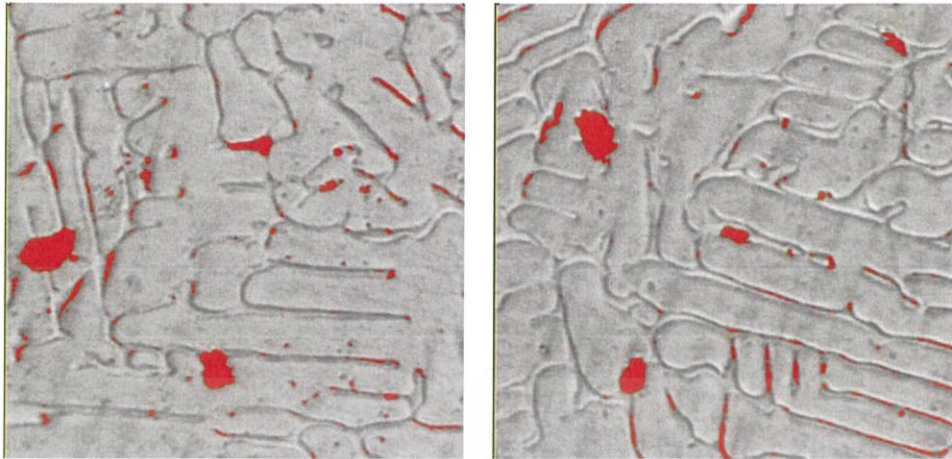
รูปที่ ข 18 รูปวิเคราะห์พื้นที่การเกิด Porosity Model B ทดลองครั้งที่ 3 ตำแหน่งที่ 1

จากรูป ข 18 จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม ImageJ พบว่ามีจุดที่ขนาดใหญ่กว่า 50 ตารางไมโครเมตรจำนวน 22 จุด คิดเป็นพื้นที่รูพรุนทั้งหมด 3039.901 ตารางไมโครเมตร



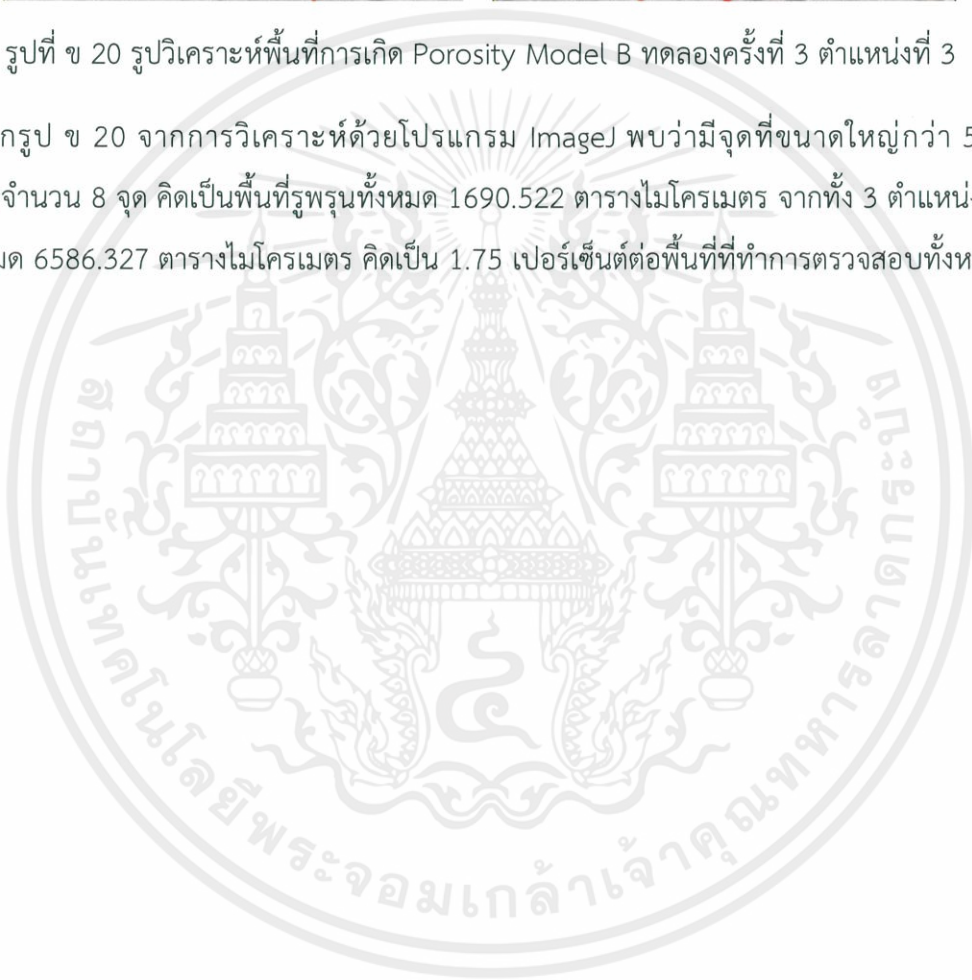
รูปที่ ข 19 รูปวิเคราะห์พื้นที่การเกิด Porosity Model B ทดลองครั้งที่ 3 ตำแหน่งที่ 2

จากรูป ข 19 จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม ImageJ พบว่ามีจุดที่ขนาดใหญ่กว่า 50 ตารางไมโครเมตรจำนวน 10 จุด คิดเป็นพื้นที่รูพรุนทั้งหมด 1855.904 ตารางไมโครเมตร

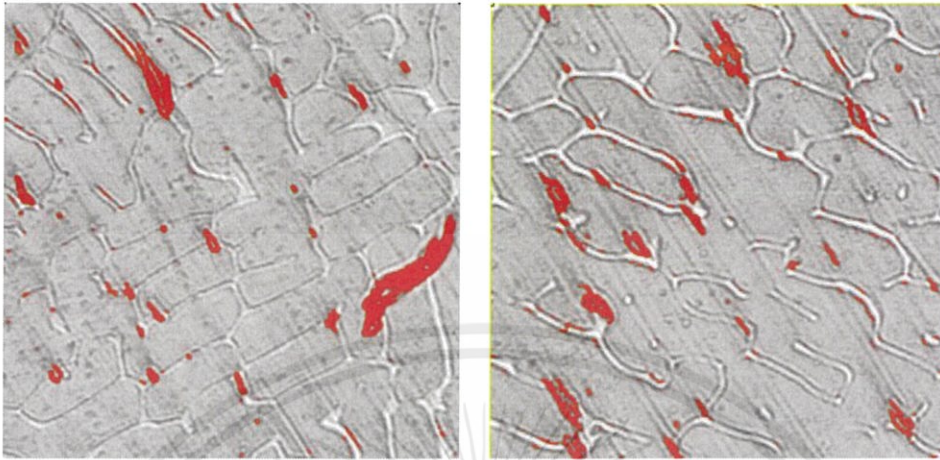


รูปที่ ข 20 รูปวิเคราะห์พื้นที่การเกิด Porosity Model B ทดลองครั้งที่ 3 ตำแหน่งที่ 3

จากรูป ข 20 จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม ImageJ พบว่ามีจุดที่ขนาดใหญ่กว่า 50 ตารางไมโครเมตรจำนวน 8 จุด คิดเป็นพื้นที่รูพรุนทั้งหมด 1690.522 ตารางไมโครเมตร จากทั้ง 3 ตำแหน่งเป็นพื้นที่รูพรุนทั้งหมด 6586.327 ตารางไมโครเมตร คิดเป็น 1.75 เปอร์เซ็นต์ต่อพื้นที่ที่ทำการตรวจสอบทั้งหมด

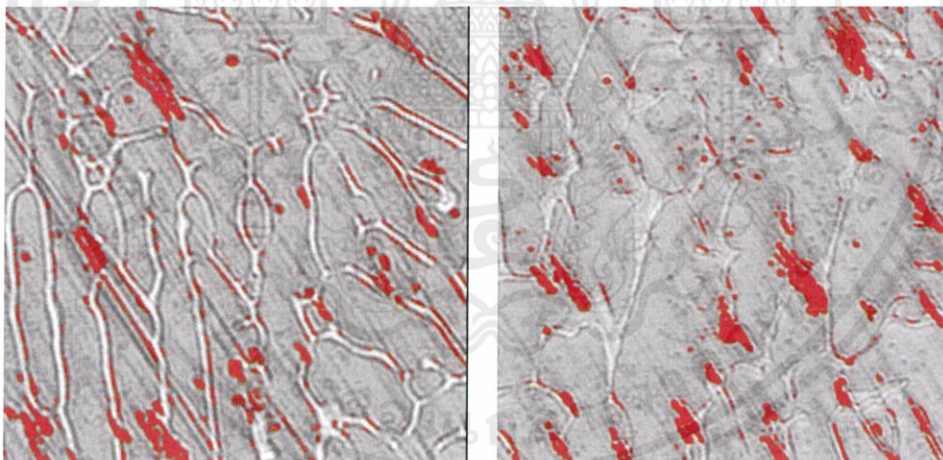


Model C อุณหภูมิอบเข้า 540 องศาเซลเซียสและอุณหภูมิหล่อ 1020 องศาเซลเซียส ทดลองครั้งที่ 1



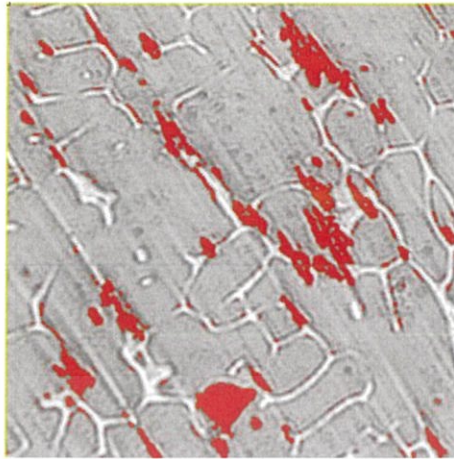
รูปที่ ข 21 รูปวิเคราะห์พื้นที่การเกิด Porosity Model c ทดลองครั้งที่ 1 ตำแหน่งที่ 1

จากรูป ข 21 จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม ImageJ พบว่ามีจุดที่ขนาดใหญ่กว่า 50 ตารางไมโครเมตรจำนวน 17 จุด คิดเป็นพื้นที่รูพรุนทั้งหมด 2635.046 ตารางไมโครเมตร



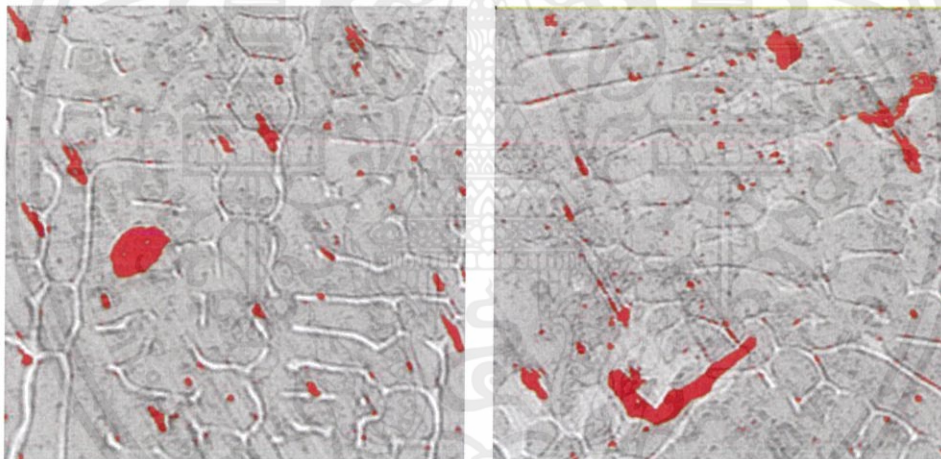
รูปที่ ข 22 รูปวิเคราะห์พื้นที่การเกิด Porosity Model c ทดลองครั้งที่ 1 ตำแหน่งที่ 2

จากรูป ข 22 จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม ImageJ พบว่ามีจุดที่ขนาดใหญ่กว่า 50 ตารางไมโครเมตรจำนวน 33 จุด คิดเป็นพื้นที่รูพรุนทั้งหมด 4459.69 ตารางไมโครเมตร



รูปที่ ข 23 รูปวิเคราะห์พื้นที่การเกิด Porosity Model c ทดลองครั้งที่ 1 ตำแหน่งที่ 3

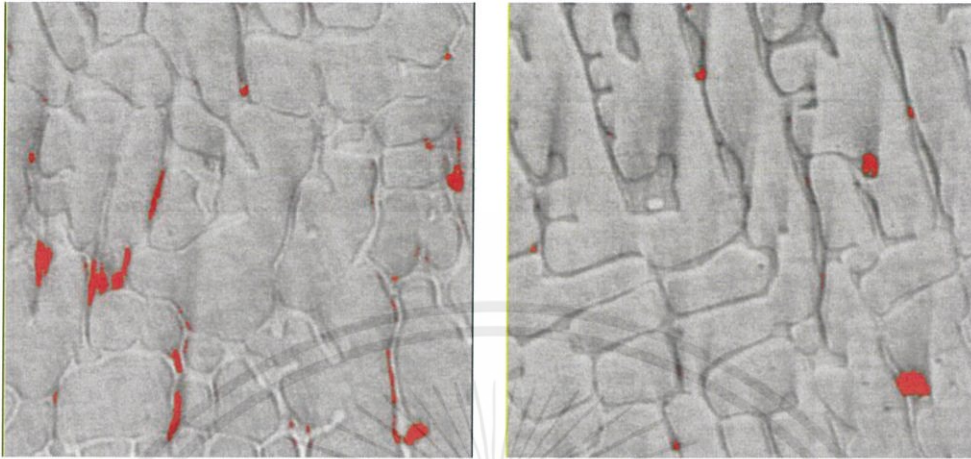
จากรูป ข 23 จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม ImageJ พบว่ามีจุดที่ขนาดใหญ่กว่า 50 ตารางไมโครเมตรจำนวน 19 จุด คิดเป็นพื้นที่รูพรุนทั้งหมด 3387.802 ตารางไมโครเมตร



รูปที่ ข 24 รูปวิเคราะห์พื้นที่การเกิด Porosity Model c ทดลองครั้งที่ 1 ตำแหน่งที่ 4

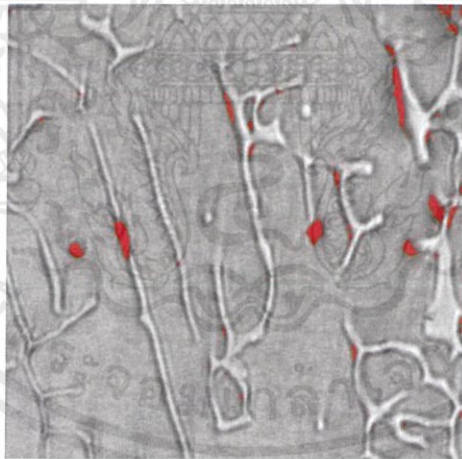
จากรูป ข 24 จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม ImageJ พบว่ามีจุดที่ขนาดใหญ่กว่า 50 ตารางไมโครเมตรจำนวน 13 จุด คิดเป็นพื้นที่รูพรุนทั้งหมด 2762.061 ตารางไมโครเมตร จากทั้ง 4 ตำแหน่งเป็นพื้นที่รูพรุนทั้งหมด 13244.599 ตารางไมโครเมตร คิดเป็น 3.02 เปอร์เซ็นต์ต่อพื้นที่ที่ทำการตรวจสอบทั้งหมด

Model C อุณหภูมิอบเบ้า 540 องศาเซลเซียสและอุณหภูมิหล่อ 1020 องศาเซลเซียส ทดลองครั้งที่ 2



รูปที่ ข 25 รูปวิเคราะห์พื้นที่การเกิด Porosity Model c ทดลองครั้งที่ 2 ตำแหน่งที่ 1

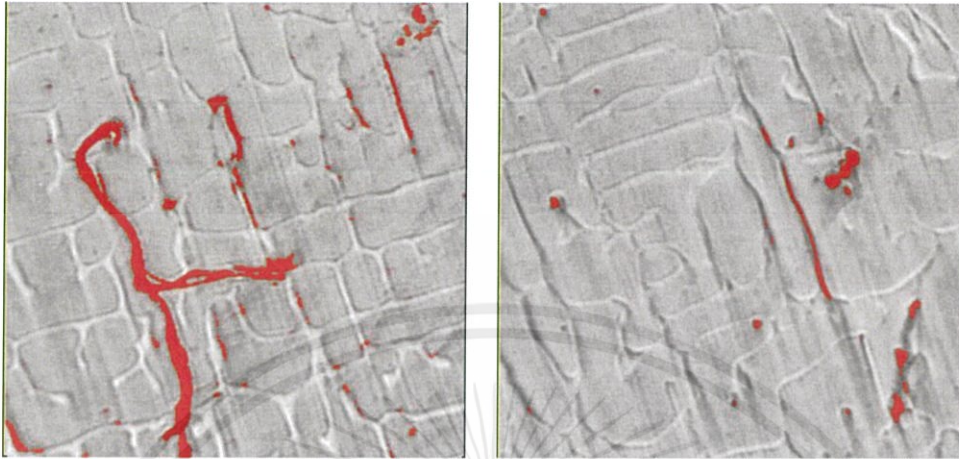
จากรูป ข 25 จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม ImageJ พบว่ามีจุดที่ขนาดใหญ่กว่า 50 ตารางไมโครเมตรจำนวน 9 จุด คิดเป็นพื้นที่รูพรุนทั้งหมด 874.119 ตารางไมโครเมตร



รูปที่ ข 26 รูปวิเคราะห์พื้นที่การเกิด Porosity Model c ทดลองครั้งที่ 2 ตำแหน่งที่ 2

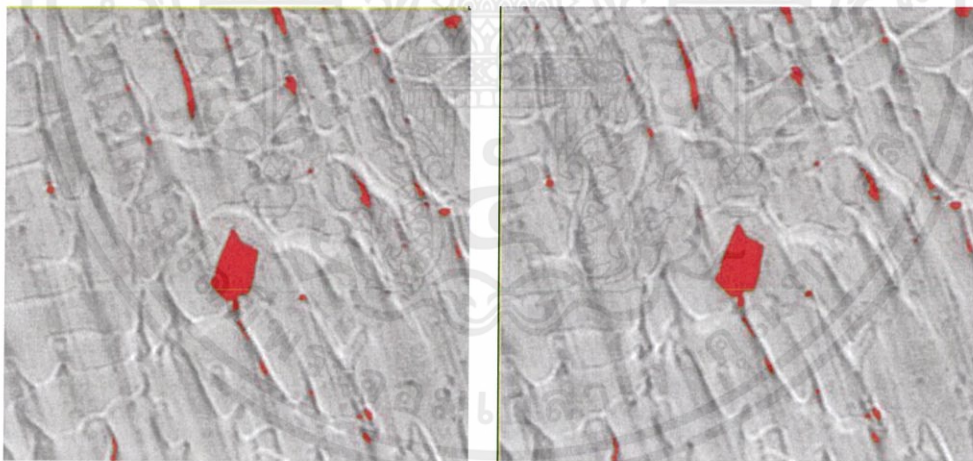
จากรูป ข 26 จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม ImageJ พบว่ามีจุดที่ขนาดใหญ่กว่า 50 ตารางไมโครเมตรจำนวน 4 จุด คิดเป็นพื้นที่รูพรุนทั้งหมด 302.285 ตารางไมโครเมตร จากทั้ง 2 ตำแหน่งเป็นพื้นที่รูพรุนทั้งหมด 1176.404 ตารางไมโครเมตร คิดเป็น 0.5 เปอร์เซ็นต์ต่อพื้นที่ที่ทำการตรวจสอบทั้งหมด

Model C อุณหภูมิอบเข้า 540 องศาเซลเซียสและอุณหภูมิหล่อ 1020 องศาเซลเซียส ทดลองครั้งที่ 3



รูปที่ ข 27 รูปวิเคราะห์พื้นที่การเกิด Porosity Model c ทดลองครั้งที่ 3 ตำแหน่งที่ 1

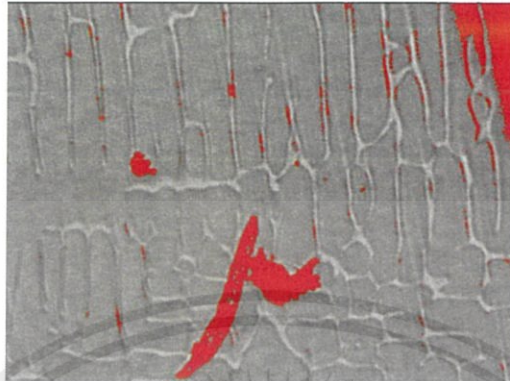
จากรูป ข 27 จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม ImageJ พบว่ามีจุดที่ขนาดใหญ่กว่า 50 ตารางไมโครเมตรจำนวน 7 จุด คิดเป็นพื้นที่รูพรุนทั้งหมด 2209.255 ตารางไมโครเมตร



รูปที่ ข 28 รูปวิเคราะห์พื้นที่การเกิด Porosity Model c ทดลองครั้งที่ 3 ตำแหน่งที่ 2

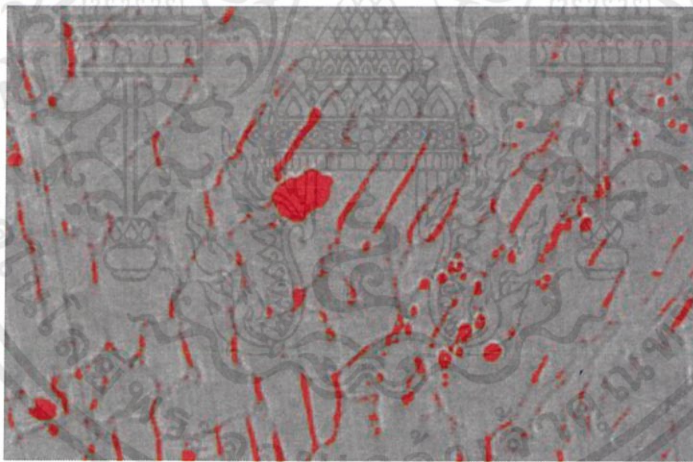
จากรูป ข 28 จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม ImageJ พบว่ามีจุดที่ขนาดใหญ่กว่า 50 ตารางไมโครเมตรจำนวน 7 จุด คิดเป็นพื้นที่รูพรุนทั้งหมด 1455.267 ตารางไมโครเมตร จากทั้ง 2 ตำแหน่งเป็นพื้นที่รูพรุนทั้งหมด 3664.522 ตารางไมโครเมตร คิดเป็น 0.5 เปอร์เซ็นต์ต่อพื้นที่ที่ทำการตรวจสอบทั้งหมด

Model D อุณหภูมิอบเบ้า 480 องศาเซลเซียสและอุณหภูมิหล่อ 1020 องศาเซลเซียส ทดลองครั้งที่ 1



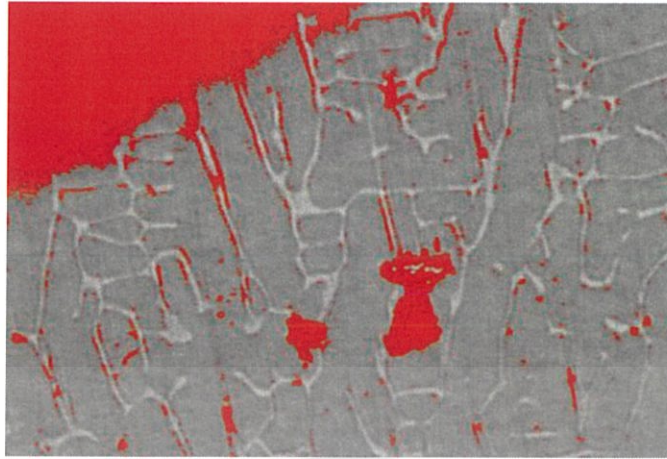
รูปที่ ข 29 รูปวิเคราะห์พื้นที่การเกิด Porosity Model D ทดลองครั้งที่ 1 ตำแหน่งที่ 1

จากรูป ข 29 จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม ImageJ พบว่ามีจุดที่ขนาดใหญ่กว่า 50 ตารางไมโครเมตรจำนวน 8 จุด คิดเป็นพื้นที่รูพรุนทั้งหมด 4997.913 ตารางไมโครเมตร



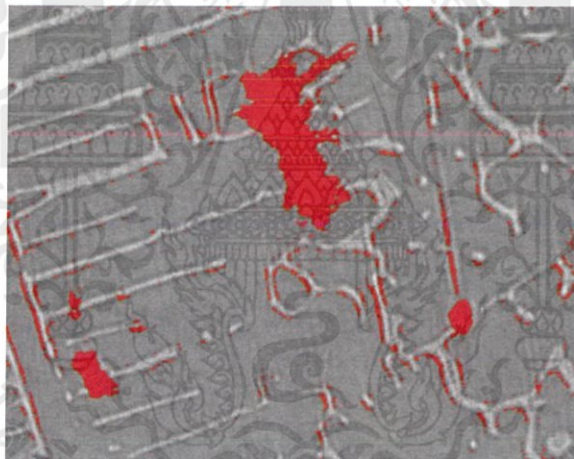
รูปที่ ข 30 รูปวิเคราะห์พื้นที่การเกิด Porosity Model D ทดลองครั้งที่ 1 ตำแหน่งที่ 2

จากรูป ข 30 จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม ImageJ พบว่ามีจุดที่ขนาดใหญ่กว่า 50 ตารางไมโครเมตรจำนวน 49 จุด คิดเป็นพื้นที่รูพรุนทั้งหมด 2853.115 ตารางไมโครเมตร



รูปที่ ข 31 รูปวิเคราะห์พื้นที่การเกิด Porosity Model D ทดลองครั้งที่ 1 ตำแหน่งที่ 3

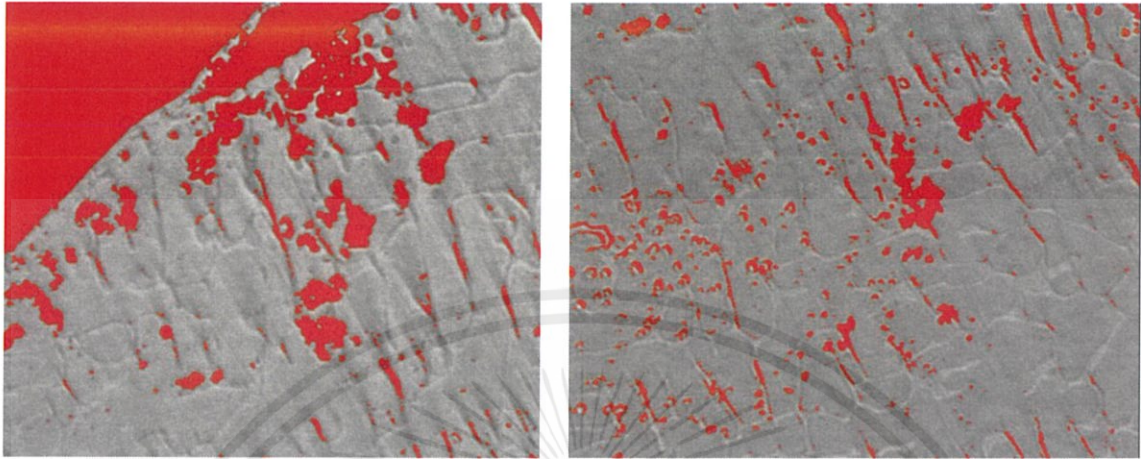
จากรูป ข 31 จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม ImageJ พบว่ามีจุดที่ขนาดใหญ่กว่า 50 ตารางไมโครเมตรจำนวน 30 จุด คิดเป็นพื้นที่รูพรุนทั้งหมด 16325.319 ตารางไมโครเมตร



รูปที่ ข 32 รูปวิเคราะห์พื้นที่การเกิด Porosity Model D ทดลองครั้งที่ 1 ตำแหน่งที่ 4

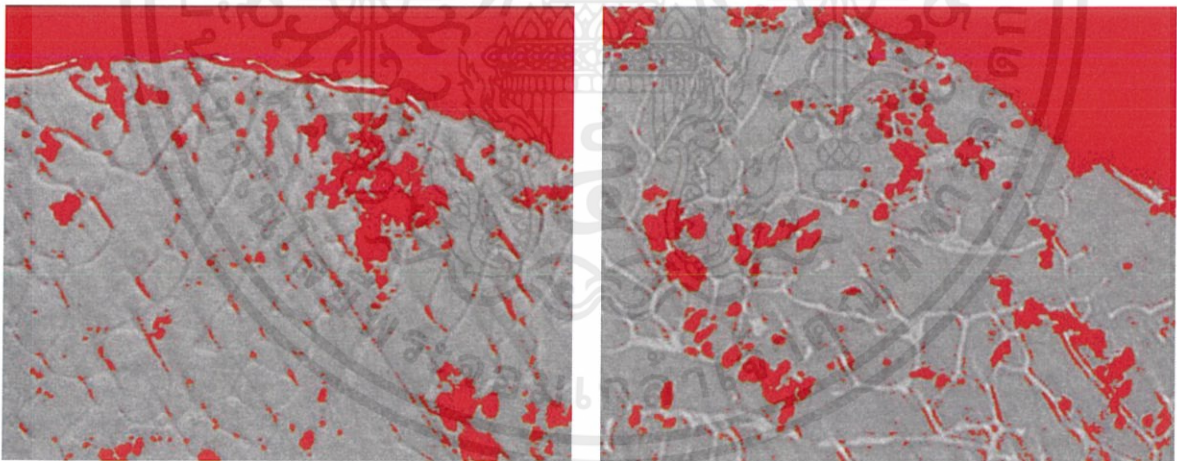
จากรูป ข 32 จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม ImageJ พบว่ามีจุดที่ขนาดใหญ่กว่า 50 ตารางไมโครเมตรจำนวน 17 จุด คิดเป็นพื้นที่รูพรุนทั้งหมด 4414.215 ตารางไมโครเมตร จากทั้ง 4 ตำแหน่งเป็นพื้นที่รูพรุนทั้งหมด 28590.562 ตารางไมโครเมตร คิดเป็น 11.41 เปอร์เซ็นต์ต่อพื้นที่ที่ทำการตรวจสอบทั้งหมด

Model D อุณหภูมิอบเบ้า 480 องศาเซลเซียสและอุณหภูมิหล่อ 1020 องศาเซลเซียส ทดลองครั้งที่ 2



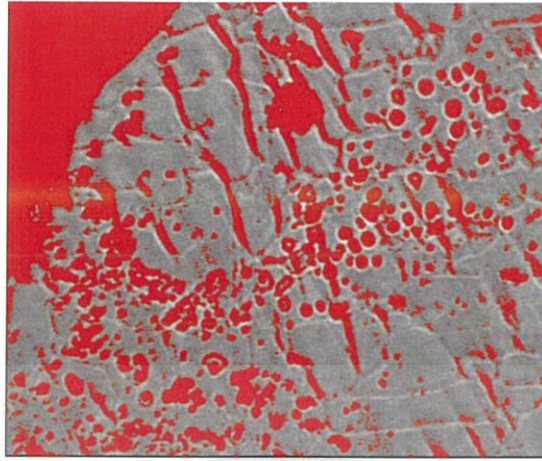
รูปที่ ข 33 รูปวิเคราะห์พื้นที่การเกิด Porosity Model D ทดลองครั้งที่ 2 ตำแหน่งที่ 1

จากรูป ข 33 จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม ImageJ พบว่ามีจุดที่ขนาดใหญ่กว่า 50 ตารางไมโครเมตรจำนวน 132 จุด คิดเป็นพื้นที่รูพรุนทั้งหมด 36817.871 ตารางไมโครเมตร



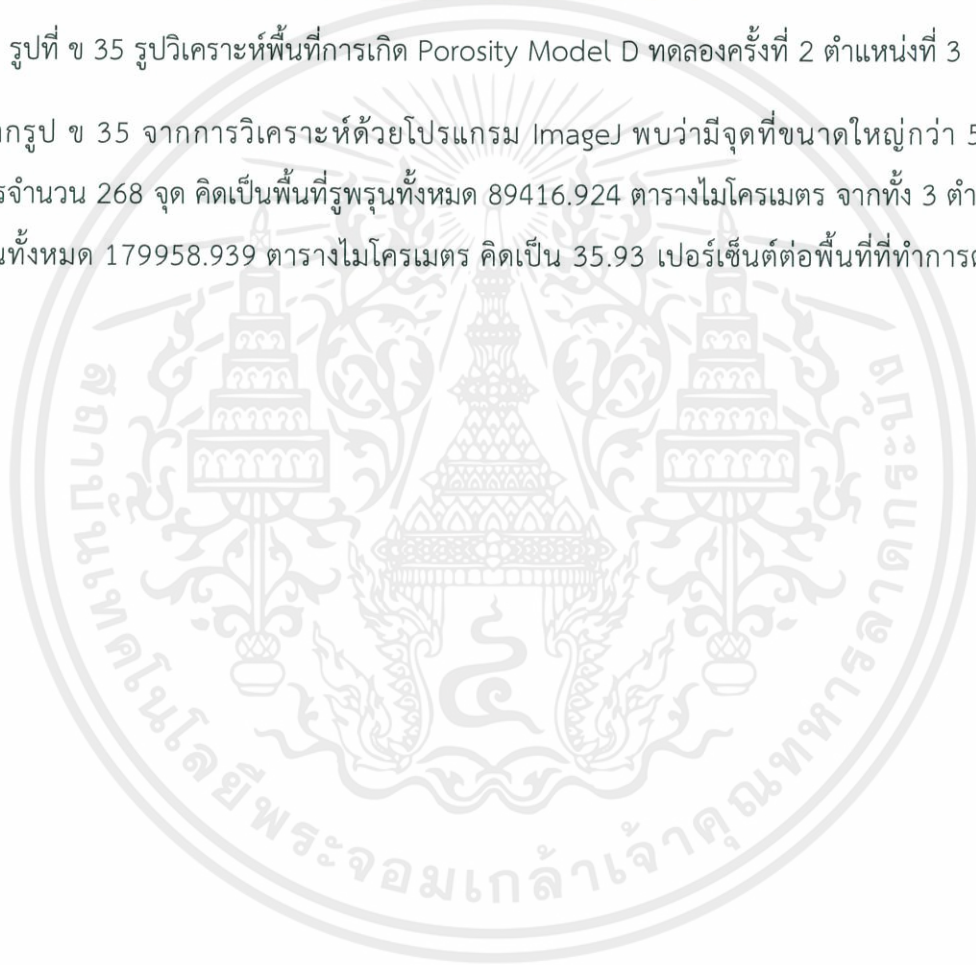
รูปที่ ข 34 รูปวิเคราะห์พื้นที่การเกิด Porosity Model D ทดลองครั้งที่ 2 ตำแหน่งที่ 2

จากรูป ข 34 จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม ImageJ พบว่ามีจุดที่ขนาดใหญ่กว่า 50 ตารางไมโครเมตรจำนวน 119 จุด คิดเป็นพื้นที่รูพรุนทั้งหมด 53724.144 ตารางไมโครเมตร

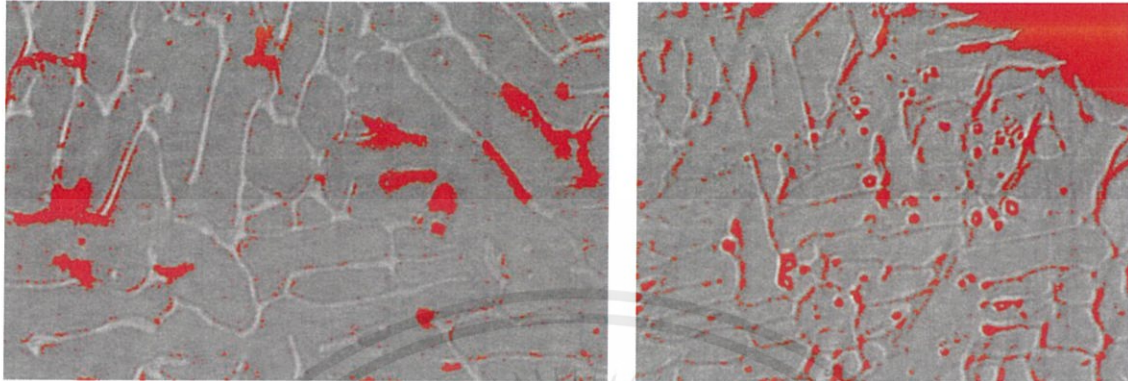


รูปที่ ข 35 รูปวิเคราะห์พื้นที่การเกิด Porosity Model D ทดลองครั้งที่ 2 ตำแหน่งที่ 3

จากรูป ข 35 จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม ImageJ พบว่ามีจุดที่ขนาดใหญ่กว่า 50 ตารางไมโครเมตรจำนวน 268 จุด คิดเป็นพื้นที่รูพรุนทั้งหมด 89416.924 ตารางไมโครเมตร จากทั้ง 3 ตำแหน่งเป็นพื้นที่รูพรุนทั้งหมด 179958.939 ตารางไมโครเมตร คิดเป็น 35.93 เปอร์เซ็นต์ต่อพื้นที่ที่ทำการตรวจสอบทั้งหมด

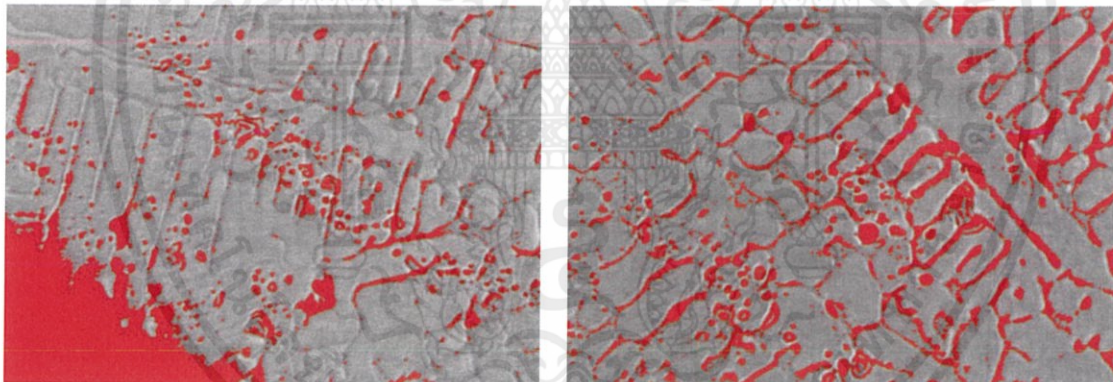


Model D อุณหภูมิอบเบ้า 480 องศาเซลเซียสและอุณหภูมิหล่อ 1020 องศาเซลเซียส ทดลองครั้งที่ 3



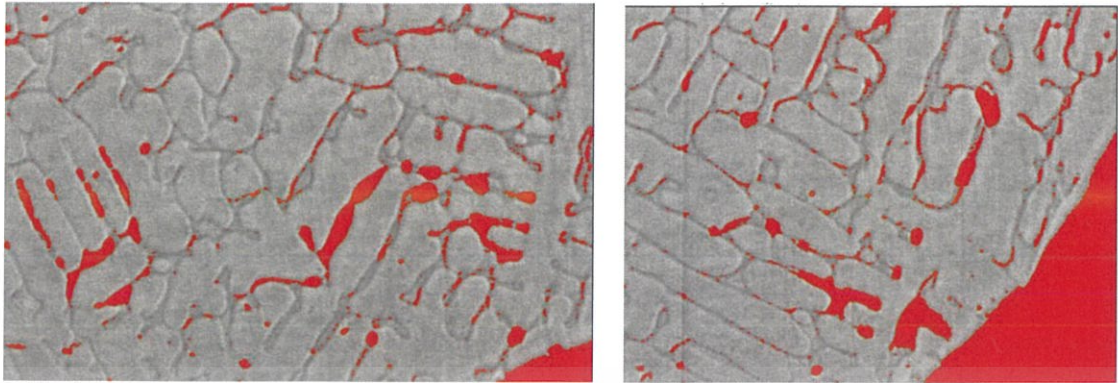
รูปที่ ข 36 รูปวิเคราะห์พื้นที่การเกิด Porosity Model D ทดลองครั้งที่ 3 ตำแหน่งที่ 1

จากรูป ข 36 จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม ImageJ พบว่ามีจุดที่ขนาดใหญ่กว่า 50 ตารางไมโครเมตรจำนวน 121 จุด คิดเป็นพื้นที่รูพรุนทั้งหมด 16749.531 ตารางไมโครเมตร



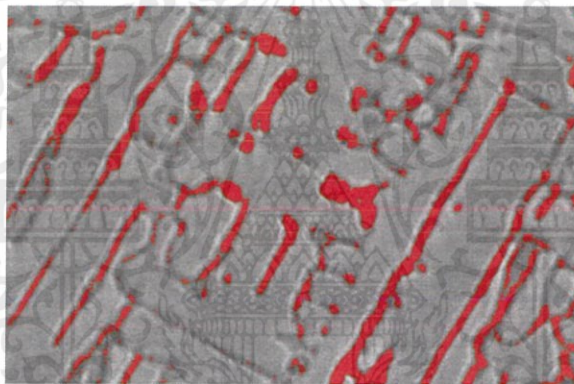
รูปที่ ข 37 รูปวิเคราะห์พื้นที่การเกิด Porosity Model D ทดลองครั้งที่ 3 ตำแหน่งที่ 2

จากรูป ข 37 จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม ImageJ พบว่ามีจุดที่ขนาดใหญ่กว่า 50 ตารางไมโครเมตรจำนวน 258 จุด คิดเป็นพื้นที่รูพรุนทั้งหมด 35563.449 ตารางไมโครเมตร



รูปที่ ข 38 รูปวิเคราะห์พื้นที่การเกิด Porosity Model D ทดลองครั้งที่ 3 ตำแหน่งที่ 3

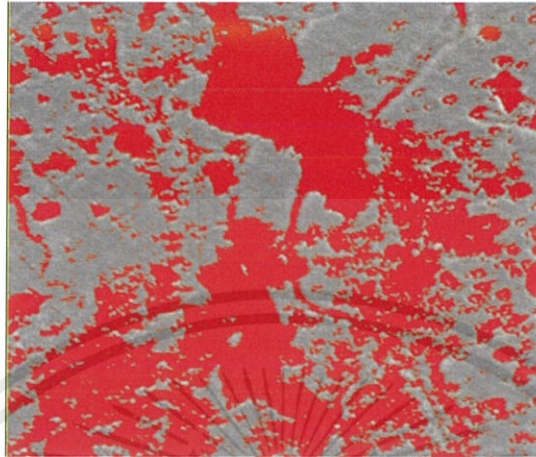
จากรูป ข 38 จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม ImageJ พบว่ามีจุดที่ขนาดใหญ่กว่า 50 ตารางไมโครเมตรจำนวน 107 จุด คิดเป็นพื้นที่รูพรุนทั้งหมด 23453.589 ตารางไมโครเมตร



รูปที่ ข 39 รูปวิเคราะห์พื้นที่การเกิด Porosity Model D ทดลองครั้งที่ 3 ตำแหน่งที่ 4

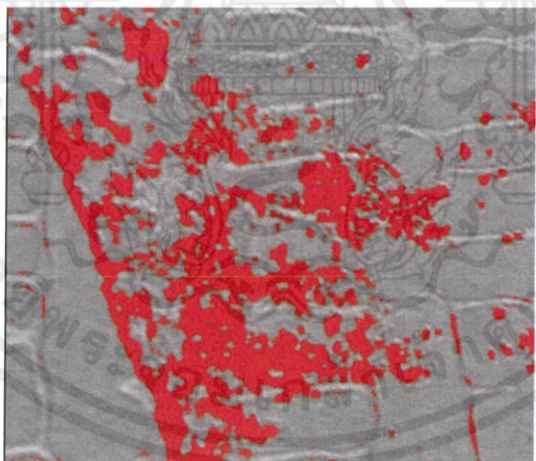
จากรูป ข 39 จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม ImageJ พบว่ามีจุดที่ขนาดใหญ่กว่า 50 ตารางไมโครเมตรจำนวน 72 จุด คิดเป็นพื้นที่รูพรุนทั้งหมด 8864.441 ตารางไมโครเมตร จากทั้ง 4 ตำแหน่งเป็นพื้นที่รูพรุนทั้งหมด 86431.01 ตารางไมโครเมตร คิดเป็น 19.31 เปอร์เซ็นต์ต่อพื้นที่ที่ทำการตรวจสอบทั้งหมด

Model E อุณหภูมิอบเบา 480 องศาเซลเซียสและอุณหภูมิหล่อ 1030 องศาเซลเซียส ทดลองครั้งที่ 1



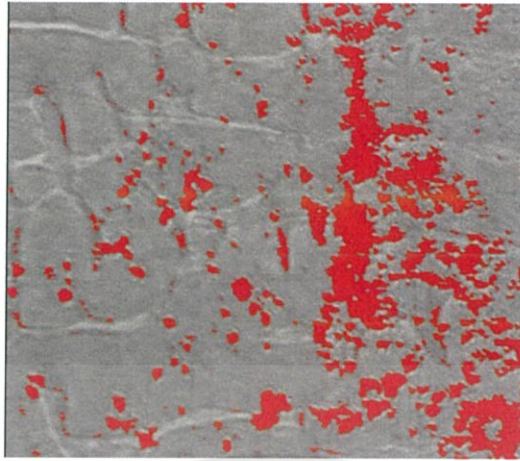
รูปที่ ข 40 รูปวิเคราะห์พื้นที่การเกิด Porosity Model E ทดลองครั้งที่ 1 ตำแหน่งที่ 1

จากรูป ข 40 จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม ImageJ พบว่ามีจุดที่ขนาดใหญ่กว่า 50 ตารางไมโครเมตรจำนวน 72 จุด คิดเป็นพื้นที่รูพรุนทั้งหมด 19918.52 ตารางไมโครเมตร



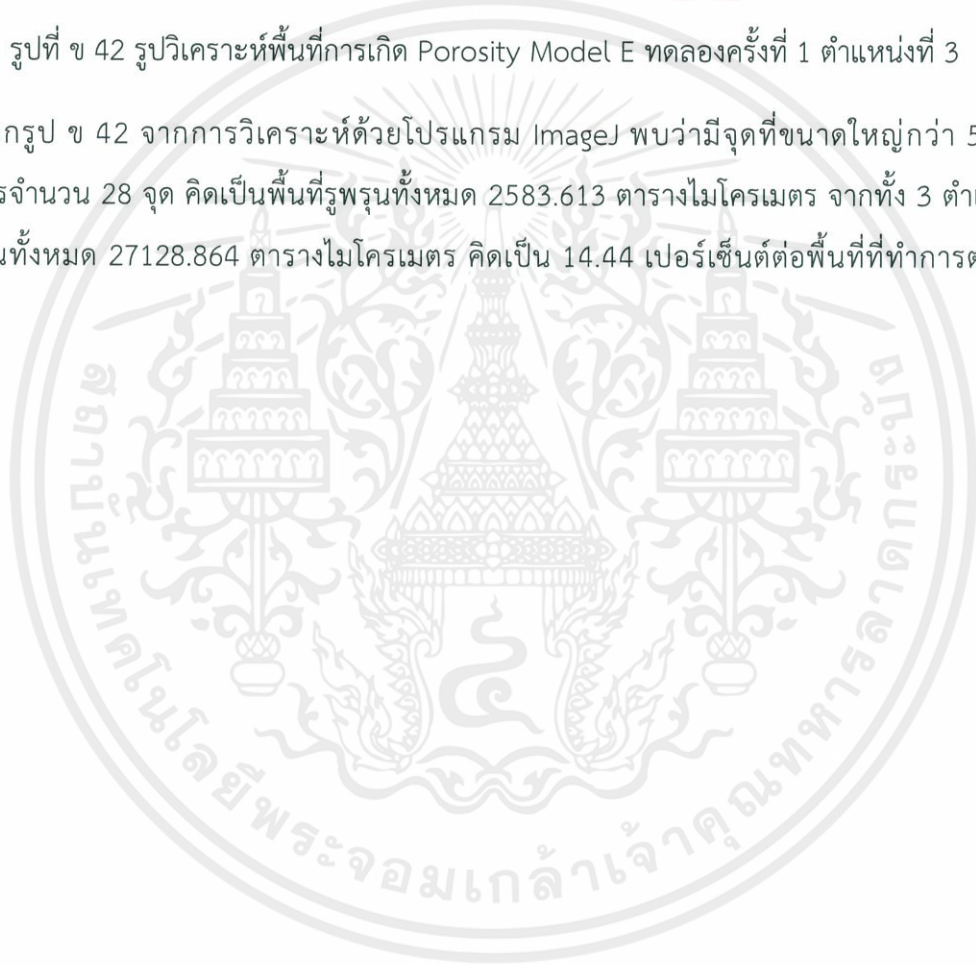
รูปที่ ข 41 รูปวิเคราะห์พื้นที่การเกิด Porosity Model E ทดลองครั้งที่ 1 ตำแหน่งที่ 2

จากรูป ข 41 จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม ImageJ พบว่ามีจุดที่ขนาดใหญ่กว่า 50 ตารางไมโครเมตรจำนวน 18 จุด คิดเป็นพื้นที่รูพรุนทั้งหมด 4626.731 ตารางไมโครเมตร

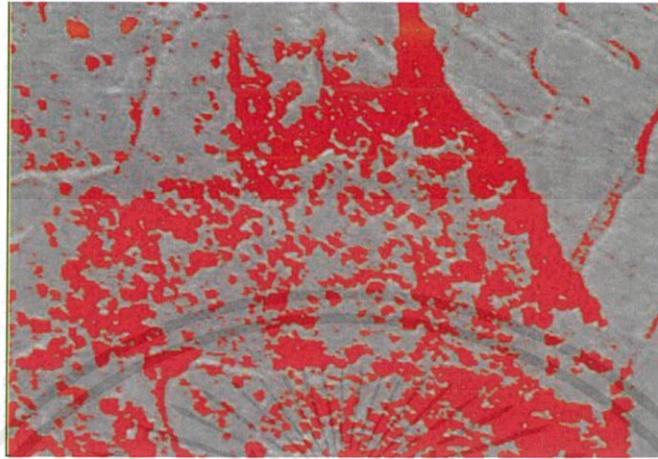


รูปที่ ข 42 รูปวิเคราะห์พื้นที่การเกิด Porosity Model E ทดลองครั้งที่ 1 ตำแหน่งที่ 3

จากรูป ข 42 จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม ImageJ พบว่ามีจุดที่ขนาดใหญ่กว่า 50 ตารางไมโครเมตรจำนวน 28 จุด คิดเป็นพื้นที่รูพรุนทั้งหมด 2583.613 ตารางไมโครเมตร จากทั้ง 3 ตำแหน่งเป็นพื้นที่รูพรุนทั้งหมด 27128.864 ตารางไมโครเมตร คิดเป็น 14.44 เปอร์เซ็นต์ต่อพื้นที่ที่ทำการตรวจสอบทั้งหมด

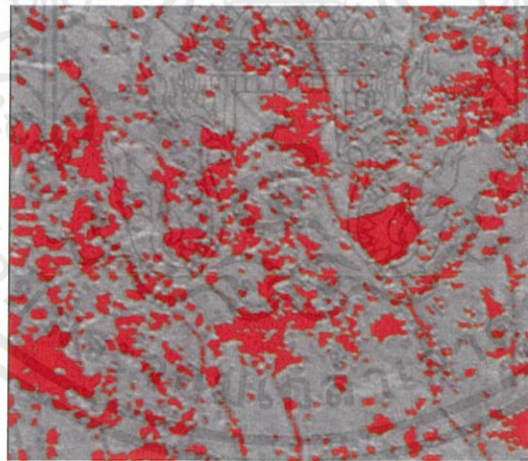


Model E อุณหภูมิอบเข้า 480 องศาเซลเซียสและอุณหภูมิหล่อ 1030 องศาเซลเซียส ทดลองครั้งที่ 2



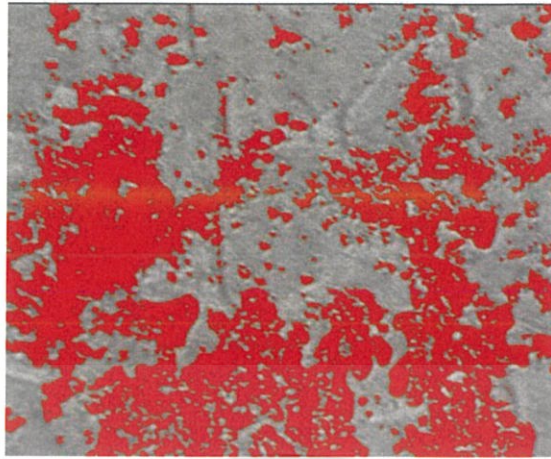
รูปที่ ข 43 รูปวิเคราะห์พื้นที่การเกิด Porosity Model E ทดลองครั้งที่ 2 ตำแหน่งที่ 1

จากรูป ข 43 จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม ImageJ พบว่ามีจุดที่ขนาดใหญ่กว่า 50 ตารางไมโครเมตรจำนวน 149 จุด คิดเป็นพื้นที่รูพรุนทั้งหมด 15373.278 ตารางไมโครเมตร



รูปที่ ข 44 รูปวิเคราะห์พื้นที่การเกิด Porosity Model E ทดลองครั้งที่ 2 ตำแหน่งที่ 2

จากรูป ข 44 จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม ImageJ พบว่ามีจุดที่ขนาดใหญ่กว่า 50 ตารางไมโครเมตรจำนวน 54 จุด คิดเป็นพื้นที่รูพรุนทั้งหมด 4423.773 ตารางไมโครเมตร

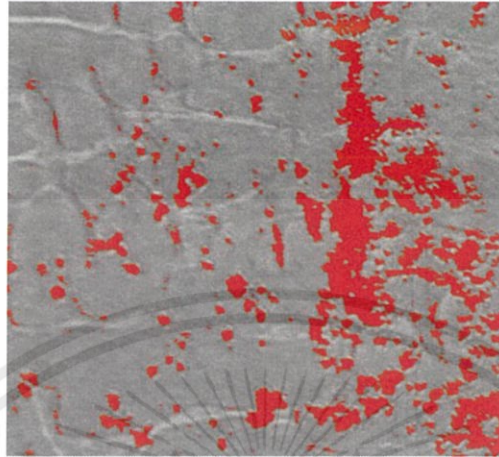


รูปที่ ข 45 รูปวิเคราะห์พื้นที่การเกิด Porosity Model E ทดลองครั้งที่ 2 ตำแหน่งที่ 3

จากรูป ข 45 จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม ImageJ พบว่ามีจุดที่ขนาดใหญ่กว่า 50 ตารางไมโครเมตรจำนวน 16 จุด คิดเป็นพื้นที่รูพรุนทั้งหมด 9957.661 ตารางไมโครเมตร จากทั้ง 3 ตำแหน่งเป็นพื้นที่รูพรุนทั้งหมด 29754.712 ตารางไมโครเมตร คิดเป็น 5.94 เปอร์เซ็นต์ต่อพื้นที่ที่ทำการตรวจสอบทั้งหมด

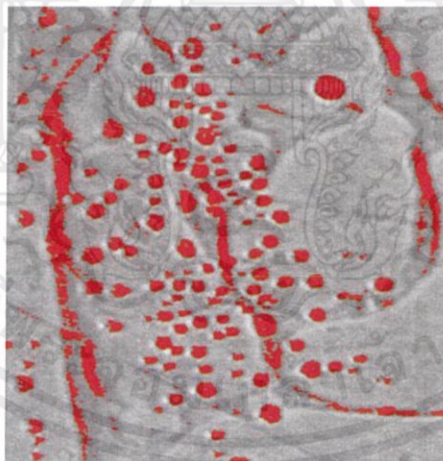


Model E อุณหภูมิอบเข้า 480 องศาเซลเซียสและอุณหภูมิหล่อ 1030 องศาเซลเซียส ทดลองครั้งที่ 3



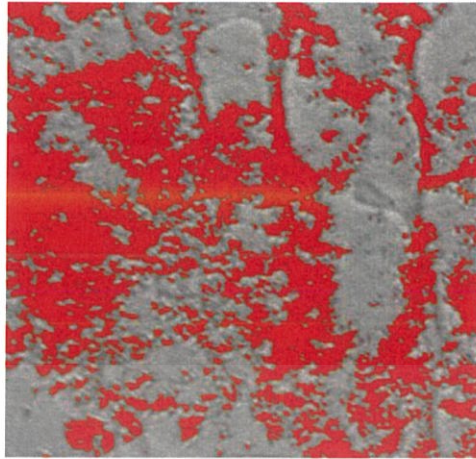
รูปที่ ข 46 รูปวิเคราะห์พื้นที่การเกิด Porosity Model E ทดลองครั้งที่ 3 ตำแหน่งที่ 1

จากรูป ข 46 จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม ImageJ พบว่ามีจุดที่ขนาดใหญ่กว่า 50 ตารางไมโครเมตรจำนวน 28 จุด คิดเป็นพื้นที่รูพรุนทั้งหมด 2583.613 ตารางไมโครเมตร



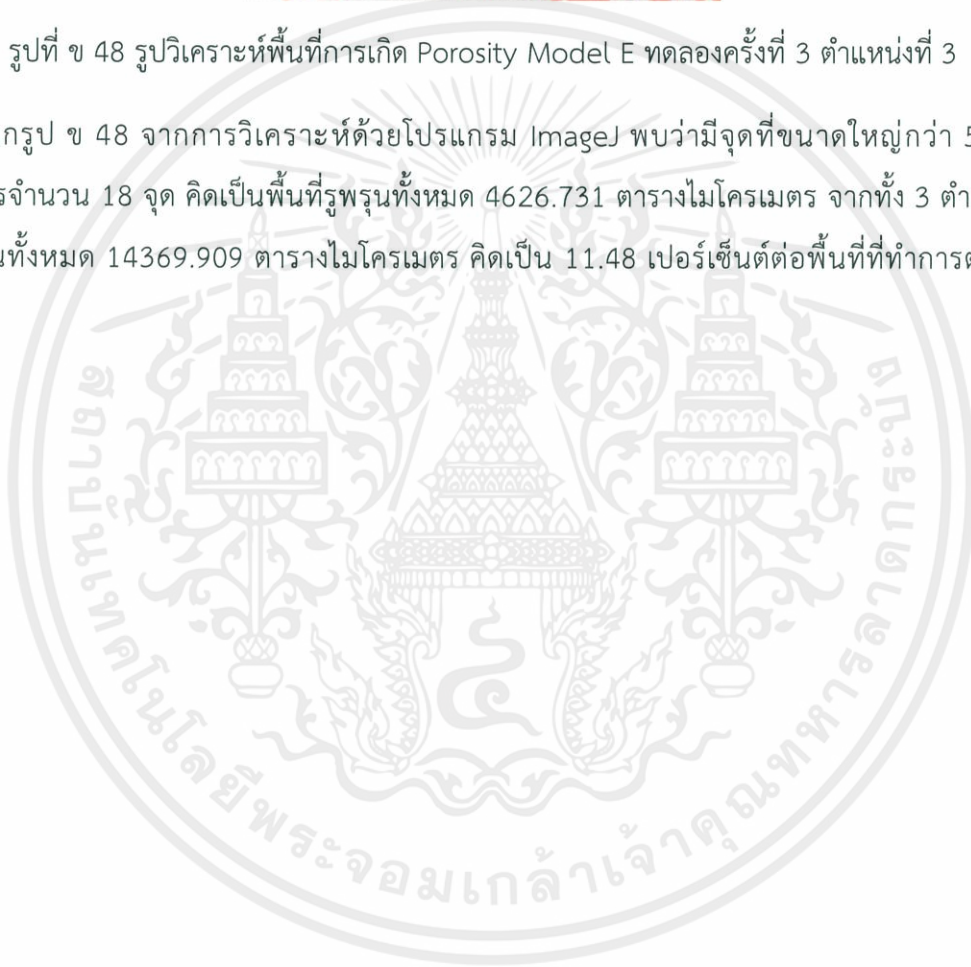
รูปที่ ข 47 รูปวิเคราะห์พื้นที่การเกิด Porosity Model E ทดลองครั้งที่ 3 ตำแหน่งที่ 2

จากรูป ข 47 จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม ImageJ พบว่ามีจุดที่ขนาดใหญ่กว่า 50 ตารางไมโครเมตรจำนวน 29 จุด คิดเป็นพื้นที่รูพรุนทั้งหมด 7159.565 ตารางไมโครเมตร

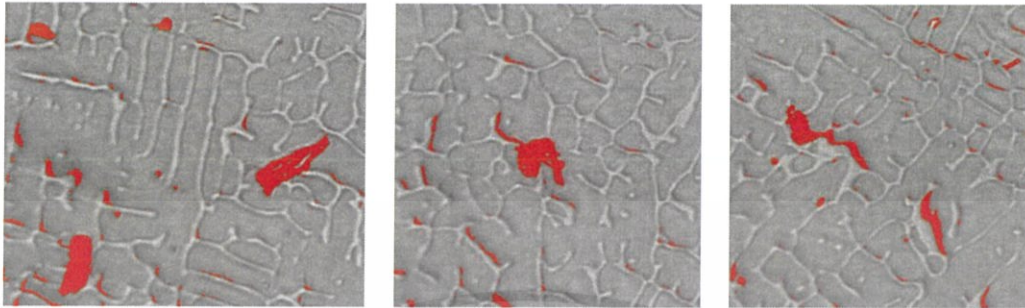


รูปที่ ข 48 รูปวิเคราะห์พื้นที่การเกิด Porosity Model E ทดลองครั้งที่ 3 ตำแหน่งที่ 3

จากรูป ข 48 จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม ImageJ พบว่ามีจุดที่ขนาดใหญ่กว่า 50 ตารางไมโครเมตรจำนวน 18 จุด คิดเป็นพื้นที่รูพรุนทั้งหมด 4626.731 ตารางไมโครเมตร จากทั้ง 3 ตำแหน่งเป็นพื้นที่รูพรุนทั้งหมด 14369.909 ตารางไมโครเมตร คิดเป็น 11.48 เปอร์เซ็นต์ต่อพื้นที่ที่ทำการตรวจสอบทั้งหมด

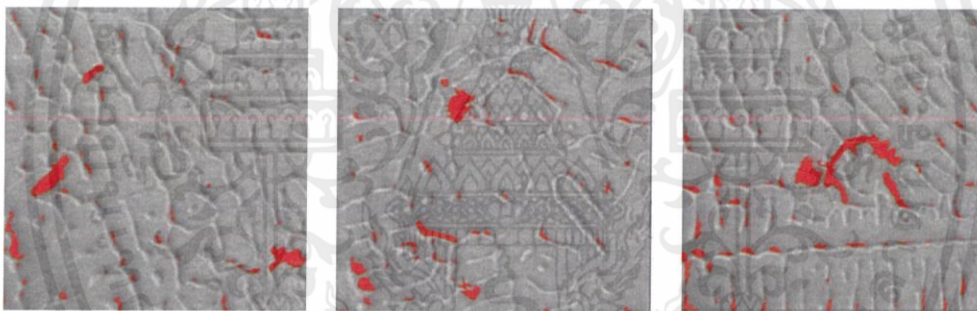


Model F อุณหภูมิอบเบ้า 540 องศาเซลเซียสและอุณหภูมิหล่อ 1030 องศาเซลเซียส ทดลองครั้งที่ 1



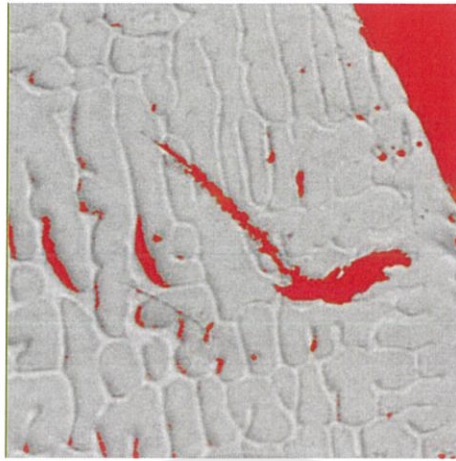
รูปที่ ข 49 รูปวิเคราะห์พื้นที่การเกิด Porosity Model F ทดลองครั้งที่ 1 ตำแหน่งที่ 1

จากรูป ข 49 จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม ImageJ พบว่ามีจุดที่ขนาดใหญ่กว่า 50 ตารางไมโครเมตรจำนวน 37 จุด คิดเป็นพื้นที่รูพรุนทั้งหมด 6562.578 ตารางไมโครเมตร



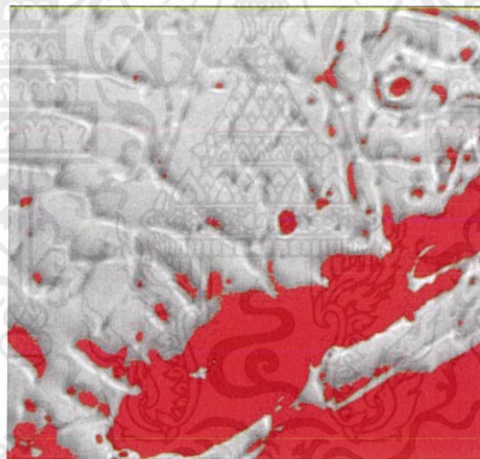
รูปที่ ข 50 รูปวิเคราะห์พื้นที่การเกิด Porosity Model F ทดลองครั้งที่ 1 ตำแหน่งที่ 2

จากรูป ข 50 จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม ImageJ พบว่ามีจุดที่ขนาดใหญ่กว่า 50 ตารางไมโครเมตรจำนวน 53 จุด คิดเป็นพื้นที่รูพรุนทั้งหมด 5371.784 ตารางไมโครเมตร



รูปที่ ข 51 รูปวิเคราะห์พื้นที่การเกิด Porosity Model F ทดลองครั้งที่ 1 ตำแหน่งที่ 3

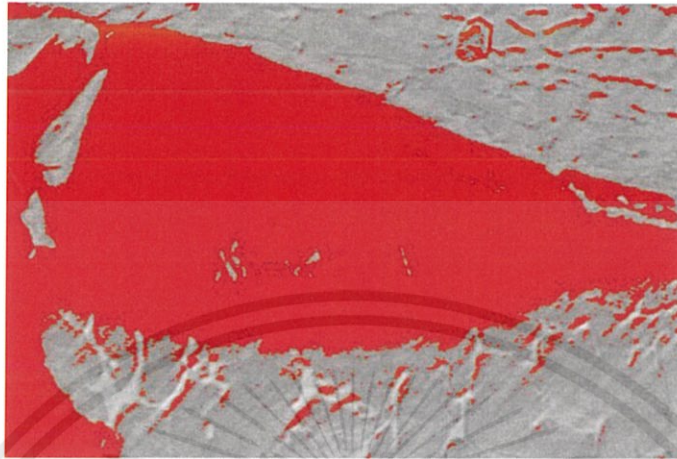
จากรูป ข 51 จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม ImageJ พบว่ามีจุดที่ขนาดใหญ่กว่า 50 ตารางไมโครเมตรจำนวน 39 จุด คิดเป็นพื้นที่รูพรุนทั้งหมด 17765.718 ตารางไมโครเมตร



รูปที่ ข 52 รูปวิเคราะห์พื้นที่การเกิด Porosity Model F ทดลองครั้งที่ 1 ตำแหน่งที่ 4

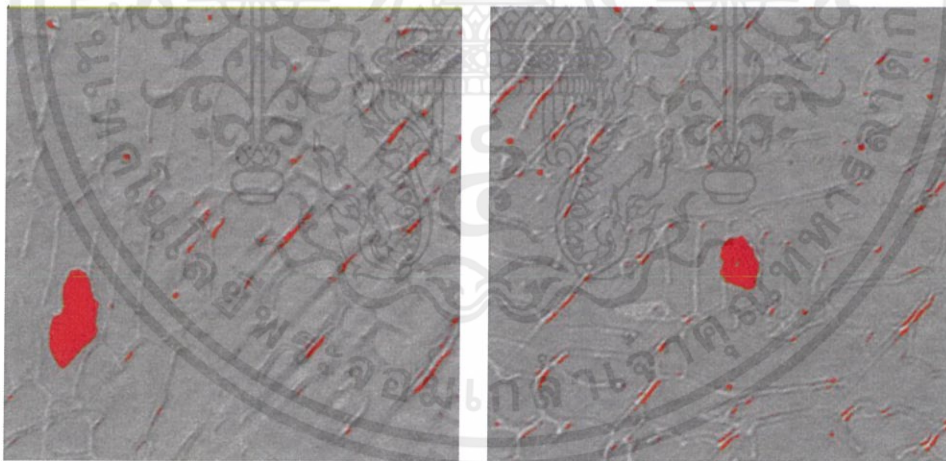
จากรูป ข 52 จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม ImageJ พบว่ามีจุดที่ขนาดใหญ่กว่า 50 ตารางไมโครเมตรจำนวน 60 จุด คิดเป็นพื้นที่รูพรุนทั้งหมด 105446.422 ตารางไมโครเมตร จากทั้ง 4 ตำแหน่งเป็นพื้นที่รูพรุนทั้งหมด 135146.502 ตารางไมโครเมตร คิดเป็น 19.62 เปอร์เซ็นต์ต่อพื้นที่ที่ทำการตรวจสอบทั้งหมด

Model F อุณหภูมิอบเข้า 540 องศาเซลเซียสและอุณหภูมิหล่อ 1030 องศาเซลเซียส ทดลองครั้งที่ 2



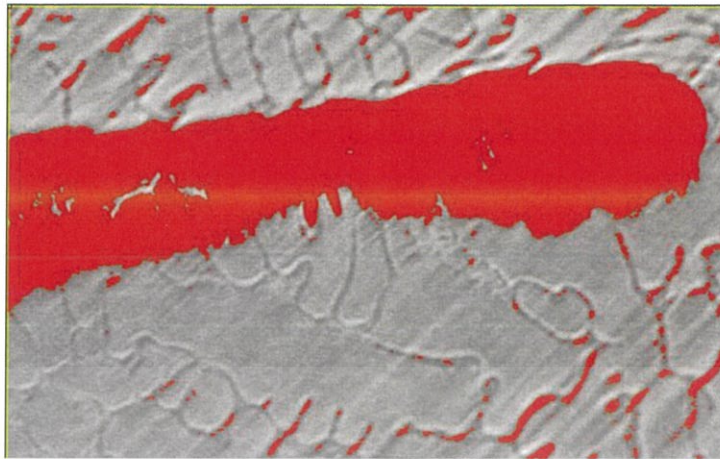
รูปที่ ข 53 รูปวิเคราะห์พื้นที่การเกิด Porosity Model F ทดลองครั้งที่ 2 ตำแหน่งที่ 1

จากรูป ข 53 จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม ImageJ พบว่ามีจุดที่ขนาดใหญ่กว่า 50 ตารางไมโครเมตรจำนวน 56 จุด คิดเป็นพื้นที่รูพรุนทั้งหมด 98328.287 ตารางไมโครเมตร



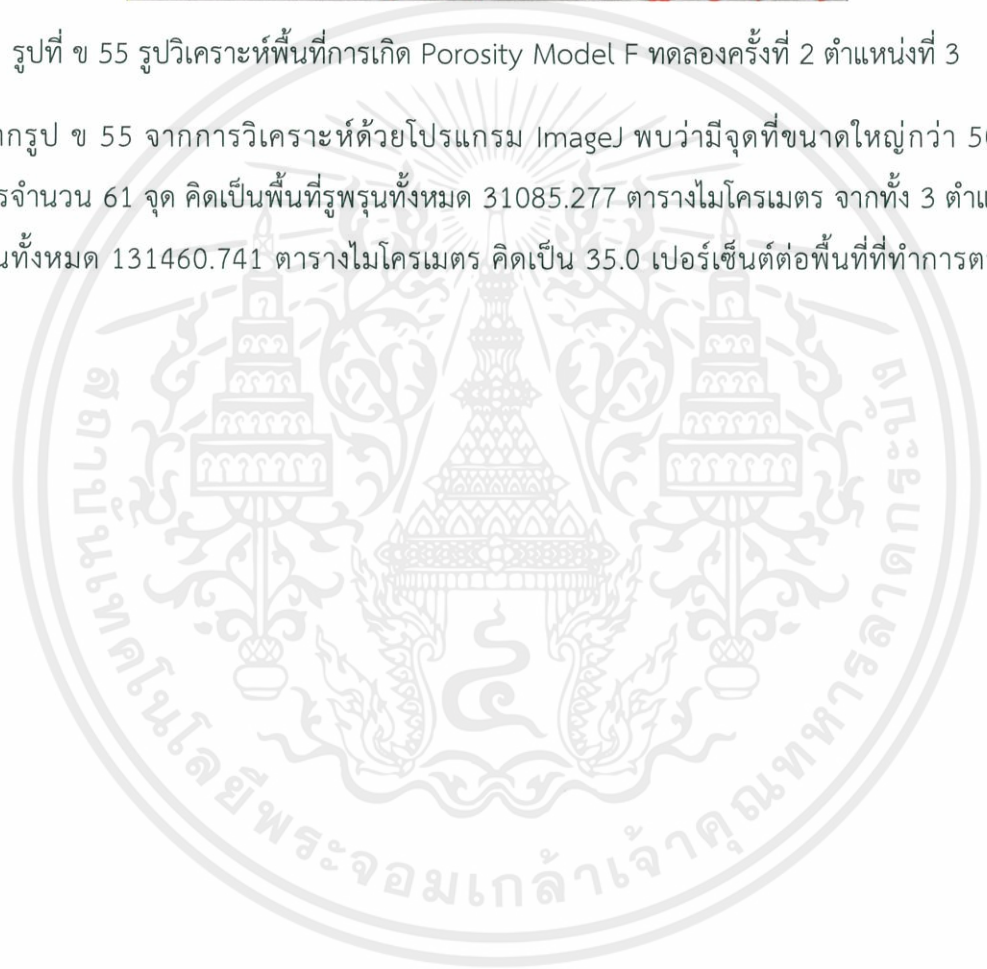
รูปที่ ข 54 รูปวิเคราะห์พื้นที่การเกิด Porosity Model F ทดลองครั้งที่ 2 ตำแหน่งที่ 2

จากรูป ข 54 จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม ImageJ พบว่ามีจุดที่ขนาดใหญ่กว่า 50 ตารางไมโครเมตรจำนวน 12 จุด คิดเป็นพื้นที่รูพรุนทั้งหมด 2047.177 ตารางไมโครเมตร

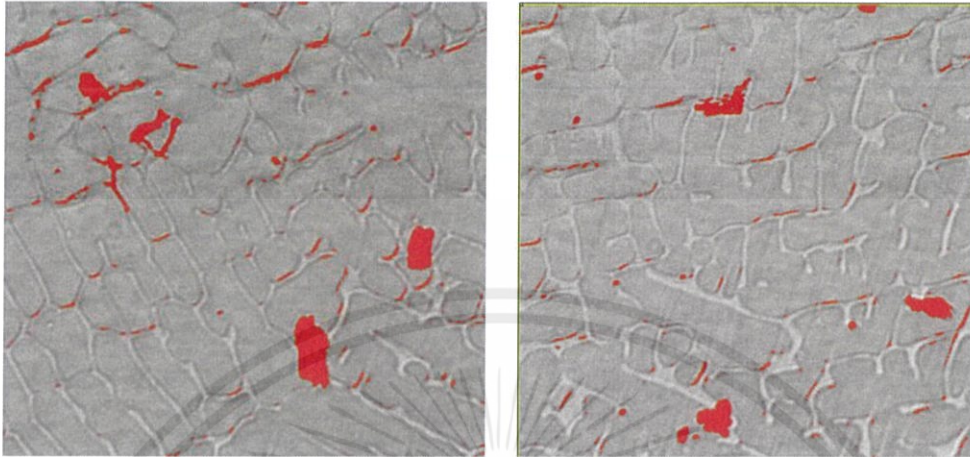


รูปที่ ข 55 รูปวิเคราะห์พื้นที่การเกิด Porosity Model F ทดลองครั้งที่ 2 ตำแหน่งที่ 3

จากรูป ข 55 จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม ImageJ พบว่ามีจุดที่ขนาดใหญ่กว่า 50 ตารางไมโครเมตรจำนวน 61 จุด คิดเป็นพื้นที่รูพรุนทั้งหมด 31085.277 ตารางไมโครเมตร จากทั้ง 3 ตำแหน่งเป็นพื้นที่รูพรุนทั้งหมด 131460.741 ตารางไมโครเมตร คิดเป็น 35.0 เปอร์เซ็นต์ต่อพื้นที่ที่ทำการตรวจสอบทั้งหมด



Model F อุณหภูมิอบเบา 540 องศาเซลเซียสและอุณหภูมิหล่อ 1030 องศาเซลเซียส ทดลองครั้งที่ 3



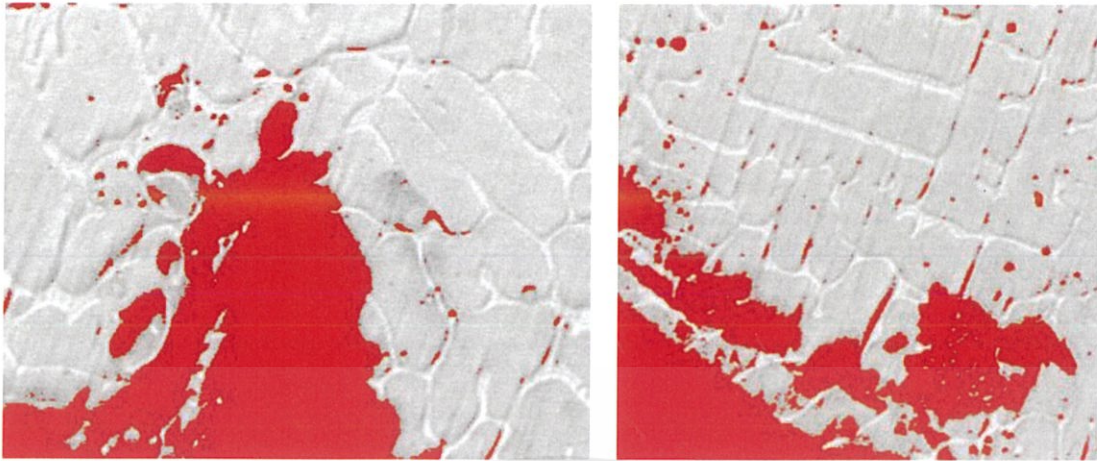
รูปที่ ข 56 รูปวิเคราะห์พื้นที่การเกิด Porosity Model F ทดลองครั้งที่ 3 ตำแหน่งที่ 1

จากรูป ข 56 จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม ImageJ พบว่ามีจุดที่ขนาดใหญ่กว่า 50 ตารางไมโครเมตรจำนวน 42 จุด คิดเป็นพื้นที่รูพรุนทั้งหมด 26895.058 ตารางไมโครเมตร



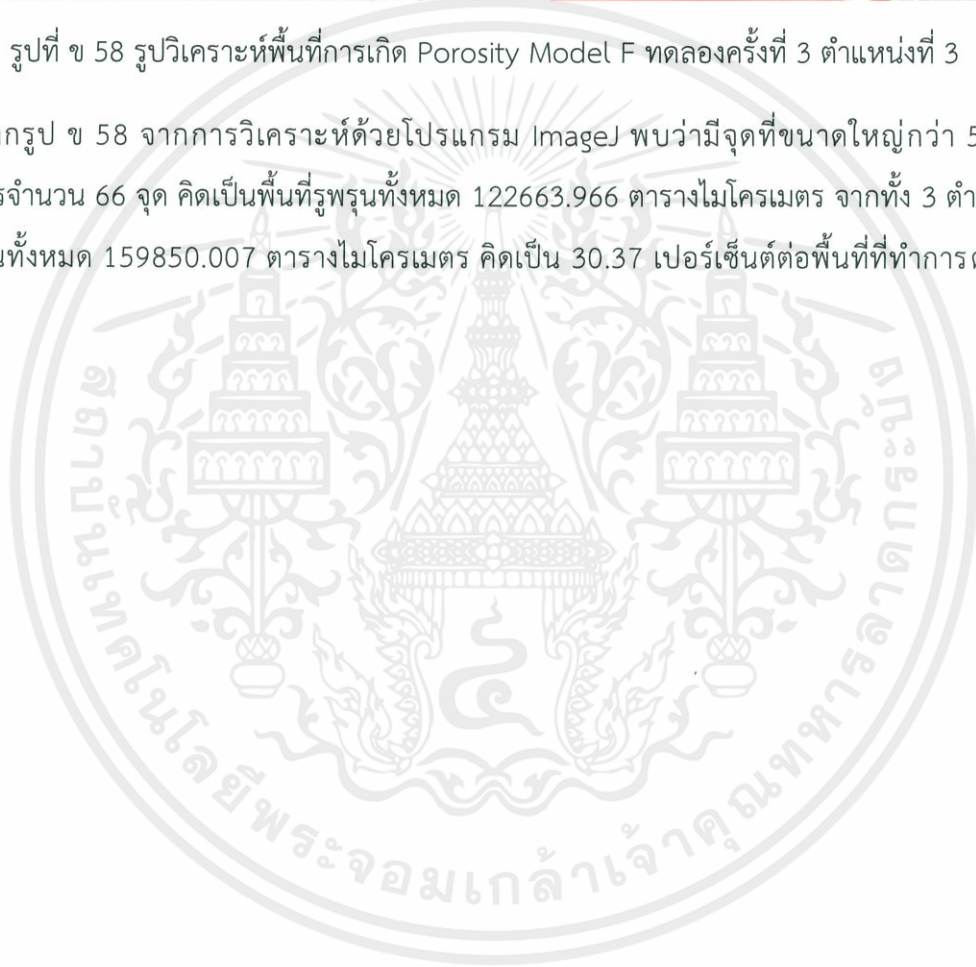
รูปที่ ข 57 รูปวิเคราะห์พื้นที่การเกิด Porosity Model F ทดลองครั้งที่ 3 ตำแหน่งที่ 2

จากรูป ข 57 จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม ImageJ พบว่ามีจุดที่ขนาดใหญ่กว่า 50 ตารางไมโครเมตรจำนวน 18 จุด คิดเป็นพื้นที่รูพรุนทั้งหมด 10291.053 ตารางไมโครเมตร



รูปที่ ข 58 รูปวิเคราะห์พื้นที่การเกิด Porosity Model F ทดลองครั้งที่ 3 ตำแหน่งที่ 3

จากรูป ข 58 จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม ImageJ พบว่ามีจุดที่ขนาดใหญ่กว่า 50 ตารางไมโครเมตรจำนวน 66 จุด คิดเป็นพื้นที่รูพรุนทั้งหมด 122663.966 ตารางไมโครเมตร จากทั้ง 3 ตำแหน่งเป็นพื้นที่รูพรุนทั้งหมด 159850.007 ตารางไมโครเมตร คิดเป็น 30.37 เปอร์เซ็นต์ต่อพื้นที่ที่ทำการตรวจสอบทั้งหมด

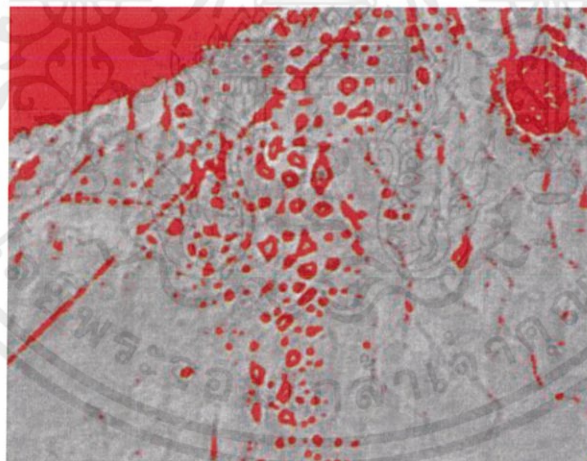


Model G อุณหภูมิอบเบ้า 540 องศาเซลเซียสและอุณหภูมิหล่อ 1060 องศาเซลเซียส ทดลองครั้งที่ 1



รูปที่ ข 59 รูปวิเคราะห์พื้นที่การเกิด Porosity Model G ทดลองครั้งที่ 1 ตำแหน่งที่ 1

จากรูป ข 59 จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม ImageJ พบว่ามีจุดที่ขนาดใหญ่กว่า 50 ตารางไมโครเมตรจำนวน 14 จุด คิดเป็นพื้นที่รูพรุนทั้งหมด 37373.704 ตารางไมโครเมตร

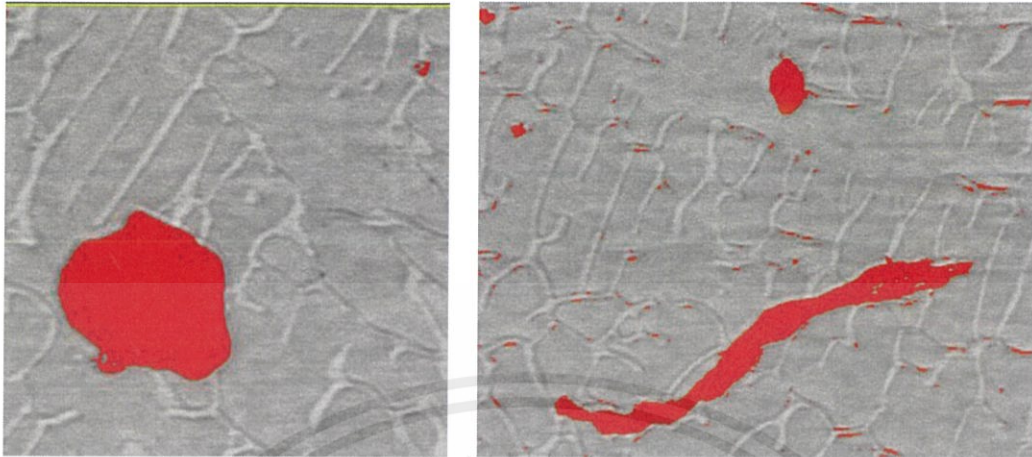


รูปที่ ข 60 รูปวิเคราะห์พื้นที่การเกิด Porosity Model G ทดลองครั้งที่ 1 ตำแหน่งที่ 2

จากรูป ข 60 จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม ImageJ พบว่ามีจุดที่ขนาดใหญ่กว่า 50 ตารางไมโครเมตรจำนวน 112 จุด คิดเป็นพื้นที่รูพรุนทั้งหมด 19587.624 ตารางไมโครเมตร จากทั้ง 2 ตำแหน่งเป็นพื้นที่รูพรุนทั้งหมด 56961.328 ตารางไมโครเมตร คิดเป็น 45.49 เปอร์เซ็นต์ต่อพื้นที่ที่ทำการตรวจสอบทั้งหมด

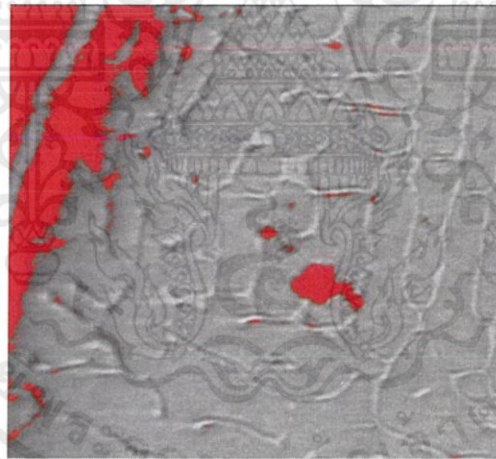
Model G อุณหภูมิอบเบ้า 540 องศาเซลเซียสและอุณหภูมิหล่อ 1060 องศาเซลเซียส ทดลองครั้งที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



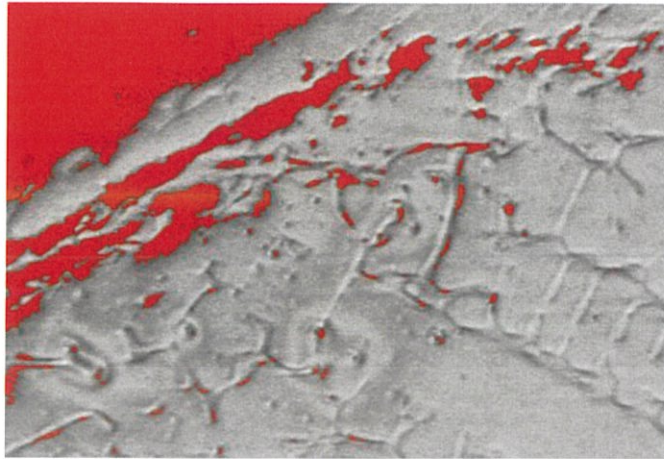
รูปที่ ข 61 รูปวิเคราะห์พื้นที่การเกิด Porosity Model G ทดลองครั้งที่ 2 ตำแหน่งที่ 1

จากรูป ข 61 จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม ImageJ พบว่ามีจุดที่ขนาดใหญ่กว่า 50 ตารางไมโครเมตรจำนวน 14 จุด คิดเป็นพื้นที่รูพรุนทั้งหมด 39279.208 ตารางไมโครเมตร



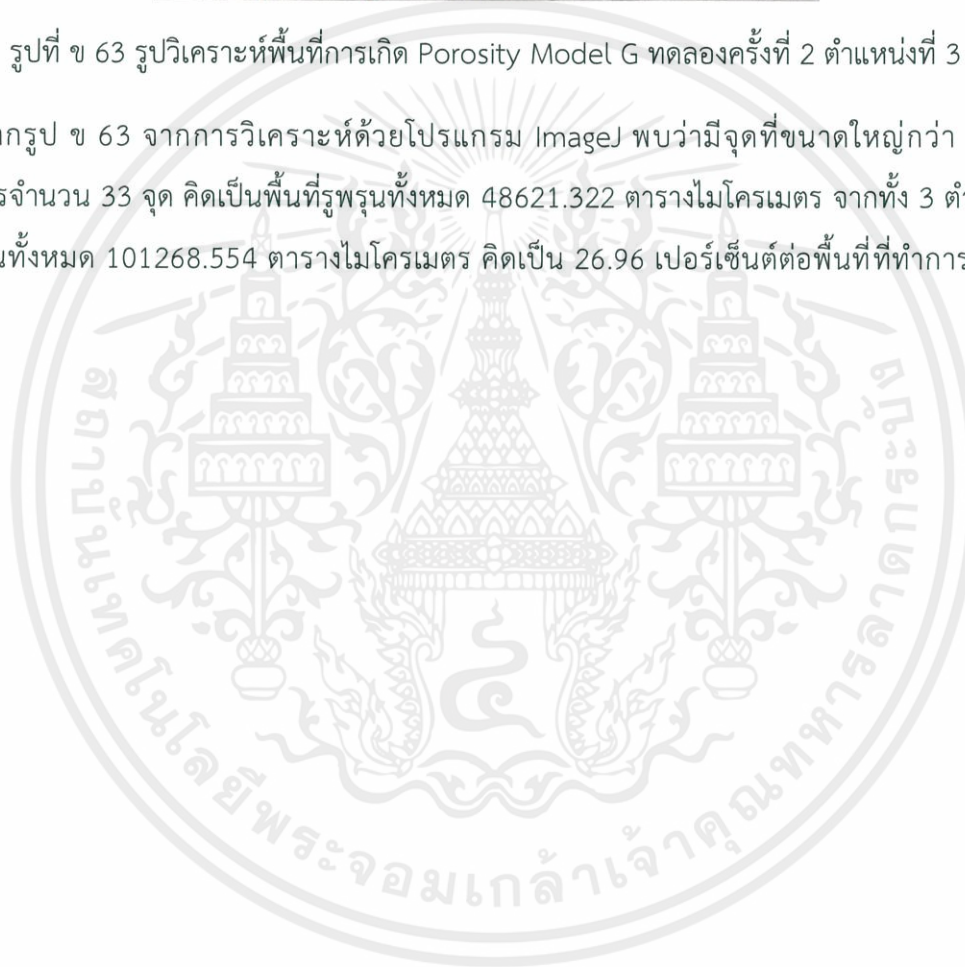
รูปที่ ข 62 รูปวิเคราะห์พื้นที่การเกิด Porosity Model G ทดลองครั้งที่ 2 ตำแหน่งที่ 2

จากรูป ข 62 จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม ImageJ พบว่ามีจุดที่ขนาดใหญ่กว่า 50 ตารางไมโครเมตรจำนวน 10 จุด คิดเป็นพื้นที่รูพรุนทั้งหมด 13368.024 ตารางไมโครเมตร

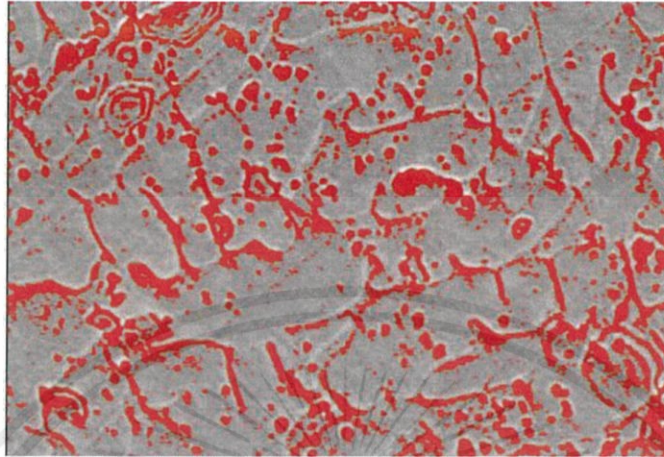


รูปที่ ข 63 รูปวิเคราะห์พื้นที่การเกิด Porosity Model G ทดลองครั้งที่ 2 ตำแหน่งที่ 3

จากรูป ข 63 จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม ImageJ พบว่ามีจุดที่ขนาดใหญ่กว่า 50 ตารางไมโครเมตรจำนวน 33 จุด คิดเป็นพื้นที่รูพรุนทั้งหมด 48621.322 ตารางไมโครเมตร จากทั้ง 3 ตำแหน่งเป็นพื้นที่รูพรุนทั้งหมด 101268.554 ตารางไมโครเมตร คิดเป็น 26.96 เปอร์เซ็นต์ต่อพื้นที่ที่ทำการตรวจสอบทั้งหมด

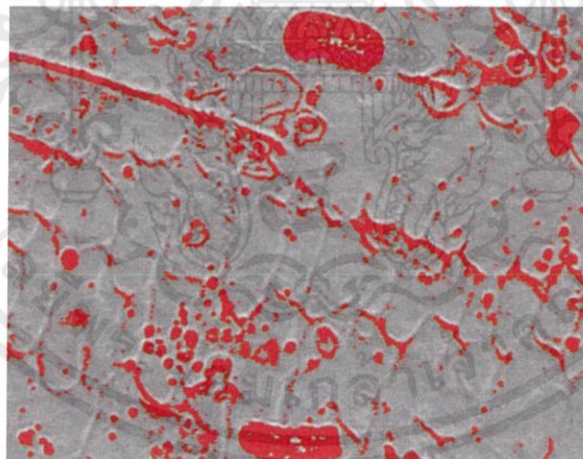


Model G อุณหภูมิอบเบ้า 540 องศาเซลเซียสและอุณหภูมิหล่อ 1060 องศาเซลเซียส ทดลองครั้งที่ 3



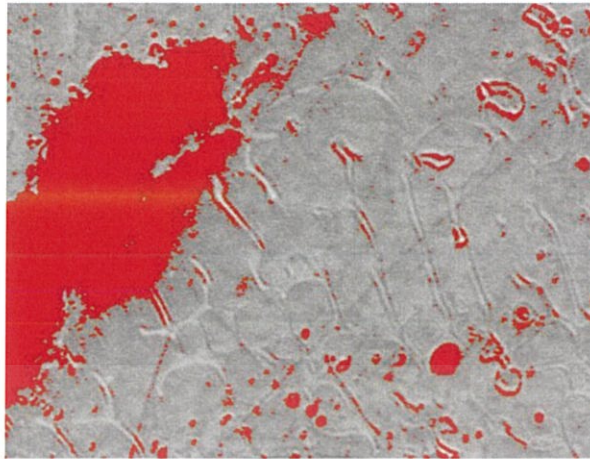
รูปที่ ข 64 รูปวิเคราะห์พื้นที่การเกิด Porosity Model G ทดลองครั้งที่ 3 ตำแหน่งที่ 1

จากรูป ข 64 จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม ImageJ พบว่ามีจุดที่ขนาดใหญ่กว่า 50 ตารางไมโครเมตรจำนวน 311 จุด คิดเป็นพื้นที่รูพรุนทั้งหมด 33448.422 ตารางไมโครเมตร



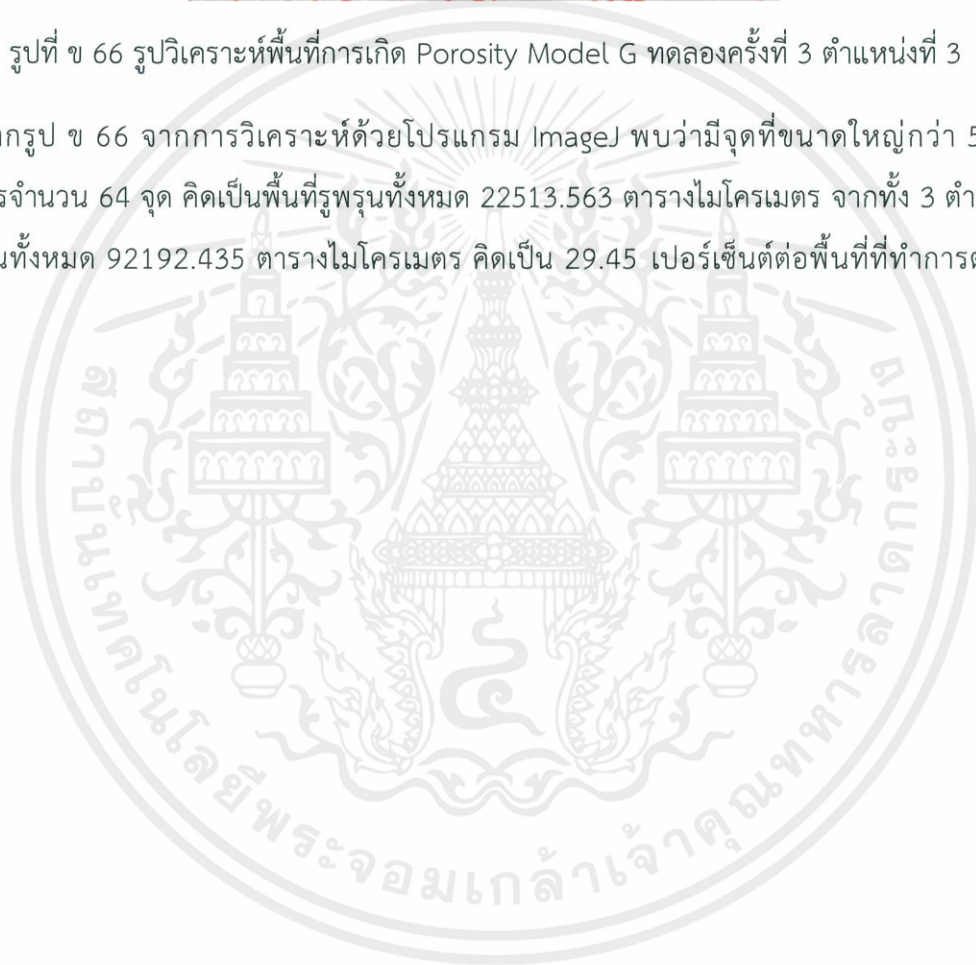
รูปที่ ข 65 รูปวิเคราะห์พื้นที่การเกิด Porosity Model G ทดลองครั้งที่ 3 ตำแหน่งที่ 2

จากรูป ข 65 จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม ImageJ พบว่ามีจุดที่ขนาดใหญ่กว่า 50 ตารางไมโครเมตรจำนวน 21 จุด คิดเป็นพื้นที่รูพรุนทั้งหมด 36230.45 ตารางไมโครเมตร

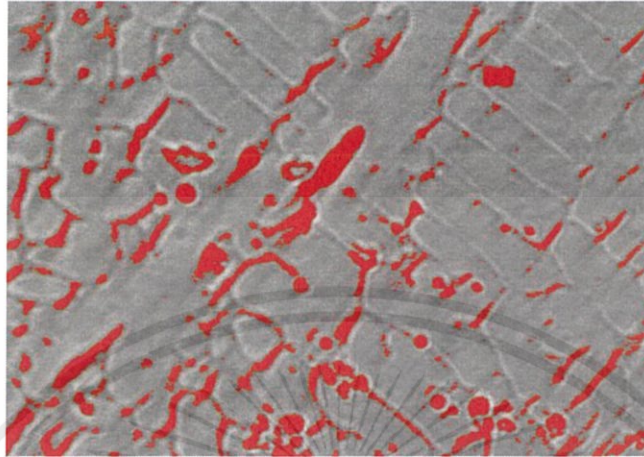


รูปที่ ข 66 รูปวิเคราะห์พื้นที่การเกิด Porosity Model G ทดลองครั้งที่ 3 ตำแหน่งที่ 3

จากรูป ข 66 จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม ImageJ พบว่ามีจุดที่ขนาดใหญ่กว่า 50 ตารางไมโครเมตรจำนวน 64 จุด คิดเป็นพื้นที่รูพรุนทั้งหมด 22513.563 ตารางไมโครเมตร จากทั้ง 3 ตำแหน่งเป็นพื้นที่รูพรุนทั้งหมด 92192.435 ตารางไมโครเมตร คิดเป็น 29.45 เปอร์เซ็นต์ต่อพื้นที่ที่ทำการตรวจสอบทั้งหมด

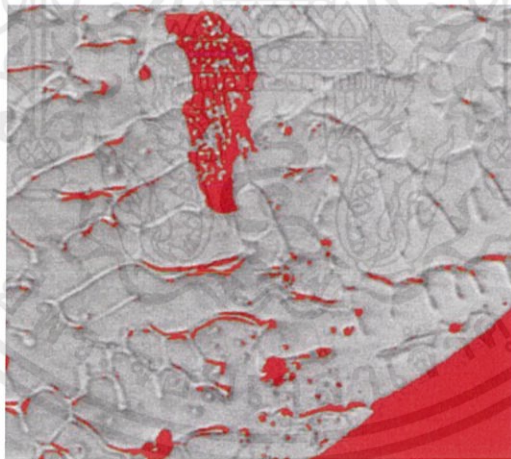


Model H อุณหภูมิอบเบ้า 600 องศาเซลเซียสและอุณหภูมิหล่อ 1020 องศาเซลเซียส ทดลองครั้งที่ 1



รูปที่ ข 67 รูปวิเคราะห์พื้นที่การเกิด Porosity Model H ทดลองครั้งที่ 1 ตำแหน่งที่ 1

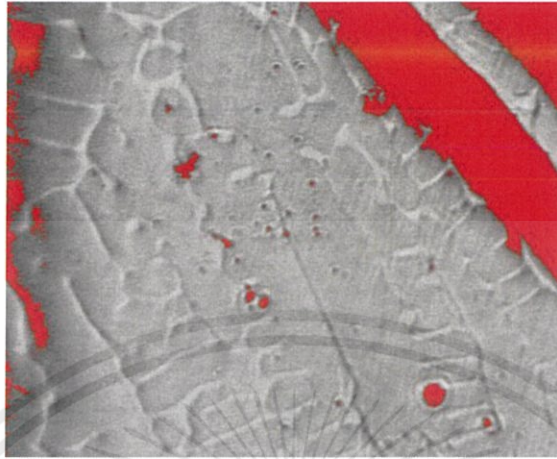
จากรูป ข 67 จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม ImageJ พบว่ามีจุดที่ขนาดใหญ่กว่า 50 ตารางไมโครเมตรจำนวน 14 จุด คิดเป็นพื้นที่รูพรุนทั้งหมด 76563.906 ตารางไมโครเมตร



รูปที่ ข 68 รูปวิเคราะห์พื้นที่การเกิด Porosity Model H ทดลองครั้งที่ 1 ตำแหน่งที่ 2

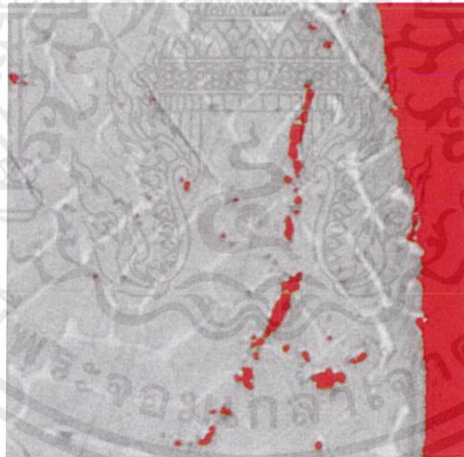
จากรูป ข 68 จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม ImageJ พบว่ามีจุดที่ขนาดใหญ่กว่า 50 ตารางไมโครเมตรจำนวน 46 จุด คิดเป็นพื้นที่รูพรุนทั้งหมด 39739.797 ตารางไมโครเมตร จากทั้ง 2 ตำแหน่งเป็นพื้นที่รูพรุนทั้งหมด 116303.703 ตารางไมโครเมตร คิดเป็น 46.44 เปอร์เซ็นต์ต่อพื้นที่ที่ทำการตรวจสอบทั้งหมด

Model H อุณหภูมิอบเข้า 600 องศาเซลเซียสและอุณหภูมิหล่อ 1020 องศาเซลเซียส ทดลองครั้งที่ 2



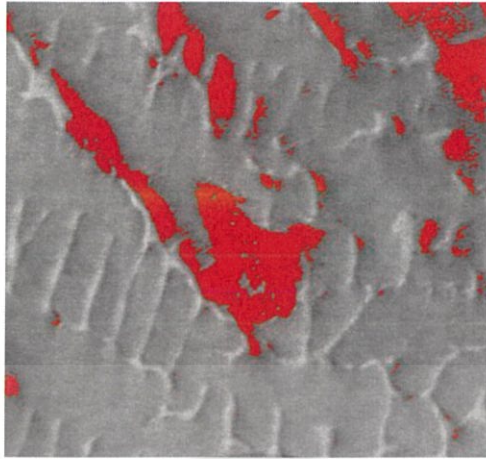
รูปที่ ข 69 รูปวิเคราะห์พื้นที่การเกิด Porosity Model H ทดลองครั้งที่ 2 ตำแหน่งที่ 1

จากรูป ข 69 จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม ImageJ พบว่ามีจุดที่ขนาดใหญ่กว่า 50 ตารางไมโครเมตรจำนวน 23 จุด คิดเป็นพื้นที่รูพรุนทั้งหมด 64555.964 ตารางไมโครเมตร



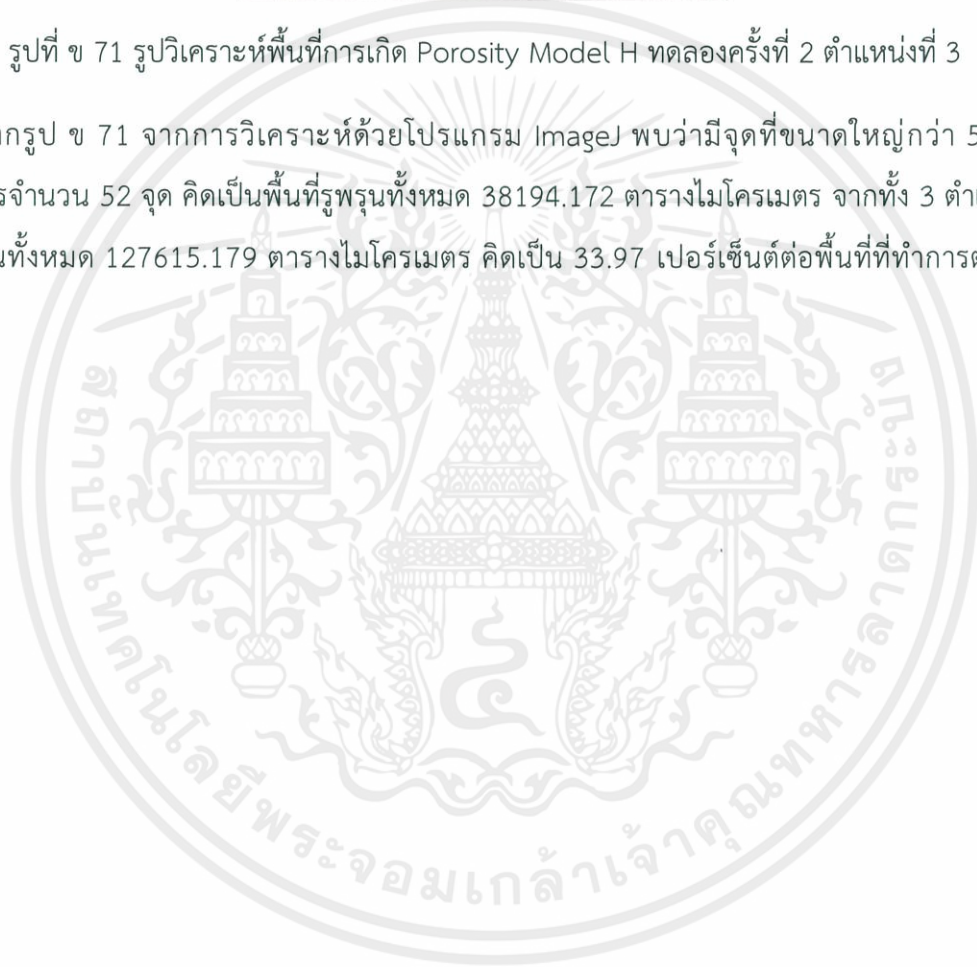
รูปที่ ข 70 รูปวิเคราะห์พื้นที่การเกิด Porosity Model H ทดลองครั้งที่ 2 ตำแหน่งที่ 2

จากรูป ข 70 จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม ImageJ พบว่ามีจุดที่ขนาดใหญ่กว่า 50 ตารางไมโครเมตรจำนวน 10 จุด คิดเป็นพื้นที่รูพรุนทั้งหมด 24865.043 ตารางไมโครเมตร

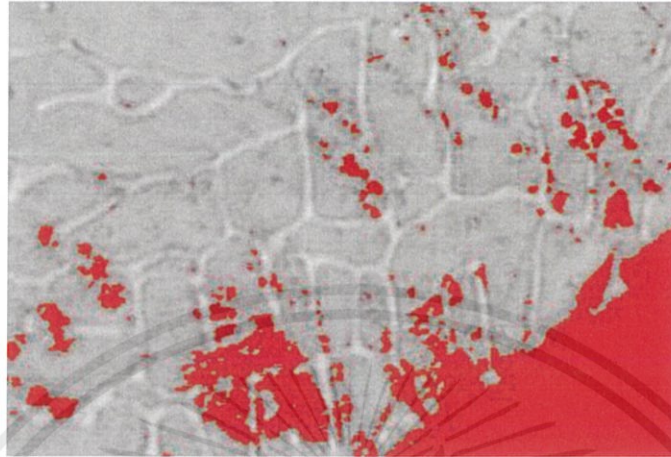


รูปที่ ข 71 รูปวิเคราะห์พื้นที่การเกิด Porosity Model H ทดลองครั้งที่ 2 ตำแหน่งที่ 3

จากรูป ข 71 จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม ImageJ พบว่ามีจุดที่ขนาดใหญ่กว่า 50 ตารางไมโครเมตรจำนวน 52 จุด คิดเป็นพื้นที่รูพรุนทั้งหมด 38194.172 ตารางไมโครเมตร จากทั้ง 3 ตำแหน่งเป็นพื้นที่รูพรุนทั้งหมด 127615.179 ตารางไมโครเมตร คิดเป็น 33.97 เปอร์เซ็นต์ต่อพื้นที่ที่ทำการตรวจสอบทั้งหมด

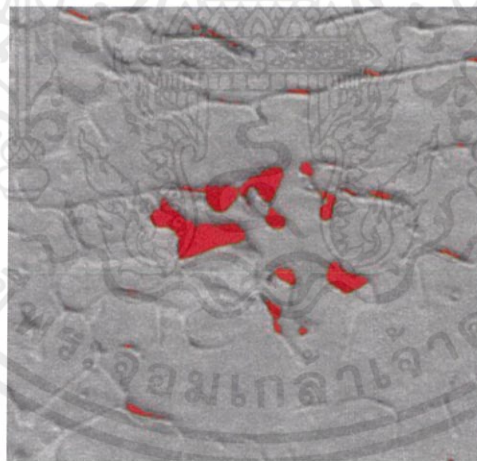


Model H อุณหภูมิอบเบ้า 600 องศาเซลเซียสและอุณหภูมิหล่อ 1020 องศาเซลเซียส ทดลองครั้งที่ 3



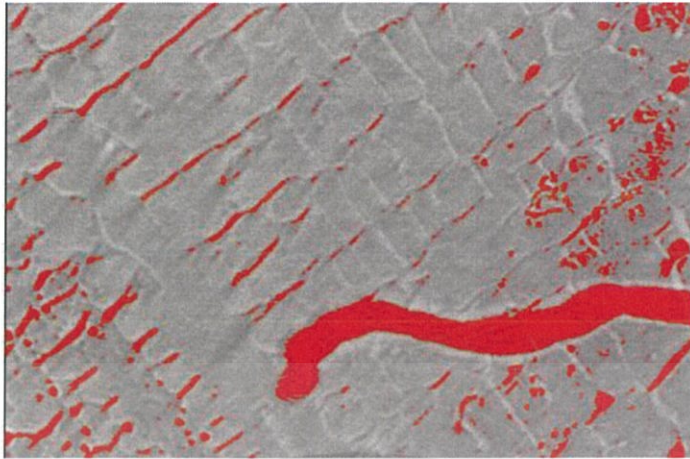
รูปที่ ข 72 รูปวิเคราะห์พื้นที่การเกิด Porosity Model H ทดลองครั้งที่ 3 ตำแหน่งที่ 1

จากรูป ข 72 จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม ImageJ พบว่ามีจุดที่ขนาดใหญ่กว่า 50 ตารางไมโครเมตรจำนวน 6 จุด คิดเป็นพื้นที่รูพรุนทั้งหมด 50476.799 ตารางไมโครเมตร



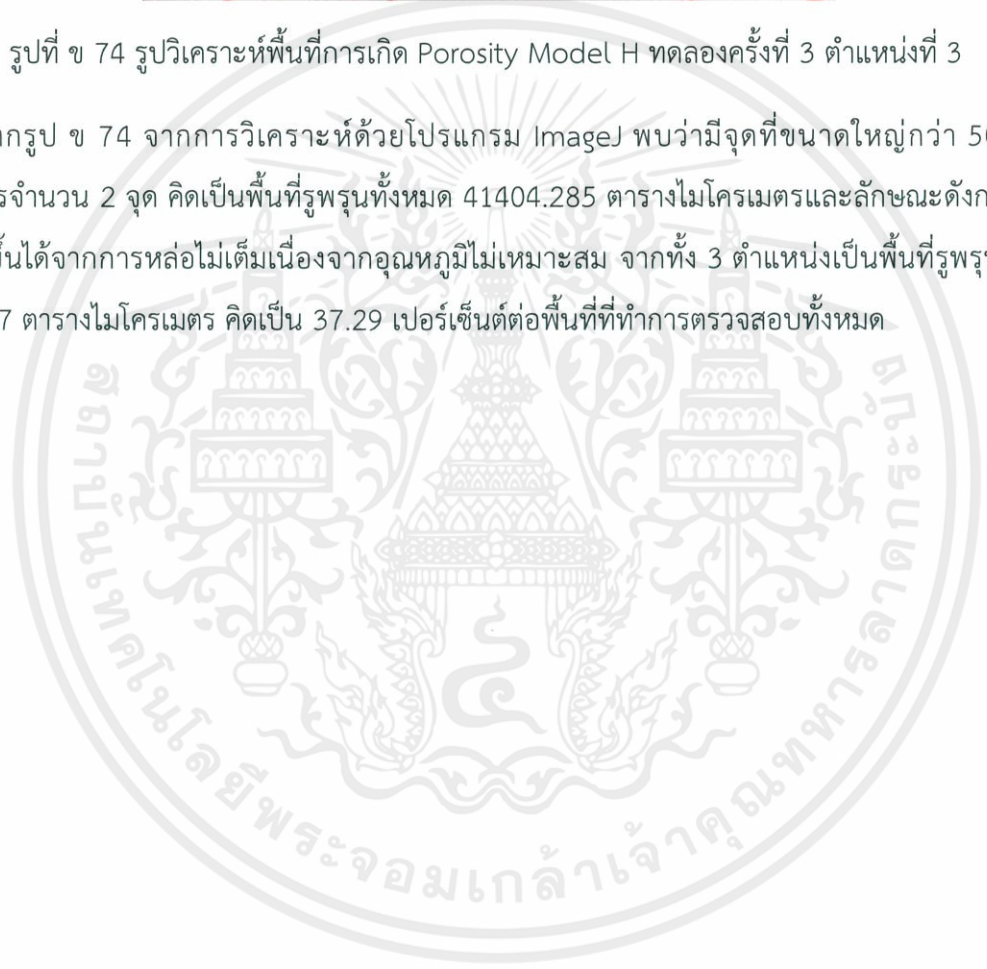
รูปที่ ข 73 รูปวิเคราะห์พื้นที่การเกิด Porosity Model H ทดลองครั้งที่ 3 ตำแหน่งที่ 2

จากรูป ข 73 จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม ImageJ พบว่ามีจุดที่ขนาดใหญ่กว่า 50 ตารางไมโครเมตรจำนวน 10 จุด คิดเป็นพื้นที่รูพรุนทั้งหมด 1489.263 ตารางไมโครเมตร

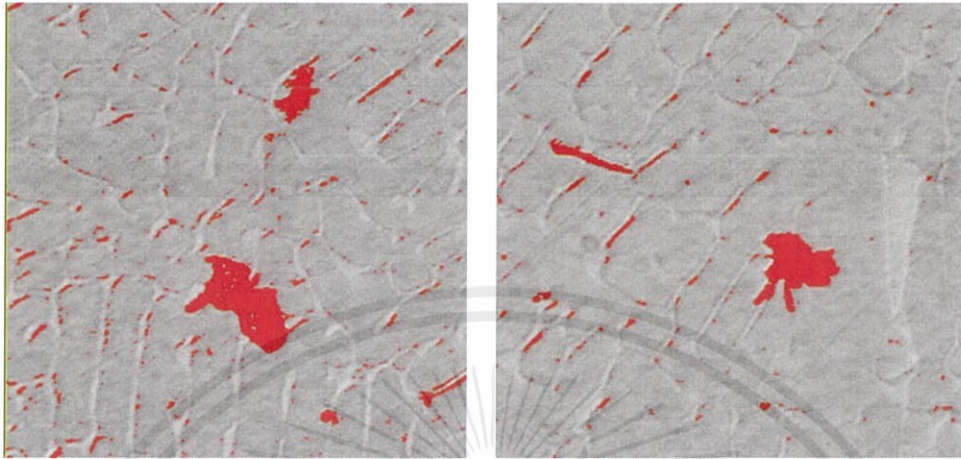


รูปที่ ข 74 รูปวิเคราะห์พื้นที่การเกิด Porosity Model H ทดลองครั้งที่ 3 ตำแหน่งที่ 3

จากรูป ข 74 จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม ImageJ พบว่ามีจุดที่ขนาดใหญ่กว่า 50 ตารางไมโครเมตรจำนวน 2 จุด คิดเป็นพื้นที่รูพรุนทั้งหมด 41404.285 ตารางไมโครเมตรและลักษณะดังกล่าวแบบในรูปเกิดขึ้นได้จากการหล่อไม่เต็มเนื่องจากอุณหภูมิไม่เหมาะสม จากทั้ง 3 ตำแหน่งเป็นพื้นที่รูพรุนทั้งหมด 93370.347 ตารางไมโครเมตร คิดเป็น 37.29 เปอร์เซ็นต์ต่อพื้นที่ที่ทำการตรวจสอบทั้งหมด

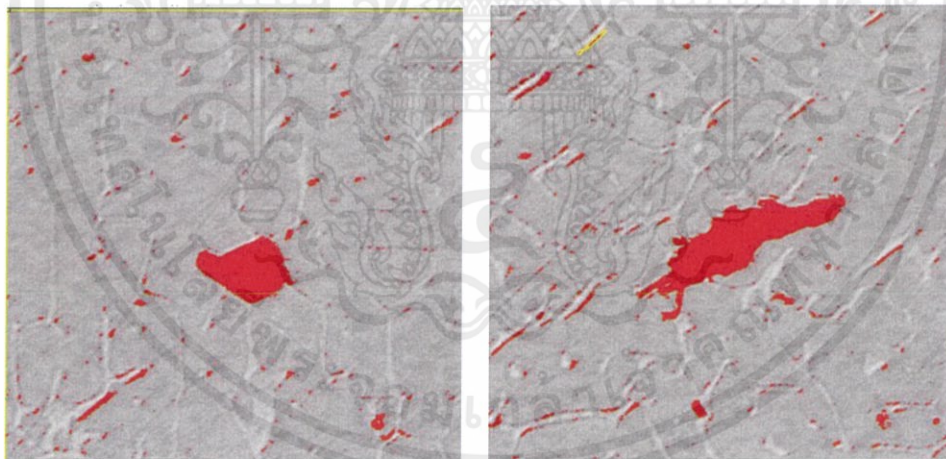


Model I อุณหภูมิอบเบ้า 600 องศาเซลเซียสและอุณหภูมิหล่อ 1060 องศาเซลเซียส ทดลองครั้งที่ 1



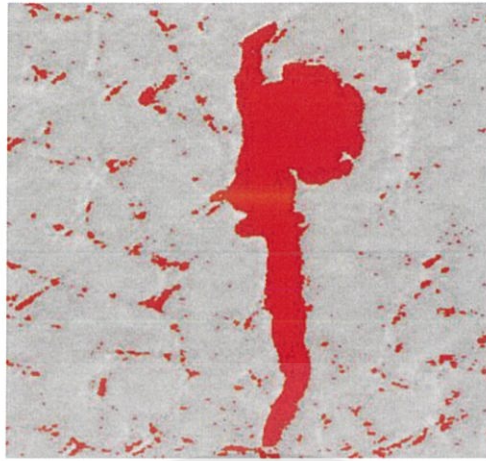
รูปที่ ข 75 รูปวิเคราะห์พื้นที่การเกิด Porosity Model I ทดลองครั้งที่ 1 ตำแหน่งที่ 1

จากรูป ข 75 จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม ImageJ พบว่ามีจุดที่ขนาดใหญ่กว่า 50 ตารางไมโครเมตรจำนวน 26 จุด คิดเป็นพื้นที่รูพรุนทั้งหมด 4622.377 ตารางไมโครเมตร



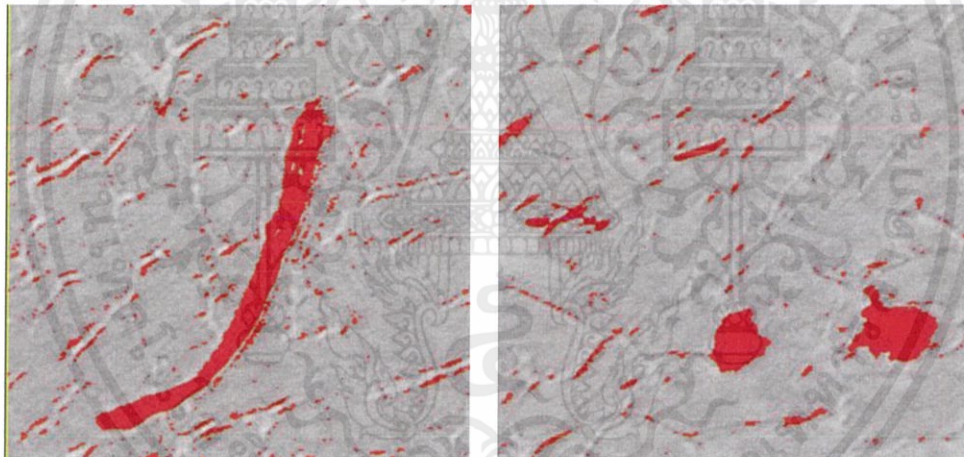
รูปที่ ข 76 รูปวิเคราะห์พื้นที่การเกิด Porosity Model I ทดลองครั้งที่ 1 ตำแหน่งที่ 2

จากรูป ข 76 จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม ImageJ พบว่ามีจุดที่ขนาดใหญ่กว่า 50 ตารางไมโครเมตรจำนวน 21 จุด คิดเป็นพื้นที่รูพรุนทั้งหมด 5314.392 ตารางไมโครเมตร



รูปที่ ข 77 รูปวิเคราะห์พื้นที่การเกิด Porosity Model I ทดลองครั้งที่ 1 ตำแหน่งที่ 3

จากรูป ข 77 จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม ImageJ พบว่ามีจุดที่ขนาดใหญ่กว่า 50 ตารางไมโครเมตรจำนวน 19 จุด คิดเป็นพื้นที่รูพรุนทั้งหมด 6586.035 ตารางไมโครเมตร



รูปที่ ข 78 รูปวิเคราะห์พื้นที่การเกิด Porosity Model I ทดลองครั้งที่ 1 ตำแหน่งที่ 4

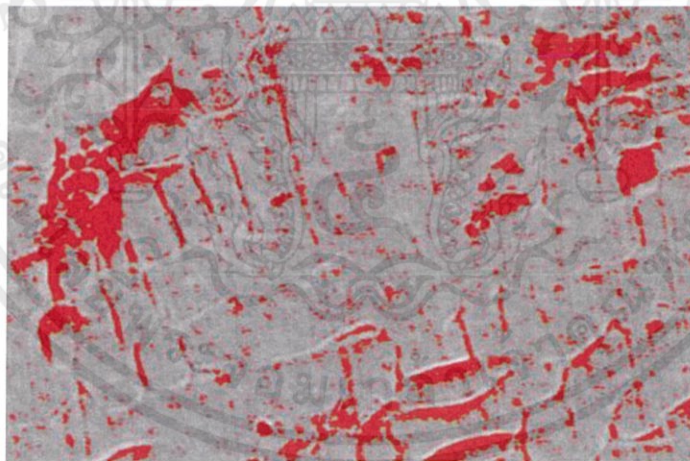
จากรูป ข 78 จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม ImageJ พบว่ามีจุดที่ขนาดใหญ่กว่า 50 ตารางไมโครเมตรจำนวน 25 จุด คิดเป็นพื้นที่รูพรุนทั้งหมด 4804.878 ตารางไมโครเมตร จากทั้ง 4 ตำแหน่งเป็นพื้นที่รูพรุนทั้งหมด 21327.682 ตารางไมโครเมตร คิดเป็น 4.87 เปอร์เซ็นต์ต่อพื้นที่ที่ทำการตรวจสอบทั้งหมด

Model I อุณหภูมิอบเบา 600 องศาเซลเซียสและอุณหภูมิหล่อ 1060 องศาเซลเซียส ทดลองครั้งที่ 2



รูปที่ ข 79 รูปวิเคราะห์พื้นที่การเกิด Porosity Model I ทดลองครั้งที่ 2 ตำแหน่งที่ 1

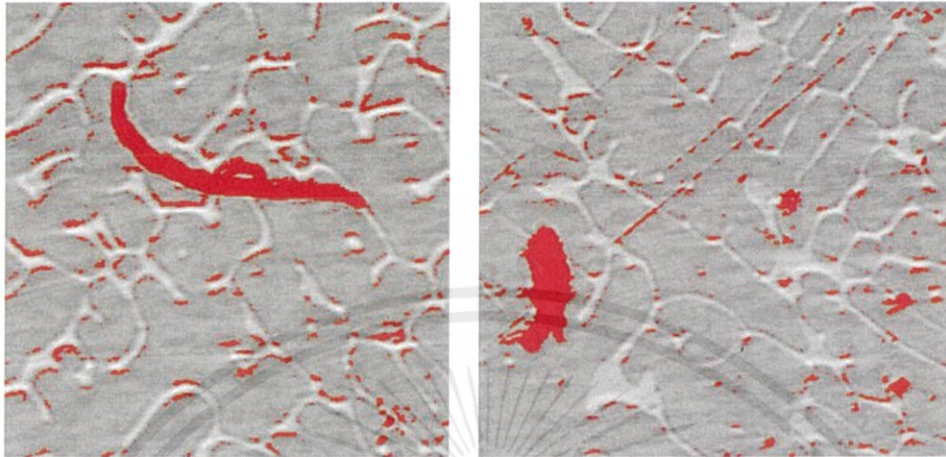
จากรูป ข 79 จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม ImageJ พบว่ามีจุดที่ขนาดใหญ่กว่า 50 ตารางไมโครเมตรจำนวน 65 จุด คิดเป็นพื้นที่รูพรุนทั้งหมด 12876.388 ตารางไมโครเมตร



รูปที่ ข 80 รูปวิเคราะห์พื้นที่การเกิด Porosity Model I ทดลองครั้งที่ 2 ตำแหน่งที่ 2

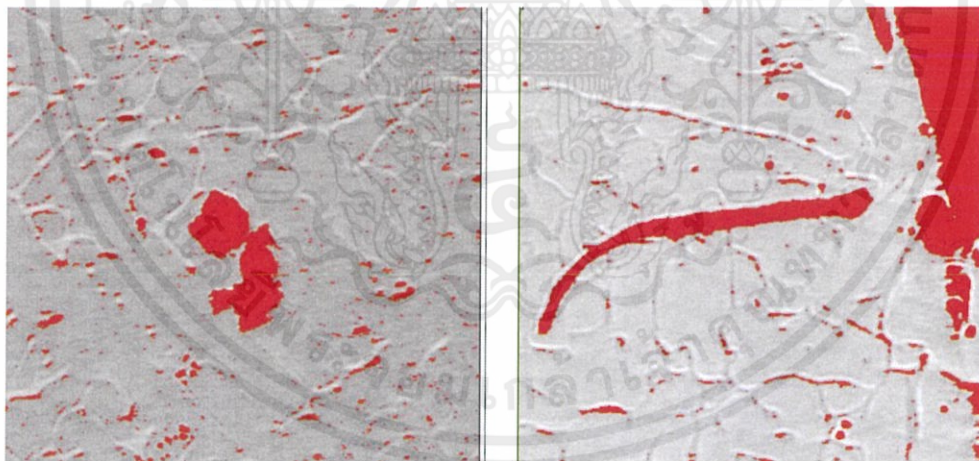
จากรูป ข 80 จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม ImageJ พบว่ามีจุดที่ขนาดใหญ่กว่า 50 ตารางไมโครเมตรจำนวน 81 จุด คิดเป็นพื้นที่รูพรุนทั้งหมด 10698.452 ตารางไมโครเมตร จากทั้ง 2 ตำแหน่งเป็นพื้นที่รูพรุนทั้งหมด 23574.84 ตารางไมโครเมตร คิดเป็น 18.82 เปอร์เซ็นต์ต่อพื้นที่ที่ทำการตรวจสอบทั้งหมด

Model I อุณหภูมิอบเบ้า 600 องศาเซลเซียสและอุณหภูมิหล่อ 1060 องศาเซลเซียส ทดลองครั้งที่ 3



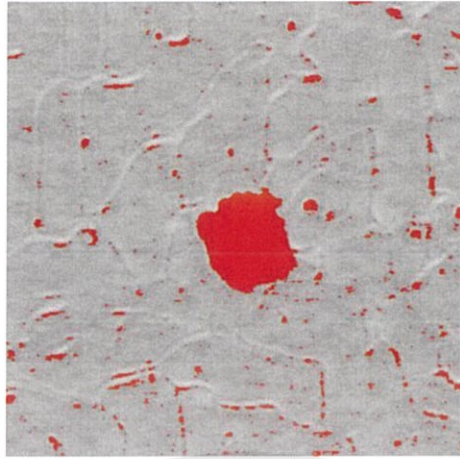
รูปที่ ข 81 รูปวิเคราะห์พื้นที่การเกิด Porosity Model I ทดลองครั้งที่ 3 ตำแหน่งที่ 1

จากรูป ข 81 จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม ImageJ พบว่ามีจุดที่ขนาดใหญ่กว่า 50 ตารางไมโครเมตรจำนวน 39 จุด คิดเป็นพื้นที่รูพรุนทั้งหมด 4266.72 ตารางไมโครเมตร



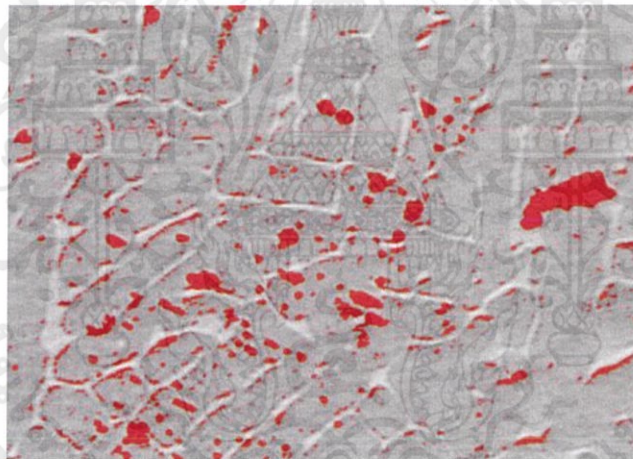
รูปที่ ข 82 รูปวิเคราะห์พื้นที่การเกิด Porosity Model I ทดลองครั้งที่ 3 ตำแหน่งที่ 2

จากรูป ข 82 จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม ImageJ พบว่ามีจุดที่ขนาดใหญ่กว่า 50 ตารางไมโครเมตรจำนวน 42 จุด คิดเป็นพื้นที่รูพรุนทั้งหมด 13383.473 ตารางไมโครเมตร



รูปที่ ข 83 รูปวิเคราะห์พื้นที่การเกิด Porosity Model I ทดลองครั้งที่ 3 ตำแหน่งที่ 3

จากรูป ข 83 จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม ImageJ พบว่ามีจุดที่ขนาดใหญ่กว่า 50 ตารางไมโครเมตรจำนวน 17 จุด คิดเป็นพื้นที่รูพรุนทั้งหมด 2536.837 ตารางไมโครเมตร



รูปที่ ข 84 รูปวิเคราะห์พื้นที่การเกิด Porosity Model I ทดลองครั้งที่ 3 ตำแหน่งที่ 4

จากรูป ข 84 จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม ImageJ พบว่ามีจุดที่ขนาดใหญ่กว่า 50 ตารางไมโครเมตรจำนวน 93 จุด คิดเป็นพื้นที่รูพรุนทั้งหมด 7675.334 ตารางไมโครเมตร จากทั้ง 4 ตำแหน่งเป็นพื้นที่รูพรุนทั้งหมด 27862.364 ตารางไมโครเมตร คิดเป็น 6.36 เปอร์เซ็นต์ต่อพื้นที่ที่ทำการตรวจสอบทั้งหมด