



รายงานวิจัย

เรื่อง

การพัฒนาผลิตภัณฑ์เครื่องมือตัดปาดผิวโลหะนาโนเมตรจาก
โลหะผงทังสเตนคาร์ไบด์ที่ผลิตภายในประเทศ

Development of nano-tools Product by Tungsten carbide
powder nanosized in Thailand

ผู้จัดทำวิจัย

นายสรัตน์

วงศ์ศรีษะ

หัวหน้าโครงการวิจัย

นายประสิทธิ์

แพงเพชร

ผู้ร่วมวิจัย

รายงานวิจัยนี้ เป็นการวิจัยสาขาวิชา กลุ่ม สาขาวิศวกรรมศาสตร์และอุตสาหกรรมวิจัย

สาขาวิชาวิศวกรรมการจัดการอุตสาหกรรมเพื่อความยั่งยืน

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

ปีงบประมาณ 2557

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร



รายงานวิจัย

เรื่อง

การพัฒนาผลิตภัณฑ์เครื่องมือตัดปาดผิวโลหะนาโนเมตรจาก
โลหะผงทังสเตนคาร์ไบด์ที่ผลิตภายในประเทศ

Development of nano-tools Product by Tungsten carbide
powder nanosized in Thailand

ผู้จัดทำวิจัย

นายสหรัตน์

วงศ์ศรีษะ

หัวหน้าโครงการวิจัย

นายประสิทธิ์

แพงเพชร

ผู้ร่วมวิจัย

รายงานวิจัยนี้ เป็นการวิจัยสาขาวิชา กลุ่ม สาขาวิศวกรรมศาสตร์และอุตสาหกรรมวิจัย

สาขาวิชาวิศวกรรมการจัดการอุตสาหกรรมเพื่อความยั่งยืน

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

ปีงบประมาณ 2557

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร



โครงการวิจัยเรื่อง การพัฒนาผลิตภัณฑ์เครื่องมือตัดปาดผิวโลหะนาโนเมตรจากโลหะผง
ทั้งสแตนคาร์ไบด์ที่ผลิตภายในประเทศ

หัวหน้าโครงการวิจัย ผศ.สหรัตน์ วงษ์ศรีษะ
ผู้ร่วมวิจัย อาจารย์ประสิทธิ์ แพงเพชร

สาขาวิชา วิศวกรรมการจัดการอุตสาหกรรมเพื่อความยั่งยืน
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
ปีงบประมาณ 2557

บทคัดย่อ

ผงโลหะทั้งสแตนคาร์ไบด์ที่ผลิตจากกระบวนการรีไซเคิลเศษซีเมนต์ทั้งสแตนคาร์ไบด์ มีความบริสุทธิ์ 99 % งานวิจัยนี้จึงทำการศึกษาความสามารถในการผลิตเป็นแผ่นมีดกลึงขนาด $12.7 \times 12.7 \times 4.76$ มม. ตามมาตรฐาน SNMG 120408 โดยการบดแบบ Ball milling เป็นเวลา 100 ชั่วโมง ผสมโลหะประสานโคบอลต์และอบพูนิก (Sintering) ที่ $1,430^\circ\text{C}$ ผลการทดลองปรากฏว่า ที่ส่วนผสมโคบอลต์ 15 % ชิ้นงานมีความแข็งที่ 2,031.6 HV สามารถกลึงปอกชิ้นงานเหล็กกล้า S45C ที่อัตราป้อน 0.2 เมตรต่อรอบ ความเร็วตัด 45 เมตรต่อนาที ความลึกในการตัด (Depth of cut) 0.25 มิลลิเมตร ชิ้นงานมีความเรียบผิว $3.65\ \mu\text{m}$ เมื่อระยะทางการกลึง 4,200 มม. ส่วนแผ่นมีดที่ผลิตจากผงโลหะนำเข้ามีความแข็ง 1,254 HV ผงโลหะทั้งสแตนคาร์ไบด์ที่พัฒนาขึ้นใหม่ผลิตเป็นแผ่นมีดกลึงมีสมบัติด้านความแข็งและความต้านทานต่อการสึกหรอเทียบเท่ากับแผ่นมีดมาตรฐาน จึงเป็นการพัฒนาวัสดุและการผลิตแผ่นมีดทั้งสแตนคาร์ไบด์ที่เป็นพื้นฐานสำคัญต่อการพัฒนาผลิตภัณฑ์เครื่องมือตัดต่อไป

คำสำคัญ (Keywords) : ทั้งสแตนคาร์ไบด์ , นาโนเมตร , อบพูนิก , เครื่องมือตัด



Researcher title Development of nano-tools Product by Tungsten carbide powder nanosized in Thailand

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

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

Abstracts

The tungsten carbide powder which recycled from the scraps of cemented tungsten carbide, produces the purity of 99%. Using this tungsten carbide powder to manufacture a cutting tool and test its properties are the main objective of this work. Based on the standard SNMG 120408, the cutting tool with the dimension of 12.7x12.7x4.76 is fabricated. With the 100 hours of Ball milling grinding, Cobalt mixing, and sintering at 1430 °C, the experimental result is impressive. At 15% of mixed-cobalt, the cutting tool with the hardness of 2031.6 HV be able to cut S45C steel in the feed rate of 0.2 meters per revolution and 45 m/min in the cutting speed. Besides that, it provides the depth of cut of 0.25 mm and when it reaches the cutting distance of 4,200 mm, the surface roughness is 3.65 μm . In comparison with the cutting tool made of imported tungsten carbide powder which has a hardness of 1,254 HV, it turned out that our cutting tool has the equivalent quality in terms of hardness and wear resistance. Hence, this work is considered to be a material development and a tungsten carbide cutting tool manufacture those would be the vital base to lead us to a commercial production.

Keywords : Tungsten Carbide , Nanometer , Sintering , Cutting tool



กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนด้วยทุนวิจัยงบประมาณแผ่นดิน โดยมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร และทำการทดลองที่ห้องปฏิบัติการผลิตโลหะผงทั้งสแตนคาร์ไบด์ (WC) สาขาวิชาวิศวกรรมจัดการอุตสาหกรรมเพื่อความยั่งยืน คณะวิศวกรรมศาสตร์ ผลการวิจัย เป็นผลิตภัณฑ์ต้นแบบ งานวิจัยได้รับความร่วมมือจากหน่วยงานต่าง ๆ ประกอบด้วย ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ วิเคราะห์โลหะผงด้วยเทคนิค SEM, XRD และ XRF สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย (วว.) ช่วยวิเคราะห์ SEM, EDX และ Particle size distribution วิทยาศาสตร์บริการ วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีและทดสอบ XRF และขอบคุณ บริษัท อาร์ เอส คาร์ไบด์ โปรดักส์ จำกัด จึงขอขอบคุณผู้ที่เกี่ยวข้องมา ณ ที่นี้

ผศ.สหรัตน์ วงษ์ศรีษะ
หัวหน้าโครงการ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญภาพ	ช
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์	5
1.3 ขอบเขตของการวิจัย	5
1.4 สมมุติฐานและกรอบแนวความคิดของโครงการวิจัย	6
1.5 วิธีดำเนินงานวิจัย	7
1.6 สถานที่ดำเนินการทดลองและเก็บข้อมูลโครงการวิจัย	10
1.7 ระยะเวลาทำการวิจัย	10
1.8 ประโยชน์ที่ได้รับ	11
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	12
2.1 การกำหนดเครื่องมือตัดแปดผิวโลหะ	12
2.2 ทังสเทน (Tungsten)	16
2.3 กรรมวิธีทางโลหะผง (Power Metallurgy)	18
2.4 วิธีการบดละเอียด (Ball Milling)	19
2.5 การอัดขึ้นรูป (Pressure)	22
2.6 การอบพูนึก (Sintering)	25
2.7 การกลึง (Turning Operation)	26
2.8 การอ่านรหัสแผ่นมิตกึ่ง	28
2.9 เหล็กกล้าชิ้นส่วนเครื่องจักรกล	30
2.10 การทดสอบความแข็งด้วยวิธี Hardness Vickers	30
2.11 ความหยาบของพื้นผิว (Surface Roughness)	31
2.12 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	33
บทที่ 3 วิธีการวิจัย	35
3.1 ศึกษาและออกแบบแผ่นมิตซีเมนต์คาร์ไบด์	36
3.2 ศึกษากระบวนการผลิตชิ้นงานคาร์ไบด์	39
3.3 วิเคราะห์ข้อมูลการผลิตและทดสอบ	42
3.4 ผลิตแผ่นมิตซีเมนต์ทังสเทนคาร์ไบด์	42
3.5 การทดสอบความแข็งและประสิทธิภาพการใช้งาน	55

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.6 รวบรวมข้อมูลการทดสอบ	57
3.7 วิเคราะห์ผลการทดสอบ	58
3.8 สรุปผล	58
บทที่ 4 ผลการวิจัย (Results)	59
4.1 ผลการวิเคราะห์คุณลักษณะของผงโลหะ	60
4.2 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุ	61
4.3 ผลการวิเคราะห์ขนาดและการกระจายของอนุภาคผงโลหะ (Particle Size Distribution)	62
4.4 ผลการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค	62
4.5 ผลการทดสอบความแข็ง	63
4.6 ผลการเปรียบเทียบการสึกหรอบริเวณคมตัดภายหลังการทดสอบ	64
4.7 ผลการทดสอบความเรียบผิวชิ้นงาน	71
บทที่ 5 การอภิปรายผล	72
บทที่ 6 สรุปผลการวิจัย	74
บรรณานุกรม	76
ภาคผนวก ก ภาพเครื่องมือและอุปกรณ์	80
ภาคผนวก ข ผลการทดสอบการใช้งาน	90
ภาคผนวก ค ผลการทดสอบความแข็งของแผ่นมีด	97
ประวัติคณะผู้วิจัย	99

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1.1	แผนดำเนินโครงการ	10
2.1	Green Dimensions (mm) of simple square insert, average of four parts [5]	13
2.2	สมบัติของซีเมนต์ทั้งสแตนคาร์ไบด์ (ทั้งสแตนคาร์ไบด์ผสมกับผงโคบอลต์)	17
2.3	สมบัติเครื่องมือชนิดทั้งสแตนคาร์ไบด์	17
2.4	สมบัติของชิ้นงานทั้งสแตนคาร์ไบด์	18
2.5	แสดงการใช้ความดัน (Pressure) สำหรับอัดขึ้นรูปผงโลหะแต่ละชนิด	23
3.1	แสดงรหัสแผ่นมีดรูปทรง S (Square)	36
3.2	แสดงลักษณะมุมหลบของมีด N (Relief Angle)	36
3.3	แสดงการกำหนดระยะเผื่อของแผ่นมีด M (Tolerance)	36
3.4	แสดงลักษณะรูตรงกลางมีด G (Hole and Chip Breaker)	36
3.5	แสดงขนาดความกว้างและความยาวของแผ่นมีด 12	37
3.6	แสดงขนาดความหนาของแผ่นมีด 04	37
3.7	แสดงขนาดรัศมีคมตัดของแผ่นมีด 08	37
3.8	แสดงความสามารถในการใช้งานกลึงภายนอกของมีดมีดรูปทรง S (Square)	38
3.9	เงื่อนไขการกลึงที่เหมาะสมของแผ่นมีดคาร์ไบด์ทรง S (Square) จากบริษัท SANDVIK, TUNGALOY, LAMINA	38
3.10	เงื่อนไขการบดผงทั้งสแตนคาร์ไบด์	39
3.11	เงื่อนไขการผสมทั้งสแตนคาร์ไบด์กับโคบอลต์	40
3.12	เงื่อนไขการอัดขึ้นรูป	40
3.13	แสดงอุณหภูมิในการอบผนึกต่อสมบัติของแผ่นมีด	41
4.1	ความแข็งของแผ่นมีดซีเมนต์ทั้งสแตนคาร์ไบด์	63
4.2	ความเรียบผิวชิ้นงาน	71
ข.1	ระยะทางในการกลึงทดสอบแผ่นมีด	96
ค.1	ผลความแข็งของแผ่นมีดซีเมนต์ทั้งสแตนคาร์ไบด์	98

สารบัญภาพ

รูปที่		หน้า
1.1	โครงสร้างโลหะผสม ทั้งสแตน โคบอลต์และคาร์บอน [21]	2
1.2	การวิเคราะห์โลหะผงทั้งสแตนคาร์ไบด์ด้วย SEM [15]	4
1.3	ตัวอย่างผลิตภัณฑ์เครื่องมือตัดทั้งสแตนคาร์ไบด์ [19]	4
1.4	รูปแบบกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์เครื่องมือตัดทั้งสแตนคาร์ไบด์และการทดสอบผลิตภัณฑ์ (Methodologies of hard metals) ภายในระยะเวลา ไม่เกิน 1 ปี	9
2.1	แสดงการกำหนดขนาดชิ้นงานแผ่นมีดตัด [5]	13
2.2	การแบ่งกลุ่มของผลิตภัณฑ์เครื่องมือตัด ผลิตจากทั้งสแตนคาร์ไบด์ในอุตสาหกรรม [4]	14
2.3	ความสัมพันธ์ของขนาดผงโลหะทั้งสแตนคาร์ไบด์และส่วนผสมโคบอลต์ มีอิทธิพลต่อความแข็งของชิ้นงานและการจัดกลุ่มเครื่องตัดให้เหมาะสมกับลักษณะงาน [4]	14
2.4	กระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์เครื่องมือทั้งสแตนคาร์ไบด์ (Tungsten Carbide tools) [3]	15
2.5	กระบวนการผลิตชิ้นงานคาร์ไบด์หรือผลิตภัณฑ์เครื่องมือตัดทั้งสแตนคาร์ไบด์ [3]	15
2.6	โครงสร้างผลึก (Body Centered Cubic) [7]	16
2.7	ผงทั้งสแตนคาร์ไบด์ (Tungsten Carbide Power) [7]	17
2.8	ระดับของลูกบดใน Ball Mill ที่เหมาะสม [9]	19
2.9	แสดงการเคลื่อนตัวของลูกบดในหม้อบด [9]	20
2.10	แสดงมุมตกกระทบที่เหมาะสมของหม้อบด [9]	21
2.11	A ระดับการเติมวัตถุดิบที่เหมาะสม B ระดับของวัตถุดิบน้อยเกินไปทำให้ลูกบดและตัวหม้อบดสึกหรือเร็ว C ระดับของวัตถุดิบมากเกินไปทำให้ประสิทธิภาพในการบดต่ำลง [9]	21
2.12	ขั้นตอนการอัดขึ้นรูปผงโลหะ (Compaction of Metal Powders) [8]	22
2.13	ความหนาแน่นในการอัดผงโลหะในแม่พิมพ์แบบต่างๆ [8]	22
2.14	กราฟแสดงความหนาแน่นต่อแรงกดดันที่ต่างกัน [9]	23
2.15	Isostatic pressing [10]	24
2.16	วิธีการอัดขึ้นรูปแบบทิศทางเดียว (Uniaxial Pressing) [9]	25
2.17	แสดงการประสานตัวจากการอบผนึก [10]	26
2.18	ลักษณะการกลึง [33]	26
2.19	แสดงปัจจัยสำคัญที่ใช้ในงานกลึงปอก [33]	27
2.20	แสดงรหัสแผ่นมีด [33]	28
2.21	แสดงรหัสแผ่นมีด (ต่อ) [33]	30
2.22	ลักษณะหัวกัดและรอยกดของการทดสอบความแข็ง Vickers [33]	31
2.23	การหา (Ra) [18]	32
2.24	การหา (Ry) [18]	32
2.25	การหา (Rz) [18]	32

สารบัญภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.26 ภาพผลการวิเคราะห์ผงทั้งสแตนคาร์ไบด์ผสมกับผงโคบอลต์ด้วยวิธีการ Scanning Electron Microscope [7]	33
2.27 ภาพผลการวิเคราะห์โครงสร้างชิ้นงานหลังการอบผนึกด้วยวิธีการ Scanning Electron Microscope [14]	33
2.28 ผลการวิเคราะห์หึ่งค์ประกอบธาตุผงทั้งสแตนคาร์ไบด์ X-ray diffractometer [19]	34
2.29 ผลการวิเคราะห์ความแข็งและแสดงรอยกดบนผลิตภัณฑ์ทั้งสแตนคาร์ไบด์ [19]	34
3.1 แผนผังการดำเนินโครงการ	35
3.2 แสดงความสัมพันธ์ของรูปทรงแผ่นมีดและ Strength [11]	37
3.3 กราฟการลดลงของขนาดผงทั้งสแตนคาร์ไบด์เมื่อเทียบกับระยะเวลาในการบด [33]	39
3.4 กราฟแสดงความหนาแน่นต่อแรงกดอัดของผงทั้งสแตนคาร์ไบด์ [35]	40
3.5 ชั่งน้ำหนักผงทั้งสแตนคาร์ไบด์ความละเอียด 1/10,000 กรัม	43
3.6 ล้างผงทั้งสแตนคาร์ไบด์ด้วยน้ำกลั่น	43
3.7 ล้างผงทั้งสแตนคาร์ไบด์ด้วยเอทานอล	44
3.8 ลูกบอลบดทั้งสแตน (Ball Mill)	44
3.9 แสดงการบรรจุลูกบอลและผงโลหะในหม้อบด	45
3.10 แสดงการวางหม้อบดในเครื่องบด	45
3.11 แสดงการเตรียมผงทั้งสแตนคาร์ไบด์ระหว่างการบดละเอียด	46
3.12 แสดงการเผาผลาญความชื้น	46
3.13 แสดงการอบผงโลหะด้วยเตาสัญญากาศ	47
3.14 แสดงผงทั้งสแตนคาร์ไบด์หลังการอบในเตาสัญญากาศ	47
3.15 แสดงเครื่อง SEM (Scanning Electron Microscope)	48
3.16 แสดงเครื่องวิเคราะห์หึ่งค์ประกอบธาตุ XRD (X-ray Diffractometer)	48
3.17 แสดงเครื่องวิเคราะห์การกระจายตัวและขนาดอนุภาค (Particle Size Diffraction)	49
3.18 ผงโคบอลต์ [7]	49
3.19 ผสมผงโคบอลต์กับทั้งสแตนคาร์ไบด์ลงในหม้อบด	49
3.20 การผสมผงโคบอลต์กับผงทั้งสแตนคาร์ไบด์ด้วยวิธี Ball Milling	50
3.21 วัสดุประสานเพื่อการอัดขึ้นรูป (Paraffin Wax)	50
3.22 เทวัสดุประสานเพื่อการอัดขึ้นรูป (Paraffin Wax) ลงหม้อบด	51
3.23 ผงทั้งสแตนคาร์ไบด์หลังการผสมผงโคบอลต์กับวัสดุประสานเพื่อการอัดขึ้นรูป	51
3.24 แสดงเครื่องอัดขึ้นรูปอัตโนมัติ	52
3.25 แสดงแม่พิมพ์แผ่นมีดทรง S (Square)	52
3.26 แสดงการอัดขึ้นรูป (Pressure)	53
3.27 แสดงชิ้นงานที่ผ่านการอัดขึ้นรูป (Green Compact)	53
3.28 เครื่องอบผนึก	53

สารบัญภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า	
3.29	กราฟแสดงขั้นตอนการอบผนึก (Sintering) [12]	54
3.30	แผ่นมีดซีเมนต์ทั้งสแตนคาร์ไบด์หลังการอบผนึก [13]	54
3.31	รอยกัดด้วยหัวเพชรทรงปิรามิด [14]	55
3.32	เครื่องกลึง CNC รุ่น MORI SEIKI SL-25	55
3.33	เหล็กกล้าคาร์บอนปานกลาง S45C	56
3.34	แสดงกลึงปอกเหล็กกล้าคาร์บอนปานกลางของแผ่นมีดกลึงที่พัฒนาขึ้นมาใหม่	56
3.35	ชิ้นงานหลังการกลึง	57
3.36	ทำการทดสอบความเรียบผิวชิ้นงาน	57
4.1	แสดงการตรวจสอบอนุภาคของทั้งสแตนคาร์ไบด์ที่ผ่านการบดละเอียด 100 ชั่วโมง	60
4.2	ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุผงทั้งสแตนคาร์ไบด์หลังการบดละเอียด 100 ชั่วโมง	61
4.3	กราฟแสดงขนาดอนุภาคผงทั้งสแตนคาร์ไบด์หลังการบดด้วยวิธี Ball Milling เป็นเวลา 100 ชั่วโมง	62
4.4	แสดงตัวอย่างโครงสร้างจุลภาคขอบแผ่นมีด (Insert tool) ทั้งสแตนคาร์ไบด์	63
4.5	กราฟเปรียบเทียบความแข็งของแผ่นมีดซีเมนต์ทั้งสแตนคาร์ไบด์	64
4.6	ลักษณะคมตัดหลังการทดสอบที่ระยะทาง 840 มิลลิเมตร ของแผ่นมีดซีเมนต์ทั้งสแตนคาร์ไบด์ที่ผลิตจากผงนำเข้า มีทั้งสแตนคาร์ไบด์ 95 % โคบอลต์ 5 %	65
4.7	ลักษณะคมตัดหลังการทดสอบที่ระยะทาง 240 มิลลิเมตร ของแผ่นมีดซีเมนต์ทั้งสแตนคาร์ไบด์ที่ผลิตจากผงนำเข้า มีทั้งสแตนคาร์ไบด์ 90 % โคบอลต์ 10 %	66
4.8	ลักษณะคมตัดหลังการทดสอบที่ระยะทาง 1,440 มิลลิเมตร ของแผ่นมีดซีเมนต์ทั้งสแตนคาร์ไบด์ที่ผลิตจากผงนำเข้า มีทั้งสแตนคาร์ไบด์ 85 % โคบอลต์ 15 %	67
4.9	ลักษณะคมตัดหลังการทดสอบที่ระยะทาง 840 มิลลิเมตร ของแผ่นมีดซีเมนต์ทั้งสแตนคาร์ไบด์ที่ผลิตจากผงโลหะจากห้องปฏิบัติการวิจัยโลหะทั้งสแตนคาร์ไบด์ มีทั้งสแตนคาร์ไบด์ 95 % โคบอลต์ 5 %	68
4.10	ลักษณะคมตัดหลังการทดสอบที่ระยะทาง 720 มิลลิเมตร ของแผ่นมีดซีเมนต์ทั้งสแตนคาร์ไบด์ที่ผลิตจากผงโลหะจากห้องปฏิบัติการวิจัยโลหะทั้งสแตนคาร์ไบด์ มีทั้งสแตนคาร์ไบด์ 90 % โคบอลต์ 10 %	69
4.11	ลักษณะคมตัดหลังการทดสอบที่ระยะทาง 4,200 มิลลิเมตร ของแผ่นมีดซีเมนต์ทั้งสแตนคาร์ไบด์ที่ผลิตจากผงโลหะจากห้องปฏิบัติการวิจัยโลหะทั้งสแตนคาร์ไบด์ มีทั้งสแตนคาร์ไบด์ 85 % โคบอลต์ 15 %	70
4.12	กราฟแสดงความเรียบผิวชิ้นงาน	71
ก.1	เอทานอลบริสุทธิ์	81
ก.2	น้ำกลั่น	81
ก.3	บีกเกอร์ 600 มิลลิลิตร	82
ก.4	ตะแกรงหยาบ	82

สารบัญภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
ก.5 ตะแกรงโลหะ	83
ก.6 ลูกบดขนาด 3 มิลลิเมตร	83
ก.7 หม้ออบ	84
ก.8 ด้ามมีดกลึงคาร์ไบด์	84
ก.9 เครื่องซังน้ำหนักแบบดิจิตอล HR200 Max 120 กรัม	85
ก.10 เตาไฟฟ้า Hot Plate Stirrer รุ่น H5-115	85
ก.11 เครื่องสูญญากาศ รุ่น ND 300	86
ก.12 เครื่องบดผสม Ball Milling รุ่น Puluersette 6	86
ก.13 เครื่องไดรฟ์ลม รุ่น PHILIP 1200 w.	87
ก.14 เครื่องทดสอบความเรียบผิว	87
ก.15 เครื่องทดสอบความหนาพิเศษ	88
ก.16 เครื่องกลึงอัตโนมัติ รุ่น MORI SEIKI SL-25	88
ก.17 เครื่องอบผงรุ่น Linn High	89
ก.18 เครื่องอัดขึ้นรูปแบบไฮดรอลิกส์ Max 10 ton.	89
ข.1 ชิ้นงานหลังการกลึงของแผ่นมีดที่ผลิตจากผงนำเข้า 5 % โคบอลต์	91
ข.2 ผิวชิ้นงานหลังการกลึงของแผ่นมีดที่ผลิตจากผงนำเข้า 5 % โคบอลต์	91
ข.3 ชิ้นงานหลังการกลึงของแผ่นมีดที่ผลิตจากผงนำเข้า 10 % โคบอลต์	92
ข.4 ผิวชิ้นงานหลังการกลึงของแผ่นมีดที่ผลิตจากผงนำเข้า 10 % โคบอลต์	92
ข.5 ชิ้นงานหลังการกลึงของแผ่นมีดที่ผลิตจากผงนำเข้า 15 % โคบอลต์	93
ข.6 ผิวชิ้นงานหลังการกลึงของแผ่นมีดที่ผลิตจากผงนำเข้า 15 % โคบอลต์	93
ข.7 ชิ้นงานหลังการกลึงของแผ่นมีดที่ผลิตจากผงโลหะห้องปฏิบัติการ 5 % โคบอลต์	94
ข.8 ผิวชิ้นงานหลังการกลึงของแผ่นมีดที่ผลิตจากผงโลหะห้องปฏิบัติการ 5 % โคบอลต์	94
ข.9 ชิ้นงานหลังการกลึงของแผ่นมีดที่ผลิตจากผงโลหะห้องปฏิบัติการ 10 % โคบอลต์	95
ข.10 ผิวชิ้นงานหลังการกลึงของแผ่นมีดที่ผลิตจากผงโลหะห้องปฏิบัติการ 10 % โคบอลต์	95
ข.11 ชิ้นงานหลังการกลึงของแผ่นมีดที่ผลิตจากผงโลหะห้องปฏิบัติการ 15 % โคบอลต์	96
ข.12 ผิวชิ้นงานหลังการกลึงของแผ่นมีดที่ผลิตจากผงโลหะห้องปฏิบัติการ 15 % โคบอลต์	96

บทที่ 1

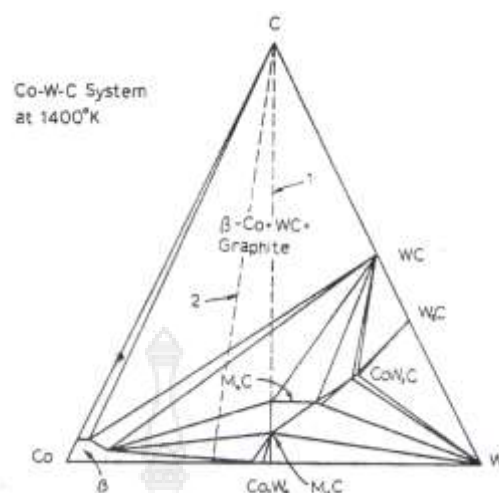
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย

จำนวนทังสเทน (W) ที่ใช้ในอุตสาหกรรมในทุก ๆ ทวีปทั่วโลก มีจำนวนมากถึง 450,000 ตัน ในปี ค.ศ.1995 และเพิ่มขึ้นเป็น 860,000 ตัน ในปี ค.ศ.2011

ส่วนใหญ่พัฒนาเป็นทังสเทนคาร์ไบด์ (Tungsten carbides : WC) โดยเฉพาะประเทศผู้นำทางอุตสาหกรรม อาทิ ประเทศสหรัฐอเมริกา (U.S.A.) ซึ่งเป็นผู้นำทั้งด้านอุตสาหกรรมและเทคโนโลยี ได้แก่ เทคโนโลยีเกี่ยวกับการทหาร เทคโนโลยีสมัยใหม่และเทคโนโลยีเฉพาะทาง เป็นต้น ซึ่งต้องใช้ทังสเทนจำนวนมากขึ้นตลอดมาจนถึงปัจจุบัน ผลการศึกษาพบว่าสหรัฐอเมริกามีการจัดตั้งหน่วยงานเพื่อรับผิดชอบในการจัดหาคลังไว้และการนำไปพัฒนาเทคโนโลยีต่าง ๆ หน่วยงานที่ดำเนินการนี้เรียกว่า Defense National Stockpile Center (DNSC) ซึ่งอยู่ภายใต้การควบคุมของ 2 กระทรวงหลัก คือ กระทรวงกลาโหมและกระทรวงพาณิชย์ [1] มีการสะสมทังสเทนจำนวน 38,500 ตัน ในปี ค.ศ.1995 และเพิ่มขึ้นเป็น 79,500 ตัน ในปี ค.ศ.2011 โลหะทังสเทนคาร์ไบด์เพื่อใช้ในอุตสาหกรรมการผลิต อาทิ เครื่องมือตัดเฉือนโลหะ (Metal removal technology) ขึ้นส่วนทนการสึกหรอและความแข็งสูง [2] มีสมบัติพิเศษในด้านความแข็งสูง (High hardness) ความหนาแน่น 19 g/cm^3 จุดหลอมที่ $2,880 \text{ }^\circ\text{C}$ คงสมบัติเดิมได้ดีจากการนำกลับมาผลิตใหม่หรือการรีไซเคิล (Recycling) [3] พบว่าอุตสาหกรรมการผลิตโลหะทังสเทนคาร์ไบด์สำหรับผู้นำทางอุตสาหกรรมมีแนวโน้มสูงขึ้นต่อเนื่อง [4] คาดว่าในปี ค.ศ.2010 - 2020 การผลิตด้วยการรีไซเคิลจะเพิ่มขึ้นมากกว่าร้อยละ 54 และประเทศสหรัฐอเมริกาผลิตมากที่สุดถึงร้อยละ 90 [3]

สมบัติทางกล (Mechanical properties) ของซีเมนต์ทังสเทนคาร์ไบด์ ขึ้นกับขนาดผง (Grain size) และอัตราส่วนผสมของโคบอลต์ (Cobalt binder) ซึ่งเป็นวัสดุประสาน อาทิ ขึ้นงานโลหะแข็งที่ส่วนผสมของ WC-6 wt % Co ขนาดผงทังสเทนคาร์ไบด์ (WC Powder) $6 \mu\text{m}$ ให้ความแข็งสูงถึง 1,170 HV ขณะที่ผงทังสเทนคาร์ไบด์ขนาด $1.7 \mu\text{m}$ ให้ความแข็งที่ 1,600 HV (92.7 HRA)



รูปที่ 1.1 โครงสร้างโลหะผสม ทั้งสแตน โคบอลต์และคาร์บอน [21]

หากขนาดลดลงมาที่ 0.2 μm ความแข็งเพิ่มขึ้นเป็น 2,300 HV การแยกสลาย (Dissolution) สารประกอบ (Co) จากเศษซีเมนต์ทั้งสแตนคาร์ไบด์ที่ส่วนผสมโคบอลต์ 6 % , 14 % , 20 % และ 22 % ที่ขนาดเกรน 2 μm , 3.5 μm และ 4.5 μm ตามลำดับ ปรากฏว่าสารละลายกรดซิตริก (Citric acid) ผสมในสารละลายไฮโดรคลอริก (Hydrochloric acid : HCl) ให้กระแสไฟฟ้าได้สูงถึง 2,000 - 3,000 มิลลิแอมป์ (mA) จากการจ่ายแรงดันไฟฟ้าที่เหมาะสมในช่วง 0.200 - 0.600 โวลต์ อุณหภูมิของสารละลายอยู่ที่ 25 $^{\circ}\text{C}$ โดยใช้เวลานาน 24 ชั่วโมง ปรากฏว่าได้รับสารละลายโคบอลต์ อยู่ในช่วง 16 - 18 g dm^{-3} [4] การทดลองโดยใช้อุณหภูมิและออกซิเจน มีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อการเพิ่มอัตราการแยกสลาย ความสามารถในการสลายสารประกอบโคบอลต์ในสารละลาย ขึ้นกับ ส่วนประกอบและขนาดเกรน (Grain size) การใช้กรดอะซิติก (acetic acid) ที่อุณหภูมิ 80 $^{\circ}\text{C}$ ที่เวลานานกว่า 50 - 300 ชั่วโมง ส่งผลให้ความหนาผิวชิ้นงานเกิดการละลายลดลงประมาณ 65 - 299 μm ทั้งนี้ ขึ้นกับชนิดของเศษวัสดุที่มีสารประกอบโคบอลต์ต่างกัน

เศษวัสดุที่มีในอุตสาหกรรม ได้แก่ ส่วน (Circuit board drill) 7.9 % แผ่นมีดตัด (Cutting insert) 8 - 11 % และ 14.6 % ชิ้นงานทนการสึกหรอ (Wear part) 10 % และ 13 % มีดตัด (Cutting knife) 10 - 12 % ขนาดเกรนในช่วง 0.5 - 9.5 μm [22] จากการแยกสลายชิ้นงานซีเมนต์ทั้งสแตนคาร์ไบด์ขนาดเกรนทั้งสแตนคาร์ไบด์ 1 - 5 μm ส่วนผสมโคบอลต์ 20 % อบผนึกที่อุณหภูมิ 1,380 $^{\circ}\text{C}$ ชิ้นงานมีความแข็ง 83.1 HRA เพื่อแยกสารประกอบโคบอลต์ด้วยสารละลายไฮโดรคลอริก (HCl) ให้อัตราการแยกสารประกอบเพิ่มขึ้นโดยเพิ่มอุณหภูมิสารละลายสูงขึ้นถึง 110 $^{\circ}\text{C}$ และการบดย่อย (Re-sintered) ปรากฏว่าสามารถสกัดโคบอลต์ออกได้โดยใช้เวลานานถึง 24 ชั่วโมง [22] จากการละลายสารประกอบโคบอลต์ด้วยการใช้ตระกล้าไททาเนียม (Titanium) ขั้วบวกบรรจุชิ้นงานและคงอุณหภูมิที่ 25 $^{\circ}\text{C}$ แรงเคลื่อนไฟฟ้าอยู่ระหว่าง 200 - 600 มิลลิโวลต์ (mV) ในสารละลายไฮโคร

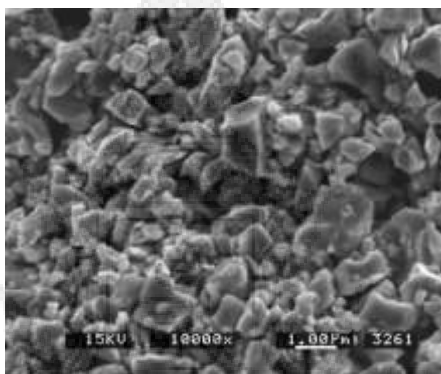
คลอริกผสมกรดซิงค์ประมาณ 40 กรัม/ลิตร ปรากฏว่า โคบอลต์ละลาย (Dissolved) ได้ในช่วงร้อยละ 20.5 - 80.7 [23] และการนำเศษซีเมนต์ทั้งสแตนคาร์ไบด์กลับมาใช้ใหม่ด้วยกระบวนการหลอมในสังกะสี (Zinc process) ใช้อุณหภูมิสูงกว่า 1,000 °C ซึ่งเป็นกระบวนการหนึ่ง นำเศษโลหะกลับมาใช้ใหม่แต่ต้นทุนสูง [24] ในขณะที่การแยกสลายชิ้นงานซีเมนต์ทั้งสแตนคาร์ไบด์ที่เป็นเครื่องมือตัดและแท่งชิ้นงานซึ่งมีขนาดใหญ่ (Larger the piece) การทดลองจ่ายแรงดันไฟฟ้าในช่วง 0.5 – 20 โวลต์ กระแสไฟฟ้าในช่วง 0.5 - 30 แอมแปร์ ในสารละลายแอมโมเนียม (Ammonium solution) และใช้วัสดุแท่งทั้งสแตนเป็นขั้วลบ (Cathode) ปรากฏว่าวัสดุที่ได้มีความบริสุทธิ์ถึง 99 % [25]

ปัจจุบันชิ้นส่วนความแข็งสูงพิเศษ โดยเฉพาะเครื่องมือตัด (Cutting tools) ซีเมนต์ทั้งสแตนคาร์ไบด์ที่ใช้งานในอุตสาหกรรมมีเงื่อนไขและตัวแปร (Parameters) ในการผลิตของแต่ละรายมีความแตกต่างกัน อาทิ อุณหภูมิ เวลา แรงดัน เป็นต้น ซึ่งเป็นองค์ประกอบสำคัญต่อคุณภาพด้านความแข็ง (Hardness) หากความแข็งสูง มูลค่าของชิ้นงานก็สูงขึ้น [25] รายงานวิจัยพบว่า ขนาดเกรนเล็กเป็นปัจจัยทำให้ชิ้นงานมีความแข็งสูงขึ้น [3] และพบว่าเศษชิ้นงานเครื่องมือตัดที่ใช้งานในอุตสาหกรรม หลังจากทดสอบความแข็งแล้ว พบว่ามีค่าความแข็งมีแนวโน้มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่องและเศษซีเมนต์คาร์ไบด์ในประเทศไทย มีปริมาณเพิ่มกว่า 250 ตัน ในปี พ.ศ.2556

จากรายงาน USGS Science for a changing world Report เกี่ยวกับการนำชิ้นงานซีเมนต์ทั้งสแตนคาร์ไบด์กลับมาใช้ใหม่ของประเทศสหรัฐอเมริกา โดย Kim B.Shedd เรื่อง Tungsten Recycling in the United States in 2000 ผลการวิจัยนี้ได้ถูกเปิดเผยเมื่อ ปี พ.ศ.2548 พบว่าประเทศดังกล่าวมีการใช้ทั้งสแตนมีแนวโน้มมากขึ้นและสัดส่วนการใช้งานสูงกว่าวัสดุอื่น ในกลุ่มวัสดุที่นำกลับมาใช้ใหม่ จากรายงานสรุปว่า สัดส่วนการใช้วัสดุทั้งสแตนที่เรียกว่า New scrap ต่อ Old scrap ในอัตราส่วน 20 : 80 และเมื่อพิจารณาสัดส่วนการนำวัสดุเก่าใช้งานแล้วกลับมาใช้ใหม่ปรากฏว่าเป็นวัสดุชนิดทั้งสแตน มากกว่าชนิดอื่นร้อยละ 66 ของวัสดุนำกลับมาใช้ใหม่ทั้งหมด ในปี ค.ศ. 2000 สหรัฐอเมริกามีทั้งสแตนที่เป็น New scrap สูงถึง 10,400 ตัน ส่วนใหญ่ผลิตเป็นโลหะผงและผลิตชิ้นงานความแข็งสูง (Hard metal) ในปี ค.ศ.2000 สหรัฐอเมริกานำเข้า Tungsten ,Waste and Scrap สูงถึง 993 ตัน มูลค่าประมาณ 248,000,000 ล้านบาท โดยนำเข้าจากประเทศจีน ร้อยละ 25 เกาหลีใต้และรัสเซียร้อยละ 15 เยอรมันร้อยละ 8 ญี่ปุ่น อเมริกาใต้และอุซเบกิสถาน ร้อยละ 6 และประเทศอื่น ๆ กว่า 14 ประเทศ

จากรายงานของ International Tungsten Industry Association ทั้งสแตนจะมีสมบัติในด้านต่าง ๆ ได้แก่ Atomic weight 183.85 g/g atom ความหนาแน่น (Density) 19.25 g/cm³ จุดหลอม (Melting) 3387 - 3,422 °C จากรายงานพบว่า การนำวัสดุในอุตสาหกรรมกลับมาใช้ใหม่ (Recycling) ทั่วโลก มีทั้งสแตนมากกว่าร้อยละ 30 และหากนับรวมการนำทั้งสแตนและเหล็กกล้ารอบสูงกลับมาใช้ใหม่ผสมกับวัสดุอื่น ๆ แล้วมีสัดส่วนการใช้สูงถึงร้อยละ 60 - 70 และในส่วนของทั้งสแตนคาร์ไบด์ (WC) ผลิตเป็นผง (Powder) โดยมีคาร์บอนบริสุทธิ์ (Pure carbon Powder) ในสัดส่วนที่เหมาะสมสามารถทำการผลิตด้วยอุณหภูมิในช่วง 900 - 2,000 °C

ผลการศึกษาดังกล่าวผลิตภัณฑ์ที่จำหน่ายทั่วโลก ชิ้นงานที่ผลิตด้วยผงทังสเตนคาร์ไบด์ วัสดุที่นิยมทำเป็นตัวประสาน (Binder) เพื่อเพิ่มสมบัติเหมาะสมกับการใช้งาน ได้แก่ โคบอลต์ (Co) ร้อยละ 2.00 - 20.00 และธาตุอื่น ๆ เช่น Ti+Ta+Nb ชิ้นงานจะมีความแข็ง 2,000 - 2,500 HV ความหนาแน่น 16 - 17 g/cm³ ขนาดเกรน (Particle size:mesh) ขึ้นกับขนาดผงโลหะ สามารถประยุกต์ใช้งานได้หลายแบบ ได้แก่ ผลิตเป็นชิ้นส่วนสำหรับอุปกรณ์ ชิ้นส่วนเครื่องมือในงานด้านทานการสึกหรอสูง (Abrasion machine part) ชิ้นส่วนเครื่องจักรกลหนัก อุปกรณ์ขุดเจาะ (Excavator) ชิ้นส่วนเครื่องจักรกลส่งกำลังสูง เช่น เฟือง ลูกกรีด ชิ้นส่วนในเครื่องใช้และเครื่องประดับที่ต้องการอายุการใช้งานยาวนานมากขึ้น ได้แก่ ชิ้นส่วนนาฬิกา ทนทานต่อการกัดกร่อน และผลิตเครื่องมือตัด (Cutting tools) และการเลือกวัสดุผสมขึ้นกับความต้องการด้านใช้งาน โดยเฉพาะโคบอลต์นิยมนำมาเป็นวัสดุประสานส่วนผสมอยู่ในช่วง ร้อยละ 3 - 25 เป็นต้น



รูปที่ 1.2 การวิเคราะห์โลหะผงทังสเตนคาร์ไบด์ด้วย SEM [15]



รูปที่ 1.3 ตัวอย่างผลิตภัณฑ์เครื่องมือตัดทังสเตนคาร์ไบด์ [19]

ซีเมนต์คาร์ไบด์ที่ใช้ในอุตสาหกรรม พบว่าผลิตเป็นเครื่องมือตัดที่สัดส่วน ร้อยละ 59 ผลิตชิ้นส่วนทนการสึกหรอ ร้อยละ 16 ผลิตเครื่องมือในอุตสาหกรรมเหมืองแร่และงานขุดเจาะน้ำมัน

ร้อยละ 15 และผลิตเครื่องมืองานไม้และพลาสติก ร้อยละ 11

ดังนั้น การวิจัยนี้จึงทำการศึกษาเพื่อพัฒนาผลิตภัณฑ์เครื่องมือตัดปาดผิวโลหะโดยใช้วัตถุดิบ ทั้งสแตนคาร์ไบด์นาโนเมตรที่ผลิตภายในประเทศ ซึ่งเป็นการต่อยอดการวิจัยโลหะผงทั้งสแตนคาร์ไบด์ โดยการปรับปรุงทั้งสแตนคาร์ไบด์เป็นผงโลหะที่มีขนาดเล็กลง เพื่อผลิตเครื่องมือตัดที่มีคุณสมบัติด้าน ความแข็งแรงและการต้านทานต่อการสึกหรอ ผลการวิจัยจะเป็นข้อมูลพื้นฐานสำหรับพัฒนาผลิตภัณฑ์ เครื่องมือตัดปาดผิวในอุตสาหกรรมการตัดเฉือนโลหะ หากงานวิจัยประสบผลสำเร็จ จะเป็นการ พัฒนาทั้งวัตถุดิบขนาดระดับนาโนเมตรและเป็นแนวทางในการสร้างมูลค่าเพิ่มของวัสดุดังกล่าว การ ผลิตชิ้นส่วนความแข็งแรงสูงประเภทเครื่องมือตัดปาดผิว เพื่อใช้งานในอุตสาหกรรมการผลิตชิ้นส่วนและ ผลิตแม่พิมพ์ จะเป็นการต่อยอดงานวิจัยด้วยการประยุกต์ใช้วัตถุดิบที่ผลิตในประเทศให้เกิดประโยชน์ มากขึ้น

งานวิจัยจึงทำการพัฒนาผลิตภัณฑ์เครื่องมือตัดสำหรับปาดผิวโลหะและเป็นการพัฒนาวัสดุ เพื่อเป็นแนวทางลดการนำเข้าทั้งโลหะผงทั้งสแตนคาร์ไบด์และเครื่องมือตัดปาดผิว ซึ่งพบว่ามูลค่า นำเข้าโลหะทั้งสแตนคาร์ไบด์มีต้นทุนสูงขึ้นและเป็นการนำเข้า 100 % ตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน

1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 เพื่อศึกษาและพัฒนาผลิตภัณฑ์เครื่องมือตัดปาดผิวโลหะนาโนเมตรจากโลหะผง ทั้งสแตนคาร์ไบด์ที่ผลิตภายในประเทศ

1.2.2 เพื่อศึกษาสมบัติของผลิตภัณฑ์เครื่องมือตัดนาโนเมตรสำหรับการใช้งานใน อุตสาหกรรม

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1.3.1 พัฒนาผลิตภัณฑ์ทั้งสแตนคาร์ไบด์ (Tungsten Carbides tools) ขนาดนาโนเมตร จากวัตถุดิบที่ผลิตในประเทศ ผสมโคบอลต์ ให้สามารถผลิต ผลิตภัณฑ์เครื่องมือตัดทั้งสแตนคาร์ไบด์ นาโนเมตรสำหรับการตัดปาดผิวเหล็กกล้าชิ้นส่วนเครื่องจักรกล

- 1.3.2 ใช้วัตถุดิบทั้งสแตนคาร์ไบด์จากการผลิตด้วยกระบวนการที่พัฒนาขึ้นใหม่ในประเทศ
- กำหนดขนาดผงโลหะอยู่ในช่วงไม่มากกว่า 1,000 nm
 - วัสดุเป็นโลหะผงทั้งสแตนคาร์ไบด์ที่มีความบริสุทธิ์ไม่น้อยกว่า 99 %
 - ขนาดและการกระจายของผงโลหะให้การกระจายโลหะผงแบบโค้งปกติ

1.3.3 ชิ้นส่วนโลหะความแข็งแรงสูงผสมโลหะประสานโคบอลต์ในช่วงไม่มากกว่า 10 %

1.3.4 พัฒนาโลหะผงมาตรฐานโดยการวิเคราะห์วัสดุด้วยเทคโนโลยี SEM , XRD , EDS

1.3.5 การเตรียมโลหะผงก่อนการอบผนึกด้วยวิธีการบด Pulverized โดยใช้ Tungsten carbide Ball mills กับเครื่องบดโลหะผง (Mechanical alloying) และการกำหนดการกระจายของ

โลหะผง (Particle sized Distribution) ไม่มากกว่า 1,000 nm

1.3.6 การเตรียมโลหะผงตามกำหนดด้วยการบดที่ความเร็วรอบ ระหว่าง 300 - 500 rpm ขนาดลูกบด ระหว่าง 5 - 10 mm เวลาในการบด การผสมวัสดุประสาน (wax) เป็นต้น

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

1.3.8 การอบพูนิก (Sintering) ที่อุณหภูมิไม่น้อยกว่า 1,400 °C โดยให้ความหนาแน่นไม่ต่ำกว่า 14.00 g/cm²

1.3.9 ศึกษาสมบัติทางกลและทดสอบการใช้งาน อาทิ การสึกหรอ การกลึงปอก ผิวจีนงานเหล็กกล้าที่มีสมบัติเทียบเท่า AISI 1045

1.3.10 วิเคราะห์ผลการทดลองและกำหนดคุณลักษณะของชิ้นส่วนโลหะความแข็งสูง ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์พื้นฐาน

โดยมีการดำเนินการทดลอง การวัดผล การศึกษาคุณภาพผลิตภัณฑ์ โดยการทดลองใช้งานหาประสิทธิภาพในการใช้งาน เทียบกับมาตรฐานและสินค้าที่นำเข้ามาในด้านต่าง ๆ ประกอบด้วย

1) ตรวจสอบขนาดและการกระจายของโลหะผง (Particle sized distribution) ให้ผงโลหะมีขนาดอยู่ในช่วงที่เหมาะสม

2) ทดสอบคุณลักษณะของโลหะผงทั้งสแตนคาร์ไบด์ การผสมโลหะประสานโคบอลต์ ด้วย วิธี XRF, XRD, EDS และ SEM

3) การอัดขึ้นรูปแบบ CIP (Cold isostatic press) ศึกษาความหนาแน่น (Green density) ขนาดและรูปร่างเรขาคณิต (Dimension and Geometry)

4) การทดลองผลิตเครื่องมือตัดด้วยวิธีการอบพูนิก (Re- Sintering)

5) ศึกษาสมบัติทางกล ได้แก่ ความแข็ง (Hardness)

6) ศึกษาโครงสร้างจุลภาคของผลิตภัณฑ์

7) ศึกษาเปรียบเทียบการตัดปาดผิวด้วยการกลึง (Metal removal) เกี่ยวกับอายุการใช้งาน (Tools life) การสึกหรอที่คมตัด (Tools wear) และตรวจสอบความเรียบผิวงาน (Surface roughness)

หลังจากการอบพูนิกและเจียรระโนผิวสำเร็จแล้ว จากนั้นทดสอบการใช้งานด้วยการกลึงชิ้นงานเป็นเหล็กกล้าภายใต้ปัจจัยการตัดปาดผิว อาทิ ความเร็วตัด (Cutting speed) ความลึก (Depth of cut) อัตราป้อน (Feed rate)

1.4 สมมุติฐานและกรอบแนวความคิดของโครงการวิจัย

1.4.1 เตรียมโลหะผงทั้งสแตนคาร์ไบด์ (WC) ซึ่งเป็นวัสดุหลัก (Substrate) และโลหะประสานโคบอลต์ (Cobalt) ด้วยการใช้วิธี Ball milling

1.4.2 เตรียมโลหะผงให้มีขนาด (particle sized of WC) ตามมาตรฐานการผลิตชิ้นงานซีเมนต์คาร์ไบด์ ด้วยการบดให้ได้ขนาดผงในช่วง ไม่มากกว่า 5 μm รวมถึงการผสม (mixing) โลหะประสานโคบอลต์ (Cobalt)

1.5 วิธีดำเนินการวิจัย

1.5.1 การเตรียมงานและการวิจัย

1) ห้องปฏิบัติการผลิตทั้งสแตนคาร์ไบด์ ผลิตโลหะผงทั้งสแตนคาร์ไบด์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

2) กำหนดขนาดโลหะผงไม่เกิน 1,000 nm และลดขนาดของ WC particle ด้วยการบด (Ball mill) เป็นเวลาไม่น้อยกว่า 50 ชั่วโมง

3) คัดกรองและแยกขนาดโลหะผง

4) คัดเลือกผงโลหะทั้งสแตนคาร์ไบด์ที่มีขนาดและคุณลักษณะที่เหมาะสมเพื่อนำไปผลิตเป็นชิ้นส่วนความแข็งสูงพิเศษ (Hard metals)

5) ผสมโลหะประสานโคบอลต์ตามสัดส่วนที่กำหนดและตรงตามมาตรฐานในช่วง 1 - 10 %

6) ผสมวัสดุยึดติดชนิด Paraffin Wax ตามสัดส่วนมาตรฐานที่กำหนดไม่เกิน 3 %

7) ผลิตเป็นผลิตภัณฑ์เครื่องมือตัดด้วยการอัดขึ้นรูป

8) ตรวจสอบขนาด ความหนาแน่น (Green density) และอื่น ๆ

9) อบพูนที่อุณหภูมิ ในช่วง 1400 – 1500 °C

10) ตรวจสอบขนาด รูปทรงเรขาคณิต ความหนาแน่นของชิ้นส่วนความแข็งสูงที่พัฒนาขึ้น

11) การเจียรระไนผิวสำเร็จและตรวจสอบขั้นตอนสุดท้ายในการผลิต

12) การทดสอบสมบัติทางกลและทดสอบการใช้งาน

13) การเปรียบเทียบและสมบัติเบื้องต้นของผลิตภัณฑ์เครื่องมือตัดทั้งสแตนคาร์ไบด์

14) การรายงานผลและเผยแพร่ผลงานวิจัยทั้งในและต่างประเทศ

1.5.2 กระบวนการและเวลาดำเนินการ

1) เตรียมผงโลหะด้วยห้องปฏิบัติการผลิตโลหะผง	<u>ใช้เวลาประมาณ 15 วัน</u>
1.1 ผลิตผงโลหะทั้งสแตนคาร์ไบด์	10 วัน
1.2 การคัดกรองและทำให้บริสุทธิ์ขั้นต้น	2 วัน
1.3 การเตรียมวัสดุยึดเพื่อทำให้บริสุทธิ์	3 วัน
2) การเตรียมวัสดุยึดให้บริสุทธิ์มากกว่า 99 %	<u>ใช้เวลาประมาณ 15 วัน</u>
2.1 การอบแห้ง การทำให้สะอาด	5 วัน
2.2 การบดและแยกวัสดุผง	5 วัน

2.3 การกรองและกำหนดขนาด	5 วัน
3) การเตรียมผงโลหะให้ได้ขนาดที่ต้องการ	<u>ใช้เวลาประมาณ 15 วัน</u>
3.1 การแยกวัสดุ และการทำความสะอาด (Cleaning system)	5 วัน
3.2 การบด (Ball mill) และ Mechanical alloying	6 วัน
3.3 การคัดแยกตามขนาดที่กำหนด	4 วัน
4) การเตรียมวัตถุดิบก่อนอบพูนิก	<u>ใช้เวลาประมาณ 45 วัน</u>
4.1 กำหนดสัดส่วนผสมโลหะประสานโคบอลต์	15 วัน
4.2 การผสมโลหะผง	5 วัน
4.3 การขึ้นรูปผลิตภัณฑ์	15 วัน
4.4 ตรวจสอบผลิตภัณฑ์ก่อนอบพูนิก	10 วัน
5) การอบพูนิกผลิตภัณฑ์และขึ้นรูปผิวสำเร็จของผลิตภัณฑ์	<u>ใช้เวลาประมาณ 3 เดือน</u>
5.1 ทำอุปกรณ์จับยึด	10 วัน
5.2 อบพูนิก (Sintering)	30 วัน
5.3 ศึกษาและตรวจสอบความหนาแน่น	10 วัน
5.4 เจียรไนผิวสำเร็จ	10 วัน
5.5 วิเคราะห์สมบัติของผลิตภัณฑ์และปรับปรุง	30 วัน
6) ทดสอบสมบัติทางกลและการใช้งาน	<u>ใช้เวลาประมาณ 5 เดือน</u>
6.1 เตรียมเครื่องมืออุปกรณ์การทดลอง	10 วัน
6.2 เตรียมชิ้นงานเหล็กกล้าด้วยการกำหนดขนาด ปรับผิวสำเร็จ	10 วัน
6.3 ทดสอบการปาดผิวชิ้นงาน (การกลึง)	45 วัน
6.4 ทดสอบความแข็ง	10 วัน
6.5 ทดสอบโครงสร้างจุลภาค	15 วัน
6.6 ตรวจสอบการสึกหรอ	10 วัน
6.7 ตรวจสอบผิวงาน	10 วัน
6.8 ตรวจสอบกลไกการเกิดเศษกลึง	10 วัน
6.9 วิเคราะห์ผลการผลิตผลิตภัณฑ์และปรับปรุง	30 วัน
7) กำหนดมาตรฐานผลิตภัณฑ์เครื่องมือตัดทั้งสแตนคาร์ไบด์	<u>ใช้เวลาประมาณ 2 เดือน</u>
7.1 วิเคราะห์ผลการตรวจสอบ XRD, SEM, Particle sized Distribution	20 วัน
7.2 วิเคราะห์ความแข็งและโครงสร้างจุลภาค	10 วัน
7.3 วิเคราะห์การสึกหรอ กลไกการเกิดเศษตัดและผิวงาน	15 วัน
7.4 กำหนดคุณลักษณะและมาตรฐานเครื่องมือตัดทั้งสแตนคาร์ไบด์	15 วัน

8) สรุปผลการวิจัยและรายงาน

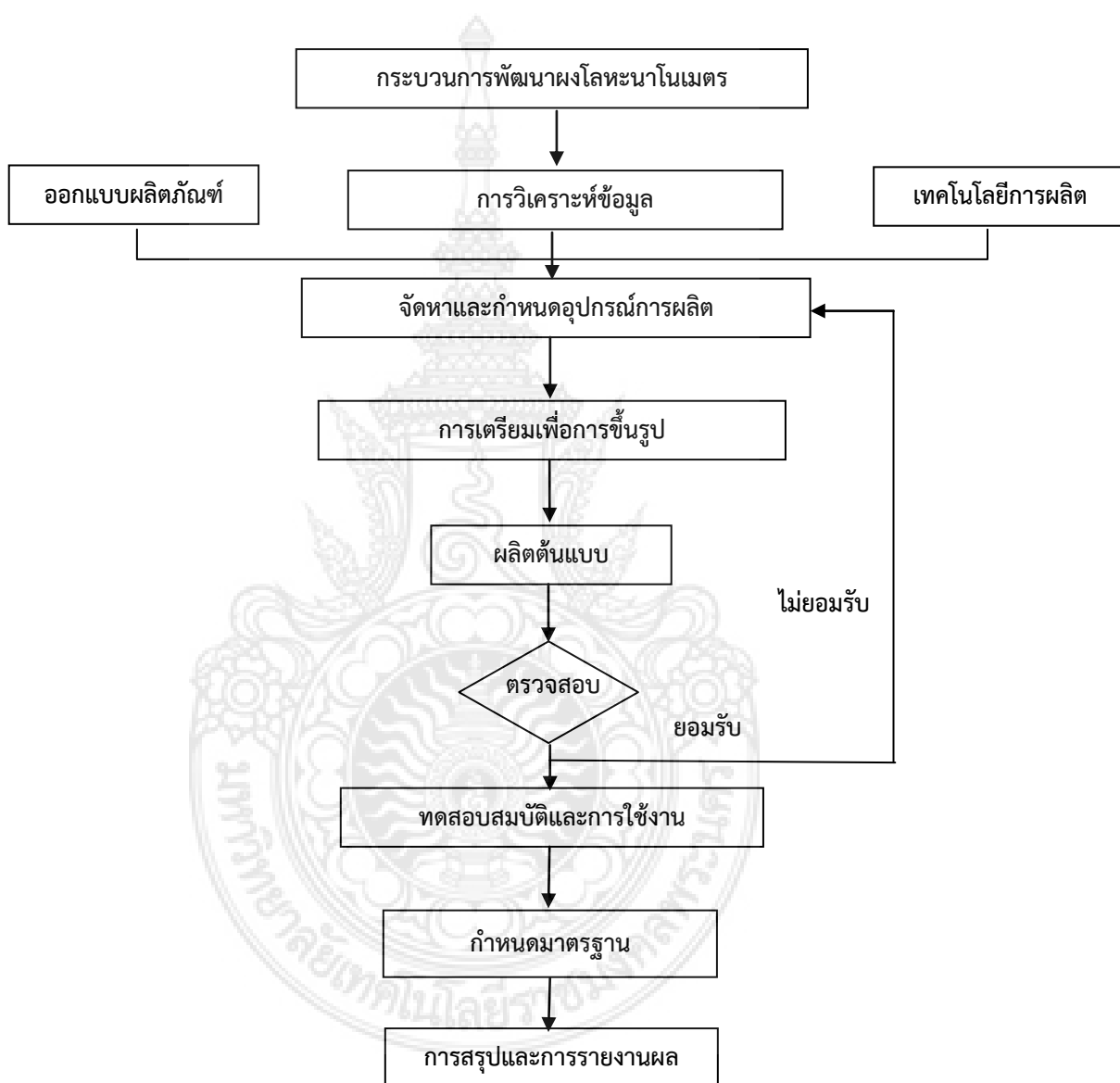
ใช้เวลาประมาณ 1 เดือน

8.1 สรุปผลการทดลอง

15 วัน

8.2 รายงานผลการวิจัย

15 วัน



รูปที่ 1.4 รูปแบบกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์เครื่องมือตัดทั้งสแตนคาร์ไบด์และการทดสอบผลิตภัณฑ์

(Methodologies of hard metals)

1.6 สถานที่ดำเนินการทดลองและเก็บข้อมูลโครงการวิจัย

1.6.1 สาขาวิชาวิศวกรรมการจัดการอุตสาหกรรมเพื่อความยั่งยืน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร เป็นหน่วยงานหลักในการดำเนินโครงการ ได้แก่ การผลิตโลหะผงทั้งสแตนคาร์ไบด์ การเตรียมวัสดุดิบ การผลิต การออกแบบ การทดสอบผลิตภัณฑ์และการพัฒนาผลิตภัณฑ์

1.6.2 ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น เพื่อทดสอบวัสดุนาโนเมตร

1.6.3 ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ เพื่อการทดสอบวัสดุผงโลหะทั้งสแตนคาร์ไบด์ที่พัฒนาขึ้น โดยการพ่นเคลือบ (Plasma spray) และการตรวจสอบสมบัติของผงโลหะที่พัฒนาขึ้นใหม่

1.6.4 สถาบันวิจัยโลหะวิทยาและวัสดุศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ซอยจุฬา 12 ถนนพญาไท กรุงเทพฯ 10330 ตรวจสอบสมบัติทางเคมีของผงโลหะ

1.6.5 ภาควิชาวิศวกรรมการผลิต สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ทดสอบด้วยเครื่องมือในการทดลอง ได้แก่ การอบให้ความร้อน และการทดสอบสมบัติทางกลของวัสดุ

1.6.6 ภาควิชาวิศวกรรมโลหการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา การวิเคราะห์โลหะ ได้แก่ Inductivity coupled plasma spectrometer , Mass spectrometer , Atomic absorption spectrometer

1.6.7 ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน จังหวัดนครราชสีมา เพื่อดำเนินการทดสอบสมบัติของวัสดุทางวิศวกรรม

1.7 ระยะเวลาการทำวิจัย

ตารางที่ 1.1 แผนดำเนินโครงการ

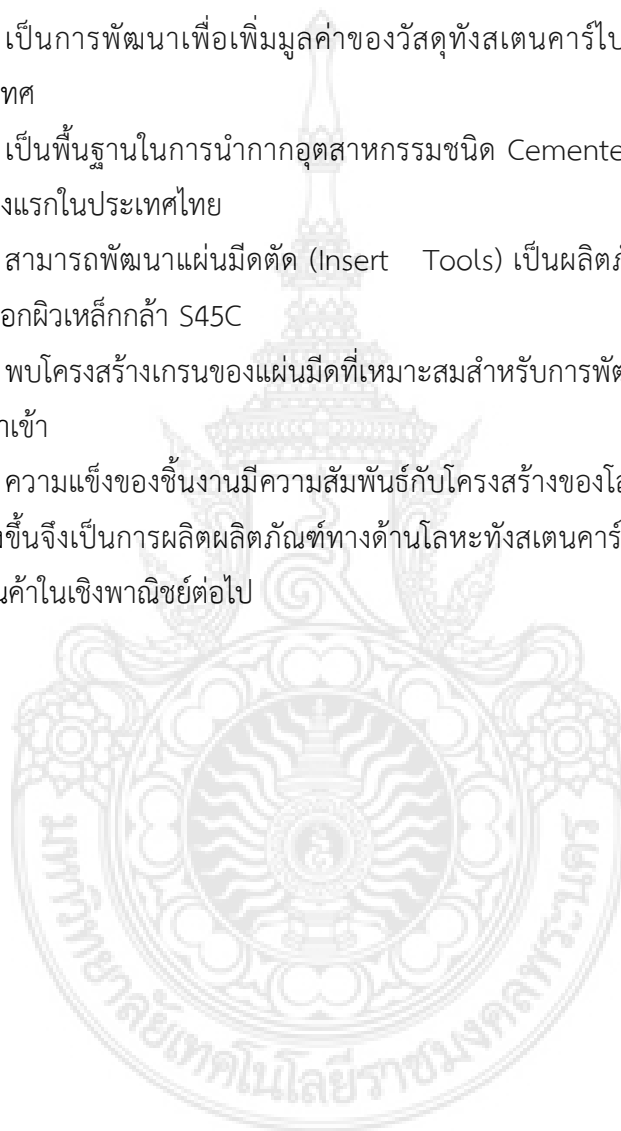
ขั้นตอนการวิจัย	พ.ศ. 2557													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1. ผลิตโลหะผง WC	----													
2. จัดเตรียมวัสดุ ขนาดผง คัดแยกขนาด (<1,000nm)		----												
3. ผสมและผลิต			----											
4. อบพ่นและเจียรระโน				-----										
5. ทดสอบสมบัติทางกล						-----								
6. ทดสอบการใช้งาน การสึกหรอ กลไกการเกิดเศษตัดและโครงสร้างจุลภาค								-----						
7. กำหนดมาตรฐานผลิตภัณฑ์										-----			-----	
8. สรุปผลและรายงาน												-----		-----

---- แผนงาน

— ปฏิบัติจริง

1.8 ประโยชน์ที่ได้รับ

- 1.8.1 ผลิตภัณฑ์เครื่องมือตัดทั้งสแตนคาร์ไบด์สำหรับงานตัดปาดผิวโลหะและเป็นผลิตภัณฑ์ใหม่
- 1.8.2 ผลิตภัณฑ์ผงโลหะทั้งสแตนคาร์ไบด์มีคุณลักษณะเหมาะสมต่อการผลิต ผลิตภัณฑ์เครื่องมือในงานตัดปาดผิวโลหะ
- 1.8.3 เป็นการพัฒนาเพื่อเพิ่มมูลค่าของวัสดุทั้งสแตนคาร์ไบด์ที่เป็นกากอุตสาหกรรม (Waste) ในประเทศ
- 1.8.4 เป็นพื้นฐานในการนำกากอุตสาหกรรมชนิด Cemented Tungsten Carbide กลับมาใช้ใหม่แห่งแรกในประเทศไทย
- 1.8.5 สามารถพัฒนาแผ่นมีดตัด (Insert Tools) เป็นผลิตภัณฑ์ต้นแบบ (Prototype) สำหรับการกลึงปอกผิวเหล็กกล้า S45C
- 1.8.6 พบโครงสร้างเกรนของแผ่นมีดที่เหมาะสมสำหรับการพัฒนาเครื่องมือตัดให้มีสมบัติเทียบเท่าสินค้านำเข้า
- 1.8.7 ความแข็งของชิ้นงานมีความสัมพันธ์กับโครงสร้างของโลหะ และเป็นการผลิตแผ่นมีดมีความแข็งสูงขึ้นจึงเป็นการผลิตผลิตภัณฑ์ทางด้านโลหะทั้งสแตนคาร์ไบด์ที่มีสมบัติเหมาะสมต่อการพัฒนาเป็นสินค้าในเชิงพาณิชย์ต่อไป



บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 การกำหนดเครื่องมือตัดปาดผิวโลหะ

ผลิตภัณฑ์เครื่องมือตัดปาดผิวนาโนเมตร ผลิตจากวัตถุดิบชนิดผงโลหะทังสเตนคาร์ไบด์ขนาดนาโนเมตร ซึ่งเป็นโลหะที่ผลิตขึ้นด้วยกระบวนการที่พัฒนาขึ้นในประเทศให้ได้สมบัติด้านความบริสุทธิ์ 99.90 % โดยมีขนาดเป็นนาโนเมตร (ด้วยนวัตกรรมการผลิตโลหะผงทังสเตนคาร์ไบด์โดยนักวิจัยของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร) ผลิตภัณฑ์ที่พัฒนาขึ้นมาใหม่นี้ภายใต้อัตราส่วนผสมระหว่างโลหะทังสเตนคาร์ไบด์ (Tungsten carbides) กับ โลหะผงโคบอลต์ (Cobalt powder) เพื่อนำไปใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตชิ้นส่วนโลหะความเที่ยงตรงสูง (High Precision) เทคโนโลยีการขึ้นรูปโลหะด้วยการตัดปาดผิว ได้แก่ เครื่องมือตัดทังสเตนคาร์ไบด์ (Tungsten carbide Insert tools product) สำหรับการขึ้นรูปด้วยการกลึง (Turning) งานกัด (Milling) และงานเจาะ (Drilling) ผลิตภัณฑ์ที่พัฒนาขึ้นเป็นเครื่องมือตัดสำหรับงานตัดเฉือนโลหะ (Machining) โดยพัฒนาจากทังสเตนคาร์ไบด์นาโนเมตร ให้เป็นไปตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์เพื่อใช้งานในอุตสาหกรรมการผลิต เป็นวัตถุดิบที่สามารถผลิตได้เองจึงเป็นการพัฒนาผลิตภัณฑ์ต้นแบบและมีเป้าหมายเพื่อเป็นแนวทางนำไปสู่การผลิตด้วยตนเองและลดการนำเข้า ทั้งวัตถุดิบทังสเตนคาร์ไบด์และผลิตภัณฑ์ชนิดเดียวกันจากต่างประเทศ

อุตสาหกรรมเครื่องมือตัดปาดผิวโลหะนาโนเมตร (Cutting tools) ได้แก่ แผ่นมีดตัดปาดผิวโลหะในงานกลึง งานกัด งานเจาะ อุตสาหกรรมการผลิตชิ้นส่วนและแม่พิมพ์โลหะ (Punch and die) รวมถึง เครื่องมืองานชุดเจาะถนน อุตสาหกรรมการผลิตชิ้นส่วนเครื่องจักรกล อุตสาหกรรมแปรรูปไม้พลาสติกและชิ้นงานโลหะทนการสึกหรอในอุตสาหกรรมสนับสนุน (Supporting industry)

ผลจากการพัฒนาเทคโนโลยีการผลิตโลหะผงทังสเตนคาร์ไบด์ ทำให้ผลิตผงโลหะที่มีคุณภาพสูงขึ้นในด้านความบริสุทธิ์มากกว่า 99 % จึงมีแผนพัฒนาเพื่อเพิ่มมูลค่าด้วยการผลิตโลหะผงเป็นขนาดนาโนเมตร และการนำไปผลิตเป็นชิ้นงานเพื่อการใช้งานในอุตสาหกรรมที่กว้างขวางมากขึ้น เป็นการพัฒนาต่อยอดเพื่อผลิตเป็นผลิตภัณฑ์เครื่องมือตัดทังสเตนคาร์ไบด์นาโน (Tungsten carbide nano-tools) ให้มีคุณภาพเหมาะกับการใช้และสนับสนุนอุตสาหกรรมตัดปาดผิวโลหะต่อไป

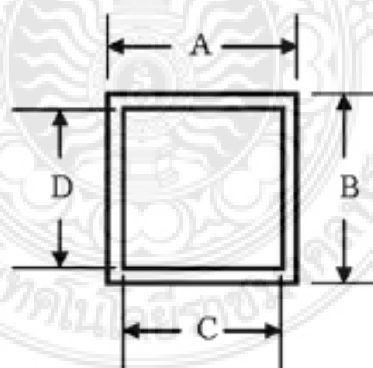
พบว่าในปัจจุบันประเทศไทยนำเข้าเทคโนโลยีการผลิตชิ้นส่วนซีเมนต์ทังสเตนคาร์ไบด์มากขึ้น อาทิ ชิ้นส่วนเครื่องจักรกลเพื่อการผลิตขึ้นรูปในแบบ Cold Isostatic press (CIP), Hot Isostatic press (HIP) หรือ Water pressure press และเทคโนโลยีการอบผนึก (Sintering technology) เป็นต้น และใช้ในห้องปฏิบัติการวิจัยโลหะผงทั้งภาครัฐและภาคเอกชน

จากการศึกษาพบว่ารัฐบาลของประเทศสหรัฐอเมริกา ได้จัดตั้งหน่วยงานเฉพาะทาง รับผิดชอบและสนับสนุนโครงการ (Projected) พัฒนาอุตสาหกรรมโลหะทั้งสแตนเพื่อสร้างความเข้มแข็งของประเทศด้านการพาณิชย์และพัฒนาเทคโนโลยีด้านการทหาร มีหน่วยงานรับผิดชอบในการศึกษา วิจัย พัฒนา รวมถึงการสะสมวัตถุดิบทั้งสแตนในรูปแบบต่าง ๆ จากทั่วโลกเพื่อนำมาพัฒนาและผลิตผลิตภัณฑ์ทั้งสแตน (Tungsten) และทั้งสแตนคาร์ไบด์ (Tungsten carbides) เป้าหมายสำคัญคือ การผลิตใช้ในประเทศและพัฒนาอุตสาหกรรมหลาย ๆ ด้าน อาทิ พัฒนาวัสดุทั้งสแตนเพื่อใช้ในอุตสาหกรรมสนับสนุนการผลิตเครื่องจักรกล การพัฒนาเทคโนโลยีด้านการป้องกันประเทศและเพิ่มศักยภาพด้านผู้นำทางเทคโนโลยี มีการพัฒนาการผลิตผลิตภัณฑ์เป็นทั้งสแตนคาร์ไบด์ (Tungsten Carbides) อย่างเป็นระบบเชิงบูรณาการ

สอดคล้องกับการพัฒนาอุตสาหกรรมการผลิตชิ้นส่วนจากโลหะทั้งสแตนของประเทศผู้นำทางอุตสาหกรรมในหลายประเทศทั่วโลก อาทิ ประเทศจีน ไต้หวัน ญี่ปุ่น สวีเดน เยอรมัน เกาหลี อินเดีย โดยที่ประเทศไทยยังเป็นผู้นำเข้า 100 % และมีเศษโลหะดังกล่าวผ่านการใช้งานกลายเป็นเศษโลหะ (Waste) จำนวนมาก

ตารางที่ 2.1 Green dimensions (mm) of simple square insert, average of four parts. [5]

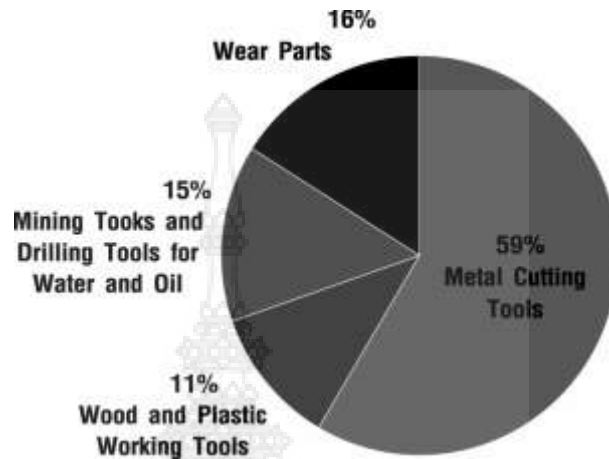
	A	B	C	D
Average	16.24	16.23	13.68	13.67
Range	0.09	0.17	0.07	0.06
Target	16.21	16.21	13.61	13.61
Deviation	0.03	0.02	0.07	0.06



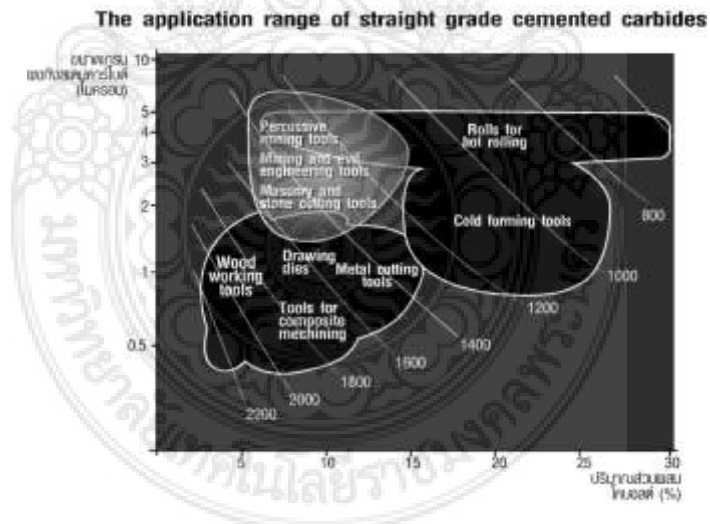
รูปที่ 2.1 แสดงการกำหนดขนาดชิ้นงานแผ่นมีดตัด [5]

ผลิตภัณฑ์เครื่องมือตัดทั้งสแตนคาร์ไบด์ ชนิดแผ่นมีด (Insert tools) และแท่งเครื่องมือตัด (Solid tools) เป็นโลหะที่มีส่วนผสมทั้งสแตนคาร์ไบด์สูงกว่าร้อยละ 80 - 97 โดยน้ำหนัก โดยใช้โลหะประสานชนิด โคบอลต์ มากกว่า 90 % เมื่อเทียบกับโลหะอื่น ๆ พบว่า ผลิตภัณฑ์เครื่องมือตัดผลิตจากทั้งสแตนคาร์ไบด์ มีการใช้โลหะโคบอลต์เป็นโลหะประสาน (Cobalt binder) ขนาดเกรน (Grain size) อยู่ในช่วง 0.15 - 50.00 ไมครอน (μm) และปัจจุบันแนวโน้มผลิตผงนาโนเมตรเพิ่มขึ้นอย่าง

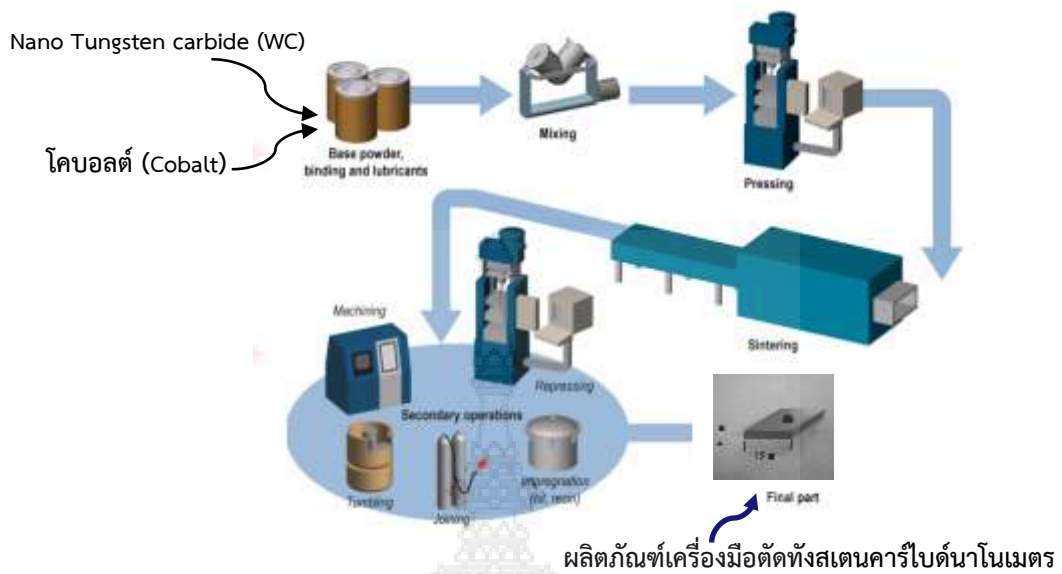
ต่อเนื่อง หากผลิตชิ้นงาน (Part) ให้ความแข็งอยู่ระหว่าง 830 - 2500 HV ขึ้นกับหลายปัจจัย ได้แก่ ขนาดและรูปทรงของโลหะผง อัตราส่วนผสมของโลหะประสานและกระบวนการอบนึ่งเป็นต้น



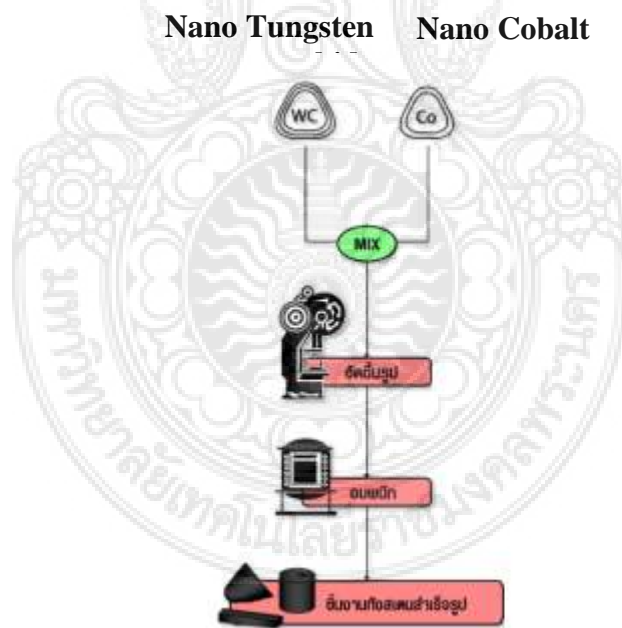
รูปที่ 2.2 การแบ่งกลุ่มของผลิตภัณฑ์เครื่องมือตัด ผลิตจากทั้งสแตนคาร์ไบด์ในอุตสาหกรรม [4]



รูปที่ 2.3 ความสัมพันธ์ของขนาดผงโลหะทั้งสแตนคาร์ไบด์และส่วนผสมโคบอลต์ มีอิทธิพลต่อความแข็งของชิ้นงานและการจัดกลุ่มเครื่องมือตัดให้เหมาะสมกับลักษณะงาน [4]



รูปที่ 2.4 กระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์เครื่องมือตัดทั้งสแตนคาร์ไบด์ (Tungsten Carbide tools) [3]



รูปที่ 2.5 กระบวนการผลิตชิ้นงานคาร์ไบด์หรือผลิตภัณฑ์เครื่องมือตัดทั้งสแตนคาร์ไบด์ [3]

การผลิตชิ้นงานทั้งสแตนคาร์ไบด์ด้วยการขึ้นรูปจากวัสดุผงในประเทศไทยมีการผลิตมากขึ้น โดยนำเข้าผงโลหะทั้งสแตน (Tungsten powder) ในปี พ.ศ.2545 จนถึงปี พ.ศ.2554 อัตราการนำเข้าสูงขึ้นกว่า 8.20 เท่า และนำเข้าโคบอลต์ (Cobalt powder) เพิ่มขึ้นโดยนับจากปี พ.ศ.2545

ถึง พ.ศ.2554 อัตราการนำเข้าสูงขึ้น 7.5 เท่า เพื่อผลิตซีเมนต์ทังสเตนคาร์ไบด์ (Cement tungsten carbide) (ที่มา : กรมศุลกากร กระทรวงการคลัง) และการนำเข้าผงโลหะที่มีขนาดเล็กในระดับนาโนเมตรมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น

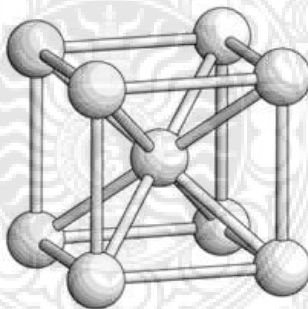
ประเทศไทยนำเข้าผงทังสเตนคาร์ไบด์ (Tungsten carbides powder) 100 % มูลค่า 2,500 ล้านบาท ในปี พ.ศ.2554 เพิ่มขึ้นกว่า 2.5 เท่า นำเข้าเครื่องมือตัดจำนวนกว่า 3.25 ล้านชิ้น/ปี (มูลค่านำเข้าชุดเครื่องมือตัดสูงถึง 4,500 ล้านบาทในปี พ.ศ.2554) เป็นทังสเตนคาร์ไบด์ 70 %

ผลการศึกษาพบว่าผลิตภัณฑ์เครื่องมือตัด (Cutting tools product) ที่ผลิตจากทังสเตนคาร์ไบด์ในปี พ.ศ.2554 มีมูลค่ารวม 1,250,000 ล้านบาท เมื่อเทียบกับปี พ.ศ.2552 แนวโน้มสูงขึ้นไม่น้อยกว่าร้อยละ 25 ส่วนใหญ่ใช้โลหะประสานโคบอลต์มากกว่าร้อยละ 90

การพัฒนาผลิตภัณฑ์แผ่นมีดซีเมนต์ทังสเตนคาร์ไบด์ (Cement tungsten carbide) จึงเป็นการวิจัยและพัฒนาเชิงประยุกต์เพื่อค้นหาอิทธิพลของผงทังสเตนคาร์ไบด์ขนาดนาโนเมตร ต่อสมบัติทางกลของชิ้นงาน โดยการผลิตเป็นชิ้นงานโลหะความแข็งสูง (High hardness) ที่จะมีความสำคัญต่อการนำไปใช้ในอุตสาหกรรมอีกทางเลือกหนึ่งและเป็นพื้นฐานที่ดีต่อการวิจัยสู่การสร้างมูลค่าเพิ่มของวัสดุต่อไป

2.2 ทังสเตน (Tungsten)

2.2.1 ทังสเตนในตารางธาตุทังสเตน คือ ธาตุที่มีเลขอะตอม 74 หมู่ที่ 6 คาบที่ 6 บล็อก d คุณสมบัติของทังสเตน มวลอะตอม 183.84 กรัม/โมล สถานะเป็นของแข็ง ความหนาแน่น 19.25 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร จุดหลอมเหลว 3,422 °C โครงสร้างผลึก Body Centered Cubic รูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 โครงสร้างผลึก (Body Centered Cubic) [7]

2.2.2 ผงทังสเตนคาร์ไบด์ (Tungsten Carbide Powder) มีส่วนประกอบทางเคมีประกอบด้วยทังสเตนและคาร์บอนอัดประสานเข้าด้วยกันที่ความร้อน เกิดเป็นวัสดุเซรามิกที่มีลักษณะเหมือนโลหะ แม้จะนิยมเรียกวัดชนิดนี้ว่าเป็นโลหะ แต่ทางเทคนิคแล้วถือว่าเป็นเซรามิกประเภทหนึ่ง ไม่มีสิ่งใดที่จะทำให้ทังสเตนคาร์ไบด์เป็นรอยได้นอกจากเพชร ลักษณะกายภาพของทังสเตนคาร์ไบด์มีความแข็งสูง มีน้ำหนักมากด้วยคุณสมบัตินี้ทำให้เป็นที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมที่เกี่ยวกับเครื่องมือตัด อวกาศ กระสุนเจาะเกราะและแม่พิมพ์โลหะ ปัจจุบันเริ่มนิยมนำมาทำเป็นเครื่องประดับแสดงลักษณะผงทังสเตนคาร์ไบด์รูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 ผงทังสเตนคาร์ไบด์ (Tungsten Carbide Powder) [7]

2.2.3 ซีเมนต์ทังสเตนคาร์ไบด์ (Cemented Tungsten Carbide) เป็นวัสดุกลุ่มที่มีความแข็งสูงและทนทานต่อการสึกหรอ มีส่วนประกอบของทังสเตนคาร์ไบด์ (WC) และโคบอลต์ (CO) นิกเกิล (Ni) ไทเทเนียมคาร์ไบด์ (TiC) หรือแทนทาลัมคาร์ไบด์ (TaC) นิยมใช้เป็นวัสดุผลิตเครื่องมือตัด สมบัติของวัสดุจะขึ้นอยู่กับขนาดอนุภาคของทังสเตนคาร์ไบด์และปริมาณของโคบอลต์ ผงโลหะที่มีขนาดอนุภาคเล็กและปริมาณโคบอลต์ น้อยจะมีความแข็งสูงและการผลิตชิ้นงานจากทังสเตนคาร์ไบด์ขนาดอนุภาคใหญ่และปริมาณโคบอลต์ มากจะมีความเหนียวสูง ทังสเตนคาร์ไบด์มีจุดหลอมเหลวสูงไม่สามารถขึ้นรูปด้วยวิธีอื่น จึงต้องผลิตจากกรรมวิธีทางวัสดุผงหรือกระบวนการอัดขึ้นรูปเป็นส่วนใหญ่

ตารางที่ 2.2 สมบัติของซีเมนต์ทังสเตนคาร์ไบด์ (ทังสเตนคาร์ไบด์ผสมกับผงโคบอลต์)

ชั้นที่	ขนาดเกรน ผงทังสเตนคาร์ไบด์ (μm)	ปริมาณของ โคบอลต์ (Co) (%)	ค่าความแข็ง HV
1	3 - 4	16	1323 - 1400
2	1.5 - 2.5	6	1478 - 1556

ตารางที่ 2.3 สมบัติเครื่องมือชนิดทังสเตนคาร์ไบด์

ชิ้นงาน	อัตราส่วนผสม (%)		ความหนาแน่น (gms/cm^3)	ค่าความแข็ง (HRA)	ขนาดของเกรน (μm)	แรงอัดขึ้นรูป (ton/inch^2)	อุณหภูมิอบพูน ($^{\circ}\text{C}$)
	WC	Co					
C-90-x	90.0	10.0	14.45	89.5	1 - 4	5 - 30	1400 - 1500
C-93	95.5	4.5	15.15	92.5	1 - 3		
C-85	87.0	13.0	14.25	88.4	3 - 4		

ตารางที่ 2.4 สมบัติของชิ้นงานทั้งสแตนคาร์ไบด์

ชั้น ที่	อัตราส่วนของขนาดทั้งสแตนคาร์ ไบด์ (WC) รวมทั้งหมด 54 %ของ ชิ้นงาน (%)		ปริมาณโลหะ คาร์ไบด์ (TiTaW)C(%)	ปริมาณ โคบอลต์ (Co) (%)	อุณหภูมิ อบพูนิก (°C)	ค่า ความ แข็ง (HRA)
	ขนาด WC 2 μ m	ขนาด WC 0.2 μ m				
1	18	36	46	6	1485	93
2	27	27	46	6	1485	91
3	36	18	46	6	1485	89

การวิจัยนี้จึงมุ่งพัฒนาผลิตภัณฑ์จากโลหะทั้งสแตนคาร์ไบด์นาโนเมตร เป็นการวิจัยตามแนวทางการพัฒนาเพื่อความยั่งยืน ในลักษณะหมุนเวียนกลับมาใช้ใหม่ เป็นการส่งเสริมการพึ่งตนเองและจะเป็นการลดอัตราการนำเข้าทั้งสแตนคาร์ไบด์จากต่างประเทศทั้งในรูปของโลหะผง (Powder) และชิ้นงาน (Product Parts) วิจัยโดยพัฒนาโลหะผงทั้งสแตนคาร์ไบด์ให้มีขนาดนาโนเมตร แล้วผสมกับโลหะประสานโคบอลต์ ในอัตราส่วนผสมไม่เกิน 10 % โดยน้ำหนัก เพื่อผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ใหม่ จากนั้นทำการทดสอบสมบัติต่าง ๆ ได้แก่ การทดสอบและวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค การทดสอบความแข็ง และการทดสอบความสามารถในการตัดปาดผิวชิ้นงานเหล็กกล้า (Machinery steels) เป็นต้น

2.3 กรรมวิธีทางโลหะผง (Powder Metallurgy)

2.3.1 การผลิตและการเตรียมผงโลหะ แบ่งออกได้อย่างกว้าง ๆ เป็นวิธีทางกลและเคมี

2.3.1.1 กรรมวิธีทางกล

ก) Machining โดยการใช้เครื่องกัดเนื้อโลหะให้เป็นเศษเล็ก ๆ นิยมใช้กับพวกโลหะผสมต่าง ๆ หรืออาจจะใช้การกลึงแล้วบดอัดด้วยลูกบดอีกครั้ง

ข) Milling โดยการบดแตก การกัด การกลึง ขูด การเจาะหรือการตัด ใช้กับโลหะที่มีความเปราะมาก ๆ

ค) Shotting โดยการหลอมโลหะให้เหลวผ่านตะแกรงตาถี่ที่ทนความร้อนสูงลงในน้ำ จะได้ผงโลหะที่มีลักษณะยาวรีขนาดใหญ่ที่มีขนาดไม่แน่นอน ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ เวลา ระยะทาง และขนาดของรูตะแกรง วิธีนี้ใช้ได้กับโลหะเหล็กเกือบทุกชนิด

ง) Granulation โดยการนำโลหะที่หลอมเหลวเหลวในภาชนะแล้วทำการกววนอย่างรวดเร็วด้วยความเร็วสูง จะทำให้โลหะแยกตัวออกอย่างเป็นอิสระต่อกันจนแข็งตัว เป็นวิธีที่ไม่นิยม

จ) Atomization เป็นกรรมวิธีการพ่นโลหะที่เป็นของเหลว เหมาะสำหรับโลหะที่มีจุดหลอมเหลวต่ำ เช่น ดีบุก ตะกั่ว สังกะสี อะลูมิเนียม เป็นที่นิยมใช้มากที่สุดวิธีหนึ่ง

2.3.1.2 กรรมวิธีทางเคมี

ก) รีดักชันของสารประกอบออกไซด์ (Oxide Reduction) เป็นปฏิกิริยาที่มีการถ่ายเทอิเล็กตรอนจากสารหนึ่งไปยังอีกสารหนึ่ง

ข) อิเล็กโทรลิซิส (Electrolysis) คือกระบวนการผ่านกระแสไฟฟ้าเคมีลงในสารอิเล็กโทรลิซิสและทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมี เพื่อให้ได้สารผลิตภัณฑ์ตามที่ต้องการ

2.4 วิธีกรบดละเอียด (Ball Milling)

2.4.1 การบด (Ball Mill) เป็นการบดวัสดุโดยใช้หลักการหมุนของหม้อบด โดยใช้ลูกบดอยู่ภายในสามารถบดวัสดุได้ทั้งแบบเปียก (Wet Milling) และแบบแห้ง (Dry Milling)

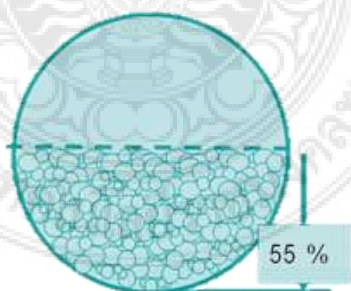
การคำนวณปริมาตรของหม้อบด

โดยที่

- L = ความยาวภายในของหม้อบด
- D = เส้นผ่านศูนย์กลางภายในของหม้อบด
- V = ปริมาตรของหม้อบด
- F = พื้นที่หน้าตัด

$$\begin{aligned} \text{ปริมาตรหม้อบด } V &= F \times D & (2-1) \\ &= \frac{\pi D^2}{4} \times L \end{aligned}$$

เมื่อเติมลูกบดลงไป 55 % ของปริมาตรหม้อบดแล้ว การจัดเรียงตัวของลูกบดในแต่ละขนาดจะทำให้เกิดช่องว่างภายในระหว่างลูกบด ถึงแม้ว่าจะเติมลูกบดหลาย ๆ ขนาดลงไปเพื่อให้เกิดการอัดตัวของลูกบด ปริมาตรของลูกบดที่ไม่รวมช่องว่าง (Void) ประมาณ 60 % ของปริมาตรรวมทั้งหมด (ที่ 55 % ของ Mill Volume) ดังรูปที่ 2.8 ดังนั้นปริมาตรของลูกบดที่อยู่ในหม้อบด = 55 % x 60 % = 33 % ของปริมาตรหม้อบด ดังนั้นในหม้อบดจะเหลือช่องว่างที่สามารถเติมวัสดุบดและน้ำลงไปได้อีกประมาณ 67 %



รูปที่ 2.8 ระดับของลูกบดใน Ball Mill ที่เหมาะสม [9]

2.4.2 ความเร็วในการหมุนหม้อบด (Critical Speed) ขณะทำการบดจะอยู่ภายใต้แรง 3 ชนิดที่มีความสัมพันธ์กัน เพื่อส่งเสริมให้การบดมีประสิทธิภาพสูงสุด แรงทั้ง 3 ชนิดนี้ คือ

2.4.2.1 แรงโน้มถ่วงของโลก (Gravitational Force)

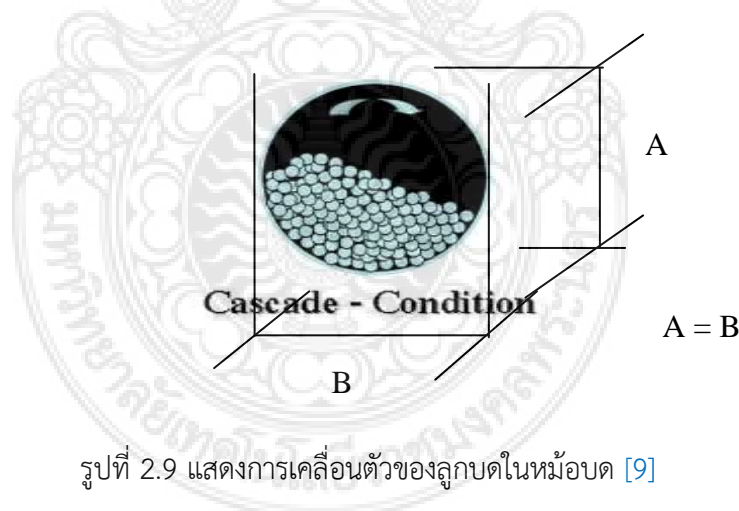
2.4.2.2 แรงสู่ศูนย์กลาง (Centrifugal Force)

2.4.2.3 แรงเสียดทานระหว่างวัตถุ (Frictional Force)

การเคลื่อนตัวของลูกบด วัตถุดิบและสารละลายนั้น จะขึ้นอยู่กับความเร็วของการหมุนหม้อบดเป็นหลัก ตามทฤษฎีของการเคลื่อนที่ของวัตถุที่เคลื่อนที่ด้วยความเร็ววิกฤต วัตถุดิบจะมีความเร็วเท่ากับความเร็ววิกฤต ในกรณีของลูกบดและวัตถุดิบภายในหม้อบดมากเกินไปจะไม่เกิดการบดหรือการกระแทกกันขึ้น ความเร็วที่เหมาะสมจะทำให้ลูกบดตกกระทบกับวัตถุดิบ เพื่อทำให้เกิดแรงตกระแทกกัน และทำให้ลูกบดกับวัตถุดิบเกิดการบดระหว่างกันและกันอยู่ที่ 60 – 80 % ของความเร็ววิกฤต ขึ้นกับการบดนั้นเป็นการบดแห้งหรือบดเปียก

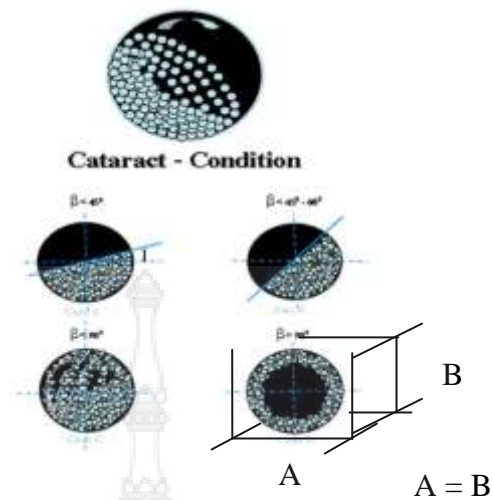
ความเร็วจะทำให้ลูกบดถูกพาขึ้นไปและตกกระทบลงมาด้วยแรงโน้มถ่วง ถ้าในกรณีที่ความเร็วของหม้อบดมีค่าต่ำเกินไป หม้อบดไม่สามารถจะพาลูกบดขึ้นไปเพื่อให้เกิดการตกระแทกลงมาได้จะมีเพียงแรงเสียดทานระหว่างวัตถุเท่านั้นที่จะทำหน้าที่ในการบดย่อยวัตถุดิบซึ่งจะใช้เวลาานานมากขึ้น ในการบดวัตถุดิบให้ละเอียด แต่ถ้าความเร็วของหม้อบดเร็วมากกว่าระดับ 80 % ของความเร็ววิกฤตแต่ยังไม่ถึงความเร็ววิกฤต จะเกิดสภาพที่ลูกบดตกกระทบกับวัตถุดิบและลูกบดด้วยกัน เมื่อแรงเกินไป จนทำให้เกิดการสึกหรือแตกของลูกบดได้รวดเร็ว

Catacracting คือ มุมที่เหมาะสมที่ความเร็วของหม้อบดยกเอาลูกบดขึ้นไปจนถึงจุดที่สมดุลกันระหว่างแรงสู่ศูนย์กลาง แรงโน้มถ่วงทำให้ลูกบดตกลงมากระทบกับลูกบดอื่น ๆ และวัตถุดิบ มุมที่เหมาะสมต้องทำมุมกับแนวเพลลาของหม้อบด 45 ° ดังรูปที่ 2.9



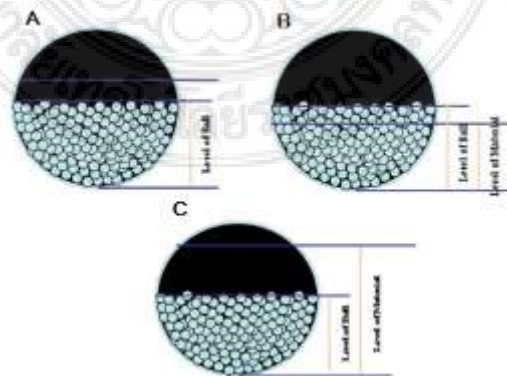
รูปที่ 2.9 แสดงการเคลื่อนตัวของลูกบดในหม้อบด [9]

ส่วนสภาวะที่ความเร็วของหม้อบดไม่พอเพียงที่จะยกให้ลูกบดขึ้นไปและตกระแทกลงมาได้นั้น ลูกบดจะทำหน้าที่เพียงแค่เป็นตัวเสียดสีกับวัตถุดิบและลูกบดด้วยตัวเอง ซึ่งทำให้เวลาการบดยาวนานขึ้นเรียกสภาวะนี้ว่า Cascade - Condition ดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 แสดงมุมตกกระทบที่เหมาะสมของหม้อบด [32]

2.4.3 ปริมาณของวัตถุดิบที่เติมและปริมาณของสารละลายที่เติมจากการคำนวณปริมาตรที่เหลือของหม้อบดหลังจากเติมลูกบดลงไปแล้ว เหลือปริมาตรหรือช่องว่างประมาณ 67 % ของปริมาตรหม้อบด การคำนวณปริมาตรวัตถุดิบและสารละลายที่เติมลงไปนั้น จะต้องเว้นช่องว่างของปริมาตรหม้อบดประมาณ 25 % ด้วยเหตุผลคือ จะต้องมช่องว่างเพื่อให้โอกาสวัตถุดิบและลูกบดมีการเคลื่อนที่ได้ และมีช่วงของการตกกระทบซึ่งกันและกัน เหตุผลที่สำคัญคือ ในการเติมวัตถุดิบในหม้อบดวัตถุดิบทั้งหมดไม่ว่าจะมีขนาดใหญ่หรือเล็กจะไม่สามารถแทรกผ่านไปตามช่องว่างระหว่างลูกบดที่มีอยู่ในหม้อบดได้ ดังนั้น 22 % ที่เป็นช่องว่างของลูกบดจะไม่มีวัตถุดิบแทรกเข้าไปได้ จนกว่าจะเริ่มหมุนหม้อบดให้มีการเคลื่อนตัวของลูกบดและวัตถุดิบ จนกระทั่งวัตถุดิบและสารละลายสามารถแทรกเข้าไปอยู่ในช่องว่างของลูกบดได้ ดังนั้นปริมาตรที่เป็นช่องว่างของหม้อบดที่ใช้ในการบดอย่างมีประสิทธิภาพ จะเท่ากับ 22 % ของช่องว่างระหว่างลูกบด 20 % ของช่องว่างหม้อบดที่เหลือเท่ากับ 42 % ของปริมาตร หม้อบด ดังรูปที่ 2.11

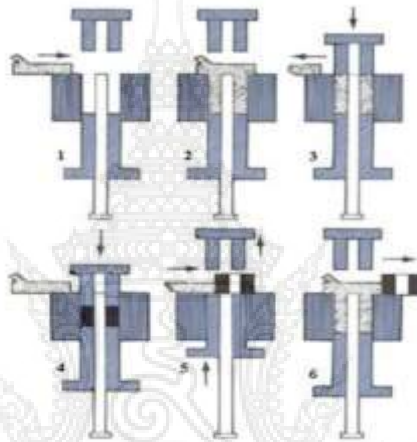


รูปที่ 2.11 A ระดับการเติมวัตถุดิบที่เหมาะสม B ระดับของวัตถุดิบน้อยเกินไปทำให้ลูกบดและตัวหม้อบดสึกหรือเร็ว C ระดับของวัตถุดิบมากเกินไปทำให้ประสิทธิภาพในการบดต่ำลง [32]

เมื่อทราบว่าสามารถเติมวัตถุดิบและสารละลายได้ เท่ากับ 42 % ของปริมาตรหม้อทั้งหมดโดยคำนวณเป็นน้ำหนักทั้งหมดที่จะเติมลงไปในหม้ออบ

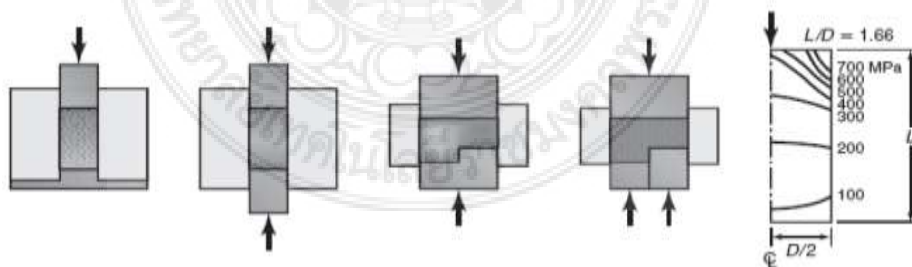
2.5 การอัดขึ้นรูป (Pressure)

การขึ้นรูปด้วยวิธีการอัด (Pressing) เป็นกระบวนการใช้แรงดันเข้าไปอัดอนุภาคให้ได้รูปทรงตามแบบพิมพ์ (Mold) ผลิตภัณฑ์ที่ผลิตได้แก่ ชิ้นงานความแข็งสูง (Hard metal) แผ่นมีดตัด (Cutting tools) ชิ้นงานทนการสึกหรอสูง เป็นต้น วัตถุดิบที่ใช้จะเป็นผงโลหะ ได้แก่ ทังสเตนคาร์ไบด์ โคบอลต์ นิเกิล โครเมียม และผงเหล็ก เป็นต้น

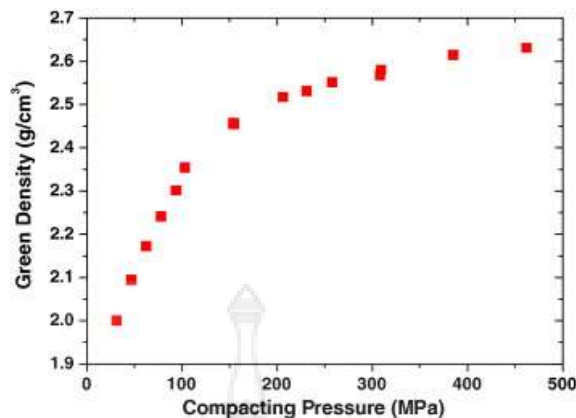


รูปที่ 2.12 ขั้นตอนการอัดขึ้นรูปผงโลหะ (Compaction of Metal Powders) [8]

โลหะผงที่ผ่านการอัดขึ้นรูป เรียกว่า Green Compact หรือ Green Part ซึ่งยังมีความแข็งแรงต่ำ ความหนาแน่นของ Green Compact นั้นขึ้นกับแรงที่ใช้ในการอัด ดังรูปที่ 2.13 และ 2.14



รูปที่ 2.13 ความหนาแน่นในการอัดผงโลหะในแม่พิมพ์แบบต่าง ๆ [8]



รูปที่ 2.14 กราฟแสดงความหนาแน่นต่อแรงกดที่ต่างกัน [9]

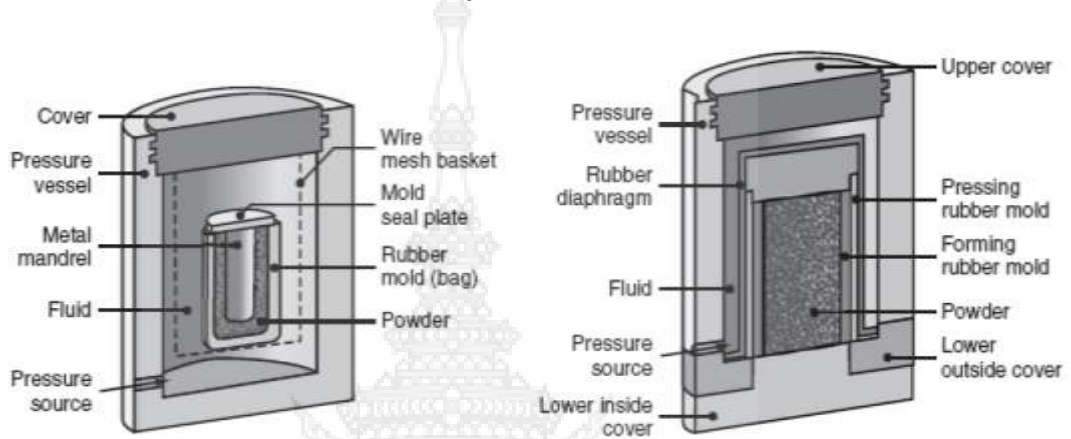
ตารางที่ 2.5 แสดงการใช้ความดัน (Pressure) สำหรับอัดขึ้นรูปผงโลหะแต่ละชนิด

Compacting Pressure for Various Powder	
Metal	Pressure (MPa)
Aluminum	70 - 275
Tantalum	70 - 140
Tungsten	70 - 400
Bronze	200 - 275
Brass	400 - 700
Iron	350 - 800
Other Materials	
Metal	Pressure (MPa)
Cemented Carbide	140 - 600
Aluminum Oxide	110 - 140
Ferrites	110 - 165
Carbon	110 - 140

2.5.1 การขึ้นรูปโดยวิธี Isostatic Pressing วิธีนี้เป็นการอัด โดยแรงอัดที่เท่ากันทุกทิศทาง ซึ่งหมายความว่าผลิตภัณฑ์ทุกส่วนจะมีความหนาแน่นใกล้เคียงกัน ทำให้ผลิตภัณฑ์ไม่โค้งงอและไม่แตกเมื่ออบพูนิก (Sintering) วิธีการนี้สามารถใช้ความดันสูงได้โดยไม่มีปัญหาเรื่องการแตกร้าว การขึ้นรูปโดยวิธีนี้เมื่อนำผลิตภัณฑ์ไปอบพูนิก (Sintering) เพื่อให้อนุภาคผนึกตัวกัน (Sinter) จะได้เนื้อผลิตภัณฑ์ที่มีความหนาแน่นมากกว่าการขึ้นรูปโดยวิธีอื่น ๆ เพราะว่าการขึ้นรูปโดยวิธีนี้จะไม่มีความเครียดเกิดขึ้นในเนื้อผลิตภัณฑ์สูงมากและความเครียดนี้จะเปลี่ยนเป็นพลังเร่งให้เนื้อผลิตภัณฑ์เกิดการผนึกตัวกันได้ดีและเร็วขึ้น การขึ้นรูปวิธีนี้ใช้กับการผลิตวัสดุทนไฟชนิดพิเศษผลิตหัวเทียน กระบวนการ Isostatic Pressing จะประกอบด้วย 2 ประเภทด้วยกันดังนี้

2.5.1.1 Cold Isostatic Pressing (CIP) เป็นวิธีที่ใช้กันอย่างกว้างขวางทั้งในห้องปฏิบัติการ และรวมถึงการผลิตผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ ในกรณีการขึ้นรูปด้วยวิธี Isostatic Pressing ถ้าเกิดขึ้นที่อุณหภูมิห้อง จะเรียกว่า Cold Isostatic Pressing

2.5.1.2 Hot Isostatic Pressing (HIP) ช่วยแยกวัสดุออกจากแก๊ส Activity ในแก๊ส เพิ่มขึ้นเพื่อปกป้องคุณสมบัติของผงเสียไปหรืออีกนัยหนึ่งผลิตภัณฑ์ที่เป็นแก๊สที่เกิดขึ้นไม่สามารถหนี ออกนอกชิ้นงานได้ ซึ่งถือว่าเป็นผลดีต่อวัสดุ ดังรูปที่ 2.15

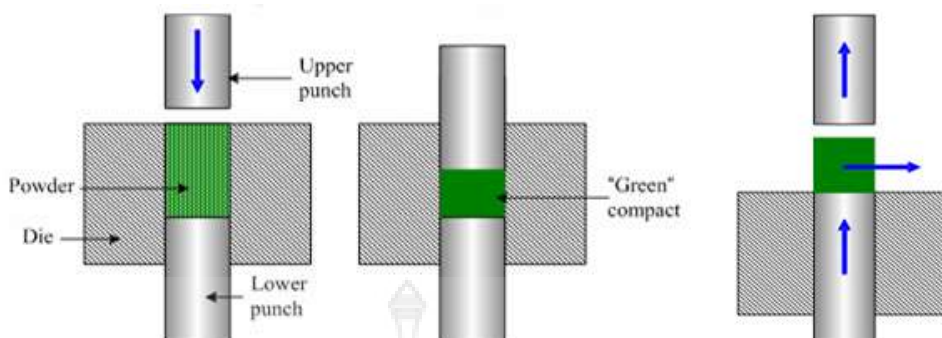


รูปที่ 2.15 Isostatic Pressing [10]

2.5.2 การอัดขึ้นรูปทิศทางเดียว (Uniaxial Pressing) ในกระบวนการขึ้นรูปเซรามิกหรือโลหะผง ประกอบด้วยการอัดผงอนุภาค ซึ่งถูกบรรจุในช่องว่างโดยการให้ความดันทิศทางเดียว อาจใช้หัวกดตัวเดียวหรือหลายตัวก็ได้ สำหรับช่องว่างที่บรรจุผงโลหะจะถูกทำขึ้นจากฐานซึ่งเคลื่อนที่ได้ เรียกว่า Lower Punch และผนังที่สามารถเคลื่อนที่หรืออาจยึดติดกับแม่พิมพ์ การอัดขึ้นรูปมีความแตกต่างกันในด้าน การเคลื่อนที่ของแม่พิมพ์ Upper Punch, Lower Punch, Die และความดันที่ใช้

ขั้นตอนในกระบวนการอัดมี 3 ขั้นตอน ได้แก่

- 1) Die filling
- 2) Compaction
- 3) Green compact part ejection and removal



รูปที่ 2.16 วิธีการอัดขึ้นรูปแบบทิศทางเดียว (Uniaxial Pressing) [9]

การใช้เทคนิคการอัดขึ้นรูปแบบทิศทางเดียวเป็นที่นิยมมากขึ้น กระบวนการการขึ้นรูปประกอบด้วย การอัดผงโลหะซึ่งถูกบรรจุในช่องว่าง โดยการให้ความดันทิศทางเดียว รูปแบบการขึ้นรูปขึ้นกับการออกแบบแม่พิมพ์ให้เหมาะสมกับลักษณะงาน เป็นต้น

2.6 การอบผนึก (Sintering)

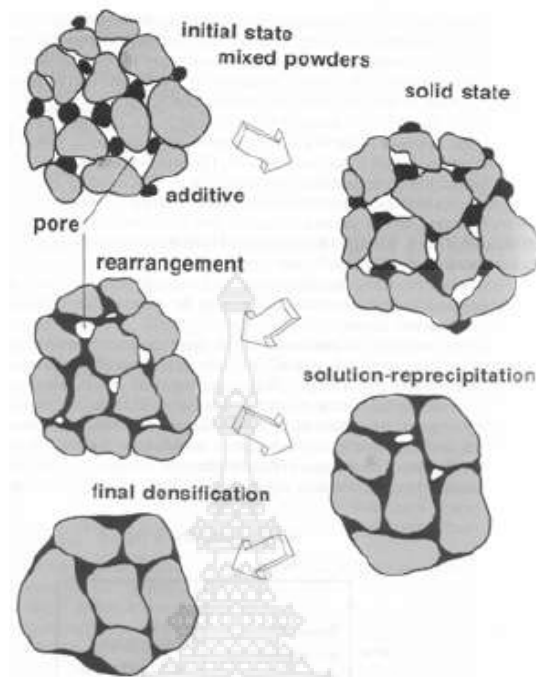
การอบผนึก เป็นการอบชิ้นงาน Green Compact ความร้อนขณะอบผนึกจะทำให้ช่องว่างระหว่างอนุภาคของผงโลหะรวมทั้งช่องว่างที่เกิดจากการสลายตัวของวัสดุประสานหลังการเผา โลหะประสานเกิดการเชื่อมติดกันระหว่างเม็ดผง ในขั้นตอนนี้จัดได้ว่าเป็นขั้นตอนที่สำคัญ โดยสมบัติทางกลที่เกิดขึ้นกับชิ้นส่วนโลหะจะขึ้นกับความสมบูรณ์ของการเผาผนึกเป็นปัจจัยสำคัญ การเผาผนึกที่ดีอาจนำมาซึ่งค่าความหนาแน่นของชิ้นงานที่สูงถึงร้อยละ 97

2.6.1 ปัจจัยที่มีผลต่อการเผาผนึกแบบ Liquid Phase Sintering

2.6.1.1 Particle Size ผงที่มีขนาดเล็กทำให้มีรูพรุน หากผงโลหะมีพื้นผิวโค้งจะทำให้เกิดการเผาผนึกได้ง่าย

2.6.1.2 Viscosity ความหนืดของเฟสของเหลวที่เกิดขึ้น ขึ้นอยู่กับส่วนผสมทางเคมีของของเหลวนั้น หากมีความหนืดต่ำก็จะแพร่กระจายไปในรูพรุนได้ดี แต่อาจทำให้ชิ้นงานเสียรูปได้

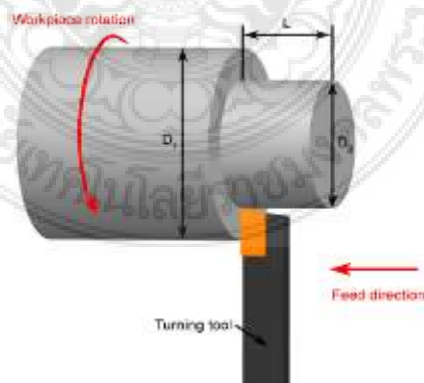
2.6.1.3 Surface Tension ความตึงผิวของของเหลวที่เกิดขึ้น ถ้ามีความตึงผิวต่ำจะสามารถกระจายตัวไปยังรูพรุนบริเวณต่าง ๆ ได้ดี



รูปที่ 2.17 แสดงการประสานตัวจากการอบพูน [10]

รูปที่ 2.17 แสดงลำดับการเปลี่ยนแปลงของโลหะประสานหลังจากการผสมผงโลหะ Substrate กับโลหะ Binder เมื่อความร้อนจากการอบพูนเพิ่มขึ้น โลหะประสานจะหลอมละลายแทรกเข้าตามช่องว่างจนเต็ม เมื่อถึงอุณหภูมิที่เหมาะสมใช้ระยะเวลาหนึ่ง ปล่อยให้เย็นตัวจะเกิดการพูนกันโดยสมบูรณ์

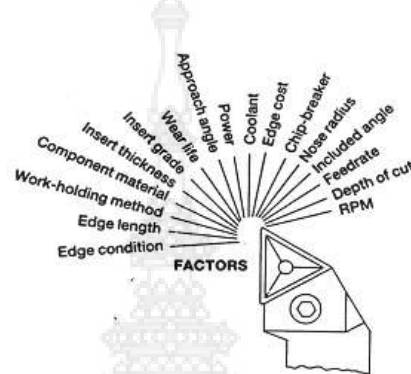
2.7 การกลึง (Turning Operation)



รูปที่ 2.18 ลักษณะการกลึง [33]

ชิ้นงานจากการอบผนึกอาจจะผลิตเป็นแผ่นมีดตัด (Cutting tools) ซึ่งนิยมผลจากทั้งสแตนคาร์ไบด์ผสมโคบอลต์ เป็นต้น ความสามารถในการตัดเฉือน ได้แก่ การกลึง ดังรูปที่ 2.18 จะเป็นการผลิตชิ้นงานปอกผิวงานให้มีขนาดและรูปร่างตามต้องการ

2.7.1 ปัจจัยที่สำคัญของงานกลึงปอกด้วยแผ่นมีดกลึง (Insert Tools) ประกอบด้วยอัตราป้อน (Feed Rate) ระยะเวลาป้อนลึก (Depth of Cut) ความเร็วตัด (Cutting Speed) ลักษณะมีดกลึง (Cutting Tool) และชิ้นงานที่ต้องการทำการตัดเฉือน (Work Piece)



รูปที่ 2.19 แสดงปัจจัยสำคัญที่ใช้ในงานกลึงปอก [33]

นอกจากปัจจัยต่าง ๆ ตามรูปที่ 2.19 แล้ว กระบวนการขึ้นรูปโลหะของการตัดเฉือน (Machining) ต้องพิจารณาปัจจัยอื่น ๆ ซึ่งมีความสำคัญต่อคุณภาพชิ้นงานและต้นทุนการผลิต ปัจจัยเหล่านั้น ได้แก่

- 1) เงื่อนไขของคมตัด (Edge Condition)
- 2) ความยาวของคมตัด (Edge Length)
- 3) วิธีการจับยึดชิ้นงาน (Work Holding Method)
- 4) ส่วนประกอบของวัสดุ (Component Material)
- 5) ความหนาของเม็ดมีด (Insert Thickness)
- 6) เกรดของเม็ดมีด (Insert Grade)
- 7) อายุของการสึกหรอ (Wear Lift)
- 8) มุมตัด (Approach Angle)
- 9) กำลัง (Power)
- 10) น้ำหล่อเย็น (Coolant)
- 11) ต้นทุนของคมตัด (Edge Cost)
- 12) การหักเศษ (Chip Breaker)
- 13) รัศมีปลายมีด (Nose Radius)
- 14) มุมประกอบของใบมีดกลึง (Included Angle)
- 15) อัตราป้อน (Feed Rate)
- 16) ระยะเวลาป้อนลึก (Depth of Cut)
- 17) ความเร็วรอบ (Revolution per Minute)

2.7.2 ทฤษฎีการกลึง (Turning theory)

2.7.2.1 ความเร็วตัด

เมื่อกำหนด

v = ความเร็วตัดงานกลึง (เมตร/นาที)

n = ความเร็วรอบชิ้นงานกลึง (รอบ/นาที)

d = ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางชิ้นงานของงานกลึง (มิลลิเมตร)

π = 3.1416 (มิลลิเมตร)

ความเร็วตัด

$$v = \frac{\pi \times d \times n}{1,000} \quad \text{เมตรต่อนาที} \quad (2-2)$$

2.7.2.2 ความเร็วรอบ

ความเร็วรอบ

$$n = \frac{v \times 1,000}{\pi \times D} \quad \text{รอบต่อนาที} \quad (2-3)$$

2.7.3 อัตราป้อน (Feed rate) เป็นระยะทางที่มีดกลึงเคลื่อนที่ปาดผิวชิ้นงาน เมื่อหมุนไปครบ 1 รอบ หากชิ้นงานหมุน 2 รอบระยะป้อนจะเพิ่มเป็น 2 เท่า หากหมุน N รอบ อัตราป้อนจะเท่ากับ ระยะป้อน * N ดังนั้น สามารถเขียนสมการเป็นความเร็วป้อน ดังนี้

$$\text{Feed velocity (vf)} = f * N \quad \text{มม/นาที}$$

2.7.4 ความลึกในการกลึง เป็นระยะจากผิวงานในแนวตั้งฉากกับแกนกลาง (Center) ของชิ้นงานถึงปลายมีดกลึงขณะกลึงชิ้นงาน

2.8 การอ่านรหัสแผ่นมีดกลึง

การเลือกรหัสใช้แผ่นมีดตามมาตรฐาน ISO โดยประกอบด้วยตัวอักษรที่บอกถึงส่วนต่างๆของแผ่นมีดแต่ละรูปทรง ยกตัวอย่าง การกำหนดรหัสแผ่นมีดคาร์ไบด์ (บริษัท SUMITOMO จำกัด)



รูปที่ 2.20 แสดงรหัสแผ่นมีด [33]

Chart 1: Insert Shape

Symbol	Insert Shape	Angle
C		80°
D		55°
E		75°
F		50°
V		35°
R		—
S		90°
T		60°
W		80°
A		85°
B		82°
K		55°
H		120°
O		135°
P		108°
L		90°
M		86°

Chart 2: Relief Angle

Symbol	Relief Angle
A	3°
B	5°
C	7°
D	15°
E	20°
F	25°
G	30°
N	0°
P*	11°
O	Others

O : Other clearance angle with specific description

Chart 3: Tolerance (mm)

Symbol	Nose Height	Inscribed Circle	Thickness
A	± 0,005	± 0,025	± 0,025
F	± 0,005	± 0,013	± 0,025
C	± 0,013	± 0,025	± 0,025
H	± 0,013	± 0,013	± 0,025
E	± 0,025	± 0,025	± 0,025
G	± 0,025	± 0,025	± 0,13
J*	± 0,005	± 0,05± 0,15	± 0,025
K*	± 0,013	± 0,05± 0,15	± 0,025
L*	± 0,025	± 0,05± 0,15	± 0,025
M*	± 0,08± 0,2	± 0,05± 0,15	± 0,13
N*	± 0,08± 0,2	± 0,05± 0,15	± 0,025
U*	± 0,13± 0,38	± 0,08± 0,25	± 0,13

Chart 4: Insert Hole or Breaker

Symbol	Hole	Hole Style	Chip Breaker	Shape	Symbol	Hole	Hole Style	Chip Breaker	Shape
N	No Hole	—	Nil		A	With Hole	Straight hole	Nil	
R	No Hole	—	One Face		M	With Hole	Straight hole	One Face	
F	No Hole	—	Both Faces		G	With Hole	Straight hole	Both Faces	
W	With Hole	Straight hole with top and counter sink (M1-M12)	Nil		B	With Hole	Straight hole with top and counter sink (M1-M12)	Nil	
T	With Hole	Straight hole with top and counter sink (M1-M12)	One Face		H	With Hole	Straight hole with top and counter sink (M1-M12)	One Face	
Q	With Hole	Straight hole with top and counter sink (M1-M12)	Nil		C	With Hole	Straight hole with top and counter sink (M1-M12)	Nil	
U	With Hole	Straight hole with top and counter sink (M1-M12)	Both Faces		J	With Hole	Straight hole with top and counter sink (M1-M12)	Both Faces	

● Tolerance of Nose Height (M-Class)

Inscribed Circle	Triangle	Square	80° Diamond	55° Diamond	35° Diamond	Round
6,35	± 0,08	± 0,08	± 0,08	± 0,11	—	—
9,525	± 0,08	± 0,08	± 0,08	± 0,11	± 0,16	—
12,70	± 0,13	± 0,13	± 0,13	± 0,15	—	—
15,875	± 0,15	± 0,15	± 0,15	± 0,18	—	—
19,05	± 0,15	± 0,15	± 0,15	± 0,18	—	—
25,40	± 0,18	± 0,18	± 0,18	—	—	—
31,75	—	± 0,20	—	—	—	—

● Tolerance of Inscribed Circle (M-Class)

Inscribed Circle	Triangle	Square	80° Diamond	55° Diamond	35° Diamond	Round
6,35	± 0,05	± 0,05	± 0,05	± 0,05	—	—
9,525	± 0,05	± 0,05	± 0,05	± 0,05	± 0,05	± 0,05
12,70	± 0,08	± 0,08	± 0,08	± 0,08	—	± 0,08
15,875	± 0,10	± 0,10	± 0,10	± 0,10	—	± 0,10
19,05	± 0,10	± 0,10	± 0,10	± 0,10	—	± 0,10
25,40	± 0,13	± 0,13	± 0,13	—	—	± 0,10
31,75	—	± 0,15	—	—	—	± 0,12

Chart 5: Cutting Edge Length (mm)

Shape	ISO	Cutting Edge	Inscribed Circle	Shape	ISO	Cutting Edge	Inscribed Circle	Shape	ISO	Cutting Edge	Inscribed Circle
C	06	6,4	6,35	D	07	7,7	6,35	W	03	3,8	5,56
	08	8,0	7,94		11	11,6	9,525		04	4,3	6,35
	09	9,7	9,525		15	15,5	12,70		05	5,4	7,94
	12	12,9	12,70		19	19,4	15,875		06	6,5	9,525
	16	16,1	15,875		09	9,7	5,56		08	8,7	12,70
	19	19,3	19,05		11	11,1	6,35		10	10,9	15,875
S	06	6,35	6,35	16	16,6	9,525	08	8,0	8,0		
	S7	7,14	7,14	06	6,9	3,97	10	10,0	10,0		
	07	7,94	7,94	08	8,2	4,76	12	12,0	12,0		
	09	9,525	9,525	09	9,6	5,56	12	12,7	12,70		
	12	12,7	12,70	11	11,0	6,35	15	15,875	15,875		
	15	15,875	15,875	16	16,5	9,525	16	16,0	16,0		
	19	19,05	19,05	22	22,0	12,70	19	19,05	19,05		
	25	25,4	25,40	27	27,5	15,875	25	25,0	25,0		
	31	31,75	31,75	33	33,0	19,05	25	25,4	25,40		

Chart 6: Thickness

ISO	Thickness (mm)
01	1,59
02	2,38
T2	2,78
03	3,18
T3	3,97
04	4,76
06	6,35
07	7,94
09	9,52

Chart 7: Nose Radius

ISO	Nose Radius (mm)
00	Sharp Point
01	0,1
02	0,2
04	0,4
08	0,8
12	1,2
16	1,6
24	2,4
32	3,2
M0	Round Insert (Metric)
00	Round Insert (Imperial)

Chart 8: Feed Direction

ISO	Direction
R	Right-hand
L	Left-hand
N	Neutral

Chart 9: Chip Breaker

Symbol	Process	Bumpy Type	Standard	Handed
F	Fine Finishing To Finishing	FA, FK, FP		FT, FX, FZ, FY, FW
S, L	Light Cut	SE, SEW, SC, SF, SK, SP, SS, SU, LU, LUW	SJ, EX	SD, SM, ST
G, U	General	GU, GUW, GE, UG, UP, US, UX	GZ, UZ	UM
M	Rough	MU, ME, MX	MC	MM
H	Heavy	MP, HG, HP, HU, HW		

รูปที่ 2.21 แสดงรหัสแผ่นมีด (ต่อ) [33]

2.9 เหล็กกล้าชิ้นส่วนเครื่องจักรกล

เหล็กกล้าชิ้นส่วนเครื่องจักรกล ได้แก่ 1045, 1050 (AISI) เทียบเท่ากับเหล็กกล้า S45C, S50C (JIS) นิยมทำเป็นชิ้นส่วนแม่พิมพ์ เพื่อง เหลลา เนื่องจากชุบแข็งได้ดี โดยเฉพาะชุบแข็งบริเวณผิว (Case depth)

2.10 การทดสอบความแข็งด้วยวิธี Hardness Vickers

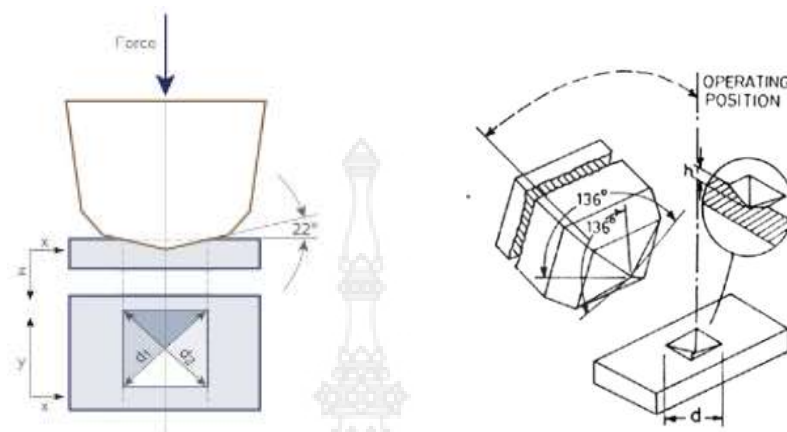
การทดสอบความแข็ง Vickers โดยใช้หัวกดเพชรรูปปิรามิดฐานสี่เหลี่ยมจัตุรัส ปลายหัวกดทำมุม 136 °C ดังรูปที่ 2.22 น้ำหนักกดอยู่ระหว่าง 5 - 120 กิโลกรัม โดยเพิ่มครั้งละ 5 กิโลกรัม หลักการเดียวกันกับการทดสอบความแข็งแบบ Brinell คือ ค่าความแข็งที่ได้คิดจากน้ำหนักกดที่กระทำต่อพื้นที่ของรอยกดและสามารถหาค่าพื้นที่รอยกดได้ดังสมการ

$$\begin{aligned} \text{พื้นที่รอยกด} &= d^2 / 2 \sin (136^\circ / 2) \\ &= d^2 / 1.8544 \end{aligned} \quad (2-4)$$

ดังนั้นค่าความแข็ง Vickers หัวกดเพชรปิรามิดฐานสี่เหลี่ยมจัตุรัส DPH (Vickers Diamond Pyramid Hardness) หรือ HV (Vickers Hardness) จะมีค่าดังสมการ

$$\begin{aligned} \text{ความแข็ง} &= \text{แรงกด} / \text{พื้นที่รอยกด} \\ \text{จะได้ DPH} &= 1.8544 F / d^2 \end{aligned} \quad (2-5)$$

เมื่อ DPH คือความแข็ง Vickers มีหน่วยเป็นกิโลกรัมต่อตารางมิลลิเมตร (kg/mm^2) F คือแรงกดมีหน่วยเป็นกิโลกรัม (kg) และ d คือความยาวเส้นทแยงมุมเฉลี่ยมีหน่วยเป็นมิลลิเมตร (mm)



รูปที่ 2.22 ลักษณะหัวกดและรอยกดของการทดสอบความแข็ง Vickers [34]

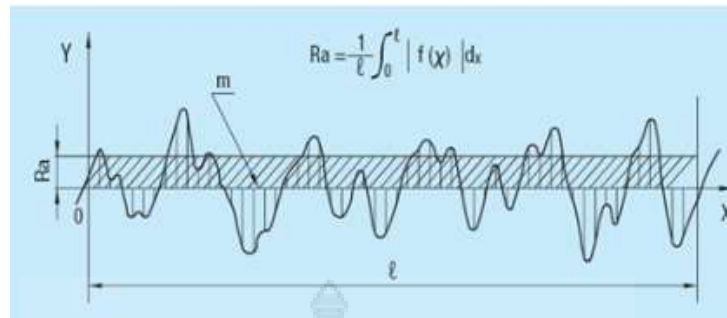
วิธีการทดสอบ เริ่มจากนำชิ้นงานวางบนแท่นทดสอบ จากนั้นยกแท่นวางขึ้นจนชิ้นงานเข้าใกล้หัวกด ปลดลือระบบคานน้ำหนักจะถูกส่งไปยังหัวกดในอัตรา 20:1 อย่างต่อเนื่อง จากนั้นนำน้ำหนักกดออก ลดระดับแท่นวางลง ตรวจสอบรอยกดด้วยกล้องจุลทรรศน์เพื่อทำการวัดเส้นทแยงมุมของรอยกด การทดสอบความแข็งแบบ Vickers ข้อดี คือ ขนาดของเส้นทแยงมุมจะมีความแม่นยำ นอกจากนั้นยังให้ค่าความแข็งที่ถูกต้องเมื่อใช้ทดสอบกับวัสดุที่แข็งมากประมาณ 1,300 HV เนื่องจากหัวกดไม่เกิดการยุบตัว

2.11 ความหยาบของพื้นผิว (Surface Roughness)

ความหยาบของพื้นผิว (Surface Roughness) หมายถึง ขนาดความขรุขระของผิว หากมีความขรุขระมากแสดงว่ามีความหยาบมาก ความขรุขระหรือความหยาบจะใช้กับผิวของวัสดุ

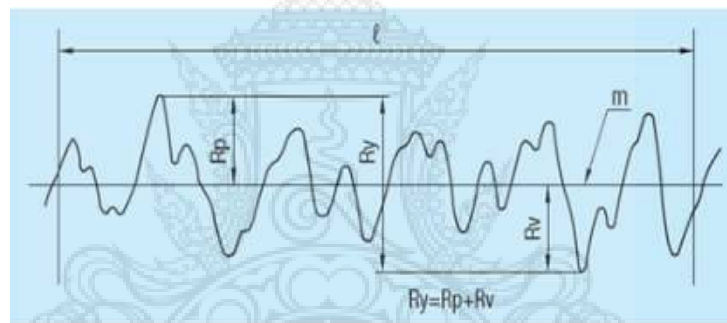
ความหยาบผิวจึงเป็นสมบัติทางโลหะวิทยา ในการวัดความหยาบผิวจะใช้เครื่องวัดความหยาบผิว (Surface Roughness Tester)

2.11.1 ความหยาบเฉลี่ยของพื้นผิวตามอนุกรมเลขคณิต (R_a) วัดจากกราฟความหยาบผิวที่อยู่บนเส้นอ้างอิง ค่าเฉลี่ยนี้จะอยู่บนกราฟตามแนวแกน X ของเส้นอ้างอิง และแนวแกน Y จะเป็นขนาดความหยาบผิว ค่า R_a จะหาได้จากสมการแสดงบนรูปที่ 2.23 มีหน่วยเป็นไมครอน (μm) เมื่อ $Y = X$



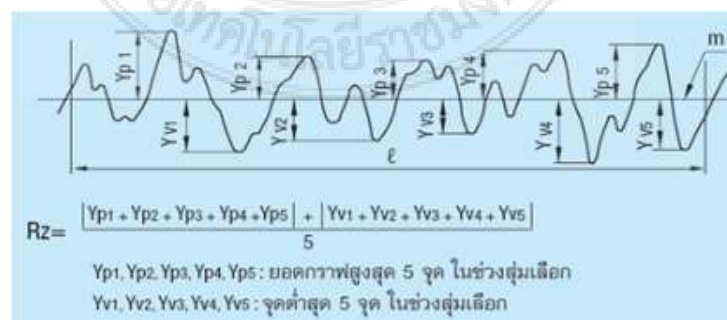
รูปที่ 2.23 การหา (Ra) [18]

2.11.2 ค่าความหยาบสูงสุด (Ry) ค่าความหยาบสูงสุด วัดจากกราฟความหยาบผิวที่อยู่บนเส้นอ้างอิงเป็นระยะที่เกิดจากกราฟสูงสุดและต่ำสุด มีหน่วยเป็นไมครอน (μm) หมายเหตุ : การหาค่า Ry ควรเลือกบริเวณที่มีกราฟความหยาบปกติ ไม่ควรวัดบริเวณที่มีค่ากราฟสูงหรือต่ำผิดปกติ



รูปที่ 2.24 การหา (Ry) [18]

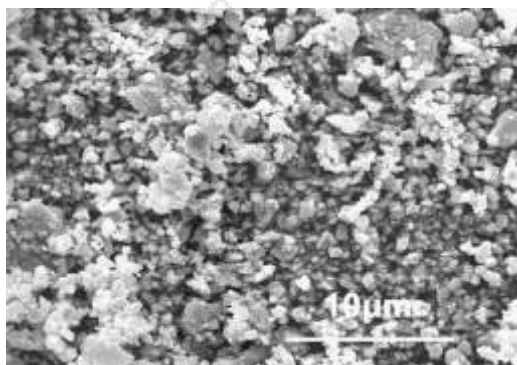
2.11.3 ค่าเฉลี่ยความหยาบของพื้นผิวแบบสิบจุด (Rz) ค่าเฉลี่ยนี้วัดจากกราฟความหยาบผิวที่อยู่บนเส้นอ้างอิง โดยคำนวณจากความสูงของยอดกราฟ 5 จุดด้านบน และความสูงของยอดกราฟ 5 จุดด้านล่างมารวมกันและหาค่าเฉลี่ยมีหน่วยเป็นไมครอน (μm)



รูปที่ 2.25 การหา (Rz) [18]

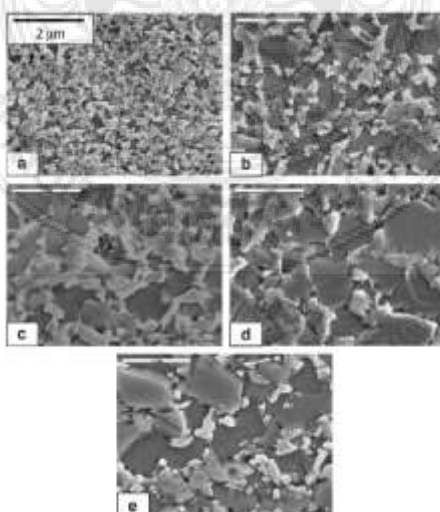
2.12 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.12.1 การผลิตผงทั้งสแตนคาร์ไบด์ (F.L. Zhang, 2008) เงื่อนไขการทดลอง ผงทั้งสแตนคาร์ไบด์ 99.8 % ขนาด 1 ไมครอน ผสมโคบอลต์ 10 % บดผสมผงทั้งสแตนคาร์ไบด์กับผงโคบอลต์ ด้วยวิธีการ Ball Milling อัตราส่วนของน้ำหนักลูกบดต่อน้ำหนักผงทั้งสแตนคาร์ไบด์ 1:1 เป็นเวลา 10 ชั่วโมง



รูปที่ 2.26 ภาพผลการวิเคราะห์ผงทั้งสแตนคาร์ไบด์ผสมกับผงโคบอลต์ด้วยวิธีการ Scanning Electron Microscope [7]

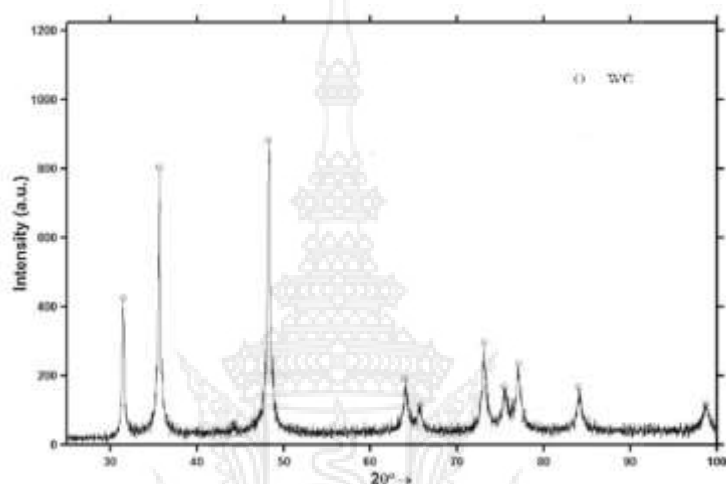
2.12.2 การผลิต ผลิตภัณฑ์ทั้งสแตนคาร์ไบด์ (H.C Kim, 2007) เงื่อนไขการทดลอง ผงทั้งสแตนคาร์ไบด์ 99.8 % ขนาด 0.5, 1.3, 2.4, 4.3, 6.5 ไมครอน ผสมโคบอลต์ 8 % ขนาด 2 ไมครอน บดผสมผงทั้งสแตนคาร์ไบด์กับผงโคบอลต์ด้วยวิธีการ Ball Milling อัตราส่วนของน้ำหนักลูกบดต่อน้ำหนักผงทั้งสแตนคาร์ไบด์ 6 ต่อ 1 อัดขึ้นรูปด้วยแรง 60 MPa อบผนึกชิ้นงาน Green Compact ด้วยอุณหภูมิ 1,350 °C



รูปที่ 2.27 ภาพผลการวิเคราะห์โครงสร้างชิ้นงานหลังการอบผนึกด้วยวิธีการ Scanning Electron Microscope [14]

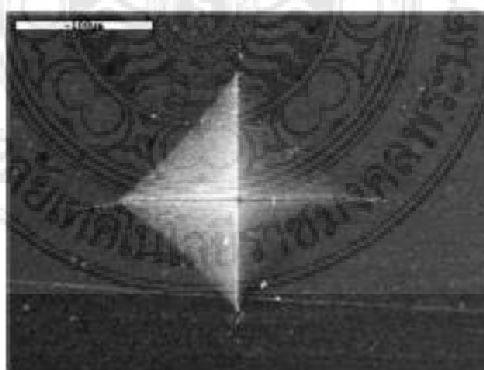
จากรูปที่ 2.27 ภาพ a โลหะทังสเตนคาร์ไบด์มีขนาด 0.2 ไมครอน ภาพ b โลหะทังสเตนคาร์ไบด์มีขนาด 0.8 ไมครอน ภาพ c โลหะทังสเตนคาร์ไบด์มีขนาด 1 ไมครอน ภาพ d โลหะทังสเตนคาร์ไบด์มีขนาด 1.3 ไมครอน ภาพ e โลหะทังสเตนคาร์ไบด์มีขนาด 1.6 ไมครอน

2.12.3 การผลิตผลิตภัณฑ์ทังสเตนคาร์ไบด์ (Hwan Cheol Kim, 2004) เงื่อนไขการทดลองขนาดผงทังสเตนคาร์ไบด์ 200 นาโนเมตร ผสมโคบอลต์ 15 °C อัดขึ้นรูปด้วยแรง 60 MPa อบพูนิกขึ้นงาน Green Compact ด้วยอุณหภูมิ 1,495 °C



รูปที่ 2.28 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุผงทังสเตนคาร์ไบด์ X-ray Diffractometer [19]

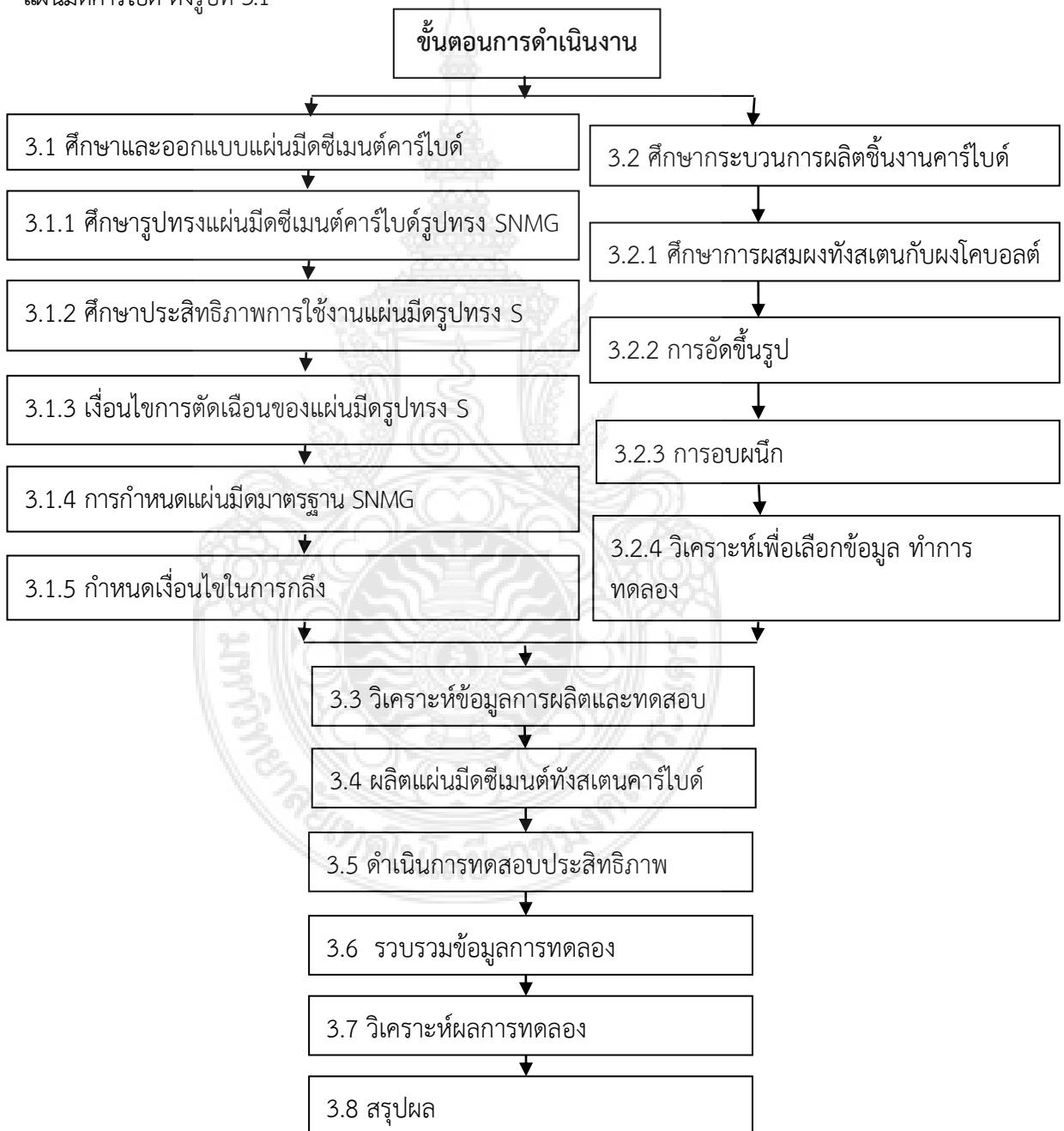
จากรูปที่ 2.28 เป็นการนำผงทังสเตนคาร์ไบด์ก่อนผสมโคบอลต์มาวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุ พบว่าเป็นทังสเตนคาร์ไบด์ทุก ๆ องค์ประกอบ



รูปที่ 2.29 ผลการวิเคราะห์ความแข็งและแสดงรอยกดบนผลิตภัณฑ์ทังสเตนคาร์ไบด์ [19]

บทที่ 3 วิธีการวิจัย

การวิจัยนี้มีขั้นตอนดำเนินงานจากการผลิตผงโลหะทั้งสแตนคาร์ไบด์ (WC) และพัฒนาให้เป็นผลิตภัณฑ์แผ่นมิตคาร์ไบด์ ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แผนผังการดำเนินโครงการ


3.1 ศึกษาและออกแบบแผ่นมีดซีเมนต์คาร์ไบด์

3.1.1 ศึกษารูปทรงแผ่นมีดซีเมนต์คาร์ไบด์รูปทรง SNMG 120408 จากบริษัท SANDVIK, LAMINA, TUNGALOY, ในตารางที่ 3.1 – 3.7

ตารางที่ 3.1 แสดงรหัสแผ่นมีดรูปทรง S (Square)

ตราผลิตภัณฑ์	รหัส	มุมคมตัด (องศา)	รูปทรง
SANDVIK	S	90	
LAMINA	S	90	
TUNGALOY	S	90	


ตารางที่ 3.2 แสดงลักษณะมุมหลบของมีด N (Relief Angle)

ตราผลิตภัณฑ์	รหัส	มุมหลบ (องศา)	ภาพลักษณะมุมหลบ
SANDVIK	N	0	
LAMINA	N	0	
TUNGALOY	N	0	

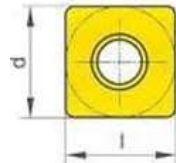
ตารางที่ 3.3 แสดงการกำหนดระยะเผื่อของแผ่นมีด M (Tolerance)

ตราผลิตภัณฑ์	รหัส	ระยะเผื่อมุมปลายมีด	ระยะเผื่อความหนาแผ่นมีด	ระยะเผื่อความโตแผ่นมีด
SANDVIK	M	0.08 - 0.18	± 0.13	0.05 - 0.15
LAMINA	M	0.08 - 0.18	± 0.13	0.05 - 0.15
TUNGALOY	M	0.08 - 0.18	± 0.13	0.05 - 0.15

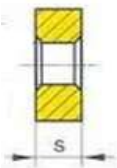
ตารางที่ 3.4 แสดงลักษณะรูตรงกลางมีด G (Hole and Chip Breaker)

ตราผลิตภัณฑ์	รหัส	ลักษณะรูยึด	รูปแผ่นมีด
SANDVIK	G	รูยึดแบบสองด้าน	
LAMINA	G	รูยึดแบบสองด้าน	
TUNGALOY	G	รูยึดแบบสองด้าน	

ตารางที่ 3.5 แสดงขนาดความกว้างและความยาวของแผ่นมีด 12

ตราผลิตภัณฑ์	รหัส	กว้าง x ยาว (mm)	รูปแผ่นมีด
SANDVIK	12	12.7 x 12.7	
LAMINA	12	12.7 x 12.7	
TUNGALOY	12	12.7 x 12.7	

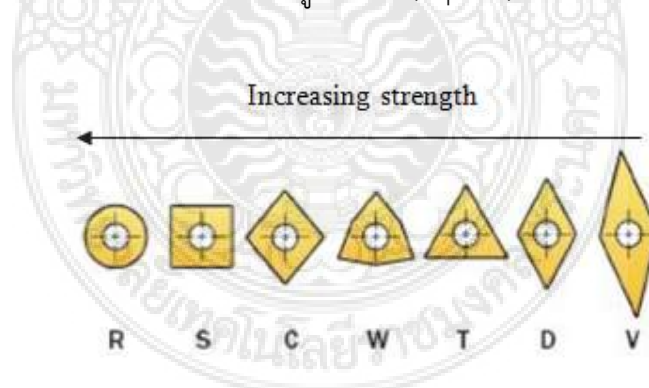
ตารางที่ 3.6 แสดงขนาดความหนาของแผ่นมีด 04

ตราผลิตภัณฑ์	รหัส	หนา (mm)	รูปแผ่นมีด
SANDVIK	04	4.76	
LAMINA	04	4.76	
TUNGALOY	04	4.76	

ตารางที่ 3.7 แสดงขนาดรัศมีคมตัดของแผ่นมีด 08

ตราผลิตภัณฑ์	รหัส	รัศมีคมตัด	รูปแผ่นมีด
SANDVIK	08	0.8 °c	
LAMINA	08	0.8 °c	
TUNGALOY	08	0.8 °c	

3.1.2 ศึกษาประสิทธิภาพการใช้งานแผ่นมีดรูปทรง S (Square)



รูปที่ 3.2 แสดงความสัมพันธ์ของรูปทรงแผ่นมีดและ Strength [11]

จากรูปที่ 3.2 รูปทรงของแผ่นมีดต่างกันจะสัมพันธ์กับความแข็งแรง ได้แก่ แผ่นมีดรูปทรง V จะมีความแข็งแรงน้อยกว่าแผ่นมีดรูปทรงอื่น ๆ

ตารางที่ 3.8 แสดงความสามารถในการใช้งานกลึงภายนอกของเม็ดมีดรูปทรง S (Square)

Insert Shape	Longitudinal turning/ facing	Profiling	Facing	Plunging
				
	●		● ●	

● ● = ใช้งานได้ดี ● = ใช้งานได้

3.1.3 เจื่อนไขในการตัดเฉือนของแผ่นมีดรูปทรง S (Square) การศึกษาการทดสอบแผ่นมีดคาร์ไบด์ทรง S (Square)

ตารางที่ 3.9 เจื่อนไขการกลึงที่เหมาะสมของแผ่นมีดคาร์ไบด์ทรง S (Square) จากบริษัท SANDVIK , TUNGALOY , LAMINA

บริษัท	ระยะกินลึก (มิลลิเมตร)		อัตราป้อน (มิลลิเมตรต่อรอบ)		ความเร็วตัด (เมตรต่อนาที)	
	Min	Max	Min	Max	Min	Max
SANDVIK	0.25	2.1	0.06	0.25	35	80
TUNGALOY	0.5	2.5	0.5	2.5	100	250
LAMINA	0.008	0.079	0.005	0.016	50	100

3.1.4 การกำหนดแผ่นมีดมาตรฐาน SNMG 120408 ประกอบด้วยอักษร 7 ตัวโดยมีความหมาย

3.1.4.1 S หมายถึง ลักษณะรูปทรงแผ่นมีดที่มีลักษณะสี่เหลี่ยมมุม (90 °C)

3.1.4.2 N หมายถึง มุม หลบ (Relief Angle) ของแผ่นมีดเท่ากับ 0 องศา

3.1.4.3 M หมายถึง ระยะเวลา (Tolerance) มีดังนี้

ก) ความหนา (Thickness) ± 0.13

ข) มุมปลายมีด (Conner Height) $\pm 0.08 - 0.18$

ค) I.C Size $\pm 0.05 - 0.15$

3.1.4.4 G หมายถึง มีรูตรงกลางมีดและมีมุมหักเศษใช้งานได้ทั้งสองด้าน

3.1.4.5 12 หมายถึง ขนาดความกว้างและความยาวของแผ่นมีดมีขนาด 12.7 มิลลิเมตร

3.1.4.6 04 หมายถึง ความหนาของแผ่นมีดขนาด 4.67 มิลลิเมตร

3.1.4.7 08 หมายถึง รัศมีโค้งปลายมีด 0.8 มิลลิเมตร

3.1.5 กำหนดเจื่อนไขในการกลึงจากการศึกษาข้อมูลในการกลึงเจื่อนไขในการกลึง

3.1.5.1 ความเร็วตัด 35 – 250 (เมตร/นาที)

3.1.5.2 อัตราป้อน 0.005 – 2.5 (มิลลิเมตร/รอบ)

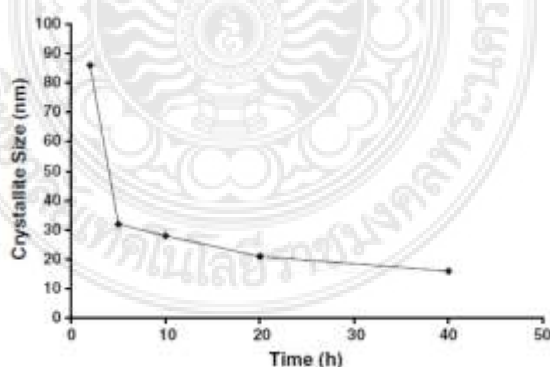
3.1.5.3 ระยะกินลึก 0.008 – 2.5 (มิลลิเมตร)

3.2 ศึกษากระบวนการผลิตชิ้นงานคาร์ไบด์

ขั้นตอนการผลิตแผ่นมีดซีเมนต์ทั้งสแตนคาร์ไบด์จากผงทั้งสแตนคาร์ไบด์ (WC) ผสมกับโคบอลต์ (Co) และ Paraffin Wax ในการผสมนั้นจะใช้วิธีการบดผสมแบบ Ball Milling จากนั้นมาอัดขึ้นรูปเพื่อให้เป็นชิ้นงาน Green Compact และทำการอบผนึก (Sintering) เพื่อให้โคบอลต์ละลายยึดติดกันเป็นโครงสร้างที่เหมาะสมต่อการนำไปใช้งานต่อไป

ตารางที่ 3.10 เงื่อนไขการบดผงทั้งสแตนคาร์ไบด์

อ้างอิง ผลงานวิจัย	ขนาดผง ก่อนบด (μm)	สัดส่วน ลูกบอล บด	ขนาดลูก บอลบด (mm)	ชนิดของ สารละลาย	ความ เร็วรอบ (RPM)	เวลา ในการ บด (h)	ขนาดผง หลังบด (nm)
F.L. Zhang 2008	6	10 : 1	6	Ethanol	150	10	46.5
Y. Han 2011	0.21	2 : 1	6-8	Ethanol	200	10	40.6
M.H. Enayati 2009	5	10 : 1	20	Ethanol	350	40	17.5



รูปที่ 3.3 กราฟการลดลงของขนาดผงทั้งสแตนคาร์ไบด์เมื่อเทียบกับระยะเวลาในการบด [33]

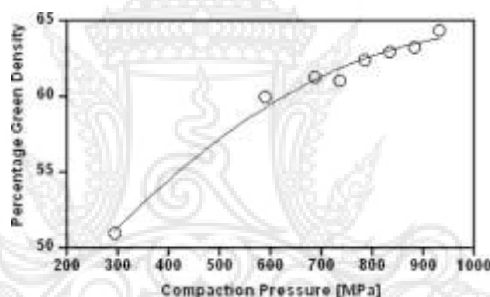
จากรูปที่ 3.3 แสดงขนาดผงโลหะที่ผ่านการบด เมื่อเวลาเพิ่มขึ้นขนาดผงโลหะจะเล็กลง เมื่อเวลาในการบด 40 ชั่วโมง ผงโลหะจะมีขนาดประมาณ 20 nm

3.2.1 ศึกษาการผสมผงทั้งสแตนกับผงโคบอลต์

ตารางที่ 3.11 เงื่อนไขการผสมผงทั้งสแตนคาร์ไบด์กับโคบอลต์

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

3.2.2 การอัดขึ้นรูปโลหะทั้งสแตนคาร์ไบด์



รูปที่ 3.4 กราฟแสดงความหนาแน่นต่อแรงกดอัดของผงทั้งสแตนคาร์ไบด์ [35]

ตารางที่ 3.12 เงื่อนไขการอัดขึ้นรูป

อ้างอิงผลงานวิจัย (References)	เงื่อนไขการอัดขึ้นรูป (Consolidation process)	แรงกดอัด Passure (MPa)	อุณหภูมิ Temperature ($^{\circ}\text{C}$)
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 $^{\circ}\text{C}$ แรงอัด 130 Megapascal

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

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

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

จากงานวิจัยของ S. Liu 2006 ขึ้นรูปโดยวิธีขึ้นรูปแบบร้อน (HIP)

3.2.3 การอบผนึกเป็นการนำชิ้นงานมาเผาในเตาที่มีอุณหภูมิใกล้เคียงจุดหลอมเหลวของชิ้นงานนั้น ๆ จึงทำให้โลหะเกิดการประสานจะมีความแข็งแรงมากขึ้น

ตารางที่ 3.13 แสดงอุณหภูมิในการอบผนึกต่อสมบัติของแผ่นมีด

อ้างอิงผลงานวิจัย (References)	อุณหภูมิ temperature (°C)	ความหนาแน่น Density (g/cm ³)	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 °C ความหนาแน่น 14.1 g/cm³ ได้ความแข็ง 1,397 Hardness Vicker

จากงานวิจัยของ B. Ratna Sunil ใช้อุณหภูมิในการอบผนึก 1,460 °C 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

3.2.4 วิเคราะห์เพื่อเลือกข้อมูลทำการทดลอง

จากการพิจารณารูปที่ 3.3 จะเห็นได้ว่าเมื่อเวลาในการบด (Ball Milling) เพิ่มขึ้นขนาดเกรนของผงทังสเตนคาร์ไบด์ (Tungsten Carbide) จะมีขนาดเล็กลงจึงเลือกทำการบดผงทังสเตนคาร์ไบด์ที่ระยะเวลา 100 ชั่วโมง

แผ่นมีดซีเมนต์ทังสเตนคาร์ไบด์ (Cemented Tungsten Carbide) ผสมโคบอลต์เพื่อเป็นโลหะประสานจะมีสัดส่วนอยู่ที่ 4 - 25 %

กระบวนการอัดขึ้นรูปโลหะผงจะทำหลังจากการผสมผงทังสเตนคาร์ไบด์กับผงโคบอลต์โดยมี Paraffin Wax เป็นตัวทำให้ผงโลหะเกิดการเชื่อมประสานเพื่อทำให้ผงโลหะยึดเกาะตัวกันชั่วคราวในขณะที่ทำการอัดขึ้นรูป จากการศึกษาข้อมูลงานวิจัยพบว่าใช้แรงอัดอยู่ในช่วง 35 – 950 Megapascal

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

3.3 วิเคราะห์ข้อมูลการผลิตและทดสอบ

3.3.1 รูปทรงเรขาคณิต แผ่นมีดรูปทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัสเหมาะกับงานกลึงปอกและปาดผิวชิ้นงาน โดยชิ้นงานมีความหนาความละเอียดปานกลางตามแผ่นมีดรูปทรงมาตรฐาน SNMG 120408

3.3.2 การกำหนดขนาด ผลิตแผ่นมีดตามแบบของแผ่นมีดที่ทำการตรวจสอบขนาดโดยมีขนาดความกว้าง (Edge Length) 12.7 มิลลิเมตร ความหนา (Thickness) 4.76 มิลลิเมตร และรัศมีคมตัด (Conner Radius) 0.8 องศา และมุมคายเศษ 15 องศา ตามแผ่นมีดรูปทรงมาตรฐาน SNMG 120408 ที่ผลิตขึ้นสำหรับงานกลึงละเอียดปานกลาง เหมาะกับวัสดุเหล็กกล้าคาร์บอนปานกลาง

3.3.3 การบดละเอียด จากการศึกษาข้อมูลการบดละเอียดถ้าใช้เวลาในการบดละเอียดมากจะทำให้ขนาดอนุภาคของผงทั้งสเตนคาร์ไบด์เล็ก จึงเลือกเวลาในการบดละเอียดอยู่ที่ 100 ชั่วโมง

3.3.4 วัสดุก่อนอัดขึ้นรูป จากข้อมูลการศึกษากระบวนการผลิตชิ้นงานคาร์ไบด์ เลือกใช้โคบอลต์เป็นโลหะผสมใช้ส่วนผสมอยู่ที่ 5, 10, 15 % และใช้ Paraffin Wax เป็นวัสดุประสานชั่วคราว ทำการบดผสมผงเป็นเวลา 20 ชั่วโมง แบ่งออกเป็น 2 ช่วงของการบดผสม คือผสมผงทั้งสเตนคาร์ไบด์กับผงโคบอลต์เป็นเวลา 12 ชั่วโมง จากนั้นผสม Paraffin Wax เป็นเวลา 8 ชั่วโมง ก่อนทำการอัดขึ้นรูปเนื่องจากวัสดุประสานจะทำหน้าที่ให้โลหะผงเกิดการยึดเกาะตัวกันในระหว่างการอัดขึ้นรูป

3.3.5 กระบวนการอัดขึ้นรูป การอัดขึ้นรูปโลหะผงเลือกใช้แรงอัดขึ้นรูปอยู่ที่ 350 Megapascal เนื่องจากรูปที่ 3.4 ได้ใช้แรงในการอัดขึ้นรูปอยู่ในช่วง 300 - 950 Megapascal

3.3.6 การอบพ่นึกชิ้นงาน เนื่องจากโคบอลต์มีจุดหลอมเหลวอยู่ที่ 1,400 - 1,500 °C และจากตารางที่ 3.13 อบพ่นึกที่ 1,430 °C ได้ความแข็งมากที่สุดจึงเลือกใช้อุณหภูมิในการอบพ่นึกชิ้นงานอยู่ที่ 1,430 °C

3.3.7 การผลิตและทดสอบ ผลิตชิ้นงานรูปทรง SNMG 120408 ผสมผงโคบอลต์ที่ 5, 10, 15 % มีขนาดกว้าง 12.7 มิลลิเมตร ยาว 12.7 มิลลิเมตร หนา 4.76 มิลลิเมตร และรัศมีคมตัด 0.8 องศา และมุมคายเศษ 0 องศา ตามแผ่นมีดรูปทรงมาตรฐาน SNMG 120408 บดละเอียดผงทั้งสเตนคาร์ไบด์ 100 ชั่วโมง ใช้ Paraffin Wax เป็นวัสดุประสานชั่วคราว โดยทำการบดผสมผงเป็นเวลา 20 ชั่วโมง แบ่งออกเป็น 2 ช่วงของการบดผสม คือผสมผงทั้งสเตนคาร์ไบด์กับผงโคบอลต์เป็นเวลา 12 ชั่วโมง จากนั้นผสม Paraffin Wax เป็นเวลา 8 ชั่วโมง ใช้แรงอัดขึ้นรูปที่ 350 Megapascal อบพ่นึกที่ 1,430 °C

3.4 ผลิตแผ่นมีดซีเมนต์ทั้งสเตนคาร์ไบด์

กระบวนการผลิตในแต่ละขั้นตอนการผลิตเริ่มจากการเตรียมผงโลหะทั้งสเตนคาร์ไบด์ ได้แก่การคัดขนาด ชั่งน้ำหนักเพื่อให้ทราบสัดส่วนของโลหะ สำหรับการเตรียมผงโลหะขั้นตอนต่อไป

3.4.1 การเตรียมผง (Preplanning of metal powder)

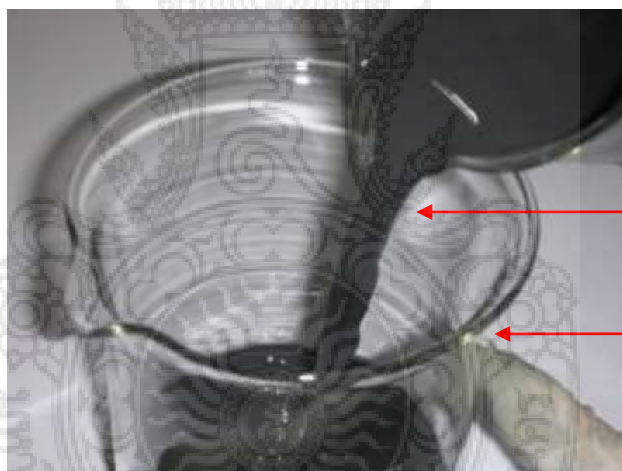


ผงทั้งสเตนคาร์ไบด์

เครื่องชั่งน้ำหนักแบบ
ดิจิตอล รุ่น HR-200

รูปที่ 3.5 ชั่งน้ำหนักผงทั้งสเตนคาร์ไบด์ความละเอียด 1/10,000 กรัม

จากรูปที่ 3.5 เป็นการชั่งน้ำหนักโลหะผงทั้งสเตนคาร์ไบด์ให้ได้จำนวนตามกำหนด คือ ปริมาณ 120 กรัม โดยใช้เครื่องชั่งน้ำหนักแบบดิจิตอล รุ่น HR-200



ผงทั้งสเตนคาร์ไบด์
ที่ผสมน้ำกลั่น

บีกเกอร์ขนาด
400 มิลลิลิตร

รูปที่ 3.6 ล้างผงทั้งสเตนคาร์ไบด์ด้วยน้ำกลั่น

จากรูปที่ 3.6 ล้างโลหะผงทั้งสเตนคาร์ไบด์ ด้วยน้ำกลั่นโดยบรรจุผงทั้งสเตนคาร์ไบด์ในบีกเกอร์และเติมน้ำกลั่นปริมาณ 400 มิลลิลิตร กวนให้เข้ากัน และให้ผงโลหะตกตะกอน จากนั้นแยกน้ำกลั่นและผงโลหะออกจากกัน สารปนเปื้อนที่มีค่าความหนาแน่นน้อยกว่าจะลดลง ทำการล้างด้วยน้ำกลั่นซ้ำ ๆ จนกว่าสารปนเปื้อนไม่ตกค้างในผงโลหะก่อนที่จะใช้เอทานอลในลำดับต่อไป

สารละลายเอทานอล

ผงทั้งสแตนคาร์ไบด์
ที่ผสมเอทานอล



รูปที่ 3.7 ล้างผงทั้งสแตนคาร์ไบด์ด้วยเอทานอล

เพื่อขจัดคราบสกปรกที่อาจตกค้างในผงโลหะทั้งสแตนคาร์ไบด์จึงทำการทำความสะอาดโลหะด้วยการล้างขั้นสุดท้ายใช้เอทานอล ดังรูปที่ 3.7

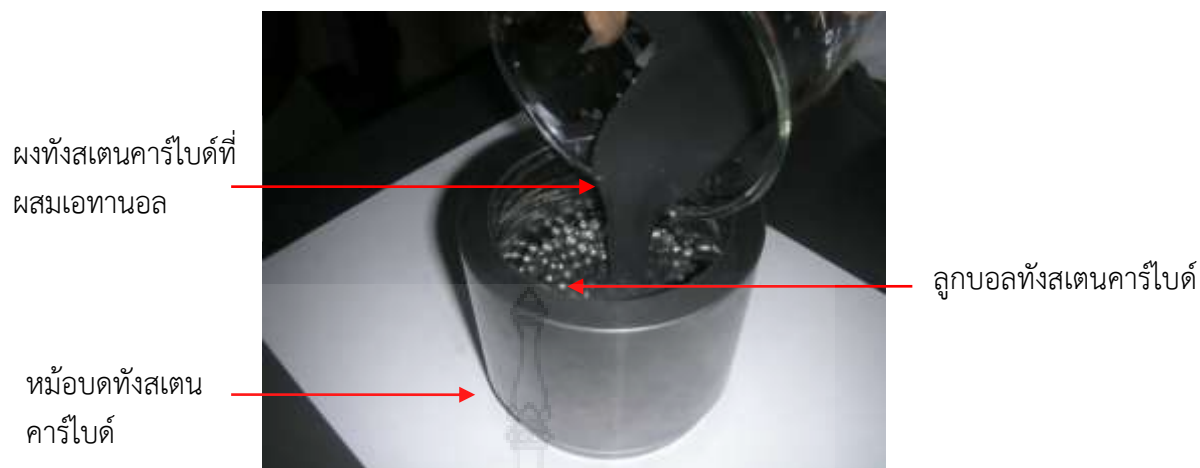
3.4.2 การบดละเอียด



ลูกบอลบดทั้งสแตน

รูปที่ 3.8 ลูกบอลบดทั้งสแตน (Ball Mill)

จากรูปที่ 3.8 เตรียมลูกบอลทั้งสแตนคาร์ไบด์ขนาด 6 มิลลิเมตร น้ำหนักลูกบอลบดต่อน้ำหนักของผงโลหะ มีอัตราส่วนเป็น 1:10 ก่อนการบดลูกบอลต้องได้รับการทำความสะอาด ไม่มีวัสดุปนเปื้อน



รูปที่ 3.9 แสดงการบรรจุลูกบอลและผงโลหะในหม้อบด

เมื่อเตรียมผงโลหะและลูกบอลเรียบร้อยแล้วบรรจุลงในหม้อบด ดังรูปที่ 3.9 ตามอัตราส่วนที่กำหนด เพื่อเตรียมการบดต่อไป



รูปที่ 3.10 แสดงการวางหม้อบดในเครื่องบด

หม้อบดที่บรรจุลูกบอลและผงโลหะเรียบร้อยแล้ว ปิดฝาให้สนิท (ฝาทังสเตนคาร์ไบด์) และประกอบหม้อบดเข้าเครื่องบด ตามรูปที่ 3.10 สำหรับการบดต่อไป



รูปที่ 3.11 แสดงการเตรียมผงทั้งสแตนคาร์ไบด์ระหว่างการบดละเอียด

จากรูปที่ 3.11 นำผงทั้งสแตนคาร์ไบด์ออกจากหม้อบดและล้างผงโลหะให้สะอาด เมื่อครบ 50 ชั่วโมง ด้วยเงื่อนไขการล้าง ดังรูปที่ 3.6,3.7

3.4.3 การลดความชื้นในผงโลหะก่อนการอบในเตาสัญญากาศ



รูปที่ 3.12 แสดงการเผาลดความชื้น

จากรูปที่ 3.12 แสดงการเผาลดความชื้นผงทั้งสแตนคาร์ไบด์หลังการบด เพื่อให้ผงแห้งและป้องกันไม่ให้เกิดออกไซด์ ก่อนนำไปอบแห้งด้วยเตาสัญญากาศ (เตาไฟฟ้า รุ่น HS-115 ให้ความร้อนใช้อุณหภูมิ 100 °C)



รูปที่ 3.13 แสดงการอบผงโลหะด้วยเตาสุญญากาศ

จากรูปที่ 3.13 แสดงการวางภาชนะบรรจุผงทังสเตนคาร์ไบด์หลังจากลดความชื้น แล้วนำมาอบในเตาสุญญากาศ เพื่อให้แห้งและไม่มีสิ่งเจือปนเป็นทังสเตนคาร์ไบด์ 100 %



รูปที่ 3.14 แสดงผงทังสเตนคาร์ไบด์หลังการอบในเตาสุญญากาศ

จากรูปที่ 3.14 ผงทังสเตนคาร์ไบด์จะเป็นลักษณะแห้ง จากนั้นนำไปบดแห้ง เพื่อทำการผลิตในขั้นตอนต่อไป หลังจากผ่านการอบสุญญากาศที่อุณหภูมิ 200 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

3.4.4 การทดสอบผงทั้งสแตนคาร์ไบด์หลังการอบแห้ง



รูปที่ 3.15 แสดงเครื่อง SEM (Scanning Electron Microscope)

จากรูปที่ 3.15 แสดงการทดสอบและวิเคราะห์ทั้งสแตนคาร์ไบด์ที่ผ่านการบดละเอียดเป็นเวลา 100 ชั่วโมง ด้วยวิธีการ SEM (Scanning Electron Microscope) เพื่อศึกษาอนุภาคของผงทั้งสแตนคาร์ไบด์



รูปที่ 3.16 แสดงเครื่องวิเคราะห์ห้องค์ประกอบธาตุ XRD (X-ray Diffractometer)

จากรูปที่ 3.16 แสดงการตรวจสอบทั้งสแตนคาร์ไบด์ที่ผ่านการบด 100 ชั่วโมง โดยวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุด้วยเครื่อง XRD (X-ray Diffractometer)



รูปที่ 3.17 แสดงเครื่องวิเคราะห์การกระจายตัวและขนาดอนุภาค (Particle Size Diffraction)

จากรูปที่ 3.17 แสดงการตรวจสอบผงทั้งสแตนคาร์ไบด์หลังการบด 100 ชั่วโมง วิเคราะห์การกระจายตัวและขนาดอนุภาคด้วยเครื่อง (Particle Size Diffraction)

3.4.5 การบดผสม



รูปที่ 3.18 ผงโคบอลต์ [7]

จากรูปที่ 3.18 เตรียมผงโคบอลต์เพื่อบดและผสมเลือกใช้โคบอลต์ในอัตราส่วน 5, 10, 15 % โดยน้ำหนัก



ผงโคบอลต์

รูปที่ 3.19 ผสมผงโคบอลต์กับผงทั้งสแตนคาร์ไบด์ลงในหม้อบด

จากรูปที่ 3.19 ผสมผงโคบอลต์กับผงทังสเตนคาร์ไบด์ลงในหม้อบดเพื่อเตรียมการบดผสมด้วยเครื่องบด Ball Milling



รูปที่ 3.20 การผสมโคบอลต์กับผงทังสเตนคาร์ไบด์ด้วยวิธี Ball Milling

จากรูปที่ 3.20 แสดงการผสมผงทังสเตนคาร์ไบด์กับผงโคบอลต์เป็นเวลา 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 3.21 วัสดุประสานเพื่อการอัดขึ้นรูป (Paraffin Wax)

จากรูปที่ 3.21 เป็นการเตรียมวัสดุประสานเพื่อการผสมกับโลหะก่อนการอัดขึ้นรูป (Paraffin Wax) โดยจะเตรียมวัสดุประสานที่สัดส่วนผสม 3 % ของน้ำหนักผงทังสเตนคาร์ไบด์เพื่อทำหน้าที่เป็นตัวประสานชั่วคราวในการอัดขึ้นรูป



รูปที่ 3.22 เทวัสดุประสานเพื่อการอัดขึ้นรูป (Paraffin Wax) ลงหม้อบด

จากรูปที่ 3.22 เป็นการเทวัสดุประสานลงไปในหม้อบดผสมกับผงทั้งสแตนคาร์ไบด์และผงโคบอลต์ เพื่อทำการผสมด้วยเครื่องบด Ball Milling เป็นเวลา 8 ชั่วโมง



รูปที่ 3.23 ผงทั้งสแตนคาร์ไบด์หลังการผสมผงโคบอลต์กับวัสดุเพื่อการอัดขึ้นรูป (Paraffin Wax)

จากรูปที่ 3.23 ผงทั้งสแตนคาร์ไบด์หลังการผสมผงโคบอลต์และวัสดุประสาน จะมีลักษณะเป็นก้อน เนื่องจากการยึดเกาะของผงโลหะด้วย Paraffin Wax

3.4.6 การอัดขึ้นรูป



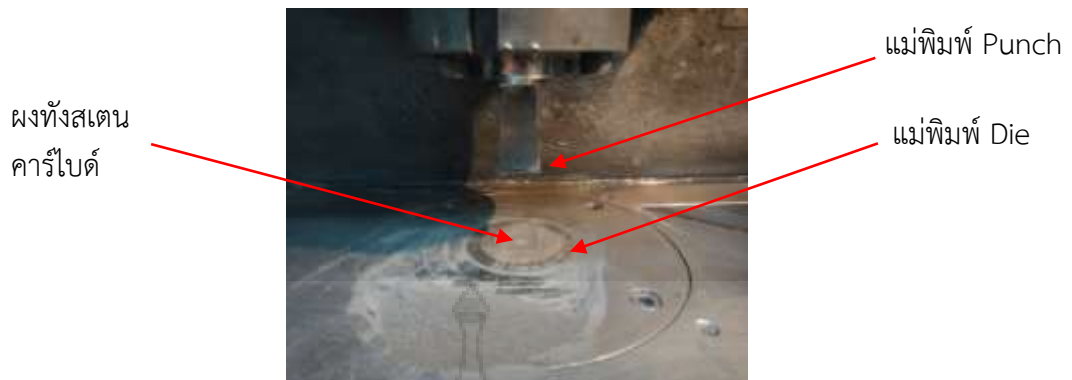
รูปที่ 3.24 แสดงเครื่องอัดขึ้นรูปอัตโนมัติ

จากรูปที่ 3.24 เป็นการแสดงภาพเครื่องอัดขึ้นรูปโลหะผสมสำเร็จรูป



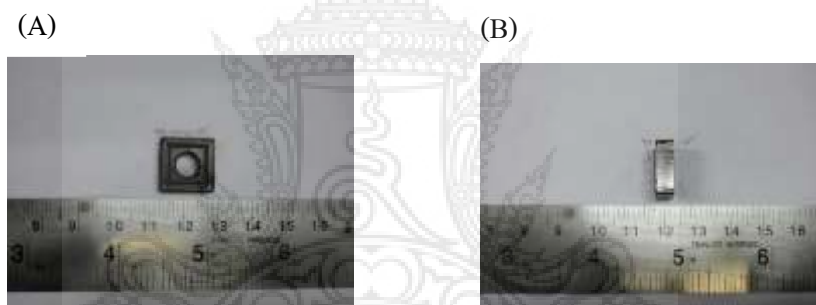
รูปที่ 3.25 แสดงแม่พิมพ์แผ่นมีดทรง S (Square)

การขึ้นรูปโลหะทั้งสแตนคาร์ไบด์ผสมโคบอลต์และ Paraffin Wax เรียบร้อยแล้วจากนั้นจะใช้แม่พิมพ์ตามรูปที่ 3.25 สำหรับอัดขึ้นรูปโลหะผสมสำเร็จรูปเป็นแผ่นมีด (Green Density)



รูปที่ 3.26 แสดงการอัดขึ้นรูป (Pressure)

ผงโลหะที่ผสมเรียบร้อยแล้ว (WC - 10 % Co) นำมาทำการอัดขึ้นรูป ให้เป็นชิ้นงาน Green Density รูปทรงแผ่นมีดกลึง (SNMG 120408) ดังรูปที่ 3.26



รูปที่ 3.27 แสดงชิ้นงานที่ผ่านการอัดขึ้นรูป (Green Compact)

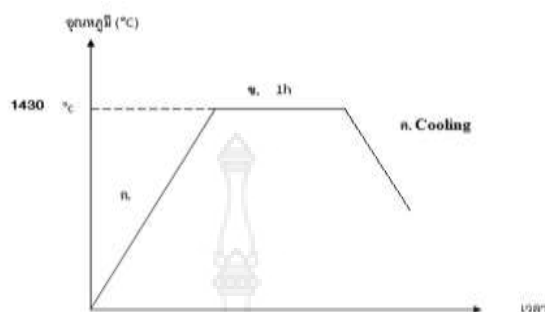
ชิ้นงาน (Green Compact) ที่ผ่านการอัดขึ้นรูปด้วยแรงอัด 350 MPa มีลักษณะตามรูปที่ 3.27

3.4.7 การอบพูน



รูปที่ 3.28 เครื่องอบพูน

เตาอบระบบสุญญากาศสามารถอบที่อุณหภูมิสูงถึง 1600 °C ควบคุมการทำงานด้วยระบบอัตโนมัติ (บริษัท อาร์เอส कार์ไบต์ จำกัด) เมื่อใช้ในการอบผนึกชิ้นงาน ดังรูป 3.28 การทดสอบผลิตภัณฑ์ใช้อุณหภูมิ 1450 °C



รูปที่ 3.29 กราฟแสดงขั้นตอนการอบผนึก (Sintering) [12]

จากรูปที่ 3.29 ขั้นตอนการอบผนึก (Sintering)

- ก) ขั้นตอนการให้ความร้อนจากอุณหภูมิ 30 °C ที่เป็นอุณหภูมิของห้องจนถึง 1,430 °C
- ข) ขั้นตอนการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 1,430 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง โคบอลต์จะเริ่มละลายทำให้เกิดการรวมตัวกับทังสเตนคาร์ไบด์
- ค) ขั้นตอนการปล่อยให้เย็นตัว (Cooling) ปล่อยให้ชิ้นงานเย็นตัวในเตา จนถึงอุณหภูมิ 800 °C จากนั้นนำชิ้นงานออกมาและให้เย็นตัวในบรรยากาศ

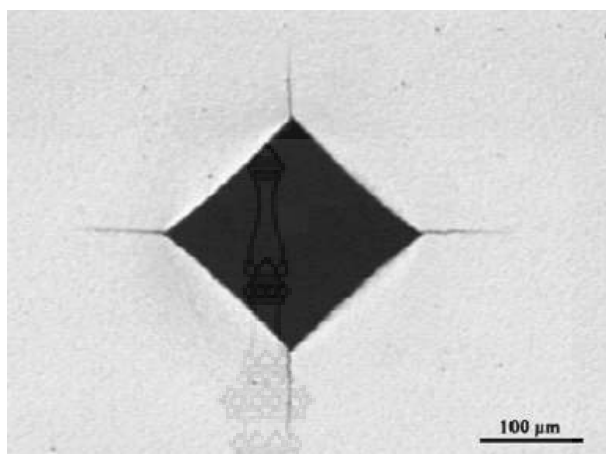


รูปที่ 3.30 แผ่นมีดซีเมนต์ทังสเตนคาร์ไบด์หลังการอบผนึก [13]

จากรูปที่ 3.30 แผ่นมีดซีเมนต์ทังสเตนคาร์ไบด์หลังจากการอบผนึกที่อุณหภูมิ 1,430 °C

3.5 การทดสอบความแข็งและประสิทธิภาพการใช้งาน

3.5.1 ทดสอบความแข็งด้วยเครื่อง Hardness Vickers



รูปที่ 3.31 รอยกดด้วยหัวเพชรทรงปิรามิด [14]

จากรูปที่ 3.31 การทดสอบความแข็งของแผ่นมีดซีเมนต์ทั้งสแตนคาร์ไบด์โดยใช้วิธีการทดสอบความแข็งแบบ Hardness Vickers

3.5.2 ทดสอบระยะทางในการกลึงและการสึกหรอของแผ่นมีดคาร์ไบด์



รูปที่ 3.32 เครื่องกลึง CNC รุ่น MORI SEIKI SL-25

การทดสอบการใช้งานของแผ่นมีดทั้งสแตนคาร์ไบด์จะใช้เครื่องกลึงอัตโนมัติ (CNC Lathe) ดังรูปที่ 3.32



รูปที่ 3.33 เหล็กกล้าคาร์บอนปานกลาง S45C

การทดสอบการใช้งานและศึกษาการสึกหรอของแผ่นมีดซีเมนต์ทั้งสแตนคาร์ไบด์ โดยใช้เครื่องกลึง CNC รุ่น MORI SEIKI SL-25 จากรูปที่ 3.33 แสดงชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอนปานกลาง S45C ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 36 มิลลิเมตร ยาว 100 เซนติเมตร สำหรับทดสอบการกลึง



รูปที่ 3.34 แสดงกลึงปอกเหล็กกล้าคาร์บอนปานกลางของแผ่นมีดกลึงที่พัฒนาขึ้นมาใหม่

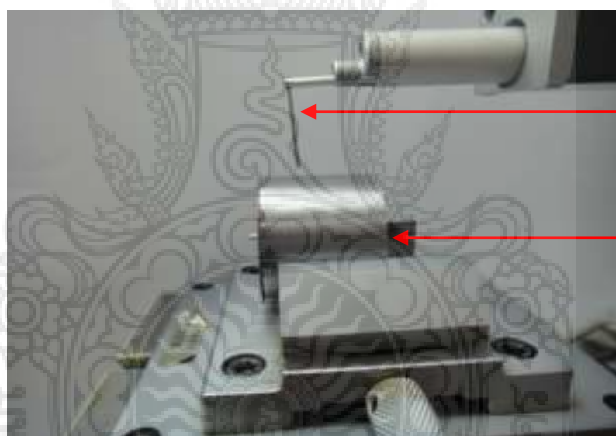
จากรูปที่ 3.34 เป็นการกลึงปอกเหล็กกล้าคาร์บอนปานกลางด้วยความเร็วรอบ 400 รอบต่อนาที อัตราป้อน 0.2 มิลลิเมตรต่อรอบ กินลึก 0.25 มิลลิเมตร เป็นระยะทาง 30 มิลลิเมตร และเส้นผ่าศูนย์กลาง 36 มิลลิเมตรให้เหลือ 34 มิลลิเมตร



รูปที่ 3.35 ชิ้นงานหลังการกลึง

ชิ้นงานตัวอย่างที่ผ่านการกลึงจะมีลักษณะตามรูปที่ 3.35 ขนาดของชิ้นงานมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 34 มิลลิเมตร ความยาว 30 มิลลิเมตร

3.5.3 ทดสอบความเรียบผิวชิ้นงาน



← แท่งวัดความ
เรียบผิวชิ้นงาน
← ชิ้นงานหลัง
การกลึง

รูปที่ 3.36 ทำการทดสอบความเรียบผิวชิ้นงาน

จากรูปที่ 3.36 ชิ้นงานที่ผ่านการกลึงตามรูปที่ 3.35 จะนำมาทำการทดสอบความเรียบผิวด้วยเครื่อง Surface Roughness เพื่อตรวจสอบค่าความเรียบผิวของชิ้นงานและนำไปวิเคราะห์การใช้งานของแผ่นมีดต่อไป

3.6 รวบรวมข้อมูลการทดสอบ

ทำการเก็บบันทึกข้อมูลที่ได้ทำการทดสอบในด้านต่าง ๆ โดยละเอียดและนำข้อมูลที่ได้มาทำการเปรียบเทียบ โดยข้อมูลดังกล่าวจะแสดงในบทที่ 4 ซึ่งมีดังนี้

- 3.6.1 ผลการวิเคราะห์คุณลักษณะของผงโลหะ
- 3.6.2 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุ
- 3.6.3 ผลการวิเคราะห์ขนาดและการกระจายของอนุภาคผงโลหะ

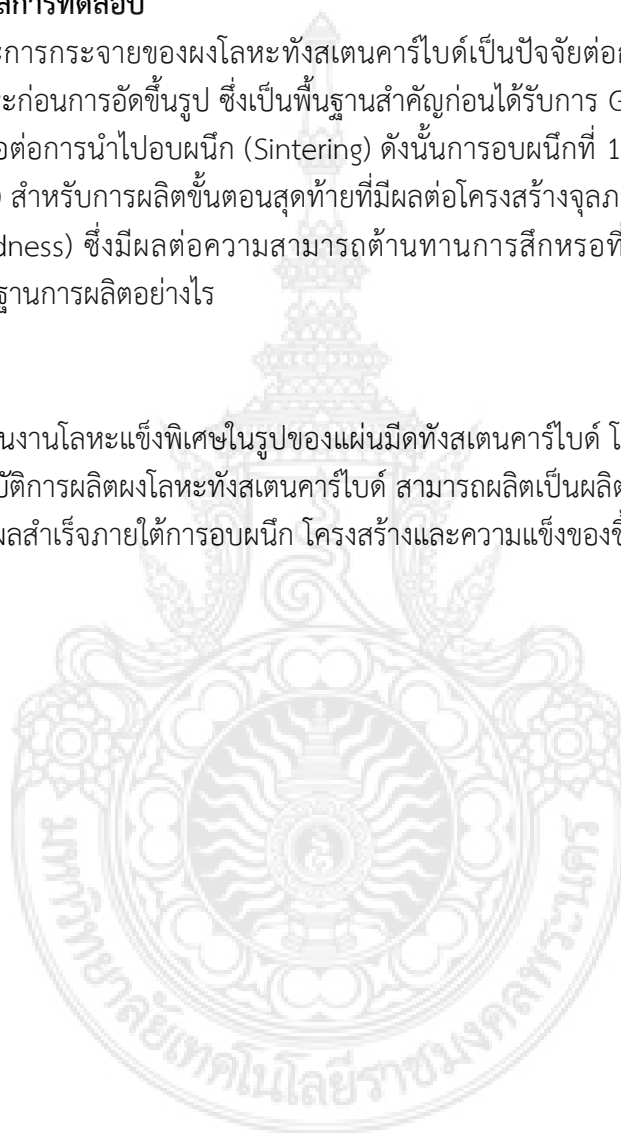
- 3.6.4 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค
- 3.6.5 ผลการทดสอบความแข็ง
- 3.6.6 ผลการเปรียบเทียบการสึกหรอบริเวณคมตัดก่อนและหลังการใช้งาน
- 3.6.7 ผลการทดสอบความเรียบผิวชิ้นงานที่ผ่านการกลึงปอกแล้ว

3.7 วิเคราะห์ผลการทดสอบ

ขนาดและการกระจายของผงโลหะทั้งสแตนคาร์ไบด์เป็นปัจจัยต่อการผสมโลหะประสานเป็นการเตรียมผงโลหะก่อนการอัดขึ้นรูป ซึ่งเป็นพื้นฐานสำคัญก่อนได้รับการ Green Compact ที่มีความหนาแน่นเพียงพอต่อการนำไปอบผนึก (Sintering) ดังนั้นการอบผนึกที่ 1450 °C เป็นเวลา 60 นาที (Holding Time) สำหรับการผลิตชิ้นตอนสุดท้ายที่มีผลต่อโครงสร้างจุลภาค (Microstructure) และความแข็ง (Hardness) ซึ่งมีผลต่อความสามารถต้านทานการสึกหรอที่บริเวณคมตัดของแผ่นมีดเป็นไปตามมาตรฐานการผลิตอย่างไร

3.8 สรุปผล

การผลิตชิ้นงานโลหะแข็งพิเศษในรูปของแผ่นมีดทั้งสแตนคาร์ไบด์ โดยใช้วัตถุดิบเป็นผงโลหะที่ผลิตจากห้องปฏิบัติการผลิตผงโลหะทั้งสแตนคาร์ไบด์ สามารถผลิตเป็นผลิตภัณฑ์เพื่อใช้งานตัดปาดผิวเหล็กกล้าได้เป็นผลสำเร็จภายใต้การอบผนึก โครงสร้างและความแข็งของชิ้นงานเป็นสำคัญ



บทที่ 4

ผลการวิจัย (Results)

ผลงานวิจัยนี้เป็นองค์ความรู้ใหม่ด้านการเตรียมวัสดุดิบ โดยเฉพาะโลหะผงทังสเตนคาร์ไบด์ เนื่องจากการรีไซเคิลเศษโลหะชนิด Cemented Tungsten Carbide เป็นการผลิตจากเทคโนโลยีการพัฒนาชิ้นใหม่ การควบคุมคุณภาพผงโลหะยังเป็นการศึกษาและทดลองที่มีประสิทธิภาพมากขึ้น ทั้งนี้เป็นการพัฒนาเทคโนโลยีการผลิตไปพร้อมกันกับการศึกษาผงโลหะ อย่างไรก็ตาม ผงโลหะทังสเตนคาร์ไบด์ที่มีคุณภาพนั้น ต้องทำการผลิตเป็นชิ้นงานที่มีความแข็งและทนต่อการสึกหรอ จึงจะเชื่อมั่นได้ว่าเป็นผงโลหะที่ดีมีคุณภาพสูงขึ้น เป็นต้น ซึ่งผงโลหะที่ได้จากการผลิตมีขนาดและการกระจายตัว (Particle Size and Distribution) ในช่วง 1.00 – 550 μm เป็นขนาดที่แตกต่างกันมาก ไม่สามารถนำมาผลิตเป็นชิ้นงานที่มีคุณภาพด้านการต้านทานการสึกหรอ แต่จะเกิดการแตกหักง่าย ขณะเดียวกัน ผงโลหะที่ผ่านการผลิตจะมีสารอินปนเปื้อนซึ่งเป็นอุปสรรคในการนำไปผลิตเป็นชิ้นงาน ความแข็งสูงและทนทานการสึกหรอ

การทดลองล้างผงโลหะด้วยน้ำกลั่น เป็นการพัฒนาวิธีการทำความสะอาดและลดสิ่งเจือปน ขณะที่การใช้เอทานอลบริสุทธิ์จะช่วยให้มั่นใจได้ว่า คราบมันที่เกิดจากกระบวนการผลิต แล้วเจือปนในผงโลหะถูกกำจัดออกมาได้มากขึ้น เมื่อมั่นใจได้ว่าผงโลหะไม่มีสิ่งเจือปนแล้ว ขั้นตอนถัดไปเป็นการบดผงโลหะเพื่อลดขนาดลงจากเดิม ให้มีขนาดไม่เกิน 60 μm การบดใช้เทคนิคการบดแบบ Ball Milling ลูกบดสารละลายเอทานอลและผงบดบรรจุในหม้อบดที่พัฒนาขึ้นมาใหม่ทำด้วยทังสเตนคาร์ไบด์

หลังจากการบดผงโลหะให้มีขนาดและการกระจายน้อยลงแล้วทำการผสมกับโลหะประสานโคบอลต์ (Co) การผสมโลหะประสานโคบอลต์เป็นการศึกษาอีกขั้นตอนหนึ่งที่สำคัญ เพราะมีผลต่อการผลิตชิ้นงานโดยตรง การทดลองศึกษาความสามารถในด้านความแข็งและการทดสอบการใช้งานของแผ่นมีดที่มีส่วนผสมโคบอลต์ต่างกันที่ 5 % , 10 % และ 15 %

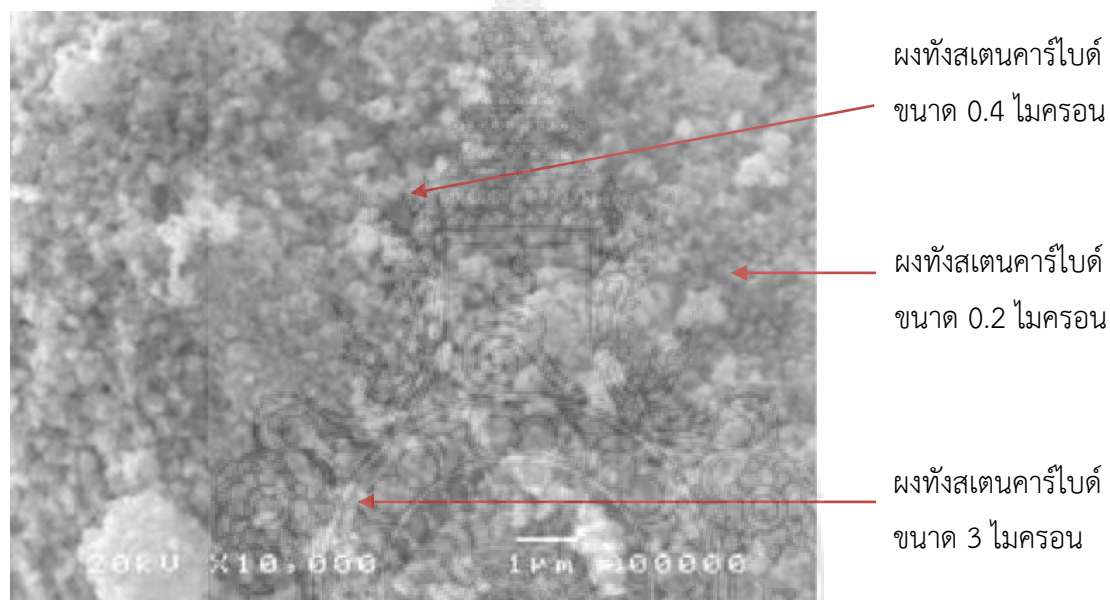
การผสม Paraffin Wax เพื่อให้เกิดการยึดเกาะของผงโลหะ เป็นอีกขั้นตอนหนึ่งที่สำคัญ เป็นการค้นหาคำตอบความรู้ใหม่อีกส่วนหนึ่งของการผลิตชิ้นงานจากผงโลหะทังสเตนคาร์ไบด์ ปัจจัยที่สำคัญคือ อัตราส่วนผสมระหว่าง WC + Co + Paraffin Wax เวลาในการบด การออกแบบหม้อบด ความเร็วรอบในการบดและระยะเวลาในการบด เป็นต้น

ผลการศึกษาการเตรียมผงโลหะ ขั้นตอนสุดท้ายเป็นการอัดขึ้นรูปเป็น Green Compact ซึ่งมีความสำคัญอยู่ที่ค่า Green Density ต้องเป็นไปตามมาตรฐานการผลิตโลหะผงทังสเตนคาร์ไบด์

ขั้นตอนการอบผนึก เป็นการควบคุมอุณหภูมิในการอบโดยใช้เตาอบสุญญากาศ ควบคุมอุณหภูมิการอบทุกขั้นตอนในระบบอัตโนมัติ อุณหภูมิที่ใช้เป็น 1430 °C คงอุณหภูมิไว้ 60 นาทีที่อุณหภูมิสูงสุด

ในบทรายงานผลการวิจัยนี้ จึงเป็นผลการวิจัยใหม่ ในทุก ๆ ขั้นตอนการศึกษา ไม่มีการวิจัยมาก่อนเป็นผลงานใหม่ ตั้งแต่การผลิตโลหะผงจนถึงการผลิตชิ้นงานด้วยการอบผนึก ชิ้นงานที่ได้จากการอบผนึกนำไปทดสอบสมบัติต่าง ๆ ที่สำคัญ ได้ผลออกมาตามข้อมูลดังต่อไปนี้

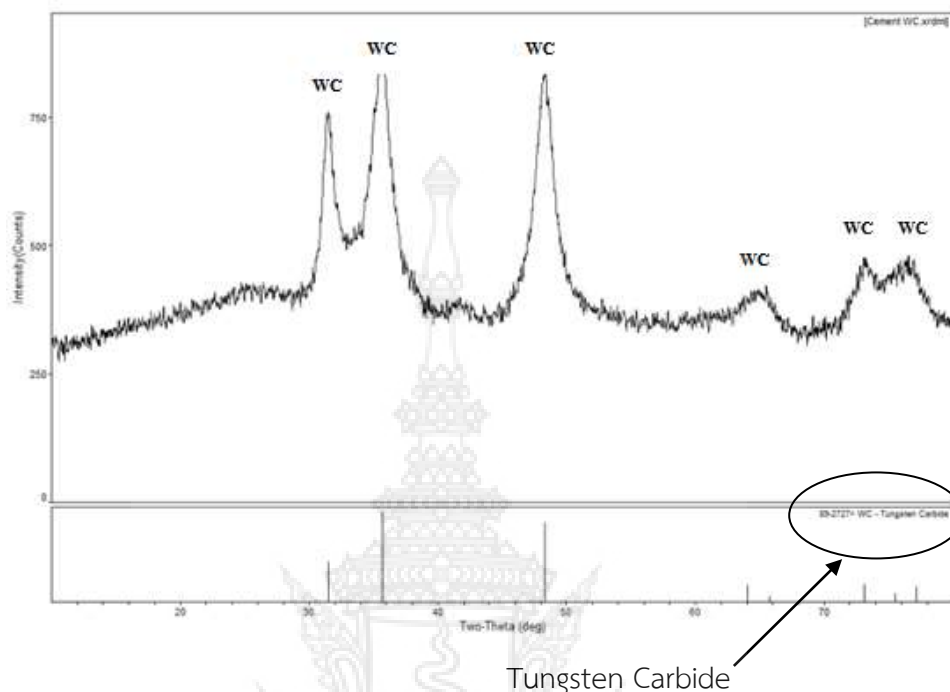
4.1 ผลการวิเคราะห์คุณลักษณะของผงโลหะ



รูปที่ 4.1 แสดงการตรวจสอบอนุภาคของผงทังสเตนคาร์ไบด์ที่ผ่านการบดละเอียด 100 ชั่วโมง

จากรูปที่ 4.1 เป็นผลการตรวจสอบโครงสร้างอนุภาคด้วยวิธีการ Scanning Electron Microscope (SEM) ที่กำลังขยาย 10,000 เท่า สำหรับการศึกษาศึกษาการเตรียมโลหะผงด้วยเวลาการบดละเอียด 100 ชั่วโมง ผลการทำ SEM พบว่า ผงทังสเตนคาร์ไบด์มีขนาดเล็กที่สุด 0.20 μm ผงที่มีขนาดใหญ่ประมาณ 3.00 μm ซึ่งมีรูปร่างค่อนข้างกลม จากรูปที่ 4.1 ผงโลหะส่วนใหญ่จะมีขนาดเล็ก รูปทรงกลมเป็นลักษณะผงที่สามารถนำไปผลิตเป็นชิ้นงาน (Cemented Carbide) ได้ ตรงตามลักษณะผงที่มีการใช้งานในอุตสาหกรรม อย่างไรก็ตาม ผงโลหะขนาดใหญ่เป็นสิ่งที่ควรทำการศึกษาคุณลักษณะต่างๆ เพิ่มขึ้น เพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาต่อไป ตัวอย่างเช่น รูปทรง ส่วนประกอบ เป็นต้น

4.2 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุ

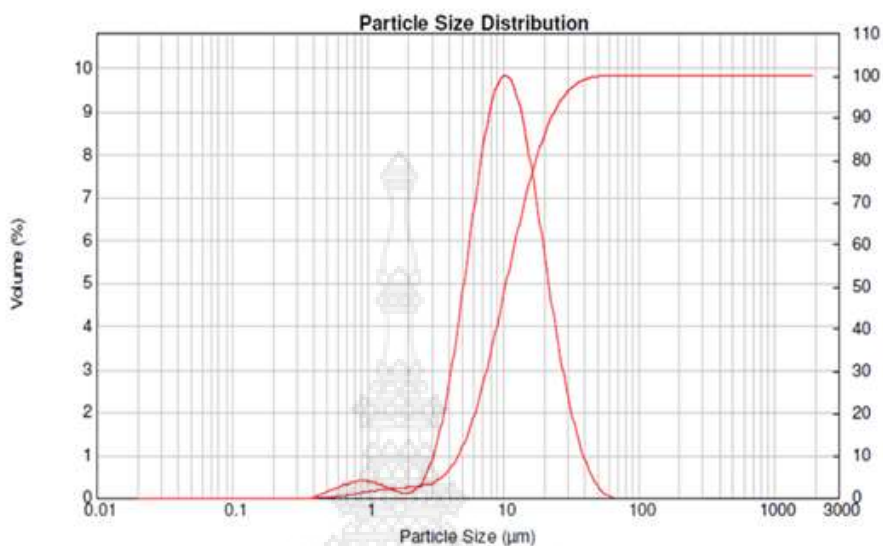


รูปที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุผงทังสเตนคาร์ไบด์หลังการบดละเอียด 100 ชั่วโมง

จากรูปที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุด้วยวิธี X – Ray diffraction (XRD) พบว่า ผงโลหะเป็นทังสเตนคาร์ไบด์ โดยพิจารณาจากการวิเคราะห์ Two-Theta (deg) ที่องศาอิสระ 32, 35, 48, 64, 66, 73, 75 และ 77 องศา ระยะเวลาที่ปรากฏ สอดคล้องกับมาตรฐานของโลหะทังสเตนคาร์ไบด์

ดังนั้น ผลการวิเคราะห์โลหะด้วยวิธี XRD ทำให้ได้ผลที่เชื่อถือได้ ว่าโลหะที่ผ่านการผลิตโดยวิธีการรีไซเคิล การบดด้วยวิธี Ball Milling การล้างด้วยน้ำกลั่นและเอทานอล สามารถผลิตผงโลหะทังสเตนคาร์ไบด์ได้ ดังผลการวิเคราะห์ตามรูปที่ 4.2

4.3 ผลการวิเคราะห์ขนาดและการกระจายของอนุภาคผงโลหะ (Particle Size Distribution)



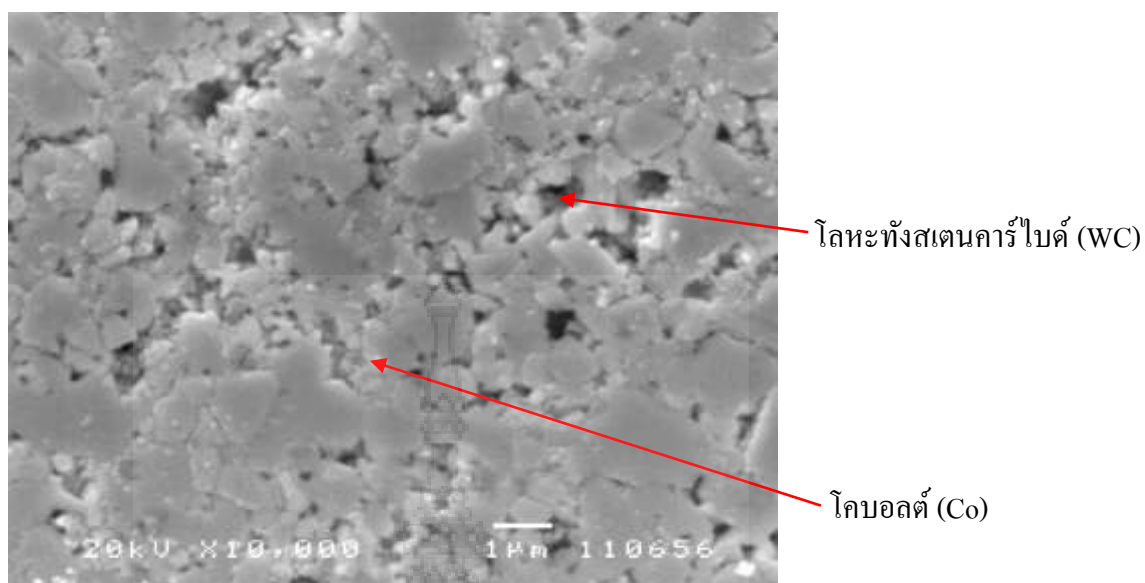
รูปที่ 4.3 กราฟแสดงขนาดอนุภาคผงทั้งสแตนคาร์ไบด์หลังการบดด้วยวิธี Ball Milling เป็นเวลา 100 ชั่วโมง

จากรูปที่ 4.3 แสดงผลการวิเคราะห์ขนาดและการกระจายของอนุภาคผงทั้งสแตนคาร์ไบด์ที่ผ่านการบดให้ละเอียดด้วยวิธี Ball Milling เป็นเวลา 100 ชั่วโมง พบว่าขนาดผงโลหะมีขนาดเล็กลง โดยมีขนาดอยู่ระหว่าง 0.30 – 60 µm โดยมีผงโลหะที่มีขนาดระหว่าง 0.30 – 2.00 µm เป็นกลุ่มผงโลหะอีกกลุ่มหนึ่งที่กระจายออกมา มีการแบ่งแยกอย่างชัดเจน

ลักษณะการกระจายของผงโลหะทั้งสแตนคาร์ไบด์ เป็นแบบโค้งปกติ ในช่วง 0.30 – 2.00 µm เป็นกลุ่มผงโลหะขนาดเล็ก ช่วงที่มีขนาดระหว่าง 2.00 – 60.00 µm กระจายแบบโค้งปกติและจำนวนผงโลหะมากกว่า 50 % มีขนาดในช่วง 300 – 10,000 nm ดังรูปที่ 4.3

4.4 ผลการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค

หลังจากการผสมโลหะผง อัดขึ้นรูปและอบผนึก (Sintering) จะได้รับชิ้นงานเป็นซีเมนต์คาร์ไบด์ ดังนั้นการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของแผ่นมีดซีเมนต์ทั้งสแตนคาร์ไบด์ที่ผลิตขึ้นใหม่ จึงเป็นขั้นตอนสำคัญในการศึกษาสมบัติพื้นฐานภายในของชิ้นงานซีเมนต์คาร์ไบด์



รูปที่ 4.4 แสดงตัวอย่างโครงสร้างจุลภาคของขอบแผ่นมีด (Insert tool) ทังสเตนคาร์ไบด์

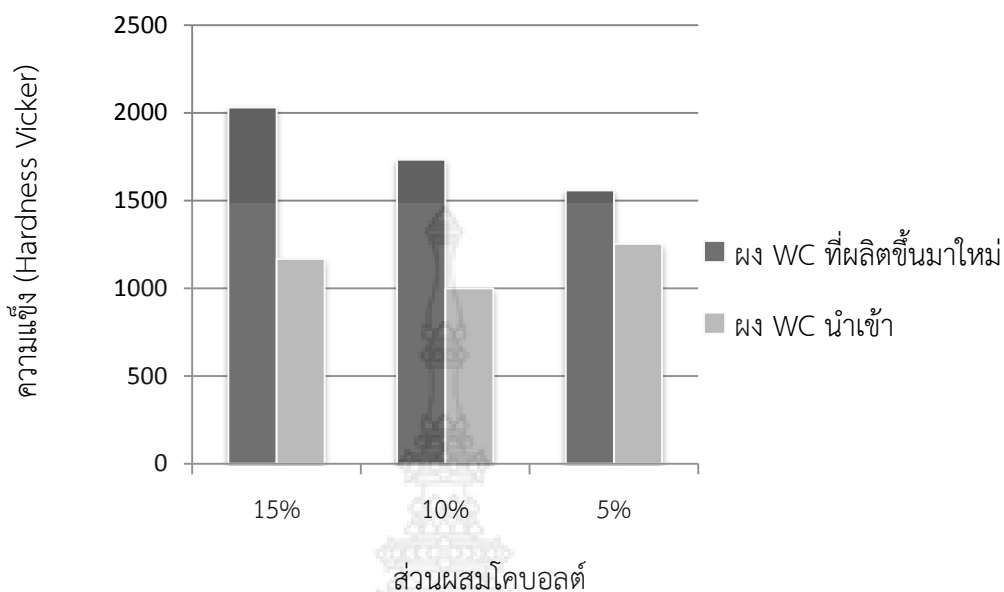
จากรูปที่ 4.4 เป็นผลการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงาน (Insert tool) ด้วยวิธี Scanning Electron Microscope (SEM) กำลังขยาย 10,000 เท่า (10,000x) พบว่า โครงสร้างจุลภาคเป็นไปตามมาตรฐานการผลิตซีเมนต์ทังสเตนคาร์ไบด์ รูปร่างเกรนเป็นรูปหลายเหลี่ยม มีขนาดอยู่ระหว่าง 0.10 - 3.00 μm ส่วนใหญ่มีการจัดเรียงสม่ำเสมอ การยึดติดระหว่างเกรนของทังสเตนคาร์ไบด์ จะทำให้ทนการสึกหรอได้ดี แสดงว่าเป็นโครงสร้างที่มีความแข็งแรงสูงตามมาตรฐานการผลิตซีเมนต์คาร์ไบด์

4.5 ผลการทดสอบความแข็ง

การทดสอบความแข็งของแผ่นมีดซีเมนต์ทังสเตนคาร์ไบด์ที่ผลิตจากผงโลหะ (WC) นำเข้า และผงโลหะ (WC) ที่ผลิตจากห้องปฏิบัติการมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร (คณะวิศวกรรมศาสตร์)

ตารางที่ 4.1 ความแข็งของแผ่นมีดซีเมนต์ทังสเตนคาร์ไบด์

ความแข็ง (Hardness Vicker)			
โคบอลต์ (Co)	5%	10%	15%
แผ่นมีด (ผงโลหะผลิตจากห้องปฏิบัติการมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร)	1,558.6	1,732.6	2,031.6
แผ่นมีด (โลหะผงนำเข้าจากต่างประเทศ)	1,254.5	1,000.7	1,167

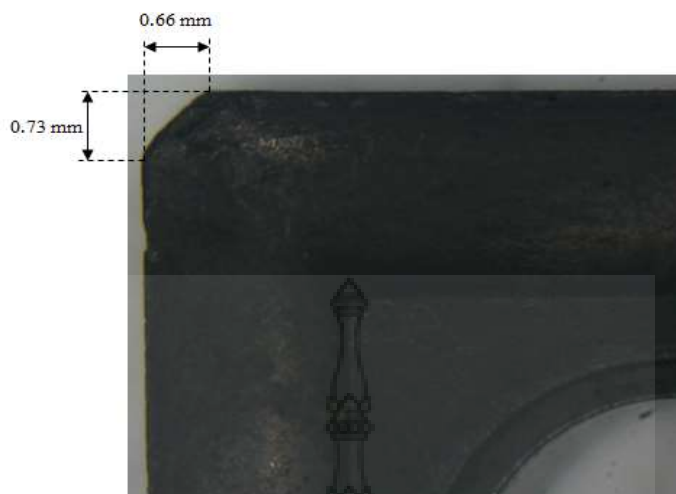


รูปที่ 4.5 กราฟเปรียบเทียบความแข็งของแผ่นมีดซีเมนต์ทั้งสแตนคาร์ไบด์

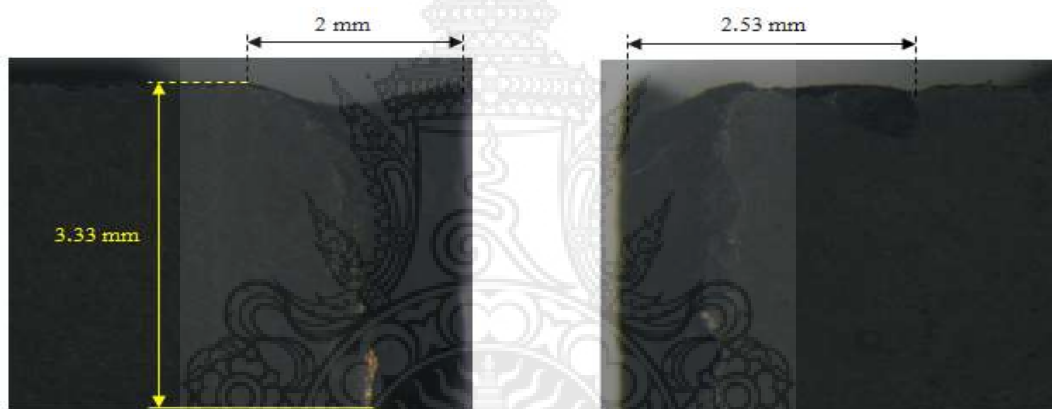
จากรูปที่ 4.5 แสดงผลการทดสอบความแข็งของชิ้นงานที่มีส่วนผสมโคบอลต์ต่างกัน ประกอบด้วย 5 %, 10 % และ 15 % พบว่าที่ 5 % ชิ้นงานที่ผลิตจาก WC ผลิตขึ้นมาใหม่มีความแข็งมากกว่าชิ้นงานที่ผลิตจากผงนำเข้า ซึ่งมีค่าความแข็งอยู่ที่ 1,254 HV เมื่อส่วนผสมโคบอลต์เพิ่มขึ้นเป็น 10 % และ 15 % ความแข็งลดลงเป็น 1,732 HV และ 1,254 HV สำหรับชิ้นงานจากผงใหม่และผงนำเข้าตามลำดับ

4.6 ผลการเปรียบเทียบการสึกหรอบริเวณคมตัดภายหลังการทดสอบ

ภาพถ่ายของแผ่นมีดหลังการทดสอบโดยการถ่ายภาพคมตัดหลังทดสอบการกลึงโดยใช้เครื่อง Computerize Optical Profiling ถ่ายที่กำลังขยาย 20 เท่าเพื่อตรวจสอบลักษณะการสึกหรอบริเวณคมตัด



A. การสึกหรอบริเวณผิวคายเศษ (Crater wear)



B. การสึกหรอบริเวณผิวหลบของคมตัดด้านขวา

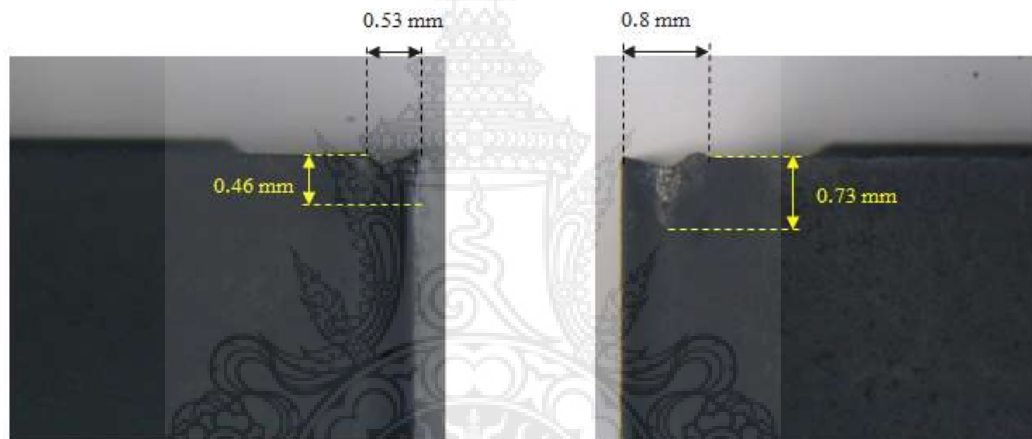
C. การสึกหรอบริเวณผิวหลบของคมตัดด้านซ้าย

รูปที่ 4.6 ลักษณะคมตัดหลังการทดสอบที่ระยะทาง 840 มิลลิเมตร ของแผ่นมีดซีเมนต์ทั้งสแตนคาร์ไบด์ ที่ผลิตจากผงนำเข้ามีทั้งสแตนคาร์ไบด์ 95 % โคบอลต์ 5 %

จากรูปที่ 4.6 A.การสึกหรอบริเวณผิวคายเศษ (Crater wear) อยู่ที่ 0.73 มิลลิเมตร และ 0.66 มิลลิเมตร จากภาพ B. การสึกหรอบริเวณผิวหลบ (Flank wear) ของคมตัดด้านขวา 2 มิลลิเมตร จากภาพ C. การสึกหรอบริเวณผิวหลบ (Flank wear) ของคมตัดด้านซ้าย 2.53 มิลลิเมตร



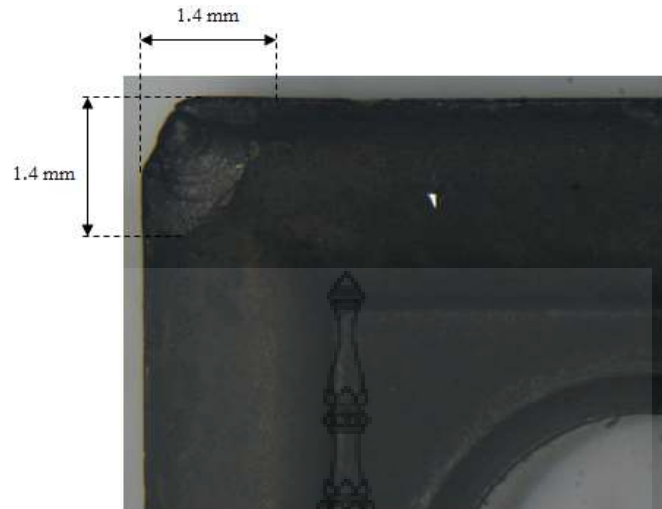
A. การสึกหรอบริเวณผิวคายเศษ (Crater wear)



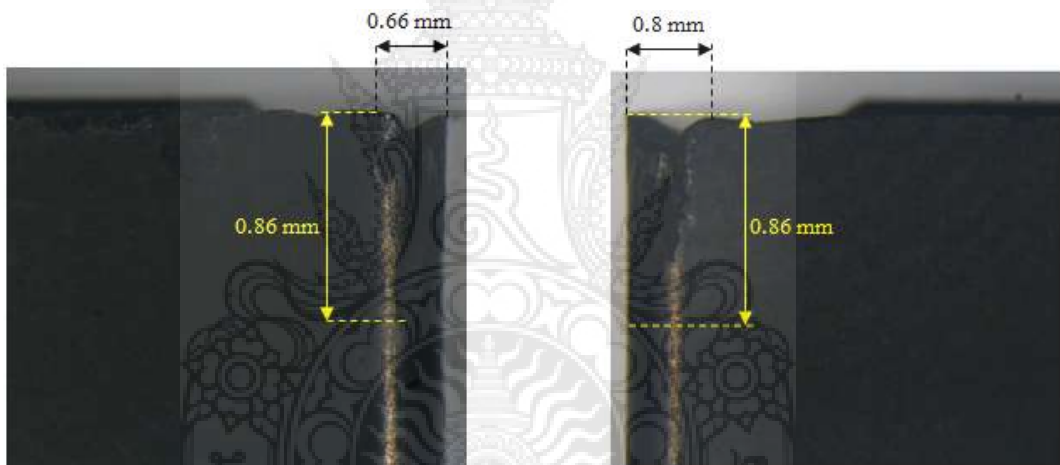
B. การสึกหรอบริเวณผิวหลบของคมตัดด้านขวา C. การสึกหรอบริเวณผิวหลบของคมตัดด้านซ้าย

รูปที่ 4.7 ลักษณะคมตัดหลังการทดสอบที่ระยะทาง 240 มิลลิเมตร ของแผ่นมีดซีเมนต์ทั้งสแตนคาร์ไบด์ ที่ผลิตจากผงนำเข้ามีทั้งสแตนคาร์ไบด์ 90 % โคบอลต์ 10 %

จากรูปที่ 4.7 A.การสึกหรอบริเวณผิวคายเศษ (Crater wear) อยู่ที่ 0.53 มิลลิเมตร และ 0.53 มิลลิเมตร จากภาพ B. การสึกหรอบริเวณผิวหลบ (Flank wear) ของคมตัดด้านขวา 0.53 มิลลิเมตร จากภาพ C. การสึกหรอบริเวณผิวหลบ (Flank wear) ของคมตัดด้านซ้าย 0.8 มิลลิเมตร



A. การสึกหรอบริเวณผิวคายเศษ (Crater wear)

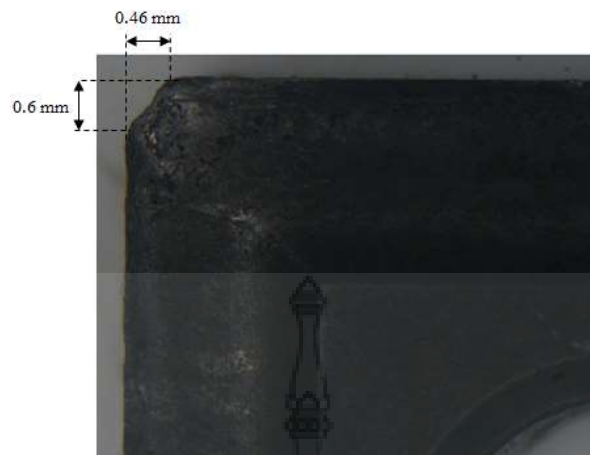


B. การสึกหรอบริเวณผิวหลบของคมตัดด้านขวา

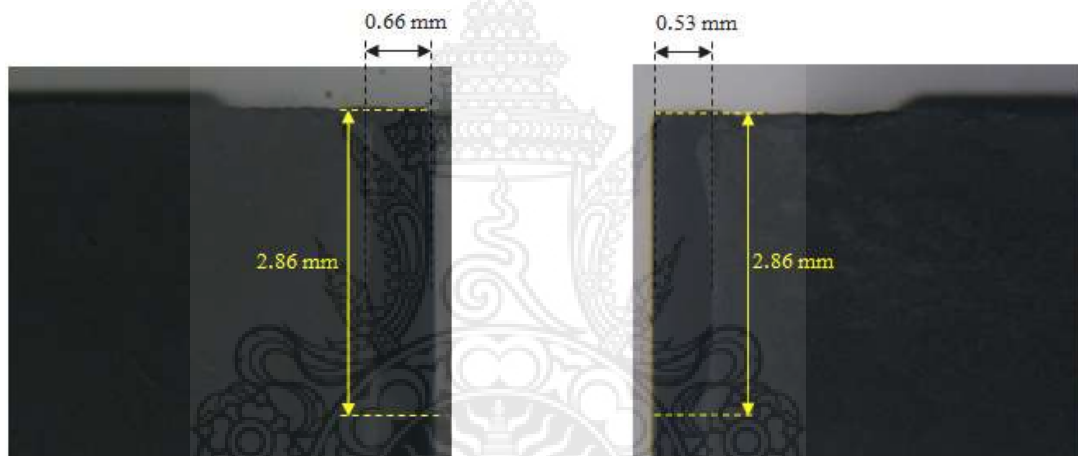
C. การสึกหรอบริเวณผิวหลบของคมตัดด้านซ้าย

รูปที่ 4.8 ลักษณะคมตัดหลังการทดสอบที่ระยะทาง 1,440 มิลลิเมตร ของแผ่นมีดซีเมนต์ทั้งสแตนคาร์ไบด์ ที่ผลิตจากผงนำเข้ามีทั้งสแตนคาร์ไบด์ 85 % โคบอลต์ 15 %

จากรูปที่ 4.8 A.การสึกหรอบริเวณผิวคายเศษ (Crater wear) อยู่ที่ 1.4 มิลลิเมตร และ 1.4 มิลลิเมตร จากภาพ B. การสึกหรอบริเวณผิวหลบ (Flank wear) ของคมตัดด้านขวา 0.66 มิลลิเมตร จากภาพ C. การสึกหรอบริเวณผิวหลบ (Flank wear) ของคมตัดด้านซ้าย 0.8 มิลลิเมตร



A. การสึกหรอบริเวณผิวคายเศษ (Crater wear)

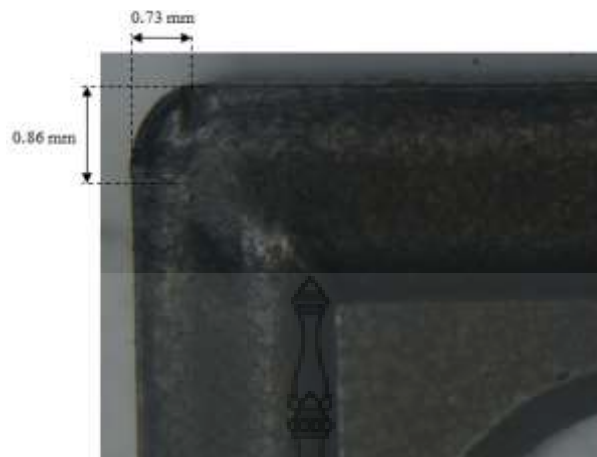


B. การสึกหรอบริเวณผิวหลบของคมตัดด้านขวา

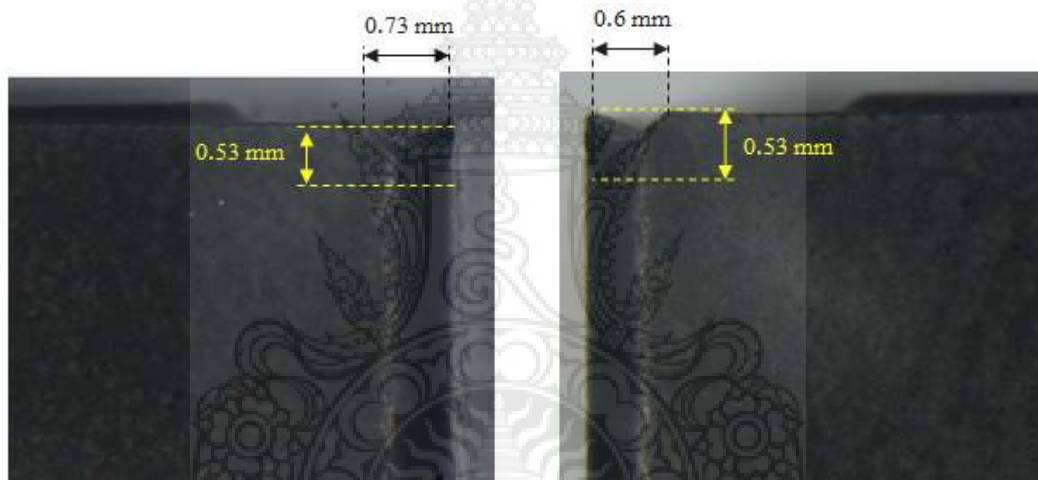
C. การสึกหรอบริเวณผิวหลบของคมตัดด้านซ้าย

รูปที่ 4.9 ลักษณะคมตัดหลังการทดสอบที่ระยะทาง 840 มิลลิเมตร ของแผ่นมีดซีเมนต์ทั้งสแตนคาร์ไบด์ ที่ผลิตจากผงที่ผลิตจากผงโลหะจากห้องปฏิบัติการวิจัยโลหะทั้งสแตนคาร์ไบด์มีทั้งสแตนคาร์ไบด์ 95 % โคบอลต์ 5 %

จากรูปที่ 4.9 A.การสึกหรอบริเวณผิวคายเศษ (Crater wear) อยู่ที่ 0.6 มิลลิเมตร และ 0.46 มิลลิเมตร จากภาพ B. การสึกหรอบริเวณผิวหลบของคมตัดด้านขวา 0.66 มิลลิเมตร จากภาพ C. การสึกหรอบริเวณผิวหลบของคมตัดด้านซ้าย 0.53 มิลลิเมตร



A. การสึกหรอบริเวณผิวคายเศษ (Crater wear)

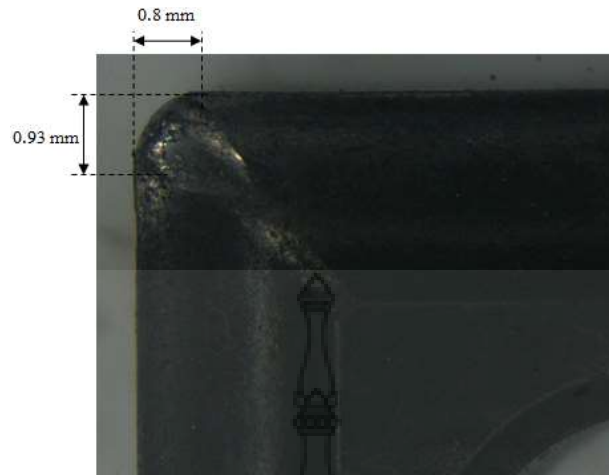


B. การสึกหรอบริเวณผิวหลบของคมตัดด้านขวา

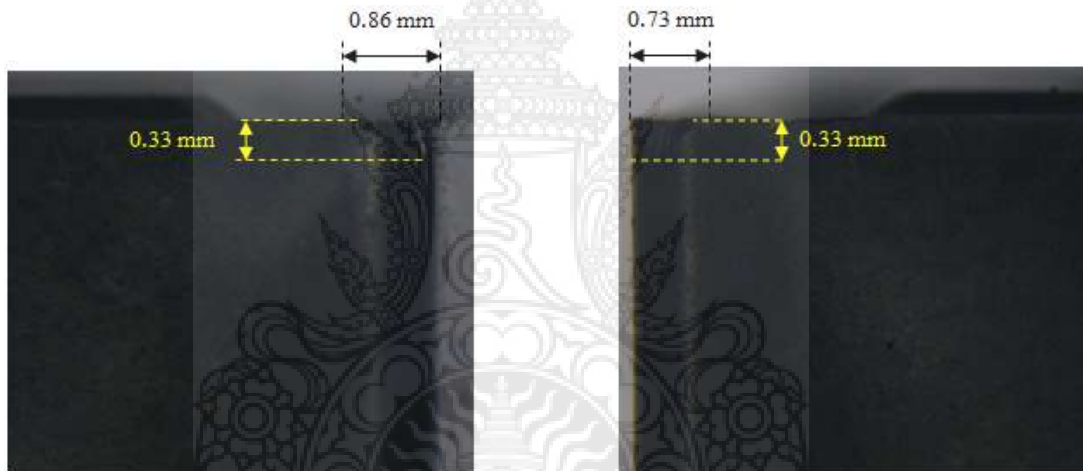
C. การสึกหรอบริเวณผิวหลบของคมตัดด้านซ้าย

รูปที่ 4.10 ลักษณะคมตัดหลังการทดสอบที่ระยะทาง 720 มิลลิเมตร ของแผ่นมีดซีเมนต์ทั้งสแตนคาร์ไบด์ ที่ผลิตจากผงที่ผลิตจากผงโลหะจากห้องปฏิบัติการวิจัยโลหะทั้งสแตนคาร์ไบด์มีทั้งสแตนคาร์ไบด์ 90 % โคบอลต์ 10 %

จากรูปที่ 4.10 A.การสึกหรอบริเวณผิวคายเศษ (Crater wear) อยู่ที่ 0.86 มิลลิเมตร และ 0.73 มิลลิเมตร จากภาพ B. การสึกหรอบริเวณผิวหลบของคมตัดด้านขวา 0.73 มิลลิเมตร จากภาพ C. การสึกหรอบริเวณผิวหลบของคมตัดด้านซ้าย 0.6 มิลลิเมตร



A. การสึกหรอบริเวณผิวคายเศษ (Crater wear)



B. การสึกหรอบริเวณผิวหลบของคมตัดด้านขวา

C. การสึกหรอบริเวณผิวหลบของคมตัดด้านซ้าย

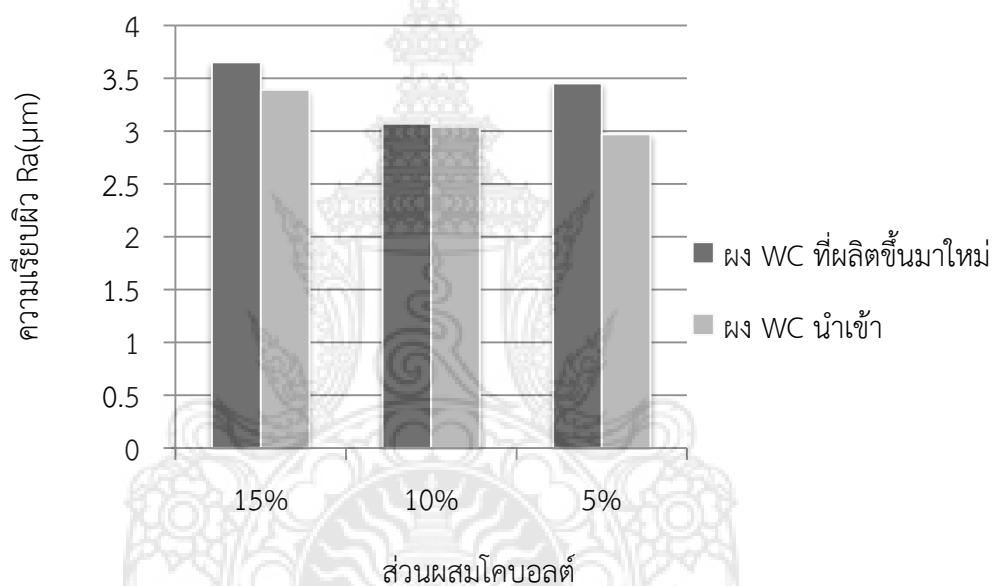
รูปที่ 4.11 ลักษณะคมตัดหลังการทดสอบที่ระยะทาง 4,200 มิลลิเมตร ของแผ่นมีดซีเมนต์ทั้งสแตนคาร์ไบด์ ที่ผลิตจากผงที่ผลิตจากผงโลหะจากห้องปฏิบัติการวิจัยโลหะทั้งสแตนคาร์ไบด์มีทั้งสแตนคาร์ไบด์ 85 % โคบอลต์ 15 %

จากรูปที่ 4.11 A.การสึกหรอบริเวณผิวคายเศษ (Crater wear) อยู่ที่ 0.93 มิลลิเมตร และ 0.8 มิลลิเมตร จากภาพ B. การสึกหรอบริเวณผิวหลบของคมตัดด้านขวา 0.86 มิลลิเมตร จากภาพ C. การสึกหรอบริเวณผิวหลบของคมตัดด้านซ้าย 0.73 มิลลิเมตร

4.7 ผลการทดสอบความเรียบผิวชิ้นงาน

ตารางที่ 4.2 ความเรียบผิวชิ้นงาน

ความเรียบผิวชิ้นงาน (μm)			
โคบอลต์ (Co)	5 %	10 %	15 %
แผ่นมิต (ผงโลหะผลิตจากห้องปฏิบัติการมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร)	3.45	3.07	3.65
แผ่นมิต (ผงโลหะนำเข้าจากต่างประเทศ)	2.97	3.04	3.39



รูปที่ 4.12 กราฟแสดงความเรียบผิวชิ้นงาน

จากรูปที่ 4.12 แสดงผลการทดสอบความเรียบผิวชิ้นงานที่มีส่วนผสมโคบอลต์ต่างกัน ประกอบด้วย 5 %, 10 % และ 15 % พบว่าที่ 5 % ชิ้นงานที่ผลิตจาก WC ผลิตขึ้นมาใหม่มีความเรียบมากกว่าชิ้นงานที่ผลิตจากผงนำเข้า ซึ่งมีค่าความเรียบผิวอยู่ที่ 3.45 μm เมื่อส่วนผสมโคบอลต์เพิ่มขึ้นเป็น 10 % และ 15 % ความเรียบผิวลดลงเป็น 3.07 μm และ 3.45 μm สำหรับชิ้นงานจากผงใหม่และผงนำเข้าตามลำดับ แผ่นมิตที่ผลิตจากห้องปฏิบัติการมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร มีความเรียบสูงกว่าแผ่นมิตนำเข้าจากต่างประเทศ

บทที่ 5

การอภิปรายผล

การพัฒนาผลิตภัณฑ์เครื่องมือตัดปาดผิวโลหะนาโนเมตรจากโลหะผงทั้งสแตนคาร์ไบด์ที่ผลิตในประเทศ ซึ่งเป็นโลหะที่ผลิตขึ้นด้วยกระบวนการที่พัฒนาขึ้นในประเทศ ให้ได้สมบัติด้านความบริสุทธิ์ 99.90 % ผลิตภัณฑ์ที่พัฒนาขึ้นมาใหม่มีส่วนผสมระหว่างโลหะทั้งสแตนคาร์ไบด์กับโลหะผงโคบอลต์ ปรากฏผลการวิจัยดังนี้

จากการวิเคราะห์คุณลักษณะของผงโลหะด้วยวิธีการ Scanning Electron Microscope (SEM) ของผงทั้งสแตนคาร์ไบด์ ที่ผ่านการบดละเอียด 100 ชั่วโมง ปรากฏว่า ผงทั้งสแตนคาร์ไบด์ที่มีขนาดเล็กที่สุด 200 nm ผงที่มีขนาดใหญ่ประมาณ 3,000 nm ซึ่งมีรูปร่างค่อนข้างกลม ใกล้เคียงกับงานวิจัยของ [Sunjung Kim, et al., \(2013\) \[6\]](#) และ [Yan Li, et al., \(2009\) \[16\]](#) ซึ่งได้ผงที่มีขนาดเล็กที่สุด 150 nm ใหญ่ขนาดประมาณ 4,000 nm ผ่านการบดละเอียด 100 ชั่วโมง และมีรูปร่างกลม

จากการวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุ ด้วยวิธี X – Ray diffraction (XRD) หลังการบดละเอียด 100 ชั่วโมง ปรากฏว่า โลหะที่ผ่านการผลิตโดยวิธีการรีไซเคิล การบดด้วยวิธี Ball Milling การล้างด้วยน้ำกลั่นและเอทานอล สามารถผลิตผงโลหะทั้งสแตนคาร์ไบด์ได้ ใกล้เคียงกับงานวิจัยของ [R.Ahmed, et al., \(2015\) \[17\]](#)

จากการวิเคราะห์ขนาดและการกระจายของอนุภาคผงโลหะ (Particle Size Distribution) ที่ผ่านการบดให้ละเอียดด้วยวิธี Ball Milling เป็นเวลา 100 ชั่วโมง พบว่าขนาดผงโลหะมีขนาดเล็กถึง โดยมีขนาดอยู่ระหว่าง 0.30 – 60 μm โดยมีผงโลหะที่มีขนาดระหว่าง 300 – 2,000 nm เป็นกลุ่มผงโลหะอีกกลุ่มหนึ่งที่กระจายแบบโค้งปกติ ใกล้เคียงกับงานวิจัยของ [T.Kagnaya, et al., \(2014\) \[20\]](#) ลักษณะการกระจายของผงโลหะทั้งสแตนคาร์ไบด์ มีขนาดอยู่ระหว่าง 200 – 2,000 nm เป็นกลุ่มผงโลหะขนาดเล็ก กระจายแยกออกมาจากกลุ่ม ลักษณะของการกระจายมีความสม่ำเสมอ

จากการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของแผ่นมีดซีเมนต์ทั้งสแตนคาร์ไบด์ที่ผลิตขึ้นมาใหม่ การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคชิ้นงาน (Insert tool) ด้วยวิธี Scanning Electron Microscope (SEM) กำลังขยาย 10,000 เท่า พบว่าโครงสร้างจุลภาคเป็นไปตามมาตรฐานการผลิตซีเมนต์ทั้งสแตนคาร์ไบด์ รูปร่างเกรนเป็นรูปหลายเหลี่ยม มีขนาดอยู่ระหว่าง 100 – 300 nm ส่วนใหญ่มีการจัดเรียงสม่ำเสมอ การยึดติดระหว่างเกรนของทั้งสแตนคาร์ไบด์จะทำให้ทนทานการสึกหรอได้ดี แสดงว่าเป็นโครงสร้างที่มีความแข็งแรงสูงตามมาตรฐานการผลิตซีเมนต์คาร์ไบด์ใกล้เคียงกับงานวิจัยของ [C.A.Poblano – Salas,](#)

et al., (2014) [26]

จากการทดสอบความแข็งของแผ่นมิตซีเมนต์คาร์ไบด์ที่ผลิตจากผงโลหะ (WC) นำเข้าและผงโลหะ (WC) ที่ผลิตจากห้องปฏิบัติการมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล (คณะวิศวกรรมศาสตร์) ผลการทดสอบความแข็งของชิ้นงานที่มีส่วนผสมโคบอลต์ต่างกัน ประกอบด้วย 5 %, 10 % และ 15 % พบว่าที่ 5 % ชิ้นงานที่ผลิตจาก WC ที่ผลิตขึ้นมาใหม่มีความแข็งมากกว่าชิ้นงานที่ผลิตจากผงนำเข้า มีค่าความแข็งอยู่ที่ 1,254 HV เมื่อส่วนผสมโคบอลต์เพิ่มขึ้นเป็น 10 % ความแข็งลดลงเป็น 1,732 HV และ 1,254 HV สำหรับชิ้นงานจากผงใหม่และชิ้นงานผงนำเข้าตามลำดับ และความแข็งน้อยที่สุดเมื่อส่วนผสมโคบอลต์ 15 % ใกล้เคียงกับงานวิจัยของ [Rasit Koc, et al., \(2000\) \[27\]](#) ชิ้นงานที่ผลิตขึ้นมาใหม่ด้วยกระบวนการใหม่ ชิ้นงานจะมีความแข็งมากกว่าชิ้นงานที่ผลิตจากผงนำเข้า เมื่อส่วนผสมโคบอลต์ต่างกัน

จากการเปรียบเทียบการสึกหรอบริเวณคมตัดภายหลังการทดสอบของแผ่นมิตซีเมนต์ทั้งสแตนคาร์ไบด์ที่ผลิตจากผงนำเข้าที่ระยะทาง 840 240 และ 1,440 มิลลิเมตร ปรากฏผลดังนี้ ทั้งสแตนคาร์ไบด์ 95 % โคบอลต์ 5 % การสึกหรอบริเวณปลายเศษอยู่ที่ 0.73 และ 0.66 มิลลิเมตร ทั้งสแตนคาร์ไบด์ 90 % โคบอลต์ 10 % การสึกหรอบริเวณปลายเศษอยู่ที่ 0.53 และ 0.53 มิลลิเมตร ทั้งสแตนคาร์ไบด์ 85 % โคบอลต์ 15 % การสึกหรอบริเวณปลายเศษอยู่ที่ 1.4 และ 1.4 มิลลิเมตร ใกล้เคียงกับงานวิจัยของ [Liang Liang,Xin Liu, et al., \(2014\) \[28\]](#) การสึกหรอบริเวณคมตัดภายหลังการทดสอบของแผ่นซีเมนต์ทั้งสแตนคาร์ไบด์ที่ผลิตจากผงโลหะจากห้องปฏิบัติการวิจัยโลหะ ทั้งสแตนคาร์ไบด์ที่ระยะทาง 840 720 และ 4,200 มิลลิเมตร ปรากฏผลดังนี้ ทั้งสแตนคาร์ไบด์ 95 % โคบอลต์ 5 % การสึกหรอบริเวณปลายเศษอยู่ที่ 0.6 และ 0.46 มิลลิเมตร ทั้งสแตนคาร์ไบด์ 90 % โคบอลต์ 10 % การสึกหรอบริเวณปลายเศษอยู่ที่ 0.86 และ 0.73 มิลลิเมตร ทั้งสแตนคาร์ไบด์ 85 % โคบอลต์ 15 % การสึกหรอบริเวณปลายเศษอยู่ที่ 0.86 และ 0.33 มิลลิเมตร ใกล้เคียงกับงานวิจัยของ [T.Kegnaya, et al.,\(2013\) \[31\]](#)

จากการทดสอบความเรียบผิวชิ้นงานที่มีส่วนผสมโคบอลต์ต่างกัน ประกอบด้วย 5 %, 10 % และ 15 % พบว่าที่ 5 % ชิ้นงานที่ผลิตจาก WC ที่ผลิตขึ้นมาใหม่มีความเรียบมากกว่าชิ้นงานที่ผลิตจากผงนำเข้า ซึ่งมีค่าความเรียบผิวอยู่ที่ 3.45 μm ใกล้เคียงกับงานวิจัยของ [Humberto Gomez, et al.,\(2011\) \[29\]](#) พบว่าที่ 6 % ชิ้นงานที่ผลิตจากผงนำเข้ามีค่าความเรียบผิวอยู่ที่ 200 - 400 nm เมื่อส่วนผสมโคบอลต์เพิ่มขึ้นเป็น 10 % ความเรียบผิวลดลงเป็น 3.07 μm และ 3.45 μm สำหรับชิ้นงานจากผงใหม่และผงนำเข้าตามลำดับ ใกล้เคียงกับงานวิจัยของ [Kedong Zhang, et al., \(2014\) \[30\]](#) เมื่อส่วนผสมโคบอลต์เพิ่มขึ้น ความเรียบผิวลดลงอยู่ที่ 190 - 2,500 nm สำหรับชิ้นงานจากผงนำเข้าแผ่นมิตที่ผลิตจากห้องปฏิบัติการมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร มีความเรียบสูงกว่าแผ่นมิตนำเข้าจากต่างประเทศ

บทที่ 6

สรุปผลการวิจัย

การวิจัยการพัฒนาผลิตภัณฑ์เครื่องมือตัดปาดผิวโลหะนาโนเมตรจากโลหะผงทั้งสแตนคาร์ไบด์ (WC) โดยการวิเคราะห์คุณสมบัติของผงโลหะด้วยวิธีการ Scanning Electron Microscope (SEM) พบว่ามีขนาดเล็กประมาณ 200 – 300 nm ผงโลหะส่วนใหญ่จะมีลักษณะเป็นทรงกลม ซึ่งเกิดจากการบดด้วยวิธี Ball Milling

เมื่อผลิตเป็นชิ้นงานซีเมนต์ทั้งสแตนคาร์ไบด์ (WC - Co) มีสัดส่วน WC – 10 % Co ที่อุณหภูมิ 1450 °C ปรากฏว่า โครงสร้างจุลภาคเป็นไปตามมาตรฐานการผลิตซีเมนต์ทั้งสแตนคาร์ไบด์ รูปร่างเกรนเป็นรูปหลายเหลี่ยม มีขนาดอยู่ระหว่าง 100 – 3,000 nm ความแข็งของแผ่นมิตที่ส่วนผสมโคบอลต์ 5 % แผ่นมิตที่ผลิตจากผงโลหะที่พัฒนาขึ้นใหม่มีความแข็ง 1,558.6 HV และแผ่นมิตผลิตจากผงโลหะนำเข้ามีความแข็ง 1,254.5 HV ที่ส่วนผสมโคบอลต์ 10 % แผ่นมิตที่ผลิตจากผงโลหะที่พัฒนาขึ้นใหม่มีความแข็ง 1,732.6 HV และแผ่นมิตที่ผลิตจากผงนำเข้ามีความแข็ง 1,000.7 HV ที่ส่วนผสมโคบอลต์ 15 % แผ่นมิตที่ผลิตจากผงโลหะที่พัฒนาขึ้นใหม่มีความแข็ง 2,031.6 HV และแผ่นมิตจากผงโลหะนำเข้ามีความแข็ง 1,167 HV ดังนั้นการผสมโลหะประสานโคบอลต์เพื่อผลิตแผ่นมิต พบว่าผงที่ผลิตจากผงโลหะที่พัฒนาขึ้นใหม่มีความแข็งมากกว่าแผ่นมิตที่ผลิตจากผงโลหะนำเข้า

ผลการเปรียบเทียบการสึกหรอบริเวณคมตัดที่ระยะทาง 840 , 240 และ 1,440 มิลลิเมตร ปรากฏว่า ทั้งสแตนคาร์ไบด์ 95 % โคบอลต์ 5 % สึกหรอบริเวณผิวหยาบ (Flank wear) อยู่ที่ 0.73 และ 0.66 มิลลิเมตร เมื่อใช้โลหะทั้งสแตนคาร์ไบด์ 90 % โคบอลต์ 10 % สึกหรอบริเวณผิวหยาบ (Flank wear) อยู่ที่ 0.53 และ 0.53 มิลลิเมตร และเมื่อใช้โลหะทั้งสแตนคาร์ไบด์ 85 % โคบอลต์ 15 % สึกหรอบริเวณผิวหยาบ (Flank wear) อยู่ที่ 1.4 และ 1.4 มิลลิเมตร ในส่วนผลการทดสอบแผ่นมิตที่ผลิตจากผงโลหะที่พัฒนาขึ้นใหม่ ระยะทาง 840 , 720 และ 4,200 มิลลิเมตร ปรากฏว่าแผ่นมิตทั้งสแตนคาร์ไบด์ 95 % โคบอลต์ 5 % สึกหรอบริเวณผิวหยาบ (Flank wear) อยู่ที่ 0.6 และ 0.46 มิลลิเมตร การใช้โลหะทั้งสแตนคาร์ไบด์ 90 % โคบอลต์ 10 % สึกหรอบริเวณผิวหยาบ (Flank wear) อยู่ที่ 0.86 และ 0.73 มิลลิเมตร และการใช้โลหะทั้งสแตนคาร์ไบด์ 85 % โคบอลต์ 15 % สึกหรอบริเวณผิวหยาบ (Flank wear) อยู่ที่ 0.86 และ 0.33 มิลลิเมตร

ผลการทดสอบความเรียบผิวชิ้นงานของแผ่นมิตที่มีส่วนผสมโดย 5 % , 10 % และ 15 % พบว่าที่ 5 % ชิ้นงานผ่านการกลึงด้วยมีดกลึงผลิตจากผงโลหะที่พัฒนาขึ้นใหม่ มีความเรียบมากกว่าชิ้นงานที่ผลิตจากผงโลหะนำเข้า ซึ่งมีค่าความเรียบผิวอยู่ที่ 3.45 μm เมื่อส่วนผสมโคบอลต์เพิ่มขึ้น

เป็น 10 % และ 15 % ความเรียบผิวลดลงเป็น 3.07 μm และ 3.45 μm ตามลำดับ ดังนั้นเมื่อ ส่วนผสมโคบอลต์เพิ่มขึ้นจะทำให้ความเรียบผิวลดลงและพบว่าชิ้นงานแผ่นมิดที่ผลิตจากผงโลหะที่ พัฒนาขึ้นใหม่ มีความเรียบสูงกว่าแผ่นมิดนำเข้าจากต่างประเทศ

ดังนั้น สรุปได้ว่า การพัฒนาผลิตภัณฑ์เครื่องมือตัดปาดผิวโลหะจากโลหะผงทั้งสแตนคาร์ไบด์ที่ พัฒนาขึ้นใหม่ สามารถถึงปอกชิ้นงานได้ตามมาตรฐาน โดยวัดจากความเรียบผิวชิ้นงาน ความ ต้านทานการสึกหรอ การผลิตแผ่นมิดทั้งสแตนคาร์ไบด์จึงเป็นการพัฒนาวัสดุทั้งสแตนคาร์ไบด์ ภายในประเทศและจะเป็นแนวทางในการพัฒนาไปสู่การผลิตและการใช้งานในอุตสาหกรรมต่อไป



บรรณานุกรม

- [1] Erik Lassner and Wolf-Dieter Schubert, Tungsten Properties, Chemistry, Technology, of the Element, Alloy and Chemical Compounds. Vienna, Austria, 1999
- [2] 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
- [3] 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, Städe Weg 12-24, 36151 Burghaun, Germany
- [4] Yuhong Xiong, Ki Lau, Xiaoying Zhou, Julie M. Schoenung, A streamlined life cycle assessment on the fabrication of WCo cermets, Department of Chemical Engineering and Materials Science, University of California, Davis, One Shields Avenue, Davis, CA 95616, USA
- [5] Brian D. Kernan, Emanuel M. Sachs, Mark A. Oliveira, Michael J. Cima, Three-dimensional printing of tungsten carbide-10 wt% cobalt using a cobalt oxide precursor, International Journal of Refractory Metals & Hard Materials 25 (2007)
- [6] Sunjung Kim, Bosung Seo, Seong-Ho Son, Dissolution behavior of cobalt from WC-Co hard metal scraps by oxidation and wet milling process, School of Materials Science and Engineering, University of Ulsan, Ulsan 680-749, Republic of Korea
- [7] Hua Lin, Bowan Tao, Jie Xiong, Qing Li, Yanrong Li, Tungsten carbide (WC) nanopowders synthesized via novel core-shell structured precursors, State Key Laboratory of Electronic Thin Films and Integrated Devices, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China
- [8] Mirva Eriksson, Mohamed Radwan, Zhijian Shen, Spark plasma sintering of WC, cemented carbide and functional graded materials, Department of Materials and Environmental Chemistry, Arrhenius Laboratory, Stockholm University, SE-10691 Stockholm, Sweden
- [9] Andrew Siao Ming Ang, Christopher C. Berndt, Philip Cheang, Deposition effects of WC particle size on cold sprayed WC-Co coatings, Industrial Research Institute

- Swinburne, Faculty of Engineering and Industrial Sciences, Swinburne University of Technology, H66, P.O. Box 218, Victoria 3122, Hawthorn, Australia
- [10] Kristin Mandel, Lutz Krüger, Rico Krause, Markus Radajewski, The influence of stress state on the compressive strength of WC–Co with different Co contents, TU Bergakademie Freiberg, Institute of Materials Engineering, Gustav-Zeuner-Str. 5, 09599 Freiberg, Germany
- [11] E.O. Correa, J.N. Santos, A.N. Klein, Microstructure and mechanical properties of WC Ni–Si based cemented carbides developed by powder metallurgy, *Int. Journal of Refractory Metals and Hard Materials* (2010)
- [12] M. Zakeri, Effect of cup and ball types on alumina–tungsten carbide nanocomposite powder synthesized by mechanical alloying, *Advanced Powder Technology*, 2010
- [13] Yutaka Shinoda, Takashi Akatsu, Fumihiro Wakai, Integrated molding of nano crystalline tungsten carbide powder with stainless steel, *Materials Science and Engineering B* (2007)
- [14] A. Muthuraja, S. Senthilvelan, Development of tungsten carbide based selflubricant cutting tool material: Preliminary investigation, Department of Mechanical Engineering, Indian Institute of Technology, Guwahati 781039, India
- [15] Shixian Zhao, Xiaoyan Song, Chongbin Wei, Li Zhang, Xuemei Liu, Jiuxing Zhang, Effects of WC particle size on densification and properties of spark plasma sintered WC–Co cermet, College of Materials Science and Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China
- [16] Yan Li, Chenguang Lin, Ruijun Cao, Study on nanometer e-cobalt powder prepared by precipitation–hydrogen reduction in Co(II)–(NH₄)₂CO₃–H₂O system, General Research Institute for Nonferrous Metals, Beijing 100088, PR China
- [17] R. Ahmed, O.Ali, N.H.Faisal, N.M.AL-Anazi, S.AL-Mutairi, Sliding wear investigation of suspensions of WC–Co nanocomposite coatings, College of Engineering Alfaisal University, P.O.Box 50927, Riyadh 11533, Saudi Arabia
- [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 Métallurgiques, UMR 5614 CNRS-INPG/UJF, F-38402 Saint-Martin D'Heres, Cedex, France

- [19] Hwan-Cheol Kim, Hyun-Kuk Park, In-Kyoon Jeong, In-Yong Ko, In-Jin Shon, Sintering of binderless WC–Mo₂C hard materials by rapid sintering process , *Ceramics International* 34 (2008) 1419–1423
- [20] Lifeng Zhang, Arjan Ciftja. Recycling of solar cell silicon scraps through filtration, Part I: Experimental investigation. *Solar Energy Materials & Solar Cells* 2008; 92:1450-1461
- [21] 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
- [22] F.J.J. Kellner, H. Hildebrand, S. Virtanen, Effect of WC grain size on the corrosion behavior of WC–Co based hardmetals in alkaline solutions, *Int. Journal of Refractory Metals & Hard Materials*, (2009) 806–812
- [23] 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
- [24] สหรัตน์ วงษ์ศรีษะและคณะ การพัฒนาชิ้นส่วนเครื่องมือวัสดุผงอัดขึ้นรูปที่ผ่านการใช้งานกลับมาใช้ใหม่ (Recycling of tools scrap) สถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร ปี พ.ศ.2552
- [25] Shidi Yang, Wei Fang, Yongheng Chi, Dil Faraz Khan, Ruijie Zhang, 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
- [26] 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
- [27] 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

- [28] Liang Liang, Xin Liu, Xiao-qiang Li, Yuan-Yuan Li, Wear mechanisms of WC–10Ni3Al carbide tool in dry turning of Ti6Al4V, College of Mechanical and Automotive Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, PR China
- [29] Humberto Gomez, Delcie Durhama, 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
- [30] Kedong Zhang, Jianxin Deng, Youqiang Xing, Shipeng Li, Huanhuan Gao, Effect of microscale texture on cutting performance of WC/Co-based TiAlN coated tools under different lubrication conditions, Department of Mechanical Engineering, Key Laboratory of High Efficiency and Clean Mechanical Manufacture, Shandong University, Ministry of Education, PR China
- [31] Li Zhang , Zhe Wang , Shu Chen , Tao Xu, Ji-fei Zhu, Yi Chen, Binder phase strengthening of WC–Co alloy through post-sintering treatment, State Key Laboratory of Powder Metallurgy, Central South University, Changsha 410083, China
- [32] T.V. SreeramaReddy, T. Sornakumar, M. VenkataramaReddy, R. Venkatram , Machinability of C45 steel with deep cryogenic treated tungsten carbide cutting tool inserts, Int. Journal of Refractory Metals & Hard Materials 27 (2009) 181–185
- [33] Gaurav Bartarya, S.K.Choudhury, State of the art in hard turning, Mechanical Engineering Department, Harcourt Butler Technological Institute, Kanpur 208002, India
- [34] Youngmoo Kim , Eun-Pyo Kim, Joon-Woong Noh, Sung Ho Lee, 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

ภาคผนวก ก
เครื่องมือ และอุปกรณ์ในการทดสอบ





รูปที่ ก.1 เอทานอลบริสุทธิ์



รูปที่ ก.2 น้ำกลั่น



รูปที่ ก.3 ปิกเกอร์ 600 มิลลิลิตร



รูปที่ ก.4 ตะแกรงหยาบ



รูปที่ ก.5 ตะแกรงโลหะ



รูปที่ ก.6 ลูกบดขนาด 3 มิลลิเมตร



รูปที่ ก.7 หม้ออบ



รูปที่ ก.8 ต่อมืดกึ่งคาร์ไบด์



รูปที่ ก.9 เครื่องชั่งน้ำหนักแบบดิจิตอล HR200 Max 120 กรัม



รูปที่ ก.10 เตาไฟฟ้า Hot Plate Stirrer รุ่น HS-115



รูปที่ ก.11 เครื่องอบสุญญากาศ รุ่น ND 300



รูปที่ ก.12 เครื่องบดผสม Ball Milling รุ่น Pulversette 6



รูปที่ ก.13 เครื่องไดร์ผม รุ่น PHILIP 1200w



รูปที่ ก.14 เครื่องทดสอบความเรียบผิว



รูปที่ ก.15 เครื่องทดสอบความหนาเศษ



รูปที่ ก.16 เครื่องกลึงอัตโนมัติ รุ่น MORI SEIKI SL-25



รูปที่ ก.17 เครื่องอบผนึก รุ่น Linn High



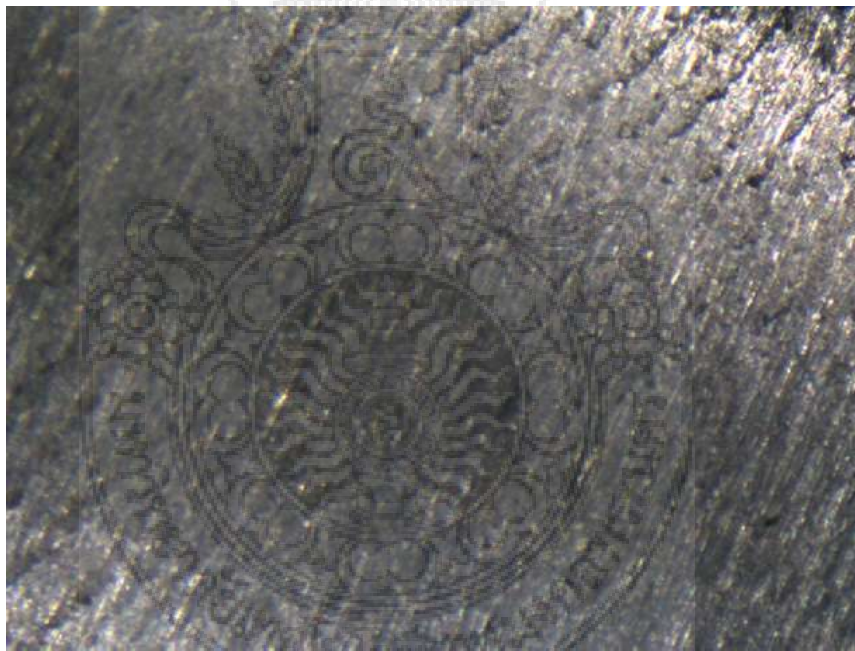
รูปที่ ก.18 เครื่องอัดขึ้นรูปแบบไฮดรอลิกส์ Max 10 ton

ภาคผนวก ข
ผลการทดสอบการใช้งาน





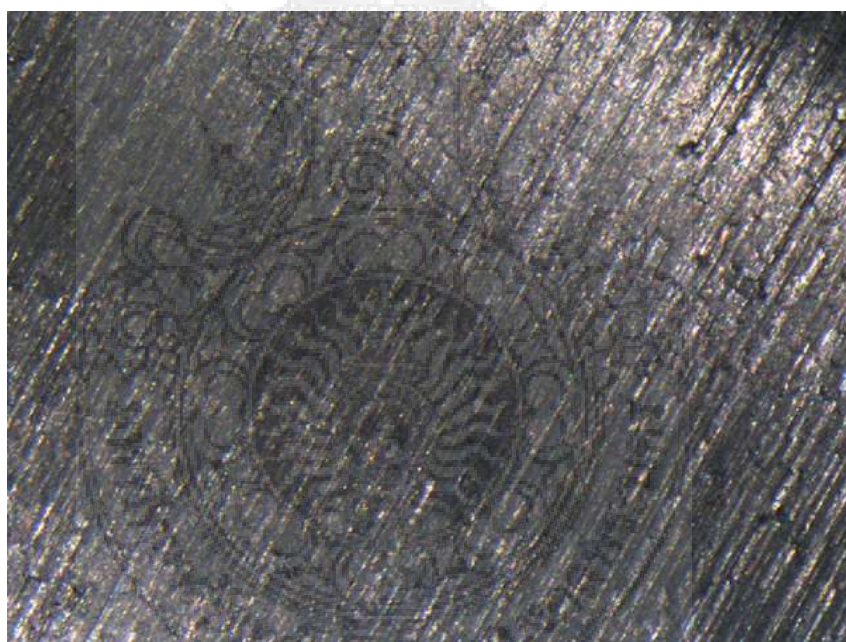
รูปที่ ข.1 ชิ้นงานหลังการกลึงของแผ่นมีดที่ผลิตจากผงนำเข้า 5 % โคบอลต์



รูปที่ ข.2 ผิวชิ้นงานหลังการกลึงของแผ่นมีดที่ผลิตจากผงนำเข้า 5 % โคบอลต์



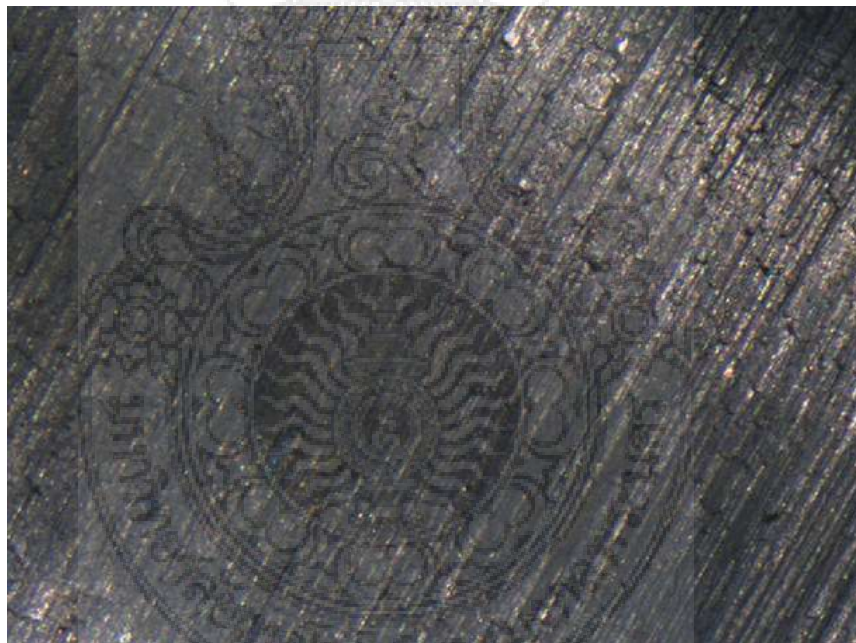
รูปที่ ข.3 ชิ้นงานหลังการกลึงของแผ่นมิตที่ผลิตจากผงนำเข้า 10 % โคบอลต์



รูปที่ ข.4 ผิวชิ้นงานหลังการกลึงของแผ่นมิตที่ผลิตจากผงนำเข้า 10 % โคบอลต์



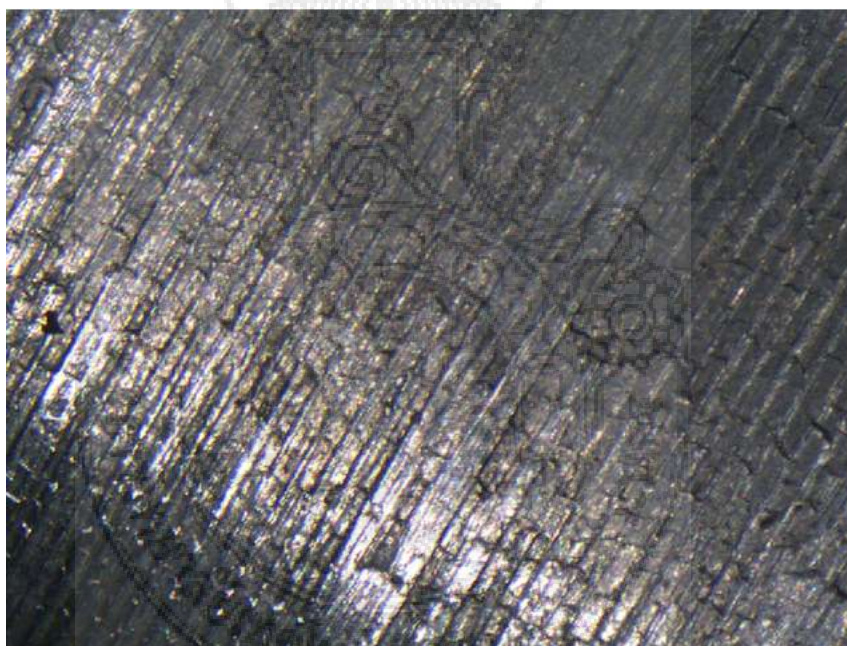
รูปที่ ข.5 ชิ้นงานหลังการกลึงของแผ่นมิตที่ผลิตจากผงนำเข้า 15 % โคบอลต์



รูปที่ ข.6 ผิวชิ้นงานหลังการกลึงของแผ่นมิตที่ผลิตจากผงนำเข้า 15 % โคบอลต์



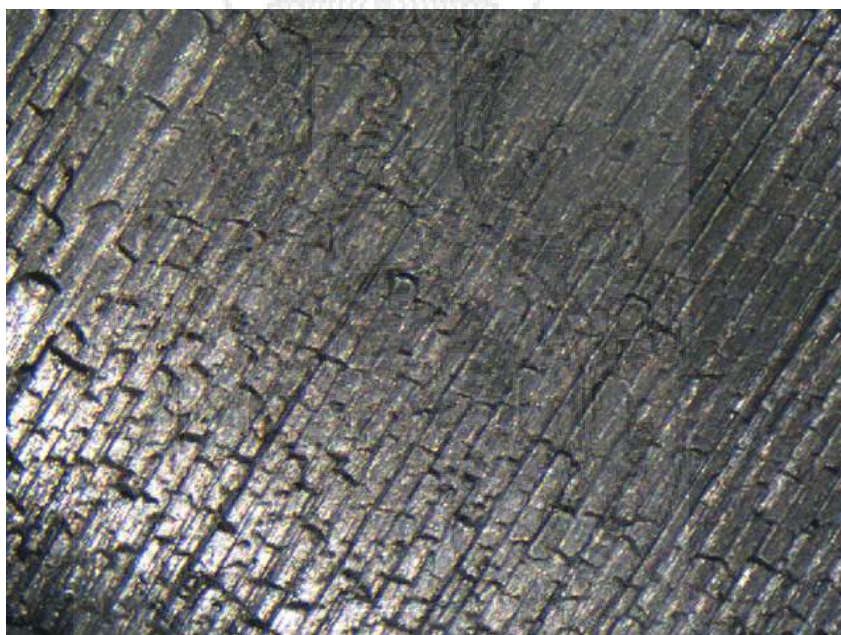
รูปที่ ข.7 ชิ้นงานหลังการกลึงของแผ่นมีดที่ผลิตจากผงโลหะห้องปฏิบัติการ 5 % โคบอลต์



รูปที่ ข.8 ผิวชิ้นงานหลังการกลึงของแผ่นมีดที่ผลิตจากผงโลหะห้องปฏิบัติการ 5 % โคบอลต์



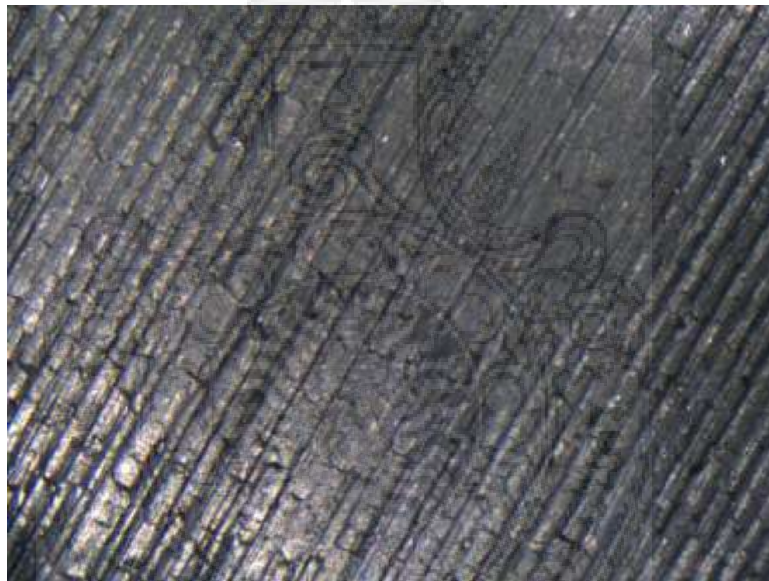
รูปที่ ข.9 ชิ้นงานหลังการกลึงของแผ่นมีดที่ผลิตจากผงโลหะห้องปฏิบัติการ 10 % โคบอลต์



รูปที่ ข.10 ผิวชิ้นงานหลังการกลึงของแผ่นมีดที่ผลิตจากผงโลหะห้องปฏิบัติการ 10 % โคบอลต์



รูปที่ ข.11 ชิ้นงานหลังการกลึงของแผ่นมิดที่ผลิตจากผงโลหะห้องปฏิบัติการ 15 % โคบอลต์



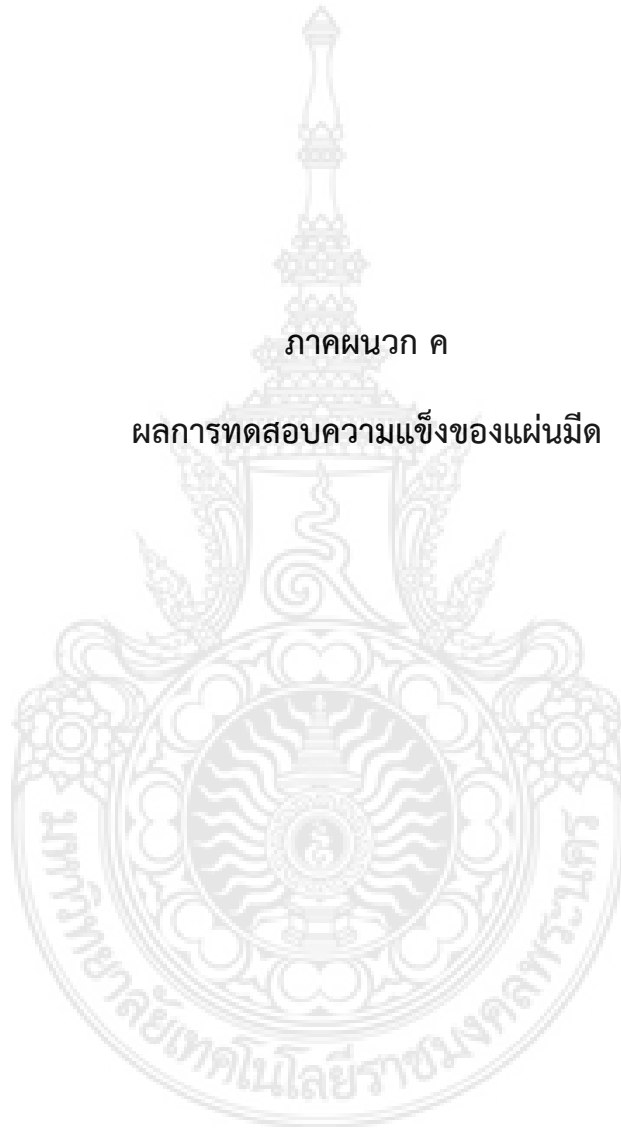
รูปที่ ข.12 ผิวชิ้นงานหลังการกลึงของแผ่นมิดที่ผลิตจากผงโลหะห้องปฏิบัติการ 15 % โคบอลต์

ตารางที่ ข.1 ระยะทางในการกลึงทดสอบแผ่นมิด

ชื่อแผ่นมิด	RE 5 %	RE 10 %	RE 15 %	OR 5 %	OR 10 %	OR 15 %
ระยะทางการกลึง (มม.)	840	720	4200	840	240	1,440

ภาคผนวก ค

ผลการทดสอบความแข็งของแผ่นมิด



ตารางที่ ค.1 ผลความแข็งของแผ่นมิดซีเมนต์ทั้งสแตนคาร์ไบด์

ผลการทดสอบค่าความแข็งของแผ่นมิด			
ส่วนผสม	ครั้งที่	ค่าความแข็ง (HV)	
		ผงโลหะนำเข้า	ผงโลหะที่พัฒนาขึ้นใหม่
5 %	1	1,288	1,539.9
	2	1,285	1,563.3
	3	1,295	1,563
	4	-	1,563
	5	-	1,558.6
10 %	1	1,355	1,715.8
	2	1,349	1,771.6
	3	1,348	1,743.3
	4	-	1,743
	5	-	1,688.9
15 %	1	1,490	1,989.9
	2	1,492	2,024.3
	3	1,488	2,059.7
	4	-	2,059.7
	5	-	2,024.3

ประวัติคณะผู้วิจัย

หัวหน้าโครงการ

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 กรุงเทพฯ 10800
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. วิศวกรรมอุตสาหกรรม 2546
 - ระดับปริญญาตรี คอ.บ. วิศวกรรมอุตสาหกรรม 2531
6. สาขาวิชาที่มีความชำนาญพิเศษ (แตกต่างจากวุฒิการศึกษา) ระบุสาขาวิชา
 - สาขาการออกแบบและพัฒนาผลิตภัณฑ์ทางวิศวกรรม อาทิ การออกแบบผลิตภัณฑ์เครื่องมือตัด (Design Of Cutting tool products)
 - สาขาวิศวกรรมการจัดการอุตสาหกรรมเพื่อความยั่งยืน

ผู้ร่วมวิจัย

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 กรุงเทพฯ 10800
โทรศัพท์ : 02-9132424
โทรสาร : 02-5859175
5. ประวัติการศึกษา
 - ระดับปริญญาโท วศ.ม. วิศวกรรมการจัดการอุตสาหกรรม 2548
 - ระดับปริญญาตรี วศ.บ. วิศวกรรมอุตสาหกรรม 2545
 - ระดับปริญญาตรี คอ.บ. วิศวกรรมอุตสาหกรรม 2538
6. สาขาวิชาที่มีความชำนาญพิเศษ (แตกต่างจากวุฒิการศึกษา) ระบุสาขาวิชา
 - การผลิตชิ้นส่วนงานความเที่ยงตรงสูง (High precision) ความสามารถในการใช้เครื่องมือทดสอบและการตรวจสอบชิ้นส่วนความเที่ยงตรงสูง อาทิ เครื่องมือวัดละเอียด การผลิตด้วยเครื่องจักรกลอัตโนมัติ (CNC) ได้แก่ การกลึง เจาะ กัด และการเจียรระโน
 - การพัฒนาชิ้นส่วนความเที่ยงตรงสูงในงานเครื่องมือกล (Machine tools)
 - การทดสอบและตรวจสอบคุณภาพชิ้นงานความเที่ยงตรงสูง