

รายงานวิจัย

เรื่อง

การพัฒนาผลิตภัณฑ์จากเศษทั้งสแตนคาร์ไบด์กลับมาใช้ใหม่
Product Development of Tungsten Carbide scraps

คณะผู้ทำวิจัย

1. นายสหรัตน์ วงษ์ศรีษะ
2. นายสิงห์แก้ว ปือกเท็ง
3. นายคมพันธ์ ชมสมุทร
4. นายประสิทธิ์ แพงเพชร

รายงานวิจัยนี้เป็นการวิจัยสาขาวิชาการ กลุ่ม สาขาวิศวกรรมศาสตร์และอุตสาหกรรมวิจัย

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

ปีการศึกษา 2552



งานวิจัยเรื่อง การพัฒนาผลิตภัณฑ์จากเศษทั้งสแตนคาร์ไบด์กลับมาใช้ใหม่

หัวหน้าโครงการวิจัย ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สหรัตน์ วงษ์ศรีษะ

ผู้ร่วมวิจัย นายสิงห์แก้ว ปือกเท็ง
นายคมพันธ์ ชมสมุทร
นายประสิทธิ์ แพงเพชร

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

ปีงบประมาณ 2552

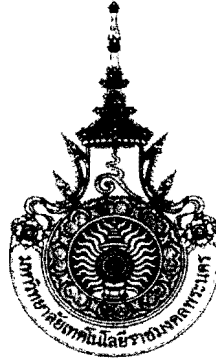
บทคัดย่อ

รายงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาแนวทางเพื่อการผลิตชิ้นงานโลหะแข็ง (Hard materials part) ด้วยการใช้วัตถุดิบชนิดผงโลหะทั้งสแตนคาร์ไบด์ (tungsten carbide powder) ผ่านการ recycled จากเศษโลหะ (Tungsten scraps) ซึ่งเป็นเศษแผ่นมีด (insert tools scraps) เป็นวัสดุเหลือใช้ (waste) จากกระบวนการตัดปาดผิว (metal removal process) หรือ ผ่านการใช้งานด้านเครื่องมือกล (machining on machine tools) เป็นการผลิตโลหะผง (Metal powder) ด้วยกรรมวิธีการ recovery ซีเมนต์คาร์ไบด์ (cemented carbide) ให้เป็นผงโลหะทั้งสแตนคาร์ไบด์ แล้วนำกลับมาใช้ใหม่ ในงานทดลองของการวิจัยนี้ จึงเริ่มจากการผลิตวัตถุดิบผงทั้งสแตนคาร์ไบด์บริสุทธิ์ เพื่อนำไปผลิตชิ้นงานความแข็งสูง (hard metal part) โดยศึกษาความเป็นไปได้ในการผลิตเป็นชิ้นส่วนทนการสึกหรอ หรือชิ้นส่วนโลหะแข็ง (hard materials) โดยเตรียมผงโลหะด้วยการ บด (pulverized) การผสม (mixed) กับโลหะประสานโคบอลต์ (Co Binder) ในสัดส่วนไม่เกิน 17 % อัดขึ้นรูปด้วยแรงอัด 300 MPa และอบผืน (sintering) ที่อุณหภูมิ 1430 องศาเซลเซียส ให้เป็นชิ้นงาน (Cemented carbide part) ชนิด แผ่น

มีด(insert tools) รูปทรงสี่เหลี่ยม มาตรฐาน SNMG 120408 สำหรับใช้ในงานกลึงปอกผิว(Turning) ชิ้นงานโลหะ ผลการผลิตปรากฏว่าแผ่นมีด(insert tools) มีความแข็งประมาณ 1,385 HV ความหนาแน่น 13.45 g/cm³ จากนั้นนำไปทดลองกลึง(machining) ชิ้นงานทดลอง(specimens) ชนิดเหล็กกล้า AISI 1045 ปรากฏว่า แผ่นมีด(Insert tools) ที่พัฒนาขึ้นสามารถตัดปาดผิว(Machining) โดยกลึงปอกผิวชิ้นงานให้ได้ขนาดเทียบเท่าแผ่นมีดนำเข้าได้ดี สรุปได้ว่าการผลิตชิ้นงานแผ่นมีด ทั้งสแตนคาร์ไบด์จากวัสดุ recycled นั้น มีสมบัติด้านความแข็ง(Hardening properties) เทียบเท่าสินค้านำเข้า และเป็นผลงานวิจัยที่พัฒนาขึ้นมาใหม่ในประเทศ เพื่อเป็นแนวทางสำหรับการผลิตสินค้า(Cutting tools product) ชนิดดังกล่าวแทนการนำเข้าต่อไป

คำสำคัญ(Key word) Recycling, Tungsten powder, Cemented tungsten carbide, Sintering, Hard materials





Research title **Product Development of Tungsten Carbide scraps**

Researcher by **Asst.Prof Saharat Wongsisa**

Mr. Singkaew Pokterng

Mr. Kompun Chomsamut

Faculty of Engineering

Rajamangala University of Technology Phra nakon

Abstract

This research is to study the approach for producing the hard materials part by using tungsten carbide powder. The tungsten carbide powder derived from Tungsten scraps recycle processes which are Insert tools scraps, the waste of metal removal process, or derived from usage of machining on machine tools which are the production of metal powder by recovering cemented carbide to tungsten carbide powder and bring it to recycle. The first experiment of this research starts with the production of pure tungsten carbide powder in order to produce the hard metal part how to possibly produce the durable part or hard materials. Preparing tungsten carbide powder which pulverized and mixed with Cobalt co-binder less than 17%, so that molding with the pressure 300 Mpa and sintering at 1430 degree Celsius to the cemented carbide part in Insert tools type, rectangle, SNMG standard 120408 for turning. The result is found that the Insert tools have hardness about 1,385 HV and density 13.45 g/cm³ and then, they are tested to machine specimens in AISI 1045 type. The developed Insert tools can be machining metal removal them as well as the imported Insert tools. It is concluded that the production of Insert tools by recycling of tungsten carbide is qualified as the imported Insert tools. In addition, it is the new developed

research in Thailand to be the approach for domestic cutting tools product instead of the imported cutting tools.

Key word : Recycling, Tungsten powder, Cemented tungsten carbide, Sintering, Hard materials



สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ	
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	
กิตติกรรมประกาศ	
สารบัญรูปภาพ	
สารบัญตาราง	
สัญลักษณ์	
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	5
1.3 ขอบเขตของการวิจัย	5
1.4 ประโยชน์ที่ได้รับจากการทำวิจัย	7
1.5 วิธีวิจัย	8
1.6 การเตรียมงานและการวิจัย	9
1.7 กระบวนการและเวลาดำเนินการ	10
1.8 เครื่องมือและอุปกรณ์	11
1.9 สถานที่ทำวิจัย	13
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย	
2.1 บทนำ	14
2.2 โลหะทังสเตน (Tungsten)	14
2.3 โลหะกรรมวัสดุผง (Powder Metallurgy)	24
2.4 การขึ้นรูปชิ้นงานซีเมนต์ทังสเตนคาร์ไบด์	91
2.5 การกลึง (Turning Operation)	95
2.6 มาตรฐานแผ่นมีดอินเสิร์ต	121
2.7 เหล็กกล้า	125

สารบัญภาพ (ต่อ)

	หน้า
ภาพที่ 2.54 การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของรูพรุนตามปริมาณการอบผนึ่ง	82
ภาพที่ 2.55 การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของรูพรุนขณะอบผนึ่ง	83
ภาพที่ 2.56 การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคของพัลลาเดียมขณะการอบผนึ่ง	83
ภาพที่ 2.57 ลำดับการแยกตัวออกของรูพรุนในขั้นตอนสุดท้ายการอบผนึ่ง	84
ภาพที่ 2.58 ลักษณะที่เป็นได้สองแบบของรูพรุน และขอบเกรนในขณะอบผนึ่ง	85
ภาพที่ 2.59 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของเวลาและอุณหภูมิในการอบผนึ่ง	87
ภาพที่ 2.60 กระบวนการผลิตชิ้นงานทั้งสแตนคาร์ไบด์	94
ภาพที่ 2.61 แสดงถึงองค์ประกอบสำหรับการกลึง	95
ภาพที่ 2.62 แสดงปัจจัยที่สำคัญทั้งหมดที่ใช้ในงานกลึงปอกด้วยมีดกลึงอินเสิร์ต	96
ภาพที่ 2.63 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วตัด/เวลาทำงาน	99
ภาพที่ 2.64 Monograph สำหรับหาความเร็วตัดในการกลึงงานด้วยมีดกลึงคาร์ไบด์	101
ภาพที่ 2.65 แสดงลักษณะการตัดเฉือนงานบนเครื่องกลึง	106
ภาพที่ 2.66 แสดงส่วนต่างๆของมีดกลึง	108
ภาพที่ 2.67 แสดงคมตัดและการเกิดเศษ	109
ภาพที่ 2.68 ภาพถ่ายเนื้อวัสดุที่ถูกตัดเฉือน	110
ภาพที่ 2.69 แสดงทิศทางของความเร็วในระนาบตัดขวาง (V_c , V_s)	111
ภาพที่ 2.70 แสดงการเกิดการเกาะติดของเศษที่ปลายคมตัด (BUE)	114
ภาพที่ 2.71 การสึกหรอของมีดตัด	114
ภาพที่ 2.72 แสดงการสึกหรอบริเวณผิวหกลบ (Flank Wear)	116
ภาพที่ 2.73 แสดงการสึกหรอแบบ (Crater Wear)	117
ภาพที่ 2.74 แสดงการสึกหรอแบบรอยบาก (Notch Wear)	117
ภาพที่ 2.75 แสดงการสึกหรอแบบการหลอมตัวของเครื่องมีดตัด (Plastic Deformation)	118
ภาพที่ 2.76 แสดงการสึกหรอแบบการแตกร้าวเนื่องจากอุณหภูมิ (Thermal cracking)	118

สารบัญภาพ (ต่อ)

	หน้า
ภาพที่ 2.77 แสดงการสึกหรอแบบการแตกร้าวเนื่องจากความล้า (Mechanical Fatigue Crack)	119
ภาพที่ 2.78 แสดงการสึกหรอแบบ (Chipping of the Cutting Edge)	119
ภาพที่ 2.79 แสดงการสึกหรอแบบการสะสมของเศษวัสดุที่คมตัด (Build up edge)	120
ภาพที่ 2.80 แสดงรหัสแผ่นมีดบริษัท KYOCERA มาตรฐาน ISO	122
ภาพที่ 2.81 ประเภทการทำงานแผ่นมีดกลึงปอก	123
ภาพที่ 2.82 แสดงสัญลักษณ์ลักษณะสำหรับสภาพการทำงานที่เหมาะสมของแผ่นมีด	123
ภาพที่ 2.83 แสดงสัญลักษณ์ลักษณะสำหรับสภาพการทำงานทั่วไปของแผ่นมีด	124
ภาพที่ 2.84 แสดงสัญลักษณ์ลักษณะสำหรับสภาพการทำงานที่ยากต่อการตัดเฉือน	124
ภาพที่ 2.85 แสดงรหัสตามมาตรฐาน ISO ของชนิดวัสดุงานสำหรับเกรดแผ่นมีด	124
ภาพที่ 2.86 Part of the Iron-Carbon Thermal-Equilibrium Diagram	127
ภาพที่ 2.87 โครงสร้างเหล็กกล้าคาร์บอนปานกลาง (S45C)	128
ภาพที่ 2.88 การทดสอบแบบ Brinell	130
ภาพที่ 2.88 ลักษณะการทดสอบแบบ Brinell ที่ไม่ถูกต้อง	131
ภาพที่ 2.89 ลักษณะรอยกดจากหัวเพชรของ Vickers Hardness Test	133
ภาพที่ 2.91 แสดงลักษณะผลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง SEM	141
ภาพที่ 3.1 แผนผังการดำเนิน โครงการวิจัย	143
ภาพที่ 3.2 กราฟเปรียบเทียบค่าความแข็งของชิ้นงานกับปริมาณของส่วนผสมของผง โคบอลต์ ของบริษัท Allegheny Technologies จากกราฟขนาดเกรนผงทั้งสแตนคาร์ไบด์ 3 ไมครอน	158
ภาพที่ 3.3 กราฟเปรียบเทียบค่าความแข็งของชิ้นงานกับปริมาณของส่วนผสมของผง โคบอลต์ ของบริษัท Betek Progress.	159
ภาพที่ 3.4 กราฟเปรียบเทียบค่าความแข็งของชิ้นงานกับขนาดเกรนของทั้งสแตนคาร์ไบด์ ของบริษัท Osram Sylvania	160
ภาพที่ 3.5 แผนผังการผลิตชิ้นงานทั้งสแตนคาร์ไบด์สำเร็จรูป	161

สารบัญภาพ (ต่อ)

	หน้า
ภาพที่ 3.6 แผนผังรายละเอียดการทดลองและจำนวนชิ้นงานที่ใช้การทดลอง	162
ภาพที่ 3.7 อุปกรณ์ในการแยกเศษชิ้นงานทั้งสแตนคาร์ไบด์	163
ภาพที่ 3.8 แผนผังการแยกสลายชิ้นงานทั้งสแตนคาร์ไบด์	164
ภาพที่ 3.9 ชิ้นงานทั้งสแตนคาร์ไบด์ก่อนการแยกสลาย	165
ภาพที่ 3.10 ทำความสะอาดชิ้นงานไม่ให้มีสิ่งปนเปื้อน	166
ภาพที่ 3.11 ตรวจสอบน้ำหนักเศษชิ้นงานทั้งสแตนคาร์ไบด์ก่อนการแยกสลาย	166
ภาพที่ 3.12 ติดตั้งชิ้นงานกับอุปกรณ์จับยึด	167
ภาพที่ 3.13 ติดตั้งแท่งทั้งสแตนบริสุทธ์เข้ากับอุปกรณ์จับยึด	167
ภาพที่ 3.14 วางตำแหน่งของชิ้นงานที่แยกกับแท่งทั้งสแตนบริสุทธ์	168
ภาพที่ 3.15 เทสารละลายไฮดรอกซิดคลอไรด์ที่ใช้ในการเติม	168
ภาพที่ 3.16 การต่อวงจรโดยให้ชิ้นงานที่แยกสลายและแท่งทั้งสแตนบริสุทธ์	169
ภาพที่ 3.17 ให้ความร้อนกับสารละลายไฮโดรคลอริก	169
ภาพที่ 3.18 แหล่งจ่ายที่ใช้ในการกักความร้อน โดยตั้งค่าแรงดันและกระแสไฟฟ้า	170
ภาพที่ 3.19 วัดค่าแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าทุก 5 นาที	170
ภาพที่ 3-20 ปฏิกิริยาของสารละลายเกิดฟองอากาศเมื่อได้รับแรงดันและกระแสไฟฟ้า	171
ภาพที่ 3.21 กรดเริ่มเปลี่ยนเป็นสีเขียวอ่อนและเดือดที่ขั้วไฟฟ้าทั้ง 2 ขั้ว ทำการวัดอุณหภูมิ	171
ภาพที่ 3.22 เติมสารละลายไฮโดรคลอริกทุกๆ 20 นาที	172
ภาพที่ 3.23 ชิ้นงานทั้งสแตนคาร์ไบด์ที่ถูกกักความร้อน	172
ภาพที่ 3.24 นำสารละลายที่กักความร้อนตั้งทิ้งไว้ให้เย็นตัวและตกตะกอน	173
ภาพที่ 3.25 แยกสารละลายกรดไฮโดรคลอริกออกจากผงโลหะ	173
ภาพที่ 3.26 ใส่แอลกอฮอล์แล้วต้มให้แห้ง	174
ภาพที่ 3.27 ลักษณะของผงทั้งสแตนที่ได้จากการผ่านกระบวนการแยกสลาย	174
ภาพที่ 3.28 แผนผังขั้นตอนการอัดขึ้นรูปชิ้นงานทั้งสแตนคาร์ไบด์	175

สารบัญภาพ (ต่อ)

	หน้า
ภาพที่ 3.29 ภาพขณะใส่ผงทั้งสเตนคาร์ไบด์ 83 % ผสมผงโคบอลต์ 17% ที่นำเข้ามา จากต่างประเทศ	176
ภาพที่ 3.30 ผงทั้งสเตนคาร์ไบด์ที่ได้จากการแยกสลาย	177
ภาพที่ 3.31 ชั่งน้ำหนักผงทั้งสเตนคาร์ไบด์ที่นำเข้ามาจากต่างประเทศถูละ 106.5 กรัม จำนวน 6 ถู	177
ภาพที่ 3.32 ชั่งน้ำหนักผงทั้งสเตนคาร์ไบด์ที่นำเข้ามาจากต่างประเทศถูละ 96กรัม จำนวน 3 ถู	178
ภาพที่ 3.33 ชั่งน้ำหนักผงทั้งสเตนคาร์ไบด์ที่ได้จากการแยกสลายถูละ 10.5 กรัม จำนวน 3 ถู	178
ภาพที่ 3.34 อุปกรณ์การผสมผงทั้งสเตนคาร์ไบด์กับตัวประสานโพลีไวนิลแอลกอฮอล์	179
ภาพที่ 3.35 ปริมาณตัวประสานโพลีไวนิลแอลกอฮอล์ที่ใช้ผสมผงทั้งสเตนคาร์ไบด์ 2 ซีซี.	179
ภาพที่ 3.36 ผสมผงทั้งสเตนคาร์ไบด์ที่นำเข้ามาจากต่างประเทศกับตัวประสาน	180
ภาพที่ 3.37 ผสมผงทั้งสเตนคาร์ไบด์ที่นำเข้ามาจากต่างประเทศและผงทั้งสเตนคาร์ไบด์ที่ได้ จากการแยกสลายกับตัวประสานโพลีไวนิลแอลกอฮอล์	180
ภาพที่ 3.38 เครื่องมืออัดขึ้นรูปผลิตชิ้นงานทั้งสเตนคาร์ไบด์	181
ภาพที่ 3.39 แม่พิมพ์ชิ้นงานที่ทำการอัดขึ้นรูป	181
ภาพที่ 3.40 หัวกดอัดขึ้นรูปชิ้นงาน	182
ภาพที่ 3.41 แรงอัดที่ใช้ 14 ตัน และเวลาที่อัดขึ้นงาน 30 วินาทีต่อชิ้น	182
ภาพที่ 3.42 นำผงทั้งสเตนคาร์ไบด์ที่นำเข้ามาจากต่างประเทศที่ผสมตัวประสาน โพลีไวนิลแอลกอฮอล์ใส่ลงไปแม่พิมพ์	183
ภาพที่ 3.43 เครื่องกำลังทำการอัดขึ้นรูปชิ้นงาน	183
ภาพที่ 3.44 ชิ้นงานทั้งสเตนคาร์ไบด์ที่ได้จากการอัดขึ้นรูป	184
ภาพที่ 3.45 นำชิ้นงานที่ได้ใส่ถุงปิดให้สนิทป้องกันอากาศเข้าวางไว้บนโต๊ะ	184
ภาพที่ 3.46 นำชิ้นงานใส่ลงภาชนะที่ปิดสนิทวางลงที่ฟองน้ำเพื่อป้องกันการกระแทก	185

สารบัญภาพ (ต่อ)

	หน้า
ภาพที่ 3.47 เตรียมชิ้นงานทั้งสแตนคาร์ไบด์ที่ได้ไปอบผืนึก	185
ภาพที่ 3.48 แผนผังการอบผืนึก	186
ภาพที่ 3.49 กราฟแสดงความสัมพันธ์อุณหภูมิกับเวลาการอบผืนึก	187
ภาพที่ 3.50 เครื่องอบผืนึก	188
ภาพที่ 3.51 จุดใส่ชิ้นงานทั้งสแตนคาร์ไบด์ที่จะอบผืนึก	189
ภาพที่ 3.52 ด้านข้างเครื่องอบผืนึกชิ้นงานทั้งสแตนคาร์ไบด์	189
ภาพที่ 3.53 สถานที่จัดวางถังก๊าซไนโตรเจนที่ใช้สำหรับปกคลุมชิ้นงานทั้งสแตนคาร์ไบด์ ในการอบผืนึก	190
ภาพที่ 3.54 หน้าจอควบคุมอุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการอบผืนึก	190
ภาพที่ 3.55 แผนผังการทดสอบและวิเคราะห์ชิ้นงาน	191
ภาพที่ 3.56 เครื่องมือวิเคราะห์ขนาดและการกระจายตัว	193
ภาพที่ 3.57 การวิเคราะห์ขนาดและการกระจายตัว	193
ภาพที่ 3.58 เครื่องมือวิเคราะห์ความหนาแน่นผงทั้งสแตนคาร์ไบด์	194
ภาพที่ 3.59 เครื่องมือวิเคราะห์รูปร่างผงทั้งสแตนคาร์ไบด์ (SEM)	194
ภาพที่ 3.60 เครื่องมือวิเคราะห์ส่วนผสมผงทั้งสแตนคาร์ไบด์ (XRD)	195
ภาพที่ 3.61 เครื่องมือวิเคราะห์ความแข็งของชิ้นงาน	195
ภาพที่ 3.62 เครื่องมือวิเคราะห์ส่วนผสมของชิ้นงาน	196
ภาพที่ 3.63 เครื่องมือวิเคราะห์เกรนโลหะของชิ้นงาน	196
ภาพที่ 3.64 เครื่องมือวิเคราะห์ความแข็งของชิ้นงาน	197
ภาพที่ 3.65 การวิเคราะห์ความแข็งของชิ้นงาน	197
ภาพที่ 3.66 เครื่องมือวิเคราะห์เกรนโลหะของชิ้นงาน (SEM)	198
ภาพที่ 3.67 นำชิ้นงานทั้งสแตนคาร์ไบด์เข้าเครื่องวิเคราะห์เกรนโลหะของชิ้นงาน	198
ภาพที่ 4.1 แผนภูมิแสดงขั้นตอนดำเนินโครงการงาน	200
ภาพที่ 4.2 ความถี่ของของรูปทรง ความแข็งแรง และต้นทุนของแผ่นมีด	203

สารบัญภาพ (ต่อ)

	หน้า
ภาพที่ 4.3 รูปทรงทางเรขาคณิตและลักษณะการใช้งานของแผ่นมีด	203
ภาพที่ 4.4 แสดงความสามารถของรูปทรงทางเรขาคณิตแผ่นมีดกลึงปอก	204
ภาพที่ 4.5 รูปทรงทางเรขาคณิตแผ่นมีดกลึงปอกทรง S (Square)	211
ภาพที่ 4.6 แบบและขนาดของแผ่นมีดที่นำเข้ารหัส SNMG 120408 ที่ทำการการตรวจสอบ	213
ภาพที่ 4.7 กระบวนการผลิตชิ้นงานซีเมนต์ทั้งสแตนคาร์ไบด์	215
โครงสร้างจุลภาค และสมบัติเชิงกลของคาร์ไบด์	
ภาพที่ 4.8 ผลการวิเคราะห์จากเครื่อง SEM ที่กำลังขยาย 5000 เท่า	220
ภาพที่ 4.9 ผลการวิเคราะห์จากกล้อง SEM ที่กำลังการขยาย 10000 เท่า	220
ภาพที่ 4.10 การผลิตแผ่นมีดซีเมนต์ทั้งสแตนคาร์ไบด์	223
ภาพที่ 4.11 ผงทั้งสแตนคาร์ไบด์ (WC) 83 % ผสมกับผงโคบอลต์ (Co) 17 %	224
ภาพที่ 4.12 วัสดุประสานชนิด Paraffin wax	224
ภาพที่ 4.13 ชั่งน้ำหนักโลหะผงและวัสดุประสาน	225
ภาพที่ 4.14 ผสมโลหะผงด้วยแผ่นให้ความร้อน (Hot pate) โดยใช้อุณหภูมิ	225
50 องศาเซลเซียส ในบีกเกอร์	
ภาพที่ 4.15 บดโลหะผงด้วยเครื่องบด (Ball Mill) เป็นเวลา 24 ชั่วโมง	226
ภาพที่ 4.16 ร้อนแยกโลหะผงกับลูกบด โดยใช้ตะแกรง	226
ภาพที่ 4.17 เครื่องวิเคราะห์การกระจายตัวของผงโลหะ	226
ภาพที่ 4.18 เครื่องอัดขึ้นรูปด้วยระบบไฮดรอลิกส์	227
ภาพที่ 4.19 เครื่องอบผึ่งชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการอัด	227
ภาพที่ 4.20 กราฟแสดงขั้นตอนการอบผึ่ง	228
ภาพที่ 4.21 แผ่นมีดซีเมนต์ทั้งสแตนคาร์ไบด์ที่ทำการผลิต	229
ภาพที่ 4.22 เครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM)	229
ภาพที่ 4.23 ทดสอบความแข็งของแผ่นมีดด้วยเครื่อง Hardness Vickers Test	230
ภาพที่ 4.24 เครื่องกลึง CNC รุ่น MAZAK 15 M	230

สารบัญภาพ (ต่อ)

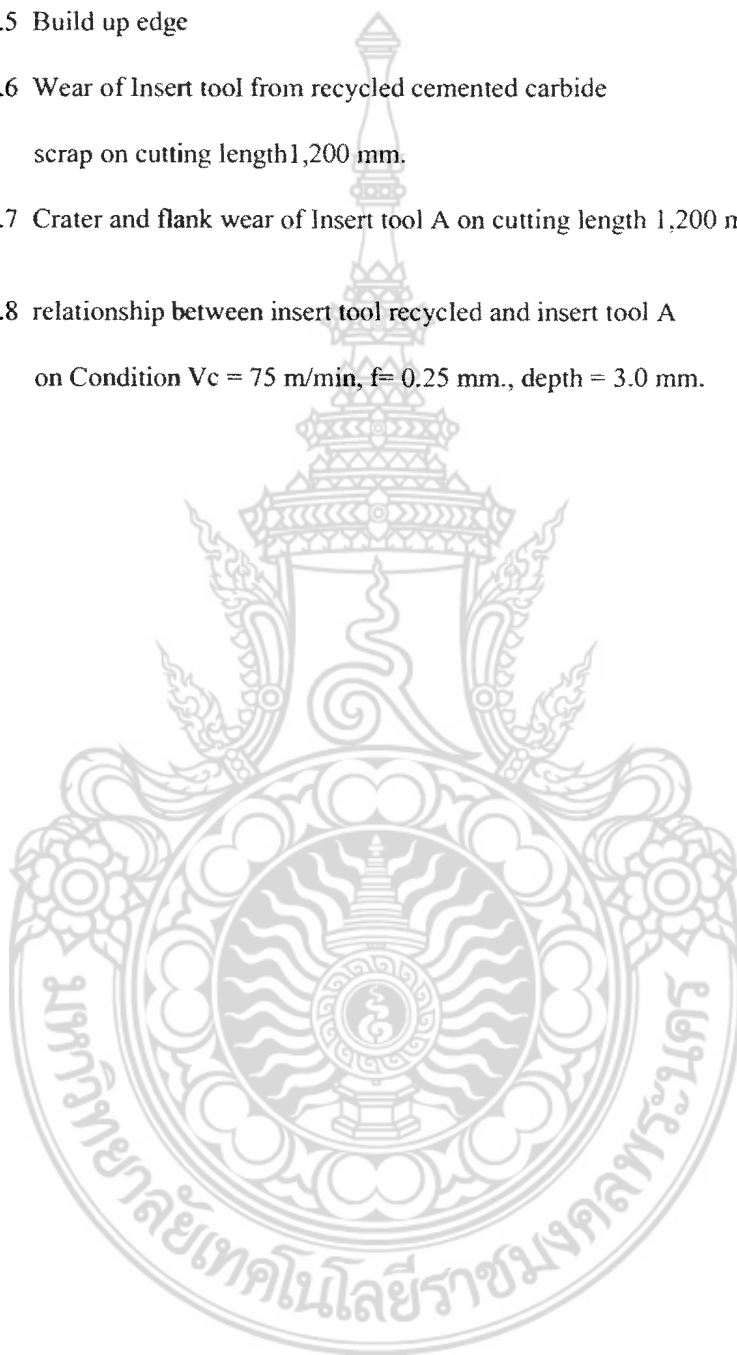
	หน้า
ภาพที่ 5.8 ผลการทดสอบรูปร่างผงทั้งสเดนคาร์ไบด์นำเข้าจากต่างประเทศด้วยเครื่อง SEM กำลังขยาย 1000 เท่า	249
ภาพที่ 5.9 กราฟแสดงค่าความแข็งชิ้นงานแบบ A ตามช่วงอุณหภูมิที่กำหนด	252
ภาพที่ 5.10 กราฟแสดงกราฟสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งชิ้นงานทั้งสเดนคาร์ไบด์ส่วนผสม โคบอลต์ 17% กับช่วงอุณหภูมิที่ใช้ในการอบผนิก	253
ภาพที่ 5.11 กราฟแสดงค่าความแข็งชิ้นงานแบบ B ตามช่วงอุณหภูมิที่กำหนด	253
ภาพที่ 5.12 กราฟแสดงค่าความแข็งสูงสุดของชิ้นงานที่ทำการผลิตกับชิ้นงานผู้อื่นผลิต	254
ภาพที่ 5.13 เกรนโลหะชิ้นงานทั้งสเดนคาร์ไบด์ (WC 68.5%) (Ti,Ta,Na 21%) Co 9.5% กำลังขยาย 1000 เท่า	255
ภาพที่ 5.14 เกรนโลหะชิ้นงานทั้งสเดนคาร์ไบด์ผสมโคบอลต์ 17 % นำเข้าจาก ต่างประเทศอบผนิกที่ อุณหภูมิ 1450 °C กำลังขยาย 1000 เท่า	255
ภาพที่ 5.15 เกรนโลหะชิ้นงานผงทั้งสเดนคาร์ไบด์นำเข้าจากต่างประเทศอบผนิกที่ อุณหภูมิ 1350 °C	256
ภาพที่ 5.16 เกรนโลหะชิ้นงานผงทั้งสเดนคาร์ไบด์นำเข้าจากต่างประเทศผสม ผงทั้งสเดนคาร์ไบด์ที่แยกเศษ 10 % อบผนิกที่อุณหภูมิ 1350 °C	256
ภาพที่ 5.17 เกรนโลหะชิ้นงานผงทั้งสเดนคาร์ไบด์นำเข้าจากต่างประเทศอบผนิกที่ อุณหภูมิ 1400 °C	257
ภาพที่ 5.18 เกรนโลหะชิ้นงานผงทั้งสเดนคาร์ไบด์นำเข้าจากต่างประเทศผสมผง ทั้งสเดนคาร์ไบด์ที่แยกสลาย 10 % อบผนิกที่อุณหภูมิ 1400 °C	257
ภาพที่ 5.19 เกรนโลหะชิ้นงานผงทั้งสเดนคาร์ไบด์นำเข้าจากต่างประเทศอบผนิกที่ 1450 °C	258
ภาพที่ 5.20 เกรนโลหะชิ้นงานผงทั้งสเดนคาร์ไบด์นำเข้าจากต่างประเทศผสม ผงทั้งสเดนคาร์ไบด์ที่แยกสลาย 10 % อบผนิกที่อุณหภูมิ 1450 °C	258
ภาพที่ 6.1 แสดงลักษณะการกระจายตัวของโลหะผงภายหลังการผสมเป็นเวลา 12 ชั่วโมง	260
ภาพที่ 6.2 แสดงลักษณะการกระจายตัวของโลหะผงภายหลังการผสมเป็นเวลา 24 ชั่วโมง	261

สารบัญภาพ (ต่อ)

	หน้า
ภาพที่ 6.3 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค ของแผ่นมิดซีเมนต์ทั้งสแตนคาร์ไบด์ที่ผลิตขึ้น	262
ภาพที่ 6.4 โครงสร้างจุลภาค ของแผ่นมิดซีเมนต์ทั้งสแตนคาร์ไบด์ที่ผลิตขึ้นด้วยเครื่อง Scanning Electron Microcroscope (SEM) ที่กำลังการขยาย 3500 เท่า	262
ภาพที่ 6.5 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค ของแผ่นมิดซีเมนต์ทั้งสแตนคาร์ไบด์นำเข้า	263
ภาพที่ 6.6 โครงสร้างจุลภาค ของแผ่นมิดซีเมนต์ทั้งสแตนคาร์ไบด์ที่นำเข้า ด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) ที่กำลังการขยาย 3500 เท่า	263
ภาพที่ 6.7 ความแข็งของแผ่นมิดซีเมนต์ทั้งสแตนคาร์ไบด์ที่ผลิตขึ้นและนำเข้า	264
ภาพที่ 6.8 แรงในการตัดเฉือนของแผ่นมิดขณะทำการกลึงทดสอบ	265
ภาพที่ 6.9 ผลการเปรียบเทียบน้ำหนักที่หายไปสะสมของแผ่นมิดภายหลังการทดสอบ	266
ภาพที่ 6.10 ลักษณะคมตัดก่อนทำการทดสอบ ของแผ่นมิดซีเมนต์คาร์ไบด์ นำเข้าแผ่นที่ 1	267
ภาพที่ 6.11 ลักษณะคมตัดหลังการทดสอบ ที่ระยะทาง 2200 มิลลิเมตรของแผ่นมิด ซีเมนต์คาร์ไบด์นำเข้า แผ่นที่ 1	268
ภาพที่ 6.12 ลักษณะคมตัดหลังการทดสอบ ที่ระยะทาง 2400 มิลลิเมตรของแผ่นมิด ซีเมนต์คาร์ไบด์ นำเข้า แผ่นที่ 2	269
ภาพที่ 6.13 ลักษณะคมตัดหลังการทดสอบ ด้วยระยะทาง 2400 มิลลิเมตรของแผ่นมิด ซีเมนต์คาร์ไบด์ นำเข้า แผ่นที่ 3	270
ภาพที่ 6.14 ลักษณะคมตัดก่อนทำการทดสอบ ของแผ่นมิดซีเมนต์คาร์ไบด์ที่ผลิตขึ้นแผ่นที่ 1	271
ภาพที่ 6.15 ลักษณะคมตัดหลังการทดสอบ ด้วยระยะทาง 1400 มิลลิเมตร ของแผ่นมิด ซีเมนต์คาร์ไบด์ที่ผลิตขึ้น แผ่นที่ 1	272
ภาพที่ 6.16 ลักษณะคมตัดหลังการทดสอบ ด้วยระยะทาง 1400 มิลลิเมตร ของแผ่นมิด ซีเมนต์คาร์ไบด์ที่ผลิตขึ้น แผ่นที่ 2	273
ภาพที่ 6.17 ลักษณะคมตัดหลังการทดสอบ ด้วยระยะทาง 1541 มิลลิเมตร ของแผ่นมิด ซีเมนต์คาร์ไบด์ที่ผลิตขึ้น แผ่นที่ 3	274
ภาพที่ 7.1 Product to Insert SNMG120408 of WC-17%Co sintering at 1,430°C 1h.	277

สารบัญภาพ (ต่อ)

	หน้า
ภาพที่ 7.2 การทดสอบความแข็ง และแสดงรอยกดเพื่อทดสอบความแข็ง(Hardness) load 20 kg	277
ภาพที่ 7.3 SEM วิเคราะห์โครงสร้างของแผ่นมีดที่พัฒนาขึ้นใหม่	278
ภาพที่ 7.4 Test run of metal removal	278
ภาพที่ 7.5 Build up edge	279
ภาพที่ 7.6 Wear of Insert tool from recycled cemented carbide scrap on cutting length 1,200 mm.	280
ภาพที่ 7.7 Crater and flank wear of Insert tool A on cutting length 1,200 mm.	281
ภาพที่ 7.8 relationship between insert tool recycled and insert tool A on Condition $V_c = 75 \text{ m/min}$, $f = 0.25 \text{ mm.}$, depth = 3.0 mm.	282



สัญลักษณ์

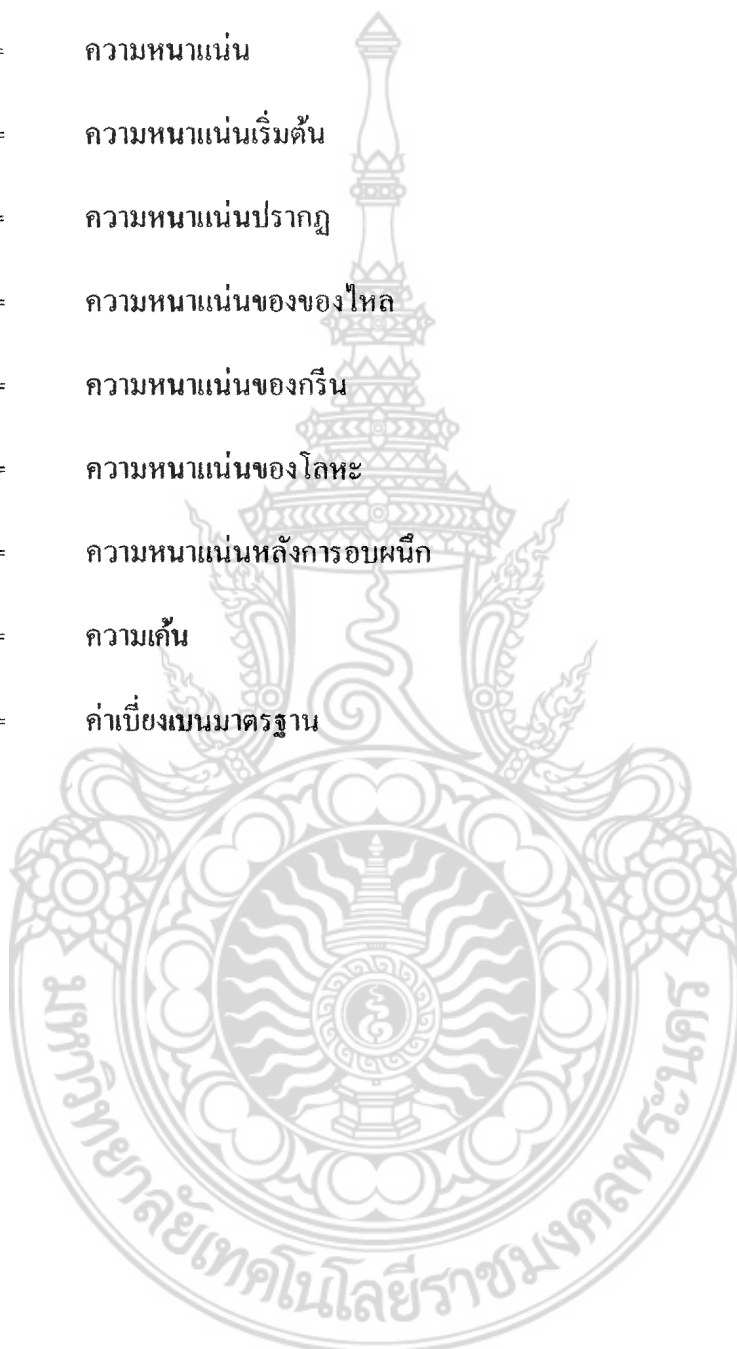
A	=	พื้นที่หน้าตัด
C_0	=	ความเข้มข้นของวาเคนซีสมดูล
C_R	=	อัตราการอัด
D	=	ขนาดอนุภาค
D	=	สัมประสิทธิ์การแพร่
d_{hkl}	=	ความกว้างระหว่างชั้น hkl
D_{mp}	=	ขนาดกลางของอนุภาค โดยเกณฑ์ประชากร
dP/dt	=	อัตราการแน่นตัว
G	=	ขนาดเฉลี่ยของเกรน
G_0	=	ขนาดเกรนเริ่มต้น
K	=	ค่าคงที่สมดูล
N	=	ความเร็วในการหมุน
N	=	จำนวนรูพรุนต่อหน่วยปริมาตร
N	=	ตำแหน่งที่ว่างหรือจำนวนอะตอมที่มีพลังงานกระตุ้น
N_0	=	จำนวนอะตอมทั้งหมด
n	=	ค่าความไวต่อความถี่
P	=	ความดัน
Q	=	พลังงานกระตุ้น

สัญลักษณ์ (ต่อ)

R	=	อัตราการผลิต
R_1, R_2	=	รัศมีสำคัญของผิวโค้ง
t	=	เวลา
T	=	อุณหภูมิ
U	=	โมดูลัสแบบเฉือน
u	=	สัมประสิทธิ์ความเสียดทาน
V	=	ความเร็ว
V	=	ปริมาตร
V_c	=	ปริมาตรของผงที่ผ่านการอัดแล้ว
V_L	=	ปริมาตรของผงในสภาวะหลอม
w	=	น้ำหนักของอนุภาค
Ω	=	ปริมาตรของอะตอม
α	=	มุมระหว่างโลหะเหลวกับหัวฉีดน้ำ
β	=	ค่าคงที่ขึ้นกับวัสดุและผลกระทบต่อการออกแบบเครื่องอะตอมดมเซอร์
ϵ	=	ความพรุน
γ	=	ความตึงผิว
K	=	พารามิเตอร์ที่กระตุ้นโยความร้อน
λ	=	ความยาวคลื่น

สัญลักษณ์ (ต่อ)

- v = อัตราส่วนปริมาตรของ
- θ = มุมเลี้ยวเบน
- ρ = ความหนาแน่น
- ρ_0 = ความหนาแน่นเริ่มต้น
- ρ_a = ความหนาแน่นปรากฏ
- ρ_r = ความหนาแน่นของของไหล
- ρ_g = ความหนาแน่นของกรีน
- ρ_m = ความหนาแน่นของโลหะ
- ρ_s = ความหนาแน่นหลังการอบผนึก
- σ = ความเค้น
- σ = ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาวิจัย

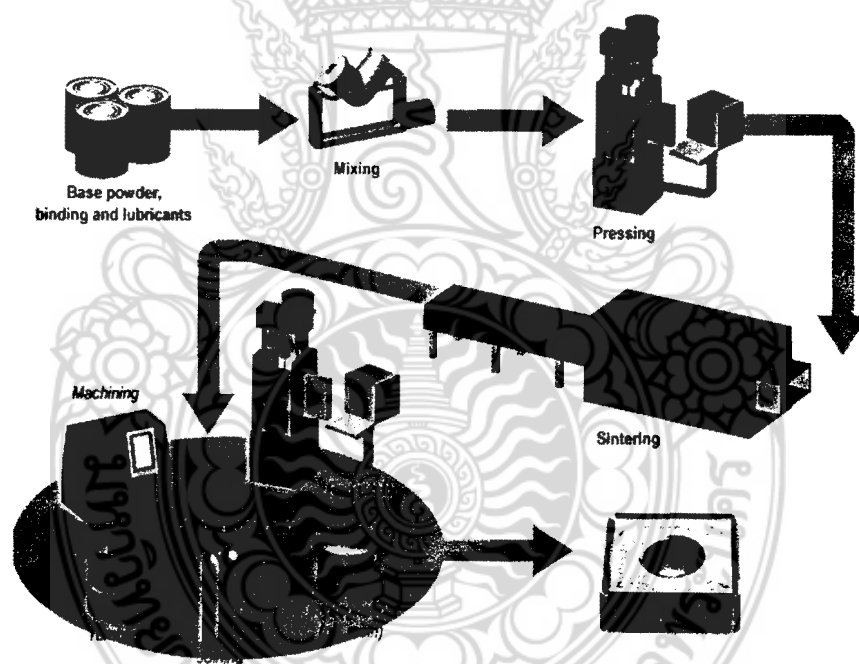
เครื่องมือตัดเพื่อการผลิตในปัจจุบันเป็นสิ่งจำเป็นพื้นฐานของอุตสาหกรรมการผลิตเกือบทุกชนิด เนื่องจากสิ่งอำนวยความสะดวกต่างๆของมนุษย์นั้นมีพื้นฐานการผลิตจากกระบวนการขึ้นรูปโลหะด้วยกรรมวิธีการตัดเฉือนเกือบร้อยเปอร์เซ็นต์ ครอบคลุมปัจจัย 4 ของมนุษย์ไม่ว่าจะเป็น ยานพาหนะ เครื่องนุ่งห่ม ข้าราชการโรค และที่อยู่อาศัย เนื่องจากกรรมวิธีการตัดเฉือนเป็นกระบวนการผลิตชิ้นส่วนขั้นต้นก่อนนำไปผลิตเป็นเครื่องมือเครื่องใช้ต่อไป เช่น แม่พิมพ์ชิ้นส่วนรถยนต์ โดยแม่พิมพ์ที่ผ่านกระบวนการตัดเฉือนเป็นรูปทรงไปผลิตชิ้นส่วนรถยนต์ ดังนั้นการผลิตด้วยกรรมวิธีการตัดเฉือนจึงเป็นการผลิตที่สำคัญและนำไปสู่การผลิตชิ้นส่วนอื่นๆ กระทั่งเป็นสินค้าสำเร็จรูปที่สามารถอุปโภคและบริโภคได้ ในปัจจุบันเครื่องมือตัดจะมีความจำเป็นต่ออุตสาหกรรมการผลิตสินค้าตราใบไคท์มนุษย์ยังแสวงหาและพัฒนาสิ่งใหม่ๆให้เกิดขึ้นบนโลกนี้อย่างไม่หยุดยั้ง



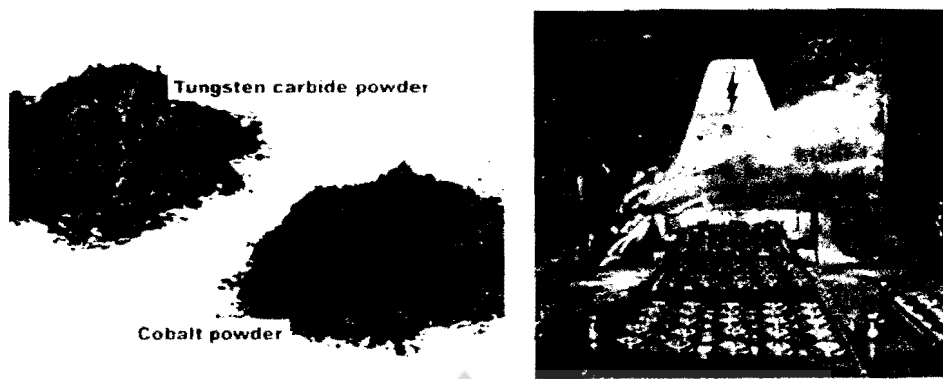
ภาพที่ 1.1 ลักษณะรูปทรงทางเรขาคณิตแผ่นมีดอินเสิร์ต

ในประเทศไทยมีโรงงานอุตสาหกรรมไม่น้อยกว่า 2,000 ราย (ที่มา : กระทรวงอุตสาหกรรม และกรมพัฒนาธุรกิจการค้ากระทรวงพาณิชย์) ซึ่งโรงงานที่ต้องใช้เครื่องกลึงในการปอกผิวชิ้นงาน โดยต้องอาศัยแผ่นมีด (Insert Tools) เป็นอุปกรณ์ในการตัด ปาดผิวโลหะเพื่อขึ้นรูปชิ้นงาน ดังนั้นจึงมีการนำเข้าแผ่นมีดซีเมนต์คาร์ไบด์ (Cemented Carbide Cutting Tool) จากต่างประเทศเกือบทั้งหมด และมีการลงทุนภายในประเทศเพิ่มขึ้นแต่ปรากฏว่าเป็นการลงทุนจากต่างชาติ ไม่พบนักธุรกิจของไทยเข้ามาลงทุนในอุตสาหกรรมนี้ เนื่องจากต้องผลิตแข่งกับสินค้าที่มีอยู่เดิมและต้องใช้เทคโนโลยีนำเข้าร้อยละ 90 ของต้นทุนและมีความเสี่ยงสูง เพราะผลิตตามหลังผู้นำเหล่านั้น จึงทำให้ไม่มีการเข้ามาศึกษาทำการวิจัยและลงทุน ถือว่าเป็นการเสียโอกาสในการแข่งขัน หากว่าประเทศไทยสามารถผลิตแผ่นมีดขึ้นใช้เองได้จะลดการสูญเสียเงินตราออกนอกประเทศได้เป็นจำนวนมาก

การใช้แผ่นมีดซีเมนต์ทั้งสเตนคาร์ไบด์ (Cemented Carbide Cutting Tools) ในอุตสาหกรรมการผลิตชิ้นส่วนอย่างแพร่หลายเพราะมีความต้านทานการสึกหรอสูง (Wear Resistance) และมีความแข็งแรงต่อการกดอัด (Strength)



ภาพที่ 1.2 กระบวนการผลิตชิ้นงานทั้งสเตนคาร์ไบด์ (Solid Tungsten Carbide)



ก.

ข.

ภาพที่ 1.3 การเตรียมผงโลหะ และการขึ้นรูปด้วยการอบผืนึก

ก. ผงโลหะ

ข. เตาอบผืนึก (Sintering)

อุตสาหกรรมการผลิตเครื่องมือและเครื่องมือตัดจากวัสดุทังสแตน ประกอบด้วย การผลิต Cutting tools, Pin, Bush, Bearing, Gear และ tools holder ปัจจุบันมีผู้ผลิตจำนวนกว่า 10 ราย ใช้วัตถุดิบนำเข้าทั้งหมด พบว่าเริ่มมีการส่งออกเศษทังสแตน ในปี พ.ศ. 2549 สูงถึง 9.416 กิโลกรัม เพิ่มขึ้นจากปี พ.ศ.2548 ถึง 3 เท่า และเป็นการส่งออกในราคาประมาณ 150 -250 บาทต่อกิโลกรัม หากนำมาเพิ่มมูลค่าด้วยการ Recycle จะทำให้มูลค่าวัตถุดิบเหลือใช้สูงขึ้นเทคโนโลยีการผลิตชิ้นส่วนจากวัสดุผงในประเทศ ปัจจุบันเริ่มมีอุตสาหกรรมการผลิตชิ้นส่วนด้วยกรรมวิธีอบผืนึก (Sintered) ซึ่งเป็นกระบวนการขึ้นรูปโลหะผง และปัจจุบันผู้ผลิตชิ้นส่วนจากโลหะผงในประเทศไทย มีจำนวนกว่า 6 ราย แต่นำเข้าวัตถุดิบประเภทผงทังสแตนแบบ 100% ทังสแตนคาร์ไบด์ความแข็งสูงกว่า 1,700-2,500 HV ปัจจุบันนำเข้าในราคาแพง จึงส่งผลต่อต้นทุนการผลิตสูง ได้แก่ ผงทังสแตนคาร์ไบด์(WC Powder) ราคาประมาณ 4,691.28-10,551.112 บาท/กิโลกรัม (ไม่รวมค่าขนส่งสินค้าและภาษีศุลกากร) และชิ้นงานทังสแตนคาร์ไบด์ (Solid part) เช่น ชิ้นงานขนาด ϕ 0.50 นิ้ว ยาว 12 นิ้ว ราคาประมาณ 4,000- 5,000 บาท (ไม่รวมค่าขนส่งสินค้าและภาษีศุลกากร) ทำให้ผู้ผลิตแม่พิมพ์ตัด เครื่องมือและอุปกรณ์ทนการสึกหรอมีต้นทุนวัตถุดิบสูงในปัจจุบันการนำเศษเครื่องมือตัดทังสแตนคาร์ไบด์กลับมาใช้ใหม่ จะทำให้อุตสาหกรรมพื้นฐานของประเทศต้นทุนต่ำลง ส่งผลดีต่ออุตสาหกรรมปลายน้ำ โดยโครงการวิจัยนี้ส่วนหนึ่งต้องการนำเครื่องมือตัด

ทั้งสแตนคาร์ไบด์ที่ผ่านการใช้งานแล้ว มาผ่านกระบวนการย่อยให้เป็นผงที่มีสมบัติเหมาะสมต่อ
 การขึ้นรูปมาใช้งานใหม่ ทดแทนการนำเข้าในกลุ่มวัสดุพิเศษความแข็งสูง ทนการสึกหรอได้ดี
 พัฒนาเป็นชิ้นส่วนเครื่องจักรกลการเกษตร ชิ้นงานสำหรับชุดเจาะ การซ่อมแซมถนน และชิ้นส่วน
 อุตสาหกรรมหนักอื่น ๆ รวมถึงอุตสาหกรรมไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ ได้แก่ วัสดุหลอดไฟฟ้า
 Collimator platelets อุตสาหกรรมการแพทย์ ได้แก่ เข็มฉีดยา เป็นต้น เครื่องมือตัดที่ผ่านการใช้งาน
 ในแต่ละปีมีจำนวนกว่า 1.9 ล้านชิ้น (มูลค่านำเข้าชุดเครื่องมือตัดสูงถึง 5,747 ล้านบาทในปี พ.ศ.
 2548) เป็นทั้งสแตนรอยละ 50 (ที่มา : กรมศุลกากร กระทรวงการคลัง) แผ่นมิดที่ผ่านการใช้งาน
 (Insert tools scrap) มีจำนวนมากกว่า 1,000,000 ชิ้น และมีแนวโน้มนำสูงขึ้นไปมากกว่า 3 เท่าตลอด 5 ปี
 ที่ผ่านมาการวิจัยนี้ต้องการนำเศษเครื่องมือตัด ชิ้นส่วนที่มีทั้งสแตนผสมผ่านการใช้แล้วกลับมาใช้
 ใหม่ (Recycle) โดยผลิตเป็นชิ้นงานหรือผลิตภัณฑ์ใหม่ ได้แก่ แท่งชิ้นงาน (Solid Part) ได้แก่
 Punch & Die หรือ Wear resistance part หรือ Cutting tools เป็นต้น เป็นการผลิตด้วยต้นทุนวัตถุดิบ
 ถูกกว่าการนำเข้ากว่าร้อยละ 20 เนื่องจากเป็นการลดสัดส่วนวัตถุดิบจากเศษวัสดุผ่านการใช้งาน
 แล้ว ปัจจุบันมีขดนำเข้าทั้งสแตนสำเร็จรูป (Bars and Rode) มีอัตราสูงขึ้นไปกว่า ร้อยละ 55.86 มูลค่า
 นำเข้า ประมาณ 24.81 ล้านบาทในปี 2548 นำเข้าผงทั้งสแตน (Tungsten powder) มีมูลค่า 126.50
 ล้านบาท ในปี พ.ศ. 2548 มีอัตราสูงขึ้นไปกว่าร้อยละ 300 เมื่อเทียบกับปี พ.ศ. 2544 เครื่องมือตัด
 ทั้งสแตนคาร์ไบด์ ในปี 2548 มีมูลค่ารวมทั่วโลก 350,000 ล้านบาท แนวโน้มนำสูงขึ้นไปไม่น้อยกว่า ร้อย
 ละ 20 และเครื่องมือตัดชนิดเหล็กกล้ารอบสูงมีมูลค่าทั่วโลกมากกว่า 125,000 ล้านบาท มีแนวโน้มนำ
 สูงขึ้นไปมากกว่า ร้อยละ 15 (ที่มา: Sandvik Annual report 2005) ประเทศไทยเติบโตในด้าน
 อุตสาหกรรมการผลิตชิ้นส่วนและแม่พิมพ์ อุตสาหกรรมการผลิตเครื่องจักรกลที่มีแนวโน้มนำ
 สูงขึ้นไป และอุตสาหกรรมแม่พิมพ์ที่มีมูลค่าสูงกว่า 5 หมื่นล้านบาทในปี 2547 (ที่มา : สมาคม
 อุตสาหกรรมแม่พิมพ์ไทย และสถาบันยานยนต์) ซึ่งเป็นอุตสาหกรรมต้นน้ำสำคัญของอุตสาหกรรม
 ต่าง ๆ จนถึงปลายน้ำจำนวนมาก ได้แก่ เครื่องนึ่งห่ม ขารักษาโรค ที่อยู่อาศัย ยานพาหนะและการ
 สื่อสาร พบว่าประเทศสหรัฐอเมริกาให้ความสำคัญกับการสะสมทั้งสแตน มากกว่า 9,700 ตันในปี
 พ.ศ. 2543 และแนวโน้มนำการสะสมมากขึ้น ทั้งแร่ยูเรเนียมและเศษทั้งสแตน ด้วยการกำหนดให้
 หน่วยงานด้านการป้องกันประเทศ (Defense National Stockpile Center:DNSC) ร่วมกับกระทรวง
 พาณิชย์ ออกกฎหมายเป็นข้อตกลงทางการค้า สำหรับการนำเข้าทั้งสแตนร่วมกับประเทศคู่ค้าสำคัญ

อาทิ ประเทศจีนและรัสเซีย ซึ่งเป็นผู้ผลิตทังสเตนรายใหญ่ของโลก สำหรับประเทศจีน มีสัดส่วนการผลิตทังสเตนมากกว่าร้อยละ 83 ของผู้จำหน่ายทั่วโลก และสหรัฐอเมริกามีองค์กรรับผิดชอบโดยตรง เพื่อพัฒนาการใช้วัสดุทังสเตนทั้งในด้านการทหาร และเศรษฐกิจ (ที่มา : American National Carbide :ANC) สำหรับการผลิตแร่ทังสเตน (Scheelite , Wolfram) ในประเทศไทยพบว่าเป็นการส่งออกปริมาณส่งออกกว่า 520 ตันในปี พ.ศ. 2548 (ราคาจำหน่าย ประมาณ 173,846.15 บาท/ตัน) และ 443 ตันในปี พ.ศ. 2549(ราคาจำหน่าย ประมาณ 227,313.76 บาท/ตัน) (ที่มา:ศูนย์สารสนเทศ ส่วนประกอบโลหะกรรม สำนักอุตสาหกรรมพื้นฐาน กรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่ กระทรวงอุตสาหกรรม) ซึ่งเป็นการส่งออกวัตถุดิบในราคาถูก แต่ประเทศไทยซื้อสินค้าในราคาแพงขึ้นกว่า 15- 45 เท่า ประเภทผลิตภัณฑ์ทังสเตนคาร์ไบด์ หากเป็นชิ้นงานสำเร็จรูป ได้แก่ เครื่องมือตัด ชิ้นส่วนเครื่องจักรกล มูลค่าจะสูงขึ้นมากกว่าวัสดุผงหลายเท่า จึงเป็นการเสียโอกาสในการสร้างภูมิคุ้มกันด้านเศรษฐกิจและอุตสาหกรรมการผลิตของประเทศมาเป็นเวลานาน

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อพัฒนาชิ้นงานทังสเตนคาร์ไบด์ (Cement tungsten carbide) โลหะแข็งพิเศษ(Hard metal) จากผงโลหะด้วยการอบผนึก (Sintering)

1.2.2 ศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพที่เหมาะสมต่อการใช้งานในอุตสาหกรรมการผลิต

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1.3.1 พัฒนาวัสดุผงจากเศษโลหะหรือเศษทังสเตนที่ผ่านการใช้งานมาแล้ว

1.3.2 เป็นการนำเศษเครื่องมือ (Cutting tools scrap) ที่ผ่านการใช้งาน มาบดย่อยวัสดุให้เป็นผงสามารถนำไปขึ้นรูปด้วยกรรมวิธีอัดขึ้นรูปและการอบผนึก (Sintering process) ให้เป็นผลิตภัณฑ์

1.3.3 เป็นการออกแบบผลิตภัณฑ์ ด้าน รูปทรงและขนาด ผลิตชิ้นงานจาก โลหะผง เพื่อเป็นพื้นฐานที่จะพัฒนาสู่การผลิตและรองรับอุตสาหกรรมการขึ้นรูปวัสดุผง และอื่น ๆ ต่อไป

1.3.4 ผลิตให้ได้ขนาด (Grain size) ตามมาตรฐาน โลหะผง สามารถนำไปผลิตชิ้นส่วน(Solid part) แผ่นสี่เหลี่ยมขนาดไม่เกิน 30 x 30 x 5 มิลลิเมตร หรือแผ่นมีดทรงมาตรฐานขนาดไม่เกิน 12 x

12 x 5 มิลลิเมตร สำหรับตัดแต่งเหล็กกล้าชิ้นส่วนเครื่องจักรกล ในกลุ่มเหล็กกล้าคาร์บอนปานกลาง

1.3.5 ผลิตภัณฑ์ที่พัฒนาขึ้นมีความแข็งไม่น้อยกว่า 1,000 HV หรือมีคุณภาพไม่ด้อยกว่าสินค้านำเข้า หรือมีสมบัติเทียบเท่าด้วยปัจจัยการผลิต ประกอบด้วย การออกแบบ การขึ้นรูป การปรับปรุงสมบัติด้วยความร้อน การอบ และขึ้นรูปเป็นชิ้นงานสำเร็จ เป็นต้น

1.3.6 ผลิตภัณฑ์ที่พัฒนาขึ้นเป็นชิ้นงานที่มีคุณลักษณะตามตลาดเป้าหมายและราคาถูกกว่าสินค้านำเข้าอย่างน้อยร้อยละ 20

1.3.7 ผลิตแผ่นมีดสำหรับงานกลึงปอก (Turning) รูปทรง S รหัส SNMG 120408

1.3.8 ขนาดแผ่นมีด กว้าง x ยาว x หนา = 12.7 x 12.7 x 4.76 มิลลิเมตร รัศมีคมตัดตัด 0.8 องศา มุมคายเศษ 15 องศา และมุมหลบ 0 องศา ตามมาตรฐาน ISO

1.3.9 วิเคราะห์เพื่อดูการกระจายตัวของโลหะผงก่อนการขึ้นรูปแผ่นมีดซีเมนต์ทั้งสแตนคาร์ไบด์

1.3.10 ขึ้นรูปแผ่นมีดซีเมนต์ทั้งสแตนคาร์ไบด์โดยใช้ส่วนผสมของโลหะผงทั้งสแตน (WC) 83 เปอร์เซ็นต์ และโลหะประสาน โคบอลต์ (Co) 17 เปอร์เซ็นต์

1.3.11 ผลิตแผ่นมีดซีเมนต์ทั้งสแตนคาร์ไบด์จำนวนไม่น้อยกว่า 10 ชิ้น

1.3.12 ขนาดเกรนของโลหะผงทั้งสแตนคาร์ไบด์มีขนาดไม่เกิน 15 ไมครอน

1.3.13 ความหนาแน่นตามมาตรฐานของผงทั้งสแตนคาร์ไบด์ ไม่น้อยกว่า 13 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร (g/cm^3)

1.3.14 บดผสมโลหะผงเป็นเวลาไม่น้อยกว่า 24 ชั่วโมง

1.3.15 อัดขึ้นรูปผงโลหะด้วยกระบวนการอัดแน่น (Pressing) ด้วยแรง 350 bar

1.3.16 อบเผา (Sintering) แผ่นมีดซีเมนต์ทั้งสแตนคาร์ไบด์ที่อุณหภูมิ 1430 องศาเซลเซียส

1.3.17 ความแข็งของชิ้นงานแผ่นมีดซีเมนต์ทั้งสแตนคาร์ไบด์มีความแข็งไม่ต่ำกว่า 865 HV

1.3.18 วิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาคชิ้นงานแผ่นมีดซีเมนต์ทั้งสแตนคาร์ไบด์ที่ผลิตขึ้นเพื่อเทียบกับมาตรฐานอื่น

1.3.19 ทดสอบความแข็งแผ่นมีดซีเมนต์ทั้งสแตนคาร์ไบด์ด้วยเครื่อง Hardness Vicker

1.3.20 ทดสอบการใช้งานแผ่นมิดซีเมนต์ทั้งสเตนคาร์ไบด์ที่ผลิตขึ้นกับแผ่นมิดนำเข้าโดยการกลึงชิ้นงานด้วยเครื่องจักร CNC เพื่อวัดผลการสึกหรอกำหนดเงื่อนไข ดังนี้

1.3.20.1	ความเร็วตัด	75	เมตร / นาที
1.3.20.2	อัตราการป้อน	0.22	มิลลิเมตร / รอบ
1.3.20.3	อัตราการกินลึก	1.5	มิลลิเมตร
1.3.20.4	มุมตั้งมีด	75	องศา
1.3.20.5	มุมคายเศษ	15	องศา
1.3.20.6	มุมหลบ	8	องศา

1.3.20.7 ชิ้นงานทดสอบเป็นเหล็กกล้าคาร์บอนปานกลาง 0.45 เปอร์เซนต์ รัศมีความโต 93 ยาว 200 มิลลิเมตร

1.4 ประโยชน์ที่ได้รับจากการทำวิจัย

ผลสำเร็จของการวิจัยที่คาดว่าจะได้รับ ประกอบด้วย

1.4.1 ผลิตภัณฑ์ทั้งสเตนคาร์ไบด์ (Product of tungsten carbide) จากการใช้วัสดุผงนำเข้าและผงที่พัฒนาขึ้น มีสมบัติเทียบเท่าสินค้านำเข้า และสมบัติทางกลสอดคล้องกับลักษณะการใช้งาน ประกอบด้วย ความแข็ง และความสามารถต้านทานต่อการสึกหรอ เป็นต้น

1.4.2 เป็นข้อมูลพื้นฐานสำหรับการพัฒนางานวิจัยต่อยอดและการศึกษาทางธุรกิจ เพื่อการผลิตเชิงพาณิชย์ในอนาคต หน่วยงานที่จะนำผลการวิจัยไปใช้ประโยชน์

1.4.3 ผู้ผลิตชิ้นส่วนจากวัสดุผงทั้งสเตน ผงเหล็กกล้ารอบสูง มีต้นทุนวัตถุดิบสูง และต้องนำเข้าจากต่างประเทศทั้งหมด หากงานวิจัยสำเร็จ ผู้ผลิตสามารถลดต้นทุนการผลิตทางด้านวัตถุดิบ ไม่น้อยกว่าร้อยละ 20

1.4.4 ได้แผ่นมิดซีเมนต์คาร์ไบด์สำหรับงานกลึงปอก

1.4.5 ทราบถึงกระบวนการขึ้นรูปทางโลหะ (Powder Metallurgy)

1.4.6 ได้ศึกษาเครื่องมือที่เหมาะสมในการทำงานแต่ละขั้นตอนและกระบวนการผลิตชิ้นงานซีเมนต์ทั้งสเตนคาร์ไบด์

1.4.7 ทราบถึงวิธีการผลิตได้แก่ การเตรียมวัตถุดิบที่เป็นโลหะผงและ อัตราส่วนผสมที่เหมาะสมในการผลิต

1.4.8 การตรวจสอบสมบัติทางโลหะวิทยา การวิเคราะห์เปรียบเทียบโครงสร้าง และการตรวจสอบเปรียบเทียบความแข็ง

1.4.9 ทราบกระบวนการผลิตและทำกาผลิตแผ่นมีดซีเมนต์ทั้งสแตนคาร์ไบด์ที่สามารถใช้งานเพื่อตัดเฉือนเหล็กกล้าชิ้นส่วนเครื่องจักรกล

1.4.10 ทราบถึงประสิทธิภาพด้านการสึกหรอของวัสดุเครื่องมือตัดประเภทซีเมนต์คาร์ไบด์

1.4.11 ทราบถึงสภาวะเงื่อนไขและตัวแปรต่างๆที่มีผลกระทบต่ออายุการใช้งานของแผ่นมีด

1.4.12 เป็นข้อมูลพื้นฐานการผลิตแผ่นมีดซีเมนต์ทั้งสแตนคาร์ไบด์ในรูปแบบอื่น

1.4.13 เป็นการศึกษาปัจจัยการผลิตและเป็นประโยชน์ต่อการพัฒนาชิ้นงานเครื่องมือตัดต่อใจ

1.5 วิธีวิจัย

1.5.1 ศึกษาการอ่านรหัสแผ่นมีด การเลือกใช้แผ่นมีดตามมาตรฐาน ISO โดยประกอบด้วยตัวอักษรที่บอกถึงเงื่อนไขของเม็ดมีดแต่ละรูปทรงซึ่งแต่ละรูปทรงมีรหัสที่แตกต่างกันตามเงื่อนไขการผลิต

1.5.2 ศึกษารูปทรงและการใช้งานแผ่นมีดกลึงปอก ลักษณะการใช้งานของแผ่นมีดมีดชนิดกลึงปลอกผิว ซึ่งรูปทรงทางเรขาคณิตของแผ่นมีดมีเงื่อนไขในการตัดเฉือนโลหะที่ต่างกัน ตามมาตรฐาน ISO

1.5.3 ศึกษากระบวนการขึ้นรูปทางโลหะผง กระบวนการผลิตเครื่องมือตัดประกอบการนำวัตถุดิบมาผสมในสารละลาย หลังจากทำให้แห้งแล้วจะเพิ่มตัวยึดประสานที่เหมาะสมนำไปอัดขึ้นรูปให้ได้รูปร่างตามต้องการ จากนั้นนำไปเผาซินเตอร์ริง สำหรับวัสดุพวกออกไซด์บริสุทธิ์ ปกติจะเผาในอากาศ แต่พวกไนไตรด์หรือคาร์ไบด์จะเผาในบรรยากาศอื่น ๆ เพื่อหลีกเลี่ยงปฏิกิริยาทางเคมีที่ไม่ต้องการ

1.5.4 ศึกษาวัสดุผงโลหะที่ใช้ในการขึ้นรูปชิ้นงาน สิ่งสำคัญของขนาดเกรนทั้งสแตนคาร์ไบด์เมื่อมีขนาดใหญ่และปริมาณส่วนผสมของผงโคบอลต์มีปริมาณมาก จะทำให้ชิ้นงานที่ได้มีความเหนียวสูง ทนต่อแรงกระแทกได้ดี แต่มีคุณสมบัติการต้านทานการสึกหรอและความแข็งต่ำ ในส่วน

นี้ขนาดเกรนของผงทั้งสแตนคาร์ไบด์และส่วนผสมของโคบอลต์ที่เป็นโลหะตัวประสานน้อย จะทำให้มีคุณสมบัติความแข็งสูงแต่มีความเหนียวต่ำ

1.5.5 ศึกษากระบวนการทดสอบ ความแข็ง Hardness Vicker เป็นการวัดความแข็งโดยใช้หัวกดเพชรมีลักษณะเป็นปิรามิดฐานสี่เหลี่ยม ที่ปลายหัวกดทำมุม 136 องศา (เป็นมุมที่มืองศาใกล้เคียงกับหัวกดลักษณะกลมมากที่สุด) ดังนั้นในการใช้งานจึงสามารถวัดค่าความแข็ง ได้ตั้งแต่โลหะที่นิ่มมาก (HV ประมาณ 5) จนถึงโลหะที่แข็งมากๆ (VHN ประมาณ 1500) โดยไม่ต้องเปลี่ยนหัวกด และการทดสอบโครงสร้าง SEM ซึ่งใช้ศึกษาผิวของเซลล์หรือผิวของตัวอย่างวัตถุที่นำมาศึกษา โดยลำแสงอิเล็กตรอนจะส่องกราดไปบนผิวของวัตถุ ทำให้ได้ภาพซึ่งมีลักษณะเป็นภาพ 3 มิติ จากนั้นจะบันทึกภาพลง Photographic

1.5.6 วิเคราะห์ข้อมูล นำข้อมูลที่ศึกษาและเกี่ยวข้องกับโครงการไปวิเคราะห์เพื่อกำหนดเงื่อนไขการผลิตชิ้นงานซีเมนต์ทั้งสแตนคาร์ไบด์ เช่น ข้อมูลบริษัทผลิตแผ่นทั้งสแตนคาร์ไบด์ Allegheny technologies

1.5.7 ผลิตแผ่นมีดซีเมนต์ทั้งสแตนคาร์ไบด์ ดำเนินการ โดยนำข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์ทางกระบวนการขึ้นรูปผงโลหะ (P/M) ไปดำเนินการผลิตแผ่นมีดซีเมนต์ทั้งสแตนคาร์ไบด์

1.5.8 ทดสอบและวิเคราะห์ชิ้นงานดำเนินการ โดยนำชิ้นงานแผ่นมีดซีเมนต์ทั้งสแตนคาร์ไบด์ที่ผลิตขึ้น ไปทดสอบการใช้งานเพื่อหาประสิทธิภาพของแผ่นมีด จากนั้นนำไปวิเคราะห์ความแข็งของแผ่นมีดที่ผ่านการผลิตตามเงื่อนไขที่กำหนดขึ้น

1.5.9 วิเคราะห์ข้อมูลการทดสอบ ดำเนินการ โดยนำผลจากการทดสอบการใช้งาน การทดสอบค่าความแข็ง และการวิเคราะห์เกรนโลหะ รวมเพื่อเป็นข้อมูลในการสรุปผล

1.5.10 สรุปผลการทดลองดำเนินการ โดยนำผลที่ได้จากการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติมาสรุปเพื่อหาประสิทธิภาพของแผ่นมีดซีเมนต์คาร์ไบด์ และให้ตรงตามวัตถุประสงค์

1.6 การเตรียมงานและการวิจัย

1.6.1 จัดหาวัตถุดิบ ทั้งสแตนคาร์ไบด์ (เครื่องมือตัดที่ผ่านการใช้งานแล้ว) จากแหล่งต่าง ๆ ประกอบด้วย ผ่านทางสมาคมอุตสาหกรรมแม่พิมพ์ไทย สถาบันไทย – เยอรมัน และ กับสถานประกอบการ ผู้ใช้งาน โดยตรง

- 1.6.2 ศึกษาและตรวจวัดคุณลักษณะของเครื่องมือตัดที่ใช้งานแล้วเพื่อคัดแยกและจัดกลุ่ม ให้ง่ายต่อการ Recycle ได้แก่ รูปร่าง ขนาดและชนิดสารเคลือบ เป็นต้น
- 1.6.3 เตรียมวัตถุดิบ ได้แก่ การอบที่อุณหภูมิ 800 – 1,200 องศาเซลเซียส และการทำให้แตก การย่อยเพื่อลดขนาดของเครื่องมือตัดใช้แล้วให้เล็กลงก่อนนำไป บดเป็นผงต่อไป
- 1.6.4 แยกสลายเศษวัสดุทั้งสแตนที่ผ่านการใช้งาน ให้เป็นผง (Powder) และกำหนดสมบัติ
- 1.6.5 ศึกษาแนวทางการนำไปขึ้นรูปใหม่สำหรับผลิตเป็นชิ้นงานสำเร็จ (Solid part)
- 1.6.6 ออกแบบและทดสอบสมบัติทางกล
- 1.6.7 การประเมินคุณภาพวัสดุผงที่ได้จากการผลิต ค้นหาจุดบกพร่องและปรับปรุง
- 1.6.8 พัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์ทั้งสแตนคาร์ไบด์จากโลหะผง
- 1.6.9 กำหนดมาตรฐานชิ้นงานให้เป็นวัตถุดิบเพื่อการผลิตเป็นผลิตภัณฑ์

1.7 กระบวนการและเวลาดำเนินการ

- 1.7.1 จัดเตรียมวัตถุดิบและตรวจสอบคุณลักษณะ(ชนิด รูปร่าง ขนาด) ของเศษทั้งสแตน ได้แก่ เครื่องมือตัด ชิ้นงานโลหะที่ผ่านการ ใช้งานแล้ว
 - 1.7.1.1 จัดหาวัตถุดิบ (เครื่องมือตัด)
 - 1.7.1.2 แยกกลุ่มเครื่องมือใช้แล้วและทำให้สะอาด
 - 1.7.1.3 เลือกขนาดของ Scrap ที่เหมาะสมต่อการนำไปผลิตผง(Powder)
- 1.7.2 เตรียมอุปกรณ์เพื่อแยกสลาย
 - 1.7.2.1 เตรียมอุปกรณ์แยกสลายเศษทั้งสแตน
 - 1.7.2.2 เตรียมวัสดุก่อนการบดละเอียด
 - 1.7.2.3 ผลิตผงทั้งสแตนคาร์ไบด์ผง (Powder) ได้แก่ การบดด้วย Ball milling
- 1.7.3. พัฒนาผลิตภัณฑ์
 - 1.7.3.1 กำหนดวิธีการทดลอง
 - 1.7.3.2 ทำการทดลองผลิตชิ้นงาน
 - 1.7.3.3 ปรับปรุงและวิเคราะห์ข้อมูล
- 1.7.4 การผลิตชิ้นงานสำเร็จ

- 1.7.4.1 เตรียมอุปกรณ์
- 1.7.4.2 ผลิตชิ้นงาน
- 1.7.4.3 ตรวจสอบและปรับปรุง
- 1.7.5 ทดสอบสมบัติของผลิตภัณฑ์และการใช้งาน
 - 1.7.5.1 ทดสอบสมบัติทางกล
 - 1.7.5.2 ทดสอบการต้านทานต่อการสึกหรอ
 - 1.7.5.3 ทดสอบเปรียบเทียบกับสินค้านำเข้า
- 1.7.6 รวบรวมข้อมูล และปรับปรุงการทดลอง
 - 1.7.6.1 ปรับปรุงการทดลอง
 - 1.7.6.2 จัดการข้อมูลผลการทดลอง
 - 1.7.6.3 วิเคราะห์ผลการทดลอง
- 1.7.7 รับปรุงและกำหนดคุณลักษณะผลิตภัณฑ์
 - 1.7.7.1 แก้ไขและปรับปรุงสมบัติของผลิตภัณฑ์
 - 1.7.7.2 กำหนดมาตรฐานการใช้งาน
- 1.7.8 สรุปผลการวิจัยและรายงาน
 - 1.7.8.1 สรุปผลการทดลอง
 - 1.7.8.2 รายงานผลการวิจัย
- 1.8 เครื่องมือและอุปกรณ์
 - 1.8.1 ชุดอุปกรณ์การขึ้นรูปชิ้นงาน
 - 1.8.1.1 เครื่องบดผสมโลหะผง (Mixing)
 - 1.8.1.2 เครื่องอบผงโลหะ
 - 1.8.1.3 เครื่องอัดขึ้นรูปผงโลหะ (Pressing) แบบไฮดรอลิกส์ Max 10 ton
 - 1.8.1.4 เครื่องอบผนึกชิ้นงานใช้แก๊สในโตรเจนปกคลุมชิ้นงาน (Sintering) รุ่น Linn High Therm W.Germany สามารถใช้อุณหภูมิสูงสุด 1800 องศาเซลเซียส
 - 1.8.1.5 ตะแกรงสำหรับร่อนผงโลหะ (Sieve)
 - 1.8.1.6 ถ้วยตวง ยี่ห้อ SHOTT DUZAN ขนาด 400 ml

- 1.8.1.7 เครื่อง Ultrasonic รุ่น Transsonic 780/W
- 1.8.1.8 แผ่นให้ความร้อน Hot Plate Stirrer รุ่น HS-115)
- 1.8.2 ชุดเครื่องมือและอุปกรณ์การวิเคราะห์และทดสอบชิ้นงาน
 - 1.8.2.1 เครื่องวิเคราะห์ส่วนผสมผงทั้งสแกนคาร์ไบด์ (XRD)
 - 1.8.2.2 เครื่องวิเคราะห์ส่วนประกอบอิเล็กทรอนิกส์ไมโครสโคป (SEM)
 - 1.8.2.3 เครื่องทดสอบความแข็งโลหะ Hardness Vicker (HV)
 - 1.8.2.4 เครื่องตัดโลหะชนิด Wire Cut
 - 1.8.2.5 เครื่องกลึง CNC
 - 1.8.2.6 เครื่องชั่งน้ำหนักชิ้นงานแบบดิจิตอล AND – GF400, MAX 410 g MIN 0.05 g, AC ADAPTER DC 12 V 0.3 A (ทศนิยม 3 ตำแหน่ง)
 - 1.8.2.7 เครื่องหล่อเรซิน
 - 1.8.2.8 เครื่องขัดโลหะรุ่น PHOENIX BETA Grinder/Polisher
- 1.8.3 ชุดอุปกรณ์เครื่องมือวัด
 - 1.8.3.1 ไม้มบรรทัด
 - 1.8.3.2 เวอร์เนียคาลิเปอร์
 - 1.8.3.4 เครื่องวัดความเรียบผิวชิ้นงาน
- 1.8.4 อุปกรณ์อื่นๆที่เกี่ยวข้อง
 - 1.8.4.1 เครื่องคอมพิวเตอร์
 - 1.8.4.2 กล้องถ่ายรูป
 - 1.8.4.3 นาฬิกาจับเวลาแบบดิจิตอล
 - 1.8.4.4 กระดาษทำความสะอาด ยี่ห้อ Winner Paper 150 Sheets ขนาด 23 x 21 cm
 - 1.8.4.5 เครื่องคำนวณ Casio fx-350MS
 - 1.8.4.6 เครื่องสลักไฟฟ้า Dremel
 - 1.8.4.7 ช้อนตรวจแบบสองด้าน รุ่น Struers (ขนาด 7.5 cm และ ขนาด 15 cm)
- 1.8.5 ส่วนผสมและสารละลายชนิดต่างๆ
 - 1.8.5.1 Polyvinyl Alcohol (PVA) โดยมีสถานะเป็นของเหลว (กาวน้ำ)

1.8.5.2 น้ำยาทำความสะอาด ACETONE

1.8.5.3 Paraffin Wax

1.8.5.4 ผงเรซิน MultiFast Bromn

1.8.5.5 Zine Stearate

1.8.5.6 ผงโลหะทั้งสเตนคาร์ไบด์ (WC) ผสม โคบอลต์ (Co) 17 เปอร์เซ็นต์

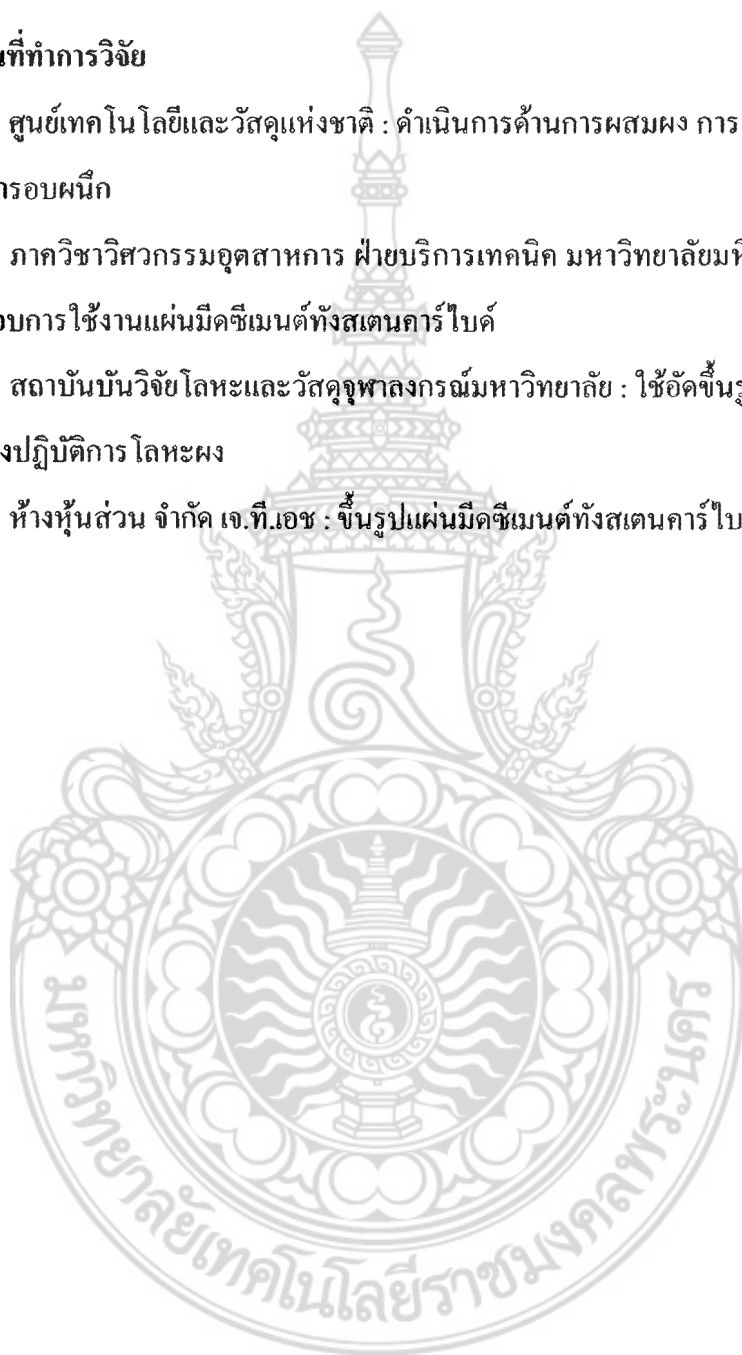
1.9 สถานที่ทำการวิจัย

1.9.1 ศูนย์เทคโนโลยีและวัสดุแห่งชาติ : ดำเนินการด้านการผสมผง การอบผงโลหะการอัดขึ้นรูป และการอบผืนึก

1.9.2 ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม ฝ่ายบริการเทคนิค มหาวิทยาลัยมหิดล : ดำเนินการด้านการทดสอบการใช้งานแผ่นมีดซีเมนต์ทั้งสเตนคาร์ไบด์

1.9.3 สถาบันวิจัยโลหะและวัสดุจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย : ใช้อัดขึ้นรูปชิ้นงานทั้งสเตนคาร์ไบด์ ห้องปฏิบัติการโลหะผง

1.9.4 ห้างหุ้นส่วน จำกัด เจ.ที.เอส : ขึ้นรูปแผ่นมีดซีเมนต์ทั้งสเตนคาร์ไบด์



บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย

2.1 บทนำ

จากการศึกษากระบวนการผลิตแผ่นมีดซีเมนต์ทั้งสแตนคาร์ไบด์ ในการทำการศึกษาศึกษาได้จัดทำการผลิตแผ่นมีดซีเมนต์ทั้งสแตนคาร์ไบด์เพื่อลดปริมาณการนำเข้าของแผ่นมีดตัดสำหรับงานกลึงปอก โดยทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานโครงการนี้ได้กล่าวถึงความหมายของ ทั้งสแตนคาร์ไบด์ (Tungsten Carbide) กระบวนการขึ้นรูปทางโลหะ (Powder Metallurgy) กระบวนการทดสอบความแข็ง (Hardness Test) โครงสร้างจุลภาค และการทดสอบการใช้งานของแผ่นมีด โดยใช้องค์ความรู้ทางด้านวิศวกรรมมาประยุกต์ใช้

โดยทฤษฎีต่างๆเหล่านี้ต้องนำมาใช้วิเคราะห์ในการศึกษาขั้นตอนการทำงานในกระบวนการผลิต และแผนการวิเคราะห์เพื่อออกแบบและทดลองแผ่นมีดซีเมนต์ทั้งสแตนคาร์ไบด์

2.2 โลหะทั้งสแตน (Tungsten)

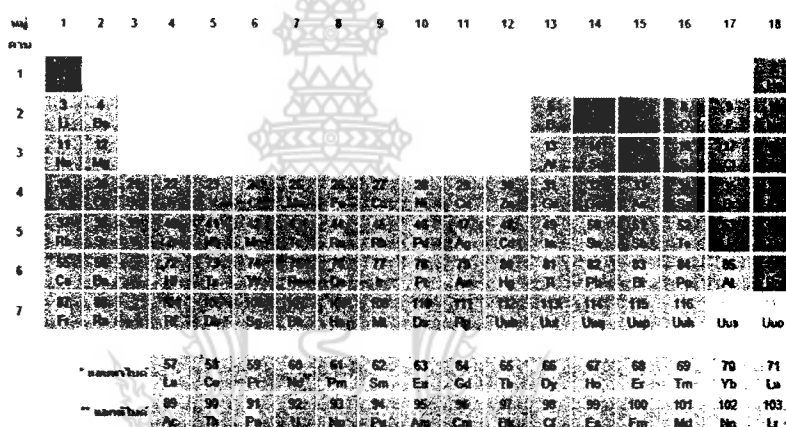
ทั้งสแตนเป็นธาตุโลหะทรานซิชันสีขาวเทาแข็งและหนัก พบมากในแร่หลายชนิดประกอบด้วย วุลแฟรมไมต์และซีไรต์ ทั้งสแตนในรูปบริสุทธิ์ใช้ในงานไฟฟ้าโดยเฉพาะไส้หลอดไฟฟ้า และการผลิตโลหะผสม

2.2.1 โลหะทั้งสแตนที่มีความถูกต้องทางเคมี

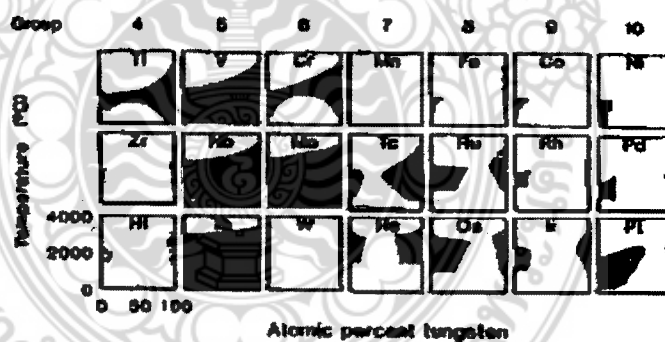
ส่วนสำคัญของการควบคุมความสมบูรณ์ในการใช้งานทั้งสแตนที่บริสุทธิ์ (จุดหลอมสูง, ความหนาแน่นสูง, กระแสไฟฟ้าแรงดันต่ำ) สารเคมีที่มีลักษณะพิเศษและความสำคัญเพราะว่ามีอิทธิพลและขอบเขตต่อการใช้งานในวงการโลหะ ให้พิจารณามากมายหลายอย่าง เช่น พิจารณาทั้งสแตนที่อยู่ในมือให้เป็นมากกว่าโลหะสิ่งที่ขัดขวางมีมากมายไม่ว่าจะเป็นสภาพอากาศและการผสมส่วนใหญ่ประกอบด้วยเซรามิกที่ทนอุณหภูมิและทนต่อการหลอมละลาย ทั้งสแตนจะไม่

แปลงในความเย็นหรือกรด และจะเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยที่อุณหภูมิสูงมีปฏิกิริยาเคมีมากมายไม่ว่าจะเป็นสภาพอากาศหรือการผสมทางเคมี อุณหภูมิห้องทำการแยกโดยสารฟอรินที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส จะถูกย่อยในสารละลายกรดไฮโครคลอริกในตริกผสมอยู่กับน้ำ และมีสารละลายต่างๆ ประกอบด้วยสารที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมีสารละลายไฮโครเจนเปอร์ออกไซด์ เป็นตัวทำลายสำหรับผลิตผงทั้งสเดนที่ดี

ถ้าอุณหภูมิสูงขึ้นจะเกิดปฏิกิริยาเคมีเพิ่มขึ้นที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส จะเกิดปฏิกิริยาเคมีกับคลอติน, กรดฟอสโฟลิก, โบตัสเซียมไฮดรอกซ์ และโซเดียมไนเตรสหรือไนเตรสที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส จะเกิดปฏิกิริยาเคมีกับคาร์บอนมอนนอกไซด์ และที่อุณหภูมิมากกว่า 1000 องศาเซลเซียส จะเกิดปฏิกิริยาเคมีกับทั้งสเดนคาร์ไบด์ โลหะทั้งสเดนจะมีเสถียรภาพถ้าอยู่ในอุณหภูมิที่แห้งและความชื้นปานกลาง



ภาพที่ 2.1 ทั้งสเดนจะมีเสถียรภาพถ้าอยู่ในอุณหภูมิที่แห้งและความชื้นปานกลาง



ภาพที่ 2.2 โลหะที่ทำปฏิกิริยาเคมีกับทั้งสเดน

ตารางที่ 2.1 แสดงส่วนผสมของทั้งสแตนของในจีนงาน

Atomic Radius	Metallic	137.0 pm (Coordination Number 8)
	Covalent	125.0 pm (Single bond ; Valence 6)
		121.0 pm (Double bond ; Valence 6)
		7.98 eV
Ionization potential		0.816 ± 0.008 eV
Electron Affinity (M \rightarrow M.)	W ⁻	226.5 pm
Ionic Radii	W ⁺	136 pm
	W ²⁺	101 pm
	W ³⁺	90 pm, 66 pm (CN 6)
	W ⁴⁺	80 pm, 62 pm (CN 6)
	W ⁵⁺	74 pm (Crystal, CN 6)
	W ⁶⁺	69 pm (Ionic, CN 6)
		9.2
Electronegativity		1.7 (Pauling)
		1.40 (Allred)
		4.40 eV (Pearson, Absolute)
Effective nuclear charge		4.35 (Slater)
		9.85 (Clementi)
		14.22 (Froese – Fischer)

การเกิดปฏิกิริยาเคมีของทั้งสแตนในสารละลายสามารถวิเคราะห์ได้ในตารางที่ 2.1 สารละลายกรดและด่างไม่ทำปฏิกิริยากับทั้งสแตนได้แก่ แอมโมเนีย ส่วนสารที่ทำให้ปฏิกิริยาเคมีได้แก่ โซเดียม, ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ เป็นต้น

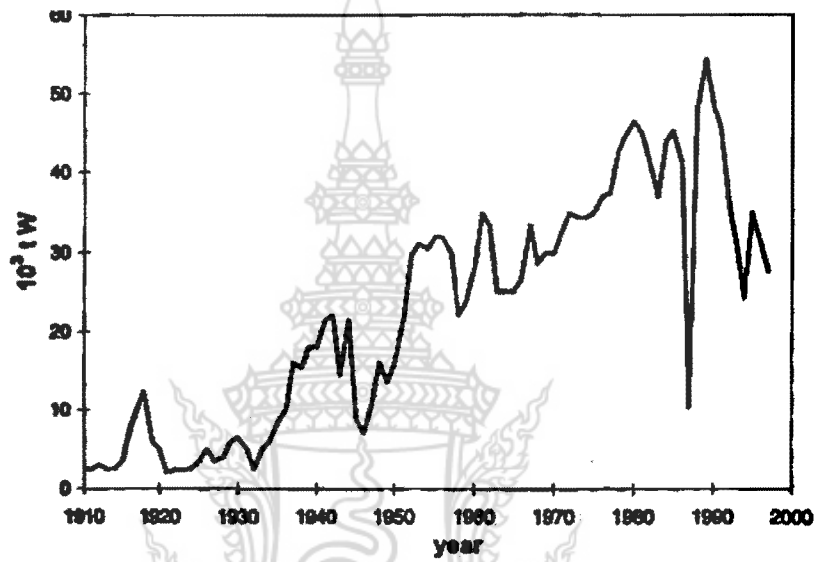
2.2.2 วิวัฒนาการของอุตสาหกรรมทางด้านทั้งสแตน (Industrial Evolution of Tungsten)

ก่อนปี ค.ศ.1920 ทั้งสแตนเป็นส่วนประกอบพื้นฐานของเส้นลวดเล็กๆ ของหลอดไฟ เวลาต่อมาทั้งสแตนถูกเติมเข้าไปในโลหะที่อยู่ในรูปของผงทั้งสแตนได้มาจากการทำปฏิกิริยาของกรดโดยไฮโดรเจน (ที่มีคาร์บอนต่ำและทั้งสแตน 96 - 98 เปอร์เซ็นต์) ส่วนใหญ่มีความซับซ้อนและ

ราคาแพงในปี ค.ศ.1940 การผลิตใช้หลักการพื้นฐานของการหลอมละลาย โดยการใช้วัสดุที่เหลือใช้
ทำเป็นปลอกลูกปืนที่ทำขึ้นจากวัสดุทั้งสแตน

วิวัฒนาการทั้งสแตนในปี ค.ศ.1930 มีการบริโภคโลหะในอุตสาหกรรมอย่างกว้างขวาง
และมีสัดส่วนทั่วไปเพียงเล็กน้อยเท่านั้นที่ใช้หลอดไฟที่มีเส้นเล็กๆ ของส่วนผสมซีเมนต์คาร์ไบด์
นับเป็นจุดเริ่มต้นของการแข่งขันระหว่างเหล็กกล้ารอบสูงกับซีเมนต์คาร์ไบด์

ในปี ค.ศ.1930 ซีเมนต์คาร์ไบด์ (Hard Metals) เหตุผลสำคัญของการแข่งขันวัสดุทั้งสแตน
เพราะว่าวัสดุทั้งสแตนมีประโยชน์และความต้องการซีเมนต์คาร์ไบด์เป็นอย่างมาก



ภาพที่ 2.3 วิวัฒนาการผลิตภัณฑ์วัสดุทั้งสแตนใน ค.ศ. 1910 – 2000

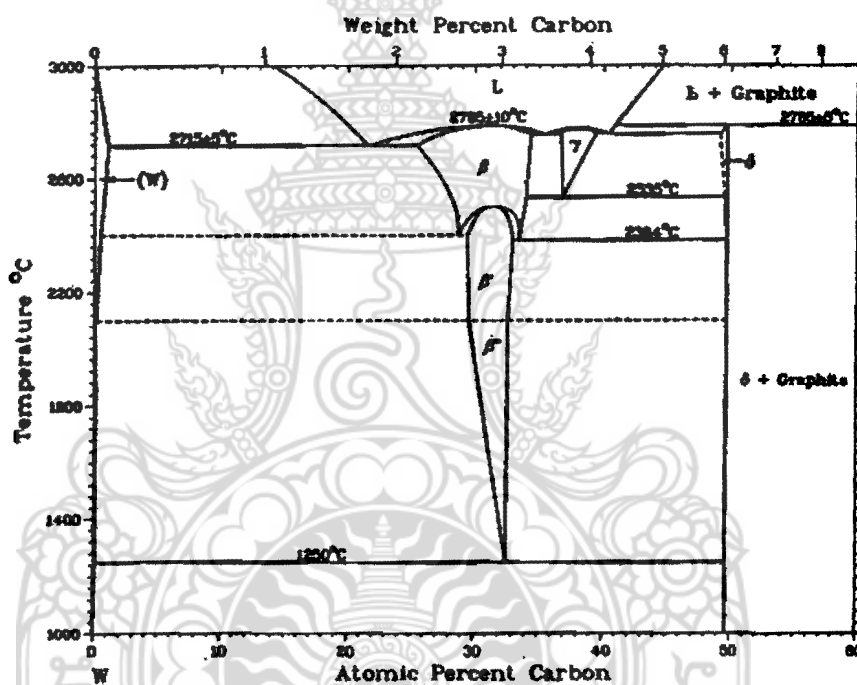


ภาพที่ 2.4 ปริมาณการใช้ของวัสดุประเภทซีเมนต์คาร์ไบด์

2.2.3 ทั้งสแตนและคาร์บอน

ระบบทั้งสแตนและคาร์บอน เป็นเทคนิคขั้นสูงโดยมีส่วนผสมอยู่ : $W_2C (\beta)$, $WC_{1-x} (r)$, และ $WC (\delta)$ ที่เป็นส่วนประกอบซีเมนต์คาร์ไบด์ นอกจากนี้ซีเมนต์คาร์ไบด์และโลหะผสมยังมีส่วนผสมที่มีความซับซ้อน ทั้งสแตนที่มีส่วนผสมคาร์บอน 6 เปอร์เซ็นต์ จะมีอิทธิพลต่อการสังเคราะห์มาก จำนวนส่วนผสมที่เหมาะสมของทั้งสแตนและคาร์บอนหรือกราฟไฟท์ ภายหลังจากให้ความร้อนภายในบรรยากาศที่อุณหภูมิ 1600 องศาเซลเซียส ทั้งสแตนผลิตได้ง่ายโดยการหลอมละลาย

W_2C สามารถเป็น W และ WC ที่อุณหภูมิ 1250 องศาเซลเซียส ยังด้านทานกรดได้หลายชนิดแต่จะหลอมละลายโดยความร้อน ความเข้มข้น HNO_3 หรือ HNO_2 ผสมกับ HF อัตราส่วน 1: 4 จะทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิห้อง W_2C เป็นส่วนประกอบของคาร์ไบด์ ($W_2C - WC$ ผสมอยู่)



ภาพที่ 2.5 เฟสไดอะแกรมทั้งสแตนและคาร์บอน

2.2.4 โลหะหนักทั้งสแตน

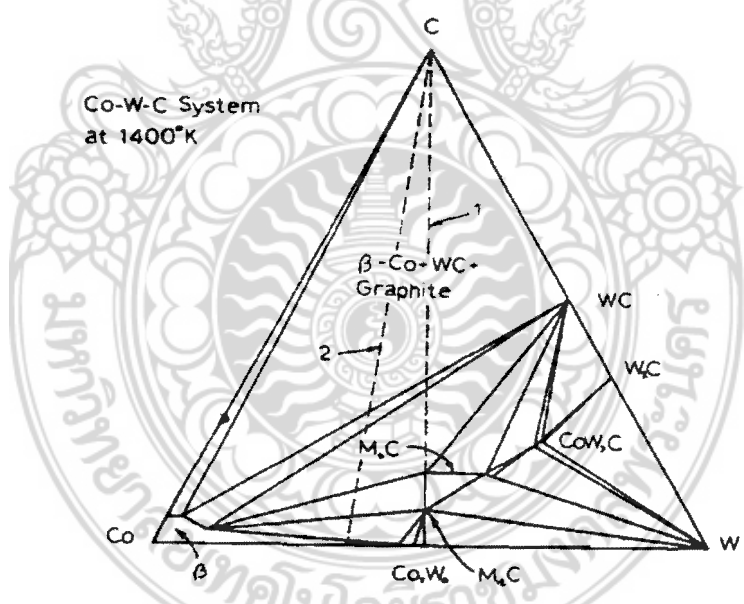
ซีเมนต์คาร์ไบด์ (Cemented Carbide) แสดงถึงกลุ่มของส่วนประกอบวัตถุดิบความร้อนสูงที่มีความแข็งและทนทานต่อการสึกหรอ ซึ่ง โยง โยกันอย่างต่อเนื่องและเหนียวแน่นอยู่ในอนุภาค

ของคาร์ไบด์ (Carbide) ถึงแม้จะเรียกว่า “ซีเมนต์คาร์ไบด์” ซึ่งเป็นที่เข้าใจและใช้อย่างแพร่หลายในกลุ่มประเทศที่ใช้ภาษาอังกฤษเป็นภาษาหลัก สำหรับสากลเรียกว่า “Hard Metals”

Hard Metals เป็นการรวมกันของความทนทานสูงและความเข้มข้นของโควาเลนต์คาร์ไบด์ (Covalent Carbide) กับความเหนียวแน่นและคุณสมบัติที่สามารถดกแต่งได้ของตัวยึดที่ประกอบด้วยโลหะ การรวมตัวเป็นอันหนึ่งอันเดียวกันของความแข็งแกร่งและความเหนียวแน่น ทำให้ถูกนำมาใช้เป็นเครื่องมือตัดในโรงงานอุตสาหกรรมซึ่งมีการใช้อย่างแพร่หลายมากที่สุดรวมไปถึงการใช้ตัดโลหะ เครื่องกลึงในงานไม้ พลาสติก งานประกอบ การตัดแต่งในการขึ้นรูป (งานร้อนและงานเย็น) การทำเหมือง งานโครงสร้าง งานเจาะหิน ส่วนประกอบในงานก่อสร้าง ชิ้นส่วนอะไหล่ และชิ้นส่วนสำคัญในอาวุธหรือสิ่งต่างๆ ที่เกี่ยวกับการทหาร

2.2.5 โลหะทังสเตนคาร์ไบด์ (Tungsten Carbide)

ทังสเตนคาร์ไบด์ (Tungsten Carbide) คือ วัสดุที่ทำจากการผสม Carbides ของ Tungsten และ Titanium หรือ Tantalum ซึ่งจะนำมาอัดขึ้นรูปเข้าด้วยกัน โดยใช้กระบวนการทางความร้อน เรียกว่า “การอบผนึก” (Sintering) คาร์ไบด์ (Carbide) ที่ได้จะมีคุณสมบัติ ทนต่อการเสียดสี ทนต่อความร้อนที่อุณหภูมิสูง มีความแข็งมากกว่า 70 HRA ซึ่งมีความแข็งสูงกว่าเหล็กกล้ารอบสูง (High Speed Steels) และสามารถรับแรงอัด ได้สูงถึง 7×10^{10} ปอนด์ต่อตารางนิ้ว (PSI)



ภาพที่ 2.6 องค์ประกอบของธาตุ

2.2.5.1 องค์ประกอบของทั้งสแตนคาร์ไบด์

ทั้งสแตนคาร์ไบด์ประกอบด้วยโลหะที่ทำให้เปลี่ยนองค์ประกอบในช่วงเวลา แสดงคุณสมบัติ ดังตารางต่อไปนี้

ตารางที่ 2.2 แสดงคุณสมบัติของทั้งสแตน (Tungsten)

ชื่อ	ทั้งสแตน (Tungsten)
สัญลักษณ์	W
หมายเลขอะตอม	74
มวลอะตอม	183.84 amu
จุดหลอมเหลว	3410.0 °C (6170.0 °F)
จุดเดือด	5660.0 °C (10220.0 °F) Number of Protons/Electrons: 74 Number of Neutrons: 110 Classification: Transition Metal
โครงสร้างผลึก	Cubic body Centered
ความหนาแน่น	@ 293 K: 19.3 g/cm ³
สี	เงิน

ตารางที่ 2.3 แสดงคุณสมบัติของคาร์บอน (Carbon)

ชื่อ	คาร์บอน (Carbon)
สัญลักษณ์	C
หมายเลขอะตอม	6
มวลอะตอม	12.0107 amu
จุดหลอมเหลว	3500.0 °C (3773.15 K, 6332.0 °F)
จุดเดือด	4827.0 °C (5100.15 K, 8720.6 °F) Number of Protons/Electrons: 6 Number of Neutrons: 6 Classification: Non - Metal
โครงสร้างผลึก	Hexagonal
ความหนาแน่น	293 K: 2.62 g/cm ³
สี	May be Black

ตารางที่ 2.4 แสดงคุณสมบัติของโคบอลต์ (Cobalt)

ชื่อ	Cobalt
สัญลักษณ์	Co
หมายเลขอะตอม	27
มวลอะตอม	58.933200 amu
จุดหลอมเหลว	1495 °C (1768 K)
จุดเดือด	2927 °C (3200 K) Number of Protons/Electrons: 27 Number of Neutrons: 32 Classification: Non - Metal
โครงสร้างผลึก	Hexagonal
ความหนาแน่น	7.75 g/cm ³
สี	May be Black

2.2.6 การผลิตผงโลหะทั้งสเดน

การผลิตผงโลหะทั้งสเดนและโลหะผสมนั้น กระบวนการผลิตผงโลหะทั้งสเดนถือว่าเป็นขั้นตอนที่สำคัญ คุณสมบัติของผงโลหะนั้นเป็นองค์ประกอบสำคัญต่อการผลิตเช่น กระบวนการอัดขึ้นรูป, กระบวนการอบผนึก และงานโลหะต่างๆทั่วโลก ชิ้นงานทั้งสเดนที่ผลิต 70-80 เปอร์เซ็นต์ จะผลิตด้วยกรรมวิธีทางโลหะผง (Powder Metallurgy) เทคโนโลยีทางโลหะผงมีประโยชน์ในงานวิจัยและพัฒนาทั้งสเดนและโลหะผสม ทำให้มาตรฐานคุณภาพสูงขึ้น โดยผงโลหะจะเป็นเกรดขึ้นอยู่กับนำไปใช้งาน

คุณลักษณะผงโลหะทางเคมี (จะบอกส่วนผสมของธาตุต่างๆ), ทางฟิสิกส์ (ขนาดเกรน, ขนาดการกระจาย) การผลิตผงโลหะทั้งสเดนให้ปฏิกิริยาด้วยไฮโดรเจน จะได้ผงโลหะที่มีความบริสุทธิ์สูง ตัวแปรผงโลหะทั้งสเดน, ขนาดเกรน, ผงโลหะ, ขนาดการกระจายตัวของเกรน, อุณหภูมิ และความชื้น

2.2.7 ผงโลหะทั้งสเดน (Tungsten Powder)

ระดับผงโลหะทั้งสเดน (Tungsten Powder of Grade) ที่ได้จากปฏิกิริยาไฮโดรเจนในเชิงพาณิชย์ที่ใช้มีขนาดเกรนของผงทั้งสเดนจาก 0.1 ไมครอน (μm) ซึ่งขนาดของเกรนของผงทั้งหมด

จะนำไปใช้ในงานซีเมนต์คาร์ไบด์ (Cemented Carbide) สิ่งที่สำคัญผงทั้งสเดนจะถูกนำไปใช้งานโดยตรง 80 เปอร์เซ็นต์ ในกระบวนการแยกโลหะจะได้ผงทั้งสเดนที่มีความบริสุทธิ์และมีขนาดเกรนผงทั้งสเดนอยู่ระหว่าง 2 - 6 ไมครอน (μm) ซึ่งจะมีความละเอียดและหยาบ ผงทั้งสเดนที่มีความละเอียดจะทำให้ยึดเกาะของเกรนดีขึ้นเมื่อผ่านกระบวนการอบนึ่ง (Sintering)

คุณสมบัติทางเคมี : ความบริสุทธิ์ของผงทั้งสเดนจะมีอิทธิพลต่อกระบวนการโลหะผง (P/M) ของโลหะทั้งสเดน และความต้องการผงทั้งสเดนบริสุทธิ์มีจำนวนเพิ่มขึ้นแน่นอน

คุณสมบัติทางเคมีทางฟิสิกส์ : คุณสมบัติทางฟิสิกส์จะมีความสัมพันธ์กัน เช่น ขนาดของเกรนผงทั้งสเดน, การกระจายของผงทั้งสเดน และความหนาแน่นของผงทั้งสเดน จากเหตุผลที่กล่าวคุณสมบัติทางฟิสิกส์จะมีอิทธิพลต่อกระบวนการผลิตและเกิดความเชื่อถือเพิ่มขึ้น คุณสมบัติทางฟิสิกส์นี้จะมีวิธีการวิเคราะห์ และมาตรฐานที่ใช้ในการวิเคราะห์ตามตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 คุณสมบัติทางฟิสิกส์ที่มีอิทธิพลต่อผงทั้งสเดน

ตัวแปรที่มีผลกระทบ	วิธีวิเคราะห์และเครื่องที่ใช้	มาตรฐานการวัด
Average grain size As supplied	Fisher subsieve sizer	ASTM No. B 330 – 88 (reapproved 1993)
Lab milled	Fisher subsieve sizer	After standerdizer milling According to ASTM No. B 430 – 90
Grain size distribution	Gravity sedimentation turbidmetry Gravity sedimentation X-ray absorption Laser scattering	For average grain size ≤ 0.5 μm ASTM No. B 430 - 90 ASTM No. B 761 - 90
Apparent density	Scott volumeter	ASTM No. B 882 – 92
Press density	By measuring the height of a cylindrical Compact prepared under standardized	ASTM No. B 527 – 93 ASTM No. B 331 – 85 (reapproved 1990)

ตารางที่ 2.5 คุณสมบัติทางฟิสิกส์ที่มีอิทธิพลต่อผงทั้งสเดน (ต่อ)

ตัวแปรที่มีผลกระทบ	วิธีวิเคราะห์และเครื่องที่ใช้	มาตรฐานการวัด
Specific surface	BET	ASTM No. C 1096 – 86 (reapproved 1992)
Morphology	SEM	ASTM No. B 312 – 82 (reapproved 1992)

Stright Grades ทั้งสเดนคาร์ไบด์เป็นส่วนประกอบพื้นฐานที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย และโคบอลต์ (Co) ถูกพบว่าเป็นตัวยึดจับโลหะได้ดีที่สุด คุณภาพของเหล็กประกอบด้วย ทั้งสเดนคาร์ไบด์ (WC) – โคบอลต์ (Co) 2 ช่วง (WC และ Co ตามภาพที่ 2.7) มักพบว่าเป็นเหล็กประเภท Stright Tungsten Carbide ซึ่งบริสุทธิ์ไม่มีสิ่งเจือปน ระดับที่ใช้ในการตัดเหล็กหรือคมมีดที่ทนต่อการสึกหรอ ในงานตัดค่าโคบอลต์มีระดับ 3 - 13 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนัก และเพิ่มสูงขึ้นถึง 30 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนัก เพื่อให้ทนต่อการกัดกร่อน ค่าเฉลี่ยของปริมาณทั้งสเดนคาร์ไบด์ (WC) จะอยู่ในระดับจาก Submicron ถึงประมาณ 30 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนัก นับได้ว่าเป็นกลุ่มที่มีการนำไปใช้ทั่วไปมากกว่า 80 เปอร์เซ็นต์ ตัวเล็กรุ่นที่ใช้เป็นตัวจับได้ใน Stright Grades ได้คือ นิเกิล เหล็กกล้า หรือการรวมตัวกันของธาตุเหล็กที่เป็นตัวยึดจับโลหะ

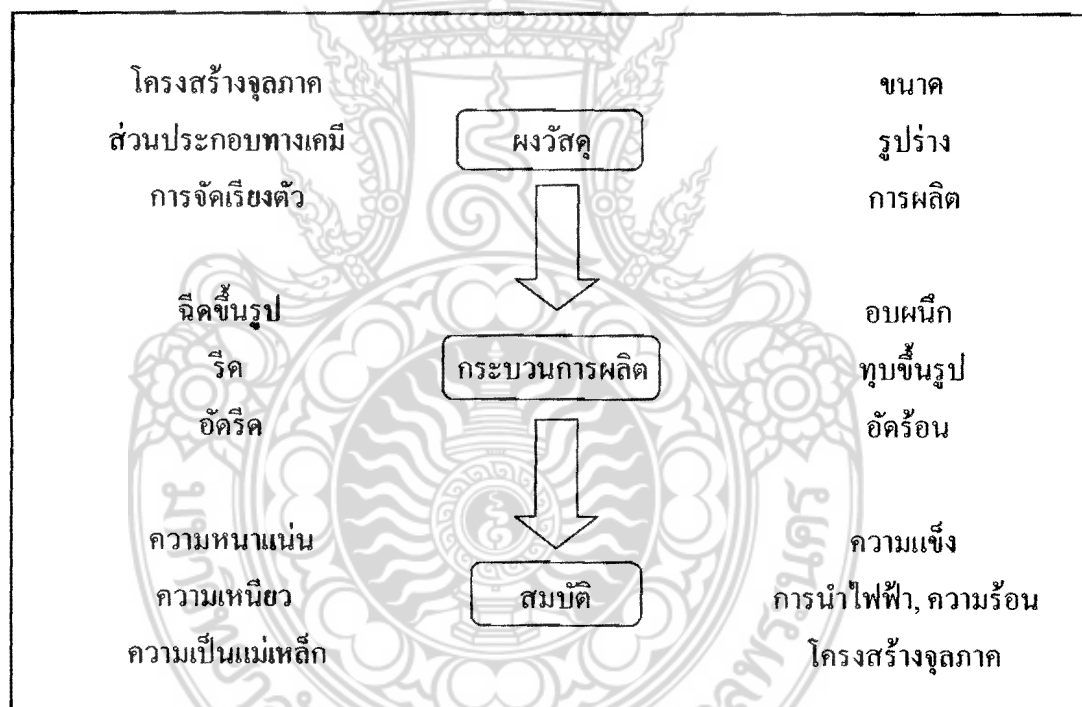


ภาพที่ 2.7 ตัวอย่างชิ้นงานทั้งสเดนคาร์ไบด์ที่มีส่วนโคบอลต์ 9 - 10 เปอร์เซ็นต์

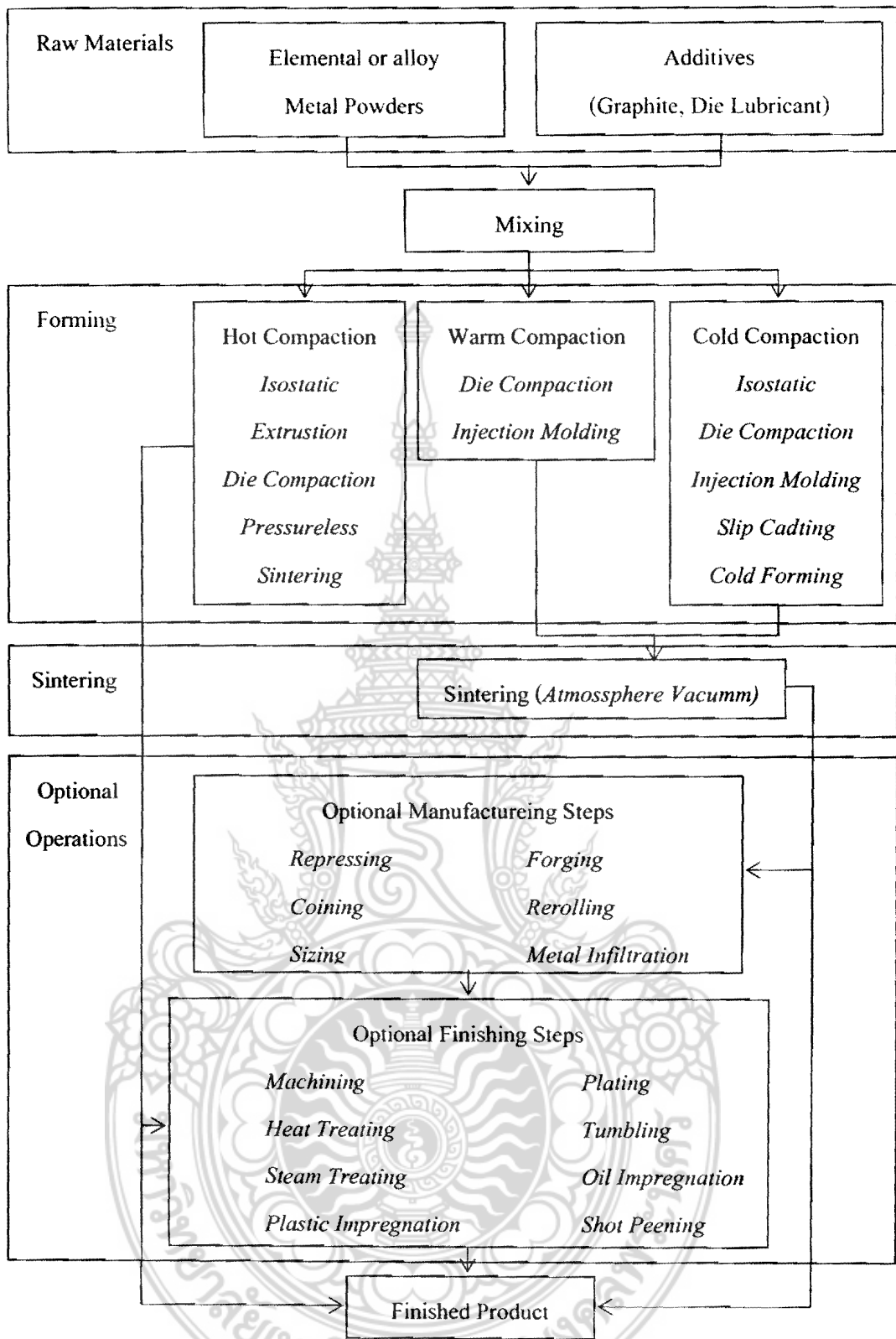
2.3 โลหะกรรมวัสดุผง (Powder Metallurgy)

โลหะกรรมวัสดุผงเป็นการศึกษากระบวนการของผงโลหะที่เริ่มตั้งแต่กระบวนการผลิตผงโลหะ การศึกษาคุณลักษณะ ไปจนถึงการเปลี่ยนสภาพจากผงโลหะไปสู่ชิ้นส่วนต่างๆ ที่มีประโยชน์ทางด้านวิศวกรรม ลำดับขั้นตอนของกระบวนการผลิตเกี่ยวข้องกับการใช้กฎพื้นฐานทางด้านความร้อน และการเปลี่ยนรูปเป็นผงโลหะ ทั้งหมดนี้เป็นกระบวนการที่มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง สมบัติ และ โครงสร้างของผงวัสดุไปสู่ขั้นตอนสุดท้ายคือผลิตภัณฑ์สำเร็จ

แนวความคิดของโลหะกรรมวัสดุผงแสดงในภาพที่ 2.8 ซึ่งประกอบด้วยขั้นตอนหลัก 3 ขั้นตอนคือ ขั้นที่หนึ่งเป็นเรื่องของเทคโนโลยีผงวัสดุที่พิจารณาธรรมชาติของผงวัสดุ โดยเน้นที่การผลิต การจำแนก การวิเคราะห์ลักษณะ และการเก็บรักษา ขั้นตอนที่สองเกี่ยวกับการสูมตัวอย่าง ความปลอดภัย การบรรจุ และการขนส่ง การตรวจสอบผงวัสดุเพื่อหาขนาดและรูปร่างของผง กิจกรรมการขึ้นรูปผงวัสดุแบบดั้งเดิมเป็นการอัดแน่นและอบผนึก สิ่งสำคัญที่ต้องพิจารณาในขั้นตอนนี้ก็คือ การขึ้นรูปและการแน่นตัวของผงวัสดุ ขั้นตอนสุดท้ายของแนวคิดเป็นการให้ความสำคัญกับสมบัติสุดท้ายของผลิตภัณฑ์ที่ได้ ซึ่งเป็นสิ่งที่มาควบคู่กับ โครงสร้างจุลภาคของผลิตภัณฑ์



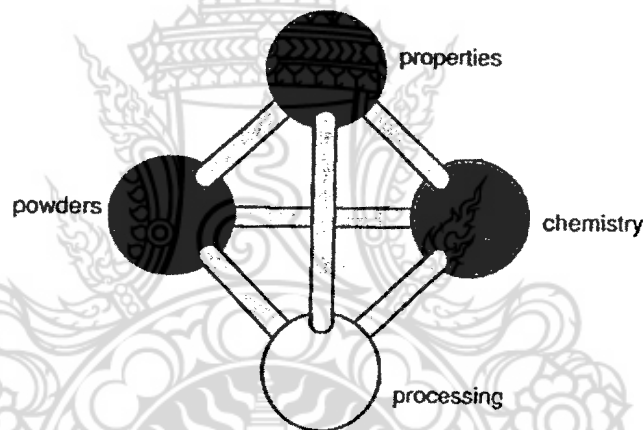
ภาพที่ 2.8 แนวความคิดของโลหะกรรมวัสดุผงที่เริ่มต้นจากผงผ่านกระบวนการผลิตเพื่อไปสู่ผลิตภัณฑ์สุดท้าย



ภาพที่ 2.9 กระบวนการผลิตแบบ P/M

จะเห็นได้ว่าภาพที่ 2.8 กิจกรรมทั้งสามไม่สามารถออกจากกันได้ การตัดสินใจเกี่ยวกับชนิดของวัสดุและกรรมวิธีการผลิตมีผลต่อความยากง่ายในการอัดแน่นและการอบผนึก ในทำนองเดียวกัน ชนิดของการแข็งตัวในการขึ้นรูปก็มีผลกระทบต่อสมบัติของผลิตภัณฑ์ที่ได้ ภาพที่ 2.9 เป็นภาพแสดงลำดับขั้นตอนกระบวนการผลิตตามวิธี P/M ซึ่งประกอบด้วยวัตถุดิบ การผสม การขึ้นรูป และการอบผนึก ขั้นตอนหลังการอบผนึกเป็นขั้นตอนการปรับปรุงคุณสมบัติของชิ้นส่วน P/M เพื่อให้สมบัติดีขึ้นและเหมาะสมกับการนำไปใช้งาน

ดังนั้นการที่จะได้ชิ้นงานที่มีสมบัติเฉพาะตามที่ต้องการต้องพิจารณาอย่างระมัดระวังตั้งแต่การเลือกชนิดของผงวัสดุ กระบวนการผลิต และส่วนประกอบทางเคมี ภาพที่ 2.10 เป็นภาพปิรามิดที่ใช้แทนการขึ้นต่อกันของส่วนประกอบทางเคมี ชนิดของวัสดุผง กระบวนการผลิตและสมบัติที่ได้ เนื้อหาที่จะกล่าวต่อไป ใช้ภาพที่ 2.8 เป็นหลัก พร้อมกับเน้นผลกระทบจากตัวแปรต่างๆ รวมทั้งความสัมพันธ์ระหว่างคุณลักษณะของผงวัสดุ ความยากง่ายในการทำให้แข็งตัว และสมบัติที่ได้ของชิ้นงานสำเร็จ



ภาพที่ 2.10 แสดงปิรามิดของการขึ้นต่อกันระหว่างหลายแง่ของ P/M รวมถึงส่วนประกอบทางเคมี คุณลักษณะของผงวัสดุ ตัวแปรในการผลิต และสมบัติของผลิตภัณฑ์สำเร็จ

เหตุผลในการเลือกใช้โลหะกรรมวัสดุผงประกอบด้วยหลายเหตุผล สิ่งสำคัญหลัก 3 ประการที่ช่วยให้เข้าใจถึงแนวความคิดในการใช้ P/M แสดงในภาพที่ 2.11 ซึ่งประกอบด้วยส่วนที่หนึ่ง คือ การประยุกต์ใช้ P/M ขึ้นอยู่กับการคำนึงถึงต้นทุนการผลิต (Economic) สำหรับในชิ้นส่วนที่

ซับซ้อน ตัวอย่างที่ดีในส่วนนี้คือชิ้นส่วนในอุตสาหกรรมยานยนต์ที่มีปริมาณการผลิตสูง การพิจารณาการผลิตที่ประหยัดและมีประสิทธิภาพ พิกัดเผื่อ (Tolerances) และการผลิตด้วยระบบอัตโนมัติ สิ่งที่ต้องดูคือความสนใจของกรรมวิธีทางโลหะ P/M คือมีขนาดที่แม่นยำและต้นทุนในการผลิตต่ำ ในภาพที่ 2.11 ยังแสดงให้เห็นถึงสมบัติเฉพาะ (Unique) หรือการปรับโครงสร้างจุลภาคในการเลือกใช้วิธีการของ P/M ตัวอย่างเช่น โลหะพรุน (Porous Metal) โลหะผสมที่เพิ่มความแข็งแรงด้วยการกระจายออกไซด์ (Oxide Dispersion Strengthened Alloys) เซอร์เมต (วัสดุผสมเซรามิก – โลหะ) และซีเมนต์คาร์ไบด์ การที่สามารถผลิตลักษณะ โครงสร้างจุลภาคเหล่านี้ด้วยวิธีการอื่นๆ ได้ส่งผลให้มีการพัฒนากรรมวิธีการผลิตทางด้าน P/M เพิ่มมากขึ้น วงกลมสุดท้ายในภาพที่ 2.11 แสดงการประยุกต์ใช้งานที่น่าสนใจ วัสดุเหล่านี้มีความยุ่งยากในการผลิตด้วยเทคนิคอื่นๆ ตัวอย่างเช่น โลหะพวกที่ไวต่อปฏิกิริยาและโลหะทนไฟ (Reactive and Refractory) ซึ่งหลอมละลายได้ยากในทางปฏิบัติ ในหลายกรณีกระบวนการขึ้นรูปและพัฒนาจากผงวัสดุต้องทำที่อุณหภูมิสูงเพื่อหลีกเลี่ยงการทำลาย



ภาพที่ 2.11 แผนภาพแสดงเหตุผลสามอย่างในการเลือกใช้โลหะกรรมวัสดุผง

โดยทั่วไปการประยุกต์ใช้กรรมวิธีทาง P/M จะมีอยู่ในทั้ง 3 หมวด สิ่งสำคัญที่มีผลต่อการขยายการเติบโตของ P/M มาจากการรวมกันทั้งทางด้านเศรษฐศาสตร์ ความน่าสนใจ และสมบัติเฉพาะของ P/M ซึ่งคือมีต้นทุนต่ำและผลผลิตสูง

กระบวนการผลิตแบบ P/M ช่วยทำให้เทคโนโลยีกระบวนการเปลี่ยนรูปโลหะสามารถแข่งขันได้ ทำรูปร่างได้หลายแบบ ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการใช้เงิน และสามารถเลือกใช้วัสดุได้หลายชนิด นอกจากนี้ยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้หลายประเภท รวมทั้งแต่ละชั้นมีสมบัติคงที่สม่ำเสมอเพื่อการปรับปรุงคุณภาพของผลิตภัณฑ์

ข้อดีของกระบวนการผลิตแบบ P/M

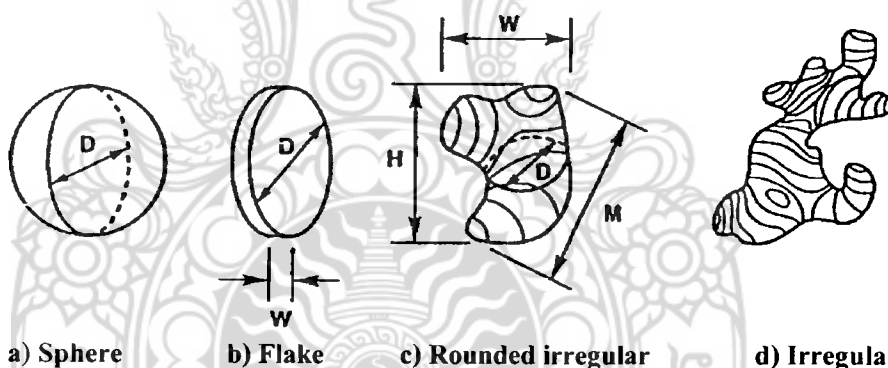
- 1) ลดหรือกำจัดการตกแต่งด้วยเครื่องจักร โดยทำชิ้นส่วนให้มีขนาดใกล้เคียงกับขนาดที่ต้องการ
- 2) ลดหรือกำจัดการสูญเสียเศษวัสดุ โดยการใช้วัตถุดิบมากกว่า 97 เปอร์เซ็นต์ ในการผลิตชิ้นส่วนสำเร็จ
- 3) ใช้ระบบโลหะผสมได้หลากหลาย
- 4) ผลิตชิ้นส่วนที่มีผิวสำเร็จดี
- 5) ใช้กับวัสดุที่สามารถใช้วิธีปรับปรุงสมบัติด้วยความร้อนได้เมื่อต้องการเพิ่มความแข็งแรงหรือเพิ่มความต้านทานต่อการสึกหรอ
- 6) สามารถควบคุมความพรุนได้สำหรับชิ้นงานประเภทหล่อขึ้นในตัวเองหรือใช้ในการกรอง
- 7) ทำชิ้นส่วนที่มีความซับซ้อนหรือมีรูปร่างเฉพาะได้ ซึ่งอาจทำได้ยากหรือไม่ได้เลยด้วยกรรมวิธีเปลี่ยนรูปโลหะวิธีอื่น
- 8) เหมาะสำหรับปริมาณการผลิตในระดับปานกลางถึงสูง
- 9) ทำชิ้นงานวิกฤตให้มีสมรรถนะที่เชื่อถือได้
- 10) ราคาไม่แพง

2.3.1 การหาลักษณะเฉพาะของผงวัสดุ (Powder Characterization)

2.3.1.1 ขนาดอนุภาค (Particle Size)

ขนาดอนุภาคที่ได้ขึ้นกับเทคนิคที่ใช้วัด โดยเฉพาะพารามิเตอร์ที่ใช้รูปร่างของอนุภาค การวิเคราะห์ขนาดอนุภาคโดยใช้เครื่องมือต่างกันทำให้ได้ค่าขนาดของอนุภาคที่ต่างกัน เนื่องจากการใช้พารามิเตอร์ไม่เหมือนกัน ผู้วิเคราะห์ขนาดอนุภาคส่วนใหญ่ใช้พารามิเตอร์ทางเรขาคณิตเพียงตัวเดียวและตั้งสมมุติฐานว่าอนุภาคว่ามีรูปร่างเป็นทรงกลม ค่าพื้นฐานที่ใช้ในการ

วิเคราะห์เป็นค่าทางเรขาคณิต เช่น พื้นที่ผิว พื้นที่ภาพฉาย ขนาดใหญ่สุด พื้นที่หน้าตัดเล็กสุดหรือปริมาตร นักโลหกรรมวัสดุคงถือว่าขนาดอนุภาคเป็นหนึ่งในลักษณะสำคัญที่ต้องศึกษาข้อมูลเกี่ยวข้องกับอนุภาคมีประโยชน์เมื่อเสนอพร้อมกับวิธีการวัดและรูปร่างของอนุภาคที่สมมติขึ้น ภาพที่ 2.12 a) เป็นภาพแสดงพารามิเตอร์เกี่ยวกับขนาดของผงวัสดุบางตัว สำหรับอนุภาครูปทรงวัสดุทรงกลมใช้พารามิเตอร์เกี่ยวกับขนาดหนึ่งตัวคือ ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง เมื่อรูปร่างอนุภาคมีความซับซ้อนขึ้นไม่สามารถใช้พารามิเตอร์เพียงตัวเดียวอธิบายได้ พิจารณาอนุภาครูปเกล็ดแผ่นในภาพที่ 2.12 b) ที่ต้องใช้พารามิเตอร์ในการอธิบายขนาดอย่างน้อย 2 ตัว คือ เส้นผ่าศูนย์กลางและความกว้างของอนุภาค เมื่อรูปร่างอนุภาคเริ่มไม่เป็นที่ทรงกลม จำนวนพารามิเตอร์ที่ใช้ก็เพิ่มขึ้น พิจารณาอนุภาครูปร่างมน ภาพที่ 2.12 c) ขนาดของอนุภาคอธิบายได้ในรูปต่อไปนี้คือ ความสูงของภาพฉาย ความยาวสูงสุด ความกว้างตามแนวนอน ปริมาตรทรงกลมเทียบเท่า เส้นผ่านศูนย์กลางของทรงกลมที่มีพื้นที่ผิวเทียบเท่า (Diameter of a Sphere with Equivalent Surface Area) สำหรับอนุภาครูปร่างไม่แน่นอน ภาพที่ 2.12 d) ซึ่งมีความยุ่งยากที่สุดในการใช้พารามิเตอร์เพียงตัวเดียวในการอธิบาย เนื่องจากขนาดของผงอนุภาคขึ้นกับวิธีการวัดจึงเป็นเรื่องปกติให้อนุภาคมีรูปร่างเป็นทรงกลม และบอกขนาดของอนุภาคด้วยพารามิเตอร์เพียงหนึ่งตัวคือ เส้นผ่าศูนย์กลาง การใช้กล้อง SEM ช่วยแสดงให้เห็นว่ารูปร่างของอนุภาคที่สมมติตรงกับลักษณะแท้จริงของอนุภาคเพียงใด



ภาพที่ 2.12 ความยุ่งยากในการวัดขนาดอนุภาค มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อรูปร่างอนุภาคมีความซับซ้อน

2.3.1.2 เทคนิควิธีการวัด (Measurement Techniques)

ก) จุลทรรศน์ศาสตร์ (Microscopy) การใช้กล้องจุลทรรศน์เป็นเทคนิคที่มีการประยุกต์ใช้อย่างกว้างขวางในการวัดขนาดอนุภาค โดยใช้ความสามารถของสายตาในการบอกขนาด

อนุภาคอย่างรวดเร็ว ถึงแม้ว่าความถูกต้องของวิธีนี้ยอมรับได้ แต่เพื่อให้เกิดการยอมรับในทางสถิติ ทำให้ต้องมีการวัดค่าหลายครั้ง ดังนั้นจึงได้มีการนำเครื่องวิเคราะห์ภาพอัตโนมัติ (Automatic Image Analyzer) เข้ามาใช้ภาพสำหรับการวิเคราะห์ สามารถสร้างได้ทั้งจากกล้องจุลทรรศน์เชิงเส้น กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) หรือกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (TEM) การเลือกใช้เครื่องมือชนิดใดขึ้นอยู่กับขนาดของอนุภาค เช่นกล้อง SEM มีระยะความลึกที่ภาพยังอยู่ในโฟกัส (Depth of Field) สูงกว่าทำให้มีข้อได้เปรียบเมื่อนำไปร่วมกับวิธีรังสีเอ็กซ์เพื่อการวิเคราะห์องค์ประกอบ โดยเฉพาะการแสดงรูปลักษณ์พื้นผิว (Surface Topography) การใช้กล้องจุลทรรศน์เพื่อการวัดค่าของเส้นผ่าศูนย์กลาง ความยาว ความสูง หรือพื้นที่ผิว ทำให้สามารถสร้างการแจกแจงความถี่ การแจกแจงถูกันที่ตามความถี่สัมพันธ์ของขนาดอนุภาคที่เลือก

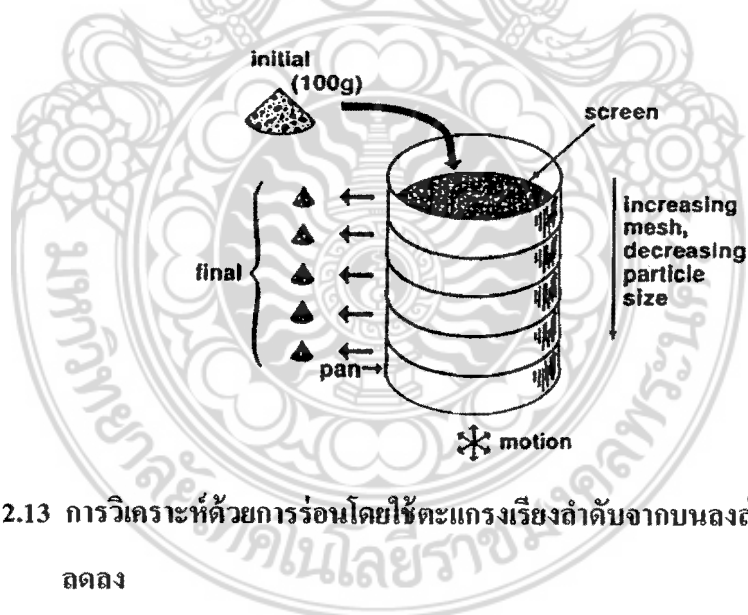
ข) การร่อน (Screening) เป็นเทคนิคที่ใช้มากในการวิเคราะห์ขนาดอนุภาคอย่างรวดเร็ว ช่องสี่เหลี่ยมจัตุรัสเกิดจากการสานของเส้นลวดทำให้เกิดเป็นช่องตะแกรงหรือเมช (Mesh) ขนาดช่องตะแกรงกำหนดด้วยจำนวนเส้นลวดต่อหน่วยตามยาว ขนาดรูเปิด (Opening Size) แปรผกผันกับขนาดช่องตะแกรง (Mesh Size) ขนาดช่องตะแกรงใหญ่หมายถึงขนาดรูเปิดเล็กและในทางกลับกันขนาดช่องตะแกรงเล็กหมายถึงขนาดรูเปิดใหญ่ การบอกขนาดช่องตะแกรงที่นิยมใช้ทั่วไปคือ บอกเป็นจำนวนเส้นลวดต่อความยาวหนึ่งนิ้ว เช่น ตะแกรงขนาด 200 เมช หมายถึงขนาดของเส้นลวด 200 เส้นต่อนิ้ว หรือระยะระหว่างกึ่งกลางเส้นลวดสองเส้นเป็น 127 ไมครอน โดยที่เส้นลวดมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเป็น 52 ไมครอน ดังนั้นขนาดรูเปิดคือ 75 ไมครอน เนื่องจากไม่สามารถทำขนาดรูเปิดเล็กมากได้ ดังนั้นการใช้เทคนิคตะแกรงร่อนนี้ใช้ได้กับอนุภาคที่มีขนาดใหญ่กว่า 38 ไมครอน ถ้าต้องการใช้ตะแกรงกับอนุภาคขนาดเล็ก มีตะแกรงอีกชนิดที่ใช้ไฟฟ้าเรียกว่า “อิเล็กโทรฟอร์ม” (Electroformed) ใช้ได้ถึงอนุภาคขนาด 5 ไมครอน แต่การเกาะตัวกันของอนุภาคกับตะแกรงทำให้มีการใช้อิเล็กโทรฟอร์มน้อย ในทางปฏิบัติตะแกรงชุดมาตรฐานของขนาดรูเปิดที่ใช้ในการร่อนแสดงในตารางที่ 2.6 ชุดของตะแกรงร่อนแต่ละชั้นมีระยะห่างกันประมาณรากที่สองของสอง (สัดส่วนประมาณ 1:1.19)

การใช้ตะแกรงร่อนมีประโยชน์ในการเลือกขนาดผงให้ได้ตามต้องการ วิธีการนี้เรียกว่า “การจำแนกขนาดอนุภาค” ดังนั้นการร่อนจึงช่วยกำจัดขนาดผงที่ไม่ต้องการออกไปได้

ตารางที่ 2.6 ขนาดมาตรฐานตะแกรงร่อน (Standard Sieve Sizes)

ขนาดช่องตะแกรง (Mesh Size)	ขนาดรูเปิด (μm) (Opening)	ขนาดช่องตะแกรง (Mesh Size)	ขนาดรูเปิด (μm) (Opening Size)
18	1000	100	150
20	850	120	125
25	710	140	106
30	600	170	90
35	500	200	75
40	425	230	63

การวิเคราะห์ด้วยการร่อนเริ่มจากการวางตะแกรงซ้อนกัน โดยเรียงขนาดช่องตะแกรงใหญ่ไว้ด้านบนและขนาดลดลงจากบนลงล่าง ดังนั้นขนาดช่องตะแกรงที่เล็กที่สุดอยู่ล่างสุด ดังภาพที่ 2.13 นำผงวัสดุใส่ในตะแกรงด้านบนสุดและเขย่าชั้นตะแกรงเป็นเวลาประมาณ 15 นาที เมื่อเขย่าเสร็จนำผงที่ค้างอยู่ในแต่ละตะแกรงไปชั่งน้ำหนักและคำนวณเปอร์เซ็นต์น้ำหนักของผงแต่ละขนาด ผงอนุภาคที่ผ่านช่องตะแกรงจะให้เครื่องหมายลบ (-) ส่วนผงที่ติดอยู่บนตะแกรงให้เครื่องหมายบวก (+) ตัวอย่างเช่น ผงขนาด -100/+200 เมช คือผงที่ผ่านช่องตะแกรงขนาด 100 เมช แต่ไม่ผ่านช่องตะแกรง 200 เมช และมีขนาดระหว่าง 150 และ 75 ไมครอน



ภาพที่ 2.13 การวิเคราะห์ด้วยการร่อนโดยใช้ตะแกรงเรียงลำดับจากบนลงล่างตามขนาดรูเปิดที่ลดลง

การใช้ตะแกรงร่อนยังมีประโยชน์ในการเลือกขนาดผงให้ได้ตามต้องการ วิธีการนี้เรียกว่า “การจำแนกขนาดอนุภาค” และใช้ในการปรับปรุงการแจกแจงขนาดอนุภาค ในการนำไปประยุกต์ใช้ในงานหลายอย่าง ความสามารถของกระบวนการผลิตของผงอนุภาคขึ้นกับการควบคุมขนาดอนุภาค ดังนั้นการร่อนจึงช่วยกำจัดขนาดผงที่ไม่ต้องการออกไปได้

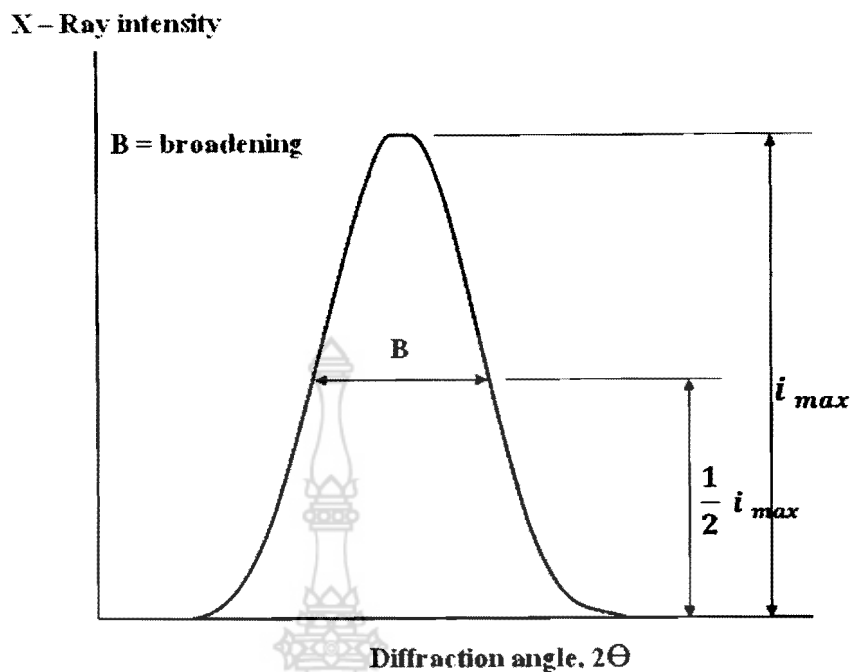
ก) เทคนิครังสีเอกซ์ (X – Ray Technique) การวิเคราะห์ขนาดอนุภาคโดยเทคนิคการใช้รังสีเอกซ์มี 2 เทคนิคที่สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์หาขนาดอนุภาคที่เล็กมาก เทคนิคชนิดที่หนึ่งคือ เทคนิครังสีเอกซ์ใช้ความกว้างของการเลี้ยวเบน ปกติความกว้างของการเลี้ยวเบนในผลึกของวัสดุเป็นผลมาจากหลายสาเหตุ เช่น ความเครียดและผลึกที่มีขนาดเล็ก การรบกวนทำลายการเลี้ยวเบนของผลึกไม่สมบูรณ์ในมุมเลี้ยวเบนที่ห่างจากเงื่อนไขของแบรกก์ (Bragg Condition)

$$\lambda = 2d_{hkl} \sin(\Theta) \quad (2.1)$$

เมื่อ λ เป็นความยาวคลื่นรังสีเอกซ์ d_{hkl} เป็นระยะระหว่างระนาบ และ Θ เป็นมุมเลี้ยวเบนความกว้างของยอดเลี้ยวเบนเพิ่มขึ้นเมื่อความยาวของผลึกลดลง การวิเคราะห์ขนาดอนุภาคด้วยวิธีการใช้รังสีเอกซ์มีประโยชน์มากที่สุดเมื่อวัดความกว้างของยอดครึ่งหนึ่งของความเข้มรังสีสูงสุดดังแสดงในภาพที่ 2.14 ความกว้างของยอดที่ความเข้มรังสีนั้นๆ บางส่วนขึ้นกับจำนวนของระนาบในผลึกเกิดการเลี้ยวเบน สูตรของเชอร์เรอร์ (Scherrer fomular) ใช้สำหรับหาค่าขนาดผลึก (D) ในรูปของความกว้างของยอด (B) มุมเลี้ยวเบน (Θ) และความกว้างคลื่นรังสีเอกซ์ (λ) ดังนี้

$$D = 0.9 \lambda / (B \cos(\Theta)) \quad (2.2)$$

การวัดขนาดผลึกขณะวัดที่มุมเลี้ยวเบนกว้าง (ดัชนีระนาบสูง) และความยาวคลื่นตกกระทบสูง ยิ่งยอดความกว้างของการเลี้ยวเบนกว้างอนุภาคยังมีขนาดเล็กลง



ภาพที่ 2.14 ความกว้างของยอดรังสีเอกซ์วัดในรูปของระยะ B ที่ครึ่งหนึ่งของความเข้มสูงสุด

การวิเคราะห์ขนาดอนุภาคที่ถูกต้องด้วยวิธีการใช้วัดความกว้างของยอดต้องนำผลกระทบจากยอดความเครียดลบบอกเสียก่อน ทำได้โดยการวิเคราะห์ขนาดความกว้างที่มุมเลี้ยวเบนต่างๆ นอกจากนี้ผลกระทบที่เกิดจากตัวเครื่องฉายรังสี คลื่นที่แผ่ออกมา และผลกระทบจากตัวอย่าง ก็ต้องลบบอกด้วยเช่นกัน การวิเคราะห์ด้วยวิธีนี้ให้ผลดีในวัสดุที่ผ่านการอบอ่อนหรือวัสดุเพราะเพราะไม่มีความเครียดเข้ามาเกี่ยวข้อง การใช้วิธีนี้หาขนาดอนุภาคของผงโลหะที่ผ่านการบดมาก่อนที่แสดงความเครียดไม่สม่ำเสมอจะทำให้ผลการวิเคราะห์ไม่ถูกต้อง การแยกความกว้างของยอดที่มาจากขนาดอนุภาคทำได้โดยการลบรูปภาพของการเลี้ยวเบนจากสาเหตุที่ต่างกันเข้ากับฟังก์ชันทดสอบเป็นมาตรฐาน นำมาตรฐานที่ใช้เป็นผลึกขนาดใหญ่ (ใหญ่กว่า 1 ไมครอน) มาประยุกต์ใช้หาขนาดอนุภาค โดยวัดความกว้างที่มุมเลี้ยวเบนที่ใกล้เคียงกัน ถ้าให้ (B_p) เป็นความกว้างของยอดที่เกิดจากผลกระทบทั้งหมด ดังนั้นความความกว้างจากขนาดอนุภาค (B) คำนวณจากความแตกต่างของกำลังสองของความกว้างของยอดผลกระทบทั้งหมดกับความกว้างของยอดมาตรฐาน ดังนี้

$$B_2 = B_T^2 - B_S^2 \quad (2.3)$$

เมื่อ B_S เป็นความกว้างของยอดมาตรฐาน เทคนิคนี้ใช้ประยุกต์ได้ดีที่สุดกับอนุภาคที่มีขนาดอยู่ในช่วง 50 นาโนเมตร ภายใต้เงื่อนไขการทดลองอย่างระมัดระวัง การใช้ความกว้างของยอดรังสีเอกซ์ใช้ได้กับอนุภาคที่มีขนาดเล็กมากจนถึงขนาด 0.2 ไมครอน (200 นาโนเมตร) แต่เทคนิคนี้ให้ค่าเฉลี่ยของผลึก (อนุภาค) เท่านั้น โดยไม่บอกลักษณะการกระจายของข้อมูลหรือข้อมูลเกี่ยวกับรูปร่าง

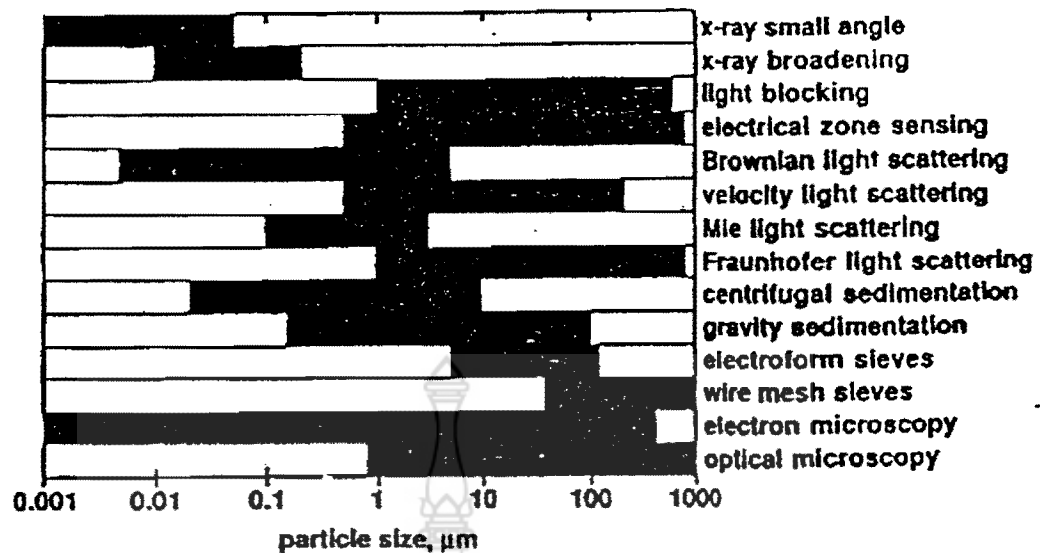
เทคนิคชนิดที่สองคือการกระเจิงมุมเล็ก ซึ่งใช้ในการแจกแจงอนุภาคถ้าทราบรูปร่างของอนุภาค ความเข้มของรังสีเอกซ์ที่กระเจิงจากมุมเล็กแปรผันตามปริมาตรอนุภาค การกระเจิงรังสีเอกซ์แบบมุมเล็กมีประโยชน์มากสำหรับอนุภาคขนาดเล็กกว่า 50 นาโนเมตร การใช้เทคนิคนี้มีสมมติฐานว่าอนุภาคมีการกระจายโดยไม่มีกรอบกวนกันระหว่างอนุภาค การวัดความเข้มข้นและมุมของรังสีเอกซ์อยู่ในช่วง 0 – 3 องศา เพื่อใช้ประมาณค่าการแจกแจงขนาดอนุภาคหรือรูปร่างอนุภาค

ง) การเปรียบเทียบเทคนิคการวิเคราะห์ขนาดอนุภาค ขึ้นกับการวัดการตอบสนองของอนุภาคกับการทดสอบทางกายภาพ โดยทั่วไปสมมติให้อนุภาคเป็นทรงกลมซึ่งบ่อยครั้งส่งผลให้เกิดความยุ่งยากจากสมการนี้ เพราะแต่ละเทคนิควิเคราะห์มีการทดสอบลักษณะสมบัติทางกายภาพที่ต่างกัน และสมมติฐานที่ให้อนุภาคเป็นทรงกลมทำให้การใช้เทคนิคต่างๆ ในการวิเคราะห์ขนาดอนุภาคให้ผลที่ต่างกันมากในผงโลหะบางอย่าง ตารางที่ 2.7 และภาพที่ 2.15 แสดงข้อเปรียบเทียบของเทคนิคต่างๆ ที่ใช้สำหรับการวิเคราะห์ขนาดอนุภาคและช่วงอนุภาค โดยประมาณที่สามารถนำไปใช้ได้ อัตราส่วนพลวัต ขนาดตัวอย่างโดยประมาณ เวลาที่ใช้ในการวิเคราะห์โดยประมาณ และเกณฑ์ที่ใช้ในการแจกแจงขนาดอนุภาค โดยทั่วไปรูปและตารางจะสะท้อนช่วงการวัดที่ดีที่สุดที่เป็นไปได้สำหรับผงโลหะ บ่อยครั้งที่ช่วงขนาดอนุภาคที่กว้างและอัตราส่วนพลวัตค่าต่างๆ ถูกนำมาอ้างแต่ไม่นำมาใช้กับอนุภาคโลหะที่มีความหนาแน่นมากและขนาดอนุภาคหยาบ ตามหลักการของการวิเคราะห์ขนาดอนุภาคที่ถูกต้องให้ง่ายที่สุดสามารถที่จะใช้เครื่องมืออย่างง่ายและหลักการพื้นฐานทางกายภาพได้ ดังนั้นการเลือกใช้เทคนิคต่างๆ ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่างรวมทั้งช่วงขนาดอนุภาคโดยประมาณ

ตารางที่ 2.7 การเปรียบเทียบวิธีการวิเคราะห์ขนาดอนุภาค

เทคนิค	ช่วงขนาดอนุภาค (μm)	อัตราส่วน พลวัต	ขนาดตัวอย่าง (g)	ความเร็ว สัมพัทธ์	เกณฑ์
จุลทรรศน์ศาสตร์ แสง อิเล็กตรอน	0.8 และมากกว่า	30	< 1	S	P
	0.001 – 400	30	< 1	S	P
การร่อน ตะแกรงลวด อิเล็กโทรฟอร์ม	38 และมากกว่า	20	100	I	W
	5 – 120	20	> 5	S	W
การตกตะกอน แรงโน้มถ่วง แรงหนีศูนย์กลาง	0.2 – 100	50	5	I	W
	0.02 – 10	50	1	S	W
การกระเจิงแสง Fraunhofer Mie ความเร็ว Brownian	1 – 800	< 200	< 5	F	W
	0.1 – 3	30	1	F	W
	0.5 – 200	400	1	F	P
	0.005 – 5	1000	< 1	I	P
รังสีเอกซ์ ความกว้าง มุมเล็ก	0.01 – 0.2	-	1	S	P
	0.001 – 0.05		1	S	P

หมายเหตุ S = ช้า (1 ชั่วโมง หรือมากกว่า) I = ปานกลาง (ประมาณครึ่งชั่วโมง)
 F = เร็ว (15 นาที หรือน้อยกว่า) P = เกณฑ์จำนวนประชากร
 W = เกณฑ์น้ำหนัก



ภาพที่ 2.15 กราฟเปรียบเทียบการวิเคราะห์ขนาดอนุภาคและช่วงขนาดที่เหมาะสมสำหรับแต่ละเทคนิค

2.3.1.3 ข้อมูลอนุภาค (Particle Size Data)

การเก็บข้อมูลขนาดอนุภาคเพื่อการวิเคราะห์คุณลักษณะการแจกแจงของขนาดอนุภาคมักเขียนในรูปฮิสโตแกรมหรือกราฟความถี่ที่แสดงจำนวนผงในแต่ละขนาด ค่าฐานนิยม (Mode) คือขนาดอนุภาคที่เกิดขึ้นมากที่สุด พิจารณาข้อมูลจากตะแกรงร่อน (Sieve Data) ในตารางที่ 2.8 ซึ่งแสดงน้ำหนักของผงในแต่ละชั้นของตะแกรงหลังการเขย่า เริ่มต้นการวิเคราะห์โดยการเปลี่ยนน้ำหนักที่อยู่ในแต่ละตะแกรงเป็นเปอร์เซ็นต์โดยการหารน้ำหนักในแต่ละตะแกรงด้วยน้ำหนักของตัวอย่างผงทั้งหมด ฮิสโตแกรมสำหรับข้อมูลนี้สร้างโดยการเขียนเปอร์เซ็นต์ในแต่ละตะแกรงกับขนาดรูเปิด กราฟในภาพที่ 2.16 ใช้ข้อมูลจากตารางที่ 2.8 เห็นได้ว่าขนาดอนุภาคถูกแปลงให้อยู่ในสเกลล็อก ทำให้ช่วงความกว้างที่เพิ่มขึ้นมีค่าเท่ากัน โดยทั่วไปกราฟของผงโลหะมีลักษณะเป็นเส้นโค้งรูประฆังคว่ำ (Bell Shape Curve) ที่เรียกว่า “การแจกแจงแบบเกาส์เซียนหรือการแจกแจงแบบปกติ” เมื่อเขียนกราฟโดยใช้สเกลล็อกกับขนาดอนุภาค เรียกว่า “สเกลกึ่งล็อก” ส่วนการแจกแจงอนุภาคแบบสะสมสร้างโดยการเพิ่มค่าเปอร์เซ็นต์ของแต่ละช่วง และเขียนผลที่ได้กับการลดลงของขนาดอนุภาค การเปรียบเทียบการแจกแจงทำได้โดยการเขียนเปอร์เซ็นต์สะสมเล็กกว่า หรือใหญ่กว่าขนาดที่กำหนด จากนั้นทำการปรับเรียบเส้นโค้งผ่านจุดต่างๆ ดังภาพที่ 2.17

จากการแจกแจงอนุภาคสะสมที่ผ่านการปรับเรียบมัธยฐานของขนาด หาได้จากค่าเปอร์เซ็นต์ที่ 50 ส่วนฐานนิยมของขนาดอนุภาคคือ ขนาดที่มีความถี่มากที่สุดหรือแท่งที่มียอดสูงสุดในการกระจายฮิสโตแกรม ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานและค่าเฉลี่ยของอนุภาคคำนวณตามวิธีปกติทั่วไปขนาดเบี่ยงเบนมาตรฐาน ($\pm 1\sigma$) ที่สอดคล้องกับขนาดอนุภาค คือขนาดอนุภาคที่เปอร์เซ็นต์ประมาณ 84 เปอร์เซ็นต์ และ 16 เปอร์เซ็นต์

จากฮิสโตแกรมขนาดอนุภาคค่าเฉลี่ยทางเรขาคณิต D_{am} และค่าเฉลี่ยทางเรขาคณิต D_{gm} คำนวณดังนี้

$$D_{am} = \left(\frac{1}{n}\right) \sum y_i D_i \quad (2.4)$$

$$\log(D_{am}) = \left(\frac{1}{n}\right) \sum y_i \log(D_i) \quad (2.5)$$

เมื่อ D_i คือค่ากลางของแต่ละช่วงขนาด y_i คือความถี่ของการเกิดในแต่ละช่วงขนาด และ N คือจำนวนข้อมูลทั้งหมด (N คือผลบวกของ y_i ในแต่ละช่วงขนาด) และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน σ คำนวณจากค่าเฉลี่ยเลขคณิตดังนี้

$$\sigma = \left[\left(\frac{1}{N}\right) \sum D_i^2 y_i - D_{am}^2\right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.6)$$

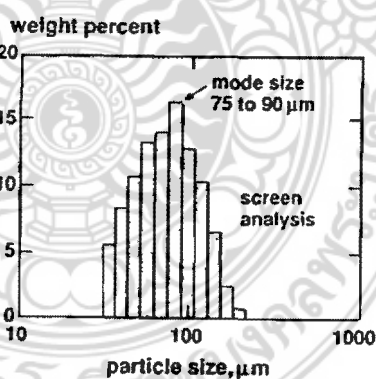
ตารางที่ 2.8 ตัวอย่างข้อมูลการแจกแจงขนาดอนุภาค (น้ำหนักทั้งหมด 122.6 กรัม)

ขนาดตะแกรง	ขนาดรูเปิด (mm)	น้ำหนักผงโลหะในตะแกรง (g)	เปอร์เซ็นต์น้ำหนัก	เปอร์เซ็นต์สะสม (เล็กกว่า)	เปอร์เซ็นต์สะสม (ใหญ่กว่า)
70	212	0.0	0.0	100.0	0.0
80	180	1.1	0.90	99.1	0.90
100	150	3.0	2.45	96.65	3.35
120	125	8.7	7.10	89.55	10.45
140	106	13.2	10.77	78.78	21.22
170	90	26.5	13.46	65.32	34.68

ตารางที่ 2.8 ตัวอย่างข้อมูลการแจกแจงขนาดอนุภาค (น้ำหนักทั้งหมด 122.6 กรัม) (ต่อ)

ขนาด ตะแกรง	ขนาดรูเปิด (μm)	น้ำหนักผง โลหะใน ตะแกรง (g)	เปอร์เซ็นต์ น้ำหนัก	เปอร์เซ็นต์ สะสม (เล็กกว่า)	เปอร์เซ็นต์ สะสม (ใหญ่กว่า)
200	75	20.8	16.96	48.36	51.64
230	63	18.0	14.68	33.68	66.32
270	53	16.9	13.78	19.9	80.10
325	45	13.6	11.09	8.91	91.19
400	38	10.8	8.81	0.0	100.0
500	25	0.0	0.0	0.0	100.0

ก) หลักเกณฑ์การพล็อต (Basic for Plots) การวิเคราะห์ขนาดอนุภาคที่ใช้เทคนิค จุลทรรศน์ให้ค่าจำนวนอนุภาค (ประชากร) และขนาดอนุภาค แต่การวิเคราะห์โดยใช้เทคนิคการ ร่อนทำให้ทราบการแจกแจงของน้ำหนักอนุภาค ดังนั้นในการวิเคราะห์ขนาดอนุภาคจำเป็นต้อง บอกหลักเกณฑ์ที่ใช้เพื่อเป็นข้อมูลในการพล็อต พิจารณาความยุ่งยากในการเปรียบเทียบข้อมูลสอง ชุดที่ใช้เกณฑ์แตกต่างกัน การแจกแจงโดยใช้เกณฑ์น้ำหนักให้ข้อมูลขนาดอนุภาคที่เบี่ยงไปทางขนาด หยาบเมื่อเปรียบเทียบกับกร ใช้เกณฑ์การแจกแจงจำนวนอนุภาค นำข้อมูลขนาดอนุภาคจากภาพที่ 2.16 มาพล็อตใหม่อีกครั้ง โดยพล็อตรวมกับการแจกแจงที่ใช้เกณฑ์จำนวนประชากรอนุภาคจากผง ชนิดเดียวกัน

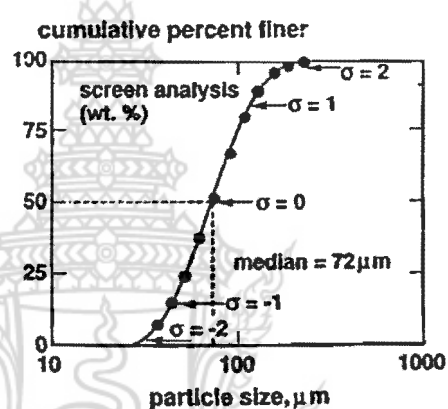


ภาพที่ 2.16 ฮิสโตแกรมข้อมูลการร่อนจากตารางที่ 2.8 ขนาดอนุภาคแสดงในสเกลล็อก

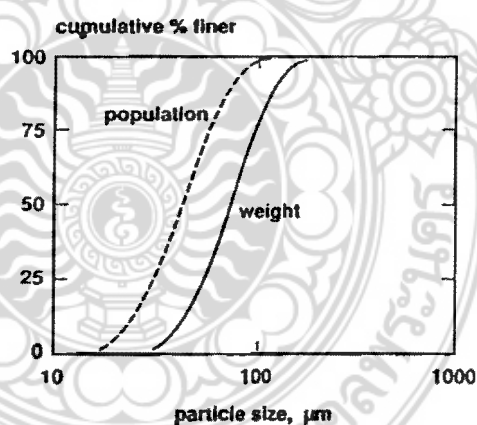
ภาพที่ 2.17 ความแตกต่างที่เห็นได้ชัดของการแจกแจงทั้งสองคู่ได้จากขนาดมัธยฐานหรือขนาดที่เปอร์เซ็นต์สะสมเท่ากับ 50 เปอร์เซ็นต์ (72 ไมครอน กับ 42 ไมครอน) การเปรียบเทียบขนาดอนุภาคจากเกณฑ์ทั้งสองทำได้โดยใช้หลักการต่อไปนี้ คือที่ขนาดอนุภาคใดๆ ถ้าสมมติให้ขนาดอนุภาคมีรูปร่างเป็นทรงกลม การคำนวณจำนวนอนุภาค (n) เมื่อทราบน้ำหนักของอนุภาค (W) และความหนาแน่นตามทฤษฎีของอนุภาค (ρ_m) ได้ดังนี้

$$n = \frac{6W}{\rho_m \pi D^3} \quad (2.7)$$

เมื่อ D คือขนาดอนุภาค การแจกแจงขนาดอนุภาคระหว่างเกณฑ์น้ำหนักและเกณฑ์จำนวนอนุภาค ไม่มีการเปรียบเทียบโดยตรง

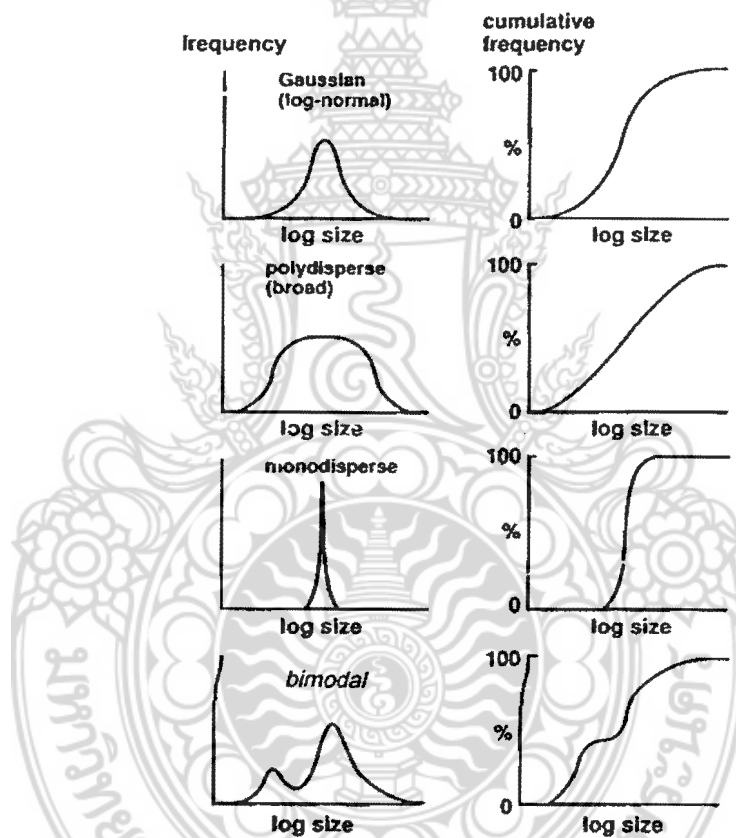


ภาพที่ 2.17 กราฟของการแจกแจงขนาดอนุภาคสะสมข้อมูลในตารางที่ 2.8



ภาพที่ 2.18 การเปรียบเทียบการแจกแจงขนาดอนุภาคสะสมระหว่างการใช้น้ำหนักและเกณฑ์จำนวนอนุภาค

ข) การแจกแจงทั่วไป (Commons Distributions) เส้นโค้งรูประฆังคว่ำเกิดขึ้นเมื่อพล็อตข้อมูลขนาดอนุภาคบนสเกลล็อกกับความถี่ดังแสดงในภาพที่ 2.19 ที่แสดงในภาพของฮิสโตแกรมและเส้นโค้งรูประฆังคว่ำได้จากการเชื่อมต่อจุดกึ่งกลางของแต่ละแท่งฮิสโตแกรมจากรูปพล็อตหลายรูปแบบ และแสดงให้เห็นความผันแปรต่างๆ เช่น การแจกแจงช่วงกว้างและการแจกแจงช่วงแคบ และการแจกแจงแบบมีสองยอด โดยทั่วไปการผลิตผงโลหะแบบปกติไม่สามารถทำให้ได้ผงโลหะเดียวกันทั้งหมดได้ ขนาดผงที่ผลิตออกมาส่วนใหญ่ให้ลักษณะกราฟที่มีการกระจายหลายยอดที่มีช่วงอนุภาคกว้าง ถ้าต้องการให้ผงที่ผลิตได้มีขนาดเท่ากันทั้งหมดต้องใช้วิธีการพิเศษในการผลิต ด้วยเหตุนี้จึงจำเป็นต้องทราบค่าข้อมูลเกี่ยวกับขนาดมัธยฐาน หรือค่าเฉลี่ย และลักษณะการแจกแจงขนาดอนุภาค ค่าที่ใช้บอกการกระจายของข้อมูลที่แท้จริงคือค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน



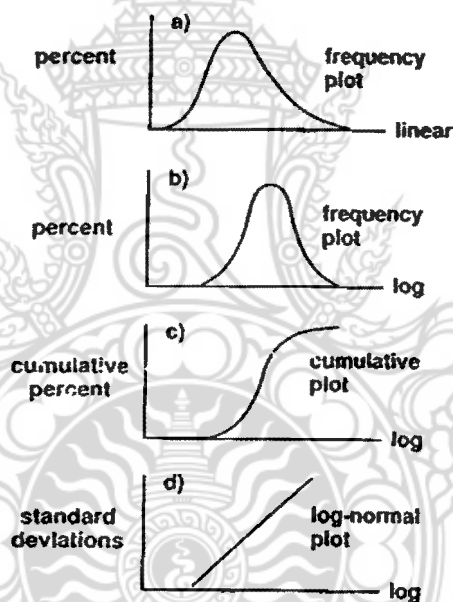
ภาพที่ 2.19 การเปรียบเทียบชนิดการแจกแจงขนาดอนุภาค

ค) การแจกแจงขนาดกึ่งล็อก (Log - Normal Size Distributions) ผงวัสดุส่วนใหญ่ที่ไม่ได้ผ่านการร่อนมีรูปแบบการแจกแจงขนาดอนุภาคกึ่งล็อกโดยธรรมชาติการแจกแจงขนาดอนุภาคแบบกึ่งล็อกมีรูปร่างเป็นระฆังคว่ำเมื่อพล็อตให้ความถี่อยู่ในสเกลปกติและขนาดอนุภาคอยู่บนสเกลล็อก การแจกแจงขนาดอนุภาคใช้หลักการทางคณิตศาสตร์อธิบาย โดยการปรับรูปฟอร์มของฟังก์ชันความน่าจะเป็นเกาส์เซียน ให้ $P(x)$ เป็นความน่าจะเป็นของขนาดอนุภาคที่อธิบายได้โดยให้ $x = \ln(\text{ขนาดอนุภาค})$ ดังนี้

$$P(x) = (2\pi\sigma_x^2)^{-\frac{1}{2}} \exp \left[-\frac{(x-U)^2}{2\sigma_x^2} \right] \quad (2.8)$$

เมื่อ U เป็นล็อกฐานธรรมชาติของขนาดอนุภาคเฉลี่ย และ σ_x เป็นค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานของการแจกแจง (บนสเกลล็อก)

$$\sigma_x = \ln \left(\frac{D_{94}}{D_{50}} \right) = \ln \left(\frac{D_{50}}{D_{16}} \right) \quad (2.9)$$



ภาพที่ 2.20 การแจกแจงขนาดอนุภาคจากพื้นฐานสี่ชนิด a) ความถี่และขนาดอนุภาคบนสเกลปกติ b) ความถี่และขนาดอนุภาคบนสเกลล็อก c) ความถี่สะสมและขนาดอนุภาคบนสเกล d) การแจกแจงขนาดแบบกึ่งล็อกแสดงความเบี่ยงเบนเป็นฟังก์ชันของขนาดอนุภาค

ภาพที่ 2.20 แสดงการเปรียบเทียบการแจกแจงขนาดอนุภาคที่เขียนบนสเกลฐานต่างๆ การใช้สเกลปกติในการพล็อตขนาดอนุภาคแสดงให้เห็นการเบ้ของการแจกแจงขนาดอนุภาค ถ้าพล็อตในสเกลล็อกจะให้ลักษณะการแจกแจงเป็นเส้นโค้งระฆังคว่ำ การแจกแจงขนาดอนุภาคสะสม $F(x)$ แสดงในรูปของการอินทิเกรตฟังก์ชัน $P(x)$ ในช่วงตั้งแต่ 0 ถึง x

$$F(x) = \int_0^x P(x)dx \quad (2.10)$$

เมื่อพิจารณารูปของความเป็นเบ้บนมาตรฐานแทนที่จะเป็นค่าร้อยละ จะเห็นว่าค่าความเป็นเบ้บนมาตรฐานสอดคล้องกับค่าเฉพาะของจุดร้อยละ เช่น ความเป็นเบ้บนมาตรฐานที่มีค่าเท่ากับศูนย์จากค่าเฉลี่ยทางคณิตศาสตร์ก็คือค่าเฉลี่ยของขนาดอนุภาคโดยรวมทั้งหมด ค่าความเป็นเบ้บนมาตรฐานและจุดเปอร์เซ็นต์สะสมที่สอดคล้องกันแสดงในตารางที่ 2.9

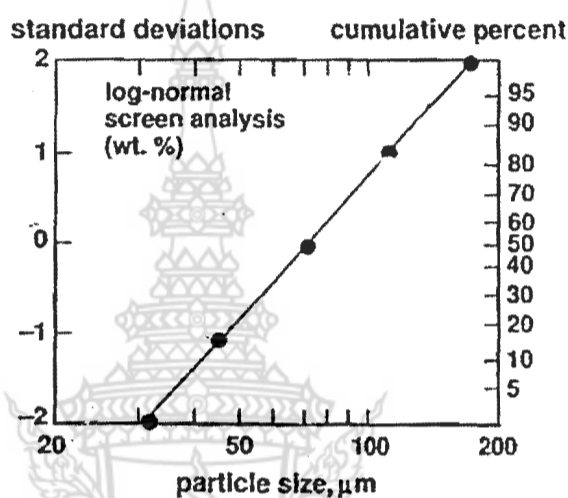
การแจกแจงขนาดอนุภาคแบบกึ่งล็อกสร้างโดยการพล็อตจุดเปอร์เซ็นต์การแจกแจงสะสมอีกครั้งในรูปของส่วนที่เบ้บน เช่น กราฟในภาพ 2.20d) ผงโลหะหลายชนิดให้ค่าพฤติกรรมของกราฟกึ่งล็อกออกมาเป็นเส้นตรง ดังนั้นการแจกแจงขนาดอนุภาคจึงสามารถลดพารามิเตอร์ลงเหลือเพียงสองตัว คือความชันและจุดตัด หรือความชันและขนาดเฉลี่ยของอนุภาค ข้อดีของการทำอย่างนี้คือ กราฟนี้สามารถใช้เป็นหลักฐานที่เหมาะสมเมื่อต้องมีการเปรียบเทียบการแจกแจงขนาดอนุภาคที่ใช้เทคนิคการวัดที่ต่างกัน ภาพที่ 2.21 ใช้ข้อมูลขนาดอนุภาคจากตารางที่ 2.9 และเขียนกราฟแจกแจงสะสมบนกราฟกึ่งล็อก จุดเบ้บนมาตรฐานในภาพที่ 2.17 ถูกนำมาใช้ในกราฟนี้และให้การแจกแจงที่มีลักษณะเป็นเส้นตรง

ตารางที่ 2.9 จุดร้อยละและค่าเบ้บนมาตรฐานบนการแจกแจงขนาดอนุภาคสะสม

ค่าเบ้บน	ค่าร้อยละ
-2.0	2.28
-1.5	6.68
-1.0	15.87
-0.5	31.85
0.0	50.00

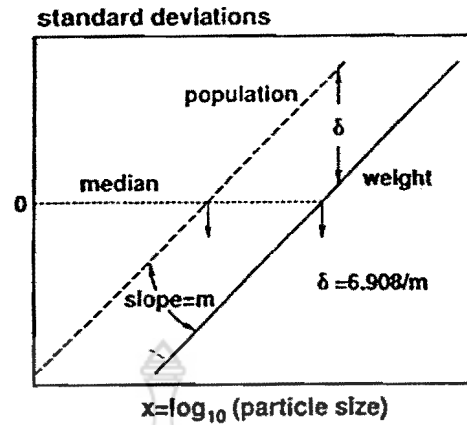
ตารางที่ 2.9 จุดร้อยละและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานบนการแจกแจงขนาดอนุภาคสะสม (ต่อ)

ค่าเบี่ยงเบน	ค่าร้อยละ
0.5	69.15
1.0	84.13
1.5	93.32
2.0	97.72



ภาพที่ 2.21 กราฟการแจกแจงขนาดอนุภาคจากตารางที่ 2.9 โดยใช้จุดเบี่ยงเบนมาตรฐาน

ปัญหาที่เกิดขึ้นในการเปรียบเทียบการวิเคราะห์ข้อมูลอนุภาคที่มาจากกรร่อนและจุลทรรศน์ศาสตร์ การร่อนให้ข้อมูลขนาดอนุภาคโดยใช้เกณฑ์น้ำหนักแต่กล้องจุลทรรศน์ให้ค่าบนเกณฑ์จำนวนอนุภาค หนึ่งในข้อดีของการแจกแจงแบบกึ่งล็อกคือสามารถใช้เปรียบเทียบข้อมูลได้ค่อนข้างง่าย ถ้าทราบความชันและจุดตัดของการแจกแจงก็สามารถประมาณการแจกแจงแบบอื่นๆ ได้โดยการเคลื่อนที่ การแปลงรูปข้อมูลต้องให้ค่าความชันคงที่บนพื้นฐานของการแจกแจงแบบกึ่งล็อก และการแปลงรูปข้อมูลต้องคำนวณพารามิเตอร์ที่ใช้ในการแทนที่ σ ซึ่งแสดงในภาพที่ 2.22 ในการเปลี่ยนรูปการแจกแจงโดยเกณฑ์น้ำหนักไปเป็นการแจกแจงโดยเกณฑ์จำนวนอนุภาค การแทนที่ต้องมีค่าเพิ่มขึ้นและขนาดของการแทนที่ขึ้นกับความชัน m



ภาพที่ 2.22 กราฟที่งัดล็อกของการแจกแจงขนาดอนุภาคที่แปลงรูปจากเกณฑ์น้ำหนักเป็นจำนวนอนุภาค ระยะการเคลื่อนที่ในแนวตั้ง δ ขึ้นอยู่กับความชันของการแจกแจง

$$\delta = \frac{6.908}{m} \quad (2.11)$$

เมื่อขนาดอนุภาคอยู่ในรูปของสเกลล็อกฐาน 10 มีข้อสังเกตว่า 6.908 มีค่าเท่ากับ 3 คูณด้วย $\log_e 10$ เมื่อ e คือ ค่าของล็อกฐานธรรมชาติ และ 3 คือ ค่ายกกำลังของขนาดอนุภาคในสมการเปลี่ยนรูปการแจกแจงจากเกณฑ์จำนวนอนุภาคไปเป็นเกณฑ์จำนวนน้ำหนัก พารามิเตอร์ การแทนค่าเป็นลบหรือทำให้ค่าลดลงที่ปริมาณเท่าเดิม เมื่อการแปลงรูปเสร็จสมบูรณ์สามารถหาค่าขนาดมัธยฐานได้อย่างตรงไปตรงมา หรือที่สามารถทำได้คือการคำนวณค่ามัธยฐานโดยวิธีทางคณิตศาสตร์ ขนาดมัธยฐาน D_{mw} สำหรับการแจกแจงขนาดอนุภาคโดยเกณฑ์น้ำหนักมีค่าดังนี้

$$D_{mw} = 10^{-b/m} \quad (2.12)$$

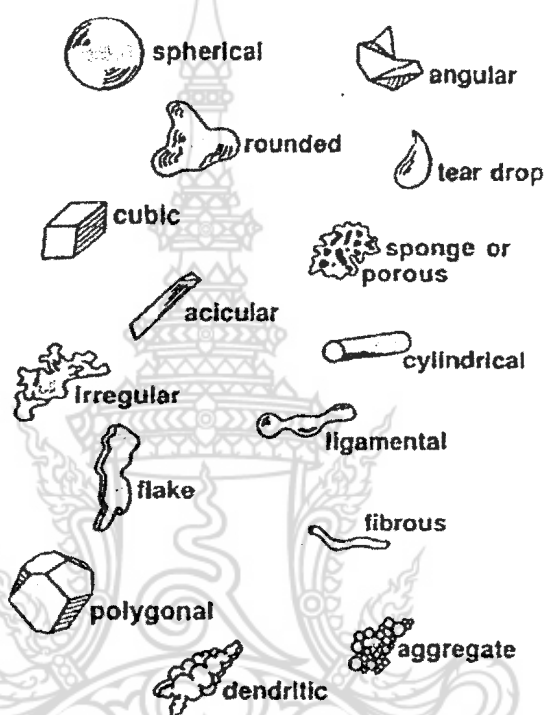
และขนาดมัธยฐานของเกณฑ์จำนวนขนาดอนุภาค D_{mp} เท่ากับ

$$D_{mp} = 10^{-(b+\delta)/m} \quad (2.13)$$

เมื่อ b คือค่าจุดตัด (ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานที่สอดคล้องกับขนาดอนุภาค 1 ไมครอน และ m เป็นค่าความชันของการแจกแจงขนาดอนุภาคซึ่งมีค่ามาก ค่า δ ยังมีขนาดลดลงหรือกล่าวอีกในหนึ่งคือขนาดมัธยฐานของเทคนิคทั้งสองมีค่าใกล้เคียงกัน

2.3.1.4 รูปร่างอนุภาค (Particle Shape)

รูปร่างของอนุภาคที่มีผลกระทบต่อความเร็ว การไหล และความสามารถในการอัดตัว นอกจากนี้ยังให้ข้อมูลเกี่ยวกับวิธีเกี่ยวกับการผลิตผงอนุภาค และช่วยในการอธิบายลักษณะเฉพาะของกระบวนการผลิตแบบต่างๆ เนื่องจากมีความยุ่งยากในการให้ข้อมูลเชิงตัวเลขเกี่ยวกับรูปร่างของอนุภาค ดังนั้นจึงนิยมใช้การอธิบายในการให้ความหมายของรูปร่างอนุภาค ภาพที่ 2.23 แสดงรูปร่างอนุภาคแบบต่างๆ โดยการบรรยายลักษณะ

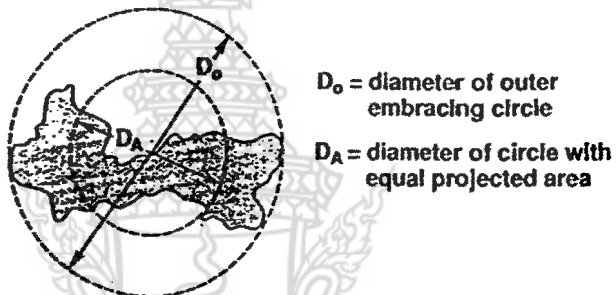


ภาพที่ 2.23 แสดงลักษณะรูปร่างอนุภาค

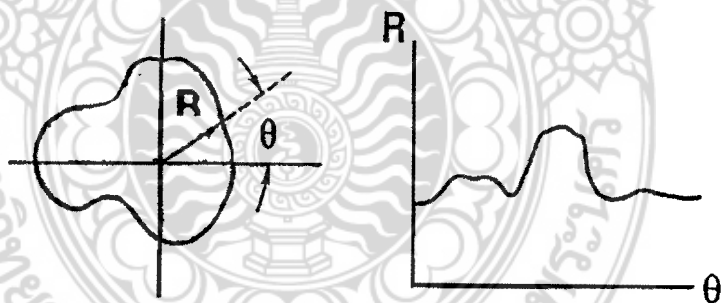
รูปร่างอนุภาคแปรตามขนาดและวิธีการผลิต การวิเคราะห์รูปร่างอนุภาคมีหลายวิธี โดยใช้วิธีการอธิบายเชิงตัวเลขอย่างง่าย คือวิธีแอสเพกเรโต (Aspect Ratio) ซึ่งหมายถึงขนาดของอนุภาคด้านที่มากที่สุดส่วนด้วยด้านที่น้อยที่สุด สำหรับอนุภาคทรงกลมมีค่าแอสเพกเรโตเท่ากับหนึ่ง ขณะที่รูปทรงลิกาเมนต์ (Ligament) มีค่าแอสเพกเรโตระหว่าง 3 ถึง 5 อนุภาค รูปเกร็ดแผ่น (Flake) มีค่าแอสเพกเรโตสูงกว่า 10 และบางครั้งอาจสูงถึง 200 โดยทั่วไปเทคนิคจุลทรรศน์ศาสตร์เป็นเทคนิคที่เหมาะสมสำหรับการบอกรูปร่างอนุภาค

พิจารณารูปร่างที่ไม่แน่นอนดังภาพที่ 2.24 พารามิเตอร์ใช้บอกรูปร่างจากภาพฉายมิได้หลายตัว อาจบอกในรูปของอัตราส่วน D_o / D_A โดยที่ D_o เป็นเส้นผ่าศูนย์กลางวงกลมรอบนอก และ D_A เป็นเส้นผ่าศูนย์กลางของวงกลมเทียบเท่าที่ใช้เกณฑ์พื้นที่ภาพฉาย จนถึงปัจจุบันนี้การอธิบายรูปร่างอนุภาคโดยวิธีจุลทรรศน์ศาสตร์เป็นวิธีที่เข้าใจง่ายที่สุดและค่อนข้างง่ายในการดูภาพฉาย

การวิเคราะห์รูปทรงอนุภาคทำให้ได้พารามิเตอร์รูปทรงอนุภาคที่ซับซ้อน ถ้าใช้ระบบพิกัดขั้วที่วัดที่จุดศูนย์กลางภายในอนุภาคดังภาพด้านขวาในภาพที่ 2.25 และเขียนเส้นรอบนอกตามพื้นผิว ภาพที่ได้มีลักษณะใกล้เคียงกับภาพด้านขวาในภาพที่ 2.25 ตำแหน่งพื้นผิวจากการลอกภาพกลายเป็นเส้นแสดงรูปร่างในระบบสองแกน รูปทรงอนุภาคที่ได้จากวิธีนี้อาจใช้เสริมกับเทคนิคการใช้กล้องจุลทรรศน์ ดังนั้นการใช้การอธิบายเชิงตัวเลขอย่างง่ายผสมกับการใช้ภาพถ่ายจาก SEM เป็นวิธีการที่มีประสิทธิภาพสูงสุดในการบอกรูปร่างอนุภาค



ภาพที่ 2.24 ภาพอนุภาครูปทรงไม่แน่นอนและการวัดขนาดในรูปของเส้นผ่านศูนย์กลางวงกลม



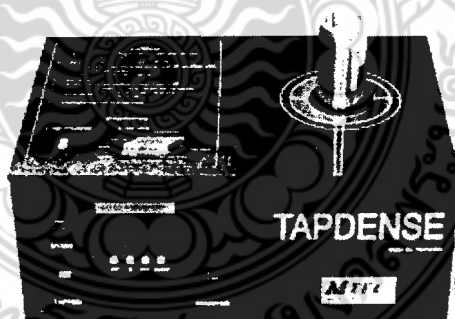
ภาพที่ 2.25 รูปทรงอนุภาคแสดงให้เห็นวิธีการวิเคราะห์รูปทรงอนุภาค เส้นแสดงลักษณะอนุภาคภายนอกใช้เป็นฟังก์ชันบอกความสัมพันธ์ระหว่าง ความยาวรัศมี R และมุม θ

2.3.1.5 แรงเสียดทานระหว่างอนุภาค (Interparticle Friction)

เมื่อกล่าวถึงแรงเสียดทานระหว่างอนุภาคมีค่าที่เข้ามาเกี่ยวข้องกับอยู่สองค่าคือ การไหลและการจัดเรียงตัวของผง ปัจจัยที่มีต่อแรงเสียดทานต่ออนุภาคคือพื้นที่ผิว ความขรุขระของพื้นผิว และส่วนประกอบทางเคมีของพื้นผิว เมื่อพื้นที่ผิวทางเคมีเพิ่มขึ้นแรงเสียดทานในมวลของผงก็เพิ่มขึ้นด้วยทำให้ประสิทธิภาพการไหลการจัดเรียงตัวของอนุภาคลดลง สิ่งเหล่านี้มีความสำคัญในการเติมผงโลหะลงในแม่พิมพ์อัดขึ้นรูปผง การบรรจุ การขนส่ง การผสมและการบดผสม

ความต้านทานการไหลเป็นลักษณะความสำคัญต่อการเสียดทาน ความต้านทานการไหลทำให้ความหนาแน่นหรือสมบัติการจัดเรียงตัวลดลงเพราะการไหลผ่านกันระหว่างอนุภาคไม่ดี ดังนั้นจึงต้องมีการวัดแรงเสียดทานระหว่างอนุภาค อาจวัดอยู่ในรูปของความหนาแน่นปรากฏ (Apparent Density) หรือความหนาแน่นมวลรวมของผง เป็นความหนาแน่นของผงอยู่ในสถานะหลวม (Loose) ส่วนความหนาแน่นเคาะ (Tap Density) เป็นความหนาแน่นสูงสุดที่ได้จากการสั่นหรือเคาะ โดยไม่มีแรงกระทำจากแรงภายนอก

การทดสอบความเสียดทานระหว่างอนุภาคที่ง่ายอีกวิธีหนึ่งคือ การวัดความหนาแน่นเคาะ วิธีการวัดทำได้โดยการนำผงที่ทราบปริมาตรบรรจุลงในกระบอก ดังภาพที่ 2.26 จากนั้นสั่นผงที่อยู่ในทรงกระบอก 1000 ถึง 3000 ครั้ง ด้วยความเร็ว 284 ครั้งต่อนาที โดยการเหวี่ยงลูกเบี้ยวขนาด 3.2 มิลลิเมตร โดยปกติปริมาตรเริ่มต้นของผงเท่ากับ 25 ลูกบาศก์มิลลิเมตร ปริมาตรของผงลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อเริ่มต้นสั่น และในที่สุดก็ไม่ลดลงอีก คำนวณความหนาแน่นเคาะได้จาก มวลหารด้วยปริมาตรสุดท้ายที่ได้ ความหนาแน่นเคาะที่ได้มีค่าสูงกว่าความหนาแน่นปรากฏ ทั้งความหนาแน่นเคาะและความหนาแน่นปรากฏบอกในรูปของความหนาแน่นทฤษฎี



ภาพที่ 2.26 เครื่องมือวัดความหนาแน่นเคาะ

2.3.1.6 ความสามารถในการอัดของโลหะผง (Compressibility)

การประยุกต์ใช้งานที่สำคัญของผงโลหะคือ การขึ้นรูปที่ซับซ้อนโดยวิธีการอัด พฏิกิริยาการอัดจึงเป็นความสำคัญ ความสามารถในการอัดหรือการอัดได้เป็นการวัดการทำให้ผงแน่นขึ้นภายใต้แรงกระทำ รูปทรงเรขาคณิตที่ใช้ในการทดสอบเป็นรูปทรงกระบอกหรือแท่งสี่เหลี่ยมอย่างง่าย ให้แรงกระทำผ่านแม่พิมพ์ที่บรรจุผงอยู่ภายในและวัดความหนาแน่นหลังการอัดแรงที่ใช้โดยทั่วไปประมาณ 414 MPa หรือ 30 ตัน/ตารางนิ้ว ความหนาแน่นที่ได้เรียกว่า “ความหนาแน่นกรีน” (Green Density) หรือความหนาแน่นก่อนอบผืนิก ซึ่งใช้เป็นเกณฑ์ในการบอกความสามารถในการอัด โดยทั่วไปผงเหล็กมีความหนาแน่นกรีนประมาณ 85 ถึง 90 เปอร์เซ็นต์ของความหนาแน่นทฤษฎี พารามิเตอร์ในการออกแบบเครื่องมืออัดตราส่วนในการอัดซึ่งมีค่าดังนี้

$$C_R = \frac{V_L}{V_C} = \frac{\rho_g}{\rho_a} \quad (2.14)$$

เมื่อ V_L เป็นปริมาตรของผงในสภาวะหลวม V_C เป็นปริมาตรของผงที่ผ่านการอัดแล้ว ρ_g เป็นความหนาแน่นกรีน และ ρ_a เป็นความหนาแน่นปรากฏ ความเสียดทานระหว่างอนุภาคที่มีค่าสูงทำให้ความหนาแน่นเริ่มต้นต่ำ แต่ปัจจัยอื่นๆ เช่น ขนาดอนุภาค ส่วนผสมทางเคมี สารหล่อลื่น สมบัติทางโลหะการ จะเป็นตัวกำหนดความหนาแน่นหลังการอัด

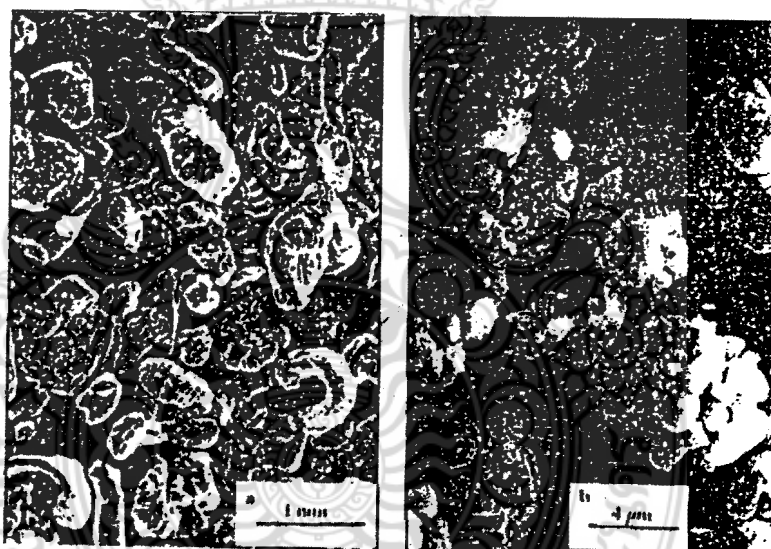
2.3.2 การผลิตผงวัสดุ (Powder Fabrication)

วัสดุส่วนใหญ่สามารถทำให้เป็นผงได้ แต่การเลือกวิธีการขึ้นอยู่กับสมบัติเฉพาะของวัสดุแต่ละชนิด เทคนิคการผลิตผงจำแนกได้เป็น 4 ประเภทหลักตามพื้นฐานการผลิตดังนี้ การบดละเอียดเชิงกล (Mechanical Comminution) การใช้ปฏิกิริยาทางเคมี (Chemical Reaction) การแยกสลายด้วยกระแสไฟฟ้า (Electrolytic Deposition) และการอะตอมไมเซชันหรือการทำให้เป็นละอองจากโลหะเหลว (Liquid Metal Atomization) การผลิตผงแต่ละประเภทประกอบด้วยเทคนิคพิเศษหลายเทคนิคและมีความแตกต่างกันสำหรับแต่ละวัสดุ

ขั้นตอนต่อไปเป็นการกล่าวถึงเทคนิคในการผลิตผงวัสดุทั้ง 4 เทคนิค ตามลำดับความสำคัญและเน้นที่หลักการทั่วไป พร้อมยกตัวอย่างของผงที่ได้จากแต่ละเทคนิคและคุณลักษณะที่เด่นๆ ที่ได้

2.3.2.1 เทคนิคการผลิตเชิงกล (Mechanical Fabrication Techniques)

กระบวนการบดผงละเอียดเชิงกลมีเทคนิคพื้นฐานในการบด 4 วิธี คือ การบดโดยใช้แรงกระแทก (Impaction) การบดโดยใช้แรงขัดสี (Attritioning) การบดโดยใช้แรงเฉือน (Shearing) และการบดโดยใช้แรงกดอัด (Compression) การบดโดยการกระแทกเกี่ยวข้องกับความเร็ว การตีอย่างรวดเร็วไปยังวัสดุ มีผลทำให้เกิดการเกาะ รอยแตกหรือแตกร้าว และทำให้อนุภาคมีขนาดเล็กลง การบดโดยการขัดสีเป็นการลดขนาดให้เล็กลง โดยการขัดสีหรือการเคลื่อนไหว การบดด้วยการเฉือนเป็นการทำให้เกิดรอยแตก รอยเกาะหยาบ โดยการตัดเฉือน (Cutting) ลักษณะผงที่ได้จากการตัดเฉือนจะหยาบ ส่วนการบดโดยการกดอัดส่วนใหญ่นำมาผสมผสานกันเพื่อผลิตผงโลหะ สำหรับผงที่มีขนาดอยู่ในช่วงมิลลิเมตร การบดด้วยค้อน (Hammer Mill) เป็นวิธีการที่เหมาะสม แต่สำหรับผงที่มีขนาด 1 – 100 ไมครอน การบดด้วยลูกบอลกวน (Stirred Balls Mill) หรือวิธีการอื่น ๆ อาจมีความเหมาะสมกว่า ผงโลหะที่ผลิตโดยเทคนิคเชิงกลจะมีรูปร่างที่ไม่แน่นอน (Irregular) ดังแสดงในภาพที่ 2.27 ทั้งอนุภาคนิยมที่ผ่านการตกแต่งด้วยเครื่องจักร (Machined) และคาร์ไบด์ที่ผ่านการบดละเอียด

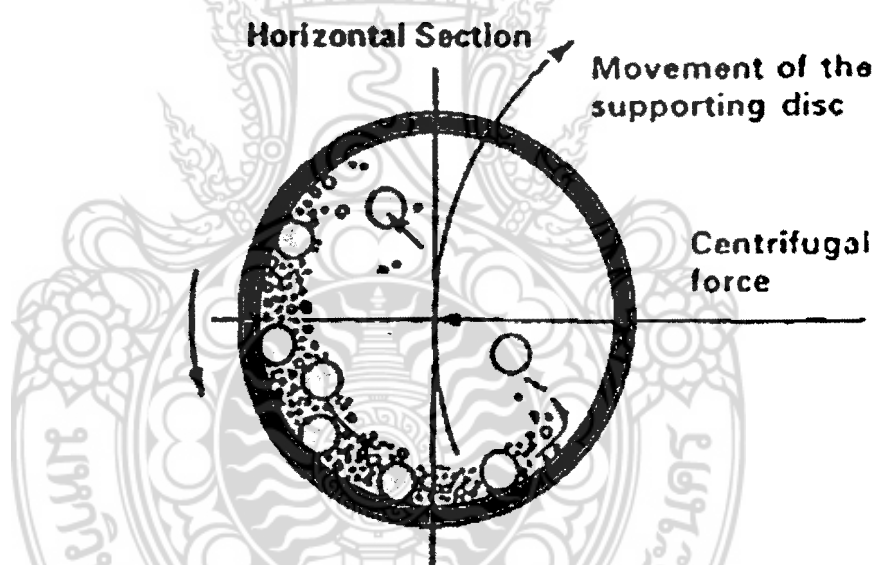


ก) ผงอนุภาคนิยมโดยการตัดเชิงกล ข) ผงเหล็กกล้าทั้งสแตนคาร์ไบด์โดยการบดกระแทก

ภาพที่ 2.27 ภาพถ่าย SEM ของผงโลหะที่เตรียมด้วยเทคนิคเชิงกล

ก) การตกแต่งด้วยเครื่องจักร (Machining) ผงที่มีลักษณะหยาบและรูปร่างไม่แน่นอนเป็นผลจากการตกแต่งโลหะที่ผ่านกรรมวิธีทางกลด้วยเครื่องจักร (Machining Wrought Metals) เศษโลหะขนาดเล็กสามารถทำให้เล็กลงได้ ดังนั้นจึงมีประโยชน์ในการผลิตผงโลหะจำนวนไม่มาก ข้อด้อยของวิธีนี้คือไม่สามารถควบคุมลักษณะของผงได้ รวมไปถึงการปนเปื้อนของสารเคมี ออกซิเจน น้ำมัน และโลหะชนิดอื่นๆ

ข) การบด (Milling) เป็นวิธีการผลิตผงเชิงกลโดยใช้ลูกบอลที่มีความแข็งมาก และเป็นวิธีที่ใช้สำหรับผลิตผงจากวัสดุเปราะ (Brittle Materials) โดยการทำให้วัสดุแตกเป็นชิ้นเล็ก การบดทำในภาชนะทรงกระบอกดังแสดงในภาพที่ 2.28 ซึ่งประกอบด้วยภาชนะทรงกระบอกที่บรรจุด้วยลูกบอลและวัสดุที่ต้องการทำให้เป็นผง เมื่อหมุนภาชนะทรงกระบอกจะทำให้เกิดการชนกันอย่างต่อเนื่องของลูกบอลกับวัสดุที่ต้องการบด และบดขยี้จนวัสดุเป็นผง ความเค้นจากการกระแทก (Impact Stress) ที่ต้องการเพื่อทำให้วัสดุแตกในการบดมีความสัมพันธ์กับ โครงสร้างรอยตำหนิและมีความไวต่อการขยายตัวของรอยแตกเร็วว่ ดังความสัมพันธ์



ภาพที่ 2.28 การบดในภาชนะทรงกระบอก เมื่อหมุนภาชนะแรงกระแทกของลูกบอลที่ตกลงมาบดวัสดุให้ละเอียด

$$\sigma = (2Er / D)^{1/2} \quad (2.15)$$

เมื่อ E คือค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่น r คือรัศมีของรอยตำหนิหรือรอยแตกกว้าง และ D คือขนาดอนุภาคจากความสัมพันธ์ในสมการ อนุภาคขนาดใหญ่ใช้แรงน้อยในการกระแทกเพื่อทำให้เกิดการแตกหัก ขณะที่ทำการบดขนาดอนุภาคเล็กลงและทำให้แรงในการกระแทกที่ต้องการเพื่อลดขนาดของอนุภาคมีค่าเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ไม่เกิดเกิดประโยชน์และคุ้มค่าในการบดเป็นเวลานาน ตัวอย่างความสัมพันธ์อย่างง่ายที่ใช้ประมาณพลังงานสัมพัทธ์ในการบดผงวัสดุ เริ่มจากขนาดอนุภาคในตอนเริ่มต้น (D_i) พลังงานที่ต้องการเพื่อให้ได้ขนาดอนุภาคสุดท้ายคือ W และขนาดอนุภาคสุดท้าย (D_f) โดยประมาณได้จากสมการเอมพิริคัล ดังนี้

$$W = g (D_f^{-a} - D_i^{-a}) \quad (2.16)$$

เมื่อ g เป็นค่าคงที่ขึ้นกับวัสดุที่ต้องการบด ลูกบอล การออกแบบการบดและการปฏิบัติการบด ค่าพลังงานที่ต้องการมีค่าระหว่าง 1 และ 2 ค่า พลังงานที่ต้องการเพื่อลดขนาดผงแปรเปลี่ยนกับการเปลี่ยนแปลงขนาดอนุภาค ดังนั้นเวลาที่ใช้ในการบดจึงขึ้นอยู่กับชนิดของผงวัสดุ การเปลี่ยนแปลงขนาดอนุภาค ขนาดของตัวกลางที่ใช้บด และความเร็วในการบด การบดแบบนี้ไม่มีประโยชน์สำหรับ โลหะเหนียว เช่น อลูมิเนียม เนื่องจากเกิดการแตกหักยาก ความเร็วในการหมุนภาชนะทรงกระบอกสามารถปรับเพื่อให้ได้ความเร็วของการกระแทกมากที่สุด ซึ่งต้องมีความเร็วเพียงพอที่จะพาลูกบอลขึ้นไปสู่ด้านบนสุดของภาชนะ อัตราการหมุนที่ต่ำเกินไปทำให้ลูกบอลกลับลงไปมาที่ด้านข้างของภาชนะ ขณะที่การหมุนที่เร็วเกินไปทำให้เกิดแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางและกันลูกบอลไม่ให้ตกลงมา สำหรับการบดที่เหมาะสมที่สุดลูกบอลที่ใช้ควรมีขนาดประมาณ 30 เท่าของวัสดุที่ต้องการบด ปริมาตรของลูกบอลประมาณครึ่งหนึ่งของปริมาตรภาชนะทรงกระบอก และควรใช้วัสดุประมาณ 25 เปอร์เซ็นต์ ของปริมาตรภาชนะทรงกระบอก เนื่องจากวัสดุที่เดิมจะเข้าไปอยู่ในช่องระหว่างลูกบอล ดังนั้นปริมาตรที่แท้จริงของการเติมลูกบอลและผงวัสดุรวมกันคือประมาณ 50 เปอร์เซ็นต์ของปริมาตรทรงกระบอก

ก) เทคนิคการกระแทกแบบอื่นๆ (Other Impaction Techniques) เทคนิคการผลิตผงโดยการกระแทกมีอัตราความเครียดสูงเหมาะสำหรับวัสดุเปราะ การบดขี้ด้วยแรงอัดต่อวัสดุอ่อนแอทำให้มีขนาดเล็กถึง 1 มิลลิเมตร การบดกระแทกด้วยความเร็วสูงด้วยใบมีดทั้งสแตนคาร์

ไบด์ทำให้ขนาดเล็กลงกว่านี้ได้อีก การผลิตด้วยวิธีนี้มีอัตราการผลิตที่ต่ำและต้องควบคุมอนุภาคตลอดการบด

2.3.2.2 เมคคานิกัลอัลลอยด์ (Mechanical Alloying; MA)

กระบวนการหลักในการผลิตแบบ MA สำหรับผลิตผงที่มีคุณภาพของโลหะผสมหรือสารประกอบด้วยการควบคุมโครงสร้างจุลภาคและรูปลักษณ์ คือการเกิดซ้ำกันของกระบวนการเชื่อมเย็น การแตกหัก และการเชื่อมเย็นอีกของผงที่มีการผสม มีกระบวนการบดหลายกระบวนการที่จัดอยู่ในการผลิตแบบ MA เช่น การบดด้วยลูกบอลแบบแพลเนต (Planetary – Type Ball Mill) การบดแบบเขย่าหรือการบดแบบสเปกซ์ (SPEX, Shaker Mills) การบดด้วยลูกบอลในถังบดกวนหรือการบดด้วยแอตริเตอร์ (Attritor – Type Ball Mill) และการบดด้วยพลังงานต่ำ (Low – Energy Tumbling Mill) ปัจจัยที่มีผลต่อการผลิตแบบ MA เพื่อให้วัสดุที่มีความเป็นเนื้อเดียวกันมีหลายปัจจัยดังต่อไปนี้ เช่น ชนิดของการบด ชนิดของวัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในการบด ชนิดของตัวกลางที่ใช้ ชนิดของบรรยากาศ ชนิดของภาวะแวดล้อม อัตราส่วนของตัวกลางต่อผง อุณหภูมิที่ใช้ในการบด และเวลาในการบด

2.3.2.3 เทคนิคการผลิตโดยการแยกสารละลายไฟฟ้า (Electrolytic Fabrication Techniques)

ผงสามารถตกตะกอนที่ขั้วแคโทดของเซลล์อิเล็กโทรไลต์ภายใต้เงื่อนไขที่แน่นอน โลหะที่สามารถฟอร์มตัวเป็นผงที่มีความบริสุทธิ์สูงด้วยวิธีการนี้ เช่น พัลลาเดียม ทองแดง เหล็ก สังกะสี แมงกานีส และเงิน ข้อดีของการแยกสารละลายด้วยไฟฟ้าคือ ได้ชิ้นงานที่มีความบริสุทธิ์สูง วัฏจักรเริ่มต้นโดยละลายขั้วแอโนดภายใต้ความต่างศักย์ของเซลล์อิเล็กโทรไลต์ ซึ่งปฏิกิริยาของขั้วแอโนดและขั้วแคโทดของทองแดงและเหล็ก การเคลื่อนที่ผ่านอิเล็กโทรไลต์ (สารละลายซัลเฟต) ทำให้เกิดความบริสุทธิ์สูงของสารที่ฟอร์มตัวสะสมขึ้นที่ขั้วแคโทดหลังจากนั้นนำสารที่ฟอร์มตัวขึ้นซึ่งมีลักษณะพรุนไปล้าง ทำให้แห้ง บดให้ละเอียด แล้วนำไปบดอ่อนเพื่อกำจัดความแข็งที่เกิดจากเวริคฮาร์ดเนนนิ่งก่อนนำไปใช้ ผงที่ได้มักมีลักษณะเป็นแขนงคล้ายกิ่งไม้

(Dendritic) หรือคล้ายฟองน้ำ (Sponge) เสมอ สมบัติเฉพาะของผงที่ได้จะขึ้นอยู่กับลักษณะของสารละลายและขั้นตอนกระบวนการผลิต

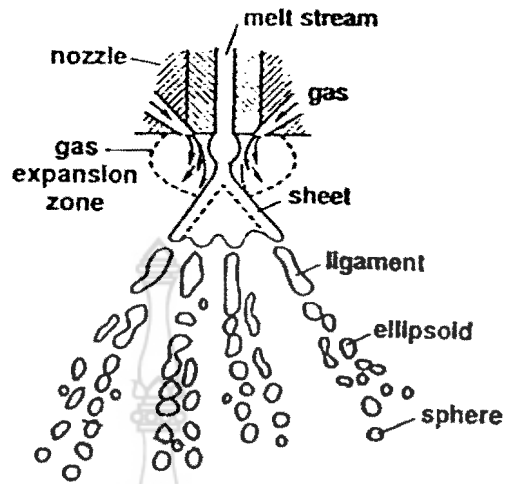
2.3.2.4 เทคนิคการอะตอมไมเซชัน (Atomization Techniques)

วิธีการอะตอมไมเซชันสามารถควบคุมสมบัติทางเคมีและรูปร่างของผงได้ ปัจจุบันการผลิตผงโลหะส่วนใหญ่ใช้วิธีการอะตอมไมเซชันซึ่งเป็นการเปลี่ยนรูปจากโลหะหลอมเหลวให้เป็นผงโลหะโดยการฉีดพ่นให้เป็นละอองที่เล็กมาก การผลิตผงด้วยวิธีนี้สามารถใช้ได้ทั้งโลหะพื้นฐานและพรีอัลลอยและมีความง่ายในการควบคุมการผลิต

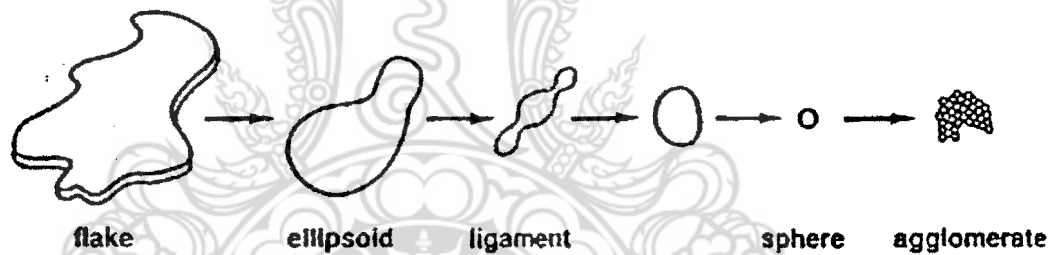
ก) การอะตอมไมเซชันด้วยก๊าซ (Gas Atomization) ก๊าซในโตรเจน ก๊าซฮีเลียม หรือก๊าซอาร์กอนเป็นของไหลในการทำให้โลหะเหลวแตกกระจายจากกันด้วยก๊าซที่ถูกปล่อยออกมาจากหัวฉีดอย่างรวดเร็ว การผลิตผงวัสดุด้วยวิธีนี้ผลิตผงได้เป็นจำนวนมาก รวมทั้งสามารถผลิตผงโลหะผสมนิกเกิลและวัสดุผสมสูงชนิดอื่นๆ แนวคิดหลักคือ การส่งพลังงานจากหัวฉีดก๊าซไปยังโลหะเหลวเพื่อทำให้เกิดเป็นละอองเล็กๆ

การอะตอมไมเซชันด้วยก๊าซภายใต้ก๊าซเฉื่อยช่วยรักษาส่วนผสมของโลหะได้อย่างสมบูรณ์ รูปร่างอนุภาคเป็นทรงกลมและขนาดมีการกระจายกว้าง กระบวนการอะตอมไมเซชันด้วยก๊าซมีตัวแปรที่เกี่ยวข้องมาก เช่น ชนิดของก๊าซที่ใช้ บรรยากาศ อุณหภูมิหลอมเหลวและระดับของความหนืดของของไหลที่เข้าสู่หัวฉีด ชนิดของโลหะผสม อัตราการป้อนโลหะ ความดันก๊าซ อัตราการป้อนก๊าซ และความเร็ว รูปลักษณะหัวฉีด และอุณหภูมิของก๊าซ พารามิเตอร์เหล่านี้ถูกปรับเพื่อรักษาระบบการควบคุมกระบวนการและปรับปรุงคุณลักษณะของผงเพื่อการใช้งานต่างๆ ข้อได้เปรียบของผงที่ได้จากการอะตอมไมเซชันคือ ใต้ผงที่มีความสม่ำเสมอเป็นเนื้อเดียวกัน และมีสมบัติการจัดเรียงตัวดี ภาพที่ 2.29 ลักษณะรูปทรงของของเหลวตอนเริ่มต้นและค่อยๆ กลายเป็นรูปทรงกลมขนาดเล็ก การลดลงของขนาดผงถูกจำกัดโดยความหนืดของโลหะเหลว อุณหภูมิและการตอบสนองต่อแรงที่แรง การให้ความร้อนที่สูงกว่าจุดหลอมเหลวจะลดความหนืดและทำให้เวลาในการแข็งตัวมากขึ้น เวลาแข็งตัวที่นานขึ้นจะช่วยให้การปรับตัวของอนุภาคเป็นทรงกลมมากขึ้น ลำดับขั้นตอนของการเกิดรูปทรงของละอองเล็กๆ เมื่อห่างจากหัวฉีดเริ่มจากทรงกระบอก –

ทรงกรวย – แผ่น – ลิกาเมนต์ – ทรงกลม ปริมาณความร้อนที่สูงและตัวแปรอื่น ๆ มีผลทำให้เกิดรูปทรงดังกล่าว



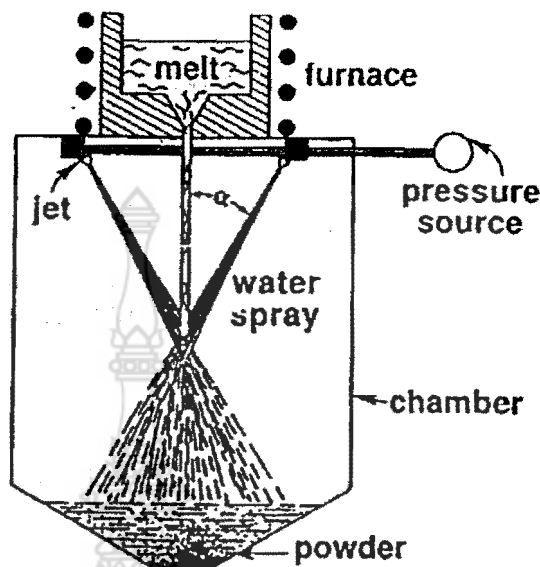
ภาพที่ 2.29 การฟอร์มตัวของผงโลหะด้วยการอะตอมไมเซชันด้วยก๊าซ แรงดึงดูดในบริเวณการขยายตัวของก๊าซทำให้โลหะเหลวก่อตัวเป็นแผ่นกรวยบางตัวจะฟอร์มตัวเป็นลิกาเมนต์รูปร่างรีและทรงกลม



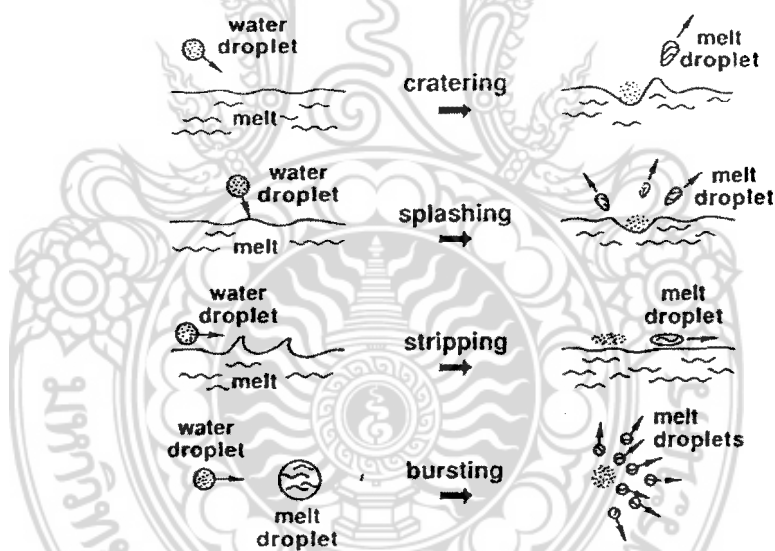
ภาพที่ 2.30 แสดงรูปร่างของหยดโลหะเหลวที่เปลี่ยนแปลงขณะอะตอมไมเซชัน

ข) การอะตอมไมเซชันด้วยน้ำ (Water Atomization) ใช้กันแพร่หลายสำหรับผลิตผงจากธาตุพื้นฐานและธาตุผสมที่มีจุดหลอมเหลวต่ำกว่า 1600 องศาเซลเซียส น้ำที่พุ่งด้วยความดันสูงไปชนสายโลหะเหลวจนขาดจากกันและมีการแข็งตัวอย่างรวดเร็ว กระบวนการนี้คล้ายวิธีใช้ก๊าซ ยกเว้นมีการเย็นตัวอย่างรวดเร็วและสมบัติของไหลที่แตกต่างกัน อนุภาคที่เกิดขึ้นได้หลายกลไก เช่น การเกิดเป็นหลุม (Cratering) การกระเด็น (Splashing) การฉีก (Stripping) และ

การแตกประทุ (Bursting) เมื่อพิจารณากลไกการเกิดผงทั้งสี่กลไก การเกิดผงด้วยวิธีนี้จะให้ผงที่มีขนาดเล็กที่สุด



ภาพที่ 2.31 กระบวนการอะตอมไมเซชันด้วยน้ำ



ภาพที่ 2.32 แสดงภาพสเก็ทกลไกการเกิดอนุภาคในกระบวนการอะตอมไมเซชันด้วยน้ำ การเกิดหลุม การกระเด็น การถาด และการแตกประทุ ผงที่เล็กที่สุดคือการแตกประทุ

ตารางที่ 2.10 วิธีการที่ใช้ในการผลิตผงโลหะชนิดต่างๆ

โลหะ	วิธีการที่นิยม
ทองแดงผสม	อะตอมไมเซชันด้วยน้ำ อะตอมไมเซชันด้วยอากาศ บด
ทอง	แยกด้วยไฟฟ้า อะตอมไมเซชันด้วยอากาศ พรีซิพิเทชันทางเคมี
โลหะผสม	อะตอมไมเซชันด้วยก๊าซ แรงหนีศูนย์กลาง
นิกเกิล	สลายด้วยคาร์บอนิล แยกด้วยไฟฟ้า อะตอมไมเซชันด้วยน้ำ
นิกเกิลผสม	อะตอมไมเซชันด้วยก๊าซเฉื่อย น้ำ แรงหนีศูนย์กลาง
โลหะมีค่า	อะตอมไมเซชันด้วยก๊าซ แยกด้วยไฟฟ้า
โลหะรีแอกทีฟ	คลอไรด์รีดักชัน พรีซิพิเทชันทางเคมี อะตอมไมเซชันทางเคมี
โลหะทนไฟ	ออกไซด์รีดักชัน พรีซิพิเทชันทางเคมี อะตอมไมเซชันพลาสมา อะตอมไมเซชันด้วยแรงหนีศูนย์กลาง
เหล็กกล้าผสม	อะตอมไมเซชันด้วยน้ำ ก๊าซ หรือแรงหนีศูนย์กลาง
โลหะพิเศษ	อะตอมไมเซชันด้วยน้ำ ก๊าซ แรงหนีศูนย์กลาง
ซูเปอร์อัลลอยด์	อะตอมไมเซชันด้วยก๊าซ แรงหนีศูนย์กลาง
ยูเรเนียม	ออกไซด์รีดักชัน ไฮโดร - คีไฮโดรด์

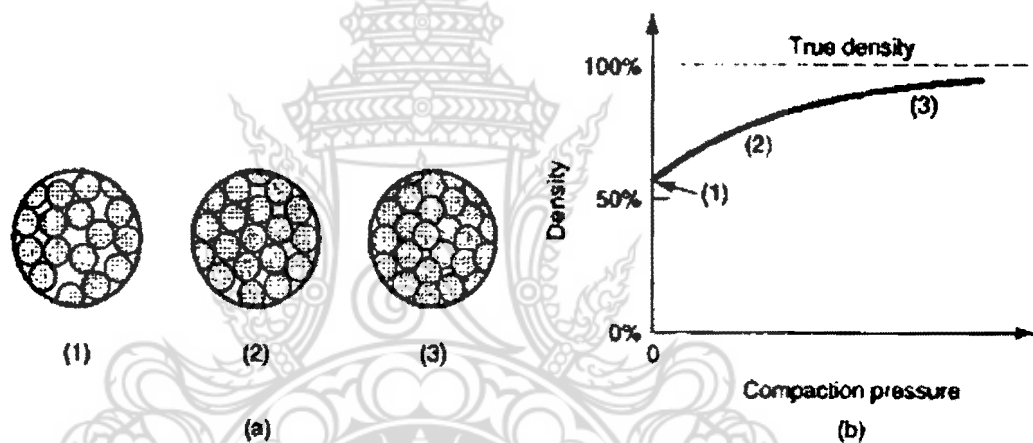
2.3.3 การขึ้นรูปและการอัดแน่น (Shaping and Compaction)

งานทางด้านโลหะกรรมวัสดุผงต้องกำหนดให้ชิ้นงานสุดท้ายมีความหนาแน่นสูง การทำให้ผงเกิดการแน่นตัว (Densification) สามารถทำได้โดยวิธีการใดวิธีการหนึ่งในวิธีต่อไปนี้ คืออบผืนขึ้นงานให้มีความหนาแน่นเพิ่มมากขึ้นจากพรีฟอร์มที่มีความหนาแน่นต่ำ อัดผงเพื่อให้ได้ความหนาแน่นสูงและตามด้วยการอบผืน และอัดผงและอบผืนในเวลาเดียวกัน โดยใช้เทคนิคที่ให้ความหนาแน่นสูง ผงวัสดุที่ถือว่ามัลทิฟาสการอบผืนขึ้นรูปที่ดีต้องสามารถขึ้นรูปโดยใช้ความดันต่ำ พร้อมกับใช้สารยึดประเภทอินทรีย์ เช่น การฉีดขึ้นรูป (Injection Molding) ส่วนการอัดแน่น (Compaction) ขึ้นกับแรงกระทำจากแหล่งภายนอกในการทำให้ผงเกิดการเสีรูปร่าง และไปสู่ชิ้นส่วนประกอบรูปทรงสุดท้ายที่มีความหนาแน่นสูง พารามิเตอร์ของกระบวนการที่สำคัญในการกำหนดความหนาแน่นสุดท้ายคือ การส่งแรงอัดไปยังผงวัสดุ ข้อจำกัดทางกลและอัตราการอัด การแน่นตัวด้วยกระบวนการอัดแน่น เกี่ยวข้องกับการเสีรูปร่างของอนุภาคและครอบคลุมถึงการพิจารณาการถ่าย

แรงอัดและผลกระทบจากแรงเสียดทานเทคนิคความหนาแน่นสูง (หรือความหนาแน่นเต็ม) ขึ้นกับทั้งความดันและความร้อนในเวลาเดียวกัน

2.3.3.1 การอัดขึ้นรูป (Compacting)

จุดประสงค์หลักของการอัดขึ้นรูป คือ การทำให้โลหะผงจับตัวกันเป็นก้อน โดยมีรูปร่าง และมิติใกล้เคียงกับวัสดุสำเร็จในขั้นตอนสุดท้ายมากที่สุด โดยการพิจารณารวงหน้าถึงการยึดแท่งโลหะขณะผ่านการสตุ นอกจากนี้การอัดขึ้นรูปยังต้องคำนัवरวงหน้าไปถึง ระดับและชนิดของรูพรุนที่ต้องการ รวมทั้งการคาดการณ์ถึงกำลังของวัสดุที่ได้ภายหลังการอัดตัวขึ้นรูป การนำผงโลหะที่ผสมเข้ากันดีแล้ว นำมาทำการอัดให้ได้รูปร่างตามที่ต้องการ ชิ้นงานที่ได้เรียกว่า Green Compact หมายถึง ชิ้นงานที่มีความแข็งแรงของโครงสร้างจากการเข้ารูปกัน ใ้เอง (Inter Lock) แต่ยังไม่สามารถใช้งานได้

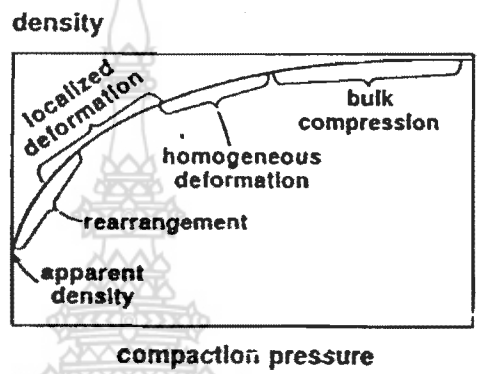


ภาพที่ 2.33 แสดงการอัดตัวของอนุภาคก่อนและหลังรับแรงอัด

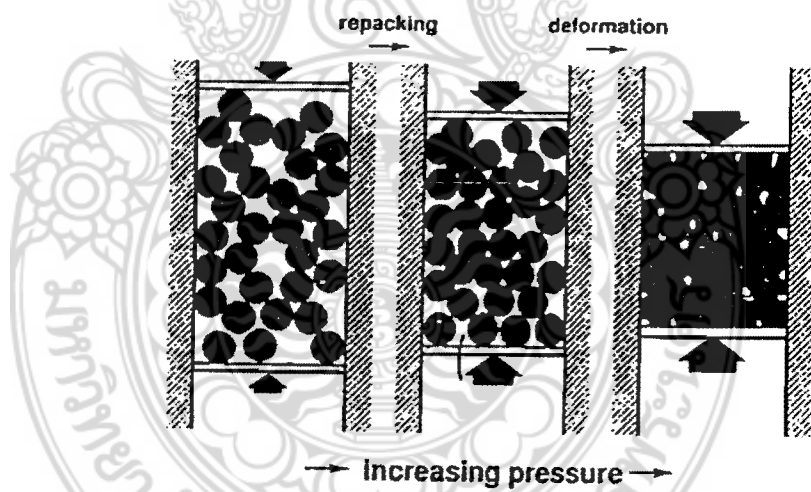
2.3.3.2 ปรากฏการณ์ของการอัดแน่น (Phenomenology of Compaction)

กระบวนการที่ใช้สารยึดเหนี่ยวในการขึ้นรูปโดยอยู่ในรูปของไหลเพื่อหล่อลื่นผงขึ้นรูปอย่างไรก็ตามการจัดเรียงตัวของอนุภาคไม่สามารถทำให้ความหนาแน่นสูงกว่าความหนาแน่นเกาะ ความหนาแน่นสูงได้จากการใช้แรงกระทำจากภายนอก อัตราการแน่นตัวเริ่มมีค่าสูงตามความดันที่ให้ เมื่อการเปลี่ยนรูปดำเนินต่อไปความชันของเส้นโค้งความหนาแน่นจะลดลง การ

อัดแน่นเริ่มต้นที่ความหนาแน่นประมาณเท่ากับความหนาแน่นที่ปรากฏ มีช่องว่างของอนุภาคปรากฏโดยทั่วไป เมื่อมีการเข้ความหนาแน่นสูงสุดที่ได้คือ ความหนาแน่นเกาะ ผงโลหะที่อยู่ในสถานะหลวมยังคงมีช่องว่างอยู่ จะยังมีความแข็งแรง และจำนวน โคออดิเนชันหรือจำนวนอนุภาคที่สัมผัสอยู่รอบๆอนุภาคหนึ่งๆ มีค่าต่ำ เมื่อเริ่มให้ความดันการตอบรับแรกสุดคือ การจัดเรียงตัวใหม่ของอนุภาค โดยอนุภาคมีการเติมรูพรุนขนาดใหญ่ก่อนส่งผลให้จำนวนการสัมผัสกับอนุภาครอบสูงขึ้น ซึ่งมีความคล้ายคลึงกับการเข้หรือสั่นผง การจัดเรียงตัวใหม่ให้ผงดีเมื่อพื้นผิวของอนุภาคเรียบและแข็ง



ภาพที่ 2.34 ภาพสเก็ตแสดงความสัมพันธ์ของความหนาแน่นกับความดันในการอัดแน่น แสดงขั้นตอนสำคัญและความสามารถในการอัดลดลงเมื่อความหนาแน่นเพิ่มขึ้น

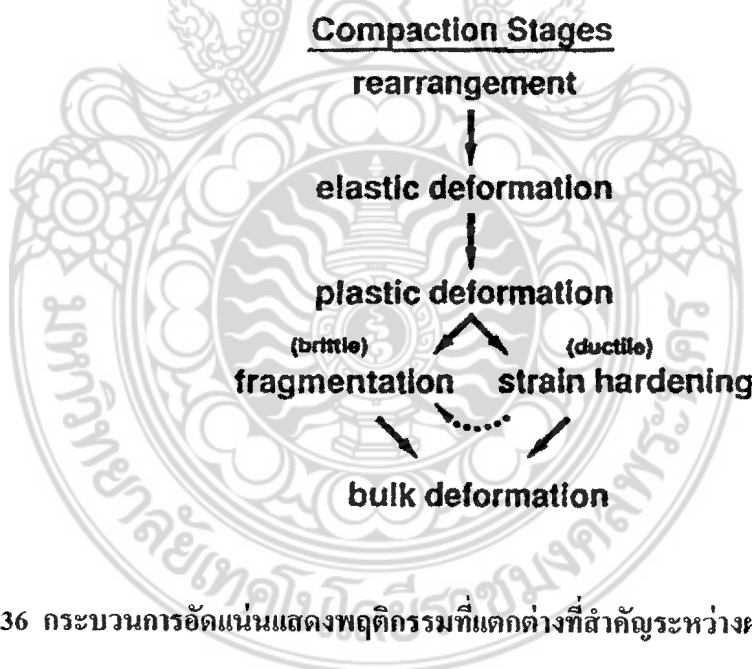


ภาพที่ 2.35 แสดงขั้นตอนการอัดผงโลหะ เริ่มต้นมีการจัดเรียงตัวโดยลดปริมาตรระหว่างอนุภาค เมื่อแรงอัดสูงขึ้นการแน่นตัวเกิดจากการเสีรูปร่างของอนุภาค

การเพิ่มความดัน ทำให้การจัดเรียงตัวของอนุภาคดีขึ้น และนำไปสู่การลดลงของความพรุนโดยการฟอร์มตัวของจุดสัมผัสใหม่ระหว่างอนุภาค ความดันที่สูงทำให้ความหนาแน่นเพิ่มขึ้น โดยการขยายบริเวณจุดสัมผัสผ่านการเปลี่ยนรูปแบบ ดังนั้นความดันทำให้เกิดการเปลี่ยนรูปร่างเฉพาะในส่วนสัมผัส ส่งผลให้เกิดความแข็งแรงจากการเปลี่ยนโครงสร้าง และยอมให้จุดสัมผัสใหม่ฟอร์มตัวขึ้นในช่องว่างระหว่างอนุภาคที่ยุบตัวลง บริเวณสัมผัสระหว่างอนุภาคที่ปรากฏเป็นลักษณะแนวราบจากที่มีรูปโค้งตามเส้นรอบวง ความหนาแน่นกรีน (ρ) และเส้นผ่าศูนย์กลางส่วนโค้ง (X) มีความสัมพันธ์กันดังนี้

$$X = D [1 - (\rho_0 / \rho)^{2/3}]^{1/2} \tag{2.17}$$

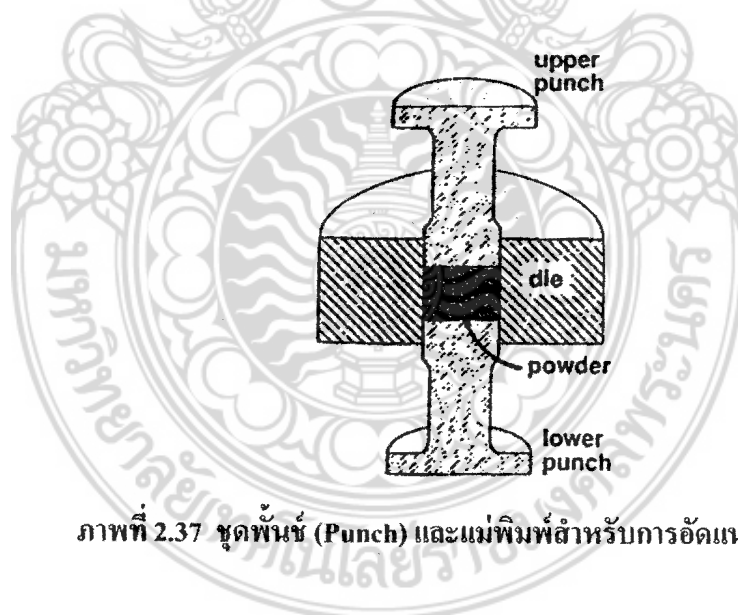
เมื่อ D เป็นขนาดของอนุภาค และ ρ_0 เป็นความหนาแน่นเริ่มต้นที่สอดคล้องกับค่า $X = 0$ ความแข็งแรงของพันธะระหว่างอะตอมขึ้นกับปริมาณแรงเฉือนที่จุดสัมผัสระหว่างอนุภาค แรงเฉือนสูงสุดเกิดขึ้นตรงกลางของจุดสัมผัสและมีค่าสูงสุดเมื่อจุดสัมผัสมีขนาดเล็ก ขณะเกิดการเปลี่ยนรูปมีการเชื่อมเย็บเกิดขึ้นที่จุดสัมผัสระหว่างอนุภาคส่งผลให้มีการพัฒนาความแข็งแรงขึ้นในชิ้นงาน ความแข็งแรงหลังการอัดและการอบผนึก เรียกว่า “ความแข็งแรงกรีน” (Green Strength)



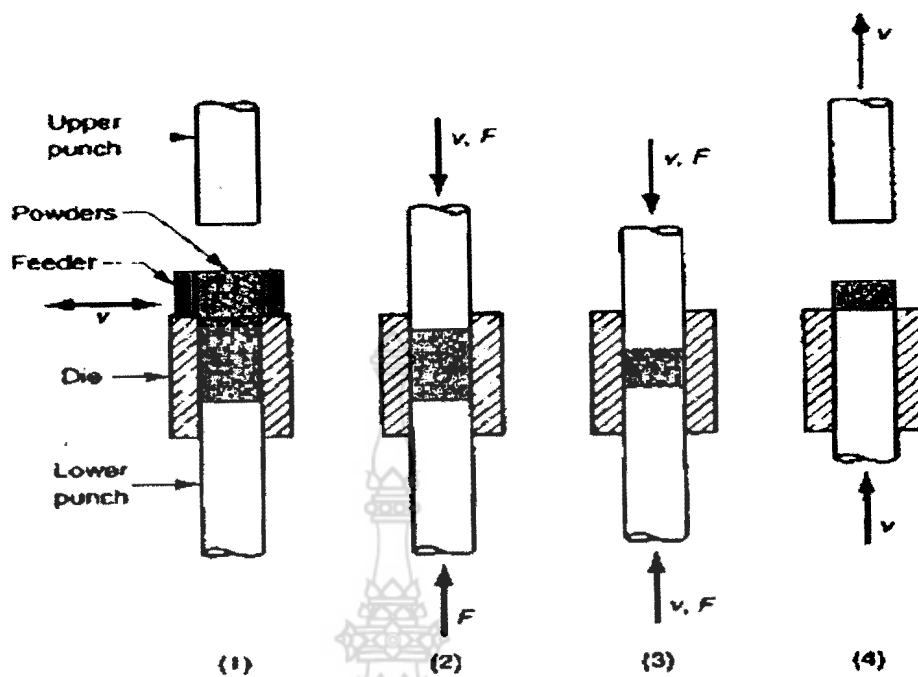
ภาพที่ 2.36 กระบวนการอัดแน่นแสดงพฤติกรรมที่แตกต่างที่สำคัญระหว่างผงเหนียวและเปราะ

2.3.3.3 การอัดแน่นแบบดั้งเดิม (Conventional Compaction)

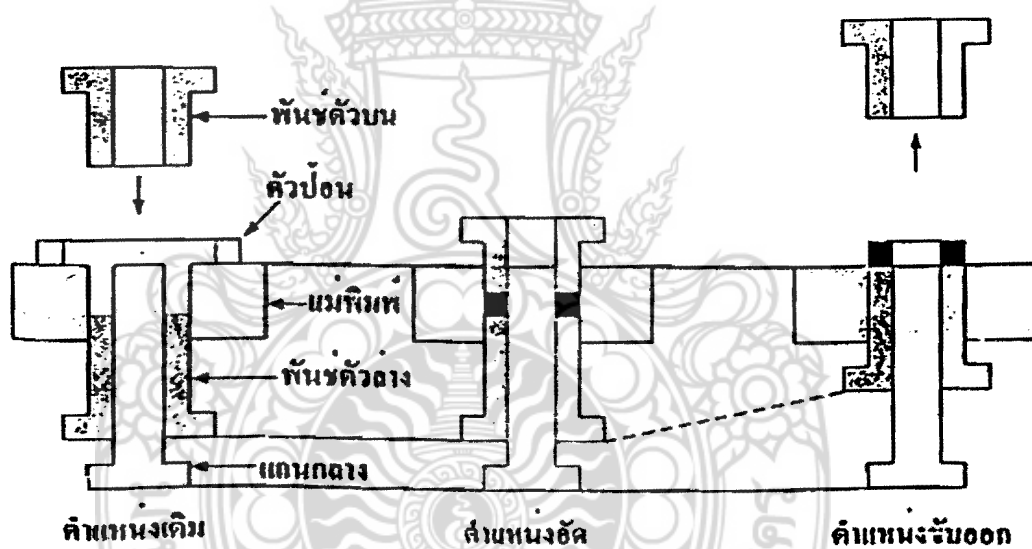
การอัดแบบดั้งเดิมเป็นการอัดในแนวแกนเดียว (Uniaxial Compaction) โดยใช้เครื่องมือที่มีความแข็งแรงมาก ดังแสดงในภาพที่ 2.37 ลำดับขั้นตอนการเคลื่อนที่ของเครื่องมือขณะอัดแน่น โดยเริ่มจากการบรรจุผงโลหะลงในแม่พิมพ์และอัดผ่านพินช์ (Punch) ซึ่งอาจเป็นพินช์ตัวเดียวหรือพินช์สองตัวคือ ทั้งตัวบน (Upper Punch) และตัวล่าง (Lower Punch) ทำให้เกิดแรงดันด้านข้างก่อนจะเทผงโลหะลงในแม่พิมพ์จะต้องเลื่อนพินช์ตัวบนออกมาด้านนอกก่อน ส่วนพินช์ตัวล่างอยู่ในตำแหน่งที่เรียกว่า “ตำแหน่งเดิมในแม่พิมพ์” ถ้ามีการคำนวณปริมาณของผงโลหะจากความสูงของช่องว่างในแม่พิมพ์และความหนาแน่นปรากฏของผงจะทำให้ทราบปริมาณที่จะเติมผงลงในแม่พิมพ์ ผงโลหะที่จะถูกเติมลงในแม่พิมพ์โดยอุปกรณ์สำหรับเติมผง (Feed Shoe) อาจผ่านกระบวนการสั้นและเขย่าลงสู่แม่พิมพ์ ตำแหน่งสำหรับเติมผงของพินช์ตัวล่างจะต่างจากตำแหน่งที่ใช้ขณะอัดเพื่อทำให้การอัดผงเข้าสู่ตรงกลางของแม่พิมพ์ ตำแหน่งของพินช์ตัวล่างสามารถปรับเปลี่ยนได้เพื่อให้เกิดการสม่ำเสมอของผงทั่วทั้งชิ้น หลังการเติมผงโลหะแล้วเลื่อนพินช์ตัวล่างให้อยู่ในตำแหน่งที่พร้อมทำการอัดและเลื่อนพินช์ตัวบนเข้าสู่แม่พิมพ์ การเพิ่มความดันให้กับผงโลหะอาจเลื่อนทั้งพินช์ตัวบนและตัวล่างเข้าหากันหรือเลื่อนเฉพาะพินช์ตัวล่างตัวบนเพียงตัวเดียว ในขณะที่พินช์ตัวล่างอยู่กับที่ ขั้นตอนสุดท้ายของการอัดแน่นผงวัสดุมีความดันสูงสุด และเมื่ออัดเสร็จพินช์ตัวบนจะถูกเลื่อนออก ใช้พินช์ตัวล่างเป็นตัวดันเอาชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์ และเริ่มวัฏจักรใหม่โดยการเติมผงโลหะลงในแม่พิมพ์



ภาพที่ 2.37 ชุดพินช์ (Punch) และแม่พิมพ์สำหรับการอัดแน่นแบบดั้งเดิม



ภาพที่ 2.38 ลำดับขั้นตอนการเคลื่อนที่ของพื้นที่ในวัฏจักรการอัดแน่นผง



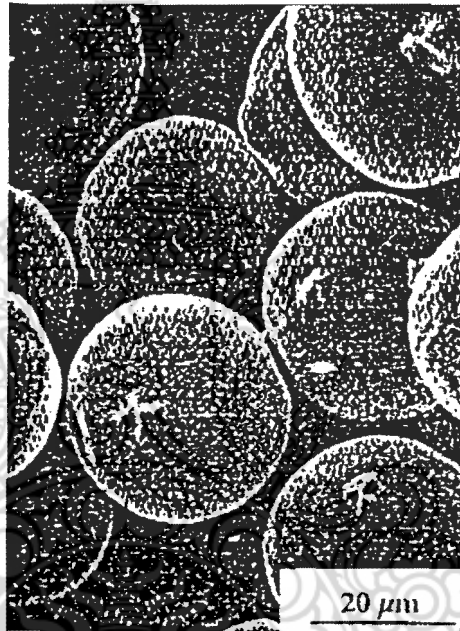
ภาพที่ 2.39 เครื่องมืออัดแบบทิศทางเดียว (เส้นประแสดงการเคลื่อนที่ของชิ้นส่วน)

หลังจากการอัดแน่นที่ต้องเอาชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์ แรงที่ใช้ในการผลักชิ้นงานเรียกว่า “แรงขับออก” (Ejection Force) สารหล่อลื่นมีความสำคัญมากในขั้นตอนนี้ พลังงานขีดข่วนที่มีมากในชิ้นงานทำให้เกิดแรงต้านที่ผิวนิ่งของแม่พิมพ์ก่อให้เกิดการสึกหรอของแม่พิมพ์

แรงขับจะลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณสารหล่อลื่น การเอาชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์โดยการดันแม่พิมพ์ลงให้ผ่านชิ้นงานและพื้นที่ตัวล่าง ชิ้นงานจะไหลขึ้นมาด้านบน

2.3.3.4 พันธะของอนุภาคในสถานะกรีน (Particle Binding in the Green State)

พันธะระหว่างอนุภาคที่เกิดจากการอัดแน่นทำให้เกิดความแข็งแรงกรีน บริเวณรอยต่อระหว่างเฟสของแข็ง (Solid Interface) เกิดจากการเปลี่ยนรูปที่จุดสัมผัสระหว่างอนุภาคที่ความหนาแน่นเริ่มต้นสูงและผิวของอนุภาคสะอาดช่วยให้พันธะระหว่างอนุภาคดีขึ้น ถ้าแรงในการอัดแน่นสูงเพียงพอแรงเฉือนจะทำลายแผ่นฟิล์มที่ผิว ตัวอย่างแสดงการเปลี่ยนแปลงรูปของอนุภาคแสดงด้วยรูปถ่าย SEM ดังภาพที่ 2.40



ภาพที่ 2.40 ภาพถ่าย SEM ของผงทองแดงทรงกลมขนาด $-44 \mu\text{m}$ หลังการอัดแน่นที่ 140 MPa

แสดงพื้นผิวการแตกหักของผงทองแดงทรงกลมหลังการอัดแน่นที่ความดัน 140 MPa จากรูปจะเห็นบริเวณสัมผัสพื้นแบนราบแต่ไม่มีหลักฐานการเชื่อมเย็น อนุภาคทรงกลมมีรูปร่างคูดระหว่างอนุภาคน้อยทำให้เกิดความแข็งแรงกรีนไม่ค่อยดี ความแข็งแรงจะเพิ่มขึ้นเฉพาะหลังการอบผนึกเท่านั้น

2.3.3.5 ความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์

การพิจารณาความหนาแน่นต้องเข้าใจในความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์สองตัว โดยที่ตัวแรก คือ ความหนาแน่นกรีนที่ค่าจะขึ้นกับความดันในการอัดแน่น และตัวที่สองคือ ความผันแปรของสมบัติกรีนต่างๆ ตามความหนาแน่นหรือความดันในการอัดแน่น การพิจารณาชิ้นงานในสถานะกรีนหรือหลังการอัดแน่นไม่ค่อยให้ความสนใจกับสมบัติตัวอื่นๆ เช่น ความเหนียว

2.3.3.6 ความหนาแน่นกรีนในรูปความดัน

เมื่อความดันเพิ่มขึ้นทำให้ความหนาแน่นของชิ้นงานเพิ่มมากขึ้น หรืออีกในหนึ่งคือความพรุนลดลง หลักเกณฑ์ในการเปรียบเทียบความยากง่ายในการอัดแน่นของผงวัสดุต่างๆ การประมาณค่าเริ่มต้นของการอัดแน่นผ่านแม่พิมพ์คือ ความแน่นตัวที่เพิ่มขึ้นตามความดันมีค่าขึ้นอยู่กับความพรุนคงเหลือ ดังนั้น

$$d\varepsilon = -dP \Theta \varepsilon \quad (2.18)$$

เมื่อ P คือความดันให้ ε เป็นสัดส่วนความพรุนและ Θ เป็นอัตราส่วนคงที่ ที่สะท้อนพฤติกรรมของวัสดุพื้นฐานหลังจากจัดเรียงและอินทิเกรตสมการใหม่ได้

$$\ln(\varepsilon / \varepsilon_0) = -\Theta P \quad (2.19)$$

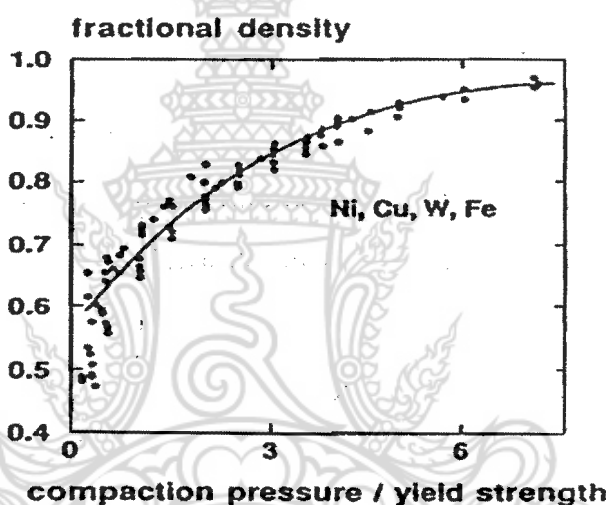
เมื่อ ε_0 เป็นความพรุนเริ่มต้นของการอัดแน่น ไม่สนใจกลไกของการอัดแน่น อย่างไรก็ตามกรณอย่างง่ายนี้กลายเป็นกรณีที่ประยุกต์ใช้ได้กับการอัดแน่นผงโลหะในช่วงความดันระหว่าง 100 – 700 MPa ดังนั้นจึงจำเป็นต้องรวมเอาการจัดเรียงตัวในตอนเริ่มต้นแข็งตัวที่ใช้เวลาที่สั้นมากและกลไกต่างๆ ในการอัดแน่นเข้ามาพิจารณาด้วย ดังสมการถูกแก้ไขปรับปรุงดังนี้

$$\ln(\varepsilon / \varepsilon_0) = B - \Theta P \quad (2.20)$$

เมื่อ B ถือเป็นค่าสำหรับการจัดเรียงตัวใหม่ เหมาะสำหรับการพฤติกรรมอัดแน่นผงวัสดุทั้งหมด

2.3.3.7 ผลกระทบของวัสดุและคุณลักษณะผง (Influence of Material and Powder Characteristics)

ขนาดอนุภาคมีผลกระทบต่อแรงเสียดทานระหว่างอนุภาค ความหนาแน่นจากการเรียงตัวและขนาดรูพรุน อนุภาคเล็กทำให้มีความยุ่งยากในการอัดเพราะรูพรุนขนาดใหญ่ยุบตัวภายใต้ความดันต่ำกว่ารูพรุนขนาดเล็ก และการเกิดเวิร์คฮาดเคอเน็งในอนุภาคขนาดใหญ่ช้ากว่า เนื่องจากระยะห่างของการเคลื่อนดิสโลเคชันกว้างกว่า ดังนั้นอัตราการแน่นตัวตามความดันของอนุภาคขนาดใหญ่จึงดีกว่าอนุภาคขนาดเล็ก อนุภาครูปร่างคล้ายฟองน้ำมีความพรุนภายในมีความยุ่งยากในการอัดแน่น ผงเหล่านี้มีการยุบตัวของรูพรุนขนาดใหญ่ระหว่างอนุภาคทำให้เกิดการเริ่มต้นของการอัดแน่น ด้วยเหตุนี้ผงลักษณะฟองน้ำจึงแสดงความสามารถในการอัดเริ่มต้นสูง



ภาพที่ 2.41 ความแข็งแรงครากของวัสดุที่มีต่อการแน่นตัวในการอัด

ปัจจัยที่ทำให้ความสามารถในการอัดลดลงมีผลทำให้ความแข็งแรงกรีนลดลงด้วย อนุภาคที่มีความแข็งแรงสูงทำให้คาดได้ว่ามีความยากมากในการอัด ภาพที่ 2.41 กราฟของสัดส่วนของความหนาแน่นผ่านการนอร์มอไลซ์แล้วของผงนิกเกิล ทองแดง เหล็กและทังสเตน แรงในการอัดของผงวัสดุแต่ละชนิดถูกนอร์มอไลซ์ด้วยความแข็งแรงครากของวัสดุนั้นๆ ปัญหาของการอัดแน่นที่คล้ายกัน ได้ชี้ชัดในผงเหล็กผสมการลดลงของความสามารถในการอัดที่ 414 MPa ของผง

เหล็กที่ผสมต่างๆของสารที่ใช้ ตามปกติคาร์บอนมีอำนาจในการทำให้แข็งแรงสูงและมีผลกระทบในทางลบแต่มีความสามารถในการอัด ความเสียบริเวณที่เกิดขึ้นในการอัดแน่นผงพรีอัลลอยด์ คือ ในผงผสมสามารถปรับเปลี่ยนคุณสมบัติได้โดยการผสมผงพื้นฐานอื่นๆเข้าไปเมื่อใดก็ได้ตามที่ ต้องการ ผงที่มีความแข็งแรงสูงเป็นอุปสรรคต่อการอัดแน่นปริมาณการแน่นตัวในรูปร้อยละของรูพรุนที่ถูกกำจัดออกด้วยรูพรุนเริ่มต้น ความแข็งแรงที่เพิ่มขึ้นทำให้ความหนาแน่นกรีนที่ระดับความดันใดๆ ที่กำหนดให้ลดลง สำหรับวัสดุแข็งเกิดการแตกหักและการเปลี่ยนรูป พฤติกรรมที่มีความดันสูงสอดคล้องกับกระบวนการเฟรกเมนเทชัน ขณะพฤติกรรมที่ความดันต่ำกับการเปลี่ยนแปลงรูปร่างอย่างถาวร ดังนั้นความแข็งแรงคราก ความแข็งแรงของวัสดุ และพฤติกรรมเวิร์คฮาร์ดเคนนึงต่อมีผลกระทบต่อความสัมพันธ์ความดัน ความหนาแน่น คุณลักษณะที่ปรับปรุงความสามารถในการอัดจะปรับปรุงความแข็งแรงกรีนด้วย ตัวอย่างเช่น พิจารณา ขนาดของอนุภาค ซึ่งเป็นอนุภาคภายนอกที่ไปขัดขวางการอัดแน่น การอัดแน่นอนุภาคขนาดเล็กได้ความหนาแน่นต่ำ ทำให้ความแข็งแรงกรีนลดลง ส่วนรูปร่างอนุภาคที่มีผลกระทบที่ค่อนข้างคล้ายคลึงกัน อนุภาครูปทรงไม่แน่นอนทำให้ค่าความหนาแน่นปรากฏต่ำและขัดขวางเพื่อให้ได้ความหนาแน่นสูงหลังการอัด อย่างไรก็ตามผงที่มีรูปร่างที่ไม่แน่นอนจะให้ความแข็งแรงกรีนสูงเนื่องจากการเกาะเกี่ยวเชิงกล ผงรูปทรงกลมให้ความหนาแน่นการจัดเรียงตัวสูงในตอนเริ่มต้นแต่ความแข็งแรงกรีนมีค่าไม่สูงมากนัก

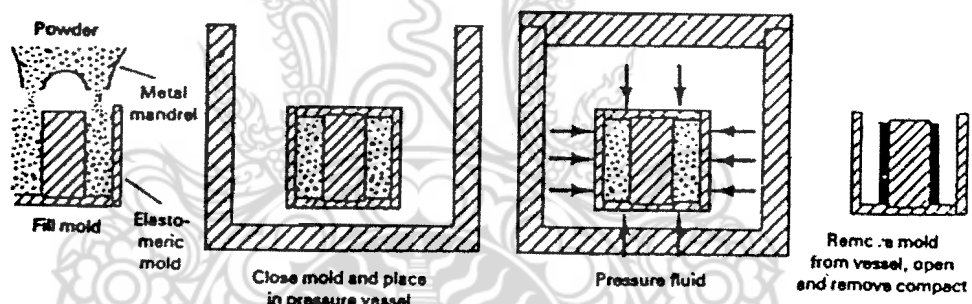
2.3.3.8 การเพิ่มความดัน (Pressurization)

ชนิดของความดันที่ใส่ให้ผงวัสดุขณะอัดมีผลต่อคุณสมบัติของชิ้นงาน ความดันที่ถูกส่งมาจากทิศทางเดียวทำให้เกิดความลาดของความหนาแน่นและความลาดของสมบัติสูง การเพิ่มความดันแบบสองทิศทางช่วยทำให้ความเค้นที่ส่งให้วัสดุมีความสม่ำเสมอมากขึ้น ส่งผลให้สมบัติและความหนาแน่นหลังการอัดมีความหนาแน่นและหลังการอัดมีความสม่ำเสมอเพิ่มขึ้น สำหรับอัดชิ้นงานที่มีอัตราความสูงต่อเส้นผ่าศูนย์กลางต่ำ การเลือกใช้วิธีการอัดแบบทิศทางเดียวก็เพียงพอ ในการอัดแน่นความสูงของชิ้นงานหลังการอัดหาได้จากความสูงของปริมาณผงที่เติมลงไป ในแม่พิมพ์และแรงที่ใช้ในการอัดแน่น ดังนั้นถ้าต้องการควบคุมความสูงของชิ้นงานสุดท้าย ต้องทราบทั้งความหนาแน่นปรากฏและความหนาแน่นสุดท้ายของวัสดุนั้นๆ

2.3.3.9 เทคโนโลยีการอัดแบบอื่น

ถึงแม้ว่าการใช้วิธีการอัดแน่นด้วยแม่พิมพ์ในแนวแกนเดียวในการทำให้ผงวัสดุขึ้นรูปเป็นชิ้นงาน แต่สำหรับชิ้นส่วนที่มีรูปร่างซับซ้อนหรือมีการเจาะร่อง หรือชิ้นส่วนที่มีความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลางมากอาจใช้เทคนิคการอัดเย็นแบบทุกทิศทาง (Cold Isostatic Pressing, CIP) การอัดเย็นแบบทุกทิศทางเริ่มต้นด้วยการเติมผงวัสดุในแบบแม่พิมพ์ที่ยืดหยุ่น (Flexible Mold) และให้ความดันเท่ากันทุกทิศทางผ่านการไหลที่เป็นตัวกลาง เช่น น้ำมัน หรือน้ำ และมีการผสมสารป้องกัน การกัดกร่อน โดยทั่วไปความดันที่ใช้กระบวนการ CIP อยู่ในช่วง 200 - 400 MPa แต่ความดันในการอัดอาจสูงถึง 1400 MPa การอัดเย็นแบบทุกทิศทางแบ่งออกเป็นสองแบบ คือ เทคนิคถุงเปียก และถุงแห้ง

การอัดแน่นแบบทุกทิศทางมีประสิทธิภาพสูงกว่าการอัดแน่นแบบแม่พิมพ์ในแนวแกนในแง่ของความหนาแน่นสูงกว่าที่ความดันที่ใช้อัดเท่ากัน และมีการกระจายความหนาแน่นที่สม่ำเสมอทั่วชิ้นงานมากกว่า การอัดแน่นแบบ CIP ไม่จำเป็นต้องใช้ตัวประสานหรือสารหล่อลื่น นอกจากนี้สามารถขึ้นรูปชิ้นงานที่มีความซับซ้อนได้มากกว่า รูปร่างของชิ้นงานกำหนดจากแม่พิมพ์ที่ใช้บรรจุผงวัสดุ



ภาพที่ 2.42 ขั้นตอนการอัดขึ้นรูปด้วย Wet - Bag Isostatic Pressing

ข้อดีของกระบวนการ Cold Isostatic Pressing

- 1) มีข้อจำกัดในเรื่องขนาดและमितิน้อยมาก เพราะเป็นการให้ความดันที่เท่ากันทุกทิศทางเป็นการขจัดปัญหาในเรื่องของขนาด ซึ่งในกรรมวิธีอื่นจะมีข้อจำกัด โดยเฉพาะอัตราส่วนระหว่างความยาวและเส้นผ่านศูนย์กลางจะเป็นปัญหาในการทำ Dry Pressing

2) สามารถทำให้ติดกันมากหรือน้อย ขึ้นอยู่กับความดันที่ใช้ ซึ่งจะส่งผลต่อความหนาแน่นและการหดตัวที่เกิดขึ้นในกระบวนการอบผนึก (Sintering)

3) เหมาะในการทำงานต้นแบบ หรือปริมาณการผลิตต่ำ

4) ใช้เวลาในการทำค่อนข้างสั้น

ข้อจำกัดของกระบวนการ Cold Isostatic Pressing

1) ความสัมพันธ์ระหว่างรูปร่างและมิติ ควบคุมยาก

2) ถ้าจะให้ได้ดี ควรมีลักษณะรูปร่างอย่างง่าย เพราะถ้ามีรูปร่างที่ซับซ้อนแล้วจะมีปัญหาในการถอดแบบออกหลังจากที่ทำการอัดแล้ว

การอัดแน่นแบบการอัดเย็นมีรูปแบบการทำพื้นฐานอยู่ 2 แบบ คือ แบบแห้งและแบบเปียก

ก) แบบเปียก (Wet – Bag Isostatic Pressing) เทคนิคแบบเปียกจุ่มแบบพิมพ์ที่เติมผงวัสดุและปิดผนึกเรียบร้อยแล้วบรรจุด้วยของไหล หลังจากนั้นให้แรงอัดคงแสดงภาพที่ 2.43 หลังการอัดนำแม่พิมพ์หรือถุงที่เปียกออกมาจากถังและถอดชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์ วิธีการนี้สามารถขึ้นรูปชิ้นงานได้หลายชนิดในเวลาเดียวกันขึ้นอยู่กับขนาดของถังความดัน มักใช้ในการทดลอง และการทำงานต้นแบบชิ้นส่วน เพราะชิ้นส่วนสามารถเป็นรูปร่างอย่างหยาบและผ่านขั้นตอนการ Green Machining เป็นรูปร่างสุดท้ายที่ต้องการและเสียค่าใช้จ่ายน้อยกว่าการขึ้นรูปด้วยวิธีอื่น

ข้อดีของแบบเปียก

1) มีข้อจำกัดในด้านขนาดและมิติน้อย สามารถทำรูปร่างที่ซับซ้อนได้

2) ให้ความหนาแน่นดี

3) ใช้ต้นทุนการผลิตต่ำ เพราะแบบทำจากยาง

ข้อเสียของแบบเปียก

1) ในกรณีที่รูปร่างที่ซับซ้อนมากจะทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนมากกว่า 3

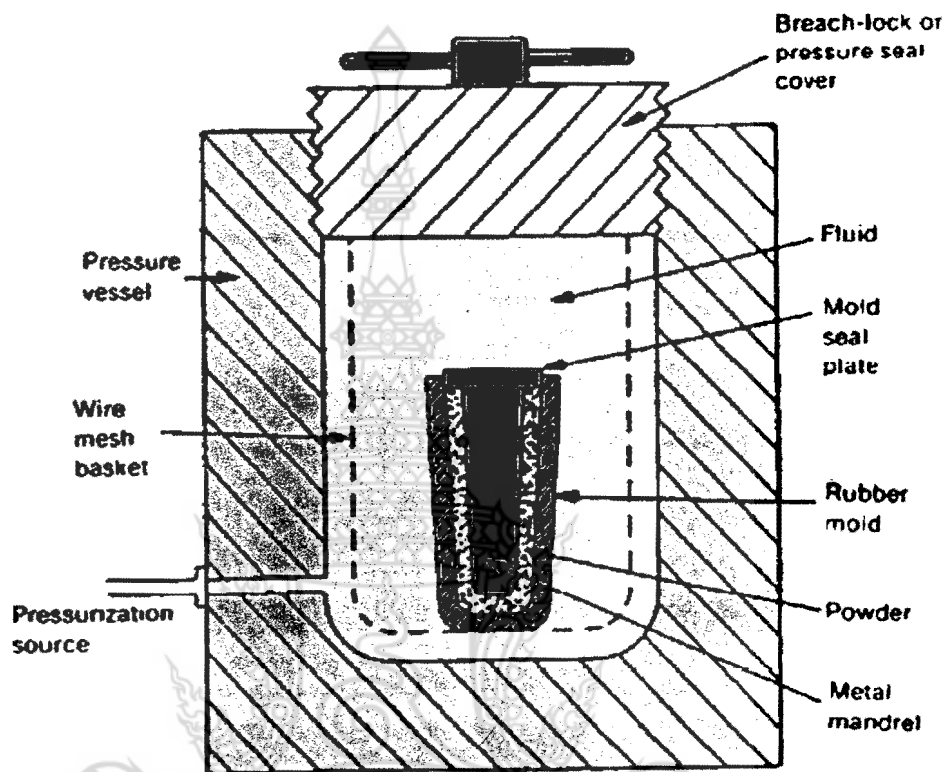
เปอร์เซ็นต์

2) ให้อัตราการผลิตที่ต่ำ

3) มีความเป็นไปได้ยากที่จะทำลักษณะอัด โนมิตี โดยทั่วไปจะใช้แรงงานคน

จุดเด่นของวิธีการนี้ คือ ความดันที่จะใช้อยู่ในช่วง 275 – 1380 MPa ส่วนข้อจำกัดในเรื่องรูปทรงและมิติที่เปลี่ยนไปสามารถแก้ไขได้โดยการออกแบบเพื่อไว้แต่อย่างไรก็ตามการให้อัตราการผลิตที่ต่ำ จึงไม่เหมาะกับการที่จะใช้กับปริมาณการผลิตที่สูง

Isostatic Press



ภาพที่ 2.43 การอัดขึ้นรูปด้วย Wet – Bag Isostatic Pressing

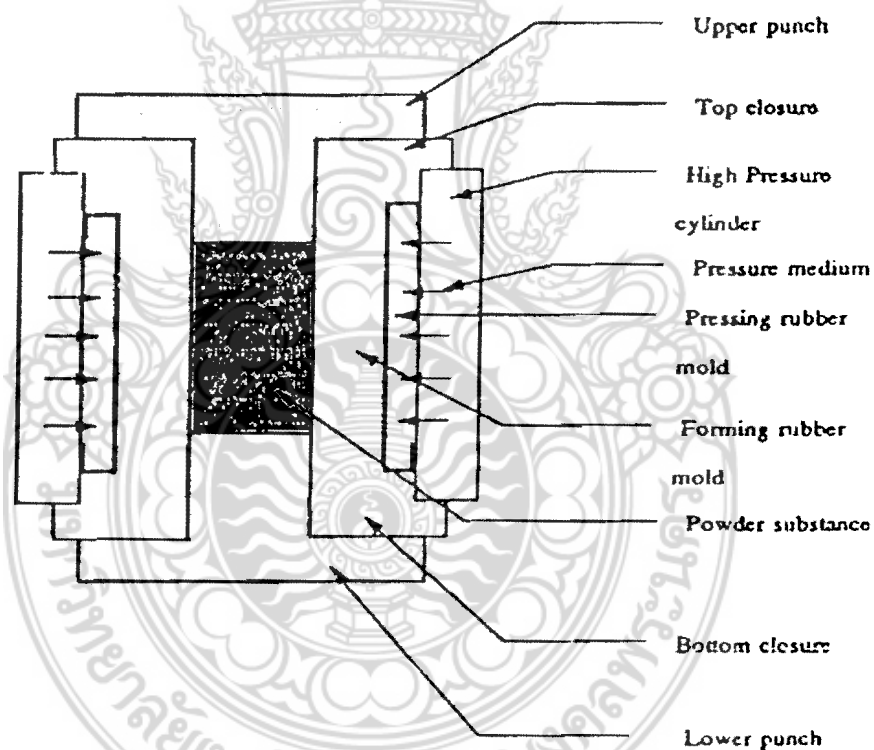
ข) การอัดแน่นแบบการอัดแห้ง (Dry – Bag Isostatic Pressing) ในวิธีการนี้แบบข้างเป็นส่วนรองรับผง และส่วนที่ให้ความดันแก่ผงกลายเป็น Press compact ในแบบที่อยู่ภายในแบบข้างอีกชั้นหนึ่ง ซึ่งชั้นนอกจะเป็นตัวรับความดันจากเครื่องไฮดรอลิกส์ผ่านทางของไหล โดยแบบจะถูกเติมด้วยผงโลหะ แล้วผงจะได้รับ ความดันหลังจาก Press compact จะถูกเคลื่อนย้ายออกที่ความดันที่ใช้อยู่ระหว่าง 21 – 275 MPa

ข้อดีของแบบแห้ง

- 1) มีข้อจำกัดทางด้านขนาดและมิติน้อย แต่มีข้อจำกัดมากกว่าวิธีแบบเปียก เพราะต้องใช้การดึงออกจากแบบโดยตรง
- 2) ให้ความหนาแน่นดีแต่ไม่เท่าวิธีแบบเปียกโดยเฉพาะบริเวณตอนปลายของแบบ จึงจำเป็นต้องออกแบบให้สามารถถอดออกจากแบบได้ง่าย
- 3) ให้อัตราการผลิตสูง
- 4) เสียค่าใช้จ่ายไม่มากนัก เมื่อเทียบกับปริมาณการผลิต
- 5) สามารถทำเป็นระบบอัตโนมัติได้

ข้อเสียของแบบแห้ง

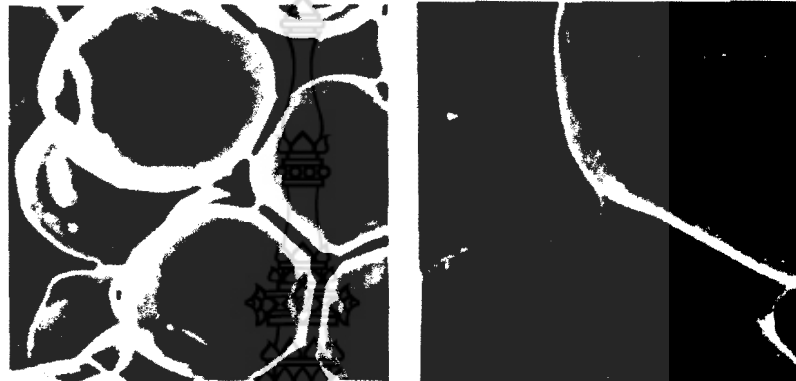
- 1) ทำได้แต่เพียงรูปร่างอย่างง่ายเพราะแบบต้องอยู่นิ่ง และชิ้นส่วนต้องออกได้ด้วยวิธีแบบแห้ง
- 2) ไม่สามารถทำรูปร่างที่ซับซ้อนเท่าวิธีแบบเปียกได้ควบคุมรูปร่างและมิติได้ยาก เพราะมิติที่จะขึ้นอยู่กับแบบยาง



ภาพที่ 2.44 การอัดขึ้นรูปด้วย Dry – Bag Isostatic Pressing

2.3.4 การอบผืนึก (Sintering)

เป็นกระบวนการอบชิ้นงาน (Green Compact) จากการอัดขึ้นรูปที่อุณหภูมิจุดหลอมเหลวของชิ้นงานในบรรยากาศที่ป้องกันไม่ให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ผิวนูนภาคจะเชื่อมติดกันทำให้รูพรุนระหว่างอนุภาคลดลงความหนาแน่นเพิ่มขึ้น ชิ้นงานมีความแข็งแรงเหมาะสมสำหรับนำไปใช้งาน



ภาพที่ 2.45 ภาพถ่าย SEM แสดงการฟอร์มตัวของคอคอด เนื่องจากการอบผืนึก

การอบผืนึกเป็นการทำให้อนุภาคเชื่อมติดกันที่อุณหภูมิสูง อาจเกิดขึ้นที่อุณหภูมิต่ำกว่าจุดหลอมเหลวของวัสดุนั้นๆ โดยการเคลื่อนที่ของอะตอมในสถานะของแข็ง แต่วัสดุหลายชนิดเกี่ยวกับการฟอร์มตัวของเฟสของเหลว เมื่อพิจารณาโครงสร้างในระดับจุลภาค การเพิ่มขนาดของคอคอด (Neck Growth) ที่เชื่อมต่อกันบริเวณจุดสัมผัสของอนุภาคสองอนุภาค ดังภาพที่ 2.45 แสดงด้วยรูป SEM เป็นการเปลี่ยนรูปคอคอดในสถานะของแข็ง (Solid State Neck) ระหว่างการอบผืนึกอนุภาคทรงกลม การเพิ่มขนาดของคอคอดทำให้สมบัติของชิ้นงานเปลี่ยนไปหลังอบผืนึก อนุภาคจะเคลื่อนที่ต่อกันด้วยการเคลื่อนที่ของอะตอม

การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างขณะอบผืนึกมีความสัมพันธ์กับการเพิ่มคอคอดที่ขึ้นกับกลไกการเคลื่อนที่ (Transport Mechanisms) ที่ส่วนใหญ่เป็นกระบวนการแพร่ และการแพร่เป็นการกระตุ้นด้วยความร้อนและจำเป็นต้องใช้พลังงานสำหรับการเคลื่อนที่ของอะตอม การที่อะตอมจะเคลื่อนที่ได้ขึ้นขึ้นอยู่กับอะตอมนั้นมีพลังงานมากกว่าหรือเท่ากับพลังงานกระตุ้นที่ทำให้อะตอมแยกตัวเป็นอิสระจากตำแหน่งปัจจุบัน และเคลื่อนที่เข้าไปยังตำแหน่งที่ว่าง (Vacant Site) จำนวน

ตำแหน่งที่ว่างและจำนวนอะตอมที่มีพลังงานเพียงพอที่จะเคลื่อนที่เข้าไปยังตำแหน่งเหล่านั้น แปรตามความสัมพันธ์อาร์เรเนียส (Arrhenius temperature relation) ดังนี้

$$N/N_0 = \exp(-Q/RT) \quad (2.21)$$

เมื่อ N/N_0 เป็นอัตราส่วนของจำนวนตำแหน่งว่างหรือจำนวนอะตอมที่ถูกกระตุ้นต่อจำนวนอะตอมทั้งหมด

Q คือ พลังงานกระตุ้น

R คือ ค่าคงที่ของแก๊ส

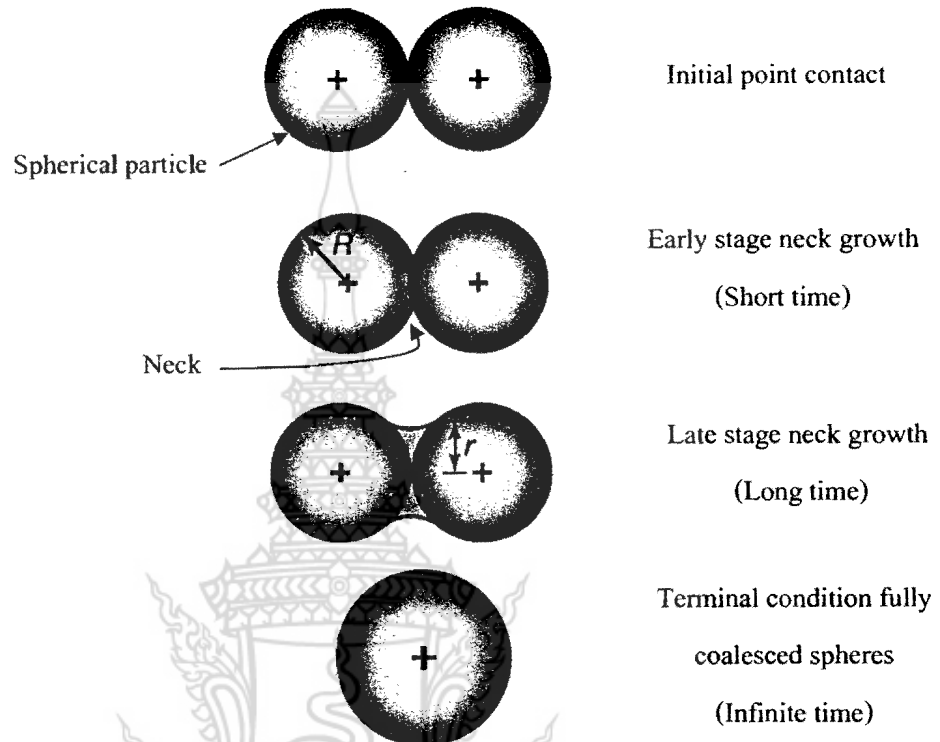
T คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์

2.3.4.1 ทฤษฎีการอบผนึก (Sintering Theory)

ถ้าพิจารณาบริเวณจุดสัมผัสของอนุภาคทรงกลมสองอนุภาค (ภาพที่ 2.46 ภาพบนสุด) โดยทั่วไปในการอัดแน่นผงอนุภาคแต่ละอนุภาคมีบริเวณจุดสัมผัสหลายบริเวณกับอนุภาคอื่นได้หลายบริเวณ พันธะระหว่างอนุภาคที่บริเวณสัมผัสขยายตัวขึ้นและรวมตัวกัน (Merge) เมื่อการอบผนึกดำเนินไปอย่างต่อเนื่อง ที่แต่ละจุดสัมผัสของอนุภาคเกิดเป็นขอบเกรน โคขึ้นมาแทนที่บริเวณรอยต่อระหว่างเฟสของแข็งและไอ (Solid Vapor Interface) การอบผนึกใช้เวลานานทำให้อนุภาคทั้งสองรวมเป็นหนึ่งอนุภาคขนาดใหญ่ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางเป็น 1.26 เท่าของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคเริ่มต้น

ขั้นตอนการอบผนึกเริ่มต้นจากขั้นตอนแรก (Initial State) ที่คอคอดระหว่างอนุภาคมีการเพิ่มขนาดอย่างรวดเร็ว ขั้นตอนต่อมาเรียกว่าขั้นตอนกลาง (Intermediate State) โครงสร้างรูพรุนราบเรียบ และมีการเชื่อมต่อกันของรูพรุนเป็นลักษณะทรงกระบอก (Cylindrical Nature) ขณะที่สมบัติของชิ้นงานมีการพัฒนาในช่วงท้ายของขั้นตอนกลางเกิดการโตของเกรน (Grain Growth) ส่งผลให้เกรนมีขนาดใหญ่ขึ้นและจำนวนเกรนลดน้อยลง กรณีนี้เกิดขึ้นพร้อมกับการแยกตัวออกไปอยู่โคเดเคียวของรูพรุนและอัตราการอบผลึกช้าลง เมื่อความพรุนหดตัวลงประมาณ 8 เปอร์เซ็นต์ (หรือความหนาแน่นตามทฤษฎี 92 เปอร์เซ็นต์) ทำให้โครงข่ายของรูพรุนเปิดไม่เสถียร จากรูปลักษณะของโครงข่ายรูพรุน ณ จุดนี้ทำให้รูพรุนรูปทรงกระบอกยุบตัวลง

กลายเป็นทรงกลม ซึ่งไม่มีประสิทธิผลในการทำให้เกรนโตช้าลง การที่เห็นรูพรุนเดี่ยวปรากฏขึ้น แสดงว่าขั้นตอนการอบผนึกมาถึงขั้นตอนสุดท้ายแล้ว ขณะเดียวกันอัตราการแน่นตัวช้าลง ก๊าซที่ค้างอยู่ในรูพรุนเป็นตัวกำหนดความหนาแน่นสุดท้ายของชิ้นงาน ดังนั้นการอบผนึกจึงทำให้ความหนาแน่นสูงขึ้นตรงเท่ากับโลหะยังไม่ระเหย



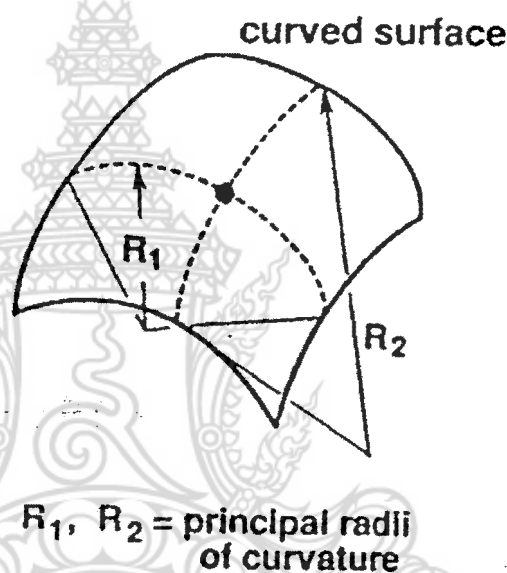
ภาพที่ 2.46 แบบจำลองการอบผนึกอนุภาคทรงกลมสองอนุภาค

ขั้นตอนแรกเกี่ยวกับ โครงสร้างของจุลภาคที่มีความแตกต่างระหว่างความโค้งมาก (Curvature Gradient) ทั้งอัตราส่วนขนาดคอคอด และการหดตัวมีค่าน้อย และขนาดเกรนไม่โตกว่าขนาดอนุภาคในตอนเริ่มต้น ในขั้นตอนกลางรูพรุนมีความเรียบมากขึ้น และมีความหนาแน่นประมาณ 70 - 92 เปอร์เซ็นต์ ของความหนาแน่นทฤษฎี และมีการ โตของเกรนดังนั้นเกรนจึงมีขนาดใหญ่กว่าขนาดอนุภาคเริ่มต้น เมื่อถึงขั้นตอนสุดท้ายของการอบผนึกรูพรุนมีลักษณะเป็นทรงกลม และปิด เห็นการ โตของเกรนอย่างชัดเจน ภาพล่างสุดในภาพที่ 2.46 แสดงลักษณะพฤติกรรมที่เกิดขึ้นจริงในขณะอบผนึก โดยแสดงการเปลี่ยนแปลงของความหนาแน่น ขนาดเกรน และลักษณะโครงสร้างของรูพรุนจากการอบผนึก

จากสมการลาปลาซ (Laplace equation) กำหนดให้ความเค้น, σ เกี่ยวกับผิวโค้ง
มีค่า ดังนี้

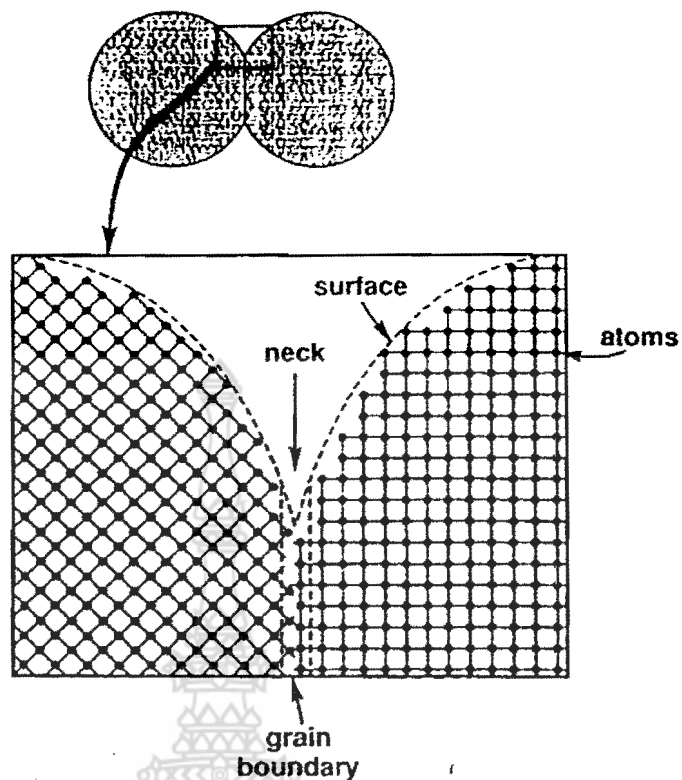
$$\sigma = \gamma(R_1^{-1} + R_2^{-1}) \quad (2.22)$$

เมื่อ γ คือความตึงผิว (Surface Tension) R_1 และ R_2 เป็นรัศมีหลักของผิวโค้ง
ภาพที่ 2.47 เป็นรูปวาดแสดงให้เห็นจุดต่างๆ บนผิวโค้งรวมทั้งรัศมีหลักตั้งอยู่ภายในมวลใช้
เครื่องหมายบวกสำหรับค่ารัศมี ดังนั้นพื้นผิวที่เว้าเข้าข้างในจะมีเครื่องหมายเป็นลบ และพื้นผิวที่
เรียบจะไม่มีค่าความเค้น ดังนั้นขณะอบผนึกให้กับพื้นผิวใดๆที่โค้งขึ้น (Bump) หรือเว้าลง (Dip) จะ
ราบเรียบ (Flatten) มากขึ้นเมื่อเวลาผ่านไป



ภาพที่ 2.47 ลักษณะความโค้งบนพื้นผิวโค้งที่บอกในรูปของรัศมีหลักสองค่า

พิจารณาขั้นตอนแรกของการอบผนึกเป็นตัวอย่างเพื่อการลองใช้สมการลาปลาซ
บริเวณคอคอดสามารถวาดภาพได้ง่าย และขยายสเกลออกเป็นระดับอะตอมในรูปที่ 2.48 บริเวณที่
เรียกว่าพื้นผิวคือบริเวณที่พันธะอะตอมขาดจากกัน ขอบเกรนจัดเป็นบริเวณบกร่องอย่างหนึ่ง
ดังนั้นบริเวณคอคอดมีโอกาที่จะขาดจากกันสูง ที่ระยะต่างๆตามพื้นผิวจากคอคอดความโค้งมี
ค่าคงที่ ทั้ง R_1 และ R_2 มีค่าเท่ากับรัศมีของอนุภาคทรงกลมคือ $D/2$ ดังนั้นจากสมการจะได้



ภาพที่ 2.48 ภาพระดับอะตอมแสดงพันธะระหว่างอนุภาคจากการอบผนึก อะตอมที่ไม่เรียงอยู่ในแนวเส้นเดียวกันกลายเป็นของเกรน คอคอดคือบริเวณที่มีการขาดกันเกิดขึ้นโดยกระบวนการเคลื่อนที่

$$\sigma = 4\gamma/D \quad (2.23)$$

โดยการประมาณรูปร่างของคอคอดเป็นวงกลมด้วยรัศมี p เมื่อ p มีค่าประมาณเท่ากับ $X^2/4D$ ดังนั้นพื้นที่ผิวโค้งของคอคอดทำให้ความเค้นมีค่า

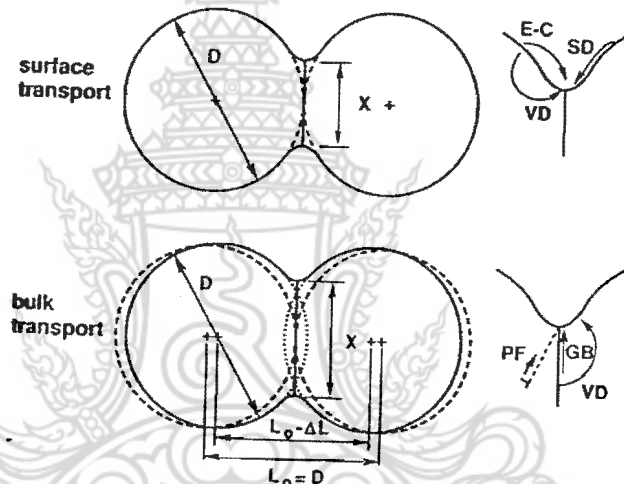
$$\sigma = \gamma \left(\frac{2}{X} - \frac{4D}{X^2} \right) \quad (2.24)$$

การเปรียบเทียบสมการที่ (2.23) และสมการที่ (2.24) แสดงให้เห็นว่ามีความแตกต่างระหว่างความเค้นในบริเวณคอคอดสูง ยิ่งคอคอดมีขนาดเล็กความแตกต่างยิ่งมีค่าสูงขึ้น ดังนั้นยิ่งระยะห่างมีค่าน้อยยิ่งมีแรงขับสำหรับการไหลของมวลไปยังคอคอดสูง เมื่อขนาดคอคอดโตขึ้นความแตกต่างระหว่างความเค้นอ่อนคลายลงและกระบวนการอบผนึกช้าลง ในขั้นตอนกลาง

ความโค้งที่อยู่รอบรูพรุนทรงกระบอกทำให้เกิดแรงขับ และในขั้นตอนสุดท้ายความโค้งรอบรูพรุนทรงกลมก่อให้เกิดการหดตัว

กลไกการเคลื่อนที่เป็นตัวกำหนดการไหลของมวลที่เกิดขึ้นตามแรงขับ กลไกการเคลื่อนที่แบ่งเป็นสองประเภทคือ การเคลื่อนที่ตามพื้นผิว (Surface Transport) และการเคลื่อนที่แบบมวลรวม (Bulk Transport) ทั้งสองกลไกประกอบด้วยกลไกระดับอะตอมที่สนับสนุนให้เกิดการไหลของมวล ดังแสดงด้วยอนุภาคทรงกลมสองอนุภาคในรูปที่ 2.49

การเคลื่อนที่ตามพื้นผิวที่เกี่ยวข้องกับการเพิ่มขนาดของคอคอดโดยปราศจากการเปลี่ยนแปลงระยะต่างๆ ภายในอนุภาค ทั้งนี้เนื่องจากการไหลของมวลเริ่มต้นและสิ้นสุดที่พื้นผิวของอนุภาค ในขณะที่คอคอดควบคุมโดยการเคลื่อนที่ตามพื้นผิวมีกระบวนการสำคัญสองกระบวนการที่เกิดขึ้นขณะอบผนึกคือการแพร่ตามพื้นผิวและการระเหย-การควบแน่น



ภาพที่ 2.49 แบบจำลองกลไกการแบบผนึกทั้งสองประเภทในอนุภาคทรงกลม

ก) ขั้นตอนแรก (Initial Stage) การประยุกต์ใช้สมการที่ (2.22) กับในการอบผนึก สำหรับขั้นตอนแรก ที่ยอมให้มีการประมาณค่าความแตกต่างของความดันไอ (Vapor Pressure) ความเข้มข้นของช่องว่างในผลึก (Vacancy Concentration) และความเค้น โดยรวมของการอบผนึก ตัวอย่างเช่น ความดันไไปที่บริเวณคอคอดมีค่าต่ำกว่าที่สถานะสมดุลเพราะบริเวณคอคอดมีความโค้งสุทธิเป็นความโค้งเว้า อย่างไรก็ตามมวลรวมของผงจะปล่อยไอออกมาที่ความดันสูงกว่าสมดุล

เพราะมวลของผงมีความโค้งงอ ดังนั้นจึงมีมวลสุทธิไหลเข้าสู่บริเวณคอคอด ในทำนองเดียวกัน ปริมาณความเข้มข้นของช่องว่างในผลึก C ภายใต้พื้นผิวโค้งงอขึ้นกับความโค้งงอ

$$C = C_0 \left[1 - (\gamma\Omega/kT)(R_1^{-1} + R_2^{-1}) \right] \quad (2.25)$$

เมื่อ C_0 คือ ความเข้มข้นของช่องว่างในผลึกที่ภาวะสมดุล γ เป็นพลังงานพื้นผิว Ω เป็นปริมาตรของอะตอม k เป็นค่าคงที่ของโบลทซ์แมนน์ และ T เป็นอุณหภูมิสัมบูรณ์ ยิ่งพื้นผิวมีความโค้งงอมากยิ่งทำให้ห่างจากภาวะสมดุลมาก สำหรับพื้นผิวว่าความเข้มข้นของช่องว่างในผลึกสูงกว่าสมดุล แต่ในพื้นผิวนูนจะมีความเข้มข้นต่ำกว่าสมดุล

แบบจำลองสำหรับการอบผนึกในขั้นตอนแรกเน้นที่การเพิ่มขนาดของคอคอดที่อุณหภูมิคงที่ (Isothermal) โดยการวัดจากอัตราส่วนขนาดคอคอด (X/D)

$$(X/D)^n = Bt/D^m \quad (2.26)$$

เมื่อ X เป็นเส้นผ่าศูนย์กลางของคอคอด D เป็นเส้นผ่าศูนย์กลางของอนุภาค t เป็นเวลาในการอบผนึก และเมื่อ B เป็นค่าคงที่ขึ้นกับชนิดและรูปทรงของวัสดุ ค่า m , n และ B ขึ้นกับกลไกการเคลื่อนที่ของมวลดังแสดงในตารางที่ 2.11 โดยทั่วไปแบบจำลองในสมการที่ 2.26 ใช้ได้สำหรับอัตราส่วนขนาดคอคอดที่มีค่าต่ำกว่า 0.3 สังเกตได้ว่าสัมประสิทธิ์การแพร่ถูกรวมอยู่ในพารามิเตอร์ B และมีค่าแปรผันตามอุณหภูมิอาร์เรเนียสคล้าย จากสมการจะเห็นได้ว่าอนุภาคขนาดเล็กทำให้การอบผนึกเร็วขึ้นเพราะการอบผนึกกับส่วนผกผันของขนาดอนุภาค การแพร่ตามพื้นผิว และการแพร่ตามขอบเกรนทำให้เร็วขึ้นได้ โดยการลดขนาดอนุภาค ถึงแม้ว่าโดยทั่วไปกลไกที่ใช้ในการอบผนึกพึงโลหะหมายถึงการแพร่ผ่านแลตทิซ (Lattice Diffusion) ในทุกกรณีการอบผนึกขึ้นกับอุณหภูมิในรูปเอ็กซ์โปเนนเชียล ซึ่งหมายถึงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเพียงเล็กน้อยส่งผลกระทบอย่างสูงต่อการอบผนึก กล่าวโดยสรุปได้ว่าเวลาเป็นตัวแปรที่มีผลกระทบน้อยที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิ และขนาดอนุภาค

ตารางที่ 2.11 สมการที่ใช้ในขั้นตอนแรกของการอบผนึก $(X/D)^n = B/(D^m)$

กลไก	N	M	B
การไหลหนืด	2	1	$3\gamma/(2\eta)$
การไหลพลาสติก	2	1	$9\pi\gamma b D / (kT)$
การระเหย-ควบแน่น	3	1	$(3 P\gamma/\rho^2)(\pi/2)^{1/2} (M/(kT))^{3/2}$
การแพร่ในเนื้อวัสดุ	5	3	$80D_s\gamma\Omega / (kT)$
การแพร่ตามขอบเกรน	6	4	$20\delta D_s\gamma\Omega / (kT)$
การแพร่ตามพื้นผิว	7	4	$56D_s\gamma\Omega^{4/3} / (kT)$

กระบวนการเคลื่อนที่แบบมวลรวมทำให้ระยะห่างระหว่างอนุภาคเปลี่ยนแปลงเมื่อคอคอดคมีขนาดเพิ่มขึ้นดังภาพที่ 2.49 ผลที่ได้คือชิ้นงานมีการหดตัว การเข้าใกล้กึ่งกลางของอนุภาคประมาณได้จากความสัมพันธ์กับขนาดของคอคอด ดังนี้

$$\Delta L/L_0 = (X/D)^2 \quad (2.27)$$

เมื่อการหดตัว $\Delta L/L_0$ คือ ความยาวที่เปลี่ยนแปลงไปจากเดิมส่วนด้วยความยาวเริ่มต้น การหดตัวของอบผนึกในขั้นตอนแรกเมื่อใช้กฎการเคลื่อนที่มวลจะมีลักษณะคล้ายกับสมการที่ (2.26) ดังนี้

$$(\Delta L/L_0)^{n/2} = Bt (2^n D^m) \quad (2.28)$$

เมื่อ $n/2$ มีค่าระหว่าง 2.5 ถึง 3 ค่า D เป็นขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาค และ t เป็นเวลาที่อุณหภูมิคงที่ พารามิเตอร์ B ในสมการที่ (2.26) และ สมการที่ (2.28) ประกอบด้วยค่าสัมประสิทธิ์และมีค่าขึ้นกับอุณหภูมิ ดังนี้

$$B = B_0 \exp (-Q/RT) \quad (2.29)$$

เมื่อ R เป็นค่าคงที่ของก๊าซ T คืออุณหภูมิสัมบูรณ์ และ B_0 เป็นพารามิเตอร์รวมของวัสดุ (พลังงานพื้นผิวขนาดอะตอม ความถี่ของการสั่นอะตอม ลักษณะทางเรขาคณิตของระบบ) Q เป็นพลังงานกระตุ้น ที่เป็นตัววัดความยากในการกระตุ้นให้อะตอมเคลื่อนที่

การหดตัวในการอบผนึกใช้ได้เฉพาะในกระบวนการเคลื่อนที่แบบมวลรวม การวัดการหดตัวอย่างง่ายโดยการให้ความร้อนกับชิ้นงานที่อุณหภูมิต่างกันในเวลาที่แตกต่างกัน และวัดความยาวของชิ้นงานที่ได้ การใช้ไดลาโตมิเตอร์ (Dilatometer) หรือเทคนิคการใช้รูปจำลองโดยตรง เป็นทางเลือกในการเก็บข้อมูลการหดตัวอย่างต่อเนื่องขณะให้ความร้อน โดยทั่วไปการใช้เทคนิคไดลาโตมิเตอร์ทำโดยการให้ความร้อนกับชิ้นงานด้วยอัตราการเพิ่มอุณหภูมิคงที่ เช่น 5 องศาเซลเซียส/นาทิจ หรือ 10 องศาเซลเซียส/นาทิจ ค่าความยาวของชิ้นงานที่เปลี่ยนไปหรือการหดตัวตามอุณหภูมิถูกบันทึกไว้ทุกอุณหภูมิ เพื่อใช้ในการหาบริเวณที่มีการหดตัวมาก วิธีการนี้ใช้การทดลองเพียงการทดลองเดียวในการบอกค่าอุณหภูมิที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงขนาดของตัวอย่าง

การเปลี่ยนแปลงขนาดของชิ้นงานมีประโยชน์สำหรับกระบวนการที่ต้องทำหลังการอบผนึกเพราะช่วยให้ไม่ต้องวัดขนาดของคอคอดแต่ละอันเพื่อหาปริมาณการหดตัว โดยทั่วไปชิ้นงานทางด้าน Powder Metallurgy (P/M) การออกแบบเครื่องมือสำหรับชิ้นงานที่มีการหดตัวต้องให้มีการเผื่อขนาดของชิ้นงานไว้เพื่อให้ได้ขนาดสุดท้ายหลังการอบผนึกอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ซึ่งอาจทำให้เกิดความยุ่งยากในกระบวนการผลิต ถ้าชิ้นงานมีความหนาแน่นต่างกัน ส่งผลให้มีการหดตัวต่างกันระหว่างการอบผนึกด้วย ดังนั้นการอบผนึกชิ้นงานที่อุณหภูมิสูงอาจทำให้ชิ้นงานเกิดการบิดเบี้ยว (Warpage) ในวัสดุบางอย่างที่ต้องการความหนาแน่นสูงเพื่อนำไปใช้งานได้จึงต้องยอมให้มีการหดตัวระหว่างการอบผนึกได้ ดังนั้นการหดตัวเป็นสิ่งที่ต้องการหรือต้องหลีกเลี่ยงขึ้นอยู่กับวัสดุ ความยากง่ายในการอัด และสมบัติที่ต้องการ

ข) ขั้นตอนกลาง (Intermediate Stage) สมการ (2.28) ใช้ได้ดีในกรณีที่มีการหดตัวเพียงเล็กน้อย (เช่น การหดตัวในขั้นตอนแรก) ความสำคัญของขั้นตอนกลางคือการกำหนดสมบัติของชิ้นงานหลังการอบผนึก ลักษณะเด่นที่เกิดขึ้นในขั้นตอนนี้คือความโค้งมนของรูพรุน (Pore Rounding) การแน่นตัวและการโตของเกรน

การใช้ลักษณะทางเรขาคณิตอธิบายการอบผนึกเป็นดังนี้ สมมติให้รูพรุนมีลักษณะเป็นทรงกระบอกอยู่ตามขอบเกรน ดังแสดงในภาพที่ 2.50 และให้รูปร่างของเกรนเป็นรูปทรงที่มีหลายหน้าหรือเตตราไฮเดรอน (Tetrahedron) อัตราการแน่นตัวขึ้นอยู่กับ การแพร่ของช่องว่างในผลึกออกห่างจากรูพรุน ดังนั้นอัตราการแน่นตัว dp/dt เป็นดังนี้

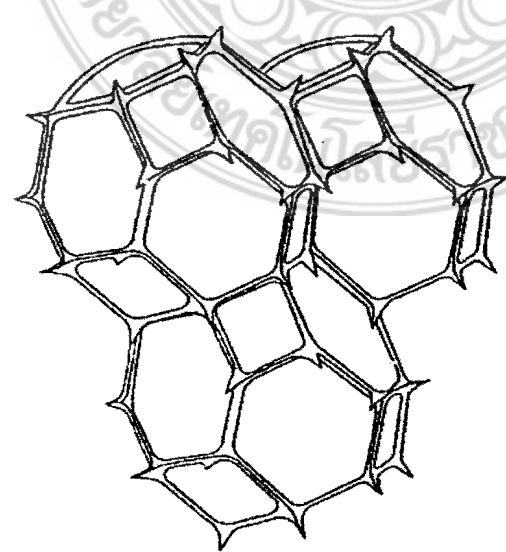
เมื่อ P_1 คือ ความหนาแน่นของมนุษย์ P_2 คือ ความหนาแน่นเมื่อเริ่มตั้งถิ่นฐาน
 ตอนกลาง (หรือขั้นตอนที่สอง) ค่าของ B_1 ได้จากสมการที่ (2.29) ค่า r_1 คือ เวลาตั้งแต่เริ่มตั้งถิ่นฐานตอน
 ที่สอง และ t คือ เวลาของมนุษย์ในช่วงตั้งถิ่นฐานที่ (เรียกว่า t_1) ค่า B_1 แปลงกลับกับกำลังสามของ
 ขนาดกรม สะท้อนให้เห็นถึงบทบาทสำคัญของการกระจายในกรณีการอพยพ การทำ
 ให้กรมโตช้าลง และการดำรงชีพในป่าที่หนาแน่นกว่าในช่วงแรกของการตั้งถิ่นฐาน โดยทั่วไป

$$P_2 = P_1 + B_1 \ln(t/r_1) \quad (2.31)$$

เมื่อ J คือ พิกัดของการแพร่ (หรือจำนวนของขั้นตอนเวลาหน่วย
 พื้นที่) A คือ พื้นที่ที่ประชากรแพร่ N คือ ปริมาณของประชากร และ $dP/dt = J \Delta N$
 ปริมาตร สมมติให้กระบวนการแพร่เป็นแบบสุ่ม โดยให้ของแบบการเป็นแบบสุ่ม
 ช่องว่างในผลึก (และช่องว่างในผลึกถูกทำลายที่นั่น) ดังนั้นการผสมผสานกันของกฎข้อที่หนึ่งของ
 ฟิคส์ (Fick's First Law) กับปริมาตรของรูพรุน ซึ่งเท่ากับ 2.50 หน่วย

$$dP/dt = J \Delta N \quad (2.30)$$

ภาพที่ 2.50 รูปตัดขวางโครงข่ายรูพรุนในหินตะกอนของถ้ำโพสิโดเนียม
 ของรัฐฟลินดา ประเทศออสเตรเลีย



การควบคุมอุณหภูมิและโครงสร้างจุลภาค ขนาดเฉลี่ยของเกรน G มีค่าเพิ่มขึ้นตามเวลาในการอบ
ผืนนี้ ดังนี้

$$G^3 = G_0^3 + kt \quad (2.32)$$

เมื่อ G_0 คือขนาดเกรนเริ่มต้น และ K เป็นพารามิเตอร์ที่กระตุ้นโดยความร้อน คล้ายกับพารามิเตอร์ B เกรนมีรูปร่างเป็นเตตราไฮเดรดาไฮดรอนที่มีรูพรุนรูปทรงกระบอกอยู่ตามรม เกรน มีลักษณะทางเรขาคณิตดังนี้ คือ รัศมีรูพรุน (r) ขนาดเกรน (G) และความพรุน (\mathcal{E}) มีความสัมพันธ์กันดังสมการ

$$\mathcal{E} = 4\pi (r/G)^2 \quad (2.33)$$

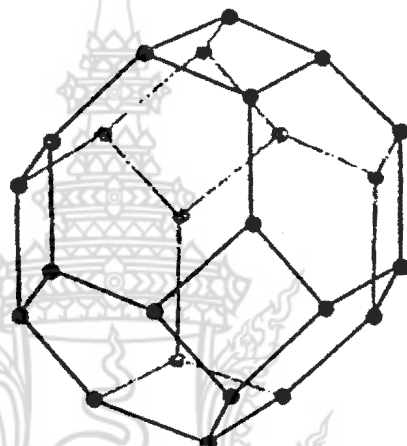
สมมติให้ขอบเกรนเชื่อมต่อกับโครงสร้างรูพรุน จากความสัมพันธ์นี้แสดงให้เห็นว่า เกรนมีขนาดเพิ่มขึ้นเมื่อรูพรุนมีการเกาะตัวกัน (Pore Coalesce) ส่งผลให้รัศมีรูพรุนเพิ่มขึ้น (r เพิ่มขึ้น) หรือเมื่อความพรุนถูกกำจัด (\mathcal{E} ลดลง)

การแน่นตัวในขั้นตอนกลางเกิดจากการแพร่ในเนื้อวัสดุและการแพร่ตามขอบเกรน รูพรุนที่อยู่บนขอบเกรนจะหายไปเร็วกว่ารูพรุนที่อยู่ตามลำพัง การเคลื่อนที่ตามพื้นผิวที่เกิดขึ้นในขั้นตอนกลางเห็นได้จากการที่รูพรุนมีลักษณะความกลมมนขึ้น และมีการเคลื่อนที่รวมไปกับขอบเกรนขณะที่มีการโตของเกรน อย่างไรก็ตามการเคลื่อนที่ตามพื้นผิวไม่ทำให้เกิดการแน่นตัวหรือการหดตัว

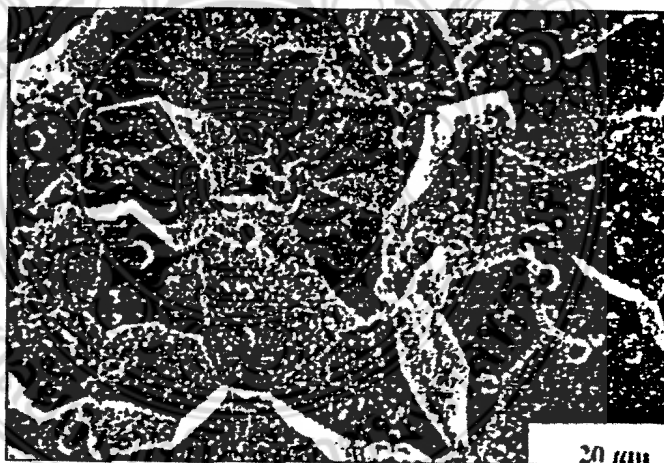
การอบผืนเป็นเวลานานให้มีการเปลี่ยนแปลงสมบัติหรือความหนาแน่นของชิ้นงานอย่างมีนัยสำคัญ ทั้งอัตราการแพร่ การโตของเกรน และการเคลื่อนที่ของรูพรุนต่างเป็นกระบวนการที่กระตุ้นได้ด้วยความร้อน วัสดุส่วนใหญ่อัตราเหล่านี้ยังขึ้นอยู่กับการรูปร่าง และลักษณะเฉพาะ (เช่น ขนาดเกรน ขนาดรูพรุน และระยะห่างระหว่างรูพรุน) เนื่องจากโครงสร้างจุลภาคมีการเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลาขณะอบผืนนี้ ดังนั้นอุณหภูมิจึงมีผลกระทบที่ซับซ้อนต่อกระบวนการอบผืนนี้ และมีผลต่อชิ้นงานที่ผลิต

ค) ขั้นตอนสุดท้าย (Final Stage) การอบผืนในขั้นตอนสุดท้ายเป็นกระบวนการที่ช้า เพราะรูพรุนทรงกลมที่แยกจากกันเกิดการหดตัวด้วยกลไกการแพร่แบบมวลรวม รูพรุน

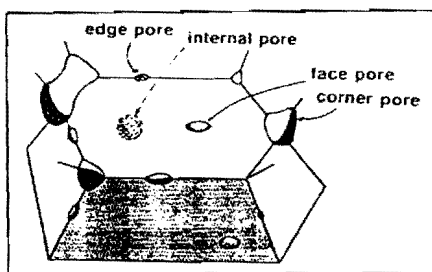
แยกกันอยู่ตามมุมของเกรนในชั้นตอนสุดท้ายของการอบผืนึก ทำให้ได้โครงสร้างแสดงในภาพที่ 2.51 และภาพถ่าย SEM แสดงโครงสร้างชั้นตอนสุดท้ายของการอบผืนึกในภาพที่ 2.52 แสดงรูพรุนทรงกลมกระจายอยู่ตามขอบเกรน ซึ่งลักษณะนี้ทำให้สมดุลระหว่างพลังงานของเกรน และพลังงานพื้นผิวของเฟสแข็ง-ไอ เกิดเป็นร่องเรียกว่ามุมสองหน้า (Dihedral Angle) รูพรุนที่อยู่ตามขอบเกรนจะมีรูปร่างนูนสองด้านเหมือนเลนส์นูนสองอันประกบกัน เมื่อรูพรุนแยกตัวออกจากขอบเกรนจะมีรูปทรงกลม ด้วยเหตุนี้รูพรุนจึงมีรูปร่างแปรตามบริเวณที่อยู่ต้งแสดงในภาพที่ 2.53 รูพรุนที่ไม่อยู่ติดกับขอบเกรนมีลักษณะทรงกลม รูพรุนที่อยู่ตามขอบเกรนมีลักษณะนูนสองด้าน และรูพรุนที่อยู่ตามมุมเกรนมีลักษณะมนหลายเหลี่ยม



ภาพที่ 2.51 เกรนรูปหลายด้านที่มีรูพรุนทรงกลมตามมุมเกรน



ภาพที่ 2.52 ภาพถ่าย SEM ชิ้นงานแสดงชั้นตอนสุดท้ายของการอบผืนึก รูพรุนทรงกลม



ภาพที่ 2.53 รูปร่างรูพรุนในการอบผืนึก แตกต่างกันตามตำแหน่งของรูพรุน

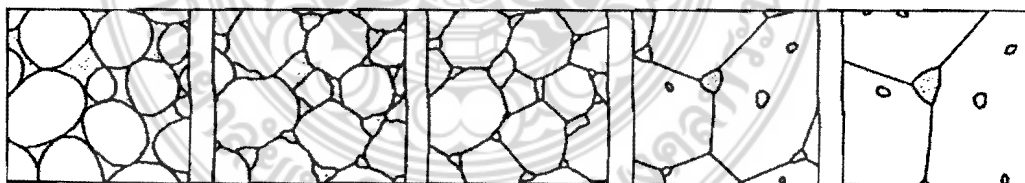
อัตราการกำจัดรูพรุนในขั้นตอนสุดท้ายเกี่ยวกับผลกระทบที่สำคัญสองอย่าง คือ พลังงานพื้นผิว (γ) และความดันก๊าซในรูพรุน (P_g) สมการอัตราการแน่นตัวที่เหมาะสม ดังนี้

$$\frac{d\rho}{dt} = \frac{12D_v\Omega}{kTG^3} \left(\frac{2\gamma}{r} - P_g \right) \tag{2.34}$$

เมื่อ ρ เป็นความหนาแน่น t เป็นเวลา Ω เป็นปริมาตรอะตอม D เป็นสภาพแพร่ในเนื้อวัสดุ k เป็นค่าคงที่ของโบลท์แมนน์ T เป็นอุณหภูมิสัมบูรณ์ G เป็นขนาดเกรน γ เป็นพลังงานพื้นผิวเฟสของแข็ง-ไอ r เป็นรัศมีรูพรุน และ P_g เป็นความดันก๊าซในรูพรุน จากสมการแสดงให้เห็นว่าเมื่อก๊าซถูกขังอยู่ในรูพรุนอัตราการแน่นตัวจะลดลงเข้าสู่ศูนย์ก่อนที่รูพรุนทั้งหมดถูกกำจัดออก ดังนั้นการอบผืนึกในสุญญากาศเท่านั้นจึงได้ความหนาแน่นสูงสุด

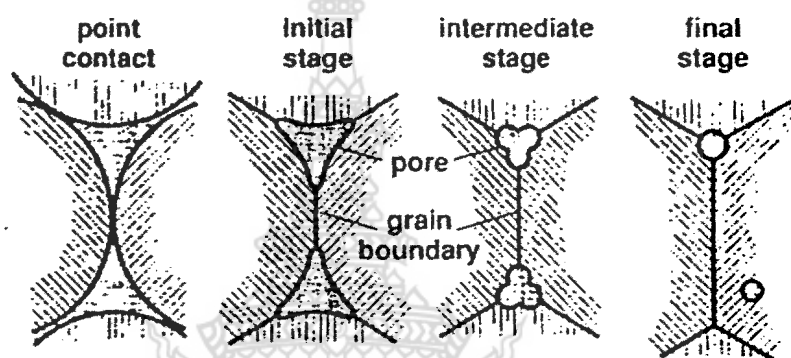
2.3.4.2 โครงสร้างของรูพรุนในการอบผืนึก (Pore Structure in Sintering)

ภาพที่ 2.54 เป็นภาพสเก็ชลักษณะการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคตามปริมาณการอบผืนึกตั้งแต่เริ่มต้นจนถึงขั้นตอนสุดท้ายของการอบผืนึก มีการเปลี่ยนแปลงขนาดเกรน จำนวน และขนาดของรูพรุน รวมไปถึงความพรุนที่ลดลงขณะอบผืนึก

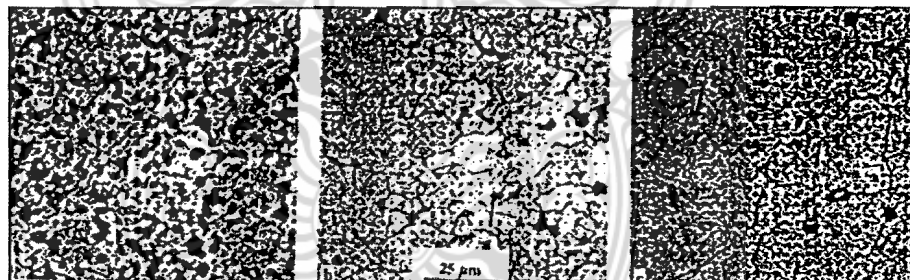


ภาพที่ 2.54 การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของรูพรุนตามปริมาณการอบผืนึก

การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของรูพรุนขณะอบผนึกสามารถแสดงด้วยรูปสเก็ทอีกแบบดังภาพที่ 2.55 ที่จุดสัมผัสระหว่างอนุภาคกลายเป็นคอคอด เมื่อผ่านขั้นตอนแรก โครงแบบของขอบเกรน และรูพรุนควบคุมอัตราการอบผนึก ในตอนเริ่มต้นของขั้นตอนกลางลักษณะรูพรุนมีการขดซ้อนทับกันสูง (Convolute) และรูพรุนอยู่ตามจุดตัดของขอบเกรน เมื่ออบผนึกต่อไปรูพรุนมีรูปร่างเป็นทรงกระบอกและเกิดการแน่นตัวขึ้น โดยการลดทึบของรูพรุน ตัวอย่างการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างแสดงในภาพที่ 2.56 เป็นรูปถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์แบบแสงของพัลลาเดียมขณะอบผนึกที่ขั้นตอนต่างๆ จะสังเกตเห็นความเปลี่ยนแปลงขนาดเกรนอย่างชัดเจน จำนวน และขนาดรูพรุน รวมทั้งการลดลงของความพรุนรวม

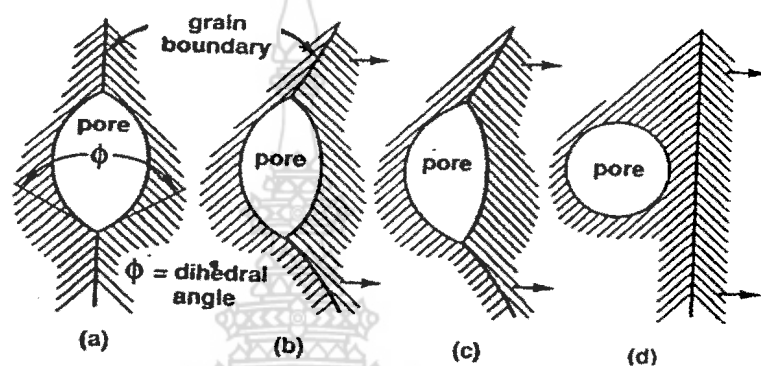


ภาพที่ 2.55 การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของรูพรุนขณะอบผนึก เริ่มต้นจากอนุภาคมีจุดสัมผัสกัน ต่อมาปริมาตรของรูพรุนลดลงและมีความราบเรียบขึ้น และเมื่อรูพรุนกลายเป็นทรงกลมถูกแทนที่ด้วยขอบเกรน



ภาพที่ 2.56 การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคของพัลลาเดียมขณะการอบผนึก ผงถูกอบผนึกที่อุณหภูมิแตกต่างกัน 3 อุณหภูมิ คือ a) 744°C b) 950°C และ c) 1400°C การเปลี่ยนแปลงขนาดเกรนและความพรุนเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิ

ในขั้นตอนสุดท้ายของการอบผนึก ปฏิกริยาระหว่างรูพรุน และขอบเกรนเกิดขึ้น สามลักษณะคือ หนึ่งรูพรุนทำให้เกรน โค้งต่ำลง สองรูพรุนถูกลาก ไปพร้อมกับการเคลื่อนที่ของขอบ เกรนขณะเกิดการ โตของเกรน และสามขอบเกรนแยกออกจากรูพรุนทิ้งให้รูพรุนค้างอยู่ภายใน เกรนวัสดุส่วนใหญ่แสดงอัตราการ โตของเกรนตั้งแต่ปานกลางถึงสูงที่อุณหภูมิต่างๆ เมื่ออุณหภูมิ เพิ่มขึ้นอัตราการเคลื่อนที่ของขอบเกรนเพิ่มขึ้นด้วย เนื่องจากรูพรุนมีการเคลื่อนที่ช้ากว่าขอบเกรน ส่งผลให้ขอบเกรนแยกออกจากรูพรุนดังแสดงในภาพที่ 2.57

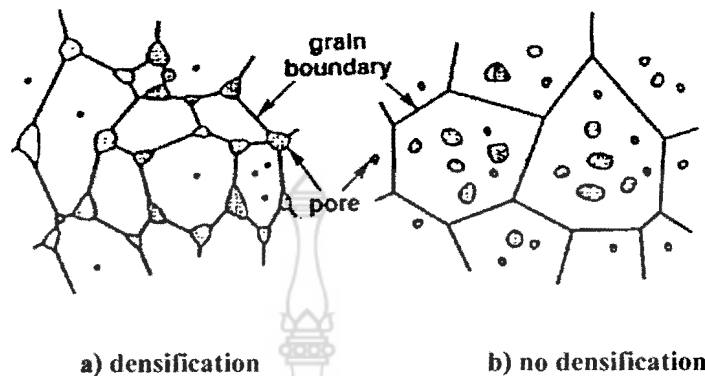


ภาพที่ 2.57 ลำดับการแยกตัวของรูพรุนในขั้นตอนสุดท้ายการอบผนึก a) รูพรุนบนขอบเกรน แสดงมุมของแข็งไอที่สมดุล b) และ c) การโตของเกรนที่ลากรูพรุนไปด้วย d) รูพรุน เดี่ยวเพราะขอบเกรนแยกตัวออก

ที่อุณหภูมิต่ำอัตราการ โตของเกรนต่ำดังนั้นรูพรุนยังคงติดอยู่กับขอบเกรน และ ขัดขวางการ โตของเกรนทำให้การเคลื่อนที่ของขอบเกรนอยู่ภายใต้แรงดึง รูพรุนเคลื่อนที่โดยการ แพร่ในเนื้อวัสดุ การแพร่ตามพื้นผิว หรือการระเหย-การควบแน่นเพื่อข้ามรูพรุน ขณะที่อุณหภูมิสูง อัตราการ โตของเกรนเพิ่มขึ้นถึงจุดที่ขอบเกรนแยกออกจากรูพรุน

พิจารณารูปลักษณะของรูพรุน และขอบเกรนที่เป็นไปได้สองลักษณะดังแสดงใน ภาพที่ 2.57 คือลักษณะที่หนึ่งรูพรุนอยู่ตามบริเวณขอบเกรน และลักษณะที่สองคือรูพรุนที่อยู่ภายใน เกรนรูพรุนที่อยู่บริเวณขอบเกรนทำให้พลังงานของระบบลดต่ำลงเพราะรูพรุน ไปลดพื้นที่ทั้งหมด ของขอบเกรน(ซึ่งจะลดพลังงานลงไปด้วย) ถ้ารูพรุนและขอบเกรนแยกกันอยู่ทำให้พลังงานของ ระบบเพิ่มขึ้นเป็นสัดส่วนกับปริมาณพื้นที่ผิวระหว่างเฟสที่สร้างขึ้นใหม่ ผลที่ตามมาคือรูพรุนจะมี พลังงานเชื่อมต่อกับขอบเกรนเพิ่มขึ้นตามความพรุนที่เพิ่มขึ้น ดังนั้นเมื่อเริ่มต้นขั้นตอนกลางจะเกิด

การแยกตัวของขอบเกรนออกจากรูพรุนขึ้นเพียงเล็กน้อย เมื่อการแน่นตัวดำเนินต่อไปการเคลื่อนที่ที่ช้าลงของรูพรุนบวกกับแรงในการตรึง (Pinning Force) กับขอบเกรนที่ลดน้อยลงทำให้เกิดการแยกตัวออกจากกันระหว่างรูพรุนและขอบเกรน



ภาพที่ 2.58 ลักษณะที่เป็นได้สองแบบของรูพรุน และขอบเกรนในขณะอบผง a) รูพรุนที่อยู่ตามขอบเกรนทำให้มีการแน่นตัว และ b) รูพรุนที่แยกตัวออกจากขอบเกรนไม่ทำให้เกิดความหนาแน่น

2.3.4.3 การอบผงโลหะผสม (Mixed Powder Sintering)

ลักษณะของชิ้นส่วนที่ผ่านการอบผงก็มีสามลักษณะ คือส่วนผสมที่มาจากอนุภาคหลายขนาดผสมกัน ลักษณะของสารละลายของแข็งและลักษณะที่เป็นวัสดุผสม ลักษณะแรกเมื่อต้องการความหนาแน่นของการจัดเรียงตัวของส่วนผสมมีค่าสูง ลักษณะที่สองเกี่ยวข้องกับความสัมพันธ์ของส่วนผสมของผงด้วยกระบวนการแพร่และลักษณะสุดท้ายเกี่ยวกับการอบผงร่วมของวัสดุสองเฟสที่ต่างกัน ส่วนผสมของผงวัสดุเดียวกันที่มีขนาดแตกต่างกัน ทำให้ความหนาแน่นที่ขึ้นสูง เมื่อขนาดอนุภาคเฉลี่ยที่ขึ้นสูงขึ้นการตอบสนองต่อการอบผงจะต่ำลง ดังนั้นจึงเกิดเป็นสองสถานการณ์ คือส่วนผสมที่อุณหภูมิอบผงต่ำและช่วงเวลาอบผงสั้นความสำคัญอยู่ที่ความหนาแน่นที่ขึ้นสูงและทำให้ความหนาแน่นสูง โดยที่ขนาดเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย ขณะที่อุณหภูมิอบผงสูงและเวลาอบผงนานขึ้นความสำคัญของผลกระทบจากการอบผงเพิ่มมากขึ้น และได้ความหนาแน่นสูงสุดเมื่ออนุภาคมีขนาดเล็กที่สุด ดังนั้นผลกระทบที่เกิดจากสถานการณ์หลัง ที่แสดงความหนาแน่นที่ขึ้นสูงและความหนาแน่นหลังอบผงกับส่วนผสมของผงเหล็กขนาด 4 - 66 ไมครอน การหดตัวจากการอบผงลดลงเมื่อขนาดเฉลี่ยของอนุภาคเพิ่มขึ้น (เปอร์เซ็นต์ของอนุภาคขนาด

ใหญ่ขึ้น) ปัญหาและข้อจำกัดที่ค้นพบในการประเมินค่าสัมประสิทธิ์ด้วยฟังก์ชันกำลังสองพหุนามเป็นขบวนการที่ไม่ยอมให้เลิกการประเมิน

2.3.4.4 เตาอบเหล็ก (Sintering Furnaces)

เตาอบเหล็กใช้การควบคุมเวลา อุณหภูมิในรอบเวลาของการประเมิน นอกจากนี้ยังรวบรวมการทดสอบการ ที่ช่วยกำจัดสารหล่อลื่น สารยึดและควบคุมการปรับปรุงคุณสมบัติของวัสดุ การควบคุมการเปลี่ยนแปลงที่เฉพาะเจาะจงที่ P/M มีความแข็งแรงและคุณสมบัติทางกายภาพที่ช่วยสร้างองค์ประกอบผสมผสาน

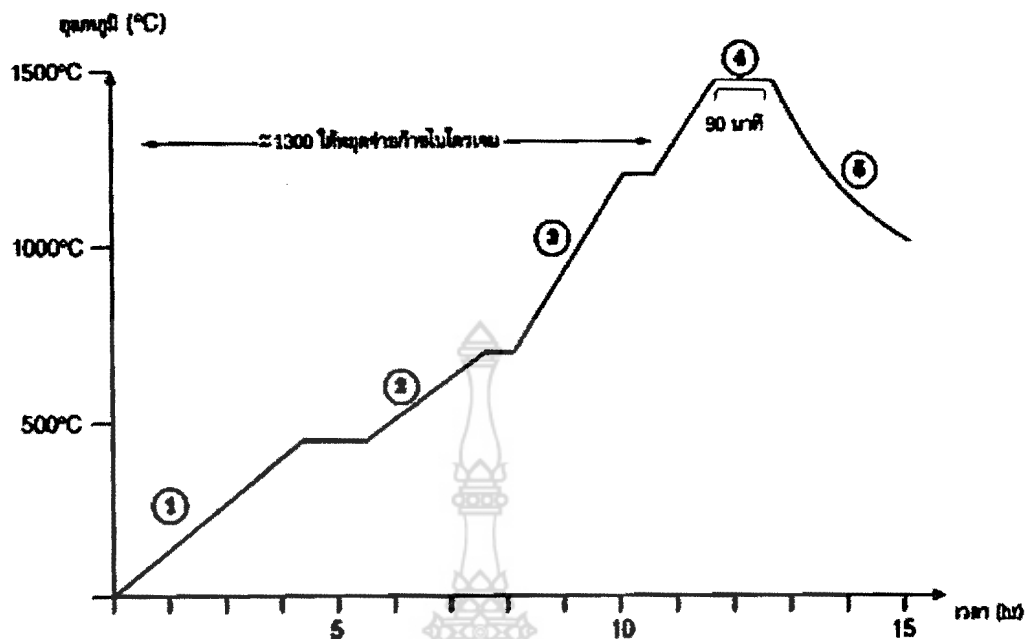
1) ขั้นตอนการให้ความร้อนของชิ้นงานเข้าเตาแล้วปรับอุณหภูมิต่อเนื่อง จนถึง 400 องศาเซลเซียส โดยใช้เวลาในการปรับอุณหภูมิเป็นเวลากว่า 4 ชั่วโมง แล้วจึงใช้เวลา 1 ชั่วโมง

2) ขั้นตอนได้ตัวประสาน (Dewaxing) เพิ่มต่อเนื่องอุณหภูมิจาก 400 องศาเซลเซียส เป็น 700 องศาเซลเซียส โดยใช้เวลาในการปรับอุณหภูมิเป็นเวลากว่า 2 ชั่วโมง แล้วจึงใช้เวลาเป็นเวลากว่า 1 ชั่วโมงเพื่อไล่ตัวประสานในอุณหภูมิแยกออก

3) ขั้นตอนการให้ความร้อนก่อนการอบเหล็ก (Pre Sintering) เพิ่มต่อเนื่องอุณหภูมิจาก 700 องศาเซลเซียส เป็น 1200 องศาเซลเซียส โดยใช้เวลาในการปรับอุณหภูมิเป็นเวลากว่า 3 ชั่วโมง แล้วจึงใช้เวลาเป็นเวลากว่า 1 ชั่วโมงเพื่อให้ความร้อนก่อนการอบเหล็ก

4) ขั้นตอนการอบเหล็กเพิ่มต่อเนื่องอุณหภูมิจาก 1200 องศาเซลเซียส เป็น 1450 องศาเซลเซียส เมื่ออุณหภูมิถึง 1300 องศาเซลเซียส ในขั้นตอนนี้ใช้เวลาในการปรับอุณหภูมิเป็นเวลากว่า 3 ชั่วโมง โดยใช้เวลาประมาณครึ่งชั่วโมงระหว่างขั้นตอน

5) ขั้นตอนการปล่อยให้เย็นตัว (Cooling) ปล่อยให้เย็นลงตามลำดับจนถึงอุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส จากนั้นนำชิ้นงานออกมายังอุณหภูมิแวดล้อม



ภาพที่ 2.59 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของเวลาและอุณหภูมิในการอบผืนึก

ดังนั้นการอบผืนึก (Sintering) เป็นขั้นตอนที่สำคัญที่สุดในกระบวนการทางโลหะพวิทยา เนื่องจากเป็นกระบวนการทางความร้อนที่ทำให้เกิดการแพร่และเชื่อมติดกันระหว่างอนุภาค ปัจจัยต่างๆในขั้นตอนนี้จะเป็นตัวกำหนดสมบัติของชิ้นงาน คือ

1) อุณหภูมิที่ใช้ในการเผาประสาน การเผาประสานที่อุณหภูมิต่ำจะทำให้เกิดกลไกการแพร่ของมวลได้ช้ากว่าที่อุณหภูมิสูง ดังนั้นอุณหภูมิในการเผาประสานต้องพิจารณาจากตัววัสดุ โดยเลือกอุณหภูมิในการเผาประสานเป็น $\frac{2}{3}$ หรือ $\frac{3}{4}$ ของอุณหภูมิหลอมเหลวของวัสดุ นั้น กรณีที่เป็นวัสดุผสมให้พิจารณาวัสดุที่เป็นเนื้อหลักที่มีปริมาณมากที่สุด

2) เวลาที่ใช้ในการเผาประสาน ที่อุณหภูมิเผาประสานเท่ากันถ้าเพิ่มเวลาในการเผาก็จะทำให้ประสิทธิภาพในการแพร่เชื่อมติดกันของอนุภาคดีขึ้น แต่ถ้ามากเกินไปอาจทำให้เกิดการโตของเกรน (Grain Growth) ทำให้ความแข็งแรงของชิ้นงานลดลงอีก อีกทั้งยังเป็นการสิ้นเปลืองเวลาในการผลิตและเปลืองแก๊สอีกด้วย

3) แก๊สที่ใช้บรรยากาศปกคลุม เนื่องจากเป็นที่ทราบกันดีอยู่แล้วว่าโลหะทุกชนิดจะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันได้ดีที่อุณหภูมิสูง ซึ่งไม่เป็นที่ต้องการของนักโลหะพวิทยาและงานในกระบวนการทางโลหะพวิทยาจำเป็นต้องหลีกเลี่ยงปรากฏการณ์เหล่านี้เพราะจะทำให้ผงโลหะ

ไม่เชื่อมติดกัน สูญเสียความแข็งแรง นำไปใช้งานไม่ได้ ดังนั้นในขั้นตอนการเผาประสานนอกจากจะมีอุณหภูมิและเวลาแล้ว จำเป็นต้องมีแก๊สปกคลุมซึ่งหน้าที่หลักของแก๊สคือป้องกันชิ้นงานหรือผงโลหะสัมผัสกับแก๊สออกซิเจน เช่น อาร์กอน (Ar) ไนโตรเจน (N₂) และบางกรณีก็เป็นตัวรีดิวซ์ออกซิเจนออกจากระบบด้วย เช่น ไฮโดรเจน (H₂) แก๊สแอมโมเนีย (NH₃) คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ในการเลือกใช้แก๊สควรพิจารณาถึงสมบัติของวัสดุที่ต้องการเผาประสานราคาแก๊ส และความปลอดภัยเป็นหลัก

2.3.4.5 การหาความหนาแน่นของชิ้นงาน

ความหนาแน่น (Density) เป็นอัตราส่วนระหว่างมวล (Mass) กับปริมาตร (Volume) ซึ่งโดยทั่วไปมีหน่วยกิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร (kg/m³) หรือกรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร (g/cm³) การหาความหนาแน่นของของแข็งสามารถทำได้ 2 วิธี ดังนี้

ก) กรณีทราบปริมาตรของของแข็งนั้น

$$\text{Density } (\rho) = \frac{\text{Mass}}{\text{Volume}} \quad (2.35)$$

ข) กรณีไม่ทราบปริมาตรของของแข็งนั้น

สามารถทำได้โดยใช้หลักการของอาร์คิมิดีส (Archimedes's Principle) ซึ่งกล่าวว่า น้ำหนักที่หายไปในน้ำย่อมเท่ากับน้ำหนักของน้ำที่ถูกวัดดูนั้นแทนที่ ดังนั้นความหนาแน่นของของแข็งสามารถหาได้จาก น้ำหนักของชิ้นงานในอากาศและความหนาแน่นของของเหลว

$$\rho = \frac{A}{A-B} \times \rho_0 \quad (2.36)$$

เมื่อ ρ = ความหนาแน่นของชิ้นงาน

A = น้ำหนักในอากาศ (g)

B = น้ำหนักของของเหลว (g)

ρ_0 = ความหนาแน่นของของเหลว

2.3.5 การปรับแต่งขั้นสุดท้าย (Finishing Operations)

การผลิตชิ้นส่วนต่างๆ ไม่ได้สิ้นสุดหลังการอบผนึกหรือหลังการแน่นตัว เนื่องจากจำเป็นต้องนำชิ้นตอนต่างๆ เข้ามาเพิ่มเพื่อให้บรรลุวัตถุประสงค์ของการใช้งาน การปรับแต่งขั้นสุดท้ายที่สำเร็จผลเป็นการเพิ่มค่าให้กับผลิตภัณฑ์ P/M โดยการปรับชิ้นงานให้เข้ากับเงื่อนไขในการใช้งานและการบริการ ซึ่งเป็นหลักการทั่วไปของการผลิตและมีความสำคัญเป็นพิเศษในโลหะกรรมวัสดุผง

2.3.5.1 การอัดซ้ำ (Repressing)

การอัดซ้ำมีกระบวนการคล้ายกับการทุบขึ้นรูป ยกเว้นในการปรับขนาดสุดท้ายและความหนาแน่น โดยไม่ทำให้รูปร่างเปลี่ยนแปลงไปมาก นำชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการอบผนึกแล้ววางในแม่พิมพ์แบบปิด โดยความเครียดมีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยที่อัตราการเพิ่มความเครียดปานกลาง ความเค้น มีค่าสูงกว่าแรงที่ใช้อัดแน่นในตอนแรก ผลที่ได้จากการอัดซ้ำ ทำให้ชิ้นส่วนมีความหนาแน่นเพิ่มขึ้น ความแข็งแรงเพิ่มขึ้น รวมทั้งมีการปรับเปลี่ยนขนาดและผิวสำเร็จ ถ้าความหนาแน่นเริ่มต้นสูงทำให้ความหนาแน่นสัมพัทธ์ที่ได้หลังการอัดซ้ำมีค่าค่อนข้างต่ำนอกจากนี้การอัดซ้ำยังใช้ในการกำจัดการบิดงอที่เกิดจากการอบผนึกหรือจากการปรับปรุงสมบัติด้วยความร้อนได้ด้วย

2.3.5.2 การตกแต่งด้วยเครื่องจักร (Machining)

วัตถุประสงค์ของ P/M คือการทำให้ชิ้นงานให้ได้ขนาดสุดท้ายตามต้องการด้วยขั้นตอนที่น้อยที่สุด ขั้นตอนที่สำคัญและจำเป็นคือการอัด และการอบผนึก การตกแต่งด้วยเครื่องจักรเป็นการขจัดมวลออกจากชิ้นงาน P/M เช่นการทำเกลียว การเจาะ การทำร่อง และลักษณะพิเศษอื่นๆที่ไม่สามารถทำได้ในตอนเริ่มต้น การตกแต่งด้วยเครื่องจักรยังใช้ในการปรับขนาดของชิ้นงานและปรับพื้นผิวที่ขรุขระได้ด้วย การปรับขนาดทำได้โดยการขจัดมวลจากชิ้นงานโดยใช้เทคนิคความเร็วสูงและอัตราป้อนต่ำ ซึ่งมีลักษณะกลับกันกับการอัดซ้ำที่มีการเปลี่ยนแปลงขนาดโดยที่มวลไม่เปลี่ยน ชิ้นส่วน P/M ส่วนใหญ่มีการตกแต่งด้วยเครื่องจักรหลังการอบผนึก และก่อนการปรับปรุงสมบัติด้วยความร้อน การใช้เครื่องจักรเพื่อตกแต่งชิ้นงาน P/M มักทำให้เกิดปัญหาเมื่อเทียบกับชิ้นงานที่เป็นวัสดุผ่านกรรมวิธีทางกล โดยเฉพาะถ้าเป็นชิ้นงานพูน เพราะเครื่องมือตัด

ต้องตัดเนื้อวัสดุสลับกับช่องว่าง (หรือรูพรุน) เป็นวัฏจักร แต่ชิ้นงานมีความหนาแน่นเต็มก็จะไม่เกิดปัญหาดังกล่าว

ตารางที่ 2.12 ตัวอย่างการปฏิบัติงานด้วยเครื่องจักร

การปฏิบัติงานด้วยเครื่องจักร	ลักษณะการปฏิบัติการ
การคว้าน (Boring)	เครื่องมือหมุนจุดเดียว ชิ้นงานอยู่กับที่ ใช้สำหรับความรูขนาดใหญ่
การแทงขึ้นรูป (Broaching)	แท่งที่มีคมตัดหลายขนาด ชิ้นงานอยู่กับที่ มีการเคลื่อนที่สลับกัน ระหว่างการดึงและการผลักเครื่องมือเหนือชิ้นงานเพื่อทำรู รูหรือรูปร่างอื่นๆ
การขัดสีเพื่อให้ชิ้นงานเงา (Burnishing)	เครื่องมือแข็งรูปมนเคลื่อนที่สลับไปมา ชิ้นงานอยู่กับที่ การทำให้ผิวเรียบโดยการขัดสีที่แรงเฉือนทำให้เกิดความแข็งแรงเรียบ
การเจาะ (Drilling)	เครื่องมือหมุนที่มีร่อง ชิ้นงานอยู่กับที่ การหมุนใบตัดกำจัดมวลออกเป็นรู
การตัดด้วยไฟฟ้า (Electrical Discharge Machining)	การสปาร์คด้วยไฟฟ้าผ่านช่องเล็กๆที่เดิมด้วยของไหลที่เป็นฉนวนการสปาร์คทำให้เกิดการละลายและไล่วัสดุออกเพื่อทำให้เกิดรูปร่าง
การเจียรไน (Grinding)	ล้อขัดหมุน ชิ้นงานอยู่กับที่หรือหมุน ไข้ทำผิวให้เรียบ (คล้ายกับการลับ และการขัด)

2.4 การขึ้นรูปชิ้นงานซีเมนต์ทั้งสแตนคาร์ไบด์

2.4.1 ส่วนผสมของชิ้นงานซีเมนต์ทั้งสแตนคาร์ไบด์ จากงานวิจัยของ Keshavan et.al

ผงทั้งสแตนคาร์ไบด์และจำนวน โคลบอลต์ที่เป็นโลหะประสาน ปกติขนาดเกรนของผงทั้งสแตนคาร์ไบด์ที่ใช้ทั่วไปมีขนาดเกรนประมาณ 0.5 - 10 ไมครอน และจำนวนส่วนผสมของผงโคลบอลต์ประมาณ 6 - 16 เปอร์เซ็นต์ ผงทั้งสแตนคาร์ไบด์ที่มีขนาดใหญ่และปริมาณ โคลบอลต์ที่เป็นตัวประสานมากทำให้ชิ้นงานมีความเหนียวสูงและทนต่อแรงกระแทกได้ดี แต่คุณสมบัติการด้านการสึกหรอและความแข็งต่ำ

ตารางที่ 2.13 สมบัติของชิ้นงานทั้งสแตนคาร์ไบด์ที่มีส่วนผสมระหว่าง ผงทั้งสแตนคาร์ไบด์ผสมกับผงโคลบอลต์

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

2.4.2 สมบัติของชิ้นงานทั้งสแตนคาร์ไบด์ การศึกษาออกแบบและผลิตชิ้นงานซีเมนต์

ทั้งสแตนคาร์ไบด์จากผงโลหะ Recycle

ตารางที่ 2.14 สมบัติของชิ้นงานทั้งสแตนคาร์ไบด์ ที่มีส่วนผสมทั้งสแตนคาร์ไบด์ผสมกับโคลบอลต์ 17 เปอร์เซ็นต์

ผลการทดสอบค่าความแข็งชิ้นงานทั้งสแตนคาร์ไบด์				
ชั้นที่	ขนาดเกรนผง ทั้งสแตนคาร์ไบด์ (μm)	แรงดันในการ อัดขึ้นรูป (ton/inch ²)	อุณหภูมิในการ อบผึ่ง ($^{\circ}\text{C}$)	ค่าความแข็ง (HV30)
1	2.5	14	1350	835.5

ตารางที่ 2.14 สมบัติของชิ้นงานทั้งสแตนคาร์ไบด์ ที่มีส่วนผสมทั้งสแตนคาร์ไบด์ผสมกับโคบอลต์ 17 เปอร์เซ็นต์ (ต่อ)

ผลการทดสอบค่าความแข็งชิ้นงานทั้งสแตนคาร์ไบด์				
ชั้นที่	ขนาดเกรนผง ทั้งสแตนคาร์ไบด์ (μm)	แรงดันในการ อัดขึ้นรูป (ton/inch ²)	อุณหภูมิในการ อบผนิก ($^{\circ}\text{C}$)	ค่าความแข็ง (HV30)
2	2.5	14	1400	995
3	2.5	14	1450	1096

2.4.3 ข้อมูลการศึกษาขนาดของอนุภาคที่มีผลต่อโครงสร้างจุลภาค และสมบัติเชิงกลของคาร์ไบด์ (WC-(W,Ti,Ta)C-6 wt% Co)

ตารางที่ 2.15 สมบัติของชิ้นงานทั้งสแตนคาร์ไบด์ จากงานวิจัยของ Farid Akhtar และคณะ

ชั้นที่	อัตราส่วนของ ขนาดทั้งสแตนคาร์ไบด์ (WC) รวมทั้งหมด 54% ของ ชิ้นงาน (%)		ปริมาณโลหะคาร์ ไบด์ (TiTaW)C (%)	ปริมาณ โคบอลต์ (Co) (%)	อุณหภูมิ อบผนิก ($^{\circ}\text{C}$)	ค่าความแข็ง (HRA)
	ขนาด WC 2 μm	ขนาด WC 0.2 μm				
1	18	36	46	6	1485	93
2	27	27	46	6	1485	91
3	36	18	46	6	1485	89

วัตถุดิบที่ใช้เป็น WC ขนาด 2 และ 0.2 ไมครอน โดยมีการเติมสารประกอบคาร์ไบด์ (W,Ti,Ta)C ขนาด 2 μm และ โลหะเชื่อมประสาน โคบอลต์ ขนาด 5 ไมครอน ในอัตราส่วน 54, 40 และ 6 เปอร์เซ็นต์ต่อน้ำหนัก ตามลำดับ โดยแปรผันอัตราส่วนของ WC ที่ขนาดอนุภาคต่างกันคือ 2:1, 1:1 และ 1:2 แล้ว Wet Milling ใน Ethanol เป็นเวลา 72 ชั่วโมง ขึ้นรูปที่แรงอัด 300 MPa ทำการอบผนึก ที่อุณหภูมิ 1440 - 1530 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง แล้ววัดค่า ความหนาแน่น (Density) ที่อุณหภูมิต่าง ๆ ได้ค่าสูงสุดหลังการอบผนึกที่อุณหภูมิ 1485 องศาเซลเซียส ประมาณ 13.6 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร สมบัติเชิงกลที่ใช้ในการตรวจสอบคือ 3 - Points Bending ได้ค่าความแข็งแรง ดังตารางที่ 2.15

2.4.4 ข้อมูลการศึกษาส่วนผสมชิ้นงานซีเมนต์คาร์ไบด์

โดยวัตถุดิบที่ใช้มีอัตราส่วนผสมระหว่างทั้งสแตนคาร์ไบด์ (WC) และ โคบอลต์ (Co) ดังนี้ 90 : 10, 95.5 : 4.5, 87 : 13, 90 : 10 ตามลำดับ โดยมีขนาดผงโลหะอยู่ในช่วง 1 - 4 ไมครอน ทำการบดผสมผงโลหะกับ Paraffin Wax 1/4 เปอร์เซ็นต์ ต่อน้ำหนัก เป็นเวลา 5 - 6 ชั่วโมง อัดขึ้นรูป จากนั้นทำการอบผนึกเป็นเวลา 30 - 60 นาที โดยสภาวะในการอบผนึกจะป้องกันการเกิดออกไซด์ หรือการใช้ระบบสุญญากาศ

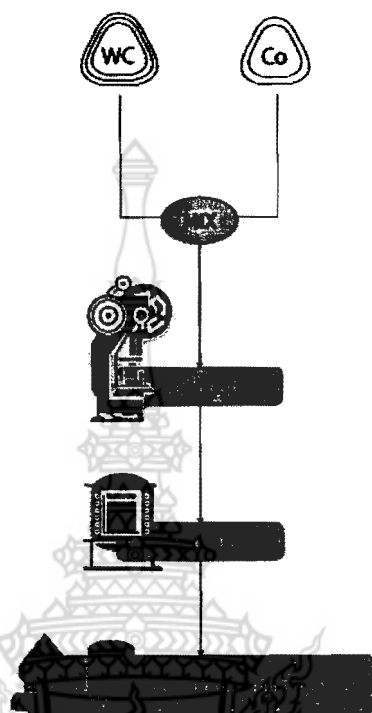
ตารางที่ 2.16 สมบัติชิ้นงานทั้งสแตนคาร์ไบด์

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

2.4.5 กระบวนการขึ้นรูปทางโลหะผง

ดำเนินการโดยศึกษากระบวนการผลิตเครื่องมือตัดประกอบด้วยการนำวัตถุดิบมาผสมในสารละลาย หลังจากทำให้แห้งแล้วจะเพิ่มตัวยึดประสานที่เหมาะสมนำไปอัดขึ้นรูปให้ได้รูปร่าง

ตามต้องการ จากนั้นนำไปเผาซินเตอร์รีง สำหรับวัสดุพวกออกไซด์บริสุทธิ์ ปกติจะเผาในอากาศ แต่พวกไนไตรด์หรือคาร์ไบด์จะเผาในบรรยากาศอื่น ๆ เพื่อหลีกเลี่ยงปฏิกิริยาทางเคมีที่ไม่ต้องการ



ภาพที่ 2.60 กระบวนการผลิตชิ้นงานทั้งสแตนคาร์ไบด์

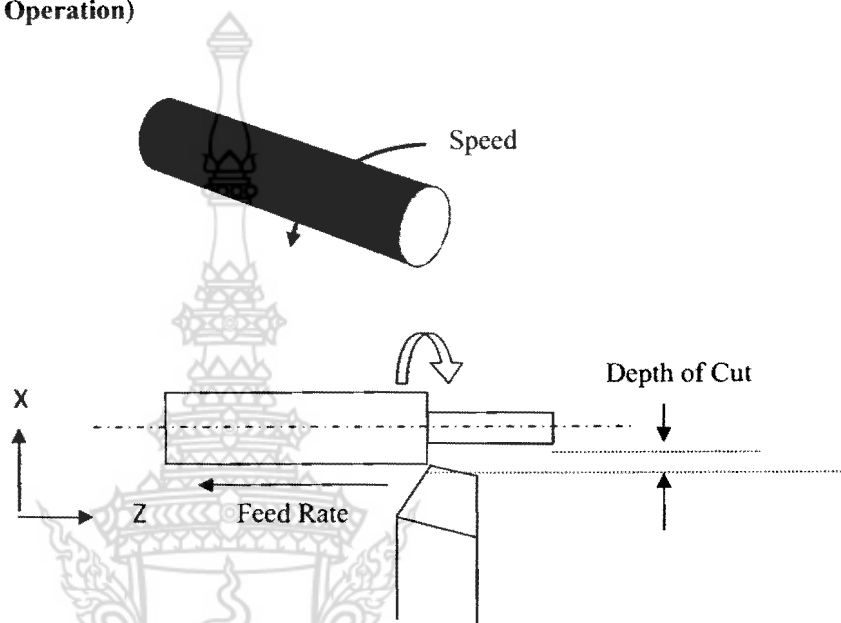
2.4.6 วัสดุผงโลหะที่ใช้ในการขึ้นรูปชิ้นงาน

คำเนินการ โดยศึกษา ขนาดเกรนผงทั้งสแตนคาร์ไบด์และจำนวนปริมาตรส่วนผสมของ โคบอลต์ที่เป็นโลหะตัวประสาน ปกติขนาดเกรนของผงทั้งสแตนคาร์ไบด์จะมีขนาดเกรนประมาณ 0.5 – 10 ไมครอน และจำนวนส่วนผสมของผงโคบอลต์ ประมาณ 6 – 16 เปอร์เซ็นต์ ของน้ำหนัก

สิ่งสำคัญของขนาดเกรนทั้งสแตนคาร์ไบด์ เมื่อมีขนาดใหญ่และปริมาตรส่วนผสมของผงโคบอลต์มีปริมาณมาก จะทำให้ชิ้นงานที่ได้มีความเหนียวสูง ทนต่อแรงกระแทกได้ดี แต่มีคุณสมบัติการต้านทานการสึกหรอและความแข็งต่ำ ในส่วนนี้ขนาดเกรนของผงทั้งสแตนคาร์ไบด์ และส่วนผสมของ โคบอลต์ที่เป็นโลหะตัวประสานน้อย จะทำให้มีคุณสมบัติความแข็งสูงแต่มีความเหนียวต่ำ ชิ้นงานที่มีความแข็งระดับนี้จะมีขนาดเกรนของผงทั้งสแตนคาร์ไบด์อยู่ที่ 3 - 4 ไมครอน

และปริมาณผงโคบอลต์ที่เป็นผงโลหะตัวประสาน 16 เปอร์เซ็นต์ จะทำให้มีค่าความแข็งอยู่ที่ประมาณ 854 – 942 HV ตัวอย่างที่ 2 ชิ้นงานที่มีขนาดเกรนของผงทั้งสแตนคาร์ไบด์อยู่ที่ 1.5 – 2.5 ไมครอน และปริมาณส่วนผสมของผงโคบอลต์ที่เป็นผงโลหะตัวประสานอยู่ที่ 6 เปอร์เซ็นต์ จะทำให้มีค่าความแข็งอยู่ที่ประมาณ 1478 – 1710 HV มีตามสมบัติและการผสมผงทั้งสแตนคาร์ไบด์

2.5 การกลึง (Turning Operation)



ภาพที่ 2.61 แสดงถึงองค์ประกอบสำหรับการกลึง

งานกลึง คือ การตัดโลหะ โดยให้ชิ้นงาน (Work Piece) หมุนรอบตัวเอง โดยมีคutter เคลื่อนที่เข้าหาชิ้นงาน การกลึงมีสองลักษณะใหญ่ คือ

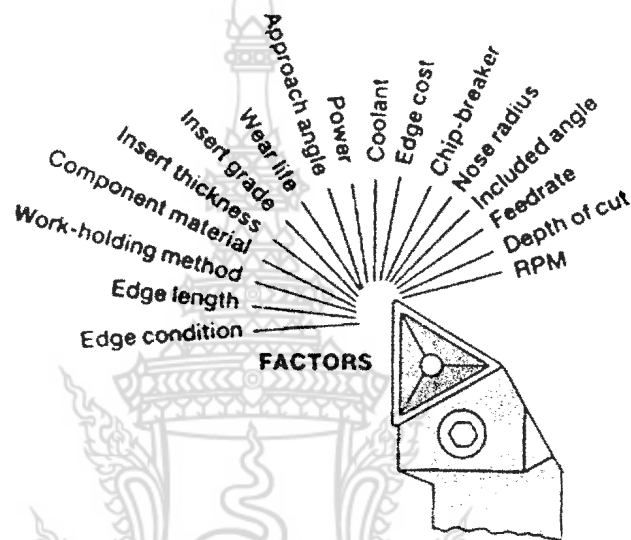
- 1) การกลึงปาดหน้า คือ การตัดโลหะ โดยให้คutter เคลื่อนที่ตัดชิ้นงานไปตามแนวขวาง (Across the Work)
- 2) การกลึงปอก คือ การตัดโลหะ โดยให้คutter เคลื่อนที่ตัดชิ้นงานไปตามแนวขนานกับแนวแกนของชิ้นงาน

ปัจจัยสำคัญที่ทำให้เกิดกระบวนการของการกลึงปอกคืออัตราป้อน (Feed Rate) ความเร็วตัด (Cutting Speed) ระยะป้อนลึก (Depth of Cut) มีคutter (Cutting Tool) และชิ้นงานที่ต้องการทำการตัดเฉือน (Work Piece) และเมื่อมีกระบวนการในการกลึงปอกเกิดขึ้น ผลที่จะเกิดขึ้นตามมาก็คือ

ขนาดของชิ้นงาน (Work Piece Dimension) ความละเอียดของผิวชิ้นงาน (Surface Roughness) เศษ
กลึง (Chip) การสึกหรอของมีดกลึง (Tool Wear)

2.5.1 ปัจจัยที่สำคัญของงานกลึงปอกด้วยมีดกลึงอินเสิร์ท

ตามที่กล่าวไว้ว่าปัจจัยสำคัญที่ทำให้เกิดกระบวนการกลึงปอก คือ อัตราป้อน (Feed Rate) ความเร็วตัด (Cutting Speed) ระยะเวลาป้อนลึก (Depth of Cut) มีดกลึง (Cutting Tool) และ ชิ้นงานที่ต้องการทำการตัดเฉือน (Work Piece) ในการกลึงปอกด้วยมีดกลึง



ภาพที่ 2.62 แสดงปัจจัยที่สำคัญทั้งหมดที่ใช้ในงานกลึงปอกด้วยมีดกลึงอินเสิร์ท

อินเสิร์ทต้องประกอบด้วยปัจจัยหลัก 5 ปัจจัย นอกจากนี้แล้วในการกลึงปอกด้วยมีดกลึงอินเสิร์ทยังมีปัจจัยอื่นๆ อีก ซึ่งควรนำมาพิจารณาปัจจัยที่สำคัญทั้งหมดที่ใช้ในงานกลึงปอกด้วยมีดกลึงอินเสิร์ทที่แสดงในภาพที่ 2.62 มีดังต่อไปนี้

- 1) เงื่อนไขของคมตัด (Edge Condition)
- 2) ความยาวของคมตัด (Edge Length)
- 3) วิธีการจับยึดชิ้นงาน (Work Holding Method)
- 4) ส่วนประกอบของวัสดุ (Component Material)
- 5) ความหนาของเม็ดมีด (Insert Thickness)

- 6) เกรดของเม็ดมีด (Insert Grade)
- 7) อายุของการสึกหรอ (Wear Life)
- 8) มุมตัด (Approach Angle)
- 9) กำลัง (Power)
- 10) น้ำหล่อเย็น (Coolant)
- 11) ต้นทุนของคมตัด (Edge Cost)
- 12) การหักเศษ (Chip Breaker)
- 13) รัศมีปลายมีด (Nose Radius)
- 14) มุมประกอบของใบมีดคดถึง (Included Angle)
- 15) อัตราป้อน (Feed Rate)
- 16) ระยะเวลาป้อนลึก (Depth of Cut)
- 17) ความเร็วรอบ (RPM)

2.5.2 ความเร็วตัด (Cutting Speed)

ความเร็วตัด คือความเร็วที่คมมีดกลิ้งตัด หรือปาดผิวโลหะออก เมื่อโลหะหมุนครบ 1 รอบ ความเร็วตัดมีหน่วยเป็น เมตร/นาที หลักเกณฑ์การเลือกใช้ความเร็วตัดมีดังนี้

- 1) วัสดุที่ใช้ทำเครื่องมือตัด (Cutting Tools) ที่ทำมาจากเหล็กโรบสูง (High Speed Steel) สามารถใช้ความเร็วตัดเป็น 2 เท่า ของความเร็วตัดของมีดที่ทำมาจากวัสดุเหล็กคาร์บอน ส่วนวัสดุคมตัดที่มีส่วนผสมพิเศษออกไปสามารถใช้ความเร็วตัดได้เร็วกว่าเหล็กโรบสูง
- 2) ชนิดของวัสดุ (Material) ที่จะนำมาทำการตัดเฉือน โดยทั่วไปวัสดุงานที่แข็งมากจะใช้ความเร็วตัดช้ากว่าวัสดุที่อ่อนกว่า
- 3) รูปร่างของคมตัด (Form Cutting Tool) มีผลต่อการทำงานมาก เช่น มีดตัดงานขาจะใช้ความเร็วรอบต่ำกว่ามีดกลิ้งปอกผิว
- 4) ความลึกในการตัด (Depth of Cut) ถ้าป้อนตัดลึกจะใช้ความเร็วรอบน้อยกว่าป้อนตื้น

คืน

5) อัตราป้อน (Rate of Feed) ในการป้อนตัดงานหยาบ เช่น อัตราป้อน 3 มิลลิเมตร/รอบ ความเร็วที่ใช้ในการตัดจะต่ำกว่าการป้อนตัดขั้นสุดท้าย เช่น อัตราป้อนตัด 0.13 มิลลิเมตร เป็นต้น จะใช้ความเร็วรอบได้สูง

6) การระบายความร้อน (Cutting Lubricant) ความเร็วตัดของวัสดุบางชนิดอาจเพิ่มให้สูงขึ้นได้เมื่อมีการระบายความร้อนที่ถูกต้อง ซึ่งสารระบายความร้อนนี้จะช่วยรักษาอุณหภูมิของคมตัดไม่ให้ร้อนสูงเกินไปขณะทำงาน

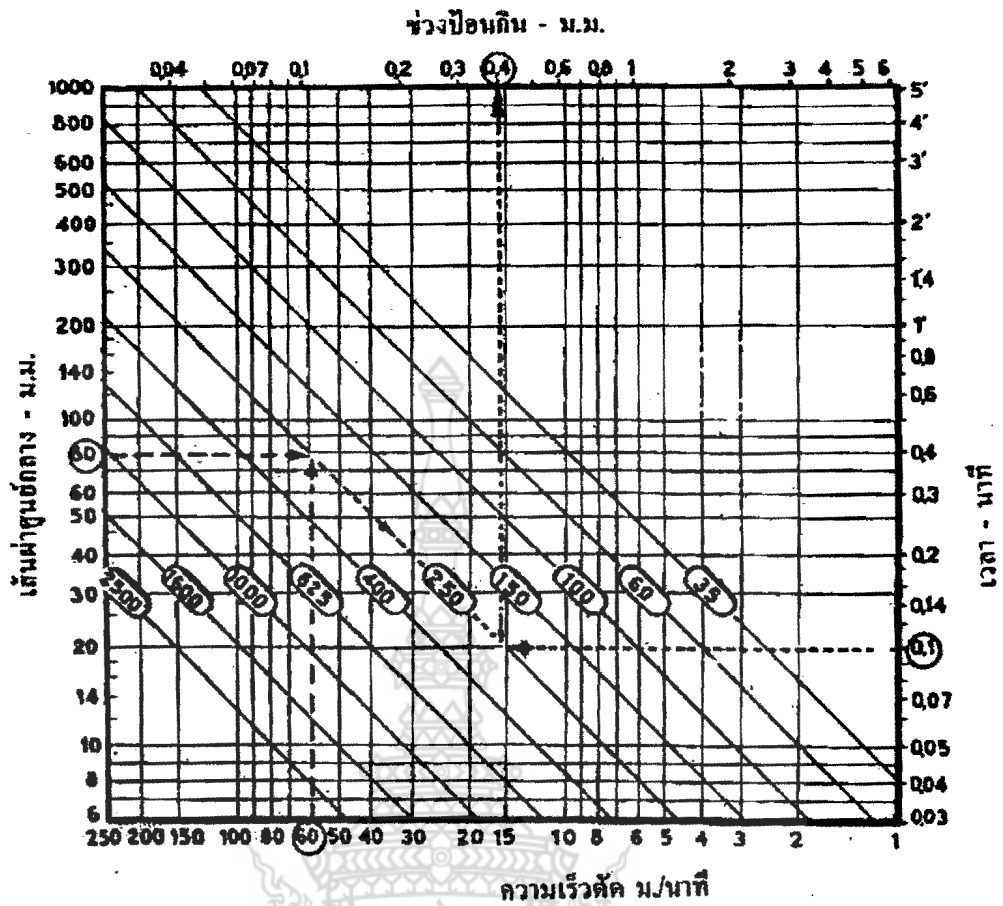
7) การจับงานให้มั่นคงแข็งแรง (Rigidity of the Work) ในกรณีงานที่ถูกจับด้วยหัวจับ โผล่ออกมาสั้นๆจะใช้ความเร็วได้สูงกว่างานที่ถูกจับโผล่ออกมายาว

2.5.3 กฎทั่วไปในการใช้ความเร็วตัด และอัตราป้อน

- 1) ถ้าอัตราป้อน (มิลลิเมตร/รอบ) เพิ่มความเร็ว (รอบต่อนาที) ต้องลดลงเมื่อความลึก (Depth) ของการตัดคงที่
- 2) ถ้า ความเร็วเพิ่ม อัตราป้อนต้องลดลง เมื่อความลึกของการตัดคงที่
- 3) ถ้าความลึกในการตัดเพิ่มขึ้น ความเร็วต้องลดลงเมื่อความเร็วคงที่

ตารางที่ 2.17 ความเร็วตัดของแผ่นมีดกลึงรอบสูง และแผ่นมีดที่เหมาะสมสำหรับวัสดุ

	ความเร็วตัด (mm/sec)			
	มีดกลึง H.S.S		เม็ดมีด	
	กินหยาบ	กินละเอียด	กินหยาบ	กินละเอียด
เหล็กหล่อแข็ง	15	20	65	90
เหล็กหล่อ	23	30	90	125
เหล็กแข็ง st 100	12	17	80	105
เหล็กแข็ง st 70	17	22	100	125
เหล็กแข็ง st 40	25	35	140	160
ทองเหลืองแข็ง	45	60	225	275
ทองเหลือง	65	90	275	380
อลูมิเนียม	300	600	800	200
พลาสติก	-	1200	-	1600



ภาพที่ 2.63 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วตัด/เวลาทำงาน

2.5.3.1 การใช้ตารางความเร็วจากตาราง Logarithm

กลึงชิ้นงานทองเหลือง ขนาดชิ้นงาน 80 มิลลิเมตร ความเร็วตัด 60 เมตร/นาที เวลาที่ป้อน 0.1 นาที ให้หาความเร็วรอบที่เหมาะสม และอัตราการป้อน

วิธีหา ลากเส้นตรงจุดขนาดชิ้นงาน 80 มิลลิเมตร เส้นซ้ายสุดตาราง ลากเส้นให้ขนานกับเส้นความเร็วตัดลากเส้นความเร็วตัด 60 เมตร/นาที ให้ขนานกับเส้นขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง เส้นขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางและเส้นความเร็วตัด ไปชนกับเส้นความเร็วรอบ ซึ่งจะลากมุม 45 องศา จากตารางอ่านค่าได้ความเร็ว 250 รอบ/นาที ลากเส้นเวลา 0.1 นาที ตรงแนวในแนวตั้ง ขนานกับเส้นความเร็วตัด ไปชนกับเส้นความเร็วรอบ 250 มิลลิเมตร ลากเส้นขึ้นไปหาเส้นอัตราป้อน

ตัวอย่าง ชิ้นงานทรงกระบอก ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 80 มิลลิเมตร ความเร็วตัด 60 เมตร/นาที ให้หาความเร็วรอบ

ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง $d = 80$ มิลลิเมตร

ความเร็วตัด $V = 60$ เมตร/นาที

$$\begin{aligned} \text{สูตร} \quad n &= \frac{1000V}{\pi d} \\ &= \frac{1000 \times 60}{\frac{22}{7} \times 80} \end{aligned}$$

$$N = 238.6$$

เลือกใช้ความเร็วรอบที่ใกล้เคียงที่สุด ≈ 250 รอบ / นาที

2.5.4 อัตราป้อน

อัตราป้อน หมายถึง ระยะทางการเดินป้อนของมีดไปตามความยาวของชิ้นงานในแต่ละรอบของการหมุนของเพลลาของเครื่องหรือการป้อนตัด การกลึงหยาบ ใช้อัตราป้อนที่สูง มีคัตชิ้นงานได้ปริมาณเศษมากผิวงานออกมาไม่เรียบ

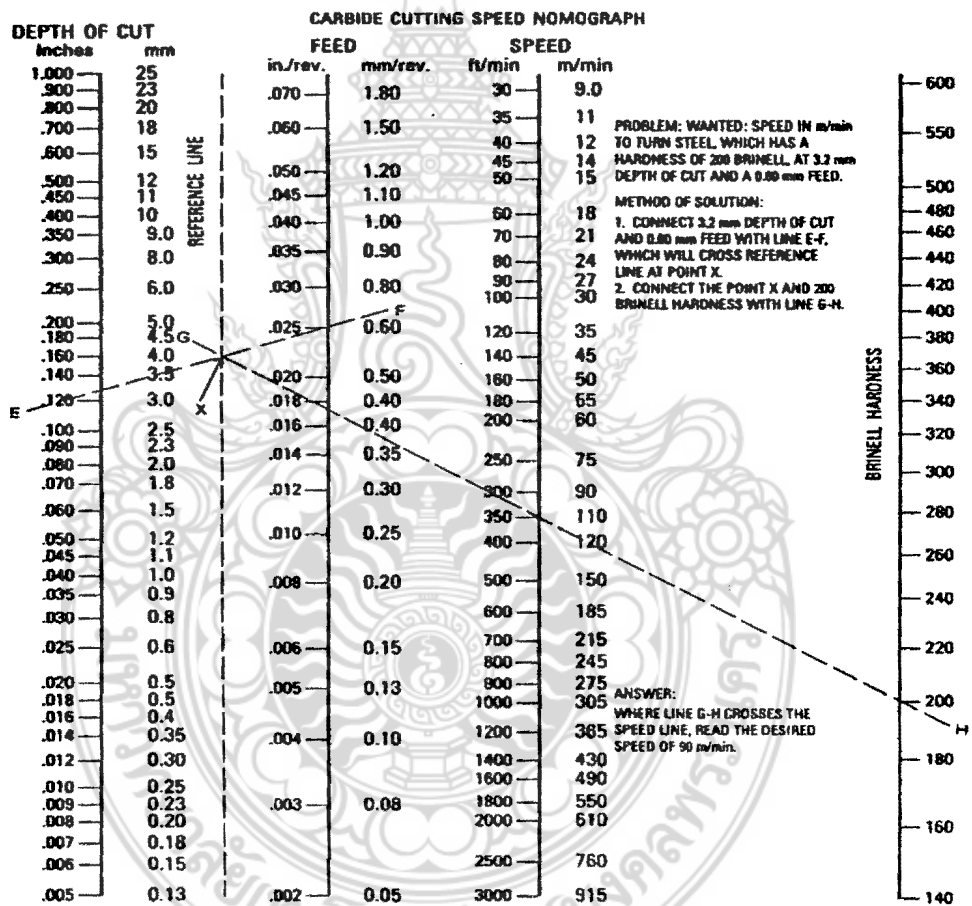
1) การกลึงละเอียด อัตราป้อนที่น้อย ทำให้ผิวงานเรียบ ส่วนมากจะใช้กลึงในขั้นสุดท้าย จะได้ผิวเรียบและขนาดถูกต้องในทางปฏิบัติที่ดีที่สุด

2) การเลือกใช้ความลึกในการตัดปานกลางขณะทำการป้อนตัดหนักๆและใช้ความเร็วตัดให้ถูกต้อง เมื่อกลึงงานหยาบ ถ้าต้องการให้กลึงงานผิวเรียบในขั้นสุดท้ายให้เพิ่มความเร็วตัดมากขึ้น การป้อนกินลึกน้อยลง พร้อมกับให้อัตราการป้อนตัดละเอียดให้สัมพันธ์กัน

2.5.5 ความลึกในการตัด (Depth of Cut)

ความลึกในการตัดทำให้เศษโลหะไหลออกมาทุกครั้งที่ทำกรกลึงหยาบ ในการตั้งความลึกในการตัดและอัตราการป้อนตัดต้องคำนึงถึงความสามารถในการรับได้ของมีดตัด หลักเกณฑ์การพิจารณาเลือกใช้ความลึกในการตัดสำหรับงานปกติทั่วไปควรพิจารณาดังนี้

- 1) ขนาดความโตของชิ้นงานก่อนทำการตัดเฉือน (โตกว่าขนาดงานสำเร็จ) ประมาณ 3.18 มิลลิเมตร
- 2) ถ้าคำนวณความเร็วรอบอยู่ในช่วงกลางของค่าสองค่า ให้เลือกใช้ความเร็วรอบในขั้นต่ำ ถ้าหากสภาพของเครื่อง มีดกลึง และชิ้นงานเหมาะสม อาจจะใช้ความเร็วรอบในขั้นสูงได้ แต่ถ้าความเร็วรอบที่คำนวณได้ใกล้เคียงกับค่าในช่วงสูง ให้เลือกความเร็วรอบในช่วงสูงได้
- 3) ความลึกในการกลึงหยาบควรป้อนลึกและหยาบมากที่สุดเท่าที่จะทำได้ เหลือไว้ประมาณ 0.76 มิลลิเมตร สำหรับขนาดความโตของชิ้นงาน ก่อนจะกลึงผิวสุดท้าย
- 4) ในการกลึงเหล็กหล่อ หรือ โลหะอื่นๆซึ่งผิวรอบๆชิ้นงานจะเป็นสะเก็ดความลึกในการกลึงครั้งแรก การป้อนมีดกินลึกจะต้องให้คมตัดของมีดกลึงตัดให้ลึกพอ ที่จะให้ส่วนผิวเปลือกแข็งหลุดออกไปให้หมด เพราะผิวเปลือกแข็งนี้จะทำให้มีดสึกหรือเร็ว



ภาพที่ 2.64 Monograph สำหรับหาความเร็วตัดในการกลึงงานด้วยมีดกลึงคาร์ไบด์

2.5.6 มีดกลึง (Cutting Tool)

มีดกลึง คือเครื่องมือที่ใช้ในการตัดเฉือนชิ้นงานให้เป็นรูปร่างต่างๆในขบวนการกลึง เพื่อให้การผลิตดำเนินไปอย่างมีประสิทธิภาพจึงได้มีการพัฒนาในด้านของเครื่องมือและวัสดุในการผลิตเครื่องมือขึ้นมาเป็นลำดับ โดยวัสดุที่ดีที่สุดสำหรับการผลิตใดๆ ก็คือวัสดุที่ใช้ในการตัดปาดชิ้นงาน ได้ผลถูกต้องในราคาต่ำสุดเท่าที่ทำได้ ซึ่งคุณสมบัติที่จำเป็นสำหรับวัสดุเครื่องมือกลใดๆ ได้แก่ ความสามารถในการต้านทานการอ่อนตัวที่อุณหภูมิสูง ความมีสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานต่ำ ความต้านทานต่อการขีดสีและความเหนียวแน่นซึ่งเพียงพอที่จะต้านทานต่อการแตกร้าวได้ เครื่องมือตัดอาจทำขึ้นได้จากวัสดุมากกว่าหนึ่งชนิดสำหรับวัตถุประสงค์ที่แตกต่างกันไป

คาร์ไบด์ (Carbide) แผ่นมีดคาร์ไบด์ (Carbide Cutting Tool) ทำขึ้นได้โดยกรรมวิธีทางโลหะผงเท่านั้น โดยผงโลหะของทั้งสแตนคาร์ไบด์และโคบอลต์จะถูกอัดให้มีรูปร่างตามต้องการแล้วนำเข้าสู่กระบวนการกึ่งยัดเหนียวในเตาซึ่งมีบรรยากาศของไฮโดรเจนที่อุณหภูมิ 1550 องศาเซลเซียส จากนั้นจึงทำผิวสำเร็จโดยการเจียรนัย เครื่องมือคาร์ไบด์นี้มีส่วนผสมของทั้งสแตนคาร์ไบด์ประมาณ 94 เปอร์เซ็นต์ และโคบอลต์ 6 เปอร์เซ็นต์ เหมาะสมกับการตัดปาดเหล็กหล่อและวัสดุอื่นๆจำนวนมากยกเว้นเหล็กกล้า คาร์ไบด์จะสามารถคงตัวไว้ได้ที่อุณหภูมิสูงกว่า 1200 องศาเซลเซียส ดังนั้นความแข็งแรงร้อนแดงของวัสดุนี้จึงมีเหนือกว่าวัสดุโดยทั่วไป นอกจากนี้ยังเป็นวัสดุจากการสังเคราะห์ที่แข็งที่สุดเท่าที่ผลิตขึ้นได้และยังมีความแข็งแรงทางด้านแรงอัดสูงเป็นอย่างยิ่ง อย่างไรก็ตามมันมีข้อเสียในด้านที่มีความเปราะสูง มีความต้านทานต่อการกระทบกระแทกต่ำและต้องการฐานรองรับอย่างมั่นคงแข็งแรงเพื่อป้องกันการแตกร้าว ทั้งยังทำการเจียรนัยได้อย่างลำบากเฉพาะกับล้อขัดซิลิกอนคาร์ไบด์หรือเพชรเท่านั้น โดยจะต้องรักษามุมห่าง (Clearance Angle) ไว้ให้ต่ำที่สุด เครื่องมือตัดคาร์ไบด์จะสามารถทำการตัดด้วยอัตราเร็ว 2 – 3 เท่าของเครื่องมือตัดจากโลหะผสมหล่อแต่ในอัตราการป้อนที่น้อยกว่ามาก ในแง่เศรษฐกิจแล้วควรนำเครื่องมือคาร์ไบด์มาใช้ให้มากที่สุด โดยเครื่องจักรสำหรับเครื่องมือคาร์ไบด์จะต้องมีความมั่นคงแข็งแรง มีกำลังพอเพียงและมีช่วงของการป้อนและอัตราเร็วรอบที่เหมาะสมสำหรับวัสดุต่างๆ

ทั้งสแตนคาร์ไบด์ที่มีความละเอียดของเกรนสูง (Micro Grain Carbide) จะมีความแข็ง (Hardness) และความแข็งแรงสูง (Strength) เป็นอย่างยิ่ง ใช้งานในที่ซึ่งไม่จำเป็นต้องใช้เครื่องมือตัดคาร์ไบด์ปกติเนื่องจากอัตราเร็วตัดที่ใช้มีค่าต่ำจนเกินไปและในกรณีซึ่งเครื่องมือตัดโดยทั่วไปไม่

สามารถทนต่อการสึกหรอได้ รวมทั้งปฏิบัติการขึ้นรูปหรือการตัดขาดเครื่องมือคาร์ไบด์อาจเคลือบด้วยชั้นตัวประสาน (Bonded Layer) ที่ขนาดความหนา 0.05 - 0.08 มิลลิเมตร ของไททาเนียมคาร์ไบด์ อลูมินัมออกไซด์ (Aluminum Oxide) หรือไททาเนียมไนไตรด์ (Titanium Nitride) เพื่อลดความร้อนจากการวิ่งผ่านของเศษตัดบนเครื่องมือ อย่างไรก็ตาม เครื่องมือตัดที่มีการเคลือบนี้ไม่เหมาะสมกับชิ้นงานที่มีสะเก็ดมากหรือมีทรายเจือปนอยู่

2.5.7 ศัพท์เทคนิคหลายคำที่เกี่ยวกับมิดดลิง

- 1) Tool Holder หมายถึง ด้านมิดส่วนที่มิดจะถูกจับยึดด้วยค้ำมิดหรืออุปกรณ์อื่นๆ ใช้งานกับเครื่องจักรกล
- 2) Size หมายถึง ขนาดของชุดมิด จะระบุด้วยความกว้างของค้ำมิดและความยาวทั้งหมดของค้ำมิด
- 3) Back Edge หมายถึง สันมิด หมายถึง สันที่เกิดจากรอยตัดระหว่างผิวหลังคมมิดกับผิวหลังของค้ำมิด
- 4) Flank หมายถึง ผิวหลังมิด ผิวส่วนที่อยู่ติดกับคมมิดอยู่ทางด้านหลัง
- 5) Lip Angle หมายถึง ผิวหน้ามิดผิวที่อยู่ติดกับคมมิดทางด้านหน้านั้นคือ ที่จะต้องสัมผัสกับผ่อโลหะนั่นเอง
- 6) Cutting Edge หมายถึง คมมิดเป็นส่วนของผิวมิดที่ทำหน้าที่แยกผ่อโลหะออกจากชิ้นงานคมมิดมีส่วนประกอบ 3 ส่วน คือ
 - (1) Side Cutting Edge เป็นคมทางด้านข้างซึ่งเป็นคมที่ทำหน้าที่หลักในการตัดเฉือนชิ้นงาน
 - (2) End Cutting Edge เป็นคมทางด้านปลาย ซึ่งมักจะไม่ได้ทำหน้าที่ตัดโลหะ Nose จมูกมิด หรือปลายสุดที่จะมีลักษณะ โค้งการที่มิดจมูก โค้ง ก็เพื่อต้องการช่วยให้พื้นผิวชิ้นงานราบเรียบขึ้นและช่วยไม่ให้ปลายของมิดแตกหักหรือเร็วเกินไป
 - (3) Nose เป็นจมูกมิด หรือปลายสุดของคมมิดที่อยู่ระหว่างคมด้านข้างกับคมก็อาจจะเรียกว่า Lead Angle
- 7) Side Cutting Edge Angle หมายถึง มุมระหว่าง Side Cutting Edge กับด้านข้างของค้ำมิด บางครั้งก็อาจจะเรียกว่า Lead Angle

8) End Cutting Edge Angle หมายถึง มุมระหว่าง End Cutting Edge กับพื้นผิวตั้งฉากกับแกนด้ามมีด

9) Side Relief Angle หมายถึง มุมระหว่างผิวหลังมีด ส่วนที่ติดกับคมมีด ด้านข้าง (Side Flank) กับเส้นตั้งฉากกับผิวหน้าของด้ามมีด วัดในทิศทางตั้งฉาก กับผิวหลังมีดด้านข้าง (Side Flank) ซึ่งเป็นมุมที่ป้องกันไม่ให้ผิวหลังมีดด้านข้างกระทบกับผิวชิ้นงาน

10) End Relief Angle หมายถึง มุมระหว่างผิวหลังมีดที่ติดกับคมมีดด้านปลาย (End Flank) กับเส้นตั้งฉากกับผิวหน้าของด้ามมีดในทิศทางตั้งฉากกับผิวหลังมีดด้านปลาย มุมนี้มีหน้าที่ป้องกันไม่ให้ผิวหลังมีดเสียดสีกับชิ้นงาน

11) Side Clearance Angle หมายถึง มุมทุติยภูมิซึ่งอยู่ด้านข้าง (Side Relief Angle) มีวิธีการวัดเหมือนกัน

12) End Clearance Angle หมายถึง มุมทุติยภูมิซึ่งอยู่ด้านหลัง (End Relief Angle) มีวิธีการวัดเหมือนกัน

13) Side Rake Angle หมายถึง มุมระหว่างผิวหน้ากับเส้นขนานกับผิวหน้าของด้ามมีด วัดบนพื้นที่ตั้งฉากกับผิวหน้าของด้ามมีดและเอียงทำมุมฉากกับเงาของ Side Cutting Angle บนผิวหน้าของด้ามมีด มุม Side Rake Angle เป็นมุมที่แสดงให้เห็นความลาดของผิวหน้ามีดเมื่อ Rake Angle เป็นมุมที่แสดงให้เห็นความลาดของผิวหน้ามีดเมื่อเทียบกับ Side Cutting Edge ถ้าคมมีดอยู่สูงกว่าผิวหน้ามีดที่อยู่ห่างออกไปจากคมมีดมุม Side Rake Angle จะมีค่าเป็นบวกแต่ถ้าคมมีดอยู่ต่ำกว่าผิวหน้ามีดที่อยู่ห่างออกไป จากคมมีดมุม Side Rake Angle จะมีค่าเป็นลบ แต่ถ้าคมมีดและผิวหน้ามีดอยู่สูงเสมอกันทั่วทั้งผิวหน้ามีดมุม Side Rake Angle จะมีค่าเป็นศูนย์

14) Back Rake Angle หมายถึง มุมระหว่างผิวหน้ามีดกับเส้นขนานกับผิวหน้าของด้ามมีด วัดบนพื้นผิวหน้าของด้ามมีดและเป็นพื้นผิวที่ตัดผ่าน Side Cutting edge มุม Back Rake Angle เป็นมุมที่แสดงให้เห็นผิวหน้ามีดที่อยู่ระหว่างผิวหน้ามีดเทียบกับ End Cutting edge ถ้าคมมีดอยู่สูงกว่าผิวหน้ามีดที่อยู่ห่างออกไปจากคมมีดมุม Back Rake Angle จะมีค่าบวก ถ้าคมมีดอยู่ต่ำกว่าผิวหน้ามีดที่มีอยู่ห่างออกไปจากคมมีด Back Rake Angle จะมีค่าลบ ถ้าคมมีดและผิวหน้ามีดอยู่สูงเสมอกันทั่วทั้งผิวหน้ามีดมุม Back Rake Angle ในกรณีที่ใช้ Carbide Tipped ถ้าจำกัดความส่วนใหญ่ยังคงเดิมแต่วิธีการวัดมุมอาจเปลี่ยนแปลงไปบ้าง

ตารางที่ 2.18 แสดงขนาดของ Nose Radius ที่ควรใช้เมื่อความลึกของรอยตัดมีค่าต่างๆ กัน

ความลึกของรอยตัด (d)	Nose Radius (r)
0 - 5	0.8
5 - 10	1.2
10 - 20	1.6
20 - 30	2.4

2.5.8 หลักการของการตัดเฉือนโลหะและความสามารถในการตัดเฉือน

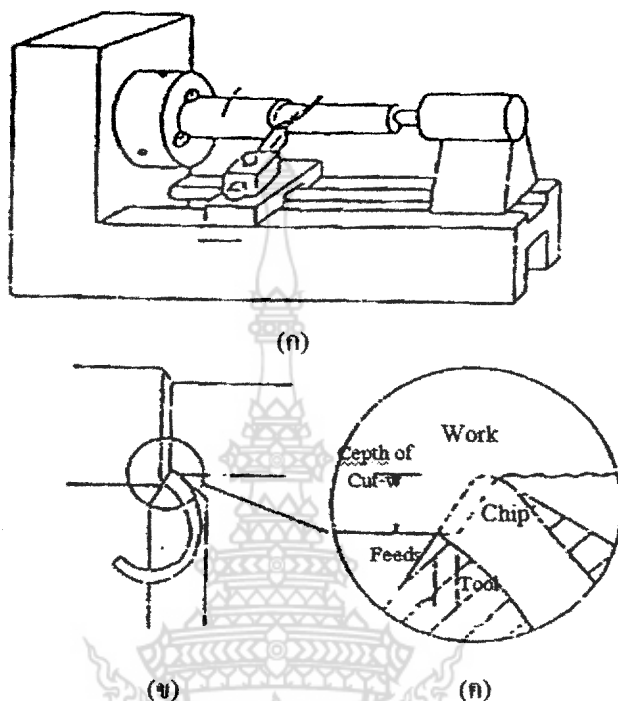
2.5.8.1 กระบวนการแปรรูปโลหะ

ในการแปรรูปโลหะให้เป็นรูปร่างต่าง ๆ นั้น มีกระบวนการในการทำการแปรรูปมากมาย โดยพิจารณาชนิดต่างๆ ของวัสดุเช่น วัสดุแข็งหรือวัสดุอ่อน เป็นวัสดุจากการหล่อ หรือการตีขึ้นรูปเป็นวัสดุเหนียวหรือวัสดุเปราะ มีจุดหลอมเหลวสูงหรือต่ำ ในทางวิศวกรรมแล้วการแปรรูปวัสดุโดยการตัดเฉือนเป็นการเปลี่ยนรูปร่างของวัสดุขึ้นงานดิบให้เป็นชิ้นส่วนต่างๆ ตามความต้องการตั้งแต่ชิ้นส่วนเล็กๆ จนกระทั่งถึงชิ้นส่วนขนาดใหญ่ของภาชนะที่ต้องทนแรงดัน โดยการตัดเฉือนด้วยเครื่องจักรซึ่งใช้คมตัดเฉือนขึ้นงาน เครื่องจักรที่ใช้ในการทำการตัดเฉือนยังแบ่งแยกเป็นหลายชนิดตามลักษณะการทำงาน และแบ่งตามลักษณะการทำงานมีตั้งแต่การตัดเฉือนในรอบของการหมุนด้วยความเร็วตัดซึ่งสูงถึง 600 เมตร/นาที (200 ฟุตต่อนาที) หรือในการตัดเฉือนด้วยความเร็วตัดเพียง 2-3 เซนติเมตร/นาที ตัวแปรต่างๆ ที่มากมายของการตัดเฉือนเป็นสิ่งสำคัญที่ต้องนำมาพิจารณา ซึ่งจะเป็นไปตามสมบัติเฉพาะตามชนิดของวัสดุ และลักษณะของงาน

2.5.9 พื้นฐานความเข้าใจในกระบวนการกลึงโลหะ

งานกลึงเป็นกระบวนการที่ใช้กันโดยทั่วไป ในการแปรรูปโลหะวัสดุขึ้นงานจะถูกจับแน่นที่หัวจับของเครื่องกลึง และหมุนเครื่องมือตัดหรือมีดกลึงจะถูกจับยึดอยู่บนส่วนที่เคลื่อนที่

อย่างคงที่ในแนวแกนของชิ้นงานกลึงและทำการตัดเฉือนบนผิวชิ้นงาน ทำให้เกิดเป็นแผ่นของเศษโลหะไหลออกจากทรงกระบอกหรือผิวงานที่ถูกกลึงแล้ว ซึ่งจะแสดงให้เห็นรูปที่ 2.67



ภาพที่ 2.65 แสดงลักษณะการตัดเฉือนงานบนเครื่องกลึง

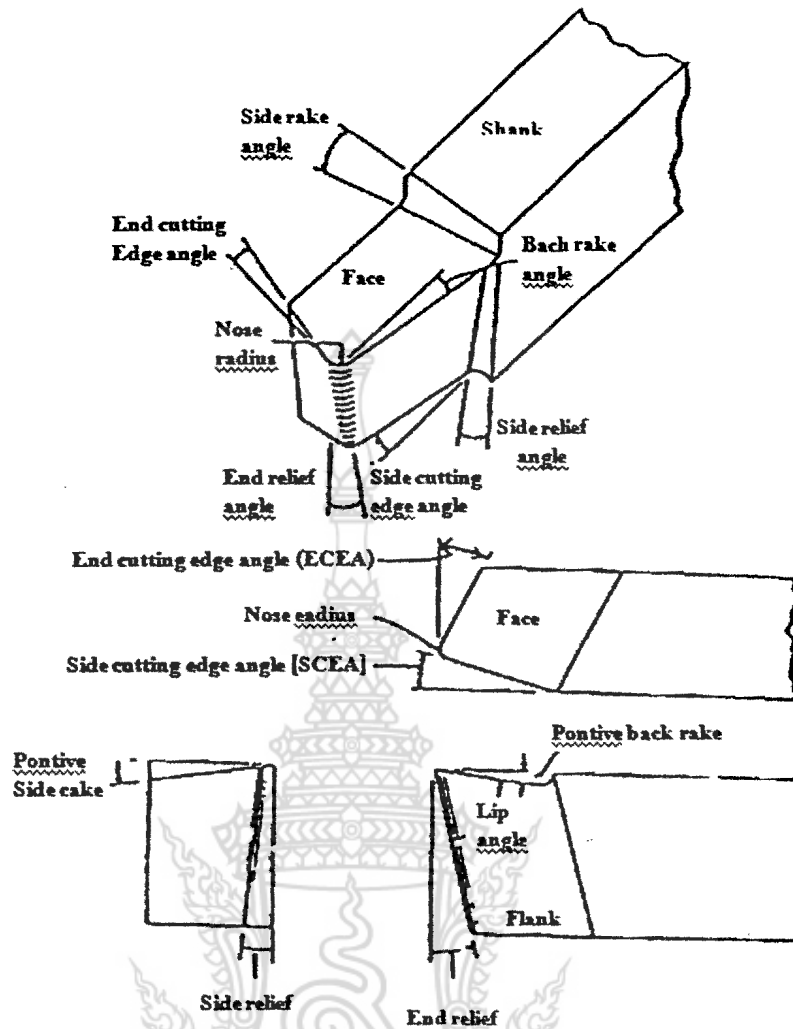
ความเร็วตัด โดยทั่วไปใช้สัญลักษณ์แทนด้วย (V) เป็นอัตราเร็วในการหมุนของผิวชิ้นงานที่เคลื่อนที่ผ่านส่วนปลายของคมตัดหรือมีด ใช้หน่วยเป็นฟุตต่อนาที (ft/min) หรือเมตรต่อนาที (m/min) อัตราป้อน (Feed) ใช้สัญลักษณ์ (f) เป็นอัตราการเคลื่อนที่ของมีด เปรียบเทียบกับการหมุนของชิ้นงานหนึ่งรอบ ซึ่งแสดงในภาพที่ 2.65 (ก) ความลึกในการตัดเฉือนจะใช้สัญลักษณ์แทนด้วย (w) เป็นความหนาของโลหะที่เคลื่อนที่ออกจากแหล่งชิ้นงาน วัดในแนวรัศมีของชิ้นงาน แสดงในภาพ 2.65 (ข) และ (ค) ผลจากสามตัวแปรนี้ จะให้อัตราการเคลื่อนที่ของอโลหะที่ไหลออกจากชิ้นงานค่าหนึ่ง ซึ่งค่าๆ นี้จะเป็นตัววัดผลของการตัดเฉือนโลหะ ซึ่งเรียกว่า “อัตราการตัดเฉือน”

$$\text{อัตราการตัดเฉือน} = V \cdot f \cdot w \quad (\text{in}^3/\text{min}, \text{cm}^3/\text{min}) \quad (2.37)$$

ความเร็วตัดและอัตราป้อน เป็นค่าที่สำคัญซึ่งสามารถเปลี่ยนแปลงหรือปรับแต่ง เพื่อให้ได้สภาพการตัดเฉือนที่ดีที่สุด ความลึกในการตัดเฉือนมักจะถูกบังคับด้วยขนาดเบื้องต้นของชิ้นงานดิบและขนาดที่ต้องการผลิต ความเร็วตัดในงานกลึงมีใช้ ตั้งแต่ 3 ถึง 200 เมตรต่อนาที (10 - 600 ft/min) แต่ในบางกรณีที่เป็นพิเศษด้วยความเร็วตัดที่ใช้ อาจสูงถึง 3000 เมตร/นาที ความเร็วรอบของการหมุน (RPM) ของหัวจับโดยทั่วไปจะมีค่าคงที่ตลอดการทำการตัดเฉือนในชั้นหนึ่งๆ ที่ปลายสุดของคมตัด ความเร็วตัดจะน้อยกว่าที่ผิวนอกของชิ้นงาน แต่ความแตกต่างนี้โดยทั่วไปถือว่าน้อยมาก และในการคำนวณจะใช้ความเร็วตัดเพียงค่าเดียวคือ ที่ปลายคมตัดเพื่อนำไปหาค่าต่างๆ ในปัจจุบันเครื่องกลึงสมัยใหม่ที่ใช้คอมพิวเตอร์ควบคุมการทำงาน สามารถปรับความเร็วในการตัดเฉือนในขณะที่ทำการตัดเฉือนชิ้นงานที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของชิ้นงานที่ทำการตัดเฉือน ทำให้ค่าของความเร็วตัดมีค่าคงที่ตลอดเวลา อัตราป้อนมีคากับชิ้นงานนี้

ในภาพที่ 2.66 จะแสดงส่วนที่สำคัญของผิวหน้าของมีดกลึงพื้นฐานที่ใช้ในงานกลึงพื้นผิวของมีด ส่วนที่อยู่ด้านบนซึ่งเป็นผิวที่เสียดสีโลหะไหลผ่านเรียกว่า “ผิวของมุมคายเศษ” (Rake Face) ส่วนปลายของมีดซึ่งต่อจากระนาบของมุมคายเศษและลาดลงไปเป็นมุมหลบหน้ามีด (Clearancer Face) หรือมุมฟรีซึ่งมุมหน้ามีดนี้จำเป็นต้องมี เพราะต้องการหลบผิวของชิ้นงาน ที่เพิ่งผ่านการตัดเฉือนมาแล้วไม่ต้องเสียดสีกับตัวมีดอีก มุมฟรีหรือมุมหลบหน้ามีดนี้ โดยทั่วไปจะมีขนาดประมาณ 6 - 10 องศา สำหรับเหล็กกล้าทั่วไปผิวหน้าของมุมคายเศษจะยึดอยู่ในแนวเดียวกับแกนของชิ้นงานและมุมคายเศษนี้อาจเปลี่ยนแปลงไปตามชนิดของชิ้นงานหรือลักษณะของการตัดเฉือนให้ดีที่สุด การวัดมุมคายเศษ (Rake Angle) จะวัดในแนวจากเส้นที่ขนานกับแกนของชิ้นงานที่หมุน (ภาพที่ 2.66)

มุมคายเศษที่เป็นบวก คือมุมคายเศษที่มีลักษณะลึกลง ไปจากเส้นแนวแกน ในภาพที่ 2.68 แสดงถึงมุมคายเศษที่มีค่ามาก ซึ่งจะทำให้คมตัดมีความคมมากขึ้นแต่ก็จะทำให้ความแข็งแรงของมีดมีน้อยลง ในวัสดุคมตัดบางชนิดจะใช้มุมคายเศษเป็นค่าศูนย์ หรือเป็นค่าลบ แสดงถึงมุมคายเศษเป็นลบ 5 องศา หรือลบ 6 องศา ชื่อของมุมต่างๆ ที่แสดงมาทั้งหมดนี้จะใช้ในการอธิบายในเรื่องต่างๆ ของการตัดเฉือนในรายงานฉบับนี้ สำหรับการตัดเฉือนด้วยกรรมวิธีอื่น ๆ เช่น งานกบ งานไส ฯลฯ จะมีลักษณะของมีดที่แตกต่างกันไป แต่ตัวแปรในการตัดเฉือนต่างๆ ก็คงเหมือนกัน จะแตกต่างกันคือ รูปร่าง และทิศทางการตัดเฉือนเท่านั้น



ภาพที่ 2.66 แสดงส่วนต่างๆของมีดกลึง

2.5.10 ลักษณะทางกายภาพในการเกิดเป็นเศษโลหะ

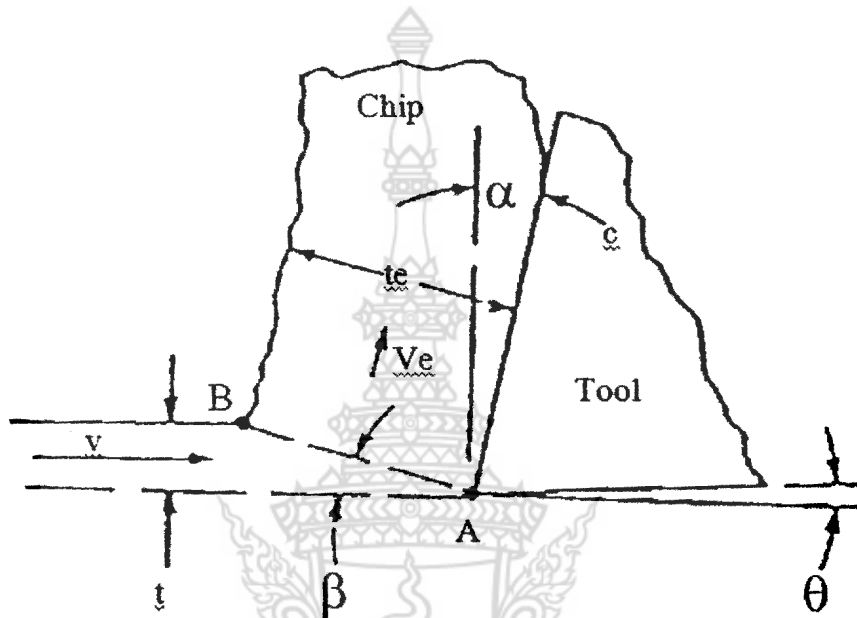
เพื่อลดความยุ่งยากในการคำนวณที่ซับซ้อนและง่ายต่อการเข้าใจจะแบ่งการพิจารณาออกเป็นแบบ 2 ระนาบ ในการพิจารณาในภาคตัดสองมิติ จะมีข้อจำกัดในการพิจารณาดังนี้

- 1) คมตัดในที่นี้จะเป็นเส้นตรงและอยู่ในตำแหน่งตั้งฉากกับทิศทางของความเร็วที่สัมพันธ์กันระหว่างชิ้นงาน และเครื่องมือตัด
- 2) ความยาวปลายคมตัดจะกว้างกว่าความกว้างของชิ้นงานส่วนที่ตัดเนียนออก
- 3) ส่วนที่ยังไม่ถูกตัดเฉือนจะมีขนาดเล็กและสัมพันธ์กับความกว้างของส่วนที่ตัด

- 4) ใช้ความเร็วตัดขนาดกลาง
- 5) สมมติฐานว่า คุณสมบัติต่าง ๆ ของชิ้นงานจะเป็นเนื้อเดียวกัน
- 6) ความเผ็ดที่ผิวหน้าของคมตัดมีน้อยมาก

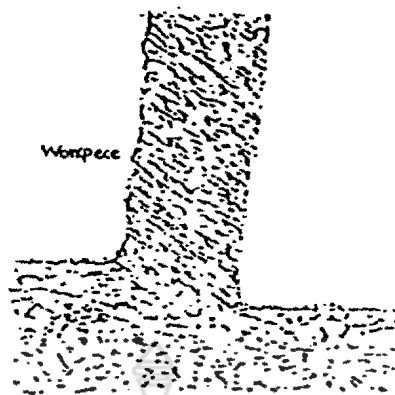
เศษที่ไหลออกมาตามข้อกำหนดข้างต้นจะไหลออกมาต่อเนื่องดังแสดงในภาพที่ 2.69

โดยที่ α = มุมภายในเฉย และ θ = มุมหลบหลังมีด



ภาพที่ 2.67 แสดงคมตัดและการเกิดเฉย

เศษโลหะที่ไหลมันออกมาจะไหลออกมาอย่างต่อเนื่องจากตำแหน่ง จูกรวมแรงเฉือน เนื้อโลหะส่วนที่ยังไม่ถูกตัดเฉือน จะยังคงสภาพเป็น Elastic จนกระทั่งถึงตำแหน่งแนว A และ B เมื่อถึงตำแหน่ง A และ B เนื้อโลหะจะถูกเฉือนอย่างกระทันหัน ด้วยแรงที่เพิ่มขึ้นอย่างมาก และหลังจากผ่านแนว A และ B เนื้อโลหะจะหมดจากสภาพกลายเป็นเนื้อแบบ Plastic ไหลโดยปราศจากความเผ็ดจากการยึดตัวไหลผ่านหน้าสัมผัส A และ C การเกาะยึดตัวของเนื้อโลหะยังคงมีอยู่บ้างจึงยังเกาะตัวแต่อยู่ในสภาพที่เสถียร



ภาพที่ 2.68 ภาพถ่ายเนื้อวัสดุที่ถูกตัดเฉือน

ภาพที่ 2.68 เป็นภาพถ่ายของเนื้อวัสดุที่ถูกตัดเฉือนตามระนาบในแนวตัด ตามเงื่อนไขที่กำหนด โดยในขณะที่ทำการตัดเฉือนด้วยความเร็วนั้นจะหยุดการตัดเฉือนโดยทันที จากนั้นทำเลื่อยตัดชิ้นงานในแนวของทำการขัดผิว และกัดกรวดด้วยวิธีการทางโลหะวิทยา

2.5.11 การคำนวณอัตราส่วนการตัดเฉือนระหว่างอัตราป้อนและความหนาเศษตัดที่เกิดขึ้น
หลังจากทำการตัดเฉือนสามารถพิจารณาได้ดังนี้

ความหนาของเศษที่ไหลออกมา (t_c) จะต้องมากกว่าความหนาของส่วนที่ยังไม่ตัดเฉือน (t) เสมอ (อัตราป้อน; f) ถ้ามองในระนาบตัดขวางของการตัดเฉือนและอัตราส่วนของ t กับ t_c นี้เราจะเรียกว่า “อัตราส่วนของการตัดเฉือน r ”

$$r = t/t_c \quad (2.38)$$

ระนาบของการตัดเฉือนความกว้างของเศษ (b_c) จะเท่ากับความกว้างของงาน (b) ($b/t > 5$)
ในลักษณะที่ความกว้างของงาน (b) เท่ากับความกว้างของเศษ (b_c) ดังนั้น

$$r = t/t_c = lc/l \quad (2.39)$$

เมื่อ l = ความยาวของเศษที่ยังไม่ผ่านการตัดเฉือน (มิลลิเมตร, นิ้ว)

lc = ความยาวของเศษที่ผ่านการตัดเฉือนแล้ว (มิลลิเมตร, นิ้ว)

หากข้อกำหนดทั้งหมด ไม่มีการเปลี่ยนแปลงในส่วนหนึ่งส่วนใดเราก็จะได้สมการเป็น

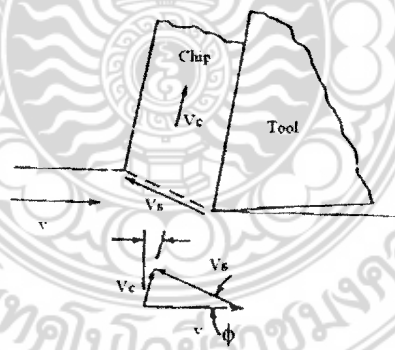
$$1 \cdot bt = 1c \cdot bc \cdot tc \quad (2.40)$$

ค่า r ในสมการคือ อัตราส่วนของการตัดเฉือน บางครั้งใช้เป็นค่าอัตราส่วนของความยาวเศษ ค่าอัตราส่วนของการตัดเฉือนเป็นค่าที่สะดวกในการหาประสิทธิภาพของการตัดเฉือน แสดงในภาพที่ 2.70 แสดงความแตกต่างของค่าอัตราส่วนของการตัดเฉือนที่แตกต่างกันจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงในขนาดต่างๆ ของเศษที่จะไหลออกมาความแตกต่างของมุมตัดเฉือนขึ้นงานระหว่าง 1 และ 2 ในความจริงที่ว่าพลังงานทั้งหมดในระนาบของการตัดเฉือนจะรวมตัวอยู่ในตำแหน่งระนาบที่เกิดการเฉือนขึ้นงาน ใช้ตัดเฉือนที่มีระนาบของการตัดเฉือนน้อยกว่าจะใช้พลังงานน้อยกว่าการตัดเฉือนที่มีระนาบของการตัดเฉือนมากกว่า ที่เป็นเช่นนี้เพราะค่าความเค้นเฉือนจะมีค่าคงที่ (ไม่คิดถึงความแข็งและความเครียด) ถ้าแนวการตัดเฉือนสำหรับเศษที่มีขนาดบางและสำหรับเศษที่มีขนาดหนา ดังนั้นการตัดเฉือนที่มีค่าอัตราส่วนของการตัดเฉือนสูงจะเป็นการตัดเฉือนที่มีประสิทธิภาพสูงกว่า

การวัดค่าอัตราส่วนของการตัดเฉือนสามารถหาได้จากทั้งสมการที่ (2.34) และสมการที่ (2.35) อย่างไรก็ตาม เศษที่ไหลออกมาจากคมตัดคมจะมีมุมออกมาไม่เป็นลักษณะเส้นตรง จึงเป็นการยากที่จะวัดหาค่า tc ดังนั้นในการวัดที่เป็นไปได้จึงจะใช้สมการที่ (2.36)

วิธีการหนึ่งที่สำคัญในการหาอัตราส่วนของการตัดเฉือน r ก็คือการสมมติมุมเฉือน เราสามารถคำนวณมุมนี้ได้ ด้วยสมการข้างล่าง

$$\tan \phi = r \cos \lambda / 1 - r \sin \lambda \quad (2.41)$$



ภาพที่ 2.69 แสดงทิศทางของความเร็วในระนาบตัดขวาง (V , V_c , V_s)

โดยกำหนดให้ α = มุมหลบด้านข้างของมีด (องศา)

T = อัตราการป้อนมีดต่อรอบ (มิลลิเมตร/นิ้ว)

B = ความลึกของการป้อน (เมตร/นาที)

V = ความเร็วตัด

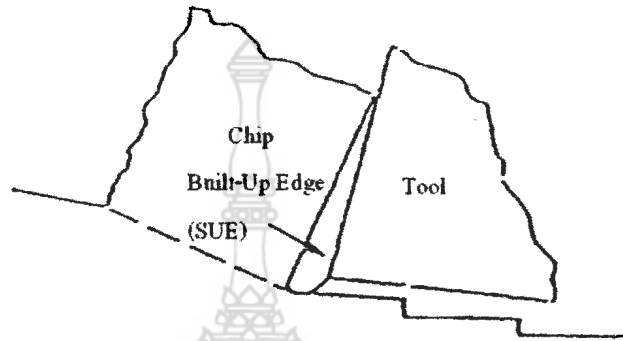
อัตราส่วนของการตัดเฉือนสามารถอธิบายได้โดยการนำเอาความยาวของเศษที่ถูกตัดเฉือนที่สอดคล้องกัน (l_c) และคำนวณเปรียบเทียบกับความยาว ในส่วนที่ยังไม่ถูกตัดเฉือนจากความกว้างของเศษและน้ำหนักของเนื้องาน โดยที่เราทราบค่าของ B และ T

ก) หลักการพิจารณาชนิดของเศษ ในการพิจารณาชนิดของเศษ ต้องเข้าใจว่า เศษที่ถูกตัดเฉือนออกมา จะมีลักษณะเป็นแผ่นบาง ๆ ที่มีความหนา (l_c) มีลักษณะต่อเนื่องเหมือนกับริบบิ้นไหลออกมาจากระนาบที่ถูกตัดเฉือน ดังภาพที่ 2.68 และ 2.69

ในกรณีใช้ความเร็วตัดต่ำๆ หรือวัสดุงานมีเนื้อวัสดุที่ไม่มีช่วงยืดตัว (เหล็กหล่อ ซึ่งมีส่วนผสมของกราไฟต์) หรือเหล็กผสมแมงกานีสเช่น (Free Machining Steel) การเกิดเศษจะเป็นแบบไม่ต่อเนื่องภาพที่ 2.70 เศษที่ได้จากการตัดเฉือนจะเป็นชิ้นเล็กๆที่ไม่ปะติดปะต่อกัน ซึ่งเกิดการแตกหักเมื่อถึงจุดที่ถูกเฉือนด้วยแรงเค้นที่รวมอยู่ที่ระนาบของการตัดเฉือนผ่านในลักษณะนี้แบบจำลองระนาบของการตัดเฉือนและการคำนวณต่างๆ จะได้ค่าที่คลาดเคลื่อนจากการคำนวณในแบบของเศษที่ต่อเนื่องกันมากเศษ โลหะที่ไหลต่อเนื่องและปลายคมตัดที่ถูกสร้างขึ้นมาขณะทำการตัดเฉือน

สิ่งที่ทำให้เกิดการเบี่ยงเบนผิดไปจากแบบจำลองการตัดเฉือนอย่างง่าย ที่ได้ทำการพิจารณาผ่านมามีคือ การตัดเฉือนด้วยปลายคมตัดที่ถูกสร้างขึ้นมาขณะทำการตัดเฉือน ในการตัดเฉือนที่ใช้ความเร็วในการตัดเฉือนค่อนข้างต่ำ การแตกของเนื้อวัสดุอาจเกิดขึ้นภายในเศษคือ การตัดเฉือนไม่ได้เกิดขึ้นที่ปลายคมตัด แต่มีเนื้อวัสดุบางส่วนที่เกาะพอกติดอยู่ที่ปลายคมตัด โดยการตัดเฉือนจะเกิดขึ้นข้างหน้าเนื้อวัสดุที่เกาะมีคอยู่ เนื้อวัสดุส่วนที่เกาะพอกอยู่ที่ปลายคมตัดส่วนนี้จะทำหน้าที่เหมือนเป็นปลายของคมตัดซึ่งเราจะเรียกส่วนนี้ว่า BUE (Built Up Edge) ตัวเนื้อโลหะส่วนนี้มีแนวโน้มที่จะเป็นวงจรัคือ จะมีขนาดไม่แน่นอน จะมีขนาดใหญ่ขึ้นจนถึงจุดๆ หนึ่งที่ปลายมีดจะได้ผิวงานกลมที่มีขนาดเปลี่ยนแปลงไปได้ เพราะแนวของเนื้อ โลหะที่มาเกาะมีดที่ปลายมีดไม่สามารถควบคุมได้ อาจยื่นออกไปในแนวความลึกของการตัด หรืออาจยื่นนำหน้ามีดไปก็ได้ (ภาพ

ที่ 2.68) ในการเพิ่มความเร็วตัด (เป็นการเพิ่มอุณหภูมิหน้าสัมผัสของมีดกับชิ้นงาน) จะทำให้ขนาดของ BUE ลดลง ส่วนของ BUE จะไม่เกิดขึ้น เมื่ออุณหภูมิของเศษที่อ่อนตัว และไหลผ่านคมตัดมีน้อยกว่าอุณหภูมิของตำแหน่งของคมตัดเหล็กที่เศษจะไหลผ่านตามปกติ ภายใต้ภาวะการกลึงตามปกติส่วนของ BUE จะมีค่ามากที่สุด ขนาดใหญ่ที่สุด เมื่อใช้ความเร็วตัดประมาณ 50 rfm (15.2 เมตร/นาที)



ภาพที่ 2.70 แสดงการเกิดการเกาะติดของเศษที่ปลายคมตัด (BUE)

แบบจำลองของระนาบการตัดเฉือนในแบบที่การมี BUE ร่วมอยู่ด้วยสามารถแสดงได้โดยการคิดร่วมกับส่วนของ BUE ที่ยื่นออกมา อิทธิพลที่สำคัญของ BUE คือ การทำให้เกิดการเกินขีดที่จุดของคมตัดสูงมากแต่เพิ่มคุณภาพในเรื่องของมุมคายเศษ อิทธิพลที่สำคัญทั้งสองอย่างที่มีผลในการตัดเฉือนมีแนวโน้มที่จะหักล้างกัน ไปนอกจากนี้ BUE ยังมีความสัมพันธ์กับความเสียหายที่เครื่องมือตัด (มีด) ไม่ทำให้ความแข็งของมีดลดลง ในการทำงานที่ความเร็วสูง BUE ส่วนที่ไหลไปพร้อมกับเศษโลหะมีแนวโน้มที่จะกัดกร่อนและทำลายเนื้อมีดในขณะที่ BUE ที่ปกคลุมตัดจะรักษาปลายคมจากการเสียหายโดยทั่วไปแล้ว BUE จะมีผลอย่างมากในเรื่องผิวงาน และความกลมของงาน

2.5.12 การสึกหรอ

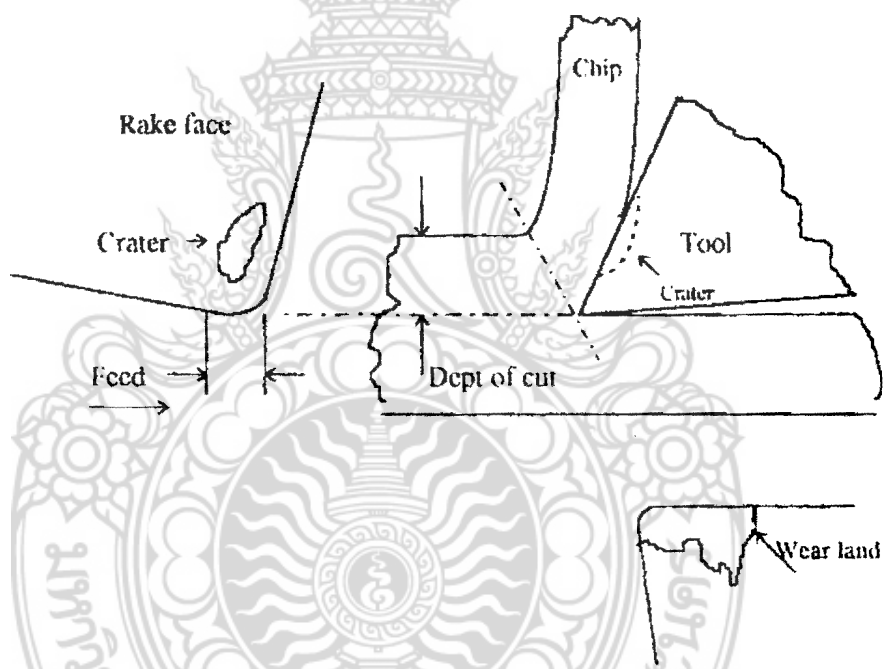
การสึกหรอคือ การเปลี่ยนแปลงผิวของชิ้นงานในลักษณะไม่พึงประสงค์เนื่องมาจากการแยกหลุดของอนุภาคบนผิวเนื่องจากปฏิกิริยาทางกลหรือทางเคมี การวิเคราะห์กระบวนการสึกหรอจะกระทำได้โดยวิเคราะห์องค์ประกอบที่มีผลต่อการสึกหรอของวัสดุพื้น วัสดุคู่ประกบ

วัสดุประกบ วัสดุที่อยู่ระหว่างกลาง ลักษณะการเคลื่อนไหวและภาระกรรมซึ่งพฤติกรรมการสึกหรอของวัสดุจะขึ้นกับองค์ประกอบเหล่านี้ พลังงานทางกลที่ป้อนเข้าไปจะเปลี่ยนเป็นพลังงานทางความร้อนอาจจะก่อให้เกิดปฏิกิริยาทุติยภูมิ โดยเฉพาะอย่างยิ่งปฏิกิริยาทางเคมีซึ่งอาจทำให้ผิวของโลหะแตกหลุด

โดยทั่วไปการสึกหรอของใบมีดนั้นมีอยู่ 2 ลักษณะ คือ

1) Crater Wears เป็นแอ่งลึกบน Rake Face การกัดกร่อนจะเป็นไปในด้านลึกมากกว่า ด้านกว้างการสึกกร่อนจะขยายใกล้ Cutting Edge และ Tool จะหมดสภาพการใช้งาน (Failure) เมื่อเกิดรอยหักจาก Clearance Face การสึกกร่อนของมีดแบบนี้มักจะเกิดกับสภาพการตัดแบบไม่ต่อเนื่อง

2) Wear Land เกิดขึ้นบน Clearance Face ในแนวขนานกับงานที่เพิ่มถูกตัด แต่เมื่อเป็นไปนานๆ เข้า รอยผุกร่อนจะเอียงขึ้นไปทาง Cutting Edge มากกว่าทาง Clearance Face ดังภาพที่ 2.71



ภาพที่ 2.71 การสึกหรอของมีดตัด

พารามิเตอร์ต่างๆที่มีอิทธิพลต่อ Tool Wear คือ สภาพะตัดอัน ได้แก่ ความกว้าง และ ความลึกของการตัด ความเร็วตัด ลักษณะเรขาคณิตของมีดตัด และคุณสมบัติของวัสดุที่นำมาตัดอัน

ได้แก่ Grain Structure Heat Treatment Hardness Strength Elasticity และอื่นๆ การที่ส่วนปลายมีด
 กระเทาะหลุดออกไป เนื่องจาก Crater Wear ผสมกับ Flank ดังกล่าวแล้ว การเกิด Built up Edge เข้ม
 ติดกับปลายมีด เมื่อ Built Up Edge หลุดคือเอาเนื้อโลหะของปลายมีดให้หลุดตามไปด้วย นี่ก็เป็น
 อีกสาเหตุหนึ่งที่ทำให้เกิดการหักที่ปลายมีดเช่นกัน การเกิดสึกหรอจะมีต่อแรงและชิ้นงาน
 ดังต่อไปนี้

(1) โดยปกติจะเพิ่มแรงที่ใช้ในการตัด แต่ในบางกรณี Crater Wear อาจทำให้แรง
 ลดลงได้ เพราะทำให้มุม Rake เพิ่ม

(2) Wear Land และการกระเทาะหลุดไปที่ปลายมีดจะทำให้แรงตัดเพิ่มขึ้นเพราะเพิ่ม
 Rubbing Force

(3) ทำให้ความเรียบของผิวงาน (Surface Finish) เสียไปโดยเฉพาะอย่างยิ่งถ้าปลาย
 มีดหักและเกิด Flank Wear แต่ในบางกรณี Wear Land อาจจะทำให้ผิวของชิ้นงานทำให้ความเรียบดี
 ขึ้น

(4) Flank Wear ทำให้ลักษณะของคมตัดเปลี่ยนไป ทำให้ชิ้นงานที่ได้มีรูปร่างไม่
 เป็นไปตามที่ต้องการ ผลอันนี้จะมีมากถ้าเป็น Form Tool

(5) Tool Wear อาจทำให้เกิด Vibration

การที่มีดสูญเสียสภาพการใช้งาน (Fail) อาจพิจารณาได้ 2 กรณี กรณีที่หนึ่งจะทำให้
 ปลายมีด (Tool tip) อ่อนตัวลงจึงเกิด Plastic Flow ที่ Shear Stress ต่ำๆทำให้ที่ตอลง และความทื่อ
 เนื่องจาก Plastic Flow สึกเข้าไปในเนื้อมีด

กรณีที่สองคือ Crater Wear และ Flank Ware ประกอบกันทำให้เกิดรอยแตกที่ปลายมีด
 และกระเทาะหลุดไปในที่สุดเป็นแบบที่หักเนื่องจากความเปราะของมีด

2.5.12.1 การสึกหรอของเครื่องมือตัด

เครื่องมือตัดเมื่อถูกใช้งานไปแล้วจะเกิดการสึกหรอขึ้น และจะเกิดอย่าง
 ต่อเนื่องจนกระทั่ง สิ้นสุดอายุการใช้งาน การสึกหรอของเครื่องมือตัดเป็นผลมาจากภาระ (Load)
 ต่างๆที่กระทำบนคมตัดซึ่งอายุการใช้งานของเครื่องมือตัดขึ้นอยู่กับภาระเหล่านั้นที่กระทำจนทำให้

คมตัดเปลี่ยนรูปร่างไปหรือกล่าวโดยสรุปคือ การสึกหรอเป็นผลจากการกระทำระหว่างเครื่องมือตัดวัสดุชิ้นงานและเงื่อนไขการตัด

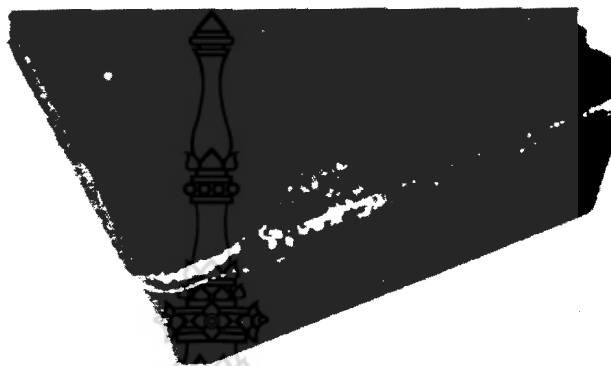
ก) การสึกหรอบริเวณผิวหอบ (Flank Wear) การสึกหรอบริเวณผิวหอบ เป็นการสึกหรอทางกลที่เกิดขึ้นจากชิ้นงานเคลื่อนที่ผ่านเครื่องมือตัด ในขณะที่เดียวกันเศษโลหะแยกตัวออกมาจากชิ้นงาน ถ้าการสึกหรอด้านหน้าขยายตัวเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนทำให้คุณภาพผิวงานและความเที่ยงตรงแม่นยำของชิ้นงานแย่งลงเรื่อยๆ นอกจากนั้น แรงที่ใช้ในการตัดยังเพิ่มขึ้นอีกด้วย ซึ่งอาจทำให้อุปกรณ์ยึดจับชิ้นงาน (JIG) อุปกรณ์ยึดจับเครื่องมือตัด (Tool Holder) หรือเครื่องจักรเสียหายได้ การสึกหรอทางด้านข้างมีดซึ่งเกิดขึ้นอย่างผิดปกติเป็นผลมาจากการใช้วัสดุมีดที่ไม่เหมาะสมและควรใช้วัสดุมีดที่มีความแข็งเพิ่มขึ้น เช่น คาร์ไบด์เคลือบหรือเซรามิกในการเปลี่ยนลักษณะของมีดทางเรขาคณิตก็อาจจะช่วยลดอัตราการสึกหรอให้ช้าลง พร้อมทั้งการเพิ่มค่าของมุมลบและลดความโตของรัศมีมุมมนด้วย การเพิ่มอัตราป้อนความลึกในการตัดและความเร็วตัดลงก็เป็นการช่วยลดการสึกหรอด้วยอีกทางหนึ่ง ดังภาพที่ 2.72



ภาพที่ 2.72 แสดงการสึกหรอบริเวณผิวหอบ (Flank Wear)

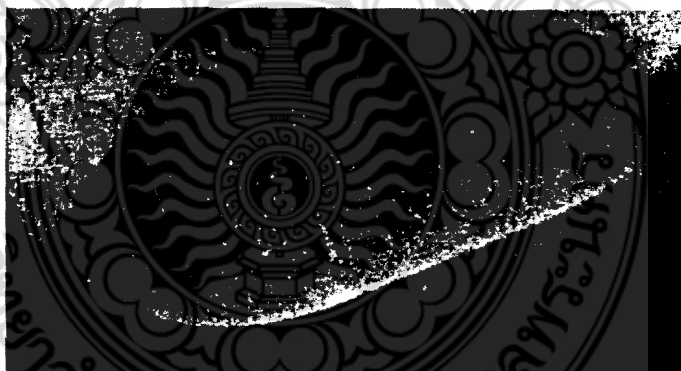
ข) การสึกหรอที่ผิวคายเศษ (Crater Wear) การสึกหรอที่ผิวคายเศษ เกิดจากการเสียดสีอนุภาคของเศษโลหะไหลผ่านด้านบนบนเครื่องมือตัดเกิดการเสียดสีกับการเจียรนัยชิ้นส่วนที่ร้อนที่สุดของเศษโลหะจะเกิดการแพร่กระจาย (Diffusion) ของอนุภาคระหว่างเศษโลหะและเครื่องมือตัด คือ เกิดการแลกเปลี่ยนอนุภาคซึ่งกันและกัน ธาตุเหล็ก (Fe) ในเศษโลหะแพร่กระจายเข้าไปในเครื่องมือตัด ธาตุคาร์บอน (C) และธาตุโคบอลต์ (Co) ในเครื่องมือตัดแพร่กระจายเข้าไป

ในเศษโลหะ ในขณะที่เกิดการแลกเปลี่ยนอนุภาคกัน ธาตุเหล่านั้นจะทำปฏิกิริยากับออกซิเจนในอากาศเกิดปฏิกิริยาเคมีที่เรียกว่าออกซิเดชัน (Oxidation) เกิดเป็นสารประกอบออกไซด์หลุดออกไป ทำให้ผิวด้านบนเครื่องมือตัดเป็นหลุมถ้าหากว่าการสึกหรือเป็นหลุมใหญ่ขึ้นเรื่อยๆ รูปทรงของคมตัดและทิศทางการตัดเปลี่ยน ไปคมตัดสูญเสียความแข็งแรงไป อาจทำให้เครื่องมือตัดหรือชิ้นงานเสียหายได้ การสึกหรือเป็นหลุมด้านบนมักเกิดจากการตัดเหล็กเหนียว ดังภาพที่ 2.73



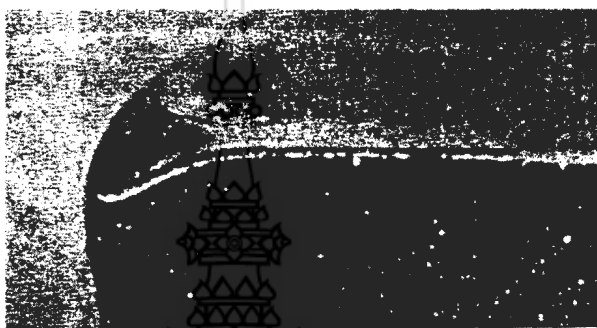
ภาพที่ 2.73 แสดงการสึกหรือแบบ (Crater Wear)

ค) การสึกหรือเป็นรอยบาก (Notch Wear) การสึกหรือเป็นรอยบากจะเกิดขึ้นที่บริเวณปลายคมตัดเกิดขึ้นจากการทำปฏิกิริยากับอากาศออกซิเดชัน เครื่องมือตัดและชิ้นงานสามารถพบได้บ่อยในการตัดชิ้นงานที่มีความแข็งแรงสูง ถ้าการสึกหรือเป็นรอยบากขนาดใหญ่ขึ้นเรื่อยๆ จะมีผลต่อคุณภาพชิ้นงานและยังทำให้ความแข็งแรงของคมตัดลดลงด้วย ดังภาพที่ 2.74



ภาพที่ 2.74 แสดงการสึกหรือแบบรอยบาก (Notch Wear)

ง) การหลอมตัวของเครื่องมือตัด (Plastic Deformation) การเปลี่ยนแปลงรูปร่างที่ปลายคมตัดของเครื่องมือตัดชนิดคาร์ไบด์จะเกิดขึ้นในขณะที่ทำการตัดเฉือน บริเวณคมตัดจะเกิดอุณหภูมิและความดันสูง โดยเฉพาะในการตัดวัสดุที่มีความแข็งสูง ด้วยอัตราเร็วตัดและอัตราป้อนที่สูงมาก เมื่อความร้อนเพิ่มขึ้นจนถึงค่าวิกฤต (Critical Hot Hardness) เครื่องมือตัดไม่สามารถทนความร้อนที่เกิดจากการตัดได้รูปร่างคมตัดเกิดการหลอมตัวเปลี่ยนรูปร่างทำให้ทิศทางการไหลของเศษโลหะเปลี่ยนไป คุณภาพผิวงานแย่ลงและ ใช้แรงในการตัด



ภาพที่ 2.75 แสดงการสึกหรอแบบการหลอมตัวของเครื่องมือตัด (Plastic Deformation)

จ) การแตกร้าวเนื่องจากอุณหภูมิ (Thermal Cracking) การแตกร้าวเนื่องจากอุณหภูมิเกิดจากรวัฏจักรการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ (Thermal Cyclic) โดยเฉพาะในงานกัด (Milling) ในขณะที่เม็ดมีดตัดชิ้นงานจะเกิดความร้อน และเย็นตัวลงเมื่อเม็ดมีดออกจากชิ้นงาน จากนั้นเม็ดมีดจะกลับเข้ามาตัดชิ้นงานอีกครั้งในรอบถัดไปเกิดความร้อนขึ้นอีกครั้ง เป็นวัฏจักรการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิต่อเนื่อง ดังภาพที่ 2.76



ภาพที่ 2.76 แสดงการสึกหรอแบบการแตกร้าวเนื่องจากอุณหภูมิ (Thermal cracking)

จ) การแตกร้าวเนื่องจากความล้า (Mechanical Fatigue Cracking) การแตกร้าวเนื่องจากความล้าเกิดขึ้นจากความไม่คงที่ของแรงตัดแต่ขนาดของแรงตัดเองไม่มากพอที่จะทำให้เครื่องมือตัดเสียหายได้ในทันที การแตกร้าวที่เกิดขึ้นจะเกิดขึ้นนากับคมตัด ดังภาพที่ 2.77



ภาพที่ 2.77 แสดงการสึกหรอแบบการแตกร้าวเนื่องจากความล้า (Mechanical Fatigue Crack)

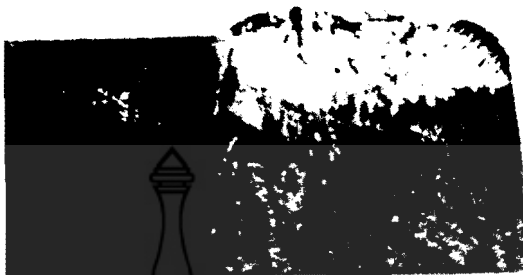
ข) การกะเทาะของคมตัด (Chipping of the Cutting Edge) การกะเทาะของคมตัดเกิดจากวัฏจักรของแรงที่กระทำต่อคมตัด ทำให้อนุภาคของเครื่องมือตัดหลุดออกจากผิวหน้าไป รูปร่างของการกะเทาะจะคล้ายกับการสึกหรอ การแตกของคมตัดเป็นความเสียหายที่ต้องหลีกเลี่ยงให้มากที่สุดการแตกของคมตัดทำให้รูปทรงตัดเปลี่ยนไป คมตัดไม่แข็งแรง อุณหภูมิขณะตัดสูง ใช้แรงในการตัดมากและอาจสร้างความเสียหายต่อชิ้นงาน เครื่องจักร อุปกรณ์ยึดจับ ดังภาพที่ 2.78



ภาพที่ 2.78 แสดงการสึกหรอแบบ (Chipping of the Cutting Edge)

ข) การสะสมของเศษวัสดุที่คมตัด (Build Up Edge) การสะสมของเศษวัสดุที่คมตัด เกิดจากชิ้นงานเกิดความร้อนจากการตัด จนกระทั่งชิ้นงานมาหลอมตัวมาพอกบริเวณคมตัด และหลุดออกไปเมื่อเครื่องมือตัดทำการตัดชิ้นงาน จากนั้นก็จะก่อตัวขึ้นใหม่อีกครั้งเป็นวัฏจักรการ

สะสมของเศษวัสดุที่คมตัดอาจทำให้อนุภาคของเครื่องมือตัดแตกหลุดออกไปพร้อมกับชิ้นงาน หลอมที่คมตัดการสะสมของเศษวัสดุที่คมตัดทำให้รูปทรงของคมตัดเปลี่ยนไป ซึ่งเป็นสาเหตุของการเกิดปัญหาอื่นๆ ตามมาดังภาพที่ 2.79



ภาพที่ 2.79 แสดงการสึกหรอแบบการสะสมของเศษวัสดุที่คมตัด (Build up edge)

ฎ) การแตกของคมตัด (Fracture of Cutting Edge) การแตกของคมตัดเป็นความเสียหายที่ต้องหลีกเลี่ยงให้มากที่สุด การแตกของคมตัดทำให้รูปทรงคมตัดเปลี่ยนไป คมตัดไม่แข็งแรง อุณหภูมิขณะตัดสูง ใช้แรงในการตัดมากและอาจสร้างความเสียหายต่อชิ้นงาน เครื่องจักร อุปกรณ์ยึดจับ ชิ้นงาน การแตกของคมตัดมักพบในงานตัดหนัก (Heavy Cutting) งานตัดกระแทก (Interrupt Cutting) การตัดชิ้นงานที่มีความแข็งสูง

ฏ) สาเหตุการสึกหรอของมีดกลึง โดยทั่วไปสาเหตุของการหมดสภาพของมีดกลึงภายใต้สภาวะปกติในการตัดเฉือนจะเป็นแบบการสึกหรอที่ละเล็กละน้อย จนกระทั่งมีดกลึงไม่สามารถจะทำการตัดเฉือนได้ดีเหมือนเดิม ซึ่งเราจะเรียกช่วงเวลาของที่มีดกลึงสามารถทำการตัดเฉือนได้ปกตินี้ว่า ช่วงอายุการใช้งานมีดกลึง (Tool Life) การสึกหรอ (Wear) เปรียบเสมือนกับน้ำหนักหรือมวลที่สูญเสียไปเนื่องจากเกิดการขัดสีจากแรงเสียดทานระหว่างมีดกลึงกับผิวชิ้นงาน ซึ่งเราสามารถจะแบ่งสาเหตุของการสึกหรอของมีดกลึงนี้ได้ 5 อย่าง ได้แก่

(ก) การขัดสี (Abrasion Wear) สาเหตุเกิดจาก ความแข็งของวัสดุชิ้นงาน โดยชิ้นงานส่วนที่แข็งกว่าจะเกิดการลื่นไถล ทำให้ขอบของชิ้นงานเย็น เพราะมีดกลึงจะตัดส่วนของชิ้นงานที่อ่อนกว่าลักษณะที่เย็นและล้าเข้ามาคร่อมระหว่างมีดกลึงนี้ เรียกว่า Build up Edge

(ข) การแพร่ของความร้อน (Diffusion Wear) ในสภาวะของแข็งการกระจาย (Diffusion) จะเกิดโดยอะตอมในผลึกของโลหะเคลื่อนจาก Lattice หนึ่งไปยังอีก Lattice หนึ่ง เนื่องจากการยึดตัวระหว่างอะตอมอ่อนลงเพราะความเค้นและอุณหภูมิสูงขึ้นหรืออาจกล่าวได้ว่า Diffusion Wear เกิดจากขบวนการทาง Mechanic ของผิวและการกระจาย (Diffusion) ถ้าขบวนการทางเครื่องกลที่เกี่ยวข้องและสามารถที่ทำให้อุณหภูมิของพื้นที่สัมผัสกันระหว่างมีดกับชิ้นงานเพิ่มขึ้นได้

(ค) การสึกหรอแบบออกซิเดชัน (Oxidation Wear) การเกิดออกซิเดชันเป็นสาเหตุทำให้มีดสึกสึกหรอ ซึ่งจะเกิดที่ความเร็วตัดสูง ๆ เช่น ในช่วงที่อุณหภูมิตัดเฉือนสูง ๆ Reformation under Compressive Stress

(ง) การยึดติด (Adhesion Wear) เมื่อผิวของวัสดุ 2 ชนิดถูกประกอปกติดกันภายใต้ Load ที่กระทำทำให้เกิดแรงเสียดทาน (Friction) ขึ้น Adhesion จะเกิดที่อุณหภูมิสูง ๆ ซึ่งจะทำให้โครงสร้างภายในของวัสดุเปลี่ยน โครงสร้างเป็น Plastic การสึกหรอนี้จะเกิดจากรอยแตกของส่วนที่ยึดติดกัน ซึ่งจะเกิดระหว่างมีดกับเศษตัดหรือมีดกับชิ้นงานอุณหภูมิที่ซึ่ง Adhesion เกิด (ระหว่างมีดกับชิ้นงาน) ขึ้นอยู่กับชนิดของธาตุที่เป็นส่วนประกอบภายในวัสดุ มีดกับชิ้นงาน นอกจากนี้ยังขึ้นอยู่กับแรงที่เกิดระหว่างมีดและชิ้นงาน ซึ่งในงานกลึงแรงนี้จะหาได้จากสภาวะในการตัดเฉือน

(จ) การสึกหรอทางเคมีและการแยกตัวด้วยไฟฟ้า (Chemical and Electrolytic Wear) การสึกหรอทางเคมี (Chemical Wear) เกิดจากปฏิกิริยาระหว่างมีดกับชิ้นงาน ซึ่งกระทำต่อสารหล่อเย็นในขณะที่ทำการตัดเฉือน การแยกตัวทางไฟฟ้า (Electrolytic Wear) เกิดจากการกัดกร่อนทางไฟฟ้าระหว่างมีดกับชิ้นงาน

2.6 มาตรฐานแผ่นมีดอินเสิร์ต

2.6.1 การอ่านรหัสแผ่นมีดอินเสิร์ต

ศึกษาวิธีการเลือกใช้แผ่นมีดตามมาตรฐาน ISO โดยประกอบด้วยตัวอักษรที่บอกถึงเงื่อนไขของเม็ดมีดแต่ละรูปทรงซึ่งแต่ละรูปทรงมีรหัสที่แตกต่างกันตามเงื่อนไขการผลิต เช่น เม็ดมีดของบริษัท KYOCERA มีวิธีการอ่านแบบนี้

Symbol	Shape
H	120°Hexagon
O	135°Octagon
P	108°Pentagon
S	90°Square
T	60°Triangle
C	80°Diamond
D	55°Diamond
E	75°Diamond
F	50°Diamond
M	86°Parallelogram
V	35°Diamond
W	80°Trigon
L	90°Rectangle
A	85°Parallelogram
B	82°Parallelogram
K	55°Parallelogram
R	Round

Shown angle stands for acute angle for diamond and parallelogram inserts.

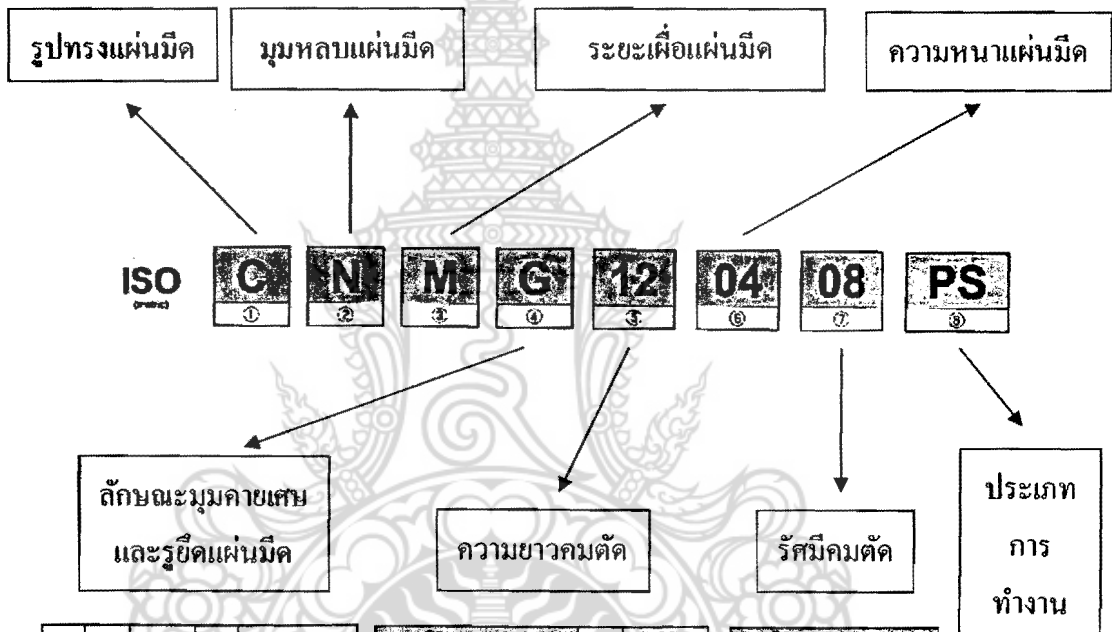
Symbol	Relief Angle
A	3°
B	5°
C	7°
D	15°
E	20°
F	25°
G	30°
N	0°
P	11°

Symbol (class)	Tolerance (mm)		
	Corner Height	Thickness	I.C. Size
A	±0.005	±0.025	±0.025
F			±0.013
C	±0.013	±0.025	±0.025
H			±0.013
E	±0.025	±0.13	±0.025
G			
J	±0.005	±0.025	±0.05~±0.15
K*	±0.013		
L*	±0.025	±0.13	±0.05~±0.15
M*			
N*	±0.08~±0.18	±0.025	
U*	±0.13~±0.38	±0.13	±0.08~±0.25

*Insert's periphery is as fired.
Tolerance difference is depending on insert size.

Thickness Symbol			
ISO		ANSI	
Thickness (mm)	Symbol	Thickness (inch)	Symbol
1.59	01	1/16	1(2)
2.38	02	3/32	1.5(3)
2.78	T2	-	-
3.18	03	1/8	2
3.97	T3	5/32	2.5
4.76	04	3/16	3
6.35	06	7/32	3.5
7.94	07	1/4	4
9.525	09	5/16	5

Thickness displayed as the distance between bottom surface and highest point on cutting edge



Symbol	Hole	Hole Shape	Options	Shape
N	Without Hole	-	No	Without Hole
R	With Hole	One Side	No	Without Hole
F			Two Sides	With Hole
A	With Hole	One Side	No	Without Hole
M			Two Sides	With Hole
G	With Hole	Two Sides	No	Without Hole
W			With Hole and One Corner	With Hole
T	With Hole	40°-60°	No	Without Hole
Q			With Hole and Two Corners	With Hole
U	With Hole	40°-60°	No	Without Hole
B			With Hole and One Corner	With Hole
H	With Hole	10°-90°	No	Without Hole
C			With Hole and Two Corners	With Hole
J	With Hole	70°-90°	No	Without Hole
X			With Hole and Two Corners	With Hole

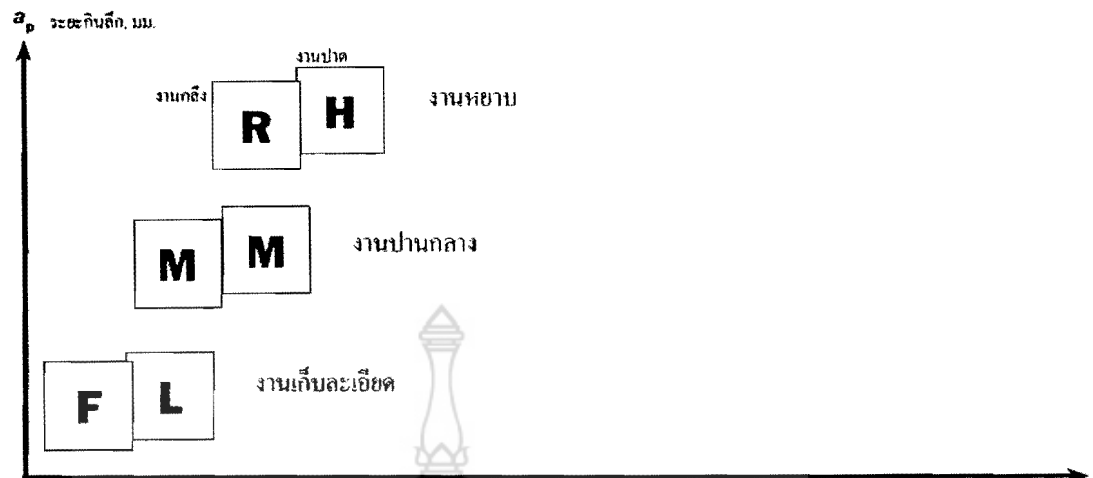
Edge Length Symbol (ISO)		I.C. Size (mm)		I.C. Size (ANSI)				
Symbol	Symbol	I.C. Size (mm)	Symbol	I.C. Size (inch)	Symbol			
03	04	03	06	1.97	3/32	1.2		
04	06	04	08	4.78	3/16	1.5		
05	05	05	09	5				
06	06	05	09	5.98	7/32	1.8		
08	07	08	11	11	04	6.35	1/4	2
08	09	07	13	05	7.94	5/16	2.5	
09	11	09	18	18	08	9.525	3/8	3
12	10			10				
12	15	12	22	22	08	12.7	1/2	4
16	18	16	25	27	10	16.875	5/8	5
16	23	16	33	33	13	19.05	3/4	6
19	23	19	33	33	13	19.05	3/4	6
22	27	22	38	38	15	20		
22	31	22	38	38	15	22.225	7/8	7
25	31	25	44	44	17	25.4	1	8
32	38	31	54	54	21	31.75	1-1/4	10
32		32						

Corner-Round Symbol			
ISO		ANSI	
Corner-R (r:mm)	Symbol	Corner-R (r:inch)	Symbol
0.03	003	0.001	0.1
0.1	01	0.004	0.2
0.2	02	0.008	0.5
0.4	04	1/64	1
0.8	08	1/32	2
1.2	12	3/64	3
1.8	18	1/16	4
2.6	26	5/64	5
2.4	24	3/32	6
2.8	28	7/64	7
3.2	32	1/8	8
0.0	00	0	0
Round Insert	00	Round Insert	0

Manufacturer's Option
Hand Symbol, Chipbreaker Symbol, etc.

ภาพที่ 2.80 แสดงรหัสแผ่นมีดบริษัท KYOCERA มาตรฐาน ISO

2.6.2 ประเภทการทำงานแผ่นมีดกลิ้งปอก



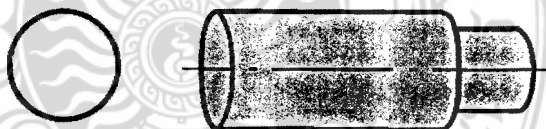
ภาพที่ 2.81 ประเภทการทำงานแผ่นมีดกลิ้งปอก

งานหยาบ สำหรับสภาพการทำงานที่ต้องการการกำจัด โลหะสูงสุดหรือชิ้นงานที่มีความหยาบขรุขระ ดังนั้นระยะกินลึกและอัตราการป้อนสูง สภาพงานที่ต้องการความแข็งแรงของขอบคมตัดสูง

งานปานกลาง สภาพการทำงานทั่วไปงานหยาบเล็กน้อย – ปานกลาง ใช้ระยะกินลึกและอัตราป้อนแตกต่างกันไป

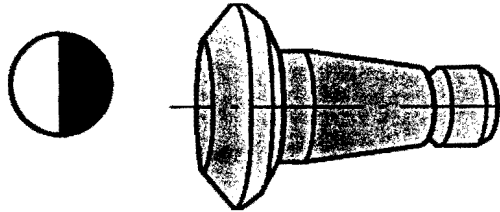
งานเก็บละเอียด ระยะกินลึกน้อยและอัตราการป้อนต่ำสภาพการทำงานที่ต้องการแรงตัดเฉือนต่ำ

2.6.3 สภาพการทำงานแผ่นมีดกลิ้งปอก



ภาพที่ 2.82 แสดงสัญลักษณ์สำหรับสภาพการทำงานที่เหมาะสมของแผ่นมีด

สภาพการทำงานที่เหมาะสม การตัดเฉือนแบบต่อเนื่อง ความเร็วตัดสูงชิ้นงานผ่านขั้นตอนการเตรียมชิ้นงานมาแล้ว มีการจับยึดชิ้นงานอย่างแข็งแรง และระยะขึ้นเล็กน้อย



ภาพที่ 2.83 แสดงสัญลักษณ์สำหรับสภาพการทำงานทั่วไปของแผ่นมีด

สภาพการทำงานทั่วไป ความเร็วตัดปานกลาง ขึ้นงานผ่านการฟอร์จจึงหรือการหล่อมี การจับยึดชิ้นงานแข็งแรงและเหมาะสม



ภาพที่ 2.84 แสดงสัญลักษณ์สำหรับสภาพการทำงานที่ขากต่อการตัดเฉือน

สภาพการทำงานที่ขากต่อการตัดเฉือน การตัดเฉือนแบบกระแทก ความเร็วตัดต่ำ ขึ้นงานผ่านการฟอร์จจึงหรือการหล่ออย่างหนักการจับยึดชิ้นงาน ไม่แข็งแรง

สภาพการทำงานของแผ่นมีดถึงปอกที่เลือกใช้สอดคล้องกับประเภทการทำงาน เนื่องจากสภาพการทำงานที่เลือกใช้นั้นส่งผลต่อการเลือกใช้ อัตราการป้อน (Feed rate) และระยะ กินลึก (Dept of Cut) ของแผ่นมีดตัด ดังนั้นการนำแผ่นมีดไปใช้งานควรคำนึงถึงสภาพการทำงาน ด้วย

2.6.4 ชนิดของวัสดุชิ้นงาน

P Steel **K** Cast Iron **N** Non-Ferrous Metal
M Stainless Steel **H** Hardened Steel **S** Super Alloys

ภาพที่ 2.85 แสดงรหัสตามมาตรฐาน ISO ของชนิดวัสดุงานสำหรับเกรดแผ่นมีด

การเลือกใช้งานแผ่นมีดคลึงปอกเพื่อตัด โลหะวัสดุชิ้นงานแต่ละชนิดนั้น ความแข็งของวัสดุชิ้นงานมีผลต่อการเลือกใช้งานแผ่นมีดตัด ดังตารางที่ 2.18

ตารางที่ 2.19 แสดงความแข็งของวัสดุชิ้นงานตามมาตรฐาน ISO

ชนิดของวัสดุชิ้นงาน	ความแข็งวัสดุชิ้นงาน
เหล็กเหนียว (P)	180 HB
เหล็กหล่อ (K)	250 HB
อลูมิเนียมอัลลอยด์ (N)	75 HB
สแตนเลส (M)	180 HB
เหล็กชุบแข็ง (H)	60 HRC
อัลลอยด์ทนความร้อนสูง (S)	350 HB

2.7 เหล็กกล้า

เหล็กที่มีธาตุคาร์บอนเป็นส่วนผสม โดยจะยึดถือหลักที่ว่าในเหล็กที่มีคาร์บอนผสมอยู่ต่ำกว่า 1.7 หรือ 2 เปอร์เซ็นต์ จะเรียกว่าเหล็กกล้า (ถ้ามีคาร์บอนผสมอยู่มากกว่า 1.72 เปอร์เซ็นต์ จะจัดเป็นเหล็กหล่อ) นอกจากธาตุคาร์บอนแล้วยังอาจจะมีธาตุอื่นๆ ผสมอยู่ด้วย แต่จะอยู่ในลักษณะเป็นธาตุเจือปน (Impurities) เช่น ซิลิกอน, แมงกานีส, กำมะถัน และฟอสฟอรัส เหล็กกล้า เป็นต้น โดยแบ่งออกเป็นสองกลุ่มใหญ่ คือ

2.7.1 เหล็กกล้าคาร์บอน (Carbon Steel)

เป็นเหล็กที่มีคาร์บอนเป็นส่วนผสมหลัก และธาตุอื่นๆ ที่มีอยู่น้อย ไม่เจาะจงในการผสมลงไป แต่อาจจะติคมาจากกรรมวิธีทางกลึงหรือกรรมวิธีการไล่แก๊ส เหล็กกล้าคาร์บอนแบ่งออกได้เป็น 3 ประเภท ตามปริมาณของธาตุคาร์บอนที่ผสม คือ

2.7.1.1 เหล็กคาร์บอนต่ำ (Low Carbon Steel)

มีคาร์บอนน้อยไม่เกิน 0.2 เปอร์เซ็นต์ เป็นเหล็กที่อ่อนมีความแข็งแรงต่ำ สามารถรีดหรือตีเป็นแผ่นได้ง่าย ที่ทำเป็นเหล็กเส้นใช้ในงานก่อสร้าง หรือรีดเป็นแผ่นใช้ในงานวิศวกรรมทั่วไป บางทีเรียกเหล็กชนิดนี้ว่าเหล็กละมุน (Mild Steel)

2.7.1.2 เหล็กกล้าคาร์บอนปานกลาง (Medium Carbon Steel)

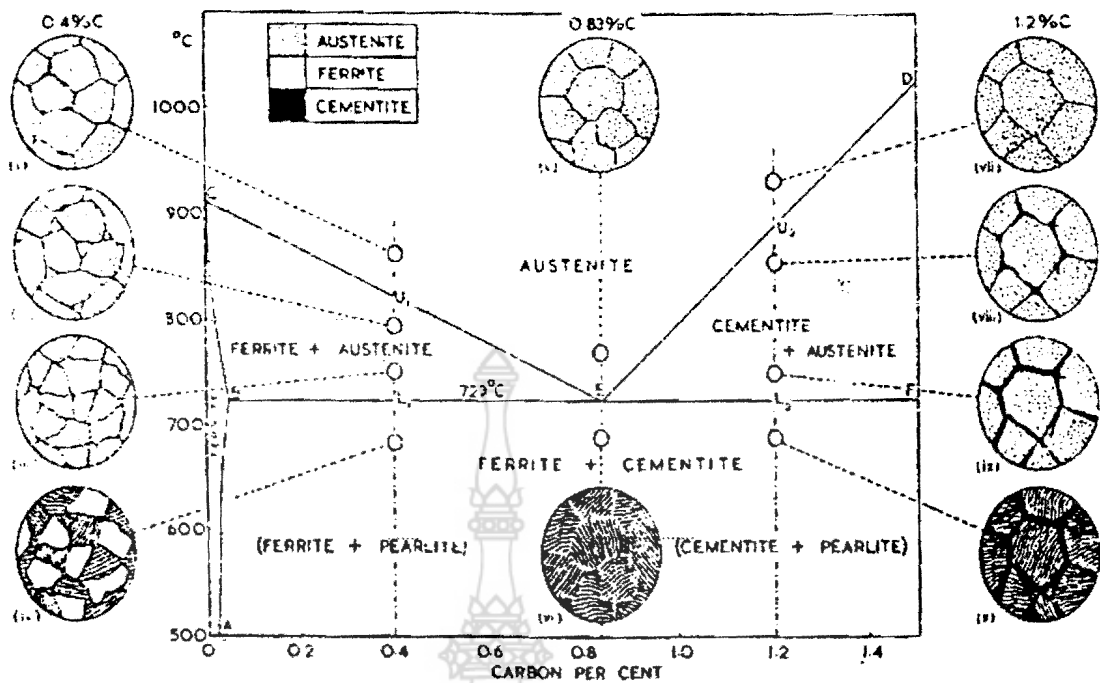
มีคาร์บอนตั้งแต่ 0.2 - 0.5 เปอร์เซ็นต์ เป็นเหล็กที่มีความแข็งแรงสูงกว่าประเภทแรก ใช้ทำชิ้นงานของเครื่องจักรกลต่างๆ ไป สามารถทำการอบชุบได้

2.7.1.3 เหล็กกล้าคาร์บอนสูง (High Carbon Steel)

มีคาร์บอนตั้งแต่ 5 เปอร์เซ็นต์ขึ้นไป จัดเป็นเหล็กที่มีความแข็งแรงและความแข็งสูง สามารถทำการอบชุบให้มีสมบัติเปลี่ยนแปลงได้ ใช้ทำเครื่องมือ เครื่องใช้ต่างๆ ที่ต้องการความต้านทานต่อการสึกหรอ ได้เป็นอย่างดี

2.7.2 สมบัติของเหล็กกล้าคาร์บอน

จากที่ทราบว่า ธาตุคาร์บอนเป็นธาตุที่อยู่ได้ในเหล็กกล้าสองลักษณะคือ ในสภาวะสารละลายของแข็ง (Solid Solution) และธาตุคาร์บอนอีกส่วนหนึ่งที่เกินจากปริมาณที่จะละลายได้ จะรวมกับเหล็กเป็นสารประกอบอินเทอร์เมทัลลิกหรือซีเมน ไตต์ ซึ่งจะมึบทบาทที่สำคัญในการทำให้เหล็กกล้าคาร์บอนมีความแข็งแรงและความแข็งเพิ่มมากขึ้นตามปริมาณของซีเมน ไตต์ นอกจากคาร์บอนจะเป็นธาตุที่มีบทบาทเปลี่ยนแปลงสมบัติเชิงกลของเหล็กกล้าคาร์บอนแล้ว การอบชุบเหล็กกล้ามีส่วนสำคัญอีกประการหนึ่งที่เปลี่ยนแปลง โครงสร้างของเหล็ก อาจจะทำให้เหล็กมีความแข็งหรือมีความเหนียวได้สูงขึ้นอยู่กับการอบชุบ และลักษณะของ โครงสร้างสุดท้ายที่ได้รับ ดังนั้นในการกำหนดสมบัติเชิงกลของเหล็กกล้าคาร์บอนจะต้องกำหนดธาตุคาร์บอนและลักษณะการอบชุบความร้อนประกอบด้วย เพราะถ้ากำหนดอย่างเดียวอย่างใดอย่างหนึ่งจะเป็นการยากที่จะทราบสมบัติเชิงกลได้แน่นอน ในทางวิชาการยังต้องกำหนดลักษณะ โครงสร้างและรายละเอียดของขนาดเม็ดเกรนอีกด้วยเพื่อความแน่นอน สำหรับทางด้านปฏิบัตินิยมกำหนดส่วนผสมและการอบชุบ ในที่นี้จะขอนำลักษณะของเหล็กที่ผ่านการทำนอร์มัลไลซ์ที่ปริมาณคาร์บอนต่างๆ เพื่อให้เห็นลักษณะ โครงสร้างของเหล็กกล้าคาร์บอนไฮโปยูเทคตอยด์ (0.4 % C) และเหล็กกล้าคาร์บอนไฮเปอร์ยูเทคตอยด์ (1.2 % C) ดังภาพแสดง และจากการทดสอบสมบัติเชิงกล (การทดสอบแรงดึงและความแข็ง) ดังภาพที่ 2.86



ภาพที่ 2.86 Part of the Iron-Carbon Thermal-Equilibrium Diagram

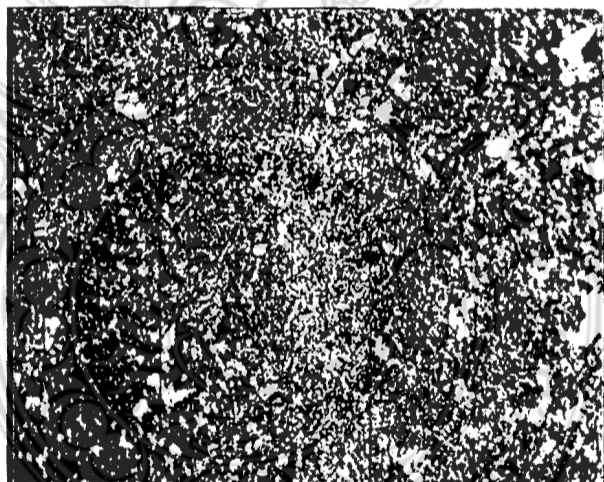
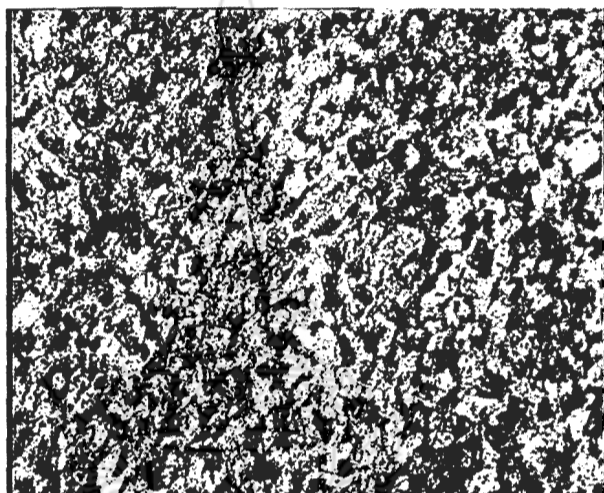
จากภาพจะเห็นว่าค่าความเค้นแรงดึง (Tensile Strength) จะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณคาร์บอนสูงขึ้น จนถึงประมาณ 0.8 เปอร์เซ็นต์ C ซึ่งโครงสร้างจะเป็นเฟิร์ดไลท์ และเมื่อคาร์บอนเพิ่มขึ้นจะปรากฏว่าความเค้นแรงดึงจะกลับลดลงซึ่งจะเห็นได้ว่าเหล็กเมื่อมีคาร์บอนสูงเกินกว่า 0.8 เปอร์เซ็นต์ จะปรากฏซิเมนต์ ไคต์ประเภท Secondary เกิดตามขอบเกรนและมีลักษณะต่อเนื่อง ทำให้เหล็กกล้าคาร์บอนไม่สามารถรับแรงดึง ได้สูงขึ้น ที่เป็นเช่นนี้เพราะซิเมนต์ ไคต์ที่แข็งและเปราะไปห่อหุ้มเนื้อเหล็กที่เป็นเฟิร์ดไลท์ ทำให้เฟิร์ดไลท์ไม่มีโอกาสรับแรง ได้เต็มที่ ซิเมนต์ ไคต์จะแตกหรือขาดเสียก่อน ทำให้ค่าความเค้นแรงดึงได้สูงขึ้น ที่เป็นเช่นนี้เพราะซิเมนต์ ไคต์ที่แข็งและเปราะไปห่อหุ้มเนื้อเหล็กที่เป็นเฟิร์ดไลท์ ทำให้เฟิร์ดไลท์ไม่มีโอกาสรับแรง ได้เต็มที่ ซิเมนต์ ไคต์จะแตกหรือขาดเสียก่อน ทำให้ค่าความเค้นแรงดึงของเหล็กกล้าคาร์บอนลดลง

สำหรับความแข็งปรากฏว่ายังมีคาร์บอนมาก ปริมาณซิเมนต์ ไคต์จะมากตาม ทำให้เหล็กกล้าคาร์บอนมีความแข็งเพิ่มขึ้นตามปริมาณของคาร์บอน ส่วนความเหนียวของเหล็กจะลดลง

เมื่อมีคาร์บอนเพิ่มขึ้น และจะเข้าไปใกล้ค่าอัตราการยืดตัว (% Elongation) เป็นศูนย์เมื่อเหล็กมีปริมาณคาร์บอนมากกว่า 0.8 เปอร์เซ็นต์

2.7.3 เฟอร์ไรต์และเพอร์ไลต์ (Pearlite and Ferrite)

เนื้อสีขาวๆ คือ Ferrite และส่วนที่เห็นสีดำและเทาๆ นั้น คือ Pearlite มีส่วนประกอบทางเคมี โคบอลต์ (Co) 46 เปอร์เซ็นต์, ซิลิกอน (Si) 0.24 เปอร์เซ็นต์, แมงกานีส (Mn) 0.69 เปอร์เซ็นต์, โบโลเนียม (Po) 0.20 เปอร์เซ็นต์, กำมะถัน (S) 0.022 เปอร์เซ็นต์



ภาพที่ 2.87 โครงสร้างเหล็กกล้าคาร์บอนปานกลาง (S45C)

ตารางที่ 2.20 แสดงเหล็กกล้าคาร์บอนปานกลาง (Medium Carbon Steel)

เดือนแรก	JIS	DIN	AISI	ASSAB	BOHLER	HITACHI	NIPPON KOSHUHA
Equivalent	S45C	CK45	C1045	-	-	S45C	S45C
ส่วนผสม (%)	C	Si	Mn	Ni	Cr	Mo	V
Composition	0.42 - 0.48	0.15 - 0.35	0.60 - 0.90	-	-	-	-
การอบชุบ (°C)	เผาขึ้นรูป (Forging)	อบอ่อน (Annealing)	ชุบแข็ง (Hardening)	อบคืนไฟ (Tempering)			
Heat treatment	1,100 - 850	810	820 - 870 (Water cooling)	550 - 650			
สมบัติเชิงกล	ความแข็งแรงการยืดตัว (Yield Strength, kgf/mm ²)	ความแข็งแรงดึงสูงสุด (Tensile Strength, kgf/mm ²)	การยืดตัวก่อนฉีก (Elongation, %)	การลดขนาดก่อนฉีก (Reduction Of Area, %)	ความทนแรงกระแทกสูงสุด (Impact Energy, kgf/m/cm ²)		
Mechanical prop.							
กึ่งชุบ	35 min.	58 min.	20 min.	-	-		
ค้ำชุบ	50 min.	70 min.	17 min.	45 min.	8 min.		
ความแข็ง	ทดสอบการอบชุบ		ทดสอบการอบชุบ				
Hardness	167 - 229 HB (4.4 - 20.5 HRC)		201 - 269 HB (13.8 - 27.6 HRC)				
คุณสมบัติพิเศษ: การใช้งาน	เหล็กกล้าจะเปราะบาง ชุบแข็งได้ยาก ตามตารางเลือกสปีดดี มีความแข็งแรงสูง เหมาะสำหรับการรับน้ำหนักสูง						
	จริงใจโรงงานของเรามีชื่อเสียง: งานดี ๆ ไป						

Pearlite เป็นบริเวณสีดำอยู่ข้างๆ เฟอร์ไรต์สีขาว ปริมาณ Pearlite ที่เกิดขึ้นจะเป็นตัวกำหนดคุณภาพทางกลต่างๆ เช่น ถ้าปริมาณมาก ชิ้นงานจะมีความแข็ง การทนแรงดึงสูงขึ้น การทนแรงกระแทกและการยึดตัวของชิ้นงานจะลดน้อยลง

เหล็กยูเทคตอยด์จะมีคาร์บอน 0.8 เปอร์เซ็นต์ จะมีโครงสร้างเป็นชั้นๆ ของเฟอร์ไรต์และซีเมนไตต์อยู่สลับกัน ด้วยกรดได้ง่ายจะเห็นสีเทาเข้ม

ส่วนเหล็กไฮโป - ยูเทคตอยด์จะมีคาร์บอนน้อยกว่า 0.8 เปอร์เซ็นต์ ถ้าปล่อยให้เย็นตัวจากสภาวะออสเทนไนต์อย่างช้าๆ เฟอร์ไรต์จะแยกตัวออก ณ อุณหภูมิหนึ่งคือ อุณหภูมิตามแนวเส้นการเปลี่ยนแปลง A3 ส่วนออสเทนไนต์ที่ตกค้างจะเปลี่ยนแปลงเป็นเฟิร์ลไลท์ที่เส้น A1 ดังภาพ แต่ถ้าเหล็กชนิดเดียวกันนี้ทำให้เกิดการเย็นตัวอย่างรวดเร็ว เส้น A3 จะต่ำลง เราจะเห็นโครงสร้าง Normalizing ซึ่งจะมีปริมาณเฟอร์ไรต์น้อยกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับ โครงสร้างที่เย็นตัวช้า

เหล็ก ไฮโป-ยูเทคตอยด์ที่มีคาร์บอนมากกว่า 0.25 เปอร์เซ็นต์ จัดเป็นเหล็กที่มีคาร์บอนปานกลาง สามารถเพิ่มสมบัติทางกลได้ โดยกรรมวิธีอบชุบด้วยความร้อน แต่กรณีที่ชิ้นงานมี

พื้นที่หน้าตัดใหญ่ จะมีผลกระทบเนื่องจากปริมาตรเข้ามาเกี่ยวข้อง ทำให้ไม่สามารถเพิ่มสมบัติทางกลได้มากกว่าเหล็กกล้าอัลลอยด์

2.8 การทดสอบ

2.8.1 การทดสอบความแข็ง (Hardness test)

ความแข็ง คือ ความต้านทานต่อแรงกด การขีดสีและการกลึงของวัสดุ ดังนั้นการทดสอบความแข็งจึงสามารถทำได้หลายวิธี แต่ในเชิงโลหะวิทยา การวัดความแข็งจะเป็นการทดสอบความสามารถของโลหะในการต้านทานต่อการแปรสภาพาร เมื่อถูกแรงกดจากหัวกดกระทำลงบนชิ้นงานทดสอบ โดยมีวิธีในการทดสอบที่นิยมใช้งานดังนี้

2.8.1.1 Brinell Hardness Test (H_B)

เป็นการวัดความแข็ง โดยอาศัยแรงกดลงที่กระทำกับลูกบอลเหล็กกล้าชุบแข็งลงบนผิวชิ้นงานทดสอบค่าความแข็งจะคำนวณจากแรงกดที่กระทำต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ผิว โดยพื้นที่ผิวมีลักษณะเป็นผิวโค้ง ดังนั้นสามารถคำนวณค่าความแข็งได้ตามสูตร ดังนี้

$$H_B = \frac{P}{\pi \frac{D}{2} (D - \sqrt{D^2 - d^2})} \quad (2.42)$$

โดยที่ H_B = คือค่าความแข็งแบบ Brinell (kgf/mm^2)

P = คือ แรงกด (kgf)

D = เส้นผ่านศูนย์กลางของลูกบอลเหล็กกล้า (mm.)

d = เส้นผ่านศูนย์กลางของรอยกด (mm.)



ภาพที่ 2.88 การทดสอบแบบ Brinell

แรงกดสำหรับการทดสอบจะอยู่ในช่วง 500-3000 kgf และลูกบอลเหล็กกล้าจะมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 1.0-10 มม. โดยใช้ระยะเวลาในการกดประมาณ 10-15 วินาที สำหรับเหล็กหรือเหล็กกล้า และ 30 วินาที สำหรับโลหะนุ่ม (เช่น ตะกั่ว ดีบุก เป็นต้น) อย่างไรก็ตาม เนื่องจากโลหะมีความแข็งที่แตกต่างกัน หากโลหะที่ทดสอบนุ่มและใช้แรงกดมาก จะมีผลทำให้ระยะที่หัวกดจมลงไปลึกมาก จนอาจเกินกว่าครึ่งลูก ซึ่งจะมีผลต่อการคำนวณค่าความแข็งผิดพลาดได้ หรือหากเลือกแรงกดน้อยไปเอเทียบกับขนาดของลูกบอลเหล็กกล้าก็จะทำให้การแปลผลทำได้ไม่แม่นยำเช่นกัน ดังนั้นการเลือกใช้แรงกด และขนาดลูกบอลจะแตกต่างกันไปด้วย เพื่อป้องกันข้อบกพร่องที่จะพบได้ในการทดสอบด้วยวิธีนี้เราสามารถได้จากอัตราส่วน P/D^2 ดังต่อไปนี้

ตารางที่ 2.21 อัตราส่วน P/D^2 ตามชนิดของโลหะ

โลหะ	ค่าความแข็งโดยประมาณ (HB)	อัตราส่วน P/D^2
เหล็กกล้าและเหล็กหล่อ	มากกว่า 100	30
ทองแดง . ทองแดงผสม . อะลูมิเนียมผสม	30-210	10
อะลูมิเนียม	15-100	5
ดีบุก . ดีบุกผสม . ตะกั่ว . ตะกั่ว ผสม	3-20	1

ภาพที่ 2.88 ลักษณะการทดสอบแบบ Brinell ที่ไม่ถูกต้อง

สำหรับการทดสอบเหล็กกล้าชุบแข็ง หรือ โลหะที่มีความแข็งสูงมากๆ จะไม่สามารถทดสอบด้วยลูกบอลเหล็กกล้าชุบแข็งได้จะต้องไม่ใช่ลูกบอลทั้งสแตนคาร์ไบด์ขนาด 2.45 มม. แทนซึ่งจะใช้สำหรับทดสอบวัสดุที่แข็งตั้งแต่ 444 ถึง 624 H_B

ข้อควรระวังสำหรับการวัดความแข็งด้วยวิธีนี้

ก) ผิวของชิ้นงานทดสอบต้องเรียบ เพื่อให้ได้ค่าเส้นผ่านศูนย์กลางของรอยกดที่แน่นอน และที่ผิวของชิ้นงานทดสอบต้องไม่มี oxide scale หรือสิ่งแปลกปลอม นอกจากนี้การเตรียมผิวต้องระมัดระวังอย่างมาก โดยหลีกเลี่ยงกรรมวิธีร้อน (heating) และกรรมวิธีเย็น (Cold Working)

ข) ต้องระวังตำแหน่งการทดสอบโดยให้ระยะหัวกดอยู่ห่างจากขอบแต่ละด้านของชิ้นงานอย่างน้อย 3 เท่า ของเส้นผ่านศูนย์กลางของลูกบอล ระยะห่างของแต่ละรอยกดห่างกันอย่างน้อย 3 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางของลูกบอล และชิ้นงานต้องมีความหนาอย่างน้อย 8 เท่าของความลึกของการกด

ค) ควรวัดเส้นผ่านศูนย์กลางรอยกด 2 ครั้งในแนวตั้งฉากกัน แล้วหาค่าเฉลี่ยเพื่อนำไปคำนวณหาความแข็งต่อไป

การวัดความแข็งแบบ Brinell มีข้อดี คือ ในการกด 1 ครั้งจะต้องครอบคลุมหลายๆ เฟสของชิ้นงานทำให้ได้ค่าความแข็งที่สม่ำเสมอ ซึ่งหากวัดด้วยวิธีที่ใช้หัวกดขนาดเล็กมาก อาจทำให้วัดได้เพียงเฟสเดียว ทำให้ค่าความแข็งที่ได้ ไม่ได้เป็นค่าที่แสดงถึงความแข็งของทั้งวัสดุ นั่นแต่ข้อจำกัดของวิธีนี้ คือ ชิ้นงานต้องมีขนาดใหญ่เพียงพอที่จะวัดกับหัวกดได้ และไม่ควรวัดกับชิ้นงานที่มีรัศมีผิวโค้งน้อยกว่า 1 นิ้ว

2.8.1.2 Vickers Hardness Test เป็นการวัดความแข็งโดยใช้หัวกดเพชรมีลักษณะเป็นปิรามิดฐานสี่เหลี่ยม ที่ปลายหัวกดทำมุม 136° (เป็นมุมที่องศาใกล้เคียงกับหัวกดกลมมากที่สุด) เป็นเวลา 10-15 วินาที ค่าความแข็งจะคำนวณจากแรงกดที่กระทำต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ผิว เช่นเดียวกับการทดสอบแบบ Brinell แต่วิธีนี้หัวกดเป็นเพชรซึ่งมีความแข็งสูงมากๆ ดังนั้นในการใช้จึงสามารถวัดค่าความแข็งได้ตั้งแต่โลหะที่นิ่มมาก (HV ประมาณ 5) จนถึงโลหะที่แข็งมากๆ (VHN ประมาณ 1500) โดยไม่ต้องเปลี่ยนหัวกด จะเปลี่ยนก็เฉพาะแรงกดเท่านั้น โดยมีตั้งแต่ 1-20 kgf. ขึ้นอยู่กับความแข็งของโลหะที่ทดสอบ ซึ่งทำให้วิธีนี้มีข้อได้เปรียบกว่า Brinell คือ ไม่ต้อง

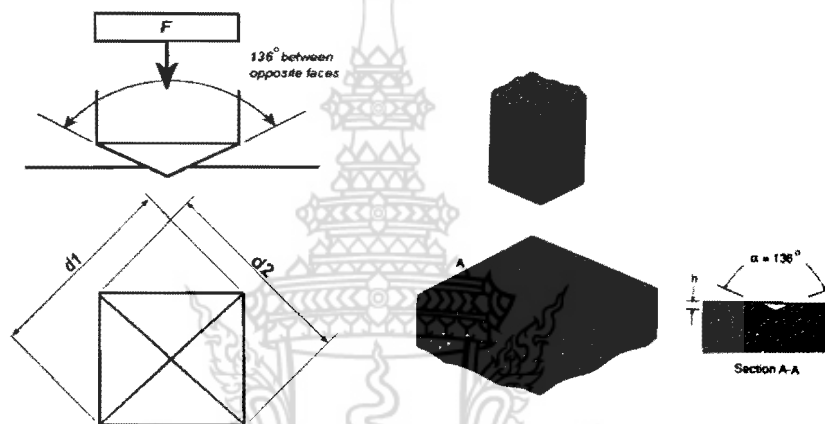
ค่านึงอัตราส่วน P/D^2 และข้อจำกัดในด้านความหนาของชิ้นงานทดสอบเนื่องจากหัวกดเพชรมีขนาดเล็กมาก

$$HV = \frac{1.854P}{d^2} \quad (2.42)$$

โดยที่ HV คือ ค่าความแข็งแบบ Vicker (kgf/mm^2)

P คือ แรงกด (kgf)

d คือ ขนาดเส้นทแยงมุม d_1 และ d_2 เฉลี่ย (mm)



ภาพที่ 2.89 ลักษณะรอยกดจากหัวเพชรของ Vickers Hardness Test

ข้อควรระวังสำหรับการวัดความแข็งด้วยวิธีนี้ได้แก่

ก) การเลือกใช้น้ำหนักกดมีผลต่อความแข็งด้วย คือ ถ้าเลือกน้ำหนักน้อยเกินไป จะได้ค่าความแข็งที่ผิด แต่ถ้าชิ้นงานนิ่มและใช้น้ำหนักกดมากเกินไป อาจทำให้เกิดปัญหา กับหัวกดเพชรจนคล้ายหัวกด ได้

ข) ผิวของชิ้นงานทดสอบต้องไม่มี Oxide scale หรือสิ่งแปลกปลอม การเตรียมผิวของชิ้นทดสอบต้องใช้ความระมัดระวังอย่างมาก และหลีกเลี่ยงกรรมวิธีร้อน (Heating) หรือกรรมวิธีเย็น (Cold working)

ค) ความหนาของชั้นงานทดสอบควรมากกว่าอย่างน้อย 1.5 เท่าของเส้นทแยงมุมของรอยกด และหลังจากการทดสอบวัดความแข็งไม่ควรมีการเปลี่ยนแปลงใดๆ ให้เห็นทางด้านหลัง (อีกด้านหนึ่ง) ของชั้นงานทดสอบ

ง) การอ่านค่าความยาวเส้นทแยงมุม จะขึ้นกับสายตาของแต่ละคน ดังนั้นควรให้คนใดคนหนึ่งเป็นผู้อ่านค่า

วิธีทดสอบนี้ไม่เป็นที่นิยมในการใช้งานสำหรับภาคอุตสาหกรรม เนื่องจากข้อจำกัดที่ทดสอบได้ช้า ต้องมีเตรียมผิวที่ดี เพื่อให้ได้ค่าเส้นทแยงมุมของรอยกดที่แน่นอน และมีโอกาสผิดพลาดในการวัดระยะเส้นผ่าศูนย์กลางได้

2.8.1.3 Rockwell Hardness Test เป็นวิธีวัดความแข็งของโลหะที่นิยมใช้มากที่สุด โดยจะวัดจากความแข็งจากความลึกกระยะกดที่ถูกหัวกดกดด้วยแรงคงที่ ซึ่งจะแตกต่างจากแบบ Brinell และ Vicker ที่วัดจากแรงกดต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ ดังนั้นวิธีนี้จึงมีการวัดด้วยกันหลายสเกล เพื่อให้สามารถเลือกใช้วัดความแข็งได้เหมาะสมที่สุด แรงที่ใช้กดมี 2 ส่วน คือ Minor load และ major load Minor load เป็นแรงยึดหัวกดลูกบอลเหล็กชุบแข็ง หรือหัวกดเพชรไว้บนผิวโลหะที่จะวัดความแข็ง Major load เป็นแรงที่มากกว่า minor load และกดลงภายหลังจากให้ minor load กับชิ้นงาน สำหรับมาตรฐานความแข็งแบบ Rockwell มีอยู่ 15 สเกล (ไม่รวม Superficial hardness scale) ดังแสดงในตารางที่ 2.22

ตารางที่ 2.22 การวัดความแข็งแบบ Rockwell สเกลต่างๆ

สเกล	ประเภทหัวกด	Major load kgf.	การใช้งานทั่วไป
A	หัวกดเพชร (two scales-carbide and steel)	60	ซีเมนต์คาร์ไบด์, เหล็กกล้าที่มีขนาดบาง และเหล็กกล้าชุบแข็งผิวไม่ลึก (shallow case -hardening steel)

ตารางที่ 2.22 การวัดความแข็งแบบ Rockwell สเกลต่างๆ (ต่อ)

สเกล	ประเภทหัวกด	Major load kgf.	การใช้งานทั่วไป
B	ลูกบอลเหล็กกล้าชุบแข็ง 1/16 นิ้ว (1.588 มม.)	100	โลหะผสมของทองแดง (Copper alloys) เหล็กกล้าที่ไม่แข็งมาก (Soft Steels) โลหะผสมของอะลูมิเนียม (aluminum alloys) และเหล็กหล่ออบเหนียว (malleable Iron)
C	หัวกดเพชร	150	เหล็กกล้า, เหล็กหล่อที่มีความแข็งสูง (Hard Cast irons) เหล็กหล่ออบเหนียว ชนิดเพอร์ริติก, ไทเทเนียม, เหล็กกล้าชุบแข็งที่ผิวลึก และวัสดุอื่นๆ ที่มีความแข็งมากกว่า 100 HRB
D	หัวกดเพชร	100	เหล็กกล้าที่มีขนาดบาง และเหล็กกล้าชุบแข็งที่ผิว และเหล็กหล่ออบเหนียว ชนิดเพอร์ริติก
E	ลูกบอลเหล็กกล้าชุบแข็ง 1/8 นิ้ว (3.175 มม.)	100	เหล็กหล่อ, โลหะผสมของอะลูมิเนียม โลหะผสมของแมกนีเซียม และโลหะสำหรับผลิตแบร็ง
F	ลูกบอลเหล็กกล้าชุบแข็ง 1/16 นิ้ว (1.588 มม.)	60	โลหะผสมของทองแดงที่ผ่านการอบอ่อน และโลหะแผ่นบางที่ไม่แข็ง

ตารางที่ 2.22 การวัดความแข็งแบบ Rockwell สเกลต่างๆ (ต่อ)

สเกล	ประเภทหัวกด	Major load kgf.	การใช้งานทั่วไป
G	ลูกบอลเหล็กกล้าชุบแข็ง 1/16 นิ้ว (1.588 มม.)	150	บรอนซ์ผสมฟอสฟอรัส (Phosphor bronze) โลหะผสมทองแดง-เบริลเลียม (beryllium copper) เหล็กหล่ออบเหนียว , โดยความแข็งสูงสุดที่วัดได้จะต้องไม่เกิน 92 HRG เพื่อป้องกันหัวกดเสียหาย
H	ลูกบอลเหล็กกล้าชุบแข็ง 1/8 นิ้ว (3.175 มม.)	60	อลูมิเนียม , สังกะสี และตะกั่ว
K	ลูกบอลเหล็กกล้าชุบแข็ง 1/8 นิ้ว (3.175 มม.)	150	โลหะสำหรับผลิตเบร็ง และวัสดุอื่นๆ ที่บางและนิ่ม โดยเลือกใช้ลูกบอลเหล็กกล้าชุบแข็ง
L	ลูกบอลเหล็กกล้าชุบแข็ง 1/4 นิ้ว (6.350 มม.)	60	โลหะสำหรับผลิตเบร็ง และวัสดุอื่นๆ ที่บางและนิ่ม โดยเลือกใช้ลูกบอลเหล็กกล้าชุบแข็งขนาดเล็กและใช้แรงกดสูงเพื่อป้องกันผลของ anvil effect
M	ลูกบอลเหล็กกล้าชุบแข็ง 1/4 นิ้ว (6.350 มม.)	100	โลหะสำหรับผลิตเบร็ง และวัสดุอื่นๆ ที่บางและนิ่ม โดยใช้ลูกบอลเหล็กกล้าชุบแข็งขนาดเล็ก และใช้แรงกดสูงเพื่อป้องกันผลของ anvil effect
P	ลูกบอลเหล็กกล้าชุบแข็ง 1/4 นิ้ว (6.350 มม.)	150	โลหะสำหรับผลิตเบร็ง และวัสดุอื่นๆ ที่บางและนิ่ม โดยเลือกใช้ลูกบอลเหล็กกล้าชุบแข็งขนาดเล็ก และแรงกดสูงเพื่อป้องกันผลของ anvil effect

ตารางที่ 2.22 การวัดความแข็งแบบ Rockwell สเกลต่างๆ (ต่อ)

สเกล	ประเภทหัวกด	Major load kgf.	การใช้งานทั่วไป
R	ลูกบอลเหล็กกล้าชุบแข็ง 1/2 นิ้ว (12.70)	60	โลหะสำหรับผลิตเบร็ง และวัสดุอื่นๆ ที่บางและนิ่ม โดยเลือกใช้ลูกบอลเหล็กกล้าชุบแข็งขนาดเล็กและใช้แรงกดสูงเพื่อป้องกันผลของ anvil effect
5	ลูกบอลเหล็กกล้าชุบแข็ง 1/2 นิ้ว (12.70 มม.)	100	โลหะสำหรับผลิตเบร็ง และวัสดุอื่นๆ ที่บาง และนิ่ม โดยเลือกใช้ลูกบอลเหล็กกล้าชุบแข็งขนาดเล็ก และใช้แรงกดสูงเพื่อป้องกันของ anvil effect
v	ลูกบอลเหล็กกล้าชุบแข็ง 1/2 นิ้ว (12.70 มม.)	150	โลหะสำหรับผลิตเบร็ง และวัสดุอื่นๆ ที่บางและนิ่ม โดยเลือกใช้ลูกบอลเหล็กกล้าชุบแข็งขนาดเล็ก และใช้แรงกดสูงเพื่อป้องกันผลของ anvil effect

ค่าความแข็งจะแสดงเป็น 2 ส่วน คือ ตัวเลขค่าความแข็งที่วัดได้ และ สัญลักษณ์ของสเกลที่ใช้วัด (แสดงถึงลักษณะหัวกดที่ใช้วัดค่า และ major load) ตัวอย่างเช่น 64.0 HRC หมายความว่า ตัวเลขความแข็งที่อ่านได้เท่ากับ 64.0 ด้วยการวัดแบบ Rockwell สเกล C ที่ใช้หัวกดเพชร และมีค่า major load เท่ากับ 100 kgf

ส่วนใหญ่การทดสอบเหล็กกล้า และวัสดุอื่นๆ จะใช้เป็น Rockwell สเกล C และ B อย่างไรก็ตาม เนื่องจากการไม่มีการกำหนดสเกลที่ชัดเจนดังนั้นจึงควรพิจารณาถึงปัจจัยอื่นๆ ด้วย เพื่อให้เลือกใช้สเกลได้เหมาะสมที่สุด ซึ่งปัจจัยต่างๆ ที่ต้องคำนึงได้แก่

ก) ชนิดของวัสดุ โดยทั่วไปผลการทดสอบที่ดีที่สุด ได้จากการใช้การใส่แรงกดสูงที่สุดเท่าที่ชิ้นงานทดสอบจะสามารถรับได้ และจากตารางที่ 1 จะบอกได้ว่าวัสดุที่ทดสอบควร

ใช้สเกลแบบไบน เช่น วัสดุแข็ง เช่น เหล็กกล้า หรือทังสเตนคาร์ไบด์ จะต้องใช้สเกล A.C.D เท่านั้น

ข) ความหนาของชิ้นงานทดสอบ ควรมากกว่าความลึกของรอยกดอย่างน้อย 10 เท่า เพื่อให้ได้ค่าความแข็งที่ถูกต้อง ซึ่งการวัดความลึกรอยกด แบ่งได้ 2 ส่วน ดังนี้

ค) ความลึกรอยกด = $(100 - \text{ค่าความแข็งที่วัดได้}) \times 0.002$ สำหรับหัวกดเพชร

ง) ความลึกรอยกด = $(130 - \text{ค่าความแข็งที่วัดได้}) \times 0.002$ สำหรับหัวกดบอล นอกจากนี้ภายหลังการทดสอบจะต้องไม่มีรอยขนุนเกิดขึ้นทางด้านหลังของชิ้นงานทดสอบด้วย

จ) ภาพร่างของชิ้นงานทดสอบ ตำแหน่งในการวัด

ฉ) ชิ้นงานภาพทรงยาว จะต้องติดตั้งแท่นรองรับเพื่อให้มั่นใจได้ว่า ผิวทดสอบที่ทำการวัดความแข็งตั้งฉากกับแนวกดของหัวกด

ช) ชิ้นงานทรงกระบอกการวัดค่าความแข็งให้ถูกต้องจะต้องใช้ค่า Correction factor ช่วยปรับค่าความแข็งที่อ่านได้ เนื่องจากในการวัดความแข็งของผิวขนุน (Convex) หัวกดจะกดลงไปลึกมากกว่าปกติ ดังนั้นค่าที่อ่านได้จะน้อยกว่าความเป็นจริง ดังนั้น Correction factor จะถูกบวกเข้าไปเมื่อวัดความแข็งกับผิวชิ้นงานทรงกระบอก นอกจากนี้ในการวัดความแข็งชิ้นงานทรงกระบอกจะต้องใช้แท่นตัววี (V anvil) เพื่อช่วยรองรับชิ้นงานทดสอบให้อยู่นิ่งกับที่

ตารางที่ 2.23 ค่า Correction factors สำหรับการวัดความแข็งชิ้นงานทรงกระบอก

Correction factors สำหรับชิ้นงานทดสอบที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ							
ค่าความ แข็งที่ อ่านได้	6.350	9.525	12.700	15.875	19.050	22.225	25.400
	มม. (0.250 นิ้ว)	มม. (0.375 นิ้ว)	มม. (0.500 นิ้ว)	มม. (0.625 นิ้ว)	มม. (0.750 นิ้ว)	มม. (0.875 นิ้ว)	มม. (1,000 นิ้ว)
0	*	*	*	*	4.5	3.5	3.0

ตารางที่ 2.23 ค่า Correction factors สำหรับการวัดความแข็งชิ้นงานทรงกระบอก (ต่อ)

Correction factors สำหรับชิ้นงานทดสอบที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ							
ค่าความ แข็งที่ อ่านได้	6.350 มม. (0.250 นิ้ว)	9.525 มม. (0.375 นิ้ว)	12.700 มม. (0.500 นิ้ว)	15.875 มม. (0.625 นิ้ว)	19.050 มม. (0.750 นิ้ว)	22.225 มม. (0.875 นิ้ว)	25.400 มม. (1,000 นิ้ว)
10	*	*	*	5.0	4.0	3.5	3.0
20	*	*	*	4.5	4.0	3.5	3.0
30	*	*	5.0	4.5	3.5	3.0	2.5
40	*	*	4.5	4.0	3.0	2.5	2.5
50	*	*	4.0	3.5	3.	2.5	2.0
60	*	5.0	3.5	3.0	2.5	2.0	2.0
70	*	4.0	3.0	2.5	2.0	2.0	1.5
80	5.0	3.5	2.5	2.0	1.5	1.5	1.5
90	4.0	3.0	3.0	1.5	1.5	1.5	1.0
100	3.5	2.5	1.5	1.5	1.0	1.0	0.5
การทดสอบความแข็งด้วยหัวกดเพชร (Rockwell สเกล C,D และ A)							
20	*	*	*	2.5	2.0	1.5	1.5
30	*	*	2.5	2.0	1.5	1.5	1.0
40	*	2.5	2.0	1.5	1.0	1.0	1.0
50	2.5	2.0	1.5	1.0	1.0	0.5	0.5
60	1.5	1.0	1.0	0.5	0.5	0.5	0.5
70	1.0	1.0	0.5	0.5	0.5	-	-

ตารางที่ 2.23 ค่า Correction factors สำหรับการวัดความแข็งขึ้นงานทรงกระบอก (ต่อ)

Correction factors สำหรับชิ้นงานทดสอบที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ							
ค่าความ แข็งที่ อ่านได้	6.350	9.525	12.700	15.875	19.050	22.225	25.400
	มม.	มม.	มม.	มม.	มม.	มม.	มม.
	(0.250 นิ้ว)	(0.375 นิ้ว)	(0.500 นิ้ว)	(0.625 นิ้ว)	(0.750 นิ้ว)	(0.875 นิ้ว)	(1.000 นิ้ว)
การทดสอบความแข็งด้วยหัวกดเพชร (Rockwell สเกล C,D และ A)							
80	0.5	0.5	0.5	-	-	-	-

* หมายเหตุ : เป็น correction factor ที่เกิน 5.0 (สำหรับ Rockwell สเกล B,F และ G) และ 3.0 (สำหรับ Rockwell สเกล C,D และ A) ซึ่งไม่เป็นที่ยอมรับจึงไม่รวมอยู่ในตาราง

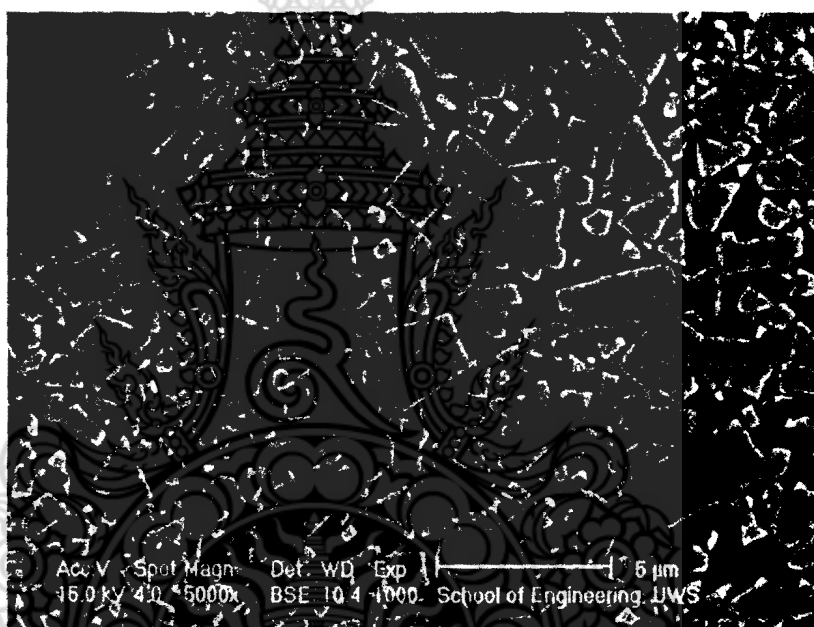
การวัดความแข็งผิวด้านใน (เช่น ด้านในของวงแหวน) ส่วนใหญ่จะใช้หัวกดแบบ gooseneck adapter - ระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางของรอยกดกับขอบชิ้นงานทดสอบควรมากกว่า 2.5 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางรอยกด และไม่ควรวัดความแข็งในบริเวณที่ใกล้กับตำแหน่งเดิม โดยควรเว้นระยะห่างไว้ไม่น้อยกว่า 4 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางรอยกด

2.8.2 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด(Scanning Electron Microscope; SEM)

การสร้างภาพทำได้โดยการตรวจวัดอิเล็กตรอนที่สะท้อนจากพื้นผิวหน้าของตัวอย่างที่ทำการศึกษา ซึ่งภาพที่ได้จากเครื่อง SEM นี้จะเป็นภาพลักษณะของ 3 มิติ ดังนั้นเครื่อง SEM จึงถูกนำมาใช้ในการศึกษาสัณฐานและรายละเอียดของลักษณะพื้นผิวของตัวอย่าง เช่น ลักษณะพื้นผิวด้านนอกของเนื้อเยื่อและเซลล์หน้าตัดของโลหะและวัสดุ เป็นต้น

ข้อดีของเครื่อง SEM เมื่อเปรียบเทียบกับเครื่อง TEM คือ ภาพโครงสร้างที่เห็นจากเครื่อง SEM จะเป็นภาพลักษณะ 3 มิติ ในขณะที่ภาพจากเครื่อง TEM จะให้ภาพลักษณะ 2 มิติ อีกทั้งวิธีการใช้งานเครื่อง SEM จะมีความรวดเร็วและใช้งานง่ายกว่าเครื่อง TEM มาก

หลักการการทำงานของเครื่อง SEM จะประกอบด้วยแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนซึ่งทำหน้าที่ผลิตอิเล็กตรอนเพื่อป้อนให้กับระบบ โดยกลุ่มอิเล็กตรอนที่ได้จากแหล่งกำเนิดจะถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้า จากนั้นกลุ่มอิเล็กตรอนจะผ่านเลนส์รวบรวมรังสี (Condenser Lens) เพื่อให้กลุ่มอิเล็กตรอนกลายเป็นลำอิเล็กตรอน ซึ่งสามารถปรับให้ขนาดของลำอิเล็กตรอนใหญ่หรือเล็กได้ตามต้องการ หากต้องการภาพที่มีความคมชัดจะปรับให้ลำอิเล็กตรอนมีขนาดเล็ก หลังจากนั้นลำอิเล็กตรอนจะถูกปรับระยะโฟกัสโดยเลนส์ใกล้วัตถุ (Objective Lens) ลงไปบนผิวชิ้นงานที่ต้องการศึกษา หลังจากลำอิเล็กตรอนถูกกวาดลงบนชิ้นงานจะทำให้เกิดอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary Electron) ขึ้น ซึ่งสัญญาณจากอิเล็กตรอนทุติยภูมินี้จะถูกบันทึก และแปลงไปเป็นสัญญาณทางอิเล็กทรอนิกส์และ ถูกนำไปสร้างเป็นภาพบนจอโทรทัศน์ต่อไป และสามารถบันทึกภาพจากหน้าจอโทรทัศน์ได้



ภาพที่ 2.91 แสดงลักษณะผลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง SEM

บทที่ 3

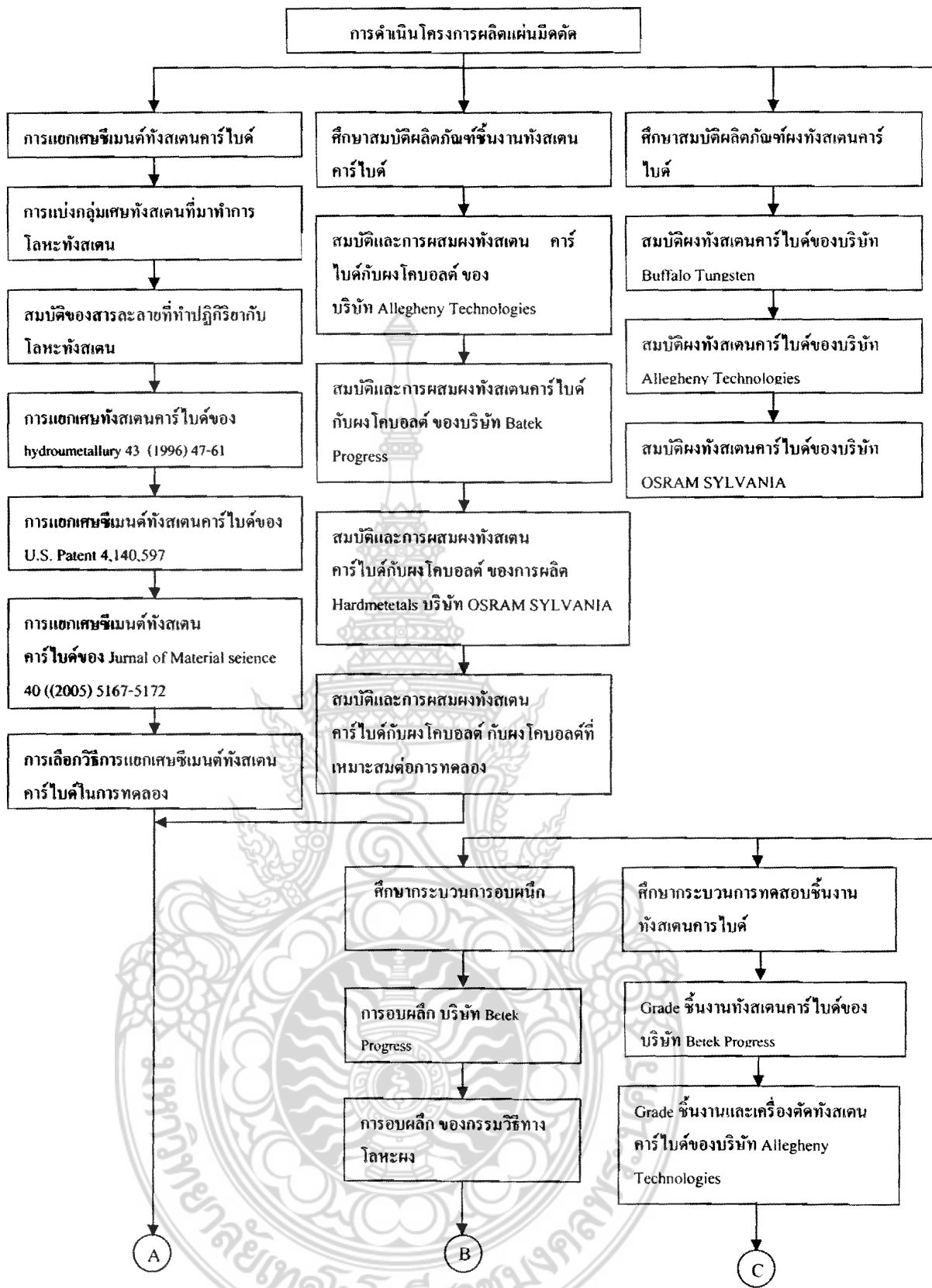
การผลิตชิ้นงานทั้งสแตนคาร์ไบด์

3.1 บทนำ

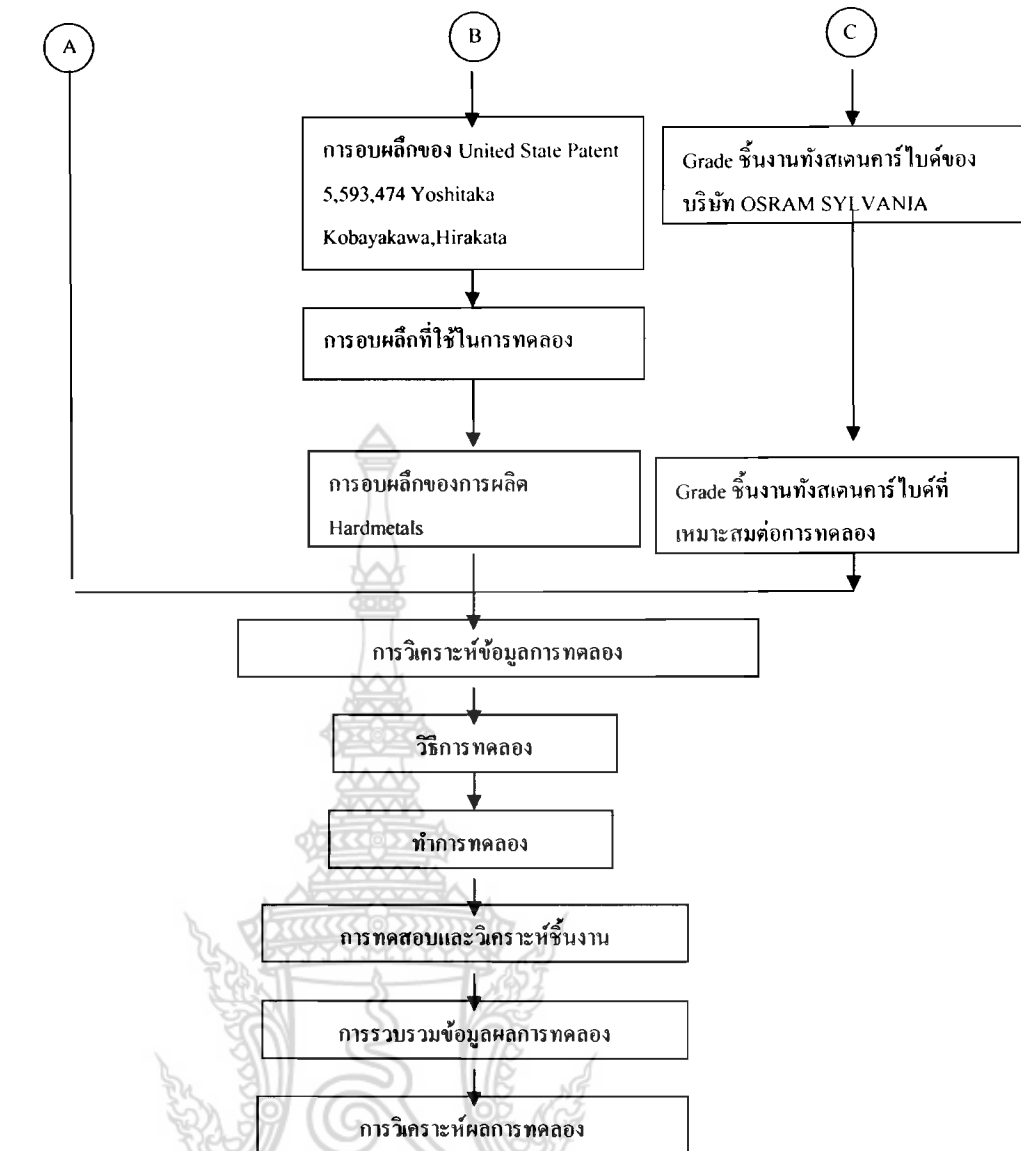
ในบทนี้จะกล่าวถึงสภาพการดำเนินงานของวิธีการทดลองต่างๆรวมถึงกระบวนการทดลอง กระบวนการวิเคราะห์ชิ้นงานและศึกษาแนวทางการนำชิ้นงานทั้งสแตนคาร์ไบด์ (Tungsten carbide) ให้แยกสลายศึกษาส่วนผสมและสมบัติของทั้งสแตนคาร์ไบด์กับผงโคบอลต์เป็นแนวทางการอัดขึ้นรูปชิ้นงานทั้งสแตนคาร์ไบด์ศึกษาอุณหภูมิที่ใช้ในการอบผนึกที่มีผลต่อสมบัติชิ้นงานทั้งสแตนคาร์ไบด์และทำการเสนอแนวทางแก้ไขปัญหา

การทดลองการศึกษาการผลิตชิ้นงานทั้งสแตนสำเร็จรูปแบ่งออกเป็น 12 ขั้นตอน

- 3.2 ศึกษากระบวนการแยกเศษทั้งสแตนคาร์ไบด์
- 3.3 ศึกษาสมบัติผลิตภัณฑ์ชิ้นงานทั้งสแตนคาร์ไบด์
- 3.4 ศึกษาสมบัติผลิตภัณฑ์ผงทั้งสแตนคาร์ไบด์
- 3.5 ศึกษากระบวนการอบผนึก (Sintering)
- 3.6 ศึกษากระบวนการทดสอบชิ้นงานทั้งสแตนคาร์ไบด์
- 3.7 การวิเคราะห์ข้อมูลการทดลอง
- 3.8 วิธีการทดลอง
- 3.9 ทำการทดลอง
- 3.10 การทดสอบ และวิเคราะห์ชิ้นงาน
- 3.11 การรวบรวมข้อมูลผลการทดลอง
- 3.12 การวิเคราะห์ผลการทดลอง ซึ่งมีรายละเอียดในบทที่ 6



ภาพที่ 3.1 แผนผังการดำเนินการวิจัย



ภาพที่ 3.1 แผนผังการดำเนินการวิจัย (ต่อ)



3.2 ศึกษากระบวนการแยกเศษทั้งสแตนคาร์ไบด์

3.2.1 กลุ่มเศษทั้งสแตน ที่จะมาทำการ Recycling

ตารางที่ 3.1 กลุ่มเศษทั้งสแตน ที่จะมาทำการแยกสลายและนำกลับมาใช้ใหม่ (Recycling)

ลำดับ	ชนิดของเศษที่จะแยก	ปริมาณทั้งสแตนที่ผสม (%)	ชนิดของเศษโลหะ
1	High – purity W	≥ 99	Hard Scrap (Solid pieces)
2	Oxide dispersed W alloys (ThO ₂ , ZrO ₂ , CeO ₂ , La ₂ O ₃)	96 - 98	
3	Hard metal pieces (also containing Co , Ta)	60 – 97	
4	Heavy metal W alloys	92 – 94	
5	Tungsten – copper	60 – 90	
6	Pure tungsten powder	≥ 98-99	Soft Scrap (Fine particles , Powder , Dust , Timings , Studagcs)
7	W grinding sludge	30 – 60	
8	W cutting sludge	70 – 80	
9	Hard metal powder	60 – 95	
10	Hard metal grinding sludge	15 – 60	
11	Heavy metal powder	92 – 97	
12	Heavy metal turnings	92 – 97	
13	W – Cu powder and green compacts	50 – 90	
14	Floor sweepings (different sources)	40 – 60	

กลุ่มเศษทั้งสแตนที่ทำการแยกคือลำดับ 4 Heavy Metal W Alloy และ ลำดับ 3 Hard Metal Pieces เพราะว่าทั้ง 2 กลุ่มนี้ผลิต ซีเมนต์ทั้งสแตนคาร์ไบด์ (Metal Cutting tools)

3.2.2 สมบัติของสารละลายที่ทำปฏิกิริยากับโลหะทั้งสแตน

ตารางที่ 3.2 สมบัติของสารละลายที่ทำปฏิกิริยากับโลหะทั้งสแตน

สารที่ทำปฏิกิริยา	อุณหภูมิ	
	20 °C	100 – 110 °C
กรดไฮโดรฟลูอริก (HF)	ทำปฏิกิริยาเล็กน้อย (None)	ไม่ทำปฏิกิริยา (None)
กรดไนตริก (HNO ₃)	ไม่ทำปฏิกิริยา (Slight attack)	ทำปฏิกิริยา (Oxidation)
กรดซัลฟูริก (H ₂ SO ₄)	ไม่ทำปฏิกิริยา (None)	ทำปฏิกิริยาเล็กน้อย (Slight attack)
กรดไฮโดรคลอริก (HCl)	ไม่ทำปฏิกิริยา (None)	ทำปฏิกิริยาเล็กน้อย (Slight attack)
กรดฟอสฟอริก (H ₃ PO ₄)	ไม่ทำปฏิกิริยา (None)	ทำปฏิกิริยาเล็กน้อย (Slight attack)
ไฮโดเจนเปอร์ออกไซด์ (H ₂ O ₂)	ไม่ทำปฏิกิริยา (None)	ชิ้นงานถูกย่อย (Dissolution)
แอมโมเนียไฮดรอกไซด์ (NH ₄ OH)	ไม่ทำปฏิกิริยา (None)	ไม่ทำปฏิกิริยา (None)
โพตัสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH)	ไม่ทำปฏิกิริยา (None)	ไม่ทำปฏิกิริยา (None)
โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH)	ไม่ทำปฏิกิริยา (None)	ไม่ทำปฏิกิริยา (None)
กรดไฮโดรคลอริก ผสมกับกรด ไนตริก (HCl + HNO ₃)	ทำปฏิกิริยา (Oxidation)	ชิ้นงานถูกย่อย (Dissolution)
กรดไฮโดรฟลูอริกผสมกับ กรดไนตริก (HF + HNO ₃)	ชิ้นงานถูกย่อย (Dissolution)	ชิ้นงานถูกย่อย (Dissolution)
โพตัสเซียมไฮดรอกไซด์ผสม ไฮโดเจนเปอร์ออกไซด์ (KOH + H ₂ O ₂ F)	ทำปฏิกิริยาเล็กน้อย (Slight attack)	ชิ้นงานถูกย่อย (Dissolution)

3.2.3 การแยกเศษซีเมนต์ทั้งสแตนคาร์ไบด์ ของ Journal Hydrometallurgy 43 (1996) 47-61

การแยกเศษซีเมนต์ทั้งสแตนคาร์ไบด์ด้วยอิเล็กโทรไลต์ด้วยการแยกโคบอลต์และทั้งสแตนคาร์ไบด์ในกรด เป็นการลดความเร็วของปฏิกิริยา Anodic Passivation ปฏิกิริยา Anodic จะเคลื่อนที่โดยตรงและรวดเร็วและในกระบวนการอิเล็กโทรไลต์จะใช้เครื่องมือวัดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าระหว่าง 2 จุด (คือขั้ว Anode และ ขั้ว Cathode) เมื่อเศษซีเมนต์ทั้งสแตนคาร์ไบด์สร้างฟิล์มมาเคลือบผิวลดลง ดังนั้นโคบอลต์จะละลายมากขึ้นปฏิกิริยา Anodic passivity ของเศษซีเมนต์ทั้งสแตนคาร์ไบด์ ในกรดที่ใช้ในการทดลอง (0.1 M citric acid in 1 M HCl) ในการแยกเศษซีเมนต์ทั้งสแตนคาร์ไบด์ด้วยวิธีอิเล็กโทรไลต์ ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่อยู่ 0.2– 0.6V (Vs/sce)

สารละลายที่ใช้ทำให้เกิดปฏิกิริยา Anodic passivation ลดลงคือ Acetic acid , Oxalic acid , Tartaric acid , Citric acid , Salicylic acid , EDTA และ Ammonium chloride เพื่อมาวิเคราะห์ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า

ในการแยกเศษซีเมนต์ทั้งสแตนคาร์ไบด์ จะใช้ความเข้มข้นของสารละลาย HCl 1 M และระดับแรงดันไฟฟ้าอยู่ที่ 0.4 – 0.6 V ในส่วนของความเข้มข้นของสารละลาย H_3PO_4 2 M แรงดันไฟฟ้าอยู่ที่ 0.4 – 0.6 V จะใช้เวลาในการแยกเศษซีเมนต์ทั้งสแตนคาร์ไบด์ 24 ชั่วโมง

3.2.4 การแยกเศษซีเมนต์ทั้งสแตนคาร์ไบด์ ของ US. Patent 4 , 140,597

วิธีการแยกเศษซีเมนต์ทั้งสแตนคาร์ไบด์ เป็นวิธีที่ประหยัดโดยใช้เศษซีเมนต์ทั้งสแตนคาร์ไบด์ เป็นขั้ว Anode ส่วนกระบวนการอิเล็กโทรไลต์จะใช้กรดเป็นตัวละลายในการแยกเศษซีเมนต์ทั้งสแตนคาร์ไบด์ ทำให้เป็นโลหะ Hydroxide ในส่วนของโคบอลต์ที่เป็นโลหะ ตัวประสานจะไปเกาะที่ผิวหน้าของขั้ว Cathode ในส่วนของโลหะที่ตกตะกอน (Metal Hydroxide) จะถูกนำไปล้าง เพื่อลดการเกิดก๊าซ Hydrogen ของผงทั้งสแตนคาร์ไบด์

เศษซีเมนต์ทั้งสแตนคาร์ไบด์ ประกอบไปด้วย ทั้งสแตนคาร์ไบด์และโคบอลต์ ที่เป็นโลหะตัวประสาน สารละลายที่ใช้ทำปฏิกิริยา คือ กรด ไนตริก (HNO_3) ใช้เศษซีเมนต์ทั้งสแตนคาร์ไบด์เป็นขั้ว Anode ส่วนขั้ว Cathode จะใช้แท่งทั้งสแตนบริสุทธิ์ และทำการต่อวงจรไฟฟ้า ระหว่างขั้ว Anode และ Cathode DC 24 V, 15 A ตะกอนที่ตกอยู่ที่ก้นภาชนะเรียกว่า H_2WO_4 นำตะกอนไป

ล้างเพื่อลดก๊าซไฮโดรเจนในส่วนของโคบอลต์จะไปเกาะที่ผิวหน้าของขั้ว Cathode (W – bar) จะใช้เวลาในการแยกเศษซีเมนต์ทั้งสแตนคาร์ไบด์ 4 – 5 ชั่วโมง

3.2.5 การแยกเศษซีเมนต์ทั้งสแตนคาร์ไบด์ของ Journal of Materials Science 40(2005)5167-5172 เป็นการแยกเศษซีเมนต์ทั้งสแตน โดยใช้กรด กรดหรือสารละลายที่ใช้มีอยู่ด้วยกัน 3 ตัว กรดไฮโดรคลอริก(HCl), กรดซัลฟูริก (H_2SO_4), กรดไนตริก (HNO_3), อุณหภูมิที่ใช้ $110^\circ C$ สารละลายไฮดรอกลอริกจะทำการแยกผงโคบอลต์ใช้เวลาในการแยก 24 ชั่วโมง สารละลาย กรดซัลฟูริกใช้เวลาในการแยกผงโคบอลต์ต่ำกว่า 24 ชั่วโมงอย่างไรก็ตามผงทั้งสแตนคาร์ไบด์ ที่ได้จะน้อยกว่าการในสารละลายกรดไฮโดรคลอริกและในส่วนของการละลายกรดไนตริกใช้เวลาในการแยกผงโคบอลต์มากกว่า 50 ชั่วโมง และจำนวนผงทั้งสแตนที่ได้ก็น้อยกว่าสารละลายทั้ง 2 ตัวที่กล่าว และความเข้มข้นของสารละลายมีส่วนที่ทำให้เวลาในการแยกเศษซีเมนต์ทั้งสแตนคาร์ไบด์มากหรือน้อยด้วย

3.2.6 การเลือกวิธีการแยกเศษซีเมนต์ทั้งสแตนคาร์ไบด์ เลือกวิธีการแยกเศษซีเมนต์ทั้งสแตนคาร์ไบด์ของUS. Patent 4,140,597 Yoshitaka Kobayakawa, Hirakata , Japan

3.3 ศึกษาสมบัติผลิตภัณฑ์ชิ้นงานทั้งสแตนคาร์ไบด์

3.3.1 สมบัติและการผสมทั้งสแตนคาร์ไบด์กับผงโคบอลต์ของบริษัท Allegheny Technologies

ตารางที่ 3.3 สมบัติและการผสมทั้งสแตนคาร์ไบด์กับผงโคบอลต์ของบริษัท Allegheny Technologies

ชนิด	ขนาดเกรน ผงทั้งสแตน คาร์ไบด์ (ไมครอน)	ความ หนาแน่น (Density) g/cc	ปริมาณ ทั้งสแตน คาร์ไบด์ (%)	ปริมาณ โคบอลต์ (%)	การนำไปใช้งาน
GWC – I	3	14.85	94.0	6.0	เหมาะสำหรับงานกัด และ งานกลึง
GWC – 4	3	14.5	90.0	10.0	เหมาะสำหรับงานกัดและ งานกลึงและมีแรงเฉือนที่ดี

ตารางที่ 3.3 สมบัติและการผสมทั้งสแตนคาร์ไบด์กับผงโคบอลต์ของบริษัท Allegheny

Technologies (ต่อ)

ชนิด	ขนาดเกรน ผงทั้งสแตน คาร์ไบด์ (ไมครอน)	ความ หนาแน่น (Density) g/cc	ปริมาณ ทั้งสแตน คาร์ไบด์ (%)	ปริมาณ โคบอลต์ (%)	การนำไปใช้งาน
GWC - 10	3	14.95	94.0	6.0	เหมาะสำหรับงานเจาะ
GWC - 12	3	14.45	90.0	10.0	เหมาะสำหรับงานที่มีความ เหนียวสูง
GWC - 31	3	14.38	89.0	11.0	เหมาะสำหรับงานเจาะที่ทน ต่อแรงกระแทก
GWC - 50	3	13.98	85.0	15.0	เหมาะสำหรับเป็นแม่พิมพ์ งานร้อน

3.3.2 สมบัติและการผสมผงทั้งสแตนคาร์ไบด์ กับ ผงโคบอลต์ของบริษัท Betek Progress.

ตารางที่ 3.4 สมบัติและการผสมผงทั้งสแตนคาร์ไบด์ กับ ผงโคบอลต์ของบริษัท Betek Progress.

ชนิด	ขนาดเกรนผง ทั้งสแตน คาร์ไบด์ (ไมครอน)	ปริมาณทั้งสแตน คาร์ไบด์ (%)	ปริมาณ โคบอลต์ (%)	ค่าความ แข็ง (HV10)	ค่าความแข็ง (HRA)
B - 10F	3	94.0	6	1475	89.8
B - 10	2.5	94.0	6	1535	90.3
B - 15	4	92.5	7.5	1350	88.8
B - 20	6	90.5	9.5	1300	88.4
B - 25	6	90.0	10	1200	87.5
B - 30	6	89.0	11	1150	87.0
B - 40	6	85.0	15	1050	85.8

3.3.3 สมบัติและการผสมทั้งสแตนคาร์ไบด์กับผงโคบอลต์ของบริษัทการผลิต

Hardmetals

ผงทั้งสแตนคาร์ไบด์ที่มีขนาดเกรน 2.5 ไมครอน และมีส่วนผสมผงโคบอลต์ 17% จะถูกนำไปใช้งานเครื่องมือขึ้นรูปเย็นมีค่าความแข็ง 1175 HV30

3.4 ศึกษาสมบัติผลิตภัณฑ์ทั้งสแตนคาร์ไบด์

3.4.1 สมบัติของผงทั้งสแตนคาร์ไบด์และโคบอลต์บริษัท Buffalo Tungsten

ตารางที่ 3.5 สมบัติของผงทั้งสแตนคาร์ไบด์และโคบอลต์บริษัท Buffalo Tungsten

ชนิด	ขนาดเกรนผงทั้งสแตน	ความหนาแน่น (g/in ³)	มาตรฐานการกระจาย
C 40	10-19.99	60-100	-100 Mesh
C 60	20-39.99	70-120	-60 Mesh
C 80	> 40.00	90-130	-60 Mesh

3.4.2 สมบัติของผงทั้งสแตนคาร์ไบด์และโคบอลต์ บริษัท Allegheny Technologies

ตารางที่ 3.6 สมบัติของผงทั้งสแตนคาร์ไบด์และโคบอลต์ บริษัท Allegheny Technologies

ชนิดของผงทั้งสแตนคาร์ไบด์						
ขนาดเกรน	1	2	3	4	5	6
	0.5-0.99	1.0-1.69	1.7-5.99	6.0-8.99	9.0-15	>15
คาร์บอนรวมทั้งหมด (Wt%)	≥ 6.16	≥ 6.16	≥ 6.16	≥ 6.16	≥ 6.16	≥ 6.16
ส่วนผสมคาร์บอน Wt%	≥ 6.07	≥ 6.07	≥ 6.07	≥ 6.07	≥ 6.07	≥ 6.07
ส่วนผสมอลูมิเนียม (Wt%)	≤ 0.004	≤ 0.003	≤ 0.003	≤ 0.003	≤ 0.003	≤ 0.005

ตารางที่ 3.6 สมบัติของผงทั้งสแตนคาร์ไบด์และโคบอลต์ บริษัท Allegheny Technologies (ต่อ)

ชนิดของผงทั้งสแตนคาร์ไบด์						
ขนาดเกรน	1	2	3	4	5	6
	0.5-0.99	1.0-1.69	1.7-5.99	6.0-8.99	9.0-15	>15
ส่วนผสม ทองแดง (Wt%)	≤0.003	≤0.003	≤0.003	≤0.003	≤0.003	≤0.003
ส่วนผสม โครเมียม (Wt%)	≤0.005	≤0.005	≤0.005	≤0.015	≤0.02	≤0.03
ส่วนผสม เหล็ก (Wt%)	≤0.01	≤0.01	≤0.01	≤0.02	≤0.03	≤0.05
ชนิดของผงทั้งสแตนคาร์ไบด์						
ขนาด เกรน	1	2	3	4	5	6
	0.5-0.99	1.0-1.69	1.7-5.99	6.0-8.99	9.0-15	>15
ส่วนผสม ของ นิกิล (Wt%)	≤0.005	≤0.005	≤0.005	≤0.1	≤0.02	≤0.03
ส่วนผสม โม ลิบดีนัม (Wt%)	≤0.1	≤0.1	≤0.1	≤0.1	≤0.2	≤0.3
ส่วนผสม ของ ออกซิเจน (Wt%)	≤0.28	≤0.20	≤0.18	≤0.01	≤0.08	≤0.08

3.4.3 สมบัติผงทั้งสแตนคาร์ไบด์ และผงโคบอลต์ ของบริษัท Osram Sylvania

ตารางที่ 3.7 สมบัติผงทั้งสแตนคาร์ไบด์และผงโคบอลต์ของบริษัท Osram Sylvania

ชนิด	ขนาดเกรนผงทั้งสแตนคาร์ไบด์ (ไมครอน)	ความหนาแน่น (g/in ³)
M 10	0.6 – 0.9	20 – 37
M 17	0.95 – 1.25	20 – 78
M 20	1.1 – 1.4	25 – 45
M 25	1.4 – 1.8	25 – 45
M 30	1.8 – 2.2	30 – 50
M 37	2.7 – 3.3	38 – 60
M 40	3.3 – 3.9	48 – 75
M 45	4.0 – 4.5	48 -75
M 55	4.7 – 5.7	50 -75
M 60	5.8 – 7.8	55 – 78
M 63	7.9 – 10.9	55 – 90
M 65	11.0 – 15.00	60 -95
M 68	15.0 – 17.5	65 - 100

3.5 ศึกษากระบวนการอบผนึก (Sintering)

3.5.1 การอบผนึกของบริษัท Betek Progress

ในการอบผนึกของบริษัท Betek Progress จะใช้อุณหภูมิในการอบผนึกที่อุณหภูมิ 1450 °C และการอบผนึกจะใช้เตาสัญญากาศใช้เวลาในการอบผนึก 7-8 ชั่วโมง

3.5.2 การอบผลึก ของกรรมวิธีทางโลหะผง การอบผนึกของการผลิตโลหะผงเมื่อได้ชิ้นงานเดิมที่อัดขึ้นรูปแล้วจะถูกลำเลียงด้วยระบบสายพาน (Conveyor) ไปเข้าเตาไฟฟ้าโดยจะต้องกันไม่ให้อากาศเข้าไป เพื่ออบให้ร้อนให้ยึดตัวแน่นที่อุณหภูมิ 1400 - 1700 °C หรือคิดเป็นอุณหภูมิประมาณ 2/3 หรือ 4/5 ของอุณหภูมิจุดหลอมเหลวของวัสดุที่มีจุดหลอมเหลวต่ำ

ชิ้นงานซีเมนต์คาร์ไบด์ ผงทั้งสเตนคาร์ไบด์ผสมกับผงโคบอลต์แล้วอัดขึ้นภาพ มีคุณสมบัติความแข็งและความเหนียว เมื่อขึ้นภาพเสร็จต้องนำไปอบให้อุณหภูมิสุดหลอมละลายของโคบอลต์ คือโคบอลต์จะหลอมละลายเกาะยึดทั้งสเตนคาร์ไบด์ ดังนั้นอุณหภูมิที่ใช้ 1450 °C

3.5.3 การอบผนึกจาก US. Patent ของ Yoshitaka Kobaykawa, Hirakata, Japan โลหะซีเมนต์ทั้งสเตนคาร์ไบด์ จะประกอบด้วยธาตุทั้งสเตนคาร์ไบด์โคบอลต์ในการอบผนึกจะใช้อุณหภูมิ 1400-1450 °C

3.5.4 การอบผนึกการผลิต Hard metals การอบผนึกชิ้นงานทั้งสเตนคาร์ไบด์ในอุณหภูมิในการอบผนึก 1300-1675 °C

3.5.5 การอบผนึกที่ใช้ในการทดลอง ในการทดลองจะใช้ช่วงอุณหภูมิในการอบผนึกที่อุณหภูมิ 1350-1450 °C

3.6 ศึกษากระบวนการทดสอบชิ้นงานทั้งสเตนคาร์ไบด์

3.6.1 ชนิดชิ้นงานทั้งสเตนคาร์ไบด์ของบริษัท Betek Progreps.

ตารางที่ 3.8 ชนิดชิ้นงานทั้งสเตนคาร์ไบด์ของบริษัท Betek Progreps

ชนิด	ขนาดเกรน ผงทั้งสเตน คาร์ไบด์ (ไมครอน)	ปริมาณผง ทั้งสเตนคาร์ ไบด์ ที่ผสม	ปริมาณผง โคบอลต์ที่ ผสม (%)	ค่า ความ แข็ง (HV10)	ค่าความ แข็ง (HRA)	Transverse Rupture Strength /mm ²
B - 10 F	3	94.0	6.0	1475	89.8	2900
B - 10	2.5	94.0	6.0	1535	90.3	3000
B - 15	4	92.5	7.5	1350	88.8	2800
B - 20	6	90.5	9.5	1300	88.4	2800
B - 25	6	90.0	10.0	1200	87.5	2800
B - 30	6	89.0	11.0	1150	87.0	2800
B - 40	6	85.0	15	1050	85.8	2800

จากตาราง 3-8 เป็นชนิดชิ้นงานทั้งสแตนคาร์ไบด์ของบริษัท Betek Progreps เลือกชนิด B-40 ขนาดเกรนผงทั้งสแตนคาร์ไบด์ 6 ไมครอน ส่วนผสมผงโคบอลต์ 15% ค่าความแข็ง 1050 HV

3.6.2 ชนิดชิ้นงานทั้งสแตนคาร์ไบด์บริษัท Atlegheny Technologies.

ตารางที่ 3.9 ชนิดชิ้นงานทั้งสแตนคาร์ไบด์บริษัท Atlegheny Technologies

ชนิด	ขนาดเกรนผงทั้งสแตนคาร์ไบด์ (ไมครอน)	ปริมาณของผงทั้งสแตนคาร์ไบด์ที่ผสม (%)	ปริมาณผงโคบอลต์ที่ผสม (%)	ค่าความแข็ง (HRA)
GWC-1	3	94.0	6.0	92.7
GWC-4	3	90.0	10.0	92.0
GWC-10	3	94.0	6.0	91.0
GWC-12	3	90.0	10.0	91.8
GWC-31	3	89.0	11.0	88.25
GWC-50	3	85.0	15.0	86.0

จากตารางที่ 3-9 เป็นชนิดชิ้นงานทั้งสแตนคาร์ไบด์ บริษัท Atlegheny Technologies เลือกชิ้นงาน GWC - 50 ขนาดเกรนผงทั้งสแตนคาร์ไบด์ 3 ไมครอน ส่วนผสมผงโคบอลต์ 15 % ได้ค่าความแข็ง 86 HRA หรือ 950-1000 HV

3.6.3 ชนิดชิ้นงานทั้งสแตนคาร์ไบด์ของบริษัท Osram Sylvania

ตารางที่ 3.10 ชนิดชิ้นงานทั้งสแตนคาร์ไบด์ของบริษัท Osram Sylvania

ชนิด	ขนาดเกรนผงทั้งสแตนคาร์ไบด์ (ไมครอน)	ความหนาแน่น (g/cc)	Coactivity (Oe)	Shrinkage (%)	ค่าความแข็ง (HRA)
SC 04V	0.7	14.88	410	20.7	94.1
SC 07V	0.7	14.93	330	19.5	93.3
SC 17V	1	14.93	330	19.5	93.3
SC 17S	1.2	14.95	215	19.0	92.2
SC 20S	1.4	14.95	190	19.0	91.9
SC 25S	1.7	14.95	185	18.7	91.8
SC 30S	2.1	14.95	200	17.0	92.0

ตารางที่ 3.10 ชนิดชิ้นงานทั้งสแตนคาร์ไบด์ของบริษัท Osram Sylvania (ต่อ)

ชนิด	ขนาดเกรนผงทั้งสแตนคาร์ไบด์ (ไมครอน)	ความหนาแน่น (g/cc)	Coactivity (Oe)	Shrinkage (%)	ค่าความแข็ง (HRA)
SC 35S	2.5	14.95	175	17.0	91.7
SC 37S	2.9	14.95	170	16.8	91.7
SC 40S	3.6	14.95	150	16.6	91.3
SC 45S	4.3	14.95	145	16.5	91.3
SC 55S	5	14.95	125	16.3	90.9
SC 59S	6.5	14.95	115	16.1	90.1
SC 60S	6	14.95	115	16.2	90.7
SC 61S	9.5	14.96	105	16.2	89.8
SC 68S	8	14.95	80	16.2	89.1

จากตารางที่ 3-10 เป็นชนิดชิ้นงานทั้งสแตนคาร์ไบด์ บริษัท Osram Sylvania เลือกชิ้นงาน SC 35S ขนาดเกรนผงทั้งสแตนคาร์ไบด์ 2.5 ไมครอน ส่วนผสมผงโคบอลต์ 6 % ได้ค่าความแข็ง 91.1 HRA หรือ 1000-1050 HV

3.7 การวิเคราะห์ข้อมูลการทดลอง

3.7.1 ศึกษากระบวนการแยกเศษซีเมนต์ทั้งสแตนคาร์ไบด์

สาเหตุที่เลือกการแยกเศษซีเมนต์ทั้งสแตนคาร์ไบด์ของ US Patent 4,140,597 เป็นกระบวนการที่มีความประหยัดต่อการทำการทดลอง ใช้ระยะเวลาในการทำการทดลองน้อยกว่ากระบวนการ อื่น ๆ ที่ได้นำเสนอ ผลกระทบที่เกี่ยวข้องต่อการทำการทดลองการแยกเศษซีเมนต์ทั้งสแตนคาร์ไบด์มีน้อยกว่า เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองหาได้ง่ายและไม่ซับซ้อน ในการทดลองการแยกเศษซีเมนต์ทั้งสแตนคาร์ไบด์ได้มีการเปลี่ยนแปลงสารละลายจากเดิมใช้กรดไนตริกผสมกับน้ำกลั่นในอัตราส่วน 1:3 เปลี่ยนมาใช้กรดไฮโดรคลอริก 100%

3.7.2 ศึกษาสมบัติผลิตภัณฑ์ชิ้นงานทั้งสแตนคาร์ไบด์

แผ่นคมตัด (Tungsten carbide insert) จะเป็นชนิดและระดับ ขนาดของเกรนผงทั้งสแตนคาร์ไบด์และจำนวนปริมาณส่วนผสมของโคบอลต์ที่เป็นโลหะตัวประสานปกติขนาดเกรนของผงทั้งสแตนคาร์ไบด์ที่ใช้กันอยู่จะมีขนาดเกรนประมาณ 0.5 – 10 ไมครอนและจำนวนส่วนผสมของผงโคบอลต์ ประมาณ 6 – 16% ของน้ำหนักที่ผสมทั้งหมด

สิ่งสำคัญถ้าขนาดเกรนของทั้งสแตนคาร์ไบด์ มีขนาดใหญ่ และปริมาณของส่วนผสมของผงโคบอลต์ที่เป็นผงโลหะตัวประสานมีประมาณมาก ทำให้ชิ้นงานมีความเหนียวสูงและทนต่อแรงกระแทกได้ดี แต่จะมีคุณสมบัติ การต้านทานการสึกหรอและความแข็งต่ำ ในส่วนนี้ขนาดเกรนของผงทั้งสแตนคาร์ไบด์ ประมาณ 2.5 – 10 ไมครอนตรงกันข้ามถ้ามีขนาดเกรนของผงทั้งสแตนคาร์ไบด์และส่วนผสมของผงโคบอลต์ที่เป็นโลหะตัวประสานน้อย

จะทำให้มีคุณสมบัติความแข็งสูงแต่ความเหนียวต่ำ ชิ้นงานที่มีความแข็งระดับนี้ จะมีขนาดเกรนของทั้งสแตนคาร์ไบด์อยู่ที่ 0.5-2.0 ไมครอน ตัวอย่างที่ 1. ชิ้นงานที่มีขนาดเกรนของผงทั้งสแตนคาร์ไบด์อยู่ที่ 3-4 ไมครอน และปริมาณผงโคบอลต์ที่เป็นผงโลหะตัวประสานผสมอยู่ที่ 16% จะทำให้มีค่าความแข็งอยู่ที่ประมาณ 85.4 - 86.2 HRA ตัวอย่างที่ 2. ชิ้นงานที่มีขนาดเกรนของผงทั้งสแตนคาร์ไบด์อยู่ที่ 1.5-2.5 ไมครอนและปริมาณส่วนผสมของผงโคบอลต์ที่เป็นผงโลหะตัวประสานอยู่ที่ 6% จะทำให้มีค่าความแข็งอยู่ที่ประมาณ 90.1 – 90.9 HRA มีตามสมบัติและการผสมผงทั้งสแตนคาร์ไบด์ได้มาจาก US. Patent 5,593,474 Keshavan et.al.(composite cemented carbide)

สาเหตุที่เลือกขนาดเกรนของผงทั้งสแตนคาร์ไบด์ 2.5 ไมครอน และส่วนผสมของผงโคบอลต์ที่เป็นผงโลหะตัวประสาน 17 % เพราะจะได้ชิ้นงานที่มีความแข็งสูงสุด 85 HRA ได้จากการเปรียบเทียบข้อมูลส่วนผสมของผงโคบอลต์ ขนาดเกรนของผงทั้งสแตนคาร์ไบด์, ความแข็งของชิ้นงาน จากบริษัท Allegheny Technologies, บริษัท Betek Progress , บริษัท Osram Sylvania

3.7.3 ศึกษากระบวนการอบผึ่ง

สาเหตุที่เลือกช่วงอุณหภูมิในการอบผึ่งที่อุณหภูมิ 1350-1450°C เพราะว่าข้อมูลที่ได้จากบริษัท Betek Progress, หนังสือกรรมวิธีการผลิต, US. Patent 5,593,474 keshavan et al. (Composite cemented carbide) มีช่วงอุณหภูมิที่ใกล้เคียงกันมากที่ใช้ในการอบผึ่ง

3.7.4 ศึกษากระบวนการทดสอบชิ้นงานทั้งสแตนคาร์ไบด์

สาเหตุที่เลือกค่าความแข็งที่ 85 HRA ได้มาจากการเปรียบเทียบค่าความแข็งที่สูงสุดระหว่างบริษัท Allegheny Technologies. และบริษัท Betek Progress, บริษัท OSRAM SYLVANIA ที่สำคัญค่าความแข็งจะมีความสัมพันธ์กับขนาดเกรนของผงทั้งสแตนคาร์ไบด์และส่วนผสมของผงโคบอลต์เป็นผงโลหะตัวประสาน จึงจะเอาค่าความแข็งนี้เป็นมาตรฐานในการเปรียบเทียบ ชั้นที่จะทำการออกแบบการทดลอง หน่วยของค่าความแข็งจะใช้หน่วย Rockwell Hardness Test นั้น จะเป็นการวัดค่าความแข็งจากความลึกระยะกดที่ถูกหัวกดด้วย แรงกดที่ซึ่งจะแตกต่าง จาก Brinell และ Vicker ที่วัดจากแรงกดต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ ดังนั้นวิธีนี้จึงมีการวัด ด้วยกันหลายสเกล แรงกดที่ใช้มี 2 ส่วน Minor load และ Major load

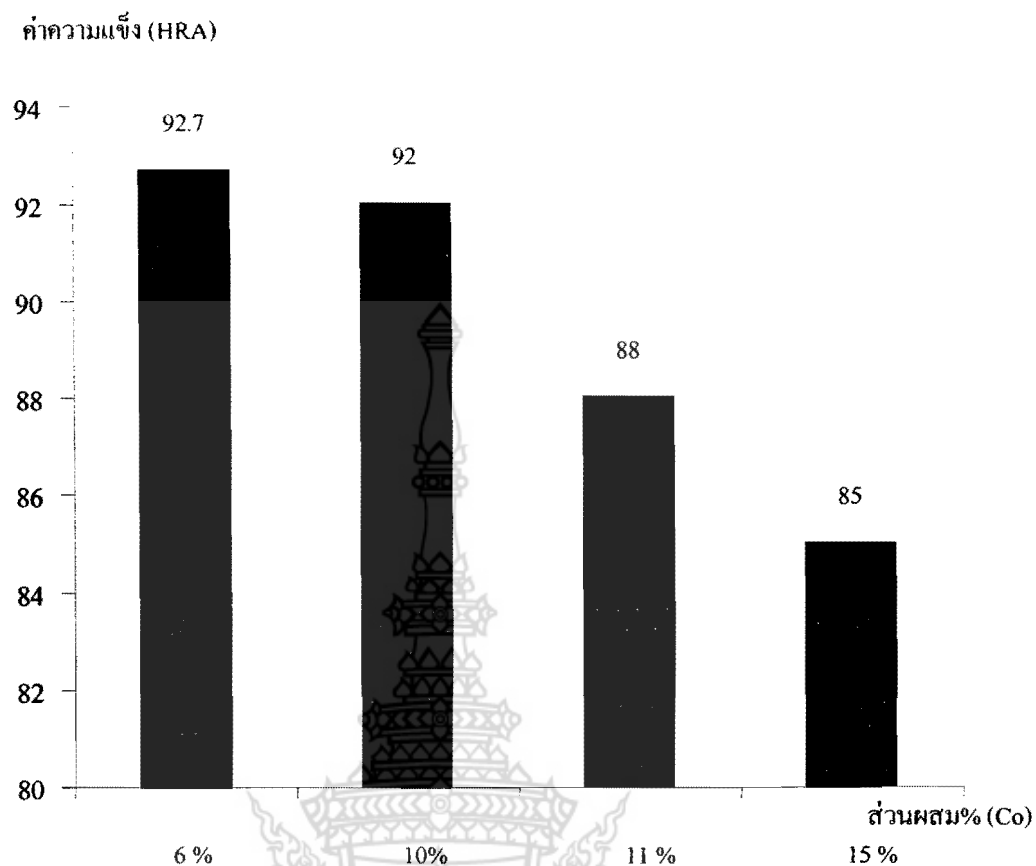
Minor load เป็นแรงที่ขีดหัวกดลูกบอลเหล็กชุบแข็ง ไว้บนผิวโลหะที่วัดความแข็ง

Major load เป็นแรงที่มากกว่า Minor load และกดลงภายหลังจากให้ Minor load กับชิ้นงาน

Rockwell Scale A ใช้กับงานซีเมนต์ทั้งสแตนคาร์ไบด์, เหล็กที่มีขนาดบาง และเหล็กกล้าชุบแข็งผิวไม่ลึก การทดสอบความแข็งจะทดสอบความแข็งด้วยแรงกด 3 จุด บนผิวชิ้นงาน และใช้แรง 60 kgf. ของ Major load ในส่วนการทดสอบเกรนโลหะของชิ้นงานทั้งสแตนคาร์ไบด์นั้นทดสอบเพื่อดูการยึดเกาะของเกรน โลหะชิ้นงานทั้งสแตนคาร์ไบด์มาตรฐานที่มีความแข็งสูงที่สุดกับชิ้นงานชิ้นอื่น ที่มีส่วนผสมของผงโคบอลต์ และช่วงอุณหภูมิในการอบผืนึก โดยทำการเปรียบเทียบเกรนโลหะดังกล่าว

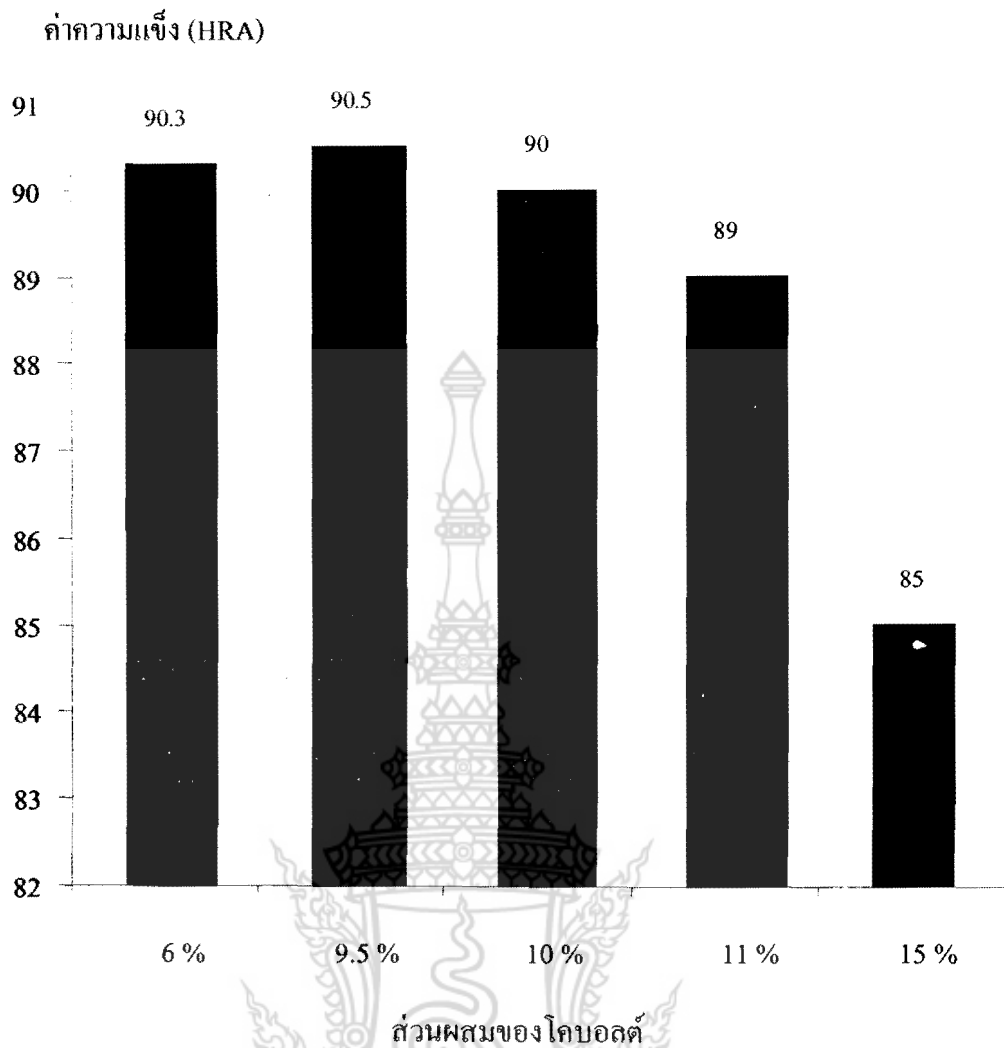
ตารางที่ 3.11 ตารางเปรียบเทียบค่าความแข็ง ส่วนผสมผงโคบอลต์ ค่าความแข็งของ 3 บริษัท

บริษัท	ส่วนผสมโคบอลต์ (%)	ขนาดเกรนผงทั้งสแตนคาร์ไบด์ (ไมครอน)	ค่าความแข็ง (HRA)
1) Allegheny	15	3	85
2) Betek	15	6	85
3) Osram	6	2.5	91.1



ภาพที่ 3.2 กราฟเปรียบเทียบค่าความแข็งของชิ้นงานกับปริมาณของส่วนผสมของผงโคบอลต์
ของ บริษัท Allegheny Technologies จากกราฟขนาดเกรนผงทั้งสแตนคาร์ไบด์
3 ไมครอน

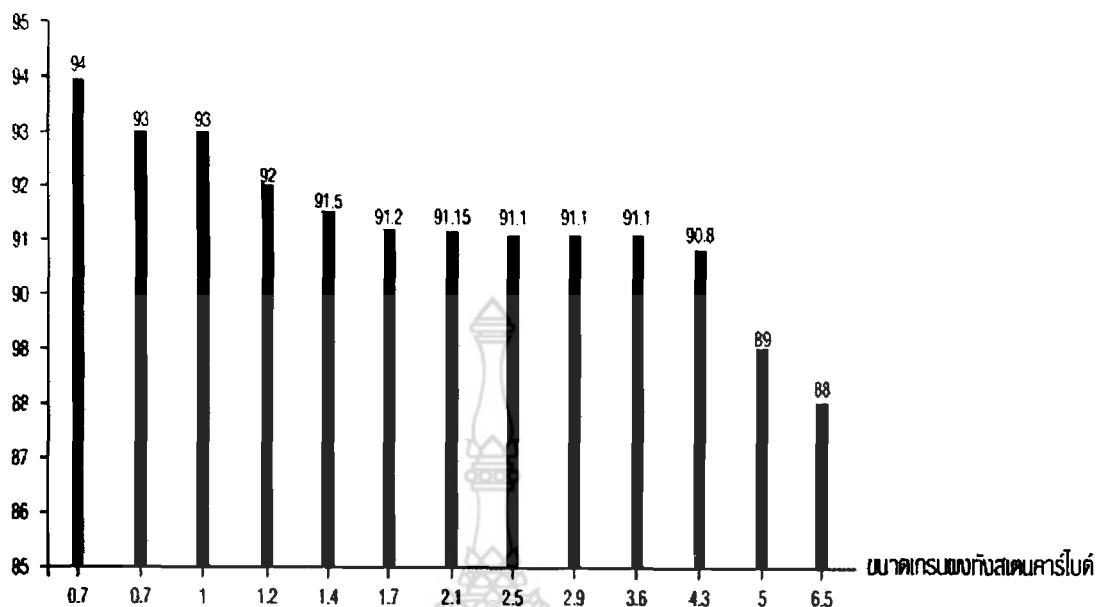
จากภาพที่ 3.2 เป็นกราฟเปรียบเทียบชิ้นงานชนิดต่าง ๆ ของบริษัท Allegheny Technologies
เลือกชิ้นงาน GWC -50 มีส่วนผสมผง โคบอลต์ 15% ใกล้เคียงกับส่วนผสมผงโคบอลต์ของชิ้นงาน
ที่ทำการทดลอง 17% ได้ค่าความแข็ง 85 HRA หรือ 850-950 HV



ภาพที่ 3.3 กราฟเปรียบเทียบค่าความแข็งของชิ้นงานกับปริมาณของส่วนผสมของผงโคบอลต์
ของบริษัท Betek Progress.

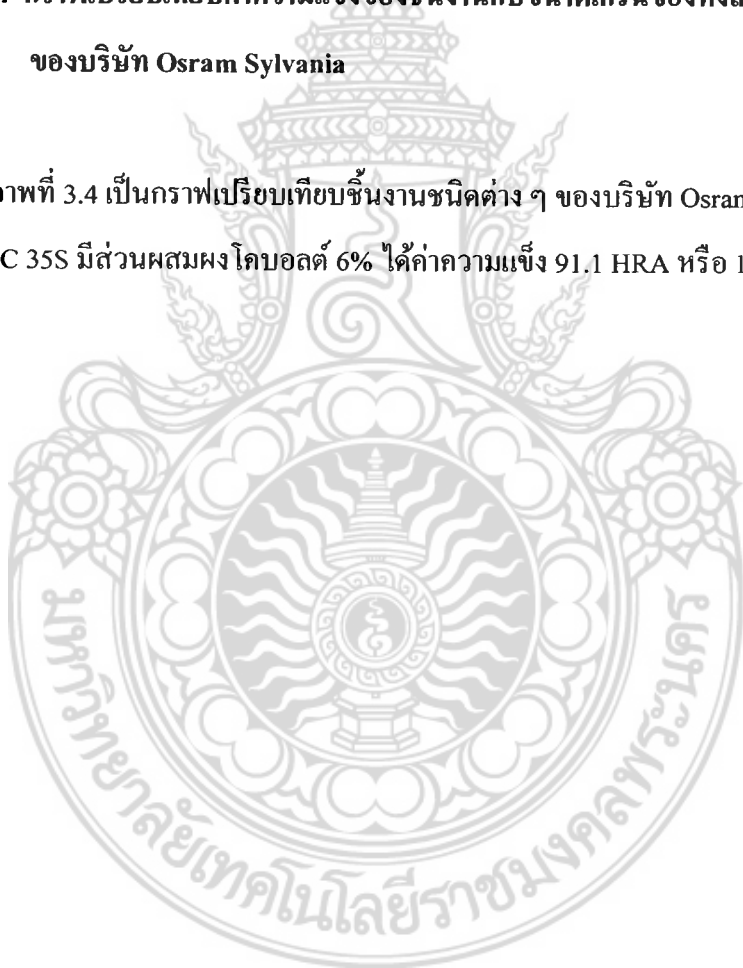
จากภาพที่ 3.3 เป็นกราฟเปรียบเทียบชิ้นงานชนิดต่างๆ ของบริษัท Betek Progress เลือก
ชิ้นงาน B-40 มีส่วนผสมผงโคบอลต์ 15 % ใกล้เคียงกับส่วนผสมผงโคบอลต์ของชิ้นงานที่ทำการ
ทดลอง 17% ได้ค่าความแข็ง 85 HRA หรือ 850-950 HV

ค่าความแข็ง (HRA)

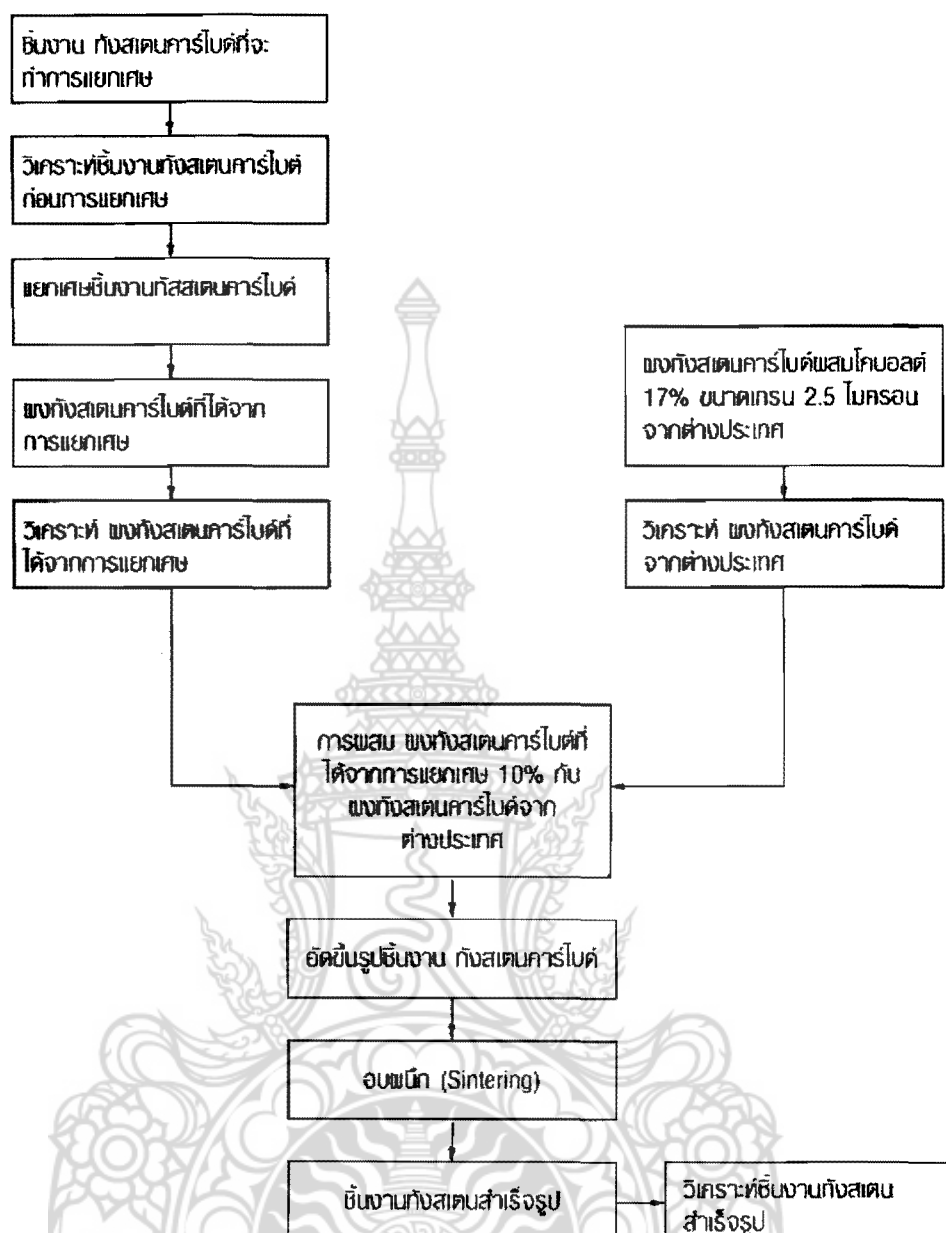


ภาพที่ 3.4 กราฟเปรียบเทียบค่าความแข็งของชิ้นงานกับขนาดกรงของกังสตนคาร์ไบด์
ของบริษัท Osram Sylvania

จากภาพที่ 3.4 เป็นกราฟเปรียบเทียบชิ้นงานชนิดต่าง ๆ ของบริษัท Osram Sylvania เลือก
ชิ้นงาน SC 35S มีส่วนผสมผงโคบอลต์ 6% ได้ค่าความแข็ง 91.1 HRA หรือ 1000-1050 HV

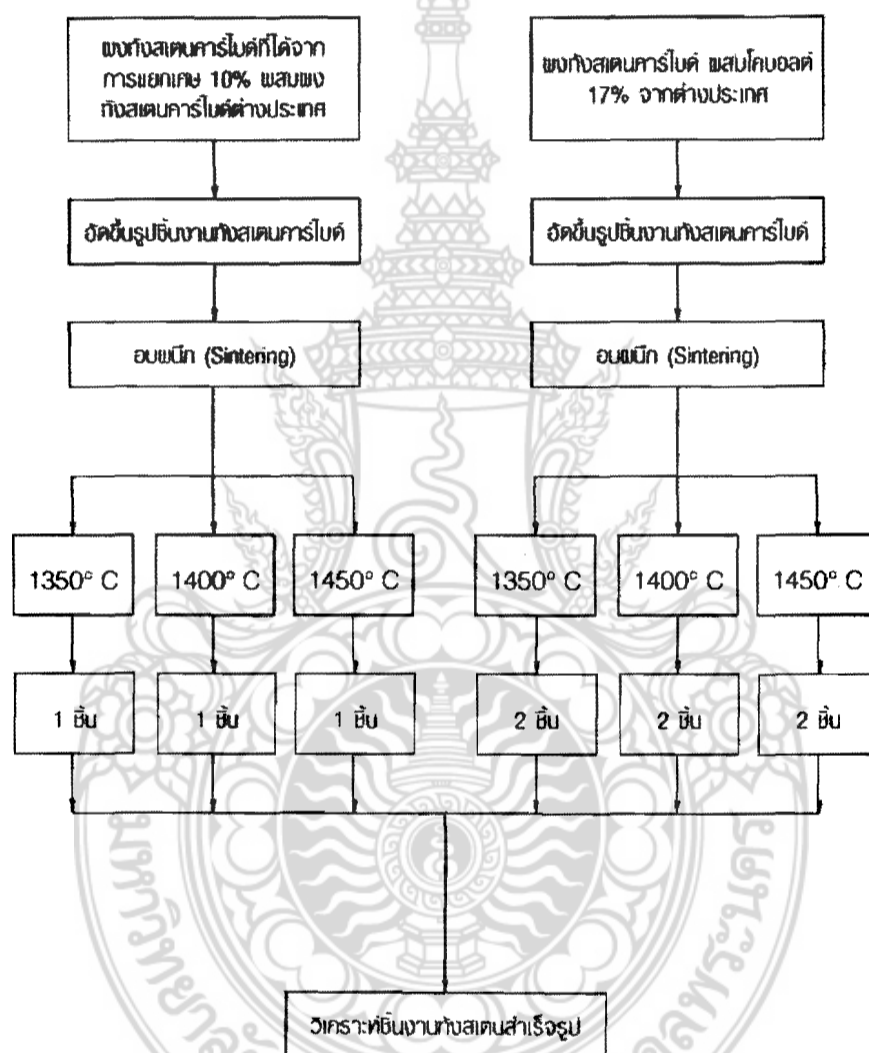


3.8 วิธีการทดลอง



ภาพที่ 3.5 แผนผังการผลิตชั่งงานกังสเดนคาร์ไบด์สำเร็จรูป

จากภาพที่ 3.5 เป็นแผนผังการผลิตชิ้นงานทั้งสแตนคาร์ไบด์ เมื่อทำการแยกเศษซีเมนต์ทั้งสแตนคาร์ไบด์ จึงได้ผงทั้งสแตนคาร์ไบด์มาทำการวิเคราะห์ขนาดเกรน ความหนาแน่นและการกระจายตัวของผงทั้งสแตนคาร์ไบด์ แล้วทำการวิเคราะห์ ผงทั้งสแตนคาร์ไบด์ที่นำเข้ามาจากต่างประเทศ โดยทำการวิเคราะห์ขนาดเกรน ค่าความหนาแน่นและการกระจายตัวของผงเป็นการผสมผงระหว่างผงทั้งสแตนคาร์ไบด์ นำเข้าอัตราส่วนผสมจะใช้ผงทั้งสแตนคาร์ไบด์ที่ได้จากการแยกสลาย 10% ของน้ำหนักชิ้นงาน มาทำการขึ้นรูปชิ้นงานทั้งสแตนคาร์ไบด์อย่างละ 1 ชิ้น เพื่อที่ใช้ในการเปรียบเทียบชิ้นงานที่ใช้ในการทดลอง โดยทำการทดสอบความแข็ง และเกรนโลหะของชิ้นงาน



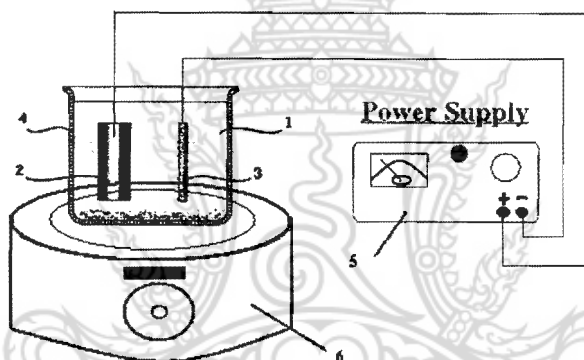
ภาพที่ 3.6 แผนผังรายละเอียดการทดลองและจำนวนชิ้นงานที่ใช้การทดลอง

จากภาพที่ 3.6 เป็นแผนผังรายละเอียดการทดลองและจำนวนชิ้นงานที่ใช้การทดลองการผลิตชิ้นงานทั้งสแตนสำเร็จรูป แบ่งออกเป็น 2 ส่วน ส่วนที่ 1 นำผงทั้งสแตนคาร์ไบด์นำเข้าผสมผงทั้งสแตนคาร์ไบด์จากการแยกสลาย 10 % มาทำการอัดขึ้นรูปและอบผึ่งตามช่วงอุณหภูมิที่กำหนด อุณหภูมิละ 1 ชั้น ส่วนที่ 2 นำผงทั้งสแตนคาร์ไบด์ นำเข้ามาทำการอัดขึ้นรูปและอบผึ่งตามช่วงอุณหภูมิที่กำหนด อุณหภูมิละ 1 ชั้น ดังนั้นชิ้นงานที่ใช้ในการทดลองทั้งหมด 9 ชิ้น แล้วทำการตรวจสอบค่าความแข็งชิ้นงาน และเกรนโลหะชิ้นงาน

3.9 ทำการทดลอง

ขั้นตอนการศึกษาเพื่อพัฒนาการผลิตชิ้นงานทั้งสแตนสำเร็จรูปโดยประกอบด้วย 3 กระบวนการ ได้แก่ การแยกสลายชิ้นงานทั้งสแตนคาร์ไบด์ กระบวนการขึ้นรูปและอบผึ่ง กระบวนการทดสอบวิเคราะห์ชิ้นงานทั้งสแตนคาร์ไบด์ โดยมีรายละเอียดของแต่ละขั้นตอน ดังนี้

3.9.1 ทดลองแยกสลายชิ้นงานทั้งสแตนคาร์ไบด์



ภาพที่ 3.7 อุปกรณ์ในการแยกเศษชิ้นงานทั้งสแตนคาร์ไบด์

อุปกรณ์ในการแยกสลายชิ้นงานทั้งสแตนคาร์ไบด์ ประกอบด้วยอุปกรณ์ที่สำคัญ 5 ส่วนได้แก่

อุปกรณ์หมายเลข 1..สารละลายไฮโดรคลอริก

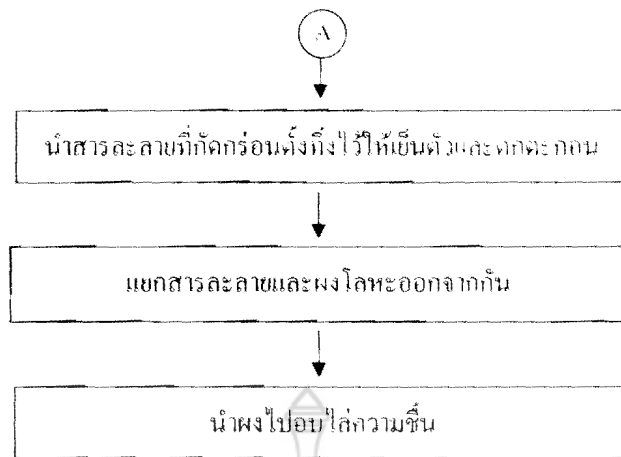
อุปกรณ์หมายเลข 2. เศษชิ้นงานทั้งสแตนคาร์ไบด์ที่มีขั้วอะโนด

อุปกรณ์หมายเลข 3. แท่งทั้งสแตนบริสุทธิ์ที่ต่อขั้วคาโทด

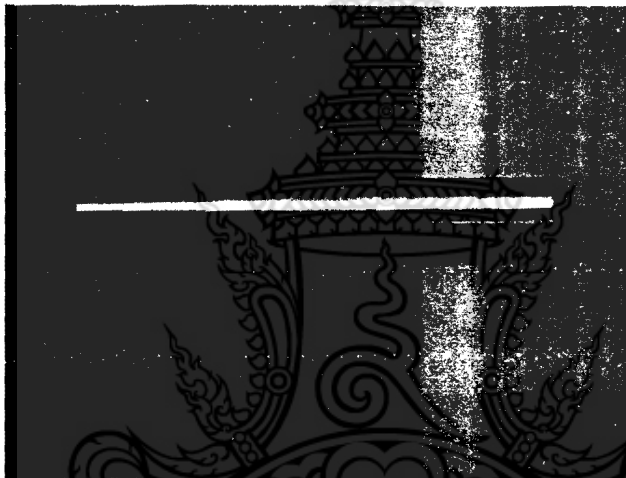
อุปกรณ์หมายเลข 4. ภาชนะใส่สารละลาย

อุปกรณ์หมายเลข 5. แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง (DC / Volt Supply)





ภาพที่ 3.8 แผนผังการแยกสลายชิ้นงานทั้งสแตนคาร์ไบด์ (ต่อ)



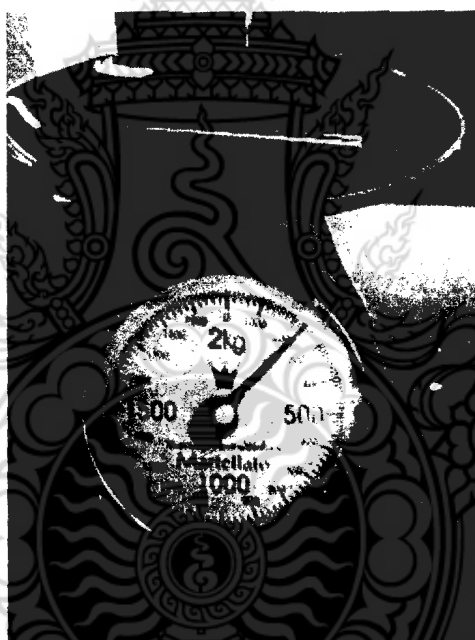
ภาพที่ 3.9 ชิ้นงานทั้งสแตนคาร์ไบด์ก่อนการแยกสลาย

จากภาพที่ 3.9 เป็นภาพเศษชิ้นงานทั้งสแตนคาร์ไบด์ก่อนที่จะทำการแยกสลาย โดยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 มิลลิเมตร และ ยาว 110 มิลลิเมตร โดยชิ้นงานนี้มีส่วนผสมของผงโคบอลต์ 15%



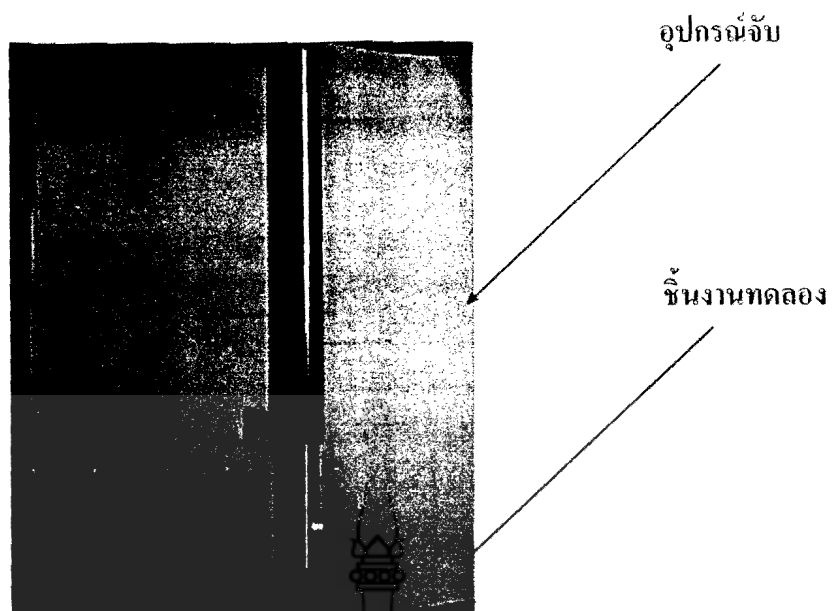
ภาพที่ 3.10 ทำความสะอาดชิ้นงานไม่ให้มีสิ่งปนเปื้อน

จากภาพที่ 3.10 เป็นภาพการทำความสะอาดชิ้นงานไม่ให้มีสิ่งปนเปื้อนที่ติดมากับชิ้นงาน ทั้งสแตนคาร์ไบด์ โดยการทำความสะอาดนี้ใช้แอลกอฮอล์เป็นตัวทำความสะอาด



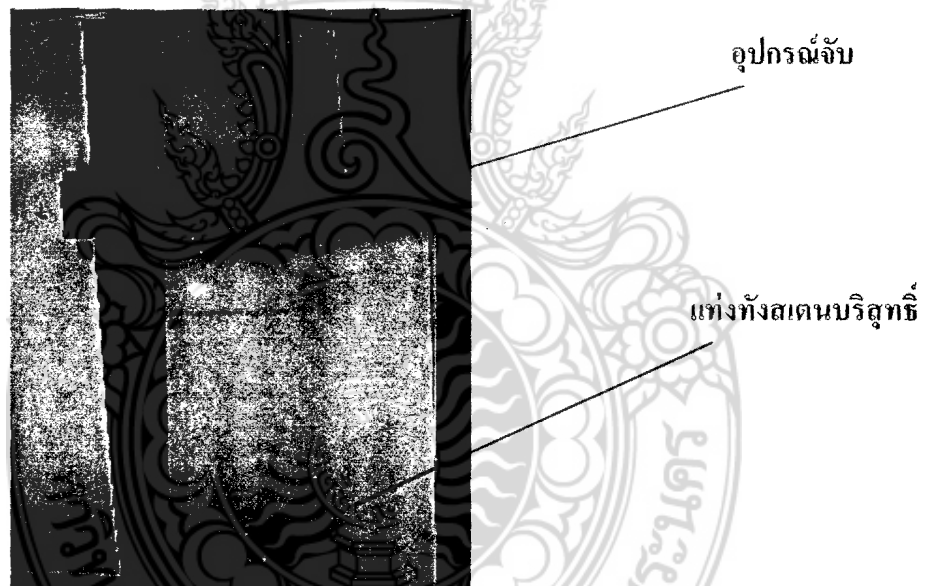
ภาพที่ 3.11 ตรวจสอบน้ำหนักเศษชิ้นงานทั้งสแตนคาร์ไบด์ก่อนการแยกสลาย

จากภาพที่ 3.11 เป็นการตรวจสอบน้ำหนักเศษชิ้นงานทั้งสแตนคาร์ไบด์ก่อนการแยกสลายเพื่อทำการตรวจสอบประสิทธิภาพในการแยกสลายของสารละลายที่ใช้ในการแยกสลาย



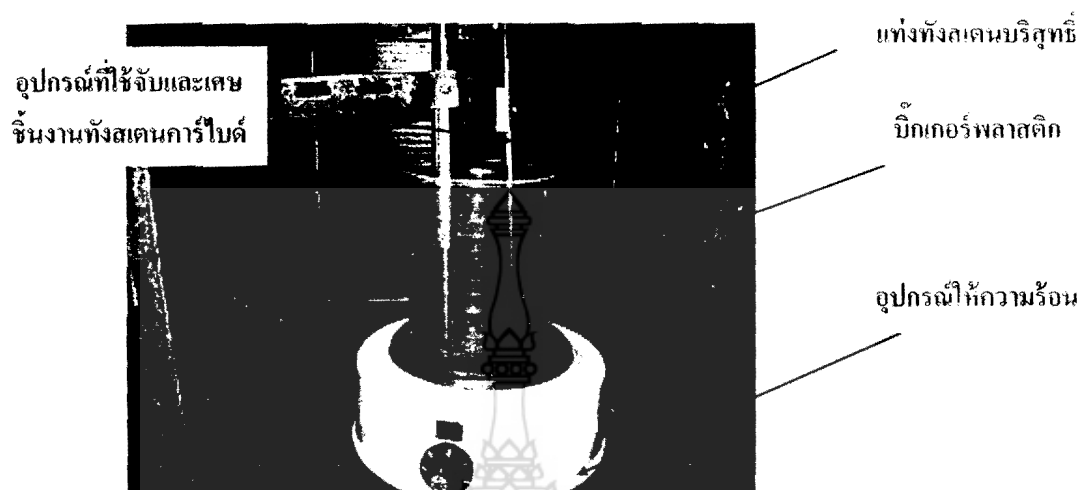
ภาพที่ 3.12 ติดตั้งชิ้นงานกับอุปกรณ์จับยึด

จากภาพที่ 3-12 เป็นการติดตั้งชิ้นงานทั้งสแตนเลสคาร์ไบด์กับอุปกรณ์จับยึด โดยอุปกรณ์ที่ใช้ในการจับยึดต้องเป็น โลหะสแตนเลสหรือวัสดุอื่นๆ ที่สามารถทนต่อการกัดกร่อนของสารละลาย



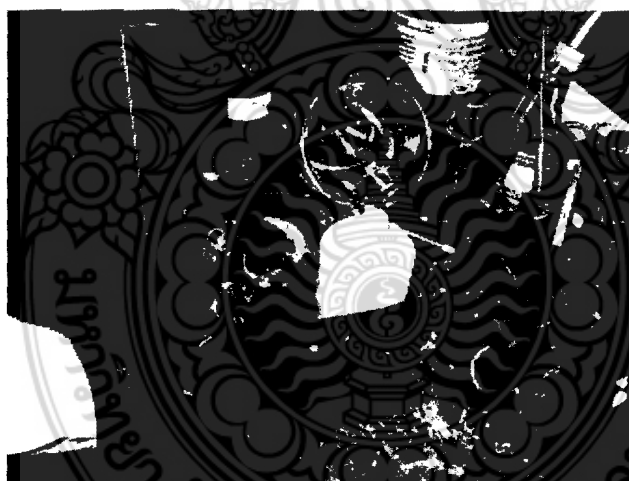
ภาพที่ 3.13 ติดตั้งแท่งทังสเตนบริสุทธิ์เข้ากับอุปกรณ์จับยึด

จากภาพที่ 3.13 เป็นการติดตั้งแท่งทังสเตนบริสุทธิ์เข้ากับอุปกรณ์จับยึด โดยอุปกรณ์ที่ใช้ต้องเป็นฉนวนเพื่อให้กระแสไฟฟ้าไหลเข้าเฉพาะแท่งทังสเตนบริสุทธิ์เท่านั้น



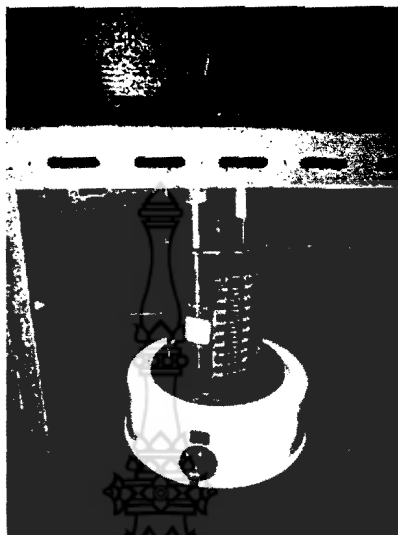
ภาพที่ 3.14 วางตำแหน่งของชิ้นงานที่แยกกับแท่งทังสเตนบริสุทธิ์

จากภาพที่ 3-14 เป็นการจัดวางตำแหน่งของแหล่งจ่ายความร้อนและระยะห่างของชิ้นงานที่แยกสลายกับแท่งทังสเตนบริสุทธิ์ โดยการใช้ภาชนะเป็นบักเก็ตพลาสติก เพื่อให้ชิ้นงานและแท่งทังสเตนบริสุทธิ์กระแทกบักเก็ตที่ใช้ในการแยกแตก



ภาพที่ 3.15 เทสารละลายไฮดรอกไซด์ลงภาชนะที่ใช้ในการเติม

จากภาพที่ 3.15 เทสารละลายไฮโดรคลอริกกลางภาชนะที่ใช้ในการเติมในการทดลองเนื่องจากในการทดลองสารละลายไฮโดรคลอริกจะถูกความร้อนทำให้สารละลายลดลงจึงต้องการเติมสารละลายเพิ่มทุกๆ 20 นาที



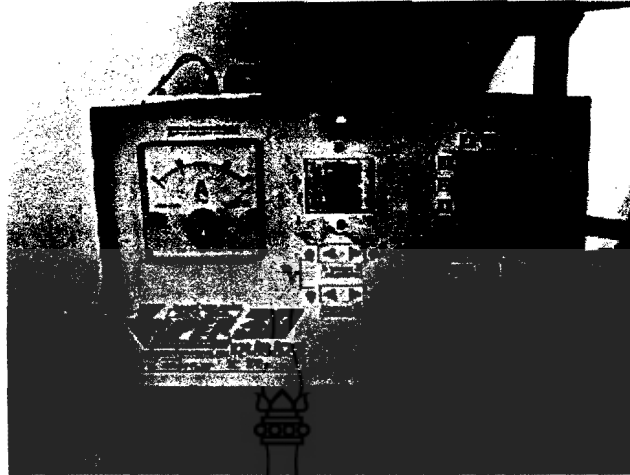
ภาพที่ 3.16 การต่อวงจรโดยให้ชิ้นงานที่แยกสายและแท่งทั้งสแตนเลสที่

จากภาพที่ 3.16 เป็นการต่อวงจรจากแหล่งจ่ายแรงดันและกระแสไฟฟ้าให้กับชิ้นงานที่แยกสายโดยกำหนดเป็นขั้วอะโนด และแท่งทั้งสแตนเลสที่ขั้วคาโทด



ภาพที่ 3.17 ให้ความร้อนกับสารละลายไฮโดรคลอริก

จากภาพที่ 3.17 เป็นการให้ความร้อนกับสารละลายไฮโดรคลอริกโดยให้ความร้อนประมาณ 5 นาที เพื่อให้สารละลายเกิดปฏิกิริยาในการกักกร่อนได้เร็วขึ้น



ภาพที่ 3.18 แหล่งจ่ายที่ใช้ในการกักกร่อนโดยตั้งค่าแรงดันและกระแสไฟฟ้า

จากภาพที่ 3.18 เป็นภาพแหล่งจ่ายที่ใช้ในการแยกสลายขณะที่เปิดแหล่งจ่ายที่ใช้ในการกักกร่อนโดยที่ป้อนแรงดันและกระแสไฟฟ้าให้กับขั้วอะโนดและคาโทด

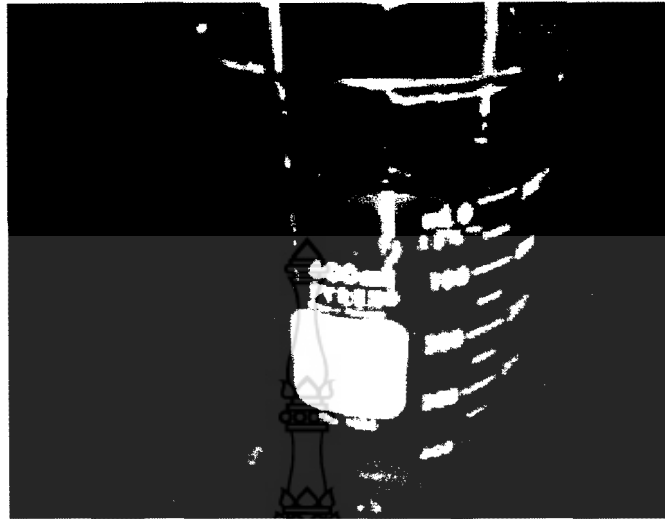


(ก) ค่าแรงดันไฟฟ้า

(ข) ค่ากระแสไฟฟ้า

ภาพที่ 3.19 วัดค่าแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าทุก 5 นาที

ภาพการใช้เครื่องมือวัดค่าแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าทุก 5 นาที เพื่อทำการบันทึกในตารางที่กำหนดเพื่อเปรียบเทียบกับแหล่งจ่ายและประสิทธิภาพในการแยกสลาย



ภาพที่ 3-20 ปฏิบัติการของสารละลายเกิดฟองอากาศเมื่อได้รับแรงดันและกระแสไฟฟ้า

จากภาพที่ 3.20 ปฏิบัติการของสารละลายเกิดฟองอากาศเมื่อได้รับแรงดันและกระแสไฟฟ้าที่ป้อนให้กับขั้วอะโนดและคาโทด



ภาพที่ 3.21 กรดเริ่มเปลี่ยนเป็นสีเขียวอ่อนและเดือดที่ขั้วไฟฟ้าทั้ง 2 ขั้ว ทำการวัดอุณหภูมิ

จากภาพที่ 3.21 กระจกเริ่มเปลี่ยนเป็นสีเขียวอ่อนและเดือดขึ้นที่ขั้วไฟฟ้าทั้ง 2 ขั้วและทำการวัดอุณหภูมิทุก 5 นาที เพื่อทำการบันทึกในตารางที่กำหนด



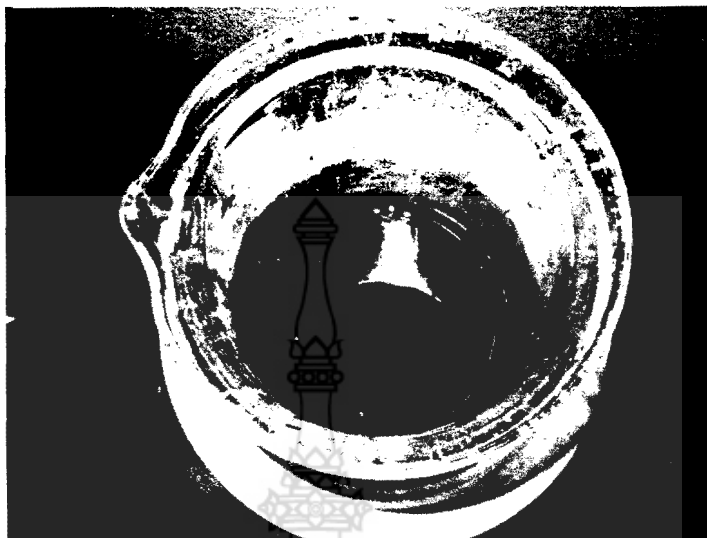
ภาพที่ 3.22 เติมสารละลายไฮโดรคลอริกทุกๆ 20 นาที

จากภาพที่ 3.22 เป็นการเติมสารละลายไฮโดรคลอริกทุกๆ 20 นาที เมื่อทำการแยกสลายเพื่อคงค่าของสารละลายที่ 300 ml. ในการแยกสลายชิ้นงานทั้งสแตนคาร์ไบด์



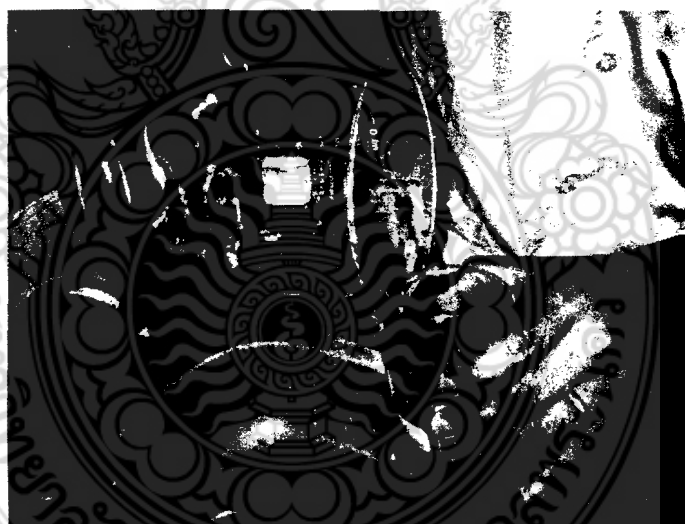
ภาพที่ 3.23 ชิ้นงานทั้งสแตนคาร์ไบด์ที่ถูกกัดกร่อน

จากภาพที่ 3.23 ภาพชิ้นงานทั้งสแตนคาร์ไบด์ที่ถูกกัดกร่อนจากการทดลองในการแยกสลาย
ชิ้นงานทั้งสแตนคาร์ไบด์จนได้ผงทั้งสแตนที่ต้องการจะนำไปใช้ในกระบวนการผลิตต่อไป



ภาพที่ 3.24 นำสารละลายที่กัดกร่อนตั้งทิ้งไว้ให้เย็นตัวและตกตะกอน

จากภาพที่ 3.24 นำสารละลายที่กัดกร่อน โดยสารละลายนี้จะมีส่วนผสมของกรดไฮโดรคลอริก
และผงทั้งสแตนคาร์ไบด์ที่ได้จากการแยกสลาย ตั้งทิ้งไว้ให้เย็นตัวและตกตะกอน



ภาพที่ 3.25 แยกสารละลายกรดไฮโดรคลอริกออกจากผงโลหะ

จากภาพที่ 3.25 เป็นการเทสารละลายกรดไฮโดรคลอริกออกโดยให้ในภาชนะมีแค่ผง หังสเดนที่ได้จากการแยกสลายหรือมีกรดไฮโดรคลอริกน้อยที่สุด ส่วนกรดไฮโดรคลอริกที่ออกก็ นำไปตั้งทิ้งไว้ให้ตกตะกอนอีกที



ภาพที่ 3.26 ใส่แอลกอฮอล์แล้วต้มให้แห้ง

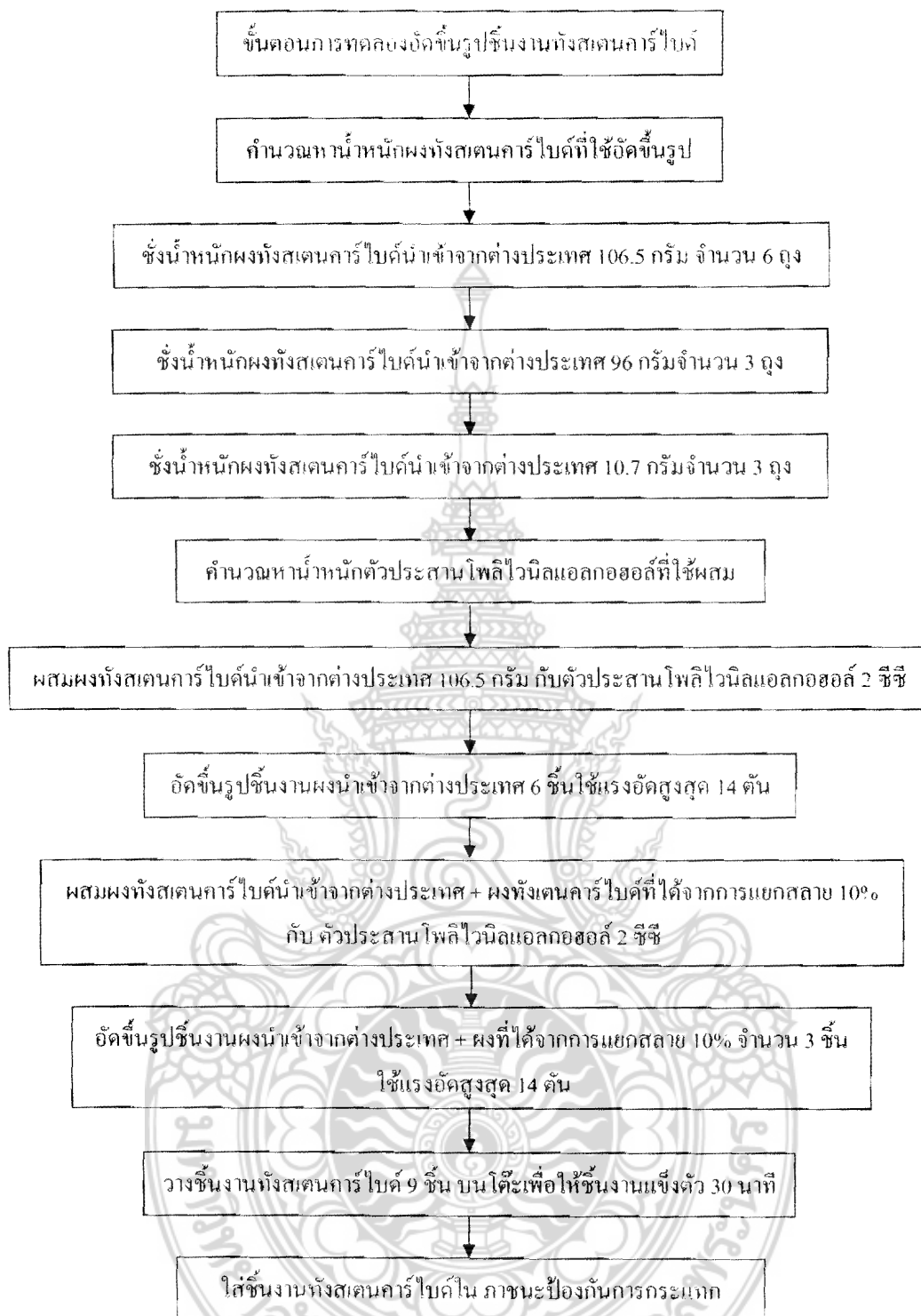
จากภาพที่ 3.26 เป็นการใส่แอลกอฮอล์พอประมาณแล้วทำการต้มให้ผงหังสเดนแห้งจนเป็นผง เพื่อทำการแยกผงหังสเดนและกรดไฮโดรคลอริก



ภาพที่ 3.27 ลักษณะของผงหังสเดนที่ได้จากการผ่านกระบวนการแยกสลาย

จากภาพที่ 3.27 ลักษณะของผงหังสเดนที่ได้จากการผ่านกระบวนการแยกสลายและการทำให้แห้งเป็นผง จากนั้นก็นำผงที่ไปอบเพื่อไล่ความชื้นก่อนจะนำผงที่ได้ไปผลิตชิ้นงานต่อไป

3.9.2 ทดลองอัดขึ้นรูปชิ้นงานทั้งสแตนคาร์ไบด์



ภาพที่ 3.28 แผนผังขั้นตอนการอัดขึ้นรูปชิ้นงานทั้งสแตนคาร์ไบด์

คำนวณหาน้ำหนักผงทั้งสแตนคาร์ไบด์และตัวประสานโพลีไวนิลแอลกอฮอล์ในการอัดขึ้นรูป
ชิ้นงานทั้งสแตนคาร์ไบด์

ชิ้นงานทั้งสแตนคาร์ไบด์มีขนาด 35 x 39 x 5 มิลลิเมตร หาปริมาตรชิ้นงานทั้งสแตนคาร์ไบด์

$$\begin{aligned} \text{สูตร} &= \text{กว้าง} \times \text{ยาว} \times \text{สูง} \\ &= 39 \times 39 \times 5 \text{ มิลลิเมตร} \\ &= 7605 \text{ ลูกบาศก์มิลลิเมตร} \\ &= 7.605 \text{ ลูกบาศก์เซนติเมตร} \end{aligned}$$

ความหนาแน่นผงทั้งสแตนคาร์ไบด์ผสมโคบอลต์ 17% = 14 กรัม / ซีซี

น้ำหนักชิ้นงานทั้งสแตนคาร์ไบด์

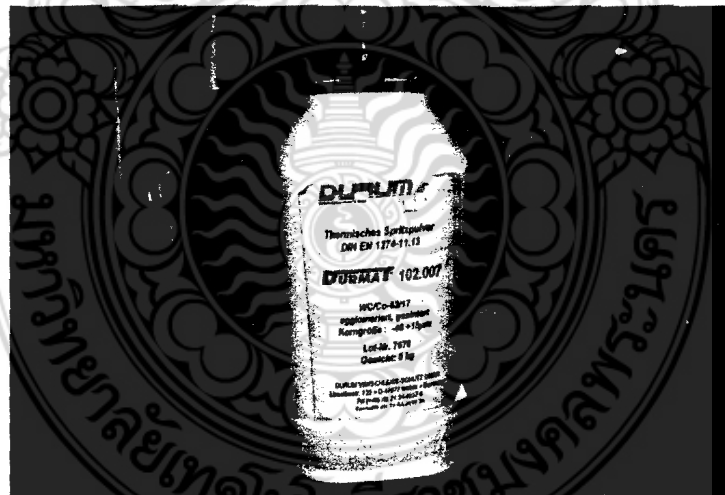
$$\begin{aligned} \text{สูตร} &= \text{ความหนาแน่น} \times \text{ปริมาตรชิ้นงาน} \\ &= 14 \times 7.605 \\ &= 106.47 \text{ กรัม} \end{aligned}$$

ใช้ผงทั้งสแตนคาร์ไบด์ผสมโคบอลต์ 17% อัดขึ้นรูปชิ้นงาน 6 ชิ้นๆละ = 106.5 กรัม

ใช้ผงทั้งสแตนคาร์ไบด์ที่ได้จากการแยก 10% = 10.5 กรัม

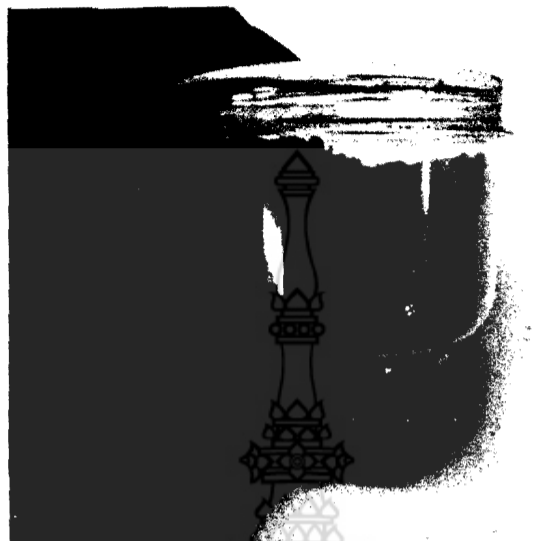
ใช้ผงทั้งสแตนคาร์ไบด์ผสมโคบอลต์ 17% อัดขึ้นรูปชิ้นงาน 3 ชิ้นๆละ = 96 กรัม

ใช้ตัวประสานโพลีไวนิลแอลกอฮอล์ ผสม 2% ของน้ำหนักชิ้นงาน = 2 ซีซี.



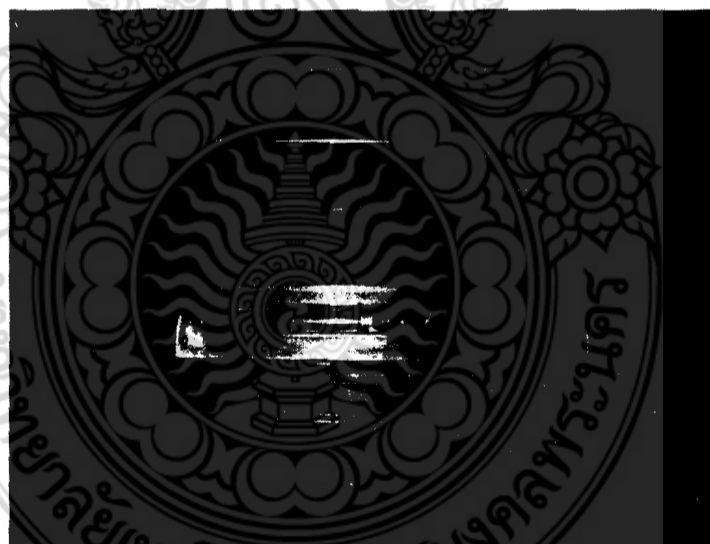
ภาพที่ 3.29 ภาพของใช้ผงทั้งสแตนคาร์ไบด์ 83% ผสมผงโคบอลต์ 17% ที่นำเข้าจากต่างประเทศ

จากภาพที่ 3.29 ภาชนะใส่ผงทั้งสแตนคาร์ไบด์ 83 %ผสมผงโคบอลต์ 17%ที่นำเข้ามาจากต่างประเทศที่ใช้ในการผลิตชิ้นงานในการทดลอง



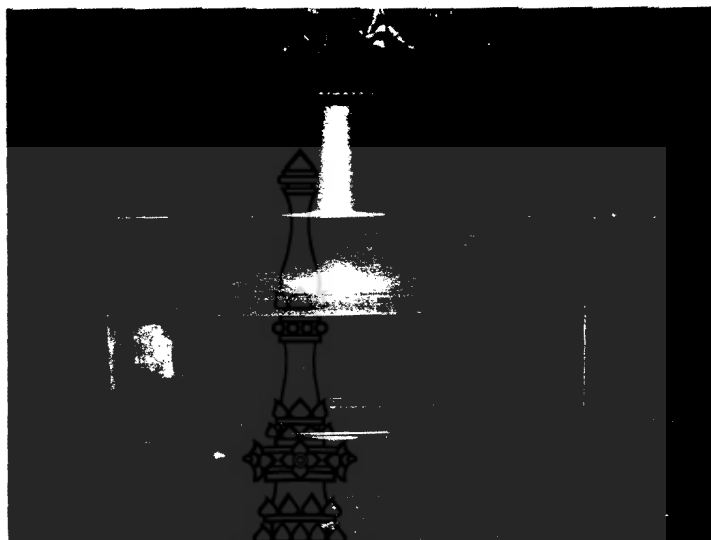
ภาพที่ 3.30 ผงทั้งสแตนคาร์ไบด์ที่ได้จากการแยกสลาย

จากภาพที่ 3.30 ผงทั้งสแตนคาร์ไบด์ที่ได้จากการแยกสลายด้วยวิธีอิเล็กโทรไลต์ที่ใช้ในการผลิตชิ้นงานในการทดลอง



ภาพที่ 3.31 ชั่งน้ำหนักผงทั้งสแตนคาร์ไบด์ที่นำเข้ามาจากต่างประเทศตุนละ 106.5 กรัม จำนวน 6 ตุง

จากภาพที่ 3.31 การชั่งน้ำหนักผงทั้งสแตนคาร์ไบด์ที่นำเข้ามาจากต่างประเทศ ถูกละ 106.5 กรัม จำนวน 6 ถูงที่ใช้ในการผลิตชิ้นงานในการทดลอง



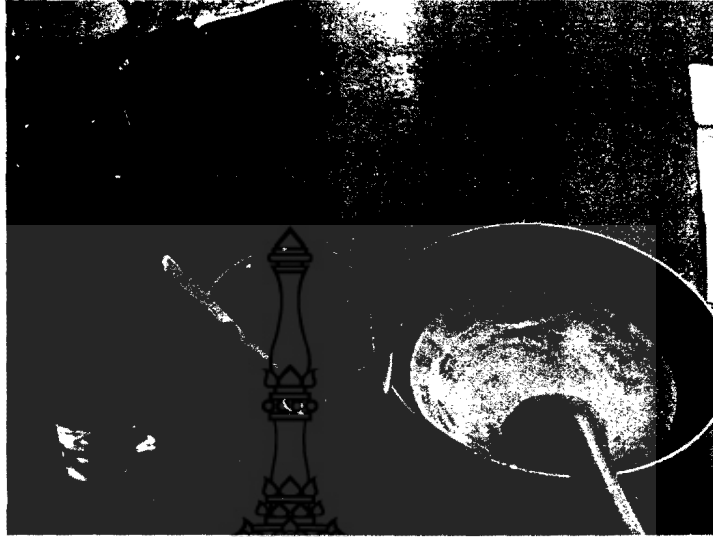
ภาพที่ 3.32 ชั่งน้ำหนักผงทั้งสแตนคาร์ไบด์ที่นำเข้ามาจากต่างประเทศ ถูกละ 96 กรัม กับจำนวน 3 ถูง

จากภาพที่ 3.32 ชั่งน้ำหนักผงทั้งสแตนคาร์ไบด์ที่นำเข้ามาจากต่างประเทศ ถูกละ 96 กรัม กับจำนวน 3 ถูง ที่ใช้ในการผลิตชิ้นงานในการทดลอง



ภาพที่ 3.33 ชั่งน้ำหนักผงทั้งสแตนคาร์ไบด์ที่ได้จากการแยกสลาย ถูกละ 10.5 กรัม จำนวน 3 ถูง

จากภาพที่ 3.33 ชั่งน้ำหนักผงทั้งสแตนคาร์ไบด์ที่ได้จากการแยกสลายถุงละ 10.5 กรัมจำนวน 3 ถุง ที่ใช้ในการผลิตชิ้นงานในการทดลอง



ภาพที่ 3.34 อุปกรณ์การผสมผงทั้งสแตนคาร์ไบด์กับตัวประสานโพลีไวนิลแอลกอฮอล์

จากภาพที่ 3.34 เป็นอุปกรณ์ที่ใช้การผสมผงทั้งสแตนคาร์ไบด์กับตัวประสานโดยประกอบไปด้วย ภาชนะที่ใช้ในการผสมและที่สำคัญคือตัวประสานโพลีไวนิลแอลกอฮอล์ที่ทำหน้าที่ยึดผงทั้งสแตนในการอัดขึ้นรูป



ภาพที่ 3.35 ปริมาณตัวประสานโพลีไวนิลแอลกอฮอล์ที่ใช้ผสมผงทั้งสแตนคาร์ไบด์ 2 ซีซี.

จากภาพที่ 3.35 เป็นการผสมตัวประสานโพลีไวนิลแอลกอฮอล์ โดยใช้ปริมาณ 2 ซีซี. : 1 ซีซี.
เพื่องานที่ทำหน้าที่ยึดผงทั้งสแตนในการอัดขึ้นรูป



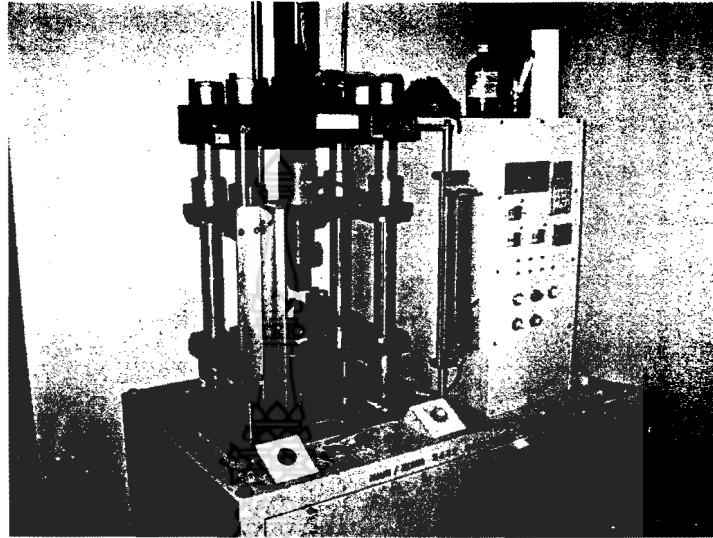
ภาพที่ 3.36 ผสมผงทั้งสแตนคาร์ไบด์ที่นำเข้าจากต่างประเทศกับตัวประสาน

จากภาพที่ 3.36 ขณะทำการผสมผงทั้งสแตนคาร์ไบด์ที่นำเข้าจากต่างประเทศกับตัวประสาน
โดยทำการผสมให้เข้ากันเพื่อให้ชิ้นงานยึดติดกันและเป็นรูปร่างที่กำหนด



ภาพที่ 3.37 ผสมผงทั้งสแตนคาร์ไบด์ที่นำเข้าจากต่างประเทศและผงทั้งสแตนคาร์ไบด์ที่ได้
จากการแยกสลายกับตัวประสานโพลีไวนิลแอลกอฮอล์

จากภาพที่ 3.37 ขณะทำการผสมผงทั้งสแตนคาร์ไบด์ที่นำเข้ามาจากต่างประเทศและผงทั้งสแตนคาร์ไบด์ที่ได้จากการแยกสลายกับตัวประสาน โพลีไวนิลแอลกอฮอล์ให้เข้ากันเพื่อให้ชิ้นงานยึดติดกันและเป็นรูปร่างที่กำหนด



ภาพที่ 3.38 เครื่องมืออัดขึ้นรูปผลิตชิ้นงานทั้งสแตนคาร์ไบด์



ภาพที่ 3.39 แม่พิมพ์ชิ้นงานที่ทำการอัดขึ้นรูป

จากภาพที่ 3.39 แม่พิมพ์ที่ทำการอัดขึ้นรูปโดยจะผลิตชิ้นงานให้มีขนาดกว้าง 39 มิลลิเมตร ยาว 39 มิลลิเมตรและสูง 5 มิลลิเมตร

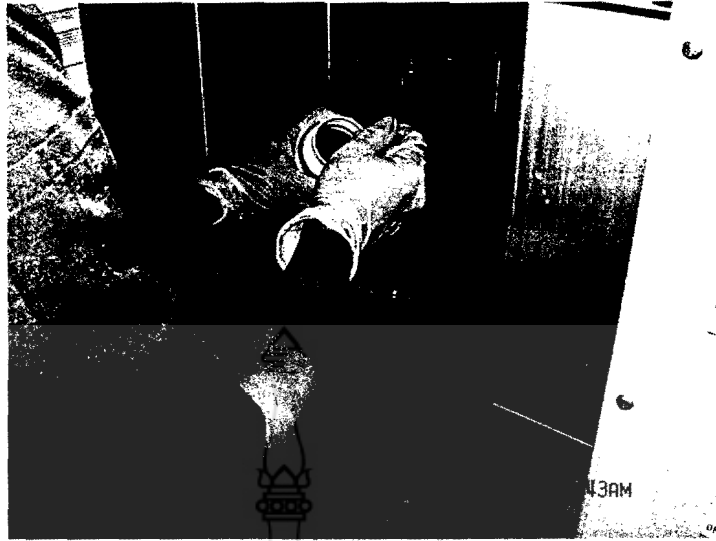


ภาพที่ 3.40 หัวกดอัดชนิดรูปขนาน



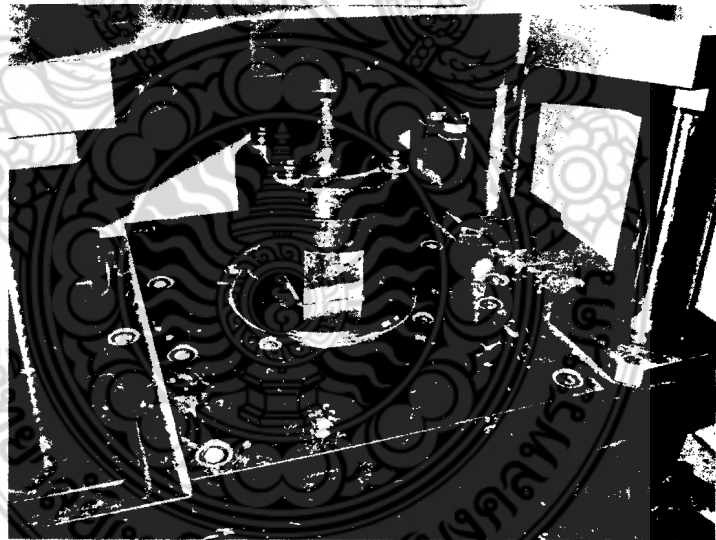
ภาพที่ 3.41 แรงอัดที่ใช้ 14 ตัน และเวลาที่อัดขึ้นงาน 30 วินาทีต่อชิ้น

จากภาพที่ 3.41 เป็นภาพจอหน้าปัดเครื่องควบคุมขณะที่เครื่องอัดทำงาน โดยแรงอัดที่ใช้ 14 ตันและเวลาที่อัดขึ้นงาน 30 วินาทีต่อชิ้น



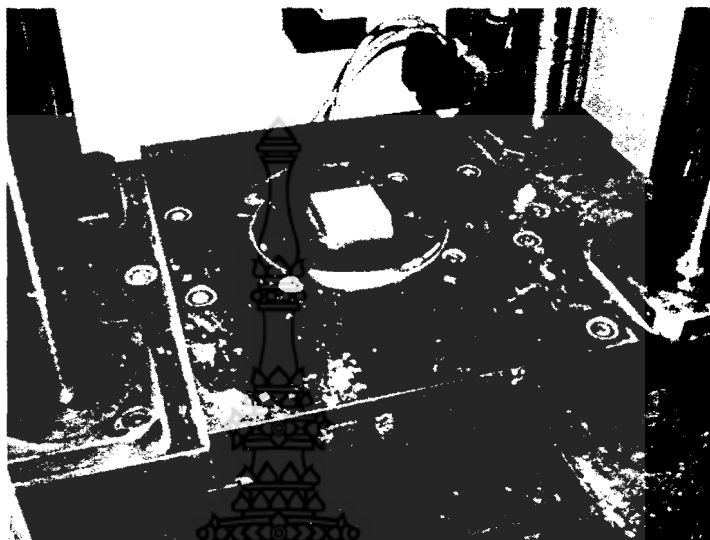
ภาพที่ 3.42 นำผงทั้งสเดนคาร์ไบด์ที่นำเข้ามาจากต่างประเทศที่ผสมตัวประสาน
โพลีไวนิลแอลกอฮอล์ใส่ลงไปในแม่พิมพ์

จากภาพที่ 3.42 นำผงทั้งสเดนคาร์ไบด์ที่นำเข้ามาจากต่างประเทศที่ผสมตัวประสานโพลีไวนิล
แอลกอฮอล์ใส่ลงไปในแม่พิมพ์ เพื่อทำการผลิตชิ้นงานในการทดลอง



ภาพที่ 3.43 เครื่องกำลังทำการอัดขึ้นรูปชิ้นงาน

จากภาพที่ 3.43 เครื่องกำลังทำการอัดขึ้นรูปชิ้นงานทั้งสแตนเลสคาร์ไบด์จากผงทั้งสแตนเลสคาร์ไบด์ ที่นำเข้าจากต่างประเทศจำนวน 6 ชิ้นและชิ้นงานทั้งสแตนเลสคาร์ไบด์จากผงที่ได้จากการแยกสลาย ผสมผงทั้งสแตนเลสคาร์ไบด์ที่นำเข้าจากต่างประเทศ จำนวน 3 ชิ้น



ภาพที่ 3.44 ชิ้นงานทั้งสแตนเลสคาร์ไบด์ที่ได้จากการอัดขึ้นรูป



ภาพที่ 3.45 นำชิ้นงานที่ได้ใส่ถุงปิดให้สนิทป้องกันอากาศเข้าวางไว้บนโต๊ะ

จากภาพที่ 3.45 นำชิ้นงานที่ได้ใส่ถุงปิดให้สนิทป้องกันอากาศเข้าวางไว้บนโต๊ะ โดยกำหนดระยะเวลาที่ 30 นาที เพื่อให้ชิ้นงานเกิดการแข็งตัวก่อนทำการเคลื่อนย้ายชิ้นงาน



ภาพที่ 3.46 นำชิ้นงานใส่ลงภาชนะที่ปิดสนิทวางลงที่ฟองน้ำเพื่อป้องกันการกระแทก



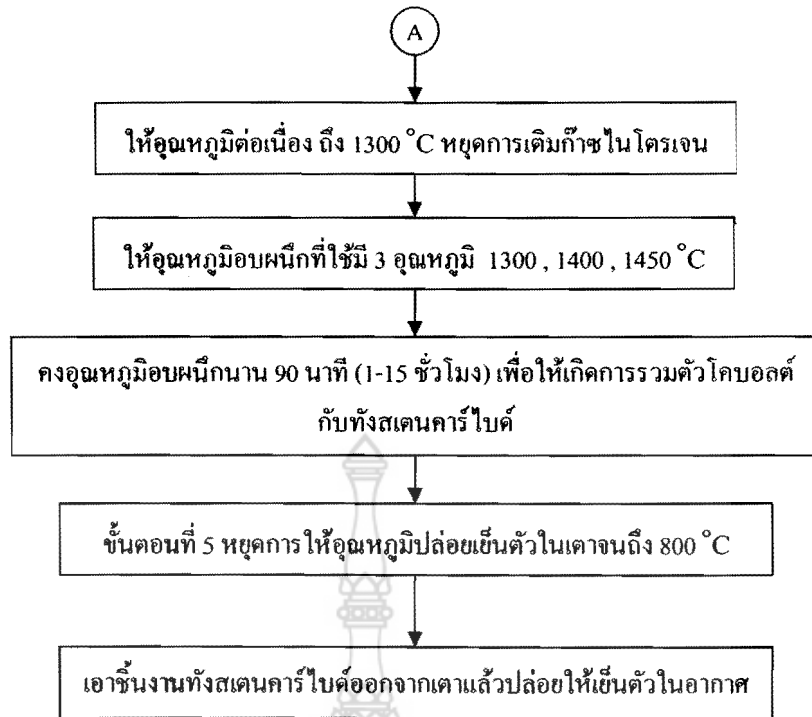
ภาพที่ 3.47 เตรียมชิ้นงานทั้งสแตนเลสคาร์ไบด์ที่ได้ไปอบพ่นึก

จากภาพที่ 3.47 เนื่องจากในกระบวนการผลิตชิ้นงานไม่ได้อยู่ที่เดียวกันกับที่ทำการอบพ่นึกชิ้นงาน จึงต้องป้องกันชิ้นงานมิให้เกิดการเสียหาย จากการเคลื่อนย้ายชิ้นงาน และที่สำคัญป้องกันอากาศไม่ทำปฏิกิริยากับชิ้นงานทั้งสแตนเลสคาร์ไบด์

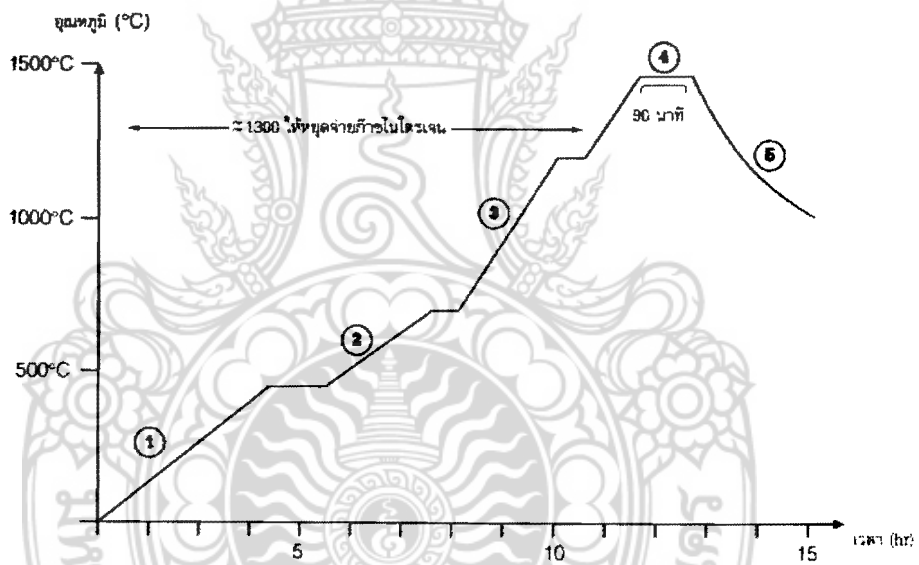
3.9.3 ทดลองอบผงชิ้นงานทั้งสแตนคาร์ไบด์



ภาพที่ 3-48 แผนผังการอบผง



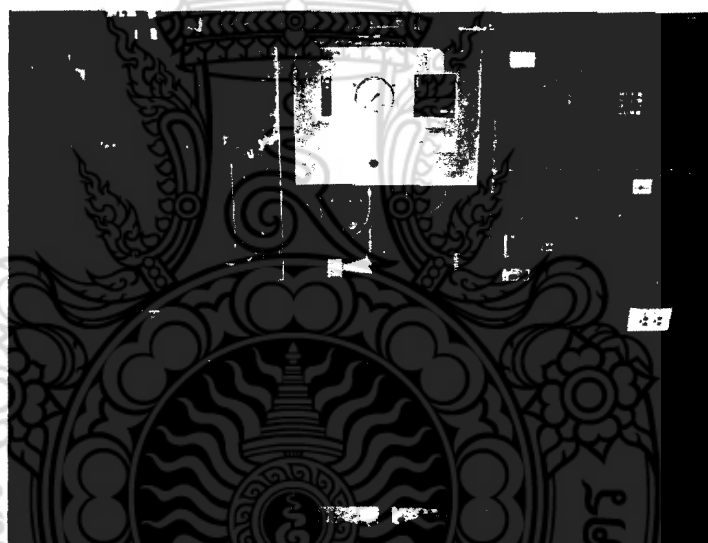
ภาพที่ 3.48 แผนผังการอบผืน(ต่อ)



ภาพที่ 3-49 กราฟแสดงความสัมพันธ์อุณหภูมิกับเวลาการอบผืน

3.9.3.1 ขั้นตอนการอบผืนึก

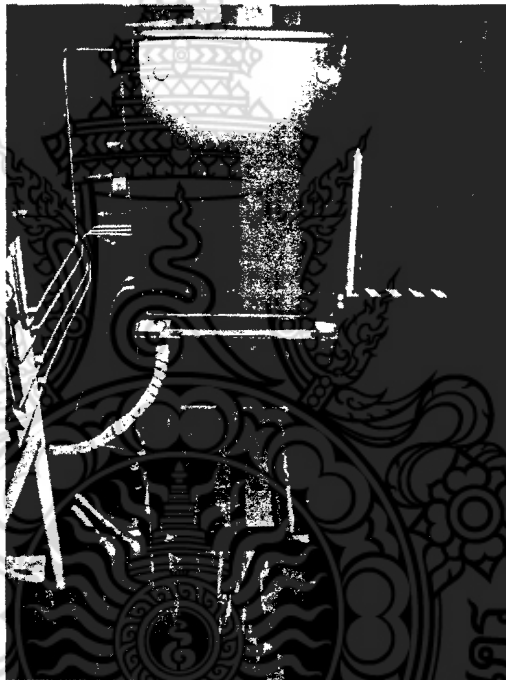
- 1) ขั้นตอนไล่ความชื้น ให้อุณหภูมิ $\approx 400^{\circ}\text{C}$ ใช้เวลา 4 ชั่วโมง แล้วคงอุณหภูมินี้ไว้ 1 ชั่วโมง
- 2) ขั้นตอนไล่ตัวประสาน (Dewaxing) ให้อุณหภูมิ $\approx 700^{\circ}\text{C}$ ใช้เวลา 2 ชั่วโมงแล้วคงอุณหภูมินี้ไว้ 1 ชั่วโมงเพื่อไล่ตัวประสานโพลีไวนิลแอลกอฮอล์
- 3) ขั้นตอนการให้ความร้อนก่อนการอบผืนึก (Presintering) ให้อุณหภูมิต่อเนื่องถึง 1200°C ใช้เวลา 3 ชั่วโมง แล้วคงอุณหภูมินี้ไว้ 1 ชั่วโมงเพื่อให้ความร้อนก่อนการอบผืนึก
- 4) ขั้นตอนการอบผืนึก ให้อุณหภูมิอบผืนึกที่ใช้มี 3 อุณหภูมิ 1350°C ใช้เวลา 3 ชั่วโมง แล้วคงอุณหภูมินี้ไว้ 1 ชั่วโมง เพื่อให้ความร้อนก่อนการอบผืนึก 90 นาที (1-1.5 ชั่วโมง) เพื่อเกิดการรวมตัวกันระหว่าง ทั้งสแตนคาร์ไบด์ และ โกลบอลต์
- 5) ขั้นตอนการปล่อยให้เย็นตัว (Cooling) ปล่อยให้ชิ้นงานเย็นตัวในเตาจนถึงอุณหภูมิ 800°C เอาชิ้นงานออกจากเตาอบแล้วปล่อยให้เย็นตัวในอากาศ



ภาพที่ 3.50 เครื่องอบผืนึก



ภาพที่ 3.51 จุดใส่ชิ้นงานทั้งสแตนคาร์ไบด์ที่จะอบผนึก



ภาพที่ 3-52 ด้านข้างเครื่องอบผนึกชิ้นงานทั้งสแตนคาร์ไบด์

จากภาพที่ 3.52 เป็นต้นข้างเครื่องอบผนึกชิ้นงานทั้งสแตนคาร์ไบด์โดยมีขนาดของเครื่องกว้าง 50 เซนติเมตร ยาว 60 เซนติเมตร สูง 100 เซนติเมตร อุณหภูมิสูงสุดของเครื่อง 1450 °C ที่สถาบันวิจัยและวัสดุแห่งชาติ (MTEC)

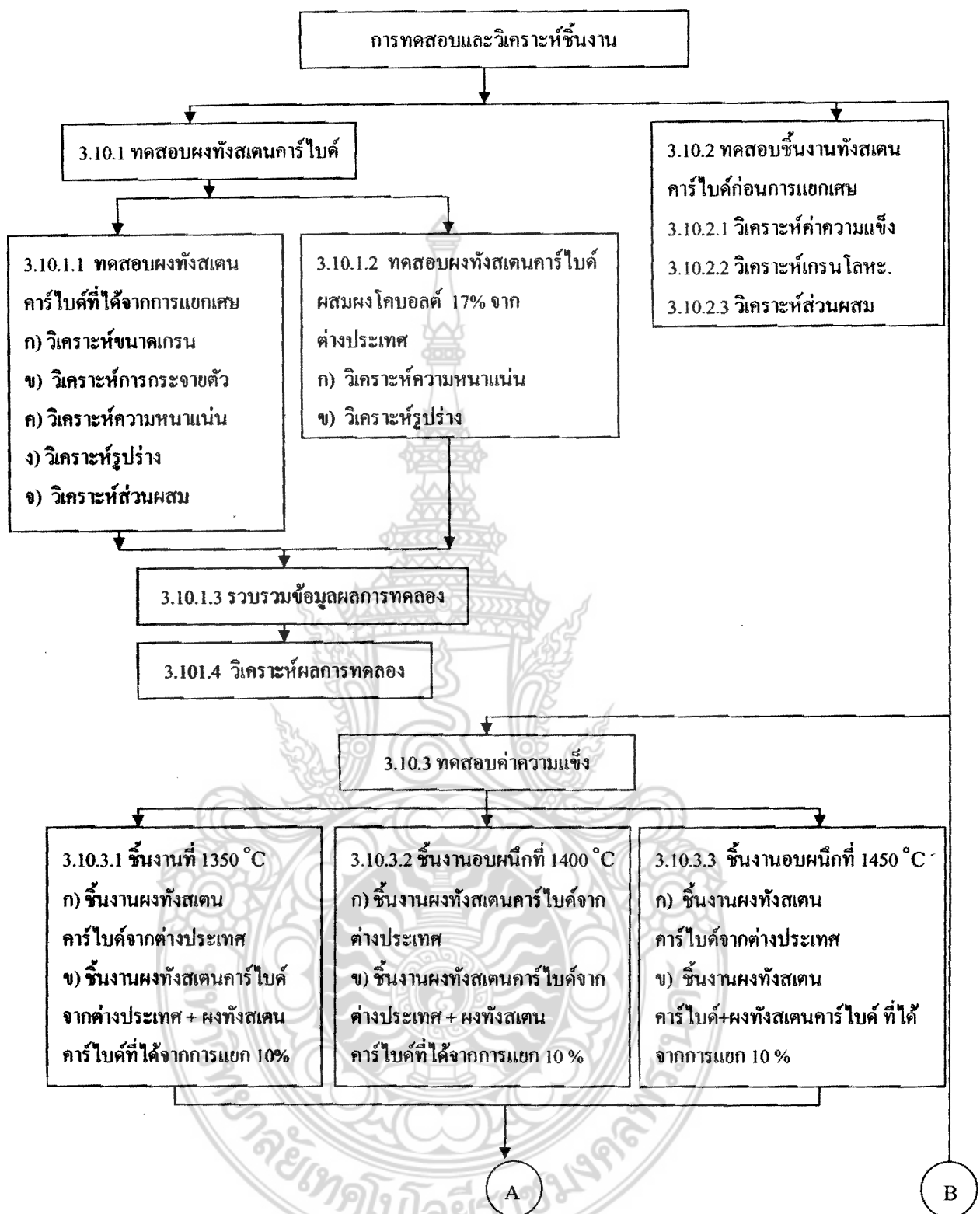


ภาพที่ 3.53 สถานที่จัดวางถังก๊าซไนโตรเจนที่ใช้สำหรับปกคลุมชิ้นงานทั้งสแตนคาร์ไบด์ในการอบผนึก

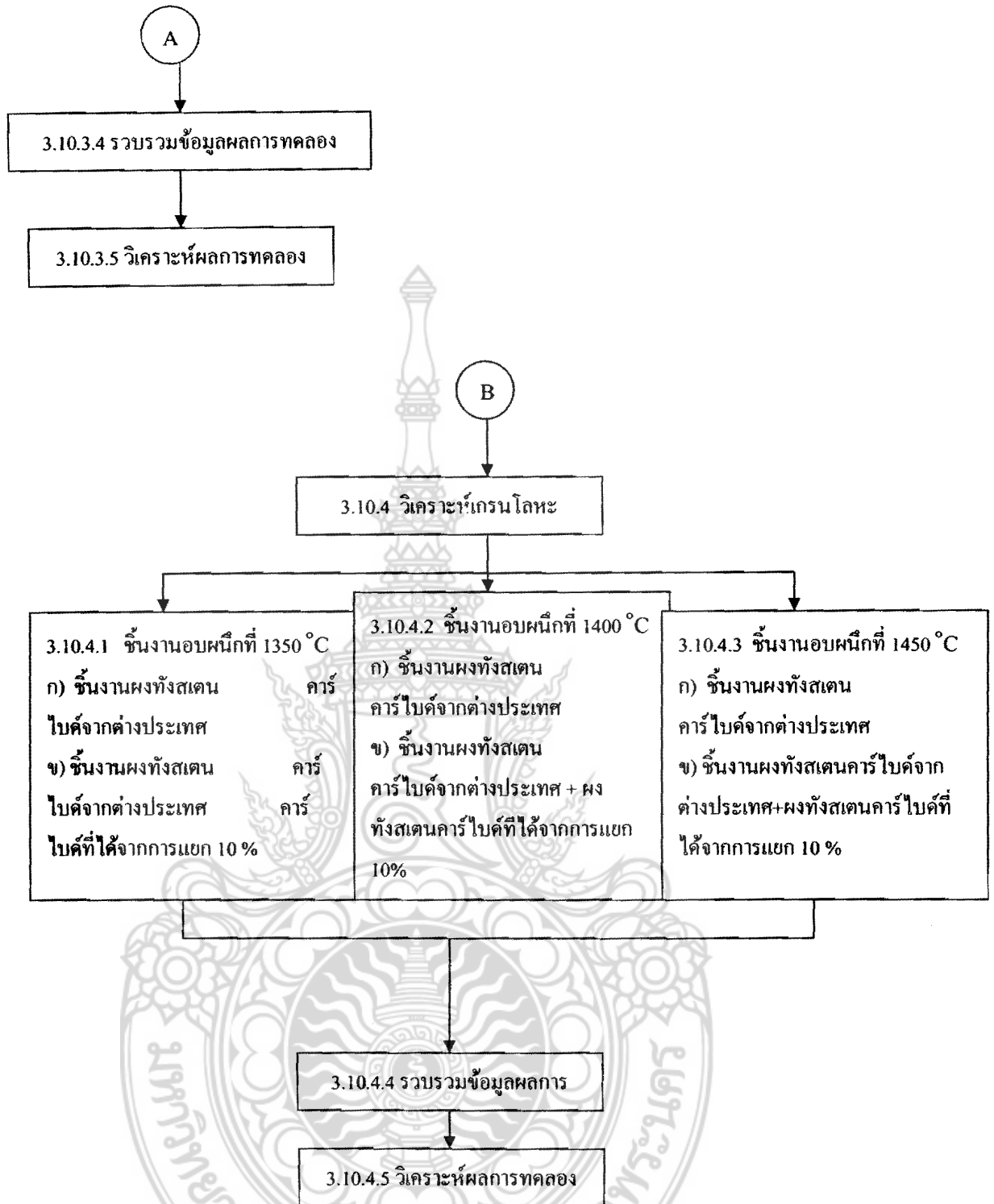


ภาพที่ 3.54 หน้าจอควบคุมอุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการอบผนึก

3.10 ขั้นตอนการทดสอบและวิเคราะห์ชิ้นงาน



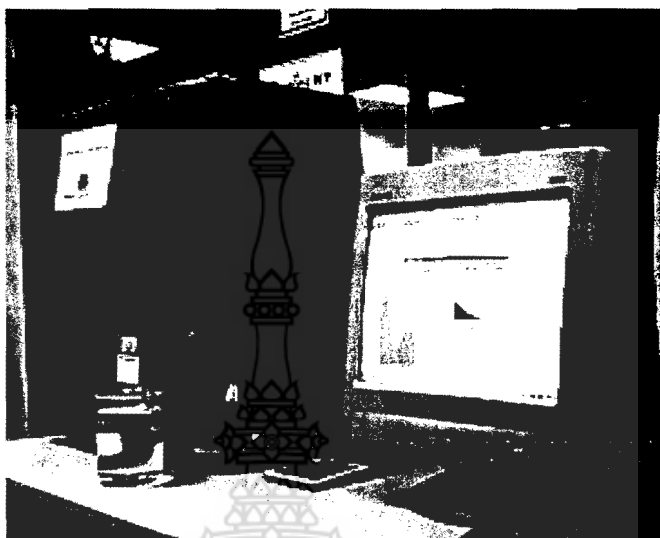
ภาพที่ 3.55 แผนผังการทดสอบและวิเคราะห์ชิ้นงาน



ภาพที่ 3.55 แผนผังการทดสอบและวิเคราะห์ชิ้นงาน (ต่อ)

3.10.1 การทดสอบแผงรังสีเตนการ์ไบต์ที่ได้จากการแยกสลาย

ทำการตรวจสอบขนาดเกรน การตรวจสอบการกระจายตัว การตรวจสอบความหนาแน่นการตรวจสอบรูปร่าง การตรวจสอบส่วนผสมแผงรังสีเตนการ์ไบต์



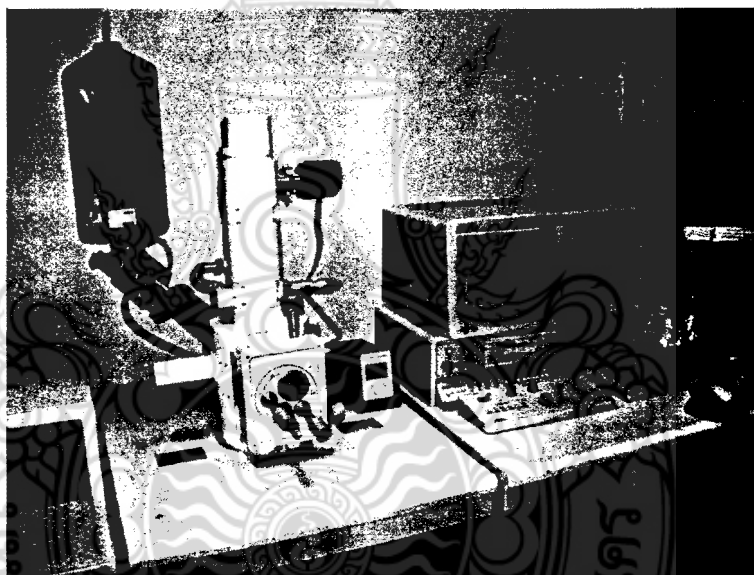
ภาพที่ 3.56 เครื่องมือวิเคราะห์ขนาดและการกระจายตัว



ภาพที่ 3.57 การวิเคราะห์ขนาดและการกระจายตัว

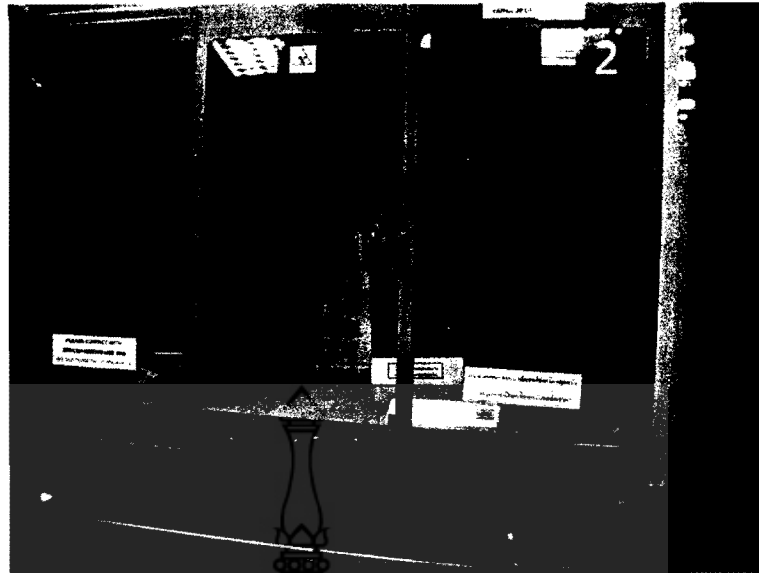


ภาพที่ 3.58 เครื่องมือวิเคราะห์ความหนาแน่นผงทั้งสแตนคาร์ไบด์



ภาพที่ 3.59 เครื่องมือวิเคราะห์รูปร่างผงทั้งสแตนคาร์ไบด์ (SEM)

จากภาพที่ 3.59 เป็นเครื่องมือวิเคราะห์รูปร่าง และเกรน โกลหะของชิ้นงานทั้งสแตนคาร์ไบด์ที่สถาบันวิจัยโลหะ และวัสดุแห่งชาติ (MTEC)



ภาพที่ 3.60 เครื่องมือวิเคราะห์ส่วนผสมทั้งสแตนครีไบต์ (XRD)

3.10.2 การทดสอบชิ้นงานทั้งสแตนครีไบต์ก่อนการแยกสลาย

ทำการตรวจสอบส่วนผสม การตรวจสอบเกรน โลหะของชิ้นงาน การตรวจสอบค่าความแข็งของชิ้นงาน



ภาพที่ 3.61 เครื่องมือวิเคราะห์ความแข็งของชิ้นงาน



ภาพที่ 3.62 เครื่องมือวิเคราะห์ส่วนผสมของชิ้นงาน

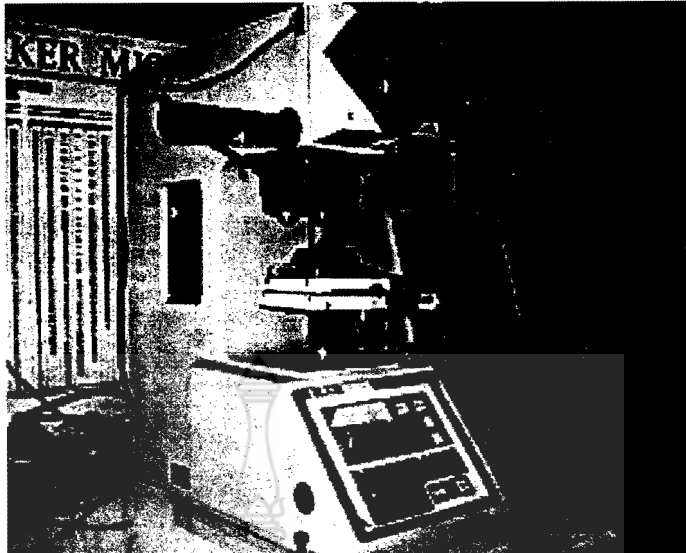


ภาพที่ 3.63 เครื่องมือวิเคราะห์เกรนโลหะของชิ้นงาน

3.10.3 การทดสอบชิ้นงานทั้งสแตนคาร์ไบด์

ทำการตรวจสอบความแข็งของชิ้นงาน ตรวจสอบเกรนโลหะของชิ้นงานทั้งสแตน

คาร์ไบด์



ภาพที่ 3.64 เครื่องมือวิเคราะห์ความแข็งของหินงาน

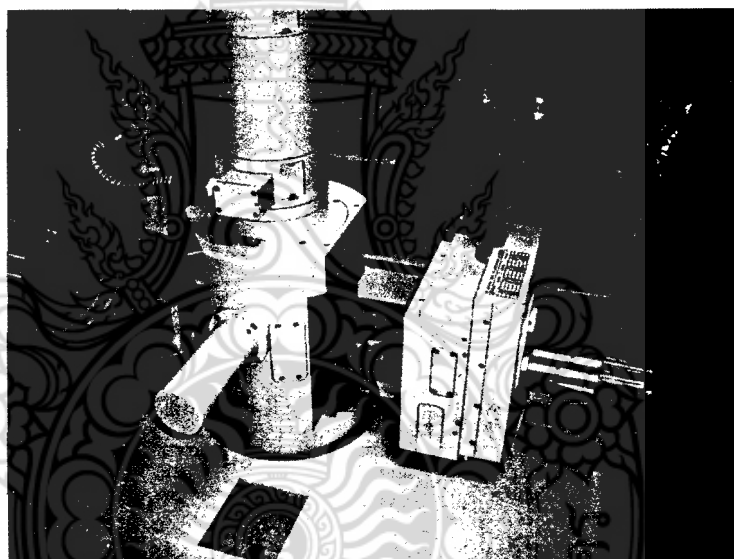


ภาพที่ 3.65 การวิเคราะห์ความแข็งของหินงาน

จากภาพที่ 3.65 เป็นการวิเคราะห์ความแข็งของหินงานที่ทำการผลิต เพื่อทำการบันทึกค่าความแข็งของหินงานทั้งหมดทุกชิ้น



ภาพที่ 3.66 เครื่องมือวิเคราะห์เกรนโลหะของชิ้นงาน (SEM)



ภาพที่ 3.67 นำชิ้นงานทั้งสแตนคาร์ไบด์เข้าเครื่องวิเคราะห์เกรนโลหะของชิ้นงาน

จากภาพที่ 3.67 เป็นการนำชิ้นงานทั้งสแตนคาร์ไบด์เข้าเครื่องวิเคราะห์เกรนโลหะ(SEM) ของชิ้นงาน เพื่อตรวจสอบโครงสร้างของชิ้นงาน

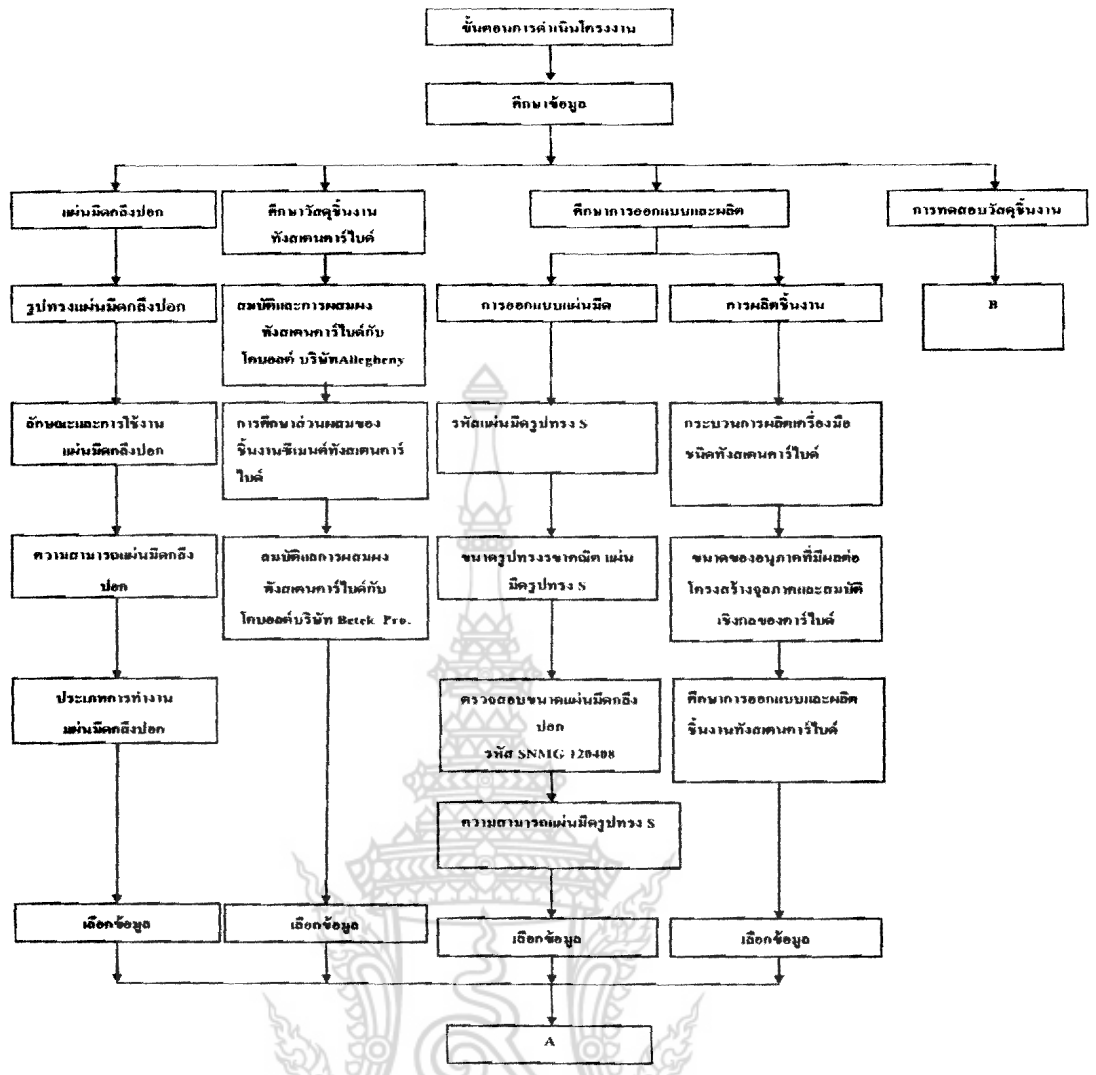
บทที่ 4

การผลิตแผ่นมีดทั้งสแตนคาร์ไบด์

4.1 บทนำ

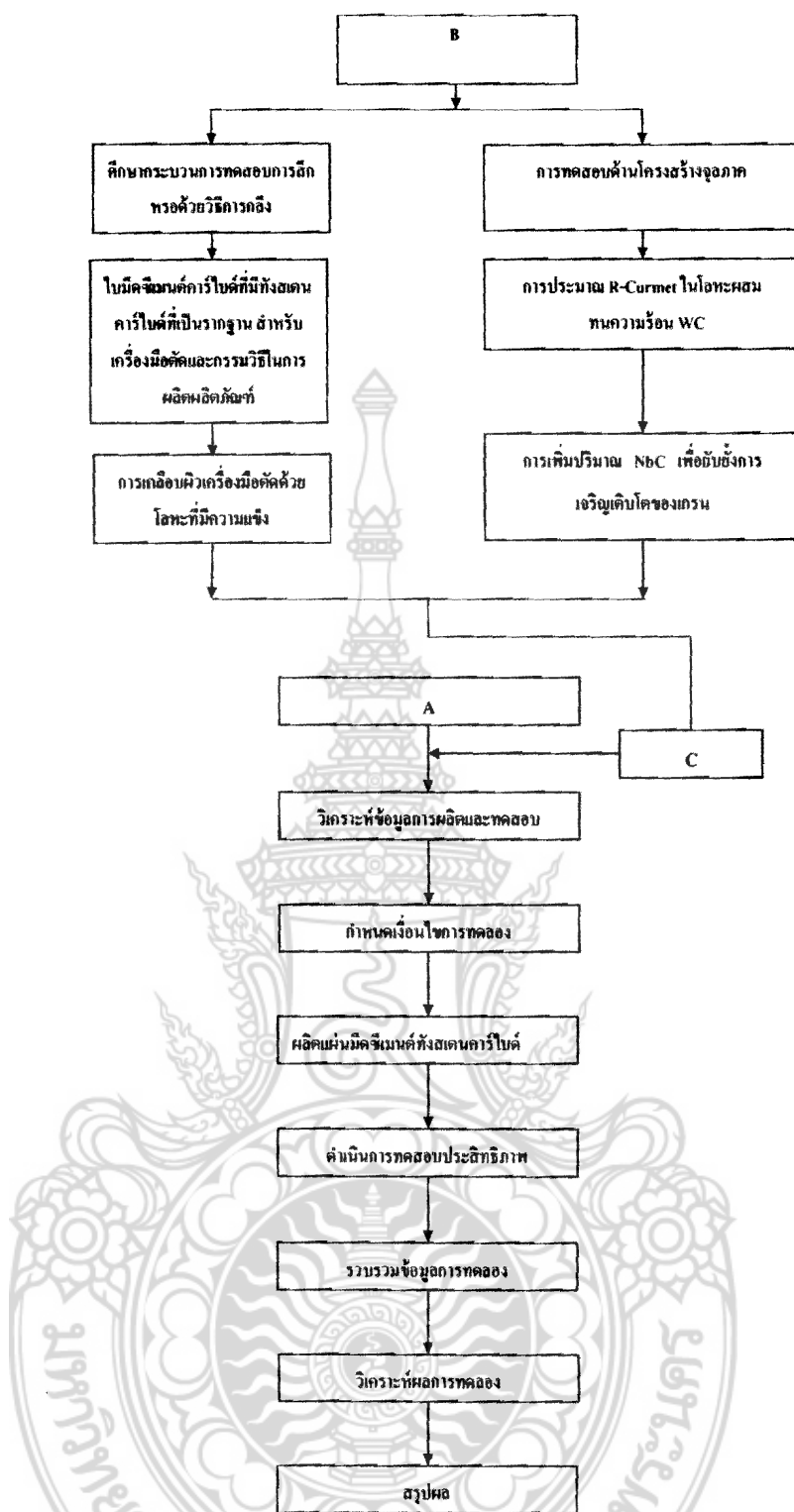
ในบทนี้กล่าวถึงวิธีการทดลองผลิตชิ้นงาน ในลำดับต่าง ๆ รวมถึงกระบวนการทดสอบกระบวนการวิเคราะห์ชิ้นงาน และศึกษาแนวทางการนำผงทั้งสแตนคาร์ไบด์ (Tungsten carbide Powder) มาศึกษาถึงคุณสมบัติของผงทั้งสแตนคาร์ไบด์ กับผงโคบอลต์ ศึกษาถึงกระบวนการขึ้นรูปทางโลหะผง (Powder metallurgy) เพื่อเป็นแนวทางในการอัดขึ้นรูปชิ้นงานซีเมนต์ทั้งสแตนคาร์ไบด์ ศึกษาถึงอุณหภูมิที่ใช้ในการอบผึ่งที่มีผลต่อสมบัติชิ้นงานซีเมนต์ทั้งสแตนคาร์ไบด์

1. ศึกษาข้อมูล
2. แผ่นมีดกลึงปอก
3. ศึกษาวัสดุชิ้นงานทั้งสแตนคาร์ไบด์
4. ศึกษาการออกแบบและผลิต
5. การทดสอบวัสดุ
6. วิเคราะห์ข้อมูลการผลิตและทดสอบ
7. กำหนดเงื่อนไขการทดสอบ
8. ผลิตแผ่นมีดซีเมนต์ทั้งสแตนคาร์ไบด์
9. ดำเนินการทดสอบประสิทธิภาพ
10. รวบรวมข้อมูลการทดลอง
11. วิเคราะห์ผลการทดสอบ
12. สรุปผล



ภาพที่ 4.1 แผนภูมิแสดงขั้นตอนดำเนินงาน





ภาพที่ 4.1 แผนภูมิแสดงขั้นตอนดำเนินงาน (ต่อ)

4.2 ศึกษาข้อมูล

การดำเนินโครงการ เรื่อง การศึกษาการออกแบบและผลิตแผ่นมีดซีเมนต์ทั้งสแตนคาร์ไบด์ ใน การดำเนินโครงการ ได้กำหนดแผนการดำเนินงานตั้งแต่เริ่มต้นศึกษารวบรวมข้อมูลจนถึง กระบวนการทดสอบ โดยกำหนดแผนการทำงาน ดังแผนภูมิแสดงขั้นตอนดำเนินการตามภาพที่ 4.1

4.3 ศึกษาผลิตภัณฑ์แผ่นมีดกลึงปอก

ศึกษาข้อมูลของผลิตภัณฑ์แผ่นมีดกลึงปอก ได้สอบถามข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับตัวแทนจำหน่าย เพื่อทำการเก็บข้อมูล แผ่นมีดที่ผลิตจากวัสดุประเภทโลหะผงทั้งสแตนคาร์ไบด์เป็นหลักซึ่ง ประกอบด้วยบริษัทต่างๆ ดังต่อไปนี้

บริษัท เคนนาเมทอล (ประเทศไทย) จำกัด ที่อยู่ 2140/90 - 93 ถนนรามคำแหง แขวงหัวหมาก เขตบางกะปิ กรุงเทพฯ ๙ 10240 โทร. 02 - 3771501 - 4, 02 - 7320445 - 8 ผลิตภัณฑ์ที่จัดจำหน่าย ได้แก่ แผ่นมีดคาร์ไบด์ คัมมีดกลึง ดอกกัด คัมมีดกัด หัวกัดชนิดต่างๆ ดอกสว่าน เป็นต้น

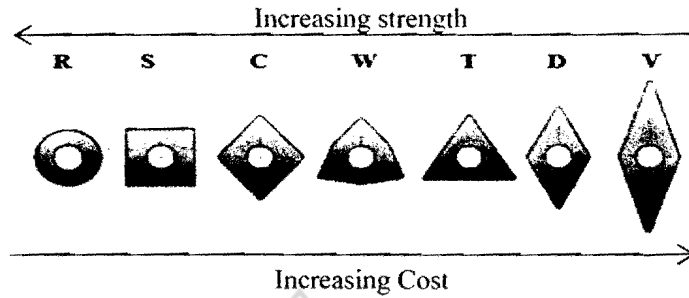
บริษัท เคียวเซร่า เอเชีย แปซิฟิค (ไทยแลนด์) จำกัด ที่อยู่ 159 อาคารเสริมมิตรทาวเวอร์ ชั้น 19 ถ.สุขุมวิท 21 แขวงคลองเตยเหนือ เขตวัฒนา กรุงเทพฯ 10110 โทร. 02 - 661 - 6400 ผลิตภัณฑ์ที่จัดจำหน่าย ได้แก่ มีดกลึง คัมมีดกลึง ดอกกัด มีดกัด คัมมีดกัด หัวกัดชนิดต่างๆ ดอกสว่าน เป็นต้น

บริษัท ทังกาลอย คัทติ้ง ทูล (ไทยแลนด์) จำกัด ที่อยู่ ชั้น 11 อาคารสรชัย เลขที่ 23/7 ซอย สุขุมวิท 63 ถนนสุขุมวิท แขวงคลองตันเหนือ เขตวัฒนา กรุงเทพฯ 10110 โทร. 02 - 714 - 3130 - 3 ผลิตภัณฑ์ที่จัดจำหน่าย ได้แก่ แผ่นมีดคาร์ไบด์ คัมมีดกลึง ดอกกัด คัมมีดกัด หัวกัด ดอกสว่าน สกรู เป็นต้น

บริษัท เบียงฮงเส็ง จำกัด ที่อยู่ 666-668 ถนนเจริญกรุง แขวง สัมพันธวงศ์ เขตสัมพันธวงศ์ กรุงเทพฯ 10100 โทร. 02 - 224 - 0776 - 8 ตัวแทนจำหน่ายเครื่องมือตัดคีย์ห้อยโคเมอร์ เช่น แผ่นมีด ดอกสว่าน ดอกกัด เป็นต้น และเทคนิคการใช้เครื่องมือตัด

ห้างหุ้นส่วน จำกัด เจ.ที.เอช ที่อยู่ 58/4-5 หมู่ 9 แขวงไร่จิง เขตสามพราน นครปฐม 73210 ผลิตภัณฑ์ที่จัดจำหน่าย ได้แก่ แผ่นมีดคาร์ไบด์ ชิ้นงานคาร์ไบด์ เพื่องชนิดต่างๆ สกรู นำเข้าผง โลหะ เป็นต้น

4.3.1 รูปทรงแผ่นมีดกลึงปอก

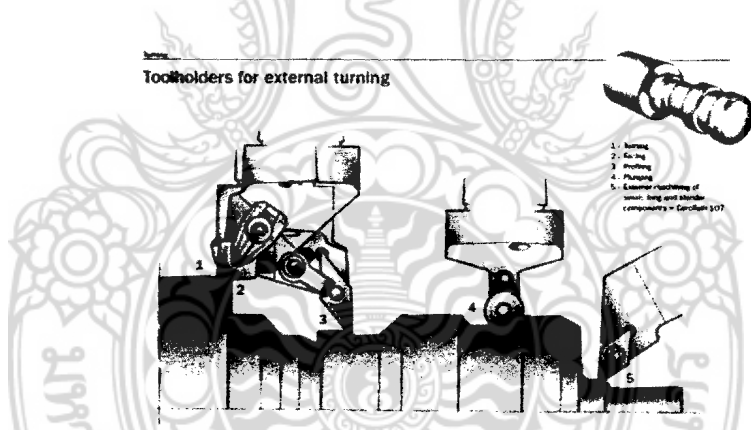


ภาพที่ 4.2 ความเกี่ยวข้องของรูปทรง ความแข็งแรง และต้นทุนของแผ่นมีด

ตามภาพที่ 4.2 ลักษณะของแผ่นมีดแบบต่างๆ ที่มีขนาดมุมคมตัดต่างกันที่สัมพันธ์กับความแข็งแรงและ ต้นทุนในการใช้งานอาทิแผ่นมีดรูปทรง V มีความแข็งน้อยกว่ารูปทรงอื่นและ ต้นทุนในการใช้งานสูงกว่ารูปทรงอื่น ส่วนแผ่นมีดรูปทรง S ซึ่งมีความแข็งแรงมากกว่า ต้นทุนในการใช้งานต่ำ เนื่องจากรูปทรงเรขาคณิตของแผ่นมีดเป็นที่นิยมจตุรัสจึงมีมุมคมตัดมากกว่า จึงทำให้สามารถใช้งานได้ทุกคมตัดซึ่งมากกว่าแผ่นมีดรูปทรงอื่น

4.3.2 ลักษณะและการใช้งานแผ่นมีดกลึงปอก

การใช้งานแผ่นมีดกลึงปอกรูปทรงต่างๆพบว่า การตัดโลหะให้มีขนาดตามความต้องการ โดยการกลึงปอกชิ้นงานมีลักษณะตามภาพที่ 4.3



ภาพที่ 4.3 รูปทรงทางเรขาคณิตและลักษณะการใช้งานของแผ่นมีด

4.3.2.1 หมายเลข 1 และ หมายเลข 2 เป็นลักษณะการกลึงปอกผิวชิ้นงาน (Turning) ตัดโลหะโดยให้มีดตัดเคลื่อนที่ตัดชิ้นงาน ไปตามแนวขนานและตั้งฉากกับแนวแกนของชิ้นงานซึ่งเป็นลักษณะการใช้งานของแผ่นมีดรูปทรง S และ C



























4.3.2.2 หมายเลข 3 เป็นลักษณะการกลึงงานที่ต้องการความละเอียด (Profiling) และ ร่องที่มีมุมน้อยกว่า 90 องศา โดยกำหนดอัตราป้อนที่น้อย ทำให้ผิวงานเรียบและชิ้นงานมีขนาดที่ เท่ากับชิ้นงานจริง ในทางปฏิบัติมากที่สุด ส่วนมากจะใช้กลึงในขั้นตอนสุดท้าย (Finishing) ซึ่งเป็น ลักษณะการใช้งานของแผ่นมีดรูปทรง V

4.3.2.3 หมายเลข 4 เป็นลักษณะการกลึงเซาะร่องหรือกลึงผิวที่มีรัศมีโค้งใช้กับ ชิ้นงานที่ตกร่องผิวโค้ง ซึ่งเป็นลักษณะการใช้งานของแผ่นมีดรูปทรง S, C

4.3.2.4 หมายเลข 5 เป็นลักษณะการกลึงดกบ่า ซึ่งเป็นลักษณะการใช้งานของแผ่นมีด รูปทรง C

4.3.3 ความสามารถแผ่นมีดกลึงปอก

Insert shape depending on operation

External machining	80°	55°	-	90°	80°	80°	35°	55°
								
								
								
								

ภาพที่ 4.4 แสดงความสามารถของรูปทรงทางเรขาคณิตแผ่นมีดกลึงปอก

ความสามารถในการตัดเฉือนของแผ่นมีดตามภาพที่ 4.4 รูปทรงที่ต่างกันมี ความสามารถในการตัดเฉือนที่แตกต่างกันไป ความสามารถดังกล่าวจะขึ้นอยู่กับรูปทรงเรขาคณิต

โดยเฉพาะมุมคมตัดและ ค่าความแข็ง เมื่อพิจารณาถึงความสามารถในด้านการใช้งานแล้ว แผ่นมีดรูปทรง S เหมาะกับงานกลึงปอกมากที่สุด

ควรเลือกใช้แผ่นมีดรูปทรง S เนื่องจากการกลึงปอกผิวชิ้นงานเป็นการปรับขนาดของชิ้นงานให้ใกล้เคียงกับชิ้นงานจริง และไม่ต้องการความละเอียดของผิวชิ้นงานมากนัก

4.3.4 ประเภทการทำงานแผ่นมีดกลึงปอก

จากทฤษฎีในบทที่ 2 ได้กล่าวถึงประเภทการทำงานของแผ่นมีดกลึงปอก เช่น งานหยาบ งานปานกลาง งานเก็บละเอียด ซึ่งในแต่ละประเภทต่างมีเงื่อนไขของการตัดที่ต่างกันเช่น อัตราการป้อน (Feedrate) ระยะการกินลึก (Dept of cut) เป็นต้น ซึ่งได้กำหนดประเภทการทำงานของแผ่นมีด เป็นงานกลึงปอกปานกลาง โดยใช้แผ่นมีดรูปทรง S จึงศึกษาข้อมูลเงื่อนไขในการตัดเฉือนจากผู้ผลิต 3 รายดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 แสดงประเภทการทำงานแผ่นมีดกลึงปอกรูปทรง S

ประเภทการทำงาน	ยี่ห้อ	รูปทรง	การทำงาน	
			Feedrate	Dept.(mm.)
งานปานกลาง	SUMITOMO	S	0.03	0.25
	TUNGALOY	S	0.30	3.0
	KYOCERA	S	0.30	3.0

4.3.5 การพิจารณาและเลือกข้อมูลทำการทดลอง

แผ่นมีดกลึงปอกรูปทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัส (Square) จากภาพที่ 4.3 แสดงถึงพื้นที่การตัดโลหะที่มากกว่าแผ่นมีดรูปทรงอื่น คือสามารถกลึงปอกผิวและปาดผิวชิ้นงานได้ ซึ่งแผ่นมีดรูปทรงอื่นเหมาะกับงานที่ใช้ความละเอียดสูง ดังนั้นแผ่นมีดรูปทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัสจึงเหมาะกับงานกลึงปอกผิวชิ้นงานที่ต้องการความเร็วในการตัดโลหะ โดยผิวชิ้นงานมีความหยาบและความละเอียด

ปานกลาง ตามมาตรฐาน ISO รหัสแผ่นมีรูปทรงสี่เหลี่ยมจตุรัสทั่วไปใช้ตัวอักษร S และกำหนดอัตราป้อนและ ความลึกกัด อยู่ในช่วง 0.03 – 0.30 เมตร/รอบ และ 0.25 – 3.0 มิลลิเมตร ตามลำดับ

4.4 ศึกษาวัสดุชิ้นงานซีเมนต์ทั้งสแตนคาร์ไบด์

4.4.1 สมบัติและการผสมผงทั้งสแตนคาร์ไบด์กับ ผงโคบอลต์ของบริษัท Allegheny Technologies

ตารางที่ 4.2 สมบัติและการผสมผงทั้งสแตนคาร์ไบด์ กับผงโคบอลต์ของบริษัท

Allegheny Technologies

ชนิด	ขนาด เกรนผง ทั้งสแตน คาร์ไบด์ (μm)	ความ หนาแน่น (Density) (g/cc)	ปริมาณ ทั้งสแตน คาร์ไบด์ (%)	ปริมาณ โคบอลต์ (%)	การนำไปใช้งาน
GWC-1	3	14.85	94.0	6.0	งานกัด และงานกลึง
GWC-4	3	14.5	90.0	10.0	งานกัดและงานกลึง
GWC-10	3	14.95	94.0	6.0	งานเจาะ
GWC-12	3	14.45	90.0	10.0	งานที่มีความเหนียวสูง
GWC-31	3	14.38	89.0	11.0	งานเจาะที่ทนต่อแรง กระแทก
GWC-50	3	13.98	85.0	15.0	แม่พิมพ์งานร้อน

จากข้อมูลสมบัติชิ้นงานซีเมนต์ทั้งสแตนคาร์ไบด์ของบริษัท Allegheny Technologies พบว่า ในการผลิตแผ่นมีดปริมาณของโคบอลต์ที่ทำหน้าที่เป็นโลหะประสานมีผลต่อ ความหนาแน่นและลักษณะการนำไปใช้งานของแผ่นมีด ดังนั้นควรเลือกให้เหมาะสมกับลักษณะการใช้งาน ตัวอย่างเช่น หากต้องการนำแผ่นมีดไปทำการขึ้นรูปแม่พิมพ์งานร้อนควรเลือกใช้แผ่นมีดที่มีปริมาณโคบอลต์ผสมอยู่ในปริมาณ 15 เปอร์เซ็นต์

4.4.2 งานวิจัยการศึกษาส่วนผสมชิ้นงานซีเมนต์คาร์ไบด์ , งานวิจัยเรื่องการออกแบบและผลิตชิ้นงานซีเมนต์ทั้งสแตนคาร์ไบด์จากผงโลหะ Recycle และบริษัทATI Engineered Product การศึกษาส่วนผสมของชิ้นงานซีเมนต์ทั้งสแตนคาร์ไบด์ ข้อมูลแสดงดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 สมบัติของชิ้นงานทั้งสแตนคาร์ไบด์ที่มีส่วนผสมระหว่าง ผงทั้งสแตนคาร์ไบด์ผสมกับ ผงโคบอลต์ จากงานวิจัยการศึกษาส่วนผสมชิ้นงานซีเมนต์คาร์ไบด์, งานวิจัยเรื่องการออกแบบและผลิตชิ้นงานซีเมนต์ทั้งสแตนคาร์ไบด์จากผงโลหะ Recycle และ บริษัท ATI- Engineered Product

ที่มา	ขนาดเกรน ผงทั้งสแตนคาร์ ไบด์ (μm)	ปริมาณ โคบอลต์ (%)	ค่าความแข็ง (HV)
การศึกษาส่วนผสมชิ้นงานซีเมนต์คาร์ไบด์	3 – 4	16	1323 - 1400
การออกแบบและผลิตชิ้นงานซีเมนต์ทั้งสแตนคาร์ไบด์จากผงโลหะ Recycle	2.5	17	1096
ATI Engineered Product	-	20	1004
	-	25	763

4.4.3 สมบัติและการผสมทั้งสแตนคาร์ไบด์กับ ผง โคบอลต์ของบริษัท Betek Progress

ตารางที่ 4.4 สมบัติและการผสมทั้งสแตนคาร์ไบด์ กับผงโคบอลต์ของบริษัท Betek Progress

ชนิด	ขนาดเกรนผง ทั้งสแตนคาร์ ไบด์ (μm)	ปริมาณ ทั้งสแตนคาร์ ไบด์ (%)	ปริมาณ โคบอลต์ (%)	ค่าความแข็ง (HV)
B - 10F	3	94.0	6	1400
B - 10	2.5	94.0	6	1556
B - 15	4	92.5	7.5	1245
B - 20	6	90.5	9.5	1200
B - 25	6	90.0	10	1160
B - 30	6	89.0	11	1160
B - 40	6	85.0	15	854

จากข้อมูลสมบัติชิ้นงานซีเมนต์ทั้งสแตนคาร์ไบด์ของ งานวิจัยการศึกษา ส่วนผสมชิ้นงานซีเมนต์คาร์ไบด์, งานวิจัยเรื่องการออกแบบและผลิตชิ้นงานซีเมนต์ทั้งสแตนคาร์ไบด์จากผงโลหะ Recycle, บริษัท ATI Engineered Product และ บริษัท Betek Progress พบว่าขนาดของผงโลหะและ ปริมาณของ โคบอลต์ที่ทำหน้าที่เป็นโลหะประสาน มีผลกระทบต่อคุณสมบัติของชิ้นงานคือ หากผงโลหะที่ใช้มีขนาดอนุภาคที่เล็ก ปริมาณ โคบอลต์ที่น้อย ชิ้นงานจะมีค่าความแข็งมาก ในทางกลับกันหากผงโลหะมีขนาดอนุภาคที่ใหญ่ ปริมาณ โคบอลต์ที่มาก ชิ้นงานจะมีค่าความแข็งที่น้อย

4.4.4 การพิจารณาและเลือกข้อมูลทำการทดลอง

ชิ้นงานซีเมนต์ทังสเตนคาร์ไบด์ (Cemented Tungsten Carbide) นั้นขนาดโลหะผง (Particle Size) ที่มีผลต่อด้านแข็งแรงของชิ้นงานทั่วไป 2.5 – 6 ไมครอน เป็นที่ทราบกันดีว่าหากต้องการให้ชิ้นงานมีความแข็งแรงที่มาก ในการผลิตควรคำนึงถึงปริมาณโคบอลต์ที่ผสมอยู่ โดยทั่วไป 6 – 25 เปอร์เซ็นต์

ชิ้นงานซีเมนต์ทังสเตนคาร์ไบด์ (Cemented Tungsten Carbide) ต้องการ ความเหนียว (Toughness) ความแข็งแรงสูง (Strength) และ ทนต่อการสึกหรอ (Wear) จึงเลือกใช้ผงทังสเตนคาร์ไบด์ที่มีขนาดเล็กและปริมาณโคบอลต์อยู่ระหว่าง 6 – 17 เปอร์เซ็นต์ และชิ้นงานสำเร็จรูปต้องมีความแข็งไม่ต่ำกว่า 837 HV ใช้สำหรับงานกลึงปอก

4.5 การศึกษาการออกแบบและผลิตแผ่นมีดซีเมนต์ทังสเตนคาร์ไบด์

4.5.1 การออกแบบแผ่นมีด

การศึกษารูปแบบการออกแบบแผ่นมีดซีเมนต์ทังสเตนคาร์ไบด์ในด้านของ รหัสของแผ่นมีดรูปทรง S และ ความสามารถในการใช้งานของแผ่นมีดกลึงปอก ซึ่งข้อมูลดังกล่าวมาจากบริษัทผู้ผลิต 3 ราย ได้แก่ บริษัท SANDVIK, บริษัท TUNGALOY และ บริษัท KYOCERA เป็นต้น

4.5.1.1 รหัสแผ่นมีดรูปทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัส (รหัส S)

แผ่นมีดรูปทรงมาตรฐาน SNMG 120408 ประกอบด้วยอักษร 7 ตัวโดยมีความหมายดังนี้

- ก) S หมายถึง ลักษณะรูปทรงของแผ่นมีดที่มีลักษณะสี่เหลี่ยมมุม (90°)
- ข) N หมายถึง มุมหลบ (Relief Angle) ของแผ่นมีดเท่ากับ 0 องศา
- ค) M หมายถึง ระยะเวลา (Tolerance) มีดังนี้
 - (ก) ความหนา (Thickness) ± 0.13
 - (ข) มุมปลายมีด (Conner Height) $\pm 0.08 \sim 0.18$
 - (ค) I.C. Size $\pm 0.05 \sim \pm 0.15$
- ง) G หมายถึง มีรูตรงกลางมีดและมีมุมหักเศษใช้งานได้ทั้งสองด้าน (Hole and Chip Breaker Symbol)

จ) 12 หมายถึง ขนาดความกว้าง (Edge Length Symbol) และความยาวของแผ่นมีดขนาด 12.7 มิลลิเมตร

ข) 04 หมายถึง ความหนาของแผ่นมีดขนาด 4.76 มิลลิเมตร

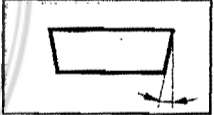
ฉ) 08 หมายถึง รัศมีโค้งปลายมีด 0.8°

ในกำหนดลักษณะรูปทรงของแผ่นมีดและ ร่องหักเศษ เพื่อนำไปใช้งานได้ อย่างถูกต้อง ดังนั้นแผ่นมีดรูปทรงมาตรฐาน SNMG 120408 ได้กำหนดลักษณะดังนี้

ตารางที่ 4.5 แสดงรหัสแผ่นมีดรูปทรง S (S _____)

ยี่ห้อ	รหัส	มุมคมตัด(องศา)	รูปทรง
SANDVIK	S	90	สี่เหลี่ยมจัตุรัส
TUNGALOY	S	90	สี่เหลี่ยมจัตุรัส
KYOCERA	S	90	สี่เหลี่ยมจัตุรัส


ตารางที่ 4.6 แสดงลักษณะมุมหลบแผ่นมีด (N _____)

ยี่ห้อ	รหัส	มุมหลบ(องศา)	ภาพลักษณะมุมหลบ
SANDVIK	N	0	
TUNGALOY	N	0	
KYOCERA	N	0	

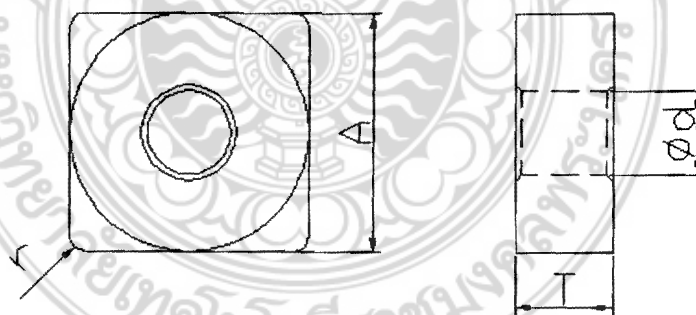
ตารางที่ 4.7 แสดงลักษณะการกำหนดระยะเผื่อของแผ่นมีด (_ M _)

ยี่ห้อ	รหัส	ระยะเผื่อมุมตัด	ระยะเผื่อความหนาแผ่นมีด	ระยะเผื่อความโตแผ่นมีด
SANDVIK	M	± 0.08	± 0.13	± 0.05
		± 0.18		± 0.15
TUNGALOY	M	± 0.08	± 0.13	± 0.05
		± 0.18		± 0.18
KYOCERA	M	± 0.08	± 0.13	± 0.05
		± 0.18		± 0.15

ตารางที่ 4.8 แสดงลักษณะรูตรรกกลางมีด (_ G _)

ยี่ห้อ	รหัส	ลักษณะรูยึด	รูปแผ่นมีด
SANDVIK	G	รูยึดแบบสองด้าน	
TUNGALOY	G	รูยึดแบบสองด้าน	
KYOCERA	G	รูยึดแบบสองด้าน	

4.5.1.2 ขนาดรูปทรงทางเรขาคณิตแผ่นมีดสี่เหลี่ยมปอกทรง S



ภาพที่ 4.5 รูปทรงทางเรขาคณิตแผ่นมีดสี่เหลี่ยมปอกทรง S (Square)

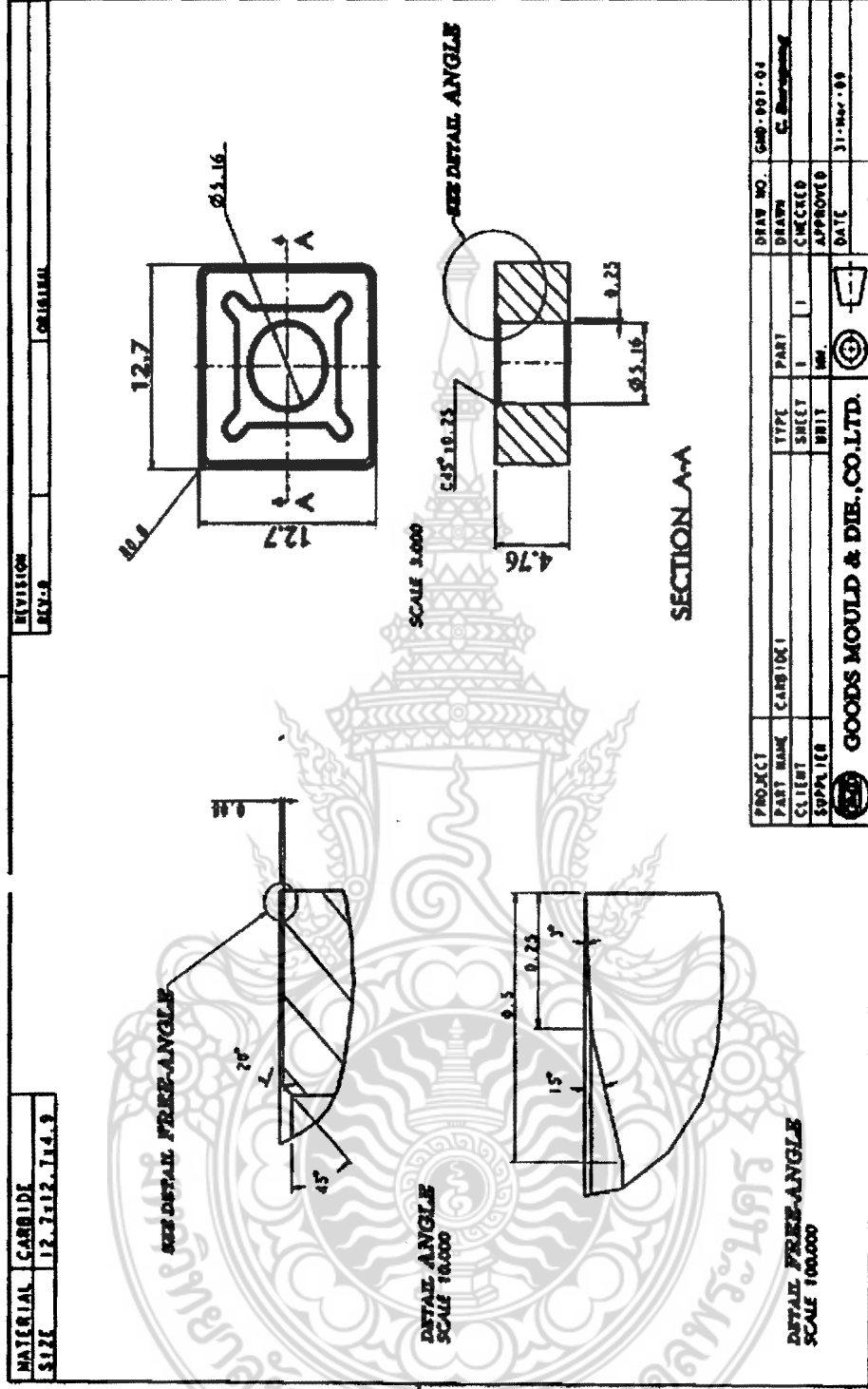
รูปทรงเรขาคณิตของแผ่นมีดกลึงปอกตลอดจนขนาด ความกว้าง ความยาว ความหนา และรัศมีมุมปลายมีด มีการกำหนดไว้ดังภาพที่ 4.7 อักษรในภาพแสดงถึงการกำหนดแผ่นมีดรูปทรงมาตรฐาน SNMG 120408 ดังตารางที่ 4.9

ตารางที่ 4.9 ขนาดรูปทรงทางเรขาคณิตแผ่นมีดกลึงปอก รหัส SNMG 120408

บริษัท	รหัส แผ่นมีด (ISO)	ขนาดแผ่นมีด A (mm.)	รัศมีคมตัด r (mm.)	ความหนา แผ่นมีด T (mm.)	ขนาดรูตรง กลางมีด Ød (Ø)
SANDVIK	SNMG 120408	12.7	0.8	4.76	5.16
TUNGALOY	SNMG 120408	12.7	0.8	4.76	5.16
KYOCERA	SNMG 120408	12.7	0.8	4.76	5.16

4.5.1.3 ตรวจสอบขนาด

ตรวจสอบขนาดแผ่นมีดกลึงปอกที่นำเข้ารหัส SNMG 120408 โดยใช้เครื่องมือวัดละเอียดชนิด Profile Projector ที่กำลังการขยาย 20 เท่า



ภาพที่ 4.6 แบบและขนาดของแผ่นมีดที่นำเข้ารหัส SNMG 120408 ที่ทำการตรวจสอบ

จากการตรวจสอบขนาดแผ่นมีดรูปทรงมาตรฐาน SNMG 120408 พบขนาดของแผ่นมีดดังตารางที่ 4.10

ตารางที่ 4.10 แสดงขนาดของแผ่นมีดรหัส SNMG 120408 ที่ตรวจสอบ

รหัสแผ่นมีด รูปทรง มาตรฐาน	ขนาดแผ่นมีด A (mm.)	รัศมีโค้ง คมตัด r (mm.)	ความหนา แผ่นมีด T (mm.)	มุมคายเศษ ของแผ่นมีด Free Angle (องศา)	ขนาดรูตรง กลางมีด $\varnothing d$ (\varnothing)
SNMG 120408	12.7	0.8	4.76	15	5.16

4.5.1.4 ศึกษาความสามารถแผ่นมีดกลึงปอกรูปทรง S

ข้อมูลที่ศึกษาจากผู้ผลิต 3 รายมีการกำหนด ความเร็วตัดและ อัตราการป้อนสำหรับแผ่นมีดกลึงปอกรูปทรง S (Square) เพื่อให้สะดวกต่อการเลือกนำไปใช้งาน โดยมีข้อมูล ความเร็วตัด (Feed; f), ความลึกตัด (Dept of Cut; ap) และ ชนิดของวัสดุที่ทำการตัดเฉือน เพื่อให้ทราบถึงความสามารถในการตัดเฉือนของแผ่นมีดนั้นๆ

ตารางที่ 4.11 ข้อมูลการตัดแผ่นมีดรหัส SNMG 120408

บริษัท	รหัสแผ่นมีด รูปทรง มาตรฐาน	อัตราการป้อน (mm./rpm)	ความลึกตัด (mm.)
SANDVIK	SNMG 120408	0.18 – 0.3	0.96 – 4.0
TUNGALOY	SNMG 120408	0.2 – 0.3	0.1 – 2.0
KYOCERA	SNMG 120408	0.18 – 0.5	1.1 – 5.0

4.5.1.5 เลือกข้อมูลเพื่อทำการทดลอง

ข้อมูลที่สำคัญของแผ่นมีดกลึงปอกของผู้ผลิต 3 ราย โดยเลือกตัวอย่างแผ่นมีดรูปทรงมาตรฐาน SNMG 120408 เป็นเครื่องมือตัดที่ใช้งานตัดปาดผิวโลหะประเภทเหล็กกล้าคาร์บอน (Carbon Steels) เนื่องจากสามารถใช้อัตราการป้อนตัด (Feed Rate) ได้สูงสุด 0.5 มิลลิเมตร/รอบ และความลึกตัด (Dept of Cut) สูงสุด 5.0 มิลลิเมตร/รอบ ดังนั้นในการทดลองผลิตแผ่นมีดกลึงปอกจึงผลิตแผ่นมีดตามมาตรฐานของแผ่นมีดที่ผ่านการตรวจสอบขนาดดังภาพที่ 4.6 โดยมีขนาดความกว้าง (Edge Length) 12.7 มิลลิเมตร ความหนา (Thickness) 4.76 มิลลิเมตร รัศมีโค้งปลายมีด (Conner Radius) 0.8° และมุมคายเศษเท่ากับ 15° ซึ่งตรงตามรหัสแผ่นมีด SNMG 120408 สำหรับกลึงเหล็กกล้าคาร์บอน 0.45 เปอร์เซ็นต์คาร์บอน

4.5.2 การศึกษากระบวนการผลิตแผ่นมีดซีเมนต์ทั้งสแตนคาร์ไบด์

เนื่องจากสมบัติของโลหะทั้งสแตนคาร์ไบด์ จึงถูกนำมาผลิตเป็นเครื่องมือตัด (Cutting Tools) ใช้ในด้านต่างๆกันอย่างแพร่หลาย ทั้งงานด้านเครื่องจักรกล งานด้านการผลิตแม่พิมพ์ เป็นต้น กระบวนการผลิตชิ้นงานซีเมนต์ทั้งสแตนคาร์ไบด์ โดยนำผงทั้งสแตนคาร์ไบด์ผสมกับสารประกอบจากนั้น อัดขึ้นรูปและอบพ่นิก ลักษณะดังกล่าวแสดงดังภาพกระบวนการผลิตชิ้นงานซีเมนต์ทั้งสแตนคาร์ไบด์ ดังภาพที่ 4.7



ภาพที่ 4.7 กระบวนการผลิตชิ้นงานซีเมนต์ทั้งสแตนคาร์ไบด์

จากภาพที่ 4.7 แสดงขั้นตอนการผลิตชิ้นงานซีเมนต์ทั้งสเตนคาร์ไบด์จากโลหะผง โดยส่วนผสมหลักใช้วัสดุที่มีคุณสมบัติทางด้านความแข็งแรงสูง เช่น ผงทั้งสเตนคาร์ไบด์ (WC) ผสมกับผงโลหะประสาน เช่น ผงโคบอลต์ (Co) และเพื่อปรับเปลี่ยนสมบัติของชิ้นงานให้เหมาะสมกับการใช้งานในบางกรณีจะผสมสารประกอบคาร์ไบด์อื่นๆ เช่น ไททานเนียมคาร์ไบด์ (TiC), แทนทาลัมคาร์ไบด์ (TaC) เพื่อให้ชิ้นงานมีคุณสมบัติ ความแข็งแรงตามความเหมาะสมในการใช้งาน วัสดุประสานสามารถแบ่งได้ 2 ประเภทได้แก่ วัสดุประสานที่ทำให้ผงโลหะยึดเกาะตัวกันชั่วคราว ในขณะที่ทำการอัดขึ้นรูปเช่น Paraffin Wax, Polyethylene glycol (PEG) และ โพลีไวนิลแอลกอฮอล์ (PVA) เป็นต้น โดยวัสดุประสานดังกล่าวจะถูกกำจัดออกในขั้นตอนสุดท้าย (Dewaxing) ก่อนอุณหภูมิการอบผนึก (Sintering) วัสดุประสานประเภทต่อมา คือ โลหะที่ทำหน้าที่ประสานวัสดุผสม ซึ่งในกระบวนการผลิตจะไม่ถูกกำจัดออกและจะยังคงเป็นส่วนหนึ่งของ โครงสร้างทางจุลภาคหรือเรียกว่าเป็น “Matrix” โลหะประสานดังกล่าวจะมีผลต่อสมบัติของชิ้นงาน เช่น การเติมผงโคบอลต์ (Co) จะทำให้ชิ้นงานมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น เนื่องด้วยคุณสมบัติของโคบอลต์เป็นโลหะที่มีความเหนียวจึงทำหน้าที่เป็นตัวประสานระหว่างอนุภาคของผงโลหะทั้งสเตนคาร์ไบด์

ในการนำวัตถุดิบมาผสมเพื่อให้เกิดการผสมผสานกันมากขึ้น ต้องนำผงโลหะเหล่านั้นมาทำการบดผสม (Milling) เป็นผงดินแบบก่อนนำไปทำการอัดขึ้นรูปชิ้นงาน (Pressing) ด้วยวิธีต่างๆ เพื่อให้เป็นชิ้นงาน Green Compact จากนั้นทำการอบผนึกชิ้นงานให้ได้ชิ้นงานทั้งสเตนคาร์ไบด์สำเร็จรูปที่สามารถใช้งานได้ ทั้งนี้ในการผลิตต้องมีการตรวจสอบคุณภาพด้วยการตรวจสอบสมบัติต่างๆ

จากกระบวนการที่ได้กล่าวอ้างมานี้เป็นส่วนหนึ่งของงานวิจัยหลายๆงานที่เกี่ยวข้อง ซึ่งกล่าวอ้างในส่วนของการผลิตและผลการวิเคราะห์อันเนื่องมาจากกระบวนการผลิตของวิธีนั้นๆ ซึ่งจะยกตัวอย่างของงานวิจัยเช่น

4.5.2.1 ข้อมูลการศึกษาขนาดของอนุภาคที่มีผลต่อ โครงสร้างจุลภาค และสมบัติเชิงกลของคาร์ไบด์ (WC-(W,Ti,Ta)C-6 wt% Co) ทำการบดผสมแบบเปียก (Wet Milling) ใน Ethanol เป็นเวลา 72 ชั่วโมง ขึ้นรูปที่แรงอัด 300 MPa ทำการอบผนึกอุณหภูมิอบผนึกต่าง ๆ ได้ค่าความหนาแน่นสูงสุดหลังการอบผนึกที่อุณหภูมิ 1485 องศาเซลเซียส ประมาณ 13.6 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร

ตารางที่ 4.12 สมบัติชิ้นงานซีเมนต์ทั้งสเดนคาร์ไบด์จากการศึกษาขนาดของอนุภาคที่มีผลต่อโครงสร้างจุลภาค และสมบัติเชิงกลของคาร์ไบด์

ชั้น ที่	อัตราส่วนของขนาด ทั้งสเดนคาร์ไบด์(WC) รวมทั้งหมด 54% ของชิ้นงาน (%)		ปริมาณโลหะ คาร์ไบด์ (TiTaW)C (%)	ปริมาณ โคบอลต์ (Co) (%)	อุณหภูมิ อบผึ่ง (°C)	ค่าความ แข็ง (HV)
	ขนาด WC 2µm	ขนาด WC 0.2 µm				
1.	1	2	46	6	1485	1702
2.	1	1	46	6	1485	1436
3.	2	1	46	6	1485	1218

4.5.2.2 ข้อมูลการศึกษาส่วนผสมชิ้นงานซีเมนต์คาร์ไบด์ ใช้อัตราส่วนระหว่างผงทั้งสเดนคาร์ไบด์และโลหะประสานโคบอลต์ 87 : 13 ขนาดอยู่ในช่วง 1-4 ไมครอน ทำการบดผสมเป็นเวลา 5-6 ชั่วโมง อบผึ่งเป็นเวลา 30-60 นาที ในระบบสุญญากาศ

ตารางที่ 4.13 สมบัติชิ้นงานซีเมนต์คาร์ไบด์จากการศึกษาส่วนผสมชิ้นงานซีเมนต์คาร์ไบด์

ชิ้นงาน	อัตราส่วนผสม (%)		ขนาด เกรน (µm)	แรงอัด ขึ้นรูป (MPa)	อุณหภูมิ อบผึ่ง (°C)	ความ หนาแน่น (gms/cm ³)	ค่าความ แข็ง (HV)
	WC	Co					
C-85	87.0	13.0	3-4	77 - 350	1400-1500	14.25	1161

4.5.2.3 ข้อมูลการศึกษาออกแบบและผลิตชิ้นงานซีเมนต์ทั้งสแตนคาร์ไบด์จากผงโลหะ

Recycle

ตารางที่ 4.14 สมบัติของชิ้นงานทั้งสแตนคาร์ไบด์ การศึกษาออกแบบและผลิตชิ้นงานซีเมนต์ทั้งสแตนคาร์ไบด์จากผงโลหะ Recycle

ผลการทดสอบค่าความแข็งชิ้นงานทั้งสแตนคาร์ไบด์				
ชั้นที่	ขนาดเกรนผง ทั้งสแตนคาร์ไบด์ (μm)	แรงดันในการ อัดขึ้นรูป (MPa)	อุณหภูมิในการ อบผืนิก ($^{\circ}\text{C}$)	ค่าความแข็ง (HV)
1.	2.5	216	1400	995
2.	2.5	216	1450	1096

4.5.2.4 เลือกข้อมูลทำการทดลอง

ก) กระบวนการบดผสมผงโลหะก่อนทำการขึ้นรูป โดยการบดผงทั้งสแตนคาร์ไบด์และผงโคบอลต์ในภาชนะ โดยมี Paraffin Wax เป็นสารเชื่อมประสาน เพื่อให้ผงโลหะยึดเกาะตัวกันชั่วคราวในขณะที่ทำการอัดขึ้นรูป

ข) กระบวนการอัดขึ้นรูปผงโลหะจากข้อมูล งานวิจัยเรื่อง การศึกษาขนาดของอนุภาคที่มีผลต่อ โครงสร้างจุลภาค และสมบัติเชิงกลของคาร์ไบด์ (WC-(W,Ti,Ta)C-6 wt% Co), การศึกษาส่วนผสมชิ้นงานซีเมนต์คาร์ไบด์, การศึกษาออกแบบและผลิตชิ้นงานซีเมนต์ทั้งสแตนคาร์ไบด์จากผงโลหะ Recycle พบว่าใช้แรงอัดที่ใกล้เคียงกันอยู่ในช่วง 200-350 MPa

ค) ศึกษาการอบผืนิก ชิ้นงานซีเมนต์ทั้งสแตนคาร์ไบด์เกิดจากผงทั้งสแตนคาร์ไบด์ผสมโคบอลต์แล้วอัดขึ้นรูป ซึ่งมีคุณสมบัติความแข็งและเหนียว เมื่อผ่านการอัดขึ้นรูปแล้วทำให้อุณหภูมิเข้าใกล้จุดหลอมละลายของโคบอลต์ประมาณ 1495 องศาเซลเซียส คือ โคบอลต์จะ

หลอมละลายยึดติดกับทั้งสแตนคาร์ไบด์ซึ่งเป็นไปตามทฤษฎี เนื่องจากข้อมูลงานวิจัยที่ทำการศึกษามีอุณหภูมิในการอบผนึกอยู่ในช่วง 1400 - 1500 องศาเซลเซียส

4.6 การทดสอบวัสดุชิ้นงาน

4.6.1 ศึกษากระบวนการทดสอบการสึกหรอด้วยวิธีการกลึง

4.6.1.1 ข้อมูลการศึกษาเกี่ยวกับไบมีดซีเมนต์คาร์ไบด์ที่มีทั้งสแตนคาร์ไบด์ที่เป็นรากฐาน สำหรับเครื่องมือตัดและกรรมวิธีในการผลิตผลิตภัณฑ์ ได้ผลิตแผ่นมีดซีเมนต์คาร์ไบด์รูปทรงมาตรฐาน SNMG 120408 มีส่วนผสมของทั้งสแตนคาร์ไบด์ (WC) ขนาดผงเฉลี่ย 3.5 ไมครอน, โคบอลต์ (Co) ขนาดผงเฉลี่ย 1.2 ไมครอน, TiC, TiN, TaC, NbC ขนาดผงเฉลี่ย 1 ไมครอน ทดสอบประสิทธิภาพโดย ทดสอบการใช้งานด้วยกระบวนการกลึง ซึ่งกำหนดเงื่อนไขดังนี้

- ก) วัสดุที่ใช้กลึง ได้แก่ เหล็กกล้าคาร์บอนปานกลาง 0.45 เปอร์เซ็นต์คาร์บอน
- ข) ความเร็วตัด : 280 เมตร/นาที
- ค) อัตราการป้อน : 0.2 มิลลิเมตร/รอบ
- ง) ระยะกินลึก : 3 มิลลิเมตร

สรุปผลการทดสอบ พบว่าเกิดความเสียหายที่บริเวณผิวหน้าของคมตัด (Frank Wear)

4.6.1.2 ข้อมูลการศึกษาเกี่ยวกับการเคลือบผิวเครื่องมือตัดด้วยโลหะที่มีความแข็ง โดยผลิตแผ่นมีดรูปทรงมาตรฐาน SNMG120408 นำมาทดสอบด้านการใช้งานด้วยการกลึง โดยกำหนดเงื่อนไขดังนี้

- ก) วัสดุที่ใช้กลึง ได้แก่ เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ คาร์บอนไม่เกิน 0.25 เปอร์เซ็นต์
- ข) ความเร็วตัด : 300 เมตร/นาที
- ค) อัตราการป้อน : 0.3 มิลลิเมตร/รอบ
- ง) ระยะกินลึก : 1.5 มิลลิเมตร
- จ) การทดสอบจะเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยความต้านทานและขนาดของรอยแตกที่

บริเวณขอบแผ่นมีด

4.7 รวบรวมข้อมูลและวิเคราะห์ข้อมูล

4.7.1 ข้อมูลด้านรูปทรงเรขาคณิต

แผ่นมีครูปทรงสี่เหลี่ยมจตุรัสเหมาะกับงานกลึงปอกผิวชิ้นงานที่ต้องการความเร็วในการตัดโลหะ โดยผิวชิ้นงานมีความหยาบและความละเอียดปานกลาง ตามแผ่นมีครูปทรงมาตรฐาน SNMG 120408 มีรูปทรงสี่เหลี่ยมจตุรัสทั่วไปใช้ตัวอักษร S

4.7.2 ข้อมูลสำหรับการผลิต

ความแข็งของชิ้นงานจะขึ้นอยู่กับส่วนประกอบโคบอลต์ที่อยู่ระหว่าง 2 - 25 เปอร์เซ็นต์ ผงทั้งสแตนคาร์ไบด์ที่มีขนาดอนุภาคใหญ่ส่งผลต่อความแข็งของชิ้นงานแต่ถ้าต้องการชิ้นงานที่มีความแข็งมากจะใช้ขนาดผงอนุภาคที่มีขนาดเล็ก

ในชิ้นงานซีเมนต์คาร์ไบด์ (Cemented Carbide) นี้ต้องการความเหนียวและความแข็งแรงของวัสดุสูง ดัดสินใจเลือกใช้ผงทั้งสแตนคาร์ไบด์ที่มีขนาดเล็กและส่วนประกอบผงโคบอลต์อยู่ระหว่าง 6 - 17 เปอร์เซ็นต์ และชิ้นงานสำเร็จรูปต้องมีความแข็งไม่ต่ำกว่า 837 HV

4.7.3 ข้อมูลทางการกำหนดขนาด

ผลิตแผ่นมีดตามแบบของแผ่นมีดที่ทำการตรวจสอบขนาดดังภาพที่ 4.6 โดยมีขนาดความกว้าง (Edge Length) 12.7 มิลลิเมตร ความหนา (Thickness) 4.76 มิลลิเมตร และรัศมีคมตัด (Conner Radius) 0.8 องศา และมุมคายเศษของแผ่นมีดเท่ากับ 15 องศา ตามแผ่นมีครูปทรงมาตรฐาน SNMG 120408 ที่ผลิตขึ้นใช้สำหรับงานกลึงปานกลาง เหมาะสมกับวัสดุเหล็กกล้าคาร์บอนปานกลาง 0.45 เปอร์เซ็นต์คาร์บอน

4.7.4 ข้อมูลวัสดุผสมก่อนอัดขึ้นรูป

จากข้อมูลการศึกษาการผสมผงโลหะการวัสดุประสาน โดยเลือกใช้ Paraffin Wax เป็นวัสดุประสาน โดยทำการบดผสมเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ก่อนทำการอัดขึ้นรูปเนื่องจากวัสดุประสานจะทำให้ผงโลหะเกิดการยึดเกาะตัวกันในขณะทำการอัดขึ้นรูป

4.7.5 ข้อมูลกระบวนการขึ้นรูป

การอัดขึ้นรูปผงโลหะเลือกใช้แรงอัดขึ้นรูป 350 MPa เนื่องจากงานวิจัยเรื่องการศึกษาส่วนผสมชิ้นงานซีเมนต์คาร์ไบด์ ในหัวข้อที่ 3.3.2.2 ชิ้นงานมีความหนาแน่น 14.25 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตรซึ่งใกล้เคียงกับความหนาแน่นตามขอบเขตที่กำหนด

4.7.6 ข้อมูลการอบผนึกชิ้นงาน

การอบผนึกชิ้นงานเลือกช่วงอุณหภูมิในการอบผนึก 1430 องศาเซลเซียสเนื่องจากอุณหภูมิดังกล่าวเป็น อุณหภูมิที่ความใกล้เคียงกับจุดหลอมเหลวโคบอลต์ ซึ่งเป็น โลหะประสาน และอยู่ในช่วงของอุณหภูมิที่งานวิจัยอื่นๆได้ทำการศึกษา คือ 1400 – 1500 องศาเซลเซียส

4.8 กำหนดเงื่อนไขในการทดลอง

4.8.1 กำหนดเงื่อนไขการทดสอบการต้านทานต่อการสึกหรอ ดังนี้

- 4.8.1.1 ความเร็วตัด 75 เมตร/นาที
- 4.8.1.2 อัตราป้อน 0.22 มิลลิเมตร/รอบ
- 4.8.1.3 ความลึกตัด 1.5 มิลลิเมตร
- 4.8.1.4 ระยะทางการกลึงประมาณ 3.000 มิลลิเมตร
- 4.8.1.5 มุมตั้งมีด 75 องศา
- 4.8.1.6 มุมหลบด้ามมีด -8 องศา
- 4.8.1.7 มุมกายเศษของมีด 15 องศา
- 4.8.1.8 การทดสอบเป็นการทดสอบแบบไม่ใช้น้ำมันหล่อเย็น (Dry Cut)
- 4.8.1.9 ทดสอบด้วยเครื่องกลึง CNC รุ่น MAZAK 15M

4.8.2 วัสดุและอุปกรณ์ในการทดสอบ

4.8.2.1 แผ่นมีดในการทดสอบเป็นแผ่นมีดซีเมนต์ทั้งสแตนคาร์ไบด์ตามมาตรฐาน SNMG 120408

4.8.2.2 วัสดุในการทดสอบ เหล็กกล้าคาร์บอนปานกลาง 0.45 เปอร์เซ็นต์คาร์บอน

4.8.2.3 ชิ้นงานทดสอบขนาดความโต 100 มิลลิเมตร ยาว 200 มิลลิเมตร กลึงตกบ่าเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร ยาว 70 มิลลิเมตร

4.8.3 ทดลองการใช้งาน

การทดลองประสิทธิภาพของแผ่นมีดกลึงปก โดยการกลึงที่ประเภทการทำงานแบบปานกลางโดยมีสภาพการทำงานที่เหมาะสม ซึ่งมีขั้นตอนการทดสอบดังนี้

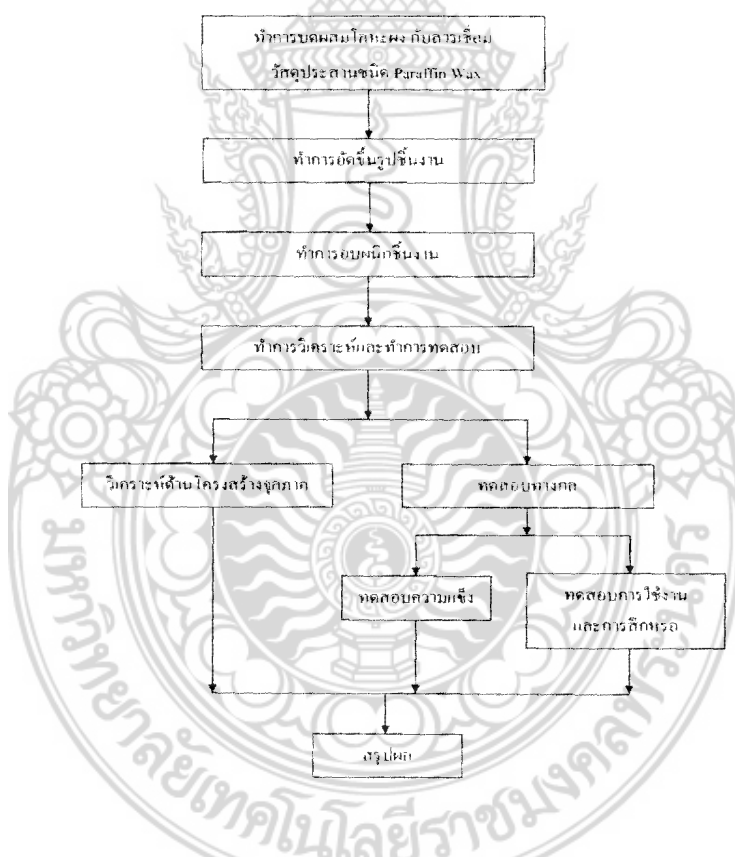
4.8.3.1 ขั้นตอนการทดลอง

ก) ทำการตั้งค่าโปรแกรมของเครื่องกลึง (CNC) ตามเงื่อนไขในการทดสอบ

- ข) บันทึกภาพของแผ่นมิดก่อนทำการทดสอบ
- ค) กลึงปอกผิวงาน (Turning) ครั้งละ 200 มิลลิเมตร เป็นจำนวน 15 ครั้ง
- ง) การเก็บเศษกลึงในระยะ 0-20, 180-200, 380-400 ถึง 2980-3000 มิลลิเมตร
- จ) วัดขนาดวัสดุและชั่งน้ำหนักแผ่นมิดก่อนและ หลังทดสอบด้วยเครื่องชั่งน้ำหนักแบบดิจิตอลทุกๆระยะ 200 มิลลิเมตร
- ฉ) วิเคราะห์การสึกหรอของแผ่นมิด

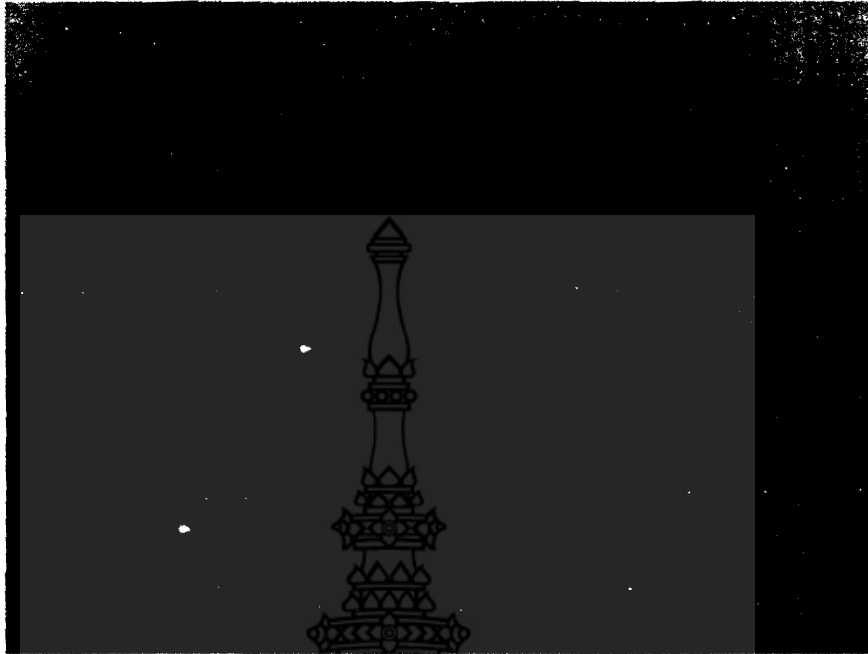
4.9 การผลิตแผ่นมิดซีเมนต์ทั้งสแตนคาร์ไบด์

กระบวนการผลิตนั้นในแต่ละขั้นตอน จะมีเหตุการณ์ต่างๆ เกิดขึ้นระหว่างการทดลอง จึงมีการถ่ายรูปเก็บเอาไว้เพื่อเป็นข้อมูลอ้างอิงในการทดลองผลิต โดยแสดงผลที่ได้จากการทดลองเพื่อให้เห็นเหตุการณ์ต่างๆ ที่เกิดขึ้นระหว่างทำการทดลอง และเพื่อทำการเปรียบเทียบความแตกต่างของการทดลองในแต่ละครั้ง



ภาพที่ 4.10 การผลิตแผ่นมิดซีเมนต์ทั้งสแตนคาร์ไบด์

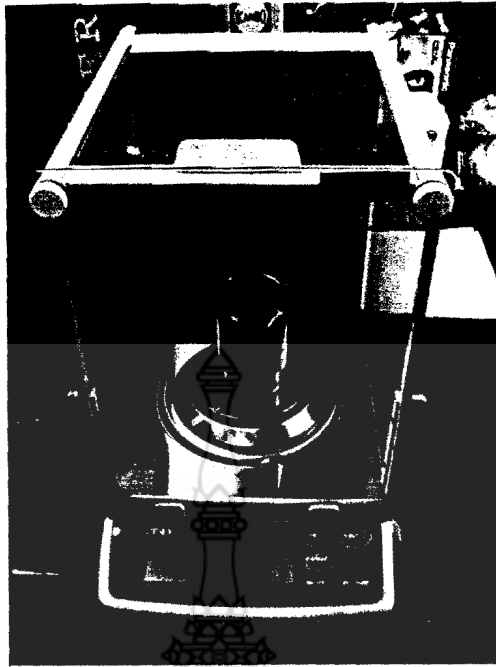
4.9.1 การผลิตแผ่นมีดซีเมนต์ทั้งสแตนคาร์ไบด์



ภาพที่ 4.11 ผงทั้งสแตนคาร์ไบด์ (WC) 83 % ผสมกับผงโคบอลต์ (Co) 17 %



ภาพที่ 4.12 วัสดุประสานชนิด Paraffin wax



ภาพที่ 4.13 ชั่งน้ำหนักโลหะผงและวัสดุประสาน



ภาพที่ 4.14 ผสมโลหะผงด้วยแผ่นให้ความร้อน (Hot pate) โดยใช้อุณหภูมิ
50 องศาเซลเซียส ไบบิกเกอร์



ภาพที่ 4.15 บดโลหะผงด้วยเครื่องบด (Ball Mill) เป็นเวลา 24 ชั่วโมง



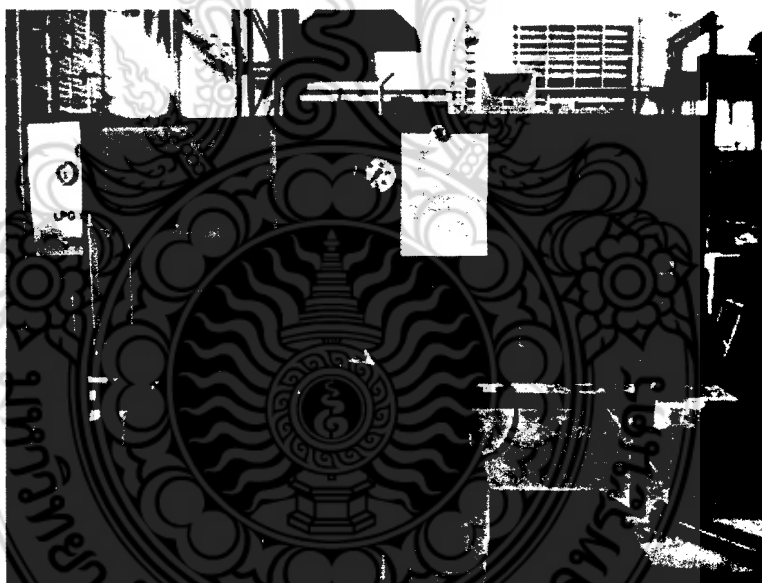
ภาพที่ 4.16 ร่อนแยกโลหะผงกับลูกบด โดยใช้ตะแกรง



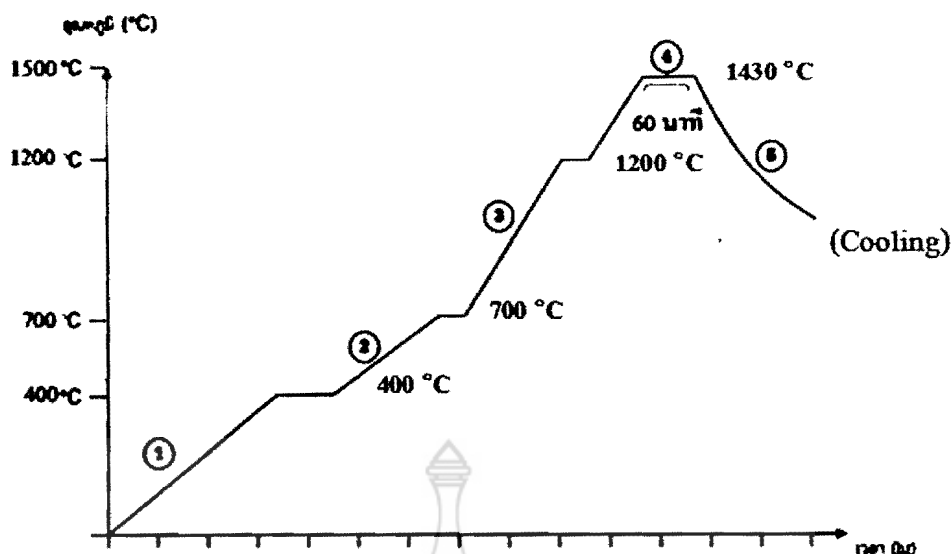
ภาพที่ 4.17 เครื่องวิเคราะห์การกระจายตัวของผงโลหะ



ภาพที่ 4.18 เครื่องอัดขึ้นรูปด้วยระบบไฮดรอลิกส์



ภาพที่ 4.19 เครื่องอบผึ่งขึ้นงานที่ผ่านกระบวนการอัด (Green Compact)
ที่อุณหภูมิ 1430 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง



ภาพที่ 4.20 กราฟแสดงขั้นตอนการอบนึ่ง

4.9.1.1 ขั้นตอนในการอบนึ่ง (Sintering)

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

ข) ขั้นตอนไล่ตัวประสาน (Dewaxing) เพิ่มต่อเนื่องอุณหภูมิจาก 400 องศาเซลเซียสเป็น 700 องศาเซลเซียส โดยใช้เวลาในการเพิ่มอุณหภูมิเป็นเวลา 2 ชั่วโมง แล้วคงอุณหภูมิไว้เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เพื่อไล่ตัวประสาน Paraffin Wax

ค) ขั้นตอนการให้ความร้อนก่อนการอบนึ่ง (Presintering) เพิ่มต่อเนื่องอุณหภูมิจาก 700 องศาเซลเซียสเป็น 1200 องศาเซลเซียส โดยใช้เวลาในการเพิ่มอุณหภูมิเป็นเวลา 3 ชั่วโมง แล้วคงอุณหภูมิไว้เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เพื่อให้ความร้อนก่อนการอบนึ่ง

ง) ขั้นตอนการอบนึ่ง เพิ่มต่อเนื่องอุณหภูมิจาก 1200 องศาเซลเซียส เป็น 1430 องศาเซลเซียส เมื่ออุณหภูมิถึง 1300 องศาเซลเซียส ให้หยุดเติมก๊าซไนโตรเจน โดยใช้เวลาในการเพิ่มอุณหภูมิเป็นเวลา 3 ชั่วโมง ให้คงการอบนึ่ง 1 ชั่วโมง เพื่อเกิดการรวมตัวกันระหว่างทั้งสแตนคาร์ไบด์ และ โคบอลต์

จ) ขั้นตอนการปล่อยให้เย็นตัว (Cooling) ปล่อยให้ชิ้นงานเย็นตัวในเตาจนถึง อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส จากนั้นนำชิ้นงานออกมาปล่อยให้เย็นตัว



ก)



ข)

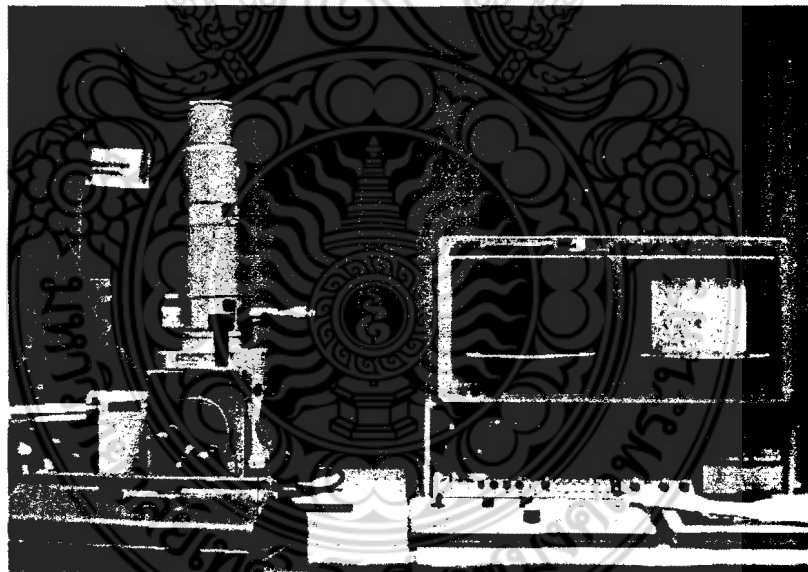
ภาพที่ 4.21 แผ่นมิดซีเมนต์ทั้งสแตนคาร์ไบด์ที่ทำการผลิต

ก) ด้านหน้าของแผ่นมิด

ข) ด้านข้างของแผ่นมิด

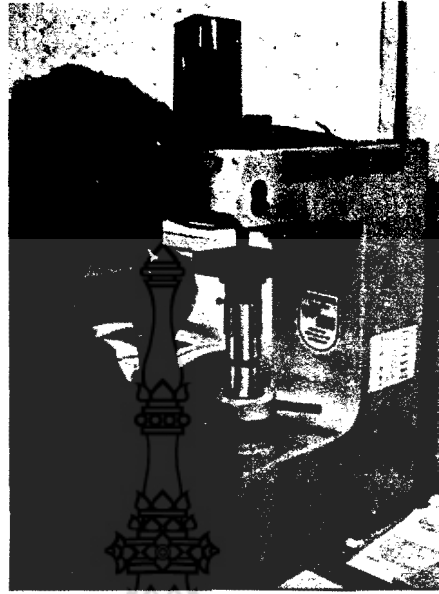
4.10 ดำเนินการทดสอบประสิทธิภาพ

4.10.1 การทดสอบโครงสร้างจุลภาค



ภาพที่ 4.22 เครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM)

4.10.2 การทดสอบความแข็งของแผ่นมีดซีเมนต์ทั้งสแตนคาร์ไบด์



ภาพที่ 4.23 ทดสอบความแข็งของแผ่นมีดด้วยเครื่อง Hardness Vickers Test

4.10.3 ทดสอบการใช้งานและการสึกหรอของแผ่นมีด



ภาพที่ 4.24 เครื่องกลึง CNC รุ่น MAZAK 15 M



ภาพที่ 4.25 วัสดุสำหรับการทดสอบเหล็กกล้าคาร์บอนปานกลาง 0.45 เปอร์เซ็นต์คาร์บอน
ขนาดความโต 100 มิลลิเมตร ยาว 200 มิลลิเมตร



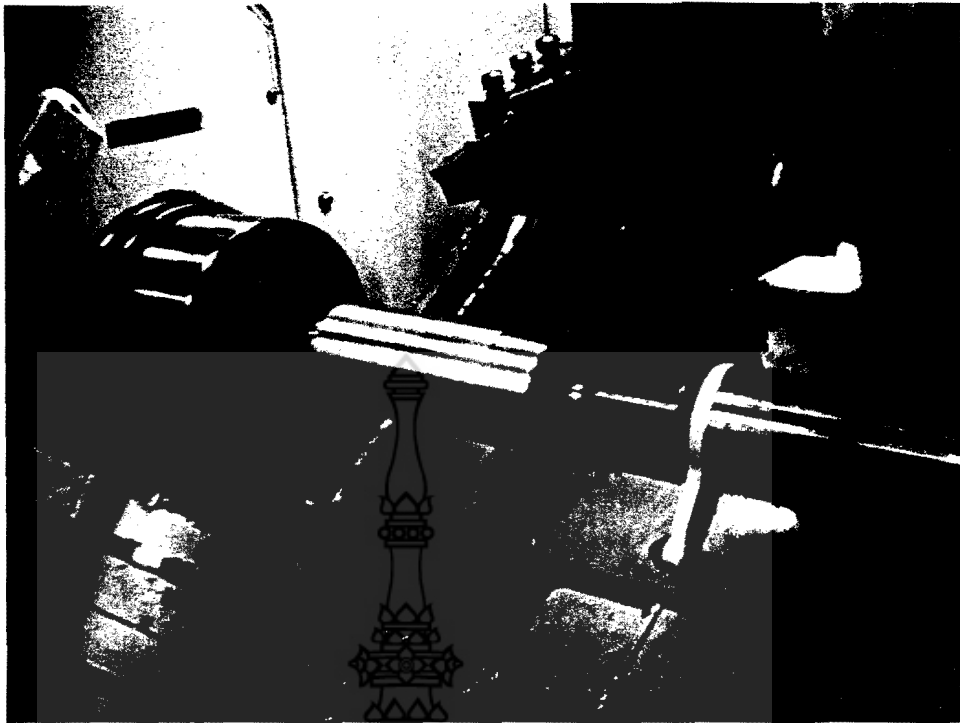
ก)

ข)

ภาพที่ 4.26 แผ่นมิดในการทดสอบ ก) แผ่นมิดที่ผลิตขึ้น ข) แผ่นมิดนำเข้า



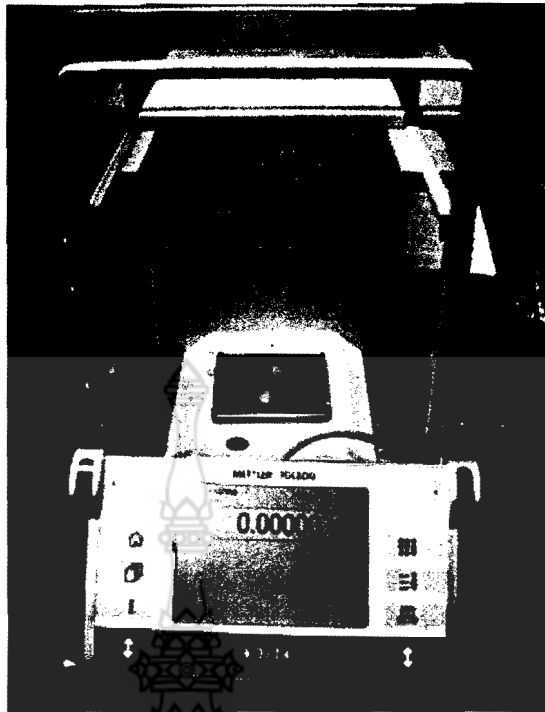
ภาพที่ 4.27 ชั่งน้ำหนักแผ่นมิดก่อนทำการทดสอบ



ภาพที่ 4.28 กลังปกอวัสดุชิ้นงานเป็นระยะทาง 200 มิลลิเมตร



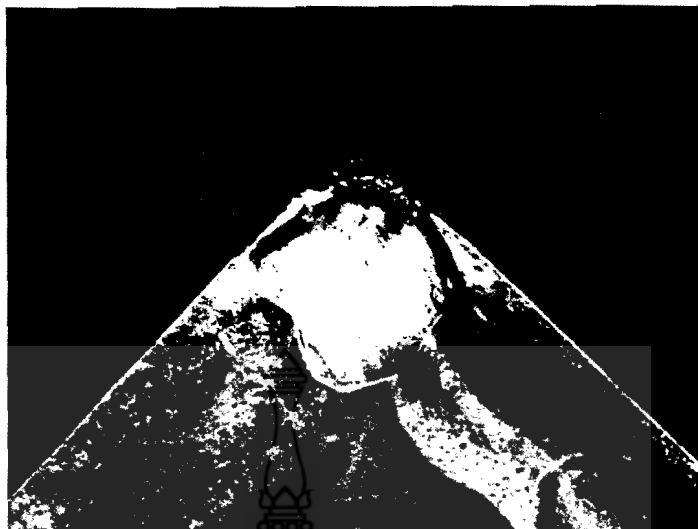
ภาพที่ 4.29 เก็บเศษกลึงในระยะ 0-20, 180-200 และ 380-400 มิลลิเมตร ตามลำดับ



ภาพที่ 4.32 ชั่งน้ำหนักของแผ่นมิดหลังจากการกลึงทุกๆ 200 มิลลิเมตร เพื่อดูน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงไปด้วยการทดสอบเครื่องชั่ง Mettler Toledo ความละเอียด 0.00001 g



ภาพที่ 4.33 ทำการถ่ายรูปลักษณะความเสียหายของแผ่นมิดก่อนและหลังทำการทดสอบ



ภาพที่ 4.34 ลักษณะความเสียหายที่เกิดขึ้นของแผ่นมิดหลังการกลึง
บริเวณผิวคายเศษ (Crater Wear)

4.11 รวบรวมข้อมูลการทดสอบ

ทำการเก็บบันทึกข้อมูลที่ได้ทำการทดสอบในด้านต่าง โดยละเอียดและนำข้อมูลที่ได้มาทำการวิเคราะห์เปรียบเทียบ โดยข้อมูลดังกล่าวจะแสดงในบทที่ 4 ซึ่งมีดังนี้

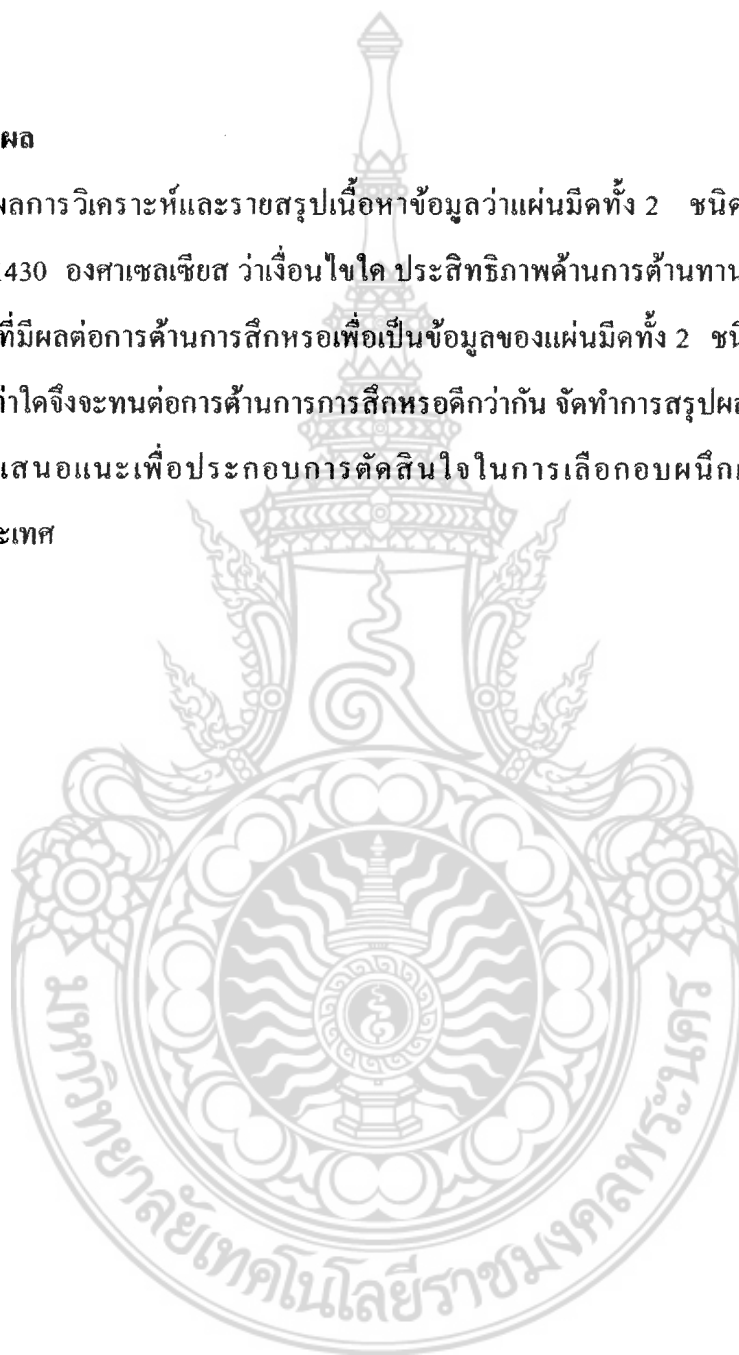
- 4.11.1 ค่าการกระจายตัวของโลหะผงภายหลังการบดผสม
- 4.11.2 ผลการวิเคราะห์ทางโครงสร้างจุลภาคของแผ่นมิดที่ผลิตขึ้นและแผ่นมิดที่นำเข้า
- 4.11.3 ผลการทดสอบค่าความแข็งของแผ่นมิดที่ผลิตขึ้นและแผ่นมิดที่นำเข้า
- 4.11.4 ผลการทดสอบการใช้งานและการสึกหรอของแผ่นมิดที่ผลิตขึ้นและแผ่นมิดที่นำเข้า
 - 4.11.4.1 ตารางแสดงน้ำหนักที่หายไปของแผ่นมิดที่ระยะต่างๆ
 - 4.11.4.2 ภาพลักษณะการสึกหรอของแผ่นมิด
 - 4.11.4.3 ตารางแสดงแรงในการตัดเฉือนของแผ่นมิด ณ ระยะต่างๆ

4.12 วิเคราะห์ผลการทดสอบ

ในการวิเคราะห์ผลการทดสอบจะวิเคราะห์แผ่นมิดที่ทำการผลิตขึ้นโดยผ่านกระบวนการอัดขึ้นรูปโลหะผงที่แรงอัด 350 MPa และผ่านกระบวนการอบผนึกที่อุณหภูมิ 1430 องศาเซลเซียส จะส่งผลให้แผ่นมิดที่ผลิตขึ้นนั้นมีประสิทธิภาพอย่างไรเมื่อเทียบกับแผ่นมิดที่นำเข้า โดยจะเปรียบเทียบในการ โครงสร้างทางจุลภาค ค่าความแข็ง การสึกหรอและ แรงในการตัดเฉือน ของแผ่นมิด

4.13 สรุปผล

จากผลการวิเคราะห์และรายสรุปเนื้อหาข้อมูลว่าแผ่นมิดทั้ง 2 ชนิด ที่ผ่านการอบผนึกที่อุณหภูมิ 1430 องศาเซลเซียส ว่าเงื่อนไขใด ประสิทธิภาพด้านการต้านทานการสึกหรอดีกว่า ผลส่วนสมที่มีผลต่อการต้านการสึกหรอเพื่อเป็นข้อมูลของแผ่นมิดทั้ง 2 ชนิดว่าจะควรอบผนึกที่อุณหภูมิเท่าใดจึงจะทนต่อการต้านการการสึกหรอดีกว่ากัน จัดทำการสรุปผลด้านการทดสอบและจัดทำข้อเสนอแนะเพื่อประกอบการตัดสินใจในการเลือกอบผนึกแผ่นมิดในการผลิตภายในประเทศ



บทที่ 5

ผลการทดลองผลิตชิ้นงานซีเมนต์คาร์ไบด์

5.1 ผลการทดลองการแยกสลายเศษชิ้นงานทั้งสแตนคาร์ไบด์

ตารางที่ 5.1 ผลการทดลองครั้งที่ 1 วันที่ 07/08/51

ข้อกำหนด ใช้สารละลายไฮโดรคลอริก 100% ปริมาณ 300 ml. แหล่งจ่ายความร้อน ที่ T5 = 00 °C ปรับค่าแหล่งจ่ายที่ ค่าแรงดันไฟฟ้า = 24 V , ค่ากระแสไฟฟ้า 1 A

เวลา (นาที)	ค่าแรงดัน ที่วัดได้ (V)	ค่ากระแสไฟฟ้า ที่วัดได้ (A)	อุณหภูมิ	ปริมาณ สารละลาย	น้ำหนัก ชิ้นงานก่อน การแยก	ข้อมูลทดลอง
00	7.2	29.5	100	300	220	
05	7.5	29				
10	9.1	15				
15	9.2	26		200		เติมกรด 100 ml.
20	3.5	22.2	110			
25	3.2	20.3				
30	7.5	15.3				
35	9.1	22		200		เติมกรด
40	7.6	26	110			
45	7.5	26				
50	3.5	27				
55	3.6	22.5		200		เติมกรด
60	3.1	18.1	110		211	

$$\text{แรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยที่อ่านได้} = \frac{81.6}{13} = 6.27 \text{ โวลท์ (V)}$$

$$\text{กระแสไฟฟ้าเฉลี่ยที่อ่านได้} = \frac{298.9}{13} = 23 \text{ แอมแปร์ (A)}$$

ตารางที่ 5.2 ผลการทดลองครั้งที่ 2 วันที่ 07/08/51

ข้อกำหนด ใช้สารละลายไฮโดรคลอริก 100% ปริมาณ 300 ml. แหล่งจ่ายความร้อนที่ $T_S = 100^\circ\text{C}$ ปรับค่าแหล่งจ่ายที่ ค่าแรงดันไฟฟ้า = 24 V , ค่ากระแสไฟฟ้า 1 A

เวลา (นาที)	ค่าแรงดันที่วัดได้ (V)	ค่ากระแสไฟฟ้าที่วัดได้ (A)	อุณหภูมิ	ปริมาณสารละลาย	น้ำหนักชิ้นงานก่อนการแยก	ข้อมูลทดลอง
00	7.1	28.1	100	300	211	
05	7.2	19.5				
10	9.0	26	110			
15	9	20.2				เติมกรด 100 ml.
20	3.7	20		200		
25	3.2	16	110			
30	7.5	15				
35	9.2	17				เติมกรด 100 ml.
40	7.5	27.3	110	200		
45	7.6	21.5				
50	2.5	17.3				
55	3.5	18	110	200		เติมกรด 100 ml.
60	3.5	14.1			200	

$$\text{แรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยที่อ่านได้} = \frac{80.5}{13} = 6.19 \text{ โวลต์ (V)}$$

$$\text{กระแสไฟฟ้าเฉลี่ยที่อ่านได้} = \frac{260}{13} = 20 \text{ แอมแปร์ (A)}$$

ตารางที่ 5.3 ผลการทดลองครั้งที่ 3 วันที่ 07/08/51

ข้อกำหนด ใช้สารละลายไฮโดรคลอริก 100% ปริมาณ 300 ml. แหล่งจ่ายความร้อนที่ $T_5 = 100\text{ }^{\circ}\text{C}$ ปรับค่าแหล่งจ่ายที่ ค่าแรงดันไฟฟ้า = 24 V , ค่ากระแสไฟฟ้า 1 A

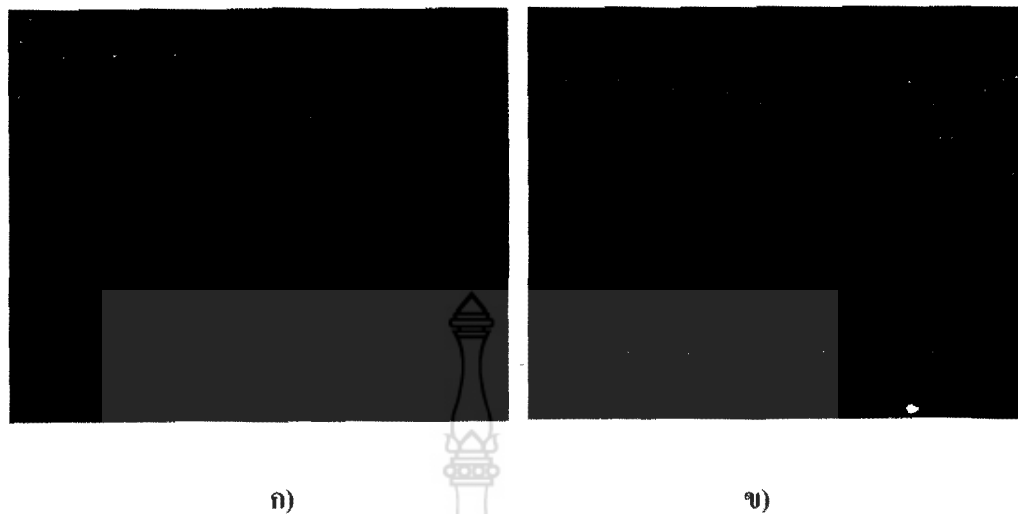
เวลา (นาที)	ค่าแรงดันที่วัดได้ (V)	ค่ากระแสไฟฟ้าที่วัดได้ (A)	อุณหภูมิ	ปริมาณสารละลาย	น้ำหนักชิ้นงานก่อนการแยก	ข้อมูลทดลอง
00	7.5	29.5	90	300	200	
05	8.7	20.1	110			
10	9.5	17.1				
15	7.3	15				เติมกรด 100 ml.
20	8.5	22	110	200		
25	9.1	17.5				
30	9.2	14.1				
35	10.5	9.5		200		เติมกรด 100 ml.
40	7.1	28.2	110			
45	3.8	30				
50	3.6	20.8				
55	9.2	14.4	110	200		เติมกรด 100 ml.
60	9.6	10.8			190	

$$\text{แรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยที่อ่านได้} = \frac{103.6}{13} = 7.9 \text{ โวลท์ (V)}$$

$$\text{กระแสไฟฟ้าเฉลี่ยที่อ่านได้} = \frac{249}{13} = 19.15 \text{ แอมแปร์ (A)}$$

การทดลองทั้ง 3 ครั้งในวันที่ 07/08/51 พบว่าค่าแรงดันและค่ากระแสไฟฟ้าที่ทำการปรับไว้ใน การทดลองที่แหล่งจ่าย นั้นไม่ตรงกับที่วัดด้วยเครื่องมือวัด ดังนั้นให้ทำการบันทึกค่าที่จาก เครื่องมือวัดเท่านั้น แล้วทำการคำนวณหาค่าเฉลี่ยของแรงดันและกระแสไฟฟ้า ในแต่ละครั้งเพื่อใช้ เป็นข้อมูลต่อไป

ส่วนการทดลองนี้เราได้กำหนดปริมาณของสารละลายที่ 300 ml. ดังนั้นในการทดลองจึงต้อง ทำการเติมสารละลายทุก 20 นาที



ภาพที่ 4.30 เศษกึ่งที่ได้จากการตัดปาดผิวเนื้อโลหะ

ก) แผ่นมีดนำเข้

ข) แผ่นมีดที่ผลิตขึ้น



ภาพที่ 4.31 ตรวจสอบขนาดชิ้นงานหลังการกึ่งทุกครั้ง

ตารางที่ 5.4 ทดลองครั้งที่ 4 วันที่ 08/08/51

ข้อกำหนด ใช้สารละลายไฮโดรคลอริก 100% ปริมาณ 300 ml. แหล่งจ่ายความร้อนที่ $T_5 = 100\text{ }^{\circ}\text{C}$ ปรับค่าแหล่งจ่ายที่ ค่าแรงดันไฟฟ้า = 24 V , ค่ากระแสไฟฟ้า 1 A

เวลา (นาที)	ค่าแรงดันที่วัดได้ (V)	ค่ากระแสไฟฟ้าที่วัดได้ (A)	อุณหภูมิ	ปริมาณสารละลาย	น้ำหนักชิ้นงานก่อนการแยก	ข้อมูลทดลอง
00	8.6	22.6	100	300	190	
05	8.7	20.3				
10	9.3	18.3				
15	9.2	14.4				เติมกรด 100 ml.
20	7.6	27.4	110	200		
25	7.9	23.6				
30	8.3	20.3				
35	9.3	16.4		200		เติมกรด 100 ml.
40	7.3	28.7	110			
45	8.7	16.4				
50	7.2	29.5				
55	7.7	20.8				เติมกรด 100 ml.
60	7.5	18.5	110	200	178	

$$\text{แรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยที่อ่านได้} = \frac{107.3}{13} = 8.25 \text{ โวลต์ (V)}$$

$$\text{กระแสไฟฟ้าเฉลี่ยที่อ่านได้} = \frac{275}{13} = 21.15 \text{ แอมแปร์ (A)}$$

ตารางที่ 5.5 ผลการทดลองครั้งที่ 5 วันที่ 08/08/51

ข้อกำหนด ใช้สารละลายไฮโดรคลอริก 100% ปริมาณ 300 ml. แหล่งจ่ายความร้อนที่ $T_5 = 100\text{ }^{\circ}\text{C}$ ปรับค่าแหล่งจ่ายที่ ค่าแรงดันไฟฟ้า = 24 V , ค่ากระแสไฟฟ้า 1 A

เวลา (นาที)	ค่าแรงดันที่วัดได้ (V)	ค่ากระแสไฟฟ้าที่วัดได้ (A)	อุณหภูมิ	ปริมาณสารละลาย	น้ำหนักชิ้นงานก่อนการแยก	ข้อมูลทดลอง
00	3.5	28.3	100	300	178	
05	4.5	16.3				
10	7.3	27	110			
15	8.7	20.2				เติมกรด 100 ml.
20	8.8	20	110	200		
25	8.1	27.3				
30	8.8	20.3				
35	8.6	19	110			เติมกรด 100 ml.
40	9.6	15		200		
45	8.6	22.3				
50	8.7	18				
55	9.7	14	110	200		เติมกรด 100 ml.
60	9.5	18			170	

$$\text{แรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยที่อ่านได้} = \frac{104.4}{13} = 8.03 \text{ โวลต์ (V)}$$

$$\text{กระแสไฟฟ้าเฉลี่ยที่อ่านได้} = \frac{265.7}{13} = 20.4 \text{ แอมแปร์ (A)}$$

ตารางที่ 5.6 ผลการทดลองครั้งที่ 6 วันที่ 08/08/51

ข้อกำหนด ใช้สารละลายไฮโดรคลอริก 100% ปริมาณ 300 ml. แหล่งจ่ายความร้อนที่ $T_5 = 100\text{ }^{\circ}\text{C}$ ปรับค่าแหล่งจ่ายที่ ค่าแรงดันไฟฟ้า = 24 V , ค่ากระแสไฟฟ้า 1 A

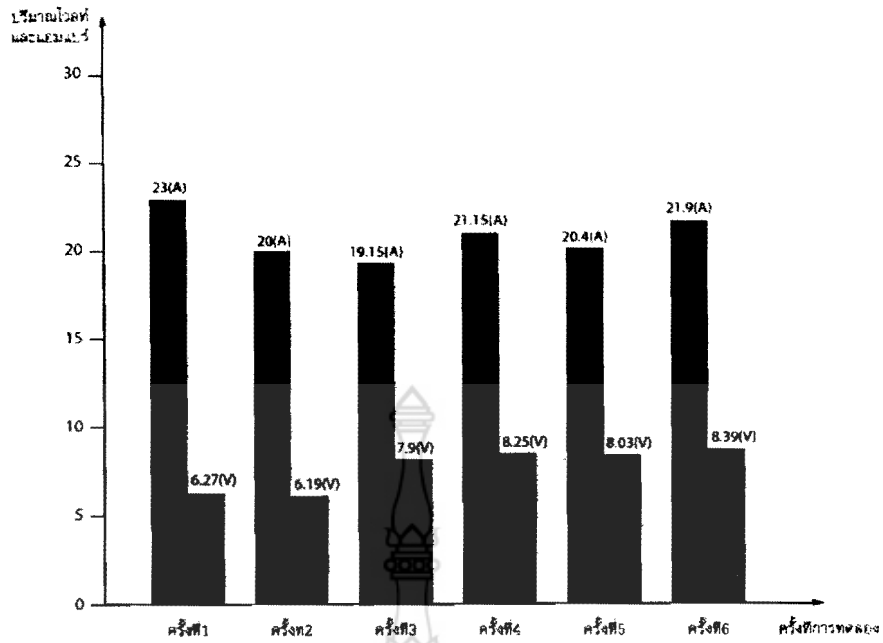
เวลา (นาที)	ค่าแรงดันที่วัดได้ (V)	ค่ากระแสไฟฟ้าที่วัดได้ (A)	อุณหภูมิ	ปริมาณสารละลาย	น้ำหนักชิ้นงานก่อนการแยก	ข้อมูลทดลอง
00	7.6	29.5	100	300	170	
05	7.5	19.5				
10	7.7	29.1	110			
15	8.4	23				เติมกรด 100 ml.
20	8.8	17	110	200		
25	9.1	15.1				
30	7.6	30				
35	7.3	26.5	110			เติมกรด 100 ml.
40	8.7	24.1		200		
45	8.6	22.5	110			
50	9.2	18.1				
55	9.1	12.1				เติมกรด 100 ml.
60	9.5	18.5	110	200	155	

$$\text{แรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยที่อ่านได้} = \frac{109.1}{13} = 8.39 \text{ โวลต์ (V)}$$

$$\text{กระแสไฟฟ้าเฉลี่ยที่อ่านได้} = \frac{285}{13} = 21.9 \text{ แอมแปร์ (A)}$$

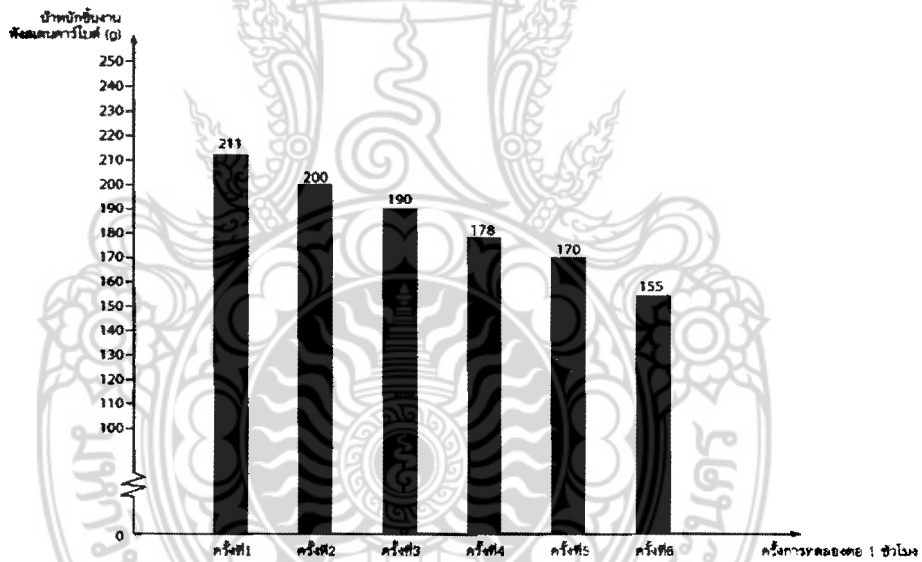
การทดลองทั้ง 3 ครั้งในวันที่ 08/08/51 พบว่าค่าแรงดันและค่ากระแสไฟฟ้าที่ทำการปรับไว้ใน การทดลองที่แหล่งจ่าย นั้น ไม่ตรงกับการวัดด้วยเครื่องมือวัด ดังนั้นให้ทำการบันทึกค่าที่จาก เครื่องมือวัดเท่านั้น แล้วทำการคำนวณหาค่าเฉลี่ยของแรงดันและกระแสไฟฟ้า ในแต่ละครั้งเพื่อใช้เป็นข้อมูลต่อไป

ส่วนการทดลองนี้เราได้กำหนดปริมาณของสารละลายที่ 300 ml. ดังนั้นในการทดลองจึงต้องทำการเติมสารละลายทุก 20 นาที



ภาพที่ 5.1 กราฟเปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงต่อช่วงเวลา

เป็นกราฟเปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลองทั้ง 6 ครั้ง โดยคิดจากค่าเฉลี่ยที่คำนวณได้ในแต่ละการทดลอง 1 ครั้ง/ 1 ชั่วโมง



ภาพที่ 5.2 กราฟแสดงปริมาณชิ้นงานสังกะสีคาร์ไบด์ที่ถูกแยกสลายต่อ 1 ชั่วโมง

เป็นกราฟแสดงปริมาณชิ้นงานสังกะสีคาร์ไบด์ที่ถูกแยกสลายต่อ 1 ชั่วโมง ทั้ง 6 ครั้ง โดยคิดคำนวณจากปริมาณชิ้นงานสังกะสีคาร์ไบด์ที่ถูกแยกสลาย 1 ครั้ง/ 1 ชั่วโมง

5.1.1 วิเคราะห์ผลการทดลอง

การแยกสลายชิ้นงานทั้งสเตนคาร์ไบด์ด้วยกระบวนการอิเล็กโทรไลต์ที่ใช้สารละลายไฮดรอกไซด์ 100 % เพื่อเป็นตัวทำละลายผลที่ได้ผงทั้งสเตนคาร์ไบด์และผงโคบอลต์ ในส่วนของผงโคบอลต์ที่ได้จะปริมาณน้อยบางส่วนจะละลายอยู่ในสารละลาย ในการวิเคราะห์การแยกสลายนั้น จะทำการวิเคราะห์ 3 ส่วน คือ

$$\begin{aligned}
 5.1.1.1 \text{ แรงดันไฟฟ้าที่เหมาะสม} &= \frac{\text{ผลแรงดันไฟฟ้าครั้งที่ } 2 + 3 + 4 + 5 + 6}{\text{จำนวนครั้งที่ทำการทดลอง}} \\
 &= \frac{45.03}{6} \\
 &= 7.5 \text{ โวลต์}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 5.1.1.2 \text{ กระแสไฟฟ้าที่เหมาะสม} &= \frac{\text{ผลกระแสครั้งที่ } 2 + 3 + 4 + 5 + 6}{\text{จำนวนครั้งที่ทำการทดลอง}} \\
 &= \frac{125.6}{6} \\
 &= 21 \text{ แอมแปร์}
 \end{aligned}$$

5.1.1.3 ปริมาณการแยกสลาย

น้ำหนักผงทั้งสเตนคาร์ไบด์ที่ได้จากการแยกสลายทั้งหมด = 55 กรัม

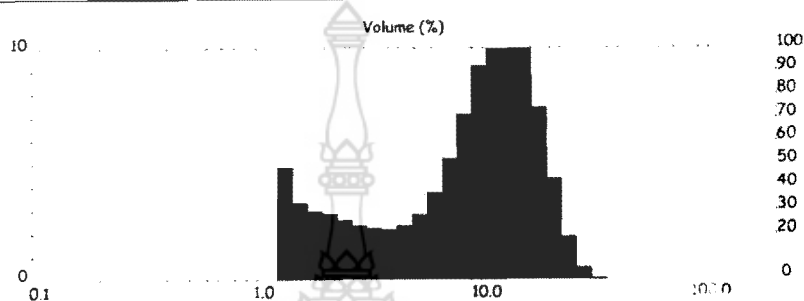
$$\text{จะได้ประสิทธิภาพการแยกสลาย} = \frac{55\text{g}}{63\text{g}} \times 100 = 84.6\%$$

5.2 ผลการทดสอบ

5.2.1 ผลการทดสอบผงทั้งสเตนคาร์ไบด์จากการแยกสลาย

ขนาดเกรนผงทั้งสเตนคาร์ไบด์ การกระจายผงทั้งสเตนคาร์ไบด์ ความหนาแน่นผงทั้งสเตนคาร์ไบด์ ส่วนผสมผงทั้งสเตนคาร์ไบด์

Size (um)	Volume In %	Size (um)	Volume In %	Size (um)	Volume In %	Size (um)	Volume In %
0.313	0.00	1.74	1.35	9.71	4.33	54.12	0.00
0.335	0.00	1.87	1.30	10.40	4.88	57.97	0.00
0.359	0.00	2.00	1.31	11.14	4.93	62.10	0.00
0.384	0.00	2.14	1.25	11.93	5.08	66.51	0.00
0.411	0.00	2.29	1.19	12.76	5.08	71.25	0.00
0.441	0.00	2.46	1.13	13.63	4.92	76.31	0.00
0.472	0.00	2.63	1.08	14.56	4.60	81.74	0.00
0.508	0.00	2.82	1.04	15.51	4.14	87.56	0.00
0.542	0.00	3.02	1.02	16.53	3.58	93.79	0.00
0.580	0.00	3.23	1.00	17.62	2.96	100.5	0.00
0.621	0.00	3.46	0.98	18.80	2.30	107.6	0.00
0.665	0.00	3.71	0.97	20.08	1.71	115.3	0.00
0.713	0.00	3.97	0.96	22.15	1.19	123.5	0.00
0.764	0.00	4.26	0.96	23.73	0.76	132.2	0.00
0.818	0.00	4.56	1.03	25.41	0.48	141.7	0.00
0.876	0.00	4.88	1.09	27.22	0.24	151.7	0.00
0.938	0.00	5.23	1.32	29.16	0.09	162.5	0.00
1.01	0.00	5.60	1.49	31.23	0.03	174.1	0.00
1.08	0.00	6.00	1.72	33.45	0.01	186.5	0.00
1.15	0.00	6.43	2.00	35.83	0.00	199.7	0.00
1.24	0.00	6.89	2.31	38.38	0.00	213.9	0.00
1.32	1.56	7.38	2.68	41.11	0.00	229.2	0.00
1.42	2.71	7.90	3.09	44.04	0.00	245.5	0.00
1.52	2.08	8.46	3.51	47.17	0.00	262.9	0.00
1.63	1.30	9.06	3.93	50.53	0.00	281.6	0.00
1.74	1.21	9.71		54.12	0.00	301.7	0.00

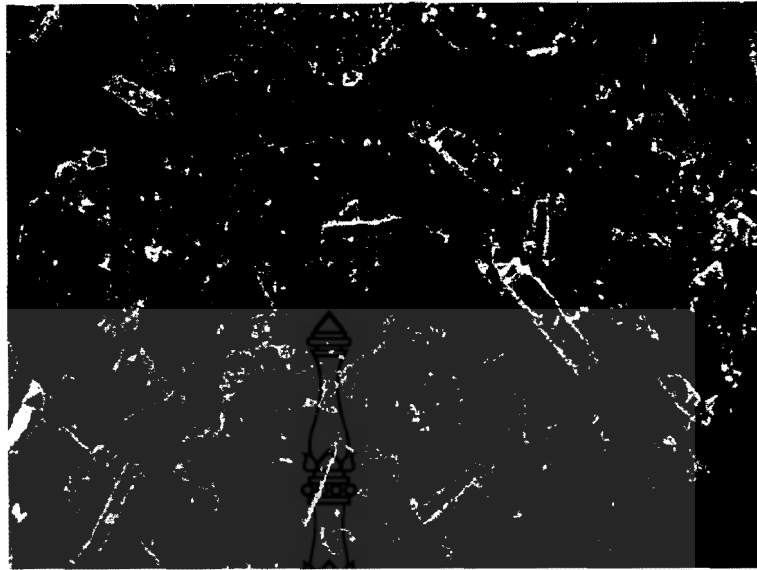


ภาพที่ 5.4 ผลการทดสอบการกระจายตัวของผงทั้งสแตนครีไบต์ที่ได้จากการแยกสลายด้วยเครื่อง Masterizer-S

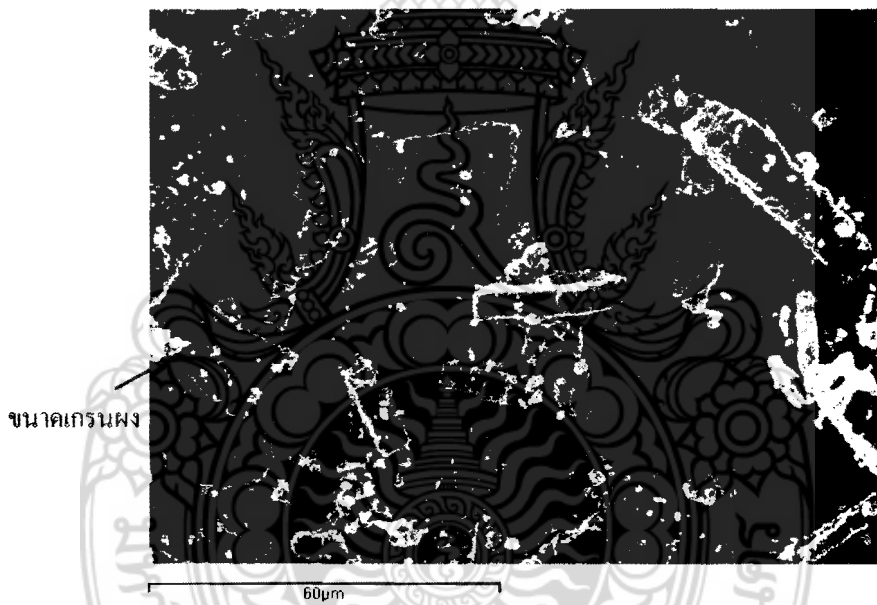
เป็นผลการทดสอบการกระจายตัวของผงทั้งสแตนครีไบต์ที่ได้จากการแยกสลาย โดยผลที่ได้จะบอกถึงขนาดเกรนที่เริ่มกระจายตัวที่ 1.24 ไมครอน ถึง 33.45 ไมครอน

ตารางที่ 5.7 ผลการทดสอบความหนาแน่นของผงทั้งสแตนครีไบต์ที่ได้จากการแยกสลายด้วยเครื่อง Ultracycrometer 1000 พบว่ามีค่าน้อยกว่าผงที่นำเข้ามาจากต่างประเทศเพราะไม่มีส่วนผสมของผงโคบอลต์

มวล, (g)	จำนวนครั้งในการทดลอง	ปริมาตร, (cc)	ความหนาแน่นปรากฏ, (g/cc)	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
1.0722	1	0.2101	5.1024	0.0195
	2	0.2098	5.1097	
	3	0.2096	5.1161	
	4	0.2081	5.1529	
	5	0.2094	5.1214	
	Average	0.2094	5.1205	



ภาพที่ 5.5 ผลการทดสอบรูปร่างผงทั้งสแตนคาร์ไบด์ที่ได้จากการแยกสลายด้วยเครื่อง SEM กำลังขยาย 500 เท่าพบว่ารูปร่างไม่กลมเนื่องจากยังไม่ผ่านการผสมและบดอัด



ภาพที่ 5.6 ผลการทดสอบรูปร่างผงทั้งสแตนคาร์ไบด์ที่ได้จากการแยกสลายด้วยเครื่อง SEM กำลังขยาย 1000 เท่า

ภาพขนาดของเกรนของทั้งสแตนคาร์ไบด์ที่ได้จากการแยกสลาย โดยผลึกที่ได้จะมีลักษณะเป็นเหลี่ยมๆเนื่องจากยังไม่ผ่านการผสมและบดอัด

ตารางที่ 5.8 ผลการทดสอบส่วนผสมผงทั้งสแตนคาร์ไบด์

ธาตุ	ปริมาณธาตุในตัวอย่าง (%wt)
	ผงโลหะจากกระบวนการ HCl
O	28.91
Si	0.08
S	0.06
Cl	11.92
Ca	<0.01
Cr	0.58
Mn	<0.01
Fe	2.09
Co	2.10
Ni	0.20
Mo	<0.01
W	54.04
Total	100.00

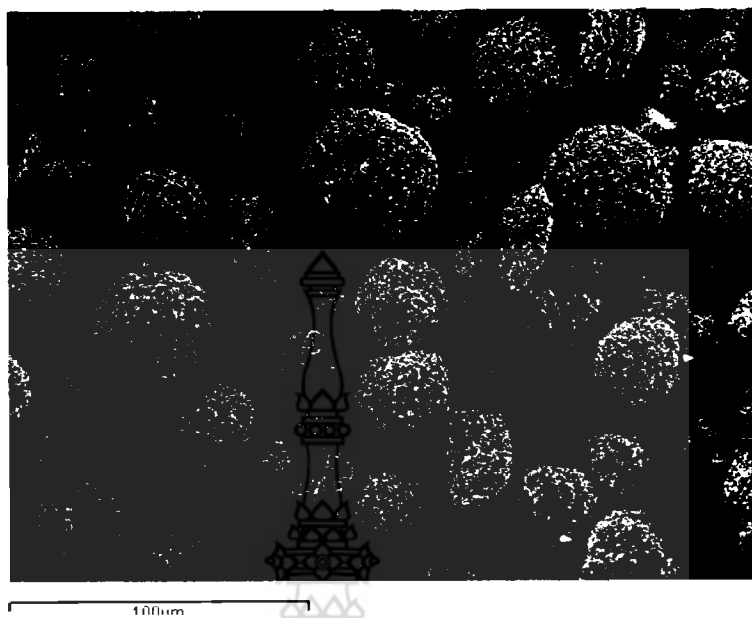
เป็นผลการทดสอบส่วนผสมของผงทั้งสแตนคาร์ไบด์ที่ได้จากการแยก เพื่อตรวจสอบส่วนผสมของชิ้นงานที่ได้จากการแยกสลาย โดยผลที่ได้จากการทดสอบทั้งสแตนคาร์ไบด์ 54.04 กรัม/ ซีซี

5.2.2 ผลการทดสอบผงทั้งสแตนคาร์ไบด์นำเข้าจากต่างประเทศ ความหนาแน่นผงทั้งสแตนคาร์ไบด์นำเข้าจากต่างประเทศ รูปร่างผงทั้งสแตนคาร์ไบด์นำเข้าจากต่างประเทศ

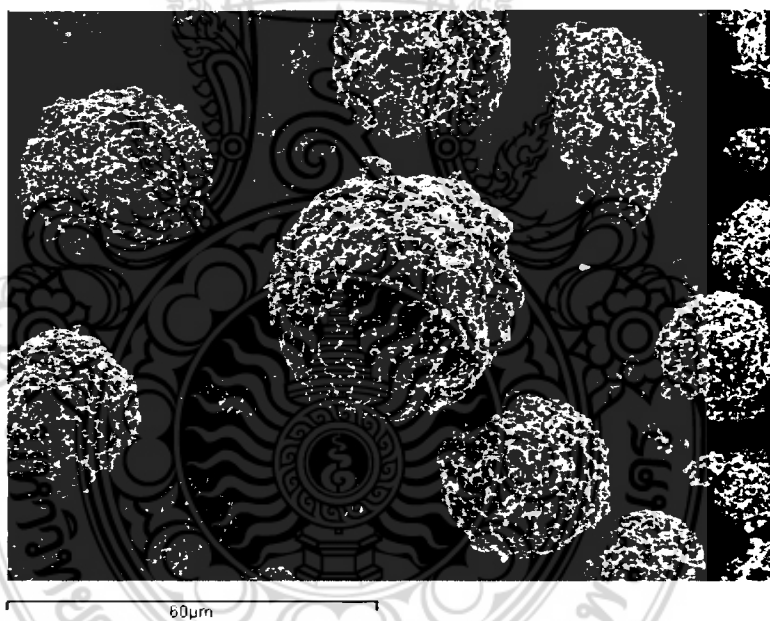
ตารางที่ 5.9 ผลการทดสอบความหนาแน่นผงทั้งสแตนคาร์ไบด์นำเข้าจากต่างประเทศด้วยเครื่อง Ultrapyenmeter 1000

มวล, (g)	จำนวนครั้งใน การทดลอง	ปริมาตร, (cc)	ความหนาแน่นปรากฏ, (g/cc)	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน
1.0723	1	0.0772	13.8959	0.0810
	2	0.0762	14.0749	
	3	0.0765	14.0216	
	4	0.0768	13.9643	
	5	0.0761	14.0924	
	Average	0.0766	14.0098	

เป็นการทดสอบความหนาแน่นของผงทั้งสแตนคาร์ไบด์ที่นำเข้ามาจากต่างประเทศ โดยค่าความหนาแน่นของผงทั้งสแตนคาร์ไบด์ที่นำเข้ามาที่มีความหนาแน่น 14.0098 กรัม/ซีซี



ภาพที่ 5.7 ผลการทดสอบรูปร่างผงทั้งสแตนคาร์ไบด์ที่นำเข้ามาจากต่างประเทศด้วยเครื่อง SEM
กำลังขยาย 500 เท่า



ภาพที่ 5.8 ผลการทดสอบรูปร่างผงทั้งสแตนคาร์ไบด์ที่นำเข้ามาจากต่างประเทศด้วยเครื่อง SEM
กำลังขยาย 1000 เท่า

ภาพขนาดของเกรนผงทั้งสเตนคาร์ไบด์ + โคบอลต์ 17% โดยผลึกที่ได้จะมีลักษณะกลมเป็นก้อนๆ เนื่องจากผงทั้งสเตนคาร์ไบด์มีส่วนผสมของผงโคบอลต์และผ่านกระบวนการบดอัดมาแล้ว

5.2.2.1 วิเคราะห์ผลการทดลอง

สมบัติผงทั้งสเตนคาร์ไบด์มีความสัมพันธ์กับกระบวนการอัดขึ้นรูปชิ้นงานได้แก่ ขนาดเกรนผงทั้งสเตนคาร์ไบด์ ความหนาแน่นผงทั้งสเตนคาร์ไบด์รูปร่างผงเพื่อที่ผลิตชิ้นงานที่มีคุณภาพและอยู่ในขอบเขตของโครงการ

ก) ขนาดเกรนผงทั้งสเตนคาร์ไบด์ที่ได้จากการแยกสลายมีขนาด 9.95 ไมครอน อยู่ในขอบเขตของโครงการ และที่สำคัญในทางทฤษฎีการผลิตชิ้นงานทั้งสเตนคาร์ไบด์ใช้ผงทั้งสเตนคาร์ไบด์ที่มีขนาดเกรนระหว่าง 0.5-10 ไมครอน

ข) ความหนาแน่นมีผลต่อการยึดเกาะกันระหว่างผงทั้งสเตนคาร์ไบด์กับผงโคบอลต์ในการอัดขึ้นรูป ความหนาแน่น ผงทั้งสเตนคาร์ไบด์ที่ได้จากการแยกเศษ 5.12 กรัม/ซีซี ความหนาแน่นผงทั้งสเตนคาร์ไบด์ ผสมผงโคบอลต์ 17% 14 กรัม/ซีซี เมื่อเปรียบเทียบกับผงทั้งสเตนคาร์ไบด์ของบริษัทที่ขายจากต่างประเทศมีค่าความหนาแน่นใกล้เคียงกันและในขอบเขตของโครงการไม่เกิน 4-15 กรัม/ซีซี

5.3 ผลการทดสอบค่าความแข็ง

ชิ้นงานทั้งสเตนคาร์ไบด์ก่อนการแยกสลาย (ผู้อื่นผลิต) และชิ้นงานที่เราผลิตด้วยการอบผนึกแต่ละแบบซึ่งแบบ A ผลิตจากผงทั้งสเตนคาร์ไบด์นำเข้าจากต่างประเทศ 100% และแบบ B ผลิตจากผงทั้งสเตนคาร์ไบด์นำเข้า 96% ผสมผงที่ได้จากการแยกสลาย 10%

ตารางที่ 5.10 ผลการทดสอบค่าความแข็งชิ้นงานทั้งสเตนคาร์ไบด์ก่อนการแยกสลาย (ผู้อื่นผลิต)

ชิ้นงานผลิต	วัดค่าความแข็งครั้งที่				ค่าความแข็งเฉลี่ย (HV30)
	1	2	3	4	
ชิ้นงานทั้งสเตนคาร์ไบด์ก่อนการแยกสลาย	1175	1153	1100	1095	1130

ความแข็งชิ้นงานก่อนนำมาแยกสลาย (ผู้อื่นผลิต) มีค่าความแข็งเฉลี่ย 1130 HV30

ตารางที่ 5.11 ผลการทดสอบค่าความแข็งชิ้นงานทั้งสแตนคาร์ไบด์ที่อบผนึกอุณหภูมิ 1350 °C

ชิ้นงานผลิต	วัดค่าความแข็งครั้งที่				ค่าความแข็งเฉลี่ย (HV 30)
	1	2	3	4	
1. ชิ้นงานแบบ A	800.5	853.5	785.5	902.5	835.5
2. ชิ้นงานแบบ B	801	830	790	850	817

ความแข็งชิ้นงานแบบ A ที่ผลิตจาก ผงทั้งสแตนคาร์ไบด์นำเข้า มีความแข็งเฉลี่ย 835.5 HV30 ความแข็งชิ้นงานแบบ B ที่ผลิตจากผงทั้งสแตนคาร์ไบด์นำเข้าผสมผงทั้งสแตนคาร์ไบด์ที่ได้จากการแยกสลายมีความแข็งเฉลี่ย 817 HV30

วิเคราะห์ค่าความแข็งชิ้นงานทั้งสแตนคาร์ไบด์ที่อบผนึกอุณหภูมิ 1350 °C ทั้ง 2 ชิ้นงานพบว่าค่าความแข็งของชิ้นงานทั้งสแตนคาร์ไบด์ มีค่าใกล้เคียงกันมาก เนื่องจากการทดสอบด้วยระบบวิกเกอร์นั้น ถ้าค่าความแข็งนั้นต้องมากหรือน้อยกว่า 50 จึงถือว่าแตกต่างกัน

ตารางที่ 5.12 ผลการทดสอบค่าความแข็งชิ้นงานทั้งสแตนคาร์ไบด์ที่อบผนึกอุณหภูมิ 1400 °C

ชิ้นงานผลิต	วัดค่าความแข็งครั้งที่				ค่าความแข็งเฉลี่ย (HV 30)
	1	2	3	4	
1. ชิ้นงานแบบ A	900.3	950	1030	1200	995
2. ชิ้นงานแบบ B	899.2	1291	1183	995.5	1092

ความแข็งชิ้นงานแบบ A ที่ผลิตจาก ผงทั้งสแตนคาร์ไบด์นำเข้า มีความแข็งเฉลี่ย 995 HV30 ความแข็งชิ้นงานแบบ B ที่ผลิตจากผงทั้งสแตนคาร์ไบด์นำเข้าผสมผงทั้งสแตนคาร์ไบด์ที่ได้จากการแยกสลายมีความแข็งเฉลี่ย 1092 HV30

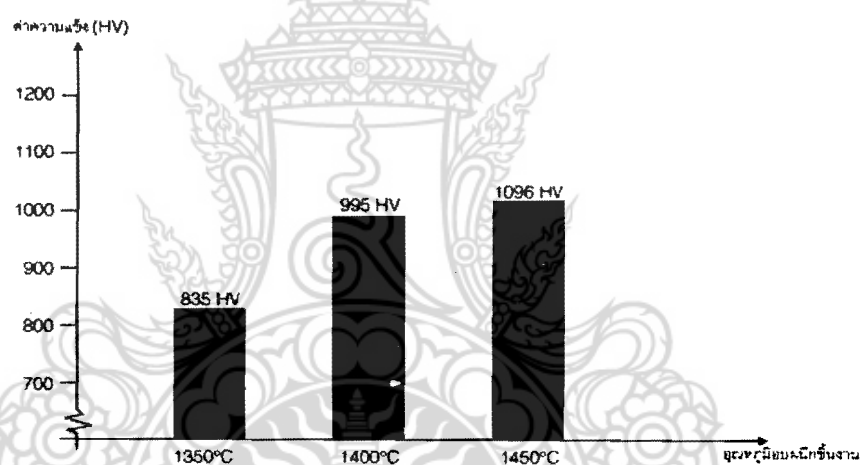
วิเคราะห์ค่าความแข็งชิ้นงานทั้งสแตนคาร์ไบด์ที่อบผนึกอุณหภูมิ 1400 °C ทั้ง 2 ชิ้นงานพบว่าค่าความแข็งของชิ้นงานทั้งสแตนคาร์ไบด์ มีค่าใกล้เคียงกันมาก เนื่องจากการทดสอบด้วยระบบวิกเกอร์นั้น ถ้าค่าความแข็งนั้นต้องมากหรือน้อยกว่า 50 จึงถือว่าแตกต่างกัน

ตารางที่ 5.13 ผลการทดสอบค่าความแข็งชิ้นงานทั้งสแตนคาร์ไบด์ที่อบผืนที่อุณหภูมิ 1450 °C

ชิ้นงานผลิต	วัดค่าความแข็งครั้งที่				ค่าความแข็งเฉลี่ย (HV 30)
	1	2	3	4	
1. ชิ้นงานแบบ A	1147	1030	1095	1113	1096
2. ชิ้นงานแบบ B	1102	1012	1026	1195	1083

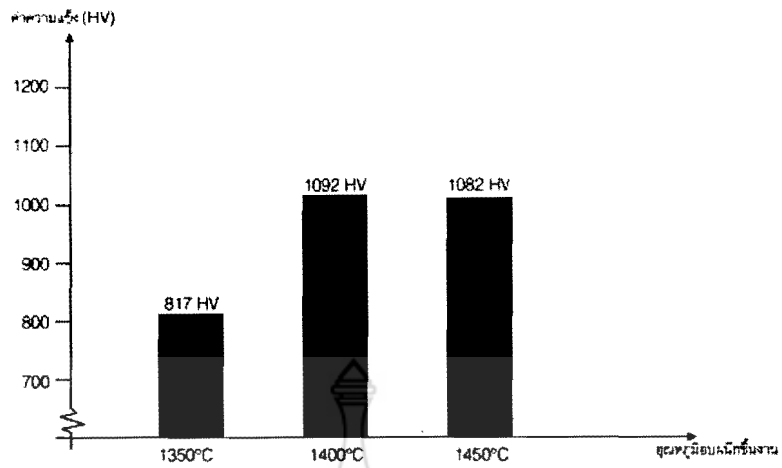
ความแข็งชิ้นงานแบบ A ที่ผลิตจาก ผงทั้งสแตนคาร์ไบด์นำเข้า มีความแข็งเฉลี่ย 1096 HV30 ความแข็งชิ้นงานแบบ B ที่ผลิตจากผงทั้งสแตนคาร์ไบด์นำเข้าผสมผงทั้งสแตนคาร์ไบด์ที่ได้จากการแยกสลายมีความแข็งเฉลี่ย 1083 HV30

วิเคราะห์ค่าความแข็งชิ้นงานทั้งสแตนคาร์ไบด์ที่อบผืนที่อุณหภูมิ 1450 °C ทั้ง 2 ชิ้นงานพบว่าค่าความแข็งของชิ้นงานทั้งสแตนคาร์ไบด์ มีค่าใกล้เคียงกันมากเนื่องจากการทดสอบด้วยระบบวิกเกอร์ นั้น ถ้าค่าความแข็งนั้นต้องมากหรือน้อยกว่า 50 จึงถือว่าแตกต่างกัน



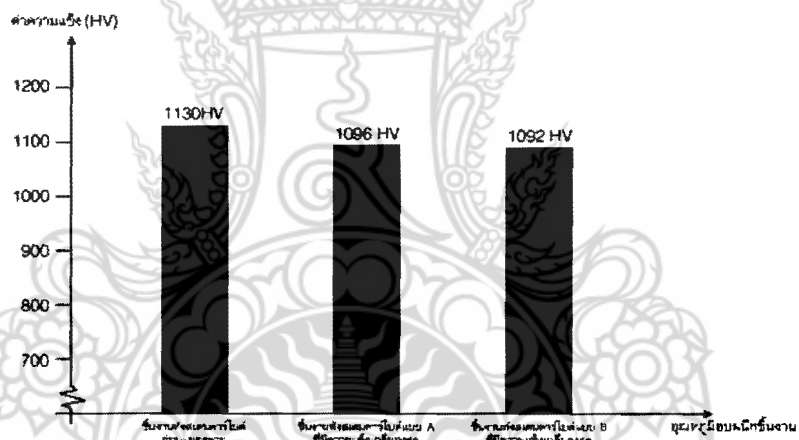
กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งชิ้นงานทั้งสแตนคาร์ไบด์ ผงทั้งสแตนคาร์ไบด์จากต่างประเทศ

ภาพที่ 5.9 กราฟแสดงค่าความแข็งชิ้นงานแบบ A ตามช่วงอุณหภูมิที่กำหนด



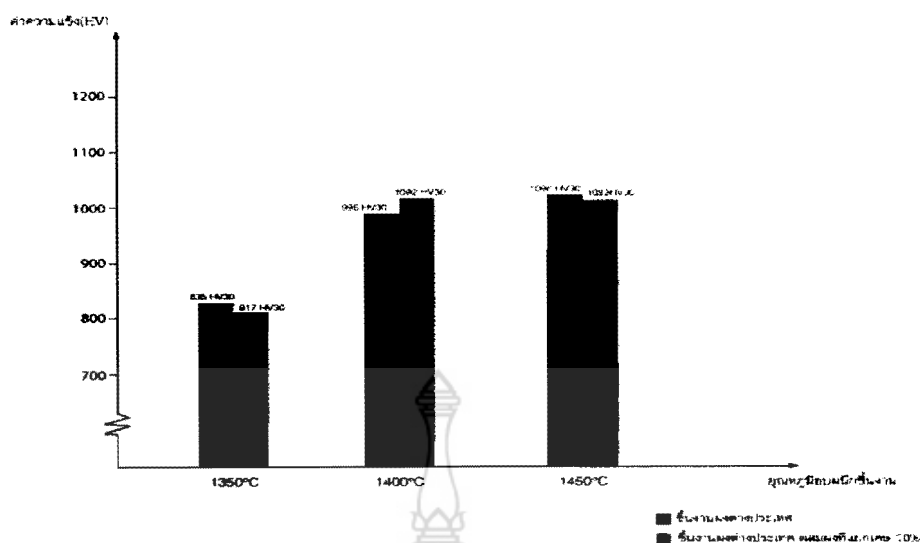
กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งชิ้นงานที่สแตนคาร์ไบด์ ผงสังกะสีจากต่างประเทศผสม ผงสังกะสีคาร์ไบด์ จากการแยกสลาย 10%

ภาพที่ 5.10 กราฟแสดงกราฟสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งชิ้นงานทั้งสแตนคาร์ไบด์ส่วนผสม โคลบอลต์ 17% กับช่วงอุณหภูมิที่ใช้ในการอบผนิก



กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งของชิ้นงานทั้งสแตนคาร์ไบด์ ก่อนแยกสลาย กับชิ้นงานทั้งสแตนคาร์ไบด์ ที่มีความแข็งเฉลี่ยสูงสุด

ภาพที่ 5.11 กราฟแสดงค่าความแข็งชิ้นงานแบบ B ตามช่วงอุณหภูมิที่กำหนด



ภาพที่ 5.12 กราฟแสดงค่าความแข็งสูงสุดของชิ้นงานที่ทำการผลิตกับชิ้นงานผู้อื่นผลิต

5.3.1 วิเคราะห์ผลการทดลอง

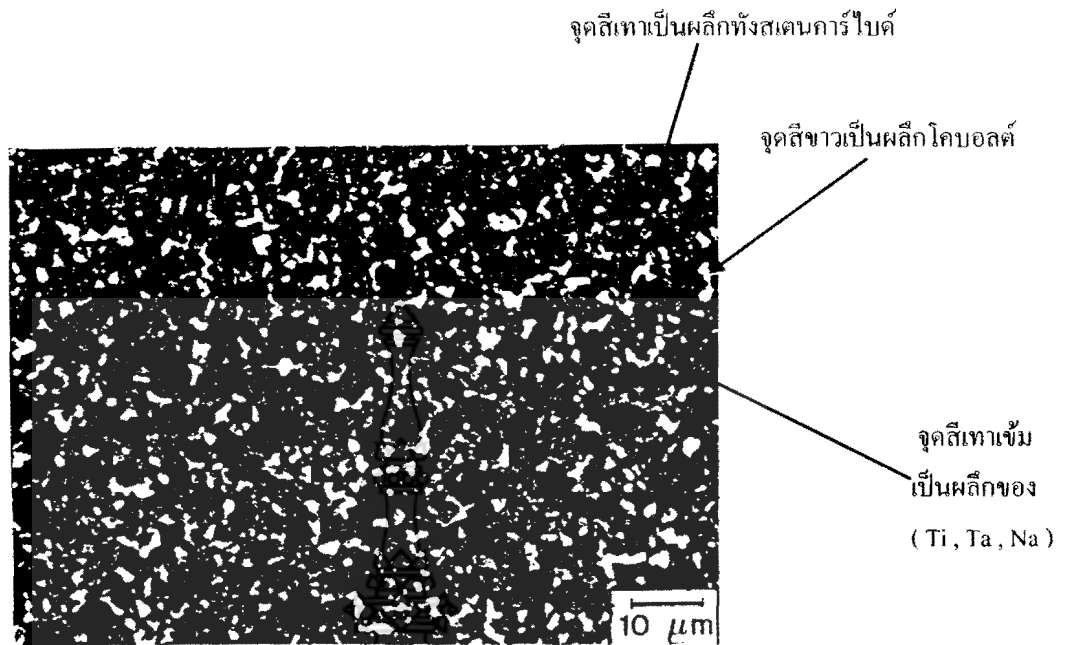
ค่าความแข็งชิ้นงานทั้งสแตนคาร์ไบด์มีตัวแปรที่มีความสัมพันธ์กับกระบวนการอบแห้ง ได้แก่ ส่วนผสมโคบอลต์ ขนาดเกรนผงทั้งสแตนคาร์ไบด์อุณหภูมิที่อบแห้ง

5.3.1.1 ค่าความแข็งชิ้นงานทั้งสแตนคาร์ไบด์ที่เราผลิตจากผงนำเข้าจากต่างประเทศ 100% ที่อุณหภูมิอบแห้ง 1450 °C มีความแข็งเฉลี่ยสูงสุดที่ 1096 HV 30 ใช้แรงกด 14 ดัน กดแค่ 30 วินาที สังเกตว่าค่าความแข็งของชิ้นงานทั้งสแตนคาร์ไบด์จะเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิที่อบแห้ง ค่าความแข็งชิ้นงานเฉลี่ยสูงสุดมีค่าความแข็งใกล้เคียงกับความแข็งผลิตภัณฑ์ของบริษัทต่างๆและตามทฤษฎีที่อ้างอิง

5.3.1.2 ค่าความแข็งชิ้นงานทั้งสแตนคาร์ไบด์(ผู้อื่นผลิต) ก่อนการแยกสลายที่ใช้อ้างอิง มีค่าความแข็งเฉลี่ย 1130 HV 30 เปรียบเทียบค่าความแข็งชิ้นงานทั้งสแตนคาร์ไบด์ที่(เราผลิต)จากผงนำเข้า 100% อบแห้งที่อุณหภูมิ 1450 °C มีความแข็งเฉลี่ย 1096 HV30 ซึ่งมีค่าความแข็งเฉลี่ยที่ใกล้เคียงกัน

5.3.1.3 ค่าความแข็งชิ้นงานทั้งสแตนคาร์ไบด์ที่ผลิตจากผงทั้งสแตนคาร์ไบด์นำเข้าจากต่างประเทศ 100% เปรียบเทียบกันค่าความแข็งชิ้นงานทั้งสแตนคาร์ไบด์ที่ผลิตจาก ผงทั้งสแตนคาร์ไบด์นำเข้าจากต่างประเทศผสมกับผงทั้งสแตนคาร์ไบด์ที่ได้จากการแยกสลาย 10 % ตามช่วงอุณหภูมิตอบแห้ง 1350 °C , 1400 °C , 1450°C พบว่าค่าความแข็งเฉลี่ยที่ได้ไม่แตกต่างกันมากนัก แสดงว่าการผสมผงทั้งสแตนคาร์ไบด์ที่ได้จากการแยกสลาย 10% ไม่มีผลต่อความแข็งของชิ้นงานทั้งสแตนคาร์ไบด์

5.4 ผลการทดสอบเกรนโลหะขึ้นงานทั้งสแตนคาร์ไบด์

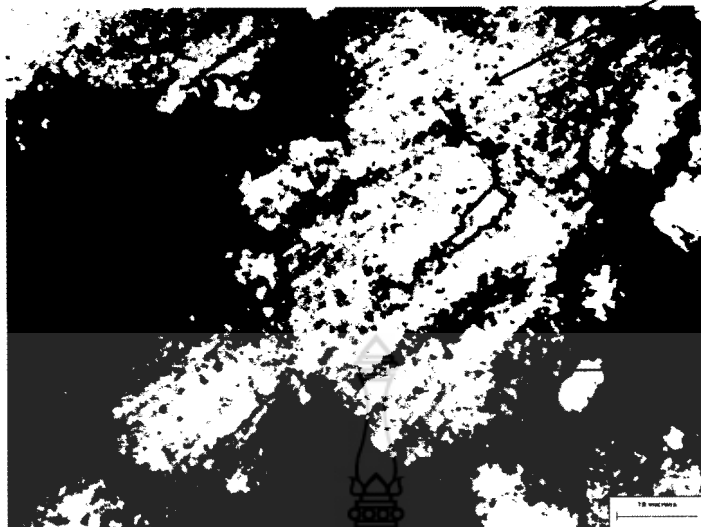


ภาพที่ 5.13 เกรนโลหะขึ้นงานทั้งสแตนคาร์ไบด์ (WC 68.5%) (Ti,Ta,Na 21%) Co 9.5%
กำลังขยาย 1000 เท่า



ภาพที่ 5.14 เกรนโลหะขึ้นงานทั้งสแตนคาร์ไบด์ผสมโคบอลต์ 17 % นำเข้าจากต่างประเทศอบ
ผนึกที่อุณหภูมิ 1450 °C กำลังขยาย 1000 เท่า

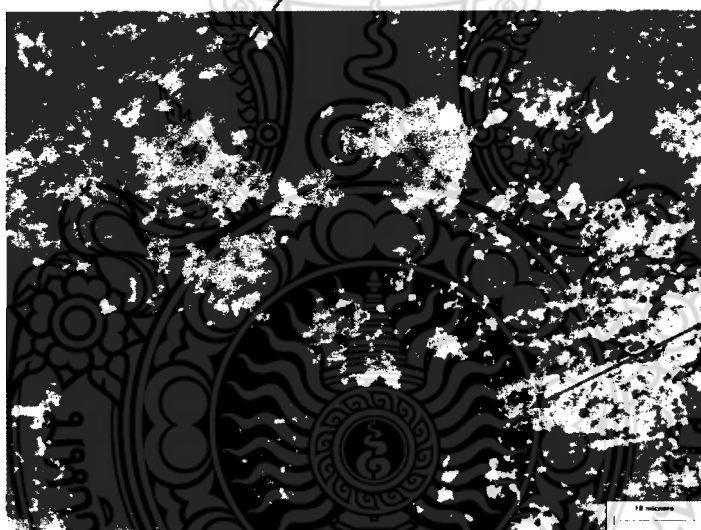
ผลึก โคบอลต์และผลึกทังสเตนคาร์ไบด์เริ่มรวมตัวกัน



เฟสซีเมนต์คาร์ไบด์

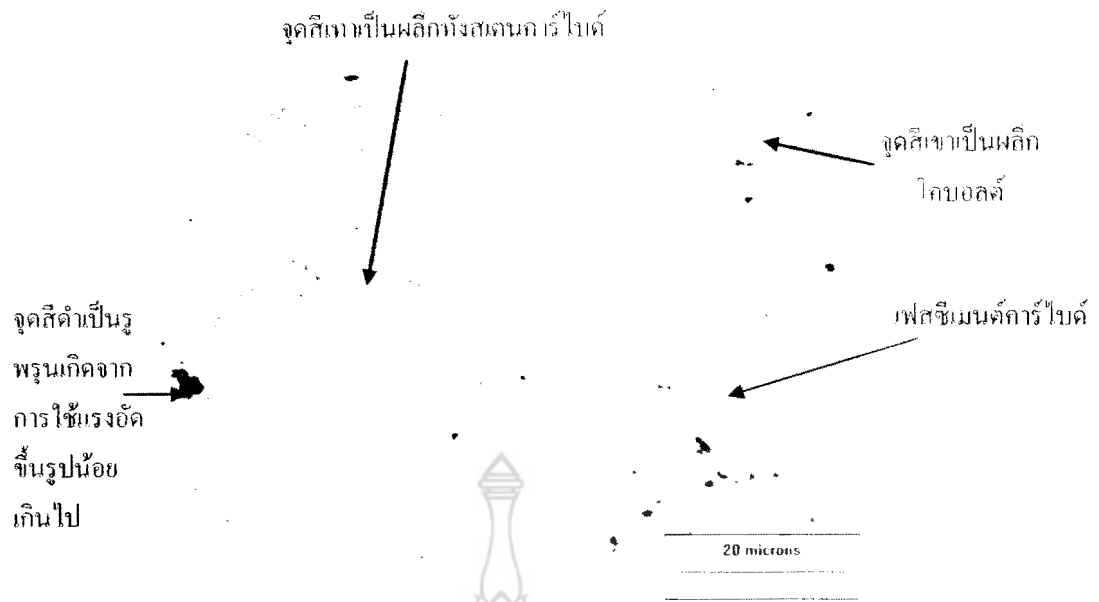
ภาพที่ 5.15 เกรนโลหะขึ้นงานผงทังสเตนคาร์ไบด์นำเข้าจากต่างประเทศอบผนึกที่อุณหภูมิ 1350 °C

ผลึก โคบอลต์และผลึกทังสเตนคาร์ไบด์เริ่มรวมกัน



เฟสซีเมนต์คาร์ไบด์

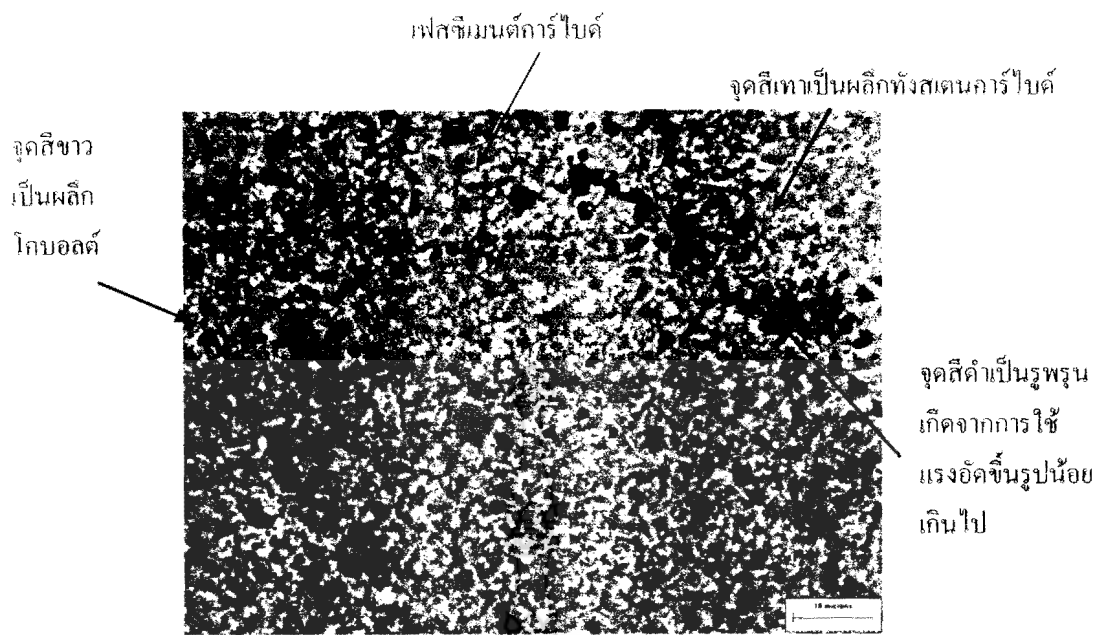
ภาพที่ 5.16 เกรนโลหะขึ้นงานผงทังสเตนคาร์ไบด์นำเข้าจากต่างประเทศผสมผง ทังสเตนคาร์ไบด์ แยกเศษ 10 % อบผนึกที่อุณหภูมิ 1350 °C



ภาพที่ 5.17 เกรนโลหะขึ้นงานผงทั้งสตนคาร์ไบด์นำเข้าจากต่างประเทศอบขึ้นที่อุณหภูมิ 1400 °C



ภาพที่ 5.18 เกรนโลหะขึ้นงานผงทั้งสตนคาร์ไบด์นำเข้าจากต่างประเทศผสมผงทั้งสตนคาร์ไบด์ที่แยกสลาย 10 % อบขึ้นที่อุณหภูมิ 1400 °C



ภาพที่ 5.19 เกรนโลหะชิ้นงานผงทั้งสเดนคาร์ไบด์นำเข้าจากต่างประเทศอบขึ้นที่อุณหภูมิ 1450 °C



ภาพที่ 5.20 เกรนโลหะชิ้นงานผงทั้งสเดนคาร์ไบด์นำเข้าจากต่างประเทศผสมผงทั้งสเดนคาร์ไบด์ที่แยกสลาย 10 % อบขึ้นที่อุณหภูมิ 1450 °C

5.5 วิเคราะห์ผลการทดลอง

เกรนโลหะชิ้นงานทั้งสเตนคาร์ไบด์มีความสัมพันธ์ต่ออุณหภูมิของกระบวนการอบผืนิก จากกระบวนการผลิตโลหะหนัก หนังสือทั้งสเตนหน้า 349 อุณหภูมิกระบวนการอบผืนิก ที่ อุณหภูมิ 1400 °C ผลึกทั้งสเตนคาร์ไบด์ และผืนิกโคบอลต์รวมตัวกันจากภาพเกรนโลหะทั้งหมดแสดงให้เห็นถึงว่าชิ้นงานทั้งสเตนคาร์ไบด์อบผืนิกที่อุณหภูมิ 1350 °C ผลึกทั้งสเตนคาร์ไบด์ และผืนิกโคบอลต์ เริ่มจะรวมตัวกันส่วนชิ้นงานทั้งสเตนคาร์ไบด์อบผืนิกที่อุณหภูมิ 1400 °C , 1450 °C ผลึกทั้งสเตนคาร์ไบด์และผลึกโคบอลต์รวมตัวกันมากขึ้นตามลำดับ



บทที่ 6

ผลการผลิตแผ่นมิดซีเมนต์คาร์ไบด์

6.1 บทนำ

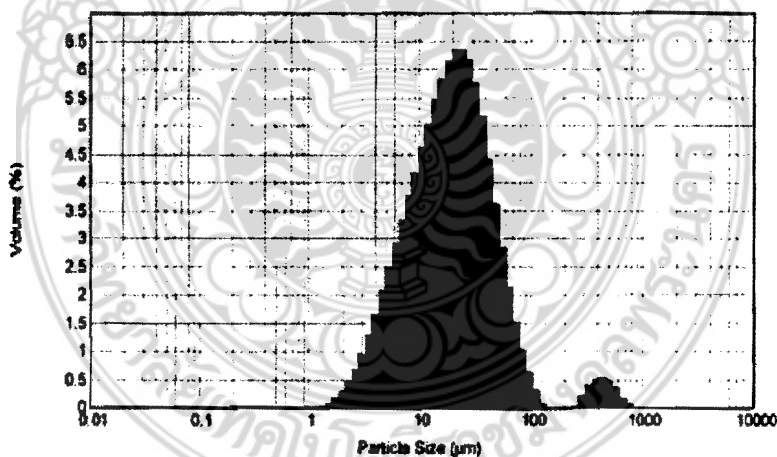
การศึกษาศึกษาและผลิตแผ่นมิดซีเมนต์ทั้งสแตนคาร์ไบด์ เพื่อนำมาผลิตทั้งสแตนคาร์ไบด์ที่นำเข้าจากต่างประเทศ มาทำการผลิตด้วยเทคโนโลยีในประเทศไทยตามสถานที่ต่าง มีผลการทดลองและวิเคราะห์ชิ้นงาน ดังนี้

6.2 เงื่อนไขในการทดลอง

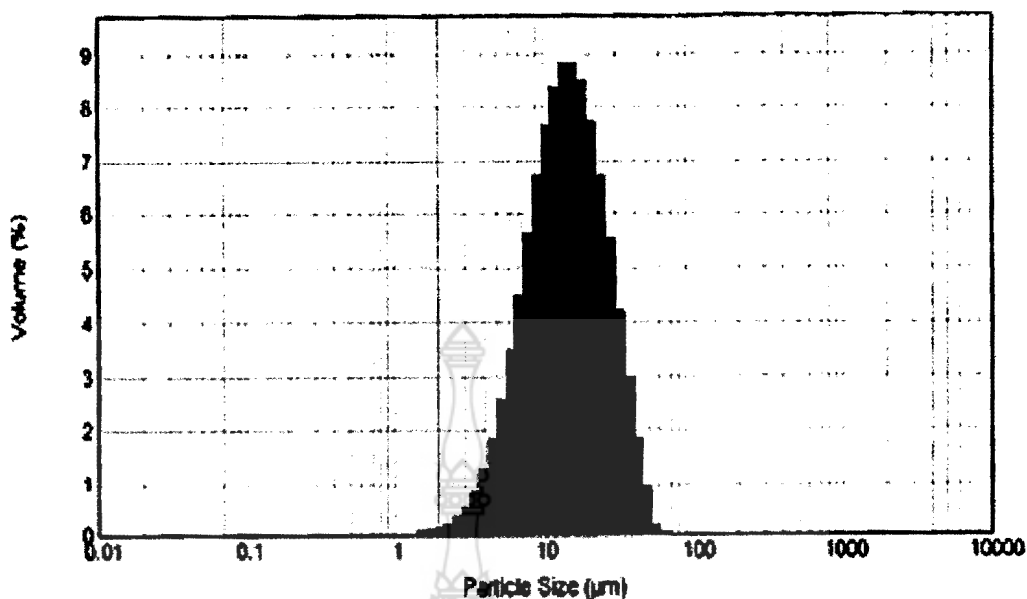
จากการผลิตแผ่นมิดซีเมนต์ทั้งสแตนคาร์ไบด์ด้วยเงื่อนไขต่างๆ ประกอบด้วยการผสมโลหะผงกับวัสดุประสาน Paraffin Wax โดยใช้ Ball Milling ผสมเป็นเวลา 24 ชั่วโมง และนำมาวิเคราะห์การกระจายตัวด้วยเครื่อง Master Sizer และนำโลหะผงดังกล่าวมาอัดขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดไฮดรอลิกส์โดยใช้แรงอัด 350 MPa และนำไปอบพูนที่อุณหภูมิ 1430 องศาเซลเซียส จากนั้นนำแผ่นมิดซีเมนต์ทั้งสแตนคาร์ไบด์ดังกล่าว ทดสอบทาง โครงสร้างจุลภาค ทดสอบความแข็ง และทดสอบด้านการใช้งาน ผลของการทดสอบดังกล่าวมีดังนี้

6.3 ผลการวิเคราะห์ทางโครงสร้าง

การวิเคราะห์การกระจายตัวของโลหะผง โดยนำโลหะภายหลังการผสมผงทั้งสแตนคาร์ไบด์ ผสมผงโคบอลต์ 17 % กับ วัสดุประสาน Paraffin Wax เป็นเวลา 12 และ 24 ชั่วโมง



ภาพที่ 6.1 แสดงลักษณะการกระจายตัวของโลหะผงภายหลังการผสมเป็นเวลา 12 ชั่วโมง



ภาพที่ 6.2 แสดงลักษณะการกระจายตัวของโลหะผงภายหลังการผสมเป็นเวลา 24 ชั่วโมง

ตารางที่ 6.1 ผลการวิเคราะห์การกระจายตัวของโลหะผงด้วยเครื่อง Mastersizer 2000

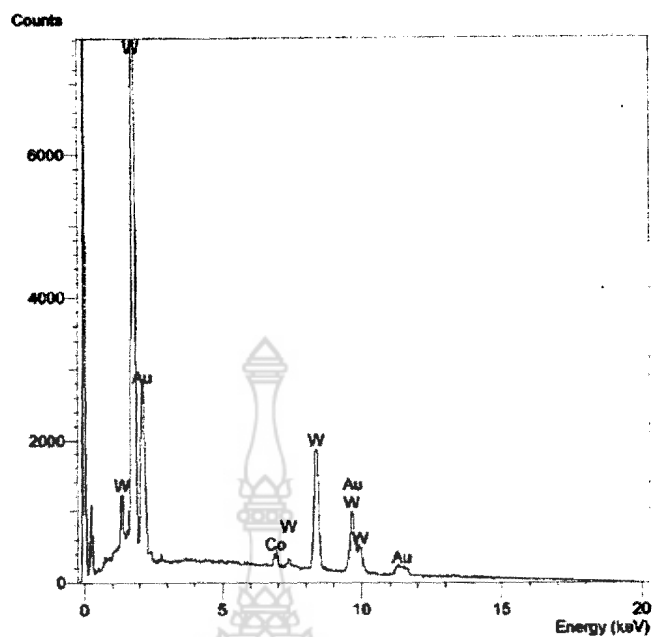
ผลการวิเคราะห์การกระจายตัวของโลหะผง	
ทำการผสมเป็นเวลา 12 ชั่วโมง	35.87 ไมครอน
ทำการผสมเป็นเวลา 24 ชั่วโมง	16.65 ไมครอน

ผลการวิเคราะห์การกระจายตัวของโลหะผง พบว่าโลหะผงมีขนาดเกรนที่ลดลงเมื่อผสมเป็นเวลา 12 ชั่วโมง โลหะผงมีขนาด 35.87 ไมครอน และที่ 24 ชั่วโมงโลหะผงมีขนาด 16.65 ไมครอน ซึ่งตรงตามทฤษฎีของการผสม

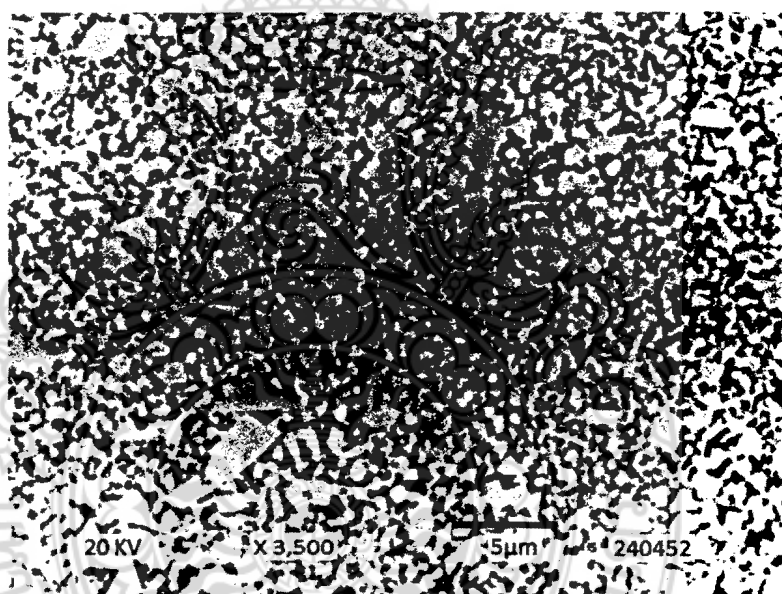
6.4 ผลการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค

การตรวจสอบ โครงสร้างจุลภาคของแผ่นมิดซีเมนต์ทั้งสแตนคาร์ไบด์ที่ผลิตขึ้นและแผ่นมิดซีเมนต์ทั้งสแตนคาร์ไบด์ที่นำเข้า เพื่อศึกษาลักษณะโครงสร้างก่อนทำการทดสอบด้านต่างๆ

6.4.1 โครงสร้างจุลภาค ของแผ่นมิดซีเมนต์ทั้งสแตนคาร์ไบด์ที่ผลิตขึ้น มีผลดังนี้

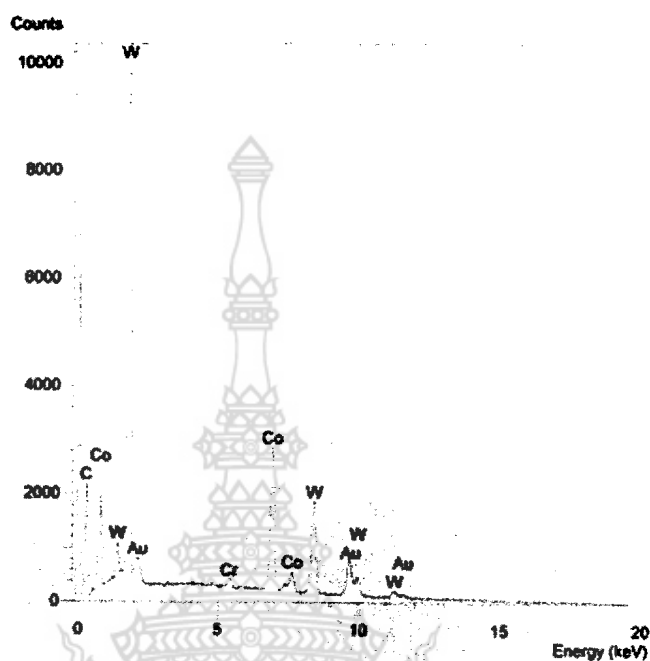


ภาพที่ 6.3 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างจุดภาค ของแผ่นมีดซีเมนต์ทั้งสแตนคาร์ไบด์ที่ผลิตขึ้น

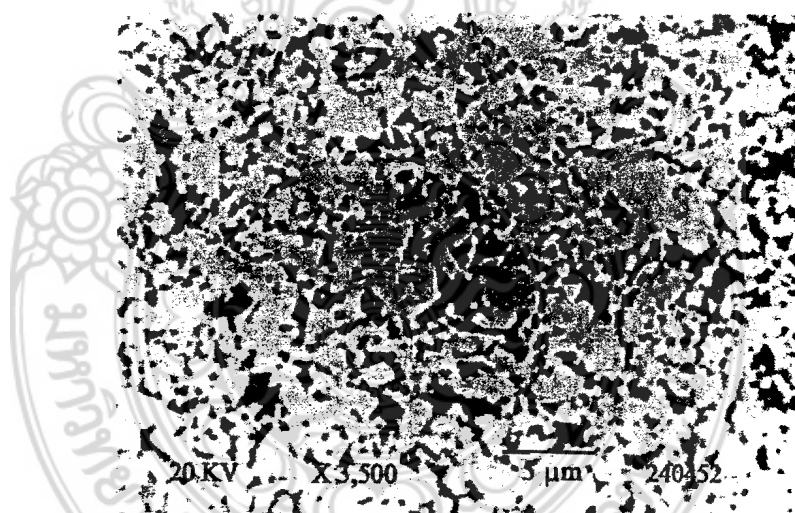


ภาพที่ 6.4 โครงสร้างจุดภาค ของแผ่นมีดซีเมนต์ทั้งสแตนคาร์ไบด์ที่ผลิตขึ้นด้วยเครื่อง Scanning Electron Microcroscope (SEM) ที่กำลังการขยาย 3500 เท่า

ผลจากการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค แผ่นมิดที่ผลิตใหม่มีปริมาณ โลหะทังสเตน 88.16 เปอร์เซ็นต์ และปริมาณ โลหะ โคบอลต์ 1.32 เปอร์เซ็นต์ โครงสร้างประกอบด้วยคาร์ไบด์ กระจาย ทั่วไปอย่างเห็นได้ชัดเจนมีขนาดแตกต่างกันค่อนข้างมาก



ภาพที่ 6.5 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค ของแผ่นมิดซีเมนต์ทังสเตนคาร์ไบด์นำเข้า

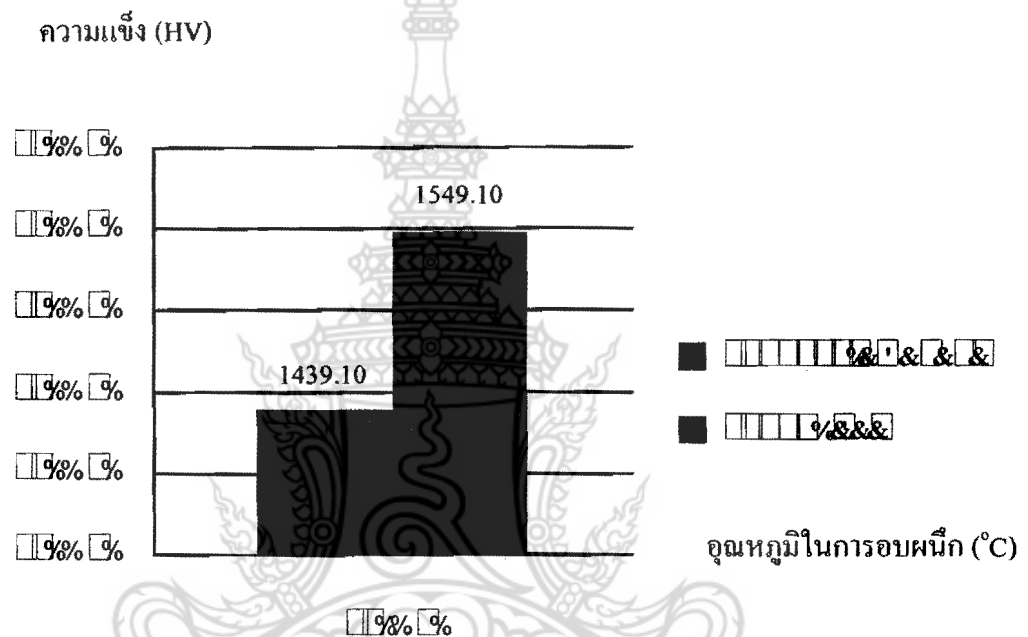


ภาพที่ 6.6 โครงสร้างจุลภาค ของแผ่นมิดซีเมนต์ทังสเตนคาร์ไบด์ที่นำเข้า ด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) ที่กำลังการขยาย 3500 เท่า

ผลจากการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค แผ่นมิดที่นำเข้ามาที่มีปริมาณโลหะทั้งสแตน 88.11 เปอร์เซ็นต์ และปริมาณโลหะโคบอลต์ 0.06 เปอร์เซ็นต์ โครงสร้างประกอบด้วยคาร์ไบด์ ขนาดค่อนข้างแน่นอนกระจายทั่วไปอย่างเห็นได้ชัดเจน มีขนาดไม่แตกต่างกันมาก

6.5 ผลการทดสอบทางกล

6.5.1 การทดสอบความแข็งของแผ่นมิดซีเมนต์ทั้งสแตนคาร์ไบด์ที่ผลิตขึ้นและแผ่นมิดซีเมนต์ทั้งสแตนคาร์ไบด์ที่นำเข้ามาทดสอบความแข็งเปรียบเทียบกัน



ภาพที่ 6.7 ความแข็งของแผ่นมิดซีเมนต์ทั้งสแตนคาร์ไบด์ที่ผลิตขึ้นและนำเข้า

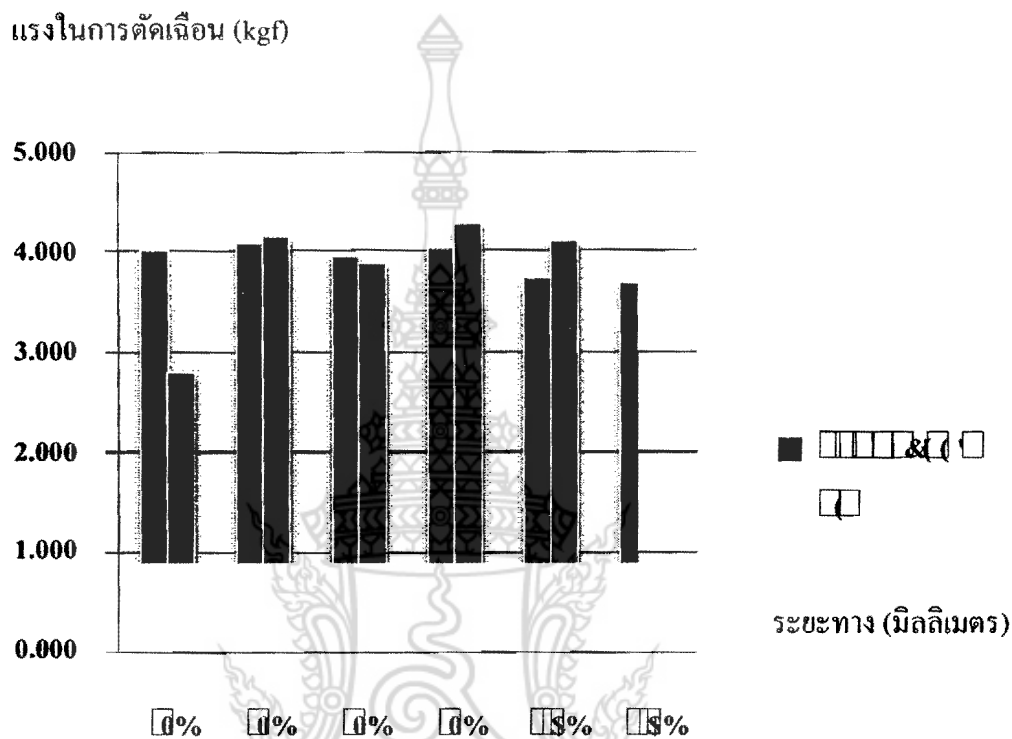
ผลการทดสอบความแข็งของแผ่นมิดซีเมนต์ทั้งสแตนคาร์ไบด์ที่ผลิตขึ้นและที่นำเข้าพบว่าแผ่นมิดที่นำเข้ามีความแข็งที่มากกว่าแผ่นมิดที่ผลิตขึ้น 110 HV หรือ 7.101 เปอร์เซ็นต์

6.5.2 ผลการทดสอบการใช้งานและการสึกหรอของแผ่นมิด

ผลการทดสอบการใช้งานโดยนำแผ่นมิดซีเมนต์ทั้งสแตนคาร์ไบด์ที่ผลิตขึ้นและที่นำเข้ามาถึงทดสอบการใช้งานตามเงื่อนไขที่ได้กำหนดไว้ในบทที่ 3 ซึ่งแบ่งผลการทดสอบดังดังนี้

6.5.2.1 ผลการเปรียบเทียบแรงในการตัดเฉือนบริเวณคมตัดขณะกลึงทดสอบ

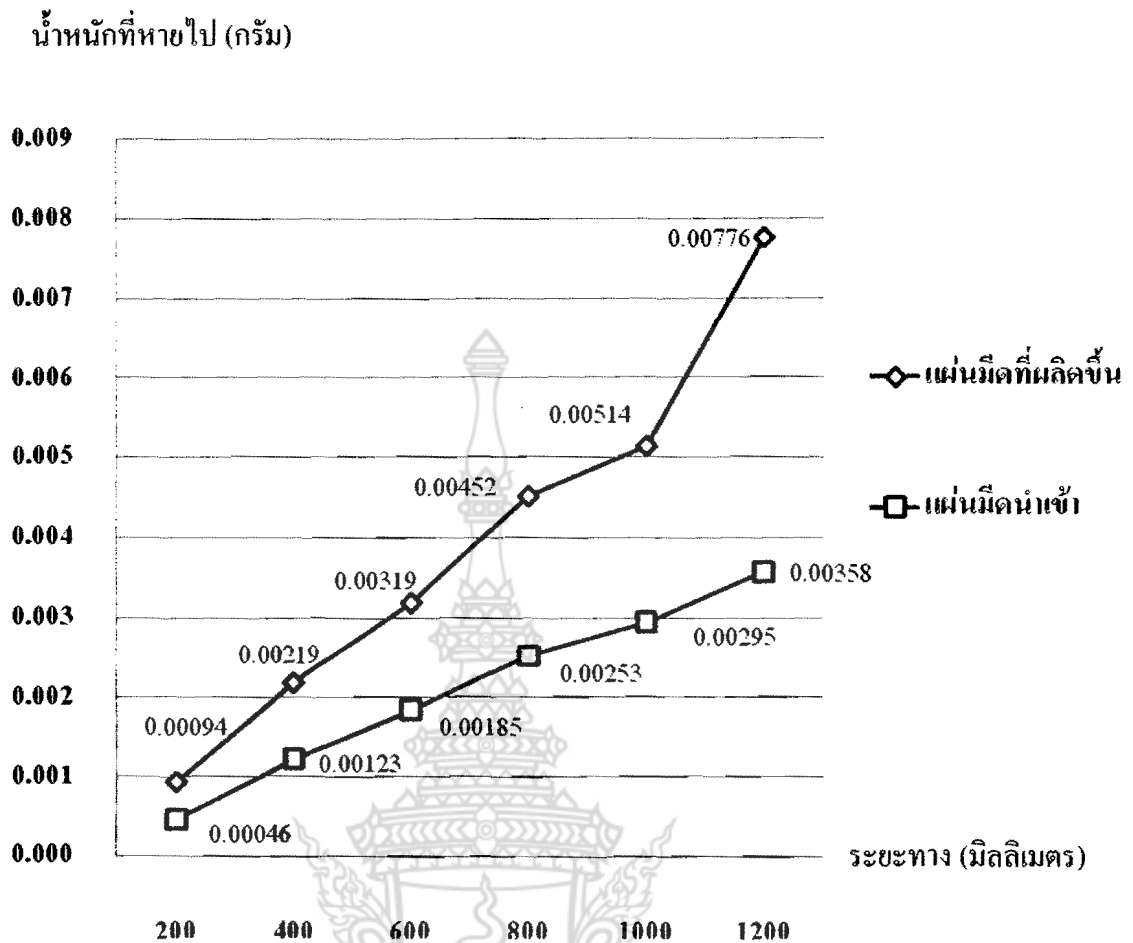
ผลการเปรียบเทียบแรงในการตัดเฉือนบริเวณคมตัด โดยการเก็บเศษกลึงที่ระยะต่างๆตามเงื่อนไขที่ได้กำหนดไว้ในบทที่ 3 และนำเศษกลึงดังกล่าวมาวัดขนาดหาพื้นที่ของเศษและ คำนวณหาแรงในการตัดเฉือนตามทฤษฎีในบทที่ 2 ผลการเปรียบเทียบแรงในการตัดเฉือนแสดงดังนี้



ภาพที่ 6.8 แรงในการตัดเฉือนของแผ่นมีดขณะทำการกลึงทดสอบ

6.5.2.2 ผลการเปรียบเทียบน้ำหนักที่หายไปของแผ่นมีดภายหลังการทดสอบ

การเปรียบเทียบน้ำหนักที่หายไปของแผ่นมีด โดยการนำแผ่นมีดมาชั่งน้ำหนักภายหลังการกลึงทดสอบทุกๆ 200 มิลลิเมตร เพื่อตรวจสอบน้ำหนักของแผ่นมีดซึ่งจะแสดงผลดังนี้

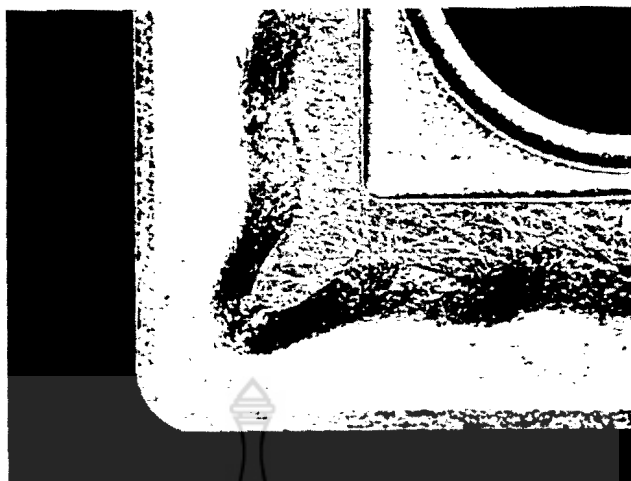


ภาพที่ 6.9 ผลการเปรียบเทียบน้ำหนักที่หายไปสะสมของแผ่นมิดภายหลังการทดสอบ

ผลการทดสอบด้านการใช้งาน โดยการเปรียบเทียบน้ำหนักที่หายไปของแผ่นมิดซีเมนต์ทั้งสแตนคาร์ไบด์ที่ผลิตขึ้นและที่นำเข้า พบว่า ที่ระยะการกลิ้งทดสอบ 1200 มิลลิเมตร น้ำหนักแผ่นมิดที่ผลิตขึ้นหายไปมากกว่า แผ่นมิดที่นำเข้า 0.00418 กรัม

6.5.2.3 ผลการเปรียบเทียบการสึกหรอบริเวณคมตัดภายหลังการทดสอบ

การเปรียบเทียบภาพถ่ายของแผ่นมิดหลังการทดสอบ โดยการถ่ายภาพ คมตัดก่อนและหลังการกลิ้งทดสอบ โดยใช้เครื่อง Computerize Optical Profiling ถ่ายที่กำลึงการขยาย 31.6 เท่า เพื่อตรวจสอบลักษณะการสึกหรอบริเวณคมตัดและ ผิวคายเศษของแผ่นมิด ได้ผลดังนี้



ก)

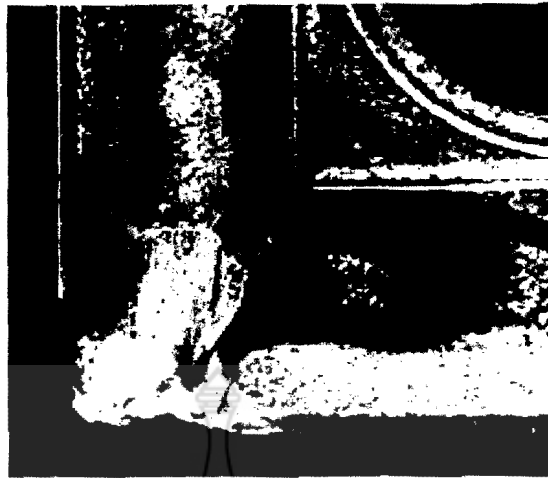


ข)

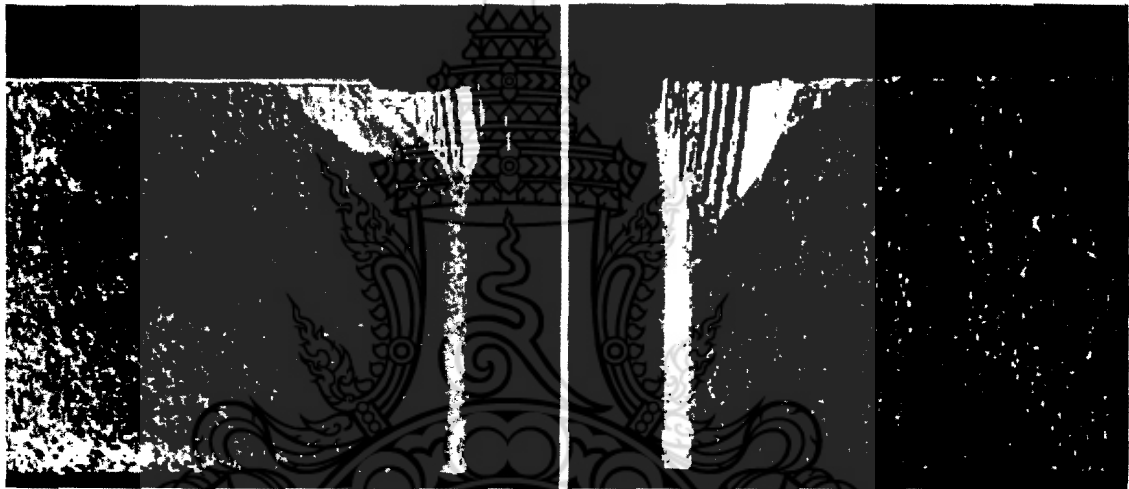
ภาพที่ 6.10 ลักษณะคมตัดก่อนทำการทดสอบ ของแผ่นมีดซีเมนต์คาร์ไบด์ นำเข้าแผ่นที่ 1

ก) บริเวณผิวภายนอก

ข) ด้านข้างของคมตัด



ก)



ข)

ค)

ภาพที่ 6.11 ลักษณะคมตัดหลังการทดสอบ ที่ระยะทาง 2200 มิลลิเมตร ของแผ่นมีดซีเมนต์คาร์ไบด์ นำเข้า แผ่นที่ 1

ก) การสึกหรอบริเวณผิวคายเศษ (Crater Wear)

ข) การสึกหรอด้านขวาของคมตัด (Flank Wear)

ค) การสึกหรอด้านซ้ายของคมตัด (Flank Wear)



ก)



ข)

ค)

ภาพที่ 6.12 ลักษณะคมตัดหลังการทดสอบ ที่ระยะทาง 2400 มิลลิเมตร ของแผ่นมิลซีเมนต์คาร์

ไบด์ นำเข้า แผ่นที่ 2

- ก) การสึกหรอบริเวณผิวคายเศษ (Crater Wear)
- ข) การสึกหรอด้านขวาของคมตัด (Build Up Edge)
- ค) การสึกหรอด้านซ้ายของตัด (Build Up Edge)



ก)

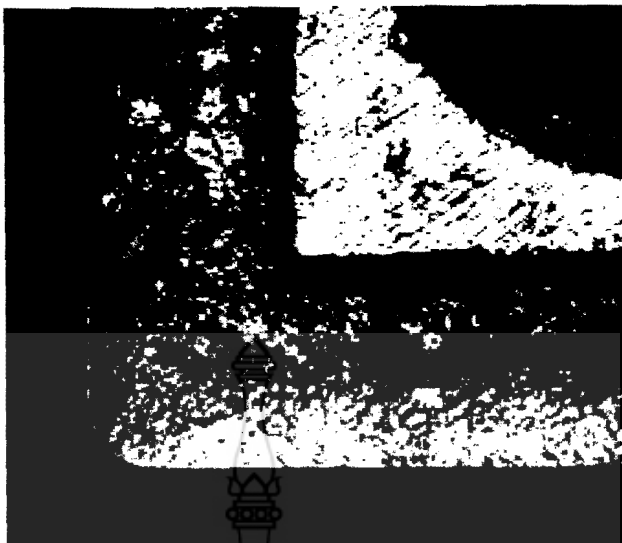


ข)

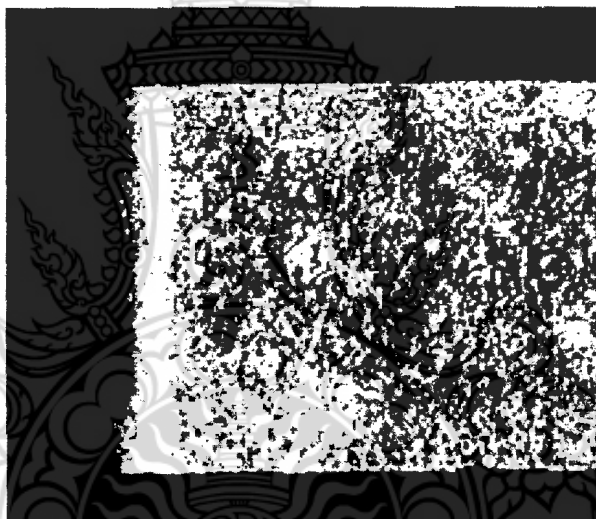
ค)

ภาพที่ 6.13 ลักษณะคมตัดหลังการทดสอบ ด้วยระยะทาง 2400 มิลลิเมตร ของแผ่นมีดซีเมนต์คาร์ไบด์ นำเข้า แผ่นที่ 3

- ก) การสึกหรอบริเวณผิวคายเศษ (Crater Wear)
- ข) การสึกหรอด้านขวาของคมตัด (Flank Wear)
- ค) การสึกหรอด้านซ้ายของคม (Flank Wear)



ก)

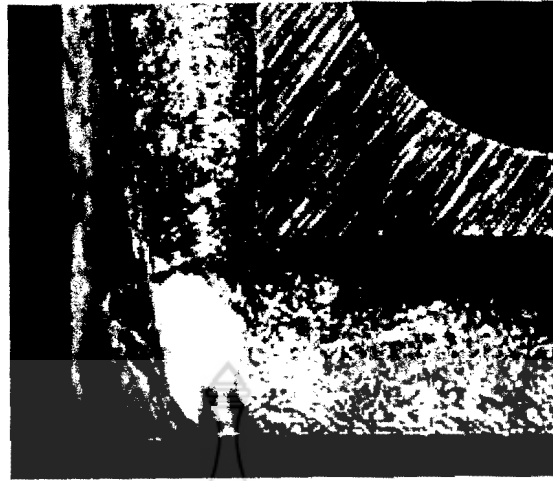


ข)

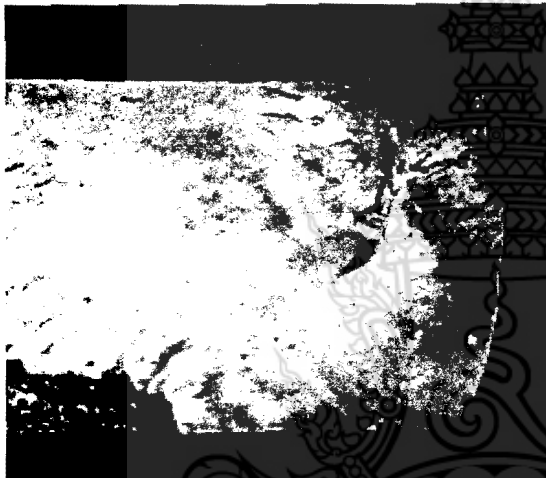
ภาพที่ 6.14 ลักษณะคมตัดก่อนทำการทดสอบ ของแผ่นมีดซีเมนต์คาร์ไบด์ที่ผลิตขึ้นแผ่นที่ 1

ก) บริเวณผิวภายนอก

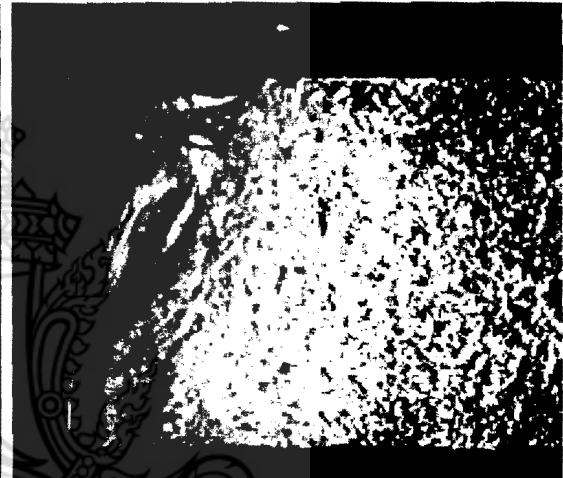
ข) ด้านข้างของคมตัด



ก)



ข)



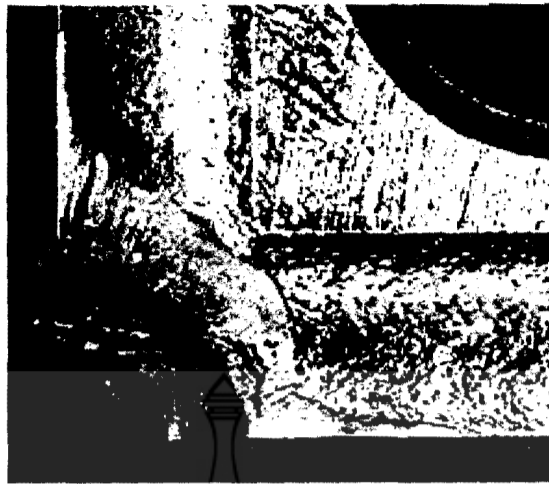
ค)

ภาพที่ 6.15 ลักษณะคมตัดหลังการทดสอบ ด้วยระยะทาง 1400 มิลลิเมตร ของแผ่นมีดซีเมนต์คาร์ไบด์ที่ผลิตขึ้น แผ่นที่ 1

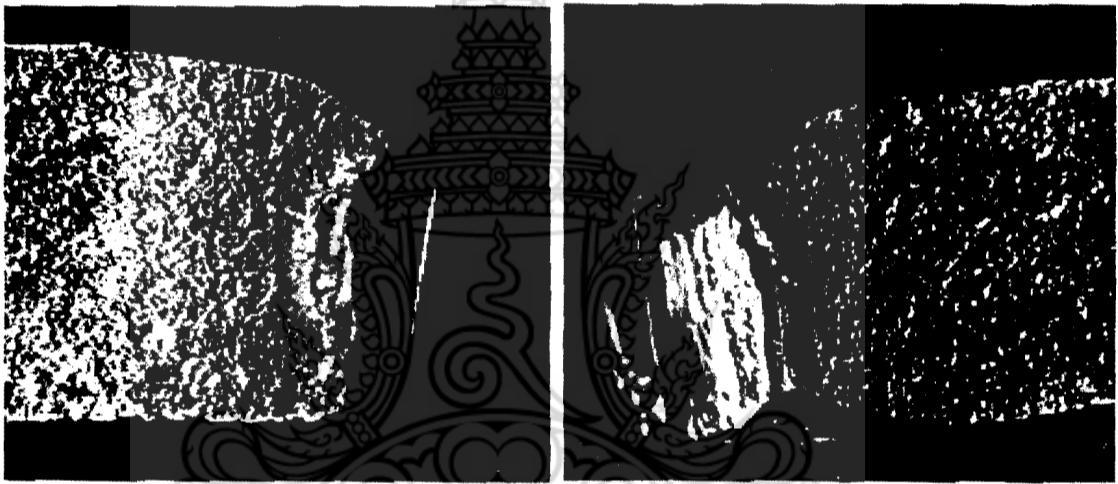
ก) การสึกหรอบริเวณผิวคายเศษและเกิดการกะเทาะของคมตัด (Crater Wear and Chipping of the Cutting Edge)

ข) เกิดการกะเทาะ ด้านขวาของคมตัด (Chipping of the Cutting Edge)

ค) เกิดการกะเทาะ ด้านซ้ายของคมตัด (Chipping of the Cutting Edge)



ก)



ข)

ค)

ภาพที่ 6.16 ลักษณะคมตัดหลังการทดสอบ ด้วยระยะทาง 1400 มิลลิเมตร ของแผ่นมีดซีเมนต์คาร์

ไบต์ที่ผลิตขึ้น แผ่นที่ 2

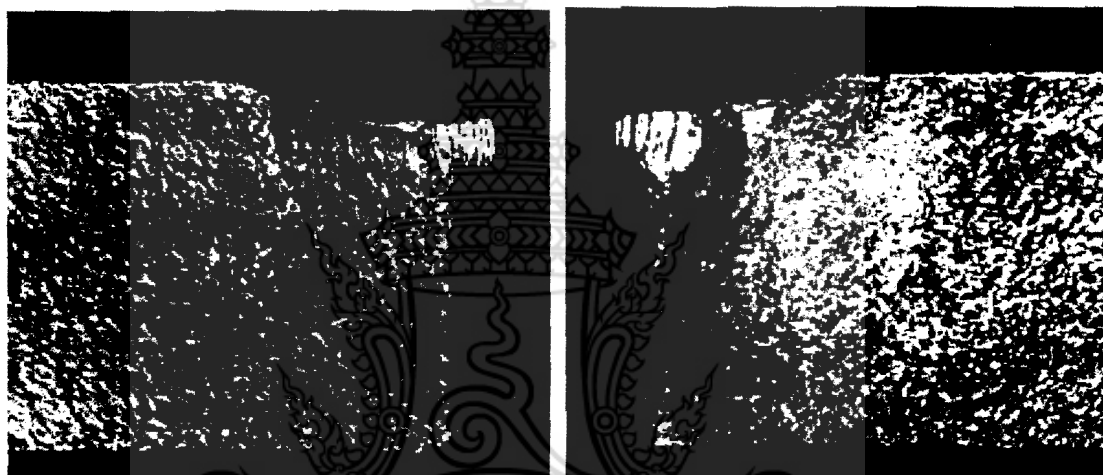
ก) การสึกหรอบริเวณผิวคายเศษ (Crater Wear)

ข) เกิดการแตก ด้านขวาของคมตัด (Fracture of Cutting Edge)

ค) เกิดการแตก ด้านซ้ายของคมตัด (Fracture of Cutting Edge)



ก)



ข)

ค)

ภาพที่ 6.17 ลักษณะคมตัดหลังการทดสอบ ด้วยระยะทาง 1541 มิลลิเมตร ของแผ่นมิดซีเมนต์การ์
ไบด์ที่ผลิตจีน แผ่นที่ 3

ก) เกิดการกะเทาะ บริเวณผิวคายเศษ (Chipping of the Cutting Edge)

ข) การสึกหรอและเกิดการกะเทาะ ด้านขวาของคมตัด (Frank Wear and Chipping of
the Cutting Edge)

ค) การสึกหรอและเกิดการกะเทาะ ด้านซ้ายของคมตัด (Frank Wear and Chipping
of the Cutting Edge)

6.6 วิเคราะห์ผลการทดสอบ

โครงสร้างจุลภาคของแผ่นมิดซีเมนต์ทั้งสเดนคาร์ไบด์ที่ผลิตขึ้นพบโลหะทั้งสเดนคาร์ไบด์ 88.16 เปอร์เซ็นต์ มีขนาดเกรนของโลหะผงไม่สม่ำเสมอ ส่วนแผ่นมิดซีเมนต์ทั้งสเดนคาร์ไบด์ที่นำเข้าพบโลหะทั้งสเดน 88.11 เปอร์เซ็นต์ มีขนาดเกรนโลหะทั้งสเดนใกล้เคียงกัน จากโครงสร้างดังกล่าวมีความสัมพันธ์กับค่าความแข็ง ซึ่งแผ่นมิดที่ผลิตขึ้นมีความแข็งน้อยกว่าแผ่นมิดที่นำเข้า 1439.10 HV และ 1549.10 HV ตามลำดับ

ผลจากการทดสอบการใช้งานด้วยการกลึงโดยการตัดแบบแห้ง พบว่า แผ่นมิดที่ผลิตขึ้นสามารถกลึงได้ระยะทางเฉลี่ย 1447 มิลลิเมตร น้ำหนักหายไปเฉลี่ย 0.00776 กรัม แผ่นมิดที่นำเข้าสามารถกลึงได้เป็นระยะทางเฉลี่ย 2333.33 มิลลิเมตร น้ำหนักหายไปเฉลี่ย 0.00358 กรัม จากน้ำหนักของแผ่นมิดที่หายไปเนื่องจากเกิดการสึกหรอเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง จึงส่งผลให้ขณะทำการตัดเฉือนเกิดแรงกระทำ ณ บริเวณคมตัด แผ่นมิดที่ผลิตขึ้นเกิดแรงที่บริเวณคมตัด 4.013 และ 3.682 กิโลกรัมแรง ที่ระยะทาง 200 และ 1200 มิลลิเมตรตามลำดับและ แผ่นมิดที่นำเข้าเกิดแรงที่บริเวณคมตัด 2.805 และ 4.485 กิโลกรัมแรง ที่ระยะทาง 200 และ 1200 มิลลิเมตร ตามลำดับ



บทที่ 7

สรุปผลและข้อเสนอแนะ

7.1 สรุปผลการผลิตชิ้นงานซีเมนต์คาร์ไบด์

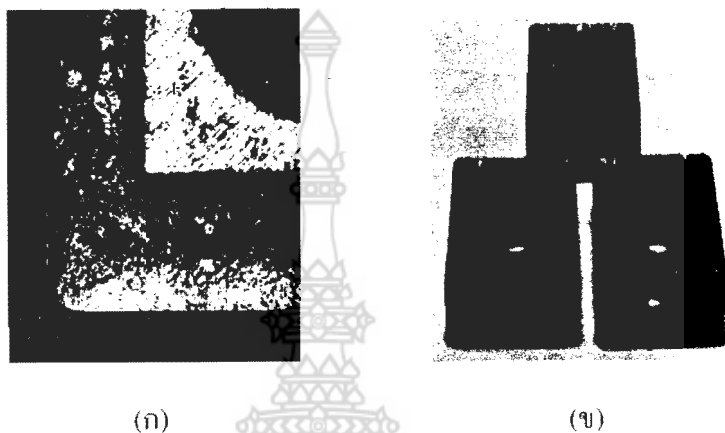
การผลิตชิ้นงานทั้งสเตนคาร์ไบด์ ประเภทชิ้นงานที่ทนการสึกหรอ (Wear Part) คุณสมบัติที่มีความสัมพันธ์กันกับการผลิตชิ้นงานทั้งสเตนคาร์ไบด์ที่มีคุณภาพขนาดเกรนผงทั้งสเตนคาร์ไบด์ควรมีขนาดเกรน 0.5-10 ไมครอน ปริมาณส่วนผสมโคบอลต์ 13-20 % ถ้าขนาดเกรนผงทั้งสเตนคาร์ไบด์ มีขนาดใหญ่ และมีปริมาณโคบอลต์ผสมอยู่มาก ทำให้ชิ้นงานทั้งสเตนคาร์ไบด์มีความเหนียวสูง ทนต่อแรงกระแทกได้ดี ตรงกันข้าม ถ้าขนาดเกรนผงทั้งสเตนคาร์ไบด์มีขนาดเล็กมีความแข็งแรงสูง แต่มีความเหนียวต่ำ

การอัดขึ้นรูปชิ้นงานทั้งสเตนคาร์ไบด์จำเป็นต้องใช้ตัวประสาน โพลีไวนิลแอลกอฮอล์ เพื่อเป็นวัสดุยึดเกาะระหว่างผงทั้งสเตนคาร์ไบด์กับผงโคบอลต์ การอบผนึก(Sintering) ชิ้นงานทั้งสเตนคาร์ไบด์จะต้องใช้อุณหภูมิไม่น้อยกว่า 1400 °C ระยะเวลาในการอบผนึก 90 นาทีจะได้ชิ้นงานที่มีคุณภาพข้อมูลอ้างอิงจาก การผลิต Hard metals ผล็กทั้งสเตนคาร์ไบด์และผล็กโคบอลต์รวมตัวเป็นเฟสเดียวกันขณะอบผนึกที่อุณหภูมิ 1430 °C และใช้ก๊าซไนโตรเจนปกคลุมชิ้นงาน

ปัจจัยที่มีผลต่อคุณภาพชิ้นงาน และมีความสัมพันธ์ด้านความแข็ง(Hardness) ชิ้นงานทั้งสเตนคาร์ไบด์ ประกอบด้วย ขนาดเกรน การกระจายของผงทั้งสเตนคาร์ไบด์ ปริมาณส่วนผสมผงโคบอลต์ ข้อมูลที่อ้างอิงจาก US. Patent 5,593,474 ผงทั้งสเตนคาร์ไบด์มีขนาดเกรน 3 ไมครอน ปริมาณ ส่วนผสมผงโคบอลต์ 16% มีค่าความแข็ง 950 HV ในส่วนชิ้นงานทั้งสเตนคาร์ไบด์ที่ทำการทดลองผงทั้งสเตนคาร์ไบด์มีขนาดเกรน 2.5 ไมครอนปริมาณส่วนผสมผงโคบอลต์ 17% มีค่าความแข็ง 1096 HV แสดงว่าค่าความแข็งใกล้เคียงกัน

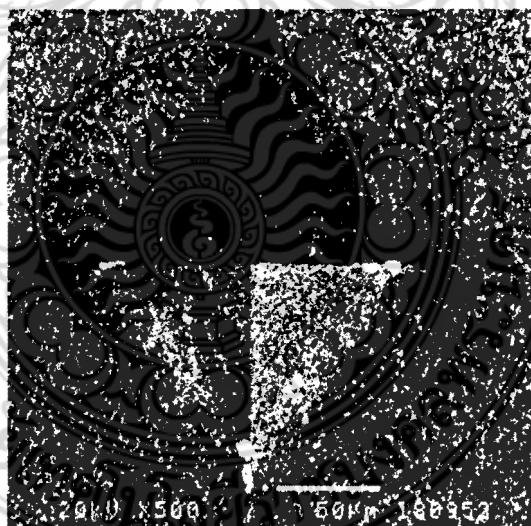
7.2 สรุปผลการผลิตแผ่นมีดและการประยุกต์ใช้งาน

ความหนาแน่น (Density of insert tools) ประมาณ 13.85 g/cm^3 และความแข็ง (hardness) $1,439.10 \text{ HV}$

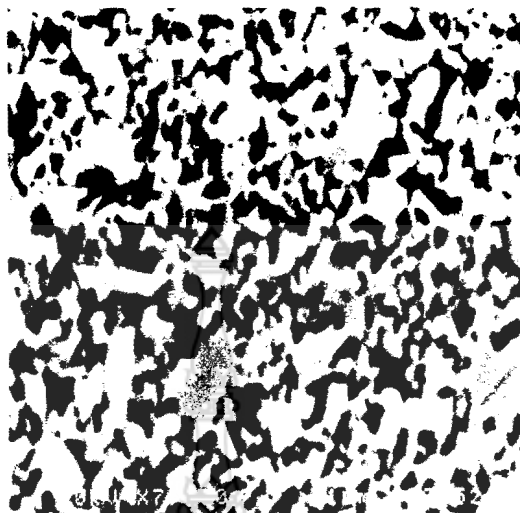


ภาพที่ 7.1 Product to Insert SNMG120408 of WC-17%Co sintering at $1,430^{\circ}\text{C}$ 1h.

จากภาพที่ 7.1 ภาพ (ก) เป็นภาพขยายบริเวณปลายมีด แสดงรัศมีโค้งที่ปลายมีด(Nose radius) ส่วนภาพ (ข) แสดงลักษณะของแผ่นมีดที่ผลิต



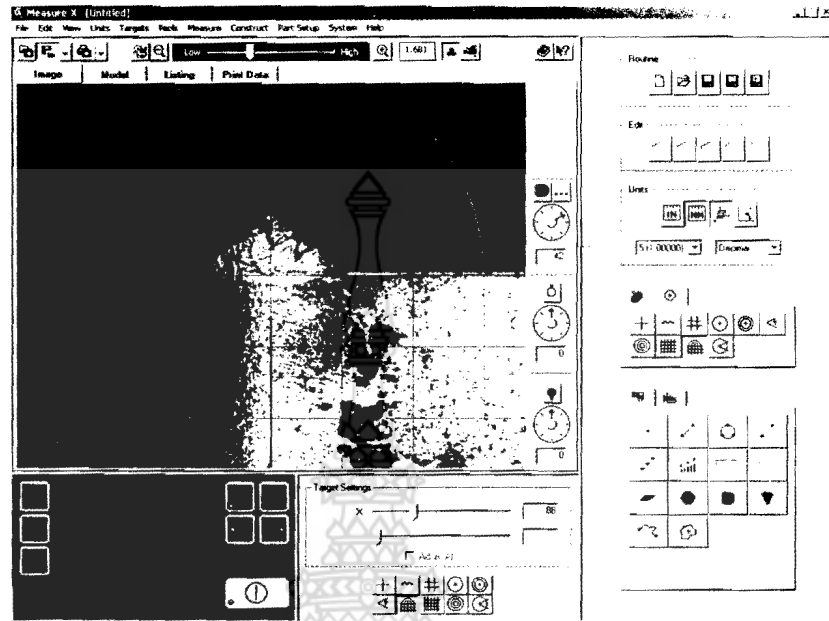
ภาพที่ 7.2 การทดสอบความแข็ง และแสดงรอยกดเพื่อทดสอบความแข็ง(Hardness) load 20 kg



ภาพที่ 7.3 SEM วิเคราะห์โครงสร้างของแผ่นเม็ดที่พัฒนาขึ้นใหม่

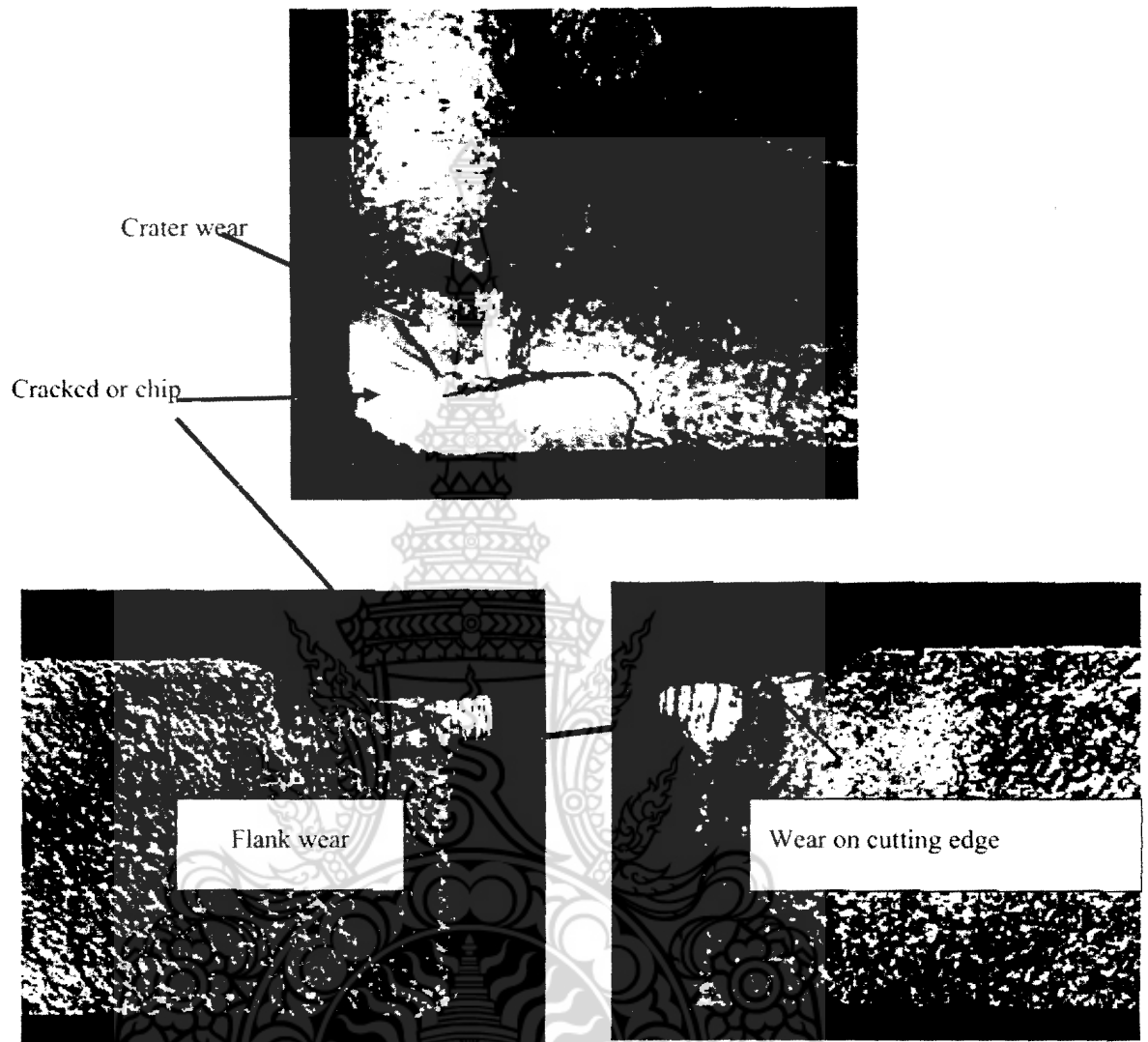


ภาพที่ 7.4 Test run of metal removal

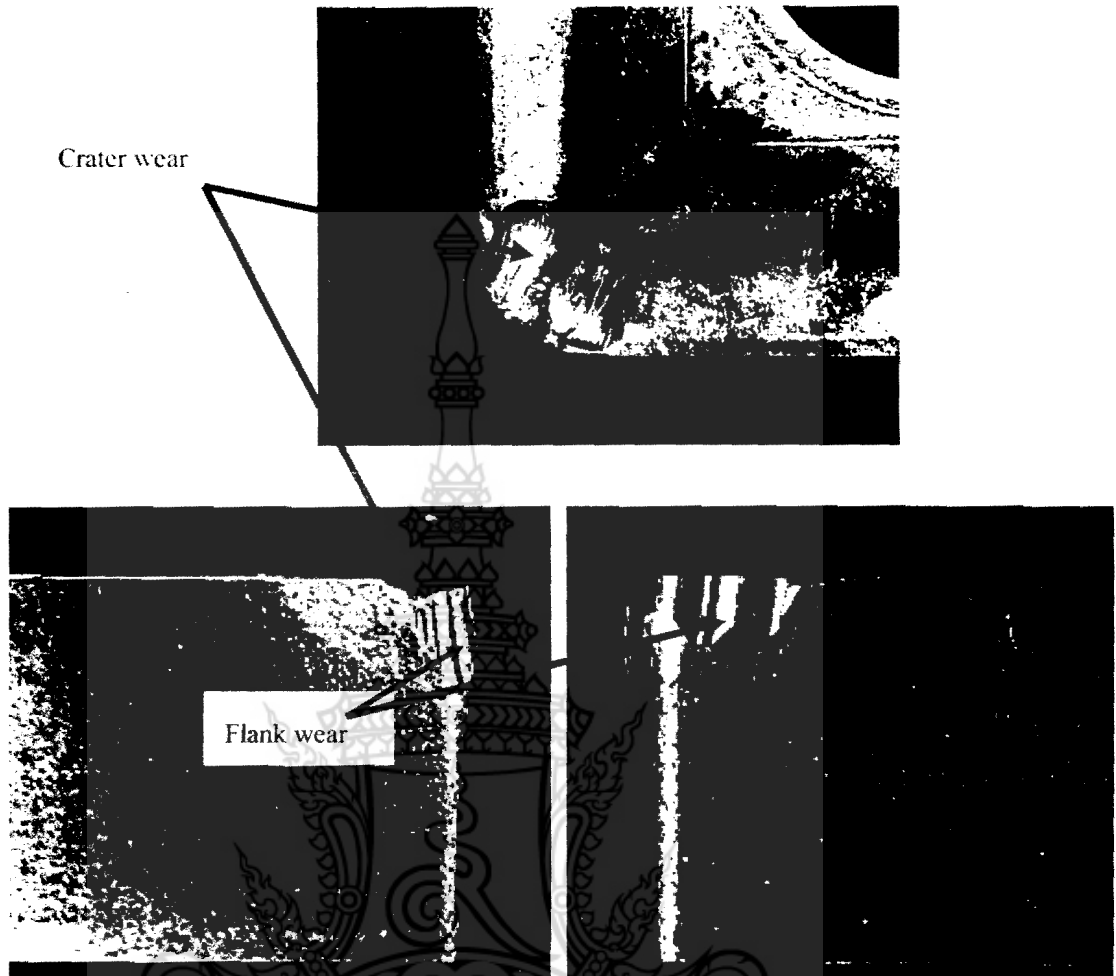


ภาพที่ 7.5 Build up edge

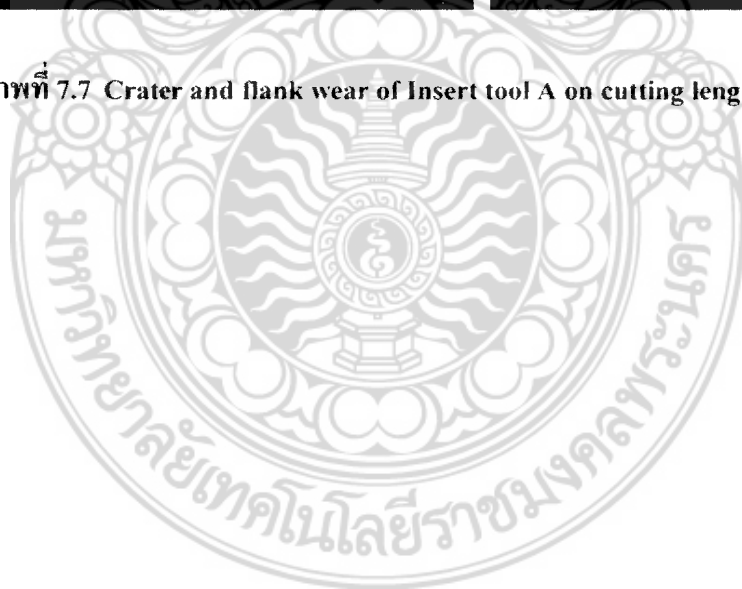


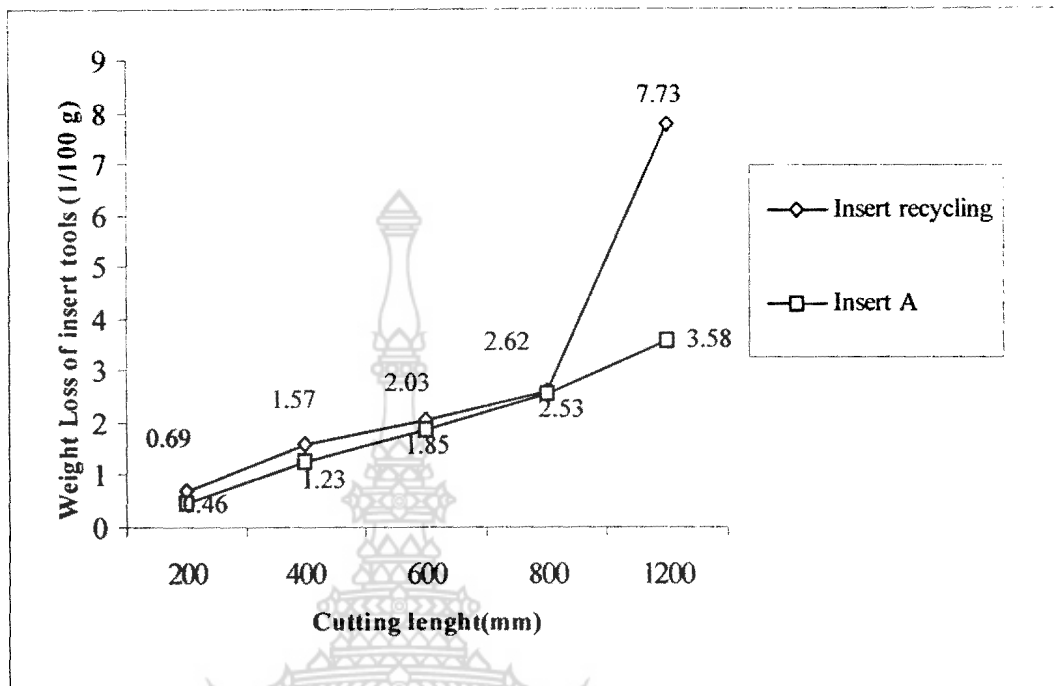


ภาพที่ 7.6 Wear of Insert tool from recycled cemented carbide scrap on cutting length
1,200 mm.



ภาพที่ 7.7 Crater and flank wear of Insert tool A on cutting length 1,200 mm.





ภาพที่ 7.8 relationship between insert tool recycled and insert tool A on Condition $V_c = 75$ m/min, $f = 0.25$ mm., depth = 3.0 mm.

สรุปได้ว่า การพัฒนาผลิตภัณฑ์ แผ่นมีดตัดซีเมนต์ทั้งสแตนคาร์ไบด์ จากวัสดุที่ผ่านการพัฒนาด้วยการ recycling เป็นผงโลหะทั้งสแตนคาร์ไบด์และผสมโลหะประสาน โคบอลต์ อัดขึ้นรูปและอบผนึก จากนั้นเจียรระโนผิว ให้ได้ขนาด ผลการทดลองใช้งานที่ความเร็วตัดสูงกว่ามาตรฐานปรากฏว่า ผลิตภัณฑ์ต้นแบบสามารถตัดปาดผิวชิ้นงาน เหล็กกล้า ชิ้นส่วนเครื่องจักรกล ได้คุณภาพผิวและขนาดเทียบเท่าสินค้านำเข้า

7.3 ข้อเสนอแนะเพื่อการศึกษาและวิจัย

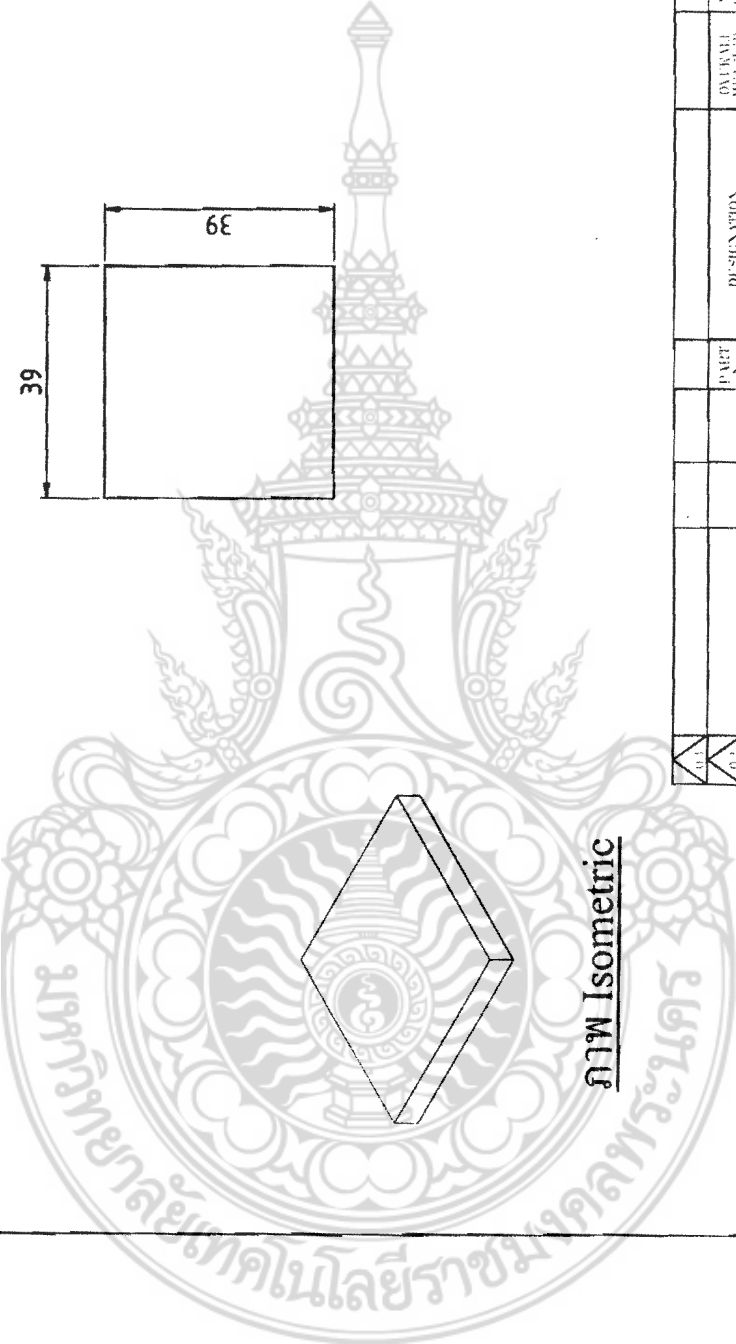
ชิ้นส่วนโลหะซีเมนต์คาร์ไบด์ สำหรับประเทศไทยแล้ว เป็นผู้นำเข้า ผงโลหะทั้งสเดนก็เป็นผู้ นำเข้า 100% และไม่มีเทคโนโลยีในการผลิตภายในประเทศ ดังนั้น การวิจัยนี้เป็นงานวิจัยชิ้นแรก ที่ทำการผลิตชิ้นส่วนโลหะแข็งด้วยผงทั้งสเดนคาร์ไบด์ ผ่านการ Recycling และผลงานวิจัยจึงเป็น ความรู้ใหม่ ไม่มีผลการวิจัยดังกล่าวในประเทศ และไม่มีการผลิตในประเทศ ดังนั้น หากมีการ ส่งเสริมและพัฒนาวัสดุ กระบวนการผลิตชิ้นส่วนดังกล่าว จะเป็นแนวทางสำคัญ ที่สามารถสร้าง ความยั่งยืนของอุตสาหกรรมให้แข่งขันกับนานาประเทศได้มากขึ้นหากได้รับการสนับสนุนจาก หน่วยงานภาครัฐ ให้มีการพัฒนางานวิจัยต่อยอด จึงจำเป็นอย่างยิ่ง ที่จะสนับสนุนให้เกิดการพัฒนา เทคโนโลยีที่เกี่ยวข้อง เนื่องจาก ว่าหากมีการพัฒนาต่อไปและสร้างผู้ประกอบการผลิต ภายในประเทศ จะเป็นการทดแทนการนำเข้าซึ่งมีมูลค่าสูงมากในแต่ละปี และมีความสำคัญต่อการ พัฒนาอุตสาหกรรมการผลิตในประเทศไทยในระยะยาว



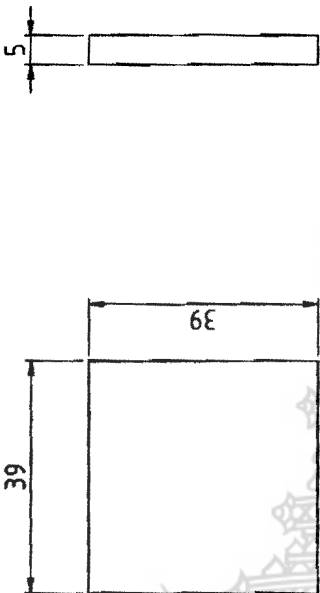



ภาคผนวก ก
แบบของชิ้นงานทั้งสตนคาร์ไบด์





ภาพ Isometric



0.1	PART No.	DESIGNATION	DRAWN MASTER	MATERIAL	HEADINGS	REF. No.	PART No.
0.2	FACULTY OF ENGINEERING KASEM BUNDIR UNIVERSITY						
0.3	SCALE:	DATE:	INITIAL	PROJECTION:	PROPERTY		
0.4	DESIGNER BY: P.PUNKAEW	11/07/2008	SIZE: A1		PART TUNGSTEN CARBIDE		
0.5	DRAWN BY: P.PUNKAEW			FILE NAME:	TITLE:		
0.6	CHECKED BY:				PART TUNGSTEN CARBIDE		
0.7	APPROVED BY:				DRAWING No. SHEET No.		
0.8	THIS DESIGN IS THE PROPERTY OF THAI STORAGE BATTERY PUBLIC CO LTD AND MAY NOT BE USED OR COPY WITHOUT PERMISSION						

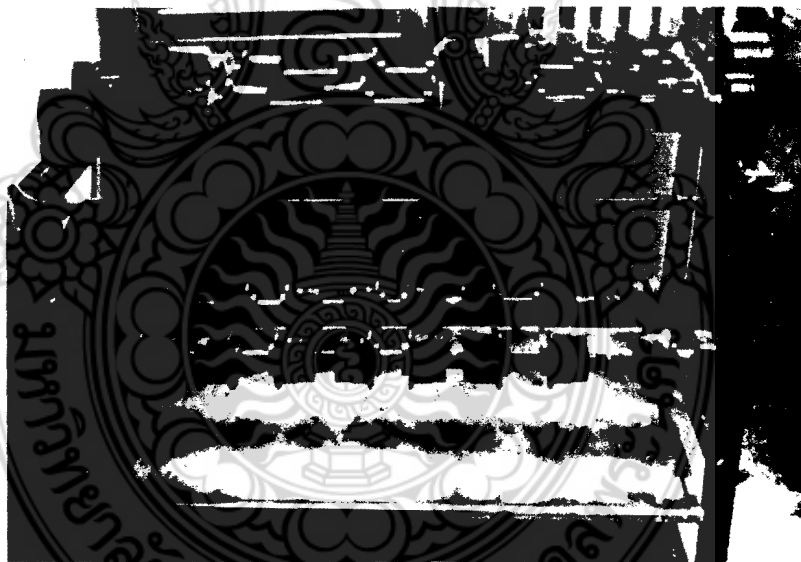
ภาคผนวก ข.

เครื่องมือและอุปกรณ์ในการทดสอบ

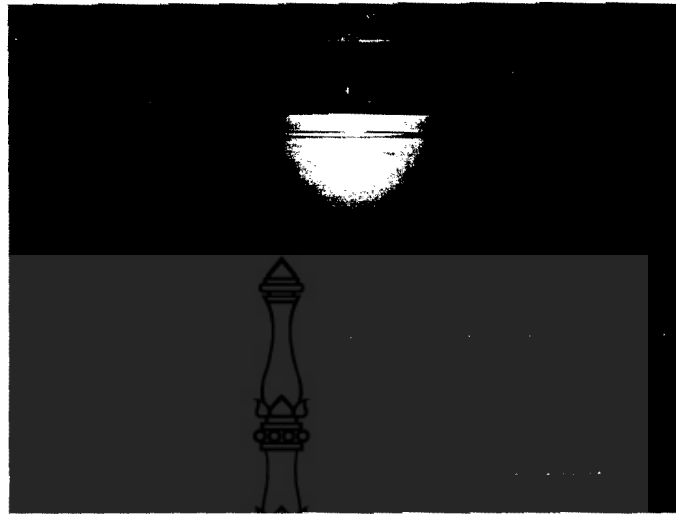




ภาคผนวก ข. 1.1 แผ่นมิดซีเมนต์ทั้งสแตนคาร์ไบด์ที่ผลิตขึ้น



ภาคผนวก ข. 1.2 เครื่องบดผสมโตะผง (Mixing)



ภาคผนวก ข.1.3 เครื่องอุป



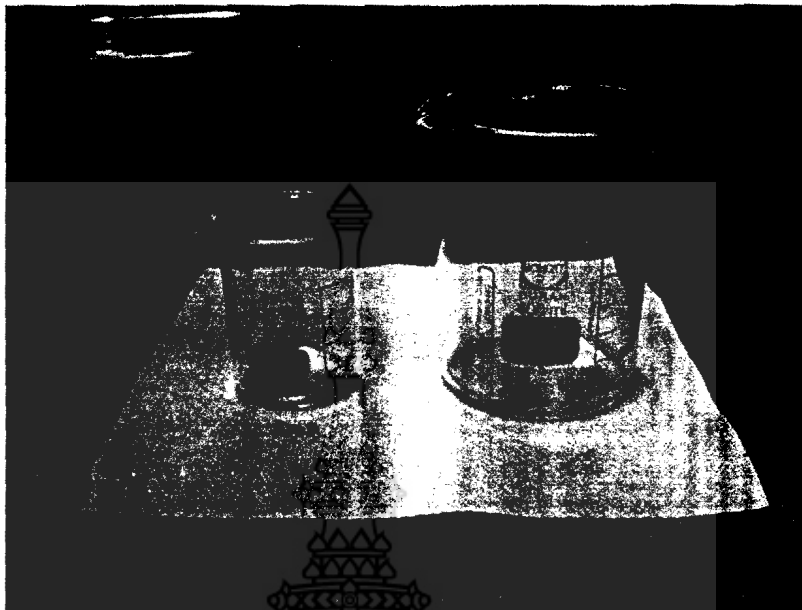
ภาคผนวก ข.1.4 เครื่องอัดขึ้นรูปผงโลหะ (Pressing) แบบไฮดรอลิกส์ Max 10 ton



ภาคผนวก ข.1.5 เครื่องอบผงขึ้นงานใช้แก๊สไนโตรเจนปกคลุมชิ้นงาน (Sintering)

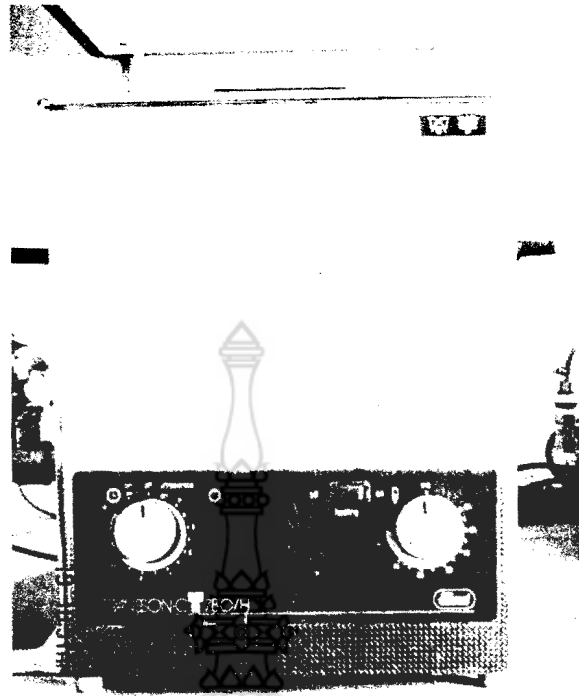


ภาคผนวก ข.1.6 ตะแกรงสำหรับร่อนผงโลหะ (Sieve)



ภาคผนวก ข.1.7 ถ้วยตวงยี่ห้อ SHOTT DUZAN ขนาด 400 ml

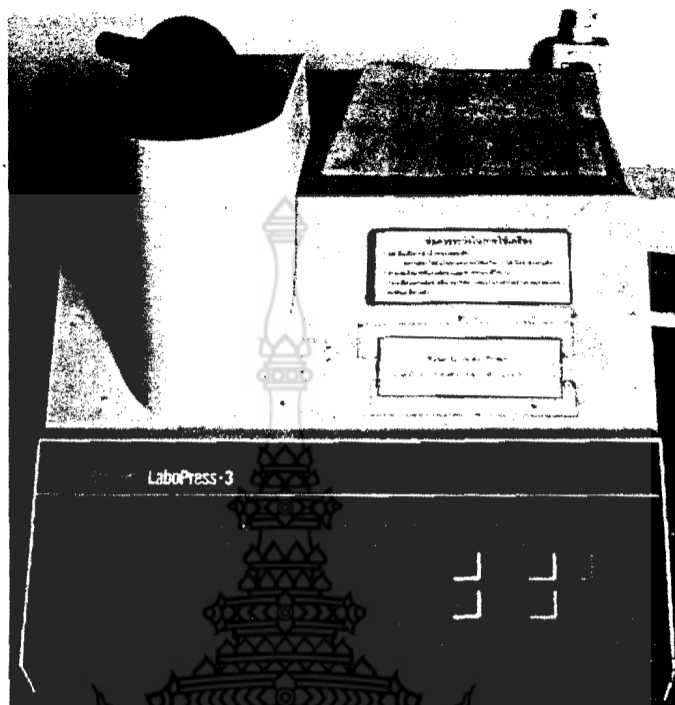




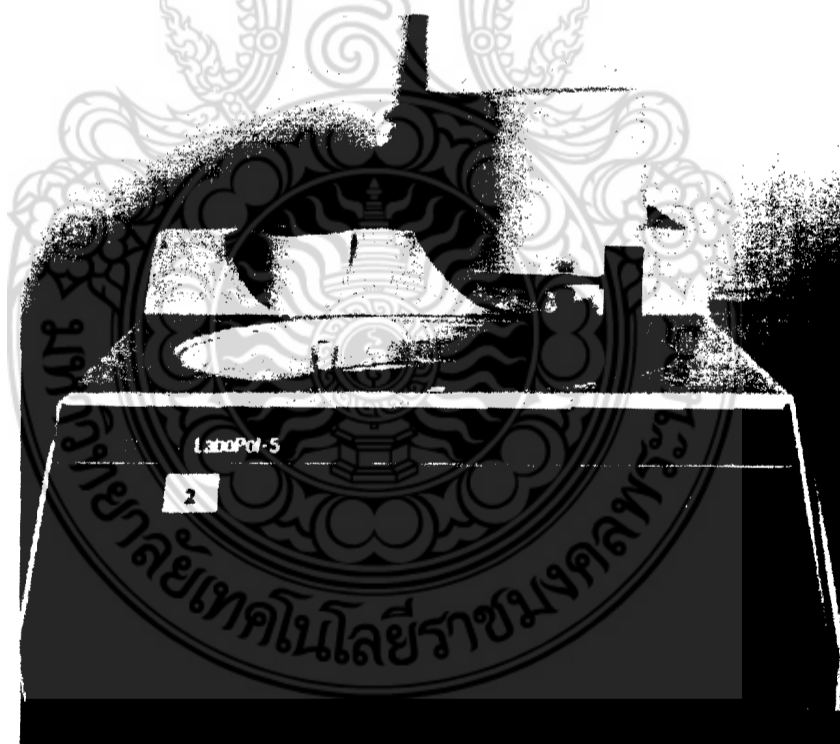
ภาคผนวก ข.1.8 เครื่อง Ultrasonic รุ่น Transsonic 780/W



ภาคผนวก ข.1.9 แผ่นให้ความร้อน Hot Plate Stirrer รุ่น HS-115



ภาคผนวก ข.1.10 เครื่องหล่อเรซิน



ภาคผนวก ข.1.11 เครื่องขัดโลหะรุ่น PHOENIX BETA Grinder/Polisher
ความเร็วรอบ 30 - 600 rpm.



ภาคผนวก ข.1.12 เครื่องวิเคราะห์ส่วนประกอบอิเล็กทรอนิกส์ไมโครสโคป (SEM)

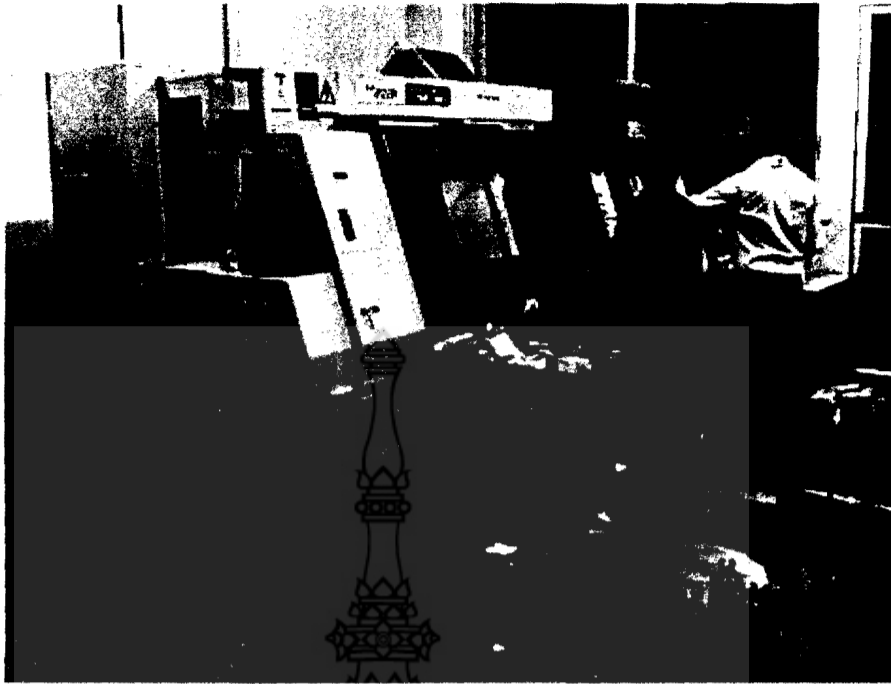




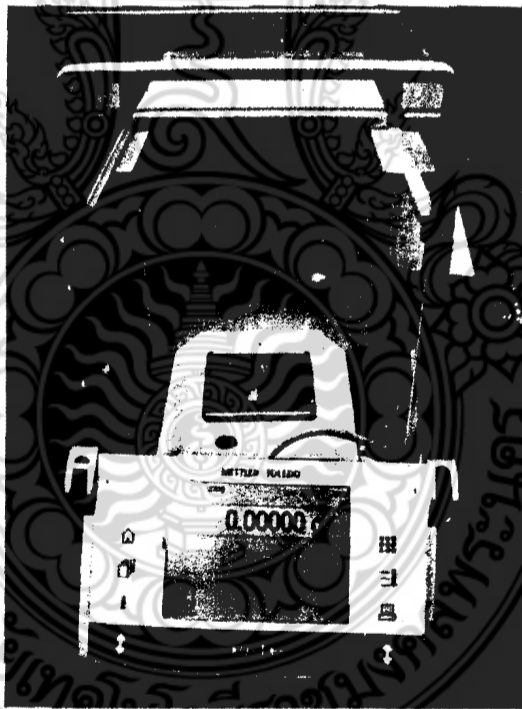
ภาคผนวก ข.1.13 เครื่องทดสอบความแข็งโลหะ Hardness Vicker (HV)

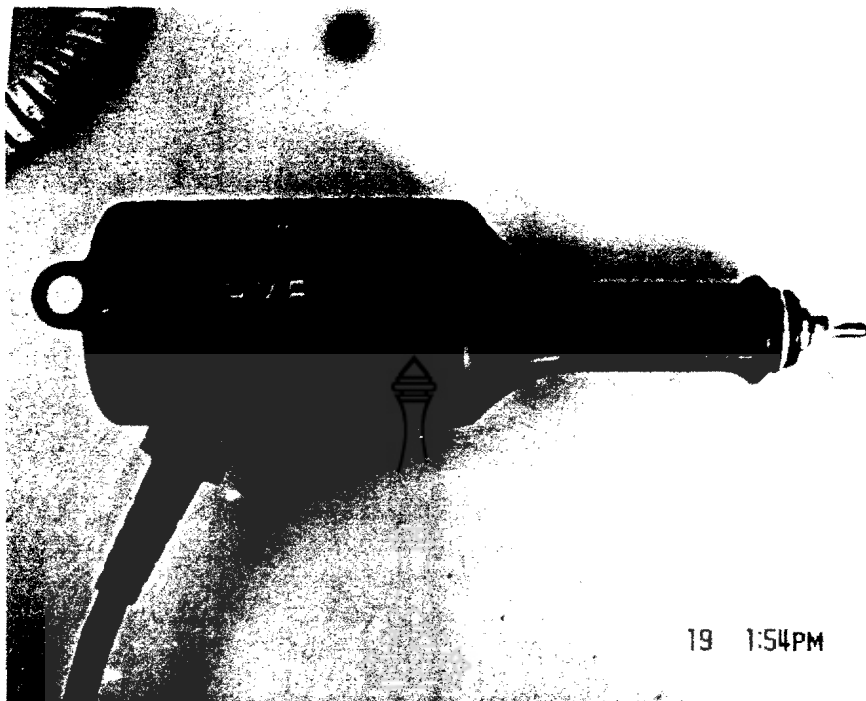


ภาคผนวก ข.1.14 เครื่องการกระจายตัวของโลหะผง



ภาคผนวก ข.1.15 เครื่องกลึง CNC ยี่ห้อ Masak





19 1:54PM

ภาคผนวก ข.1.19 เครื่องสตั๊กงานระบบสัน





ภาคผนวก ก.

ผลการทดสอบการใช้งาน

ตารางภาคผนวก ก. 1.1 ผลการทดสอบ แผ่นมิดซีเมนต์ทั้งสตนคาร์ไบด์นำเข้า ด้านการใช้งาน

ผลการทดสอบทางด้านการใช้งาน						
แผ่น มิด ที่	ระยะทาง ทดสอบ (mm.)	ขนาดความโตขึ้นงาน (mm.)		น้ำหนักแผ่นมิด (g)		น้ำหนักที่ หายไป (g)
		ก่อนกลิ้ง	หลังกลิ้ง	ก่อนกลิ้ง	หลังกลิ้ง	
1	0-200	93.020	89.680	9.5166	9.5164	0.0003
	200-400	89.680	86.780	9.5164	9.5155	0.0008
	400-600	86.780	83.700	9.5155	9.5148	0.0008
	600-800	83.780	80.805	9.5148	9.5142	0.0006
	800-1000	80.805	77.790	9.5142	9.5141	0.0000
	1000-1200	77.790	74.936	9.5141	9.5135	0.0007
	1200-1400	74.936	71.770	9.5135	9.5125	0.0009
	1400-1600	71.770	68.640	9.5125	9.5113	0.0013
	1600-1800	68.640	65.990	9.5113	9.5076	0.0036
	1800-2000	65.990	63.000	9.5097	9.5076	0.0020
2000-2200	63.000	60.000	9.5076	9.5053	0.0023	
2	0-200	93.000	90.00	9.4869	9.4865	0.0004
	200-400	90.000	84.155	9.4865	9.4858	0.0007
	400-600	84.155	84.240	9.4866	9.4849	0.0017
	600-800	84.240	81.110	9.4849	9.4842	0.0007
	800-1000	81.110	78.205	9.4842	9.4836	0.0006
	1400-1600	72.120	69.365	9.4821	9.4814	0.0007
	1600-1800	69.365	66.330	9.4814	9.4806	0.0007
	1800-2000	66.330	63.215	9.4806	9.4677	0.0129
	2000-2200	63.215	60.380	9.4677	9.467	0.0007
	2200-2400	60.000	57.520	9.467	9.4668	0.0002

ตารางภาคผนวก ค. 1.1 ผลการทดสอบ แผ่นมิดซีเมนต์ทั้งสแตนคาร์ไบด์นำเข้า
ด้านการใช้งาน (ต่อ)

ผลการทดสอบทางการใช้งาน (ต่อ)						
แผ่น มิด ที่	ระยะทาง ทดสอบ (mm.)	ขนาดความโตชิ้นงาน (mm.)		น้ำหนักแผ่นมิด (g)		น้ำหนักที่ หายไป (g)
		ก่อนกลึง	หลังกลึง	ก่อนกลึง	หลังกลึง	
3	0-200	93.00	89.970	9.5062	9.5055	0.0007
	200-400	89.970	87.020	9.5055	9.5047	0.0008
	400-600	87.020	85.050	9.5047	9.5044	0.0002
	600-800	85.050	81.080	9.5044	9.5037	0.0008
	800-1000	81.080	78.175	9.5037	9.503	0.0007
	1000-1200	78.176	75.295	9.503	9.5023	0.0007
	1200-1400	75.295	72.110	9.5023	9.5015	0.0008
	1400-1600	72.170	69.220	9.5015	9.5007	0.0008
	1600-1800	69.220	66.340	9.5007	9.5002	0.0005
	1800-2000	66.340	63.210	9.5002	9.4992	0.001
	2000-2200	63.210	60.815	9.4992	9.4981	0.0011
	2200-2400	60.815	57.400	9.4981	9.4976	0.0005

ตารางภาคผนวก ก. 1.2 ผลการทดสอบ แผ่นมิดซีเมนต์ทั้งสदनคาร์ไบด์ที่ทำการผลิตขึ้น
ด้านการใช้งาน

ผลการทดสอบทางด้านการใช้งาน						
แผ่นมิด ที่	ระยะทาง ทดสอบ (mm.)	ขนาดความโตชิ้นงาน (mm.)		น้ำหนักแผ่นมิด (g)		น้ำหนักที่ หายไป (g)
		ก่อนกลึง	หลังกลึง	ก่อนกลึง	หลังกลึง	
1	0-200	93.020	89.680	9.5167	9.5164	0.0003
	200-400	89.680	86.780	9.5164	9.5156	0.0008
	400-600	86.780	83.700	9.5156	9.5148	0.0008
	600-800	83.700	80.805	9.5148	9.5142	0.0006
	800-1000	80.805	77.790	9.5142	9.5142	0.0000
	1000-1200	77.790	74.936	9.5142	9.5135	0.0007
	1200-1400	74.936	71.770	9.5135	9.5126	0.0009
2	0-200	93.000	90.100	8.3384	8.3373	0.0011
	200-400	90.100	87.110	8.3373	8.3364	0.0009
	400-600	87.110	84.310	8.3364	8.3352	0.0012
	600-800	84.310	81.320	8.3352	8.3340	0.0012
	800-1000	81.320	78.100	8.3340	8.3338	0.0002
	1000-1200	78.100	75.310	8.3338	8.3306	0.0032
	1200-1400	75.310	72.955	8.3306	8.2230	0.1077
3	0-200	93.000	89.985	9.5062	8.2988	1.2074
	200-400	89.985	87.190	8.2988	8.2980	0.0008
	400-600	87.190	87.225	8.2980	8.2965	0.0015
	600-800	84.225	80.955	8.2965	8.2952	0.0014
	800-1000	80.955	78.100	8.2952	8.2943	0.0009

ตารางภาคผนวก ค. 1.2 ผลการทดสอบแผ่นมิดซีเมนต์ทั้งสเดนคาร์ไบด์ที่ทำการผลิตขึ้น

ด้านการใช้งาน (ต่อ)

ผลการทดสอบทางด้านการใช้งาน						
แผ่นมิด ที่	ระยะทาง ทดสอบ (mm.)	ขนาดความโตขึ้นงาน (mm.)		น้ำหนักแผ่นมิด (g)		น้ำหนักที่ หายไป (g)
		ก่อนกลิ้ง	หลังกลิ้ง	ก่อนกลิ้ง	หลังกลิ้ง	
3	1000-1200	78.100	75.320	8.2943	8.2925	0.0017
	1200-1400	75.320	72.150	8.2926	8.2907	0.0019
	1400-1600	75.320	69.295	8.2907	8.2770	0.0137



ภาคผนวก ง.

ผลการทดสอบค่าความแข็งผ่านมิด



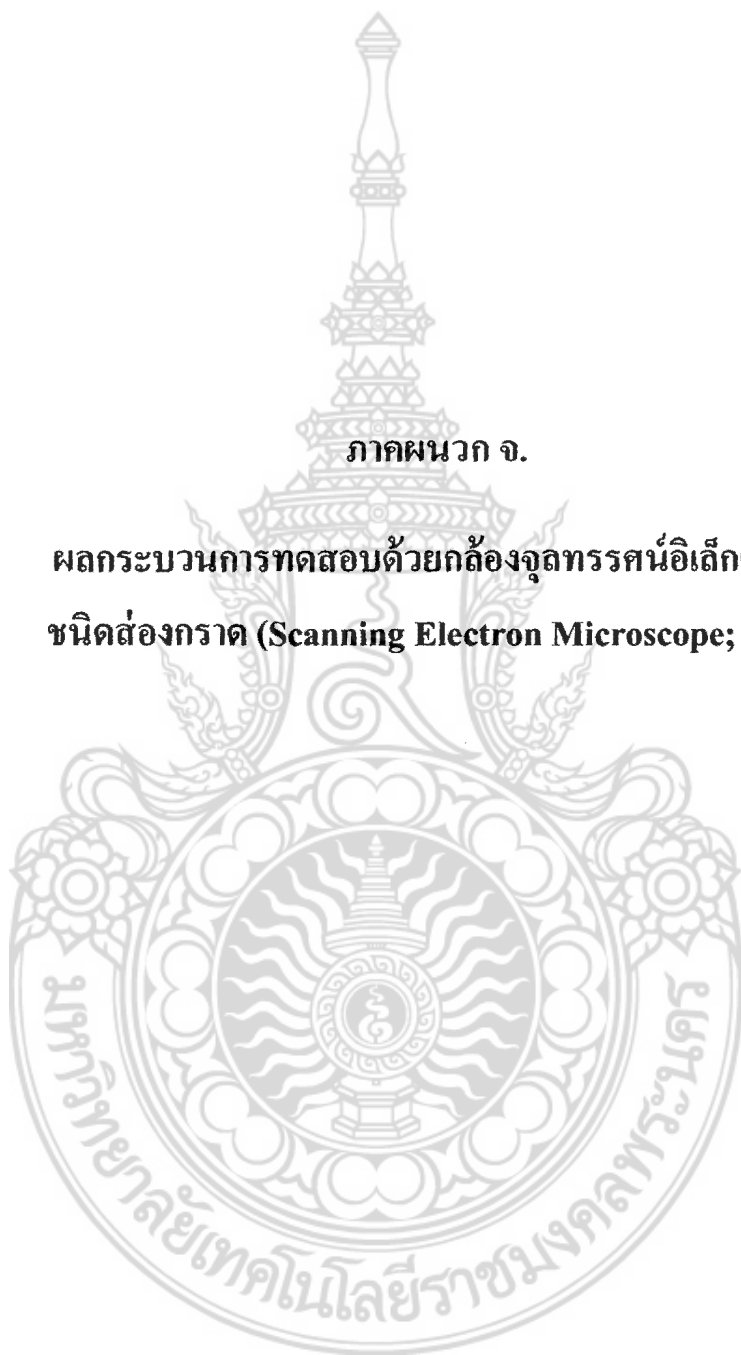
ตารางภาคผนวก ง. 1.1 ผลการทดสอบค่าความแข็งแผ่นมิด

ผลการทดสอบค่าความแข็งแผ่นมิด		
แผ่นมิด	แผ่นมิดที่ผลิตใหม่	แผ่นมิดนำเข้า
1	1439.00	1544.00
2	1440.00	1564.00
3	1428.00	1524.00
4	1439.00	1558.00
5	1454.00	1525.00
6	1448.00	1543.00
7	1420.00	1565.00
8	1451.00	1560.00
9	1433.00	1544.00
10	1439.00	1564.00
เฉลี่ย	1439.10	1549.10



ภาคผนวก จ.

ผลกระบวนการทดสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน
ชนิดส่องกราด (Scanning Electron Microscope; SEM)

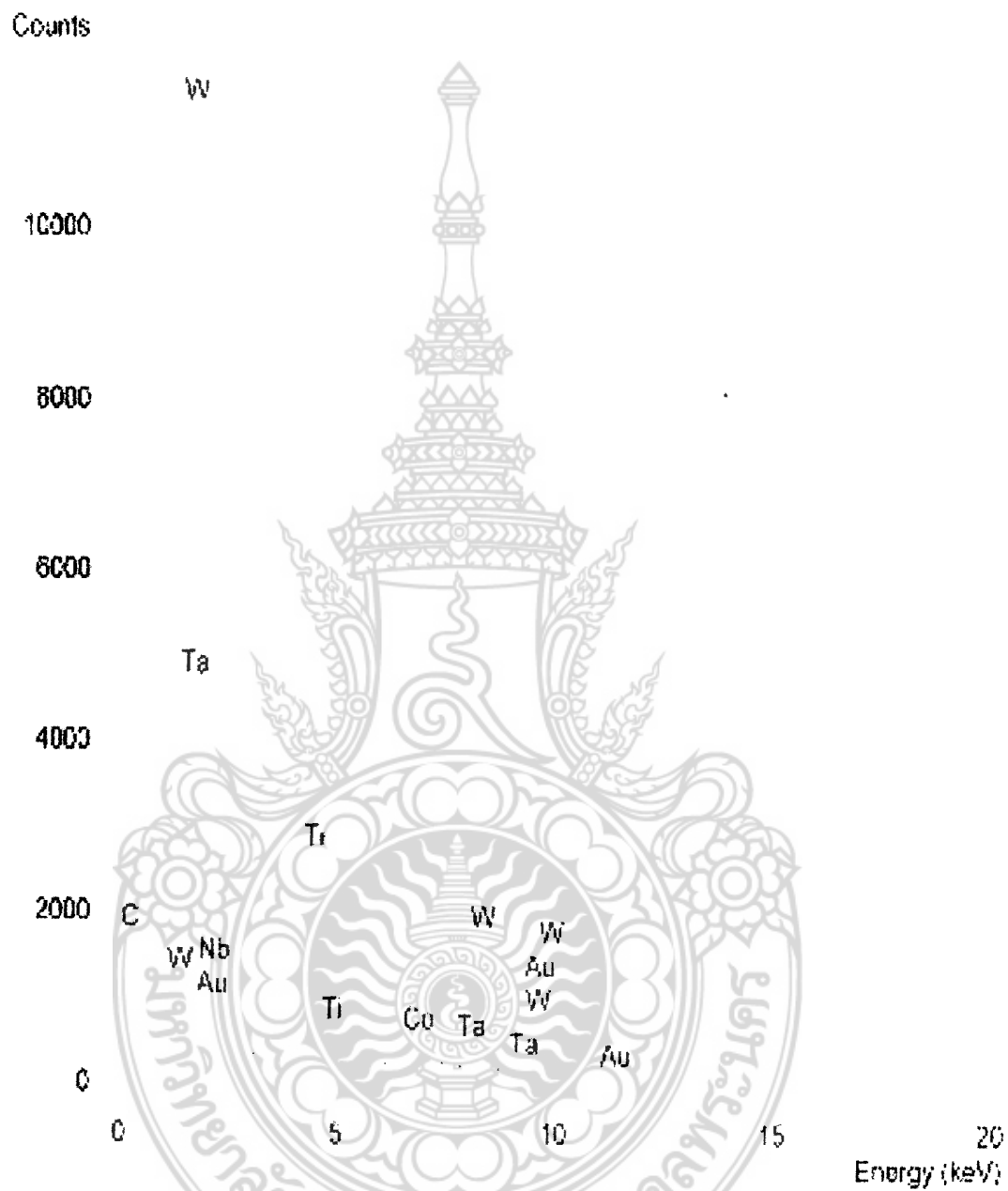


Operator : Chaweewan

Client : none

Job : Job 2009_1

Black zone of makin_1_1(24/4/2009 14:51)



ภาพผนวก จ. 1.1 ผลการวิเคราะห์ธาตุด้วยเครื่อง SEM บริเวณจุดสีดำ

SEMQuant results. Listed at 14:56:10 FM on 24/4/2009

Operator : Chaweewan

Client : none

Job : Job 2009_1

Spectrum lable :black zone of making_1_1

System resolution = 77 eV

Quantitative method : ZAF (3 iterations).

Analysed all elements and normalised results.

Standards :

C	K	c(bs12) 7/3/98
Cr	K	Cr 5/22/02
Co	K	Co 5/22/02
W	L	W sem 3/13/98
Au	L	Au 5/15/02

Elmt	Spect	Element	Atomic	
	Type	%	%	
C	K	ED	0.09	1.07
Cr	K	ED	0.45	1.18
Co	K	ED	14.91	34.75
W	L	ED	81.14	60.62
Au	L	ED	3.41	2.38
Total			100.00	100.00

* = < 2 Sigma

Fit Indices

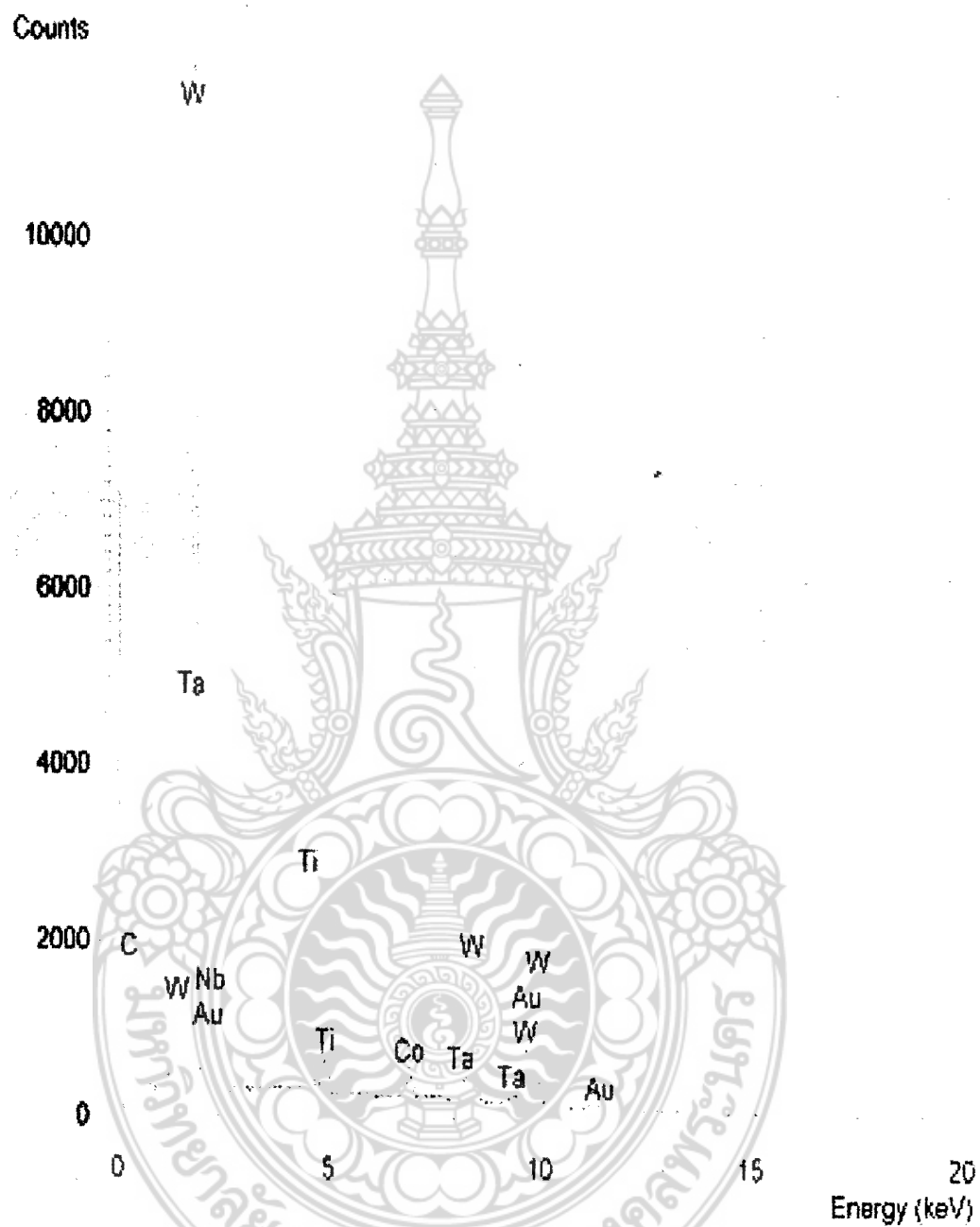
C	K	*****
Cr	K	1.3
Co	K	7.7
W	L	2.2
Au	L	1.4

Operator : Chaweewan

Client : none

Job : Job 2009_1

Grey zone of making_1_1(24/4/2009 15:00)



ภาพผนวก จ. 1.2 ผลการวิเคราะห์ธาตุด้วยเครื่อง SEM บริเวณจุดสีเทา

SEMQuant results. Listed at 15:04:19 PM on 24/4/2009

Operator : Chaweewan

Client : none

Job : Job 2009_1

Spectrum lable :grey zone of making_1_1

System resolution = 76 eV

Quantitative method : ZAF (3 iterations).

Analysed all elements and normalised results.

1 peak possibly omitted: 0.76 keV

Standards :

C	K	c(bs12) 7/3/98
Ti	K	Ti 5/22/02
Co	K	Co 5/22/02
Nb	L	Nb 5/22/02
Ta	L	Ta sem 3/13/98
W	L	W sem 3/13/98
Au	L	Au 5/15/02

Elmt	Spect	Element	Atomic
	Type	%	%
C	K	ED 0.01	0.16
Ti	K	ED 7.65	23.10
Co	K	ED 1.84	4.51
Nb	L	ED 1.43	2.23
Ta	L	ED 12.56	10.03
W	L	ED 72.90	57.33
Au	L	ED 3.61	2.65
Total		100.00	100.00

* = < 2 Sigma

Fit Indices

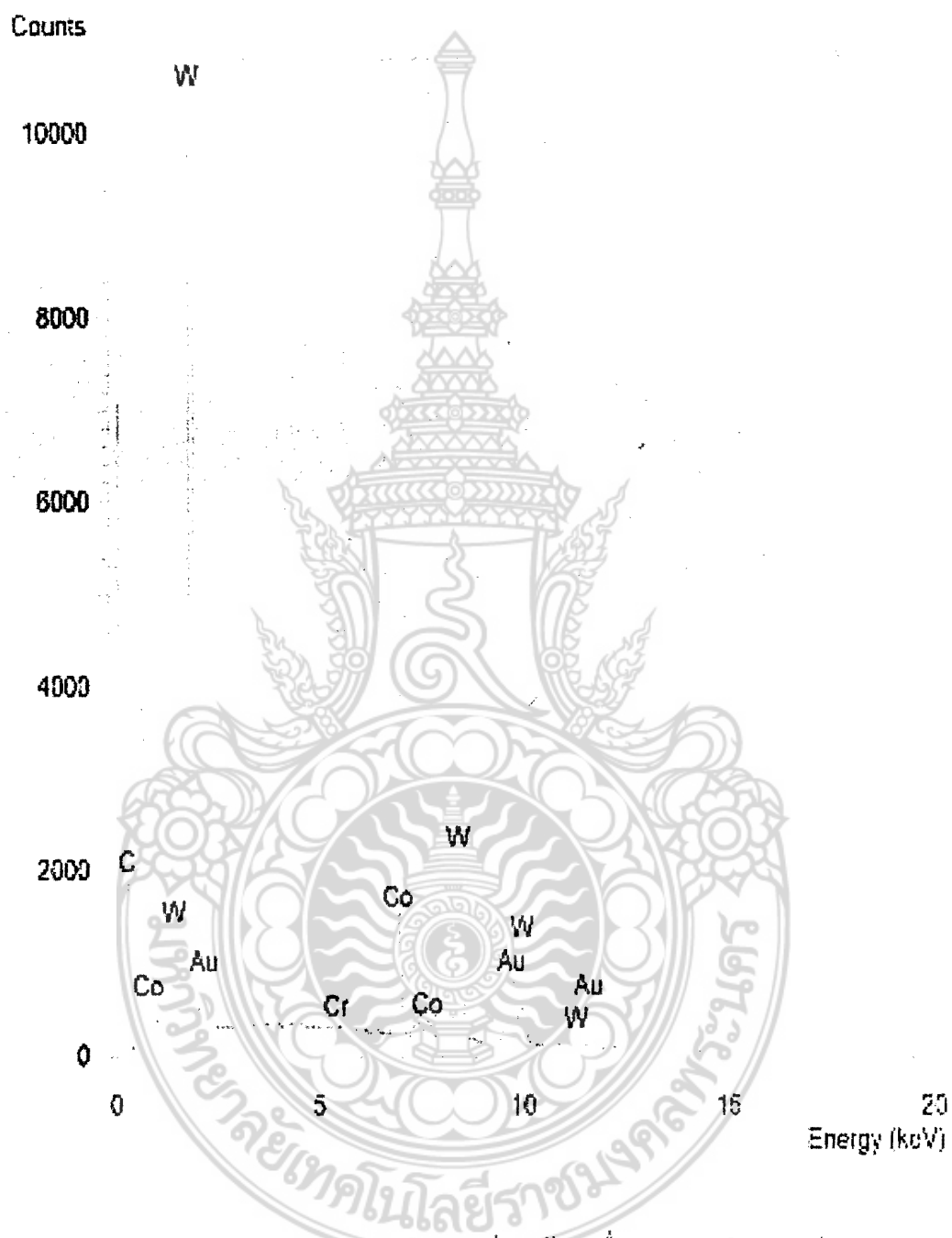
C	K	*****
Ti	K	8.1
Co	K	0.3
Nb	L	1.3
Ta	L	1.9
W	L	1.8
Au	L	1.6

Operator : Chaweewan

Client : none

Job : Job 2009_1

White zone of making_1_1(24/4/2009 14:56)



ภาพผนวก จ. 1.3 ผลการวิเคราะห์ธาตุด้วยเครื่อง SEM บริเวณจุดสีขาว

SEMQuant results. Listed at 14:56:10 FM on 24/4/2009

Operator : Chaweewan

Client : none

Job : Job 2009_1

Spectrum lable :white zone of making_1_1

System resolution = 77 eV

Quantitative method : ZAF (3 iterations).

Analysed all elements and normalised results.

Standards :

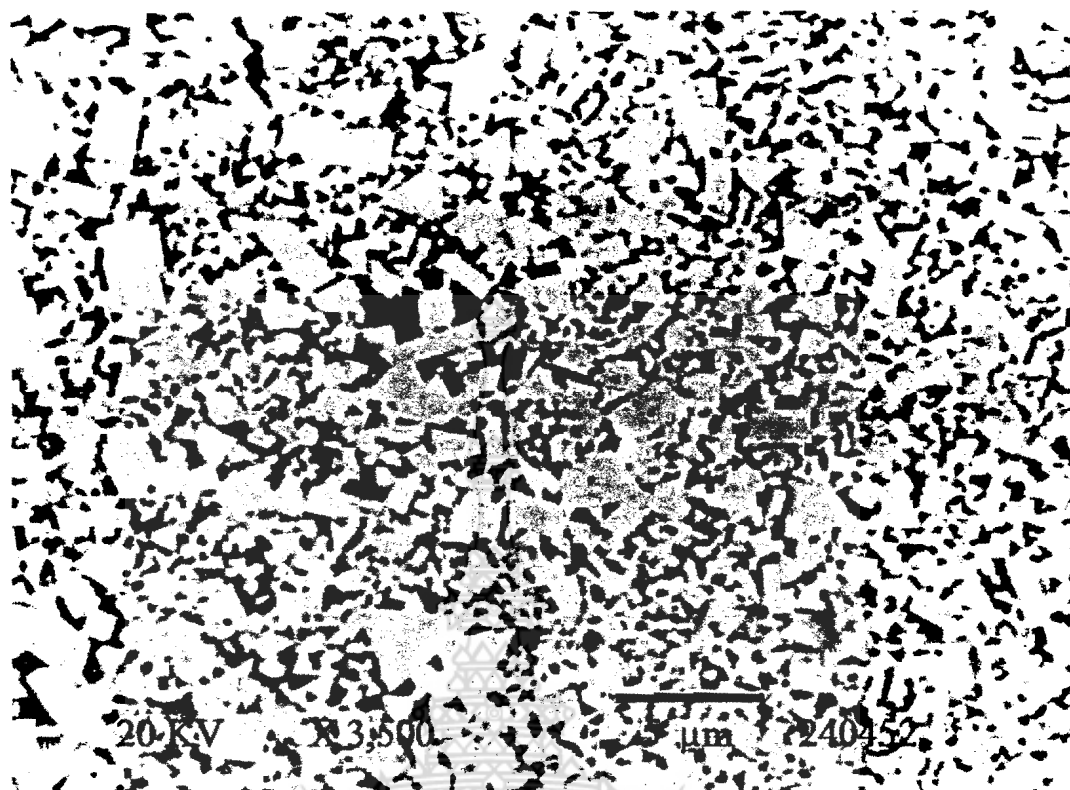
C	K	c(bs12) 7/3/98
Cr	K	Cr 5/22/02
Co	K	Co 5/22/02
W	L	W sem 3/13/98
Au	L	Au 5/15/02

Elmt	Spect	Element	Atomic
	Type	%	%
C	K	ED 0.06	0.79
Cr	K	ED 0.19	0.59
Co	K	ED 7.05	18.97
W	L	ED 88.11	75.97
Au	L	ED 4.58	3.68
Total		100.00	100.00

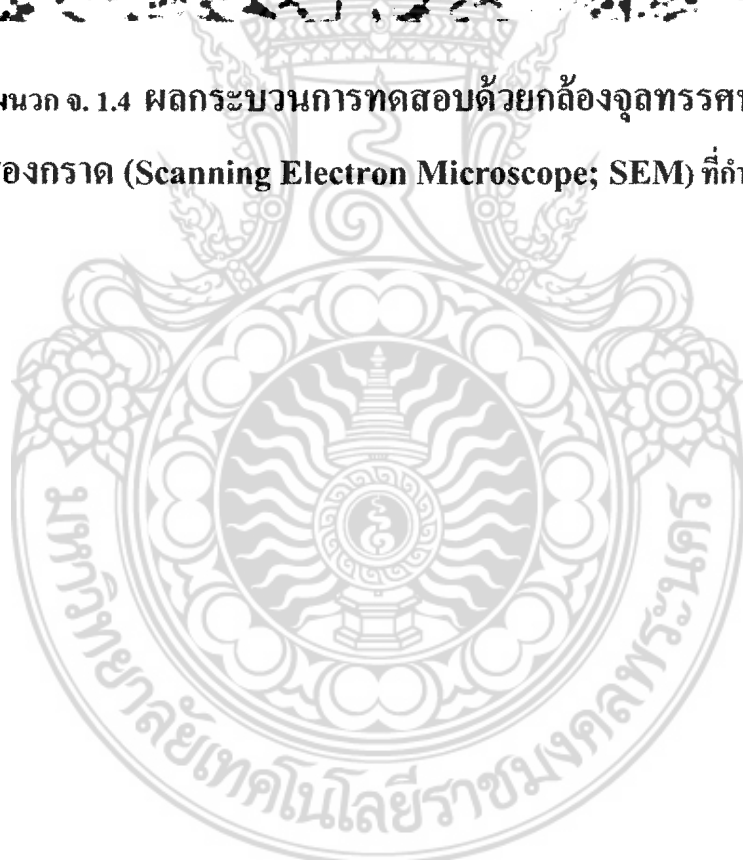
* = < 2 Sigma

Fit Indices

C	K	*****
Cr	K	0.6
Co	K	3.7
W	L	3.6
Au	L	2.8



ภาพผนวก จ. 1.4 ผลกระบวนการทดสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด (Scanning Electron Microscope; SEM) ที่กำลังขยาย 3500 เท่า



บรรณานุกรม

ภาษาไทย

1. กฤษศรณณ์ ศิริวรรณกุล, ตริมุข เจริญรัตน์ และสุจิรารุจิวงศ์, 2542, การศึกษาขนาดของอนุภาคที่มีผลต่อความสามารถในการชุบแข็งชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอนที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการทางโลหะวิทยา, ปรินูญานินพนธ์วิศวกรรมศาสตร์บัณฑิต สาขาวิศวกรรมวัสดุ ภาควิชาเทคโนโลยีการผลิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
2. เกียรติกร เลวงษ์ และสมศักดิ์ บุญวิเศษ, 2543, การศึกษาสมบัติและการสึกกร่อนของเครื่องมือตัดประเภทแผ่นมีด, ปรินูญานินพนธ์วิศวกรรมศาสตร์บัณฑิต สาขาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต
3. นกิสพร มีมงคล, 2548, โลหกรรมวัสดุผง (Powder Metallurgy). เอกสารทางวิชาการ. ภาควิชา วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
4. นิพนธ์ พ่วงเล็ก,อภิชาติ รักษา และธวัชชัย พรหมแก้ว, 2546, การศึกษาสมบัติและการต้านทานต่อการสึกกร่อนของแผ่นมีดคดถึงเซรามิกส์ ชนิด TNGA 160408 A06, ปรินูญานินพนธ์วิศวกรรมศาสตร์บัณฑิต สาขาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต
5. บุญชม ศรีสะอาด, 2541, วิธีการทางสถิติสำหรับการวิจัย เล่ม 1, พิมพ์ครั้งที่ 2, มหาสารคาม; ภาควิชาพื้นฐานของการศึกษา คณะศึกษาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
6. ศจ.บุญญศักดิ์ ใจจงกิจ, ทฤษฎีงานเครื่องมือกล, พิมพ์ครั้งที่ 2, สถาบันพระนครเหนือ
7. บริษัท Allegheny Technologies
8. บริษัท Betek Progress
9. ไพบูลย์ ชูฟังอาตม์, กิตติพัฒน์ ปณิชากรณ, โครงสร้างโลหะมาตรฐาน. สถาบันพัฒนาอุตสาหกรรมเครื่องจักรกลและโลหะการ.

10. มุhammadชาบีดี มะยี่, อนันต์ มะสง และอับดุลอาซี สุหลง, 2546 การศึกษาสมบัติและการ
ต้านทานต่อการสึกกร่อนของแผ่นมิดกลิ่งเซรามิกส์ ชนิด TNGA 160408 K90, ปรินญา
นิพนธ์วิศวกรรมศาสตร์บัณฑิต สาขาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต.

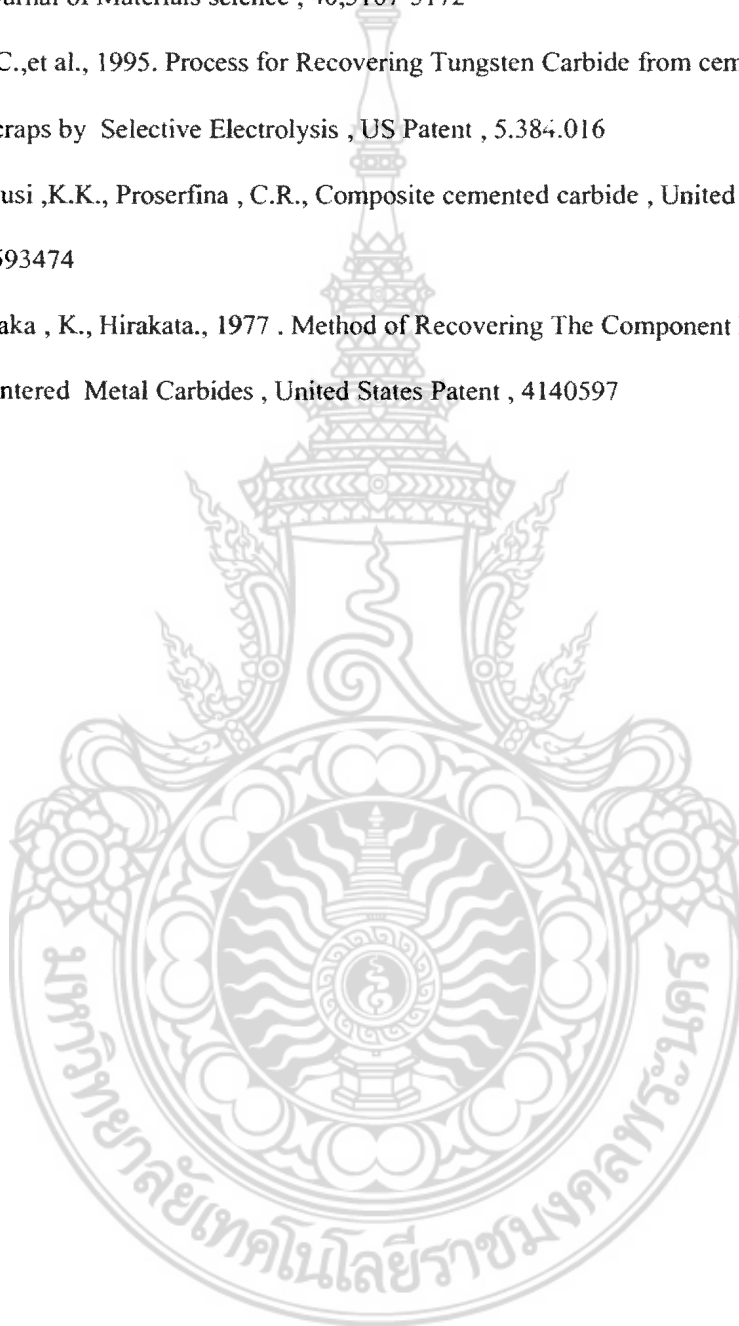


11. นายสหรัตน์ วงษ์ศรียะ “การศึกษาการออกแบบและผลิตชิ้นงานทั้งสแตนคาร์ไบด์”
แผนกเครื่องจักรอัตโนมัติ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระนคร วิทยา
เขตพระนครเหนือ , 2550

ภาษาอังกฤษ

12. Catalogue Kyocera
13. Catalogue Sandvik (Thailand)
14. Catalogue Tungaloy
15. Erik Lassner, Wolf-Dieter Schubert, 1999, **Tungsten**, Kluwer Academic / Plenum Publishers, New
16. 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
17. Frank Felten, Gerold A.Schneider, Tomasz Sadowaki, “Estmation of R-Curve in WC/Co Cermet by CT Test” Lubin University of Technology
18. Gopal, S. CEMENT TUNGSTEN CARBIDES : NOYES PUBLICATIONS, c1998
19. <http://www.atom.rmutphysics.com/charud/scibook/nanotech/Page/Unit4-5.html> (SEM)
20. <http://course.eau.ac.th/course/Download/0152601/2%20sintering.pdf>
21. <http://th.wikipedia.org/wiki/ทังสเตน>
22. <http://th.wikipedia.org/wiki/โคบอลต์>
23. Keshavan et.al “ Composition cemented carbide ” US. Patent 5,593,474
24. Robert T. Eeeghiy, Youngstown, “Tungsten carbide tool manufacture ” US. Patent 3,165,822
25. S.G. Huang, R.L. Liu, L. Li , O. Van der Biest, J. Vleugels, “NbC as grain growth inhibitor and carbide in WC–Co hardmetals” Shanghai University

26. Lin , C.J., et al ., 1996 .Selective Dissolution of the Cobalt Binder from Scraps of Cemented Tungsten Carbide in Acids Containing Additives , Hydrometallurgy , 43,47-61.
27. Latha , M.T. and Venkattachalam , S., 1989.Electrolytic Recovery of Tungsten and Cobalt from Tungsten Carbide Scrap , Hydrometalluray , 22,353-316.
28. Kojima , T., et al., 2005 .Recyclint process of WC-CO cermets by hydrothermal treatment Journal of Materials science , 40,5167-5172
29. Lin, J.C.,et al., 1995. Process for Recovering Tungsten Carbide from cemented Carbide Scraps by Selective Electrolysis , US Patent , 5.384.016
30. Madapusi ,K.K., Proserfina , C.R., Composite cemented carbide , United States Patent 5593474
31. Yoshitaka , K., Hirakata., 1977 . Method of Recovering The Component Metals From Sintered Metal Carbides , United States Patent , 4140597



MALVERN MASTERSIZER

Result Derived Diameters Report

Sample Details			
Sample ID: Tungsten Carbide	Run Number: 2	Measured: 7 Jul 2008 11:01PM	
Sample File: 1000KG	Record Number: 395	Analyzed: 7 Jul 2008 11:01PM	
Sample Path: C:\SIZER\MUDATA\		Result Source: Analyzed	
Sample Notes: 07-07-51			

System Details		
Sampler: Internal	[Particle R.I. = (2.1945, 0.1000); Dispersant R.I. = 1.3300]	Measured Beam Obscuration: 16.7 %
Presentation: 45HD		Residual: 6.719 %
Analysis Model: Polydisperse		
Modifications: None		

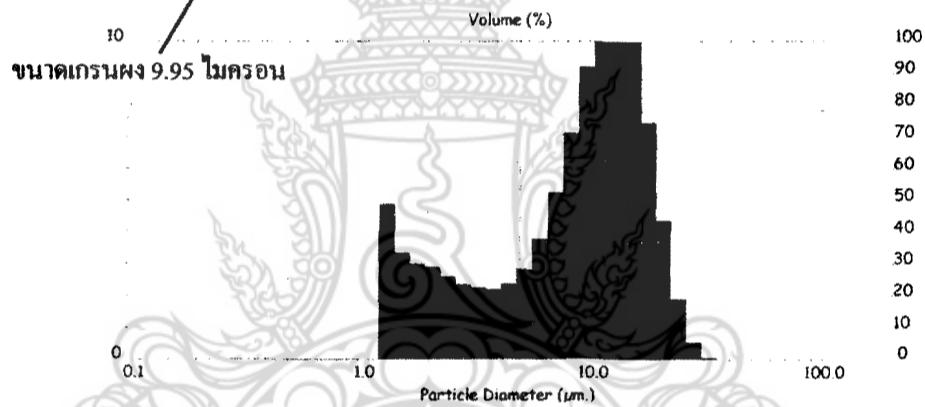
Result Statistics			
Distribution Type: Volume	Concentration = 0.0115 %Vol	Density = 1.000 g / cub cm	Specific S.A. = 1.1546 sq m / g
	Span = 1.827E+00	Uniformity = 5.030E-01	

A.S.T.M Derived Diameters (um)				
N	3	2	1	0
D[4, N]	9.95	7.19	5.09	3.92
D[3, N]		5.20	3.64	2.87
D[2, N]			2.55	2.13
D[1, N]				1.79

Distribution Moments				
	Mean	Stan. Dev.	Skewness	Kurtosis
Volume	9.95	6.047	0.3902	-0.3929
Surface	5.20	4.972	1.4574	1.5627
Length	2.55	2.598	3.6299	15.4862
Number	1.79	1.163	6.7893	64.2045

Distribution Percentiles (um) - Volume			
Percentile	Size	Percentile	Size
10.0 %	1.85	80.0 %	15.12
20.0 %	3.32	90.0 %	17.93
50.0 %	9.88		

Distribution Modal Sizes (um)			
Mode	Size	Mode	Size
1	12.79	3	1.88
2	1.38		



ภาพที่ 5.3 ผลการทดสอบขนาดเกรนผงทั้งสแตนคาร์ไบด์ที่ได้จากการแยกสลายด้วยเครื่อง Masterizer-S

เป็นผลการทดสอบขนาดเกรนผงทั้งสแตนคาร์ไบด์ที่ได้จากการแยกสลาย โดยขนาดของเกรนผงทั้งสแตนคาร์ไบด์มีขนาด 9.95 ไมครอน