ห้องสมุดงานวิจัย สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ
247542

รายงานวิจัย

เรื่อง

การพัฒนาเทคโนโลยีการรีไซเคิล ผลิตภัณฑ์โลหะผงทังสเตนคาร์ไบด์ เพื่อการใช้งานในอุตสาหกรรมอย่างยั่งยืน

Development of Recycling Technology of WC powder Product for Sustainable in Industry

คณะผู้วิจัยที่ปรึกษา

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.	วงษ์ศรีชัย
อาจารย์ ดร.	ป๊อปเกิง
อาจารย์ ดร.	ชมสนุก
อาจารย์ ดร.	แพงเพชร

รายงานวิจัยนี้เป็นการวิจัยตามวิชาการ กลุ่ม สาขาวิศวกรรมศาสตร์ ประจำปีงบประมาณ
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
ปีการศึกษา 2554

2252748

247542

รายงานวิจัย

เรื่อง

การพัฒนาเทคโนโลยีการผลิต ผลิตภัณฑ์โลหะผงทังสเตนคาร์ไบด์ เพื่อการใช้งานในอุตสาหกรรมอย่างยั่งยืน

Development of Recycling Technology of WC powder Product for Sustainable in Industry

คณะผู้จัดทำวิจัย

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สหรัตน์	วงษ์ศรีษะ
อาจารย์ สิงห์แก้ว	ป๊อกเที่ง
อาจารย์ คมพันธ์	ชมสมุทร
อาจารย์ ประสิทธิ์	แพงเพชร

รายงานวิจัยนี้เป็นการวิจัยสาขาวิชาการ กลุ่ม สาขาวิศวกรรมศาสตร์และอุตสาหกรรมวิจัย

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

ปีการศึกษา 2554

รายงานวิจัย

เรื่อง

การพัฒนาเทคโนโลยีการผลิต ผลิตภัณฑ์โลหะผงทังสเตนคาร์ไบด์ เพื่อการใช้งานในอุตสาหกรรมอย่างยั่งยืน

Development of Recycling Technology of WC powder Product for Sustainable in Industry

คณะผู้จัดทำวิจัย

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สหรัตน์	วงษ์ศรียะ
อาจารย์ สิงห์แก้ว	ป๊อกเที่ง
อาจารย์ คมพันธ์	ชมสมุทร
อาจารย์ ประสิทธิ์	แพงเพชร

รายงานวิจัยนี้เป็นการวิจัยสาขาวิชาการ กลุ่ม สาขาวิศวกรรมศาสตร์และอุตสาหกรรมวิจัย

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

ปีการศึกษา 2554

งานวิจัยเรื่อง การพัฒนาเทคโนโลยีการผลิต ผลิตภัณฑ์โลหะผงทังสเตนคาร์ไบด์เพื่อการใช้งานในอุตสาหกรรมอย่างยั่งยืน

หัวหน้าโครงการวิจัย	**ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สหรัตน์**	**วงษ์ศรีษะ**
ผู้ร่วมวิจัย	**อาจารย์ สิงห์แก้ว**	**ป๊อกเที่ง**
	อาจารย์ คมพันธ์	**ชมสมุทร**
	อาจารย์ ประสิทธิ์	**แพงเพชร**

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

ปีการศึกษา 2554

บทคัดย่อ

247542

รายงานวิจัยนี้เป็นการพัฒนาเครื่องจักรกลเพื่อผลิตโลหะผงทังสเตนคาร์ไบด์ ขนาดบรรจุชิ้นงานมีความเหมาะสมที่ 10 kg. สำหรับผลิตโลหะผงคาร์ไบด์ ปรากฏว่าผงโลหะเป็นทังสเตนคาร์ไบด์ (WC) บริสุทธิ์ 97.49 % ทั้งนี้ พบว่าผงโลหะมีขนาดและการกระจายสูงในช่วง 0.03 - 350.00 μm. ซึ่งเป็นผงโลหะที่มีขนาดใหญ่ ประกอบกับมีโลหะอื่น ๆ ผสม โดยเฉพาะโลหะประสานโคบอลต์ (Co) ดังนั้น การทำให้บริสุทธิ์และลดขนาดโลหะผงด้วยการพัฒนากระบวนการผลิต ครอบคลุมกระบวนการบด (Ball milling) การกรอง การอบแห้ง การคัดขนาด ผลจากการบดเป็นเวลา 24 hours ปรากฏว่า ขนาดลดลงมาอยู่ในช่วง 0.025 – 30.00 μm. และโลหะผงทังสเตนคาร์ไบด์มีความบริสุทธิ์ 99.50 % มีลักษณะทรงกลมมากขึ้น อย่างไรก็ตาม ผลที่ได้รับสามารถคัดขนาดโลหะผงให้ตรงตามมาตรฐานได้ง่าย เพื่อนำไปผลิตเป็นชิ้นงานซีเมนต์คาร์ไบด์สำหรับใช้ในอุตสาหกรรมโดยพัฒนาเทคโนโลยีอัดขึ้นรูปโลหะผงเพื่อเป็นพื้นฐานการพัฒนาวัสดุความแข็งสูงต่อไป

คำสำคัญ (keywords) Recycling technology, Sustainable, WC powder product, Particle sized and distribution

Researcher title **Development of recycling technology of WC Powder product for Sustainable in Industry**

Researcher by **Asst.Prof. Saharat Wongsisa**
Mr. Singkaew Pokterng
Mr. Kompun Chomsamut
Mr. Prasit Pangpech

Faculty of Engineering

Rajamangala University of Technology Phra nakhon

247542

Abstracts

This study is meant to help develops better facilities for Tungsten Carbide powder production process. The 10 kg-capacity machine used was able to produce 85 - 95.49 percent purity Tungsten carbide powder. When measured, most of the particle sizes and distribution between 0.03-350.00 μm. which are considered large sized. More than that, those tungsten carbide particles are contaminated by other kinds of metal especially Cobalt binder. We have tried to improve the Tungsten Carbide manufacturing processes by combining more steps including ball milling, drying and screening. After 24-hours ball milling process, the result showed that we were able to produce smaller Tungsten Carbide particles sizing from 0.025 to 30.00 μm. The obtained particles are also rounder and with 99.50 percent purity. They are also easier to grade. The Tungsten Carbide manufacturing technology yet needs a further development to eventually produce the desired hard material.

Key word: Recycling technology, Sustainable, WC powder product, Particle sized and distribution

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้สำเร็จได้ด้วยการสนับสนุนทุนวิจัยงบประมาณแผ่นดิน โดยมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร สามารถสร้างเทคโนโลยีและพัฒนากระบวนการผลิตโลหะผงทังสเตนคาร์ไบด์ (WC powder) ซึ่งเป็นผลงานวิจัยใหม่ ที่ได้รับความร่วมมือและสนับสนุนจากหน่วยงานต่างๆ ประกอบด้วย ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ ในด้านปฏิบัติการทดสอบโลหะ การวิเคราะห์โลหะผงด้วย XRD, สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย (วว.) เพื่อปฏิบัติการ SEM, Particle size distribution, X-ray fluorescence ภาควิชาวิศวกรรมโลหะการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ทดสอบ XRD และกรมวิทยาศาสตร์บริการ ทดสอบ XRF รวมถึงผู้ที่เกี่ยวข้องที่ได้สนับสนุนจนกระทั่งงานวิจัยนี้ประสบผลสำเร็จตามวัตถุประสงค์

ผศ.สหรัตน์ วงษ์ศรียะ
หัวหน้าโครงการ

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ

กิตติกรรมประกาศ

สารบัญ (ต่อ) รูปภาพ

สารบัญ (ต่อ) ตาราง

สัญลักษณ์

บทที่ 1 บทนำ

1.1 ความสำคัญ และที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย 1

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย 10

1.3 ขอบเขตของการวิจัย 10

1.4 วิธีดำเนินการวิจัย และสถานที่ทำการทดลอง/เก็บข้อมูล 11

1.5 ทำการทดลอง/เก็บข้อมูล 12

1.6 ระยะเวลาการทำวิจัย 13

1.7 เครื่องมือและอุปกรณ์การวิจัย 14

1.8 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ 14

บทที่ 2 แนวคิดและทฤษฎีที่สำคัญ

2.1 บทนำ 16

2.2 ชนิดและสมบัติโลหะผงทังสเตนคาร์ไบด์มาตรฐาน 22

2.3 กระบวนการผลิตซีเมนต์คาร์ไบด์ 25

2.4 การแยกสลายเศษซีเมนต์คาร์ไบด์ 32

2.5 การออกแบบและการส่งกำลังด้วยเฟือง 37

2.6 ทฤษฎีการบดละเอียดโลหะผง 47

2.7 การออกแบบเตาอบไฟฟ้าระบบควบคุมการเกิดออกซิเดชั่น (Oxidation) 54

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.8 การคัดขนาดอนุภาค	58
2.9 การอัดแน่นของโลหะผงด้วยแม่พิมพ์	61
2.10 ทฤษฎีการออกแบบเครื่องอัดไฮดรอลิกส์ (Hydraulic press)	68
บทที่ 3 การดำเนินงานและวิธีการทดลอง	
3.1 ศึกษาคุณสมบัติโลหะผงทังสเตนคาร์ไบด์	82
3.2 ขั้นตอนการผลิตโลหะผงทังสเตนคาร์ไบด์	124
3.3 การออกแบบสร้างเครื่องกัดกคัดขนาด	136
3.4 การออกแบบพัฒนาเครื่องบดโลหะ	152
3.5 การออกแบบสร้างเตาอบไฟฟ้า	162
3.6 การคัดขนาดอนุภาค	165
3.7 การออกแบบแผ่นมีดและแม่พิมพ์	171
3.8 การออกแบบสร้างเครื่องอัดระบบไฮดรอลิกส์ (Hydraulic Press)	174
3.9 รวบรวมข้อมูลและวิเคราะห์	176
3.10 ออกแบบการทดลอง	178
3.11 ติดตั้งและทดสอบระบบ	178
3.12 สรุปผลการดำเนินงาน	195
บทที่ 4 ผลการศึกษากระบวนการผลิต	
4.1 บทนำ	196
4.2 การดำเนินการสร้างเครื่องแยกสลายเศษซีเมนต์คาร์ไบด์	196
4.3 การดำเนินการพัฒนาออกแบบเครื่องบดโลหะ	219
4.4 การดำเนินการสร้างเตาไฟฟ้าระบบควบคุมการเกิดออกไซด์	231
4.5 การตรวจสอบขนาดการกระจายของอนุภาคผงโลหะ	235
4.6 การสร้างแม่พิมพ์สำหรับอัดขึ้นรูปแผ่นมีด	237
4.7 การดำเนินการสร้างเครื่องอัดไฮดรอลิกส์ (Hydraulic Press)	242

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและพัฒนาการสร้างเทคโนโลยีการผลิตโลหะผงทังสเตนคาร์ไบด์

5.1 ข้อเสนอแนะ 261

บรรณาณุกรม 262

ภาคภนวค ก 268

ภาคภนวค ข 270

ภาคภนวค ค 281

ภาคภนวค ง 284

ภาคภนวค จ 284

ภาคผนวก ฉ 286

สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 1.1 แนวโน้มการรีไซเคิลซีเมนต์คาร์ไบด์ ของประเทศสหรัฐอเมริกา [7] 1
รูปที่ 1.2 แนวโน้มการผลิตทังสเตนจากเศษโลหะที่ไม่ใช้ประโยชน์ของประเทศ สหรัฐอเมริกา [7] 2
รูปที่ 1.3 สัดส่วนการผลิตโลหะแข็งพิเศษจากทังสเตนคาร์ไบด์ในอุตสาหกรรมแต่ละประเภท [9] 2
รูปที่ 1.4 ความสัมพันธ์ของขนาดผงโลหะทังสเตนคาร์ไบด์และส่วนผสมโคบอลต์มีผลต่อ การผลิตชิ้นงานโลหะแข็ง เพื่อการใช้งานในอุตสาหกรรมแต่ละประเภท[9] 3
รูปที่ 1.5 การผลิตผงทังสเตนคาร์ไบด์ด้วยการรวมเทคโนโลยีหลายด้านเป็นกระบวนการเดียว [9] 4
รูปที่ 1.6 แสดงแบบจำลองการสลายชิ้นงานซีเมนต์คาร์ไบด์ Patent No. 4234333 [10] 5
รูปที่ 1.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้า (i/mA) กับ แรงดันไฟฟ้า (E/mV) ของสาร ละลาย HCl [11] 5
รูปที่ 2.1 โครงสร้างโลหะผสม ทังสเตน โคบอลต์และคาร์บอน [12] 16
รูปที่ 2.2 อุปกรณ์แยกสลายซีเมนต์ทังสเตนคาร์ไบด์ US Patent 4234333 [17] 18
รูปที่ 2.3 Electrolytic Recovery of Tungsten and Cobalt from Tungsten Carbide Scrap[11] 18
รูปที่ 2.4 Effect of temperature on current efficiency (current density 10 kA m^{-2} electrolyte 10% HNO_3) [11] 19
รูปที่ 2.5 Dissolution of Co [11] 21
รูปที่ 2.6 พัฒนาการซีเมนต์คาร์ไบด์ กลุ่มเครื่องมือตัดในช่วงศตวรรษที่ผ่านมา [18] 26
รูปที่ 2.7 แสดงขั้นตอนการผลิตชิ้นงานด้วยกรรมวิธีทางโลหะผง [15] 28
รูปที่ 2.8 PM processing steps of tungsten. Courtesy of E. Kimmel, Towanda, PA. [19] 29
รูปที่ 2.9 Hard metal phase equilibria schematically [20] 30
รูปที่ 2.10 Isothermal section of the W-C-Co phase diagram at 1400 °C [21] 31
รูปที่ 2.11 แสดงขั้นตอนการแยกสลายโคบอลต์ออกจากทังสเตนโดยวิธีการเคมีไฟฟ้า [11] 32
รูปที่ 2.12 แสดงความเข้มข้นของโคบอลต์ (Co) ภายใต้แรงดันไฟฟ้า (V) ระหว่าง 0.4-0.6 โวลต์ [11] 33

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 2.13 แสดงความสัมพันธ์ของเวลาและความเข้มข้นของทังสเตน (WC) ภายใต้แรงดันไฟฟ้า (V) ระหว่าง 0.4-0.6 โวลต์ [11] 34
รูปที่ 2.14 Recycling cemented carbide scrap [8] 35
รูปที่ 2.15 เครื่องกัดกดัดขนาดโลหะแนวตั้ง (เคมีไฟฟ้า) [17] 36
รูปที่ 2.16 เฟืองสเปอร์แบบฟันตรง (Spur gear) [2] 37
รูปที่ 2.17 การทดเฟืองชั้นเดียว [2] 38
รูปที่ 2.18 การทดเฟืองหลายชั้น [2] 38
รูปที่ 2.19 ปีระมิดตัด [2] 39
รูปที่ 2.20 แท่งสี่เหลี่ยม [2] 40
รูปที่ 2.21 สามเหลี่ยมด้านเท่า [2] 40
รูปที่ 2.22 แสดงมอเตอร์เกียร์ AC พร้อมกล่อง Control [50] 41
รูปที่ 2.23 แสดงมอเตอร์เกียร์ DC พร้อมกล่อง [50] 42
รูปที่ 2.24 ฮีตเตอร์แก้วควัอท [55] 45
รูปที่ 2.25 เทอร์โมสตัทแบบดูดติด [56] 46
รูปที่ 2.26 ระดับของลูกบดใน Ball mill ที่เหมาะสม [57] 47
รูปที่ 2.27 แสดงมุมตกกระทบที่เหมาะสมของหม้อบด [57] 48
รูปที่ 2.28 ระดับของลูกบดและวัตถุดิบในหม้อบด [57] 49
รูปที่ 2.29 แสดงลักษณะการเคลื่อนที่ของลูกบอล [22] 50
รูปที่ 2.30 แสดงลักษณะเครื่องบดพลังงานสูงด้วยลูกบอลแบบแพลเนต [22] 50
รูปที่ 2.31 แสดงชุดหม้อบดทังสเตนคาร์ไบด์ของเครื่องบดรุ่น SPEX 800 [22] 51
รูปที่ 2.32 Reduction of WC Crystallite Size versus Ball Milling Time [23] 52
รูปที่ 2.33 แท่งกระบอกทรงกลวง [2] 54
รูปที่ 2.34 ฮิตเตอร์สำหรับเตาอบไฟฟ้า [59] 58
รูปที่ 2.35 ตะแกรงชนิดลวดทองเหลือง [60] 60
รูปที่ 2.36 ตะแกรงคัดขนาดชนิดลวดสเตนเลส [60] 61

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 2.37 แสดงชุดพันช์และแม่พิมพ์สำหรับอัดแน่น [3] 62

รูปที่ 2.38 แสดงลำดับขั้นตอนการเคลื่อนที่ของเครื่องมือในวัฏจักรการอัดแน่นผงโลหะ [3] 62

รูปที่ 2.39 แสดงเครื่องมืออัดแบบทิศทางเดียว (เส้นประแสดงแนวการเคลื่อนที่ของชิ้นส่วน [3] 63

รูปที่ 2.40 เป็นเครื่องมืออัดแน่นแบบสองทิศทาง [3] 63

รูปที่ 2.41 เครื่องมืออัดแบบโฟลทิงดาย (เส้นประแสดงแนวการเคลื่อนที่ของชิ้นงาน) [3] 64

รูปที่ 2.42 การเลื่อนชิ้นงานที่ต้องการระยะตามที่กำหนด [5] 68

รูปที่ 2.43 ปั๊มขึ้นรูปที่ต้องการระยะชักตามที่กำหนด [5] 68

รูปที่ 2.44 แสดงส่วนประกอบของชุดต้นกำลังไฮดรอลิกส์ [5] 70

รูปที่ 2.45 แสดงส่วนประกอบของเกียร์ปั๊มแบบ External [5] 71

รูปที่ 2.46 แสดงส่วนประกอบของเกียร์ปั๊มแบบ Internal [5] 71

รูปที่ 2.47 แสดงส่วนประกอบของถังพักน้ำมันไฮดรอลิกส์ [5] 72

รูปที่ 2.48 แสดงวาล์วระบายแรงดัน (Pressure Relief Valve) [5] 73

รูปที่ 2.49 แสดงลักษณะการทำงานและวงจรการต่อ Pressure Relief Valves [5] 74

รูปที่ 2.50 แสดงวาล์วควบคุมความดันแบบ 2 ทาง (2-Way Pressure Regulator) [5] 74

รูปที่ 2.51 แสดงวงจรการต่อวาล์วควบคุมความดันแบบ 2 ทาง (2-way Press Regulator) [5] 75

รูปที่ 2.52 แสดงวาล์วควบคุมความดันแบบ 3 ทาง (3-Way Pressure Regulator) [5] 75

รูปที่ 2.53 แสดงวาล์วควบคุมความดันแบบ 3 ทาง [5] 76

รูปที่ 2.54 การต่อวงจรของวาล์วควบคุมความดันแบบ 3 ทาง (3-Way Pressure Regulator) [5] 76

รูปที่ 2.55 แสดงภาวะการณ์ทำงานของวาล์วแบบลิ้นนั่งบ่า [5] 77

รูปที่ 2.56 แสดงโครงสร้างการทำงานของวาล์ว 4/2 [5] 77

รูปที่ 2.57 แสดงการต่อวงจรการของวาล์ว 4/2 [5] 77

รูปที่ 2.58 แสดงการทำงานของวาล์ว 4/3 [5] 78

รูปที่ 3.1 แสดงขั้นตอนการดำเนินงาน 80

รูปที่ 3.1 แสดงขั้นตอนการดำเนินงาน (ต่อ) 81

รูปที่ 3.2 แสดงเฟสไดอะแกรมของระบบ W – C ที่ ความสัมพันธ์ mass-% C และ อุณหภูมิ [24] 82

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 3.3 โครงสร้างของทังสเตนคาร์ไบด์ [25] 83

รูปที่ 3.4 Virginal WC powder [26] 84

รูปที่ 3.5 Appearances of the recovered and virginal WC powders Recovered WC powder [26] 84

รูปที่ 3.6 SEM-image of a WC powder with rounded particles 600x [27] 85

รูปที่ 3.7 SEM graphs of (a) pure WC powder [28] 85

รูปที่ 3.8 แสดงการตรวจสอบองค์ประกอบธาตุของสารละลายที่ผ่านกระบวนการแยกสลาย โดยสารละลายกรดที่ อุณหภูมิ 110 °C เวลา 24 ชั่วโมง ความเข้มข้นสารละลาย 1 N [26] 86

รูปที่ 3.9 XRD pattern of WC-Co powder. [29] 87

รูปที่ 3.10 The XRD spectra of the powders of: (a) pure [28] 87

รูปที่ 3.11 XRD of the La doped WC-Co powder with different ball milling time [30] 88

รูปที่ 3.12 การตรวจวิเคราะห์ขนาดและการกระจายโลหะทังสเตนคาร์ไบด์ [31] 88

รูปที่ 3.13 Particle size distribution for powders milled at 30 °C and RT. [32] 89

รูปที่ 3.14 Particle size distribution for powders milled for 60 and 300 min. [33] 89

รูปที่ 3.15 Particle size distribution for spherical shaped tungsten carbide powder used in present study. [34] 90

รูปที่ 3.16 Isothermal sections of the binder metal rich corner for the systems: a) W-Fe-C, b) W-Co-C and c) W-Ni-C. The dotted lines represent the theoretical WC-binder metal, compositions [18] 91

รูปที่ 3.17 The flow chart of experimental procedure. [35] 92

รูปที่ 3.18 X-ray diffraction pattern of sintered specimen [35] 92

รูปที่ 3.19 XRD analyses on the phase constitution in the different composite powders. [36] 93

รูปที่ 3.20 XRD patterns for the (a) WC–Co coating; (b) 90W_6C4S coating; (c) 80W12C8S Coating and (d) 70W18C12S coating. [37] 94

รูปที่ 3.21 SEM of WC–8%Co powder mixture. [38] 95

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 3.22 (a) And (b) Microstructures of fracture sections of pressed compacts made from Coated powders. [18] 95

รูปที่ 3.23 SEM photographs of the WC–10%Co nanocomposite powders. [39] 96

รูปที่ 3.24 รูปทรงต่างๆ ของแผ่นมีด WC ก่อนการใช้งาน (เคลือบผิวด้วย Titanium Nitride) [66] 104

รูปที่ 3.25 รูปทรงต่างๆ ของเม็ดมีด WC ก่อนการใช้งาน (เคลือบผิวด้วย Titanium Carbide) [67] 104

รูปที่ 3.26 Microstructures of sintered C-WC_2 compacts. Fracture sections at (a) 1080 °C and (b) 1200 °C; polished sections at (c) 1200 °C and (d) 1260 °C. [40] 106

รูปที่ 3.27 SEM images of WC powder (40–70 nm) consolidated at different temperatures. (b) Sintered at 1500 °C with different magnifications; [41] 107

รูปที่ 3.28 SEM images of WC–10Co sintered at 1450 °C with disc-type pallet compacted under the pressures: (a) 200MPa, (b) 300MPa, for comparison the pallet. [42] 107

รูปที่ 3.29 SEM images of microwave sintered nanocrystalline powders processed at different temperature set points, (c) 1450 °c [43] 108

รูปที่ 3.30 Stress distribution in WC calculated assuming stresses are entirely due to the deviatoric strain component for the coarse and ultrafine particles in WC-10 wt. % [44] 108

รูปที่ 3.31 Stress distribution in WC calculated assuming stresses are entirely due to the Deviatoric strain component for the coarse and ultrafine particles in WC-20 wt. % Co [44] 109

รูปที่ 3.32 Stress distribution in WC calculated assuming stresses are entirely due to the deviatoric strain component for the coarse and ultrafine particles in WC-40% wt. % Co. [44] 109

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 3.33 Schematic of the sintering mechanism of n-WC on the basis of the experimental Shrinkage strain rate in a CRH experiment. [45] 112
รูปที่ 3.34 แสดงการสูญเสียโคบอลต์ของซีเมนต์ทังสเตนคาร์ไบด์เนื่องจากการกัดกคัดขนาด [71]113
รูปที่ 3.35 เศษแผ่นมีดที่ผ่านการใช้งานแล้ว 113
รูปที่ 3.36 เศษแผ่นมีดเคลือบด้วย Titanium Nitride 114
รูปที่ 3.37 เศษแผ่นเคลือบด้วย Titanium Carbide 114
รูปที่ 3.38 Sankaran Venkateswaran, Wolf-Dieter Schubert & Benno Lux W-Scrap Recycling by the Melt Bath Technique [46] 115
รูปที่ 3.39 Scheme for the processing of WC–Co hard metal sludge. [47] 115
รูปที่ 3.40 รูปจำลองการกัดกคัดขนาดชิ้นงานคาร์ไบด์ด้วยระบบเคมีไฟฟ้า 116
รูปที่ 3.41 การแยกสลายด้วยอุปกรณ์ในห้องปฏิบัติการ 117
รูปที่ 3.42 จำลองส่วนต่างๆ ขณะทำการสลายเศษโลหะ [40] 117
รูปที่ 3.43 เตรียมอุปกรณ์สำหรับการล้างโลหะผง (ผ้าฝ้ายและแอลกอฮอกล์) 118
รูปที่ 3.44 การล้างโลหะผงที่ผ่านกระบวนการแยกสลาย 118
รูปที่ 3.45 ปรับปรุงคุณภาพโดยวิธีการบด 119
รูปที่ 3.46 การลดความชื้นในโลหะผงโดยตั้งบนเตาไฟฟ้า 119
รูปที่ 3.47 โลหะผงที่ผ่านกระบวนการรีไซเคิล 119
รูปที่ 3.48 การเตรียมส่วนผสม 120
รูปที่ 3.49 การผสมโลหะประสาน 120
รูปที่ 3.50 เตรียมอุปกรณ์สำหรับการชั่งตวง 121
รูปที่ 3.51 การเตรียมโลหะผงและแม่พิมพ์สำหรับอัดขึ้นรูป 121
รูปที่ 3.52 การอัดขึ้นรูปชิ้นงานแผ่นมีดด้วยเครื่องอัดไฮดรอลิกส์ 122
รูปที่ 3.53 ตัวอย่างชิ้นงานแผ่นมีดหลังการอัดขึ้นรูป 122
รูปที่ 3.54 การอบชิ้นงานแผ่นมีดด้วยเตาสุญญากาศ 123
รูปที่ 3.55 การตกแต่งผิวชิ้นงาน 123

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 3.56 ตัวอย่างชิ้นงานแผ่นมีดที่ผ่านการเจียระไน	123
รูปที่ 3.57 การเตรียมเศษโลหะแผ่นมีด	124
รูปที่ 3.58 ทำความสะอาดด้วยแอลกอฮอลล์	124
ปที่ 3.59 เครื่องแยกสลายเศษซีเมนต์คาร์ไบด์	125
รูปที่ 3.60 การตกตะกอนของโลหะผงจากกระบวนการแยกสลาย	125
รูปที่ 3.61 การไล่ความชื้นด้วยการให้ความร้อนบนเตาไฟฟ้า	126
รูปที่ 3.62 การบรรจุเพื่อตรวจสอบน้ำหนักโลหะผงจากกระบวนการรีไซเคิล	126
รูปที่ 3.63 เศษซีเมนต์คาร์ไบด์	127
รูปที่ 3.64 เครื่องจำลองสำหรับแยกสลายเศษซีเมนต์ทังสเตนคาร์ไบด์	127
รูปที่ 3.65 เครื่องกรองโลหะผงทังสเตนคาร์ไบด์	128
รูปที่ 3.66 เครื่องคัดขนาดโลหะผงทังสเตนคาร์ไบด์	128
รูปที่ 3.67 เครื่องบดโลหะผงทังสเตนคาร์ไบด์	129
รูปที่ 3.68 เครื่องผสมโลหะผงทังสเตนคาร์ไบด์	129
รูปที่ 3.69 เตาอบโลหะผงทังสเตนคาร์ไบด์	130
รูปที่ 3.70 เครื่องบรรจุโลหะผงทังสเตนคาร์ไบด์	130
รูปที่ 3.71 เครื่องอัดขึ้นรูปชิ้นงาน ซีเมนต์ทังสเตนคาร์ไบด์	131
รูปที่ 3.72 ชิ้นงานแผ่นมีดซีเมนต์ทังสเตนคารไบด์	131
รูปที่ 3.73 การออกแบบผังบริเวณโรงงาน ขนาดของโรงงาน 10 x 9 เมตร (Planning Design) [6]	132
รูปที่ 3.74 แผนภูมิกระบวนการผลิตผงทังสเตนคาร์ไบด์ [6]	133
รูปที่ 3.74 แผนภูมิกระบวนการผลิตผงทังสเตนคาร์ไบด์ (ต่อ) [6]	134
รูปที่ 3.74 แผนภูมิกระบวนการผลิตผงทังสเตนคาร์ไบด์ (ต่อ) [6]	135
รูปที่ 3.75 ถังบรรจุสารละลาย (Tank) ขนาด 450 × 560 × 1,040 mm	144
รูปที่ 3.76 ถังพักสารละลาย ขนาด 450 × 450 × 867 mm	145
รูปที่ 3.77 ชิ้นส่วนถังบรรจุชิ้นงาน (Barrel)	145

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 3.78 ชิ้นส่วนผนังด้านซ้ายถังบรรจุชิ้นงาน (Barrel) ขนาด 200x3486x15 mm 146

รูปที่ 3.79 ชิ้นส่วนผนังด้านซ้ายถังบรรจุชิ้นงาน (Barrel) ขนาด 200x3486x15 mm 146

รูปที่ 3.80 ชิ้นส่วนเฟืองขับถังบรรจุชิ้นงาน ขนาดความโต 67 mm. 6 DP จำนวน 14 ฟัน 146

รูปที่ 3.81 ชิ้นส่วนกล่องใส่มอเตอร์ ขนาด 240x353x15 mm 147

รูปที่ 3.82 ชิ้นส่วนเฟืองตามประกบข้างถังบรรจุชิ้นงาน ขนาดความโต 122 mm 6 DP จำนวน 27 ฟัน เจาะรูยึดบูช 25 mm 147

รูปที่ 3.83 ชิ้นส่วนเฟืองทด ขนาดความโต 250 mm 6 DP จำนวน 56 ฟัน 147

รูปที่ 3.84 84 ชิ้นส่วนแผ่นทองแดงยึดถังบรรจุชิ้นงาน ให้กระแสไหลผ่านไปยังขั้ว (+) ขนาด 39x370x10 mm. เจาะรูยึดกับผนังขนาด 8 mm. 148

รูปที่ 3.85 ชิ้นส่วนฝาปิดถังบรรจุชิ้นงาน ขนาด 90x300x20 mm 148

รูปที่ 3.86 ชิ้นส่วนคานยึดถังบรรจุชิ้นงาน ขนาด 90x300x20 mm 148

รูปที่ 3.87 ชิ้นส่วนเสริมความแข็งแรงถังบรรจุชิ้นงาน ขนาด 90x300x20 mm 149

รูปที่ 3.88 ชิ้นส่วนฝาประกบข้างถังบรรจุชิ้นงาน ขนาด 90x300x20 mm 149

รูปที่ 3.89 อุปกรณ์สำหรับจับและยกเครื่องแยกสลาย ขนาด 15x67.5x215 mm. 149

รูปที่ 3.90 ชุดบรรจุชิ้นงานสำหรับกระบวนการแยกสลายเศษซีเมนต์คาร์ไบด์ 150

รูปที่ 3.91 แผนภูมิการกำหนดตัวแปรในการทดลอง 151

รูปที่ 3.92 ขั้นตอนการดำเนินการออกแบบ 152

รูปที่ 3.93 แสดงทิศทางการหมุนของลูกบด [58] 153

รูปที่ 3.94 ชิ้นส่วนจานหมุนรอง (Cover plate) 156

รูปที่ 3.95 ชิ้นส่วนชุดข้อเหวี่ยง (Gear box) 156

รูปที่ 3.96 ชิ้นส่วนฐานยึดหม้อบด (Bowl holder) 157

รูปที่ 3.97 ชิ้นส่วนปรับสมดุลน้ำหนัก (Compensation mass) 157

รูปที่ 3.98 ชิ้นส่วนสะพานขันแน่นหม้อบด 158

รูปที่ 3.99 มอเตอร์ไฟฟ้า EN 600034 158

รูปที่ 3.100 ชิ้นส่วนฐานล่าง (Bottom plate) 159

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 3.101 ชิ้นส่วนโครงฐานเครื่องบด	159
รูปที่ 3.102 ฝาครอบด้านบนพร้อมจอแสดงผล	160
รูปที่ 3.103 ฝาปิดเครื่องบด	160
รูปที่ 3.104 การออกแบบหม้อบดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 97.40 x 85 mm	161
รูปที่ 3.105 การออกแบบฝาหม้อบดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 97.40 x 15 mm	161
รูปที่ 3.106 เตาอบไฟฟ้าควบคุมการเกิดออกไซด์	162
รูปที่ 3.107 ระบบการทำงานของปั๊มสุญญากาศ [70]	163
รูปที่ 3.108 เครื่องเขย่าตะแกรงคัดขนาด รุ่น Minor [60]	165
รูปที่ 3.109 เครื่องเขย่าตะแกรงคัดขนาด รุ่น Octagon Digital 2000 [60]	166
รูปที่ 3.110 เครื่องเขย่าตะแกรงรุ่น Powermatic [60]	166
รูปที่ 3.111 เครื่องคัดแยกอนุภาคแบบ Air Jet [60]	167
รูปที่ 3.112 Sonic Sifter (เครื่องคัดแยกอนุภาคที่ละเอียดมากๆด้วยระบบความเร็วสูง) [60]	167
รูปที่ 3.113 แบบจำลองการคัดแยกขนาดผงโลหะทังสเตนคาร์ไบด์	170
รูปที่ 3.114 การออกแบบแผ่นมีด	171
รูปที่ 3.115 การออกแบบแม่พิมพ์อัดแผ่นมีด	172
รูปที่ 3.116 แสดงขั้นตอนการผลิตแม่พิมพ์	173
รูปที่ 3.117 ส่วนประกอบเครื่องอัดระบบไฮดรอลิกส์ กำลังอัดสูงสุด 300 ตัน	176
รูปที่ 3.118 การติดตั้งถังบรรจุสารละลายและท่อน้ำล้น	179
รูปที่ 3.119 การติดตั้งชุดควบคุมและตรวจวัดอุณหภูมิ	179
รูปที่ 3.120 แสดงส่วนประกอบในการแยกสลายเศษโลหะ	179
รูปที่ 3.121 เศษซีเมนต์ทังสเตนคาร์ไบด์	180
รูปที่ 3.122 การทำความสะอาดด้วยแอลกอฮอลล์	180
รูปที่ 3.123 แสดงสภานะขณะเครื่องกำลังทำการแยกสลาย	180
รูปที่ 3.124 ประกอบเทอร์โมมิเตอร์	181
รูปที่ 3.125 สารละลายพักให้ตกตะกอน	182

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 3.126 ตะกอนโคลนที่ผ่านกระบวนการแยกสลาย	182
รูปที่ 3.127 อุปกรณ์ในการกรองโลหะผง	183
รูปที่ 3.128 การกรองโลหะผง	183
รูปที่ 3.129 การเตรียมลูกบด	184
รูปที่ 3.130 เทตะกอนโคลนทังสเตนลงในหม้อบด	184
รูปที่ 3.131 เครื่องบดรุ่น Pulverisette 6	185
รูปที่ 3.132 การคัดแยกโลหะผงหลังการบด	185
รูปที่ 3.133 แสดงการตกตะกอนของโลหะผง	186
รูปที่ 3.134 ตะกอนโคลนก่อนอบ	186
รูปที่ 3.135 การเตรียมตะกอนโคลนสำหรับอบแห้ง	187
รูปที่ 3.136 การวางถังอบชิ้นงานภายในเตาอบ	187
รูปที่ 3.137 เตาอบขณะทำงาน	188
รูปที่ 3.138โลหะผงหลังอบ	188
รูปที่ 3.139 เตรียมอุปกรณ์ในการคัดขนาด	189
รูปที่ 3.140 การคัดขนาดด้วยตะแกรงสเตนเลสขนาด ≤ 50 μm	189
รูปที่ 3.141 โลหะผงจะกระบวนกรคัดขนาด	190
รูปที่ 3.142 การเตรียมส่วนผสม	190
รูปที่ 3.143 การผสมโลหะผงทังสเตนคาร์ไบด์	191
รูปที่ 3.144 การเติมพาราฟิน (Wax)	191
รูปที่ 3.145 โลหะผงทังสเตนคาร์ไบด์พร้อมสำหรับการอัดขึ้นรูป	192
รูปที่ 3.146 การประกอบแม่พิมพ์ชุด Upper punch	192
รูปที่ 3.147 แสดงการยึดสกรูชุดแม่พิมพ์	193
รูปที่ 3.148 โลหะผงทังสเตนคาร์ไบด์ผสม 10%Co	193
รูปที่ 3.149 แสดงการเตรียมโลหะผงใส่ลงในแม่พิมพ์	194
รูปที่ 3.150 แสดงตำแหน่งอัดชิ้นงาน	194

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 3.151 แสดงแผ่นมีดตัดซีเมนต์คาร์ไบด์หลังการอัดขึ้นรูป 195
รูปที่ 4.1 ถังบรรจุสารละลายขนาด 470x580x15 mm. 197
รูปที่ 4.2 การดัดขึ้นรูปขาตั้งของถังบรรจุสารละลาย 197
รูปที่ 4.3 การประกอบขาตั้งกับตัวถังบรรจุสารละลาย 198
รูปที่ 4.4 ถังบรรจุสารละลายขนาด 443x470x15 mm. 198
รูปที่ 4.5 การเชื่อมข้อต่อเกลียว 199
รูปที่ 4.6 การเชื่อมประกอบชิ้นส่วนรองรับเพลาทองแดงขนาด Ø 25.4 มิลลิเมตร 199
รูปที่ 4.7 การประกอบชิ้นส่วนสำหรับจับยึดฮีตเตอร์และเทอร์โมมิเตอร์ 200
รูปที่ 4.8 การประกอบยูเนี่ยนวาล์วและท่อน้ำล้น 200
รูปที่ 4.9 การประกอบยูเนี่ยนวาล์วของถังบรรจุสารละลายขนาด 443x470x15 มิลลิเมตร 201
รูปที่ 4.10 การแบ่งช่องสำหรับเจาะรูระบายเศษโลหะ และทำร่องสำหรับพับขึ้นรูป 202
รูปที่ 4.11 การเจาะรูผนังถังบรรจุชิ้นงาน (Barrel) 202
รูปที่ 4.12 การดัดขึ้นรูปผนังถังบรรจุชิ้นงาน 203
รูปที่ 4.13 ลักษณะถังบรรจุชิ้นงานหลังการพับตามช่องที่แบ่งไว้ 203
รูปที่ 4.14 การเชื่อมพลาสติกเพิ่มความแข็งแรงตามแนวตะเข็บของรอยพับ 204
รูปที่ 4.15 การปรับแต่งรอยเชื่อมของถังบรรจุชิ้นงาน 204
รูปที่ 4.16 การเชื่อมประกอบฝาปิดถังบรรจุชิ้นงาน (Barrel) 205
รูปที่ 4.17 ชุดเฟืองตรงสำหรับส่งกำลังเพื่อหมุนถังบรรจุชิ้นงาน (Barrel) 205
รูปที่ 4.18 ฝาประกบข้างถังบรรจุชิ้นงานทรงหกเหลี่ยมด้านเท่า 206
รูปที่ 4.19 ชิ้นส่วนสำหรับยึดแน่นถังบรรจุชิ้นงาน (Barrel) 206
รูปที่ 4.20 การเชื่อมประกอบชิ้นส่วนสำหรับยึดแน่นถังหกเหลี่ยม 207
รูปที่ 4.21 การเชื่อมประกอบส่วนสำหรับฝาประกบข้างถังหกเหลี่ยม 207
รูปที่ 4.22 ถังบรรจุชิ้นงานทรงหกเหลี่ยมที่เชื่อมยึดเฟืองพร้อมฝาประกบข้าง 208
รูปที่ 4.23 การเชื่อมประกอบชิ้นส่วนของล็อกปิดฝาถังบรรจุชิ้นงาน 208
รูปที่ 4.24 ถังบรรจุชิ้นงานที่เชื่อมยึดขอบล็อกปิดฝาถัง 209

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.25 ลักษณะการเสริมความแข็งแรงถังบรรจุชิ้นงาน 209

รูปที่ 4.26 การเชื่อมประกบแหวนรองถังติดกับฝาปิดข้างถังบรรจุชิ้นงาน 210

รูปที่ 4.27 ชิ้นส่วนผนังด้านซ้ายประกบฝาปิดข้างถังบรรจุชิ้นงาน 210

รูปที่ 4.28 ชิ้นส่วนผนังด้านขวาประกบเฟืองขับถังบรรจุชิ้นงาน 211

รูปที่ 4.29 เพลายึดผนังถังบรรจุชิ้นงาน 211

รูปที่ 4.30 การประกอบเฟืองขับถังบรรจุชิ้นงาน 212

รูปที่ 4.31 ถังบรรจุชิ้นงาน (Barrel) 212

รูปที่ 4.32 แสดงน้ำหนักสะสมจากการสลายของเศษซีมเมนต์คาร์ไบด์โดยการแยกสลายด้วยแรงดันไฟฟ้า 1.0 V อุณหภูมิ 30 °C ความเข้มข้นสารละลาย 1 N HCl 214

รูปที่ 4.33 แสดงผลวิเคราะห์การกระจายตัวของโลหะผงทังสเตนคาร์ไบด์ที่ผ่านการรีไซเคิลจากเศษแผ่นมีดตัด 215

รูปที่ 4.34 แสดงผล SEM ของโลหะผงทังสเตนคาร์ไบท์ที่ผ่านรีไซเคิลที่กำลังขยาย 3,500 เท่า 215

รูปที่ 4.35 แสดงผล SEM ของโลหะผงทังสเตนคาร์ไบท์ที่ผ่านรีไซเคิลที่กำลังขยาย 7,500 เท่า 216

รูปที่ 3.36 การตรวจสอบ XRD ของโลหะผงทังสเตนคาร์ไบด์ที่ผ่านกระบวนการรีไซเคิล 217

รูปที่ 4.37 แสดงองค์ประกอบของธาตุในโลหะผงที่ผ่านการริไซเคิล 218

รูปที่ 4.38 แสดงการตรวจสอบหาชนิดและปริมาณของธาตุในทังสเตนคาร์ไบด์ (WC) 218

รูปที่ 4.39 ส่วนประกอบชุด Safe Loke 220

รูปที่ 4.40 ชุดต้นกำลัง Motor 221

รูปที่ 4.41แสดงผนังฝาปิดและโครงสร้างภายนอกของเครื่องบด 221

รูปที่ 4.42 ชุดปรับสมดุลน้ำหนัก 222

รูปที่ 4.43 ชุดฐานเครื่องและโครงสร้างภายในของเครื่องบด 223

รูปที่ 4.44 เครื่องบดโลหะผงประกอบเสร็จพร้อมใช้งาน 224

รูปที่ 4.45 ขั้นตอนการผลิตหม้อบดพร้อมฝา 225

รูปที่ 4.46 หม้อบดทังสเตนคาร์ไบด์ด้านบน 226

รูปที่ 4.47 หม้อบดทังสเตนคาร์ไบด์ด้านข้าง 226

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.48 ฝาหม้อบดทังสเตนคาร์ไบด์ 227

รูปที่ 4.49 แสดง SEM 10,000x ของผงทังสเตนคาร์ไบด์ (WC_A) บด 12 ชั่วโมง 227

รูปที่ 4.50 แสดง SEM 30,000x ของผงทังสเตนคาร์ไบด์ (WC_A) บด 12 ชั่วโมง 228

รูปที่ 4.51 แสดง SEM 30,000x ของผงทังสเตนคาร์ไบด์ (WC_A) บด 24 ชั่วโมง 228

รูปที่ 4.52 แสดงกำลังขยาย 30,000x ของผงทังสเตนคาร์ไบด์ (WC_A) บด 36 ชั่วโมง 229

รูปที่ 4.53 การตรวจสอบ XRD โลหะผงทังสเตนคาร์ไบด์ก่อนและหลังการบด 229

รูปที่ 4.54 แสดงผลการตรวจ Particle Size Distribution ที่ผ่านการบด 48 ชั่วโมง 230

รูปที่ 4.55 แสดงลักษณะการประกอบฮีตเตอร์ให้ความร้อนและตัววัดอุณหภูมิ 231

รูปที่ 4.56 แสดงลักษณะภายในเตาอบ 231

รูปที่ 4.57 หม้อแปลงไฟฟ้า 232

รูปที่ 4.58 แสดงลักษณะชุดควบคุมการจ่ายไฟฟ้า (Solid State Contactor) 232

รูปที่ 4.59 ปั๊มดูดอากาศชนิด Mechanical pump 233

รูปที่ 4.60 แสดงลักษณะชุดควบคุมการทำงานและจอแสดงผล 233

รูปที่ 4.61 การตรวจสอบขนาดการกระจายตัวโลหะผงทังสเตนคาร์ไบด์ (WC) หลังบด 6 ชั่วโมง 235

รูปที่ 4.62 การตรวจสอบขนาดการกระจายตัวโลหะผงทังสเตนคาร์ไบด์ (WC) หลังบด 24 ชั่วโมง 235

รูปที่ 4.63 การตรวจสอบขนาดการกระจายตัวโลหะผงทังสเตนคาร์ไบด์ (WC) หลังบด 24 ชั่วโมง 236

รูปที่ 4.64 ลักษณะชุด Lower punch 237

รูปที่ 4.65 แสดงลักษณะชั้นงาน Support plate 238

รูปที่ 4.66 แสดงลักษณะชุด Lower punch ด้านหน้า 238

รูปที่ 4.67 ลักษณะชิ้นงาน Core pin 239

รูปที่ 4.68 แสดงลักษณะชิ้นงาน Upper Punch 240

รูปที่ 4.69 แสดงลักษณะชิ้นงาน Die 241

รูปที่ 4.70 โครงสำหรับเครื่องอัดไฮดรอลิกส์ 242

รูปที่ 4.71 การเตรียมชิ้นงานสำหรับสร้างฐานรองรับกระบอกสูบ (Base Plate) และ
ฐานด้านบน (Top Plate) 243

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.72 การเชื่อมประกอบชิ้นส่วนฐานสำหรับกระบอกไฮดรอลิกส์ 243
รูปที่ 4.73 การคว้านรูปสำหรับประกอบเสา 244
รูปที่ 4.74 ชิ้นส่วนที่ผ่านการคว้านรูประกอบเสา พร้อมปรับผิวหน้าและกลึงรอบตัวแล้ว 244
รูปที่ 4.75 เหล็กแผ่น SS400 สำหรับสร้างชิ้นส่วน ชุดแท่นเลื่อน (Slide Plate) 245
รูปที่ 4.76 ชิ้นส่วนชุดแท่นเลื่อน (Slide plate) 245
รูปที่ 4.77 เหล็กเพลากลมสำหรับขึ้นรูปเสาเครื่องอัด 246
รูปที่ 4.78 เสาเครื่องอัดที่ผ่านการขึ้นรูปแล้ว 246
รูปที่ 4.79 ชิ้นงานปลอกยึดเสาเครื่องอัดไฮดรอลิกส์ 247
รูปที่ 4.80 การกลึงนัต (Nut) สำหรับเครื่องอัดไฮดรอลิกส์ 247
รูปที่ 4.81 ชิ้นส่วนนัต (Nut) สำหรับขันแน่นยึดเสาเครื่องอัดไฮดรอลิกส์ 248
รูปที่ 4.82 ชิ้นส่วนก้านลูกสูบไฮดรอลิกส์ 248
รูปที่ 4.83 ชิ้นส่วนกระบอกไฮดรอลิกส์ก่อนการขึ้นรูป 249
รูปที่ 4.84 ชิ้นส่วนกระบอกไฮดรอลิกส์หลังการขึ้นรูป 249
รูปที่ 4.85 ถังน้ำมันใช้งานแล้วพร้อมอุปกรณ์สำเร็จรูป 250
รูปที่ 4.86 ถังน้ำมันไฮดรอลิกส์ 250
รูปที่ 4.87 โครงสำหรับชุดควบคุมการทำงานเครื่องอัดไฮดรอลิกส์ 251
รูปที่ 4.88 ชุดควบคุมการทำงานเครื่องอัดไฮดรอลิกส์ระหว่างการประกอบ 251
รูปที่ 4.89 ชุดควบคุมการทำงานเครื่องอัดไฮดรอลิกส์พร้อมเกจวัดความดัน 252
รูปที่ 4.90 โครงสำหรับเครื่องอัดไฮดรอลิกส์ 253
รูปที่ 4.91 แสดงการประกอบชิ้นส่วน Base Plateกับโครงเครื่องอัดไฮดรอลิกส์ 253
รูปที่ 4.92 แสดงการประกอบเสาเครื่องอัดไฮดรอลิกส์ 254
รูปที่ 4.93 แสดงการประกอบชุดกระบอกสูบ 254
รูปที่ 4.94 แสดงการประกอบชิ้นส่วน Slide Plate 255
รูปที่ 4.95 แสดงการประกอบชิ้นส่วน Top Plate 255
รูปที่ 4.96 แสดงการประกอบชุดถังน้ำมันเข้ากับเครื่องอัดไฮดรอลิกส์ 256

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.97 แสดงเครื่องอัดไฮดรอลิกส์ 256

รูปที่ 4.98 ชิ้นงานแผ่นมีดซีเมนต์คาร์ไบด์ 257

รูปที่ ก.1 แสดงชิ้นส่วนโครงเครื่องแยกสลายเศษโลหะซีเมนต์คาร์ไบด์ 268

รูปที่ ก.2 แสดงส่วนประกอบถังบรรจุชิ้นงาน (Barrel) พร้อมเฟืองและแผ่นประกบ
ท้าย Barrel 268

รูปที่ ก.3 ชุดเครื่องแยกสลายเศษโลหะซีเมนต์คาร์ไบด์ 269

รูปที่ ข.1 โลหะผงหลังการแยกสลาย กำลังขยาย 3,500 เท่า แยกสลายด้วยปัจจัยแรงดัน
ไฟฟ้า 1.0 V อุณหภูมิ 50 °C สารละลาย HCl ความเข้มข้น 5 N 270

รูปที่ ข.2 โลหะผงหลังการแยกสลาย กำลังขยาย 7,500 เท่า แยกสลายด้วยปัจจัยแรงดัน
ไฟฟ้า 0.2 V อุณหภูมิ 30 °C สารละลาย HCl ความเข้มข้น 3 N 270

รูปที่ ข.3 โลหะผงหลังการแยกสลาย กำลังขยาย 7,500 เท่า แยกสลายด้วยปัจจัยแรงดัน
ไฟฟ้า 1.0 V อุณหภูมิ 50 °C สารละลาย HCl ความเข้มข้น 3 N 271

รูปที่ ข.4 โลหะผงหลังการแยกสลาย กำลังขยาย 10,000 เท่า แยกสลายด้วยปัจจัยแรงดัน
ไฟฟ้า 1.2 V อุณหภูมิ 30 °C สารละลาย HCl ความเข้มข้น 1 N 271

รูปที่ ข.5 โลหะผงหลังการแยกสลาย กำลังขยาย 10,000 เท่า แยกสลายด้วยปัจจัยแรงดัน
ไฟฟ้า 1.0 V อุณหภูมิ 70 °C สารละลาย HCl ความเข้มข้น 7 N 272

รูปที่ ข.6 โลหะผงหลังการบด 12 ชั่วโมง กำลังขยาย 10,000 เท่า แยกสลายด้วยปัจจัย
แรงดันไฟฟ้า 1.0 V อุณหภูมิ 50 °C สารละลาย HCl ความเข้มข้น 1 N 272

รูปที่ ข.7 โลหะผงหลังการบด 12 ชั่วโมง กำลังขยาย 30,000 เท่า แยกสลายด้วยปัจจัย
แรงดันไฟฟ้า 1.0 V อุณหภูมิ 50 °C สารละลาย HCl ความเข้มข้น 1 N 273

รูปที่ ข.8 โลหะผงหลังการบด 24 ชั่วโมง กำลังขยาย 30,000 เท่า แยกสลายด้วยปัจจัย
แรงดันไฟฟ้า 1.0 V อุณหภูมิ 50 °C สารละลาย HCl ความเข้มข้น 1 N 273

รูปที่ ข.9 ผลการตรวจสอบผงโลหะด้วย X-ray Diffractrometer (XRD) ที่แรงดัน
1.0 โวลต์ อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส กรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 7 N 274

รูปที่ ข.10 ผลการตรวจสอบผงโลหะด้วย X-ray Diffractrometer (XRD) ที่แรงดัน
1.4 โวลต์ อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส กรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 1 N 274

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ ข.11 ผลการตรวจสอบผงโลหะด้วย X-ray Diffractrometer (XRD) ที่แรงดัน 1.8 โวลต์ อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส กรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 7 N 275
รูปที่ ข.12 ผลการตรวจสอบผงโลหะด้วย X-ray Diffractrometer (XRD) ที่แรงดัน 2.2 โวลต์ อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส กรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 7 N 275
รูปที่ ข.13 ผลการทดสอบขนาดและการกระจายตัวของลหะผงที่ แรงดัน 1.2 โวลต์ อุณหภูมิ 30 องศาเซลเศียส กรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 1 N 276
รูปที่ ข.14 ผลการตรวจสอบขนาดและการกระจายตัวของโลหะผงที่แรงดัน 0.4 โวลต์ อุณหภูมิ 30 °C กรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 1 N (โลหะผงหลังบด) 276
รูปที่ ข.15 แสดงผลการตรวจสอบขนาดและการกระจายตัวของลหะผงที่ แรงดัน 1.2 โวลต์ อุณหภูมิ 30 °C กรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 1 (โลหะผงหลังบด) 276
รูปที่ ค.1 ตุ้มถ่วงปรับสมดุลน้ำหนัก (Compensation mass) 278
รูปที่ ค.2 จานหมนุหลัก (Cover plate) 278
รูปที่ ค.3 โครงเครื่องบดโลหะผงทังสเตนคาร์ไบด์ 279
รูปที่ ค.4 รูปชิ้นส่วนฝาครอบด้านบนเครื่องบด 279
รูปที่ ค.5 รูปชิ้นส่วนฝาครอบด้านหน้าเครื่องบด 280
รูปที่ ง.1 โครงเตาอบระบบคอวบคุมการเกิดออกไซด์ 281
รูปที่ ง.2 แสดงฮิตเตอร์สำหรับให้ความร้อนอุณภูมิไม่เกินกว่า 250 °C 282
รูปที่ ง.3 ประตูเตาอบ 282
รูปที่ ง.4 โครงเตาอบหลังประกอบแล้ว 283
รูปที่ จ.1 การออกแบบชิ้นส่วนแม่พิมพ์ Upper punch 284
รูปที่ จ.2 การออกแบบชิ้นส่วน Core pin 284
รูปที่ จ.3 การออกแบบชิ้นส่วน Die 285
รูปที่ จ.3 การออกแบบชิ้นส่วน Lower punch 285
รูปที่ ฉ.1 การออกแบบชิ้นส่วน Base plate 286
รูปที่ ฉ.2 การออกแบบชิ้นส่วน Slide plate 287
รูปที่ ฉ.3 การออกแบบชิ้นส่วน Slide plate 287

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 1.1 ปริมาณการ (ตัน) ผลิตซีเมนต์คาร์ไบด์จากเศษซีเมนต์คาร์ไบด์ เฉพาะประเทศอเมริกา ปี 1993 [11] 6

ตารางที่ 1.2 ระยะเวลาโครงการ ประมาณ 1 ปี (ตุลาคม 2553 – กันยายน 2554) 13

ตารางที่ 2.1 ตารางแสดงเกรดของโลหะผงทังสเตนคาร์ไบด์ [49] 22

ตารางที่ 2.2 สมบัติของโลหะผงทังสเตนคาร์ไบด์ของบริษัท เอทีไอแอดีนี [51] 23

ตารางที่ 2.3 สมบัติของโลหะผงทังสเตนคาร์ไบด์ของบริษัท เอทีไอแอดีนี [51] 24

ตารางที่ 2.4 แสดงสมบัติชิ้นงานซีเมนต์คาร์ไบด์ [48] 25

ตารางที่ 2.5 แสดงองค์ประกอบของปัจจัยที่ใช้ในการบดผงโลหะทังสเตนคาร์ไบด์ [49] 51

ตารางที่ 2.6 แสดงชนิดลูกบดและการเลือกวัตถุดิบ [58] 53

ตารางที่ 2.7 ชนิดของวัสดุที่ใช้ทำ Tubular Heater [59] 57

ตารางที่ 2.8 ขนาดมาตรฐานตะแกรงคัดขนาด (Standard sieve sizes) [60] 59

ตารางที่ 2.9 กรรมวิธีการผลิตและคุณสมบัติเหล็กกล้าเครื่องมือ [4] 67

ตารางที่ 3.1 ชนิดและสมบัติของโลหะผงทังสเตนคาร์ไบด์ [61] 97

ตารางที่ 3.2 ชนิดและสมบัติของโลหะผงทังสเตนคาร์ไบด์ [62] 98

ตารางที่ 3.3 ชนิดทังสเตนคาร์ไบด์ที่ผสมธาตุโลหะ Co, Ni, TaC-TiC- NbC, WC [62] 99

ตารางที่ 3.4 สมบัติและการผสมผงทังสเตนคาร์ไบด์กับโคบอลต์ [63] 100

ตารางที่ 3.5 ชนิดและสมบัติของโลหะผงทังสเตนคาร์ไบด์ [63] 101

ตารางที่ 3.6 ส่วนผสมของธาตุอื่นๆ [63] 101

ตารางที่ 3.7 ราคาจำหน่ายทังสเตนคาร์ไบด์และโคบอลต์ [64] 102

ตารางที่ 3.8 ราคาจำหน่ายโคบอลต์ [64] 102

ตารางที่ 3.9 ราคาจำหน่ายโลหะผงทังสเตนคาร์ไบด์ ในตลาดประเทศจีนของ [65] 103

ตารางที่ 3.10 ราคาจำหน่ายโลหะผงทังสเตนคาร์ไบด์ บริษัท Inframat advaneed material LLC [64] 103

ตารางที่ 3.11 แสดงขนาดรูปทรงทางเรขาคณิตแผ่นมีดกลึงปอก [68], [60] 105

ตารางที่ 3.12 Sintering results obtained in compacts with different binder contents and sintered for 173 min at selected temperatures [40] 110

สารบัญ (ต่อ)ตาราง

หน้า

ตารางที่ 3.13 Mechanical properties of WC–10Co powders sintered at 1450 °C [42] 111

ตารางที่ 3.14 Comparison of density, hardness and fracture toughness of samples investigated in the present study. [43] 112

ตารางที่ 3.15 ตารางแสดงคุณสมบัติของหม้อบดชนิดต่างๆ [21] 154

ตารางที่ 3.16 ตารางแสดงสมบัติและการคำนวณน้ำหนักของลูกบด [21] 155

ตารางที่ 3.17 แสดงรายละเอียดขนาดตะแกรงมาตรฐาน ASTM (มิลลิเมตร) [39] 168

ตารางที่ 3.18 แสดงรายละเอียดขนาดตะแกรงมาตรฐาน ASTM (ไมคอน) [39] 169

ตารางที่ 3.19 การตรวจสอบชิ้นงานแผ่นมีดหลังการอัดขึ้นรูป 171

ตารางที่ 4.1 บันทึกผลการทดลองแยกสลายเศษมีด 213

ตารางที่ 4.2 ผลการตรวจสอบหาชนิดและปริมาณของธาตุในทังสเตนคาร์ไบด์ 233

ตารางที่ 4.3 แสดงผลการอัดขึ้นรูปชิ้นงานแผ่นมีดตัด 257

ตารางที่ 4.4 ผลการตรวจสอบสมบัติชิ้นงานแผ่นมีดตัดหลังการอบผนึก 258

ตารางที่ 4.5 ผลการตรวจสอบความแข็งชิ้นงานซีเมนต์คาร์ไบด์ 258

รายการสัญลักษณ์

สัญลักษณ์	คำอธิบาย
W	โลหะทังสเตน
C	โลหะคาร์บอน
Co	โลหะโคบอลต์
WC	โลหะทังสเตนคาร์ไบด์
Cr	โลหะโครเมียม
N	ความเข้มข้นของสารละลาย
V	แรงดันไฟฟ้า (โวลต์)
°C	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)
A	กระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)
HCl	สารละลายไฮโดรคลอริก
HNO_3	สารละลายไนตริก
H_3PO_4	สารละลายฟอสฟอริก
H_2SO_4	สารละลายซัลฟิวริก
g	กรัม
kg	กิโลกรัม
ml	มิลลิกรัม
HRA (Rockwell Hardness A Scale)	ค่าความแข็ง
HV Vickers Hardness	ค่าความแข็ง
g/cm^3	น้ำหนักกรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร
mA	มิลลิแอมป์
mV	มิลลิโวลต์
TiC	โลหะไททาเนียมคาร์ไบด์
TaC	โลหะแทนทาลัมคาร์ไบด์

รายการสัญลักษณ์(ต่อ)

สัญลักษณ์	คำอธิบาย
μm	ไมโครเมตร
kWh	กิโลวัตต์ชั่วโมง
MSt	ผลรวมกำลังสองเฉลี่ยภายในกลุ่ม
R	รัศมีสำคัญของผิวโค้ง
SEM	การส่องกล้องจุลทัศน์แบบสแกน
XRD	การวิเคราะห์ชนิดของธาตุ
Si	ซิลิคอน
Gic	ค่าความแกร่ง
PIM	กระบวนการอัดขึ้นรูปวัสดุ
CIP	การอัดแน่น
P_G	ความหนาแน่นกรีน
P_T	ความหนาแน่นทางทฤษฎี
PM	กรรมวิธีทางโลหะผง