รายงานวิจัย

เรื่อง

การพัฒนาโครงสร้างเกรนต้านทานการสึกหรอของชิ้นงานความแข็งสูงพิเศษด้วยกระบวนการอบผนึก

Development of wear resistance microstructure of hardmetals by sintering process

ผู้จัดทำวิจัย

นายสหรัตน์ วงษ์ศรีษะ หัวหน้าโครงการวิจัย

นายประสิทธิ์ แพงเพชร ผู้ร่วมวิจัย

รายงานวิจัยนี้ เป็นการวิจัยสาขาวิชา กลุ่ม สาขาวิศวกรรมศาสตร์และอุตสาหกรรมวิจัย

สาขาวิชาวิศวกรรมการจัดการอุตสาหกรรมเพื่อความยั่งยืน

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

ปีงบประมาณ 2557

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

รายงานวิจัย

เรื่อง

การพัฒนาโครงสร้างเกรนต้านทานการสึกหรอของชิ้นงานความแข็งสูงพิเศษ ด้วยกระบวนการอบผนึก

Development of wear resistance microstructure of hardmetals by sintering process

ผู้จัดทำวิจัย

นายสหรัตน์ วงษ์ศรีษะ หัวหน้าโครงการวิจัย

นายประสิทธิ์ แพงเพชร ผู้ร่วมวิจัย

รายงานวิจัยนี้ เป็นการวิจัยสาขาวิชา กลุ่ม สาขาวิศวกรรมศาสตร์และอุตสาหกรรมวิจัย

สาขาวิชาวิศวกรรมการจัดการอุตสาหกรรมเพื่อความยั่งยืน

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

ปีงบประมาณ 2557

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

โครงการวิจัยเรื่อง **การพัฒนาโครงสร้างเกรนต้านทานการสึกหรอของชิ้นงานความแข็งสูงพิเศษด้วยกระบวนการอบผนึก**

หัวหน้าโครงการวิจัย **ผศ.สหรัตน์ วงษ์ศรีษะ**
ผู้ร่วมวิจัย **อาจารย์ประสิทธิ์ แพงเพชร**

สาขาวิชา วิศวกรรมการจัดการอุตสาหกรรมเพื่อความยั่งยืน
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
ปีงบประมาณ 2557

บทคัดย่อ

การทดลองผลิตชิ้นงานซีเมนต์ทังสเตนคาร์ไบด์ด้วยการอบผนึกที่อุณหภูมิ 1430 ° C คงอุณหภูมิที่ระยะเวลา 1 ชั่วโมง โครงสร้างเกรนทังสเตนคาร์ไบด์เป็นแท่งยาว ขนาดเกรนมีความยาวและความกว้างแตกต่างกัน มีการกระจายตัวสูงตามขนาดและรูปทรงต่างๆ เวลาในการบดน้อยกว่าชิ้นงานโครงสร้างเกรนขนาดใกล้เคียงกัน ถึงแม้ว่าส่วนผสม WC – Co จะมีค่าเท่ากันก็ตาม (95 % WC – 5 % Co) ที่ระยะเวลาในการบด (Ball Milling) เท่ากันและอบผนึกที่ 1,400 ° C ปรากฏว่า โครงสร้างเกรนที่เกิดขึ้นมีขนาดใกล้เคียงกับชิ้นงานที่ผ่านการบดที่เวลาเท่ากัน พบว่า ขนาดเกรนแตกต่างกันน้อยลง อย่างไรก็ตามเมื่อโครงสร้างเกรนมีขนาดใกล้เคียงกันและมีความกลมมากขึ้นจะส่งผลด้านความแข็งและการต้านทานต่อการสึกหรอเพิ่มขึ้น ดังนั้นโครงสร้างเกรนขนาดระหว่าง 1.00 – 3.00 μm ภายใต้เวลาบด 100 ชั่วโมง จะเป็นการผลิตชิ้นงานมีความต้านทานการสึกหรอสอดคล้องกับมาตรฐานสากล

คำสำคัญ (Keywords) : ซีเมนต์ทังสเตนคาร์ไบด์ , ทังสเตนคาร์ไบด์ , โครงสร้างเกรน , อบผนึก , การต้านทานการสึกหรอ

Researcher title Development of wear resistance microstructure of hardmetals by sintering process

Researcher by Asst.Prof.Saharat Wongsisa
Mr.Prasit Pangpech

Sustainable Industrial Management Engineering (SIME)
Faculty of Engineering
Rajamangala University of Technology Phra Nakhon

Abstracts

This study developed the cemented tungsten carbide by steadily sintering at 1430 °C for one hour. The tungsten carbide structure is a long shape. Its grain size has a difference between width and length, and there are high distribution of sizes and shapes. In comparison with the work piece which has the similar size of grain structure, the milling duration of tungsten carbide is less even though the condition of WC-Co is the same (95% WC – 5% Co). When the sintering of 1400 °C, with the identical milling duration, is performed. It turned out that both grain structures of the tungsten carbide and the work piece are similar, and their grain sizes are slightly different. However, when the grain structures are almost the same, and sphericity is increased, the hardness and wear resistance will also be improved. Therefore, the size of grain structure between 1.00 – 3.00 μm with the milling duration of 100 hours, will provide a work piece that has a wear resistance according to international standard.

Keywords : Cemented tungsten Carbide , Tungsten Carbide , Grain size , Sintering , Wear resistance

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้สำเร็จได้ด้วยการสนับสนุนทุนวิจัยงบประมาณแผ่นดิน โดยมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิชาวิศวกรรมการจัดการอุตสาหกรรมเพื่อความยั่งยืน ผลการวิจัยและพัฒนาโครงสร้างเกรนต้านทานการสึกหรอของชิ้นงานความแข็งสูงพิเศษด้วยกระบวนการอบผนึก ได้รับความร่วมมือในการวิจัย จากหน่วยงานต่าง ๆ ประกอบด้วย ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ ทดสอบวัสดุผงโลหะทังสเตนคาร์ไบด์และตรวจสอบสมบัติของโลหะผง สถาบันวิจัยโลหะและวัสดุ ตรวจสอบสมบัติทางเคมีของผงโลหะ สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย (วว.) ช่วยวิเคราะห์ SEM,XRD และ Particle size distribution บริษัท อาร์ เอส คาร์ไบด์ โปรดักส์ จำกัด การอัดขึ้นรูปชิ้นงาน การอบผนึกและทดสอบการสึกหรอ และขอขอบคุณผู้ที่เกี่ยวข้องและไม่ได้กล่าวนามมา ณ ที่นี้ ที่ได้สนับสนุนงานวิจัย จนกระทั่งประสบผลสำเร็จตามวัตถุประสงค์ของการวิจัย

ผศ.สหรัตน์ วงษ์ศรีษะ
หัวหน้าโครงการ

สารบัญ

		หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย		ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ		ข
กิตติกรรมประกาศ		ค
สารบัญ		ง
สารบัญตาราง		ฉ
สารบัญภาพ		ช
บทที่ 1	บทนำ	1
	1.1 ความเป็นมาและที่มาของทำการวิจัย	1
	1.2 วัตถุประสงค์	2
	1.3 ขอบเขตของการวิจัย	3
	1.4 สมมุติฐานและกรอบแนวความคิดของโครงการวิจัย	4
	1.5 วิธีดำเนินงานวิจัย	6
	1.6 สถานที่ดำเนินการทดลองและเก็บข้อมูลโครงการวิจัย	7
	1.7 ระยะเวลาทำการวิจัย	8
	1.8 ประโยชน์ที่ได้รับ	9
บทที่ 2	ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	10
	2.1 ผงทังสเตนคาร์ไบด์ (WC)	10
	2.2 โคบอลต์ (Co)	11
	2.3 การตรวจสอบคุณภาพผงทังสเตนคาร์ไบด์	12
	2.4 กระบวนการโลหะผง (Power Metallurgy)	13
	2.5 วิธีการบดละเอียด (Ball Milling)	13
	2.6 การอัดขึ้นรูปและการอัดแน่น (Shaping and Compaction)	17
	2.7 การอบผนึก (Sintering)	20
	2.8 การทดสอบความแข็ง (Hardness Test)	26
	2.9 ทฤษฎีรอยแตกร้าว	30
	2.10 การสึกหรอ	33
บทที่ 3	วิธีการวิจัย	38
	3.1 ศึกษาข้อมูลเกี่ยวกับการเตรียมผงโลหะทังสเตนคาร์ไบด์	39
	3.2 ศึกษาข้อมูลการผลิตชิ้นงานจากผงโลหะทังสเตนคาร์ไบด์	41
	3.3 ศึกษาข้อมูลการทดสอบประสิทธิภาพชิ้นงานซีเมนต์ทังสเตนคาร์ไบด์	43
	3.4 วิเคราะห์ข้อมูล	52
	3.5 กำหนดวิธีการทดลอง	53
	3.6 ดำเนินการทดสอบประสิทธิภาพ	54
	3.7 รวบรวมข้อมูลการทดสอบ	73

สารบัญ (ต่อ)

			หน้า
	3.8	วิเคราะห์ผลการทดสอบ	74
	3.9	สรุปผล	74
บทที่ 4	ผลการวิจัย (Results)		75
	4.1	ผลการวิเคราะห์คุณลักษณะของผงโลหะ	76
	4.2	ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุ	79
	4.3	ผลการวิเคราะห์ขนาดและการกระจายของอนุภาคผงโลหะ (Particle Size Distribution)	80
	4.4	ผลการวิเคราะห์โครงสร้างเกรน	81
	4.5	ผลการทดสอบความแข็ง	90
	4.6	ผลการทดสอบรอยแตกร้าว	92
	4.7	ผลการทดสอบการสึกหรอ	93
บทที่ 5	การอภิปรายผล		97
บทที่ 6	สรุปผลการวิจัย		100
บรรณานุกรม			102
ภาคผนวก ก เครื่องมือและอุปกรณ์ในการวิจัย			106
ภาคผนวก ข ผลการวิเคราะห์โครงสร้างเกรน			111
ภาคผนวก ค ผลการทดสอบความแข็ง			117
ประวัติคณะผู้วิจัย			119

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1.1	แผนดำเนินโครงการ ระยะเวลาโครงการ ประมาณ 1 ปี 6 เดือน	8
2.1	แสดงคุณสมบัติของลูกบดชนิดต่างๆ [30]	15
2.2	แสดงอักขระที่ระบุสเกลความแข็งแบบร็อคเวลล์ [14]	27
2.3	ตัวแปรการตัดสำหรับขอบเขตขององค์ประกอบ WC-Co [31]	32
3.1	แสดงข้อมูลที่เกี่ยวกับการบดผงโลหะ [4]	39
3.2	แสดงข้อมูลที่เกี่ยวกับการผสมผงโลหะ [13]	40
3.3	เงื่อนไขการผสมผงทังสเตนคาร์ไบด์กับโคบอลต์ [7]	40
3.4	เงื่อนไขการอัดขึ้นรูป [2]	42
3.5	แสดงอุณหภูมิในการอบผนึกต่อสมบัติของแผ่นมีด [2]	42
3.6	แสดงข้อมูลที่เกี่ยวกับการอบผนึก (Green Density) [12]	62
4.1	ความแข็งของชิ้นงานที่ส่วนผสมต่างกัน	90
4.2	ความแข็งของชิ้นงาน C ที่อุณหภูมิในการอบผนึกต่างกัน	91
ค.1	ผลการทดสอบความแข็งของชิ้นงาน	118
ค.2	ผลการทดสอบความแข็งของชิ้นงาน	118

สารบัญภาพ

รูปที่ หน้า

1.1 ความสัมพันธ์ของขนาดผงโลหะทังสเตนคาร์ไบด์และส่วนผสมโคบอลต์มีผลต่อการผลิตชิ้นงานโลหะแข็งเพื่อการใช้งานในอุตสาหกรรมแต่ละประเภท [13] 4
1.2 กระบวนการผลิต hardmetals cemented carbide [10] 5
1.3 รูปแบบกระบวนการพัฒนาโครงสร้างเกรนชิ้นงานความแข็งสูง และทดสอบสมบัติด้านโครงสร้างเกรน (Methodologies of hard metals) 7
2.1 แสดงผงทังสเตน [13] 10
2.2 แสดงผงทังสเตนคาร์ไบด์สำเร็จรูป [13] 11
2.3 แสดงผงโคบอลต์ (Co) [13] 11
2.4 แสดง SEM micrographs of different cubic boron nitride powder grades used in this work. (a) 2–3 μm and (b) 10–14 μm. [29] 12
2.5 ระดับของลูกบดแบบ (Ball mill) ที่เหมาะสม [30] 14
2.6 ระดับของลูกบดและวัตถุดิบในหม้อบด [30] 16
2.7 ความหนืดของส่วนผสมในการฉีดขึ้นรูปกับอุณหภูมิและอัตราเฉือน [2] 17
2.8 ชิ้นส่วน P/M 4 ประเภท a) ประเภท 1 b) ประเภท 2 c) ประเภท 3 d) ประเภท 4 [2] 18
2.9 ส่วนประกอบของเครื่องมือหลายชิ้นใช้ในการอัดเฟืองสองระดับ [2] 19
2.10 แสดงการเชื่อมต่อระหว่างอนุภาค เกิดการฟอร์มตัวของคอคอดเนื่องจากอบผนึก [6] 20
2.11 แบบจำลองการอบผนึกอนุภาคทรงกลมสองอนุภาคที่พัฒนาพันธะระหว่างอนุภาคเริ่มต้นจากจุดสัมผัส [12] 21
2.12 แบบจำลองกลไกการอบผนึกทั้งสองประเภทในอนุภาคทรงกลม [27] 22
2.13 ผลกระทบของส่วนผสมต่อการอบผนึกในผงเหล็กสองขนาด เมื่อผงขนาดใหญ่เพิ่มจำนวนขึ้น ทำให้ความหนาแน่นดีขึ้นแต่การหดตัวลดลงเพราะอนุภาคเฉลี่ยเพิ่มขึ้น ดังนั้นความหนาแน่นหลังอบผนึกสูงสุดเมื่ออนุภาคมีขนาดเล็กสุด [6] 23
2.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของเวลาและอุณหภูมิในการอบผนึก [6] 24
2.15 แสดงหลักการทดสอบความแข็งแบบร็อคเวลล์ สเกล B [14] 27
2.16 ภาพเรขาคณิตของรอยแตกแบบเพนนีและแบบ Palmqvist (A) แบบ Palmqvist (B) แบบครึ่งเพนนี [31] 31
2.17 การสึกหรอของมีดตัด [22] 33
2.18 แสดงการสึกหรอบริเวณผิวหลบ (Flank Wear) [28] 34
2.19 แสดงการสึกหรอแบบ (Crater Wear) [28] 34
2.20 แสดงการสึกหรอแบบรอยบาก (Notch Wear) [28] 35
2.21 แสดงการสึกหรอแบบการแตกร้าวเนื่องจากอุณหภูมิ (Thermal Cracking) [28] 35

สารบัญภาพ (ต่อ)

รูปที่ หน้า

2.22 แสดงตำแหน่งการวัดระยะบริเวณมุมของเครื่องมือตัด มีการกำหนดตำแหน่ง และตัวแปลในการวัดระยะสึกหรอ ซึ่งมี 4 ระยะ ประกอบด้วย (L_S , L_f , b_W , VB_N) 37

3.1 แผนผังการดำเนินโครงการ 38

3.2 แสดงตัวอย่างขนาดผงโลหะทังสเตนคาร์ไบด์หลังจากผ่านการบด [A] ขนาดผง 4.2 ไมครอน (μm) [B] ขนาดผง 0.7 ไมครอน (μm) [11] 39

3.3 แสดงตัวอย่างผงทังสเตนคาร์ไบด์ผสมกับโคบอลต์ [13] 41

3.4 กราฟแสดงความหนาแน่นต่อแรงกดอัดของผงทังสเตนคาร์ไบด์ [20] 41

3.5 การทดสอบความหนาแน่นของชิ้นงานซีเมนต์ทังสเตนคาร์ไบด์ [32] 43

3.6 การทดสอบความแข็ง (Hardness Test) ใช้เครื่อง Misuratori di Durezza Hardness Tesdness Modello 206 RTD ใช้การทดสอบแบบ Rockwell Scal A ใช้หัวเพชร 120 ° โหลดในการทดสอบ 120 กิโลกรัม 44

3.7 ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้อง Optical microscopy [17] 44

3.8 ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้อง Scanning electron microscopy (SEM) [17] 45

3.9 รอยแตกร้าวชิ้นงานของนักวิชาการ Niihara แตกร้าวตามแนวยาวแบบเส้นตรง [31] 45

3.10 รอยแตกร้าวชิ้นงาน แตกร้าวตามแนวยาวแบบเส้นตรง 46

3.11 ตัวอย่างผลการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค (Scanning electron microscope) จากงานวิจัย Tungsten carbide platelet-containing cemented carbide with yttrium containing dispersed phase [23] 46

3.12 ตัวอย่างผลการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค จากงานวิจัย (Friction and wear characteristics of WC-Co cemented carbides in dry reciprocating sliding contact) [25] 47

3.13 ตัวอย่างผลการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค (Scanning electron microscope) จากงานวิจัย (Surface characteristics and removal mechanism of cemented tungsten carbides in nanoscratching) [27] 47

3.14 การสึกหรอของวัสดุ [22] 48

3.15 กลไกการเกิดการสึกหรอแบบเกาะติดแบบเย็น [22] 49

3.16 ขั้นตอนการเกิดสึกหรอแบบเกาะติดแบบเย็น [22] 49

3.17 การสึกหรอแบบขัดสีแบบวัตถุสองชิ้นและแบบวัตถุสามชิ้น [22]50

3.18 การสึกหรอแบบขัดสี [21] 50

3.19 กลไกการสึกหรอแบบกัดเซาะ [19] 51

3.20 แสดงผังการกำหนดวิธีการทดลอง 53

3.21 แสดงการนำลูกบดบรรจุหม้อบด 55

3.22 แสดงนำแอลกอฮอล์บรรจุลงในหม้อบดในปริมาณ 150 ml. 55

3.23 แสดงการนำผงทังสเตนคาร์ไบด์บรรจุหม้อบด 55

สารบัญภาพ (ต่อ)

รูปที่ หน้า

3.24 แสดงปิดระบบการทำงานของเครื่องบดผงโลหะ 56
3.25 แสดงแม่พิมพ์แผ่นมีดทรง S (Square)แสดงการพักหม้อบด 56
3.26 แสดงการเตรียมอุปกรณ์ในการแยกผง 57
3.27 แสดงการแยกผงโลหะออกจากหม้อบด 57
3.28 แสดงการเทแอลกอฮอล์เพื่อล้างลูกบด 58
3.29 เทแอลกอฮอล์ออกเหลือแต่โคลนตะกอน 58
3.30 แสดงลักษณะของการเปลี่ยนแปลงจากโคลนมาเป็นก้อน 59
3.31 แสดงทำการบดผงโลหะให้ละเอียดขึ้นด้วยมือ 59
3.32 แสดงนำผงทังสเตนคาร์ไบด์ใส่ถ้วยเซรามิกส์ 60
3.33 แสดงการผสมโคบอลต์ 60
3.34 แสดงการผสมตัวผสาน Paraffin Wax 61
3.35 แสดงเครื่องอัดขึ้นรูป 61
3.36 เครื่องอบผนึก 62
3.37 การอบผนึกแบบ ก กราฟแสดงขั้นตอนการอบผนึกที่อุณหภูมิ 1,430 องศาเซลเซียส เวลาในการอบผนึก 1 ชั่วโมง [27] 63
3.38 การอบผนึกแบบ ข กราฟแสดงขั้นตอนการอบผนึกที่อุณหภูมิ 1,400 องศาเซลเซียส เวลาในการอบผนึก 1 ชั่วโมง [27] 64
3.39 การอบผนึกแบบ ค กราฟแสดงขั้นตอนการอบผนึกที่อุณหภูมิ 1,400 องศาเซลเซียส เวลาในการอบผนึก 2 ชั่วโมง [27] 65
3.40 ชิ้นงานแบบแท่ง ผสมโคบอลต์ 5 % (กำลังขยาย 20 เท่า) 66
3.41 ชิ้นงานแบบแท่ง ผสมโคบอลต์ 5 % (กำลังขยาย 40 เท่า) 66
3.42 ชิ้นงานแบบแท่ง ผสมโคบอลต์ 5 % (กำลังขยาย 63 เท่า) 66
3.43 ชิ้นงานแบบแท่ง ผสมโคบอลต์ 10 % (กำลังขยาย 20 เท่า) 67
3.44 ชิ้นงานแบบแท่ง ผสมโคบอลต์ 10 % (กำลังขยาย 40 เท่า) 67
3.45 ชิ้นงานแบบแท่ง ผสมโคบอลต์ 10 % (กำลังขยาย 63 เท่า) 67
3.46 ชิ้นงานแบบแท่ง ผสมโคบอลต์ 15 % (กำลังขยาย 20 เท่า) 68
3.47 ชิ้นงานแบบแท่ง ผสมโคบอลต์ 15 % (กำลังขยาย 40 เท่า) 68
3.48 ชิ้นงานแบบแท่ง ผสมโคบอลต์ 15 % (กำลังขยาย 63 เท่า) 68
3.49 แสดงลักษณะการสึกหรอบริเวณด้านข้างคมตัดของแผ่นมีด จากงานวิจัย การศึกษาอิทธิพลของสารหล่อเย็นในขบวนการกลึงเหล็กหล่อ FCD 400 [19] 69

สารบัญภาพ (ต่อ)

รูปที่ หน้า

3.50 ภาพถ่ายลักษณะการสึกหรอของแผ่นมีดตัด จากงานวิจัย การศึกษากระบวนการผลิตและผลิตแผ่นมีดซีเมนต์ทังสเตนคาร์ไบด์สำหรับงานกลึงปอก [21] (A) ภาพการสึกหรอบริเวณผิวคายเศษ (B) ภาพการสึกหรอบริเวณด้านข้างคมตัด 69
3.51 ภาพถ่ายลักษณะการสึกหรอของแผ่นมีดตัด จากงานวิจัย อิทธิพลของสภาวะการกลึงเหล็กกล้าสเตนเลส (AISI 316) ด้วยใบมีดคาร์ไบด์ ที่มีผลต่อการสึกหรอใบมีดตัดและความขรุขระของพื้นผิว [22] 70
3.52 แสดงแผ่นมีดตัดที่สึกหรอบริเวณคมตัด [28] 70
3.53 แผ่นมีดตัดที่ผ่านการใช้งานจนสึกหรอ [28] 71
3.54 รอยกดด้วยหัวเพชรทรงปิรามิด [14] 71
3.55 แสดงภาพโครงสร้างเกรนของผงทังสเตนคาร์ไบด์ [5] 72
3.56 เครื่องวิเคราะห์โครงสร้าง (X-Ray Diffractrometer) 72
3.57 แสดงเครื่องวิเคราะห์การกระจายตัวและขนาดอนุภาค (Particle Size Diffraction) 73
3.58 แสดงเครื่อง SEM (Scanning Electron Microscope) 73
4.1 แสดงการตรวจสอบอนุภาคผงทังสเตนคาร์ไบด์ 95 % ผงโคบอลต์ 5 % 76
4.2 แสดงการตรวจสอบอนุภาคผงทังสเตนคาร์ไบด์ 90 % ผงโคบอลต์ 10 % 77
4.3 แสดงการตรวจสอบอนุภาคผงทังสเตนคาร์ไบด์ 85 % ผงโคบอลต์ 15 % 78
4.4 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุผงทังสเตนคาร์ไบด์หลังการบดละเอียด 79
4.5 กราฟแสดงขนาดอนุภาคผงทังสเตนคาร์ไบด์หลังการบดด้วยวิธี Ball Milling 80
4.6 โครงสร้างเกรนชิ้นงาน A1 WC 95 % Co 5 % อบผนึกแบบ ก (1,430 °c 1 ชม.) 81
4.7 โครงสร้างเกรนชิ้นงาน A2 WC 90 % Co 10 % อบผนึกแบบ ก (1,430 °c 1 ชม.) 82
4.8 โครงสร้างเกรนชิ้นงาน A3 WC 85 % Co 15 % อบผนึกแบบ ก (1,430 °c 1 ชม.) 83
4.9 โครงสร้างเกรนชิ้นงาน B1 WC 95 % Co 5 % อบผนึกแบบ ก (1,430 °c 1 ชม.) 84
4.10 โครงสร้างเกรนชิ้นงาน B2 WC 90 % Co 10 % อบผนึกแบบ ก (1,430 °c 1 ชม.) 85
4.11 โครงสร้างเกรนชิ้นงาน B3 WC 85 % Co 15 % อบผนึกแบบ ก (1,430 °c 1 ชม.) 86
4.12 โครงสร้างเกรนชิ้นงาน C1 WC 95 % Co 5 % อบผนึกแบบ ก (1,430 °c 1 ชม.) 87
4.13 โครงสร้างเกรนชิ้นงาน C2 WC 95 % Co 5 % อบผนึกแบบ ข (1,400 °c 1 ชม.) 88
4.14 โครงสร้างเกรนชิ้นงาน C3 WC 95 % Co 5 % อบผนึกแบบ ค (1,400 °c 2 ชม.) 89
4.15 กราฟเปรียบเทียบความแข็งของชิ้นงาน A และ B 90
4.16 กราฟเปรียบเทียบความแข็งของชิ้นงาน C 91
4.17 แสดงรอยแตกร้าวจากการกดชิ้นงาน 92
4.18 แสดงรอยแตกร้าวจากการกดชิ้นงาน ที่กำลังขยาย 1,000 เท่า 93
4.19 แผ่นมีดซีเมนต์ทังสเตนคาร์ไบด์ที่ส่วนผสมโคบอลต์ 15% (a) ลักษณะคมตัดที่เกิดการสึกหรอด้านข้างคมตัด (b) ภาพจำลองลักษณะคมตัดที่เกิดการสึกหรอด้านข้างคมตัดและกำหนดตำแหน่งการวัดระยะสึกหรอ (b_W) และ (VB_N) 94

สารบัญภาพ (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.20	แผ่นมีดซีเมนต์ทังสเตนคาร์ไบด์ที่ส่วนผสมโคบอลต์ 10% (a) ลักษณะคมตัดที่เกิดการสึกหรอด้านข้างคมตัด (b) ภาพจำลองลักษณะคมตัดที่เกิดการสึกหรอด้านข้างคมตัดและกำหนดตำแหน่งการวัดระยะสึกหรอ (b_W) และ (VB_N)	95
4.21	แผ่นมีดซีเมนต์ทังสเตนคาร์ไบด์ที่ส่วนผสมโคบอลต์ 5% (a) ลักษณะคมตัดที่เกิดการสึกหรอด้านข้างคมตัด (b) ภาพจำลองลักษณะคมตัดที่เกิดการสึกหรอด้านข้างคมตัดและกำหนดตำแหน่งการวัดระยะสึกหรอ (b_W) และ (VB_N)	96
ก.1	เครื่องบดผงคาร์ไบด์	107
ก.2	หม้อบดและลูกบด	107
ก.3	ตะแกรงหยาบ	108
ก.4	ถ้วยเซรามิค	108
ก.5	เครื่องชั่งน้ำหนักแบบดิจิตอล HR200 Max 120 กรัม	108
ก.6	เตาไฟฟ้า Hot Plate Stirrer รุ่น HS-115	109
ก.7	เครื่องอบผนึก รุ่น Linn High	109
ก.8	เครื่องอัดขึ้นรูปแบบไฮดรอลิกส์ Max 10 ton	110
ข.1	โครงสร้างเกรนชิ้นงาน A1 WC 95 % Co 5 % อบผนึกแบบ ก (1,430 °c 1 ชม.)	112
ข.2	โครงสร้างเกรนชิ้นงาน A2 WC 90 % Co 10 % อบผนึกแบบ ก (1,430 °c 1 ชม.)	112
ข.3	โครงสร้างเกรนชิ้นงาน A3 WC 85 % Co 15 % อบผนึกแบบ ก (1,430 °c 1 ชม.)	113
ข.4	โครงสร้างเกรนชิ้นงาน B1 WC 95 % Co 5 % อบผนึกแบบ ก (1,430 °c 1 ชม.)	113
ข.5	โครงสร้างเกรนชิ้นงาน B2 WC 90 % Co 10 % อบผนึกแบบ ก (1,430 °c 1 ชม.)	114
ข.6	โครงสร้างเกรนชิ้นงาน B3 WC 85 % Co 15 % อบผนึกแบบ ก (1,430 °c 1 ชม.)	114
ข.7	โครงสร้างเกรนชิ้นงาน C1 WC 95 % Co 5 % อบผนึกแบบ ก (1,430 °c 1 ชม.)	115
ข.8	โครงสร้างเกรนชิ้นงาน C2 WC 95 % Co 5 % อบผนึกแบบ ข (1,400 °c 1 ชม.)	115
ข.9	โครงสร้างเกรนชิ้นงาน C3 WC 95 % Co 5 % อบผนึกแบบ ค (1,400 °c 2 ชม.)	116

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและที่มาของการวิจัย

การผลิตชิ้นส่วนและเครื่องมือในอุตสาหกรรมแม่พิมพ์ อุตสาหกรรมผลิตชิ้นส่วนเครื่องจักรกล ประเทศไทยจะเสียเปรียบทางการค้ามาโดยตลอด เนื่องจากต้องนำเข้าเครื่องมือและอุปกรณ์ โดยเฉพาะเครื่องมือและวัสดุที่มีความแข็งสูง (Hardmetals) ปัจจุบันนำเข้า 100 % อาทิ เครื่องมือตัด (Cutting tools) และผงโลหะ ส่วนใหญ่นำเข้าจากประเทศญี่ปุ่น ได้แก่ ตราผลิตภัณฑ์ SUMITOMO, MITSUBISHI, ประเทศสวีเดน ได้แก่ ตราสินค้า SANDVIK, ประเทศเยอรมัน ได้แก่ ตราสินค้า IZAR, DORMER, ประเทศสหรัฐอเมริกา ได้แก่ ตราสินค้า KENNAMETAL, ประเทศอิสราเอล ได้แก่ ตรา ISCAR, และนำเข้าจากประเทศจีน หลายตราผลิตภัณฑ์ ได้แก่ Top rank, ZHUZHOU KELITE ADVANCED MATERIALS CO.,LTD , ECHAINTOOLS เป็นต้น มูลค่าการนำเข้ารวมมากกว่า 5,500 ล้านบาทในปี พ.ศ.2554 รวมถึงการนำเข้าโลหะผง ชนิด WC , Co, TaC, SiC, Ni, Mo พบว่ามูลค่านำเข้ารวมประมาณ 670 ล้านบาท (ที่มา: ระบบฐานข้อมูลการนำเข้าโลหะและชิ้นส่วน กรมศุลกากร กระทรวงการคลัง) โลหะผงนำเข้าจากกลุ่มประเทศผู้นำทางอุตสาหกรรมเช่นกัน ทั้งนี้ เพื่อการผลิตเป็นสินค้าความแข็งสูงของบริษัทข้ามชาติกว่า 99 % ได้แก่ บริษัท ซูมิโตโม (ประเทศไทย) จำกัด บริษัทในเครือ มิตซูบิชิ (ประเทศไทย) จำกัด (Mitsubishi Material Co.,Ltd. official distributor in Thailand) เป็นต้น

สมบัติทางกลที่สำคัญของเครื่องมือ คือ ความแข็งแรงสูง (High Strength) ความสามารถในการต้านทานการสึกหรอสูง (High Wear resistance) จึงนิยมผลิตเป็นเครื่องมือกล เครื่องมือในงานตัดปาดผิวโลหะสำหรับการขึ้นรูปโดยวิธีตัดเฉือน (Machining) ได้แก่ ผลิตแม่พิมพ์โลหะ แม่พิมพ์พลาสติก ผลิตเพลาส่งกำลัง ผลิตเฟืองส่งกำลัง สลัก ลิ่ม เครื่องมือในงานขุดเจาะ ซ่อม สร้างถนน เครื่องมือบดหินในงานผลิตปูนซีเมนต์ ผลิตเครื่องมือกล และเครื่องมืองานอุตสาหกรรมพื้นฐาน เป็นต้น

สำหรับการผลิตเครื่องมือตัดเป็นเครื่องมือที่จำเป็นต่ออุตสาหกรรมการผลิตโดยเฉพาะการผลิตชิ้นส่วนเครื่องจักรกล การผลิตแม่พิมพ์ทุกชนิด และเป็นเครื่องมือตั้งต้นสำหรับการผลิตเทคโนโลยีต่าง ๆ ในอุตสาหกรรมทั้งหมด ทั้งทางตรงและทางอ้อม

การผลิตชิ้นงานความแข็งสูง (Hardmetals) ส่วนใหญ่จะผลิตให้มีความแข็งในช่วง 80 – 100 HRC โดยผลิตจากโลหะผงทังสเตนคาร์ไบด์ (WC) ซึ่งเป็นโลหะที่สำคัญ คือ มีสมบัติในการให้ความแข็ง (Hardness) มากกว่าโลหะอื่น โดยผสมโลหะประสาน อาทิ Co ลักษณะผงโลหะ WC - Co

ที่ขนาดไม่เกิน 1.0 ไมครอน (μm) และมีรูปทรงค่อนข้างกลมเมื่อผ่านการบดด้วยวิธี Ball milling [4] เมื่ออบผนึกที่ 1,430 °c เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จะให้ความแข็งสูงกว่า 80.92 HRC มีโครงสร้างเกรนสม่ำเสมอ สอดคล้องกับขนาดผง WC-9%Co-1%Cu [7] และขนาดผงโลหะไม่เกิน 1.00 μm ผ่านการบด 20 ชั่วโมง [9] และผงโลหะที่ผ่านการบดด้วยวิธีเดียวกันแต่เพิ่มเวลาในการบดมากขึ้นผงโลหะมีขนาดและการกระจายลดลง อยู่ที่ประมาณ 0.20 ไมครอน (μm) เมื่อนำไปอัดขึ้นรูปแบบ Pulse plasma sintering ความแข็งเพิ่มขึ้น [3] และผงโลหะ WC-6.29%Co ผ่านการ Vacuum sintering with HIP จะได้ความแข็งสูงถึง 89.50 HRC [10] หากขนาดผงอยู่ที่ 5.00 ไมครอน (μm) เมื่อนำไปอัดขึ้นรูปและอบผนึกความแข็งที่ได้รับจะเป็น 90.48 HRC [2] ชิ้นงานมีโครงสร้างเกรนแข็งด้วยการอบผนึก (Sintering) ที่อุณหภูมิ Eutectic temperature [6] หรือที่อุณหภูมิ 1,450°c [8,12] จะได้โครงสร้างเกรนที่มีความแข็งสูง [5,12,17] นิยมผลิตเป็นมีดตัด (Insert tools) และชิ้นส่วนทนการสึกหรอ

การผลิตเครื่องมือตัด นำไปใช้งานเพื่อขึ้นรูปชิ้นส่วนด้วยการ กลึง กัด เจาะ หรือผลิตเป็นเฟืองทด ใบตัด อุปกรณ์ทนแรงเสียดทานสูง และชิ้นส่วนโลหะความแข็งแรงสูงในทางการแพทย์ เป็นต้น โดยส่วนใหญ่ก็จะนิยมใช้ WC รองลงมาจะเป็น แทนทาลัมคาร์ไบด์ (TaC) และซิลิกอนคาร์ไบด์ (SiC) เป็นต้น ทั้งหมดใช้โลหะประสาน นิเกิล (Ni) โคบอลต์ (Co) เป็นต้น

ที่ผ่านมากลุ่มนักวิจัยได้ทำการพัฒนาการผลิตโลหะผงทังสเตนคาร์ไบด์เป็นพื้นฐานและพัฒนาคุณภาพของผงโลหะทังสเตนคาร์ไบด์มาเป็นลำดับ ได้แก่ ผลิตผงโลหะให้มีความบริสุทธิ์มากกว่า 99.00 % ปรับปรุงขนาดและการกระจายของผงโลหะทังสเตนคาร์ไบด์ (Particle sized and distribution) ไม่เกิน 25 μm เป็นต้น

ดังนั้น การวิจัยนี้จึงต้องการศึกษาอิทธิพลของกระบวนการอบผนึก อิทธิพลของขนาดและการกระจายของผงโลหะต่อการพัฒนาโครงสร้างเกรนของชิ้นงานเพื่อเพิ่มสมบัติทางกล ซึ่งการวิจัยต้องการพัฒนาโครงสร้างเกรนที่เหมาะสมจากผงโลหะที่ผลิตใหม่ และนำเสนอแนวทางการพัฒนาโลหะทังสเตนคาร์ไบด์โดยเพิ่มความสามารถในด้านสมบัติทางกลให้เป็นพื้นฐานที่สำคัญต่อการพัฒนาโลหะให้มีคุณภาพเพิ่มขึ้น โดยเฉพาะการพัฒนาโครงสร้างเกรนที่เหมาะสมต่อการต้านทานการสึกหรอของชิ้นงาน

1.2 วัตถุประสงค์

เพื่อพัฒนาโครงสร้างเกรนทนการสึกหรอของชิ้นส่วนโลหะความแข็งสูง (High Hardmetals) จากโลหะผงทังสเตนคาร์ไบด์ที่ผลิตขึ้นมาใหม่

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1.3.1 พัฒนาโครงสร้างเกรนชิ้นส่วนโลหะความแข็งสูงจากวัสดุ WC

1.3.2 ใช้วัสดุคาร์ไบด์ที่อัตราส่วนผสมในช่วง 3-10% โคบอลต์ (Co) ไม่มากกว่า 10%

- ขนาดผงอยู่ในช่วง 0.5 – 5.0 µm โดยวิธีการคัดกรองตาม มาตรฐาน Sieve
- วัสดุเป็นโลหะผงทังสเตนคาร์ไบด์ที่มีความบริสุทธิ์ไม่น้อยกว่า 99%
- ตรวจสอบขนาดและการกระจายของผงโลหะให้การกระจายโลหะผงแบบโค้งปกติ

1.3.3 ชิ้นส่วนโลหะความแข็งสูงผสมโลหะประสานโคบอลต์ในช่วง 5%

1.3.4 ตรวจสอบวัสดุด้วย SEM , XRD

1.3.5 การบดแบบ Pulverized ด้วย Tungsten carbide Ball mills โดยใช้เครื่องบดโลหะผง (Mechanical alloying) และการกำหนดการกระจายของโลหะผง (Particle sized Distribution)

1.3.6 การเตรียมโลหะผงด้วยปัจจัยเดียวกัน ได้แก่ ความเร็วรอบ ขนาดลูกบด อัตราส่วนสารละลายในการบด เวลาในการบด การผสมวัสดุประสาน (Paraffin Wax) เป็นต้น

1.3.7 การอัดขึ้นรูป (Press) การกำหนดค่าความหนาแน่นก่อนอบ (Green density) และตรวจสอบความหนาแน่นหลังการอบผนึก (Sintering process)

1.3.8 ออกแบบกระบวนการอบผนึก โดยให้ความหนาแน่นไม่ต่ำกว่า 15.00 g/cm^2

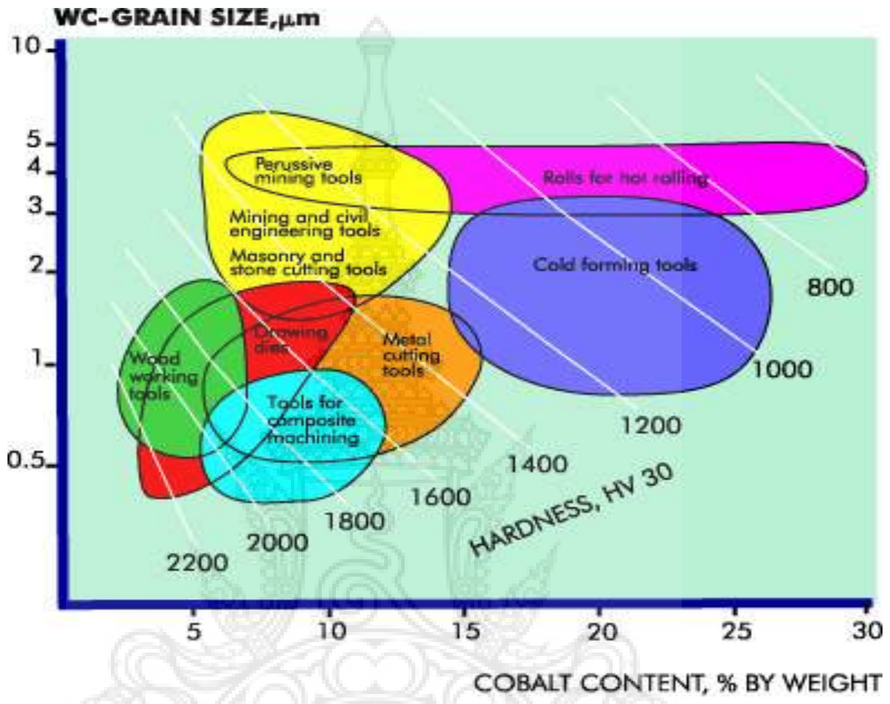
1.3.9 วิเคราะห์ผลการทดลองและกำหนดคุณลักษณะของชิ้นส่วนโลหะความแข็งสูง ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์พื้นฐาน

โดยมีการดำเนินการ การทดลอง การวัดผล การศึกษาสมบัติของชิ้นงานที่ผ่านการ Re-sintering และศึกษาการใช้งาน หาประสิทธิภาพในการใช้งาน เทียบกับมาตรฐานและสินค้าที่นำเข้าในด้านต่าง ๆ ประกอบด้วย

1) ตรวจสอบขนาดและการกระจายของโลหะผง (Particle sized distribution) ให้ผงโลหะมีขนาดอยู่ในช่วง 0.5-5.0 µm
2) ทดสอบคุณลักษณะของโลหะผงทังสเตนคาร์ไบด์ การผสมโลหะประสานโคบอลต์ ด้วยวิธี XRD และ SEM
3) การอัดขึ้นรูปแบบ CIP (Cold isostatic press) ศึกษาความหนาแน่น(Green density)
4) ขนาดและรูปทรงเรขาคณิต (Dimension and Geometry)
5) ทดลองการอบผนึก (Re- Sintering) ด้วยอุณหภูมิระหว่าง 1450-1,550 °C
6) ศึกษาโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานซีเมนต์คาร์ไบด์ที่ผ่านการ Re-Sintering

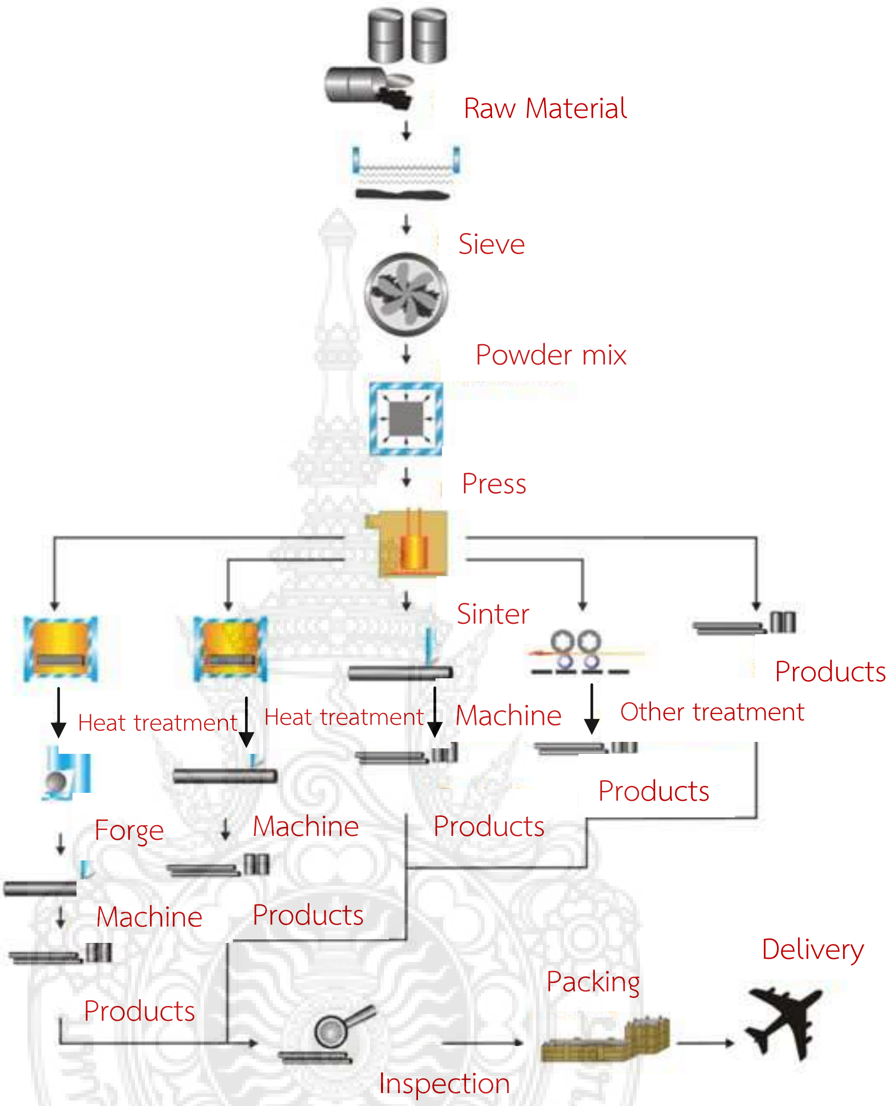
1.4 สมมุติฐานและกรอบแนวความคิดของโครงการวิจัย

ความแข็งที่เหมาะสมต่อการใช้งานขึ้นกับขนาดของโลหะผงทังสเตนคาร์ไบด์และอัตราส่วนผสมของ WC และ Co แสดง ดังรูปที่ 1.1 และการผลิตชิ้นส่วน Hardmetals มีขั้นตอนการผลิตแสดงตามรูปที่ 1.2



รูปที่ 1.1 ความสัมพันธ์ของขนาดผงโลหะทังสเตนคาร์ไบด์และส่วนผสมโคบอลต์มีผลต่อการผลิตชิ้นงานโลหะแข็งเพื่อการใช้งานในอุตสาหกรรมแต่ละประเภท [13]

รูปที่ 1.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนผสมของโคบอลต์และขนาดของผงโลหะทังสเตนคาร์ไบด์ ต่อความแข็งของชิ้นงานที่ผลิต



รูปที่ 1.2 กระบวนการผลิต hard metals cemented carbide [10]

จากรูปที่ 1.2 วัตถุดิบเป็นผงโลหะ ผ่านการคัดขนาดด้วย Sieve จากนั้นนำมาผสมกับผงโลหะประสาน (Powder mix) อัดขึ้นรูป อบผนึก และขึ้นรูปชิ้นงานสำเร็จ เป็นขั้นตอนก่อนการทำตราสัญลักษณ์ (ตราสินค้า) บรรจุ และส่งมอบ

ผงโลหะที่ขนาดเล็กกว่าจะให้ความแข็งสูงกว่าผงโลหะขนาดใหญ่กว่าและอัตราส่วนผสมพัฒนาความสามารถของโครงสร้างแข็ง ที่มีสมบัติทนต่อการสึกหรอสูงขึ้น การเตรียมโลหะผงทังสเตนคาร์ไบด์ (WC) ซึ่งเป็นวัสดุหลัก (Substrate) ให้ได้ขนาดที่เหมาะสมและโลหะประสานโคบอลต์ (Cobalt) ด้วยวิธี Ball milling

การเตรียมโลหะผงให้มีขนาด (particle sized of WC) ตามมาตรฐานการผลิตชิ้นงานซีเมนต์คาร์ไบด์ ด้วยการบดให้ได้ขนาดผงในช่วง ไม่มากกว่า 5 µm รวมถึงการผสม (mixing) โลหะประสานโคบอลต์ (Cobalt) เป็นต้น

1.5 วิธีดำเนินการวิจัย

การเตรียมงานและการวิจัย

1.5.1 ใช้ผงโลหะมาตรฐานและผลิตโลหะผงทังสเตนคาร์ไบด์จากห้องปฏิบัติการผลิตทังสเตนคาร์ไบด์กลับคืนมาใช้ใหม่

1.5.2 กำหนดขนาดโลหะผงด้วยการคัดกรอง 5.0 µm. ลดขนาดของ WC particle ด้วยการบด (Ball mill) เป็นเวลาประมาณ 24 ชั่วโมง

1.5.3 ผสมโลหะประสานตามสัดส่วนที่กำหนดและตรงตามมาตรฐานในช่วง 3 - 20%

1.5.4 ผสมวัสดุยึดติดชนิด Paraffin Wax ตามสัดส่วนมาตรฐานที่กำหนดไม่เกิน 3%

1.5.5 อัดขึ้นรูปตามแบบงานโดยการผลิตแม่พิมพ์เพื่อขึ้นรูปโลหะผงตามขนาดที่กำหนด

1.5.6 ตรวจสอบขนาด ความหนาแน่น (Green density)

1.5.7 อบผนึกที่อุณหภูมิ ในช่วง 1400-1550°c และสอดคล้องตามมาตรฐาน

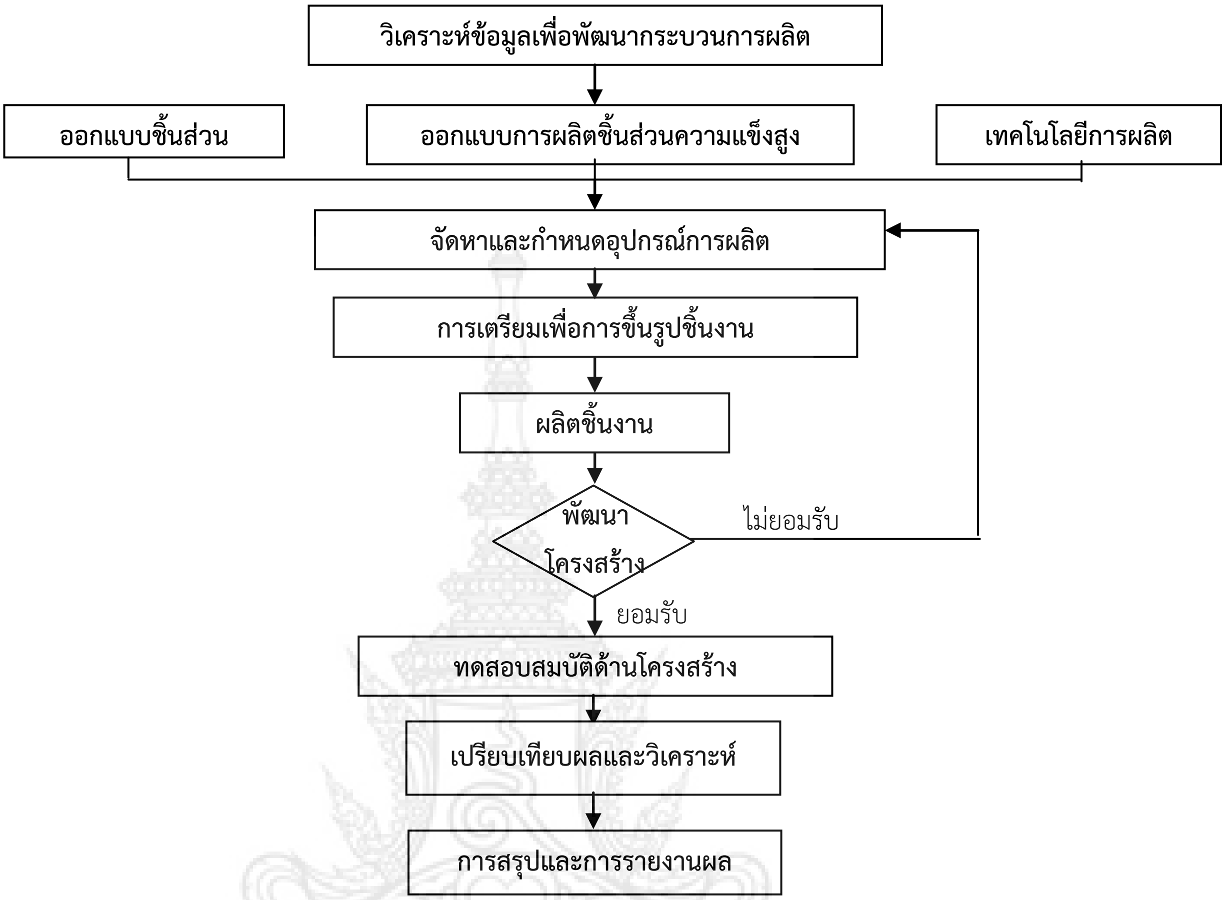
1.5.8 ตรวจสอบขนาด ความหนาแน่นของชิ้นส่วนความแข็งสูง

1.5.9 การเจียระไนผิวสำเร็จ (Finish to size)

1.5.10 การทดสอบความแข็ง ศึกษาและวิเคราะห์โครงสร้างเกรน

1.5.11 เปรียบเทียบและกำหนดสมบัติเบื้องต้นของผลิตภัณฑ์ทังสเตนคาร์ไบด์

1.5.12 การรายงานผลและเผยแพร่ผลงานวิจัยทั้งในและต่างประเทศ



รูปที่ 1.3 รูปแบบกระบวนการพัฒนาโครงสร้างเกรนชิ้นงานความแข็งสูง และทดสอบสมบัติด้านโครงสร้างเกรน (Methodologies of hard metals)

1.6 สถานที่ดำเนินการทดลองและเก็บข้อมูลโครงการวิจัย

1.6.1 สาขาวิศวกรรมการจัดการอุตสาหกรรมเพื่อความยั่งยืน คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร เพื่อผลิตโลหะผง การออกแบบ การทดสอบชิ้นงาน

1.6.2 ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น เพื่อการทดสอบวัสดุนาโนเมตร

1.6.3 ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ เพื่อการทดสอบวัสดุผงโลหะทังสเตนคาร์ไบด์ที่พัฒนาขึ้นโดยการพ่นเคลือบ (Plasma spry) และการตรวจสอบสมบัติของผงโลหะที่พัฒนาขึ้นใหม่

1.6.4 สถาบันวิจัยโลหะและวัสดุ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ซอยจุฬา 12 ถนนพญาไท กรุงเทพฯ 10330 ตรวจสอบสมบัติทางเคมีของผงโลหะ

1.6.5 ภาควิชาวิศวกรรมโลหะการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา การวิเคราะห์โลหะ ได้แก่ Atomic absorption spectrometer, Inductivity coupled plasma spectrometer, Mass spectrometer

1.6.6 ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ จังหวัดเชียงใหม่ เพื่อวิเคราะห์อนุภาคนาโนและตรวจสอบอนุภาคนาโนของโลหะขนาดประมาณ 50 นาโนเมตร

1.6.7 สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย 35 หมู่ที่ 3 เทคโนธานี ตำบลคลองห้า อำเภอคลองหลวง จังหวัดปทุมธานี 12120

1.6.8 บริษัท อาร์ เอส คาร์ไบด์ โปรดักส์ จำกัด

1.7 ระยะเวลาการทำวิจัย

ตารางที่ 1.1 แผนดำเนินโครงการ ระยะเวลาโครงการ ประมาณ 1 ปี 6 เดือน
(ตุลาคม 2556 – มีนาคม 2558 เสนอแผนงานระยะ 1 ปี)

ขั้นตอนการวิจัย	ระยะเวลา 1 ปี 6 เดือน																	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1. ผลิตโลหะผง WC	---- ━━	---- ━━																
2. จัดเตรียมวัสดุ ลดขนาดผง คัดแยกขนาด(<5 μm)			---- ━━	---- ━━	━━													
3. ผสมและอัดขึ้นรูป					---- ━━	---- ━━	━━											
4.อบผนึกและปรับผิวสำเร็จ						----	---- ━━	---- ━━	━━	━━								
5. ทดสอบสมบัติด้านโครงสร้างจุลภาคและขนาดเกรนทางโลหะวิทยา								----	----	---- ━━	---- ━━	---- ━━	━━	━━				
6. เปรียบเทียบสมบัติกับชิ้นงานซีเมนต์คาร์ไบด์มาตรฐาน												----	----	---- ━━	━━	━━		
7. สรุปผลและรายงาน														----	----	---- ━━	━━	━━

---- แผนงาน ━━ ปฏิบัติจริง

1.8 ประโยชน์ที่ได้รับ

1.8.1 การผลิตชิ้นงานโลหะแข็งที่มีโครงสร้างเกรนมาตรฐานโดยผลิตจากโลหะผงทังสเตนคาร์ไบด์ (WC) ที่ผลิตในประเทศ ซึ่งเป็นชิ้นงาน (Solid part) ที่มีโครงสร้างเกรนเหมาะสมต่อการต้านทานการสึกหรอ

1.8.2 เป็นการพัฒนาชิ้นงานความแข็งสูง (Hard Metals) ที่มีโครงสร้างเกรนสำหรับพัฒนาต่อยอดไปสู่อุตสาหกรรมอื่นๆ เช่น ผลิตแม่พิมพ์ ผลิตชิ้นส่วนเครื่องมือและอุปกรณ์ เครื่องจักรกล

1.8.3 ส่งเสริมการจัดการเทคโนโลยีโลหะโครงสร้างแข็ง ให้สามารถใช้ประโยชน์ในการผลิตโลหะเพื่อลดต้นทุนการผลิตของวัสดุสิ้นเปลือง เป็นการสร้างมูลค่าเพิ่ม ให้สอดคล้องกับแนวทางเศรษฐกิจพอเพียง และพัฒนาความยั่งยืนโดยการพัฒนาโลหะนำกลับมาใช้ใหม่ ตามนโยบายรัฐบาลเพื่อเป็นแนวทางการลดสัดส่วนการนำเข้าต่อไป

บทที่ 2
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ผงทังสเตนคาร์ไบด์ (WC)

ผงทังสเตนคาร์ไบด์เป็นวัตถุดิบทีสำคัญต่อการผลิตซีเมนต์ทังสเตนคาร์ไบด์ ลักษณะสีเทาเป็นเงา เป็นโลหะแข็งที่ใกล้เคียงกับเพชรมากกว่าโลหะชนิดอื่น มีสมบัตินำความร้อนและนำไฟฟ้าได้ดี การผลิตโลหะทังสเตนคาร์ไบด์ส่วนใหญ่อยู่ในประเทศอุตสาหกรรมที่เป็นผู้นำ เช่น ญี่ปุ่น อเมริกา เยอรมนี อิตาลี ฝรั่งเศส สวีเดน จีน และไต้หวัน เป็นต้น

รูปที่ 2.1 แสดงผงทังสเตน [13]

จากรูปที่ 2.1 ทังสเตน มีสัญลักษณ์ในตารางธาตุคือ W เลขอะตอม 74 อนุกรมเคมี เป็นโลหะทรานซิชัน ลักษณะเป็นสีเทาเงิน มีสถานะเป็นของแข็ง มีความหนาแน่นที่ 19.25 g/cm^3 มีจุดหลอมเหลว 3,422 °C จุดเดือดที่ 5,555 °C ความร้อนการหลอมเหลว 52.31 J/mol^{-1} ความร้อนของการกลายเป็นไอ 806.7 J/mol^{-1} ความแข็งวิกเกอร์ส 3,430 MPa

รูปที่ 2.2 แสดงผงทังสเตนคาร์ไบด์สำเร็จรูป [13]

จากรูปที่ 2.2 เป็นผงทังสเตนคาร์ไบด์สำเร็จรูปของบริษัท Jiangsu Maoyuan Economic And Trade Development Co, Ltd. ซึ่งตั้งอยู่ที่ประเทศจีนมีราคาอยู่ที่ประมาณกิโลกรัมละ 5,140 บาท

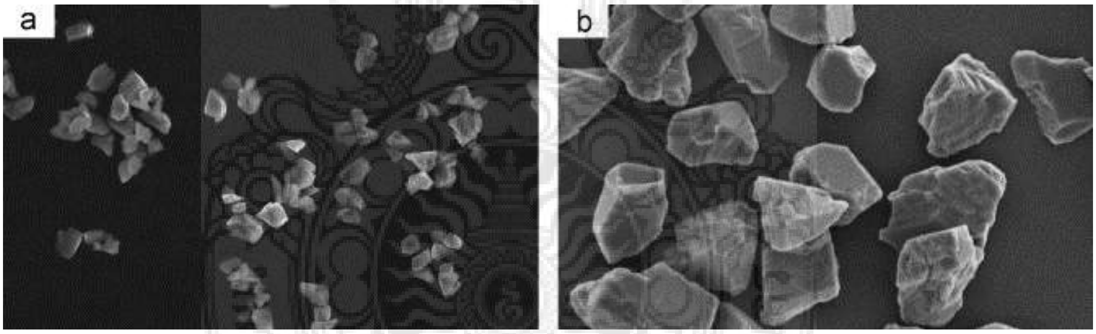
2.2 โคบอลต์ (Co)

รูปที่ 2.3 แสดงผงโคบอลต์ (Co) [13]

จากรูปที่ 2.3 โคบอลต์มีลักษณะเป็นเงาสีเทา มีองค์ประกอบทางเคมีเป็น Co สัญลักษณ์และเลขอะตอม 27 โคบอลต์ใช้ในการผลิตแม่เหล็กโคบอลต์และความต้านทานการสึกหรอสูงและโลหะผสม ขนาดของผงโคบอลต์อยู่ที่ประมาณ 1-2 μm ผงโคบอลต์ที่ละเอียดมีขนาดน้อยกว่าหรือเท่ากับ 0.5 μm ใช้ในเครื่องมือคาร์ไบด์ เพชรและเป็นโลหะผสม เช่น ผลิตภัณฑ์โลหะและการชาร์จแบตเตอรี่ เป็นต้น

2.3 การตรวจสอบคุณภาพผงทังสเตนคาร์ไบด์

การตรวจสอบรูปทรงเม็ดผงด้วยวิธีการ Scanning Electron Microscope (SEM) กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่มีกำลังขยายไม่สูงเท่ากับเครื่อง TEM (มีกำลังขยายสูงสุดประมาณ 10 นาโนเมตร) การเตรียมตัวอย่างเพื่อตรวจสอบด้วยเครื่อง SEM การสร้างภาพทำได้โดยการตรวจวัดอิเล็กตรอนที่สะท้อนจากพื้นผิวหน้าของตัวอย่าง ซึ่งภาพที่ได้จากเครื่อง SEM จะเป็นภาพลักษณะ 3 มิติ ดังนั้น เครื่อง SEM จึงถูกนำมาใช้ในการศึกษาสันนิษฐานและรายละเอียดของลักษณะพื้นผิวของตัวอย่าง เช่น ลักษณะพื้นผิวด้านนอกของเนื้อเยื่อและเซลล์ หน้าตัดของโลหะและวัสดุ หลักการทำงาน จะประกอบด้วยแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนซึ่งทำหน้าที่ผลิตอิเล็กตรอนเพื่อป้อนให้กับระบบ โดยกลุ่มอิเล็กตรอนที่ได้จากแหล่งกำเนิดจะถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้า จากนั้นกลุ่มอิเล็กตรอนจะผ่านเลนส์รวบรวมรังสี (Condenser lens) เพื่อทำให้กลุ่มอิเล็กตรอนกลายเป็นลำอิเล็กตรอน ซึ่งสามารถปรับให้ขนาดของลำอิเล็กตรอนใหญ่หรือเล็กได้ตามต้องการ หากต้องการภาพที่มีความคมชัดจะปรับให้ลำอิเล็กตรอนมีขนาดเล็ก หลังจากนั้นลำอิเล็กตรอนจะถูกปรับระยะโฟกัสโดยเลนส์ใกล้วัตถุ (Objectivelens) ลงไปบนผิวชิ้นงานที่ต้องการศึกษา หลังจากลำอิเล็กตรอนถูกกราดลงบนชิ้นงานจะทำให้เกิดอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary Electron) ขึ้นซึ่งสัญญาณจากอิเล็กตรอนทุติยภูมิจะถูกบันทึกและแปลงไปเป็นสัญญาณทางอิเล็กทรอนิกส์ ถูกนำไปสร้างเป็นภาพบนจอโทรทัศน์ต่อไป สามารถบันทึกภาพจากหน้าจอโทรทัศน์ได้เลย



รูปที่ 2.4 แสดง SEM micrographs of different cubic boron nitride powder grades used in this work. (a) 2–3 μm and (b) 10–14 μm. [29]

จากรูปที่ 2.4 เป็นภาพการส่องขยายผงทังสเตนคาร์ไบด์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน หรือ Scanning Electron Microscope (SEM) (a) มีขนาดผง 2-3 ไมครอน และ (b) มีขนาดผง 10-14 ไมครอน

2.4 กระบวนการโลหะผง (Power Metallurgy)

2.4.1 การผลิตและการเตรียมผงโลหะ แบ่งออกได้อย่างกว้าง ๆ เป็นวิธีทางกลและเคมี

2.4.1.1 กรรมวิธีทางกล

ก) Machining โดยการใช้เครื่องกัดเนื้อโลหะให้เป็นเศษเล็ก ๆ นิยมใช้กับโลหะผสมต่าง ๆ หรืออาจจะใช้การกลึงแล้วบดอัดด้วยลูกบดอีกครั้ง

ข) Milling โดยการบดแตก การกัด การกลึง ขูด การเจาะหรือการตัด ใช้กับโลหะที่มีความเปราะมากๆ

ค) Shoting โดยการหลอมโลหะให้เหลวเทผ่านตะแกรงตาถี่ที่ทนความร้อนสูงลงในน้ำ จะได้ผงโลหะที่มีลักษณะยาวรีขนาดใหญ่ที่มีขนาดไม่แน่นอน ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ เวลา ระยะทาง และขนาดของรูตะแกรง วิธีนี้ใช้ได้กับโลหะเหล็กเกือบทุกชนิด

ง) Granulation โดยการนำโลหะที่หลอมเหลวเทลงในภาชนะแล้วทำการกวนอย่างรวดเร็วโดยใช้ความเร็วสูง จะทำให้โลหะแยกตัวออกอย่างเป็นอิสระต่อกันจนแข็งตัว เป็นวิธีที่ไม่นิยม

จ) Atomization เป็นกรรมวิธีการพ่นโลหะที่เป็นของเหลว เหมาะสำหรับโลหะที่มีจุดหลอมเหลวต่ำ เช่น ดีบุก ตะกั่ว สังกะสี อะลูมิเนียม เป็นที่นิยมใช้มากที่สุดวิธีหนึ่ง

2.4.1.2 กรรมวิธีทางเคมี

ก) รีดักชันของสารประกอบออกไซด์ (Oxide Reduction) เป็นปฏิกิริยาที่มีการถ่ายเทอิเล็กตรอนจากสารหนึ่งไปยังอีกสารหนึ่ง

ข) อีเล็กโทรลิซิส (Electrolysis) คือกระบวนการผ่านกระแสไฟฟ้าเคมีลงในสารอิเล็กโทรลิซิสและทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมี เพื่อให้ได้สารผลิตภัณฑ์ตามที่ต้องการ

2.5 วิธีการบดละเอียด (Ball Milling)

เป็นการบดวัตถุที่ผ่านการบดหยาบให้มีขนาดของอนุภาคเล็กลงจนถึงขั้นละเอียดมาก (Pulverization) โดยใช้การกระทบ, กระแทกและการเสียดสีกันระหว่างวัตถุดิบ ตัวลูกบด (Grinding Media) และตัวบุผนังของหม้อบด (Lining) การที่เราจำเป็นที่จะต้องบดอนุภาคของวัตถุดิบให้มีขนาดละเอียดมาก (ต่ำกว่า 60 ไมครอนลงไป) เพื่อจะช่วยให้การเกิดปฏิกิริยาระหว่างการเผาของวัตถุดิบต่างๆ ที่อยู่ในสูตรของผลิตภัณฑ์เร็วขึ้น สมบูรณ์ขึ้น ให้ได้สมบัติต่าง ๆ เช่น ความแข็งแรงหลังเผา, เปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำ, ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อน, ปริมาณเนื้อแก้ว (Glassy Phase)

บอลมิลล์ (Ball Mill) ที่ใช้สำหรับบดวัตถุดิบให้มีความละเอียด สามารถแบ่งอย่างกว้างๆได้เป็นสองประเภทคือ แบบ (Batch Mill) และแบบ (Continuous Mill Batch mill) เป็นการบดโดยใช้ (Ball mill) โดยการเติมวัตถุ และ ตัวช่วยบด (Medium) เช่น น้ำ, แอลกอฮอล์, โพลีเอธิลีน อะซิโตน และ (Additive) ต่าง ๆ เช่น ตัวช่วยการกระจายลอยตัว (Deflocculant) ลงไปใน (Ball Mill) ทำการปิดฝา (Ball Mill) เริ่มดำเนินการบด จนกระทั่งได้ความละเอียดหรือเวลาตามที่ต้องการจึงทำการถ่ายน้ำออกมา ซึ่งเป็นการผลิตแบบไม่ต่อเนื่อง

การบดแบบ (ball mill) เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพที่ดีนั้นมีปัจจัยที่จะต้องควบคุมดังนี้

2.5.1 ปริมาณของลูกบดที่ใช้ในหม้อบด

เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพในการบดสูงสุด การเติมลูกบดลงไปในหม้อบด (Ball Mill) จะเติมอยู่ที่ประมาณ 50 - 55 เปอร์เซ็นต์ ของปริมาตรภายในทั้งหมดของหม้อบด ซึ่งจากการทดสอบ พบว่าช่วงของการเติมลูกบดในช่วงนี้จะช่วยให้เวลาในการบดน้อยที่สุด และค่าการกระจายตัวของอนุภาค (Particle Size Distribution) ดีที่สุด ซึ่งสามารถคำนวณปริมาณในการเติมลูกบดจากสูตร

ปริมาตรหม้อบด (V) = พื้นที่หน้าตัด x ความยาวของหม้อบด

= ¶ r^2 x L

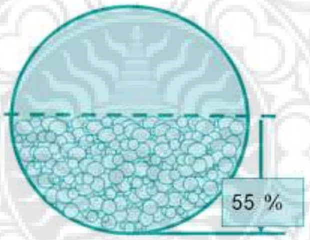
โดยที่ L = ความยาวภายในของหม้อบด

D = เส้นผ่านศูนย์กลางภายในของหม้อบด

จากสูตรเป็นสูตรการหาปริมาตรการบดประกอบด้วยปริมาตรหม้อบด ใช้สัญลักษณ์ตัวแปล (V) เป็นการหาปริมาณของช่องว่างที่อยู่ภายในของหม้อบด เพื่อให้ทราบถึงขนาดความจุภายในหม้อบด

พื้นที่หน้าตัด เป็นการนำค่าจากการวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของหม้อบด (D หรือ r^2) มีหน่วยเป็นมิลลิเมตร (mm) นำมาคูณกับค่าพาย (¶) ซึ่งจะได้เป็นสูตร (¶ r^2)

ความยาวของหม้อบด ใช้สัญลักษณ์ตัวแปล (L) คือ เป็นการนำค่าจากการวัดความยาวจากหัวหม้อบดจนถึงปลายหม้อบดมีหน่วยเป็นมิลลิเมตร (mm.)



รูปที่ 2.5 ระดับของลูกบดแบบ (Ball mill) ที่เหมาะสม [30]

จากรูปที่ 2.5 เป็นภาพจำลองแสดงระดับของลูกบดที่เหมาะสมต่อการบด ซึ่งจากภาพจะแสดงเส้นระดับจากพื้นวงกลมไปจนถึงระดับครึ่งวงกลม ซึ่งมีปริมาณการใช้ลูกบดที่ 55 เปอร์เซ็นต์ของหม้อบด

2.5.2 ขนาดของลูกบดและสัดส่วนในแต่ละขนาดที่เติมลงในหม้อบด

ขนาดของลูกบดที่ใช้เติมในหม้อบดนั้นขึ้นอยู่กับขนาดของหม้อบดที่ใช้งาน, ขนาดของวัตถุดิบที่เติมลงไปในหม้อบดและความละเอียดที่ต้องการบด โดยลูกบดขนาดใหญ่จะทำหน้าที่บดย่อยวัตถุดิบที่มีขนาดใหญ่ให้เล็กลง ลูกบดขนาดเล็กจะเป็นตัวทำให้วัตถุดิบเล็กลงได้ตามที่ต้องการ ลูกบดขนาดเล็ก จะบดวัตถุดิบให้มีขนาดการกระจายตัวของอนุภาคได้แคบกว่าลูกบดขนาดใหญ่เนื่องจาก

มีพื้นที่ผิวสัมผัสมากกว่า การเติมลูกบดที่มีขนาดแตกต่างกันลงไปในหม้อบดนั้นจะช่วยให้การเรียงตัวของ ลูกบดดีขึ้น นั่นคือมีช่องว่างลดลง ทำให้สามารถเติมวัตถุดิบลงไปในหม้อบดได้มากขึ้น นอกจากนี้การเติมลูกบดหลายๆขนาดจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการบดให้ดีขึ้นด้วย

2.5.3 ชนิดของลูกบดที่ใช้เติมในหม้อบด

การเลือกใช้ลูกบดชนิดต่าง ๆ กัน ขึ้นอยู่กับสิ่งที่เราจะบด จากตารางที่ 2.1 เป็นตารางแสดงคุณสมบัติของลูกบดชนิดต่างๆ ซึ่งจากตารางจะเห็นได้ว่ามีชนิดของลูกบดมี 5 ชนิด ซึ่งแต่ละชนิดจะมีประสิทธิภาพที่แตกต่างกัน ข้อมูลในตาราจะเรียงลำดับโดยดูจากประสิทธิภาพในการบดเริ่มจากชนิดของลูกบดที่มีประสิทธิภาพน้อยที่สุดไปหาชนิดของลูกบดที่มีประสิทธิภาพมาก จะเห็นได้ว่าชนิดของลูกบด (Flint/Pebble Stone) มีประสิทธิภาพในการบดน้อยที่สุด ส่วนชนิดของลูกบดทังสเตน (Tungsten) มีประสิทธิภาพในการบดมากที่สุด ในการเลือกใช้ชนิดของลูกบด จะต้องคำนึงถึงวัตถุดิบที่จะทำการบดด้วย วัตถุดิบที่จะทำการบดต้องมีความแข็งน้อยกว่าชนิดของลูกบดหรือเทียบเท่า ทำให้เกิดการบดที่ประสิทธิภาพ

ตารางที่ 2.1 แสดงคุณสมบัติของลูกบดชนิดต่างๆ [30]

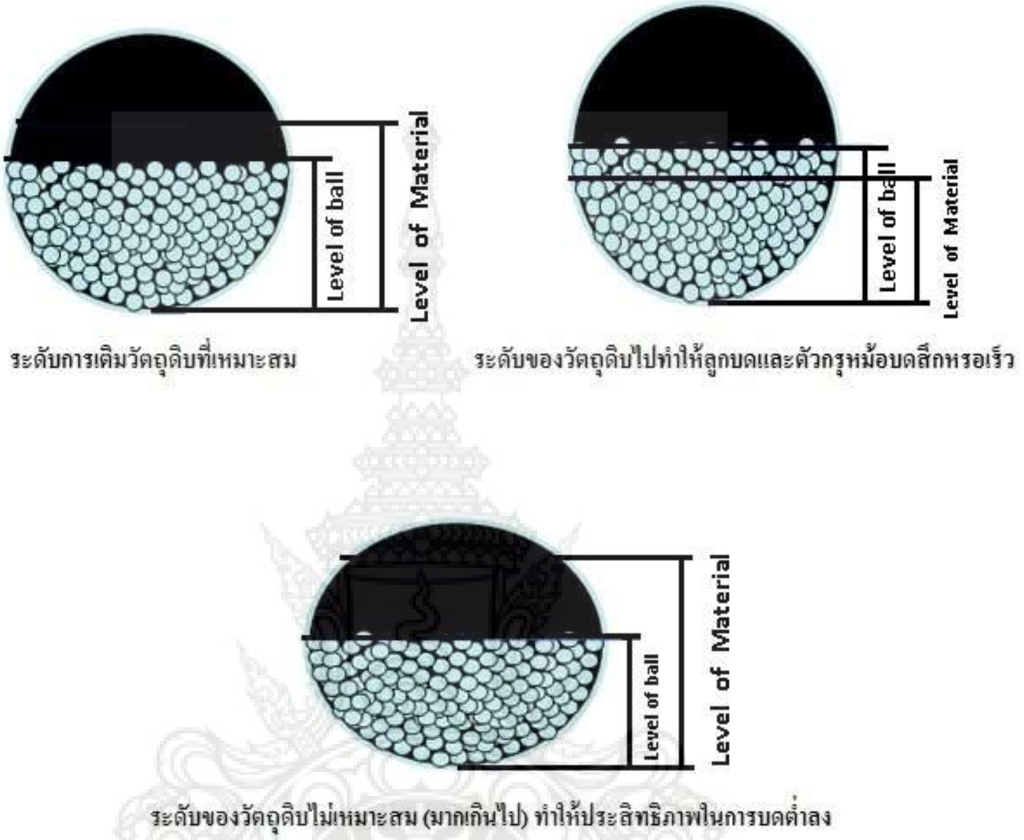
ชนิดของลูกบด	**ธาตุองค์ประกอบ**	**ความถ่วงจำเพาะ**	**ประสิทธิภาพในการบด**	**ราคา**	**% การสึกหรอ**
Flint/Pebble Stone	SiO_2	2.5 - 2.6	ปานกลางถึงต่ำ	ถูก	สูง
Porcelain	Al_2O_3, SiO_2	2.3 - 2.6	ปานกลาง	ปานกลาง	สูง
Steatite	SiO_2, MgO, Al_2O_3	2.6 - 2.8	ปานกลาง	ปานกลาง	ปานกลาง
Alumina	Al_2O_3	3.5 - 3.7	สูง	สูง	น้อย
Zirconia	ZrO_2	5.8 - 6.0	สูงมาก	สูงมาก	ต่ำ
tungsten	WC	13.0-16.0	สูงมาก	สูงมาก	น้อย

จากตารางที่ 2.1 เป็นตารางแสดงสมบัติของลูกบดชนิดต่างๆ จากข้อมูลในตารางที่ 2.1 ประกอบด้วย ชนิดของลูกบด ธาตุองค์ประกอบ ความถ่วงจำเพาะ ประสิทธิภาพ ราคา เปอร์เซ็นต์การสึกหรอ ซึ่งข้อมูลเหล่านี้ ค่าความสามารถต่างๆ จะแตกต่างกัน เนื่องจากชนิดของลูกบดแต่ละแบบมีประสิทธิภาพที่ต่างกัน จะเห็นได้ว่าลูกบดทังสเตนจะมีคุณภาพดีที่สุด

2.5.4 ปริมาณของวัตถุที่เติมและปริมาณของตัวช่วยบด (Medium) ที่เติม [34]

จากการคำนวณปริมาตรที่เหลือของหม้อบด หลังจากเติมลูกบดลงไปแล้ว เหลือปริมาตร หรือช่องว่างอยู่อีก 67 เปอร์เซ็นต์ ของปริมาตรหม้อบด การคำนวณปริมาตรวัตถุดิบและ (Medium) ที่เติมลงไปนั้นจะต้องเว้นช่องว่างของปริมาตรหม้อบดไว้อีก 25 เปอร์เซ็นต์ ด้วยเหตุผลที่ว่าจะต้องเหลือช่องว่างที่ให้โอกาสวัตถุดิบ และลูกบดมีการเคลื่อนที่ได้ และมีช่วงของการตกกระทบซึ่งกันและกัน อีกเหตุผลที่สำคัญก็คือ ในการเติมวัตถุดิบลงไปในหม้อบดนั้น วัตถุดิบทั้งหมดไม่ว่าจะมีขนาดใหญ่หรือเล็ก จะไม่สามารถแทรกผ่านไปตามช่องว่างระหว่างลูกบดที่มีอยู่ในหม้อบดได้ ดังนั้น

22 เปอร์เซ็นต์ ที่เป็นช่องว่างของลูกบดจะแทบไม่มีวัตถุดิบแทรกเข้าไปได้เลย จนกว่าเราจะเริ่มหมุนหม้อบดให้มีการเคลื่อนตัวของลูกบดและวัตถุดิบ จนกระทั่งวัตถุดิบและ (Medium) สามารถแทรกเข้าไปอยู่ในช่องว่างของลูกบดได้



รูปที่ 2.6 ระดับของลูกบดและวัตถุดิบในหม้อบด [30]

จากรูปที่ 2.6 เป็นภาพแสดงระดับของลูกบดและวัตถุดิบในหม้อบด ปริมาณระดับของลูกบดและวัตถุดิบที่ทำการบดที่อยู่ภายในหม้อบด จากภาพจะเห็นได้ว่าภาพระดับของลูกบดและวัตถุดิบที่อยู่ภายในหม้อบดมีเส้นระดับที่ควรเติมลูกบดและวัตถุดิบลงไปในหม้อบด เส้นระดับเส้นล่างจะเป็นระดับของปริมาณของลูกบด (Line Level of ball) ส่วนเส้นบนเป็นเส้นระดับของปริมาณวัตถุดิบที่จะทำการบด (Line Level of Material)

2.5.5 ความเร็วในการหมุนของหม้อบด (Critical Speed)

ในการบดนั้นจะอยู่ภายใต้แรงสามชนิด ที่จะต้องมีความสัมพันธ์ สอดคล้องกัน เพื่อส่งเสริมให้การบดมีประสิทธิภาพสูงสุด แรงทั้งสามชนิด คือแรงโน้มถ่วงของโลก (Gravitational Force) แรงสู่ศูนย์กลาง (Centrifugal Force) และแรงเสียดทานระหว่างวัตถุ (Frictional Force) ซึ่งการเคลื่อนตัวของลูกบด จะขึ้นอยู่กับความเร็วของการหมุนหม้อบดเป็นหลักตามทฤษฎีของการเคลื่อนที่ของวัตถุที่เคลื่อนที่ด้วยความเร็ว วัตถุจะมีความเร็วเมื่อมีแรงกระทำ ในกรณีของลูกบดและวัตถุดิบภายในหม้อบด ก็จะไม่เกิดการบดหรือการกระแทกกันขึ้น ซึ่งความเร็วที่เหมาะสมที่จะทำให้

ลูกบดตกกระทบกับวัตถุ เพื่อทำให้เกิดแรงตกกระทบกัน (Impact) และทำให้ลูกบดกับวัตถุดิบ เกิดการบดระหว่างกันและกัน (Grinding) ลูกบดถูกพาขึ้นไปและตกกระทบลงมาด้วยแรงโน้มถ่วง

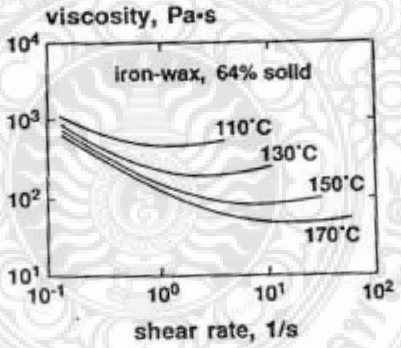
2.6 การขึ้นรูปและการอัดแน่น (Shaping and Compaction)

งานต่าง ๆ ทางด้านโลหะกรรมวัสดุผงต้องกำหนดให้ชิ้นงานสุดท้ายมีความหนาแน่นสูง การทำให้ผงเกิดการแน่นตัว (Densification) สามารถทำได้โดยวิธีการใดวิธีการหนึ่งในสามวิธีต่อไปนี้ คือ

1) อบผนึกชิ้นงานให้มีความหนาแน่นเพิ่มขึ้นจากพรีฟอร์มที่มีความหนาแน่นต่ำ
2) อัดผงเพื่อให้ความหนาแน่นสูงและตามด้วยการอบผนึก
3) อัดผงและอบผนึกในเวลาเดียวกันโดยใช้เทคนิคที่ให้ความหนาแน่นสูง

2.6.1 กระบวนการขึ้นรูป (Shaping Process)

ขั้นตอนการฉีดขึ้นรูปเกี่ยวข้องกับการให้ความร้อนและความดันต่อฟีดสต็อกในเวลาเดียวกันความสำเร็จที่ได้ขึ้นกับตัวแปรดังต่อไปนี้ เช่น อัตราการเติมผงในแม่พิมพ์ความดันสูงสุด อุณหภูมิส่วนผสมและเวลาภายใต้แรงดัน ส่วนผสมถูกทำให้ร้อนในท่อกระบอกที่ 130-190 ^{0}C จังหวะการขึ้นรูปที่แท้จริงเกิดจากการผลักสกรูในกระบอกไปข้างหน้าเพื่อฉีดฟีดสต็อกที่หลอมเหลวลงในแม่พิมพ์ฟีดสต็อกไหลจากหัวฉีดที่ปลายของกระบอกไปยังรูเท (Sprue) จากนั้นแยกไปตามช่องทางวิ่ง (Runner) ที่ผ่านเกตก่อนที่จะลงสู่แม่พิมพ์ เครื่องมือขึ้นรูปมีความเย็นกว่าฟีดสต็อก ดังนั้นความหนืดจึงมีค่าเพิ่มขึ้นขณะเติมลงสู่แม่พิมพ์ ความต้านทานการไหลที่เพิ่มขึ้นขณะเทส่วนผสมลงสู่แม่พิมพ์ทำให้ต้องเพิ่มความดันให้มากขึ้นจนช่องว่างในแม่พิมพ์ถูกเติมจนเต็ม



รูปที่ 2.7 ความหนืดของส่วนผสมในการฉีดขึ้นรูปกับอุณหภูมิและอัตราเฉือน [2]

2.6.2 เทคโนโลยีการอัดแน่น (Compaction Technology)

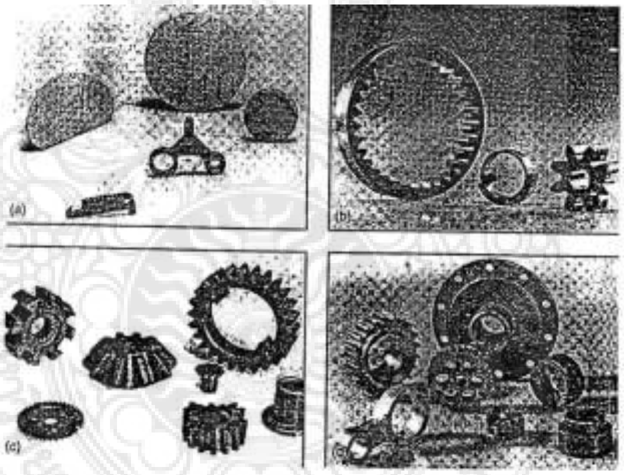
2.6.2.1 การเพิ่มความดัน (Pressurization)

ชนิดของความดันที่ใส่ให้ผงวัสดุขณะอัดมีผลต่อสมบัติชิ้นงานความดันที่มีผลมาจากทิศทางเดียวทำให้เกิดความลาดของความหนาแน่นและความลาดของสมบัติสูง โดยเฉพาะถ้าอัตราส่วนของความสูงต่อเส้นผ่าศูนย์กลางมีค่ามากการให้ความดันแบบสองทิศทางช่วยทำให้ความเค้นที่ส่งให้ผงวัสดุมีความสม่ำเสมอมากขึ้นส่งผลให้สมบัติและความหนาแน่นหลังการอัดมีความสม่ำเสมอเพิ่มขึ้นสำหรับอัดชิ้นงานที่มีอัตราส่วนความสูงต่อเส้นผ่าศูนย์กลางต่ำ การเลือกใช้วิธีการอัดแบบทิศทางเดียวก็เพียงพอ

ในการอัดแน่นสูงชิ้นงานหลังการอัดหา ได้ความสูงของปริมาณผงที่เติมลงในแม่พิมพ์และแรงที่ใช้ในการอัดแน่น ดังนั้นถ้าต้องการควบคุมความสูงของชิ้นงานสุดท้ายต้องทราบทั้งความหนาแน่นปรากฏและความหนาแน่นสุดท้ายของวัสดุนั้นๆ

2.6.2.2 การแยกประเภทของชิ้นส่วน (Part Classification)

ชิ้นส่วนแยกได้ 4 ประเภทตามระดับความยุ่งยากในการอัดเป็นการสรุปเปรียบเทียบชิ้นส่วนทั้งสี่ชิ้นส่วนประเภทที่ 1 เป็นชิ้นส่วนระดับเดียวมีรูปร่างง่ายๆ อัดโดยใช้แม่พิมพ์จังหวะเดียวที่มีการเคลื่อนที่ของพันช์ตัวเดียว โดยปกติอัตราส่วนความสูงต่อเส้นผ่าศูนย์กลางมีค่าน้อย ชิ้นส่วนประเภทที่ 2 เป็นชิ้นส่วนระดับเดียวที่ความดันในการอัดแน่นมาจากสองทิศทางความแตกต่างในสองประเภทนี้คืออัตราส่วนความสูงต่อเส้นผ่าศูนย์กลางมีค่ามากขึ้นและมีการคำนึงเกี่ยวกับเครื่องมือมากขึ้น ชิ้นส่วนประเภทที่ 3 เป็นชิ้นส่วนที่มีสองระดับและความดันมาจากสองทิศทาง สุดท้ายชิ้นส่วนประเภทที่ 4 เป็นชิ้นส่วนที่มีรูปร่างยุ่งยากที่สุดในการอัดส่วนประกอบมีหลายระดับซึ่งได้แรงอัดมาจากทั้งพันช์ตัวบนและพันช์ตัวล่าง โดยปกติชิ้นส่วนเครื่องมือมีการสร้างให้มีการเคลื่อนที่หลายแบบที่เป็นอิสระต่อกันเพื่อความมั่นใจในการเติมผงและความดันที่ให้เพียงพอในแต่ละระดับ รูปที่ 2.31 เป็นรูปแสดงชิ้นส่วนทั้ง 4 ประเภท ชิ้นส่วนเหล่านี้ได้แสดงถึงความสามารถของการอัดแน่นทางด้าน P/M



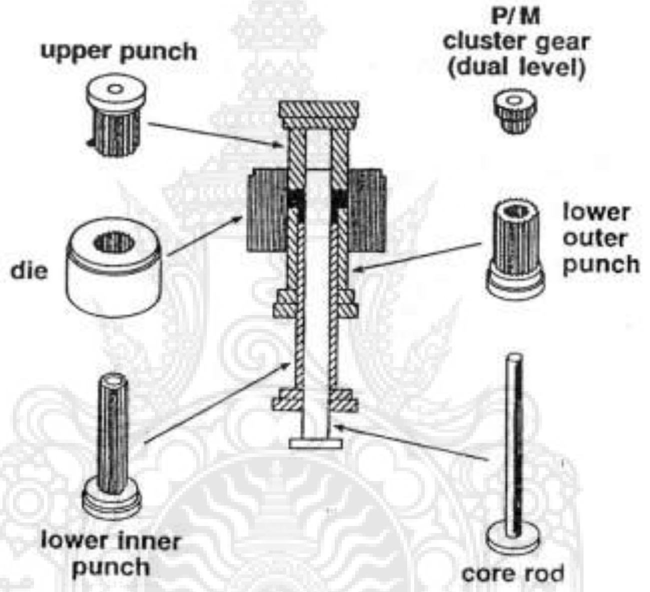
รูปที่ 2.8 ชิ้นส่วน P/M 4 ประเภท a) ประเภท 1 b) ประเภท 2 c) ประเภท 3 d) ประเภท 4 [2]

2.6.2.3 การพิจารณาเลือกเครื่องมือ (Tooling Concerns)

การออกแบบและข้อกำหนดที่เหมาะสมของเครื่องมือในการอัดแน่นช่วยยืดอายุการใช้งานได้เหมาะสม ถ้าจำนวนชิ้นส่วนในชุดเครื่องมือมีมากขึ้นต้องเพิ่มการกำจัดการสึกหรอที่เพิ่มขึ้นด้วยเหล็กกล้าเครื่องมือมีความเหมาะสมในการผลิตชิ้นส่วนที่มีจำนวนไม่มากนัก ขณะที่การเลือกใช้ซีเมนต์คาร์ไบด์สำหรับการผลิตส่วนจำนวนมาก การหดตัวและการบวมของวัสดุผงจากการอบผนึกและการคืนตัวแบบยืดหยุ่นขณะดันชิ้นงานออกต้องนำมาพิจารณาร่วมกันในการกำหนดขนาดของเครื่องมือความสามารถในการทำรูปร่างสุดท้ายเป็นลักษณะสำคัญของวิธีการ P/M ข้อดีนี้ทำให้ต้องมี

การกำหนดขนาดของเครื่องมือด้วยความระมัดระวังเพื่อให้ได้ขนาดชิ้นส่วนที่ถูกต้องความดันที่ใช้ขณะอัดแน่นถูกจำกัดโดยรูปร่างและชนิดของวัสดุเครื่องมือยิ่งกว่านั้นขนาดของเครื่องอัดการเคลื่อนที่ความซับซ้อนของชิ้นส่วนและผิวสุดท้ายที่ต้องการล้วนมีอิทธิพลต่อการออกแบบเครื่องมือทั้งสิ้น

ลักษณะการเคลื่อนที่พิเศษของเครื่องมือสามารถนำไปพิจารณาในการออกแบบเครื่องมือเพื่อใช้กับผงหรือชิ้นส่วนที่มีลักษณะที่เป็นปัญหา เช่น เติมผงลงในแม่พิมพ์ให้ล้นก่อนการอัดแน่นและก่อนที่จะใส่พันช์ตัวบนเข้าไปในแม่พิมพ์ต้องกวาดของส่วนของผงที่เกินออกไปก่อนการทำ พิสูจน์ว่าใช้ได้ผลดีมากในการอัดชิ้นส่วนขนาดเล็กที่มีความสม่ำเสมอของการไหลของผงไม่แน่นอนหรืออาจทำโดยเติมผงให้มีความสูงต่ำกว่าแม่พิมพ์ซึ่งใช้ในกรณีอัดชิ้นส่วนด้วยพันช์ตัวบนที่มีลักษณะเปราะบาง การทำดังนี้สามารถใช้แม่พิมพ์เป็นตัวพยุงด้านข้างของพันธ์ตัวบนก่อนเริ่มการอัด



รูปที่ 2.9 ส่วนประกอบของเครื่องมือหลายชิ้นใช้ในการอัดเฟืองสองระดับ [2]

2.6.2.4 การออกแบบการอัดแน่น (Designing for Compaction)

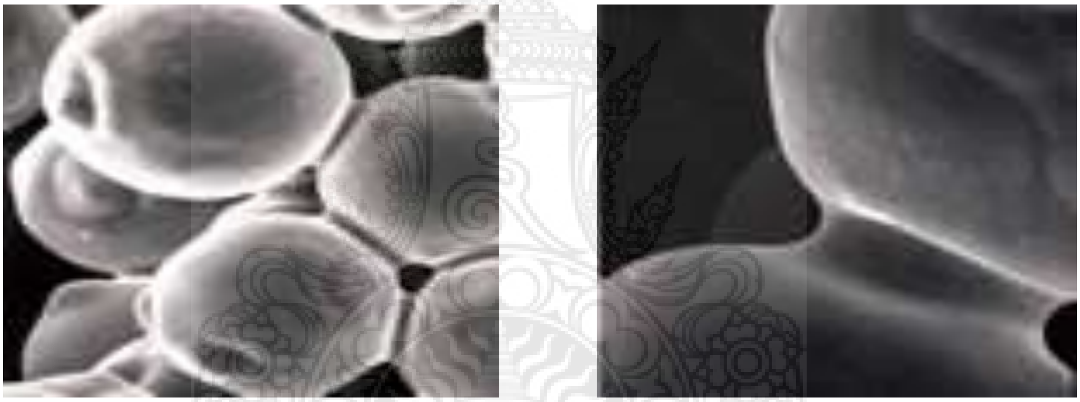
การออกแบบชิ้นส่วนและเครื่องมือสำหรับการอัดแน่นอย่างง่ายเป็นงานที่ต้องใช้ทั้งประสบการณ์และความรู้สึกความสำคัญคือการผสมผสานคุณลักษณะของวัสดุผง สมบัติที่คาดว่าจะได้รับและระยะเผื่อของชิ้นงานเข้าด้วยกันการออกแบบเครื่องมือเพื่อให้มีอายุการใช้งานนานและมีการสึกหรอต่ำและคาดว่ารับความดันได้สูงถึง 700 PMa โดยสามารถควบคุมขนาดของชิ้นงานได้ ชิ้นส่วน P/M ส่วนใหญ่มีความผันแปรในขนาดสุดท้ายน้อยกว่า $\pm$ 0.07 มม และถ้าทำภายใต้เงื่อนไขที่แน่นอนสามารถควบคุมระยะเผื่อได้ถึง $\pm$ 0.01 มม

เพื่อให้ได้ชิ้นงานที่มีความสมบูรณ์และสามารถความคุมขนาดของชิ้นงานได้ต้องมีกฎเกณฑ์ที่แน่นอนในการออกแบบชิ้นส่วนและเครื่องมือ สำหรับเครื่องมือควรออกแบบให้มีการอัดตามแนวแกนมีความง่ายสุดเท่าที่เป็นไปได้ ถึงแม้ว่ารูปร่างชิ้นส่วนมีความซับซ้อนแต่เครื่องมือควรสามารถผลิตให้

ง่ายได้ การออกแบบรูปร่างต้องให้มีการไหลของผงวัสดุลงสู่แม่พิมพ์ได้ง่ายและเอาชิ้นงานออกก็ต้องทำได้ง่ายด้วย ดังนั้นชิ้นงานรูปร่างเฉพาะไม่สามารถผลิตได้จากการอัดแบบทิศทางเดียว มีวิธีการอื่นๆ เช่น การอัดแบบทุกทิศทางหรืออาจมีการใช้แม่พิมพ์ที่มีการถอดแบบได้เพื่อแยกส่วนประกอบในแต่ละรอบเวลาที่ทำการอัดเพื่อให้การแตกหักของเครื่องมือเกิดขึ้นน้อยที่สุด ดังนั้นควรหลีกเลี่ยงการใช้เครื่องมือที่มีบางส่วนบางเกินไปพันช์รูปร่างแบนราบและผนังแม่พิมพ์ที่ตรงเป็นที่ต้องการมากแต่ใช้ไม่ได้ในทุกกรณี

2.7 การอบผนึก (Sintering)

การอบผนึกเป็นการทำให้อนุภาคเชื่อมติดกันที่อุณหภูมิสูง อาจเกิดขึ้นที่อุณหภูมิต่ำกว่าจุดหลอมเหลวของวัสดุนั้นๆโดยการเคลื่อนที่ของอะตอมในสถานะของแข็ง แต่ในวัสดุหลายชนิดจะเกี่ยวกับการฟอร์มตัวของเฟสของเหลว เมื่อพิจารณาโครงสร้างในระดับจุลภาค การเพิ่มขนาดของคอคอด (Neck Growth) ที่เชื่อมติดต่อกันบริเวณจุดสัมผัสของอนุภาคสองอนุภาค



รูปที่ 2.10 แสดงการเชื่อมต่อระหว่างอนุภาค เกิดการฟอร์มตัวของคอคอดเนื่องจากอบผนึก [6]

จากรูปที่ 2.10 แสดงภาพถ่ายแสดงการเชื่อมต่อระหว่างอนุภาค เป็นการเปลี่ยนแปลงรูปคอคอดในสถานะของแข็ง (Solid State Neck) ระหว่างการอบผนึกอนุภาคทรงกลมการเพิ่มขนาดของคอคอดทำให้สมบัติของชิ้นงานเปลี่ยนไปหลังอบผนึก

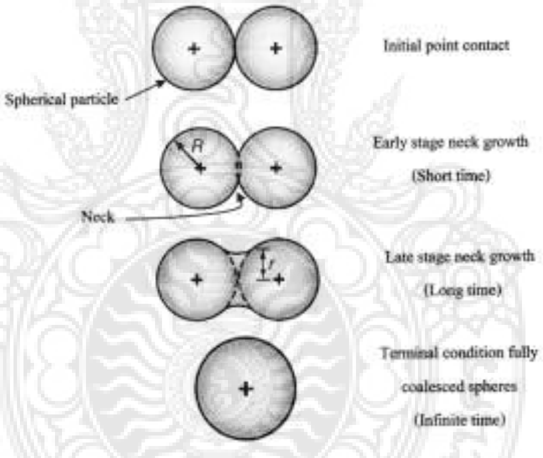
อนุภาคเชื่อมต่อกันโดยการเคลื่อนที่ของอะตอม การเชื่อมต่อกันของอนุภาคเป็นการกำจัดพลังงานพื้นที่ผิวที่มีอยู่สูงของผงวัสดุ ปริมาณพลังงานพื้นผิวต่อหน่วยปริมาตรขึ้นกับส่วนกลับของขนาดอนุภาค และการประเมินพลังงานพื้นผิวประเมินจากพื้นที่ผิวของอนุภาค ดังนั้นอนุภาคขนาดเล็กมีพื้นที่ผิวมากกว่าจึงมีพลังงานพื้นผิวมากกว่าทำให้อบผนึกได้เร็วกว่า อย่างไรก็ตามไม่ใช่พลังงานพื้นผิวทุกอย่างที่ใช้ได้สำหรับการอบผนึก สำหรับของแข็งที่มีลักษณะเป็นผิวบริเวณสัมผัสระหว่างอนุภาคทั้งหมดกลายเป็นขอบเกรน ในกรณีนี้จึงเกี่ยวข้องกับพลังงานขอบเกรน ซึ่งมีความสำคัญต่อการเคลื่อนที่ของอนุภาคจัดเป็นข้อบกพร่องชนิดหนึ่ง ภายในบริเวณนี้มีการเคลื่อนที่ของอะตอมสูง กลไกของการอบผนึกอธิบายได้ในรูปของเส้นทางการเคลื่อนที่ของอะตอมทำให้เกิดการไหลของมวล สำหรับผงโลหะกลไกการอบผนึกเป็นกระบวนการแพร่ผ่านขอบเกรนหรือแพร่ผ่านแลตทิซของผนึก

ขั้นตอนกระบวนการอบผนึกอธิบายโดยใช้วิธีการทางคณิตศาสตร์ที่เกี่ยวข้องกับแรงขับและจลนศาสตร์

การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างขณะอบผนึกมีความสัมพันธ์กับการเพิ่มขนาดของคอคอดที่ขึ้นกับกลไกการเคลื่อนที่ (Transport Mechanisms) ที่ส่วนใหญ่เป็นกระบวนการแพร่ เป็นกระบวนการที่กระตุ้นด้วยความร้อนได้ (Thermally Activated) และจำเป็นต้องใช้พลังงานสำหรับการเคลื่อนที่ของอะตอม การที่อะตอมจะเคลื่อนที่ได้ มีพลังงานมากกว่าหรือเท่ากับพลังงานกระตุ้นที่ทำให้จำนวนอะตอมแยกตัวออกเป็นอิสระจากตำแหน่งปัจจุบันและเคลื่อนที่เข้าไปยังตำแหน่งที่ว่าง (Vacant Site)

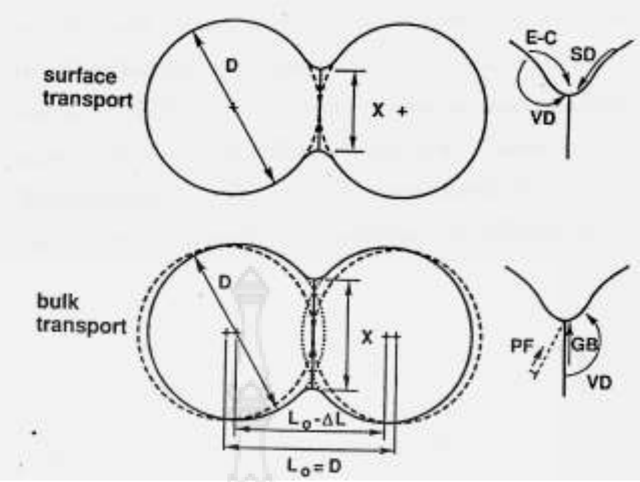
2.7.1 ทฤษฎีการอบผนึก (Sintering theory)

การอัดแน่นผงอนุภาคมีบริเวณสัมผัสกับอนุภาคอื่นได้หลายบริเวณ พันธะระหว่างอนุภาคที่บริเวณสัมผัสขยายโตขึ้นและรวมตัวกัน (Merge) เมื่อการอบผนึกดำเนินไปอย่างต่อเนื่องที่แต่ละจุดสัมผัสของอนุภาคเกิดเป็นขอบเกรนโตขึ้นมาแทนที่บริเวณรอยต่อระหว่างเฟสของแข็งและไอ (Solid-Vapor Interface) การอบผนึกเป็นเวลานานทำให้อนุภาคสองอนุภาครวมเป็นหนึ่งอนุภาคขนาดใหญ่มีเส้นผ่าศูนย์กลางเป็น 1.26 เท่าของขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของอนุภาคเมื่อเริ่มต้น



รูปที่ 2.11 แบบจำลองการอบผนึกอนุภาคทรงกลมสองอนุภาคที่พัฒนาพันธะระหว่างอนุภาคเริ่มต้นจากจุดสัมผัส [12]

จากรูปที่ 2.11 แสดงขั้นตอนแบบจำลองการอบผนึกอนุภาคทรงกลมสองอนุภาคที่พัฒนาพันธะระหว่าง ซึ่งอนุภาคเริ่มต้นจากจุดสัมผัสการอบผนึกเริ่มต้นจากขั้นตอนแรก (Initial Stage) ที่คอคอดระหว่างอนุภาคมีการเพิ่มขนาดอย่างรวดเร็ว ขั้นตอนต่อมาเรียกว่าขั้นตอนกลาง (Intermediate Stage) โครงสร้างรูพรุนราบเรียบขึ้นและมีการเชื่อมต่อกันของรูพรุนเป็นลักษณะกระบอก (Cylindrical Nature) ขณะที่สมบัติของชิ้นงานเคมีการพัฒนา ในช่วงท้ายของขั้นตอนกลางการเกิดการโตของเกรน (Grain Growth) ส่งผลให้เกรนมีขนาดใหญ่ขึ้นและจำนวนเกรนลดน้อยลง กรณีนี้เกิดขึ้นพร้อมกับการแยกตัวออกไปอยู่โดดเดี่ยวของรูพรุนและอัตราการอบผนึกช้าลง



รูปที่ 2.12 แบบจำลองกลไกการอบผนึกทั้งสองประเภทในอนุภาคทรงกลม [27]

จากรูปที่ 2.12 แสดงแบบจำลองกลไกการอบผนึกทั้งสองประเภทในอนุภาคทรงกลม ซึ่งกลไกการเคลื่อนที่เป็นตัวกำหนดการไหลของมวลที่เกิดขึ้นตามแรงขับ กลไกการเคลื่อนที่แบ่งเป็นสองประเภท คือ การเคลื่อนที่ตามพื้นผิว (Surface Transport) และการเคลื่อนที่แบบมวลรวม (Bulk Transport) ทั้งสองกลไกประกอบด้วยกลไกระดับอะตอมที่สนับสนุนให้เกิดการไหลของมวล

การเคลื่อนที่แบบตามพื้นผิวเกี่ยวข้องกับการเพิ่มขนาดของคอคอดโดยปราศจากการเปลี่ยนแปลงระยะต่างๆ ภายในอนุภาค (นั่นคือ ไม่มีการหดตัวและไม่มีการแน่นตัวเกิดขึ้น) ทั้งนี้เนื่องจากการไหลของมวลเริ่มต้นและสิ้นสุดที่พื้นผิวของอนุภาค ในขณะอบผนึกที่ควบคุมโดยการเคลื่อนที่ตามพื้นผิวมีกระบวนการสำคัญสองกระบวนการที่เกิดขึ้นขณะอบผนึกและการแพร่ตามพื้นผิวและการระเหย การควบแน่น การแพร่ตามพื้นผิวที่มีความสำคัญในการอบผนึกโลหะหลายชนิดที่อุณหภูมิต่ำ รวมทั้งการอบผนึกเหล็กด้วย ส่วนการระเหย การควบแน่นไม่เกิดอุณหภูมิต่ำแต่มีความสำคัญต่อการอบผนึกโลหะที่มีความเสถียรต่ำ เช่น ตะกั่ว

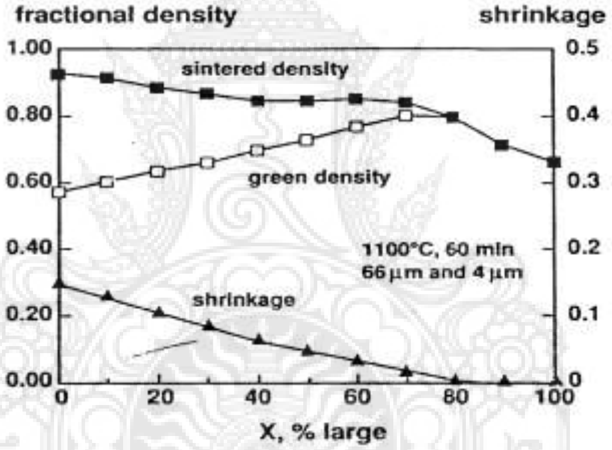
ในทางตรงกันข้ามการอบผนึกที่ควบคุมโดยการเคลื่อนที่มวลรวมทำให้เกิดการหดตัว มวลเริ่มต้นเคลื่อนที่จากภายในอนุภาคและสิ้นสุดที่คอคอ กลไกการเคลื่อนที่แบบมวลรวมคือการแพร่ในเนื้อวัสดุการแพร่ตามขอบเกรน การไหลแบบพลาสติกและการไหลแบบหนืด สำหรับการไหลแบบพลาสติกมีความสำคัญที่สุดในช่วงเริ่มให้ความร้อน โดยเฉพาะผงที่ผ่านการอัดทำให้มีความหนาแน่นของดิสโลเคชันสูง

โดยทั่วไปความเค้นของแรงตึงผิวไม่เพียงพอต่อการสร้างดิสโลเคชันขึ้นมาใหม่ ดังนั้นเมื่อดิสโลเคชันถูกอบอ่อน (จากการให้ความร้อน) ให้เลื่อนออกจากผงอนุภาค บทบาทของการไหลแบบพลาสติกจึงลดลง ในทางตรงกันข้ามสำหรับวัสดุ เช่น แก้วและพลาสติก การอบผนึกโดยการไหลแบบหนืดที่อัตราการรวมตัวกันของอนุภาคขึ้นกับขนาดของอนุภาคและความหนืดของวัสดุ โลหะสามารถอบผนึกโดยการไหลแบบหนืดได้เช่นกันถ้ามีเฟสของเหลวเกิดขึ้นตามขอบเกรน การแพร่ตามขอบเกรนมีความสำคัญบ้างสำหรับการแน่นตัวในวัสดุที่เป็นผลึก และมีความสำคัญมากสำหรับการแน่นตัวของโลหะทั่วไป ทั้งกระบวนการเคลื่อนที่ตามพื้นผิวและการเคลื่อนที่มวลรวมทำให้คอคอดมีการเพิ่มขนาด

แต่ความแตกต่างที่สำคัญอยู่ที่ความหนาแน่น (การหดตัว) ระหว่างการอบผนึกโดยทั่วไปกระบวนการเคลื่อนที่มวลรวมมีความสำคัญมากขึ้นที่อุณหภูมิสูงขึ้น

2.7.2 การอบผนึกผงโลหะผสม (Mixed Powder Sintering)

ลักษณะของชิ้นส่วนที่ผ่านการอบผนึกมีสามลักษณะ คือ ส่วนผสมที่มาจากอนุภาคหลายขนาดผสมกัน ลักษณะของสารละลายของแข็งและลักษณะที่เป็นวัสดุผสม ลักษณะแรกใช้เมื่อต้องการความหนาแน่นจากการจัดเรียงตัวของส่วนผสมมีค่าสูง ลักษณะที่สองเกี่ยวข้องกับความสม่ำเสมอของส่วนผสมของผงด้วยกระบวนการแพร่ และลักษณะสุดท้ายเกี่ยวกับการอบผนึกร่วมของวัสดุสองเฟสที่ต่างกัน ส่วนผสมของผงชนิดเดียวกันที่มีขนาดแตกต่างกันจะให้ความหนาแน่นกรีนสูง เมื่อขนาดอนุภาคเฉลี่ยสูงขึ้นการตอบสนองต่อการอบผนึกจะต่ำลง ดังนั้นจึงเกิดขึ้นเป็นสองสถานการณ์คือส่วนผสมที่อุณหภูมิอบผนึกต่ำและช่วงเวลาการอบผนึกสั้นความสำคัญอยู่ที่ความหนาแน่นกรีนและทำให้ความหนาแน่นสูงโดยที่ขนาดมีความเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย ขณะที่อุณหภูมิอบผนึกสูงและเวลาอบผนึกนานขึ้น ความสำคัญของผลกระทบจากการอบผนึกเพิ่มขึ้นและได้ความหนาแน่นสูงสุดเมื่ออนุภาคมีขนาดเล็กสุด



รูปที่ 2.13 ผลกระทบของส่วนผสมต่อการอบผนึกในผงเหล็กสองขนาด เมื่อผงขนาดใหญ่เพิ่มจำนวนขึ้น ทำให้ความหนาแน่นดีขึ้นแต่การหดตัวลดลงเพราะอนุภาคเฉลี่ยเพิ่มขึ้น ดังนั้นความหนาแน่นหลังอบผนึกสูงสุดเมื่ออนุภาคมีขนาดเล็กสุด [6]

จากรูปที่ 2.13 แสดงผลกระทบที่เกิดจากสถานการณ์หลัง ที่แสดงความหนาแน่นกรีนและความหนาแน่นหลังอบผนึกกับส่วนผสมของผงเหล็กขนาด 4 และ 66 ไมครอน การหดตัวจากการอบผนึกเล็กลงเมื่อขนาดเฉลี่ยของอนุภาคเพิ่มขึ้น (เปอร์เซ็นต์ของอนุภาคขนาดใหญ่เพิ่มขึ้น) ปัญหาลักษณะงานคล้ายกันนี้เกิดขึ้นในการอบผนึกวัสดุผสมที่ประกอบด้วยผงที่ต่างกันสองชนิด โดยเฉพาะเมื่อเฟสหนึ่งเป็นเซรามิคที่ไม่ยอมให้เกิดการอบผนึก

แผนภาพเฟสแสดงปฏิกิริยาที่เป็นไปได้ขณะอบผนึกเฟสผสม อัตราการแพร่เป็นตัวกำหนดอัตราการรวมเป็นเนื้อเดียวกันที่ขนาดอนุภาคต่างๆแบบจำลองของส่วนผสมโลหะ 2 ชนิด (binary) อนุภาคเป็นทรงกลม เริ่มต้นความลาดของความเข้มข้นมีความชันสูง เมื่อให้ความร้อนนาน

ขึ้นระดับความแตกต่างหรือความลาดจะลดลง (gradient level out) จนในที่สุดมีค่าเข้าใกล้ค่าคงที่ โดยทั่วไปอนุภาคขนาดเล็ก อุณหภูมิอบผนึกสูงและเวลาในการอบผนึกนานช่วยในการส่งเสริมการรวมตัวเป็นเนื้อเดียวกัน

2.7.3 เตาอบผนึก (Sintering furnaces)

เตาอบผนึกใช้ควบคุมเส้นทางเวลา-อุณหภูมิในรอบเวลาของการอบผนึก นอกจากนี้ยังใช้บรรจุบรรยากาศที่ต้องการ ที่ช่วยในการกำจัดสารหล่อลื่น สารยึด และควบคุมการปรับปรุงสมบัติด้วยความร้อน การควบคุมเส้นทางการเย็นตัวลงที่เหมาะสมทำให้วัสดุ (P/M) มีความแข็งแรงและความทนทานสูงดังแสดงด้วยโครงสร้างจุลภาคเฟสผสม

รูปที่ 2.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของเวลาและอุณหภูมิในการอบผนึก [6]

จากรูปที่ 2.14 แสดงกราฟแสดงความสัมพันธ์ของเวลาและอุณหภูมิในการอบผนึก ซึ่งข้อมูลจากกราฟนี้มีความสัมพันธ์ในแนวแกน (X) เป็นเวลาที่ใช้ในการอบผนึก แกน (Y) เป็นอุณหภูมิที่ใช้ในการอบผนึก ซึ่งมีขั้นตอนดังนี้

2.7.3.1 ขั้นตอนการไล่ความชื้น เมื่อนำชิ้นงานเข้าเตาแล้วให้ปรับอุณหภูมิต่อเนื่องขึ้นถึง 400 องศาเซลเซียส โดยใช้เวลาในการเพิ่มอุณหภูมิเป็นเวลา 4 ชั่วโมง แล้วคงอุณหภูมินี้ไว้เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

2.7.3.2 ขั้นตอนไล่ตัวประสาน (Dewaxing) เพิ่มต่อเนื่อง อุณหภูมิจาก 400 องศาเซลเซียส เป็น 700 องศาเซลเซียส โดยใช้เวลาในการเพิ่มอุณหภูมิเป็นเวลา 2 ชั่วโมง แล้วคงอุณหภูมินี้ไว้เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เพื่อไล่ตัวประสานโพลิไวนิลแอลกอฮอล์

2.7.3.3 ขั้นตอนการให้ความร้อนก่อนการอบผนึก (Pre Sintering) เพิ่มต่อเนื่องอุณหภูมิจาก 700 องศาเซลเซียสเป็น 1200 องศาเซลเซียส โดยใช้เวลาในการเพิ่มอุณหภูมิเป็นเวลา 3 ชั่วโมง แล้งคงอุณหภูมิไว้เป็นเวลา 1 ชั่วโมงเพื่อให้ความร้อนก่อนการอบผนึก

2.7.3.4 ขั้นตอนการอบผนึก เพิ่มต่อเนื่องอุณหภูมิจาก 1200 องศาเซลเซียส เป็น 1450 องศาเซลเซียส เมื่ออุณหภูมิถึง 1300 องศาเซลเซียส ให้หยุดเติมก๊าซไนโตรเจน โดยใช้เวลาในการเพิ่มอุณหภูมิเป็นเวลา 3 ชั่วโมง ให้คงการอบผนึก 1 ชั่วโมง เพื่อเกิดการรวมตัวกันระหว่างทังสเตนคาร์ไบด์และโคบอลต์

2.7.3.5 ขั้นตอนการปล่อยให้เย็นตัว (Cooling) ปล่อยให้ชิ้นงานเย็นตัวในเตาจนถึงอุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส จากนั้นนำชิ้นงานออกมาปล่อยให้เย็นตัวในอากาศ

2.7.4 การหาความหนาแน่นของชิ้นงาน

การหาความหนาแน่นของของแข็งสามารถทำได้ 2 วิธี ดังนี้

2.7.4.1 กรณีทราบปริมาตรของของแข็งนั้น

$$\text{Density } (\rho) = \frac{Mass}{Volume}$$

จากสูตรแสดงการหาความหนาแน่นด้วยสูตรในกรณีทราบปริมาตรของของแข็งนั้น ซึ่งความหนาแน่น (Density) เป็นอัตราส่วนระหว่างมวล (Mass) กับปริมาตร (Volume) ซึ่งโดยทั่วไปมีหน่วยกิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร (Kg/m^3) หรือกรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร (g/cm^3)

2.7.4.2 กรณีไม่ทราบปริมาตรของของแข็ง

สามารถทำได้โดยใช้หลักการของอาร์คีมีดิส (Archimedes’ Principle) ซึ่งกล่าวว่า น้ำหนักที่หายไปในน้ำย่อมเท่ากับน้ำหนักของน้ำที่ถูกวัตถุนั้นแทนที่ ดังนั้นความหนาแน่นของของแข็งสามารถหาได้จาก น้ำหนักของชิ้นงานในอากาศและความหนาแน่นของของเหลว

$$\rho = \frac{A}{A-B} \times \rho_0$$

เมื่อ ρ = ความหนาแน่นของชิ้นงาน

A = น้ำหนักในอากาศ (g)

B = น้ำหนักของของเหลว (g)

ρ_0 = ความหนาแน่นของของเหลว

จากสูตร แสดงการหาความหนาแน่นด้วยสูตรในกรณีไม่ทราบปริมาตรของของแข็งนั้น ซึ่งความหนาแน่น (Density) เป็นอัตราส่วนระหว่างน้ำหนักในอากาศกับน้ำหนักในอากาศลบน้ำหนักของของเหลวคูณกับความหนาแน่นของของเหลว ซึ่งโดยทั่วไปมีหน่วยกิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร (Kg/m^3) หรือกรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร (g/cm^3)

2.8 การทดสอบความแข็ง (Hardness Test)

ความแข็ง (Hardness) เป็นการต้านทานของโลหะของวัสดุอื่นต่อการเจาะหรือการแทงวัสดุอื่นที่แข็งกว่าโดยการไม่เปลี่ยนรูปถาวร (Permanent Set) ซึ่งเป็นลักษณะหนึ่งของความต้านทานต่อการเปลี่ยนรูปของโลหะ

2.8.1 การทดสอบความแข็งแบบร็อคเวลล์ (Rockwell Hardness Test)

หลักการทำงานความแข็งแบบร็อคเวลล์ (Rockwell Hardness Test) การทดสอบความแข็งแบบร็อคเวลล์แบบนี้จะนิยมมากในอุตสาหกรรมเพราะเป็นวิธีการทดสอบที่ทำได้รวดเร็วเนื่องจากสามารถอ่านค่าความแข็งได้โดยตรงทันทีจากเครื่องทดสอบ ไม่ต้องเสียเวลาในการวัดเส้นผ่านศูนย์กลางของรอยกดเหมือนวิธีแบบบริเนลล์และแบบวิคเกอร์ การทดสอบความแบบร็อคเวลล์ยังสามารถใช้ทดสอบความแข็งของโลหะ ตั้งแต่อ่อนจนกระทั้งแข็งมาก ได้เพรามีสเกลให้เลือกใช้หลายสเกลแต่ละสเกลก็เหมาะกับโลหะแต่ละชนิดโดยใช้ขนาดหัวกดและแรงกดทดสอบต่างกันมีหัวกดทดสอบอยู่ 2 ชนิด คือรูปเพชรกรวย (Diamond Cone) ซึ่งอ่านค่าความแข็งที่วัดได้บนสเกลดำและลูกบอลเหล็กกล้าอ่านได้จากสเกลสีแดงที่ตั้งเครื่อง โดยทั่วไปการทดสอบความแข็งแบบร็อคเวลล์ที่นิยมใช้กันมากจะมีสเกล B และสเกล C

สำหรับการทดสอบความแข็งแบบร็อคเวลล์นี้จะแตกต่างกับการทดสอบความแข็งแบบบริเนลล์และความแข็งแบบวิคเกอร์ดังที่กล่าวมาแล้ว คือทั้งวิธีแบบบริเนลล์และแบบวิคเกอร์จะวัดขนาดภายหลังการกดแต่วิธีร็อคเวลล์จะวัดความลึกของรอยกดซึ่งวัดด้วยเครื่องทดสอบแล้วอ่านค่าสเกลที่เครื่องการทดสอบร็อคเวลล์ไม่ว่าเป็นสเกลใดก็ตามจะต้องทดสอบด้วยแรงกดนำ (Minor Load) ขนาด 10 Kg. ก่อนเสมอเพราะมีจุดประสงค์ดังนี้

1) เพื่อให้หัวกดทดสอบฝังจมอยู่ในเนื้อของโลหะที่ผ่านการตกแต่งผิวเรียบซึ่งป้องกันการลื่นของหัวกดทดสอบขณะกดด้วยแรงเพิ่ม (Minor Load) ด้วย

2) เพื่อเป็นการปรับเข็มให้อยู่ที่ศูนย์บนสเกลวัดความแข็ง

หลังจากทดสอบแรงกดนำแล้วก็ต้องทดสอบด้วยแรงกดเพิ่ม ซึ่งมีขนาดต่างๆกันขึ้นอยู่กับความแข็งแรงของโลหะที่ต้องการทดสอบและขึ้นอยู่กับสเกลความแข็งร็อคเวลล์ที่จะทดสอบด้วยสำหรับแรงกดรวมเป็นแรงรวมทั้งหมดทั้งระบบ เช่นความแข็งร็อคเวลล์สเกล A จะใช้แรงกดรวม 60 Kg. ซึ่งความหมายว่าเป็นแรงกดนำ 10 Kg. และแรงกดเพิ่ม 50 Kg. โดยจะถูกเพิ่มภายหลังและขนาดของแรงต่างๆตามสเกลทดสอบ

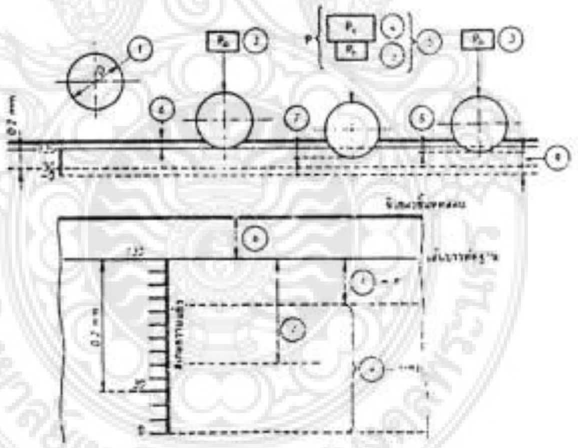
เนื่องจากการทดสอบความแข็งแบบร็อคเวลล์ มีกันหลายสเกลดังนั้นการระบุค่าความแข็งของโลหะจะต้องบอกสเกลที่ทดสอบไว้ด้วยเพื่อไม่ให้เกิดความสับสน เช่น 45 HRA จะหมายความว่าโลหะนั้นจะมีค่าความแข็งแบบร็อคเวลล์ต่างๆไว้โดยมีรายละเอียดดังตาราง

ตารางที่ 2.2 แสดงอักษรที่ระบุสเกลความแข็งแบบร็อคเวลล์ [14]

หัวกดทดสอบ	แรงกดรวม (Kg)		
เพชรรูปกรวยมุมปลาย 120°	A	D	C
ลูกบอลเหล็กกล้า 1.6 mm.	F	B	G
ลูกบอลเหล็กกล้า 3.2 mm.	H	E	K
ลูกบอลเหล็กกล้า 6.4 mm.	L	M	P
ลูกบอลเหล็กกล้า 12.7 mm.	R	S	V

2.8.2 หลักการทดสอบความแข็งแบบร็อคเวลล์สเกล B

การทดสอบแบบนี้นิยมใช้กับวัสดุที่มีความแข็งปานนกลาง เช่น พวกเหล็กกล้าผสมคาร์บอนต่ำหรือเหล็กกล้าผสมคาร์บอนปานกลางที่ผ่านการอบอ่อน เพราะวิธีใช้หัวกดเป็นลูกบอลเหล็กกล้าเส้นผ่าศูนย์กลาง 1.6 มม ซึ่งในการทดสอบก็จะทำเหมือนสเกลอื่นๆคือวัดความลึกของรอยกด ถ้ารอยกดใดลึกอ่อนและมีหลักการทดสอบดังรูป



รูปที่ 2.15 แสดงหลักการทดสอบความแข็งแบบร็อคเวลล์ สเกล B [14]

จากรูปสามารถอธิบายหลักการทดสอบความแข็งสเกล B ที่มีรายละเอียดระบุตามหมายเลขดังนี้

1) ขยายเส้นผ่าศูนย์กลางของลูกบอลเหล็กกล้า 1.6 มม

2) แรงกดเท่ากับ 100 Kg.

3) แรงกดรวม 100 Kg. ซึ่งจะเป็นผลของแรงกดนำ 10 Kg. และแรงกดเพิ่ม 90 Kg.

4) ความลึกของรอยกดเนื่องจากแรงกดนำ

5) ความลึกของแรงกดที่เพิ่มขึ้นภายหลังที่กดด้วยแรงกดเพิ่ม

5) ความลึกของรอยกดภายใต้แรงกดนำ หลังจากเอาแรงกดเพิ่มออกแล้ว

6) ค่าความแข็งร็อคเวลล์สเกล B

สำหรับค่าความแข็งร็อคเวลล์สเกล B จะไม่มีหน่วยใดๆทั้งสิ้นและถ้าทำให้การทดสอบด้วยเครื่องทดสอบส่วนมากจะทำการอ่านค่าความแข็งจากตัวเลขโดยตรงจากสเกลเครื่องทดสอบจะเป็นสเกลสีแดงซึ่งถูกแบ่งเป็น 100 ช่อง โดยเริ่มต้นจากขีด 30-130 และแต่ละช่วงจะเท่ากับค่าความแข็งในการกดลึก 0.002 มม ดังนั้นวัสดุใดที่แข็งกว่าจะมีตัวเลขระบุค่าความแข็งมากกว่า เช่น 56 HRB จะมีค่าความแข็งมากกว่า 53 HRB

นอกจากจะอ่านค่าความแข็งแบบร็อคเวลล์จากสเกลของตัวเครื่องทดสอบแล้วยังสามารถคำนวณได้ดังนี้

ความแข็งร็อคเวลล์สเกล B = e/0.002

เมื่อ e = ความลึกของรอยกดภายหลังการกดหน่วยเป็น มม

2.8.3.3 หลักการทดสอบความแข็งร็อคเวลล์สเกล C

การทดสอบแบบนี้เป็นวิธีการทดสอบที่นิยมใช้กันมาก เมื่อเปรียบเทียบกับการทดสอบความแข็งร็อคเวลล์สเกลอื่นๆ เพราะสามารถใช้กับการทดสอบวัสดุหรือโลหะที่แข็งแรงมากได้ โดยเฉพาะโลหะที่มีความแข็งเกิน 100 HRB หรือโลหะจำพวกเครื่องมือที่ผ่านการชุบแข็ง เป็นต้น เนื่องจากการทดสอบความแข็งแบบนี้ใช้หัวกดทดสอบเป็นหัวเพชรรูปกรวย (Daimond Cone) มุมที่ปลาย 120 องศา รัศมีโค้งที่ปลายกรวย 0.20 มม หรือบางทีเรียกการทดสอบแบบนี้ว่าเบรล (Brale) ซึ่งการทดสอบแบบนี้คือกดหัวทดสอบด้วยแรงคงที่ ลงไปบนผิวโลหะชิ้นทดสอบแล้วปล่อยให้อยู่ภายใต้แรงกดชั่วขณะหนึ่ง ซึ่งจะทำให้เกิดรอยกดบนผิวโลหะชิ้นทดสอบแล้ววัดค่าความลึกของรอยกด โดยอ่านค่าความแข็งได้จากสเกลสีดำบนเครื่องทดสอบ

สำหรับค่าความแข็งแบบร็อคเวลล์สเกล C จะไม่มีหน่วยใดๆทั้งสิ้นถ้าทำการทดสอบด้วยเครื่องทดสอบส่วนมากจะอ่านค่าความแข็งเป็นตัวเลขได้จากสเกลสีดำบนตัวเครื่องทดสอบซึ่งแบ่งออกเป็น 100 ช่อง โดยเริ่มจากขีด 0-100 และแต่ละช่องจะเท่ากับค่าความแข็งกดลึก 0.002 มม ดังนั้นถ้าไม่อ่านค่าความแข็งจากสเกลที่ตัวเครื่องทดสอบก็สามารถคำนวณค่าความแข็งจากสูตรดังนี้

2.8.3 ข้อควรพิจารณาในการทดสอบความแข็งแบบร็อคเวลล์

ทดสอบแบบร็อคเวลล์เป็นวิธีการทดสอบแบบมาตราฐานและสามารถกำหนดค่าความแข็งของวัสดุเป็นมาตราฐานได้เช่นเดียวกับการทดสอบความแข็งแบบบริเนลล์และแบบวิคเกอร์ ดังนั้นเพื่อให้ได้ผลการทดสอบร็อคเวลล์สเกลต่างๆถูกต้องจึงควรพิจารณาดังนี้

1) การอ่านสัญลักษณ์การทดสอบความแข็งแบบร็อคเวลล์ เช่น

45 HRC = ความแข็งตามร็อคเวลล์ 45 ตามวิธี C

80 HRB = ความแข็งตามร็อคเวลล์ 80 ตามวิธี B

2) ผิวของชิ้นทดสอบต้องราบเรียบปราศจากสะเก็ดออกไซด์ น้ำมันหรือสิ่งแปลกปลอมอื่นๆเพื่อป้องกันลื่นและเคลื่อนที่ของหัวกดทดสอบ ขณะที่เพิ่มแรงกดทดสอบและการ

ทดสอบการเตรียมผิวชิ้นทดสอบควรหลีกเลี่ยงกรรมวิธีทางความร้อน เพราะจะทำให้ความแข็งที่ผิวทดสอบเปลี่ยนไป

3) การวัดความแข็งของโลหะชิ้นทดสอบที่ผ่านการชุบผิวแข็ง ซึ่งจะมีความแข็งที่ผิวมาก ดังนั้นการเลือกสเกลความแข็งของร็อคเวลล์ควรที่จะใช้ลูกบอลเหล็กกล้าเป็นหัวทดสอบและแรงรวมขนาดต่ำ เพื่อป้องกันการกดลึกทะลุชั้นความแข็งลงไปถึงผิวเนื้อโลหะข้างใต้ซึ่งอ่อนกว่าจะทำให้ค่าความแข็งที่ชิ้นทดสอบผิดพลาด

4) ความหนาของชิ้นงานทดสอบต้องไม่น้อยกว่า 8 เท่า ของความลึกรอยกดและหลังจากการทดสอบแล้วจะต้องไม่เกิดรอยนูนขึ้นทางด้านหลังของชิ้นงานทดสอบ

5) ตำแหน่งกดทดสอบควรมีระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางของรอยกดที่อยู่ข้างเดียวกันไม่น้อยกว่าเท่าของขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของรอยกดและระยะห่างจากจุดศูนย์กลางของรอยกดจากขอบของชิ้นงานทดสอบควรห่างเป็นอย่างน้อย 2.5 เท่าของเส้นผ่าศูนย์กลางรอยกด

6) การทดสอบจะต้องไม่มีแรงกระแทกเกิดขึ้นหรือเกิดการสั่นสะเทือน อันเนื่องจากแท่นรองรับชิ้นงานไม่มั่นคงแข็งแรงเพราะจะมีผลต่อความลึกของรอยกด

2.8.4 วิธีการทดสอบความแข็งแบบร็อคเวลล์

ลำดับขั้นตอนในการทดสอบความแข็งแบบร็อคเวลล์โดยใช้เครื่องทดสอบความแข็งแบบยูนิเวอร์เซล การทำตามขั้นตอนนี้

1) ประกอบหัวทดสอบ

2) ปรับสเกลที่ Dial Gage โดยสเกล B จะเป็นสเกลสีแดง สเกลจะถูกแบ่งเป็น 100 ช่อง เริ่มต้นจาก 30-100 และสเกล C จะเป็นสเกลสีดำ สเกลจะถูกแบ่งเป็น 100 ช่องจาก 0-100

3) เอาชิ้นงานวางลงบนแท่นรองรับชิ้นงานค่อยหมุนมือจนหัวกดสัมผัสชิ้นงาน

4) หมุนมือหมุนต่อไปอีกจนเข็มยาง Dial Gage ชี้ที่เลข 0 และเข็มสั้นชี้ที่จุดศูนย์กลางของงวงกลมสีแดง

5) ผลักมือโยกไปทางด้านหลัง (ให้ Minor Load)

6) รอเวลาอีกประมาณ 10 วินาที หลังจากเข็มยาวหยุดนิ่งแล้ว

7) ดึงมือโยกกลับมาด้านหน้า (ให้ Major Load)

8) รอเวลาโยกมือกลับไปข้างหลัง (ปลด Major Load)

9) อ่านค่าความแข็งจาก Dial Gage

10) หมุนมือหมุนเพื่อนำชิ้นงานออกจากแท่นรอง

2.8.5 ข้อควรระวังในการทดสอบความแข็งแบบร็อคเวลล์

เพื่อให้ได้ผลการทดสอบที่ถูกต้องและมีโอกาสผิดพลาดน้อยที่สุดจึงมีข้อควรระวังในการทดสอบดังนี้

1) ผิวของชิ้นงานทดสอบต้องราบเรียบ

2) ความหนาขอชิ้นงานต้องไม่น้อยกว่า 8 เท่าของความลึกรอยบุ๋ม

3) ตำแหน่งกดทดสอบต้องมีระยะห่างจุดศูนย์กลางของรอยบุ๋มที่อยู่ข้างเคียงกันไม่น้อยกว่า 4 เท่าของเส้นผ่าศูนย์กลาง

2.9 ทฤษฎีรอยแตกร้าว

Niihara แนะนำว่า สำหรับผลิตภัณฑ์ที่แตกร้าว ผลวิเคราะห์การแตกร้าวของ Evans and Charles ควรมีการปรับสูตรเรขาคณิตจากครึ่งวงเป็น Palmqvist โดยเรขาคณิตของการแตกร้าว Niihara กล่าวว่าข้อมูลการแตกร้าวของ Dawihl and Altmeyer สำหรับองค์ประกอบ WC-Co เป็นการแสดงถึงการเปลี่ยนแปลงเรขาคณิตจากครึ่งวงเป็น Palmqvist ซึ่งน่าจะเป็นความยาวรอยแตกปกติที่เหมาะสม l/a รอยแตกเป็นแบบ Palmqvist ในองค์ประกอบ WC-Co Niihara พบว่าข้อมูลของ Dawihl and Altmeyer มีคำอธิบายจากสูตรของ Evans and Charles ความยาวรอยแตกปกติซึ่งเป็นรอยแตกแบบ Palmqvist l/a แทนด้วย c/a และองค์ประกอบซึ่งเป็นเรขาคณิตครึ่งวง ฉะนั้น –3/2 แทนด้วย –1/2 สูตรจึงเป็น

$$\frac{K_{1C}}{Ha^{1/2}}\left(\frac{H}{E\phi}\right)^{0.4} = \{0.129(c/a)^{-3/2}, c/a \geq 3$$

$$\frac{K_{1C}}{Ha^{1/2}}\left(\frac{H}{E\phi}\right)^{0.4} = \{0.035(l/a)^{-1/2}, c/a \geq 3$$

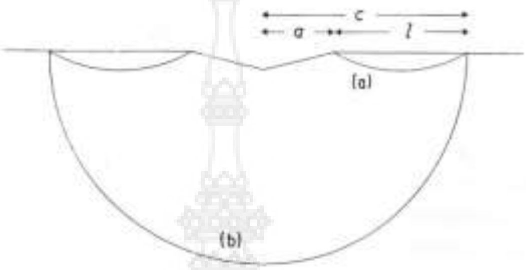
เมื่อ K_{1C} เป็นความแกร่ง H เป็นความแข็ง E เป็นเกณฑ์ของ Young และ ϕ เป็นปัจจัยคงที่ Niihara กล่าวว่า สูตรที่ปรับใหม่น่าจะใช้งานได้กับกรณีวัตถุดิบที่แตกง่าย ซึ่งจะเกิดเป็นรอยแตกแบบ Palmqvist แล้วสามารถใช้แทนผลลัพธ์เก่าของ Evans and Charles ในสภาพแวดล้อมเช่นนั้นได้

Lankford ทดสอบข้อสันนิษฐานดังกล่าวตามขนาดของผลิตภัณฑ์ ซึ่งจะทำให้เกิดรอยแตกแบบ Palmqvist การที่โหลดจำนวนน้อย และพบว่าทุกกรณี ข้อมูลอธิบายจากสูตรของ Evans and Charles นอกจากนี้ สูตรที่ปรับใหม่ของ Niihara ยังไม่พบข้อเห็นพ้องกับข้อมูล เว้นแต่ในกรณีของ WC-Co

Lankford ได้ลงข้อมูล WC-Co ตามสูตรและพบว่าข้อมูลลงอยู่ในตำแหน่งกระจัดกระจาย ซึ่งตอบข้อเห็นพ้องประมาณ 35% ตามข้อสันนิษฐานของ Evans and Charles Lankford จึงสรุปว่าผลลัพธ์ของ Evans and Charles ยังคงมีค่าเป็นไปได้ในกรณีโหลดจำนวนน้อย ซึ่งยังไม่เกิดรอยแตกแบบครึ่งวงกลม แต่รอยแตกเป็นแบบ Palmqvist ก่อนจะสรุปว่ามีความเกี่ยวพันกับงานของ Niihara อย่างประจวบเหมาะ ควรพิจารณาถึงธรรมชาติของวัตถุดิบ โดย WC-Co เป็นเพียง Cermet ซึ่งมีองค์ประกอบ 2 แง่มุม อันประกอบด้วยชิ้นส่วนที่แตกหักง่ายยากต่อการยืดหยุ่น และน่าแปลกใจว่าผลลัพธ์นำมาจากองค์ประกอบในแง่ชิ้นส่วนที่แตกหักเพียงด้านเดียว ข้อมูลความแกร่งสำหรับองค์ประกอบ WC-Co ยังคงไม่ได้นำผลทดสอบการตัดมาเปรียบเทียบให้เห็นอย่างชัดเจน เพราะผลของการเตรียมตัวอย่างมีความยุ่งยากมากเป็นพิเศษทำให้ผลประเมินของการทดสอบการตัดยังคงไม่แน่นอน

การทดสอบที่เรียกว่า Palmqvist ขององค์ประกอบ WC-Co ความแกร่งได้รับการประเมินในแง่ตัวแปร P/l = g เป็นแรงทนต่อการแตก ซึ่ง P เป็นการโหลดมาจากเครื่องอัดและ g เป็นค่าคงที่สำหรับการโหลดที่นอกเหนือจากช่วงน้อยสุด ปริมาณ g จะสัมพันธ์กับอัตราปล่อยพลังงานแรงตึง

เครียด G_{1C} และอัตราที่เกินกำหนด ความสัมพันธ์น่าจะเป็นเส้นกราฟตรง งานที่ดำเนินการสอบสวนในจุดนี้ จะใช้วัตถุดิบที่มีความแกร่งอย่างดีเพื่อใช้เป็นค่าเฉลี่ยมาตรฐาน Viswanadham and Venables ได้ตั้งข้อสังเกตจากการเชื่อมโยง g และ H และ Perrott ได้พัฒนาโมเดลซึ่งเชื่อมโยง G_{1C} และ g ซึ่งสันนิษฐานว่าเส้นกราฟจะอยู่เหนือการโหลดแบบใกล้ และเป็นดังนี้ตามข้อเห็นพ้องเชิงคุณภาพกับการสังเกต



รูปที่ 2.16 ภาพเรขาคณิตของรอยแตกแบบเพนนีและแบบ Palmqvist
(A) แบบ Palmqvist (B) แบบครึ่งเพนนี [31]

Exner และ Almond and Roebuck พบว่า ปริมาณ $P/c^{3/2}$ = kยังคงที่สำหรับองค์ประกอบ WC-Co และสำหรับเซรามิค ทฤษฎีของการแตกเซรามิคพัฒนาขึ้นโดย Evans and Charles และ Lawn กับคนอื่นๆ สังเกตจากพื้นฐานมีข้อน่าสนใจว่า k เป็นรูปทรงของปัจจัยแรงเครียด ซึ่งเหมาะสำหรับรอยแตกแบบครึ่งวงกลม ข้อสังเกตเช่นเดียวกันนี้ที่มาจาก Exner และ Almond and Roebuck ก็ได้รับการสานต่อโดยผู้เขียนปัจจุบัน ในขอบเขตขององค์ประกอบ WC-Co ซึ่งนำไปสู่คำอธิบายสำหรับการค้นพบของ Niihara ข้อมูลสรุปไว้ในตาราง 2-1 ทั้งนี้ สันนิษฐานว่า $K_{1C}=\alpha P/c^{3/2}=\alpha k$ สำหรับเซรามิคและใช้ความสัมพันธ์ของ Anstis และคณะ $K_{1C}=0.016(E/H)^{1/2}(P/c^{3/2})$ ซึ่งเป็นการปรับแต่งจากผลลัพธ์ของ Evans and Charles ถูกใช้โดย Niihara และ Lankford $K_{1C}=0.031(E/H)^{0.4}(P/c^{3/2})$ ให้ $\alpha = 0.016(E/H)^{1/2}$ ทำนองเดียวกันกำหนดให้ $G_{1C}=\beta P/l=\beta g$ และประยุกต์ความสัมพันธ์จากเส้นกราฟของเครื่องมือ $G_{1C} = [K^2_{1C}(1-v^2)]/E$ เมื่อ v เป็นอัตราส่วนของ Poisson นำไปสู่ $\beta=(\alpha^2k^2/Eg)(1-v^2)=\alpha^2/\theta$ ค่าของ θ คำนวณตามแต่ละเกรดและลิสต์ในตาราง 2-1 โดย v = 0.22 พบว่าลงไว้ในช่วง 128 – 155 ค่าเฉลี่ยของ 148

คำอธิบายสำหรับความแกร่ง G_{1C} คือ

$$G_{1C} = 1.73 \times 10^{-6}\ \frac{E}{H}\frac{P}{l}$$

ตารางที่ 2.3 ตัวแปรการตัดสำหรับขอบเขตขององค์ประกอบ WC-Co [31]

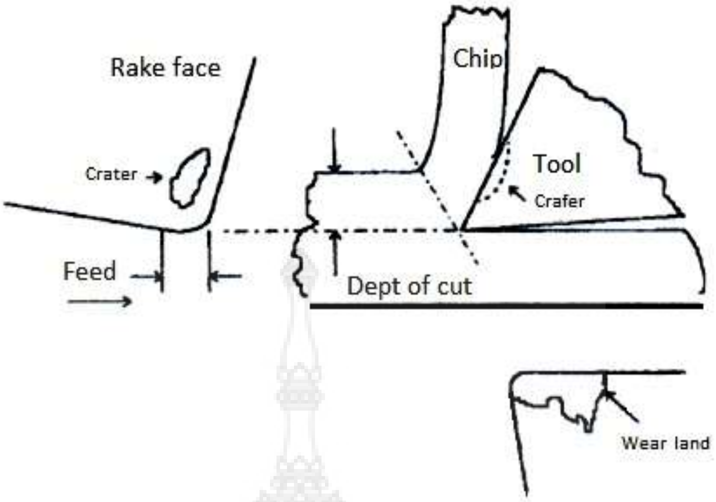
Grade	Heyn's grain size (mean linear intercept) (10^{-6} m)	C_o volume Fraction ($10^2 f_\beta$)	H_M (MPa)	c/a*	E/H	$g = P/l$* (MN m^{-1})	$S(g)$†	$k = P/c^{3/2}$* (MPa m$^{1/2}$)	$S(k)$†	θ*	$S(\theta)$†	G_{IC}‡ ('Palmqvist') (N m^{-1})	S†¶	G_{IC}§ (Anstis et al.) (N m^{-1})	S†**
9.5M	0.9	16	14 090	1.5	42	6.6	0.3	165	3.7	151	1.8	455	26	470	21
7.5M	1.1	12	14 270	1.7	42	5.0	0.3	148	6	144	3.5	345	29	373	30
6M	1.0	10	15 350	1.8	41	4.3	0.4	137	11	152	10	297	47	297	48
15F	0.7	24	13 300	1.3	41	12.2	2.8	213	14.8	150	15	848	279	829	115
10F	0.5	16	15 700	1.7	37	5.3	0.5	159	11	128	6.9	366	54	391	54
6F	0.5	10	17 460	2.3	36	5.0	0.2	109	3	166	7.1	207	23	165	9
3F	0.6	5	19 840	3.1	33	1.9	0.07	76	4	233	23	131	18	71	7

*Average of nine values for loads in the range 30 to 50 kg. † Standard deviation. ‡ Calculated from $G_{IC} = (a^2/\theta) g = 0.69 \times 10^{-4}\,\bar{g}$. § Calculated from the formula of Anstis et al. [12]: $G_{IC} = a^2(1-\nu^2)(E/H)k^2$. ¶ Estimated from $S = G_{IC}[S(\theta)/\theta + S(g)/g]$. ** Estimated from $s = G_{IC}\, 2S(k)/k$.

2.10 การสึกหรอ

การสึกหรอ คือ การเปลี่ยนแปลงผิวของชิ้นงานในลักษณะไม่พึงประสงค์เนื่องมาจากการแยกหลุดของอนุภาคบนผิวเนื่องจากภาระกรรมทางกลหรือทางเคมี การวิเคราะห์กระบวนการสึกหรอจะกระทำได้โดยวิเคราะห์องค์ประกอบที่มีผลต่อการสึกหรอของวัสดุพื้น วัสดุคู่ประกบ วัสดุประกบ วัสดุที่อยู่ระหว่างกลาง ลักษณะการเคลื่อนไหวและภาระกรรมซึ่งพฤติกรรมการสึกหรอของวัสดุจะขึ้นกับองค์ประกอบเหล่านี้ พลังงานทางกลที่ป้อนเข้าไปจะเปลี่ยนเป็นพลังงานทางความร้อนอาจจะก่อให้เกิดปฏิกิริยาทุติยภูมิ โดยเฉพาะอย่างยิ่งปฏิกิริยาทางเคมีซึ่งอาจทำให้ผิวของโลหะแยกหลุดออกจากกัน

พารามิเตอร์ต่างๆที่มีอิทธิพลต่อ (Tool Wear) คือ สภาวะตัดอันได้แก่ ความกว้างและความลึกของการตัด ความเร็วตัด ลักษณะเรขาคณิตของมีดตัด และคุณสมบัติของวัสดุที่นำมาตัดอัน ได้แก่ (Grain Structure Heat Treatment Hardness Strength Elasticity) และอื่นๆการที่ส่วนปลายมีดกะเทาะหลุดออกไป เนื่องจาก (Crater Ware) ผสมกับ (Flank) ดังกล่าวแล้ว การเกิด (Built Up Edge) เยิ้มติดกับปลายมีดเมื่อ (Built Up Edge) หลุดดึงเอาเนื้อโลหะของปลายมีดให้หลุดตามไปด้วยนี่ก็เป็นอีกสาเหตุหนึ่งที่ทำให้เกิดการหักที่ปลายมีดเช่นกัน การเกิดสึกหรอจะมีแรงและชิ้นงานดังต่อไปนี้



รูปที่ 2.17 การสึกหรอของมีดตัด [22]

จากรูปที่ 2.17 แสดงภาพจำลองการสึกหรอของมีดตัด สามารถเกิดขึ้นได้เมื่อเกิดการใช้งาน ซึ่งการเกิดการสึกหรอแต่ละตำแหน่งก็จะแตกต่างกัน จากภาพดังกล่าวแสดงบริเวณที่เกี่ยวข้องกับการกลึงซึ่งมีชื่อเรียกตามบริเวณที่แตกต่างกัน เช่น (Rake Face) , (Crater Wear) เป็นต้น

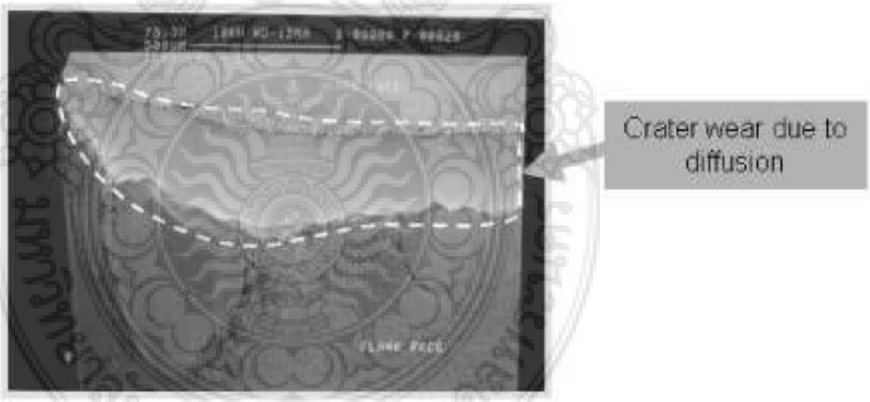
2.10.1 การสึกหรอของเครื่องมือตัด

เครื่องมือตัดเมื่อถูกใช้งานไปแล้วจะเกิดการสึกหรอขึ้นและจะเกิดอย่างต่อเนื่องจนกระทั่ง สิ้นสุดอายุการใช้งาน การสึกหรอของเครื่องมือตัดเป็นผลมาจากภาระ (Load) ต่างๆที่กระทำบนคมตัดซึ่งอายุการใช้งานของเครื่องมือตัดขึ้นอยู่กับภาระเหล่านั้นที่กระทำจนทำให้คมตัดเปลี่ยนรูปร่างไปหรือกล่าวโดยสรุปคือ การสึกหรอเป็นผลจากการกระทำระหว่างเครื่องมือตัดวัสดุชิ้นงานและเงื่อนไขการตัด

2.10.1.1 การสึกหรอบริเวณผิวหลบ (Flank Wear) เป็นการสึกหรอทางกลที่เกิดขึ้นจากชิ้นงานเคลื่อนที่ผ่านเครื่องมือตัด ในขณะเดียวกันเศษโลหะแยกตัวออกมาจากชิ้นงาน ถ้าการสึกหรอด้านหน้าขยายตัวเพิ่มขึ้นเรื่อยๆจนทำให้คุณภาพผิวงานและความเที่ยงตรงแม่นยำของชิ้นงานแย่ลงเรื่อยๆนอกจากนั้น แรงที่ใช้ในการตัดยังเพิ่มขึ้นอีกด้วย ซึ่งอาจทำให้อุปกรณ์ยึดจับชิ้นงาน (JIG) อุปกรณ์ยึดจับเครื่องมือตัด (Tool Holder) หรือเครื่องจักรเสียหายได้การสึกหรอทางด้านข้างมีดซึ่งเกิดขึ้นอย่างผิดปกติเป็นผลมาจากการใช้วัสดุมีดที่ไม่เหมาะสมและควรใช้วัสดุมีดที่ความแข็งเพิ่มขึ้น เช่น คาร์ไบท์เคลือบหรือเซรามิคในการเปลี่ยนลักษณะของมีดทางเรขาคณิตก็อาจจะช่วยลดอัตราการสึกหรอให้ช้าลง พร้อมทั้งการเพิ่มค่าของมุมลบและลดความโตของรัศมีมุมมนด้วย การเพิ่มอัตราป้อนความลึกในการตัดและความเร็วตัดลงก็เป็นการช่วยลดการสึกหรอด้วยอีกทางหนึ่ง

รูปที่ 2.18 แสดงการสึกหรอบริเวณผิวหลบ (Flank Wear) [28]

2.10.1.2 การสึกหรอที่ผิวคายเศษ (Crater Wear) เกิดจากการเสียดสีอนุภาคของเศษโลหะไหลผ่านด้านบนเครื่องมือตัดเกิดการเสียดสีกับการเจียรนัยชิ้นส่วนที่ร้อนที่สุดของเศษโลหะจะเกิดการแพร่กระจาย (Diffusion) ของอนุภาคระหว่างเศษโลหะและเครื่องมือตัด คือ เกิดการแลกเปลี่ยนอนุภาคซึ่งกันและกัน ธาตุเหล็ก (Fe) ในเศษโลหะแพร่กระจายเข้าไปในเครื่องมือตัด ธาตุคาร์บอน (C) และธาตุโคบอลต์ (Co) ในเครื่องมือตัดแพร่กระจายเข้าไปในเศษโลหะอาจทำให้เครื่องมือตัดหรือชิ้นงานเสียหายได้การสึกหรอหลุมด้านบนมักเกิดจากการตัดเหล็กเหนียว



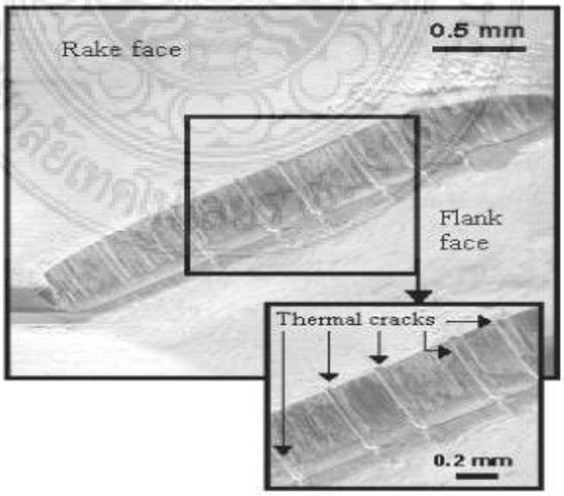
รูปที่ 2.19 แสดงการสึกหรอแบบ (Crater Wear) [28]

2.10.1.3 การสึกหรอเป็นรอยบาก (Notch Wear) จะเกิดขึ้นที่บริเวณปลายคมตัดเกิดขึ้นจากการทำปฏิกิริยากับอากาศออกซิเดชั่นเครื่องมือตัดและชิ้นงานสามารถพบได้บ่อยในการตัดชิ้นงานที่มีความแข็งแรงสูง ถ้าการสึกหรอเป็นรอยบากขนาดใหญ่ขึ้นเรื่อยๆ จะมีผลต่อคุณภาพชิ้นงานและยังทำให้ความแข็งแรงของคมตัดลดลงด้วย

รูปที่ 2.20 แสดงการสึกหรอแบบรอยบาก (Notch Wear) [28]

2.10.1.4 การหลอมตัวของเครื่องมือตัด (Plastic Deformation) การเปลี่ยนแปลงรูปร่างที่ปลายคมตัดชนิดคาร์ไบด์ จะเกิดขึ้นในขณะทำการตัดเฉือน บริเวณคมตัดจะเกิดอุณหภูมิและความดันสูง โดยเฉพาะในการตัดวัสดุที่มีความแข็งสูง ด้วยอัตราเร็วตัดและอัตราป้อนที่สูงมาก เมื่อความร้อนเพิ่มขึ้นจนถึงค่าวิกฤต (Critical Hot Hardness) เครื่องมือตัดไม่สามารถทนความร้อนที่เกิดจากการตัดได้รูปร่างคมตัดเกิดการหลอมตัวเปลี่ยนรูปร่างทำให้ทิศทางการไหลของเศษโลหะเปลี่ยนไปคุณภาพผิวงานแย่ลงและใช้แรงในการตัด

2.10.1.5 การแตกร้าวเนื่องจากอุณหภูมิ (Thermal Cracking) การแตกร้าวเนื่องจากอุณหภูมิจาก วัฏจักรการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ (Thermal Cyclic) โดยเฉพาะในงานกัด (Milling) ในขณะเม็ดมีดตัดชิ้นงานจะเกิดความร้อน และเย็นตัวลงเมื่อเม็ดมีดออกจากชิ้นงาน จากนั้นเม็ดมีดจะกลับเข้ามาตัดชิ้นงานอีกครั้งในรอบถัดไปเกิดความร้อนขึ้นอีกครั้งเป็น วัฏจักรการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิต่อเนื่อง



รูปที่ 2.21 แสดงการสึกหรอแบบการแตกร้าวเนื่องจากอุณหภูมิ (Thermal Cracking) [28]

2.10.1.6 การแตกร้าวเนื่องจากความล้า (Mechanical Fatigue Cracking) เกิดขึ้นจากความไม่คงที่ของแรงตัดแต่ขนาดของแรงตัดเองไม่มากพอที่จะทำให้เครื่องมือตัดเสียหายได้ในทันที การแตกร้าวที่เกิดขึ้นจะเกิดขนานกับคมตัด

2.10.1.7 การกะเทาะของคมตัด (Chipping of the Cutting Edge) เกิดจากที่วัฏจักรของแรงที่กระทำต่อคมตัด ทำให้อนุภาคของเครื่องมือตัดหลุดออกจากผิวหน้าไปหลีกเลี่ยงให้มากที่สุดการแตกของคมตัดทำให้รูปทรงตัดเปลี่ยนไป คมตัดไม่แข็งแรง อุณหภูมิขณะตัดสูงใช้แรงในการตัดมากและอาจสร้างความเสียหายต่อชิ้นงาน เครื่องจักร อุปกรณ์ยึดจับ

2.10.1.8 การสะสมของเศษวัสดุที่คมตัด (Build Up Edge) เกิดจากชิ้นงานเกิดความร้อนจากการตัด จนกระทั่งชิ้นงานมาหลอมตัวมาพอกบริเวณคมตัดและหลุดออกไปเมื่อเครื่องมือตัดทำการตัดชิ้นงาน จากนั้นก็จะก่อตัวขึ้นใหม่อีกครั้งเป็นวัฏจักรการสะสมของเศษวัสดุที่คมตัด อาจทำให้อนุภาคของเครื่องมือตัดแตกหลุดออกไปพร้อมกับชิ้นงานหลอมที่คมตัดการสะสมของเศษวัสดุที่คมตัดทำให้รูปทรงของคมตัดเปลี่ยนไป ซึ่งเป็นสาเหตุของการเกิดปัญหาอื่นๆ

2.10.1.9 การแตกของคมตัด (Fracture of Cutting Edge) เป็นความเสียหายที่ต้องหลีกเลี่ยงให้มากที่สุด การแตกของคมตัดทำให้รูปทรงคมตัดเปลี่ยนไป คมตัดไม่แข็งแรงอุณหภูมิขณะตัดสูง ใช้แรงในการตัดมาก อาจสร้างความเสียหายต่อชิ้นงานเครื่องจักร อุปกรณ์ยึดจับ ชิ้นงาน การแตกของคมตัดมักพบในงานตัดหนัก (Heavy Cutting) งานตัดกระแทก (Interrupt Cutting) การตัดชิ้นงานที่มีความแข็งสูง

สาเหตุการสึกหรอของมีดกลึง โดยทั่วไปสาเหตุของการหมดสภาพของมีดกลึงภายใต้สภาวะปกติในการตัดเฉือนจะเป็นแบบการสึกหรอทีละเล็กทีละน้อย จนกระทั่งมีดกลึงไม่สามารถจะทำการตัดเฉือนได้ดีเหมือนเดิม ซึ่งเราจะเรียกช่วงเวลาของที่มีดกลึงสามารถทำการตัดเฉือนได้ปกตินี้ว่า ช่วงอายุการใช้งานมีดกลึง (Tool Life) การสึกหรอ (Wear) เปรียบเสมือนกับน้ำหนักหรือมวลที่สูญเสียไปเนื่องจากเกิดการขัดสีจากแรงเสียดทานระหว่างมีดกลึงกับผิวชิ้นงานซึ่งเราสามารถจะแบ่งสาเหตุของการสึกหรอของมีดกลึงนี้ได้ 5 อย่าง ได้แก่

1) การขัดสี (Abrasion Wear) สาเหตุเกิดจากความแข็งของวัสดุชิ้นงาน โดยชิ้นส่วนที่แข็งกว่าจะเกิดการลื่นไถล ทำให้ขอบของชิ้นงานเยิน เพราะมีดกลึงจะตัดส่วนของชิ้นงานที่อ่อนกว่าลักษณะที่เยินและล้ำเข้ามาคร่อมระหว่างมีดกลึงนี้ เรียกว่า (Build Up Edge)

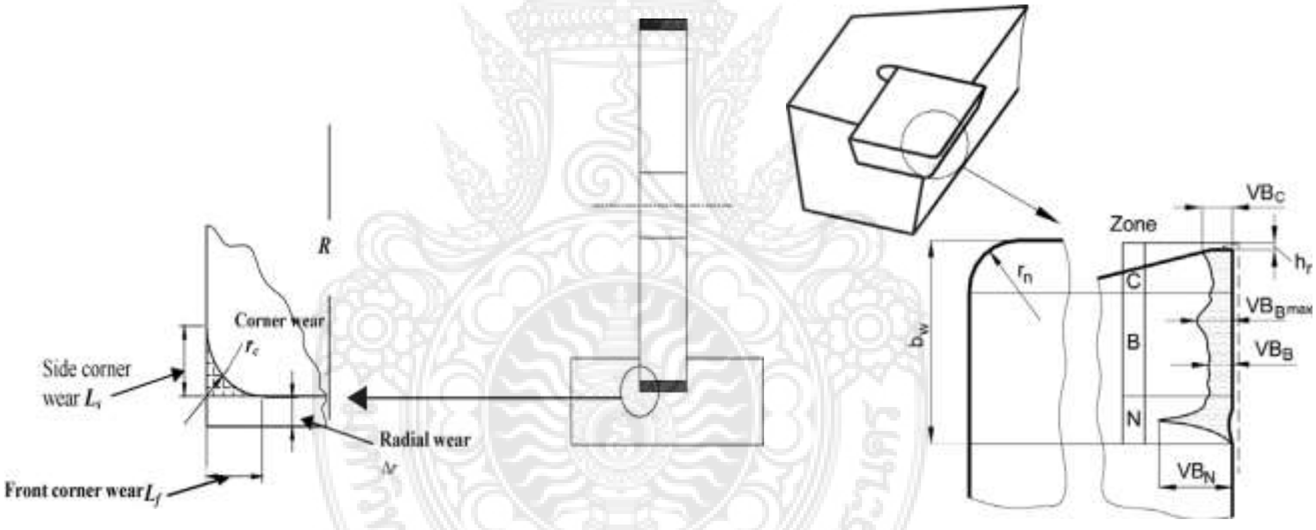
2) การแพร่ความร้อน (Diffusion Wear) ในสภาวะของแข็งการกระจาย (Diffusion) จะเกิดโดยอะตอมในผลึกของโลหะเคลื่อนจาก Lattice หนึ่งไปยังอีก Lattice หนึ่ง เนื่องจากการยึดตัวระหว่างอะตอมอ่อนลงเพราะความเค้นและอุณหภูมิสูงขึ้นหรืออาจกล่าวว่า (Diffusion Wear) เกิดจากขบวนการทาง (Machanic) ของผิวและการกระจายตัว (Diffusion) ถ้าขบวนการทางเครื่องกลที่เกี่ยวข้องและสามารถที่ทำให้อุณหภูมิของพื้นที่ที่สัมผัสกันระหว่างมีดกลึงกับชิ้นงานเพิ่มขึ้นได้

3) การสึกหรอแบบออกซิเดชั่น (Oxidation Wear) การเกิดออกซิเดชั่นเป็นสาเหตุทำให้มีดกลึงสึกหรอ ซึ่งเกิดที่ความเร็วตัดสูงๆ เช่น ในช่วงที่อุณหภูมิตัดเฉือนสูงๆ (Efermation under Compressive Stress)

4) การยึดติด (Adhesion Wear) เมื่อผิวของวัสดุ 2 ชนิด ถูกประกอบติดกันภายใต้ (Load) ที่กระทำให้เกิดแรงเสียดทาน (Friction) ขึ้น (Adhesion) จะเกิดที่อุณหภูมิสูงๆ ซึ่งจะทำให้โครงสร้างภายในของวัสดุเปลี่ยนโครงสร้างเป็น Plastic การสึกหรอนี้จะเกิดจากรอยแตกของส่วนที่ยึดติดกัน ซึ่งจะเกิดระหว่างมีดกลึงกับเศษตัดหรือมีดกลึงกับชิ้นงานอุณหภูมิที่ซึ่ง (Adhesion) เกิด (ระหว่างมีดกลึงกับชิ้นงาน) ขึ้นอยู่กับชนิดของธาตุที่เป็นส่วนประกอบภายในวัสดุมีดกลึงและชิ้นงาน นอกจากนี้ยังขึ้นอยู่กับแรงที่เกิดระหว่างมีดและชิ้นงาน ซึ่งในงานกลึงแรงนี้จะหาได้จากสภาวะในการตัดเฉือน

5) การสึกหรอทางเคมีและการแยกตัวด้วยไฟฟ้า (Chemical and Electrolytic Wear) การสึกหรอทางเคมี (Chemical Wear) เกิดจากปฏิกิริยาระหว่างมีดกลึงกับชิ้นงานซึ่งกระทำต่อสารหล่อเย็นในขณะทำการตัดเฉือน การแยกตัวทางไฟฟ้า (Electrolytic Wear) เกิดจากการกัดกร่อนทางไฟฟ้าระหว่างมีดกลึงกับชิ้นงาน

2.10.2 การวัดระยะการสึกหรอของเครื่องมือตัด

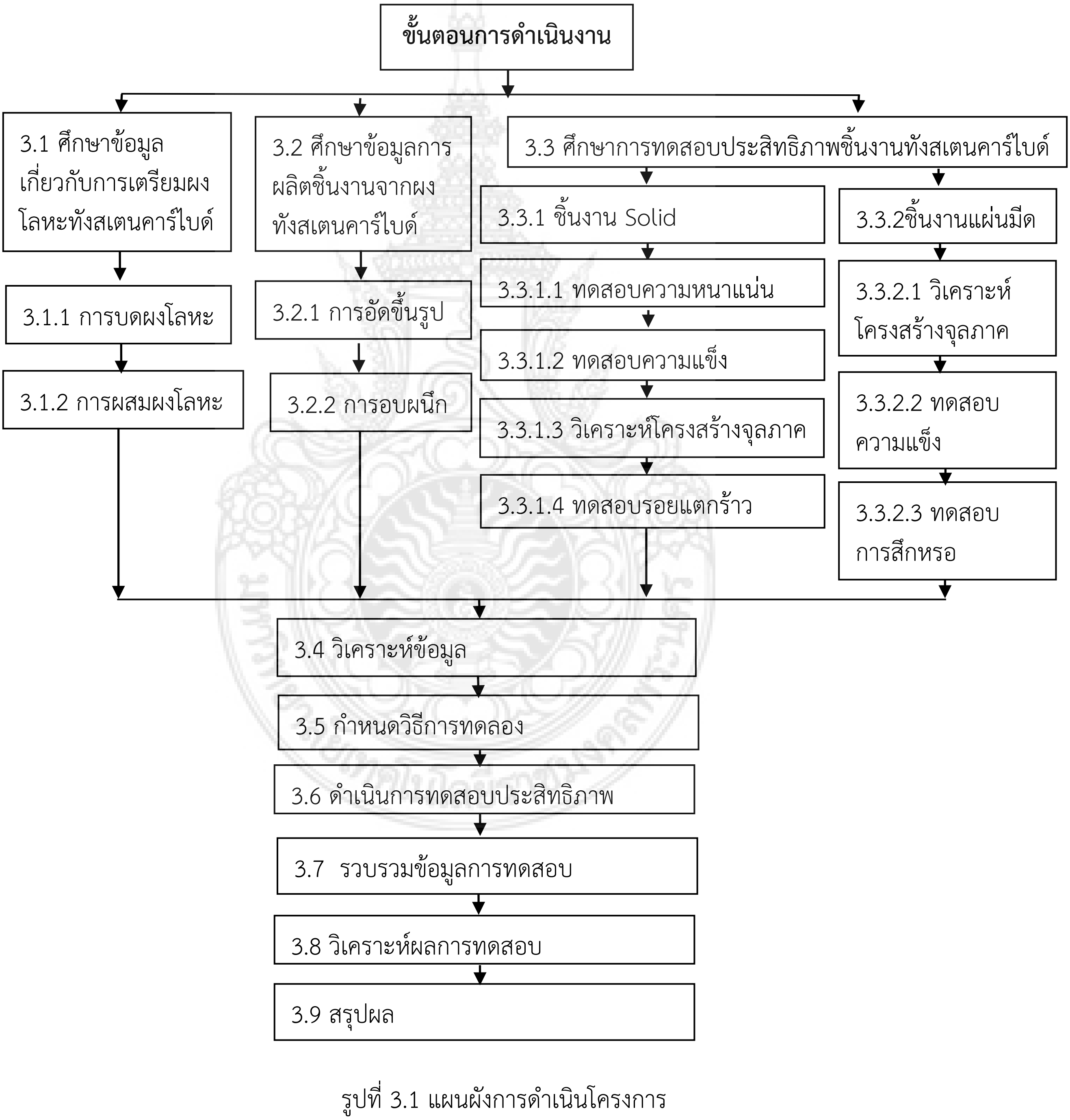


รูปที่ 2.22 มุมที่ใช้ในการวัดระยะสึกหรอ [28]

จากรูปที่ 2.22 แสดงตำแหน่งการวัดระยะบริเวณมุมของเครื่องมือตัดมีการกำหนดตำแหน่งและตัวแปลในการวัดระยะสึกหรอ ซึ่งมี 4 ระยะ ประกอบด้วย (L_S , L_f , b_W , VB_N)

บทที่ 3
วิธีการวิจัย

การวิจัยนี้มีขั้นตอนดำเนินงาน โดยผลิตจากโลหะ WC – Co พัฒนาโครงสร้างเกรนต้านทานการสึกหรอของชิ้นงานความแข็งสูงพิเศษด้วยกระบวนการอบผนึก ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แผนผังการดำเนินโครงการ

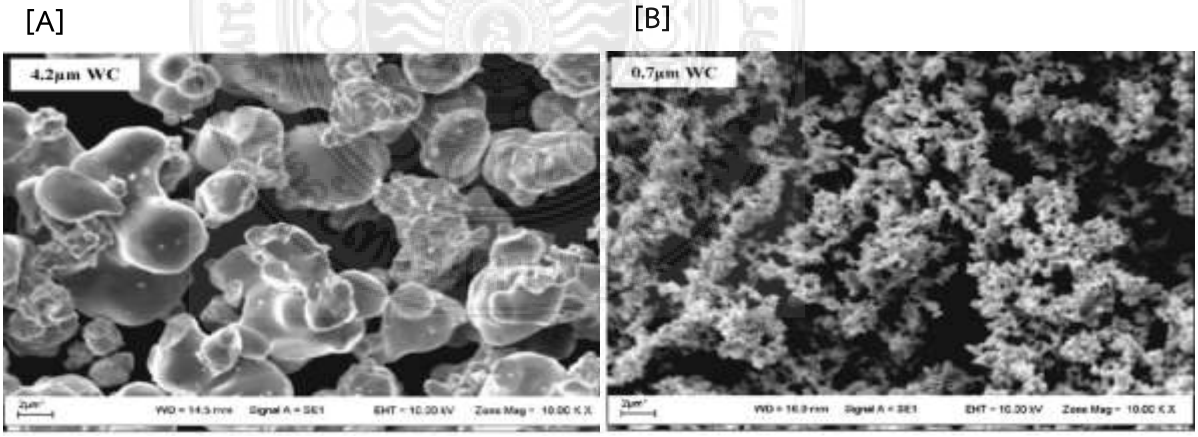
3.1 ศึกษาข้อมูลเกี่ยวกับการเตรียมผงโลหะทังสเตนคาร์ไบด์

การผลิตผงโลหะทังสเตนและโลหะผสมนั้น กระบวนการผลิตผงโลหะทังสเตนถือว่าเป็นขั้นตอนที่สำคัญ สมบัติของผงโลหะนั้นเป็นองค์ประกอบสำคัญต่อการผลิต เช่น กระบวนการอัดขึ้นรูป กระบวนการอบผนึก และงานโลหะต่างๆทั่วโลก ชิ้นงานทังสเตนที่ผลิต 70-80 % จะผลิตด้วยกรรมวิธีทางโลหะผง (Powder Metallurgy) เทคโนโลยีทางโลหะผงมีประโยชน์ในงานวิจัยและพัฒนาทังสเตนและโลหะผสม ทำให้มาตรฐานคุณภาพสูงขึ้น โดยผงโลหะจะเป็นเกรดขึ้นอยู่กับการนำไปใช้งาน ลักษณะผงโลหะทางเคมี (จะบอกส่วนผสมของธาตุต่างๆ),ทางฟิสิกส์(ขนาดเกรน, ขนาดการกระจาย) การผลิตผงโลหะทังสเตนให้ปฏิกิริยาด้วยไฮโดรเจน จะได้ผงโลหะที่มีความบริสุทธิ์สูง ตัวแปรผงโลหะทังสเตน,ขนาดเกรน,ผงโลหะ,ขนาดการกระจายตัวของเกรน,อุณหภูมิและความชื้น

3.1.1 การบดผงโลหะ เป็นการลดขนาดอนุภาคให้มีขนาดเล็กลงซึ่งส่งผลต่อประสิทธิภาพในการยึดเกาะที่ดี ในการบดผงนี้จะใช้กระบวนการบดแบบบอลมิลล์ (Ball Mill) โดยทำให้เกิดการเคลื่อนของหม้อบดด้วยแรงหมุนซึ่งลูกบดจะเกิดการเคลื่อนที่แรงเกิดกระแทกกับวัตถุดิบ ในการบดจะต้องมีการวิเคราะห์ข้อมูลปัจจัยที่เกี่ยวข้อง แสดงดังตารางที่ 3.1 ซึ่งจะช่วยทำให้การบดมีประสิทธิภาพมากขึ้น

ตารางที่ 3.1 แสดงข้อมูลที่เกี่ยวกับการบดผงโลหะ [4]

เวลาในการบด (h)	ขนาดลูกบด d (mm.)	อัตราส่วนระหว่างผงโลหะกับลูกบด	ขนาดผงโลหะที่ได้หลังการบด (μm)
3-10 h	20	1:10	29
10-40 h	20	1:10	21



รูปที่ 3.2 แสดงตัวอย่างขนาดผงโลหะทังสเตนคาร์ไบด์หลังจากผ่านการบด

[A] ขนาดผง 4.2 ไมครอน (μm) [B] ขนาดผง 0.7 ไมครอน (μm) [11]

จากรูปที่ 3.2 เป็นภาพถ่ายตัวอย่างจากเครื่อง (Scanning Electron Microscope : SEM) กำลังขยายเท่ากัน 10,000 เท่า แสดงให้เห็นถึงลักษณะอนุภาคของผงทังสเตนคาร์ไบด์ จากภาพ (a) เป็นขนาดผงทังสเตนคาร์ไบด์ 4.2 ไมครอน จะเห็นได้ชัดเจนถึงการยึดเกาะระหว่างผงโลหะ และ ภาพ (b) เป็นขนาดผงทังสเตนคาร์ไบด์ 0.7 ไมครอน

3.1.2 การผสมผงโลหะ

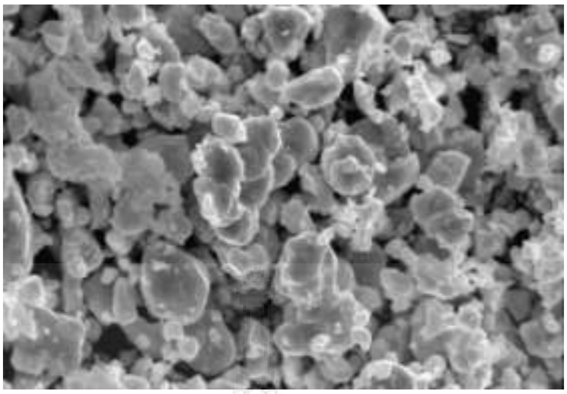
ในการนำผงทังสเตนคาร์ไบด์ไปใช้งานจากแหล่งข้อมูลจะนำมาผสมกับโคบอลต์ซึ่งเป็นตัวเชื่อมประสาน ทำให้ผงคาร์ไบด์เกิดการยึดเกาะและนำไปผลิตเป็นชิ้นงานซีเมนต์ทังสเตนคาร์ไบด์ ซึ่งจะทำให้ชิ้นงานมีความแข็ง ซึ่งการผสมผงคาร์ไบด์กับตัวเชื่อมประสานโคบอลต์จะต้องผสมด้วยอุณหภูมิที่เหมาะสม เพื่อให้เกิดการรวมตัวที่ดีซึ่งส่งผลต่อประสิทธิภาพของชิ้นงาน ผงทังสเตนคาร์ไบด์ที่มีขนาดใหญ่และปริมาณโคบอลต์ที่เป็นตัวประสานมากทำให้ชิ้นงานมีความเหนียวสูงและทนต่อแรงกระแทกได้ดี แต่คุณสมบัติการต้านทานการสึกหรอและความแข็งต่ำ

ตารางที่ 3.2 แสดงข้อมูลที่เกี่ยวกับการผสมผงโลหะ [13]

กระบวนการทำ	**วัสดุที่ผสม**	**WC (%)**	**Co (%)**	**% วัสดุที่ผสม**	**อุณหภูมิ**	**เวลา (ชม.)**
DRYING	Paraffin Wax	83	17	3	50	2
	Paraffin Wax	-	-	2	200	2
	Gelcasting	92	8	3	60	2

ตารางที่ 3.3 เงื่อนไขการผสมผงทังสเตนคาร์ไบด์กับโคบอลต์ [7]

อ้างอิงผลงานวิจัย	**ส่วนผสม**		**ขนาดผง (μm)**	**ความแข็ง (Hardness Vicker)**
	WC (%)	**Co (%)**		
บริษัท DURMAT	88	12	2.5	1200
Stephen A. Hewitt 2009	90	10	0.117	1363
H.-C. Kim 2004	85	15	0.7 - 2.5	1992

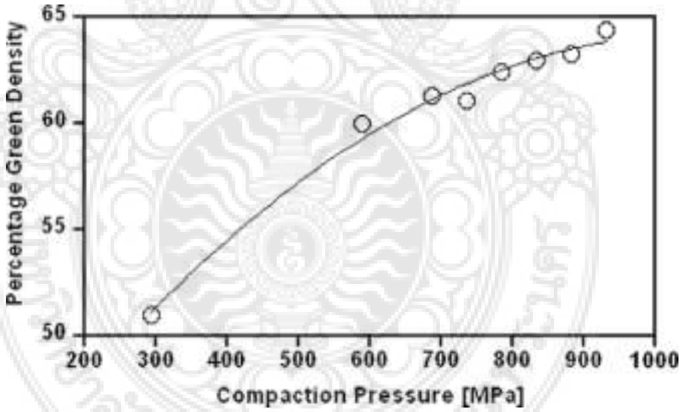


รูปที่ 3.3 แสดงตัวอย่างผงทังสเตนคาร์ไบด์ผสมกับโคบอลต์ [13]

จากรูปที่ 3.3 เป็นภาพถ่ายตัวอย่างจากเครื่อง (Scanning Electron Microscope :SEM) กำลังขยายเท่ากัน 10,000 เท่า แสดงให้เห็นถึงลักษณะเกรนของผงทังสเตนคาร์ไบด์ที่มีส่วนผสมของตัวเชื่อมประสานโคบอลต์ผสมอยู่

3.2 ศึกษาข้อมูลการผลิตชิ้นงานจากผงโลหะทังสเตนคาร์ไบด์

3.2.1 การอัดขึ้นรูปโลหะทังสเตนคาร์ไบด์



รูปที่ 3.4 กราฟแสดงความหนาแน่นต่อแรงกดอัดของผงทังสเตนคาร์ไบด์ [20]

ตารางที่ 3.4 เงื่อนไขการอัดขึ้นรูป [2]

อ้างอิงผลงานวิจัย (References)	**เงื่อนไขการอัดขึ้นรูป (Consolidation process)**	**แรงกดอัด Passure (MPa)**	**อุณหภูมิ Temparature (°c)**
Kuo-Ming Tsai 2009	HIP	130	200
E.O. Correa 2010	CIP	130	-
Zhu Baojun 2002	PIM	75	170
Z. Zak Fang 2009	HIP	30	N/A
S. Liu 2006	HIP	-	N/A

จากงานวิจัยของ Kuo-Ming Tsai 2009 ขึ้นรูปโดยวิธีอัดขึ้นรูปแบบร้อน (HIP) ที่อุณหภูมิ 200 ℃ แรงอัด 130 Megapascal

จากงานวิจัยของ E.O.Correa,2010 ขึ้นรูปโดยวิธีอัดขึ้นรูปแบบเย็น (CIP) ที่แรงอัด 130 Megapascal

จากงานวิจัยของ Zhu Baojun 2002 ขึ้นรูปโดยวิธีการฉีดขึ้นรูป (PIM) ที่อุณหภูมิ 170 ℃ แรงอัด 75 Megapascal

จากงานวิจัยของ Z.Zak Fang 2009 ขึ้นรูปโดยวิธีการอัดขึ้นรูปแบบร้อน (HIP) ที่แรงอัด 30 Megapascal

จากงานวิจัยของ S. Liu 2006 ขึ้นรูปโดยวิธีขึ้นรูปแบบร้อน (HIP)

3.2.2 การอบผนึก

เป็นการนำชิ้นงานมาเผาในเตาที่มีอุณหภูมิใกล้เคียงจุดหลอมเหลวของชิ้นงานนั้น ๆ จึงทำให้โลหะเกิดการประสานจะมีความแข็งแรงมากขึ้น

ตารางที่ 3.5 แสดงอุณหภูมิในการอบผนึกต่อสมบัติของแผ่นมีด [2]

อ้างอิงผลงานวิจัย (References)	**อุณหภูมิ temperature (°c)**	**ความหนาแน่น Density (g/cm³)**	**ความแข็ง (Hardness Vicker)**
B. Ratna Sunil	1,250	14.1	1,397
Zhu Baojun 2002	1,460	14.7	1,445
S. Liu 2006	1,430	14.6	1,503

จากงานวิจัยของ B. Ratna Sunil ใช้อุณหภูมิในการอบผนึก 1,250 ℃ ความหนาแน่น 14.1 g/cm³ ได้ความแข็ง 1,397 Hardness Vicker

จากงานวิจัยของ B. Ratna Sunil ใช้อุณหภูมิในการอบผนึก 1,460 ℃ ความหนาแน่น 14.7 g/cm³ ได้ความแข็ง 1,445 Hardness Vicker

จากงานวิจัยของ S. Liu 2,006 ใช้อุณหภูมิในการอบผนึก 1,430 °C ความหนาแน่น 14.6 g/cm³ ได้ความแข็ง 1,503 Hardness Vicker

แผ่นมีดซีเมนต์ทังสเตนคาร์ไบด์ (Cemented Tungsten Carbide) ผสมโคบอลต์เพื่อเป็นโลหะประสานจะมีสัดส่วนอยู่ที่ 4 - 25 %

กระบวนการอัดขึ้นรูปโลหะผงจะทำหลังจากการผสมผงทังสเตนคาร์ไบด์กับผงโคบอลต์โดยมี Paraffin Wax เป็นตัวทำให้ผงโลหะเกิดการเชื่อมประสานเพื่อทำให้ผงโลหะยึดเกาะตัวกันชั่วคราวในขณะทำการอัดขึ้นรูป จากการศึกษาข้อมูลงานวิจัยพบว่าใช้แรงอัดอยู่ในช่วง 35 – 950 Megapascal

การอบผนึกชิ้นงาน Green Compact เกิดจากการผสมผงทังสเตนคาร์ไบด์กับผงโคบอลต์แล้วอัดขึ้นรูป จึงทำการอบผนึกที่อุณหภูมิใกล้เคียงจุดหลอมเหลวของโคบอลต์ โคบอลต์จะละลายยึดติดกับทังสเตนคาร์ไบด์ จากข้อมูลการศึกษางานวิจัยมีอุณหภูมิอบผนึกอยู่ในช่วง 1,250 - 1,460 °C

3.3 ศึกษาการทดสอบประสิทธิภาพชิ้นงานซีเมนต์ทังสเตนคาร์ไบด์

3.3.1 ชิ้นงาน Solid

3.3.1.1 ทดสอบความหนาแน่น

การทดสอบความหนาแน่นของผลิตภัณฑ์ซีเมนต์ทังสเตนคาร์ไบด์เพื่อที่จะต้องการทราบปริมาตรน้ำหนักของชิ้นงานว่าได้ตรงกันตามที่ได้คำนวณไว้ตั้งแต่ตอนการชั่งผงคาร์ไบด์ การทดสอบความหนาแน่นของชิ้นเป็นการสุ่มการทดสอบชิ้นงานจะไม่ทำการทดสอบทุกชิ้น เพราะการทดสอบนั้นต้องทำลายชิ้นงานให้แตกหรือทำให้เป็นผงเสียก่อนจะทำการทดสอบซึ่งผลการทดสอบผลิตภัณฑ์ซีเมนต์ทังสเตนคาร์ไบด์

รูปที่ 3.5 การทดสอบความหนาแน่นของชิ้นงานซีเมนต์ทังสเตนคาร์ไบด์ [32]

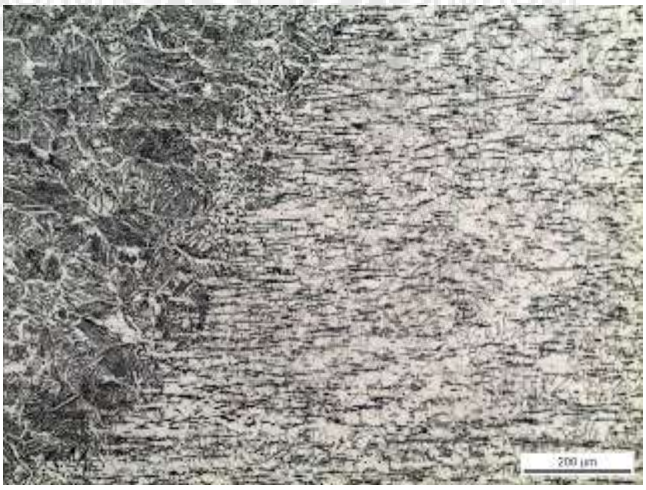
3.3.1.2 การทดสอบความแข็ง (Hardness Test)

การทดสอบความแข็งเป็นการทดสอบความแข็งแรงของชิ้นงานซีเมนต์ทังสเตนคาร์ไบด์ว่าชิ้นงานที่ผลิตออกมามีความแข็งแรงตรงตามที่กำหนดไว้หรือไม่ เพื่อที่จะได้นำชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบ นำไปใช้งานได้

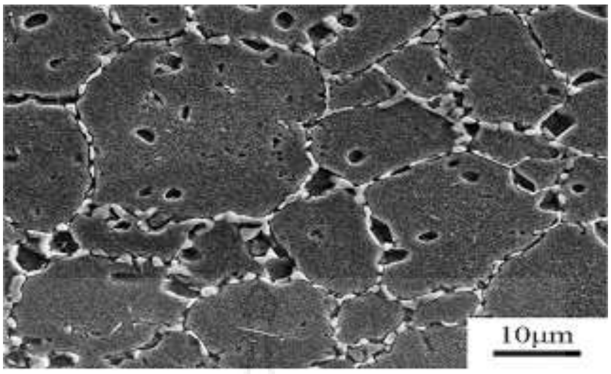
รูปที่ 3.6 การทดสอบความแข็ง (Hardness Test) ใช้เครื่อง Misuratori di Durezza Hardness Tesdness Modello 206 RTD ใช้การทดสอบแบบ Rockwell Scal A ใช้หัวเพชร 120 ° โหลดในการทดสอบ 120 กิโลกรัม

3.3.1.3 วิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค

โครงสร้างจุลภาค (microstructure) คือ สภาพหรือลักษณะของพื้นผิวที่ปรากฏของชิ้นงานที่ผ่านการเตรียมเพื่อการตรวจสอบภายใต้กล้องจุลทรรศน์ ณ กำลังขยายสูงกว่า 25 เท่า ในทางปฏิบัติ โครงสร้างจุลภาคของโลหะมักจะประกอบไปด้วยเกรน (Grain) และเฟสต่างๆ ซึ่งหากเป็นเนื้อหลักจะเรียกว่า เมทริกซ์ (Matrix) แต่หากเป็นก้อนเล็กๆ ในเนื้อหลักจะเหมาเรียกรวมๆ ว่า อนุภาค (Particle)



รูปที่ 3.7 ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้อง Optical microscopy [17]



รูปที่ 3.8 ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้อง Scanning electron microscopy (SEM) [17]

การวิเคราะห์โครงสร้างและส่วนผสมทางเคมีของโลหะ ได้แก่

1. เพื่อศึกษากลไกการเกิดโครงสร้างจุลภาค และความสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้างจุลภาคกับสมบัติต่างๆ ของโลหะ
2. เพื่อตรวจสอบและยืนยันระดับคุณภาพของชิ้นงาน
3. เพื่อวิเคราะห์ความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นกับชิ้นงานในระหว่างการใช้งาน
4. เพื่อการทำวิศวกรรมย้อนรอยชิ้นส่วนที่ผลิตจากโลหะชนิดหนึ่งๆ

โครงสร้างจุลภาคและส่วนผสมทางเคมีอาจเปลี่ยนแปลงไปในขั้นตอนต่างๆ นับตั้งแต่เริ่มการผลิต จนถึงการใช้งาน ซึ่งปัจจัยที่มีผลกระทบได้แก่ เริ่มจากขบวนการผลิต ผลกระทบของขบวนการผลิตต่อโครงสร้างจุลภาคและส่วนผสมทางเคมี

3.3.1.4 ทดสอบรอยแตกร้าว

รอยแตกร้าวของชิ้นงานจากนักวิชาการ Niihara ที่ได้ทดลองและปรับปรุงสูตรในการผสมผงคาร์ไบด์แบบใหม่ในการผลิตชิ้นงานและนำชิ้นงานอบผนึกจนเกิดรอยแตกร้าวตามแนวยาวแบบเส้นตรงขึ้นบนชิ้นงานทดลองและเมื่อได้ศึกษากระบวนการผลิตชิ้นงานแผ่นใบตัดและชิ้นงาน Recycle แล้วพบว่าชิ้นงานทั้งสองชิ้นมีรอยแตกร้าวตามแนวยาวแบบเส้นตรงเหมือนกับรอยแตกร้าวชิ้นงานนักวิชาการ Niihara ดังรูปที่ 3.9 และรูปที่ 3.10

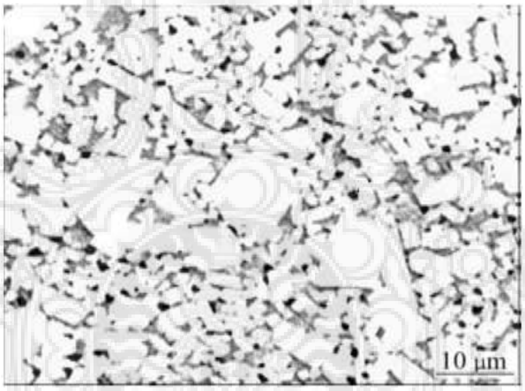
รูปที่ 3.9 รอยแตกร้าวชิ้นงานของนักวิชาการ Niihara แตกร้าวตามแนวยาวแบบเส้นตรง [31]

รูปที่ 3.10 รอยแตกร้าวชิ้นงาน แตกร้าวตามแนวยาวแบบเส้นตรง

3.3.2 ชิ้นงานความหนาแน่นสูง (Hard metals)

3.3.2.1 วิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค (Scanning electron microscope :SEM)

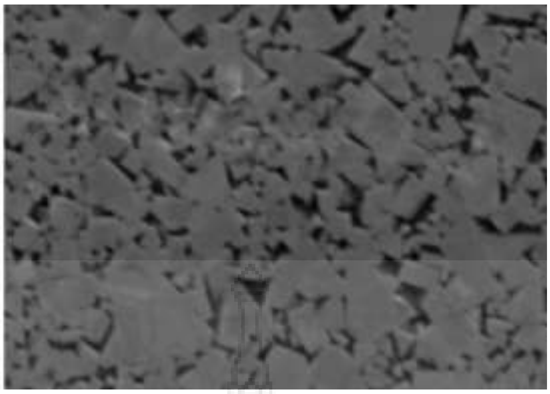
จากงานวิจัย (Tungsten carbide platelet-containing cemented carbide with yttrium containing dispersed phase) ซึ่งจะแสดงผลการตรวจสอบผงโลหะทังสเตนคาร์ไบด์ (WC-Co) ด้วยตรวจสอบโครงสร้างทางจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope : SEM ยี่ห้อ JEOL JSM-6360 LV)



รูปที่ 3.11 ตัวอย่างผลการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค (Scanning electron microscope) จากงานวิจัย Tungsten carbide platelet-containing cemented carbide with yttrium containing dispersed phase [23]

จากรูปที่ 3.11 เป็นภาพแสดงการตรวจสอบโครงสร้างด้วยด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope : SEM) ซึ่งแสดงลักษณะโครงสร้างบริเวณที่ตรวจสอบ โครงสร้างที่ได้มีลักษณะใกล้เคียงกับโครงสร้างตามทฤษฎี

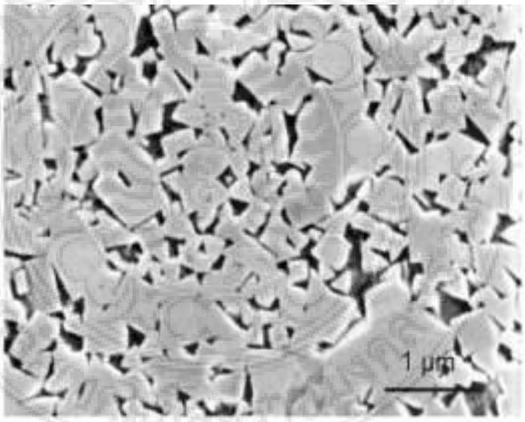
จากงานวิจัย (Friction and wear characteristics of WC-Co cemented carbides in dry reciprocating sliding contact) ซึ่งจะแสดงผลการตรวจสอบผงโลหะทังสเตนคาร์ไบด์ (WC-Co) ด้วยตรวจสอบโครงสร้างทางจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM XL-30 FEG,FEI Philips)



รูปที่ 3.12 ตัวอย่างผลการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค จากงานวิจัย (Friction and wear characteristics of WC-Co cemented carbides in dry reciprocating sliding contact) [25]

จากรูปที่ 3.12 เป็นภาพแสดงการตรวจสอบโครงสร้างด้วยด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope : SEM) ซึ่งแสดงลักษณะโครงสร้างบริเวณที่ตรวจสอบ โครงสร้างที่ได้มีลักษณะใกล้เคียงกับโครงสร้างตามทฤษฎี

งานวิจัย (Surface characteristics and removal mechanism of cemented tungsten carbides in nanoscratching) ซึ่งจะแสดงผลการตรวจสอบผงโลหะทังสเตนคาร์ไบด์ (WC-Co) ด้วยตรวจสอบโครงสร้างทางจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM)



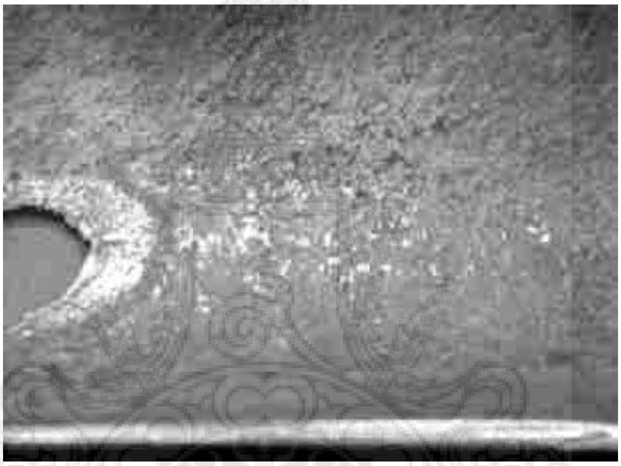
รูปที่ 3.13 ตัวอย่างผลการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค (Scanning electron microscope) จากงานวิจัย (Surface characteristics and removal mechanism of cemented tungsten carbides in nanoscratching) [27]

จากรูปที่ 3.13 เป็นภาพแสดงการตรวจสอบโครงสร้างด้วยด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope SEM) ซึ่งแสดงลักษณะโครงสร้างบริเวณที่ตรวจสอบ โครงสร้างที่ได้มีลักษณะใกล้เคียงกับโครงสร้างตามทฤษฎี

3.3.2.2 การทดสอบความแข็ง

การทดสอบความแข็งเป็นการตรวจสอบถึงความแข็งของเครื่องมือตัดที่ต้องการตรวจสอบเพื่อให้ทราบถึงค่าความแข็งและสามารถนำมาเปรียบเทียบถึงประสิทธิภาพได้ ซึ่งในการทดสอบความแข็งกับงานทดลองต่างๆนี้นิยมใช้มาก คือการทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์ เพราะเป็นการทดสอบความแข็งที่มาตรฐานและสามารถกำหนดค่าความแข็งของวัสดุได้ถูกต้อง ในการทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์นี้จะใช้เครื่องทดสอบกดบนผิวชิ้นทดสอบทำให้เกิดรอยบุ๋มถาวร (Permanent Indentation) แล้ววัดขนาด ความโตหรือความลึกของรอยบุ๋ม ถ้าทดสอบกับวัสดุอ่อนก็จะทำให้เกิดรอยบุ๋มขนาดใหญ่หรือลึกมาก แต่ถ้าทดสอบกับวัสดุแข็งก็จะทำให้เกิดรอยบุ๋มขนาดเล็กหรือลึกน้อย ซึ่งในการตรวจสอบความแข็งจะทำการตรวจสอบชิ้นงานที่เป็นทังสเตนคาร์ไบด์ มีความแข็งสูง

3.3.2.3 การทดสอบการสึกหรอ



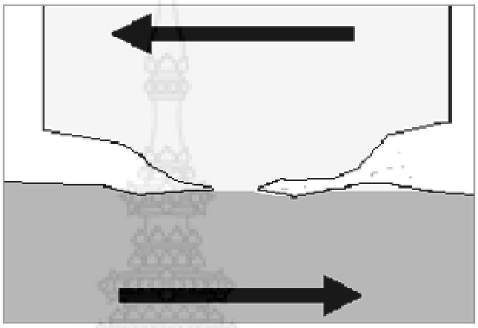
รูปที่ 3.14 การสึกหรอของวัสดุ [22]

จากรูปที่ 3.14 แสดงการสึกหรอของวัสดุ การสึกหรอ (Wear) คือ “ความเสียหายบนพื้นผิวของของแข็งทีละน้อยและค่อย ๆ สึกหรอเนื่องมาจากการเลื่อนหรือเคลื่อนที่ของวัสดุเนื่องจากแรงทางกล เป็นผลให้วัสดุนั้นไปสัมผัสกับของแข็ง ของเหลวหรือแก๊ส” โดยเราสามารถแบ่งประเภทของการสึกหรอออกได้เป็น 3 แบบคือ

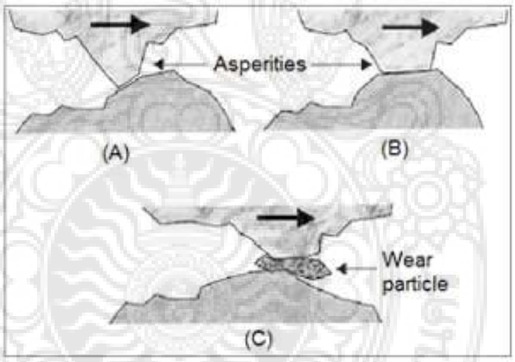
- การสึกหรอแบบยึดติด (Adhesive Wear)
- การสึกหรอแบบขัดสี (Abrasive Wear)
- การสึกหรอแบบกัดเซาะ (Erosive Wear)

การสึกหรอแบบยึดติด (Adhesive Wear) เกิดขึ้นเนื่องจากการที่พื้นผิวของวัสดุสองชิ้นเลื่อนผ่านกันโดยมีแรงกดที่มากเกินไปเป็นตัวกระทำลงบนวัสดุและทำให้วัสดุเกิดการยึดติดกันด้วยแรงกด (Pressure) ที่ทำให้ความเค้นระหว่างผิวหน้าของพื้นผิววัสดุที่เกินกว่าความเค้นที่จุดคราก (Yield Point) ของวัสดุนั้น ๆ จึงทำให้ผิวหน้าของวัสดุของชิ้นที่แข็งแรงน้อยกว่าหลุดติดอยู่ระหว่างวัสดุทั้งสอง การเกิดการยึดติดของวัสดุเกิดได้ 2 กรณีคือ

การยึดติดแบบเย็น (Cold Adhesive Wear) เป็นการสึกหรอของวัสดุสองชิ้นที่เคลื่อนที่ผ่านกันโดยขาดฟิล์มน้ำมันมาหล่อลื่นส่งผลให้พื้นผิวส่วนที่ไม่เรียบ (Asperities) ของวัสดุทั้งสองถูกันอย่างรุนแรงด้วยแรงกดจนส่วนบนที่ยื่นมาของโลหะตัวล่างที่อ่อนกว่าหลุดออก จากนั้นเมื่อวัสดุทั้งสองยังเคลื่อนที่กลับไปกลับมาอยู่ระหว่างกันอีก ชิ้นส่วนที่หลุดออกจากการสึกในครั้งแรกก็จะเข้ามาแทรกกลางระหว่างผิวสัมผัสของโลหะทั้งสองชิ้น ส่งผลให้เกิดการสึกหรอเนื่องจากการขูดขีดของชิ้นส่วนที่สึกหรอต่อวัสดุชิ้นที่อ่อนกว่าให้เกิดรอยยึดติดเพิ่มไปอย่างรวดเร็ว



รูปที่ 3.15 กลไกการเกิดการสึกหรอแบบเกาะติดแบบเย็น [22]

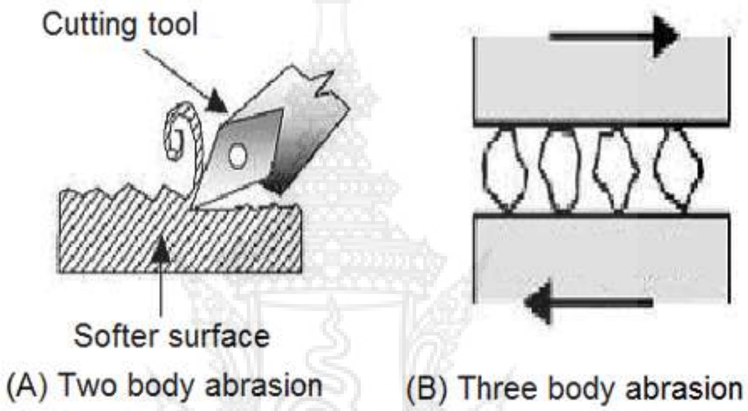


รูปที่ 3.16 ขั้นตอนการเกิดสึกหรอแบบเกาะติดแบบเย็น [22]

จากรูปที่ 3.15 และ 3.16 แสดงกลไกการสึกหรอและขั้นตอนการเกิดการสึกหรอแบบเกาะติดแบบเย็น เป็นการสึกหรอของวัสดุสองชิ้นที่เคลื่อนที่ผ่านกันโดยขาดฟิล์มน้ำมันมาหล่อลื่นส่งผลให้พื้นผิวส่วนที่ไม่เรียบ (Asperities) ของวัสดุทั้งสองถูกันอย่างรุนแรงด้วยแรงกด (รูปที่ 3.16 A) จนส่วนบนที่ยื่นมาของโลหะตัวล่างที่อ่อนกว่าหลุดออก (รูปที่ 3.16 B)

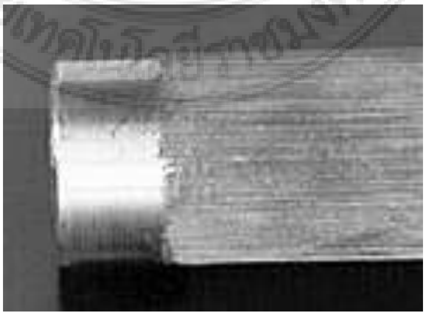
การยึดติดแบบร้อน (Seizure Wear) หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่าการไหม้ติดกันเนื่องจากความร้อน ในกรณีนี้ความเสียหายเกิดขึ้นเนื่องจากการที่เมื่อวัสดุเกิดการเสียดสีกันจนมีอุณหภูมิสูง หรือเสียดสีกันในที่สภาพแวดล้อมที่มีอุณหภูมิสูงก็จะทำให้ความแข็งแรงหรือความสามารถในการทนต่อความเค้นของวัสดุลดลงและเกิดการอ่อนตัวจนทนกับสภาพความเค้นที่เกิดขึ้นไม่ได้และหลุดออกมาติดกับผิวของวัสดุอีกชิ้นหนึ่ง

การสึกหรอแบบขัดสี (Abrasive Wear) เกิดขึ้นเนื่องจากการที่วัสดุที่มีความแข็งกว่าเคลื่อนที่ไปบนวัสดุที่มีความอ่อนกว่าด้วยแรงเสียดทานเป็นผลให้เกิดรอยขีดข่วน รอยไถ (Pouching) หรือการสึกหรอบนพื้นผิวของวัสดุที่อ่อนกว่า การสึกหรอที่เกิดขึ้นอาจมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับความต่างของความแข็งแรงระหว่างผิวของวัสดุทั้งสอง แรงที่กดลงบนหน้าสัมผัสของวัสดุ และแรงเสียดทานที่เกิดขึ้น โดยการเกิดการสึกหรอดังกล่าวจะเกิดขึ้นได้สองสภาวะคือ การขัดสีแบบวัตถุสองชิ้น (Two Body Abrasion) สภาวะนี้เกิดขึ้นเมื่อมีคู่วัตถุสองชิ้นถูกัน หรือวัตถุที่ผิวแข็งมากกว่าถูไปบนวัตถุที่ผิวอ่อนกว่า ทำให้วัตถุที่ผิวอ่อนกว่าหลุดออกมาเนื่องจากความแข็งแรงของผิวที่น้อยกว่า เช่น การทำงานของเครื่องตัดและเครื่องเจียระไนหรือการขัดพื้นผิวด้วยกระดาษทราย



รูปที่ 3.17 การสึกหรอแบบขัดสีแบบวัตถุสองชิ้นและแบบวัตถุสามชิ้น [22]

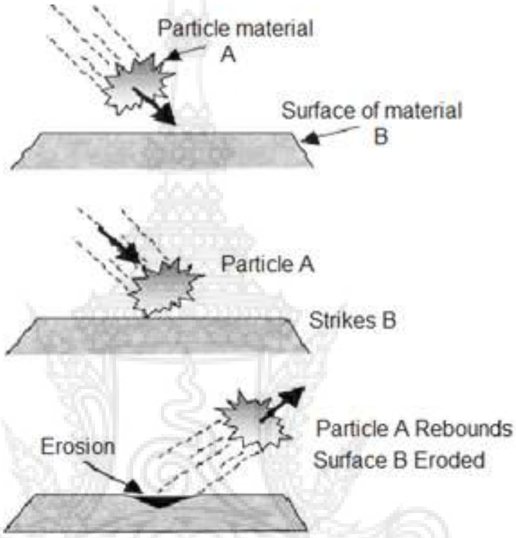
จากรูปที่ 3.17 แสดงการสึกหรอแบบขัดสีแบบวัตถุสองชิ้นและแบบวัตถุสามชิ้น (Three Body Abrasion) เกิดขึ้นเมื่อมีวัตถุแปลกปลอมมาคั่นกลางอยู่ระหว่างที่คู่ผิววัตถุสองชิ้นถูไปมา โดยที่เศษวัตถุชิ้นที่คั่นกลางระหว่างผิวสัมผัสของวัตถุทั้งสองนั้นอาจเป็นวัตถุแปลกปลอมจากภายนอกระบบ หรือวัตถุที่เกิดจากความเสียหายจากการขัดสีกันระหว่างวัตถุคู่สัมผัสในตอนแรกแล้วหลุดอ อกมาอยู่ระหว่างผิวสัมผัสของวัตถุทั้งสองในตอนหลัง



รูปที่ 3.18 การสึกหรอแบบขัดสี [21]

จากรูปที่ 3.18 แสดงการสึกหรอแบบขัดสี ผิวหน้าชิ้นงานที่เป็นวัตถุแข็งมีการเปลี่ยนที่หรือมีการเคลื่อนที่ของวัสดุที่มีผลมาจากแรงปฏิสัมพันธ์กับผิวหน้าของวัตถุอื่นหรืออนุภาคอื่น โดยอนุภาคสามารถฝังลึกลงไปผิวหน้าของวัสดุทั้งสองที่สัมผัสกันและมีการเคลื่อนที่เสียดสีระหว่างกันทำให้เกิดการเสียดสี

การสึกหรอแบบกัดเซาะ (Erosive Wear) เป็นความเสียหายซึ่งเกิดจากผลกระทบของอณุภาค หยดน้ำหรือกระแสของมวลของของเหลวหรือแก๊ส (Liquid or Gas) ที่ปะทะกับวัสดุและเกิดการกัดเซาะอย่างต่อเนื่องและเป็นผลให้วัสดุหรือชิ้นส่วนเหล่านั้นเกิดการผุกร่อนจากการกัดเซาะ



รูปที่ 3.19 กลไกการสึกหรอแบบกัดเซาะ [19]

จากรูปที่ 3.19 แสดงกลไกการสึกหรอแบบกัดเซาะ ที่เกิดจากการที่อนุภาค A ซึ่งเป็นอนุภาคขนาดเล็กและเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูงเคลื่อนที่เข้ามาปะทะกับพื้นผิว B ซึ่งอยู่กับที่เป็นผลทำให้ส่วนบนของพื้นผิว B นั้นหลุดออก ทำให้พื้นผิว B มีลักษณะพรุนเนื่องจากในสถานการณ์จริงๆ นั้นอนุภาคเล็ก ๆ

3.4 วิเคราะห์ข้อมูล

จากข้อมูลของงานวิจัยที่ได้นำมาวิเคราะห์ปัจจัยที่เกี่ยวข้องและนำมาเป็นทฤษฎีในการทดลองในครั้งนี้มีข้อมูลที่สอดคล้องกับการทดลองที่ได้ปฏิบัติตามแผนการดำเนินงานทั้งหมดหลังจากการรวบรวมข้อมูลและวิเคราะห์ทฤษฎีผลการวิเคราะห์จากทฤษฎีที่นำมาปฏิบัติดังนี้

3.4.1 การบดโลหะผงทังสเตนจากทฤษฎีที่ได้วิเคราะห์เรื่องขนาดของลูกบอลในการบดและความเร็วรอบของเครื่องบดที่เหมาะสมคือ ความเร็วรอบที่ใช้ในการบดคือ 300 RPM และใช้ลูกบอลขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 mm เพื่อไม่ให้เกิดการกระจายตัวของผงทังสเตนที่สูง

3.4.2 การผสมจากทฤษฎีที่ได้ศึกษาการที่ผสมผงโลหะทังสเตนคาร์ไบด์ที่มีขนาดเกรนไซด์ที่เล็กประมาณ 0.28 - 1 μm และทำการผสมกับผงโคบอลต์ที่ 6 % จะได้ชิ้นงานซีเมนต์คาร์ไบด์ที่มีความแข็งมากที่สุด

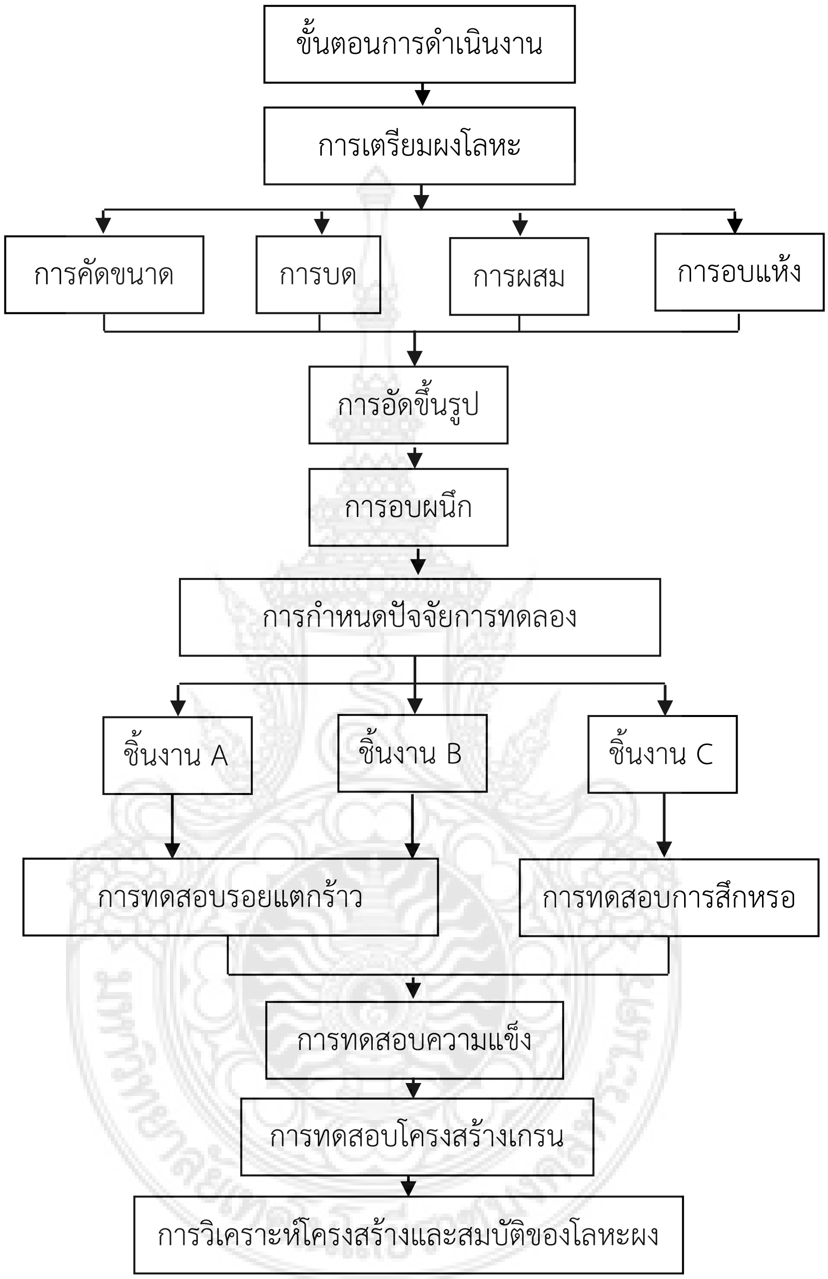
3.4.3 วัสดุก่อนอัดขึ้นรูป จากข้อมูลการศึกษากระบวนการผลิตชิ้นงานคาร์ไบด์ เลือกใช้โคบอลต์เป็นโลหะผสมใช้ส่วนผสมอยู่ที่ 5, 10, 15 % และใช้ Paraffin Wax เป็นวัสดุประสานชั่วคราว ก่อนทำการอัดขึ้นรูปเนื่องจากวัสดุประสานจะทำหน้าที่ให้โลหะผงเกิดการยึดเกาะตัวกันในขณะทำการอัดขึ้นรูป

3.4.4 การอัดขึ้นรูปจากการศึกษาทฤษฎีก็พบว่าการอัดขึ้นรูปที่ใช้แรงดันเป็นตัวกำหนดนั้นต้องคำนึงถึงรูปร่างและมิติและความหนาแน่นการอบผนึกโดยที่ขนาดก่อนอบต้องใหญ่กว่าหลังอบเมื่อหลังจากการอบผนึกที่ 1400°C นั้นจะเกิดการหดตัวลงไปประมาณ 3 mm. จากทฤษฎีดังนั้นแรงอัดขึ้นรูปที่ 350 MPa จึงเหมาะสมสูงสุดสำหรับแผ่นมีด

3.4.5 การอบผนึกนั้นต้องดูที่คุณสมบัติของวัสดุที่จะอบผนึก (Sintering) จากทฤษฎีพบว่าข้อมูลคือที่อุณหภูมิ 1400°C นี้เป็นจุดที่โคบอลต์เกิดการหลอมตัวเพื่อยึดเกาะกับเม็ดเกรนของทังสเตนดังนั้นจึงเลือกอุณหภูมิที่ 1400°C เป็นอุณหภูมิสูงสุดสำหรับการอบผนึก

3.4.6 การตรวจสอบโครงสร้างชิ้นงานหลังอบผนึกนั้นทำการทสอบโดยใช้การทดสอบความแข็งแบบ Vicker เพื่อศึกษาคุณสมบัติชิ้นงานซีเมนต์คาร์ไบด์จากรอยแตกบนชิ้นงานหลังจากได้รับแรงโหลดของหัวกดและทำการตรวจสอบโครงสร้างโดยการขัดเปิดผิว

3.5 กำหนดวิธีการทดลอง



รูปที่ 3.20 แสดงผังการกำหนดวิธีการทดลอง

ชิ้นงาน A คือ ชิ้นงานแบบแท่งที่ส่วนผสมต่างกัน ได้แก่
A1 ขนาด 7.48 x 13.50 x 44.55 มม. / WC 95 % Co 5 % / อบผนึกแบบ ก (1,430 °c 1 ชม.)
A2 ขนาด 7.48 x 13.50 x 44.55 มม. / WC 90 % Co 10 % / อบผนึกแบบ ก (1,430 °c 1 ชม.)
A3 ขนาด 7.48 x 13.50 x 44.55 มม. / WC 85 % Co 15 % / อบผนึกแบบ ก (1,430 °c 1 ชม.)
ชิ้นงาน B คือ ชิ้นงานแผ่นมีดที่ส่วนผสมต่างกัน ได้แก่
B1 ขนาด 12.7 x 12.7 x 4.76 มม. / WC 95 % Co 5 % / อบผนึกแบบ ก (1,430 °c 1 ชม.)
B2 ขนาด 12.7 x 12.7 x 4.76 มม. / WC 90 % Co 10 % / อบผนึกแบบ ก (1,430 °c 1 ชม.)
B3 ขนาด 12.7 x 12.7 x 4.76 มม. / WC 85 % Co 15 % / อบผนึกแบบ ก (1,430 °c 1 ชม.)
ชิ้นงาน C คือ ชิ้นงานแผ่นมีดที่อุณหภูมิการอบผนึกต่างกัน ได้แก่
C1 ขนาด 12.7 x 12.7 x 4.76 มม. / WC 95 % Co 5 % / อบผนึกแบบ ก (1,430 °c 1 ชม.)
C2 ขนาด 12.7 x 12.7 x 4.76 มม. / WC 95 % Co 5 % / อบผนึกแบบ ข (1,400 °c 1 ชม.)
C3 ขนาด 12.7 x 12.7 x 4.76 มม. / WC 95 % Co 5 % / อบผนึกแบบ ก (1,400 °c 2 ชม.)
การอบผนึก
แบบ ก การอบผนึกที่อุณหภูมิ 1430 °c เป็นเวลา 1 ชั่วโมง
แบบ ข การอบผนึกที่อุณหภูมิ 1400 °c เป็นเวลา 1 ชั่วโมง
แบบ ค การอบผนึกที่อุณหภูมิ 1400 °c เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

3.6 ดำเนินการทดสอบประสิทธิภาพ

3.6.1 การเตรียมผงโลหะ

1) การคัดขนาดโลหะผงทังสเตนคาร์ไบด์ด้วยตะแกรงคัดขนาด

2) การบดผงทังสเตนคาร์ไบด์ นำผงก่อนบดไปทำการทดสอบ X-ray Diffractometer (XRD) ด้วยเครื่อง Shimadzu: XRD 6000 และทำการทดสอบ Particle Size Distribution ด้วยเครื่อง Malvern:Mastersizer 2000 และ ทำการตรวจ Scanning Electron Microscope (SEM) เพื่อดูลักษณะโครงสร้างผงและทำการตรวจสอบโครงสร้างผลึกด้วยเทคนิค x-ray fluorescence spectrometry (XRF)

3) นำผงทังสเตนคาร์ไบด์ที่ได้จากการย่อย นำมาชั่งน้ำหนักก่อนนำไปบด

4) เตรียมผงทังสเตนคาร์ไบด์และลูกบด ball maill

5) ชั่งน้ำหนักของลูกบด ball mail ตามปริมาณน้ำหนักและสัดส่วน 1:10 ก่อนนำเข้าหม้อบด

6) นำลูกบด Ball Mill บรรจุลงในหม้อบด

รูปที่ 3.21 แสดงการนำลูกบดบรรจุหม้อบด

รูปที่ 3.22 แสดงนำแอลกอฮอล์บรรจุลงในหม้อบดในปริมาณ 150 ml.

7) จากรูปที่ 3.22 แสดงการนำแอลกอฮอล์บรรจุลงในหม้อบดในปริมาณ 150 ml. ที่สูงกว่าลูกบดประมาณ 0.5-1 cm

รูปที่ 3.23 แสดงการนำผงทังสเตนคาร์ไบด์บรรจุหม้อบด

8) จากรูปที่ 3.23 แสดงการนำผงทังสเตนคาร์ไบด์ที่ได้เตรียมไว้บรรจุลงในหม้อบดแล้วปิดฝา เพื่อที่จะได้เริ่มขั้นตอนต่อไป

9) จัดเตรียมเครื่องบดผงโลหะ

10) ติดตั้งหม้อบด หลังจากที่เตรียมเครื่องบดเสร็จได้เริ่มทำการเปิดเครื่อง และทำการติดตั้งหม้อบดลงในเครื่องบด โดยการคายตัวจับหม้อบดและนำหม้อบดมาวางไว้ในฐานรองหม้อบด แล้วทำการหมุน สกูรตัวจับให้แน่นแล้วปิดฝาเพื่อดำเนินการขั้นตอนต่อไป

11) ปรับตั้งค่าความเร็วรอบ 300 รอบ/นาที และตั้งเวลาในการบดตามเงื่อนไขและเริ่มทำการเดินเครื่อง

รูปที่ 3.24 แสดงปิดระบบการทำงานของเครื่องบดผงโลหะ

12) จากรูปที่ 3.24 แสดงการปิดระบบการทำงานของเครื่องบดผงโลหะ เมื่อทำการบดเสร็จสิ้นแล้วให้ทำการเปิดฝาเครื่องบดผงโลหะ และนำหม้อบดออกจากเครื่อง เพื่อดำเนินขั้นตอนต่อไป

13) ทำการพักหม้อบดให้เย็นตัว

รูปที่ 3.25 แสดงการพักหม้อบด

14) จัดเตรียมอุปกรณ์ในการแยกผงโลหะออกจากหม้อบด

รูปที่ 3.26 แสดงการเตรียมอุปกรณ์ในการแยกผง

รูปที่ 3.27 แสดงการแยกผงโลหะออกจากหม้อบด

15) จากรูปที่ 3.27 แสดงการแยกผงทังสเตนคาร์ไบด์ที่ผ่านการบดจากเครื่องบดผงโลหะออกจากหม้อบดโดยการนำตะแกรงกรองลูกบดมาวางไว้บนบิกเกอร์แล้วเทผงทังสเตน ออกจากลูกบดโดยผ่านกรองลงสู่บิกเกอร์

รูปที่ 3.28 แสดงการเทแอลกอฮอล์เพื่อล้างลูกบด

16) จากรูปที่ 3.28 แสดงการล้างลูกบดโดยใช้แอลกอฮอล์ เพื่อให้ผงที่ติดอยู่ลูกบดได้ไหลลงในบิกเกอร์ แล้วจึงเทแอลกอฮอล์ใส่หม้อบดเพื่อนำผงโลหะที่ติดอยู่ในหม้อบดออกมา และเทใส่ลงในบิกเกอร์

17) รอผงโลหะตกตะกอน

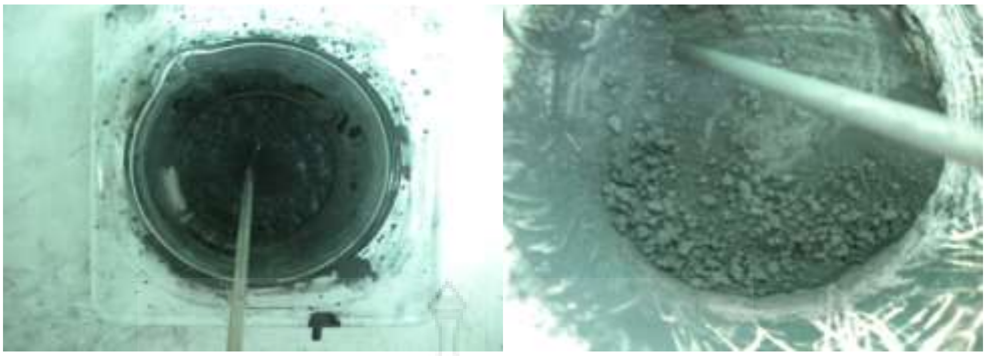
รูปที่ 329 เทแอลกอฮอล์ออกเหลือแต่โคลนตะกอน

18) จากรูปที่ 3.29 แสดงการเทแอลกอฮอล์ออก เมื่อผงโลหะตกตะกอนแล้ว จะเหลือแค่โคลนตะกอนที่อยู่ด้านล้าง

19) นำโคลนตะกอนผงโลหะมาทำให้แห้งโดยใช้เตาไฟฟ้า

20) ทำการคนโคลนโลหะผงจนกว่าผงจะจับตัวเป็นก้อน

21) เมื่อคนโคลนโลหะผงไปสักระยะหนึ่งผงโลหะเริ่มจับตัวเป็นก้อนและแห้ง



รูปที่ 3.30 แสดงลักษณะของการเปลี่ยนแปลงจากโคลนมาเป็นก้อน

รูปที่ 3.31 แสดงทำการบดผงโลหะให้ละเอียดขึ้นด้วยมือ

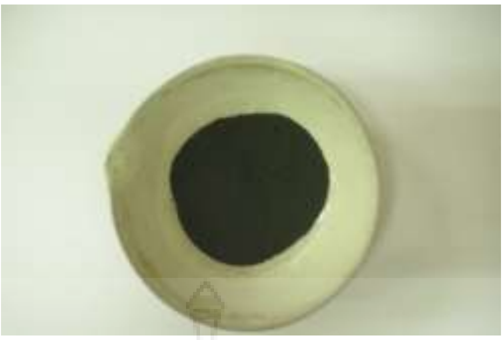
22) จากรูปที่ 3.31 แสดงให้เห็นการบดผงโลหะด้วยมือ หลังจากทำการขั้วผงโลหะจากโคลนมาเป็นการจับตัวเป็นก้อนและแห้งในที่สุด นำผงโลหะที่จับตัวเป็นก้อนและแห้งแล้วที่อยู่ในบิกเกอร์นำมาใส่ในถ้วยเซรามิกส์ เพื่อทำการบดผงให้ละเอียดขึ้น

23) นำผงโลหะที่ทำการบดด้วยมือ มาบรรจุและทำการตรวจสอบน้ำหนักก่อนนำไปเก็บในขวดโหลเพื่อป้องกันความชื้น

24) การเก็บรักษาโลหะผงทังสเตนคาร์ไบด์เพื่อป้องกันความชื้นก่อนการนำผงโลหะไปทำการทดสอบ Particle Size Distribution หลังบดตามเงื่อนไขและทำการตรวจ Scanning Electron Microscope (SEM) เพื่อดูลักษณะโครงสร้างของผงหลังบด

25) การผสม จัดเตรียมอุปกรณ์ที่จะทำการผสมและส่วนผสม ในการผสมนั้นมีส่วนผสมอยู่ 3 อย่าง ได้แก่ ผงทังสเตนคาร์ไบด์ ผงโคบอลต์ และตัวผสาน WAX

26) นำผงทังสเตนคาร์ไบด์ใส่ถ้วยเซรามิกส์



รูปที่ 3.32 แสดงนำผงทังสเตนคาร์ไบด์ใส่ถ้วยเซรามิกส์

27) นำผงทังสเตนคาร์ไบด์มาทำให้แห้งก่อนการผสมโดยการขั้วบนเตาไฟฟ้า ประมาณ 45 – 60 นาที

28) นำผงทังสเตนคาร์ไบด์ ผสมกับ โคบอลต์ โดยใช้ระยะเวลา 3 ชั่วโมง เตรียมผงโคบอลต์เพื่อบดและผสมเลือกใช้โคบอลต์ในอัตราส่วน 5, 10, 15 % โดยน้ำหนัก ผสมผงทังสเตนคาร์ไบด์กับผงโคบอลต์เป็นเวลา 12 ชั่วโมง ด้วยเครื่อง Ball Milling การผสมแยกเป็น 3 ชุด ประกอบด้วย

ชุดที่ 1 ผงทังสเตนคาร์ไบด์ 95 % ผงโคบอลต์ 5 %

ชุดที่ 2 ผงทังสเตนคาร์ไบด์ 90 % ผงโคบอลต์ 10 %

ชุดที่ 3 ผงทังสเตนคาร์ไบด์ 85 % ผงโคบอลต์ 15 %

รูปที่ 3.33 แสดงการผสมโคบอลต์

29) นำ WAX มาผสมกับทังสเตนคาร์ไบด์ที่ผสมโคบอลต์เสร็จแล้วโดยใช้ระยะเวลา 1 ชั่วโมง

รูปที่ 3.34 แสดงการผสมตัวผสาน Paraffin Wax

30) เมื่อผสมเสร็จแล้ว ทิ้งไว้ให้ผงเย็นตัวแล้วทำการบรรจุและตรวจสอบน้ำหนัก แล้วทำการเตรียมผงเพื่อทำการตรวจสอบ Scanning Electron Microscope (SEM) เพื่อดูลักษณะโครงสร้างผง หลังบดก่อนการอัดขึ้นรูปในกระบวนการต่อไป

3.6.2 กระบวนการอัดขึ้นรูป

รูปที่ 3.35 แสดงเครื่องอัดขึ้นรูป

เป็นกระบวนการนำผงคาร์ไบด์มาชั่งน้ำหนักจากนั้นนำผงคาร์ไบด์เทลงในแบบแม่พิมพ์ที่จะอัดขึ้นรูปก่อนจะทำการเทผงคาร์ไบด์ลงไปในแม่พิมพ์นั้น ให้ทำความสะอาดแม่พิมพ์ก่อนทุกครั้ง เพื่อป้องกันการเกิดสิ่งปนเปื้อนผสมลงในชิ้นงาน จากนั้นก็อัดขึ้นรูปชิ้นงาน กดค้างด้วยเวลา 5 วินาที และแรงอัด 350 MPa และไฮดรอลิกส์ก็จะอัดขึ้นรูปชิ้นงานซึ่งเครื่อง จะทำงานด้วยโปรแกรมอัตโนมัติ

ในการการควบคุมการทำงาน เมื่อเครื่องอัดขึ้นรูปชิ้นงานเสร็จก็นำชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์พร้อมกับใช้แปลงขนอ่อนทำความสะอาดครีบขอบชิ้นงานอัดขึ้นรูป

3.6.3 การอบผนึก

รูปที่ 3.36 เครื่องอบผนึก

ตารางที่ 3.6 แสดงข้อมูลที่เกี่ยวกับการอบผนึก (Green Density) [12]

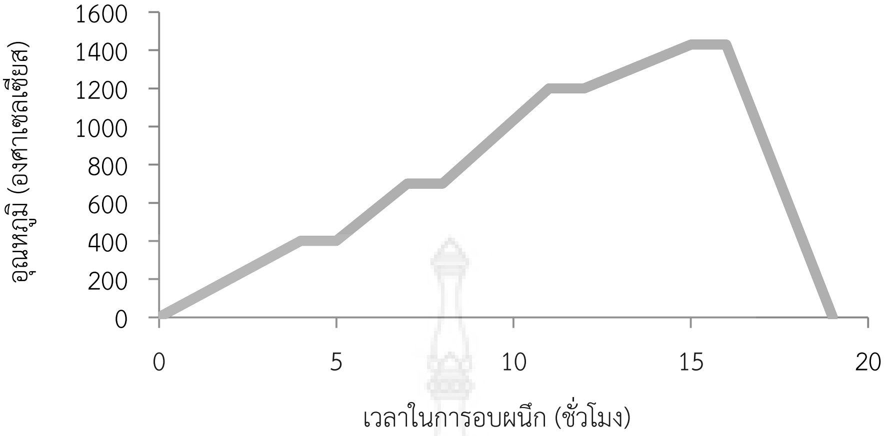
ส่วนผสมของผงโลหะ	**อุณหภูมิในการอบ (°C)**	**เวลาในการอบ**
WC+Co	1430	1 hr
WC+Co	1400	1 hr
WC+Co	1400	2 hr

จากตารางที่ 3.7 แสดงข้อมูลที่เกี่ยวข้องในเรื่องของการอบผนึก

1) ส่วนผสมของผงโลหะจากข้อมูล เป็นผงทังสเตนคาร์ไบด์ผสมกับตัวเชื่อมประสานโคบอลต์ (WC+Co)

2) อุณหภูมิในการอบผนึกจากข้อมูลมีขนาด 1400 และ 1430 องศาเซลเซียส

3) เวลาในการอบผนึกจากข้อมูลมี 1 และ 2 ชั่วโมง



รูปที่ 3.37 การอบผนึกแบบ ก กราฟแสดงขั้นตอนการอบผนึกที่
อุณหภูมิ 1,430 องศาเซลเซียส เวลาในการอบผนึก 1 ชั่วโมง [27]

จากรูปที่ 3.37 แสดงขั้นตอนการอบผนึก เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแกน (X) เวลาในการอบผนึกมีหน่วยเป็นชั่วโมง และแกน (Y) อุณหภูมิที่ใช้ในการอบผนึกมีหน่วยเป็นองศาเซลเซียส มีขั้นตอนการอบผนึกดังนี้

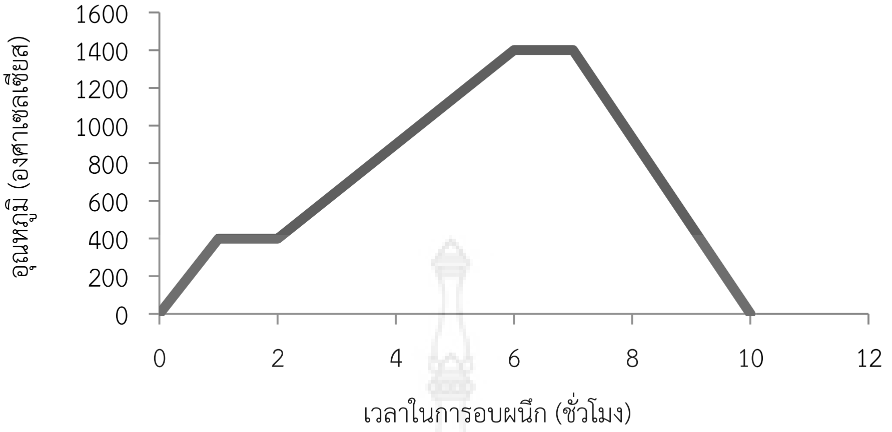
1) ขั้นตอนการไล่ความชื้น เมื่อนำชิ้นงานเข้าเตาแล้วให้ปรับอุณหภูมิต่อเนื่องขึ้นถึง 400 องศาเซลเซียส โดยใช้เวลาในการเพิ่มอุณหภูมิเป็นเวลา 4 ชั่วโมง แล้วคงอุณหภูมินี้ไว้เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

2) ขั้นตอนไล่ตัวประสาน (Dewaxing) เพิ่มต่อเนื่อง อุณหภูมิจาก 400 องศาเซลเซียส เป็น 700 องศาเซลเซียส โดยใช้เวลาในการเพิ่มอุณหภูมิเป็นเวลา 2 ชั่วโมง แล้วคงอุณหภูมินี้ไว้เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เพื่อไล่ตัวประสานโพลิไวนิลแอลกอฮอล์

3) ขั้นตอนการให้ความร้อนก่อนการอบผนึก (Pre Sintering) เพิ่มต่อเนื่องอุณหภูมิจาก 700 องศาเซลเซียสเป็น 1200 องศาเซลเซียส โดยใช้เวลาในการเพิ่มอุณหภูมิเป็นเวลา 3 ชั่วโมง แล้งคงอุณหภูมิไว้เป็นเวลา 1 ชั่วโมงเพื่อให้ความร้อนก่อนการอบผนึก

4) ขั้นตอนการอบผนึก เพิ่มต่อเนื่องอุณหภูมิจาก 1200 องศาเซลเซียส เป็น 1430 องศาเซลเซียส เมื่ออุณหภูมิถึง 1300 องศาเซลเซียส ให้หยุดเติมก๊าซไนโตรเจน โดยใช้เวลาในการเพิ่มอุณหภูมิเป็นเวลา 3 ชั่วโมง ให้คงการอบผนึก 1 ชั่วโมงเพื่อเกิดการรวมตัวกันระหว่างทังสเตนคาร์ไบด์และโคบอลต์

5) ขั้นตอนการปล่อยให้เย็นตัว (Cooling) ปล่อยให้ชิ้นงานเย็นตัวในเตาจนถึงอุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส จากนั้นนำชิ้นงานออกมาปล่อยให้เย็นตัวในอากาศ



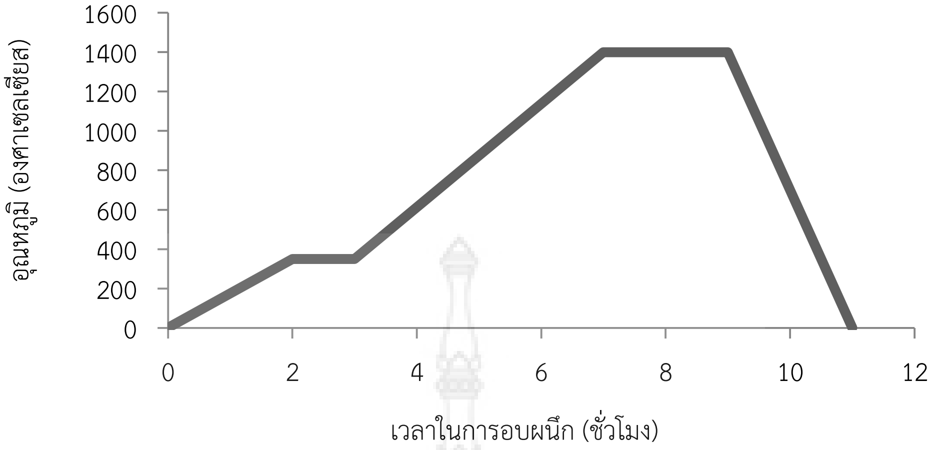
รูปที่ 3.38 การอบผนึกแบบ ข กราฟแสดงขั้นตอนการอบผนึกที่ อุณหภูมิ 1,400 องศาเซลเซียส เวลาในการอบผนึก 1 ชั่วโมง [27]

จากรูปที่ 3.38 แสดงขั้นตอนการอบผนึก เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแกน (X) เวลาในการอบผนึกมีหน่วยเป็นชั่วโมง และแกน (Y) อุณหภูมิที่ใช้ในการอบผนึกมีหน่วยเป็นองศาเซลเซียส ซึ่งมีขั้นตอนการอบผนึกดังนี้

1) ขั้นตอนการไล่ความชื้น เมื่อนำชิ้นงานเข้าเตาแล้วให้ปรับอุณหภูมิต่อเนื่องขึ้นถึง 400 องศาเซลเซียส โดยใช้เวลาในการเพิ่มอุณหภูมิเป็นเวลา 1 ชั่วโมง แล้วคงอุณหภูมินี้ไว้เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

2) ขั้นตอนไล่ตัวประสาน (Dewaxing) และการให้ความร้อนก่อนการอบผนึก (Pre Sintering) เพิ่มต่อเนื่อง อุณหภูมิจาก 400 องศาเซลเซียส เป็น 1400 องศาเซลเซียส โดยใช้เวลาในการเพิ่มอุณหภูมิเป็นเวลา 4 ชั่วโมง แล้วให้คงการอบผนึก 1 ชั่วโมง เพื่อเกิดการรวมตัวกันระหว่างทังสเตนคาร์ไบด์และโคบอลต์

3) ขั้นตอนการปล่อยให้เย็นตัว (Cooling) ปล่อยให้ชิ้นงานเย็นตัวในเตาจนถึงอุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส จากนั้นนำชิ้นงานออกมาปล่อยให้เย็นตัวในอากาศ



รูปที่ 3.39 การอบผนึกแบบ ค กราฟแสดงขั้นตอนการอบผนึกที่ อุณหภูมิ 1,400 องศาเซลเซียส เวลาในการอบผนึก 2 ชั่วโมง [27]

จากรูปที่ 3.39 แสดงขั้นตอนการอบผนึก เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแกน (X) เวลาในการอบผนึกมีหน่วยเป็นชั่วโมง และแกน (Y) อุณหภูมิที่ใช้ในการอบผนึกมีหน่วยเป็นองศาเซลเซียส ซึ่งมีขั้นตอนการอบผนึกดังนี้

1) ขั้นตอนการไล่ความชื้น เมื่อนำชิ้นงานเข้าเตาแล้วให้ปรับอุณหภูมิต่อเนื่องขึ้นถึง 400 องศาเซลเซียส โดยใช้เวลาในการเพิ่มอุณหภูมิเป็นเวลา 2 ชั่วโมง โดย แล้วคงอุณหภูมินี้ไว้เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

2) ขั้นตอนไล่ตัวประสาน (Dewaxing) และการให้ความร้อนก่อนการอบผนึก (Pre Sintering) เพิ่มต่อเนื่อง อุณหภูมิจาก 400 องศาเซลเซียส เป็น 1400 องศาเซลเซียส โดยใช้เวลาในการเพิ่มอุณหภูมิเป็นเวลา 4 ชั่วโมง แล้วให้คงการอบผนึก 1 ชั่วโมง เพื่อเกิดการรวมตัวกันระหว่างทังสเตนคาร์ไบด์และโคบอลต์

3) ขั้นตอนการปล่อยให้เย็นตัว (Cooling) ปล่อยให้ชิ้นงานเย็นตัวในเตาจนถึงอุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส จากนั้นนำชิ้นงานออกมาปล่อยให้เย็นตัวในอากาศ

3.6.4 การกำหนดปัจจัยการทดลอง

- ชิ้นงานแบบ A

A 1 ผงทังสเตนคาร์ไบด์ 95 % ผงโคบอลต์ 5 % อบผนึกแบบ ก

A 2 ผงทังสเตนคาร์ไบด์ 90 % ผงโคบอลต์ 10 % อบผนึกแบบ ก

A 3 ผงทังสเตนคาร์ไบด์ 85 % ผงโคบอลต์ 15 % อบผนึกแบบ ก

- ชิ้นงานแบบ B

B 1 ผงทังสเตนคาร์ไบด์ 95 % ผงโคบอลต์ 5 % อบผนึกแบบ ก

B 2 ผงทังสเตนคาร์ไบด์ 90 % ผงโคบอลต์ 10 % อบผนึกแบบ ก

B 3 ผงทังสเตนคาร์ไบด์ 85 % ผงโคบอลต์ 15 % อบผนึกแบบ ก

- ชิ้นงานแบบ C

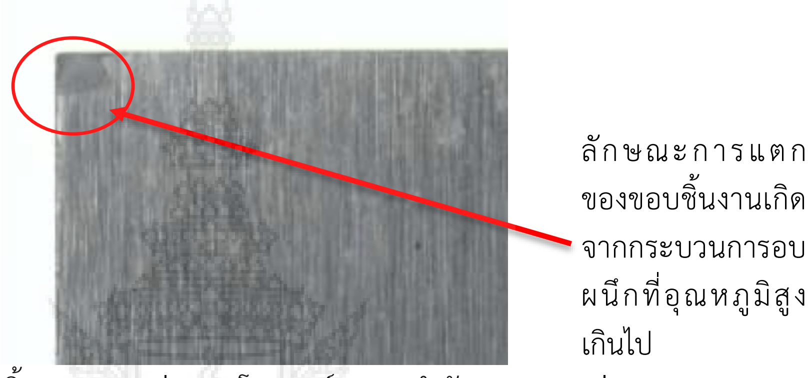
C 1 ผงทังสเตนคาร์ไบด์ 95 % ผงโคบอลต์ 5 % อบผนึกแบบ ก

C 2 ผงทังสเตนคาร์ไบด์ 95 % ผงโคบอลต์ 5 % อบผนึกแบบ ข

C 3 ผงทังสเตนคาร์ไบด์ 95 % ผงโคบอลต์ 5 % อบผนึกแบบ ค

3.6.4.1 การทดสอบรอยแตกร้าว

การทดสอบส่องรอยแตกร้าวด้วยกล้องจุลทรรศน์ เป็นการทดสอบเพื่อที่จะขยายรอยแตกร้าวของผลิตภัณฑ์ซีเมนต์ทังสเตนคาร์ไบด์ให้มีขนาดใหญ่ขึ้นและสามารถมองเห็นชัดขึ้น จากการส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์ รุ่น NIKON MZ 800 กำลังขยาย 20,40 และ 63 เท่า



รูปที่ 3.40 ชิ้นงานแบบแท่ง ผสมโคบอลต์ 5 % (กำลังขยาย 20 เท่า)

รูปที่ 3.41 ชิ้นงานแบบแท่ง ผสมโคบอลต์ 5 % (กำลังขยาย 40 เท่า)

รูปที่ 3.42 ชิ้นงานแบบแท่ง ผสมโคบอลต์ 5 % (กำลังขยาย 63 เท่า)

รูปที่ 3.43 ชิ้นงานแบบแท่ง ผสมโคบอลต์ 10 % (กำลังขยาย 20 เท่า)

ลักษณะของชิ้นงานเกิดจากมีสิ่งปนเปื้อนฝังอยู่ภายในชิ้นงานทำให้พื้นผิวชิ้นงานมีรอยตำหนิและรูพรุนพร้อมกับชิ้นงานมีโครงสร้างไม่สมบูรณ์

รูปที่ 3.44 ชิ้นงานแบบแท่ง ผสมโคบอลต์ 10 % (กำลังขยาย 40 เท่า)

รูปที่ 3.45 ชิ้นงานแบบแท่ง ผสมโคบอลต์ 10 % (กำลังขยาย 63 เท่า)

ลักษณะชิ้นงานเกิดจากมีสิ่งปนเปื้อนฝังอยู่ในเนื้อของชิ้นงานทำให้พื้นผิวผิดปกติและภายในมี deject เกิดขึ้น

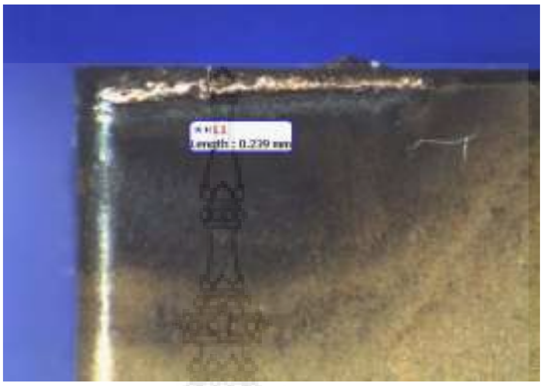
รูปที่ 3.46 ชิ้นงานแบบแท่ง ผสมโคบอลต์ 15 % (กำลังขยาย 20 เท่า)

รูปที่ 3.47 ชิ้นงานแบบแท่ง ผสมโคบอลต์ 15 % (กำลังขยาย 40 เท่า)

รูปที่ 3.48 ชิ้นงานแบบแท่ง ผสมโคบอลต์ 15 % (กำลังขยาย 63 เท่า)

3.6.4.2 การทดสอบการสึกหรอ

การนำข้อมูลเกี่ยวกับภาพถ่ายที่ทำการบันทึกจากงานวิจัยมาวิเคราะห์ในการกำหนดลักษณะการบันทึกภาพที่ชัดเจนและเข้าใจมากที่สุด เพื่อให้เห็นบริเวณคมตัดที่เกิดการสึกหรอ จากงานวิจัย การศึกษาอิทธิพลของสารหล่อเย็นในขบวนการกลึงเหล็กหล่อ FCD 400

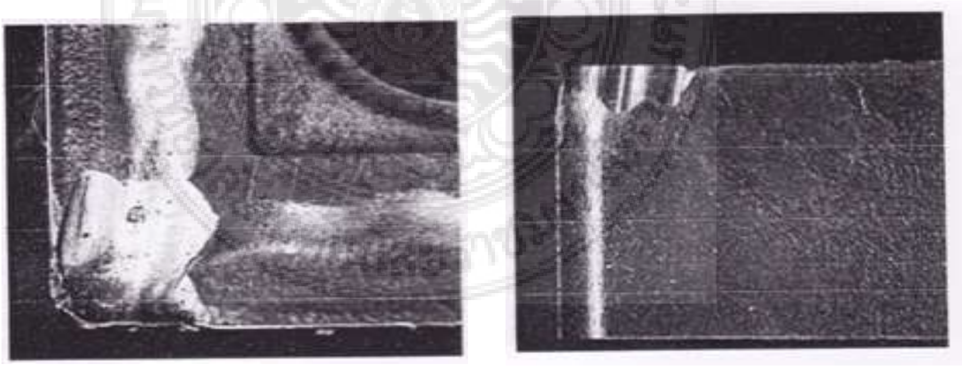


รูปที่ 3.49 แสดงลักษณะการสึกหรอบริเวณด้านข้างคมตัดของแผ่นมีด
จากงานวิจัย การศึกษาอิทธิพลของสารหล่อเย็นในขบวนการกลึงเหล็กหล่อ FCD 400 [19]

จากรูปที่ 3.49 เป็นภาพถ่ายบริเวณมุมคมตัดที่การสึกหรอบริเวณด้านข้างของแผ่นมีดตัดที่ผ่านการทดสอบกลึง ซึ่งภาพที่ออกมามีความคมชัด เป็นการเลือกกำลังขยายของกล้องถ่ายภาพที่เหมาะสม จะเห็นว่ามีการวัดระยะสึกหรอโดยกำหนดตัวแปลการวัดระยะ (L1)

จากงานวิจัย การศึกษากระบวนการผลิตและผลิตแผ่นมีดซีเมนต์ทังสเตนคาร์ไบด์สำหรับงานกลึงปอก

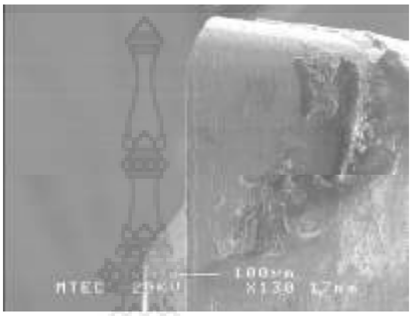
(A) **(B)**



รูปที่ 3.50 ภาพถ่ายลักษณะการสึกหรอของแผ่นมีดตัด จากงานวิจัย การศึกษากระบวนการผลิตและผลิตแผ่นมีดซีเมนต์ทังสเตนคาร์ไบด์สำหรับงานกลึงปอก [21]
(A) ภาพการสึกหรอบริเวณผิวคายเศษ (B) ภาพการสึกหรอบริเวณด้านข้างคมตัด

จากรูปที่ 3.50 เป็นภาพถ่ายบริเวณมุมคมตัดที่การสึกหรอบริเวณด้านข้างและด้านบนของแผ่นมีดตัดที่ผ่านการทดสอบกลึง ภาพที่ออกมานั้นมีความคมชัด เป็นการเลือกกำลังขยายของกล้องถ่ายภาพที่เหมาะสม

จากงานวิจัย อิทธิพลของสภาวะการกลึงเหล็กกล้าสเตนเลส AISI 316 ด้วยใบมีดคาร์ไบด์ ที่มีผลต่อการสึกหรอใบมีดตัดและความขรุขระของพื้นผิว



รูปที่ 3.51 ภาพถ่ายลักษณะการสึกหรอของแผ่นมีดตัด จากงานวิจัย อิทธิพลของสภาวะการกลึงเหล็กกล้าสเตนเลส (AISI 316) ด้วยใบมีดคาร์ไบด์ ที่มีผลต่อการสึกหรอใบมีดตัดและความขรุขระของพื้นผิว [22]

จากรูปที่ 3.51 เป็นภาพถ่ายบริเวณมุมคมตัดที่การสึกหรอของแผ่นมีดตัดที่ผ่านการทดสอบกลึง ภาพที่ออกมานั้นแสดงให้เห็นถึงลักษณะการสึกหรอที่เกิดขึ้นหลังผ่านการทดสอบกลึง

รูปที่ 3.52 แสดงแผ่นมีดตัดที่สึกหรอบริเวณคมตัด [28]

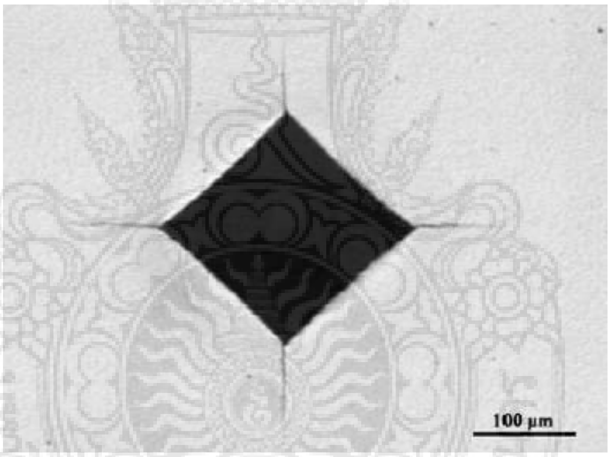
จากรูปที่ 3.52 แสดงแผ่นมีดตัดที่ผ่านการกลึงอย่างหนักเป็นระยะเวลานานจนทำให้แผ่นมีดตัดเกิดการสึกหรอและไม่สามารถใช้งานต่อได้

รูปที่ 3.53 แผ่นมีดตัดที่ผ่านการใช้งานจนสึกหรอ [28]

จากรูปที่ 3.53 แสดงแผ่นมีดซีเมนต์คาร์ไบด์ที่ผ่านการใช้งานแล้ว ซึ่งเกิดการสึกหรอบริเวณคมตัด

3.6.5 การทดสอบความแข็ง

การทดสอบความแข็งและประสิทธิภาพการใช้งาน ทดสอบความแข็งด้วยเครื่อง Hardness Vickers

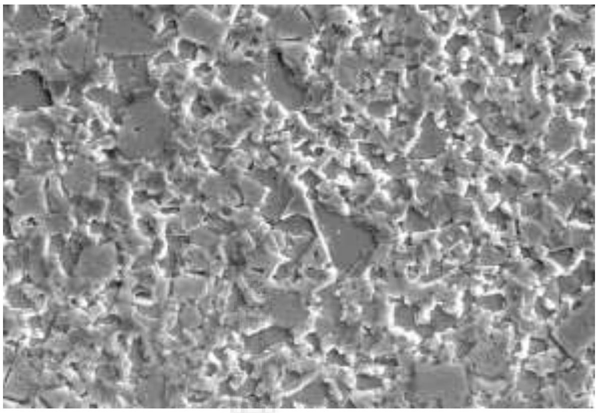


รูปที่ 3.54 รอยกดด้วยหัวเพชรทรงปิรามิด [14]

จากรูปที่ 3.54 การทดสอบความแข็งของแผ่นมีดซีเมนต์ทังสเตนคาร์ไบด์โดยใช้วิธีการทดสอบความแข็งแบบ Hardness Vickers

3.6.6 การทดสอบโครงสร้างเกรน

การตรวจสอบโครงสร้างเกรนของผงทังสเตนคาร์ไบด์ โดยตรวจสอบดูลักษณะการยึดเกาะของเกรนที่เกิดขึ้นในผงโลหะทังสเตนคาร์ไบด์



รูปที่ 3.55 แสดงภาพโครงสร้างเกรนของผงทังสเตนคาร์ไบด์ [5]

จากรูปที่ 3.55 แสดงภาพโครงสร้างเกรนของผงทังสเตนคาร์ไบด์ที่นำไปตรวจสอบ เพื่อดูลักษณะโครงสร้างของวัสดุ ขนาดของเม็ดเกรน ระยะห่าง และการจับกลุ่มเรียงตัวของเม็ดเกรนหลังผ่านการอบผนึก

3.6.7 วิเคราะห์โครงสร้างและสมบัติของโลหะ

การวิเคราะห์ชนิด ปริมาณของธาตุและโครงสร้าง (X-Ray Diffractrometer XRD) ซึ่งจะตรวจธาตุต่างๆที่มีอยู่ในผงโลหะที่จะทำการตรวจสอบ

รูปที่ 3.56 เครื่องวิเคราะห์โครงสร้าง (X-Ray Diffractrometer)

จากรูปที่ 3.56 แสดงการตรวจสอบทังสเตนคาร์ไบด์ที่ผ่านการบด โดยวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุด้วยเครื่อง XRD (X-ray Diffractometer)

การวิเคราะห์การกระจายตัวของผงโลหะ (Particle size) การตรวจสอบการกระจายตัวของผงโลหะทังสเตนคาร์ไบด์โดยใช้เครื่อง Malnern instrument Mastersizer 2000

รูปที่ 3.57 แสดงเครื่องวิเคราะห์การกระจายตัวและขนาดอนุภาค (Particle Size Diffraction)

จากรูปที่ 3.57 แสดงการตรวจสอบผงทังสเตนคาร์ไบด์หลังการบด วิเคราะห์การกระจายตัวและขนาดอนุภาคด้วยเครื่อง (Particle Size Diffraction)

การทดสอบผงทังสเตนคาร์ไบด์หลังการอบแห้ง

รูปที่ 3.58 แสดงเครื่อง SEM (Scanning Electron Microscope)

จากรูปที่ 3.58 แสดงการทดสอบและวิเคราะห์ทังสเตนคาร์ไบด์ที่ผ่านการบดละเอียดด้วยวิธีการ SEM (Scanning Electron Microscope) เพื่อศึกษาอนุภาคของผงทังสเตนคาร์ไบด์

3.7 รวบรวมข้อมูลการทดสอบ

ทำการเก็บบันทึกข้อมูลที่ได้ทำการทดสอบในด้านต่าง ๆ โดยละเอียดและนำข้อมูลที่ได้มาทำการเปรียบเทียบ โดยข้อมูลดังกล่าวจะแสดงในบทที่ 4 ซึ่งมีดังนี้

3.7.1 ผลการวิเคราะห์คุณลักษณะของผงโลหะ

3.7.2 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุ

3.7.3 ผลการวิเคราะห์ขนาดและการกระจายของอนุภาคผงโลหะ

3.7.4 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างเกรน

3.7.5 ผลการทดสอบความแข็ง

3.7.6 ผลการทดสอบรอยแตกร้าว

3.7.7 ผลการทดสอบการสึกหรอ

3.8 วิเคราะห์ผลการทดสอบ

ขนาดและโครงสร้างเกรนต้านทานการสึกหรอของชิ้นงานความแข็งสูงพิเศษ มีขั้นตอนในการวิจัย ดังนี้ เริ่มตั้งแต่การเตรียมผงโลหะ การบด การผสม การอัดขึ้นรูป การอบผนึก การทดสอบความแข็ง การทดสอบรอยแตกร้าว การทดสอบการสึกหรอ โดยต้องการพัฒนาโครงสร้างเกรนที่เหมาะสมจากผงโลหะที่ผลิตใหม่และนำเสนอแนวทางการพัฒนาโลหะทังสเตนคาร์ไบด์ โดยเพิ่มความสามารถในด้านสมบัติทางกลให้เป็นพื้นฐานที่สำคัญต่อการพัฒนาโลหะให้มีคุณภาพเพิ่มขึ้น โดยเฉพาะการพัฒนาโครงสร้างเกรนที่เหมาะสมต่อการต้านทานการสึกหรอของชิ้นงาน

3.9 สรุปผล

การพัฒนาโครงสร้างเกรนของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการอบผนึก โดยใช้วัตถุดิบเป็นผงโลหะรีไซเคิลผลิตเป็นชิ้นงานแบบแท่งและแผ่นมีด ผลการวิจัยโครงสร้างเกรนมีความแข็ง ชิ้นงานสามารถต้านทานการสึกหรอสอดคล้องกับมาตรฐานสากล

บทที่ 4
ผลการวิจัย (Results)

ผลงานวิจัยนี้และพัฒนาโครงสร้างเกรนต้านทานการสึกหรอของชิ้นงานความแข็งสูงพิเศษด้วยกระบวนการอบผนึก ได้ทำการศึกษากระบวนการผลิตโลหะผง การทดสอบ การวิเคราะห์โครงสร้างและสมบัติของโลหะผง ลักษณะต่างๆ ได้แก่ รูปร่าง ขนาด โครงสร้างจุลภาค โครงสร้างเกรน และการตรวจสอบสมบัติของโลหะผง เช่น การวิเคราะห์พื้นผิวและรูปทรงด้วยเทคนิค Scanning Electron Microscopy (SEM) การวิเคราะห์หาขนาดและการกระจายตัวของอนุภาคขนาดนาโนเมตร (Particle size and Distribution) การวิเคราะห์ชนิดและปริมาณของสารประกอบ (XRD) ที่สามารถกำหนดระดับคุณภาพของผงโลหะทังสเตนคาร์ไบด์ที่เหมาะสม เพื่อนำไปใช้งานด้านการผลิตชิ้นงานโลหะความแข็งสูง ผลจากการดำเนินงานวิจัยคือ ชิ้นงานมาตรฐานความแข็งสูง (Hard Metals) ทังสเตนคาร์ไบด์ ผลิตจากผงทังสเตนคาร์ไบด์ (WC) เป็นชิ้นงาน (Solid part) ความหนาแน่นไม่ต่ำกว่า 15 g/cm^3 มีความต้านทานต่อการสึกหรอสูง

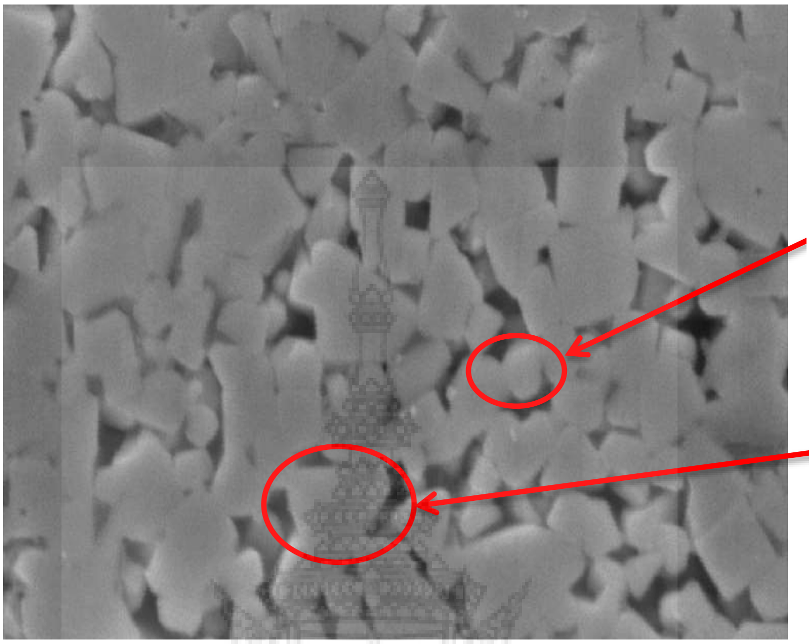
เตรียมผงโลหะ คัดขนาดผงโลหะทังสเตนคาร์ไบด์ด้วยตะแกรง ทำความสะอาดและนำผงโลหะมาบด โดยใช้เทคนิคการบดแบบ Ball Milling ลูกบดสารละลายเอทานอลและผงบดบรรจุในหม้อบด ปรับค่าความเร็วรอบและตั้งเวลาในการบด

หลังจากการบดผงโลหะให้มีขนาดและการกระจายน้อยลง แล้วทำการผสมกับโลหะประสานโคบอลต์ (Co) การทดลองศึกษาความสามารถในด้านความแข็งและความต้านทานการสึกหรอของแผ่นมีดที่มีส่วนผสมโคบอลต์ต่างกันและอุณหภูมิในการอบผนึกต่างกัน

ขั้นตอนการอบผนึก เป็นการควบคุมอุณหภูมิในการอบโดยใช้เตาอบสุญญากาศ ควบคุมอุณหภูมิการอบทุกขั้นตอนในระบบอัตโนมัติ อุณหภูมิที่ใช้เป็น 1400 และ 1430 °C คงอุณหภูมิไว้ 60 นาที และ 120 นาที ที่อุณหภูมิสูงสุด

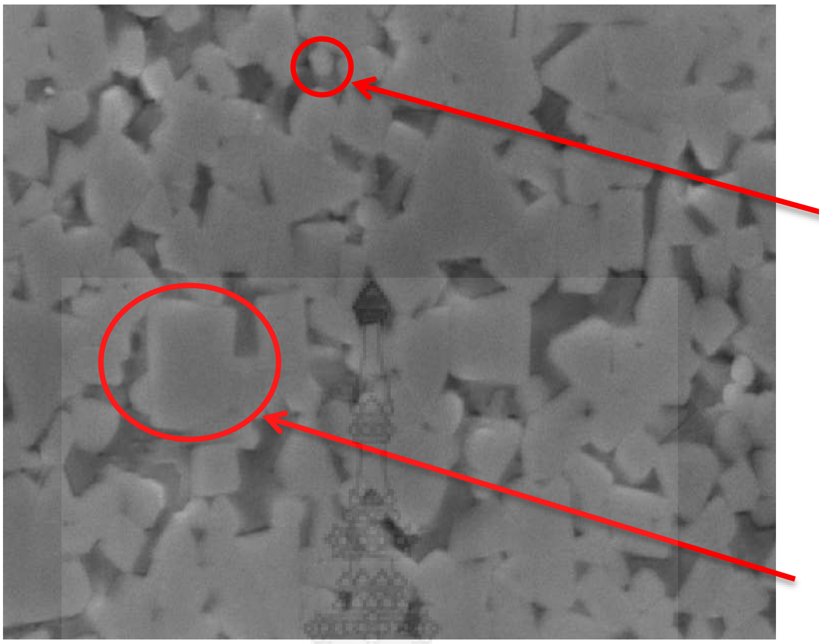
การวิเคราะห์โครงสร้างและคุณสมบัติของโลหะผง เช่น การวิเคราะห์ชนิด ปริมาณของธาตุและโครงสร้าง (X-Ray Diffractrometer XRD) การวิเคราะห์การกระจายตัวของผงโลหะ (Particle size Diffractrometer) การทดสอบและวิเคราะห์ด้วยวิธีการ SEM (Scanning Electron Microscope) ได้ผลออกมาตามข้อมูลดังต่อไปนี้

4.1 ผลการวิเคราะห์คุณลักษณะของผงโลหะ



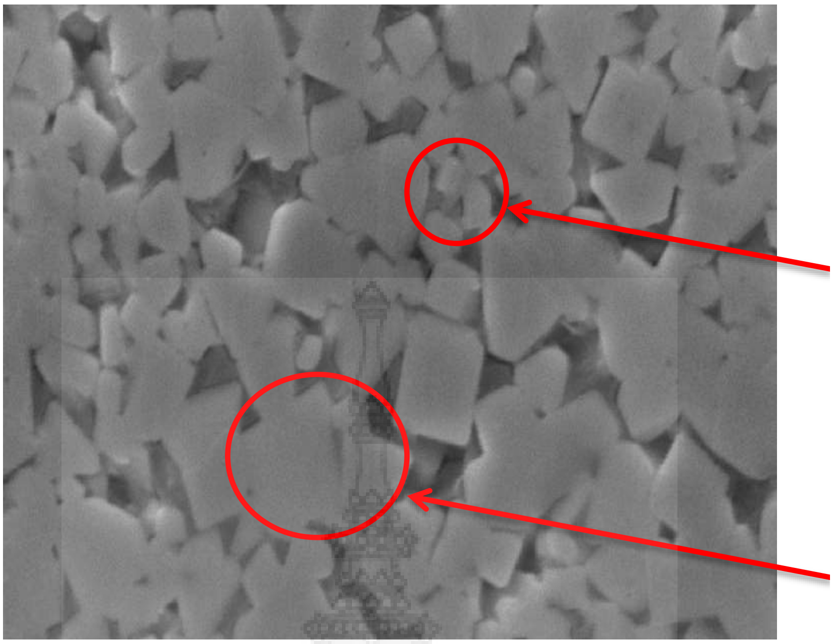
รูปที่ 4.1 แสดงการตรวจสอบอนุภาคผงทังสเตนคาร์ไบด์ 95 % ผงโคบอลต์ 5 %

จากรูปที่ 4.1 เป็นผลการตรวจสอบโครงสร้างอนุภาคด้วยวิธีการ SEM (Scanning Electron Microscope) ของผงทังสเตนคาร์ไบด์ 95 % ผงโคบอลต์ 5 % ที่กำลังขยาย 10,000 เท่า ผลการทำ SEM พบว่า ผงทังสเตนคาร์ไบด์มีขนาดเล็กที่สุด 3 µm ผงที่มีขนาดใหญ่ประมาณ 10 µm ซึ่งมีรูปร่างไม่เท่ากัน ผงโลหะส่วนใหญ่จะมีขนาดเล็กรูปทรงกลมเป็นลักษณะผงที่สามารถนำไปผลิตเป็นชิ้นงาน (Cemented Carbide) ได้ ตรงตามลักษณะผงที่มีการใช้งานในอุตสาหกรรม อย่างไรก็ตาม ผงโลหะขนาดใหญ่เป็นสิ่งที่ควรทำการศึกษาคุณลักษณะต่างๆ เพิ่มขึ้น เพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาต่อไป ตัวอย่างเช่น รูปทรง ส่วนประกอบ เป็นต้น



รูปที่ 4.2 แสดงการตรวจสอบอนุภาคผงทังสเตนคาร์ไบด์ 90 % ผงโคบอลต์ 10 %

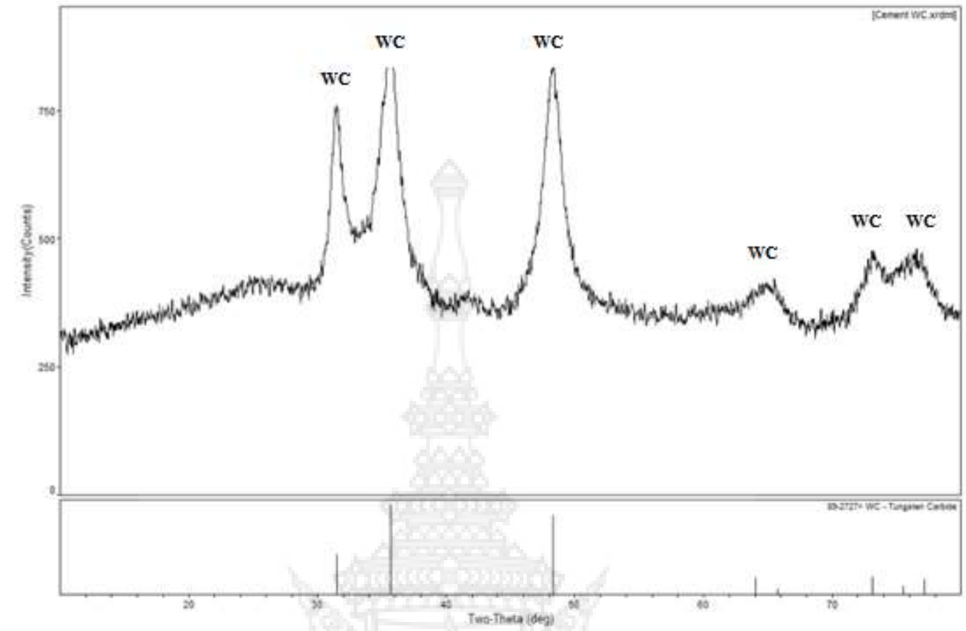
จากรูปที่ 4.2 เป็นผลการตรวจสอบโครงสร้างอนุภาคด้วยวิธีการ SEM (Scanning Electron Microscope) ของผงทังสเตนคาร์ไบด์ 90 % ผงโคบอลต์ 10 % ที่กำลังขยาย 10,000 เท่า ผลการทำ SEM พบว่า ผงทังสเตนคาร์ไบด์มีขนาดเล็กที่สุด 1 µm ผงที่มีขนาดใหญ่ประมาณ 10 µm ซึ่งมีรูปร่างไม่เท่ากัน ผงโลหะส่วนใหญ่จะมีขนาดเล็กรูปทรงกลมเป็นลักษณะผงที่สามารถนำไปผลิตเป็นชิ้นงาน (Cemented Carbide) ได้ ตรงตามลักษณะผงที่มีการใช้งานในอุตสาหกรรม อย่างไรก็ตาม ผงโลหะขนาดใหญ่เป็นสิ่งที่ควรทำการศึกษาคุณลักษณะต่างๆ เพิ่มขึ้น เพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาต่อไป ตัวอย่างเช่น รูปทรง ส่วนประกอบ เป็นต้น



รูปที่ 4.3 แสดงการตรวจสอบอนุภาคผงทังสเตนคาร์ไบด์ 85 % ผงโคบอลต์ 15 %

จากรูปที่ 4.3 เป็นผลการตรวจสอบโครงสร้างอนุภาคด้วยวิธีการ SEM (Scanning Electron Microscope) ของผงทังสเตนคาร์ไบด์ 85 % ผงโคบอลต์ 15 % ที่กำลังขยาย 10,000 เท่า ผลการทำ SEM พบว่า ผงทังสเตนคาร์ไบด์มีขนาดเล็กที่สุด 3 μm ผงที่มีขนาดใหญ่ประมาณ 10 μm ซึ่งมีรูปร่างไม่เท่ากัน ผงโลหะส่วนใหญ่จะมีขนาดเล็กรูปทรงกลมเป็นลักษณะผงที่สามารถนำไปผลิตเป็นชิ้นงาน (Cemented Carbide) ได้ ตรงตามลักษณะผงที่มีการใช้งานในอุตสาหกรรม อย่างไรก็ตาม ผงโลหะขนาดใหญ่เป็นสิ่งที่ควรทำการศึกษาคุณลักษณะต่างๆ เพิ่มขึ้น เพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาต่อไป ตัวอย่างเช่น รูปทรง ส่วนประกอบ เป็นต้น

4.2 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุ

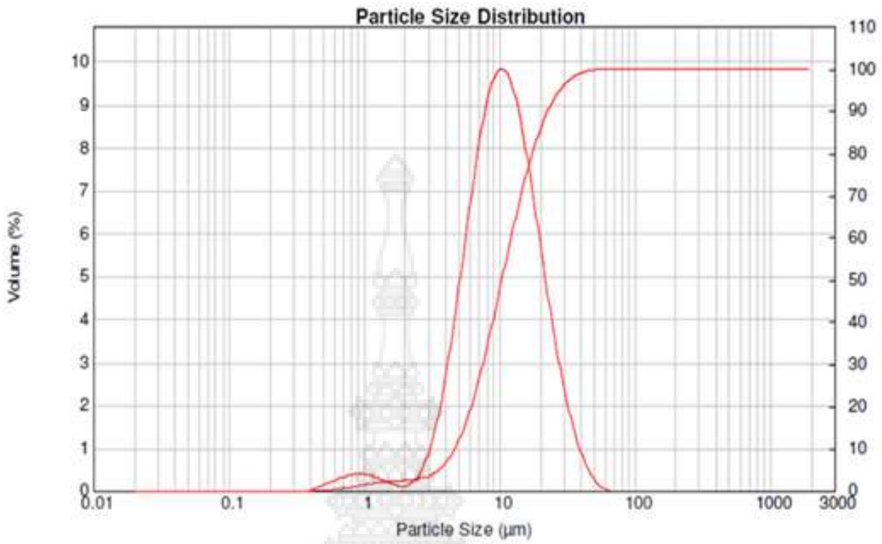


รูปที่ 4.4 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุผงทังสเตนคาร์ไบด์หลังการบดละเอียด

จากรูปที่ 4.4 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุด้วยวิธี X – Ray diffraction (XRD) พบว่า ผงโลหะเป็นทังสเตนคาร์ไบด์ โดยพิจารณาจากการวิเคราะห์ Two-Theta (deg) ที่องศาอิสระ 32, 35, 48, 64, 66, 73, 75 และ 77 องศา ระยะกราฟที่ปรากฏ สอดคล้องกับมาตรฐานของโลหะทังสเตนคาร์ไบด์

ดังนั้น ผลการวิเคราะห์โลหะด้วยวิธี XRD ทำให้ได้ผลที่เชื่อถือได้ ว่าโลหะที่ผ่านการผลิตโดยวิธีการรีไซเคิล การบดด้วยวิธี Ball Milling การล้างด้วยน้ำกลั่นและเอทานอล สามารถผลิตผงโลหะทังสเตนคาร์ไบด์ได้ ดังผลการวิเคราะห์ตามรูปที่ 4.4

4.3 ผลการวิเคราะห์ขนาดและการกระจายของอนุภาคผงโลหะ (Particle Size Distribution)



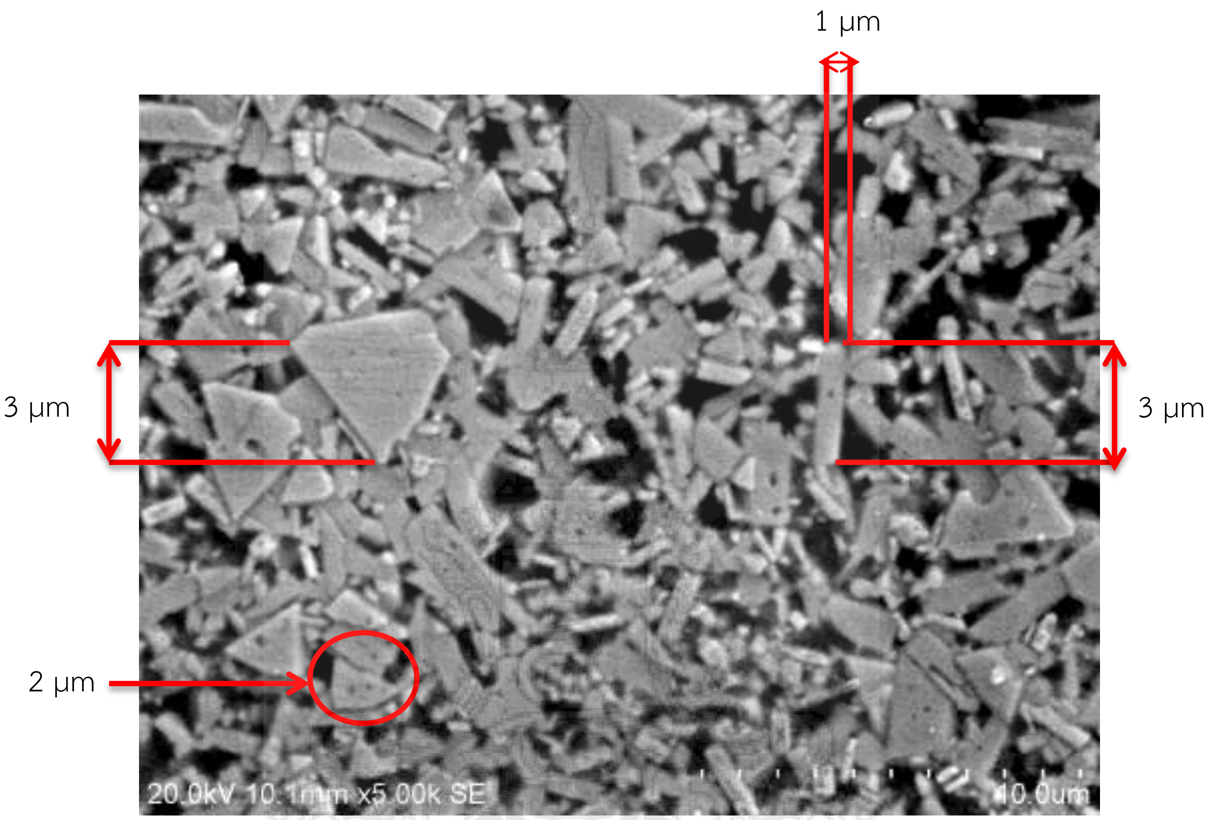
รูปที่ 4.5 กราฟแสดงขนาดอนุภาคผงทังสเตนคาร์ไบด์หลังการบดด้วยวิธี Ball Milling

จากรูปที่ 4.5 แสดงผลการวิเคราะห์ขนาดและการกระจายของอนุภาคผงทังสเตนคาร์ไบด์ที่ผ่านการบดให้ละเอียดด้วยวิธี Ball Milling พบว่าขนาดผงโลหะมีขนาดเล็กลงโดยมีขนาดอยู่ระหว่าง 0.30 – 60 µm โดยมีผงโลหะที่มีขนาดระหว่าง 0.30 – 2.00 µm เป็นกลุ่มผงโลหะอีกกลุ่มหนึ่งที่กระจายออกมา มีการแบ่งแยกอย่างชัดเจน

ลักษณะการกระจายของผงโลหะทังสเตนคาร์ไบด์ เป็นแบบโค้งปกติ ในช่วง 0.30 – 2.00 µm เป็นกลุ่มผงโลหะขนาดเล็ก ช่วงที่มีขนาดระหว่าง 2.00 – 60.00 µm กระจายแบบโค้งปกติและจำนวนผงโลหะมากกว่า 50 % มีขนาดในช่วง 300 – 10,000 nm ดังรูปที่ 4.5

4.4 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างเกรน

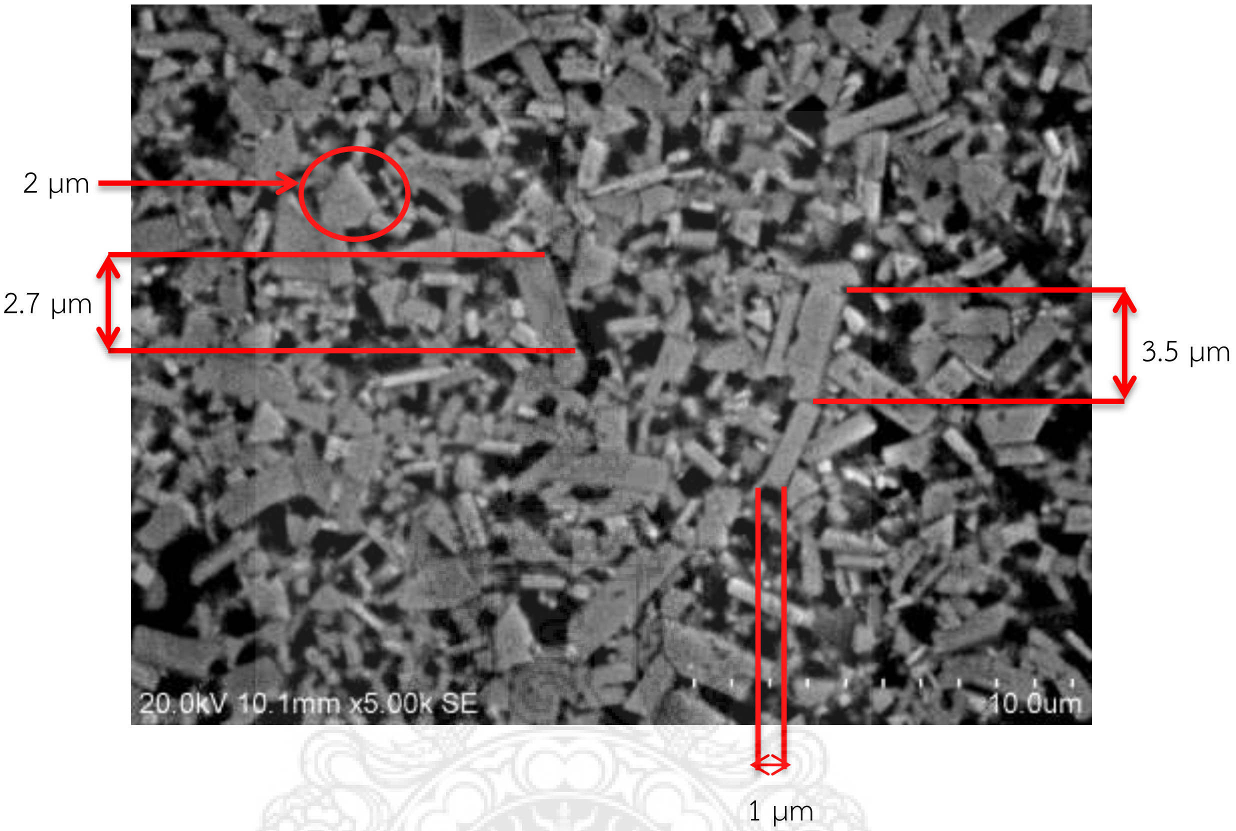
4.4.1 ชิ้นงาน A1 ขนาด 7.48 x 13.50 x 44.55 มม. / WC 95 % Co 5 % / อบผนึกแบบ ก (1,430 °c 1 ชม.)



รูปที่ 4.6 โครงสร้างเกรนชิ้นงาน A1 WC 95 % Co 5 % อบผนึกแบบ ก (1,430 °c 1 ชม.)

จากรูปที่ 4.6 แสดงโครงสร้างเกรนชิ้นงาน A1 ส่วนผสมทังสเตนคาร์ไบด์ 95 % โคบอลต์ 5 % อบผนึกแบบ ก ที่อุณหภูมิ 1,430 °c เป็นเวลา 1 ชม. รูปร่างเกรนเป็นรูปทรงหลายเหลี่ยม มีขนาดไม่เท่ากัน อยู่ระหว่าง 2.00 – 3.00 µm ส่วนใหญ่มีรูปร่างเป็นแท่งยาวประมาณ 60 – 70 % มีการกระจายตัวค่อนข้างมาก

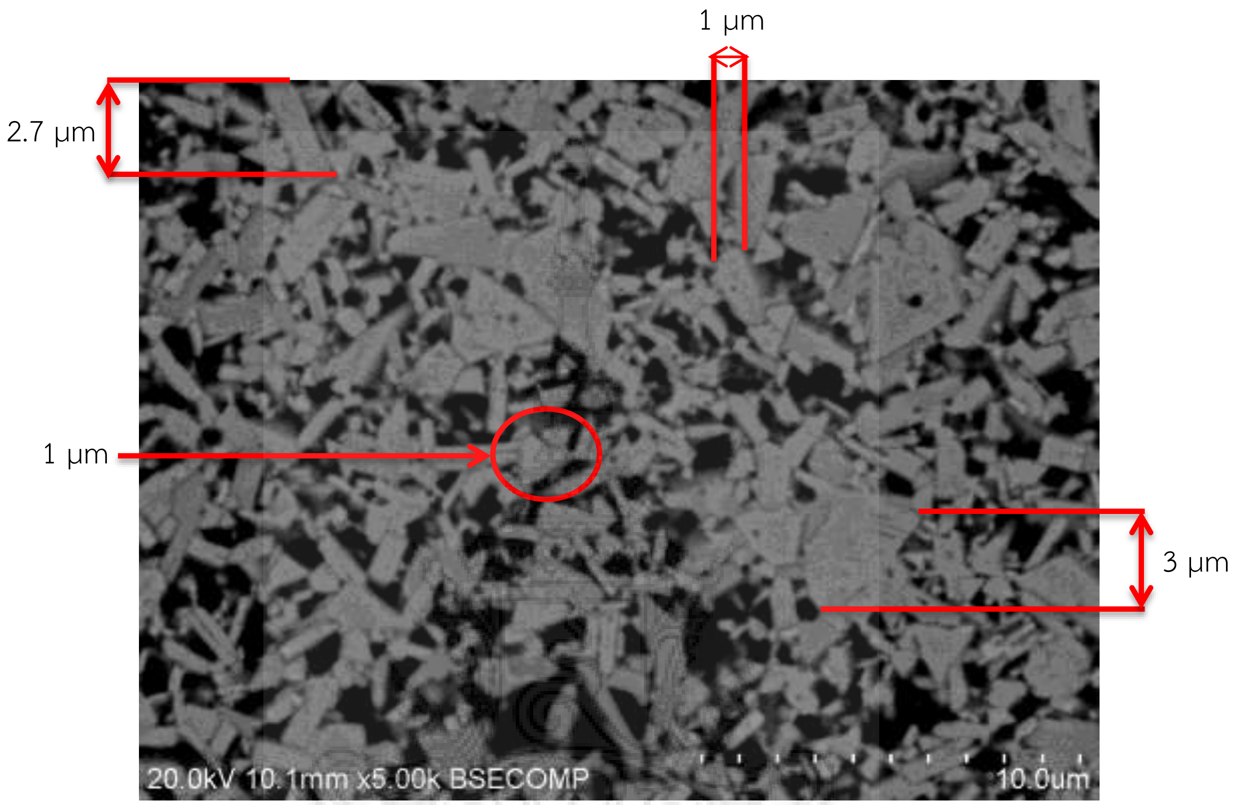
4.4.2 ชิ้นงาน A2 ขนาด 7.48 x 13.50 x 44.55 มม. / WC 90 % Co 10 % / อบผนึกแบบ ก (1,430 °c 1 ชม.)



รูปที่ 4.7 โครงสร้างเกรนชิ้นงาน A2 WC 90 % Co 10 % อบผนึกแบบ ก (1,430 °c 1 ชม.)

จากรูปที่ 4.7 แสดงโครงสร้างเกรนชิ้นงาน A2 ส่วนผสมทังสเตนคาร์ไบด์ 90 % โคบอลต์ 10 % อบผนึกแบบ ก ที่อุณหภูมิ 1,430 °c เป็นเวลา 1 ชม. รูปร่างเกรนเป็นรูปทรงหลายเหลี่ยม มีขนาดใกล้เคียงกันประมาณ 2 µm รูปร่างเกรนเป็นแบบขนาดเล็กและมีความยาวประมาณ 60 – 75 % กระจายตัวมาก

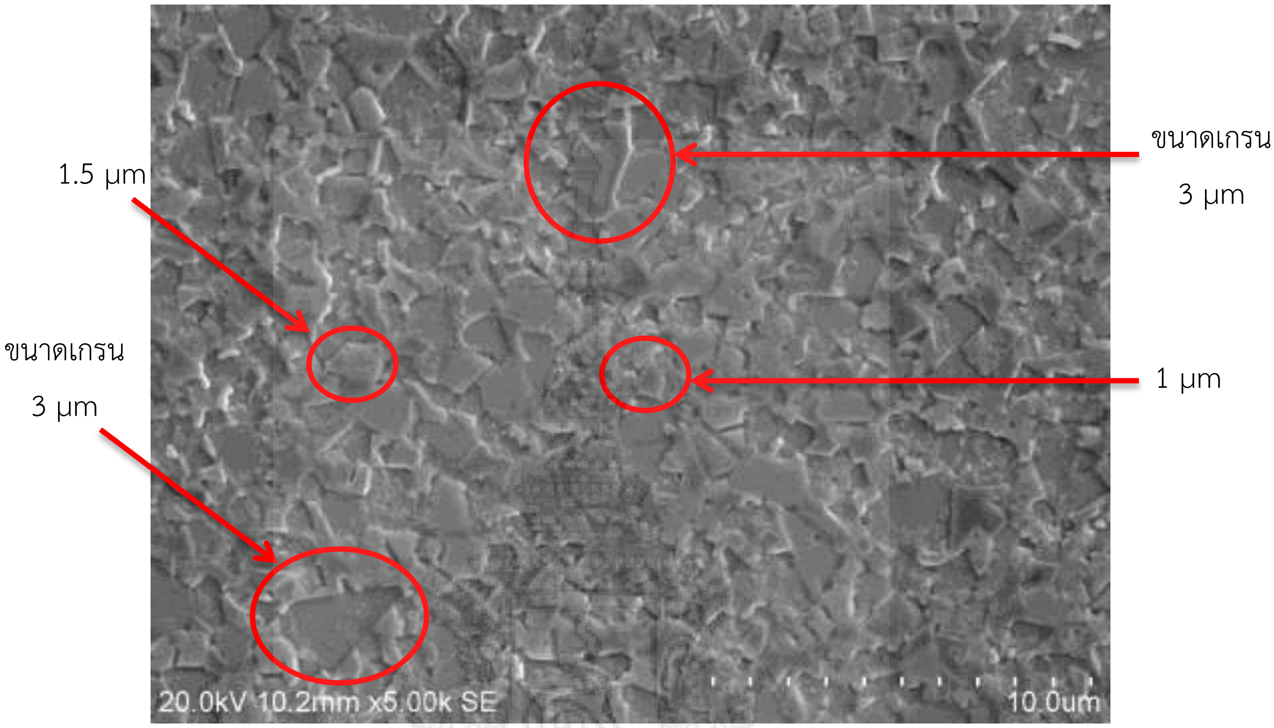
4.4.3 ชิ้นงาน A3 ขนาด 7.48 x 13.50 x 44.55 มม. / WC 85 % Co 15 % / อบผนึกแบบ ก (1,430 °c 1 ชม.)



รูปที่ 4.8 โครงสร้างเกรนชิ้นงาน A3 WC 85 % Co 15 % อบผนึกแบบ ก (1,430 °c 1 ชม.)

จากรูปที่ 4.8 แสดงโครงสร้างเกรนชิ้นงาน A2 ส่วนผสมทังสเตนคาร์ไบด์ 85 % โคบอลต์ 15 % อบผนึกแบบ ก ที่อุณหภูมิ 1,430 °c เป็นเวลา 1 ชม. รูปร่างเกรนเป็นหลายเหลี่ยม มีขนาดของเกรนระหว่าง 1.00 – 3.00 μm เป็นแบบแท่ง กระจายตัวน้อยลง เมื่อเทียบกันรูปที่ 4.7

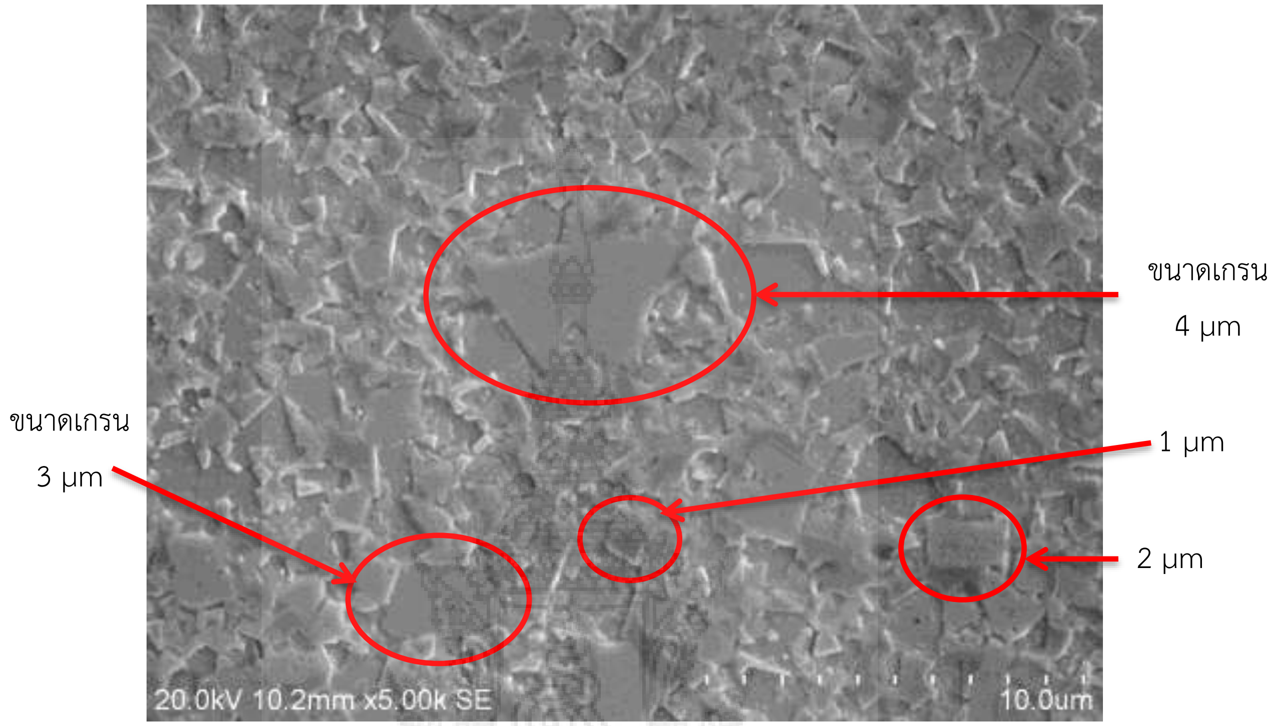
4.4.4 ชิ้นงาน B1 ขนาด 12.7 x 12.7 x 4.76 มม. / WC 95 % Co 5 % / อบผนึกแบบ ก (1,430 °c 1 ชม.)



รูปที่ 4.9 โครงสร้างเกรนชิ้นงาน B1 WC 95 % Co 5 % อบผนึกแบบ ก (1,430 °c 1 ชม.)

จากรูปที่ 4.9 แสดงโครงสร้างเกรนชิ้นงาน B1 ส่วนผสมทังสเตนคาร์ไบด์ 95 % โคบอลต์ 5 % อบผนึกแบบ ก ที่อุณหภูมิ 1,430 °c เป็นเวลา 1 ชม. เป็นโครงสร้างเกรนที่ใกล้เคียงกับโครงสร้างมาตรฐาน ขนาดเกรนระหว่าง 1.00 – 3.00 µm เฉลี่ยประมาณ 1.5 µm มีความกลมมากขึ้น ขนาดและการกระจายตัวน้อย เมื่อเทียบกับรูปที่ 4.8

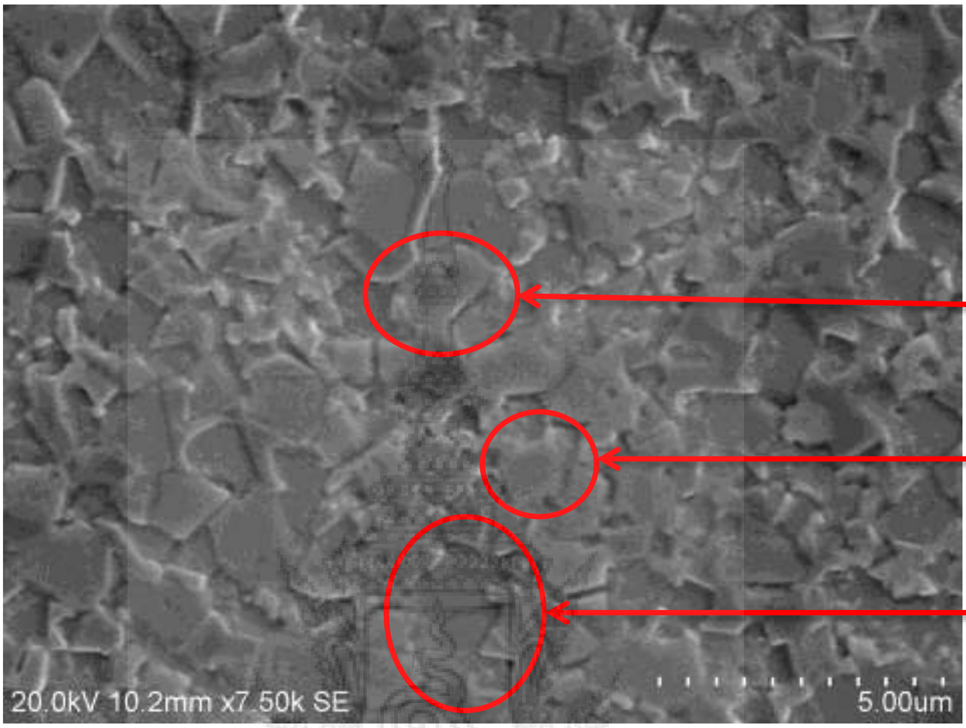
4.4.5 ชิ้นงาน B2 ขนาด 12.7 x 12.7 x 4.76 มม. / WC 90 % Co 10 % / อบผนึกแบบ ก (1,430 °c 1 ชม.



รูปที่ 4.10 โครงสร้างเกรนชิ้นงาน B2 WC 90 % Co 10 % อบผนึกแบบ ก (1,430 °c 1 ชม.)

จากรูปที่ 4.10 แสดงโครงสร้างเกรนชิ้นงาน B2 ส่วนผสมทังสเตนคาร์ไบด์ 90 % โคบอลต์ 10 % อบผนึกแบบ ก ที่อุณหภูมิ 1,430 °c เป็นเวลา 1 ชม. เป็นโครงสร้างเกรนเทียบเท่ามาตรฐานสากล ขนาดเกรนระหว่าง 1.00 – 4.00 μm เฉลี่ยประมาณ 2.00 μm การกระจายตัวน้อยมีความกลมมากขึ้น เป็นโครงสร้างเกรนที่มีความแข็งตามมาตรฐาน

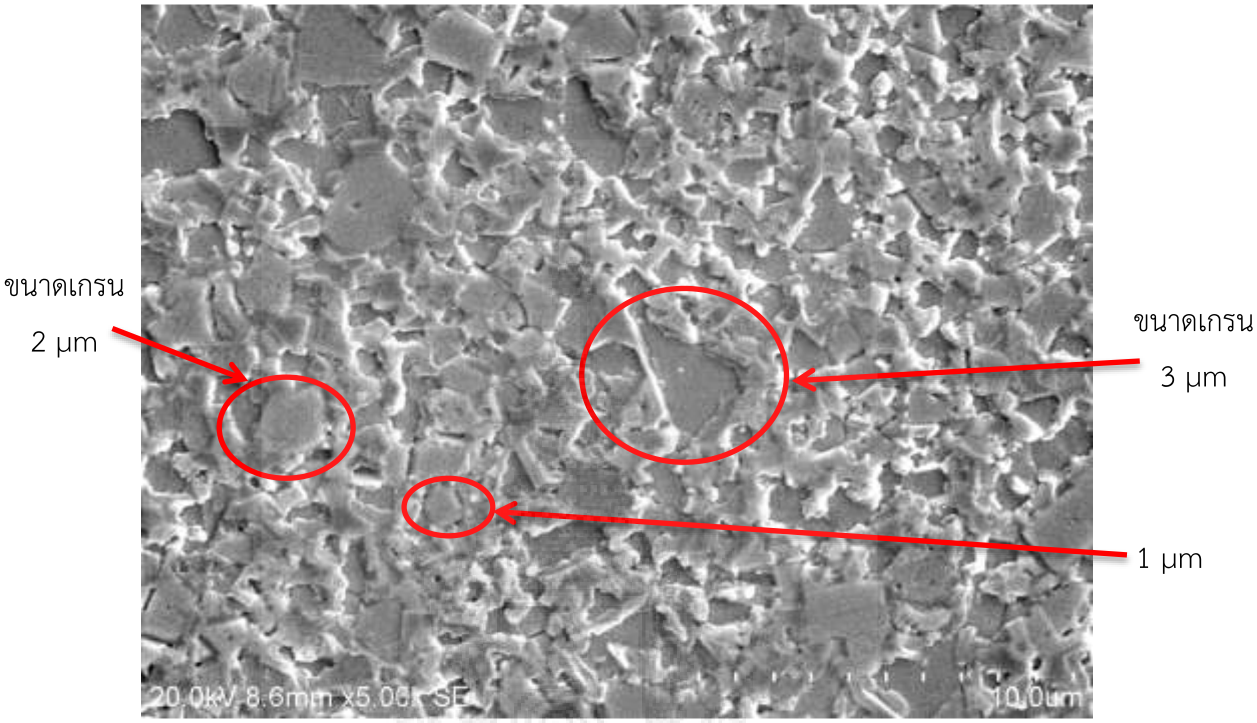
4.4.6 ชิ้นงาน B3 ขนาด 12.7 x 12.7 x 4.76 มม. / WC 85 % Co 15 % / อบผนึกแบบ ก (1,430 °c 1 ชม.)



รูปที่ 4.11 โครงสร้างเกรนชิ้นงาน B3 WC 85 % Co 15 % อบผนึกแบบ ก (1,430 °c 1 ชม.)

จากรูปที่ 4.11 แสดงโครงสร้างเกรนชิ้นงาน B3 ส่วนผสมทังสเตนคาร์ไบด์ 85 % โคบอลต์ 15 % อบผนึกแบบ ก ที่อุณหภูมิ 1,430 °c เป็นเวลา 1 ชม. ขนาดเกรนสม่ำเสมอ การกระจายตัวด้านขนาดเกรนมีน้อยเทียบเท่าขนาดเกรนที่เป็นมาตรฐาน ส่วนใหญ่ประมาณ 1 µm การผลิตซีเมนต์คาร์ไบด์ในเชิงพาณิชย์เป็นลักษณะโครงสร้างที่มีความแข็งสูงซึ่งเป็นโครงสร้างที่มีการต้านทานการสึกหรอได้ดี

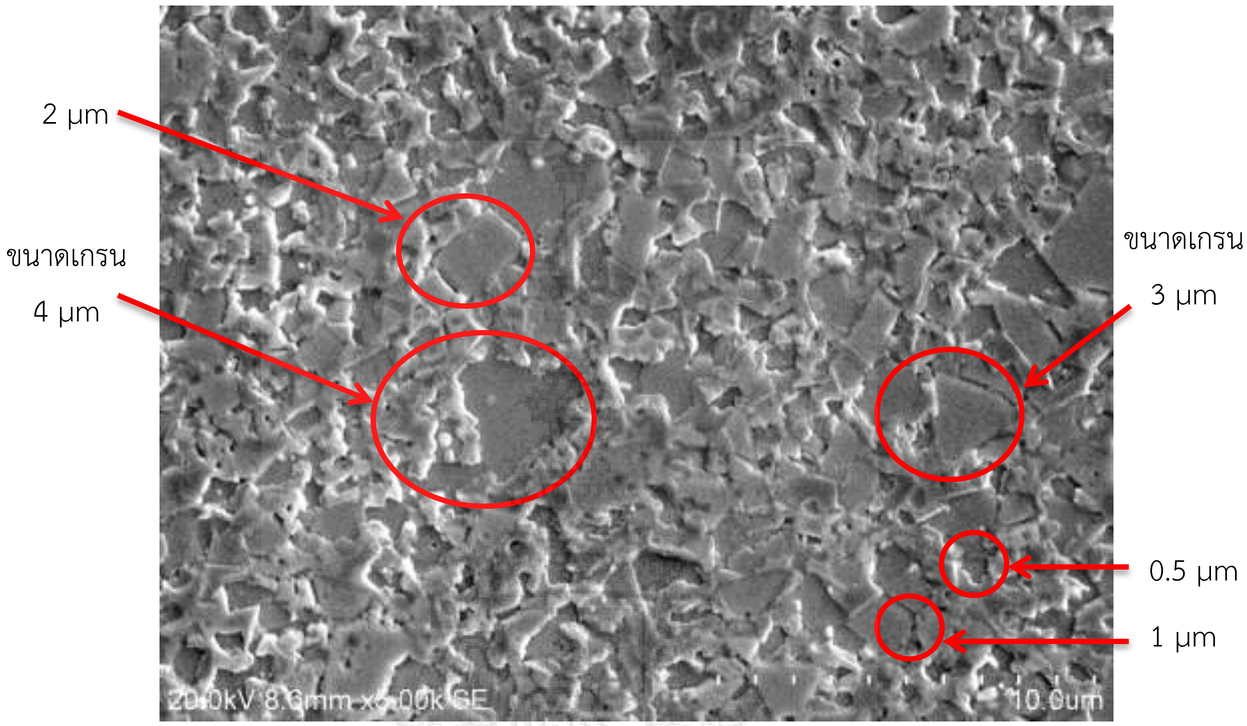
4.4.7 ชิ้นงาน C1 ขนาด 12.7 x 12.7 x 4.76 มม. / WC 95 % Co 5 % / อบผนึกแบบ ก (1,430 °c 1 ชม.)



รูปที่ 4.12 โครงสร้างเกรนชิ้นงาน C1 WC 95 % Co 5 % อบผนึกแบบ ก (1,430 °c 1 ชม.)

จากรูปที่ 4.12 แสดงโครงสร้างเกรนชิ้นงาน C1 ส่วนผสมทังสเตนคาร์ไบด์ 95 % โคบอลต์ 5 % อบผนึกแบบ ก ที่อุณหภูมิ 1,430 °c เป็นเวลา 1 ชม. เป็นโครงสร้างเกรนที่มีขนาดเกรนใกล้เคียงกันระหว่าง 1.00 – 3.00 µm ประมาณ 60 -70 % และมีเกรนขนาดประมาณ 10 µm เทียบเท่าโครงสร้างเกรนของชิ้นงานที่ใช้ในอุตสาหกรรม

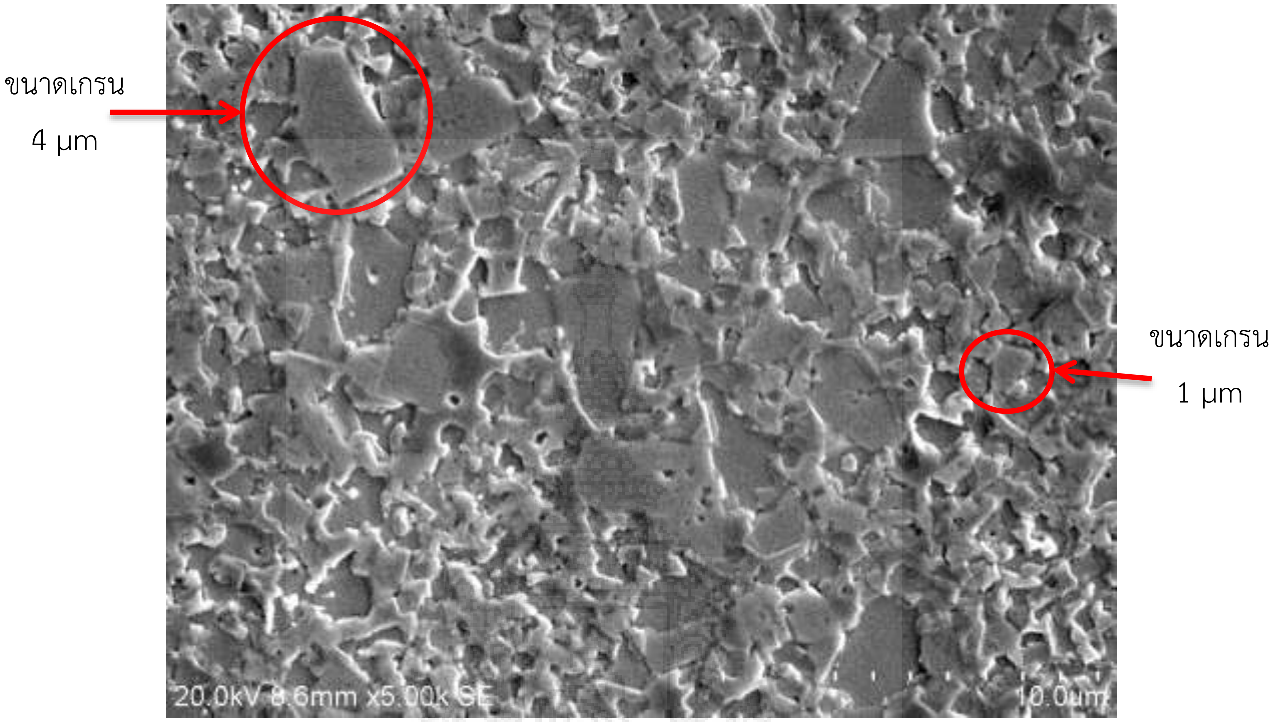
4.4.8 ชิ้นงาน C2 ขนาด 12.7 x 12.7 x 4.76 มม. / WC 95 % Co 5 % / อบผนึกแบบ ข (1,400 °c 1 ชม.)



รูปที่ 4.13 โครงสร้างเกรนชิ้นงาน C2 WC 95 % Co 5 % อบผนึกแบบ ข (1,400 °c 1 ชม.)

จากรูปที่ 4.13 แสดงโครงสร้างเกรนชิ้นงาน C2 ส่วนผสมทังสเตนคาร์ไบด์ 95 % โคบอลต์ 5 % อบผนึกแบบ ข ที่อุณหภูมิ 1,400 °c เป็นเวลา 1 ชม. เป็นโครงสร้างเกรนที่มีการกระจายตัวน้อยกว่ารูปที่ 4.6 – 4.7 ขนาดเล็กประมาณ 0.5 µm และขนาดใหญ่ประมาณ 4 µm

4.4.9 ชิ้นงาน C3 ขนาด 12.7 x 12.7 x 4.76 มม. / WC 95 % Co 5 % / อบผนึกแบบ ค (1,400 °c 2 ชม.)



รูปที่ 4.14 โครงสร้างเกรนชิ้นงาน C3 WC 95 % Co 5 % อบผนึกแบบ ค (1,400 °c 2 ชม.)

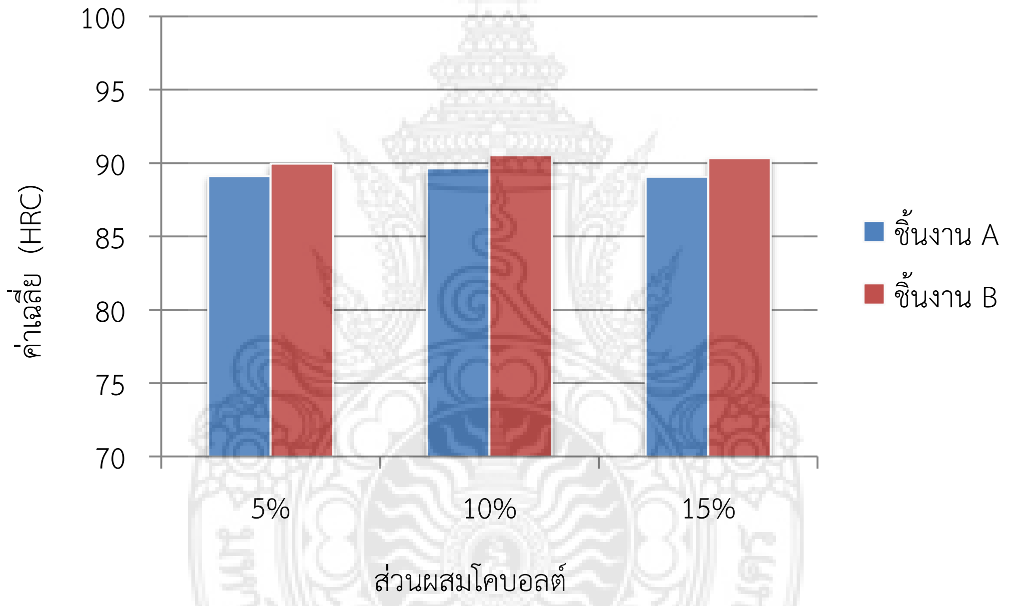
จากรูปที่ 4.14 แสดงโครงสร้างเกรนชิ้นงาน C3 ส่วนผสมทังสเตนคาร์ไบด์ 95 % โคบอลต์ 5 % อบผนึกแบบ ค ที่อุณหภูมิ 1,400 °c เป็นเวลา 2 ชม. การยึดติดระหว่างเกรนใกล้เคียงกับมาตรฐาน การกระจายตัวค่อนข้างมาก มีเกรนขนาดเล็กประมาณ 1 μm และขนาดใหญ่ประมาณ 4 μm

4.5 ผลการทดสอบความแข็ง

ผลการตรวจสอบลักษณะรอยกดในการทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์และรอย Clack ตามมุมของรอยกดของชิ้นงานแบบแท่งและแผ่นมีดที่ส่วนผสม อุณหภูมิที่ต่างกัน

ตารางที่ 4.1 ความแข็งของชิ้นงานที่ส่วนผสมต่างกัน

ค่าเฉลี่ย (HRC)			
โคบอลต์ (Co)	**5%**	**10%**	**15%**
ชิ้นงาน A	89.12	89.64	89.08
ชิ้นงาน B	89.98	90.54	90.34

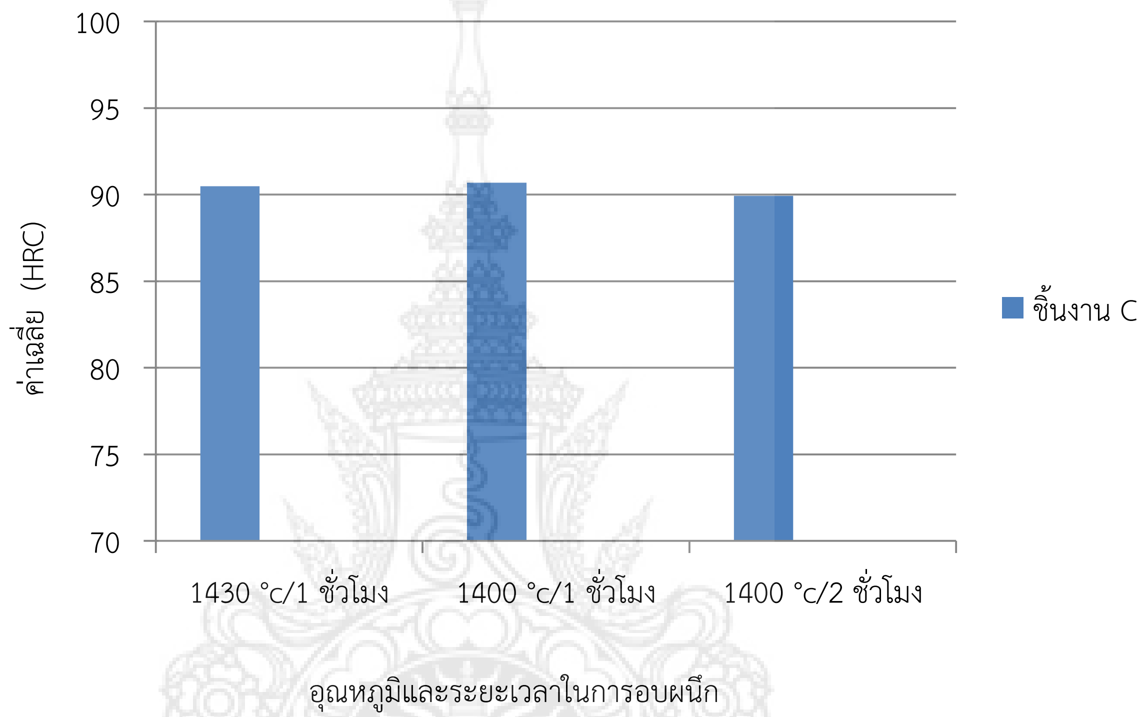


รูปที่ 4.15 กราฟเปรียบเทียบความแข็งของชิ้นงาน A และ B

จากรูปที่ 4.15 แสดงผลการทดสอบความแข็งของชิ้นงาน A และ B ประกอบด้วย 5 %,10 % และ 15 % พบว่าที่ 5 % ชิ้นงาน B มีความแข็งมากกว่าชิ้นงาน A ซึ่งมีค่าความแข็งอยู่ที่ 89.98 HRC เมื่อส่วนผสมโคบอลต์เพิ่มขึ้นเป็น 10 % และ 15 % ความแข็งเพิ่มขึ้นเป็น 90.54 HRC และ 90.34 HRC สำหรับชิ้นงาน B

ตารางที่ 4.2 ความแข็งของชิ้นงาน C ที่อุณหภูมิในการอบผนึกต่างกัน

ค่าเฉลี่ย (HRC)			
อุณหภูมิในการอบผนึก	**1430 °c/1 ชั่วโมง**	**1400 °c/1 ชั่วโมง**	**1400 °c/2 ชั่วโมง**
ชิ้นงาน C	90.48	90.68	89.92

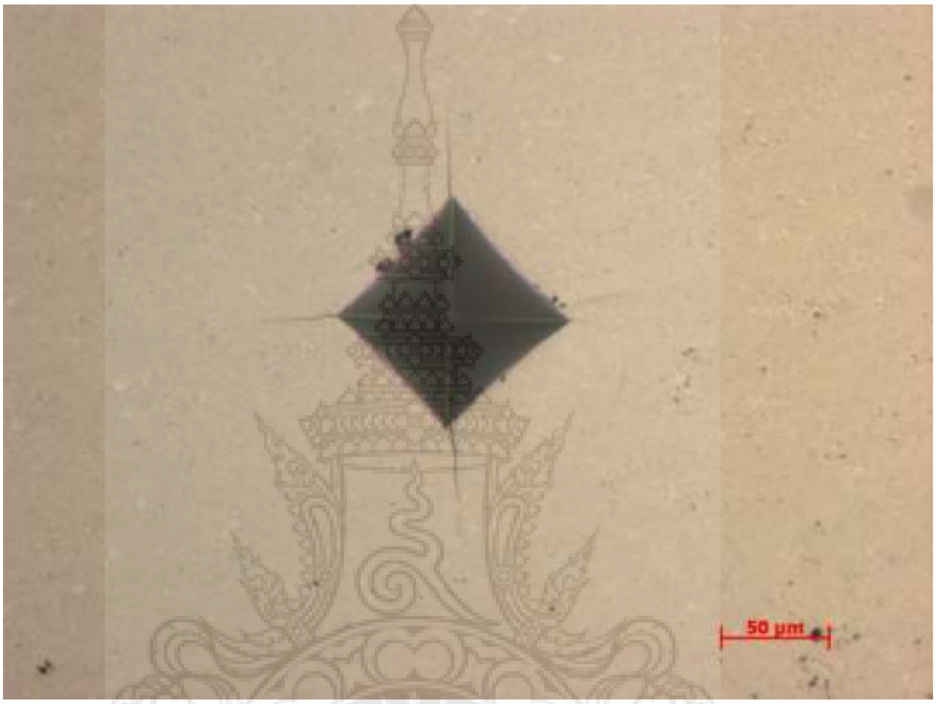


รูปที่ 4.16 กราฟเปรียบเทียบความแข็งของชิ้นงาน C

จากรูปที่ 4.16 แสดงผลการทดสอบความแข็งของชิ้นงาน c ประกอบด้วย 1430 °c และ 1400 °c เป็นระยะเวลา 1 ชั่วโมงและ 2 ชั่วโมง พบว่าที่อุณหภูมิ 1430 °c ระยะเวลา 1 ชั่วโมง ค่าความแข็งอยู่ที่ 90.48 HRC ที่อุณหภูมิ 1400 °c ระยะเวลา 1 ชั่วโมง มีค่าความแข็งอยู่ที่ 90.68 HRC และที่อุณหภูมิ 1400 °c ระยะเวลา 2 ชั่วโมง ค่าความแข็งอยู่ที่ 89.92 HRC ตามลำดับ

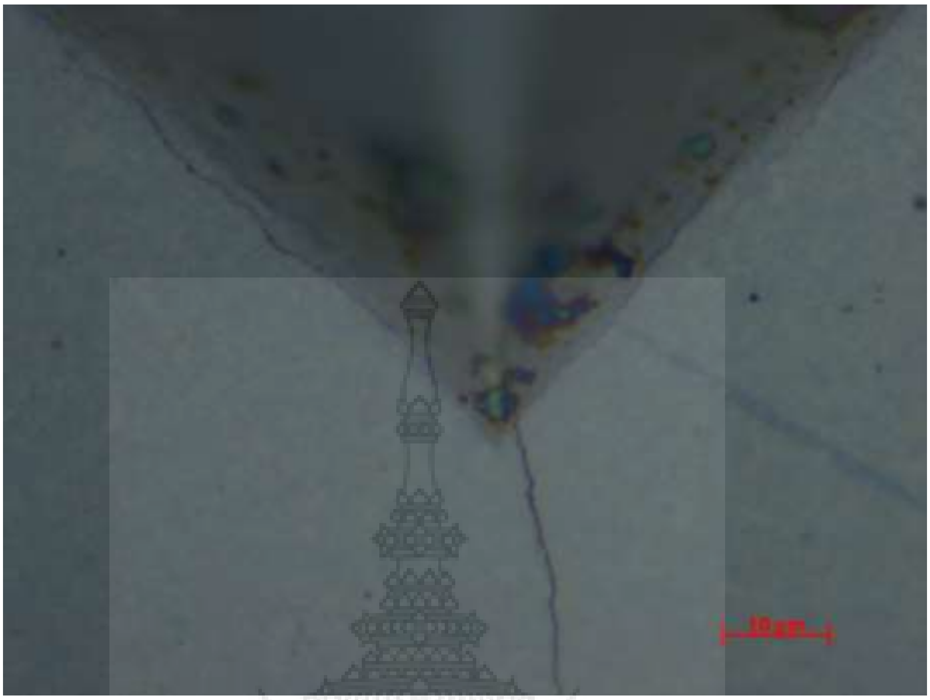
4.6 ผลการทดสอบรอยแตกร้าว

การทดสอบรอยกดบนชิ้นงานเพื่อตรวจสอบดูรอยแตกร้าว ขณะที่ชิ้นงานได้รับความร้อน เกิดการขยายตัวของชิ้นงานขึ้นทำให้ชิ้นงานแตกร้าวหรือบิดงอ อันส่งผลให้การเจียระไนชิ้นงานที่บิดงอเกิดการแตกร้าว



รูปที่ 4.17 แสดงรอยแตกร้าวจากการกดชิ้นงาน

จากรูปที่ 4.17 แสดงผลการกดชิ้นงานเพื่อทดสอบรอยแตกร้าวของชิ้นงาน ปรากฏรอยแตกร้าวที่มุมทั้ง 4 มุม ของชิ้นงาน ซึ่งเกิดจากการเตรียมผงและสิ่งเจือปนที่มีต่อการแตกร้าว การเพิ่มอุณหภูมิความร้อนระหว่างผิวชิ้นงานกับแกนกลางชิ้นงานที่อุณหภูมิเท่ากันและคงอุณหภูมิให้เสถียรต่อการเย็นตัวที่มีผลต่อการแตกร้าว มีลักษณะเป็นแบบเส้นตรง

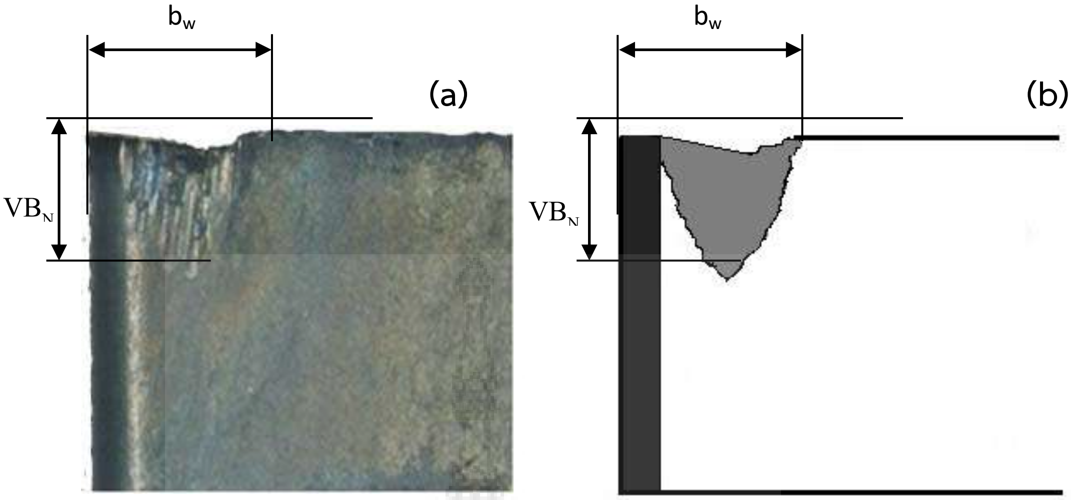


รูปที่ 4.18 แสดงรอยแตกร้าวจากการกดชิ้นงาน ที่กำลังขยาย 1,000 เท่า

จากรูปที่ 4.18 แสดงผลการกดชิ้นงานเพื่อทดสอบรอยแตกร้าวของชิ้นงาน ที่กำลังขยาย 1,000 เท่า ปรากฏรอยแตกร้าวที่ได้จากการกด เป็นเส้นตรง มีลักษณะเป็นแนวยาวที่มุมของชิ้นงาน

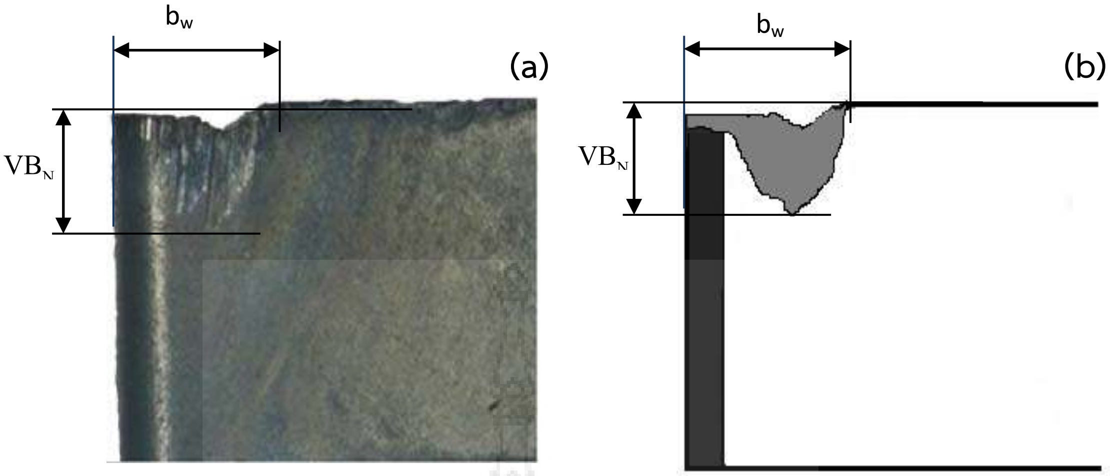
4.7 ผลการทดสอบการสึกหรอ

ผลการเปรียบเทียบการสึกหรอที่มุมของชิ้นงาน ซึ่งเป็นผลของการชั่งน้ำหนักที่หายไปของชิ้นงาน โดยทำการถ่ายรูปการสึกหรอก่อนทำการกลึงและหลังทำการกลึง ใช้กล้องกำลังขยาย 10 เท่า เพื่อตรวจสอบลักษณะการสึกหรอของชิ้นงานที่เสียหาย ได้ผลดังนี้



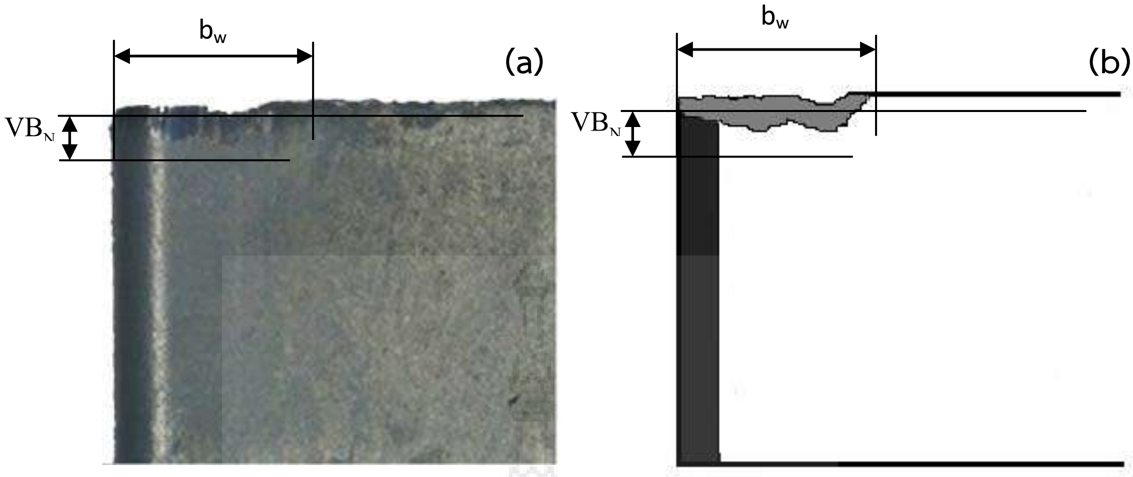
รูปที่ 4.19 แผ่นมีดซีเมนต์ทังสเตนคาร์ไบด์ที่ส่วนผสมโคบอลต์ 15% (a) ลักษณะคมตัดที่เกิดการสึกหรอด้านข้างคมตัด (b) ภาพจำลองลักษณะคมตัดที่เกิดการสึกหรอด้านข้างคมตัดและกำหนดตำแหน่งการวัดระยะสึกหรอ (b_W) และ (VB_N)

จากรูปที่ 4.19 แสดงภาพการสึกหรอของชิ้นงานแผ่นมีดซีเมนต์ทังสเตนคาร์ไบด์ที่ส่วนผสมโคบอลต์ 15% แสดงให้เห็นถึงการสึกหรอแบบ (Notch Wear) บริเวณด้านข้าง แสดงให้เห็นถึงคุณภาพของแผ่นมีดตัดซีเมนต์ทังสเตนคาร์ไบด์ที่ ยังมีความแข็งอยู่ในเกณฑ์ปานกลาง คุณภาพการใช้งานอยู่ในเกณฑ์พอใช้ได้ และจากลักษณะการสึกหรอ ได้ทำการวัดระยะสึกหรอบริเวณด้านข้างคมตัด ระยะ (VB_N) 1.14 มิลลิเมตร ระยะ (b_W) 1.63 มิลลิเมตร



รูปที่ 4.20 แผ่นมีดซีเมนต์ทังสเตนคาร์ไบด์ที่ส่วนผสมโคบอลต์ 10% (a) ลักษณะคมตัดที่เกิดการสึกหรอด้านข้างคมตัด (b) ภาพจำลองลักษณะคมตัดที่เกิดการสึกหรอด้านข้างคมตัดและกำหนดตำแหน่งการวัดระยะสึกหรอ (b_W) และ (VB_N)

จากรูปที่ 4.20 แสดงภาพการสึกหรอของชิ้นงานแผ่นมีดซีเมนต์ทังสเตนคาร์ไบด์ที่ส่วนผสมโคบอลต์ 10% แสดงให้เห็นถึงการสึกหรอแบบ (Notch Wear) บริเวณด้านข้าง แสดงให้เห็นถึงคุณภาพของแผ่นมีดตัดซีเมนต์ทังสเตนคาร์ไบด์ที่ยังมีความแข็งอยู่ในเกณฑ์ปานกลาง คุณภาพการใช้งานอยู่ในเกณฑ์พอใช้ได้ และจากลักษณะการสึกหรอ ได้ทำการวัดระยะสึกหรอของบริเวณด้านข้างคมตัด ระยะ (VB_N) 1.13 มิลลิเมตร ระยะ (b_W) 1.57 มิลลิเมตร



รูปที่ 4.21 แผ่นมีดซีเมนต์ทังสเตนคาร์ไบด์ที่ส่วนผสมโคบอลต์ 5% (a) ลักษณะคมตัดที่เกิดการสึกหรอด้านข้างคมตัด (b) ภาพจำลองลักษณะคมตัดที่เกิดการสึกหรอด้านข้างคมตัดและกำหนดตำแหน่งการวัดระยะสึกหรอ (b_W) และ (VB_N)

จากรูปที่ 4.21 แสดงภาพการสึกหรอของชิ้นงานแผ่นมีดซีเมนต์ทังสเตนคาร์ไบด์ที่ส่วนผสมโคบอลต์ 5% แสดงให้เห็นถึงการสึกหรอแบบ (Flank Wear) บริเวณด้านข้าง แสดงให้เห็นถึงคุณภาพของแผ่นมีดตัดซีเมนต์ทังสเตนคาร์ไบด์ที่ยังมีความแข็งอยู่ในเกณฑ์ปานกลาง คุณภาพการใช้งานอยู่ในเกณฑ์พอใช้ได้ และจากลักษณะการสึกหรอ ได้ทำการวัดระยะสึกหรอบริเวณด้านข้างคมตัด ระยะ (VB_N) 0.23 มิลลิเมตร ระยะ (b_W) 1.54 มิลลิเมตร

บทที่ 5
การอภิปรายผล

การพัฒนาโครงสร้างเกรนต้านทานการสึกหรอของชิ้นงานความแข็งสูงพิเศษด้วยกระบวนการอบผนึก เพื่อศึกษาโครงสร้างเกรนของชิ้นงานแบบแท่งและแผ่นมีดที่ส่วนผสมและอุณหภูมิที่ต่างกัน ปรากฏผลการวิจัยดังนี้

จากการวิเคราะห์คุณลักษณะของผงโลหะด้วยวิธีการ Scanning Electron Microscope (SEM) ของผงทังสเตนคาร์ไบด์ ปรากฏว่า ที่ส่วนผสมผงทังสเตนคาร์ไบด์ 95 % ผงโคบอลต์ 5 % ผงที่มีขนาดเล็ดที่สุด 3 μm ผงที่มีขนาดใหญ่ประมาณ 10 μm ซึ่งมีรูปร่างไม่เท่ากัน ผงโลหะส่วนใหญ่จะมีขนาดเล็กรูปทรงกลมเป็นลักษณะผงที่สามารถนำไปผลิตเป็นชิ้นงาน (Cemented Carbide) ได้ ตรงตามลักษณะผงที่มีการใช้งานในอุตสาหกรรม ใกล้เคียงกับงานวิจัยของ Youngmoo Kim, et al. (2013) [29] ซึ่งได้ผงที่มีขนาดเล็กที่สุดประมาณ 3 μm และขนาดใหญ่ประมาณ 15 μm และมีรูปร่างกลม ที่ส่วนผสมผงทังสเตนคาร์ไบด์ 90 % ผงโคบอลต์ 10 % ผงที่มีขนาดเล็ดที่สุด 1 μm ผงที่มีขนาดใหญ่ประมาณ 10 μm มีรูปร่างไม่เท่ากัน ส่วนใหญ่จะมีขนาดเล็กรูปทรงกลม ใกล้เคียงกับงานวิจัยของ Yuhong Xiong, et al. (2013) [17] ซึ่งได้ผงที่มีขนาดเล็กที่สุดประมาณ 1 μm และขนาดใหญ่ประมาณ 10 μm ที่ส่วนผสมผงทังสเตนคาร์ไบด์ 85 % ผงโคบอลต์ 15 % ผงที่มีขนาดเล็ดที่สุด 3 μm ผงที่มีขนาดใหญ่ประมาณ 10 μm มีรูปร่างไม่เท่ากัน ส่วนใหญ่จะมีขนาดเล็กรูปทรงกลม ใกล้เคียงกับงานวิจัยของ Youngmoo Kim, et al. (2013) [29] ซึ่งได้ผงที่มีขนาดเล็กที่สุดประมาณ 3 μm และขนาดใหญ่ประมาณ 15 μm และมีรูปร่างกลม

จากผลการวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุด้วยวิธี X – Ray diffraction (XRD) พบว่า ผงโลหะเป็นทังสเตนคาร์ไบด์ สอดคล้องกับมาตรฐานของโลหะทังสเตนคาร์ไบด์ ใกล้เคียงกับงานวิจัยของ C.A. Poblano-Salas, et al. (2013) [23] ผงทังสเตนคาร์ไบด์ที่ผ่านการบดด้วยวิธี Ball Milling ผ่านการล้างด้วยน้ำกลั่นและเอทานอล สามารถผลิตผลโลหะทังสเตนคาร์ไบด์ได้

จากการวิเคราะห์ขนาดและการกระจายของอนุภาคผงทังสเตนคาร์ไบด์ที่ผ่านการบดละเอียดด้วยวิธี Ball Milling พบว่า ขนาดผงโลหะมีขนาดเล็กลงโดยมีขนาดอยู่ระหว่าง 0.30 – 60 μm โดยมีผงโลหะที่มีขนาดระหว่าง 0.30 – 2.00 μm เป็นกลุ่มผงโลหะอีกกลุ่มหนึ่งที่กระจายออกมา มีการแบ่งแยกอย่างชัดเจน ใกล้เคียงกับงานวิจัยของ C.A. Poblano-Salas, et al. (2013) [23] ขนาดผงโลหะมีขนาด 0.20 – 0.50 μm มีกลุ่มผงโลหะที่กระจายออกมาและแบ่งแยกอย่างชัดเจน

จากการวิเคราะห์โครงสร้างเกรนของชิ้นงาน A1ขนาด 7.48 x 13.50 x 44.55 มม. ส่วนผสมทังสเตนคาร์ไบด์ 95 % โคบอลต์ 5 % อบผนึกแบบ ก ที่อุณหภูมิ 1,430 °c เป็นเวลา 1 ชม. รูปร่างเกรนเป็นรูปทรงหลายเหลี่ยม มีขนาดไม่เท่ากัน กระจายอยู่ทั่วไปและมีการจับกลุ่มเรียงตัวกัน ชิ้นงาน A2 ส่วนผสมทังสเตนคาร์ไบด์ 90 % โคบอลต์ 10 % อบผนึกแบบ ก ที่อุณหภูมิ 1,430 °c เป็นเวลา 1 ชม. รูปร่างเกรนเป็นรูปทรงหลายเหลี่ยม มีขนาดไม่เท่ากัน กระจายอยู่ทั่วไป ชิ้นงาน A3 ส่วนผสมทังสเตนคาร์ไบด์ 85 % โคบอลต์ 15 % อบผนึกแบบ ก ที่อุณหภูมิ 1,430 °c เป็นเวลา 1 ชม. รูปร่างเกรนเป็นหลายเหลี่ยม มีขนาดเท่าๆกัน กระจายอยู่ทั่วไปและมีการจับกลุ่มเรียงตัวกัน ใกล้เคียงกับงานวิจัยของ Yuhong Xiong, et al. (2012) [17] โครงสร้างเกรนเป็นรูปหลายเหลี่ยม มีขนาดไม่เท่ากัน กระจายอยู่ทั่วไป ชิ้นงาน B1 ขนาด 12.7 x 12.7 x 4.76 มม. ส่วนผสมทังสเตนคาร์ไบด์ 95 % โคบอลต์ 5 % อบผนึกแบบ ก ที่อุณหภูมิ 1,430 °c เป็นเวลา 1 ชม. รูปร่างเกรนเป็นหลายเหลี่ยม มีขนาดเท่าๆกันและเรียงตัวกันอยู่เป็นกลุ่ม ชิ้นงาน B2 ส่วนผสมทังสเตนคาร์ไบด์ 90 % โคบอลต์ 10 % อบผนึกแบบ ก ที่อุณหภูมิ 1,430 °c เป็นเวลา 1 ชม. รูปร่างเกรนเป็นหลายเหลี่ยมและขนาดไม่เท่ากัน จับกลุ่มเรียงตัวกันอยู่ ชิ้นงาน B3 ส่วนผสมทังสเตนคาร์ไบด์ 85 % โคบอลต์ 15 % อบผนึกแบบ ก ที่อุณหภูมิ 1,430 °c เป็นเวลา 1 ชม. รูปร่างเกรนเป็นหลายเหลี่ยมและขนาดไม่เท่ากัน จับกลุ่มเรียงตัวกันอยู่ ใกล้เคียงกับงานวิจัยของ Kedong Zhang, et al. (2012) [27] โครงสร้างเกรนเป็นรูปร่างหลายเหลี่ยม มีขนาดไม่เท่ากัน จับเรียงตัวกันเป็นกลุ่ม ชิ้นงาน C1 ขนาด 12.7 x 12.7 x 4.76 มม. ส่วนผสมทังสเตนคาร์ไบด์ 95 % โคบอลต์ 5 % อบผนึกแบบ ก ที่อุณหภูมิ 1,430 °c เป็นเวลา 1 ชม. รูปร่างเกรนเป็นหลายเหลี่ยมและขนาดไม่เท่ากัน ชิ้นงาน C2 ส่วนผสมทังสเตนคาร์ไบด์ 95 % โคบอลต์ 5 % อบผนึกแบบ ข ที่อุณหภูมิ 1,400 °c เป็นเวลา 1 ชม. รูปร่างเกรนเป็นหลายเหลี่ยมและขนาดไม่เท่ากัน มีการจับกลุ่มเรียงตัวกัน ชิ้นงาน C3 ส่วนผสมทังสเตนคาร์ไบด์ 95 % โคบอลต์ 5 % อบผนึกแบบ ค ที่อุณหภูมิ 1,400 °c เป็นเวลา 2 ชม. รูปร่างเกรนเป็นหลายเหลี่ยมและขนาดไม่เท่ากัน จับกลุ่มเรียงตัวกัน ใกล้เคียงกับงานวิจัยของ Gerhard Gille, et al. (2012) [5] โครงสร้างเกรนเป็นรูปร่างหลายเหลี่ยมและขนาดไม่เท่ากัน มีการจับกลุ่มเรียงตัวกัน

จากการทดสอบความแข็งของชิ้นงานแบบแท่งและแผ่นมีดที่ผลิตจากผงทังสเตนคาร์ไบด์ ผลการทดสอบความแข็งของชิ้นงานแบบแท่งที่มีส่วนผสมโคบอลต์ต่างกัน ประกอบด้วย 5 %,10 % และ 15 % พบว่าที่ 5 % ชิ้นงานมีค่าความแข็งอยู่ที่ 89.12 HRC เมื่อส่วนผสมโคบอลต์เพิ่มขึ้นเป็น 10 % ความแข็งลดลงเป็น 89.64 HRC และเมื่อส่วนผสมโคบอลต์เพิ่มขึ้นเป็น 15 % ความแข็งลดลงเป็น 89.08 HRC ชิ้นงานแผ่นมีดที่มีส่วนผสมโคบอลต์ 5 % ค่าความแข็งอยู่ที่ 89.98 HRC เมื่อส่วนผสมโคบอลต์เพิ่มขึ้นเป็น 10 % ความแข็งเพิ่มขึ้นเป็น 90.54 HRC และเมื่อส่วนผสมโคบอลต์เพิ่มขึ้นเป็น 15 % ความแข็งลดลงเป็น 90.34 HRC ชิ้นงานแผ่นมีดที่มีอุณหภูมิการอบผนึก 1430 °c เป็นเวลา 1 ชั่วโมง มีค่าความแข็งอยู่ที่ 90.48 HRC เมื่ออุณหภูมิการอบผนึก 1400 °c เป็นเวลา 1 ชั่วโมง มีค่า

ความแข็งอยู่ที่ 90.68 HRC และเมื่ออุณหภูมิการอบผนึก 1400 °c เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ค่าความแข็งลดลงอยู่ที่ 89.92 HRC ใกล้เคียงกับงานวิจัยของ Rasit Koc, et al. (2011) [24] ค่าความแข็งของชิ้นงานที่ดีที่สุดอยู่ที่ ส่วนผสมโคบอลต์ 10 %

จากการทดสอบรอยกดบนชิ้นงานเพื่อตรวจสอบดูรอยแตกร้าว ปรากฏรอยแตกร้าวที่มุมทั้ง 4 มุม ของชิ้นงาน รอยแตกร้าวที่ได้จากการกด เป็นเส้นตรง มีลักษณะเป็นแนวยาวที่มุมของชิ้นงาน ใกล้เคียงกับงานวิจัยของ Jiannan Li, et al. (2011) [31] รอยแตกร้าวที่มุมทั้ง 4 มุม ของชิ้นงาน ลักษณะของรอยแตกร้าว เป็นเส้นตรง แนวยาวไปตามมุมของชิ้นงาน

จากการทดสอบการสึกหรอของชิ้นงานแผ่นมีดทังสเตนคาร์ไบด์ที่ผสมโคบอลต์ 15 % วัดระยะสึกหรอบริเวณด้านข้างคมตัด ระยะ (VB_N) 1.14 มิลลิเมตร ระยะ (b_W) 1.63 มิลลิเมตร ชิ้นงานแผ่นมีดทังสเตนคาร์ไบด์ที่ผสมโคบอลต์ 10 % วัดระยะสึกหรอของบริเวณด้านข้างคมตัด ระยะ (VB_N) 1.13 มิลลิเมตร ระยะ (b_W) 1.57 มิลลิเมตร ชิ้นงานแผ่นมีดทังสเตนคาร์ไบด์ที่ผสมโคบอลต์ 5 % วัดระยะสึกหรอบริเวณด้านข้างคมตัด ระยะ (VB_N) 0.23 มิลลิเมตร ระยะ (b_W) 1.54 มิลลิเมตร ใกล้เคียงกับงานวิจัยของ Gaurav Bartarya, et al. (2013) [28]

บทที่ 6
สรุปผลการวิจัย

การวิจัยการพัฒนาโครงสร้างเกรนต้านทานการสึกหรอชองชิ้นงานความแข็งสูงพิเศษด้วยกระบวนการอบผนึก โดยการวิเคราะห์คุณลักษณะของผงโลหะด้วยวิธีการ Scanning Electron Microscope (SEM) พบว่ามีขนาดเล็กประมาณ 1-3 µm ผงโลหะส่วนใหญ่จะมีลักษณะเป็นทรงกลม ซึ่งเกิดจากการบดด้วยวิธี Ball Milling

เมื่อนำมาวิเคราะห์โครงสร้างเกรนที่ส่วนผสมต่างกันและอุณหภูมิต่างกัน ปรากฏว่าโครงสร้างเกรนของชิ้นงาน A1, A2, A3 มีลักษณะรูปร่างเกรนเป็นรูปหลายเหลี่ยม มีขนาดอยู่ระหว่าง 5-10 µm ความแข็งของชิ้นงานที่ส่วนผสมโคบอลต์ 5 % เป็น 89.12 HRC ส่วนผสมโคบอลต์ 10 % เป็น 89.64 HRC ส่วนผสมโคบอลต์ 15 % เป็น 89.08 HRC และชิ้นงาน B1, B2, B3 มีโครงสร้างเกรนลักษณะค่อนข้างกลม จับเรียงตัวกันเป็นกลุ่ม มีขนาดอยู่ระหว่าง 3-10 µm ที่ส่วนผสมโคบอลต์ 5 % ความแข็งเป็น 89.98 HRC ส่วนผสมโคบอลต์ 10 % ความแข็ง 90.54 HRC ส่วนผสมโคบอลต์ 15 % ความแข็ง 90.34 HRC ชิ้นงานแผ่นมีดที่อุณหภูมิการอบผนึกต่างกัน 1430 °c 1 ชั่วโมง ความแข็ง 90.48 HRC อุณหภูมิ 1400 °c 1 ชั่วโมง ความแข็ง 90.68 HRC อุณหภูมิ 1400 °c 2 ชั่วโมง ความแข็ง 89.92 HRC ชิ้นงาน C1, C2, C3 ที่ส่วนผสมโคบอลต์ 10 % และอบผนึกที่อุณหภูมิ 1430 °c 1 ชั่วโมง มีความแข็งมากที่สุด

ผลการทดสอบรอยกดบนชิ้นงานเพื่อตรวจสอบดูรอยแตกร้าว ขณะที่ชิ้นงานได้รับความร้อนเกิดการขยายตัวของชิ้นงานขึ้นทำให้ชิ้นงานแตกร้าวหรือบิดงอ อันส่งผลให้การเจียระไนชิ้นงานที่บิดงอเกิดการแตกร้าว รอยแตกร้าวที่มุมทั้ง 4 มุม ของชิ้นงาน ซึ่งเกิดจากการเตรียมผงและสิ่งเจือปนที่มีต่อการแตกร้าว การเพิ่มอุณหภูมิความร้อนระหว่างผิวชิ้นงานกับแกนกลางชิ้นงานที่อุณหภูมิเท่ากันและคงอุณหภูมิให้เสถียรต่อการเย็นตัวที่มีผลต่อการแตกร้าว เป็นเส้นตรง มีลักษณะเป็นแนวยาวที่มุมของชิ้นงาน

ผลการทดสอบการสึกหรอของชิ้นงาน B1 ที่ส่วนผสมโคบอลต์ 15 % เป็นการสึกหรอแบบ (Notch Wear) บริเวณด้านข้าง ระยะสึกหรอบริเวณด้านข้างคมตัด 1.14 มิลลิเมตรและ 1.63 มิลลิเมตร B2 ส่วนผสมโคบอลต์ 10 % เป็นการสึกหรอแบบ (Notch Wear) บริเวณด้านข้าง ระยะสึกหรอของบริเวณด้านข้างคมตัด 1.13 มิลลิเมตรและ 1.57 มิลลิเมตร B3 ที่ส่วนผสมโคบอลต์ 5 % เป็นการสึกหรอแบบ (Flank Wear) บริเวณด้านข้าง ระยะสึกหรอบริเวณด้านข้างคมตัด 0.23 มิลลิเมตรและ 1.54 มิลลิเมตร

ดังนั้น สรุปได้ว่า การพัฒนาโครงสร้างเกรนต้านทานการสึกหรอของชิ้นงานความแข็งสูงพิเศษด้วยกระบวนการอบผนึก สามารถใช้ในชิ้นงาน B และ C ได้ดีกว่าชิ้นงาน A โดยวัดจากรอยกดบนชิ้นงาน การทดสอบการสึกหรอ ความหนาแน่น ความแข็ง จากการศึกษาโครงสร้างเกรนเป็นการนำไปพัฒนาและจะเป็นแนวทางนำไปสู่การผลิตและการใช้งานชิ้นงานในอุตสาหกรรมต่อไป

บรรณานุกรม

[1] José Garcia, Effect of cubic carbide composition and sintering parameters on the formation of wear resistant surfaces on cemented carbides, Helmholtz-Zentrum Berlin für Materialien and Energie GmbH, Hahn-Meitner-Platz-1, D-14109 Berlin, Germany.

[2] X.L. Shi, G.Q. Shao, X.L. Duan, R.Zh. Yuan, H.H. Lin, Mechanical properties,phases and microstructure of ultrafine hardmetals prepared by WC–6.29Co nanocry - stalline composite powder, State Key Laboratory of Advanced Technology for Materials Synthesis and Processing, Wuhan University of Technology,122 Luoshi Road, Wuhan 430070, China.

[3] Gwan-Hyoung Lee, Shinhoo Kang, Sintering of nano-sized WC–Co powders produced by a gas reduction–carburization process, School of Materials Science and Engineering, Seoul National University, Seoul 151-742, Republic of Korea.

[4] S. Chanthapan ,A. Kulkarni , J. Singh ,C. Haines , D. Kapoor, Sintering of tungsten powder with and without tungsten carbide additive by field assisted sintering technology, Department of Materials Science and Engineering, Pennsylvania State University, University Park, PA, USA.

[5] Gerhard Gille, Advanced and new grades of WC and binder powder – their properties and application, H.C. Starck GmbH & Co. KG, Im Schleeke 78-91, Postfach 2540, 38642 Goslar, Germany.

[6] V. Bonache , M.D. Salvador, Synthesis and processing of nanocrystalline tungsten carbide: Towards cemented carbides with optimal mechanical properties, Instituto de Tecnología de Materiales, Universidad Politécnica de Valencia, Camino de Vera s/n, 46022, Valencia, Spain.

[7] Jeff Rodelas a, Greg Hilmas a, Rajiv S. Mishra, Sinterbonding cobalt-cemented tungsten carbide to tungsten heavy alloys, Missouri University of Science and Technology, Department of Materials Science and Engineering, 222 McNutt Hall, 1870 Miner Circle, Rolla, MO 65409, United States.

[8] Jing-Chie Lin, Jain-Yuan Lin, Shie-Peir Jou, Selective dissolution of the cobalt binder from scraps of cemented tungsten carbide in acids containing additives, Department of Mechanical Engineering, National Central University, Chung-Li, 32054, Taiwan, ROC.

[9] T.V. SreeramaReddy, Machinability of C45 steel with deep cryogenic treated tungsten carbide cutting tool inserts, Department of Mechanical Engineering, Bangalore Institute of Technology, Bangalore 560 004, India.

[10] H. Engqvist, S. Jacobson, N. Axén, A model for the hardness of cemented carbides, The Tribomaterials Group, Ångström Laboratory, Uppsala University, Box 534, S-75121 Uppsala, Sweden.

[11] A. Michalski , D. Siemiaszko, Nanocrystalline cemented carbides sintered by the pulse plasma method, Warsaw University of Technology, Materials Science and Engineering Faculty, 02-507 Warsaw, Wołoska 141, Poland.

[12] C.B. Wei, X.Y. Song, Microstructure and properties of ultrafine cemented carbides-Differences in spark plasma sintering and sinter-HIP, College of Materials Science and Engineering, Key Lab of Advanced Functional Materials, Education Ministry of China, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China.

[13] Deng Jianxin , Zhang Hui, Wu Ze, Lian Yunsong, Zhao Jun, Friction and wear behaviors of WC/Co cemented carbide tool materials with different WC grain sizes at temperatures up to 600 °C, Department of Mechanical Engineering, Shandong University, Jinan 250061, Shandong Province, PR China.

[14] Hans-Olof Andren, Microstructures of cemented carbides, Department of Experimental Physics, Chalmers University of Technology and Go tabors University, SE-412 96 Goteborg, Sweden.

[15] N. Lin ,Y. Jiang, Effect of Cu, Ni on the property and microstructure of ultrafine WC-10Co alloys by sinter–hipping, State Key Laboratory of Powder Metallurgy, Central South University, Changsha 410083, China.

[16] Wenbin Liu, Xiaoyan Song, Preparation of ultrafine WC–Co composite powder by in situ reduction and carbonization reactions, College of Materials Science and Engineering, Key Laboratory of Advanced Functional Materials, Chinese Education Ministry, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China.

[17] Yuhong Xiong, Ki Lau, Xiaoying Zhou, A streamlined life cycle assessment on the fabrication of WC-Co cermets, Department of Chemical Engineering and Materials Science, University of California, Davis, One Shields Avenue, Davis, CA 95616, USA.

[18] V. Chabretou, J.M. Missiaen, Analysis of the evolution of the grain size distribution in WC–Co sintered materials with random set models, Laboratoire de Thermodynamique et de Physico-Chimie Me´tallurgiques, UMR 5614 CNRS-INPG/UJF, F-38402 Saint-Martin D'Heres,Cedex, France.

[19] T. Kagnaya , C. Boher, L. Lambert, Microstructural analysis of wear micro mechanisms of WC–6Co cutting tools during high speed dry machining, Université de Toulouse, Mines Albi, INSA, UPS, ISAE, ICA (Institut Clément Ader) Campus Jarlard, F 81013 Albi Cedex 09, France.

[20] C. Edtmaier, R. Schiesser, C. Meissla, W.D. Schubert, A. Bock, Selective removal of the cobalt binder in WC/Co based hardmetal scraps by acetic acid leaching, Vienna University of Technology, Institute for Chemical Technologies and Analytics, 1060 Vienna, Getreidemarkt 9/164-CT, Austria.

[21] Thi Hong Nguyen, Man Seung Lee, Development of a hydrometallurgical process for the recovery of calcium molybdate and cobalt oxalate powders from spent hydrodesulphurization (HDS) catalyst, Department of Advanced Material Science and Engineering, Institute of Rare Metal, Mokpo National University, Chonnam 534-729, Republic of Korea.

[22] Shidi Yang,Wei Fang,Yongheng Chi,Dil Faraz Khan,Ruijie Zhan,Xuanhui Qu, Bulk observation of aluminum green compacts by way of X-ray Tomography, State Key Laboratory for Advanced Metals and Materials, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, People’s Republic of China.

[23] C.A. Poblano-Salas , J.A. Cabral-Miramontes, Effects of VC additions on the mechanical properties of bimodal WC–Co HVOF thermal sprayed coatings measured by nanoindentation, CIATEQ A.C., Centro de Tecnología Avanzada, Av. Manantiales 23 A, Parque Industrial Bernardo Quintana, El Marqués, Querétaro 76246, México.

[24] Rasit Koc , Suneel K. Kodambaka , Tungsten carbide (WC) synthesis from novel precursors, Department of Materials Science and Engineering, University of Florida, Gainesville, FL 32611, USA.

[25] Liang Liang, Xin Liu, Xiao-qiang Li, Yuan-Yuan Li, Wear mechanisms ofWC–10Ni3Al carbide tool in dry turning of Ti6Al4V, College of Mechanical and Automotive Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, PR China.

[26] Humberto Gomeza, Delcie Durham, Xingcheng Xiao, Adhesion analysis and dry machining performance of CVD diamond coatings deposited on surface modified WC–Co turning inserts, Department of Mechanical Engineering, University of South Florida, Tampa, FL 33620, USA.

[27] Kedong Zhang, Jianxin Deng, Youqiang Xing, Shipeng Li, Huanhuan Gao, Effect of microscale texture on cutting performance of WC/Co-basedTiAlN coated tools under different lubrication condition, Department of Mechanical Engineering, Key Laboratory of High Efficiency and Clean Mechanical Manufacture, Shandong University, Ministry of Education,PR China.

[28] Gaurav Bartarya, S.K.Choudhury, State oftheartinhardturning, MechanicalEngineer Department,HarcourtButlerTechnologicalInstitute,Kanpur208002,India.

[29] Youngmoo Kim, Eun-Pyo Kim, Fabrication and mechanical properties of powder metallurgy tantalum prepared by hot isostatic pressing, Agency for Defense Development, P.O. Box 35, Yuseong-gu, Daejeon 305–600, Republic of Korea.

[30] Li Zhang ,Zhe Wang , Shu Chen , Tao Xu, Ji-fei Zhu, Yi Chen, Binder phase strengthening ofWC–Co alloy through post-sintering treatment, State Key Laboratory of Powder Metallurgy, Central South University, Changsha 410083, China.

[31] Jiannan Li , Huiqi Li, Mei Wang, Shufeng Wang, Qiang Ji, Min Li, Jing Chi, Applications of WC-based composites rapid synthesized by consumable electrode in-situ metallurgy to cutting pick, School of Materials Science and Engineering, Shandong University of Science and Technology, 266590 Qingdao, PR China.

[32] I. Konyashin , S. Hlawatschek, B. Ries, F. Lachmann, M. Vukovic, Cobalt capping on WC–Co hard metals. Part II: A technology for fabrication of Co coated articles during sintering, Element Six GmbH, Element Six Hard Materials, Städeweg 12-24, 36151 Burghaun, Germany.

ภาคผนวก ก

เครื่องมือและอุปกรณ์ในการวิจัย

รูปที่ ก.1 เครื่องบดผงคาร์ไบด์

รูปที่ ก.2 หม้อบดและลูกบด

รูปที่ ก.3 ตะแกรงหยาบ

รูปที่ ก.4 ถ้วยเซรามิค

รูปที่ ก.5 เครื่องชั่งน้ำหนักแบบดิจิตอล HR200 Max 120 กรัม

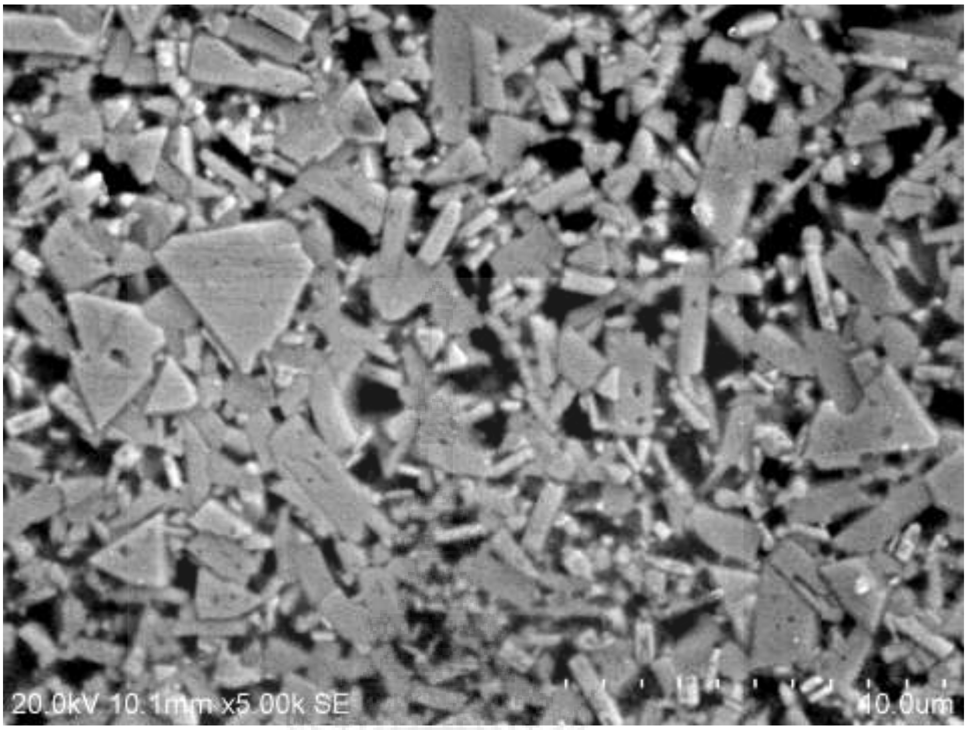
รูปที่ ก.6 เตาไฟฟ้า Hot Plate Stirrer รุ่น HS-115

รูปที่ ก.7 เครื่องอบผนึก รุ่น Linn High

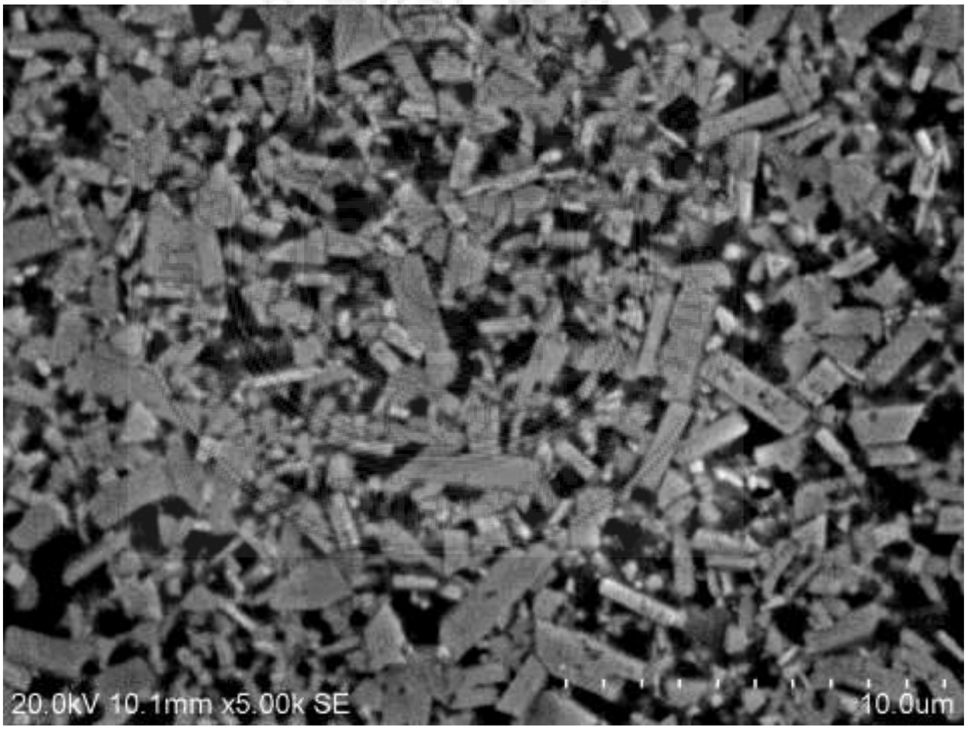
รูปที่ ก.8 เครื่องอัดขึ้นรูปแบบไฮดรอลิกส์ Max 10 ton

ภาคผนวก ข

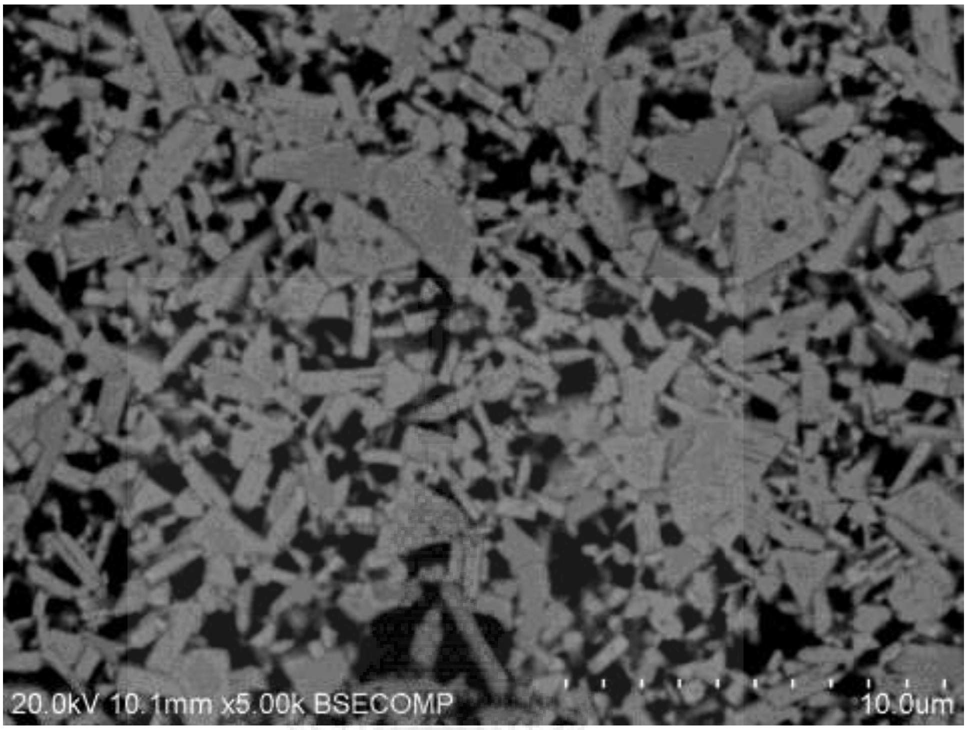
ผลการวิเคราะห์โครงสร้างเกรน



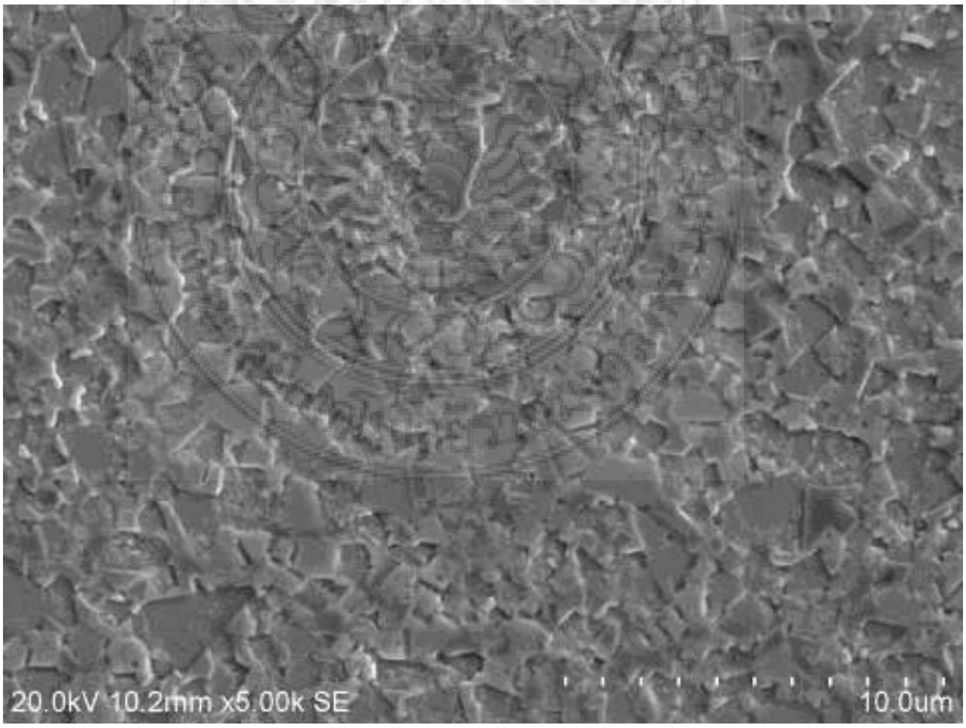
รูปที่ ข.1 โครงสร้างเกรนชิ้นงาน A1 WC 95 % Co 5 % อบผนึกแบบ ก (1,430 °c 1 ชม.)



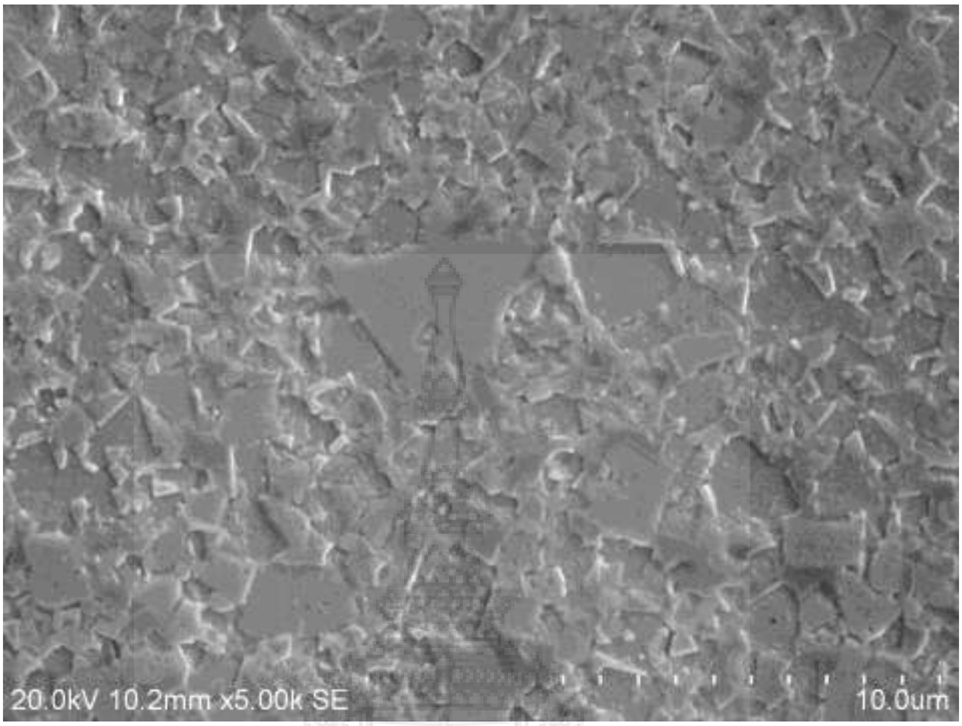
รูปที่ ข.2 โครงสร้างเกรนชิ้นงาน A2 WC 90 % Co 10 % อบผนึกแบบ ก (1,430 °c 1 ชม.)



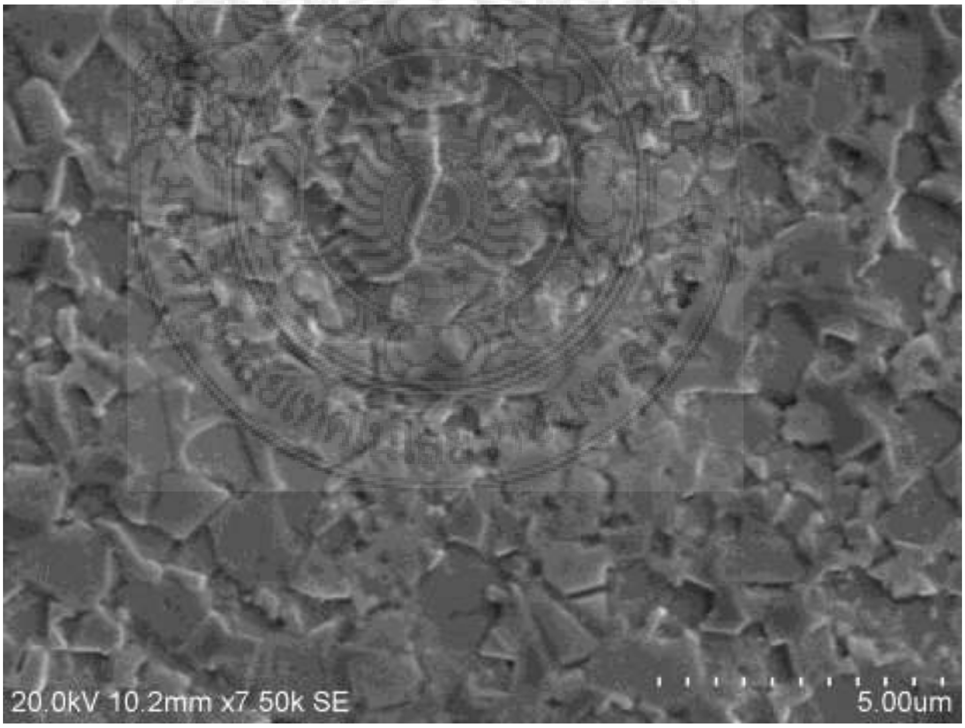
รูปที่ ข.3 โครงสร้างเกรนชิ้นงาน A3 WC 85 % Co 15 % อบผนึกแบบ ก (1,430 °c 1 ชม.)



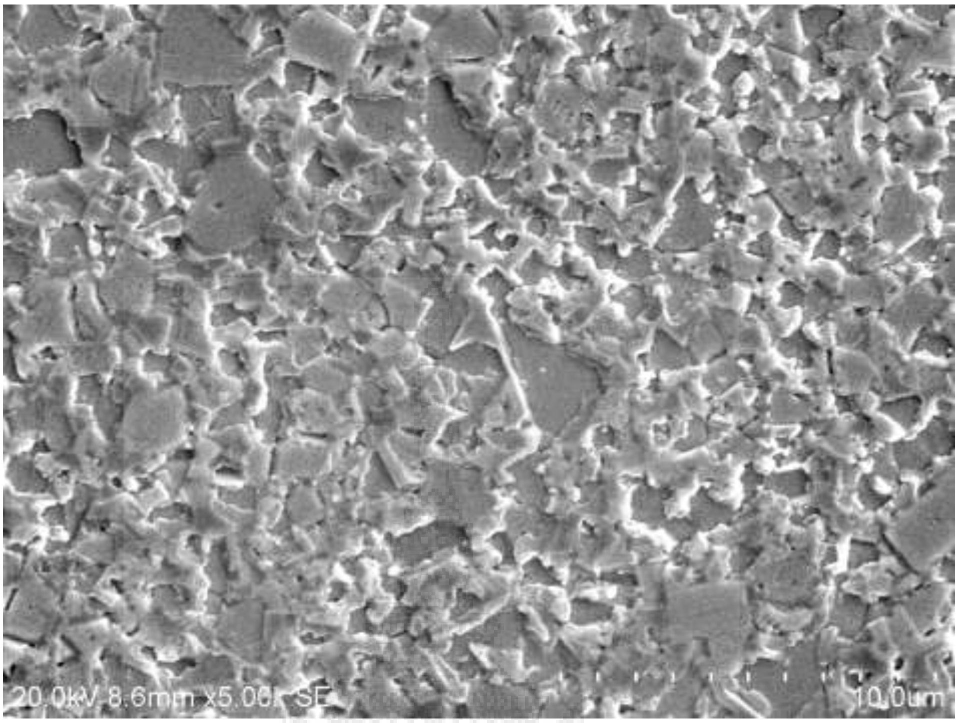
รูปที่ ข.4 โครงสร้างเกรนชิ้นงาน B1 WC 95 % Co 5 % อบผนึกแบบ ก (1,430 °c 1 ชม.)



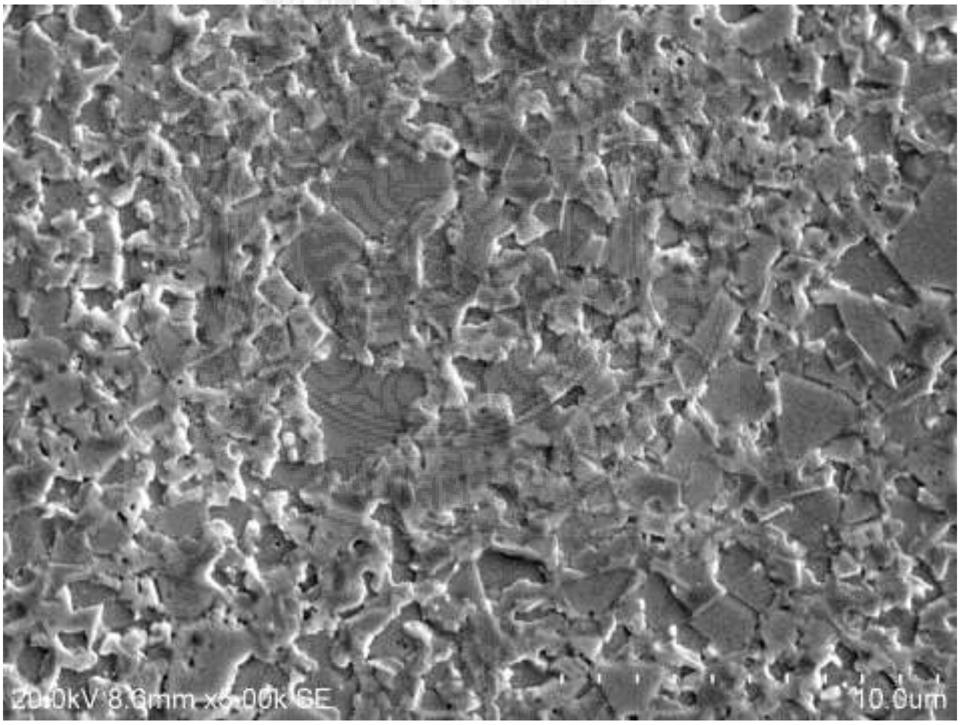
รูปที่ ข.5 โครงสร้างเกรนชิ้นงาน B2 WC 90 % Co 10 % อบผนึกแบบ ก (1,430 °c 1 ชม.)



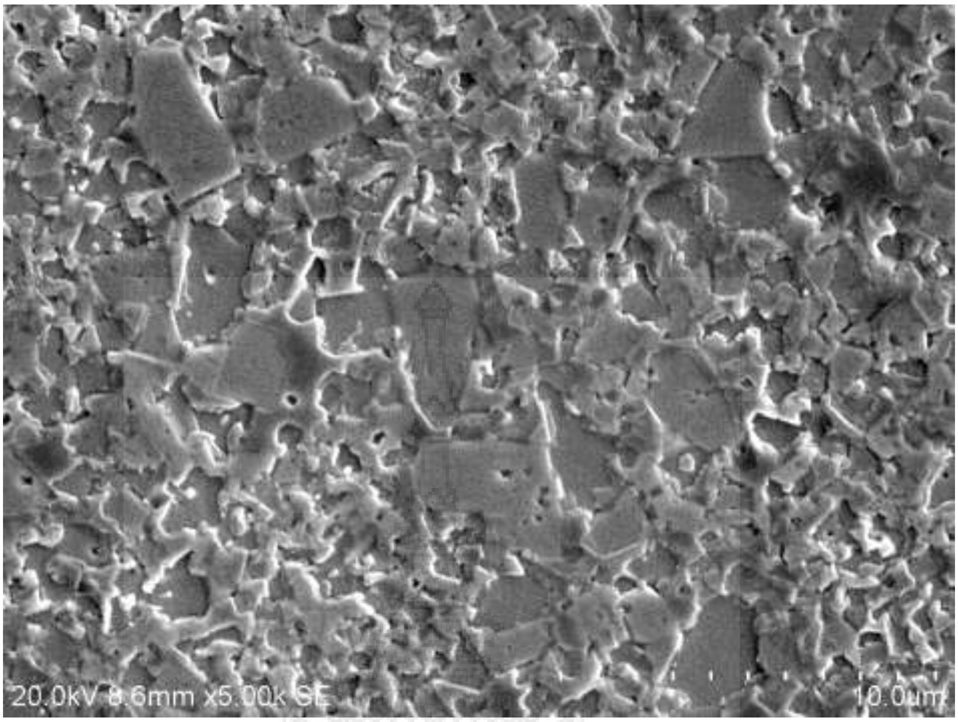
รูปที่ ข.6 โครงสร้างเกรนชิ้นงาน B3 WC 85 % Co 15 % อบผนึกแบบ ก (1,430 °c 1 ชม.)



รูปที่ ข.7 โครงสร้างเกรนชิ้นงาน C1 WC 95 % Co 5 % อบผนึกแบบ ก (1,430 °c 1 ชม.)



รูปที่ ข.8 โครงสร้างเกรนชิ้นงาน C2 WC 95 % Co 5 % อบผนึกแบบ ข (1,400 °c 1 ชม.)



รูปที่ ข.9 โครงสร้างเกรนชิ้นงาน C3 WC 95 % Co 5 % อบผนึกแบบ ค (1,400 °c 2 ชม.)

ภาคผนวก ค

ผลการทดสอบความแข็ง

ตารางที่ ค.1 ผลการทดสอบความแข็งของชิ้นงาน

ตารางการทดสอบความแข็งของชิ้นงาน (HRC)		
ส่วนผสมโคบอลต์	**ชิ้นงาน A**	**ชิ้นงาน B**
5 %	89.12	89.98
10 %	89.64	90.54
15 %	89.08	90.34

ตารางที่ ค.2 ผลการทดสอบความแข็งของชิ้นงาน

ตารางการทดสอบความแข็งของชิ้นงาน (HRC)	
อุณหภูมิในการอบผนึก	**ชิ้นงาน C**
1430 °c/1 ชั่วโมง	90.48
1400 °c/1 ชั่วโมง	90.68
1400 °c/2 ชั่วโมง	89.92

ประวัติคณะผู้วิจัย

<u>หัวหน้าโครงการ</u>

1. ชื่อ – นามสกุล (ภาษาไทย) นายสหรัตน์ วงษ์ศรีษะ
(ภาษาอังกฤษ) Mr. Saharat Wongsisa
2. หมายเลขประจำตัวประชาชน 3 4410 000 76 23 8
3. ตำแหน่งบริหาร/วิชาการ ที่เป็นปัจจุบัน
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ระดับ 8
4. หน่วยงานและสถานที่ที่ติดต่อได้สะดวก พร้อมหมายเลขโทรศัพท์ โทรสาร และ e-mail
สาขาวิชาวิศวกรรมการจัดการอุตสาหกรรมเพื่อความยั่งยืน คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
1381 ถ.พิบูลสงคราม แขวงบางซื่อ เขตบางซื่อ กรุงเทพฯอ10800
โทรศัพท์ : 081-8891409 , 02-9132424 ต่อ 4175
โทรสาร : 02-9132424 ต่อ 4175
E-mail : saharat_w@hotmail.com

5. ประวัติการศึกษา
- ระดับปริญญาโท วศ.ม. วิศวกรรมการผลิต 2541
- ระดับปริญญาตรี วศ.บ. วิศวกรรมอุตสาหการ 2546
- ระดับปริญญาตรี คอ.บ. วิศวกรรมอุตสาหการ 2531

6. สาขาวิชาที่มีความขำนาญพิเศษ (แตกต่างจากวุฒิการศึกษา) ระบุสาขาวิชา
- สาขาการออกแบบและพัฒนาผลิตภัณฑ์ทางวิศวกรรม อาทิ การออกแบบผลิตภัณฑ์เครื่องมือตัด (Design Of Cutting tool products)
- สาขาวิศวกรรมการจัดการอุตสาหกรรมเพื่อความยั่งยืน

<u>ผู้ร่วมวิจัย</u>

1. ชื่อ – นามสกุล (ภาษาไทย) นายประสิทธิ์ แพงเพชร
   (ภาษาอังกฤษ) Mr. Prasit Pangpech
2. หมายเลขประจำตัวประชาชน 5 6505 900 09 17 1
3. ตำแหน่งบริหาร/วิชาการ ที่เป็นปัจจุบัน
   อาจารย์ ระดับ 6
4. หน่วยงานและสถานที่ที่ติดต่อได้สะดวก พร้อมหมายเลขโทรศัพท์ โทรสาร และ e-mail
   คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
   1381 ถ.พิบูลสงคราม แขวงบางซื่อ เขตบางซื่อ กรุงเทพฯอ10800
   โทรศัพท์ : 02-9132424
   โทรสาร : 02-5859175
5. ประวัติการศึกษา
   - ระดับปริญญาโท วศ.ม. วิศวกรรมการจัดการอุตสาหกรรม 2548
   - ระดับปริญญาตรี วศ.บ. วิศวกรรมอุตสาหการ 2545
   - ระดับปริญญาตรี คอ.บ. วิศวกรรมอุตสาหการ 2538
6. สาขาวิชาที่มีความขำนาญพิเศษ (แตกต่างจากวุฒิการศึกษา) ระบุสาขาวิชา
   - การผลิตชิ้นส่วนงานความเที่ยงตรงสูง (High precision) ความสามารถในการใช้เครื่องมือทดสอบและการตรวจสอบชิ้นส่วนความเที่ยงตรงสูง อาทิ เครื่องมือวัดละเอียด การผลิตด้วยเครื่องจักรกลอัตโนมัติ (CNC) ได้แก่ การกลึง เจาะ กัด และการเจียระไน
   - การพัฒนาชิ้นส่วนความเที่ยงตรงสูงในงานเครื่องมือกล (Machine tools)
   - การทดสอบและตรวจสอบคุณภาพชิ้นงานความเที่ยงตรงสูง