



รายงานวิจัย

เรื่อง

พัฒนาโลหะมีค่าชนิดทังสเตนคาร์ไบด์ผ่านการรีไซเคิลหมุนเวียนมาใช้ใหม่
เพื่อผลิตชิ้นส่วนโลหะความแข็งสูง

Development of tungsten carbide recovery for the hard metal

คณะผู้จัดทำวิจัย

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สหรัตน์

วงศ์ศรีษะ

อาจารย์ ประสิทธิ์

แพงเพชร

รายงานวิจัยนี้เป็นการวิจัยสาขาวิชาการ กลุ่ม สาขาวิศวกรรมศาสตร์และอุตสาหกรรมวิจัย

สาขาวิชาวิศวกรรมการจัดการอุตสาหกรรมเพื่อความยั่งยืน

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

ปีการศึกษา 2555



รายงานวิจัย

เรื่อง

พัฒนาโลหะมีค่าชนิดทังสเตนคาร์ไบด์ผ่านการรีไซเคิลหมอนเวียนมาใช้ใหม่
เพื่อผลิตชิ้นส่วนโลหะความแข็งสูง

Development of tungsten carbide recovery for the hard metal

คณะผู้จัดทำวิจัย

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สหรัตน์

วงศ์ศรีษะ

อาจารย์ ประสิทธิ์

แพงเพชร

รายงานวิจัยนี้เป็นการวิจัยสาขาวิชาการ กลุ่ม สาขาวิศวกรรมศาสตร์และอุตสาหกรรมวิจัย
สาขาวิชาวิศวกรรมการจัดการอุตสาหกรรมเพื่อความยั่งยืน

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

ปีการศึกษา 2555



งานวิจัยเรื่อง พัฒนาโลหะมีค่าชนิดทังสเตนคาร์ไบด์ผ่านการรีไซเคิลหมุนเวียนมาใช้ใหม่เพื่อผลิต
ชิ้นส่วนโลหะความแข็งสูง

หัวหน้าโครงการวิจัย ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สหรัตน์ วงษ์ศรีษะ
ผู้ร่วมวิจัย อาจารย์ ประสิทธิ์ แพ่งเพชร

สาขาวิชาวิศวกรรมการจัดการอุตสาหกรรมเพื่อความยั่งยืน
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
ปีการศึกษา 2555

บทคัดย่อ

รายงานวิจัยนี้เป็นการผลิตชิ้นส่วนโลหะความแข็งสูงจากโลหะผงทังสเตนคาร์ไบด์ผ่านการรีไซเคิล (Recycling) จากนั้นทำการบดผงโลหะด้วยวิธี Ball Milling เป็นเวลา 40 ชั่วโมง ผงโลหะที่ได้จะมีขนาดระหว่าง 0.11-0.22 μm ส่วนผสม 96.69% ทังสเตนคาร์ไบด์ (WC), 1.68% แทนทาลัม (Ta), 1.21% ไทเทเนียม (Ti) และ 0.42% นีโอเบียม (Nb) เมื่อผสมโลหะประสานโคบอลต์ในช่วง 5-15% อัดขึ้นรูปและอบพูนิก (sintering) ที่อุณหภูมิ 1,450 °C เป็นชิ้นงานโลหะแข็งขนาด 12.39 x 13.82 x 5.6 mm ปรากฏว่าความแข็งเท่ากับ 1,410 HV ที่ความหนาแน่น 14.34 g/cm^3 ผลการทดสอบกลึงเหล็กกล้า S45C ปรากฏใช้งานได้ดีและผลการวิจัยสรุปได้ว่า การผลิตชิ้นงานความแข็งสูงจากวัสดุที่พัฒนาขึ้นมีสมบัติพื้นฐานเหมาะสมและจะนำไปสู่การพัฒนาเพื่อการใช้งานต่อไป

คำสำคัญ (keywords) Recovered, Cemented carbide scraps, Tungsten carbide, Particle size distribution, Hard metal, High wear resistance



กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้สำเร็จได้ด้วยการสนับสนุนทุนวิจัยของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร สามารถผลิตชิ้นส่วนโลหะความแข็งสูงจากโลหะผงทั้งสแตนคาร์ไบด์ผ่านการ รีไซเคิล (Recycling) ซึ่งเป็นผลงานวิจัยใหม่ ที่ได้รับความร่วมมือและสนับสนุนจากหน่วยงานต่างๆ ประกอบด้วยสาขาวิชาวิศวกรรมการจัดการอุตสาหกรรมเพื่อความยั่งยืน คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร และสาขาวิชาเทคโนโลยีการผลิตเครื่องมือและแม่พิมพ์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร ขอบคุนบริษัท อาร์.เอส.คาร์ไบด์ โปรดักส์ จำกัด เพื่อปฏิบัติการขึ้นรูปชิ้นงานแผ่นมีดตัด พร้อมอบพ่นิกและทดสอบความหนาแน่น ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ ในด้านปฏิบัติการทดสอบวิเคราะห์ลักษณะรูปร่างของโลหะผงด้วย SEM สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย (วว.) เพื่อปฏิบัติการวิเคราะห์ Particle size distribution, กรมวิทยาศาสตร์บริการ เพื่อทดสอบวิเคราะห์โลหะผงเชิงคุณภาพและเชิงปริมาณ (X-ray fluorescence, XRF; X-ray diffraction, XRD) รวมถึงผู้ที่เกี่ยวข้องที่ได้สนับสนุนจนกระทั่งงานวิจัยนี้ประสบผลสำเร็จตามวัตถุประสงค์

ผศ.สหรัตน์ วงษ์ศรีษะ

หัวหน้าโครงการ

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ

กิตติกรรมประกาศ

สารบัญ (ต่อ) รูปภาพ

สารบัญ (ต่อ) ตาราง

สัญลักษณ์

บทที่ 1 บทนำ

1.1 ความสำคัญ และที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย	11
1.3 ขอบเขตของการวิจัย	11
1.4 วิธีดำเนินการวิจัย	13
1.5 สถานที่ทดลองและเก็บข้อมูล	14
1.6 ระยะเวลาการทำวิจัย	15
1.7 เครื่องมือและอุปกรณ์การวิจัย	15
1.8 ประโยชน์ที่จะได้รับ	17

บทที่ 2 แนวคิดและทฤษฎีที่สำคัญ

2.1 บทนำ	18
2.2 กระบวนการผลิตชิ้นงานซีเมนต์คาร์ไบด์	25
2.3 การบดละเอียด (Grinding or Milling)	26
2.4 การตรวจสอบสมบัติโลหะผง	28
2.5 กระบวนการอัดขึ้นรูป Rapid sintering [40]	31
2.6 การอบพูนึก (Sintering) [5] [40]	32
2.7 สมบัติชิ้นงานซีเมนต์คาร์ไบด์ [42]	34

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.8 การตรวจสอบและทดสอบประสิทธิภาพแผ่นมีด	36
2.9 การทดสอบประสิทธิภาพการใช้งาน	42
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย	
3.1 ศึกษากระบวนการโลหะผง	52
3.2 ศึกษาข้อมูลเกี่ยวกับการผสมผงโลหะทั้งสแตนคาร์ไบด์	60
3.3 ศึกษาการผลิตชิ้นงานซีเมนต์คาร์ไบด์	65
3.4 ศึกษาสมบัติชิ้นงานซีเมนต์คาร์ไบด์	70
3.5 ศึกษาการทดสอบการใช้งานของชิ้นงานซีเมนต์คาร์ไบด์	75
3.6 วิเคราะห์ข้อมูล	78
3.7 ออกแบบวิธีการทดลอง	79
3.8 การดำเนินการทดลอง	83
3.9 วิธีการบันทึกผลการทดลอง	106
3.10 วิธีการวิเคราะห์ผลการทดลอง	107
3.11 วิธีการสรุปผลการทดลอง	108
บทที่ 4 ผลการวิจัย	
4.1 บทนำ	110
4.2 ผลการวิเคราะห์โลหะผงทั้งสแตนคาร์ไบด์	110
4.3 ผลการตรวจสอบขนาดของแผ่นมีดกลึงทั้งสแตนคาร์ไบด์ รูปทรง SNMG 120408	118
4.4 ผลการวิเคราะห์สมบัติของแผ่นมีดตัดซีเมนต์ทั้งสแตนคาร์ไบด์	121
4.5 ผลการทดสอบความแข็งของแผ่นมีดตัดซีเมนต์ทั้งสแตนคาร์ไบด์	122
4.6 ผลการทดสอบการสึกหรอของแผ่นมีดตัดซีเมนต์ทั้งสแตนคาร์ไบด์จากการกลึง	125
4.7 การวิเคราะห์ผลการทดลอง	132
4.8 การอภิปรายผลการทดลอง	134
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย	
5.1 ข้อเสนอแนะ	137

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บรรณาณุกรม	138
ภาคผนวก ก	145
ภาคผนวก ข	154
ภาคผนวก ค	156



สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 1.1 แนวโน้มการรีไซเคิลซีเมนต์คาร์ไบด์ ของประเทศสหรัฐอเมริกา [7]	2
รูปที่ 1.2 แนวโน้มการผลิตทั้งสแตนเลส โลหะที่ไม่ใช่ประโยชน์ของประเทศสหรัฐอเมริกา 2	2
รูปที่ 1.3 สัดส่วนการผลิตโลหะแข็งพิเศษจากทั้งสแตนเลสคาร์ไบด์ในอุตสาหกรรมแต่ละประเภท [7]3	3
รูปที่ 1.4 ความสัมพันธ์ของขนาดผงโลหะทั้งสแตนเลสคาร์ไบด์และส่วนผสมโคบอลต์มีผลต่อการผลิตชิ้นงานโลหะแข็ง เพื่อการใช้งานในอุตสาหกรรมแต่ละประเภท [7]	3
รูปที่ 1.5 กระบวนการผลิตชิ้นงานทั้งสแตนเลสคาร์ไบด์ (Solid Tungsten Carbide) [10]	4
รูปที่ 1.6 ชิ้นงานโลหะแข็งทั้งสแตนเลสคาร์ไบด์ (Solid Tungsten Carbide) [67]	5
รูปที่ 1.7 การอัดผงโลหะ เริ่มต้นมีการจัดเรียงตัวโดยลดปริมาตรระหว่างอนุภาค เมื่อแรงอัดสูงขึ้น การแน่นตัวเกิดจากการเสียรูปของอนุภาค [11]	6
รูปที่ 1.8 แบบจำลองการอบผนึกอนุภาคทรงกลมสองอนุภาค	6
รูปที่ 1.9 กระบวนการผลิตชิ้นงานทั้งสแตนเลสคาร์ไบด์ [12]	8
รูปที่ 1.10 แสดงปัจจัยที่สำคัญทั้งหมดที่ใช้ในงานกลึงปอกด้วยมีดกลึงอินเสิร์ต [14]	10
รูปที่ 1.11 การทดสอบชิ้นงานซีเมนต์คาร์ไบด์โดยการตัดปาดผิวชิ้นงานเพื่อศึกษาการสึกหรอบริเวณคมตัดของซีเมนต์คาร์ไบด์ [15]	10
รูปที่ 1.12 เปรียบเทียบการสึกหรอบริเวณคมตัดของแผ่นมีดซีเมนต์คาร์ไบด์แต่ละแบบ [15]	11
รูปที่ 1.13 แสดงตัวอย่างการกำหนดขนาดชิ้นงานแผ่นมีดตัดเพื่อการทดลอง [16]	12
รูปที่ 1.14 แสดงตัวอย่างผงโลหะ Submicron WC powder วิเคราะห์ ด้วย SEM	12
รูปที่ 2.1 โครงสร้างโลหะผสม ทั้งสแตนเลส โคบอลต์และคาร์บอน [22]	19
รูปที่ 2.2 Dissolution of Co [9]	22
รูปที่ 2.3 การวิเคราะห์โลหะผงทั้งสแตนเลสคาร์ไบด์ด้วย SEM [24]	22
รูปที่ 2.4 ลักษณะของแผ่นมีดตัดปาดผิว (Insert tools) ผลิตจากโลหะผงทั้งสแตนเลสคาร์ไบด์ [2]	22
รูปที่ 2.5 โครงสร้างของซีเมนต์คาร์ไบด์ ชนิดแผ่นมีดตัดปาดผิว [25]	23
รูปที่ 2.6 Schematic diagram and photographic view of experimental set-up. [26]	23
รูปที่ 2.7 รูปแบบการสึกหรอบริเวณคมตัดของแผ่นมีดจากการตัดปาดผิวชิ้นงาน [15]	24
รูปที่ 2.8 การสึกหรอที่ผิวหลบ (Flank wear) ที่บริเวณคมตัดของแผ่นมีดซีเมนต์คาร์ไบด์ [15]	24
รูปที่ 2.9 ลักษณะของเศษตัด (Chip) [27]	25

สารบัญรูป(ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 2.10 แสดงกระบวนการผลิตชิ้นงานซีเมนต์ทั้งสแตนคาร์ไบด์ [69]	25
รูปที่ 2.11 Virginal WC powder [29]	28
รูปที่ 2.12 Appearances of the recovered and virginal WC powders Recovered WC powder [29]	28
รูปที่ 2.13 XRD pattern of WC-Co powder. [35]	29
รูปที่ 2.14 XRD patterns of WC-17 wt.% Co powder particles as-received and after ball Milling in shaker mill for different times. [30]	29
รูปที่ 2.15 การตรวจวิเคราะห์ขนาดและการกระจายโลหะผงทั้งสแตนคาร์ไบด์ [31]	30
รูปที่ 2.16 Particle size distribution for powders milled at 30 °C and RT. [31]	30
รูปที่ 2.17 Particle size distribution for spherical shaped tungsten carbide powder used in present study. [32]	31
รูปที่ 2.18 แสดงลักษณะส่วนประกอบของแม่พิมพ์ที่มีส่วนผสมของกราฟไฟต์ที่ใช้ในการ อัดขึ้นรูปชิ้นงานซีเมนต์ทั้งสแตนคาร์ไบด์ [34]	32
รูปที่ 2.19 ภาพถ่าย SEM แสดงการฟอรัมตัวของคอคอด (Neck Growth) เนื่องจากการ การอบผนึก [5]	33
รูปที่ 2.20 แสดงอุณหภูมิการอบผนึกชิ้นงานซีเมนต์คาร์ไบด์ส่วนผสม WC-10Co [35]	33
รูปที่ 2.21 แสดงความสัมพันธ์ของอุณหภูมิและเวลา ต่อการหดตัวของชิ้นที่ผ่านการอัดขึ้นรูป จากงานวิจัย Rapid sintering of ultrafine WC–Ni cermets [34]	34
รูปที่ 2.22 แสดงลักษณะชิ้นงานสำหรับทดสอบ โครงสร้างและกวดัดความแข็ง	36
รูปที่ 2.23 กราฟแสดงค่าความแข็งต่อการเปลี่ยนรูปเมื่อได้รับแรงกด 50 HV ของงานวิจัย Crack propagation characteristic and toughness of functionally graded WC–Co cemented carbide.[37]	37
รูปที่ 2.24 Schematic diagram of palmqvist indentation characteristics [38]	38
รูปที่ 2.25 HV50 indent image in the intermediate zone, with diagonal length of 315.05 μm and 315.51 μm , respectively [37]	38
รูปที่ 2.26 Sketch of crack propagation in WC-Co DP cemented carbide [39]	39
รูปที่ 2.27 Micrographs of the crack at the surface zone with WC+Co tool gradient materials [38]	39

สารบัญรูป(ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 2.28 Cracks generated in the corners of Vickers indentations (at load 30 kg) [40]	40
รูปที่ 2.29 แสดงลักษณะรอยแตกที่มุมของชิ้นงานซีเมนต์คาร์ไบด์หลังรับโหลดแรงกด 50 HV ของงานวิจัย Crack propagation characteristic and toughness of functionally graded WC-Co cemented carbide. [37]	41
รูปที่ 2.30 แสดงลักษณะรูปทรงของแผ่นมีดสำหรับงานกลึงปอก [41]	42
รูปที่ 2.31 แสดงรูปทรงเลขาคณิตและลักษณะการใช้งานของแผ่นมีด [41]	43
รูปที่ 2.32 แสดงรหัสแผ่นมีด CATALOGUE HIW Supply CO., LTD	45
รูปที่ 2.33 ลักษณะแผ่นมีดตัด SNMG 120408 [43]	47
รูปที่ 2.34 Geometry of wear of turning tool [43]	48
รูปที่ 2.35 แสดงลักษณะการสึกหรอบริเวณด้านข้างคมตัดของแผ่นมีดตัด จากงานวิจัย Wear mechanisms of WC coated and uncoated tools in finish turning of Inconel 718 [44]	48
รูปที่ 2.36 แสดงลักษณะการสึกหรอของแผ่นตัดซีเมนต์คาร์ไบด์ที่ผ่านการกลึง ตามเงื่อนไขที่กำหนดจากงานวิจัย Wear mechanisms of WC coated and uncoated tools in finish turning of Inconel 718 [44]	49
รูปที่ 2.37 แสดงเครื่องทดสอบความเรียบผิว [2]	50
รูปที่ 2.38 แสดงภาพจำลองการแบ่งชิ้นงานเพื่อตรวจสอบความเรียบผิว	50
รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการดำเนินโครงการ	51
รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการดำเนินโครงการ(ต่อ)	52
รูปที่ 3.2 กระบวนการผลิตชิ้นงานซีเมนต์คาร์ไบด์ [45]	53
รูปที่ 3.3 กระบวนการผลิต Hard-Metal tools [46]	54
รูปที่ 3.4 แสดงขั้นตอนการบดผงโลหะในงานวิจัย Microwave Sintering of nanocrystalline WC-12Co: Challenges and Perspectives [48]	57
รูปที่ 3.5 แสดงขั้นตอนการผลิตโลหะผงระดับนาโนเมตรด้วยกรรมวิธีทางกล [40]	57
รูปที่ 3.6 แสดงตัวอย่างการวิเคราะห์โครงสร้างด้วย Scanning Electron Microscope ของผงโลหะทั้งสแตนคาร์ไบด์หลังจากผ่านการบด [50]	58
รูปที่ 3.7 Synthesised WC powders [50]	58
รูปที่ 3.8 แสดงตัวอย่างการวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุในผงโลหะทั้งสแตนคาร์ไบด์ หลังผ่านการบด 50 ชั่วโมง [51]	59

สารบัญรูป(ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 3.9 แสดงลักษณะการกระจายขนาดของอนุภาคหลังผ่านการบด 24 h [52]	59
รูปที่ 3.10 แสดงแผนผังขั้นตอนการผสมผงโลหะในงานวิจัย Effect of VC and NbC a dditions on microstructure and properties of ultrafine WC-10Co cemented carbides [55]	61
รูปที่ 3.11 SEM image (a) and XRD pattern (b) of composite powder of WC-10 Co alloy [24]	61
รูปที่ 3.12 แสดงแผนผังขั้นตอนการผสมผงโลหะในงานวิจัย Gelcasting of WC-8wt% Co Tungsten Cemented Carbide [54]	62
รูปที่ 3.13 แสดงแผนผังขั้นตอนการผสมผงโลหะในงานวิจัย Synthesis and Processing of Nanocrystalline Tungsten Carbide towards Cemented Carbides with Optimal Mechanical Properties [40]	63
รูปที่ 3.14 แสดงตัวอย่างผงโลหะทั้งสแตนคาร์ไบด์ผสมกับโคบอลต์ [56]	63
รูปที่ 3.15 The morphology of the mixed powders: (a) sub-micron WC/nano-Co and [57]	64
รูปที่ 3.16 SEM images of raw WC powder: WC-Co powder with the optimized parameters. [28]	64
รูปที่ 3.17 Powder mixture WC (95%), Co (5%) after 8 hours of grinding in a ball mill [38]	65
รูปที่ 3.18 แสดงโครงสร้างผลึกของโลหะคาร์ไบด์ที่ผ่านการอบที่อุณหภูมิ 1,400 °C ใช้เวลาในการอบ 1 ชั่วโมง [40]	67
รูปที่ 3.19 Average grain size of WC in sintered alloys [49]	68
รูปที่ 3.20 Mean grain size, d _{WC} (nm) [52]	70
รูปที่ 3.21 HV50 indent image in the core zone, with diagonal length of 281.32 μm and 278.02 μm respectively [37]	71
รูปที่ 3.22 Vickers indentation in the surface zone, diamond indenter, indentation load, 30kgf in WC+Co tool gradient materials [38]	71
รูปที่ 3.23 แสดงภาพรอยกดการทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์ [52]	72
รูปที่ 3.24 Optical micrograph of Vickers indentation effect on specimen No. 5 tested under 40 kgf. [49]	72

สารบัญรูป(ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 3.25 ตัวอย่างผลการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคจากงานวิจัย Effects Of Ball Milling Time On The Synthesis And Consolidation of Nanostructured WC-Co Composites [61]	73
รูปที่ 3.26 ตัวอย่างผลการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคจากงานวิจัย Powder Injection Molding of WC-8%Co Tungsten Cemented Carbide [62]	73
รูปที่ 3.27 SEM Sintering Of Nano-Sized WC-Co Powders Produced by A Gas Reduction-Carburization Process [35]	74
รูปที่ 3.28 Optical micrographs of the WC-10Co alloys with various grain growth inhibitors sintered at 1350, 1450 and 1550 °C [39]	74
รูปที่ 2.29 SEM images of investigated cemented carbides, (a) WC-10Co [49]	75
รูปที่ 3.30 แสดงลักษณะการสึกหรอของเครื่องมือตัด จากงานวิจัย Dry Turning of Alumina/Aluminum Composites with CVD Diamond Coated Co-Cemented Tungsten Carbide tools [64]	76
รูปที่ 3.31 แสดงภาพการสึกหรอของเครื่องมือตัดจากงานวิจัย Influence Of Tool Wear On Surface Roughness in Hard Turning Using Differently Shaped Ceramic tools [49]	77
รูปที่ 3.32 แสดงภาพการสึกหรอของเครื่องมือตัดจากการศึกษา งานวิจัย Wear Behavior of Cutting Tool Material During The Turning Of A Cast Iron FCD 400 In Cutting Lubricants Condition [60]	77
รูปที่ 3.33 แสดงค่าความเรียบต่อเวลาที่ใช้ในการกลึง 3 ลักษณะ [65]	78
รูปที่ 3.34 แสดงขั้นตอนการบดผงโลหะทั้งสแตนคาร์ไบด์	80
รูปที่ 3.35 แผนผังแสดงขั้นตอนการผสมผงโลหะทั้งสแตนคาร์ไบด์	81
รูปที่ 3.36 Sintering schedules for WC-10Co powders compacted: (c) 500-1150-1450 °C [35]	81
รูปที่ 3.37 แสดงโลหะผงทั้งสแตนคาร์ไบด์หลังการย่อย	83
รูปที่ 3.38 แสดงโลหะผงทั้งสแตนคาร์ไบด์หลังการย่อย	84
รูปที่ 3.39 แสดงการล้างโลหะผงด้วยเอทานอล	84
รูปที่ 3.40 การติดตั้งหม้ออบ	85
รูปที่ 3.41 แสดงการแยกโลหะผงหลังการอบ	85
รูปที่ 3.42 แสดงการล้างโลหะผงหลังการอบ	86

สารบัญรูป(ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 3.43 แสดงการตกตะกอนของโลหะผงทั้งสแตนคาร์ไบด์หลังการล้าง	86
รูปที่ 3.44 แสดงโคลนทั้งสแตนคาร์ไบด์สำหรับอบแห้ง	87
รูปที่ 3.45 การเตรียมโคลนตะกอนโลหะผงเข้าเตาอบสูญญากาศ	87
รูปที่ 3.46 แสดงลักษณะโลหะผงหลังการอบด้วยเตาสูญญากาศ	88
รูปที่ 3.47 แสดงการเทโลหะผงหลังการอบลงในหม้อสำหรับทำการบด	88
รูปที่ 3.48 แสดงการคัดขนาดโลหะผงด้วยตะแกรง	89
รูปที่ 3.49 การเตรียมการผสม	89
รูปที่ 3.50 แสดงการเตรียมส่วนผสมลงในหม้อบด	90
รูปที่ 3.51 แสดงการติดตั้งหม้อบด	90
รูปที่ 3.52 แสดงโลหะผงทั้งสแตนคาร์ไบด์ที่ผ่านการผสมโลหะประสาน	91
รูปที่ 3.53 การคัดแยกโลหะผงหลังการผสม	91
รูปที่ 3.54 โลหะผงทั้งสแตนคาร์ไบด์ที่ไซเคิลที่ผ่านกระบวนการผสมโลหะประสาน	92
รูปที่ 3.55 การชั่งตวงโลหะผงทั้งสแตนคาร์ไบด์สำหรับอัดขึ้นรูป	92
รูปที่ 3.56 เครื่องอัดขึ้นรูปแผ่นมีดตัดซีเมนต์คาร์ไบด์	93
รูปที่ 3.57 การเตรียมโลหะผงลงในแม่พิมพ์	93
รูปที่ 3.58 แสดงแผ่นมีดตัดซีเมนต์คาร์ไบด์ระหว่างการขึ้นรูป	94
รูปที่ 3.59 แสดงแผ่นมีดตัดรีไซเคิลหลังการอัดขึ้นรูป	94
รูปที่ 3.60 เตาอบสูญญากาศ รุ่น CSG-200	95
รูปที่ 3.61 แสดงแผ่นมีดซีเมนต์คาร์ไบด์ที่ไซเคิลหลังการอบผนึก	95
รูปที่ 3.62 เครื่องวิเคราะห์การกระจายตัวของผงโลหะ Particle size ด้วยเครื่อง (Malvern instrument Mastersizer 2000)	96
รูปที่ 3.63 เครื่องวิเคราะห์โครงสร้าง (X-ray Diffractometer)	96
รูปที่ 3.64 เครื่อง Scanning Electron Microscopy, SEM	97
รูปที่ 3.65 ตรวจสอบขนาดแผ่นด้วยเครื่อง (Profile Projector) ความละเอียด 0.001mm	97
รูปที่ 3.66 ตรวจสอบขนาดของชิ้นงานซีเมนต์ทั้งสแตนคาร์ไบด์ (a) ดำเนินการตรวจสอบขนาด แผ่นมีดตัด (b) ตำแหน่งการวางแผ่นมีดตัดเพื่อทำการตรวจสอบขนาด	98
รูปที่ 3.67 แบบแผ่นมีดตัดซีเมนต์ทั้งสแตนคาร์ไบด์และแสดงตำแหน่งที่ทำการตรวจสอบขนาด	98
รูปที่ 3.68 เครื่องกลึงอัตโนมัติสำหรับทดสอบแผ่นมีดตัดซีเมนต์ทั้งสแตนคาร์ไบด์	99

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 3.69 แบบจำลองการจับยึดวัสดุทดสอบก่อนทำการทดสอบกลึง	99
รูปที่ 3.70 แบบจำลองแสดงค่าตามตำแหน่งบริเวณที่เกี่ยวข้องกับการทดสอบกลึง	99
รูปที่ 3.71 แสดงการกลึงวัสดุทดสอบด้วยเครื่องกลึงอัตโนมัติ (CNC)	100
รูปที่ 3.72 ชั่งน้ำหนักแผ่นมีดตัดด้วยเครื่องชั่งความละเอียด 0.0001 กรัม	101
รูปที่ 3.73 ตรวจสอบการสึกหรอของแผ่นมีดตัดด้วยกล้องถ่ายภาพยี่ห้อ (Nikon) รุ่น (ZNX800) กำลังขยาย 10-63 เท่า	102
รูปที่ 3.74 ตรวจสอบความเรียบผิววัสดุทดสอบด้วยเครื่อง (Measuring Microscope SJ 400)	102
รูปที่ 3.75 ดำเนินการตรวจสอบความเรียบผิวของวัสดุทดสอบ	103
รูปที่ 3.76 แบบจำลองลักษณะการตรวจสอบความเรียบผิว	103
รูปที่ 3.77 แสดงตัวอย่างผลการวัดความเรียบผิวที่ได้ จากเครื่องทดสอบความเรียบผิว	104
รูปที่ 3.78 วัดขนาดวัสดุทดสอบด้วย เวอร์เนียร์คาลิเปอร์ดิจิตอล ความละเอียด 0.01 mm.	104
รูปที่ 3.79 เครื่องตรวจสอบโครงสร้างและรอยกด	105
รูปที่ 3.80 ทดสอบความแข็งแผ่นมีดตัดด้วยเครื่องทดสอบความแข็ง (Microhardness Tester : HV)	106
รูปที่ 4.1 การตรวจสอบการกระจายตัวของโลหะผงทั้งสแตนคาร์ไบด์ที่ผ่านการรีไซเคิล	110
รูปที่ 4.2 ผลวิเคราะห์การกระจายตัวของโลหะผงทั้งสแตนคาร์ไบด์ที่ผ่านการรีไซเคิลจากเศษ แผ่นมีดตัดหลังการอบค	111
รูปที่ 4.3 การตรวจสอบ XRD ของโลหะผงทั้งสแตนคาร์ไบด์ที่ผ่านกระบวนการรีไซเคิล	112
รูปที่ 4.4 แสดงองค์ประกอบของธาตุในโลหะผงทั้งสแตนคาร์ไบด์ที่ผ่านกระบวนการรีไซเคิล	112
รูปที่ 4.5 แสดงการตรวจสอบองค์ประกอบธาตุโลหะผงทั้งสแตนคาร์ไบด์หลังการอบค 40 ชั่วโมง	113
รูปที่ 4.6 แสดงผล SEM ของโลหะผงทั้งสแตนคาร์ไบด์ที่ผ่านกระบวนการรีไซเคิลกำลังขยาย 30,00 เท่า	115
รูปที่ 4.7 แสดงผล SEM ของโลหะผงทั้งสแตนคาร์ไบด์ ผ่านการอบค 20 ชั่วโมง กำลังขยาย 30,00 เท่า	115
รูปที่ 4.8 แสดงผล SEM ของโลหะผงทั้งสแตนคาร์ไบด์ ผ่านการอบค 40 ชั่วโมง กำลังขยาย 30,00 เท่า	116
รูปที่ 4.9 แสดงผล SEM ของโลหะผงทั้งสแตนคาร์ไบด์ผสมโคบอลต์ 5% ที่กำลังขยาย 30,000 เท่า	116

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.10 แสดงผล SEM ของโลหะผงทั้งสแตนคาร์ไบด์ผสมโคบอลต์ 10% ที่กำลังขยาย 30,000 เท่า	117
รูปที่ 4.11 แสดงผล SEM ของโลหะผงทั้งสแตนคาร์ไบด์ผสมโคบอลต์ 15% ที่กำลังขยาย 30,000 เท่า	117
รูปที่ 4.12 แบบ (Drawing) ของชิ้นงานมาตรฐาน (SNMG) [68]	118
รูปที่ 4.13 โครงสร้างจุลภาคแผ่นมีดตัดผงรีไซเคิลจากเศษแผ่นมีดตัด (WC-15%Co (RE)) ที่กำลังขยาย 500 เท่า	121
รูปที่ 4.14 โครงสร้างจุลภาคของแผ่นมีดตัดที่ผลิตจากโลหะผงทั้งสแตนคาร์ไบด์มาตรฐาน (WC-15%Co (OR)) ที่กำลังขยาย 500 เท่า	122
รูปที่ 4.15 แสดงภาพรอยกดแบบวิกเกอร์ ของแผ่นมีดตัดซีเมนต์ทั้งสแตนคาร์ไบด์ที่ผลิตจากโลหะผงทั้งสแตนคาร์ไบด์ที่ผ่านการรีไซเคิลจากเศษแผ่นมีดตัด (WC-15% Co (RE))	123
รูปที่ 4.16 แสดงภาพรอยกดแบบวิกเกอร์ของแผ่นมีดตัดซีเมนต์ทั้งสแตนคาร์ไบด์ที่ผลิตจากผงโลหะทั้งสแตนคาร์ไบด์มาตรฐานเป็นผงนำเข้า (WC-15%Co (OR))	124
รูปที่ 4.17 ความแข็งชิ้นงานแผ่นมีดตัดที่ผลิตด้วยโลหะผงที่ผ่านการรีไซเคิลและแผ่นมีดตัดที่ผลิตด้วยผงมาตรฐานนำเข้าจากต่างประเทศส่วนผสมโคบอลต์ 15%	125
รูปที่ 4.18 การตรวจสอบน้ำหนักแผ่นมีดตัดซีเมนต์ทั้งสแตนคาร์ไบด์ที่เปลี่ยนแปลง ก่อน-หลังการทดสอบประสิทธิภาพ	126
รูปที่ 4.19 แสดงเปอร์เซ็นต์ (%) การหดตัวของชิ้นงานแผ่นมีดตัดผงรีไซเคิล (RE) และผงมาตรฐาน (OR)	127
รูปที่ 4.20 ลักษณะคมตัดก่อนทดสอบบริเวณผิวภายนอกของแผ่นมีดตัดผงทั้งสแตนคาร์ไบด์รีไซเคิล	128
รูปที่ 4.21 ลักษณะคมตัดบริเวณด้านข้างหลังการทดสอบของแผ่นมีดตัดผงทั้งสแตนคาร์ไบด์รีไซเคิล	128
รูปที่ 4.22 ลักษณะการสึกหรอของแผ่นมีดตัดซีเมนต์คาร์ไบด์หลังการทดสอบประสิทธิภาพ	129
รูปที่ 4.23 แผ่นมีดตัดซีเมนต์ทั้งสแตนคาร์ไบด์ที่ผลิตจากโลหะผงทั้งสแตนคาร์ไบด์มาตรฐาน ส่วนผสม 15%Co (a) มุมภายนอก (b) Flank Wear	129
รูปที่ 4.24 ลักษณะของผิวชิ้นงานกลึงของแผ่นมีดที่ผลิตด้วยโลหะผงที่ผ่านการรีไซเคิลและแผ่นมีดที่ผลิตด้วยผงมาตรฐานนำเข้าจากต่างประเทศ	130

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.25 ผลการเปรียบเทียบค่าความเรียบผิวของแผ่นมิดดัดซีเมนต์ทั้งสแตนคาร์ไบด์ที่ผลิตจากโลหะผงทั้งสแตนคาร์ไบด์รีไซเคิลและผงมาตรฐาน	131
รูปที่ 4.26 ผลการวิเคราะห์ความหนาเศษตัดระหว่างแผ่นมิดที่ผลิตด้วยผงที่ผ่านการรีไซเคิลกับแผ่นมิดที่ผลิตด้วยผงมาตรฐานนำเข้าจากต่างประเทศ	131
รูปที่ 4.27 ผลการวัดขนาดของชิ้นงานทดสอบหลังทำการกลึง	132
รูปที่ 4.28 แสดงขั้นตอนการปรับปรุงสมบัติผงโลหะโดยวิธีการบดแบบ Ball Milling	134
รูปที่ ก.1 แผ่นมิดสำหรับกลึงเกลียว	145
รูปที่ ก.2 แผ่นมิดสำหรับกลึงปาดหน้า	147
รูปที่ ก.3 แสดงองค์ประกอบสำหรับการกลึง	149
รูปที่ ก.4 Nomograph สำหรับหาความเร็วตัดในการกลึงงานด้วยมิดกลึงคาร์ไบด์ที่มา: STEVA F.KRAR, J.WILLIAM OSWALD หน้า 190	153
รูปที่ ค.1 ผลการตรวจสอบผงโลหะด้วย X-ray Diffractometer (XRD) ที่แรงดัน 1.0 โวลต์ อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส กรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 1 N	156
รูปที่ ค.2 ผลการตรวจสอบผงโลหะด้วย X-ray Diffractometer (XRD) ที่แรงดัน 1.4 โวลต์ อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส กรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 1 N	156
รูปที่ ค.3 ผลการทดสอบขนาดและการกระจายตัวของโลหะผงที่ แรงดัน 1.2 โวลต์ อุณหภูมิ 30 °C กรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 1 N	157
รูปที่ ค.4 แสดงผลการทดสอบขนาดและการกระจายตัวของโลหะผงที่ แรงดัน 1.2 โวลต์ อุณหภูมิ 30 °C กรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 1 (โลหะผงหลังบด)	157

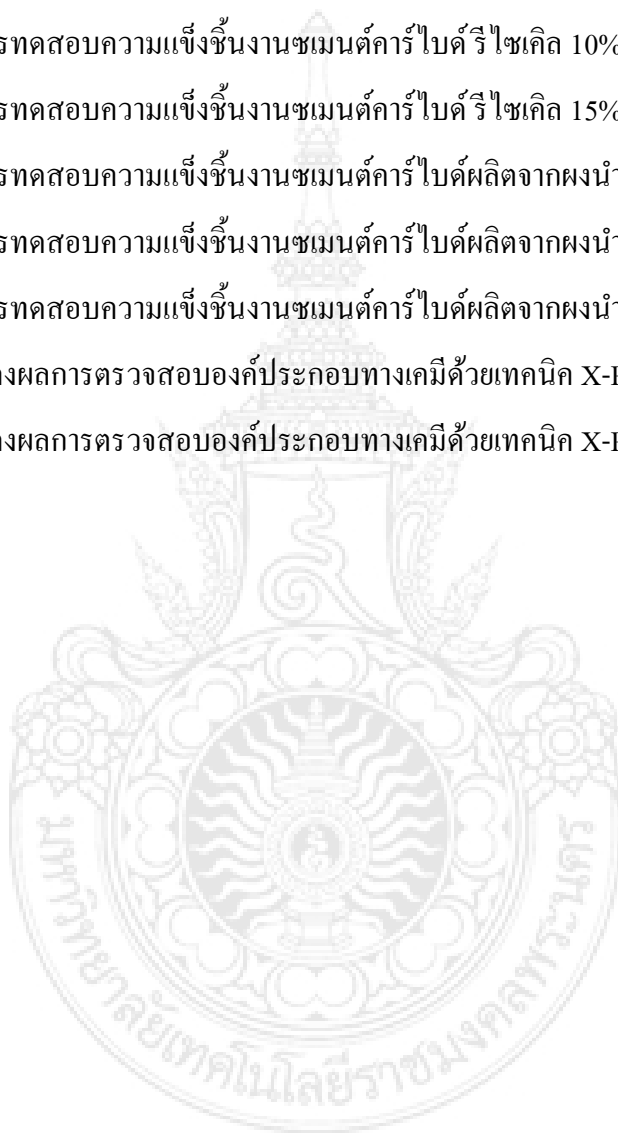
สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 1.1 สมบัติของชิ้นงานทั้งสแตนคาร์ไบด์ที่มีส่วนผสมระหว่าง ผงทั้งสแตนคาร์ไบด์ผสมกับ ผงโคบอลต์	8
ตารางที่ 1.2 สมบัติของชิ้นงานทั้งสแตนคาร์ไบด์ จากงานวิจัยของ Farid Akhtar และคณะ [13]	9
ตารางที่ 1.3 สมบัติเครื่องมือชนิดทั้งสแตนคาร์ไบด์	9
ตารางที่ 1.4 ระยะเวลาโครงการ ประมาณ 1 ปี (ตุลาคม 2554 – กันยายน 2555)	15
ตารางที่ 2.1 แสดง parameter ในการบดโลหะผงทั้งสแตนคาร์ไบด์ [23]	26
ตารางที่ 2.2 สมบัติและการผสมทั้งสแตนคาร์ไบด์ กับผงโคบอลต์ของ Betek Progress, Inc [67]	27
ตารางที่ 2.3 สมบัติชิ้นงานซีเมนต์คาร์ไบด์ [36]	35
ตารางที่ 2.4 แสดงความสามารถของรูปทรงทางเรขาคณิตแผ่นมีดกลึงปอก	44
ตารางที่ 2.5 แสดงขนาดรูปทรงทางเรขาคณิตแผ่นมีดกลึงปอก [41, [42]	46
ตารางที่ 3.1 สมบัติโลหะผงทั้งสแตนคาร์ไบด์ของบริษัท MITSUBISHI CARBIDE [47]	55
ตารางที่ 3.2 ข้อมูลแสดงปัจจัยที่เกี่ยวกับการบดผงโลหะ [35], [40]	56
ตารางที่ 3.3 แสดงข้อมูลปัจจัยที่เกี่ยวกับการผสมผงโลหะ [54], [55]	60
ตารางที่ 3.4 แสดงข้อมูลปัจจัยที่เกี่ยวกับการอัดขึ้นรูป (Green Compact) [58], [40]	66
ตารางที่ 3.5 แสดงข้อมูลปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการอบผนึก (Sintering) [40], [54], [1]	66
ตารางที่ 3.6 Processing parameters of alloys 1-14 Note that the size of WC powders is 0.2 μm [60]	69
ตารางที่ 3.7 แสดงข้อมูลปัจจัยที่เกี่ยวกับรายละเอียดในการกลึง [1], [2], [3]	75
ตารางที่ 3.8 แสดงเงื่อนไขในการบดผงโลหะทั้งสแตนคาร์ไบด์	79
ตารางที่ 3.9 แสดงเงื่อนไขการผสมผงโลหะทั้งสแตนคาร์ไบด์	80
ตารางที่ 4.1 แสดงผลการวิเคราะห์ห้องค์ประกอบของธาตุโลหะผงทั้งสแตนคาร์ไบด์รีไซเคิล	111
ตารางที่ 4.2 แสดงผลการวิเคราะห์ปริมาณส่วนผสมทางเคมีโลหะผงทั้งสแตนคาร์ไบด์รีไซเคิล	114
ตารางที่ 4.3 การวัดขนาดแผ่นมีดซีเมนต์คาร์ไบด์ก่อนทำการอบผนึก (Before sintering)	118
ตารางที่ 4.4 การวัดขนาดชิ้นงานคาร์ไบด์ก่อนทำการอบผนึก (After sintering)	119
ตารางที่ 4.5 การตรวจสอบแผ่นมีดตัดก่อนอบผนึก	120

สารบัญตาราง (ต่อ)

	หน้า
ตารางที่ 4.6 การตรวจสอบแผ่นมีดตัดหลังอบพ่น	120
ตาราง ข.1 ผลการทดสอบความแข็งแรงชิ้นงานซเมนต์คาร์ไบด์รีไซเคิล 5% Co	154
ตาราง ข.2 ผลการทดสอบความแข็งแรงชิ้นงานซเมนต์คาร์ไบด์รีไซเคิล 10% Co	154
ตาราง ข.3 ผลการทดสอบความแข็งแรงชิ้นงานซเมนต์คาร์ไบด์รีไซเคิล 15% Co	154
ตาราง ข.4 ผลการทดสอบความแข็งแรงชิ้นงานซเมนต์คาร์ไบด์ผลิตจากผงนำเข้า 5% Co	155
ตาราง ข.5 ผลการทดสอบความแข็งแรงชิ้นงานซเมนต์คาร์ไบด์ผลิตจากผงนำเข้า 5% Co	155
ตาราง ข.5 ผลการทดสอบความแข็งแรงชิ้นงานซเมนต์คาร์ไบด์ผลิตจากผงนำเข้า 5% Co	155
ตารางที่ ค.1 แสดงผลการตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมีด้วยเทคนิค X-Ray Fluorescence	158
ตารางที่ ค.2 แสดงผลการตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมีด้วยเทคนิค X-Ray Fluorescence	159



รายการสัญลักษณ์

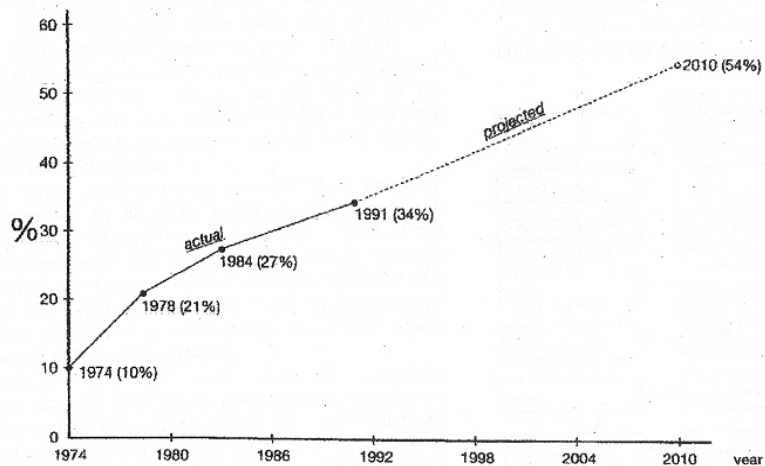
สัญลักษณ์	คำอธิบาย
W	โลหะทังสเตน
C	โลหะคาร์บอน
Co	โลหะโคบอลต์
WC	โลหะทังสเตนคาร์ไบด์
Cr	โลหะโครเมียม
N	ความเข้มข้นของสารละลาย
V	แรงดันไฟฟ้า (โวลต์)
°C	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)
g	กรัม
kg	กิโลกรัม
ml	มิลลิลิตร
HV Vickers Hardness	ค่าความแข็ง
g/cm ³	น้ำหนักกรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร
TiC	โลหะไททาเนียมคาร์ไบด์
SiC	โลหะซิลิกอนคาร์ไบด์
µm	ไมโครเมตร, ไมครอน
TiTaC2	ไทเทเนียมแทนทาลัมคาร์ไบด์
SEM	การส่องกล้องจุลทรรศน์แบบสแกน
HIP	กระบวนการขึ้นรูปแบบร้อน
CIP	กระบวนการขึ้นรูปแบบเย็น
XRD	การวิเคราะห์ชนิดของธาตุ
EDX	การวิเคราะห์ธาตุเชิงปริมาณ
Si	ซิลิกอน

บทที่ 1

บทนำ

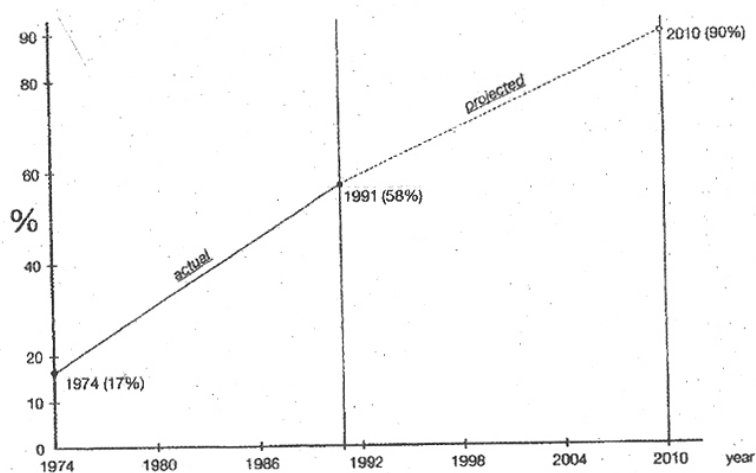
1.1 ความสำคัญ และที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย

1.1.1 จำนวนทังสเทน (W) ที่ทำการผลิตรวมทั้งหมดในอุตสาหกรรมทั่วโลกมีจำนวนมากถึง 38,500 ตัน ในปีค.ศ. 1995 และเพิ่มขึ้นเป็น 88,000 ตัน ในปี ค.ศ. 2008 [17] ในด้านการผลิตทังสเทนคาร์ไบด์ (Tungsten carbides) โดยเฉพาะประเทศผู้นำทางอุตสาหกรรม อาทิ ประเทศสหรัฐอเมริกา (U.S.A.) โดยหน่วยงาน Defense National Stockpile Center (DNSC) มีการรายงานผลการผลิตทังสเทนจากเศษซีเมนต์ทังสเทนคาร์ไบด์มากกว่า 5,250 ตันในปี ค.ศ.1999 และขนาดผลิตเพิ่มขึ้นโดยลำดับ [6] โลหะทังสเทน (Tungsten) เป็นโลหะที่มีการนำมาใช้อย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรมการผลิตสินค้า อาทิ ชิ้นส่วนทนการสึกหรอสูง ความแข็งสูง ชิ้นส่วนในเทคโนโลยีการตัดปาดผิว (Metal removal technology) เพื่อผลิตแม่พิมพ์ซึ่งเป็นต้นแบบของผลิตภัณฑ์แทบทุกชนิด ชิ้นส่วนยานยนต์ เครื่องจักรกล อุปกรณ์ไฟฟ้า อิเล็กทรอนิกส์ อุปกรณ์ทางการแพทย์ อากาศยาน วัสดุด้านการทหาร และเป็นโลหะที่สำคัญด้านการการผลิตเครื่องมือทนการสึกหรอสูง [7] มีสมบัติพิเศษในด้านความแข็งสูง (High hardness) ความหนาแน่น 19 g/cm^3 จุดหลอมที่ $3400 \text{ }^\circ\text{C}$ [33] คงสมบัติเดิมได้ดีจากการนำกลับมาผลิตใหม่จากการรีไซเคิล (Recycling) ตามผลงานวิจัยของ Kieffer, B.F.and LassnerjE., [7] พบว่าอุตสาหกรรมการผลิตโลหะทังสเทนในประเทศผู้นำทางอุตสาหกรรมมีการผลิตจำนวนมากและแนวโน้มสูงขึ้นต่อเนื่องนานกว่า 40 ปี ปริมาณการนำกลับมาใช้ใหม่ จากปี ค.ศ. 1974 ถึง 1991 เพิ่มขึ้น 34% ประมาณ 348,000 เมตริกตัน [8] คาดว่าในปี ค.ศ. 2010-2020 การรีไซเคิลจะเพิ่มขึ้นมากกว่าร้อยละ 54 โดยประเทศสหรัฐอเมริกาผลิตมากที่สุดถึงร้อยละ 90 นำเข้าวัตถุดิบจากประเทศจีน รัสเซีย และประเทศอื่น ๆ รวมถึงประเทศไทย เพื่อผลิตเทคโนโลยีในอุตสาหกรรมพื้นฐานทั้งหมด [7]

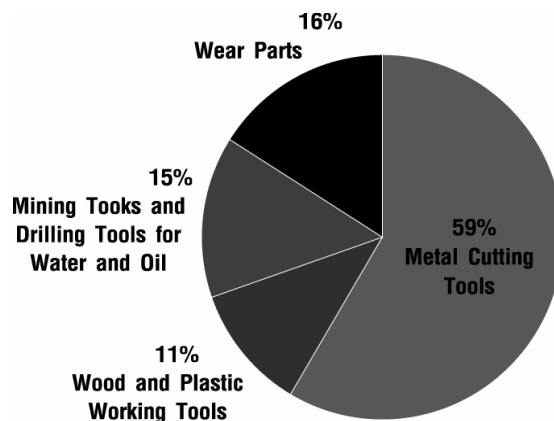


รูปที่ 1.1 แนวโน้มการใช้เชื้อเพลิงถ่านหินเพื่อผลิตไฟฟ้าของสหรัฐอเมริกา [7]

จากรูปที่ 1.1 และ 1.2 รายงานวิจัย แนวโน้มการนำโลหะเศษซีเมนต์คาร์ไบด์กลับมาใช้เพื่อการผลิตในอุตสาหกรรมพื้นฐานด้านต่างๆ ของสหรัฐอเมริกา เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องจนถึง ค.ศ.2010



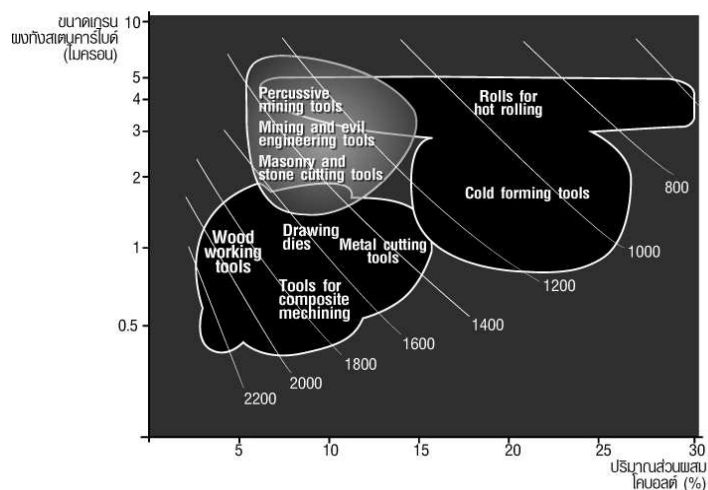
รูปที่ 1.2 แนวโน้มการผลิตทั้งสเต็มจากเศษ โลหะที่ไม่ใช้ประโยชน์ของสหรัฐอเมริกา [7]



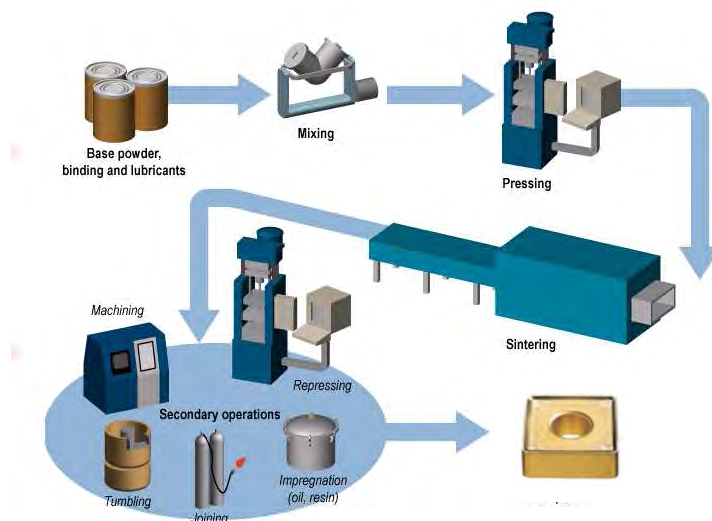
รูปที่ 1.3 สัดส่วนการผลิตโลหะแข็งพิเศษจากทั้งสแตนคาร์ไบด์ในอุตสาหกรรมแต่ละประเภท [7]

ซีเมนต์คาร์ไบด์ในอุตสาหกรรมเครื่องมือตัดมีสัดส่วนถึง ร้อยละ 59 ผลิตชิ้นส่วนทนการสึกหรอร้อยละ 16 ผลิตเครื่องมือในอุตสาหกรรมเหมือง งานขุดเจาะ น้ำมันร้อยละ 15 และ ผลิตเครื่องมืองานไม้และพลาสติก ร้อยละ 11

The application range of straight grade cemented carbides



รูปที่ 1.4 ความสัมพันธ์ของขนาดผงโลหะทั้งสแตนคาร์ไบด์และส่วนผสมโคบอลต์มีผลต่อการผลิตชิ้นงานโลหะแข็ง เพื่อการใช้งานในอุตสาหกรรมแต่ละประเภท [7]



รูปที่ 1.5 กระบวนการผลิตชิ้นงานทังสเทนคาร์ไบด์ (Solid Tungsten Carbide) [10]

เพื่อผลิตโลหะผงทังสเทนคาร์ไบด์ ซึ่งเป็นแนวทางที่ดีที่สุดสำหรับการพัฒนางานวิจัยสู่การผลิตที่มีคุณภาพมากขึ้น งานวิจัยนี้จึงให้ความสำคัญกับการสร้างใช้วัสดุจากการรีไซเคิลทังสเทนคาร์ไบด์ ผลิตเป็นเครื่องมือตัด (Cutting tools) ชนิดแผ่นมีดตัด (Insert tools) เป็นชิ้นส่วนงานโลหะทนการสึกหรอสูง (High Wear resistance part)

1.1.2 ซีเมนต์ทังสเทนคาร์ไบด์ในกลุ่มเครื่องมือตัด ชนิด แผ่นมีด (Insert tools) และแท่งเครื่องมือตัด (Solid tools) เป็น โลหะที่มีส่วนผสมทังสเทนคาร์ไบด์สูงกว่าร้อยละ 80-96 โดยน้ำหนัก ชิ้นงานที่ผลิตด้วยการปาดผิว (Removal) ต้องการความเที่ยงตรงสูง (High Precision)

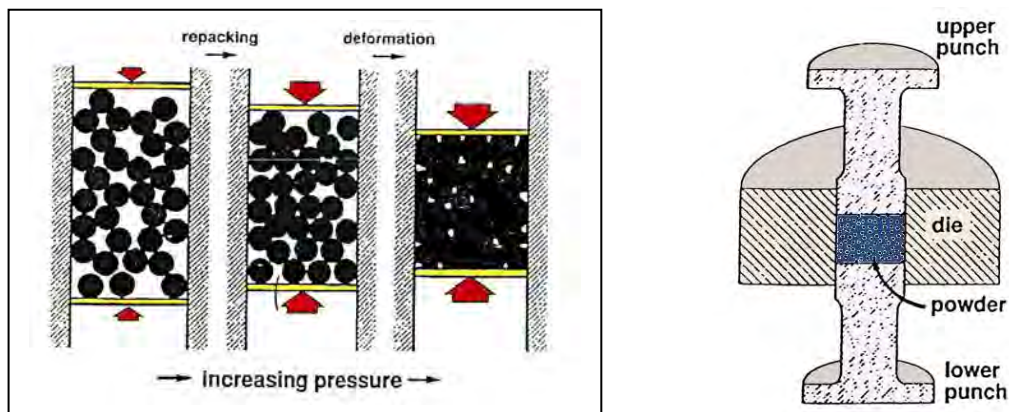
1.1.3 พบว่าโลหะทังสเทนคาร์ไบด์ผ่านการใช้งานกว่าร้อยละ 90 มีโลหะโคบอลต์เป็นโลหะประสาน (Cobalt binder) การนำกลับมาใช้ใหม่ (Recycled) ขนาดเกรน (Grain size) 0.15-50.00 ไมครอน (μm) หากผลิตชิ้นงานให้ความแข็งสูงถึง 830-2500 HV มูลค่าการลงทุนจะสูงขึ้น ขึ้นกับขนาดเกรนและสมบัติของผงโลหะ เป็นต้น



รูปที่ 1.6 ชิ้นงานโลหะแข็งทังสเตนคาร์ไบด์ (Solid Tungsten Carbide) [67]

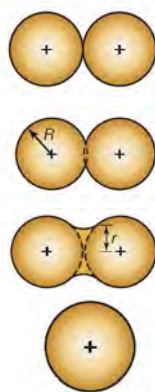
1.1.4 ตามประกาศของคณะกรรมการส่งเสริมการลงทุน (BOI) ที่ 7/2546 ลงวันที่ 16 ตุลาคม 2546 สนับสนุนและส่งเสริมการลงทุนด้านการผลิตชิ้นส่วนอัดขึ้นรูป (Sintered Product) จากผงโลหะทังสเตนคาร์ไบด์ ซึ่งเป็นอุตสาหกรรมที่ให้ความสำคัญเป็นพิเศษ และส่งเสริมการผลิตอุปกรณ์หรือวัสดุสำหรับงาน กัด กลึง เจาะ เจียรระไนและทำเกลียว ใ้ใช้กับเครื่องจักรกลที่มีความเที่ยงตรงสูง (High precision) รัฐบาลให้ความสำคัญด้านการพัฒนาวัสดุผง (Powder) การผลิตวัสดุผงและการผลิตชิ้นงานด้วยวัสดุผงโลหะความแข็งสูง (Hard metal) ให้เป็นชิ้นงานทดแทนการนำเข้าสำหรับใช้ในอุตสาหกรรมแม่พิมพ์ และอุตสาหกรรมการผลิตเครื่องจักรกล รวมถึงเครื่องจักรกลการเกษตร ซึ่งใช้ชิ้นส่วนทนต่อการสึกหรอสูง (Wear resistance) ซึ่งเป็นโลหะทังสเตนเป็นส่วนใหญ่ (ที่มา : BOI)

1.1.5 การผลิตชิ้นงานทังสเตนคาร์ไบด์ด้วยการขึ้นรูปจากวัสดุผงในประเทศไทยมีการผลิตมากขึ้นโดยนำเข้าผงโลหะทังสเตน (Tungsten powder) อาทิ ปี พ.ศ. 2545 จนถึง ปี พ.ศ.2549 อัตราการนำเข้าสูงขึ้นกว่า 4.28 เท่า และนำเข้าโคบอลต์ (Cobalt powder) เพิ่มขึ้นโดยนับจากปี พ.ศ. 2545 ถึง พ.ศ.2550 อัตราการนำเข้าสูงขึ้น 5.39 เท่า เพื่อผลิตซีเมนต์ทังสเตนคาร์ไบด์ (Cement tungsten carbide) (ที่มา : กรมศุลกากร กระทรวงการคลัง)



รูปที่ 1.7 การอัดผงโลหะ เริ่มต้นมีการจัดเรียงตัวโดยลดปริมาตรระหว่างอนุภาค เมื่อแรงอัดสูงขึ้น การแน่นตัวเกิดจากการเสียรูปของอนุภาค [11]

1.1.6 ประเทศไทยนำเข้าผงทังสเตน(WC Powder) และชิ้นส่วนซีเมนต์คาร์ไบด์ 100% ยอดนำเข้าทังสเตนสำเร็จรูป (Bars and Rode) มีมูลค่าประมาณ 1,940.81 ล้านบาท มีอัตราสูงขึ้นกว่า 65.86 % ในปี พ.ศ.2550 และนำเข้าผงทังสเตน (Tungsten powder) มีมูลค่า 826.50 ล้านบาท ในปี พ.ศ. 2550 เพิ่มขึ้นกว่า 450 % เมื่อเทียบกับปี พ.ศ. 2548 นำเข้าเครื่องมือตัดจำนวนกว่า 2.15 ล้านชิ้น/ปี (มูลค่านำเข้าชุดเครื่องมือตัดสูงถึง 6,598 ล้านบาทในปี พ.ศ. 2550) เป็นทังสเตน 68% (ที่มา : กรมศุลกากร กระทรวงการคลัง)



รูปที่ 1.8 แบบจำลองการอบผนึกอนุภาคทรงกลมสองอนุภาค

1.1.7 สำหรับการผลิตทังสเตน (Scheelite , Wolfram) ของไทย พบว่าส่งออกแร่ทังสเตนปริมาณมากถึง 520 ตันในปี พ.ศ. 2548 (ราคาจำหน่าย ประมาณ 173,846.15 บาท/ตัน) และ 443 ตัน

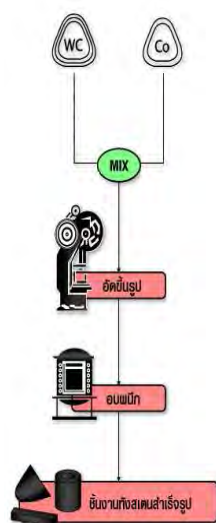
ในปี พ.ศ. 2549 (ราคาจำหน่าย ประมาณ 227,313.76 บาท/ตัน) หรือประมาณ 173.8-227.3 บาท/กิโลกรัม (ที่มา:ศูนย์สารสนเทศ ส่วนประกอบโลหะกรรม สำนักอุตสาหกรรมพื้นฐาน กรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่ กระทรวงอุตสาหกรรม) ซึ่งเป็นการส่งออกวัตถุดิบในราคาถูก แต่ซื้อผงทังสเตนคาร์ไบด์ในราคาแพงขึ้นกว่า 20- 45 เท่า เป็นการขาดดุลทางการค้าสูงมาก

1.1.8 เครื่องมือตัด (Cutting tools) ทังสเตนคาร์ไบด์ ในปี 2551 มีมูลค่ารวมทั่วโลก 465,000 ล้านบาท แนวโน้มสูงขึ้นไม่น้อยกว่าร้อยละ 30 และเครื่องมือตัดชนิดเหล็กกล้ารอบสูงมีมูลค่าทั่วโลกมากกว่า 124,000 ล้านบาท มีแนวโน้มสูงขึ้นมากกว่า ร้อยละ 10 (ที่มา: Sandvik Annual report 2008)

1.1.9 พบว่าประเทศสหรัฐอเมริกาสะสมทังสเตนมากกว่า 9,700 ตันในปี พ.ศ. 2543 และมีการนำเข้ามากขึ้นรวมทั้งแร่ wolfram และเศษโลหะที่มีส่วนผสมทังสเตนคาร์ไบด์ โดยกำหนดให้หน่วยงานด้านการป้องกันประเทศเพื่อพัฒนาการใช้วัสดุทังสเตนทั้งด้านการทหารและเศรษฐกิจ (Defense National Stockpile Center :DNSC) ร่วมกับกระทรวงพาณิชย์เพื่อออกกฎหมายและทำข้อตกลงทางการค้า โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อนำเข้าทังสเตนร่วมกับประเทศคู่ค้าสำคัญ อาทิ จีนและรัสเซีย ซึ่งเป็นผู้ผลิตแร่ทังสเตนรายใหญ่ของโลก สำหรับประเทศจีนมีสัดส่วนการถลุงแร่และผลิตโลหะทังสเตนเพื่อการส่งออกมากกว่าร้อยละ 83 ของผู้จำหน่ายทั่วโลก (ที่มา : American National Carbide พ.ศ. 2545 :ANC)

1.1.10 จากการวิจัยแยกสลายเศษโลหะซีเมนต์ทังสเตนคาร์ไบด์ด้วยกระบวนการทางเคมีไฟฟ้า (Electrolysis) ผงโลหะเป็นทังสเตนคาร์ไบด์มีความบริสุทธิ์ประมาณ ร้อยละ 90 และผู้วิจัยได้พัฒนาต่อเนื่องเป็นกระบวนการผลิตแบบ “Manual of Small-scale plant”

ดังนั้น การพัฒนาแผ่นมิดซีเมนต์ทังสเตนคาร์ไบด์ (Cement tungsten carbide) ให้กลับมาใช้งานเพื่อการตัดปาดผิว จึงเป็นการพัฒนาการทดลองขึ้นใหม่ในประเทศไทย หากพัฒนาได้จะเป็นการใช้วัตถุดิบที่มีในประเทศ ลดการนำเข้าและรวมถึงการสร้างมูลค่าเพิ่มได้หลายล้านบาทต่อปี



รูปที่ 1.9 กระบวนการผลิตชิ้นงานทั้งสแตนด์คาร์ไบด์ [12]

จากรูปที่ 1.9 แสดงกระบวนการผลิตชิ้นงานทั้งสแตนด์คาร์ไบด์ ซึ่งประกอบด้วย การเตรียมทั้งสแตนด์คาร์ไบด์และโคบอลต์ ทำการผสม อัดขึ้นรูปเป็นชิ้นงาน อบเผาและได้เป็นชิ้นงานสำเร็จรูป

ตารางที่ 1.1 สมบัติของชิ้นงานทั้งสแตนด์คาร์ไบด์ที่มีส่วนผสมระหว่าง ผงทั้งสแตนด์คาร์ไบด์ผสมกับ ผงโคบอลต์

ชั้นที่	ขนาดเกรน	ปริมาณของ	ค่าความแข็ง HV
	ผงทั้งสแตนด์คาร์ไบด์ (μm)	โคบอลต์ (Co), (%)	
1.	3 - 4	16	1,323 – 1,400
2.	1.5 - 2.5	6	1,478 – 1,556

ตารางที่ 1.2 สมบัติของชิ้นงานทั้งสแตนคาร์ไบด์ จากงานวิจัยของ Farid Akhtar และคณะ [13]

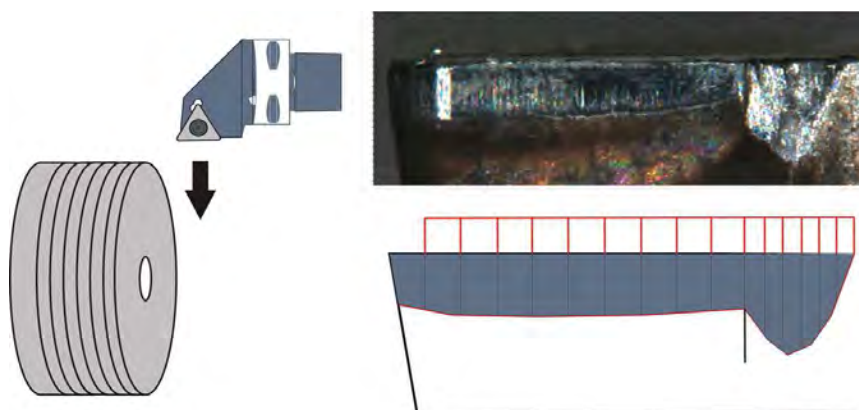
ชั้นที่	อัตราส่วนของ ขนาดทั้งสแตนคาร์ไบด์(WC) รวมทั้งหมด 54%ของชิ้นงาน (%)		ปริมาณโลหะคาร์ไบด์ (TiTaW)C (%)	ปริมาณ โคบอลต์(Co) (%)	อุณหภูมิ อบพูน (°C)	ค่าความแข็ง (HRA)
	ขนาด WC	ขนาด WC				
	2µm	0.2 µm				
1.	18	36	46	6	1,485	93
2.	27	27	46	6	1,485	91
3.	36	18	46	6	1,485	89

ตารางที่ 1.3 สมบัติเครื่องมือชนิดทั้งสแตนคาร์ไบด์

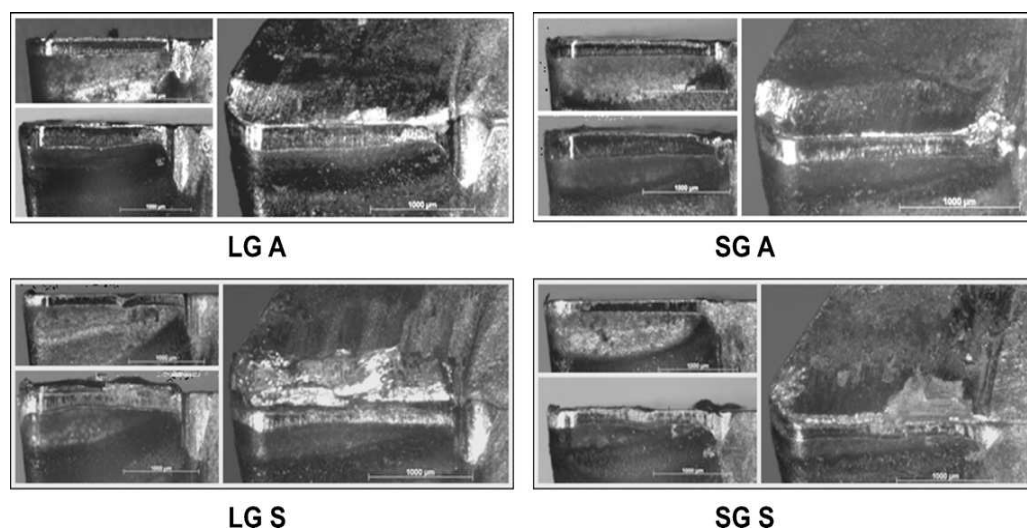
ชิ้นงาน	อัตราส่วนผสม (%)		ความ หนาแน่น (g/cm ³)	ค่าความแข็ง (HRA)	ขนาดของ เกรน (µm)	แรงอัดขึ้น รูป (ton/inch ²)	อุณหภูมิ อบพูน (°C)
	WC	Co					
C-90-x	90.0	10.0	14.45	89.5	1-4	5-30	1,400-1,500
C-93	95.5	4.5	15.15	92.5	1-3		
C-85	87.0	13.0	14.25	88.4	3-4		
YG8 [63]	92	8	14.72	90	1-10	-	1,400
UF12 [66]	88	12	-	1,674 HV	0.6 ± 0.04	-	-



รูปที่ 1.10 แสดงปัจจัยที่สำคัญทั้งหมดที่ใช้ในงานกลึงปอกด้วยมีดกลึงอินเสิร์ท [14]



รูปที่ 1.11 การทดสอบชิ้นงานซีเมนต์คาร์ไบด์โดยการตัดปาดผิวชิ้นงานเพื่อศึกษาการสึกหรอบริเวณคมตัดของซีเมนต์คาร์ไบด์ [15]



รูปที่ 1.12 เปรียบเทียบการสึกหรอบริเวณคมตัดของแผ่นมีดซีเมนต์คาร์ไบด์ [15]

การวิจัยนี้จึงมุ่งพัฒนาชิ้นงานความแข็งสูงพิเศษจากโลหะผงที่ผลิตขึ้นมาใหม่ด้วยเทคโนโลยีที่พึ่งตนเอง ให้มีความสามารถในการใช้งานมีสมบัติที่เหมาะสมและมีคุณภาพสูงสามารถนำไปพัฒนาต่อไปเพื่อการใช้งานและผลิตในอุตสาหกรรมภายในประเทศต่อไปในอนาคต

1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 เพื่อออกแบบและผลิตชิ้นส่วนโลหะความแข็งสูง (Hard metals) จากโลหะผงทั้งสแตนคาร์ไบด์ที่ผ่านการ recovered ด้วยเทคโนโลยีที่พัฒนาขึ้นมาใหม่

1.2.2 เพื่อศึกษาสมบัติของชิ้นส่วนมาตรฐานต่อความสามารถในการใช้งาน

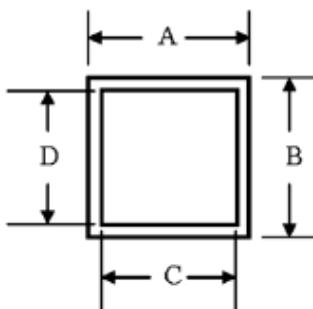
1.2.3 เพื่อเปรียบเทียบสมบัติทางกลและการใช้งานของชิ้นส่วนโลหะความแข็งสูงที่พัฒนาขึ้น

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1.3.1 พัฒนาชิ้นส่วนโลหะความแข็งสูงจากวัสดุมีค่าชนิด Tungsten Carbides (WC) ที่ผ่านการ recovered ด้วยเทคโนโลยีที่พัฒนาขึ้นมาใหม่ในประเทศไทย ให้ชิ้นส่วนโลหะความแข็งสูงสำหรับงานตัดปาดผิวชิ้นส่วนเหล็กกล้า ชนิดเหล็กกล้าชิ้นส่วนเครื่องจักรกล สำหรับงานตัดผิวละเอียด

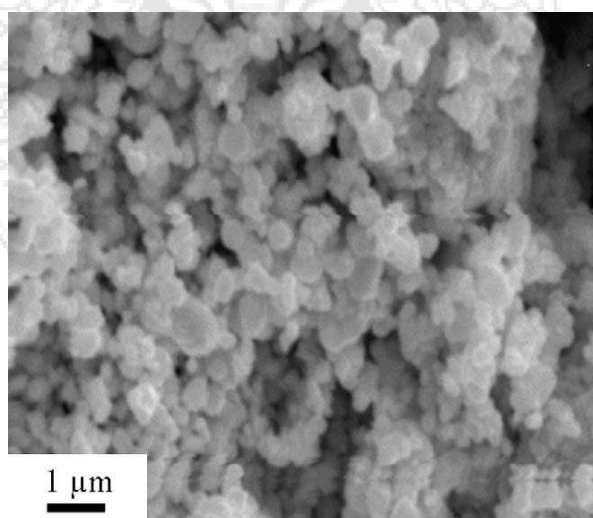
Green dimensions (mm) of simple square insert, average of four parts

	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 1.13 แสดงตัวอย่างการกำหนดขนาดชิ้นงานแผ่นมีดตัดเพื่อการทดลอง [16]

1.3.2 ใช้วัสดุทังสเตนคาร์ไบด์จากกระบวนการรีไซเคิลกลับมาใช้ใหม่ (Recovered) ด้วยกระบวนการที่พัฒนาขึ้นใหม่ ผลิตโลหะผงขนาดผงอยู่ในช่วง 1.00 – 51.00 μm โดยวิธีการคัดกรองตามมาตรฐาน Sieve วัสดุผงทังสเตนคาร์ไบด์ที่มีความบริสุทธิ์ไม่น้อยกว่า 95% ตรวจสอบขนาดและการกระจายของผงโลหะ ให้การกระจายโลหะผงแบบโค้งปกติ



รูปที่ 1.14 แสดงตัวอย่างผงโลหะ Submicron WC powder วิเคราะห์ ด้วย SEM

- 1.3.3 ชิ้นส่วนโลหะความแข็งสูงผสมโลหะประสานโคบอลต์ระหว่าง 5-15%
- 1.3.4 ตรวจสอบวัสดุด้วย SEM, XRD, XRF, PSD
- 1.3.5 การบดแบบ Pulverized ด้วย Tungsten carbide Ball mills โดยใช้เครื่องบดโลหะผง (Mechanical alloying) และการกำหนดการกระจายของโลหะผง (Particle sized Distribution)
- 1.3.6 การเตรียมโลหะผงด้วยปัจจัยเดียวกัน ได้แก่ ความเร็วรอบ ขนาดลูกบด อัตราส่วนสารละลายในการบด เวลาในการบด การผสมวัสดุประสาน (wax) เป็นต้น
- 1.3.7 การอัดขึ้นรูป (Press) การกำหนดค่าความหนาแน่นก่อนอบ (Green density) และตรวจสอบความหนาแน่นหลังการอบพูนึก (Sintering process)
- 1.3.8 ออกแบบกระบวนการอบพูนึก (Sintering) โดยให้ความหนาแน่นไม่ต่ำกว่า 14.00 g/cm²
- 1.3.9 ศึกษาสมบัติทางกล และทดสอบการใช้งาน อาทิ การสึกหรอ การกลิ้งปอกผิวชิ้นงาน เหล็กกล้าที่มีสมบัติเทียบเท่า AISI 1045
- 1.3.10 วิเคราะห์ผลการทดลอง และกำหนดคุณลักษณะของชิ้นส่วนโลหะความแข็งสูง ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์พื้นฐาน

1.4 วิธีดำเนินการวิจัย

- 1.4.1 ผลิตโลหะผงทั้งสแตนคาร์ไบด์จากห้องปฏิบัติการผลิตทั้งสแตนคาร์ไบด์กลับคืนมาใช้ใหม่ (เป็นเทคโนโลยีที่พัฒนาขึ้นใหม่)
- 1.4.2 กำหนดขนาดโลหะผงด้วยการคัดกรองจากตะแกรงความละเอียด 51 μm . และลดขนาดของ WC particle ด้วยการบด (Ball mill) เป็นเวลาประมาณ 40 ชั่วโมง
- 1.4.3 คัดกรองและแยกขนาดโลหะผง
- 1.4.4 คัดเลือกผงโลหะทั้งสแตนคาร์ไบด์ที่มีขนาดและคุณลักษณะที่เหมาะสมเพื่อนำไปผลิตเป็นชิ้นส่วนความแข็งสูงพิเศษ (Hard metals)
- 1.4.5 ผสมโลหะประสานตามสัดส่วนที่กำหนดและตรงตามมาตรฐานในช่วง 3-20%
- 1.4.6 ผสมวัสดุยึดติดชนิด Paraffin Wax ตามสัดส่วนมาตรฐานที่กำหนดไม่เกิน 3%
- 1.4.7 อัดขึ้นรูปตามแบบงาน โดยการผลิตแม่พิมพ์เพื่อขึ้นรูปโลหะผงตามขนาดที่กำหนด
- 1.4.8 ตรวจสอบขนาด ความหนาแน่น (Green density) และอื่น ๆ
- 1.4.9 อบพูนึกที่อุณหภูมิ ในช่วง 1,400-1,500^oc และสอดคล้องตามมาตรฐาน
- 1.4.10 ตรวจสอบขนาด ความหนาแน่นของชิ้นส่วน โลหะแข็งที่พัฒนาขึ้น
- 1.4.11 การเจียรระโนผิวสำเร็จ (Finish to size)

1.4.12 การทดสอบความแข็ง และทดสอบการใช้งาน

1.4.13 เปรียบเทียบและกำหนดสมบัติเบื้องต้นของผลิตภัณฑ์ทั้งสแตนคาร์ไบด์

1.5 สถานที่ทดลองและเก็บข้อมูล

1.5.1 สาขาวิศวกรรมการจัดการอุตสาหกรรมเพื่อความยั่งยืน และสาขาวิชาเทคโนโลยีการผลิตเครื่องมือและแม่พิมพ์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร การเตรียมและผลิตโลหะผงทั้งสแตนคาร์ไบด์เพื่อผลิตชิ้นงานซีเมนต์ทั้งสแตนคาร์ไบด์

1.5.2 สถาบันวิจัยและพัฒนา โดยสำนักบริการเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร การเตรียมอุปกรณ์การทดลอง เตรียมชิ้นงาน การตรวจสอบและทดสอบพื้นฐานชิ้นงานคาร์ไบด์

1.5.3 ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติเพื่อการทดสอบวัสดุผงโลหะทั้งสแตนคาร์ไบด์ที่พัฒนาขึ้นมาใหม่

1.5.4 สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทยเพื่อตรวจสอบสมบัติโลหะผงทั้งสแตนคาร์ไบด์ การคัดขนาดโลหะผง การอบผนึกชิ้นงานซีเมนต์คาร์ไบด์

1.5.5 บริษัท อาร์.เอส.คาร์ไบด์ โปรดักส์ จำกัด สำหรับปฏิบัติงานอัดขึ้นรูปชิ้นงาน ตรวจสอบความหนาแน่น และอบผนึกชิ้นงานแผ่นมีดตัด



1.6 ระยะเวลาการทำวิจัย

ตารางที่ 1.4 ระยะเวลาโครงการ ประมาณ 1 ปี (ตุลาคม 2554 – กันยายน 2555)

ขั้นตอนการวิจัย	ระยะเวลา 1 ปี											
	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.
1. ผลิตโลหะผง WC	----- —————											
2. จัดเตรียมวัสดุ ลดขนาดผง คัดแยก ขนาด (<20 μm)		----- —————										
3. ผสมและอัดขึ้นรูป			----- —————									
4.อบพ่นึกและเจียรในผิวสำเร็จ				----- —————								
5. ทดสอบสมบัติทางกล									----- —————			
6.ทดสอบการใช้งาน (กลึง) การสึกหรอ ความแข็ง ลักษณะ โครงสร้างจุลภาคและความ เรียบผิว						----- —————	----- —————	----- —————	----- —————			
7. กำหนดมาตรฐานชิ้นงาน ซีเมนต์คาร์ไบด์										----- —————		
8. สรุปผลและรายงาน											----- —————	

----- แผนงาน
————— ปฏิบัติจริง

1.7 เครื่องมือและอุปกรณ์การวิจัย

1.7.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ผลิตโลหะ

1.7.1 .1 เครื่องสลายเศษซีเมนต์คาร์ไบด์ที่พัฒนาขึ้น

1.7.1.2 เครื่องบดผงโลหะแบบบอลมิลล์ ยี่ห้อ ฟริตซ์ (Fritsch) ความเร็วรอบสูงสุด 600 รอบต่อนาที (RPM)

1.7.1.3 เครื่องคัดขนาดอนุภาคโลหะผงทั้งสแตนคาร์ไบด์ (Sieve Shaker)

1.7.1.4 ลูกบดทั้งสแตนคาร์ไบด์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 มิลลิเมตร และ 6 มิลลิเมตร

1.7.1.5 ถ้วยเซรามิกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของถ้วย 100 มิลลิเมตร

1.7.1.6 เตาอบสุญญากาศให้ความร้อนที่อุณหภูมิสูงสุด 250 องศาเซลเซียส

1.7.2 อุปกรณ์ขึ้นรูปชิ้นงาน

1.7.2.1 เครื่องอัดขึ้นรูประบบไฮดรอลิกส์แรงอัดสูงสุด 50 ตันต่อตารางนิ้ว (ton/inch²)

1.7.2.2 เตาอบชิ้นงานซีเมนต์คาร์ไบด์ระบบสุญญากาศและการอบคืนตัวแบบอัตโนมัติอุณหภูมิในการอบสูงสุด 4,000 องศาเซลเซียส

1.7.3 อุปกรณ์วัดตรวจสอบ

1.7.3.1 เครื่องทดสอบการกระจายตัวของผงโลหะ (Particle Size สามารถวัดขนาดและการกระจายของอนุภาคในช่วงตั้งแต่ 0.1-2,000 ไมโครเมตร

1.7.3.2 เครื่องวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมี (XRD)

1.7.3.3 เครื่องตรวจสอบสมบัติโลหะผง XRF, PSD

1.7.3.4 เครื่องวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค (SEM) กำลังขยายสูงสุด 30,000 เท่า

1.7.3.5 เครื่องทดสอบความหนาแน่น

1.7.3.6 เครื่องกลึงอัตโนมัติ ซีเอ็นซี (CNC) รุ่น โอคูมา (OKUMA) ความเร็วรอบสูงสุด 4,000 รอบต่อนาที (RPM)

1.7.3.7 เครื่องวัดขนาดแผ่นมิดตัด เครื่องโพรไฟลย โปรเจคเตอร์ คิว เอ็ม ดาต้า 200 (Profile Projector QM DATA 200) ยี่ห้อ นิคคอน (Nikon) รุ่น (V-128) กำลังขยาย (5X, 10X, 20X, 50X) ความละเอียดในการวัดระยะ 0.001 มม.

1.7.3.8 เครื่องทดสอบความเรียบผิว เมสเซอร์ริง ไมโครสโคป (Measuring Microscope) ยี่ห้อ นิคคิน (Nikon) รุ่น (SJ 400) สามารถบอกค่าความเรียบเป็น (Ra, Rz, Rmax)

1.7.3.9 เวอร์เนียคาลิปเปอร์ ดิจิตอล ยี่ห้อ ไคบะ (Keiba) ความละเอียด 0.01 มิลลิเมตร

1.7.3.10 เครื่องชั่งน้ำหนักความละเอียด 0.0001 กรัม (g)

1.7.4 อุปกรณ์อื่นๆที่เกี่ยวข้อง

วัสดุในการทดสอบ เหล็กกล้าคาร์บอน 0.45 เปอร์เซนต์ (S45C) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 40 มิลลิเมตร ความยาว 300 มิลลิเมตร

1.8 ประโยชน์ที่จะได้รับ

1.8.1 ชิ้นส่วนมาตรฐานความแข็งสูง (Standard of Hard metals) ได้แก่ แผ่นมีดตัดที่มีความสามารถในการตัดปาดผิวเหล็กกล้าชิ้นส่วนเครื่องจักรกล AISI 1045

1.8.2 ผลผลิตชิ้นส่วนมาตรฐานความแข็งสูง ได้แก่ แผ่นมีดตัดมีสมบัติด้านความแข็งเทียบเท่า Commercial tools

1.8.3 ความหนาแน่น (Density) มาตรฐานไม่น้อยกว่า 14.34 g/cm^3

1.8.4 โครงสร้างต่างๆ ของชิ้นงานซีเมนต์ทั้งสแตนคาร์ไบด์ที่ทำการผลิตและนำเข้าจากต่างประเทศ

1.8.5 สมบัติทางกลและทางโลหะวิทยาของชิ้นงานซีเมนต์ทั้งสแตนคาร์ไบด์

1.8.6 กระบวนการผลิตชิ้นส่วนโลหะความแข็งสูง

1.8.7 ได้ผลิตภัณฑ์ที่ใช้งานได้และมีคุณภาพเทียบเคียงชิ้นงานมาตรฐานหรือชิ้นงานนำเข้าจากต่างประเทศ

1.8.8 ผู้ผลิตชิ้นส่วนในอุตสาหกรรมพื้นฐาน เช่น การอบผืน (Sintering) และผู้สนใจในอุตสาหกรรมสนับสนุน เนื่องจากเป็นเทคโนโลยีใหม่ในประเทศและยังไม่มีการแข่งขัน สำหรับการนำโลหะกลับมาใช้ซ้ำ ๆ ซึ่งเป็นโลหะที่มีศักยภาพทางอุตสาหกรรมสูง

1.8.9 ผู้ผลิตชิ้นส่วนจากผงทั้งสแตนคาร์ไบด์และผู้ประกอบการที่ใช้วัตถุดิบประเภทผงโลหะเพื่อการฟั่นเคลือบให้สามารถลดต้นทุนวัตถุดิบจากการนำเข้า เพราะมีการผลิตภายในประเทศลดต้นทุนแก่ผู้ประกอบการ

1.8.10 ผู้ประกอบการที่นำเข้าผงโลหะ เพื่อการขึ้นรูปชิ้นงานซีเมนต์ทั้งสแตนคาร์ไบด์และการฟั่นเคลือบมีโอกาสเลือกสินค้าโลหะผงทั้งสแตนที่ผลิตในประเทศ

บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

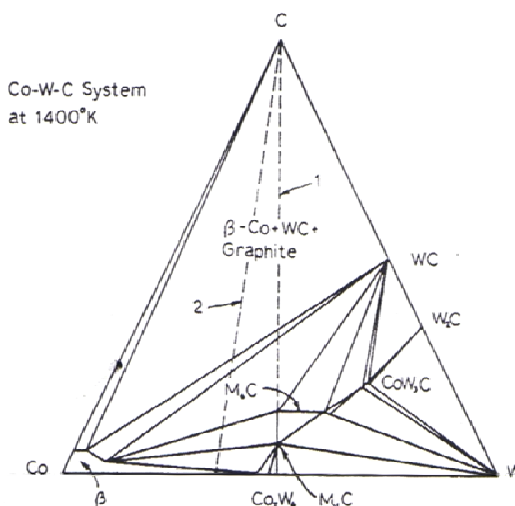
2.1 บทนำ

สำหรับการ recovered ด้วยกระบวนการ Hydrothermal treatment processes [53] พบว่าสามารถสกัด (Extracted) โลหะโคบอลต์ให้ละลายออกจากชิ้นงานซีเมนต์ทั้งสแตนคาร์ไบด์ที่ผลิตจาก WC powder, sized 1.0-5.0 μm , WC-20Co% ด้วยการ treatment were charged into PTFE-lined autoclave containers and hydrothermal-treated. เกิดการสกัดโคบอลต์ได้ผลดีที่อุณหภูมิ 110°C for 24 h in 6N HCl จากนั้นกรองให้ได้ผงโลหะและล้างทำความสะอาด บดด้วย ball mill ใช้เวลาบดนาน 24 h. อบให้แห้งและนำกลับไปผลิตเป็นชิ้นงาน (re-sintering) โดยอบผงที่ 1,380°C , 1h. ปรากฏว่าได้ชิ้นงานมีความหนาแน่น 13.40 g/cm^3 ความแข็ง 83.1 HRA, TRS 216 kgf/mm^2 ซึ่งสมบัติทางกลของชิ้นงานที่น้อยลงนี้เนื่องจากการ formation of η phase because of the oxidation of WC particles. อย่างไรก็ตามสามารถแก้ไขให้ดีขึ้นได้ด้วยการ Improving the drying process of recovered powder.[20] การ recycling methods for WC-Co starting from wastes usually use chemicals such as acids and bases for their dissolution, followed by controlled precipitation. Reduction and final carburization. จากนั้นผลิตเป็นชิ้นงานแผ่นมีด (Cutting tools) ISO CNMG 120408 เปรียบเทียบสมบัติและการใช้งานกับชิ้นงานโลหะผงมาตรฐานที่มีเงื่อนไขการผลิตเดียวกัน ปรากฏว่าการสึกหรอที่คมตัดด้านผิวหลบ (Flank wear) มากกว่า 3 เท่า เมื่อเทียบกับ Commercial tools ที่ความเร็วตัด 150 m/min และเกิดสึกหรอเพิ่มขึ้นเมื่อความเร็วตัดเพิ่มขึ้น ปรับปรุงคุณภาพด้วยการเคลือบผิวแบบ PACVD coated ปรากฏว่าด้านทานการสึกหรอดีขึ้นการสึกหรอที่ผิวหลบน้อยกว่ามีดตัดเคลือบผิว Commercial tools. [21]

เศษซีเมนต์ทั้งสแตนคาร์ไบด์ (Cement tungsten carbide scrap) เป็นชิ้นงานโลหะความแข็งสูง (Hard metals) มีสารประกอบสำคัญ ได้แก่ ผงทั้งสแตน (Tungsten powder) คาร์บอน (C) ผงโคบอลต์ (Co powder) เหล็ก (Iron) หรือ นิกเกิล (Nickel) และผ่านการผลิตด้วยกรรมวิธีอบผง (Sintering) ที่อุณหภูมิในช่วง 1,450-1,600°C โครงสร้างเป็น Co/WC/C [4] ตามรูปที่ 2.1

สมบัติทางกล (Mechanical properties) ของซีเมนต์ทั้งสแตนคาร์ไบด์ ขึ้นกับขนาดผง (Grain size) และอัตราส่วนผสมของโคบอลต์ (Cobalt binder) ซึ่งเป็นวัสดุประสาน อาทิ ชิ้นงานโลหะแข็ง

ที่ส่วนผสมของ WC-6 wt% Co ขนาดผงทั้งสแตนคาร์ไบด์ (WC Powder) 6 μm ให้ความแข็งสูงถึง 1,170 HV ขณะที่ผงทั้งสแตนคาร์ไบด์ขนาด 1.7 μm ให้ความแข็งที่ 1,600 HV (92.7 HRA)



รูปที่ 2.1 โครงสร้างโลหะผสม ทั้งสแตน โคบอลต์และคาร์บอน [22]

หากขนาดลดลงมาที่ 0.2 μm ความแข็งเพิ่มขึ้นเป็น 2,300 HV [19] การแยกสลาย (Dissolution) สารประกอบ (Co) จากเศษซีเมนต์ทั้งสแตนคาร์ไบด์ที่ส่วนผสมโคบอลต์ 6% , 14%, 20% และ 22% ที่ขนาดเกรน 2 μm , 2 μm , 3.5 μm และ 4.5 μm ตามลำดับ ปรากฏว่าสารละลาย กรดซิตริก (Citric acid) ผสมในสารละลายไฮโดรคลอริก (Hydrochloric acid :HCl) ให้กระแสไฟฟ้าได้สูงถึง 2,000-3,000 มิลลิแอมป์ (mA) จากการจ่ายแรงดันไฟฟ้าที่เหมาะสมในช่วง 0.200-0.600 โวลต์ อุณหภูมิของสารละลายอยู่ที่ 25°C โดยใช้เวลานาน 24 ชั่วโมง ปรากฏว่าได้รับสารละลายโคบอลต์อยู่ในช่วง 16-18 g dm^{-3} [9] การทดลองโดยใช้อุณหภูมิและออกซิเจนมีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อการเพิ่มอัตราการแยกสลาย ความสามารถในการสลายสารประกอบโคบอลต์ในสารละลาย ขึ้นกับส่วนผสมและขนาดเกรน (Grain size) การใช้กรดอะซิติก (acetic acid) ที่อุณหภูมิ 80°C ในเวลานานกว่า 50-300 ชั่วโมง ส่งผลให้ความหนาผิวชิ้นงานเกิดการละลายลดลงประมาณ 65-299 μm ทั้งนี้ ขึ้นกับชนิดของเศษวัสดุที่มีสารประกอบโคบอลต์ได้แก่ สว่าน (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 [20] จากการแยกสลายชิ้นงานซีเมนต์ทั้งสแตนคาร์ไบด์ขนาดเกรนทั้งสแตนคาร์ไบด์ 1-5 μm ส่วนผสมโคบอลต์ 20% อบผนึกที่อุณหภูมิ 1,380°C ชิ้นงานมีความแข็ง 83.1 HRA เพื่อแยกสารประกอบโคบอลต์ด้วยสารละลายไฮโดรคลอ

ริก (HCl) ให้อัตราการแยกสารประกอบเพิ่มขึ้นโดยเพิ่มอุณหภูมิสารละลายสูงขึ้นถึง 110°C และการบดย่อย (Re-sintered) ปรากฏว่าสามารถสกัดโคบอลต์ออกได้โดยใช้เวลานานถึง 24 ชั่วโมง [21] จากการละลายสารประกอบโคบอลต์ด้วยการใช้ตระกล้าไททาเนียม (Titanium) ขั้วบวก บรรจุชิ้นงานและลงอุณหภูมิที่ 25°C แรงเคลื่อนไฟฟ้าอยู่ระหว่าง 200-600 มิลลิโวลต์ (mV) ในสารละลายไฮโครคลอริกผสมกรดซิดริกประมาณ 40 กรัม/ลิตร ปรากฏว่าโคบอลต์ละลาย (Dissolved) ได้ในช่วงร้อยละ 20.5-80.7 [22] และการนำเศษซีเมนต์ทั้งสแตนคาร์ไบด์กลับมาใช้ใหม่ด้วยกระบวนการหลอมในสังกะสี (Zinc process) ใช้อุณหภูมิสูงกว่า $1,000^{\circ}\text{C}$ ซึ่งเป็นกระบวนการหนึ่งที่นำเศษโลหะกลับมาใช้ใหม่แต่ต้นทุนสูง [20] ในขณะที่การแยกสลายชิ้นงานซีเมนต์ทั้งสแตนคาร์ไบด์ที่เป็นเครื่องมือตัดและแท่งชิ้นงานซึ่งมีขนาดใหญ่ (Larger the piece) การทดลองจ่ายแรงดันไฟฟ้าในช่วง 0.5 – 20 โวลต์ กระแสไฟฟ้าในช่วง 0.5-30 แอมแปร์ ในสารละลายแอมโมเนียม (Ammonium solution) และใช้วัสดุแท่งทั้งสแตนเป็นขั้วลบ (Cathode) ปรากฏว่าวัสดุที่ได้มีความบริสุทธิ์ถึง 99% [23]

ปัจจุบันชิ้นส่วนความแข็งสูงพิเศษ อาทิ เครื่องมือตัด (Cutting tools) ซีเมนต์ทั้งสแตนคาร์ไบด์ที่ใช้งานในอุตสาหกรรมมีผู้ผลิตหลายราย เงื่อนไขและตัวแปร (Parameters) ในการผลิตของแต่ละรายมีความแตกต่างกัน อาทิ อุณหภูมิ เวลา แรงดัน เป็นต้น ซึ่งเป็นองค์ประกอบสำคัญต่อคุณภาพด้านความแข็ง (Hardness) หากความแข็งมากมูลค่าของชิ้นงานก็สูงขึ้น [20] รายงานวิจัยพบว่าขนาดเกรนเล็กจะส่งผลให้ชิ้นงานมีความแข็งสูงขึ้น [18] และพบว่าเศษชิ้นงานเครื่องมือตัดที่ใช้งานในอุตสาหกรรมมีค่าความแข็งสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง และเศษซีเมนต์คาร์ไบด์มีปริมาณเพิ่มกว่า 20 ตัน ในปี พ.ศ.2550

ดังนั้น ในการวิจัยนี้จึงเห็นความสำคัญเพื่อศึกษาการผสมโคบอลต์สำหรับผลิตแผ่นมีความแข็งกว่า 90 HRA

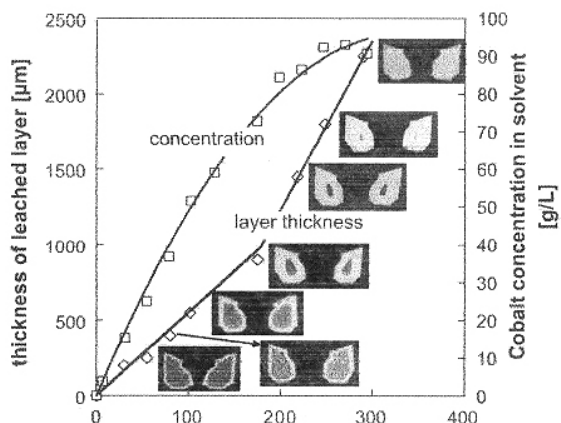
จากรายงาน USGS Science for a changing world Report เกี่ยวกับการนำชิ้นงานซีเมนต์ทั้งสแตนคาร์ไบด์กลับมาใช้ใหม่ สำหรับประเทศสหรัฐอเมริกา โดย Kim B. Shedd เรื่อง Tungsten Recycling in the United States in 2000 ผลการวิจัยนี้ได้ถูกเปิดเผยเมื่อ ปี พ.ศ. 2548 พบว่าที่ประเทศดังกล่าวนี้การใช้ทั้งสแตนมีแนวโน้มมากขึ้นและสัดส่วนการใช้งานสูงกว่าวัสดุอื่น ในกลุ่มวัสดุที่นำกลับมาใช้ใหม่ จากรายงานสรุปว่า สัดส่วนการใช้วัสดุทั้งสแตนที่เรียกว่า New scrap ต่อ Old scrap ในอัตราส่วน 20 ต่อ 80 และเมื่อพิจารณาสัดส่วนการนำวัสดุเก่าใช้งานแล้วกลับมาใช้ใหม่ปรากฏว่าเป็นวัสดุชนิดทั้งสแตน มากกว่าชนิดอื่นร้อยละ 66 ของวัสดุนำกลับมาใช้ใหม่ทั้งหมด ในปี ค.ศ. 2000 สหรัฐอเมริกามีทั้งสแตนที่เป็น New scrap สูงถึง 10,400 ตัน ส่วนใหญ่ผลิตเป็น โลหะผงและผลิตชิ้นงานความแข็งสูง (Hard metal) ในปี ค.ศ.2000 สหรัฐอเมริกานำเข้า Tungsten ,Waste and

Scrap สูงถึง 993 ตัน มูลค่าประมาณ 248,000,000 ล้านบาท คิดเป็นร้อยละ 81 ของทั้งหมด โดยนำเข้าจากประเทศจีน ร้อยละ 25 เกาหลีใต้และรัสเซียร้อยละ 15 เยอรมันร้อยละ 8 ญี่ปุ่น อเมริกาใต้ และอุซเบกิสถานร้อยละ 6 และประเทศอื่น ๆ กว่า 14 ประเทศ [59] ส่วนการผลิตชิ้นส่วนหรือเครื่องมือวัสดุทั้งสแตนคาร์ไบด์ (Heavy metal alloy scrap)

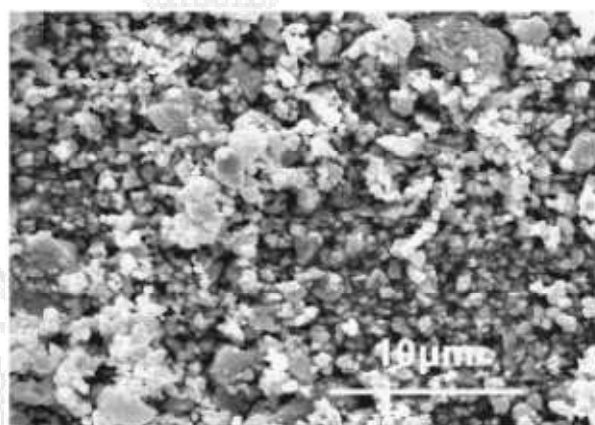
จากรายงานของ International Tungsten Industry Association ทั้งสแตนจะมีสมบัติในด้านต่าง ๆ ได้แก่ Atomic weight 183.85 g/g atom ความหนาแน่น (Density) 19.25 g/cm³ จุดหลอม (Melting) 3,387-3,422 °C [33] จากรายงานพบว่าการนำวัสดุในอุตสาหกรรมกลับมาใช้ใหม่ (Recycling) ทั่วโลก มีทั้งสแตนมากกว่าร้อยละ 30 และหากนับรวมการนำทั้งสแตนและเหล็กกล้ารอบสูงกลับมาใช้ใหม่ผสมกับวัสดุอื่น ๆ แล้วมีสัดส่วนการใช้สูงถึงร้อยละ 60-70 และในส่วนของทั้งสแตนคาร์ไบด์ (WC) ส่วนมากผลิตเป็นผง (Powder) โดยมีคาร์บอนบริสุทธิ์ (Pure carbon Powder) ในสัดส่วนที่เหมาะสม สามารถทำการผลิตด้วยอุณหภูมิในช่วง 900 -2,000 °C

ผลการศึกษาตัวอย่างผลิตภัณฑ์ที่จำหน่ายในตลาดทั่วโลก ชิ้นงานที่ผลิตด้วยผงทั้งสแตนคาร์ไบด์วัสดุที่นิยมทำเป็นตัวประสาน (Binder) เพื่อเพิ่มสมบัติเหมาะสมกับการใช้งาน ได้แก่ โคบอลต์ (Co) ร้อยละ 2.00-20.00 และธาตุอื่น ๆ เช่น Ti+Ta+Nb ชิ้นงานจะมีความแข็ง (Hardness) 2,000-2,500 HV ความหนาแน่น 16-17 g/cm³ ขนาดเกรน (Particle size:mesh) ขึ้นกับขนาดผงโลหะสามารถประยุกต์ใช้งานได้หลายแบบ ได้แก่ ผลิตเป็นชิ้นส่วนสำหรับอุปกรณ์ ชิ้นส่วนเครื่องมือในงานด้านทานการสึกหรอสูง (Abrasion machine part) ชิ้นส่วนเครื่องจักรกลหนัก อุปกรณ์ขุดเจาะ (Excavator) ชิ้นส่วนเครื่องจักรกลส่งกำลังสูง เช่น เฟือง ลูกกรีด ชิ้นส่วนในเครื่องใช้เครื่องประดับที่คงทน ได้แก่ ชิ้นส่วนนาฬิกา ของเล่น ที่แข็งแรงสูงทนทานต่อการกัดกร่อน และผลิตเครื่องมือตัด (Cutting tools) และการเลือกวัสดุผสมขึ้นกับความต้องการด้านใช้งาน โดยเฉพาะโคบอลต์เป็นวัสดุประสานที่ดีสามารถผสมในสัดส่วนสูงถึง ร้อยละ 30 เป็นต้น

งานวิจัย เรื่อง การอัดฉีดขึ้นรูปโลหะผงทั้งสแตนคาร์ไบด์และโคบอลต์โดยการใช้ตัวประสานชนิดพอลิเอทิลีนไกลคอลและพอลิเมทิลเมทาคริเลท โดย ณีฐิตา ชวนเกริกกุล ผลงานวิจัยปรากฏว่าความหนาแน่นสูงสุดของชิ้นงานคิดเป็นร้อยละ 97 ของความหนาแน่นทางทฤษฎี



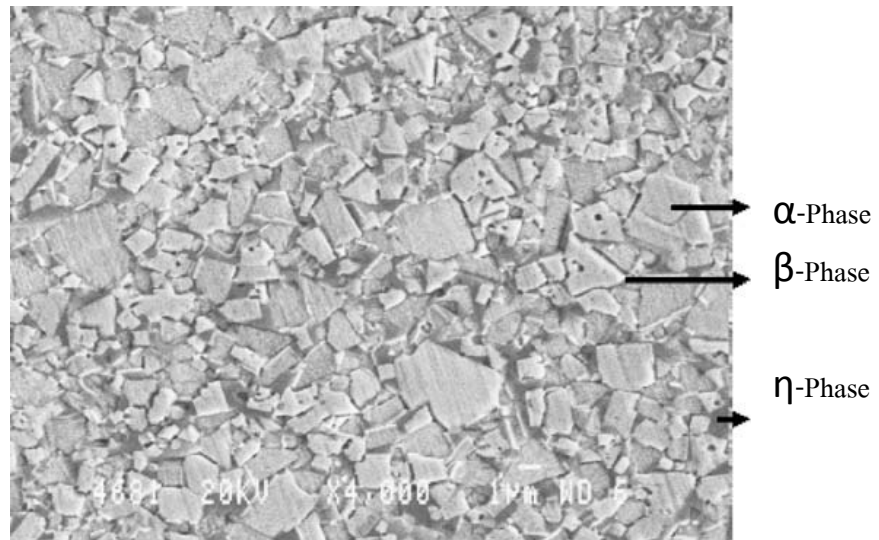
รูปที่ 2.2 Dissolution of Co [9]



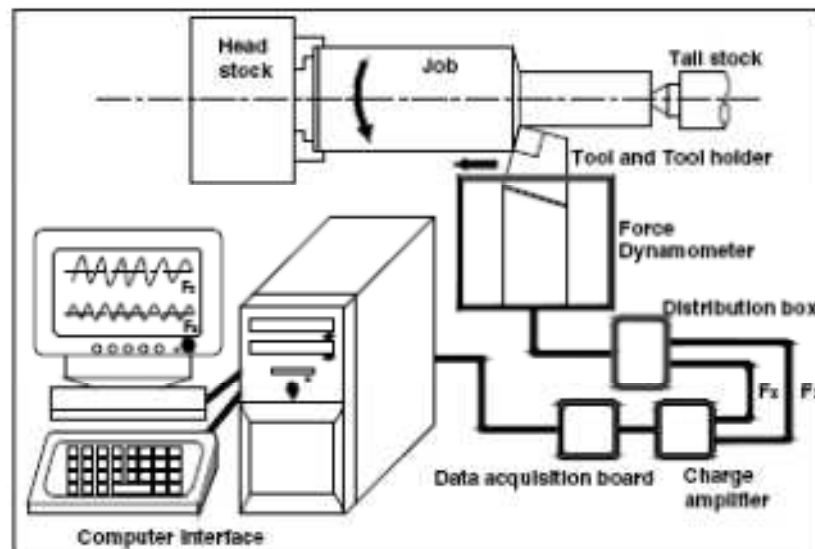
รูปที่ 2.3 การวิเคราะห์โลหะผงทั้งสแตนคาร์ไบด์ด้วย SEM [24]



รูปที่ 2.4 ลักษณะของแผ่นมีดตัดปาดผิว (Insert tools) ผลิตจากโลหะผงทั้งสแตนคาร์ไบด์ [21]

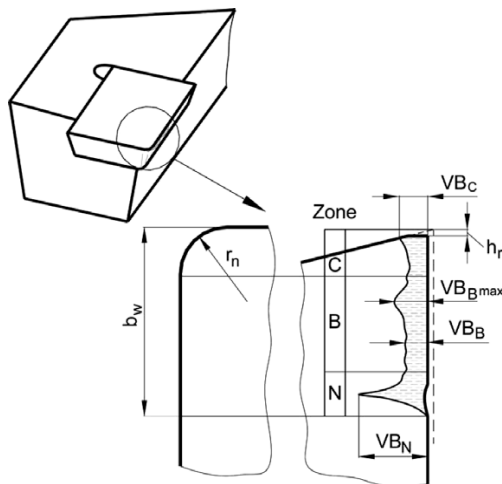


รูปที่ 2.5 โครงสร้างของซีเมนต์คาร์ไบด์ ชนิดแผ่นมีดตัดปาดผิว [25]



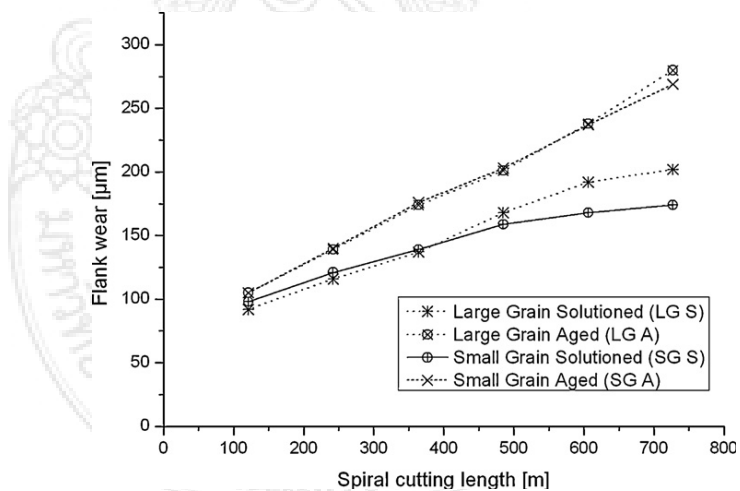
รูปที่ 2.6 Schematic diagram and photographic view of experimental set-up. [26]

จากรูปที่ 2.6 แสดงลักษณะภาพจำลองการทดสอบประสิทธิภาพการกัดงานและการเก็บข้อมูลแต่ละขั้นตอนการดำเนินงาน



รูปที่ 2.7 รูปแบบการสึกหรอบริเวณคมตัดของแผ่นมีดจากการตัดปาดผิวชิ้นงาน [15]

จากรูปที่ 2.7 แสดงการตรวจสอบการสึกหรอบริเวณคมตัดของแผ่นมีดสำหรับงานกลึงปอก ประกอบด้วย VB_N คือความลึกสูงสุดของระยะการสึกหรอบริเวณคมตัด VB_B คือ ความลึกน้อยสุดของระยะการสึกหรอบริเวณคมตัด เป็นต้น



รูปที่ 2.8 การสึกหรอที่ผิวหอบ (Flank wear) ที่บริเวณคมตัดของแผ่นมีดซีเมนต์คาร์ไบด์ [15]

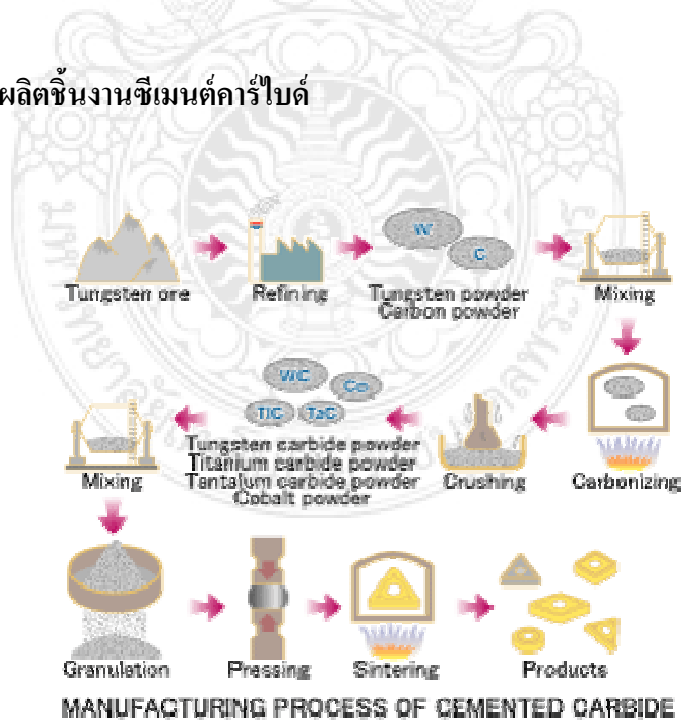
จากรูปที่ 2.8 แสดงการสึกหรอของแผ่นมีดซีเมนต์คาร์ไบด์ จากรูปแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการสึกหรอที่ผิวหอบกับระยะทางในการตัด

Work Material: AISI 1045 Steel Tool Insert: VBMT-332-UM Cutting Speed: 250 m/min						
Depth of Cut (mm)	0.2					
	0.6					
	1.2					
	2.0					
		0.04	0.07	0.10	0.13	0.16
Feed (mm/rev)						

รูปที่ 2.9 ลักษณะของเศษตัด (Chip) [27]

รูปที่ 2.9 แสดงลักษณะของเศษตัด (Chip) โดยใช้ระยะความลึก (Depth of Cut) ของการตัดอยู่ระหว่าง 0.2-1.2 mm และการใช้อัตราป้อน (Feed) ระหว่าง 0.04-0.16 mm/rev

2.2 กระบวนการผลิตชิ้นงานซีเมนต์คาร์ไบด์



รูปที่ 2.10 แสดงกระบวนการผลิตชิ้นงานซีเมนต์ทั้งสแตนคาร์ไบด์ [69]

จากรูปที่ 2.10 แสดงกระบวนการผลิตชิ้นงานซีเมนต์ทั้งสแตนท์คาร์ไบด์ของบริษัท Mitsubishi เริ่มต้นจากแร่ทั้งสแตนท์ผ่านกระบวนการสกัด ผลิตเป็นทั้งสแตนท์คาร์ไบด์ด้วยการผสมคาร์บอน เข้าสู่กระบวนการ carbonizing ลดขนาดโดยวิธีการบด ผสมโลหะประสาน คัดขนาด อัดขึ้นรูปเป็นชิ้นงานคาร์ไบด์ ออบพูนิก (Sintering) ด้วยอุณหภูมิที่เหมาะสม จบกระบวนการ ได้ผลิตภัณฑ์ชนิดซีเมนต์คาร์ไบด์สำเร็จรูปพร้อมใช้งาน

2.3 การบดละเอียด (Grinding or Milling)

เป็นการบดวัตถุให้มีขนาดของอนุภาคเล็กลงจนถึงขั้นละเอียดมาก (Pulverization) โดยใช้การกระทบ กระแทกและการเสียดสีกันระหว่างวัตถุกับ ตัวลูกบด (Grinding Media) และตัวบุผนังของหม้อบด (Lining) Ball Mill ที่ใช้สำหรับบดวัตถุให้มีขนาดละเอียดนั้นสามารถแบ่งอย่างกว้างๆได้เป็นสองประเภทคือแบบ Batch Mill และแบบ Continuous Mill Batch mill เป็นการบดด้วย Ball mill โดยการเติมวัตถุ และ Medium เช่น น้ำ, แอลกอฮอล์, โพลีเอธิลีนอะซิโตน และ Additive ต่าง ๆ เช่น ตัวช่วยการกระจายและการลอยตัว (Deflocculant) [28]

ตารางที่ 2.1 แสดง parameter ในการบดโลหะทั้งสแตนท์คาร์ไบด์ [23]

	A	B	C	D	E
ปัจจัย	อัตราส่วนลูกบด	ขนาดลูกบด (mm)	ตัวกลางในการช่วยบด	ปริมาณของสารช่วยบด (ml)	ความเร็วในการหมุน (RPM)
1	5:1	6	น้ำกลั่น	0	100
2	10:1	6+8	เอทานอล	4	150
3	15:1	8+12	อาซิโตน	8	200
4	20:1	12+18	75% เอทานอล	12	250

จากตารางที่ 2.1 แสดงพารามิเตอร์สำหรับการบดผงโลหะทั้งสแตนท์คาร์ไบด์ ซึ่งเกี่ยวข้องกับตัวแปรต่างๆ เช่น อัตราส่วนผงโลหะและลูกบด ขนาดของลูกบด ปริมาณของตัวกลางในการช่วยบด ความเร็วรอบในการบด ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

ปัจจัยที่ 1 ใช้อัตราส่วนน้ำหนักระหว่างลูกบดและผงโลหะ 5 ต่อ 1 ขนาดของลูกบด 6 mm. ประเภทสารละลายที่ใช้เป็นตัวกลางในการบดละเอียดคือ น้ำกลั่น ความเร็วรอบที่ใช้ในการบดละเอียดคือ 100 RPM

ปัจจัยที่ 2 ใช้อัตราส่วนน้ำหนักระหว่างลูกบดและผงโลหะ 10:1 ขนาดของลูกบด 6 + 8 mm. ประเภทสารละลายที่ใช้เป็นตัวกลางในการบดละเอียดคือ เอทานอลใช้ปริมาณ 4 ml ความเร็วรอบที่ใช้ในการบดละเอียดคือ 150 RPM

ปัจจัยที่ 3 ใช้อัตราส่วนน้ำหนักระหว่างลูกบดและผงโลหะ 15:1 ขนาดของลูกบด 8 + 12 mm. ประเภทสารละลายที่ใช้เป็นตัวกลางในการบดละเอียดคือ อะซิโตนใช้ปริมาณ 8 ml ความเร็วรอบที่ใช้ในการบดละเอียดคือ 200 RPM

ปัจจัยที่ 4 ใช้อัตราส่วนน้ำหนักระหว่างลูกบดและผงโลหะ 20:1 ขนาดของลูกบด 12+18 mm. ประเภทสารละลายที่ใช้เป็นตัวกลางในการบดละเอียดคือ สารละลายเอทานอล 75 % และน้ำใช้ปริมาณ 12 ml ความเร็วรอบที่ใช้ในการบดละเอียดคือ 250 RPM

ตารางที่ 2.2 สมบัติและการผสมทั้งสแตนคาร์ไบด์โคบอลต์ของ Betek Progress, Inc [67]

ชนิด	ขนาดเกรนผงทั้งสแตนคาร์ไบด์ (μm)	ปริมาณทั้งสแตนคาร์ไบด์ (%)	ปริมาณโคบอลต์ (%)	ค่าความแข็ง (HV)
B-10F	3	94.0	6	1,400
B-10	2.5	94.0	6	1,556
B-15	4	92.5	7.5	1,245
B-20	6	90.5	9.5	1,200
B-25	6	90.0	10	1,160
B-30	6	89.0	11	1,160
B-40	6	85.0	15	854

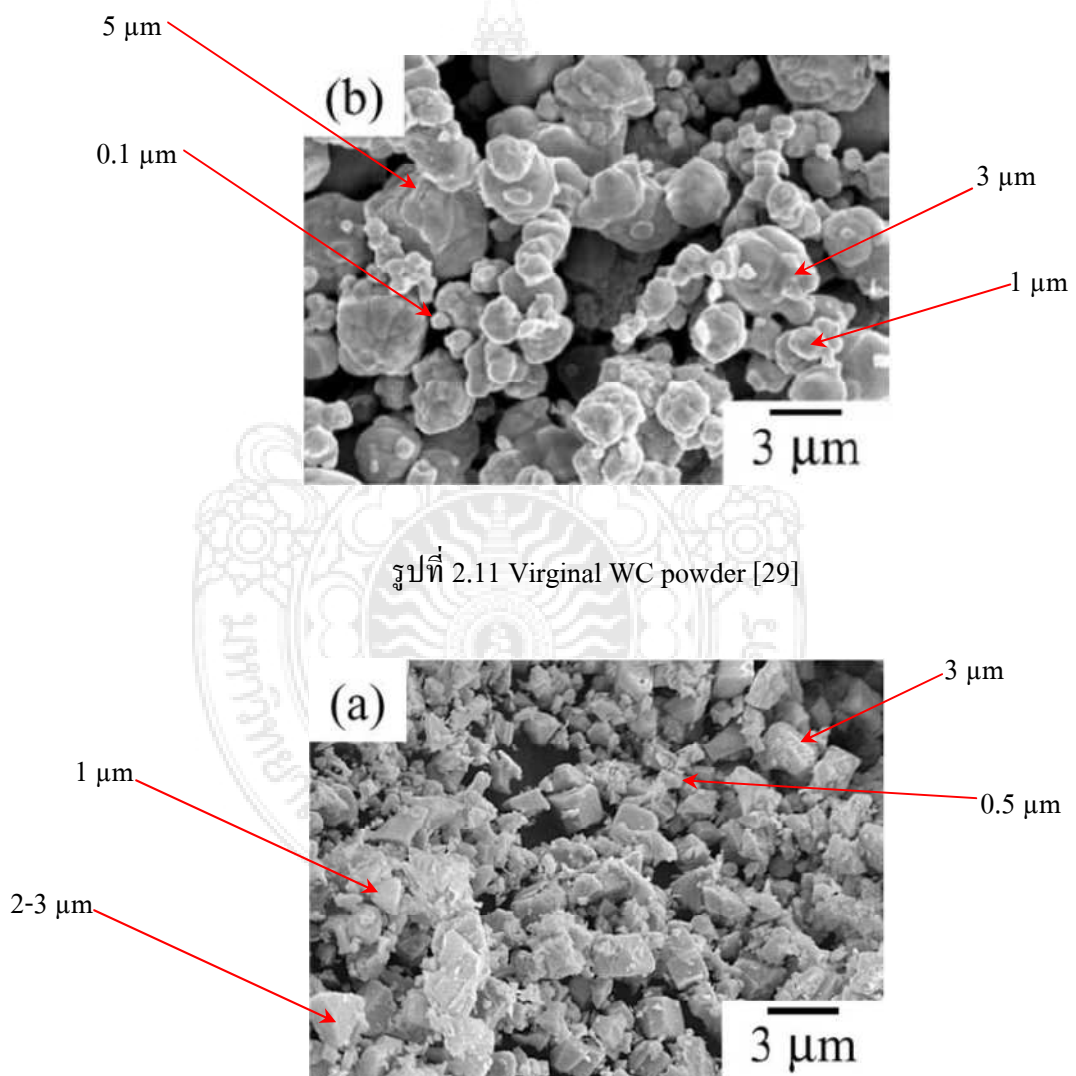
จากตารางที่ 2.2 แสดงให้เห็นสมบัติและสัดส่วนการผสมโลหะประสานโคบอลต์ของบริษัท Betek Progress, Inc ซึ่งแบ่งประเภทของชิ้นงานซีเมนต์คาร์ไบด์ได้เป็น B-10F ถึง B-40 จากการพิจารณาพบว่าขนาดเกรนของทั้งสแตนคาร์ไบด์มีขนาดระหว่าง 2.5-6 μm อัตราส่วนทั้งสแตน

คาร์ไบด์ 85-94% โคบอลต์อยู่ระหว่าง 6-15 % สมบัติด้านความแข็งหลังการอบผนึกมีความแข็งระหว่าง 854-1556 HV

2.4 การตรวจสอบสมบัติโลหะผง

2.4.1 ลักษณะรูปร่างโลหะผงทั้งเตนคาร์ไบด์

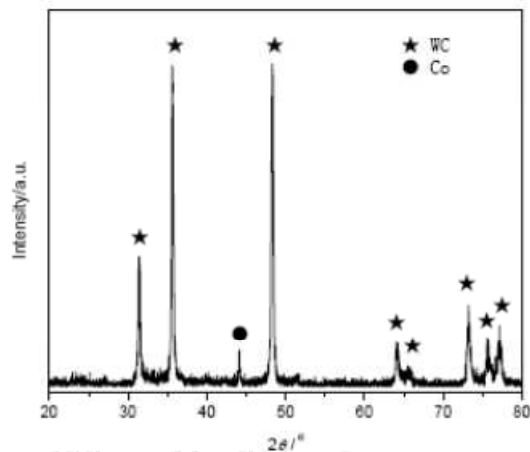
การตรวจลักษณะของโลหะผงทั้งเตนคาร์ไบด์ เพื่อการตรวจสอบสมบัติโลหะผงเป็นการทดสอบเพื่อวิเคราะห์สมบัติ คุณภาพที่เหมาะสมสำหรับการนำไปใช้งานขึ้นรูปเป็นโลหะแข็งต่อไป



รูปที่ 2.11 Virginal WC powder [29]

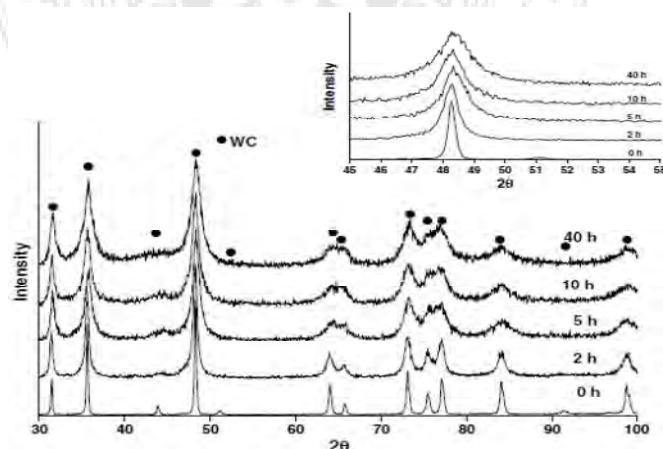
รูปที่ 2.12 Appearances of the Recovered WC powder [29]

จากรูปที่ 2.11 และ 2.12 แสดงผลการวิเคราะห์โลหะผงทั้งสแตนคาร์ไบด์ทั้งสแตนคาร์ไบด์มาตรฐานและทั้งสแตนคาร์ไบด์จากการรีไซเคิล ปรากฏว่าโลหะผงทั้งสแตนคาร์ไบด์มาตรฐานขนาดอนุภาคใหญ่สุดประมาณ 0.5 μm ขนาดอนุภาคเล็กสุดประมาณ 0.1 μm พิจารณาโดยส่วนใหญ่อนุภาคมีขนาดระหว่าง 1-3 μm ส่วนโลหะผงทั้งสแตนคาร์ไบด์ที่ผ่านการรีไซเคิลปรากฏว่าขนาดอนุภาคใหญ่สุดมีขนาด 3 μm ขนาดเล็กสุดประมาณ 0.5 μm พิจารณาโดยส่วนใหญ่อนุภาคมีขนาดระหว่าง 1-2 μm



รูปที่ 2.13 XRD pattern of WC-Co powder. [35]

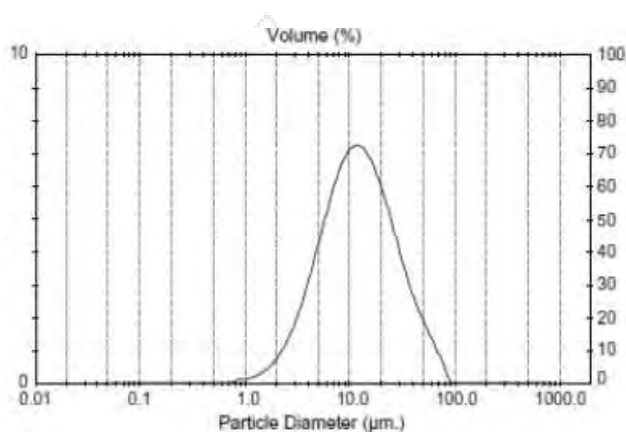
จากรูปที่ 2.13 แสดงผลการตรวจ XRD โลหะผง WC-Co จากการพิจารณาพบว่าตัวอย่างทดสอบมีทั้งสแตนเป็นองค์ประกอบหลักกว่า 90% และมีโคบอลต์ผสมประมาณ 10%



รูปที่ 2.14 XRD patterns of WC-17 wt.% Co powder particles as-received and after ball milling in shaker mill for different times. [30]

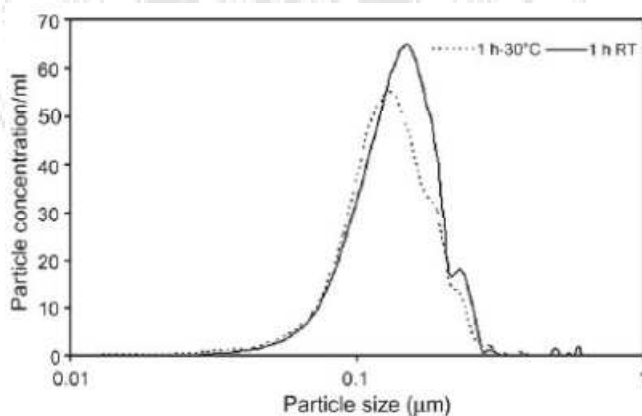
จากรูปที่ 2.14 แสดงผลการตรวจสอบ XRD ของโลหะผง WC-Co ที่ผ่านการบดละเอียด จากการวิเคราะห์พบว่า ที่ 0-40 hr ตัวอย่างโลหะผงเป็นทั้งสแตนคาร์ไบด์ 100%

2.4.2 ขนาดและการกระจายของอนุภาคโลหะผงทั้งสแตนคาร์ไบด์ (WC powder)



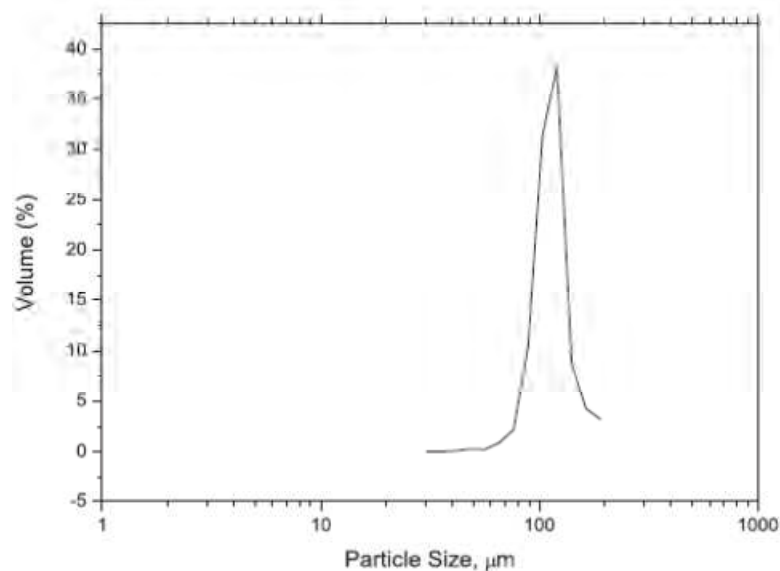
รูปที่ 2.15 การตรวจวิเคราะห์ขนาดและการกระจายโลหะผงทั้งสแตนคาร์ไบด์ [31]

จากรูปที่ 2.15 เป็นผลการตรวจสอบขนาดอนุภาคของโลหะผงทั้งสแตนคาร์ไบด์ จากการวิเคราะห์ขนาดอนุภาคอยู่ระหว่าง 0.8 – 100 μm อนุภาคเล็กสุดประมาณ 0.8 μm และอนุภาคใหญ่สุดประมาณ 90 μm



รูปที่ 2.16 Particle size distribution for powders milled at 30 °C and RT. [31]

จากรูปที่ 2.16 แสดงผลการวิเคราะห์ Particle size distribution ของโลหะผงทังสเตนคาร์ไบด์ ที่อุณหภูมิ 30 °C จากการวิเคราะห์พบว่า อนุภาคมีขนาดระหว่าง 0.05 – 0.4 เล็กสุดประมาณ 0.05 μm อนุภาคใหญ่สุดมีขนาดประมาณ 0.8 μm

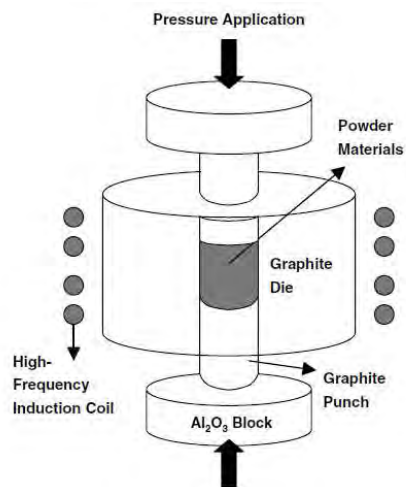


รูปที่ 2.17 Particle size distribution for spherical shaped tungsten carbide powder used in present study. [32]

จากรูปที่ 2.17 แสดงผลการวิเคราะห์ขนาดของอนุภาคโลหะผงทังสเตนคาร์ไบด์ ปรากฏว่าอนุภาคเล็กสุดประมาณ 30 μm อนุภาคใหญ่สุดประมาณ 200 μm เมื่อพิจารณาแล้วพบว่าขนาดอนุภาคส่วนใหญ่อยู่ระหว่าง 75 μm – 150 μm

2.5 กระบวนการอัดขึ้นรูป Rapid sintering [34]

กระบวนการที่สำคัญที่สุดในการทำชิ้นงาน โลหะผง ก็คือ ขั้นตอนการอัดขึ้นรูป เทคโนโลยีของการทำโลหะผงก็คือ การอัดผงให้ได้รูปร่างและความหนาแน่นตามที่กำหนด โดยทั่วไปการอัดขึ้นรูปกระทำที่อุณหภูมิห้อง และมีบางกรณีที่ต้องอัดขึ้นรูปโลหะที่อุณหภูมิสูงเพื่อจุดประสงค์ในการใช้งานเฉพาะแบบ

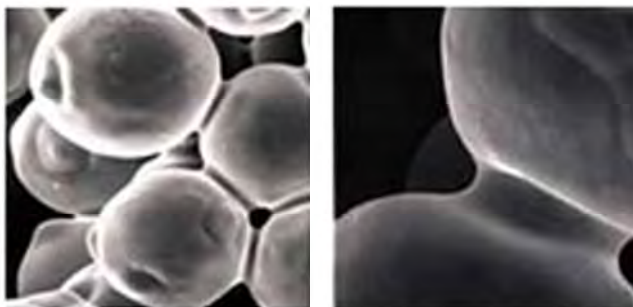


รูปที่ 2.18 แสดงลักษณะส่วนประกอบของแม่พิมพ์ที่มีส่วนผสมของกราฟไฟต์ที่ใช้ในการอัดขึ้นรูป
ชิ้นงานซีเมนต์ทั้งสแตนคาร์ไบด์ [34]

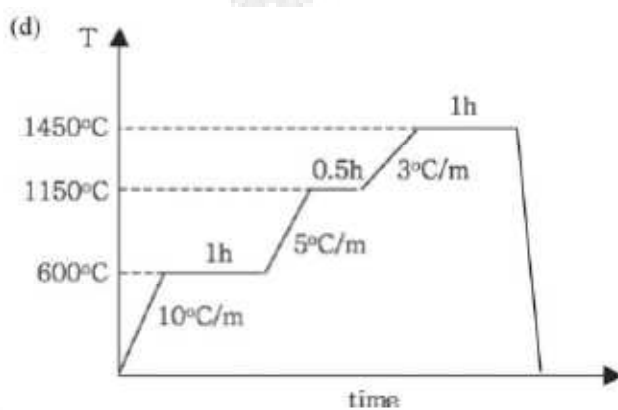
จากรูปที่ 2.18 แสดงลักษณะการขึ้นรูปเป็นการอัดขึ้นรูปจุดประสงค์หลักคือ การทำให้โลหะผงจับตัวเป็นก้อน โดยมีรูปร่างและมิติใกล้เคียงกับวัสดุสำเร็จชิ้นสุดท้ายมากที่สุด โดยพิจารณาล่วงหน้าถึงการหดตัวของชิ้นงานซีเมนต์คาร์ไบด์ขณะผ่านการ อบพูนิก นอกจากนี้การอัดขึ้นรูปยังต้องคำนวนล่วงหน้า ถึงระดับ และชนิดของรูพรุนที่ต้องการให้มีรวมทั้งคาดถึงกำลังวัสดุที่ได้ภายหลังจากการอัดตัว

2.6 การอบพูนิก (Sintering) [5] [34]

การอบพูนิกเป็นการทำให้อนุภาคเชื่อมติดกันที่อุณหภูมิสูง อาจเกิดขึ้นที่อุณหภูมิต่ำกว่าจุดหลอมเหลวของวัสดุนั้นๆ โดยการเคลื่อนที่ของอะตอมในสถานะของแข็งแต่ในวัสดุหลายชนิดจะเกี่ยวกับการฟอร์มตัวของเฟสของเหลว เมื่อพิจารณาโครงสร้างในระดับจุลภาค การเพิ่มขนาดของ คอคอด (neck growth) ที่เชื่อมต่อกันบริเวณจุดสัมผัสของอนุภาคดังรูป 2.20 ซึ่งเป็นการเปลี่ยนรูปคอคอดในสถานะของแข็ง (solid state neck) ระหว่างการอบพูนิกอนุภาคทรงกลมการเพิ่มขนาดของคอคอดทำให้สมบัติของชิ้นงานเปลี่ยนไปหลังอบพูนิก

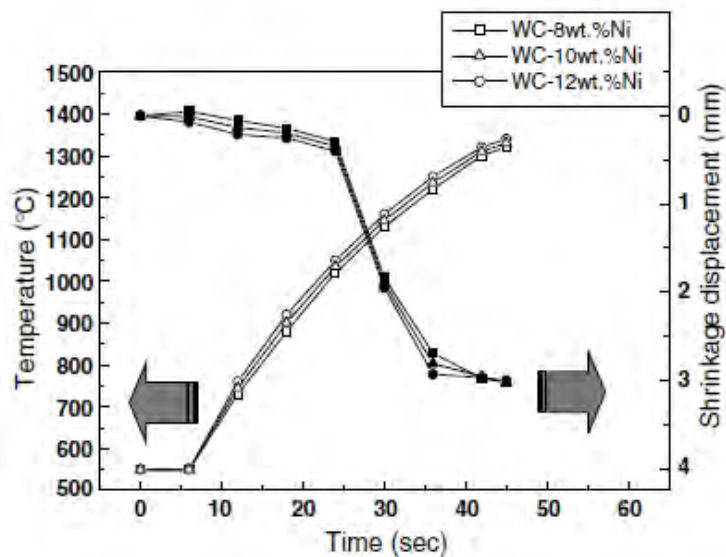


รูปที่ 2.19 ภาพถ่าย SEM แสดงการฟอรัมตัวของคอคอด (Neck Growth) เนื่องจากการอบผนึก [5]



รูปที่ 2.20 แสดงอุณหภูมิการอบผนึกชิ้นงานซีเมนต์คาร์ไบด์ส่วนผสม WC-10Co [35]

จากรูปที่ 2.20 แสดงอุณหภูมิในการอบชิ้นงานซีเมนต์คาร์ไบด์ส่วนผสม WC-10Co ซึ่งแกนตั้งแสดงอุณหภูมิ (°C) ในการอบผนึก แกนนอนแสดงเวลา (m) Step ที่ 1 เพิ่มอุณหภูมิ 10 °C/นาที่ ให้อุณหภูมิถึง 600 °C Step ที่ 2 เพิ่มอุณหภูมิ 5 °C/นาที่ ให้อุณหภูมิถึง 1,150 °C แล้วแช่คงที่ไว้เป็นเวลา 0.5 ชั่วโมง Step ที่ 3 เพิ่มอุณหภูมิ 3 °C/นาที่ ให้อุณหภูมิถึง 1,450 °C แล้วแช่คงที่ไว้เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ขั้นตอนสุดท้ายหลังอบผนึกที่อุณหภูมิ 1,450 °C แล้ว ปล่อยให้ชิ้นงานเย็นตัวลงเป็น 0 °C ภายในเตาอบ



รูปที่ 2.21 แสดงความสัมพันธ์ของอุณหภูมิและเวลา ต่อการหดตัวของชิ้นที่ผ่านการอัดขึ้นรูปจากงานวิจัย Rapid sintering of ultrafine WC–Ni cermets [34]

จากรูปที่ 2.21 ความสัมพันธ์ของอุณหภูมิและเวลาส่งผลต่อการหดตัวตามมิติที่ได้จากการอัดขึ้นรูปกราฟนี้แสดงให้เห็นถึงว่า เมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลงและเวลาหลังจากการเพิ่มความร้อนจากอุณหภูมิ 550 °C ไปจนถึงที่ อุณหภูมิ 1,400 °C เมื่อเวลาผ่านไป 45 วินาทีชิ้นงานเกิดการหดตัวลงไป 3 มิลลิเมตร ซึ่งแสดงให้เห็นเวลาและอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อขนาดการหดตัวของชิ้นงานซีเมนต์ทั้งสแตนคาร์ไบด์เพื่อ หลังจากการอบพูนแล้วชิ้นงานซีเมนต์คาร์ไบด์ที่ออกมาจะมีขนาดตรงตามความต้องการ

2.7 สมบัติชิ้นงานซีเมนต์คาร์ไบด์ [36]

Cemented Carbides เป็นกลุ่มของวัสดุที่ทำจากทั้งสแตนคาร์ไบด์ (WC) โดยใช้เทคนิคการขึ้นรูปด้วยโลหะผง (powder metallurgy technique) โดยมีโคบอลต์เป็นวัสดุประสาน จากหนังสือ “ASM Engineered Materials Reference Book”, ASM International, pp. 182, 1989 แสดงสมบัติของชิ้นงานคาร์ไบด์ดังนี้

ตารางที่ 2.3 สมบัติชิ้นงานซีเมนต์คาร์ไบด์ [36]

ซีเมนต์คาร์ไบด์	ความแข็ง (HV)	มอดูลัสความยืดหยุ่น(Gpa)	ความต้านทานการแตกร้าว (MPa)	สัมประสิทธิ์ความร้อนและการขยายตัว ($10^{-6}/K$)	การนำความร้อน (W/m·K)	ความหนาแน่น (g/cm^3)
WC-20wt% Co	1,050	490	2,850	6.4	100	13.55
WC-10wt% Co	1,625	580	2,280	5.5	110	14.50
WC-3wt% Co	1,900	673	1,600	5.0	110	15.25
WC-10wt% Co-22% (Ti,Ta,Nb)C	1,500	510	2,000	6.1	40	11.40

จากตารางที่ 2.3 แสดงสมบัติชิ้นส่วนซีเมนต์คาร์ไบด์ จากการพิจารณาส่วนผสม WC-20% Co มีความแข็ง 1,050 HV มอดูลัสความยืดหยุ่น 490 Gpa ความต้านทานการแตกร้าว 2850 Mpa สัมประสิทธิ์ความร้อนและการขยายตัว 6.4 K การนำความร้อน 100 W/m·K มีความหนาแน่น 13.55 g/cm^3

ส่วนผสม WC-10% Co มีความแข็ง 1625 HV มอดูลัสความยืดหยุ่น 580 Gpa ความต้านทานการแตกร้าว 2,280 Mpa สัมประสิทธิ์ความร้อนและการขยายตัว 5.5 K การนำความร้อน 110 W/m·K มีความหนาแน่น 14.50 g/cm^3

ส่วนผสม WC-3% Co มีความแข็ง 1900 HV มอดูลัสความยืดหยุ่น 673 Gpa ความต้านทานการแตกร้าว 1,600 Mpa สัมประสิทธิ์ความร้อนและการขยายตัว 5.0 K การนำความร้อน 110 W/m·K มีความหนาแน่น 15.25 g/cm^3

ส่วนผสม WC-10% Co มีความแข็ง 1500 HV มอดูลัสความยืดหยุ่น 510 Gpa ความต้านทานการแตกร้าว 2,000 Mpa สัมประสิทธิ์ความร้อนและการขยายตัว 6.1 K การนำความร้อน 40 W/m·K มีความหนาแน่น 11.40 g/cm^3

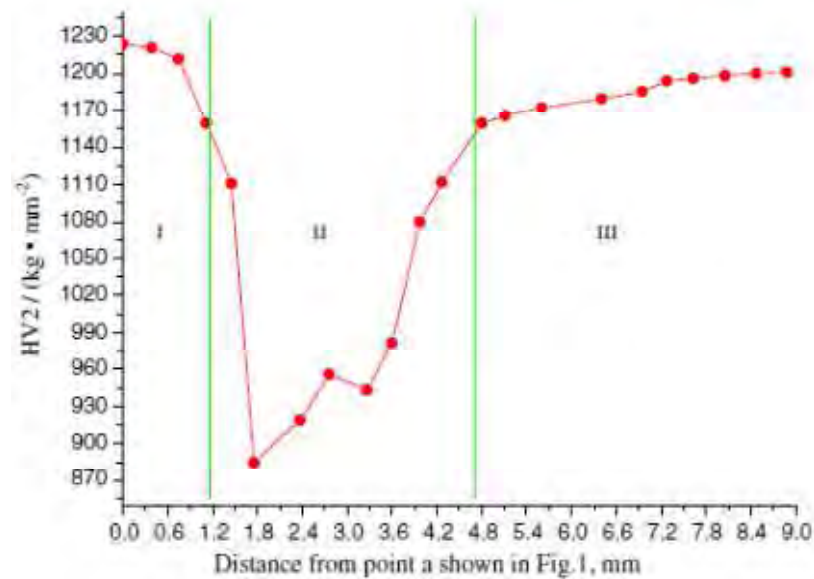
2.8 การตรวจสอบและทดสอบประสิทธิภาพแผ่นมิด

2.8.1 การทดสอบความแข็ง [37]

ความแข็ง (Hardness) คือความต้านทานต่อแรงกด การขีดสีและการกรัดของวัสดุ ดังนั้น การทดสอบความแข็งจึงสามารถทำได้หลายวิธี แต่ในเชิงโลหะวิทยา การวัดความแข็งจะเป็นการทดสอบความสามารถของวัสดุโลหะ ในการต้านทานการเปลี่ยนรูปถาวร เมื่อถูกแรงกดจากหัวกดกระทำลงบนชิ้นงานทดสอบ โดยมีวิธีในการทดสอบที่นิยมใช้งาน การเลือกประเภทในการทดสอบความแข็งของชิ้นงานมีดังนี้ เป็นการวัดความแข็งโดยใช้หัวกดเพชรมีลักษณะเป็นปิรามิดฐานสี่เหลี่ยม ที่ปลายหัวกดทำมุม 136° (เป็นมุมที่มีองศาใกล้เคียงกับหัวกดลักษณะกลมมากที่สุด) ใช้ระยะเวลา 10-15 วินาที ค่าความแข็งจะคำนวณจากแรงกดกระทำต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ผิว เช่นเดียวกับการทดสอบแบบ Brinell แต่วิธีนี้หัวกดเป็นเพชรซึ่งมีความแข็งสูงมากๆ ดังนั้นในการใช้งานจึงสามารถวัดค่าความแข็งได้ตั้งแต่โลหะที่นิ่มมาก (HV ประมาณ 5) จนถึงโลหะที่แข็งมากๆ (VHN ประมาณ 1,500) โดยไม่ต้องเปลี่ยนหัวกด จะเปลี่ยนก็เฉพาะแรงกดเท่านั้น โดยมีขนาดตั้งแต่ 1-120 kgf ขึ้นอยู่กับความแข็งของโลหะที่ทดสอบ ซึ่งทำให้วิธีนี้มีข้อได้เปรียบกว่า Brinell คือ ไม่ต้องคำนึงถึงอัตราส่วน P/D2 และข้อจำกัดในด้านความหนาของชิ้นงานทดสอบเนื่องจากหัวกดเพชรมีขนาดเล็กมาก

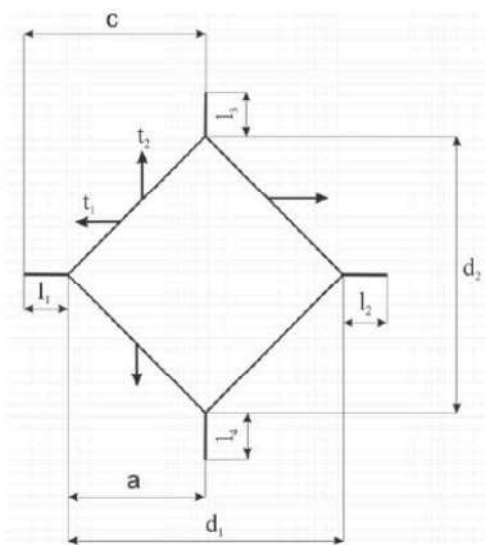


รูปที่ 2.22 แสดงลักษณะชิ้นงานสำหรับทดสอบ โครงสร้างและกดวัดความแข็ง

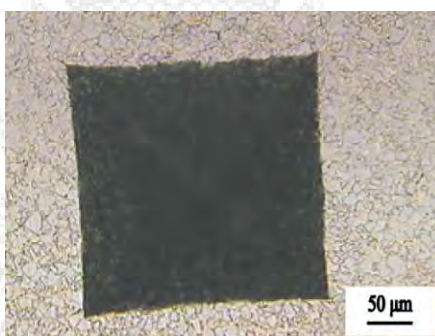


รูปที่ 2.23 กราฟแสดงค่าความแข็งต่อการเปลี่ยนรูปเมื่อได้รับแรงกด 50 HV ของงานวิจัย Crack propagation characteristic and toughness of functionally graded WC-Co cemented carbide [37]

จากรูปที่ 2.23 แสดงให้เห็นถึงลักษณะของการต้านทานการเปลี่ยนรูปของชิ้นงานซีเมนต์คาร์ไบด์ที่ผสมโคบอลต์ 6% มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 25 mm ความสูง 34 mm หลังจากได้รับแรงกดจากหัวกดค่าที่ได้ออกมา ก็แสดงให้เห็นถึงระดับชั้นความแข็งที่แตกต่างกันในแต่ละโซนของพื้นที่ชิ้นงานคาร์ไบด์ตัวอย่างจะเห็นได้ว่าโซน I มีค่าความแข็งเริ่มต้นที่ 1,220 kg.mm² ความแข็งลดลงมาอยู่ที่ 1,150 kg.mm² และมีการเปลี่ยนรูปไป 1.2 mm ณ โซน II และลงไปต่ำสุดที่ความแข็ง 890 kg mm² มีการเปลี่ยนรูปไป 1.8 mm และผ่านไป ณ โซน III ความแข็งของชิ้นงานเริ่มกลับมามีค่าความแข็งอยู่ที่ 1,157 kg.mm² มีการเปลี่ยนรูปไป 4.8 mm และมีค่าความแข็งเพิ่มขึ้นเป็น 1,200 kg.mm² ไปที่จุดสุดท้ายและมีระยะการต้านทานการเปลี่ยนรูป 9 mm



รูปที่ 2.24 Schematic diagram of palmqvist indentation characteristics [38]

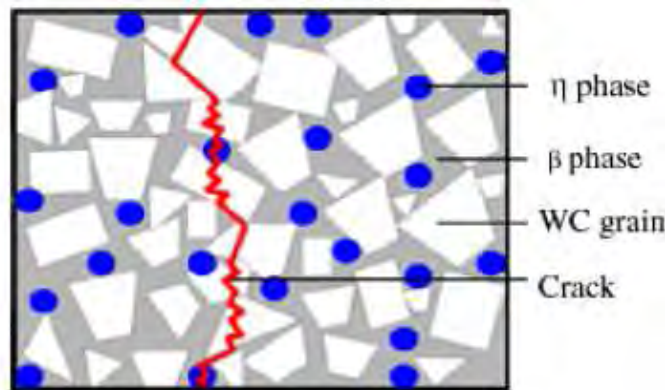


รูปที่ 2.25 HV50 indent image in the intermediate zone, with diagonal length of 315.05 μm and 315.51 μm , respectively [37]

จากรูปที่ 2.25 แสดงการตรวจสอบหาค่าความแข็งแบบวิกเกอร์ จากรูปแสดงลักษณะรอยกดที่มีความยาวเส้นทแยงมุม 315.05 μm และ 315.51 μm

2.8.2 ลักษณะโครงสร้างและบริเวณการเกิดรอยแตก

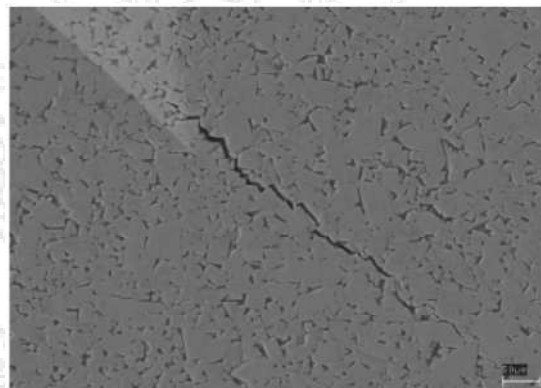
ลักษณะโครงสร้างซีเมนต์คาร์ไบด์ส่วนใหญ่ประกอบด้วย ทั้งสเดนคาร์ไบด์เป็นหลักผสมโลหะประสาน โคบอลต์ และอาจจะมาตุอื่นๆ ผสมเพิ่มเติมเพื่อเพิ่มสมบัติที่เหมาะสมตามการใช้งานซึ่งสามารถแสดงลักษณะโครงสร้าง และรอบได้ได้ดังนี้



(b)

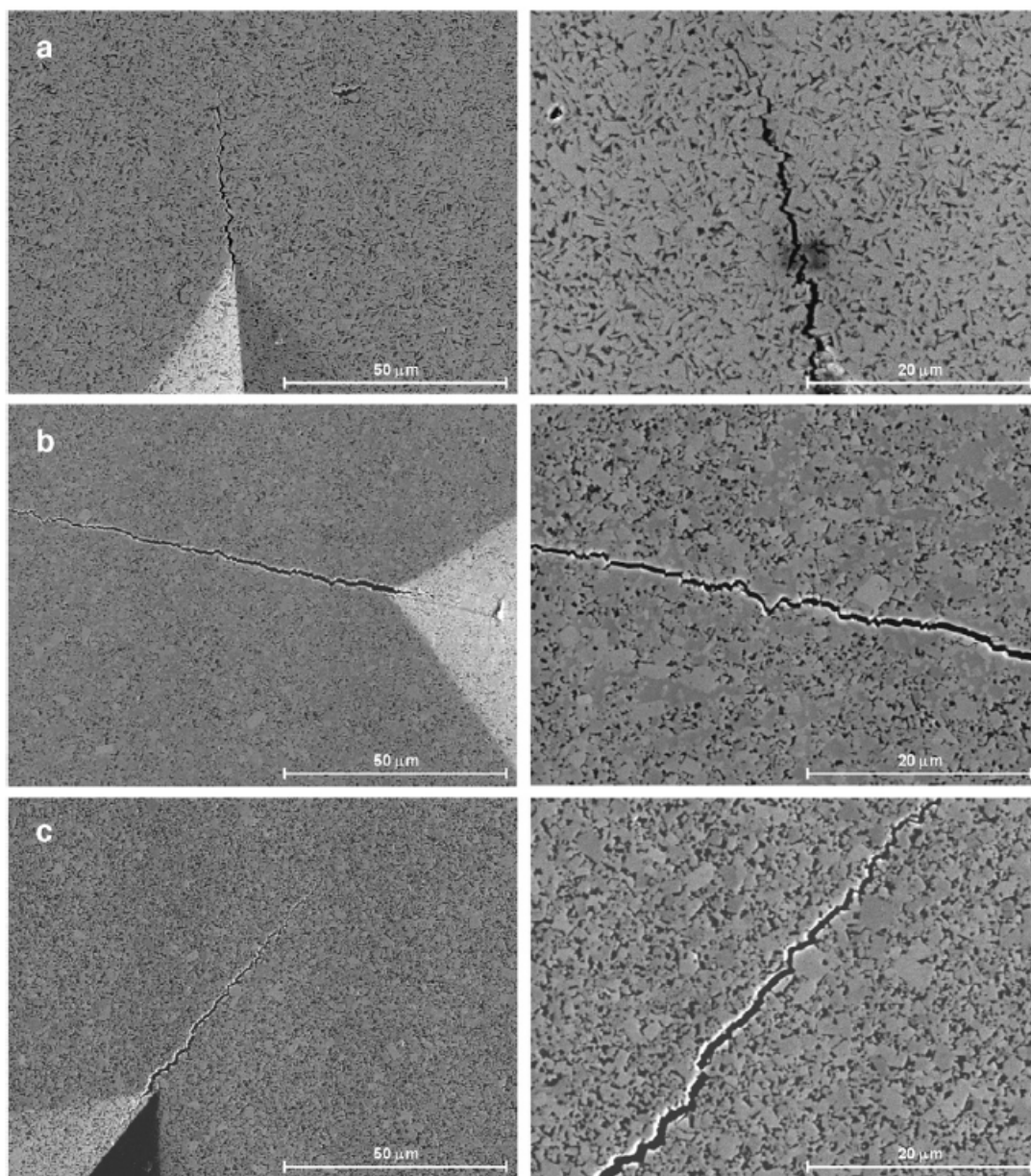
รูปที่ 2.26 Sketch of crack propagation in WC-Co DP cemented carbide [39]

จากรูปที่ 2.26 แสดงลักษณะการเกิดรอยแตกร้าวของชิ้นงานซีเมนต์คาร์ไบด์ ซึ่งเป็นลักษณะการแตกแบบผ่าเกรน



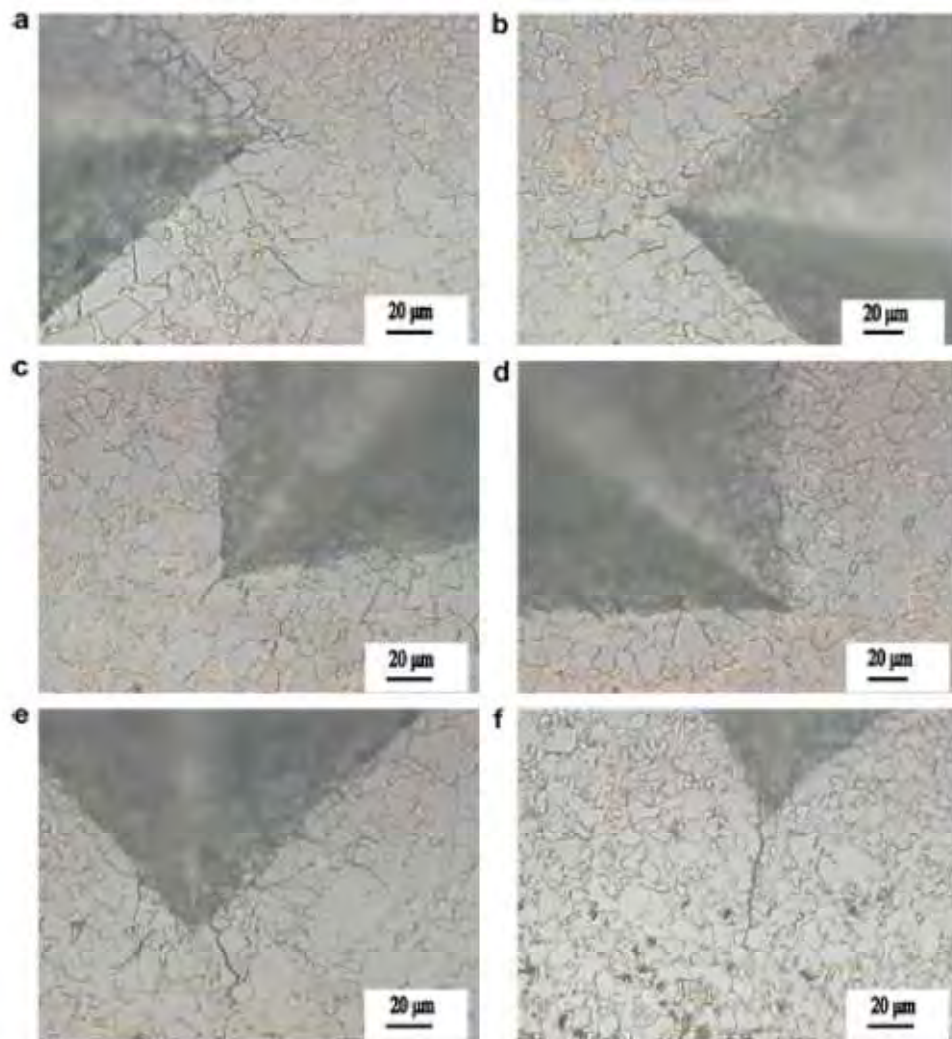
รูปที่ 2.27 Micrographs of the crack at the surface zone with WC+Co tool gradient materials [38]

รูปที่ 2.27 แสดงรูปถ่ายโครงสร้างชิ้นงานซีเมนต์คาร์ไบด์ จากรูปแสดงลักษณะรอยแตกบริเวณใกล้ๆ ของมุมตามรอยกดของวัสดุทดสอบ



รูปที่ 2.28 Cracks generated in the corners of Vickers indentations (at load 30 kg) [40]

จากรูปที่ 2.28 แสดงรอยแตกจากรายงานวิจัย Synthesis and processing of nanocrystalline tungsten carbide: Towards cemented carbides with optimal mechanical properties ซึ่งเป็นการเกิดรอยร้าวบริเวณมุมของรอยกดที่กำลั้กด 30 kg



รูปที่ 2.29 แสดงลักษณะรอยแตกที่มุมของชิ้นงานซีเมนต์คาร์ไบด์หลังรับโหลดแรงกด 50 HV ของงานวิจัย Crack propagation characteristic and toughness of functionally graded WC-Co cemented carbide. [37]

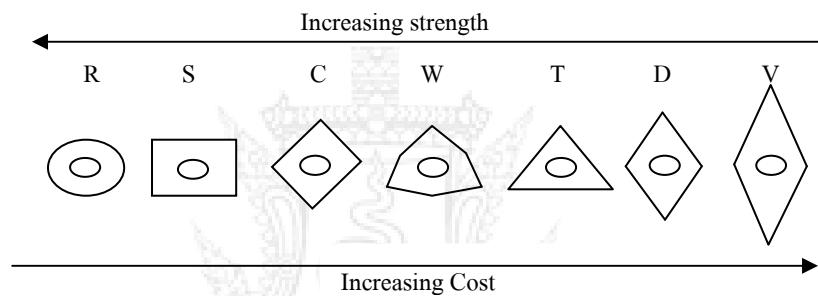
จากการศึกษางานวิจัยรอยแตกที่เกิดขึ้นบนชิ้นงานตัวอย่างมีอยู่ 2 แบบ แสดงดังรูปที่ 2.27-2.30 กล่าวคือ

ลักษณะการแตกตามขอบเกรนของภาพ (e) การแตกลักษณะนี้เรียกว่าการแตกระหว่างเกรน (Intergranular fracture) ความยาวของรอยแตกวัดโดยใช้สเกลเทียบ 20 μm ขนาดความยาวของรอยแตกคือ 0.03 mm การแตกหักแบบนี้โดยปกติเกิดบริเวณขอบเกรนไม่แข็งแรงและเปราะเนื่องมาจากการไม่จับตัวระหว่างโคบอลต์กับทั้งสแตนคาร์ไบด์ในการผสมและการอัดขึ้นรูป หลังจากการอบหรือได้รับแรงกดจากการทดสอบความแข็งแรงทำให้เกิดรอยแยกตามขอบเกรน

การแตกแบบผ่าแกรน (Tran granular cleavage fracture) จากภาพ (f) ความยาวของรอยแตกวัดโดยใช้สเกลเทียบ 20 μm ขนาดความยาวของรอยแตกคือ 0.045 mm เกิดขึ้นโดยปราศจากการเปลี่ยนรูปที่เห็นได้ชัดและรอยแตกขยายตัวได้อย่างรวดเร็ว รอยแตกโตขึ้นในทิศทางเกือบตั้งฉากกับทิศทางความเค้นแรงกดที่กระทำ การแตกแบบนี้เป็นการแตกแบบปกติของวัสดุโลหะแข็งคือเมื่อได้รับแรงโหดจากหัวกดทำให้มีแรงดึงแยกผ่าแกรนแสดงให้เห็นถึงการยึดเกาะระหว่างทั้งสแตนคาร์ไบด์กับโคบอลต์

2.9 การทดสอบประสิทธิภาพการใช้งาน

2.9.1 รูปทรงแผ่นมีดกลึงปอก



รูปที่ 2.30 แสดงลักษณะรูปทรงของแผ่นมีดสำหรับงานกลึงปอก [41]

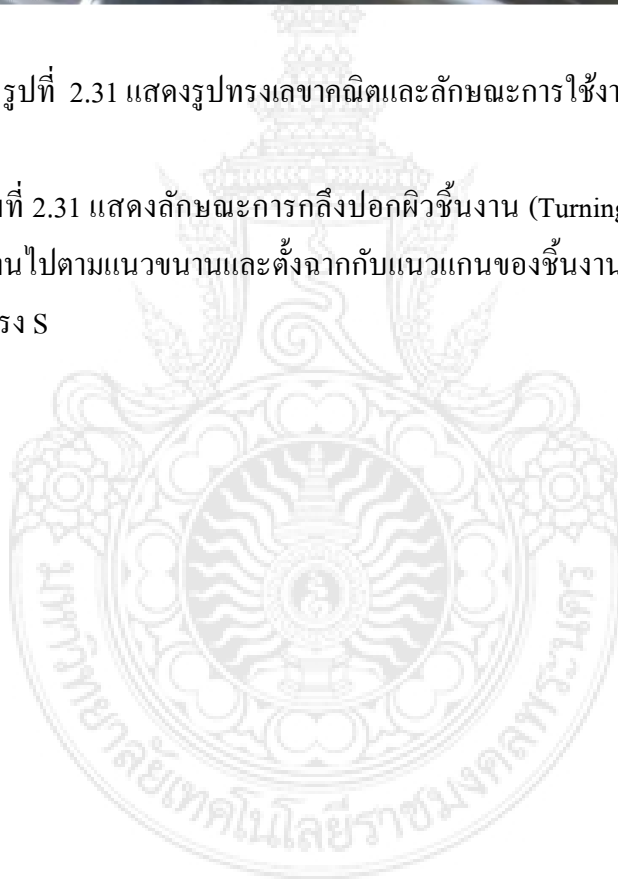
จากรูปที่ 2.30 ลักษณะของแผ่นมีดแบบต่างๆที่มีขนาดมุมคมตัดต่างกันที่สัมพันธ์กับความแข็งแรงและต้นทุนในการใช้งาน อาทิ แผ่นมีดรูปทรง V มีความแข็งแรงน้อยกว่ารูปทรงอื่นและต้นทุนในการใช้งานสูงกว่ารูปทรงอื่น ส่วนแผ่นมีดรูปทรง S ซึ่งมีความแข็งแรงมากกว่า ต้นทุนในการใช้งานต่ำ เนื่องจากรูปทรงเลขาคณิตของแผ่นมีดเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัสจึงมีมุมคมตัด มากกว่า จึงทำให้สามารถใช้งานได้ทุกคมตัดซึ่งมากกว่าแผ่นมีดรูปทรงอื่น

2.9.2 ลักษณะและการใช้งานแผ่นมีดกลึงปอก (Catalogue SANDVIK THAILAND CO., LTD)










รูปที่ 2.31 แสดงรูปทรงเลขาคณิตและลักษณะการใช้งานของแผ่นมีด [41]

จากภาพที่ 2.31 แสดงลักษณะการกลึงปอกผิวชิ้นงาน (Turning) ตัดโลหะโดยให้มีดตัดเคลื่อนที่ตัดชิ้นงานไปตามแนวขนานและตั้งฉากกับแนวแกนของชิ้นงานซึ่งเป็นลักษณะการใช้งานของแผ่นมีดรูปทรง S



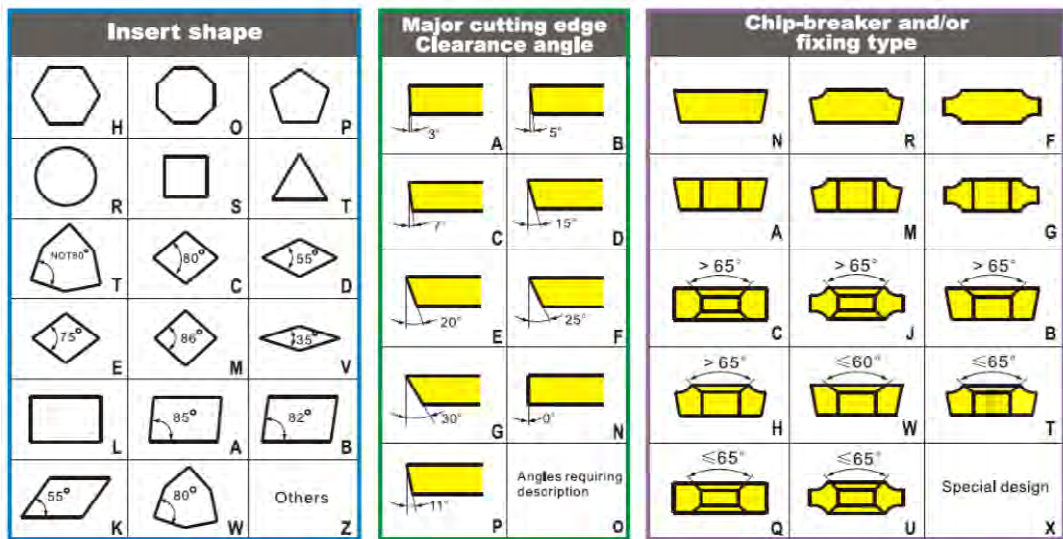
2.9.3 ความสามารถแผ่นมีดกลึงปอก [41]

ตารางที่ 2.4 แสดงความสามารถของรูปทางทรงเลขาคณิตแผ่นมีดกลึงปอก

Basic-shape designation, nose angle	R	S 90°	C 80°	W 80°	T 60°	D 55°	V 35°
							
Roughing (strength)	●	●	●	○	○		
Light roughing/semi-finishing (no. of edges)		○	●	●	●	●	
Finishing (no. of edges)			○	○	●	●	●
Longitudinal turning (feed direction)			●	○	○	●	●
Profiling (accessibility)			○	○	○	●	●
Facing (feed direction)	○	●	●	●	○	○	
Operational versatility	○		●	○	○	●	○
Limited machine power			○	○	●	●	●
Vibration tendencies				○	●	●	●
Hard materials	●	●					
Intermittent machining	●	●	○	○	○		
Large entering angle			●	●	●	●	
Small entering angle	●	●		●	●		

● Most suitable ○ Suitable

จากตารางที่ 2.4 แสดงความสามารถของรูปทางทรงเลขาคณิตแผ่นมีดกลึงปอก แผ่นมีดรูปทรง S เหมาะกับงานกลึงปอกมากที่สุด เนื่องจากการกลึงปอกผิวชิ้นงานเป็นการปรับขนาดของชิ้นงานให้ใกล้เคียงกับชิ้นงานจริง และไม่ต้องการความละเอียดของผิวชิ้นงานมากนัก



T N M G

Tolerances, inch							
Letter Symbol	Tolerances in inches			Letter Symbol	Tolerances in inches		
	m	s	d		m	s	d
A	±0.0002	±0.001	±0.0010	J	±0.0002	±0.001	±0.002 ±0.005
F	±0.0002	±0.001	±0.0005	K	±0.0005	±0.001	±0.002 ±0.005
C	±0.0005	±0.001	±0.0010	L	±0.0010	±0.001	±0.002 ±0.005
H	±0.0005	±0.001	±0.0005	M	±0.003 ±0.007	±0.005	±0.002 ±0.005
E	±0.0010	±0.001	±0.0010	N	±0.003 ±0.007	±0.001	±0.002 ±0.005
G	±0.0010	±0.005	±0.0010	U	±0.005 ±0.015	±0.005	±0.003 ±0.010

Inscribed circle diameter	Tolerances for M		Tolerances for d	
	Class M	Class U	Class M,J,K,L	Class U
0.250	±0.003	±0.005	±0.002	±0.003
0.375	±0.003	±0.005	±0.002	±0.003
0.500	±0.005	±0.008	±0.003	±0.005
0.625	±0.006	±0.011	±0.004	±0.007
0.750	±0.006	±0.011	±0.004	±0.007
1.000	±0.007	±0.015	±0.005	±0.010

Insert shape D			Insert shape V		
Inscribed circle diameter	Tolerances for M	Tolerances for M	Inscribed circle diameter	Tolerances for M	Tolerances for M
0.250	±0.004	±0.002	0.250	±0.006	±0.002
0.375	±0.004	±0.002	0.375	±0.006	±0.002
0.500	±0.006	±0.003	0.500	±0.008	±0.003
0.625	±0.007	±0.004	0.625	±0.011	±0.004
0.750	±0.007	±0.004	0.750	±0.011	±0.004

รูปที่ 2.32 แสดงรหัสแผ่นมีด CATALOGUE HIW Supply CO., LTD

จากรูปที่ 2.32 แสดงรหัสแผ่นมีดตัด ของบริษัท HIW Supply ซึ่งแสดงลักษณะที่เหมาะสม สำหรับประกอบการตัดสินใจนำไปใช้งานสำหรับงานประเภทต่างๆ ตามความลักษณะงาน

ตารางที่ 2.5 แสดงขนาดรูปทรงทางเรขาคณิตแผ่นมีดกลึงปอก [41] [42]

INSERT	รหัสแผ่น มีด (ISO)	ขนาดแผ่นมีด A mm.	รัศมีคมตัด r (mm.)	ความหนา แผ่นมีด T (mm.)	ขนาดรูตรง กลาง d (mm.)
SANDVIK	SNMG 120408	12.7	0.8	4.76	5.16
MITSUMISHI	SNMG 120408	12.7	0.8	4.76	5.16



จากตารางที่ 2.5 และรูปที่ 2.31 รหัสแผ่นมีดรูปทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัส (รหัส S) แผ่นมีดรูปทรง ทรงมาตรฐาน SNMG 120408 ประกอบด้วยอักษร 7 ตัวโดยมีความหมายดังนี้

- 1) S หมายถึง ลักษณะรูปทรงของแผ่นมีดที่มีลักษณะสี่เหลี่ยมมุม (90°)
- 2) N หมายถึง มุมหลบ (Relief Angle) ของแผ่นมีดเท่ากับ 0 องศา
- 3) M หมายถึง ระยะเวลา (Tolerance) มีดังนี้คือความหนา (Thickness) ± 0.13 , มุมปลายมีด (Conner Height $\pm 0.08 - 0.18$, I.C.Size $\pm 0.05 - 0.15$)
- 4) G หมายถึง มีรูตรงกลางมีดและมีมุมหักเศษใช้งานได้ทั้งสองด้าน (Hole and Chip Breaker Symbol)
- 5) 12 หมายถึง ขนาดความกว้าง (Edge Length Symbol) และความยาวของแผ่นมีดขนาด 12.7 mm.
- 6) 04 หมายถึง ความหนาของมีดขนาด 4.76 mm
- 7) 08 หมายถึง รัศมีโค้งปลายมีด 0.8 mm

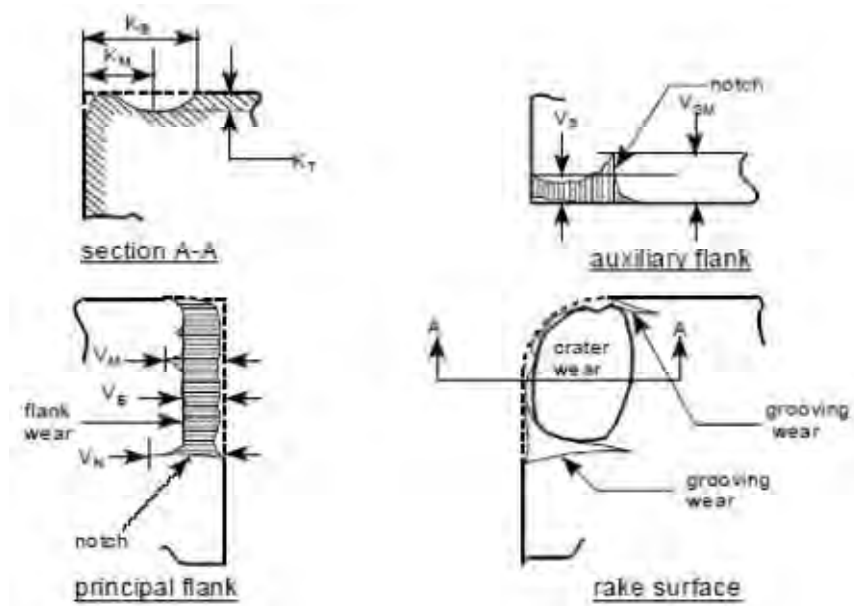
2.8.4 กลไกของการสึกหรอ (Mechanism of Wear)

การสึกหรอจากการเกาะตัวระหว่างผิวโลหะและชิ้นงานแผ่นมีด มีชื่อเรียกกันหลายชื่อ เช่น การขูดสึก (Scoring) การเกิดรอยแผล (Galing) การยึดเกาะตัว (Seizing) การเกิดรอยถลอก (Scuffing) ผิวที่ไม่เรียบของชิ้นส่วนเครื่องจักร ทำให้เกิดความเสียดทานต่อการเคลื่อนไหว ถ้าแรง

จับเคลื่อนมีเพียงพอที่จะผลักดันให้ระบบเคลื่อนที่หรือหมุนต่อไปได้ ส่วนที่ไหลออกมาชิ้นจะถูกทำลายถ้าผิวโลหะเป็นวัสดุอ่อนก็จะถูกบดขี้ให้ฝืดๆ สิ่งนี้นำไปสู่ข้อสรุปที่ว่า การปรับปรุงและพัฒนาความต้านทานการสึกหรอหรือการป้องกันการสึกหรอ มีวัสดุและวิธีการหลายอย่างที่นำมาใช้ป้องกันการสึกหรอได้ แต่การเลือกใช้วัสดุหรือ กรรมวิธีอย่างหนึ่งจำเป็นจะต้องทำการวิเคราะห์สภาพการใช้งานจริงของชิ้นส่วนนั้นให้แน่ชัดและควรจะได้มีความรอบรู้ถึงขีดความสามารถของวัสดุและกรรมวิธีที่เลือกใช้นั้นรวมทั้งข้อมูลทางด้านราคาวัสดุวิศวกรและช่างเทคนิคผู้จะสามารถตัดสินใจเลือกใช้วัสดุและกรรมวิธีป้องกันการสึกหรอได้ถูกต้อง

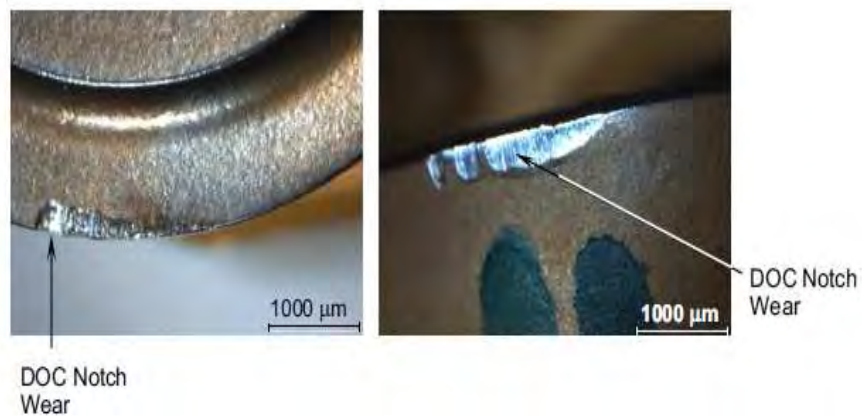
Experimental conditions	
Machine tool	17.5 HP, NH22 Lathe HMT, India
Work material	AISI 1060 steel
Cutting tools	(i) SNMG 120408-26 TTS (ii) SNMM 120408 TTS
	
SNMG 120408-26 TTS	SNMM 120408 TTS
<i>Process parameters</i>	
Cutting velocity (V_c)	110 m/min
Feed rate (S_0)	0.20 mm/rev
Depth of cut (t)	2.0 mm
Environments	(i) Dry (ii) Wet (conventional flood cooling with 1:20 soluble oil) (iii) Liquid N_2 jet

รูปที่ 2.33 ลักษณะแผ่นมีดตัด SNMG 120408 [43]

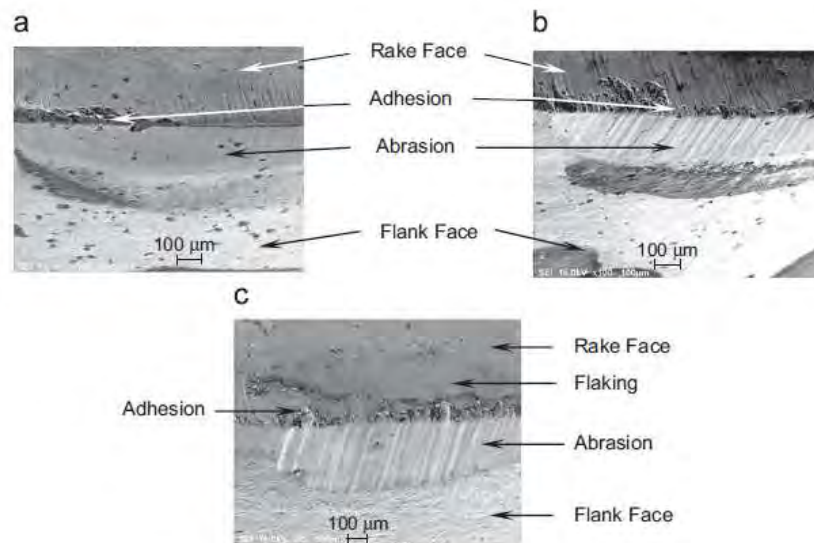


รูปที่ 2.34 Geometry of wear of turning tool [43]

รูปที่ 2.34 แสดงลักษณะการสึกหรอของเครื่องมือสำหรับงานกลึงตามหลักเรขาคณิต



รูปที่ 2.35 แสดงลักษณะการสึกหรอบริเวณด้านข้างคมตัดของแผ่นมีดตัด จากงานวิจัย Wear mechanisms of WC coated and uncoated tools in finish turning of inconel 718 [44]



รูปที่ 2.36 แสดงลักษณะการสึกหรอของแผ่นตัดซีเมนต์คาร์ไบด์ที่ผ่านการกลึง ตามเงื่อนไขที่กำหนดจากงานวิจัย Wear mechanisms of WC coated and uncoated tools in finish turning of Inconel 718 [44]

จากรูปที่ 2.36 ลักษณะการสึกหรอของแผ่นตัดซีเมนต์คาร์ไบด์ที่ผ่านการกลึง ตามเงื่อนไขที่กำหนดคือ ความเร็วตัด 50 (m./rev.) อัตราป้อน 0.1 (mm./rev.) ลักษณะรอยสึกหรอที่เกิดขึ้น

Rake face = การสึกหรอแบบรอยครูดด้านบนของคมตัด

Adhesion = ลักษณะพื้นที่สึกหรอและสิ่งที่ยึดอยู่ในพื้นที่สึกหรอเป็นลักษณะรู

พรุน

Abrasion = ลักษณะรอยขีดข่วนตรงส่วนสัมผัสของคมตัดที่สัมผัสกับชิ้นงาน

Flank Face = ลักษณะมุมหลบพื้นผิวที่สึกหรอหลังจากการกลึง

Flanking = มุมด้านบน มีการสึกหรอแบบมีรอยดิ่งครากบริเวณคมตัด

จากงานวิจัยพบว่า การกลึงทดสอบระหว่างแผ่นมิดที่ผ่านการเคลือบผิวและไม่เคลือบผิวแผ่น

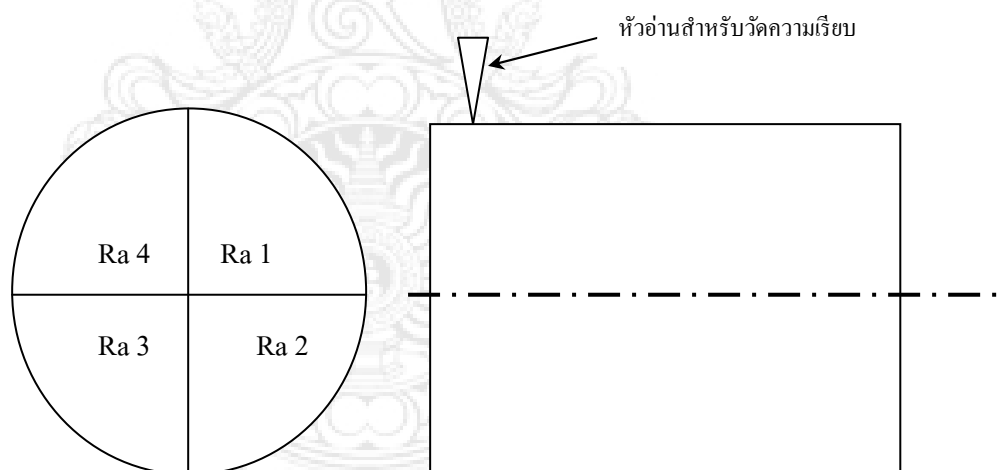
มิดที่ผ่านการเคลือบผิวมีความต้านทานการสึกหรอจากการทดสอบด้วยการกลึง Inconel 718 และคุณสมบัติของ Inconel 718 เป็นโลหะผสม นิกเกิลกับโครเมียมและเหล็ก ทนทานต่อการกัดกร่อนของสารอินทรีย์ดีมาก

2.8.5 การตรวจสอบความเรียบผิว

จากงานวิจัยเรื่อง การศึกษาอิทธิพลของสารหล่อเย็นในขบวนการกลึงเหล็กหล่อ FCD 400 ซึ่งจะนำข้อมูลขั้นตอนวิธีการปฏิบัติงาน การเก็บข้อมูล การตรวจสอบความเรียบผิว ของงานวิจัยนี้ มาเป็นแนวทางในการกำหนดวิธีการทดลอง ซึ่งมีข้อมูลดังนี้



รูปที่ 2.37 แสดงเครื่องทดสอบความเรียบผิว [2]

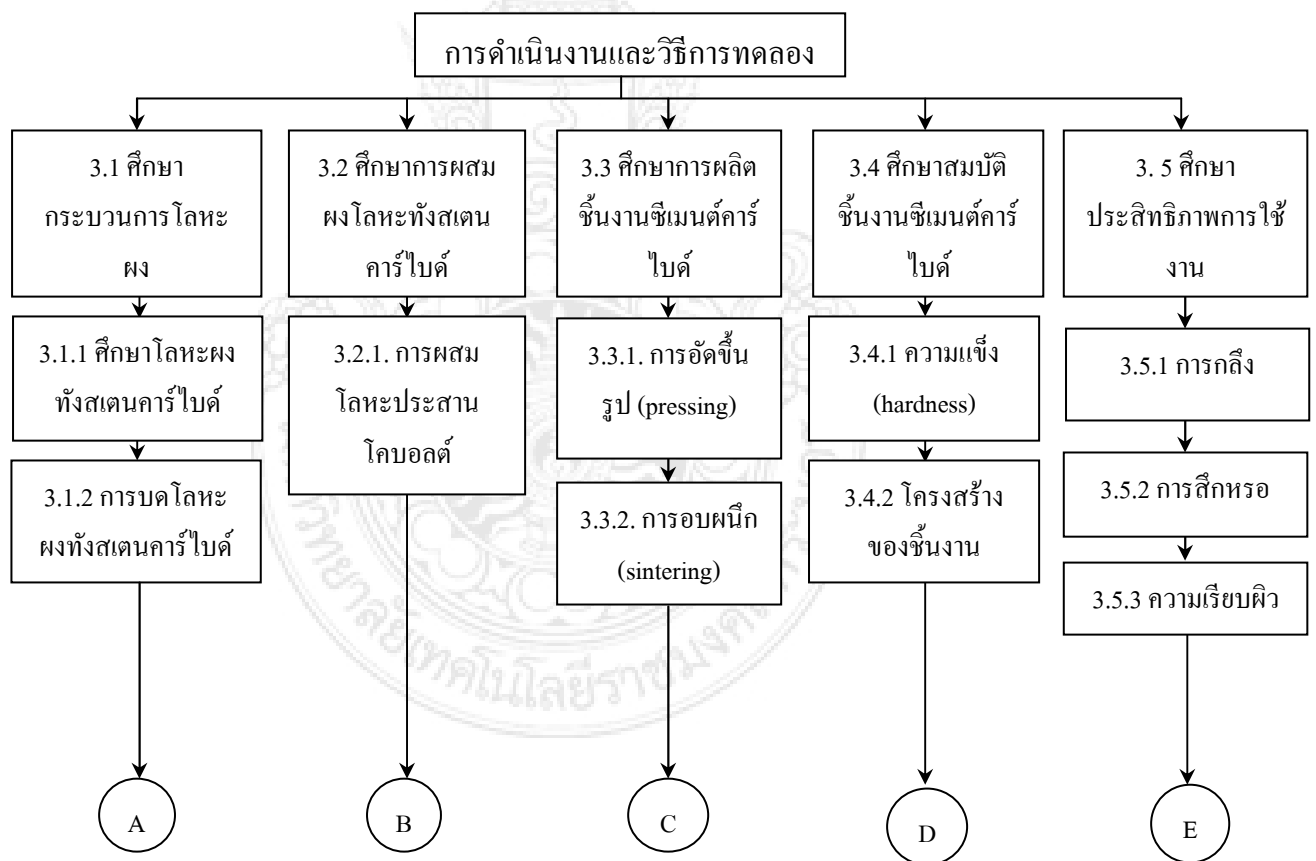


รูปที่ 2.38 แสดงภาพจำลองการแบ่งชิ้นงานหลังกลึงเพื่อตรวจสอบความเรียบผิว

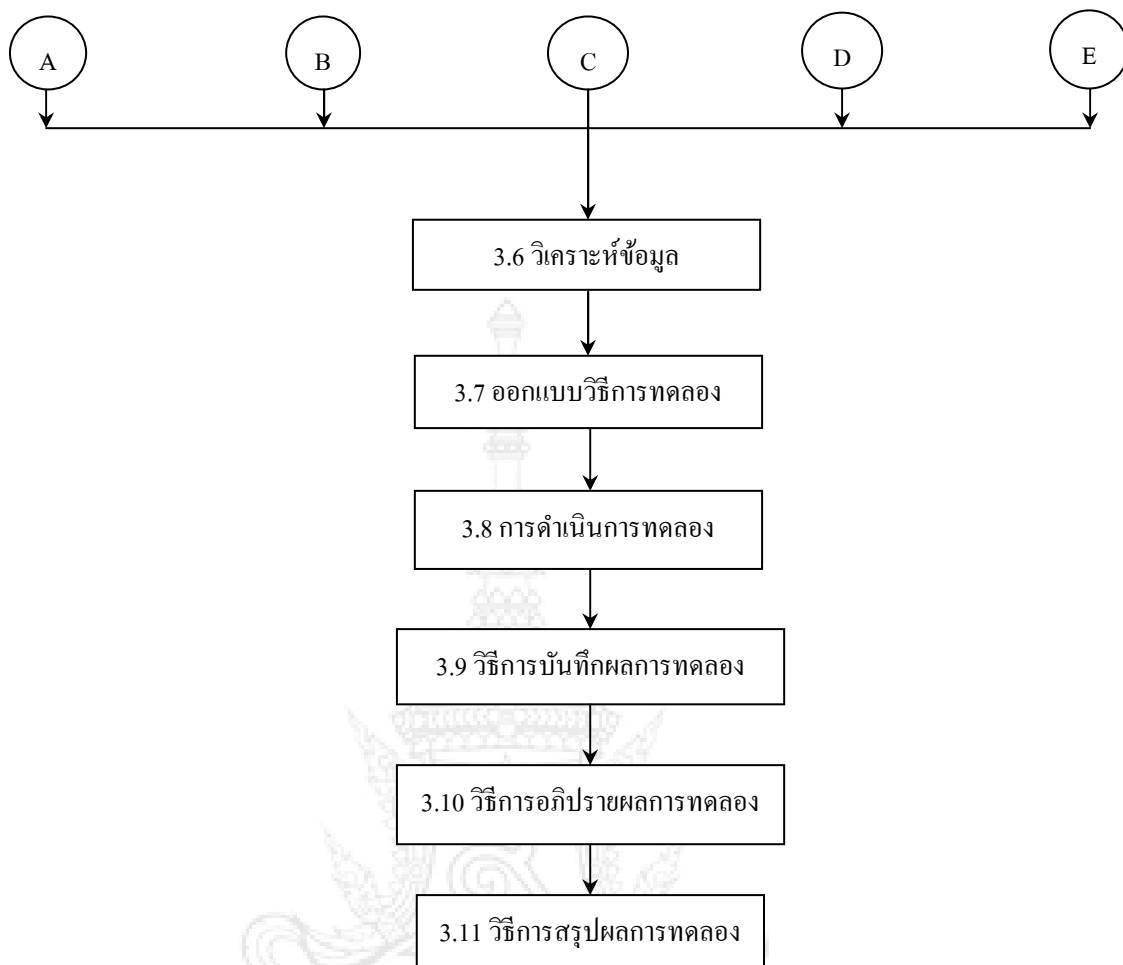
จากรูปที่ 2.37-2.38 แสดงลักษณะของเครื่องทดสอบความเรียบผิว และแสดงการแบ่งชิ้นงานออกเป็น 4 ส่วน ตามขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเพื่อใช้ในการทดสอบความเรียบผิวของชิ้นงาน

บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย

การดำเนินการวิจัยเพื่อผลิตชิ้นส่วนโลหะความแข็งสูง (Hard metals) จากโลหะผงทั้งสแตนคาร์ไบด์ที่ผ่านการ recovered การศึกษาข้อมูลอ้างอิงจากผลงานวิจัยและผู้ผลิต เช่น ศึกษาโลหะผงทั้งสแตนคาร์ไบด์ ศึกษาการบดโลหะผงทั้งสแตนคาร์ไบด์ ศึกษาการผสมโลหะผงทั้งสแตนคาร์ไบด์ การผลิตชิ้นงานซีเมนต์ทั้งสแตนคาร์ไบด์ กระบวนการอัดขึ้นรูป การอบพูนึก ศึกษาสมบัติชิ้นงานซีเมนต์คาร์ไบด์ ความแข็ง โครงสร้างของชิ้นงานซีเมนต์คาร์ไบด์ การวิเคราะห์สมบัติชิ้นงานซีเมนต์คาร์ไบด์ การทดสอบการใช้งาน การกลึง ศึกษาลักษณะการสึกหรอ ลักษณะความเรียบผิว เป็นต้น การวิเคราะห์และตรวจสอบสมบัติชิ้นงานคาร์ไบด์ ที่เหมาะสมเพื่อการใช้งานให้เป็นไปตามวัตถุประสงค์ ซึ่งดำเนินการวิจัยตามรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการดำเนินโครงการ



รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการดำเนินโครงการ (ต่อ)

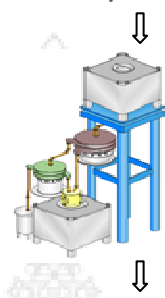
3.1 ศึกษากระบวนการโลหะผง

จากการศึกษากระบวนการโลหะผงบริษัท ATI ที่ผลิตวัสดุประเภทโลหะความแข็งสูงสามารถอธิบายขั้นตอนพื้นฐานได้ดังนี้

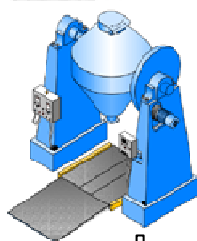
จากรูปที่ 3.2 แสดงขั้นตอนการผลิตชิ้นงานซีเมนคาร์ไบด์ของบริษัท ATI ซึ่งประกอบด้วยกระบวนการหลอมและทำให้เป็นละออง การคัดกรอง การผสม การปรับปรุงสมบัติโลหะผง การขัดก้ำขและควมชื้นตคก้างในผงโลหะ ขั้นตอนสุดท้ายเป็นการขึ้นรูปชิ้นงานตามความต้องการใช้ประโยชน์



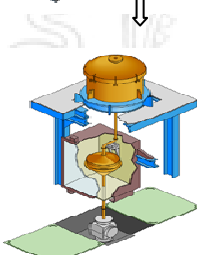
ทำให้เป็นละออง



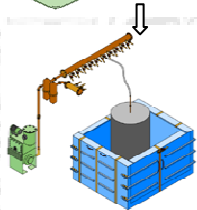
งทั้งสแตนคาร์ไบด์



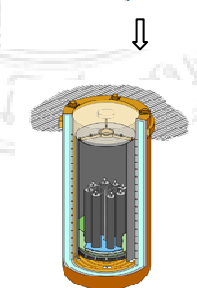
ประสาน เช่น โคบอลต์



บดตีและความหนาแน่นผงโลหะ



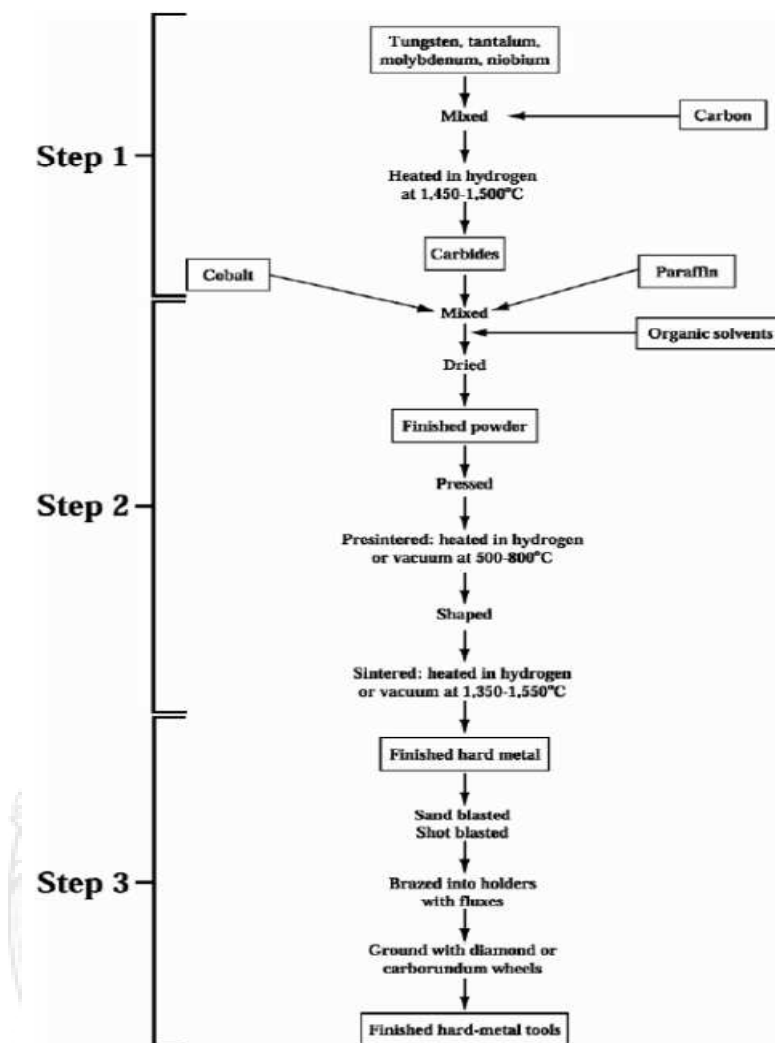
ะความชื้นตกค้างในโลหะผง



Hot Isostatic Pressing (HIP)

รูปที่ 3.2 กระบวนการผลิตชิ้นงานซีเมนต์คาร์ไบด์ [45]

จากรายงานการศึกษาโรคมะเร็งที่เกี่ยวข้องกับการโลหะ Cobalt-Tungsten Carbide ในอุตสาหกรรมโลหะผงและชิ้นส่วนโลหะแข็ง ซึ่งอธิบายกระบวนการผลิตชิ้นส่วนโลหะแข็งไว้ดังนี้



รูปที่ 3.3 กระบวนการผลิต Hard-Metal tools [46]

จากรูปที่ 3.3 แสดงกระบวนการผลิตชิ้นงานโลหะแข็งจากโคบอลต์และทังสเตนคาร์ไบด์ โดยสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ขั้นตอนใหญ่ๆ ประกอบด้วย การผลิตโลหะผง การขึ้นรูปและอบผืนชิ้นงานโลหะแข็ง การเจียรระไนตกแต่งผิวสำเร็จและได้ผลิตภัณฑ์เป็นเครื่องมือโลหะแข็ง

3.1.1 ศึกษาโลหะผงทั้งสแตนคาร์ไบด์

ทั้งสแตนคาร์ไบด์เป็นส่วนประกอบพื้นฐานที่ใช้กันอย่างแพร่หลายโดยพบว่าโคบอลต์ (Co) เป็นตัวประสานการยึดเกาะโลหะได้ดีที่สุด ชิ้นส่วนโลหะแข็งที่ผลิตประกอบด้วย ทั้งสแตนคาร์ไบด์ (WC) และโคบอลต์ (Co) โดยพบว่าเป็นเหล็กประเภท Stright Tungsten Carbide ที่บริษัท คมมีด ทนต่อการสึกหรอ การใช้งานในการตัดเนื้อส่วนใหญ่จะผสมโคบอลต์ระหว่าง 3-13% โดยนำหนัก และเพิ่มสูงจนถึง 30% เพื่อให้ทนต่อการกัดกร่อน ซึ่งค่าเฉลี่ยของปริมาณทั้งสแตนคาร์ไบด์ (WC) โดยทั่วไปมากกว่า 80% ตัวเลือกอื่นที่ใช้เป็นตัวประสานของโลหะผงประเภท Stright Grades คือ นิเกิลเหล็กกล้า หรือการรวมตัวของธาตุเหล็กที่เป็นตัวยึดจับโลหะ เป็นต้น

ตารางที่ 3.1 สมบัติโลหะผงทั้งสแตนคาร์ไบด์ของบริษัท MITSUBISHI CARBIDE [47]

Grade	Grain Size (μm)	Cobalt content Co (%)	Hardness (HV)	Density (g/cm^3)
MF07	<0.6	7	1930	14.7
MF10	<0.6	8	1900	14.6
MF20	<0.6	12	1700	14.2
MF30	<0.6	16	1500	13.7
SF10	<0.8	6	1830	14.9
TDA15	<0.8	10	1680	14.9
TF15	<0.9	10	1550	14.5
HTi10	<1.0	6	1700	14.9

จากตารางที่ 3.1 แสดงอัตราส่วนผสมของชิ้นงานซีเมนต์คาร์ไบด์ของบริษัท Mitsubishi Carbide Co, Ltd เกรด SF10 มีส่วนผสมของโคบอลต์คือ 6 % มีค่าความแข็งประมาณ 1830 HV และที่ความหนาแน่น 14.9 g/cm^3 โดยที่ขนาดเกรนไซด์ประมาณ $< 0.8 \mu\text{m}$

เกรด HTi10 มีส่วนผสมของโคบอลต์คือ 6% มีความแข็งประมาณ 1,700 HV ที่ความหนาแน่น 14.9 g/cm^3 โดยมีขนาดเกรนไซด์ประมาณ $<1.0 \mu\text{m}$

จากการวิเคราะห์ข้อมูลในส่วนผสมโคบอลต์ 6% มีความแตกต่างกันของขนาดเกรนไซด์ ทำให้มีค่าความแข็งที่ต่างกันคือ เกรนไซด์ที่มีขนาดเล็ก จะทำให้ชิ้นงานซีเมนต์คาร์ไบด์มีค่าความแข็งมากกว่าเกรนไซด์ที่มีขนาดใหญ่

3.1.2 การบดโลหะผงทั้งสแตนคาร์ไบด์

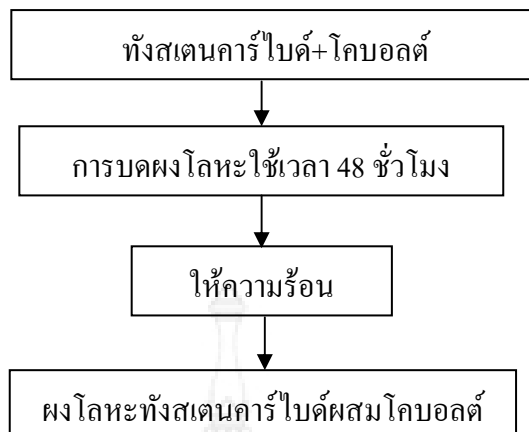
การบดเป็นการทำให้วัสดุผงทั้งสแตนคาร์ไบด์มีขนาดของอนุภาคเล็กลงจนถึงขั้นละเอียดมาก (Pulverization) โดยใช้การกระทบ กระแทก และการเสียดสีกันระหว่างวัตถุกับ ตัวลูกบด (Grinding Media) และตัวบุผนังของหม้อบด (Lining) เป็นการปรับปรุงคุณภาพโลหะผงเพื่อให้ได้ขนาดตามที่เราต้องการ

ตารางที่ 3.2 ข้อมูลแสดงปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการบดผงโลหะ [35], [40]

เวลาในการบด (h)	รอบในการบด (RPM)	ขนาดลูกบด (mm)	อัตราส่วนระหว่างผงโลหะกับลูกบด	ขนาดผงโลหะที่ได้จากการบด (μm)
48	150	4-10	1:15	1-3
50	350	4-10	1:10	1

จากตารางที่ 3.2 แสดงปัจจัยการบดโลหะผงทั้งสแตนคาร์ไบด์ประกอบด้วย พารามิเตอร์ที่ 1 กำหนดเวลาสำหรับการบดที่ 48 ชั่วโมง ใช้ความเร็วรอบ 150 รอบต่อนาที ขนาดลูกบด 4-10 มิลลิเมตร อัตราส่วนระหว่างผงโลหะกับลูกบด 1:15 สามารถผลิตโลหะผงที่มีขนาดระหว่าง 1-3 μm [35] พารามิเตอร์ที่ 2 กำหนดเวลาสำหรับการบดที่ 50 ชั่วโมง ใช้ความเร็วรอบ 350 รอบต่อนาที ขนาดลูกบด 4-10 มิลลิเมตร อัตราส่วนระหว่างผงโลหะกับลูกบด 1:10 สามารถผลิตโลหะผงทั้งสแตนคาร์ไบด์ที่มีขนาดประมาณ 1 μm [40]

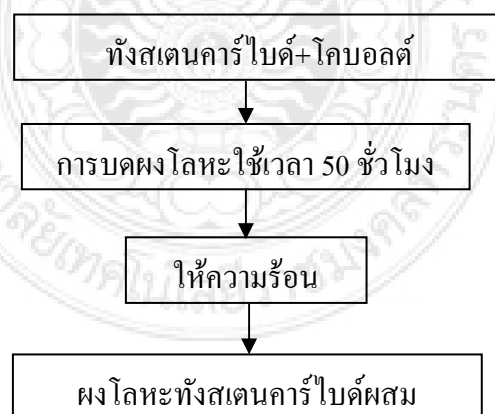
จากการศึกษาการบดโลหะผงทั้งสแตนคาร์ไบด์จากรายงานวิจัย Microwave Sintering of Nanocrystalline WC–12Co: Challenges And Perspectives สามารถอธิบายขั้นตอนการบดได้ดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 แสดงขั้นตอนการบดผงโลหะในงานวิจัย Microwave Sintering of nanocrystalline WC-12Co:Challenges and Perspectives [48]

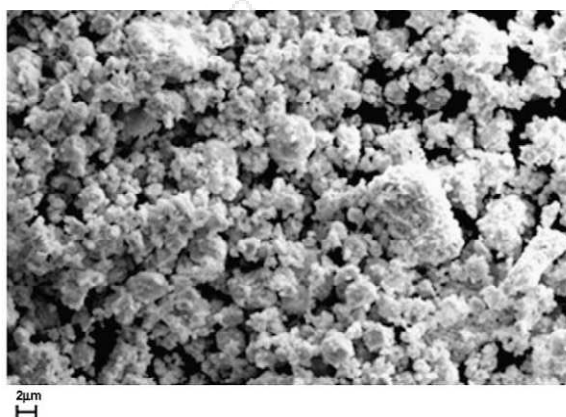
จากรูปที่ 3.4 แสดงขั้นตอนการบดผงโลหะทังสเทนคาร์ไบด์ โดยใช้เวลาสำหรับการบด 48 ชั่วโมง ใช้เอทานอลกลางในการบด ที่อัตราส่วนลูกบดต่อผง 15:1 ใช้ความเร็วรอบ 150 รอบ/นาที สามารถผลิตโลหะผงทังสเทนคาร์ไบด์ที่มีขนาด 38 นาโนเมตร [48]

จากการศึกษากระบวนการบดโลหะผงงานวิจัย Synthesis and Processing of Nanocrystalline Tungsten Carbide towards Cemented Carbides with Optimal Mechanical Properties สามารถสรุปขั้นตอนการบดผงโลหะได้ตามรูปที่ 3.5



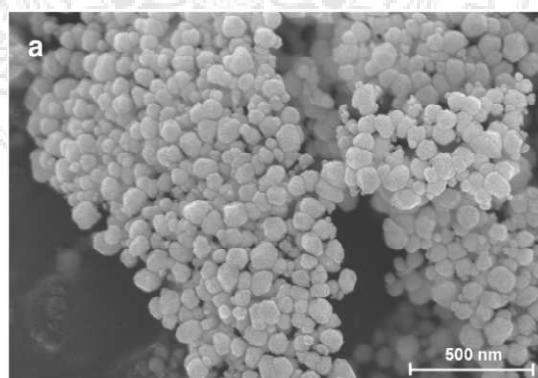
รูปที่ 3.5 แสดงขั้นตอนการผลิตโลหะผงระดับนาโนเมตรด้วยกรรมวิธีทางกล [40]

จากรูปที่ 3.5 แสดงขั้นตอนการบดผงโลหะทังสเตนคาร์ไบด์ร่วมกับผงโคบอลต์ โดยใช้เอทานอลเป็นสารตัวกลางสำหรับการบด กำหนดเวลาในการบด 2 ชั่วโมง ถูกบดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 มม. อัตราส่วน 10:1 ใช้ความเร็วรอบ 700 รอบ/นาที โลหะทังสเตนคาร์ไบด์ที่ผลิตได้มีขนาดระหว่าง 40-80 นาโนเมตร



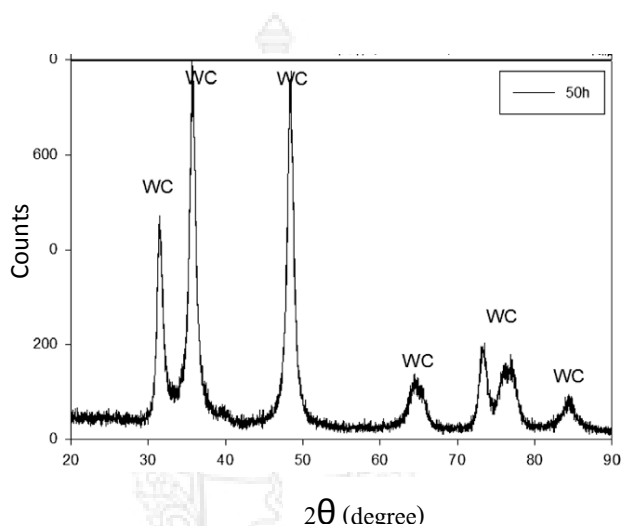
รูปที่ 3.6 แสดงตัวอย่างการวิเคราะห์โครงสร้างด้วย Scanning Electron Microscope ของผงโลหะทังสเตนคาร์ไบด์หลังจากผ่านการบด [50]

จากรูปที่ 3.6 แสดงผลวิเคราะห์ SEM ของโลหะผงทังสเตนคาร์ไบด์ที่ผ่านการบดเป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากการวิเคราะห์ปรากฏว่าโลหะผงขนาดอนุภาคเล็กสุดประมาณ 0.1µm ใหญ่สุดประมาณ 4µm พิจารณาโดยส่วนใหญ่มีขนาดประมาณ 2 µm



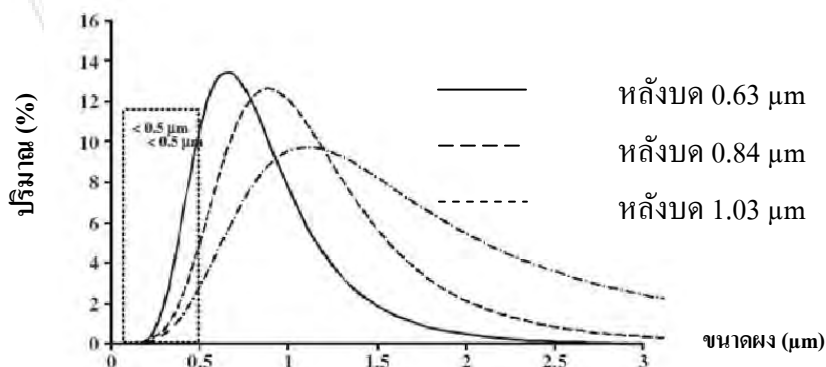
รูปที่ 3.7 Synthesized WC powders [50]

จากรูปที่ 3.7 แสดงผลการวิเคราะห์ SEM ของโลหะผงทั้งสแตนคาร์ไบด์ ที่ผ่านกระบวนการบดโดยใช้เวลา 2 ชั่วโมง จากการวิเคราะห์ปรากฏว่าโลหะผงขนาดอนุภาคเล็กสุดประมาณ 40 นาโนเมตร ใหญ่สุดประมาณ 80 นาโนเมตร และโลหะผงส่วนใหญ่มีขนาดประมาณ 45 นาโนเมตร



รูปที่ 3.8 แสดงตัวอย่างการวิเคราะห์ห้วงค์ประกอบของธาตุในผงโลหะทั้งสแตนคาร์ไบด์หลังผ่านการบด 50 ชั่วโมง [51]

จากรูปที่ 3.8 แสดงผลการวิเคราะห์ห้วงค์ประกอบทางเคมีของผงโลหะทั้งสแตนคาร์ไบด์ที่ผ่านการบดเป็นเวลา 50 ชั่วโมง พบว่า โลหะผงส่วนใหญ่เป็นทั้งสแตนคาร์ไบด์



รูปที่ 3.9 แสดงลักษณะการกระจายขนาดของอนุภาคหลังผ่านการบด 24 h [52]

จากรูปที่ 3.9 แสดงการวิเคราะห์ขนาดการกระจายของผงโลหะทั้งสเตนคาร์ไบด์ที่ผ่านการบดด้วยเวลา 24 h จากการพิจารณาปรากฏว่าความเข้มข้นของอนุภาคน้อยกว่า 0.5 μm มีขนาด 0.63, 0.84 และ 1.03 ซึ่งพบว่ามีปริมาณอยู่ประมาณ 31.126%, 8.71% และ 7.9% ตามลำดับ

3.2 ศึกษาข้อมูลเกี่ยวกับการผสมผงโลหะทั้งสเตนคาร์ไบด์

3.2.1 การผสมโลหะประสานโคบอลต์

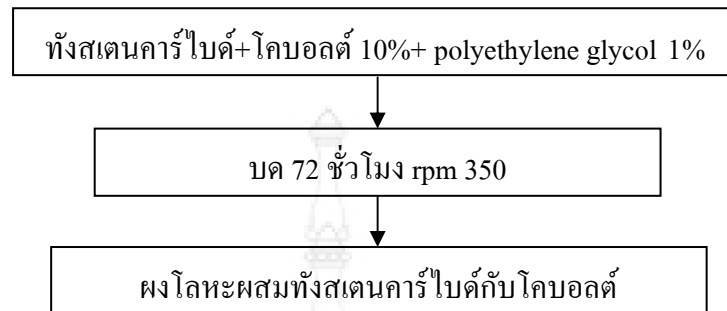
จากงานวิจัย [8], [9] สามารถอธิบายถึงปัจจัยที่เกี่ยวข้องในการผสมโลหะทั้งสเตนคาร์ไบด์เพื่อให้มีสมบัติที่เหมาะสมในการผลิตชิ้นงานโลหะแข็งซึ่งจากการวิเคราะห์สรุปได้ดังนี้

ตารางที่ 3.3 แสดงข้อมูลปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการผสมผงโลหะ [54], [55]

ปัจจัย	วัสดุที่ผสม	WC (%)	Co (%)	% วัสดุที่ผสม	อุณหภูมิ	เวลา (ชม.)
1	Paraffin Wax	83	17	3	50	2
2	Gelcasting	92	8	3	60	2
3	Paraffin Wax	94	6	2.5	110	2

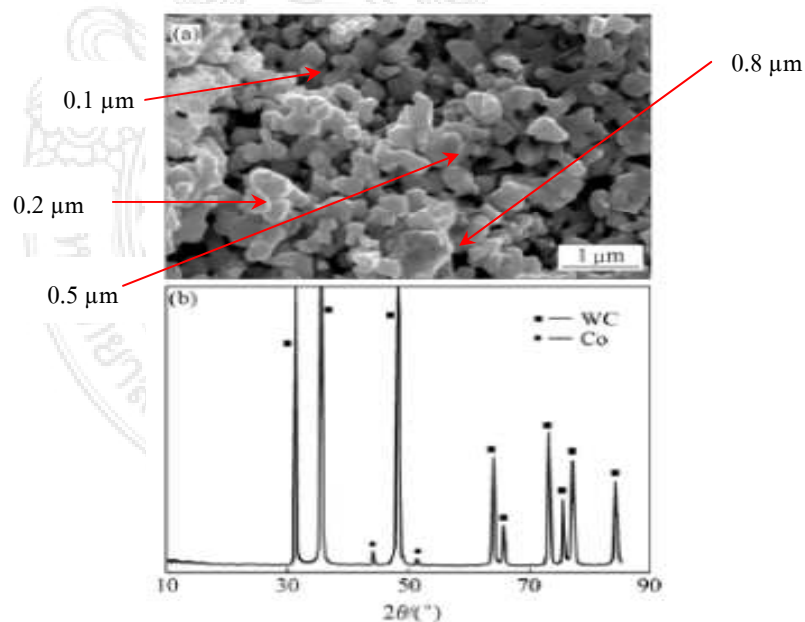
จากตารางที่ 3.3 แสดงปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการผสมผงโลหะทั้งสเตนคาร์ไบด์กับโคบอลต์และวัสดุผสม โดยกระบวนการให้ความร้อนใช้วัสดุผสมเป็น Paraffin Wax ในปริมาณ 3 % ใช้ผงโลหะทั้งสเตนคาร์ไบด์ 83 % ผงโคบอลต์ 17 % ให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 50 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ใช้วัสดุผสมเป็น Gelcasting ในปริมาณ 3 % ใช้ผงโลหะทั้งสเตนคาร์ไบด์ 92 % ผงโคบอลต์ 8 % ให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 60 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง และใช้วัสดุผสมเป็น Paraffin Wax ในปริมาณ 2.5 % ใช้ผงโลหะทั้งสเตนคาร์ไบด์ 94 % ผงโคบอลต์ 6 % ให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 110 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

จากรายงานวิจัย Effect of VC and NbC additions on microstructure and properties of ultrafine WC-10Co cemented carbides อธิบายขั้นตอนการผสมได้ดังรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 แสดงแผนผังขั้นตอนการผสมผงโลหะในงานวิจัย Effect of VC and NbC additions on microstructure and properties of ultrafine WC-10Co cemented carbides [55]

จากรูปที่ 3.10 แสดงขั้นตอนการผสมผงโลหะทั้งสแตนคาร์ไบด์ร่วมกับผงโคบอลต์ 10% โดยมี polyethylene glycol 1% เป็นวัสดุที่ผสมเพื่อการผสม ใช้ความเร็วรอบ 350 รอบ/นาที



รูปที่ 3.11 SEM image (a) and XRD pattern (b) of composite powder of WC-10 Co alloy [24]

จากรูปที่ 3.11 แสดงผลการตรวจสอบ SEM และ XRD โลหะผงทั้งสแตนคาร์ไบด์ผสมโคบอลต์จากการวิเคราะห์ปรากฏว่า (a) เป็นโลหะผงทั้งสแตนคาร์ไบด์ที่ผ่านการผสมโคบอลต์ โลหะผงขนาดอนุภาคใหญ่สุดประมาณ $0.8\mu\text{m}$ เล็กสุดประมาณ $0.1\mu\text{m}$ โดยส่วนใหญ่มีขนาดระหว่าง $0.2-0.5\mu\text{m}$ (b) แสดงการตรวจสอบหาองค์ประกอบทางเคมีโลหะผงหลังการผสมแล้ว ซึ่งจากการวิเคราะห์ปรากฏว่าธาตุองค์ประกอบในสารตัวอย่างโดยส่วนใหญ่เป็นทั้งสแตนคาร์ไบด์และมีโคบอลต์ผสมอยู่เล็กน้อย

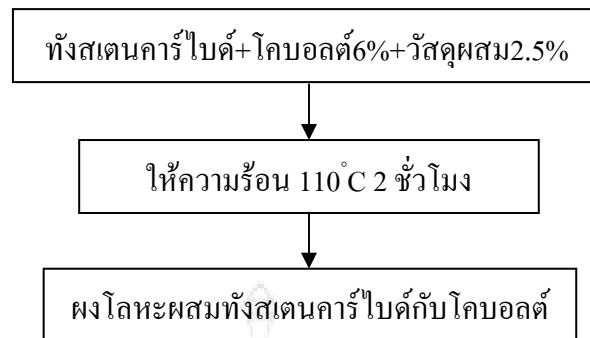
จากงานวิจัย Gelcasting of WC-8wt Co Tungsten Cemented Carbide แสดงขั้นตอนการผสมโลหะผงทั้งสแตนคาร์ไบด์สำหรับการนำไปผลิตชิ้นส่วนซีเมนต์ทั้งสแตนคาร์ไบด์ ซึ่งสามารถอธิบายขั้นตอนและอัตราส่วนผสมได้ดังรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 แสดงแผนผังขั้นตอนการผสมผงโลหะในงานวิจัย Gelcasting of WC-8wt% Co Tungsten Cemented Carbide [54]

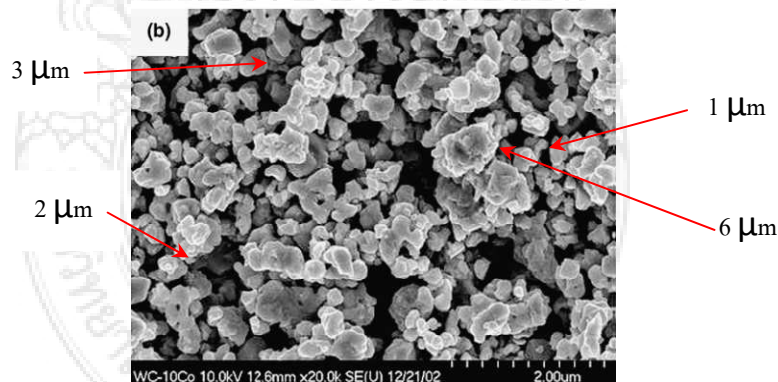
จากรูปที่ 3.12 แสดงขั้นตอนการผสมผงโลหะทั้งสแตนคาร์ไบด์ร่วมกับผงโคบอลต์ 8 % โดยมีพาราฟินแว๊ก (Paraffin Wax) 3% เป็นวัสดุที่ผสมเพื่อการผสมในขั้นตอนอบผง โดยให้ความร้อน $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ สำหรับการผสม 2 ชั่วโมง สามารถผลิตโลหะผงทั้งสแตนคาร์ไบด์โคบอลต์สำหรับการนำไปใช้ผลิตชิ้นงานโลหะความแข็งแรงสูง

จากงานวิจัย Synthesis and Processing of Nanocrystalline Tungsten Carbide towards Cemented Carbides with Optimal Mechanical Properties ซึ่งจะนำข้อมูลการผสมผงโลหะของงานวิจัยนี้มาเป็นข้อมูลในการวิเคราะห์หาแนวทางที่ดีที่สุดในการกำหนดวิธีการทดลองไปจนถึงการดำเนินการทดลอง ซึ่งมีข้อมูลตามรูปที่ 3.13



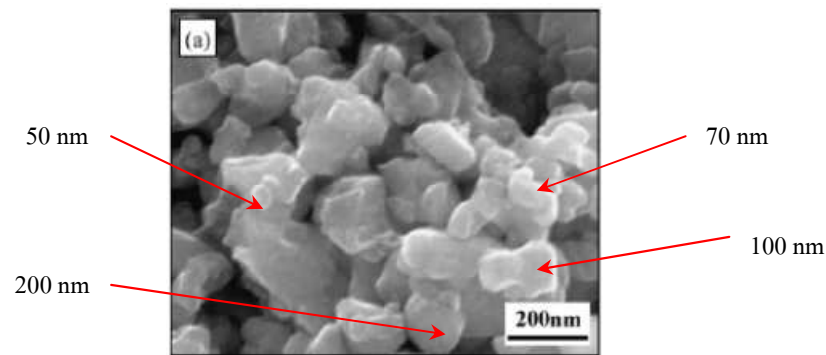
รูปที่ 3.13 แสดงแผนผังขั้นตอนการผสมผงโลหะในงานวิจัย Synthesis and Processing of Nanocrystalline Tungsten Carbide towards Cemented Carbides with Optimal Mechanical Properties [40]

จากรูปที่ 3.13 แสดงขั้นตอนการผสมผงโลหะทังสเตนคาร์ไบด์ร่วมกับผงโคบอลต์ 6% โดยมี พาราฟินแว๊ก (Paraffin Wax) 2.5 % เป็นวัสดุที่ผสมเพื่อการประสานในขั้นตอนอบผง โดยให้ความร้อน 110 °C ในการผสม 2 ชั่วโมง สามารถผลิตโลหะผสมทังสเตนคาร์ไบด์ที่เหมาะสมต่อผลิตชิ้นงานซีเมนต์คาร์ไบด์



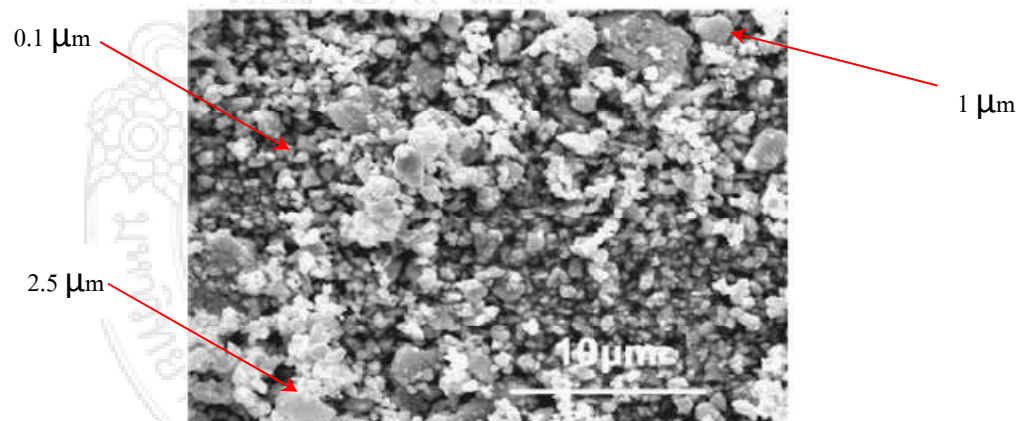
รูปที่ 3.14 แสดงตัวอย่างผงโลหะทังสเตนคาร์ไบด์ผสมกับโคบอลต์ [56]

จากรูปที่ 3.14 แสดงผลการทดสอบผงโลหะทังสเตนคาร์ไบด์จากการศึกษาวิจัยเรื่อง Consolidation of Ultra Fine WC and WC-Co Hard Materials by Pulsed Current Activated Sintering and Its Mechanical Properties ด้วยเทคนิคการตรวจสอบแบบสแกนนิ่งไมโครสโคป พบว่าลักษณะอนุภาคของผงโลหะมีรูปร่างทรงเหลี่ยมและทรงกลมผสมกัน โดยจะเห็นว่าขนาดของผงเล็กสุดประมาณ 1 μm ใหญ่สุดประมาณ 6 μm โดยที่ส่วนใหญ่มีขนาดระหว่าง 2-3 μm



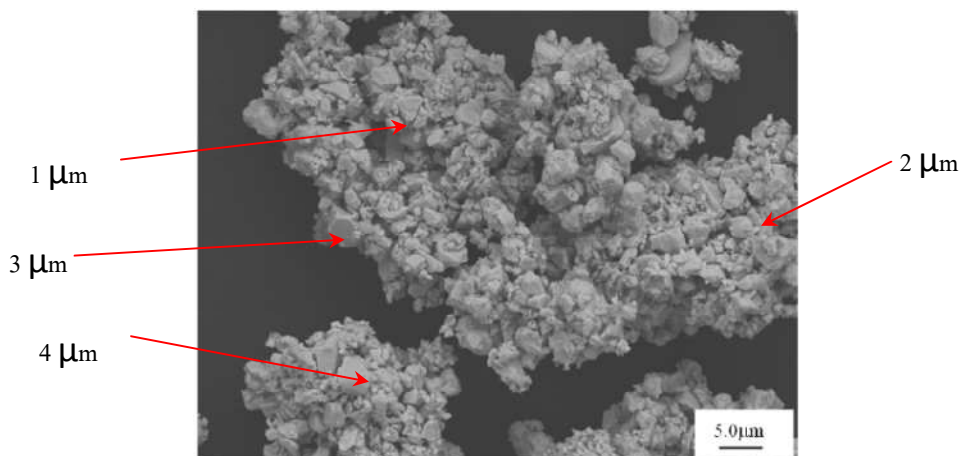
รูปที่ 3.15 The morphology of the mixed powders: (a) sub-micron WC/nano-Co and [57]

จากรูปที่ 3.15 แสดงผลการตรวจสอบ SEM โลหะผงทั้งสแตนคาร์ไบด์ผสมโคบอลต์โดยวิธีการบด จากการวิเคราะห์ปรากฏว่า โลหะผงทั้งสแตนคาร์ไบด์ขนาดใหญ่สุดประมาณ 200 นาโนเมตร ขนาดเล็กสุดประมาณ 50 นาโนเมตร ซึ่งพิจารณาโดยส่วนใหญ่มีขนาดระหว่าง 70-100 นาโนเมตร



รูปที่ 3.16 SEM images of raw WC powder: WC-Co powder with the optimized parameters.[28]

จากรูปที่ 3.16 แสดงผลการวิเคราะห์ SEM ของโลหะผงทั้งสแตนคาร์ไบด์ที่ผ่านการบดเป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากการวิเคราะห์ปรากฏว่าโลหะผงทั้งสแตนคาร์ไบด์มีขนาดใหญ่สุดประมาณ 2.5 μm ขนาดเล็กสุดประมาณ 0.1 μm ซึ่งโลหะผงโดยส่วนใหญ่มีขนาดระหว่าง 0.1-1 μm



รูปที่ 3.17 Powder mixture WC (95%), Co (5%) after 8 hours of grinding in a ball mill [38]

จากรูปที่ 3.17 แสดงผลการตรวจ SEM โลหะผงทังสเตนคาร์ไบด์โคบอลต์ที่ผ่านการบด 8 ชั่วโมง จากการวิเคราะห์ปรากฏว่าโลหะผงทังสเตนคาร์ไบด์มีขนาดใหญ่มากที่สุดประมาณ 4 μm ขนาดเล็กสุดประมาณ 1 μm พิจารณาโดยส่วนใหญ่โลหะผงมีขนาดระหว่าง 2-3 μm

3.3 ศึกษาการผลิตชิ้นงานซีเมนต์คาร์ไบด์

3.3.1. การอัดขึ้นรูป (pressing)

การขึ้นรูปชิ้นงานซีเมนต์คาร์ไบด์เป็นการนำโลหะผงทังสเตนคาร์ไบด์ที่ผ่านกระบวนการผสมกับโคบอลต์ หรือวัสดุอื่นเช่น นิเกิล ไทเทเนียม มาผลิตเป็นรูปร่างโดยผ่านการกดอัดด้วยแรงอัดที่เหมาะสม ซึ่งสามารถทำให้โลหะผงเกิดเป็นรูปร่างตามแม่พิมพ์ที่กำหนด โดยวิธีการคือ นำโลหะผงทังสเตนคาร์ไบด์ที่ผ่านการผสมแล้วใส่ลงในแม่พิมพ์ของชิ้นงาน และทำการกดอัดทำให้ได้เป็นชิ้นงานตามต้องการ ซึ่งเป็นชิ้นงานที่ได้นั้นยังไม่สามารถใช้งานได้ ซึ่งเรียก กรีนคอมแพ็ค (Green Compact) [5]

ตารางที่ 3.4 แสดงข้อมูลปัจจัยที่เกี่ยวกับการอัดขึ้นรูป (Green Compact) [58], [40]

ส่วนผสมของผงโลหะ	ขนาดผงโลหะ (μm)	แรงกด (MPa)
WC + Co	0.14	>300
WC + Co	0.1	300
WC + Co	0.148	400

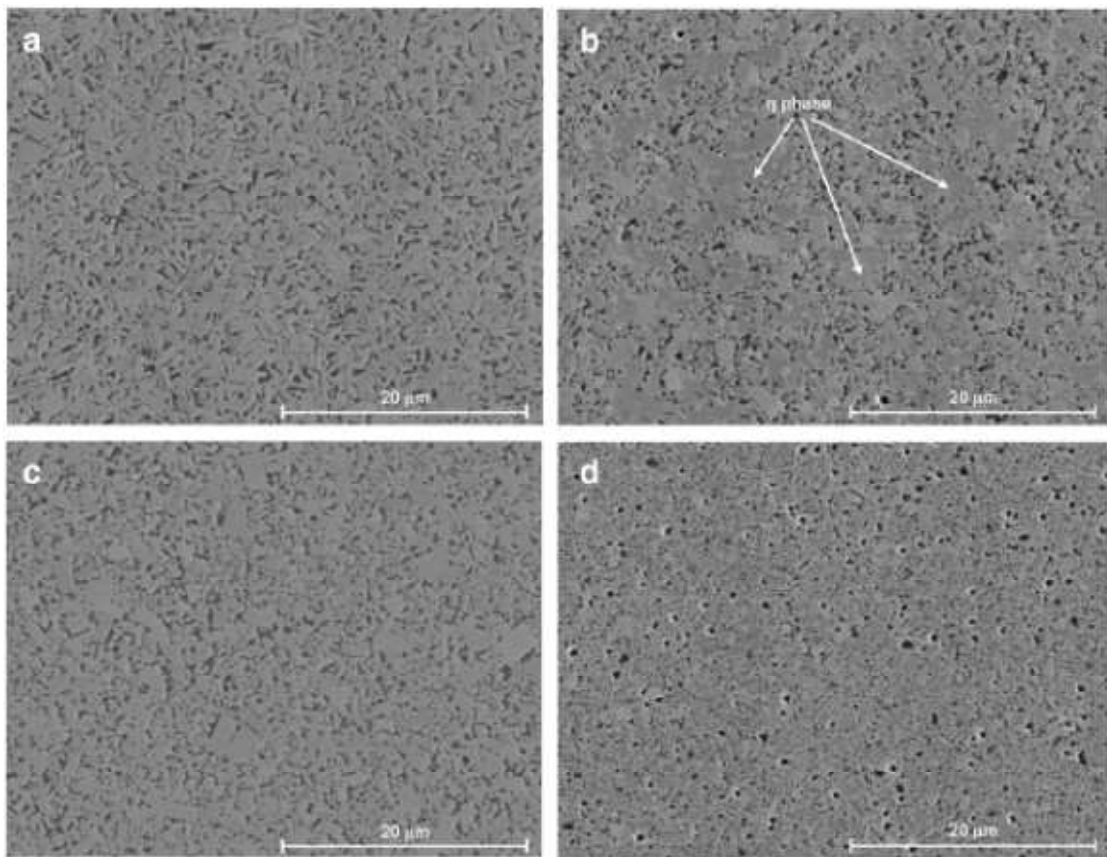
3.3.2 การอบพูน (sintering)

การอบพูนเป็นขั้นตอนการทำให้ช่องว่างระหว่างอนุภาคของผงโลหะทั้งสแตนคาร์ไบด์รวมตัวกันซึ่งเกิดจากช่องว่างที่มีการสลายตัวออกไปของวัสดุประสานระหว่างการเผาผล การศึกษารายงานวิจัยมีปัจจัยที่เกี่ยวข้องในการอบพูนได้แก่ อัตราส่วนผสม อุณหภูมิในการอบ และเวลาในการอบพูน จากการพิจารณาสามารถสรุปปัจจัยต่างๆ ได้ดังตารางที่ 3.5

ตารางที่ 3.5 แสดงข้อมูลปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการอบพูน (Sintering) [40], [54], [1]

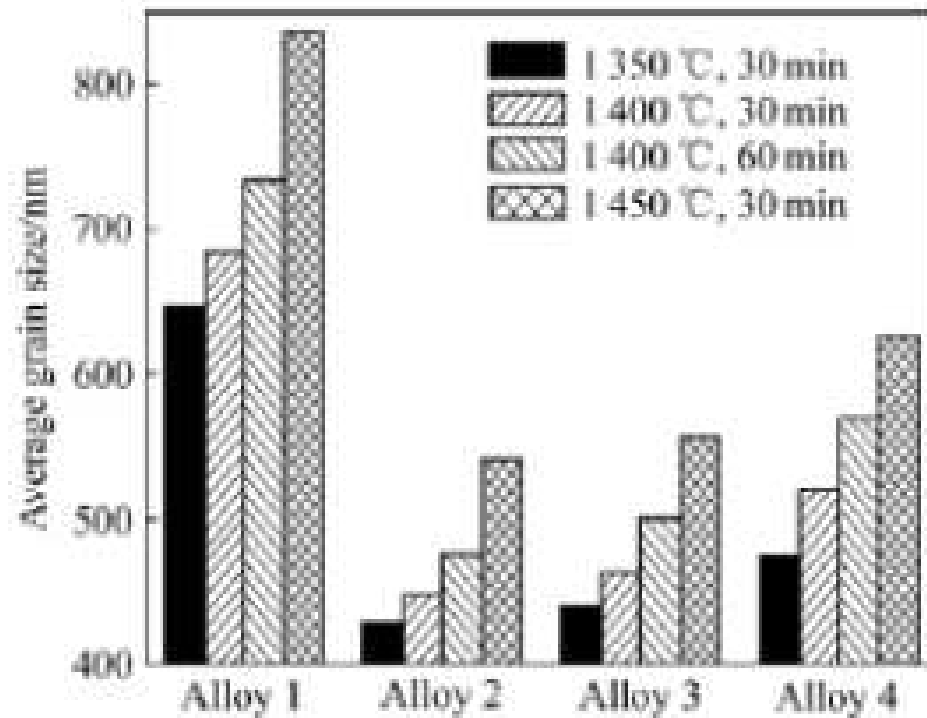
ส่วนผสมของผงโลหะ	อุณหภูมิในการอบพูน ($^{\circ}\text{C}$)	เวลาในการอบพูน (h)
WC + Co	1,390	1
WC + Co	1,400	2
WC + Co	1,400	1

จากตารางที่ 3.5 แสดงข้อมูลปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการอบพูนโดยประกอบด้วย ปัจจัยที่ 1 โลหะผงทั้งสแตนคาร์ไบด์มีส่วนผสมคือโลหะผงทั้งสแตนคาร์ไบด์และผงโคบอลต์ อบพูนด้วย อุณหภูมิ 1,390 $^{\circ}\text{C}$ ใช้เวลาในการอบ 1 ชั่วโมง ปัจจัยที่ 2 โลหะผงทั้งสแตนคาร์ไบด์มีส่วนผสมคือผง ทั้งสแตนคาร์ไบด์และผงโคบอลต์ อุณหภูมิที่ 1,400 $^{\circ}\text{C}$ ใช้เวลาในการอบพูน 2 ชั่วโมง และปัจจัยที่ 3 โลหะผงทั้งสแตนคาร์ไบด์มีส่วนผสมคือผงโลหะทั้งสแตนคาร์ไบด์และผงโคบอลต์ อบพูนที่ อุณหภูมิ 1,400 $^{\circ}\text{C}$ เวลา 1 ชั่วโมง



รูปที่ 3.18 แสดงโครงสร้างผลึกของโลหะคาร์ไบด์ที่ผ่านการอบผลึกที่อุณหภูมิ 1,400 °C ใช้เวลาในการอบผลึก 1 ชั่วโมง [40]

จากรูปที่ 3.18 เป็นภาพแสดงการทดสอบโครงสร้างจุลภาคชิ้นงานซีเมนต์คาร์ไบด์ ที่ผ่านการอบผลึกด้วยอุณหภูมิ 1,400 °C ใช้เวลา 1 ชั่วโมง [40] จากการวิเคราะห์ปรากฏว่าลักษณะอนุภาคของโลหะผสมเป็นเนื้อเดียวกันได้ดี การเรียงตัวมีรูพรุนอยู่เล็กน้อย ทำให้เกิดช่องว่างในเนื้อของชิ้นงานซีเมนต์คาร์ไบด์



รูปที่ 3.19 Average grain size of WC in sintered alloys [49]

จากรูปที่ 3.19 แสดงขนาดเกรนชิ้นงานซีเมนต์คาร์ไบด์ที่ผ่านการอบผนึก จากการวิเคราะห์ปรากฏว่าชิ้นงาน Alloy 1 อบผนึกที่อุณหภูมิระหว่าง 1,350-1,450 °C ด้วยเวลาระหว่าง 30-60 นาที มีขนาดเกรนระหว่าง 650-840 นาโนเมตร

ชิ้นงาน Alloy 2 อบผนึกที่อุณหภูมิระหว่าง 1,350-1,450 °C ด้วยเวลาระหว่าง 30-60 นาที มีขนาดเกรนระหว่าง 425-525 นาโนเมตร

ชิ้นงาน Alloy 3 อบผนึกที่อุณหภูมิระหว่าง 1,350-1,450 °C ด้วยเวลาระหว่าง 30-60 นาที มีขนาดเกรนระหว่าง 430-550 นาโนเมตร

ชิ้นงาน Alloy 4 อบผนึกที่อุณหภูมิระหว่าง 1,350-1,450 °C ด้วยเวลาระหว่าง 30-60 นาที มีขนาดเกรนระหว่าง 450-600 นาโนเมตร

ตารางที่ 3.6 Processing parameters of alloys 1-14 Note that the size of WC powders is 0.2 μ m [60]

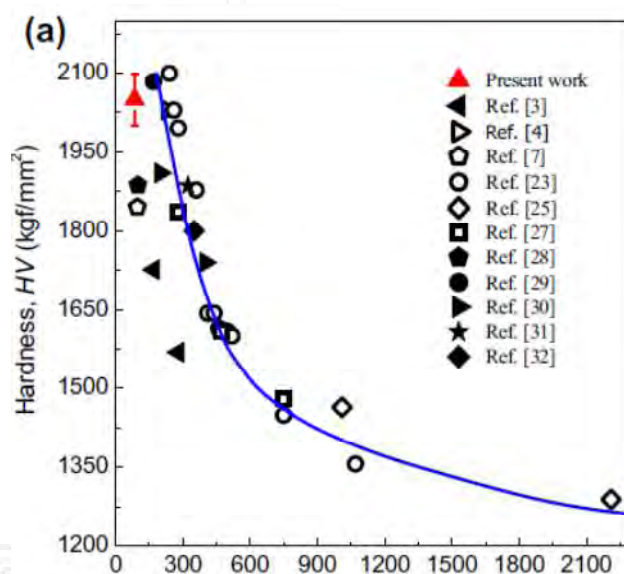
Samples	Cobalt particle size (μ m)	Milling time (h)	Milling speed (rpm)	Sintering temperature ($^{\circ}$ C)
Alloy 1	17	18	250	1,450
Alloy 2	1.4	18	250	1,450
Alloy 3	1.4	48	200	1,400
Alloy 4	1.4	48	250	1,400
Alloy 5	1.4	48	300	1,400
Alloy 6	1.4	48	350	1,400
Alloy 7	1.4	48	200	1,450
Alloy 8	1.4	48	250	1,450
Alloy 9	1.4	48	300	1,450
Alloy 10	1.4	48	350	1,450
Alloy 11	1.4	48	200	1,500
Alloy 12	1.4	48	250	1,500
Alloy 13	1.4	48	300	1,500
Alloy 14	1.4	48	350	1,500

จากตารางที่ 3.6 แสดงพารามิเตอร์ในการผลิตชิ้นงานซีเมนต์คาร์ไบด์ Alloy 1- Alloy 14 ด้วยโลหะผงขนาด 0.2 μ mจากการวิเคราะห์ปรากฏว่าขนาดอนุภาคโคบอลต์อยู่ระหว่าง 1.4-17 μ m ใช้เวลาในการบด 18-48 ชั่วโมง ด้วยความเร็วรอบ 200-350 รอบ/นาที ใช้อุณหภูมิในการอบผงระหว่าง 1,450-1,500 $^{\circ}$ C

3.4 ศึกษาสมบัติชิ้นงานซีเมนต์คาร์ไบด์

3.4.1 ความแข็ง (hardness)

จากงานวิจัยสมบัติของซีเมนต์ทั้งสแตนคาร์ไบด์ขนาดนาโนเมตร สามารถอธิบายสมบัติด้านความแข็งได้ดังนี้



รูปที่ 3.20 Mean grain size, d_{WC} (nm) [52]

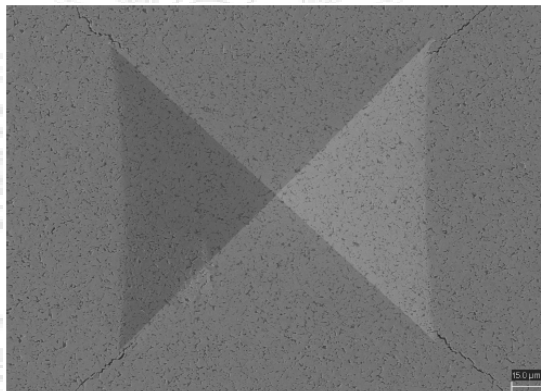
จากรูปที่ 3.20 แสดงผลการตรวจสอบความแข็งของชิ้นงานซีเมนต์คาร์ไบด์ แกนนอนแสดงขนาดเกรนเฉลี่ยของทั้งสแตนคาร์ไบด์ มีขนาดระหว่าง 0-2,250 (nm) แกนตั้งแสดงค่าความแข็ง (HV) มีความแข็งระหว่าง 1,200-2,100 HV



(a)

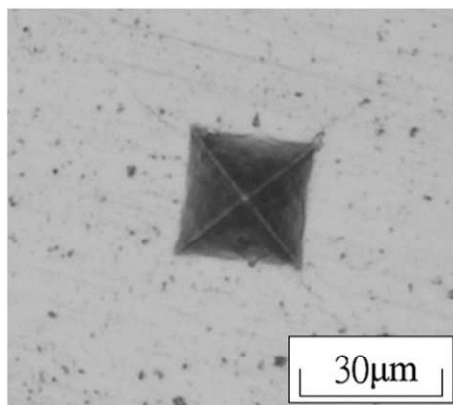
รูปที่ 3.21 HV50 indent image in the core zone, with diagonal length of 281.32 μm and 278.02 μm respectively [37]

จากรูปที่ 3.21 แสดงการตรวจสอบค่าความแข็งแบบวิกเกอร์ที่มีโหลดในการกด 50 kgf ลักษณะรอยกดมีความยาวเส้นทแยงมุม 281.32 μm และ 278.02 μm



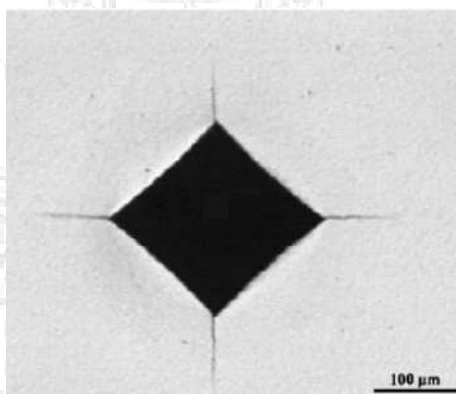
รูปที่ 3.22 Vickers indentation in the surface zone, diamond indenter, indentation load, 30kgf in WC+Co tool gradient materials [38]

จากรูปที่ 3.22 แสดงการตรวจสอบความแข็งที่มีโหลดในการทดสอบ 30 kgf ซึ่งแสดงผลลักษณะรอยกดและการแตกร้าบริเวณรอยกด



รูปที่ 3.23 แสดงภาพรอยกดการทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์ [52]

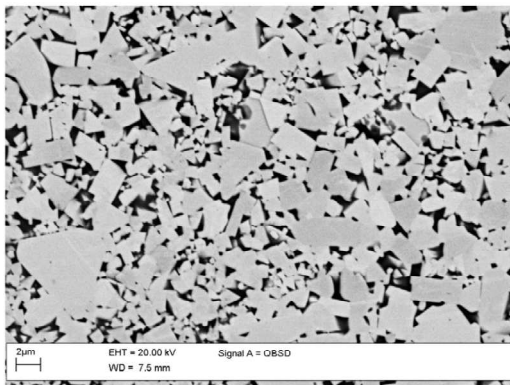
จากรูปที่ 3.23 แสดงการทดสอบหาค่าความแข็งแบบวิกเกอร์ที่มีโหลด 30 Kgf จากรูปแสดงลักษณะรอยกดและของรอยแตกบริเวณมุมของรอยกด



รูปที่ 3.24 Optical micrograph of Vickers indentation effect on specimen No. 5 tested under 40 kgf. [49]

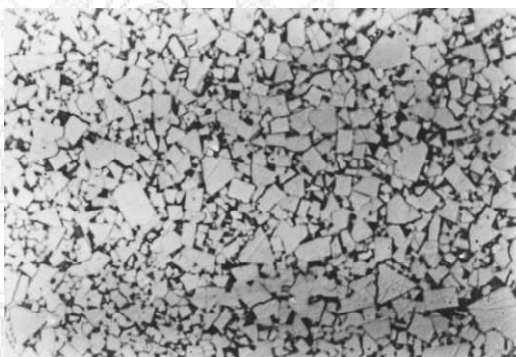
3.4.2 โครงสร้างของชิ้นงาน

การศึกษาข้อมูลจากงานวิจัย Effects of Ball Milling Time on the Synthesis and Consolidation of Nanostructured WC-Co Composites ซึ่งจะแสดงผลการตรวจสอบผงโลหะทั้งสแตนคาร์ไบด์ WC-Co ด้วยเครื่องตรวจสอบโครงสร้างทางจุลภาคโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope) ซึ่งมีผลการทดสอบดังรูปที่ 3.25



รูปที่ 3.25 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคจากงานวิจัย Effects of Ball Milling time on the Synthesis and Consolidation of Nanostructured WC–Co Composites [61]

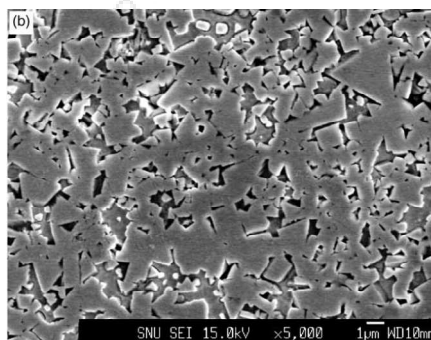
จากรูปที่ 3.25 แสดงการทดสอบโครงสร้างจุลภาคชิ้นงานซีเมนต์คาร์ไบด์จากการศึกษา งานวิจัย [67] พบว่าลักษณะอนุภาคผงโลหะมีลักษณะการเข้ากันดีของโลหะผงทั้งสแตนคาร์ไบด์กับ โคบอลต์ การเรียงตัวเกิดโพรงอากาศปนอยู่ทำให้เกิดช่องว่างในเนื้อชิ้นงานซีเมนต์คาร์ไบด์



รูปที่ 3.26 ตัวอย่างผลการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคจากงานวิจัย Powder Injection Molding of WC–8%Co Tungsten Cemented Carbide [62]

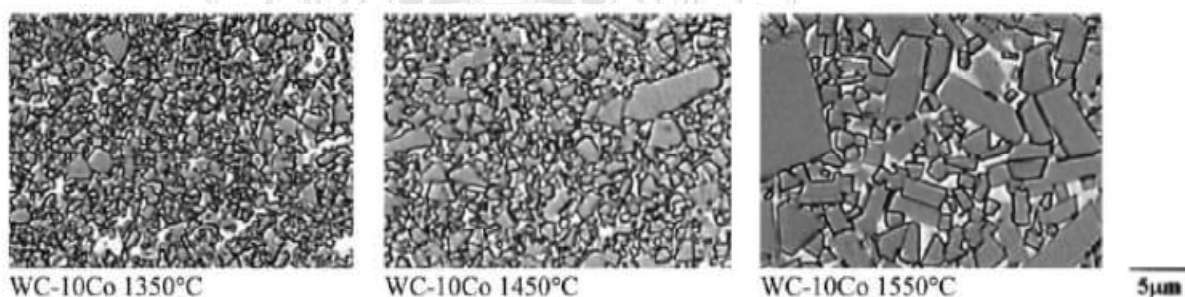
จากรูปที่ 3.26 แสดงการทดสอบโครงสร้างจุลภาคชิ้นงานซีเมนต์คาร์ไบด์จากการศึกษา งานวิจัยเรื่อง Powder Injection Molding of WC–8%Co Tungsten Cemented Carbide พบว่าลักษณะ อนุภาคของผงโลหะมีลักษณะการเข้ากันของผงโลหะทั้งสแตนคาร์ไบด์กับโคบอลต์มีการเรียงตัวกัน และการเกิดโพรงอากาศขึ้นปนอยู่ที่ได้จากการอัดขึ้นรูปทำให้เกิดช่องว่างขึ้นในเนื้อของชิ้นงาน ซีเมนต์คาร์ไบด์

จากงานวิจัย Sintering of Nano-sized WC-Co Powders Produced by a Gas Reduction-Carburization Process ซึ่งจะแสดงผลการตรวจสอบผงโลหะทั้งสแตนคาร์ไบด์ WC-Co ด้วยเครื่องตรวจสอบโครงสร้างทางจุลภาคโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ซึ่งแสดงผลการทดสอบดังรูปที่ 3.27



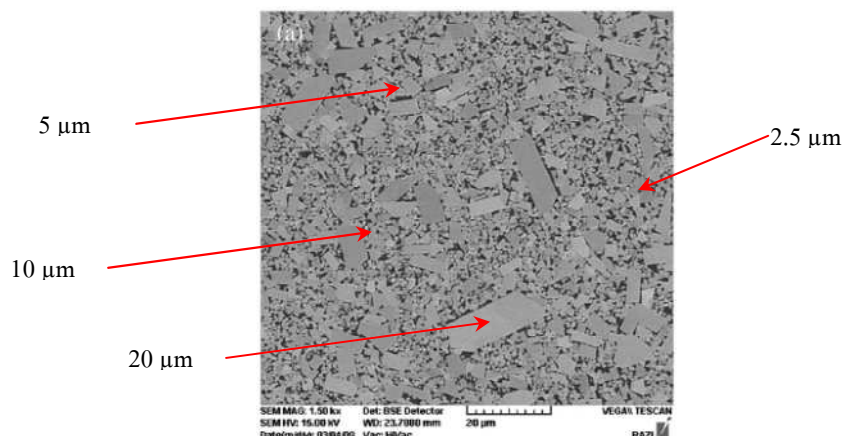
รูปที่ 3.27 SEM Sintering Of Nano-Sized WC-Co Powders Produced by a Gas Reduction-Carburization Process [35]

จากรูปที่ 3.27 แสดงการทดสอบ โครงสร้างจุลภาคชิ้นงานซีเมนต์คาร์ไบด์จากงานวิจัยเรื่อง Sintering Of Nano-Sized WC-Co Powders Produced by a Gas Reduction-Carburization Process ด้วยเทคนิคแสดกนนิ่งไมโครสโคป ลักษณะอนุภาคของผงโลหะมีลักษณะการเข้ากันของผงโลหะทั้งสแตนคาร์ไบด์กับ โคบอลต์มีการเรียงตัวกัน และการเกิดโพรงอากาศขึ้นปะปนอยู่ทำให้เกิดช่องว่างขึ้นในเนื้อของชิ้นงานซีเมนต์คาร์ไบด์



รูปที่ 3.28 Optical micrographs of the WC-10Co alloys with various grain growth inhibitors Sintered at 1,350, 1,450 and 1,550 °C [39]

จากรูปที่ 2.28 แสดงผลการตรวจสอบ SEM ชิ้นงานซีเมนต์ทั้งสแตนคาร์ไบด์ ส่วนผสมโคบอลต์ 10% อบพนักที่อุณหภูมิ 1,350, 1,450, และ 1,550 °C



รูปที่ 2.29 SEM images of investigated cemented carbides, (a) WC–10Co [49]

จากรูปที่ 2.29 แสดงผลการตรวจสอบ SEM โลหะผงทั้งสแตนคาร์ไบด์ผสมโคบอลต์ 10% ที่ผ่านการอบพ่นิก จากการวิเคราะห์ปรากฏว่า เกรนใหญ่สุดขนาด 20 μ m เล็กสุดประมาณ 2.5 μ m เกรนคาร์ไบด์ส่วนใหญ่ขนาดระหว่าง 5-10 μ m

3.5 ศึกษาการทดสอบการใช้งานของชิ้นงานซีเมนต์คาร์ไบด์

3.5.1 การศึกษาการกลึง

ตารางที่ 3.7 แสดงปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับรายละเอียดในการกลึง [1], [2], [3]

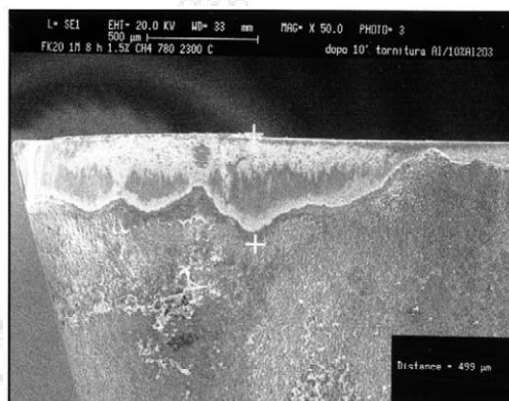
ประเภทเครื่องกลึง	ความเร็วตัด เมตร/นาที	อัตราป้อน มิลลิเมตร/รอบ	ระยะป้อนลึก มิลลิเมตร	ระยะ การกลึง มิลลิเมตร	วัสดุในการทดสอบ
CNC รุ่น MORI SEIKI SL3 FANUC 10 T	400	0.6	3	200	เหล็กหล่อ FCD 400
CNC รุ่น EMCO TRONIC ET 242	120	0.10	0.4	220	เหล็กกล้าสแตนเลส AISI 316
CNC รุ่น MAZAK	75	0.22	1.5	200	เหล็กกล้าคาร์บอน ปานกลาง 0.45%

จากตารางที่ 3.7 แสดงปัจจัยที่เกี่ยวข้องในการทดสอบประสิทธิภาพการกลึง จากการวิเคราะห์ปรากฏว่า การกลึงทดสอบใช้ความเร็วตัดอยู่ระหว่าง 75-400 เมตร/นาที อัตราป้อนระหว่าง 1.5-3 มิลลิเมตร/รอบ ระยะการกลึงอยู่ระหว่าง 200-220 มิลลิเมตร

3.5.2 ศึกษาการสึกหรอ

การนำข้อมูลเกี่ยวกับภาพถ่ายที่ทำการบันทึกจากงานวิจัยมาวิเคราะห์ในการกำหนดลักษณะการบันทึกภาพที่ชัดเจนและเข้าใจมากที่สุด เพื่อให้เห็นบริเวณมุมคมตัดที่เกิดการสึกหรอ

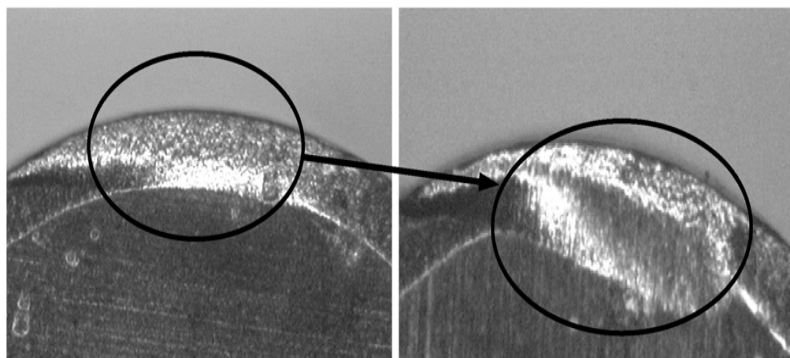
จากงานวิจัย Dry Turning of Alumina/Aluminum Composites with CVD Diamond Coated Co-Cemented Tungsten Carbide Tools



รูปที่ 3.30 แสดงลักษณะการสึกหรอของเครื่องมือตัด จากงานวิจัย Dry Turning of Alumina/Aluminum Composites with CVD Diamond Coated Co-Cemented Tungsten Carbide tools [64]

จากรูปที่ 3.30 แสดงการสึกหรอของชิ้นงานแผ่นมิลคิ่งซีเมนต์ทั้งสแตนคาร์ไบด์จากการใช้งานด้วยเทคนิคสแกนนิ่งอิเล็กตรอนไมโครสโคป การสึกหรอที่เกิดกับชิ้นงานเนื่องจากความร้อน จึงนำไปใช้เป็นปัจจัยในการวิเคราะห์ผลการทดสอบในการทดลอง

จากงานวิจัย Influence of Tool Wear on Surface Roughness in Hard Turning Using Differently Shaped Ceramic Tools แสดงวิธีการเกี่ยวกับการทดสอบการสึกหรอ โดยใช้เป็นแนวทางในการกำหนดการทดลอง



รูปที่ 3.31 แสดงภาพการสึกหรอของเครื่องมือตัดจากงานวิจัย Influence of Tool Wear on Surface Roughness in Hard Turning Using Differently Shaped Ceramic tools [49]

จากรูปที่ 3.31 แสดงลักษณะชิ้นงานแผ่นมีดกลึงซีเมนต์ทั้งสแตนคาร์ไบด์ก่อนการทดสอบการใช้งานและหลังจากการทดสอบการใช้งานว่าเกิดการสึกหรอเกิดขึ้นบริเวณมุมคายเศษของคมตัดของชิ้นงานแผ่นมีดกลึงซีเมนต์ทั้งสแตนคาร์ไบด์ มาเป็นแนวทางในการกำหนดการวิเคราะห์การทดลองและสรุปผลการทดลอง

จากงานวิจัย Wear Behavior of Cutting Tool Material during the Turning of a Cast Iron FCD 400 in Cutting Lubricants Conditions ซึ่งสามารถวิเคราะห์ข้อมูลวิธีการเกี่ยวกับการทดสอบการสึกหรอมาเป็นแนวทางสำหรับการทดลอง

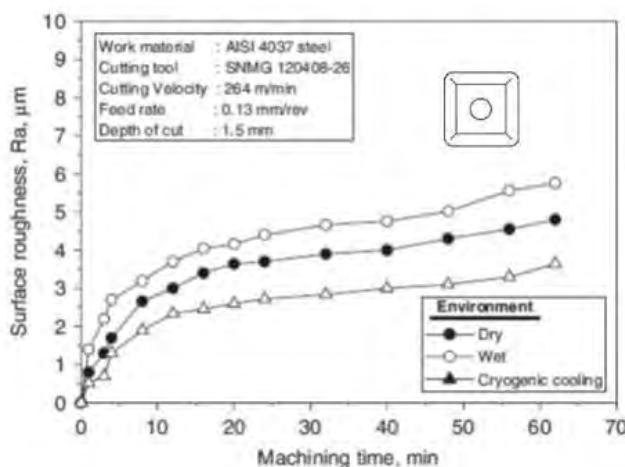


รูปที่ 3.32 แสดงภาพการสึกหรอของเครื่องมือตัดจากการศึกษา งานวิจัย Wear Behavior of Cutting Tool Material during the Turning of a Cast Iron FCD 400 in Cutting Lubricants Condition [60]

จากรูปที่ 3.32 แสดงลักษณะชิ้นงานแผ่นมีดกลึงซีเมนต์ทั้งสแตนคาร์ไบด์หลังจากการการ
ใช้งานว่าเกิดการสึกหรอเกิดขึ้นบริเวณคมตัดของชิ้นงานแผ่นมีดกลึงซีเมนต์ทั้งสแตนคาร์ไบด์

3.5.3 ตรวจสอบความเรียบผิว [65]

การตรวจสอบความเรียบผิวของงานวิจัยอ้างอิง [65] เกี่ยวกับการทดสอบการกลึงเพื่อ
เปรียบเทียบความต้านทานการสึกหรอและ วัสดุประสิทธิภาพของแผ่นมีดกลึงโดยไม่ใช้ระบบหล่อ
เย็น



รูปที่ 3.33 แสดงค่าความเรียบต่อเวลาที่ใช้ในการกลึง 3 ลักษณะ [65]

จากงานวิจัยเรื่องการกลึงด้วยแผ่นมีด SNMG120408 ที่แตกต่างของสถานะของเหล็ก
AISI-4037 ภายใต้สภาวะ dry, wet, และ cryogenic condition แสดงถึงค่าความเรียบที่แตกต่างกัน
จากการวิเคราะห์ปรากฏว่า การกลึงภายใต้สภาวะ dry ใช้เวลาประมาณ 63 นาที ค่าความเรียบผิวอยู่
ระหว่าง 0.9-4.9 μm การกลึงภายใต้สภาวะ wet ใช้เวลาประมาณ 63 นาที ค่าความเรียบผิวอยู่ระหว่าง
1.5-5.9 μm และการกลึงภายใต้สภาวะ cryogenic condition ใช้เวลาประมาณ 63 นาที ค่าความเรียบ
ผิวอยู่ระหว่าง 0.5-3.5 μm

3.6 วิเคราะห์ข้อมูล

จากการศึกษาข้อมูลทางทฤษฎีในการผลิตชิ้นส่วนโลหะความแข็งสูง(Hard metals)
วิเคราะห์แล้วสามารถอธิบายได้ว่า ขั้นตอนการผลิตชิ้นงานประเภทนี้ประกอบด้วย เตรียมวัสดุผง
สำหรับผสมโลหะประสาน นิยมใช้วิธีการบดละเอียดจากรายงานวิจัยอัตราส่วนของวัสดุผงต่อลูก
บดที่นิยมใช้คือ 10:1 สารละลายที่ใช้เป็นตัวกลางในการทดลองใช้ จากนั้นกำหนดเงื่อนไขในการ

บดซึ่งจากการวิเคราะห์ข้อมูลปรากฏว่าเวลาที่ใช้ในการบดโลหะผงทั้งสแตนคาร์ไบด์อยู่ระหว่าง 4 ชั่วโมงถึง 50 ชั่วโมง เลือกใช้ความเร็วรอบในการบดอยู่ระหว่าง 150 ถึง 700 รอบต่อนาที โดยที่นิยมใช้คือ 300 รอบต่อนาที หลังการบดโลหะผงทั้งสแตนคาร์ไบด์ใช้วิธีการอบแห้งด้วยเตาระบบสูญญากาศ แล้ววิเคราะห์สมบัติและคุณลักษณะของโลหะผงทั้งสแตนคาร์ไบด์ เช่น การตรวจสอบรูปร่าง โครงสร้างผลึก ความบริสุทธิ์ ขนาดและการกระจายตัวของอนุภาคโลหะผงที่ได้ จากนั้นผสมโลหะประสานโคบอลต์ ซึ่งจากการศึกษาพบว่าอัตราส่วนในการผสมโคบอลต์นั้นอยู่ระหว่าง 3-30% สำหรับงานวิจัยนี้กำหนดส่วนผสมโคบอลต์ในช่วง 3-17 %Co หลังจากการผสมแล้วนำโลหะผงทั้งสแตนคาร์ไบด์ที่ได้อัดขึ้นรูปด้วยวิธีการกดอัดที่กำลังอัดประมาณระหว่าง 300-400 Mpa แล้วอบพ่นที่อุณหภูมิระหว่าง 1,350-1,550 °C โดยใช้เวลาระหว่าง 1-2 h ขั้นตอนสุดท้ายคือการวิเคราะห์สมบัติชิ้นงานซีเมนต์คาร์ไบด์ที่ผลิตขึ้นใหม่ เช่น สมบัติด้านความแข็ง โครงสร้างลักษณะรอยกด ความเรียบผิวชิ้นงานทดสอบ ลักษณะการสึกหรอ เป็นต้น จากข้อมูลข้างต้นนี้สามารถออกแบบการทดลองได้ตามหัวข้อ 3.7

3.7 ออกแบบวิธีการทดลอง

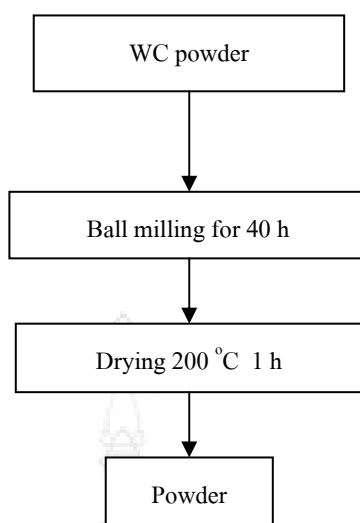
จากข้อมูลการศึกษาการผลิตชิ้นส่วนโลหะแข็งสูงจากวัสดุผงทั้งสแตนคาร์ไบด์ที่ผ่านการรีไซเคิลจากเศษแผ่นมิดคัต ซึ่งผงที่นำมาทำการบดแล้วขึ้นรูปเป็นแผ่นมิดคัตสำหรับงานตัดปาดผิวจากการศึกษารายงานวิจัยสามารถออกแบบวิธีการทดลองได้ดังนี้

3.7.1 การบดผงโลหะ

ตารางที่ 3.8 แสดงเงื่อนไขในการบดผงโลหะ

เวลาในการบด (h)	รอบในการบด(RPM)	ขนาดลูกบด (mm.)	อัตราส่วนระหว่างผงโลหะกับลูกบด	สารช่วยบด	ขนาดผงโลหะที่ได้หลังการบด (μm)
40 h	400	5, 6	1:10	Ethanol	1-20

จากตารางที่ 3.8 แสดงเงื่อนไขในการบดผงโลหะ ประกอบด้วย เวลาในการบดใช้ 40 ชั่วโมง รอบในการบดใช้ 400 รอบต่อนาที ขนาดลูกบดใช้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 และ 6 มิลลิเมตร ใช้อัตราส่วน 1:10 สารช่วยบดใช้เอทานอล



รูปที่ 3.34 แสดงขั้นตอนการบดผงโลหะทังสเตนคาร์ไบด์

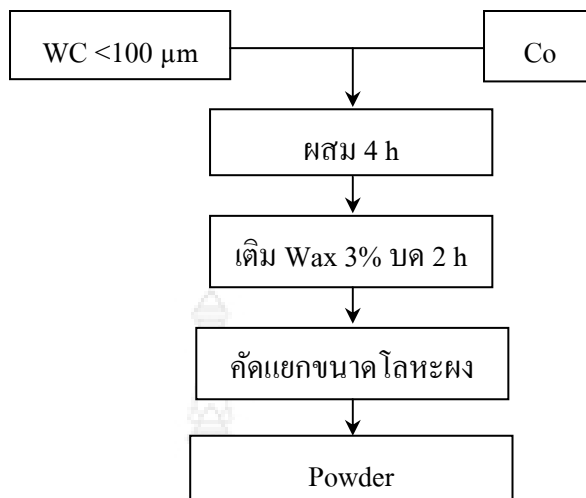
จากรูปที่ 3.34 แสดงขั้นตอนดำเนินการบดผงโลหะสามารถอธิบายได้ดังนี้ เตรียมวัสดุผงทังสเตนคาร์ไบด์ (WC) ลูกบด สารช่วยบดเอทานอล (Ethanol) เตรียมส่วนผสมลงในหม้อบด ตั้งเวลาบด 40 ชั่วโมง หลังบดเสร็จทำการอบด้วยเตาสู่ญญากาศ เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

3.7.2 การผสมโลหะसान

ตารางที่ 3.9 แสดงเงื่อนไขการผสมผงโลหะ

สถานะการบด	วัสดุที่ผสม	WC (%)	Co (%)	% วัสดุที่ผสม	เวลา (ชม.)
DRYING	Paraffin Wax	85	5,10,15	3	6

จากตารางที่ 3.9 แสดงเงื่อนไขการผสมผงโลหะประกอบด้วย วัสดุที่ผสมไข (Paraffin Wax) อัตราส่วนผสมของ (Paraffin Wax) 3 เปอร์เซ็นต์ ส่วนผสมของตัวเชื่อมประสานไข 5, 10, และ 15 เปอร์เซ็นต์ อุณหภูมิในการอบแห้งใช้ 50 องศาเซลเซียส เวลาในการอบแห้งใช้ 2 ชั่วโมง เตรียมสำหรับการนำไปผสมโลหะประสาน



รูปที่ 3.35 แผนผังแสดงขั้นตอนการผสมผงโลหะทั้งสแตนคาร์ไบด์

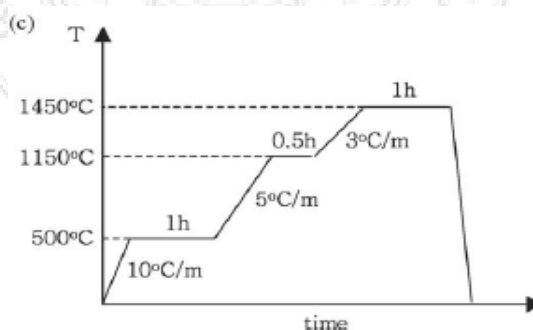
จากรูปที่ 3.35 แสดงขั้นตอนการผสมผงโลหะซึ่งเริ่มจาก เตรียมผงทั้งสแตนคาร์ไบด์ (WC) ขนาดเล็กกว่า $100 \mu\text{m}$ เตรียมตัวเชื่อมประสานโคบอลต์ (Co) บด 4 ชั่วโมง ผสม Paraffin Wax 2 ชั่วโมง คัดขนาดโลหะผง เตรียมสำหรับนำไปขึ้นรูป

3.7.3 การอัดขึ้นรูป

- 1) เครื่องอัดขึ้นรูประบบไฮดรอลิกใช้แรงกด 350 (MPa)
- 2) ทดสอบความหนาแน่นหลังการอัดขึ้นรูป (Green Compact)

3.7.4 การอบพูน

ทำการอบพูนตามเงื่อนไขที่กำหนดซึ่ง จากงานวิจัย [35] สามารถแสดงขั้นตอนการอบพูนได้ดังนี้



รูปที่ 3.36 Sintering schedules for WC-10Co powders compacted: (c) 500 - 1,150 -1,450 °C [35]

3.7.5 ตรวจสอบลักษณะของผงโลหะด้วยเทคนิคต่างๆ

3.7.5.1 ตรวจสอบการกระจายตัวของผงโลหะ (Particle size) ด้วยเครื่องตรวจสอบการกระจายตัวของผงโลหะ

3.7.5.2 ตรวจสอบโครงสร้างผลึก (XRD) ของผงโลหะด้วยเครื่องตรวจสอบ โดยใช้เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffractometer) ตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมีด้วยเทคนิค X-ray fluorescence (XRF)

3.7.5.3 ตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคโลหะผงด้วยเทคนิค (SEM)

3.7.6 การตรวจสอบขนาดของแผ่นมีดตัดซีเมนต์ทั้งสแตนคาร์ไบด์

ทำการตรวจสอบขนาดของแผ่นมีดตัดซีเมนต์ทั้งสแตนคาร์ไบด์ด้วยเครื่องตรวจสอบ (Profile Projector รุ่น SJ 400)

3.7.7 การตรวจสอบความหนาแน่น

ตรวจสอบความหนาแน่นของแผ่นมีดตัดซีเมนต์ทั้งสแตนคาร์ไบด์หลังการอบผนึก (Green Density) ด้วยเครื่องทดสอบความหนาแน่น

3.7.8 การกลึง

การทดสอบการกลึงด้วยเครื่องกลึง (CNC) ยี่ห้อ (OKUMA)
ตารางที่ 3.10 เงื่อนไขการทดสอบกลึง

Cutting Speed (m/min)	Feed Rate (mm./รอบ)	Dept of Cut (mm.)	Revolution (รอบ/min)
50	0.05	1.5	466.34

จากตารางที่ 3.10 แสดงเงื่อนไขการทดสอบกลึงประกอบด้วย ความเร็วตัด (Cutting Speed) ใช้ 100 เมตร/นาที (m/min) อัตราป้อน (Feed Rate) ใช้ 0.05 มิลลิเมตร/รอบ (mm./รอบ) ระยะกินลึก (Dept of Cut) ใช้ 1.5 มิลลิเมตร ความเร็วรอบ (Revolution) ใช้ 466.34 รอบ/นาที

3.7.9 การทดสอบการสึกหรอ

3.7.9.1 ชั่งน้ำหนักของแผ่นมีดตัดก่อนกลึงและหลังกลึงด้วยเครื่องชั่งน้ำหนักความละเอียด 0.0001 กรัม

3.7.9.2 ภาพถ่ายบริเวณคมตัดที่ทำการสึกหรอ 1 คมตัด และวัดระยะสึกหรอ บริเวณคมตัดที่ทำการทดสอบ ด้วยกล้องถ่ายรูปยี่ห้อ (Nikon รุ่น ZNZ800 กำลังขยาย 10-63 เท่า)

3.7.9.3 ทดสอบความเรียบผิวของวัสดุทดสอบด้วย เครื่องทดสอบความเรียบผิว (Surface Roughness) โดยใช้ค่า (Ra) ในการเปรียบเทียบความเรียบผิวของวัสดุชิ้นงาน

3.7.9.4 ตรวจสอบขนาดของวัสดุทดสอบด้วย เวเนียร์คาลิปเปอร์ ความละเอียด 0.02 มิลลิเมตร

3.7.10 การตรวจสอบโครงสร้างของแผ่นมิดตัดซีเมนต์ทั้งสแตนคาร์ไบด์

ถ่ายภาพบริเวณโครงสร้างที่แสดงให้เห็นการเกาะตัวของผงโลหะ ที่กำลังขยาย 7,500 เท่า ด้วยเครื่อง (Emission Spectrometer)

3.7.11 การทดสอบความแข็ง

3.7.11.1 ใช้การทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์ (Vickers hardness test) ใช้โหลดในการกด 20 kg และกดเป็นจำนวน 3 รอยกด ค่าความแข็ง

3.7.11.2 ถ่ายภาพลักษณะรอยกดชิ้นงานแผ่นมิดตัด

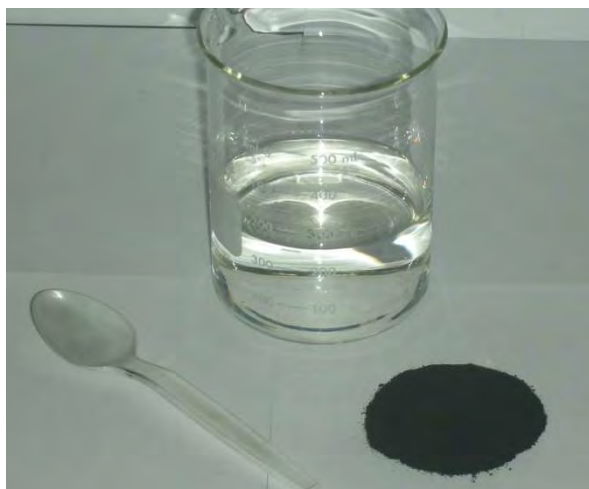
3.8 การดำเนินการทดลอง

การดำเนินการทดลองผลิตชิ้นส่วนแผ่นมิดตัดซีเมนต์คาร์ไบด์ สามารถสรุปขั้นตอนการปฏิบัติได้ ดังนี้



รูปที่ 3.37 แสดงโลหะผงทั้งสแตนคาร์ไบด์ที่ผ่านการรีไซเคิล

จากรูปที่ 3.37 แสดงลักษณะโลหะผงทั้งสแตนคาร์ไบด์ที่ผ่านการย่อยสลาย สำหรับการนำไปผลิตเป็นชิ้นงานโลหะความแข็งสูง



รูปที่ 3.38 การเตรียมเครื่องมือและอุปกรณ์สำหรับทำความสะอาดโลหะผง

รูปที่ 3.38 การเตรียมอุปกรณ์สำหรับล้างโลหะผงประกอบด้วย โลหะผงที่ผ่านการผลิตขึ้นใหม่ เอทานอล และช้อนสำหรับกวนสารละลาย



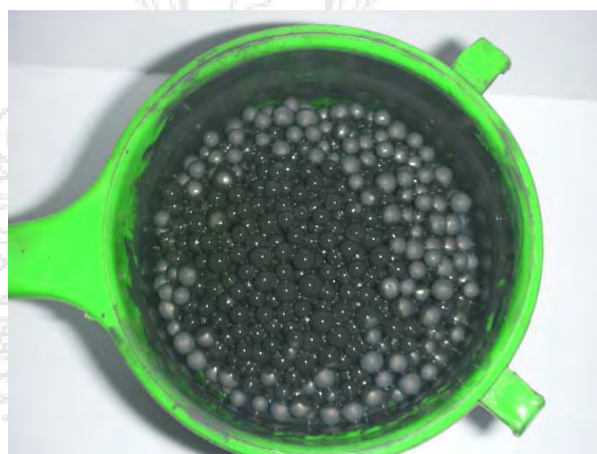
รูปที่ 3.39 แสดงการล้างเพื่อทำความสะอาดโลหะผงรีไซเคิลด้วยเอทานอล

จากรูปที่ 2.39 แสดงการล้างโลหะผงทั้งสแตนคาร์ไบด์ในสารละลายเอทานอลบริสุทธิ์



รูปที่ 3.40 การติดตั้งชุดหม้อบด

จากรูปที่ 3.40 แสดงการประกอบชุดหม้อบดกับเครื่องบด พร้อมปิดล็อกด้วยอุปกรณ์ขัน
แน่น



รูปที่ 3.41 แสดงการคัดกรองลูกบดผ่านตะแกรงสเตนเลส

จากรูปที่ 3.41 แสดงการคัดแยกโลหะผงจากการบดโดยเทผ่านตะแกรง แล้วให้ทำการล้าง
ด้วยเอทานอลที่เตรียมไว้



รูปที่ 3.42 แสดงการล้างเพื่อทำความสะอาดโลหะผงก่อนพักให้ตกตะกอน

จากรูปที่ 3.42 แสดงการล้างโลหะผงทั้งสแตนคาร์ไบด์ที่ผ่านการบดด้วยเอทานอล



รูปที่ 3.43 แสดงการตกตะกอนของโลหะผงทั้งสแตนคาร์ไบด์ที่ผ่านกระบวนการคัดกรอง

จากรูปที่ 3.43 แสดงลักษณะของชั้นตะกอนที่ผ่านกระบวนการล้างหลังจากทำการบดเป็นเวลา 40 ชั่วโมง



รูปที่ 3.44 แสดงโลหะผงทั้งสแตนคาร์ไบด์ที่ผ่านการตกตะกอนสำหรับการอบแห้ง

จากรูปที่ 3.44 แสดงลักษณะตะกอนโคลนที่ได้จากการล้างหลังบด เตรียมใส่ถ้วยเซรามิกส์ สำหรับอบด้วยเตาสู่ญญากาศ



รูปที่ 3.45 การเตรียมตะกอนโลหะผงสำหรับอบแห้งด้วยเตาสู่ญญากาศ

จากรูปที่ 3.45 แสดงลักษณะการเตรียมโลหะผงสำหรับการอบแห้งด้วยเตาสู่ญญากาศ



รูปที่ 3.46 แสดงลักษณะโลหะผงทั้งสแตนคาร์ไบด์ที่ผ่านการอบด้วยเตาสู่ญญากาศ

จากรูปที่ 3.46 แสดงลักษณะโลหะผงทั้งสแตนคาร์ไบด์ที่ผ่านการอบด้วยเตาอบสุญญากาศ



รูปที่ 3.47 การเตรียมโลหะผงที่ผ่านการอบแห้งเพื่อทำการบดละเอียด

จากรูปที่ 3.47 แสดงการเตรียมโลหะผงทั้งสแตนคาร์ไบด์ลงในหม้อสำหรับบดให้โลหะผงมีขนาดเล็กกลง



รูปที่ 3.48 แสดงการคั่วขนาดโลหะผงผ่านตะแกรงคั่วขนาด

จากรูปที่ 3.48 แสดงการคั่วขนาดโลหะผงทั้งสแตนคาร์ไบด์ด้วยตะแกรงสเตนเลสเพื่อนำไปทำการผสมโลหะประสานต่อไป



รูปที่ 3.49 การเตรียมเครื่องมือและอุปกรณ์สำหรับการผสมโลหะประสานโคบอลต์

จากรูปที่ 3.49 แสดงการเตรียมอุปกรณ์สำหรับการผสมโลหะประสานซึ่งประกอบด้วย หม้ออบ ลูกบด ผงทั้งสแตนรีไซเคิล โคบอลต์ และพาราฟินแว็กซ์



รูปที่ 3.50 แสดงการเตรียมส่วนผสมสำหรับการผสมทั้งสแตนคาร์ไบด์กับโคบอลต์

จากรูปที่ 3.50 แสดงการเตรียมส่วนผสมสำหรับการผสมโลหะประสานลงในหม้อบด แล้วนำเข้าเครื่องบด



รูปที่ 3.51 แสดงการเตรียมชุดหม้อบดสำหรับการผสมทั้งสแตนคาร์ไบด์และโคบอลต์

จากรูปที่ 3.51 แสดงการติดตั้งหม้อบดที่บรรจุโลหะผงทั้งสแตนคาร์ไบด์และผสมโลหะประสานเพื่อทำการบดผสมด้วยเครื่องแบบบอลมิลล์



รูปที่ 3.52 แสดงโลหะผงทั้งสแตนคาร์ไบด์ที่ผ่านการผสมโลหะประสานโคบอลต์

จากรูปที่ 3.52 แสดงโลหะผงทั้งสแตนคาร์ไบด์ที่เกิดที่ผ่านการผสมโลหะประสานด้วยเครื่องบดแบบบอลมิลล์



รูปที่ 3.53 การคัดแยกโลหะผงทั้งสแตนคาร์ไบด์หลังการผสมผ่านตะแกรงคัดขนาด

รูปที่ 3.53 แสดงการคัดแยกโลหะผงทั้งสแตนคาร์ไบด์ที่เกิดที่ผ่านการผสมโดยเทผ่านตะแกรงคัดขนาดเพื่อแยกโลหะผงออกจากลูกบด



รูปที่ 3.54 โลหะผงทั้งสแตนคาร์ไบด์รีไซเคิลที่ผ่านกระบวนการผสมโลหะประสานโคบอลต์



รูปที่ 3.55 การชั่งตวงโลหะผงทั้งสแตนคาร์ไบด์สำหรับอัดขึ้นรูป

จากรูปที่ 3.55 แสดงการชั่งตวงโลหะผงทั้งสแตนคาร์ไบด์สำหรับการอัดขึ้นรูปชิ้นงานแผ่น
มีดตัดซีเมนต์คาร์ไบด์



รูปที่ 3.56 เครื่องอัดขึ้นรูปแผ่นมีดตัดซีเมนต์คาร์ไบด์



รูปที่ 3.57 การเตรียมโลหะผงลงในแม่พิมพ์สำหรับอัดขึ้นรูป

จากรูปที่ 3.57 แสดงการเกลี่ยโลหะผงทั้งสแตนคาร์ไบด์ลงในแม่พิมพ์สำหรับอัดขึ้นรูปแผ่นมีดตัด



รูปที่ 3.58 แสดงแผ่นมีดตัดซีเมนต์คาร์ไบด์ที่ผ่านการอัดขึ้นรูป

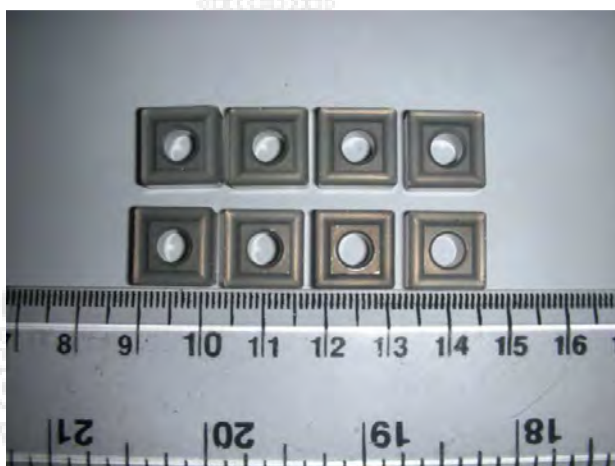
จากรูปที่ 3.58 แสดงชิ้นงานแผ่นมีดตัด (มาตรฐาน SNMG-120408) รีไซเคิลที่ผ่านการอัดขึ้นรูป



รูปที่ 3.59 แสดงแผ่นมีดตัดที่ผลิตด้วยผงทังสเตนคาร์ไบด์ที่ผ่านการรีไซเคิลหลังการอัดขึ้นรูป



รูปที่ 3.60 เตาอบสุญญากาศ รุ่น CSG-200



รูปที่ 3.61 แสดงแผ่นมีดซีเมนต์คาร์ไบด์ที่ผ่านการอบพ่นึก

จากรูปที่ 3.61 แสดงชิ้นงานแผ่นมีดซีเมนต์คาร์ไบด์ที่ผลิตด้วยผงทั้งสแตนคาร์ไบด์รีไซเคิล ที่ผ่านการอบพ่นึกด้วยเอาอบสุญญากาศ

3.8.1 ดำเนินการทดสอบประสิทธิภาพ

การดำเนินการทดสอบประสิทธิภาพประกอบด้วย การตรวจสอบสมบัติโลหะผงทั้งสแตนคาร์ไบด์ ได้แก่ การวิเคราะห์โครงสร้างด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกนนิ่ง (SEM) การวิเคราะห์ขนาดและการกระจายของโลหะผง (Particle size distribution) การวิเคราะห์ชนิดและ

ปริมาณของธาตุในสารตัวอย่าง (XRD, XRF) การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคชิ้นงานคาร์ไบด์ การวิเคราะห์ความแข็ง ลักษณะรอบคด การวัดความเรียบผิวชิ้นงานกลึง เป็นต้น

3.8.1.1 วิเคราะห์ผงโลหะ

1) การวิเคราะห์การกระจายตัวของผงโลหะ (Particle size)

การตรวจสอบการกระจายตัวของผงโลหะทั้งสแตนคาร์ไบด์ (Particle size) ใช้เครื่อง (Malvern instrument Mastersizer 2000)



รูปที่ 3.62 เครื่องวิเคราะห์การกระจายตัวของผงโลหะ Particle size ด้วยเครื่อง (Malvern instrument Mastersizer 2000)

2) การวิเคราะห์วิเคราะห์ชนิดและปริมาณของธาตุ (X-ray Diffractometer, XRD;

X-Ray Fluorescence Spectrometry , XRF)

การวิเคราะห์โครงสร้าง (X-ray Diffractometer) ซึ่งจะตรวจธาตุต่างๆที่มีอยู่ในผงโลหะที่จะทำการตรวจสอบ



รูปที่ 3.63 เครื่องวิเคราะห์โครงสร้าง (X-ray Diffractometer)

3) การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค (Scanning Electron Microscope, SEM)

การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของผงคาร์ไบด์ (Scanning Electron Microscope) โดยจะตรวจสอบคุณลักษณะการยึดเกาะของเกรนที่เกิดขึ้นในผงโลหะทั้งสแตนคาร์ไบด์

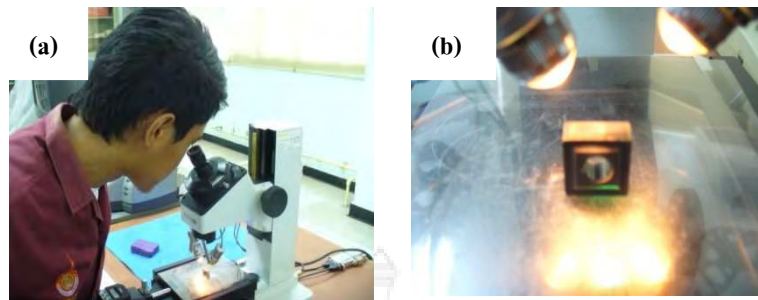


รูปที่ 3.64 เครื่อง Scanning Electron Microscopy, SEM

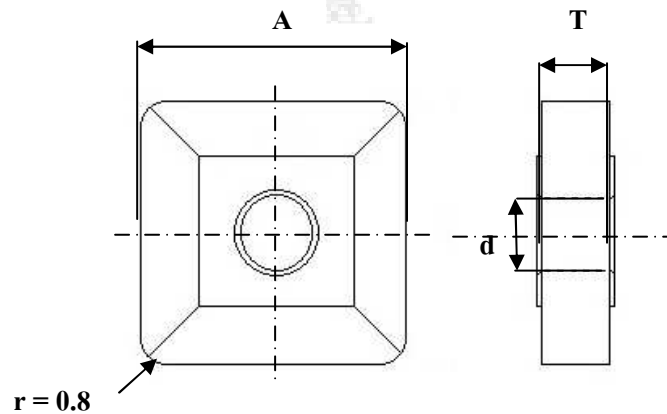
3.8.1.2 ตรวจสอบขนาดของแผ่นมีดตัดซีเมนทั้งสแตนคาร์ไบด์



รูปที่ 3.65 ตรวจสอบขนาดแผ่นด้วยเครื่อง (Profile Projector) ความละเอียด 0.001mm



รูปที่ 3.66 ตรวจสอบขนาดของชิ้นงานซีเมนต์ทั้งสแตนคาร์ไบด์ (a) ดำเนินการตรวจสอบขนาดแผ่นมิดตัด (b) ตำแหน่งการวางแผ่นมิดตัดเพื่อทำการตรวจสอบขนาด



รูปที่ 3.67 แบบแผ่นมิดตัดซีเมนต์ทั้งสแตนคาร์ไบด์และแสดงตำแหน่งที่ทำการตรวจสอบขนาด

จากรูปที่ 3.67 แสดงแบบจำลองของแผ่นมิดตัดรีไซเคิล โดยกำหนดตำแหน่งที่ทำการตรวจสอบขนาด ประกอบด้วย ด้าน (A) ด้าน (r) ด้าน (T) และด้าน (d)

3.8.1.3 การทดสอบการกลึงของแผ่นมิดตัดซีเมนต์ทั้งสแตนคาร์ไบด์กับวัสดุทดสอบ

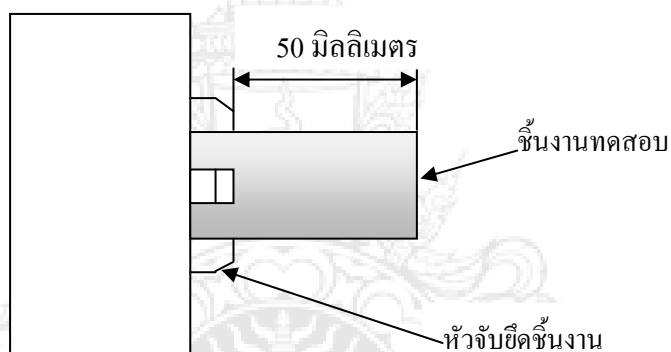
การทดสอบกลึงเพื่อทดสอบประสิทธิภาพของแผ่นมิดตัดซีเมนต์ทั้งสแตนคาร์ไบด์ที่ผลิตขึ้น โดยจะทำการทดสอบกับวัสดุเหล็กเพลากลม (S45C) ขนาด $\varnothing 40 \times 200$ มิลลิเมตร ซึ่งในการประสิทธิภาพนั้นได้กำหนดเงื่อนไขการทดสอบไว้ดังนี้

ความเร็วตัด (Cutting Speed)	50	เมตร/นาที
อัตราป้อน (Feed Rate)	0.05	มิลลิเมตร/รอบ
ระยะป้อนลึก (Depth of cut)	1.0	มิลลิเมตร
ความเร็วรอบ (Revolution)	465.34	รอบ/นาที

ระยะทางการกลึงอยู่ในช่วงประมาณ 450 มิลลิเมตรต่อ 1 แผ่นมีดตัด หรือคมตัดสีการทดสอบกลึง จะไม่ใช้น้ำหล่อเย็น

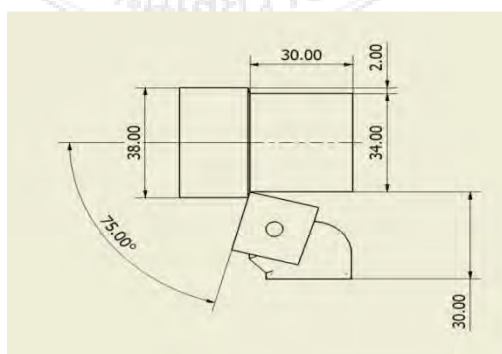


รูปที่ 3.68 เครื่องกลึงอัตโนมัติสำหรับทดสอบแผ่นมีดตัดซีเมนต์ทั้งสแตนคาร์ไบด์



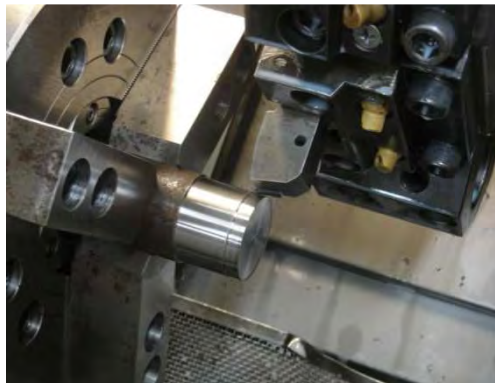
รูปที่ 3.69 แบบจำลองการจับยึดวัสดุทดสอบก่อนทำการทดสอบกลึง

วิธีการจับยึดชิ้นงานจะจับยึดชิ้นงานมีระยะห่างออกจากปากจับชิ้นงาน 50 มิลลิเมตรทุกๆ รอบการกลึง



รูปที่ 3.70 แบบจำลองแสดงค่าตามตำแหน่งบริเวณที่เกี่ยวข้องกับการทดสอบกลึง

รูปที่ 3.70 แสดงแบบจำลองค่าต่างๆ ตามตำแหน่งที่เกี่ยวข้องกับการทดสอบประสิทธิภาพ แผ่นมิดตัดซีเมนต์คาร์ไบด์



รูปที่ 3.71 แสดงการกลึงวัสดุทดสอบด้วยเครื่องกลึงอัตโนมัติ (CNC)

จากรูปที่ 3.71 เป็นการกลึงโดยใช้เครื่องกลึง (CNC) ด้วยการตัดเฉือนวัสดุทดสอบ โดยทุกรอบการทดสอบจะทำเหมือนกันทุกรอบการทดสอบคือ เป็นการกลึงเพียง 1 คมตัด ก่อนการกลึงทดสอบให้ทำการกลึงปาดหน้าชิ้นงานด้วยแผ่นมิดตัดมาตรฐานให้เหลือขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 38 มิลลิเมตร แล้วทำการกลึงปาดหน้าด้วยแผ่นมิดตัดที่ต้องการทดสอบโดยมีระยะการกลึงของแต่ละชิ้น คือ 30 มิลลิเมตร รวมระยะกลึงทั้งหมดต่อแผ่นมิดตัด 1 ชิ้น มีระยะกำหนด 450 มิลลิเมตร ไม่มีการหล่อเย็นเพื่อง่ายต่อการวิเคราะห์ข้อมูลเนื่องจากไม่ต้องควบคุมเงื่อนไขตัวแปรเกี่ยวกับความร้อนโดยกำหนดระยะในการตัดเฉือน

3.8.1.4 การทดสอบการสึกหรอของแผ่นมิดตัดซีเมนต์ทั้งสแตนคาร์ไบด์จากการกลึง

1) การทดสอบการชั่งน้ำหนักแผ่นมิดตัดซีเมนต์ทั้งสแตนคาร์ไบด์

a) ตรวจสอบน้ำหนักก่อนทำการกลึง

ตรวจสอบโดยใช้เครื่องชั่งความละเอียด 0.0001 กรัม เพื่อหาน้ำหนักก่อนการกลึง โดยชั่งน้ำหนักทุกชิ้นเพื่อใช้เป็นค่าอ้างอิงกับหลังจากการกลึง น้ำหนักจะหายไปเมื่อทำการกลึงที่ระยะทางมากขึ้น วิธีการคือ ทำความสะอาดเม็ดมิดก่อนทำการชั่งด้วยแอลกอฮอล์เพื่อให้ได้ค่าที่ถูกต้องที่สุด

b) ตรวจสอบน้ำหนักหลังการกลึง

ตรวจสอบโดยใช้เครื่องชั่งความละเอียด 0.0001 กรัม เพื่อหาน้ำหนักหลังการกลึงเมื่อผ่านการกลึงตามที่กำหนดคือระยะตั้งแต่ 0 – 450 มิลลิเมตร



รูปที่ 3.72 ชั่งน้ำหนักแผ่นมิดตัดด้วยเครื่องชั่งความละเอียด 0.0001 กรัม

จากรูปที่ 3.72 ลักษณะเครื่องชั่งน้ำหนักใช้ในการชั่งที่มีความละเอียด 0.0001 กรัม ใช้สำหรับการชั่งน้ำหนักส่วนผสม หรือตรวจสอบน้ำหนักชิ้นงานซีเมนต์ทั้งสแตนคาร์ไบด์ที่ผ่านการทดสอบประสิทธิภาพ

2) ตรวจสอบการสึกหรอของแผ่นมิดตัดโดยรูปถ่ายและวัดระยะสึกหรอ

เครื่อง (Measuring Microscope) ใช้สำหรับการตรวจสอบคมตัดของแผ่นมิดตัดเพื่อวัดขนาด การสึกหรอของคมตัด และระยะการสึกหรอว่ามีขนาดเท่าไรและคุณลักษณะการสึกหรอที่เกิดขึ้นบริเวณคมตัดว่าเป็นแบบใด ซึ่งจะวิเคราะห์ผลโดยดูข้อมูลจากทฤษฎีที่เกี่ยวข้องเพื่อเปรียบเทียบความแตกต่างของแต่ละชิ้นงาน

วิธีการตรวจสอบลักษณะการสึกหรอ ลักษณะการสึกหรอตรวจสอบโดยการถ่ายภาพคมตัดแต่ละคม ที่ผ่านการตัดกลึง โดยใช้กล้องถ่ายภาพความละเอียด 10-63 เท่า ยี่ห้อ (Nikon รุ่น ZNZ800) ดังแสดงในรูปที่ 3.76 โดยการ ถ่ายบริเวณคมตัดที่มีการกลึง เพื่อวิเคราะห์การสึกหรอของแผ่นมิดตัดที่ได้ทำการกลึงมาแล้วว่ามีลักษณะอย่างไร



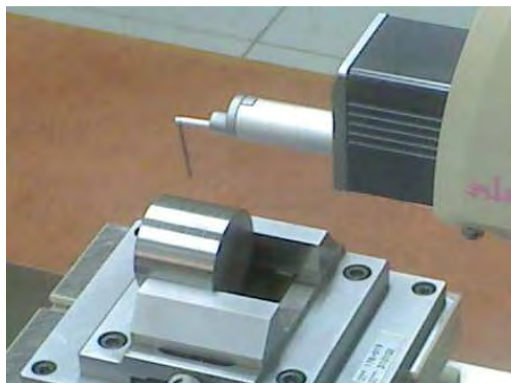
รูปที่ 3.73 ตรวจสอบการสึกหรอของแผ่นมีดตัดด้วยกล้องถ่ายภาพยี่ห้อ (Nikon) รุ่น (ZNZ800) กำลังขยาย 10-63 เท่า

3) ทดสอบความเรียบผิวของวัสดุทดสอบ

ตรวจสอบโดยใช้เครื่องทดสอบความเรียบผิว เครื่อง (Measuring Microscope) ยี่ห้อ (Nikon รุ่น SJ 400) กำลังขยาย 5X, 10X, 20X, 50X ความละเอียดในการวัดระยะ 0.001 มิลลิเมตร เพื่อหาค่าความเรียบผิว โดยเป็นเครื่องมือวัดความเรียบผิวที่ทำงานด้วยระบบไฟฟ้า ซึ่งสามารถวัดค่าความเรียบผิวเป็นตัวเลขหรือกราฟ โดยสามารถบอกค่าความเรียบเป็น (Ra, Rz, Rmax) ซึ่งค่าที่ใช้เพื่อนำไปบันทึกผลการทดลองคือค่า (Ra) ซึ่งเป็นค่าที่งานวิจัยอื่นๆ นิยมใช้เพื่อเปรียบเทียบค่าความเรียบผิว

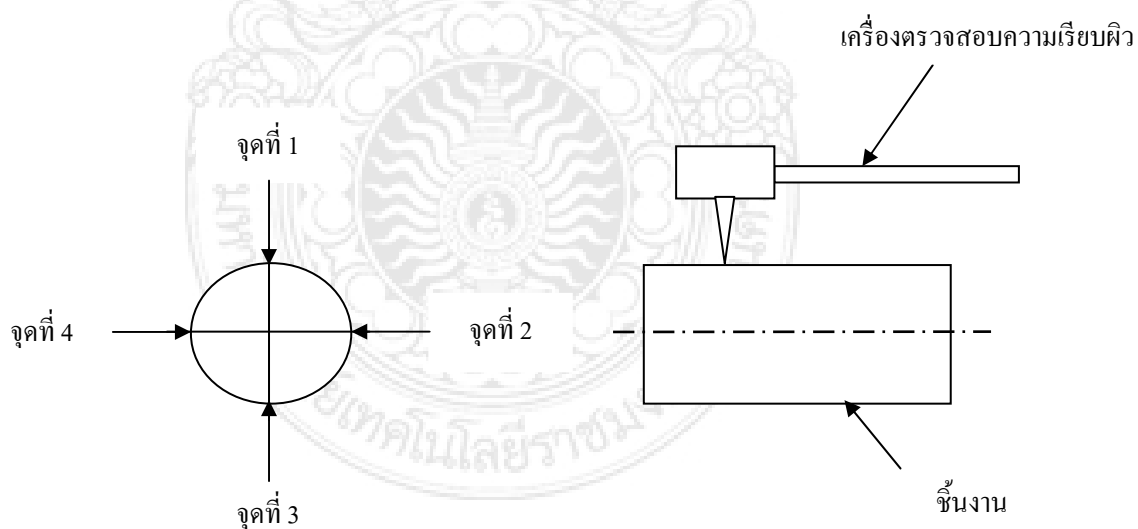


รูปที่ 3.74 ตรวจสอบความเรียบผิววัสดุทดสอบด้วยเครื่อง (Measuring Microscope SJ 400)

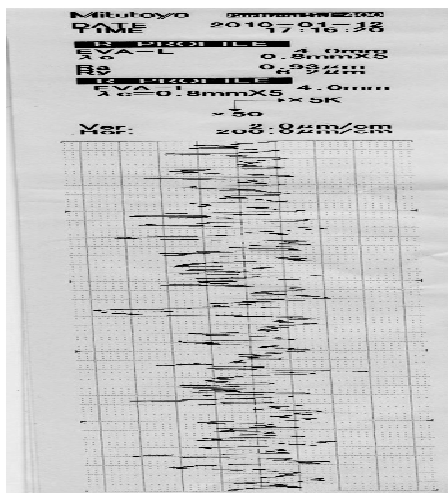


รูปที่ 3.75 ดำเนินการตรวจสอบความเรียบผิวของวัสดุทดสอบ

จากรูปที่ 3.78 แสดงลักษณะการตรวจสอบความเรียบผิวซึ่งจะทำการสุ่มเลือกวัสดุทดสอบที่ระยะการกลึง 0-30 , 60-90 , 150-180 , 240-270 , 330-360 , 420-450 mm. ของแผ่นมีดตัดแต่ละแผ่น โดยการตรวจสอบแต่ละระยะจะตรวจสอบ 4 จุด โดยแบ่งแต่ละจุดห่างกัน 90 องศา ในการตั้งค่าเครื่องจะใช้มาตรฐาน (ANSI) 1995 วิธีการคำนวณ (GAUSS) ค่า (CUT OFF) (λC) 0.8 mm. กำลังขยาย (X5 RANGE 800)



รูปที่ 3.76 แบบจำลองลักษณะการตรวจสอบความเรียบผิว



รูปที่ 3.77 แสดงตัวอย่างผลการวัดความเรียบผิวที่ได้ จากเครื่องทดสอบความเรียบผิว

4) ตรวจสอบขนาดความโตของวัสดุทดสอบ

การตรวจสอบขนาดความโตของวัสดุชิ้นงานเพื่อตรวจสอบประสิทธิภาพของแผ่นมีดตัด ตรวจสอบขนาดของวัสดุทดสอบที่ได้จากการกลึง ว่าแผ่นมีดตัดสามารถทำกลึงให้ได้ขนาดตามที่ต้องการเมื่อแผ่นมีดตัดเกิดการสึกหรอ โดยใช้เวอร์เนียคาลิเปอร์



รูปที่ 3.78 วัดขนาดวัสดุทดสอบด้วย เวอร์เนียคาลิเปอร์ดิจิทัล ความละเอียด 0.01 mm.

จากรูปที่ 3.85 ทำการวัดขนาดของวัสดุทดสอบ ซึ่งได้หลังจากผ่านการทดสอบกลึง ในการตรวจสอบนี้จะใช้เวอร์เนียคาลิเปอร์ดิจิทัล โดยทำการวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของชิ้นงาน

3.8.1.5 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของแผ่นมิดตัดซีเมนต์ทั้งสแตนคาร์ไบด์

โดยใช้เครื่อง (Emission Spectrometer) ยี่ห้อ JEOL รุ่น JSM-5410LV กำลังขยาย 1,500 – 20,000 เท่า ดังแสดงดังรูปที่ 3.86 เพื่อทำการตรวจสอบโครงสร้างของแผ่นมิดตัดแต่ละแบบ เพื่อนำมาใช้เป็นข้อมูลในการเปรียบเทียบ



รูปที่ 3.79 เครื่องตรวจสอบโครงสร้างและรอยกด

1) การเตรียมชิ้นงาน ขัดบริเวณที่จะทำการตรวจสอบโครงสร้าง เพื่อไม่ให้ค่าที่ได้ เกิดความผิดพลาดในการตรวจสอบหาค่า

2) ตรวจสอบ โครงสร้างแผ่นมิดตัดด้วยเครื่อง Emission Spectrometer

3.8.1.6 การทดสอบความแข็งของแผ่นมิดตัดซีเมนต์ทั้งสแตนคาร์ไบด์

ตรวจสอบโดยเครื่องทดสอบความแข็ง ดังแสดงในรูปที่ 3.81 เพื่อหาความแข็งของแผ่นมิดตัด เพื่อใช้ในการประกอบการพิจารณา



รูปที่ 3.80 ทดสอบความแข็งแผ่นมีดตัดด้วยเครื่องทดสอบความแข็ง (Microhardness Tester : HV)

3.9 วิธีการบันทึกผลการทดลอง

จากการดำเนินการทดลองตามขั้นตอนที่ทำการออกแบบการทดลอง ผลการทดลองที่ได้รับประกอบด้วย

3.9.1 ผลการตรวจสอบโลหะผงทั้งสแตนคาร์ไบด์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน แสดงผลการวิเคราะห์ขนาด และรูปร่างของอนุภาคโลหะผงในสารตัวอย่าง

3.9.2 ผลการตรวจสอบโลหะผงทั้งสแตนคาร์ไบด์ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ เพื่อทำการวิเคราะห์ธาตุประกอบในสารตัวอย่าง (XRD), การวิเคราะห์ชนิดและปริมาณของธาตุในสารตัวอย่าง (XRF)

3.9.3 ผลการตรวจสอบลักษณะขนาดและการกระจายตัวของโลหะผงทั้งสแตนคาร์ไบด์

3.9.4 ผลการตรวจสอบด้วยเทคนิค Transmission Electron Microscope (TEM) ผลการศึกษา โครงสร้างจุลภาค ถ่ายภาพและวิเคราะห์ผลด้วยเทคนิคทรานสมิชันอิเล็กตรอนไมโครสโคป

3.9.5 ผลการตรวจสอบขนาดของแผ่นมีดตัดซีเมนต์ทั้งสแตนคาร์ไบด์

3.9.6 ผลการตรวจสอบความหนาแน่นของแผ่นมีดตัดซีเมนต์ทั้งสแตนคาร์ไบด์

3.9.7 ผลการตรวจสอบการสึกหรอของแผ่นมีดตัดซีเมนต์ทั้งสแตนคาร์ไบด์ที่ผ่านการกลึง

3.9.7.1 ผลการเปรียบเทียบการสึกหรอของแผ่นมีดตัด โดยรูปถ่าย

3.9.7.2 ผลการตรวจสอบความเรียบผิวของชิ้นงาน

3.9.7.3 ผลการตรวจสอบขนาดของวัสดุทดสอบ

3.9.8 ผลการตรวจสอบ โครงสร้างจุลภาคของแผ่นมีดตัดซีเมนต์ทั้งสแตนคาร์ไบด์

3.9.9 ผลการตรวจสอบความแข็งของแผ่นมีดตัดซีเมนต์ทั้งสแตนคาร์ไบด์

3.9.6.1 รูปลักษณะรอยกด

3.9.6.2 ผลการตรวจสอบความแข็งของแผ่นมีดตัดซีเมนต์ทั้งสแตนคาร์ไบด์

3.10 วิธีการอภิปรายผลการทดลอง

การวิเคราะห์ผลการทดลองผลิตชิ้นส่วน โลหะความแข็งสูงด้วยการรีไซเคิลวัสดุทั้งสแตนคาร์ไบด์กลับมาใช้ใหม่ว่า มีลักษณะรูปทรงของโลหะเป็นอย่างไร การวิเคราะห์ชนิดของโลหะผงที่ผ่านกระบวนการผลิต การวิเคราะห์สมบัติโลหะผงด้านความบริสุทธิ์ การวิเคราะห์ขนาดและการกระจายของโลหะผง เพื่อเทียบกับโลหะผงทั้งสแตนคาร์ไบด์ที่เป็นมาตรฐานในอุตสาหกรรม การวิเคราะห์ ลักษณะรอยกดและรอยแตกร้าว วิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคเป็นต้น

เป็นการอธิบายผลการทดลองแต่ละผลซึ่งอ้างอิงกับการศึกษาทฤษฎีเพื่อทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่างแผ่นมีดตัดซีเมนต์ทั้งสแตนคาร์ไบด์ซึ่งผลิตด้วยผงโลหะทั้งสแตนคาร์ไบด์ที่ผลิตขึ้นใหม่และแผ่นมีดตัดที่ผลิตด้วยผงโลหะทั้งสแตนคาร์ไบด์มาตรฐานซึ่งเป็นผงนำเข้าจากต่างประเทศ การศึกษาสมบัติของชิ้นส่วนมาตรฐานต่อความสามารถในการใช้งาน เพื่อเปรียบเทียบสมบัติทางกลและการใช้งานของชิ้นส่วนโลหะความแข็งสูงชนิดแผ่นมีดตัดสำหรับงานตัดปาดผิวซึ่งประกอบด้วย

3.10.1 ผลการวิเคราะห์โลหะผงทั้งสแตนคาร์ไบด์ประกอบด้วย

3.10.1.1 การวิเคราะห์การกระจายตัวของผงโลหะ (Particle Size) อธิบายและวิเคราะห์ช่วงขนาดอนุภาคของผงโลหะที่ตรวจพบ ซึ่งผลที่ได้แสดงเป็นเส้นกราฟ

3.10.1.2 การวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุทางเคมีของโลหะผง (X-Ray Diffraction: XRD) การวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุเชิงปริมาณของสารประกอบ (X-Ray Fluorescence Spectrometry , XRF)

3.10.1.3 การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค (Scanning Electron Microscope : SEM) เป็นวิเคราะห์ลักษณะรูปร่างของอนุภาค

3.10.2 การตรวจสอบขนาดของแผ่นมีดตัดซีเมนต์ทั้งสแตนคาร์ไบด์ อธิบายและวิเคราะห์เปอร์เซ็นต์การหดตัว เพื่อนำมาเปรียบเทียบกันระหว่างแผ่นมีดตัด 2 ชนิดนี้

3.10.3 การวิเคราะห์ความหนาแน่นหลังการอบผนึก และนำผลการตรวจสอบมาเปรียบเทียบกันระหว่างแผ่นมีดตัด 2 ชนิดนี้

3.10.4 ผลการทดสอบการสึกหรอของแผ่นมีดตัดซีเมนต์ทั้งสแตนคาร์ไบด์จากการกลึง

3.10.4.1 การตรวจสอบน้ำหนักแผ่นมิดดซีเมนต์ทั้งสแตนคาร์ไบด์ อธิบายและวิเคราะห์ถึงน้ำหนักที่หายไปหลังผ่านการทดสอบกลึง

3.10.4.2 การเปรียบเทียบการสึกหรอของแผ่นมิดดซีเมนต์โดยรูปถ่าย อธิบายและวิเคราะห์ลักษณะการเกิดการสึกหรอบริเวณมุมคมตัด การวัดระยะการสึกหรอและเปรียบเทียบกับระหว่างแผ่นมิดดซีเมนต์ 2 ชนิดนี้

3.10.4.3 การตรวจสอบความเรียบผิวของชิ้นงาน อธิบายและวิเคราะห์ช่วงความเรียบผิวที่เกิดขึ้นกับชิ้นงานที่ผ่านการกลึง

3.10.4.4 ผลการตรวจสอบขนาดของวัสดุทดสอบ อธิบายและวิเคราะห์ถึงความเปลี่ยนแปลงขนาดที่เกิดขึ้นหลังผ่านการกลึง ซึ่งจะต้องทำการวัดขนาดและนำผลการตรวจสอบมาเปรียบเทียบกัน

3.10.5 ผลการทดสอบโครงสร้างจุลภาคของแผ่นมิดดซีเมนต์ทั้งสแตนคาร์ไบด์ อธิบายและวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างที่เกิดบนพื้นผิวของชิ้นงาน ขนาดเกรนที่เกิดขึ้นระหว่างแผ่นมิดดซีเมนต์ทั้ง 2 ชนิด

3.10.6 การวิเคราะห์ความแข็งของแผ่นมิดดซีเมนต์ทั้งสแตนคาร์ไบด์

3.10.6.1 ผลการตรวจสอบภาพถ่ายรอยกดทดสอบความแข็ง อธิบายและวิเคราะห์ลักษณะการเกิดรอยกด

3.10.6.2 ผลการตรวจสอบความแข็งของแผ่นมิดดซีเมนต์ทั้งสแตนคาร์ไบด์

3.11 วิธีการสรุปผลการทดลอง

จากผลศึกษากระบวนการผลิตโลหะผงทั้งสแตนคาร์ไบด์หมุนเวียนกลับมาใช้ใหม่เพื่อผลิตชิ้นส่วนโลหะความแข็งสูงด้วยเทคโนโลยีที่พัฒนาขึ้น เพื่อการผลิตชิ้นส่วนจากโลหะผงทั้งสแตนคาร์ไบด์ที่ผ่านการรีไซเคิล จากผลการดำเนินการทดลอง สามารถอธิบายสมบัติของชิ้นส่วนมาตรฐานต่อความสามารถในการใช้งาน อิทธิพลที่เหมาะสมในการบดโลหะผงได้แก่ ความเร็วรอบ ขนาดลูกบด อัตราส่วนสารละลายในการบด เวลาในการบด การตรวจสอบและวิเคราะห์สมบัติด้านรูปทรงของอนุภาคโลหะ

ผลการตรวจสอบวิเคราะห์ด้านความบริสุทธิ์และปริมาณของโลหะผงที่ผ่านการรีไซเคิล การวิเคราะห์ขนาดและการกระจายตัวของอนุภาคโลหะผง คุณลักษณะโลหะผงทั้งสแตนคาร์ไบด์ที่เหมาะสมการเพื่อนำไปประยุกต์ใช้งานสำหรับขึ้นรูปชิ้นงานซีเมนต์คาร์ไบด์

ผลการวิเคราะห์สมบัติชิ้นงานโลหะแข็งประเภทแผ่นมิดดซีเมนต์สำหรับงานตัดปาดผิว เช่น การวิเคราะห์ความหนาแน่น ความแข็ง ลักษณะโครงสร้าง ลักษณะรอยกด

ผลการวิเคราะห์ประสิทธิภาพการใช้งานแผ่นมีดตัดเพื่อเปรียบเทียบสมบัติทางกล เช่น การวิเคราะห์ลักษณะการสึกหรอ การวิเคราะห์ความเรียบผิว



บทที่ 4 ผลการวิจัย

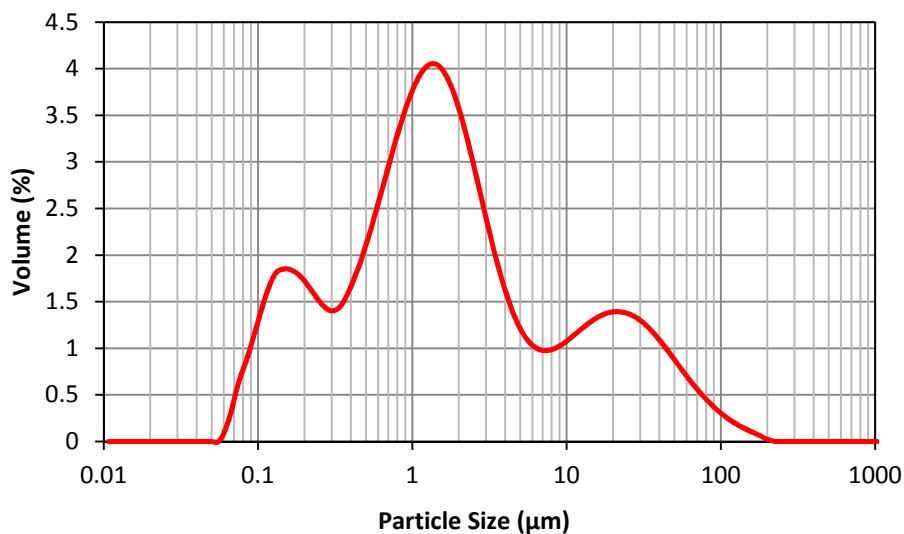
4.1 บทนำ

การศึกษาศสมบัติของชิ้นงานซีเมนต์ทั้งสแตนคาร์ไบด์เพื่อทำการผลิตชิ้นส่วนโลหะความแข็งแรงสูง จากโลหะผงที่ผ่านการรีไซเคิลด้วยเทคโนโลยีที่พัฒนาขึ้นใหม่ เป็นการวิเคราะห์ความสามารถในการใช้งานของชิ้นส่วนมาตรฐาน เพื่อเปรียบเทียบสมบัติทางกลของชิ้นงานแผ่นมิดคัตที่พัฒนาขึ้นซึ่งแสดงผลการวิเคราะห์ดังนี้

4.2 ผลการวิเคราะห์โลหะผงทั้งสแตนคาร์ไบด์

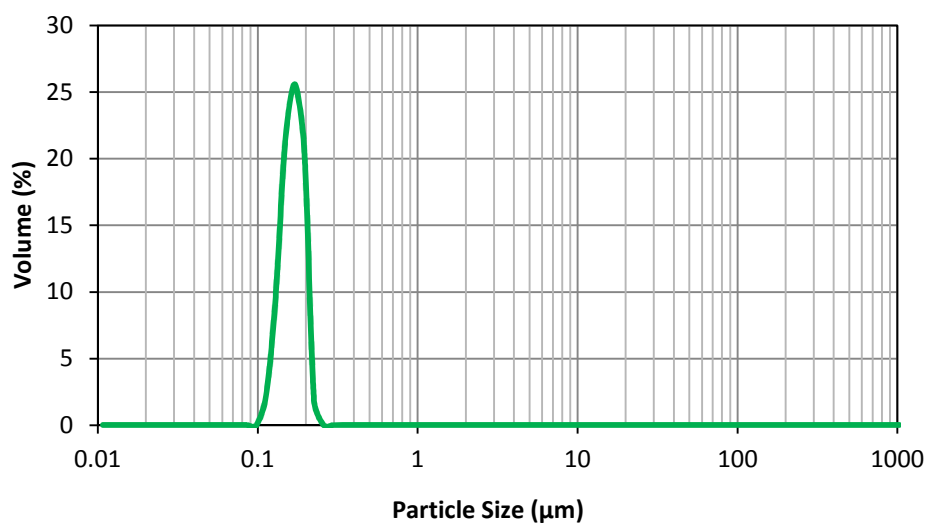
4.2.1 การวิเคราะห์ขนาดการกระจายของโลหะผง (Particle size Distribution)

วิเคราะห์การกระจายของโลหะผงทั้งสแตนคาร์ไบด์ที่ผลิตขึ้นใหม่จากการรีไซเคิลเศษซีเมนต์คาร์ไบด์ โดยผลการวิเคราะห์อธิบายได้ดังรูปที่ 4.1-4.2



รูปที่ 4.1 การวิเคราะห์การกระจายของโลหะผงทั้งสแตนคาร์ไบด์ที่ผ่านการรีไซเคิล

จากรูปที่ 4.1 แสดงผลการวิเคราะห์ขนาดอนุภาคโลหะผงทั้งสแตนคาร์ไบด์ จากการวิเคราะห์อนุภาคโลหะผงอยู่ระหว่าง 0.05-200 µm อนุภาคเล็กสุดประมาณ 0.05 µm และอนุภาคใหญ่สุดประมาณ 200 µm เมื่อพิจารณาแล้วปรากฏว่าอนุภาคส่วนใหญ่อยู่ระหว่าง 0.5-4 µm



รูปที่ 4.2 ผลวิเคราะห์การกระจายของโลหะผงทั้งสแตนคาร์ไบด์ที่ผ่านการรีไซเคิล
จากเศษแผ่นมีดตัดหลังผ่านการบด

จากรูปที่ 4.2 แสดงผลการวิเคราะห์ขนาดอนุภาคโลหะผงทั้งสแตนคาร์ไบด์ จากการวิเคราะห์อนุภาคโลหะผงมีขนาดระหว่าง 0.11-0.22 μm ขนาดอนุภาคเล็กสุดประมาณ 0.11 μm และอนุภาคใหญ่สุดประมาณ 0.22 μm เมื่อพิจารณาแล้วปรากฏว่าอนุภาคส่วนใหญ่มีขนาดระหว่าง 0.14-0.19 μm

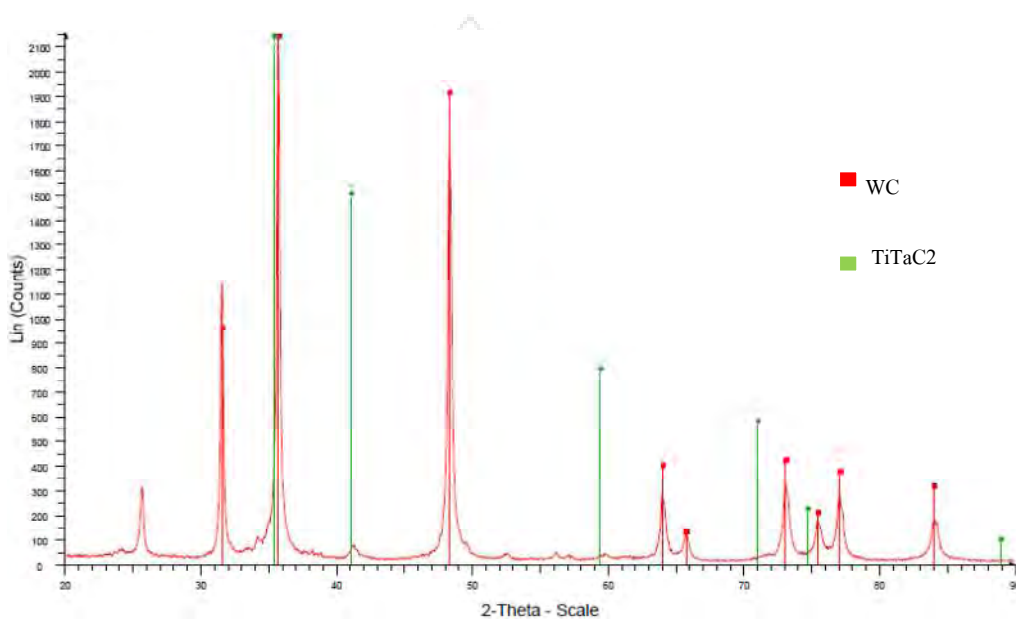
4.2.2 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของโลหะผงด้วยเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคชัน (XRD)

การวิเคราะห์โครงสร้างโลหะผงทั้งสแตนคาร์ไบด์ที่ผลิตขึ้นใหม่ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-Ray Diffraction) โดยผลการทดสอบแสดงได้ดังนี้

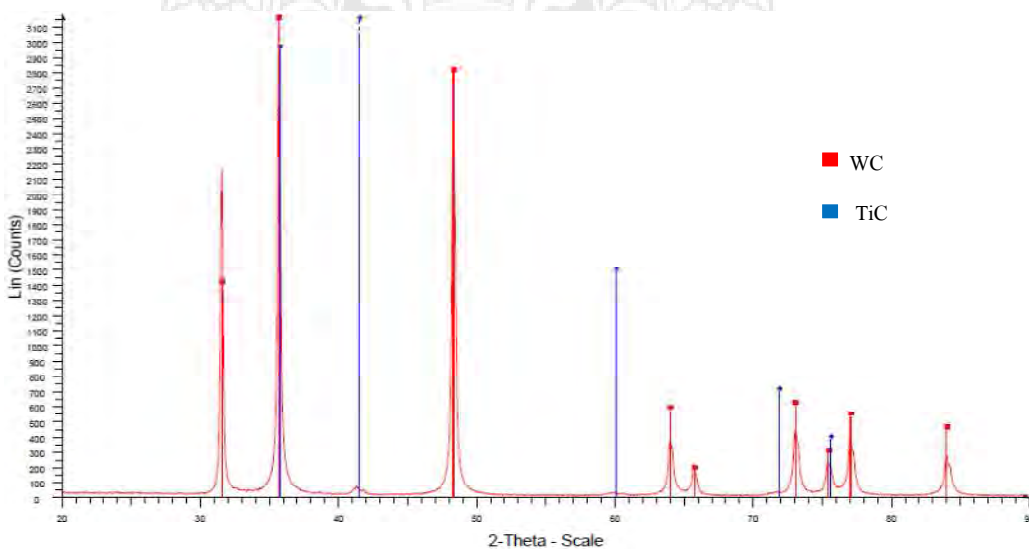
ตารางที่ 4.1 แสดงผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของโลหะผงทั้งสแตนคาร์ไบด์รีไซเคิล

ตัวอย่าง	องค์ประกอบที่มีความเป็นไปได้ในตัวอย่าง [JCPDS NO.]
โลหะผงที่ผ่านการบด 12 ชั่วโมง	Qusongite – WC
	Moissanite – TiTaC ₂
โลหะผงที่ผ่านการบด 24 ชั่วโมง	Qusongite – WC
	Moissanite – Tic

จากตารางที่ 4.1 แสดงผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD) จากการวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุในสารตัวอย่างทั้งสแตนคาร์ไบด์ พบว่าโลหะผงที่มีความเป็นไปได้ประกอบด้วย ทั้งสแตนคาร์ไบด์ (WC) ไทเทเนียมแทนทาลัมคาร์ไบด์ (TiTaC₂) และไทเทเนียมคาร์ไบด์ ดังแสดงผลการวิเคราะห์ไว้ด้วย รูปที่ 4.3 - 4.5

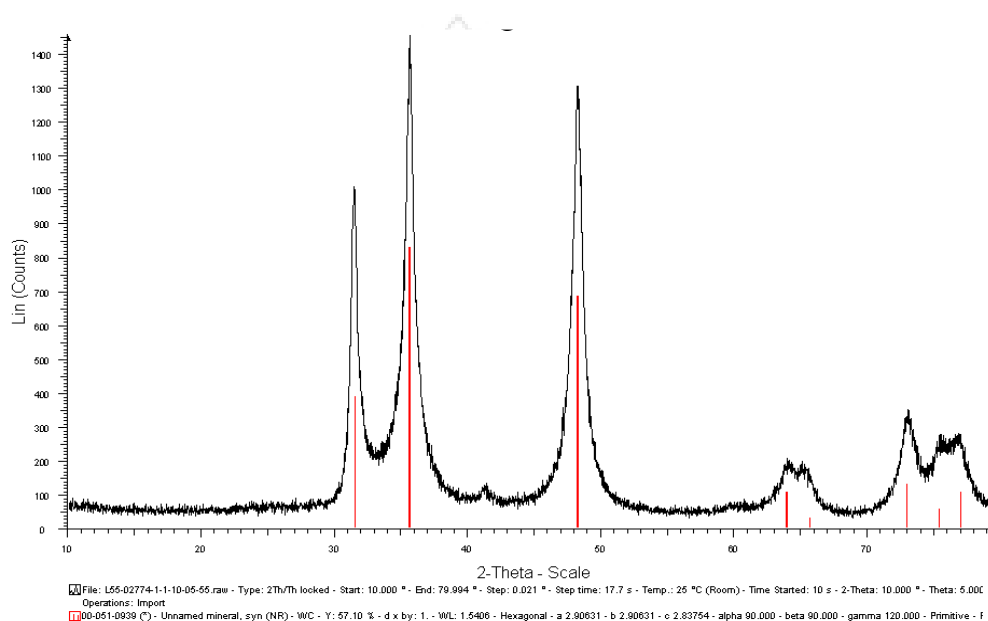


รูปที่ 4.3 การวิเคราะห์ XRD ของโลหะผงทั้งสแตนคาร์ไบด์ที่ผ่านกระบวนการรีไซเคิล



รูปที่ 4.4 แสดงองค์ประกอบทางเคมีของโลหะผงทั้งสแตนคาร์ไบด์ที่ผ่านกระบวนการรีไซเคิล

จากรูปที่ 4.3 และ 4.4 แสดงผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD) จากการวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุในสารตัวอย่างทั้งสแตนคาร์ไบด์พบว่า โลหะผงที่มีความเป็นไปได้คือ ทั้งสแตนคาร์ไบด์ (WC) และมีธาตุอื่นผสมอยู่ด้วย เช่น ไทเทเนียมคาร์ไบด์ (TiC) แทนทาลัม ไททาลัมคาร์ไบด์ (TiTaC₂) เป็นต้น



รูปที่ 4.5 แสดงการวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุโลหะผงทั้งสแตนคาร์ไบด์หลังการบด 40 ชั่วโมง

รูปที่ 4.5 ผลการวิเคราะห์ XRD ที่ผ่านการบดแบบ Ball Milling ด้วยเวลา 40 ชั่วโมง
 ปรากฏว่าองค์ประกอบของธาตุที่พบเป็นทั้งสแตนคาร์ไบด์

ตารางที่ 4.2 แสดงผลการวิเคราะห์ปริมาณส่วนผสมทางเคมีของโลหะผงทั้งสแตนคาร์ไบด์รีไซเคิล

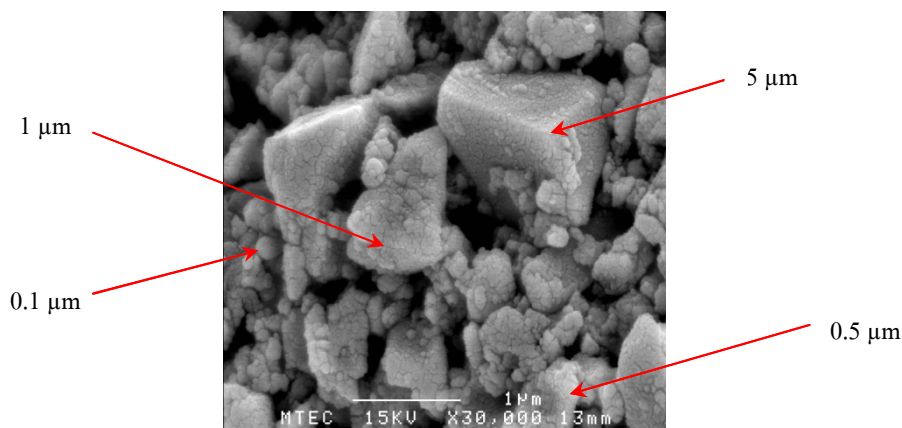
ธาตุ	ปริมาณธาตุ
Al	0.04%
S	0.08%
Ti	1.21%
Cr	0.03%
Fe	0.04%
Co	0.35%
Nb	0.42%
Ta	1.68%
W	96.15%
	100.00%

ตารางที่ 4.2 แสดงผลการวิเคราะห์ปริมาณของธาตุในสารตัวอย่าง ด้วยเทคนิค X-Ray Fluorescence: XRF จากการวิเคราะห์ปรากฏว่า องค์ประกอบส่วนใหญ่เป็นทั้งสแตน 96.15% นอกนั้นเป็นธาตุอื่นๆ ประมาณ 3.85 % เช่น แทนทาลัม (Ta) ไทเทเนียม (Ti) นีโอเบียม (Nb) โคบอลต์ (Co) เป็นต้น

4.2.3 การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค (Scanning Electron Microscope)

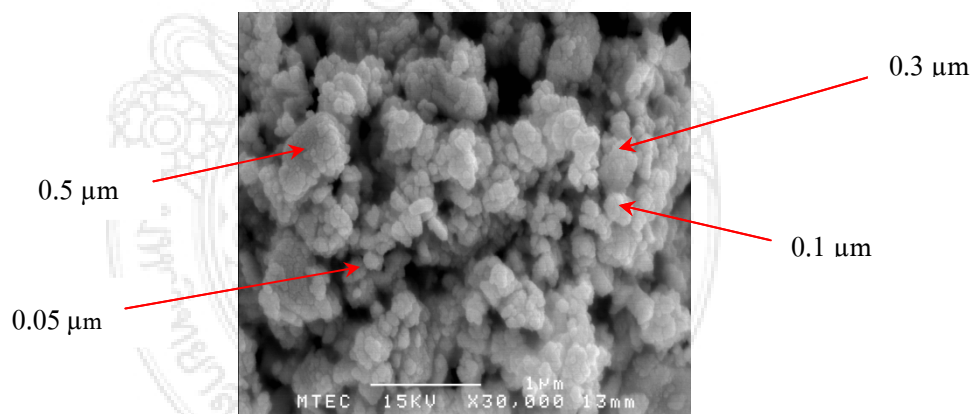
การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของโลหะผงทั้งสแตนคาร์ไบด์ที่ผ่านการรีไซเคิล จากเศษแผ่นมีดตัด ด้วยเครื่องวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค (Scanning Electron Microscope) โดยทำการวิเคราะห์ลักษณะรูปร่างและขนาดของเม็ดเกรนที่เกิดขึ้น ซึ่งแสดงผลการทดสอบได้ดังนี้

4.2.3.1 ผลทดสอบโลหะผงทั้งสแตนคาร์ไบด์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบ สแกน (Scanning Electron Microscope) (SEM)



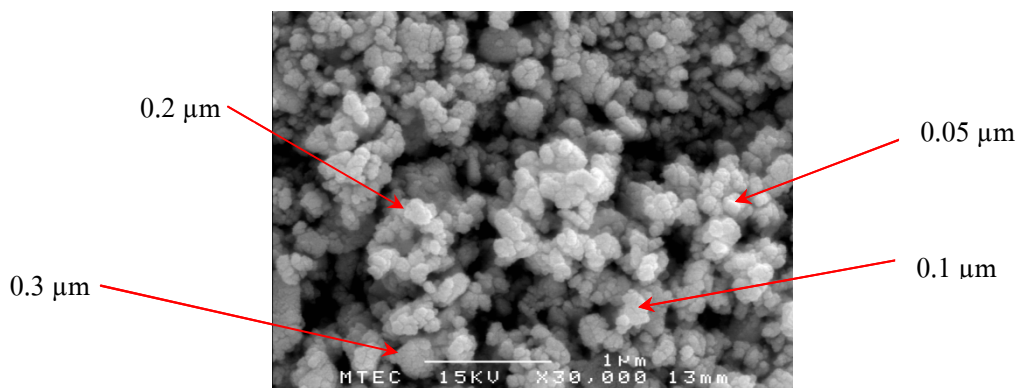
รูปที่ 4.6 แสดงผล SEM โลหะผงทั้งสแตนคาร์ไบด์ที่ผ่านกระบวนการรีไซเคิลกำลังขยาย 30,000 เท่า

จากรูปที่ 4.6 แสดงผลการวิเคราะห์ SEM โลหะผงทั้งสแตนคาร์ไบด์ก่อนการบด ที่กำลังขยาย 30,000 เท่า ปรากฏว่า โลหะผงมีอนุภาคขนาดเล็กที่สุดประมาณ 0.1 μm ขนาดใหญ่ที่สุดประมาณ 5 μm พิจารณาโดยรวมแล้วโลหะผงมีขนาดอนุภาคระหว่าง 0.5-1 μm



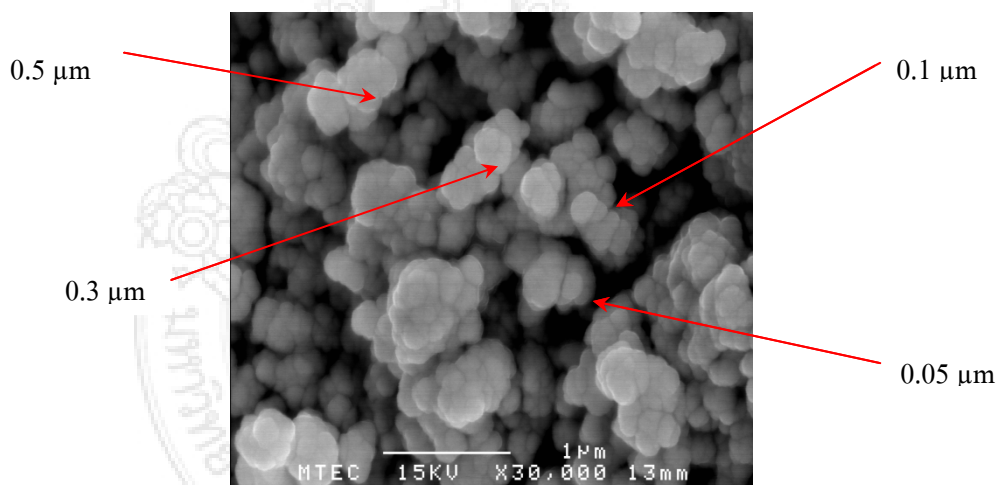
รูปที่ 4.7 แสดงผล SEM ของโลหะผงทั้งสแตนคาร์ไบด์ ผ่านการบด 20 ชั่วโมง กำลังขยาย 30,000 เท่า

จากรูปที่ 4.7 แสดงผลการวิเคราะห์ SEM โลหะผงทั้งสแตนคาร์ไบด์ผ่านการบด 20 ชั่วโมง ที่กำลังขยาย 30,000 เท่า ปรากฏว่า โลหะผงมีขนาดอนุภาคเล็กที่สุดประมาณ 0.05 μm ขนาดใหญ่ที่สุดประมาณ 0.3 μm พิจารณาโดยรวมแล้วปรากฏว่าโลหะผงมีขนาดระหว่าง 0.10-0.3 μm



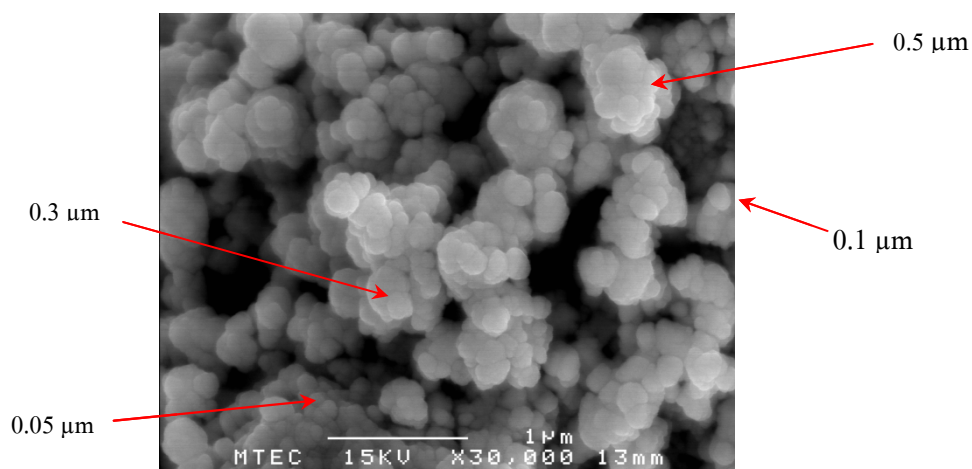
รูปที่ 4.8 แสดงผล SEM ของโลหะผงทั้งสแตนคาร์ไบด์ ผ่านการอบ 40 ชั่วโมง กำลังขยาย 30,00 เท่า

จากรูปที่ 4.8 แสดงผลการวิเคราะห์ SEM โลหะผงทั้งสแตนคาร์ไบด์ผ่านการอบ 40 ชั่วโมง ที่กำลังขยาย 30,000 เท่า ปรากฏว่า โลหะผงมีขนาดเล็กสุดประมาณ $0.05\ \mu\text{m}$ ขนาดใหญ่สุดประมาณ $0.3\ \mu\text{m}$ พิจารณาโดยส่วนใหญ่โลหะผงมีขนาดอยู่ระหว่าง $0.1\text{-}0.2\ \mu\text{m}$



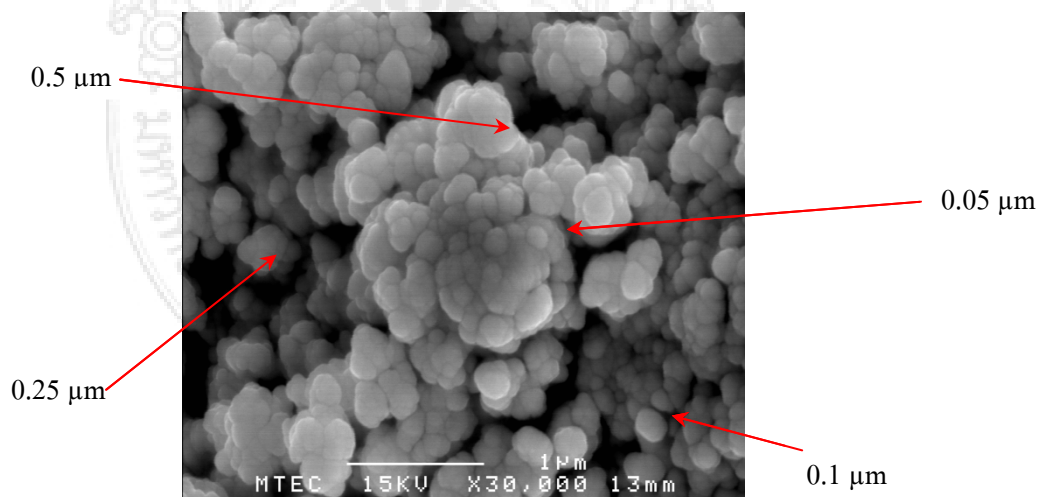
รูปที่ 4.9 แสดงผล SEM ของโลหะผงทั้งสแตนคาร์ไบด์ผสมโคบอลต์ 5% ที่กำลังขยาย 30,000 เท่า

จากรูปที่ 4.9 แสดงผลการวิเคราะห์ SEM โลหะผงทั้งสแตนคาร์ไบด์ผสมโคบอลต์ 10% ที่กำลังขยาย 30,000 เท่า ปรากฏว่า โลหะผงมีขนาดอนุภาคเล็กสุดประมาณ $0.05\ \mu\text{m}$ ขนาดใหญ่สุดประมาณ $0.5\ \mu\text{m}$ พิจารณาโดยส่วนใหญ่โลหะผงมีขนาดอนุภาคระหว่าง $0.1\text{-}0.3\ \mu\text{m}$



รูปที่ 4.10 แสดงผล SEM ของโลหะผงทั้งสแตนคาร์ไบด์ผสมโคบอลต์ 10% ที่กำลังขยาย 30,000 เท่า

จากรูปที่ 4.10 แสดงผลการวิเคราะห์ SEM โลหะผงทั้งสแตนคาร์ไบด์ผสมโคบอลต์ 10% ที่กำลังขยาย 30,000 เท่า ปรากฏว่า โลหะผงมีขนาดอนุภาคเล็กสุดประมาณ 0.05 μm ขนาดใหญ่สุดประมาณ 0.5 μm พิจารณาโดยรวมแล้วโลหะผงมีขนาดระหว่าง 0.1-0.3 μm



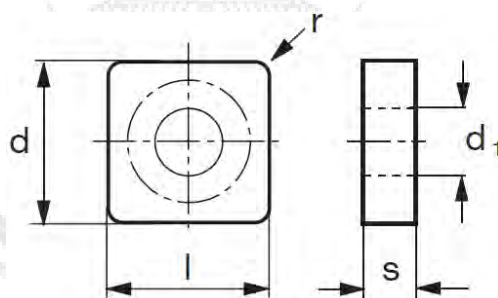
รูปที่ 4.11 แสดงผล SEM ของโลหะผงทั้งสแตนคาร์ไบด์ผสมโคบอลต์ 15% ที่กำลังขยาย 30,000 เท่า

จากรูปที่ 4.11 แสดงผลการวิเคราะห์ SEM โลหะผงทั้งสแตนคาร์ไบด์ผสมโคบอลต์ 15%Co ที่กำลังขยาย 30,000 เท่า ปรากฏว่า โลหะผงมีขนาดอนุภาคเล็กสุดประมาณ 0.05 μm ขนาดใหญ่สุดประมาณ 0.5 μm พิจารณาโดยรวมแล้วโลหะผงมีขนาดอนุภาคระหว่าง 0.1-0.25 μm

4.3 ผลการวิเคราะห์ขนาดของแผ่นมีดกลึงทั้งสแตนคาร์ไบด์รูปทรง SNMG 120408

การผลิตแผ่นมีดกลึงทั้งสแตนคาร์ไบด์รูปทรง SNMG 120408 นั้นมีค่าพารามิเตอร์ที่ส่งผลถึงความเปลี่ยนแปลงและความแตกต่างของผงโลหะทั้งสแตนคาร์ไบด์ซึ่งในผงโลหะแต่ละชุดผลจากค่าพารามิเตอร์ที่แตกต่างนั้นสามารถแสดงรายละเอียดได้ดังนี้

4.3.1 ผลการวิเคราะห์ขนาดแผ่นมีดตัดซีเมนต์ทั้งสแตนคาร์ไบด์ที่ผ่านการอัดขึ้นรูป ด้วยโลหะผงทั้งสแตนคาร์ไบด์ที่ผ่านการรีไซเคิลในอัตราส่วนผสมโคบอลต์ 5-15% Co ตามแบบที่กำหนด



รูปที่ 4.12 แบบ (Drawing) ของชิ้นงานมาตรฐาน (SNMG) [74]

ตารางที่ 4.3 การวัดขนาดแผ่นมีดซีเมนต์คาร์ไบด์ก่อนทำการอบผนึก (Before sintering)

การเปรียบเทียบขนาดแผ่นมีดตัดที่ผลิตด้วยผงที่ผ่านการรีไซเคิลและแผ่นมีดที่ผลิตด้วยผงมาตรฐานนำเข้าจากต่างประเทศ ก่อนอบผนึก						
ส่วนผสม Co	ผงรีไซเคิล	ผงมาตรฐาน	ผงรีไซเคิล	ผงมาตรฐาน	ผงรีไซเคิล	ผงมาตรฐาน
ด้าน	(RE-5%)	(OR-5%)	(RE-10%)	(OR-10%)	(RE-15%)	(OR-15%)
d (mm)	15.730	15.710	15.730	15.70	15.730	15.700
l (mm)	15.742	15.698	15.730	15.70	15.730	15.700
r (mm)	0.84	0.87	0.88	0.85	0.86	0.88
s (mm)	6.014	5.138	6.506	5.438	6.654	5.438
d ₁ (mm)	6.408	6.412	6.408	6.412	6.408	6.412

จากตารางที่ 4.3 แสดงผลการวิเคราะห์ขนาดแผ่นมีซีเมนต์ทั้งสแตนคาร์ไบด์หลังการอัดขึ้นรูปปรากฏว่า แผ่นมีดที่ผลิตด้วยผงที่ผ่านการรีไซเคิลส่วนผสมระหว่าง 5-15% โคบอลต์ ด้าน d มีขนาด 15.73 mm. ด้าน l ขนาดอยู่ระหว่าง 15.73-15.74 mm. รัศมี r ขนาดอยู่ระหว่าง 0.84-0.86 mm. ความหนา s ขนาดอยู่ระหว่าง 6.01-6.65 mm. ด้าน d₁ ขนาด 6.40 mm. ส่วนแผ่นมีดที่ผลิตด้วยผงมาตรฐานนำเข้าจากต่างประเทศส่วนผสมระหว่าง 5-15% โคบอลต์ ด้าน d มีขนาดอยู่ระหว่าง 15.70-15.71 mm. ด้าน l ขนาดอยู่ระหว่าง 15.69-15.70 mm. รัศมี r ขนาดอยู่ระหว่าง 0.88-0.88 mm. ความหนา s ขนาดอยู่ระหว่าง 5.13-5.43 mm. ด้าน d₁ ขนาด 6.41 mm.

ตารางที่ 4.4 การวัดขนาดชิ้นงานคาร์ไบด์ก่อนทำการอบผนึก (After sintering)

การเปรียบเทียบขนาดแผ่นมีดตัดที่ผลิตด้วยผงที่ผ่านการรีไซเคิลและแผ่นมีดที่ผลิตด้วยผงมาตรฐานนำเข้าจากต่างประเทศ หลังอบผนึก						
ส่วนผสม (Co)	ผงรีไซเคิล	ผงมาตรฐาน	ผงรีไซเคิล	ผงมาตรฐาน	ผงรีไซเคิล	ผงมาตรฐาน
ด้าน	(RE -5%)	(OR-5%)	(RE-10%)	(RE-10%)	(RE-15%)	(OR-15%)
d (mm)	13.82	12.956	13.158	12.626	12.392	12.942
l (mm)	13.828	12.964	13.184	12.642	12.398	12.962
r (mm)	0.81	0.78	0.76	0.80	0.81	0.76
s (mm)	5.584	4.254	5.398	4.404	5.24	4.416
D ₁ (mm)	5.67	5.326	5.445	5.216	5.2	5.308

จากตารางที่ 4.4 แสดงผลการวิเคราะห์ขนาดแผ่นมีซีเมนต์ทั้งสแตนคาร์ไบด์หลังการอัดขึ้นรูปปรากฏว่า แผ่นมีดที่ผลิตด้วยผงที่ผ่านการรีไซเคิลส่วนผสมระหว่าง 5-15% โคบอลต์ ด้าน d มีขนาด 15.73 mm. ด้าน l ขนาดอยู่ระหว่าง 15.73-15.74 mm. รัศมี r ขนาดอยู่ระหว่าง 0.84-0.86 mm. ความหนา s ขนาดอยู่ระหว่าง 6.01-6.65 mm. ด้าน d₁ ขนาด 6.40 mm. ส่วนแผ่นมีดที่ผลิตด้วยผงมาตรฐานนำเข้าจากต่างประเทศ ส่วนผสมระหว่าง 5-15% โคบอลต์ ด้าน d มีขนาดอยู่ระหว่าง 15.70-15.71 mm. ด้าน l ขนาดอยู่ระหว่าง 15.69-15.70 mm. รัศมี r ขนาดอยู่ระหว่าง 0.88-0.88 mm. ความหนา s ขนาดอยู่ระหว่าง 5.13-5.43 mm. ด้าน d₁ ขนาด 6.41 mm.

4.3.2 การวิเคราะห์น้ำหนักพร้อมความหนาแน่นก่อนและหลังอบผนึก

การวิเคราะห์น้ำหนักแผ่นมีดตัดที่ผลิตด้วยโลหะผงที่ผ่านการรีไซเคิลและแผ่นมีดตัดที่ผลิตด้วยโลหะผงมาตรฐานนำเข้าจากต่างประเทศ ส่วนผสมโคบอลต์ 5-15% สามารถแสดงผลตามตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 การวิเคราะห์แผ่นมิดตัดก่อนอบผนิก

การเปรียบเทียบขนาดแผ่นมิดตัดที่ผลิตด้วยผงที่ผ่านการรีไซเคิลและแผ่นมิดที่ผลิตด้วยผงมาตรฐานนำเข้าจากต่างประเทศ ก่อนอบผนิก						
รายการวิเคราะห์แผ่น มิดตัด	ผงรีไซเคิล (RE-5%)	ผงมาตรฐาน (OR-5%)	ผงรีไซเคิล (RE-10%)	ผงมาตรฐาน (RE-10%)	ผงรีไซเคิล (RE-15%)	ผงมาตรฐาน (OR-15%)
น้ำหนัก (g)	7.89	7.93	7.95	7.83	8.11	7.83
density (g/cm ³)	6.42	6.42	6.36	8.13	6.2	8.13

จากตารางที่ 4.5 แสดงผลการวิเคราะห์น้ำหนักและความหนาแน่นของแผ่นมิดตัดก่อนอบผนิกจากการวิเคราะห์ปรากฏว่าแผ่นมิดตัดผงรีไซเคิลส่วนผสมระหว่าง 5-15% โคบอลต์น้ำหนักอยู่ระหว่าง 7.89-8.11 g ความหนาแน่นอยู่ระหว่าง 6.2-6.42 g/cm³ ส่วนแผ่นมิดตัดที่ผลิตด้วยผงมาตรฐานนำเข้าจากต่างประเทศส่วนผสมระหว่าง 5-15% โคบอลต์น้ำหนักอยู่ระหว่าง 7.83-7.93 g ความหนาแน่นอยู่ระหว่าง 6.2-8.13 g/cm³

ตารางที่ 4.6 การวิเคราะห์แผ่นมิดตัดหลังอบผนิก

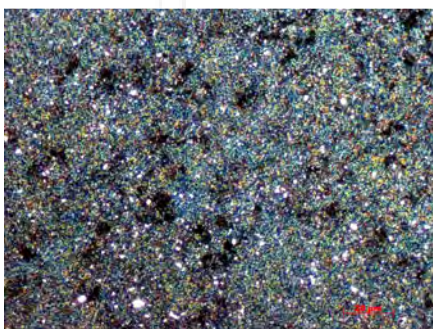
การเปรียบเทียบขนาดแผ่นมิดตัดที่ผลิตด้วยผงที่ผ่านการรีไซเคิลและแผ่นมิดที่ผลิตด้วยผงมาตรฐานนำเข้าจากต่างประเทศ หลังอบผนิก						
รายการวิเคราะห์แผ่น มิดตัด	ผงรีไซเคิล (RE -5%)	ผงมาตรฐาน (OR-5%)	ผงรีไซเคิล (RE-10%)	ผงมาตรฐาน (RE-10%)	ผงรีไซเคิล (RE-15%)	ผงมาตรฐาน (OR-15%)
น้ำหนัก (g)	7.29042	7.68908	7.17808	7.49616	7.17862	7.57714
density (g/cm ³)	14.34	14.35	13.8	14.23	13.56	14.08

จากตารางที่ 4.6 แสดงผลการวิเคราะห์น้ำหนักและความหนาแน่นของแผ่นมิดตัดหลังอบผนิกจากการวิเคราะห์ปรากฏว่าแผ่นมิดตัดที่ผลิตด้วยผงที่ผ่านการรีไซเคิลส่วนผสมระหว่าง 5-15% โคบอลต์น้ำหนักอยู่ระหว่าง 7.17-7.29 g มีความหนาแน่นอยู่ระหว่าง 13.56-13.80 g/cm³ ส่วนแผ่นมิดตัดที่ผลิตด้วยผงมาตรฐานนำเข้าจากต่างประเทศส่วนผสมระหว่าง 5-15% โคบอลต์น้ำหนักอยู่ระหว่าง 7.49-7.68 g ความหนาแน่นอยู่ระหว่าง 14.08-14.35 g/cm³

4.4 ผลการวิเคราะห์สมบัติของแผ่นมีดตัดซีเมนต์ทั้งสแตนคาร์ไบด์

การวิเคราะห์สมบัติของแผ่นมีดตัดซีเมนต์ทั้งสแตนคาร์ไบด์ที่ผลิตจากโลหะผงทั้งสแตนคาร์ไบด์ที่ผ่านการรีไซเคิลและแผ่นมีดตัดที่ผลิตด้วยผงมาตรฐานนำเข้าจากต่างประเทศประกอบด้วย การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค การวิเคราะห์ความแข็ง ลักษณะรอยกด เป็นต้น ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

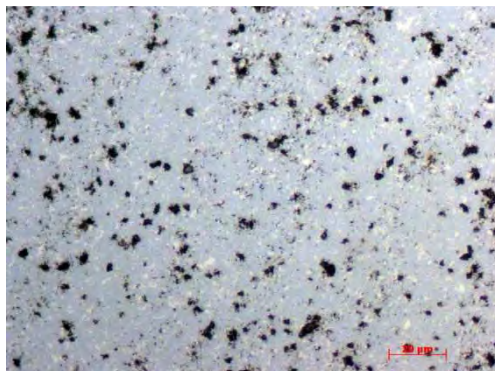
4.4.1 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างของแผ่นมีดตัดซีเมนต์ทั้งสแตนคาร์ไบด์ที่ผลิตจากโลหะผงที่ผ่านการรีไซเคิลส่วนผสม โคบอลต์ (WC-15%Co (RE))



รูปที่ 4.13 โครงสร้างจุลภาคแผ่นมีดตัดที่ผลิตด้วยผงที่ผ่านการรีไซเคิล (RE) ส่วนผสม 15% โคบอลต์

จากรูปที่ 4.13 แสดงรูปถ่าย โครงสร้างจุลภาคของแผ่นมีดตัดซีเมนต์ทั้งสแตนคาร์ไบด์ที่ผลิตด้วยโลหะผงทั้งสแตนคาร์ไบด์ที่ผ่านการรีไซเคิล (WC-15%Co (RE)) ที่กำลังขยาย 500 เท่า สามารถแสดงให้เห็นลักษณะพื้นผิวของโลหะ มีความแน่นตัวของโครงสร้างค่อนข้างเมื่อเทียบกับรูปที่ 4.13 และ 4.14 แต่ก็ยังพบว่าการกระจายของเฟสยังไม่ดีเนื่องจากยังมีโพรงอากาศอยู่เป็นจำนวนมากซึ่งจะส่งผลต่อความแข็งของวัสดุ

4.4.2 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างของแผ่นมีดตัดซีเมนต์ทั้งสแตนคาร์ไบด์ที่ผลิตด้วยโลหะผงทั้งสแตนคาร์ไบด์มาตรฐานนำเข้าจากต่างประเทศ (WC-15%Co (OR))



รูปที่ 4.14 โครงสร้างจุลภาคของแผ่นมีดตัดที่ผลิตด้วยโลหะผงทั้งสแตนคาร์ไบด์มาตรฐานนำเข้าจากต่างประเทศ

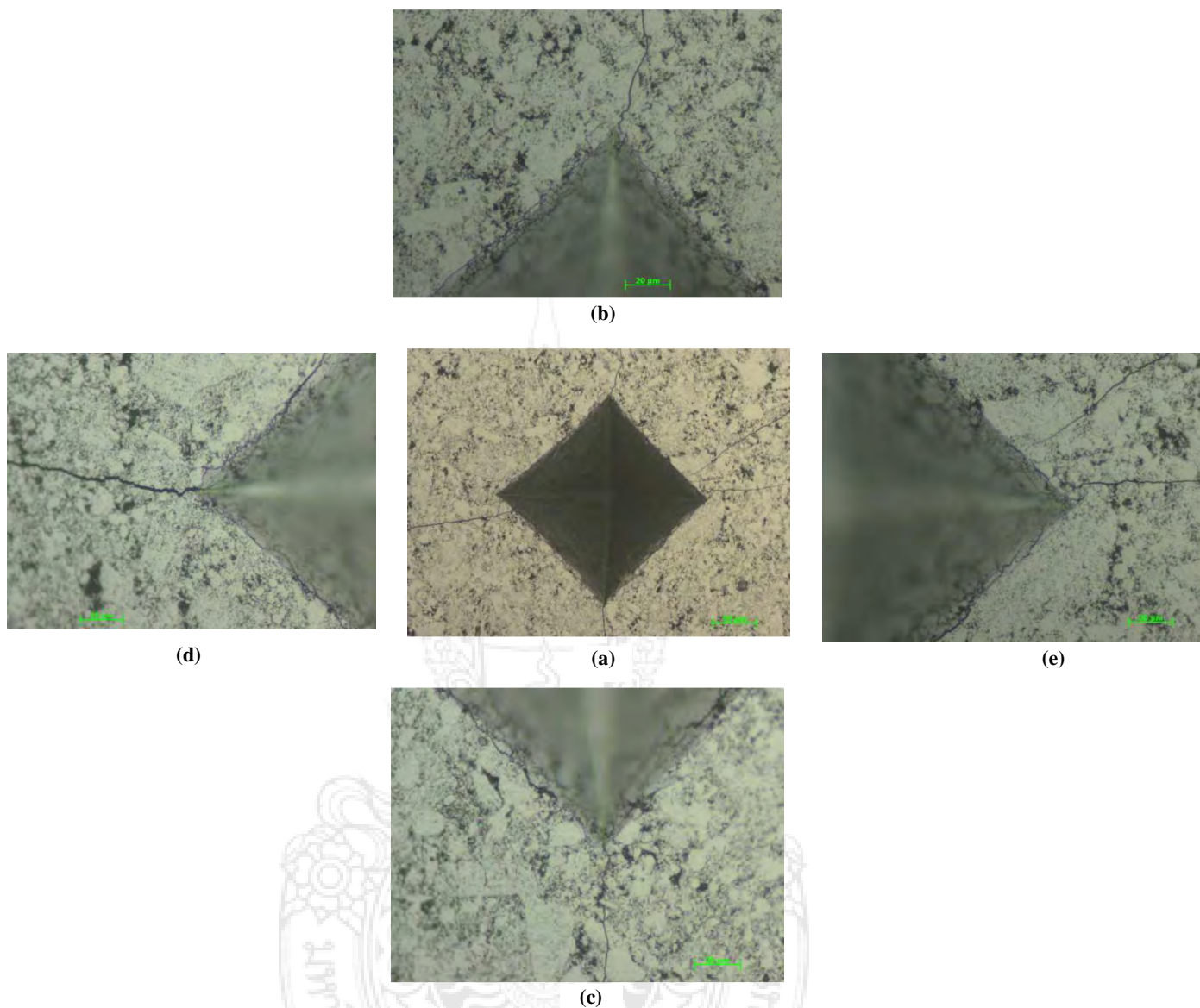
จากรูปที่ 4.14 แสดงรูปถ่ายโครงสร้างจุลภาคของแผ่นมีดตัดซีเมนต์ทั้งสแตนคาร์ไบด์ที่ผลิตด้วยโลหะผงทั้งสแตนคาร์ไบด์มาตรฐานนำเข้าจากต่างประเทศ (WC-15%Co (OR)) ที่กำลังขยาย 500 เท่า มีความหนาแน่นตัวของโครงสร้างค่อนข้างแน่น โครงสร้างมีการยึดเกาะกันเป็นกลุ่มๆ การกระจายตัวของเฟสดี แต่ก็ยังพบว่ามีรูพรุนอยู่เป็นจำนวนมากซึ่งเกิดจากการแทรกตัวของออกซิเจนขณะทำการอบผนึกนั่นเอง

4.5 ผลการทดสอบความแข็งของแผ่นมีดตัดซีเมนต์ทั้งสแตนคาร์ไบด์

การทดสอบความแข็งของแผ่นมีดตัดซีเมนต์ทั้งสแตนคาร์ไบด์ที่ผลิตด้วยโลหะผงทั้งสแตนคาร์ไบด์ที่ผ่านการรีไซเคิลและแผ่นมีดตัดซีเมนต์ทั้งสแตนคาร์ไบด์ที่ผลิตด้วยโลหะผงทั้งสแตนคาร์ไบด์มาตรฐานนำเข้าจากต่างประเทศแสดงลักษณะรอยแตกร้าวและค่าความแข็งดังนี้

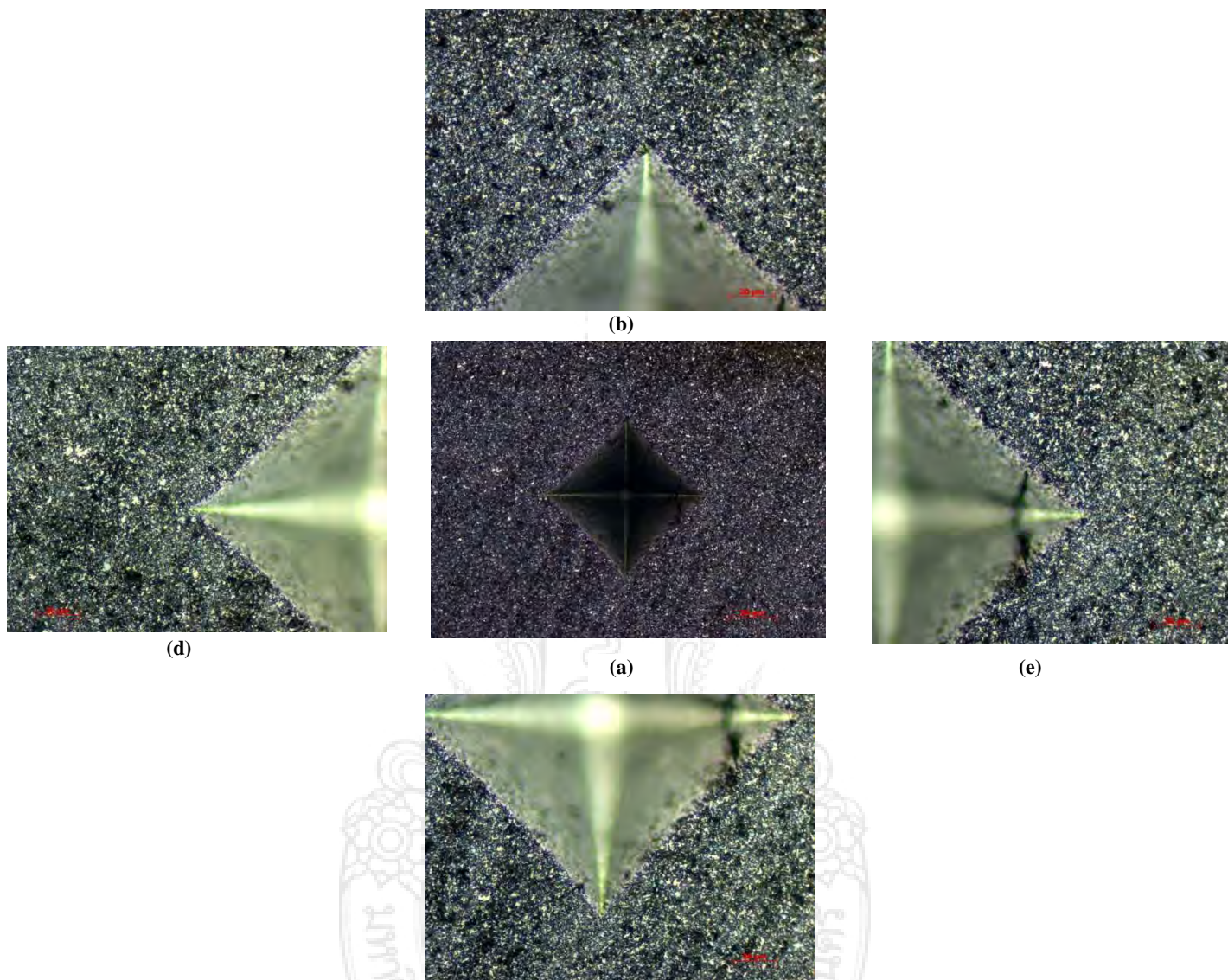
4.5.1 การวิเคราะห์ลักษณะรอยแตกและทดสอบความแข็ง

การวิเคราะห์ลักษณะรอยแตกร้าวด้วยการทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์และรอย (Clack) ตามมุมของรอยกด ของแผ่นมีดตัดซีเมนต์ทั้งสแตนคาร์ไบด์ที่ผลิตจากโลหะผงทั้งสแตนคาร์ไบด์ที่ผ่านการรีไซเคิลจากเศษแผ่นมีดตัดสามารถแสดงผลได้ดังนี้



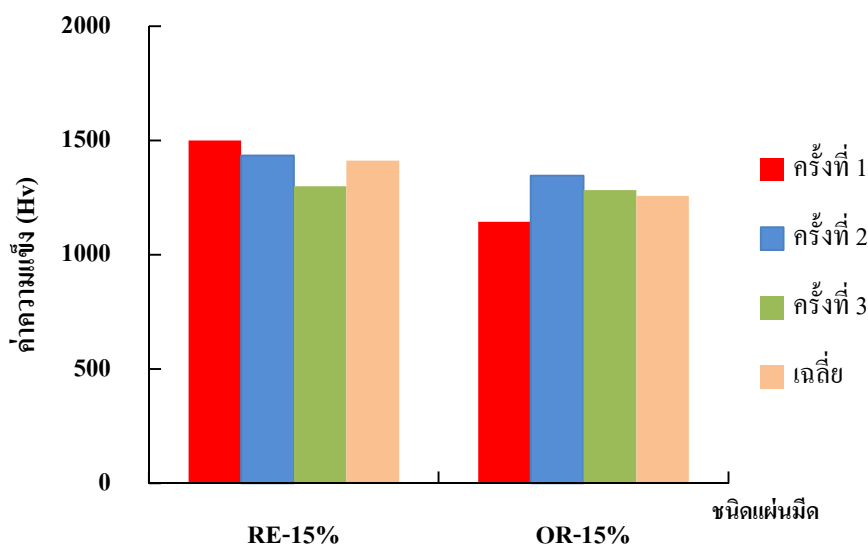
รูปที่ 4.15 แสดงภาพรอยกดแบบวิกเกอร์ ของแผ่นมิดตัดซีเมนต์ทั้งสแตนคาร์ไบด์ที่ผลิตด้วยโลหะผงทั้งสแตนคาร์ไบด์ที่ผ่านการรีไซเคิล (WC-15% Co (RE))

แสดงภาพถ่ายรอยกดโดยใช้การทดสอบแบบวิกเกอร์ (Vickers Hardness Test) โดยใช้โหลดในการกด 20 kgf จากลักษณะการแตกของรอยกดบนแผ่นมิดคาร์ไบด์ 15% โคบอลต์ เป็นลักษณะการแตกแบบเปราะผ่าเกรน (Transgranular cleavage fracture) เกิดขึ้นโดยปราศจากการเปลี่ยนรูปที่เห็นได้ชัดและรอยแตกขยายตัวได้อย่างรวดเร็วจนรอยแตกโตขึ้นในทิศทางเกือบตั้งฉากกับทิศทางความเค้นแรงกดที่กระทำการแตกแบบนี้เป็นการแตกแบบปกติของวัสดุโลหะแข็งคือเมื่อได้รับแรงโหลดจากหัวกดทำให้มีแรงดึงแยกผ่าเกรนแสดงให้เห็นถึงการยึดเกาะระหว่างทั้งสแตนคาร์ไบด์กับโคบอลต์



รูปที่ 4.16 แสดงภาพรอยกุดแบบวิกเกอร์ของแผ่นมีดตัดซีเมนต์ทั้งสแตนคาร์ไบด์ที่ผลิตด้วยผงโลหะทั้งสแตนคาร์ไบด์มาตรฐานนำเข้าจากต่างประเทศ (WC-15%Co (OR))

รูปที่ 4.16 แสดงลักษณะรอยกุดและการแตกร้าวของแผ่นมีดตัดผงมาตรฐานที่ผสมโคบอลต์ 15% แสดงถึงลักษณะรอยกุดรูปเต็ม (a) ขนาดกว้าง 50 x 50 μm ลักษณะการแตกร้าวไม่ชัดเจน แต่ลักษณะโครงสร้างเกิดจากการรวมตัวกันเป็นกลุ่มเล็กๆของอนุภาค ซึ่งพบว่ายังมีความพรุนในเนื้อวัสดุอยู่เป็นจำนวนมากซึ่ง ผลการทดสอบความแข็งแผ่นมีดตัดซีเมนต์ทั้งสแตนคาร์ไบด์ที่สัดส่วนการผสมโคบอลต์ 15% แสดงข้อมูลได้ดังนี้



รูปที่ 4.17 ความแข็งชิ้นงานแผ่นมิดตัดที่ผลิตด้วยโลหะผงที่ผารการรีไซเคิลและแผ่นมิดตัดที่ผลิตด้วยผงมาตรฐานนำเข้าจากต่างประเทศส่วนผสม โคบอลต์ 15%

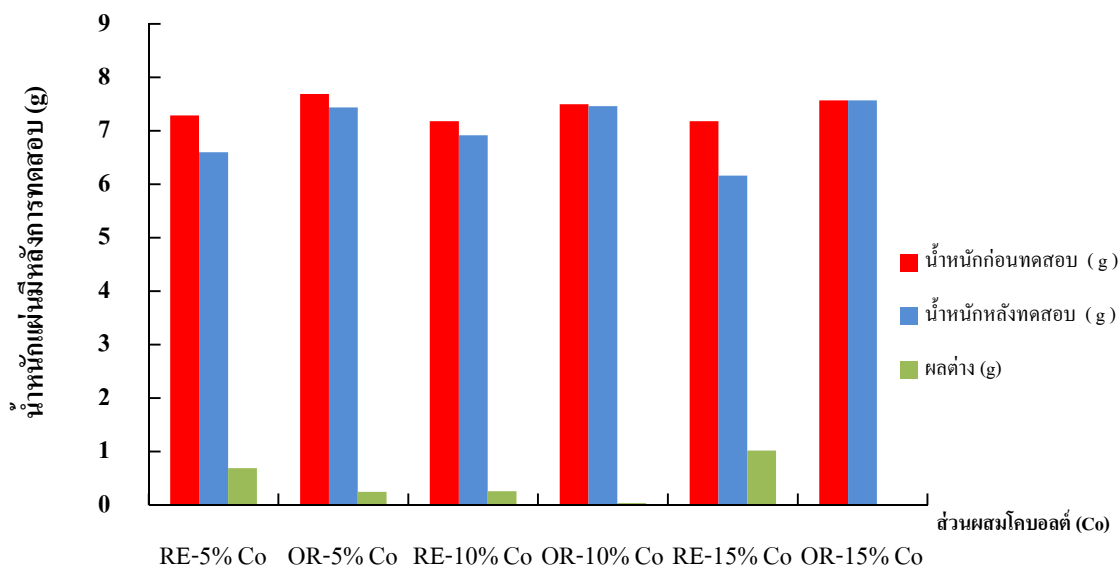
จากรูปที่ 4.17 อธิบายได้ว่าจากการวิเคราะห์ความแข็งของแผ่นมิดที่ผลิตด้วยโลหะผงที่ผ่านการรีไซเคิล (RE-15%Co) มีความต่ำสุดที่ 1,300 Hv สูงสุดอยู่ที่ 1,500 Hv โดยเฉลี่ยความแข็งอยู่ที่ 1,412 Hv ส่วนความแข็งของแผ่นมิดตัดที่ผลิตด้วยผงมาตรฐานนำเข้าจากต่างประเทศมีความแข็งต่ำสุดที่ 1,258 Hv สูงสุดอยู่ที่ 1,345 โดยเฉลี่ยความแข็งอยู่ที่ 1,258 Hv

4.6 ผลการทดสอบการสึกหรอของแผ่นมิดตัดซีเมนต์ทั้งสเดนคาร์ไบด์จากการกลิ้ง

4.6.1 ผลการทดสอบการชั่งน้ำหนักแผ่นมิดตัดซีเมนต์ทั้งสเดนคาร์ไบด์

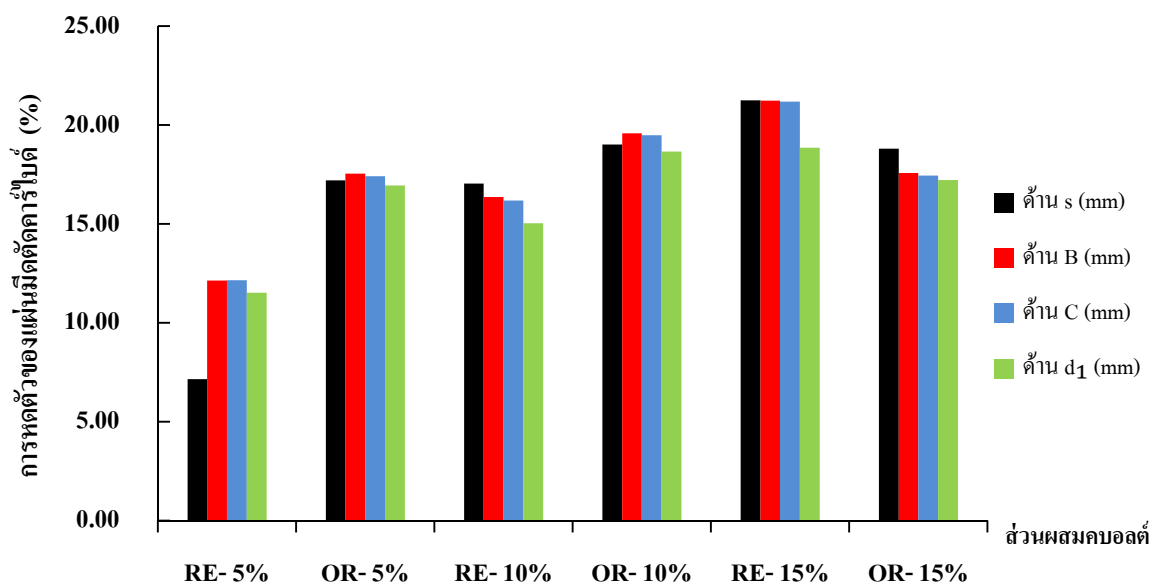
ผลการวิเคราะห์การชั่งน้ำหนักที่หายไปของแผ่นมิดตัดซีเมนต์ทั้งสเดนคาร์ไบด์ ก่อนกลิ้งและหลังกลิ้ง โดยใช้เครื่องชั่งน้ำหนักความละเอียด 0.0001 กรัม เพื่อตรวจสอบหาน้ำหนักที่หายไปหลังจากผ่านการกลิ้ง โดยพิจารณาจากสภาพแผ่นมิดตัดบริเวณคมตัด ว่าคมตัดสามารถใช้งานต่อได้หรือไม่ ซึ่งจะมีผลการทดสอบดังนี้

4.6.1.1 ผลการทดสอบการชั่งน้ำหนักที่หายไป ของแผ่นมิดตัดซีเมนต์ทั้งสเดนคาร์ไบด์ที่ผลิตจากโลหะผงทั้งสเดนคาร์ไบด์ที่ผ่านการรีไซเคิล (WC-15%Co (RE)) จำนวน 3 ส่วนผสม และแผ่นมิดตัดซีเมนต์ทั้งสเดนคาร์ไบด์ที่ผลิตจากโลหะผงทั้งสเดนคาร์ไบด์มาตรฐานนำเข้าจากต่างประเทศ (WC-15%Co (OR)) จำนวน 3 ส่วนผสม ซึ่งอธิบายผลได้ดังนี้



รูปที่ 4.18 การวิเคราะห์น้ำหนักแผ่นมิดดซีเมนต์ทั้งสแตนคาร์ไบด์ที่เปลี่ยนแปลง ก่อน-หลังการทดสอบประสิทธิภาพ

จากรูปที่ 4.18 แสดงการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของแผ่นมิดซีเมนต์ทั้งสแตนคาร์ไบด์ภายหลังทดสอบประสิทธิภาพการกลึง จากการพิจารณาปรากฏว่า น้ำหนักเฉลี่ยของแผ่นมิดที่ผลิตด้วยโลหะผงที่ผ่านการรีไซเคิลส่วนผสม 5-15% Co มีน้ำหนักระหว่าง 7.18-6.6 g หลังกลึงทดสอบแล้วอยู่ระหว่าง 6.16-6.92 g และน้ำหนักเฉลี่ยที่หายไปอยู่ระหว่าง 0.26-1.02 g ส่วนแผ่นมิดดที่ผลิตด้วยผงมาตรฐานนำเข้าจากต่างประเทศส่วนผสม 5-15% มีน้ำหนักอยู่ระหว่าง 7.50-7.69 g หลังกลึงทดสอบแล้วมีน้ำหนักระหว่าง 7.44-7.57 g และน้ำหนักเฉลี่ยที่หายไปอยู่ระหว่าง 0.01-0.25 g



รูปที่ 4.19 แสดงเปอร์เซ็นต์ (%) การหดตัวของชิ้นงานแผ่นมิดตัดที่ผลิตด้วยโลหะผงที่ผ่านการรีไซเคิล (RE) และผงมาตรฐานนำเข้าจากต่างประเทศ (OR)

รูปที่ 4.19 แสดงสัดส่วนการหดตัวของแผ่นมิดตัดที่ผลิตด้วยผงโลหะที่ผ่านการรีไซเคิล (RE) และแผ่นมิดตัดที่ผลิตด้วยผงมาตรฐานที่นำเข้าจากต่างประเทศ (OR) ที่ส่วนผสมโบลต์ 5, 10, และ 15% ผลการเปรียบเทียบปรากฏว่า อัตราส่วนการหดตัวของแผ่นมิดที่ผลิตด้วยผงโลหะที่ผ่านการรีไซเคิลด้าน s มีขนาดระหว่าง 7.15-21.15% ด้าน B มีขนาดระหว่าง 12.14-21.22 ด้าน C มีขนาดระหว่าง 12.6-21.18 และด้าน d₁ มีขนาดระหว่าง 11.52-18.85 % ส่วนแผ่นมิดตัดที่ผลิตด้วยผงมาตรฐานนำเข้าจากต่างประเทศเปอร์เซ็นต์การหดตัวประกอบด้วย ด้านด้าน s มีขนาดระหว่าง 17.21-19.01% ด้าน B มีขนาดระหว่าง 17.53-19.58 ด้าน C มีขนาดระหว่าง 17.42-19.48 และด้าน d₁ มีขนาดระหว่าง 16.94-18.65 %

4.6.2 การวิเคราะห์การสึกหรอของแผ่นมิดตัดโดยรูปถ่ายและวัดระยะสึกหรอ

โดยทำการถ่ายรูปการสึกหรอก่อนทำการกลึงและหลังทำการกลึง ใช้กล้องกำลังขยาย 10 เท่า เพื่อตรวจสอบลักษณะการสึกหรอของมุมแผ่นมิดตัดและวัดระยะสึกหรอบริเวณมุมมิดตัดที่เสียหาย ได้ผลดังนี้

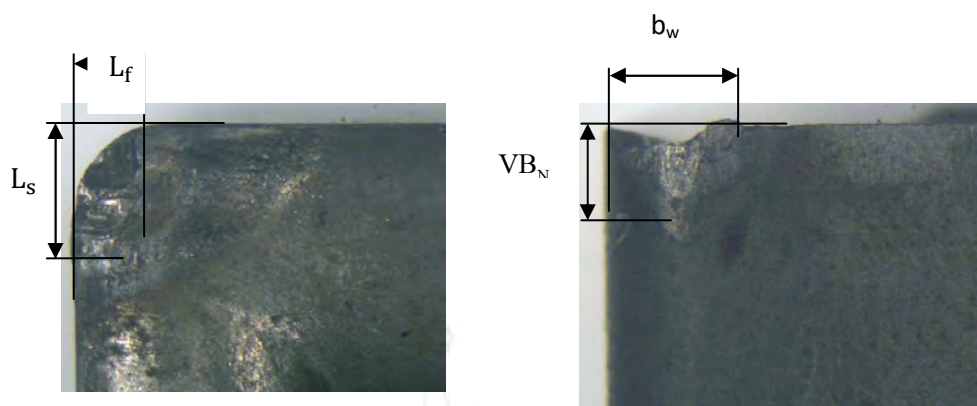
4.6.2.1 ผลการทดสอบการสึกหรอของแผ่นมิดตัดซีเมนต์ทั้งสแตนคาร์ไบด์ที่ผลิตด้วยโลหะผงทั้งสแตนคาร์ไบด์ที่ผ่านการรีไซเคิล (WC-10%Co (RE))



รูปที่ 4.20 ลักษณะคมตัดก่อนทดสอบบริเวณผิวภายนอกของแผ่นตัดที่ผลิตด้วยโลหะผงทั้งสแตนคาร์ไบด์ที่ผ่านการรีไซเคิล

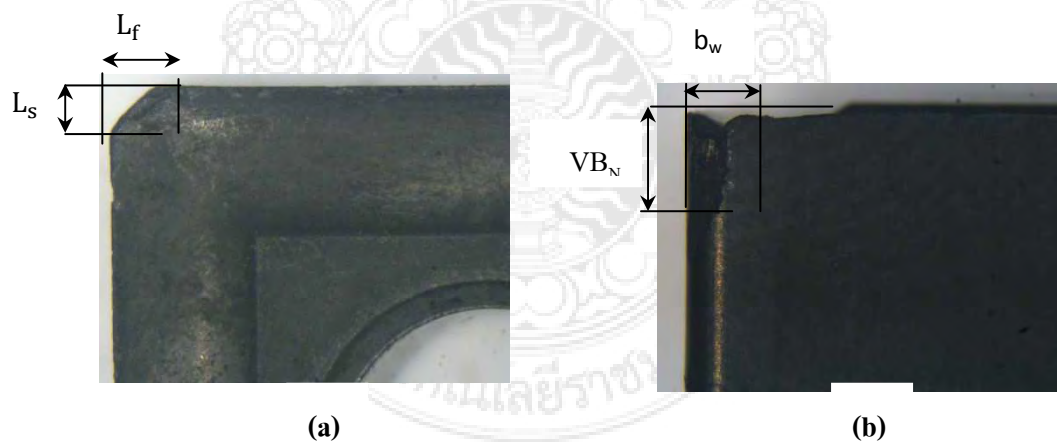


รูปที่ 4.21 ลักษณะคมตัดบริเวณด้านข้างหลังการทดสอบของแผ่นมีดตัดที่ผลิตด้วยโลหะผงทั้งสแตนคาร์ไบด์ที่ผ่านการรีไซเคิล



รูปที่ 4.22 ลักษณะการสึกหรอของแผ่นมีดตัดซีเมนต์คาร์ไบด์หลังการทดสอบประสิทธิภาพ

จากรูปที่ 4.22 แสดงภาพตัวอย่างการสึกหรอหลังจากทำการกลึงชิ้นงานชิ้นงานทดสอบ ซึ่งจากภาพแสดงลักษณะการสึกหรอของแผ่นมีดตัดซีเมนต์ทั้งสแตนคาร์ไบด์ที่ผลิตด้วยโลหะผงที่ผ่านการรีไซเคิลแสดงถึงการสึกหรอบริเวณผิวคายเศษ (Crater Wear) และ (Notch Wear) บริเวณด้านข้างคมตัดซึ่ง ได้ทำการวัดระยะสึกหรอบริเวณผิวคายเศษ ปรากฏว่าระยะ (L_s) 1.82 มิลลิเมตร ระยะ (L_f) 2.02 มิลลิเมตร วัดระยะสึกหรอของบริเวณด้านข้างคมตัด ระยะ (VB_N) 1.17 มิลลิเมตร ระยะ (b_w) 2.80 มิลลิเมตร



รูปที่ 4.23 แผ่นมีดตัดซีเมนต์ทั้งสแตนคาร์ไบด์ที่ผลิตด้วยโลหะผงทั้งสแตนคาร์ไบด์มาตรฐานนำเข้าจากต่างประเทศส่วนผสม 15%Co (a) มุมคายเศษ (b) Flank Wear

จากรูปที่ 4.23 แสดงภาพการสึกหรอหลังจากทำการกลึงชิ้นงานทดสอบ เป็นการสึกหรอของแผ่นมิลตัดซีเมนต์ทั้งสแตนคาร์ไบด์ที่ผลิตด้วยโลหะผงทั้งสแตนคาร์ไบด์มาตรฐานนำเข้าจากต่างประเทศส่วนผสม 15%Co จากลักษณะการสึกหรอ ได้ทำการวัดระยะสึกหรอบริเวณผิวภายนอก (L_s) 0.92 มิลลิเมตร ระยะ (L_r) 2.14 มิลลิเมตร ระยะการสึกหรอบริเวณด้านข้างคมตัด (Flank wera) (VB_N) 1.24 มิลลิเมตร ระยะ (b_w) 1.63 มิลลิเมตร

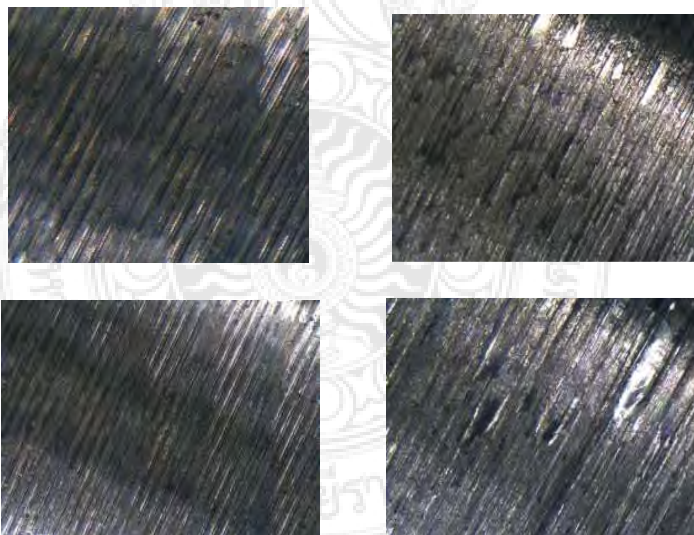
4.6.3 การทดสอบความเรียบผิวของชิ้นงาน AISI 1045

การทดสอบความเรียบผิวของวัสดุทดสอบ (Surface Roughness) หลังทำการกลึงเพื่อดูความเรียบของผิวงาน ซึ่งจะถ่ายภาพผิวและวัดค่าความเรียบผิว ซึ่งค่าความเรียบผิวตามมาตรฐานในงานกลึงค่าเฉลี่ยจะอยู่ในช่วง 0-3.2 ไมครอน (μm) การทดสอบแบ่งชิ้นงานเป็น 4 จุด จุดแต่ละจุดที่ทำการวัดจะมีระยะห่างกัน 90 องศา

4.6.3.1 ผลการทดสอบลักษณะของผิวของชิ้นงาน ที่ผ่านการกลึงด้วยแผ่นมิลตัดซีเมนต์ทั้งสแตนคาร์ไบด์ที่ผลิตจากโลหะผงทั้งสแตนคาร์ไบด์ที่พัฒนาขึ้นใหม่ (รีไซเคิล) จากเศษแผ่นมิลตัด (WC-15%Co (OR)) ด้วยกำลังขยาย 10 เท่า

ผิวงานกลึงของแผ่นมิลที่ผลิตด้วยผงที่พัฒนาขึ้นใหม่

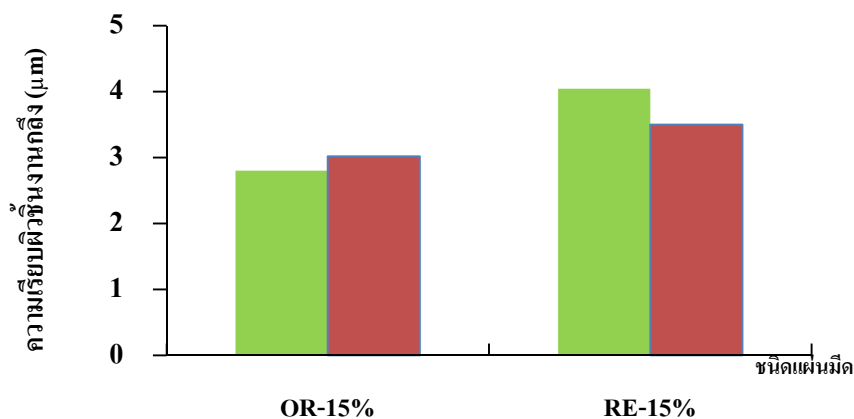
ผิวงานกลึงของแผ่นมิลแผ่นมิลที่ผลิตด้วยผงมาตรฐาน



รูปที่ 4.24 ลักษณะของผิวชิ้นงานกลึงของแผ่นมิลผงที่ผลิตด้วยโลหะผงที่ผ่านการรีไซเคิลและแผ่นมิลที่ผลิตด้วยผงมาตรฐานนำเข้าจากต่างประเทศ

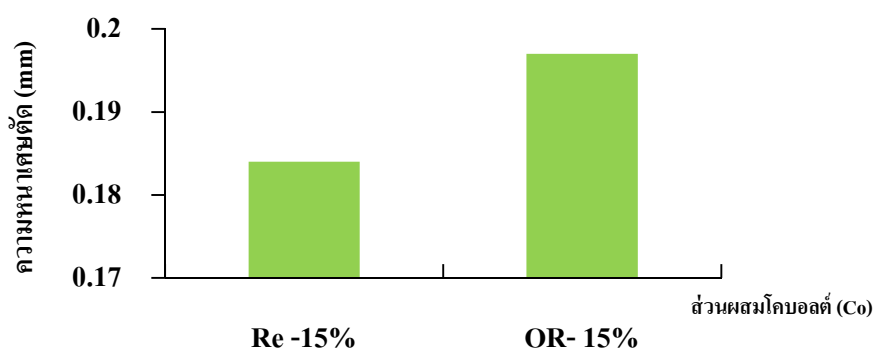
จากรูปที่ 3.24 แสดงผิวกลึงของแผ่นมิลที่ผลิตด้วยผงที่ผ่านการรีไซเคิลและแผ่นมิลที่ผลิตด้วยผงมาตรฐานนำเข้าจากต่างประเทศ โดยใช้ความเร็วตัด (Cutting Speed) 50 เมตร/นาที อัตรา

ป้อน (Feed rate) 0.05 มิลลิเมตร/รอบ ระยะป้อนลึก (Depth of cut) 1.0 มิลลิเมตร ความเร็วรอบ (Revolution) 465.34 รอบ/นาที



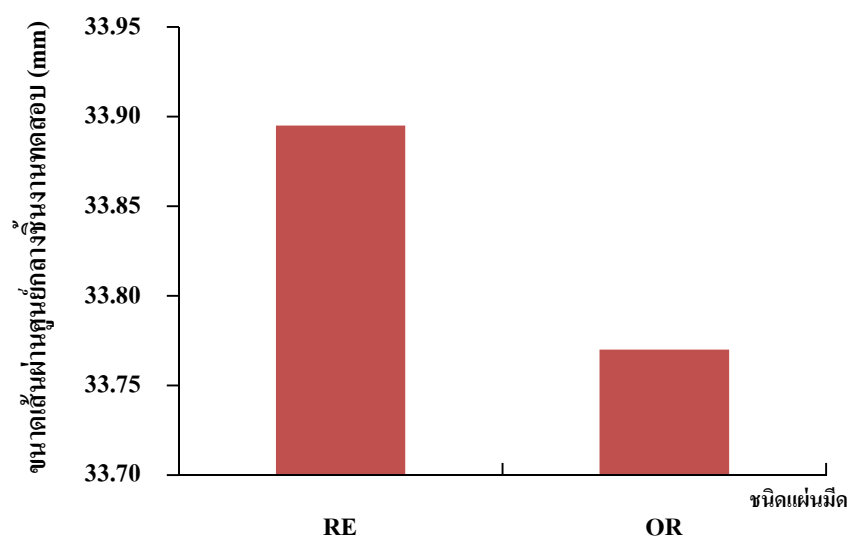
รูปที่ 4.25 ผลการเปรียบเทียบค่าความเรียบผิวของแผ่นมีดตัดซีเมนต์ทั้งสแตนคาร์ไบด์ที่ผลิตด้วยโลหะผงทั้งสแตนคาร์ไบด์ที่ผ่านการรีไซเคิลและผงมาตรฐานนำเข้าจากต่างประเทศ

จากรูปที่ 4.25 แสดงผลการเปรียบเทียบค่าความเรียบผิวของแผ่นมีดตัดซีเมนต์ทั้งสแตนคาร์ไบด์ที่ผลิตด้วยโลหะผงทั้งสแตนคาร์ไบด์ที่ผ่านการรีไซเคิลและแผ่นมีดที่ผลิตจากผงมาตรฐานนำเข้าจากต่างประเทศที่สัดส่วนการผสม 5-15%Co ผลการทดสอบปรากฏว่า แผ่นมีดที่ผลิตด้วยผงที่ผ่านการรีไซเคิลค่าความเรียบผิวระหว่าง 3.02-3.5 μm แผ่นมีดผงมาตรฐานผงนำเข้าจากต่างประเทศแสดงค่าความเรียบผิวระหว่าง 2.80-4.04 μm



รูปที่ 4.26 ผลการวิเคราะห์ความหนาเศษตัดระหว่างแผ่นมีดที่ผลิตด้วยผงที่ผ่านการรีไซเคิลกับแผ่นมีดที่ผลิตด้วยผงมาตรฐานนำเข้าจากต่างประเทศ

จากรูปที่ 4.26 แสดงผลการวิเคราะห์ความหนาเศษตัดของแผ่นมิดที่ผลิตด้วยผงที่ผ่านการรีไซเคิลกับแผ่นมิดตัดที่ผลิตด้วยผงมาตรฐานที่นำเข้าจากต่างประเทศที่ส่วนผสม 15 % โคบอลต์ (Co) ผลทดสอบปรากฏว่าความหนาเศษตัดที่ผ่านการกลึงด้วยแผ่นมิดที่ผลิตด้วยผงที่ผ่านการรีไซเคิลมีความหนา 0.184 μm ส่วนความหนาเศษตัดที่ผ่านการกลึงด้วยแผ่นมิดที่ผลิตด้วยผงมาตรฐานนำเข้าจากต่างประเทศมีความหนา 0.197 μm



รูปที่ 4.27 ผลการวัดขนาดของชิ้นงานทดสอบหลังทำการกลึง

จากรูปที่ 4.27 เป็นผลการวิเคราะห์ขนาดความโตของชิ้นงานทดสอบที่ผ่านการกลึงด้วยแผ่นมิดที่ผลิตด้วยโลหะผงที่ผ่านการรีไซเคิล ผลปรากฏว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของชิ้นงานที่ผ่านการกลึงด้วยแผ่นมิดที่ผลิตด้วยโลหะผงที่ผ่านการรีไซเคิลมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของชิ้นงานอยู่ที่ 33.90 มิลลิเมตร ส่วนชิ้นงานทดสอบที่กลึงด้วยแผ่นมิดที่ผลิตด้วยผงมาตรฐานนำเข้าจากต่างประเทศมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ที่ 33.77 มิลลิเมตร

4.7 วิเคราะห์ผลการทดสอบ

การดำเนินงานออกแบบและผลิตชิ้นส่วนโลหะความแข็งสูงที่ผลิตขึ้นใหม่ ชนิดแผ่นมิดตัดซีเมนต์ทั้งสแตนคาร์ไบด์เพื่อศึกษาเปรียบเทียบสมบัติทางกลและการใช้งานของแผ่นมิดตัดซีเมนต์คาร์ไบด์ สรุปได้ว่าประสบความสำเร็จได้ตามวัตถุประสงค์ สามารถอธิบายได้ดังนี้

4.7.1 การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของของโลหะผงทั้งสแตนคาร์ไบด์ที่ผลิตจากโลหะผงทั้งสแตนคาร์ไบด์ที่ผ่านการรีไซเคิล เมื่อผ่านการปรับปรุงสมบัติด้วยวิธีการบดแบบ Ball milling

เป็นเวลา 40 ชั่วโมงปรากฏว่ามีขนาดอนุภาคระหว่าง 0.1-4.0 μm มีขนาดการกระจาย ระหว่าง 0.63-1.03 μm เป็นทั้งสเดนบริสุทธิ์ 96.15% ซึ่งสามารถนำไปผลิตเป็นชิ้นส่วน โลหะความแข็งสูง (ผลิตแผ่นมิดตัดซีเมนต์ทั้งสเดนคาร์ไบด์)

4.7.2 จากการทดสอบความหนาแน่นของแผ่นมิดตัดหลังผ่านกระบวนการขึ้นรูปแล้วพบว่า แผ่นมิดตัดซีเมนต์ทั้งสเดนคาร์ไบด์ที่ผลิตด้วยโลหะผงทั้งสเดนคาร์ไบด์ที่ผ่านการรีไซเคิล (WC-15%Co (RE)) มีค่าความหนาแน่น 14.34 g/cm^3 ซึ่งมีความใกล้เคียงกับแผ่นมิดที่ผลิตด้วยผงมาตรฐานนำเข้าจากต่างประเทศ โดยแผ่นมิดตัดซีเมนต์ทั้งสเดนคาร์ไบด์ที่ผลิตด้วยโลหะผงทั้งสเดนคาร์ไบด์มาตรฐานนำเข้าจากต่างประเทศ (WC-15%Co (OR)) มีค่าความหนาแน่น 14.35 g/cm^3

4.7.3 จากการวิเคราะห์การซังน้ำหนักของแผ่นมิดตัดซีเมนต์ทั้งสเดนคาร์ไบด์ที่ทำการตัดเฉือน พบว่าแผ่นมิดตัดที่ผลิตด้วยผงที่ผ่านการรีไซเคิลมีน้ำหนักหายไปหลังผ่านการกลึงอยู่ระหว่าง 0.69-1.02 กรัม ส่วนน้ำหนักของแผ่นมิดที่ผลิตด้วยผงมาตรฐานนำเข้าจากต่างประเทศหลังผ่านการกลึงแล้วพบว่าน้ำหนักหายไปอยู่ระหว่าง 0.04-0.25 กรัม ซึ่งจากลักษณะของโครงสร้างจุลภาคที่มีความพรุนทำให้เกิดการสูญเสียเนื้อวัสดุจากการตัดเฉือน ได้มากดังนั้นจึงต้องทำการปรับปรุงสมบัติด้านโครงสร้างเพื่อให้มีความแข็งแรงสูงขึ้นจึงจะสามารถลดการสูญเสียเนื้อวัสดุเมื่อผ่านการใช้งานลงได้

4.7.4 จากการวิเคราะห์การสึกหรอของแผ่นมิดตัดพบว่าระยะการสึกหรอเฉลี่ยของแผ่นมิดตัดซีเมนต์ทั้งสเดนคาร์ไบด์ที่ผลิตด้วยโลหะผงทั้งสเดนคาร์ไบด์ที่ผ่านการรีไซเคิล (WC-15%Co (RE)) เกิดการสึกหรอมากกว่าที่มุมคายเศษ 0.66 mm ส่วนการสึกหรอของคมตัดด้านข้างอยู่ที่ 0.58 mm แผ่นมิดตัดซีเมนต์ทั้งสเดนคาร์ไบด์ที่ผลิตด้วยโลหะผงทั้งสเดนคาร์ไบด์มาตรฐานนำเข้าจากต่างประเทศ (WC-15%Co (OR)) เพราะการยึดเกาะมีความหนาแน่นน้อยกว่า

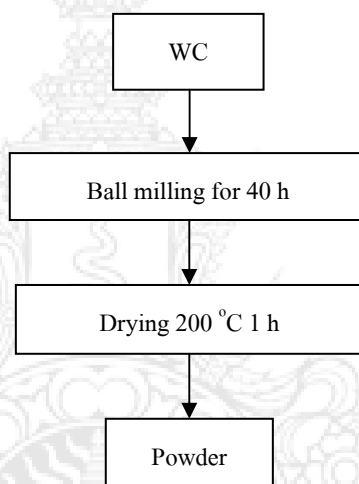
4.7.5 จากการวิเคราะห์ความเรียบผิวของชิ้นงานพบว่าความเรียบผิวเฉลี่ยของแผ่นมิดตัดซีเมนต์ทั้งสเดนคาร์ไบด์ที่ผลิตด้วยโลหะผงทั้งสเดนคาร์ไบด์ที่ผ่านการรีไซเคิล (WC-15%Co (RE)) มีความเรียบผิวระหว่าง 2.7-3.50 μm ซึ่งมีผิวชิ้นงานที่กลึงด้วยแผ่นมิดรีไซเคิลมีความหยาบกว่าแผ่นมิดที่ผลิตด้วยผงมาตรฐานนำเข้าจากต่างประเทศ ซึ่งมีความเรียบผิวระหว่าง 2.80-3.02 μm

4.7.6 จากการทดสอบความแข็งของแผ่นมิดตัดซีเมนต์ทั้งสเดนคาร์ไบด์ที่ผลิตด้วยโลหะผงทั้งสเดนคาร์ไบด์ที่ผ่านการรีไซเคิล (WC-15%Co (RE)) มีค่าความแข็งสูงสุดที่ 1500 Hv ซึ่งโดยเฉลี่ยอยู่ที่ 1410 HV ซึ่งมีความแข็งสูงกว่าแผ่นมิดตัดซีเมนต์ทั้งสเดนคาร์ไบด์ที่ผลิตด้วยโลหะผงทั้งสเดนคาร์ไบด์มาตรฐานนำเข้า (WC-15%Co (OR)) ที่มีค่าความแข็งสูงสุดอยู่ที่ 1346 Hv โดยเฉลี่ยอยู่ 1258 HV

4.8 การอภิปรายผลการทดลอง

ผลการดำเนินงานวิจัยสำหรับการนำผงโลหะทั้งสแตนคาร์ไบด์ไปใช้งานเพื่อเทียบสมบัติกับผงโลหะทั้งสแตนมาตรฐานนำเข้าจากต่างประเทศ ปรากฏว่าสมบัติเหมาะสมด้านการนำไปประโยชน์ในการผลิตชิ้นส่วนทดการสึกหรอมี่ดังนี้

จากกระบวนการทดลองที่ได้ออกแบบให้เหมาะสมกับการปรับปรุงสมบัติด้านการใช้งานที่มีความสอดคล้องตามหลักทฤษฎี ด้านการปรับปรุงสมบัติโลหะผง โดยวิธีการบดแบบ Ball Milling ของงานวิจัยหลายๆ งานวิจัยเช่น [37, 40, 48,51, 54, 55] ผลจากการศึกษาจึงทำการออกแบบวิธีการบดแบบบอลมิลลิ่ง โดยมีขั้นตอนดังนี้



รูปที่ 4.28 แสดงขั้นตอนการปรับปรุงสมบัติผงโลหะโดยวิธีการบดแบบ Ball Milling

แสดงขั้นตอนดำเนินการบดผงโลหะสามารถอธิบายได้ดังนี้ เตรียมวัสดุผงทั้งสแตนคาร์ไบด์ (WC) ลูกบด สารช่วยบดเอทานอล (Ethanol) เตรียมส่วนผสมลงในหม้อบด ตั้งเวลาบด 40 ชั่วโมง หลังบดเสร็จทำการอบด้วยเตาสูญญากาศ เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

จากการวิเคราะห์ผลการดำเนินการพัฒนาสมบัติผงโลหะเพื่อผลิตชิ้นส่วนปรากฏว่าผลการวิเคราะห์สมบัติของรูปร่างและลักษณะ โครงสร้างจุลภาคขนาดอนุภาคอยู่ระหว่าง 0.1-0.22 μm ซึ่งใกล้เคียงกับรายงานวิจัย [56] และจากการวิเคราะห์ขนาดและการกระจายพบว่าขนาดการกระจายส่วนใหญ่มีขนาดไม่เกิน 0.1-0.5 μm ซึ่งใกล้เคียงกับรายงานวิจัย [46] วัสดุผงผลิตจากงานวิจัยนี้มีส่วนผสม 96.69% ทั้งสแตนคาร์ไบด์ (WC), 1.68% แทนทาลัม (Ta), 1.21% ไทเทเนียม (Ti) และ 0.42% นีโอเบียม (Nb) และอื่นๆ เมื่อผสมโลหะประสานโคบอลต์ในช่วง 5-15% โดยใช้ผงโลหะ 2

ชนิดคือ ผงที่ผ่านการรีไซเคิล (ผลิตขึ้นใหม่) และผงมาตรฐานนำเข้าจากต่างประเทศ โดยกระบวนการอัดขึ้นรูปและอบผนึกที่อุณหภูมิระหว่าง 600-1,500 °C [35] เป็นแผ่นมิลด์ขนาด 12.39 x 13.82 x 5.6 mm เปอร์เซ็นต์การหดตัวอยู่ระหว่าง 7.15-21.22% ได้ชิ้นงานความแข็ง 1,410 Hv (อยู่ในช่วงมาตรฐานที่ 1,050-1,900 Hv) ที่ความหนาแน่น 14.34 g/cm³ ซึ่งใกล้เคียงกับชิ้นงานจากงานวิจัย [36] ผลการทดสอบกลึงเหล็กกล้า S45C ปรากฏว่า แผ่นมิลด์ที่ผลิตด้วยผงที่ผ่านการรีไซเคิลมีระยะการสึกหรอมากกว่า ประกอบด้วยการสึกหรอบริเวณผิวฉายเศษอยู่ที่ 0.60 mm ส่วนบริเวณด้านข้าง (Flank Wear) ระยะการสึกหรออยู่ที่ 0.58 mm ซึ่งใช้งานได้ดีที่ความเรียบผิวระหว่าง 2.7-3.5 µm ส่วนแผ่นมิลด์ที่ผลิตด้วยโลหะผงมาตรฐานนำเข้าจากต่างประเทศ ปรากฏว่ามีความแข็ง 1346 Hv ที่ความหนาแน่น 14.34 g/cm³ ผลการทดสอบกลึงเหล็กกล้า S45C ปรากฏว่า ใช้งานได้ดีที่ความเรียบผิวระหว่าง 2.8-3.02 µm



บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย

ผลการวิจัยเพื่อออกแบบและผลิตชิ้นส่วนโลหะความแข็งสูง (Hard metals) จากโลหะผงทั้งสแตนคาร์ไบด์ที่ผ่านการ Recovered ด้วยเทคโนโลยีที่พัฒนาขึ้นใหม่ การศึกษาสมบัติของชิ้นส่วนมาตรฐานต่อความสามารถในการใช้งานเพื่อเปรียบเทียบสมบัติทางกลและการในงานของชิ้นส่วนโลหะแข็งที่พัฒนาขึ้นนี้สามารถสรุปได้ว่า

จากผลการดำเนินงานวิจัยปรากฏว่ากระบวนการที่พัฒนาขึ้นใหม่ โดยวิธีการบดแบบ Ball Milling สามารถผลิตโลหะผงทั้งสแตนคาร์ไบด์ที่มีสมบัติเหมาะสมในการผลิตชิ้นงานคาร์ไบด์ที่ขนาดและการกระจายของโลหะผงทั้งสแตนคาร์ไบด์อยู่ระหว่าง 0.1-0.22 ไมครอน วัสดุผงรีไซเคิลดังกล่าวมีความบริสุทธิ์ 96.15% ลักษณะการกระจายแบบโค้งปรกติ

เมื่อทำการบดละเอียดเป็นเวลา 40 ชั่วโมงพบว่าโครงสร้างผลึกส่วนใหญ่มีขนาดระหว่าง 0.1-0.5 ไมครอน จากการตรวจสอบส่วนผสมทางเคมีพบว่าโลหะผงส่วนใหญ่เป็นทั้งสแตนคาร์ไบด์ (WC) แต่ยังมีธาตุอื่นๆ ผสมอยู่เล็กน้อยเช่น ไทเทเนียมคาร์ไบด์ (TiC) ไทเทเนียมแทนทาลัมคาร์ไบด์ (TiTaC₂) และ โคบอลต์ (Co) เป็นต้น

จากการตรวจสอบ โครงสร้างจุลภาคโลหะผงหลังทำการผสมโลหะประสาน โคบอลต์ 5-15% ปรากฏว่าขนาดโลหะผงอยู่ระหว่าง 0.05-0.5 ไมครอน เมื่อผ่านการขึ้นรูปด้วยกำลังอัด 350 Mpa สามารถผลิตชิ้นงานแผ่นมีดตัดขนาด 15.70 x 15.74 x 6.48 มิลลิเมตร เมื่อผ่านการอบด้วยอุณหภูมิ 1,450 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ขนาดแผ่นมีดที่ผลิตจากโลหะผงที่ผ่านการรีไซเคิลมีขนาดชิ้นงาน 12.39 x 13.82 x 5.6 มิลลิเมตร ที่ความหนาแน่น 14.34 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร จากการตรวจสอบความแข็งโดยเฉลี่ย 1,410 HV และความแข็งสูงสุดคือ 1,500 Hv ด้านประสิทธิภาพการใช้งานด้วยการกลึงปรากฏว่าแผ่นมีดที่ผลิตด้วยผงที่ผ่านการรีไซเคิลเกิดการสึกหรอมากกว่า ซึ่งการสึกหรอบริเวณผิวฉายเศษระยะการสึกหรออยู่ที่ 0.60 มิลลิเมตร ส่วนบริเวณด้านข้าง (Flank Wear) ระยะการสึกหรอเท่ากับ 0.58 มิลลิเมตร คุณภาพผิวชิ้นงานมีความเรียบระหว่าง 2.7-3.5 μm จากผลการวิจัยนี้จึงสรุปได้ว่าประสบความสำเร็จสามารถผลิตชิ้นส่วนโลหะความแข็งสูงที่มีสมบัติพื้นฐานเป็นไปตามชิ้นส่วนมาตรฐานซึ่งจะได้ดำเนินการวิจัยและพัฒนาสมบัติของชิ้นงานเพื่อให้เหมาะสมต่อการนำไปใช้ประโยชน์ได้อย่างมีประสิทธิภาพในอนาคตต่อไป

5.1 ข้อเสนอแนะ

1. ควรพัฒนาต่อยอดการผลิตชิ้นงานความแข็งสูงชนิดซีเมนต์คาร์ไบด์ด้วยการศึกษาอิทธิพลของการอัดขึ้นรูป การศึกษาอุณหภูมิในการอบผึ่ง เพื่อเพิ่มความสามารถด้านการใช้งาน
2. ควรพัฒนาผลการทดสอบสมบัติทางกลอื่นๆ เช่น transverse ruptures strength, tool life
3. ควรพัฒนาโครงสร้างเกรนที่เหมาะสมต่อการเพิ่มความสามารถด้าน ความต้านทานการสึกหรอ การพัฒนาสมบัติด้านความแข็งและความแข็งแรงของชิ้นงาน
4. พัฒนาชิ้นงานโลหะความแข็งสูงไปใช้งานในเชิงพาณิชย์



บรรณานุกรม

ไทย

- [1] วิษระ กงจักร, ปาลิต ภูวนานูวัฒน์, จตุรงค์ แก้วสว่าง, 2551, ศึกษากระบวนการผลิตและผลิตแผ่นมิดซีเมนต์ทั้งสแตนคาร์ไบต์สำหรับงานกลึงปอก, ปรินูญานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตร์บัณฑิต สาขาวิศวกรรมสาขาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
- [2] กิตติชัย หล่อบุญสม, ศิริชัย ต่อสกุล, 2552, การศึกษาอิทธิพลของสารหล่อเย็นในขบวนการกลึงเล็กหล่อ FCD 400, ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
- [3] พงพันธ์ ราชภักดี, เฉลิมพล คล้ายนิล, 2552, อิทธิพลของสภาวะการกลึงเหล็กกล้าสแตนเลส AISI 316 ด้วยไบเมคคาร์ไบด์ ที่มีผลต่อการสึกหรอไบเมคตัดและความขรุขระของพื้นผิว, ภาควิชาอุตสาหกรรมและเทคโนโลยีสถาปัตยกรรมและเทคโนโลยีสถาปัตยกรรมและเทคโนโลยีสถาปัตยกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
- [4] สุวันชัย พงษ์สุกิจวัฒน์, กอบบุญ หล่อทองคำ, ธาชาย เหลืองวรานันท์, มาวิน สุประดิษฐ์ อนุอยุธยา, เอกสิทธิ์ นิสารัตนพร และ ปฐมา วิสุทธิพิทักษ์กุล “วัสดุศาสตร์และวิศวกรรมวัสดุพื้นฐาน”, สำนักพิมพ์ท็อปส์แปลและเรียบเรียงจาก “Materials Science and Engineering: An Introduction” ของ William D. Callister, Wiley.
- [5] นกิสพร มีมงคล, โทกรรมวัสดุผง (Powder Metallurgy), สำนักหอสมุด มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2548; 123 – 124.

อังกฤษ

- [6]. Erik Lassner and Wolf-Dieter Schubert, Tungsten Properties, Chemistry, Technology, of the Element, Alloy, and Chemical Compounds. Vienna, Austria, 1999
- [7] Kieffer, B.F. and Lassner, E. Tungsten Recycling in Today's Environment. Canada : Canadian Agriculture Library, 1994
- [8] Izabel Fernanda Machado, Luca Girardini, Ivan Lonardelli, Alberto Molinari. The study of ternary carbides formation during SPS consolidation process in the WC-Co-steel System. Int J Refract Met Hard Mater 2009; 27:883-891.
- [9] Jing-Chie Lin, Jain-Yuan Lin, Shie-Peir Jou. Selective dissolution of the cobalt binder from scraps of cemented tungsten carbide in acids containing additives. Chung-Li, Taiwan, 1996
- [10] Zhen Xiong, Gangqin Shao, Xiaoliang Shi, Xinglong Duan, Li Yan. Ultrafine hardmetals prepared by WC-10 wt.%Co composite powder. Int J Refract Met Hard Mater 2007; 3:1-9.
- [11] German, R.M., Powder Metallurgy Science, 2nd edition, MPIF, New Jersey, 1994
- [12] Erik Lsaaner, Wolf-Dieter Schubert, 1999, Tungsten, Kluwer Academic/Plenum Publishers, New
- [13] Farid Akhtar, Islam S. Humail, S.J. Askari, Jianjun Tian, Guo Shiju, Effect of WC particle size on the microstructure, mechanical properties and fracture behavior of WC-(W, Ti, Ta) C-6 wt% Co cemented carbides, International Journal of Refractory Metals & Hard Materials 25 (2007) 405-410
- [14] Graham T. Smith, "Cutting Tool Technology: Industrial Handbook", 22, 2008
- [15] S. Olovsjoa, A. Wretlandb, G. Sjobergb, The effect of grain size and hardness of wrought Alloy 718 on the wear of cemented carbide tools, Wear 268 (2010) 1045-1052
- [16] 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) 82-94
- [17] Dr. Wolf-W. Albrecht, Hard Metal (WC-Co), retired Director of H.C. Starck, Germany, and November 2008.

อังกฤษ (ต่อ)

- [18] Gerald R. Smith , Materials Flow of Tungsten in the United State. Bureau of mines information circular, 1994
- [19] H. Puga, J. Barbosa, D. Soares, F. Silva, S. Ribeiro. Recycling of aluminium swarf By direct incorporation in aluminium melts. *Journal of Materials Processing Technology* 2009; 209:5195-5203.
- [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] Zhen Xiong, Gangqin Shao, Xiaoliang Shi, Xinglong Duan, Li Yan. Ultrafine hardmetals prepared by WC-10 wt.%Co composite powder. *Int J Refract Met Hard Mater* 2007;3:1-9.
- [22] S. Hairunnisha, G.K. Sendil, J. Prabhakar Rethinaraj, G.N. Srinivasan, P. Adaikkalam, S. Kulandaisamy. Studies on the preparation of pure ammonium para tungstate from Tungsten alloy scrap. *Hydrometallurgy* 2007; 85:67-71.
- [23] F.L. Zhang a,*, M. Zhu b, C.Y. Wang a, Parameters optimization in the planetary ball milling of nanostructured tungsten carbide/cobalt powder, *International Journal of Refractory Metals & Hard Materials* 26 (2008) 329–333
- [24] 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, *Int. Journal of Refractory Metals & Hard Materials* 27 (2009) 1014–1018
- [25] 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
- [26] P. Roy, S.K. Sarangi, A. Ghosh, A.K. Chattopadhyay, Machinability study of pure aluminium and Al–12% Si alloys against uncoated and coated carbide inserts, *Int. Journal of Refractory Metals & Hard Materials* 27 (2009) 535–544
- [31] M. Hagiwara, S. Chen, I.S. Jawahir, Contour finish turning operations with coated grooved tools: Optimization of machining performance, *journal of materials processing technology* 209 (2009) 332–342

อังกฤษ (ต่อ)

- [28] Rasit Koc a, Suneel K. Kodambaka b, Tungsten carbide (WC) synthesis from novel precursors, *Journal of the European Ceramic Society* 20 (2000) 1859±1869
- [29] T. KOJIMA, T. SHIMIZU, R. SASAI, H. ITOH, Recycling process of WC-Co cermets by hydrothermal Treatment, Nagoya University, Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya 464-8603, Japan 2005.
- [30] M.H. Enayati, G.R. Aryanpour, A. Ebnonnasir, Production of nanostructured WC-Co powder by ball milling, *Int. Journal of Refractory Metals & Hard Materials* 27 (2009) 159–163 *Metals & Hard Materials* 24 (2006) 461–464.
- [31] G. Prabhu, Amitava Chakraborty, Bijoy Sarma, Microwave sinter of tungsten, *Int. Journal of Refractory Metals & Hard Materials* 27 (2009) 545-548.
- [32] Zhonglai Yi, Gangqin Shao*, Xinglong Duan, Peng Sun, Xiaoliang Shi, Zhen Xiong and Jingkun Guo, Preparation of WC-Co Powder by Direct Reduction and Carbonization, *China Particuology* Vol. 3, No. 5, 286-288, 2005.
- [33] A. S. Kurlov and A. I. Gusev, Tungsten Carbides and W-C Phase Diagram, ISSN 0020-1685, *Inorganic Materials*, 2006, Vol. 42, No. 2, pp. 121–127.
- [34] Hwan-Cheol Kim a, In-Jin Shon a, Jin-Kook Yoon b, Jung-Mann Doh b, Z.A. Munir c “Rapid sintering of ultrafine WC-Ni cermets”, *International Journal of Refractory Metals & Hard Materials* 24 (2006) 427–431
- [35] Gwan-Hyoung Lee, Shinhoo Kang, Sintering of nano-sized WC-Co powders produced by a gas reduction-carburization process, *Journal of Alloys and Compounds* 419 (2006) 281–289
- [36] *ASM Engineered Materials Reference Book*”, ASM International, pp. 182, 1989.
- [37] Zhang Li a, Wang Yuan-jie a, Yu Xian-wang a, Chen Shu b, Xiong Xiang- jun, Crack propagation characteristic and toughness of functionally, *International Journal of Refractory Metals & Hard Materials* 26 (2008) 295–300
- [38] L.A. Dobrzanski, B. Dolanska, Hardness to toughness relationship on WC-Co tool gradient materials evaluated by Palmqvist method, *International Scientific Journal Archives of materials Science and Engineering* Volume 43 (2010) 87–93]

อังกฤษ (ต่อ)

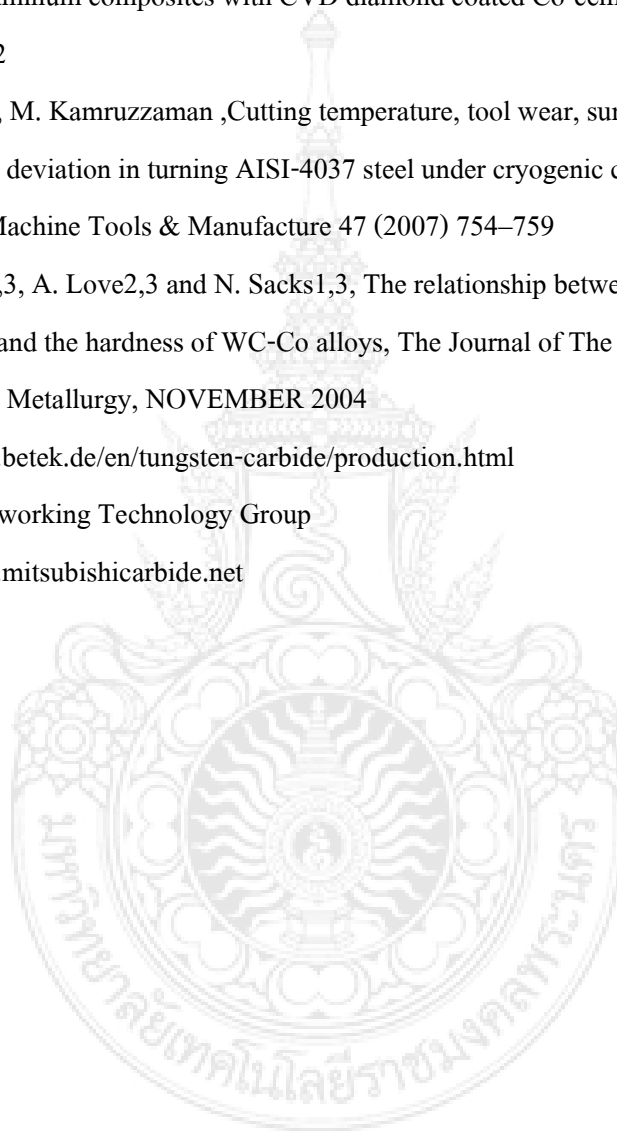
- [39] P. Shanmugavel, G. B. Bhaskar, M. Chandrasekaran, P. S. Mani, S. P. Srinivasan, An Overview of Fracture Analysis in Functionally Graded Materials, European Journal of Scientific Research ISSN 1450-216X Vol.68 No.3 (2012), pp. 412-439
- [40] V. Bonache, M.D. Salvador, D. Busquets, P. Burguete, E. Martíne, F. Sapiña, E. Sánchez, “Synthesis and processing of nanocrystalline tungsten carbide: Towards cemented carbides with optimal mechanical properties” Universidad Politécnica de Valencia, 2010.
- [41] <http://www.sandvik.coromant.com>
- [42] Catalogue MITSUBISHI CARBIDE CO,LTD
- [43] S.Paul, N.R. Dhar, A.B. Chattopadhyay, Beneficial effects of cryogenic cooling over dry and wet machining on tool wear and surface finish in turning AISI 1060 steel, Journal of Materials processing technology 116 (2001) 44-48.
- [44] Tribology International, Wear mechanisms of WC coated and uncoated tools in finish turning of Inconel 718 43 (2010) 1113–1121
- [45] <http://www.atimetals.com>.
- [46] U.S. Department of Health and Human Services, Report on Carcinogens Background Document for Cobalt–Tungsten Carbide: Powders and Hard Metals, National Toxicology Program Research Triangle Park, NC 27709, March 16, 2009.
- [47] Catalogue MITSUBISHI CARBIDE CO, LTD.
- [48] J. Maa,b, S.G. Zhu a,b, C.X. Wua,b, M.L. Zhang Application of back-propagation neural network technique to high-energy planetaryball milling process for synthesizing nanocomposite WC–MgO powders, Materials and Design 30 (2009) 2867–2874
- [49] W. Grzesik, “Influence of tool wear on surface roughness in hard turning using differently shaped ceramic tools” Opole University of Technology, 2008
- [50] Stephen A. Hewitt *, Tahar Laoui, Kevin K. Kibble, “Effect of milling temperature on the synthesis and consolidation of nanocomposite WC–10Co powders” University of Wolverhampton, 2008.
- [51] S. Bolokang, C. Banganayi, M. Phasha, “Effect of C and milling parameters on the synthesis of WC powders by mechanical alloying” University of Johannesburg, 2009.

ภาษาอังกฤษ (ต่อ)

- [52] Kuo-Ming Tsai “The effect of consolidation parameters on the mechanical properties of binderless tungsten carbide” National Chin-Yi University of Technology, 2010.
- [53] Jae-chun Lee a,* , Eun-young Kim a, Ji-Hye Kim a, Wonbaek Kim a, Byung-Soo Kim a, Banshi D. Pandey a,b , Recycling of WC–Co hardmetal sludge by a new hydrometallurgical Route, Int. Journal of Refractory Metals and Hard Materials 29 (2011) 365–371
- [54] Yan Li, Zhimeng Guo, “Gelcasting of WC-8wt% Co tungsten cemented carbide” University of Science and Technology Beijing, 2007
- [55] XIAO Dai-hong, HE Yue-hui, LUO Wei-hong, SONG Min, Effect of VC and NbC additions on microstructure and properties of ultrafine WC-10Co cemented carbides, Trans. Nonferrous Met. Soc. China 19(2009) 1520-1525.
- [56] Stephen A. Hewitt *, Tahar Laoui, Kevin K. Kibble, Effect of milling temperature on the synthesis and consolidation of nanocomposite WC–10Co powders, Int. Journal of Refractory Metals & Hard Materials 27 (2009) 66–73.
- [57] Shixian Zhao, Xiaoyan Song, Jiuxing Zhang, Xuemei Liu, Effects of scale combination and contact condition of raw powders on SPS sintered near-nanocrystalline WC–Co alloy, Materials Science and Engineering A 473 (2008) 323–329.
- [58] Tao Li, Qingfa Li, J.Y.H.Fuh, Poh Ching Yu, L.Lu, C.C.Wu “Effects of Lower cobalt binder concentrations in sintering of tungsten carbide”, Materials Science and Engineering A 430 (2006) 113–119.
- [59] INTERNATIONAL TUNGSTEN INDUSTRY ASSOCIATION: ITIA
- [60] Kittichai Lowboonsom, Sirichai Torsakul, Wear Behavior of Cutting Tool Material During the Turning of a Cast Iron FCD 400 in Cutting Lubricants Conditions, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology, Thanyaburi, 2008 ภาษาอังกฤษ (ต่อ)
- [61] Stephen A. Hewitt , Kevin A. Kibble, “Effects of ball milling time on the synthesis and consolidation of nanostructured WC–Co composites” University of Wolverhampton, 2009
- [62] Zhu Baojun, Qu Xuanhui, Tao Ying, “Powder injection molding of WC–8%Co tungsten cemented carbide” Central South University, 2002

ภาษาอังกฤษ (ต่อ)

- [63] Gwan-Hyoung Lee, Shinhoo Kang, Sintering of nano-sized WC–Co powders produced by a gas reduction–carburization process, *Journal of Alloys and Compounds* 419 (2006) 281–289
- [64] Riccardo Polinia, Fabrizio Casadei, Pierangelo D’Antonio, Enrico Traversa, “Dry turning of alumina/aluminum composites with CVD diamond coated Co-cemented tungsten carbide tools” 2002
- [65] N.R. Dhara, M. Kamruzzaman, Cutting temperature, tool wear, surface roughness and dimensional deviation in turning AISI-4037 steel under cryogenic condition, *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 47 (2007) 754–759
- [66] S. Luyckx^{1,3}, A. Love^{2,3} and N. Sacks^{1,3}, The relationship between the abrasion Resistance and the hardness of WC-Co alloys, *The Journal of The South African Institute of Mining and Metallurgy*, NOVEMBER 2004
- [67] <http://www.betek.de/en/tungsten-carbide/production.html>
- [68] Leitz Metalworking Technology Group
- [69] <http://www.mitsubishicarbide.net>



ภาคผนวก ก

เครื่องมือที่ใช้ในการตัดเฉือนชิ้นงานให้เป็นรูปร่างต่างๆ ในขบวนการกลึง

1. วัสดุทำเครื่องมือตัด (Tool Material)

การดำเนินการผลิตในปัจจุบันนี้จำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องมีเครื่องมือกลเข้าช่วยในกระบวนการต่างๆ เพื่อให้การผลิตดำเนินไปอย่างมีประสิทธิภาพ ดังนั้นจึงได้มีการพัฒนาในด้านของเครื่องมือและวัสดุในการผลิตเครื่องมือขึ้นมาเป็นลำดับ โดยวัสดุที่ดีที่สุดสำหรับการผลิตใดๆ ก็คือวัสดุที่ใช้ในการตัดปาดชิ้นงานได้ผลถูกต้องในราคาต่ำสุดเท่าที่ทำได้ ซึ่งคุณสมบัติที่จำเป็นสำหรับวัสดุเครื่องมือกลใดๆ ได้แก่ ความสามารถในการต้านทานการอ่อนตัวที่อุณหภูมิสูง ความมีสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานต่ำ ความต้านทานต่อการขีดสีและความเหนียวแน่นซึ่งเพียงพอที่จะต้านทานต่อการแตกร้าวได้ ชุดเครื่องมือตัดใดๆ อาจทำขึ้นได้จากวัสดุมากกว่าหนึ่งชนิดสำหรับวัตถุประสงค์ที่แตกต่างกันไป เช่น ในการกลึงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 ขนาด จำต้องใช้อัตราการผลิตของเครื่องมือแตกต่างกันไปตามขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางที่ต้องการ ซึ่งไม่จำเป็นที่เครื่องมือตัดต้องทำจากวัสดุชนิดเดียวกัน อันอาจก่อให้เกิดผลเสียต่อทั้งชิ้นงานและตัวเครื่องมือตัดเอง วัสดุหลักที่ใช้ในการทำเครื่องมือตัดอาจกล่าวได้ดังนี้



รูปที่ ก.1 แผ่นมีดสำหรับกลึงเกลียว

1.1 เหล็กกล้าคาร์บอนสูง (High Carbon Steel)

ใช้กันในช่วงที่ยังไม่มีการค้นพบเหล็กกล้าความเร็วสูง โดยวัสดุนี้จะมีปริมาณคาร์บอน 0.8%–1.20% จึงสามารถทำการชุบแข็งได้ดีและด้วยกรรมวิธีทางความร้อนที่เหมาะสมอาจเพิ่มความแข็งของมันจนมีค่าใกล้เคียงกับเหล็กกล้าความเร็วสูงต่างๆ หรืออาจทำให้มีความเหนียวแน่นได้ตามต้องการ อย่างไรก็ตามเหล็กกล้านี้มีความสามารถในการชุบแข็งหรือความลึกในการชุบแข็งต่ำและจะสูญเสียความแข็งที่อุณหภูมิประมาณ 300 องศา ดังนั้นจึงถูกจำกัดใช้เฉพาะเครื่องมือตัดขนาดเล็ก และไม่เหมาะสมในการตัดด้วยความเร็วสูงหรือใช้ในงานหนัก แต่จะใช้ในการปฏิบัติกับวัสดุอ่อน

1.2 เหล็กกล้าความเร็วสูง (High Speed Steel: HSS)

เหล็กกล้าความเร็วสูงหรือเหล็กโรบสูงจะมีส่วนประกอบของโลหะผสมสูง มีความสามารถในการชุบแข็งได้ดีเป็นพิเศษ และสามารถรักษาสภาพของคมตัดที่ดีไว้ได้จนถึงอุณหภูมิประมาณ 650 องศา ซึ่งสภาพนี้เป็นคุณสมบัติในด้านความต้านทานต่อการอ่อนตัวที่อุณหภูมิสูงหรือความแข็งขณะร้อนแดง (red hardness) อันเป็นคุณสมบัติที่ต้องการมากที่สุดในเครื่องมือตัดต่างๆ โดยเหล็กกล้าทำเครื่องมือตัดชนิดแรกที่มีคุณสมบัติดังกล่าวถูกพัฒนาขึ้นโดย Frederick W. Taylor และ M. White ในปี ค.ศ. 1900 ซึ่งทำโดยการเติมทังสเตน (tungsten) 18% และ โครเมียม 5.5% ลงเป็นธาตุผสมในเหล็กกล้า ส่วนผสมนี้สืบทอดมาจนถึงปัจจุบันโดยมีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยเท่านั้น

1.3 โลหะผสมหล่อนอกกลุ่มเหล็ก (Cast Nonferrous Alloy)

โลหะผสมนอกกลุ่มเหล็กจำนวนมากประกอบด้วยส่วนผสมหลัก โครเมียม โคบอลต์และทังสเตนกับธาตุผสมในปริมาณน้อยกว่าตั้งแต่หนึ่งชนิดขึ้นไปที่มีการสร้างรูปแบบคาร์ไบด์ เช่น แทนทาลัม (tantalum) พลวงหรือ โบรอน (boron) ซึ่งเป็นวัสดุที่เหมาะสมเป็นพิเศษสำหรับทำเครื่องมือตัด เมื่อหล่อให้เข้ารูปแล้ววัสดุจะมีความแข็งขณะร้อนแดงสูง และสามารถรักษามุมตัดที่ดีไว้ได้จนถึงอุณหภูมิ 925 องศา เปรียบเทียบกับเหล็กกล้าความเร็วสูงมันจะสามารถใช้ได้ที่อัตราเร็วตัดสูงกว่าถึง 2 เท่าที่อัตราการป้อนเดียวกัน อย่างไรก็ตามโลหะผสมนี้จะไม่ทนต่อการกัดกร่อนและทำการตัดปาดได้ด้วยการเจียรนัยเพียงวิธีเดียวเท่านั้น เครื่องมือตัดที่มีรูปร่างซับซ้อนสามารถขึ้นรูปได้โดยการหล่อในแม่แบบเซรามิกส์ หรือโลหะแล้วทำผิวสำเร็จโดยการเจียรนัย คุณสมบัติของชิ้นงานภกภกภายหลังการหล่อจะแปรไปตามระดับของการหล่อเย็นที่เนื้อวัสดุได้รับในระหว่างการหล่อ ซึ่งส่วนผสมของเนื้อวัสดุเหล่านี้จะอยู่ในช่วงของทังสเตน 12%–25% โคลอบด์ 40%–

50% และ โครเมียม 15%–35% ร่วมกับธาตุที่ทำให้เกิดการก่อตัวของคาร์ไบด์ เช่นคาร์บอนในช่วง 1%–4% โดยสมบัติที่ได้จากส่วนผสมเหล่านี้คือ มีความต้านทานต่อการเกิดแอ่งและความต้านทานต่อการกระแทก ส่วนในด้านของประสิทธิภาพในการตัดนั้นจะอยู่ระหว่างเหล็กกล้าความเร็วสูงและเหล็กกล้าคาร์ไบด์



รูปที่ ก.2 แผ่นมิดสำหรับกลึง

1.4 คาร์ไบด์ (Carbide)

มิดเล็บบคาร์ไบด์ (Carbide cutting tool) ทำขึ้นได้โดยการทางโลหะผงเท่านั้นโดยผงโลหะของทั้งสแตนคาร์ไบด์และโคบอลต์จะถูกอัดให้มีรูปร่างตามต้องการแล้วนำเข้าสู่กระบวนการที่แข็งเหนียวในเตาซึ่งมีบรรยากาศของไฮโดรเจนที่อุณหภูมิ 1550 องศา จากนั้นจึงทำผิวสำเร็จ โดยการเจียรนัย เครื่องมือคาร์ไบด์นี้มีส่วนผสมของทั้งสแตนคาร์ไบด์ประมาณ 94 % และ โคบอลต์ 6 % เหมาะสมกับการตัดปาดเหล็กหล่อและวัสดุอื่นๆจำนวนมากยกเว้นเหล็กกล้า เนื่องจากเศษตัดจะยึดติดหรือเชื่อมตัวเข้ากับผิวหน้าคาร์ไบด์และฝังตัวลงในเครื่องมือตัดอย่างรวดเร็ว อย่างไรก็ตามข้อบกพร่องนี้อาจแก้ไขได้โดยการเติมไททาเนียมและแทนทาลัมคาร์ไบด์ เข้าผสมพร้อมกันกับเพิ่มปริมาณของโคบอลต์ ซึ่งในเครื่องมือตัดของคาร์ไบด์ที่เหมาะสมแก่การปฏิบัติสำหรับเหล็กกล้าจะประกอบไปด้วย ทั้งสแตนคาร์ไบด์ 82% ไททาเนียมคาร์ไบด์ 10% และ โคบอลต์ 8% ส่วนผสมนี้จะมีสัมประสิทธิ์ความเสียดทานต่ำเป็นผลให้มีแนวโน้มการสึกหรอที่ด้านบนหรือความเป็นแอ่งลดน้อยลง เนื่องจากการแปรเปลี่ยนส่วนประกอบ

จะทำให้คาร์ไบด์มีการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติไป โดยคาร์ไบด์ระดับคุณภาพต่างๆสามารถหาซื้อให้เหมาะสมกับการปฏิบัติการทั่วไป

คาร์ไบด์จะสามารถคงตัวไว้ได้ที่อุณหภูมิสูงกว่า 1200 องศา ดังนั้นความแข็งแรงขณะร้อนแดงของวัสดุนี้จึงมีเหนือว่าวัสดุโดยทั่วไป นอกจากนี้ยังเป็นวัสดุจากการสังเคราะห์ที่แข็งที่สุดเท่าที่ผลิตขึ้นได้ และยังมีความแข็งแรงทางด้านแรงอัดสูงเป็นอย่างยิ่ง อย่างไรก็ตามมันมีข้อเสียในด้านที่มีความเปราะสูง มีความต้านทานต่อการกระทบกระแทกต่ำและต้องการฐานรองรับอย่างมั่นคงแข็งแรงเพื่อป้องกันการแตกร้าว ทั้งยังทำการเจียรนัยได้อย่างลำบากเฉพาะกับล้อขัดซิลิกอนคาร์ไบด์หรือเพชรเท่านั้น โดยจะต้องรักษามุมห่าง (Clearance angle) ไว้ให้ต่ำที่สุด เครื่องมือตัดคาร์ไบด์จะสามารถทำการตัดด้วยอัตราเร็ว 2 - 3 เท่า ของเครื่องมือตัดจากโลหะผสมหล่อแต่ในอัตราการป้อนที่น้อยกว่ามาก ในแง่เศรษฐกิจแล้วจึงควรนำเครื่องมือคาร์ไบด์มาใช้ให้มากที่สุด โดยเครื่องจักรสำหรับเครื่องมือคาร์ไบด์จะต้องมีความมั่นคงแข็งแรง มีกำลังพอเพียงและมีช่วงของการป้อนและอัตราเร็วรอบที่เหมาะสมสำหรับวัสดุต่าง ๆ

ทั้งสแตนคาร์ไบด์ที่มีความละเอียดของเกรนสูง (micrograin carbide) จะมีความแข็งและความแข็งแรงสูงเป็นอย่างยิ่ง ใช้งานในที่ซึ่งไม่จำเป็นต้องใช้เครื่องมือตัดคาร์ไบด์ปกติเนื่องจากอัตราเร็วตัดที่ใช้มีค่าต่ำจนเกินไปและในกรณีซึ่งเครื่องมือตัดโดยทั่วไปไม่สามารถทนต่อการสึกหรอได้ รวมทั้งปฏิบัติการขึ้นรูปหรือการตัดขาดเครื่องมือคาร์ไบด์อาจเคลือบด้วยชั้นตัวประสาน (bonded layer) ที่ขนาดความหนา 0.05-0.08 มม. ของไททานเนียมคาร์ไบด์ อลูมินัมออกไซด์ (aluminum oxide) หรือไททานเนียมไนไตรด์ (titanium nitride) เพื่อลดความร้อนจากการวิ่งผ่านของเศษตัดบนเครื่องมือและการแพร่ซึมหรือการยึดติดของเศษตัดรวมทั้งป้องกันการเกิดแอ่งจากการสึกหรอโดยเครื่องมือที่เคลือบด้วยอลูมินัมออกไซด์จะสามารถทำการตัดด้วยอัตราเร็วใกล้เคียงกัน 2 เท่าของอัตราเร็วที่ได้จากการเคลือบด้วยสารอื่น อย่างไรก็ตามเครื่องมือตัดที่มีการเคลือบนี้ไม่เหมาะสมกับชิ้นงานที่มีสะเก็ดมากหรือมีทรายเจือปนอยู่

1.5 เพชร (Diamond)

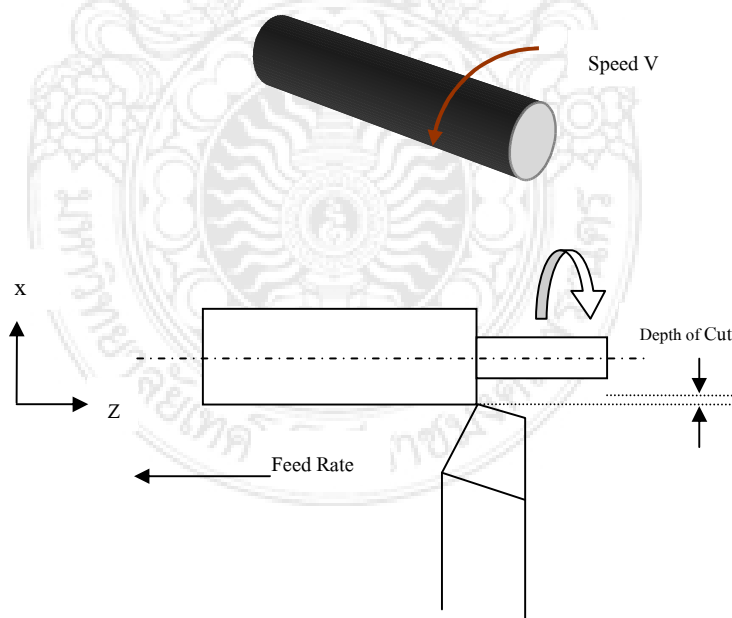
เพชรใช้เป็นเครื่องมือตัดคมเดียวสำหรับการตัดขนาดเบาที่อัตราเร็วสูง ซึ่งต้องมีการรองรับอย่างมั่นคงแข็งแรงเนื่องจากวัสดุเพชรมีความแข็งและเปราะสูงมากเป็นพิเศษ รูปแบบของการทำงานคือ ใช้ในการตัดปาดวัสดุที่มีความแข็งจนยากต่อการปฏิบัติการด้วยเครื่องมืออื่น ๆ ทั้งยังต้องการความแม่นยำและผิวสำเร็จที่ดีเยี่ยมหรือใช้ในการตัดขนาดเบาที่ความเร็วสูงสำหรับวัสดุอ่อนกว่า เช่น การตัด

พลาสติก ยางแข็ง คาร์บอนอัดและอลูมิเนียมที่อัตราเร็วตัด 5-25 เมตรต่อวินาที รวมทั้งสามารถใช้ในการตกแต่งลือหินเจียรนัย แม่แบบคิงสวดขนาดเล็ก การเจียรนัยและการขัดถูจำเพาะอย่าง

1.6 เซรามิกส์ (Ceramic)

เป็นส่วนผสมของผงอลูมิเนียมออกไซด์และสารตัวเติมจำพวก ไททาเนียม แมกนีเซียม หรือโครเมียมออกไซด์ (chromium oxide) รวมตัวประสานที่นำผ่านเข้าขบวนการทำมีดเล็ก (cutting tool insert) ตัวมีดเล็กที่ได้อาจยึดเข้ากับฐานมีดได้ทั้งโดยการใส่ตัวบีบจับ (clamp) หรือการใช้อีพอกซีเรซิน (epoxy resin) โดยสมบัติของมีดเล็กคือมีความแข็งแรงในด้านการรับแรงอัดสูงเป็นอย่างยิ่งแต่ค่อนข้างเปราะ ดังนั้นมีดเล็กจึงต้องมีค่ามุมคายเป็นลบในช่วง 5-7 องศา เพื่อความแข็งแรงเช่นเดียวกับฐานการรองรับซึ่งต้องทำอย่างแน่นหนาเครื่องมือตัดซิลิกอนไนไตรด์ (Silicon Nitride) ซึ่งมีชื่อรหัสเป็น S-8 จะใช้ในการตัดปาดเหล็กหล่อวัสดุจากเซรามิกส์ชนิดนี้มีอายุการใช้งานถึง 1,500 ชั่วโมงเหล็กหล่อในขณะที่เครื่องมือทั้งสแตนคาร์ไบด์เคลือบผิวมีอายุงานเพียง 250 ชั่วโมง

2. การกลึง (Turning Operation) [4]



รูปที่ ก.3 แสดงองค์ประกอบสำหรับการกลึง

งานกลึง คือ การตัดโลหะโดยให้ชิ้นงาน (Work piece) หมุนรอบตัวเอง โดยมีดกลึงเคลื่อนที่เข้าหาชิ้นงาน การกลึงมีสองลักษณะใหญ่คือ

การกลึงปาดหน้า คือ การตัดโลหะโดยให้มิดตัดชิ้นงานไปตามแนวขวาง (Across the work)

การกลึงปอก คือ การตัดโลหะโดยให้มิดตัดเคลื่อนที่ตัดชิ้นงานไปตามแนวนานกับแนวแกนของชิ้นงาน ปัจจัยสำคัญที่ทำให้เกิดกระบวนการของการกลึงปอกคืออัตราป้อน (Feed Rate) ความเร็วตัด (Cutting Speed) ระยะป้อนลึก (Depth of Cut) มีดกลึง (Cutting Tool) และชิ้นงานที่ต้องการทำการตัดเฉือน (Work piece) และเมื่อมีกระบวนการในการกลึงปอกเกิดขึ้น ผลที่จะเกิดขึ้นตามมาก็คือ ขนาดของชิ้นงาน (Work piece Dimension) ความละเอียดของผิวชิ้นงาน (Surface Roughness) เศษกลึง (Chip) การสึกหรอของมีดกลึง (Tool Wear)

ปัจจัยที่สำคัญของงานกลึงปอกด้วยมีดกลึงอินเสิร์ตตามที่กล่าวไว้แล้วว่าปัจจัยสำคัญที่ทำให้เกิดกระบวนการของการกลึงปอกคือ อัตราป้อน (Feed Rate) ความเร็วตัด (Cutting Speed) ระยะป้อนลึก (Depth of Cut) มีดกลึง (Cutting Tool) และชิ้นงานที่ต้องการทำการตัดเฉือน (Work piece) ในการกลึงปอกด้วยมีดกลึง

3. ความเร็วตัด (Cutting speed)

ความเร็วตัด (Cutting speed) คือความเร็วที่คมมีดกลึงตัด หรือปาดผิวโลหะออก เมื่อโลหะหมุนครบ 1 รอบ คมมีดกลึงก็จะตัดโลหะเป็นแนวตัดยาวเท่าเส้นรอบวงพอดี ความเร็วตัดมีหน่วยเป็น เมตร/นาที หลักเกณฑ์การเลือกใช้ความเร็วตัดมีดังนี้ คือ

3.1 วัสดุที่ใช้ทำเครื่องมือตัด (Cutting tools) ที่ทำมาจากเหล็กโรบสูง (High Speed Steel) สามารถใช้ความเร็วตัดเป็น 2 เท่า ของความเร็วตัดของมีดที่ทำมาจากวัสดุเหล็กคาร์บอน ส่วนวัสดุคมตัดที่มีส่วนผสมพิเศษออกไปสามารถใช้ความเร็วตัดได้สูงกว่าเหล็กโรบสูง

3.2 ชนิดของวัสดุ (Material) ที่จะนำมาทำการตัดเฉือน โดยทั่วไปวัสดุงานที่แข็งมากจะใช้ความเร็วตัดช้ากว่าวัสดุที่อ่อนกว่า

3.3 รูปร่างของคมตัด (Form Cutting Tool) มีผลต่อการทำงานมาก เช่น มีดตัดงานขนาดจะใช้ความเร็วรอบต่ำกว่ามีดกลึงปอกผิว

3.4 ความลึกในการตัด (Depth of Cut) ถ้าป้อนตัดลึกจะใช้ความเร็วรอบน้อยกว่าป้อนตัดตื้น

3.5 อัตราป้อน (Rate of Feed) ในการป้อนตัดงานหยาบ เช่น อัตราป้อน 3 มม./รอบ ความเร็วที่ใช้ในการตัดจะต่ำกว่าการป้อนตัดขั้นสุดท้าย เช่น อัตราป้อนตัด 0.13 มม. เป็นต้น จะใช้ความเร็วรอบที่สูง

3.6 การระบายความร้อน (Cutting lubricant) ความเร็วตัดของวัสดุบางชนิดอาจเพิ่มให้สูงขึ้นได้ เมื่อมีการระบายความร้อนที่ถูกต้อง ซึ่งสารระบายความร้อนนี้ จะช่วยรักษาอุณหภูมิของคมตัดไม่ให้ร้อนสูงเกินไปขณะทำงาน

3.7 การจับงานให้มั่นคงแข็งแรง (Rigidity of the Work) ในกรณีงานที่ถูกจับด้วยหัวจับ โพล์ออกมาสั้นๆ จะใช้ความเร็วได้สูงกว่างานที่ถูกจับโพล์ออกมายาวๆ

8.) ความสามารถของสภาพเครื่อง เครื่องที่แข็งแรงมีกำลังสูง สามารถใช้ความเร็วตัดได้สูง อย่างไรก็ตามอย่าใช้สูงจนคมตัดใหม่

กฎทั่วไปในการใช้ความเร็วตัด และอัตราป้อน

ถ้า Feed อัตราป้อน (มม. /รอบ) เพิ่ม Speed ความเร็ว (รอบต่อนาที) ต้องลดลงเมื่อความลึก (Depth) ของการตัดคงที่

ถ้า Speed ความเร็ว เพิ่ม Feed อัตราป้อน ต้องลดลง เมื่อความลึกของการตัดคงที่

ถ้าความลึกในการตัดเพิ่มขึ้น Speed ต้องลดลงเมื่อ Feed คงที่

อัตราป้อน

อัตราป้อนหมายถึง ระยะทางการเดินป้อนของมีดไปตามความยาวของชิ้นงาน ในแต่ละรอบของการหมุนของเพลลาของเครื่องหรือการป้อนตัด อาจพิจารณาจากความหนาของเศษตัด (Chips) การป้อนตัด 0.5 มม. หมายถึง มีดตัดเคลื่อนที่เป็นระยะทาง 0.5 มม. ตามความยาวของชิ้นงานขณะที่ชิ้นงานหมุน 1 รอบ

การกลึงหยาบ ใช้อัตราป้อนที่สูง มีดตัดชิ้นงานได้ปริมาณเศษมากผิวงานออกมาไม่เรียบ การกลึงละเอียด อัตราป้อนที่น้อย ทำให้ผิวงานเรียบ ส่วนมากจะใช้กลึงในขั้นสุดท้ายจะได้ผิวเรียบและขนาดถูกต้องในทางปฏิบัติที่ดีที่สุด

การเลือกใช้ความลึกในการตัดปานกลางขณะทำการป้อนตัดหน้าๆ และใช้ความเร็วตัดให้ถูกต้อง เมื่อกลึงงานหยาบ ถ้าต้องการให้กลึงงานผิวเรียบในขั้นสุดท้ายให้เพิ่มความเร็วตัดมากขึ้น การป้อนกินลึกน้อยลง พร้อมกับให้อัตราการป้อนตัดละเอียดให้สัมพันธ์กัน ในกรณีที่ใช้ความลึกในการตัด

มาก และอัตราการป้อนตัดน้อยๆจะดีกว่าการใช้ความลึกในการตัดเท่ากับอัตราป้อนตัด ถึงแม้ว่าอัตราการไหลของเศษโลหะจะเท่ากัน

ความลึกในการตัด (Depth of cut)

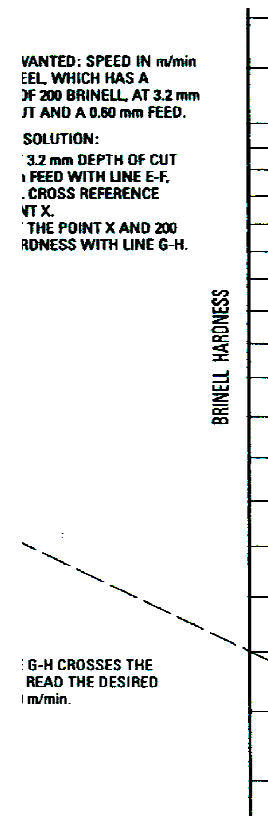
ความลึกในการตัดทำให้เศษโลหะไหลออกมา ทุกครั้งที่ทำการกลึงหยาบในการตั้งความลึกในการตัด และอัตราการป้อนตัด จะต้องคำนึงถึงความสามารถในการรับได้ของมีดตัด และเครื่องที่จะทนได้หลักเกณฑ์การพิจารณาเลือกใช้ความลึกในการตัดสำหรับงานปกติทั่วไปควรพิจารณาดังนี้

1. ขนาดความโตของชิ้นงานก่อนทำการตัดเฉือน (โตกว่าขนาดงานสำเร็จ) ควรจะโตกว่าประมาณ 3.18 มม.

2. ถ้าคำนวณความเร็วรอบอยู่ในช่วงกลางของค่าสองค่า ให้เลือกใช้ความเร็วรอบในขั้นต่ำ ถ้าหากสภาพของเครื่อง มีดกลึง และชิ้นงานเหมาะสม อาจจะเลือกใช้ความเร็วรอบในขั้นสูงได้ แต่ถ้าความเร็วรอบที่คำนวณได้ใกล้เคียงกับค่าในช่วงสูง ให้เลือกความเร็วรอบในช่วงสูงได้

3. ความลึกในการกลึงหยาบควรป้อนลึกและหยาบมากที่สุดเท่าที่จะทำได้ เหลือไว้ประมาณ 0.76 มม. สำหรับขนาดความโตของชิ้นงาน ก่อนจะกลึงผิวสุดท้าย

4. ในการกลึงเหล็กหล่อ หรือ โลหะอื่นๆซึ่งผิวรอบๆชิ้นงานจะเป็นสะเก็ดความลึกในการกลึงครั้งแรก การป้อนมีดกลึงจะต้องให้คมตัดของมีดกลึงตัดให้ลึกพอ ที่จะให้ส่วนผิวเปลือกแข็งหลุดออกไปให้หมด เพราะผิวเปลือกแข็งนี้จะทำให้มีดสึกหรือเร็ว



รูปที่ ก.4 Nomograph สำหรับหาความเร็วตัดในการกลึงงานด้วยมีดกลึงคาร์ไบด์ที่มา: STEVA
 F.KRAR, J.WILLIAM OSWALD หน้า 190

ภาคผนวก ข

ผลการตรวจวิเคราะห์ความแข็งชิ้นงานซีเมนต์คาร์ไบด์

ตาราง ข.1 ผลการทดสอบความแข็งชิ้นงานซีเมนต์คาร์ไบด์ ริโซเคลิล 5% Co

SAMPLE NO.: RE-5% Co																	
	แผ่นที่ 1			แผ่นที่ 2			แผ่นที่ 3			แผ่นที่ 4			แผ่นที่ 5			เฉลี่ย	
POINT	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	
d1	343	332	338	330	342	328	352	317	316	329	310	319	314	333	351	319	329.5625
d2	348	331	324	325	335	335	323	322	319	325	314	326	324	334	329	327	327.5625
d	345.5	331.5	331	327.5	338.5	331.5	321	319.5	317.5	327	312	322.5	319	333.5	340	323	327.5313
HV10	155	168	169	172	162	168	180	181	183	173	191	179	182	166	160	178	172.9375

ตาราง ข.2 ผลการทดสอบความแข็งชิ้นงานซีเมนต์คาร์ไบด์ ริโซเคลิล 10% Co

SAMPLE NO.: RE-10% Co																
	แผ่นที่ 1			แผ่นที่ 2			แผ่นที่ 3			แผ่นที่ 4			แผ่นที่ 5			เฉลี่ย
POINT	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	
d1	416	384	404	386	400	393	387	389	363	392	382	400	383	386	377	389.5
d2	432	390	403	395	402	385	405	368	379	374	386	396	390	382	376	390.9
d	424	387	403.5	390.5	401	389	396	378.5	371	383	384	398	386.5	384	376.5	390.2
HV 20	206	248	227	244	231	245	237	260	269	253	252	234	249	252	262	244.6

ตาราง ข.3 ผลการทดสอบความแข็งชิ้นงานซีเมนต์คาร์ไบด์ ริโซเคลิล 15% Co

SAMPLE NO.: RE-15% Co																
	แผ่นที่ 1			แผ่นที่ 2			แผ่นที่ 3			แผ่นที่ 4			แผ่นที่ 5			เฉลี่ย
POINT	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	
d1	273	272	273	272	280	276	264	270	305	258	277	280	272	273	272	274.5
d2	279	291	282	274	282	276	265	290	265	275	277	272	273	273	279	276.9
d	276	281.5	277.5	273	281	273	264.5	280	285	266.5	277	276	272.5	273	275.5	275.5
HV 20	487	466	480	498	470	498	532	473	457	524	483	487	402	493	487	482.5

ตาราง ข.4 ผลการทดสอบความแข็งชิ้นงานซเมนต์คาร์ไบด์ผลิตจากผงนำเข้า 5% Co

SAMPLE NO.: OR-5% Co																
	แผ่นที่ 1			แผ่นที่ 2			แผ่นที่ 3			แผ่นที่ 4			แผ่นที่ 5			เฉลี่ย
POINT	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	
d1	176	179	171	165	156	160	163	154	170	179	183	178	172	176	176	170.5
d2	190	194	182	160	158	168	173	156	174	183	160	175	182	184	188	175.1
d	183	186.5	176.5	162.5	157	164	168	155	172	181	171.5	176.5	177	180	182	172.8
HV 20	1107	1072	1197	1413	1505	1379	1314	1544	1254	1132	1254	1197	1184	1145	1120	1254

ตาราง ข.5 ผลการทดสอบความแข็งชิ้นงานซเมนต์คาร์ไบด์ผลิตจากผงนำเข้า 10% Co

SAMPLE NO.: OR-10% Co											
	แผ่นที่ 1			แผ่นที่ 2			แผ่นที่ 3			เฉลี่ย	
POINT	1	2	3	4	5	6	7	8	9		
d1	192	190	180	193	200	193	188	194	198	192	
d2	188	183	186	197	210	192	186	196	208	194	
d	190	186.5	183	195	205	192.5	187	195	203	193	
HV 20	1027	1072	1107	975	883	1006	1061	975	900	1000.667	

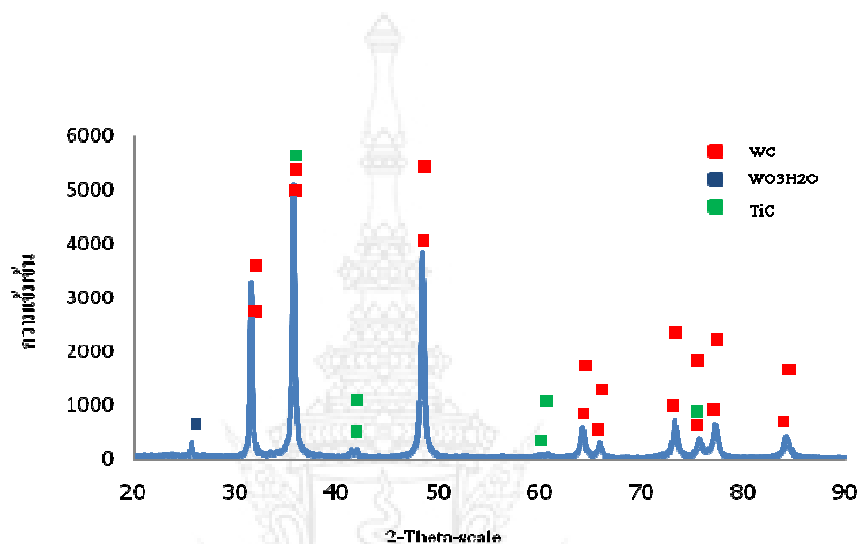
ตาราง ข.6 ผลการทดสอบความแข็งชิ้นงานซเมนต์คาร์ไบด์ผลิตจากผงนำเข้า 15% Co

SAMPLE NO.: OR-15% Co																
	แผ่นที่ 1			แผ่นที่ 2			แผ่นที่ 3			แผ่นที่ 4			แผ่นที่ 5			เฉลี่ย
POINT	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	
d1	168	182	178	181	160	171	170	182	178	174	196	172	185	190	190	178.4667
d2	188	178	182	178	171	170	172	176	168	183	188	176	184	186	190	179.3333
d	178	180	180	179.5	165.5	170.5	171	179	173	178.5	189	174	184.5	188	190	178.7
HV 20	1171	1145	1145	1145	1346	1283	1268	1158	1239	1171	1038	1225	1095	1049	1027	1167

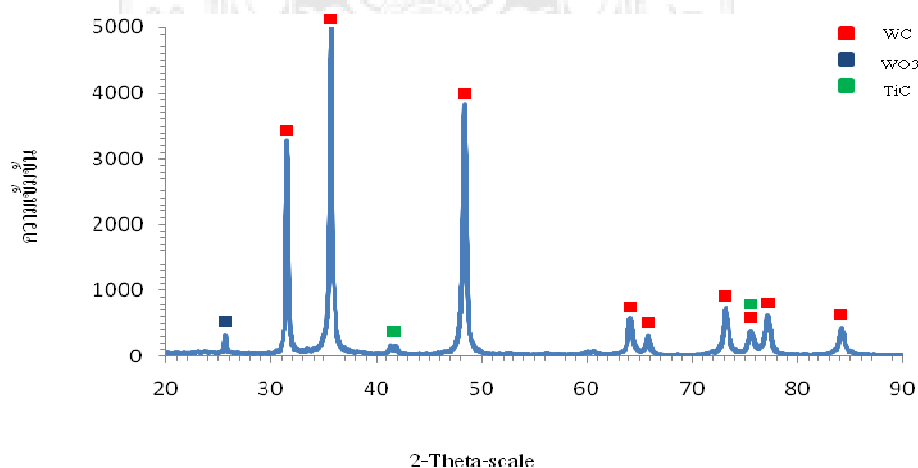
ภาคผนวก ค

ผลการตรวจวิเคราะห์ความบริสุทธิ์ของโลหะผงก่อนการบดและลักษณะขนาดการกระจาย

1. ผลการทดสอบ โลหะผงทั้งสแตนคาร์ไบด์ด้วยเทคนิค X-Ray Diffract meter (XRD)

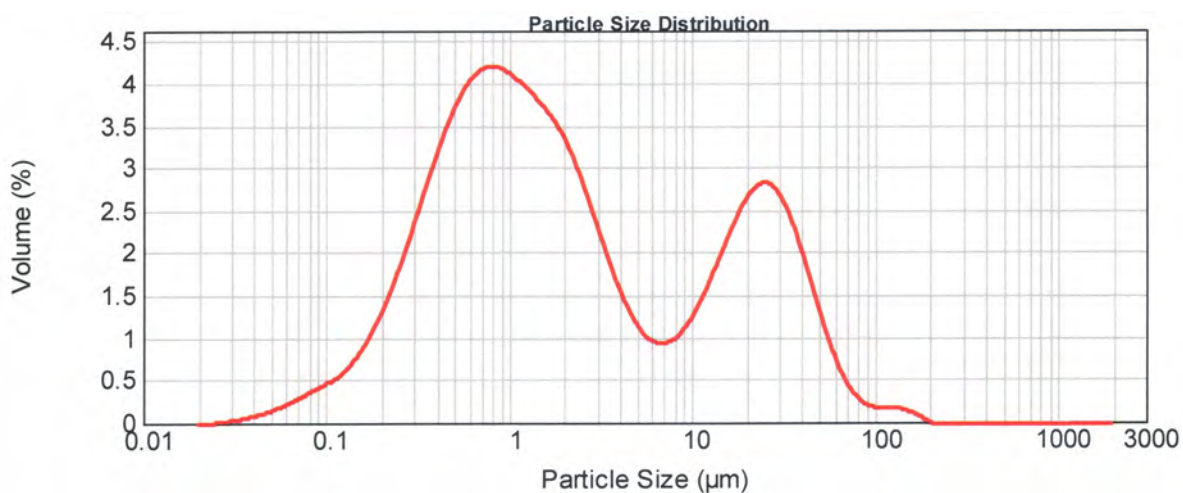


รูปที่ ค.1 ผลการตรวจสอบผงโลหะด้วย X-ray Diffractometer (XRD) ที่แรงดัน 1.0 โวลต์
อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส กรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 1 N

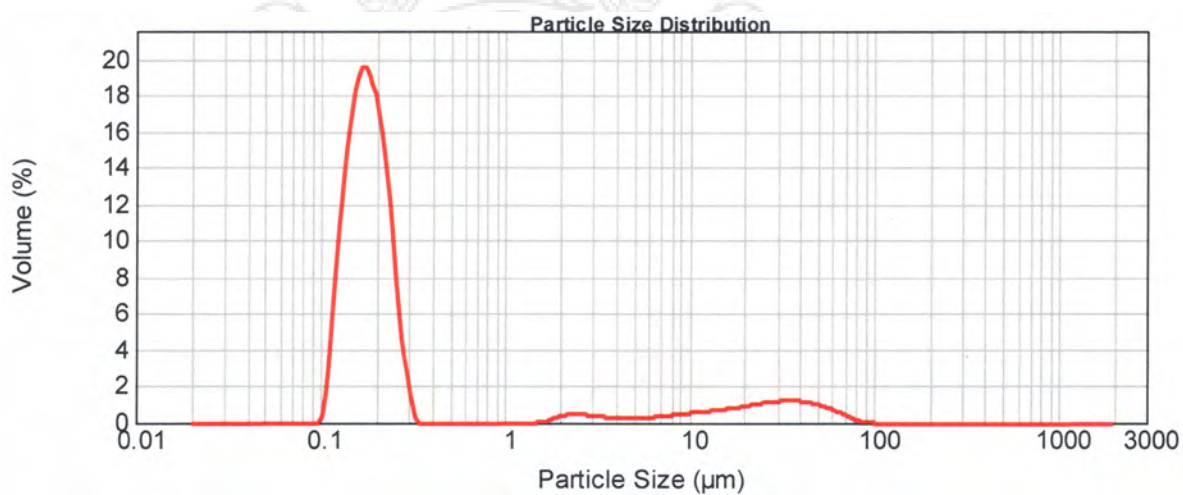


รูปที่ ค.2 ผลการตรวจสอบผงโลหะด้วย X-ray Diffractometer (XRD) ที่แรงดัน 1.4 โวลต์
อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส กรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 1 N

2. ผลการตรวจสอบขนาดและการกระจายตัวของโลหะผงทั้งสแตนคาร์ไบด์



รูปที่ ค.3 ผลการทดสอบขนาดและการกระจายตัวของโลหะผงที่ แรงดัน 1.2 โวลต์ อุณหภูมิ 30 °C กรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 1 N



รูปที่ ค.4 แสดงผลการตรวจสอบขนาดและการกระจายตัวของโลหะผงที่ แรงดัน 1.2 โวลต์ อุณหภูมิ 30 °C กรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 1 (โลหะผงหลังบด)

3.ผลการตรวจสอบส่วนผสมทางเคมีโลหะผงทั้งสแตนคาร์ไบด์

ตารางที่ ค.1 แสดงผลการตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมีด้วยเทคนิค X-Ray Fluorescence (XRF)

องค์ประกอบทางเคมี	ปริมาณ, ร้อยละ
Cl	0.07
Ti	5.99
Cr	0.04
Fe	0.05
Co	0.52
Nb	0.74
Mo	0.52
Ta	2.15
W	83.81

ตารางที่ ค.2 แสดงผลการตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมีด้วยเทคนิค X-Ray Fluorescence (XRF)

	WC A20	WC B40
Formula	Concentration	Concentration
Al	0.11%	-
S	0.09%	0.07%
Ti	2.26%	1.20%
Cr	0.03%	0.03%
Fe	0.05%	0.04%
Co	0.30%	0.40%
Ni	0.04%	-
Cu	0.24%	0.24%
Zr	0.02%	-
Nb	0.65%	0.62%
Mo	0.10%	-
Hf	-	0.04%
Ta	2.81%	2.50%
W	93.29%	94.84%
Pb		0.02%
		99.93%