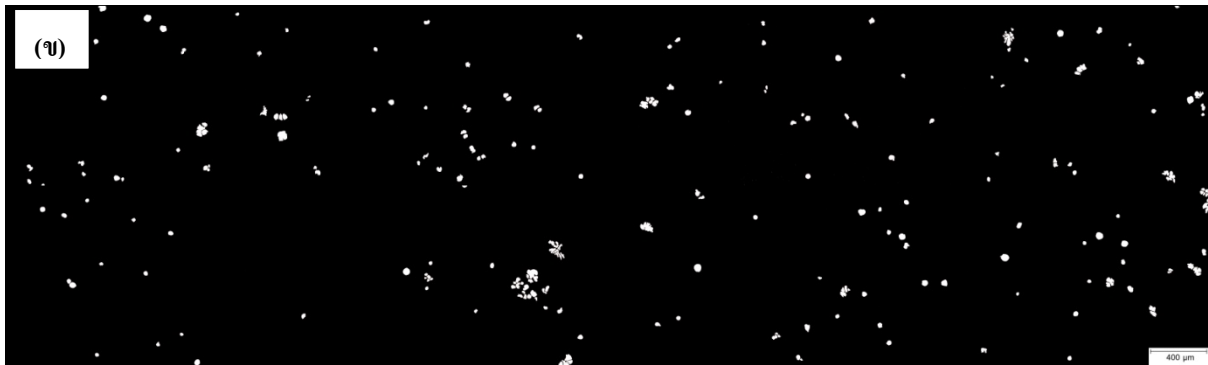




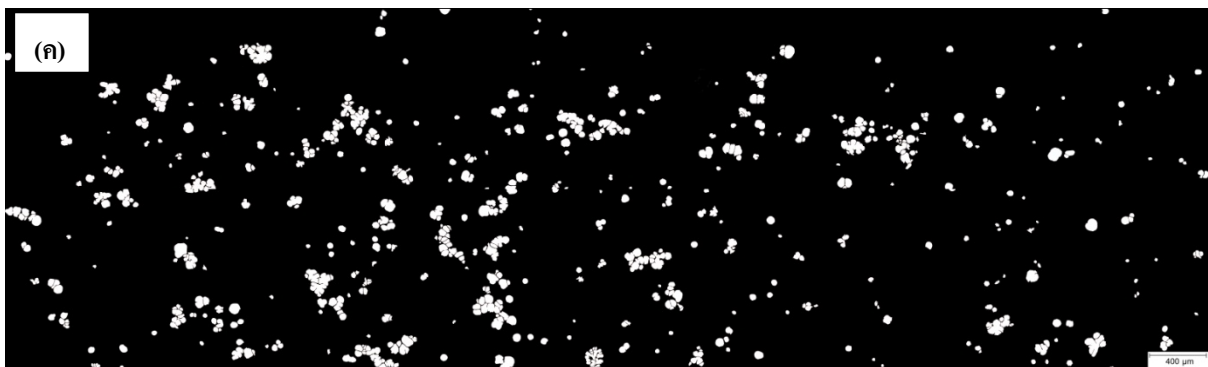
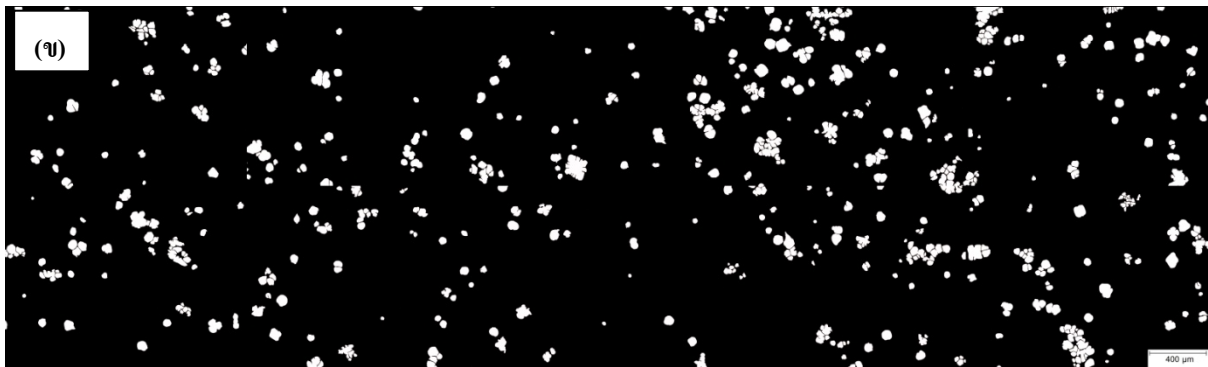
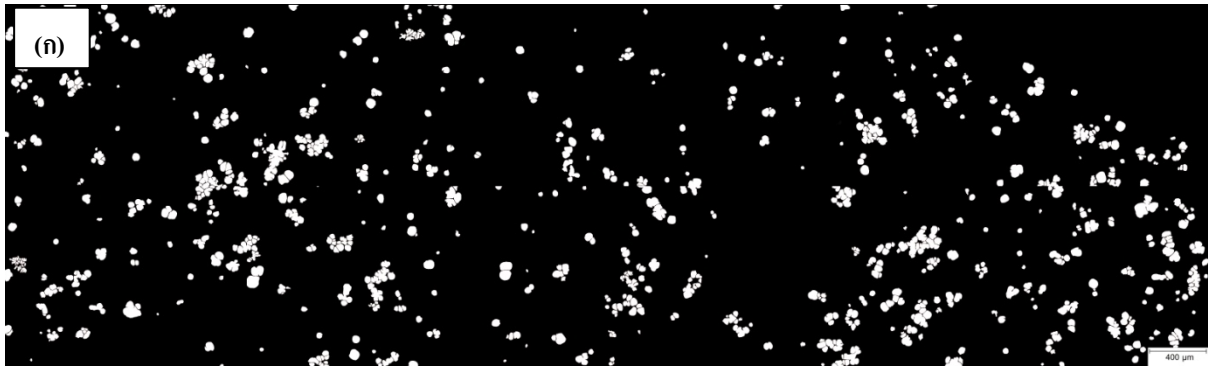
รูปที่ 3 - 70 แสดงโครงสร้างจุลภาคที่อุณหภูมิแท่งแกรไฟต์ 300°C จุ่มแท่งแกรไฟต์เป็นเวลา 10 วินาที

(ก) ส่วนบน (ข) ส่วนกลาง และ (ค) ส่วนล่าง



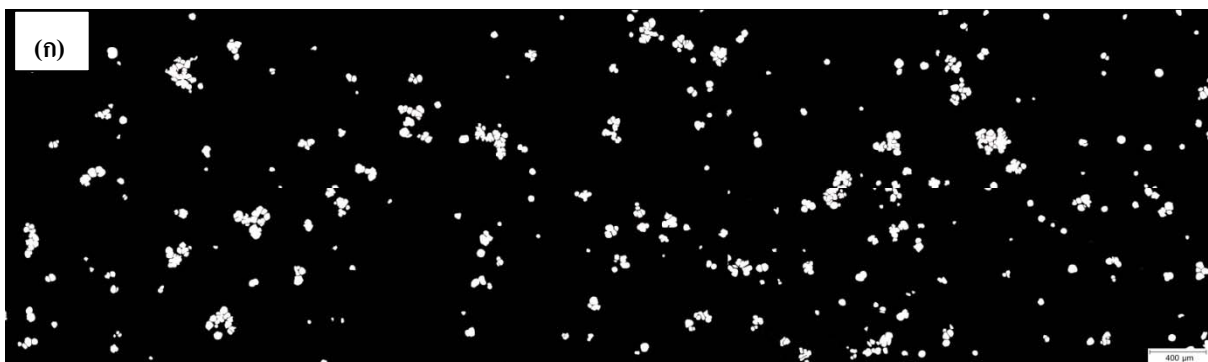
รูปที่ 3 - 71 แสดงโครงสร้างจุลภาคที่อุณหภูมิแท่งแกรไฟต์ 400°C จุ่มแท่งแกรไฟต์เป็นเวลา 10 วินาที

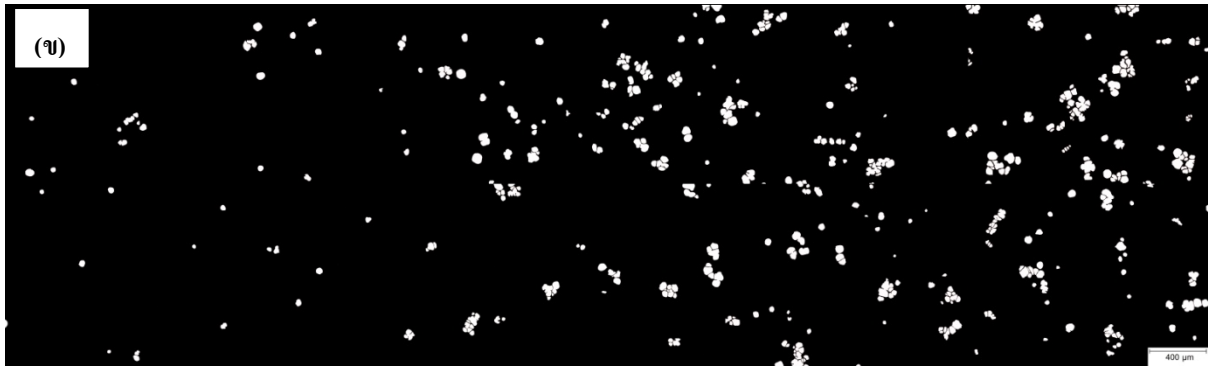
(ก) ส่วนบน (ข) ส่วนกลาง และ (ค) ส่วนล่าง



รูปที่ 3 - 72แสดงโครงสร้างจุลภาคที่อุณหภูมิแท่งแกรไฟต์ 100°C จุ่มแท่งแกรไฟต์เป็นเวลา 20วินาที

(ก) ส่วนบน (ข) ส่วนกลาง และ (ค) ส่วนล่าง

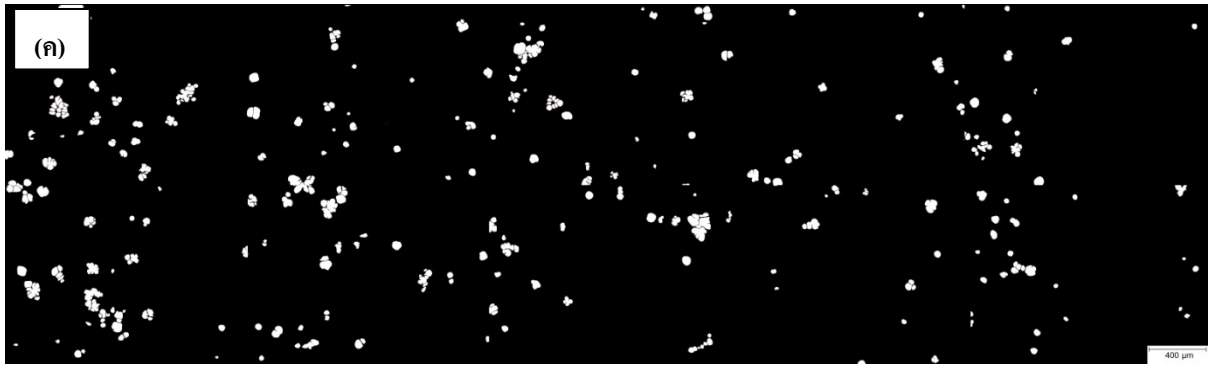




รูปที่ 3 - 73แสดงโครงสร้างจุลภาคที่อุณหภูมิแท่งแกรไฟต์ 200°C จุ่มแท่งแกรไฟต์เป็นเวลา 20วินาที

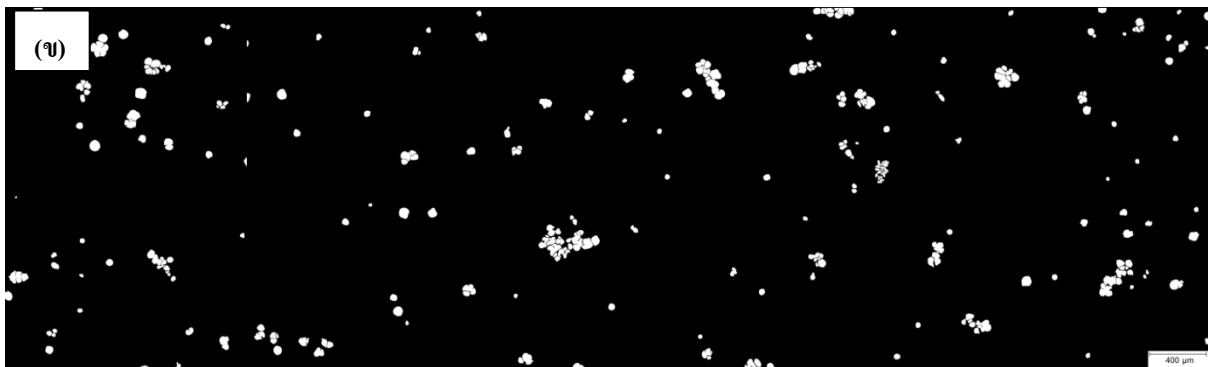
(ก) ส่วนบน (ข) ส่วนกลาง และ (ค) ส่วนล่าง





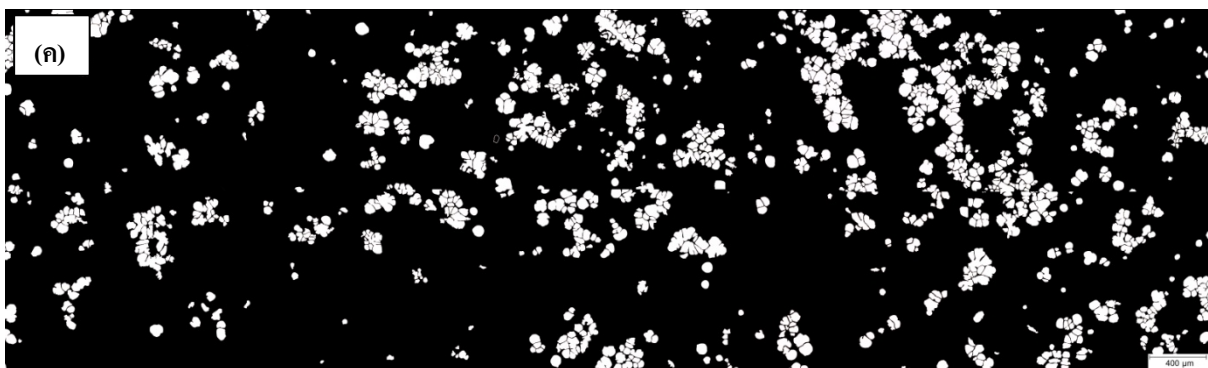
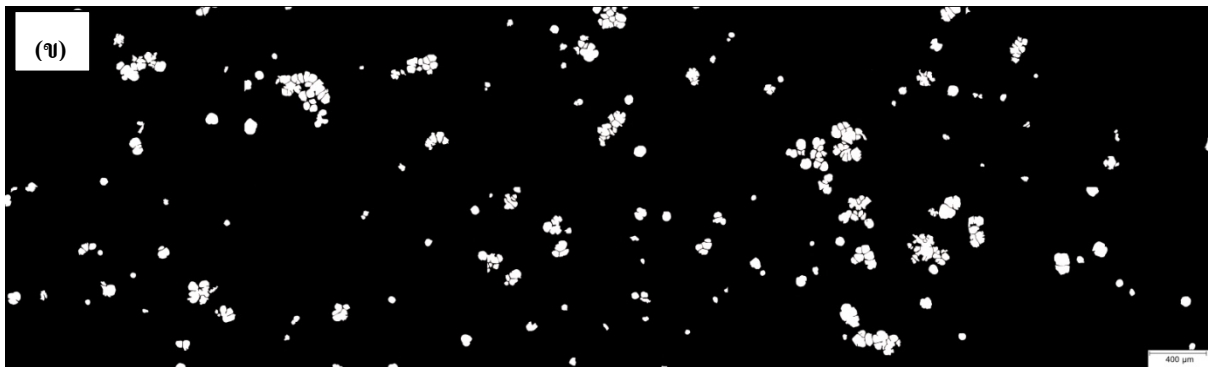
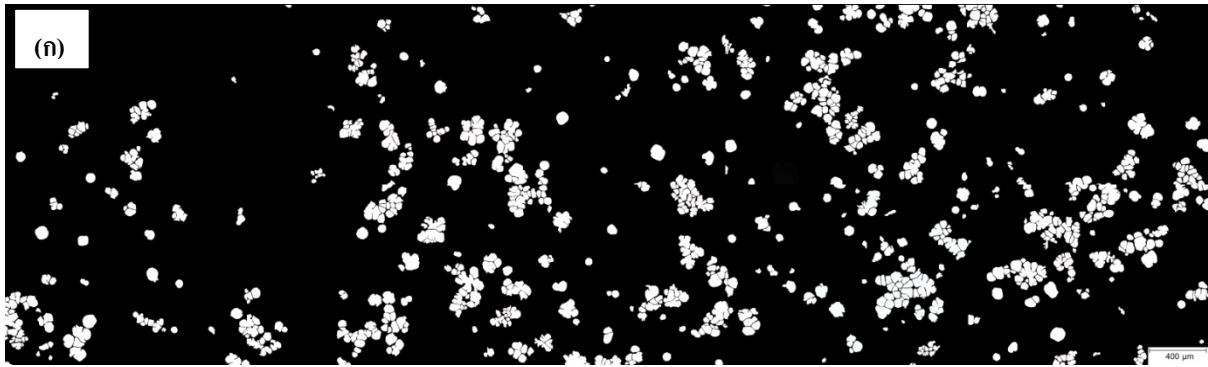
รูปที่ 3 - 74แสดงโครงสร้างจุลภาคที่อุณหภูมิแท่งแกรไฟต์ 300°C จุ่มแท่งแกรไฟต์เป็นเวลา 20วินาที

(ก) ส่วนบน (ข) ส่วนกลาง และ (ค) ส่วนล่าง



รูปที่ 3 - 75แสดงโครงสร้างจุลภาคที่อุณหภูมิแท่งแกรไฟต์ 400°C จุ่มแท่งแกรไฟต์เป็นเวลา 20วินาที

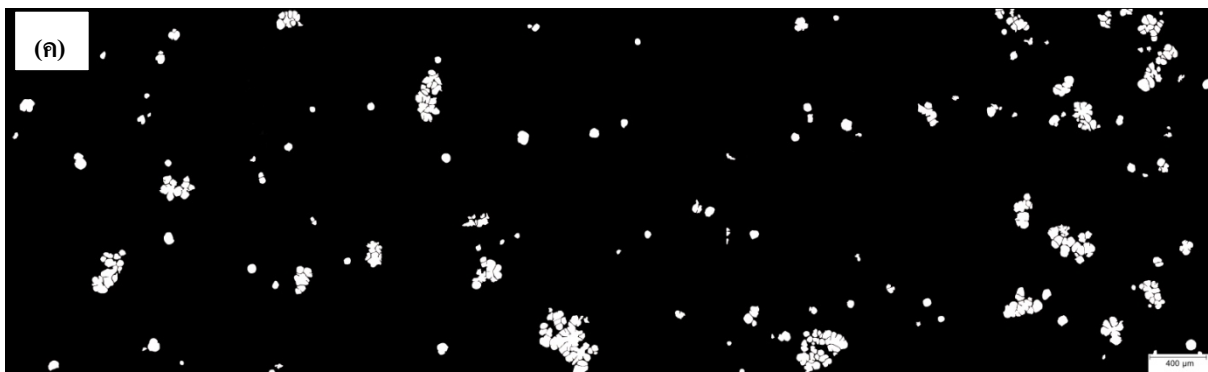
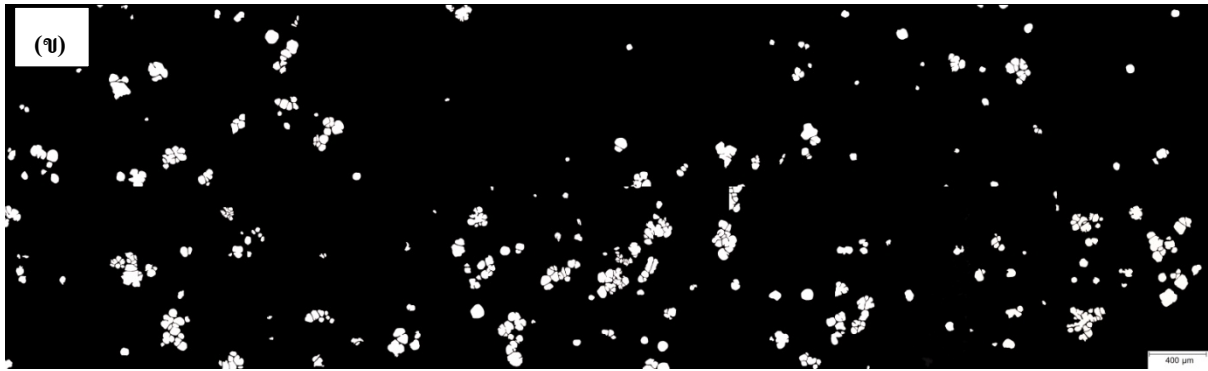
(ก) ส่วนบน (ข) ส่วนกลาง และ (ค) ส่วนล่าง



รูปที่ 3 - 76แสดงโครงสร้างจุลภาคที่อุณหภูมิแท่งแกรไฟต์ 100°C จุ่มแท่งแกรไฟต์เป็นเวลา 30วินาที

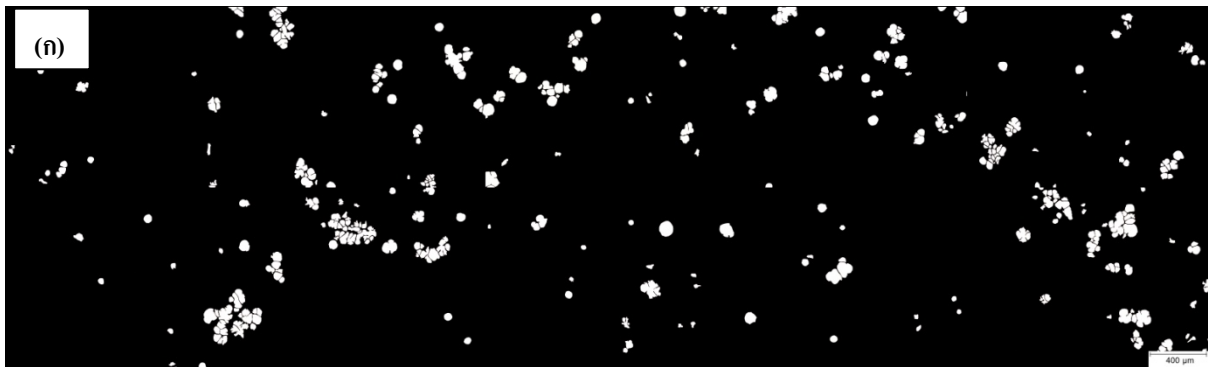
(ก) ส่วนบน (ข) ส่วนกลาง และ (ค) ส่วนล่าง

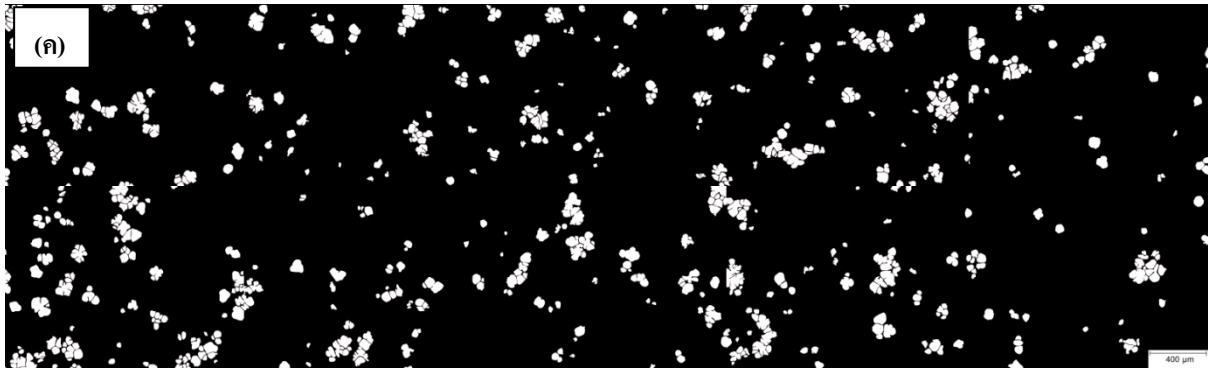




รูปที่ 3 - 77แสดงโครงสร้างจุลภาคที่อุณหภูมิแท่งแกรไฟต์200°C จุ่มแท่งแกรไฟต์เป็นเวลา 30วินาที

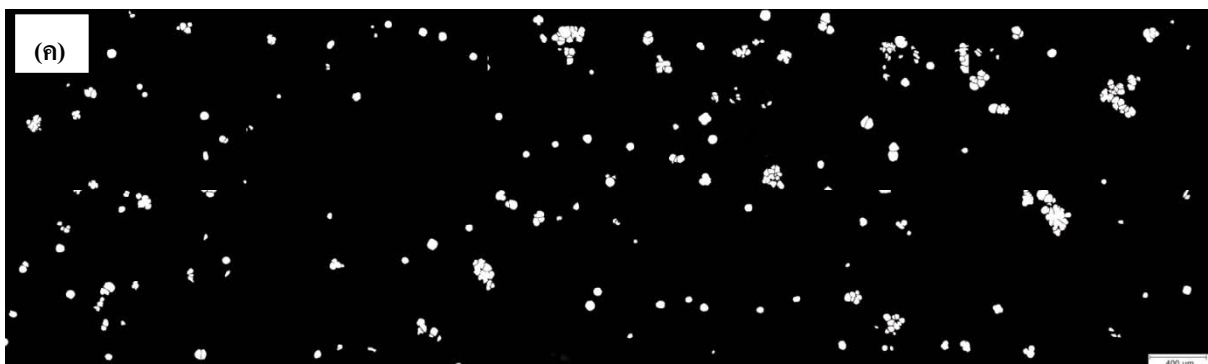
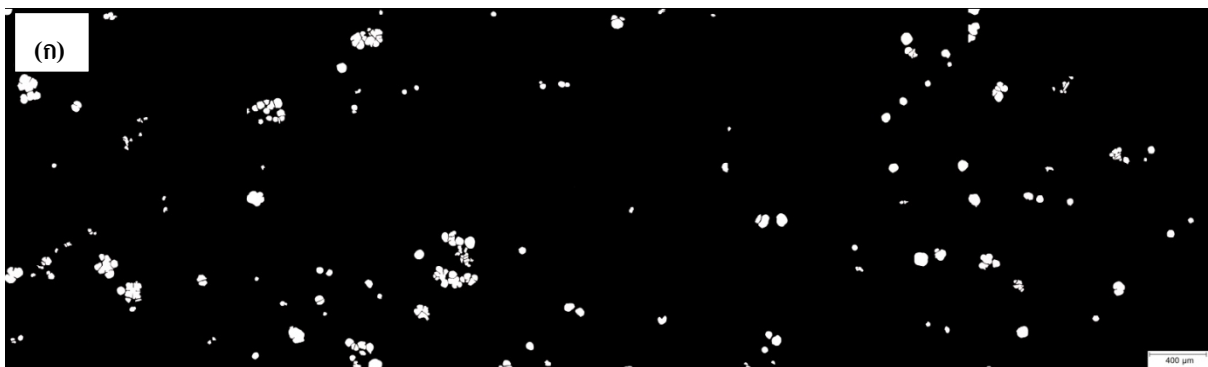
(ก) ส่วนบน (ข) ส่วนกลาง และ (ค) ส่วนล่าง





รูปที่ 3 - 78 แสดงโครงสร้างจุลภาคที่อุณหภูมิแท่งแกรไฟต์ 300°C จุ่มแท่งแกรไฟต์เป็นเวลา 30 วินาที

(ก) ส่วนบน (ข) ส่วนกลาง และ (ค) ส่วนล่าง



รูปที่ 3 - 79 แสดงโครงสร้างจุลภาคที่อุณหภูมิแท่งแกรไฟต์ 400°C จุ่มแท่งแกรไฟต์เป็นเวลา 30 วินาที

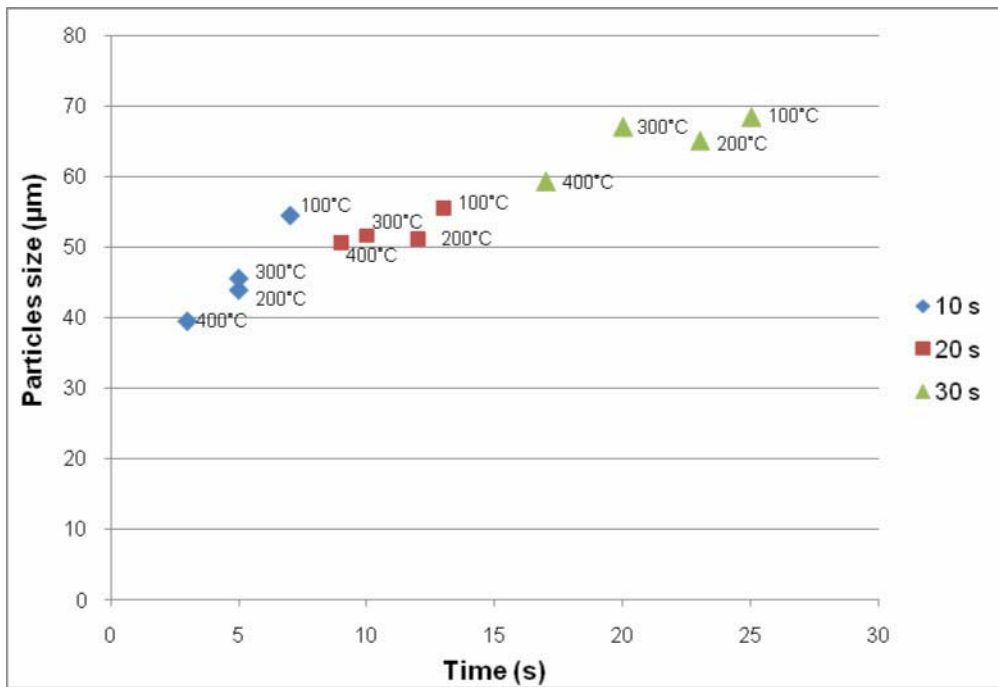
(ก) ส่วนบน (ข) ส่วนกลาง และ (ค) ส่วนล่าง

ตารางที่ 2 - 2ตารางแสดงสัดส่วนของแข็งที่อุณหภูมิและเวลาในการจุ่มแท่งแกรไฟต์แตกต่างกัน

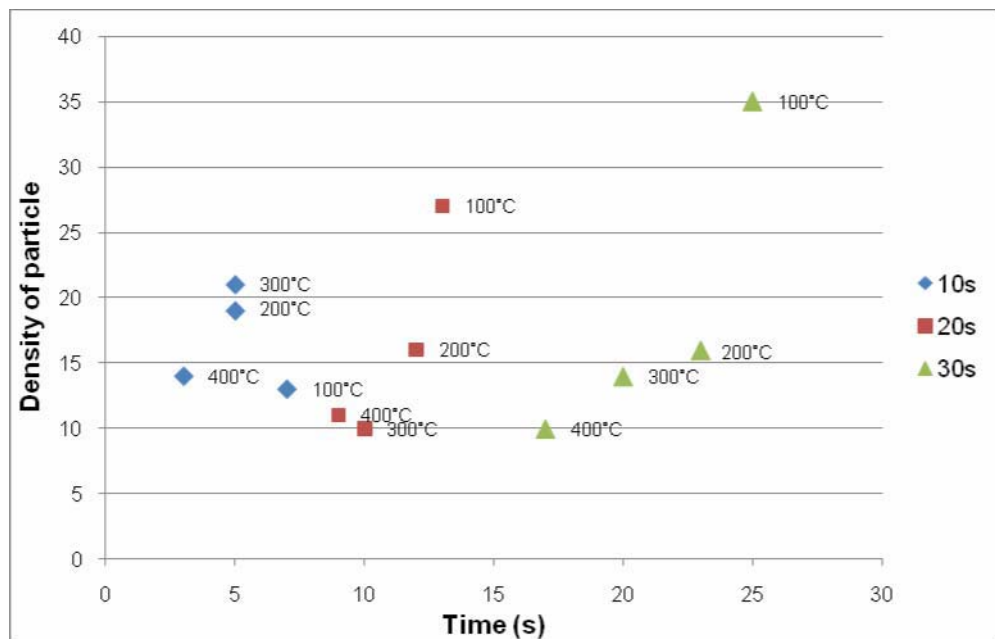
เวลาในการปล่อยฟองแก๊ส (วินาที)	สัดส่วนของแข็ง (%)				
	25°C	100°C	200°C	300°C	400°C
10 s	0.05	2.54	2.41	2.77	1.50
20 s	2.78	5.98	2.95	2.01	1.86
30 s	5.55	9.24	4.41	4.04	2.24

ตารางที่ 2 - 2แสดงอิทธิพลของอุณหภูมิแท่งแกรไฟต์ต่อสัดส่วนของแข็ง ที่การจุ่มแท่งแกรไฟต์เป็นเวลา 10 วินาที และอุณหภูมิแท่งแกรไฟต์ 100 200 300 และ 400°C มีสัดส่วนของแข็ง 2.54 2.41 2.77 และ 1.50 ตามลำดับ ที่การจุ่มแท่งแกรไฟต์เป็นเวลา 20 วินาที และอุณหภูมิแท่งแกรไฟต์ 100 200 300 และ 400°C มีสัดส่วนของแข็ง 5.98 2.95 2.01 และ 1.86 ตามลำดับ และที่เวลาในการจุ่มแท่งแกรไฟต์เป็นเวลา 30 วินาที และอุณหภูมิแท่งแกรไฟต์ 100 200 300 และ 400°C มีสัดส่วนของแข็ง 9.24 4.41 4.04 และ 2.24 ตามลำดับ จากผลการทดลอง พบว่า ที่อุณหภูมิแท่งแกรไฟต์ 100°C จะทำให้เกิดสัดส่วนของแข็งสูงกว่าที่อุณหภูมิแท่งแกรไฟต์ 25 200 300 และ 400°C เนื่องจากที่อุณหภูมิแท่งแกรไฟต์ 100°C จะไม่เกิดการเคลือบผิวแท่งแกรไฟต์ของน้ำโลหะหลังจากจุ่มแท่งแกรไฟต์ ทำให้แก๊สเกิดการไหลได้ดีขึ้น อีกทั้งแท่งแกรไฟต์ก็ไม่ได้มีอุณหภูมิสูงจนเกินไป เนื่องจากมีอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิหลอมเหลวของโลหะ ทำให้ผิวเคลือบสามารถเกิดบริเวณผิวของแท่งแกรไฟต์ได้มาก จึงเกิดสัดส่วนของแข็งเพิ่มสูงขึ้นอย่างเห็นได้ชัด แต่เมื่ออุณหภูมิแท่งแกรไฟต์สูงกว่า 100°C ซึ่งมีอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิหลอมเหลวของโลหะ ผิวเคลือบจึงสามารถเกิดขึ้นได้น้อย ทำให้สัดส่วนของแข็งลดน้อยลง

ขนาดอนุภาคที่การจุ่มแท่งแกรไฟต์เป็นเวลา 10 วินาที และอุณหภูมิแท่งแกรไฟต์ 100 200 300 และ 400°C มีสัดส่วนของแข็ง 55 44 46 และ 40 μm ตามลำดับ ที่การจุ่มแท่งแกรไฟต์เป็นเวลา 20 วินาที และอุณหภูมิแท่งแกรไฟต์ 100 200 300 และ 400°C มีสัดส่วนของแข็ง 56 51 52 และ 51 μm ตามลำดับ และที่เวลาในการจุ่มแท่งแกรไฟต์เป็นเวลา 30 วินาที และอุณหภูมิแท่งแกรไฟต์ 100 200 300 และ 400°C มีสัดส่วนของแข็ง 68 65 67 และ 59 μm ตามลำดับ ดังรูปที่ 3 - 80



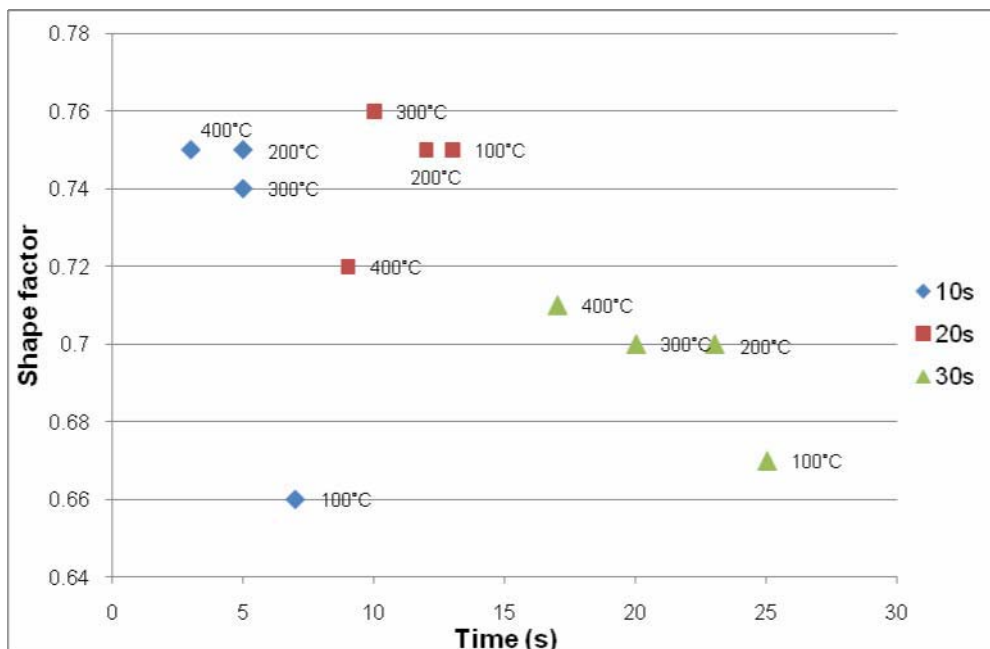
รูปที่ 3 - 80 แสดงขนาดอนุภาคที่อุณหภูมิแท่งแกรไฟต์แตกต่างกัน โดยทำการจุ่มแท่งแกรไฟต์เป็นเวลา 10 และ 30 วินาที



รูปที่ 3 - 81 แสดงจำนวนอนุภาคที่อุณหภูมิแท่งแกรไฟต์แตกต่างกัน โดยทำการจุ่มแท่งแกรไฟต์เป็นเวลา 10 และ 30 วินาที

รูปที่ 3 - 81 แสดงจำนวนอนุภาคที่การจุ่มแท่งแกรไฟต์เป็นเวลา 10 วินาที และอุณหภูมิแท่งแกรไฟต์ 100 200 300 และ 400°C มีสัดส่วนของแข็ง 131921 และ 14 ตามลำดับ ที่การจุ่มแท่งแกรไฟต์เป็น

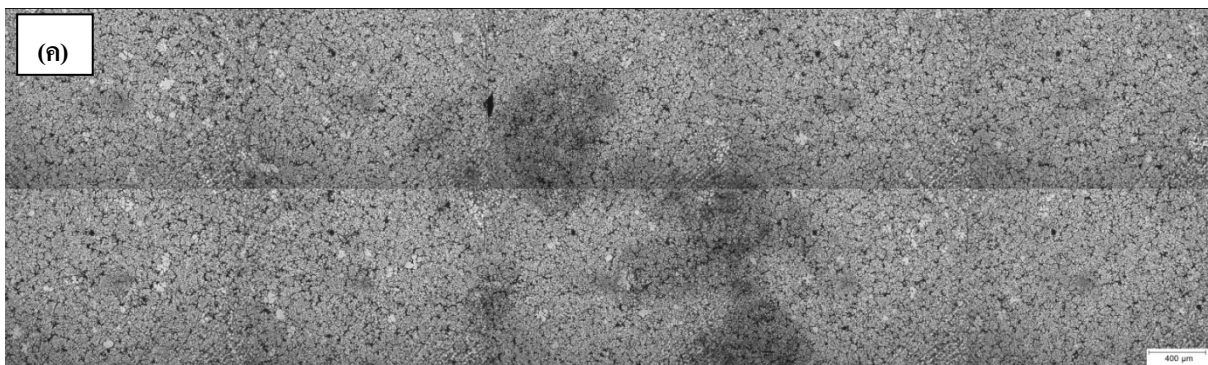
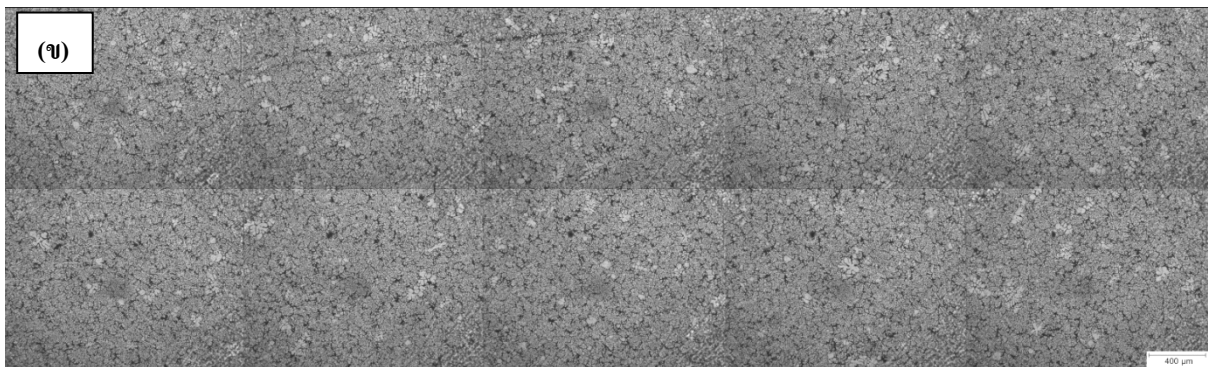
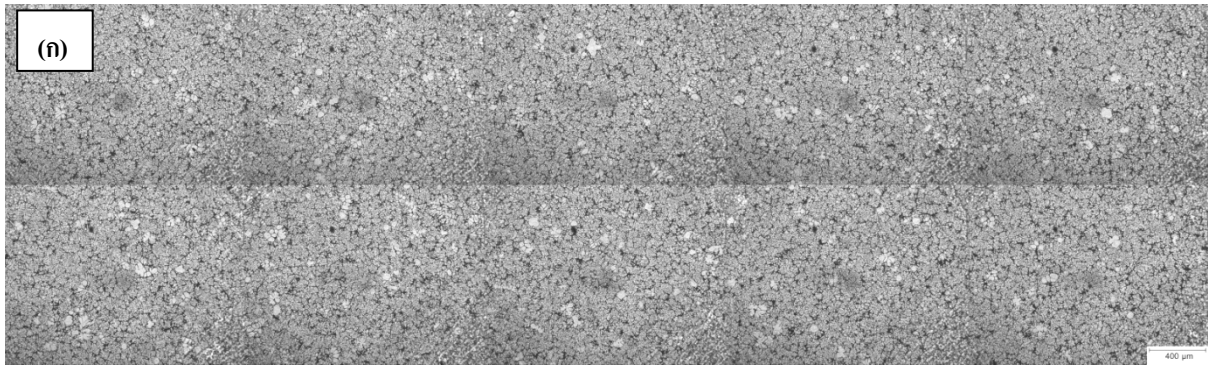
เวลา 20 วินาที และอุณหภูมิแท่งแกรไฟต์ 100 200 300 และ 400°C มีสัดส่วนของแข็ง 271610 และ 11 ตามลำดับ และที่เวลาในการจุ่มแท่งแกรไฟต์เป็นเวลา 30 วินาที และอุณหภูมิแท่งแกรไฟต์ 100 200 300 และ 400°C มีสัดส่วนของแข็ง 351614 และ 10 ตามลำดับ ลักษณะของอนุภาคที่การจุ่มแท่งแกรไฟต์เป็นเวลา 10 วินาที และอุณหภูมิแท่งแกรไฟต์ 100 200 300 และ 400°C มีสัดส่วนของแข็ง 0.66 0.75 0.74 และ 0.75 ตามลำดับ ที่การจุ่มแท่งแกรไฟต์เป็นเวลา 20 วินาที และอุณหภูมิแท่งแกรไฟต์ 100 200 300 และ 400°C มีสัดส่วนของแข็ง 0.75 0.75 0.76 และ 0.72 ตามลำดับ และที่เวลาในการจุ่มแท่งแกรไฟต์เป็นเวลา 30 วินาที และอุณหภูมิแท่งแกรไฟต์ 100 200 300 และ 400°C มีสัดส่วนของแข็ง 0.67 0.70 0.70 และ 0.71 ตามลำดับ ดังรูปที่ 3 - 82



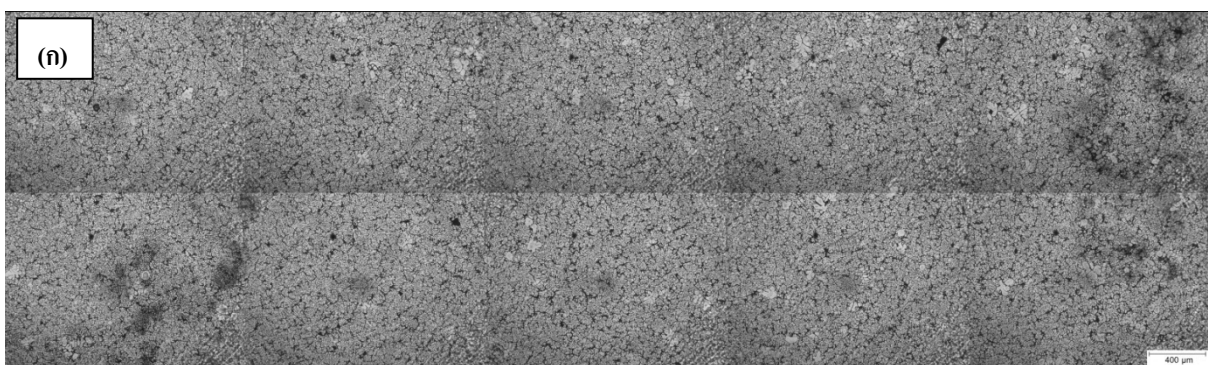
รูปที่ 3 - 82แสดงลักษณะของอนุภาคที่อุณหภูมิแท่งแกรไฟต์แตกต่างกัน โดยทำการจุ่มแท่งแกรไฟต์เป็นเวลา 10 20 และ 30 วินาที

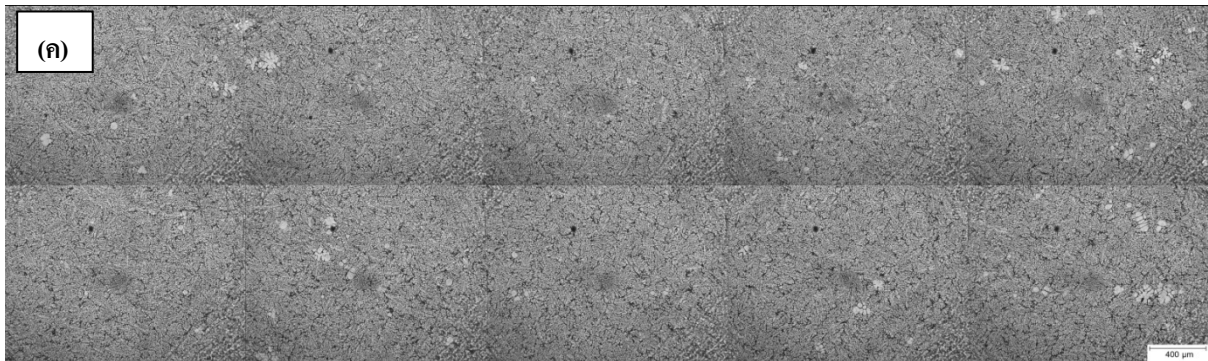
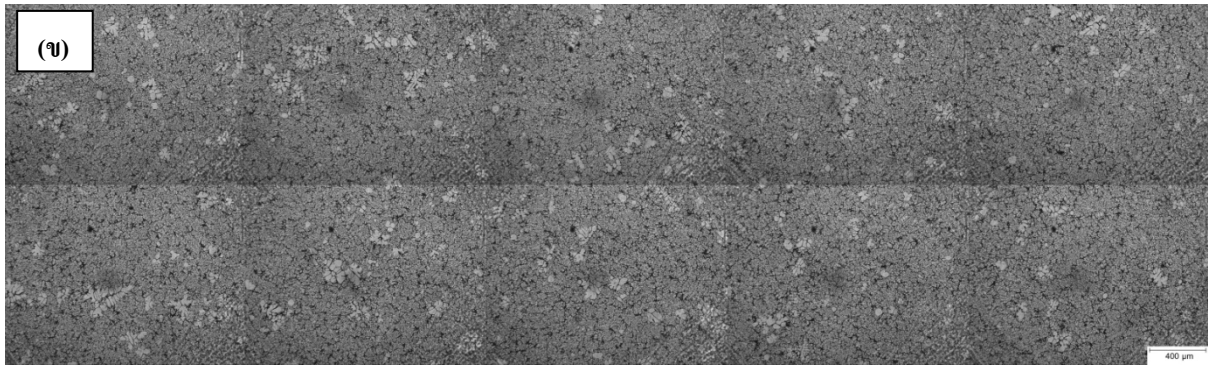
3.3 การศึกษาอิทธิพลของอัตราการเย็นตัว สภาวะของการพา และการปรับปรุงโครงสร้างทางจุลภาค

ในขั้นตอนนี้จะนำรูปโครงสร้างจุลภาคที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสงมาวิเคราะห์ผลด้วยโปรแกรม Image Tool ดังรูปที่ 3 - 83-รูปที่ 3 - 86มาแยกเฟสระหว่างของแข็งกับของเหลวให้ชัดเจนโดยใช้คำสั่ง Threshold ของโปรแกรมตกแต่งภาพซึ่งผลการแยกเฟสแสดงในรูปที่ 3 - 87-รูปที่ 3 - 90



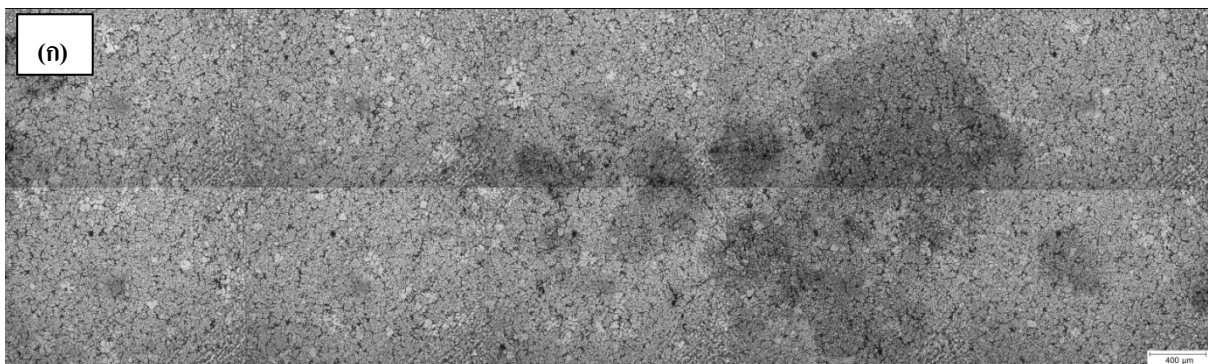
รูปที่ 3 - 83แสดงโครงสร้างจุลภาคที่ความดันในการปล่อยแก๊ส 4 bar
โดยจุ่มแท่งแกรไฟต์เป็นเวลา 10วินาที (ก) ส่วนบน (ข) ส่วนกลาง และ (ค) ส่วนล่าง

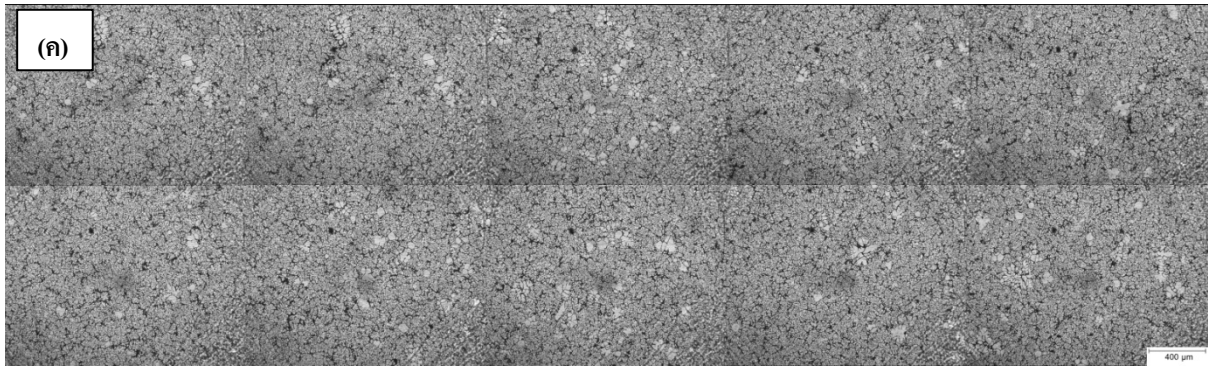




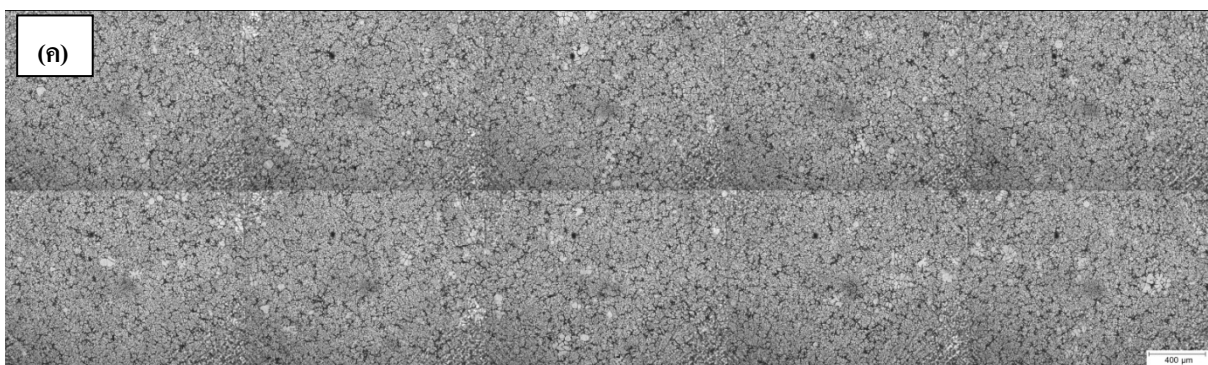
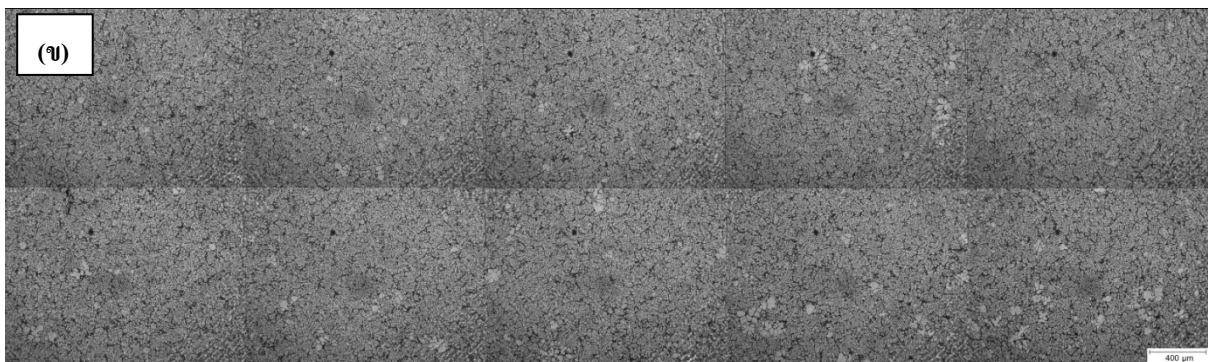
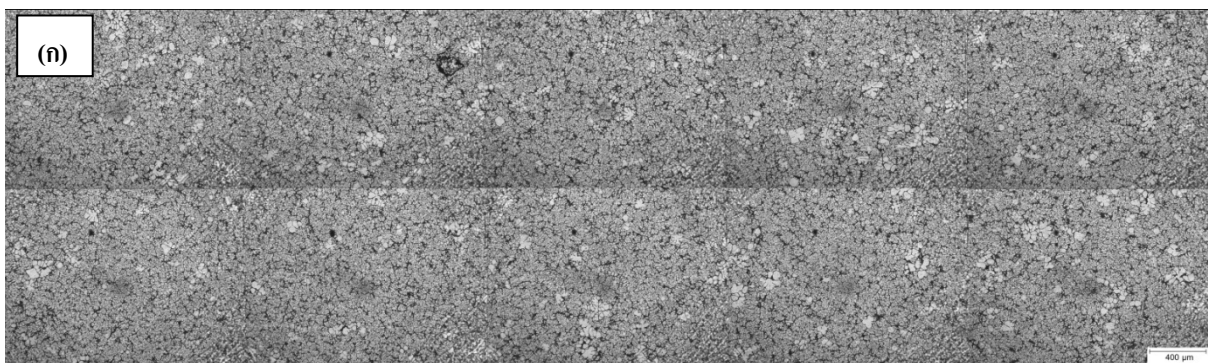
รูปที่ 3 - 84แสดงโครงสร้างจุลภาคที่มี cooling โดยจุ่มแท่งแกรไฟต์เป็นเวลา 10 วินาที

(ก) ส่วนบน (ข) ส่วนกลาง และ (ค) ส่วนล่าง

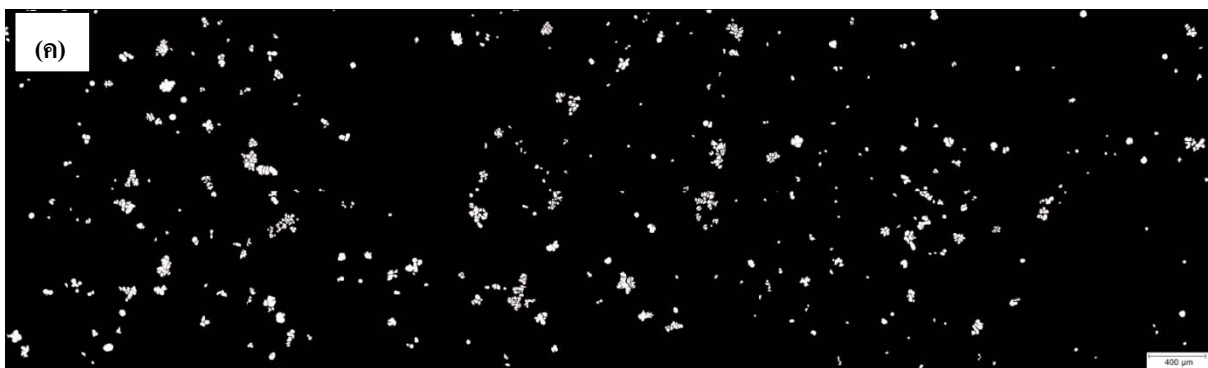
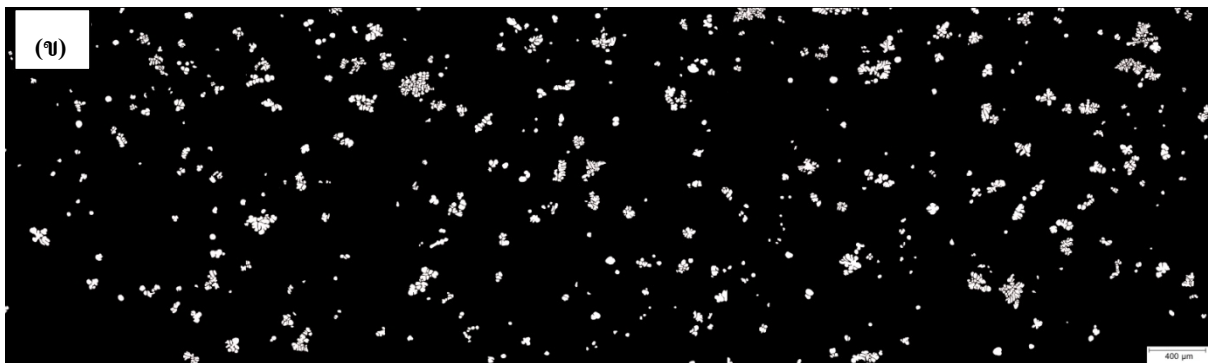
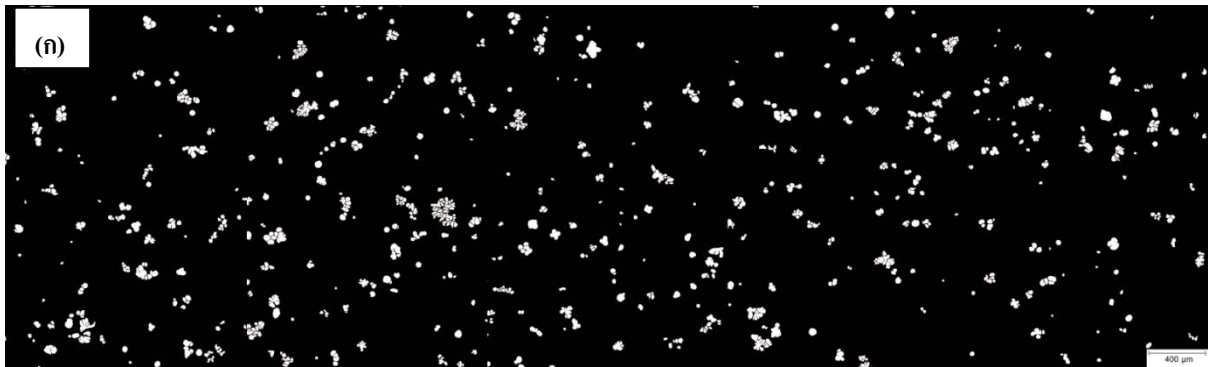




รูปที่ 3 - 85 แสดงโครงสร้างจุลภาคที่ความดันในการปล่อยฟองแก๊ส 4 bar และมี cooling โดยจุ่มแท่งแกรไฟต์เป็นเวลา 10 วินาที (ก) ส่วนบน (ข) ส่วนกลาง และ (ค) ส่วนล่าง

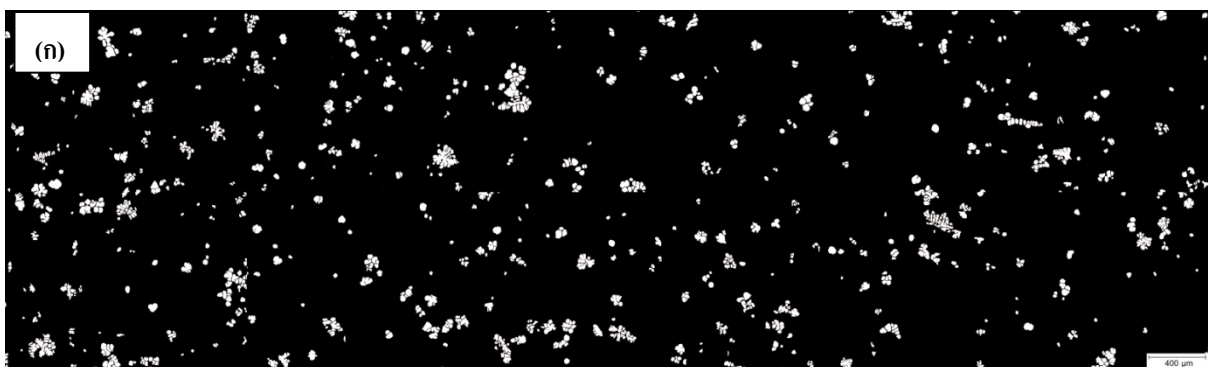


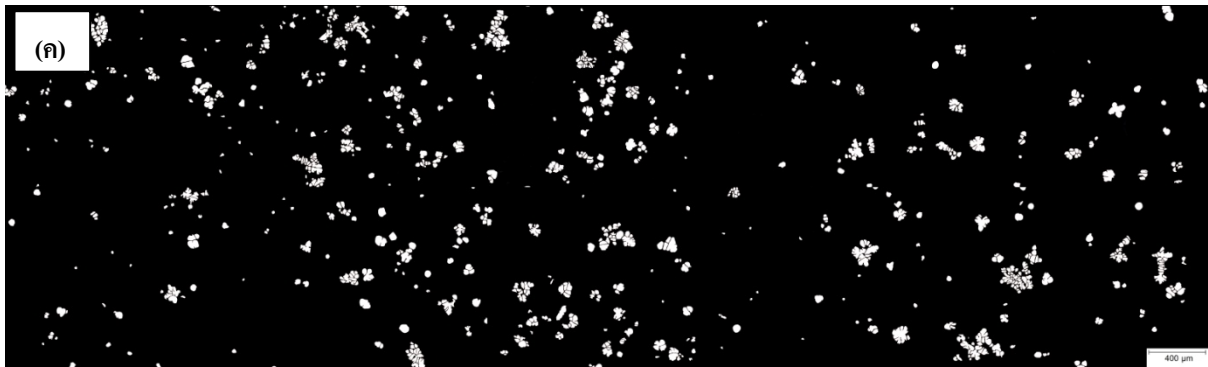
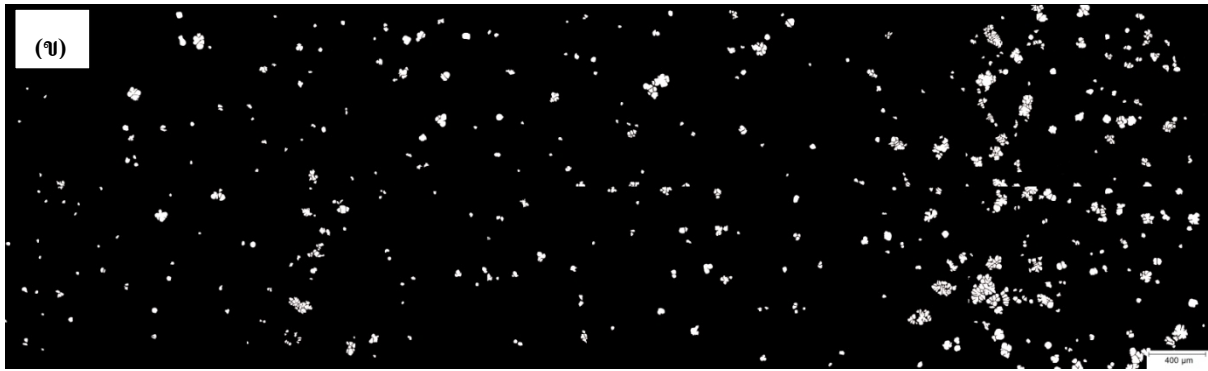
รูปที่ 3 - 86 แสดงโครงสร้างจุลภาคที่เติม TiB_2 โดยจุ่มแท่งแกรไฟต์เป็นเวลา 10 วินาที (ก) ส่วนบน (ข) ส่วนกลาง และ (ค) ส่วนล่าง



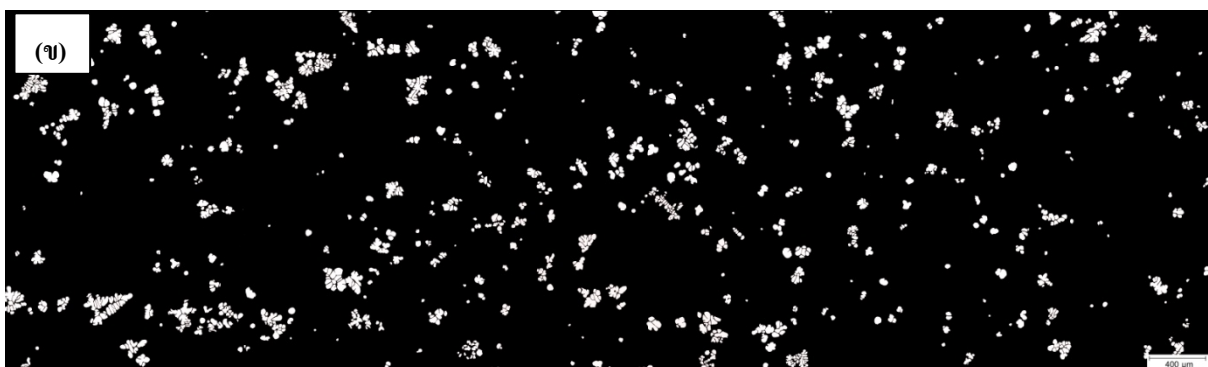
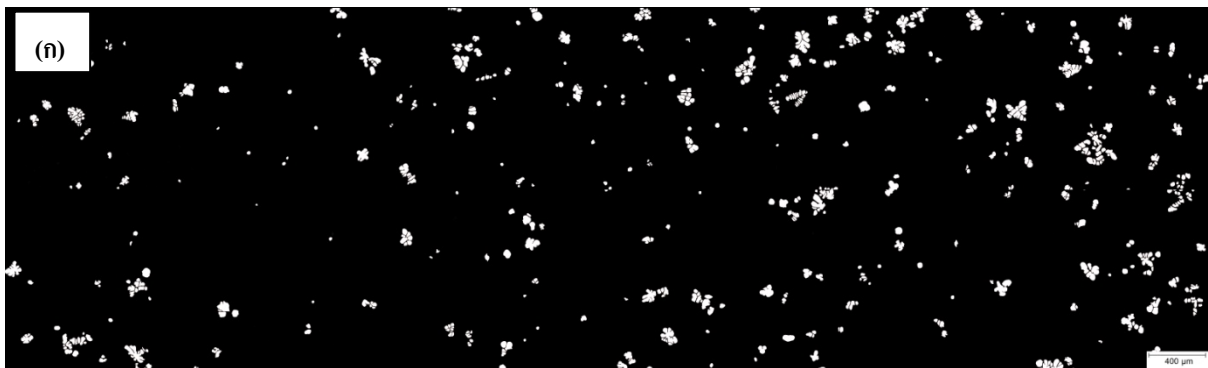
รูปที่ 3 - 87แสดงโครงสร้างจุลภาคที่ความดันในการปล่อยแก๊ส 4 bar

(ก) โดยจุ่มแท่งแกรไฟต์เป็นเวลา 10วินาที (ก) ส่วนบน (ข) ส่วนกลาง และ (ค) ส่วนล่าง





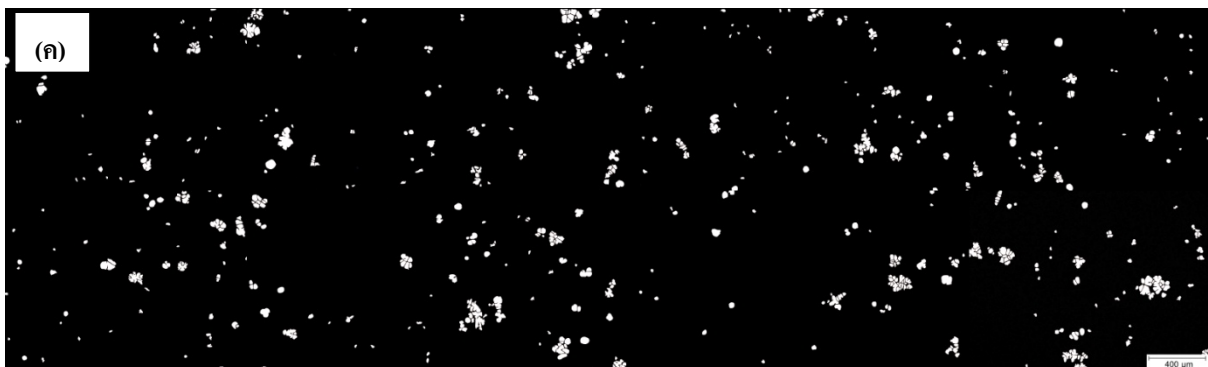
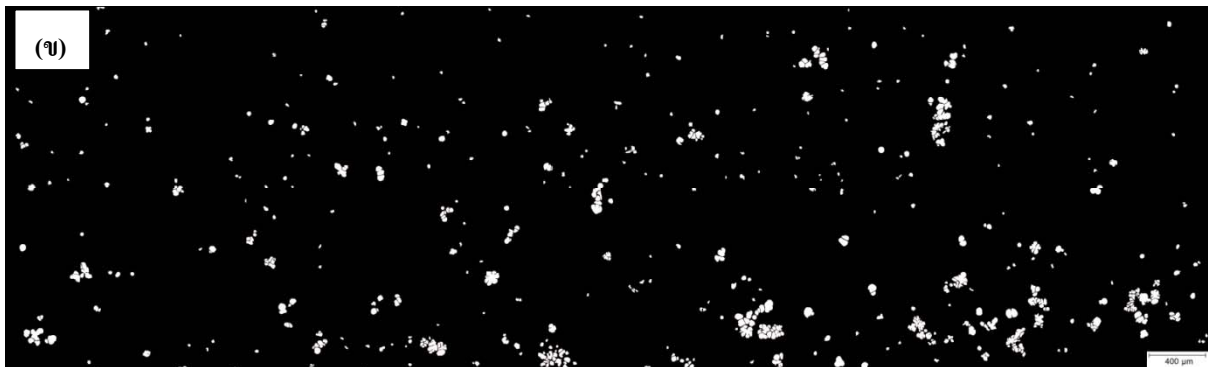
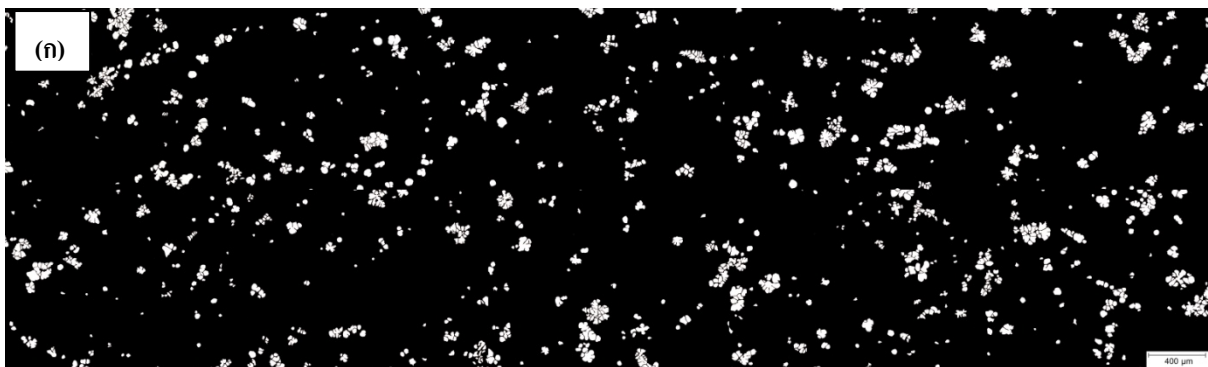
รูปที่ 3 - 88แสดงโครงสร้างจุลภาคที่ความดันในการปล่อยฟองแก๊ส 4 bar และมี cooling โดยจุ่มแท่งแกรไฟต์เป็นเวลา 10วินาที (ก) ส่วนบน (ข) ส่วนกลาง และ (ค) ส่วนล่าง





รูปที่ 3 - 89 แสดงโครงสร้างจุลภาคที่มี cooling โดยจุ่มแท่งแกรไฟต์เป็นเวลา 10 วินาที

(ก) ส่วนบน (ข) ส่วนกลาง และ (ค) ส่วนล่าง



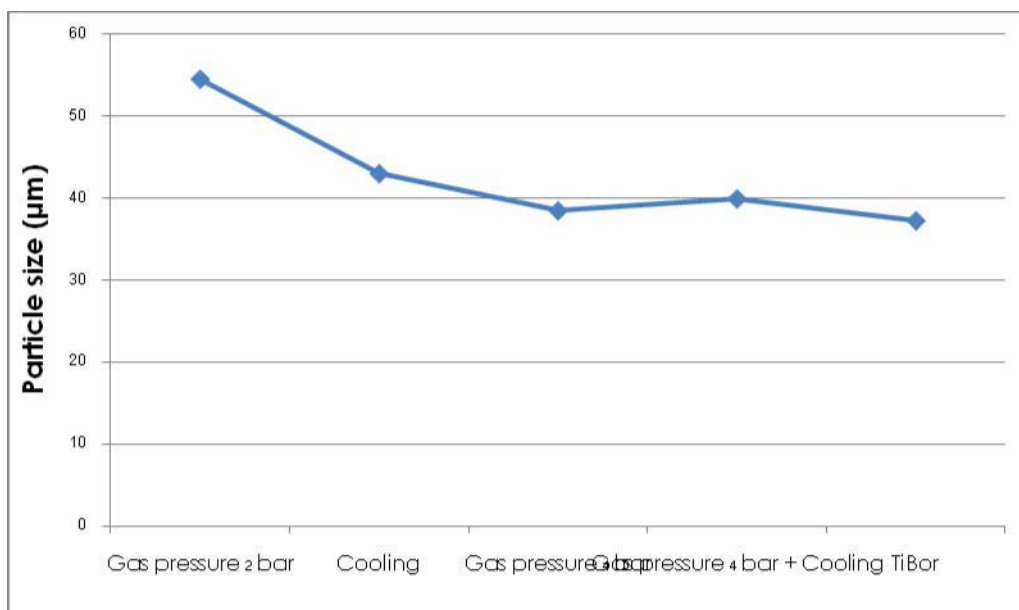
รูปที่ 3 - 90 แสดงโครงสร้างจุลภาคที่เติม TiB_2 โดยจุ่มแท่งแกรไฟต์เป็นเวลา 10 วินาที

(ก) ส่วนบน (ข) ส่วนกลาง และ (ค) ส่วนล่าง

ตารางที่ 2 - 3 ตารางแสดงสัดส่วนของแข็งที่อิทธิพลแตกต่างกัน โดยจุ่มแท่งแกรไฟต์เป็นเวลา 10 วินาที

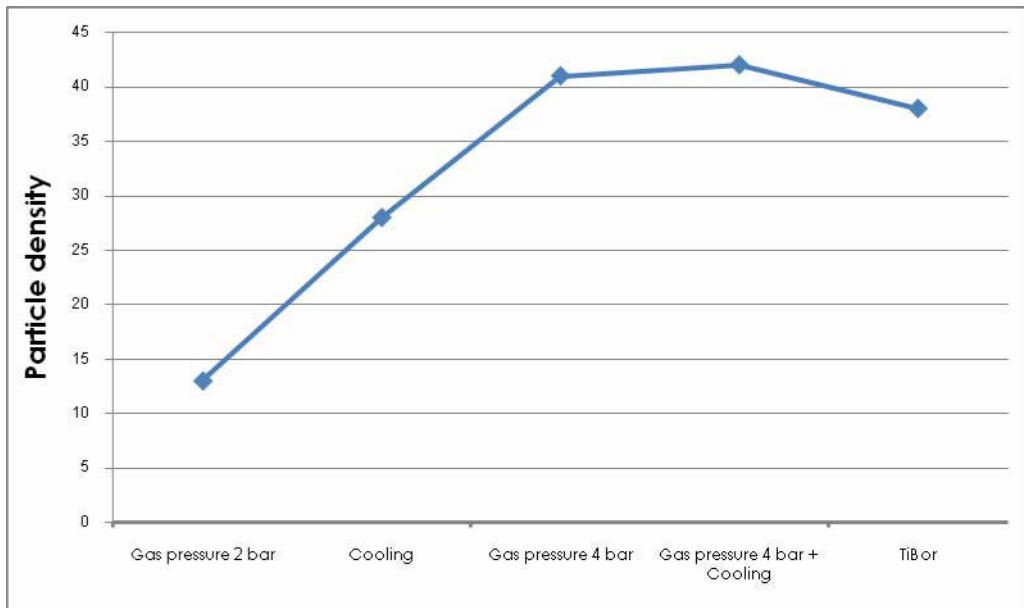
อิทธิพลต่าง ๆ	สัดส่วนของแข็ง (%)
ความดันในการปล่อยฟองแก๊ส 4 bar	3.6
มี Cooling	3.3
ความดันในการปล่อยฟองแก๊ส 4 bar และมี Cooling	4.0
เติม TiB_2	3.8

เมื่อทำการปล่อยฟองแก๊สเป็นเวลา 10 วินาที ที่อิทธิพลแตกต่างกัน คือ มี Cooling ความดันในการปล่อยฟองแก๊ส 4 bar เติม TiB_2 และความดันในการปล่อยฟองแก๊ส 4 bar และมี Cooling จะมีสัดส่วนของแข็ง 3.3 3.6 3.8 และ 4.0 ตามลำดับ ดังตารางที่ 2 - 3 จากผลการทดลองพบว่า ที่เวลาในการจุ่มแท่งแกรไฟต์เดียวกัน ที่ความดันในการปล่อยฟองแก๊ส 4 bar และมี Cooling จะให้สัดส่วนของแข็งเพิ่มสูงขึ้นอย่างเห็นได้ชัดจากรูปที่ 3 - 91 พบว่า เมื่อมี Cooling ความดันในการปล่อยแก๊ส 4 bar ความดันในการปล่อยแก๊ส 4 bar และมี Cooling และเติม TiB_2 จะมีขนาดอนุภาค 43 38 40 และ 37 ไมครอน ตามลำดับ ที่ความดันในการปล่อยฟองแก๊ส 4 bar และเติม TiB_2 อนุภาคจะมีขนาดที่เล็กลงอย่างเห็นได้ชัดเมื่อเปรียบเทียบกับความดันในการปล่อยฟองแก๊ส 2 bar

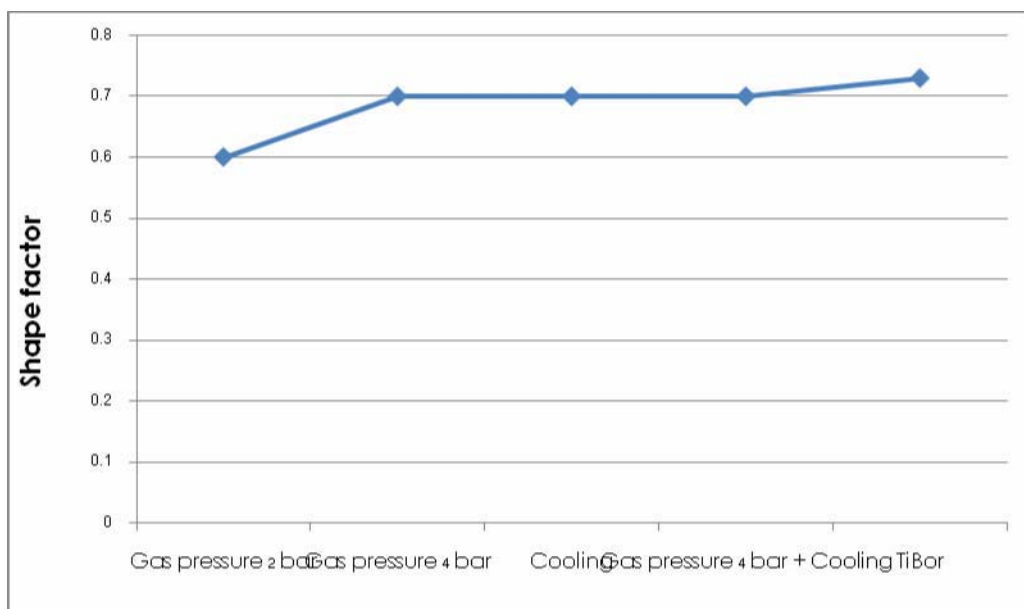


รูปที่ 3 - 91 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดอนุภาคกับอิทธิพลที่แตกต่างกัน

ที่อิทธิพลของ Cooling ความดันในการปล่อยแก๊ส 4 bar ความดันในการปล่อยแก๊ส 4 bar และมี Cooling และเติม TiB_2 จะมีความหนาแน่นของอนุภาค 28 41 42 และ 38 อนุภาคต่อตารางมิลลิเมตร ตามลำดับ ดังรูปที่ 3 - 92 และมีลักษณะของอนุภาค 0.7 0.7 0.7 และ 0.73 ตามลำดับ ดังรูปที่ 3 - 93 ตัวเติม TiB_2 จะช่วยลดขนาดของอนุภาคและทำให้อนุภาคมีความกลมเพิ่มขึ้น เนื่องจากเกิดการนิวคลีเอชันจากเนื้อที่แตกต่างกัน และแรงจากการพาจะทำให้อนุภาคกระจายสู่เป้าหมาย



รูปที่ 3 - 92 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของอนุภาคกับอิทธิพลที่แตกต่างกัน



รูปที่ 3 - 93 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างลักษณะของอนุภาคกับอิทธิพลที่แตกต่างกัน

บทที่ 4

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

สรุปผลการทดลอง

ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาการเกิดโครงสร้างเกรนก่อนกลมในระยะเริ่มต้นในกระบวนการผลิตโลหะกึ่งของแข็งแบบรีโอแคสติง โดยใช้เทคนิค Rapid Quenching Mold ซึ่งผลการศึกษาสามารถสรุปได้ ดังนี้

- 1) โครงสร้างจุลภาคในระยะเริ่มต้นของกระบวนการผลิตโลหะกึ่งของแข็งแบบรีโอแคสติง ประกอบด้วย เกรนก่อนกลม เกรน equiaxed และเดนไดรต์
- 2) ในระยะเริ่มต้นของการปล่อยฟองแก๊ส จะเกิดอนุภาคน้ำขนาดเล็ก ซึ่งอุณหภูมิของน้ำโลหะบริเวณต่างๆ จะมีบางบริเวณที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิหลอมเหลว จึงทำให้เกิดการหลอมกลับของอนุภาคของแข็ง แต่เมื่ออุณหภูมิของน้ำโลหะลดลงต่ำกว่าอุณหภูมิหลอมเหลวจะทำให้อนุภาคของแข็งเหล่านั้นสามารถดำรงอยู่ได้
- 3) เมื่อเวลาในการปล่อยฟองแก๊สเพิ่มขึ้นทำให้อนุภาคเกรนก่อนกลมเพิ่มขึ้น เนื่องจากเกิดการแตกหักของกิ่งเดนไดรต์โดยกระบวนการหลอมบริเวณโคน แต่เมื่อเวลาในการปล่อยฟองแก๊สเพิ่มสูงขึ้นจะเกิดโครงสร้างเกรนก่อนกลมคงที่ เนื่องจากเกิดการเชื่อมติดกันของอนุภาคเกรนก่อนกลม
- 4) อุณหภูมิของแท่งแกรไฟต์จะส่งผลต่อการเกิดโครงสร้างเกรนก่อนกลม หากมีอุณหภูมิต่ำจะทำให้จำนวนอนุภาคของแข็งเกิดได้น้อย เนื่องจากเกิดการเคลือบของน้ำโลหะที่แท่งแกรไฟต์ และหากมีอุณหภูมิสูงเกินไปจะทำให้ความสามารถในการสร้างอนุภาคของแข็งลดน้อยลงเช่นกัน
- 5) การเพิ่มความดันในการปล่อยฟองแก๊สและมี cooling จะทำให้การเกิดอนุภาคของแข็งเพิ่มสูงขึ้นและมีขนาดเล็กลง
- 6) การเติม TiB_2 จะทำให้เกิดอนุภาคของแข็งที่มีขนาดเล็กลงจำนวนเพิ่มมากขึ้นและอนุภาคของแข็งมีลักษณะความกลมสูงขึ้น เนื่องจากเกิดการนิวคลีเอชันจากเนื้อที่แตกต่างกัน
- 7) เทคนิค Rapid Quenching Mold สามารถวิเคราะห์กลไกการเกิดและวิวัฒนาการของโครงสร้างเกรนก่อนกลม (Spheroidal grain)

ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยในอนาคต

งานวิจัยเพิ่มเติมในการศึกษาการเกิดโครงสร้างเกรนก่อนกลมในระยะเริ่มต้นในกระบวนการผลิตโลหะกึ่งของแข็งแบบรีโอแคสติง ในอนาคตมีดังนี้

- 1) ศึกษาการเกิดโครงสร้างเกรนก่อนกลมในระยะเริ่มต้นกับโลหะผสมชนิดอื่น ๆ

2) วิเคราะห์แบบ 3D เพื่อศึกษาการเกิดโครงสร้างเกรนก่อนกลมในระยะเริ่มต้น

เอกสารอ้างอิง

- [1] Campbell J. *Castings*. Butterworth-Heinemann, Oxford, 1991.
- [2] The North American Die Casting Association. <http://www.nadca.org>.
- [3] Vinarcik E. *High Integrity Die Casting Processes*. Wiley-Interscience, 2002.
- [4] UBE Machinery, Inc. <http://www.ubemachinery.com/diecasting.html>.
- [5] Martinez R. “Formation and Processing of Rheocast Microstructures.” Ph.D. Thesis, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA, USA, 2004.
- [6] Vforge, Inc. <http://www.vforge.com/>
- [7] deFigueredo A, Ed. *Science and Technology of Semi-Solid Metal Processing*, The North American Die Casting Association, 2001.
- [8] Jorstad J, *et al.*, Proceedings of the 8th International Conference on Semi-Solid Processing of Alloys and Composites, Limassol, Cyprus, September 21–23, 2004.
- [9] Yurko J., *et al.* Proceedings of the 8th International Conference on Semi-Solid Processing of Alloys and Composites, Limassol, Cyprus, September 21–23, 2004.
- [10] Wannasin J, *et al.*, ScriptaMaterialia. 55 (2006) 115-118.
- [11] Iqbal N, *et al.*, Acta Mater. 53 (2005) 2875-2880.
- [12] Nafisi N and Ghomashchi R, Mater. Sci. Eng. 437A (2006) 388-395.
- [13] Wu S, *et al.*, Scripta Mater. 58 (2008) 556-559.
- [14] Jian X, *et al.*, Mater. Letters. 59 (2005) 190-193.
- [15] Li T, *et al.*, Acta Mater. 54 (2006) 4815-4824.
- [16] Flemings MC. *Solidification Processing*. McGraw-Hill, 1974.
- [17] Yang Z, *et al.*, Metall. Mater. Trans. A. 36A (2005) 2785-2792.
- [18] Das A, *et al.*, ActaMaterialia. 50 (2002) 4571-4585.
- [19] Jackson KA, *et al.*, Trans. Metall. Soc. AIME. 236 (1966) 149-158.
- [20] Hellawell A, *et al.*, JOM (1997) 18-20.
- [21] Ji S. J. Mater. Sci. 38 (2003) 1559-1564.
- [22] Ruvalcaba D, *et al.*, Acta Mater. 55 (2007) 4287-4292.