



การพัฒนากระบวนการอบผนึกชิ้นงานความแข็งสูงพิเศษเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพ
การต้านทานการสึกหรอตามแนวทางการจัดการวัสดุเพื่อความยั่งยืน

Development of sintering process hard metals to wear resistant
efficiency on sustainable material management

ผู้จัดทำวิจัย

นายสหรัตน์

วงศ์ศรีษะ

หัวหน้าโครงการวิจัย

นายประสิทธิ์

แพ่งเพชร

ผู้ร่วมวิจัย

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากงบประมาณรายจ่าย ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2558

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร



การพัฒนากระบวนการอบผนึกชิ้นงานความแข็งสูงพิเศษเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพ
การต้านทานการสึกหรอตามแนวทางการจัดการวัสดุเพื่อความยั่งยืน

Development of sintering process hard metals to wear resistant
efficiency on sustainable material management

ผู้จัดทำวิจัย

นายสหรัตน์

วงศ์ศรีษะ

หัวหน้าโครงการวิจัย

นายประสิทธิ์

แพ่งเพชร

ผู้ร่วมวิจัย

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากงบประมาณรายจ่าย ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2558

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร



โครงการวิจัยเรื่อง การพัฒนากระบวนการอบผนึกชิ้นงานความแข็งสูงพิเศษเพื่อเพิ่ม
ประสิทธิภาพการต้านทานการสึกหรอตามแนวทางการจัดการวัสดุเพื่อ
ความยั่งยืน

หัวหน้าโครงการวิจัย ผศ.สหรัตน์ วงษ์ศรีษะ
ผู้ร่วมวิจัย อาจารย์ประสิทธิ์ แพงเพชร

สาขาวิชา วิศวกรรมการจัดการอุตสาหกรรมเพื่อความยั่งยืน
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
ปีงบประมาณ 2558

บทคัดย่อ

การศึกษานี้เพื่อพัฒนาการผลิตชิ้นงานความแข็งสูงพิเศษ (hard metal) โดยผลิตจากผงโลหะทั้งสแตนคาร์ไบด์ที่มีขนาดในช่วง $0.1 - 0.35 \mu\text{m}$ ผงโลหะดังกล่าวมีส่วนผสมของ Ta = 2.82 % , Mo = 0.45 % , Nb = 1.22 % , Ti = 4.56 % , Zr = 0.37 % เนื่องจากการรีไซเคิลเศษซีเมนต์คาร์ไบด์มีส่วนผสมของธาตุเหล่านี้นำนามาพัฒนาเป็นชิ้นงานใหม่ ผงโลหะมีลักษณะค่อนข้างกลมเกิดจากวิธี ball milling เป็นเวลา 300 ชั่วโมง เมื่อผลิตเป็นชิ้นงาน (Insert tools) โดยการผสมโคบอลต์ 10 % และ Paraffin wax 2 % พบว่าชิ้นงานที่ผ่านการอบผนึก (sintering) ด้วยอุณหภูมิ 1,400 °c และ 1,430 °c จะมีความแข็ง 1,346.3 และ 1,368.5 HV ตามลำดับ โดยการคงอุณหภูมิอบผนึก (Holding time) เป็นเวลา 1 ชั่วโมง พบว่าชิ้นงานที่ผ่านการอบผนึกที่อุณหภูมิ 1,430 °c เกิดการสึกหรอน้อยกว่า ถ้าหากทดสอบการกลิ้งปอกผิวชิ้นงานปรากฏว่าแผ่นมีดทั้งสแตนคาร์ไบด์สามารถใช้งานได้เทียบเท่ากับแผ่นมีดมาตรฐาน ดังนั้น ปัจจัยการผลิตชิ้นงานความแข็งสูงพิเศษที่พัฒนาขึ้นจึงเป็นพื้นฐานการผลิตต่อไป

(Keywords) : ผงทั้งสแตนคาร์ไบด์ , การอบผนึก , ชิ้นงานซีเมนต์คาร์ไบด์ , ความแข็ง



Researcher title Development of sintering process hard metals to wear resistant efficiency on sustainable material management

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

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

Abstracts

This study aims to development of production process of hard metal by tungsten carbide powder with the particle sized of 0.1 - 0.35 μm . This carbide powder were made of recycling cemented carbide tool scraps, so it is mixed with Ta = 2.82 % , Mo = 0.45 % , Nb = 1.22 % , Ti = 4.56 % , Zr = 0.37 % The shape of the carbide powder are roughly round due to ball milling for 300 hours. It was mixing cobalt 10 % and Paraffin wax 2 % , which is found the work piece that running through the process of sintering with a temperature of 1,400 $^{\circ}\text{C}$ and 1,430 $^{\circ}\text{C}$, have the hardness of 1,368.5 and 1,346.3 HV, respectively. In one hour of holding time process, the work piece with 1,430 $^{\circ}\text{C}$ of the sintering causes less wear. After the test of turning operation, it can be concluded that the tungsten carbide cutting tool provides the equivalent quality as a standard cutting tool.

Keywords : Tungsten Carbide , Sintering , Cemented tungsten Carbide , Hardness



กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้สำเร็จได้ด้วยการสนับสนุนทุนวิจัยงบประมาณแผ่นดิน โดยมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิชาวิศวกรรมการจัดการอุตสาหกรรมเพื่อความยั่งยืน ผลการวิจัยและพัฒนากระบวนการออกแบบชิ้นงานความแข็งแรงสูงพิเศษเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการต้านทานการสึกหรอตามแนวทางการจัดการวัสดุเพื่อความยั่งยืน ได้รับความร่วมมือในการวิจัย จากหน่วยงานต่าง ๆ ประกอบด้วย คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย (วว.) สถาบันเหล็กและเหล็กกล้าแห่งประเทศไทย บริษัท อาร์ เอส คาร์ไบด์ โปรดักต์ จำกัด บริษัท มานะกิจ พรซิชั่น จำกัด และขอขอบคุณผู้ที่เกี่ยวข้องและไม่ได้กล่าวนามมา ณ ที่นี้ ที่ได้สนับสนุนงานวิจัย จนกระทั่งประสบผลสำเร็จตามวัตถุประสงค์ของการวิจัย

ผศ.สหรัตน์ วงษ์ศรีษะ
หัวหน้าโครงการ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญภาพ	ช
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและที่มาของการวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์	5
1.3 ขอบเขตของการวิจัย	5
1.4 สมมุติฐานและกรอบแนวคิดของโครงการวิจัย	8
1.5 วิธีดำเนินงานวิจัย	12
1.6 สถานที่ดำเนินการทดลองและเก็บข้อมูลโครงการวิจัย	15
1.7 ระยะเวลาทำการวิจัย	16
1.8 ประโยชน์ที่ได้รับ	16
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	17
2.1 ผงทังสเตนคาร์ไบด์ (WC)	17
2.2 โคบอลต์ (Co)	18
2.3 พาราฟิน แวกซ์ (Paraffin Wax)	18
2.4 การตรวจสอบคุณภาพผงทังสเตนคาร์ไบด์	19
2.5 การผลิตแผ่นมิตทังสเตนคาร์ไบด์	20
2.6 การทดสอบสมบัติทางกลและการตรวจสอบคุณภาพแผ่นมิต	25
บทที่ 3 วิธีการวิจัย	39
3.1 ศึกษาข้อมูลเกี่ยวกับการเตรียมผงโลหะทังสเตนคาร์ไบด์	40
3.2 ศึกษาข้อมูลการผลิตชิ้นงานจากผงทังสเตนคาร์ไบด์	44
3.3 ศึกษาการทดสอบประสิทธิภาพชิ้นงานทังสเตนคาร์ไบด์	57
3.4 วิเคราะห์ข้อมูลการทดสอบ	61
3.5 รวบรวมข้อมูลการทดสอบ	61
3.6 วิเคราะห์ผลการทดสอบ	62
3.7 สรุปผล	62
บทที่ 4 ผลการวิจัย (Results)	63
4.1 ผลการวิเคราะห์คุณลักษณะของผงโลหะ	63
4.2 ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติของผงทังสเตนคาร์ไบด์ (XRF)	64
4.3 ผลการทดลองการกระจายตัวและขนาดของอนุภาค (P&D)	65

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.4 ผลการทดลองและส่วนประกอบทางเคมี (XRD)	65
4.5 ผลการทดสอบความแข็งของแผ่นมิดทั้งสแตนคาร์ไบด์	66
4.6 ผลการทดสอบระยะทางในการกลึง	68
4.7 ผลการเปรียบเทียบลักษณะผิวกลึง	74
บทที่ 5 การอภิปรายผล	76
บทที่ 6 สรุปผลการวิจัย	79
บรรณานุกรม	80
ภาคผนวก ก เครื่องมือและอุปกรณ์ในการวิจัย	84
ภาคผนวก ข สถานที่ในการดำเนินโครงการ	92
ประวัติคณะผู้วิจัย	94



สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	แสดงอัตราส่วนผสมในการบดผงทั้งสแตนคาร์ไบด์ด้วยเครื่อง Ball Milling [18]	21
2.2	แสดงสมบัติและการผสมผงทั้งสแตนโคบอลต์ [30]	22
2.3	แสดงส่วนผสมของธาตุที่ผสมในเม็ดกลึงของแต่ละเกรด [32]	37
2.4	แสดงการเปรียบเทียบความเรียบผิวของสองเม็ดเม็ดที่มีส่วนผสมและเงื่อนไขในการกลึงต่างกัน	37
3.1	แสดงข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับการอบผนึก (Green Density)	55
3.2	แสดงข้อมูลปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับรายละเอียดในการเลือกใช้การทดสอบความแข็ง [24]	58
4.1	แสดงผลการตรวจสอบส่วนประกอบทางเคมี (XRF) ในผล WC ที่นำมาใช้เป็นวัตถุดิบเพื่อสร้างแผ่นมิด WC	64
4.2	แสดงองค์ประกอบที่มีความเป็นไปได้ในตัวอย่าง	65
4.3	แสดงความแข็งของแผ่นมิด WC แต่ละจุดทดสอบ	66
4.4	แสดงขนาดของชิ้นงานหลังจากกลึงทดสอบด้วยเครื่องกลึงอัตโนมัติ (CNC)	68



สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
1.1 การผลิตสินค้าจากโลหะทั้งสแตนในอุตสาหกรรมขนาดใหญ่จำหน่าย [1]	2
1.2 กระบวนการผลิตชิ้นงานคาร์ไบด์หรือผลิตภัณฑ์เครื่องมือตัดทั้งสแตนคาร์ไบด์ [26]	3
1.3 แสดงตัวอย่างการอบผนึกชิ้นงานความแข็งสูงพิเศษ [39]	3
1.4 แสดงเตาอบผนึก (Sintering furnace) [3]	4
1.5 การอัดขึ้นรูปชิ้นงานจากโลหะผง WC-Co (a) แบบจำลองการอัดขึ้นรูป [36], (b) การอัดขึ้นรูปโลหะผงทั้งสแตนคาร์ไบด์ (WC) และ SUS303 [38]	5
1.6 ขั้นตอนการอบผนึก (Sintering) [35]	6
1.7 ผลการทดสอบความแข็งและรอยกดผิวชิ้นงาน [37]	7
1.8 แสดง SEM วิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของผลิตภัณฑ์ที่ผ่านการอบผนึก (Sintering)[33]	7
1.9 SEM micrographs of the starting powders: (a) WC and (b) Co. [31]	8
1.10 Schematic presentation of the arrangement of the different crystal structures in the Co binder matrix. [28]	8
1.11 การผสมโลหะ WC-Co และการกระจายตัวของโลหะในระหว่างการเตรียมโลหะผง ก่อนการอัดขึ้นรูป [28]	9
1.12 SEM images for WCCo06 that provide an overview of the microstructure (a) and after polarization at -0.85 V for 2 h in 1 M NaOH (b). [28]	9
1.13 Variations of the displacement and displacement rate in the SPS process for powder samples with different WC particle sizes. [30]	9
1.14 EBSD images of SPSed cermet bulk samples prepared using powder mixtures with different WC particles: (a) ultrafine WC, (b) submicron WC, (c) micron WC [34]	10
1.15 รูปแบบกระบวนการผลิตชิ้นงานทั้งสแตนคาร์ไบด์และการทดสอบ (Methodologies of hard metals)	10
1.16 SEM images of WC-Co bulk samples prepared with powder mixtures using different-scaled WC particles: (a) ultrafine WC, (b) submicron WC, and (c) micron WC. [30]	11
1.17 EBSD images of SPSed cermet bulk samples prepared using powder mixtures with different WC particles: (a) ultrafine WC, (b) submicron WC, (c) micron WC [34]	11

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
1.18 รูปแบบกระบวนการผลิตชิ้นงานทั้งสแตนคาร์ไบด์และการทดสอบ (Methodologies of hard metals)	14
2.1 แสดงผงทั้งสแตน [13]	17
2.2 แสดงผงทั้งสแตนคาร์ไบด์สำเร็จรูป [13]	17
2.3 แสดงผงโคบอลต์ (Co) [13]	18
2.4 แสดงพาราฟิน แวกซ์ [2]	18
2.5 แสดง SEM micrographs of different cubic boron nitride powder grades used in this work. (a) 2–3 μm and (b) 10–14 μm . [29]	19
2.6 แสดงส่วนประกอบของแม่พิมพ์ที่ใช้ในการอัดขึ้นรูปชิ้นงานทั้งสแตนคาร์ไบด์ [8]	23
2.7 แสดงลักษณะของเตาอบผนึก Sintering [12]	24
2.8 แสดงกราฟอุณหภูมิในการอบผนึก (Sintering) ที่แตกต่างกัน [12]	24
2.9 แสดงภาพโครงสร้างของมีดกลึงทั้งสแตนคาร์ไบด์ที่มีส่วนผสมของโคบอลต์ 8%	25
2.10 แสดงลักษณะโครงสร้างของมีดกลึงทั้งสแตนคาร์ไบด์กับโคบอลต์ [14]	26
2.11 แสดงลักษณะของรอยกดบนชิ้นงานทดสอบ [10]	27
2.12 แสดงค่าความแข็งแรงต่อการเปลี่ยนรูปเมื่อได้รับแรงกด [32]	27
2.13 แสดง Sketch Diagram of Crack Propagation in WC–Co DP Cemented Carbide. [24]	28
2.14 แสดงรอยแตกที่เกิดจากการกดด้วยเครื่องวัดความแข็ง Vickers Hardness Test [27]	29
2.15 แสดงลักษณะรูปทรงของแผ่นมีดทั้งสแตนคาร์ไบด์สำหรับงานกลึงปอก	29
2.16 แสดงลักษณะด้ามจับมีดกลึงทั้งสแตนคาร์ไบด์ ปอกซ้าย-ปอกขวาทั้งสองทาง-กลึงเกลียว-ตรึง [22]	30
2.17 แสดงรูปทรงของแผ่นมีดกลึงทั้งสแตนคาร์ไบด์	31
2.18 แสดงลักษณะการกลึงปอกเหล็กเพลากลม [15]	32
2.19 แสดงลักษณะในการใช้งานของแผ่นมีดทั้งสแตนคาร์ไบด์ที่ใช้ในการกลึงปอก	32
2.20 แสดงรูปทรงของมีดกลึงทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัสหรือทรง S ของบริษัท narzedzia	33
2.21 แสดงการสึกหรอของแผ่นมีดกลึงทั้งสแตนคาร์ไบด์ [23]	34
2.22 แสดงการสึกหรอของมีดกลึงซีเมนต์ทั้งสแตนคาร์ไบด์ [9]	34
2.23 แสดงลักษณะการสึกหรอของมีดกลึงซีเมนต์ทั้งสแตนคาร์ไบด์ [9]	35
2.24 แสดงค่าความเรียบผิวที่แตกต่างกัน [25]	36
3.1 แผนผังการดำเนินโครงการ	39
3.2 แสดงเศษมีดทั้งสแตนคาร์ไบด์	40
3.3 แสดงการชั่งน้ำหนักเศษมีด	40

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
3.4 แสดงการนำเศษมีดบรรจุลงในบาร์เรล	41
3.5 แสดงอุปกรณ์การผลิตโลหะผงทั้งสแตนคาร์ไบด์จากเศษแผ่นมีดทั้งสแตนคาร์ไบด์	41
3.6 แสดงเครื่องมือสำหรับวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ X-ray Diffraction (XRD)	42
3.7 แสดงเครื่องวิเคราะห์ส่วนทางเคมี X-Ray Fluorescence.(XRF) Spectrometry รุ่น AXIOS	42
3.8 แสดงเครื่องตรวจสอบวัดการกระจายตัวของอนุภาค (Particle size Analyzer)	43
3.9 แสดงกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope) รุ่น JEOL JSM-6380LV	43
3.10 แสดงหม้อบดและลูกบดบดทั้งสแตน (Ball Milling)	44
3.11 แสดงการบรรจุลูกบดบดทั้งสแตนและผงทั้งสแตนคาร์ไบด์ในหม้อบด	44
3.12 แสดงการเติมสารละลายในหม้อบด	45
3.13 แสดงการประกอบหม้อบดเข้ากับเครื่องบด	45
3.14 แสดงการปรับตั้งความเร็วรอบและเวลาในการบด	46
3.15 แสดงการกดปุ่มเริ่มทำงานเพื่อดำเนินการบด	46
3.16 แสดงการคลายแรงดัน	46
3.17 แสดงการแยกผงทั้งสแตนคาร์ไบด์และลูกบดออกจากหม้อบด	47
3.18 แสดงการแยกผงโลหะทั้งสแตนคาร์ไบด์ออกจากลูกบด	47
3.19 แสดงการรอตตะกอน	48
3.20 แสดงการตักตะกอนของโลหะ	48
3.21 แสดงผงหลังทำการอบผนึก	49
3.22 แสดงการเตรียมหม้อบดและส่วนผสม	49
3.23 การเทผงโลหะทั้งสแตนคาร์ไบด์กับโคบอลต์	50
3.24 แสดงการเติมพาราฟิน	50
3.25 แสดงการแยกผงโลหะออกจากหม้อบด	51
3.26 แสดงการชั่งน้ำหนักผงก่อนอัดขึ้นรูป	51
3.27 แสดงผงที่ผ่านการอัดขึ้นรูปแล้ว	52
3.28 แสดงเครื่องวัดค่าความหนาแน่น	52
3.29 แสดงการวัดแผ่นมีด	53

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
3.30 การอบผนึกชิ้นงานทั้งสแตนคาร์ไบด์ กราฟแสดงขั้นตอนการอบผนึกที่อุณหภูมิ 1,430 องศาเซลเซียส เวลาในการอบผนึก 1 ชั่วโมง	53
3.31 การอบผนึกชิ้นงานทั้งสแตนคาร์ไบด์ กราฟแสดงขั้นตอนการอบผนึกที่อุณหภูมิ 1,400 องศาเซลเซียส เวลาในการอบผนึก 1 ชั่วโมง	54
3.32 การอบผนึกชิ้นงานทั้งสแตนคาร์ไบด์ กราฟแสดงขั้นตอนการอบผนึกที่อุณหภูมิ 1,400 องศาเซลเซียส เวลาในการอบผนึก 2 ชั่วโมง	54
3.33 ภาพรอยกดทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์	55
3.34 แสดงภาพโครงสร้างจุลภาค	56
3.35 การสีหกรของวัสดุ	57
3.36 ภาพรอยกดทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์	58
3.37 แสดงบริเวณมุมรอยกดทดสอบความแข็งที่เกิดรอย Crack	59
3.38 ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้อง Optical microscopy	60
3.39 ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้อง Scanning electron microscopy (SEM)	60
3.40 การสีหกรของวัสดุ	61
4.1 แสดงการตรวจสอบอนุภาคของผงทั้งสแตนคาร์ไบด์ที่ผ่านการบดละเอียด 100 ชั่วโมง	63
4.2 แสดงกราฟขนาดและการกระจายอนุภาคผง WC	65
4.3 แสดงผลการตรวจสอบวิเคราะห์องค์ประกอบด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (XRD)	66
4.4 แสดงรอยกดจากการทดสอบความแข็งของการทดลองที่ 1	67
4.5 แสดงรอยกดจากการทดสอบความแข็งของการทดลองที่ 2	67
4.6 แสดงรอยกดจากการทดสอบความแข็งของการทดลองที่ 3	68
4.7 แสดงภาพด้านผิวหลบของแผ่นมิด WC การทดลองที่ 1 แสดงการเปรียบเทียบการสีหกรก่อนและหลังการทดสอบกลึงด้วยเครื่องกลึงอัตโนมัติ (CNC)	69
4.8 แสดงภาพด้านผิวหลบของแผ่นมิด WC การทดลองที่ 2 แสดงการเปรียบเทียบการสีหกรก่อนและหลังการทดสอบกลึงด้วยเครื่องกลึงอัตโนมัติ (CNC)	70
4.9 แสดงภาพด้านผิวหลบของแผ่นมิด WC การทดลองที่ 3 แสดงการเปรียบเทียบการสีหกรก่อนและหลังการทดสอบกลึงด้วยเครื่องกลึงอัตโนมัติ (CNC)	70
4.10 แสดงภาพด้านมุมคายเศษของแผ่นมิด WC การทดลองที่ 1 แสดงการเปรียบเทียบการสีหกรก่อนและหลังการทดสอบกลึงด้วยเครื่องกลึงอัตโนมัติ (CNC)	71
4.11 แสดงภาพด้านมุมคายเศษของแผ่นมิด WC การทดลองที่ 2 แสดงการเปรียบเทียบการสีหกรก่อนและหลังการทดสอบกลึงด้วยเครื่องกลึงอัตโนมัติ (CNC)	71

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4.12 แสดงภาพด้านมุมคายเศษของแผ่นมีด WC การทดลองที่ 3 แสดงการเปรียบเทียบการสึกหรอก่อนและหลังการทดสอบกลึงด้วยเครื่องกลึงอัตโนมัติ (CNC)	72
4.13 แสดงภาพด้านมุมปลายมีดของแผ่นมีด WC การทดลองที่ 1 แสดงการเปรียบเทียบการสึกหรอก่อนและหลังการทดสอบกลึงด้วยเครื่องกลึงอัตโนมัติ (CNC)	72
4.14 แสดงภาพด้านมุมปลายมีดของแผ่นมีด WC การทดลองที่ 2 แสดงการเปรียบเทียบการสึกหรอก่อนและหลังการทดสอบกลึงด้วยเครื่องกลึงอัตโนมัติ (CNC)	73
4.15 แสดงภาพด้านมุมปลายมีดของแผ่นมีด WC การทดลองที่ 3 แสดงการเปรียบเทียบการสึกหรอก่อนและหลังการทดสอบกลึงด้วยเครื่องกลึงอัตโนมัติ (CNC)	73
4.16 แสดงภาพผิวของชิ้นงานหลังการกลึงทดสอบด้วยแผ่นมีด WC การทดลองที่ 1	74
4.17 แสดงภาพผิวของชิ้นงานหลังการกลึงทดสอบด้วยแผ่นมีด WC การทดลองที่ 2	74
4.18 แสดงภาพผิวของชิ้นงานหลังการกลึงทดสอบด้วยแผ่นมีด WC การทดลองที่ 3	75
4.19 แสดงการเปรียบเทียบความเรียบผิวชิ้นงาน	76
4.20 แสดงให้เห็นความเรียบของพื้นผิวที่ได้จากการตรวจสอบความเรียบผิวกลึงชิ้นงานของทั้ง 3 การทดลอง	77
5.1 แสดงการวิเคราะห์คุณลักษณะของผงโลหะด้วยวิธีการ SEM	78
5.2 แสดงการวิเคราะห์คุณลักษณะของผงโลหะด้วยวิธีการ SEM งานวิจัยของ Jing-Chie Lin, et al.,(1996) [15]	79
5.3 แสดงการวิเคราะห์การกระจายตัวและขนาดอนุภาค งานวิจัยของ B.F. Kieffer, et al., (1994) [19]	79
ก.1 ซ้อนสแตนเลส	87
ก.2 เครื่องชั่งน้ำหนักความละเอียด 0.0001 g	87
ก.3 เครื่องชั่งน้ำหนักความละเอียด 0.01 g	88
ก.4 เอทานอล ความบริสุทธิ์ 99.8%	88
ก.5 เครื่องกลึง Mori Seiki รุ่น SL-3	89
ก.6 ตะแกรงกรองผงขนาด 100 μm	89
ก.7 ถังมือป้องกันสารเคมี	90
ก.8 ปีกเกอร์ที่ใช้ในการทดลอง	90
ก.9 เตาไฟฟ้าขนาดอุณหภูมิ 28-500 $^{\circ}\text{C}$	91
ก.10 หลอดดูดสารละลาย	91
ก.11 เครื่องบดละเอียดผงโลหะ	92
ก.12 ถ้วยเซรามิคทนความร้อนอุณหภูมิ 1,200 $^{\circ}\text{C}$	92
ก.13 เตาอบผนังความร้อนสูง	93
ก.14 ตะแกรงขนาด 50 μm	93

บทที่ 1

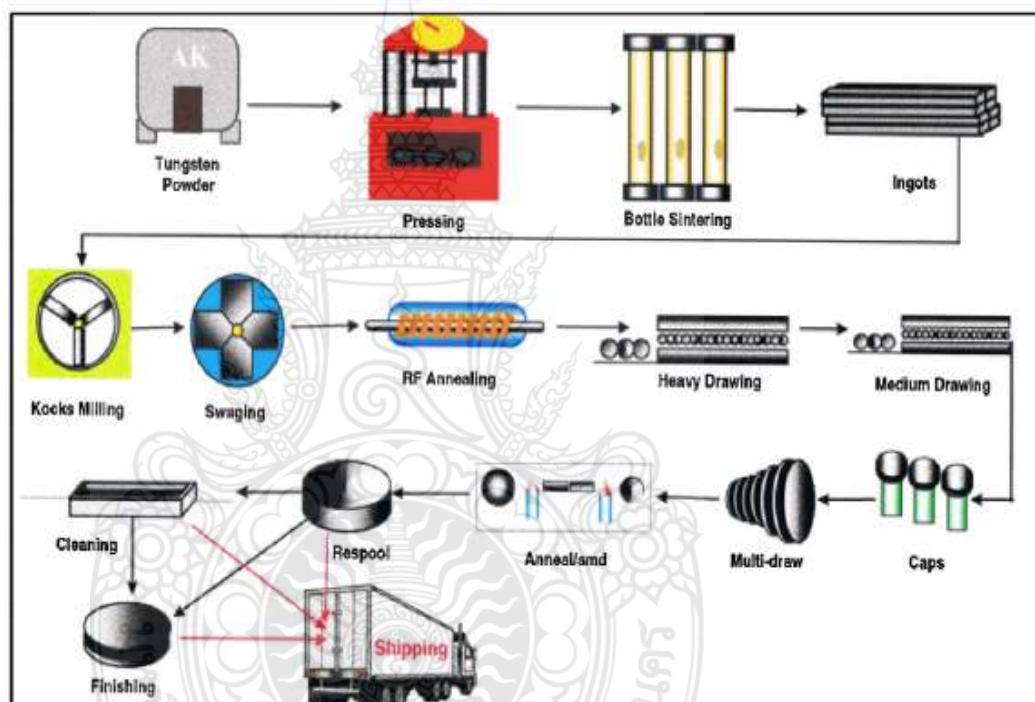
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและที่มาของการวิจัย

ทังสเทน (W) เป็นธาตุชนิดที่มีความหนาแน่นสูง (High density) 19 g/cm^3 หากเทียบกับธาตุในกลุ่มตารางธาตุทั้งหมด เมื่อต้องการใช้งานในอุตสาหกรรมจะต้องผลิตให้เป็นโลหะที่มีส่วนผสมของคาร์บอน (C) กลายเป็นโลหะทังสเทนคาร์ไบด์ (Tungsten carbides) ใช้สัญลักษณ์ WC เป็นโลหะทังสเทนคาร์ไบด์ (WC) มีสถานะเป็นผงโลหะขนาดเล็ก (Powder) ต้องผสมระหว่าง ทังสเทน และ คาร์บอน (C) 6.13% ด้วยกระบวนการ carburization process จากนั้นจึงนำทังสเทนคาร์ไบด์ ผสมกับโลหะอื่นที่ทำหน้าที่ประสาน (binder) ให้ผงโลหะทังสเทนคาร์ไบด์ยึดติดกันแน่น ซึ่งต้องเป็นโลหะมีสมบัติพิเศษในการเกิด metallic bond ที่อุณหภูมิสูงกว่า $1,300^\circ\text{C} - 1,500^\circ\text{C}$ โลหะที่ทำหน้าที่ประสาน ได้แก่ โคบอลต์ (Co) นิกเกิล (Ni) โครเมียม และโมลิบดีนัม (Mo) เป็นต้น

การผลิตทังสเทน (W) เพื่อใช้ในอุตสาหกรรมปัจจุบันมีจำนวนมากถึง 38,500,000 ตัน ในปี ค.ศ. 1995 และเพิ่มขึ้นเป็น 79,500,000 ตัน ในปี ค.ศ. 2011 ส่วนใหญ่พัฒนาเป็นทังสเทนคาร์ไบด์ (Tungsten carbides:WC) โดยเฉพาะประเทศผู้นำทางอุตสาหกรรม อาทิสหรัฐอเมริกา (U.S.A.) เป็นผู้นำทั้งด้านอุตสาหกรรม การพัฒนาเทคโนโลยีและการพัฒนาเทคโนโลยีด้านการทหาร ชนิดต่างๆ อีกจำนวนมาก ซึ่งต้องใช้โลหะทังสเทนคาร์ไบด์และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจนถึงปัจจุบัน ผลจากการศึกษา พบว่า สหรัฐอเมริกามีการจัดตั้งหน่วยงานเพื่อรับผิดชอบในการจัดหาโลหะทังสเทน การจัดเก็บและกักตุนโลหะดังกล่าวคงคลังขนาดใหญ่เพื่อนำไปพัฒนาเทคโนโลยีต่าง ๆ โดยมีหน่วยงานรับผิดชอบ เรียกว่า Defense National Stockpile Center (DNSC) ซึ่งอยู่ภายใต้การควบคุม 2 กระทรวง ประกอบด้วย กระทรวงกลาโหมและกระทรวงพาณิชย์ [4] มีการนำเข้าโลหะทังสเทนและทังสเทนคาร์ไบด์ (Tungsten carbides) จากหลายประเทศทั่วโลก โดยเฉพาะนำเข้าจากประเทศจีนมากที่สุด ซึ่งโลหะดังกล่าวนำไปใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆ ได้อย่างกว้างขวาง อาทิ ผลิตเครื่องมือตัดเฉือนโลหะ (Metal removal technology) ผลิตชิ้นส่วนทนการสึกหรอและความแข็งแรงสูง [5] เนื่องจากมีสมบัติพิเศษในด้านความแข็งแรงสูง (High hardness) ทังสเทนมีความหนาแน่น 19 g/cm^3 จุดหลอม $3,400^\circ\text{C}$ เมื่อผลิตเป็นชิ้นงาน ความหนาแน่นประมาณ 15 g/cm^3 จุดหลอมที่ $2,880^\circ\text{C}$ มันยังคงสมบัติเดิมได้ดีจากการนำกลับมาผลิตใหม่โดยเฉพาะกระบวนการรีไซเคิล (Recycling) [6] พบว่าอุตสาหกรรมการผลิตโลหะทังสเทนคาร์ไบด์สำหรับผู้นำทางอุตสาหกรรมมีแนวโน้มสูงขึ้นต่อเนื่องตั้งแต่ปี ค.ศ. 1994 เป็นต้นมา [7] คาดว่าในปี ค.ศ. 2020 การผลิตทังสเทนคาร์ไบด์ด้วยการรีไซเคิลจะเพิ่มขึ้นมากกว่าร้อยละ 54 และประเทศสหรัฐอเมริกาเป็นผู้ผลิตมากที่สุดถึงร้อยละ 90 [6]

สำหรับกระบวนการอบผิวนั้นมีขั้นตอนการผลิตหลายขั้นตอน ปัจจัยสำคัญและเป็นเงื่อนไขหลักในการผลิต คือ การใช้เตาสุญญากาศ (Vacuum furnace) โดยตรงเพื่อใช้ในการอบให้ความร้อนและการเย็นตัว รวมถึงการควบคุมตัวแปรอื่น ได้แก่ เวลาในการอบ อุณหภูมิ บรรยากาศภายในเตา อัตราการเพิ่มอุณหภูมิตั้งแต่อุณหภูมิห้องเป็นลำดับไป (pre-heat) จนถึงอุณหภูมิสูงสุด (heating rate) อุณหภูมิอบผิวนิก (sintering temperature) เวลาในการคงอุณหภูมิอบผิวนิก (holding time) และอัตราการเย็นตัว (cooling rate) เป็นต้น ขั้นตอนการทำงานในกระบวนการผลิตชิ้นงานโลหะแข็ง รวมถึงการอบผิวนิกแสดงตามภาพที่ 1.1

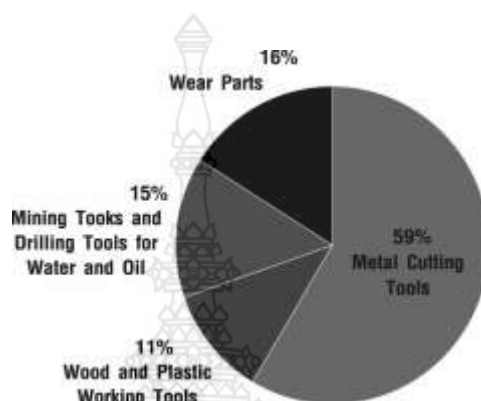


ภาพที่ 1.1 การผลิตสินค้าจากโลหะทังสเตนในอุตสาหกรรมขนาดใหญ่จำหน่าย [1]

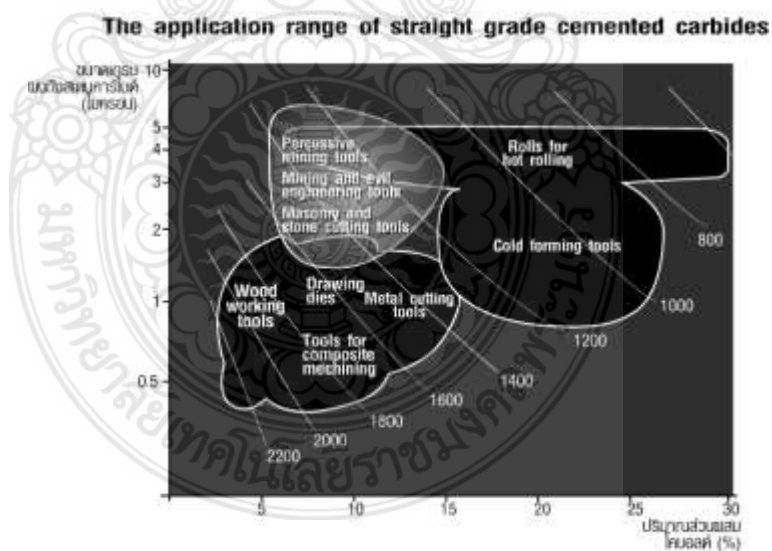
ชิ้นงานผลิตจากการอบผิวนิก ส่วนใหญ่จะเป็นชิ้นส่วนเครื่องจักรกล เครื่องมือตัด เป็นต้น นิยมเรียกว่า ซีเมนต์คาร์ไบด์ (Cemented carbides) เมื่อนำไปใช้ในอุตสาหกรรมพบว่านำไปผลิตเป็นเครื่องมือตัด ร้อยละ 59 ผลิตชิ้นส่วนทนการสึกหรอ ร้อยละ 16 ผลิตเครื่องมือในอุตสาหกรรมเหมืองแร่ งานขุดเจาะ (น้ำ น้ำมัน) ร้อยละ 15 ผลิตเครื่องมืองานไม้และพลาสติก ร้อยละ 11 [5]

ผลิตภัณฑ์ซีเมนต์คาร์ไบด์ ชนิดแผ่นมิด (Insert tools) และแท่งเครื่องมือตัด (Solid tools) เป็นโลหะที่มีส่วนผสมทังสเตนคาร์ไบด์สูงกว่าร้อยละ 80-97 โดยน้ำหนัก ใช้โลหะประสานโคบอลต์

มากกว่า 90 % ตามภาพที่ 1.2 และ 1.3 พบว่ามีการใช้โลหะโคบอลต์เป็นโลหะประสาน (Cobalt binder) ขนาดเกรน (Grain size) อยู่ในช่วง 0.15-50.00 ไมครอน (μm) และปัจจุบันแนวโน้มผลิตผงนาโนเมตรเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง หากผลิตชิ้นงาน(Parts) จะให้ความแข็งแรงอยู่ระหว่าง 1,400-2,500 HV ตามตารางที่ 1-3 ขึ้นกับปัจจัยการผลิตหลายปัจจัย ได้แก่ ขนาดและรูปทรงของโลหะผง

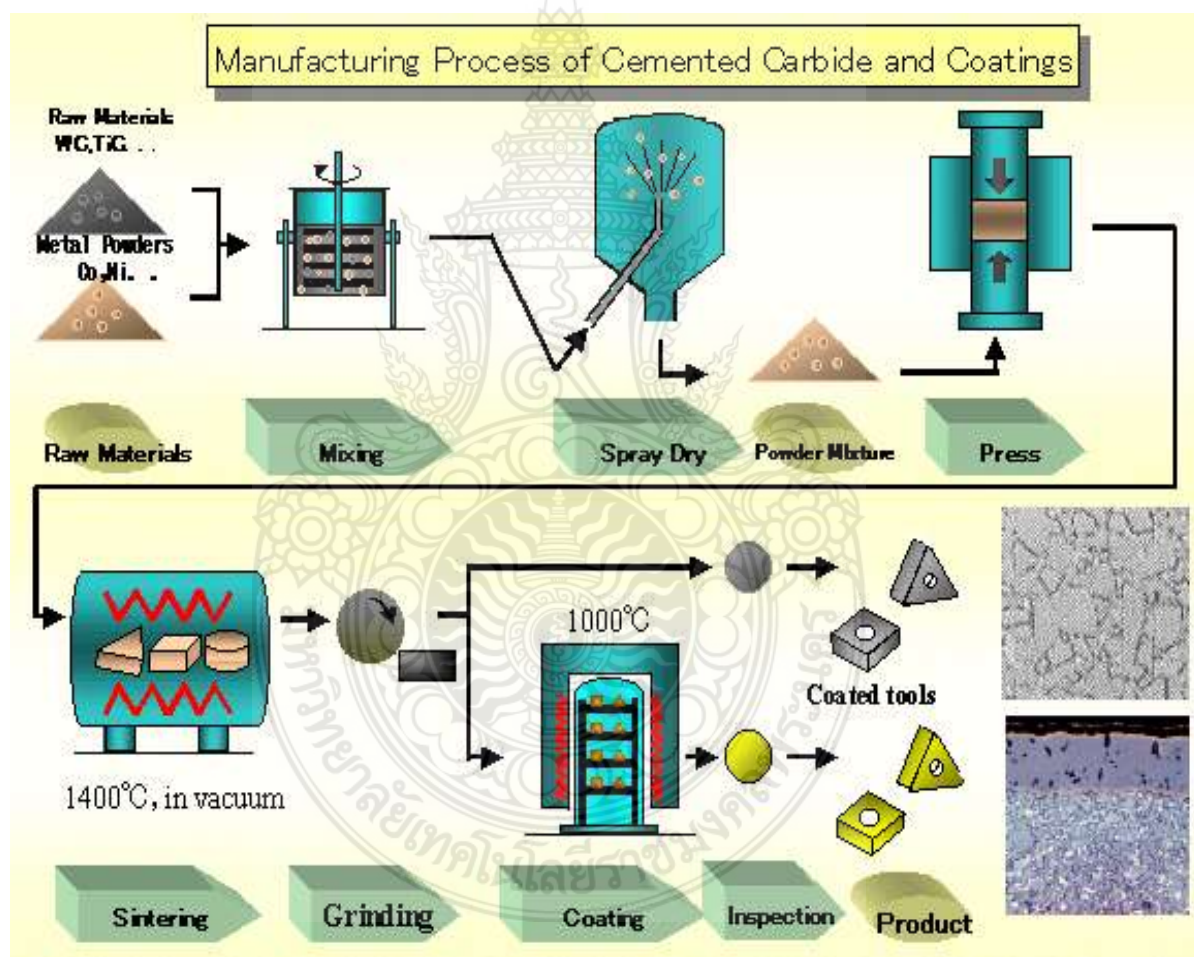


ภาพที่ 1.2 การแบ่งกลุ่มของผลิตภัณฑ์เครื่องมือตัดผลิตจากทั้งสแตนคาร์ไบด์ในอุตสาหกรรม [5]



ภาพที่ 1.3 ความสัมพันธ์ของขนาดผงโลหะทั้งสแตนคาร์ไบด์และส่วนผสมโคบอลต์ มีอิทธิพลต่อความแข็งแรงของชิ้นงานและการจัดกลุ่มเครื่องตัดให้เหมาะสมกับลักษณะงาน [5]

ดังนั้น การพัฒนาผลิตภัณฑ์ซีเมนต์ทั้งสแตนคาร์ไบด์ (Cement tungsten carbide) จากวัสดุที่ผลิตและพัฒนาในประเทศจึงเป็นการวิจัยและพัฒนาเชิงประยุกต์เพื่อค้นหาอิทธิพลของตัวแปรในการอบผนึกผลิตเป็นชิ้นงานความแข็งสูงเพื่อพัฒนาสมบัติทางกล เป็นการวิจัยและพัฒนาต่อยอดวัสดุทั้งสแตนคาร์ไบด์ที่ผลิตในประเทศ ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงเป็นการศึกษาและพัฒนาต่อยอดวัสดุโลหะผงทั้งสแตนคาร์ไบด์ให้เป็นชิ้นงานโลหะความแข็งสูง (High hardness) ภายใต้อิทธิพลของตัวแปรในการอบผนึก จึงเป็นงานวิจัยพื้นฐานที่สำคัญต่อการนำไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรม และเป็นองค์ความรู้ใหม่ต่อการวิจัยสู่การสร้างมูลค่าเพิ่มของวัสดุในเชิงพาณิชย์ต่อไป



ภาพที่ 1.4 กระบวนการผลิตชิ้นงานคาร์ไบด์หรือผลิตภัณฑ์เครื่องมือตัดทั้งสแตนคาร์ไบด์ [26]

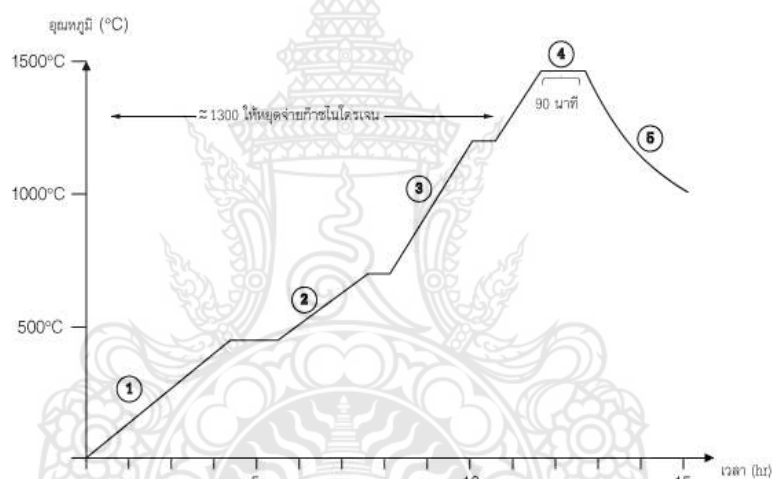
1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 ศึกษาปัจจัยการผลิตและวิเคราะห์กระบวนการอบผนึก (sintering) เพื่อเพิ่มความแข็ง (hardness) ของชิ้นงานซีเมนต์คาร์ไบด์จากโลหะผงทังสเตนคาร์ไบด์ที่ผลิตภายในประเทศ

1.2.2 พัฒนาชิ้นงานอบผนึกโลหะทังสเตนคาร์ไบด์ตามแนวทางการส่งเสริมอุตสาหกรรมอย่างยั่งยืน

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1.3.1 พัฒนาชิ้นงานทังสเตนคาร์ไบด์ (Tungsten Carbides) จากวัตถุดิบที่ผลิตในประเทศ ผสมโคบอลต์ ให้สามารถผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ซีเมนต์ทังสเตนคาร์ไบด์



ภาพที่ 1.5 แสดงตัวอย่างการอบผนึกชิ้นงานความแข็งสูงพิเศษ [39]

1.3.2 ใช้วัตถุดิบทังสเตนคาร์ไบด์จากการผลิตด้วยกระบวนการที่พัฒนาขึ้นใหม่ในประเทศ

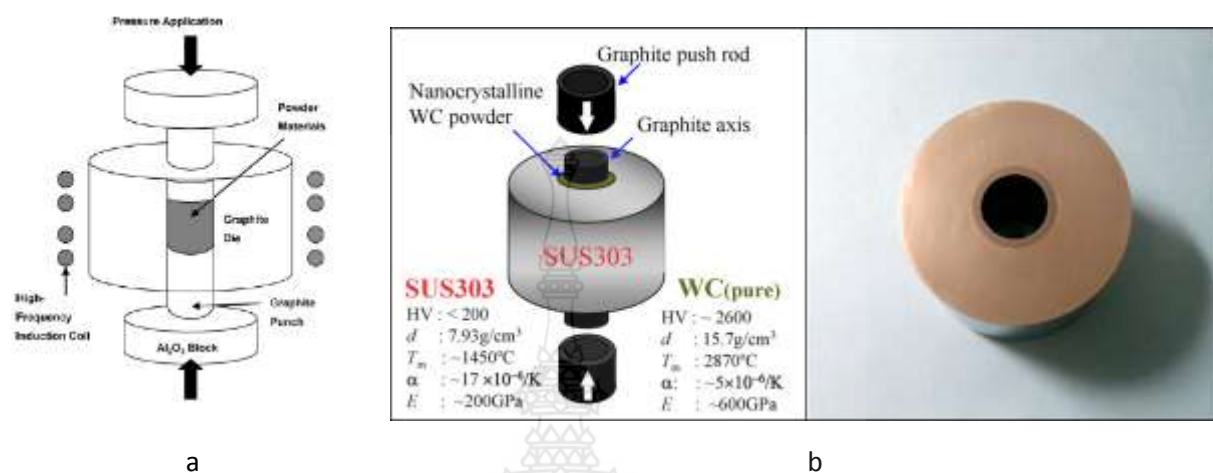
- กำหนดขนาดผงโลหะนาโน อยู่ในช่วงไม่มากกว่า 1,000 nm
- วัสดุเป็นโลหะผงทังสเตนคาร์ไบด์ที่มีความบริสุทธิ์ไม่น้อยกว่า 95%
- ขนาดและการกระจายของผงโลหะ ให้การกระจายโลหะผงเข้าใกล้โค้งปกติ



ภาพที่ 1.6 แสดงเตาอบผง (Sintering furnace) [3]

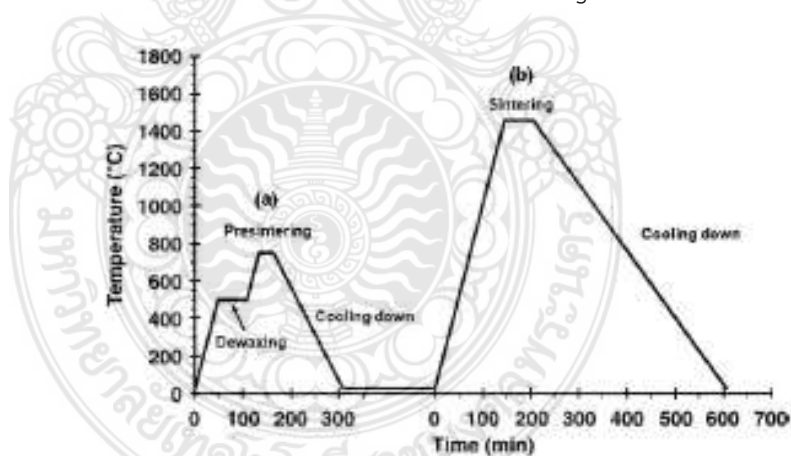
- 1.3.3 ชิ้นส่วนโลหะความแข็งแรงสูงผสมโลหะประสานโคบอลต์ไม่เกิน 10 %
 - 1.3.4 ผลิตโลหะผงมาตรฐานโดยการวิเคราะห์วัสดุด้วยเทคโนโลยี SEM, XRD
 - 1.3.5 การเตรียมโลหะผงก่อนการอบผงด้วยการบด Pulverized โดยใช้ Tungsten carbide Ball mills กับเครื่องบดโลหะผง (Mechanical alloying) และการกำหนดการกระจายของโลหะผง (Particle sized Distribution) ไม่มากกว่า 1,000 nm
 - 1.3.6 การเตรียมโลหะผงตามกำหนดด้วยการบดที่ความเร็วรอบ ระหว่าง 300-500 rpm ขนาดลูกบด ระหว่าง 5-10 mm เวลาในการบด การผสมวัสดุประสาน (wax) เป็นต้น
 - 1.3.7 การอัดขึ้นรูป (Press) การกำหนดค่าความหนาแน่นก่อนอบและตรวจสอบความหนาแน่นหลังการอบผง (Sintering process)
 - 1.3.8 การอบผง (Sintering) ที่อุณหภูมิแตกต่างกันระหว่าง 1,300 - 1,500°C
 - 1.3.9 อัตราการเพิ่มความร้อนจากอุณหภูมิห้องจนถึงอุณหภูมิอบผง
 - 1.3.10 ศึกษาความหนาแน่นของชิ้นงานเทียบมาตรฐาน (14.00 g/cm^3) และทดสอบสมบัติทางกล อาทิ ความแข็ง
 - 1.3.11 วิเคราะห์ผลการทดลองและคุณลักษณะของชิ้นส่วนโลหะความแข็งแรงสูง
- โดยมีการดำเนินการ การทดลอง การวัดผล การศึกษาคุณภาพชิ้นงานเทียบกับมาตรฐานและสินค้าที่นำเข้ามาในด้านต่าง ๆ ประกอบด้วย
- 1) ตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค
 - 2) ทดสอบคุณลักษณะของโลหะผงทั้งสเตนคาร์ไบด์ การผสมโลหะประสานโคบอลต์ด้วยวิธี XRF, XRD และ SEM

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



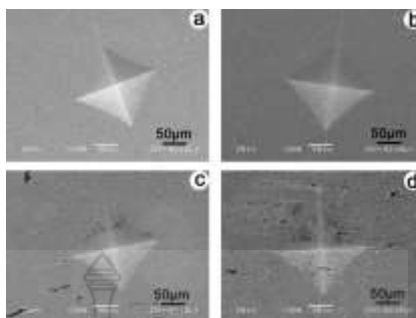
ภาพที่ 1.7 การอัดขึ้นรูปชิ้นงานจากโลหะผง WC-Co (a) แบบจำลองการอัดขึ้นรูป [36],
(b) การอัดขึ้นรูปโลหะผงทั้งสแตนคาร์ไบด์ (WC) และ SUS303 [38]

- 4) การทดลองผลิตชิ้นงานด้วยวิธีการอบนึ่ง (Re- Sintering)



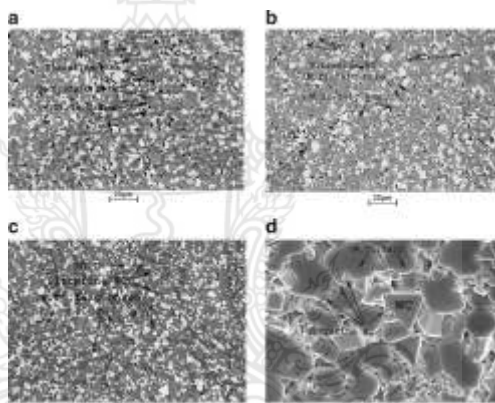
ภาพที่ 1.8 ขั้นตอนการอบนึ่ง (Sintering) [35]

- 5) ศึกษาสมบัติทางกล ได้แก่ ความแข็ง (Hardness)



ภาพที่ 1.9 ผลการทดสอบความแข็งและรอยกดผิวชิ้นงาน [37]

6) ศึกษาโครงสร้างจุลภาคของผลิตภัณฑ์



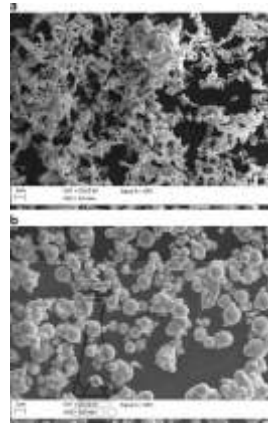
ภาพที่ 1.10 แสดง SEM วิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของผลิตภัณฑ์ที่ผ่านการอบพูน (Sintering)[33]

7) ศึกษาเปรียบเทียบโครงสร้างเกรนของโลหะกับชิ้นงานมาตรฐานและจากผลงานวิจัยที่เป็นมาตรฐานสากล ไม่น้อยกว่า 5 ผลงานวิจัย

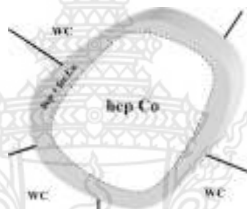
1.4 สมมุติฐานและกรอบแนวความคิดของโครงการวิจัย

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

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

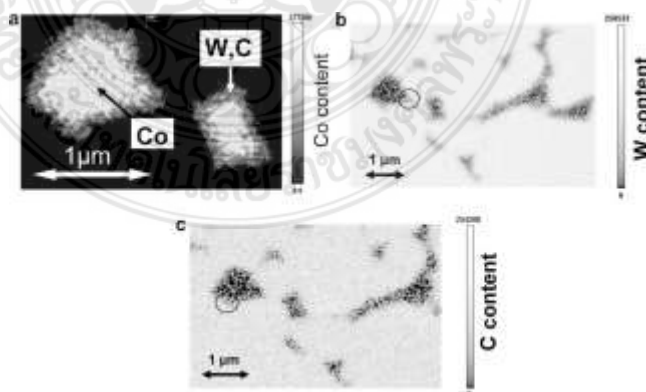


ภาพที่ 1.11 SEM micrographs of the starting powders: (a) WC and (b) Co. [31]

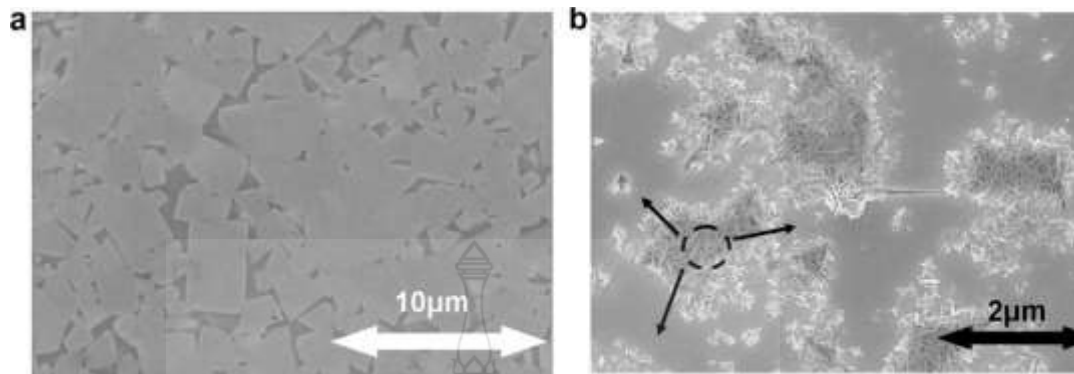


ภาพที่ 1.12 Schematic presentation of the arrangement of the different crystal structures in the Co binder matrix. [28]

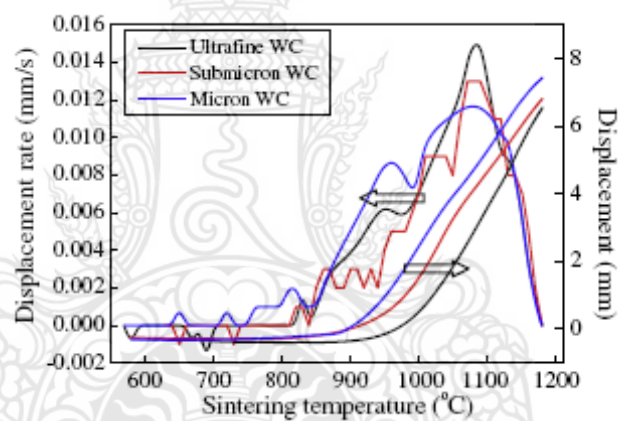
จากภาพที่ 1.12 เป็นแบบแสดงโครงสร้างเกรนที่มีการเชื่อมติดของโลหะทั้งสแตนคาร์ไบด์โดยมีโคบอลต์เป็นโลหะประสาน ในรูปของ hcp Co สามารถเกาะยึดทั้งสแตนคาร์ไบด์ได้หลาย particles



ภาพที่ 1.13 การผสมโลหะ WC-Co และการกระจายตัวของโลหะในระหว่างการเตรียมโลหะผงก่อนการอัดขึ้นรูป [28]

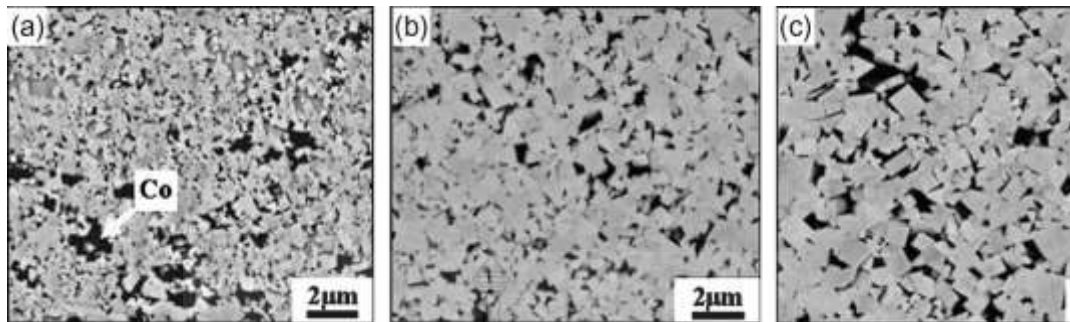


ภาพที่ 1.14 SEM images for WCCo06 that provide an overview of the microstructure (a) and after polarization at -0.85 V for 2 h in 1 M NaOH (b). [28]

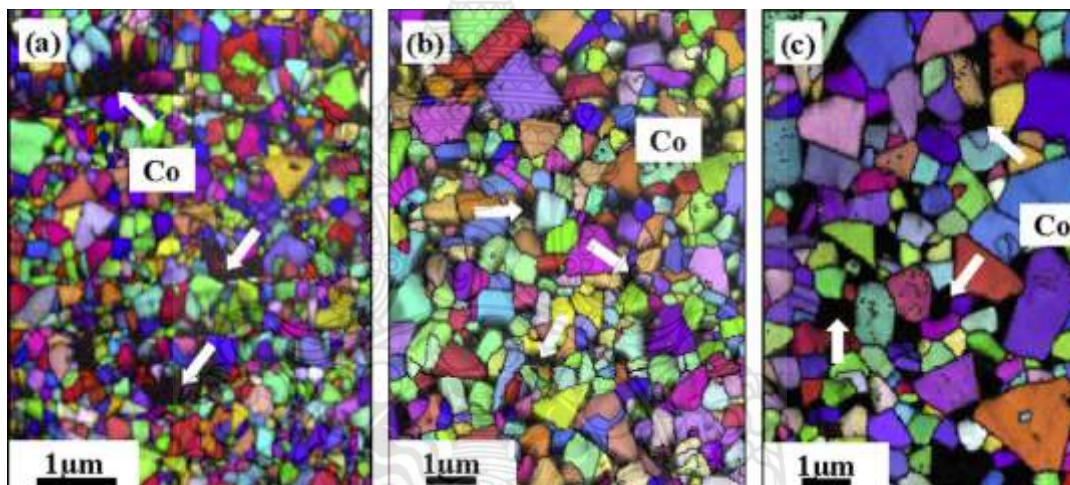


ภาพที่ 1.15 Variations of the displacement and displacement rate in the SPS process for powder samples with different WC particle sizes. [30]

จากภาพที่ 1.15 ลักษณะเกรนของโคบอลต์ที่ปรากฏอยู่ระหว่างเกรนของทั้งสแตนคาร์ไบด์ แสดงให้เห็นโครงสร้างเกรนของชิ้นงานมีการเชื่อมติดด้วยโลหะประสาน ซึ่งมีผลต่อความแข็งซึ่งมีผลต่อความสามารถในการต้านทานการสึกหรอของชิ้นงานซีเมนต์คาร์ไบด์



ภาพที่ 1.16 SEM images of WC–Co bulk samples prepared with powder mixtures using different-scaled WC particles: (a) ultrafine WC, (b) submicron WC, and (c) micron WC. [30]



ภาพที่ 1.17 EBSD images of SPSed cermet bulk samples prepared using powder mixtures with different WC particles: (a) ultrafine WC, (b) submicron WC, (c) micron WC [34]

จากภาพที่ 1.17 เป็นโครงสร้างเกรนที่ผลิตจากโลหะผงขนาดต่างกัน ประกอบด้วย รูป (a) ultrafine WC, (b) submicron WC, and (c) micron WC ส่วนรูปที่ 21 เป็น EBSD images of SPSed cermet bulk samples prepared using powder mixtures with different WC particles: (a) ultrafine WC, (b) submicron WC, (c) micron WC ซึ่งจะแสดงรายละเอียดของโครงสร้างโดยแยกตามสีสำหรับเกรนทั้งสเตนคาร์ไบด์และโคบอลต์

1.5 วิธีดำเนินการวิจัย

15.1 การเตรียมงานและการวิจัย

1) ผลิตโลหะผงทั้งสแตนคาร์ไบด์เป็นวัตถุดิบในการวิจัย โดยห้องปฏิบัติการและวิจัยโลหะทั้งสแตนคาร์ไบด์ สาขาวิชาวิศวกรรมการจัดการอุตสาหกรรมเพื่อความยั่งยืน คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

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

3) คัดกรองและแยกขนาดโลหะผง

4) คัดเลือกผงโลหะทั้งสแตนคาร์ไบด์ที่มีขนาดและคุณลักษณะที่เหมาะสมเพื่อนำไปผลิตเป็นชิ้นส่วนความแข็งสูงพิเศษ(Hard metals)

5) ผสมโลหะประสานโคบอลต์ ตามสัดส่วนที่กำหนดและตามมาตรฐานในช่วง 1-10%

6) ผสมวัสดุยึดติด Paraffin Wax ตามสัดส่วนมาตรฐานที่กำหนดไม่เกิน 3%

7) ผลิตเป็นผลิตภัณฑ์เครื่องมือตัดด้วยการอัดขึ้นรูป

8) ตรวจสอบขนาด ความหนาแน่น (Green density) และการยึดติดของโลหะผง

9) ทดลองการอบผนึกที่อุณหภูมิสูงสุดในช่วง 1,400-1,500°C

10) ตรวจสอบขนาด รูปทรงเรขาคณิต ความหนาแน่นของชิ้นงานความแข็งสูงพิเศษ ซึ่งเป็นกระบวนการกำหนดคุณภาพของชิ้นงานที่พัฒนาขึ้นใหม่

11) การเจียระไนผิวสำเร็จ (Finish to size) และตรวจสอบขั้นตอนสุดท้ายในการผลิต

12) การทดสอบสมบัติทางกลและทดสอบการใช้งาน

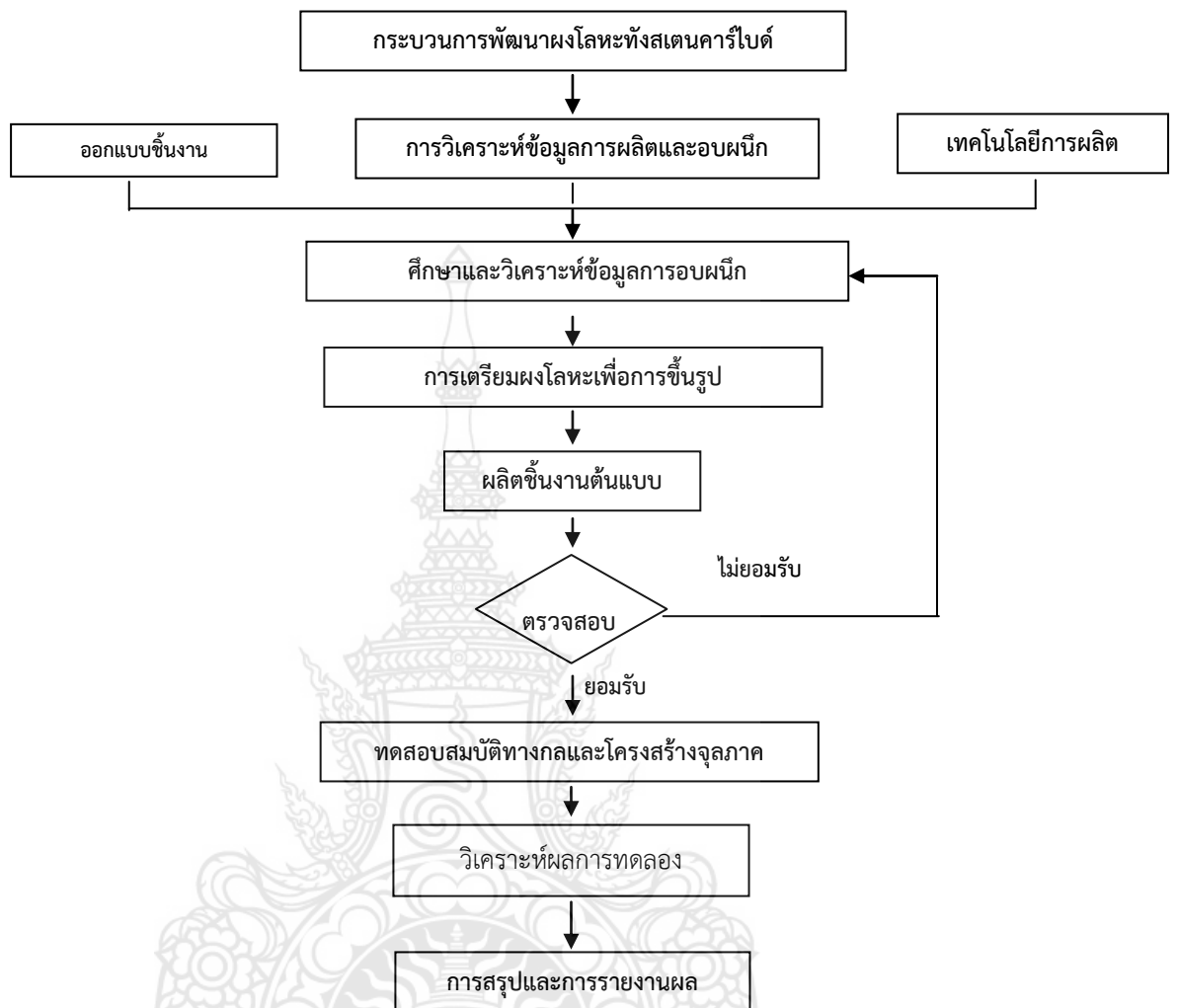
13) เปรียบเทียบและสมบัติเบื้องต้นของผลิตภัณฑ์เครื่องมือตัดทั้งสแตนคาร์ไบด์

14) การรายงานผลและเผยแพร่ผลงานวิจัยทั้งในและต่างประเทศ

15.2 กระบวนการและเวลาดำเนินการ

1. เตรียมผงโลหะด้วยห้องปฏิบัติการผลิตโลหะผง	<u>ใช้เวลาประมาณ 15 วัน</u>
1.1 ผลิตผงโลหะทั้งสแตนคาร์ไบด์	10 วัน
1.2 การคัดกรองและทำให้บริสุทธิ์ขั้นต้น	2 วัน
1.3 การเตรียมวัตถุดิบเพื่อทำให้บริสุทธิ์	3 วัน
2. การเตรียมวัตถุดิบให้บริสุทธิ์มากกว่า 99%	<u>ใช้เวลาประมาณ 15 วัน</u>
2.1 การอบแห้ง การทำให้สะอาด	5 วัน
2.2 การบดและแยกวัสดุผง	5 วัน
2.3 การกรองและกำหนดขนาด	5 วัน

3. การเตรียมผงโลหะให้ได้ขนาดที่ต้องการ	<u>ใช้เวลาประมาณ 15 วัน</u>
3.1 การแยกวัสดุ และการทำความสะอาด (Cleaning system)	5 วัน
3.2 การบด (Ball mill) และ Mechanical alloying	6 วัน
3.3 การคัดแยกตามขนาดที่กำหนด	4 วัน
4. การเตรียมวัตถุดิบก่อนอบพ่นิก	<u>ใช้เวลาประมาณ 30 วัน</u>
4.1 กำหนดสัดส่วนผสมโลหะประสานโคบอลต์	10 วัน
4.2 การผสมโลหะผง	5 วัน
4.3 การขึ้นรูปชิ้นงาน	10 วัน
4.4 ตรวจสอบ green density	5 วัน
5. การอบพ่นิก การทดลอง การวิเคราะห์ปัจจัยที่เหมาะสม	<u>ใช้เวลาประมาณ 5 เดือน</u>
5.1 ทำอุปกรณ์จับยึด	15 วัน
5.2 ทดลองอบพ่นิกภายใต้ตัวแปรต่างกัน (Sintering)	90 วัน
5.3 ศึกษาและตรวจสอบความหนาแน่น	15 วัน
5.4 เจียรในผิวสำเร็จ	15 วัน
5.5 รวบรวมข้อมูลเพื่อการวิเคราะห์	15 วัน
6. ทดสอบสมบัติทางกล	<u>ใช้เวลาประมาณ 2 เดือน</u>
6.1 เตรียมเครื่องมืออุปกรณ์การทดลอง	10 วัน
6.2 เตรียมชิ้นงาน	10 วัน
6.4 ทดสอบความแข็ง	10 วัน
6.5 ทดสอบโครงสร้างจุลภาค	20 วัน
6.9 วิเคราะห์ผลการทดสอบ	10 วัน
7. การกำหนดมาตรฐานผลิตภัณฑ์เครื่องมือตัดทั้งสแตนคาร์ไบด์	<u>ใช้เวลาประมาณ 45 วัน</u>
7.1 วิเคราะห์ผลการตรวจสอบ XRD, SEM,	15 วัน
7.2 วิเคราะห์ความแข็ง และโครงสร้างจุลภาค	10 วัน
7.3 วิเคราะห์การสึกหรอ กลไกการเกิดเศษตัดและผิวงาน	10 วัน
7.4 กำหนดคุณลักษณะและมาตรฐานเครื่องมือตัดทั้งสแตนคาร์ไบด์	10 วัน
8. สรุปผลการวิจัยและรายงาน	<u>ใช้เวลาประมาณ 1 เดือน</u>
8.1 สรุปผลการทดลอง	15 วัน
8.2 รายงานผลการวิจัย	15 วัน



ภาพที่ 1.18 รูปแบบกระบวนการผลิตชิ้นงานทั้งสแตนคาร์ไบด์และการทดสอบ
(Methodologies of hard metals)

1.6 สถานที่ดำเนินการทดลองและเก็บข้อมูลโครงการวิจัย

16.1 สาขาวิชาวิศวกรรมการจัดการอุตสาหกรรมเพื่อความยั่งยืน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร ดำเนินการวิจัยโดยรวม ได้แก่ การผลิตโลหะผงทั้งสแตนคาร์ไบด์ การเตรียมวัตถุดิบ การผลิต การออกแบบการทดสอบผลิตภัณฑ์

16.2 สาขาเทคโนโลยีการผลิตเครื่องมือและแม่พิมพ์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ การออกแบบและผลิต (CAD/CAM/CAE) เพื่อผลิตเครื่องต้นแบบแยกสลายเศษทั้งสแตนคาร์ไบด์ ได้แก่ การเชื่อม กัด เจาะ เจียรไน การทดลองและวิเคราะห์ผล

16.3 สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย (วว) การเตรียมและผลิตอุปกรณ์การทดลองอบผนึก เตรียมชิ้นงานหลังอบผนึก ตรวจสอบและทดสอบเพื่อกำหนดมาตรฐานชิ้นงาน

16.4 ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ เพื่อการทดสอบวัสดุผงโลหะทั้งสแตนคาร์ไบด์ที่พัฒนาขึ้นโดยการพ่นเคลือบ (Plasma spray) และการตรวจสอบสมบัติของผงโลหะที่พัฒนาขึ้นใหม่

16.5 สถาบันวิจัยโลหะวิทยาและวัสดุศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ซอยจุฬา 12 ถนนพญาไท กรุงเทพฯ 10330 ตรวจสอบสมบัติทางเคมีของผงโลหะ

16.6 ภาควิชาวิศวกรรมการผลิต สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ทดสอบด้วยเครื่องมือในการทดลอง ได้แก่ การอบให้ความร้อนและการทดสอบสมบัติทางกลของวัสดุ

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

16.8 ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน จังหวัดนครราชสีมา เพื่อดำเนินการทดสอบสมบัติของวัสดุและเปรียบเทียบ

16.9 ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ จังหวัดเชียงใหม่ เพื่อวิเคราะห์อนุภาคนาโนและตรวจสอบอนุภาคนาโนของโลหะขนาดประมาณ 50 นาโนเมตร

1.7 ระยะเวลาการทำวิจัย

ระยะเวลาโครงการ ประมาณ 1 ปี (ตุลาคม 2557 – กันยายน 2558)

ขั้นตอนการวิจัย	ระยะเวลา 1 ปี											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1. ผลิตโลหะผง WC	—											
2. จัดเตรียมวัสดุ ขนาดผง คัดแยกขนาด (<1,000 nm)		—										
3. ผสมโลหะและเตรียมการ ทดลองอบพูนิก			—									
4. ศึกษาและวิเคราะห์การ อบพูนิกและเจียรในผิว สำเร็จ			—	—	—	—						
5. การทดลองอบพูนิก						—	—	—	—			
6. ทดสอบสมบัติทางกล โครงสร้างจุลภาคและ วิเคราะห์ผลการทดลอง							—	—	—	—		
7. กำหนดมาตรฐานและ จัดทำข้อมูลต้นแบบ											—	—
8. สรุปผลและรายงาน												—

1.8 ประโยชน์ที่ได้รับ

1.8.1 กระบวนการอบพูนิก (Sintering) มีปัจจัยสำคัญประกอบด้วย อุณหภูมิ อัตราการให้ความร้อน เวลาที่เหมาะสมของกรรมวิธีการอบพูนิกขึ้นงานความแข็งสูงพิเศษทั้งสแตนคาร์ไบด์ เป็นชิ้นงานต้นแบบเนื่องจากใช้วัตถุดิบที่ผลิตเอง

1.8.2 ชิ้นงานที่มีความแข็งสูงกว่า 2,000 HV หรือเทียบเท่าสินค้านำเข้า

1.8.3 องค์ความรู้ใหม่ ได้แก่ ขนาดโลหะผง การผสม การอัดขึ้นรูปและการวิเคราะห์โลหะด้วยวิธีต่างๆ ในการผลิตชิ้นงานทั้งสแตนคาร์ไบด์เพื่อเป็นพื้นฐานในการสนับสนุนการผลิตภายในประเทศ

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ผงทังสเตนคาร์ไบด์ (WC)

ผงทังสเตนคาร์ไบด์เป็นวัตถุดิบที่สำคัญต่อการผลิตซีเมนต์ทังสเตนคาร์ไบด์ ลักษณะสีเทา เป็นเงา เป็นโลหะแข็งที่ใกล้เคียงกับเพชรมากกว่าโลหะชนิดอื่น มีสมบัตินำความร้อนและนำไฟฟ้าได้ดี การผลิตโลหะทังสเตนคาร์ไบด์ส่วนใหญ่อยู่ในประเทศอุตสาหกรรมที่เป็นผู้นำ เช่น ญี่ปุ่น อเมริกา เยอรมนี อิตาลี ฝรั่งเศส สวีเดน จีน และไต้หวัน เป็นต้น



ภาพที่ 2.1 แสดงผงทังสเตน [13]

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



ภาพที่ 2.2 แสดงผงทังสเตนคาร์ไบด์สำเร็จรูป [13]

จากภาพที่ 2.2 เป็นผงทั้งสเตนคาร์ไบด์สำเร็จรูปของบริษัท Jiangsu Maoyuan Economic And Trade Development Co, Ltd. ซึ่งตั้งอยู่ที่ประเทศจีนมีราคาอยู่ที่ประมาณกิโลกรัมละ 5,140 บาท

2.2 โคบอลต์ (Co)



ภาพที่ 2.3 แสดงผงโคบอลต์ (Co) [13]

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

2.3 พาราฟิน แวกซ์ (Paraffin Wax)



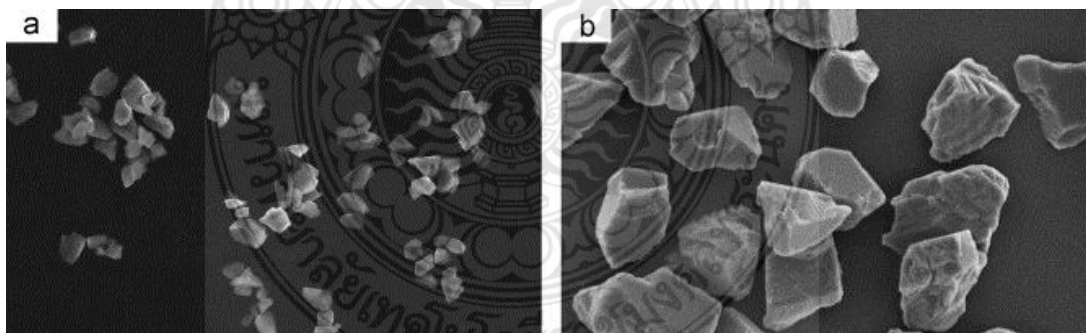
ภาพที่ 2.4 แสดงพาราฟิน แวกซ์ [2]

จากภาพที่ 2.4 พาราฟิน แวกซ์ (Paraffin Wax) เป็นแวกซ์ที่ได้มาจากกากส่วนที่เหลือ ที่ได้จากกระบวนการกลั่นน้ำมันดิบ โดยกระบวนการกลั่นน้ำมันแบบหากลั่นลำดับส่วน ไชหรือกากแวกซ์ที่ได้จากกระบวนการกลั่นนี้ เรียกว่า สแลก แวกซ์ (Slack Wax) ซึ่งยังมีปริมาณน้ำมันในแวกซ์สูง นำ

สแลค แร่กซ์ ที่ได้ มาผ่านกระบวนการการสกัดน้ำมันออกจากแร่กซ์ เพื่อให้ได้พาราฟิน แร่กซ์ ที่มี ปริมาณน้ำมันในแร่กซ์ตามค่ามาตรฐานของพาราฟิน แร่กซ์ ที่ได้สามารถนำมาใช้ทำเทียนและใช้ ประโยชน์ในอุตสาหกรรมอื่นๆ

2.4 การตรวจสอบคุณภาพผงทั้งสแตนคาร์ไบด์

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



ภาพที่ 2.5 แสดง SEM micrographs of different cubic boron nitride powder grades used in this work. (a) 2–3 μm and (b) 10–14 μm . [29]

จากภาพที่ 2.5 เป็นภาพการส่องขยายผงทั้งสแตนคาร์ไบด์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน หรือ Scanning Electron Microscope (SEM) (a) มีขนาดผง 2-3 ไมครอน และ (b) มีขนาดผง 10-14 ไมครอน

2.5 การผลิตแผ่นมิตทั้งสแตนคาร์ไบด์

2.5.1 การบดละเอียดผงทั้งสแตนคาร์ไบด์ (Ball Milling)

การบดละเอียด (Ball Milling) เป็นการบดวัตถุที่ผ่านการบดหยาบมาแล้ว ให้มีขนาดของอนุภาคเล็กลงจนถึงขั้นละเอียดมาก (Pulverization) โดยใช้การกระทบ, กระทบ และ การเสียดสีกันระหว่างวัตถุดิบ ตัวลูกบด (Grinding Media) และตัวบุผนังของหม้อบด (Lining) การที่เราจำเป็นต้องบดอนุภาคของวัตถุดิบให้มีขนาดละเอียดมาก (ต่ำกว่า 60 ไมครอนลงไป) ก็เพื่อที่จะช่วยให้การเกิดปฏิกิริยาระหว่างการเผาของวัตถุดิบต่างๆ ที่อยู่ในสูตรของผลิตภัณฑ์เซรามิก เร็วขึ้น สมบูรณ์ขึ้น เพื่อให้ได้คุณสมบัติต่าง ๆ เช่น ความแข็งแรงหลังเผา, เปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำ, ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อน, ปริมาณเนื้อแก้ว (Glassy Phase) ได้ตามที่เรากำลังต้องการสามารถแบ่งวิธีการบดละเอียดได้ตามอุปกรณ์และหลักการในการบด (Milling) ได้ดังนี้

2.5.1.1 Ball Mill เป็นการบดวัตถุโดยใช้หลักการหมุนของหม้อบด โดยมีลูกบดอยู่ภายใน สามารถแบ่งได้เป็น การบดแบบเป็นครั้งคราว (Batch Mill) และการบดแบบต่อเนื่อง (Continuous Mill) โดยการบดทั้งสองแบบนี้ สามารถบดวัตถุได้ทั้งแบบเปียก (Wet Milling) และแบบแห้ง (Dry Milling)

2.5.1.2 Attrition Mill เป็นการบดวัตถุดิบให้มีความละเอียดมาก และมีการกระจายตัวของขนาดอนุภาคต่ำ โดยอนุภาคที่ได้จากการบดโดยใช้ Attrition Mill นั้นจะมีขนาดต่ำกว่า 1 μm ขึ้นอยู่กับขนาดของวัตถุดิบตั้งต้น, ความแข็งของวัตถุดิบ, ชนิดและปริมาณของลูกบด, เวลาในการบด

2.5.1.3 Jet Mill เป็นการบดโดยไม่ใช้ลูกบดแต่อาศัยการบดกันเองของวัตถุดิบที่เคลื่อนที่ด้วยความเร็ว

2.5.1.4 Vibro Mill or Vibration Mill เป็นเครื่องมือบดที่อาศัยการสั่นให้แท่งเหล็กที่ใช้บดกระทบเข้ากับวัตถุดิบ รวมทั้งการกระทบกันเองของวัตถุดิบเองด้วย

2.5.1.5 Pendula Mill เป็นเครื่องบดวัตถุดิบแบบแห้งโดยมีหัวค้อนตีในแนวนอนขนาดก้นโถ และใช้การค้อนขนาดด้วยลม

2.5.1.6 Edge Runner, Muller Mill เป็นเครื่องบดที่ใช้ล้อเหล็กหรือล้อหินขนาดใหญ่หมุนไปในถาดขนาดใหญ่ ซึ่งน้ำหนักของล้อจะเป็นตัวกดเพื่อให้วัตถุดิบย่อยเป็นขนาดเล็ก

2.5.2 ในการบดเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพที่ดีนั้นมีปัจจัยที่จะต้องควบคุมดังต่อไปนี้

2.5.2.1. ปริมาณของลูกบดที่ใช้ในหม้อบด

2.5.2.2. ขนาดของลูกบดและสัดส่วนในแต่ละขนาดที่เติมลงในหม้อบด

2.5.2.3. ชนิดของลูกบด (Type of Grinding Media)

2.5.2.4. ชนิดของตัวบุผนังหม้อบด (Liner)

2.5.2.5. ความเร็วในการหมุนของหม้อบด (Critical Speed)

2.5.2.6. ปริมาณของวัตถุดิบที่เติมและปริมาณของ Medium ที่เติม

2.5.2.7. ความสม่ำเสมอของวัตถุดิบและความแข็ง (Hardness) ของวัตถุดิบ

2.5.2.8. ความละเอียดของวัตถุดิบ

2.5.2.9. ความหนืด (Viscosity) และความหนาแน่น (Density) ของน้ำดิน

2.5.2.10. ปริมาณการเติม Deflocculant และชนิดของ Deflocculant

2.5.2.11. วิธีการเติมวัตถุติบและตัวช่วยปรับปรุงคุณภาพ (Additive)

ตารางที่ 2.1 แสดงอัตราส่วนผสมในการบดผงทังสเตนคาร์ไบด์ด้วยเครื่อง Ball Milling [18]

Factors	A	B	C	D	E
	Weight ratio of balls to powder	Balls size (mm)	Types of milling medium	Volume of medium (ml)	Rotation speed (RPM)
1	5:01	6	Distilled water	0	100
2	10:01	6 + 8	Ethanol	4	150
3	15:01	8 + 12	Acetone	8	200
4	20:01	12 + 18	75% Ethanol water solution	12	250

จากตารางที่ 2.1 จากบทความวิจัย Parameters optimization in the planetary ball milling of nanostructured tungsten carbide/cobalt powder เป็นตารางแสดงอัตราส่วนผสมในการบดผงทังสเตนคาร์ไบด์ด้วยเครื่อง Ball Milling ซึ่งจะแสดงให้เห็นถึงตัวแปรต่างๆในการบดโลหะผงทังสเตนคาร์ไบด์ เช่น อัตราส่วนของผงโลหะทังสเตนคาร์ไบด์กับลูกบด ขนาดของลูกบด ปริมาณตัวกลางในการช่วยบด ความเร็วรอบ มีรายละเอียดดังตารางดังนี้

อัตราส่วนที่ 1 ใช้อัตราส่วนระหว่างน้ำหนักและผงโลหะทังสเตนคาร์ไบด์ในอัตราส่วน 5:1 ใช้ขนาดของลูกบด 6 mm ประเภทสารละลายที่ใช้เป็นตัวกลางในการบดละเอียด คือ น้ำกลั่น ใช้ความเร็วรอบในการบด 100 rpm

อัตราส่วนที่ 2 ใช้อัตราส่วนระหว่างน้ำหนักและผงโลหะทังสเตนคาร์ไบด์ในอัตราส่วน 10:1 ใช้ขนาดของลูกบด 6+8 mm ประเภทสารละลายที่ใช้เป็นตัวกลางในการบดละเอียด คือ เอทานอล 4 ml ใช้ความเร็วรอบในการบด 150 rpm

อัตราส่วนที่ 3 ใช้อัตราส่วนระหว่างน้ำหนักและผงโลหะทังสเตนคาร์ไบด์ในอัตราส่วน 15:1 ใช้ขนาดของลูกบด 8+12 mm ประเภทสารละลายที่ใช้เป็นตัวกลางในการบดละเอียด คือ อะซิโตน ใช้ในปริมาณ 8 ml ใช้ความเร็วรอบในการบด 100 rpm

อัตราส่วนที่ 4 ใช้อัตราส่วนระหว่างน้ำหนักรีดและผงโลหะทั้งสแตนคาร์ไบด์ในอัตราส่วน 5:1 ใช้ขนาดของลูกบิด 6 mm ประเภทรายละเอียดที่ใช้เป็นตัวกลางในการบดละเอียด คือ เอทานอล 75% และใช้น้ำ 12 ml ใช้ความเร็วรอบในการบด 100 rpm

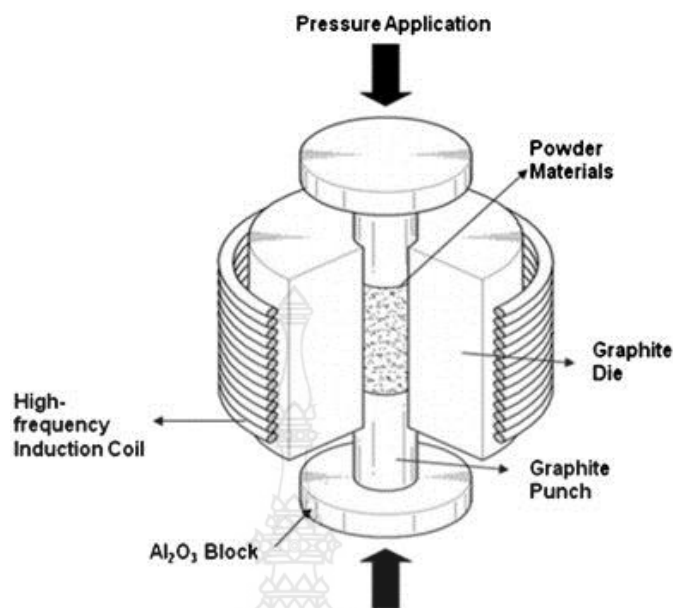
ตารางที่ 2.2 แสดงสมบัติและการผสมผงทั้งสแตนโคบอลต์ [30]

ชนิด	ขนาดเกรนผง WC μm	ปริมาณ WC %	ปริมาณ Co %	ค่าความแข็ง HV
B-10F	3	94	6	1,400
B-10	2.5	94	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	10	1,160
B-30	6	89	11	1,160
B-40	6	85	15	854

จากตารางที่ 2.2 แสดงให้เห็นสมบัติและสัดส่วนการผสมโลหะผสมสแตนโคบอลต์ของบริษัท Betek Progress ซึ่งแบ่งประเภทของชิ้นงานซีเมนต์ทั้งสแตนคาร์ไบด์เป็น B-10F ถึง B-40 จากตารางพบว่าขนาดเกรนของทั้งสแตนคาร์ไบด์มีขนาดระหว่าง 2.5-6 μm อัตราส่วนทั้งสแตนคาร์ไบด์ 85-94 % โคบอลต์อยู่ระหว่าง 6-15 % และค่าความแข็งอยู่ที่ระหว่าง 854-1,556 HV

2.5.3 กระบวนการอัดขึ้นรูป

การขึ้นรูปด้วยวิธีการอัด (Pressing) เป็นกระบวนการให้แรงดันเข้าไปอัดอนุภาคให้ได้รูปทรงตามแบบพิมพ์ที่ต้องการ กระบวนการที่สำคัญในการทำชิ้นงานโลหะผงคือการอัดขึ้นรูป การอัดผงโลหะให้ได้รูปร่างและความหนาแน่นตามที่กำหนด โดยทั่วไปการอัดขึ้นรูปกระทำที่อุณหภูมิห้องและในบางกรณีกระทำการอัดขึ้นรูปด้วยอุณหภูมิที่สูงเพื่อประสิทธิภาพและจุดประสงค์ในการใช้งานงานเฉพาะแบบ



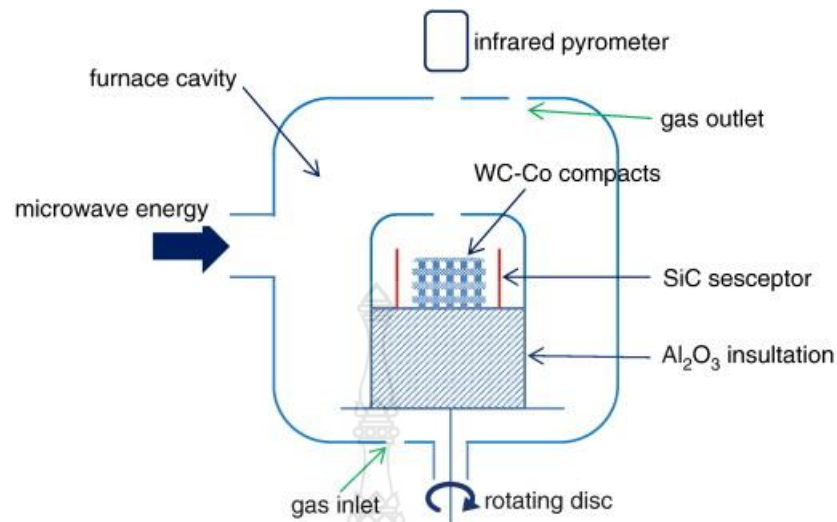
ภาพที่ 2.6 แสดงส่วนประกอบของแม่พิมพ์ที่ใช้ในการอัดขึ้นรูปชิ้นงานทั้งสแตนคาร์ไบด์ [8]

จากภาพที่ 2.6 แสดงส่วนประกอบของแม่พิมพ์ที่ใช้ในการอัดขึ้นรูปชิ้นงานทั้งสแตนคาร์ไบด์ โดยมีจุดประสงค์หลักคือ การทำให้โลหะผงมีขนาดตามที่กำหนด โดยมีรูปร่างใกล้เคียงกับแบบที่กำหนดมากที่สุด จากบทความวิจัย High-frequency Induction heated sintering of High-energy ball milled TiC0.5N0.5 Powders and mechanical properties of the sintered products

2.5.4 การอบผนึก (Sintering)

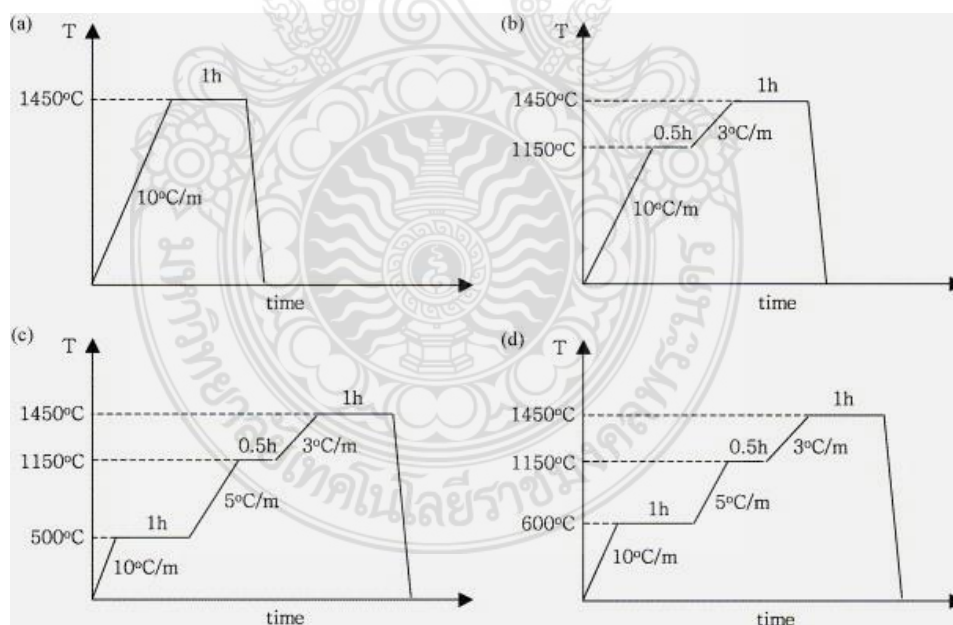
เป็นการนำเอาแท่งโลหะผงปริเทปไปเผาหรืออบที่อุณหภูมิสูง แต่ต่ำกว่าจุดหลอมเหลวของโลหะหลัก ผงโคบอลต์ที่ทำหน้าที่เป็นตัวประสานจะเชื่อมตัว เกาะยึดเม็ดผงโลหะให้ติดกันแน่น ทำให้ค่าความเค้นของชิ้นงานซินเตอร์สูงขึ้น

การซินเตอร์ชิ้นงานบางชิ้นอาจต้องทำถึง 2 ครั้ง ในระดับอุณหภูมิที่แตกต่างกัน ตัวอย่างเช่น ชิ้นงานซินเตอร์ที่ผลิตจากผงทั้งสแตนคาร์ไบด์ แทนทาลัมคาร์ไบด์ และโบลิบดีนัมคาร์ไบด์ ที่ต้องการความเที่ยงตรงด้านขนาดและรูปร่างสูง โดยครั้งแรกจะทำการซินเตอร์ที่อุณหภูมิ $850-900^{\circ}\text{C}$ แล้วนำชิ้นงานนั้นมาตกแต่งด้วยเครื่องจักรให้ได้ขนาดและลักษณะงานตามต้องการแล้วนำไปซินเตอร์ที่อุณหภูมิสูงกว่าที่ระหว่าง $1,100-1,200^{\circ}\text{C}$ จะได้ชิ้นงานที่มีประสิทธิภาพใช้งานได้ดียิ่งขึ้น มีความแข็งแรง ค่าความเค้นและความหนาแน่นสูงขึ้น เตาที่ใช้การอบผนึก มีทั้งเตาที่รับความร้อนจากขดลวดความต้านทานไฟฟ้า เตาที่ใช้ก๊าซหรือใช้น้ำมันเป็นเชื้อเพลิง ในการเผาต้องทำการควบคุมอุณหภูมิอย่างใกล้ชิด เพราะมีผลต่อมิติขั้นสุดท้ายของการผลิต สำหรับกรณีที่ต้องระมัดระวังเรื่องขนาดของชิ้นงานสุดท้าย เตาไฟฟ้าจะมีความเหมาะสมในการใช้มากกว่า



ภาพที่ 2.7 แสดงลักษณะของเตาอบพนัก Sintering [12]

จากภาพที่ 2.7 แสดงให้เห็นถึงลักษณะของเตาอบพนัก หรือ เตา Sintering จากบทความวิจัย Effect of sintering atmosphere on microwave prepared WC-8wt.%Co cemented carbide



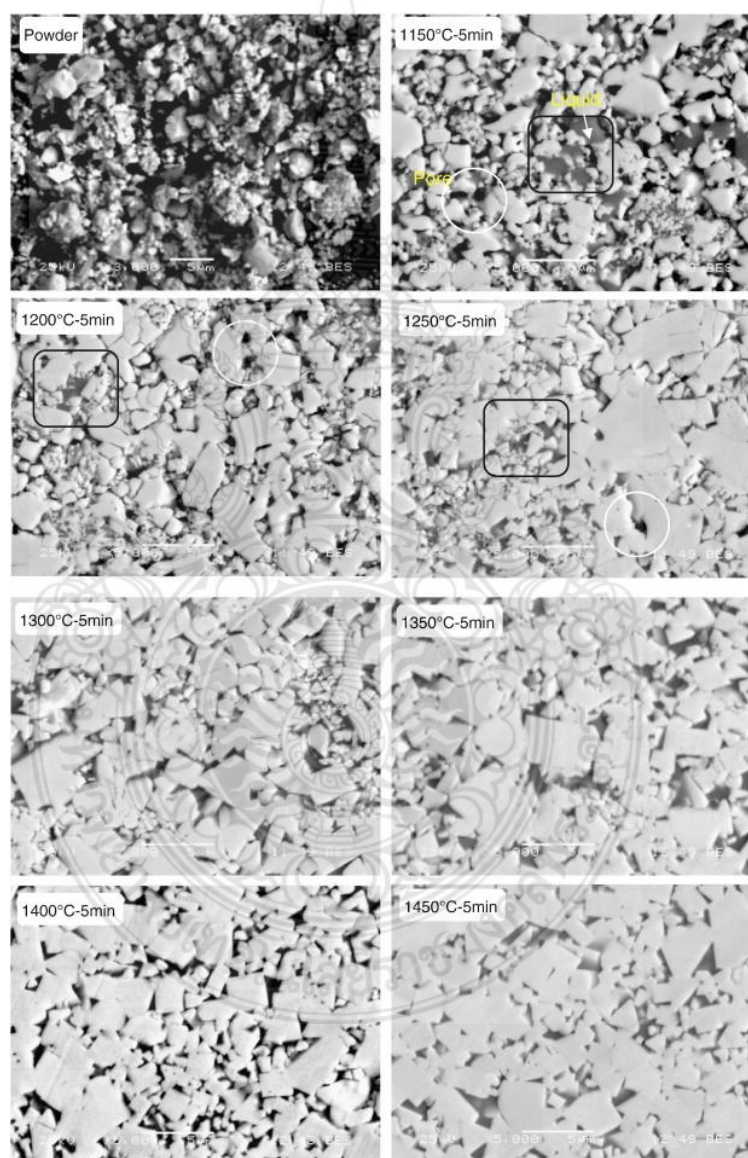
ภาพที่ 2.8 แสดงกราฟอุณหภูมิในการอบพนัก (Sintering) ที่แตกต่างกัน [12]

จากภาพที่ 2.8 แสดงให้เห็นถึงกราฟอุณหภูมิในการอบพนัก กราฟ (a) ใช้อุณหภูมิในการอบที่ 1,450°C เป็นเวลา 1h กราฟ (b) ใช้อุณหภูมิในการอบที่ 1,150°C เป็นเวลา 30min ใช้อุณหภูมิในการอบที่ 1,450°C เป็นเวลา 1h กราฟ (c) ใช้อุณหภูมิในการอบที่ 500°C เป็นเวลา 1h ใช้อุณหภูมิใน

การอบที่ 1,150°C เป็นเวลา 30min และใช้อุณหภูมิในการอบที่ 1,450°C เป็นเวลา 1h กราฟ (d) ใช้ อุณหภูมิในการอบที่ 600°C เป็นเวลา 1h ใช้อุณหภูมิในการอบที่ 1,150°C เป็นเวลา 30min และใช้อุณหภูมิในการอบที่ 1,450°C เป็นเวลา 1h จากบทความวิจัย Sintering of Nano-Sized WC-Co Powders Produced By A Gas Reduction–Carburization Process

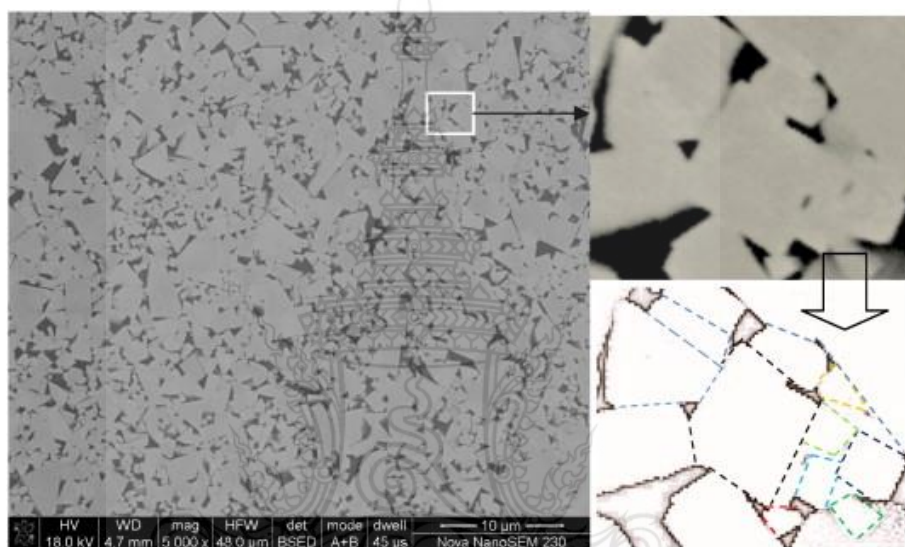
2.6 การทดสอบสมบัติทางกลและการตรวจสอบคุณภาพแผ่นมีด

2.6.1 การตรวจสอบดูโครงสร้าง (SEM)



ภาพที่ 2.9 แสดงภาพโครงสร้างของมีดกลึงทั้งสแตนคาร์ไบด์ที่มีส่วนผสมของโคบอลต์ 8%

จากภาพที่ 2.9 แสดงให้เห็นภาพโครงสร้างของมิดกลิ่งทังสเตนคาร์ไบด์ที่มีส่วนผสมของโคบอลต์ 8% และอบในอุณหภูมิที่แตกต่างกันจากภาพจะเห็นได้ว่า เมื่ออบพูนิกที่อุณหภูมิ 1,150 °C ทังสเตนคาร์ไบด์และโคบอลต์มีการผสมผสานตัวกันและทังสเตนคาร์ไบด์จะเริ่มเปลี่ยนรูปทรงคล้ายเพชรหรือมีรูปทรงหกเหลี่ยมและเพิ่มอุณหภูมิขึ้นเรื่อยๆจนถึงอุณหภูมิ 1,450 °C จะเห็นความแตกต่างกับการอบที่อุณหภูมิ 1,150 °C เพราะมีการผสมผสานตัวกันระหว่างทังสเตนกับโคบอลต์มากขึ้น จากบทความวิจัย *Densification and alloying of microwave sintering WC-8 wt.% Co composites*



ภาพที่ 2.10 แสดงลักษณะโครงสร้างของมิดกลิ่งทังสเตนคาร์ไบด์กับโคบอลต์ [14]

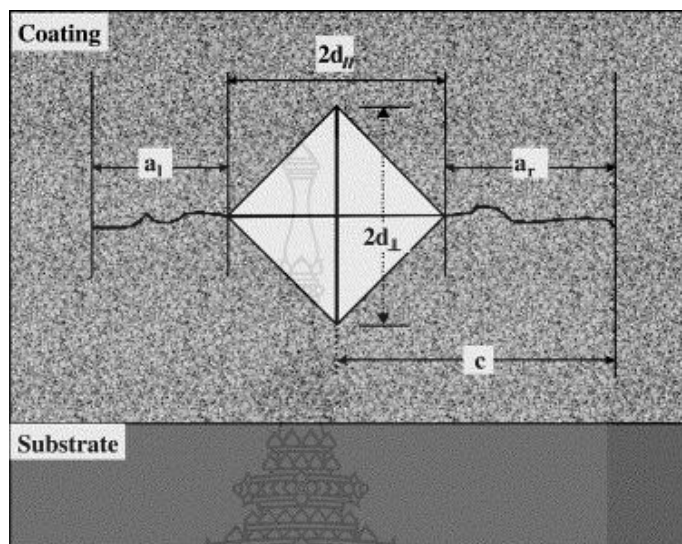
จากภาพที่ 2.10 แสดงลักษณะโครงสร้างของมิดกลิ่งทังสเตนคาร์ไบด์กับโคบอลต์ที่มีการผสมกันระหว่างทังสเตนคาร์ไบด์กับโคบอลต์และเป็นการดูโครงสร้างการผสมผสานตัวกันระหว่างทังสเตนคาร์ไบด์กับโคบอลต์ และขยายเข้าไปเรื่อยๆ จากบทความวิจัย *Densification And Alloying of Microwave Sintering WC-8 wt. % Co Composites*

2.6.2 การทดสอบความแข็งด้วยเครื่อง Vickers Hardness

2.6.2.1 การตรวจสอบประสิทธิภาพมิดทังสเตนคาร์ไบด์และการตรวจสอบรอยกด

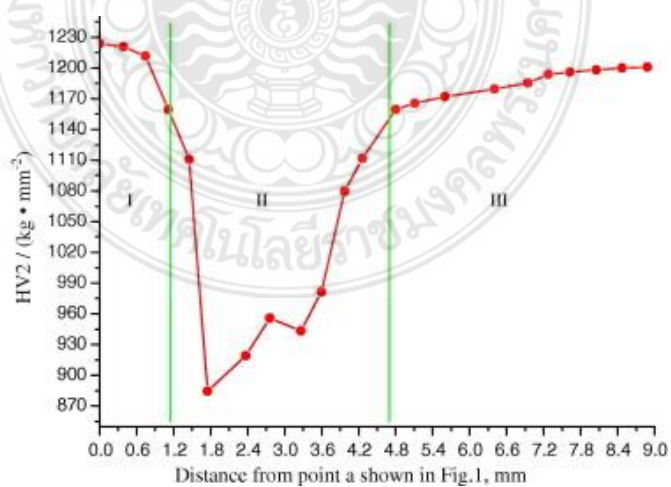
ความแข็ง (Hardness) คือความต้านทานต่อแรงกด ดังนั้นการทดสอบความแข็งจึงสามารถทำได้หลายวิธี การทดสอบความแข็งเป็นการวัดความสามารถของวัสดุ ในการต้านทานการเปลี่ยนรูปถาวร เมื่อถูกแรงกดจากหัวกด กระทำลงบนชิ้นงานที่ทดสอบ การเลือกประเภทในการทดสอบความแข็งของชิ้นงาน เป็นการวัดความแข็งโดยใช้หัวกดเพชร มีลักษณะเป็นรูปทรงปิรามิด มีฐานเป็นสี่เหลี่ยม ที่ปลายหัวกดทำมุม 136 องศา เป็นมุมที่มีองศาใกล้เคียงกับหัวกด ลักษณะกลมมากที่สุด ค่าความแข็งจะคำนวณจาก แรงกดกระทำต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ผิว เช่นเดียวกับการทดสอบแบบ Brinell แต่วิธีนี้หัวกดเป็นเพชรซึ่งมีความแข็งสูงมาก ดังนั้นในการใช้งานจึงสามารถ

วัดค่าความแข็งได้ ตั้งแต่โลหะอ่อนจนถึงโลหะที่มีความแข็งสูง โดยที่ไม่ต้องทำการเปลี่ยนหัวกด แต่จะเปลี่ยนเฉพาะค่าของแรงกดเท่านั้น



ภาพที่ 2.11 แสดงลักษณะของรอยกดบนชิ้นงานทดสอบ [10]

จากภาพที่ 2.11 เป็นการบอกลักษณะของหัวกดทดสอบความแข็ง Vickers Hardness และรอยแตกร้าวหลังจากการทดสอบความแข็งว่ามีความยาวของรอยแตกร้าวเท่าใด จากบทความวิจัย Coating Fracture Toughness Determined By Vickers Indentation: an Important Parameter In Cavitation Erosion Resistance of WC-Co Thermally Sprayed Coatings

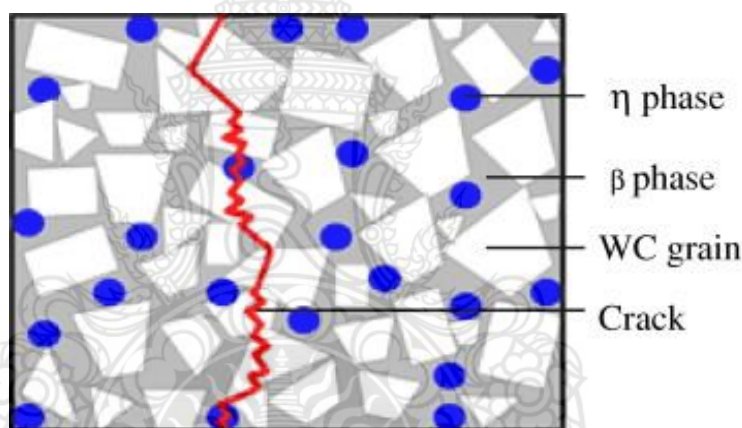


ภาพที่ 2.12 แสดงค่าความแข็งต่อการเปลี่ยนรูปเมื่อได้รับแรงกด [32]

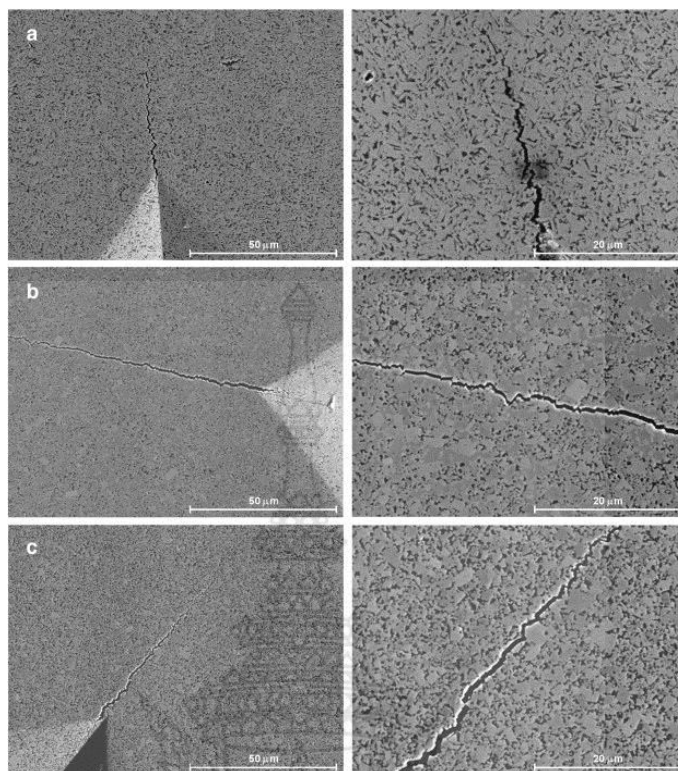
จากภาพที่ 2.12 แสดงกราฟค่าความแข็งต่อการเปลี่ยนรูปเมื่อได้รับแรงกด 50 HV ของ ชิ้นงานซีเมนต์ทั้งสแตนคาร์ไบด์ ที่มีส่วนผสมของโคบอลต์ 6% มีขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลาง 25 mm มีความสูง 34 mm จะเห็นได้ว่าในช่วงที่ 1 มีรอยกดทั้งหมด 4 จุดจะมีค่าความแข็งสูงสุดอยู่ที่ 1,217 (HV2) และลดลงมาเรื่อยๆจนถึง 1,160 (HV2) และมีค่าการเปลี่ยนรูปอยู่ที่ 1.2 mm ในช่วงที่ 2 มี รอยกดทั้งหมด 8 จุด ค่าความแข็งลงมาต่ำสุดที่ 885 (HV2) และมีค่าการเปลี่ยนรูปอยู่ที่ 1.8 mm และในช่วงที่ 3 ค่าความแข็งเพิ่มขึ้นสูงสุดที่ 1,200 (HV2) และมีค่าการเปลี่ยนรูปอยู่ที่ 9.0 mm จาก บทความวิจัย Crack Propagation Characteristic And Toughness of Functionally Graded WC-Co Cemented Carbide

2.6.2.2 การตรวจสอบรอยแตกร้าว

ลักษณะโครงสร้างแผ่นมิดซีเมนต์ทั้งสแตนคาร์ไบด์ส่วนใหญ่จะมีส่วนประกอบ คือ โลหะ ทั้งสแตนเป็นส่วนผสมหลักและมีโคบอลต์เป็นตัวผสม และอาจจะมีธาตุอื่นผสมไปด้วยเพื่อเพิ่ม คุณสมบัติที่เหมาะสมตามความต้องการในการใช้งานซึ่งสามารถแสดงลักษณะโครงสร้างรอบๆได้



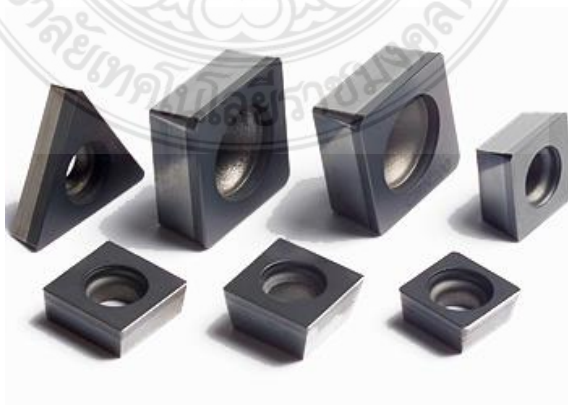
ภาพที่ 2.13 แสดง Sketch Diagram of Crack Propagation in WC-Co DP Cemented Carbide. [24]



ภาพที่ 2.14 แสดงรอยแตกที่เกิดจากการกดด้วยเครื่องวัดความแข็ง Vickers Hardness Test [27]

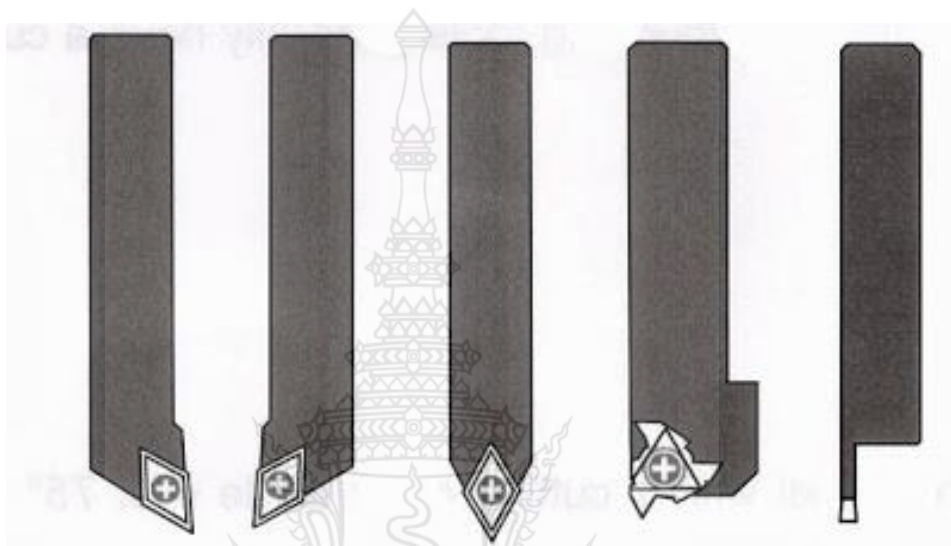
จากภาพที่ 2.14 เป็นลักษณะรอยแตกที่เกิดจากการกดด้วยเครื่องวัดความแข็ง Vickers Hardness Test ที่แรงกด 30 kg ซึ่งเป็นการเกิดรอยร้าวบริเวณมุมของรอยกด โดยวัดความกว้างและขนาดของรอยแตกกว้างที่ 50 μm และขยายดูความกว้างและขนาดของรอยแตกกว้างที่ 20 μm จากบทความวิจัย Synthesis and Processing of Nanocrystalline Tungsten Carbide: Towards Cementedcarbides With Optimal Mechanical Properties

2.6.3 การทดสอบประสิทธิภาพการใช้งาน



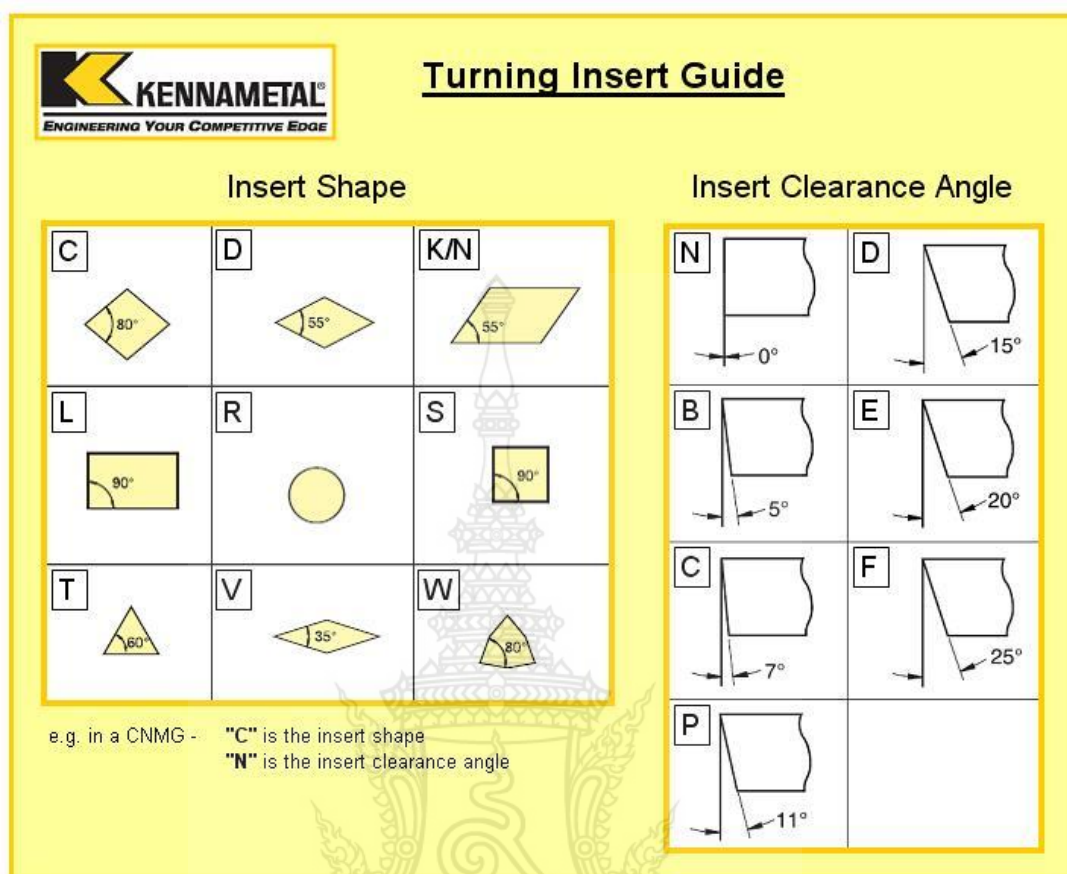
ภาพที่ 2.15 แสดงลักษณะรูปทรงของแผ่นมีดทั้งสแตนคาร์ไบด์สำหรับงานกลึงปอก

จากภาพที่ 2.15 แผ่นมีดกลึงทั้งสแตนคาร์ไบด์ได้ออกแบบมาให้มีรูปทรงตามลักษณะการใช้งาน ด้ามจับมีดกลึงสามารถจับบนป้อมมีด (Tool Turret) ของเครื่องได้ คมแผ่นมีดกลึงทั้งสแตนคาร์ไบด์ที่ใช้สำหรับงานกลึง CNC ในปัจจุบันจะเป็นอินเสิร์ตที่ทำจากคาร์ไบด์ ซึ่งมีแบบและรูปทรงต่าง ๆ คมแผ่นมีดจะถูกยึดติดกับด้ามมีดด้วยสกรูที่ถูกออกแบบมาโดยตรง และสามารถถอดเปลี่ยนอินเสิร์ตได้เมื่อเกิดการสึกหรอหรือแตกหัก



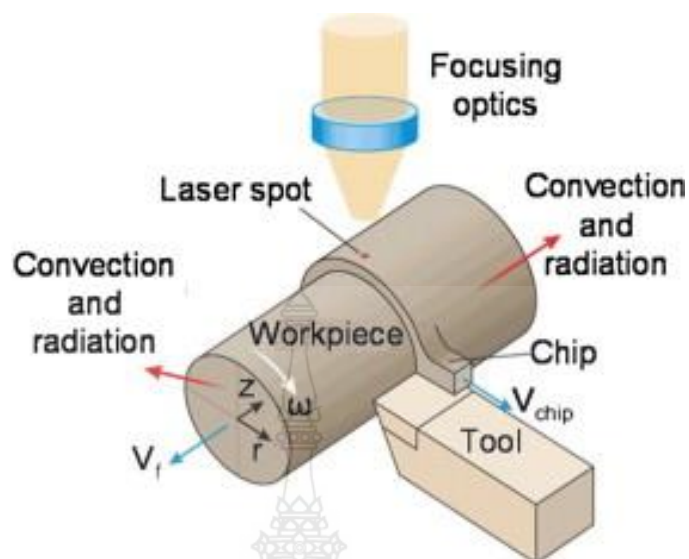
ภาพที่ 2.16 แสดงลักษณะด้ามจับมีดกลึงทั้งสแตนคาร์ไบด์
ปอกซ้าย-ปอกขวา กลึงสองทาง-กลึงเกลียว-ตกร่อง [22]

จากภาพที่ 2.16 แผ่นมีดกลึงภายนอกและด้ามมีดกลึง (External Tool with Tool Holders) แผ่นมีดกลึงภายนอก คือ มีดกลึงที่ใช้สำหรับกลึงปอกผิวเพื่อลดขนาด แผ่นมีดกลึงผิวสำเร็จ หรือมีดกลึงสำหรับกลึงขึ้นรูปภายนอก คมแผ่นมีดที่ใช้กับงานกลึง CNC จะเป็นคมอินเสิร์ตทั้งสี่ด้าน ด้ามมีด (Tool Holders) จะถูกออกแบบมาสำหรับจับยึดได้กับแท่นจับมีด (Tool Turret) มีดกลึงขวา (Right - Hand) ใช้กลึงงานจากขวาไปซ้าย



ภาพที่ 2.17 แสดงรูปทรงของแผ่นมีดกลึงทั้งสแตนคาร์ไบด์

จากภาพที่ 2.17 ลักษณะของแผ่นมีดในแบบต่างๆ มีขนาดมุมของคมตัดที่แตกต่างกันคือ มีดกลึงรูปทรง C,W มีมุมคมตัดอยู่ที่ 80 องศา มีดกลึงรูปทรง D,K/N มีมุมคมตัดอยู่ที่ 55 องศา มีดกลึงรูปทรง S,L มีมุมคมตัดอยู่ที่ 90 องศา มีดกลึงรูปทรง T มีมุมคมตัดอยู่ที่ 60 องศา และมีดกลึงรูปทรง V มีมุมคมตัดอยู่ที่ 35 องศา จากรูปทรงของมีดกลึงดังกล่าวสามารถตัดสินใจว่าจะเลือกมีดกลึงชนิดใดให้เหมาะสมกับลักษณะในการใช้งานของบริษัท Kennametal Engineering supplies

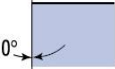
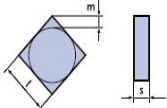
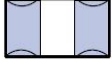


ภาพที่ 2.18 แสดงลักษณะการกลึงลอกเหล็กเพลากลม [15]



ภาพที่ 2.19 แสดงลักษณะในการใช้งานของแผ่นมีดทังสเตนคาร์ไบด์ที่ใช้ในการกลึงลอก

จากภาพที่ 2.18 และภาพที่ 2.19 แสดงลักษณะการกลึงลอกผิวชิ้นงาน (Turning) ตัดโลหะ โดยให้มีดตัดเคลื่อนที่ตัด ชิ้นงานไปตามแนวขนาน และตั้งฉากกับแนวแกนของชิ้นงาน ซึ่งเป็นลักษณะการใช้งานของแผ่นมีดรูปทรง S (Squares)

 S N M G  Shape Square 90°  Clearance Angle 0° No rake  Tolerance l ± 0.08 m ± 0.13 s ± 0.13  Insert Type Pin / Top clamp Double sided						
Insert designation	Grade	l	s	r	Catalog Nr.	Page
SNMG 120408 NN LT 10	LT 10	12	4,76	0,8	T0000322	60
SNMG 120412 NN LT 10	LT 10	12	4,76	1,2	T0000323	61

ภาพที่ 2.20 แสดงรูปทรงของมีดกลึงทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัสหรือทรง S ของบริษัท narzedzia

จากภาพที่ 2.20 แสดงรูปทรงของมีดกลึงทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัสหรือทรง S (บริษัท Kennametal Engineering Supplies) เป็นมีดกลึงรูปทรงมาตรฐาน SNMG 120408 จะประกอบด้วยสัญลักษณ์ 7 ตัวโดยมีความหมายดังนี้ สัญลักษณ์ที่ 1) S หมายถึง ลักษณะรูปทรงของแผ่นมีดสี่เหลี่ยมจัตุรัส มีมุมของคมตัดที่ 90 องศา สัญลักษณ์ที่ 2) N หมายถึง มุมหลบของมีดกลึง (Relief Angle) ของมีดกลึงเท่ากับ 0 องศา สัญลักษณ์ที่ 3) M หมายถึง ระยะเวลา (Tolerance) สัญลักษณ์ที่ 4) G หมายถึง มีมุมตรงกลางมีและมีมุมหักเหใช้งานได้ทั้งสองด้าน (Hole and Chip Breaker Symbol) สัญลักษณ์ที่ 5) 12 หมายถึง ความกว้าง (Edge Length Symbol) และความยาวของแผ่นมีดมีขนาดเท่ากับ 12.7 mm สัญลักษณ์ที่ 6) 04 หมายถึง ความหนาของมีดกลึงมีขนาด 4.76 mm สัญลักษณ์ที่ 7) 08 หมายถึง รัศมีความโค้งของปลายมีดกลึงมีขนาด 0.8 mm

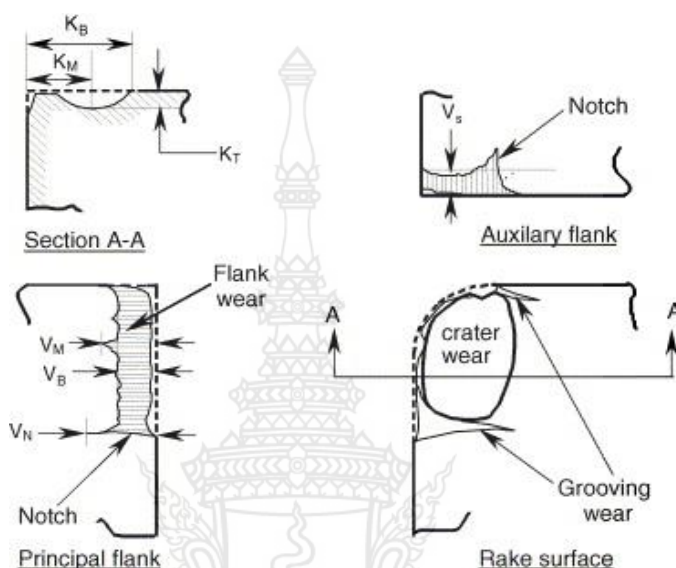
2.6.4 การสึกหรอ

การสึกหรอหมายถึงการสูญเสียวัสดุที่ผิวหน้าเมื่อมีการเสียดสีหรือมีการเคลื่อนที่สัมผัสกันของวัสดุ 2 ชิ้น แม้ว่าวัสดุที่สูญเสียไปจะมีปริมาณเพียงเล็กน้อยก็ตาม แต่อาจทำให้ชิ้นส่วนนั้นเสื่อมสภาพอย่างรวดเร็วจนไม่สามารถใช้งานได้อีกต่อไป โดยเฉพาะอย่างยิ่งชิ้นส่วนที่ต้องการความเที่ยงตรงสูง เช่น แม่พิมพ์มีดกลึงหรือชิ้นส่วนเครื่องจักรกลบางชนิด

การสึกหรอเป็นศัพท์ทั่วไปที่ใช้อธิบายการเสื่อมสภาพของผิวหน้าวัสดุจากการเสียดสีเริ่มจากการสัมผัสกันระหว่างผิวหน้าสองผิวที่อันใดอันหนึ่งมีการเคลื่อนที่ และอุณหภูมิจะมีส่วนในอัตราการสึกหรอเป็นอย่างมาก เนื่องจากการเสียดสีทำให้เกิดความร้อนได้ส่งผลกระทบต่อโครงสร้างจุลภาคของวัสดุและทำให้เพิ่มความไวต่อการเสื่อมสภาพด้วย

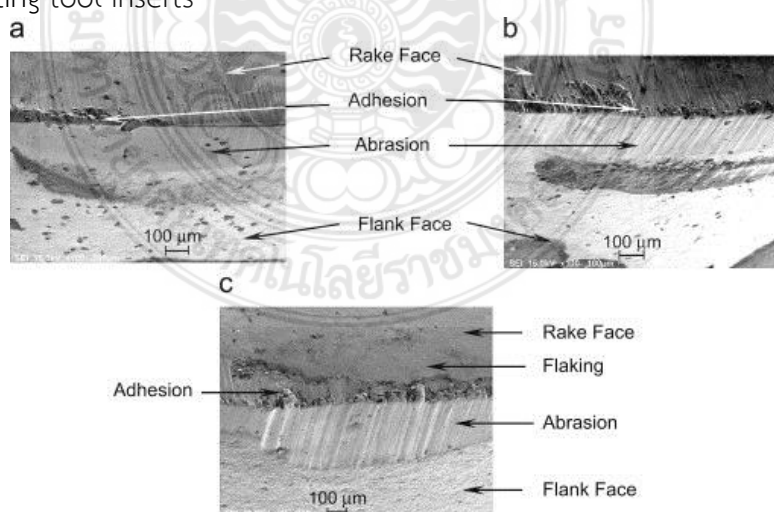
ลักษณะกลไกการสึกหรอตามมาตรฐานอุตสาหกรรมของ ประเทศเยอรมัน หมายเลข 50320 (DIN 50320) จำแนกออกเป็น 4 ลักษณะใหญ่ๆ ได้ดังนี้

- กลไกการสึกหรอบีบติด (Adhesive Wear)
- กลไกการสึกหรอบนขูดขีด (Abrasive Wear)
- กลไกการสึกหรอจากการล้าตัวที่ผิวหน้า (Surface Fatigue Wear)
- กลไกการสึกหรอแบบปฏิกิริยาไทรโบเคมี (Tribochemical Reaction)



ภาพที่ 2.21 แสดงการสึกหรอของแผ่นมีดกลึงทั้งสแตนคาร์ไบด์. [23]

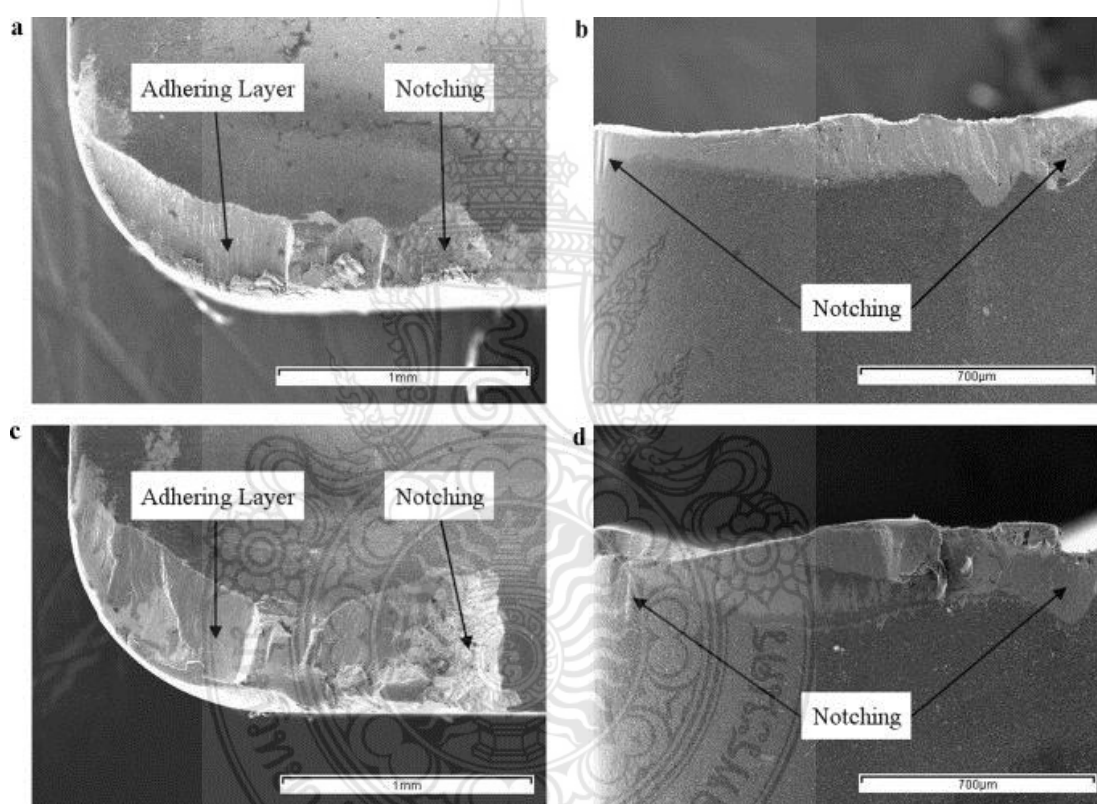
จากภาพที่ 2.21 แสดงลักษณะการสึกหรอของเครื่องมือที่ใช้ในการกลึงหรือแผ่นมีดกลึง จากงานวิจัยของ Progressive flank wear and machining performance of silver toughened alumina cutting tool inserts



ภาพที่ 2.22 แสดงการสึกหรอของมีดกลึงซีเมนต์ทั้งสแตนคาร์ไบด์ [9]

จากภาพที่ 2.22 ลักษณะการสึกหรอของมีดกลึงซีเมนต์ทั้งสแตนคาร์ไบด์ที่ผ่านการกลึงตามเงื่อนไขที่กำหนดคือ Cutting Speed 50 m/min, Feed Rate 0.1 mm/rev, Depth of Cut 0.4 mm

Rake face	หมายถึง การสึกหรอแบบรอยครูดด้านบนของคมตัด
Adhesion	หมายถึง ลักษณะพื้นที่สึกหรอ และสิ่งที่ติดอยู่ในพื้นที่สึกหรอมีลักษณะเป็นรูปพุ่ม
Abrasion	หมายถึง ลักษณะรอยขีดข่วนตรงส่วนสัมผัสของคมตัดที่สัมผัสกับชิ้นงาน
Flank face	หมายถึง ลักษณะมุมหลบพื้นผิวที่สึกหรอหลังจากการกลึง
Flanking	หมายถึง มุมด้านบนมีรอยสึกหรอแบบมีรอยคลากบริเวณคมตัด

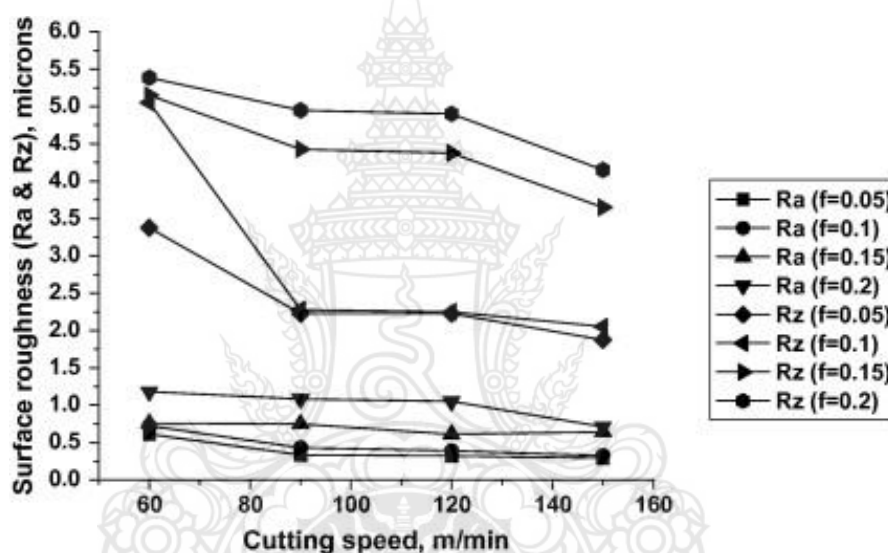


ภาพที่ 2.23 แสดงลักษณะการสึกหรอของมีดกลึงซีเมนต์ทั้งสแตนคาร์ไบด์ [9]

จากภาพที่ 2.23 ลักษณะการสึกหรอของแผ่นมีดกลึงซีเมนต์ทั้งสแตนคาร์ไบด์ที่ผ่านการกลึงตามเงื่อนไขงานวิจัย Adhering Layer Formation And Its Effect on The Wear of Coated Carbide Tools During Turning of a Nickel-Based Alloy มีเงื่อนไขอัตราการกลึงที่กำหนดคือ Cutting Speed 58 m/min, Feed rate 0.1 mm/rev, Depth of cut 1.2 mm ซึ่งมีเงื่อนไขใกล้เคียงกับเงื่อนไขการกลึงของงานวิจัย Wear Mechanisms of WC Coated And Uncoated Tools in Finish Turning of Inconel 718

2.6.5 การตรวจสอบความเรียบผิว

งานกลึงเป็นปฏิบัติการขั้นพื้นฐานในงานอุตสาหกรรมที่ใช้กันอย่างกว้างขวาง โดยเป็นการตัดโลหะที่ให้ชิ้นงานหมุนรอบตัวเองและมีดกลึงเคลื่อนที่เข้าหาชิ้นงาน กระบวนการกลึงปอกผิวเป็นกระบวนการในการลดขนาดความโตของชิ้นงานโดยให้มิตตัดเคลื่อนที่ตัดชิ้นงานไปตามแนวขนานกับแนวแกนของชิ้นงาน ปัจจัยสำคัญที่ทำให้เกิดกระบวนการของการกลึงปอกคืออัตราป้อน (Feed Rate) ความเร็วตัด (Cutting Speed) อัตราป้อนลึก (Depth of Cut) แผ่นมีดกลึง (Cutting Tool) และชิ้นงานที่ต้องการตัดเฉือน ผลที่เกิดขึ้นหลังจากกระบวนการกลึงปอกคือ ขนาดของชิ้นงานที่ลดลงตามอัตราป้อนลึก ความขรุขระของผิวชิ้นงาน (Surface roughness) เศษกลึง (Chip) และการสึกหรอของมีดกลึง (Tool Wear)



ภาพที่ 2.24 แสดงค่าความเรียบผิวที่แตกต่างกัน [25]

จากภาพที่ 2.24 จากบทความวิจัย Performance Studies of Multilayer Hard Surface Coatings (TiN/TiCN/Al₂O₃/TiN) of Indexable Carbide Inserts in Hard Machining: Part-I (An experimental approach) เป็นการทดสอบความเรียบผิวของมีดกลึงที่เคลือบด้วย TiN/TiCN/Al₂O₃/TiN จึงทำให้มีค่าความแข็งเพิ่มมากขึ้นนำมาทดสอบกลึงหาค่าความเรียบผิวโดยกำหนดค่าที่ใช้ในการกลึงต่างกัน เช่น ใช้ค่าความเร็วตัด (Cutting Speed) ที่ 60 m/min ใช้อัตราป้อน (Feed Rate) 0.05 mm/sec และอัตราป้อนลึก (Depth of Cut) 0.2 mm จะมีความเรียบผิวอยู่ที่ประมาณ 0.60 μ m และ ใช้ค่าความเร็วตัด (Cutting Speed) ที่ 120 m/min ใช้อัตราป้อน (Feed Rate) 0.15 mm/sec และอัตราป้อนลึก (Depth of Cut) 0.2 mm จะมีความเรียบผิวอยู่ที่ประมาณ 0.55 μ m

ตารางที่ 2.3 แสดงส่วนผสมของธาตุที่ผสมในเม็ดกลึงของแต่ละเกรด [32]

Alloy	C	Si	Mn	S	P	Cr	Ni	Mo	Cu	N	Fe
5A	0.028	0.67	0.87	0.005	0.028	25.1	6.63	4.16	–	0.17	Bal.
4A	0.028	0.65	0.71	0.006	0.027	22.16	5.66	3.33	0.14	0.24	Bal.

จากตารางที่ 2.3 เป็นตารางแสดงส่วนผสมของแผ่นมิดทั้งสแตนคาร์ไบด์ของเกรด 5A และเกรด 4A ว่ามีส่วนผสมของธาตุอะไรและมีส่วนผสมของธาตุที่เปอร์เซ็นต์ ยกตัวอย่างเช่น แผ่นมิดกลึงทั้งสแตนคาร์ไบด์เกรด 5A มีส่วนผสมของธาตุ C ที่ 0.028% และธาตุ Ni ที่ 6.63%

ตารางที่ 2.4 แสดงการเปรียบเทียบความเรียบผิวของสองเม็ดมิดที่มีส่วนผสมและเงื่อนไขในการกลึงต่างกัน

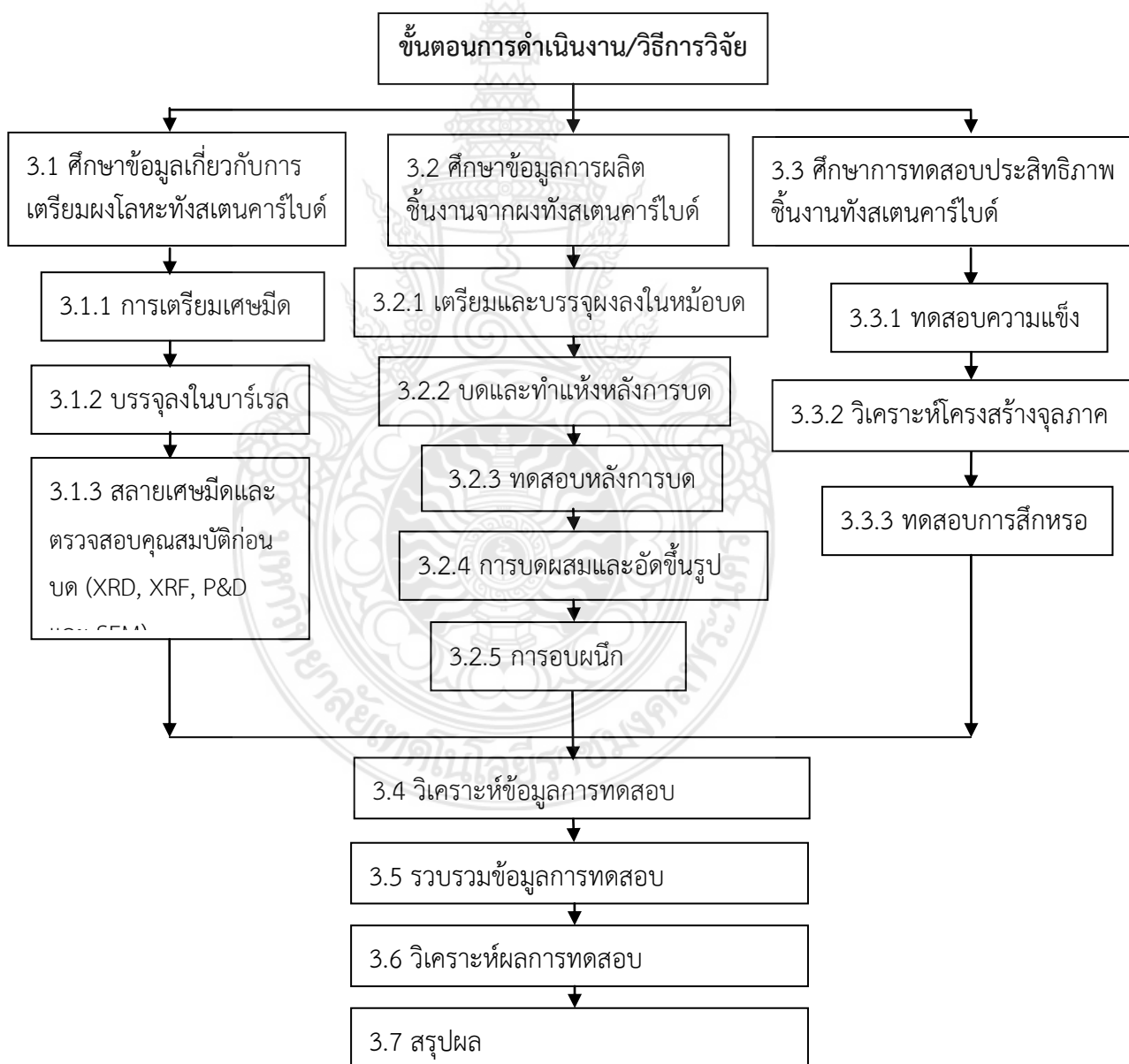
S. no.	Cutting Speed (m/min)	Feed rate (mm/rev)	Surface roughness Ra (μm)		S/N ratio (dB)	
			5A Grade	4A Grade	5A Grade	4A Grade
1	80	0.04	1.2	0.6	-1.58	4.44
2	80	0.08	1.25	0.68	-1.94	3.35
3	80	0.12	1.32	0.85	-2.41	1.41
4	100	0.04	1.05	0.53	-0.42	5.51
5	100	0.08	1.17	0.57	-1.36	4.88
6	100	0.12	1.25	0.64	-1.94	3.88
7	120	0.04	1.16	0.58	-1.29	4.73
8	120	0.08	1.24	0.6	-1.87	4.44
9	120	0.12	1.3	0.76	-2.28	2.38

จากตารางที่ 2.4 เป็นการเปรียบเทียบความเรียบผิวของมีดกลึงทั้งสองเกรดคือ 5A และ 4A ซึ่งแต่ละเกรดมีส่วนผสมที่ต่างกันดังตารางที่ 2.4 โดยใช้เงื่อนไขในการกลึงต่างกัน เช่น การทดสอบที่ 1 ใช้ค่าความเร็วตัด (Cutting Speed) ที่ 80 m/min ใช้อัตราป้อน (Feed Rate) 0.04 mm/sec และอัตราป้อนลึก (Depth of Cut) 0.5 mm มีความเรียบผิวของมีดกลึง 5A อยู่ที่ 1.2 μm ความเรียบผิวของมีดกลึง 4A อยู่ที่ 0.6 μm การทดสอบที่ 5 ใช้ค่าความเร็วตัด (Cutting Speed) ที่ 100 m/min ใช้อัตราป้อน (Feed Rate) 0.08 mm/sec และอัตราป้อนลึก (Depth of Cut) 0.5 mm มีความเรียบผิวของมีดกลึง 5A อยู่ที่ 1.17 μm ความเรียบผิวของมีดกลึง 4A อยู่ที่ 0.57 μm และการทดสอบที่ 9 ใช้ค่าความเร็วตัด (Cutting Speed) ที่ 120 m/min ใช้อัตราป้อน (Feed Rate) 0.12 mm/sec และอัตราป้อนลึก (Depth of Cut) 0.5 mm มีความเรียบผิวของมีดกลึง 5A อยู่ที่ 1.3 μm ความเรียบผิวของมีดกลึง 4A อยู่ที่ 0.76 μm



บทที่ 3 วิธีการวิจัย

การวิจัยนี้มีขั้นตอนดำเนินงานจากการผลิตผงโลหะทั้งสแตนคาร์ไบด์ (WC) และพัฒนากระบวนการอบ
ผนึกชิ้นงานความแข็งสูงพิเศษเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการต้านทานการสึกหรอตามแนวทางการจัดการวัสดุเพื่อ
ความยั่งยืน ดังรูปที่ 3.1



ภาพที่ 3.1 แผนผังการดำเนินโครงการ

3.1 ศึกษาข้อมูลเกี่ยวกับการเตรียมผงโลหะทั้งสแตนคาร์ไบด์

การผลิตผงโลหะทั้งสแตนและโลหะผสมนั้น กระบวนการผลิตผงโลหะทั้งสแตนถือว่าเป็นขั้นตอนที่สำคัญ สมบัติของผงโลหะนั้นเป็นองค์ประกอบสำคัญต่อการผลิต เช่น กระบวนการอัดขึ้นรูป กระบวนการอบผนึก และงานโลหะต่างๆทั่วโลก ชิ้นงานทั้งสแตนที่ผลิต 70-80 % จะผลิตด้วยกรรมวิธีทางโลหะผง (Powder Metallurgy) เทคโนโลยีทางโลหะผงมีประโยชน์ในงานวิจัยและพัฒนาทั้งสแตนและโลหะผสม ทำให้มาตรฐานคุณภาพสูงขึ้น โดยผงโลหะจะเป็นเกรดขึ้นอยู่กับการนำไปใช้งาน ลักษณะผงโลหะทางเคมี (จะบอกส่วนผสมของธาตุต่างๆ),ทางฟิสิกส์ (ขนาดเกรน, ขนาดการกระจาย) การผลิตผงโลหะทั้งสแตนให้ปฏิกิริยาดว้ยไฮโดรเจน จะได้ผงโลหะที่มีความบริสุทธิ์สูง ตัวแปรผงโลหะทั้งสแตน,ขนาดเกรน,ผงโลหะ,ขนาดการกระจายตัวของเกรน,อุณหภูมิและความชื้น

3.1.1 การเตรียมเศษมีด



ภาพที่ 3.2 แสดงเศษมีดทั้งสแตนคาร์ไบด์

จากภาพที่ 3.2 เป็นแผ่นมีดทั้งสแตนคาร์ไบด์ที่ผ่านการใช้งานแล้วมีลักษณะเป็นชิ้นขนาดประมาณ 12x12x4 mm ที่ผ่านการทำความสะอาดก่อนนำมาย่อยสลาย



ภาพที่ 3.3 แสดงการชั่งน้ำหนักเศษมีด

จากภาพที่ 3.3 การซังน้ำหนักของเศษมีดทั้งสแตนคาร์ไบด์ที่ทำความสะอาดเรียบร้อยแล้ว ก่อนนำมาย่อยสลายครั้งละ 2,000 g

3.1.2 บรรจุลงในบาร์เรล



ภาพที่ 3.4 แสดงการนำเศษมีดบรรจุลงในบาร์เรล

จากภาพที่ 3.4 ลักษณะของเศษมีดทั้งสแตนคาร์ไบด์ที่บรรจุลงในบาร์เรลเพื่อรอการย่อยสลายต่อไป

3.1.3 ดำเนินการสลายเศษมีดและตรวจสอบคุณสมบัติก่อนบด (XRD , XRF , P&D SEM)



ภาพที่ 3.5 แสดงการสลายเศษมีดทั้งสแตนคาร์ไบด์ด้วยขบวนการไฮโดรเทอร์มอลทรีตเมนต์

จากภาพที่ 3.5 แสดงการย่อยสลายเศษมีดทั้งสแตนคาร์ไบด์เพื่อสลายโคบอลต์ออกจากโลหะทั้งสแตนคาร์ไบด์เพื่อนำกลับมาใช้ใหม่

3.1.3.1 ตรวจสอบองค์ประกอบของธาตุ (XRD)



ภาพที่ 3.6 แสดงเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ X-ray Diffraction (XRD)

จากภาพที่ 3.6 เครื่องที่ใช้วิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (XRD) เพื่อวิเคราะห์คุณสมบัติของผงทั้งสแตนคาร์ไบด์เพื่อคำนวณหาปริมาณขององค์ประกอบต่างๆ

3.1.5.2 ตรวจสอบส่วนประกอบทางเคมี (XRF)



ภาพที่ 3.7 แสดงเครื่องวิเคราะห์ส่วนทางเคมี X-Ray Fluorescence.(XRF) Spectrometry รุ่น AXIOS

จากภาพที่ 3.7 การทดสอบด้วยเครื่องวิเคราะห์ส่วนประกอบทางเคมีเพื่อวิเคราะห์ธาตุที่อยู่ในผงทั้งสแตนคาร์ไบด์ว่ามีส่วนประกอบของธาตุใดบ้าง

3.1.5.3 ตรวจสอบวัดการกระจายตัวของอนุภาค (P&D)



ภาพที่ 3.8 แสดงเครื่องตรวจสอบวัดการกระจายตัวของอนุภาค (Particle size Analyzer)

จากภาพที่ 3.8 การตรวจวัดการกระจายตัวของอนุภาคเพื่อต้องการตรวจสอบผงว่ามีขนาดของอนุภาคผงทั้งสแตนคาร์ไบด์เท่าใด

3.1.5.4 ตรวจสอบรูปทรงของเม็ดผงทั้งสแตนคาร์ไบด์ด้วยวิธีการ (SEM)



ภาพที่ 3.9 แสดงกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope)
รุ่น JEOL JSM-6380LV

จากภาพที่ 3.9 เครื่องตรวจสอบรูปทรงกับขนาดโดยรวมของผงโลหะทั้งสแตนคาร์ไบด์โดยใช้กำลังขยายที่ 3,000, 5,000, 8,000, และ 10,000 เท่า

3.2 ศึกษาข้อมูลการผลิตชิ้นงานจากผงทังสเตนคาร์ไบด์

3.2.1 เตรียมและบรรจุลงในหม้อบด



ภาพที่ 3.10 แสดงหม้อบดและลูกบอลลบดทังสเตน (Ball Milling)

จากภาพที่ 3.10 เตรียมการบดโดยการล้างหม้อบดและลูกบด ใช้ลูกบอลลบขนาด 6 mm น้ำหนักลูกบอลลบหนักเป็น 10 เท่าของน้ำหนักผงทังสเตนคาร์ไบด์ คือ 1.2 kg



ภาพที่ 3.11 แสดงการบรรจุลูกบอลลบดทังสเตนและผงทังสเตนคาร์ไบด์ลงในหม้อบด

จากภาพที่ 3.11 แสดงการบรรจุลูกบอลลบดทังสเตนลงในหม้อบด จากนั้นนำผงทังสเตนคาร์ไบด์ทั้งหมดลงในหม้อบด



ภาพที่ 3.12 แสดงการเติมสารละลายในหม้อบด

จากภาพที่ 3.12 การเติมเอทานอลเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการบด และลดการทำปฏิกิริยากับอากาศ ที่จะส่งผลให้เกิดออกไซด์



ภาพที่ 3.13 แสดงการประกอบหม้อบดเข้ากับเครื่องบด

จากภาพที่ 3.13 การประกอบหม้อบดเข้ากับลูกบดและทำการล็อคหม้อบดกับแท่นวางของเครื่องบดบอลมิลล์เพื่อ ป้องกันความเสียหายจากการทำงานของเครื่องบด

3.2.2 บดผงทั้งสแตนคาร์ไบด์และทำแห้งหลังการบด



ภาพที่ 3.14 แสดงการตั้งค่าของเครื่องบด

จากภาพที่ 3.14 การตั้งค่า ความเร็วรอบที่ 300 rpm ใช้เวลาในการเหวี่ยงไปกลับ ช้างละ 30 min การเหวี่ยงแต่ละข้าง ตั้งการเหวี่ยงที่ 20 r รวมการเหวี่ยงครบ 2 ข้างเป็นเวลา 1 h ใช้เวลาในการบดทั้งหมด 20 h



ภาพที่ 3.15 แสดงการกดปุ่มเริ่มทำงานเพื่อดำเนินการบด



ภาพที่ 3.16 แสดงการคลายแรงดัน

จากภาพที่ 3.16 การคลายแรงดัน หลังจากทำการบดเป็นเวลา 20 h โดยใช้ผ้าพันบริเวณรอบของหม้อบด เพื่อลดแรงดันในหม้อบด



ภาพที่ 3.17 แสดงการแยกผงทั้งสแตนคาร์ไบด์และลูกบดออกจากหม้อบด

จากภาพที่ 3.17 การแยกผงทั้งสแตนคาร์ไบด์และลูกบดออกจากหม้อบด ด้วยวิธีการ ตักออกจากหม้อบด



ภาพที่ 3.18 แสดงการแยกผงโลหะทั้งสแตนคาร์ไบด์ออกจากลูกบด

จากภาพที่ 3.18 การแยกผงทั้งสแตนคาร์ไบด์ออกจากลูกบด ด้วยวิธีการล้างด้วยเอทานอลผ่านตะแกรงสแตนเลส ขนาด 1x1 mm ผงโลหะที่ผ่านการบดจะไหลผ่านตะแกรงลงไปในถ้วยบีกเกอร์ที่รองไว้ด้านล่าง



ภาพที่ 3-19 แสดงการรอตตะกอน

จากภาพที่ 3.19 แสดงการรอตตะกอนของผงโลหะ เพื่อรอทำการแยกเอทานอลออก



ภาพที่ 3.20 แสดงการตกตะกอนของโลหะ

จากภาพที่ 3.20 แสดงการตกตะกอนของผงโลหะ เพื่อรอทำการแยกเอทานอลออก



ภาพที่ 3.21 แสดงผงหลังทำการอบ

จากภาพที่ 3.21 แสดงผงทั้งสแตนคาร์ไบด์หลังจากผ่านการอบอุณหภูมิ 100°C เป็นเวลา 5 h

3.2.3 ทดสอบหลังการอบ (SEM , P&D)

3.2.3.1 ตรวจสอบรูปทรงของเม็ดผงทั้งสแตนคาร์ไบด์ (SEM) หลังการอบ



ภาพที่ 3.22 แสดงกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope) รุ่น JEOL JSM-6380LV

จากภาพที่ 3.22 นำผงทั้งสแตนคาร์ไบด์ที่ผ่านการบดละเอียดที่เวลา 100 h มาส่องขยายด้วยวิธีการ SEM (Scanning Electron Microscope) เพื่อดูโครงสร้างอนุภาคของผงทั้งสแตนคาร์ไบด์



ภาพที่ 3.23 แสดงเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ X-ray Diffractometer (XRD)

จากภาพที่ 3.23 แสดงเครื่องที่ใช้วิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (XRD) เพื่อวิเคราะห์คุณสมบัติของผงทั้งสแตนคาร์ไบด์หลังการบดว่าไม่เกิดออกไซด์จากการบด



ภาพที่ 3.24 แสดงเครื่องวิเคราะห์ส่วนทางเคมี X-Ray Fluorescence.(XRF) Spectrometry รุ่น AXIOS

จากภาพที่ 3.24 แสดงการทดสอบด้วยเครื่องวิเคราะห์ส่วนประกอบทางเคมีเพื่อวิเคราะห์ธาตุที่อยู่ในผงทั้งสแตนคาร์ไบด์ว่ามีส่วนประกอบของธาตุใดบ้าง

3.2.4 การบดผสมและอัดขึ้นรูป

3.2.4.1 การตั้งเงื่อนไขการบดผสม

อ้างอิงจากบทความวิจัยของ F.L Zhang โดยใช้ส่วนผสมของผงทั้งสแตนคาร์ไบด์ประมาณ WC-CO 10% และ พาราฟินเป็นตัวประสานชั่วคราว 2%

3.2.4.2 เตรียมส่วนผสม



ภาพที่ 3.25 แสดงการเตรียมหม้อบดและส่วนผสม

จากภาพที่ 3.25 การเตรียมส่วนผสมของผงทังสเตนคาร์ไบด์ผงโคบอลต์และพาราฟิน



ภาพที่ 3.26 การเทผงโลหะทังสเตนคาร์ไบด์กับโคบอลต์

จากภาพที่ 3.26 แสดงการเทผงโคบอลต์ลงไปในหม้อบดที่มีผงทังสเตนคาร์ไบด์ที่เตรียมไว้
เพื่อทำการบดให้ส่วนผสมเข้ากันก่อนที่จะเติมพาราฟินต่อไป



ภาพที่ 3.27 แสดงการเติมพาราฟิน

จากภาพที่ 3.27 แสดงการเติมพาราฟิน แก๊ซหลังจากผสมผงโลหะทั้งสแตน และโคบอลต์ เข้ากันแล้ว



ภาพที่ 3.28 แสดงการแยกผงโลหะออกจากหม้ออบ

จากภาพที่ 3.28 แสดงการแยกผงโลหะที่ผสมเสร็จแล้วออกจากหม้ออบและลูกบิด

อัดขึ้นรูปผงโลหะทั้งสแตนคาร์ไบด์ทรง S รหัสแผ่นมีด SNMG-120408 เป็นมีดรูปทรง สี่เหลี่ยมจัตุรัส

- | | |
|---|---|
| S | หมายถึง ลักษณะรูปทรงแผ่นมีดที่มีลักษณะสี่เหลี่ยมมุม 90 องศา |
| N | หมายถึง มุม หลบ (Relief Angle) ของแผ่นมีดเท่ากับ 0 องศา |
| M | หมายถึง ระยะเวลา (Tolerance) มีดังนี้ |
| | - ความหนา (Thickness) ± 0.13 mm |

- มุมปลายมีด (Conner Height) ± 0.08 - 0.18 mm
- I.C Size ± 0.05 - 0.15

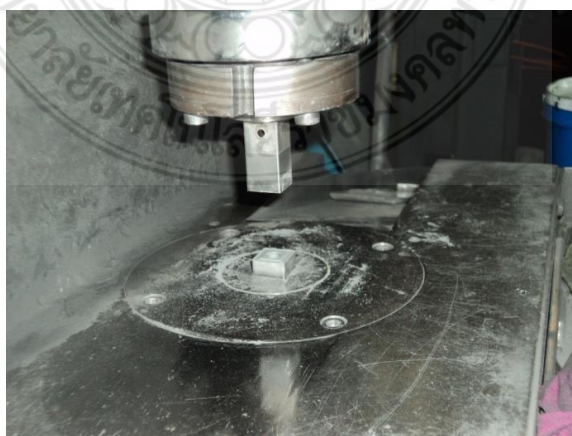
- G หมายถึง มีรูตรงกลางมีดและ มีมุมหักเศษใช้งานได้ทั้งสองด้าน
- 12 หมายถึง ขนาดความกว้างและความยาวของแผ่นมีดมีขนาด 12.7 mm
- 04 หมายถึง ความหนาของแผ่นมีดขนาด 4.67 mm
- 08 หมายถึง รัศมีโค้งปลายมีด 0.8 องศา

3.2.4.3 ตั้งเงื่อนไขการอัดโดยใช้แรงในการอัดที่ 60 Mpa



ภาพที่ 3.29 แสดงการชั่งน้ำหนักผงก่อนอัดขึ้นรูป

จากภาพที่ 3.29 แสดงการชั่งน้ำหนักผงทั้งสแตนคาร์ไบด์ที่ผสมแล้วโดยมีตลับหนึ่งชิ้นใช้น้ำหนักผงโดยเฉลี่ย 9.10 กรัม/เม็ด



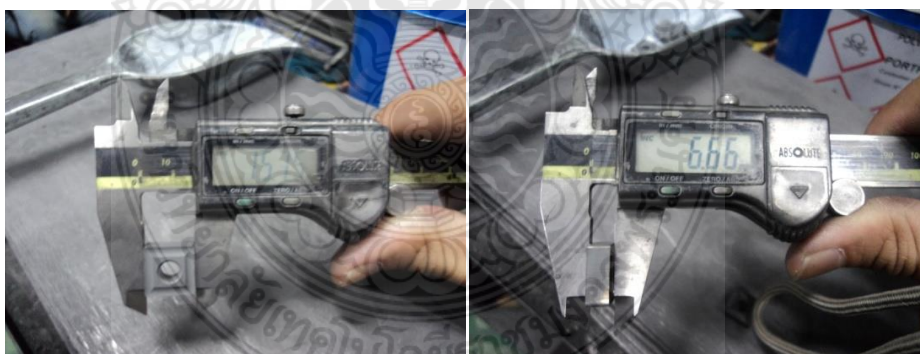
ภาพที่ 3.30 แสดงผงที่ผ่านการอัดขึ้นรูปแล้ว

จากภาพที่ 3.30 แสดงผงทั้งสแตนคาร์ไบด์ที่ผ่านการอัดขึ้นรูปเสร็จแล้ว



ภาพที่ 3.31 แสดงเครื่องวัดค่าความหนาแน่น

จากภาพที่ 3.31 แสดงเครื่องวัดความหนาแน่นที่ใช้ในการตรวจสอบแผ่นมิตที่ผ่านการอัดขึ้นรูปแล้ว เพื่อตรวจวัดความหนาแน่นของแผ่นมิตที่ทำการอัดขึ้นรูปว่ามีความหนาแน่นเหมาะสมที่จะนำไปอบพูนิกหรือไม่



ภาพที่ 3.32 แสดงการวัดแผ่นมิต

จากภาพที่ 3.32 แสดงการวัดแผ่นมิตที่ผ่านการอัดขึ้นรูปเพื่อนำไปคิดค่าการหดตัวของแผ่นมิตก่อนและหลังอบ

3.2.5 การอบผืน

ตารางที่ 3.1 แสดงข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับการอบผืน (Green Density)

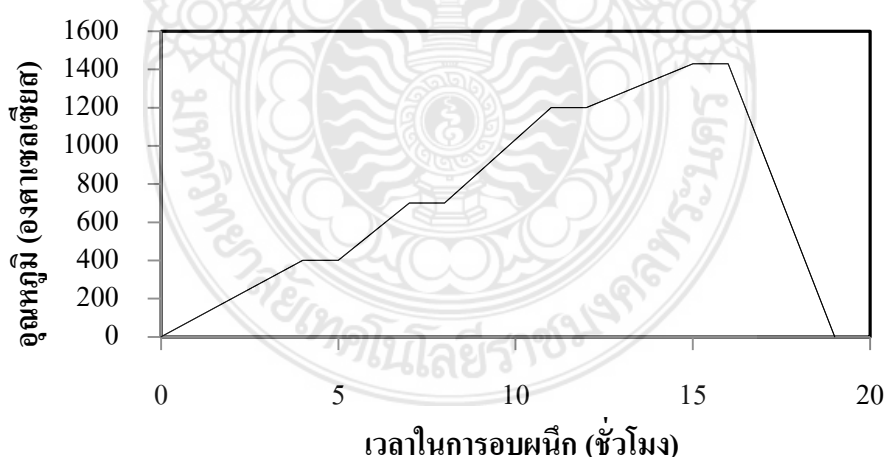
ส่วนผสมของผงโลหะ	อุณหภูมิในการอบ (°C)	เวลาในการอบ
WC+Co	1,430	1 hr
WC+Co	1,400	1 hr
WC+Co	1,400	2 hr

จากตารางที่ 3.1 แสดงข้อมูลที่เกี่ยวข้องในเรื่องของการอบผืน ซึ่งนำมาจากงานวิจัยต่างๆที่ได้ทำการทดลองไว้แล้ว มาเป็นแนวทางในการเลือกใช้ข้อมูลที่ดีที่สุดในการดำเนินการทดลอง จากตารางจะเห็นว่าข้อมูลที่เกี่ยวข้องประกอบด้วย

3.2.5.1 ส่วนผสมของผงโลหะจากข้อมูล เป็นผงทั้งสแตนคาร์ไบด์ผสมกับตัวเชื่อมประสานโคบอลต์ (WC+Co) ซึ่งในส่วนผสมของส่วนผสมของผงโลหะ ข้อมูลมีความใกล้เคียงกับทฤษฎีในบทที่ 2 และแนวทางที่จะดำเนินการทดลอง

3.2.5.2 อุณหภูมิในการอบผืนจากข้อมูลมีขนาด 1,400 และ 1,430 องศาเซลเซียส ซึ่งในส่วนข้อมูลอุณหภูมิในการอบผืน ข้อมูลมีความใกล้เคียงกับทฤษฎีในบทที่ 2 และแนวทางที่จะดำเนินการทดลอง

3.2.5.3 เวลาในการอบผืนจากข้อมูลมี 1 และ 2 ชั่วโมง ซึ่งในส่วนข้อมูลเวลาในการอบผืนข้อมูลมีความใกล้เคียงกับทฤษฎีในบทที่ 2 และแนวทางที่จะดำเนินการทดลอง

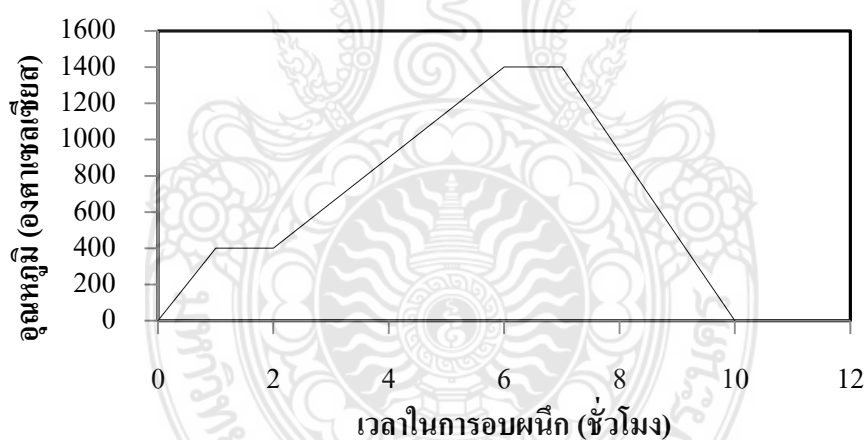


ภาพที่ 3.33 การอบผืนชิ้นงานทั้งสแตนคาร์ไบด์ กราฟแสดงขั้นตอนการอบผืนที่อุณหภูมิ 1,430 องศาเซลเซียส เวลาในการอบผืน 1 ชั่วโมง

จากภาพที่ 3.33 แสดงขั้นตอนการอบผืน เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแกน (X) เวลาในการอบผืนมีหน่วยเป็นชั่วโมง และแกน (Y) อุณหภูมิที่ใช้ในการอบผืนมีหน่วยเป็นองศา

เซลเซียส ข้อมูลขั้นตอนการดำเนินงานมีความใกล้เคียงกับทฤษฎีในบทที่ 2 โดยมีขั้นตอนการอบผืนดังนี้

- 1) ขั้นตอนการไล่ความชื้น เมื่อนำชิ้นงานเข้าเตาแล้วให้ปรับอุณหภูมิต่อเนื่องขึ้นถึง 400 องศาเซลเซียส โดยใช้เวลาในการเพิ่มอุณหภูมิเป็นเวลา 4 ชั่วโมง แล้วคงอุณหภูมิไว้ 1 ชั่วโมง
- 2) ขั้นตอนไล่ตัวประสาน (Dewaxing) เพิ่มต่อเนื่อง อุณหภูมิจาก 400 องศาเซลเซียส เป็น 700 องศาเซลเซียส โดยใช้เวลาในการเพิ่มอุณหภูมิเป็นเวลา 2 ชั่วโมง แล้วคงอุณหภูมิไว้เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เพื่อไล่ตัวประสานโพลีไวนิลแอลกอฮอล์
- 3) ขั้นตอนการให้ความร้อนก่อนการอบผืน (Pre Sintering) เพิ่มต่อเนื่อง อุณหภูมิจาก 700 องศาเซลเซียสเป็น 1,200 องศาเซลเซียส โดยใช้เวลาในการเพิ่มอุณหภูมิเป็นเวลา 3 ชั่วโมง แล้วคงอุณหภูมิไว้เป็นเวลา 1 ชั่วโมงเพื่อให้ความร้อนก่อนการอบผืน
- 4) ขั้นตอนการอบผืน เพิ่มต่อเนื่องอุณหภูมิจาก 1200 องศาเซลเซียส เป็น 1430 องศาเซลเซียส เมื่ออุณหภูมิถึง 1,300 องศาเซลเซียส ให้หยุดเติมน้ำในโตรเจน โดยใช้เวลาในการเพิ่มอุณหภูมิเป็นเวลา 3 ชั่วโมง ให้คงการอบผืน 1 ชั่วโมง เพื่อเกิดการรวมตัวกันระหว่างทั้งสแตนคาร์ไบด์และโคบอลต์
- 5) ขั้นตอนการปล่อยให้เย็นตัว (Cooling) ปล่อยให้ชิ้นงานเย็นตัวในเตาจนถึงอุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส จากนั้นนำชิ้นงานออกมาปล่อยให้เย็นตัวในอากาศ



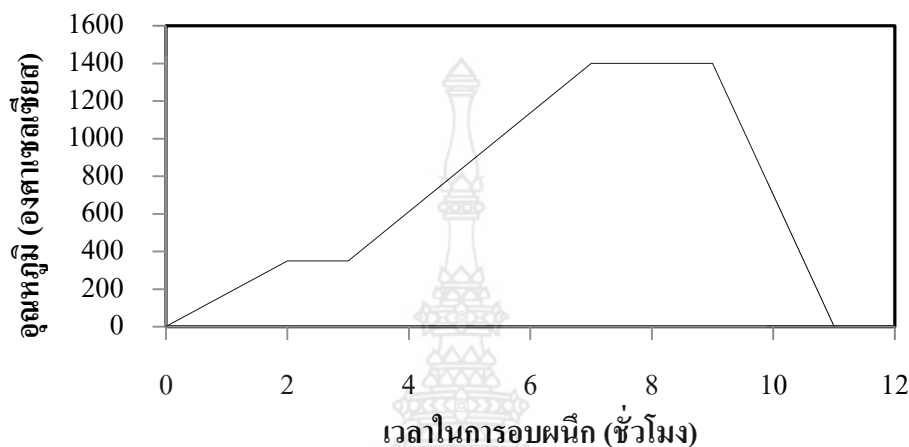
ภาพที่ 3.34 การอบผืนชิ้นงานทั้งสแตนคาร์ไบด์ กราฟแสดงขั้นตอนการอบผืนที่อุณหภูมิ 1,400 องศาเซลเซียส เวลาในการอบผืน 1 ชั่วโมง

จากภาพที่ 3.34 แสดงขั้นตอนการอบผืน เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแกน (X) เวลาในการอบผืนมีหน่วยเป็นชั่วโมง และแกน (Y) อุณหภูมิที่ใช้ในการอบผืนมีหน่วยเป็นองศาเซลเซียส ซึ่งมีขั้นตอนการอบผืนดังนี้

- 1) ขั้นตอนการไล่ความชื้น เมื่อนำชิ้นงานเข้าเตาแล้วให้ปรับอุณหภูมิต่อเนื่องขึ้นถึง 400 องศาเซลเซียส โดยใช้เวลาในการเพิ่มอุณหภูมิเป็นเวลา 1 ชั่วโมง แล้วคงอุณหภูมิไว้เป็น 1 ชั่วโมง
- 2) ขั้นตอนไล่ตัวประสาน (Dewaxing) และการให้ความร้อนก่อนการอบผืน (Pre Sintering) เพิ่มต่อเนื่อง อุณหภูมิจาก 400 องศาเซลเซียส เป็น 1,400 องศาเซลเซียส โดยใช้เวลาใน

การเพิ่มอุณหภูมิเป็นเวลา 4 ชั่วโมง แล้วให้คงการอบผืน 1 ชั่วโมง เพื่อเกิดการรวมตัวกันระหว่างทั้งสแตนคาร์ไบด์และโคบอลต์

3) ขั้นตอนการปล่อยให้เย็นตัว (Cooling) ปล่อยให้ชิ้นงานเย็นตัวในเตาจนถึงอุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส จากนั้นนำชิ้นงานออกมาปล่อยให้เย็นตัวในอากาศ



ภาพที่ 3.35 การอบผืนชิ้นงานทั้งสแตนคาร์ไบด์ กราฟแสดงขั้นตอนการอบผืนที่อุณหภูมิ 1,400 องศาเซลเซียส เวลาในการอบผืน 2 ชั่วโมง

จากภาพที่ 3.35 แสดงขั้นตอนการอบผืน เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแกน (X) เวลาในการอบผืนมีหน่วยเป็นชั่วโมง และแกน (Y) อุณหภูมิที่ใช้ในการอบผืนมีหน่วยเป็นองศาเซลเซียส ซึ่งมีขั้นตอนการอบผืนดังนี้

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

2) ขั้นตอนไล่ตัวประสาน (Dewaxing) และการให้ความร้อนก่อนการอบผืน (Pre Sintering) เพิ่มต่อเนื่อง อุณหภูมิจาก 400 องศาเซลเซียส เป็น 1,400 องศาเซลเซียส โดยใช้เวลาในการเพิ่มอุณหภูมิเป็นเวลา 4 ชั่วโมง แล้วให้คงการอบผืน 1 ชั่วโมง เพื่อเกิดการรวมตัวกันระหว่างทั้งสแตนคาร์ไบท์และโคบอลต์

3) ขั้นตอนการปล่อยให้เย็นตัว (Cooling) ปล่อยให้ชิ้นงานเย็นตัวในเตาจนถึงอุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส จากนั้นนำชิ้นงานออกมาปล่อยให้เย็นตัวในอากาศ

3.3 ศึกษาการทดสอบประสิทธิภาพชิ้นงานทั้งสแตนคาร์ไบด์

3.3.1 การทดสอบความแข็ง

การทดสอบความแข็งเป็นการตรวจสอบถึงความแข็งของเครื่องมือตัดที่ต้องการตรวจสอบเพื่อให้ทราบถึงค่าความแข็งและสามารถนำมาเปรียบเทียบกับประสิทธิภาพได้ ซึ่งในการทดสอบความแข็งกับงานทดลองต่าง ๆ นิยมใช้มาก คือการทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์ เพราะเป็นการทดสอบความแข็งที่มาตรฐานและสามารถกำหนดค่าความแข็งของวัสดุได้ถูกต้อง ในการทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์

นี้จะใช้เครื่องทดสอบกดบนผิวชิ้นทดสอบทำให้เกิดรอยบุ๋มถาวร (Permanent Indentation) แล้ววัดขนาด ความโตหรือความลึกของรอยบุ๋ม ถ้าทดสอบกับวัสดุอ่อนก็จะทำให้เกิดรอยบุ๋มขนาดใหญ่หรือลึกมาก แต่ถ้าทดสอบกับวัสดุแข็งก็จะทำให้เกิดรอยบุ๋มขนาดเล็กหรือลึกน้อย ซึ่งในการตรวจสอบความแข็งนี้จะทำการตรวจสอบชิ้นงานที่เป็นทั้งสแตนคาร์ไบด์ ซึ่งมีความแข็งสูง

ตารางที่ 3.2 แสดงข้อมูลปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับรายละเอียดในการเลือกใช้การทดสอบความแข็ง [24]

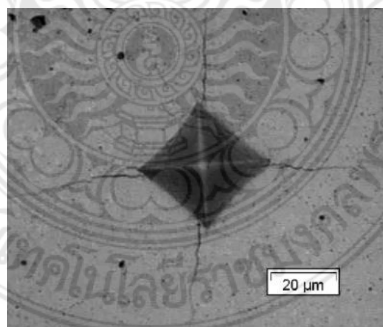
การทดสอบความแข็ง	โหลดที่ใช้กด (kgf)	เวลาที่ใช้กด (S)
Vicker Hardness test (HV)	10	15
Vicker Hardness test (HV)	20	10
Vicker Hardness test (HV)	10	5

จากตารางที่ 3.2 แสดงข้อมูลที่เกี่ยวกับรายละเอียดในการเลือกใช้การทดสอบความแข็ง ซึ่งนำมาจากงานวิจัยต่างๆที่ได้ทำการทดลองไว้แล้ว มาเป็นแนวทางในการเลือกใช้ข้อมูลที่ดีที่สุดใน การดำเนินการทดลอง จากตารางจะเห็นว่าข้อมูลที่เกี่ยวข้องประกอบด้วย

3.3.1.1 การทดสอบความแข็งจากข้อมูลเลือกใช้การทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์ (HV) ในส่วนของการเลือกทดสอบความแข็ง ข้อมูลมีความใกล้เคียงกับแนวทางที่จะดำเนินการทดลอง

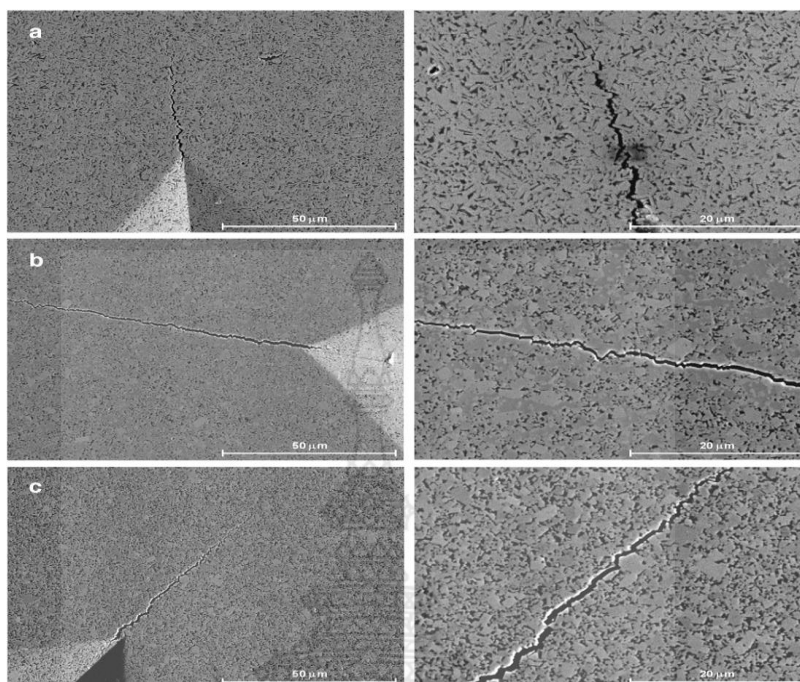
3.3.1.2 โหลดที่ใช้กดจากข้อมูลมี 10,20 กิโลกรัมแรง (kgf) ซึ่งในส่วนของเรื่องโหลดที่ใช้กดนั้น ข้อมูลมีความใกล้เคียงกับแนวทางที่จะดำเนินการทดลอง

3.3.1.3 เวลาที่ใช้กดจากข้อมูลมี 5,10,15 วินาที ซึ่งในส่วนของเรื่องเวลาที่ใช้กด ข้อมูลมีความใกล้เคียงกับแนวทางที่จะดำเนินการทดลอง



ภาพที่ 3.36 ภาพรอยกดทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์

จากภาพที่ 3.36 เป็นภาพถ่ายของรอยกดทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์จากชิ้นงานจริง ซึ่งลักษณะรอยกดเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส ซึ่งเป็นลักษณะที่ตรงตามทฤษฎีในเรื่องการทดสอบความแข็ง จากภาพนี้จะเป็แนวทางในการดำเนินการถ่ายภาพรอยกดที่ถูกต้องเพื่อทำการหาค่าความแข็ง

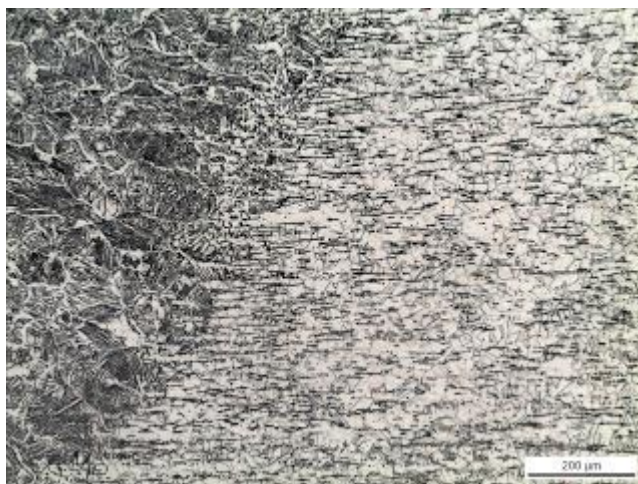


ภาพที่ 3.37 แสดงบริเวณมุมรอยกดทดสอบความแข็งที่เกิดรอย Crack

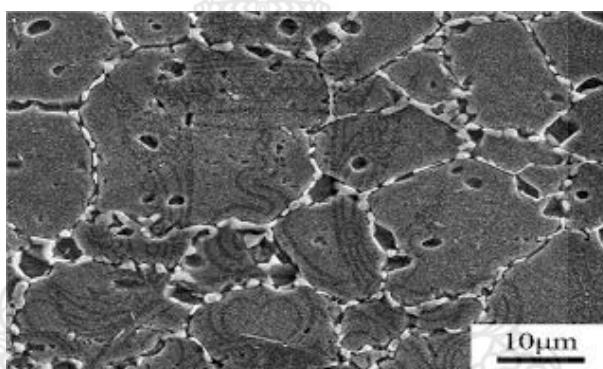
ภาพที่ 3.37 แสดงภาพบริเวณมุมรอยกดทดสอบความแข็งที่เกิดรอยร้าว Crack ของชิ้นงาน ซึ่งจากภาพถ่ายนี้แสดงให้เห็นได้ชัดถึงรอยร้าวที่เกิดขึ้นบริเวณมุมรอยกด 3 มุม แสดงให้เห็นถึงการเลือกใช้กำลังขยายของเครื่องถ่ายภาพที่เหมาะสม จากภาพนี้จะเป็นแนวทางในการดำเนินการถ่ายภาพรอยร้าวที่ถูกต้องในการบันทึกภาพ

3.3.2 การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค

โครงสร้างจุลภาค (microstructure) คือ สภาพหรือลักษณะของพื้นผิวที่ปรากฏของชิ้นงานที่ผ่านการเตรียมเพื่อการตรวจสอบภายใต้กล้องจุลทรรศน์ ณ กำลังขยายสูงกว่า 25 เท่า ในทางปฏิบัติ โครงสร้างจุลภาคของโลหะมักจะประกอบไปด้วยเกรน (Grain) และเฟสต่างๆ ซึ่งหากเป็นเนื้อหลักจะเรียกว่า เมทริกซ์ (Matrix) แต่หากเป็นก้อนเล็กๆ ในเนื้อหลักจะเหมาะเรียกรวมๆ ว่าอนุภาค (Particle)



ภาพที่ 3.38 ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้อง Optical microscopy



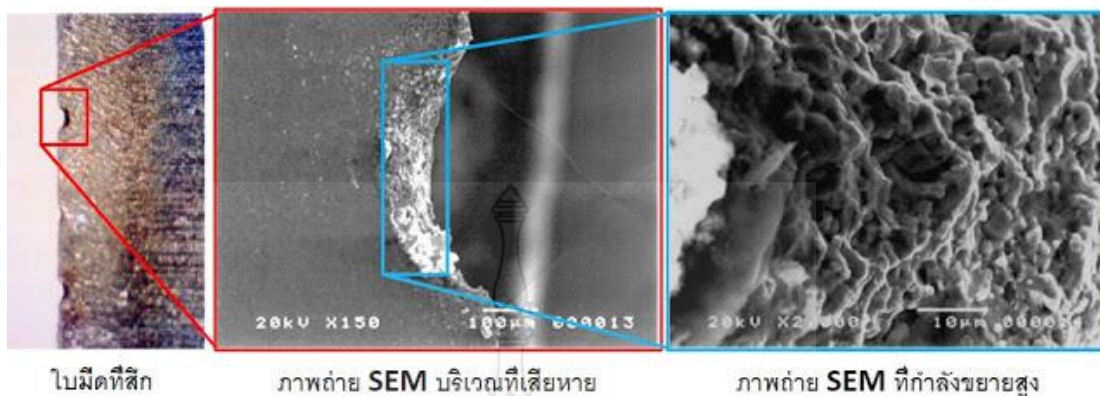
ภาพที่ 3.39 ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้อง Scanning electron microscopy (SEM)

การวิเคราะห์โครงสร้างและส่วนผสมทางเคมีของโลหะ ได้แก่

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

โครงสร้างจุลภาคและส่วนผสมทางเคมีอาจเปลี่ยนแปลงไปในขั้นตอนต่างๆ นับตั้งแต่เริ่มการผลิต จนถึงการใช้งาน ซึ่งปัจจัยที่มีผลกระทบได้แก่ เริ่มจากขบวนการผลิต ผลกระทบของขบวนการผลิตต่อโครงสร้างจุลภาคและส่วนผสมทางเคมี

3.3.3 การทดสอบการสึกหรอ



ภาพที่ 3.40 การสึกหรอของวัสดุ

จากภาพที่ 3.40 แสดงการสึกหรอของวัสดุ การสึกหรอ (Wear) คือ “ความเสียหายบนพื้นผิวของของแข็งที่ละน้อยและค่อย ๆ สึกหรอเนื่องมาจากการเลื่อนหรือเคลื่อนที่ของวัสดุเนื่องจากแรงทางกล เป็นผลให้วัสดุนั้นไปสัมผัสกับของแข็ง ของเหลวหรือแก๊ส”

3.4 วิเคราะห์ข้อมูลการทดสอบ

ในการวิเคราะห์ผลการทดสอบจะวิเคราะห์แผ่นมิตที่ผลิตจากผงที่ผลิตขึ้นเอง โดยผ่านกระบวนการอัดขึ้นรูปโลหะผงที่แรงอัด 110 MPa และผ่านกระบวนการอบผนึกที่ 3 ช่วงอุณหภูมิ โดยการทดลองที่ 1 อบที่อุณหภูมิ 1,430°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง การทดลองที่ 2 อบที่อุณหภูมิ 1,400°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมงและการทดลองที่ 3 อบที่อุณหภูมิ 1,400°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จะส่งผลให้มิตที่ผลิตขึ้นนั้นมีประสิทธิภาพอย่างไรเมื่อเทียบกับแผ่นอุณหภูมิการอบผนึกที่แตกต่างกัน โดยจะเปรียบเทียบโครงสร้างจุลภาค ค่าความแข็ง การสึกหรอของแผ่นมิตและความเรียบผิวชิ้นงาน

3.5 รวบรวมข้อมูลการทดสอบ

ทำการเก็บบันทึกข้อมูลที่ได้ทำการทดสอบในด้านต่างๆโดยละเอียดและนำข้อมูลที่ได้มาทำการเปรียบเทียบ โดยข้อมูลดังกล่าวจะแสดงในบทที่ 4 ซึ่งมีดังนี้

- 3.5.1 ข้อมูลผลการทดลองคุณลักษณะของผงทั้งสแตนคาร์ไบด์
- 3.5.2 ข้อมูลผลการทดลองคุณสมบัติของผงทั้งสแตนคาร์ไบด์ (XRF)
- 3.5.3 ข้อมูลผลการทดลองการกระจายตัวและขนาดอนุภาค (P&D)
- 3.5.4 ข้อมูลผลการทดลองวิเคราะห์ส่วนประกอบทางเคมี (XRD)
- 3.5.5 ข้อมูลผลการทดลองความแข็งของแผ่นมิตซีเมนต์ทั้งสแตนคาร์ไบด์
- 3.5.6 ข้อมูลผลระยะทางในการกลิ้ง
- 3.5.7 ข้อมูลการเปรียบเทียบลักษณะผิวกลิ้ง

3.6 วิเคราะห์ผลการทดสอบ

จากการเก็บบันทึกข้อมูลจากการทดลอง สามารถวิเคราะห์ข้อมูล เพื่อนำไปสู่การวิเคราะห์ผล และสรุปผลการทดลอง ดังนี้

- 3.6.1 วิเคราะห์ผลคุณลักษณะของผงทั้งสแตนคาร์ไบด์
- 3.6.2 วิเคราะห์ผลคุณสมบัติของผงทั้งสแตนคาร์ไบด์ (XRF)
- 3.6.3 วิเคราะห์ผลการทดลองการกระจายตัวและขนาดอนุภาค (P&D)
- 3.6.4 วิเคราะห์ผลการทดลอง และส่วนประกอบทางเคมี (XRD)
- 3.6.5 วิเคราะห์ผลการทดลองทดสอบความแข็งของแผ่นมิดทั้งสแตนคาร์ไบด์
- 3.6.6 วิเคราะห์ผลการทดสอบระยะทางในการกลึง
- 3.6.7 วิเคราะห์ผลการเปรียบเทียบลักษณะผิวกลึง

3.7 สรุปผล

การพัฒนากระบวนการอบผนึกชิ้นงานความแข็งสูงพิเศษเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการต้านทานการสึกหรอ เป็นการพัฒนาต่อยอดวัตถุดิบโลหะผงทั้งสแตนคาร์ไบด์ให้เป็นชิ้นงานโลหะความแข็งสูง (High Hardness) ภายใต้อิทธิพลของตัวแปรในการอบผนึก สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรม และเป็นองค์ความรู้ใหม่ต่อการสร้างงานมูลค่าเพิ่มของวัสดุในเชิงพาณิชย์ต่อไป

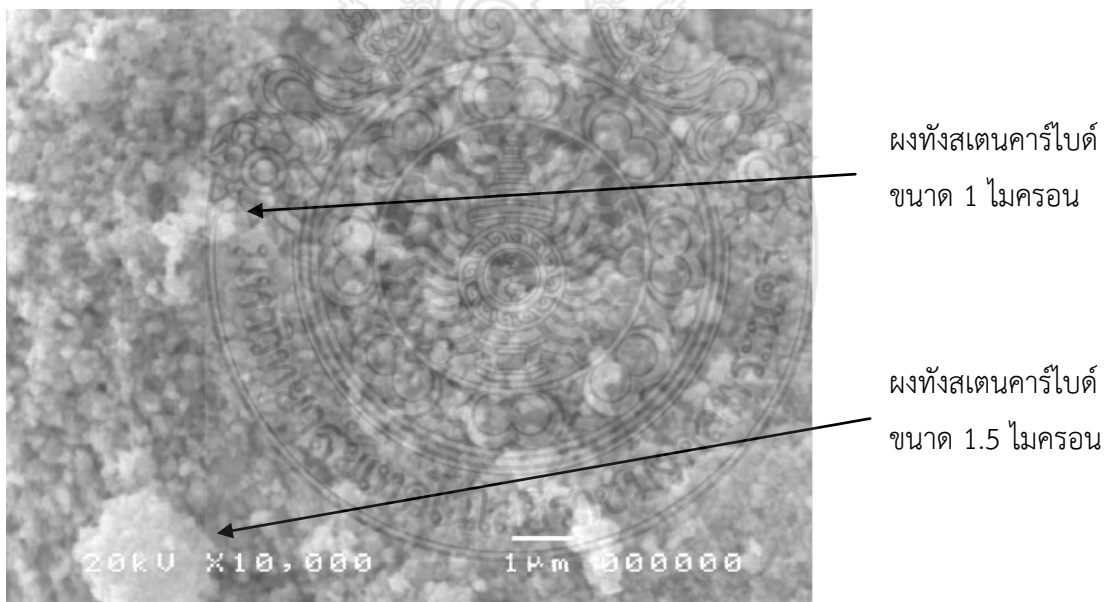


บทที่ 4

ผลการวิจัย (Results)

ผลงานวิจัยนี้มุ่งพัฒนาผลิตภัณฑ์จากโลหะทั้งสแตนคาร์ไบด์ โดยการผลิตขึ้นมามีในประเทศไทย ได้ทำการศึกษาวิจัยโดยพัฒนาโลหะผงทั้งสแตนคาร์ไบด์ผสมกับโลหะประสานในอัตราส่วนผสมไม่เกิน 15 % โดยน้ำหนัก เพื่อผลิตเป็นชิ้นงานใหม่ จากนั้นทำการทดสอบสมบัติทางกลและทดลองการใช้งาน ได้แก่ การทดสอบและวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค การทดสอบความแข็งและการประยุกต์ใช้งาน ทดลองการอบผนึก (Sintering) เพื่อหาตัวแปรที่เหมาะสมต่อการเพิ่มสมบัติด้านความแข็ง การต้านทานต่อการสึกหรอและสมบัติทางกลที่สำคัญต่อการใช้งานของชิ้นงานทั้งสแตนคาร์ไบด์ จึงเป็นการวิจัยตามแนวทางการพัฒนาเพื่อความยั่งยืน ได้ผลออกมาดังต่อไปนี้

4.1 ผลการวิเคราะห์คุณลักษณะของผงโลหะ



ภาพที่ 4.1 แสดงการตรวจสอบอนุภาคของผงทั้งสแตนคาร์ไบด์ที่ผ่านการบดละเอียด 100 ชั่วโมง

จากภาพที่ 4.1 เป็นผลการตรวจสอบโครงสร้างอนุภาคด้วยวิธีการ Scanning Electron Microscope (SEM) ที่กำลังขยาย 10,000 เท่า สำหรับการศึกษาการเตรียมโลหะผงด้วยเวลาการ

บดละเอียด 100 ซั่งโม่ ผลการทำ SEM พบว่า ผงทังสเตนคาร์ไบด์มีขนาดเล็กที่สุด $0.20\ \mu\text{m}$ ผงที่มีขนาดใหญ่ประมาณ $3.00\ \mu\text{m}$ ซึ่งมีรูปร่างค่อนข้างกลม จากรูปที่ 4.1 ผงโลหะส่วนใหญ่จะมีขนาดเล็ก รูปทรงกลมเป็นลักษณะผงที่สามารถนำไปผลิตเป็นชิ้นงาน (Cemented Carbide) ได้ ตรงตามลักษณะผงที่มีการใช้งานในอุตสาหกรรม อย่างไรก็ตาม ผงโลหะขนาดใหญ่เป็นสิ่งที่ควรทำการศึกษาคุณลักษณะต่างๆ เพิ่มขึ้น เพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาต่อไป ตัวอย่างเช่น รูปทรง ส่วนประกอบ เป็นต้น

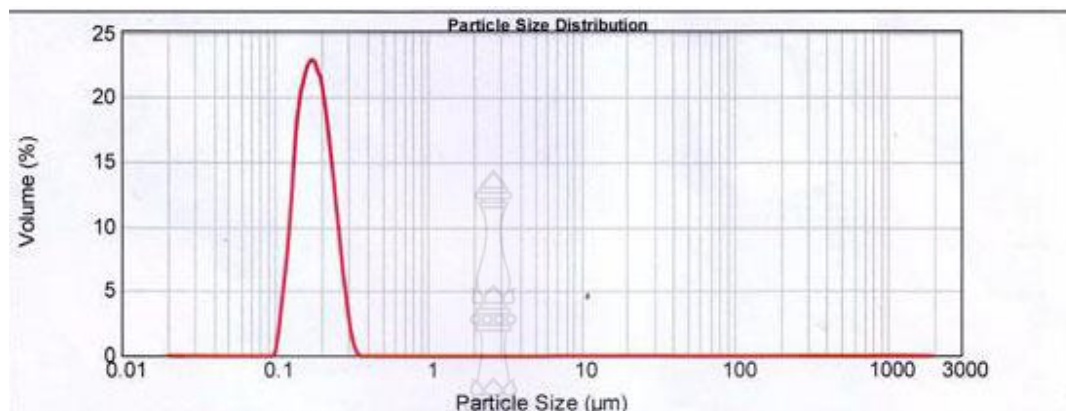
4.2 ผลวิเคราะห์คุณสมบัติของผงทังสเตนคาร์ไบด์ (XRF)

ตารางที่ 4.1 แสดงผลการตรวจสอบส่วนประกอบทางเคมี (XRF) ในผล WC ที่นำมาใช้เป็นวัตถุดิบเพื่อสร้างแผ่นมิด WC

No	Compound Name	Conc. (%)
1	Al	0.01
2	Si	0.04
3	Cl	0.20
4	Ti	4.56
5	Cr	0.03
6	Fe	0.17
7	Zr	0.37
8	Nb	1.22
9	Mo	0.49
10	Ta	2.82
11	W	90.9

จากตารางที่ 4.1 แสดงส่วนประกอบทางเคมีจากตัวอย่างผง WC พบว่า มีธาตุทั้งหมด 11 ธาตุ ได้แก่ อะลูมิเนียม 0.01 % ซิลิคอน 0.04 % คลอรีน 0.20 % ไทเทเนียม 4.56 % โครเมียม 0.03 % เหล็ก 0.17 % เซอร์โคเนียม 0.37 % นีโอเบียม 1.22 % โมลิบดีนัม 0.49 % และ ทังสเตน ซึ่งเป็นธาตุที่ตรวจพบมากที่สุดถึง 90.09 %

4.3 ผลการทดลองการกระจายตัวและขนาดอนุภาค (P&D)



ภาพที่ 4.2 แสดงกราฟขนาดและการกระจายอนุภาคผง WC

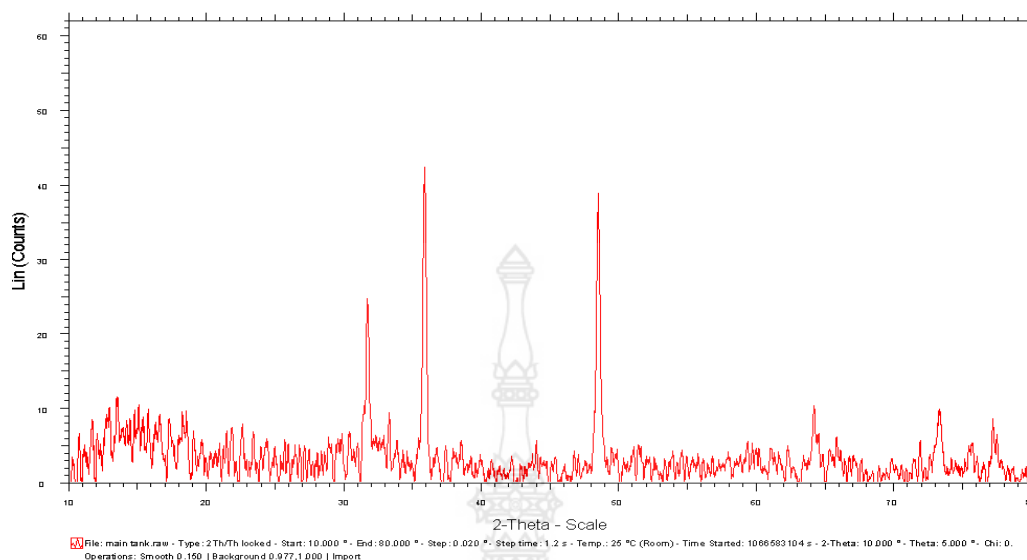
จากภาพที่ 4.2 แสดงผลตรวจสอบขนาดและการกระจายของอนุภาคผง WC โดยวิธีการ Particle Size & Distribution ผลปรากฏว่า อนุภาคผง WC มีขนาดอยู่ในช่วง 0.1-0.35 μm อนุภาคที่พบส่วนใหญ่มีขนาด 0.178 μm

4.4 ผลการทดลองและส่วนประกอบทางเคมี (XRD)

ตารางที่ 4.2 แสดงองค์ประกอบที่มีความเป็นไปได้ในตัวอย่าง

ตัวอย่าง	องค์ประกอบที่มีความเป็นไปได้ในตัวอย่าง
ผง WC	Tungsten Carbide (WC)

จากตารางที่ 4.2 แสดงตัวอย่างผง WC องค์ประกอบที่มีความเป็นไปได้คือ Tungsten Carbide (WC)



ภาพที่ 4.3 แสดงผลการตรวจสอบวิเคราะห์องค์ประกอบด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (XRD)

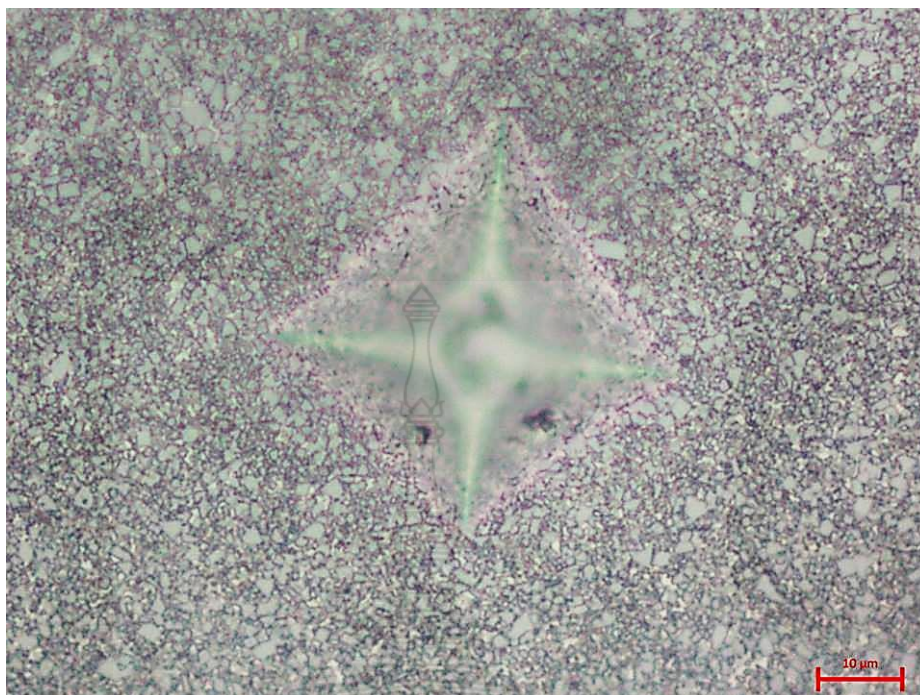
จากภาพที่ 4.3 แสดงผลการตรวจสอบวิเคราะห์องค์ประกอบด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD) สังเกตได้จาก Peak Identification ที่พุ่งสูงทั้ง 3 ชีตแสดงให้เห็นว่า องค์ประกอบที่มีความเป็นไปได้ในภาพตัวอย่างคือ Tungsten Carbide (WC)

4.5 ผลการทดสอบความแข็งของแผ่นมิดทั้งสแตนคาร์ไบด์

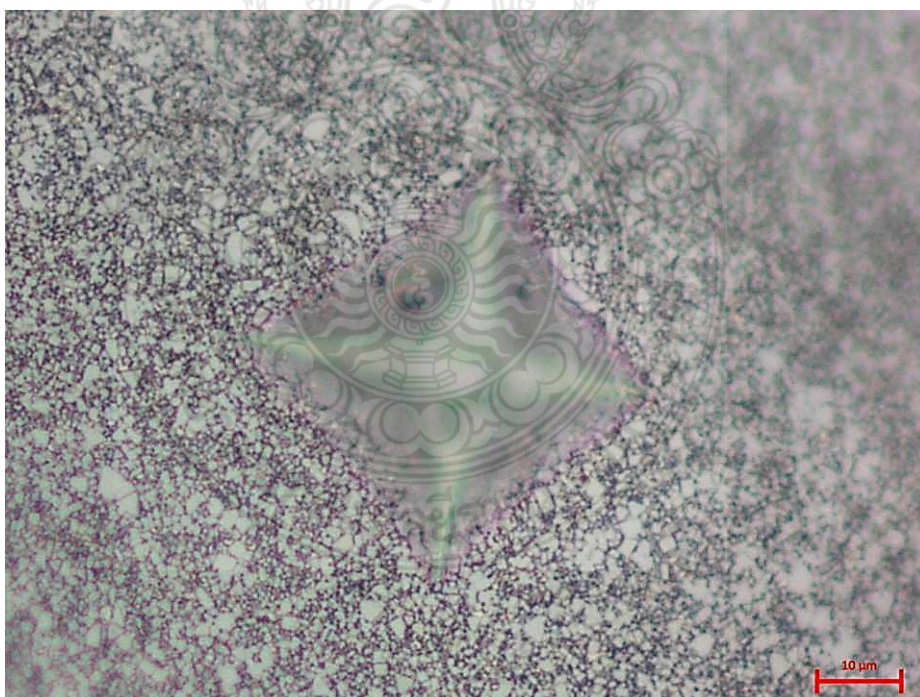
ตารางที่ 4.3 แสดงความแข็งของแผ่นมิด WC แต่ละจุดทดสอบ

จุดที่	การทดลอง		
	การทดลองที่ 1 WC+Co 1,430 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง	การทดลองที่ 2 WC+Co 1,400 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง	การทดลองที่ 3 WC+Co 1,400 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง
	ผล	ผล	ผล
1	1,346.3 HV	1,346.3 HV	1,383.9 HV
2	1,368.5 HV	1,346.3 HV	1,399.3 HV
3	1,361.0 HV	1,346.3 HV	1,415.2 HV
เฉลี่ย	1,358.6 HV	1,346.3 HV	1,399.5 HV

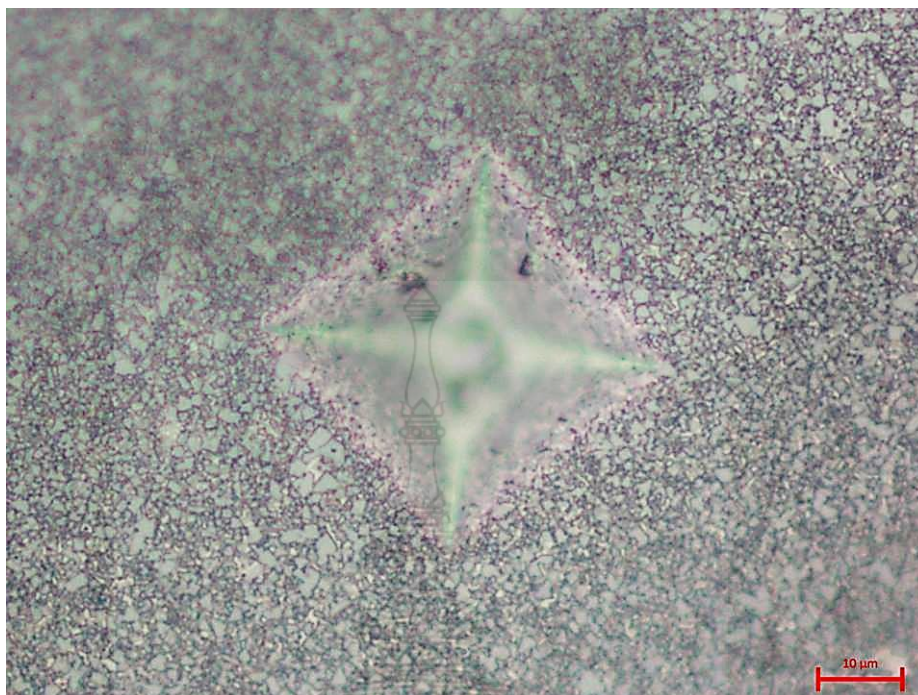
จากตารางที่ 4.3 แสดงความแข็งของแผ่นมิด WC แต่ละจุดทดสอบ การทดลองที่ 1 มีค่าความแข็งโดยเฉลี่ยที่ 1,358.6 HV, การทดลองที่ 2 มีค่าความแข็งโดยเฉลี่ยที่ 1,346.3 HV, การทดลองที่ 3 มีค่าความแข็งโดยเฉลี่ยที่ 1,399.5 HV



ภาพที่ 4.4 แสดงรอยกดจากการทดสอบความแข็งของการทดลองที่ 1



ภาพที่ 4.5 แสดงรอยกดจากการทดสอบความแข็งของการทดลองที่ 2



ภาพที่ 4.6 แสดงรอยกดจากการทดสอบความแข็งของการทดลองที่ 3

จากภาพที่ 4.4, 4.5, 4.6 แสดงรอยกดจากการทดสอบความแข็งของชิ้นงานการทดลองที่ 1, การทดลองที่ 2, การทดลองที่ 3 ด้วยเครื่องทดสอบความแข็ง Vickers Hardness Test (HRV) โดยมีกำลังขยายภาพถ่าย 1,000 เท่า

4.6 ผลการทดสอบระยะทางในการกลึง

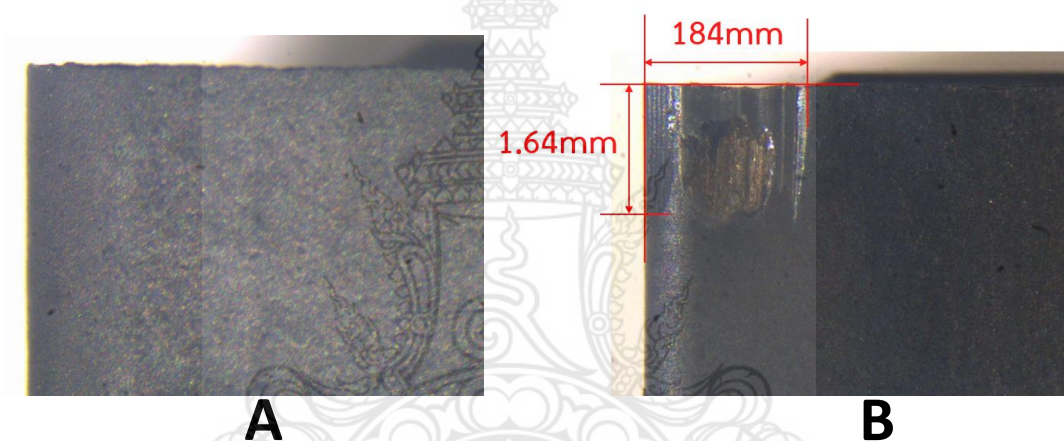
ตารางที่ 4.4 แสดงขนาดของชิ้นงานหลังจากกลึงทดสอบด้วยเครื่องกลึงอัตโนมัติ (CNC)

การทดลองที่ 1	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 3	ชั้นที่ 4	ชั้นที่ 5	ชั้นที่ 6	ชั้นที่ 7
ขนาด	33.00 mm	32.58 mm	32.60 mm	32.62 mm	32.66 mm	32.66 mm	32.69 mm
การทดลองที่ 2	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 3	ชั้นที่ 4	ชั้นที่ 5	ชั้นที่ 6	ชั้นที่ 7
ขนาด	33.00 mm	33.00 mm	33.00 mm	33.02 mm	33.08 mm	33.10 mm	33.13 mm
การทดลองที่ 3	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 3	ชั้นที่ 4	ชั้นที่ 5	ชั้นที่ 6	ชั้นที่ 7
ขนาด	33.00 mm	32.92 mm	32.94 mm	32.96 mm	33.02 mm	33.04 mm	33.08 mm

จากตารางที่ 4.4 แสดงขนาดชิ้นงานหลังกลึงทดสอบด้วยเครื่องกลึงอัตโนมัติ (CNC) พบว่าการทดลองที่ 1 มีค่าคลาดเคลื่อนจากการกลึงชั้นที่ 1-2 มีค่าคลาดเคลื่อน 0 mm จากการกลึงชั้นที่ 1-3 มีค่าคลาดเคลื่อน 0.02 mm จากการกลึงชั้นที่ 1-4 มีค่าคลาดเคลื่อน 0.04 mm จากการกลึงชั้นที่ 1-5 มีค่าคลาดเคลื่อน 0.08 mm จากการกลึงชั้นที่ 1-7 มีค่าคลาดเคลื่อน 0.08 mm

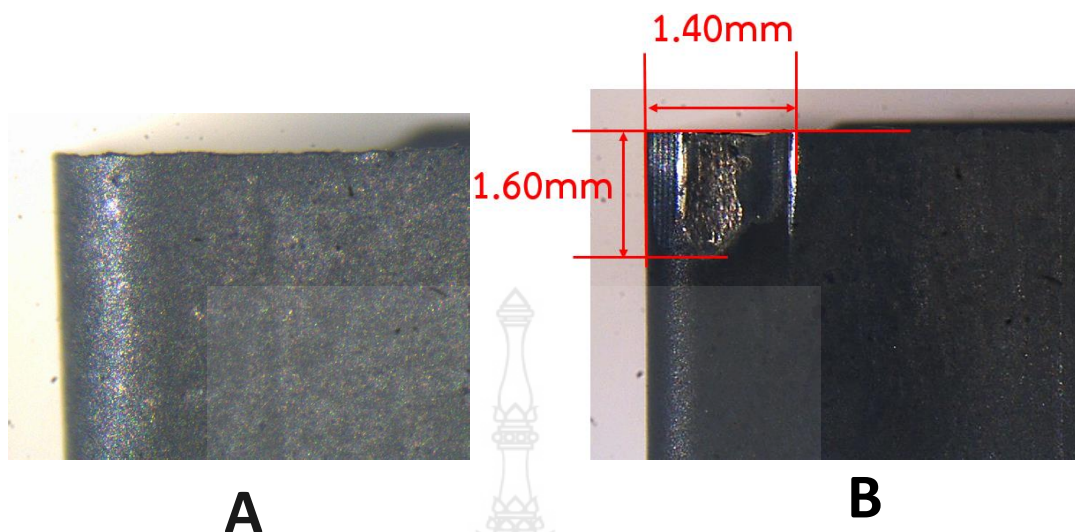
การทดลองที่ 2 มีค่าคลาดเคลื่อนจากการกลึงชั้นที่ 1-2 มีค่าคลาดเคลื่อน 0 mm จากการกลึงชั้นที่ 1-3 มีค่าคลาดเคลื่อน 0 mm จากการกลึงชั้นที่ 1-4 มีค่าคลาดเคลื่อน 0.02 mm จากการกลึงชั้นที่ 1-5 มีค่าคลาดเคลื่อน 0.08 mm จากการกลึงชั้นที่ 1-7 มีค่าคลาดเคลื่อน 0.10 mm

การทดลองที่ 3 มีค่าคลาดเคลื่อนจากการกลึงชั้นที่ 1-2 มีค่าคลาดเคลื่อน 0 mm จากการกลึงชั้นที่ 1-3 มีค่าคลาดเคลื่อน 0 mm จากการกลึงชั้นที่ 1-4 มีค่าคลาดเคลื่อน 0.02 mm จากการกลึงชั้นที่ 1-5 มีค่าคลาดเคลื่อน 0.10 mm จากการกลึงชั้นที่ 1-7 มีค่าคลาดเคลื่อน 0.12 mm



ภาพที่ 4.7 แสดงภาพด้านผิวหลบของแผ่นมิด WC การทดลองที่ 1 แสดงการเปรียบเทียบการสึกหรอ ก่อนและหลังการทดสอบกลึงด้วยเครื่องกลึงอัตโนมัติ (CNC)

จากภาพที่ 4.7 เปรียบเทียบบริเวณผิวหลบโดยภาพ A คือภาพก่อนการใช้งาน ภาพ B แสดงบริเวณผิวหลบของแผ่นมิดหลังใช้งาน มีขนาดการสึกหรอกว้าง 1.84 mm หนา 1.64 mm เกิดการสึกหรอมากและรวดเร็ว ซึ่งจะนำไปสู่การสูญเสียสภาพการใช้งานของแผ่นมิด



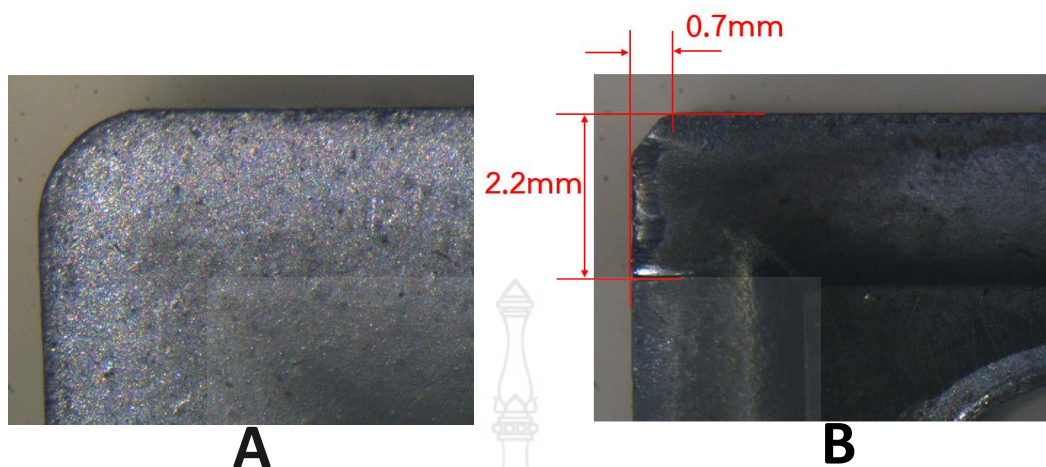
ภาพที่ 4.8 แสดงภาพด้านผิวหลบของแผ่นมิต WC การทดลองที่ 2 แสดงการเปรียบเทียบการสึกหรอ ก่อนและหลังการทดสอบกลึงด้วยเครื่องกลึงอัตโนมัติ (CNC)

จากภาพที่ 4.8 เปรียบเทียบบริเวณผิวหลบโดยภาพ A คือภาพก่อนการใช้งาน ภาพ B แสดง บริเวณผิวหลบของแผ่นมิตหลังใช้งาน มีขนาดการสึกหรอกว้าง 1.4 mm หนา 1.6 mm เกิดการสึกหรอน้อยกว่าการทดลองที่ 1 แผ่นมิตยังคงใช้งานได้ปกติ



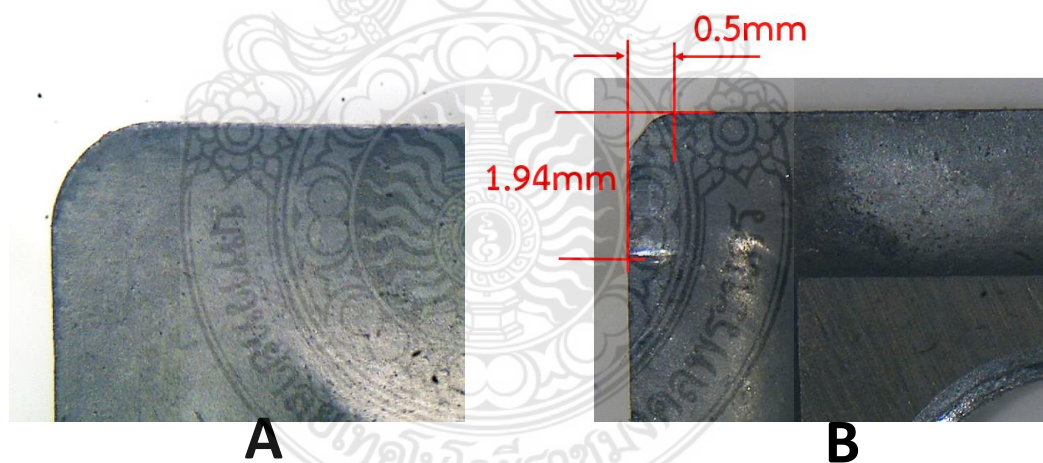
ภาพที่ 4.9 แสดงภาพด้านผิวหลบของแผ่นมิต WC การทดลองที่ 3 แสดงการเปรียบเทียบการสึกหรอ ก่อนและหลังการทดสอบกลึงด้วยเครื่องกลึงอัตโนมัติ (CNC)

จากภาพที่ 4.9 เปรียบเทียบบริเวณผิวหลบโดยภาพ A คือภาพก่อนการใช้งาน ภาพ B แสดง บริเวณผิวหลบของแผ่นมิตหลังใช้งาน มีขนาดการสึกหรอกว้าง 1.54 mm หนา 0.94 mm เป็นการสึกหรอที่เพิ่มขึ้นในลักษณะคงที่และมักเป็นจุดสิ้นสุดอายุการใช้งานของแผ่นมิต



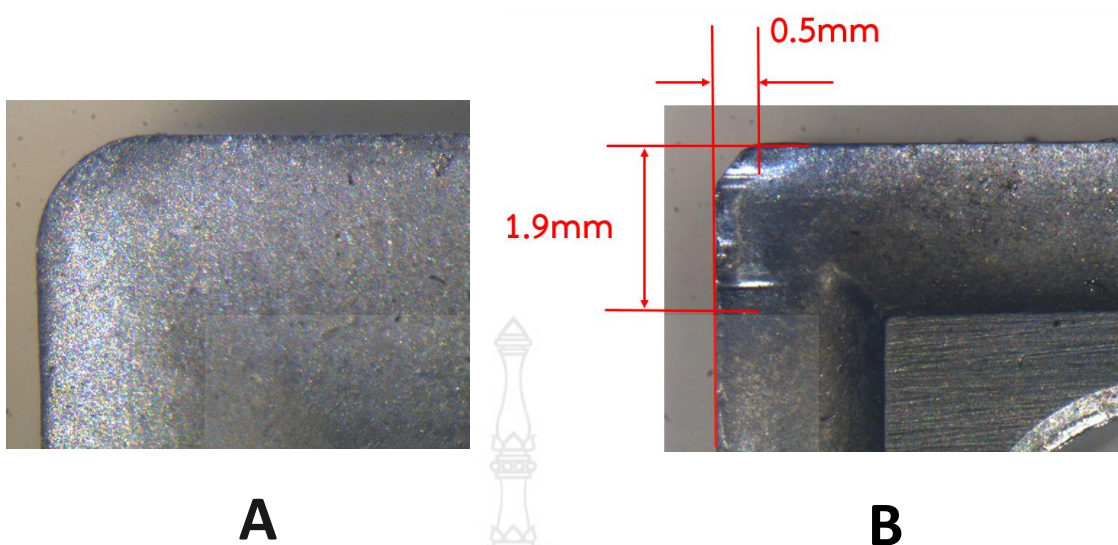
ภาพที่ 4.10 แสดงภาพด้านมุมคายเศษของแผ่นมิด WC การทดลองที่ 1 แสดงการเปรียบเทียบการสึกหรอก่อนและหลังการทดสอบกลึงด้วยเครื่องกลึงอัตโนมัติ (CNC)

จากภาพที่ 4.10 แสดงการเปรียบเทียบบริเวณมุมคายเศษโดยภาพ A คือภาพก่อนการใช้งาน ภาพ B แสดงบริเวณมุมคายเศษของแผ่นมิดหลังใช้งาน มีขนาดการสึกหรอกว้าง 0.7 mm หนา 2.2 mm



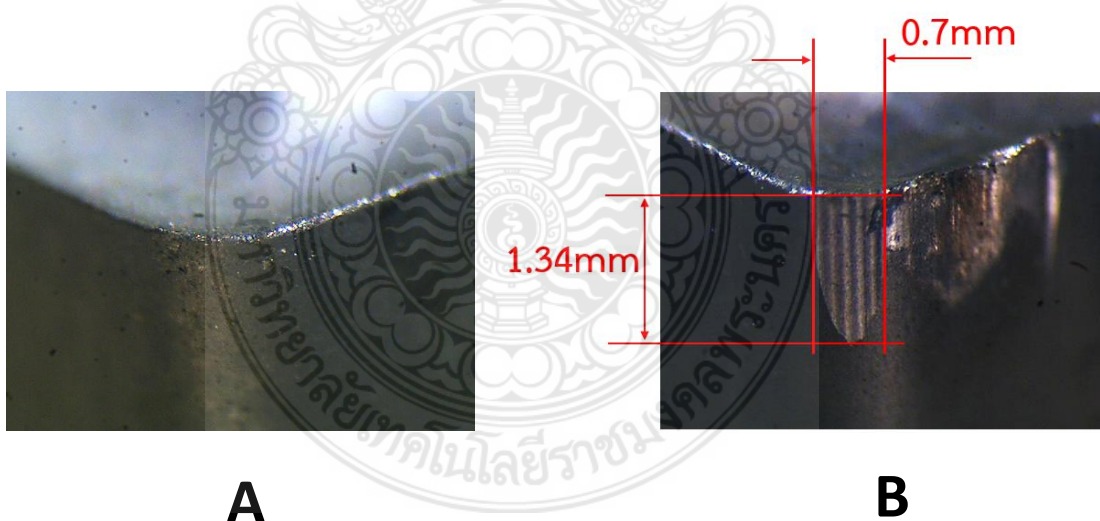
ภาพที่ 4.11 แสดงภาพด้านมุมคายเศษของแผ่นมิด WC การทดลองที่ 2 แสดงการเปรียบเทียบการสึกหรอก่อนและหลังการทดสอบกลึงด้วยเครื่องกลึงอัตโนมัติ (CNC)

จากภาพที่ 4.11 แสดงการเปรียบเทียบบริเวณมุมคายเศษโดยมิด A เป็นการถ่ายภาพก่อนการใช้งาน ภาพ B แสดงบริเวณมุมคายเศษของแผ่นมิดหลังใช้งาน มีขนาดการสึกหรอกว้าง 0.5 mm หนา 1.94 mm



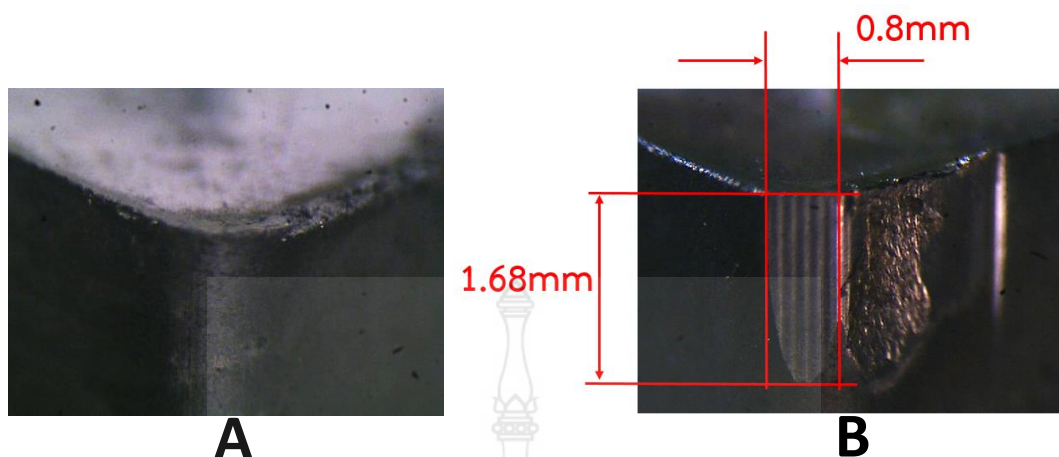
ภาพที่ 4.12 แสดงภาพด้านมุมคายเศษของแผ่นมิด WC การทดลองที่ 3 แสดงการเปรียบเทียบการสึกหรอก่อนและหลังการทดสอบกลึงด้วยเครื่องกลึงอัตโนมัติ (CNC)

จากภาพที่ 4.12 แสดงการเปรียบเทียบบริเวณมุมคายเศษโดยมิด A เป็นการถ่ายภาพก่อนการใช้งาน ภาพ B แสดงบริเวณมุมคายเศษของแผ่นมิดหลังใช้งาน มีขนาดการสึกหรอกว้าง 0.5 mm หนา 1.9 mm



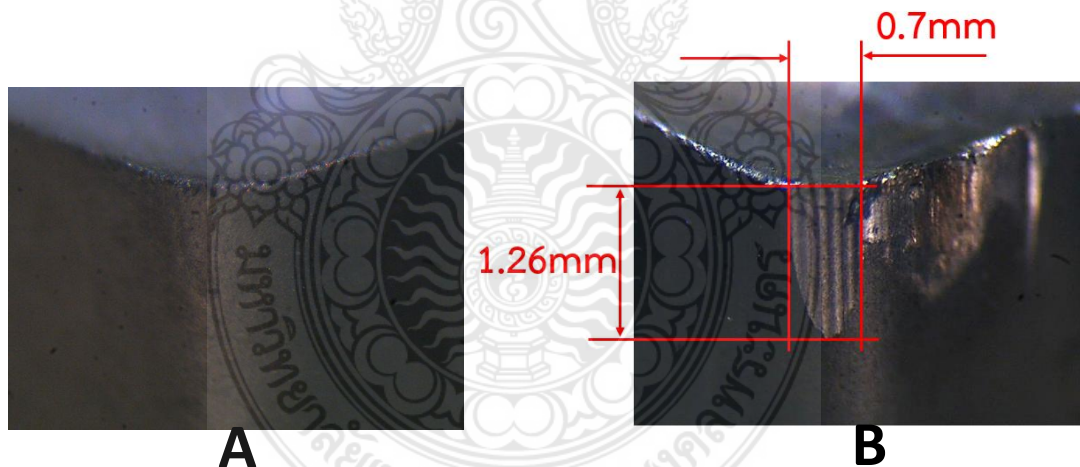
ภาพที่ 4.13 แสดงภาพด้านมุมปลายมิดของแผ่นมิด WC การทดลองที่ 1 แสดงการเปรียบเทียบการสึกหรอก่อนและหลังการทดสอบกลึงด้วยเครื่องกลึงอัตโนมัติ (CNC)

จากภาพที่ 4.13 แสดงการเปรียบเทียบบริเวณมุมปลายมิดโดยมิด A เป็นการถ่ายภาพก่อนการใช้งาน ภาพ B แสดงบริเวณมุมปลายมิดของแผ่นมิดหลังใช้งาน มีขนาดการสึกหรอกว้าง 0.7 mm หนา 1.34 mm



ภาพที่ 4.14 แสดงภาพด้านมุมปลายมีดของแผ่นมีด WC การทดลองที่ 2 แสดงการเปรียบเทียบการสึกหรอก่อนและหลังการทดสอบกลึงด้วยเครื่องกลึงอัตโนมัติ (CNC)

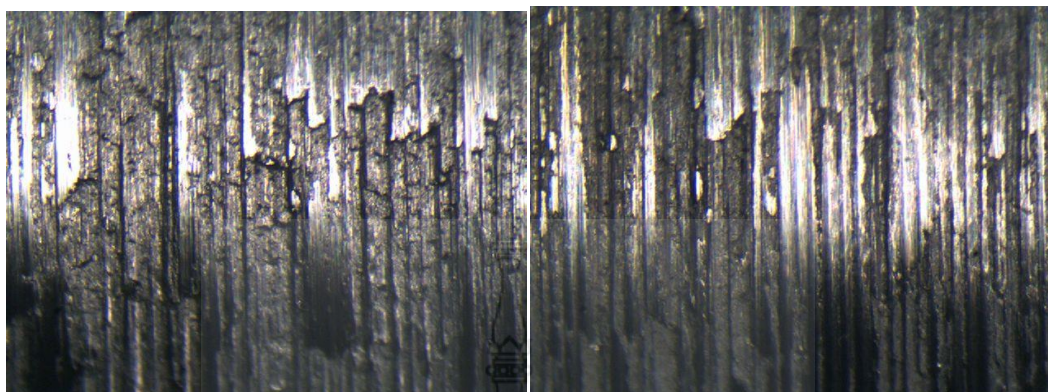
จากภาพที่ 4.14 แสดงการเปรียบเทียบบริเวณมุมปลายมีดโดยมีด A เป็นการถ่ายภาพก่อนการใช้งาน ภาพ B แสดงบริเวณมุมปลายมีดของแผ่นมีดหลังใช้งาน มีขนาดการสึกหรอกว้าง 0.8 mm หนา 1.68 mm



ภาพที่ 4.15 แสดงภาพด้านมุมปลายมีดของแผ่นมีด WC การทดลองที่ 3 แสดงการเปรียบเทียบการสึกหรอก่อนและหลังการทดสอบกลึงด้วยเครื่องกลึงอัตโนมัติ (CNC)

จากภาพที่ 4.15 แสดงการเปรียบเทียบบริเวณมุมปลายมีดโดยมีด A เป็นการถ่ายภาพก่อนการใช้งาน ภาพ B แสดงบริเวณมุมปลายมีดของแผ่นมีดหลังใช้งาน มีขนาดการสึกหรอกว้าง 0.7 mm หนา 1.26 mm

4.7 ผลการเปรียบเทียบลักษณะผิวกลิ้ง

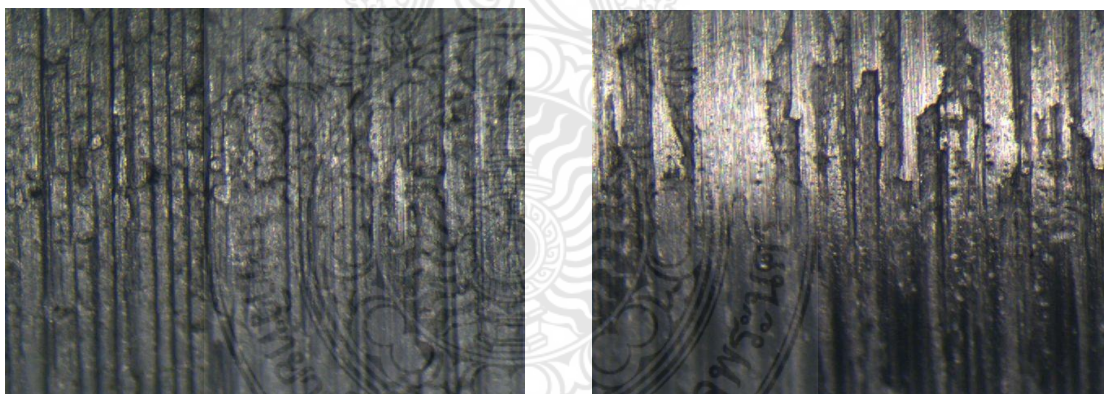


A

B

ภาพที่ 4.16 แสดงภาพผิวของชิ้นงานหลังการกลิ้งทดสอบด้วยแผ่นมีด WC การทดลองที่ 1

จากภาพที่ 4.16 แสดงภาพผิวของชิ้นงานเหล็กเกรด S45C หลังการกลิ้งทดสอบด้วยแผ่นมีด WC การทดลองที่ 1 ภาพ A แสดงระยะทางกลิ้ง 0-300 mm ภาพ B แสดงระยะทางกลิ้ง 1,500-1,530 mm พบว่าภาพ B มีความเรียบของผิวชิ้นงานมากกว่าภาพ A

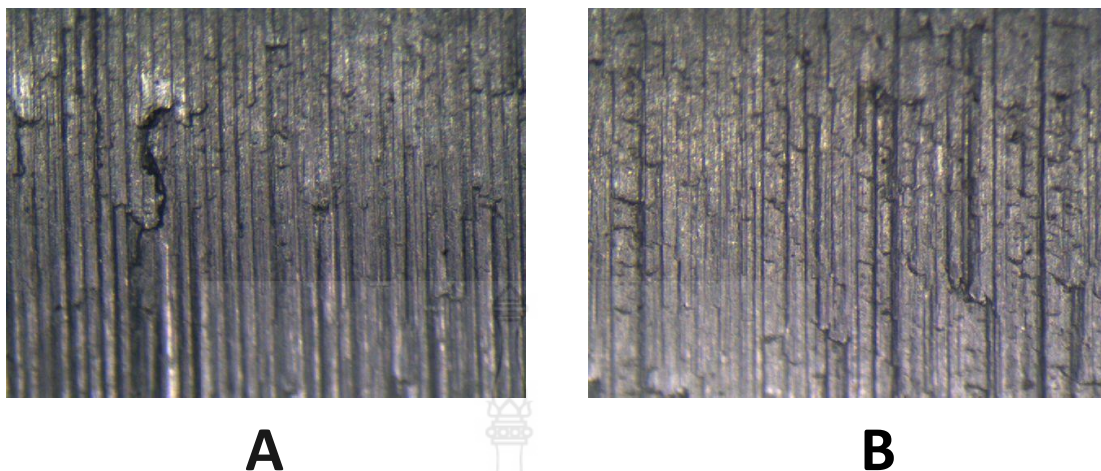


A

B

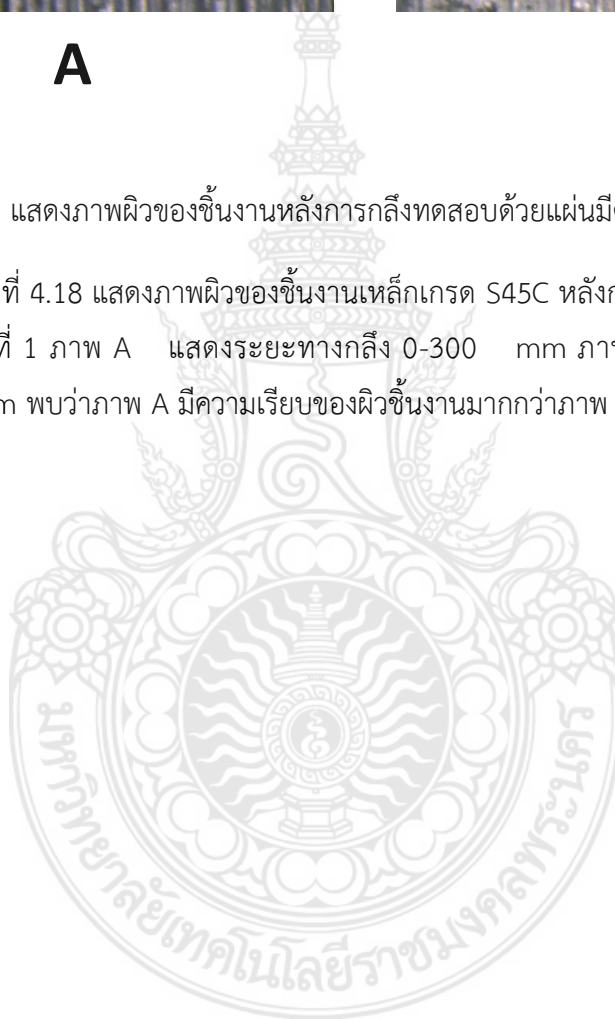
ภาพที่ 4.17 แสดงภาพผิวของชิ้นงานหลังการกลิ้งทดสอบด้วยแผ่นมีด WC การทดลองที่ 2

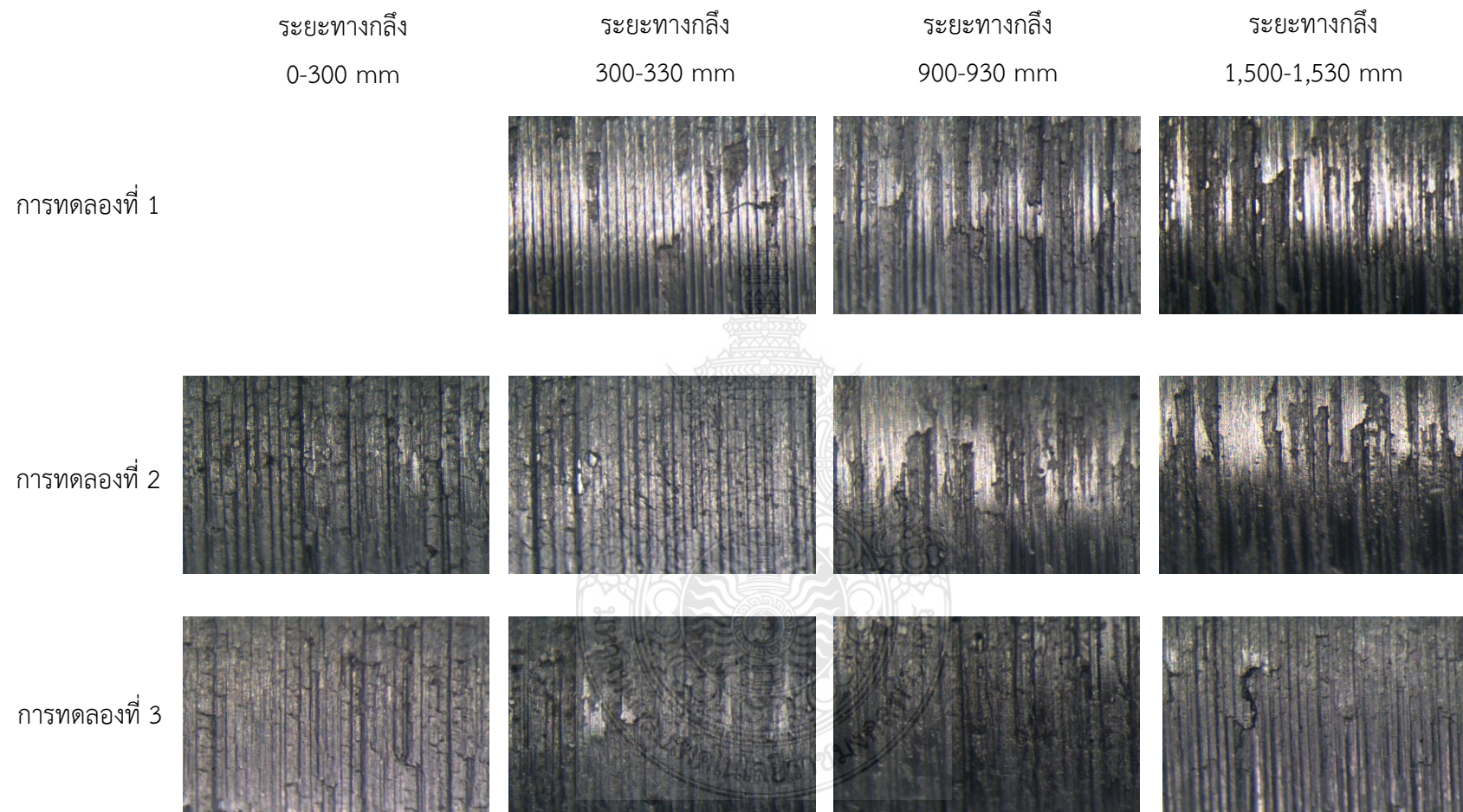
จากภาพที่ 4.17 แสดงภาพผิวของชิ้นงานเหล็กเกรด S45C หลังการกลิ้งทดสอบด้วยแผ่นมีด WC การทดลองที่ 1 ภาพ A แสดงระยะทางกลิ้ง 0-300 mm ภาพ B แสดงระยะทางกลิ้ง 1,500-1,530 mm พบว่าภาพ A มีความเรียบของผิวชิ้นงานมากกว่าภาพ B



ภาพที่ 4.18 แสดงภาพผิวของชิ้นงานหลังการกลึงทดสอบด้วยแผ่นมิด WC การทดลองที่ 3

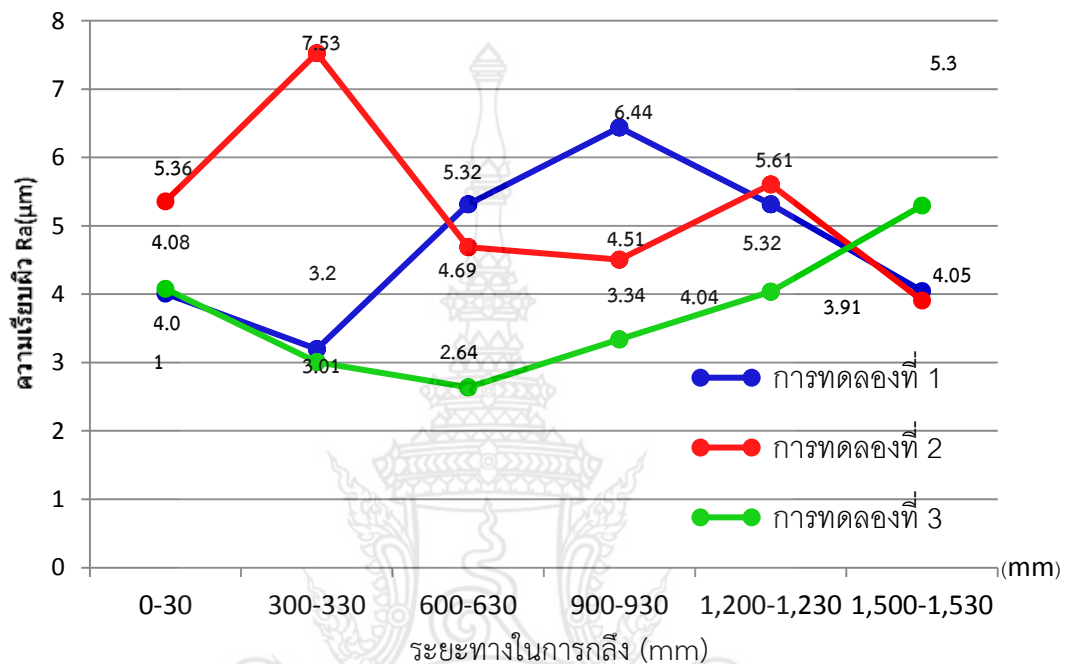
จากภาพที่ 4.18 แสดงภาพผิวของชิ้นงานเหล็กเกรด S45C หลังการกลึงทดสอบด้วยแผ่นมิด WC การทดลองที่ 1 ภาพ A แสดงระยะทางกลึง 0-300 mm ภาพ B แสดงระยะทางกลึง 1,500-1,530 mm พบว่าภาพ A มีความเรียบของผิวชิ้นงานมากกว่าภาพ B





ภาพที่ 4.19 แสดงการเปรียบเทียบความเรียบผิวชิ้นงาน

จากภาพที่ 4.19 แสดงความเรียบของผิวชิ้นงานที่ผ่านการกลึงทดสอบด้วยแผ่นมีด WC การทดลองที่ 1 การทดลองที่ 2 และการทดลองที่ 3 ต่อระยะทางในการกลึง 0-300 mm, 300-330 mm, และ 900-930 mm



ภาพที่ 4.20 แสดงให้เห็นความเรียบของพื้นผิวที่ได้จากการตรวจสอบความเรียบผิว กลึงชิ้นงานของทั้ง 3 การทดลอง

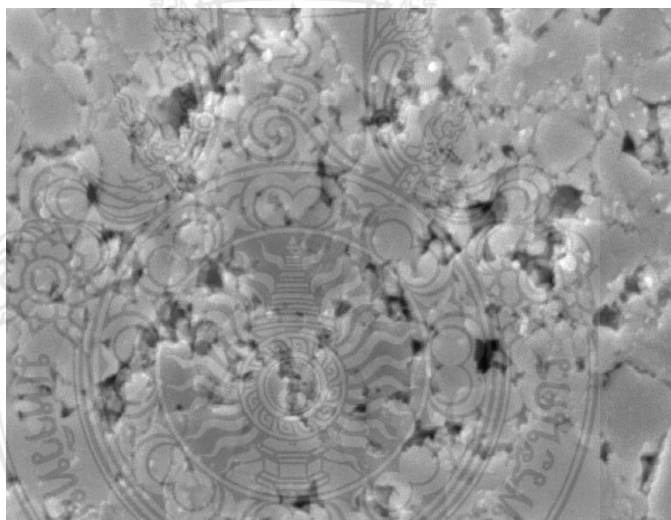
จากภาพที่ 4.20 แสดงกราฟความเรียบผิวชิ้นงานที่ได้จากการกลึงทดสอบด้วยแผ่นมีดกลึงทั้ง 3 การทดลอง พบว่าแผ่นมีดการทดลองที่ 1 มีค่าความหยาบผิวสูงสุด 6.44 Ra มีค่าความเรียบผิวสูงสุด 3.2 Ra แผ่นมีดการทดลองที่ 2 มีค่าความหยาบผิวสูงสุด 7.53 Ra มีค่าความเรียบผิวสูงสุด 4.05 Ra แผ่นมีดการทดลองที่ 3 มีค่าความหยาบผิวสูงสุด 5.3 Ra มีค่าความเรียบผิวสูงสุด 2.64 Ra

บทที่ 5

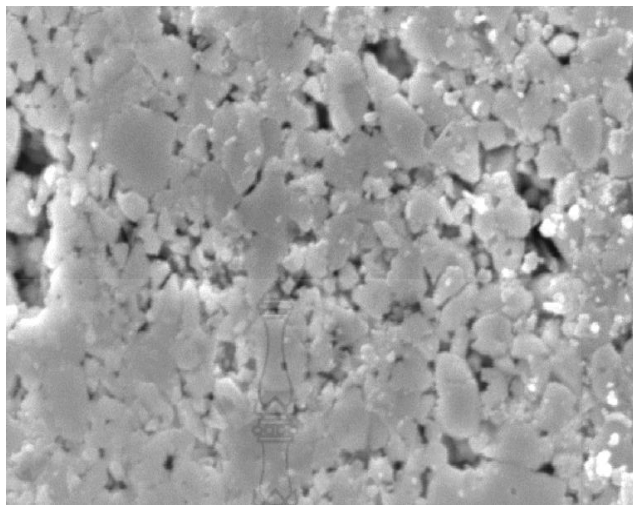
การอภิปรายผล

การพัฒนากระบวนการอบผนึกชิ้นงานความแข็งสูงพิเศษเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการต้านทานการสึกหรอ เพื่อศึกษาปัจจัยการผลิตและวิเคราะห์กระบวนการอบผนึก (Sintering) เพิ่มความแข็ง (Hardness) ของชิ้นงานซีเมนต์คาร์ไบด์จากโลหะผงทั้งสแตนคาร์ไบด์ที่ผลิตภายในประเทศ ปรากฏผลการวิจัยดังนี้

จากการวิเคราะห์คุณลักษณะของผงโลหะด้วยวิธีการ Scanning Electron Microscope (SEM) ของผงทั้งสแตนคาร์ไบด์ ที่ผ่านการบดละเอียด 100 ชั่วโมง ปรากฏว่า ผงทั้งสแตนคาร์ไบด์ที่มีขนาดเล็กที่สุด 0.2 ไมครอน ผงที่มีขนาดใหญ่ 3 ไมครอน ซึ่งรูปร่างค่อนข้างกลม



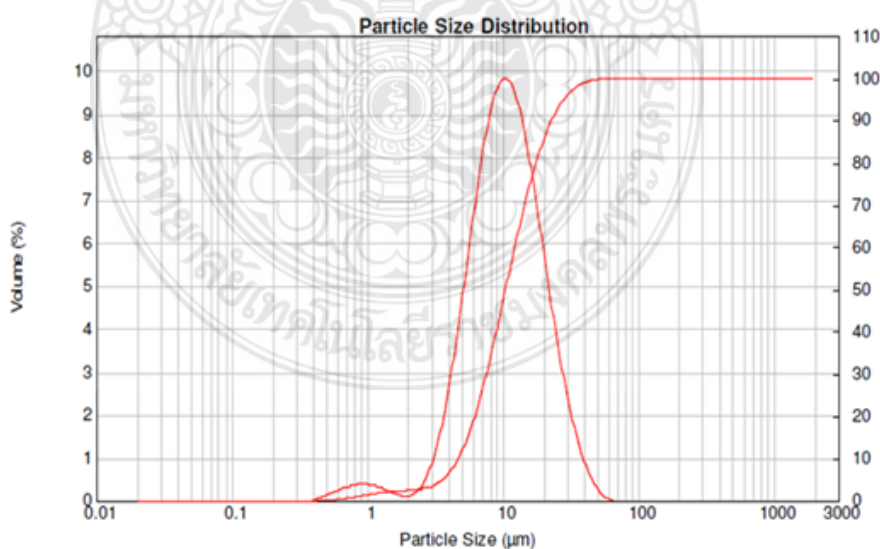
ภาพที่ 5.1 แสดงการวิเคราะห์คุณลักษณะของผงโลหะด้วยวิธีการ SEM



ภาพที่ 5.2 แสดงการวิเคราะห์คุณสมบัติของผงโลหะด้วยวิธีการ SEM
งานวิจัยของ Jing-Chie Lin, et al.,(1996) [15]

จากผลการวิเคราะห์คุณสมบัติของผงทั้งสแตนคาร์ไบด์ ด้วยวิธี XRF พบว่า ส่วนประกอบทางเคมีของ WC มีธาตุทั้งหมด 11 ธาตุ ได้แก่ อะลูมิเนียม ซิลิคอน คลอรีน ไทเทเนียม โครเมียม เหล็ก เซอร์โคเนียม ไนโอเบียม โมลิบดีนัม ทั้งสแตน แทนทาลัม WC มีธาตุทั้งหมด 11 ธาตุ ซึ่งตรงกับงานวิจัยของ M. Ohammand, et al.,(1980) [21]

จากผลการทดลองการกระจายตัวและขนาดอนุภาค (Particle Size Distribution) พบว่าอนุภาคผง WC มีขนาดอยู่ในช่วง 0.1-0.35 μm อนุภาคที่พบส่วนใหญ่มีขนาด 0.178 μm



ภาพที่ 5.3 แสดงการวิเคราะห์การกระจายตัวและขนาดอนุภาค
งานวิจัยของ B.F. Kieffer, et al., (1994) [19]

งานวิจัยของ B.F. Kieffer, et al., (1994) [19] แสดงผลการวิเคราะห์ขนาดและการกระจายของอนุภาคผงทังสเตนคาร์ไบด์ที่ผ่านการบดให้ละเอียดด้วยวิธี Ball Milling พบว่าขนาดผงโลหะมีขนาดเล็กถึงโดยมีขนาดอยู่ระหว่าง $0.30 - 60 \mu\text{m}$ โดยมีผงโลหะที่มีขนาดระหว่าง $0.30 - 2.00 \mu\text{m}$ เป็นกลุ่มผงโลหะอีกกลุ่มหนึ่งที่กระจายออกมา มีการแบ่งแยกอย่างชัดเจน ลักษณะการกระจายของผงโลหะทังสเตนคาร์ไบด์ เป็นแบบโค้งปกติ ในช่วง $0.30 - 2.00 \mu\text{m}$ เป็นกลุ่มผงโลหะขนาดเล็ก ช่วงที่มีขนาดระหว่าง $2.00 - 60.00 \mu\text{m}$ กระจายแบบโค้งปกติและจำนวนผงโลหะมากกว่า 50 % มีขนาดในช่วง $300 - 10,000 \text{ nm}$

จากผลการทดลองส่วนประกอบทางเคมีด้วยวิธี X-Ray Diffraction (XRD) พบว่า ผงโลหะเป็นทังสเตนคาร์ไบด์ สอดคล้องกับมาตรฐานของโลหะทังสเตนคาร์ไบด์ ใกล้เคียงกับงานวิจัยของ Madhavi Latha, et al., (1988) [22]

จากการทดสอบความแข็งของแผ่นมิดทังสเตนคาร์ไบด์ที่ผลิตจากผงโลหะ (WC) แต่ละจุดทดสอบผลปรากฏว่า การทดลองที่ 1 มีค่าความแข็งโดยเฉลี่ยที่ 1,358.6 HV การทดลองที่ 2 มีค่าความแข็งโดยเฉลี่ยที่ 1,346.3 HV การทดลองที่ 3 มีค่าความแข็งโดยเฉลี่ยที่ 1,399.5 HV ทดสอบความแข็งด้วยเครื่อง Vickers Hardness Test (HRV) [18]

จากการทดสอบระยะทางในการกลึงด้วยเครื่องกลึงอัตโนมัติ (CNC) พบว่า การทดลองที่ 1 มีค่าคลาดเคลื่อนจากการกลึงขั้นที่ 1-2 มีค่าคลาดเคลื่อน 0 mm จากการกลึงขั้นที่ 1-3 มีค่าคลาดเคลื่อน 0.02 mm จากการกลึงขั้นที่ 1-4 มีค่าคลาดเคลื่อน 0.04 mm จากการกลึงขั้นที่ 1-5 มีค่าคลาดเคลื่อน 0.08 mm จากการกลึงขั้นที่ 1-7 มีค่าคลาดเคลื่อน 0.08 mm [16] การทดลองที่ 2 มีค่าคลาดเคลื่อนจากการกลึงขั้นที่ 1-2 มีค่าคลาดเคลื่อน 0 mm จากการกลึงขั้นที่ 1-3 มีค่าคลาดเคลื่อน 0 mm จากการกลึงขั้นที่ 1-4 มีค่าคลาดเคลื่อน 0.02 mm จากการกลึงขั้นที่ 1-5 มีค่าคลาดเคลื่อน 0.08 mm จากการกลึงขั้นที่ 1-7 มีค่าคลาดเคลื่อน 0.10 mm [20] การทดลองที่ 3 มีค่าคลาดเคลื่อนจากการกลึงขั้นที่ 1-2 มีค่าคลาดเคลื่อน 0 mm จากการกลึงขั้นที่ 1-3 มีค่าคลาดเคลื่อน 0 mm จากการกลึงขั้นที่ 1-4 มีค่าคลาดเคลื่อน 0.02 mm จากการกลึงขั้นที่ 1-5 มีค่าคลาดเคลื่อน 0.10 mm จากการกลึงขั้นที่ 1-7 มีค่าคลาดเคลื่อน 0.12 mm [17]

บทที่ 6

สรุปผลการวิจัย

การวิจัยการพัฒนาระบวนการอบผนึกชิ้นงานความแข็งสูงพิเศษเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการต้านทานต่อการสึกหรอ เพื่อศึกษาปัจจัยการผลิตและวิเคราะห์กระบวนการอบผนึก (sintering) เพิ่มความแข็ง (hardness) ของชิ้นงานซีเมนต์คาร์ไบด์จากโลหะผงทั้งสแตนคาร์ไบด์ที่ผลิตภายในประเทศ และพัฒนาชิ้นงานอบผนึกโลหะทั้งสแตนคาร์ไบด์ตามแนวทางการส่งเสริมอุตสาหกรรมอย่างยั่งยืน จากการศึกษาการทดลองวิเคราะห์และสรุปผลได้ดังนี้

จากการบดละเอียดผงทั้งสแตนคาร์ไบด์ด้วยเครื่อง Ball Milling เป็นเวลา 100 ชั่วโมง ได้ขนาดผงเฉลี่ย 0.178 μm ทำให้แผ่นมีดทั้งสแตนคาร์ไบด์ที่ได้ มีโครงสร้างเล็ก สม่ำเสมอและมีประสิทธิภาพตรงตามมาตรฐาน

ส่วนผสมในการสร้างแผ่นมีดทั้งสแตนคาร์ไบด์ประกอบด้วยผงทั้งสแตนคาร์ไบด์ ที่ได้จากการผลิตเฉลี่ย 90 % โคบอลต์ 8 % และวัตถุประสานชั่วคราวพาราฟินแว็กซ์ 2% ใช้รอบในการบดผสม 150 rpm/min อุณหภูมิในการอบผนึก 1,400 – 1,500 $^{\circ}\text{C}$

การอัดขึ้นรูปแผ่นมีดทั้งสแตนคาร์ไบด์โดยใช้แรงกด 110 MPa และการอบผนึกช่วงอุณหภูมิที่ต่างกันทั้งสามช่วงอุณหภูมิ ได้แผ่นมีดทั้งสแตนคาร์ไบด์ที่มีความแข็งเทียบเท่าหรือมากกว่าแผ่นมีดทั้งสแตนคาร์ไบด์มาตรฐาน

การทดสอบความแข็งเม็คมีดทั้งสแตนคาร์ไบด์ ได้ค่าความแข็งสูงสุดที่ 1,399.5 HV ตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคพบว่าเกรนหรือโครงสร้างมีขนาดเล็กและสม่ำเสมอ กัน จากโครงสร้างที่มีขนาดเล็ก สม่ำเสมอกันจะทำให้ เม็ดมีดทั้งสแตนคาร์ไบด์ที่ได้มีค่าความแข็งสูงและค่าความต้านทานการสึกหรอเพิ่มขึ้น สามารถนำไปใช้งานได้จริง

ดังนั้นสรุปได้ว่า การพัฒนาระบวนการอบผนึกชิ้นงานความแข็งสูงพิเศษเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการต้านทานต่อการสึกหรอตามแนวทางการจัดการวัสดุเพื่อความยั่งยืน สามารถผลิตชิ้นงานความแข็งสูงพิเศษทั้งสแตนคาร์ไบด์เป็นชิ้นงานต้นแบบ เนื่องจากใช้วัตถุดิบที่ผลิตเอง โดยวัดจากอุณหภูมิที่เหมาะสมของกรรมวิธีการอบผนึก เวลาในการอบผนึก กระบวนการขั้นตอนการอบผนึก ความแข็งของแผ่นมีด เป็นต้น การพัฒนาระบวนการอบผนึกเป็นองค์ความรู้ใหม่ในการผลิตชิ้นงานทั้งสแตนคาร์ไบด์เพื่อสนับสนุนการผลิตในอุตสาหกรรมเป็นการใช้ประโยชน์ในการพัฒนาผลิตภัณฑ์ร่วมกับภาคอุตสาหกรรมในประเทศต่อไปและเป็นการพัฒนาต่อยอดการผลิตชิ้นงานทั้งสแตนคาร์ไบด์ที่ใช้ประโยชน์ได้จริงอย่างยั่งยืนนำไปสู่แนวทางการพัฒนาอย่างยั่งยืนต่อไป

บรรณานุกรม

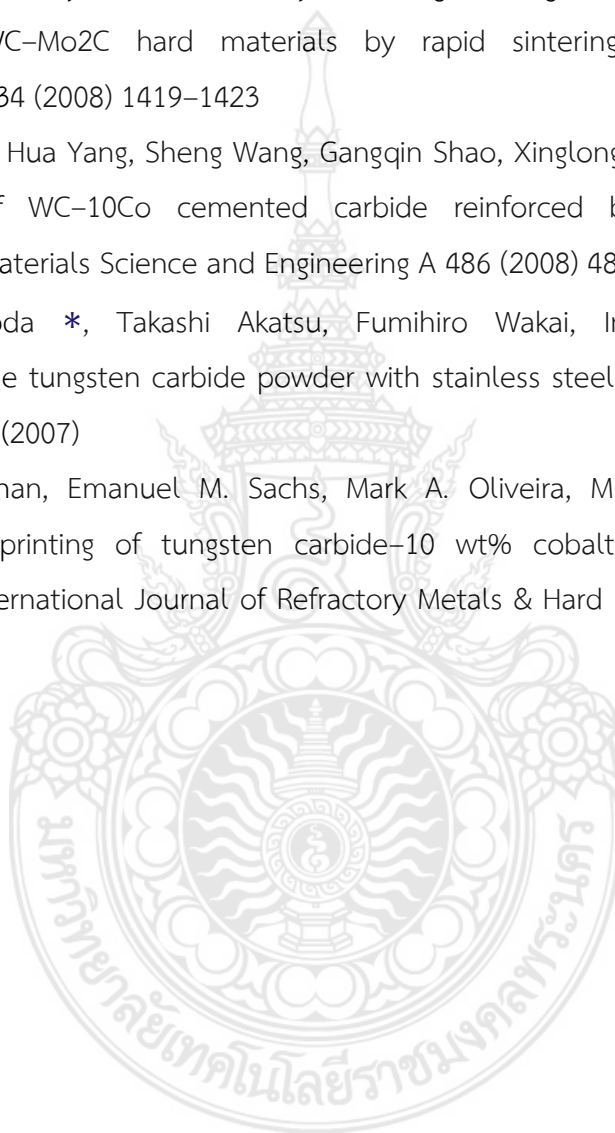
- [1] Liu Sha, Huang Ze-Lan, Liu Gang, Yang Gui-Bin, Preparing nano-crystalline rare earth doped WC/Co powder by high energy ball milling. *International Journal of Refractory Metals & Hard Materials* 24 (2006) : 461–464
- [2] J.C. Kim, B.K. Kim, Synthesis of nanosized tungsten carbide powder by the chemical vapor condensation process. *Scripta Materialia* 50 (2004) 969–972
- [3] M. Zakeri, Effect of cup and ball types on alumina–tungsten carbide nanocomposite powder synthesized by mechanical alloying, *Advanced Powder Technology*, 2010,
- [4] Erik Lassner and Wolf-Dieter Schubert, *Tungsten Properties, Chemistry, Technology, of the Element, Alloy and Chemical Compounds*. Vienna,Austria,1999
- [5] Kieffer, B.F. and Lassner, E. *Tungsten Recycling in Todays Environment*. Canada : Canadian Agriculture Library, 1994.
- [6] Gerald R. Smith , *Materials Flow of Tungsten in the United State*. Bureau of mines information circular, 1994
- [7] 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.
- [8] Jing-Chie Lin, Jain-Yuan Lin, Shie-Peir Jou. Selective dissolution of the cobalt binder From scrap of cemented tungsten carbide in acids containing additives. *Hydrometallurgy* 1996; 43:47-61.
- [9] 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.
- [10] Junya Kano, Eiko Kobayashi, William Tongamp, Shoko Miyagi, Fumio Saito. Reduction of WO_3 to W-metal by mechanochemical reaction. *Journal of Alloys and Compounds*2009; 480:666-669.
- [11] 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.
- [12] 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.

- [13] 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.
- [14] Richard S. Polizzotti, Milford; Larry E. McCandlish, Highland Park, both of N.J., U.S. Pat. 4,851,041(1989)
- [15] 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
- [16] C. Edtmaier, R. Schiesser, C. Meissl, W.D. Schubert, A. Bock, A. Schoen, B. Zeiler. Selective removal of the cobalt binder in WC/Co based hardmetal scraps by acetic acid leaching. Vienna, Austria, 2005
- [17] T. KOJIMA, T. SHIMIZU, R. SASAI, H. ITOH, Recycling process of WC-Co cermets by hydrothermal treatment, Nagoya, 2005, 5167-5172
- [18] J.C. Lin, J.Y. and Lee S.L., "Process for Recovering Tungsten Carbide from Cemented Carbide Scraps by Selective Electrolysis", US Patent, 5,384,016, 1995.
- [19] B.F. Kieffer and E. Lassner. Tungsten recycling in today environment. United State, 1994
- [20] Clarence D. Vanderpool, Tai K. Kim, Electrolytic Method for Producing Ammonium Paratungstate from Cemented Tungsten Carbide, US Patent, 5,021,133, 1991
- [21] M ohammad H. Ghandehari, Salt Lake City, Utah ; Mortimer Schussler, Process for recovering metal carbide powder from cemented carbide, US. Patent, 4,234,333, 1980
- [22] T. MADHAVI LATHA, S. VENKATACHALAM. Electrolytic Recovering of Tungsten and Cobalt from Tungsten Carbide Scrap. *Hydrometallurgy*, 1988
- [23] Erik Lassner and Wolf-Dieter Schubert, "Tungsten Properties, Chemistry, Technology of the Element, Alloys, and Chemical Compounds", Kluwer academic/Plenum Publishers, New York, 233 Spring Street, N.Y. 10013, 1999
- [24] M. OZBAYRAK, A. K. TURKER and R. BELL : Recycling of cutting tools in flexible manufacturing systems, *Computer integrated manufacturing*, 2003, vol. 16, no. 6, 409-427.

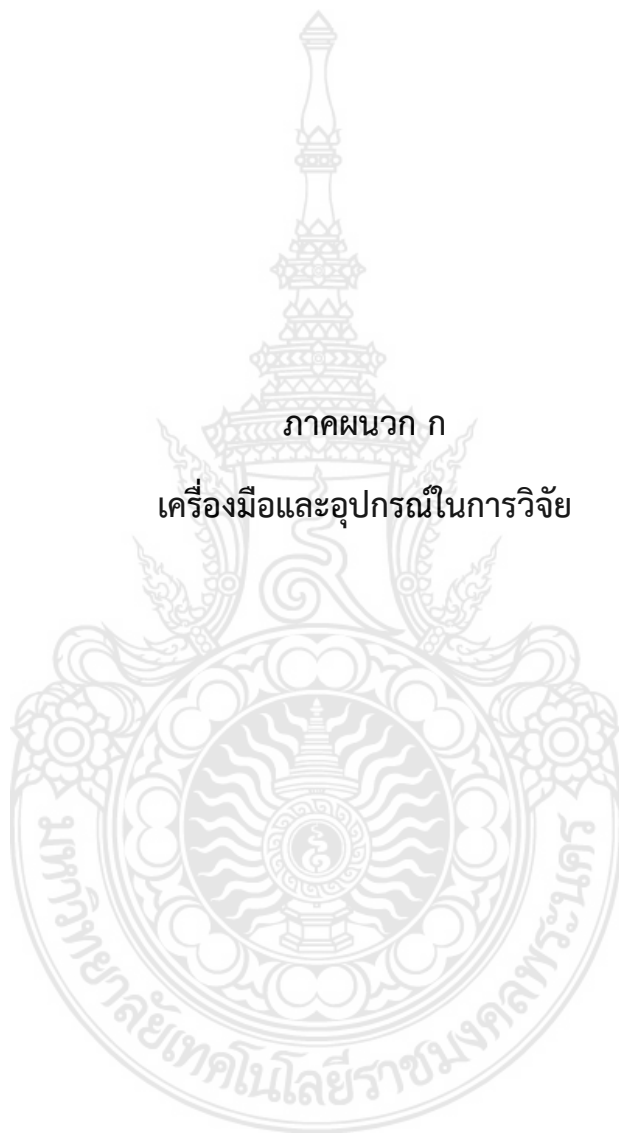
- [25] Kim B. Shedd : Cobalt Recycling in the United states in 1998 ,U.S.Department of the interior, U.S. Geological survey,Open file Report 2002-229,
- [26] สหรัตน์ วงษ์ศรีษะและคณะ การพัฒนาชิ้นส่วนเครื่องมือวัสดุผงอัดขึ้นรูปที่ผ่านการใช้งานกลับมาใช้ใหม่ (Recycling of tools scrap) สถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร ปี พ.ศ.2552
- [27] S. Olovsj, A. Wretland, G. Sj berg, The effect of grain size and hardness of wrought Alloy 718 on the wear of cemented carbide tools, Department of Materials and Manufacturing Technology, Chalmers University of Technology, 41296 Goteborg, Sweden, Wear 268 (2010) 1045–1052
- [28] F.J.J. Kellner, H. Hildebrand, S. Virtanen, Effect of WC grain size on the corrosion behavior of WC–Co based hardmetals in alkaline solutions, Int. Journal of Refractory Metals & Hard Materials, (2009) 806–812
- [29] V.N. Gaitonde , S.R. Karnik , Luis Figueira , J. Paulo Davim, Machinability investigations in hard turning of AISI D2 cold work tool steel with conventional and wiper ceramic inserts, Int. Journal of Refractory Metals & Hard Materials 27 (2009) 754–763
- [30] 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
- [31] Stephen A. Hewitt *, Kevin A. Kibble, Effects of ball milling time on the synthesis and consolidation of nanostructured WC–Co composites, Int. Journal of Refractory Metals & Hard Materials 27 (2009) 937–948
- [32] T.V. SreeramaReddy, T. Sornakumar, M. VenkataramaReddy, R. Venkatram , Machinability of C45 steel with deep cryogenic treated tungsten carbide cutting tool inserts, Int. Journal of Refractory Metals & Hard Materials 27 (2009) 181–185
- [33] 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
- [34] 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.

- [35] E.O. Correa, J.N. Santos, A.N. Klein, Microstructure and mechanical properties of WC Ni–Si based cemented carbides developed by powder metallurgy, *Int. Journal of Refractory Metals and Hard Materials* (2010)
- [36] Hwan-Cheol Kim, Hyun-Kuk Park, In-Kyoon Jeong, In-Yong Ko, In-Jin Shon, Sintering of binderless WC–Mo₂C hard materials by rapid sintering process, *Ceramics International* 34 (2008) 1419–1423
- [37] XiaoLiang Shi, Hua Yang, Sheng Wang, Gangqin Shao, Xinglong Duan, Fabrication and properties of WC–10Co cemented carbide reinforced by multi-walled carbon nanotubes, *Materials Science and Engineering A* 486 (2008) 489–495
- [38] Yutaka Shinoda *, Takashi Akatsu, Fumihiro Wakai, Integrated molding of nanocrystalline tungsten carbide powder with stainless steel, *Materials Science and Engineering B* (2007)
- [39] 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



ภาคผนวก ก
เครื่องมือและอุปกรณ์ในการวิจัย





ภาพที่ ก.1 ช้อนสแตนเลส



ภาพที่ ก.2 เครื่องชั่งน้ำหนักความละเอียด 0.0001 g



ภาพที่ ก.3 เครื่องชั่งน้ำหนักความละเอียด 0.01 g



ภาพที่ ก.4 เอทานอล ความบริสุทธิ์ 99.8%



ภาพที่ ก.5 เครื่องกลึง Mori Seiki รุ่น SL-3



ภาพที่ ก.6 ตะแกรงกรองผงขนาด 100 μm



ภาพที่ ก.7 ถุงมือป้องกันสารเคมี



ภาพที่ ก.8 ปีกเกอร์ที่ใช้ในการทดลอง



ภาพที่ ก.9 เตาไฟฟ้าขนาดอุณหภูมิ 28-500 °C



ภาพที่ ก.10 หลอดดูดสารละลาย



ภาพที่ ก.11 เครื่องบดละเอียดผงโลหะ



ภาพที่ ก.12 ถ้วยเซรามิกทนความร้อนอุณหภูมิ 1,200 °C



ภาพที่ ก.13 เตาอบผนึกความร้อนสูง



ภาพที่ ก.14 ตะแกรงขนาด 50 μm

ภาคผนวก ข

สถานที่ในการดำเนินโครงการ



ข.1 สถานที่ในการดำเนินโครงการ

ข.1.1 ห้องปฏิบัติการผลิตโลหะทั้งสแตนคาร์ไบด์ สาขาวิศวกรรมการจัดการอุตสาหกรรมเพื่อความยั่งยืน คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

ข.1.2 อาคารวัสดุศาสตร์ ห้อง 809 คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ถนนพญาไท เขตปทุมวัน กรุงเทพมหานคร 10330 โทรศัพท์ติดต่อ 02-2185541 มือถือ 086-9905200 E-mail: thanakorn.w@chula.ac.th ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธนากร วาสนาเพียรพงศ์ เพื่อนำโลหะผงทั้งสแตนคาร์ไบด์ไปทำการอบ โดยตู้อบยี่ห้อ Binder, Model: FD53/E2 s/n: 03-48539

ข.1.3 ห้องปฏิบัติการวิเคราะห์เชิงฟิสิกส์ หน่วยวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะของวัสดุ ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ อุทยานวิทยาศาสตร์ประเทศไทย ถนนพหลโยธิน ตำบลคลองหนึ่ง อำเภอคลองหลวง จังหวัดปทุมธานี 12120 โทรศัพท์ติดต่อ 02-5646500 โทรสาร 02-5646501-5 เพื่อทดสอบโลหะผงทั้งสแตนคาร์ไบด์วิเคราะห์โครงสร้าง และสารประกอบในตัวอย่างด้วยเครื่อง X-Ray Diffractometer (XRD) เทคนิคที่ใช้วิเคราะห์คือ X-Ray Diffraction

ข.1.4 ฝ่ายนวัตกรรมวัสดุ สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย (วว.) 35 หมู่ 3 เทคโนโลยีธานี ตำบลคลองห้า อำเภอคลองหลวง จังหวัดปทุมธานี 12120 โทรศัพท์ติดต่อ 02-5779000 โทรสาร 02-5779009 เพื่อทดสอบโลหะผงทั้งสแตนคาร์ไบด์โดยวัดการกระจายตัวของขนาดอนุภาค ด้วยเทคนิค Particle Size Distribution, Malvern: Mastersizer 2000

ข.1.5 อาคารสำนักพัฒนาอุตสาหกรรมรายสาขา ชั้น 1 สถาบันเหล็กและเหล็กกล้าแห่งประเทศไทย ซอยตรีมิตร ถนนพระราม 4 แขวงพระโขนง เขตคลองเตย กรุงเทพมหานคร 10110 โทรศัพท์ติดต่อ 02-7136290 ต่อ 130 โทรสาร 02-7136293-4 เพื่อทดสอบโลหะผงทั้งสแตนคาร์ไบด์โดยการตรวจสอบรูปร่างด้วยกล้องจุลทรรศน์ Scanning Electron Microscope (SEM) รุ่น JEOL JSM-6380LV และตรวจสอบส่วนประกอบทางเคมีด้วยเครื่อง X-Ray Fluorescence Spectrometer (XRF) รุ่น AXIOS

ข.1.6 บริษัท อาร์ เอส คาร์ไบด์ โปรดักต์ จำกัด 58/5 หมู่ 9 ตำบลไร่เชิง อำเภอสามพราณ จังหวัดนครปฐม 73210 โทรศัพท์ติดต่อ 02-4205112 เพื่อทำการอัดขึ้นรูปและอบผืน

ข.1.7 บริษัท มานะกิจ ปริซึชั่น จำกัด 1448 ม.8 ซอยสามมิตรเจริญ ถนนเทพารักษ์ อำเภอเมือง จังหวัดสมุทรปราการ 10270 โทรศัพท์ติดต่อ 02-3853528 เพื่อทำการกลึงทดสอบแผ่นมีดทั้งสแตนคาร์ไบด์

ประวัติคณะผู้วิจัย

หัวหน้าโครงการ

1. ชื่อ – นามสกุล (ภาษาไทย) นายสหรัตน์ วงษ์ศรีษะ
(ภาษาอังกฤษ) Mr. Saharat Wongsisa
2. หมายเลขประจำตัวประชาชน 3 4410 000 76 23 8
3. ตำแหน่งบริหาร/วิชาการ ที่เป็นปัจจุบัน ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ระดับ 8
4. หน่วยงานและสถานที่ที่ติดต่อได้สะดวก พร้อมหมายเลขโทรศัพท์ โทรสาร และ e-mail
สาขาวิชาวิศวกรรมการจัดการอุตสาหกรรมเพื่อความยั่งยืน คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
1381 ถ.พิบูลสงคราม แขวงบางซื่อ เขตบางซื่อ กรุงเทพฯ 10800
โทรศัพท์ : 081-8891409 , 02-9132424 ต่อ 4175
โทรสาร : 02-9132424 ต่อ 4175
E-mail : saharat_w@hotmail.com
5. ประวัติการศึกษา
 - ระดับปริญญาโท วศ.ม. วิศวกรรมการผลิต 2541
 - ระดับปริญญาตรี วศ.บ. วิศวกรรมอุตสาหการ 2546
 - ระดับปริญญาตรี คอ.บ. วิศวกรรมอุตสาหการ 2531
6. สาขาวิชาที่มีความชำนาญพิเศษ (แตกต่างจากวุฒิการศึกษา) ระบุสาขาวิชา
 - สาขาการออกแบบและพัฒนาผลิตภัณฑ์ทางวิศวกรรม อาทิ การออกแบบผลิตภัณฑ์เครื่องมือตัด (Design Of Cutting tool products)
 - สาขาวิศวกรรมการจัดการอุตสาหกรรมเพื่อความยั่งยืน

ผู้ร่วมวิจัย

1. ชื่อ – นามสกุล (ภาษาไทย) นายประสิทธิ์ แพงเพชร
(ภาษาอังกฤษ) Mr. Prasit Pangpech
2. หมายเลขประจำตัวประชาชน 5 6505 900 09 17 1
3. ตำแหน่งบริหาร/วิชาการ ที่เป็นปัจจุบัน
อาจารย์ ระดับ 6
4. หน่วยงานและสถานที่ติดต่อได้สะดวก พร้อมหมายเลขโทรศัพท์ โทรสาร และ e-mail
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
1381 ถ.พิบูลสงคราม แขวงบางซื่อ เขตบางซื่อ กรุงเทพฯ 10800
โทรศัพท์ : 02-9132424
โทรสาร : 02-5859175
5. ประวัติการศึกษา
 - ระดับปริญญาโท วศ.ม. วิศวกรรมการจัดการอุตสาหกรรม 2548
 - ระดับปริญญาตรี วศ.บ. วิศวกรรมอุตสาหการ 2545
 - ระดับปริญญาตรี คอ.บ. วิศวกรรมอุตสาหการ 2538
6. สาขาวิชาที่มีความชำนาญพิเศษ (แตกต่างจากวุฒิการศึกษา) ระบุสาขาวิชา
 - การผลิตชิ้นส่วนงานความเที่ยงตรงสูง (High precision) ความสามารถในการใช้เครื่องมือทดสอบและการตรวจสอบชิ้นส่วนความเที่ยงตรงสูง อาทิ เครื่องมือวัดละเอียด การผลิตด้วยเครื่องจักรกลอัตโนมัติ (CNC) ได้แก่ การกลึง เจาะ กัด และการเจียรระโน
 - การพัฒนาชิ้นส่วนความเที่ยงตรงสูงในงานเครื่องมือกล (Machine tools)
 - การทดสอบและตรวจสอบคุณภาพชิ้นงานความเที่ยงตรงสูง