รายงานวิจัย

เรื่อง

การพัฒนากระบวนการผลิตผงโลหะคาร์ไบด์จากเศษทังสเตนคาร์ไบด์กลับคืนมาใช้ใหม่

Development of Process for Recovery Metal Carbide Powder from Cemented Tungsten Carbide Scraps

คณะผู้จัดทำวิจัย

นายสหรัตน์ วงษ์ศรีษะ

นายสิงห์แก้ว ป๊อกเหิ่ง

นายคมพพันธ์ ชมสมุทร

นายประสิทธิ์ แพงเพชร

นางสาวพัทรียา เห็นกลาง

รายงานวิจัยนี้เป็นการวิจัยสาขาวิชาการ กลุ่ม สาขาวิศวกรรมศาสตร์และอุตสาหกรรมวิจัย

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

ปีการศึกษา 2553

รายงานวิจัย

เรื่อง

การพัฒนากระบวนการผลิตผงโลหะคาร์ไบด์จากเศษทังสเตนคาร์ไบด์กลับคืนมาใช้ใหม่

Development of Process for Recovery Metal Carbide Powder from Cemented Tungsten Carbide Scraps

คณะผู้จัดทำวิจัย

นายสหรัตน์	วงษ์ศรีษะ
นายสิงห์แก้ว	ป๊อกเที่ง
นายคมพพันธ์	ชมสมุทร
นายประสิทธิ์	แพงเพชร
นางสาวพัทรียา	เห็นกลาง

รายงานวิจัยนี้เป็นการวิจัยสาขาวิชาการ กลุ่ม สาขาวิศวกรรมศาสตร์และอุตสาหกรรมวิจัย

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

ปีการศึกษา 2553

งานวิจัยเรื่อง การพัฒนากระบวนการผลิตผงโลหะคาร์ไบด์จากเศษทังสเตนคาร์ไบด์กลับคืนมาใช้ใหม่

หัวหน้าโครงการวิจัย ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สหรัตน์ วงษ์ศรีษะ

ผู้ร่วมวิจัย นายสิงห์แก้ว ป๊อกเที่ง

นายคมพพันธ์ ชมสมุทร

นายประสิทธิ์ แพงเพชร

นางสาวพัทรียา เห็นกลาง

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

ปีการศึกษา 2553

บทคัดย่อ

การ Recycling of materials เป็นกระบวนการหมุนเวียนกลับมาใช้ใหม่(recovered) และเป็นแนวทางที่สำคัญต่อการพัฒนาวัสดุเพื่อความยั่งยืน งานวิจัยนี้ศึกษา Recycling tungsten carbides จากเศษโลหะซีเมนต์คาร์ไบด์(cemented carbide scraps) ด้วยการสกัด (Extracted) ให้โลหะประสานละลาย (Dissolved of binder phase) ส่วนโลหะหลัก (substrate) ไม่ละลาย(un-dissolved) แต่คงสถานะและคงขนาดเดิมไว้ได้ในรูปของอนุภาคทังสเตนคาร์ไบด์(WC particles) การวิจัยเริ่มจากการทดลองในห้องปฏิบัติการตามหลักการทางเคมีไฟฟ้า (electrolysis) พบว่าศักย์ไฟฟ้าที่เหมาะสม(Operating potentials) ในช่วง 0.20-1.4 โวลต์ อุณหภูมิของสารละลาย(Temperatures) ในช่วง 30-80^{o}c สารละลายเข้มข้นไฮโดรคลอริก 1N-7N (1N-7N HCl concentrations) รวมถึงการเคลื่อนไหวของสารละลายและ

การเคลื่อนไหวชิ้นงานก็มีอิทธิพลต่อความสามารถในการสลายชิ้นงานเช่นกัน นอกจากนี้ปัจจัยเหล่านั้นยังมีผลต่อความบริสุทธิ์(pure) และลดการเสียหายต่อพื้นผิว(passivation) ของ WC particles จากผลการทดลองข้างต้นนำไปสู่การออกแบบและสร้างเครื่องสลายเศษซีเมนต์คาร์ไบด์ด้วยระบบเคมีไฟฟ้าแบบกึ่งอัตโนมัติ สามารถบรรจุเศษโลหะได้สูงสุด 2.50 กิโลกรัม ความเร็วรอบการหมุนของถังบรรจุชิ้นงานในช่วง 0-25 รอบ/นาที กระแสไฟฟ้า ในช่วง 0-50 แอมแปร์ แรงดันไฟฟ้าในช่วง 0-15 โวลต์ เครื่องจักรที่พัฒนาขึ้นใช้ระบบการไหลเวียนของสารละลายที่ 15 ลิตร/นาที สามารถใช้อุณหภูมิสูงสุด 90°c นอกจากนั้นยังรวมถึงการพัฒนาวิธีการผลิต WC powders ที่สัมพันธ์กัน ขึ้นมาใหม่(Invention process) ประกอบด้วย การกรอง(residues) การทำความสะอาด(washing) การคัดกรอง(leaching) การบด(ball milling) การอบแห้ง(drying) การคัดขนาดผงโลหะ(screening) และการตรวจสอบคุณภาพโลหะผง ผลจากการพัฒนาเครื่องจักรกลเพื่อสลายชิ้นงาน พบว่ามีความสามารถในการผลิตโลหะผงทังสเตนคาร์ไบด์ได้ในช่วง 16-50 กรัม/ชั่วโมง โลหะผงที่ผลิตได้เป็นชนิด Tungsten Carbide (WC powder) ประมาณ 97.49% ซึ่งมีโลหะโคบอลต์ผสมอยู่ด้วยในจำนวนน้อย อย่างไรก็ตามการสลายชิ้นงานซีเมนต์คาร์ไบด์ด้วยเครื่องจักรดังกล่าวสามารถเลือกใช้ปัจจัยที่ดีที่สุดในการผลิตโลหะผงทังสเตนคาร์ไบด์ (WC) ให้มีความบริสุทธิ์(purifies) เพิ่มขึ้นกว่า 99 % สามารถบดให้โลหะมีขนาดและการกระจาย (Particle sized distribution) ที่ดีที่สุดอยู่ในช่วง 0.30-20.00 μm จากนั้นเมื่อผสมผงโลหะโคบอลต์ 15% (WC-15%Co) และผลิตเป็นชิ้นงานซีเมนต์คาร์ไบด์ ชนิดแผ่นมีด (insert tools) รูปทรงสี่เหลี่ยมมาตารฐาน SNMG 120408 ปรากฏว่าแผ่มมีด(insert tools) มีความแข็งไม่น้อยกว่า 1,430 HV ความหนาแน่นไม่ต่ำกว่า 14.10 g/cm^3 และหากต้องการผลิตผงโลหะทังสเตนคาร์ไบด์ด้วยเทคโนโลยีการผลิต ซึ่งประกอบด้วย เครื่องสลายชิ้นงานและเครื่องจักรกลการผลิตที่สัมพันธ์กัน ให้สามารถผลิตโลหะผงทังสเตนคาร์ไบด์บริสุทธิ์ พบว่ามูลค่าการลงทุนด้านเทคโนโลยีการผลิตที่พัฒนาขึ้นมาใหม่ ใช้ต้นทุนไม่ต่ำกว่า 9,481,888 บาท

คำสำคัญ (keywords) Cement carbide scrap, Recycling, Tungsten carbide powder, Recovered

Researcher title **Development of Process for Recovery Metal Carbide Powder from Cemented Tungsten Carbide Scraps**

Researcher by

Asst.Prof Saharat Wongsisa

Mr. Singkaew Pokterng

Mr. Kompun Chomsamut

Mr. Prasit Pangpech

Mis. Pattareeya Heankrang

Faculty of Engineering

Rajamangala University of Technology Phra nakon

Abstracts

The recycling of materials is the recovered process and the important approach for sustainable development. This research is to study recycling tungsten carbides from cemented carbide scraps by extracting the dissolved of binder phase, and to study the un-dissolved substrate which stayed condition and size in WC particles. The experiment of this research starts in laboratory with electrolysis, is found that the appropriate operating potential is 0.20-1.40 volts, at 30-80 ^{o}c, treated in 1N-7N HCl concentrations aqueous solution as well as the movement of solution and specimens had an effect on capacity of dissolution. Additionally, these factors are affected to purity and passivation of WC particles. According to the above experiment, it leads to design and create the semi-automatic cemented dissolution machine with electrolysis. This machine can contain the scraps up to 2.5 kilograms, in rev 0-25 rpm (revolutions per minute), at electric current 0-50 ampere, in electric voltage 0-15 volts. Its flowing process can be 15 lpm (litre per

minute) and temperature is up to 90 ^{o}c. Furthermore, there are the relative WC power invention processes included residues, washing, leaching, ball milling, drying, screening, and quality examination. The result of developed machine is capacity of tungsten carbide production is in the range 16-50 gram/hour, the obtained powder is 97.49% of tungsten carbide (WC powder), which contained a few amount of cobalt. However, the dissolution of cemented carbides with this machine can be selected the optimized factors to produce tungsten carbide (WC) to purify more than 99%, ball milled them in the most suitable size and particle sized distribution between 0.30-20.00 µm. Afterwards, combining cobalt 15% (WC-15%Co) and producing to cemented carbides, insert tools, rectangle as SNMG standard 120408, it appears that insert tools has a hardness not less than 1,430 HV, density not less than 14.10 g/cm^{3}. In the other hands, the production of tungsten carbides with advanced technology of dissolution machine and manufacturing machine to produce purely tungsten carbides powder has been required an investment charge of new research and development more than 9,481,888 baht.

Key word: Cement carbide scrap, Recovering, Tungsten carbide powder, Recovered

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้สำเร็จได้ด้วยการได้รับความร่วมมือและสนับสนุนจากบุคคลต่างๆประกอบด้วย ผู้บริหารมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร ที่สนับสนุนทุนวิจัย ผู้บริหารคณะวิศวกรรมศาสตร์ ที่อนุญาตให้ผู้วิจัย ใช้เวลาในการศึกษา ทดลอง ทั้งในและนอกสถานที่ ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมโลหะการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ขอบคุณเจ้าหน้าที่ ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ ในส่วนห้องปฏิบัติการทดสอบโลหะ การวิเคราะห์โลหะด้วย XRD , Particle distribution ขอบคุณ สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย(วว.) โดยเฉพาะเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการทดสอบความแข็ง และ SEM ขอบคุณบริษัท เจทีเอช อนุเคราะห์สถานที่ในการอัดขึ้นรูปและทดสอบความหนาแน่น รวมถึงผู้ที่เกี่ยวในการสนับสนุนการวิจัย จนกระทั่งงานวิจัยนี้ประสบผลสำเร็จด้วยดีตามวัตถุประสงค์ สามารถสร้างเทคโนโลยีและพัฒนากระบวนการผลิตใหม่เพื่อผลิตโลหะทังสเตนคาร์ไบด์ (WC powder) ซึ่งเป็นผลงานวิจัยชิ้นแรกของประเทศไทย ขอบคุณบุคคลที่มิได้กล่าวนาม ไว้ ณ ที่นี้ด้วย ซึ่งส่งเสริมให้งานวิจัยนี้สำเร็จด้วยดี

ผศ.สหรัตน์ วงษ์ศรียะ

หัวหน้าโครงการ

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ

กิตติกรรมประกาศ

สารบัญรูปภาพ

สารบัญตาราง

สัญลักษณ์

บทที่ 1 บทนำ

1.1 ความสำคัญ และที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย 1

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย 6

1.3 ขอบเขตของการวิจัย 6

1.4 ทฤษฎี สมมุติฐาน (ถ้ามี) และกรอบแนวความคิดของโครงการวิจัย 7

1.5 วิธีดำเนินการวิจัย และสถานที่ทำการทดลอง/เก็บข้อมูล 10

1.6 สถานที่ทดลองและเก็บข้อมูล 12

1.7 ระยะเวลาการทำวิจัย 14

1.8 อุปกรณ์การวิจัย อุปกรณ์การวิจัยที่จำเป็นต้องใช้และมีพร้อมได้แก่ 14

บทที่ 2 แนวคิดและทฤษฎีที่สำคัญ

2.1 บทนำ 16

2.2 ชนิดของโลหะทังสเตนคาร์ไบด์ในอุตสาหกรรม 21

2.3 กระบวนการสลายเศษซีเมนต์ทังสเตนคาร์ไบด์ 22

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.4 ระบบส่งกำลัง	33
2.5 วัสดุและโลหะที่มีคุณสมบัติทนความร้อนและไม่เกิดการกัดกร่อนจากกรดไฮโดรคลอริก	48
2.6 อุปกรณ์การเพิ่มความร้อนในสารละลายหรือของเหลว	56
2.7 การตรวจวัดความร้อน (Thermal Sensors)	60
2.8 เทอร์โมสตัท (Thermostat)	63
2.9 การบดผงโลหะ	65
2.10 ทฤษฎีการขึ้นรูปและการอัดแน่น (Shaping and Compaction)	66
2.11 การอบผนึก (Sintering)	75
2.12 ทฤษฎีเกี่ยวกับการศึกษากระบวนการผลิต	85
2.13 ทฤษฎีเกี่ยวกับเศรษฐศาสตร์วิศวกรรม	91
บทที่ 3 ขั้นตอนการดำเนินการ	
3.1 ศึกษากระบวนการผลิตผงโลหะ	107
3.2 การออกแบบและสร้างเครื่องแยกสลายเศษโลหะ	112
3.3 การศึกษาประสิทธิภาพการผลิต	144
3.4 การเตรียมผลิตชิ้นงานจากโลหะผงทังสเตนคาร์ไบด์	165
3.5 การศึกษาต้นทุนเชิงเศรษฐศาสตร์ในการผลิตโลหะผง	178
3.6 การวิเคราะห์ผลการทดลอง	189
3.7 สรุปวิธีผลการทดลอง	189
บทที่ 4 ผลการศึกษากระบวนการผลิต	
4.1 บทนำ	191
4.2 ผลการศึกษาคุณสมบัติเศษวัสดุ	191
4.3 ผลการศึกษากลไกการย่อยสลาย	193
4.4 การทดลองแยกสลายเศษซีเมนต์ทังสเตนคาร์ไบด์ด้วยอุปกรณ์การทดลอง	196

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.5 ผลการศึกษาการแยกผงโลหะออกจากสารละลาย 199

4.6 ผลการศึกษาวิธีการบดผงโลหะ 201

4.7 ผลการศึกษาเพื่อกำหนดวิธีการทดลอง 203

4.8 ตารางการบันทึกและรวบรวมผลการทดลอง 204

4.9 วิเคราะห์ผลการทดลอง 210

4.10 ผลการทดลองการแยกสลายทังสตนคาร์ไบด์จากเศษซีเมนต์ทังสเตนคาร์ไบด์ 212

4.11 สรุปวิเคราะห์ผลการศึกษากระบวนการผลิตโลหะผงทังสเตนคาร์ไบด์ 223

บทที่ 5 การสร้างเครื่องและการทดสอบประสิทธิภาพ

5.1 บทนำ 224

5.2 การดำเนินการสร้างเครื่องกัดก่อนโลหะ 224

5.3 การทดลองวัดประสิทธิภาพเครื่อง 244

5.4 รวบรวมข้อมูลการทดลอง 246

5.5 วิเคราะห์ผลการทดลอง 247

5.6 สรุปผลการทดสอบประสิทธิภาพเครื่องย่อยเศษซีเมนต์ทังสเตนคาร์ไบด์ 253

บทที่ 6 การย่อยเศษโลหะด้วยเครื่องกัดก่อน

6.1 บทนำ 254

6.2 ผลการปฏิบัติงานและขั้นตอนการทำงาน 254

6.3 ตารางบันทึกผลของการย่อยลายภายใต้เงื่อนไขที่ต่างกัน 260

6.4 ผลการทดลองกระบวนการย่อยสลายโลหะผงจากซีเมนต์ทังสเตนคาร์ไบด์ 265

6.5 ผลการทดสอบโลหะผงทังสเตนคาร์ไบด์ที่ได้จากกระบวนการการทดลอง 268

6.6 ผลทดสอบโลหะผงทังสเตนคาร์ไบด์ด้วยเทคนิค X – Ray Diffract meter (XRD) 271

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

6.7 ผลการทดสอบขนาดและการกระจายตัวของโลหะผง 272

6.8 สรุปผลการทดลองใช้เครื่องย่อยสลายเศษโลหะแผ่นมีด 275

บทที่ 7 การศึกษากระบวนการอัดขึ้นรูปชิ้นงานจากโลหะผง

7.1 บทนำ 277

7.2 ขั้นตอนการผลิตชิ้นงานจากโลหะผงทังสเตนคาร์ไบด์ 278

7.3 ขั้นตอนการเตรียมผสมโลหะผงทังสเตนคาร์ไบด์จากกระบวนการ Recycle 278

7.4 การทดสอบคุณสมบัติโลหะผงทังสเตนคาร์ไบด์ 281

7.5 กรรมวิธีการอัดขึ้นรูปโลหะผง 284

7.6 ผลการทดสอบความหนาแน่นของผลิตภัณฑ์ ชิ้นงาน ก่อน-หลัง การอบผนึก 288

7.7 ผลการตรวจลักษณะโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่อัดขึ้นรูปด้วยโลหะผง ทังสเตนคาร์ไบด์ Recycle 290

7.8 สรุปวิเคราะห์ผลการผลิตชิ้นงานจากโลหะผงทังสเตนคาร์ไบด์ Recycle ด้วย วิธีการอัดขึ้นรูป 292

บทที่ 8 เทคโนโลยีการผลิตชิ้นงาน ซีเมนต์ทังสเตนคาร์ไบด์

8.1 กระบวนการผลิตชิ้นงาน ซีเมนต์ทังสเตนคาร์ไบด์ 293

8.2 ขั้นตอนการผลิตชิ้นงานซีเมนต์ทังสเตนคาร์ไบด์ 294

8.3 สรุปค่าใช้จ่ายด้านแรงงานและเครื่องจักร 298

8.4 การวางผังโรงงาน 300

8.5 การวิเคราะห์ต้นทุนในการดำเนินงาน 303

8.6 สรุปวิเคราะห์ต้นทุนเชิงเศรษฐศาสตร์ 307

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

บทที่ 9 สรุปผลและข้อเสนอแนะ

9.1 สรุปผลการพัฒนากระบวนการผลิตผงโลหะคาร์ไบด์จากเศษทังสเตนคาร์ไบด์กลับคืนมาใช้ใหม่ 308

9.2 ข้อเสนอแนะ 310

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1 การทดลองของกระบวนการรีไซเคิลทังสเตนจากเศษซีเมนต์คาร์ไบด์โดยใช้กระแสไฟฟ้าและสารละลายในการแตกตัว 25

ตารางที่ 2.2 สมบัติของซีเมนต์คาร์ไบด์แต่ละเกรด(Properties of representative grades of cemented carbide) 29

ตารางที่ 2.3 สมบัติของโลหะทังสเตนคาร์ไบด์วัสดุโลหะประสาน(Properties of refractory metal carbides and binder materials) 29

ตารางที่ 2.4 มอเตอร์ที่มีเกียร์ลดรอบขนาดต่างๆ ที่ผลิตขึ้นในท้องตลาด 37

ตารางที่ 2.5 ชื่อเรียกทางสากลของสเตนเลส 56

ตารางที่ 2.6 การเปรียบเทียบทางเลือกของการขึ้นรูปและการอัดแน่น 75

ตารางที่ 2.7 เวลามาตรฐานการผลิตของแต่ละสถานี 90

ตารางที่ 3.1 ผลการทดสอบความแข็งของแผ่นมีดซีเมนต์ทังสเตนคาร์ไบด์ (Insert) (HRA) 107

ตารางที่ 3.2 การทดสอบส่วนผสมทางเคมีของชิ้นส่วนซีเมนต์ทังสเตนคาร์ไบด์ก่อนการอบให้ความร้อน 108

ตารางที่ 3.3 แสดงสมบัติของทังสเตน 108

ตารางที่ 3.4 แสดงสมบัติของโคบอลต์ (Cobalt) 109

ตารางที่ 3.5 สมบัติของกรดไฮโดรคลอริก 110

ตารางที่ 3.6 เปรียบเทียบความสามารถของสารละลายที่ใช้ในการกัดกร่อน 113

ตารางที่ 3.7 บันทึกผลการทดลองที่แรงดันไฟฟ้า 0.2 V อุณหภูมิ 30 ^{0}C 159

ตารางที่ 3.8 บันทึกผลการทดลองที่แรงดันไฟฟ้า 0.2 V อุณหภูมิ 30 ^{0}C 159

ตารางที่ 3.9 บันทึกผลการทดลองที่แรงดันฟ้า 0.2 V อุณหภูมิ 30 ^{0}C 160

ตารางที่ 3.10 บันทึกผลการทดลองที่แรงดันไฟฟ้า 0.6 V อุณหภูมิ 30 ^{0}C 160

สารบัญตาราง (ต่อ)

หน้า

ตารางที่ 3.11 บันทึกผลการทดลองที่แรงดันไฟฟ้า 0.6 V อุณหภูมิ 30 ^{0}C 161

ตารางที่ 3.12 บันทึกผลการทดลองที่แรงดันฟ้า 0.6 V อุณหภูมิ 30 ^{0}C 161

ตารางที่ 3.13 บันทึกผลการทดลองที่แรงดันไฟฟ้า 1.0 V อุณหภูมิ 50 ^{0}C 162

ตารางที่ 3.14 บันทึกผลการทดลองที่แรงดันไฟฟ้า 1.0 V อุณหภูมิ 50 ^{0}C 162

ตารางที่ 3.15 บันทึกผลการทดลองที่แรงดันไฟฟ้า 1.0 V อุณหภูมิ 50 ^{0}C 163

ตารางที่ 3.16 บันทึกผลการทดลองที่แรงดันไฟฟ้า 1.0 V อุณหภูมิ 70 ^{0}C 163

ตารางที่ 3.17 บันทึกผลการทดลองที่แรงดันไฟฟ้า 1.0 V อุณหภูมิ 70 ^{0}C 164

ตารางที่ 3.18 บันทึกผลการทดลองที่แรงดันไฟฟ้า 1.0 V อุณหภูมิ 70 ^{0}C 164

ตารางที่ 3.19 ค่าความแข็งของชิ้นงานที่ใช้แล้วนำมาบดเป็นผงคาร์ไบด์ 169

ตารางที่ 3.20 ผลทดสอบความหนาแน่นของผลิตภัณฑ์ซีเมนต์ทังสเตนคาร์ไบด์ชิ้นงาน
ทำการผลิต (ก่อนกระบวนการอบผนึก) 175

ตารางที่ 3.21 ผลการทดสอบความแข็งของชิ้นงานซีเมนต์ทังสเตนคาร์ไบด์ชิ้นงาน
ทำการผลิต (หลังกระบวนการอบผนึก) 178

ตารางที่ 3.22 แสดงค่าใช้จ่ายค่าแรงงาน 180

ตารางที่ 3.23 แสดงการประเมินค่าใช้จ่ายในการจัดซื้อเครื่องจักร) 180

ตารางที่ 3.24 เครื่องจักรที่ใช้ในกระบวนการผลิต 181

ตารางที่ 3.24 เครื่องจักรที่ใช้ในกระบวนการผลิต (ต่อ) 182

ตารางที่ 3.24 เครื่องจักรที่ใช้ในกระบวนการผลิต (ต่อ) 183

ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบความแข็งของเศษแผ่นมีดทังสเตนคาร์ไบด์ (Insert) (HRA) 192

ตารางที่ 4.2 ผลการศึกษาคุณศึกษาสมบัติของ ผงทังสเตนคาร์ไบด์ ของบริษัท ATI All dyne 192

ตารางที่ 4.3 ผลการศึกษาคุณสมบัติของ ผงทังสเตนคาร์ไบด์ ของบริษัท CB Carbide 193

สารบัญตาราง (ต่อ)

หน้า

ตารางที่ 4.4 แสดงผลการศึกษาชนิดของขั้วไฟฟ้ากับปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น 194

ตารางที่ 4.5 ผลการศึกษาคุณสมบัติของกรดไฮโดรคลอริก 195

ตารางที่ 4.6 ความสามารถในสารละลายของวัสดุแต่ละชนิด 195

ตารางที่ 4.6 ความสามารถในสารละลายของวัสดุแต่ละชนิด (ต่อ) 196

ตารางที่ 4.7 บันทึกผลการทดลอง: กรดไฮโดรคลอริก: T (50°C) : แรงดัน 0.2 โวลต์ วันที่ 13-14 กรกฎาคม 2553 204

ตารางที่ 4.7 บันทึกผลการทดลอง : กรดไฮโดรคลอริก: T (50°C): แรงดัน 0.2 โวลต์ วันที่ 13-14 กรกฎาคม 2553 (ต่อ) 205

ตารางที่ 4.7 บันทึกผลการทดลอง: กรดไฮโดรคลอริก: T (50°C): แรงดัน 0.2โวลต์ วันที่ 14-15 กรกฎาคม 2553 (ต่อ) 206

ตารางที่ 4.7 บันทึกผลการทดลอง: กรดไฮโดรคลอริก: T (50°C): แรงดัน 0.2 โวลต์ วันที่ 14-15 กรกฎาคม 2553 (ต่อ) 207

ตารางที่ 4.7 บันทึกผลการทดลอง: กรดไฮโดรคลอริก: T (50°C): แรงดัน 0.2 โวลต์ วันที่ 14-15 กรกฎาคม 2553 (ต่อ) 208

ตารางที่ 4.7 บันทึกผลการทดลอง: กรดไฮโดรคลอริก: T (50°C): แรงดัน 0.2 โวลต์ วันที่ 14-15 กรกฎาคม 2553 (ต่อ) 209

ตารางที่ 4.8 ผลการทดสอบขนาดและการกระจายตัวของผงโลหะของตัวอย่าง 1 A 221

ตารางที่ 5.1 ขั้นตอนการสร้างถังบรรจุสารละลาย 224

ตารางที่ 5.1 ขั้นตอนการสร้างถังบรรจุสารละลาย (ต่อ) 225

ตารางที่ 5.1 ขั้นตอนการสร้างถังบรรจุสารละลาย (ต่อ) 226

ตารางที่ 5.1 ขั้นตอนการสร้างถังบรรจุสารละลาย (ต่อ) 227

สารบัญตาราง (ต่อ)

หน้า

ตารางที่ 5.1 ขั้นตอนการสร้างถังบรรจุสารละลาย (ต่อ 228

ตารางที่ 5.1 ขั้นตอนการสร้างถังบรรจุสารละลาย (ต่อ) 229

ตารางที่ 5.1 ขั้นตอนการสร้างถังบรรจุสารละลาย (ต่อ) 230

ตารางที่ 5.2 ขั้นตอนการสร้างถังพักสารละลาย (ต่อ) 231

ตารางที่ 5.2 ขั้นตอนการสร้างถังพักสารละลาย (ต่อ) 232

ตารางที่ 5.2 ขั้นตอนการสร้างถังพักสารละลาย (ต่อ) 233

ตารางที่ 5.3 ขั้นตอนการสร้างถังบรรจุชิ้นงาน (Barrel) 234

ตารางที่ 5.3 ขั้นตอนการสร้างถังบรรจุชิ้นงาน (Barrel) (ต่อ) 235

ตารางที่ 5.3 ขั้นตอนการสร้างถังบรรจุชิ้นงาน (Barrel) (ต่อ) 236

ตารางที่ 5.3 ขั้นตอนการสร้างถังบรรจุชิ้นงาน (Barrel) (ต่อ) 237

ตารางที่ 5.3 ขั้นตอนการสร้างถังบรรจุชิ้นงาน (Barrel) (ต่อ) 238

ตารางที่ 5.3 ขั้นตอนการสร้างถังบรรจุชิ้นงาน (Barrel) (ต่อ) 239

ตารางที่ 5.3 ขั้นตอนการสร้างถังบรรจุชิ้นงาน (Barrel) (ต่อ) 249

ตารางที่ 5.3 ขั้นตอนการสร้างถังบรรจุชิ้นงาน (Barrel) (ต่อ) 241

ตารางที่ 5.3 ขั้นตอนการสร้างถังบรรจุชิ้นงาน (Barrel) (ต่อ) 242

ตารางที่ 5.3 ขั้นตอนการสร้างถังบรรจุชิ้นงาน (Barrel) (ต่อ) 243

ตารางที่ 5.4 ตัวอย่างตารางบันทึกผลการทดลอง : กรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 3 N 247

ตารางที่ 5.5 สรุปผลการเปรียบเทียบน้ำหนักที่ลดลงแต่ละแรงดันไฟฟ้า 249

ตารางที่ 5.6 ตารางผลการตรวจสอบผงโลหะที่แรงดันไฟฟ้า 1.0 V. T 50 □C กรด HCl 3N 250

ตารางที่ 5.7 สรุปผลการตรวจสอบผงโลหะที่แรงดันไฟฟ้า 3.0 V. T 50 □C กรด HCl 3N 251

สารบัญตาราง (ต่อ)

หน้า

ตารางที่ 5.8 สรุปผลการตรวจสอบผงโลหะผ่านการกรองที่แรงดันไฟฟ้า 6.0 V. T 50 □C กรดHCl 3N 252
ตารางที่ 6.1 บันทึกผลการทดลอง: กรดไฮโดรคลอริก 1 N แรงดันไฟฟ้า 0.2V 260
ตารางที่ 6.2 บันทึกผลการทดลอง: กรดไฮโดรคลอริก 1 N แรงดันไฟฟ้า 0.4V 261
ตารางที่ 6.3 บันทึกผลการทดลอง: กรดไฮโดรคลอริก 1 N แรงดันไฟฟ้า 0.6 V 262
ตารางที่ 6.4 บันทึกผลการทดลอง: กรดไฮโดรคลอริก 1 N แรงดันไฟฟ้า 0.8V 263
ตารางที่ 6.5 บันทึกผลการทดลอง: กรดไฮโดรคลอริก 1 N แรงดันไฟฟ้า 1.0V 264
ตารางที่ 6.6 ผลการทดลองภายใต้ปัจจัยอุณหภูมิ 30 ˚C 265
ตารางที่ 6.7 ผลการทดลองภายใต้ปัจจัยการใช้แรงดันไฟฟ้า 1.0V 266
ตารางที่ 6.8 ผลวิเคราะห์เพื่อศึกษาองค์ประกอบของธาตุอื่นในโลหะผงทังสเตนคาร์ไบด์ที่ได้จากกระบวนการการทดลอง 271
ตารางที่ 6.9 การวิเคราะห์ขนาดและการกระจายของอนุภาคโลหะผงทังสเตนคาร์ไบด์แยกสลายภายใต้ปัจจัย แรงดัน 0.2 และ 0.6 V, อุณหภูมิ 30˚C, สารละลายไฮโดรคลอริก ความเข้มข้น 3, 5 และ 7 N 272
ตารางที่ 6.10 การวิเคราะห์ขนาดและการกระจายของอนุภาคโลหะผงทังสเตนคาร์ไบด์การแยกสลายภายใต้ปัจจัย แรงดัน 1.0 V, อุณหภูมิ 50˚C, และ 70 ˚C สารละลายไฮโดรคลอริก ความเข้มข้น 3, 5, และ 7 N 273
ตารางที่ 7.1 ค่าความแข็งของชิ้นงานที่ใช้แล้วนำมาบดเป็นผงคาร์ไบด์ 281
ตารางที่ 7.2 แสดงเกรดของผงคาร์ไบด์และค่าความแข็งหลังการอบผนึก 284
ตารางที่ 7.3 การสอบทดสอบความหนาแน่นของผลิตภัณฑ์ซีเมนต์ทังสเตนคาร์ไบด์ (ก่อนการอบผนึก) 288

สารบัญตาราง (ต่อ)

หน้า

ตารางที่ 7.4 การทดสอบความหนาแน่นของผลิตภัณฑ์ซีเมนต์ทังสเตนคาร์ไบด์ (หลังการอบผนึก) 288
ตารางที่ 7.5 ผลการการตรวจสอบขนาดชิ้นงานแผ่นมีดซีเมนต์ทังสเตนคาร์ไบด์หลังการอัดขึ้นรูปก่อนทำการอบผนึก 289
ตารางที่ 7.6 ผลการตรวจสอบขนาดชิ้นงานแผ่นมีดซเมนต์ทังสเตนคาร์ไบด์หลังการอัดขึ้นรูปที่ผ่านการอบผนึก 289
ตารางที่ 7.7 ผลการทดลองความแข็งของผลิตภัณฑ์ซีเมนต์ทังสเตนคาร์ไบด์ (หลังกระบวนการอบผนึก) 290
ตารางที่ 7.8 ผลการทดสอบความแข็งของชิ้นงานหลังการอบ ส่วนผสม Co 5,6,9,15 % (นำเข้า) 290
ตารางที่ 7.9 ผลการทดสอบความแข็งของชิ้นงานหลังการอบส่วนผสม Co 3-9% (Recycle) 291
ตารางที่ 8.1 แสดงค่าใช้จ่ายค่าแรงงาน 298
ตารางที่ 8.2 แสดงการประเมินค่าใช้จ่ายในการจัดซื้อเครื่องจักรสำหรับห้องฏิบัติการ 299
ตารางที่ 8.3 เวลามาตรฐานการผลิตของแต่ละสถานี 302
ตารางที่ 8.4 การประเมินค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานต่อเดือน 303
ตารางที่ 8.5 แสดงราคาขายของโลหะผงทังสเตนคาร์ไบด์ (ไม่รวม vat 7%) 304
ตารางที่ 8.6 แสดงต้นทุนการผลิต 305
ตารางที่ ก. 1 การทดลองย่อยสลายเศษซีเมนต์ทังสเตนคาร์ไบด์ด้วยกรดไฮโดรคลอริก (HCl) 1N แรงดัน 1.2 v ที่อุณหภูมิห้อง 316
ตารางที่ ก. 2 การทดลองย่อยสลายเศษซีเมนต์ทังสเตนคาร์ไบด์ด้วยกรดไฮโดรคลอริก (HCl) 1 N แรงดัน 1.0 V ที่อุณหภูมิห้อง 317

สารบัญตาราง (ต่อ)

หน้า

ตารางที่ ก. 3 การทดลองย่อยสลายเศษซีเมนต์ทังสเตนคาร์ไบด์ด้วยกรดไฮโดรคลอริก (HCl) 1 N แรงดัน 0.8 V ที่อุณหภูมิห้อง 318

ตารางที่ ก. 4 การทดลองย่อยสลายเศษซีเมนต์ทังสเตนคาร์ไบด์ด้วยกรดไฮโดรคลอริก (HCl) 1N แรงดัน 0.6 V ที่อุณหภูมิห้อง 319

ตารางที่ ก. 5 การทดลองย่อยสลายเศษซีเมนต์ทังสเตนคาร์ไบด์ด้วยกรดไฮโดรคลอริก (HCl) 1 N แรงดัน 0.4 V ที่อุณหภูมิห้อง 320

ตารางที่ ก. 6 การทดลองย่อยสลายเศษซีเมนต์ทังสเตนคาร์ไบด์ด้วยกรดไฮโดรคลอริก (HCl) 1 N แรงดัน 0.2 V ที่อุณหภูมิห้อง 321

ตารางที่ ก. 7 การทดลองย่อยสลายเศษซีเมนต์ทังสเตนคาร์ไบด์ด้วยกรดไฮโดรคลอริก 3 N แรงดัน 0.2 V ที่อุณหภูมิห้อง 322

ตารางที่ ก. 8 การทดลองย่อยสลายเศษซีเมนต์ทังสเตนคาร์ไบด์ด้วยกรดไฮโดรคลอริก 5 N แรงดัน 0.2 V ที่อุณหภูมิห้อง 323

ตารางที่ ก. 9 การทดลองย่อยสลายเศษซีเมนต์ทังสเตนคาร์ไบด์ด้วยกรดไฮโดรคลอริก 7 N แรงดัน 0.2 V ที่อุณหภูมิห้อง 324

ตารางที่ ก. 10 การทดลองย่อยสลายเศษซีเมนต์ทังสเตนคาร์ไบด์ด้วยกรดไฮโดรคลอริก 3N แรงดัน 0.6 V ที่อุณหภูมิห้อง 325

ตารางที่ ก. 11 การทดลองย่อยสลายเศษซีเมนต์ทังสเตนคาร์ไบด์ด้วยกรดไฮโดรคลอริก 5 N แรงดัน 0.6 V ที่อุณหภูมิห้อง 326

ตารางที่ ก. 12 การทดลองย่อยสลายเศษซีเมนต์ทังสเตนคาร์ไบด์ด้วยกรดไฮโดรคลอริก 7 N แรงดัน 0.6 V ที่อุณหภูมิห้อง 327

สารบัญตาราง (ต่อ)

หน้า

ตารางที่ ก. 13 การทดลองย่อยสลายเศษซีเมนต์ทังสเตนคาร์ไบด์ด้วยกรดไฮโดรคลอริก 3 N แรงดัน 1.0 v ที่อุณหภูมิห้อง 328
ตารางที่ ก. 14 การทดลองย่อยสลายเศษซีเมนต์ทังสเตนคาร์ไบด์ด้วยกรดไฮโดรคลอริก 5 N แรงดัน 1.0 v ที่อุณหภูมิห้อง 329
ตารางที่ ก. 15 การทดลองย่อยสลายเศษซีเมนต์ทังสเตนคาร์ไบด์ด้วยกรดไฮโดรคลอริก 7 N แรงดัน 1.0 v ที่อุณหภูมิห้อง 330
ตารางที่ ก. 16 การทดลองย่อยสลายเศษซีเมนต์ทังสเตนคาร์ไบด์ด้วยกรดไฮโดรคลอริก 1 N แรงดัน 1.0 v ที่อุณหภูมิ 50 °C 331
ตารางที่ ก. 17 การทดลองย่อยสลายเศษซีเมนต์ทังสเตนคาร์ไบด์ด้วยกรดไฮโดรคลอริก 1 N แรงดัน 1.0 v ที่อุณหภูมิ 70 °C 332
ตารางที่ ก. 18 การทดลองย่อยสลายเศษซีเมนต์ทังสเตนคาร์ไบด์ด้วยกรดไฮโดรคลอริก 3 N แรงดัน 1.0 v ที่อุณหภูมิ 50 °C 333
ตารางที่ ก. 19 การทดลองย่อยสลายเศษซีเมนต์ทังสเตนคาร์ไบด์ด้วยกรดไฮโดรคลอริก 5 N แรงดัน 1.0 v ที่อุณหภูมิ 50 °C 334
ตารางที่ ก. 20 การทดลองย่อยสลายเศษซีเมนต์ทังสเตนคาร์ไบด์ด้วยกรดไฮโดรคลอริก 7 N แรงดัน 1.0 v ที่อุณหภูมิ 50 °C 335
ตารางที่ ก. 21 การทดลองย่อยสลายเศษซีเมนต์ทังสเตนคาร์ไบด์ด้วยกรดไฮโดรคลอริก 3 N แรงดัน 1.0 v ที่อุณหภูมิ 70 °C 336
ตารางที่ ก. 22 การทดลองย่อยสลายเศษซีเมนต์ทังสเตนคาร์ไบด์ด้วยกรดไฮโดรคลอริก 5 N แรงดัน 1.0 v ที่อุณหภูมิ 70 °C 337

สารบัญตาราง (ต่อ)

หน้า

ตารางที่ ก. 23 การทดลองย่อยสลายเศษซีเมนต์ทังสเตนคาร์ไบด์ด้วยกรดไฮโดรคลอริก 7 N แรงดัน 1.0 v ที่อุณหภูมิ 70 °C 338

ตารางที่ ก. 24 การทดลองย่อยสลายเศษซีเมนต์ทังสเตนคาร์ไบด์ด้วยกรดไฮโดรคลอริก 1 N แรงดัน 0.2 V ที่อุณหภูมิ 50 ºC 339

ตารางที่ ก. 25 การทดลองย่อยสลายเศษซีเมนต์ทังสเตนคาร์ไบด์ด้วยกรดไฮโดรคลอริก 1 N แรงดัน 0.2 V ที่อุณหภูมิ 70 ºC 340

ตารางที่ ก. 26 การทดลองย่อยสลายเศษซีเมนต์ทังสเตนคาร์ไบด์ด้วยกรดไฮโดรคลอริก 1 N แรงดัน 0.6 V ที่อุณหภูมิ 50 ºC 341

ตารางที่ ก. 27 การทดลองย่อยสลายเศษซีเมนต์ทังสเตนคาร์ไบด์ด้วยกรดไฮโดรคลอริก 1 N แรงดัน 0.6 V ที่อุณหภูมิ 70 ºC 342

ตารางที่ ก. 28 การทดลองย่อยสลายเศษซีเมนต์ทังสเตนคาร์ไบด์ด้วยกรดไฮโดรคลอริก 1 N แรงดัน 1.4 V ที่อุณหภูมิ 30 ºC 343

ตารางที่ ก. 29 การทดลองย่อยสลายเศษซีเมนต์ทังสเตนคาร์ไบด์ด้วยกรดไฮโดรคลอริก 3 N แรงดัน 1.4 V ที่อุณหภูมิ 30 ºC 344

ตารางที่ ก. 30 การทดลองย่อยสลายเศษซีเมนต์ทังสเตนคาร์ไบด์ด้วยกรดไฮโดรคลอริก 5 N แรงดัน 1.4 V ที่อุณหภูมิ 30 ºC 345

ตารางที่ ก. 31 การทดลองย่อยสลายเศษซีเมนต์ทังสเตนคาร์ไบด์ด้วยกรดไฮโดรคลอริก 7 N แรงดัน 1.4 V ที่อุณหภูมิ 30 ºC 346

ตารางที่ ก. 32 การทดลองย่อยสลายเศษซีเมนต์ทังสเตนคาร์ไบด์ด้วยกรดไฮโดรคลอริก 7 N แรงดัน 1.8 V ที่อุณหภูมิ 30 ºC 347

สารบัญตาราง (ต่อ)

หน้า

ตารางที่ ก. 33 การทดลองย่อยสลายเศษซีเมนต์ทังสเตนคาร์ไบด์ด้วยกรดไฮโดรคลอริก 7 N แรงดัน 2.2 V ที่อุณหภูมิ 30 ºC 348
ตารางที่ ค.1 ปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าและสารละลาย ที่ปัจจัยการแยกสลาย แรงดันไฟฟ้า 1.2 V อุณหภูมิ 30 ºC สารละลาย HCl ความเข้มข้น 1 N 384
ตารางที่ ค.2 ปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าและสารละลาย ที่ปัจจัยการแยกสลาย แรงดันไฟฟ้า 1.0 V อุณหภูมิ 30 ºC สารละลาย HCl ความเข้มข้น 1 N 384
ตารางที่ ค.3 ปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าและสารละลาย ที่ปัจจัยการแยกสลาย แรงดันไฟฟ้า 0.8 V อุณหภูมิ 30 ºC สารละลาย HCl ความเข้มข้น 1 N 385
ตารางที่ ค.4 ปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าและสารละลาย ที่ปัจจัยการแยกสลาย แรงดันไฟฟ้า 0.6 V อุณหภูมิ 30 ºC สารละลาย HCl ความเข้มข้น 1 N 385
ตารางที่ ค.5 ปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าและสารละลาย ที่ปัจจัยการแยกสลาย แรงดันไฟฟ้า 0.4 V อุณหภูมิ 30 ºC สารละลาย HCl ความเข้มข้น 1 N 386
ตารางที่ ค.6 ปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าและสารละลาย ที่ปัจจัยการแยกสลาย แรงดันไฟฟ้า 0.2 V อุณหภูมิ 30 ºC สารละลาย HCl ความเข้มข้น 1 N 386
ตารางที่ ค.7 ปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าและสารละลาย ที่ปัจจัยการแยกสลาย แรงดันไฟฟ้า 1.0 V อุณหภูมิ 30 ºC สารละลาย HCl ความเข้มข้น 3 N 387
ตารางที่ ค.8 ปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าและสารละลาย ที่ปัจจัยการแยกสลาย แรงดันไฟฟ้า 1.0 V อุณหภูมิ 30 ºC สารละลาย HCl ความเข้มข้น 5 N 387
ตารางที่ ค.9 ปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าและสารละลาย ที่ปัจจัยการแยกสลาย แรงดันไฟฟ้า 1.0 V อุณหภูมิ 30 ºC สารละลาย HCl ความเข้มข้น 7 N 388
ตารางที่ ค.10 ปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าและสารละลายที่ปัจจัยการแยกสลายแรงดันไฟฟ้า 1.0 V อุณหภูมิ 50 ºC สารละลาย HCl ความเข้มข้น 3 N 388

สารบัญตาราง (ต่อ)

หน้า

ตารางที่ ค.11 ปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าและสารละลายที่ปัจจัยการแยกสลายแรงดันไฟฟ้า 1.0 V อุณหภูมิ 50 ºC สารละลาย HCl ความเข้มข้น 5 N 389
ตารางที่ ค.12 ปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าและสารละลายที่ปัจจัยการแยกสลายแรงดันไฟฟ้า 1.0 V อุณหภูมิ 50 ºC สารละลาย HCl ความเข้มข้น 7 N 389
ตารางที่ ค.13 ปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าและสารละลายที่ปัจจัยการแยกสลายแรงดันไฟฟ้า 1.0 V อุณหภูมิ 70 ºC สารละลาย HCl ความเข้มข้น 3 N 390
ตารางที่ ค.14 ปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าและสารละลายที่ปัจจัยการแยกสลายแรงดันไฟฟ้า 1.0 V อุณหภูมิ 70 ºC สารละลาย HCl ความเข้มข้น 5 N 390
ตารางที่ ค.15 ปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าและสารละลายที่ปัจจัยการแยกสลายแรงดันไฟฟ้า 1.0 V อุณหภูมิ 70 ºC สารละลาย HCl ความเข้มข้น 7 N 391
ตารางที่ ค.16 ปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าและสารละลายที่ปัจจัยการแยกสลายแรงดันไฟฟ้า 0.2 V อุณหภูมิ 30 ºC สารละลาย HCl ความเข้มข้น 3 N 391
ตารางที่ ค.17 ปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าและสารละลายที่ปัจจัยการแยกสลายแรงดันไฟฟ้า 0.2 V อุณหภูมิ 30 ºC สารละลาย HCl ความเข้มข้น 5 N 392
ตารางที่ ค.18 ปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าและสารละลายที่ปัจจัยการแยกสลายแรงดันไฟฟ้า 0.2 V อุณหภูมิ 30 ºC สารละลาย HCl ความเข้มข้น 7 N 392
ตารางที่ ค.19 ปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าและสารละลายที่ปัจจัยการแยกสลายแรงดันไฟฟ้า 0.6 V อุณหภูมิ 30 ºC สารละลาย HCl ความเข้มข้น 3 N 393
ตารางที่ ค.20 ปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าและสารละลายที่ปัจจัยการแยกสลายแรงดันไฟฟ้า 0.6 V อุณหภูมิ 30 ºC สารละลาย HCl ความเข้มข้น 5 N 393
ตารางที่ ค.21 ปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าและสารละลายที่ปัจจัยการแยกสลายแรงดันไฟฟ้า 0.6 V อุณหภูมิ 30 ºC สารละลาย HCl ความเข้มข้น 7 N 394
ตารางที่ ค.22 ปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าและสารละลายที่ปัจจัยการแยกสลายแรงดันไฟฟ้า 0.2 V อุณหภูมิ 50 ºC สารละลาย HCl ความเข้มข้น 1 N 394

สารบัญตาราง (ต่อ)

หน้า

ตารางที่ ค.23 ปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าและสารละลายที่ปัจจัยการแยกสลายแรงดันไฟฟ้า 0.2 V อุณหภูมิ 70 ºC สารละลาย HCl ความเข้มข้น 1 N 395
ตารางที่ ค.24 ปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าและสารละลายที่ปัจจัยการแยกสลายแรงดันไฟฟ้า 0.6 V อุณหภูมิ 50 ºC สารละลาย HCl ความเข้มข้น 1 N 395
ตารางที่ ค.25 ปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าและสารละลายที่ปัจจัยการแยกสลายแรงดันไฟฟ้า 0.6 V อุณหภูมิ 70 ºC สารละลาย HCl ความเข้มข้น 1 N 396
ตารางที่ ค.26 ปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าและสารละลายที่ปัจจัยการแยกสลายแรงดันไฟฟ้า 1.0 V อุณหภูมิ 50 ºC สารละลาย HCl ความเข้มข้น 1 N 396
ตารางที่ ค.27 ปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าและสารละลายที่ปัจจัยการแยกสลายแรงดันไฟฟ้า 1.0 V อุณหภูมิ 70 ºC สารละลาย HCl ความเข้มข้น 1 N 397
ตารางที่ ค.28 ปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าและสารละลายที่ปัจจัยการแยกสลายแรงดันไฟฟ้า 1.4 V อุณหภูมิ 30 ºC สารละลาย HCl ความเข้มข้น 1 N 397
ตารางที่ ค.29 ปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าและสารละลายที่ปัจจัยการแยกสลายแรงดันไฟฟ้า 1.4 V อุณหภูมิ 30 ºC สารละลาย HCl ความเข้มข้น 3 N 398
ตารางที่ ค.30 ปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าและสารละลายที่ปัจจัยการแยกสลายแรงดันไฟฟ้า 1.4 V อุณหภูมิ 30 ºC สารละลาย HCl ความเข้มข้น 5 N 398
ตารางที่ ค.31 ปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าและสารละลายที่ปัจจัยการแยกสลายแรงดันไฟฟ้า 1.4 V อุณหภูมิ 30 ºC สารละลาย HCl ความเข้มข้น 7 N 399
ตารางที่ ค.32 ปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าและสารละลายที่ปัจจัยการแยกสลายแรงดันไฟฟ้า 1.8 อุณหภูมิ 30 ºC สารละลาย HCl ความเข้มข้น 7 N 399
ตารางที่ ค.33 ปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าและสารละลายที่ปัจจัยการแยกสลายแรงดันไฟฟ้า 2.2 V อุณหภูมิ 30 ºC สารละลาย HCl ความเข้มข้น 7 N 400
ตารางที่ ง .1 มูลค่าปัจจุบันเงินทบงวด (Present value of Annuity) 401
ตารางที่ ง. 1 มูลค่าปัจจุบันเงินทบงวด (Present value of Annuity) (ต่อ) 402

สารบัญตาราง (ต่อ)

หน้า

ตารางที่ ง .1 มูลค่าปัจจุบันเงินทบงวด (Present value of Annuity) (ต่อ) 403

ตารางที่ ง. 2 มูลค่าปัจจุบันเงินทบงวด (Present value of Annuity) 404

ตารางที่ ง. 2 มูลค่าปัจจุบันเงินทบงวด (Present value of Annuity) (ต่อ) 405

ตารางที่ ง. 2 มูลค่าปัจจุบันเงินทบงวด (Present value of Annuity) (ต่อ) 406

สารบัญภาพ

หน้า

ภาพที่ 1.1 ปริมาณการผลิต (ตัน) ทังสเตนคาร์ไบด์จากเศษซีเมตน์ทังสเตนคาร์ไบด์กลับมาใช้ใหม่ของแต่ละกระบวนการ ของประเทศสหรัฐอเมริกาในปี 1993 [7] 3

ภาพที่ 1.2 สัดส่วนการนำทังสเตนคาร์ไบด์กลับมาใช้ใหม่ของประเทศสหรัฐอเมริกา [7] 3

ภาพที่ 1.3 เศษซีเมนต์ทังสเตนคาร์ไบด์[19] 4

ภาพที่ 1.4 การแยกสลายเศษด้วยเคมีไฟฟ้า[19] 4

ภาพที่ 1.5 เศษซีเมนต์ทังสเตนคาร์ไบด์และการแยกสลายในห้องทดลอง [19] 5

ภาพที่ 1.6 ผงโลหะทังสเตนคาร์ไบด์จากการทดลองในห้องปฏิบัติการ [19] 5

ภาพที่ 1.7 อุปกรณ์พื้นฐานในการแยกสลายซีเมนต์ทังสเตนคาร์ไบด์ด้วยอิเล็กโตรไลต์ [6] 7

ภาพที่ 1.8 รูปแบบการบดด้วย Mechanical alloying[16] 8

ภาพที่ 1.9 เครื่องบด(Mechanical alloying) [16] 9

ภาพที่ 1.10 ผงโลหะนำเข้าจากต่างประเทศ [16] 9

ภาพที่ 1.11 แนวทางการพัฒนาอุปกรณ์ใหม่สำหรับการแยกสลายผงโลหะทังสเตนคาร์ไบด์ 12

ภาพที่ 2.1 โครงสร้างโลหะผสม ทังสเตน โคบอลต์และคาร์บอน [2] 16

ภาพที่ 2.2 ระบบท่อและถังแยกสารละลายและระบบทำงานของอุปกรณ์[10] 18

ภาพที่ 2.3 Electrolytic Recovery of Tungsten and Cobalt from Tungsten Carbide Scrap[11] 19

ภาพที่ 2.4 Effect of temperature on current efficiency (current density 10 kA m^{-2} electrolyte 10% HNO_3)[11] 19

ภาพที่ 2.5 แสดงขนาดของอนุภาคโลหะผงทังสเตนคาร์ไบด์ต่อน้ำหนักโคบอลต์ [1] 21

ภาพที่ 2.6 กราฟแสดงแรงดันไฟฟ้าต่อกระแสไฟฟ้าในสารละลายที่อุณหภูมิ 25 °C เพื่อการย่อยสลายเศษทังสเตนคาร์ไบด์ CS14 (Anodic Linnear sweep voltammogram of tungsten carbide scrap CS24 in various acid solution at 25 °C) [17] 23

สารบัญภาพ (ต่อ)

หน้า

ภาพที่ 2.7 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลาย HCl ต่อการแยกโลหะประสานโคบอลต์ (Relation between concentration of HCl and amount of extracted Co ion. Specimens are treated at 110 °C for 24 H.) [18] 23

ภาพที่ 2.8 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิการย่อยวัสดุและการสกัดโคบอลต์ด้วย 6 N HCl สารละลายเป็นเวลา 24 ชั่วโมง (Relation between concentration of HCl and amount of extracted Co ion. Specimens are treated in 6 N HCl aqueous solution for 24 h.) [19] 24

ภาพที่ 2.9 แสดงกระบวนการรีไซเคิลทังสเตนจากเศษซีเมนต์คาร์ไบด์โดยใช้กระแสไฟฟ้าและสารละลาย [19] 24

ภาพที่ 2.10 แผนผังกระบวนนำเศษทังสเตนกลับมาใช้ใหม่ด้วยกรรมวิธีเทคนิคการหลอม (Flow sheets of W scrap recycling by melt bath techniques) [20] 26

ภาพที่ 2.11 แผนผังพัฒนาการหลอมเศษทังสเตนที่อุณหภูมิต่างกัน (Schematic time- temperature diagram indicating the steps in the process of recycling tungsten scrap.) [20] 27

ภาพที่ 2.12 โครงสร้างโลหะ คาร์บอน-เหล็ก-ทังสเตน แสดงบริเวณนำกลับมาใช้ใหม่ (Projection of the liquid us surface of the C-Fe-W system according to Jellinghaus. The shaded zone indicates the working area of the recycling procedure.) [20] 27

ภาพที่ 2.13 เฟสไดอะแกรมของ ทังสเตนคาร์ไบด์ (The WC phase diagram) [10] 28

ภาพที่ 2.14 เฟสไดอะแกรมของทังสเตนคาร์ไบด์กับโคบอลต์ที่อุณหภูมิ 1425ºC (The isothemal section of WC-Co phase diagram at 1425ºC) [10] 28

ภาพที่ 2.15 เครื่องกัดกร่อนโลหะแนวนอน (เคมีไฟฟ้า) [21] 30

ภาพที่ 2.16 หลักการทำงานการกัดกร่อนแผ่นมีดตัดทังสเตนคาร์ไบด์ [21] 30

ภาพที่ 2.17 กราฟแสดงคุณสมบัติของทังสเตนคาร์ไบด์และโคบอลต์ [21] 31

ภาพที่ 2.18 กราฟแสดงเวลาการกัดกร่อนของทังสเตนคาร์ไบด์ [21] 31

ภาพที่ 2.19 แบบแสดงการกัดกร่อนทังสเตนคาร์ไบด์ในแนวแกนตั้ง [21] 32

สารบัญภาพ (ต่อ)

หน้า

ภาพที่ 2.20 ลักษณะของมอเตอร์ปรับความเร็วรอบได้ 37
ภาพที่ 2.21 ส่วนต่างๆของฟันเฟือง Involute 39
ภาพที่ 2.22 ปิระมิดตัด 46
ภาพที่ 2.23 แท่งสี่เหลี่ยม 47
ภาพที่ 2.24 สามเหลี่ยมด้านเท่า 47
ภาพที่ 2.25 ฮีสเตอร์แท่ง Cartridge Heater 57
ภาพที่ 2.26 ฮีสเตอร์ครีบ Finned Heater 57
ภาพที่ 2.27 ฮีสเตอร์จุ่ม ,Immersion Heater 58
ภาพที่ 2.28 เทอร์โมสตัทแบบดูดติด 64
ภาพที่ 2.29 เทอร์โมสตัทแบบปรอทจังหวะเดียว 64
ภาพที่ 2.30 รูปร่างของท่อที่เป็นตัวรับความร้อน 64
ภาพที่ 2.31 ลักษณะถ้วยและภายในถ้วยบดผงโลหะ 65
ภาพที่ 2.32 กระบวนการอัดรีดส่วนผสมของผง-สารยึดถูกดันผ่านแม่พิมพ์ เพื่อขึ้นรูปชิ้นงานแบบต่อเนื่อง 66
ภาพที่ 2.33 ภาพสเก็ตช์แสดงความสัมพันธ์ของความหนาแน่นกับความดันในการอัดแน่นแสดงขั้นตอนสำคัญและความสามารถในการอัดลดลงเมื่อความหนาแน่นเพิ่มขึ้น 67
ภาพที่ 2.34 ภาพแสดงขั้นตอนการอัดผงโลหะ เริ่มต้นมีการเรียงตัวโดยลดบริดจ์ระหว่างอนุภาคเมื่อแรงอัดสูงขึ้นการแน่นตัวเกิดจากการเสียรูปของอนุภาคขนาดของเกรนและความพรุนเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิ 67
ภาพที่ 2.35 การอัดแน่นผ่านแม่พิมพ์ของผงบรอนซ์ทรงกลม แสดงการเปลี่ยนแปลงความพรุนจำนวนอนุภาคที่สัมผัสและพื้นที่สัมผัสเมื่อแรงอัดเพิ่มขึ้น 68
ภาพที่ 2.36 หลักการสมดุลของแรงในการอัดแน่นด้วยแม่พิมพ์ 69
ภาพที่ 2.37 แสดงความสัมพันธ์ของความดันที่ส่งผ่านในชิ้นงานอัดกับความหนาของชิ้นงาน 70
ภาพที่ 2.38 ความลาดของความดันที่ใต้พันช์ตัวบนในการอัดด้านเดียวในแม่พิมพ์ ในแผนภาพแสดงความดันที่ตำแหน่ง x ใต้พันช์ตัวบนที่เป็นอัตราส่วนกับความดัน 70

สารบัญภาพ (ต่อ)

หน้า

ภาพที่ 2.39 ผงโลหะผสมที่เพิ่มขึ้นทำให้ความสามารถในการอัดลดลง แสดงโดยการเพิ่มความเข้มข้นของส่วนผสมเมื่อเติมให้กับผงเหล็กอะตอมไมซ์ด้วยน้ำ 71
ภาพที่ 2.40 แสดงการแข็งตัวของวัสดุที่มีความแข็งต่างกัน 72
ภาพที่ 2.41 แสดงชิ้นส่วน P/M ทั้ง 4 ประเภท 73
ภาพที่ 2.42 ส่วนประกอบของเครื่องมือหลายชิ้นใช้ในการอัดเฟืองสองระดับ 73
ภาพที่ 2.43 ชิ้นส่วนหลายระดับที่ต้องการพันช์ตัวล่าง 3 ตัว และพันช์ตัวบน 2 ตัว 74
ภาพที่ 2.44 ภาพถ่าย SEM แสดงการฟอร์มตัวของคอคอดเนื่องจากอบผนึก 76
ภาพที่ 2.45 การอบผนึกอนุภาคทรงกลมขนาดคอคอด X ขนาดอนุภาค D และเส้นล้อมรอบคอคอดมีรัศมี p 77
ภาพที่ 2.46 ผลของเวลาในการอบผนึกต่ออัตราส่วนขนาดคอคอดพื้นผิวที่ลดลงการหดตัวและการแน่นตัว 77
ภาพที่ 2.47 แบบจำลองการอบผนึกอนุภาคทรงกลมสองอนุภาคที่พัฒนาพันธะระหว่างอนุภาคเริ่มต้นจากจุดสัมผัสการเพิ่มขนาดของคอคอดสร้างขอบเกรนที่รอยต่ออนุภาคและในที่สุดรวมตัวเป็นหนึ่งอนุภาค 78
ภาพที่ 2.48 แสดงการแน่นตัวและการโตของเกรนขณะอบผนึกและพื้นผิวแตกหักในสภาพ d แสดงลักษณะที่ต้องการคือรูพรุนทรงกลมตามบริเวณขอบเกรนในขั้นตอนสุดท้ายของการอบผนึก 79
ภาพที่ 2.49 ลักษณะความโค้งบนพื้นผิวโค้งที่บอกในรูปของรัศมีหลักสองค่า 80
ภาพที่ 2.50 ภาพระดับอะตอมแสดงพันธะระหว่างอนุภาคจากการอบผนึกอะตอมที่ไม่เรียงอยู่ในแนวเส้นเดียวกันกลายเป็นขอบเกรนคอคอดคือบริเวณที่มีการขาดกันเกิดขึ้นโดยกระบวนการเคลื่อนที่ 80

สารบัญภาพ (ต่อ)

หน้า

ภาพที่ 2.51 แบบจำลองกลไกการอบผนึกทั้งสองประเภทในอนุภาคทรงกลมกลไกการเคลื่อนที่ตามพื้นผิวใช้สำหรับการเพิ่มขนาดของคอคอดโดยมวลเคลื่อนที่จากแหล่งกำเนิดที่พื้นผิว (E-C = การระเหยการควบแน่น SD = การแพร่ตามพื้นผิว VD = การแพร่ในเนื้อวัสดุ) 81

ภาพที่ 2.52 การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของรูพรุนตามปริมาณการอบผนึก 81

ภาพที่ 2.53 การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของรูพรุนขณะอบผนึก เริ่มต้นจากอนุภาคมีจุดสัมผัสกันต่อมาปริมาณของรูพรุนลดลงและมีความราบเรียบขึ้น และเมื่อรูพรุนกลายเป็นทรงกลมถูกแทนที่ด้วยขอบเกรน 82

ภาพที่ 2.54 การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคของพัลลาเดียมขณะอบผนึก ผงการอบผนึกที่อุณหภูมิแตกต่างกัน 3 เท่าคือ a) 744 ^{0}C b) 950 ^{0}C และ c) 1400 ^{0}C การเปลี่ยนแปลงขนาดของเกรนและความพรุนเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิ 82

ภาพที่ 2.55 ลำดับการแยกออกของรูพรุนในขั้นตอนสุดท้ายการอบผนึก a) รูพรุนบนขอบเกรนแสดงมุมของแข็ง-ไอที่สมดุล b) และ c) การโตของเกรนที่ลากรูพรุนไปด้วย และ d) รูพรุนเดี่ยวเพราะขอบเกรนแยกตัวออก 83

ภาพที่ 2.56 ผลกระทบแรงอัดต่อการอบผนึกทองแดงทรงกลม กราฟภาพบนและรูปกลางแสดงอัตราส่วนขนาดคอคอดในรูปฟังก์ชันของแรงอัดและเวลาในการอบผนึก กราฟภาพล่างแสดงการหดตัวลดลงเนื่องจากการอัด 84

ภาพที่ 2.57 ผลกระทบของการอบตัวในชิ้นส่วนที่ขึ้นรูปโดยการอัดแน่นในพิมพ์และการฉีดขึ้นรูปความลาดของความหนาแน่นในการอัดผ่านแม่พิมพ์ทำให้มีการหดตัวไม่เท่ากันทุกทิศทางและเกิดการบิดเบี้ยวส่วนการฉีดขึ้นรูปทำให้มีความแน่นตัวหลังอบผนึกโดยไม่มีการบิดเบี้ยว 85

สารบัญภาพ (ต่อ)

หน้า

ภาพที่ 2.58 ไดอะแกรมการเคลื่อนที่ของกิจกรรม 86
ภาพที่ 2.59 แผนภูมิกระบวนการผลิตประเภทวัสดุ 87
ภาพที่ 2.59 แผนภูมิกระบวนการผลิตประเภทวัสดุ(ต่อ) 88
ภาพที่ 2.60 การจำแนกต้นทุนผลิตภัณฑ์ 97
ภาพที่ 2.61 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างรายได้ ต้นทุน และปริมาณ 101
ภาพที่ 2.62 กราฟต้นทุน ปริมาณ และกำไร 102
ภาพที่ 3.1 แผนผังการดำเนินการ 105
ภาพที่ 3.1 แผนผังการดำเนินการ ต่อ 106
ภาพที่ 3.2 กระบวนการแยกสารด้วยไฟฟ้า (Electrolysis) 111
ภาพที่ 3.3 การทดลองการสลายแผ่นมีดตัด 112
ภาพที่ 3.4 การติดตั้งอุปกรณ์จ่ายกระแสไฟฟ้า 112
ภาพที่ 3.5 เครื่องกัดกร่อนโลหะกึ่งอัตโนมัติแบบคัดกรองผงโลหะแยก 3 ส่วน(แบบที่1) 114
ภาพที่ 3.6 เครื่องกัดกร่อนโลหะกึ่งอัตโนมัติแบบโครงสร้างเดียว (แบบที่ 2) 115
ภาพที่ 3.7 เครื่องกัดกร่อนโลหะกึ่งอัตโนมัติแบบแยกส่วน(แบบที่ 3) 117
ภาพที่ 3.8 ถังบรรจุสารละลาย (Tank) ขนาด 400 × 300 × 535 มม. 134
ภาพที่ 3.9 โครงสร้างถังบรรจุสารละลาย (Tank) ขนาด 402 × 302 × 660 มม. 134
ภาพที่ 3.10 ถังพักสารละลาย ขนาด 430 × 430 × 410 มม. 135
ภาพที่ 3.11 ชิ้นส่วนผนังด้านขวาถังบรรจุชิ้นงาน (Barrel) ขนาด 160×320×10 มม. 135
ภาพที่ 3.12 ชิ้นส่วนผนังด้านซ้ายถังบรรจุชิ้นงาน (Barrel) ขนาด 160×320×10 มม. 136
ภาพที่ 3.13 ชิ้นส่วนแผ่นคลี่ถังบรรจุชิ้นงาน (Barrel) ขนาด 186×350×5 มม. 136
ภาพที่ 3.14 ชิ้นส่วนถังบรรจุชิ้นงาน (Barrel) ดัดขึ้นรูป 136

สารบัญภาพ (ต่อ)

หน้า

ภาพที่ 3.15 ชิ้นส่วนเพลายึดผนังถังบรรจุชิ้นงาน (Barrel) ขนาดความโต 20×260 มม. 137
ภาพที่ 3.16 ชิ้นส่วนฝาประกบข้างถังบรรจุชิ้นงาน (Barrel) ขนาด 150 ×212 มม.เจาะรูยึดบูช 32 มม. 137
ภาพที่ 3.17 ชิ้นส่วนเฟืองตามประกบข้างถังบรรจุชิ้นงาน ขนาดความโต 152.4 มม. 10 DP จำนวนฟัน 70 ฟัน เจาะรูยึดบูช 32 มม. 137
ภาพที่ 3.18 ชิ้นส่วนคานยึดถังบรรจุชิ้นงาน (Barrel) ขนาด 18×186×5 มม. 138
ภาพที่ 3.19 ชิ้นส่วนขอบฝาปิดถัง (Barrel) ด้านขวา ขนาด 18×186×17 มม. 138
ภาพที่ 3.20 ชิ้นส่วนขอบล็อกปิดฝาถังบรรจุชิ้นงาน ด้านซ้าย ขนาด 18×186×17 มม. เจาะรูยึดฝาถังหมุน (Barrel) ขนาด 3×27 มม. 138
ภาพที่ 3.21 ชิ้นส่วนฝาปิดถังบรรจุชิ้นงาน (Barrel) ขนาด 40×186 ×8 มม. เจาะรูยึดหมุดล็อกฝาปิด ขนาดความโต 5 มม. 139
ภาพที่ 3.22 ลักษณะประกอบถังบรรจุชิ้นงาน (Barrel) 139
ภาพที่ 3.23 ชิ้นส่วนเฟืองทดถังบรรจุชิ้นงาน (Barrel) ขนาดความโต 131 มม. 10 DP จำนวนฟัน 60 ฟัน 139
ภาพที่ 3.24 ชิ้นส่วนเฟืองขับถังบรรจุชิ้นงาน (Barrel) ขนาดความโต 38 มม. 10 DP จำนวนฟัน 60 ฟัน 140
ภาพที่ 3.25 ชิ้นส่วนแผ่นทองแดงยึดถังบรรจุชิ้นงาน (Barrel) ให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านไปยังขั้วบวก (+) ขนาด 30×260×5 มม. เจาะรูยึดกับผนังความโต 8 มม. 140
ภาพที่ 3.26 ชิ้นส่วนกล่องใส่มอเตอร์ถังบรรจุชิ้นงาน (Barrel) ขนาด 95×240×95 มม. 140
ภาพที่ 3.27 ลักษณะการประกอบถังบรรจุชิ้นงาน (Barrel) 141
ภาพที่ 3.28 ถังบรรจุชิ้นงาน (Barrel) 141
ภาพที่ 3.29 แผนภูมิการกำหนดตัวแปรในการทดลอง 143
ภาพที่ 3.30 เครื่องย่อยสลาย [2] 146

สารบัญภาพ (ต่อ)

หน้า

ภาพที่ 3.31 เครื่องวัดขนาดอนุภาค (Particle size analyzer) ผลิตภัณฑ์ Malvern รุ่น Zetasizer ZS 146
ภาพที่ 3.32 เครื่อง X-ray Diffractometer 147
ภาพที่ 3.33 Scanning Electron Microscope 148
ภาพที่ 3.34 แสดงแผนการทดลองที่ 1 150
ภาพที่ 3.35 แสดงแผนการทดลองที่ 2 151
ภาพที่ 3.36 ทำความสะอาดเศษทังสเตนคาร์ไบด์โดยใช้แอลกอฮอล์ 152
ภาพที่ 3.37 เติมสารละลายไฮโดรคลอริกลงในถังทดลอง 152
ภาพที่ 3.38 เริ่มกระบวนการย่อยสลายเศษทังสเตนคาร์ไบด์ 153
ภาพที่ 3.39 ทำการแยกเศษเล็กแล้วเก็บในภาชนะบรรจุให้เรียบร้อย 154
ภาพที่ 3.40 แสดงสารละลายไฮโดรคลอริกในบีกเกอร์และรอการตกตะกอนของโลหะผงทังสเตนคาร์ไบด์ 154
ภาพที่ 3.41 การกรองเศษด้วยตะแกรงสเตนเลส 155
ภาพที่ 3.42 ล้างขอบบีกเกอร์ด้วยแอลกอฮอล์ 156
ภาพที่ 3.43 ทำการแยกโลหะผงทังสเตนคาร์ไบด์ออกจากสารละลายไฮโดรคลอริก 156
ภาพที่ 3.44 โลหะผงทังสเตนคาร์ไบด์ที่ผ่านกระบวนการแยกสลาย 157
ภาพที่ 3.45 การโลหะผงทังสเตนคาร์ไบด์ 158
ภาพที่ 3.46 การเก็บรักษาโลหะผงทังสเตนคาร์ไบด์เพื่อป้องกันความชื้น 158
ภาพที่ 3.47 แสดงขั้นตอนกระบวนการผลิตชิ้นงาน Recycle 165
ภาพที่ 3.48 ขั้นตอนการบดโลหะผงทังสเตนคาร์ไบด์ 166
ภาพที่ 3.49 ชั่งน้ำหนักโลหะผงทังสเตนคาร์ไบด์และโคบอลต์ 167

สารบัญภาพ (ต่อ)

หน้า

ภาพที่ 3.50 เตรียมลูกบดและแอลกอฮอลล์ใส่ลงในถ้วยบด 167
ภาพที่ 3.51 เตรียมโลหะผงทังสเตนคาร์ไบด์และโคบอลต์ที่เตรียมไว้ใส่ลงในถ้วยบด 167
ภาพที่ 3.52 ปิดฝาถ้วย ทำการติดตั้งถ้วยบดข้ากับเครื่องบด แล้ว เริ่มทำการบด 168
ภาพที่ 3.53 เมื่อครบกำหนดเทสารละลายในถ้วยบดลงในบิกเกอร์และล้างลูกบด
ด้วยแอลกอฮอลล์ 168
ภาพที่ 3.54 นำตะกอนที่ได้ไปตั้งไฟจนแห้งเพื่อไล่ความชื้น 168
ภาพที่ 3.55 นำโลหะผงที่แห้งแล้ว ใส่ในถ้วยเซรามิกและอบด้วยเตาไฟฟ้า 169
ภาพที่ 3.56 ตรวจสอบน้ำหนักบรรจุและเตรียมนำผงโลหะทังสเตนคาร์ไบด์ไปอัดขึ้นรูป 169
ภาพที่ 3.57 อุปกรณ์ที่ใช้ในกระบวนการผลิต 170
ภาพที่ 3.58 อุปกรณ์ในการตวงผงคาร์ไบด์ 171
ภาพที่ 3.59 เครื่องชั่งน้ำหนักผงคาร์ไบด์ 171
ภาพที่ 3.60 ตัวอย่างผงทังสเคนคาร์ไบด์ที่ใช้ในการผสม 172
ภาพที่ 3.61 กระบวนการตวงผงคาร์ไบด์ 172
ภาพที่ 3.62 กระบวนการชั่งผงคาร์ไบด์ 173
ภาพที่ 3.63 การอัดขึ้นรูปชิ้นงาน 174
ภาพที่ 3.64 การทดสอบความหนาแน่นของชิ้นงานซีเมนต์ทังสเตนคาร์ไบด์ 174
ภาพที่ 3.65 กราฟการแสดงผลการทดสอบความหนาแน่นชิ้นงานทำการผลิต
(ก่อนกระบวนการอบผนึก) 175
ภาพที่ 3.66 เตาอบชิ้นงานหลังการอัดขึ้นรูป 176
ภาพที่ 3.67 การเจียระไนผิวสำเร็จชิ้นงาน 176

สารบัญภาพ (ต่อ)

หน้า

ภาพที่ 3.68 การทดสอบความแข็ง (Hardness Test) ใช้เครื่อง Misuratori di Durezza Hardness Tesdness Modello 206 RTD ใช้การทดสอบแบบ Rockwell Scal A ใช้หัวเพชร 120 ° โหลดในการทดสอบ 120 กิโลกรัม 177
ภาพที่ 3.69 แผนภูมิกระบวนไหล (Flow Process Chart) 184
ภาพที่ 3.69 แผนภูมิกระบวนไหล (Flow Process Chart)(ต่อ) 185
ภาพที่ 4.1 การแยกสารด้วยไฟฟ้า (Electrolysis) [6] 194
ภาพที่ 4.2 การเตรียมเศษโลหะแผ่นมีด 196
ภาพที่ 4.3 ทำความสะอาดด้วยแอลกอฮอลล์ 197
ภาพที่ 4.4 ชั่งน้ำหนักเศษโลหะ แผ่นมีดก่อนทำการย่อย 197
ภาพที่ 4.5 นำเศษโลหะแผ่นมีด ใส่ลงในบิกเกอร์และเริ่มทำการย่อยด้วยเคมีไฟฟ้า 197
ภาพที่ 4.6 ครบเวลา 48 ชั่งโมง นำเศษโลหะ แผ่นมีดชั่งน้ำหนักแล้วบันทึกผล 197
ภาพที่ 4.7 พักสารละลายทิ้งไว้ให้ตกตะกอน 198
ภาพที่ 4.8 แยกสารละลายและทำให้แห้ง 198
ภาพที่ 4.9 การบรรจุเพื่อชั่งตวงวัดน้ำหนักโลหะผงทังสเตนคาร์ไบด์ 199
ภาพที่ 4.10 การแยกผงโดยการตกตะกอนจากถังทดลอง 200
ภาพที่ 4.11 ขั้นตอนการบดผงทังสเตนคาร์ไบด์ 201
ภาพที่ 4.11 ขั้นตอนการบดผงทังสเตนคาร์ไบด์ (ต่อ) 202
ภาพที่ 4.12 แผนการทดลอง 203
ภาพที่ 4.13 แผนภูมิแสดงน้ำหนักผงทังสเตนคาร์ไบด์ที่ได้จากการทดลองที่อุณหภูมิ 50 องศา 212
ภาพที่ 4.14 แผนภูมิแสดงน้ำหนักผงทังสเตนคาร์ไบด์ที่ได้จากการทดลองที่อุณหภูมิ 60 องศา 212
ภาพที่ 4.15 แผนภูมิแสดงน้ำหนักผงทังสเตนคาร์ไบด์ที่ได้จากการทดลองที่อุณหภูมิ 70 องศา 213

สารบัญภาพ (ต่อ)

หน้า

ภาพที่ 4.16 แผนภูมิแสดงการเปรียบเทียบน้ำหนักที่ลดลงระหว่างเวลาทดลองที่ แรงดัน 0.2 โวลต์ 213
ภาพที่ 4.17 แผนภูมิแสดงการเปรียบเทียบน้ำหนักที่ลดลงระหว่างเวลาทดลองที่ แรงดัน 0.4 โวลต์ 214
ภาพที่ 4.18 แผนภูมิแสดงการเปรียบเทียบน้ำหนักที่ลดลงระหว่างเวลาทดลองที่ แรงดัน 0.6 โวลต์ 214
ภาพที่ 4.19 แผนภูมิแสดงการเปรียบเทียบน้ำหนักที่ลดลงในเวลาทดลอง 48 (ชั่วโมง) 215
ภาพที่ 4.20 แผนภูมิแสดงการเปรียบเทียบการระเหยของสารละลาย 215
ภาพที่ 4.21กราฟแสดงผลการทดสอบผงโลหะที่ได้จากการทดลองด้วยวิธี X-Ray Diffraction 216
ภาพที่ 4.22 กราฟแสดงผลการทดสอบผงโลหะที่ได้จากการทดลองด้วยวิธี X-Ray Diffraction 217
ภาพที่ 4.23 กราฟแสดงผลการทดสอบผงโลหะที่ได้จากการทดลองด้วยวิธี X-Ray Diffraction 218
ภาพที่ 4.24 กราฟแสดงผลการทดสอบผงโลหะที่ได้จากการทดลองด้วยวิธี X-Ray Diffraction 219
ภาพที่ 4.25 กราฟแสดงผลการทดสอบผงโลหะที่ได้จากการทดลองด้วยวิธี X-Ray Diffraction 220
ภาพที่ 4.26 กราฟแสดงผลการทดสอบการกระจายตัวของผงโลหะที่ได้จากการทดลอง 222
ภาพที่ 5.1 ติดตั้งเครื่องกัดกร่อนและทำการทดลองใช้ย่อยสลายเศษซีเมนต์ทังสเตน 244
ภาพที่ 5.2 นำสารละลายในถังย่อย ใส่ในบิกเกอร์พักไว้ให้สารละลายตกตะกอน 244
ภาพที่ 5.3 ผงโลหะที่ได้จากการตกตะกอน 244
ภาพที่ 5.4 นำตะกอนที่ได้จากการทดลองตั้งไฟไล่ความชื้น 245
ภาพที่ 5.5 ลักษณะของผงทังสเตนคาร์ไบด์ที่ได้จากกระบวนการทดลอง 245
ภาพที่ 5.6 บรรจุผงทังสเตนคาร์ไบด์ที่ได้จากกระบวนการทดลอง 245
ภาพที่ 5.7 แผ่นมีดตัด (Insert tools) ก่อนการทดลอง 246

สารบัญภาพ (ต่อ)

หน้า

ภาพที่ 5.8 แผ่นมีดตัด (Insert tools) หลังการทดลอง 246

ภาพที่ 5.9 เปรียบเทียบน้ำหนักที่ลดลงระหว่างเวลาทดลอง (ทุก 12 ชั่วโมง) 248

ภาพที่ 5.10 กราฟแสดงผลอุณหภูมิในการทดลอง 248

ภาพที่ 5.11 แผนภูมิแสดงการเปรียบเทียบน้ำหนักที่ลดลงทั้งหมดระหว่างแรงดันไฟฟ้า 249

ภาพที่ 5.12 กราฟแสดงผลตรวจสอบผงโลหะที่แรงดันไฟฟ้า 1.0 V. T 50 □C กรด HCl 3N

250 ภาพที่ 5.13 กราฟสรุปผลตรวจสอบผงโลหะที่แรงดันไฟฟ้า 3.0 V. T 50 □C กรด HCl 3N251 ภาพที่ 5.14 กราฟผลตรวจสอบผงโลหะผ่านการกรองที่แรงดันไฟฟ้า 6.0 V. T 50 □C กรด HCl 3N

252 ภาพที่ 6.1 ขั้นตอนการผลิตโลหะผงทังสเตนคาร์ไบด์

255 ภาพที่ 6.2 ล้างชิ้นงานในแอลกอฮอล์จนสะอาด

256 ภาพที่ 6.3 การตรวจสอบน้ำหนักชิ้นงาน

256 ภาพที่ 6.4 การบรรจุชิ้นงานใส่ใน Barrel

256 ภาพที่ 6.5 เตรียมสารละลายในการการแยกโลหะ

257 ภาพที่ 6.6 ประกอบชุด Barrel และอุปกณ์สำหรับแยกสลายโลหะทังสเตนคาร์ไบด์และ เริ่มเปิดเครื่องทำการย่อย

257 ภาพที่ 6.7 เมื่อครบเวลาที่กำหนดแล้วยกอุปกรณ์ออกจากถังแยกโลหะทังสเตนคาร์ไบด์ 257 ภาพที่ 6.8 พักสารละลายให้ตกตะกอนโดยใช้เวลาประมาณ 1-2 ชั่วโมง 258 ภาพที่ 6.9 ระบายสารละลายส่วนบนออก

258 ภาพที่ 6.10 นำตะกอนจากถังเครื่องกัดกร่อนใส่บิกเกอร์และพักไว้ รอตกตะกอนอีก 1 ชั่วโมง 258 ภาพที่ 6.11 เทสารละลายส่วนบนและนำโคลนโลหะผงที่ตกตะกอนตั้งไฟ 259 ภาพที่ 6.12 นำผงที่ได้อบไล่ความชื้นด้วยเตาอบไฟฟ้า ตรวจสอบน้ำหนักและบรรจุ 259

สารบัญภาพ (ต่อ)

หน้า

ภาพที่ 6.13 แผนภูมิแสดงการเปรียบเทียบจำนวนผง WC คิดเป็นร้อยละที่ได้จากการทดลองภายใต้ปัจจัยอุณหภูมิ 30 ˚C 265

ภาพที่ 6.14 แผนภูมิแสดงเปรียบเทียบจำนวนผง WC ที่ได้จากการทดลองภายใต้ปัจจัยการใช้แรงดันไฟฟ้า 1.0 V 267

ภาพที่ 6.15 กำลังขยาย 3,500 เท่า ที่ปัจจัยแรงดันไฟฟ้า 0.2 V อุณหภูมิ 30˚C สารละลาย HCl ความเข้มข้น 3 N 268

ภาพที่ 6.16 กำลังขยาย 7,500 เท่า ที่ปัจจัยแรงดันไฟฟ้า 0.2 V อุณหภูมิ 30˚Cสารละลาย HCl ความเข้มข้น 3 N 268

ภาพที่ 6.17 กำลังขยาย 3,500 เท่า ที่ปัจจัยแรงดันไฟฟ้า 0.6 V อุณหภูมิ 30˚Cสารละลาย HCl ความเข้มข้น 3 N 269

ภาพที่ 6.18 กำลังขยาย 7,500 เท่า ที่ปัจจัยแรงดันไฟฟ้า 0.6 V อุณหภูมิ 30˚C สารละลาย HCl ความเข้มข้น 3 N 269

ภาพที่ 6.19 กำลังขยาย 3,500 เท่า ที่ปัจจัยแรงดันไฟฟ้า 1.0 V อุณหภูมิ 50˚C สารละลาย HCl ความเข้มข้น 3 N 270

ภาพที่ 6.20 กำลังขยาย 7,500 เท่า ที่ปัจจัยแรงดันไฟฟ้า 1.0 V อุณหภูมิ 50˚C สารละลาย HCl ความเข้มข้น 3 N 270

ภาพที่ 6.21 XRD ผงโลหะชนิดทังสเตนคาร์ไบด์ (WC) 271

ภาพที่ 6.22 กราฟแสดงขนาดและการกระจายอนุภาคที่ปัจจัยแรงดันไฟฟ้า 0.2 V อุณหภูมิ 30˚C สารละลาย HCl ความเข้มข้น 5 N 274

ภาพที่ 6.23 กราฟแสดงขนาดและการกระจายอนุภาคที่ปัจจัยแรงดันไฟฟ้า 1.0 V อุณหภูมิ 70˚C สารละลาย HCl ความเข้มข้น 7 N 275

สารบัญภาพ (ต่อ)

หน้า

ภาพที่ 7.1 แสดงขั้นตอนกระบวนการผลิตชิ้นงาน Recycle 278
ภาพที่ 7.2 เตรียมส่วนผสมใส่ถ้วยบดนำไปเข้าเครื่องบด แล้ว เริ่มทำการบด 279
ภาพที่ 7.3 เมื่อครบตามเวลาที่กำหนดเปิดฝาเครื่องบดแล้วนำถ้วยบดออกจากตัวเครื่อง 279
ภาพที่ 7.4 เทสารละลายในถ้วยบดลงในบิกเกอร์และพักไว้รอให้ตกตะกอน 280
ภาพที่ 7.5 นำตะกอนที่ได้ไปตั้งไฟจนแห้งแล้วนำไปอบด้วยเตาไฟฟ้า 280
ภาพที่ 7.6 ตรวจสอบน้ำหนักบรรจุและเตรียมนำผงโลหะทังสเตนคาร์ไบด์ไปอัดขึ้นรูป 280
ภาพที่ 7.7 โครงสร้างทางจุลภาคโลหะผงทังสเตนคาร์ไบด์ Recycle กำลังขยาย 3,500 เท่า (ก่อนบด) 281
ภาพที่ 7.8 โครงสร้างทางจุลภาคโลหะผงทังสเตนคาร์ไบด์ Recycle กำลังขยาย 3,500 เท่า (หลังบด) 282
ภาพที่ 7.9 กราฟแสดงผลการทดสอบโลหะผงด้วยเครื่อง XRD 282
ภาพที่ 7.10 ผลการตรวจสอบขนาดการกระจายของผงโลหะทังสเตคาร์ไบด์ Recycle (ก่อนบด) 283
ภาพที่ 7.11 ผลการตรวจสอบขนาดการกระจายของผงโลหะทังสเตคาร์ไบด์ Recycle (หลังบด) 283
ภาพที่ 7.12 กระบวนการตวงผงคาร์ไบด์ 285
ภาพที่ 7.13 กระบวนการอัดขึ้นรูปชิ้นงาน 285
ภาพที่ 7.14 แสดงชิ้นงานแท่งสี่เหลี่ยมหลังอัดขึ้นรูป 286
ภาพที่ 7.15 แสดงชิ้นงานแผ่นมีดหลังอัดขึ้นรูป 286
ภาพที่ 7.16 เตาไฟฟ้าในการอบผนึก 287
ภาพที่ 7.17 แสดงชิ้นงานแผ่นมีดหลังอบผนึกและเจียระไนผิว 287
ภาพที่ 7.18 แสดงลักษณะรอยกดชิ้นงาน กำลังขยาย 200 เท่า 291
ภาพที่ 7.19 โครงสร้างทางจุลภาค ชิ้นงานหลังการอบผนึกกำลังขยาย 7,500 เท่า 291
ภาพที่ 8.1 แสดงกระบวนการผลิตชิ้นงานซีเมนต์ทังสเตนคาร์ไบด์ 293

สารบัญภาพ (ต่อ)

หน้า

ภาพที่ 8.1 แสดงกระบวนการผลิตชิ้นงานซีเมนต์ทังสเตนคาร์ไบด์ (ต่อ) 294
ภาพที่ 8.2 เศษซีเมนต์ทังสเตนคาร์ไบด์สำหรับการย่อย 294
ภาพที่ 8.3 เครื่องย่อยเศษ ซีเมนต์ทังสเตนคาร์ไบด์ 294
ภาพที่ 8.4 เครื่องกรองโลหะผงทังสเตนคาร์ไบด์ 294
ภาพที่ 8.5 เครื่องคัดขนาดโลหะผงทังสเตนคาร์ไบด์ 295
ภาพที่ 8.6 เครื่องบดโลหะผงทังสเตนคาร์ไบด์ 295
ภาพที่ 8.7 เครื่องผสมโลหะผงทังสเตนคาร์ไบด์ 295
ภาพที่ 8.8 เตาอบโลหะผงทังสเตนคาร์ไบด์ 296
ภาพที่ 8.9 เครื่องบรรจุโลหะผงทังสเตนคาร์ไบด์ 296
ภาพที่ 8.10 เครื่องอัดขึ้นรูปชิ้นงาน ซีเมนต์ทังสเตนคาร์ไบด์ 296
ภาพที่ 8.11 ชิ้นงานแท่งสี่เหลี่ยมซีเมนต์ทังสเตนคาร์ไบด์ 297
ภาพที่ 8.12 ชิ้นงานแผ่นมีดซีเมนต์ทังสเตนคารไบด์ 297
ภาพที่ 8.13 การออกแบบผังบริเวณโรงงาน (Planning Design) 300
ภาพที่ ข.1 โลหะผงหลังการแยกสลาย กำลังขยาย 7,500 เท่า แยกสลายด้วยปัจจัยแรงดันไฟฟ้า 0.2 V อุณหภูมิ 30 ºC สารละลาย HCl ความเข้มข้น 3 N 350
ภาพที่ ข.2 โลหะผงหลังการแยกสลาย กำลังขยาย 7,500 เท่า แยกสลายด้วยปัจจัยแรงดันไฟฟ้า 0.2 V อุณหภูมิ 30 ºC สารละลาย HCl ความเข้มข้น 5 N 350
ภาพที่ ข.3 โลหะผงหลังการแยกสลาย กำลังขยาย 7,500 เท่า แยกสลายด้วยปัจจัยแรงดันไฟฟ้า 0.2 V อุณหภูมิ 30 ºC สารละลาย HCl ความเข้มข้น 7 N 351
ภาพที่ ข.4 โลหะผงหลังการแยกสลาย กำลังขยาย 7,500 เท่า แยกสลายด้วยปัจจัยแรงดันไฟฟ้า 0.6 V อุณหภูมิ 30 ºC สารละลาย HCl ความเข้มข้น 3 N 351

สารบัญภาพ (ต่อ)

หน้า

ภาพที่ ข.5 โลหะผงหลังการแยกสลาย กำลังขยาย 7,500 เท่า แยกสลายด้วยปัจจัยแรงดันไฟฟ้า 0.6 V อุณหภูมิ 30 ºC สารละลาย HCl ความเข้มข้น 5 N 352
ภาพที่ ข.6 โลหะผงหลังการแยกสลาย กำลังขยาย 7,500 เท่า แยกสลายด้วยปัจจัยแรงดันไฟฟ้า 0.6 V อุณหภูมิ 30 ºC สารละลาย HCl ความเข้มข้น 7 N 352
ภาพที่ ข.7 โลหะผงหลังการแยกสลาย กำลังขยาย 7,500 เท่า แยกสลายด้วยปัจจัยแรงดันไฟฟ้า 1.0 V อุณหภูมิ 50 ºC สารละลาย HCl ความเข้มข้น 3 N 353
ภาพที่ ข.8 โลหะผงหลังการแยกสลาย กำลังขยาย 7,500 เท่า แยกสลายด้วยปัจจัยแรงดันไฟฟ้า 1.0 V อุณหภูมิ 50 ºC สารละลาย HCl ความเข้มข้น 5 N 353
ภาพที่ ข.9 โลหะผงหลังการแยกสลาย กำลังขยาย 7,500 เท่า แยกสลายด้วยปัจจัยแรงดันไฟฟ้า 1.0 V อุณหภูมิ 50 ºC สารละลาย HCl ความเข้มข้น 7 N 354
ภาพที่ ข.10 โลหะผงหลังการแยกสลาย กำลังขยาย 7,500 เท่า แยกสลายด้วยปัจจัยแรงดันไฟฟ้า 1.0 V อุณหภูมิ 70 ºC สารละลาย HCl ความเข้มข้น 3 N 354
ภาพที่ ข.11 โลหะผงหลังการแยกสลาย กำลังขยาย 7,500 เท่า แยกสลายด้วยปัจจัยแรงดันไฟฟ้า 1.0 V อุณหภูมิ 70 ºC สารละลาย HCl ความเข้มข้น 5 N 355
ภาพที่ ข.12 โลหะผงหลังการแยกสลาย กำลังขยาย 7,500 เท่า แยกสลายด้วยปัจจัยแรงดันไฟฟ้า 1.0 V อุณหภูมิ 70 ºC สารละลาย HCl ความเข้มข้น 7 N 355
ภาพที่ ข.13 โลหะผงหลังการแยกสลาย กำลังขยาย 7,500 เท่า แยกสลายด้วยปัจจัยแรงดันไฟฟ้า 0.2 V อุณหภูมิ 50 ºC สารละลาย HCl ความเข้มข้น 1 N 356
ภาพที่ ข.14 โลหะผงหลังการแยกสลาย กำลังขยาย 7,500 เท่า แยกสลายด้วยปัจจัยแรงดันไฟฟ้า 0.2 V อุณหภูมิ 70 ºC สารละลาย HCl ความเข้มข้น 1 N 356
ภาพที่ ข.15 โลหะผงหลังการแยกสลาย กำลังขยาย 7,500 เท่า แยกสลายด้วยปัจจัยแรงดันไฟฟ้า 0.6 V อุณหภูมิ 50 ºC สารละลาย HCl ความเข้มข้น 1 N 357

สารบัญภาพ (ต่อ)

หน้า

ภาพที่ ข.16 โลหะผงหลังการแยกสลาย กำลังขยาย 7,500 เท่า แยกสลายด้วยปัจจัยแรงดันไฟฟ้า 0.6 V อุณหภูมิ 70 ºC สารละลาย HCl ความเข้มข้น 1 N 357
ภาพที่ ข.17 โลหะผงหลังการแยกสลาย กำลังขยาย 7,500 เท่า แยกสลายด้วยปัจจัยแรงดันไฟฟ้า 1.0V อุณหภูมิ 50 ºC สารละลาย HCl ความเข้มข้น 1 N 358
ภาพที่ ข.18 โลหะผงหลังการแยกสลาย กำลังขยาย 7,500 เท่า แยกสลายด้วยปัจจัยแรงดันไฟฟ้า 1.0 V อุณหภูมิ 70 ºC สารละลาย HCl ความเข้มข้น 1 N 358
ภาพที่ ข.19 โลหะผงหลังการแยกสลาย กำลังขยาย 7,500 เท่า แยกสลายด้วยปัจจัยแรงดันไฟฟ้า 1.4 V อุณหภูมิ 30 ºC สารละลาย HCl ความเข้มข้น 1 N 359
ภาพที่ ข.20 โลหะผงหลังการแยกสลาย กำลังขยาย 7,500 เท่า แยกสลายด้วยปัจจัยแรงดันไฟฟ้า 1.4 V อุณหภูมิ 30 ºC สารละลาย HCl ความเข้มข้น 3 N 359
ภาพที่ ข.21 โลหะผงหลังการแยกสลาย กำลังขยาย 7,500 เท่า แยกสลายด้วยปัจจัยแรงดันไฟฟ้า 1.4 V อุณหภูมิ 30 ºC สารละลาย HCl ความเข้มข้น 5 N 360
ภาพที่ ข.22 โลหะผงหลังการแยกสลาย กำลังขยาย 7,500 เท่า แยกสลายด้วยปัจจัยแรงดันไฟฟ้า 1.4 V อุณหภูมิ 30 ºC สารละลาย HCl ความเข้มข้น 7 N 360
ภาพที่ ข.23 โลหะผงหลังการแยกสลาย กำลังขยาย 7,500 เท่า แยกสลายด้วยปัจจัยแรงดันไฟฟ้า 1.8 V อุณหภูมิ 30 ºC สารละลาย HCl ความเข้มข้น 7 N 261
ภาพที่ ข.24 โลหะผงหลังการแยกสลาย กำลังขยาย 7,500 เท่า แยกสลายด้วยปัจจัยแรงดันไฟฟ้า 2.2 V อุณหภูมิ 30 ºC สารละลาย HCl ความเข้มข้น 7 N 361
ภาพที่ ข.25 โลหะผงหลังการแยกสลาย กำลังขยาย 7,500 เท่า แยกสลายด้วยปัจจัยแรงดันไฟฟ้า 1.0 V อุณหภูมิ 30 ºC สารละลาย HCl ความเข้มข้น 3 N 362
ภาพที่ ข.26 โลหะผงหลังการบด กำลังขยาย 7,500 เท่า แยกสลายด้วยปัจจัยแรงดันไฟฟ้า 1.0 V อุณหภูมิ 30 ºC สารละลาย HCl ความเข้มข้น 3 N 362

สารบัญภาพ (ต่อ)

หน้า

ภาพที่ ข.27 โลหะผงหลังการบด กำลังขยาย 7,500 เท่า แยกสลายด้วยปัจจัยแรงดันไฟฟ้า 1.0 V อุณหภูมิ 30 ºC สารละลาย HCl ความเข้มข้น 5 N 363

ภาพที่ ข.28 โลหะผงหลังการบด กำลังขยาย 7,500 เท่า แยกสลายด้วยปัจจัยแรงดันไฟฟ้า 1.0 V อุณหภูมิ 30 ºC สารละลาย HCl ความเข้มข้น 7 N (ไม่กรองก่อนบด) 363

ภาพที่ ข.29 โลหะผงหลังการบด กำลังขยาย 7,500 เท่า แยกสลายด้วยปัจจัยแรงดันไฟฟ้า 1.0 V อุณหภูมิ 30 ºC สารละลาย HCl ความเข้มข้น 7 N (กรอง< 26 μm ก่อนบด) 364

ภาพที่ ข.30 โลหะผงหลังการแยกสลาย กำลังขยาย 10,000 เท่า แยกสลายด้วยปัจจัยแรงดันไฟฟ้า 0.4 V อุณหภูมิ 30 ºC สารละลาย HCl ความเข้มข้น 1 N 364

ภาพที่ ข.31 โลหะผงหลังการบด กำลังขยาย 10,000 เท่า แยกสลายด้วยปัจจัยแรงดันไฟฟ้า 0.4 V อุณหภูมิ 30 ºC สารละลาย HCl ความเข้มข้น 1 N 365

ภาพที่ ข.32 โลหะผงหลังการแยกสลาย กำลังขยาย 10,000 เท่า แยกสลายด้วยปัจจัยแรงดันไฟฟ้า 0.8 V อุณหภูมิ 30 ºC สารละลาย HCl ความเข้มข้น 1 N 365

ภาพที่ ข.33 โลหะผงหลังการบด กำลังขยาย 10,000 เท่า แยกสลายด้วยปัจจัยแรงดันไฟฟ้า 0.8 V อุณหภูมิ 30 ºC สารละลาย HCl ความเข้มข้น 1 N 366

ภาพที่ ข.34 โลหะผงหลังการแยกสลาย กำลังขยาย 10,000 เท่า แยกสลายด้วยปัจจัยแรงดันไฟฟ้า 1.2 V อุณหภูมิ 30 ºC สารละลาย HCl ความเข้มข้น 1 N 366

ภาพที่ ข.35 โลหะผงหลังการบด กำลังขยาย 10,000 เท่า แยกสลายด้วยปัจจัยแรงดันไฟฟ้า 1.2 V อุณหภูมิ 30 ºC สารละลาย HCl ความเข้มข้น 1 N 367

ภาพที่ ข.36 ใบรายงานผลการตรวจสอบผงโลหะด้วย X-ray Diffractrometer (XRD)ที่แรงดัน 0.2 โวลต์ อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส กรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 3 N 368

ภาพที่ ข.37 ผลการตรวจสอบผงโลหะด้วย X-ray Diffractrometer (XRD) ที่แรงดัน 0.6 โวลต์ อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส กรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 7 N 369

สารบัญภาพ (ต่อ)

หน้า

ภาพที่ ข.38 ผลการตรวจสอบผงโลหะด้วย X-ray Diffractrometer (XRD) ที่แรงดัน 1.0 โวลต์ อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส กรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 5 N 370
ภาพที่ ข.39 ผลการตรวจสอบผงโลหะด้วย X-ray Diffractrometer (XRD) ที่แรงดัน 1.0 โวลต์ อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส กรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 5 N 371
ภาพที่ ข.40 ผลการตรวจสอบผงโลหะด้วย X-ray Diffractrometer (XRD) ที่แรงดัน 1.0 โวลต์ อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส กรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 7 N 372
ภาพที่ ข.41 ผลการตรวจสอบผงโลหะด้วย X-ray Diffractrometer (XRD) ที่แรงดัน 1.4 โวลต์ อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส กรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 1 N 372
ภาพที่ ข.42 ผลการตรวจสอบผงโลหะด้วย X-ray Diffractrometer (XRD) ที่แรงดัน 1.8 โวลต์ อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส กรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 7 N 373
ภาพที่ ข.43 ผลการตรวจสอบผงโลหะด้วย X-ray Diffractrometer (XRD)ที่แรงดัน 2.2 โวลต์ อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส กรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 7 N 373
ภาพที่ ข.44 ผลการตรวจสอบขนาดและการกระจายตัวของโลหะผงที่แรงดัน 0.2 โวลต์ อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส กรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 3 N 374
ภาพที่ ข.45 ผลการตรวจสอบขนาดและการกระจายตัวของโลหะผงที่แรงดัน 0.2 โวลต์ อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส กรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 3 N 374
ภาพที่ ข.46 ผลการตรวจสอบขนาดและการกระจายตัวของโลหะผงที่แรงดัน 0.2 โวลต์ อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส กรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 7 N 375
ภาพที่ ข.47 ผลการตรวจสอบขนาดและการกระจายตัวของโลหะผงที่แรงดัน 0.6 โวลต์ อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส กรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 3 N 375

สารบัญภาพ (ต่อ)

หน้า

ภาพที่ ข.48 ผลการตรวจสอบขนาดและการกระจายตัวของโลหะผงที่แรงดัน 0.6 โวลต์ อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส กรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 5 N 376
ภาพที่ ข.49 ผลการตรวจสอบขนาดและการกระจายตัวของโลหะผงที่แรงดัน 0.6 โวลต์ อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส กรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 7 N 376
ภาพที่ ข.50 ผลการตรวจสอบขนาดและการกระจายตัวของโลหะผงที่แรงดัน 10. โวลต์ อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส กรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 3 N 377
ภาพที่ ข.51 ผลการตรวจสอบขนาดและการกระจายตัวของโลหะผงที่แรงดัน 1.0 โวลต์ อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส กรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 5 N 377
ภาพที่ ข.52 ผลการตรวจสอบขนาดและการกระจายตัวของโลหะผงที่แรงดัน 1.0 โวลต์ อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส กรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 7 N 378
ภาพที่ ข.53 ผลการตรวจสอบขนาดและการกระจายตัวของโลหะผงที่แรงดัน 1.0 โวลต์ อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส กรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 3 N 378
ภาพที่ ข.54 ผลการตรวจสอบขนาดและการกระจายตัวของโลหะผงที่แรงดัน 1.0 โวลต์ อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส กรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 5 N 379
ภาพที่ ข.55 ผลการตรวจสอบขนาดและการกระจายตัวของโลหะผงที่แรงดัน 0.4 โวลต์ อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส กรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 1 N 379
ภาพที่ ข.56 ผลการตรวจสอบขนาดและการกระจายตัวของโลหะผงที่แรงดัน 0.8 โวลต์ อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส กรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 1 N 380
ภาพที่ ข.57 ผลการทดสอบขนาดและการกระจายตัวของลหะผงที่ แรงดัน 1.2 โวลต์ อุณหภูมิ 30 องศาเซลเศียส กรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 1 380
ภาพที่ ข.58 ผลการตรวจสอบขนาดและการกระจายตัวของโลหะผงที่แรงดัน 0.4 โวลต์ อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส กรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 1 N (โลหะผงหลังบด) 381

สารบัญภาพ (ต่อ)

หน้า

ภาพที่ ข.59 ผลการตรวจสอบขนาดและการกระจายตัวของโลหะผงที่แรงดัน 0.8 โวลต์
อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส กรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 1 N (โลหะผงหลังบด) 381
ภาพที่ ข.60 ผลการตรวจสอบขนาดและการกระจายตัวของลหะผงที่ แรงดัน 1.2 โวลต์
อุณหภูมิ 30 องศาเซลเศียส กรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 1 (โลหะผงหลังบด) 382

รายการสัญลักษณ์

สัญลักษณ์	คำอธิบาย
W	โลหะทังสเตน
C	โลหะคาร์บอน
Co	โลหะโคบอลต์
WC	โลหะทังสเตนคาร์ไบด์
Cr	โลหะโครเมียม
N	ความเข้มข้นของสารละลาย (นอร์มาลิตี)
V	แรงดันไฟฟ้า (โวลต์)
˚C	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)
A	กระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)
HCl	สารละลายไฮโดรคลอริก
HNO3	สารละลายไนตริก
H3PO4	สารละลายฟอสฟอริก
H2SO4	สารละลายซัลฟิวริก
g	กรัม
kg	กิโลกรัม
ml	มิลลิกรัม
HRA	ค่าความแข็ง Rockwell Hardness A Scale

รายการสัญลักษณ์ (ต่อ)

สัญลักษณ์	คำอธิบาย
HV	ค่าความแข็ง Vickers Hardness
g/cm3	น้ำหนักกรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร
mA	มิลลิแอมป์
mV	มิลลิโวลต์
TiC	โลหะไททาเนียมคาร์ไบด์
TaC	โลหะแทนทาลัมคาร์ไบด์
TiTaC2	โลหะไททาเนียมแทนทาลัมคาร์ไบด์
μm	ไมโครเมตร
kWh	กิโลวัตต์ชั่วโมง
MSt	ผลรวมกำลังสองเฉลี่ยภายในกลุ่ม
R	รัศมีสำคัญของผิวโค้ง
S	ของแข็ง
SEM	การส่องกล้องจุลทัศน์แบบสแกน
XRD	การวิเคราะห์ชนิดของธาตุ
Si	ซิลิคอน
Gic	ค่าความแกร่ง
PIM	กระบวนการอัดขึ้นรูปวัสดุ
CIP	การอัดแน่น
P_G	ความหนาแน่นกรีน
P_T	ความหนาแน่นทางทฤษฎี

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความสำคัญ และที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย

1.1.1 ปัจจุบันอุตสาหกรรมการผลิตชิ้นส่วนและแม่พิมพ์ในประเทศ ทำให้มีเศษซีเมนต์ทังสเตนคาร์ไบด์เพิ่มขึ้นไม่น้อยกว่า 25 ตัน/ปี อาทิ เศษเครื่องมือตัด(Cutting tools) แบบแผ่นมีดตัด (Insert tools) แบบแท่ง (Solid tools) เอ็นมิลล์ (End mills) สว่าน(Drills) เป็นต้น เศษโลหะเหล่านี้ไม่สามารถใช้งานต่อไปได้ แต่มีการซื้อขายในรูปของเศษวัสดุในราคาประมาณ 175-350 บาท/กิโลกรัม ซึ่งเป็นการซื้อขายในราคาต่ำเพื่อส่งออกไปยังประเทศกลุ่มอุตสาหกรรมการผลิตเครื่องมือและชิ้นส่วนดังกล่าว อาทิ สหรัฐอเมริกา สวีเดน เยอรมัน อิสรเอล รัสเซีย ญี่ปุ่น ไต้หวัน และประเทศจีน เป็นต้น และปัจจุบันประเทศไทยไม่มีการศึกษาเพื่อนำเศษโลหะเหล่านั้นกลับมาใช้ใหม่ แต่เป็นผู้ส่งออกเศษโลหะดังกล่าว 100 % และเป็นผู้นำเข้าผงทังสเตนในราคาสูงกว่า 5,500-35,000 บาท/กิโลกรัม ขึ้นกับชนิด ขนาด ความบริสุทธิ์ของโลหะผง เป็นต้น

1.1.2 เศษซีเมนต์ทังสเตนคาร์ไบด์ในกลุ่มเครื่องมือตัด ชนิด แผ่นมีด (Insert tools) เป็นเศษโลหะที่มีส่วนผสมทังสเตนคาร์ไบด์สูงกว่าร้อยละ 80 โดยน้ำหนัก หลังจากผ่านการใช้งานแล้วบริเวณคมตัด (Cutting edge) สึกหรอคมตัดเสียหายและสูญเสียน้ำหนักเพียงเล็กน้อยประมาณร้อยละ 5-15 จะไม่สามารถใช้งานต่อไปได้ ด้วยเหตุผลที่ว่าชิ้นงานที่ผลิตด้วยการปาดผิว(Removal) ต้องการความเที่ยงตรงสูง (High Precision) เครื่องมือตัดจึงกลายเป็นเศษโลหะที่ผู้ผลิตเครื่องมือและผลิตผงโลหะนำกลับไปผ่านกระบวนการแยกโลหะประกอบเพื่อผลิตและนำกลับมาใช้ใหม่ (Recycling) เป็นผงโลหะทังสเตนคาร์ไบด์ เพื่อนำกลับมาใช้อีกครั้ง

1.1.3 พบว่าเศษโลหะทังสเตนคาร์ไบด์กว่าร้อยละ 90 โลหะประสานเป็นโคบอลต์(Cobalt binder) และการนำกลับมาใช้ใหม่ (Recycle) ใช้เทคนิคการสลาย (Dissolution) ที่โลหะโคบอลต์เพื่อคงสถานะเดิมแต่เพียงผงโลหะทังสเตนคาร์ไบด์ และทำให้บริสุทธิ์ (WC pure) ที่ความหนาแน่น 14 -19 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร จากนั้นลดขนาดเกรน (Grain size) อยู่ในช่วง 0.15-50.00 μm โดยการบด (Mechanical alloying) หากผลิตชิ้นงานให้ความแข็งสูงถึง 830-2500 HV มูลค่าจะสูงขึ้นหลายเท่า ขึ้นกับขนาดเกรนและสมบัติของผงโลหะ เป็นต้น

1.1.4 ตามประกาศของคณะกรรมส่งเสริมการลงทุน (BOI) ที่ 7/2546 ลงวันที่ 16 ตุลาคม 2546 สนับสนุนและส่งเสริมการลงทุนด้านการผลิตชิ้นส่วนอัดขึ้นรูป(Sintered Product) จากผงโลหะทังสเตนคาร์ไบด์ เป็นอุตสาหกรรมที่ให้ความสำคัญเป็นพิเศษ และส่งเสริมการผลิตอุปกรณ์หรือวัสดุสำหรับงาน กัด กลึง เจาะ เจียระไนและทำเกลียว ใช้กับเครื่องจักรกลที่มีความเที่ยงตรงสูง

(High precision) รัฐบาลให้ความสำคัญด้านการพัฒนาวัสดุผง(Powder) การผลิตวัสดุผงและการผลิตชิ้นงานด้วยวัสดุผงโลหะความแข็งสูง(Hard metal) ให้เป็นชิ้นงานทดแทนการนำเข้าสำหรับใช้ในอุตสาหกรรมแม่พิมพ์ และอุตสาหกรรมการผลิตเครื่องจักรกล รวมถึงเครื่องจักรกลการเกษตรซึ่งใช้ชิ้นส่วนทนต่อการสึกหรอสูง(Wear resistance) ซึ่งเป็นโลหะทังสเตนเป็นส่วนใหญ่ (ที่มา : BOI)

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

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

1.1.7 สำหรับการผลิตทังสเตน (Scheelite , Wolfram) ของไทย พบว่าส่งออกแร่วูลแฟรมจำนวนมากถึง 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) หรือประมาณ 173.8-227.3 บาท/กิโลกรัม (ที่มา:ศูนย์สารสนเทศ ส่วนประกอบโลหะกรรม สำนักอุตสาหกรรมพื้นฐาน กรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่ กระทรวงอุตสาหกรรม) ซึ่งเป็นการส่งออกวัตถุดิบในราคาถูก แต่ซื้อผงทังสเตนคาร์ไบด์ในราคาแพงขึ้นกว่า 20- 45 เท่า

1.1.8 เครื่องมือตัดทังสเตนคาร์ไบด์ ในปี 2549 มีมูลค่ารวมทั่วโลก 389,000 ล้านบาท แนวโน้มสูงขึ้นไม่น้อยกว่าร้อยละ 25 และเครื่องมือตัดชนิดเหล็กกล้ารอบสูงมีมูลค่าทั่วโลกมากกว่า 130,000 ล้านบาท มีแนวโน้มสูงขึ้นมากกว่า ร้อยละ 15 (ที่มา: Sandvik Annual report 2007)

1.1.9 พบว่าประเทศสหรัฐอเมริกาสะสมทังสเตนมากกว่า 9,700 ตันในปี พ.ศ. 2543 และสะสมมากขึ้นทั้งแร่วุลแฟรมและเศษทังสเตน โดยกำหนดให้หน่วยงานด้านการป้องกันประเทศ เพื่อพัฒนาการใช้วัสดุทังสเตนทั้งด้านการทหารและเศรษฐกิจ (Defense National Stockpile Center :DNSC) ร่วมกับกระทรวงพาณิชย์เพื่อออกกฎหมายและทำข้อตกลงทางการค้าเพื่อนำเข้าทังสเตนร่วมกับประเทศคู่ค้าสำคัญ อาทิ จีนและรัสเซีย ซึ่งเป็นผู้ผลิตแร่ทังสเตนรายใหญ่ของโลก สำหรับ

ประเทศจีนมีสัดส่วนการผลิตทังสเตนกว่าร้อยละ 83 ของผู้จำหน่ายทั่วโลก (ที่มา : American National Carbide พ.ศ. 2545 :ANC)

METHOD	ESTIMATED W RECOVERY (T)
CHEMICAL PROCESSING (APT)	2,500
ZINC PROCESS	
CRUSHING (GRIT FOR HARD FACING RODS)	500
MELTING (ALLOY ADDITION FOR STELLITES ETC.)	300
LEACH MILLING	<50
MENSTRUM PROCESS	<50
OTHER PROCESSES	<50

NOTE: ESTIMATED USA CONSUMPTION FOR CEMENTED CARBIDE: 5,000 - 5,400 T

ภาพที่ 1.1 ปริมาณการผลิต (ตัน) ทังสเตนคาร์ไบด์จากเศษซีเมตน์ทังสเตนคาร์ไบด์กลับมาใช้ใหม่ของแต่ละกระบวนการ ของประเทศสหรัฐอเมริกาในปี 1994 [22]

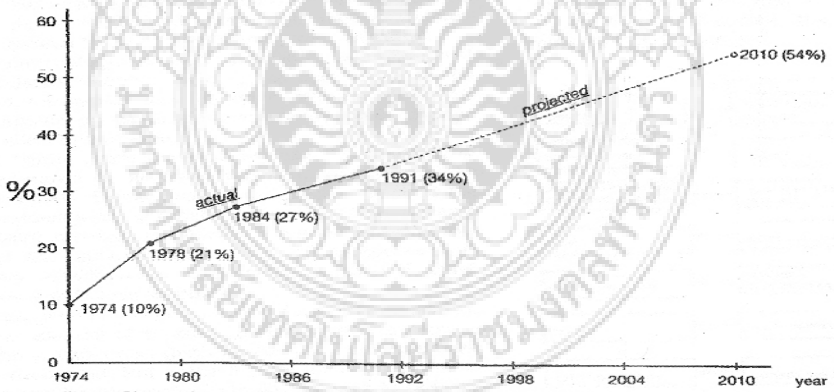


Fig. 4. Share of cemented carbide recycling in total U.S.A. tungsten consumption

ภาพที่ 1.2 สัดส่วนการนำทังสเตนคาร์ไบด์กลับมาใช้ใหม่ของประเทศสหรัฐอเมริกา [22]

1.1.10 การเติบโตในด้านอุตสาหกรรมการผลิตชิ้นส่วนและแม่พิมพ์ ซึ่งมีมูลค่าสูงกว่า 5 หมื่นล้านบาทในปี 2545 (ที่มา : สมาคมอุตสาหกรรมแม่พิมพ์ไทย และสถาบันยานยนต์) เป็น

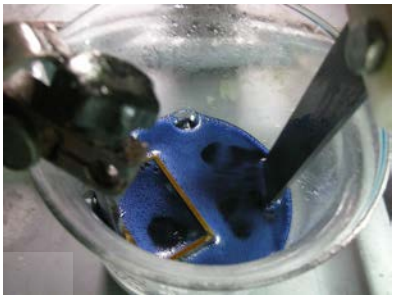
อุตสาหกรรมพื้นฐานสำคัญ นำเข้าสินค้าประเภทชิ้นส่วนเครื่องมือตัด วัสดุผลิตชิ้นส่วนแม่พิมพ์ รวมถึงการซ่อม การบำรุงรักษาชิ้นส่วนเครื่องจักรกลต่าง ๆ ใช้วัสดุต้นน้ำ ชนิด ผงโลหะทังสเตนคาร์ไบด์และชิ้นส่วนโลหะทังสเตนคาร์ไบด์ นำเข้าจากต่างประเทศมาใช้งานกระทั่งหมดอายุกลายเป็นเศษโลหะไม่สามารถใช้ต่อไปได้ (Waste) กลายเป็นวัตถุดิบสำหรับการ Recycling ซึ่งมีจำนวนมากขึ้นอย่างต่อเนื่องตลอดมา

1.1.11 ผลการวิจัยพื้นฐานในการแยกสลายเศษโลหะซีเมนต์ทังสเตนคาร์ไบด์ด้วยกระบวนการทางเคมีไฟฟ้า(Electrolysis) โดย สหรัตน์ วงษ์ศรียะและคณะ เป็นการทดลองในห้องปฏิบัติการ โดยประยุกต์อุปกรณ์การทดลองเคมีเพื่อแยกสลายโลหะ ผลปรากฏว่าสลายเศษซีเมนต์ทังสเตนคาร์ไบด์และสกัดผงโลหะทังสเตนคาร์ไบด์มีขนาดในช่วง 15.00 – 559.00 μm ซึ่งใช้รูปแบบการทดลองซ้ำ ๆ ในห้องปฏิบัติการ โดยใช้เครื่องมือในห้องปฏิบัติการทางเคมี แสดงดังรูปที่ 1.5 ผงโลหะเป็นทังสเตนประมาณ 99% ผู้วิจัยจึงเห็นโอกาสและความเป็นไปได้ในการพัฒนาอุปกรณ์การทดลองสำหรับการ Recycling โลหะทังสเตนคาร์ไบด์โดยเฉพาะ ซึ่งเป็นโลหะที่มีบทบาทสูงในอุตสาหกรรมการผลิต

ดังนั้น การพัฒนาอุปกรณ์แบบกึ่งอัตโนมัติ และพัฒนากระบวนการแยกสลาย (Dissolution) เศษซีเมนต์ทังสเตนคาร์ไบด์ (Cement tungsten carbide scrap) เพื่อศึกษาปัจจัยที่ดีที่สุดในการผลิตให้เป็นผงโลหะทังสเตนคาร์ไบด์ (Tungsten carbide powder) เป็นการศึกษาและพัฒนา เป็นองค์ความรู้ใหม่ที่มีโอกาสทางการผลิตภายในประเทศ หากพัฒนาได้จะเป็นการสร้างอุปกรณ์ทดลองและพัฒนากระบวนการใหม่เพื่อพัฒนางานวิจัยต่อเนื่องให้สามารถสร้างมูลค่าเพิ่มและนำไปสู่การทดแทนการนำเข้าได้หลายล้านบาทต่อปีในอนาคต

การวิจัยนี้ จึงมีเป้าหมายเพื่อพัฒนาเครื่องมือและอุปกรณ์การผลิตผงโลหะทังสเตนคาร์ไบด์ขนาดเล็ก เป็นการพัฒนาชุดเครื่องมือทดลองต้นแบบ (Prototype) ไว้สำหรับศึกษาวิจัยการแยกสลายโลหะจากเศษซีเมนต์ทังสเตนคาร์ไบด์ การสกัด รวมถึงการแยกผงโลหะจากสารละลาย การกรอง การอบ การบด ทดลองผลิตผงโลหะภายใต้การกำหนดคุณลักษณะของผงโลหะทังสเตนคาร์ไบด์ให้เหมาะสมและเปรียบเทียบกับผงโลหะนำเข้า เป็นแนวทางสำหรับวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีการผลิตในเชิงพานิช ในกาสต่อไป

ภาพที่ 1.3 เศษซีเมนต์ทังสเตนคาร์ไบด์[15]



ภาพที่ 1.4 การแยกสลายเศษด้วยเคมีไฟฟ้า[15]

ตะกล้าบรรจุเศษแผ่นมีดในสารละลายอิเล็กโตรไลต์

ชิ้นงานที่ผ่านการแยกสลาย

ภาพที่ 1.5 เศษซีเมนต์ทังสเตนคาร์ไบด์และการแยกสลายในห้องทดลอง [15]

ภาพที่ 1.6 ผงโลหะทังสเตนคาร์ไบด์จากการทดลองในห้องปฏิบัติการ [15]

1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 เพื่อศึกษาและออกแบบเครื่องมือและอุปกรณ์สำหรับแยกสลายเศษซีเมนต์ทังสเตนคาร์ไบด์ด้วยระบบเคมีไฟฟ้าแบบกึ่งอัตโนมัติ

1.2.2 เพื่อพัฒนากระบวนการผลิตโลหะผงและสร้างเครื่องมือทดลองสำหรับแยกสลายเศษซีเมนต์ทังสเตนคาร์ไบด์ การสกัดและคัดแยกผงโลหะทังสเตนคาร์ไบด์

1.2.3 เพื่อผลิตผงทังสเตนคาร์ไบด์ (Cement tungsten carbide powder) มีสมบัติเหมาะสมต่อการใช้งานและเปรียบเทียบกับผงโลหะทังสเตนคาร์ไบด์นำเข้าจากต่างประเทศ

1.2.4 เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการพัฒนาเทคโนโลยีการผลิตเชิงเศรษฐศาสตร์

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1.3.1 ออกแบบและสร้างเครื่องจักรกลแยกสลาย (Dissolution) เศษโลหะทังสเตนคาร์ไบด์ ด้วยกรรมวิธีทางเคมีไฟฟ้า (Electrolysis) ให้มีการแยกสลายชิ้นงานแบบกึ่งอัตโนมัติ

1.3.2 ศึกษาคุณลักษณะเศษเครื่องมือตัด (Cutting tools scrap) เลือกกลุ่มแผ่นมีด (Insert tools) ที่ผ่านการใช้งานแล้ว หรือเศษชิ้นงานทังสเตนคาร์ไบด์

1.3.3 ให้การแยกสลายเศษโลหะด้วยการพัฒนาเครื่องจักรสำหรับกัดกร่อนโลหะทางเคมีไฟฟ้าที่มีระบบการทำงานแบบกึ่งอัตโนมัติ ประกอบด้วย

1.3.3.1 อุปกรณ์ที่ทำการพัฒนาให้มีส่วนประกอบหลัก อาทิ ถังบรรจุสารละลายถังบรรจุชิ้นงาน (Barrel) ระบบส่งกำลังขับเคลื่อนถังบรรจุชิ้นงานหมุนรอบแกนในสารละลายอิเล็กโตรไลต์ ระบบหมุนเวียนสารละลาย ระบบการกรองผงโลหะ ระบบจ่ายกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าแบบปรับค่ากระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้า เป็นต้น

1.3.3.2 ใช้มอเตอร์ขนาด 220 โวลต์ เป็นต้นกำลังเพื่อส่งกำลังให้ถังบรรจุชิ้นงาน (Barrel) ขนาดไม่เกิน 5.0 กิโลกรัม

1.3.3.3 การทำปฏิกิริยาในสารละลาย เลือกใช้กระแสไฟฟ้าได้ในช่วง 0 - 10 แอมแปร์ และกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในสารละลายไม่เกิน 10 แอมแปร์ ปรับแรงดันไฟฟ้าได้ถึง 30 โวลต์

1.3.3.4 อุปกรณ์ที่สร้างขึ้นสามารถให้ความร้อนแก่สารละลายได้ สูงถึง 110 องศาเซลเซียส เพื่อการแยกสลายโลหะประสาน

1.3.3.5 ถังบรรจุสารละลายสามารถเปิด และ ปิด ให้สารละลายไหลออกจากถังสู่ถังสำรองและนำสารละลายกลับเข้าสู่การใช้งานแบบหมุนวนได้ (หลังการแยกผงและการตกตะกอน)

1.3.3.6 มีระบบกรอง เพื่อแยกผงโลหะและสารละลายออกจากกัน

1.3.3.7 มีระบบหมุนเวียนสารละลายกลับไปใช้ใหม่และการเติมสารละลาย

1.3.4 ศึกษาเปรียบเทียบกับผงโลหะนำเข้าและศึกษาแนวทางการนำไปใช้ประโยชน์

1.3.5 ศึกษาเทคโนโลยีการผลิตโลหะผงทังสเตนคาร์ไบด์สำหรับกระบวนการนำเศษซีเมนต์คาร์ไบด์กลับมาใช้ใหม่

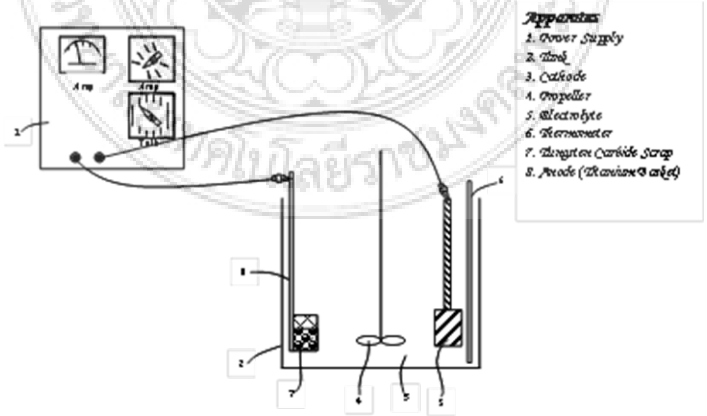
1.3.6 ศึกษาด้านเศรษฐศาสตร์ อาทิ ความเป็นไปได้ในการลงทุนเพื่อวิจัยและพัฒนาในระยะต่อไป

1.4. ทฤษฎี สมมุติฐาน (ถ้ามี) และกรอบแนวความคิดของโครงการวิจัย

1.4.1 ทฤษฎีการแยกสลายทางเคมีไฟฟ้า (Electrolysis)

หลักการแยกยสลายโลหะด้วยเคมีไฟฟ้าโดยให้กระแสไหลผ่านสารละลายทำให้ตัวทำละลายเกิดการเปลี่ยนแปลงที่ขั้วไฟฟ้า เกิดออกซิเดชั่น(Oxidation) ขั้วบวก(Anode) ไอออนลบเคลื่อนที่เข้าหา Anode เพื่อถ่ายเทอิเล็กตรอนและการีดักชั่น(Reduction) ที่ขั้วลบ(Cathode) ไอออนบวกเคลื่อนที่เข้าหา Cathode เพื่อรับอิเล็กตรอน กฎการแยกสลายด้วยไฟฟ้าของฟาราเดย์เพื่ออธิบายความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณไฟฟ้าที่ผ่านสารละลายอิเล็กโตรไลต์กับปริมาณสารละลายที่เกิดขึ้น ประกอบด้วย มวลของสารเกิดขึ้นที่ขั้วไฟฟ้าจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับปริมาณไฟฟ้าไฟฟ้าไหลผ่านสารละลาย และมวลของสารเกิดขึ้นที่ขั้วไฟฟ้าเมื่อใช้ปริมาณไฟฟ้าเท่ากันจะเป็นสัดส่วนเดียวกันกับน้ำหนักสมมูลของสาร

อุปกรณ์สำคัญประกอบด้วยแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้า ต่อขั้วไฟฟ้าบวก กับตระกล้า (Basket) บรรจุชิ้นงานสำหรับแยกสลาย ส่วนขั้วลบได้แก่ เหล็กกล้าสเตนเลส หรือวัสดุที่ทนการกัดกร่อน เป็นต้น

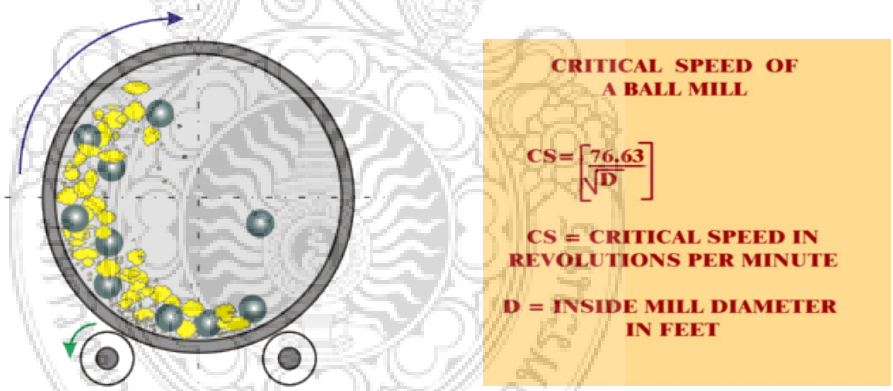


ภาพที่ 1.7 อุปกรณ์พื้นฐานในการแยกสลายซีเมนต์ทังสเตนคาร์ไบด์ด้วยอิเล็กโตรไลต์ [23]

การแยกสลายโลหะซีเมนต์ทังสเตนคาร์ไบด์ ซึ่งผ่านการขึ้นรูปจากผงทังสเตนคาร์ไบด์ (WC Powder) ที่มีขนาดเกรน ในช่วง 0.25 – 40 ไมครอน ผสมกับโลหะประกอบโคบอลต์ ในสัดส่วนร้อยละ 4-20 โดยน้ำหนัก ผสมเข้าด้วยกัน ทำการอัดขึ้นรูปและอบผนึก (Sintering) ที่อุณหภูมิ 1,450-1,600 องศาเซลเซียส ผู้ผลิตผลิตชิ้นงานโดยทั่วไปกำหนดคุณลักษณะเป็น ชิ้นงานที่มีโครงสร้างเกรนใหญ่ (Coarse) มีความแข็ง 830-1,200 HV โครงสร้างเกรนขนาดกลาง (Medium) มีความแข็ง 1201-1520 HV โครงสร้างเกรนเล็ก(Fine) มีความแข็ง 1521-1750 HV โครงสร้างเกรนละเอียด(Sub-Micron) มีความแข็งเท่ากับโครงสร้างเกรนเล็ก แต่ความทนทานต่อการแตกหักสูงกว่า และโครงสร้างเกรนละเอียดมาก(Ultra fine) ความแข็งในช่วง 1751-1950 HV เป็นต้น

1.4.2 การแยกสลายเกิดไอออนลบเคลื่อนที่เข้าไปยังขั้วที่ต่อเข้ากับเศษโลหะเพื่อถ่ายเทอิเล็กตรอน ทำให้โลหะผสมโคบอลต์ละลายออกจากชิ้นงานส่วนทังสเตนคาร์ไบด์ในรูปเม็ดเกรนขนาดเล็ก (Particle) ที่ความหนาแน่นสูงกว่า 14-19.25 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร ตกลงด้านล่างซึ่งเศษโลหะขนาดเล็กจะนำไปแยกสารละลายและผลิตเป็นผงทังสเตนคาร์ไบด์ที่มีสมบัติที่ดีต่อการนำไปใช้งาน เช่น การพ่นเคลือบเพื่อซ่อมชิ้นส่วนโลหะ และขึ้นรูปเป็นชิ้นงาน (Solid part) เป็นต้น

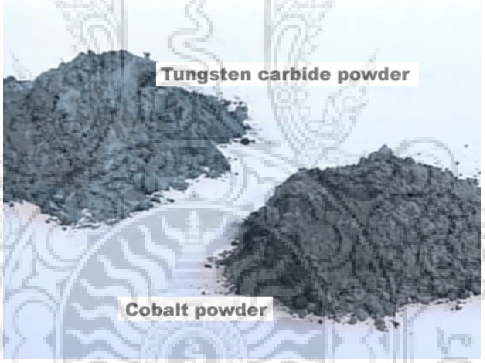
1.4.3 ทฤษฎีการบดย่อยวัสดุและการขึ้นรูปเป็นชิ้นงาน



ภาพที่ 1.8 รูปแบบการบดด้วย Mechanical alloying[26]

ภาพที่ 1.9 เครื่องบด (Mechanical alloying) [26]

เครื่องบดตามรูปที่ 1.9 เป็นเครื่อง รุ่น SPEX-8000 สำหรับบดโลหะให้เป็นผง อาทิ ลดขนาดเกรน (particle size reducing) การผสม (mixing) และการบดเพื่อเปลี่ยนแปลงรูปร่างเกรน (particle shape change)



ภาพที่ 1.10 ผงโลหะนำเข้าจากต่างประเทศ [26]

1.5 วิธีดำเนินการวิจัย และสถานที่ทำการทดลอง/เก็บข้อมูล

1.5.1 การเตรียมงานและการวิจัย

1.5.1.1 ออกแบบเครื่องจักรกลภายใต้หลักการแยกสลายทังสเตนคาร์ไบด์ (เครื่องมือตัดที่ผ่านการใช้งานแล้ว) ประกอบด้วยส่วนประกอบสำคัญ ได้แก่ การออกแบบระบบส่งกำลังให้ภาชะนะบรรจุชิ้นงานเหมาะสมต่อการจ่ายปริมาณไฟฟ้าและการแยกสลาย การใช้วัสดุทนการกัดกร่อนต่อสารละลาย ออกแบบระบบจ่ายกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้า ออกแบบระบบการแยกสลายเศษซีเมนต์ทังสเตนคาร์ไบด์ ระบบการแยกวัสดุผง ระบบการใช้สารระลาย ระบบการสกัดความบริสุทธิ์ของผงโลหะ การบดย่อยและการกำหนดคุณลักษณะของผงทังสเตสคาร์ไบด์

1.5.1.2 การคำนวณรอบการหมุนของภาชะนะบรรจุชิ้นงานเพื่อหาความสามารถในการแยกสลาย การกำหนดขนาด การรับภาระ(Load) อัตราการแยกสลาย

1.5.1.3 การวิเคราะห์ระบบการจ่ายกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าและการกำหนดขนาดที่เหมาะสม

1.5.1.4 การเลือกใช้วัสดุที่เหมาะสมต่อระบบการทำงานเพื่อแยกสลายชิ้นงาน

1.5.1.5 การประกอบและสร้างเครื่องจักรกล

1.5.1.6 ศึกษาคุณลักษณะของเครื่องมือตัดที่ใช้งานแล้วเพื่อคัดแยกและจัดกลุ่ม ให้ง่ายต่อการ Recycle ได้แก่ รูปร่าง ขนาดและชนิดสารเคลือบ เป็นต้น

1.5.1.7 เตรียมวัตถุดิบ ได้แก่ การอบที่อุณหภูมิ 800 – 1,200 องศาเซลเซียส และการทำให้แตก การย่อยเพื่อลดขนาดของเครื่องมือตัดใช้แล้วให้เล็กลงก่อนนำไป บดเป็นผงต่อไป

1.5.1.8 ออกแบบการทดลอง การบันทึกผลการทดลอง

1.5.1.9 พัฒนาระบบการแยกสลายเศษวัสดุทังสเตนที่ผ่านการใช้งาน เป็นวัสดุผง (Powder)

1.5.1.10 ศึกษาการออกแบบและทดสอบด้านสมบัติของผงโลหะ

1.5.1.11 การประเมินคุณภาพวัสดุผงที่ได้จากการผลิต ค้นหาจุดบกพร่องและปรับปรุง

1.5.1.12 การปรับปรุงและกำหนดความเหมาะสมในการผลิตผงโลหะ

1.5.1.13 สร้างมาตรฐานโลหะผง

1.5.1.14 พัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์ ประกอบด้วย กรรมวิธีการผลิต (Process prototype) และผลิตภัณฑ์ผงทังสเตนคาร์ไบด์ (Product prototype)

1.5.1.15 การรายงานผลและเผยแผ่ผลงานวิจัย

1.5.2 กระบวนการและเวลาดำเนินการ

1.5.2.1 ออกแบบอุปกรณ์และจัดเตรียมวัตถุดิบและตรวจสอบคุณลักษณะ

	ใช้เวลาประมาณ 1 เดือน
1) ออกแบบและจัดหาวัตถุดิบ	15 วัน
2) การเลือกวัสดุทนสารเคมีเพื่อการผลิต	10 วัน
3) เลือกขนาดของ Scrap ที่เหมาะสมต่อการนำไปผลิตผง (Powder)	5 วัน

1.5.2.2 สร้างอุปกรณ์การผลิตเพื่อ Recycling ใช้เวลาประมาณ 2 เดือน

1) เตรียมวัสดุและอุปกรณ์	10 วัน
2) การขึ้นรูป ได้แก่ การเชื่อม กลึง กัด เจียระไน	30 วัน

3) การประกอบเครื่องจักร ได้แก่ ระบบส่งกำลัง ระบบไฟฟ้า เป็นต้น 20 วัน

1.5.2.3 พัฒนากระบวนการผลิต ใช้เวลาประมาณ 4 เดือน

1) การทดสอบและปรับปรุงเครื่องจักรให้เหมาะสมต่อการผลิต 45 วัน

2) ศึกษาอิทธิพลของตัวแปรเพื่อออกแบบกระบวนการแยกสลาย 60 วัน

3) ปรับปรุงและวิเคราะห์ข้อมูล 15 วัน

1.5.2.4 การทดลองผลิต การแยกสารและโลหะผง ใช้เวลาประมาณ 1 เดือน

1) ออกแบบการทดลอง 5 วัน

2) แยกสลายชิ้นงาน 15 วัน

3) แยกสารละลายและโลหะผงให้บริสุทธิ์ 10 วัน

1.5.2.5 ทดสอบ ใช้เวลาประมาณ 1 เดือน

1) ทดสอบโลหะผงที่ผ่านการผลิต 15 วัน

2) วิเคราะห์ผงโลหะทางโลหะวิทยา 15 วัน

1.5.2.6 รวบรวมข้อมูล และวิเคราะห์ผล ใช้เวลาประมาณ 1 เดือน

1) รวบรวมผลการทดลอง 15 วัน

2) วิเคราะห์ผลการทดลอง 15 วัน

1.5.2.7 การกำหนดมาตรฐานการผลิตและผงโลหะ ใช้เวลาประมาณ 1 เดือน

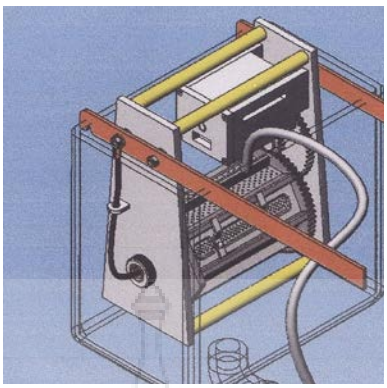
1) วิเคราะห์ข้อมูลระบบการผลิต ผงโลหะและปรับปรุง 15 วัน

2) จัดทำกระบวนการผลิตผงโลหะและผงโลหะมาตรฐาน 15 วัน

1.5.2.8 สรุปผลการวิจัยและรายงาน ใช้เวลาประมาณ 1 เดือน

1) สรุปผลการทดลอง 15 วัน

2) รายงานผลการวิจัย 15 วัน



ภาพที่ 1.11 แนวทางการพัฒนาอุปกรณ์ใหม่สำหรับการแยกสลายผงโลหะทังสเตนคาร์ไบด์

1.6 สถานที่ทดลองและเก็บข้อมูล

1.6.1 สาขาเทคโนโลยีการผลิตเครื่องมือและแม่พิมพ์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร การออกแบบ (CAD) ผลิตเครื่องจักรแยกสลายเศษทังสเตนคาร์ไบด์ ได้แก่ การเชื่อม กลึง กัด เจาะ การทดลองและวิเคราะห์ผล

1.6.2 สถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร ดำเนินการด้านการจัดสรรงบประมาณเพื่อดำเนินการวิจัยตลอดโครงการวิจัย

1.6.3 บริษัท ไทยพัฒนะแมชโทรนิคส์ จำกัด ให้คำปรึกษาด้านการออกแบบ ผลิต ประกอบอุปกรณ์อิเล็กโตรไลต์ การใช้วัสดุทนการกัดกร่อน การติดตั้งอุปกรณ์สกัดและแยกสารละลายทางเคมีแบบกึ่งอัตโนมัติ

1.6.4 ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ เพื่อการทดสอบวัสดุผงโลหะทังสเตนคาร์ไบด์ที่พัฒนาขึ้นโดยการพ่นเคลือบ(Plasma spry) และการตรวจสอบสมบัติของผงโลหะที่พัฒนาขึ้นใหม่

1.6.5 สถาบันวิจัยโลหะวิทยาและวัสดุศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ซอยจุฬา 12 ถนนพญาไท กรุงเทพฯ 10330 ตรวจสอบสมบัติทางเคมีของผงโลหะ

1.6.6 ภาควิชาวิศวกรรมการผลิต สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ทดสอบด้วยเครื่องมือในการทดลอง ได้แก่ การอบให้ความร้อน และการทดสอบสมบัติทางกลของวัสดุ

1.6.7 ภาควิชาวิศวกรรมโลหการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัด นครราชสีมา การวิเคราะห์โลหะ ได้แก่ Atomic absorption spectrometer, Inductivity coupled plasma spectrometer, Mass spectrometer

1.6.8 ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ และ ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา จังหวัด ชลบุรี ทดสอบการใช้งานในห้องปฏิบัติการวิจัยเทคโนโลยีสุญญากาศและฟิล์มบาง และการพ่นเคลือบด้วยวัสดุโลหะผง

1.6.9 ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน จังหวัด นครราชสีมา เพื่อดำเนินการทดสอบสมบัติของวัสดุและเปรียบเทียบ

1.6.10 ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ จังหวัดเชียงใหม่ เพื่อวิเคราะห์อนุภาคนาโนและตรวจสอบอนุภาคนาโนของโลหะขนาดประมาณ 50 นาโนเมตร

1.6.11 ห้องปฏิบัติการ Powder metallurgy คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์เพื่อทดสอบ Transmittion electron microscope, Optical emission spectrometer

ผลงานวิจัยนี้นำไปสู่การพัฒนาต่อยอดจากการผลิตผงทังสเตนคาร์ไบด์ ด้วยการพัฒนาระบบการผลิตผงโลหะ(Process prototype) เพื่อการผลิตเชิงอุตสาหกรรม และผงดลหะทังสเตนคาร์ไบด์ที่เหมาะสมต่อการพ่นเคลือบหรือการอัดขึ้นรูป การอบผนึก ให้มีสมบัติเทียบเท่ากับสินค้านำเข้า เพื่อนำไปพัฒนาสู่การผลิตในเชิงพาณิชย์ และเป็นแนวทางที่นำไปสู่การลดปริมาณการนำเข้าต่อไป

1.7 ระยะเวลาการทำวิจัย

ระยะเวลาโครงการ ประมาณ 1 ปี (ตุลาคม 2552 – กันยายน 2553) (เสนอแผนงานระยะ 1 ปี)

ขั้นตอนการวิจัย	ระยะเวลา 1 ปี											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1. ออกแบบ(Design)	———	———										
2. จัดเตรียมวัสดุและสร้างเครื่อง		———	———	———								
3. พัฒนากระบวนการผลิต			———	———	———	———	———					
4.การทดลองผลิต การแยกสารและโลหะผง						———	———	———				
5. ทดสอบ								———	———			
6.รวบรวมข้อมูลและวิเคราะห์									———	———		
7. กำหนดการผลิตและโลหะผงมาตรฐาน										———	———	
8. สรุปผลและรายงาน											———	———

1.8 อุปกรณ์การวิจัย อุปกรณ์การวิจัยที่จำเป็นต้องใช้และมีพร้อมได้แก่

1.8.1 เครื่องตัดโลหะไททาเนียมคาร์ไบด์

1.8.2 เครื่องเคลือบผิววัสดุ

1.8.3 เครื่องเชื่อมโลหะ

1.8.4 เครื่องเชื่อมพลาสติก

1.8.5 เครื่องบด ขนาด 19 in. (48 cm) x 14 in. (36 cm) x 18 in ใช้สำหรับ (Applications) particle size reducing, blending or mixing, particle shape change

1.8.6 เครื่องกลึง (Lathe machine) เครื่องกัด (Milling machine) เครื่องเจาะ (Drilling) และเครื่องเจียระไน (Grinding machine)

1.8.7 เครื่องกัดอัตโนมัติ (CNC Milling machine) เครื่องกลึงอัตโนมัติ (CNC Lathe)

1.8.8 เครื่องกัดโลหะด้วยไฟฟ้า (EDM)

1.8.9 เตาชุบแข็งสุญญากาศควบคุมการชุบแข็งและการอบคืนตัวแบบอัตโนมัติ

1.8.10 วัสดุชิ้นงานสำหรับผลิตเครื่องมือตัดสามารถจัดหาได้ง่าย ได้แก่ เหล็กกล้าเครื่องมือเหล็กกล้ารอบสูง และทังสเตนคาร์ไบด์ หรือ ซีเมนต์คาร์ไบด์

1.8.11 เครื่องชั่งนำหนัก 1/10,000 กรัม

1.8.12 XRD, CMM, Measuring microscope, Surface roughness, Microscope และเครื่องมืออื่น ๆ

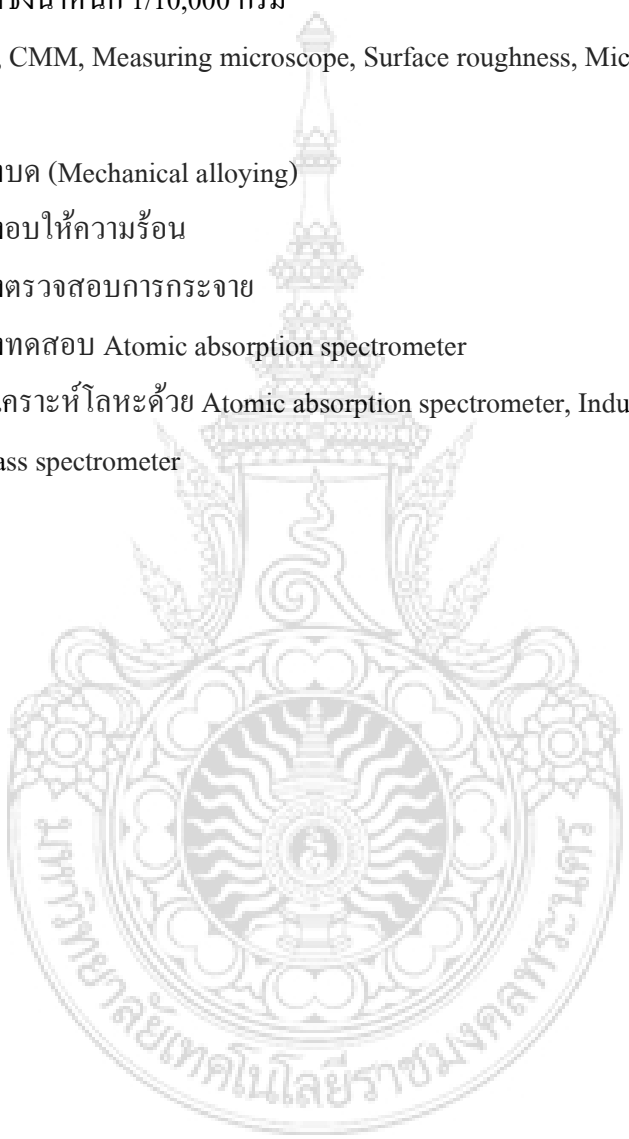
1.8.13 เครื่องบด (Mechanical alloying)

1.8.14 เครื่องอบให้ความร้อน

1.8.15 เครื่องตรวจสอบการกระจาย

1.8.16 เครื่องทดสอบ Atomic absorption spectrometer

1.8.17 การวิเคราะห์โลหะด้วย Atomic absorption spectrometer, Inductivity coupled plasma spectrometer, Mass spectrometer

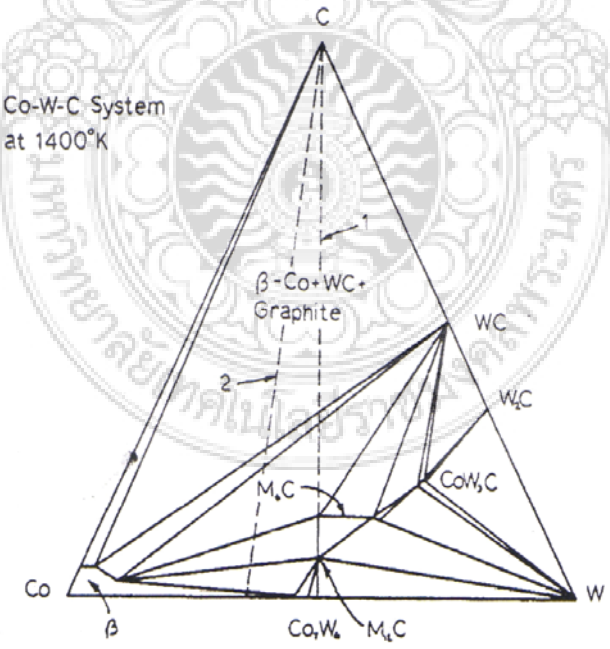


บทที่ 2
แนวคิดและทฤษฎีที่สำคัญ

2.1 บทนำ

เศษซีเมนต์ทังสเตนคาร์ไบด์ (Cement tungsten carbide scrap) เป็นชิ้นงานโลหะความแข็งสูง (Hard metals) มีสารประกอบสำคัญ ได้แก่ ผงทังสเตน (Tungsten powder) คาร์บอน(C) ผงโคบอลต์ (Co powder) เหล็ก (Iron) หรือ นิเกิล (Nickel) และผ่านการผลิตด้วยกรรมวิธีอบผนึก (Sintering) ที่อุณหภูมิในช่วง 1,450-1,600°c โครงสร้างเป็น Co/WC/C ภาพที่ 2.1

สมบัติทางกล(Mechanical properties) ของซีเมนต์ทังสเตนคาร์ไบด์ ขึ้นกับขนาดผง (Grain size) และอัตราส่วนผสมของโคบอลต์ (Cobalt binder) ซึ่งเป็นวัสดุประสาน อาทิ ชิ้นงานโลหะแข็งที่ส่วนผสมของ WC-6 wt% Co ขนาดผงทังสเตนคาร์ไบด์ (WC Powder) 6 μm ให้ความแข็งสูงถึง 1,170 HV ขณะที่ผงทังสเตนคาร์ไบด์ขนาด 1.7 μm ให้ความแข็งที่ 1,600 HV (92.7 HRA)



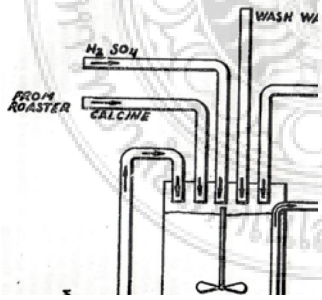
ภาพที่ 2.1 โครงสร้างของทังสเตนคาร์ไบด์ [29]

หากขนาดลดลงมาที่ 0.2 μm ความแข็งเพิ่มขึ้นเป็น 2,300 HV[2] การแยกสลาย(Dissolution) สารประกอบ(Co) จากเศษซีเมนต์ทังสเตนคาร์ไบด์ที่ส่วนผสมโคบอลต์ 6% , 14%, 20% และ 22% ที่ขนาดเกรน 2 μm , 2μm, 3.5μm และ 4.5μm ตามลำดับ ปรากฏว่าสารละลาย กรดซิตริก(Citric acid) ผสมในสารละลายไฮโดรคลอริก (Hydrochloric acid :HCl) ให้กระแสไฟฟ้าได้สูงถึง 2,000-3,000 มิลลิแอมป์ (mA) จากการจ่ายแรงดันไฟฟ้าที่เหมาะสมในช่วง 0.200-0.600 โวลต์ อุณหภูมิของสารละลายอยู่ที่ 25°c โดยใช้เวลานาน 24 ชั่วโมง ปรากฏว่าได้รับสารละลายโคบอลต์อยู่ในช่วง 16-18 g dm^{-3}[17] การทดลองโดยใช้อุณหภูมิและออกซิเจนมีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อการเพิ่มอัตราการแยกสลาย ความสามารถในการสลายสารประกอบโคบอลต์ในสารละลาย ขึ้นกับส่วนประกอบและขนาดเกรน(Grain size) การใช้กรดอซิติก(acetic acid) ที่อุณหภูมิ 80°c ในเวลานานกว่า 50-300 ชั่วโมง ส่งผลให้ความหนาผิวชิ้นงานเกิดการละลายลดลงประมาณ 65-299 μm ทั้งนี้ ขึ้นกับชนิดของเศษวัสดุที่มีสารประกอบโคบอลต์ ได้แก่ สว่าน(Circuit board drill) 7.9% แผ่นมีดตัด(Cutting insert) 8-11% และ 14.6% ชิ้นงานทนการสึกหรอ(Wear part) 10% และ 13% มีดตัด(Cutting knife) 10-12% ขนาดเกรนในช่วง 0.5-9.5 μm[24] จากการแยกสลายชิ้นงานซีเมนต์ทังสเตนคาร์ไบด์ขนาดเกรนทังสเตนคาร์ไบด์ 1-5μm ส่วนผสมโคบอลต์ 20% อบผนึกที่อุณหภูมิ 1,380°c ชิ้นงานมีความแข็ง 83.1 HRA เพื่อแยกสารประกอบโคบอลต์ด้วยสารละลายไฮโดรคลอริก (HCl) ให้อัตราการแยกสารประกอบเพิ่มขึ้นโดยเพิ่มอุณหภูมิสารละลายสูงขึ้นถึง 110°c และการบดย่อย (Re-sintered) ปรากฏว่าสามารถสกัดโคบอลต์ออกได้โดยใช้เวลานานถึง 24 ชั่วโมง[18] จากการละลายสารประกอบโคบอลต์ ด้วยการใช้ตระกล้าไททาเนียม (Titanium) ขั้วบวก บรรจุชิ้นงานและคงอุณหภูมิที่ 25°c แรงเคลื่อนไฟฟ้าอยู่ระหว่าง 200-600 มิลลิโวลต์(mV) ในสารละลายไฮโดรคลอริกผสมกรดซิตริกประมาณ 40 กรัม/ลิตร ปรากฏว่าโคบอลต์ละลาย(Dissolved) ได้ในช่วงร้อยละ 20.5-80.7[23] และการนำเศษซีเมนต์ทังสเตนคาร์ไบด์กลับมาใช้ใหม่ด้วยกระบวนการหลอมในสังกะสี(Zinc process) ใช้อุณหภูมิสูงกว่า 1,000°c ซึ่งเป็นกระบวนการหนึ่งในการนำเศษโลหะกลับมาใช้ใหม่แต่ต้นทุนสูง [22] ในขณะที่การแยกสลายชิ้นงานซีเมนต์ทังสเตนคาร์ไบด์ที่เป็นเครื่องมือตัดและแท่งชิ้นงานซึ่งมีขนาดใหญ่(Larger the piece) การทดลองจ่ายแรงดันไฟฟ้าในช่วง 0.5 – 20 โวลต์ กระแสไฟฟ้าในช่วง 0.5-30 แอมแปร์

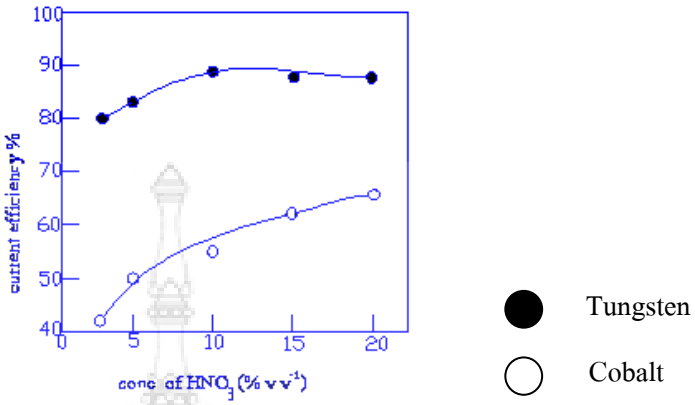
ในสารละลายแอมโมเนียม (Ammonium solution) ใช้วัสดุแท่งทังสเตนเป็นขั้วลบ(Cathode) ปรากฏว่าวัสดุที่ได้มีความบริสุทธิ์ถึง 99% [25]

ปัจจุบันเครื่องมือตัด(Cutting tools) ซีเมนต์ทังสเตนคาร์ไบด์ที่ใช้งานในอุตสาหกรรมมีผู้ผลิตจำนวนมากขึ้น เงื่อนไขและตัวแปร(Parameters) ในการผลิตแต่ละผู้ผลิตมีโอกาสต่างกัน อาทิ อุณหภูมิ เวลา แรงดัน เป็นต้น ซึ่งเป็นองค์ประกอบสำคัญต่อคุณภาพด้านความแข็ง(Hardness) ยิ่งความแข็งมากมูลค่าของชิ้นงานก็สูงขึ้น[24] พบว่าเศษวัสดุประเภทเครื่องมือตัดที่ใช้งานในประเทศมีค่าความแข็งสูงขึ้นมากกว่าชิ้นงานที่พบในการวิจัยที่ผ่านมา และปริมาณเพิ่มกว่า 20 ตัน ในปี พ.ศ.2550 ขนาดเกรนเล็กลงความแข็งจะมากขึ้น[24]

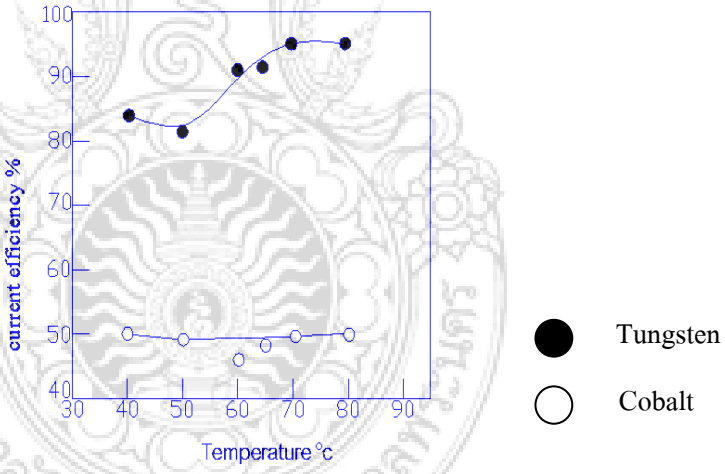
ดังนั้น ในการวิจัยนี้จึงเห็นความสำคัญเพื่อศึกษาการแยกสารประกอบโคบอลต์จากเศษวัสดุเป็นแผ่นมีดความแข็งกว่า 90 HRA และผ่านการใช้งานในอุตสาหกรรมการผลิตชิ้นส่วนและแม่พิมพ์ เพื่อค้นหาความสามารถของการสลายวัสดุความแข็งสูง ด้วยสารละลายในแยกสารด้วยไฟฟ้า(Electrolysis) และพบว่าการแยกวัสดุดังกล่าวได้ดีขึ้นด้วยการใช้ Hydrothermal treatment [18] เป็น งานวิจัยที่ทำการทดลองโดยเพิ่มอุณหภูมิและต้องใช้วัสดุและอุปกรณ์ที่มีคุณลักษณะเหมาะสมต่อการแยกวัสดุด้วยสารละลาย ต่าง ๆ กัน ตามสิทธิบัตร US.Patent 4,234,333 พัฒนาอุปกรณ์(Apparatus) สำหรับแยกสลายเศษซีเมนต์ทังสเตนคาร์ไบด์[21]



ภาพที่ 2.2 ระบบท่อและถังแยกสารละลายและระบบทำงานของอุปกรณ์[21]



ภาพที่ 2.3 อิทธพลของกรดไนตริกต่อประสิทธิภาพของกระแสไฟฟ้า(Effect of nitric acid concentration on current efficiency) (current density10 kA m-2, 28°c) [16]



ภาพที่ 2.4 อุณหภูมิและประสิทธิภาพของกระแสไฟฟ้าในการย่อยโลหะด้วยไฟฟ้า (Effect of temperature on current efficiency) (current density 10 kA m^{-2} electrolyte) [16]

จากรายงาน USGS Science for a changing world Report เกี่ยวกับการนำชิ้นงานทังสเตนกลับมาใช้ใหม่ สำหรับประเทศสหรัฐอเมริกา โดย Kim B.Shedd เรื่อง Tungsten Recycling in the United States in 2000 ผลการวิจัยนี้ได้ถูกเปิดเผยเมื่อ ปี พ.ศ. 2548 พบว่าที่ประเทศดังกล่าวนี้การใช้

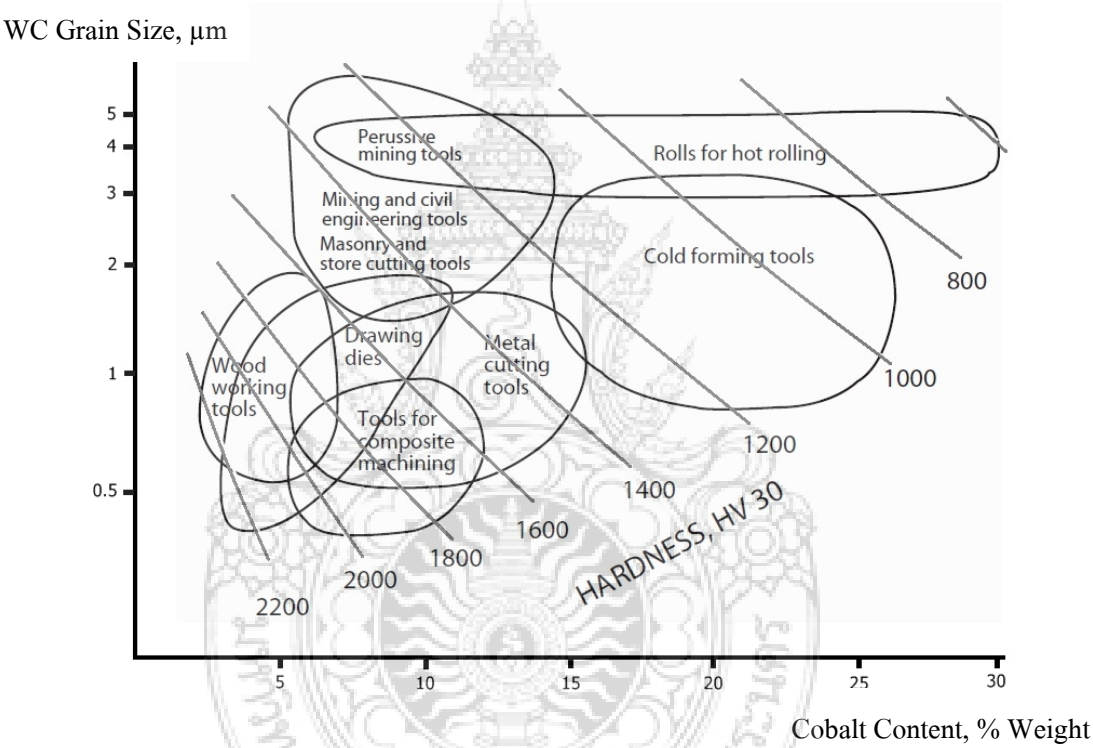
ทังสเตนมีแนวโน้มมากขึ้นและสัดส่วนการใช้งานสูงกว่าวัสดุอื่นในกลุ่มวัสดุที่นำกลับมาใช้ใหม่ จากรายงานสรุปว่า มีสัดส่วนการใช้วัสดุทังสเตนที่เรียกว่า New scrap ต่อ Old scrap ในอัตราส่วน 20 ต่อ 80 และเมื่อพิจารณาสัดส่วนการนำวัสดุเก่าใช้งานแล้วกลับมาใช้ใหม่ปรากฏว่าเป็นวัสดุชนิดทังสเตนมากกว่าชนิดอื่นร้อยละ 66 ของวัสดุที่นำกลับมาใช้ใหม่ทั้งหมด ในปี ค.ศ. 2000 สหรัฐอเมริกามีทังสเตนที่เป็น New scrap สูงถึง 10,400 ตัน ส่วนใหญ่ผลิตเป็นวัสดุผงและชิ้นงานที่ความแข็งสูง (Hard metal) ในปี ค.ศ.2000 สหรัฐอเมริกานำเข้า Tungsten ,Waste and Scrap สูงถึง 993 ตัน มูลค่าประมาณ 248,000,000 บาท คิดเป็นร้อยละ 81 ของทั้งหมด โดยนำเข้าจากประเทศจีน ร้อยละ 25 เกาหลีใต้และรัสเซียร้อยละ 15 เยอรมันร้อยละ 8 ญี่ปุ่น อเมริกาใต้และอุซเบกิสถาน ร้อยละ 6 และประเทศอื่น ๆ กว่า 14 ประเทศ ส่วนการผลิตชิ้นส่วนหรือเครื่องมือวัสดุทังสเตนคาร์ไบด์ (Heavy metal alloy scrap) โดยกระบวนการ Direct recycling process กระบวนการกำจัดออกไซด์ใน Scrap โดยการอบให้ความร้อนที่อุณหภูมิ ประมาณ 600-1,000 องศาเซลเซียส จากนั้นบดและทำความสะอาด และทำ hydrogen reduced ที่อุณหภูมิเหมาะสม ในช่วง 800 -1,200 องศาเซลเซียส

จากรายงานของ International Tungsten Industry Association ทังสเตนจะมีสมบัติในด้านต่าง ๆ ได้แก่ Atomic weight 183.85 g/g atom ความหนาแน่น (Density) 19.25 g/cm^3 จุดหลอม (Melting) 3387-3,422 องศาเซลเซียส จากรายงานพบว่าการนำวัสดุในอุตสาหกรรมกลับมาใช้ใหม่ (Recycling) ทั่วโลก มีทังสเตนมากกว่าร้อยละ 30 และหากนับรวมการนำทังสเตนและเหล็กกล้ารอบสูงกลับมาใช้ใหม่ผสมกับวัสดุอื่น ๆ แล้วมีสัดส่วนการใช้สูงถึงร้อยละ 60-70 และในส่วนของทังสเตนคาร์ไบด์ (WC) ส่วนมากผลิตเป็นผง (Powder) โดยมีคาร์บอนบริสุทธิ์ (Pure carbon Powder) ในสัดส่วนที่เหมาะสม สามารถทำการผลิตด้วยอุณหภูมิในช่วง 900 -2,000 องศาเซลเซียส

ผลการศึกษาตัวอย่างผลิตภัณฑ์ที่จำหน่ายในตลาดทั่วโลก ชิ้นงานที่ผลิตด้วยผงทังสเตนคาร์ไบด์วัสดุที่นิยมทำเป็นตัวประสาน (Binder) เพื่อเพิ่มสมบัติเหมาะสมกับการใช้งาน ได้แก่ สัดส่วนคาร์บอน(C) ร้อยละ 3.8-4.1 เหล็ก (Fe) ร้อยละ 0.25-0.50 โครเมี่ยม (Cr) ร้อยละ 0.2 โคบอลต์ (Co) ร้อยละ 0.30 และธาตุอื่น ๆ เช่น Ti+Ta+Nb ร้อยละ 0.2 ชิ้นงานจะมีสมบัติ ดังนี้ ความแข็ง (Hardness) 2,000-2,500 HV ความหนาแน่น 16-17 g/cm^3 ขนาดเกรน (Particle size:mesh) มีหลายขนาด ในช่วงต่างกัน ได้แก่ 10-20 , 20-30, 30-40 , 40-60, 60-80, 80-100, 100-200 โดยขนาดเกรนที่โตกว่าผลิตได้ก่อน สามารถประยุกต์ใช้งานได้หลายแบบ ได้แก่ ผลิตเป็นชิ้นส่วนสำหรับอุปกรณ์ชิ้นส่วนเครื่องมือในงานต้านทานการสึกหรอสูง (Abrasion machine part) ชิ้นส่วนเครื่องจักรกลหนัก อุปกรณ์ขุดเจาะ(Excavator) ชิ้นส่วนเครื่องจักรกลส่งกำลังสูง เช่น เฟือง ลูกรีด ชิ้นส่วนในเครื่องใช้เครื่องประดับที่คงทน ได้แก่ ชิ้นส่วนนาฬิกา ของเล่น ที่แข็งแรงสูงทนทานต่อการ

กัดกร่อน และผลิตเครื่องมือตัด(Cutting tools) และการเลือกวัสดุผสมขึ้นกับความต้องการด้านการใช้งาน โดยเฉพาะโคบอลต์ เป็นวัสดุประสานที่ดีสามารถผสมในสัดส่วนสูงถึง ร้อยละ 30 เป็นต้น งานวิจัย เรื่อง การอัดฉีดขึ้นรูปโลหะผงทังสเตนคาร์ไบด์และโคบอลต์โดยการใช้ตัวประสานชนิดพอลิเอทิลีนไกลคอลและพอลิเมทิลเมทาคริเลท โดย ณัฏฐิตา ชวนเกริกกุล ผลงานวิจัยปรากฏว่าความหนาแน่นสูงสุดของชิ้นงานคิดเป็นร้อยละ 97 ของความหนาแน่นทางทฤษฎี

2.2 ชนิดของโลหะทังสเตนคาร์ไบด์ในอุตสาหกรรม



ภาพที่ 2.5 แสดงขนาดของอนุภาคโลหะผงทังสเตนคาร์ไบด์ต่อน้ำหนักโคบอลต์ [1]

จากภาพที่ 2.5 ได้แสดงถึงขนาดของอนุภาคโลหะผงทังสเตนคาร์ไบด์ต่อความจุของโคบอลต์ จากการสังเกตพบว่ามีการแบ่งแยกขนาดของอนุภาคโลหะผงทังสเตนคาร์ไบด์เมื่อนำไปใช้งานตามประเภทของงานซึ่งแบ่งได้เป็น 7 ประเภทดังนี้

1) Wood Working Tools จัดเป็นประเภทเครื่องมืองานไม้โดยมีสัดส่วนของโคบอลต์อยู่ที่ประมาณ 2 – 7 % ขนาดอนุภาคของโลหะผงทังสเตนคาร์ไบด์ที่ใช้ประมาณ 0.55 – 1.98 µm และมีค่าความแข็งประมาณ 1,600 – 2,300 เทียบตามมาตรฐานค่าความแข็ง HV 30

2) Metal Cutting Tools จัดเป็นประเภทของเครื่องมือตัดโลหะ โดยมีสัดส่วนของโคบอลต์อยู่ที่ประมาณ 5 – 15.5 % ขนาดอนุภาคของโลหะผงทังสเตนคาร์ไบด์ที่ใช้ประมาณ 0.55 – 1.90 μm และมีค่าความแข็งประมาณ 1,300 – 1,950 เทียบตามมาตรฐานค่าความแข็ง HV 30

3) Cold Forming Tools จัดเป็นประเภทเครื่องมือขึ้นรูปเย็น โดยมีสัดส่วนโคบอลต์ที่ประมาณ 14.5 -26 % ขนาดอนุภาคของโลหะผงทังสเตนคาร์ไบด์ที่ใช้ประมาณ 1.98 – 3.2 μm และมีค่าความแข็งประมาณ 810 – 1,300 เทียบตามมาตรฐานค่าความแข็ง HV 30

4) Rolls for Hot Rolling จัดเป็นเครื่องมือสำหรับงานรีดร้อน โดยมีสัดส่วนของโคบอลต์ที่ประมาณ 7 – 30 % ขนาดอนุภาคของโลหะผงทังสเตนคาร์ไบด์ที่ใช้อยู่ประมาณ 3 – 5 μm และมีค่าความแข็งประมาณ 790 – 1,590 เทียบตามมาตรฐานความแข็ง HV 30

5) Tools for Composite Machining จัดเป็นประเภทเครื่องมือสำหรับประกอบเครื่องจักร โดยมีสัดส่วนของโคบอลต์ที่ประมาณ 5 – 12 % ขนาดอนุภาคของโลหะผงทังสเตนคาร์ไบด์ที่ใช้อยู่ประมาณ 0.4 – 0.98 μm และมีค่าความแข็งประมาณ 1,550 – 2,100 เทียบตามมาตรฐานค่าความแข็ง HV 30

6) Drawing Dies จัดเป็นประเภทแบบงานปั๊มโลหะ โดยมีสัดส่วนของโคบอลต์อยู่ที่ประมาณ 3 – 11 % ขนาดอนุภาคของโลหะผงทังสเตนคาร์ไบด์ที่ใช้อยู่ประมาณ 0.4 – 2 μm และมีค่าความแข็งประมาณ 1,390 – 2,300 เทียบตามมาตรฐานค่าความแข็ง HV 30

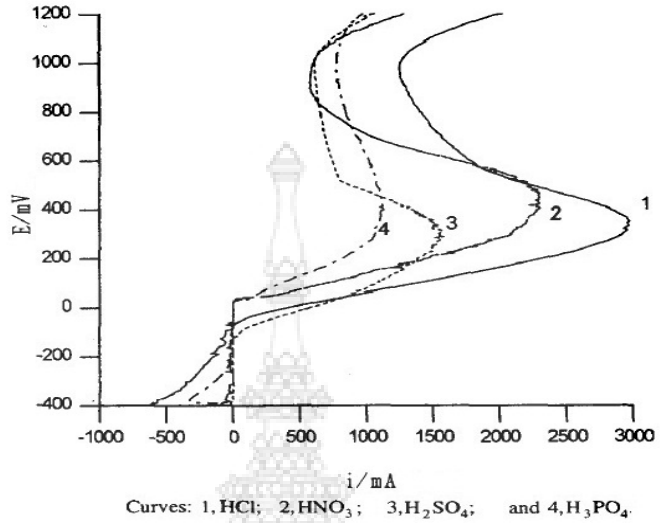
7) Perussive Mining Tools, Mining and Civil Engineering Tools, Masonry and Store Cutting Tools จัดเป็นประเภทเครื่องมืองานเหมืองแร่ โดยมีสัดส่วนโคบอลต์ประมาณ 5 – 14 % ขนาดอนุภาคของโลหะผงทังสเตนคาร์ไบด์ที่ใช้อยู่ประมาณ 3 – 7 μm และจะมีค่าความแข็งประมาณ 1,100 – 1,600 เทียบตามมาตรฐานค่าความแข็ง HV 30

2.3 กระบวนการสลายเศษซีเมนต์ทังสเตนคาร์ไบด์

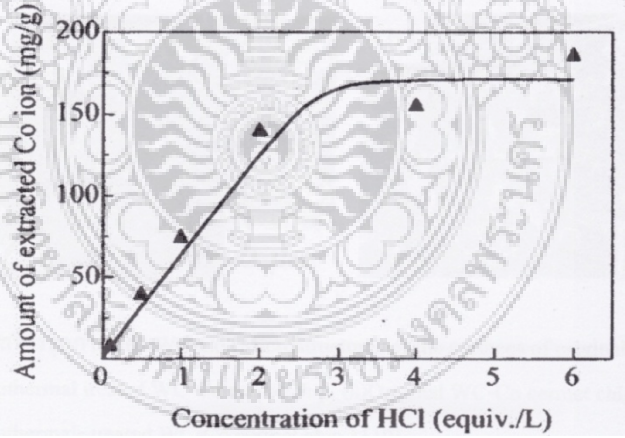
2.3.1 การเลือกวิธีการละลายโลหะประสานโคบอลต์จากเศษของซีเมนต์ทังสเตนคาร์ไบด์ในสารละลาย (Selective dissolution of the cobalt binder from scraps of cemented tungsten carbide in acids containing additives)

โดยเศษทังสเตนคาร์ไบด์จะถูกแยกให้ละลายตัวด้วยกระแสไฟฟ้าและสลายโคบอลต์ที่เป็นตัวประสานทังสเตนคาร์ไบด์ให้ติดกัน จนได้ผลผลิตเป็นโลหะผงทังสเตนคาร์ไบด์ซึ่งความเข้มข้น

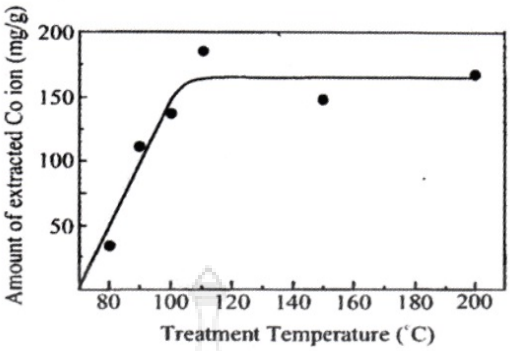
ของสารละลาย กระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าเป็นปัจจัยที่ถูกนำมาใช้สำหรับวิธีการแยกสลายเศษทังสเตนคาร์ไบด์ด้วยกระแสไฟฟ้า



ภาพที่ 2.6 กราฟแสดงแรงดันไฟฟ้าต่อกระแสไฟฟ้าในสารละลายที่อุณหภูมิ 25 °C เพื่อการแยกสลายเศษทังสเตนคาร์ไบด์ CS14 (Anodic Linnear sweep voltammogram of tungsten carbide scrap CS24 in various acid solution at 25 °C) [17]



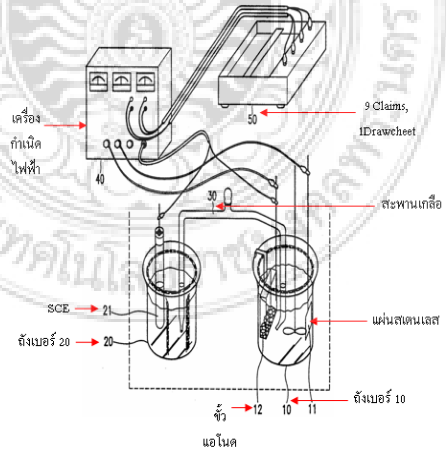
ภาพที่ 2.7 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลาย HCl ต่อการแยกโลหะประสานโคบอลต์ (Relation between concentration of HCl and amount of extracted Co ion. Specimens are treated at 110 °C for 24 H.) [18]



ภาพที่ 2.8 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิการย่อยวัสดุและการสกัดโคบอลต์ด้วย 6 N HCl สารละลายเป็นเวลา 24 ชั่วโมง (Relation between concentration of HCl and amount of extracted Co ion. Specimens are treated in 6 N HCl aqueous solution for 24 h.) [19]

2.3.2 กระบวนการรีไซเคิลทังสเตนคาร์ไบด์จากเศษซีเมนต์คาร์ไบด์โดยใช้กระแสไฟฟ้า (Process for recovering tungsten carbide from cemented tungsten carbide scraps by selective electrolysis)

กระบวนการแยกสลายทังสเตนคาร์ไบด์โดยใช้กระแสไฟฟ้าช่วยในการแตกตัวสารประกอบของทังสเตนคาร์ไบด์จากเศษซีเมนต์คาร์ไบด์เพื่อใช้สารเคมีและกระแสไฟฟ้าในการสกัดทังสเตนคาร์ไบด์ซึ่งถูกเลือกใช้ในการแตกตัวของอะตอม



ภาพที่ 2.9 แสดงกระบวนการรีไซเคิลทังสเตนจากเศษซีเมนต์คาร์ไบด์โดยใช้กระแสไฟฟ้าและสารละลาย [19]

ตารางที่ 2.1 การทดลองของกระบวนการรีไซเคิลทังสเตนจากเศษซีเมนต์คาร์ไบด์โดยใช้กระแสไฟฟ้าและสารละลายในการแตกตัว [18]

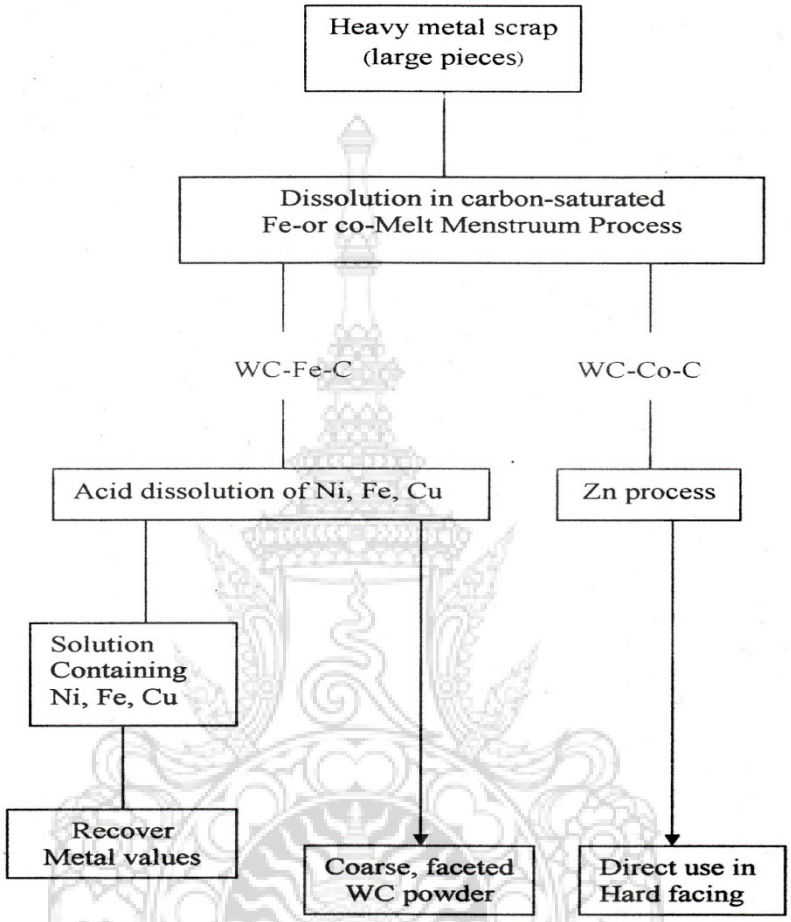
ลำดับ	ศักย์ไฟฟ้า (mV vs SCE)	สารละลาย	เศษ WC (g)	การละลายของ W (mg/l)	การละลายของ Co (mg/l)	อัตราส่วน Co ของการละลาย (%)	แผ่นคาโทด (g)
1	600	1N HCl	44.3	9	9.0	49.4	0.14
		1N KCl + 40 g/I CA	51.2	539	17.1	80.7	0.24
2	400	1N HCl	59.3	38	14.1	59.0	0.11
		1N KCl + 40 g/I CA	59.0	687	19.1	79.5	0.21
3	200	1N HCl	50.6	45	6.7	31.0	0.23
		1N KCl + 40 g/I CA	51.2	498	10.6	49.0	0.35
4	400	2N H_3PO_4	50.4	266	4.5	20.5	0.01
		$2NH_3PO_4$+ 20 g/I NH_4Cl	50.2	399	7.8	35.5	0.03

จากตารางที่ 2.1 เป็นตารางแสดงความสัมพันธ์ของกระบวนการรีไซคิลทังสเตนจากเศษซีเมนต์คาร์ไบด์โดยใช้ไฟฟ้าและสารละลายในการแตกตัวโดยใช้สารละลาย 2 ชนิด คือ 1N HCl, 1N KCl เปรียบเทียบภายใต้ศักย์ไฟฟ้าที่เท่ากันแต่ละค่าตามลำดับ จากข้อมูลในตารางสรุปได้ดังนี้

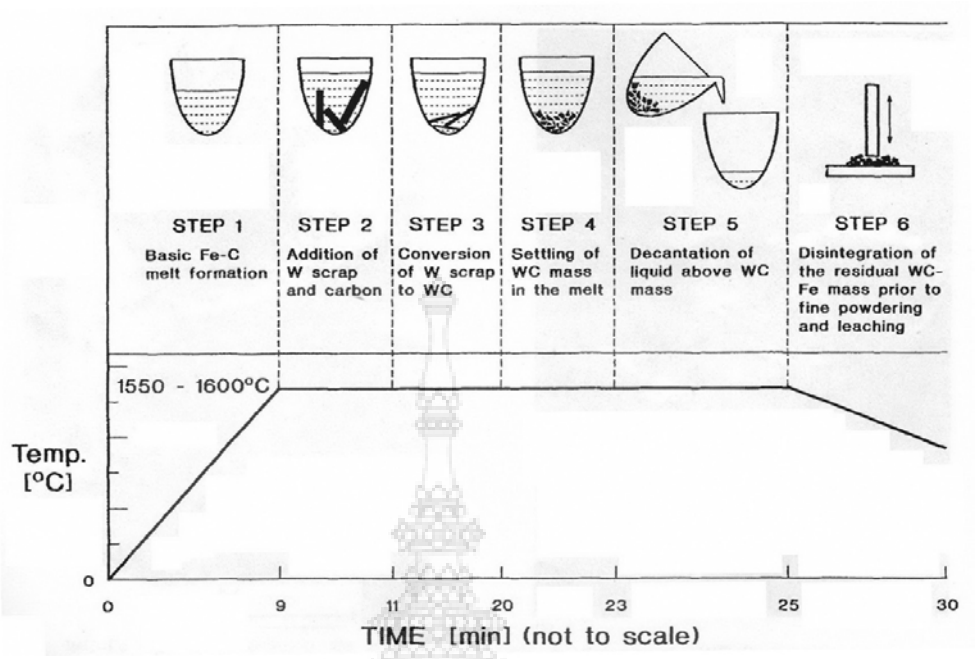
1) การสลายด้วยสารละลายความเข้มข้น 1N HCl แรงดันไฟฟ้า 400 mV การละลายของ Co สูงที่สุดคือ 14.1 mg/l คิดเป็น 59% โดยที่แผ่นคาโทดถูกกัดกร่อนไปคือ 0.11 g

2) การสลายด้วยสารละลายความเข้มข้น 1N KCl +40 g/I CA แรงดันไฟฟ้า 600 mV การละลายของ Co สูง ที่สุดคือ 17.1 mg/l คิดเป็น 80.7% โดยที่แผ่นคาโทดถูกกัดกร่อนไปคือ 0.24 g

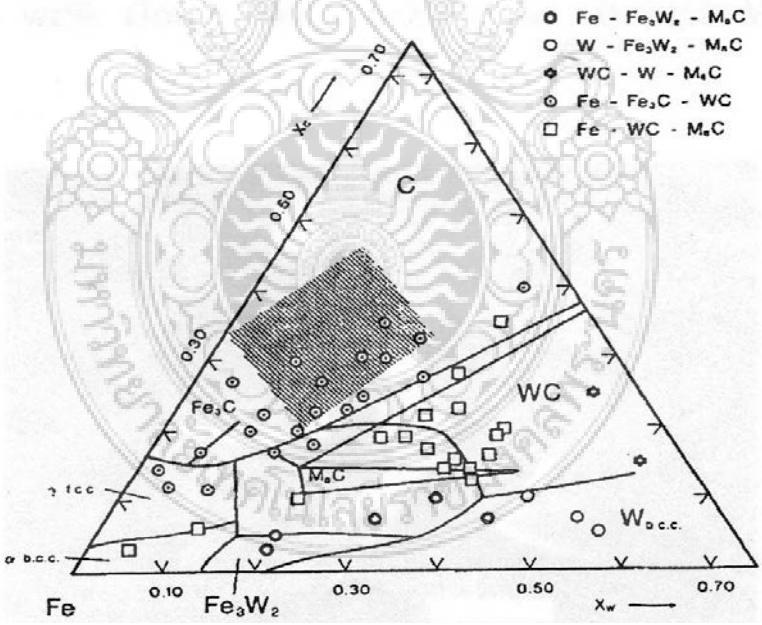
2.3.3 การนำเศษทังสเตนมาใช้ใหม่ด้วยเทคนิคการหลอม (W-Scrap Recycling by the Melt Bath Technique)



ภาพที่ 2.10 แผนผังกระบวนนำเศษทังสเตนกลับมาใช้ใหม่ด้วยกรรมวิธีเทคนิคการหลอม (Flow sheets of W scrap recycling by melt bath techniques) [20]

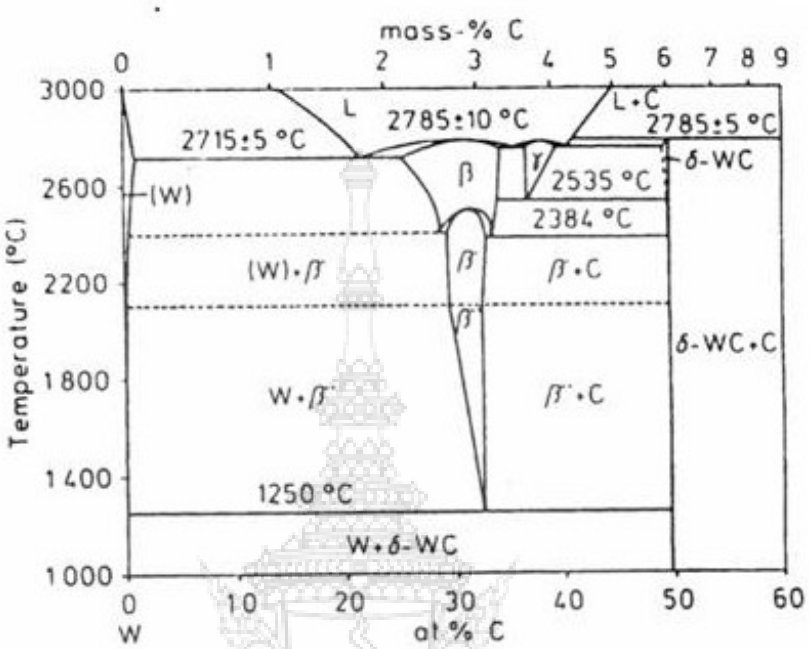


ภาพที่ 2.11 แผนผังพัฒนาการหลอมเศษทังสเตนที่อุณหภูมิต่างกัน (Schematic time- temperature diagram indicating the steps in the process of recycling tungsten scrap.) [20]

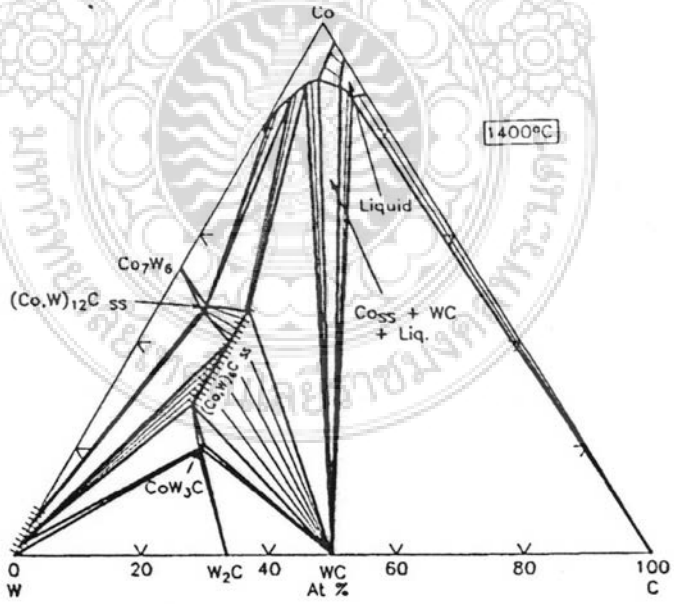


ภาพที่ 2.12 โครงสร้างโลหะ คาร์บอน-เหล็ก-ทังสเตน แสดงบริเวณนำกลับมาใช้ใหม่ (Projection of the liquid us surface of the C-Fe-W system according to Jellinghaus. The shaded zone indicates the working area of the recycling procedure.) [20]

2.3.4 นาโนเกรนของทังสเตนคาร์ไบด์และโคบอลต์ (Nano-grained Tungsten Carbide-Cobalt) [16]



ภาพที่ 2.13 เฟสไดอะแกรมของ ทังสเตนคาร์ไบด์ (The WC phase diagram) [16]



ภาพที่ 2.14 เฟสไดอะแกรมของทังสเตนคาร์ไบด์กับโคบอลต์ที่อุณหภูมิ 1425ºC

(The isothemal section of WC-Co phase diagram at 1425ºC) [16]

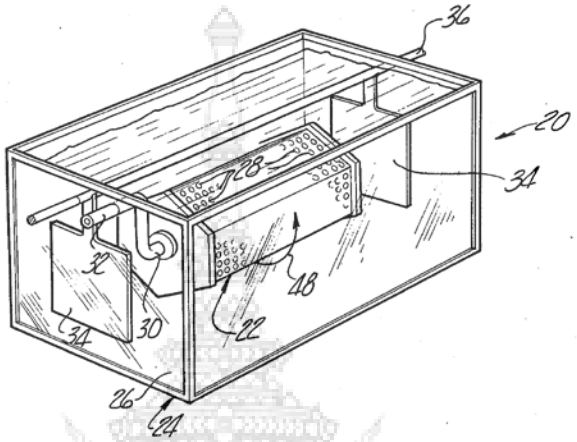
ตารางที่ 2.2 สมบัติของซีเมนต์คาร์ไบด์แต่ละเกรด(Properties of representative grades of cemented carbide) [16]

Cemented carbide	Room temp. hardness, HV	Modulus of elasticity, GPa	Transverse rupture strength, MPa	Coeggicient of thermal expansion, 10^{-6}/K	Thermal conductivity, W/mK	Density, g/cm^3
WC-20 wt%Co	1050	490	2850	6.4	100	13.55
WC-10 wt%Co	1625	580	2280	5.5	110	14.50
WC-3 wt%Co	1900	673	1600	5.0	110	15.25
WC-3 wt%Co 22wt%	1500	510	2000	6.1	40	11.40

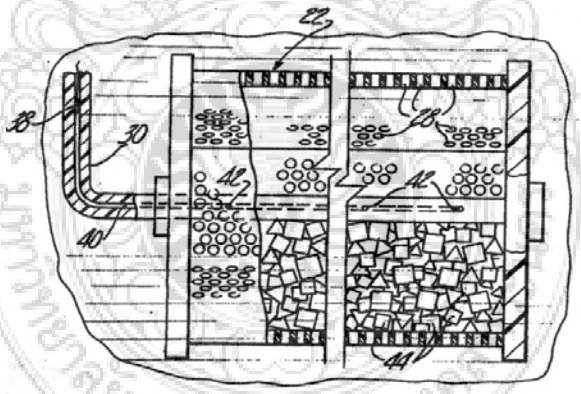
ตารางที่ 2.3 สมบัติของโลหะทังสเตนคาร์ไบด์วัสดุโลหะประสาน(Properties of refractory metal carbides and binder materials) [16]

Meterrial	Hardness HV (50kg)	Crystal structure	Melting temperature (ºC)	Theoretical density, g/cm^3	Modulus of elasticity, GPa	Thermal expansio, µm/mK
WC	2200	Hexagonal	2800	15.63	696	5.2
W_2C	3000	Hexagonal	2777	17.3	-	-
TiC	3000	Cubic	3100	4.94	451	7.7
VC	2900	Cubic	2700	5.71	422	7.2
HfC	2600	Cubic	3900	12.76	352	6.6
ZrC	2700	Cubic	3400	6.56	348	6.7
NbC	2000	Cubic	3600	7.8	338	6.7
TaC	1800	Cubic	3800	14.50	285	6.3
Cr_3C_2	1400	Orthorhombic	1800	6.66	373	10.3
Co	<100	Cubic/ hexagonal	1495	8.9	207	16.0
Ni	<100	Cubic	1455	8.9	207	15.0

2.3.5 หลักการนำทฤษฎีจาก สิทธิบัตร United States Patent No. 4,234,333 ได้บอกรายละเอียดเกี่ยวกับกระบวนการในการผลิตทังสเตนคาร์ไบด์ด้วยวิธีไฟฟ้า โดยคิดค้นเกี่ยวกับ Barral และตำแหน่งของอุปกรณ์ต่างๆ ดังภาพและกราฟแสดงผล [21]



ภาพที่ 2.15 เครื่องกัดกร่อนโลหะแนวนอน (เคมีไฟฟ้า) [21]



ภาพที่ 2.16 หลักการทำงานการกัดกร่อนแผ่นมีดตัดทังสเตนคาร์ไบด์ [21]

ภาพที่ 2.15 และ 2.16 ตามสิทธิบัตร [21] เป็นการแสดงรายละเอียดของชิ้นส่วนเครื่องสลายเศษโลหะแนวนอนมีหมายเลขหน้าและเป็นอุปกรณ์สำคัญ ได้แก่

หมายเลข 20. อุปกรณ์การสลายโลหะ (Apparatus) ที่ใช้ในการสร้างเครื่อง

หมายเลข 22. ถังทรงกระบอกหกเหลี่ยม เป็นถังบรรจุชิ้นงาน (Barrel) ใส่เศษแผ่นมีดลงไปนำไปในถังบรรจุสารละลาย

หมายเลข 24. ถังพลาสติกโพลีโพพีลีน(Polypropylene)เป็นถังที่ใส่สารละลายเพื่อทำการกัดกร่อน

หมายเลข 26. สารละลายไฮโดรคลอริก (HCl) สารละลายที่ใช้ในการสลายเศษแผ่นมีด

หมายเลข 28. รูถังบรรจุชิ้นงาน (Barrel) เพื่อให้เศษแผ่นมีดที่ถูกสลายหรือผงโลหะออกมาทางรู

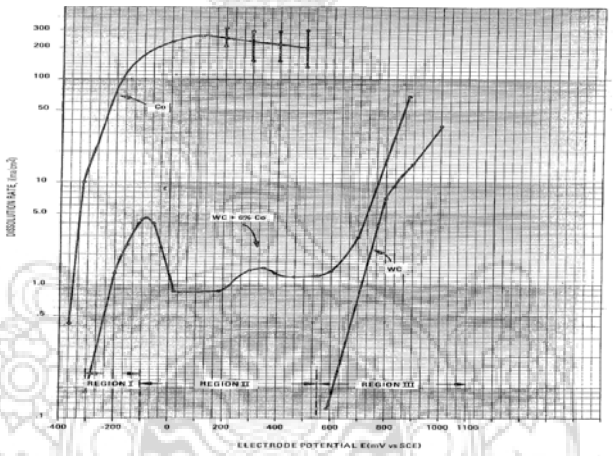
หมายเลข 30. ขั้วบวก และ Preferably ทังสเตนคาร์ไบด์ในอิเล็คโตไลค์ระหว่างการสลายตัวโดยการหมุนรอบแกน

หมายเลข 32. ทองแดงทำหน้าที่ให้กระแสไฟไหลผ่านไปยัง ขั้วบวก และขั้วลบ

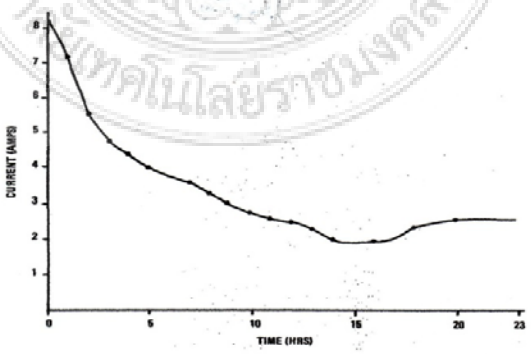
หมายเลข 34. สเตนเลส 304 ขั้วลบ (-) เป็นตัวล่อกระแสไฟ

หมายเลข 36. ทองแดงทำหน้าที่ให้กระแสไฟไหลผ่านไปยัง ขั้วบวก และขั้วลบ

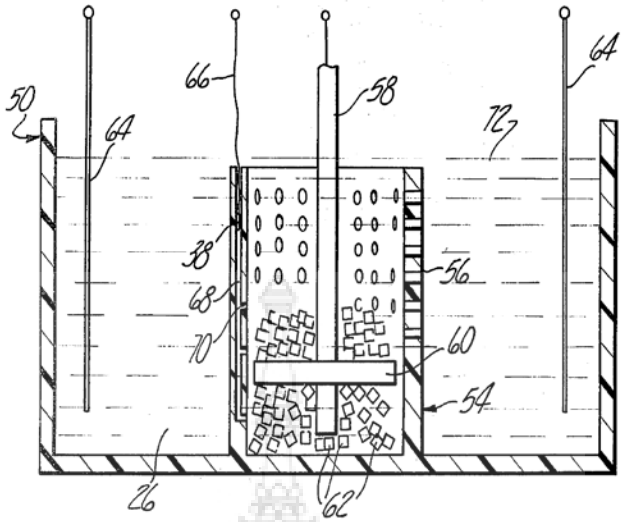
หมายเลข 48. การหมุนของถังบรรจุชิ้นงาน (Barrel) ในทิศทางทวนเข็มทำให้เศษแผ่นมีดสัมผัสกับขั้วบวกเพื่อ ทำปฏิกิริยาในการสลาย



ภาพที่ 2.17 กราฟแสดงคุณสมบัติของทังสเตนคาร์ไบด์และโคบอลต์ [21]



ภาพที่ 2.18 กราฟแสดงเวลาการกัดกร่อนของทังสเตนคาร์ไบด์ [21]



ภาพที่ 2.19 แบบแสดงการกัดกร่อนทังสเตนคาร์ไบด์ในแนวแกนตั้ง [21]

จากรูปที่ 2.19 ตามสิทธิบัตร [21] เป็นการแสดงรายละเอียดของชิ้นส่วนเครื่องสลายเศษโลหะแนวตั้งมีหมายเลขหน้าและเป็นอุปกรณ์สำคัญ ได้แก่

หมายเลข 26. สารละลาย ไฮโดรคลอริก (HCl) สารละลายที่ใช้ในการสลายเศษแผ่นมีด

หมายเลข 38. อ้างอิงถึงขั้วไฟฟ้า ขั้วบวก + แรงดันกระแสไฟฟ้า A

หมายเลข 50. ถังด้านนอกใส่สารละลายในการสลายเศษแผ่นมีด

หมายเลข 54. ถังด้านในใส่เศษแผ่นมีดในการสลาย

หมายเลข 56. หลุม Anode + ด้วยอิเล็กโทรไลต์รับใน Apparatus

หมายเลข 58. เพลาใบพัดหมุนใบกวน

หมายเลข 60. ใบพัดกวนเศษแผ่นมีดให้สัมผัส ขั้วบวกเพื่อเกิดปฏิกิริยาในการกัดกร่อน

หมายเลข 62. ถังทรงกระบอกบรรจุเศษแผ่นมีด (Insert Tool)

หมายเลข 64. ขั้วไฟฟ้า

หมายเลข 66. อ้างอิงถึงขั้วไฟฟ้า ขั้วบวก (SCE) + แรงดันกระแสไฟฟ้า A

หมายเลข 68. ขั้วบวก + (Anode)

หมายเลข 70. ขั้วบวก และ Preferably ทังสเตนคาร์ไบด์ในอิเล็กโทรไลต์ระหว่างการสลายตัวโดยการหมุนรอบแกน

หมายเลข 72. สารละลายไฮโดรคลอริก (HCl) สารละลายที่ใช้ในการสลายแผ่นเม็ดมีด

2.4 ระบบส่งกำลัง

2.4.1 มอเตอร์ [2]

ปัจจุบันการทำงานทางด้านอุตสาหกรรมมีมากมายหลายรูปแบบ ดังนั้นการเลือกใช้มอเตอร์ให้เหมาะสมกับประเภทของงานจึงมีความสำคัญซึ่งทำให้งานมีประสิทธิภาพสูง ลดอุบัติเหตุ และประหยัดค่าใช้จ่ายมากขึ้นด้วย การเลือกชนิดของมอเตอร์และกำลังงานนั้น ๆ ต้องการ เช่น เมื่อต้องการใช้มอเตอร์ในการยกของมอเตอร์นั้นจะต้องมีแรงบิดมากเมื่อมีต้นกำลังม้า (hp) พอเพียงที่จะยกของได้ ลักษณะของพลังงานไฟฟ้าซึ่งจ่ายให้มอเตอร์เหมาะสมกัน เช่น เมื่อมีระบบจ่ายไฟ 3 เฟส 380 โวลต์ ก็ควรเลือกใช้มอเตอร์ที่ใช้กับไฟฟ้า 3 เฟส 380 โวลต์ ราคาของมอเตอร์ต้องเลือกมอเตอร์ที่ใช้งานได้ตรงตามวัตถุประสงค์และมีราคาถูกที่สุดลักษณะภายนอกของมอเตอร์ต้องเหมาะสมกับสภาพแวดล้อมของงาน เช่น มอเตอร์ใช้กับงานที่มีฝุ่นละอองมาก ต้องเลือกมอเตอร์ที่ปิดมิดชิดสามารถกันได้ เมื่อสามารถเลือกมอเตอร์ได้ตามข้อกำหนดแล้ว โดยมีขนาดแรงม้าต่ำที่สุดก็จะได้ราคามอเตอร์ที่ถูกที่สุดด้วย ในกรณีเลือกซื้อมอเตอร์ให้มีขนาดแรงม้าน้อยเกินไป ถึงราคาของมอเตอร์ถูกแต่จะทำให้อายุการใช้งานของมอเตอร์นั้นสั้นลงด้วย

2.4.1.1 อินดักชั่นมอเตอร์แบบทรงกระบอก (Squirrel – Cage Induction Motor) ลักษณะคุณสมบัติการทำงานของมอเตอร์สามารถแสดงค่าแรงบิดของมอเตอร์ที่แปรเปลี่ยนไปตามความเร็วของมอเตอร์ ณ จุดนี้จะได้ค่าแรงม้าสูงสุดของมอเตอร์ มอเตอร์ชนิด F เป็นมอเตอร์ซึ่งมีแรงบิดเริ่มหมุนต่ำ แรงบิดวิกฤตต่ำ และกระแสไฟฟ้าเมื่อเริ่มหมุนต่ำชนิดนี้มีใช้น้อย ตามปกติจะผลิตให้มีขนาดสูงกว่า 30 แรงม้า เนื่องจากมอเตอร์ชนิด F มีค่าแรงบิดวิกฤตต่ำ จึงต้องใช้มอเตอร์ขนาดใหญ่เพื่อความเหมาะสมกับงาน ดังนั้นเพื่อให้ประหยัดมักจะใช้มอเตอร์ชนิด A , B หรือ C แทนชนิด F ซึ่งสามารถสตาร์ทโดยต่อแรงดันไฟฟ้าสูงสุดเข้าโดยตรงได้ จะเห็นว่ามอเตอร์มากว่าหนึ่งชนิดสามารถใช้กับงานชนิดเดียวกันได้ แต่ต้องพิจารณาว่าใช้มอเตอร์ชนิดใดประหยัดกว่ากัน การทดลองเพื่อที่จะหาขนาดของงานในขณะซึงทำงานจริง ๆ มีความ จำเป็นมากในการเลือกมอเตอร์ให้ได้ดีที่สุด

2.4.1.2 ตัวถังหุ้มมอเตอร์ ตัวถังของมอเตอร์แบ่งได้เป็นสองประเภทใหญ่ ๆ แบบเปิดและแบบปิดโดยตลอดตัวถังแบบเปิด (Open) แบ่งลักษณะตามสภาพแวดล้อมในการใช้งานคือ ใช้งานทั่วไป (General Purpose) เป็นมอเตอร์ซึ่งเปิดให้อากาศภายนอกถ่ายเทเข้าออกได้โดยรอบขดลวดเพื่อระบายความร้อน ชนิดป้องกันการหยดของของเหลว (Drip Proof) เป็นมอเตอร์ซึ่งเปิดให้อากาศระบายถ่ายเทได้ แต่ป้องกันของเหลวหรือของแข็งซึ่งตกมาในแนวไม่เกิน 15 องศา จากแนวดิ่งชนิดป้องกัน (Protected) เป็นมอเตอร์เปิดให้ตัวถังสามารถเข้าถึงชิ้นส่วนซึ่งหมุน (ยกเว้นเพลา) ภายในมอเตอร์ได้ง่าย เพื่อที่สะดวกในการซ่อมแซม แต่มีแผ่น

โลหะปิดไว้ป้องกันอุบัติเหตุซึ่งเกิดจากการจับต้องชิ้นส่วนซึ่งหมุนอยู่ในมอเตอร์ได้โดยบังเอิญ ชนิดป้องกันการฉีดของของเหลว (Splash Proof) เป็นมอเตอร์ที่เปิดให้อากาศถ่ายเทได้ แต่ออกแบบให้ป้องกันการผ่านของของเหลวหรือของแข็งซึ่งพุ่งมาในแนวไม่เกิน 100 องศา จากแนวดิ่งเข้าไปภายในมอเตอร์ ชนิดท่อระบายอากาศ (Pipe Ventilated) เป็นมอเตอร์ที่ออกแบบให้อากาศที่ดูดเข้ามาระบายความร้อนเข้าได้ทางท่อที่กำหนด ชนิดทนต่อสภาพดินฟ้าอากาศมีสองชนิด คือ ชนิดที่หนึ่ง ช่องระบายอากาศถูกออกแบบให้ป้องกันไม่ให้ฝนและฝุ่นเข้าไปถึงชิ้นส่วนทางไฟฟ้าภายในมอเตอร์ ชนิดที่สอง ช่องทางระบายอากาศถ่ายเทผ่านมอเตอร์ด้วยความเร็วสูง ทำให้ฝุ่นละอองไม่สามารถเข้าไปยังชิ้นส่วนทางไฟฟ้าภายในได้ ตัวถังแบบเปิด (Totally Enclosed) เป็นมอเตอร์ซึ่งส่วนทางไฟฟ้าต่าง ๆ ถูกปิดไว้โดยตลอดภายในตัวถัง แบ่งออกได้คือ ชนิดที่ไม่มีการระบายอากาศ (Non Ventilated) เป็นมอเตอร์ซึ่งไม่มีเครื่องมือจากภายนอกตัวถังช่องระบายความร้อนเลย ชนิดระบายความร้อนด้วยพัดลม (Fan Cooled) เป็นมอเตอร์ระบายความร้อนด้วยพัดลม ซึ่งอยู่ภายนอกตัวถังปิดของมอเตอร์ ชนิดท่ออากาศระบายความร้อน เป็นมอเตอร์ที่มีช่องเปิดให้ท่อระบายอากาศทั้งเข้าและออกต่อเข้ากับตัวถังได้ ชนิดเครื่องถ่ายเทความร้อน (Heat Cnchanger Type) เป็นมอเตอร์แบบปิดซึ่งถ่ายเทความร้อนโดยให้อากาศในตัวถังแบบไหลหมุนเวียนผ่านเครื่องถ่ายเทความร้อน ซึ่งระบายความร้อนด้วยอากาศหรือน้ำ อากาศเย็นซึ่งผ่านออกจากเครื่องถ่ายเทความร้อนจะไหลวนกลับเข้าไปแทนอากาศร้อนภายในมอเตอร์ ชนิดป้องกันการระเบิด (Explosion Proof) เป็นมอเตอร์วิ่งออกแบบให้ทนการระเบิดของก๊าซหรือไอน้ำในมอเตอร์ได้และป้องกันไม่ให้ก๊าซหรือไอภายนอกมอเตอร์จุดระเบิดได้ป้องกันการลุกไหม้ของฝุ่นละออง ชนิดป้องกันการลุกไหม้ของฝุ่นละออง (Dust – Ignition Proof) เป็นมอเตอร์ซึ่งออกแบบให้กันฝุ่นซึ่งติดไฟได้ไม่ให้เข้าไปในมอเตอร์เพื่อป้องกันการลุกไหม้หรือระเบิดในบริเวณรอบนอกของมอเตอร์

2.4.1.3 ตัวถังของเครื่องควบคุม (Controller Enclosures) แบ่งออกเป็นชนิดต่าง ๆ ตามมาตรฐานของ ENMA ตามสภาพการใช้งานคือ

ก) แบบทั่วไป ใช้ภายในอาคารและที่ซึ่งมีสภาพดินฟ้าอากาศปกติ

ข) ป้องกันการหยดของของเหลว ป้องกันการซึมผ่านของของเหลวซึ่งหยดลงบนเครื่องควบคุม

ค) ทนต่อสภาพดินฟ้าอากาศ ใช้ในที่ซึ่งมีฝนหรือลูกเห็บใช้ในอู่ต่อเรือประตูน้ำ

ง) ป้องกันน้ำ ใช้ภายนอกอาคารซึ่งถูกน้ำสาดถึง

จ) ป้องกันฝุ่น ป้องกันฝุ่นละอองซึ่งไม่เป็นเชื้อเพลิง เช่น เครื่องบดปูนซีเมนต์ เครื่องรีดเหล็กและลานขนถ่านหิน

ฉ) ใช้ใต้น้ำ ใช้สำหรับงานซึ่งอาจต้องแช่อยู่ในน้ำ เช่นเหมืองแร่

ช) ใช้บริเวณอันตราย ใช้ในบริเวณที่มีก๊าซซึ่งเป็นอันตราย

ซ) ใช้ในบริเวณอันตราย เหมือนกับชนิดที่ 7 แต่ผิวสัมผัสของสวิทซ์ถูกแช่อยู่ในน้ำมัน เพื่อใช้ในที่มีก๊าซซึ่งมีคุณสมบัติกัดกร่อน

ฌ) ใช้ในบริเวณซึ่งมีฝุ่นที่เป็นอันตราย ใช้กับเครื่องโม่แป้ง เครื่องลำเลียง

ญ) ใช้งานในเหมือง ซึ่งใช้ในเหมืองถ่านหิน

2.4.1.4 มอเตอร์แบบวาล์วโรเตอร์ (Wound-Rotor Motor) เป็นมอเตอร์ซึ่งมีลักษณะคล้ายมอเตอร์แบบทรงกระบอก แตกต่างกันที่ค่าความต้านทานทางไฟฟ้าของโรเตอร์สามารถเปลี่ยนแปลงค่าได้ การเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานทางไฟฟ้าของโรเตอร์ไม่ทำให้ค่าแรงบิดสูงสุดเปลี่ยนไป แต่ทำให้ความเร็วของมอเตอร์ที่ให้ค่าแรงบิดสูงสุดเปลี่ยนไป นอกจากนี้ยังสามารถเปลี่ยนแปลงกระแสไฟฟ้าเมื่อเริ่มหมุน และแรงบิดเริ่มหมุนได้โดยการเปลี่ยนค่าความต้านทานไฟฟ้าของโรเตอร์ มอเตอร์ชนิดนี้นำไปใช้งานเป็นเครื่องอัด เครื่องบด เครื่องเป่าลม ซึ่งเหล่านี้ต้องการแรงบิดเมื่อเริ่มหมุนสูง

2.4.1.5 ซิงโครนัสมอเตอร์ (Synchronous Motor) ใช้แพร่หลายในงานต่าง ๆ เนื่องจากเป็นมอเตอร์ที่มีคุณสมบัติเด่นสองประการคือ มีความเร็วคงที่ ไม่ว่างานจะมีค่าเพิ่มขึ้นหรือลดลง และมีคุณสมบัติที่มีค่าเพาเวอร์แฟคเตอร์ (Leading Power Factor) จึงใช้ในการแก้เพาเวอร์แฟคเตอร์ของระบบงาน ซึ่งจะทำให้ค่าใช้จ่ายถูกลง แต่ข้อเสียของมอเตอร์ชนิดนี้คือ ราคาสูง ค่าบำรุงสูง และต้องมีแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้ากระแสตรงจ่ายให้กับขดลวดสนามไฟฟ้า (Field Coil) มอเตอร์ชนิดนี้มักใช้เป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้า เครื่องอัด และเครื่องสูบแบบหอยโข่ง ซึ่งต้องการความเร็วคงที่ในการแก้เพาเวอร์แฟคเตอร์ตามของมอเตอร์ทำได้โดยต่อมอเตอร์เข้ากับแหล่งไฟฟ้าซึ่งมีกระแสไฟฟ้านำแรงดันไฟฟ้าอยู่ สามารถแก้เพาเวอร์แฟคเตอร์โดยที่งานยังมีค่าเท่าเดิม ขนาดของมอเตอร์ควรจะสูงกว่าที่ใช้ เพื่อกระแสที่มอเตอร์ต้องการใช้จะได้ไม่เกินขีดจำกัดของมอเตอร์นั้น

2.4.1.6 มอเตอร์กระแสตรง (D.C. Motor) มอเตอร์ชนิดนี้มีคุณสมบัติเฉพาะคือ สามารถปรับเปลี่ยนความเร็วได้ง่ายในช่วงกว้างและมีแรงบิดเริ่มหมุนสูง ดังนั้นจึงเหมาะกับงานที่มีแรงบิดคงที่และเปลี่ยนแปลงที่ต้องปรับปรุงความเร็วได้ แต่มอเตอร์ชนิดนี้มีข้อเสียคือ ราคาแพง ค่าบำรุงรักษาสูง และอุปกรณ์ควบคุมมีขนาดใหญ่ มอเตอร์กระสตรงที่ใช้กันแพร่หลายมี 3 ชนิดคือ แบบขนาน (Shout Winding) แบบอนุกรม (Series Winding) และแบบผสม (Compound Winding) ในการพิจารณาเลือกใช้มอเตอร์แบบนี้ต้องพิจารณาถึงขนาดของแหล่งจ่ายไฟกระตรง ให้มีขนาดเหมาะสมด้วย

2.4.1.7 มอเตอร์ใช้งานทั่วไป (Universal Motor) คือมอเตอร์แบบอนุกรมซึ่งสามารถใช้กับไฟฟ้ากระแสตรงและกระแสสลับได้ มักมีขนาดไม่ถึงหนึ่งแรงม้า ใช้กับเครื่องอุปกรณ์ที่ยกเคลื่อนย้ายได้ เช่น เครื่องบดผสมอาหาร

2.4.1.8 มอเตอร์ใช้เฉพาะงาน (Difinite-Purpose Motor) เป็นมอเตอร์ที่ออกแบบให้เป็นไปตามข้อกำหนดของงานที่ต้องการใช้ตามปกติ มอเตอร์ชนิดนี้จะมีลักษณะสมบัติการทำงานเป็นไปตามมาตรฐานที่กำหนดไว้ของ NEMA แต่จะมีการดัดแปลงตัวถังและลักษณะการติดตั้งให้เหมาะสมกับงาน มอเตอร์แบบนี้มีที่ใช้งานเช่น ใช้สูบน้ำมันเข้าเตาเผา เครื่องสูบน้ำมันก๊าซโซลีน เครื่องสูบระบายความร้อน มอเตอร์ใช้ใต้น้ำ เครื่องซักผ้าและมอเตอร์ซึ่งภายในเป็นสุญญากาศ

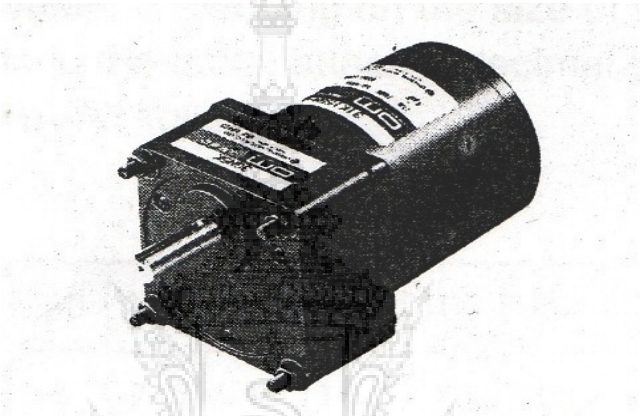
2.4.1.9 มอเตอร์ใช้งานพิเศษ (Special Purpose Motor) เป็นมอเตอร์ซึ่งออกแบบให้มีลักษณะสมบัติการทำงานใหม่ซึ่งแตกต่างไปจากมาตรฐานของ NEMA เพื่อให้เหมาะสมกับงานชนิดพิเศษนั้น ๆ การออกแบบนี้อาจจะเป็นทางด้านกลศาสตร์หรือทางด้านไฟฟ้า หรือทั้งสองอย่าง การออกแบบทางด้านกลศาสตร์นั้นรวมถึงการออกแบบตัวถัง กรติดตั้งขนาด ระบบลูกปืน การเป็นฉนวน และวิธีการระบายความร้อนด้วย ตัวอย่างของมอเตอร์ที่มีขนาดการดัดแปลงทางกลศาสตร์ เช่น แพนเค้กมอเตอร์ (Pancake Motor)

2.4.1.10 มอเตอร์สปลิทเฟส (Split Phase Motor) เป็นมอเตอร์จำพวกเอาท์พุทต่ำที่มีขนาดต่ำกว่าหนึ่งแรงม้า หรือที่เรียกว่า เศษส่วนของแรงม้า มีใช้งานมากมายเช่น เครื่องซักผ้า ปั๊มน้ำขนาดเล็ก ๆ เป็นต้น

2.4.1.11 มอเตอร์คาปาซิเตอร์ (Capacitor Motor) มอเตอร์คาปาซิเตอร์ได้รับการปรับปรุงมาจากมอเตอร์สปลิทเฟส จะมีขนาดตั้งแต่ 1/20 ถึง 10 แรงม้าและมีใช้กันอย่างกว้างขวางส่วนใหญ่จะใช้ในเครื่องทำความร้อน ตู้เย็น เครื่องอัดอากาศ และเครื่องปรับอากาศที่ซึ่งต้องการแรงบิดตอนออกตัวสูง (High Starting Torques)

2.4.1.12 ทฤษฎีเกี่ยวกับระบบเกียร์และมอเตอร์ กำลังที่ใช้ในการขับให้สกรูหมุนได้มาจากมอเตอร์ที่สามารถปรับความเร็วของการหมุนได้โดยมอเตอร์จะต่อกับระบบเกียร์ทดและเพลาขับ เพื่อกำหนดความเร็วในการหมุนและทอร์คของสกรูอัตราเร็วของการหมุนสกรูจะอยู่ในช่วง 5 ถึง 150 รอบต่อนาที (rpm) โดยทั่วไประบบเกียร์ทดและมอเตอร์จะต้องให้สกรูหมุนด้วยอัตราการหมุนอย่างต่อเนื่อง มอเตอร์ที่ใช้ส่วนใหญ่เป็นมอเตอร์คอมมิวเตเตอร์ (Commutator) และมอเตอร์กระแสตรง (Dc Motors) ซึ่งมีกำลังขับอยู่ในช่วง 5 กิโลวัตต์ (ใช้ขับสกรูที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 25 มิลลิเมตร) ถึง 500 กิโลวัตต์ (ใช้ขับสกรูที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 250 มิลลิเมตร)ในการใช้งานของมอเตอร์เหนี่ยวนำ ธรรมดาที่ความเร็วรอบต่ำกว่าปกตินั้น

อาจใช้การส่งกำลังโดยสายพานหรือโซ่ โดยมีมู่เล่ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางต่าง ๆ หรือใช้เกียร์ลดรอบเพื่อให้ได้ความเร็วรอบลดลงตามต้องการแต่ในลักษณะการลดความเร็วรอบดังกล่าวต้องอาศัยส่วน ประกอบงาน ในการที่เปลี่ยนระบบยุ่งยากดังกล่าวและยังคงสภาพการส่งผ่านกำลังที่ความเร็วรอบต่ำอย่างมีประสิทธิภาพจึงเป็นการรวมเกียร์ลดรอบและมอเตอร์เข้าเป็นส่วนเดียวกันเสีย และเรียกมอเตอร์ชนิดนี้ว่า เกียร์มอเตอร์ เพื่อให้ได้ความเร็วรอบลดลงตามความต้องการ



ภาพที่ 2.20 ลักษณะของมอเตอร์ปรับความเร็วรอบได้

ตารางที่ 2.4 มอเตอร์ที่มีเกียร์ลดรอบขนาดต่างๆ ที่ผลิตขึ้นในท้องตลาด

จำนวนขั้วของมอเตอร์		**สี่ขั้ว**	**หกขั้ว**
ความถี่ของระบบ (hz)		50	50
ความเร็วรอบซิงโครนัสของมอเตอร์ (rpm)		1500	1000
ความเร็วรอบของเพลา (rpm)	ขนาดลดความเร็วรอบ 1/10	150	100
	ขนาดลดความเร็วรอบ 1/15	100	66
	ขนาดลดความเร็วรอบ 1/20	75	50
	ขนาดลดความเร็วรอบ 1/30	50	33

ขนาดมาตรฐานของเกียร์มอเตอร์มีตั้งแต่ขนาดกำลัง 65 วัตต์ ถึง 200 วัตต์ สำหรับมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียว และตั้งแต่ขนาด 65 วัตต์ ถึง 37 กิโลวัตต์ สำหรับมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส ตามตาราง 2.4 แสดงถึงมอเตอร์ที่มีเกียร์ลดรอบขนาดต่าง ๆ ที่ผลิตขึ้นในท้องตลาด

มอเตอร์ดังกล่าวใช้ในสภาพงานต่าง ๆ ทั่วไปอย่างแพร่หลาย เช่น สายพานส่งของ เครื่องผสม ปั่นจั่น รอกยก เครื่องบด เครื่องนวด เครื่องหล่อโลหะ เครื่องอบแห้ง เครื่องมือช่าง เป็นต้น

การคำนวณหากำลังมอเตอร์

เมื่อ $W_p = \frac{2\pi TN}{60}$

W_p = กำลังงาน เป็นวัตต์

T = โมเมนต์บิด เป็น Nm

N = ความเร็วรอบ เป็น red/s

การคำนวณหาแรงบิดของมอเตอร์

แรงบิดของมอเตอร์ $P = \frac{2 \times \pi \times T \times N}{60}$ 2.1

$T = \frac{60\ P}{2\pi N}$ 2.2

โดยที่ P = กำลังงานที่เพลารองรับ Kw

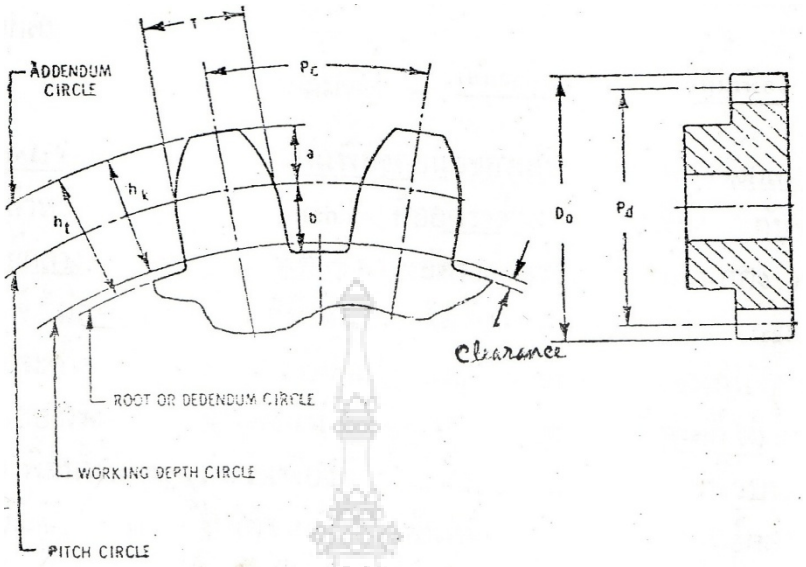
T = โมเมนต์แรงบิด Nm

N = ความเร็วรอบ rpm

แต่ $T = \frac{\pi D^3}{16}$ 2.3

2.4.2 เฟืองตรงระบบอังกฤษ [3]

เฟืองตรง (Spur Gear) เฟืองตรงใช้เป็นตัวส่งกำลังในการขับเคลื่อนได้ดีกว่าสายพานแบนหรือสายพานตัววี ตรงที่การสูญเสียกำลังในการเคลื่อนที่ (Backlash) น้อยที่สุด เฟืองมีทั้งระบบอังกฤษและระบบเมตริก ซึ่งทั้งสองนี้มีลักษณะคล้ายกันมาก ผิดกันอยู่ตรงที่หน่วยของแต่ละระบบไม่เหมือนกัน การใช้งานจุดมุ่งหมายก็คืออันเดียวกันคือใช้ส่งกำลัง การส่งกำลังของเฟืองนั้นจะต้องใช้ฟันเป็นตัวเคลื่อน ส่วนต่าง ๆ ของฟันเฟืองทั้งสองระบบมีชื่อเรียกเหมือนกันจะผิดอยู่แต่ค่าคงที่ของแต่ละระบบเท่านั้นส่วนต่าง ๆ ของฟันเฟืองระบบอังกฤษ



ภาพที่ 2.21 ส่วนต่างๆของฟันเฟือง Involute [3]

เส้นผ่าศูนย์กลางวงกลมพิตช์ = Pd
เส้นผ่าศูนย์กลางวัดนอกที่ยอดฟัน = do
เส้นผ่าศูนย์กลางที่โคนฟัน = df
โมดุลของเฟือง = m
ระยะพิตช์ หรือระยะห่างระหว่างฟันวัดตามเส้นรอบวง = cp
ความสูงของฟันเฟืองจากยอดถึงโคน = h
ช่วงสูงบน (addendum) = a
ช่วงสูงล่าง (dedendum) = b
จำนวนฟัน = N

เส้นวงกลมพิตช์ (Dp) คือเส้นวงกลมที่เฟืองสองตัวขบกัน โดยปกติแล้วเฟืองที่ขบกันจะมีจุด ๆ หนึ่งซึ่งถือว่าสัมผัสกันในลักษณะเช่นเดียวกับทรงกระบอกสองอันมาสัมผัสกัน ณ จุดนั้น คือเส้นวงกลมพิตช์จะอยู่ระหว่างครึ่งหนึ่งของส่วนบนและส่วนล่างฟันเฟือง

เส้นวงกลมช่วงบน (a) และเส้นวงกลมช่วงล่าง (b) เส้นวงกลมช่วงบนคือเส้นรอบวงกลมที่ลากผ่านส่วนบนสุดของฟันเฟือง หรืออาจจะเรียกว่าเส้นรอบวงของตัวเฟืองวัดนอกนั่นเองสำหรับเส้นวงกลมช่วงล่างก็คือเส้นวงกลมที่ลากผ่านส่วนล่างสุดของเฟือง หรือเรียกว่า เส้นวงกลมของเส้นผ่าศูนย์กลางวัดในเช่นกัน

ระยะพิตช์ (Circular pitch) ระยะพิตช์ คือระยะที่วัดจากจุดกึ่งกลางของฟันเฟืองหนึ่งถึงฟันเฟืองถัดไปบนเส้นรอบวงพิตช์ โดยการวัดตามแนวเส้นโค้งของเส้นรอบวงพิตช์ ระยะพิตช์หาได้โดยการเอาเส้นรอบวงพิตช์ หารด้วยจำนวนฟันเฟือง นั่นคือ

$$\text{ระยะพิตช์ (cp)} = \frac{\text{เส้นรอบวงพิตช์}}{\text{จำนวนฟันเฟือง}} \qquad 2.4$$

ในทำนองเดียวกันถ้ารู้ระยะพิตช์และจำนวนฟันเฟือง ก็สามารถคำนวณหาเส้นผ่าศูนย์กลางของวงกลมพิตช์ได้ดังนี้

$$\text{เส้นผ่าศูนย์กลางวงกลมพิตช์ (Pd)} = \frac{\text{เส้นรอบวงพิตช์} \times \text{จำนวนฟันเฟือง}}{3.1416} \qquad 2.5$$

Diametral pitch จำนวนฟันเฟืองต่อนิ้วของเส้นผ่านศูนย์กลางวงกลมพิตช์เรียกว่า Diametral pitch สำหรับ Diametral pitch คืออัตราส่วนของฟันเฟือง กับจำนวนของนิ้วบนเส้นผ่าศูนย์กลางของวงกลมพิตช์ ซึ่งเป็นอัตราส่วนระหว่างจำนวนสองจำนวน ดังนั้น Diametral pitch จึงไม่สามารถจะแสดงให้เห็นขนาดได้ในแบบ ระบบ Diametral pitch นี้ความมุ่งหมายเพื่อจะตั้งชื่อมาตรฐานของพิตช์ของเกลียวเช่นกัน แต่ให้จำไว้ว่าเป็นจำนวนฟันของเฟืองเท่านั้น ดังนั้น Diametral pitch จะหมายถึงพิตช์ก็ได้ เช่น เฟืองตัวหนึ่งมี 10 พิตช์นั้นหมายความว่าเฟืองตัวนั้นมีจำนวนฟัน 10 ฟันต่อนิ้วบนเส้นผ่าศูนย์กลางวงกลมพิตช์ Diametral pitch หารด้วยจากจำนวนฟันเฟืองหารด้วยเส้นผ่าศูนย์กลางวงกลมพิตช์

$$\text{Diametral pitch} = \frac{\text{จำนวนฟันเฟือง}}{\text{เส้นผ่าศูนย์กลางวงกลมพิตช์}} \qquad 2.6$$

ตัวอย่างเช่นเฟืองตัวหนึ่งมี 22 ฟันและมีเส้นผ่าศูนย์กลางวงกลมพิตช์ 2 นิ้ว จงคำนวณหา diametral pitch

$$\text{Diametral pitch} = \frac{22}{2}$$

$$= 11$$

ในการคำนวณเรื่องของเฟืองจะนิยมใช้ diametral pitch มากกว่าระยะพิตช์ (Circular pitch) เพราะว่า diametral pitch มักจะบอกด้วยเลขจำนวนเต็ม โดยปกติแล้วการเปลี่ยน diametral pitch ให้เป็น Circular pitch ได้หรือในทางตรงกันข้ามก็สามารถเปลี่ยน Circular pitch ให้เป็น diametral pitch ได้เช่นเดียวกัน มีสูตรหาดังนี้

$$CP = \frac{3.1416}{DP} \qquad 2.7$$

CP = Circular pitch DP = diametral pitch

เส้นผ่าศูนย์กลางวงกลมพิตช์ (Pitch diameter) เส้นผ่าศูนย์กลางวงกลมพิตช์ สามารถคำนวณหาได้จากสูตร

$$Pd = \frac{N}{DP} \qquad 2.8$$

Pd = เส้นผ่าศูนย์กลางวงกลมพิตช์ N = จำนวนฟันเฟือง

ช่วงสูงบนของฟันเฟือง (addendum) คือความสูงของฟันเฟืองนับจากเส้นรอบวงพิตช์ถึงส่วนบนสุดของเฟือง มีสูตรในการคำนวณดังนี้

$$a = \frac{1}{DP} \qquad 2.9$$

ช่วงสูงล่างของฟันเฟือง (Dedendum) อาจเรียกว่าความลึกของฟันเฟือง ซึ่งมีช่วงต่ำจากเส้นรอบวงพิตช์ลงไปจนสุดความลึกของฟัน คำนวณได้จาก

$$b = \frac{1.157}{DP} \qquad b = \text{dedendum} \qquad 2.10$$

จำนวนฟันเฟือง คือจำนวนฟันต่อนิ้วที่ขึ้นอยู่กับ diametral pitch และเส้นผ่าศูนย์วงกลมพิตช์

$$N = DP \times Pd \qquad N = \text{จำนวนฟันเฟือง} \qquad 2.11$$

ช่วงว่างบนฟันเฟือง (Clearance) เฟืองทุกตัวจะต้องกำหนดเผื่อช่องว่างระหว่างฟันเฟืองในขณะขบกันเอาไว้เสมอ ทั้งนี้เพื่อป้องกันการเสียดสีระหว่างยอดฟันกับโคนฟันของเฟืองในขณะส่งกำลัง โดยปกติการเผื่อช่องว่างนี้จะเท่ากับ $\frac{1}{20}$ เท่าของวงกลมพิตช์ การคำนวณช่องว่างโดยการเอา 5.157 (ได้จาก $\frac{1}{20} \times 3.1416$) หารด้วย diametral pitch

$$C = \frac{0.157}{DP} \qquad C = \text{ช่วงว่างบนฟันเฟือง} \qquad 2.12$$

ความลึกใช้งาน (Working depth) ตามทฤษฎีความยาวของฟันเฟืองจะเท่ากับสองเท่าของช่วงสูงบนให้ดูรูปประกอบด้วย ดังนั้นความลึกใช้งานจึงหาได้จาก

$$W = \frac{2.0}{DP} \qquad 2.13$$

ความลึกทั้งหมดของฟันเฟือง (Whole depth) เป็นความลึกทั้งหมดของฟันเฟืองโดยเอาช่วงสูงบนบวกกับช่วงสูงล่าง หรือความลึกทั้งหมดจะเท่ากับความลึกใช้งานบวกช่องว่างของเฟือง ความลึกทั้งหมดจงหาได้

$$WD = \frac{2.157}{DP} \qquad 2.14$$

เส้นผ่านศูนย์กลางวัดนอก (Outside diameter) หรือเรียกว่าเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นรอบวงช่วงสูงบนนั้นเอง การคำนวณหาเส้นผ่าศูนย์กลางวัดนอกใช้สูตร

$$Do = \frac{N + 2}{DP} \qquad 2.15$$

ความหนาของฟันเฟือง (Tooth thickness) คือความยาวคอร์ดของส่วนโค้งที่วงกลมพิตช์กับด้านข้างทั้งสองของฟันเฟือง ความหนาของฟันเฟืองคำนวณจากสูตร

$$T = \frac{1.5708}{DP} \qquad 2.16$$

ช่องว่างด้านข้าง (Side clearance) ตามทฤษฎีความหนาของฟันเฟืองบนเส้นวงกลมพิตช์เท่ากับช่องที่เป็นร่องฟันเฟือง แต่ในทางปฏิบัติจำเป็นต้องทำร่องที่เป็นร่องฟันเฟืองให้กว้างกว่าความหนาของฟันเฟืองเล็กน้อยเพื่อให้การใช้งานส่งกำลังฟันเฟืองจะได้เคลื่อนที่ไปได้ง่าย ความแตกต่างระหว่างความหนาของฟันเฟืองกับช่องที่เป็นร่องฟันเฟืองเรียกว่าช่องว่างด้านข้างหรือช่องที่ทำให้เฟืองสูญเสียการเคลื่อนที่ (back lash) ไปเล็กน้อย

ระยะห่างระหว่างศูนย์กลาง (Center distance) เฟืองตรงสองตัวขบกัน จุดศูนย์กลางระหว่างเฟืองทั้งสองนั้นหาได้จาก

$$CD = \frac{N1 + N2}{2DP} \qquad 2.17$$

ตัวอย่าง ต้องการกัดเฟืองตรงตัวที่หนึ่งให้ได้จำนวนฟัน 20 ฟัน และให้เฟืองตัวนี้มี 10 DP จงหา

ก . เส้นผ่าศูนย์กลางวัดนอก ข. เส้นผ่าศูนย์กลางวงกลมพิตช์

ค. ช่วงสูงบนและล่าง ง. ความลึกจริง และ ความลึกใช้งาน

แทนค่า

เส้นผ่าศูนย์กลางนอก (Do) $= \frac{20 + 2}{10}$

$= 2.2$ นิ้ว

เส้นผ่าศูนย์กลางวงกลมพิตช์ (Pd) $= \frac{20}{10}$

$= 2.0$ นิ้ว

คำนวณระยะของฟันเฟือง (a) $= \frac{1}{10}$

$= 0.1$ นิ้ว

คำนวณระยะของฟันเฟือง (b) $= \frac{1.157}{10}$

$= 0.1157$ นิ้ว

คำนวณความลึกจริง (WD) $= \frac{2.157}{10}$

$= 0.2157$ นิ้ว

คำนวณความลึกใช้งาน (W) $= \frac{2}{10}$

$= 0.2$ นิ้ว

เฟืองตรงระบบเมตริก เฟืองระบบเมตริกนั้นส่วนต่างๆ ของฟันก็คล้ายกับเฟืองระบบอังกฤษ เพื่อให้สอดคล้องกันจึงเปลี่ยนสัญญาลักษณ์ให้เป็นไปตามแบบเดิมของเฟืองเมตริกดังนี้

เส้นผ่าศูนย์กลางวงกลมพิตช์ = do

เส้นผ่าศูนย์กลางวัดนอกที่ยอดฟัน = dk

เส้นผ่าศูนย์กลางที่โคนฟัน = df

โมดุลของเฟือง = m

ระยะพิตช์ หรือระยะห่างระหว่างฟันวัดตามเส้นรอบวง = t

ความสูงของฟันเฟืองจากยอดถึงโคน = h

ช่วงสูงบน (addendum) = hk

ช่วงสูงล่าง (dedendum) = hf

จำนวนฟัน = z

เส้นรอบวงพิตช์เป็นเส้นรอบวงที่อยู่ระหว่างเส้นรอบวงนอกกันเส้นรอบวงในของเฟือง เส้นผ่าศูนย์กลางเรียกว่าเส้นผ่าศูนย์กลางของวงกลมพิตช์เส้นผ่าศูนย์กลางวงกลมพิตช์หาได้จาก

สูตร เส้นผ่าศูนย์กลางวงกลมพิตช์ = โมดุล × จำนวนฟัน

$$do = m \times z \qquad 2.18$$

ระยะพิตช์ของเฟือง คือความห่างระหว่างฟันเฟืองหนึ่งถึงฟันเฟืองถัดไป โดยการวัด ณ จุดของเส้นรอบวงกลมพิตช์ ตัดกับเส้นกึ่งกลางของฟันตามแนวโค้ง ซึ่งคล้ายกับการวัดระยะพิตช์ของเกลียว แต่ระยะพิตช์ของเกลียวต่างกันตรงที่วัดในแนวเส้นตรง มีสูตรหาได้ดังนี้

ระยะห่างระหว่างฟันเฟืองของเฟือง = $\pi \times$ โมดุล 2.19

$$P = \pi m$$

โมดุลของเฟือง เป็นค่าคงที่สำหรับเฟืองตัวหนึ่งๆ เฟืองที่มีค่าคงที่เท่ากันจึงจะขบกันได้ สำหรับค่าคงที่หรือโมดุลนี้จะเป็นอัตราส่วนระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางวงกลมพิตช์กับจำนวนเฟืองนั่นเอง

$$m = \frac{do}{z} \quad 2.20$$

ความสูงของฟันเฟือง หาได้จากช่วงสูงบนบวกกับช่วงสูงล่างวัดได้จากเส้นผ่าศูนย์กลางวัดนอกกับเส้นกลางวัดใน ความสูงของฟันเฟืองหาได้จาก

$$h = ha + hf \quad 2.21$$

ช่วงสูงบน เป็นระยะเส้นวงกลมพิตช์ ถึงเส้นผ่าศูนย์กลางวัดนอกโดยปกติช่วงสูงบนของเฟืองจะมีค่าเท่ากับโมดุล

$$ha = m \quad 2.22$$

ช่วงสูงล่าง เป็นระยะจากเส้นวงกลมพิตช์ ถึงเส้นผ่าศูนย์กลางวัดในสำหรับเฟืองที่มีโมดุลโตจะกำหนดให้ช่วงสูงล่างเท่ากับ 7m/6 ถ้าเฟืองที่มีโมดุลเล็กๆ จะกำหนดช่วงสูงล่างใน 5m/4

เส้นผ่าศูนย์กลางที่วัดนอกสุด คือขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางที่จะต้องกลึงจากโลหะเพื่อที่จะตัดเฟือง สำหรับเส้นผ่าศูนย์กลางวัดนอกนี้ อาจคำนวณหาได้เริ่มจากเส้นผ่าศูนย์กลางวงกลมพิตช์และช่วงสูงบน สูตรการคำนวณเป็นดังนี้

$$dk = do + 2\,ht \quad 2.23$$

$$dk = m\,(z + 2) \quad 2.24$$

เส้นผ่าศูนย์กลางวัดใน คือเส้นผ่าศูนย์กลางที่ได้จากการตัดฟันของเฟืองได้ความสูงที่ต้องการแล้ว ซึ่งสามารถวัดได้หรือคำนวณ

$$df = do - 2\ hf \qquad 2.25$$

การทดความเร็วรอบ

จากสมการ $N_2Z_2 = N_3Z_3$

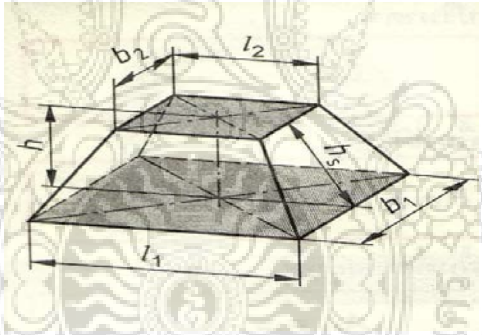
$$N_3 = \frac{N_2Z_2}{Z_3} \qquad 2.26$$

การหาอัตราทดรวม

อัตราทดรวม $= \frac{Z_2 \times Z_3}{Z_1 \times Z_2}$ 2.27

2.4.3 การหาปริมาตรและพื้นที่

2.4.3.1 ปิระมิดตัด



ภาพที่ 2.22 ปิระมิดตัด [13]

V = ปริมาตร H = ความสูง

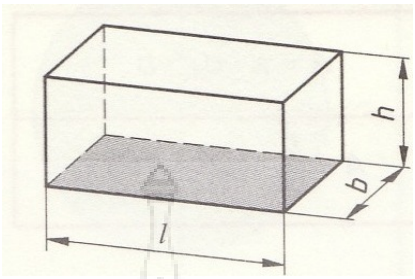
b_1 , b_2 = ความกว้าง l_1 , l_2 = ความยาวด้าน

A_1 = พื้นที่ฐาน A_2 = พื้นที่ยอด

h_s = ความสูงของผิวเอียง

สูตร $V = \frac{h}{3} \times (A_1 + A_2 + \sqrt{(A_1 \cdot A_2)})$ 2.28

2.4.3.2 ปริมาตรแท่งสี่เหลี่ยม

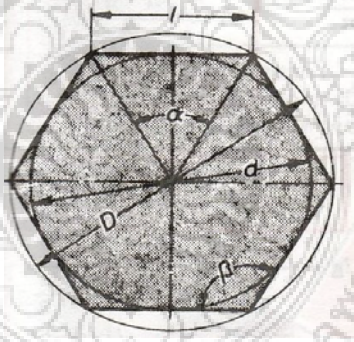


ภาพที่ 2.23 แท่งสี่เหลี่ยม [13]

V = ปริมาตร l = ความยาวด้านข้าง A_o = พื้นที่ผิว h = ความสูง

สูตร V = $l \times b \times h$ 2.29

2.4.3.3 สามเหลี่ยมด้านเท่า



ภาพที่ 2.24 สามเหลี่ยมด้านเท่า [13]

A = พื้นที่ l = ความยาวด้านต่างๆ

D = เส้นผ่านศูนย์กลางวงกลมรอบรูปn = จำนวนด้าน

d = เส้นผ่านศูนย์กลางวงกลมในรูป α = มุมที่ศูนย์กลาง

β = มุมที่ด้าน

สูตรพื้นที่ $A = \frac{n \times l \times d}{4}$ 2.30

สูตรปริมาตร $V = \frac{\pi \times h\ (D^2 - d^2)}{6}$ 2.31

มวล (m) = ความหนาแน่น × ปริมาตร 2.32

2.5 วัสดุและโลหะที่มีคุณสมบัติทนความร้อนและไม่เกิดการกัดกร่อนจากกรดไฮโดรคลอริก

2.5.1 อโลหะ (non-metal) คือ ธาตุที่มีคุณสมบัติต่างจากโลหะและธาตุกึ่งโลหะ ในด้านการแตกตัวของไอออน (ionization) และการดึงดูดระหว่างอะตอม (bonding properties)

2.5.1.1 โพลีโพรพีลีน (Polypropylene : PP) [13]

เป็นพลาสติกที่มีคุณสมบัติทั่วไปคล้ายโพลิเอทิลีน แต่มีคุณสมบัติบางประการที่ดีกว่า เช่น มีความทนแรงกระแทกสูงและทนความร้อนได้สูงกว่า ทดสอบอย่างง่ายๆ ใช้เล็บขูดดู ถ้าเกิดเป็นรอยขีดข่วนได้ง่ายก็คือ โพลิเอทิลีน

ชื่อทางการค้า : Hostalen PP, Luparen, Vestolen P

ลักษณะที่ผลิตออกมาขาย : เป็นเม็ด และผสมสีโปร่งแสงจนถึงทึบแสง

คุณสมบัติ : ทนต่อการแปรรูปด้วยความร้อน ทนต่อแรงดึง แรงกระแทกและทรงตัวดี ผิวแข็งไม่มีแนวโน้มของการสึกกร่อน ฆ่าเชื้อโรคที่อุณหภูมิ 120°C ได้ไม่ดูดซึมน้ำจะเปราะที่อุณหภูมิ 0°C

อุณหภูมิที่ใช้งานได้เป็นระยะเวลานานๆ : 120 - 130 °C

การทนต่อสารเคมี ทนต่อกรดอ่อน ด่างอ่อน ทนต่อแอลกอฮอล์ ester ketone ether น้ำมันเครื่องและไขมันได้จำกัด ไม่ทนต่อกรดแก่ ด่างแก่ chlorinated hydrocarbon, benzol และเบนซิน

สภาพและกลิ่นเมื่อไหม้ไฟ : เปลวไฟจะติดต่อไปหลังจากจุด เปลวจ้ามีแกนสีน้ำเงินและหยด

กลิ่น : คล้ายพาราฟินอ่อนๆ

สัมประสิทธิ์การนำความร้อน (λ) : 1.09 kJ/mh°C

ค่าความร้อนจำเพาะ (c) : 1.93 kJ/mh°C

ความหนาแน่นที่อุณหภูมิ (ρ) : ทีอุณหภูมิ 20 °C เท่ากับ 0.91g/mc^3

ระยะเวลาอบแห้ง : 1 - 1.5ชั่วโมงที่อุณหภูมิ 75°C

อัตราการหดตัวอยู่ระหว่าง : 2 - 3% ถ้าเป็นแบบไหลยาก

2.5.1.2 โพลิเอทิลีน (Polyethylene : PE) [13]

ชื่อทางการค้า : Hostaien PE ; Vestolen A

ลักษณะที่ผลิต : ทำเป็นเม็ด สีทึบแดง (สีนม) และอาจผสมสีอ่อนโปร่งแสงจนถึงเข็ม

คุณสมบัติ : มีความแข็งแรงสูง ทนอุณหภูมิสูงและคงรูป มีค่า dielectricity ดีมาก ไม่มีรสและกลิ่น ต้มฆ่าเชื้อได้

ตัวอย่างการใช้งาน : เครื่องใช้ในบ้าน เช่น กระจาด ถัง อ่าง ตระกร้า ของเด็กเล่น ถังขนส่งของเหลว ขวด ชิ้นส่วนใช้กับไฟฟ้าแรงสูง เครื่องมือแพทย์ ชิ้นส่วนทางเทคนิค เรือนเครื่อง และกล่องต่าง ๆ

อุณหภูมิที่ใช้งานได้เป็นระยะเวลานานๆ : 105 °C

การทนต่อสารเคมี : ทนต่อกรด ด่าง และแอลกอฮอล์ ทนต่อ ester, ketone, ether, น้ำมันเครื่องและไขมันได้น้อย ไม่ทนต่อ chlorinated hydrocarbon, benzol และเบนซิน

สภาพและกลิ่นเมื่อไหม้ไฟ : เปลวไฟจะติดต่อไปหลังจากจุด เปลวจ้ามีแกนสีน้ำเงินและหยด

กลิ่น : คล้ายพาราฟีน หรือเทียนไข

สัมประสิทธิ์การนำความร้อน (λ) : 1.38 kJ/mh°C

ค่าความร้อนจำเพาะ (c) : 1.88 kJ/mh°C

ความหนาแน่นที่อุณหภูมิ (ρ) : ที่อุณหภูมิ 20 °C เท่ากับ 0.94 - 0.96 g/mc^3

ระยะเวลาอบแห้ง : 1 - 15 ชั่วโมงที่อุณหภูมิ 65°C

อัตราการหดตัวอยู่ระหว่าง : 2.0-4.0%

2.5.1.3 Polycarbonate (PC) [13]

ชื่อทางการค้า : Makrolon, Lexan

ลักษณะที่ผลิตออกมาขาย : เป็นเม็ด สีธรรมชาติ (ใส ไม่มีสีจนถึงออกเหลืองอ่อน) และยอมสีได้ทุกสี

คุณสมบัติโดยทั่วไปของผลผลิต : ความแข็งแรงเชิงกลสูงในช่วงอุณหภูมิสูง คงขนาด และทนความร้อนได้ดี มีค่า dielectricity ดี ไม่เสื่อมคุณภาพง่าย ดูดซึมน้ำน้อย

ตัวอย่างการใช้งาน : ฝาครอบและฉนวนดวงไฟสว่างที่ต้องการความแข็งแรงในช่วงอุณหภูมิสูง ใช้ในอุตสาหกรรมไฟฟ้าและรถยนต์ ใช้เป็นส่วนประกอบของอุปกรณ์ฆ่าเชื้อโรคด้วยความร้อน (ทางการแพทย์) หมวกกันน็อค อุปกรณ์ในครัวที่ต้องรับการกระทบกระแทกมาก ใช้ทำเลนส์ เรือนเครื่องมือฝาครอบกล่องสวิตช์ไฟฟ้า ฯลฯ

อุณหภูมิที่ใช้งานได้เป็นระยะเวลานานๆ : 110 - 135 C

การทนต่อสารเคมี : ทนต่อกรดอ่อน แอลกอฮอล์ เบนซิน น้ำมันเครื่องและไขมัน ทนต่อกรดแก่และด่างอ่อนได้จำกัด ไม่ทนต่อด่างแก่ ketone ether chlorinated hydrocarbon benzol รับ load ไดน้อยในน้ำร้อน

สภาพและกลิ่นเมื่อไหม้ไฟ : เมื่อจ่ออยู่ในเปลวไฟติด แต่เมื่อดึงออกจากเปลวไฟจะดับและมีเถ้าดำเปลวจ้า และมีเขม่า

กลิ่น : เหมือน phenolic

สัมประสิทธิ์การนำความร้อน (λ) 0.71 KJ/mh C

ค่าความร้อนจำเพาะ (c) 1.17 KJ/mg C

ความหนาแน่น (ρ) ที่อุณหภูมิ 20 C เท่ากับ 1.2 g/cm^3

ระยะเวลาอบแห้ง (ก่อนเข้าเครื่องฉีด) 8 - 12 ชั่วโมงที่อุณหภูมิ 120 - 130 C

อัตราการหดตัวอยู่ระหว่าง 0.4 – 0.8 %

2.5.1.4 โพลีเอมีดหรือไนลอน (Polyamide : Pa หรือ Nylon) [13]

ชื่อทางการค้า : Ultramid A , B, BM, S, Durethane BK, TROGAMID-T; Vestamid

ลักษณะที่ผลิตออกมาขาย : เป็นเม็ด สีธรรมชาติออกขาวนมออกเหลือง และย้อมสีต่างๆ

คุณสมบัติโดยทั่วไปของผลผลิต : เหนียวและขยายตัวได้มาก มีค่าความยืดหยุ่นต่ำ ทนต่อการขัดสี ทนต่อความร้อน ดูดซึมน้ำได้มาก มีแนวโน้มที่จะเกิดไอได้ง่าย จึงเปราะเมื่ออบแห้ง ตัวอย่างการใช้งาน (จากกรรมวิธีฉีด) : ชิ้นส่วนทางเทคนิคทุกชนิด (เรือนเครื่อง ใบพัดเรือ ใบพัดลม ชิ้นส่วนงาน ท่อ ถังขนส่งของเหลว มือจับเปิด-ปิดประตู) เฟือง เรือนแบริ่ง กรอบบังคับลูกปืนแบริ่ง ชิ้นส่วนข้อต่อ (coupling) หมวกกันน็อค เครื่องมือแพทย์

อุณหภูมิที่ใช้งานได้เป็นระยะเวลานานๆ : 90 - 110 C

การทนต่อสารเคมี : ทนต่อกรดและด่าง แอลกอฮอล์ เบนซิน น้ำมันเครื่องและไขมัน ไม่ทนต่อกรด ด่างแก่ และ ketone

สภาพและกลิ่นเมื่อไหม้ไฟ : เปลวไฟจะติดต่อไปหลังจากจุด เปลวไฟออกสีน้ำเงินขอบเหลืองหยดเป็นฟอง ยืดเป็นเส้นใย

กลิ่น : คล้ายเขาสัตว์ไหม้

สัมประสิทธิ์การนำความร้อน 0.92 KJ/mh C

ค่าความร้อนจำเพาะ (c) 1.67 KJ/mg C

ความหนาแน่น (ρ) ที่อุณหภูมิ 20 C เท่ากับ 1.13 g/cm^3

ระยะเวลาอบแห้ง (ก่อนเข้าเครื่องฉีด) 2 - 3 ชั่วโมงที่อุณหภูมิ 60 - 85 C

อัตราการหดตัวอยู่ระหว่าง 1.0 – 2.5 %

2.5.1.5 พีวีซี PVC_h (Polyvinylchloride : PVC - hard) [13]

ชื่อทางการค้า : TROSIPLAST, Vestolit, Vinofles, Hostalit

ลักษณะที่ผลิตออกมาขาย : เป็นผงละเอียด หรือเป็นเม็ด โปร่งแสงหรือย้อมสีทึบให้ทุกสี

คุณสมบัติโดยทั่วไปของผลผลิต : มีความแข็งแรงสูง แข็งเหนียว ไม่สึกกร่อน มีค่า dielectricity ดี ติดไฟยาก

ตัวอย่างการใช้งาน (จากกรรมวิธีฉีด) : อุปกรณ์ท่อ (fittings) ชิ้นส่วนปั๊ม แผ่นเสียง ปะเก็น ฉนวนไฟฟ้า ชิ้นส่วนเครื่องใช้ในบ้านและในสำนักงาน

อุณหภูมิที่ใช้งานได้เป็นระยะเวลานานๆ : 60 - 70 C

การทนต่อสารเคมี : ทนต่อกรดและด่าง แอลกอฮอล์ เบนซิน น้ำมันเครื่องและไขมัน

สภาพและกลิ่นเมื่อไหม้ไฟ : เมื่อจ่ออยู่ในเปลวไฟติด เมื่อดึงออกจากเปลวไฟ ไฟจะดับมีเถ้ามาก เปลวมีสีเขียวหรี่ ปะทุ

กลิ่น : กลิ่นกรดเกลือ (กัดเยื่อจมูก)

สัมประสิทธิ์การนำความร้อน 0.59 KJ/mh C

ความหนาแน่น (þ) ที่อุณหภูมิ 20 C เท่ากับ 1.4 g/cm^3

อัตราการหดตัวอยู่ระหว่าง 0.4 – 0.5 %

2.5.1.6 พีวีซี (Polyvinylchloride : PVC) [13]

ชื่อทางการค้า : TROSIPLAST, Vestolit, Vinofles, Hostalit

ลักษณะที่ผลิตออกมาขาย : แผ่นกลมหรือทรงลูกเต๋า (ประมาณ 3 mm) สีมีทั้งโปร่งแสงและย่อมสีโปร่งแสงจนถึงสีทึบ

คุณสมบัติโดยทั่วไปของผลผลิต : ยืดหยุ่นดีมาก มีลักษณะคล้ายยาง เนื่องจากมีสารทำให้อ่อนเจือปนอยู่มากจึงไม่เหมาะที่จะใช้ห่อหุ้มอาหาร

ตัวอย่างการใช้งาน (จากกรรมวิธีฉีด) : ทำปะเก็นต่างๆ ของเด็กเล่น รองเท้ากันน้ำ รองเท้าหนังเทียม ส่วนที่ได้รับแรงกระแทกของวิทยุ โทรศัพท์ ส่วนขาของอุปกรณ์ต่างๆ ส้นรองเท้า ปุ่มและมือจับต่างๆ ภายในรถยนต์

การทนต่อสารเคมี : ทนต่อกรดและด่างอ่อน แก่ น้ำมันเครื่องและไขมันได้จำกัด ไม่ทนต่อแอลกอฮอล์ ketone ether chlorinated hydrocarbon benzol และเบนซิน

อุณหภูมิที่ใช้งานได้เป็นระยะเวลานานๆ : 40 - 70 C

กลิ่น : กลิ่นกรดเกลือ (กัดเยื่อจมูก) และกลิ่นสารทำให้อ่อน

อัตราการหดตัวอยู่ระหว่าง 1.5 - 3.0%

2.5.2 โลหะ (Metal) คือ วัสดุที่ประกอบด้วยธาตุโลหะที่มีอิเล็กตรอนอิสระอยู่มากมาย นั่นคือ อิเล็กตรอนเหล่านี้ไม่ได้เป็นของอะตอมใดอะตอมหนึ่งโดยเฉพาะ ทำให้มันมีคุณสมบัติพิเศษหลายประการ เช่น เป็นตัวนำไฟฟ้าและความร้อนได้ดีมาก ไม่ยอมให้แสงผ่าน ผิวของโลหะที่ขัดเรียบ

จะเป็นมันวาว โลหะมีความแข็งแรงพอสมควรและสามารถแปรรูปได้จึงถูกใช้งานในด้านโครงสร้างอย่างกว้างขวาง เป็นต้น

2.5.2.1 ไทเทเนียม (Titanman) [4] ไทเทเนียม (Titanium, Ti) เป็นโลหะชนิดหนึ่งที่อุตสาหกรรมต่างให้ความสนใจ เนื่องจาก โลหะมีความต้านแรงสูง แต่มีความหนาแน่นต่ำ ทนการกัดกร่อนได้ดีมาก มีค่าความแข็งแรงที่อุณหภูมิสูง(high temperature strength) จึงเหมาะกับงานพิเศษในงานสร้างเครื่องบินระบบไอพ่นขับและมอเตอร์ที่มีกำลังงานสูง

ไทเทเนียมเป็นธาตุที่มีมากเป็นลำดับที่ 9 ในชั้นเปลือกโลก แต่โลหะชนิดนี้สามารถเกิดปฏิกิริยากับธาตุอื่นๆ ได้ง่าย จึงไม่พบ ในรูปโลหะบริสุทธิ์ตามธรรมชาติ แต่จะพบในรูปสารประกอบในแร่ชนิดต่างๆ เช่น แร่รูไทล์ (Rutile) แร่อิลเมไนต์ (Ilmenite) แร่อะนาเทส (Anatase) แร่บรูไคต์ (Brookite) แร่ไททะไนต์ (Titanite) เป็นต้น นอกจากนี้ยังมีการพบแร่ไทเทเนียมอยู่รวมกับแร่เหล็กด้วย

คุณสมบัติของไทเทเนียม (Titanman)

ความหนาแน่น	4.5 kg/dm^3
จุดหลอมเหลว	1670°C
โมดูลัสยืดหยุ่น	110000 N/mm^2
สัมประสิทธิ์การขยายตัว	9.10^{-6} /k
โมดูลัสเฉือน	45 kN/mm^2
ความต้านแรงดึง	300 - 750 N/mm^2
ความแข็ง	100-200 HB 30
ความต้านการกระแทก	$\alpha_{k=}$ 0.5 - 2.5 J/mm^2

2.5.2.2 ตะกั่วและตะกั่วผสม (Lead and Lead alloys) [4]

ตะกั่ว เป็นโลหะที่มีสีขาวและมีจุดหลอมเหลวต่ำ ดังนั้น จึงจักตะกั่วไว้ในกลุ่มโลหะขาว (white metal) ตะกั่วเป็นโลหะที่มีความสำคัญมากในงานวิศวกรรมเหมือนกัน จะเห็นได้ว่าตะกั่วที่ผลิตมาเป็นจำนวนมากนั้น จะถูกนำไปใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตหม้อ แบตเตอรี่รถยนต์ โดยใช้ตะกั่วเป็นแผ่นธาตุ สารประกอบของตะกั่วใช้ผสมในน้ำมันเบนซินเพื่อเพิ่มค่าออกเทนให้สูงขึ้น และป้องกันการน๊อคของเครื่องยนต์ นอกจากนี้ยังผสมสารประกอบของตะกั่วลงในสีที่มีคุณภาพอีกด้วย

ความหนาแน่น 11.3 kg/dm^3

จุดหลอมเหลว 327 °C

โมดูลัสยืดหยุ่น 175000 N/mm^2

สัมประสิทธิ์การขยายตัว 29.10^{-6}/K

ความสามารถในการนำกระแสไฟฟ้า 5 m/Ω . mm^2

ความยืดอยู่ระหว่าง 50%

คุณสมบัติที่สำคัญของตะกั่วและตะกั่วผสม มีอยู่หลายประการดังเช่น มีความหนาแน่นมากและหนัก มีความอ่อนเหนียวสามารถขึ้นรูปง่าย มีความแข็งแรงต่ำ มีคุณสมบัติการหล่อลื่นดี มีสัมประสิทธิ์การขยายตัวสูง มีความนำไฟฟ้าต่ำ และมีความต้านทานการกัดกร่อนดี เนื่องจากตะกั่วมีน้ำหนักมาก จึงนิยมใช้เป็นน้ำหนักถ่วงความสมดุล เช่น การถ่วงล้อรถยนต์และการที่ตะกั่วมีความหนาแน่นสูง จึงเหมาะที่ใช้เป็นแกป้องกัน รังสีเบต้าและแกมมา จากสารกัมมันตรังสีต่างๆ

ตะกั่วผสม (Lead alloys) ธาตุผสมส่วนมากที่นิยมผสมเข้าไปในตะกั่วนั้น ได้แก่พลวงและดีบุก ซึ่งธาตุผสมสองชนิดนี้เมื่อผสมกับตะกั่ว จะมีระบบผสมเป็นแบบระบบยูเต็คติค และโลหะตะกั่วผสมมีดังนี้

1) โลหะตะกั่วผสมพลวง
2) โลหะตะกั่วผสมดีบุก
3) โลหะผสม ตะกั่ว – ดีบุก – พลวง
4) โลหะผสมตะกั่ว แบริ่ง

2.5.2.3 ทองแดง (Copper) [4]

เป็นโลหะที่เป็นตัวนำไฟฟ้าที่ดี ทนต่ออากาศ น้ำร้อน และกรดบางชนิดได้ เป็นโลหะที่สำคัญที่สุดอันดับสอง ทองแดงที่ทำการขึ้นรูปในขณะเย็นจะทำให้ความเค้นที่ต่ำลงอยู่แล้วสูงมากขึ้นทีเดียว มีคุณสมบัติทางกลที่อุณหภูมิต่ำดีเหมือนเดิม สารมลทินและสารที่เจือลงในทองแดงจะทำให้ความสามารถในการนำไฟฟ้าลดน้อยลง

ความหนาแน่น 8.90 - 8.96 Kg/dm^3

จุดหลอมเหลว 1083 ° C

ความเค้นยืดหยุ่น 125000 N / mm^2

สัมประสิทธิ์การขยายตัว 17.10^{-6}/K

ความสามารถในการนำกระแสไฟฟ้า 35 - 58 m/Ω . mm^2

ความสามารถในการนำความร้อน 240 - 386 W/K . m

ความต้านแรงดึง 200 - 360 N / mm^2

ความยืดอยู่ระหว่าง 2 - 45%

สินแร่ทองแดง จะมีทองแดงอยู่ประมาณ 4% หลังจากการคั่วแล้วจะทำให้หินทองแดงมีปริมาณทองแดง 30 ถึง 60% เมื่อผ่านเตาถลุงด้วยก๊าซแบบนอน ที่เหลือส่วนใหญ่ จะเป็นเหล็กและกำมะถัน

ทองแดงจากเตาแปรสภาพ จะมีความบริสุทธิ์ตั้งแต่ 97.5 ถึง 99.5% โดยการอัดลมเข้าไปยังหินทองแดงเหลวในระหว่างที่เป่าลมเข้าไป เหล็กออกไซด์จะรวมตัวเป็นขี้ตะกรันกำมะถันไดออกไซด์ซึ่งเป็นก๊าซเสียที่นำไปผลิตเป็นกรดกำมะถัน

ทองแดงหลอม ได้จากการผ่านเตาถลุงบริสุทธิ์ด้วยก๊าซ ทำให้มีความบริสุทธิ์ถึงประมาณ 99.9% แต่ยังมีปริมาณทองแดงออกไซด์ อยู่เล็กน้อย ใช้ทำเป็นวัสดุกึ่งสำเร็จรูปเป็นแผ่นแถบ และแผ่นอะไนด์สำหรับนำไปหลอมด้วยวิธีอิเล็กโตรไลต์ต่อไป

ทองแดงอิเล็กโตรไลต์ มีความบริสุทธิ์ของทองแดงอย่างน้อยที่สุด 99.9% ด้วยวิธีการอิเล็กโตรไลต์นี้จะทำให้ทองแดงแดงแยกตัวมาอีก 0.5 ถึง 5 กรัม/ตัน และเงิน 100 กรัมถึง 2000 กรัม/ตัน ทองแดงนี้จะมีออกซิเจน เจือปนอยู่ประมาณ 0.015 ถึง 0.04% ทองแดงสามารถรีดหรือดึงขึ้นรูปได้ดีมาก ไม่เหมาะในงานหล่อด้วยกระสวนแบบตายตัว เพราะจะเกิดก๊าซเสียได้ง่าย

2.5.2.4 สเตนเลส [27]

คุณสมบัติ ของสเตนเลส (Stainless Steel)

1) ตระกูลออสเทนนิติค (Austenitic)

ก) ต้านทานการกัดกร่อนดีเยี่ยม

ข) ใช้งานประกอบและขึ้นรูป ทีเกี่ยวข้องกับความสะอาดและสุขอนามัยได้ดีเลิศ

ค) สะดวกในงานสร้าง ประกอบหรือขึ้นรูปทั่วไปได้ดีมาก

ง) ความแข็งแรงสูงสุดและมีความยืดตัวสูง

จ) แม่เหล็กดูดไม่ติด

ฉ) สามารถใช้งานเย็นจัดและร้อนจัดที่อุณหภูมิประมาณ 600 องศาเซลเซียส หรือสูงกว่านี้

2) ตระกูลเฟอร์ริติค (Ferritic)

ก) ต้านทานการกัดกร่อนปานกลางถึงดี

ข) ต้านทานการกัดกร่อนแบบเป็นจุดและแบบมุมอับในซอกแคบๆ ได้ดีและมีความต้านทานการกัดกร่อนใต้แรงเค้นดีกว่าเกรดออสเทนนิติกมีข้อจำกัดในการเชื่อมและการขึ้นรูป เช่น ดัด ดึงขึ้นรูป มากกว่าเกรดออสเทนนิติค

ค) มีความต้านทานการเกิดออกซิไดซ์ที่อุณหภูมิสูงถึง 850 องศาเซลเซียส

ง) แม่เหล็กดูดติด

จ) ไม่สามารถชุบแข็งได้

3) ตระกูลมาร์เทนซิติค

ก) ความต้านทานการกัดกร่อนปานกลาง

ข) แม่เหล็กดูดติด

ค) สามารถทำให้แข็งได้ด้วยกรรมวิธีทางความร้อน ดังนั้นจึงสามารถพัฒนาปรับปรุงให้มีความแข็งแรงสูงและปรับระดับความแข็งแรงได้

ง) มีข้อจำกัดในการเชื่อม เนื่องจากมีปริมาณคาร์บอนสูงและมีความแข็งโดยธรรมชาติในตัวเอง

จ) ใช้งานในอุณหภูมิสูงได้ดีถึง 593 องศาเซลเซียส

4) ตระกูลดูเพล็กซ์ (Duplex)

การที่โครงสร้างผสมระหว่างเฟอร์ริติค และออสเทนนิติค ทำให้สามารถต้านทานการแตกร้าว จากการกัดกร่อนด้วยแรงเค้นสูงและการกัดกร่อนเป็นรู

ก) ทนต่อสารคลอไรด์ทำให้ใช้ในสภาพแวดล้อมที่มีความเป็นกรดหรือด่างสูงได้

ข) ต้านทานการกัดกร่อนได้ดี เนื่องจากมีส่วนผสมของโครเมียมสูงและเพิ่มส่วนผสมของธาตุโมลิบดินัม ไนโตรเจน

ค) ใช้ในงานเชื่อมและขึ้นรูปได้ดีเช่น งานปั๊มก้นลึก เนื่องจากมีสมบัติเชิงกลดีเลิศในการใช้งานที่อุณหภูมิติดลบ ได้ถึง 225 องศาเซลเซียส หรือ ใช้งานที่อุณหภูมิ (ถึง 1100 องศาเซลเซลเซียส)ชนิดของสเตนเลสที่นิยมใช้ในประเทศไทย

ชนิด SUS303 เป็นแตนเลสออสเตนิติก มีส่วนผสมของโครเมียมประมาณ 18 % และนิกเกิลประมาณ 9 % จะมีความสามารถขึ้นรูปเย็นได้ดีเมื่อแผ่นสเตนเลสต้องมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างไปมาก จึงเหมาะกับงานพิเศษ เช่น การขึ้นรูปทรงที่ซับซ้อนที่ต้องการการดึงและการยืดตัว เป็นต้น

ชนิด SUS304 เป็นสเตนเลสออสเตนิติก มีส่วนผสมของโครเมียมประมาณ 18 % และนิกเกิลประมาณ 8 % ใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร เครื่องดื่ม อุปกรณ์ในกระบวนการทางเคมี อุปกรณ์เครื่องครัว เครื่องใช้บนโต๊ะอาหาร ภาชนะหุงต้ม เครื่องมือในโรงพยาบาล เครื่องล้างจาน ฯลฯ

ชนิด SUS304 D เป็นสเตนเลสออสเตนิติก มีส่วนผสมของโครเมียมประมาณ 18 % และนิกเกิลประมาณ 8.5 % จะมีความสามารถขึ้นรูปเย็นได้ดีกว่าชนิด 304 เหมาะสำหรับ

การผลิตที่มีการขึ้นรูปแบบหลุมลึกและการดึงขึ้นรูปสำหรับรูปทรงที่ซับซ้อน เช่น ภาชนะที่เป็นหลุมลึก อ่างล้างจาน เป็นต้น

ชนิด SUS316 เป็นสเตนเลสออสเตนิติก มีส่วนผสมของโครเมียมประมาณ 16-18 % และนิกเกิลประมาณ 11-14 % และยังมีโมลิบดินัมผสมอยู่อย่างน้อยที่สุด 2 % ซึ่งทนการกัดกร่อนที่เป็นหลุมได้ดี ใช้ในกระบวนการทางเคมี ปั๊ม แท็งก์ กระบวนการผลิตอาหารและเครื่องดื่ม เป็นต้น

ชนิด SUS403 เป็นสเตนเลสเกรดเฟอร์ริติก มีความต้านทานการกัดกร่อนน้อยกว่าชนิด 304 มีส่วนผสมของโครเมียม 17 % ใช้ทำเครื่องครัว เครื่องใช้บนโต๊ะอาหาร อุปกรณ์หุ้งต้ม เฟอร์นิเจอร์และการตกแต่งภายในอาคาร

ตารางที่ 2.5 ชื่อเรียกทางสากลของสเตนเลส

มาตรฐานไทย (TISI)	มาตรฐานญี่ปุ่น (JIS)	มาตรฐานอเมริกัน(ASTM)
SST 303	SUS 303	303
SST 304L	SUS 303L	304L
SST 316L	SUS 316L	316L
SST 430	SUS 430	430

2.6 อุปกรณ์การเพิ่มความร้อนในสารละลายหรือของเหลว

2.6.1 ฮีสเตอร์ [28]

ชนิดต่างๆ ของฮีสเตอร์ที่จะนำมาเลือกใช้งานมีดังนี้

2.6.1.1 ฮีสเตอร์แท่ง Cartridge Heater ใช้ความร้อนกับวัสดุที่เป็นของแข็ง เช่น เหล็ก และโลหะต่างๆ ตัวอย่างการใช้งาน เช่น งานบรรจุหีบห่องานขึ้นรูปพลาสติก

ภาพที่ 2.25 ฮีสเตอร์แท่ง Cartridge Heater [28]

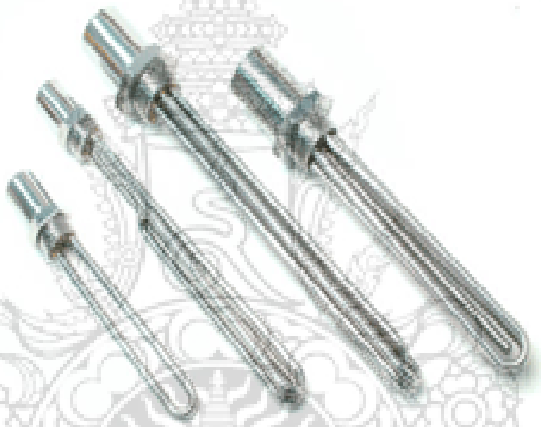
ลักษณะการใช้งานทั่วไปของ Cartridge Heater คือ ใส่ไว้ในช่องบนวัตถุ ความร้อนจะถูกส่งผ่านจากฮีสเตอร์ ไปยังวัตถุที่ต้องการให้ความร้อน ตัวอย่าง เช่น ให้ความร้อนแม่พิมพ์ของเครื่องบรรจุหีบห่อ Cartridge Heater แบ่งออกเป็น 2 ชนิดคือ High Density และ Low Density (บางครั้งเรียกว่า High Temperature) และLow TemperatureCartridge Heater สามารถสั่งทำได้ตามแบบ หรือระบุรายละเอียดดังนี้ 1. เส้นผ่าศูนย์กลาง 2. ความยาว 3. แรงดัน 4. กำลังวัตต์

2.6.1.2 ฮีสเตอร์ครีบ Finned Heater ใช้ให้ความร้อนกับอากาศ เช่น ใช้ในห้องอบแห้งในเตาอบ

ภาพที่ 2.26 ฮีสเตอร์ครีบ Finned Heater [28]

ฮีสเตอร์ครีบและฮีสเตอร์ท่อกลม ใช้กับงานต่อไปนี้ ใช้ในเตาอบ , ใช้ในท่อ DUCT , ใช้กับเครื่องปรับอากาศ การติดตั้งสามารถทำได้ 2 วิธีคือ ติดตั้งแบบให้ความร้อนโดยตรง และ แบบส่งผ่านความร้อนจากห้องเผาไปยังห้องอบโดยใช้ลมร้อน เป็นฮีสเตอร์ที่ใช้กับอากาศ ไม่ควรใช้กับของเหลวเนื่องจากจะเกิดตะกอนจับที่ครีบของฮีสเตอร์ทำให้ความร้อนไม่สามารถถ่ายเทได้ ในกรณีที่ให้ความร้อนกับอากาศที่ไม่หมุนเวียน ควรเลือกวัสดุที่ใช้ทำฮีสเตอร์เป็นอินโคลอย เนื่องจากมีคุณสมบัติถ่ายเทความร้อนได้ และทนอุณหภูมิได้กว่าชนิดอื่นรหัสการสั่งทำ สามารถระบุชนิดวัสดุที่ต้องการได้ รวมทั้งค่าเส้นผ่านศูนย์กลาง , ความยาว , แรงดัน และกำลังวัตต์

2.6.1.3 ฮีสเตอร์จุ่ม, Immersion Heater หรือบางทีเรียกว่า ฮีสเตอร์ต้มน้ำ ใช้ให้ความร้อนกับของเหลวทุกชนิด ตัวอย่างการใช้งานเช่น งานต้มน้ำ - ต้มน้ำมัน งานผสมสาร



ภาพที่ 2.27 ฮีสเตอร์จุ่ม ,Immersion Heater [28]

ทำจาก Tubular Heater ที่ดัดเป็นรูปตัวยู และเชื่อมติดกับเกลียว ซึ่งมีขนาดเกลียวตั้งแต่ 1" 1¼ 1½ 2½ ขนาดของเกลียวจะขึ้นอยู่กับจำนวนเส้นของฮีสเตอร์ ตามความเหมาะสมของกำลังวัตต์ และความยาวของฮีสเตอร์ ฮีสเตอร์แบบจุ่ม เหมาะสำหรับใช้กับของเหลว เช่น ต้มน้ำหรืออุ่นน้ำมัน การติดตั้งสามารถทำได้โดยเชื่องเกลียวตัวเมียติดกับถังแล้วใส่ฮีสเตอร์ แบบเกลียวเข้าไป โดยตัวฮีสเตอร์ขนานกับพื้นถัง ควรระวังไม่ให้ส่วนของฮีสเตอร์โผล่พ้นของเหลวเนื่องจากจะทำให้ส่วนที่อยู่เหนือของเหลวร้อนจัดเกินไปทำให้อายุการใช้งานสั้น และเพื่อให้ความร้อนกระจายทั่วถึง ควรติดตั้งใบพัดกวนของเหลวด้วย รหัสการสั่งทำ สามารถระบุชนิดวัสดุที่ต้องการได้ รวมทั้งค่าเส้นผ่าศูนย์กลาง , ความยาว , แรงดัน และกำลังวัตต์ สเตนเลส 304 ใช้กับงานของเหลวทั่วไป สำหรับสเตนเลส 316 ใช้กับงานที่ต้องการกัดกร่อนได้สูง เช่น งานที่เป็นสารเคมี

2.6.1.4 ฮีสเตอร์แผ่น, Strip Heater ใช้ให้ความร้อนโดยแนบกับวัตถุโดยตรงสามารถออกแบบให้เป็นรูปทรงใดๆก็ได้โครงสร้างจะเป็นฮีสเตอร์แบบเดียวกับฮีสเตอร์ รัดท่อแต่รูปทรงจะเป็นแบบสี่เหลี่ยมจัตุรัสหรือต้องการได้รวมทั้ง, ความยาว, แรงดัน และกำลังวัตต์ รับสั่งทำตามขนาดที่ต้องการสี่เหลี่ยมผืนผ้า เหมาะสมสำหรับให้ความร้อนกับแม่พิมพ์ รหัสการสั่งทำ สามารถระบุชนิดวัสดุ

2.6.1.5 ฮีสเตอร์รัดท่อ, Band Heater ให้ความร้อนกับของเหลวที่อยู่ในท่อหรือถังรูปทรงกระบอกโดยรัดจากด้านนอกได้รับการออกแบบสำหรับท่อ หรือถังรูปทรงกระบอก ฉนวนของฮีสเตอร์ทำจากแผ่น Micea และลวดฮีสเตอร์เป็นแบบแบน (Ribbon Wire Heating Element) จึงทำให้ฮีสเตอร์ชนิดนี้มีเส้นผ่าศูนย์กลางเล็กขนาด 25 มม. หรืออาจใหญ่ถึง 600 มม. ก็ได้ ส่วนความกว้างอยู่ระหว่าง 20 – 300 มม. ตัวถังด้านนอกเป็นแผ่นเหล็กหรือสเตนเลส เหมาะสมสำหรับให้ความร้อนกับเครื่องฉีดพลาสติกมีอีกชื่อหนึ่งว่า ฮีสเตอร์กระบอก รหัสการสั่งทำ สามารถระบุชนิดวัสดุที่ต้องการได้รวมทั้งค่าเส้นผ่าศูนย์กลาง , ความยาว , แรงดัน และกำลังวัตต์

2.6.1.6 ฮีสเตอร์อินฟาเรด (Infrared Heater) ใช้ให้ความร้อนกับวัตถุโดยไม่ต้องสัมผัสโดยตรง ไม่เหมาะกับวัตถุที่มีลักษณะมันวาวเนื่องจากวัตถุมันวาวจะมี คุณสมบัติสะท้อนแสง ทำให้ไม่สามารถดูดซับแสงอินฟราเรดได้อย่างเต็มที่ ใช้ติดตั้งในเตาอบ หรือ เหนือคอนเวย์เยอร์ได้ ลักษณะการทำงานของ Infrared Heater เป็นการส่งผ่านความร้อนแบบแผ่รังสี จึงมี ประสิทธิภาพสูง ความสูญเสียต่ำ ประหยัดไฟได้ 30 – 50 %สามารถให้ความร้อนวัตถุได้ถึงเนื้อใน จึงทำให้ประหยัดเวลาได้ 1 – 10 เท่า (การให้ความร้อนการพา และการนำความร้อนจะทำให้วัตถุร้อนเฉพาะที่ผิว แล้วค่อยๆ ซึมเข้าๆปเนื้อในจึงใช้เวลามาก)มีขนาดเล็กกว่าฮีสเตอร์แบบทั่วๆไป ทำให้ประหยัดเนื้อที่ การติดตั้ง และการถอดเปลี่ยนเพื่อซ่อมบำรุงง่ายมีความปลอดภัยสูง เนื่องจากไม่มีเปลวไฟ ตัวเรือนมีความเป็นฉนวนสูง ไฟไม่รั่วให้รังสี 3 – 10 Um. ซึ่งเป็นช่วงที่วัสดุเกือบทุกชนิดสามารถดูดซับรังสีได้ดี

2.6.1.7 ฮีสเตอร์บ้อบบิน BOBBIN HEATER ใช้ให้ความร้อนของเหลวเหมือนฮีสเตอร์จุ่มเป็นฮีสเตอร์แบบจุ่มชนิดหนึ่ง ถูกออกแบบสำหรับให้ความร้อนกับของเหลว สามารถเคลื่อนย้ายได้ง่าย ปลอดฮีตเตอร์สามารถเลือกให้เหมาะสมกับการใช้งานมีให้เลือกทั้งสเตนเลส 304, สเตนเลส 316 และควอทซ์ โดยแบบสเตนเลสมีข้อดี คือ เมื่อฮีตเตอร์เสียสามารถซ่อมได้ แบบควอกซ์ ใช้สำหรับงานชุบโดยใช้ไฟฟ้า, แช่ในกรด หรือ สารละลาย รหัสการสั่งทำสามารถระบุชนิดวัสดุที่ต้องการได้รวมทั้งค่าเส้นผ่าศูนย์กลาง, ความยาว, แรงดัน และกำลังวัตต์

2.7 การตรวจวัดความร้อน (Thermal Sensors) [27]

นิยามของอุณหภูมิ (Definition of Temperature)

2.7.1 พลังงานความร้อน (Thermal Energy)

ในวัสดุที่เป็นของแข็ง แต่ละอะตอมหรือแต่ละโมเลกุลจะยึดเกาะหรือมีพันธะต่อกันอย่างแข็งแรงสภาวะดังกล่าวนี้เรียกว่า “ตำแหน่งสมดุล” (equilibrium position) อย่างไรก็ตามแต่ละอะตอมยังคง สามารถสั่นสะเทือนรอบตำแหน่งที่มันตั้งอยู่ได้ แต่ถ้าของแข็งที่ไม่มีการสั่นสะเทือนของโมเลกุล แสดงว่าพลังงานความร้อนภายในอะตอมเป็นศูนย์หรือ $W_{TH} = 0$ ตอนนี้หากเราเพิ่มพลังงานให้กับวัตถุดังกล่าวจะทำให้โมเลกุลเกิดการสั่นสะเทือนรอบ ๆ ตำแหน่งสมดุลของมันจึงกล่าวได้ว่าขณะนี้มีพลังงานความร้อนเกิดขึ้นหรือ $W_{TH} > 0$ หากเราเพิ่มพลังงานเข้าไปในวัตถุนี้อีก การสั่นสะเทือนจะเพิ่มมากขึ้น สุดท้ายสภาวะในการยึดเกาะก็จะน้อยลงและแตกออกในที่สุด แสดงว่าวัตถุดังกล่าวนี้เกิดการหลอมละลายและกำลังจะกลายเป็นของเหลว

ในกรณีของแก๊ส หากเพิ่มพลังงานความร้อนในวัตถุที่เป็นของเหลวให้มากขึ้นต่อไปอีกความเร็วของโมเลกุลก็จะเพิ่มขึ้นจนอยู่ในสภาวะสุดท้ายทำให้เกิดช่องว่างระหว่างแต่ละโมเลกุลเต็มที่ หากถึงขั้นโมเลกุลไม่สัมผัสกันและเคลื่อนที่อย่างสุ่ม ๆ (Random) ในภาชนะ วัตถุดังกล่าวก็จะกลายเป็นแก๊สไปในที่สุดมีผลทำให้โมเลกุลชนกระแทกกับโมเลกุลอื่น ๆ รวมถึงผนังของภาชนะในงานจริง วัตถุประสงค์ของการตรวจวัดความร้อน อุปกรณ์วัดความร้อนของวัตถุหรือสิ่งแวดล้อมจะอยู่ในรูปแบบที่แตกต่างกัน

2.7.2 อุณหภูมิ (Temperature)

หน่วยของการวัดพลังงานที่เหมาะสมก็คือ “จูล” (Joule) ซึ่งเป็นหน่วยในระบบ SI ค่านี้จะขึ้นอยู่กับขนาดของวัตถุ เพราะมันจะเป็นตัวบอกปริมาณในการเก็บความร้อน ส่วนการวัดพลังงานความร้อนเฉลี่ยต่อโมเลกุลก็มีหน่วยเป็นจูลเช่นเดียวกันการวัดอุณหภูมิ (Measurement of Temperature)

2.7.2.1 วิธีการวัดที่ไม่ใช่วิธีทางไฟฟ้า (Non-Electrical Methods)

วิธีที่ไม่ใช่การวัดอุณหภูมิทางไฟฟ้า อาจจะอยู่บนวิธีใดวิธีหนึ่งดังต่อไปนี้

ก) การเปลี่ยนแปลงสถานะทางฟิสิกส์

ข) การเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางเคมี

ค) การเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางฟิสิกส์

2.7.2.2 วิธีการแสดงผลของอุณหภูมิ

ก) เทอร์โมมิเตอร์แบบแท่งโลหะ(Solid Rod thermometer)หลักการของเทอร์โมมิเตอร์แบบแท่งโลหะนี้ อยู่บนหลักการของการขยายตัวเชิงเส้นของโลหะเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น

ข) เทอร์โมมิเตอร์แบบไบเมทัล (Bimetallic Thermometer)เทอร์โมมิเตอร์นี้ใช้หลักการขยายตัวของของแข็ง

ค) เทอร์โมมิเตอร์แบบเติมของเหลวในหลอดแก้ว (Liquid-in-Glass Thermometer)เทอร์โมมิเตอร์แบบนี้ใช้วัดอุณหภูมิซึ่งใช้ความแตกต่างของการขยายตัวนี้เป็นตัวบอกระดับอุณหภูมิ

ง) เทอร์โมมิเตอร์แบบความดัน (Pressure Thermometer) ทำงานบนพื้นฐานการขยายตัวของของไหล อันเนื่องมาจากการเพิ่มความดันของปริมาตรที่ใช้วัดอุณหภูมิ เทอร์โมมิเตอร์แบบนี้ใช้งานกันอย่างกว้างขวางในการวัดอุณหภูมิทางอุตสาหกรรม

จ) เทอร์โมมิเตอร์แบบปรอทที่อยู่ในโลหะ (Mercury-in-steel Thermometer) เทอร์โมมิเตอร์แบบนี้มีสเกลเป็นเชิงเส้น และมีกำลังเพียงพอที่จะใช้งานกับปากกาบันทึกได้

ฉ) เทอร์โมมิเตอร์แบบปริมาตรคงที่ (Constant Volume Thermometer) เทอร์โมมิเตอร์แบบดังกล่าวนี้ใช้แก๊สเฉื่อย (ปกติจะเป็นไนโตรเจน) เป็นตัวทำงานแทนที่ปรอท หลักการทำงานคือ อาศัยการเพิ่มความดันของแก๊สเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ณ จุดที่ซึ่งปริมาตรคงที่

ช) เทอร์โมมิเตอร์แบบความดันไอ (Vapor Pressure Thermometer) เทอร์โมมิเตอร์แบบนี้สเกลไม่เป็นเชิงเส้น

2.7.2.3 การเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานของโลหะกับอุณหภูมิ

ก) ความต้านทานของโลหะกับอุณหภูมิ (Temperature Versus Resistance of Metallic)โลหะเกิดจาการรวมอะตอมในสถานะของแข็ง ซึ่งในแต่ละอะตอมจะมีตำแหน่งการสั่นที่ซ้อนทับกันและพลังงานความร้อนจะสมดุลกัน คุณสมบัติที่สำคัญของโลหะอยู่ที่ว่าในแต่ละอะตอมจะมีอิเล็กตรอน 1 ตัว เรียกว่า “ วาเลนซ์อิเล็กตรอน “ (Valance electron) ที่สามารถเคลื่อนที่ผ่านวัตถุได้อย่างอิสระซึ่งกลายเป็นอิเล็กตรอนตัวนำ (Conduction electron)

ข) การประมาณค่าความต้านทานกับอุณหภูมิ (Resistance Versus Temperature Approximation) การประมาณค่าความเป็นเชิงเส้น (Linear approximation) คือการหาค่าจากสมการเส้นตรงซึ่งพล๊อตระหว่างค่าความต้านทานเทียบกับอุณหภูมิ (R-T curve) ในบางช่วงที่ต้องการตัวตรวจวัดอุณหภูมิโดยใช้หลักการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทาน (Resistance Temperature Detectors ;RTD)

อาร์ทีดี คือ ตัวเซ็นเซอร์อุณหภูมิที่ใช้หลักการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานของโลหะซึ่งค่าความต้านทานดังกล่าวจะมีค่าเพิ่มตามอุณหภูมิ ความต้านทานของโลหะที่เพิ่มเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นนี้ เรียกว่า “ สัมประสิทธิ์การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิแบบบวก “ (Positive Temperature Coefficient ; PTC)นอกจากนี้อาร์ทีดียังมีชื่อเรียกได้อีกอย่างว่า “ เทอร์โมมิเตอร์แบบค่าความต้านทาน (Resistance Temperatures)

อาร์ทีดีค้นพบในปีเดียวกับที่ซีแบ็คค้นพบปรากฏการณ์เทอร์โมอิเล็กทริก โดย Sir Humphry Day ซึ่งพบว่า ความต้านทานในโลหะจะมีผลตามค่าความร้อน อีก 50 ปีต่อมา Sir Willium Siemens ก็นำเอาแพลทินัมมาทำเป็นเทอร์โมมิเตอร์ และจัดให้เป็นเทอร์โมมิเตอร์แบบปฐมภูมิที่มีความแน่นอนสูง ในความเป็นจริงค่าความต้านทานของอาร์ทีดีแบบแพลทินัม (PRTD) ที่ใช้กันในทุกกวันนี้จะมีการกำหนดสเกลมาตรฐานจากจุดออกซิเจน (-182.96^0 C) ถึงจุดแอนติโมนี(630.740 C) โดย IPTS

2.7.2.4 ชนิดของอาร์ทีดี (Type of RTD)

ก) แพลทินัม เป็นแบบที่นิยมใช้มากที่สุด เขียนบอกไว้เป็น PT ได้แก่ PT-10, PT-100, PT – 1000 ความสามารถในการทำซ้ำสูง แต่ความไวต่ำ ราคาแพงมากเมื่อเทียบกับนิกเกิลซึ่งมีความสามารถในการทำซ้ำน้อย แต่มีความไวมากกว่า และราคาถูกกว่า

ข) ทองคำและเงิน ธาตุทั้งสองมีค่าความต้านทานจำเพาะต่ำ

ค) ทังสเตนมีค่าความต้านทานจำเพาะสัมพัทธ์สูง มักใช้กับการวัดอุณหภูมิที่มีค่าสูง เพราะ หากใช้ที่อุณหภูมิปกติจะมีความเปราะและยากต่อการใช้งาน

ง) นิกเกิล ใช้กับย่านวัดอุณหภูมิสูงๆ มีความเป็นเชิงเส้นต่ำ ทำให้เกิดค่าดริฟต์ (Drift) กับเวลา นอกจากนี้ยังมีวัสดุชนิดอื่นๆ ที่ใช้ทำอาร์ทีดี ได้แก่ เหล็ก เป็นต้น

2.7.2.5 คุณลักษณะของอาร์ทีดี (Characteristic of RTD)

ก) ความไว (Sensitivity) ความไวของอาร์ทีดีหาได้จากค่าของ α_0 พบว่าแพลทินัมจะมีค่า α = 0.00385 $\Omega/\Omega/^0$C (ประมาณ $0.004/^0$C) ดังนั้น สำหรับแพลทินัมอาร์ทีดีแบบ $100\,\Omega$ จึงเปลี่ยนค่าความต้านทานไปเพียง 0.4 Ω เท่านั้น หากอุณหภูมิเปลี่ยนไป 100^0C

ข) ผลตอบสนองต่อเวลา (Response Time) เวลาในการตอบสนองของอาร์ทีดีเกิดจากการนำความร้อน โดยทั่วไปเวลาคงที่จะกำหนดโดยสภาวะอากาศอิสระ (หรือสภาวะใดๆ ที่สมมูลกัน) หากว่าหากมันอยู่ในฝักป้องกัน (sheath) มันจะสัมผัสความร้อนได้ไม่ดีจึงทำให้ได้ผลตอบสนองต่อเวลาช้า

ค) โครงสร้าง (Construction) แน่นอนว่าอาร์ทีดีที่มีความยาวของสายมาก จะทำให้ความต้านทานเป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิมาก

ง) การปรับสภาพสัญญาณ (Sine Conditioning)

จ) ค่าคงที่ในการสูญเสีย (Dissipation Constant)

ฉ) ย่านการใช้งาน (Range) ย่านประสิทธิผลการใช้งานของอาร์ทีดีจะขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุที่ใช้เป็นอุปกรณ์แอกทีฟ พบว่า อาร์ทีดีแบบแพลทินัมจะมีย่านใช้งานจาก -100^{0}C ถึง 650^{0}C ในขณะที่อาร์ทีดีที่ทำจากนิกเกิลจะมีช่วงใช้งานจาก -180^{0}C ถึง 300^{0}C

2.7.2.6 ข้อควรจำในการวัดอุณหภูมิโดยใช้อาร์ทีดี คือ

ก) ต้องมีการชีลด์สายและเดินสายบิดเกลียวเพื่อป้องกันสัญญาณรบกวน

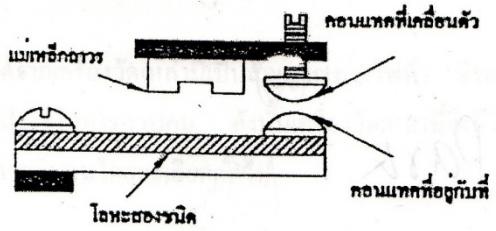
ข) อาร์ทีดีมีความเปราะบาง จึงต้องป้องกันและระวังการใช้งาน

ค) เนื่องจากที่อาร์ทีดีไม่สามารถกำเนิดพลังได้เหมือนกับเทอร์โมคัปเปิล จึงทำให้มีกระแสไหลผ่านและเกิดผลของความร้อนจูล (I^2R)กับตัวมันเอง

2.8 เทอร์โมสตัท (Thermostat) [27]

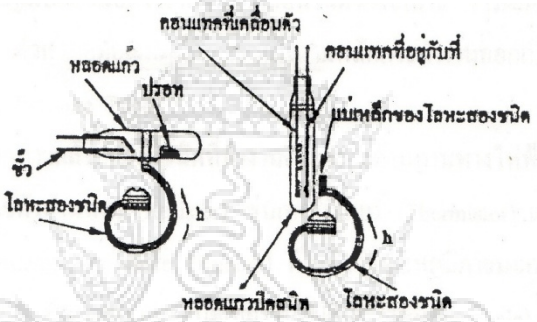
ตัวควบคุมอุณหภูมิของระบบการทำงานทำความร้อนเราเรียกกันทั่วไปว่า เทอร์โมสตัท (Thermostat) เมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลงจะทำให้ความดันในตัวเปราะ (Thermobulb) ไปดันคอนแทคไฟฟ้าเปิด/ปิด ตัวควบคุมอุณหภูมินี้ เราแบ่งตามหลักการทำงานออกเป็นชนิดโลหะกับชนิดความดันไอ (Vapor Pressure Type)

นอกจากชนิดดังกล่าวแล้ว ยังมีชนิดทำงานด้วยความต้านทานทางไฟฟ้า (Electric Resistance Type) โดยใช้ตัวต้านทาน (Resistor) เช่นเทอร์มิเตอร์ (Thermistor) และตัวต้านทานแบบแพลทินัม (Platinum Resistance Element) เป็นตัววัดอุณหภูมิภายนอก โดยอาศัยหลักการเปลี่ยนแปลงค่าของความต้านทาน และชนิดเทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple) ซึ่งเมื่ออุณหภูมิที่ขั้วเปลี่ยนแปลงจะทำให้มีแรงเคลื่อนไฟฟ้าเกิดขึ้น เทอร์โมสตัท เนื่องจากกลไกการวัดอุณหภูมิที่ดีเลิศของโลหะสองชนิดจึงนิยมใช้ทำเป็นเทอร์โมสตัท (Thermostat) กันอย่างกว้างขวาง นอกจากนี้ยังต้องการการปิด/เปิดคอนแทคที่รวดเร็ว (Snap Action) ทั้งนี้จะเกิดประกายไฟในช่องห่างระหว่างคอนแทคขึ้นในขณะที่แรงเคลื่อนไฟฟ้ากำลังไหลอยู่ระหว่างคอนแทคนั้นทำให้หน้าคอนแทคเสียหาย เพื่อป้องกันมิให้เกิดประกายไฟดังกล่าว จึงจำเป็นจะต้องมีตัวช่วยดึงแบบแม่เหล็กหรือสปริง ดังรูปภาพที่ 2.28 ตัวช่วยดึงยังป้องกันไม่ให้ตัด – ต่อ บ่อยเกินไปเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย



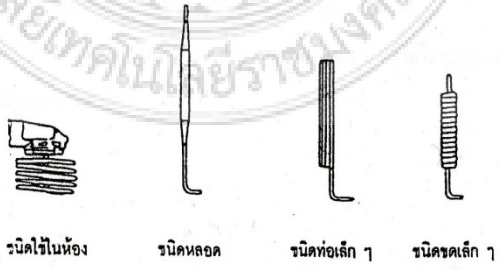
ภาพที่ 2.28 เทอร์โมสตัทแบบดูดติด [27]

เพื่อป้องกันไม่ให้คอนแทคชำรุดเนื่องจากประกายไฟ เราอาจทำได้โดยประกอบคอนแทคให้อยู่ในหลอดแก้วสุญญากาศดังภาพที่ 2.29



ภาพที่ 2.29 เทอร์โมสตัทแบบปรอทจังหวะเดียว [27]

ในเทอร์โมสตัทชนิดที่ใช้ความดันไอ จะประกอบด้วยตัวกลาง (ของเหลว ไอ) บรรจุอยู่ในท่อที่เป็นตัวรับความร้อนที่สามารถเปลี่ยนแปลงความดันเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลง อุณหภูมิเปลี่ยนเป็นความดันทำให้คอนแทค ตัด – ต่อ ได้ รูปร่างของท่อที่เป็นตัวรับความร้อนดูได้ภาพที่ 2.30



ภาพที่ 2.30 รูปร่างของท่อที่เป็นตัวรับความร้อน [27]

2.9 การบดผงโลหะ

กระบวนการบดเป็นการลดขนาดอนุภาคให้มีขนาดเล็กลงเพื่อง่ายต่อกระบวนการผลิตชิ้นงานที่มีความแข็งสูง ในขั้นต่อ ๆ ไป ตัวอย่างเช่น สินแร่ต้องผ่านการย่อยเพื่อเข้ากระบวนการแต่งแร่ที่เหมาะสม สารเคมีถูกบดให้เป็นผงเพื่อให้ง่ายต่อการทำละลาย แผ่นพลาสติกถูกตัดเป็นชิ้นหรือก้อนเล็ก ๆ เพื่อง่ายต่อการหลอมและผสมสี ผลิตภัณฑ์บางชนิดถูกย่อยเพื่อให้ได้ตามข้อกำหนดของลูกค้าทั้งขนาดและรูปร่าง การลดขนาดอนุภาคมีผลต่อปฏิกิริยาเคมี ต่อการละลาย ต่อการหลอมของแข็งอาจถูกทำให้มีขนาดเล็กลงโดยกระบวนการ

ภาพที่ 2.31 ลักษณะถ้วยและภายในถ้วยบดผงโลหะ

Tumbling Mill คือตัวอย่าง Tumbling Mill ประกอบตัวถังหมุนช้า ๆ รอบแกนนอนภายในบรรจุลูกบดไว้ประมาณครึ่งหนึ่งของปริมาตรตัวเอง ตัวถังมักทำด้วยเหล็ก กรุด้วยแผ่นเหล็กคาร์บอนสูงหรือเซรามิกส์ หรือยาง ลูกบดที่ใช้มักใช้เป็นชื่อของเครื่องบด เช่น Rod Mill ใช้ลูกบดเป็นแท่งโลหะ (Metal Rod) หรือโซ่ของลูกบดโลหะ Ball Mill ใช้ลูกบดกลมทำจากโลหะ ไม้ หรือ Pebble Mill ใช้ลูกบดประเภทลูกหิน ทำจาก Zircon หรือ เซรามิกส์ Tumbling mill เป็นต้น วัตถุที่จะบดจะถูกใส่ในเครื่องปริมาณหนึ่งปิดฝาแล้วให้เครื่องหมุนไประยะหนึ่ง

ซึ่งอาจเป็นเวลาหลายชั่วโมงแล้วจึงหยุดเครื่องแล้วแยกผลิตภัณฑ์ออกในขณะที่เครื่องแบบต่อเนื่องวัตถุป้อนจะเข้าด้านปลายหนึ่งแล้วออกทางอีกปลายหนึ่งใน Tumbling Mill ทุกชนิด ลูกบดจะถูกพาสูงขึ้น ด้านในของตัวถัง แล้วก็จะตกลงมากระทบวัสดุที่จะบดที่อยู่ข้างใต้ พลังงานที่ใช้ในการยกตัวบดจะได้คืนมาโดยการบดวัสดุ ใน Tumbling Mill ชนิด Rod Mill การลดขนาดส่วนใหญ่ได้จากการอัดบดขณะหมุน และการโม่ขณะที่เกิดการเลื่อนไหลไปบนตัวบดตัวอื่น ๆ แท่งบดดังกล่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ระหว่าง 25-125 มิลลิเมตร โดยใช้หลายขนาดคละกัน แท่งบดนี้มีอยู่ตลอดความยาวของเครื่องบดบางครั้งจะใช้ตัวถังบดรูปกรวยเพื่อป้องกันการบิดออกนอก

แนวทาง Rod Mill เป็นเครื่องบดขนาดกลาง ทำงานในช่วง 20 มิลลิเมตร ได้ผลิตภัณฑ์ประมาณ 10 เมช ส่วนใหญ่ใช้เตรียมผลิตภัณฑ์ให้กับ Ball Mill ได้รับตัวป้อนจากเครื่องบีบใน Ball Mill หรือ Pebble Mill การลดขนาดเกิดจากการที่ลูกบดที่ถูกยกขึ้นไปสูงสุดตกลงมากระทบกับวัสดุ ใน Ball Mill ตัวถังอาจมีเส้นผ่านศูนย์กลางถึง 3 เมตร ยาว 4.25 เมตร ลูกบดขนาด 25-125 มิลลิเมตร ลูกบดแบบลูกหิน (Pebble Mill) ลูกบดจะมีขนาดโตกว่า Ball Mill เล็กน้อย คือมีขนาด 50-175 มิลลิเมตร Tube Mill เป็นเครื่องบดแบบต่อเนื่องตัวถังทรงกระบอกจะยาว วัสดุถูกบด 2-5 เท่าของถังบดแบบสั้น Tube Mill สามารถปรับเป็นห้อง ๆ ที่มีลูกบดต่างขนาดกัน ใหญ่ กลาง เล็ก เรียงไปตามลำดับ ลูกบดใหญ่ใช้บดหยาบลูกบดเล็กใช้บดละเอียด Conical Ball Mill

2.10 ทฤษฎีการขึ้นรูปและการอัดแน่น (Shaping and Compaction)

งานต่าง ๆ ทางด้านโลหะกรรมวัสดุผงต้องกำหนดให้ชิ้นงานสุดท้ายมีความหนาแน่นสูง การทำให้ผงเกิดการแน่นตัว (Densification) สามารถทำได้โดยวิธีการใดวิธีการหนึ่งในสามวิธีต่อไปนี้ คือ

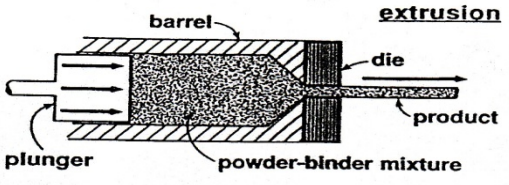
1) อบผนึกชิ้นงานให้มีความหนาแน่นเพิ่มขึ้นจากพรีฟอร์มที่มีความหนาแน่นต่ำ

2) อัดผงเพื่อให้ความหนาแน่นสูงและตามด้วยการอบผนึก และ

3) อัดผงและอบผนึกในเวลาเดียวกันโดยใช้เทคนิคที่ให้ความหนาแน่นสูง

2.10.1 การอัดรีด (Extrusion)

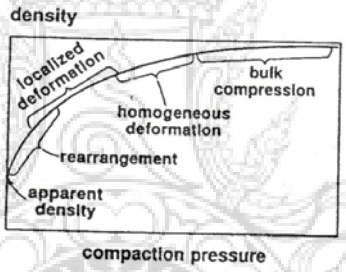
การอัดรีดเป็นกรรมวิธีการผสมผสานระหว่างเทคนิคการฉีดขึ้นรูป (PIM) และเทคนิคสเลอร์รี่ ภาพที่ 2.32 แสดงส่วนผสมของสารผงและสารยึดที่บรรจุในกระบอกสูบถูกดันด้วยลูกสูบหรือเกลียวส่วนผสมถูกอัดผ่านแม่พิมพ์ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ลักษณะยาวและมีพื้นที่หน้าตัดคงที่สารยึดทำให้อนุภาคเกาะติดกันเพื่อคงรูปร่างของชิ้นงาน สำหรับการอัดผ่านตามแม่พิมพ์ชิ้นส่วนที่ผ่านการอัดจะถูกตัดออกเป็นท่อนสั้นๆ (เม็ด) และนำไปอัดในแม่พิมพ์แบบแนวแกนเดี่ยวในที่อุณหภูมิไม่สูงนักเพื่อให้ได้รูปทรงตามที่ต้องการ



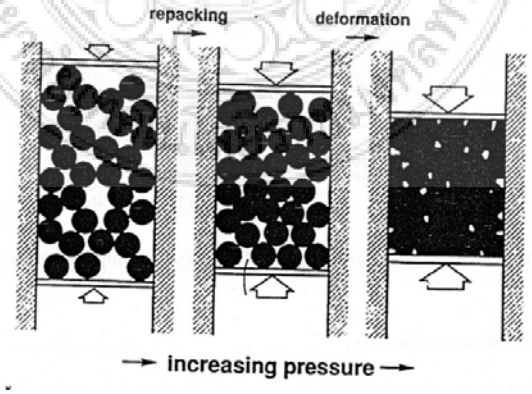
ภาพที่ 2.32 กระบวนการอัดรีด ส่วนผสมของผง-สารยึดถูกดันผ่านแม่พิมพ์ เพื่อขึ้นรูปชิ้นงานแบบต่อเนื่อง

2.10.2 ปรากฏการณ์ของการอัดแน่น (Phenomnology of Compaction)

กระบวนการผลิตที่ใช้สารยึดช่วยในการขึ้นรูปโดยอยู่ในรูปของไหลเพื่อหล่อลื่นผงขณะขึ้นรูป ความหนาแน่นสูงได้จากการใช้แรงกระทำจากภายนอก ดังภาพที่ 2.33 อัตราการแน่นตัวเริ่มต้นมีค่าสูงตามความดันที่ให้ ภาพที่ 2.34 แสดงหลักเกณฑ์ในการนิยามขั้นตอนการอัดแน่น การอัดแน่นเริ่มต้นที่ความหนาแน่นประมาณเท่ากับความหนาแน่นปรากฏมีช่องว่างระหว่างอนุภาคปรากฏโดยทั่ว เมื่อมีการเขย่าความหนาแน่นสูงสุดที่ได้คือความหนาแน่นเคาะผงที่อยู่ในสภาวะหลอมยังคงมีช่องว่างอยู่ไม่มีความแข็งแรง และจำนวนโคออร์ดิเนชัน (CN) หรือจำนวนอนุภาคที่สัมผัสอยู่รอบอนุภาคหนึ่งๆ มีค่าต่ำเมื่อเริ่มให้ความดันการตอบรับแรกสุดคือการจัดเรียงตัวใหม่ของอนุภาคโดยอนุภาคมีการเติมในรูพรุนขนาดใหญ่ก่อนส่งผลให้จำนวนการสัมผัสกับอนุภาครอบข้างสูงขึ้น ซึ่งมีการคล้ายคลึงกับการเขย่าหรือสั่นผงการจัดเรียงตัวใหม่ให้ได้ผลดีเมื่อพื้นผิวของอนุภาคเรียบและแข็ง



ภาพที่ 2.33 ภาพสเก็ตช์แสดงความสัมพันธ์ของความหนาแน่นกับความดันในการอัดแน่น แสดงขั้นตอนสำคัญและความสามารถในการอัดลดลงเมื่อความหนาแน่นเพิ่มขึ้น

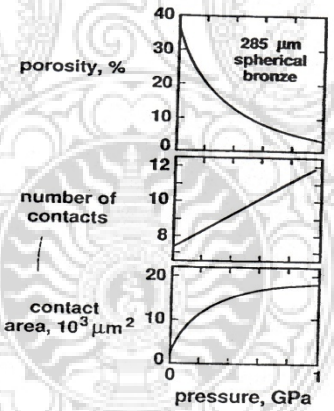


ภาพที่ 2.34 ภาพแสดงขั้นตอนการอัดผงโลหะ เริ่มต้นมีการเรียงตัวโดยลดบริดจ์ระหว่างอนุภาคเมื่อแรงอัดสูงขึ้นการแน่นตัวเกิดจากการเสียรูปของอนุภาค

การเพิ่มความดันทำให้การจัดเรียงตัวของอนุภาคดีขึ้นและจะทำให้ความพรุนลดลง โดยการฟอร์มตัวของจุดสัมผัสใหม่ระหว่างอนุภาค และทุกจุดสัมผัสในวัฏจักรของการอัดแน่นมีบริเวณสัมผัสผ่านการเปลี่ยนแปลงรูปแบบพลาสติก ดังนั้นความดันทำให้การเปลี่ยนรูปจำกัดเฉพาะในส่วนสัมผัสส่งผลให้เกิดความแข็งจากการเปลี่ยนโครงสร้าง (เกิดความเครียด) หรือเวิร์กฮาร์ดเดนนิง และยอมให้จุดสัมผัสใหม่ฟอร์มตัวขึ้นที่ช่องว่างระหว่างอนุภาคที่ยุบตัวลง (Collapse) บริเวณสัมผัสระหว่างอนุภาคปรากฏเป็นลักษณะแบนราบจากที่มีรูปโค้งตามเส้นรอบวงกลม ความหนาแน่นกรีน (ρ)และเส้นผ่าศูนย์กลางของส่วนโค้ง (X) มีความสัมพันธ์กันดังนี้

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

เมื่อ D เป็นขนาดอนุภาค และ ρ_0 เป็นความหนาแน่นเริ่มต้นที่สอดคล้องกับค่า X = 0 ความแข็งแรงของพันธะระหว่างอะตอมขึ้นกับปริมาณแรงเฉือนที่จุดสัมผัสระหว่างอนุภาคแรงเฉือนสูงสุดเกิดขึ้นตรงกลางของจุดสัมผัสและมีค่าสูงสุดเมื่อจุดสัมผัสมีขนาดเล็ก ขณะเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปมีการเชื่อมเย็นเกิดขึ้นที่จุดสัมผัสระหว่างอนุภาคส่งผลให้มีการพัฒนาความแข็งแรงในชิ้นงานความแข็งแรงหลังการอัดและก่อนการอบผนึก เรียกว่าหรือความแข็งแรงกรีน (Green)



ภาพที่ 2.35 การอัดแน่นผ่านแม่พิมพ์ของผงบรอนซ์ทรงกลม แสดงการเปลี่ยนแปลงความพรุนจำนวนอนุภาคที่สัมผัสและพื้นที่สัมผัสเมื่อแรงอัดเพิ่มขึ้น

ขณะที่เพิ่มความดัน โดยทั่วไปเฉพาะการจัดเรียงใหม่ (Rearrangement) เกิดขึ้นที่ความดันต่ำกว่า 0.03 MPa ความหนาแน่นที่เปลี่ยนแปลงจากการจัดเรียงตัวใหม่ขึ้นกับลักษณะของผง แต่ความพรุนที่ลดลง 5 ถึง 10 % ทำให้เกิดความแน่นตัวของผงโลหะ ขั้นตอนการไหลแบบพลาสติกทำให้ความพรุนลดลงต่ำกว่า 10 % ในโลหะทั่วไปเริ่มขยายการเกิดเวิร์กฮาร์ดเดนนิงที่ 50-100 MPa และเนื่องจากในการอัดเกิดเวิร์กฮาร์ดเดนนิงจึงทำให้การอัดเพื่อให้ได้ความหนาแน่นสูงกว่า

90 % ของความหนาแน่นทฤษฎีเป็นเรื่องที่ทำได้ยาก เมื่อความแข็งของผงวัสดุโลหะสูงขึ้นและความสามารถในการทำเวิร์กฮาร์ดเดนนิงลดลงทำให้เกิดการแตกเป็นผลึกเล็กๆสมบัติต่างๆภายในของวัสดุเมื่อรวมตัวกับลักษณะทางผนึกศาสตร์ (Crystallography) พันธะเคมีความเสียดทานและลักษณะพื้นผิว (Surface State) จะบอกระดับความยากง่ายในการอัดแน่นตัวแปรภายนอกของผง เช่น ขนาด และรูปร่างก็มีผลกระทบต่อการอัดแน่นเช่นกัน

2.10.3 พื้นฐานทางทฤษฎี (Theoretical Basis)

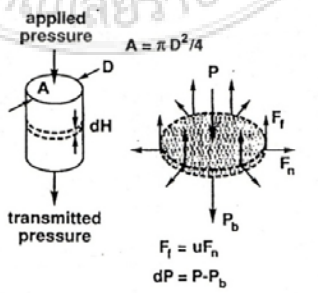
ปัญหาสำคัญในการอัดผงโลหะในแนวแกนเดี่ยวคือความเสียดทานที่ผนังแม่พิมพ์ แรงเสียดทานทำให้แรงกระทำลดลงตามความลึกของวัสดุ (Power Bed) คุณลักษณะที่สำคัญภายในของผงโลหะมีผลต่อความสัมพันธ์ระหว่างความดัน-ความหนาแน่น-ความแข็งแรงในการอัด หมายถึงสมบัติวัสดุต่อไปนี้ เช่น ความแข็ง อัตราเกิดเวิร์กฮาร์ดเดนนิง แรงเสียดทานที่พื้นผิวและพันธะเคมีระหว่างอนุภาค ซึ่งมีความสำคัญเท่ากับปัจจัยภายนอก เช่น ขนาด รูปร่างของผงโลหะ การหล่อลื่นและกรรมวิธีการอัดแน่น

2.10.3.1 หลักการของอัดแน่น (Fundamentals OF Compaction)

พิจารณาชิ้นงานรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง (D) ความสูง (H) การวิเคราะห์ชิ้นส่วนขนาดเล็กรูปร่างบางที่มีความสูง (dH) เมื่อมีแรงกระทำภายนอก แสดงให้เห็นความแตกต่างระหว่างความดันด้านบน (P) ของชิ้นส่วนเล็กบางนี้และความดันที่ส่งผ่านชิ้นส่วนนี้สู่ด้านล่างคือ (P_b) มีค่าเท่ากับแรงที่ให้ในแนวตั้งฉากลบด้วยแรงเสียดทานใช้หลักการสมดุลแรงทางคณิตศาสตร์สำหรับชิ้นส่วนเล็กบางจะได้

$$\Sigma F = O = A(P_b - P) + u\,F_n$$

เมื่อ F_n คือแรงตั้งฉาก u คือสัมประสิทธิ์ความเสียดทานระหว่างผงวัสดุกับผนังแม่พิมพ์ A เป็นพื้นที่หน้าตัด แรงตั้งฉากสามารถเขียนในรูปของความดันที่ให้ซึ่งมีค่าสัดส่วนกับค่าคงที่ z โดยที่ z แปรตามความหนาแน่นของชิ้นงาน ซึ่งปัจจัยนี้แทนด้วยอัตราส่วนของความเค้นตามแนวแกน ดังนั้น



ภาพที่ 2.36 หลักการสมดุลของแรงในการอัดแน่นด้วยแม่พิมพ์

$$F_n = \pi u z P D dH$$

แรงเสียดทาน (F_f) คำนวณโดยตรงจากแรงในแนวตั้งฉาก และสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน u ดังนี้

$$F_f = \pi z P D dH$$

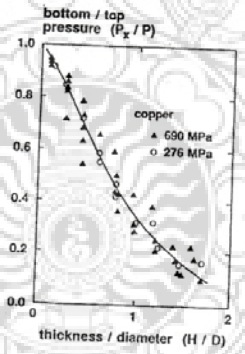
เมื่อรวมพจน์ต่างๆเข้าด้วยกัน ได้ค่าความแตกต่างของความดันระหว่างบนและด้านล่างของชิ้นส่วน

$$dP = P\text{-}P_b = F_f / A = -4 u z P dh / D$$

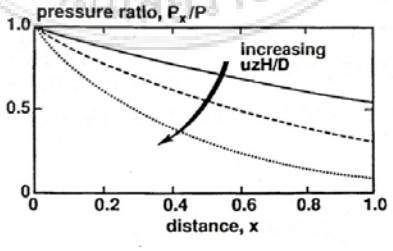
รวบรวมพจน์ของความดันตามความสูงของชิ้นงาน ทำให้ได้ความดันที่ตำแหน่ง x ใดๆ ใต้พันช์ตัวบนลงมามีค่าดังนี้

$$P_X = P \exp (-4 u z x / D)$$

สมการนี้ใช้ได้กับการอัดแน่นในแนวแกนแบบทิศทางเดียวเพื่อแสดงว่าความดันลดลงตามความลึกของผงวัสดุ ภาพที่ 2.37 แสดงความดันที่ส่วนล่างของชิ้นงานนอร์มอไลซ์ด้วยความดันที่ใส่เข้าไปด้านบน กับความหนาของชิ้นงานที่มอร์มอไลซ์ด้วยเส้นผ่าศูนย์กลางของชิ้นงาน ถึงแม้ว่าข้อมูลมีการกระจัดกระจายแต่เห็นได้ชัดเจนว่าการส่งผ่านแรงลดลงความหนาของชิ้นงานเพิ่มขึ้น



ภาพที่ 2.37 แสดงความสัมพันธ์ของความดันที่ส่งผ่านในชิ้นงานอัดกับความหนาของชิ้นงาน



ภาพที่ 2.38 ความลาดของความดันที่ใต้พันช์ตัวบนในการอัดด้านเดียวในแม่พิมพ์ ในแผนภาพแสดงความดันที่ตำแหน่ง x ใต้พันช์ตัวบนที่เป็นอัตราส่วนกับความดัน

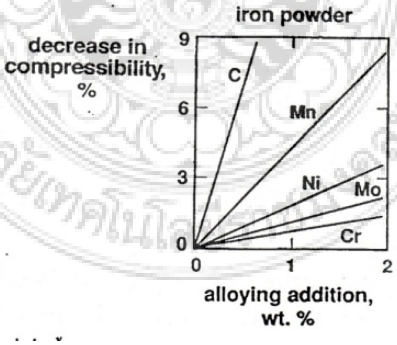
ภาพที่ 2.38 แสดงถึงผลกระทบจากการเพิ่มค่าของพจน์ uzH/D ความเสียดทานที่ผนังทำให้ความดันลดลงตามความลึกของผงวัสดุ ในชิ้นงานจริงมีค่าแรงเสียดทานที่มาจากผิวด้านหน้าของพันซ์ซึ่งช่วยเพิ่มให้มีความแตกต่างของความดันด้านข้างของส่วนประกอบในการอัดแน่นด้วยแรงสองทิศทางจะได้รูปแบบการเปลี่ยนความดันทั้งด้านบนและด้านล่างในเวลาเดียวกันกับการอัดแน่นสองด้าน แต่ระยะ x จะเปลี่ยนระยะไปยังพันช์ตัวที่ใกล้ที่สุด ทำให้กระจายของความดันในชิ้นงานมีความสม่ำเสมอมากขึ้นทำให้ความดันลดลงอย่างรวดเร็วตามความลึกของผงวัสดุ ดังนั้นเพื่อความสม่ำเสมอเป็นเนื้อเดียวกันของการอัดแน่นควรมีอัตราส่วนความสูงต่อเส้นผ่าศูนย์กลางต่ำการอัดแน่นแบบด้านเดียว (Sgleended Compaction) ใช้ได้จำกัดเฉพาะรูปทรงชิ้นงานแบบง่าย ๆ

สำหรับการอัดแน่นทิศทางเดียว ความเค้นเฉลี่ยของการอัดประมาณได้จาก

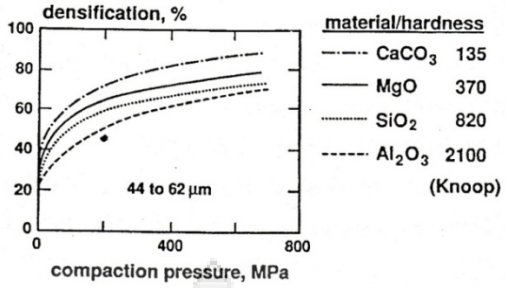
$$\sigma = \mathrm{P}\ [1 - 2uz(H / D)]$$

2.10.4 ผลกระทบของวัสดุและคุณลักษณะ (Influence Of Material And Powder Characteristics)

ขนาดอนุภาคมีผลกระทบต่อแรงเสียดทานระหว่างอนุภาค ความหนาแน่นจากการเรียงตัวและขนาดรูพรุน อนุภาคเล็กทำให้มีความยุ่งยากในการอัดเพราะเป็นรูพรุนขนาดใหญ่ และการเกิดเวิร์กฮาร์ดเดนนิงในอนุภาคขนาดใหญ่ช้ากว่าเนื่องจากระยะห่างของการเลื่อนดิสโลเคชั่นกว้างกว่า ดังนั้นอัตราการแน่นตัวตามความดันของอนุภาคขนาดใหญ่จึงดีกว่าอนุภาคเล็ก



ภาพที่ 2.39 ผงโลหะผสมที่เพิ่มขึ้นทำให้ความสามารถในการอัดลดลง แสดงโดยการเพิ่มความเข้มข้นของส่วนผสมเมื่อเติมให้กับผงเหล็กอะตอมไมซ์ด้วยน้ำ



ภาพที่ 2.40 แสดงการแข็งตัวของวัสดุที่มีความแข็งต่างกัน

2.10.5 เทคโนโลยีการอัดแน่น (Compaction Technology)

2.10.5.1 การเพิ่มความดัน (Pressurization)

ชนิดของความดันที่ใช้ขณะอัดมีผลต่อสมบัติชิ้นงาน ความดันที่มีผลมาจากทิศทางเดียวทำให้เกิดความลาดของความหนาแน่น โดยเฉพาะถ้าอัตราส่วนของความสูงต่อเส้นผ่าศูนย์กลางมีค่ามากการให้ความดันแบบสองทิศทางช่วยทำให้ความเค้นที่ส่งให้ผงวัสดุมีความสม่ำเสมอมากขึ้นทำให้สมบัติและความหนาแน่นหลังการอัดมีความสม่ำเสมอเพิ่มขึ้นสำหรับอัดชิ้นงานที่มีอัตราส่วนความสูงต่อเส้นผ่าศูนย์กลางต่ำ การเลือกใช้วิธีการอัดแบบทิศทางเดียวก็เพียงพอ

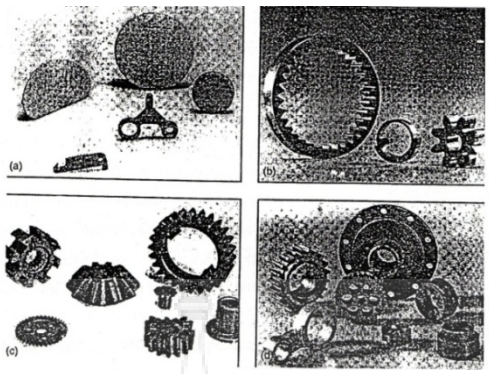
2.10.5.2 การแยกประเภทของชิ้นส่วน (Part Classification) แยกได้ 4 ประเภทดังนี้

ประเภทที่ 1 เป็นชิ้นส่วนระดับเดียวมีรูปร่างง่ายๆ อัดโดยใช้แม่พิมพ์จังหวะเดียวที่มีการเคลื่อนที่ของพันช์ตัวเดียว

ประเภทที่ 2 เป็นชิ้นส่วนระดับเดียวที่ความดันในการอัดแน่นมาจากสองทิศทางความแตกต่างในสองประเภทนี้คืออัตราส่วนความสูงต่อเส้นผ่าศูนย์กลางมีค่ามากขึ้นและมีการคำนึงเกี่ยวกับเครื่องมือมากขึ้น

ประเภทที่ 3 เป็นชิ้นส่วนที่มีสองระดับและความดันมาจากสองทิศทาง

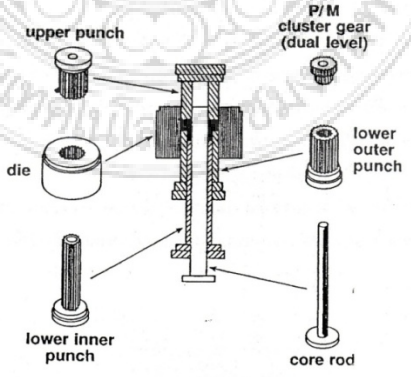
ประเภทที่ 4 เป็นชิ้นส่วนที่มีรูปร่างยุ่งยากที่สุดในการอัดส่วนประกอบมีหลายระดับ



ภาพที่ 2.41 แสดงชิ้นส่วน P/M ทั้ง 4 ประเภท

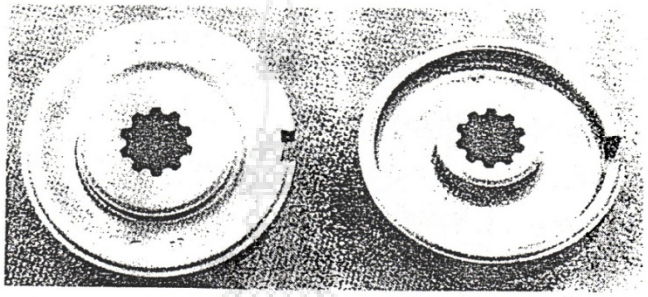
2.10.5.3 การพิจารณาเลือกเครื่องมือ (Tooling Concerns)

การออกแบบและข้อกำหนดที่เหมาะสมของเครื่องมือในการอัดแน่นช่วยยืดอายุการใช้งานและการใช้งานได้เหมาะสม ถ้าจำนวนชิ้นส่วนในชุดเครื่องมือมีมากขึ้นต้องเพิ่มการกำจัดการสึกหรอที่เพิ่มขึ้นด้วยเหล็กกล้าเครื่องมือมีความเหมาะสมในการผลิตชิ้นส่วนที่มีจำนวนไม่มากนัก ขณะที่การเลือกใช้ซีเมนต์คาร์ไบด์สำหรับการผลิตส่วนจำนวนมาก การหดตัวและการบวมของวัสดุผงจากการอบนึกและการคืนตัวแบบยืดหยุ่นขณะดันชิ้นงานออกต้องนำมาพิจารณาร่วมกันในการกำหนดขนาดของเครื่องมือความสามารถในการทำรูปร่างสุดท้ายเป็นลักษณะสำคัญของวิธีการ P/M ข้อดีนี้ทำให้ต้องมีการกำหนดขนาดของเครื่องมือด้วยความระมัดระวังเพื่อให้ได้ขนาดชิ้นส่วนที่ถูกต้องความดันที่ใช้ขณะอัดแน่นถูกจำกัดโดยรูปร่างและชนิดของวัสดุเครื่องมือยิ่งกว่านั้นขนาดของเครื่องอัดการเคลื่อนที่ความซับซ้อนของชิ้นส่วน และผิวสุดท้ายที่ต้องการล้วนมีอิทธิพลต่อการออกแบบเครื่องมือทั้งสิ้น



ภาพที่ 2.42 ส่วนประกอบของเครื่องมือหลายชิ้นใช้ในการอัดเฟืองสองระดับ

ระดับส่วนประกอบของชุดเครื่องมือประกอบด้วยแกนกลาง (Core Rod) เพื่อใช้สอดเข้าไปในช่องของพันช์ตัวล่างทั้งตัวในและตัวนอก สำหรับพันช์ตัวบนก็ทำให้เป็นช่องเหมือนกันเพื่อให้แกนกลางเคลื่อนที่ได้ภาพสเก็ตช์ตรงกลางเป็นภาคตัดขวางของการประกอบสุดท้ายเห็นได้ชัดว่าเมื่อชิ้นงานมีความซับซ้อนเพิ่มขึ้นตามระดับของชิ้นงานที่เพิ่มขึ้น ทำให้จำนวนชิ้นส่วนเครื่องมือเป็นอิสระและการเคลื่อนที่ของเครื่องมือเพิ่มขึ้นด้วยรวมทั้งการเพิ่มต้นทุนของเครื่องมือและเพิ่มความสลับซับซ้อนของการอัด



ภาพที่ 2.43 ชิ้นส่วนหลายระดับที่ต้องการพันช์ตัวล่าง 3 ตัว และพันช์ตัวบน 2 ตัว

2.10.5.4 การออกแบบการอัดแน่น (Designing for Compaction)

การออกแบบชิ้นส่วนและเครื่องมือสำหรับการอัดแน่นอย่างง่ายเป็นงานที่ต้องใช้ทั้งประสบการณ์และความรู้สึกความสำคัญคือการผสมผสานคุณลักษณะของวัสดุผง สมบัติที่คาดว่าจะได้รับและระยะเผื่อของชิ้นงานเข้าด้วยกันการออกแบบเครื่องมือเพื่อให้มีอายุการใช้งานนานและมีการสึกหรอต่ำและคาดว่ารับความดันได้สูงถึง 700 PMa โดยสามารถควบคุมขนาดของชิ้นงานได้ ชิ้นส่วน P/M ส่วนใหญ่มีความผันแปรในขนาดสุดท้ายน้อยกว่า $\pm$ 0.07 มม และถ้าทำภายใต้เงื่อนไขที่แน่นอนสามารถควบคุมระยะเผื่อได้ถึง $\pm$ 0.01 มม

ตารางที่ 2.6 การเปรียบเทียบทางเลือกของการขึ้นรูปและการอัดแน่น

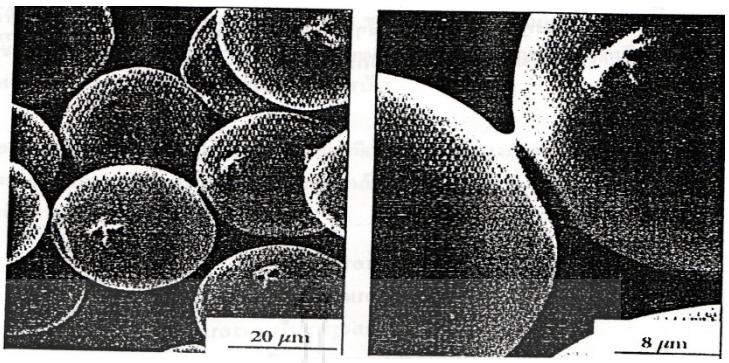
ตัวแปร (variable)	ช่วงของทางเลือก (range of option)
ชนิดของรอบเวลา	ต่อเนื่อง กับ ไม่ต่อเนื่อง
ความเค้น	0 ถึง > 3 GPa
อุณหภูมิ	-200 ถึง 2000 องศาเซลเซียล
ความเร็วในการอัด	10^4 ถึง 10^5 เมตร / วินาที
เครื่องมือ	แข็ง กับ ยืดหยุ่น
ทิศทางการอัด	ทิศทางเดียว กับ ทุกทิศทาง
สารเติม	ไม่มี สารหล่อลื่น สารหนืด
ความซับซ้อนของชิ้นส่วน	ระดับเดียว กับ หลายระดับ

2.11 การอบผนึก (Sintering)

การอบผนึกเป็นกระบวนการทางความร้อนที่ใช้ในการเชื่อมอนุภาคเข้าด้วยกันสมบัติที่ได้จากการอบผนึกเป็นการปรับปรุงสมบัติจากสถานะก่อนเผาหรือสถานะกรีน (Green State) ผลกระทบจากกลไกและกระบวนการที่เกี่ยวกับการอบผนึกแสดงในรูปของอะตอม พร้อมทั้งการอธิบายการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างรูพรุน โดยเน้นเหตุการณ์ซับซ้อนต่างๆ ที่เกี่ยวกับการอบผนึก โดยเฉพาะการอบผนึกแบบมีเฟสของเหลว (Liquid Phase Sintering) และวัฏจักรทางความร้อนอื่นๆ

2.11.1 หลักการอบผนึก (Sintering Fundamentals)

มนัส (2541 : 126-130)[14] กล่าวว่า การอบผนึกเป็นการทำให้อนุภาคเชื่อมติดกันที่อุณหภูมิสูงอาจเกิดขึ้นที่อุณหภูมิต่ำกว่าจุดหลอมเหลวของวัสดุนั้นๆ โดยการเคลื่อนที่ของอะตอมในสถานะของแข็งแต่ในวัสดุหลายชนิดจะเกี่ยวกับการฟอร์มตัวของเฟสของเหลวเมื่อพิจารณาโครงสร้างในระดับจุลภาคการเพิ่มขนาดของคอคอด (Neck Growth) ที่เชื่อมติดต่อกันบริเวณจุดสัมผัสของอนุภาคสองอนุภาค



ภาพที่ 2.44 ภาพถ่าย SEM แสดงการฟอร์มตัวของคอคอดเนื่องจากอบผนึก

ภาพที่ 2.44 เป็นของการเปลี่ยนแปลงรูปคอคอดในสถานะของแข็ง (Solid State Neck) ระหว่างการอบผนึกอนุภาคทรงกลมการเพิ่มขนาดของคอคอดทำให้สมบัติของชิ้นงานเปลี่ยนไปหลังอบผนึก

กลไกของการอบผนึกอธิบายได้ในรูปของเส้นทางการเคลื่อนที่ของอะตอมทำให้เกิดการไหลของมวลสำหรับผงโลหะกลไกการอบผนึกเป็นกระบวนการแพร่ผ่านขอบเกรนหรือแพร่ผ่านแลตทิซของผนึกขั้นตอนกระบวนการอบผนึกอธิบายโดยใช้วิธีการทางคณิตศาสตร์ที่เกี่ยวข้องกับแรงขับและจลนศาสตร์

ขณะอบผนึกพื้นที่ผิวของอนุภาคลดลงอย่างรวดเร็วจากพื้นที่เริ่มต้น (S_0) ปริมาณพื้นที่ผิวที่เปลี่ยนแปลง (ปริมาณพื้นที่ผิวเริ่มต้นลบด้วยปริมาณพื้นที่ผิวสุดท้าย) ส่วนด้วยพื้นที่ผิวเริ่มต้นวัดอยู่ในรูปของพารามิเตอร์แบบไม่มีหน่วย ($\Delta S/S_0$) และพารามิเตอร์นี้เป็นตัวบอกปริมาณการอบผนึก การวัดพื้นที่ได้หลายวิธี เช่น วัดโดยใช้เทคนิคการวิเคราะห์ทางจุลภาค (Microscopic Analysis) วัดปริมาณการดูดซับก๊าซ (Gas Adsorption) หรือวัดความสามารถการซึมผ่านได้ของก๊าซ (Gas Permeability)

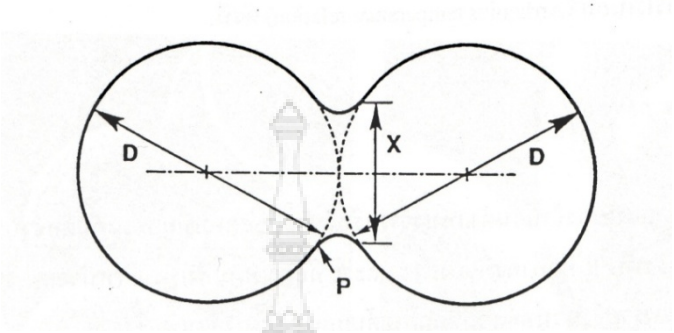
สำหรับอุณหภูมิสองค่า การหดตัว ($\Delta L/L_0$) เป็นการเปลี่ยนแปลงความยาวของชิ้นงานหลังอบผนึกส่วนด้วยความยาวเริ่มต้นหรือก่อนอบผนึก การหดตัวทำให้ชิ้นงานแน่นตัวขึ้นจากความหนาแน่นกรีน (P_G) เป็นไปตามความหนาแน่นหลังอบผนึก (P_S) ดังความสัมพันธ์

$$P_S = P_G / (1-\Delta L/L_0)^3$$

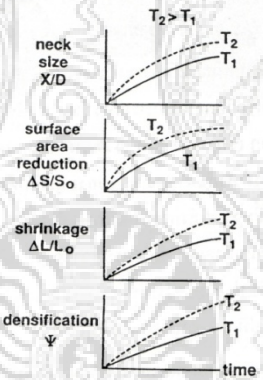
พารามิเตอร์การแน่นตัว (หรือ Densification Parameter , แทนด้วย Ψ) คือการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นเนื่องจากการอบผนึกส่วนด้วยการเปลี่ยนแปลงที่จำเป็นเพื่อให้ได้ชิ้นงานแข็งที่ปราศจากรูพรุนโดยพารามิเตอร์การแน่นตัวมีค่าดังนี้

$$\Psi = (P_S-P_G) / (P_T-P_G)$$

เมื่อ P_T คือความหนาแน่นทางทฤษฎี จะเห็นได้ว่าการวัดค่าปริมาณการแน่นตัวความหนาแน่นสุดท้ายขนาดคอคอด พื้นที่ผิว และการหดตัว ล้วนเกี่ยวข้องกระบวนการกำจัดรูพรุนขณะอบผนึก



ภาพที่ 2.45 การอบผนึกอนุภาคทรงกลมขนาดคอคอด X ขนาดอนุภาค D และเส้นล้อมรอบคอคอดมีรัศมี p



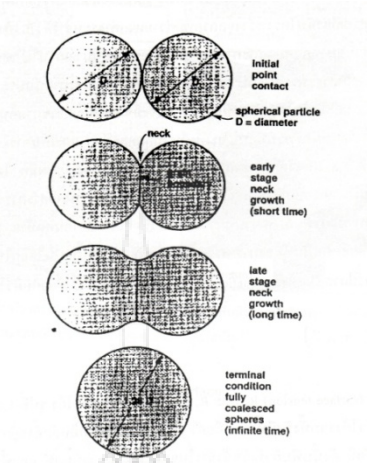
ภาพที่ 2.46 ผลของเวลาในการอบผนึกต่ออัตราส่วนขนาดคอคอด พื้นผิวที่ลดลง การหดตัว และการแน่นตัว

2.11.2 ทฤษฎีการอบผนึก (Sintering Theory)

2.11.2.1 แนวคิดพื้นฐาน (Basic Concept)

วีระพันธ์ (2533 : 174-179) [6] กล่าวว่า พิจารณาบริเวณจุดสัมผัสของอนุภาคทรงกลมสองอนุภาคในภาพที่ 2.47 (ภาพบนสุด) โดยทั่วไปในการอัดแน่นผงอนุภาคแต่ละอนุภาคมีบริเวณสัมผัสกับอนุภาคอื่นได้หลายบริเวณพันธะระหว่างอนุภาคที่บริเวณสัมผัสขยายโตขึ้นและ

รวมตัวกัน (Merge) เมื่อการอบผนึกดำเนินไปอย่างต่อเนื่อง ที่แต่ละจุดสัมผัสของอนุภาคเกิดเป็นขอบเกรนโตขึ้นมาแทนที่บริเวณรอยต่อระหว่างเฟสของแข็งและไอ (Solid-Vapor Interface)



ภาพที่ 2.47 แบบจำลองการอบผนึกอนุภาคทรงกลมสองอนุภาคที่พัฒนาพันธะระหว่างอนุภาคเริ่มต้นจากจุดสัมผัส การเพิ่มขนาดของคอคอดสร้างขอบเกรนที่รอยต่ออนุภาคและในที่สุดรวมตัวเป็นหนึ่งอนุภาค

ขั้นตอนการอบผนึกเริ่มต้นจากขั้นตอนแรก (Initial Stage) ที่คอคอดระหว่างอนุภาคมีการเพิ่มขนาดอย่างรวดเร็ว ขั้นตอนต่อมาเรียกว่าขั้นตอนกลาง (Intermediate Stage) โครงสร้างรูพรุนราบเรียบขึ้นและมีการเชื่อมต่อกันของรูพรุนเป็นลักษณะกระบอก (Cylindrical Nature) ขณะที่สมบัติของชิ้นงานเคมีการพัฒนาในช่วงท้ายของขั้นตอนกลางการเกิดการโตของเกรน (Grain Growth) ส่งผลให้เกรนมีขนาดใหญ่ขึ้นและจำนวนเกรนลดน้อยลงกรณีนี้เกิดขึ้นพร้อมกับการแยกตัวออกไปอยู่โดดเดี่ยวของรูพรุนและอัตราการอบผนึกช้าลง

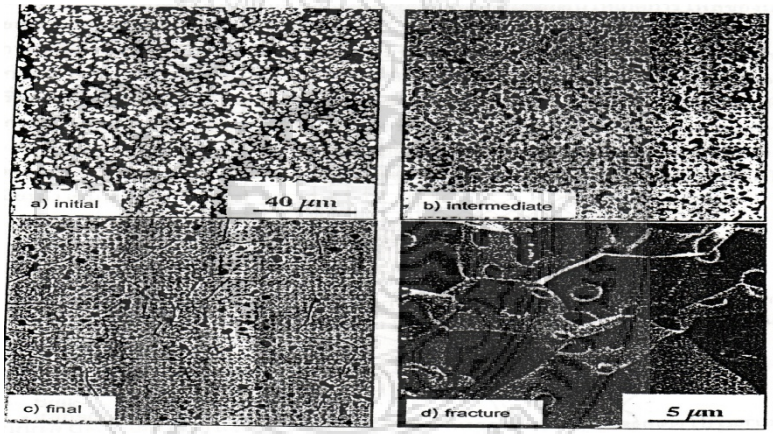
เมื่อความพรุนหดตัวลงประมาณ 8 % (หรือความหนาแน่นทางทฤษฎี 92 %) ทำให้โครงข่ายรูพรุนเปิดไม่เสถียรจากภาพลักษณะโครงข่ายของรูพรุน ณ จุดนี้ทำให้รูพรุนรูปทรงกระบอกยุบตัวลง (Collapse) กลายเป็นวงกลม ซึ่งไม่มีประสิทธิผลในการทำให้แกรนโตช้าลงการที่เห็นรูพรุนเดี่ยวปรากฏขึ้นแสดงว่าขั้นตอนการอบผนึกมาถึงขั้นตอนสุดท้ายแล้ว ขณะเดียวกันอัตราการแน่นตัวช้าลงก๊าซที่ค้างอยู่ในรูพรุนเป็นตัวกำหนดความหนาแน่นสุดท้ายของชิ้นงาน ดังนั้นการอบผนึกในสุญญากาศจึงทำให้ความหนาแน่นสูงขึ้นตราบเท่าที่โลหะยังไม่เกิดการระเหย

ขั้นตอนการอบผนึกยังไม่มีการแบ่งอย่างชัดเจนแต่พอที่จะแยกออกจากกันตามลักษณะที่เกิดขึ้นได้ดังนี้ขั้นตอนแรกเกี่ยวกับโครงสร้างจุลภาคที่มีความแตกต่างระหว่างความโค้งมาก (Curvature Gradient) ทั้งอัตราส่วนขนาดคอคอดและการหดตัวมีค่าอยู่น้อยและขนาดเกรน

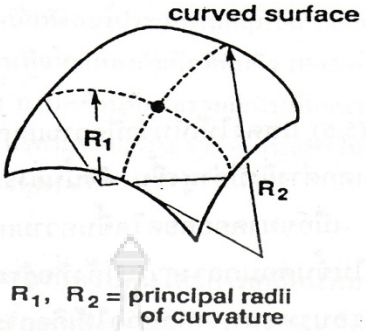
ไม่โตว่าขนาดอนุภาคในตอนเริ่มต้นในขั้นตอนกลางรูพรุนมีความราบเรียบมากขึ้นและมีความหนาแน่นประมาณ 70-92 % ของความหนาแน่นทฤษฎีและมีการโตของเกรนดังนั้นเกรนจึงมีขนาดใหญ่กว่าขนาดอนุภาคเริ่มต้นเมื่อถึงขั้นตอนสุดท้ายของการอบผนึกรูพรุนมีลักษณะเป็นทรงกลมและปิด และเห็นการโตของเกรนอย่างชัดเจน รูปทั้งสี่ในภาพที่ 2.47 แสดงลักษณะพฤติกรรมที่เกิดขึ้นจริงในขณะอบผนึก โดยการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่น ขนาดเกรน และลักษณะโครงสร้างของรูพรุนจากการอบผนึก ภาพที่ 2.48 d แสดงการแตกหักตามขอบเกรนของชิ้นงานที่ผ่านการอบผนึกจนถึงขั้นตอนสุดท้ายรูพรุนทรงกลมตามขอบเกรนบนพื้นผิวที่แตกหักเป็นที่ต้องการเพราะสามารถเพิ่มความหนาแน่นได้อีกในขั้นตอนสุดท้ายจากสมการลาปลาส (Laplace Equation) กำหนดให้ค่าความเค้น , σ เกี่ยวกับผิวโค้งมีค่าดังนี้

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

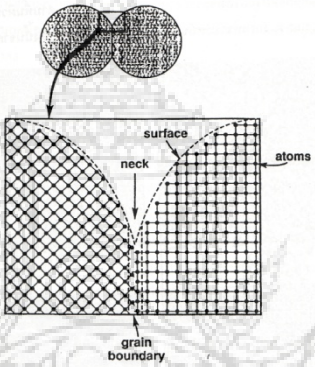
เมื่อ γ คือความตึงผิว (Surface Tension) R_1 และ R_2 เป็นรัศมีหลักของผิวโค้ง ดังนั้นพื้นผิวที่เว้าเข้าข้างในจะมีเครื่องหมายเป็นลบ และพื้นผิวที่เรียบจะไม่มีความเค้น ดังนั้นขณะอบผนึกให้กับพื้นผิวใดๆที่โค้งโตขึ้น (Bump) หรือเว้าลง (Dip) จะราบเรียบ (Flatten) ขึ้นเมื่อเวลาผ่านไป



ภาพที่ 2.48 แสดงการแน่นตัวและการโตของเกรนขณะอบผนึกและพื้นผิวแตกหักในสภาพ d แสดงลักษณะที่ต้องการคือรูพรุนทรงกลมตามบริเวณขอบเกรนในขั้นตอนสุดท้ายของการอบผนึก

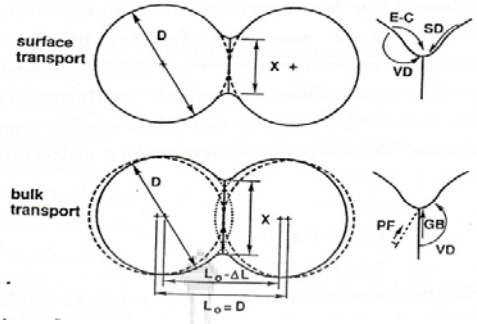


ภาพที่ 2.49 ลักษณะความโค้งบนพื้นผิวโค้งที่บอกในรูปของรัศมีหลักสองค่า



ภาพที่ 2.50 ภาพระดับอะตอมแสดงพันธะระหว่างอนุภาคจากการอบผนึกอะตอมที่ไม่เรียงอยู่ในแนวเส้นเดียวกันกลายเป็นขอบเกรนคอคอดคือบริเวณที่มีการขาดกันเกิดขึ้นโดยกระบวนการเคลื่อนที่

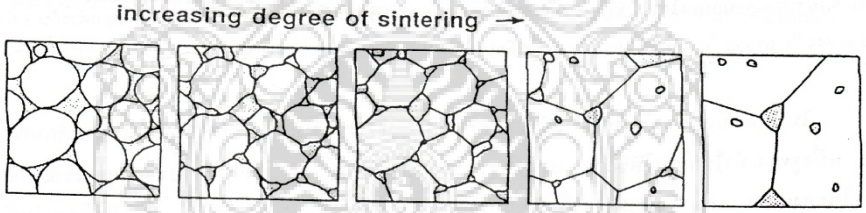
การเคลื่อนที่แบบตามพื้นผิวเกี่ยวข้องกับการเพิ่มขนาดของคอคอดโดยปราศจากการเปลี่ยนแปลงระยะต่างๆ ภายในอนุภาค (นั่นคือไม่มีการหดตัวและไม่มีการแน่นตัวเกิดขึ้น) ทั้งนี้เนื่องจากการไหลของมวลเริ่มต้นและสิ้นสุดที่พื้นผิวของอนุภาคในขณะอบผนึกที่ควบคุมโดยการเคลื่อนที่ตามพื้นผิวมีกระบวนการสำคัญสองกระบวนการที่เกิดขึ้นขณะอบผนึกและการแพร่ตามพื้นผิวและการระเหยการควบแน่นการแพร่ตามพื้นผิวที่มีความสำคัญในการอบผนึกโลหะหลายชนิดที่อุณหภูมิต่ำรวมทั้งการอบผนึกเหล็กด้วย ส่วนการระเหยการควบแน่นไม่เกิดอุณหภูมิต่ำแต่มีความสำคัญต่อการอบผนึกโลหะที่มีความเสถียรต่ำ เช่น ตะกั่ว



ภาพที่ 2.51 แบบจำลองกลไกการอบผนึกทั้งสองประเภทในอนุภาคทรงกลมกลไกการเคลื่อนที่ตามพื้นผิวใช้สำหรับการเพิ่มขนาดของคอคอดโดยมวลเคลื่อนที่จากแหล่งกำเนิดที่พื้นผิว (E-C = การระเหยการควบแน่น SD = การแพร่ตามพื้นผิว VD = การแพร่ในเนื้อวัสดุ)

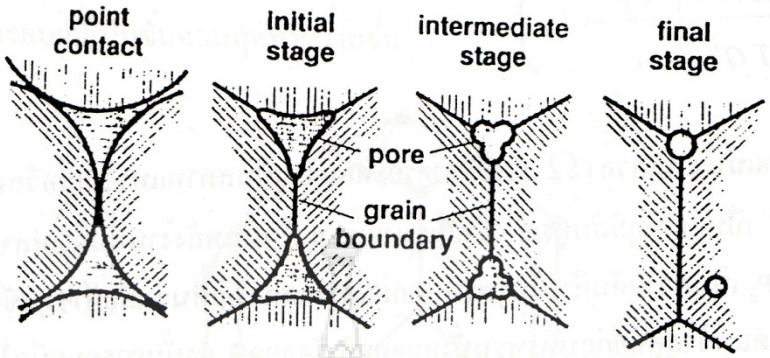
2.11.3 โครงสร้างของรูพรุนในการอบผนึก (Pore Structur In Sintering)

ภาพที่ 2.52 เป็นภาพสเก็ตช์ลักษณะการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางจุลภาคตามปริมาณการอบผนึกตั้งแต่เริ่มต้นจนถึงขั้นตอนสุดท้ายของการอบผนึกมีการเปลี่ยนแปลงขนาดของเกรน จำนวนและขนาดของรูพรุนรวมไปถึงความพรุนที่ลดลงขณะอบผนึก

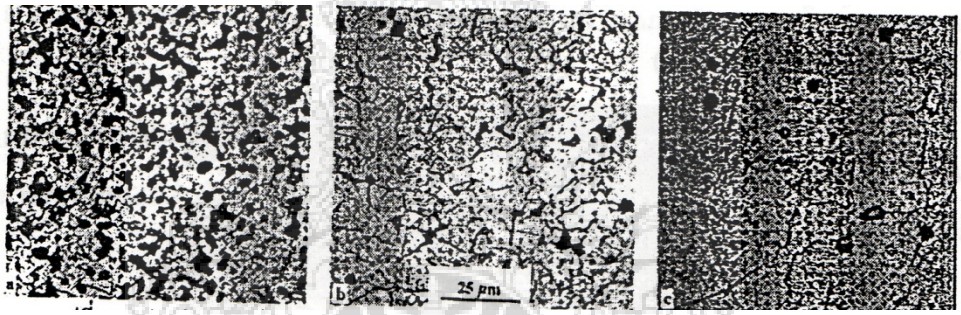


ภาพที่ 2.52 การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของรูพรุนตามปริมาณการอบผนึก

การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของรูพรุนขณะอบผนึกสามารถแสดงด้วยภาพสเก็ตช์อีกแบบดังภาพที่ 2.53 ที่จุดสัมผัสระหว่างอนุภาคกลายเป็นคอคอด เมื่อผ่านขั้นตอนแรกของโครงแบบของขอบเกรนและรูพรุนควบคุมอัตราการอบผนึกในตอนเริ่มต้นของขั้นตอนกลางลักษณะรูพรุนมีการกดซ้อนทับกันสูงและรูพรุนอยู่ตามจุดตัดของขอบเกรน เมื่ออบผนึกต่อไปรูพรุนมีรูปร่างเป็นทรงกระบอกและเกิดการแน่นตัวโดยการลดรัศมีของรูพรุน ตัวอย่างการเปลี่ยนโครงสร้างแสดงในภาพที่ 2.54 เป็นรูปถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์แบบแสงของพัลลาเดียมขณะอบผนึกที่ขั้นตอนต่างๆจะสังเกตเห็นความเปลี่ยนแปลงขนาดเกรนอย่างชัดเจนจำนวนและขนาดของรูพรุนรวมทั้งการลดขนาดของความพรุนรวม



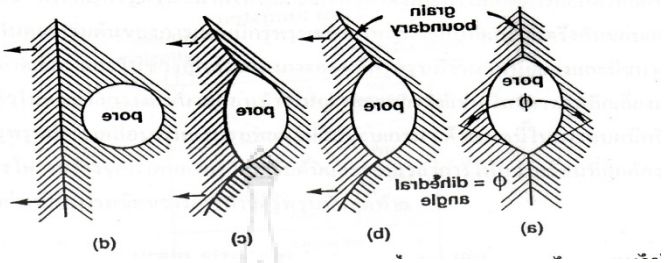
ภาพที่ 2.53 การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของรูพรุนขณะอบผนึก เริ่มต้นจากอนุภาคมีจุดสัมผัสกัน ต่อมาปริมาณของรูพรุนลดลงและมีความราบเรียบขึ้น และเมื่อรูพรุนกลายเป็นทรงกลมถูกแทนที่ด้วยขอบเกรน



ภาพที่ 2.54 การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคของพัลลาเดียมขณะอบผนึก ผงการอบผนึกที่อุณหภูมิแตกต่างกัน 3 เท่าคือ a) 744 ^{0}C b) 950 ^{0}C และ c) 1400 ^{0}C การเปลี่ยนแปลงขนาดของเกรนและความพรุนเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิ

ในขั้นตอนสุดท้ายของการอบผนึกปฏิกิริยาระหว่างรูพรุนและขอบเกรนเกิดขึ้นสามลักษณะ คือ หนึ่งรูพรุนทำให้เกรนโตช้าสองรูพรุนถูกลากไปพร้อมกับการเคลื่อนที่ของเกรนขณะเกิดการโตของเกรนและสามเกรนแยกออกจากรูพรุนทิ้งให้รูพรุนค้างอยู่ภายในเกรนวัสดุส่วนใหญ่แสดงอัตราการโตตั้งแต่ปานกลางถึงสูงที่อุณหภูมิต่างๆ เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นอัตราการเคลื่อนที่ของขอบเกรนเพิ่มขึ้นด้วย เนื่องจากรูพรุนมีการเคลื่อนที่ช้ากว่าขอบเกรนส่งผลให้ขอบเกรนแยกออกจากรูพรุนดังแสดงในภาพที่ 2.54 ที่อุณหภูมิต่ำอัตราการโตของเกรนต่ำดังนั้นรูพรุนยังคงติดอยู่กับขอบแกรนและขัดขวางการโตของแกรนทำให้การเคลื่อนที่ของขอบเกรนอยู่ภายใต้แรงดึง รูพรุน

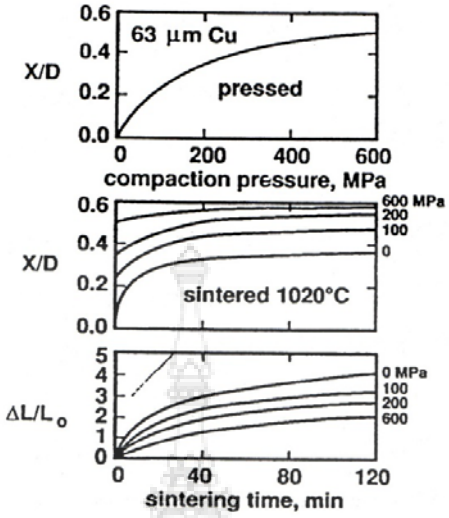
เคลื่อนที่โดยการแพร่ในเนื้อวัสดุการเพิ่มตามพื้นผิวหรือการระเหย-การควบแน่นเพื่อข้ามรูพรุน ขณะที่อุณหภูมิสูงอัตราการโตของเกรนเพิ่มขึ้นถึงขั้นถึงจุดขอบเกรนแยกออกจากรูพรุน



ภาพที่ 2.55 ลำดับการแยกออกของรูพรุนในขั้นตอนสุดท้ายการอบผนึก a) รูพรุนบนขอบเกรน แสดงมุมของแข็ง-ไอที่สมดุล b) และ c) การโตของเกรนที่ลากรูพรุนไปด้วย และ d) รูพรุนเดี่ยวเพราะขอบเกรนแยกตัวออก

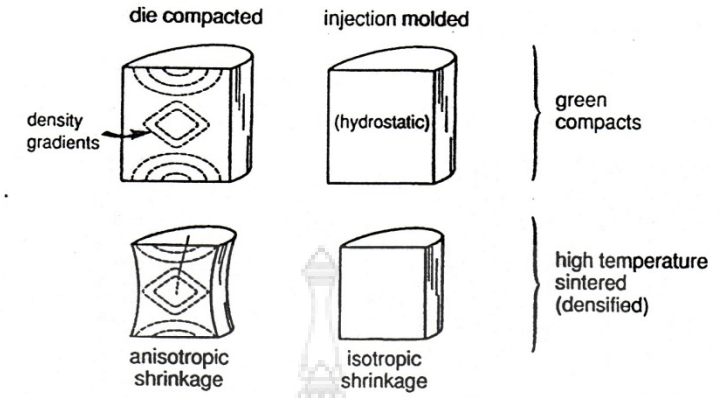
2.11.4 ผลกระทบของการอัดต่อการอบผนึก (Compaction Effects on Sintering)

โดยทั่วไปการผลิตชิ้นงานจากผงวัสดุมีการให้แรงอัดก่อนการอบผนึก แต่บางกรณีมีข้อยกเว้น เช่น การอบผนึกในสภาพหลวม (Loose Powder) ซึ่งใช้เมื่อต้องการทำโครงสร้างที่มีความพรุนสูง เช่น การทำไส้กรอง หรือการทำรูปร่างชิ้นงานที่นำเทคนิคการใช้สารยึดช่วยในการขึ้นรูป เช่น การฉีดขึ้นรูป การอัดผงโลหะให้แน่นก่อนการอบผนึกจะลดความพรุนลงและมีการเพิ่มปริมาณดิสโลเคชั่นเข้าเป็นผงโลหะ เนื่องจากมีความพรุนต่ำกว่าดังนั้นการหดตัวขณะอบผนึกจึงเกิดขึ้นน้อยกว่าความหนาแน่นของดิสโลเคชั่นสูงกว่าช่วยทำให้อัตราการอบผนึกเริ่มต้นเร็วกว่าการอัดแน่นทำให้ความแข็งแรงความหนาแน่นจำนวนการจำนวนการกำหนดภาพและการควบคุมขนาดเพิ่มขึ้นผลกระทบของการอัดแน่นต่อการอบผนึกแสดงในภาพที่ 2.56 ซึ่งแสดงผลกระทบของการอัดแน่นต่อการอบผนึกของผลทองแดงทรงกลมขนาด 63 ไมครอน อบผนึกที่อุณหภูมิ 1,020 ^{0}C ในบรรยากาศไฮโดรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลานาน 2 ชั่วโมง เส้นกราฟภาพบนแสดงการเพิ่มขนาดของคอคอดตามแรงอัดที่เพิ่มขึ้นแรงอัดเพิ่มขึ้นทำให้ความหนาและขนาดที่สัมผัสเพิ่มขึ้นแต่ลดอัตราการเพิ่มขนาดของคอคอดขนาดคอคอดสุทธิสูงขึ้นตามแรงอัดที่เพิ่มขึ้นแสดงในรูปกราฟกลาง กราฟภาพล่างสุดแสดงการหดตัวลดลงเมื่อแรงอัดเพิ่มขึ้น ขนาดคอคอดหลังการอบผนึกเป็นตัวกำหนดสมบัติบางอย่าง เช่น ความแข็งแรงและความเหนียว ดังนั้นแรงในการอัดแน่นสูงจึงเป็นสิ่งที่ต้องการการเพิ่มแรงอัดทำให้การควบคุมขนาดทำให้ดีขึ้นการหดตัวจากการอบผนึกลดลงและสมบัติสุดท้ายสูงขึ้น



ภาพที่ 2.56 ผลกระทบแรงอัดต่อการอบผนึกทองแดงทรงกลม กราฟภาพบนและรูปกลางแสดงอัตราส่วนขนาดคอคอดในรูปฟังก์ชันของแรงอัดและเวลาในการอบผนึก กราฟภาพล่างแสดงการหดตัวลดลงเนื่องจากการอัด

ในการขึ้นรูปชิ้นงานต้องคำนึงถึงการควบคุมขนาดขณะอบผนึกและทำด้วยความระมัดระวังโดยทั่วไปชิ้นส่วนและแม่พิมพ์ควรมีขนาดเท่ากันและชิ้นส่วนควรมีการหดตัวอย่างสม่ำเสมอเพื่อให้สามารถทำนายการเปลี่ยนแปลงขนาดและรูปร่างของชิ้นงานสุดท้ายได้การหดตัวขณะอบผนึกแปรผกผันกับความหนาแน่นกรีน ดังนั้นถ้ามีความลาดของความหนาแน่นทำให้การหดตัวไม่สม่ำเสมอ ดังภาพที่ 2.57 ความลาดของความหนาแน่นกรีนที่เกิดจากความเสียดทานที่ผนังแม่พิมพ์ทำให้ขนาดชิ้นงานหลังการอบผนึกมีความแตกต่างกัน โครงสร้างที่ได้จากการอัดผ่านแม่พิมพ์มีการเปลี่ยนแปลงขนาดน้อยที่สุดถ้าใช้ผงขนาดใหญ่แรงอัดสูงอุณหภูมิอบผนึกต่ำเวลาที่ใช้ในการอบผนึกสั้นชิ้นงานมีความสูงน้อยและชิ้นงานมีรูปทรงสม่ำเสมอ แต่สมบัติเหล่านี้บางตัวทำให้เกิดความเสียหายต่อความแข็งแรงของชิ้นงานหรือเกิดความสึกหรอในแม่พิมพ์ และบางครั้งไม่เหมาะในทางปฏิบัติ



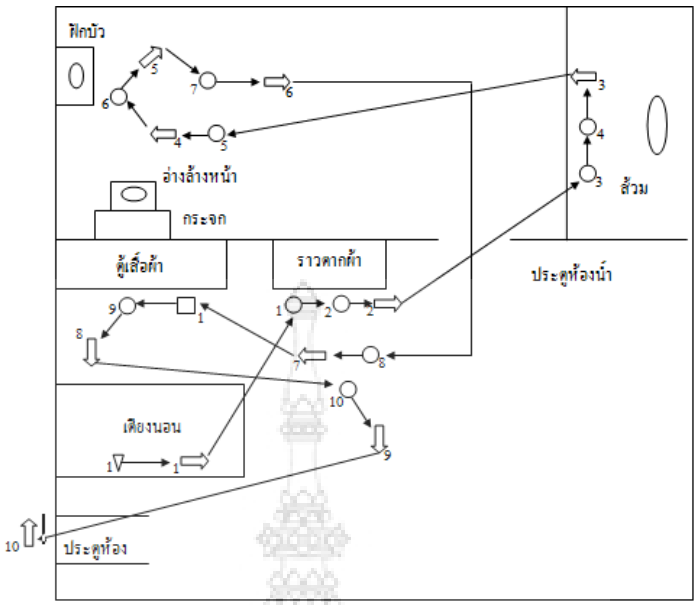
ภาพที่ 2.57 ผลกระทบของการอบตัวในชิ้นส่วนที่ขึ้นรูปโดยการอัดแน่นในพิมพ์และการฉีดขึ้นรูป ความลาดของความหนาแน่นในการอัดผ่านแม่พิมพ์ทำให้มีการหดตัวไม่เท่ากันทุกทิศทางและเกิดการบิดเบี้ยวส่วนการฉีดขึ้นรูปทำให้มีความแน่นตัวหลังอบผนึกโดยไม่มีการบิดเบี้ยว

2.12 ทฤษฎีเกี่ยวกับการศึกษากระบวนการผลิต

การศึกษากระบวนการผลิตมีจุดมุ่งหมายเพื่อวิเคราะห์ขั้นตอนและวิธีการเพื่อการผลิตสิ้นค้าในโรงงานโดยมีรูปแบบการดำเนินการดังนี้

2.12.1 การศึกษาการเพื่อออกแบบผังกระบวนการผลิต

ขั้นตอนการผลิตสิ้นค้าเริ่มจากการเตรียมวัตถุดิบ การนำวัตถุดิบไปผ่านกระบวนการผลิตตั้งแต่ขั้นตอนแรกเป็นลำดับไปจนถึงขั้นตอนสุดท้าย โดยพิจารณาที่การเคลื่อนไหวของวัตถุดิบเป็นหลักเกี่ยวกับ รูปแบบการผลิต วิธีการทำงานย่อย เวลาแต่ละงานย่อย เวลาที่ใช้ไปในแต่ละสถานีงานจนกระทั่งผลิตชิ้นงานสำเร็จ จะหมายถึงการนำไปสู่การออกแบบกระบวนการผลิตและกำหนดแผนผังโรงงาน ซึ่งต้องมีการศึกษาและวิเคราะห์ตามขั้นตอนการผลิตและเทคโนโลยีที่ใช้ในการผลิต จากนั้นกำหนดขนาดของพื้นที่บริเวณโรงงานตามหลักการออกแบบแผนผังโรงงานและการศึกษาวิธีการทำงาน ตามภาพที่ 2.58



ภาพที่ 2.58 ไดอะแกรมการเคลื่อนที่ของกิจกรรม

2.12.2 แผนภูมิกระบวนการผลิต (Flow Process Chart) แผนภูมิกระบวนการผลิตเป็นแผนภูมิที่ใช้บันทึกแสดงการเคลื่อนย้ายตามลำดับก่อนหลังของกระบวนการผลิตแบ่งออกเป็น 3 ประเภท คือ

1) แผนภูมิกระบวนการผลิตประเภทคน

2) แผนภูมิกระบวนการผลิตประเภทวัสดุ

3) แผนภูมิการผลิตประเภทเครื่องจักร

แผนภูมิกระบวนไหล (Flow Process Chart)

CHART NO. SHEET NO. OF.

SUBJECTE CHARTED / ACTIVITY	ACTIVITY	PRESENT	PROPOSED	SAVING
	OPERATION ○	8		
	TRANSPORT ⇨	10		
	DELAY D	1		
	INSPECTION □	3		
	STORAGE ▽	2		
METHOD PRESENT/PROPOSED	DISTANCE (m)	165		
LOCATION	TIME(Man-hr)	24.39		
OPERATIVE CLOCK NO.	COST			
CHARTED BY. DATE:	TOTAL			
APPROVED BY DATE:				

DESCRIPTION	QTY (plates)	DISTANCE (m)	TIME (min)	SYMBOL ○	⇨	D	□	▽	REMARKS
1.แผ่นเหล็กอยู่ใน Storage	200	-	-				●		
2.เครนยกแผ่นเหล็กไปตรวจเช็ค	200	10	2.00	●					
3.ตรวจเช็คแผ่นเหล็ก	200	-	4.00				●		
4.Forklift ยกไปเข้า Line Press	200	25	0.86		●				
5.ปั๊ม Process Draw	1	-	0.66	●					
6.ตรวจสอบชิ้นส่วน	1	-	0.18				●		
7.ชิ้นงานเลื่อนไปตาม Convertor	1	5	0.18		●				
8.ปั๊ม Process Trim	1	-	0.72	●					
9.ชิ้นงานเลื่อนไปตาม Convertor	1	5	0.18		●				
10.ปั๊ม Process Separate	1	-	0.69	●					
11.ชิ้นงานเลื่อนไปตาม Convertor	1	5	0.18		●				
12.ปั๊ม Process Flange	1	-	0.67	●					
13.ชิ้นงานเลื่อนไปตาม Convertor	1	5	0.18		●				
14.ปั๊ม Process Prestrike	1	-	0.72	●					
15.หยิบชิ้นงานใส่ Pallet	1	-	0.45	●					
16.รอยกชิ้นงานเข้าไป Storage	40	40	1.86		●				
17.ชิ้นงานรออยู่ใน Storage	40	-	-			●			
18.รอยกชิ้นงานไปเข้าแผนก Hand Work	40	30	1.56		●				
19. Hand Work	1	-	2.49	●					
20.ตรวจสอบ	1	-	1.25				●		

ภาพที่ 2.59 แผนภูมิกระบวนการผลิตประเภทวัสดุ

CHART NO. SHEET NO. OF.			SUMMARY						
SUBJECTE CHARTED	ACTIVITY		PRESENT			PROPOSED		SAVING	
	OPERATION ○		8						
	TRANSPORT ⇨		10						
ACTIVITY	DELAY D		1						
	INSPECTION □		3						
	STORAGE ▽		2						
METHOD PRESENT/PROPOSED	DISTANCE (m)		165						
LOCATION	TIME(Man-hr)		24.39						
OPERATIVE CLOCK NO.	COST								
CHARTED BY. DATE:	TOTAL								
APPROVED BY DATE:									
DESCRIPTION	QTY (plates)	DISTANCE (m)	TIME (min)	SYMBOL					REMARKS
				○	⇨	D	□	▽	
21.รถยก Pallet ไปพ่นน้ำมัน	40	10	1.00						
22.พ่นน้ำมัน	40	-	3.00						
23.รอยกไปเข้า Storage	40	30	1.56						
24.ชิ้นงานรอการประกอบใน Storage	40	-	-						
Total		165	24.39	9.4	9.56	1	5.43	2	

ภาพที่ 2.59 แผนภูมิกระบวนการผลิตประเภทวัสดุ(ต่อ)

2.12.3 การคำนวณเวลามาตรฐาน

เมื่อมีการจับเวลาบันทึกข้อมูลเวลาตามจำนวนวัฏจักรให้ได้ระดับความเชื่อมั่นและระดับความผิดพลาดที่ต้องการแล้ว เราจะสามารถหาเวลาเลือก ซึ่งจะใช้ค่าเฉลี่ยหรือค่าฐานนิยมของข้อมูลเวลา จากนั้นจะปรับค่าองค์ประกอบการประเมิน ทำให้ได้ค่าเวลาปรกติ เมื่อปรับค่าเวลาเผื่อจะได้เวลามาตรฐาน

การกำหนดหาเวลามาตรฐานจากค่าปรกติปรับค่าเวลาเผื่อทำได้ 2 วิธี ดังนี้

(1) เวลามาตรฐาน = เวลาปรกติ + (เวลาปรกติ x %เวลาเผื่อ) 2.33

(2) เวลามาตรฐาน = เวลาปรกติ x $\frac{100}{100 - \%\text{เวลาเผื่อ}}$ 2.34

ตัวอย่าง การคำนวณหาค่าเวลามาตรฐาน

ค่าเวลาเลือก = 0.90 นาที

องค์ประกอบการประเมิน = 110 %

เวลาเผื่อ = 5 %

เวลาปรกติ = $0.90 \times \frac{110}{100}$

= 0.99 นาที

โดยวิธีที่ 1

เวลามาตรฐาน = 0.99 + (0.99 x 0.05) = 1.0395 นาที

โดยวิธีที่ 2

เวลามาตรฐาน = $0.99 \times \frac{100}{100 - 5}$ = 1.0421 นาที

2.12.4 การคำนวณประสิทธิภาพของสายงานผลิต

โรงงานประกอบชิ้นส่วนมอเตอร์พัดลมมีสถานีผลิต 7 สถานี เมื่อทำการศึกษาเวลามาตรฐานการทำงานในแต่ละสถานีผลิตจะพบว่า สถานีที่ 4 เป็นสถานีที่ใช้เวลาผลิตมากที่สุดจึงเป็นสถานีที่เรียกว่าสถานีคอขวด สถานีอื่น ๆ ซึ่งทำงานได้เร็วกว่าต้องรองานจากสถานีนี้ ขณะเดียวกันจะมีพัสดุระหว่างกระบวนการรออยู่ที่หน้าสถานีนี่เป็นจำนวนมาก ข้อมูลมาตรฐานเวลาการผลิตของแต่ละสถานีแสดงในตารางที่ 2.7

ตารางที่ 2.7 เวลามาตรฐานการผลิตของแต่ละสถานี

สถานีผลิตที่	เวลามาตรฐาน (นาที)	เวลาที่เสียไปต่อหน่วย
1	0.42	0.30
2	0.56	0.16
3	0.48	0.24
4	0.72*	-
5	0.59	0.13
6	0.45	0.27
7	0.50	0.22
*รอบเวลาการผลิตเท่ากับ 0.72 นาที		

เราสามารถคำนวณอัตราการผลิตได้ดังนี้

อัตราการผลิต = เวลาผลิต/รอบการผลิต 2.35

= 60/0.72 = 83 หน่วยต่อชั่วโมง หรือ

= 450/0.72 = 62.3 หน่วย/วัน

ประสิทธิภาพของสายงานผลิตคำนวณได้ดังนี้

$$\text{ประสิทธิภาพ} = \frac{\text{ผลรวมของเวลามาตรฐานของแต่ละสถานี}}{\text{รอบการผลิต} \times \text{จำนวนสถานี}} \times 100 \qquad 2.36$$

$$= \frac{0.42 + 0.56 + 0.48 + 0.072 + 0.59 + 0.40 + 0.50}{0.72 \times 7} \times 100$$

= 73.81 %

2.13 ทฤษฎีเกี่ยวกับเศรษฐศาสตร์วิศวกรรม

เศรษฐศาสตร์วิศวกรรมเป็นงานส่วนหนึ่งที่จะช่วยให้สามารถวิเคราะห์โครงงานทางวิศวกรรม เพื่อกำหนดคุณค่าหรือผลได้ในลักษณะต่างๆ เพื่อเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายที่ต้องลงทุนไปเพื่อการได้มาซึ่งผลได้นั้น ๆ ดังนั้นการวิเคราะห์เชิงเศรษฐศาสตร์มีความมุ่งหมายเพื่อการประหยัดทรัพยากร และเพื่อการรักษาทรัพยากรเหล่านั้นไว้ใช้ในอนาคต เปรียบเทียบและตัดสินใจเลือกแนวทางการแก้ไขปัญหาของระบบก็คือ การวิเคราะห์เชิงเศรษฐศาสตร์ การวิเคราะห์ในแนวนี้เกี่ยวเนื่องในเชิงเศรษฐศาสตร์ เกี่ยวกับค่าใช้จ่ายและผลประโยชน์อื่นๆ โดยมีจำนวนเงินเป็นหน่วยเปรียบเทียบ ถ้าพิจารณาแนวปฏิบัติที่กำหนดให้ดีแล้วพบว่ามีอยู่สองลักษณะคือ ลักษณะที่เกี่ยวข้องกับการตัดสินใจสำหรับดำเนินการในปัจจุบันและสำหรับการดำเนินการในอนาคต ส่วนมากที่จะกล่าวถึงจะอยู่ในลักษณะที่สอง กล่าวคือ แนวทางปฏิบัติต่างๆ ที่กำหนดเป็นการกำหนดการดำเนินงานในอนาคต โดยมีค่าใช้จ่ายและผลได้ต่างๆเป็นการคาดคะเนสำหรับอนาคตทั้งสิ้น

2.13.1 ความเป็นมาของการคำนวณต้นทุนการผลิต

การคำนวณมูลค่าต้นทุนเป็นการดำเนินงานของกิจการถ้าเป็นกิจการที่ซื้อสินค้ามาเพื่อขายจะคำนวณต้นทุนสินค้าที่ขายจากราคาทุนที่ซื้อมาแต่ถ้าเป็นกิจการที่ผลิตสินค้าเพื่อขาย จะคำนวณจากต้นทุนสินค้าจากต้นทุนการผลิต โดยคำนวณจากต้นทุนค่าวัตถุดิบ ค่าแรงงาน และค่าใช้จ่ายการผลิตต่างๆ ซึ่งต้องมีวิธีการเก็บบันทึกข้อมูลเพื่อนำมาคำนวณต้นทุนสินค้าที่ผลิตและต้นทุนสินค้าที่ขาย ต้นทุนของสินค้าจะอำนวยประโยชน์ต่อฝ่ายบริหารในการนำไปใช้เพื่อการวางแผนการควบคุมและการตัดสินใจได้อีกด้วยการวิเคราะห์ต้นทุนการผลิต หรือการคำนวณต้นทุนการผลิตมีวัตถุประสงค์สำคัญ 5 ประการ ดังต่อไปนี้ [7]

2.13.1.1 เพื่อวัดผลการดำเนินงานหรือกำไรขาดทุน (Income Determination) โดยการคำนวณต้นทุนขาย แล้วนำไปเปรียบเทียบกับยอดขายเพื่อคำนวณหากำไรหรือขาดทุน

2.13.1.2 เพื่อคำนวณหรือตีราคาสินค้าคงเหลือ (Inventory Valuation) โดยการรวบรวมข้อมูลต้นทุน บันทึก แยกประเภท จัดสรร และสะสม ซึ่งจะได้นำไปใช้ในการตีราคาสินค้าคงคลัง

2.13.1.3 เพื่อวางแผนและควบคุม (Planning and Control) ในการบริหารงานของฝ่ายบริหารมักจะต้องมีการวางแผนล่วงหน้าโดยการจัดทำงบประมาณขึ้น ซึ่งต้องนำข้อมูลต้นทุนในอดีตมาใช้ในการประมาณต้นทุนที่คาดว่าจะเกิดขึ้นภายใต้การทำงาน ณ ระดับปกติ และมีการเก็บ

ข้อมูลที่เกิดขึ้นจริง นำมาเปรียบเทียบกับงบประมาณที่กำหนดไว้ ซึ่งอาจจะเกิดผลแตกต่างที่ไม่น่าพอใจ (Unfavorable Variance) หากพบว่าผลแตกต่างนั้นเกิดจากข้อบกพร่องของการดำเนินงานในส่วนใด ฝ่ายผู้บริหารจะได้แก้ไขทันต่อเหตุการณ์

2.13.1.4 เพื่อใช้ในการตัดสินใจ (Decision Making) เมื่อฝ่ายบริหารมีปัญหาที่ต้องตัดสินใจการพิจารณาทางเลือกของปัญหาในเชิงปริมาณ จะต้องใช้ข้อมูลต้นทุนที่เกี่ยวข้องกับปัญหานั้น โดยอาจจะนำต้นทุนในอดีตมาพิจารณาปรับเปลี่ยนให้เหมาะสมกับปัญหา เช่น การพิจารณาการเพิ่มหรือลดสายผลิตภัณฑ์ การตัดสินใจขยาย หรือลดกำลังการผลิตของโรงงาน เป็นต้น

2.13.1.5 เพื่อประเมินผลการดำเนินงานของทรัพยากรต่างๆ ที่ใช้ในการดำเนินงาน ทั้งนี้เพื่อพิจารณาประสิทธิผล (Effective) และประสิทธิภาพ (Efficiency) ในการปฏิบัติงานของทรัพยากรเหล่านั้น

2.13.2 การแยกประเภทของต้นทุน

การแยกประเภทของต้นทุนเป็นขั้นตอนที่สำคัญอันหนึ่งในการเข้าใจถึงพฤติกรรมของต้นทุนและการประมวลต้นทุนต่างๆ ดังนั้นในการจำแนกประเภทของต้นทุน จำเป็นต้องทราบว่าต้นทุนหรือกลุ่มต้นทุนมีความสัมพันธ์กับอะไร ในลักษณะใด ถ้าความสำพันธ์ดังกล่าวยิ่งมีมากเท่าใดความถูกต้องในข้อมูลด้านต้นทุนยิ่งมีมากขึ้นเท่านั้น สมนึก เอื้อจิระพงษ์พันธ์ [8] กล่าวไว้ว่าสามารถแยกประเภทของต้นทุนได้หลายประเภทดังต่อไปนี้

2.13.2.1 การแยกประเภทต้นทุนโดยให้สัมพันธ์กับหน่วยต้นทุน

การจำแนกต้นทุนโดยให้สัมพันธ์กับหน่วยต้นทุนนี้ สามารถจำแนกได้เป็น 2 ชนิด คือ ต้นทุนทางตรง (Direct Cost) และต้นทุนทางอ้อม (Indirect Cost) กล่าวคือ

ก) ต้นทุนทางตรง คือต้นทุนที่กำหนดขึ้นซึ่งมีผลโดยตรงต่อหน่วยการผลิตของผลิตภัณฑ์ หรือต่อฝ่ายที่มีหน้าที่เกี่ยวข้องกับหน่วยผลิตโดยตรง เช่น วัตถุดิบทางตรง (Direct Material) แรงงานทางตรง (Direct Labor)

ข) ต้นทุนทางอ้อม คือต้นทุนที่เกิดขึ้นเพื่อใช้ร่วมกันระหว่างผลิตภัณฑ์หรือระหว่างฝ่ายที่มีหน้าที่แตกต่างกัน ซึ่งเป็นต้นทุนที่มิอาจคิดแยกตามแต่ละหน่วยของผลิตภัณฑ์หรือฝ่ายที่มีหน้าที่เกี่ยวข้องได้อย่างถูกต้องชัดเจน โดยปกติแล้วต้นทุนทางอ้อมนี้จะถูกปันส่วนหรือแบ่งสรรให้แก่หน่วยต้นทุนต่างๆ ด้วยวิธีการจัดสรรต้นทุน (Cost Allocation) ซึ่งโดยทั่วไปต้นทุน

ทางอ้อมก็หมายถึงค่าโสหุ้ยการผลิตของสินค้านั่นเอง ได้แก่ ค่าใช้จ่ายในการผลิต (Overhead) เช่น ค่าเช่าอาคารโรงงาน ค่าเสื่อมราคาเครื่องจักร

2.13.3 ประเภทของต้นทุนตามลักษณะของการผลิต

ต้นทุนในการผลิตแยกออกตามประเภท และลักษณะของการผลิต คือ มีการผลิตแบบงานสั่งทำ (Intermittent หรือ Job Shop) ต้นทุนการผลิตแบบนี้เรียกว่า ต้นทุนงานสั่งทำ (Job Order Costing) และการผลิตแบบต่อเนื่อง (Continuous) เป็นต้นทุนการผลิตเป็นช่วง หรือต้นทุนกระบวนการ (Process Costing) [9]

2.13.3.1 ต้นทุนงานสั่งทำ (Job Order Costing)

คือ เป็นต้นทุนสำหรับแต่ละงาน หรือแต่ละคำสั่งผลิตที่มักจะแตกต่างกัน ตามความต้องการของลูกค้าหรือเพื่อผลิตสินค้าเก็บไว้ในสต๊อก การวิเคราะห์ต้นทุนการผลิตจะมีความยุ่งยากซับซ้อนการที่จะกำหนดต้นทุนการผลิตได้ จำเป็นต้องมีการวิเคราะห์กระบวนการผลิตแต่ละขั้นตอน โดยการประมาณการค่าแรงงานตามปริมาณงานและค่าแรงทางตรงที่จ่าย คำนวณหาปริมาณวัตถุดิบหรือวัสดุที่ใช้และต้นทุนวัตถุดิบทางตรง รวมทั้งการคำนวณประมาณการค่าใช้จ่ายโรงงานด้วยสาเหตุของความซับซ้อนของกระบวนการผลิตและความหลากหลายของผลิตภัณฑ์

การคิดต้นทุนในระบบต้นทุนงานสั่งทำ มีวัตถุประสงค์ที่ต้องการ 2 ประการ คือ

ก) เพื่อหาต้นทุนต่อหน่วยของสินค้า

ข) เพื่อใช้สำหรับการวางแผน และควบคุมให้เป็นไปตามเป้าหมายที่กำหนด

การที่จะบรรลุวัตถุประสงค์ทั้งสองอย่างได้นั้น จะต้องหาต้นทุนที่ถูกใช้ไปในแต่ละแผนกการผลิต และต้นทุนต่อหน่วยของสินค้า วิธีการของการหาต้นทุนดังกล่าวประกอบด้วยขั้นตอนสำคัญ 2 ขั้นตอน คือ

1) หาต้นทุนสะสมที่เกิดขึ้นในแต่ละแผนกการผลิต

2) ปันส่วนต้นทุนที่เกิดขึ้นในแต่ละแผนกการผลิตแยกตามผลิตภัณฑ์ที่ตรวจนับได้ซึ่งเรียกว่า Cost Absorption

เพื่อแยกต้นทุนการผลิตในแต่ละแผนกผลิตว่ามีค่าใช้จ่ายเท่าใด ซึ่งในระดับการผลิตที่ปกตินั้นค่าใช้จ่ายควรจะถูกควบคุมให้อยู่ในระดับที่ใกล้เคียงกับของทุกงวดการผลิต จึงถือว่าได้บรรลุจุดประสงค์ข้อที่สองของการคิดต้นทุนในระบบต้นทุนงานสั่งทำแล้ว และเมื่อปันส่วนต้นทุนที่เกิดขึ้นในแต่ละแผนกการผลิตให้กับหน่วยของผลผลิตที่ได้จากแผนกต่างๆ ครบทุกแผนก

แล้วเราสามารถหาต้นทุนต่อหน่วยของสินค้าได้โดยการนำต้นทุนต่อหน่วย ของทุกแผนกสะสมเข้าด้วยกันซึ่งทำให้บรรลุวัตถุประสงค์ของการคิดต้นทุนในระบบต้นทุนงานสั่งทำ

2.13.3.2 ต้นทุนการผลิตเป็นช่วง (Process Costing)

คือต้นทุนการผลิตในการผลิตผลิตภัณฑ์แบบต่อเนื่องและกระบวนการผลิตค่อนข้างจะเป็นมาตรฐานเดียวกัน ไม่จำเป็นต้องรับคำสั่งจากลูกค้า เช่น อุตสาหกรรมประเภทเคมีภัณฑ์ น้ำมัน สิ่งทอ สี ปูนซีเมนต์ พลาสติก เป็นต้น การผลิตในอุตสาหกรรมเหล่านี้ จะมีการผลิตเป็นช่วงๆ และผลิตครั้งละจำนวนมากๆ การบริหารวัสดุคงคลัง (Inventory) จะเป็นสิ่งจำเป็นมาก

การคิดต้นทุนการผลิตแบบเป็นช่วงจะไม่สามารถปันส่วนต้นทุนในแต่ละแผนกให้กับหน่วยของผลผลิตในแต่ละแผนกได้ เนื่องจากไม่สามารถระบุต้นทุนการผลิตในแต่ละแผนกได้เพราะเป็นผลผลิตที่เป็นเนื้อเดียวกัน จะต้องผ่านทุกขั้นตอนของกระบวนการผลิต จนกระทั่งได้เป็นสินค้าสำเร็จรูป จึงจะสามารถวัดหน่วยของผลผลิตได้ ดังนั้นการหาต้นทุนต่อหน่วยสินค้าจะต้องสะสมต้นทุนรวมของทุกแผนกการผลิตแล้วนำมาเฉลี่ยด้วยตัวหารที่เหมาะสม ซึ่งตามปกติตัวหารมักมีขนาดใหญ่ เนื่องจากเป็นการผลิตจำนวนมาก จึงเป็นการถัวเฉลี่ยต้นทุน (Cost Averaging) ไปยังทุกหน่วยผลิตภัณฑ์

การที่จะเลือกใช้ต้นทุนงานสั่งทำหรือต้นทุนการผลิตแบบเป็นช่วง ขึ้นอยู่กับลักษณะของการผลิต ดังนั้นข้อแตกต่างระหว่างระบบต้นทุนงานสั่งทำกับระบบต้นทุนช่วง ขึ้นอยู่กับการจัดประเภทและการรวบรวมต้นทุนการผลิต กล่าวคือระบบต้นทุนการผลิตงานสั่งทำจะเน้นการรวบรวมของผลิตภัณฑ์ ส่วนระบบต้นทุนแบบช่วงจะมีผลิตภัณฑ์ที่เหมือนกันอย่างสม่ำเสมอ โดยจะเน้นการรวบรวมต้นทุนตามรอบระยะเวลาบัญชีและรวบรวมต้นทุนเป็นของแต่ละแผนกหรือศูนย์ต้นทุนตามขั้นตอนกระบวนการผลิตของผลิตภัณฑ์ [10]

2.13.4 ต้นทุนที่เกี่ยวข้องกับผลิตภัณฑ์

ต้นทุนที่เกี่ยวกับผลิตภัณฑ์เป็นต้นทุนที่จำแนกตามช่วงปฏิบัติการ กล่าวคือ แบ่งเป็นช่วงการผลิตและช่วงการขาย หรือกล่าวได้ว่า ต้นทุนรวมหรือต้นทุนสินค้าขาย ประกอบด้วยต้นทุนการผลิต (Manufacturing Cost) และค่าใช้จ่ายในการขายและบริหาร (Marketing and Administrative Expense) [11]

2.13.4.1 ต้นทุนการผลิต (Manufacturing Cost)

ต้นทุนการผลิต คือ ต้นทุนทั้งหมดที่เกิดในการผลิตสินค้าสำหรับงวดหนึ่งหรือต้นทุนทั้งหมดที่เกี่ยวข้องไม่ว่าจะเป็นโดยทางตรงหรือทางอ้อมในการผลิตผลิตภัณฑ์ขึ้นมา ต้นทุนวัตถุดิบเป็นองค์ประกอบของผลรวมทั้งสามอย่าง ได้แก่ ค่าวัตถุดิบทางตรง ค่าแรงงานทางตรง และค่าโสหุ้ยการผลิต สำหรับผลรวมของค่าวัตถุดิบทางตรงและค่าแรงงานทางตรง เรียกว่า ต้นทุนขั้นต้น (Primary Cost) และผลรวมของค่าแรงงานทางตรง และค่าโสหุ้ยการผลิต เรียกว่า ต้นทุนแปรสภาพ (Conversion Cost) ต้นทุนการผลิตจะประกอบไปด้วยต้นทุนต่อไปนี้ [11]

ก) ต้นทุนค่าวัตถุดิบทางตรง คือ วัตถุดิบที่เป็นส่วนสำคัญในการผลิตโดยตรงของโรงงาน เช่น เหล็กแผ่นที่ใช้ทำโครงเสริมกันชนหน้า วัตถุดิบที่เป็นส่วนสำคัญในการผลิตคือ เหล็กแผ่น ซึ่งค่าวัตถุดิบทางตรงมีหลักพิจารณา คือ วัตถุดิบต้องเป็นองค์ประกอบสำคัญในการผลิต และสามารถคำนวณต่อหน่วยผลิตภัณฑ์ได้

ข) ต้นทุนค่าแรงงานทางตรง คือ ค่าแรงงานที่ใช้ในการเปลี่ยนสภาพวัตถุดิบทางตรงให้เป็นสินค้าสำเร็จรูป ได้แก่ ค่าจ้าง หรือเงินเดือนที่จ่ายให้แก่คนงานที่ทำการผลิตสินค้านั้นเป็นต้น

ค) ต้นทุนค่าโสหุ้ยการผลิต คือ ต้นทุนการผลิตอื่นๆที่นอกเหนือจากค่าวัตถุดิบทางตรงและค่าแรงงานทางตรง ได้แก่ ค่าวัตถุดิบทางอ้อม ค่าแรงงานทางอ้อม ค่าสวัสดิการ ค่าสาธารณูปโภค ค่าเสื่อมราคาเครื่องจักรอุปกรณ์ ค่าบำรุงรักษาเครื่องจักร ค่าโทรศัพท์ ค่าขนส่ง และค่าใช้จ่ายเบ็ดเตล็ดต่างๆ เป็นต้น

2.13.5 วิธีการคำนวณต้นทุนการผลิต

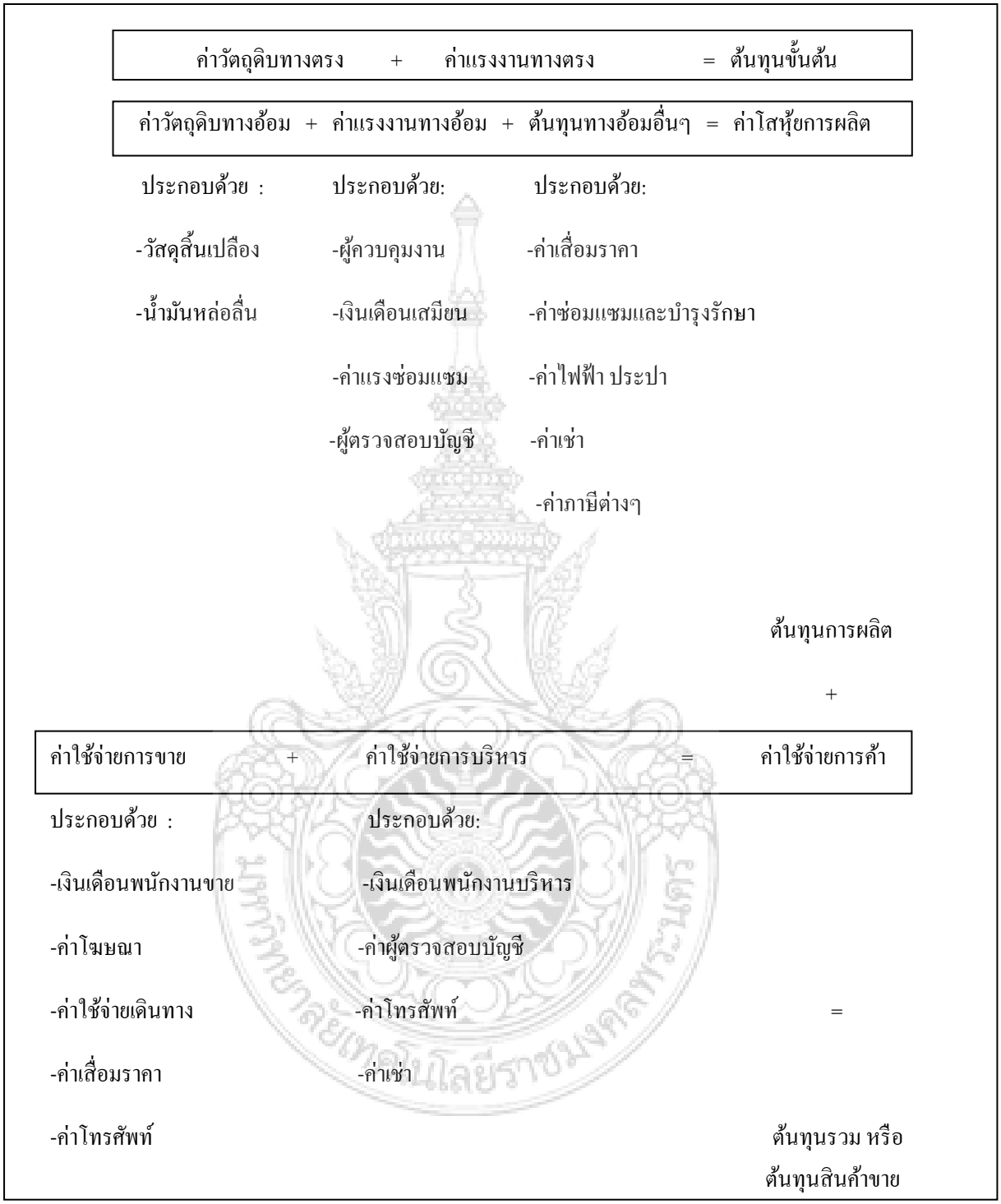
งานสั่งทำแต่ละงานย่อมมีลักษณะเฉพาะของงานนั้นๆ งานหนึ่งมักจะแตกต่างกับอีกงานหนึ่ง การวิเคราะห์ต้นทุนผลิตภัณฑ์จึงเป็นสิ่งจำเป็น ด้วยเหตุนี้จึงต้องมีการวางแผนการผลิตให้มีประสิทธิภาพ แผนกที่ต้องรับผิดชอบในเรื่องการวางแผนและกำหนดการผลิต ได้แก่ แผนกวิศวกรรมหรือแผนกวางแผนการผลิตและควบคุมการผลิต เมื่อแผนกนี้ได้รับใบสั่งทำจากลูกค้า ก็จะคำนวณหาจำนวนวัตถุดิบที่ต้องการ กะประมาณค่าแรงงานและค่าใช้จ่ายในแรงงาน ดังนั้นสามารถคำนวณหาต้นทุนการผลิตทั้ง 3 ส่วน ได้ดังนี้

2.13.5.1 ค่าวัตถุดิบทางตรง

การเบิกวัสดุเมื่อเริ่มงาน วัตถุดิบทางตรงที่ใช้ในการผลิตในแต่ละตัวของผลิตภัณฑ์ ต้นทุนวัตถุดิบทางตรงเกิดจากเอกสารใบเบิกวัสดุกับราคาต่อหน่วยของวัสดุแล้วนำมาคำนวณเป็นต้นทุนวัตถุดิบทางตรง

2.13.5.2 ค่าแรงงานทางตรง

การคำนวณต้นทุนค่าแรงงานทางตรงที่ใช้ไปในการทำงานหนึ่งๆนั้นคำนวณได้จากบัตรนาฬิกา (Time Card) สำหรับบันทึกเวลาเข้าออกที่โรงงาน บัตรนี้จึงใช้เป็นหลักในการคิดค่าจ้างคนงานแต่ละคนในระหว่างวันหนึ่งๆ คนงานจะต้องลงรายการงานที่ทำพร้อมกับชั่วโมงที่ทำงานหนึ่งๆ ในบัตรทำงานทุกๆคราวที่พนักงานเริ่มงานใหม่ และทำงานนั้นเสร็จ



ภาพที่ 2.60 การจำแนกต้นทุนผลิตภัณฑ์ [11]

ในปัจจุบันการจ่ายค่าแรงงานนิยมใช้ 2 วิธี คือ เน้นในเรื่องเวลา โดยจะจ่ายเป็นรายวันหรือรายเดือน และเน้นในเรื่องปริมาณการทำงาน โดยจะจ่ายค่าแรงงานให้ตามจำนวนชิ้นหรือปริมาณงานที่ผลิตได้

ดังนั้นการคำนวณหาต้นทุนค่าแรงงานทางตรงจึงต้องทราบข้อมูลดังต่อไปนี้ รายงานเวลาการผลิต ซึ่งบันทึกเวลาการผลิตที่ใช้ในทุกขั้นตอน ค่าจ้างแรงงานทางตรง เพื่อหายอดค่าจ้างที่จ่ายจริงของแรงงานทางตรงทั้งในเวลาปกติ ล่วงเวลาทำงาน และเวลาการผลิตที่ใช้จริง ซึ่งส่วนนี้จะสรุปยอดชั่วโมงแรงงานทางตรงใช้จริงทั้งในเวลาปกติและล่วงเวลา

2.13.5.3 ค่าโสหุ้ยการผลิต

ค่าโสหุ้ยการผลิต เป็นค่าใช้จ่ายที่ไม่อาจคิดเข้าผลิตภัณฑ์แต่ละชนิดได้โดยตรง เช่น ค่าแรงงานทางอ้อม ค่าวัตถุดิบทางอ้อม ค่าประกันภัย ค่าซ่อมแซม ค่าเสื่อมราคา เป็นต้น เพราะเป็นค่าใช้จ่ายรวมกันทั้งโรงงาน ในการคิดต้นทุนผลิตภัณฑ์ของงานแต่ละงาน จึงนิยมใช้อัตราโสหุ้ยการผลิตที่คำนวณไว้ล่วงหน้า เรียกว่า Applied Factory Overhead แล้วแต่จะเลือกตัวฐานจากชั่วโมงแรงงานทางตรง ชั่วโมงแรงงานเครื่องจักร ค่าแรงงานทางตรง หรือฐานอื่นๆ ดังที่กล่าวมาแล้วในเรื่องการจัดสรรค่าโสหุ้ยการผลิตเข้างาน ดังนั้นการคำนวณหาค่าโสหุ้ยการผลิตจัดสรรสามารถหาได้โดย [11]

โดยที่ค่าโสหุ้ยการผลิตรวม = ค่าโสหุ้ยการผลิตคงที่ + ค่าโสหุ้ยการผลิตแปรผัน

จากแนวคิดของการจำแนกต้นทุนในลักษณะต่างๆ เมื่อทราบต้นทุนการผลิตทั้ง 3 อย่าง คือ ค่าวัตถุดิบทางตรง ค่าแรงงานทางตรง และค่าโสหุ้ยการผลิต สามารถคำนวณต้นทุนการผลิตได้ดังสมการ 2.35 คือ

ต้นทุนการผลิต = ค่าวัตถุดิบทางตรง + ค่าแรงงานทางตรง + ค่าโสหุ้ยการผลิต

2.13.6 แนวคิดเกี่ยวกับการลดต้นทุนการผลิต

กิจกรรมการลดต้นทุนการผลิตในงานผลิต เป้าหมายของกิจกรรมนั้น คือ การลดต้นทุนในส่วนที่เกี่ยวกับการผลิต เพราะมีอัตราส่วนสูงมากในบรรดาต้นทุนทั้งหมด ต้นทุนที่เกี่ยวกับการผลิตนั้นอาจแบ่งออกได้เป็น ต้นทุนค่าวัตถุดิบทางตรง ต้นทุนค่าแรงทางตรง และต้นทุนค่าโสหุ้ยการผลิต โซเฮ ฮิบิ [12] กล่าวไว้ว่าสามารถที่จะลดต้นทุนการผลิตในการดำเนินงานผลิตได้ดังนี้

2.13.6.1 ค่าวัตถุดิบทางตรง การลดต้นทุนทางด้านนี้ จะต้องอาศัยการควบคุมไม่ให้เกิดของเสีย การควบคุมต้นทุนต่อหน่วยใช้การวิเคราะห์คุณค่า (Value Analysis)

2.13.6.2 ค่าแรงงานทางตรง การลดต้นทุนทางด้านนี้ จะต้องอาศัยการศึกษาการทำงาน การจัดทำมาตรฐานการทำงาน การวางตำแหน่งหน้าที่งานของพนักงานให้เหมาะสม และการฝึกอบรมพนักงาน เพื่อให้มีความสามารถในการทำงานได้ดีขึ้น

2.13.6.3 ต้นทุนค่าโสหุ้ยการผลิต การลดต้นทุนทางด้านนี้ จะต้องมีการวางแผนการผลิต การควบคุมการผลิต การควบคุมการทำงานของอุปกรณ์และเครื่องจักร ให้มีความสามารถในการทำงานอย่างมีประสิทธิภาพ และต้องใช้ประโยชน์จากเครื่องจักรอย่างเต็มที่ การควบคุมการบริหารพัสดุคงคลัง ตลอดจนระบบการขนถ่ายวัสดุที่เหมาะสม

2.13.7 ระยะเวลาคืนทุน (Payback Period, PBP)

คือ จำนวนเวลา (ปี) ในการดำเนินงาน ซึ่งจะทำให้มูลค่าการลงทุนเท่ากับผลตอบแทนสะสม โดย

กำหนดให้ : P = มูลค่าการลงทุนในปีปัจจุบัน

A = มูลค่าผลตอบแทนในแต่ละปีของการดำเนินงาน

t = ปีที่ดำเนินงาน

n = จำนวนเวลา (ปี) ที่ผลตอบแทนสะสมเท่ากับมูลค่าการลงทุน

I = อัตราดอกเบี้ยต่ำสุด [1]

เนื่องจากมูลค่าการลงทุน และมูลค่าผลตอบแทนในแต่ละปีอยู่คนละช่วงเวลาการนำมูลค่าทั้งสองมาเปรียบเทียบกัน จะต้องทำให้มูลค่าทั้งสองอยู่ในช่วงเวลาเดียวกันดังนั้นในการเปรียบเทียบนี้จะใช้วิธีกระจายมูลค่าผลตอบแทนในแต่ละช่วงเวลาให้กลับมาในช่วงปัจจุบันที่มีการลงทุน ฉะนั้นมูลค่าในการลงทุนในปีปัจจุบันที่มีมูลค่าผลตอบแทนสะสมในแต่ละปีกระจายกลับมาในปีปัจจุบันได้ดังนี้

$$\text{ระยะเวลาคืนทุน} = \frac{\text{เงินลงทุนทั้งหมด}}{\text{จำนวนเงินที่ได้}} \qquad 2.37$$

<u>ตัวอย่าง</u> บริษัท เอ บี จำกัด มีโครงการซื้อเครื่องจักรใหม่ เงินลงทุนที่ต้องใช้ในโครงการ 20,000 บาท ต้นทุนที่ประหยัดได้แต่ละปีจากการซื้อเครื่องจักรใหม่ 50,000 บาท ระยะเวลาคืนทุนสามารถคำนวณได้ดังนี้

<u>วิธีการคำนวณ</u> จากสมการ2.7 ระยะเวลาคืนทุน = เงินลงทุนทั้งหม / จำนวนเงินที่ได้

= 200,000 / 50,000

= 4 ปี

---

[1]อัตราดอกเบี้ยจากธนาคารพาณิชย์ประจำวันที่ 4 พฤษภาคม 2553

2.13.8 การวิเคราะห์จุดคุ้มทุน (Break-even analysis)

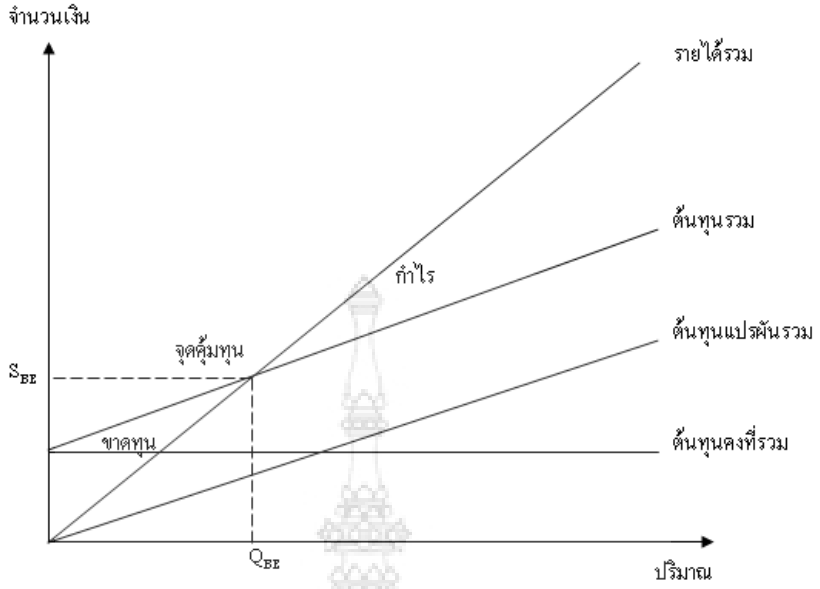
การวิเคราะห์เพื่อตัดสินใจลงทุนในโครงการบางครั้งต้องทราบจำนวนผลผลิตที่จะผลิตแล้วคุ้มทุนควรเป็นเท่าไร เพื่อเป็นเครื่องช่วยในการตัดสินใจ จุดคุ้มทุน(Break-even analysis) คือจุดที่รายได้กับรายจ่ายเท่ากันนั้นคือกำไรเป็นศูนย์ นั้นเอง การวิเคราะห์จุดคุ้มทุนเป็นการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของตุนทุน รายได้ และผลกำไรที่ปริมาณการผลิตต่างๆ การวิเคราะห์จุดคุ้มทุนเหมาะกับโครงการระยะสั้น เงื่อนไขต่างๆ ไม่เปลี่ยนแปลงตลอดโครงการเพราะถ้ามีการเปลี่ยนแปลง ก็จะมีผลทำให้การตัดสินใจคลาดเคลื่อนได้ บางครั้งก็ใช้พยากรณ์การผลิตในอนาคตได้

2.13.8.1 การคำนวณจุดคุ้มทุน

การคำนวณจุดคุ้มทุนทำได้ 2 วิธีได้แก่ การวาดกราฟและการใช้สมการทางคณิตศาสตร์

1) กราฟ

แสดงความสัมพันธ์ระหว่างรายได้ ต้นทุน และปริมาณการขาย โดยแกนนอนแทนค่าของปริมาณการขาย และแกนตั้งแทนจำนวนเงินที่เกิดขึ้นทั้งรายได้ และต้นทุนโดยที่รายได้รวมของธุรกิจจะเปลี่ยนแปลงไปตามปริมาณการขาย ดังนั้นเส้นกราฟจึงเป็นเส้นตรงออกจากศูนย์เสมอและมีความชันเท่ากับราคาขายต่อหน่วย ส่วนต้นทุนรวม เมื่อลากเส้นจากจุดตัดของเส้นกราฟทั้งสองมายังแกนนอน ณ จุดตัดที่แกนนอน แสดงถึงปริมาณการขายสิ้นค้าหรือบริการที่รายได้รวมเท่ากับต้นทุนรวม เรียกว่า ปริมาณการขาย ณ จุดคุ้มทุน (Q_{BE}) และเมื่อลากเส้นจากจุดตัดของเส้นกราฟทั้งสองมายังแกนตั้ง ณ จุดตัดที่แกนตั้ง แสดงถึงรายได้รวม เท่ากับต้นทุนรวม เรียกว่า ยอดขาย ณ จุดคุ้มทุน (S_{BE}) ดังภาพที่ 2.62



ภาพที่ 2.61 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างรายได้ ต้นทุน และปริมาณ

ในการคำนวณหาจุดคุ้มทุนโดยการวาดกราฟกำไรนั้น จะแสดงจุดคุ้มทุนรวมทั้งเน้นให้เห็นถึงส่วนกำไรหรือขาดทุน โดยกราฟกำไรจะแสดงเฉพาะเส้นกำไร โดยจุดคุ้มทุนจะเป็นจุดที่เส้นกำไรตัดกับแกน X และส่วนกำไรหรือขาดทุนจะแสดงตามจำนวนระยะห่างระหว่างเส้นกำไรกับแกน X ณ ปริมาณขายระดับต่างๆ ขั้นตอนการวาดกราฟกำไรมีดังนี้

ก) แสดงจุดต้นทุนคงที่ ให้กำหนดหน่วยขายเป็น 0 หน่วย มีต้นทุนคงที่เท่าใด ก็แสดงจำนวนต้นทุนคงที่เท่านั้น โดยแสดงที่แกน Y ในด้านลบ

ข) แสดงจุดกำไรหรือขาดทุน โดยสมมติปริมาณขาย ณ ระดับต่าง ๆ แล้วคำนวณกำไรหรือขาดทุนโดย กำไร(ขาดทุน) = รายได้รวม - ต้นทุนผันแปร – ต้นทุนคงที่

ค) คำนวณจุดคุ้มทุน

<u>ตัวอย่าง</u>

บริษัทดาวกระจาย จำกัด ราคาขายของโทรทัศน์เครื่องละ 6,000 บาท ต้นทุนคงที่ต่อเดือนรวม 150,000 บาท และต้นทุนผันแปรต่อหน่วย 3,000 บาท

- ปริมาณขายที่ 10 หน่วย

กำไร (ขาดทุน) = (10 หน่วย x 6,000 บาท) – (10 หน่วย x 3,000 บาท) – 150,000 บาท

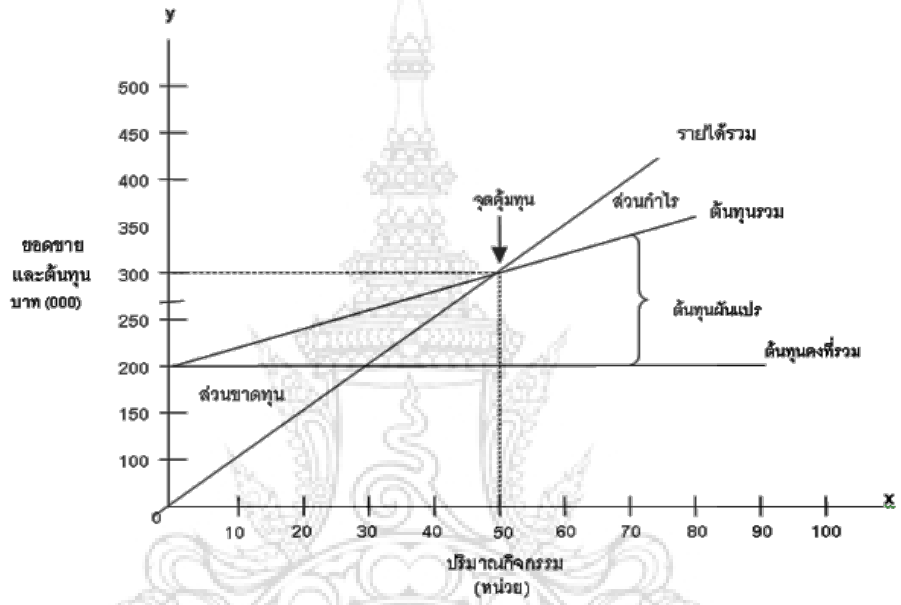
= - 120,000 บาท

- ปริมาณขายที่ 30 หน่วย

กำไร (ขาดทุน) = (30 หน่วย x 6,000 บาท) – (30 หน่วย x 3,000 บาท) – 150,000 บาท

= - 6,000 บาท

แสดงส่วนกำไรและส่วนขาดทุน



ภาพที่ 2.62 กราฟต้นทุน ปริมาณ และกำไร

2) การใช้สมการทางคณิตศาสตร์

จากความหมายของจุดคุ้มทุนที่แสดงถึงปริมาณการขายสินค้าหรือบริการที่ทำให้รายได้รวม เท่ากับต้นรวม สามารถแสดงเป็นสมการทางคณิตศาสตร์ได้ดังนี้

จากสูตร[(1)]

กำหนดให้ : TI = รายได้รวม (บาท)

TC = ต้นทุนรวม (บาท)

F = ต้นทุนคงที่ (บาท)

V = ต้นทุนแปรผัน (บาท)

Q = ปริมาณที่ผลิต (กิโลกรัมต่อปี)

P = ราคาขาย (บาท)

จาก TI = TC

QP = FC + Q (V)

ฉะนั้น Q = FC / (P-V) 2.38

<u>ตัวอย่าง</u> บริษัทเสริมทรัพย์ จำกัด จำหน่ายสินค้าราคา 200 บาท มีต้นทุนแปรผันต่อหน่วย 100 บาท มีต้นทุนคงที่ 40,000 บาท บริษัท เสริมทรัพย์ จำกัด จะต้องขายสินค้ากี่หน่วยจึงจะคุ้มทุน

<u>วิธีคำนวณ</u> จาก สมการ(2.38) Q = FC / (P-V)

$$= \frac{40,000}{200-100}$$

= 400 หน่วย

= 400x200

= 80,000 บาท

2.13.9 การประเมินโครงการการลงทุน

2.13.9.1 วิธีอัตราผลตอบแทนคิดลด (Internal Rate of Return หรือ IRR) เป็นการวิเคราะห์การลงทุน โดยจะต้องหาอัตราผลตอบแทนจากการลงทุนที่ทำให้กระแสเงินสดเข้าสุทธิของโครงการ มีมูลค่าปัจจุบันเท่ากับเงินลงทุนสุทธิ วิธีนี้ในบางครั้งเรียกว่าอัตราผลตอบแทนที่ปรับตามระยะเวลาการตัดสินใจ ถ้าอัตราผลตอบแทนคิดลดที่คำนวณได้น้อยกว่าอัตราผลตอบแทนขั้นต่ำที่ต้องการปฏิเสธโครงการนั้น

กรณีกระแสเงินสดเข้าสุทธิเท่ากันทุกงวด

$$\text{ตัวคูณของอัตราผลตอบแทนคิดลด} = \frac{\text{เงินลงทุนสุทธิ}}{\text{กระแสเงินสดเข้าสุทธิ}} \quad 2.39$$

<u>ตัวอย่าง</u> บริษัทแห่งหนึ่งจ่ายเงินลงทุน 28,250 บาท และจะได้รับกระแสเงินสดเข้าสุทธิเป็นเวลา 10 ปี ปีละ 25,000 บาท อัตราผลตอบแทนคิดลดหาได้ดังนี้

<u>วิธีการคำนวณ</u> ตัวคูณของอัตราผลตอบแทนคิดลด $= \frac{\text{เงินลงทุนสุทธิ}}{\text{กระแสเงินสดเข้าสุทธิ}}$

$= \frac{28,250}{5,000}$

$= 5.650$ บาท

ตัวคูณอัตราผลตอบแทนคิดลด = 5.650 จะนำตัวเลขนี้ไปเปิดตาราง พบว่า ตัวคูณของอัตราผลตอบแทนคิดลด 5.650 นั้น อยู่ที่อัตราผลตอบแทน 12% อัตราผลตอบแทนคิดลดจึงเท่ากับ 12% เมื่อได้ค่าตัวคูณของอัตราผลตอบแทนคิดลดแล้ว นำค่านี้ไปเปิดตารางมูลค่าปัจจุบันเงินทบงวด (Present value of Annuity) ตารางในภาคผนวกที่ ง-1

กรณีกระแสเงินสดเข้าสุทธิไม่เท่ากันทุกงวด สามารถคำนวณหาอัตราผลตอบแทนคิดลดดังนี้

1) คำนวณมูลค่าปัจจุบันสุทธิ ณ ระดับอัตราต้นทุนของเงินสุทธิ

2) พิจารณามูลค่าปัจจุบันสุทธิที่คำนวณได้จากตัวอย่างโดยวิธีการลองผิดลองถูก

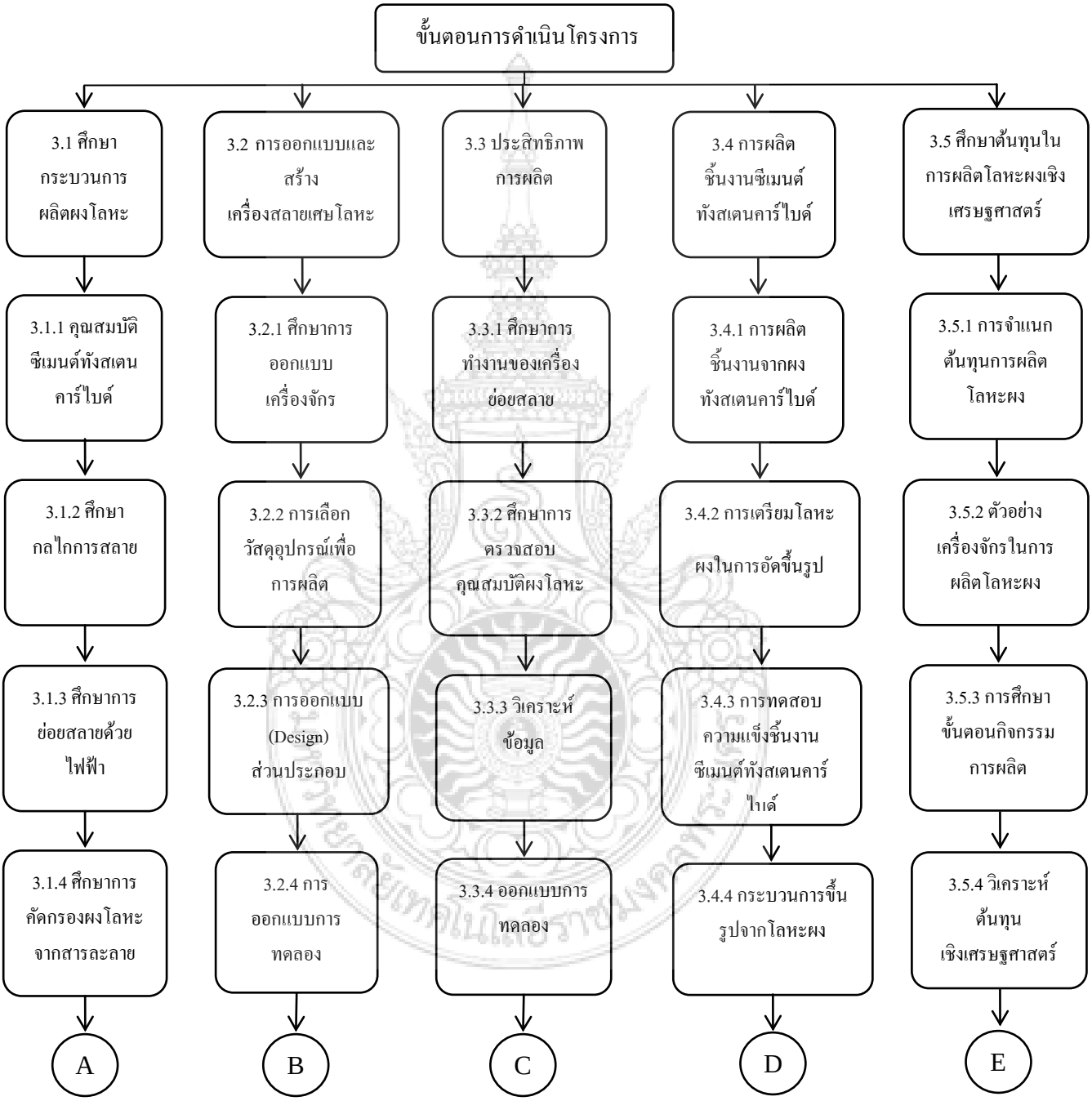
ก) ถ้ามูลค่าปัจจุบันสุทธิมีค่าเป็นบวก ให้เพิ่มอัตราผลตอบแทนคิดลดจากระดับต้นทุนของเงินทุน

ข) ถ้ามูลค่าปัจจุบันสุทธิมีค่าเป็นลบ ให้ลดอัตราผลตอบแทนคิดลดจากระดับต้านทุนของเงินทุน

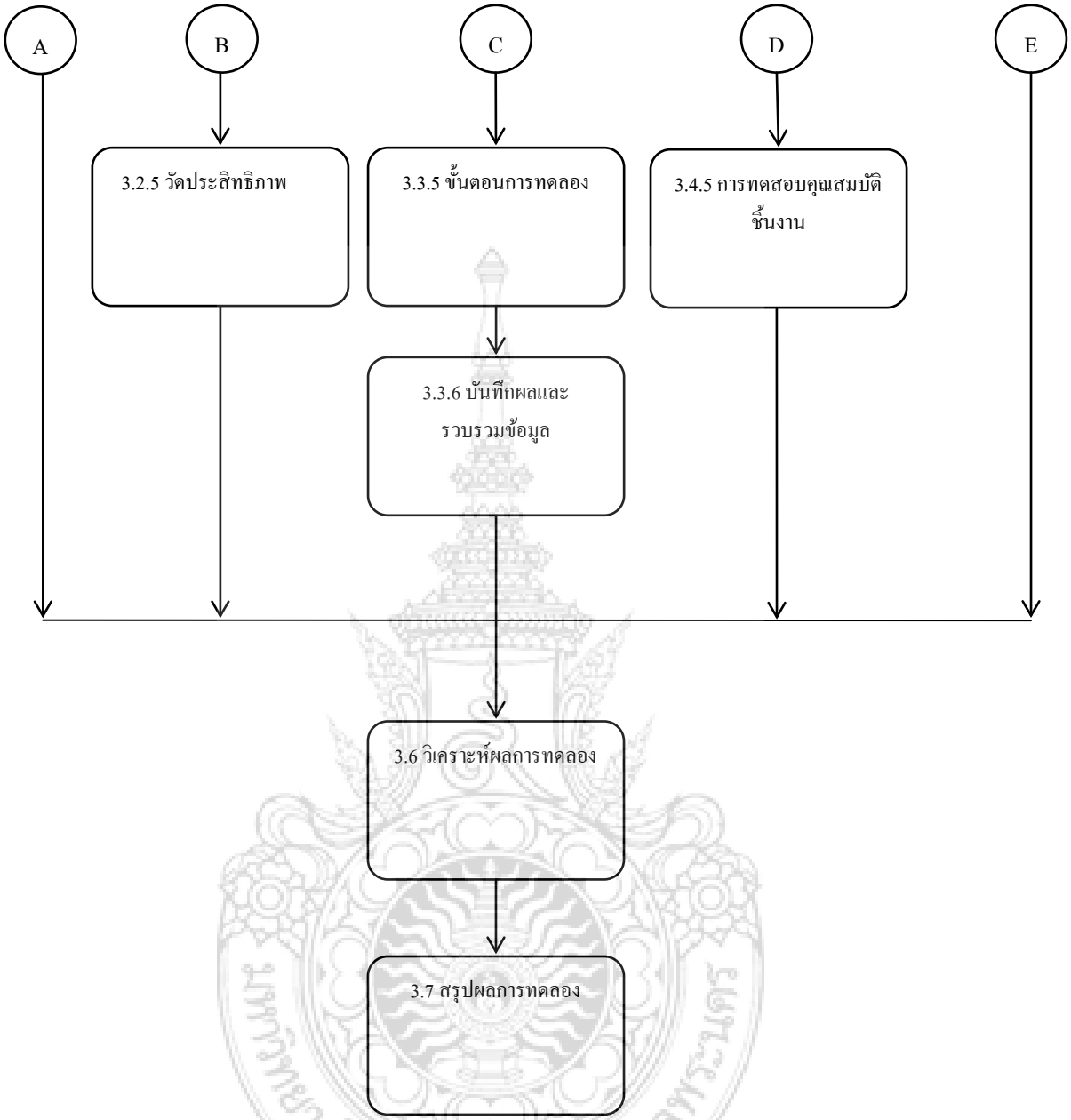
3) ทำการเปรียบเทียบเพื่อหาอัตราผลตอบแทนคิดลดที่ทำให้มูลค่าปัจจุบันของกระแส เงินสดเข้าสุทธิเท่ากับเงินทุน โดยใช้วิธีการเทียบบัญญัติไตรยางศ์

บทที่ 3

ขั้นตอนการดำเนินงาน



ภาพที่ 3.1 แผนผังการดำเนินการ



ภาพที่ 3.1 แผนผังการดำเนินการ (ต่อ)

3.1 ศึกษากระบวนการผลิตผงโลหะ

3.1.1 สมบัติของซีเมนต์ทังสเตนคาร์ไบด์ (Cemented Tungsten carbide)

3.1.1.1 การทดสอบความแข็งของชิ้นส่วนซีเมนต์ทังสเตนคาร์ไบด์

ตารางที่ 3.1 ผลการทดสอบความแข็งของแผ่นมีดซีเมนต์ทังสเตนคาร์ไบด์ (Insert) (HRA)

แรงกด (kg/f)	ก่อนอบ				หลังอบ				รูปแผ่นมีดตัดทังสเตนคาร์ไบด์ 3 ลักษณะ
	ครั้งที่			ค่าเฉลี่ย	ครั้งที่ 1			ค่าเฉลี่ย	
	1	2	3		1	2	3		
150	79.2	79.5	79.8	79.5	60.3	52.8	59.8	57.63	
150	73.5	74.0	74.0	73.83	71.6	72.5	71.9	72.0	
150	77.7	78.0	78.0	77.9	70.1	66.2	68.4	68.23	

ตารางที่ 3.2 การทดสอบส่วนผสมทางเคมีของชิ้นส่วนซีเมนต์ทังสเตนคาร์ไบด์ก่อนการอบให้ความร้อน [10]

ส่วนผสมของชิ้นส่วนทังสเตนคาร์ไบด์ก่อนอบ		ส่วนผสมของชิ้นส่วนทังสเตนคาร์ไบด์หลังอบ	
องค์ประกอบ	ร้อยละ	องค์ประกอบ	ร้อยละ
ไทเทเนียม (Ti)	85	ไทเทเนียม (Ti)	91
ทังสเตน (W)	ไม่พบ	ทังสเตน (W)	ไม่พบ
อลูมิเนียม (Al)	ไม่พบ	ซิลิคอน (Si)	ไม่พบ
โคบอลต์ (Co)	12	โคบอลต์ (Co)	7
ซิลิคอน (Si)	ไม่พบ	เหล็ก (Fe)	ไม่พบ
เหล็ก (Fe)	ไม่พบ	อลูมิเนียม (Al)	ไม่พบ

ตารางที่ 3.3 แสดงสมบัติของทังสเตน

ชื่อ	Tungsten
สัญลักษณ์	W
หมายเลขอะตอม	74
มวลอะตอม	183.84
จุดหลอมเหลว	3410.0 °C (3683.15 K, 6170.0 °F)
จุดเดือด	5660.0 °C (5933.15 K, 10220.0 °F) Number of protons/Electrons: 74 Number of neutrons: 110 Classification: Transition metal
โครงสร้างผลึก	Cubic
ความหนาแน่น	@ 293 K: 19.3 g/cm^3
สี	เงิน

ตารางที่ 3.4 แสดงสมบัติของโคบอลต์ (Cobalt)

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/cm3
สี	May be Black

3.1.2 ศึกษากลไกการสลายชิ้นงานซีเมนต์คาร์ไบด์

การนำวัสดุซีเมนต์ทังสเตนคาร์ไบด์ที่ผ่านการใช้งานแล้วกลับมาใช้ใหม่โดยทั่วไป มีกระบวนการรีไซเคิล 4 วิธี ได้แก่ Hydrometallurgy , Melting , Direct recycling และ Semidirect recycling ในการทดลองนี้เป็นการศึกษาแนวทางการนำกลับมาใช้ใหม่โดยวิธี Hydrometallurgy ซึ่งเลือกใช้การรีไซเคิลด้วยเคมีไฟฟ้า (Electrolysis) การกรอง การอบ และการบดละเอียด

กรรมวิธีแบบ Hydrometallurgy เป็นกระบวนการควบคุมคุณภาพชิ้นงานร่วมกับกระบวนการเคมีไฟฟ้า (Electrolysis) ในสารละลายกรดไฮโดรคลอริก (HCl) กรดฟอสฟอริก (H_3PO_4) กรดอะซิติก ($C_2H_4O_8$) กรดซัลฟูริก (H_2SO_4) ทำหน้าที่กัดกร่อนโลหะโดยมีอุปกรณ์จ่ายแรงดันไฟฟ้า และกระแสไฟฟ้า ผ่านสารละลาย

3.1.2.1 การสลายด้วยเคมีไฟฟ้า (Electrolysis)

การสลายด้วยเคมีไฟฟ้าเป็นคำที่ใช้อธิบายปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้น เมื่อผ่านกระแสไฟฟ้าเข้าไปในของเหลวที่มีไอออนอยู่ โลหะและกราไฟต์จะนำกระแสไฟฟ้า เพราะอิเล็กตรอนอิสระที่จะเคลื่อนที่ผ่านผลึกแลตทิซ แต่สารประกอบไอออนิก ที่หลอมเหลว หรือสารประกอบที่แตกตัวเป็นไอออนในสารละลาย จะนำไฟฟ้าได้โดยการเคลื่อนที่ของไอออน

3.1.2.2 สารละลาย (Solution)

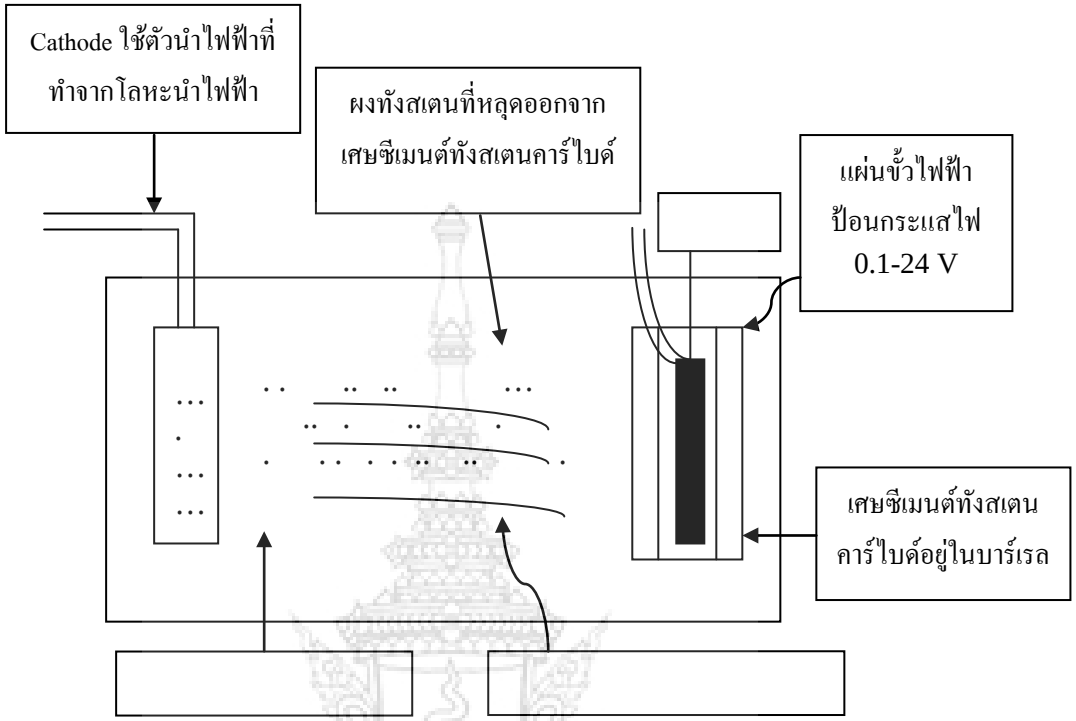
1) กรดไฮโดรคลอริก (hydrochloric acid)

กรดไฮโดรคลอริก เป็นสารประกอบเคมีประเภทกรดละลายในน้ำ สารละลายไฮโดรคลอริก (HCl) มีสมบัติในการกัดกร่อนโลหะมีปฏิกิริยากัดกร่อนสูงกว่า และใช้กันอย่างกว้างในอุตสาหกรรรม

ตางรางที่ 3.5 สมบัติของกรดไฮโดรคลอริก

ชื่อ	ไฮโดรคลอริกแอซิด
ชื่ออื่น	กรดเกลือ หรือ Muriatic acid
สูตรโมเลกุล	HCl in น้ำ (H_2O)
มวลโมเลกุล	36.46 g/mol (HCl)
ความหนาแน่น และ เฟส	1.18 g/cm^3, 37% solution
การละลาย ใน น้ำ	สารละลาย 38%
จุดหลอมเหลว	26 °C (247 K), สารละลาย 38%
จุดเดือด	110 °C (383 K), สารละลาย 20.2%48 °C (321 K), สารละลาย 38%

3.1.3 ศึกษาการย่อยสลายด้วยไฟฟ้า



ภาพที่ 3.2 กระบวนการแยกสารด้วยไฟฟ้า (Electrolysis)

ปฏิกิริยารีดอกซ์ที่เกิดขึ้นบริเวณขั้วไฟฟ้าทั้งสอง สรุปเป็นกรณีเท่าไปดังนี้

1) ที่ขั้วบวก ไอออนลบของสารอิเล็กโทรไลต์ จะเสียอิเล็กตรอนให้ขั้วบวกเกิดสารหรือแก๊สของไอออนลบ เรียกว่าขั้วที่เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันนี้ว่า ขั้วแอโนด

2) ที่ขั้วลบ ไอออนลบของสารอิเล็กโทรไลต์ จะเข้ามารับอิเล็กตรอนจากขั้วลบทำให้เกิดโลหะของไอออนบวก เรียกว่า ขั้วที่เกิดปฏิกิริยารีดักชันนี้ว่า ขั้วแคโทด

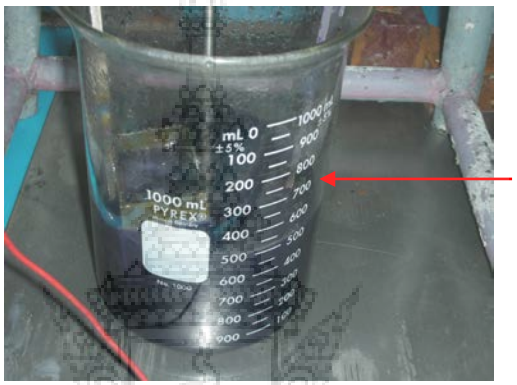
3.1.4 ศึกษาการคัดกรองผงโลหะจากสารละลาย

การศึกษาการแยกผงโลหะจากสารละลาย ที่มีลักษณะเป็นของเหลวจากขั้นตอนการแยกทังสเตนคาร์ไบด์ เพื่อออกแบบขั้นตอนการคัดกรองผงโลหะจากสารละลาย Fig.8 A flowsheet suggested for the recovery of w and Co from tungsten cemented scraps via selective electrolysis. [อ้างอิงงานวิจัยเรื่อง Selective dissolution of the cobalt binder from scrap of cemented tungsten carbide in acids containing additives; Jing-Chie Lin, Jain-Yuan Lin, Shie-Peir Jou. Hydrometallurgy 1996; 43:47-61.]

3.2 การออกแบบและสร้างเครื่องแยกสลายเศษโลหะ

3.2.1 ศึกษาการออกแบบเครื่องจักร

หลักการออกแบบอาศัยข้อมูลพื้นฐานจากการทดลองสลายเศษซีเมนต์ทังสเตนคาร์ไบด์ในห้องปฏิบัติการ ด้วยวิธีการทางเคมีไฟฟ้า เศษชิ้นงานจะบรรจุในตะกร้าไทเทเนียมตามภาพที่ 3.3 และ 3.4 เป็นขั้วลบ (Cathode) จุ่มในสารละลายที่บรรจุในบีกเกอร์ขนาด 1000 มิลลิลิตร ทำ ปฏิกิริยาระหว่างขั้วบวก (Anode) และใช้ใบกวนสารละลายตามรูป



บีกเกอร์บรรจุสารละลาย

ภาพที่ 3.3 การทดลองการสลายแผ่นมีดตัด

อุปกรณ์และการจ่ายแรงดันไฟฟ้า

ภาพที่ 3.4 การติดตั้งอุปกรณ์จ่ายกระแสไฟฟ้า

ตารางที่ 3.6 เปรียบเทียบความสามารถของสารละลายที่ใช้ในการกัดกร่อน

สารละลาย	แรงดันไฟฟ้า (V.)	กระไฟฟ้า (A.)	น้ำหนัก(W.)		
			ก่อน	หลัง	ผลต่าง
HCl	12	4	85.0789	85.1412	1.9377
HNO_3	12	4	34.4670	34.4646	0.0024
$C_2H_4O_8$	12	4	34.4646	34.4620	0.0026

ผลการเปรียบเทียบสารละลายที่ใช้กัดกร่อนโลหะที่แรงดันไฟฟ้า 12 โวลต์ พบว่าสารละลายกรดไฮโดรคลอริกเกิดการกัดกร่อนได้ 1.9377 g ดีกว่าสารละลายชนิดอื่นๆ ดังนั้นจึงเลือกใช้กรดไฮโดรคลอริกเป็นสารละลายในการทดลอง

จากการทดลองในห้องปฏิบัติการ สรุปได้ว่าการใช้กรดไฮโดรคลอริก ทำให้เกิดการสลายได้ดี แต่ในการทดลองเลือกใช้ กรดฟอสฟอริก และกรดอะซิติคทดลอง เนื่องจากกรดไฮโดรคลอริกจะทำให้ตะกร้าบรรจุชิ้นงานเกิดการกัดกร่อนในสารละลาย

ปัญหาที่เกิดขึ้นด้วยวิธีการทดลองในห้องปฏิบัติการ

1) ตะกร้าบรรจุชิ้นงานเกิดการกัดกร่อนในสารละลาย

2) การติดตั้งอุปกรณ์ต่างๆ ทำให้เกิดความไม่สะดวก

3) การควบคุมกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าที่ประยุกต์อุปกรณ์ในท้องตลาดได้ค่าไม่มาตรฐาน

4) ต้องเติมสารละลายเมื่อสารละลายลดลง

5) ตะกร้าบรรจุชิ้นงานได้น้อย

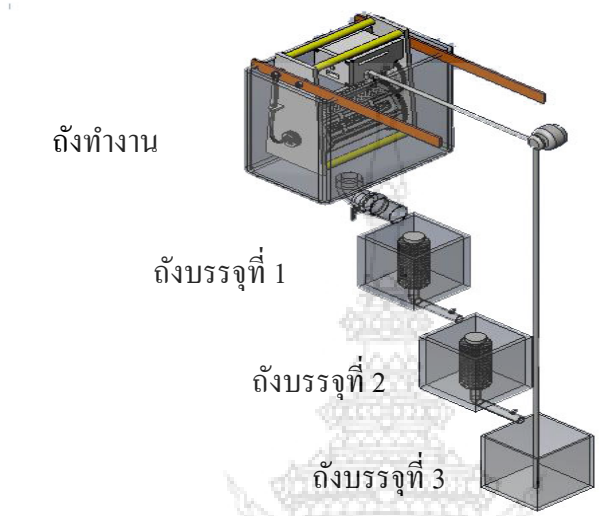
6) ผู้ทดลองไม่มีความปลอดภัยต้องสัมผัสกับสารละลาย

ดังนั้นจึงสร้างเครื่องกัดกร่อนโลหะเคมีไฟฟ้า เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการกัดกร่อนเศษซีเมนต์ทังสเตนคาร์ไบด์ และวัดประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องจักรและสามารถทดลองกับกรดไฮดรอคลอริกในการกัดกร่อน

โดยการออกแบบเครื่องกัดกร่อนโลหะเคมีไฟฟ้า มีจุดประสงค์เพื่อจัดสร้างเครื่องและมีประสิทธิภาพในการกัดกร่อนวัสดุโดยมีชุดต้นกำลังจะเป็นมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง (DC) ขนาด 15W ความเร็วรอบ 120 rpm ส่งกำลังผ่านระบบเฟืองขับโดยปรับความเร็วรอบได้ในช่วง 1-25 รอบต่อนาที ใช้หม้อแปลงไฟฟ้ากระแสสลับ (AC) 220 โวลต์ กระแสไฟฟ้าจ่ายเป็นกระแสตรง (DC) ปรับตั้งในช่วง 1 - 24 โวลต์ และเลือกใช้กระแสไฟฟ้าในช่วง 0-50 แอมแปร์

ซึ่งการสร้างเครื่องกัดกร่อนโลหะได้ออกแบบหลักการทำงานของเครื่องไว้ 3 แนวทาง เพื่อพิจารณาข้อดีและข้อเสียในการเลือกสร้างเครื่องที่มีความเหมาะสมประกอบด้วย

3.2.1.1 ชุดคัดกรองผงโลหะแยก 3 ส่วน (แบบที่1)



ภาพที่ 3.5 เครื่องกัดกร่อนโลหะกึ่งอัตโนมัติแบบคัดกรองผงโลหะแยก 3 ส่วน (แบบที่1)

1) ระบบการทำงานของเครื่องย่อย

แบบแยกระบบคัดกรอง 3 ส่วน เป็นการให้สารละลายไหลเวียนลงเป็นระบบขั้นตอนไปยังถังพักสารละลายถังที่ 1 และถังที่ 2 ที่มีไส้กรองเศษผงโลหะขนาด 10 μm และ 5 μm และถังพักสารละลายที่ 3 จะเป็นถังเปล่ารองรับสารละลายที่ไหลลงมา โดยมีระบบปั๊มดูดสารละลายไปยังถังทำงานเพื่อนำกลับมาใช้ในการกัดกร่อนใหม่

2) ขั้นตอนการแยกผงโลหะจากสารละลายโดยเครื่องกัดกร่อนโลหะกึ่งอัตโนมัติแบบแยกระบบคัดกรอง 3 ส่วน (แบบที่1)

ก) เมื่อมีการกัดกร่อนเศษแผ่นมีด สารละลายจะเกิดการทำปฏิกิริยา

ข) ปล่อยสารละลายไหลลงไปยังถังพักสารละลายที่ 1 ที่มีไส้กรองขนาด 10 μmเพื่อกรองเศษผงโลหะ

ค) สารละลายไหลจากถังพักสารละลายที่ 1 ลงสู่ถังพักสารละลายที่ 2 มีไส้กรองผงโลหะขนาด 5 μm

ง) สารละลายจากถังพักที่ 2 ไหลลงถังพักสารละลายถังที่ 3 จากนั้นปิดวาล์ว

สารละลายที่ถังทำงาน แล้วเปิดสวิตซ์ปั๊มดูดสารละลายกลับไปใช้ในการกัดกร่อนใหม่

จ) ถอดไส้กรองถังพักสารละลายที่ 1 และถังพักสารละลายที่ 2 ออกมาแยกสารละลายที่ถังทำงาน แล้วเปิดสวิตซ์ปั๊มดูดสารละลายกลับไปใช้ในการกัดกร่อนใหม่

ฉ)ไส้กรองสำรองติดตั้งที่ถังพักสารละลายที่ 1 และถังพักสารละลายที่ 2

ช) ผงซีเมนต์ทังสเตนคาร์ไบด์ ทำให้แห้งที่อุณหภูมิ 95-120 องศา

ซ) บรรจุผงซีเมนต์ทังสเตนคาร์ไบด์ ลงในภาชนะบรรจุ

3) ข้อดี เครื่องกัดกร่อนโลหะกึ่งอัตโนมัติแบบระบบคัดกรองแยก 3 ส่วน

ก) ไม่ต้องเติมสารละลาย เนื่องจากมีปั๊มดูดสารละลายกลับไปใช้ใหม

ข) สารละลายไหลเวียนกลับมาใช้ใหม่ได้ในถังทำงาน

ค) ผู้ปฏิบัติสัมผัสสารละลายน้อย เนื่องจากเครื่องทำงานเป็นระบบไหลเวียน

4) ข้อเสีย เครื่องกัดกร่อนโลหะกึ่งอัตโนมัติแบบระบบคัดกรองแยก 3 ส่วน

ก) การวางถังพักสารละลายเป็นแบบขั้นบันไดทำให้ซับซ้อน

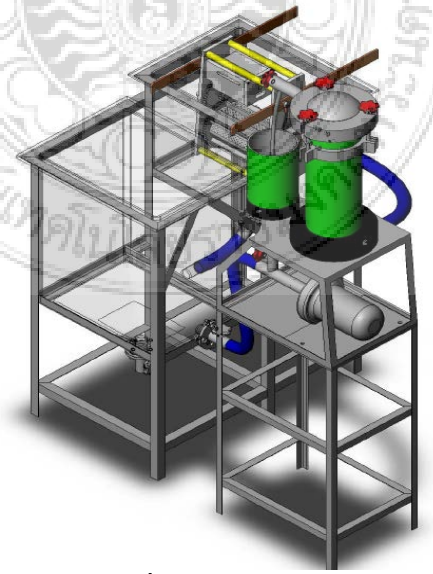
ข) ใช้ถังพักสารละลายหลายใบ และไส้กรองหลายชิ้น

ค) มีเศษผงโลหะตกค้างที่ถังพักสารละลาย

ง) การติดตั้งต้องใช้พื้นที่มาก

จ) ต้องมีโครงสร้างรองรับเครื่องและอุปกรณ์

3.2.1.2 ชุดการกัดกร่อนแบบโครงสร้างเดียว (แบบที่ 2)



ภาพที่ 3.6 เครื่องกัดกร่อนโลหะกึ่งอัตโนมัติแบบโครงสร้างเดียว (แบบที่ 2)

1) หลักการทำงาน

หลักการทำงานคล้ายกับหลักการทำงานแบบชุดคัดกรองผงโลหะแบบแยก 3 ส่วน (แบบที่ 1) ซึ่งมีข้อแตกต่างในการใช้ถังพักสารละลาย โดยไม่ต้องเปิดวาล์วสารละลายที่ถังทำงาน แต่จะเป็นการปล่อยสารละลายลงสู่ถังพัก และกรองผงโลหะที่ถังพักสารละลายที่เดียว ถังพักสารละลายมีรูปร่างเป็นทรงสี่เหลี่ยม ภายในถังมีลักษณะเป็นรูปกรวยปิระมิด จึงไม่มีเศษผงโลหะตกค้างที่ถังพัก และ ปั๊มสารละลายกรองผงโลหะขนาด 5 μm สารละลายไหลเวียนผ่านระบบปั๊มนำกลับไปใช้ใหม่

2) ขั้นตอนการแยกผงโลหะจากสารละลายโดยเครื่องกัดกร่อนโลหะกึ่งอัตโนมัติแบบโครงสร้างเดียว (แบบที่ 2)

ก) มีการกัดกร่อนเศษผงโลหะสารละลายจะเกิดการทำปฏิกิริยา

ข) สารละลายจะไหลไปยังถังพักสารละลายเพื่อถ่ายความร้อนในการกัดกร่อนในถังสารละลาย

ค) เปิดวาล์วสารละลายที่ถังพักสารละลายเพื่อแยกเศษผงโลหะด้วยภาชนะรองรับ

ง) ปิดปั๊มสารละลายถอดไส้กรองออกมาเคาะเพื่อเอาเศษผงโลหะ (ปิดปั๊มสารละลายแต่เครื่องยังทำงานอยู่)

จ) นำภาชนะที่รองรับเศษผงโลหะมาทำให้ตกตะกอนแล้วคัดกรองสารละลายออก

ฉ) ผงซีเมนต์ทังสเตนคาร์ไบด์ ทำให้แห้งที่อุณหภูมิ 95-120 องศา

ช) บรรจุผงซีเมนต์ทังสเตนคาร์ไบด์ ลงในภาชนะบรรจุ

3) ข้อดีเครื่องกัดกร่อนโลหะกึ่งอัตโนมัติแบบโครงสร้างเดียว (แบบที่ 2)

ก) ไม่ต้องเติมสารละลาย เนื่องจากมีปั๊มดูดสารละลายกลับไปใช้ใหม่

ข) สารละลายไหลเวียนกลับมาใช้ใหม่ได้ในถังทำงาน

ค) ผู้ปฏิบัติงานสัมผัสสารละลายน้อย เนื่องจากเครื่องทำงานเป็นระบบไหลเวียน

ง) มีระบบปั๊มสารละลายและไส้กรองเศษผงโลหะ

จ) ใช้ถังพักสารละลายและไส้กรองผงเพียงถังเดียว

ฉ) ไม่มีเศษผงโลหะตกค้างที่ถังพักสารละลาย

ช) ไม่ต้องกรองเศษผงโลหะที่ถังทำงาน

ซ) ใช้พื้นที่น้อยกว่าแบบระบบคัดกรองแยก 3 ส่วน (แบบที่ 1)

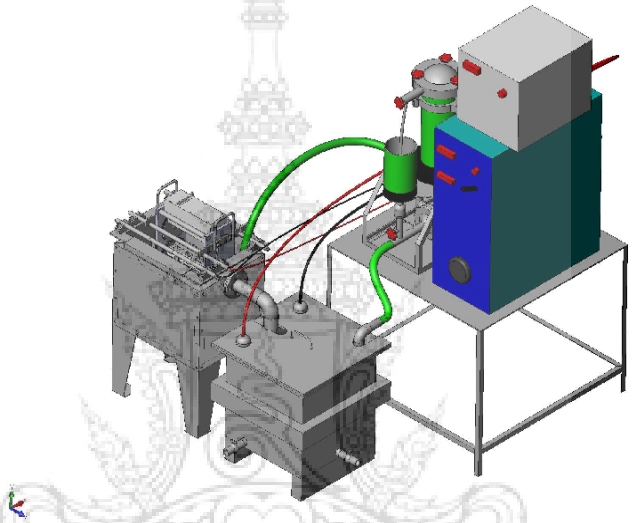
4) ข้อเสียเครื่องกัดกร่อนโลหะกึ่งอัตโนมัติแบบโครงสร้างประกอบชุดเดียว (แบบที่ 2)

ก) ต้องใช้โครงสร้างในการยึดประกอบเครื่อง

ข) การถอดอุปกรณ์และบำรุงรักษาเครื่องไม่สะดวกต้องถอดออกจากโครงรองรับเครื่อง

ค) ต้องใช้งบประมาณในการสร้างโครงรองรับเครื่อง

3.2.1.3 ชุดการกัดกร่อนแบบแยกส่วนระบบกึ่งอัตโนมัติ (แบบที่ 3)



ภาพที่ 3.7 เครื่องกัดกร่อนโลหะกึ่งอัตโนมัติแบบแยกส่วน (แบบที่ 3)

1) หลักการทำงาน

เป็นระบบไหลเวียนสารละลาย มีระบบล้นสารละลายจากถังทำงาน เศษผงโลหะที่มีขนาดเล็กจะระบายออกทางรูล้นสารละลายและไหลไปยังถังพักสารละลาย ซึ่งถังพักสารละลายมีรูปร่างเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มีผนังกั้นตรงกลาง โดยมีวาล์วปิด- เปิดสารละลายเพื่อแยกขนาดเศษผงโลหะจากถังสารละลาย ขนาดเศษผงโลหะที่มีขนาดใหญ่จะตกอยู่ภายในถังทำงาน และมีปั๊มสารละลายมีไส้กรองขนาด 5 μm เพื่อกรองเศษผงโลหะ และดูดสารละลายนำกลับไปใช้ใหม่

2) ขั้นตอนการแยกผงโลหะจากสารละลายโดยเครื่องกัดกร่อนโลหะกึ่งอัตโนมัติแบบแยกส่วน (แบบที่ 3)

ก) การกัดกร่อนเศษผงโลหะสารละลายจะเกิดการทำปฏิกิริยา

ข) เปิดวาล์วสารละลายที่ถังทำงานเพื่อคัดกรองเศษผงโลหะที่มีขนาดใหญ่ออก โดยรองรับด้วยภาชนะแล้วปิดวาล์วสารละลาย

ค) เปิดวาล์วสารละลายที่ถังพักสารละลายเพื่อนำเศษผงโลหะออกด้วย

ง) ขั้นตอนข้อที่ 2 และข้อที่ 3 ไม่ต้องปิดการทำงานของเครื่อง

จ) ปิดปั๊มสารละลายถอดไส้กรองออกเพื่อแยกเศษผงโลหะ

ฉ) ภาชนะที่รองรับสารละลายมาทำให้ตกตะกอนแล้วคัดกรองเศษผงโลหะ

ช) ผงซีเมนต์ทังสเตนคาร์ไบด์ที่ได้ ทำให้แห้งที่อุณหภูมิ 95 - 120 องศา

ซ) บรรจุผงซีเมนต์ทังสเตนคาร์ไบด์ ลงในภาชนะบรรจุ

3) ข้อดีของเครื่องกัดกร่อนโลหะกึ่งอัตโนมัติแบบแยกส่วน

ก) ไม่ต้องรอเติมสารละลายบ่อยครั้ง เนื่องจากมีปั๊มดูดสารละลายกลับไปใช้ต่อไป

ข) สารละลายไหลเวียนกลับมาใช้ใหม่ได้ในถังทำงาน

ค) ผู้ปฏิบัติงานสัมผัสสารละลายน้อย เนื่องจากเครื่องทำงานเป็นวัฏจักร

ง) เครื่องทำงานตลอดเวลา

จ) มีระบบปั๊มสารละลายและไส้กรองเศษผงโลหะในตัว

ฉ) ใช้ถังพักสารละลายและไส้กรองผงเพียงถังเดียว

ช) อุปกรณ์สามารถแยกส่วนกันได้ ตั้งในพื้นที่จำกัดได้

4) ข้อเสียของเครื่องกัดกร่อนโลหะกึ่งอัตโนมัติแบบแยกส่วน (แบบที่ 3)

ก) มีการถ่ายเทสารละลายเพื่อนำเศษผงโลหะที่ถังทำงานและถังพักสารละลาย

ข) ถังพักสารละลายมีพื้นที่หน้าตัดมาก การแยกผงโลหะอาจมีการตกค้างที่ถังพักสารละลาย

หลักการทำงานของเครื่องทั้ง 3 หลักการ เพื่อที่จะเลือกสร้างเครื่องที่มีประสิทธิภาพดีที่สุด พบว่าแต่ละแบบก็มีข้อดีข้อเสียต่างกันในการสร้างเครื่องกัดกร่อนโลหะ จึงต้องคำนึงถึงประสิทธิภาพในการทำงาน โดยลดต้นทุนในการสร้างเครื่อง และพื้นที่ในการติดตั้งที่มีข้อจำกัด ดังนั้นจึงเลือกสร้างเครื่องแบบแยกส่วน(แบบที่ 3) ระบบล้นของสารละลายและไหลเวียนกลับไปใช้ต่อได้

สาเหตุที่เลือกสร้างเครื่องกัดกร่อนโลหะกึ่งอัตโนมัติแบบแยกส่วน(แบบที่ 3) เนื่องจากมีระบบการล้นของสารละลายและมีการไหลเวียนของสารละลายในถังทำงานและถังพักสารละลาย ที่ผ่านปั๊มกรองดูดสารละลายให้นำกลับไปใช้ใหม่ และลดต้นทุนในการสร้างโครงสร้างเครื่อง

3.2.2 การเลือกวัสดุอุปกรณ์เพื่อการผลิต

จากการศึกษาวัสดุที่ใช้สร้างเครื่องกัดกร่อนโลหะ จากสิทธิบัตร United States Patent No. 4,234,333 ของประเทศสหรัฐอเมริกา ซึ่งได้กล่าวส่วนต่างๆและแหล่งอ้างอิงในการสร้างเครื่องอาทิ วัสดุและอุปกรณ์ โดยศึกษาและวางแผนประยุกต์เลือกใช้ ตลอดถึงการออกแบบและพัฒนา ใช้ในการสร้างเครื่องมือและอุปกรณ์เพื่อการผลิต

3.2.2.1 สเตนเลส เกรด304

เลือกใช้สร้างถังบรรจุสารละลายโดยโครงตั้งถังบรรจุสารละลาย มีโครเมี่ยม (17-25%), nickel (8-25%), ไม่เป็นแม่เหล็ก, ไม่มีวิธีการทางความร้อน สามารถพัฒนาให้แข็งโดยระบบเย็น การเพิ่ม molybdenum (เพิ่มขึ้น 7%) จะสามารถป้องกันการกัดกร่อนตระกูลมาร์เทนซิติค (Martensitic) เป็นตระกูลที่มีความต้านทานการกัดกร่อนน้อยกว่าออสเทนนิติค และเฟอร์ริติค แต่มีความทนทานและแข็งแรงมากกว่า มีคุณสมบัติดูดแม่เหล็ก โดยทั่วไปจะมีส่วนผสมของโครเมียม 12 -14 เปอร์เซนต์ โมลิบดินัม 0.2-1 เปอร์เซนต์ มีนิกเกิ้ล 0-2 เปอร์เซนต์และมีคาร์บอนผสม อยู่ประมาณ 0.1-1 เปอร์เซนต์ ซึ่งสามารถชุบแข็งได้โดยการให้ความร้อนแล้วทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็วและอบคืนตัว ความต้านทานการกัดกร่อนปานกลาง แม่เหล็กดูดติด สามารถทำให้แข็งได้ด้วยกรรมวิธีทางความร้อน ดังนั้น จึงสามารถพัฒนาปรับปรุงให้มีความแข็งแรงสูงและปรับระดับความแข็งแรงได้ มีข้อจำกัดในการเชื่อม เนื่องจากมีปริมาณคาร์บอนสูงและมีความแข็งโดยธรรมชาติในตัวเอง ใช้งานในอุณหภูมิสูงได้ดีถึง 593 องศาเซลเซียส

3.2.2.2 ไทเทเนียม (Titanman)

เลือกนำมาสร้างทำแผ่นจ่ายกระแสไฟให้กับขั้วลบ (-) กับบูชทำขั้วบวก (+)

คุณสมบัติของไทเทเนียม

คุณสมบัติของไทเทเนียม (Titanman)

ความหนาแน่น	4.5 kg/dm^3
จุดหลอมเหลว	1670°C
โมดูลัสยืดหยุ่น	110000 N/mm^2
สัมประสิทธิ์การขยายตัว	9.10^{-6} /k
โมดูลัสเฉือย	45 kN/mm^2
ความต้านแรงดึง	300 – 750 N/mm^2
ความแข็ง	100 – 200 HB 30

3.2.2.3 ทองแดง (Copper)

เลือกนำมาสร้างทำเพลาเพื่อนำไฟฟ้าจากหม้อแปลงไฟฟ้า จ่ายกระแสไฟไปยังขั้วลบ (-) กับขั้วบวก (+)

คุณสมบัติของทองแดงเป็นโลหะที่เป็นตัวนำไฟฟ้าที่ดี

ความหนาแน่น 8.90 – 8.96 Kg/dm^3

จุดหลอมเหลว 1083 ˚C

ความเค้นยืดหยุ่น 125000 N / mm^2

สัมประสิทธิ์การขยายตัว 17.10 $^{-6}/K$

ความสามารถในการนำกระแสไฟฟ้า 35 – 58 $m/\Omega . mm^2$

ความสามารถในการนำความร้อน 240 – 386 W/K. m

ความต้านแรงดึง 200 – 360 N / mm^2 ความยืดอยู่ระหว่าง 2 – 45 %

3.2.2.4 ตะกั่ว (Lead)

เลือกนำมาสร้างใช้เคลือบกับถังบรรจุสารละลายเพื่อกันสารละลายในการกัดกร่อน

คุณสมบัติของตะกั่ว

ความหนาแน่น 11.3 kg/dm^3

จุดหลอมเหลว 327 °C

โมดูลัสยืดหยุ่น 175000 N / mm^2

สัมประสิทธิ์การขยายตัว 29.10 $^{-6}/K$

ความสามารถในการนำกระแสไฟฟ้า 5 $m/\Omega . mm^2$

ความยืดถึง 50%

3.2.2.5 พลาสติกโพลีโพรพีลีน (Polypropylene : PP)

เลือกนำมาสร้างถังบรรจุชิ้นงาน (Barrel) ถังพักสารละลาย และผนังกั้นกระแสไฟ

คุณสมบัติของโพลีโพรพีลีน

ทนต่อการแปรรูปด้วยความร้อน ทนต่อแรงดึง แรงกระแทกและทรงตัวดี ผิวแข็งไม่มีแนวโน้มของการสึกกร่อน ฆ่าเชื้อโรคที่อุณหภูมิ 120°C ได้ ไม่ดูดซึมน้ำจะเปราะที่อุณหภูมิ 0°C

อุณหภูมิที่ใช้งานได้เป็นระยะเวลานานๆ : 120 – 130 °C

การทนต่อสารเคมี ทนต่อกรดอ่อน ด่างอ่อน

3.2.2.6 โพลีเอทิลีน (Polyethylene: PE)

อุปกรณ์ส่วนหนึ่งที่ใช้ในเครื่องกัดกร่อนพวก วาล์วน้ำ ซีลยางกันน้ำรั่ว และร่องตัวยู

คุณสมบัติโพลีเอทิลีน มีความแข็งแรงสูง ทนอุณหภูมิสูงและคงรูป อุณหภูมิที่ใช้งานได้เป็นระยะเวลานานๆ 105 °C

การทนต่อสารเคมี : ทนต่อกรด ด่าง

สัมประสิทธิ์การนำความร้อน (λ) : 1.38 kJ/mh°C

ค่าความร้อนจำเพาะ © : 1.88 kJ/mh°C

ความหนาแน่นที่อุณหภูมิ (ρ) : ทีอุณหภูมิ 20 °C เท่ากับ 0.94 – 0.96 g/mc^3

ระยะเวลาอบแห้ง : 1-15 ชั่วโมงที่อุณหภูมิ 65°C

3.2.2.7 พีวีซี (Polyvinylchloride : PVC)

อุปกรณ์ส่วนหนึ่งที่ใช้ในเครื่องกัดกร่อนพวก ข้อต่อ ท่อล้นของสารละลาย

คุณสมบัติโดยทั่วไปของผลผลิต : มีความแข็งแรงสูง แข็งเหนียว ไม่สึกกร่อน ติดไฟยากอุณหภูมิที่ใช้งานได้เป็นระยะเวลานานๆ : 60-70 C

การทนต่อสารเคมี : ทนต่อกรดและด่าง แอลกอฮอล์ เบนซิน น้ำมันเครื่องและไขมัน

สัมประสิทธิ์การนำความร้อน 0.59 KJ/mh C

ความหนาแน่น (þ) ที่อุณหภูมิ 20 C เท่ากับ 1.4 g/cm^3

อัตราการหดตัวอยู่ระหว่าง 0.4 – 0.5 %

3.2.2.8 โพลีเอมีดหรือไนลอน (Polyamide: Pa หรือ Nylon)

อุปกรณ์ที่ใช้กรองผงโลหะที่ได้จากการแยกสลาย

คุณสมบัติโดยทั่วไป

อุณหภูมิที่ใช้งานได้เป็นระยะเวลานานๆ : 90 - 110 C การทนต่อสารเคมี : ทนต่อกรดและด่าง แอลกอฮอล์ เบนซิน น้ำมันเครื่องและไขมัน ไม่ทนต่อ กรด ด่างแก่

สัมประสิทธิ์การนำความร้อน 0.92 KJ/mh C

ค่าความร้อนจำเพาะ (c) 1.67 KJ/mg C

ความหนาแน่น (þ) ที่อุณหภูมิ 20 C เท่ากับ 1.13 g/cm^3

ระยะเวลาอบแห้ง (ก่อนเข้าเครื่องฉีด) 2 - 3 ชั่วโมงที่อุณหภูมิ 60 - 85 C

อัตราการหดตัวอยู่ระหว่าง 1.0 – 2.5 %

3.2.2.9 ระบบการทำงานของเครื่อง

โดยมีชุดต้นกำลังจะเป็นมอเตอร์ไฟฟ้า DC ขนาด 15 W ความเร็วรอบ 120 rpm ส่งกำลังผ่านระบบเฟืองขับโดยปรับความเร็วรอบได้ในช่วง 1 - 25 รอบต่อนาที เป็นตัวขับเคลื่อนในการหมุนของถังบรรจุชิ้นงาน (Barrel) เพื่อจะทำให้ชิ้นงานเกิดการสัมผัสกับขั้วแอโนด เพื่อทำปฏิกิริยาในการกัดกร่อน

3.2.2.10 ระบบหมุนของถังบรรจุชิ้นงาน (Barrel)

ถังบรรจุชิ้นงานจะมีทิศทางการหมุนทวนเข็ม โดยอ้างอิงจากสิทธิบัตร United States Patent No. 4,234,333 ของสหรัฐอเมริกา การหมุนของถังบรรจุชิ้นงาน หมุนในทิศทางทวนเข็มโดยการส่งกำลังด้วยเฟืองขับมีต้นกำลังมอเตอร์เกียร์สามารถปรับความเร็วรอบได้ จะทำให้เกิดปฏิกิริยาในการกัดกร่อนดีกว่าการหมุนตามเข็ม

1. คำนวณปริมาณชิ้นงานที่บรรจุลงในถังบรรจุชิ้นงาน (Barrel)

ความหนาแน่นทังสเตนคาร์ไบด์ WC = 19.3 g/cm^3

D = 100 ม.ม , d = 87 ม.ม , l = 50 ม.ม , h = 206 ม.ม , α = 60° , β = 120°

คำนวณพื้นที่ A

จากสมการ (2.30) $A = \frac{n \times l \times d}{4}$

$= \frac{6 \times 50 \times 87}{4}$

$= 6525\ cm^3$

คำนวณปริมาตร V

จากสมการ (2.31) $V = \frac{\pi \times h}{6} (D^2 - d^2)$

$= \frac{3.1415 \times 206}{6} \times (100^2 - 87^2)$

$= \frac{107.86\ (2431)}{1000}$

$= 262.20\ cm^3$

จากสมการ (2.32) มวล = ความหนาแน่น × ปริมาตร

$= 19.3\ g/cm^3 \times 262.20\ cm^3$

= 5 kg.

ดังนั้น ถังบรรจุชิ้นงาน (Barrel) สามารถใส่วัสดุซีเมนต์ทังสเตนคาร์ไบด์ ได้จำนวน 5 กิโลกรัม จาก U.S. Patent 4,234,333 บอกว่าการกัดกร่อนโลหะจะมีประสิทธิภาพต้องมีวัสดุซีเมนต์ทังสเตนคาร์ไบด์ WC ปริมาณ ¼ ของ ถังบรรจุชิ้นงาน (Barrel) คือ 1.25 kg. จึงจะมีการกัดกร่อนที่ดี

3.2.2.11 ระบบส่งกำลังด้วยเฟืองขับ

1) การคำนวณเฟืองตรงระบบอังกฤษ (Spur gear)

กัดเฟืองตรงตัวที่ 1 มีจำนวนฟัน 16 ฟัน และเฟืองตัวนี้มี 10 DP จงหา Pd , CP , a , b , c , W , WD , Do , T

คำนวณเส้นผ่าศูนย์กลางวงกลมพิตช์ Pd

จากสมการ (2.8) $Pd = \frac{N}{DP}$

$= \frac{16}{12}$

$= 1.333$ นิ้ว

คำนวณระยะพิตช์ CP

จากสมการ (2.7) $CP = \frac{3.1416}{DP}$

$= \frac{3.1416}{12}$

$= 0.261$ นิ้ว

คำนวณระยะของฟันเฟือง a

จากสมการ (2.9) $a = \frac{1}{DP}$

$= \frac{1}{12}$

$= 0.083$ นิ้ว

คำนวณระยะของฟันเฟือง b

จากสมการ (2.10) $b = \frac{1.157}{DP}$

$= \frac{1.157}{12}$

$= 0.096$ นิ้ว

คำนวณช่องว่างบนฟันเฟือง C

จากสมการ (2.12) $C = \frac{0.157}{DP}$

$= \frac{0.157}{12}$

$= 0.013$ นิ้ว

คำนวณความลึกใช้งาน W

จากสมการ (2.13) $W = \frac{2.0}{DP}$

$= \frac{2.0}{12}$

$= 0.166$ นิ้ว

คำนวณความลึกจริง WD

จากสมการ (2.14) $WD = \frac{2.157}{DP}$

$= \frac{2.157}{12}$

$= 0.179$ นิ้ว

คำนวณเส้นผ่าศูนย์กลางวัดนอก Do

จากสมการ (2.15) $Do = \frac{N + 2}{DP}$

$= \frac{16 + 2}{12}$

$= 1.5$ นิ้ว

คำนวณความหนาของฟันเฟือง T

จากสมการ (2.16) $T = \frac{1.5708}{DP}$

$= \frac{1.5708}{12}$

$= 0.130$ นิ้ว

กัดเฟืองตรงตัวที่ 2 มีจำนวนฟัน 60 ฟัน และเฟืองตัวนี้มี 10 DP จงหา Pd , CP , a , b , c , W , WD , Do , T

คำนวณเส้นผ่าศูนย์กลางวงกลมพิตช์ Pd

จากสมการ (2.8) $Pd = \frac{N}{DP}$

$= \frac{60}{12}$

$= 5$ นิ้ว

คำนวณระยะพิตช์ CP

จากสมการ (2.7) $CP = \frac{3.1416}{DP}$

$= \frac{3.1416}{12}$

$= 0.261$ นิ้ว

คำนวณระยะของฟันเฟือง a

จากสมการ (2.9) $a = \frac{1}{DP}$

$= \frac{1}{12}$

$= 0.083$ นิ้ว

คำนวณระยะของฟันเฟือง b

จากสมการ (2.10) b $= \frac{1.157}{DP}$

$= \frac{1.157}{12}$

$= 0.096$ นิ้ว

คำนวณช่องว่างบนฟันเฟือง C

จากสมการ (2.12) C $= \frac{0.157}{DP}$

$= \frac{0.157}{12}$

$= 0.013$ นิ้ว

คำนวณความลึกใช้งาน W

จากสมการ (2.13) W $= \frac{2.0}{DP}$

$= \frac{2.0}{12}$

$= 0.166$ นิ้ว

คำนวณความลึกจริง WD

จากสมการ (2.14) WD $= \frac{2.157}{DP}$

$= \frac{2.157}{12}$

$= 0.179$ นิ้ว

คำนวณเส้นผ่าศูนย์กลางวัดนอก Do

จากสมการ (2.15) $Do = \frac{N + 2}{DP}$

$= \frac{60 + 2}{12}$

$= 5.16$ นิ้ว

คำนวณความหนาของฟันเฟือง T

จากสมการ (2.16) $T = \frac{1.5708}{DP}$

$= \frac{1.5708}{12}$

$= 0.130$ นิ้ว

กัดเฟืองตรงตัวที่ 3 มีจำนวนฟัน 70 ฟัน และเฟืองตัวนี้มี 10 DP จงหา Pd , CP , a , b , c , W , WD , Do , T

คำนวณเส้นผ่าศูนย์กลางวงกลมพิตช์ Pd

จากสมการ (2.8) $Pd = \frac{N}{DP}$

$= \frac{70}{12}$

$= 5.83$ นิ้ว

คำนวณระยะพิตช์ CP

จากสมการ (2.7) $CP = \frac{3.1416}{DP}$

$= \frac{3.1416}{12}$

$= 0.261$ นิ้ว

คำนวณระยะของฟันเฟือง a

จากสมการ (2.9) a $= \frac{1}{DP}$

$= \frac{1}{12}$

$= 0.083$ นิ้ว

คำนวณระยะของฟันเฟือง b

จากสมการ (2.10) b $= \frac{1.157}{DP}$

$= \frac{1.157}{12}$

$= 0.096$ นิ้ว

คำนวณช่องว่างบนฟันเฟือง C

จากสมการ (2.12) C $= \frac{0.157}{DP}$

$= \frac{0.157}{12}$

$= 0.013$ นิ้ว

คำนวณความลึกใช้งาน W

จากสมการ (2.13) W $= \frac{2.0}{DP}$

$= \frac{2.0}{12}$

$= 0.166$ นิ้ว

คำนวณความลึกจริง WD

จากสมการ (2.14) WD $= \frac{2.157}{DP}$

$= \frac{2.157}{12}$

$$= \quad 0.179 \text{ นิ้ว}$$

คำนวณเส้นผ่าศูนย์กลางวัดนอก Do

จากสมการ (2.15) $Do = \dfrac{N + 2}{DP}$

$$= \frac{72 + 2}{12}$$

$$= \quad 6 \text{ นิ้ว}$$

คำนวณความหนาของฟันเฟือง T

จากสมการ (2.16) $T = \dfrac{1.5708}{DP}$

$$= \frac{1.5708}{12}$$

$$= \quad 0.130 \text{ นิ้ว}$$

2) คำนวณอัตราความเร็วของเฟือง

เฟืองฟันตรง 3 ตัวขับกันดังรูปส่งกำลังเฟืองติดกับแกนมอเตอร์เฟืองขับตัวที่ 1 มีจำนวนฟัน 16 ฟัน เฟืองตามตัวที่ 2 มีจำนวนฟัน 60 ฟัน เฟืองขับตัวที่ 3 มีจำนวน 70 ฟันเฟือง หาอัตราความเร็วของเฟืองตัวที่ 1 , 2 และตัวที่ 3

N_1 = ความเร็วรอบ 120 rpm

Z_1 = จำนวนฟันเฟืองขับ 16 mm.

Z_2 = จำนวนฟันเฟืองตาม 60 mm.

Z_3 = จำนวนฟันเฟืองขับ 70 mm.

คำนวณความเร็วรอบ N_2

จากสมการ (2.26) $N_1 Z_1 = N_2 Z_2$

$$N_2 = \frac{N_1 Z_1}{Z_2}$$

$$= 120 \times (16 / 60)$$

$$= 32 \text{ rpm}$$

อัตราความเร็วของเฟืองตาม $N_2 = 32$ รอบ / นาที

คำนวณความเร็วรอบ N_3

จากสมการ (2.26) $N_2 Z_2 = N_3 Z_3$

$$N_3 = \frac{N_2 Z_2}{Z_3}$$

$$= 32 \times (60 / 70)$$

$$= 27 \text{ rpm.}$$

อัตราความเร็วของเฟืองตาม $N_3 = 27$ รอบ / นาที

การส่งกำลังด้วยเฟือง : ทดหลายชั้น

จากสมการ (2.27) อัตราทดรวม $= \frac{Z_2 \times Z_3}{Z_1 \times Z_2}$

$$i = \frac{60 \times 70}{16 \times 60}$$

$$= 4.375$$

3.2.2.12 ระบบความร้อน

ให้ความร้อนโดยใช้ฮีสเตอร์ เนื่องจากมีคุณสมบัติถ่ายเทความร้อนกับของเหลวทุกชนิด ตัวอย่างการใช้งานเช่น งานต้มน้ำ - ต้มน้ำมัน งานผสมสาร แล้วหุ้มด้วยหลอดแก้วคอสป้องกันการกัดกร่อนของสารละลาย โดยจุ่มลงไปในถังทำงานให้สารละลายเกิดความร้อน

3.2.2.13 ระบบแหล่งจ่ายไฟฟ้า

ใช้หม้อแปลงไฟฟ้ากระแสสลับ (AC) 220 โวลต์ กระแสไฟฟ้าจ่ายเป็นกระแสตรง(DC) ปรับได้ในช่วง 1-24 Volt และมีกระแสไฟฟ้าปรับได้ในช่วง 0-50 แอมแปร์ จ่ายเข้าไปยังขั้วแอโนด (+) และขั้วแคโทด (-) เพื่อทำปฏิกิริยาในการกัดกร่อนโลหะ

3.2.2.14 การไหลเวียนของสารละลาย

ใช้ระบบปั๊มสารละลายที่มีคุณสมบัติสามารถทนกรด และทนความความร้อนดูดสารละลายจากถังพักไปยังถังทำงานสารละลาย มีระบบไส้กรองผงโลหะในตัวปั๊มสารละลายและไหลเวียนได้ตลอดเวลาเพื่อกรองผงโลหะ

1) คำนวณปริมาตรถังบรรจุสารละลาย

V	ปริมาตร	l	=	40 cm^3
l	ความยาวด้านข้าง	b	=	30 cm
A_O	พื้นที่ผิว	h	=	39.2 cm

จากสมการ (2.29) $V = l \times b \times h$

แทนค่า V $= 40 \times 30 \times 39.2 \ cm^3$

$= 47{,}040 \ cm^3$

คำนวณปริมาตรถังปิระมิดตัด

V	ปริมาตร	l_1	=	40 cm^3
H	ความสูง	l_2	=	4 cm
b_1 , b_2	ความกว้าง	h	=	10 cm
l_1 , l_2	ความยาวด้าน	b_1	=	30 cm
A_1	พื้นที่ฐาน	b_2	=	3 cm
A_2	พื้นที่ยอด	h_s	ความสูงของผิวเอียง	

จากสมการ (2.28) $\frac{V}{3} = h \times (A_1 + A_2 + \sqrt{(A_1 \bullet A_2)})$

แทนค่า $= \frac{10}{3} \times (40 + 30 + \sqrt{(40 \bullet 30)})$

$= 3.33 \times (70 + 189.73)$

$= 864.90 \ cm^3$

ปริมาตรรวม $= 47{,}040 + 864.90$

$= 47{,}904.9 \ cm^3$

คำนวณความจุถังสารละลาย (ลิตร)

$$= \frac{47,904.9}{1,000}$$

= 47.9 ลิตร หรือ 48 ลิตร

2) คำนวณปริมาตรช่องถังพักสารละลาย ใช้สูตรเรขาคณิต

คำนวณปริมาตรถังสี่เหลี่ยม

V	ปริมาตร	l	= 40 cm^3
l	ความยาวด้านข้าง	b	= 30 cm
A_O	พื้นที่ผิว	h	= 32 cm

จากสมการ (2.29) V = $l \times b \times h$

แทนค่า V = $40 \times 30 \times 25\ cm^3$

= 30,000 cm^3

คำนวณความจุถังพักสารละลาย (ลิตร)

$$= \frac{30,000}{1,000}$$

= 30 ลิตร

ดังนั้น ปริมาตรสารละลายที่ใช้ในการกัดกร่อนในถังทำงานและถังพักทั้งหมด 78 ลิตร

หาความดันในสารละลายไฮโดรคลอริกในถังสารละลาย

Pe ความดันของเหลวสถิต

e ความหนาแน่นของของเหลว

h ความลึกของของเหลว

g อัตราเร่งของการตก

ที่ความดันของไฮโดรคลอริก 32 ซม. มีความดันเท่าไร

Hcl = 1180 kg / cm^3

g = 9.81 m/s^2

h = 0.32 m.

จากสมการ $Pe = g.\rho.h$

$= 9.81 \times 1180 \times 0.32$

$= 3704.25$ Pa หรือ 0.03 bar

3.2.2.15 ระบบตรวจวัดอุณหภูมิ

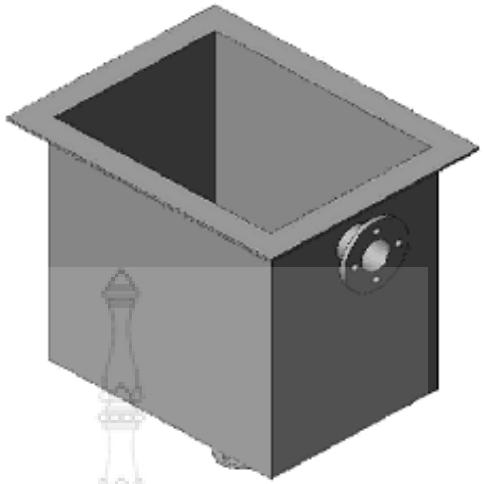
ใช้เทอร์โมมิเตอร์แบบเติมของเหลวในหลอดแก้ว (Liquid-in-Glass Thermometer)เทอร์โมมิเตอร์แบบนี้ใช้วัดอุณหภูมิซึ่งใช้ความแตกต่างของการขยายตัวนี้เป็นตัวบอกระดับอุณหภูมิเทอร์โมสตัท (Thermostat)

ตัวควบคุมอุณหภูมิของระบบการทำงานทำความร้อน เมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลงจะทำให้ความดันในตัวเปราะ (Thermobulb) ไปดันคอนแทคไฟฟ้าเปิด / ปิด ตัวควบคุมอุณหภูมิจะตัดไฟเมื่อมีอุณหภูมิเกินที่กำหนดไว้

3.2.3 การออกแบบ (Design) ส่วนประกอบ

3.2.3.1 การออกแบบถังบรรจุสารละลาย (Tank) เลือกวัสดุที่ทำจากสเตนเลสแผ่น 304 มีคุณสมบัติต้านทานการกัดกร่อนดีมีความแข็งแรงและมีความยืดตัวสูง ทนอุณหภูมิได้สูง สะดวกในงานสร้างประกอบหรือขึ้นรูปทั่วไปได้ ถังบรรจุสารละลายนั้นต้องรับภาระเรื่องน้ำหนักของถังบรรจุชิ้นงาน (Barrel) ทนความร้อนได้แต่ถังที่ทำจากสเตนเลสยังไม่สามารถทนกรดไฮโดรคลอริกได้ดังนั้นด้านในของถังทำงานจึงต้องเคลือบด้วยตะกั่ว มีคุณสมบัติต้านทานการกัดกร่อนได้ดี ความหนาแน่น 11.3 kg/dm^3 จุดหลอมเหลว 327 °C

มีหน้าที่บรรจุสารละลายและบรรจุชิ้นงาน (Barrel) การกัดกร่อนในถังทำงานที่มีขนาด 476 × 376 × 535 มม. มีรูล้นของสารละลายด้านข้างสำหรับไหลลงถังพักสารละลาย และมีท่อระบายสารละลายด้านล่าง



ภาพที่ 3.8 ถังบรรจุสารละลาย (Tank) ขนาด 400 × 300 × 535 มม.

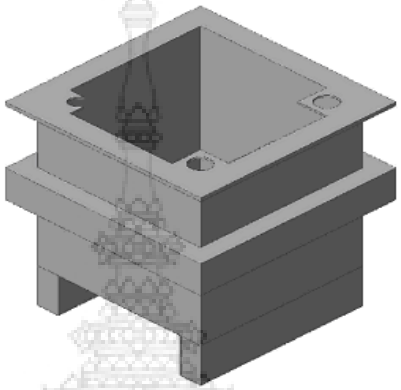
3.2.3.2 การออกแบบโครงใส่ถังบรรจุสารละลาย (Tank) เลือกวัสดุทำจาก สเตนเลสฉาก มีคุณสมบัติต้านทานการกัดกร่อนดีมีความแข็งแรงและมีความยืดตัวสูง ทนอุณหภูมิได้สูง สะดวกในงานสร้าง ประกอบหรือขึ้นรูปทั่วไปได้ ขาตั้งทำจากสเตนเลสแผ่นหนา 3 มม. และผนังกันความร้อนทำจากจากสเตนเลสแผ่นหนา 3 มม. ต้องรับภาระเรื่องน้ำหนักของถังทำงาน

มีหน้าเป็นโครงใส่ถังบรรจุสารละลาย (Tank) และด้านข้างโครงเป็นใยแก้วกันความร้อน ขนาด 402 × 302 × 660 มม.

ภาพที่ 3.9 โครงสร้างถังบรรจุสารละลาย (Tank) ขนาด 402 × 302 × 660 มม.

3.2.3.3 การออกแบบถังพักสารละลาย เลือกวัสดุที่ทำจากพลาสติกโพลีโพรพีลีน

การทนต่อสารเคมี ทนต่อกรดอ่อน ด่างอ่อน ทนแรงกระแทกสูงและทนความร้อนได้สูง รับภาระบรรจุสารละลายเพื่อไหลเวียนไปยังถังทำงาน มีหน้าที่บรรจุสารละลายเพื่อให้ปั๊มดูดสารละลายให้ไหลเวียนไปยังถังบรรจุสารละลาย (Tank) จากนั้นสารละลายล้นกลับมายังถังพักและไหลเวียนตลอดเวลา

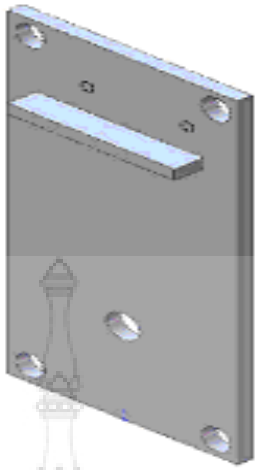


ภาพที่ 3.10 ถังพักสารละลาย ขนาด 430 × 430 × 410 มม.

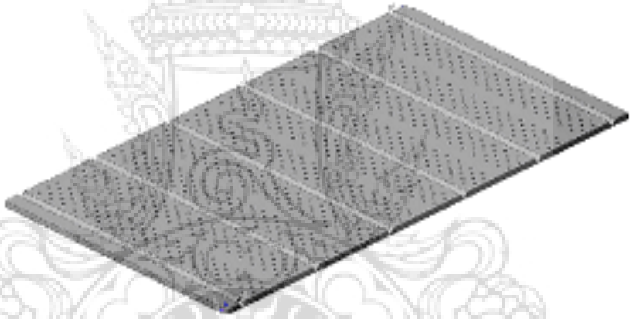
3.2.3.4 ออกแบบถังบรรจุชิ้นงาน (Barrel) เลือกวัสดุที่ทำจากพลาสติกโพลีโพรพีลีน

การทนต่อสารเคมี ทนต่อกรดอ่อน ด่างอ่อน ทนแรงกระแทกสูงและทนความร้อนได้สูง ต้องรับภาระบรรจุชิ้นงาน น้ำหนักของชิ้นงานมีหน้าที่บรรจุชิ้นงานเศษแผ่นมีด ที่สามารถกัดกร่อนได้ในถังบรรจุสารละลาย (Tank) ถังบรรจุชิ้นงาน (Barrel) มีขนาด 160×260×380 มม. สามารถหมุนด้วยความเร็วรอบตามต้องการในช่วง 0 – 20 รอบ/นาที

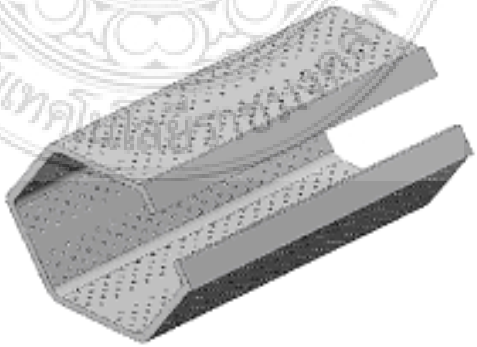
ภาพที่ 3.11 ชิ้นส่วนผนังด้านขวาถังบรรจุชิ้นงาน (Barrel) ขนาด 160×320×10 มม.



ภาพที่ 3.12 ชิ้นส่วนผนังด้านซ้ายถังบรรจุชิ้นงาน (Barrel) ขนาด 160×320×10 มม.

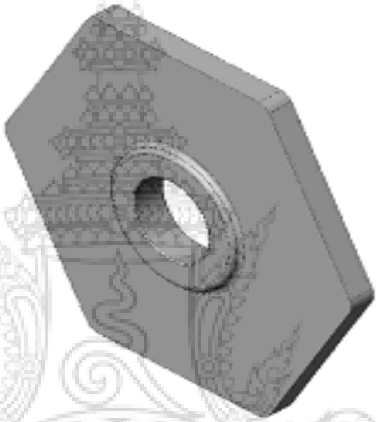


ภาพที่ 3.13 ชิ้นส่วนแผ่นคลี่ถังบรรจุชิ้นงาน (Barrel) ขนาด 186×350×5 มม.



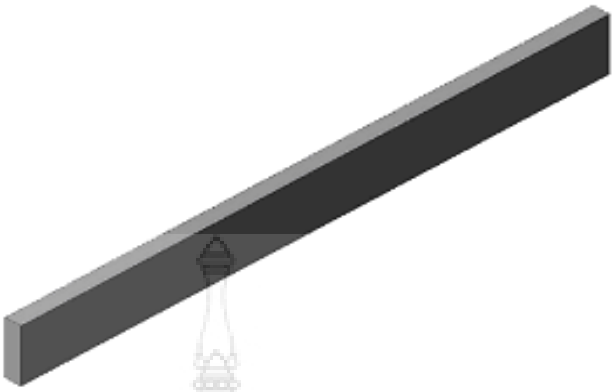
ภาพที่ 3.14 ชิ้นส่วนถังบรรจุชิ้นงาน (Barrel) คัดขึ้นรูป

ภาพที่ 3.15 ชิ้นส่วนเพลายึดผนังถังบรรจุชิ้นงาน (Barrel) ขนาดความโต 20×260 มม.

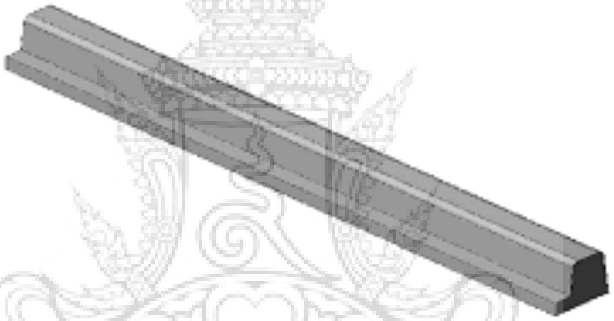


ภาพที่ 3.16 ชิ้นส่วนฝาประกบข้างถังบรรจุชิ้นงาน (Barrel) ขนาด 150 ×212 มม. เจาะรูยึดบูช 32 มม.

ภาพที่ 3.17 ชิ้นส่วนเฟืองตามประกบข้างถังบรรจุชิ้นงาน ขนาดความโต 152.4 มม. 10 DP จำนวนฟัน 70 ฟัน เจาะรูยึดบูช 32 มม.



ภาพที่ 3.18 ชิ้นส่วนคานยึดถังบรรจุชิ้นงาน (Barrel) ขนาด 18×186×5 มม.

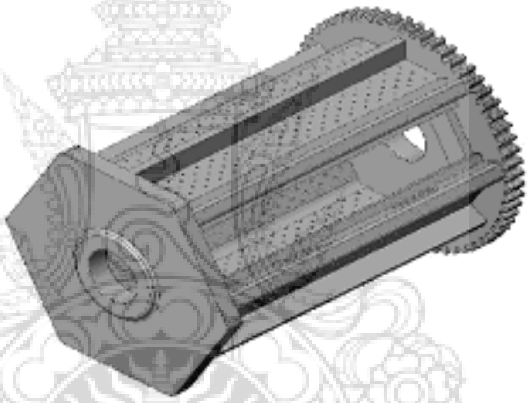


ภาพที่ 3.19 ชิ้นส่วนขอบฝาปิดถัง (Barrel) ด้านขวา ขนาด 18×186×17 มม.

ภาพที่ 3.20 ชิ้นส่วนขอบล็อกปิดฝาถังบรรจุชิ้นงาน ด้านซ้าย ขนาด 18×186×17 มม. เจาะรูยึดฝาถังหมุน (Barrel) ขนาด 3×27 มม.

รูปที่ 3.21 ชิ้นส่วนฝาปิดถังบรรจุชิ้นงาน (Barrel) ขนาด 40×186 ×8 มม.
เจาะรูยึดหมุดล็อกฝาปิด ขนาดความโต 5 มม.

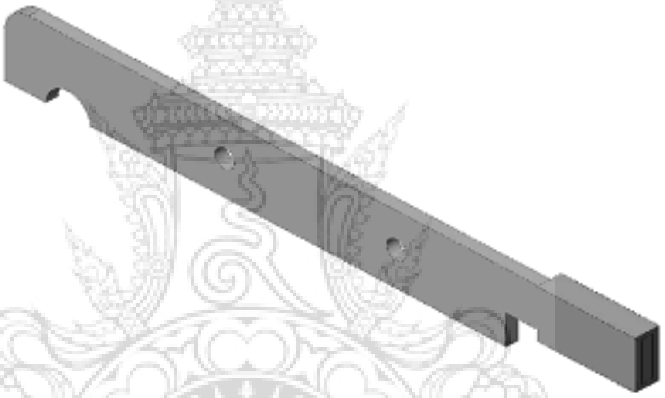
.



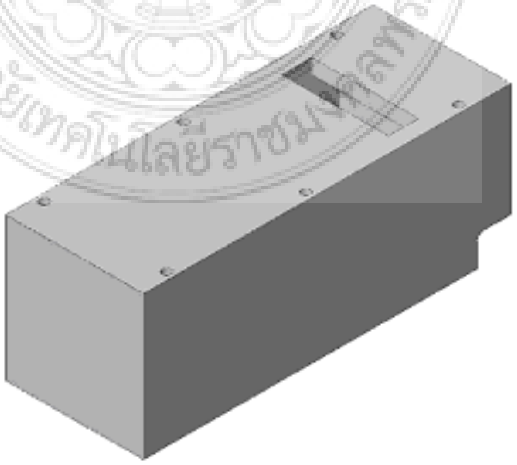
ภาพที่ 3.22 ลักษณะประกอบถังบรรจุชิ้นงาน (Barrel)

ภาพที่ 3.23 ชิ้นส่วนเฟืองทดถังบรรจุชิ้นงาน (Barrel) ขนาดความโต 131 มม. 10 DP
จำนวนฟัน 60 ฟัน

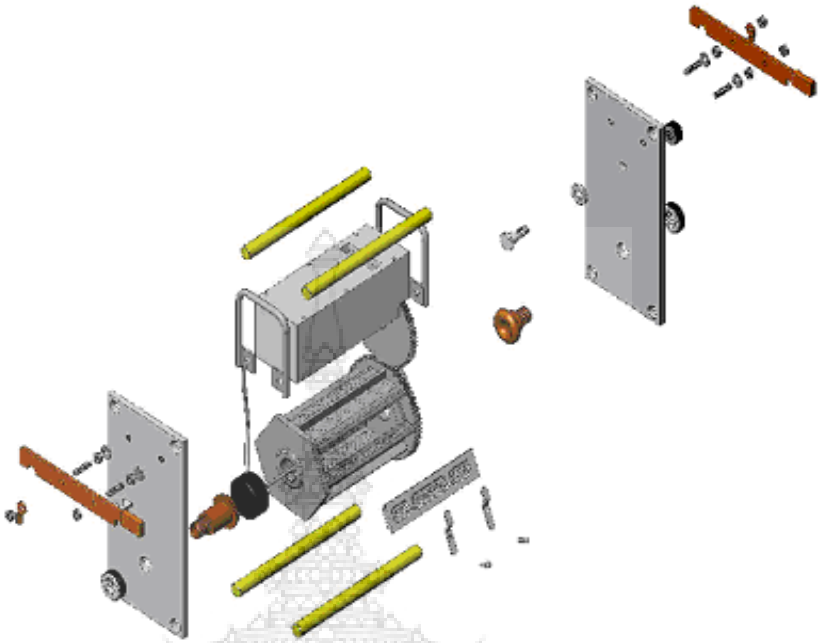
ภาพที่ 3.24 ชิ้นส่วนเฟืองขับถังบรรจุชิ้นงาน (Barrel) ขนาดความโต 38 มม. 10 DP จำนวนฟัน 60 ฟัน



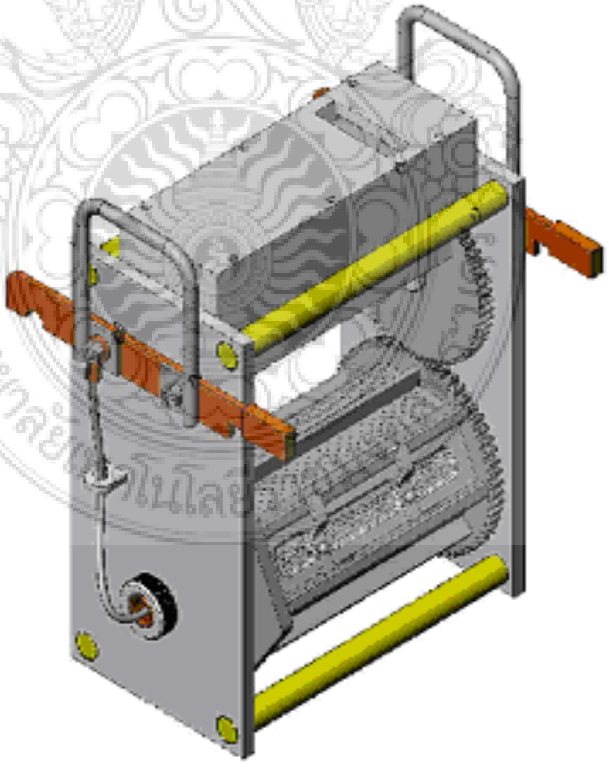
ภาพที่ 3.25 ชิ้นส่วนแผ่นทองแดงยึดถังบรรจุชิ้นงาน (Barrel) ให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านไปยังขั้วบวก (+) ขนาด 30×260×5 มม. เจาะรูยึดกับผนังความโต 8 มม.



ภาพที่ 3.26 ชิ้นส่วนกล่องใส่มอเตอร์ถังบรรจุชิ้นงาน (Barrel) ขนาด 95×240×95 มม.



ภาพที่ 3.27 ลักษณะการประกอบถังบรรจุชิ้นงาน (Barrel)



ภาพที่ 3.28 ถังบรรจุชิ้นงาน (Barrel)

3.2.4 การออกแบบการทดลอง

การออกแบบทดลองมีขั้นตอนดำเนินการ ดังนี้

3.2.4.1 ศึกษาคุณสมบัติของทังสเตนคาร์ไบด์

3.2.4.2 ศึกษาชนิดและประเภทของแผ่นมีดตัด (Inserts tools)

3.2.4.3 เตรียมวัสดุสำหรับการทดลอง

3.2.4.4 ศึกษาสารละลายที่ใช้การทดลอง

3.2.4.5 ออกแบบวิธีการทดลองสลายโดยใช้ระบบเคมีไฟฟ้า

3.2.4.6 ทำการทดลองตามแผนการทดลองที่วางไว้

3.2.4.7 แยกสลายเศษแผ่นมีดตัดที่ผ่านการใช้งานแล้ว

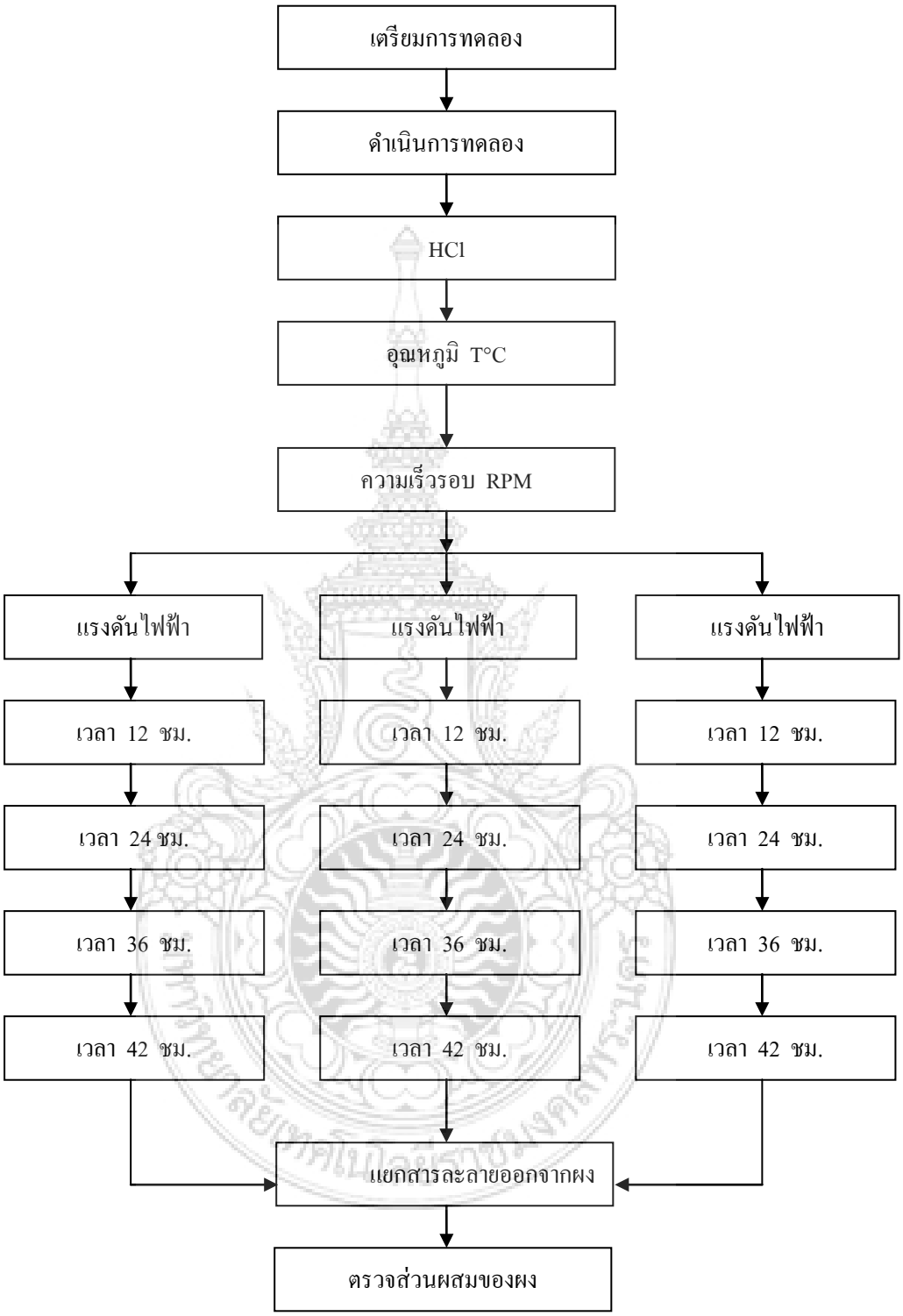
3.2.4.8 ตรวจสอบคุณสมบัติของผงโลหะซีเมนต์ทังสเตนที่ได้จากการทดลอง

3.2.4.9 เก็บรวบรวมผลที่ได้จากการทดลอง

3.2.4.10 ตรวจสอบคุณภาพผงโลหะ

3.2.4.11 วิเคราะห์ผลการทดลอง

3.2.4.12 สรุปผลการทดลอง



ภาพที่ 3.29 แผนภูมิการกำหนดตัวแปรในการทดลอง

3.2.5 วัดประสิทธิภาพของเครื่อง

3.2.5.1 วัดประสิทธิภาพเครื่อง

ความสามารถในการทำงานของเครื่องว่าสามารทำการกัดกร่อนโลหะได้หรือไม่ และวัสดุที่สร้างเครื่องสามารถทนกรดทนความร้อนได้หรือไม่

3.2.5.2 วัดประสิทธิภาพแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้า มีประสิทธิภาพในการกัดกร่อนได้ดี และสามารถปรับแรงดันไฟฟ้าต่ำๆ ได้

3.2.5.3 วัดประสิทธิภาพเศษผงโลหะที่ได้จากการกัดกร่อน ตรวจสอบผงโลหะที่ได้จากการกัดกร่อนแต่ละครั้ง ดูคุณสมบัติด้วยเครื่อง X-Ray Diffractometer (XRD), X-ray fluorescence spectrometry (XRF) และวัดขนาดอนุภาคด้วยวิธี Laser Diffraction Technique ว่าผงโลหะที่สลายมีความบริสุทธิ์หรือไม่

3.2.6 สรุปผลการดำเนินการออกแบบและสร้างเครื่องสลายเศษโลหะ

จากการออกแบบเครื่องกัดกร่อนโลหะ 3 แบบ คือ แบบที่ 1 เครื่องกัดกร่อนโลหะกึ่งอัตโนมัติแบบคัดกรองผงโลหะแยก 3 ส่วน แบบที่ 2 เครื่องกัดกร่อนโลหะกึ่งอัตโนมัติแบบโครงสร้างเดียวและ แบบที่ 3 เครื่องกัดกร่อนโลหะกึ่งอัตโนมัติแบบแยกส่วน จากหลักการที่ใช้ออกแบบได้มีการปรับปรุงหลักการทำงานเพื่อให้เครื่องนั้นมีประสิทธิภาพในการทำงาน และปลอดภัยกับผู้ปฏิบัติงานเครื่องกัดกร่อนโลหะเคมีไฟฟ้า ประกอบด้วย 3 ส่วนหลักคือ ส่วนที่ 1 ถังทำงานทำจากสเตนเลส 304 บรรจุสารละลายที่ใช้ในการสลาย ส่วนที่ 2 เป็นถังพักสารละลายทำจากพลาสติกโพลีโพรพีลีน บรรจุสารละลายเพื่อไหลเวียนไปยังถังทำงาน และส่วนที่ 3 เป็นถังบรรจุชิ้นงาน (Barrel) ทำจากพลาสติกโพลีโพรพีลีน เพื่อบรรจุเศษแผ่นมีดสลายในถังทำงาน และติดตั้งอุปกรณ์ต่างๆ ในการสลายด้วยกระบวนการเคมีไฟฟ้า

3.3 การศึกษาประสิทธิภาพการผลิต

3.3.1 ศึกษาการทำงานของเครื่องย่อยสลาย

การศึกษาประสิทธิภาพการผลิตของชุดอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการทดลองย่อยเศษโลหะนั้นเพื่อเป็นการทดลองใช้เครื่องย่อยหลังจากที่ได้ดำเนิกการสร้าง ซึ่งมีชุดอุปกรณ์ดังนี้

3.3.1.1 เครื่องกำเนิดกระแสไฟฟ้า (Power Supply)

เครื่องกำเนิดกระแสไฟฟ้าจะทำหน้าที่จ่ายกระแสไฟฟ้าให้ขั้วบวก จากนั้นกระแสไฟฟ้าจะวิ่งไปตามขั้วบวกเข้าสู่แท่งทองแดงซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวเชื่อมระหว่างแหล่งจ่ายกับแผ่นตัวนำไฟฟ้า ก่อนที่กระแสจะวิ่งผ่านแผ่นตัวนำกระแสไฟฟ้า และ เข้าสู่สารละลายไฮโดรคลอริกเพื่อทำการย่อยสลายเศษทังสเตนคาร์ไบด์ ก่อนที่จะเข้าสู่ขั้วลบ และกลับเข้าแหล่งจ่ายทำให้ครบวงจรกระแสไฟฟ้า จึงเกิดกระบวนการย่อยสลายด้วยไฟฟ้าที่สมบูรณ์

3.3.1.2 เครื่องควบคุมอุณหภูมิ (Temperature Control)

เครื่องควบคุมอุณหภูมิทำหน้าที่ปรับสภาพอุณหภูมิในสารละลายให้ได้ค่าตามที่ต้องการ เนื่องจากการทำกระบวนการย่อยสลายนั้น อุณหภูมิก็เป็นส่วนสำคัญที่ทำให้เศษทังสเตนคาร์ไบด์ย่อยสลายได้ดี

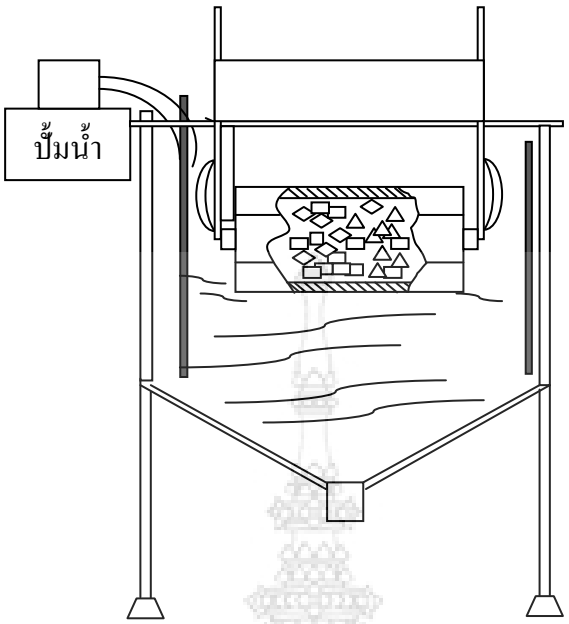
3.3.1.3 ปั๊มน้ำ (Pump)

เมื่อสารละลายในถังหลักไม่มีการเคลื่อนที่หรือหมุนเวียน การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนในสารละลายก็จะไม่สะดวกเนื่องจากมีเศษผงทังสเตนคาร์ไบด์จำนวนมากลอยอยู่ในสารละลายทำให้การเคลื่อนที่ของกระแสไฟฟ้าที่จะวิ่งเข้าสู่ขั้วลบก็จะเป็นไปได้อย่างลำบาก ดังนั้นปั๊มสูบน้ำจะทำหน้าที่ดูดน้ำจากถังพักวนกลับสู่ถังหลักเพื่อให้ผงที่ปะปนอยู่ในสารละลายมีการเคลื่อนที่ และทำให้กระแสไฟฟ้าเคลื่อนที่ในสารละลายได้สะดวกเช่นกัน

3.3.1.4 บาร์เรล (Barrel)

บาร์เรลมีหน้าที่บรรจุเศษทังสเตนคาร์ไบด์ก่อนจะนำไปวางประกอบเข้ากับขั้วลบ ภายในบาร์เรลประกอบด้วย 2 ส่วนคือ

1) ส่วนที่บรรจุเศษทังสเตนคาร์ไบด์
2) มอเตอร์ไฟฟ้าและชุดเฟืองขับ



ภาพที่ 3.30 เครื่องย่อยสลาย [2]

3.3.2 ศึกษาการตรวจสอบคุณสมบัติของผงทังสเตนคาร์ไบด์

การตรวจสอบคุณสมบัติของผงทังสเตนคาร์ไบด์จะเป็นการตรวจสอบในส่วนของ ขนาดของผงทังสเตนคาร์ไบด์ และ การกระจาย,สารประกอบในผงทังสเตนคาร์ไบด์ และ รูปทรงของผงทังสเตนคาร์ไบด์ ซึ่งมีรายละเอียดต่าง ๆ ดังนี้

1) เครื่องวัดขนาดอนุภาค (Particle Size Analyzer)

เป็นเครื่องมือสำหรับตรวจวัดการกระจายตัวของอนุภาคของสารตัวอย่างที่มีขนาดต่างๆ กัน ซึ่งมีความถูกต้องแม่นยำสูง

ภาพที่ 3.31 เครื่องวัดขนาดอนุภาค (Particle size analyzer) ผลิตภัณฑ์ Malvern รุ่น Zetasizer ZS

2) เครื่องวิเคราะห์หาองค์ประกอบ X-Ray diffraction (XRD)

คุณสมบัติทั่วไปเป็นเครื่องมือวิเคราะห์เพื่อศึกษาโครงสร้างของผลึก (Crystal Structure) ดูการจัดเรียงตัวของอะตอมในโมเลกุลของสารประกอบต่างๆ และวิเคราะห์หาองค์ประกอบของธาตุได้ทั้งเชิงปริมาณ และเชิงคุณภาพ โดยอาศัยหลักการ X-ray Diffractometer ซึ่งเป็นการเลี้ยวเบนและการกระเจิงของรังสีเอ็กซ์ ซึ่งเกิดจากการปล่อยกระแสไฟฟ้าเข้าขั้วแคโทดทำให้อิเล็กตรอนจับกันหนาแน่น เกิดความต่างศักย์ระหว่างขั้วแคโทดและแอโนด ทำให้อิเล็กตรอนวิ่งเข้าชนเป้าที่ขั้วแอโนด แล้วมีการปลดปล่อยรังสีเอ็กซ์ออกมาชนกับ ชิ้นงานตัวอย่างแล้วเกิดอันตรกิริยาต่างๆบนชิ้นงาน ส่วนรังสีที่สะท้อนกลับมาจะถูกตรวจวัดด้วยชุด Detector เพื่อแปลงสัญญาณออกมาในรูป Diffractogram โดยควบคุมด้วยระบบคอมพิวเตอร์

ภาพที่ 3.32 เครื่อง X-ray Diffractometer

คุณสมบัติพิเศษมีดังนี้

ก) ชุด Goniometer เป็นแบบ Vertical 0-0

ข) มีระบบโฟกัสลำแสงแบบ Polycapillary

ค) สามารถวิเคราะห์แบบ Qualitative ได้

ง) สามารถวิเคราะห์แบบ Crystalline Structural analysis ได้

จ) สามารถวิเคราะห์แบบ State Analysis ได้

ฉ) รัศมี Goniometer ได้ถึง 275 มม.

เครื่องมือวิเคราะห์นี้สามารถนำไปใช้กับงานเหล่านี้ได้ เช่น อุตสาหกรรมด้านโลหะและอโลหะ อุตสาหกรรมด้านเครื่องจักรกล รถยนต์ การสร้างเรือ งานด้านเคมีและCatalysts งานด้านเซรามิก งานด้านอุตสาหกรรมผลิตยา ด้านวัสดุทำฟัน งานอุตสาหกรรมด้านไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ งานด้านโครงสร้าง งานด้านสิ่งแวดล้อม งานด้านพลังงาน และอื่นๆ

ภาพที่ 3.33 Scanning Electron Microscope

3) กล้องจุลทัศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน Scanning Electron Microscope (SEM)

เป็นเครื่องมือวิทยาศาสตร์ช่วยสายตา ประเภทกล้องจุลทัศน์ ที่ใช้ลำแสงอิเล็กตรอน ฉายหรือส่องกรวดไปบนผิวของตัวอย่างที่ต้องการตรวจสอบให้ได้ข้อมูลของลักษณะ พื้นผิวปรากฏเป็นภาพขยายที่สามารถมองเห็น ได้ด้วยตาเปล่าหรืออาจบันทึกภาพที่บนแผ่นฟิล์มได้กล้องจุลทัศน์อิเล็กตรอน แบบสแกนซึ่งรายละเอียดของเครื่องมีดังนี้

ก) กำลังขยาย (Magnification) 10X-100,000X

ข) การแจกแจงรายละเอียด (Resolution) 6-10nanometer

ค) การปรากฏของภาพ (Imageformation) ภาพเกิดจากสัญญาณ(เกิดทางอ้อม)

ง) ลักษณะของภาพ (Typeofimage) ภาพ3มิติเห็นความลึก

จ) การประยุกต์(Applications) ศึกษาราย ละเอียดของพื้นผิว

ฉ) ขนาดตัวอย่างใหญ่ถึง50nm

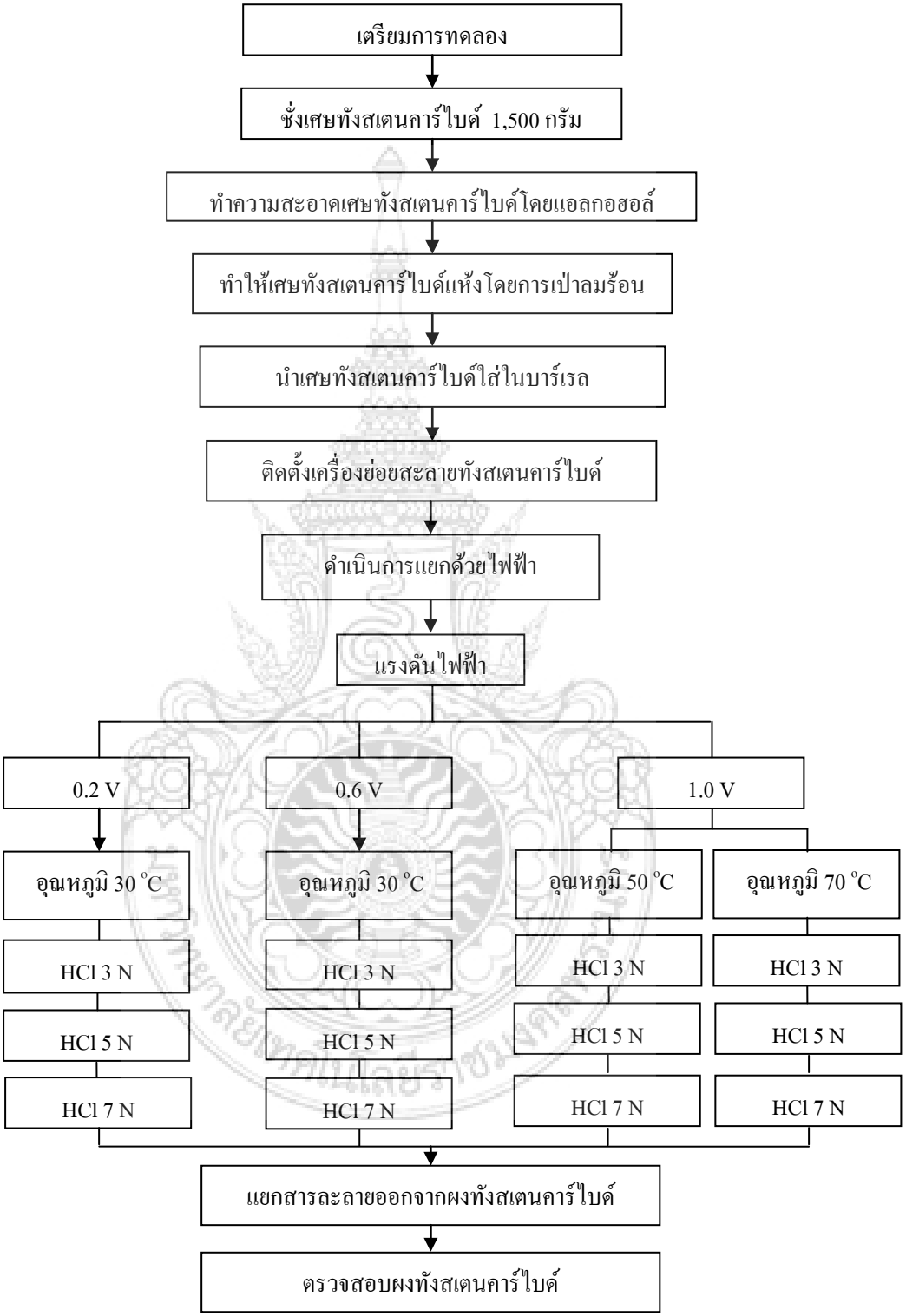
3.3.3 วิเคราะห์ข้อมูล

จากการนำเนื้อหาของทฤษฎีที่เกี่ยวข้องซึ่งประกอบด้วย สารละลายไฮโดรคลอริก การนำกระแสไฟฟ้าในสารละลาย แรงดันไฟฟ้าที่เหมาะสมต่อการย่อยสลายเศษทังสเตนคาร์ไบด์และอุณหภูมิในการย่อยสลายเศษทังสเตนคาร์ไบด์ มาทำการศึกษาเพื่อจะนำมาปรับปรุงการทดลองให้ใกล้เคียงกับสภาพความเป็นจริงและได้มาซึ่งผลการทดลอง โดยมีเนื้อหาเป็นแนวทางเดียวกับทฤษฎีที่นำมาใช้ประกอบการทดลอง ซึ่งมีรายละเอียดการวิเคราะห์ข้อมูลดังนี้

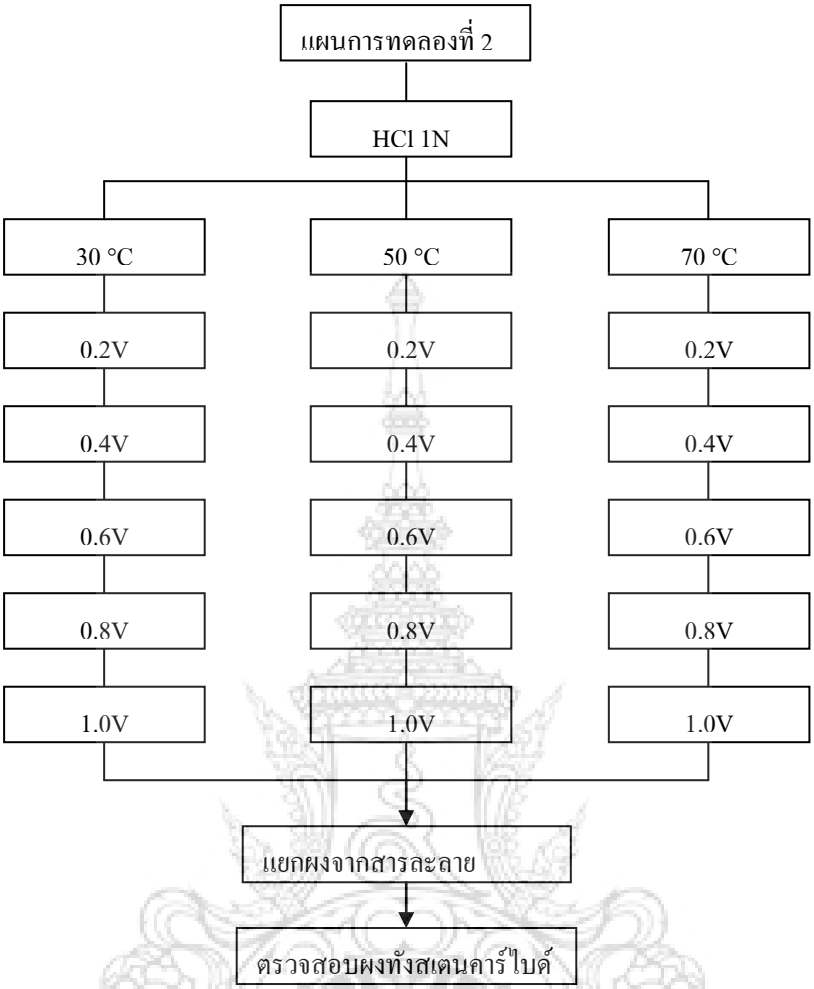
แสดงความสัมพันธ์ของการย่อยสลายเศษทังสเตนคาร์ไบด์ซึ่งถูกประสานโดยโคบอลต์ สามารถสรุปได้ว่าการย่อยสลายเศษทังสเตนคาร์ไบด์จนได้เป็นโลหะผงทังสเตนคาร์ไบด์ผลที่ได้จะมีขนาดอนุภาคที่แตกต่างกันซึ่งจะถูกแบ่งนำไปใช้งานตามขนาดอนุภาคและตามอัตราส่วนผสมของโคบอลต์ โดยการย่อยสลายเศษทังสเตนคาร์ไบด์นั้นได้เลือกวิธีการแยกสารด้วยไฟฟ้า เนื่องจากการศึกษาข้อมูลเกี่ยวกับสารละลายไฮโดรคลอริกได้ข้อสรุปว่าสารละลายไฮโดรคลอริกมีความสามารถในนำพากระแสไฟฟ้าในสารละลายได้ดี การเลือกแรงดันไฟฟ้าได้ศึกษาข้อมูลจากวิธีการละลายตัวประสานโคบอลต์จากเศษของซีเมนต์ทังสเตนคาร์ไบด์ในสารละลาย (Selective dissolution of the cobalt binder from scraps of cemented tungsten carbide in acids containing additives) ผู้วิจัยได้เขียนบทความเกี่ยวกับแรงดันไฟฟ้าไว้ว่ากระบวนการแยกสารนั้นต้องใช้แรงดันไฟฟ้าที่ 200 - 600 mV จึงจะมีการถ่ายเทไอออนในสารละลาย เมื่อศึกษาจากตารางที่ 2.1

การวิเคราะห์อุณหภูมิที่ใช้ในการทดลองจากการศึกษาทฤษฎีกระบวนการนำ WC-Co กลับมาใช้ใหม่ด้วยวิธีไฮโดรเทอร์มอล ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับกระบวนการย่อยสลายด้วยสารละลายไฮโดรคลอริก ได้มีข้อมูลการสกัดโคบอลต์โดยการเร่งอุณหภูมิทำให้เปิดปฏิกิริยาการกัดกร่อนซึ่งผลปรากฏว่าการสกัดโคบอลต์ได้สูงสุดที่อุณหภูมิ 110 ˚C เมื่อเร่งอุณหภูมิสูงเกิน 110 ˚C ผลการสกัดโคบอลต์ที่ได้นั้นมีจำนวนการสกัดที่คงที่ ดังนั้นการใช้อุณหภูมิอยู่ในช่วงไม่เกิน 110 ˚C จึงเป็นเหตุผลในการเลือกใช้อุณหภูมิ แต่เนื่องจากอุปกรณ์การทดลองมีขีดจำกัดในการใช้อุณหภูมิ จึงได้เลือกใช้อุณหภูมิที่ไม่ควรจะสูงมากแต่อยู่ในระดับที่แตกต่างกันคือที่ 30, 50 และ70 ˚C เป็นปัจจัยในการทดลอง

3.3.4 ออกแบบการทดลอง



ภาพที่ 3.34 แสดงแผนการทดลองที่ 1



ภาพที่ 3.35 แสดงแผนการทดลองที่ 2

3.3.5 ขั้นตอนการทดลอง

3.3.5.1 ขั้นตอนการเตรียมอุปกรณ์และทดลองการย่อยสลาย

1) ชั่งน้ำหนักเศษซีเมนต์ทังสเตนคาร์ไบด์

เริ่มการทดลองโดยการชั่งน้ำหนักเศษทังสเตนคาร์ไบด์ 1500 กรัม เพื่อนำไปใช้ในกระบวนการแยกสลายเศษซีเมนต์ทังสเตนคาร์ไบด์

2) ทำความสะอาดเศษซีเมนต์ทังสเตนคาร์ไบด์

นำเศษทังสเตนคาร์ไบด์ที่ผ่านการชั่งน้ำหนักมาทำความสะอาดเพื่อให้สิ่งสกปรกที่เกาะบนผิวของเศษซีเมนต์ทังสเตนคาร์ไบด์หมดไป โดยการใช้แอลกอฮอล์ในการทำความสะอาด

ภาพที่ 3.36 ทำความสะอาดเศษทังสเตนคาร์ไบด์โดยใช้แอลกอฮอล์

จากภาพที่ 3.6 แสดงการทำความสะอาดเศษซีเมนต์ทังสเตนคาร์ไบด์โดยการนำเอาเศษซีเมนต์ทังสเตนคาร์ไบด์แช่ลงในแอลกอฮอล์เพื่อขจัดสิ่งสกปรก หลังจากนั้นนำเอาเศษซีเมนต์ทังสเตนคาร์ไบด์ออกจากบีกเกอร์และทำให้เศษซีเมนต์ทังสเตนคาร์ไบด์แห้งสนิทก่อนนำไปใช้ในการทดลอง

3) เติมกรดไฮโดรคลอริกลงในถังการทดลอง

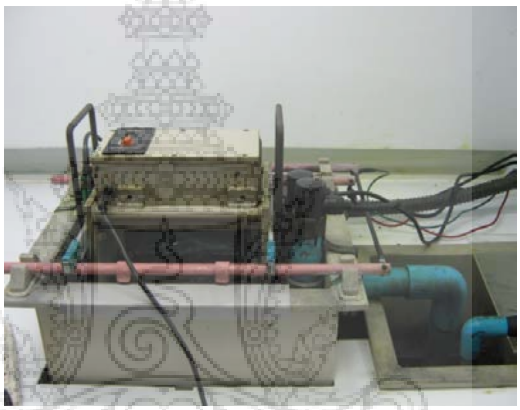
นำกรดไฮโดรคลอริกที่ตรงตามปัจจัยต้องการทดลองเติมลงถังการทดลองในระดับที่เหมาะสมเพื่อให้กระแสไฟฟ้าจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเกิดการนำพาไอออนในสารละลายได้ดีและต่อเนื่อง

ภาพที่ 3.37 เติมสารละลายไฮโดรคลอริกลงในถังทดลอง

ภาพที่ 3.37 แสดงการเติมสารละลายไฮโดรคลอริกลงในถังทดลองซึ่งถังทดลองนั้นประกอบด้วยถังหลักและถังพัก โดยที่ถังหลักมีหน้าที่รองรับโลหะผงทังสเตนคาร์ไบด์และเศษทังสเตนคาร์ไบด์ที่ผ่านการย่อยสลายจนกลายเป็นเศษเล็ก ส่วนถังพักมีหน้าที่นำกรดไฮโดรคลอริกจากถังหลักไหลวนกลับเข้าสู่ถังหลักอีกครั้งส่งผลให้การนำพาไอออนในสารละลายไฮโดรคลอริกสะดวกยิ่งขึ้น

4) ดำเนินการแยกสลายเศษซีเมนต์ทังสเตนคาร์ไบด์

เมื่อนำบาร์เรลประกอบกับแท่งนำกระแสไฟฟ้าเรียบร้อยแล้ว จากนั้นเปิดสวิตช์ให้บาร์เรลเกิดการหมุนภายในถังทดลอง โดยกระบวนการย่อยสลายใช้เวลา 12 ชั่วโมง



ภาพที่ 3.38 เริ่มกระบวนการแยกสลายเศษทังสเตนคาร์ไบด์

จากภาพที่ 3.38 เป็นกระบวนการแยกสลายเศษทังสเตนคาร์ไบด์ด้วยกระแสไฟฟ้า ซึ่งบาร์เรลภายในถังทดลองมีการหมุนอย่างสม่ำเสมอส่งผลให้กรดไฮโดรคลอริกมีการนำพาไอออนอย่างต่อเนื่อง

3.3.5.2. ขั้นตอนการชั่งน้ำหนักเศษซีเมนต์ทังสเตนคาร์ไบด์

1) ปิดสวิตช์เครื่องกำเนิดกระแสไฟฟ้า บาร์เรล เครื่องควบคุมอุณหภูมิและปั๊มน้ำตามลำดับการชั่งน้ำหนักเศษซีเมนต์ทังสเตนคาร์ไบด์จำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องปิดอุปกรณ์ไฟฟ้าดังที่กล่าวมาข้างต้นก่อนที่จะนำบาร์เรลออกจากถังทดลอง เพื่อป้องกันอันตรายต่อชีวิตและความเสียหายของอุปกรณ์

2) นำเศษซีเมนต์ทังสเตนคาร์ไบด์ออกจากบาร์เรลและทำให้แห้งโดยทำการเป่าลมร้อนนำบาร์เรลออกจากถังทดลอง หลังจากนั้นเปิดฝาและนำเศษทังสเตนคาร์ไบด์ในบาร์เรลใส่ลงในภาชนะที่รองรับด้วยความระมัดระวัง

3) เก็บรวบรวมเศษเล็กในขณะที่มีการแยกสลายของเศษซีเมนต์ทังสเตนคาร์ไบด์ภายในบาร์เรลจะมีเศษซีเมนต์ทังสเตนคาร์ไบด์ที่เป็นเศษเล็กปะปนภายในบาร์เรล ดังนั้นจึงจำเป็นที่จะต้องเก็บรวบรวมและคัดแยกออกมาจากบาร์เรลเพื่อป้องกันมิให้เศษเล็กปะปนกับโลหะผงทังสเตนคาร์ไบด์

ภาพที่ 3.39 ทำการแยกเศษเล็กแล้วเก็บในภาชนะบรรจุให้เรียบร้อย

จากภาพที่ 3.39 เป็นการคัดแยกเศษเล็กที่ปะปนอยู่ในบาร์เรล จากนั้นนำไปเก็บในภาชนะบรรจุให้เรียบร้อยก่อนนำไปชั่งน้ำหนัก

3.3.5.3. ขั้นตอนการแยกโลหะผงทังสเตนคาร์ไบด์ออกจากสารละลาย

1) ทำการถ่ายสารละลายไฮโดรคลอริกจากถังทดลอง

ภาพที่ 3.40 แสดงสารละลายไฮโดรคลอริกในบีกเกอร์และรอการตกตะกอนของโลหผงทังสเตนคาร์ไบด์

จากภาพที่ 3.40 แสดงสารละลายไฮโดรคลอริกภายในบีกเกอร์จะสังเกตเห็นว่าสารละลายไฮโดรคลอริกมีสีเข้มข้นซึ่งเกิดจากโลหะผงทังสเตนคาร์ไบด์แขวนลอยในสารละลายไฮโดรคลอริก ดังนั้นจึงต้องรอการตกตะกอนของโลหะผงทังสเตนคาร์ไบด์

2) การเทผ่านตะแกรงสเตนเลสเพื่อกรองเศษเล็กออกจนเหลือแต่โลหะผงทังสเตนคาร์ไบด์เท่านั้นเมื่อโลหะผงทังสเตนคาร์ไบด์ตกตะกอนเรียบร้อยแล้วจึงทำการกรองสารละลายไฮโดรคลอริกออกจากบีกเกอร์ พร้อมกับกรองเศษเล็กที่ปะปนออกจากโลหะทังสเตนคาร์ไบด์

ภาพที่ 3.41 การกรองเศษด้วยตะแกรงสเตนเลส

จากภาพที่ 3.41 แสดงการกรองเศษเล็กผ่านตะแกรงสเตนเลส หลังจากกรองเป็นที่เรียบร้อนแล้ว เก็บเศษเล็กที่ผ่านการกรองใส่ภาชนะบรรจุให้เรียบร้อย

3) ทำการล้างเศษโลหะผงทังสเตนคาร์ไบด์ที่ติดอยู่ขอบบีกเกอร์ด้วยแอลกอฮอล์เมื่อเทสารละลายไฮโดรคลอริกรวมกันเป็นบีกเกอร์เดียวหลังจากนั้นให้ชำระล้างเศษโลหะผงทังสเตนคาร์ไบด์ที่ติดอยู่ขอบบีกเกอร์ด้วยแอลกอฮอล์

ภาพที่ 3.42 การล้างขอบบีกเกอร์ด้วยแอลกอฮอล์

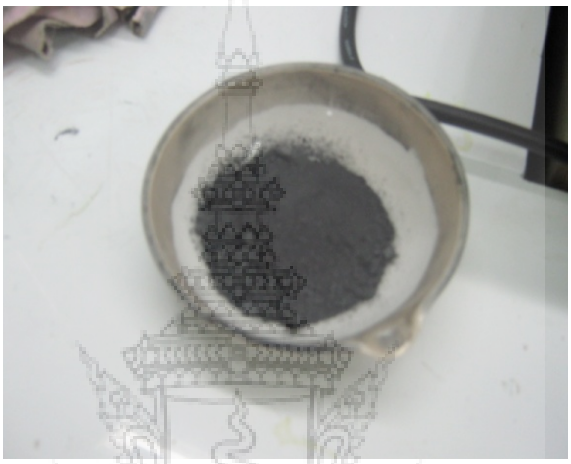
จากภาพที่ 3.42 แสดงการชำระล้างขอบบีกเกอร์ด้วยแอลกฮอล์ เพื่อทำให้โลหะผงทังสเตนคาร์ไบด์ที่ติดขอบบีกเกอร์หลุดไป เนื่องจากแอลกฮอล์มีจุดเดือดที่ต่ำกว่าสารละลายไฮโดรคลอริก จึงทำให้สารละลายระเหยออกจากบีกเกอร์ได้อย่างรวดเร็ว

4) นำตะกอนเศษทังสเตนคาร์ไบด์ที่ผ่านการกรองไปให้ความร้อนด้วยเตาไฟฟ้า เพื่อทำให้สารละลายที่อยู่ในบีกเกอร์ระเหยออกไปจนเหลือแต่โลหะผงทังสเตนคาร์ไบด์

ภาพที่ 3.43 การแยกโลหะผงทังสเตนคาร์ไบด์ออกจากสารละลายไฮโดรคลอริกโดยการให้ความร้อน

จากภาพที่ 3.43 แสดงการให้ความร้อนโดยการใช้เตาไฟฟ้าเพื่อให้สารละลายภายในบีกเกอร์ระเหยออกไปและเหลือแต่โลหะผงทังสเตนคาร์ไบด์

5) บดโลหะผงทังสเตนคาร์ไบด์ให้ละเอียดหลังจากที่สารละลายไฮโดรคลอริกได้ระเหยออกไปแล้วโลหะผงทังสเตนคาร์ไบด์ยังคงมีความเปียกชื้นและจับตัวกันเป็นก้อน ดังนั้นต้องบดให้ละเอียด



ภาพที่ 3.44 โลหะผงทังสเตนคาร์ไบด์ที่ผ่านกระบวนการแยกสลาย

ภาพที่ 3.44 แสดงโลหะผงทังสเตนคาร์ไบด์ภายในภาชนะกันความร้อน เนื่องจากโลหะผงทังสเตนคาร์ไบด์ที่ผ่านการให้ความร้อนจนสารละลายระเหยออกไปหมด แต่โลหะผงทังสเตนคาร์ไบด์ยังคงจับตัวกันเป็นก้อน ดังนั้นจึงต้องบดเพื่อให้ผงทังสเตนคาร์ไบด์มีความละเอียดและแยกออกจากกัน

6) ชั่งน้ำหนักโลหะผงทังสเตนคาร์ไบด์และการเก็บรักษาหลังจากโลหะผงทังสเตนคาร์ไบด์ผ่านการบดให้ละเอียดเรียบร้อยแล้ว นำมาใส่ภาชนะบรรจุให้เรียบร้อยก่อนจะนำไปชั่งน้ำหนักและเก็บรักษาโลหะผงทังสเตนคาร์ไบด์ในภาชนะป้องกันความชื้น

ภาพที่ 3.45 การโลหะผงทังสเตนคาร์ไบด์

ภาพที่ 3.46 การเก็บรักษาโลหะผงทังสเตนคาร์ไบด์เพื่อป้องกันความชื้น

3.3.6 บันทึกผลและรวบรวมข้อมูล

ทำการบันทึกข้อมูลที่ได้จากการทดลองขั้นต้นโดยละเอียดแล้วนำข้อมูลที่ได้มาทำการเปรียบเทียบทุก ๆ การทดลองเพื่อหาปัจจัยที่เหมาะสมในการผลิตโลหะผงทังสเตนคาร์ไบด์ในการจดบันทึกและเปรียบเทียบประกอบด้วย

ตารางบันทึกผลการทดลองโดยการทำตารางบันทึกผลการทดลองเพื่อใช้ในการเก็บข้อมูลต่างๆ ที่ได้จากการทดลอง เพื่อง่ายต่อการนำข้อมูลมาทำการวิเคราะห์และเปรียบเทียบเช่น ตารางบันทึกข้อมูลการสลายของชิ้นส่วนทังสเตนคาร์ไบด์ในการทดลองแต่ละครั้ง ตารางบันทึกผลการชั่งน้ำหนักเปรียบเทียบน้ำหนักก่อนและหลังการย่อยชิ้นงาน ตารางบันทึกผลการแยกสลายของชิ้นส่วนทังสเตนคาร์ไบด์กับสารละลายไฮโดรคลอริก

ตารางที่ 3.7 บันทึกผลการทดลองที่แรงดันไฟฟ้า 0.2 V อุณหภูมิ 30 ^{0}C

ชั่วโมงที่	แรงดันไฟฟ้า (V)	น้ำหนักของเศษทังสเตนคาร์ไบด์ (g)	ปริมาณการใช้ไฟฟ้าในการทดลอง (kWh)
12	0.2	1,435	0.8
24	0.2	1,370	1.7
36	0.2	1,320	2.7
48	0.2	1,280	4.2

จากตารางที่ 3.7 บันทึกผลการทดลองภายใต้ปัจจัยการใช้ความเข้มข้นของสารละลายกรดไฮโดรคลอริก 3 N น้ำหนักของเศษมีดก่อนการทดลอง 1,500 g หลังทดลอง 1,280 g ระยะเวลา 48 ชั่วโมง โลหะผงทังสเตนคาร์ไบด์ที่ได้ 175 g เศษ 6.46 g เศษที่ค้างจากตะแกรง 1.96 g

ตารางที่ 3.8 บันทึกผลการทดลองที่แรงดันไฟฟ้า 0.2 V อุณหภูมิ 30 ^{0}C

ชั่วโมงที่	แรงดันไฟฟ้า (V)	น้ำหนักของเศษทังสเตนคาร์ไบด์ (g)	ไฟฟ้าที่ใช้ (kWh)
12	0.2	1,440	0.8
24	0.2	1,385	1.5
36	0.2	1,350	2.7
48	0.2	1,300	4.4

จากตารางที่ 3.8 บันทึกผลการทดลองภายใต้ปัจจัยการใช้ความเข้มข้นของสารละลายกรดไฮโดรคลอริก 5 N น้ำหนักของเศษมีดก่อนการทดลอง 1,500 g หลังทดลอง 1300 g ระยะเวลา 48 ชั่วโมง โลหะผงทังสเตนคาร์ไบด์ที่ได้ 155.00 g เศษ 5.77 g เศษที่ค้างจากตะแกรง 0.80 g

ตารางที่ 3.9 บันทึกผลการทดลองที่แรงดันฟ้า 0.2 V อุณหภูมิ 30 ^{0}C

ชั่วโมงที่	แรงดันไฟฟ้า (V)	น้ำหนักของเศษทังสเตนคาร์ไบด์ (g)	ไฟฟ้าที่ใช้ (kWh)
12	0.2	1,430	0.8
24	0.2	1,380	1.7
36	0.2	1,310	2.7
48	0.2	1,270	4.2

จากตารางที่ 3.9 บันทึกผลการทดลองภายใต้ปัจจัยการใช้ความเข้มข้นของสารละลายกรดไฮโดรคลอริก 7 N น้ำหนักของเศษมีดก่อนการทดลอง 1,500 g หลังทดลอง 1,270 g ระยะเวลา 48 ชั่วโมง โลหะผงทังสเตนคาร์ไบด์ที่ได้ 205.00 g เศษ 11.33 g เศษที่ค้างจากตะแกรง 1.99 g

ตารางที่ 3.10 บันทึกผลการทดลองที่แรงดันไฟฟ้า 0.6 V อุณหภูมิ 30 ^{0}C

ชั่วโมงที่	แรงดันไฟฟ้า (V)	น้ำหนักของเศษทังสเตนคาร์ไบด์ (g)	ไฟฟ้าที่ใช้ (kWh)
12	0.2	1,477	0.8
24	0.2	1,400	1.7
36	0.2	1,355	2.5
48	0.2	1,310	4.2

จากตารางที่ 3.10 บันทึกผลการทดลองภายใต้ปัจจัยการใช้ความเข้มข้นของสารละลายกรดไฮโดรคลอริก 3 N น้ำหนักของเศษมีดก่อนการทดลอง 1,500 g หลังทดลอง 1,310 g ระยะเวลา 48 ชั่วโมง โลหะผงทังสเตนคาร์ไบด์ที่ได้ 160.00 g เศษ 5.40 g เศษที่ค้างจากตะแกรง 0.50 g

ตารางที่ 3.11 บันทึกผลการทดลองที่แรงดันไฟฟ้า 0.6 V อุณหภูมิ 30 ^{0}C

ชั่วโมงที่	แรงดันไฟฟ้า (V)	น้ำหนักของเศษทังสเตนคาร์ไบด์ (g)	ไฟฟ้าที่ใช้ (kWh)
12	0.2	1,440	0.8
24	0.2	1,395	1.8
36	0.2	1,350	2.7
48	0.2	1,330	4.3

จากตารางที่ 3.11 บันทึกผลการทดลองภายใต้ปัจจัยการใช้ความเข้มข้นของสารละลายกรดไฮโดรคลอริก 5 N น้ำหนักของเศษมีดก่อนการทดลอง 1,500 g หลังทดลอง 1,330 g ระยะเวลา 48 ชั่วโมง โลหะผงทังสเตนคาร์ไบด์ที่ได้ 155.00 g เศษ 3.50 g เศษที่ค้างจากตะแกรง 0.50 g

ตารางที่ 3.12 บันทึกผลการทดลองที่แรงดันฟ้า 0.6 V อุณหภูมิ 30 ^{0}C

ชั่วโมงที่	แรงดันไฟฟ้า (V)	น้ำหนักของเศษทังสเตนคาร์ไบด์ (g)	ไฟฟ้าที่ใช้ (kWh)
12	0.2	1,460	0.8
24	0.2	1,400	1.8
36	0.2	1,355	2.7
48	0.2	1,290	4.1

จากตารางที่ 3.12 บันทึกผลการทดลองภายใต้ปัจจัยการใช้ความเข้มข้นของสารละลายกรดไฮโดรคลอริก 7 N น้ำหนักของเศษมีดก่อนการทดลอง 1,500 g หลังทดลอง 1290 g ระยะเวลา 48 ชั่วโมง โลหะผงทังสเตนคาร์ไบด์ที่ได้ 195.00 g เศษ 4.23 g เศษที่ค้าจากตะแกรง 0.96 g

ตารางที่ 3.13 บันทึกผลการทดลองที่แรงดันไฟฟ้า 1.0 V อุณหภูมิ 50 ^{0}C

ชั่วโมงที่	แรงดันไฟฟ้า (V)	น้ำหนักของเศษทังสเตนคาร์ไบด์ (g)	ไฟฟ้าที่ใช้ (kWh)
12	1.0	1,460	9.2
24	1.0	1,411	17.1
36	1.0	1, 380	24.5
48	1.0	1360	32.6

จากตารางที่ 3.13 บันทึกผลการทดลองภายใต้ปัจจัยการใช้ความเข้มข้นของสารละลายกรดไฮโดรคลอริก 3 N น้ำหนักของเศษมีดก่อนการทดลอง 1,500 g หลัง ทดลอง 1,350 g ระยะเวลา 48 ชั่วโมง โลหะผงทังสเตนคาร์ไบด์ที่ได้ 125 g เศษ 1.94 g

ตารางที่ 3.14 บันทึกผลการทดลองที่แรงดันไฟฟ้า 1.0 V อุณหภูมิ 50 ^{0}C

ชั่วโมงที่	แรงดันไฟฟ้า (V)	น้ำหนักของเศษทังสเตนคาร์ไบด์ (g)	ไฟฟ้าที่ใช้ (kWh)
12	1.0	1,445	8.5
24	1.0	1,425	16.3
36	1.0	1,390	23.9
48	1.0	1,365	31.8

จากตารางที่ 3.14 บันทึกผลการทดลองภายใต้ปัจจัยการใช้ความเข้มข้นของสารละลายกรดไฮโดรคลอริก 5 N น้ำหนักของเศษมีดก่อนการทดลอง 1,500 g หลัง ทดลอง 1,365 g ระยะเวลา 48 ชั่วโมง โลหะผงทังสเตนคาร์ไบด์ที่ได้ 110 g เศษ 1.20 g

ตารางที่ 3.15 บันทึกผลการทดลองที่แรงดันไฟฟ้า 1.0 V อุณหภูมิ 50 ^{0}C

ชั่วโมงที่	แรงดันไฟฟ้า (V)	น้ำหนักของเศษทังสเตนคาร์ไบด์ (g)	ไฟฟ้าที่ใช้ (kWh)
12	1.0	1,465	8.0
24	1.0	1,430	14.9
36	1.0	1,400	21.8
48	1.0	1,365	29.1

จากตารางที่ 3.15 บันทึกผลการทดลองภายใต้ปัจจัยการใช้ความเข้มข้นของสารละลายกรดไฮโดรคลอริก 7 N น้ำหนักของเศษมีดก่อนการทดลอง 1,500 g หลังทดลอง 1,365 g ระยะเวลา 48 ชั่วโมง โลหะผงทังสเตนคาร์ไบด์ที่ได้ 100 g เศษ 6.43 g

ตารางที่ 3.16 บันทึกผลการทดลองที่แรงดันไฟฟ้า 1.0 V อุณหภูมิ 70 ^{0}C

ชั่วโมงที่	แรงดันไฟฟ้า (V)	น้ำหนักของเศษทังสเตนคาร์ไบด์ (g)	ไฟฟ้าที่ใช้ (kWh)
12	1.0	1,450	17.9
24	1.0	1,400	34.4
36	1.0	1,350	53.8
48	1.0	1,320	70.4

จากตารางที่ 3.16 บันทึกผลการทดลองภายใต้ปัจจัยการใช้ความเข้มข้นของสารละลายกรดไฮโดรคลอริก 3 N น้ำหนักของเศษมีดก่อนการทดลอง 1,500 g หลังทดลอง 1,320 g ระยะเวลา 48 ชั่วโมง โลหะผงทังสเตนคาร์ไบด์ที่ได้ 160 g เศษ 10 g

ตารางที่ 3.17 บันทึกผลการทดลองที่แรงดันไฟฟ้า 1.0 V อุณหภูมิ 70 ^{0}C

ชั่วโมงที่	แรงดันไฟฟ้า (V)	น้ำหนักของเศษทังสเตนคาร์ไบด์ (g)	ไฟฟ้าที่ใช้ (kWh)
12	1.0	1,440	18.5
24	1.0	1,390	34.3
36	1.0	1, 335	52.6
48	1.0	1,290	66.3

จากตารางที่ 3.17 บันทึกผลการทดลองภายใต้ปัจจัยการใช้ความเข้มข้นของสารละลายกรดไฮโดรคลอริก 5 N น้ำหนักของเศษมีดก่อนการทดลอง 1,500 g หลังทดลอง 1,290 g ระยะเวลา 48 ชั่วโมง โลหะผงทังสเตนคาร์ไบด์ที่ได้ 190 g เศษ 5.29 g

ตารางที่ 3.18 บันทึกผลการทดลองที่แรงดันไฟฟ้า 1.0 V อุณหภูมิ 70 ^{0}C

ชั่วโมงที่	แรงดันไฟฟ้า (V)	น้ำหนักของเศษทังสเตนคาร์ไบด์ (g)	ไฟฟ้าที่ใช้(kWh)
12	1.0	1,430	16.4
24	1.0	1,330	31.9
36	1.0	1,240	49.3
48	1.0	1,155	65.3

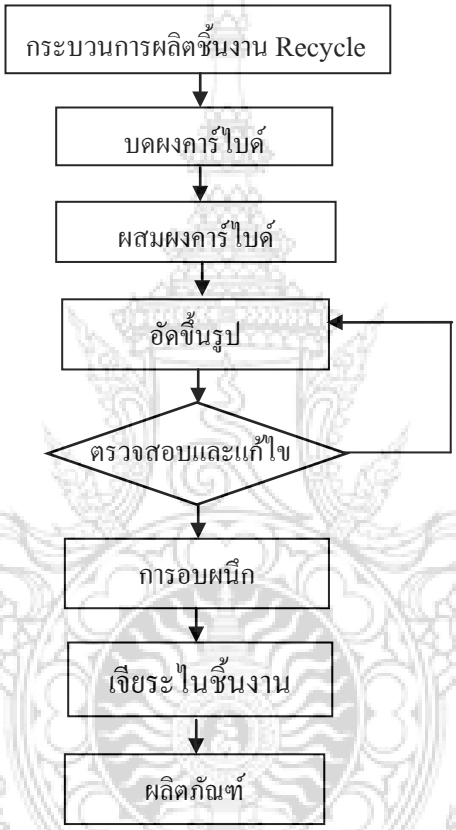
จากตารางที่ 3.18 บันทึกผลการทดลองภายใต้ปัจจัยการใช้ความเข้มข้นของสารละลายกรดไฮโดรคลอริก 3 N น้ำหนักของเศษมีดก่อนการทดลอง 1,500 g หลังทดลอง 1,155 g ระยะเวลา 48 ชั่วโมง โลหะผงทังสเตนคาร์ไบด์ที่ได้ 266.78 g เศษ 54.10 g เศษที่ค้างจากตะแกรง 3.83 g

3.4 การเตรียมผลิตชิ้นงานจากโลหะผงทังสเตนคาร์ไบด์

3.4.1 การผลิตชิ้นงานจากผงทังสเตนคาร์ไบด์

การเตรียมผงโลหะทังสเตนคาร์ไบด์สำหรับการนำไปขึ้นรูป ผลิตเป็นชิ้นงานต่าง ๆ ตามความต้องการ มีขั้นตอนการเตรียมดังนี้

3.4.1.1 ขั้นตอนการผลิตชิ้นงานด้วยโลหะผงทังสเตนคาร์ไบด์จากกระบวนการ Recycle



ภาพที่ 3.47 แสดงขั้นตอนกระบวนการผลิตชิ้นงาน Recycle

3.4.2 กระบวนการเตรียมโลหะผงในการอัดขึ้นรูป

การปรับปรุงคุณสมบัติโลหะผงที่ผ่านกระบวนการย่อยด้วยเครื่องย่อยสลายเศษซีเมนต์ทังสเตนคาร์ไบด์มีขั้นตอนดังนี้

ภาพที่ 3.48 ขั้นตอนการบดผงทังสเตนคาร์ไบด์

3.4.2.1 ขั้นตอนการเตรียมโลหะผงทังสเตนคาร์ไบด์จากกระบวนการ Recycle

การเตรียมโลหะผงทังสเตนคาร์ไบด์ที่ได้จากกระบวนการ Recycle เพื่อนำไปผลิตเป็นชิ้นงานแสดงขั้นตอนต่าง ๆ ดังนี้

ภาพที่ 3.49 ชั่งน้ำหนักโลหะผงทังสเตนคาร์ไบด์และโคบอลต์

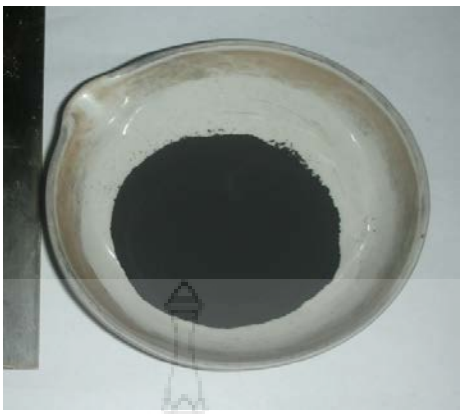
ภาพที่ 3.50 เตรียมลูกบดและแอลกอฮอลล์ใส่ลงในถ้วยบด

ภาพที่ 3.51 การผสมโลหะผงทังสเตนคาร์ไบด์และโคบอลต์ที่เตรียมไว้ลงในถ้ายบด

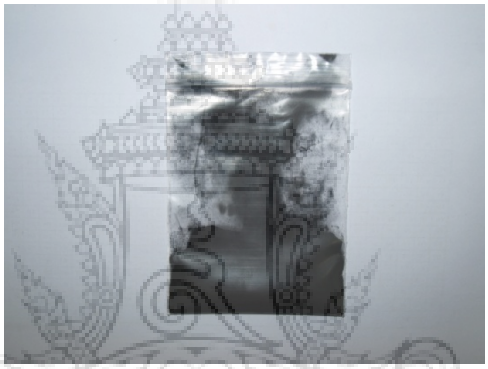
ภาพที่ 3.52 ปิดฝาถ้วย ทำการติดตั้งถ้วยบดข้ากับเครื่องบด แล้ว เริ่มทำการบด

ภาพที่ 3.53 เมื่อครบกำหนดเทสารละลายในถ้วยบดลงในบิกเกอร์และล้างลูกบดด้วยแอลกอฮอลล์

ภาพที่ 3.54 นำตะกอนที่ได้ไปตั้งไฟจนแห้งเพื่อไล่ความชื้น



ภาพที่ 3.55 นำโลหะผงที่แห้งแล้ว ใส่ในถ้วยเซรามิกและอบด้วยเตาไฟฟ้า



ภาพที่ 3.56 ตรวจสอบน้ำหนักบรรจุและเตรียมนำผงโลหะทังสเตนคาร์ไบด์ไปอัดขึ้นรูป

3.4.3 การทดสอบความแข็งชิ้นงานซีเมนต์ทังสเตนคาร์ไบด์

ตารางที่ 3.19 ค่าความแข็งของชิ้นงานที่ใช้แล้วนำมาบดเป็นผงคาร์ไบด์

ค่าความแข็งของชิ้นงานที่ใช้แล้วนำมาบดเป็นผงคาร์ไบด์											
ชิ้นงาน	ครั้งที่ทดสอบ (HRC)										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	เฉลี่ย
K 05	88.0	88.0	88.1	88.0	88.2	88.1	88.0	88.0	88.0	88.1	88.04
K 05	88.3	88.2	88.6	88.2	88.3	88.6	88.5	88.3	88.6	88.2	88.38
K 10	90.8	80.7	90.8	90.8	90.7	90.8	90.7	90.8	90.8	90.8	90.77
K 10	90.8	90.8	90.7	90.8	90.8	90.9	90.8	90.7	90.9	90.9	90.81
K 10	90.2	90.2	90.1	90.2	90.3	90.1	90.2	90.2	90.2	90.3	90.20
K 10	90.2	90.2	90.3	90.2	90.2	90.1	90.2	90.4	90.2	90.2	90.22

3.4.4 กระบวนการขึ้นรูปจากโลหะผง

การผลิตชิ้นงานผลิตภัณฑ์จากโลหะผงเป็นกรรมวิธการอัดขึ้นรูปโดยการนำโลหะผงใส่ลงในแม่พิมพ์ตามแบบที่ต้องการ จากนั้นทำการอัดขึ้นรูปโดยการใช้เครื่องจักรในการกดทับเพื่อให้โลหะผงยึดติดกัน ซึ่งมีขั้นตอนการเตรียมดังนี้

3.4.4.1 กระบวนการทำความสะอาดอุปกรณ์

กระบวนการทำความสะอาดอุปกรณ์เป็นกระบวนการที่ถือว่ามีความสำคัญไม่ต่างกับกระบวนการอื่นๆเพราะถ้าหากอุปกรณ์ที่นำมาใช้งานไม่สะอาดก็อาจเป็นผลต่อกระบวนการผลิตอีกทางหนึ่งด้วย ดังนั้นควรที่จะทำความสะอาดอุปกรณ์ เช่น ช้อนตวงผงคาร์ไบด์ ถ้วยใส่ผงคาร์ไบด์ ถาดรองชิ้นงาน เป็นต้น ซึ่งการทำความสะอาดนั้นโดยวิธีการทำความสะอาดอุปกรณ์นั้นใช้ผ้าที่สะอาดหรือแปรงขนอ่อนขนาด 2 นิ้ว ปัดทำความสะอาดให้สิ่งปนเปื้อนออกจากอุปกรณ์เพื่อป้องกันปัญหาการเกิดต่อไปในการบวนการอัดขึ้นรูปและกระบวนการอบผนึก

ภาพที่ 3.57 อุปกรณ์ที่ใช้ในกระบวนการผลิต

ภาพที่ 3.58 อุปกรณ์ในการตวงผงคาร์ไบด์

3.4.4.2 กระบวนการชั่งน้ำหนักผงคาร์ไบด์

เป็นขั้นตอนที่ต่อเนื่องจากกระบวนการตวงผงคาร์ไบด์ซึ่งนำผงคาร์ไบด์ที่ตวงไว้มาทำการชั่งน้ำหนักของผงคาร์ไบด์ เพื่อให้ได้น้ำหนักตรงตามสูตรที่คำนวณไว้

ภาพที่ 3.59 เครื่องชั่งน้ำหนักผงคาร์ไบด์

ขั้นตอนการตรวจสอบและแก้ไข

หากผลของการชั่งน้ำหนักของผงคาร์ไบด์ไม่ได้น้ำหนักตามที่คำนวณไว้ก็สามารถที่จะกลับไปเริ่มที่กระบวนการตวงผงคาร์ไบด์ใหม่ เพื่อที่จะให้ได้ค่าของน้ำหนักผงคาร์ไบด์เท่ากันทุกชิ้นงานและหากผลของการชั่งน้ำหนักตรงตามที่ได้คำนวณไว้หรืออยู่ในช่วงที่ยอมรับค่าน้ำหนักได้ก็สามารถที่จะนำไปกระทำในกระบวนการอัดขึ้นรูปต่อไปได้

3.4.4.3 กระบวนการผสมผงคาร์ไบด์

กระบวนการผสมผงคาร์ไบด์เป็นกระบวนการที่สำคัญที่จะผลิตชิ้นงานซีเมนต์ทังสเตนคาร์ไบด์ซึ่งส่วนผสมของการผสมผงคาร์ไบด์ประกอบไปด้วย

1) ผงคาร์ไบด์นำเข้า มีส่วนผสม 3% , 6% , 9%

2) ผงคาร์ไบด์ Recycle มีส่วนผสม 3% ,6% , 9%

3) ผงคาร์ไบด์ SME / MS 10%

ภาพที่ 3.60 ตัวอย่างผงทังสเตนคาร์ไบด์ที่ใช้ในการผสม

3.4.4.4 กระบวนการตวงผงคาร์ไบด์

กระบวนการตวงผงคาร์ไบด์เป็นการตักผงคาร์ไบด์มาใส่กรวยเพื่อที่จะนำผงคาร์ไบด์ไปอัดขึ้นรูปและขั้นตอนการเลือกผงคาร์ไบด์จะต้องพิจารณาเกรดของผงคาร์ไบด์ดังในตารางที่ 7.2

ภาพที่ 3.61 กระบวนการตวงผงคาร์ไบด์

3.4.4.5 กระบวนการชั่งน้ำหนักผงคาร์ไบด์

เป็นขั้นตอนที่ต่อเนื่องจากกระบวนการตวงผงคาร์ไบด์ซึ่งนำผงคาร์ไบด์ที่ตวงไว้มาทำการชั่งน้ำหนักของผงคาร์ไบด์เพื่อให้ได้น้ำหนักตรงตามสูตรที่คำนวณไว้

ภาพที่ 3.62 กระบวนการชั่งผงคาร์ไบด์

ขั้นตอนการตรวจสอบและแก้ไข

หากผลของการชั่งน้ำหนักของผงคาร์ไบด์ไม่ได้น้ำหนักตามที่คำนวณไว้ก็สามารถที่จะกลับไปเริ่มที่กระบวนการตวงผงคาร์ไบด์ใหม่เพื่อที่จะให้ได้ค่าของน้ำหนักผงคาร์ไบด์เท่ากันทุกชิ้นงานและหากผลของการชั่งน้ำหนักตรงตามที่ได้คำนวณไว้หรืออยู่ในช่วงที่ยอมรับค่าน้ำหนักได้ก็สามารถที่จะนำไปกระทำในกระบวนการอัดขึ้นรูปต่อไปได้

3.4.4.6 กระบวนการอัดขึ้นรูปชิ้นงาน

เป็นกระบวนการนำผงคาร์ไบด์มาชั่งน้ำหนักแล้วนำผงคาร์ไบด์เทลงในแบบแม่พิมพ์ที่จะอัดขึ้นรูปก่อนจะทำการเทผงคาร์ไบด์ลงไปในแม่พิมพ์นั้นให้ทำความสะอาดแม่พิมพ์ก่อนทุกครั้งเพื่อป้องกันการเกิดปัญหาต่อชิ้นงาน จากนั้นก็จะสั่งเครื่องอัดขึ้นรูปอัดชิ้นงานด้วยเวลา 5 วินาทีและแรงอัด 50 นิวตันต่อตารางนิ้ว จากนั้นไฮดรอลิกส์ก็จะอัดขึ้นรูปชิ้นงานซึ่งเครื่องจะทำงานด้วยโปรแกรมอัตโนมัติในการควบคุมการทำงาน เมื่อเครื่องอัดขึ้นรูปอัดชิ้นงานเสร็จก็นำชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์พร้อมกับใช้แปรงขนอ่อนทำความสะอาดครีบขอบชิ้นงานจากการอัดขึ้นรูป จากนั้นก็นำชิ้นงานไปวางไว้บนถาดรองชิ้นงานเพื่อที่จะนำชิ้นงานไปทำการทดสอบความหนาแน่นโดยการสุ่มชิ้นงาน

ภาพที 3.63 การอัดขึ้นรูปชิ้นงาน

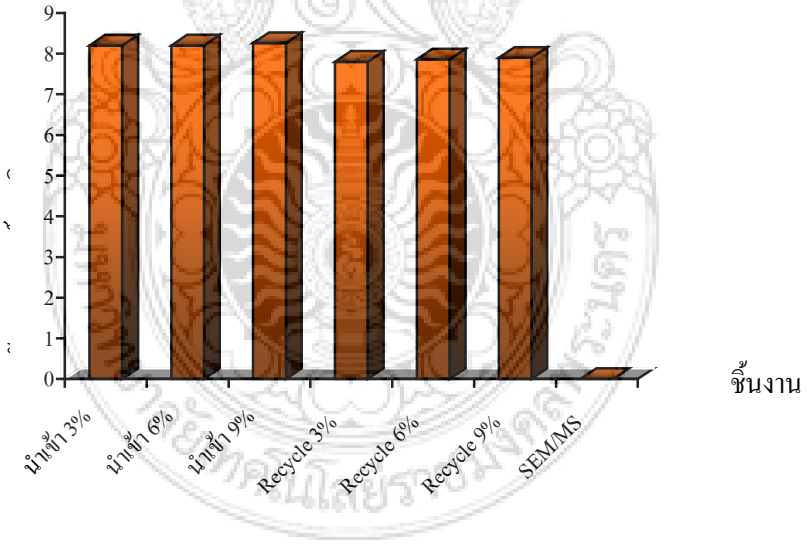
3.4.4.7 กระบวนการอัดขึ้นรูปชิ้นงาน

เป็นกระบวนการนำผงคาร์ไบด์มาชั่งน้ำหนักจากนั้นนำผงคาร์ไบด์เทลงในแบบแม่พิมพ์ที่จะอัดขึ้นรูปก่อนจะทำการเทผงคาร์ไบด์ลงไปในแม่พิมพ์นั้นให้ทำความสะอาดแม่พิมพ์ก่อนทุกครั้งเพื่อป้องกันการเกิดสิ่งปนเปื้อนผสมในชิ้นงาน จากนั้นก็อัดขึ้นรูปชิ้นงาน กดค้างด้วยเวลา 5 วินาทีและแรงอัด 50 นิวตันต่อตารางนิ้ว และไฮดรอลิกส์ก็จะอัดขึ้นรูปชิ้นงานซึ่งเครื่องจะทำงานด้วยโปรแกรมอัตโนมัติในการควบคุมการทำงาน เมื่อเครื่องอัดขึ้นรูปชิ้นงานเสร็จก็นำชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์พร้อมกับใช้แปรงขนอ่อนทำความสะอาดครีบขอบชิ้นงานจากการอัดขึ้นรูป แล้วนำชิ้นงานไปวางไว้บนถาดรองชิ้นงานเพื่อจะนำชิ้นงานไปทำการทดสอบความหนาแน่นโดยการสุ่มชิ้นงาน

ภาพที่ 3.64 การทดสอบความหนาแน่นของชิ้นงานซีเมนต์ทังสเตนคาร์ไบด์

ตารางที่ 3.20 ผลทดสอบความหนาแน่นของผลิตภัณฑ์ซีเมนต์ทังสเตนคาร์ไบด์ ชิ้นงานทำการผลิต (ก่อนกระบวนการอบผนึก)

ส่วนผสม	ผลทดสอบความหนาแน่น (กรัม / ลูกบาศก์เซนติเมตร)					
	1	2	3	4	5	ค่าเฉลี่ย
นำเข้า 3%	8.2	8.1	8.2	8.3	8.2	8.20
นำเข้า 6%	8.2	8.3	8.2	8.1	8.2	8.20
นำเข้า 9%	8.3	8.2	8.2	8.3	8.3	8.26
Recycle 3%	7.7	7.7	7.9	7.9	7.8	7.80
Recycle 6%	7.8	7.8	7.9	7.9	7.9	7.86
Recycle 9%	7.9	7.9	7.9	7.9	7.9	7.9
SEM/MS	ผงละลายน้ำ	ผงละลายน้ำ	ผงละลายน้ำ	ผงละลายน้ำ	ผงละลายน้ำ	ผงละลายน้ำ



ภาพที่ 3.65 กราฟการแสดงผลการทดสอบความหนาแน่นชิ้นงานทำการผลิต (ก่อนกระบวนการอบผนึก)

3.4.4.8 กระบวนการอบผนึกชิ้นงาน

กระบวนการอบผนึกเป็นการนำชิ้นงานที่ผ่านการอัดขึ้นรูปมาทำการอบผนึกเพื่อต้องการให้ชิ้นงานมีความแข็งมากขึ้น ซึ่งกระบวนการอบผนึกมีขั้นตอนโดยการนำชิ้นงานมาวาง

เรียงซ้อนกันเป็นชั้น ๆ ไว้ภายในเตาและทำการอบผนึกด้วยเตาอบผนึกที่อุณหภูมิ 1,410 ^{0}c และใช้เวลาในการอบผนึก 8-10 ชั่วโมง จากนั้นปล่อยให้ชิ้นงานเย็นตัวภายในเตาและนำชิ้นงานมาทำการตรวจสอบรอยแตกร้าวของชิ้นงานโดยซึ่งสามารถตรวจสอบด้วยสายตาเปล่าได้ในขั้นตอนเบื้องต้น

ภาพที่ 3.66 เตาอบชิ้นงานหลังการอัดขึ้นรูป

3.4.4.9 การทดสอบความหนาแน่น

การทดสอบความหนาแน่นของผลิตภัณฑ์ซีเมนต์ทังสเตนคาร์ไบด์เพื่อต้องการทราบปริมาตรน้ำหนักของชิ้นงานว่าได้ตรงตามที่ได้คำนวณไว้ตั้งแต่การชั่งผงคาร์ไบด์ การทดสอบความหนาแน่นของชิ้นเป็นการสุ่มการทดสอบชิ้นงานจะไม่ทำการทดสอบทุกชิ้น เพราะการทดสอบนั้นต้องทำลายชิ้นงานให้แตกหรือทำให้เป็นผงเสียก่อนจะทำการทดสอบซึ่งผลการทดสอบผลิตภัณฑ์ซีเมนต์ทังสเตนคาร์ไบด์

3.4.4.10 กระบวนการเจียระไนผิวสำเร็จชิ้นงาน

เป็นการนำชิ้นงานที่ผ่านการอบผนึกมาเจียระไนให้ได้ขนาดและรูปแบบที่กำหนดไว้ เพื่อที่จะได้ชิ้นงานที่ถูกต้องตามแบบและที่สำคัญตรงตามความต้องการของลูกค้า

ภาพที่ 3.67 การเจียระไนผิวสำเร็จชิ้นงาน

3.4.5 การทดสอบคุณสมบัติชิ้นงาน

3.4.5.1 การทดสอบความแข็ง (Hardness Test)

การทดสอบความแข็งเป็นการทดสอบความแข็งแรงของชิ้นงานซีเมนต์ทังสเตนคาร์ไบด์ว่าชิ้นงานที่ผลิตออกมานั้นมีความแข็งแรงตรงตามที่กำหนดไว้หรือไม่ เพื่อนำชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบไปใช้งาน

ในโครงการนี้มีการทดสอบความแข็งของชิ้นงานซีเมนต์ทังสเตนคาร์ไบด์ จำนวน 2 ผลิตภัณฑ์ คือ ชิ้นงานแท่งสี่เหลี่ยม ชิ้นงานแผ่นมีดตัด ซึ่งได้ทำการทดสอบความแข็งของชิ้นงาน ณ. ห้องปฏิบัติการทางโลหะวิทยา สาขาช่างโลหะ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร และการทดสอบความแข็งของผลิตภัณฑ์ซีเมนต์ทังสเตนคาร์ไบด์ทั้ง 2 ชิ้นเป็นการทดสอบแบบใช้เครื่อง Rockwell Scal A ใช้หัวเพชร 120 ° โหลดในการทดสอบ 120 กิโลกรัม การทดสอบโดยกดลงที่ผิวของชิ้นงานทั้ง 2 ผลิตภัณฑ์ และทดสอบชิ้นงานทำการผลิต 7 ชิ้นงานกดทดสอบจำนวน 5 ตำแหน่ง แล้วทำการหาค่าเฉลี่ยของการทดสอบ

ภาพที่ 3.68 การทดสอบความแข็ง (Hardness Test) ใช้เครื่อง Misuratori di Durezza Hardness Tesdness Modello 206 RTD ใช้การทดสอบแบบ Rockwell Scal A ใช้หัวเพชร 120 ° โหลดในการทดสอบ 120 กิโลกรัม

ตารางที่ 3.21 ผลการทดสอบความแข็งของชิ้นงานซีเมนต์ทังสเตนคาร์ไบด์ ชิ้นงานทำการผลิต (หลังกระบวนการอบผนึก)

ส่วนผสม	ผลการทดสอบความแข็ง (Hardness Test) HRC					
	1	2	3	4	5	ค่าเฉลี่ย
นำเข้า 3%	90.4	90.6	90.3	90.6	90.5	90.48
นำเข้า 6%	90.5	91.0	90.4	91.1	90.4	90.68
นำเข้า 9%	89.8	90.6	89.9	90.1	89.2	89.92
Recycle 3%	89.9	87.6	88.8	89.6	89.7	89.12
Recycle 6%	90.5	90.0	90.6	90.4	91.2	90.54
Recycle 9%	90.4	89.9	90.7	90.2	90.5	90.34
SEM/MS 10%	89.3	88.7	89.6	89.9	89.78	89.44

3.4.5.2 วิเคาราะห์ผลการทดลอง

จากผลการวิเคราะห์และรายงานสรุปหาข้อมูล ผลิตภัณฑ์ซีเมนต์ทังสเตนคาร์ไบด์ทั้งสองชนิดที่ผ่านการอบผนึกจะได้ว่า ชิ้นงานที่ผลิตด้วยโลหะผงจากกระบวนการทดลองเมื่อเปรียบเทียบกับการผลิตชิ้นงานด้วยโลหะผงนำเข้าผลิตภัณฑ์ทั้ง 2 ชนิด ให้ค่าความแข็งใกล้เคียงกัน คือผลิตภัณฑ์ที่ผลิตด้วยโลหะผงนำเข้ามามีค่าความแข็งเฉลี่ยหลังการอบผนึกอยู่ระหว่าง 89.92-90.68 HRC ส่วนผลิตภัณฑ์ที่ผลิตด้วยโลหะผงจากการทดลองมีค่าความแข็งเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 89.12-90.54 HRC

3.5 การศึกษาต้นทุนเชิงเศษฐศาสตร์ในการผลิตโลหะผง

3.5.1 การจำแนกต้นทุนการผลิต

ต้นทุนในการผลิตโลหะผงทังสเตนคาร์ไบด์สามารถจำแนกตามลักษณะของค่าใช้จ่ายเพื่อนำไปทำบัญชีต้นทุนได้ 3 ประเภทใหญ่ๆคือ

1) ต้นทุนค่าวัตถุดิบทางตรง

เป็นต้นทุนค่าวัตถุดิบ ประกอบด้วย Scraps สามารถคำนวณการใช้ต่อหน่วยผลิตภัณฑ์ได้

2) ต้นทุนค่าแรงงาน

ก) ต้นทุนค่าแรงงานทางตรง

เป็นต้นทุนค่าแรงงานที่โรงงานต้องจ่ายให้พนักงานในฝ่ายผลิต ในการทำงานทั้งในเวลาปกติ (Regular Time) และการทำงานล่วงเวลา (Over Time)

ข) ต้นทุนค่าแรงงานทางอ้อม

ได้แก่ เงินเดือนของหัวหน้าคนงาน และเงินเดือนของพนักงานที่ไม่มีหน้าที่ในการผลิตโดยตรงซึ่งประกอบด้วยค่าจ้างที่ทำงานในเวลาปกติและเวลาการทำงานล่วงเวลา

3) ต้นทุนค่าเครื่องจักร

ได้แก่ ราคาเครื่องจักรต่าง ๆ ที่ลงทุนไปเพื่อใช้ในการผลิตโลหะผงทังสเตนคาร์ไบด์

การจำแนกต้นทุนในการผลิตโลหะผงทังสเตนคาร์ไบด์สามารถจำแนกตามลักษณะของค่าใช้จ่ายเพื่อนำไปทำบัญชีต้นทุนได้ 3 ประเภทใหญ่ๆคือ

1) ต้นทุนค่าวัตถุดิบทางตรง

เป็นต้นทุนค่าวัตถุดิบ ประกอบด้วย Scraps สามารถคำนวณการใช้ต่อหน่วยผลิตภัณฑ์ได้

2) ต้นทุนค่าแรงงาน

ก) ต้นทุนค่าแรงงานทางตรง

เป็นต้นทุนค่าแรงงานที่โรงงานต้องจ่ายให้พนักงานในฝ่ายผลิต คือ พนักงานฝ่ายผลิต 6 อัตรา แบ่งเป็นการทำงานในเวลาปกติ (Regular Time) 2 อัตราคือช่วงเวลา 09.00น.-17.00น. เป็นเวลา 8 ชั่วโมงต่อวัน จำนวนวันทำงาน 26 วันต่อเดือน คิดเป็น ชั่วโมงละ 33.65 บาท วันละ 33.65 x 8 = 269.23 บาท เดือนละ 269.23 x 26 = 7,000 บาท/อัตรา และการทำงานล่วงเวลา (Over Time) 4 อัตราคือช่วงเวลา 17.00น.-01.00น.จำนวน 2 อัตราและช่วงเวลา 01.00น.-09.00น. จำนวน 2 อัตรา เป็นเวลา 8 ชั่วโมง คิดค่าแรง 1.5 เท่าของค่าแรงปกติ คิดเป็นชั่วโมง 50.48 บาท วันละ 50.48 x 8 = 403.85 บาท เดือนละ 403.85 x 26 = 10,500 บาท/อัตรา

ข) ต้นทุนค่าแรงงานทางอ้อม

ได้แก่ เงินเดือนของหัวหน้าคนงาน และเงินเดือนของพนักงานที่ไม่มีหน้าที่ในการผลิตโดยตรง คือ ผู้จัดการ 1 อัตรา หัวหน้าฝ่ายผลิต 1 อัตรา ฝ่ายการจัดการแบ่งออกเป็น แผนกการตลาด 1 อัตรา แผนกบัญชี 1 อัตรา แผนกบุคคล 1 อัตรา พนักงานทั่วไปแบ่งออกเป็น พนักงานรักษาความปลอดภัย 1 อัตรา และ พนักงานทำความสะอาด 2 อัตรา

ตารางที่ 3.22 แสดงค่าใช้จ่ายค่าแรงงาน

ตำแหน่ง / อ้างอิง	ผู้จัดการ	หัวหน้าฝ่ายผลิต	พนักงานฝ่ายผลิต	พนักงานฝ่ายบริหาร	พนักงานทำความสะอาด	พนักงานรักษาความปลอดภัย
1.ปริญญานิพนธ์:การผลิตชุดเสริมกันชนหน้า	92,044.11	20,000	10,000	8,000	7,000	6,000
2. ปริญญานิพนธ์:การศึกษาการลงทุนซื้อหม้อต้มไอน้ำ	20,000	6,500	3,000	5,500	2,200	2,500
3. วิจัย:Thailand salary 2008	40,000	22,000	8,000	8,000	8,000	8,000
ค่าเฉลี่ย	**50,681**	**16,167**	**7,000**	**7,167**	**5,733**	**5,500**

หมายเหตุ: หน่วย บาท/เดือน

3) ต้นทุนค่าเครื่องจักร

การลงทุนซื้อเครื่องจักรที่ใช้ในการผลิตโลหะผงทังสเตนคาร์ไบด์มีดังนี้

ตารางที่ 3.23 แสดงการประเมินค่าใช้จ่ายในการจัดซื้อเครื่องจักร

ลำดับ	รายการ	อัตราการผลิตต่อชั่วโมง	จำนวน (เครื่อง)	ราคา(บาท)	
				ต่อหน่วย	เป็นเงิน
1	เครื่องล้างScraps	20 กิโลกรัม	1	350,000	350,000 บาท
2	เครื่องสกัดผิวเคลือบ	334 กรัม	1	480,000	480,000 บาท
3	เครื่องย่อยScraps	0.025 กรัม	1	1,250,000	1,250,000 บาท
4	เครื่องกรองโลหะผง	1 กิโลกรัม	1	380,000	380,000 บาท
5	เครื่องอบโลหะผง	10 กิโลกรัม	1	450,000	250,000 บาท
6	เครื่องคัดขนาดโลหะผง	1 กิโลกรัม	1	450,000	450,000 บาท
7	เครื่องบดโลหะผง	100 กรัม	1	650,000	650,000 บาท
8	เครื่องบรรจุโลหะผง	1.2 กิโลกรัม/ขวด 30 ขวด/ชั่วโมง	1	850,000	850,000 บาท
9	เครื่องผสมผงโลหะ		1	2,500,000	2,500,000 บาท
10	เครื่องมือและอุปกรณ์การผลิต		1 ชุด	350,000	350,000 บาท
รวม					**7,510,000 บาท**

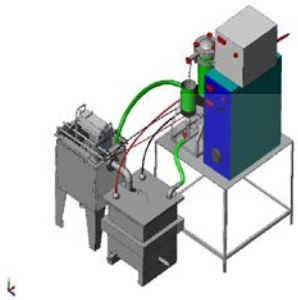
3.5.2 ตัวอย่างเครื่องจักรในการผลิตโลหะผงทังสเตนคาร์ไบด์

เครื่องจักรในกระบวนการผลิตโลหะผงทังสเตนคาร์ไบด์นั้น สามารถจะอธิบายถึงขนาด ราคา รวมทั้งกำลังการผลิตเพื่อที่จะสามารถเลือกใช้ได้ตามความเหมาะสมดังต่อไปนี้

ตารางที่ 3.24 เครื่องจักรที่ใช้ในกระบวนการผลิต

เครื่องจักร	ขนาด(เมตรxเมตร)	กำลังการผลิต	ราคา(บาท)
1. เครื่องชั่ง	**1x1**	**-**	**-**
2. เครื่องล้างเศษ Scrap	**1.1 x 1.1**	**20 กิโลกรัม/ชั่วโมง**	**350,000**
3. เครื่องอบโลหะผง	**0.8 x 0.9**	**10 กิโลกรัม/ชั่วโมง**	**250,000**

ตารางที่ 3.24 เครื่องจักรที่ใช้ในกระบวนการผลิต (ต่อ)

เครื่องจักร	ขนาด(เมตรxเมตร)	กำลังการผลิต	ราคา(บาท)
4. เครื่องผลิตโลหะผงทังสเตนคาร์ไบด์ 	**2 x 0.9**	**0.025 กรัม/ชั่วโมง**	**1,250,000**
5. เครื่องกรองโลหะผง	**1.1 x 1.1**	**1 กิโลกรัม/ชั่วโมง**	**380,000**
6. เครื่องคัดขนาด	**ขนาดตะแกงร่อน 400mm/450mm ขนาดของเครื่อง 714x435x629 mm น้ำหนักของเครื่อง 200 kg รับน้ำหนักสูงสุด 20 kg**	**สามารถร่อนผงโลหะได้ขนาดเล็กสุด 25 ไมโครเมตร ถึง 125 mm**	**450,000**

ตารางที่ 3.24 เครื่องจักรที่ใช้ในกระบวนการผลิต (ต่อ)

เครื่องจักร	ขนาด(เมตรxเมตร)	กำลังการผลิต	ราคา(บาท)
7. เครื่องบดโลหะผงทังสเตนคาร์ไบด์	450mm x 490 mm น้ำหนักเครื่อง 100 kg ความเร็วรอบ 60-700 รอบ/นาที จำนวนลูกบด 12 ลูก	ปริมาณการผลิต 500 ml บดผงโลหะได้ขนาด<1 ไมโครเมตร	650,000
8.เครื่องผสมผงโลหะ	3.25 in x 62 in น้ำหนัก 2500 kg ความเร็วรอบ 9-37 รอบ/นาที	ผลิตทังสเตนคาร์ไบด์ = 304.8 kg	2,500,000
9. เครื่องบรรจุ	1.1 x 1.1	1.2 กิโลกรัม/ถุง	850,000

3.5.3 การศึกษาขั้นตอนกิจกรรมการผลิต

แผนภูมิกระบวนไหล (Flow Process Chart)

แผนภูมิกระบวนไหล (Flow Process Chart)										
HART NO. SHEET NO. OF.			SUMMARY							
SUBJECTE CHARTED	ACTIVITY		PRESENT			PROPOSED			SAVING	
	OPERATION ○									
	TRANSPORT ⇨									
ACTIVITY	DELAY D									
	INSPECTION □									
	STORAGE ▽									
METHOD PRESENT/PROPOSED	DISTANCE (m)									
LOCATION	TIME(Man-hr)									
OPERATIVE CLOCK NO.	COST									
CHARTED BY. DATE:	TOTAL									
APPROVED BY DATE:										
DESCRIPTION	QTY (plates)	DISTANCE (m)	TIME (min)	SYMBOL ○	⇨	D	□	▽	REMARKS	
1.SCRAP อยู่ที่ STORE	-	-						●		
2.ตรวจสอบความสะอาดของ SCRAP	-	-	30				●			
3.นำ SCRAP ไปชั่ง	-	5.19			●					
4.ชั่ง SCRAP	1500g	-	30	●						
5.ตรวจสอบน้ำหนัก SCRAP ให้ได้1500g	1500g	-	30				●			
6.นำ SCRAP ไปล้าง	1500g	9.5			●					
7.ล้าง SCRAP	1500g	-	120	●						
8.ตรวจสอบความสะอาดของ SCRAP	1500g	-	30				●			
9.นำ SCRAP ไปอบ	1500g	3.25			●					
10.อบ SCRAP ให้แห้ง	1500g	-	120	●						
11.ตรวจสอบความแห้งของ SCRAP	1500g	-	30				●			
12.ให้ SCRAP เย็นตัว	1500g	-	240	●						
13.นำ SCRAP ไปยังเครื่องผลิตผง	1500g	6.84			●					
14.ทำการย่อย SCRAP	1500g	-	2880	●						
15.จาก SCRAP กลายเป็นโคลน	1500g	-		●						
16.โคลนตกตะกอน	1500g	-	360			●				
17.ตรวจสอบการตกตะกอนของโคลน	1500g	-	30				●			
18.นำโคลนไปยังเครื่องกรอง	1500g	1			●					
19.กรองโคลนให้เป็นผงเปียก	1200g	-	120	●						
20.ตรวจสอบขนาดผงเปียกที่ได้	1200g	-	30				●			

ภาพที่ 3.69 แผนภูมิกระบวนไหล (Flow Process Chart)

CHART NO. SHEET NO. OF.			SUMMARY						
SUBJECTE CHARTED	ACTIVITY		PRESENT			PROPOSED		SAVING	
	OPERATION ○								
	TRANSPORT ⇨								
ACTIVITY	DELAY D								
	INSPECTION □								
	STORAGE ▽								
METHOD PRESENT/PROPOSED	DISTANCE (m)								
LOCATION	TIME(Man-hr)								
OPERATIVE CLOCK NO.	COST								
CHARTED BY. DATE:	TOTAL								
APPROVED BY DATE:									

DESCRIPTION	QTY (plates)	DISTANCE (m)	TIME (min)	SYMBOL					REMARKS
				○	⇨	D	□	▽	
21.นำผงเปียกไปอบ	1200g	7.69							
22.อบผงเปียกให้แห้ง	1200g	-	120						
23.ตรวจสอบความแห้งของผงหยาบ	1200g	-	30						
24.นำผงหยาบที่แห้งแล้วไปคัดขนาด	1200g	7.36							
25.คัดขนาดของผงหยาบ	1200g	-	60						
26.ตรวจสอบขนาดผงหยาบ	1200g	-	30						
27.นำผงที่คัดไม่ผ่านไปบด	1200g	1							
28.บดผงหยาบให้เป็นผงละเอียด	1200g	-	1440						
29.ตรวจสอบความละเอียดของผงที่ได้	1200g	-	30						
30.นำผงที่ได้ไปบรรจุ	1200g	1							
31.บรรจุผงลงในบรรจุภัณฑ์	1 pcs	-	2						
32.ตรวจสอบบรรจุภัณฑ์	1 pcs	-	30						
33.นำผลิตภัณฑ์ที่ได้ไปยังแผนก QC	1 pcs	1							
34.ตรวจสอบผลิตภัณฑ์	1 pcs	-	10						
35.นำผลิตภัณฑ์ที่ได้ไปยังที่เก็บสินค้า	1 pcs	0.5	2						
36.เก็บสินค้า	1 pcs	-							
รวม		43.33	57.92	11	11	1	11	2	

ภาพที่ 3.69 แผนภูมิกระบวนไหล (Flow Process Chart)(ต่อ)

▽ 1 SCRAP อยู่ที่ STORE

□ 1 ตรวจสอบความสะอาดของ SCRAP

⇨ 1 นำ SCRAP ไปชั่ง

○ 1 ชั่ง SCRAP

□ 2 ตรวจสอบน้ำหนัก SCRAP ให้ได้ 150g

⇨ 2 นำ SCRAP ไปล้าง

○ 2 ล้าง SCRAP

□ 3 ตรวจสอบความสะอาดของ SCRAP

⇨ 3 นำ SCRAP ไปอบ

○ 3 อบ SCRAP ให้แห้ง

□ 4 ตรวจสอบความแห้งของ SCRAP

○ 4 ให้ SCRAP เย็นตัว

⇨ 4 นำ SCRAP ไปยังเครื่องผลิต

○ 5 ทำการย่อย SCRAP

□ 5 ตรวจสอบการตกตะกอนของโคลน

⇨ 5 นำโคลนไปยังเครื่องกรอง

○ 6 กรองโคลนให้เป็นผงเปียก

□ 6 ตรวจสอบขนาดผงเปียกที่ได้

⇨ 6 นำผงเปียกไปอบ

○ 7 อบผงเปียกให้แห้ง

□ 7 ตรวจสอบความแห้งของผงหยาบ

⇨ 7 นำผงหยาบที่แห้งแล้วไปคัดขนาด

○ 8 คัดขนาดของผงหยาบ

□ 8 ตรวจสอบขนาดผงหยาบ

⇨ 8 นำผงที่คัดไม่ผ่านไปบด

○ 9 บดผงหยาบให้เป็นผงละเอียด

□ 9 ตรวจสอบความละเอียดของผงที่ได้

⇨ 9 นำผงที่ได้ไปบรรจุ

○ 10 บรรจุผงลงในบรรจุภัณฑ์

□ 10 ตรวจสอบบรรจุภัณฑ์

⇨ 10 นำผลิตภัณฑ์ที่ได้ไปยังแผนก QC

□ 11 ตรวจสอบผลิตภัณฑ์

⇨ 11 นำผลิตภัณฑ์ที่ได้ไปยังที่เก็บสินค้า

▽ 2 เก็บสินค้า

สรุป (วิธีเดิม)	
⇨	11
○	10
□	11
D	1
▽	2

3.5.4 วิเคราะห์การลงทุนเชิงเศรษฐศาสตร์วิศวกรรม

การวิเคราะห์ต้นทุนการผลิต คิดตามอัตราการผลิต คือ 303 วันต่อปี เนื่องจาก วันหยุดนักขัตฤกษ์ 14 วันต่อปี วันอาทิตย์ 48 วันต่อปี (365-14-48 = 303)

3.5.4.1 ต้นทุนวัตถุดิบ

1) ค่าเศษซีเมนต์ทังสเตนคาร์ไบด์ (Scraps) 1500 กรัมx80% = 1,200

ในการผลิตโลหะผง 1 ครั้ง เราจะเหลือ Scraps 300 กรัม

ใช้เวลา 50 ชั่วโมง เท่ากับ 12 ครั้ง/เดือน

ดังนั้น 1 เดือนจะใช้ Scraps เท่ากับ

1,500 กรัม + (300 กรัม x 11) = 4,800 กรัม

= 4.8 กิโลกรัม

รวม 4.8 กิโลกรัม x 300 บาท = 1,440 บาท/เดือน

2) ค่าสารละลายไฮโดรคลอลิก (HCl) 20 ลิตร = 4,800 บาท

ในการผลิตโลหะผง ใช้สารละลาย HCl จำนวน 60 ลิตร

เท่ากับ 14,400 บาท

ทุก 25 ชั่วโมงการผลิต เติมสารละลาย 10 ลิตร

เท่ากับ 4,800/2 = 2,400 บาท

ดังนั้น 1 เดือนจะใช้สารละลายเท่ากับ

60 ลิตร + (10 ลิตร x 11) = 170 ลิตร

รวม 4,800 บาท x 8.5 = 40,800 บาท/เดือน

3) ค่าแอลกอฮอล์ (Alcohol)

ในการทำการผลิตโลหะผง ใช้ Alcohol 1ลิตร

เท่ากับ 100 บาท

ดังนั้น 1 เดือนจะใช้แอลกอฮอล์ เท่ากับ 12 ลิตร เท่ากับ 1,200 บาท

รวม 1, 200 บาท/เดือน

รวมทั้งสิ้น 43,440 บาท/เดือน

3.5.4.2 ค่าแรง

1) ตำแหน่งผู้จัดการ

การกำหนดอัตราเงินเดือนของตำแหน่งผู้จัดการ

พิจารณาจากตารางที่ 3.22

∴ เงินเดือนผู้จัดการคือ 50,681 บาท/เดือน

2) ตำแหน่งหัวหน้าฝ่ายผลิต

การกำหนดอัตราเงินเดือนของตำแหน่งหัวหน้าฝ่ายผลิต พิจารณาจากตารางที่ 3.22

∴ เงินเดือนหัวหน้าฝ่ายผลิตคือ 16,167 บาท/เดือน

3) ตำแหน่งพนักงานฝ่ายผลิต

การกำหนดอัตราค่าจ้างของตำแหน่งพนักงานฝ่ายผลิต พิจารณาจากตารางที่ 3.22

ก) พนักงานฝ่ายผลิตช่วงเวลา 09.00น. – 17.00น. 2 ตำแหน่ง เงินเดือน 7,000 x 2 = 14,000 บาท/เดือน

ข) พนักงานฝ่ายผลิตช่วงเวลา 17.00น. – 01.00น. 2 ตำแหน่ง เงินเดือน 10,500 x 2 = 21,000 บาท/เดือน

ค) พนักงานฝ่ายผลิตช่วงเวลา 01.00น. – 09.00น. 2 ตำแหน่ง เงินเดือน 10,500 x 2 = 21,000 บาท/เดือน

4) ตำแหน่งพนักงานฝ่ายบริหาร

การกำหนดอัตราค่าจ้างของตำแหน่งพนักงานฝ่ายบริหาร พิจารณาจากตารางที่ 3.22

∴ ค่าจ้างพนักงานฝ่ายบริหารคือ 7,167 x 3 = 21,510 บาท/เดือน

5) ตำแหน่งพนักงานทำความสะอาด

การกำหนดอัตราค่าจ้างของตำแหน่งพนักงานทำความสะอาด พิจารณาจากตารางที่ 3.22

∴ ค่าจ้างพนักงานทำความสะอาดคือ 5,733 x 2 = 11,466 บาท/เดือน

6) ตำแหน่งพนักงานรักษาความปลอดภัย

การกำหนดอัตราค่าจ้างของตำแหน่งพนักงานรักษาความปลอดภัย พิจารณาจากตารางที่ 3.22

∴ ค่าจ้างพนักงานรักษาความปลอดภัยคือ 5,500 บาท/เดือน

รวมทั้งสิ้น 161,324 บาท

3.6 การวิเคราะห์ผลการทดลอง

จากข้อมูลที่ทำการเก็บรวบรวม จะดำเนินการวิเคราะห์ผลการดำเนินการวิจัย ดังนี้

1) วิเคราะห์ผลการแยกสลายเศษโลหะซีเมนต์ทังสเตนคาร์ไบด์ เพื่อเปรียบเทียบจำนวนผงทังสเตนคาร์ไบด์ที่ผลิตได้และการตรวจสอบน้ำหนักเพื่อเปรียบเทียบผลการทดลองแต่ละการทดลอง

2) วิเคราะห์ผลการเปรียบเทียบน้ำหนักของเศษทังสเตนคาร์ไบด์ที่แรงดันไฟฟ้าต่าง ๆ ภายใต้การใช้เวลาแต่ละการทดลอง

3) วิเคราะห์ผลการทดสอบโลหะผงที่ผ่านการผลิตด้วยอุปกรณ์ในห้องปฏิบัติการวิเคราะห์คุณลักษณะของโลหะผงทังสเตนคาร์ไบด์

4) วิเคราะห์ผลการทดสอบและขั้นตอนการออกแบบสร้างเครื่องแยกสลายโลหะผงเพื่อผลิตโลหะผงทังสเตนคาร์ไบด์

5) วิเคราะห์ประสิทธิภาพการผลิตโลหะผงทังสเตนคาร์ไบด์ด้วยเครื่องแยกสลายโลหะผง

6) วิเคราะห์ผลการผลิตชิ้นงานซีเมนต์ทังสเตนคาร์ไบด์จากการทดลองเพื่อเปรียบเทียบชิ้นงานที่ทำการผลิตด้วยโลหะผงจากการทองและโลหะผงจากการนำเข้าจากต่างประเทศ

7) วิเคราะห์ต้นทุนการผลิตและการพัฒนาเทคโนโลยีการผลิตขั้นต้น

3.7 การสรุปผลการทดลอง

การสรุปผลการทดลอง ภายใต้ปัจจัยที่ใช้ในการทดลองผลิตโลหะผงทังสเตนคาร์ไบด์ภายใต้แรงดันไฟฟ้า อุณหภูมิและความเข้มข้นของสารละลายไฮโดรคลอริกมีผลต่อการทำให้เกิดปฏิกิริยาการสลายโลหะประสานได้อย่างสมบูรณ์ ปัจจัยที่สามารถผลิตโลหะผงได้ดีที่สุดและมีคุณสมบัติเหมาะสมกับการนำไปใช้งาน ขนาดของโลหะผงทังสเตนคาร์ไบด์ ลักษณะรูปร่างโลหะผงทังสเตนคาร์ไบด์

ผลการพัฒนาเครื่องจักรกลสลายชิ้นงานด้วยระบบเคมีไฟฟ้า ผลการทดสอบสมบัติของผงโลหะผงทังสเตนคาร์ไบด์คุณลักษณะ รูปร่าง ขนาด ความบริสุทธิ์ จากการทดสอบด้วยเทคนิค Scanning electron microscope (SEM) ผลการตรวจสอบด้วยเทคนิค Particle Size Analyzer เพื่อตรวจสอบขนาดและการกระจายของโลหะผงทังสเตนคาร์ไบด์และการตรวจสอบด้วยเทคนิค X-Ray Diffraction การตรวจสอบหาองค์ประกอบของธาตุอื่นๆ สรุปผลการทดลองถึงปัจจัยที่ดีที่สุดเป็นแนวทางในการผลิตโลหะผงทังสเตนคาร์ไบด์ที่มีคุณสมบัติเหมาะสมกับการนำไปใช้งาน

และเปรียบเทียบปริมาณผงทังสเตนคาร์ไบด์ที่ผ่านการแยกสลายด้วยเครื่องมือและอุปกรณ์สำหรับแยกสลายซีเมนต์ทังสเตนคาร์ไบด์ด้วยเคมีไฟฟ้า เพื่อเป็นแนวทางในการออกแบบเครื่องมือ

ทดลองสำหรับแยกสลายเศษซีเมนต์ทังสเตนคาร์ไบด์ด้วยเคมีไฟฟ้าแบบกึ่งอัตโนมัติเพื่อการผลิตโลหะผงทังสเตนคาร์ไบด์ที่สามารถพัฒนาใช้ในการผลิตชิ้นงานซีเมนต์ทังสเตนคาร์ไบด์เพื่อการศึกษาความเป็นไปได้ในการพัฒนากระบวนการผลิตในเชิงเศรษฐศาสตร์

บทที่ 4
ผลการศึกษากระบวนการผลิต

4.1 บทนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงผลการดำเนินงานด้วยวิธีการทดลองต่างๆ รวมถึงกระบวนการทดลองและศึกษาแนวทางการนำเอาเศษวัสดุทังสเตนคาร์ไบด์ (Tungsten Carbide) ผ่านการใช้งานให้แยกสลาย และเพื่อศึกษาสมบัติของผงทังสเตนคาร์ไบด์ที่ผ่านการย่อยสลายและการนำกลับมาใช้ใหม่

4.2 ผลการศึกษาคุณสมบัติเศษวัสดุ

4.2.1 ผลการศึกษากระบวนการโลหะผง

กระบวนการโลหะผงขึ้นรูปโลหะผง เป็นกระบวนการหนึ่ง ที่ใช้ขึ้นรูปโลหะจากผงละเอียด สามารถแบ่งขั้นตอนการทำงาน เริ่มจากการผลิตโลหะผง ซึ่งมีกระบวนการหลายแบบ วิธีที่นิยมสำหรับผลิตโลหะที่มีความแข็งสูง ใช้การบด ซึ่งต้องอาศัยเทคนิคเข้ามาช่วย เพราะของแข็งจะถูกบดได้ก็ต้องมีของแข็งกว่าเป็นตัวบด โดยทั่วไปใช้ตัวของมัน บดกันเองจนละเอียด กรณีของโลหะที่มีเนื้ออ่อนใช้วิธีหลอมให้ละลาย แล้วพ่นเป็นฝอย นอกจากนี้การผลิตผงโลหะ อีกวิธีหนึ่งสามารถทำได้โดยเผาโลหะให้กลายเป็นไอ แล้วเกิดการกลั่นตัวเป็นโลหะผง ในขั้นตอนที่สอง เป็นการผสมผงโลหะหลัก และโลหะที่เป็นตัวประสานให้เข้ากัน ซึ่งสามารถผสมได้ ทั้งในสภาพแห้งและเปียก เช่น ในการผลิตมีดกลึง ที่ทำด้วยโลหะทังสเตนคาร์ไบด์ จะใช้โลหะโคบอลต์ เป็นโลหะประสาน ขั้นตอนต่อไปเป็นการอัดโลหะผง ลงในแบบที่ต้องการ ในขั้นตอนนี้ต้องทราบ จำนวนของโลหะผงที่จะใช้ และขนาดของแบบ แล้วจึงเทโลหะผงลงไปในแบบ โดยให้มีปริมาณเกินกว่าปริมาตรที่ต้องใช้จริงๆ เล็กน้อย แล้วใช้เครื่องไฮดรอลิก อัดโลหะผงด้วยความดันประมาณ 5-50 ตันต่อตารางนิ้ว จนโลหะผงอัดตัวกันแน่น เป็นรูปร่างตามที่ต้องการ ในขั้นตอนสุดท้ายต้องนำไปเผาผนึก หรือที่เรียกว่า ซินเทอร์ ที่อุณหภูมิต่ำกว่าจุดหลอมตัว ของโลหะเล็กน้อย คือใช้อุณหภูมิประมาณ 70-80% ของอุณหภูมิหลอมเหลว ในกรณีของวัสดุทนความร้อน ต้องใช้อุณหภูมิประมาณ 90% ของอุณหภูมิหลอมเหลว สำหรับโลหะผสม ที่มีโลหะประสานอยู่ด้วย ต้องทำซินเทอร์ ที่อุณหภูมิ ใกล้จุดหลอมเหลวตัว ของโลหะประสาน โดยทั่วไป มักทำในบรรยากาศ ของก๊าซเฉื่อย เช่น ไนโตรเจนหรืออาร์กอน เพราะขณะเผาออกซิเจนในอากาศ จะทำให้โลหะกลายเป็นออกไซด์ได้ ทั้งนี้การทำซินเทอร์ จะทำให้อะตอมของโลหะ มีการเคลื่อนไหว และเกิดการเชื่อมโยง ระหว่าง

จุดสัมผัสของเม็ดโลหะ ซึ่งเป็นผลจาก การแพร่ของอะตอม ในสภาพของแข็งทำให้โลหะเมื่อผ่านการเผา มีความแข็งแรงมากขึ้น และสามารถนำไปใช้งานได้ ตามลักษณะของโลหะนั้นๆ

การขึ้นรูปด้วยกระบวนการโลหะผง มีจุดเด่นสำคัญคือ ชิ้นงานที่ได้มีความแข็งสูง เนื่องจากโครงสร้าง มีความสม่ำเสมอ และมีขนาดเกรนเล็กละเอียด นอกจากนั้นชิ้นงานยังมีรูปร่างที่แม่นยำ และไม่มีโพรงอากาศ เมื่อเทียบกับงานหล่อ สามารถนำไปใช้ ในการผลิตชิ้นส่วนรูปทรงซับซ้อน เช่น ชิ้นส่วนเครื่องจักร เครื่องยนต์ เป็นต้น

4.2.2 คุณสมบัติของวัสดุ

4.2.2.1 ความแข็งของการทดสอบชิ้นส่วนทังสเตนคาร์ไบด์

ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบความแข็งของเศษแผ่นมีดทังสเตนคาร์ไบด์ (Insert) (HRA)

ชิ้นที่	ความแข็งก่อนอบ (HRA)	ความแข็งหลังอบ (HRA)
1	79.5	57.63
2	74.0	72.0
3	77.9	68.23

ตารางที่ 4.2 ผลการศึกษาคุณศึกษาสมบัติของ ผงทังสเตนคาร์ไบด์ของบริษัท ATI All dyne

Type	Particle Range (μ)	Carbon Total (%)	Oxygen O_2 (%)
O	0.5~0.99	6.10~6.16	<0.28
I	1.00~1.69	6.10~6.16	<0.20
II	1.70~5.99	6.10~6.16	<0.18
III	6.0~8.99	6.10~6.16	<0.01
IV	9.0~15	6.10~6.16	<0.08
V	>15	6.10~6.16	<0.08

ตารางที่ 4.3 ผลการศึกษาคุณสมบัติของ ผงทังสเตนคาร์ไบด์ ของบริษัท CB Carbide

Type	Particle Range (μ)	Carbon Total (%)	Free Carbon O2 (%)	Oxygen O_2 (%)
CB-06	0.5~0.75	6.10~6.20	0.1% Max	≤0.40
CB-08	0.7~0.95	6.10~6.20	0.1% Max	≤0.30
CB-10	0.9~1.3	6.10~6.20	0.1% Max	≤0.20
CB-15	1.3~1.7	6.10~6.20	0.1% Max	≤0.20
CB-20	1.7~2.5	6.10~6.20	0.1% Max	≤0.20
CB-25	2.5~3.0	6.10~6.20	0.1% Max	≤0.20
CB-30	2.9~3.5	6.10~6.20	0.1% Max	≤0.20
CB-50	4.5~5.5	6.10~6.20	0.1% Max	≤0.12
CB-60	5.5~7.5	6.10~6.20	0.1% Max	≤0.15
CB-90	7.6~10.0	6.10~6.20	0.1% Max	≤0.12
CB-120	10.0~14.0	6.10~6.20	0.1% Max	≤0.12

4.3 ผลการศึกษากลไกการย่อยสลาย

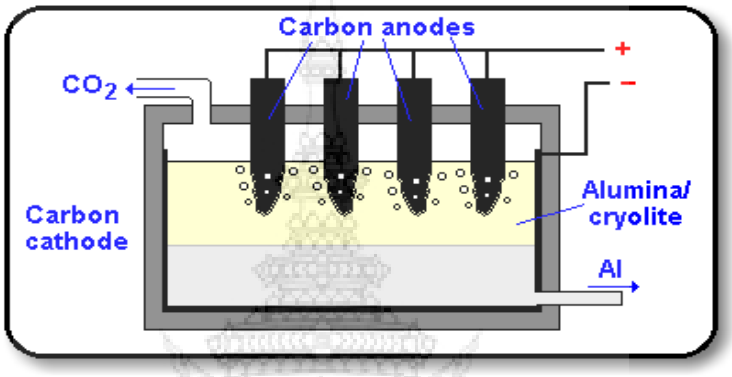
การนำวัสดุทังสเตนคาร์ไบด์ที่ผ่านการใช้งานแล้วกลับมาใช้ใหม่ มีกระบวนการแยก 4 วิธี ได้แก่ Hydrometallurgy, Melting, Direct recycling และ Semidirect recycling ในการทดลองนี้เป็นการศึกษาแนวทางการนำกลับมาใช้ใหม่โดยวิธี Hydrometallurgy ซึ่งเลือกใช้การแยกด้วยเคมีไฟฟ้า (Electrolysis) กรรมวิธีแบบ Hydrometallurgy โดยใช้เคมีไฟฟ้า (Electrolysis) แต่ในกรณีศึกษานี้เราจะใช้กรดไฮโดรคลอริก (HCl) เป็นตัวสลายโดยมีอุปกรณ์จ่ายแรงดันไฟฟ้า และจ่ายกระแสไฟฟ้า ผ่านสารละลายที่กำหนดเปรียบเทียบแรงดัน และกระแสไฟฟ้าที่ต่างกัน

4.3.1 การแยกสลายด้วยไฟฟ้า (Electrolysis)

การแยกสลายด้วยไฟฟ้าเป็นคำที่ใช้อธิบายปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้น เมื่อผ่านกระแสไฟฟ้าเข้าไปในของเหลวที่มีไอออนอยู่ โลหะและกราไฟต์จะนำกระแสไฟฟ้า เพราะอิเล็กตรอนบางตัวมีอิสระที่จะเคลื่อนที่ผ่านผลึกแลตทิซ แต่สารประกอบไอออนิก ที่หลอมเหลว หรือสารประกอบที่แตกตัวเป็นไอออนในสารละลาย จะนำไฟฟ้าได้โดยการเคลื่อนที่ของไอออน

ตารางที่ 4.4 แสดงผลการศึกษาชนิดของขั้วไฟฟ้ากับปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น

ขั้วไฟฟ้า	ปฏิกิริยา	ชนิดของปฏิกิริยา	สิ่งที่เกิดขึ้น
บวก (ขั้วแอโนด)	เสียอิเล็กตรอน	ออกซิเดชัน	สารหรือแก๊สของไอออนลบ
ลบ (ขั้วแคโทด)	รับอิเล็กตรอน	รีดักชัน	โลหะของไอออนบวก



ภาพที่ 4.1 การแยกสารด้วยไฟฟ้า (Electrolysis)

4.3.2 สารละลาย

การย่อยสลายโดยวิธีการทางเคมีไฟฟ้า(Electrolyte)เพื่อกัดกร่อนโลหะซีเมนต์ทังสเตนคาร์ไบด์สามารถใช้สารละลายได้หลายชนิด ซึ่งมีสมบัติแตกต่างกันจากการศึกษาพบว่าสารละลายชนิดไฮโดรคลอริกมีศักยภาพได้ดีกว่าสารละลายชนิดอื่น[1]

4.3.2.1 กรดไฮโดรคลอริก หรือ กรดเกลือ (Hydrochloric acid) เป็นสารประกอบเคมีประเภทกรด ละลายในน้ำ โดยเป็นสารละลาย ของไฮโดรคลอริก (HCl) เป็นกรดแก่, เป็นส่วนประกอบหลักของกรดกระเพาะ (Gastric acid) และใช้กันอย่างกว้างในอุตสาหกรรมเป็นของเหลวที่มีพลังการกัดกร่อนสูง

ตางรางที่ 4.5 ผลการศึกษาคุณสมบัติของกรดไฮโดรคลอริก

ชื่อ	ไฮโดรคลอริกแอซิด
ชื่ออื่น	กรดเกลือ หรือ Muriatic acid
สูตรโมเลกุล	HCl in น้ำ (H_2O)
มวลโมเลกุล	36.46 g/mol (HCl)
ลักษณะปรากฏ	ของเหลวใสไม่มีสี ในรูปบริสุทธิ์ ไอความเข้มข้นสูง
เลขทะเบียน CAS	[7647-01-0] (HCl)
คุณสมบัติ	
ความหนาแน่น และ เฟส	1.18 g/cm^3, 37% solution
การละลาย ใน น้ำ	สารละลาย 38%
จุดหลอมเหลว	26 °C (247 K),สารละลาย 38%
จุดเดือด	110 °C (383 K),สารละลาย 20.2% 48 °C (321 K),สารละลาย 38%

ตารางที่ 4.6 ความสามารถในสารละลายของวัสดุแต่ละชนิด (Anode performances of tungsten and nickel tungsten carbides and oxides and the percentages of anode electro activity compared to that of platinum catalyst)

Catalyst	Curr. density [a] (mA/cm^2)	I-V(V)				RDE	
		Pt percent (%)	PD[b,c]		Pt percent (%)	Curr. density (%)	Vol. /curr. (%)
			mW/ cm^2	mA/ cm^2			
30wt% W-oxide/KC	0.7	0.8	2.4	17.7	2.1	4.9	0.7
30wt% W873/KC	1.5	1.7	1.4	2.9	1.3	5.6	0.8
30wt% W973/KC	1.3	1.5	1.3	3.1	1.2	3.8	0.5
30wt% W1023/KC	5.0	5.6	6.4	15.2	5.7	0.7	0.1
30wt% W1023/VC	4.2	4.7	4.0	8.6	3.6	3.0	0.5

ตารางที่ 4.6 ความสามารถในสารละลายของวัสดุแต่ละชนิด (Anode performances of tungsten and nickel tungsten carbides and oxides and the percentages of anode electro activity compared to that of platinum catalyst) (ต่อ)

30wt% W1073/KC	0.7	0.8	0.8	1.9	0.4	1.1	0.1
W1023	0.6	0.7	0.8	1.9	0.4	1.1	0.1
30wt% NiW-oxide/KC	0.4	0.5	0.3	0.7	0.3	6.8	1.0
30wt% NiW823/KC	0	0	6.6	22.1	5.9	4.9	0.6
30wt% NiW873/KC	6.5	7.3	8.2	19.0	7.3	2.8	0.4
30wt% NiW923/KC	5.0	5.6	7.2	16.1	6.4	5.8	0.8
30wt% NiW973/KC	2.0	2.7	2.4	5.5	2.1	1.0	0.2
30wt% NiW1023/KC	4.5	5.1	4.4	9.6	3.9	2.3	0.3
30wt% NiW/KC1073d	2.6	2.9	4.1	9.8	3.6	4.5	0.2

[a] Current density at 0.7 V.

[b] Voltage at maximum power density.

[c] Power density.

[d] Carbon was physically mixed before the carburization of NiW-oxide

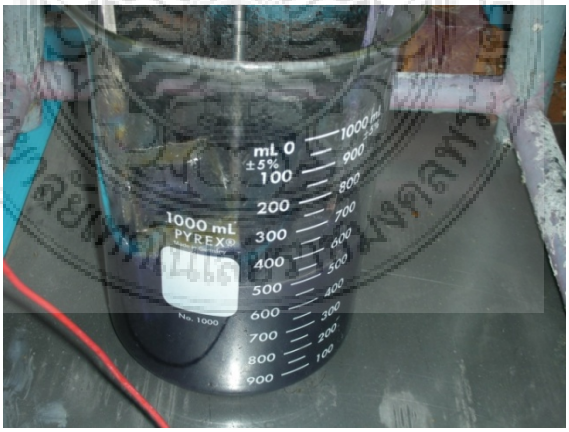
4.4 การทดลองแยกสลายเศษซีเมนต์ทังสเตนคาร์ไบด์ด้วยอุปกรณ์การทดลองในห้องปฏิบัติการ

การเตรียมเศษโลหะซีเมนต์ทังสเตนคาร์ไบด์ชนิด แผ่นมีด มีขั้นตอนการดำเนินงานตาม ภาพที่ 4.2 – 4.9

ภาพที่ 4.2 การเตรียมเศษโลหะ แผ่นมีด

ภาพที่ 4.3 ทำความสะอาดด้วยแอลกอฮอลล์

ภาพที่ 4.4 ชั่งน้ำหนักเศษโลหะ แผ่นมีดก่อนทำการย่อย



ภาพที่ 4.5 นำเศษโลหะแผ่นมีด ใส่ลงในบิกเกอร์และเริ่มทำการย่อยด้วยเคมีไฟฟ้า

ภาพที่ 4.6 ครบเวลา 48 ชั่งโมง นำเศษโลหะ แผ่นมีดชั่งน้ำหนักแล้วบันทึกผล

ภาพที่ 4.7 พักสารละลายทิ้งไว้ให้ตกตะกอน

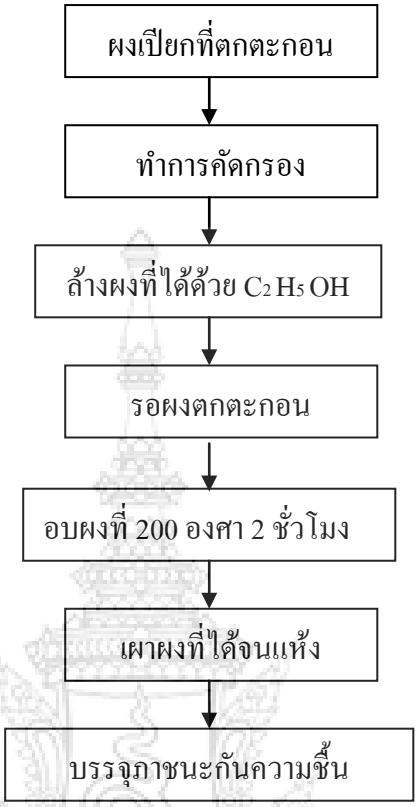
ภาพที่ 4.8 แยกสารละลายและทำให้แห้ง

ภาพที่ 4.9 การบรรจุเพื่อชั่งตวงวัดน้ำหนักโลหะผงทังสเตนคาร์ไบด์

4.5 ผลการศึกษาการแยกผงโลหะออกจากสารละลาย

4.5.1 การกรอง เป็นวิธีการแยกสารออกจากกันระหว่างของแข็งกับของเหลว หรือใช้แยกสารแขวนลอยออกจากน้ำ ซึ่งใช้กันมากในทางเคมี โดยเฉพาะในห้องปฏิบัติการที่กรองสารในปริมาณน้อย ๆ การกรองนั้นจะต้องเทสารผ่านกระดาษกรอง อนุภาคของแข็งที่ลอดผ่านรูกระดาษกรองไม่ได้จะอยู่บนกระดาษกรอง ส่วนน้ำและสารที่ละลายน้ำได้จะผ่านกระดาษกรองลงสู่ภาชนะ

4.5.2 การตกตะกอน ของแข็งแขวนลอยอยู่ในของเหลว ทำได้โดยนำของผสมนั้นวางทิ้งไว้ให้สารแขวนลอยค่อย ๆ ตกตะกอนนอนก้น ในกรณีที่ตะกอนเบามากถ้าต้องการให้ตกตะกอนเร็วขึ้นอาจทำได้โดย ใช้สารตัวกลางให้อนุภาคของตะกอนมาเกาะ เมื่อมีมวลมากขึ้น น้ำหนักจะมากขึ้นจะตกตะกอนได้เร็วขึ้น เช่น ใช้สารส้มแกว่ง อนุภาคของสารส้มจะทำหน้าที่เป็นตัวกลางให้โมเลกุลของสารที่ต้องการตกตะกอนมาเกาะ ตะกอนจะตกเร็วขึ้น



ภาพที่ 4.10 การแยกผงโลหะโดยการตกตะกอน

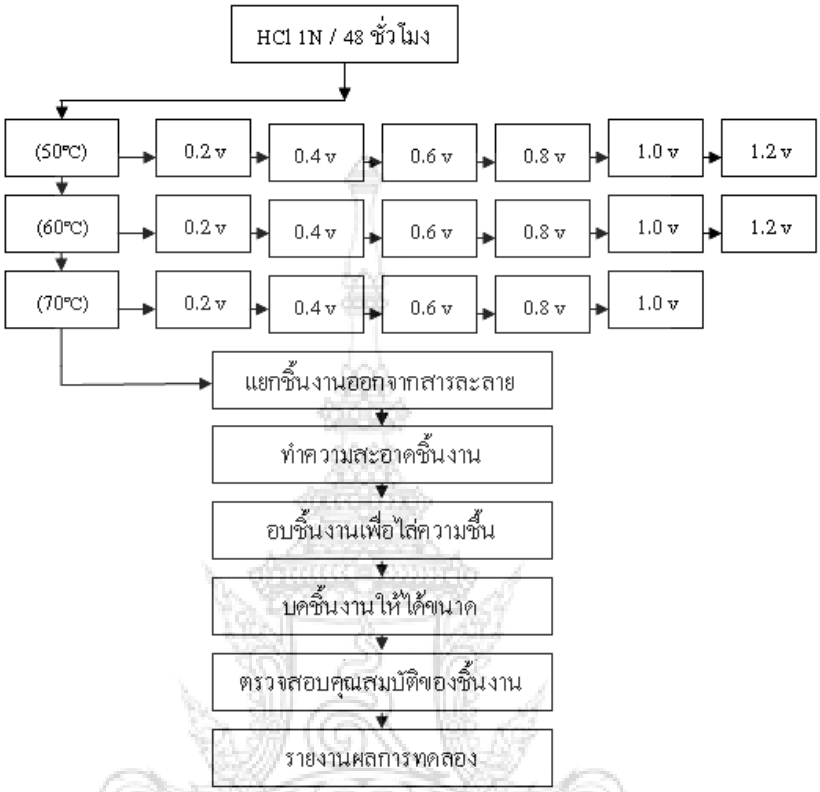
4.6 ผลการศึกษาวิธีการบดผงโลหะ

ภาพที่ 4.11 ขั้นตอนการบดผงทังสเตนคาร์ไบด์

ภาพที่ 4.11 ขั้นตอนการบดผงทังสเตนคาร์ไบด์ (ต่อ)

4.7 ผลการศึกษาเพื่อกำหนดวิธีการทดลอง

การดำเนินการทดลองมีขั้นตอนดำเนินการ ดังนี้



ภาพที่ 4.12 แผนการทดลอง

1) จากภาพที่ 2.6 แสดงให้เห็นความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้ากับกระแสไฟฟ้าโดยขนาดแรงดันไฟฟ้าช่วง 0.2 – 0.6 โวลต์ ส่งผลให้ขนดความเข้มข้นของกระแสไฟฟ้าในสารละลายเพิ่มขึ้นสูงสุดและสลายชิ้นงานเพิ่มขึ้น

2) จากภาพที่ 2.8 แสดงให้เห็นว่าที่อุณหภูมิ 50 – 110 องศาเซลเซียส มีอัตราการย่อยสลายที่เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องจนถึง 110 องศาเซลเซียส จากนั้นอัตราการสลายไม่เพิ่มขึ้น ดังนั้นอุณหภูมิมีผลต่อการสลายโลหะประสาน แต่การใช้อุณหภูมิสูงจะเป็นการสิ้นเปลืองสารละลายมากเกินไป

3) จากภาพที่ 2.7 แสดงให้เห็นว่าที่สารละลาย HCl ความเข้มข้น 1 N สามารถแยกโลหะได้ดีและให้อัตราการสลายโลหะเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นเพิ่มขึ้น

ดังนั้นข้อมูลดังกล่าวจึงสรุปได้ว่าการใช้กระแสไฟฟ้าไม่ควรเกิน 1.2 โวลต์ ภายใต้อุณหภูมิต่ำกว่าจุดเดือดของสารละลายเพื่อป้องกันการระเหยกลายเป็นไอกรด ข้อมูลดังกล่าวเป็นพื้นฐานในการออกแบบการทดลองดังภาพที่ 4.12

4.8 ตารางการบันทึกและรวบรวมผลการทดลอง

ผลการทดลองการใช้กระแสไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้าภายใต้อุณหภูมิต่างกันโดยทำการทดลองทั้งหมด 17 การทดลอง ใน 1 การทดลองใช้วเลา 48 ชั่วโมง มีการบันทึกผลทั้งหมด 98 ครั้ง เพื่อศึกษาข้อมูลสำหรับการออกแบบอุปกรณ์ย่อยสลายโลหะซีเมนต์ทังสเตนคาร์ไบด์

ตารางที่ 4.7 บันทึกผลการทดลอง: กรดไฮโดรคลอริก: T (50°C) : แรงดัน 0.2 โวลต์ 13-14 กรกฎาคม 2553

ครั้งที่	เวลาทดลอง นาที	D.C VOLT แรงดันไฟฟ้า (V)	D.C AMPERE กระแสไฟ (A)	RPM รอบ / นาที	อุณหภูมิ T(°C)
1	15.00	0.2	0.02-0.08	16	34
2	15.30	0.2	0.05-0.10	16	40
3	16.00	0.2	0.06-0.10	16	46
4	16.30	0.2	0.06-0.11	16	50
5	17.00	0.2	0.07-0.12	16	50
6	17.30	0.2	0.07-0.12	16	50
7	18.00	0.2	0.06-0.13	16	50
8	18.30	0.2	0.07-0.15	16	50
9	19.00	0.2	0.06-0.14	16	50
10	19.30	0.2	0.05-0.12	16	50
11	20.00	0.2	0.02-0.18	16	50
12	20.30	0.2	0.05-0.13	16	50
13	21.00	0.2	0.06-0.14	16	50
14	21.30	0.2	0.06-0.13	16	50
15	22.00	0.2	0.07-0.14	16	50
16	22.30	0.2	0.06-0.14	16	50

ตารางที่ 4.7 บันทึกผลการทดลอง : กรดไฮโดรคลอริก: T (50°C): แรงดัน 0.2 โวลต์
วันที่ 13-14 กรกฎาคม 2553 (ต่อ)

ครั้งที่	เวลาทดลอง นาที	D.C VOLT แรงดันไฟฟ้า (V)	D.C AMPERE กระแสไฟ (A)	RPM รอบ / นาที	อุณหภูมิ T (°C)
17	23.00	0.2	0.06-0.14	16	50
18	23.30	0.2	0.03-0.15	16	50
19	00.00	0.2	0.04-0.15	16	50
20	00.30	0.2	0.05-0.14	16	50
21	01.00	0.2	0.04-0.15	16	50
22	01.30	0.2	0.05-0.14	16	50
23	02.00	0.2	0.05-0.15	16	50
24	02.30	0.2	0.05-0.14	16	50
25	03.00	0.2	0.05-0.14	16	50
26	03.30	0.2	0.07-0.17	16	50
27	04.00	0.2	0.07-0.18	16	50
28	04.30	0.2	0.06-0.17	16	50
29	05.00	0.2	0.08-0.17	16	50
30	05.30	0.2	0.07-0.17	16	50
31	06.00	0.2	0.08-0.18	16	50
32	06.30	0.2	0.09-0.17	16	50

ตารางที่ 4.7 บันทึกผลการทดลอง : กรดไฮโดรคลอริก: T (50°C): แรงดัน 0.2 โวลต์
วันที่ 13-14 กรกฎาคม 2553 (ต่อ)

ครั้งที่	เวลาทดลอง นาที	D.C VOLT แรงดันไฟฟ้า (V)	D.C AMPERE กระแสไฟ (A)	RPM รอบ / นาที	อุณหภูมิ T (°C)
33	07.00	0.2	0.08-0.19	16	50
34	07.30	0.2	0.08-0.16	16	50
35	08.00	0.2	0.08-0.16	16	50
36	08.30	0.2	0.06-0.15	16	50
37	09.00	0.2	0.05-0.17	16	50
38	09.30	0.2	0.18-0.19	16	50
39	10.00	0.2	0.05-0.18	16	50
40	10.30	0.2	0.07-0.18	16	50
41	11.00	0.2	0.05-0.17	16	50
42	11.30	0.2	0.00-0.16	16	50
43	12.00	0.2	0.03-0.17	16	50
44	12.30	0.2	0.02-0.18	16	50
45	13.00	0.2	0.05-0.17	16	50
46	13.30	0.2	0.05-0.17	16	50
47	14.00	0.2	0.05-0.20	16	50
48	14.30	0.2	0.06-0.20	16	50
49	15.00	0.2	0.04-0.21	16	50

ตารางที่ 4.7 บันทึกผลการทดลอง: กรดไฮโดรคลอริก: T (50°C): แรงดัน 0.2 โวลต์
วันที่ 14-15 กรกฎาคม 2553 (ต่อ)

ครั้งที่	เวลาทดลอง นาที	D.C VOLT แรงดันไฟฟ้า (V)	D.C AMPERE กระแสไฟ (A)	RPM รอบ / นาที	อุณหภูมิ T (°C)
50	23.30	0.2	0.18-0.36	16	37
51	00.00	0.2	0.23-0.45	16	42
52	00.30	0.2	0.20-0.38	16	50
53	01.00	0.2	0.18-0.36	16	50
54	01.30	0.2	0.21-0.34	16	50
55	02.00	0.2	0.16-0.33	16	50
56	02.30	0.2	0.15-0.37	16	50
57	03.00	0.2	0.16-0.33	16	50
58	03.30	0.2	0.15-0.30	16	50
59	04.00	0.2	0.05-0.31	16	50
60	04.30	0.2	0.11-0.28	16	50
61	05.00	0.2	0.11-0.32	16	50
62	05.30	0.2	0.17-0.34	16	50
63	06.00	0.2	0.12-0.27	16	50
64	06.30	0.2	0.11-0.27	16	50
65	07.00	0.2	0.15-0.25	16	50

ตารางที่ 4.7 บันทึกผลการทดลอง: กรดไฮโดรคลอริก: T (50°C): แรงดัน 0.2 โวลต์
วันที่ 14-15 กรกฎาคม 2553 (ต่อ)

ครั้งที่	เวลาทดลอง นาที	D.C VOLT แรงดันไฟฟ้า (V)	D.C AMPERE กระแสไฟ (A)	RPM รอบ / นาที	อุณหภูมิ T (°C)
66	07.30	0.2	0.11-0.23	16	50
67	08.00	0.2	0.11-0.23	16	50
68	08.30	0.2	0.13-0.22	16	50
69	09.00	0.2	0.14-0.25	16	50
70	09.30	0.2	0.10-0.25	16	50
71	10.00	0.2	0.09-0.22	16	50
72	10.30	0.2	0.11-0.26	16	50
73	11.00	0.2	0.14-0.25	16	50
74	11.30	0.2	0.11-0.26	16	50
75	12.00	0.2	0.10-0.21	16	50
76	12.30	0.2	0.11-0.27	16	50
77	13.00	0.2	0.10-0.24	16	50
78	13.30	0.2	0.08-0.23	16	50
79	14.00	0.2	0.10-0.23	16	50
80	14.30	0.2	0.09-0.24	16	50
81	15.00	0.2	0.12-0.26	16	50

ตารางที่ 4.7 บันทึกผลการทดลอง: กรดไฮโดรคลอริก: T (50°C): แรงดัน 0.2 โวลต์
วันที่ 14-15 กรกฎาคม 2553 (ต่อ)

ครั้งที่	เวลาทดลอง นาที	D.C VOLT แรงดันไฟฟ้า (V)	D.C AMPERE กระแสไฟ (A)	RPM รอบ / นาที	อุณหภูมิ T (°C)
82	15.30	0.2	0.09-0.25	16	50
83	16.00	0.2	0.10-0.26	16	50
84	16.30	0.2	0.10-0.26	16	50
85	17.00	0.2	0.09-0.25	16	50
86	17.30	0.2	0.13-0.25	16	50
87	18.00	0.2	0.11-0.21	16	50
88	18.30	0.2	0.06-0.24	16	50
89	19.00	0.2	0.09-0.20	16	50
90	19.30	0.2	0.05-0.21	16	50
91	20.00	0.2	0.06-0.23	16	50
92	20.30	0.2	0.08-0.21	16	50
93	21.00	0.2	0.08-0.22	16	50
94	21.30	0.2	0.08-0.27	16	50
95	22.00	0.2	0.08-0.20	16	50
96	22.30	0.2	0.09-0.21	16	50
97	23.00	0.2	0.07-0.20	16	50
98	23.30	0.2	0.09-0.20	16	50

4.9 วิเคราะห์ผลการทดลอง

1) จากผลการทดลองเมื่อวันที่ 13 – 15 ธ.ค. 52 ใช้กรดไฮโดรคลอริก 1N แรงดัน 0.2 โวลต์ เวลา 48 ชั่วโมง กระแสอยู่ในช่วง 0.00-0.20 A RPM 16 รอบต่อนาที อุณหภูมิ 50°C ผงทังสเตนคาร์ไบด์ที่ผลิตได้ จำนวน 116.66 g

2) จากผลการทดลองเมื่อวันที่ 29 – 31 ธ.ค. 52ใช้กรดไฮโดรคลอริก 1N แรงดัน 0.2 โวลต์ เวลา 48 ชั่วโมง กระแสอยู่ในช่วง 0.00-0.18 A RPM 16 รอบต่อนาที อุณหภูมิ 60°C ผงทังสเตนคาร์ไบด์ที่ผลิตได้จำนวน 104.68 g

3) จากผลการทดลองเมื่อวันที่ 2 – 4 ธ.ค. 52ใช้กรดไฮโดรคลอริก 1N แรงดัน 0.2 โวลต์ เวลา 48 ชั่วโมง กระแสอยู่ในช่วง 0.00-0.45 A RPM 16 รอบต่อนาที อุณหภูมิ 70°C ผงทังสเตนคาร์ไบด์ที่ผลิตได้จำนวน 96.68 g

4) จากผลการทดลองเมื่อวันที่ 23 – 25 พ.ย. 52ใช้กรดไฮโดรคลอริก 1N แรงดัน 0.4 โวลต์ เวลา 48 ชั่วโมง กระแสอยู่ในช่วง 0.10-0.86 A RPM 16 รอบต่อนาที อุณหภูมิ 50°C ผงทังสเตนคาร์ไบด์ที่ผลิตได้จำนวน 109.53 g

5) จากผลการทดลองเมื่อวันที่ 25 – 27 พ.ย. 52ใช้กรดไฮโดรคลอริก 1N แรงดัน 0.4 โวลต์ เวลา 48 ชั่วโมง กระแสอยู่ในช่วง 0.15-0.87 A RPM 16 รอบต่อนาที อุณหภูมิ 60°C ผงทังสเตนคาร์ไบด์ที่ผลิตได้จำนวน 112.99 g

6) จากผลการทดลองเมื่อวันที่ 18 – 20 ธ.ค. 52ใช้กรดไฮโดรคลอริก 1N แรงดัน 0.4 โวลต์ เวลา 48 ชั่วโมง กระแสอยู่ในช่วง 0.02-0.53 A RPM 16 รอบต่อนาที อุณหภูมิ 70°C ผงทังสเตนคาร์ไบด์ที่ผลิตได้จำนวน 104.00 g

7) จากผลการทดลองเมื่อวันที่ 23 – 25 ธ.ค. 52ใช้กรดไฮโดรคลอริก 1N แรงดัน 0.6 โวลต์ เวลา 48 ชั่วโมง กระแสอยู่ในช่วง 0.02-0.31 A RPM 16 รอบต่อนาที อุณหภูมิ 50°C ผงทังสเตนคาร์ไบด์ที่ผลิตได้จำนวน 96.07 g

8) จากผลการทดลองเมื่อวันที่ 27 – 29 ธ.ค. 52ใช้กรดไฮโดรคลอริก 1N แรงดัน 0.6 โวลต์ เวลา 48 ชั่วโมง กระแสอยู่ในช่วง 0.02-0.72 A RPM 16 รอบต่อนาที อุณหภูมิ 60°C ผงทังสเตนคาร์ไบด์ที่ผลิตได้จำนวน 104.00 g

9) จากผลการทดลองเมื่อวันที่ 20 – 22 ธ.ค. 52ใช้กรดไฮโดรคลอริก 1N แรงดัน 0.6 โวลต์ เวลา 48 ชั่วโมง กระแสอยู่ในช่วง 0.11-0.53 A RPM 16 รอบต่อนาที อุณหภูมิ 70°C ผงทังสเตนคาร์ไบด์ที่ผลิตได้จำนวน 78.90 g

10) จากผลการทดลองเมื่อวันที่ 1 – 3 ม.ค. 53 ใช้กรดไฮโดรคลอริก 1N แรงดัน 0.8 โวลต์ เวลา 48 ชั่วโมง กระแสอยู่ในช่วง 0.12-0.54 A RPM 16 รอบต่อนาที อุณหภูมิ 50°C ผงทังสเตนคาร์ไบด์ที่ผลิตได้จำนวน 103.47 g

11) จากผลการทดลองเมื่อวันที่ 13 – 15 ม.ค. 53 ใช้กรดไฮโดรคลอริก 1N แรงดัน 0.8 โวลต์ เวลา 48 ชั่วโมง กระแสอยู่ในช่วง 0.08-0.70 A RPM 16 รอบต่อนาที อุณหภูมิ 60°C ผงทังสเตนคาร์ไบด์ที่ผลิตได้จำนวน 88.75 g

12) จากผลการทดลองเมื่อวันที่ 23 – 25 ม.ค. 53 ใช้กรดไฮโดรคลอริก 1N แรงดัน 0.8 โวลต์ เวลา 48 ชั่วโมง กระแสอยู่ในช่วง 0.12-2.16 A RPM 16 รอบต่อนาที อุณหภูมิ 70°C ผงทังสเตนคาร์ไบด์ที่ผลิตได้จำนวน 105.91 g

13) จากผลการทดลองเมื่อวันที่ 3 – 5 ม.ค. 53 ใช้กรดไฮโดรคลอริก 1N แรงดัน 1.0 โวลต์ เวลา 48 ชั่วโมง กระแสอยู่ในช่วง 0.32-0.98 A RPM 16 รอบต่อนาที อุณหภูมิ 50°C ผงทังสเตนคาร์ไบด์ที่ผลิตได้จำนวน 103.47 g

14) จากผลการทดลองเมื่อวันที่ 10 – 12 ม.ค. 53 ใช้กรดไฮโดรคลอริก 1N แรงดัน 1.0 โวลต์ เวลา 48 ชั่วโมง กระแสอยู่ในช่วง 0.19-0.79 A RPM 16 รอบต่อนาที อุณหภูมิ 60°C ผงทังสเตนคาร์ไบด์ที่ผลิตได้จำนวน 88.81 g

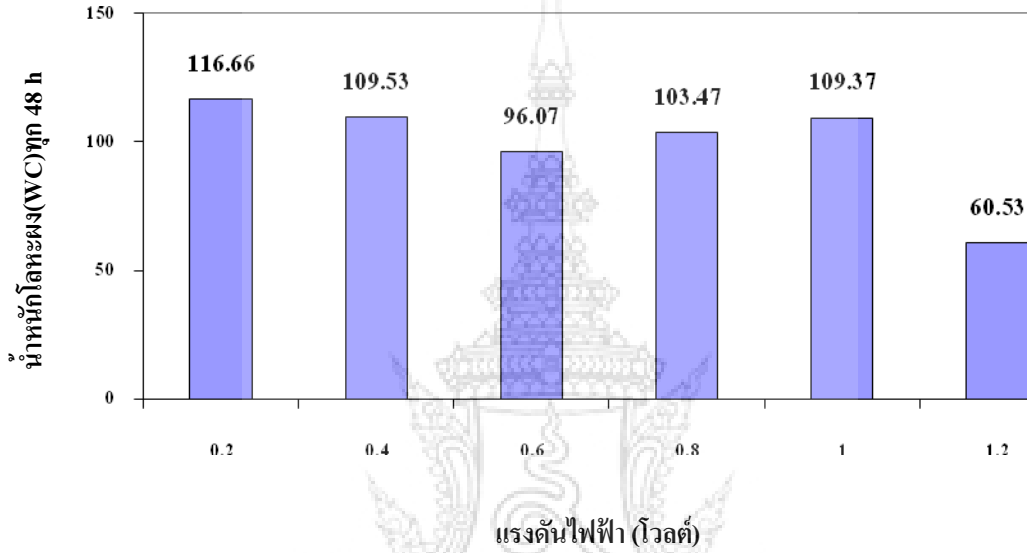
15) จากผลการทดลองเมื่อวันที่ 26 – 28 ม.ค. 53 ใช้กรดไฮโดรคลอริก 1N แรงดัน 1.0 โวลต์ กระแสอยู่ในช่วง 0.22-1.56 A RPM 16 รอบต่อนาที อุณหภูมิ 70°C ผงทังสเตนคาร์ไบด์ที่ผลิตได้จำนวน 123.52 g

16) จากผลการทดลองเมื่อวันที่ 5 – 7 ม.ค. 53 ใช้กรดไฮโดรคลอริก 1N แรงดัน 1.2 โวลต์ กระแสอยู่ในช่วง 0.32-1.09 A RPM 16 รอบต่อนาที อุณหภูมิ 50°C ผงทังสเตนคาร์ไบด์ที่ผลิตได้จำนวน 60.53 g

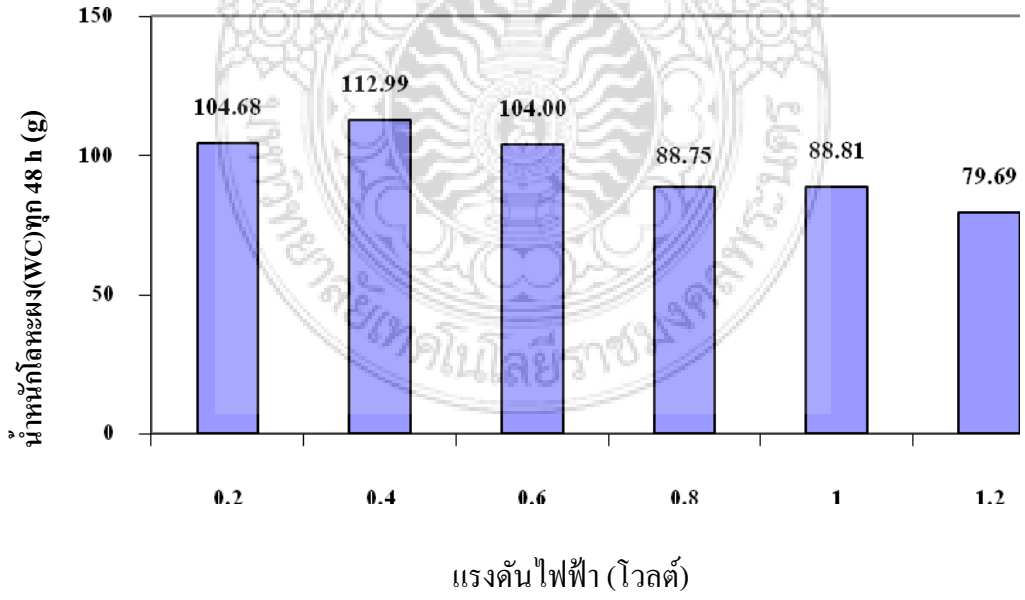
17. จากผลการทดลองเมื่อวันที่ 8 – 10 ม.ค. 53 ใช้กรดไฮโดรคลอริก 1N แรงดัน 1.2 โวลต์ กระแสอยู่ในช่วง 0.31-1.19 A RPM 16 รอบต่อนาที อุณหภูมิ 60°C ผงทังสเตนคาร์ไบด์ที่ผลิตได้จำนวน 79.69 g

4.10 ผลการทดลองการแยกสลายทังสตนคาร์ไบด์จากเศษซีเมนต์ทังสเตนคาร์ไบด์

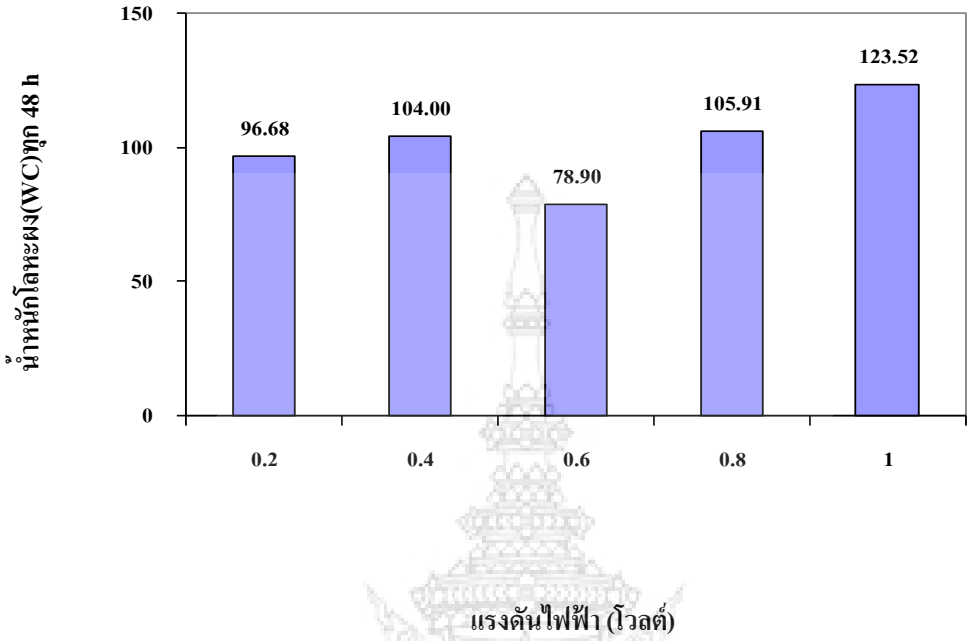
การเปรียบเทียบผลการทดลองแยกสลายทังสเตนคาร์ไบด์ อุณหภูมิ 50,60 และ 70 ⁰C ด้วยแรงดันแตกต่างกัน ผลการทดลองแสดงปริมาณน้ำหนักผงทังสเตนคาร์ไบด์ น้ำหนักที่ลดลงของเศษโลหะแผ่นมีด รวมทั้งจำนวนสารละลายที่ระเหย



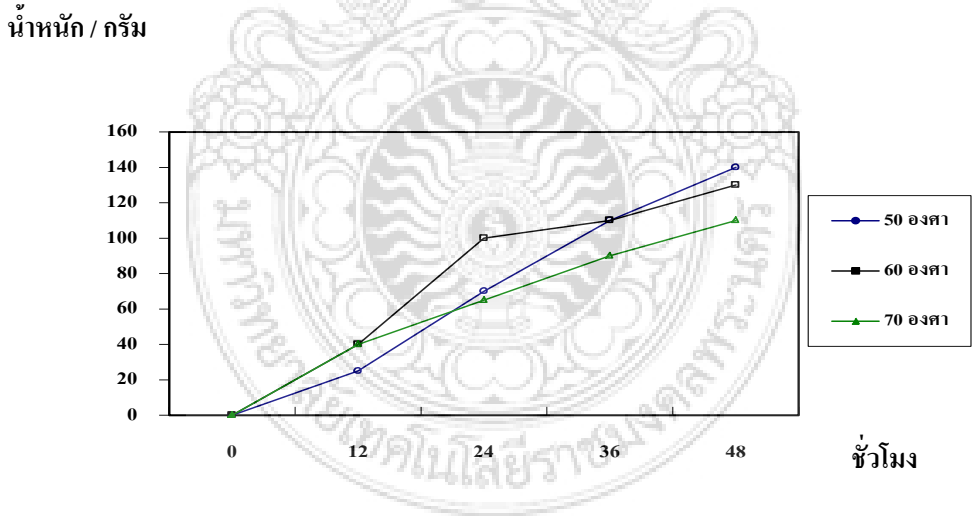
ภาพที่ 4.13 แผนภูมิแสดงน้ำหนักผงทังสเตนคาร์ไบด์ที่ได้จากการทดลองที่อุณหภูมิ 50 องศา



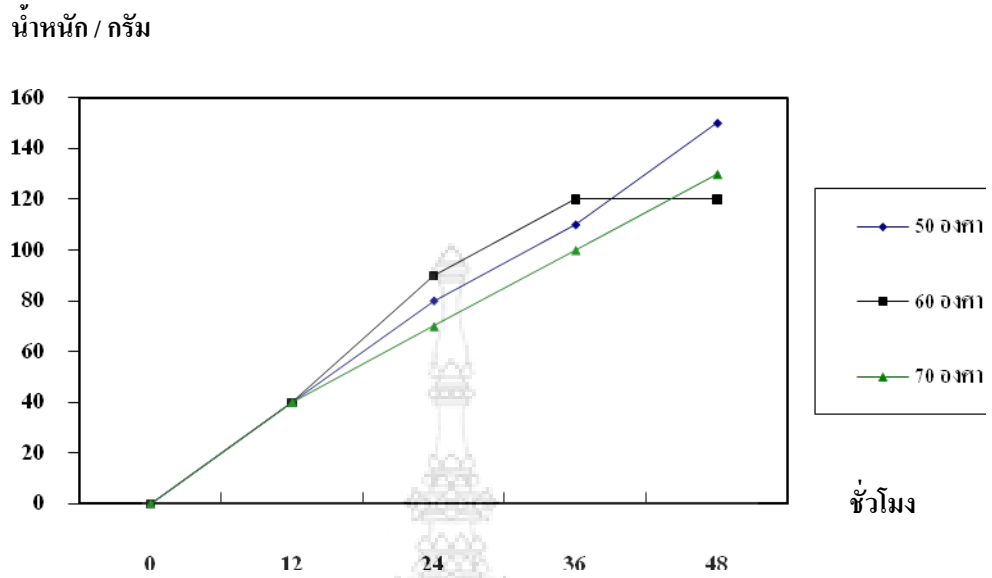
ภาพที่ 4.14 แผนภูมิแสดงน้ำหนักผงทังสเตนคาร์ไบด์ที่ได้จากการทดลองที่อุณหภูมิ 60 องศา



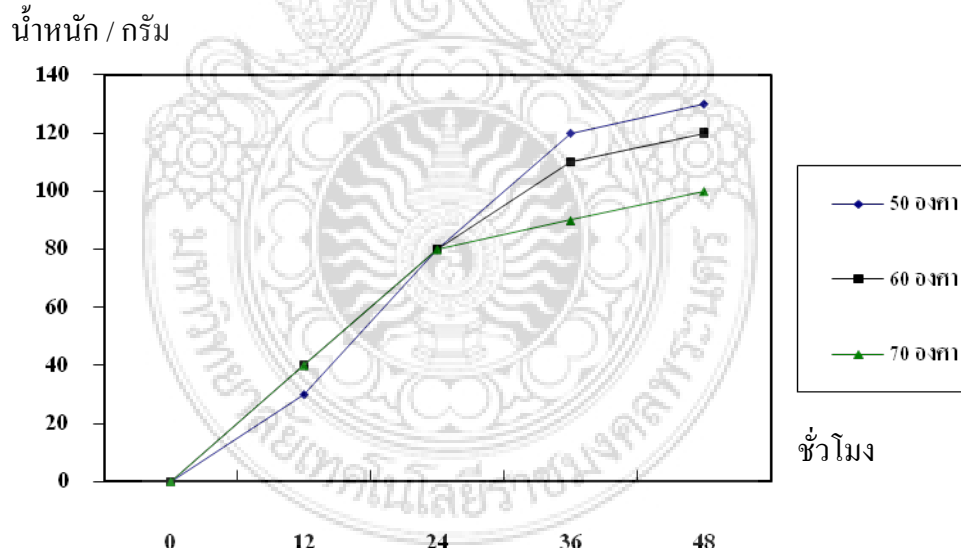
ภาพที่ 4.15 แผนภูมิแสดงน้ำหนักผงทังสเตนคาร์ไบด์ที่ได้จากการทดลองที่อุณหภูมิ 70 องศา



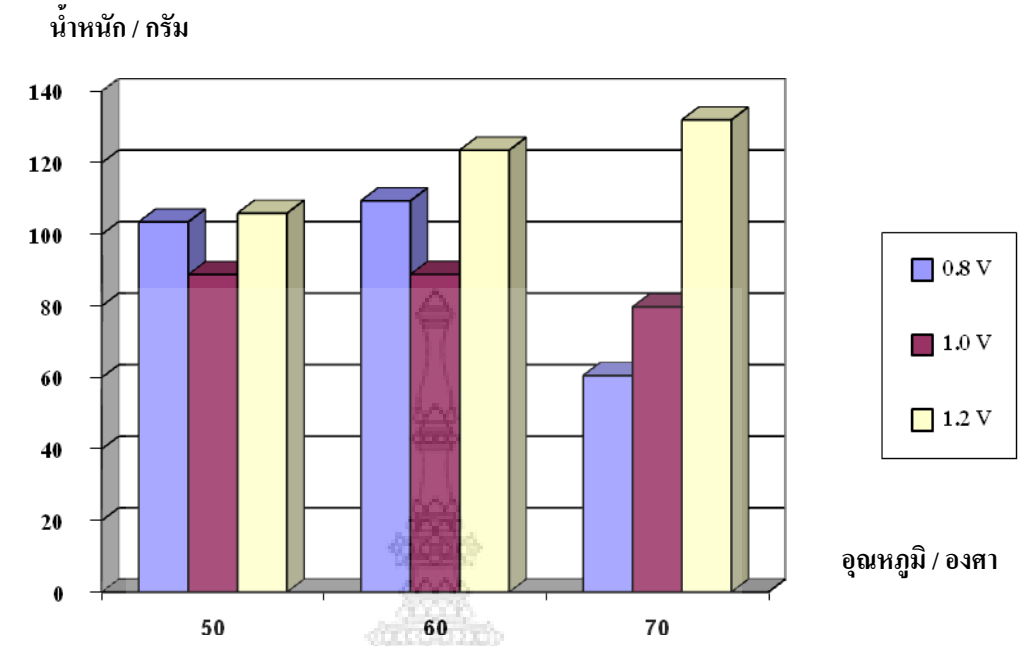
ภาพที่ 4.16 แผนภูมิแสดงการเปรียบเทียบน้ำหนักที่ลดลงระหว่างเวลาทดลองที่แรงดัน 0.2 โวลต์



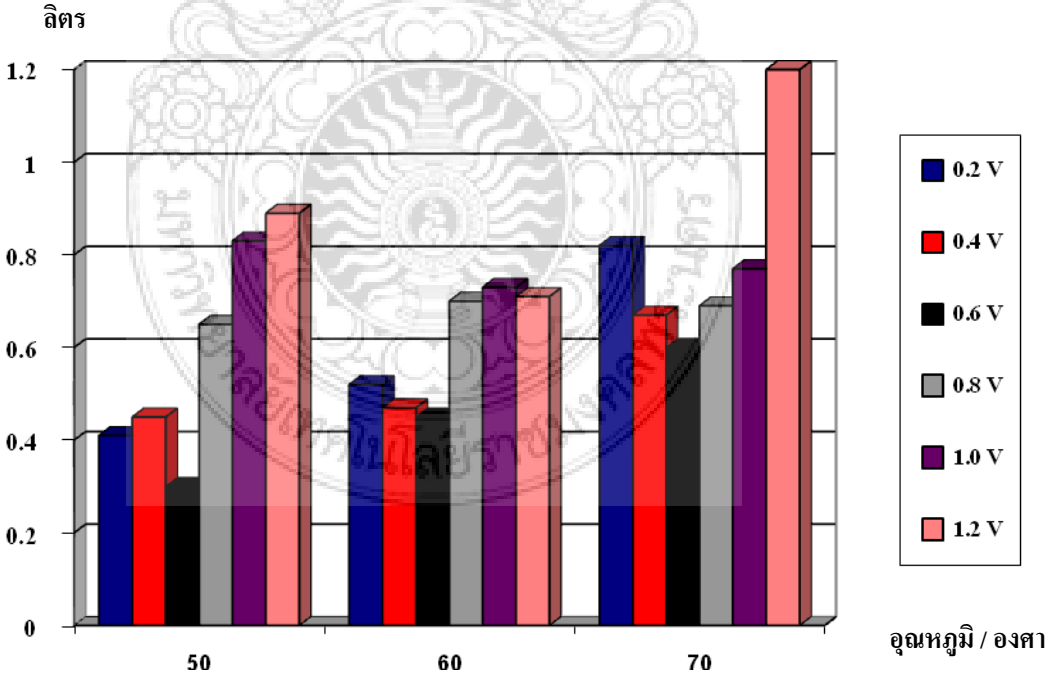
ภาพที่ 4.17 แผนภูมิแสดงการเปรียบเทียบน้ำหนักที่ลดลงระหว่างเวลาทดลองที่แรงดัน 0.4 โวลต์



ภาพที่ 4.18 แผนภูมิแสดงการเปรียบเทียบน้ำหนักที่ลดลงระหว่างเวลาทดลองที่แรงดัน 0.6 โวลต์



ภาพที่ 4.19 แผนภูมิแสดงการเปรียบเทียบน้ำหนักที่ลดลงในเวลาทดลอง 48 (ชั่วโมง)

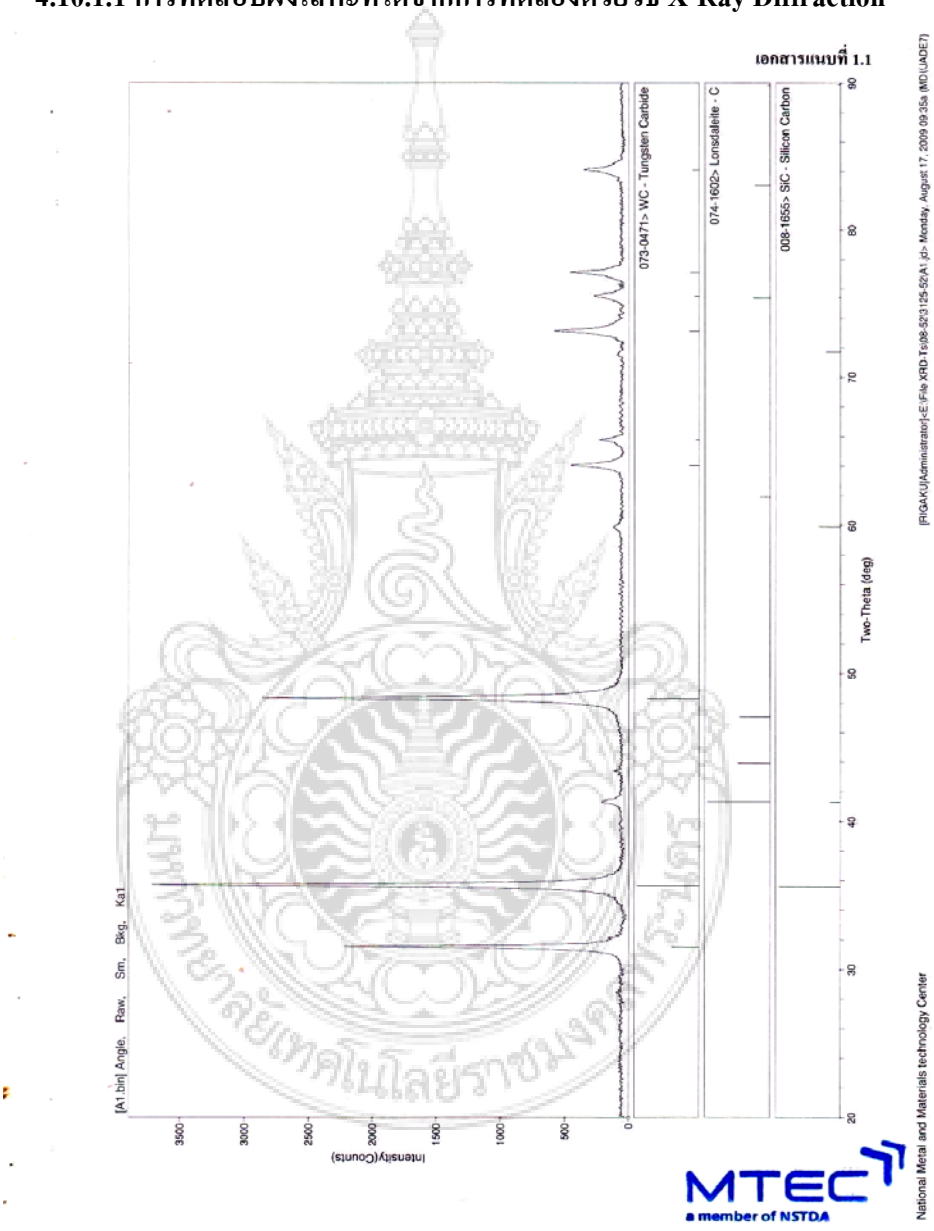


ภาพที่ 4.20 แผนภูมิแสดงการเปรียบเทียบการระเหยของสารละลาย

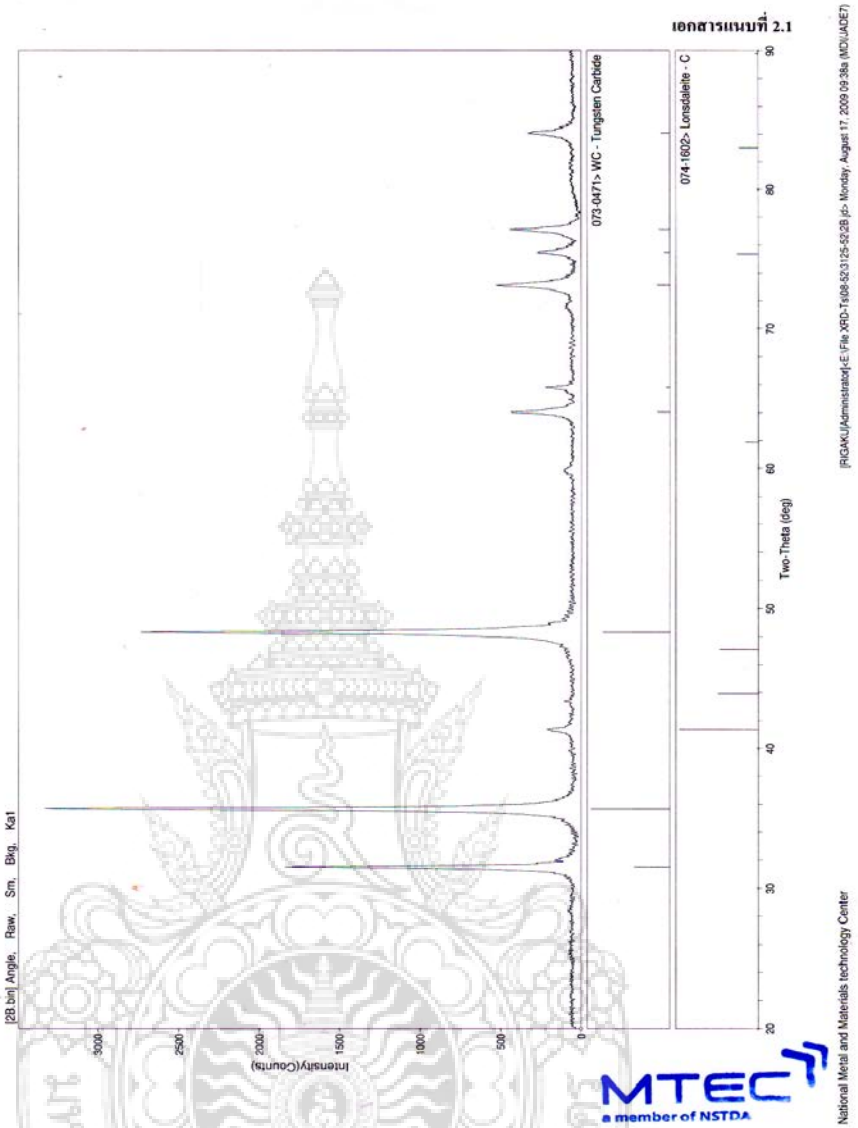
4.10.1 ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติผงโลหะทังสเตนคาร์ไบด์ที่ได้จากการทดลอง

การวิเคราะห์ตัวอย่างของโลหะผงทังสเตนคาร์ไบด์จากผลการทดลองด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์(XRD) และ การตรวจหาขนาดของอนุภาคโลหะผงทังเตนคาร์ไบด์จากการรีไซเคิล มีดังนี้

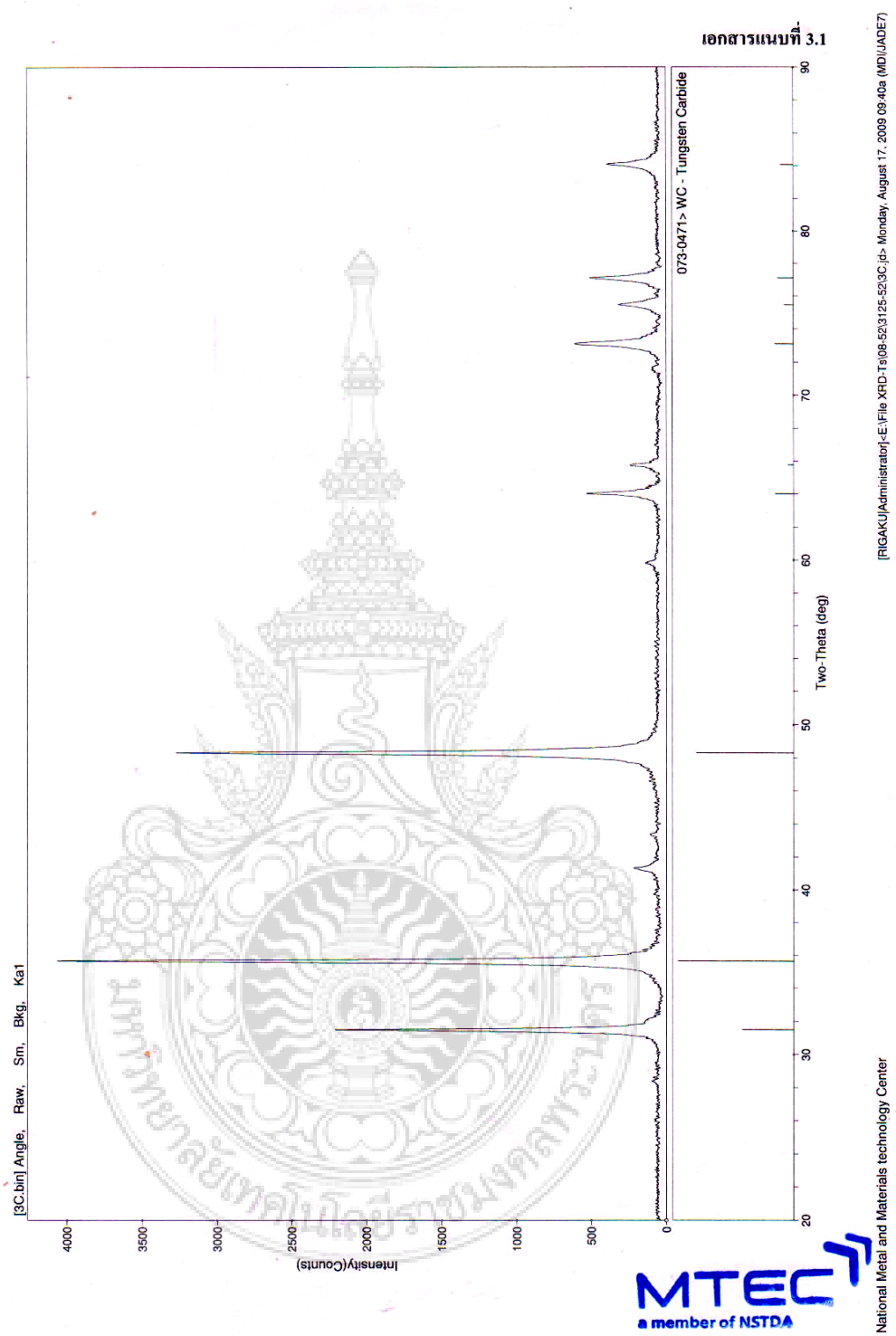
4.10.1.1 การทดสอบผงโลหะที่ได้จากการทดลองด้วยวิธี X-Ray Diffraction



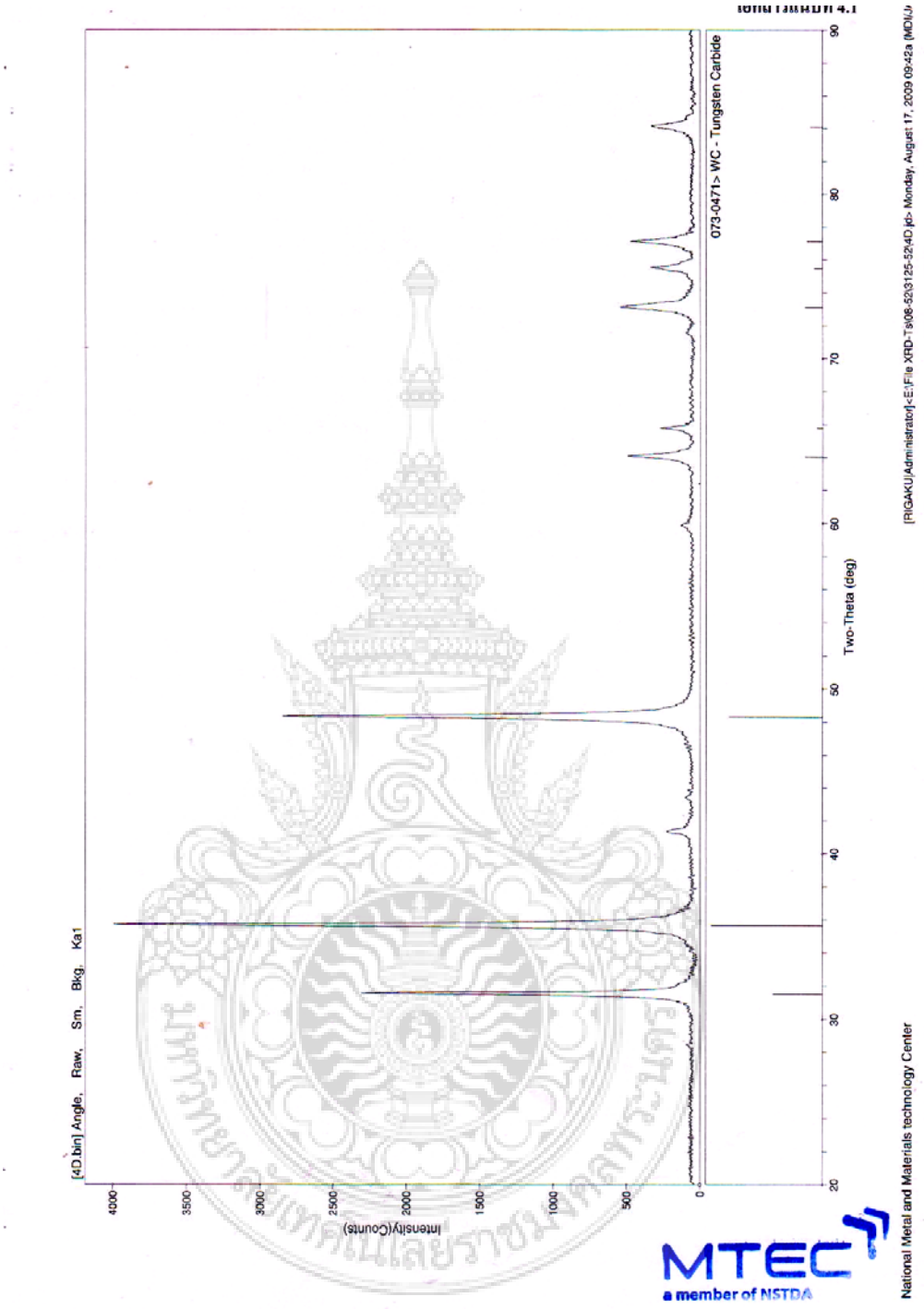
ภาพที่ 4.21 กราฟแสดงผลการทดสอบผงโลหะที่ได้จากการทดลองด้วยวิธี X-Ray Diffraction



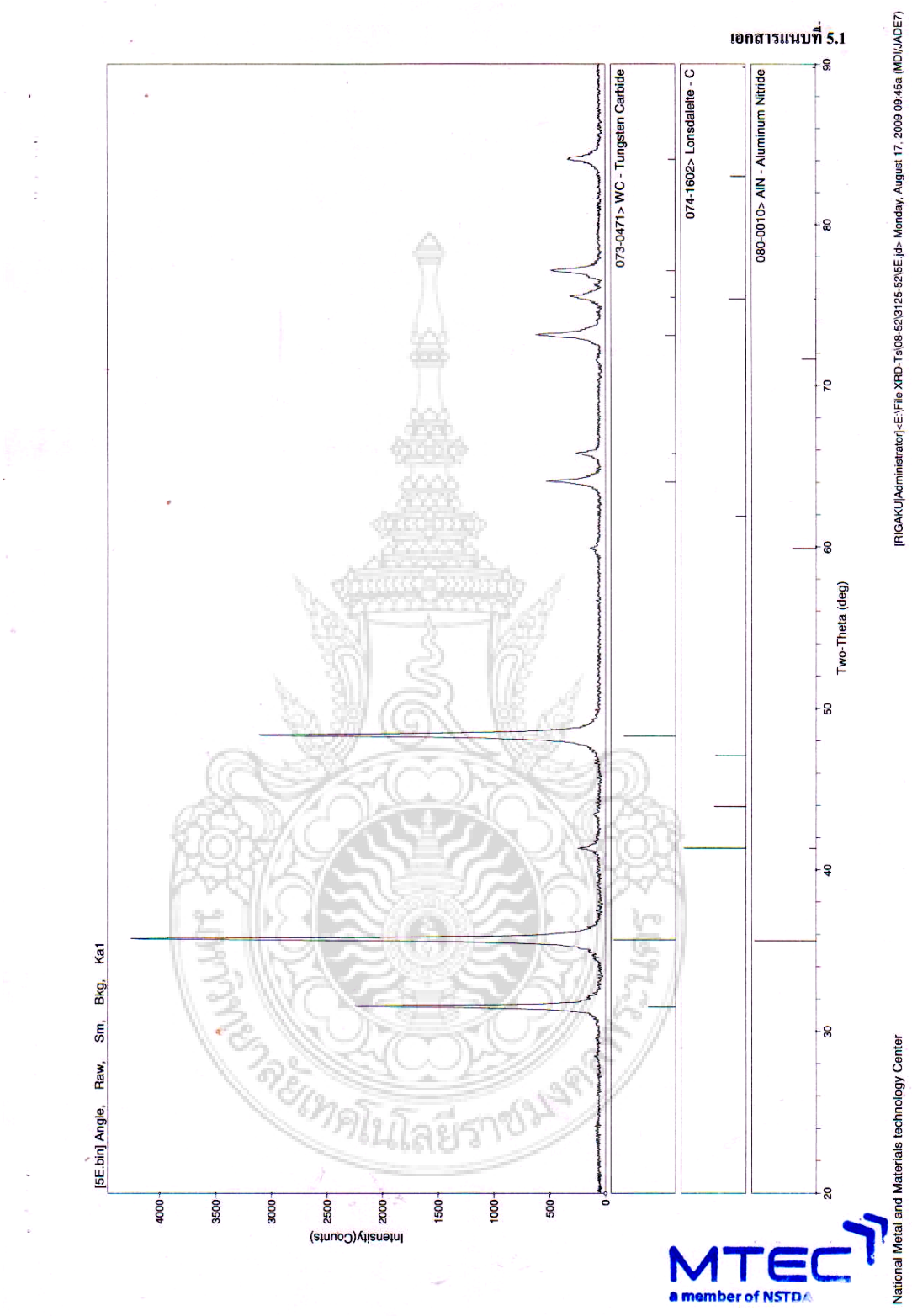
ภาพที่ 4.22 กราฟแสดงผลการทดสอบผงโลหะที่ได้จากการทดลองด้วยวิธี X-Ray Diffraction



ภาพที่ 4.23 กราฟแสดงผลการทดสอบผงโลหะที่ได้จากการทดลองด้วยวิธี X-Ray Diffraction



ภาพที่ 4.24 กราฟแสดงผลการทดสอบผงโลหะที่ได้จากการทดลองด้วยวิธี X-Ray Diffraction



ภาพที่ 4.25 กราฟแสดงผลการทดสอบผงโลหะที่ได้จากการทดลองด้วยวิธี X-Ray Diffraction

4.10.1.2 การวิเคราะห์องค์ประกอบของตัวอย่างด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD)

1)ตัวอย่างผงทังสเตนคาร์ไบด์ชนิด A องค์ประกอบที่มีความเป็นไปได้คือ Tungsten Carbide (WC) และ Silicon Caebon (SiC)

2)ตัวอย่างผงทังสเตนคาร์ไบด์ชนิด B องค์ประกอบที่มีความเป็นไปได้คือ Tungsten Carbide (WC)

3)ตัวอย่างผงทังสเตนคาร์ไบด์ชนิด C องค์ประกอบที่มีความเป็นไปได้คือ Tungsten Carbide (WC)

4)ตัวอย่างผงทังสเตนคาร์ไบด์ชนิด D องค์ประกอบที่มีความเป็นไปได้คือ Tungsten Carbide (WC)

5)ตัวอย่างผงทังสเตนคาร์ไบด์ชนิด A องค์ประกอบที่มีความเป็นไปได้คือ Tungsten Carbide (WC) และ Aluminum Nitride(AIN)

4.10.1.3 ผลการทดสอบวิเคราะห์ขนาดอนุภาคโลหะผงทังสเตนคาร์ไบด์ที่ได้จากการทดลอง

ตารางที่ 4.8 ผลการทดสอบขนาดและการกระจายตัวของผงโลหะของตัวอย่าง 1 A

จำนวนครั้งในการวิเคราะห์	จำนวนการวิเคราะห์ซ้ำ	D [4,3] ไมครอน	D (v,0.1) ไมครอน	D (v,0.5) ไมครอน	D (v,0.9) ไมครอน	Span
1	1	2.23	0.38	1.33	4.04	2.74
	2	2.02	0.34	1.31	3.59	2.49
	3	1.98	0.33	1.30	3.55	2.48
2	1	1.93	0.33	1.29	3.43	2.40
	2	2.14	0.16	1.27	4.11	3.11
	3	1.84	0.29	1.27	3.23	2.31
3	1	1.89	0.29	1.27	3.23	2.33
	2	1.84	0.27	1.25	3.13	2.28
	3	1.88	0.16	1.22	3.47	2.73
ค่าเฉลี่ย		1.97	0.28	1.28	3.53	2.54
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน		0.14	0.08	0.03	0.34	0.27
% ค่าความผิดพลาด		6.94	27.06	2.67	9.75	10.68

MTEC
a member of NSTDA

Result : Analysis Report

เอกสารแนบที่ 10

Sample Details

Sample ID : Sample 1A_1 **Measured :** Friday, August 07, 2009 2:50:18 PM

Sample File : D:\Data Mastersizer2000\Technical service\TS_52\TS3227_52.mea **Analysed :** Friday, August 07, 2009 2:50:20 PM

Sample Notes : Dispersion medium : De-ionized water
Additive : 0.1 %v/v Nonidet P40
Treatment : Stirring at 1500 rpm

System Details

Accessory Name : Hydro 2000S (A) **Beam Length (mm) :** 2.35 **Obscuration (%) :** 8.07 **Residual (%) :** 0.999

Particle RI : 2.194 **Absorption :** 0.1 **Dispersant Name :** Water **Dispersant RI :** 1.330

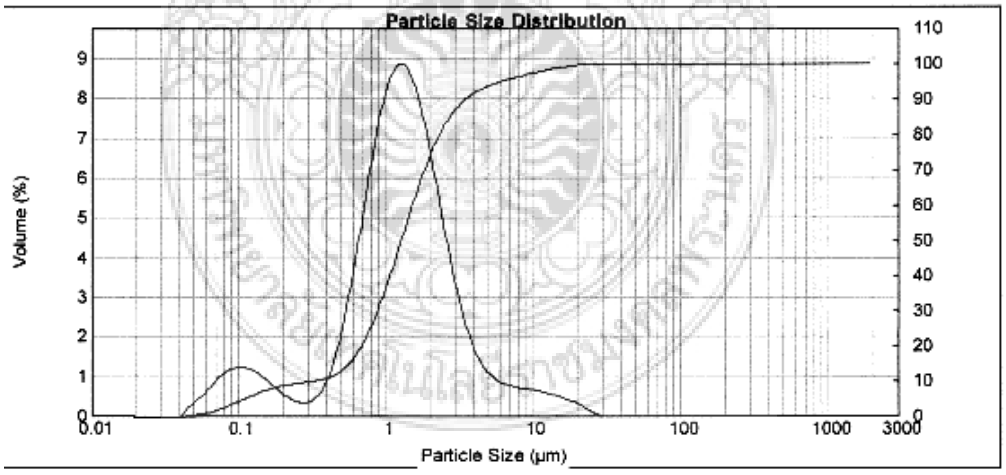
Result Statistics

Distribution Type : Volume **Concentration :** 0.0011 %Vol **Specific Surface Area :** 10.2 m²/g

Mean Diameters : **D (0.1) :** 0.34 um **D (0.5) :** 1.31 um **D (0.9) :** 3.59 um

D [4,3] : 2.02 um **D [3,2] :** 0.59 um **Span :** 2.491 **Uniformity :** 0.976

Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %
0.010	0.00	0.090	0.90	0.634	3.69	5.053	0.81	40.244	0.00	320.535	0.00
0.011	0.00	0.099	0.88	0.717	4.55	5.709	0.68	45.469	0.00	362.148	0.00
0.013	0.00	0.102	0.99	0.810	5.48	6.450	0.82	51.371	0.00	409.163	0.00
0.014	0.00	0.115	0.95	0.915	6.22	7.287	0.59	58.041	0.00	462.281	0.00
0.016	0.00	0.130	0.87	1.034	6.76	8.233	0.56	65.575	0.00	522.296	0.00
0.018	0.00	0.147	0.75	1.168	7.04	9.302	0.53	74.089	0.00	590.102	0.00
0.021	0.00	0.166	0.62	1.320	7.02	10.510	0.50	83.707	0.00	666.711	0.00
0.024	0.00	0.187	0.48	1.491	6.72	11.874	0.46	94.574	0.00	753.265	0.00
0.027	0.00	0.211	0.37	1.684	6.17	13.416	0.42	106.852	0.00	851.056	0.00
0.030	0.00	0.239	0.29	1.903	5.45	15.157	0.37	120.724	0.00	961.542	0.00
0.034	0.00	0.270	0.27	2.150	4.62	17.125	0.31	136.397	0.00	1086.372	0.00
0.038	0.00	0.305	0.31	2.429	3.77	19.348	0.26	154.104	0.00	1227.408	0.00
0.043	0.00	0.345	0.46	2.746	2.97	21.860	0.17	174.110	0.00	1386.753	0.00
0.049	0.16	0.389	0.75	3.101	2.26	24.698	0.07	196.714	0.00	1566.785	0.00
0.055	0.30	0.440	1.21	3.503	1.72	27.904	0.01	222.251	0.00	1770.189	0.00
0.062	0.43	0.497	1.86	3.958	1.29	31.527	0.00	251.105	0.00	2000.000	0.00
0.070	0.60	0.561	2.67	4.472	1.00	35.620	0.00	283.734	0.00		
0.080	0.77	0.634		5.053		40.244		320.535			



Malvern Instruments Ltd
Malvern, UK
Tel: +[44] (0) 1684-892456 Fax +[44] (0) 1684-892789

Mastersizer 2000 Ver. 5.54
Serial Number: MAL1031434

File name: TS3227_52
Record Number: 311
07 Aug 2009 10:40:48 AM

ภาพที่ 4.26 กราฟแสดงผลการทดสอบการกระจายตัวของผงโลหะที่ได้จากการทดลอง

4.10.1.4 ผลการทดสอบขนาดและการกระจายตัวของผงโลหะที่ได้จากการทดลองมีดังนี้

1)การวิเคราะห์ขนาดและการกระจายตัวของตัวอย่างชนิด A คือ 1.28 μm

2)การวิเคราะห์ขนาดและการกระจายตัวของตัวอย่างชนิด B คือ 1.12 μm

3)การวิเคราะห์ขนาดและการกระจายตัวของตัวอย่างชนิด C คือ 1.47 μm

4)การวิเคราะห์ขนาดและการกระจายตัวของตัวอย่างชนิด D คือ 1.24 μm

5)การวิเคราะห์ขนาดและการกระจายตัวของตัวอย่างชนิด E คือ 1.42 μm

6)การวิเคราะห์ขนาดและการกระจายตัวของตัวอย่างชนิด F คือ 1.11 μm

7)การวิเคราะห์ขนาดและการกระจายตัวของตัวอย่างชนิด G คือ 1.13 μm

8)การวิเคราะห์ขนาดและการกระจายตัวของตัวอย่างชนิด H คือ 1.21 μm

4.11 สรุปวิเคราะห์ผลการศึกษากระบวนการผลิตโลหะผงทังสเตนคาร์ไบด์

จากการทดลองการแยกสลายชิ้นส่วนซีเมนต์ทังสเตนคาร์ไบด์ ด้วยวิธีการแยกสลายด้วยเคมีไฟฟ้า โดยใช้กรดไฮโดรคลอริก 1 N และเพิ่มอุณหภูมิในการแยกสลาย 3 ระดับคือ 50, 60และ 70 องศาเซลเซียส ด้วยแรงดันไฟฟ้า 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0และ1.2โวลต์

1) ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส แรงดันไฟฟ้า 0.2 โวลต์ ได้ผลิตผงโลหะมากที่สุดจำนวน 116.66 กรัม

2) ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส แรงดันไฟฟ้า 0.4 โวลต์ ได้ผลิตผงโลหะมากที่สุดจำนวน 112.99 กรัม

3) ที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส แรงดันไฟฟ้า 0.4 โวลต์ ได้ผลิตผงโลหะมากที่สุดจำนวน 104.00 กรัม

4) ในการผลิตผงโลหะที่อุณหภูมิ 50, 60,70 องศาเซลเซียส โดยใช้แรงดันไฟฟ้าที่เท่ากันที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส สามารถผลิตผงโลหะได้มากที่สุด

5) การทดลองที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส แรงดันไฟฟ้า 0.4 โวลต์ กระแสไฟฟ้า 0.86 Amp. และที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส แรงดันไฟฟ้า 0.4 โวลต์ กระแสไฟฟ้า 0.31 Amp. ได้ผงโลหะที่มีความเป็นไปได้คือทังสเตนคาร์ไบด์ ตามผลการทดสอบ XRD

6) ขนาดผงโลหะที่เล็กที่สุดคือ 1.11 μm เป็นผลการทดลองจากตัวแปร ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส แรงดันไฟฟ้า 0.6 โวลต์ กระแสไฟฟ้า 0.72 Amp. ที่ได้จากการตรวจสอบขนาดและการกระจายตัวของผงโลหะ และ ขนาดผงโลหะที่ใหญ่ที่สุดคือ 1.42 μm เป็นผลการทดลองด้วยตัวแปรที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส แรงดันไฟฟ้า 0.2 โวลต์ กระแสไฟฟ้า 0.29 Amp.

บทที่ 5

การสร้างเครื่องแยกสลายซีเมนต์ทังสเตนคาร์ไบด์และการทดสอบประสิทธิภาพ

5.1 บทนำ

ในบทนี้จะเป็นการดำเนินการสร้างเครื่องกัดกร่อนโลหะ และการทดสอบประสิทธิภาพการทำงาน แสดงผลการทดลองการดำเนินการทดลอง ซึ่งทดลองด้วยเครื่องกัดกร่อนโลหะ ในการสลายแผ่นมีดตัด (Insert tools) โดยแบ่งผลการดำเนินการทดลองออกเป็น 5 ส่วน ลักษณะชิ้นงานที่ได้ทดลองสลายด้วยไฟฟ้า ผลของการสลายในการทดลองในแต่ละครั้ง สรุปผลการทดลองของแรงดันไฟฟ้าแต่ละระดับ สรุปผลของน้ำหนักที่ได้จากการทดลอง ผลจากการใช้การวิเคราะห์ความแปรปรวนมาเป็นเครื่องมือในการเปรียบเทียบ ผลการเปรียบเทียบของการทดลองในแต่ละครั้ง การวิเคราะห์หาผลการทดลองที่ดีที่สุด ผลการตรวจสอบคุณสมบัติของผงโลหะที่ได้จากการทดลอง

5.2 การดำเนินการสร้างเครื่องกัดกร่อนโลหะ

ตารางที่ 5.1 ขั้นตอนการสร้างถังบรรจุสารละลาย

ขั้นตอน	รูปภาพ	วิธีการสร้าง
1		1. ตัดแผ่นสเตนเลสทำผนังถังด้านขวา-ซ้าย ขนาด 300 × 405 × 3 มม.จำนวน 2 แผ่น แล้วใช้หินเจียระไนลบคม 2. เจาะรูที่ผนังด้านขวาขนาดความโต 26 มม. ใส่หน้าแปลนรูระบายสารละลาย 3. ตัดแผ่นสเตนเลสทำผนังถังด้านหน้า - หลังขนาด 400 × 405× 3 มม.จำนวน 2 แผ่น แล้วใช้หินเจียระไนลบคม 4. ประกอบผนังทั้ง 4 แผ่นเข้าด้วยกันแล้วเชื่อมติดกัน

ตารางที่ 5.1 (ต่อ) ขั้นตอนการสร้างถังบรรจุสารละลาย

ขั้นตอน	รูปภาพ	วิธีการสร้าง
2		5. ตัดแผ่นสแตนเลสทำถังด้านหน้า - หลัง ขนาด 100 × 400 × 3 มม.จำนวน 2 แผ่น แล้วใช้หินเจียระไนลบคม 6. ตัดแผ่นสแตนเลสทำถัง ด้านข้างซ้าย - ขวา ขนาด 100 × 300× 3 มม.จำนวน 2 แผ่น แล้วใช้หินเจียระไนแต่งลบคม 7. ประกอบผนังทั้ง 4 แผ่นเข้าด้วยกันทำมุมภายในถัง 30 องศา
3		8. นำถังประกอบเข้าด้วยกันเชื่อมด้วยเครื่องเชื่อมสเตนเลส 9. ตรวจสอบแนวรอยเชื่อมใช้หินเจียระไนลบคมแต่งแนวรอยเชื่อม
4		10. ตัดแผ่นสเตนเลสทำขอบถังด้านหน้า – หลัง ขนาด 38×405×3 มม. จำนวน 2 ชิ้น จากนั้นตัดแผ่นสเตนเลสทำขอบถังด้านข้าง ขนาด 38×405 × 3 มม. จำนวน 2 ชิ้นแล้วใช้หินเจียระไนลบคม 11. ประกอบขอบถังทั้ง 4 แผ่นเข้าด้วยกันทำมุมแล้วเชื่อมด้วยเครื่องเชื่อมสเตนเลส

ตารางที่ 5.1 (ต่อ) ขั้นตอนการสร้างถังบรรจุสารละลาย

ขั้นตอน	รูปภาพ	วิธีการสร้าง
5		12. ใช้เลื่อยตัดสเตนเลสฉาก ขนาด 1×1 นิ้ว ทำโครงถังขนาดความยาว450 มม. จำนวน 4 ชิ้น ขนาดความยาว 360 มม.จำนวน 8 ชิ้น แล้วเจาะรูความโต 4.8 มม. เพื่อต๊าปเกลียวยึดผนังกันความร้อน
6		13. นำสเตนเลสฉากมาเชื่อมติดกับถัง ขนาดความยาว 450 มม. เชื่อมติดด้านหน้า-หลัง ขนาดความยาว 360 มม. เชื่อมติดกับถังบรรจุน้ำสารละลายด้านข้างซ้าย – ขวา และทำคานยึดโครงทั้ง 4 มุม
7		14. ใช้หินเจียระไนแต่งผิวแนวรอยเชื่อม

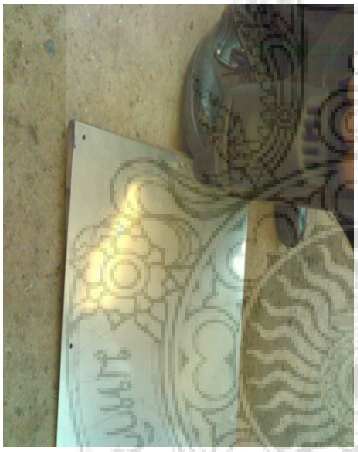
ตารางที่ 5.1 (ต่อ) ขั้นตอนการสร้างถังบรรจุสารละลาย

ขั้นตอน	รูปภาพ	วิธีการสร้าง
8		15 ใช้หินเจียระไนแต่งรูที่ช่องถังบรรจุสารละลาย เพื่อติดตั้งหน้าแปลนระบายสารละลาย
9		16. ใช้หินเจียระไนแต่งผิวหน้าแปลนให้เป็นร่องตัววี เพื่อให้รับกับมุมของช่องถังสารละลาย
10		17. ประกอบหน้าแปลนเข้ากับช่องถังสารละลายและเชื่อมติดกัน

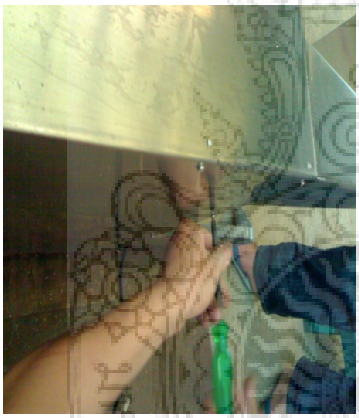
ตารางที่ 5.1 (ต่อ) ขั้นตอนการสร้างถังบรรจุสารละลาย

ขั้นตอน	รูปภาพ	วิธีการสร้าง
11		18. เคลือบถังสารละลายภายในด้วยตะกั่ว เพื่อป้องกันการกัดกร่อนและทนความร้อนจากสารละลาย
12		19. ตัดแผ่นสเตนเลสทำขาตั้งถัง ขนาด 228×300×3 มม. จำนวน 4 ชิ้นใช้ค้อนเหล็กตีดัดขึ้นรูปเชื่อมติดกันตามแนวรอยต่อ 20. ตัดแผ่นสเตนเลสทำที่รองขาตั้งถังขนาด 70×70×3 มม. จำนวน 4 ชิ้นแล้วใช้หินเจียระไนลบคม
13		21. นำขาตั้งถังทั้ง 4 ชิ้น ประกอบกับตัวถังแล้วเชื่อมด้วยสเตนเลส และนำแผ่นรองขา เชื่อมติดกับขาตั้ง

ตารางที่ 5.1 (ต่อ) ขั้นตอนการสร้างถังบรรจุสารละลาย

ขั้นตอน	รูปภาพ	วิธีการสร้าง
14		22. ต๊าปเกลียว M5×0.25
15		23. ตัดแผ่นสเตนเลสทำผนังกันความร้อน ด้านข้างขวา - ซ้าย ขนาด 350×360×1 มม. เจาะรูขนาดความโต 6 มม. จำนวน 2 ชิ้น 24. แผ่นกันความร้อนด้านหน้า – หลัง ขนาด 450×360×1 มม. เจาะรูยึดนัทขนาดความโต 6 มม. จำนวน 2 ชิ้น เจาะรูระยะห่าง 10 เซนติเมตร
16		25. นำผังกันความร้อนมาประกอบเข้าด้วยกัน เชื่อมประกอบเป็น2 ชิ้นโดยผนังด้านข้างขวา เชื่อมเข้ากับผนังด้านหน้าและผนังด้านซ้าย

ตารางที่ 5.1 (ต่อ) ขั้นตอนการสร้างถังบรรจุสารละลาย

ขั้นตอน	รูปภาพ	วิธีการสร้าง
17		26. ใช้ CSC – 100 ยึดผนังกันความร้อนกับตัวถังบรรจุสารละลายโดยมีแผ่นเหล็กรองที่ผนังกันรอย ยึดนัท M5×0.25
18		27. ยึดนัท M5×0.25 เข้ากับผนังโครงถัง
19		28. ถังบรรจุสารละลายขนาด350×450×660มม. 29. ติดหน้าแปลนรูล้นของสารละลาย

สรุปขั้นตอนการสร้างถังบรรจุสารละลาย

ถังบรรจุสารละลายใช้วัสดุสแตนเลสในการทำถังและโครงตั้งถัง ตัดสแตนเลสขนาดตามแบบแล้วนำมาประกอบด้วยวิธีการเชื่อม โดยเครื่องเชื่อมสแตนเลส ลวดเชื่อมขนาด 1.5 มม. หัวเชื่อมขนาด 2.4 มม. กระแสไฟที่ใช้ 10 A ด้านในเคลือบด้วยตะกั่วป้องกันการกัดกร่อนของสารละลาย ด้านข้างมีผนังกันความร้อนรอบถังบรรจุสารละลาย

ตารางที่ 5.2 ขั้นตอนการสร้างถังพักสารละลาย

ขั้นตอน	รูปภาพ	วิธีการสร้าง
1		1. วัดขนาดพลาสติกโพลีโพรพีลีน ขนาด 400×410×10 มม. ใช้เลื่อนจิกซอตัดแผ่นพลาสติกโพลีโพรพีลีน จำนวน 4 ชิ้น
2		2. ใช้เลื่อยวงเดือนบ่าร่อง 60 องศา เพื่อให้รอยเชื่อมซึมลึกและมีความหนา

ตารางที่ 5.2 (ต่อ) ขั้นตอนการสร้างถังพักสารละลาย

ขั้นตอน	รูปภาพ	วิธีการสร้าง
3		3. ลักษณะร่องที่บ่าก่อนเชื่อม
4		4. ประกอบถังเชื่อมพลาสติกโพลีโพรพีลีน โดยใช้ลมร้อนเป่าอุณหภูมิประมาณ 80 – 90 °C เชื่อมโดยยกหัวเชื่อม ขึ้น - ลงช้าๆ
5		5. ตัดแผ่นพลาสติกโพลีโพรพีลีนทำผนังยึดด้านข้างถัง ขนาด 80×480×10 มม. 12 ชิ้น ทำมุม 45 องศา ด้านข้าง 2 ข้าง จำนวน 8 ชิ้น 6. ประกอบเข้ากับด้านข้างถังพักสารละลาย

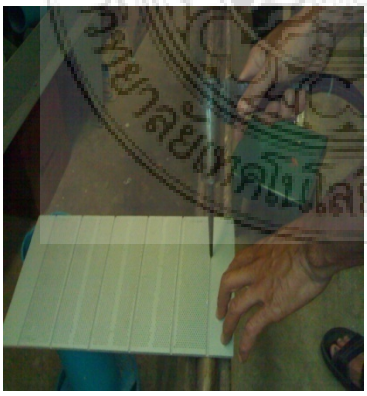
ตารางที่ 5.2 (ต่อ) ขั้นตอนการสร้างถังพักสารละลาย

ขั้นตอน	รูปภาพ	วิธีการสร้าง
6		7. ตัดแผ่นพลาสติกโพลีโพรพีลีน ทำขอบขนาด 50×480×10 มม. จำนวน 4 ชิ้นทำมุมด้านข้างเอียง 45 องศา ด้านข้าง 2 ข้าง แล้วนำมาเชื่อมติดกับขอบถัง 8. ตัดแผ่นพลาสติก ขนาด 60×70 ×10 มม. จำนวน 3 ชิ้น แล้วเจาะรูขนาดความโต 49 มม. จำนวน 2 ชิ้น โดย 1 ชิ้นทำเป็นร่องต่อยึดท่อดูดสารละลายความโต 50 ×110 มม. และเชื่อมติดกับขอบถังพักสารละลาย
7		9. ฝาปิดถังพักสารละลาย ขนาด 480×480 ×10 มม. ใช้ เลื่อยจิกซอตัดตรงมุมทั้ง 2 ข้างขนาด 110×130 มม. เพื่อใส่ฮีสเตอร์แก้ว ตรงกลางตัดเป็นร่องตัวยูประกอบท่อล้นสารละลาย

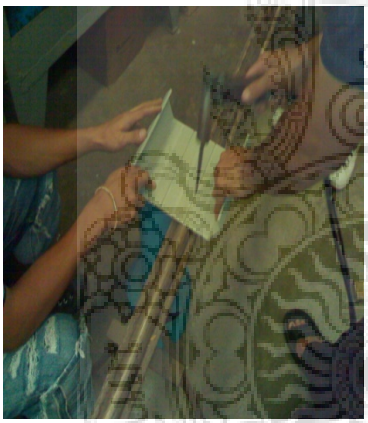
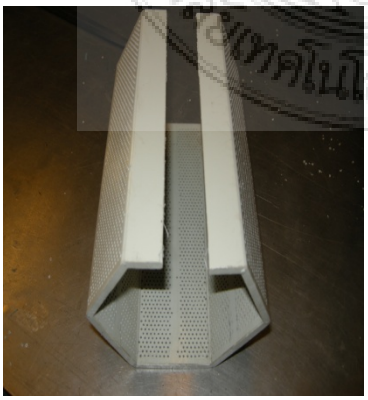
สรุปขั้นตอนการสร้างถังพักสารละลาย

ถังพักน้ำสารละลายใช้วัสดุพลาสติกโพลีโพรพีลีนทำถัง ตัดพลาสติกโพลีโพรพีลีนขนาดตามแบบแล้วนำมาประกอบด้วยวิธีการเชื่อม โดยใช้ลมร้อนเป่าลวดเชื่อมพลาสติกโพลีโพรพีลีนอุณหภูมิประมาณ 80 – 90 °C เชื่อมโดยยกหัวเชื่อม ขึ้น - ลงช้าๆ ด้านในถังแบ่งเป็น 2 ช่อง สำหรับแยกขนาดผงโลหะ ด้านข้างถังมีวาล์วระบายสารละลาย และขอบด้านบนฝาถังมีที่ยึดติดอุปกรณ์ต่างๆ มีฝาปิดถังกันสารละลายระเหย

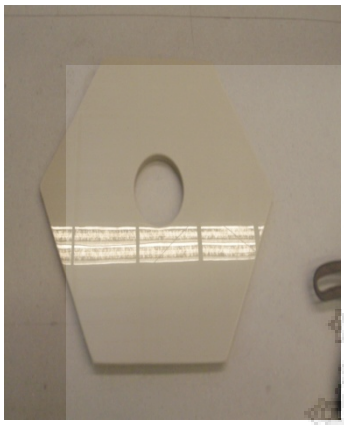
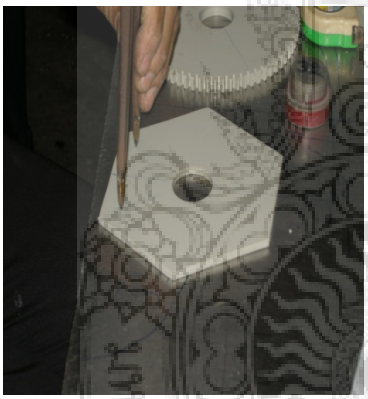
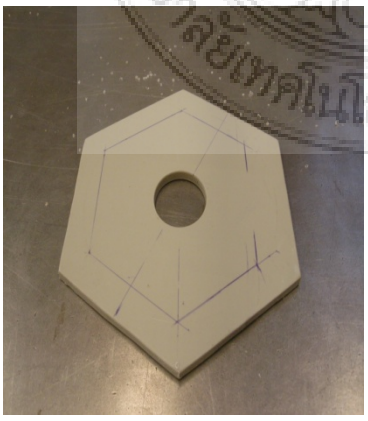
ตารางที่ 5.3 ขั้นตอนการสร้างถังบรรจุชิ้นงาน (Barrel)

ขั้นตอน	รูปภาพ	วิธีการสร้าง
1		1. ตัดแผ่นพลาสติกโพลีโพรพีลีน ขนาด 186×350×5 มม. แล้วทำร่องมุม 60 องศา ร่องกว้าง 3 มม. แล้วติดบล็อกรูเจาะ ติดกับแผ่นชิ้นงานแล้วเจาะรู
2		2. ลักษณะของแผ่นถังบรรจุชิ้นงาน แบ่งเป็น 7 ช่องด้านข้างทั้ง 2 ข้างเป็นขอบถัง และ 5 ช่องเป็นรูระบายเศษโลหะ
3		. 3. ประกอบถังบรรจุชิ้นงาน นำแผ่นพลาสติกโพลีโพรพีลีนไปวางบนฮีสเตอร์ให้ความร้อน ใช้ลมร้อนเป่าอุณหภูมิประมาณ 80 – 90 °C เพื่อให้อ่อนตัวแล้วดัดขึ้นรูป

ตารางที่ 5.3 (ต่อ) ขั้นตอนการสร้างถังบรรจุชิ้นงาน (Barrel)

ขั้นตอน	รูปภาพ	วิธีการสร้าง
4		4. ดัดขึ้นรูปถังบรรจุชิ้นงาน โดยใช้เหล็กฉาก 2 ชิ้น ขนาด 2 นิ้ว ประกบกันแล้วหนีบเข้าด้วยกัน
5		5. นำแผ่นพลาสติกโพลีโพรพีลีนวางบนฮีสเตอร์ให้ความร้อนใช้ลมร้อนเป่าอุณหภูมิประมาณ 80 – 90 °C เพื่อให้อ่อนตัวแล้วดัดขึ้นรูปเป็นถังบรรจุชิ้นงานหกเหลี่ยม
6		6. ลักษณะถังบรรจุชิ้นงานรูปหกเหลี่ยม

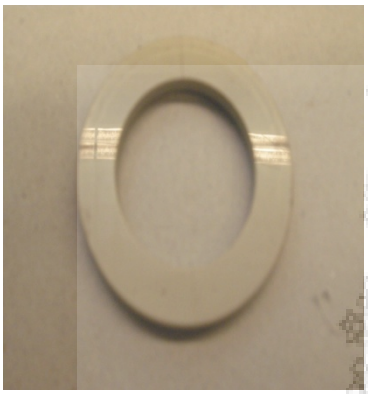
ตารางที่ 5.3 (ต่อ) ขั้นตอนการสร้างถังบรรจุชิ้นงาน (Barrel)

ขั้นตอน	รูปภาพ	วิธีการสร้าง
7		7. ตัดฝาติดข้างถังหกเหลี่ยมขนาด ความโต 150×212 มม. แล้วเจาะรูความโต 32 มม.
8		8. ร่างแบบวางถังหกเหลี่ยมเพื่อเชื่อม
9		9. แบบที่ร่างเสร็จ

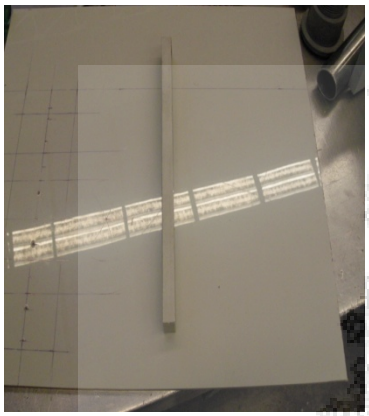
ตารางที่ 5.3 (ต่อ) ขั้นตอนการสร้างถังบรรจุชิ้นงาน (Barrel)

ขั้นตอน	รูปภาพ	วิธีการสร้าง
10		10. เฟืองตามประกบข้างถัง (Barrel) ขนาดความโต 152.4 มม. 10 DP จำนวน70 ฟัน เจาะรูตรงกลางขนาดความโต 32 มม.
11		11. นำผนังหกเหลี่ยมมาประกบกับเฟืองเพื่อหาจุดวางถังหกเหลี่ยมแล้วเชื่อม
12		12. ตัดแผ่นพลาสติกโพลีโพรพีลีนทำขอบฝาปิดถังบรรจุชิ้นงาน ด้านขวา ขนาด 18×186×17 มม. 2 ชิ้น เจาะรูขอบด้านซ้ายยึดฝาถังบรรจุชิ้นงาน ขนาด 3×27 มม. R1.3

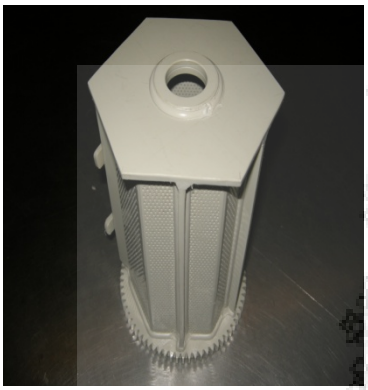
ตารางที่ 5.3 (ต่อ) ขั้นตอนการสร้างถังบรรจุชิ้นงาน (Barrel)

ขั้นตอน	รูปภาพ	วิธีการสร้าง
13		13. แหวนรองถังเชื่อมติดกับผนังถังเฟืองหมุน ความโตนอก 50 มม. ด้านในขนาดความโต 32 มม.
14		14. ทำฝาปิดถังบรรจุชิ้นงาน ตัดด้วยเครื่องตัดพลาสติกขนาด 40×186×8 มม.และเจาะรู เจาะรูยึดที่ล็อคฝาถังบรรจุชิ้นงาน ความโต 5 มม. 15. ตัวล็อคฝาถัง ขนาด 12×62×3 มม. ยึดติดกับหมุด ความโต 5×20 มม.
15		16. เชื่อมพลาสติกโพลีโพรพีลีนเพื่อให้หมุดติดแน่น

ตารางที่ 5.3 (ต่อ) ขั้นตอนการสร้างถังบรรจุชิ้นงาน (Barrel)

ขั้นตอน	รูปภาพ	วิธีการสร้าง
16		17. ตัดคานยึดถังบรรจุชิ้นงาน (Barrel) ขนาด 18×186×5 มม. เพื่อเสริมความแข็งแรง
17		18. นำถัง Barrel หกเหลี่ยมมาวางบนเฟืองตามแบบที่ร่างไว้ เชื่อมพลาสติกโพลีโพรพีลีนและฝาผนังหกเหลี่ยม
18		19. เชื่อมแหวนรองติดกับผนังเฟืองตาม

ตารางที่ 5.3 (ต่อ) ขั้นตอนการสร้างถังบรรจุชิ้นงาน (Barrel)

ขั้นตอน	รูปภาพ	วิธีการสร้าง
19		20. เชื่อมแหวนรองติดกับผนังหกเหลี่ยม
20		21. ตัดแผ่นพลาสติกทำผนังด้านซ้ายถัง Barrel บรรจุชิ้นงาน ขนาด 160×320×10 มม. เจาะรูใส่บูชยึดถัง ความโต 32 มม. เจาะรูยึดเพลาผนังความโต 20 มม. และเจาะรูยึดแผ่นยึดสลักเกลียวขนาด M8×1.25
21		22. ตัดแผ่นพลาสติกโพลีโพรพีลีนทำผนังด้านขวาถังบรรจุชิ้นงานขนาด 160×320×10 มม. เจาะรูใส่บูชยึดถังบรรจุชิ้นงานความโต 32 มม. เจาะรูใส่บูชยึดเฟืองทด ความโต 16 มม. เจาะรูยึดเพลาผนังความโต 20 มม. และเจาะรูยึดแผ่นสลักเกลียวขนาด M8×1.25

ตารางที่ 5.3 (ต่อ) ขั้นตอนการสร้างถังบรรจุชิ้นงาน (Barrel)

ขั้นตอน	รูปภาพ	วิธีการสร้าง
22		23. เพลายึดผนังถังบรรจุชิ้นงานขนาดความโต 20×260 มม.
23		24. บูชยึดถังบรรจุชิ้นงาน ขนาดความโต 50×55 มม.
24		25. นัทยึดถังบรรจุชิ้นงานขนาดความโต M23×1.25×15 มม.

ตารางที่ 5.3 (ต่อ) ขั้นตอนการสร้างถังบรรจุชิ้นงาน (Barrel)

ขั้นตอน	รูปภาพ	วิธีการสร้าง
25		26. เฟืองทดขนาดความโต 131 มม. 10 DP จำนวน 60 ฟัน
26		27. ลักษณะบูชยึดถังบรรจุชิ้นงาน
27		28. ถังบรรจุชิ้นงานกับผนัง และประกอบเฟืองทด

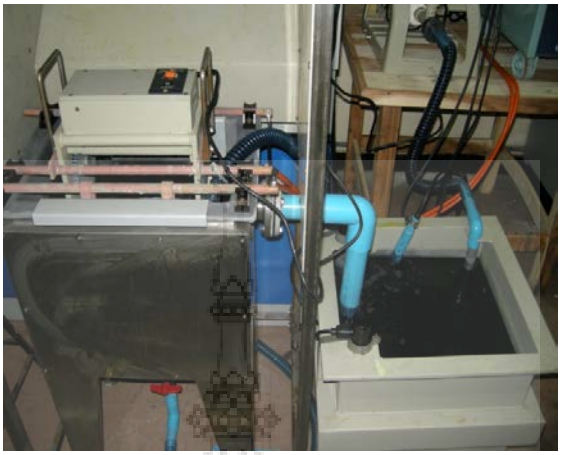
ตารางที่ 5.3 (ต่อ) ขั้นตอนการสร้างถังบรรจุชิ้นงาน (Barrel)

ขั้นตอน	รูปภาพ	วิธีการสร้าง
28		29. กล่องมอเตอร์ถังบรรจุชิ้นงาน (Barrel) ขนาด 95×240×95 มม.
29		30. ประกอบมอเตอร์เข้ากับโครงถังบรรจุชิ้นงาน (Barrel)

สรุปขั้นตอนการสร้างถังพักสารละลาย

ถังบรรจุชิ้นงาน (Barrel)ใช้วัสดุพลาสติกโพลีโพรพีลีนในการทำถังจะประกอบด้วยถังบรรจุชิ้นงาน โครงยึดถังบรรจุชิ้น เฟืองขับถังหมุน กล่องมอเตอร์ เพลา แผ่นทองแดง หูหิ้ว ถังสเตนเลส แล้วนำมาประกอบเข้ากัน เชื่อมพลาสติกโพลีโพรพีลีน โดยใช้ลมร้อนเป่าอุณหภูมิประมาณ 80 – 90 °C ขณะเชื่อมกดลวดเชื่อมโดยยกหัวเชื่อมขึ้น - ลงช้าๆ

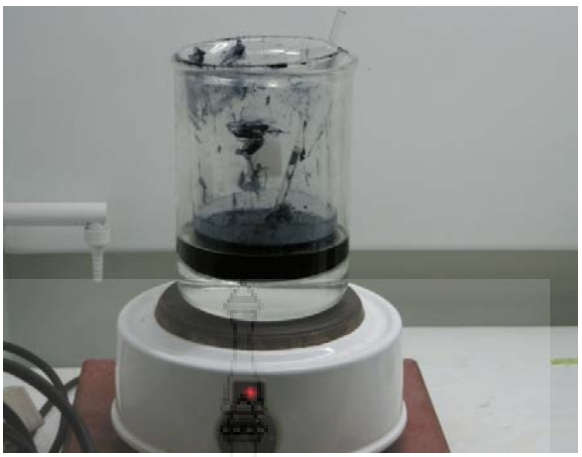
5.3 การทดลองวัดประสิทธิภาพเครื่อง



ภาพที่ 5.1 ติดตั้งเครื่องกัดกร่อนและทำการทดลองใช้ย่อยสลายเศษซีเมนต์ทังสเตน

ภาพที่ 5.2 นำสารละลายในถังย่อย ใส่ในบิกเกอร์พักไว้ให้สารละลายตกตะกอน

ภาพที่ 5.3 ผงโลหะที่ได้จากการตกตะกอน



ภาพที่ 5.4 นำตะกอนที่ได้จากการทดลองตั้งไฟไล่ความชื้น

ภาพที่ 5.5 ลักษณะของผงทังสเตนคาร์ไบด์ที่ได้จากกระบวนการทดลอง

ภาพที่ 5.6 บรรจุผงทังสเตนคาร์ไบด์ที่ได้จากกระบวนการทดลอง

5.4 รวบรวมข้อมูลการทดลอง

5.4.1 ลักษณะชิ้นงานที่ได้ทดลองในแรงดันไฟฟ้าแต่ละระดับ

5.4.1.1 ตัวอย่างลักษณะแผ่นมีดตัดที่ใช้ในการทดลองการกัดกร่อนที่แรงดันไฟฟ้า 6 โวลต์

ภาพที่ 5.7 แผ่นมีดตัด (Insert tools) ก่อนการทดลอง

ภาพที่ 5.8 แผ่นมีดตัด (Insert tools) หลังการทดลอง

ตารางที่ 5.4 ตัวอย่างตารางบันทึกผลการทดลอง: กรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 3 N

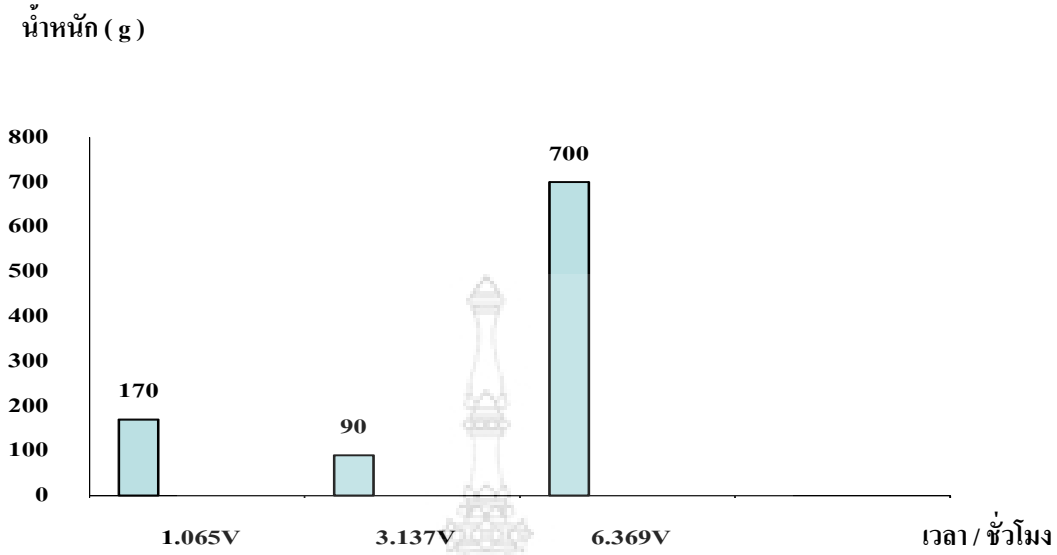
ครั้งที่	เวลา (ชม.)	แรงดันไฟฟ้า (V)		กระแสไฟฟ้า (A)	อุณหภูมิ (^{o}C)	ความเร็วรอบ (rpm)	น้ำหนักก่อน (g)	น้ำหนักหลัง (g)	น้ำหนักลดลง (g)
		ปรับค่า	วัดค่าเฉลี่ย	วัดค่าเฉลี่ย	วัดค่าเฉลี่ย				
1	12	1	0.996	0.56	48.84	16	1000	971	29
2	24	1	1.016	0.982	49.24	16	971	925	46
3	36	1	1.076	0.862	49.64	16	925	874	51
4	42	1	1.173	0.507	49.53	16	874	830	44
ค่าเฉลี่ย			1.065	0.718	49.32				170

5.5 วิเคราะห์ผลการทดลอง

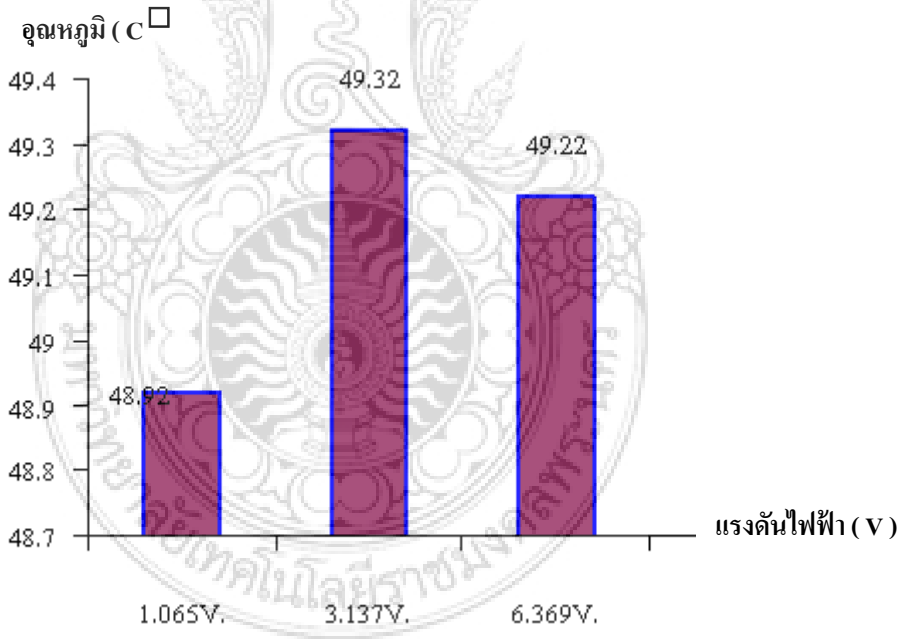
1) ทำการทดลองใช้กรดกรดไฮโดรคลอริก 3 N แรงดัน 1.0 V RPM 16 รอบ/นาที เวลา 42 ชั่วโมง อุณหภูมิ 50 ๐C กระแสไฟฟ้าอยู่ในช่วง 0.0 – 1.6 A น้ำหนักที่ลดลง 170 g

2) ทำการทดลองใช้กรดกรดไฮโดรคลอริก 3 N แรงดัน 3.0 V RPM 16 รอบ/นาที เวลา 42 ชั่วโมง อุณหภูมิ 50 ๐C กระแสไฟฟ้าอยู่ในช่วง 0.0 – 7.9 A น้ำหนักที่ลดลง 90 g

3) ทำการทดลองใช้กรดกรดไฮโดรคลอริก 3 N แรงดัน 6.0 V RPM 16 รอบ/นาที เวลา 42 ชั่วโมง อุณหภูมิ 50 ๐C กระแสไฟฟ้าอยู่ในช่วง 2.5 – 43.7 A น้ำหนักที่ลดลง 700 g



ภาพที่ 5.9 เปรียบเทียบน้ำหนักที่ลดลงระหว่างเวลาทดลอง (ทุก 12 ชั่วโมง)

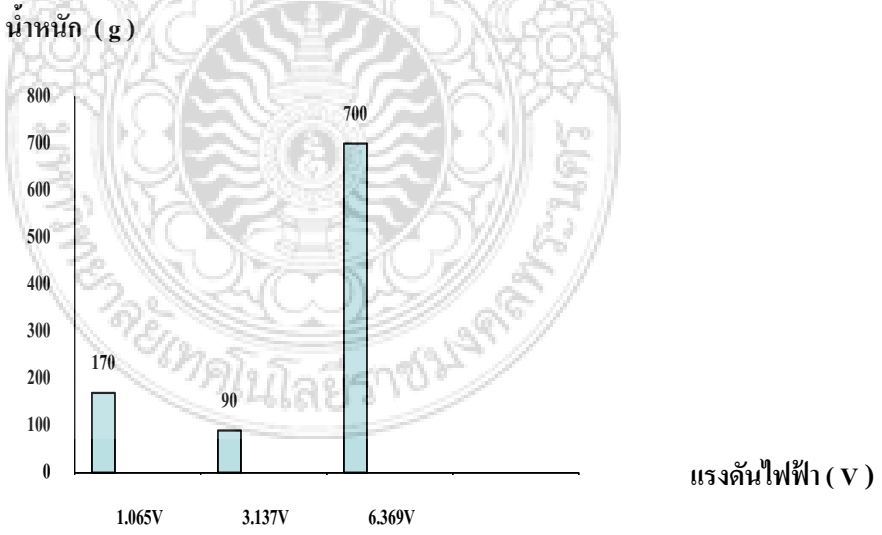


ภาพที่ 5.10 กราฟแสดงผลอุณหภูมิในการทดลอง

5.5.1 การเปรียบเทียบน้ำหนักที่ลดลงของการทดลองในแต่ละระดับแรงดันไฟฟ้า

ตารางที่ 5.5 สรุปผลการเปรียบเทียบน้ำหนักที่ลดลงแต่ละแรงดันไฟฟ้า

แรงดันไฟฟ้า (V.)	กระแสไฟฟ้า (A.)	อุณหภูมิ (ºC)	น้ำหนักทั้งหมด (g.)	น้ำหนักที่ลดลง (g.)
1	0.718	49.32	1000	170
3	2.376	49.22	1000	90
6	20.951	49.58	1000	700
		รวม		960



ภาพที่ 5.11 แผนภูมิแสดงการเปรียบเทียบน้ำหนักที่ลดลงทั้งหมดระหว่างแรงดันไฟฟ้า

5.5.2 ผลการตรวจสอบวิเคราะห์องค์ประกอบของผงทังสเตนคาร์ไบด์ที่ได้จากการทดลอง

ตารางที่ 5.6 ตารางผลการตรวจสอบผงโลหะที่แรงดันไฟฟ้า 1.0 V. T 50 □C กรด HCl 3N

[WC.bin] Angle, Raw, Sm, Bkg, Ka1 — Peak ID Report

SCAN: 20.0/90.0/0.02/1(sec), Cu, I(max)=1432, 06/05/09 13:19

PEAK: 19-pts/Parabolic Filter, Threshold=3.0, Cutoff=0.1%, BG=3/1.0, Peak-Top=Summit

NOTE: Intensity = Counts, 2T(0)=0.0(deg), Wavelength to Compute d-Spacing = 1.54056Å (Cu/K-alpha1)

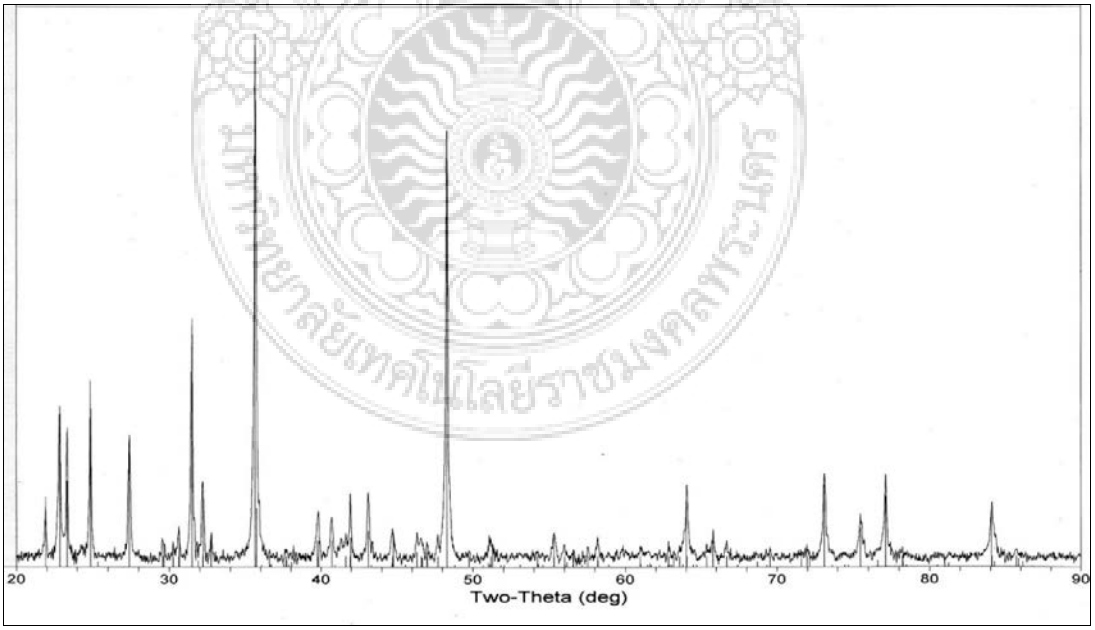
#	2-Theta	d(Å)	Height	Height%	Phase ID	d(Å)	I%	(h k l)	2-Theta	Delta
45	75.481	1.2584	114	8.1	WC	1.2585	7.3	(2 0 0)	75.477	-0.004
46	77.139	1.2355	219	15.6	Cotunnite, syn	1.2353	0.1	(3 5 2)	77.156	0.017
47	78.217	1.2211	27	1.9	Pb(WO4)	1.2208	4.1	(2 4 0)	78.244	0.026
48	84.100	1.1501	149	10.6	WC	1.1504	10.8	(2 0 1)	84.070	-0.030
49	85.701	1.1326	25	1.8	Cotunnite, syn	1.1331	0.1	(0 0 4)	85.657	-0.044

Line Shifts of Individual Phases:

PDF#73-0471 - Tungsten Carbide <2T(0) = 0.0, d/d(0) = 1.0>

PDF#84-1177 - Cotunnite, syn <2T(0) = 0.0, d/d(0) = 1.0>

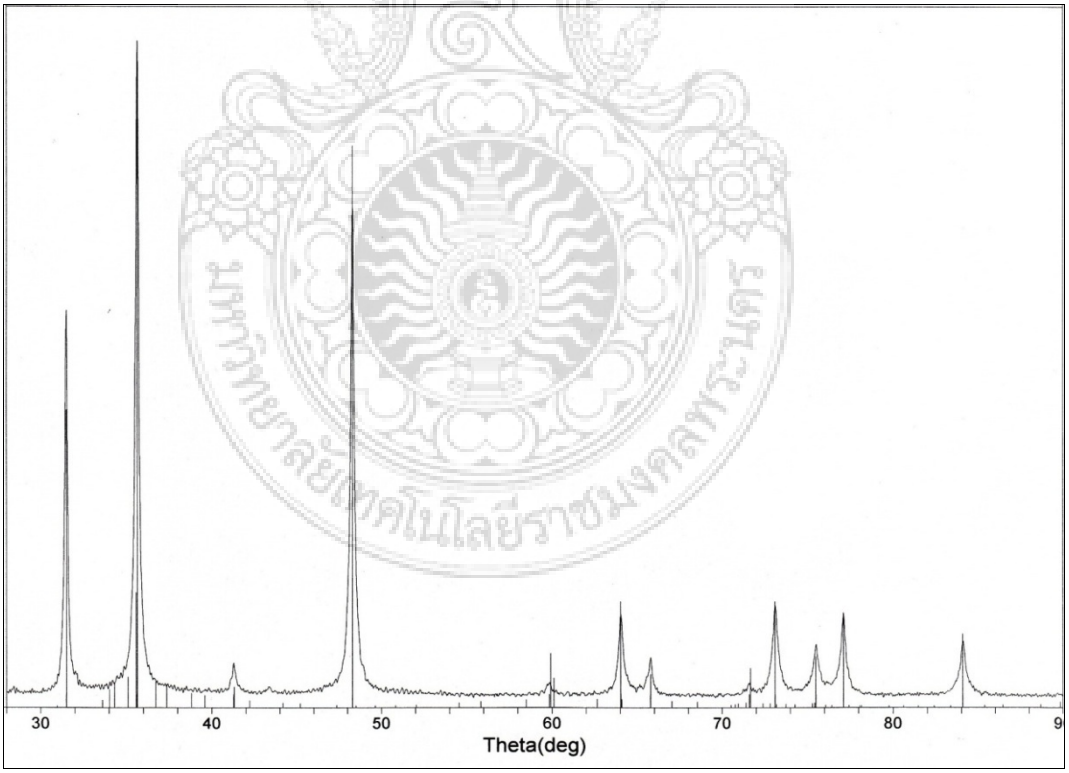
PDF#86-0843 - Lead Tungsten Oxide <2T(0) = -0.06, d/d(0) = 1.0>



ภาพที่ 5.12 กราฟแสดงผลตรวจสอบผงโลหะที่แรงดันไฟฟ้า 1.0 V. T 50 □C กรด HCl 3N

ตารางที่ 5.7 สรุปผลการตรวจสอบผงโลหะที่แรงดันไฟฟ้า 3.0 V. T 50 □C กรด HCl 3N

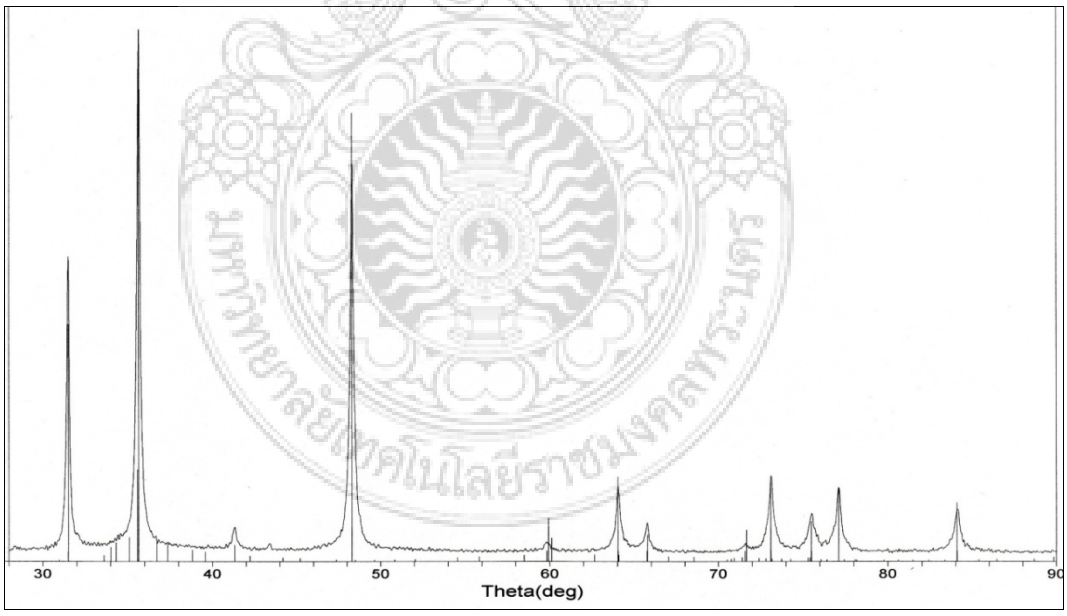
[a.bin] Angle, Raw, Sm, Bkg, Ka1										Peak ID Report
SCAN: 28.0/90.0/0.02/1(sec), Cu, I(max)=4526, 07/12/08 12:26										
PEAK: 21-pts/Parabolic Filter, Threshold=3.0, Cutoff=0.1%, BG=3/1.0, Peak-Top=Centroid Fit										
NOTE: Intensity = Counts, 2T(0)=0.0(deg), Wavelength to Compute d-Spacing = 1.54056Å (Cu/K-alpha1)										
#	2-Theta	d(Å)	Area	Area%	Phase ID	d(Å)	I%	(h k l)	2-Theta	Delta
1	31.492	2.8385	34114	51.3	WC	2.8369	44.4	(0 0 1)	31.510	0.018
2	35.640	2.5170	66435	100.0	WC	2.5170	100.0	(1 0 0)	35.640	0.000
3	41.297	2.1844	3746	5.6	SiC	2.1835	16.4	(1 0 16)	41.314	0.018
4	48.301	1.8827	56171	84.6	WC	1.8828	84.2	(1 0 1)	48.299	-0.002
5	59.837	1.5444	2061	3.1	SiC	1.5424	46.1	(1 1 0)	59.921	0.085
6	64.038	1.4528	10758	16.2	WC	1.4532	15.6	(1 1 0)	64.019	-0.019
7	65.770	1.4187	4451	6.7	WC	1.4184	4.7	(0 0 2)	65.782	0.012
8	71.604	1.3167	1105	1.7	SiC	1.3157	33.0	(1 1 24)	71.671	0.067
9	73.122	1.2931	13344	20.1	WC	1.2934	15.6	(1 1 1)	73.105	-0.017
10	75.509	1.2580	5544	8.3	WC	1.2585	7.3	(2 0 0)	75.477	-0.032
11	77.115	1.2358	10232	15.4	WC	1.2357	13.5	(1 0 2)	77.121	0.006
12	84.097	1.1501	8978	13.5	WC	1.1504	10.8	(2 0 1)	84.070	-0.028
	Line Shifts of Individual Phases:									
	PDF#73-0471 - Tungsten Carbide <2T(0) = 0.0, d/d(0) = 1.0>									
	PDF#72-1625 - Moissanite 24R, syn <2T(0) = -0.06, d/d(0) = 1.0>									



ภาพที่ 5.13 กราฟสรุปผลตรวจสอบผงโลหะที่แรงดันไฟฟ้า 3.0 V. T 50 □C กรด HCl 3N

ตารางที่ 5.8 สรุปผลการตรวจสอบผงโลหะผ่านการกรองที่แรงดันไฟฟ้า 6.0 V. T 50 □C กรด HCl 3N

[B.bin] Angle, Raw, Sm, Bkg, Ka1										Peak ID Report
SCAN: 28.0/90.0/0.02/1(sec), Cu, I(max)=4479, 07/12/08 14:48										
PEAK: 21-pts/Parabolic Filter, Threshold=3.0, Cutoff=0.1%, BG=3/1.0, Peak-Top=Centroid Fit										
NOTE: Intensity = Counts, 2T(0)=0.0(deg), Wavelength to Compute d-Spacing = 1.54056Å (Cu/K-alpha1)										
#	2-Theta	d(Å)	Area	Area%	Phase ID	d(Å)	I%	(h k l)	2-Theta	Delta
1	31.492	2.8385	32155	50.2	WC	2.8369	44.4	(0 0 1)	31.510	0.018
2	35.649	2.5164	64086	100.0	WC	2.5170	100.0	(1 0 0)	35.640	-0.009
3	41.316	2.1834	3805	5.9	SiC	2.1835	16.4	(1 0 16)	41.314	-0.001
4	48.301	1.8827	54808	85.5	WC	1.8828	84.2	(1 0 1)	48.299	-0.002
5	59.816	1.5449	1887	2.9	SiC	1.5424	46.1	(1 1 0)	59.921	0.105
6	64.044	1.4527	9338	14.6	WC	1.4532	15.6	(1 1 0)	64.019	-0.025
7	65.752	1.4190	3896	6.1	WC	1.4184	4.7	(0 0 2)	65.782	0.030
8	71.589	1.3170	674	1.1	SiC	1.3157	33.0	(1 1 24)	71.671	0.082
9	73.121	1.2931	12793	20.0	WC	1.2934	15.6	(1 1 1)	73.105	-0.016
10	75.512	1.2580	6380	10.0	WC	1.2585	7.3	(2 0 0)	75.477	-0.035
11	77.118	1.2358	11379	17.8	WC	1.2357	13.5	(1 0 2)	77.121	0.003
12	84.089	1.1502	8382	13.1	WC	1.1504	10.8	(2 0 1)	84.070	-0.019
Line Shifts of Individual Phases:										
PDF#73-0471 - Tungsten Carbide <2T(0) = 0.0, d/d(0) = 1.0>										
PDF#72-1625 - Moissanite 24R, syn <2T(0) = -0.06, d/d(0) = 1.0>										



ภาพที่ 5.14 กราฟผลตรวจสอบผงโลหะผ่านการกรองที่แรงดันไฟฟ้า 6.0 V. T 50 □C กรด HCl 3N

5.5.3 การวิเคราะห์องค์ประกอบของตัวอย่างด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD)

1) ตัวอย่างผงทังสเตนคาร์ไบด์ย่อยด้วยไฮโดรคลอริก 3N แรงดัน 1.0v อุณหภูมิ 50 ◌ำCองค์ประกอบที่มีความเป็นไปได้คือ Tungsten Carbide (WC), Lead Tungsten Oxide (Pb(WO4)

2) ตัวอย่างผงทังสเตนคาร์ไบด์ย่อยด้วยไฮโดรคลอริก 3N แรงดัน 3.0v อุณหภูมิ 50 ◌ำองค์ประกอบที่มีความเป็นไปได้คือ Tungsten Carbide (WC) และ Silicon Carbon (SiC)

3) ตัวอย่างผงทังสเตนคาร์ไบด์ย่อยด้วยไฮโดรคลอริก 3N แรงดัน 6.0v อุณหภูมิ 50 ◌ำองค์ประกอบที่มีความเป็นไปได้คือ Tungsten Carbide (WC) และ Silicon Carbon (SiC)

5.6 สรุปผลการทดสอบประสิทธิภาพเครื่องแยกสลายเศษซีเมนต์ทังสเตนคาร์ไบด์

ผลการทดลองแยกสลายเศษซีเมนต์ทังสเตนคาร์ไบด์ด้วยแรงดัน 1.0V อุณหภูมิ 50°C ความเข้มข้นสารละลาย 3 N น้ำหนักที่ลดลงของเศษซีเมนต์คร์ไบด์ 170 กรัม องค์ประกอบของตัวอย่างผงโลหะที่เป็นไปได้ คือ Tungsten Carbide (WC), Lead Tungsten Oxide (Pb(WO4)
ผลการทดลองแยกสลายเศษซีเมนต์ทังสเตนคาร์ไบด์ด้วยแรงดัน 3.0V อุณหภูมิ 50°C ความเข้มข้นสารละลาย 3 N น้ำหนักที่ลดลงของเศษซีเมนต์คาร์ไบด์ 90 กรัม องค์ประกอบของตัวอย่างผงโลหะที่เป็นไปได้ คือ Tungsten Carbide (WC)มากกว่า 97.46% และมี Silicon Carbon (SiC) ผสมในจำนวนน้อย ผลการทดลองแยกสลายเศษซีเมนต์ทังสเตนคาร์ไบด์ด้วยแรงดัน 3.0V อุณหภูมิ 50°C ความเข้มข้นสารละลาย 3 N น้ำหนักที่ลดลงของเศษซีเมนต์คาร์ไบด์ 700 กรัม องค์ประกอบของตัวอย่างผงโลหะที่เป็นไปได้ คือ Tungsten Carbide (WC) มากกว่า 99% ส่วนผสมอื่นเป็นโคบอลต์และ Silicon Carbon (SiC) เพียงเล็กน้อย

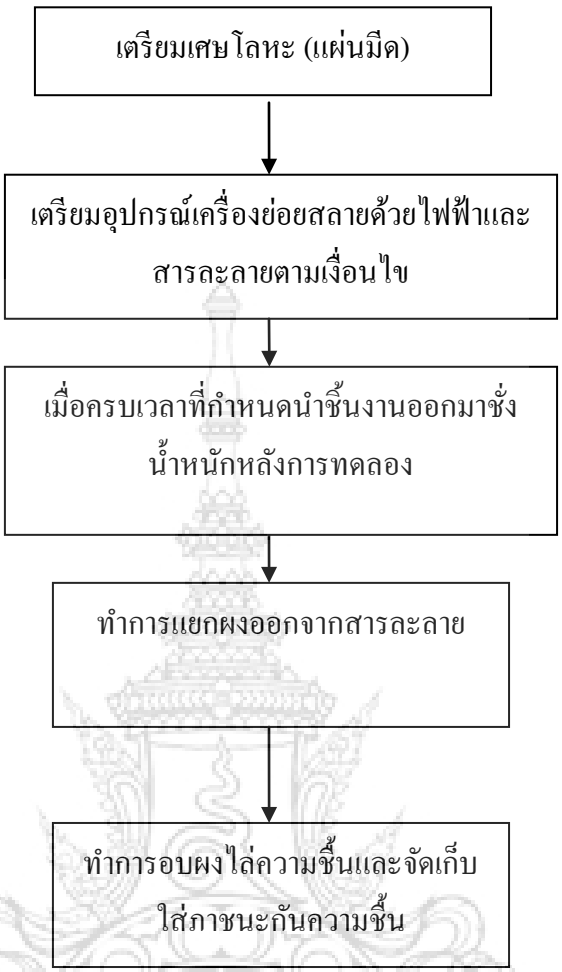
บทที่ 6
การแยกสลายเศษซีเมนต์ทังสเตนคาร์ไบด์ด้วยเครื่องกัดกร่อน

6.1 บทนำ

ในบทนี้จะเป็นการแสดงผลการดำเนินการที่กระทำตามขั้นตอนดังที่กล่าวมาแล้วในบทที่ 3 โดยแบ่งผลการดำเนินการออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่ การทดลองย่อยสลายด้วยไฟฟ้า ผลการทดสอบและการทดสอบคุณสมบัติด้วยเครื่อง X-Ray Diffract meter (XRD), Scanning Electron Microscope : SEM และวัดขนาดอนุภาคด้วยวิธี Laser Diffraction Technique ขั้นตอนต่างๆ โดยจะอธิบายด้วยภาพและตารางผลการทดลองของการแยกสลายในการทดลองในแต่ละครั้ง จะสรุปผลและนำมาเปรียบเทียบกับการทดลองแต่ละรูปแบบ สรุปผลของน้ำหนักที่ได้จากการทดลอง ผลจากการใช้การวิเคราะห์ความแปรปรวนมาเป็นเครื่องมือในการเปรียบเทียบ ผลการเปรียบเทียบของการทดลองในแต่ละครั้ง การวิเคราะห์หาผลการทดลองที่ดีที่สุด และผลการตรวจสอบคุณสมบัติของผงโลหะที่ได้จากการทดลอง

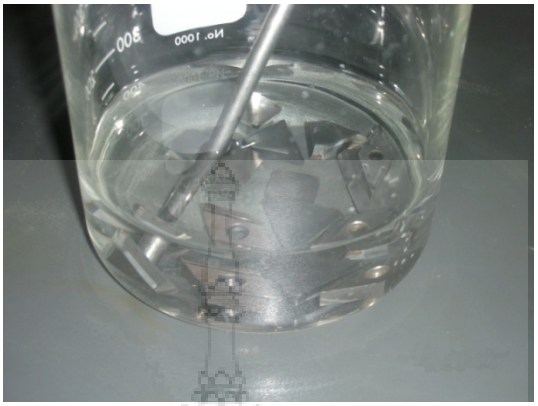
6.2 ผลการปฏิบัติงานและขั้นตอนการทำงาน

ในแต่ละขั้นตอนการทำงานได้มีการถ่ายภาพการทำงาน และขั้นตอนการแยกสลายด้วยไฟฟ้าและการแยกผงออกจากสารละลายและได้ผงโลหะดังต่อไปนี้



ภาพที่ 6.1 ขั้นตอนการผลิตโลหะผงทังสเตนคาร์ไบด์

6.2.1 ขั้นตอนการเตรียมอุปกรณ์การทดลอง



ภาพที่ 6.2 ล้างชิ้นงานในแอลกอฮอล์จนสะอาด

ภาพที่ 6.3 การตรวจสอบน้ำหนักชิ้นงาน

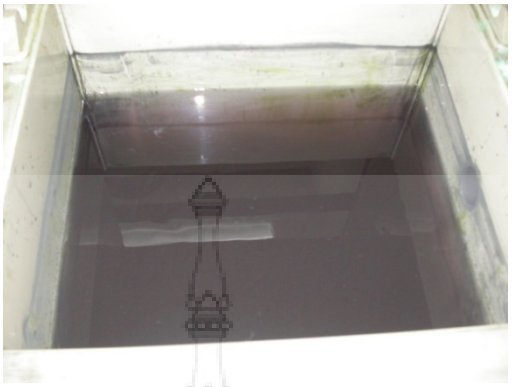
ภาพที่ 6.4 การบรรจุชิ้นงานใส่ใน Barrel

ภาพที่ 6.5 เตรียมสารละลายในการการแยกโลหะ

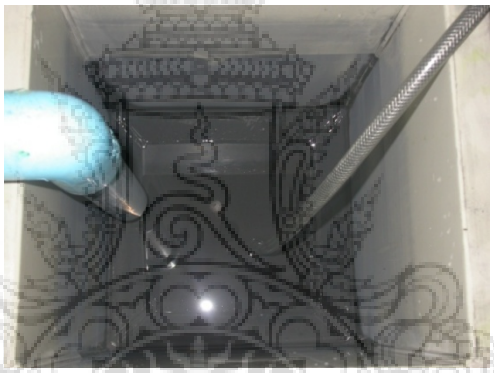
ภาพที่ 6.6 ประกอบชุด Barrel และอุปกณ์สำหรับแยกสลายโลหะทังสเตนคาร์ไบด์และเริ่มเปิดเครื่องทำการย่อย

ภาพที่ 6.7 เมื่อครบเวลาที่กำหนดแล้วยกอุปกรณ์ออกจากถังแยกโลหะทังสเตนคาร์ไบด์

6.2.2 ขั้นตอนการแยกผงออกจากสารละลาย



ภาพที่ 6.8 พักสารละลายให้ตกตะกอนโดยใช้เวลาประมาณ 1-2 ชั่วโมง



ภาพที่ 6.9 ระบายสารละลายส่วนบนออก

ภาพที่ 6.10 นำตะกอนจากถังเครื่องกัดกร่อนใส่บิกเกอร์และพักไว้ รอตกตะกอนอีก 1 ชั่วโมง

ภาพที่ 6.11 เทสารละลายส่วนบนออกและนำโคลนโลหะผงที่ตกตะกอนตั้งไฟ

ภาพที่ 6.12 นำผงที่ได้อบไล่ความชื้นด้วยเตาอบไฟฟ้า ตรวจสอบน้ำหนักและบรรจุ

6.3 ตารางบันทึกผลของการย่อยสลายภายใต้เงื่อนไขที่ต่างกัน

ผลการทดลองแยกสลายโลหะผงจากเศษซีเมนต์ทังสเตนคาร์ไบด์ แรงดันไฟฟ้า อุณหภูมิ และ ความเข้มข้นสารละลายต่างกัน

ตารางที่ 6.1 บันทึกผลการทดลอง: กรดไฮโดรคลอริก 1 N แรงดันไฟฟ้า 0.2V

ครั้งที่	เวลา (ชม.)	แรงดันไฟฟ้า (V)	กระแสไฟฟ้า (A)	อุณหภูมิ ($^{\circ}$C)	ความเร็วรอบ/นาที (rpm)	น้ำหนักก่อน (g)	น้ำหนักลดลง (g)	น้ำหนักผงที่ได้ (g)	น้ำหนักที่สูญหาย (g)
		ปรับค่า	วัดค่าเฉลี่ย						
1	48	0.2	0.3290	50	16	1500	140	109.53	40.47
2	48	0.2	0.1139	60	16	1500	130	112.99	7.01
3	48	0.2	0.1184	70	16	1500	110	96.68	13.32

1) ใช้กรดไฮโดรคลอริก 1 N แรงดัน 0.2v อุณหภูมิ 50°C rpm 16 รอบ/นาที เวลา 48 h กระแสเฉลี่ย 0.3290 A น้ำหนักที่ลดลงของเศษโลหะ แผ่นมีดอยู่ที่ 140 g

2) ใช้กรดไฮโดรคลอริก 1 N แรงดัน 0.2v อุณหภูมิ 60°C rpm 16 รอบ/นาที เวลา 48 h กระแสเฉลี่ย 0.1139 A น้ำหนักที่ลดลงของเศษโลหะ แผ่นมีดอยู่ที่ 130 g

3) ใช้กรดไฮโดรคลอริก 1 N แรงดัน 0.2v อุณหภูมิ 70°C rpm 16 รอบ/นาที เวลา 48 h กระแสเฉลี่ย 0.1184 A น้ำหนักที่ลดลงของเศษโลหะ แผ่นมีดอยู่ที่ 110 g

ตารางที่ 6.2 บันทึกผลการทดลอง: กรดไฮโดรคลอริก 1 N แรงดันไฟฟ้า 0.4V

ครั้งที่	เวลา (ชม.)	แรงดันไฟฟ้า (V)	กระแสไฟฟ้า (A)	อุณหภูมิ ($^{\circ}$C)	ความเร็วรอบ/นาที (rpm)	น้ำหนักก่อน (g)	น้ำหนักลดลง (g)	น้ำหนักผงที่ได้ (g)	น้ำหนักที่สูญหาย (g)
		ปรับค่า	วัดค่าเฉลี่ย						
1	48	0.4	0.5497	50	16	1500	150	109.53	40.47
2	48	0.4	0.7662	60	16	1500	120	112.99	7.01
3	48	0.4	0.4371	70	16	1500	130	104	26

1) ใช้กรดไฮโดรคลอริก 1 N แรงดัน 0.4v อุณหภูมิ 50°C rpm 16 รอบ/นาที เวลา 48 h กระแสเฉลี่ย 0.5491 A น้ำหนักที่ลดลงของเศษโลหะ แผ่นมีดอยู่ที่ 150 g

2) ใช้กรดไฮโดรคลอริก 1 N แรงดัน 0.4v อุณหภูมิ 60°C rpm 16 รอบ/นาที เวลา 48 h กระแสเฉลี่ย 0.7662 A น้ำหนักที่ลดลงของเศษโลหะ แผ่นมีดอยู่ที่ 120 g

3) ใช้กรดไฮโดรคลอริก 1 N แรงดัน 0.4v อุณหภูมิ 70°C rpm 16 รอบ/นาที เวลา 48 h กระแสเฉลี่ย 0.4310A น้ำหนักที่ลดลงของเศษโลหะ แผ่นมีดอยู่ที่ 130 g

ตารางที่ 6.3 บันทึกผลการทดลอง: กรดไฮโดรคลอริก 1 N แรงดันไฟฟ้า 0.6 V

ครั้งที่	เวลา (ชม.)	แรงดันไฟฟ้า (V)	กระแสไฟฟ้า (A)	อุณหภูมิ (°C)	ความเร็วรอบ/นาที (rpm)	น้ำหนักก่อน (g)	น้ำหนักลดลง (g)	น้ำหนักผงที่ได้ (g)	น้ำหนักที่สูญหาย (g)
		ปรับค่า	วัดค่าเฉลี่ย						
1	48	0.6	0.7457	50	16	1500	120	96.07	23.93
2	48	0.6	1.1005	60	16	1500	130	104	26
3	48	0.6	0.4865	70	16	1500	100	78.90	21.1

1) ใช้กรดไฮโดรคลอริก 1 N แรงดัน 0.6v อุณหภูมิ 50°C rpm 16 รอบ/นาที เวลา 48 h กระแสเฉลี่ย 0.7457A น้ำหนักที่ลดลงของเศษโลหะ แผ่นมีดอยู่ที่ 120 g

2) ใช้กรดไฮโดรคลอริก 1 N แรงดัน 0.6v อุณหภูมิ 60°C rpm 16 รอบ/นาที เวลา 48 h กระแสเฉลี่ย 1.1005A น้ำหนักที่ลดลงของเศษโลหะ แผ่นมีดอยู่ที่ 130 g

3) ใช้กรดไฮโดรคลอริก 1 N แรงดัน 0.6v อุณหภูมิ 70°C rpm 16 รอบ/นาที เวลา 48 h กระแสเฉลี่ย 0.4865A น้ำหนักที่ลดลงของเศษโลหะ แผ่นมีดอยู่ที่ 100 g

ตารางที่ 6.4 บันทึกผลการทดลอง: กรดไฮโดรคลอริก 1 N แรงดันไฟฟ้า 0.8V

ครั้งที่	เวลา (ชม.)	แรงดันไฟฟ้า (V)	กระแสไฟฟ้า (A)	อุณหภูมิ (°C)	ความเร็วรอบ/นาที (rpm)	น้ำหนักก่อน (g)	น้ำหนักลดลง (g)	น้ำหนักผงที่ได้ (g)	น้ำหนักที่สูญหาย (g)
		ปรับค่า	วัดค่าเฉลี่ย						
1	48	0.8	0.5419	50	16	1500	130	103.47	26.23
2	48	0.8	0.5620	60	16	1500	110	88.75	21.25
3	48	0.8	0.6325	70	16	1500	130	105.91	24.09

1) ใช้กรดไฮโดรคลอริก 1 N แรงดัน 0.8v อุณหภูมิ 50°C rpm 16 รอบ/นาที เวลา 48 h กระแสเฉลี่ย 0.5419A น้ำหนักที่ลดลงของเศษโลหะ แผ่นมีดอยู่ที่ 130 g

2) ใช้กรดไฮโดรคลอริก 1 N แรงดัน 0.8v อุณหภูมิ 60°C rpm 16 รอบ/นาที เวลา 48 h กระแสเฉลี่ย 0.5620A น้ำหนักที่ลดลงของเศษโลหะ แผ่นมีดอยู่ที่ 110 g

3) ใช้กรดไฮโดรคลอริก 1 N แรงดัน 0.8v อุณหภูมิ 70°C rpm 16 รอบ/นาที เวลา 48 h กระแสเฉลี่ย 0.6325 A น้ำหนักที่ลดลงของเศษโลหะ แผ่นมีดอยู่ที่ 130 g

ตารางที่ 6.5 บันทึกผลการทดลอง: กรดไฮโดรคลอริก 1 N แรงดันไฟฟ้า 1.0V

ครั้งที่	เวลา (ชม.)	แรงดันไฟฟ้า (V)	กระแสไฟฟ้า (A)	อุณหภูมิ (°C)	ความเร็วรอบ/นาที (rpm)	น้ำหนักก่อน (g)	น้ำหนักลดลง (g)	น้ำหนักผงที่ได้ (g)	น้ำหนักที่สูญหาย (g)
		ปรับค่า	วัดค่าเฉลี่ย						
1	48	1.0	1.311	50	16	1500	140	109.97	30.63
2	48	1.0	1.390	60	16	1500	100	88.81	11.19
3	48	1.0	1.490	70	16	1500	140	123.52	16.48

1) ใช้กรดไฮโดรคลอริก 1 N แรงดัน 1.0v อุณหภูมิ 50°C rpm 16 รอบ/นาที เวลา 48 h กระแสเฉลี่ย 1.311 A น้ำหนักที่ลดลงของเศษโลหะ แผ่นมีดอยู่ที่ 140 g

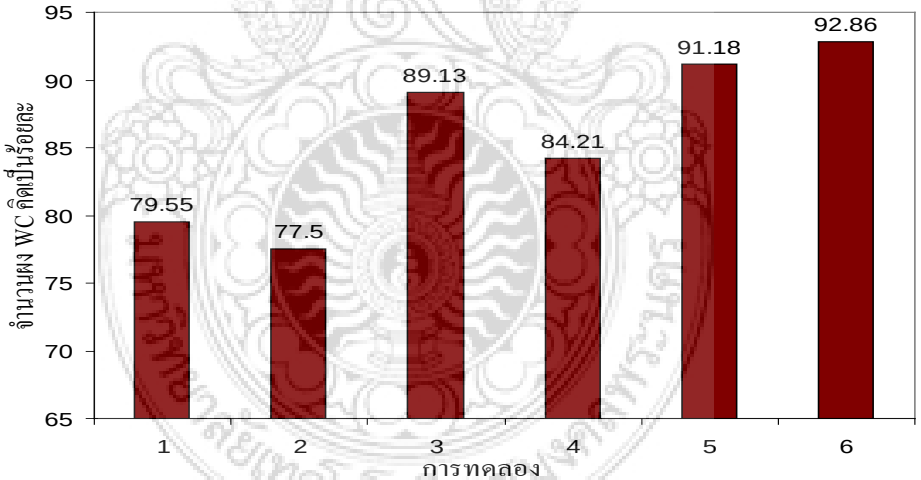
2) ใช้กรดไฮโดรคลอริก 1 N แรงดัน 1.0v อุณหภูมิ 60°C rpm 16 รอบ/นาที เวลา 48 h กระแสเฉลี่ย 1.390 A น้ำหนักที่ลดลงของเศษโลหะ แผ่นมีดอยู่ที่ 100 g

3) ใช้กรดไฮโดรคลอริก 1 N แรงดัน 1.0v อุณหภูมิ 70°C rpm 16 รอบ/นาที เวลา 48 h กระแสเฉลี่ย 1.490 A น้ำหนักที่ลดลงของเศษโลหะ แผ่นมีดอยู่ที่ 140 g

6.4 ผลการทดลองกระบวนการย่อยสลายโลหะผงจากซีเมนต์ทังสเตนคาร์ไบด์

ตารางที่ 6.6 ผลการทดลองภายใต้ปัจจัยอุณหภูมิ 30 ˚C

การทดลอง	แรงดันไฟฟ้าที่ใช้(V)	ความเข้มข้นสารละลาย HCl(N)	น้ำหนักที่ลดลงของชิ้นงาน(g)	น้ำหนักผงที่ได้(g)	น้ำหนักที่สูญหาย (g)	อัตราส่วนของผง WC(%)
1	0.2	3	220	175	45	79.55
2	0.2	5	200	155	45	77.50
3	0.2	7	230	205	25	89.13
4	0.6	3	190	160	30	84.21
5	0.6	5	170	155	15	91.18
6	0.6	7	210	195	15	92.86



ภาพที่ 6.13 แผนภูมิแสดงการเปรียบเทียบจำนวนผง WC คิดเป็นร้อยละที่ได้จากการทดลองภายใต้ปัจจัยอุณหภูมิ 30 ˚C

จากตารางที่ 6.6 และภาพที่ 6.13สามารถอธิบายได้ว่าการทดลองในกลุ่มนี้แบ่งได้ทั้งหมด 6 การทดลองและเน้นกระบวนการย่อยสลายเศษทังสเตนคาร์ไบด์ที่อุณหภูมิ 30 ˚C เป็นหลัก โดยผลที่

ได้จะใช้อัตราส่วนของผงทังสเตนคาร์ไบด์เป็นข้อมูลเปรียบเทียบผงทังสเตนคาร์ไบด์ที่ได้ในแต่ละการทดลองซึ่งจะเรียงลำดับอัตราส่วนของผงทังสเตนคาร์ไบด์จากมากไปหาน้อยได้ดังนี้

1) การทดลองที่ 6 ภายใต้ปัจจัยแรงดันไฟฟ้า 0.6 V ความเข้มข้นของสารละลาย HCl 7 N อัตราส่วนของผงทังสเตนคาร์ไบด์เท่ากับ 92.86 %

2) การทดลองที่ 5 ภายใต้ปัจจัยแรงดันไฟฟ้า 0.6 V ความเข้มข้นของสารละลาย HCl 5 N อัตราส่วนของผงทังสเตนคาร์ไบด์เท่ากับ 91.18 %

3) การทดลองที่ 3 ภายใต้ปัจจัยแรงดันไฟฟ้า 0.2 V ความเข้มข้นของสารละลาย HCl 7 N อัตราส่วนของผงทังสเตนคาร์ไบด์เท่ากับ 89.13 %

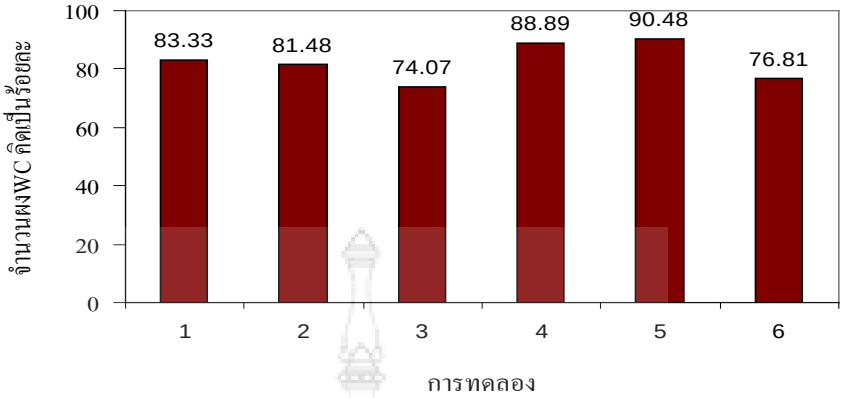
4) การทดลองที่ 4 ภายใต้ปัจจัยแรงดันไฟฟ้า 0.6 V ความเข้มข้นของสารละลาย HCl 3N อัตราส่วนของผงทังสเตนคาร์ไบด์เท่ากับ 84.21 %

5) การทดลองที่ 1 ภายใต้ปัจจัยแรงดันไฟฟ้า 0.2 V ความเข้มข้นของสารละลาย HCl 3N อัตราส่วนของผงทังสเตนคาร์ไบด์เท่ากับ 79.55 %

6) การทดลองที่ 2 ภายใต้ปัจจัยแรงดันไฟฟ้า 0.2 V ความเข้มข้นของสารละลาย HCl 5N อัตราส่วนของผงทังสเตนคาร์ไบด์เท่ากับ 77.50 %

ตารางที่ 6.7 ผลการทดลองภายใต้ปัจจัยการใช้แรงดันไฟฟ้า 1.0 V

การทดลอง	อุณหภูมิ (°C)	ความเข้มข้ม HCl(N)	น้ำหนักที่ลดลงของชิ้นงาน(g)	น้ำหนักผงที่ได้(g)	น้ำหนักทีสูญหาย(g)	อัตราส่วนผง WC(%)
1	50	3	150	125	25	83.33
2	50	5	135	110	25	81.48
3	50	7	135	100	35	74.07
4	70	3	180	160	20	88.89
5	70	5	210	190	20	90.48
6	70	7	345	265	80	76.81



ภาพที่ 6.14 แผนภูมิแสดงเปรียบเทียบจำนวนผง WC ที่ได้จากการทดลองภายใต้ปัจจัยการใช้แรงดันไฟฟ้า 1.0 V

จากตารางที่ 6.7 และภาพที่ 6.14 สามารถอธิบายได้ว่าการทดลองในกลุ่มนี้แบ่งได้ทั้งหมด 6 การทดลองและเน้นกระบวนการย่อยสลายเศษทังสเตนคาร์ไบด์ที่แรงดันไฟฟ้า 1.0 V เป็นหลัก โดยผลที่ได้จะใช้อัตราส่วนของผงทังสเตนคาร์ไบด์เป็นข้อมูลเปรียบเทียบผงทังสเตนคาร์ไบด์ที่ได้ในแต่ละการทดลองซึ่งจะเรียงลำดับอัตราส่วนของผงทังสเตนคาร์ไบด์จากมากไปหาน้อยได้ดังนี้

1) การทดลองที่ 5 ภายใต้ปัจจัยอุณหภูมิ 70 ˚C ความเข้มข้นของสารละลาย HCl 5 N อัตราส่วนของผงทังสเตนคาร์ไบด์เท่ากับ 90.48 %

2) การทดลองที่ 4 ภายใต้ปัจจัยอุณหภูมิ 70 ˚C ความเข้มข้นของสารละลาย HCl 3 N อัตราส่วนของผงทังสเตนคาร์ไบด์เท่ากับ 90.48 %

3) การทดลองที่ 1 ภายใต้ปัจจัยอุณหภูมิ 70 ˚C ความเข้มข้นของสารละลาย HCl 5 N อัตราส่วนของผงทังสเตนคาร์ไบด์เท่ากับ 74.07 %

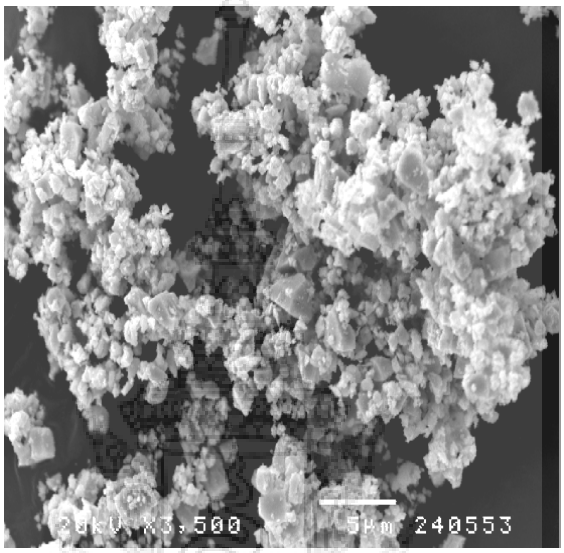
4) การทดลองที่ 2 ภายใต้ปัจจัยอุณหภูมิ 50 ˚C ความเข้มข้นของสารละลาย HCl 5 N อัตราส่วนของผงทังสเตนคาร์ไบด์เท่ากับ 81.48 %

5) การทดลองที่ 6 ภายใต้ปัจจัยอุณหภูมิ 70 ˚C ความเข้มข้นของสารละลาย HCl 7 N อัตราส่วนของผงทังสเตนคาร์ไบด์เท่ากับ 76.81 %

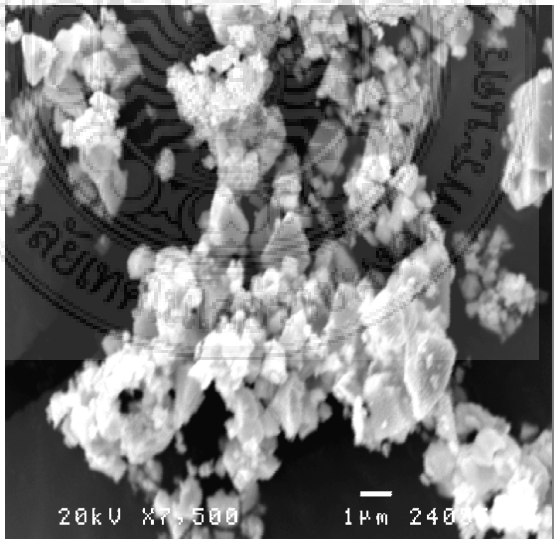
6) การทดลองที่ 3 ภายใต้ปัจจัยอุณหภูมิ 50 ˚C ความเข้มข้นของสารละลาย HCl 7 N อัตราส่วนของผงทังสเตนคาร์ไบด์เท่ากับ 74.07 %

6.5 ผลการทดสอบโลหะผงทังสเตนคาร์ไบด์ที่ได้จากกระบวนการการทดลอง

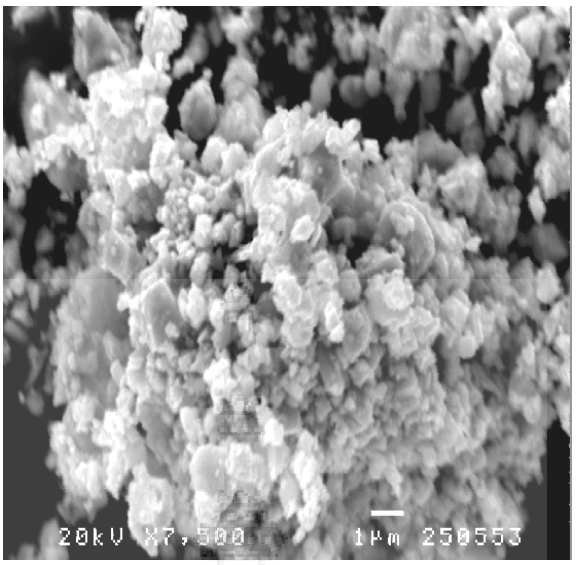
6.5.1 ภาพผลทดสอบโลหะผงทังสเตนคาร์ไบด์ด้วยเทคนิค Scanning Electron Microscope (SEM)



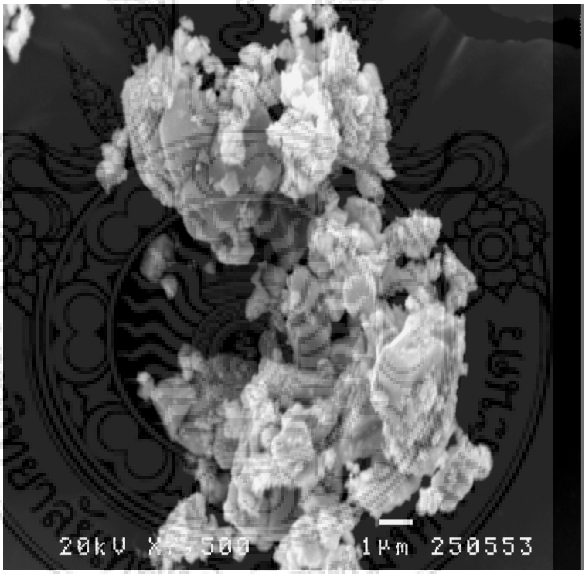
ภาพที่ 6.15 กำลังขยาย 3,500 เท่า ที่ปัจจัยแรงดันไฟฟ้า 0.2 V อุณหภูมิ 30°C สารละลาย HCl เข้มข้น 3 N



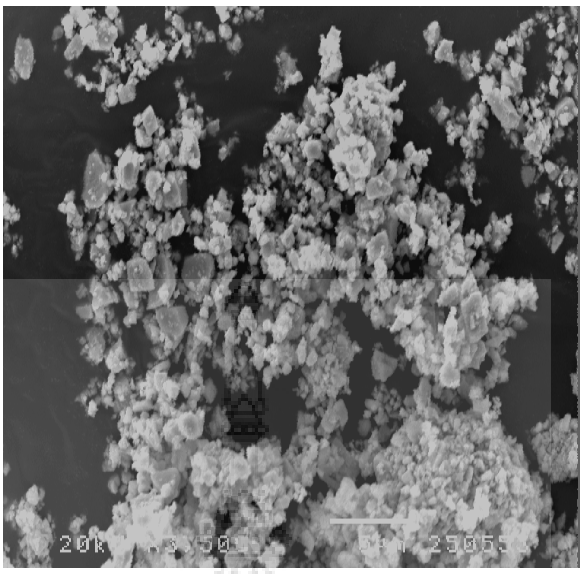
ภาพที่ 6.16 กำลังขยาย 7,500 เท่า ที่ปัจจัยแรงดันไฟฟ้า 0.2 V อุณหภูมิ 30°C สารละลาย HCl เข้มข้น 3 N



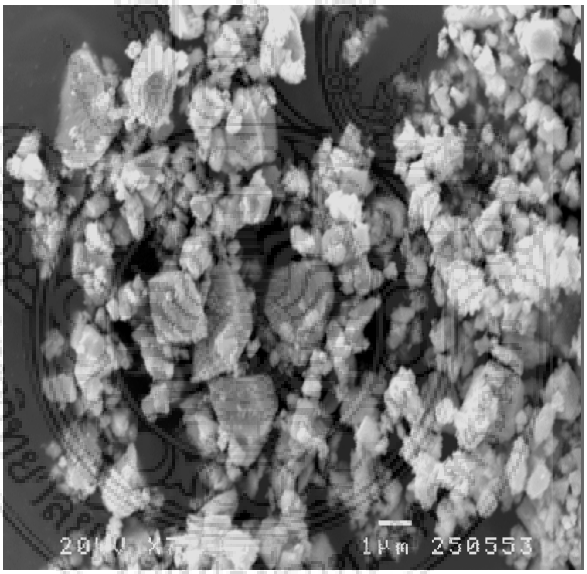
ภาพที่ 6.17 กำลังขยาย 3,500 เท่า ที่ปัจจัยแรงดันไฟฟ้า 0.6 V อุณหภูมิ 30°C สารละลาย HCl เข้มข้น 3 N



ภาพที่ 6.18 กำลังขยาย 7,500 เท่า ที่ปัจจัยแรงดันไฟฟ้า 0.6 V อุณหภูมิ 30°C สารละลาย HCl เข้มข้น 3 N



ภาพที่ 6.19 กำลังขยาย 3,500 เท่า ที่ปัจจัยแรงดันไฟฟ้า 1.0 V อุณหภูมิ 50°C สารละลาย HCl เข้มข้น 3 N

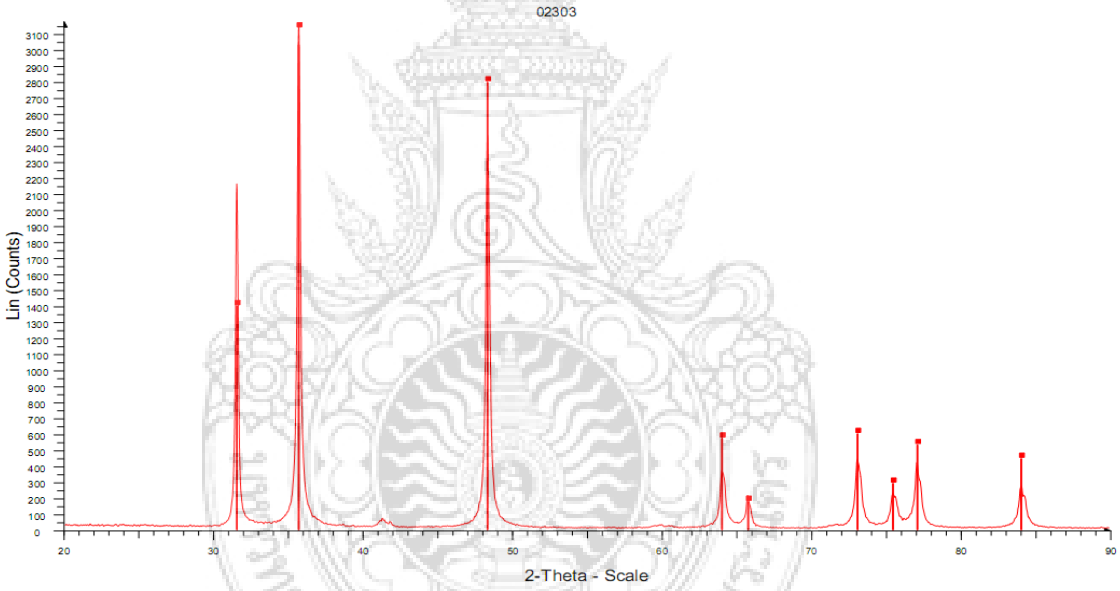


ภาพที่ 6.20 กำลังขยาย 7,500 เท่า ที่ปัจจัยแรงดันไฟฟ้า 1.0 V อุณหภูมิ 50°C สารละลาย HCl เข้มข้น 3 N

6.6 ผลทดสอบโลหะผงทังสเตนคาร์ไบด์ด้วยเทคนิค X – Ray Diffract meter (XRD)

ตารางที่ 6.8 ผลวิเคราะห์เพื่อศึกษาองค์ประกอบของธาตุอื่นในโลหะผงทังสเตนคาร์ไบด์ที่ได้จากกระบวนการการทดลอง

องค์ประกอบที่มีความเป็นไปได้	
ผงทังสเตนคาร์ไบด์ที่ได้จากการทดลอง	Tungsten Carbide - WC , Hexagonal



ภาพที่ 6.21 XRD ผงโลหะชนิดทังสเตนคาร์ไบด์ (WC)

6.7 ผลการทดสอบขนาดและการกระจายตัวของโลหะผงทังสเตนคาร์ไบด์ที่ได้จากการทดลอง

ตารางที่ 6.9 การวิเคราะห์ขนาดและการกระจายของอนุภาคโลหะผงทังสเตนคาร์ไบด์ การแยกสลายภายใต้ปัจจัย แรงดัน 0.2 และ 0.6 V, อุณหภูมิ 30°C, สารละลายไฮโดรคลอริก ความเข้มข้น 3, 5 และ 7 N

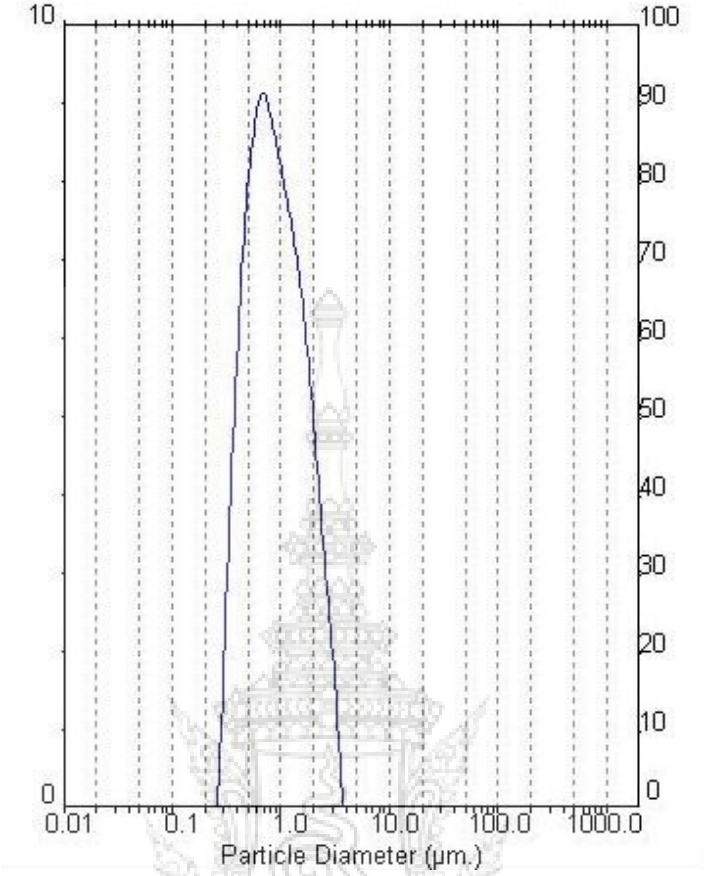
	ขนาดอนุภาคโลหะผงทังสเตนคาร์ไบด์ที่ได้จากกระบวนการทดลอง					
	ที่แรงดันไฟฟ้า 0.2 V			ที่แรงดันไฟฟ้า 0.6 V		
	3 N	5 N	7 N	3 N	5 N	7N
Volumn Mean Diameter (μm)	1.67	1.07	2.01	1.42	1.05	1.15
10 Volume% Less Than or Equal (μm)	0.45	0.42	0.45	0.49	0.41	0.43
50 Volume% Less Than or Equal (μm)	1.05	0.86	1.07	1.21	0.82	0.93
90 Volume% Less Than or Equal (μm)	2.83	2.04	3.37	2.70	2.02	2.24

หมายเหตุ 1) 10 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรที่พบอนุภาคที่เล็กกว่าหรือเท่ากับขนาดที่วิเคราะห์ได้
50 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรที่พบอนุภาคที่เล็กกว่าหรือเท่ากับขนาดที่วิเคราะห์ได้
90 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรที่พบอนุภาคที่เล็กกว่าหรือเท่ากับขนาดที่วิเคราะห์ได้
2) เทคนิคที่ในการวิเคราะห์ Laser Diffraction Technique จำนวนครั้งที่ทดสอบ 3 ครั้ง

ตารางที่ 6.10 การวิเคราะห์ขนาดและการกระจายของอนุภาคโลหะผงทังสเตนคาร์ไบด์การแยกสลายภายใต้ปัจจัย แรงดัน 1.0 V, อุณหภูมิ 50°C, และ 70 °C สารละลายไฮโดรคลอริก ความเข้มข้น 3, 5, และ 7 N

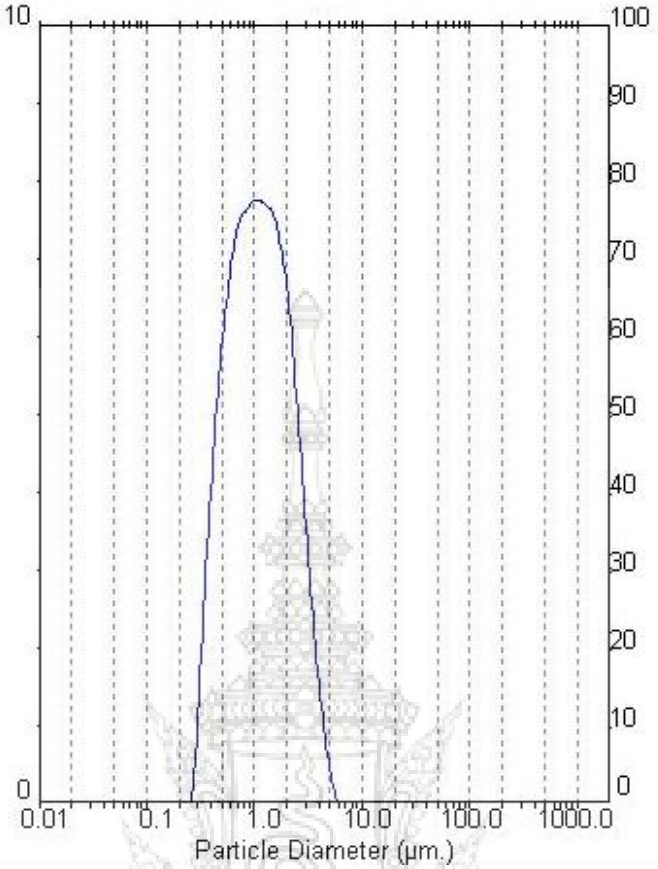
	ขนาดอนุภาคโลหะผงทังสเตนคาร์ไบด์ที่ได้จากกระบวนการทดลอง					
	ที่อุณหภูมิ 50°C			ที่อุณหภูมิ 70°C		
	3 N	5 N	7 N	3 N	5 N	7 N
Volume Mean Diameter	2.83	2.84	2.80	1.57	1.52	1.35
10 Volume% Less Than or Equal (μm)	0.77	0.89	0.86	0.42	0.49	0.46
50 Volume% Less Than or Equal (μm)	1.84	2.09	2.29	0.90	1.27	1.09
90 Volume% Less Than or Equal (μm)	3.70	4.20	4.57	2.58	2.97	2.62

หมายเหตุ 1) 10 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรที่พบอนุภาคที่เล็กกว่าหรือเท่ากับขนาดที่วิเคราะห์ได้
50 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรที่พบอนุภาคที่เล็กกว่าหรือเท่ากับขนาดที่วิเคราะห์ได้
90 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรที่พบอนุภาคที่เล็กกว่าหรือเท่ากับขนาดที่วิเคราะห์ได้
2) เทคนิคที่ในการวิเคราะห์ Laser Diffraction Technique จำนวนครั้งที่ทดสอบ 3 ครั้ง



ภาพที่ 6.22 กราฟแสดงขนาดและการกระจายอนุภาคที่ปัจจัยแรงดันไฟฟ้า 0.2 V อุณหภูมิ 30°C สารละลาย HCl เข้มข้น 5 N

จากภาพที่ 6.22 ผลตรวจสอบขนาดและการกระจายของอนุภาคโลหะผงทังสเตนคาร์ไบด์จากเครื่อง Particle Size Analyzer ที่ปัจจัยแรงดันไฟฟ้า 0.2 V อุณหภูมิ 30°C สารละลาย HCl เข้มข้น 5 N ผลปรากฏว่าอนุภาคโลหะผงทังสเตนคาร์ไบด์ที่พบมีขนาดอยู่ในช่วง 0.27-3.09 µm และขนาดอนุภาคที่ถูกพบมากสุดคือ 0.67 µm โดยคิดเป็นร้อยละ 9.08 ของขนาดอนุภาคทั้งหมด



ภาพที่ 6.23 กราฟแสดงขนาดและการกระจายอนุภาคที่ปัจจัยแรงดันไฟฟ้า 1.0 V อุณหภูมิ 70°C สารละลาย HCl เข้มข้น 7 N

จากภาพที่ 6.23 ผลตรวจสอบขนาดและการกระจายของอนุภาคโลหะผงทังสเตนคาร์ไบด์จากเครื่อง Particle Size Analyzer ที่ปัจจัยแรงดันไฟฟ้า 1.0 V อุณหภูมิ 70°C สารละลาย HCl เข้มข้น 7 N ผลปรากฏว่าอนุภาคโลหะผงทังสเตนคาร์ไบด์ที่พบมีขนาดอยู่ในช่วง 0.27-5.69 µm และขนาดอนุภาคที่ถูกพบมากสุดคือ 1.06 µm โดยคิดเป็นร้อยละ 7.74 ของขนาดอนุภาคทั้งหมด

6.8 สรุปผลการทดลองใช้เครื่องแยกสลายเศษโลหะซีเมนต์ทังสเตนคาร์ไบด์

จากการทดลองการแยกสลายชิ้นส่วนซีเมนต์ทังสเตนคาร์ไบด์ ด้วยวิธีการสลายด้วยเคมีไฟฟ้า โดยใช้กรดไฮโดรคลอริก 1 N อุณหภูมิในการแยกสลาย 3 ระดับได้แก่ 50, 60, 70°C ด้วยแรงดันไฟฟ้า 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0V และ สารละลาย 3, 5, 7 N อุณหภูมิ 30, 50, 70°C แรงดัน 0.2 และ 0.6V สรุปได้ว่า การทดลองด้วยเครื่องแยกสลายเศษซีเมนต์ทังสเตนคาร์ไบด์ โดยใช้สารละลายกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น1 N แรงดัน 0.2-1.0V อุณหภูมิ 50, 60 และ 70°C น้ำหนักของเศษโลหะแผ่นมีดลดลงมากที่สุด คือ 150 g ใช้เวลา 48 ชั่วโมง แรงดัน 0.4V อุณหภูมิ 50°C และใช้

สารละลายกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 7 N อุณหภูมิ 70°C แรงดัน 0.6V น้ำหนักที่ลดลงมากที่สุดคือ 345 g ใช้เวลา 48 ชั่วโมง ผงโลหะที่ได้เป็นทังสเตนคาร์ไบด์(WC powder)

บทที่ 7
การศึกษากระบวนการอัดขึ้นรูปชิ้นงานจากโลหะผงทังสเตนคาร์ไบด์

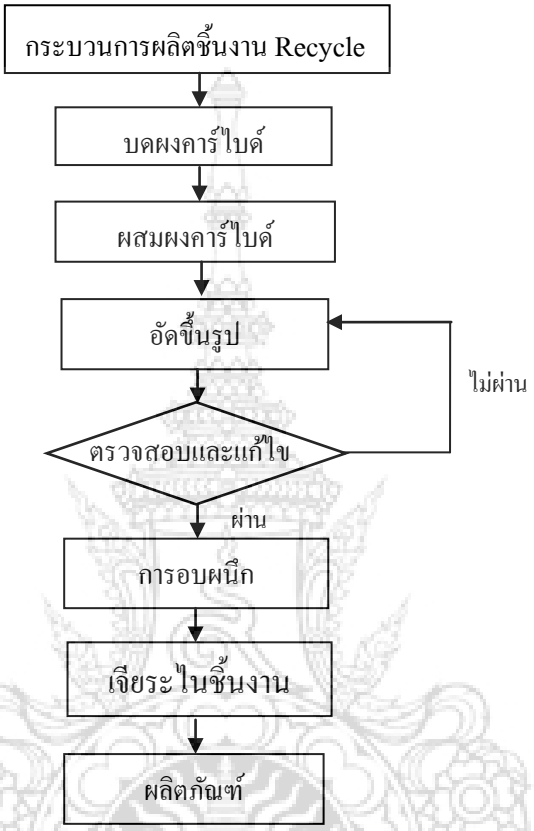
7.1 บทนำ

เนื่องจากการผลิตชิ้นงานซีเมนต์ทังสเตนคาร์ไบด์ ด้วยการอบผนึกผลิตจากผงโลหะทังสเตนคาร์ไบด์มากกว่า 80-93% โดยอนุภาคของทังสเตนคาร์ไบด์ผสมรวมเข้าด้วยกันกับโลหะประสาน โดยวิธีการของโลหะผงวิทยา (Power Metallurgy) ประกอบไปด้วย ทังสเตนคาร์ไบด์ (Wc) โดยมีโคบอลต์ (Co) เป็นโลหะประสาน อนุภาคของซีเมนต์ทังสเตนคาร์ไบด์มีขนาดเล็กมาก ซีเมนต์ทังสเตนคาร์ไบด์สามารถใช้งานที่มีความเร็วตัดสูงกว่าเหล็กกล้ารอบสูงและมีความต้านทานการสึกหรอสูงมากกว่าหลายเท่า ซีเมนต์ทังสเตนคาร์ไบด์สามารถนำไปเคลือบผิวได้เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของเครื่องมือตัด ซึ่งสารเคลือบและวิธีการเคลือบจะขึ้นอยู่กับเทคนิคของผู้ผลิต

อุตสาหกรรมการผลิตเครื่องมือและเครื่องมือตัดจากวัสดุทังสเตนคาร์ไบด์ ประกอบด้วยการผลิต Cutting Tool , Pin , Bush ปัจจุบันมีผู้ผลิตจำนวนกว่า 10 ราย ใช้วัตถุดิบนำเข้าทั้งหมด พบว่าเริ่มมีการส่งออกเศษทังสเตนคาร์ไบด์ ในปี พ.ศ. 2549 สูงถึง 9,416 กิโลกรัม เพิ่มขึ้นจากปี พ.ศ. 2548 ถึง 3 เท่า และเป็นการส่งออกในราคา 150 – 250 บาทต่อกิโลกรัม หากนำมาเพิ่มมูลค่าด้วยการ Recycle จะทำให้มูลค่าวัตถุดิบเหลือใช้สูงขึ้น

7.2 ขั้นตอนการผลิตชิ้นงานจากโลหะผงทังสเตนคาร์ไบด์

7.2.1 ขั้นตอนการผลิตชิ้นงานด้วยโลหะผงทังสเตนคาร์ไบด์จากกระบวนการ Recycle



ภาพที่ 7.1 แสดงขั้นตอนกระบวนการผลิตชิ้นงาน Recycle

7.3 ขั้นตอนการเตรียมผสมโลหะผงทังสเตนคาร์ไบด์จากกระบวนการ Recycle

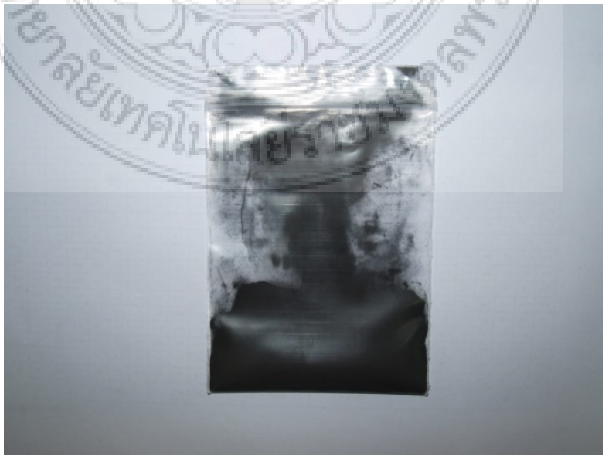
การเตรียมโลหะผงทังสเตนคาร์ไบด์ที่ได้จากกระบวนการ Recycle เพื่อนำไปผลิตเป็นชิ้นงานแสดงขั้นตอนต่าง ๆ ดังนี้

ภาพที่ 7.2 เตรียมส่วนผสมใส่ถ้วยบดนำไปเข้าเครื่องบด แล้ว เริ่มทำการบด

ภาพที่ 7.3 เมื่อครบตามเวลาที่กำหนดเปิดฝาเครื่องบดแล้วนำถ้วยบดออกจากตัวเครื่อง

ภาพที่ 7.4 เทสารละลายในถ้วยบดลงในบิกเกอร์และพักไว้รอให้ตกตะกอน

ภาพที่ 7.5 นำตะกอนที่ได้ไปตั้งไฟจนแห้งแล้วนำไปอบด้วยเตาไฟฟ้า



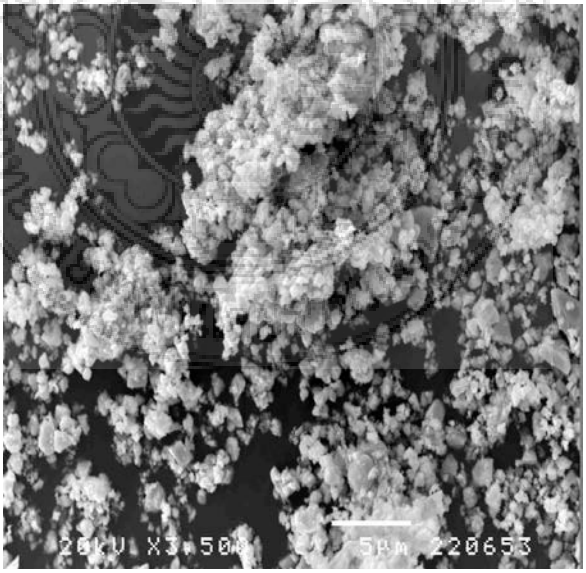
ภาพที่ 7.6 ตรวจสอบน้ำหนักบรรจุและเตรียมนำผงโลหะทังสเตนคาร์ไบด์ไปอัดขึ้นรูป

7.4 การทดสอบคุณสมบัติโลหะผงทังสเตนคาร์ไบด์

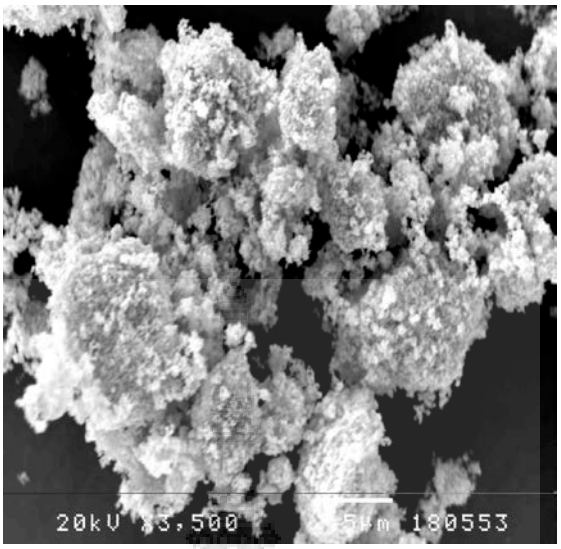
ตารางที่ 7.1 ค่าความแข็งของชิ้นงานที่ใช้แล้วนำมาบดเป็นผงคาร์ไบด์

ค่าความแข็งของชิ้นงานที่ใช้แล้วนำมาบดเป็นผงคาร์ไบด์											
ชิ้นงาน	ครั้งที่ทดสอบ (HRC)										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	เฉลี่ย
K 05	88.0	88.0	88.1	88.0	88.2	88.1	88.0	88.0	88.0	88.1	88.04
K 05	88.3	88.2	88.6	88.2	88.3	88.6	88.5	88.3	88.6	88.2	88.38
K 10	90.8	80.7	90.8	90.8	90.7	90.8	90.7	90.8	90.8	90.8	90.77
K 10	90.8	90.8	90.7	90.8	90.8	90.9	90.8	90.7	90.9	90.9	90.81
K 10	90.2	90.2	90.1	90.2	90.3	90.1	90.2	90.2	90.2	90.3	90.20
K 10	90.2	90.2	90.3	90.2	90.2	90.1	90.2	90.4	90.2	90.2	90.22

-การตรวจวิเคราะห์สมบัติของโลหะผงด้วยการถ่ายภาพด้วย Scanning Electron Microscope (SEM)

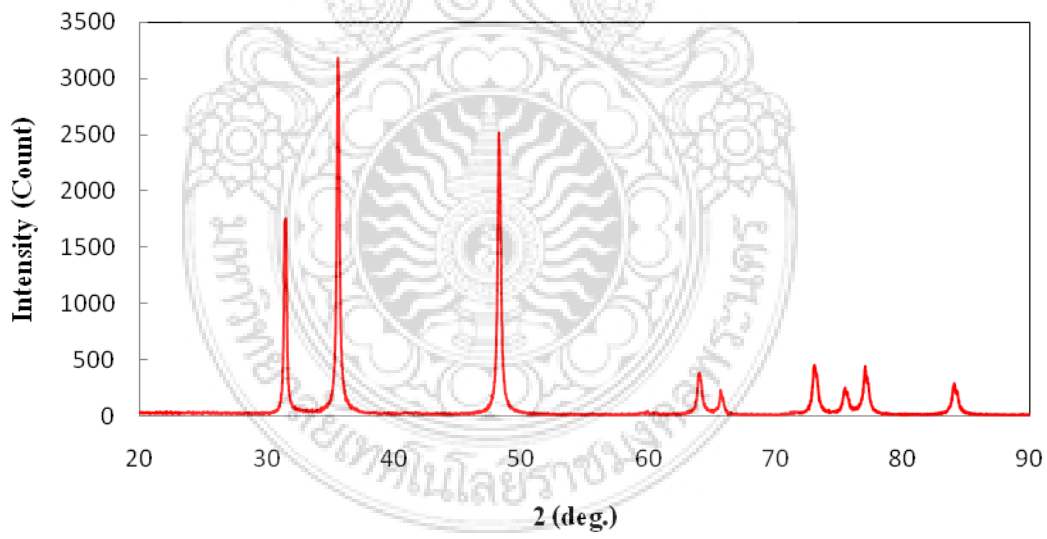


ภาพที่ 7.7โครงสร้างทางจุลภาคโลหะผงทังสเตนคาร์ไบด์ Recycle กำลังขยาย 3,500 เท่า (ก่อนบด)



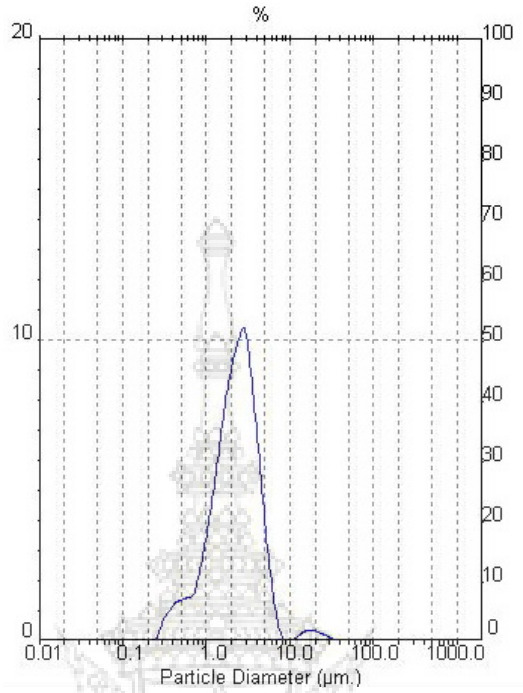
ภาพที่ 7.8โครงสร้างทางจุลภาคโลหะผงทังสเตนคาร์ไบด์ Recycle กำลังขยาย 3,500 เท่า (หลังบด)

-การตรวจสอบคุณสมบัติของโลหะผงด้วยเทคนิค การเลี้ยวเบนของแสง X-Ray Diffraction (XRD)

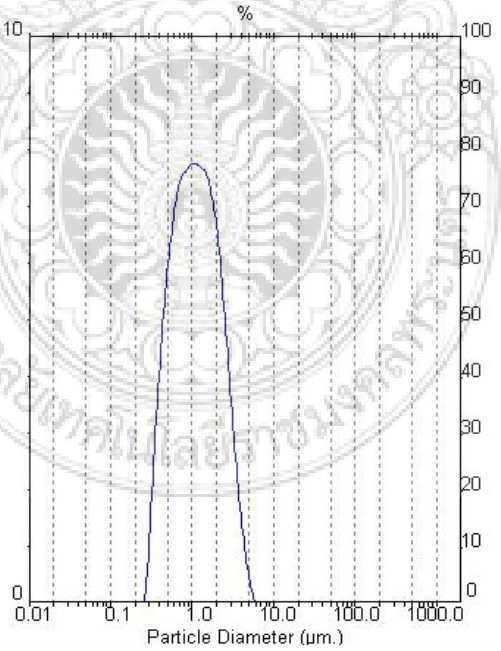


ภาพที่ 7.9 กราฟแสดงผลการทดสอบโลหะผงด้วยเครื่อง XRD

-การตรวจสอบขนาดการกระจายตัวของโลหะผงคาร์ไบด์ Recycle



ภาพที่ 7.10 ผลการตรวจสอบขนาดการกระจายของโลหะผงทังสเตคาร์ไบด์ Recycle (ก่อนบด)



ภาพที่7.11 ผลการตรวจสอบขนาดการกระจายของโลหะผงทังสเตนคาร์ไบด์ Recycle (หลังบด)

7.5 กรรมวิธีการอัดขึ้นรูปโลหะผง

7.5.1 กระบวนการตวงผงคาร์ไบด์

กระบวนการตวงผงคาร์ไบด์เป็นการตักผงคาร์ไบด์มาใส่กรวยเพื่อที่จะนำผงคาร์ไบด์ไปอัดขึ้นรูปและขั้นตอนการเลือกผงคาร์ไบด์จะต้องพิจารณาเกรดของผงคาร์ไบด์ดังในตารางที่ 7.2

ตารางที่ 7.2 แสดงเกรดของผงคาร์ไบด์และค่าความแข็งหลังการอบผนึก

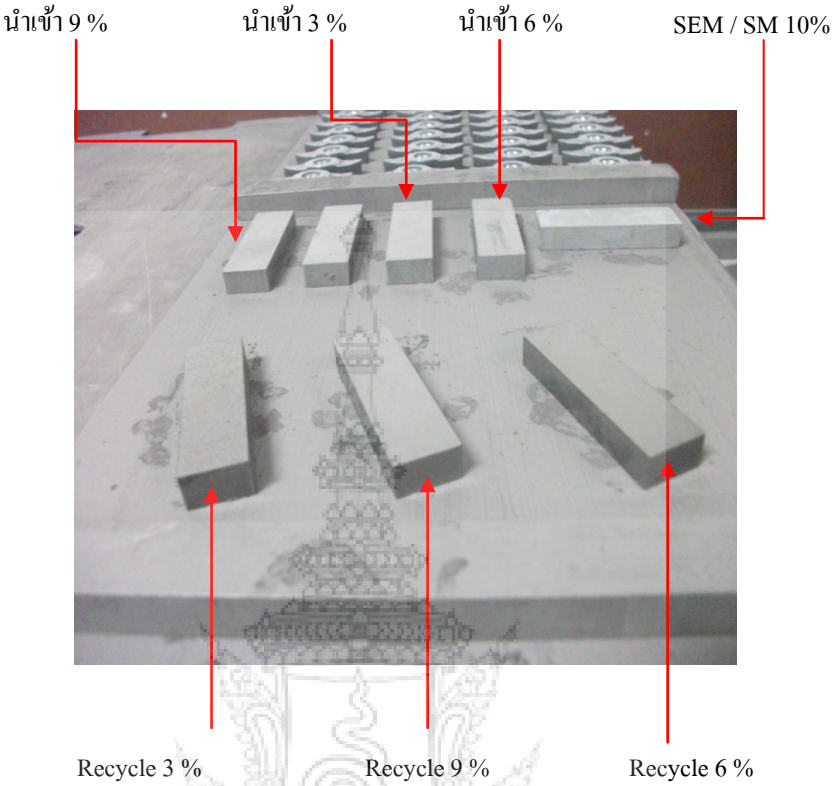
GWC GRADE	**เกรดผงคาร์ไบด์**	**ค่าผงคาร์ไบด์**	**ความหนาแน่นก่อนอบผนึก**	**ความหนาแน่นหลังอบผนึก**	**ค่าความแข็งหลังการอบผนึก**
5	FK-50F	14	7.8-8.0	13.90-14.10	90.7-91.7
	YG-6	15	7.4-7.5	14.0-14.25	89.5-92.0
	YG-6X	15	7.4-7.5	13.80-14.0	89.0-91.0
	YG-8	14.72	8.1-8.2	14.64-14.74	88.0-89.0
	YG-11	13.35	8.0-8.2	14.20-14.60	87.0-88.2
	YG-12	14.23	8.0-8.2	14.10-14.40	88.0-88.4
	YG-20	14.0	7.3-7.45	13.45-13.55	85.2-86.2
12-G	H-17	14.25	8.1-8.3	14.25-14.50	91.0-92.3
15	H-19	14.2	8.1-8.3	14.20-14.50	89.32-90.1
72	P-10	13.7	7.4-7.5	13.70-14.10	91.2-91.8
69	P-20	12.3	6.8-6.9	12.30-12.60	90.1-91.5
20	K-10	12.3	-	14.65-14.95	92.2-92.6
77	M-15	12.9	8.2-8.4	13.25-13.85	90.2-90.8
68	YG-20-C	13.56	7.4-7.5	12.50-12.90	90.7-91.8
	YS-25	13.04	7.4-7.5	14.40-13.80	90.7-91.3
	YC-30S	12.6	7.4-7.5	12.90-13.04	82.0-82.4
	GF604	-	6.8-7.0	12.50-12.60	91.0-91.4

ภาพที่ 7.12 กระบวนการตวงผงคาร์ไบด์

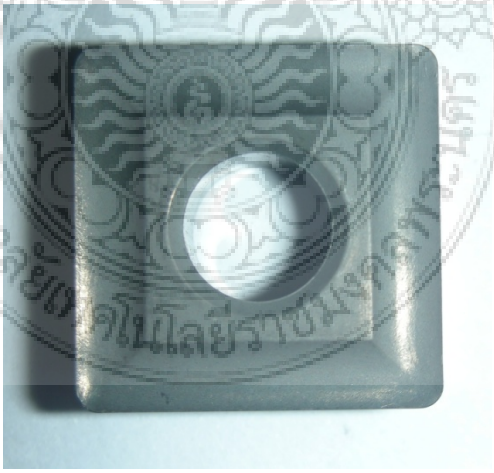
7.5.2 กระบวนการอัดขึ้นรูปชิ้นงาน

เป็นกระบวนการนำผงคาร์ไบด์มาชั่งน้ำหนักแล้วนำผงคาร์ไบด์เทลงในแบบแม่พิมพ์ที่จะอัดขึ้นรูปก่อนจะทำการเทผงคาร์ไบด์ลงไปในแม่พิมพ์นั้นให้ทำความสะอาดแม่พิมพ์ก่อนทุกครั้งเพื่อป้องกันการเกิดปัญหาต่อชิ้นงาน จากนั้นก็จะสั่งเครื่องอัดขึ้นรูปอัดชิ้นงานด้วยเวลา 5 วินาที และแรงอัด 50 นิวตันต่อตารางนิ้ว จากนั้นไฮดรอลิกส์ก็จะอัดขึ้นรูปชิ้นงานซึ่งเครื่องจะทำงานด้วยโปรแกรมอัตโนมัติในการควบคุมการทำงาน เมื่อเครื่องอัดขึ้นรูปอัดชิ้นงานเสร็จก็นำชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์พร้อมกับใช้แปรงขนอ่อนทำความสะอาดครีบขอบชิ้นงานจากการอัดขึ้นรูป จากนั้นก็นำชิ้นงานไปวางไว้บนถาดรองชิ้นงานเพื่อที่จะนำชิ้นงานไปทำการทดสอบความหนาแน่นโดยการสุ่มชิ้นงาน

ภาพที่ 7.13 กระบวนการอัดขึ้นรูปชิ้นงาน



ภาพที่ 7.14 แสดงชิ้นงานแท่งสี่เหลี่ยมหลังอัดขึ้นรูป

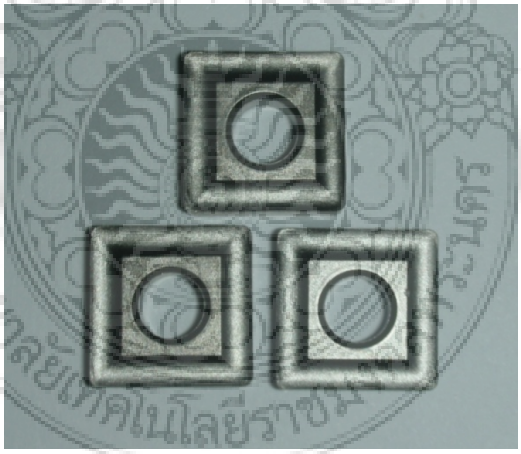


ภาพที่ 7.15 แสดงชิ้นงานแผ่นมีดหลังอัดขึ้นรูป

7.5.3 กระบวนการอบผนึกชิ้นงาน

กระบวนการอบผนึกนี้เป็นการนำชิ้นงานที่ผ่านการอัดขึ้นรูปมาทำการอบผนึกเพื่อต้องการให้ชิ้นงานมีความแข็งมากขึ้นซึ่งกระบวนการอบผนึกนี้มีขั้นตอนโดยการนำชิ้นงานมาวางเรียงซ้อนกันเป็นชั้น ๆ ไว้ภายในเตาและทำการอบผนึกด้วยเตาอบผนึกที่อุณหภูมิ 1, 410 ^{0}c และใช้เวลาในการอบผนึก 8-10 ชั่วโมง จากนั้นปล่อยให้ชิ้นงานเย็นตัวภายในเตาและนำชิ้นงานมาทำการตรวจสอบรอยแตกร้าวของชิ้นงานโดยซึ่งสามารถตรวจสอบด้วยสายตาเปล่าได้

ภาพที่ 7.16 เตาไฟฟ้าในการอบผนึก



ภาพที่ 7.17 แสดงชิ้นงานแผ่นมีดหลังอบผนึกและเจียระไนผิว

7.6 ผลการทดสอบความหนาแน่นของผลิตภัณฑ์ ชิ้นงาน ก่อน-หลัง การอบผนึก

ตารางที่ 7.3 การสอบทดสอบความหนาแน่นของผลิตภัณฑ์ซีเมนต์ทังสเตนคาร์ไบด์ (ก่อนการอบผนึก)

ความหนาแน่นของชิ้นงานแท่งสี่เหลี่ยมทำการผลิต	
ชิ้นงาน	**ค่าเฉลี่ย (กรัม / ลูกบาศก์เซนติเมตร)**
นำเข้า 3 %	8.20
นำเข้า 6 %	8.20
นำเข้า 9%	8.26
Recycle 3 %	7.80
Recycle 6 %	7.86
Recycle 9 %	7.90
SEM / MS 10%	8.35

ตารางที่ 7.4 การทดสอบความหนาแน่นของผลิตภัณฑ์ซีเมนต์ทังสเตนคาร์ไบด์ (หลังการอบผนึก)

ความหนาแน่นของ ชิ้นงานแท่งสี่เหลี่ยมทำการผลิต	
ชิ้นงาน	**ค่าเฉลี่ย (กรัม / ลูกบาศก์เซนติเมตร)**
นำเข้า 3 %	15.33
นำเข้า 6 %	15.81
นำเข้า 9%	15.07
Recycle 3 %	13.64
Recycle 6 %	13.83
Recycle 9 %	13.35
SEM / MS 10 %	13.94

ตารางที่ 7.5 ผลการการตรวจสอบขนาดชิ้นงานแผ่นมีดซีเมนต์ทังสเตนคาร์ไบด์หลังการอัดขึ้นรูปก่อนทำการอบผนึก

ส่วนผสม / รายการ	รีไซเคิล 3%co	รีไซเคิล 6%co	รีไซเคิล 9%co	นำเข้า 6%co	นำเข้า 9%co	นำเข้า 5%co	นำเข้า 15%co
	1	1	1	1	1	1	1
1.ความกว้าง (mm)	15.77	15.70	15.76	15.75	15.76	15.76	15.76
2.ความยาว (mm)	15.78	15.70	15.75	15.71	15.76	15.76	15.76
3.ความหนา (mm)	6.37	15.70	6.53	5.76	6	15.76	15.76
4.Ø รูใน (mm)	6.38	15.70	6.41	6.38	6.38	15.76	15.76
5.น้ำหนัก (g)	9.8248	9.7918	9.5907	10.3225	10.4596	10.0184	10.6248
6.ความหนาแน่น (g/cm^3)	8.169	8.078	7.711	9.745	9.448	8.937	9.733

ตารางที่ 7.6 ผลการตรวจสอบขนาดชิ้นงานแผ่นมีดซีเมนต์ทังสเตนคาร์ไบด์หลังการอัดขึ้นรูปที่ผ่านการอบผนึก

ส่วนผสม / รายการ	Rec 3% co+sin	Rec 6% co+sin	Rec 9% co+sin	OR 6% co+sin	OR 9% co+sin	OR 5% co+sin	OR 15% co+sin
1.ความกว้าง (mm)	13.79	12.94	12.76	13.43	13.36	13.42	13.24
2.ความยาว (mm)	13.81	12.95	12.75	13.40	13.34	13.42	13.25
3.ความหนา (mm)	5.56	5.33	5.45	4.94	5.10	4.95	5.47
4.Ø รูใน (mm)	5.57	5.22	4.99	5.43	5.42	5.44	5.35
5.น้ำหนัก (g)	9.4357	9.2098	9.0342	10.0065	10.0711	9.9858	10.1309
6.ความหนาแน่น (g/cm^3)	12.859	14.100	13.995	14.862	14.541	13.986	14.974

7.7 ผลการตรวจลักษณะโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่อัดขึ้นรูปด้วยโลหะผงทังสเตนคาร์ไบด์ Recycle

ตารางที่ 7.7 ผลการทดลองความแข็งของผลิตภัณฑ์ซีเมนต์ทังสเตนคาร์ไบด์ ชิ้นงานทำการผลิต (หลังกระบวนการอบผนึก)

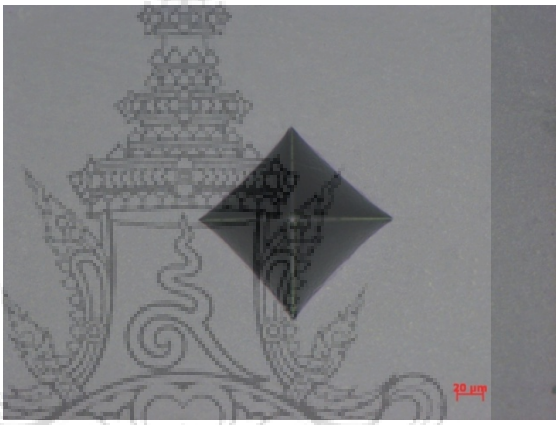
ผลการทดลองความแข็งของชิ้นงานแท่งสี่เหลี่ยม (หลังกระบวนการอบผนึก)	
ชิ้นงาน	**ค่าเฉลี่ย (HRC)**
นำเข้า 3 %	90.48
นำเข้า 6 %	90.68
นำเข้า 9%	89.92
Recycle 3 %	89.12
Recycle 6 %	90.54
Recycle 9 %	90.34

ตารางที่ 7.8 ผลการทดสอบความแข็งของชิ้นงานหลังการอบ ส่วนผสม Co 5,6,9,15 % (นำเข้า)

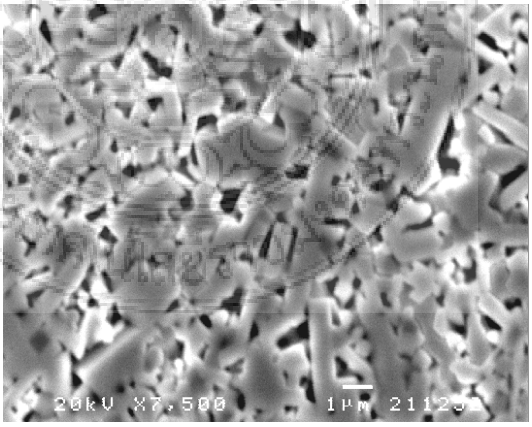
ลำดับ	No. เม็ด	ความแข็ง HV 20			
		ตำแหน่งที่ 1	ตำแหน่งที่ 2	ตำแหน่งที่ 3	ค่าเฉลี่ย
1	5%	1372	1254	1336	1320
2	6%	1486	1449	1449	1461
3	9%	1605	1584	1605	1598
4	15%	1627	1605	1649	1627

ตารางที่ 7.9 ผลการทดสอบความแข็งของชิ้นงานหลังการอบส่วนผสม Co 3-9% (Recycle)

ลำดับ	No. เม็ด	ความแข็ง HV 20			
		ตำแหน่งที่ 1	ตำแหน่งที่ 2	ตำแหน่งที่ 3	ค่าเฉลี่ย
1	3%	1449	1449	1413	1437
2	6%	1431	1467	1449	1449
3	9%	1605	1649	1649	1634



ภาพที่ 7.18 แสดงลักษณะรอยกดชิ้นงาน กำลังขยาย 200 เท่า



ภาพที่ 7.19 โครงสร้างทางจุลภาค ชิ้นงานหลังการอบผนึกกำลังขยาย 7,500 เท่า

7.8 สรุปวิเคราะห์ผลการผลิตชิ้นงานจากโลหะผงทังสเตนคาร์ไบด์ Recycle ด้วยวิธีการอัดขึ้นรูป

1) การผลิตชิ้นงานแท่งสี่หลี่ยม ส่วนผสมโคบอลต์ 3% ผสมโลหะผงทังสเตนคาร์ไบด์นำเข้าความหนาแน่น คือ 15.33 (g/cm³) ความแข็ง 90.48 HRC

2) การผลิตชิ้นงานแท่งสี่หลี่ยม ส่วนผสมโคบอลต์ 6% ผสมโลหะผงทังสเตนคาร์ไบด์นำเข้าความหนาแน่น คือ 15.81 (g/cm³) ความแข็ง 90.68 HRC

3) การผลิตชิ้นงานแท่งสี่หลี่ยม ส่วนผสมโคบอลต์ 9% ผสมโลหะผงทังสเตนคาร์ไบด์นำเข้าความหนาแน่น คือ 15.07 (g/cm³) ความแข็ง 89.92 HRC

4) การผลิตชิ้นงานแท่งสี่หลี่ยม ส่วนผสมโคบอลต์ 3% ผสมโลหะผงทังสเตนคาร์ไบด์รีไซเคิล ความหนาแน่น คือ 13.64 (g/cm³) ความแข็ง 89.12 HRC

5) การผลิตชิ้นงานแท่งสี่หลี่ยม ส่วนผสมโคบอลต์ 6% ผสมโลหะผงทังสเตนคาร์ไบด์รีไซเคิล ความหนาแน่น คือ 13.82 (g/cm³) ความแข็ง 90.54 HRC

6) การผลิตชิ้นงานแท่งสี่หลี่ยม ส่วนผสมโคบอลต์ 9% ผสมโลหะผงทังสเตนคาร์ไบด์รีไซเคิลความหนาแน่น คือ 13.35 (g/cm³) ความแข็ง 90.34 HRC

7) การผลิตชิ้นงานแผ่นมีด ส่วนผสมโคบอลต์ 6% ผสมโลหะผงทังสเตนคาร์ไบด์นำเข้าความหนาแน่น คือ 14.86 (g/cm³) ความแข็ง 1461 HV

8) การผลิตชิ้นงานแผ่นมีด ส่วนผสมโคบอลต์ 9% ผสมโลหะผงทังสเตนคาร์ไบด์นำเข้าความหนาแน่น คือ 14.54 (g/cm³) ความแข็ง 1598 HV

9) การผลิตชิ้นงานแผ่นมีด ส่วนผสมโคบอลต์ 5% ผสมโลหะผงทังสเตนคาร์ไบด์นำเข้าความหนาแน่น คือ 13.98 (g/cm³) ความแข็ง 1320 HV

10) การผลิตชิ้นงานแผ่นมีด ส่วนผสมโคบอลต์ 15% ผสมโลหะผงทังสเตนคาร์ไบด์นำเข้าความหนาแน่น คือ 14.97 (g/cm³) ความแข็ง 1627 HV

11) การผลิตชิ้นงานแผ่นมีด ส่วนผสมโคบอลต์ 3% ผสมโลหะผงทังสเตนคาร์ไบด์รีไซเคิลความหนาแน่น คือ 12.85 (g/cm³) ความแข็ง 1437 HV

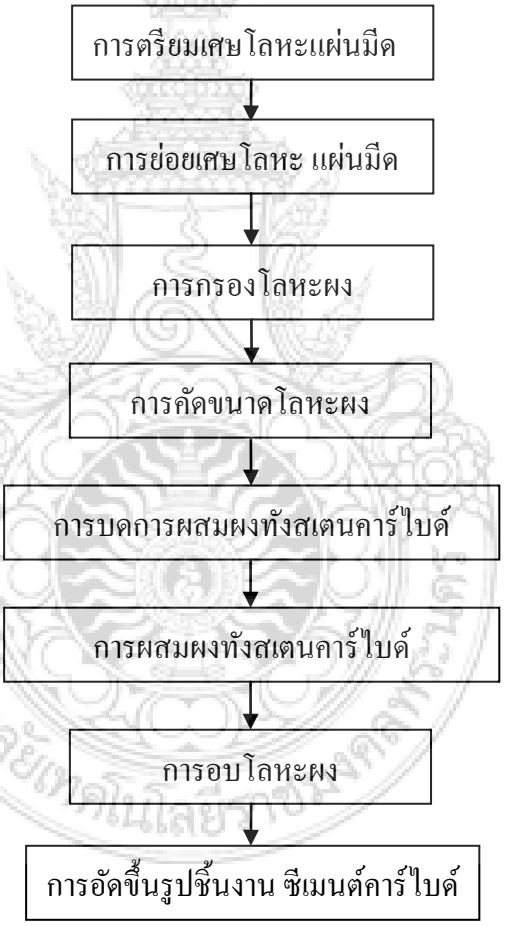
12) การผลิตชิ้นงานแผ่นมีด ส่วนผสมโคบอลต์ 6% ผสมโลหะผงทังสเตนคาร์ไบด์รีไซเคิลความหนาแน่น คือ 14.10 (g/cm³) ความแข็ง 1449 HV

13) การผลิตชิ้นงานแผ่นมีด ส่วนผสมโคบอลต์ 9% ผสมโลหะผงทังสเตนคาร์ไบด์รีไซเคิลความหนาแน่น คือ 13.99 (g/cm³) ความแข็ง 1634 HV

บทที่ 8
ต้นทุนการผลิตผงทังสเตนคาร์ไบด์เชิงเศรษฐศาสตร์

8.1 กระบวนการผลิตชิ้นงาน ซีเมนต์ทังสเตนคาร์ไบด์

การศึกษาเทคโนโลยีการผลิต การวิเคราะห์จุดคุ้มทุน (Breakeven Point) และระยะเวลาคืนทุน (Payback Period) การผลิตโลหะผงทังสเตนคาร์ไบด์ ตามหลักของเศรษฐศาสตร์วิศวกรรม (Economic Engineering) ให้เห็นจุดคุ้มทุนและระยะคืนทุนของผลิตภัณฑ์ทังสเตนคาร์ไบด์WC powder)

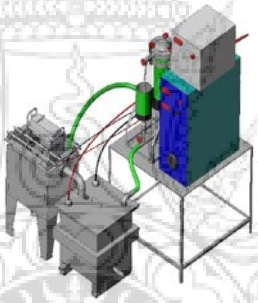


ภาพที่ 8.1 แสดงกระบวนการผลิตชิ้นงานซีเมนต์ทังสเตนคาร์ไบด์

8.2 ขั้นตอนการผลิตชิ้นงานซีเมนต์ทังสเตนคาร์ไบด์

ขั้นตอนการเตรียมโลหะผงทังสเตนคาร์ไบด์ ในการผลิตชิ้นงานซีเมนต์ทังสเตนคาร์ไบด์ด้วยวิธีการอัดขึ้นรูป ดังนี้

ภาพที่ 8.2 เศษ ซีเมนต์ทังสเตนคาร์ไบด์สำหรับการแยกสลาย

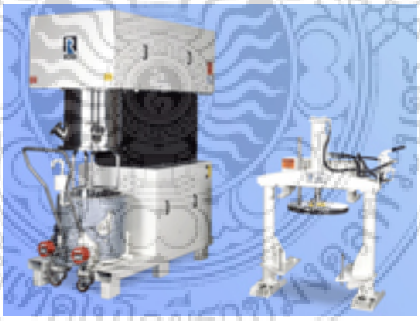


ภาพที่ 8.3 เครื่องแยกสลายเศษซีเมนต์ทังสเตนคาร์ไบด์

ภาพที่ 8.4 เครื่องกรองโลหะผงทังสเตนคาร์ไบด์

ภาพที่ 8.5 เครื่องคัดขนาดโลหะผงทังสเตนคาร์ไบด์

ภาพที่ 8.6 เครื่องบดโลหะผงทังสเตนคาร์ไบด์

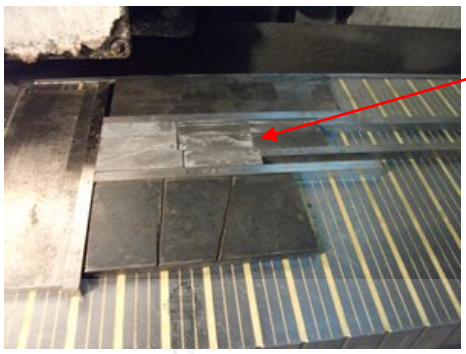


ภาพที่ 8.7 เครื่องผสมโลหะผงทังสเตนคาร์ไบด์

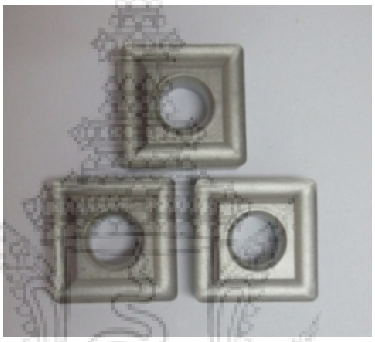
ภาพที่ 8.8 เตาอบโลหะผงทังสเตนคาร์ไบด์

ภาพที่ 8.9 เครื่องบรรจุโลหะผงทังสเตนคาร์ไบด์

ภาพที่ 8.10 เครื่องอัดขึ้นรูปชิ้นงาน ซีเมนต์ทังสเตนคาร์ไบด์



ภาพที่ 8.11 ชิ้นงานแท่งสี่เหลี่ยมซีเมนต์ทังสเตนคาร์ไบด์



ภาพที่ 8.12 ชิ้นงานแผ่นมีดซีเมนต์ทังสเตนคาร์ไบด์

8.3 สรุปค่าใช้จ่ายด้านแรงงานและเครื่องจักรในการผลิตโลหะผงทังสเตนคาร์ไบด์

ตารางที่ 8.1 แสดงค่าใช้จ่ายค่าแรงงาน

ตำแหน่ง / อ้างอิง	ผู้จัดการ	หัวหน้าฝ่ายผลิต	พนักงานฝ่ายผลิต	พนักงานฝ่ายบริหาร	พนักงานทำความสะอาด	พนักงานรักษาความปลอดภัย
1.ปริญญานิพนธ์:การผลิตชุดเสริมกันชนหน้า	92,044.11	20,000	10,000	8,000	7,000	6,000
2. ปริญญานิพนธ์: การศึกษาการลงทุนซื้อหม้อต้มไอน้ำ	20,000	6,500	3,000	5,500	2,200	2,500
3. วิจัย:Thailand salary 2008	40,000	22,000	8,000	8,000	8,000	8,000
ค่าเฉลี่ย	**50,681**	**16,167**	**7,000**	**7,167**	**5,733**	**5,500**

หมายเหตุ: หน่วย บาท/เดือน

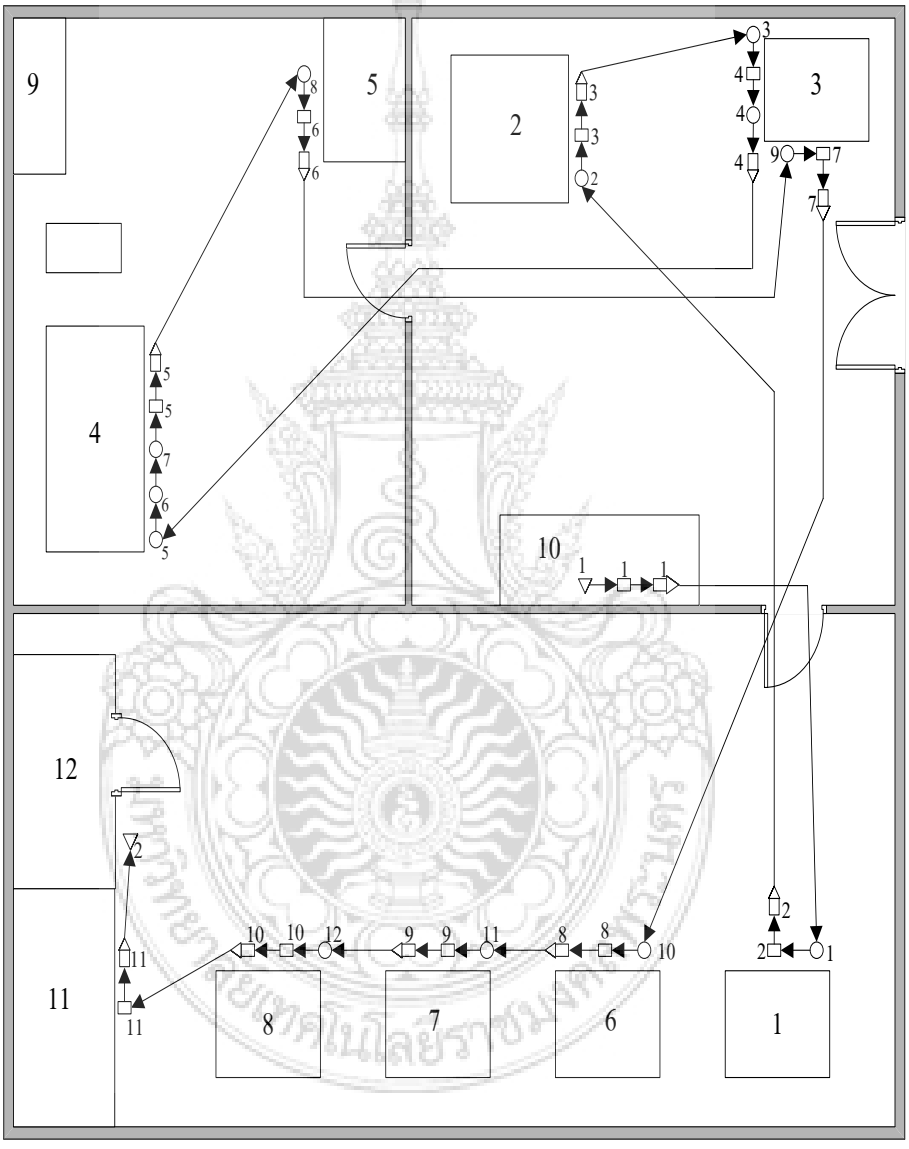
ตารางที่ 8.2 แสดงการประเมินสรุปค่าใช้จ่ายในการจัดซื้อเครื่องจักรสำหรับห้องฎิบัติการ

ลำดับ	รายการ	อัตราการผลิตต่อชั่วโมง	จำนวน (เครื่อง)	ราคา(บาท)	
				ต่อหน่วย	เป็นเงิน
1	เครื่องล้างScraps	20 กิโลกรัม	1	350,000	350,000
2	เครื่องสกัดผิวเคลือบ	334 กรัม	1	480,000	480,000
3	เครื่องย่อยScraps	0.025 กรัม	1	1,250,000	1,250,000
4	เครื่องกรองโลหะผง	1 กิโลกรัม	1	380,000	380,000
5	เครื่องอบโลหะผง	10 กิโลกรัม	1	450,000	250,000
6	เครื่องคัดขนาดโลหะผง	1 กิโลกรัม	1	450,000	450,000
7	เครื่องบดโลหะผง	100 กรัม	1	650,000	650,000
8	เครื่องบรรจุโลหะผง	1.2 กิโลกรัม/ขวด 30 ขวด/ชั่วโมง	1	850,000	850,000
9	เครื่องผสมผงโลหะ		1	2,500,000	2,500,000
10	เครื่องมือและอุปกรณ์การผลิต		1 ชุด	350,000	350,000
รวม					**7,510,000**

8.4 การวางผังโรงงาน

การวางผังโรงงานเพื่อสะดวกในการจัดการพื้นที่การใช้สอยในแผนกการผลิต

8.4.1 การออกแบบผังบริเวณโรงงาน (Planning Design)



ภาพที่ 8.13 การออกแบบผังบริเวณโรงงาน (Planning Design)

8.4.2 วิเคราะห์เวลามาตรฐานในการผลิต

เวลามาตรฐาน (Standard Time; S.T.) คือเวลาทั้งหมดที่ทำงานชิ้นงานหนึ่งควรจะแล้วเสร็จโดยวิธีการทำงานที่เป็นมาตรฐานน่าเชื่อถือ

เวลามาตรฐาน = เวลาปกติ + (เวลาปกติ x %เวลาเผื่อ)

= 48 ชั่วโมง หรือ 2,880 นาที

องค์ประกอบของการประเมิน(ค่าสเกล) = 100%

เวลาเผื่อ = 4%

เวลาปกติ $= 2{,}880 \times \frac{100}{100}$

= 2,880 นาที

วิธีที่ 1

เวลามาตรฐาน = เวลาปกติ + (เวลาปกติ x %เวลาเผื่อ) 2.33

แทนค่า เวลามาตรฐาน = 2,880 + (2,880 x 4%)

= 2,995.2 นาทีหรือ 49.92 ชั่วโมง $\approx$ 50 ชั่วโมง

วิธีที่ 2

เวลามาตรฐาน $= \text{เวลาปกติ} \times \frac{100}{100 - 4\%}$ 2.34

แทนค่า เวลามาตรฐาน $= 2{,}880 \times \frac{100}{100 - 4\%}$

= 3,000 นาที หรือ 50 ชั่วโมง/กิโลกรัม

8.4.3 การคำนวณประสิทธิภาพของสายงานผลิต

ตารางที่ 8.3 เวลามาตรฐานการผลิตของแต่ละสถานี

สถานีผลิตที่	เวลามาตรฐาน(นาที)	เวลาที่เสียไปต่อหน่วย
1	240	2,640
2	390	2,490
3	2,880*	-
4	690	2,190
5	1,560	1,320
6	32	2,848
*รอบเวลาการผลิตเท่ากับ = 2,880 นาที		

เราสามารถคำนวณอัตราการผลิตได้ดังนี้

อัตราการผลิต = เวลาผลิต/รอบการผลิต 2.35

= 60/2,880

= 0.021 หน่วย/ชั่วโมง

ประสิทธิภาพของสายงานผลิตคำนวณได้ดังนี้

$$\text{ประสิทธิภาพ} = \frac{\text{ผลรวมของเวลามาตรฐานของแต่ละสถานี}}{\text{รอบการผลิต} \times \text{จำนวนสถานี}} \text{x100} \qquad 2.36$$

$$= \frac{240 + 390 + 2,880 + 690 + 1,560 + 32}{2,880 \times 6} \text{x100}$$

= 35 %

8.5 การวิเคราะห์ต้นทุนในการดำเนินงาน

ตารางที่ 8.4 การประเมินค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานต่อเดือน

ประเภทของค่าใช้จ่าย	ลำดับ	รายการ	จำนวน	รายเดือน	
				ต่อหน่วย	เป็นเงิน
วัตถุดิบ	1	สารละลาย	170 ลิตร	240 บาท	40,800 บาท
	2	แอลกอฮอล์	12 ลิตร	100 บาท	1,200 บาท
	3	เศษ scraps	14.7 กิโลกรัม	650 บาท	9,555 บาท
รวมค่าวัตถุดิบ					**51,555 บาท**
ค่าแรง	1	ผู้จัดการ	1 ตำแหน่ง	50,681 บาท	50,681 บาท
	2	หัวหน้าฝ่ายผลิต	1 ตำแหน่ง	16,167 บาท	16,167 บาท
	3	พนักงานฝ่ายผลิต	6 ตำแหน่ง	-	-
	3.1	พนักงานฝ่ายผลิต(09.00-17.00 น)	2 ตำแหน่ง	7,000 บาท	14,000 บาท
	3.2	พนักงานฝ่ายผลิต(17.00-01.00 น)	2 ตำแหน่ง	10,500 บาท	21,000 บาท
	3.3	พนักงานฝ่ายผลิต(01.00-09.00 น)	2 ตำแหน่ง	10,500 บาท	21,000 บาท
	4	พนักงานฝ่ายบริหาร	3 ตำแหน่ง	7,167 บาท	21,510 บาท
	5	พนักงานทำความสะอาด	2 ตำแหน่ง	5,733 บาท	11,466 บาท
	6	พนักงานรักษาความปลอดภัย	1 ตำแหน่ง	5,500 บาท	5,500 บาท
รวมค่าแรง					**161,324 บาท**
ค่าโสหุ้ย	1	ค่าไฟฟ้า	4.3093 บาท	1,040 หน่วย	4,482 บาท
	2	ค่าประกันภัย		10,000 บาท	10,000 บาท
	3	ค่าใช้จ่ายเบ็ดเตล็ด		20,000 บาท	20,000 บาท
	4	ค่าบำรุงรักษา		5,000 บาท	5,000 บาท
รวมค่าโสหุ้ย					**39,482 บาท**
รวมค่าใช้จ่ายทั้งหมด					**252,361 บาท**

8.5.1 การวิเคราะห์จุดคุ้มทุน (Break-even point)

จุดคุ้มทุนคือ จุดที่รายได้จากการลงทุนคุ้มค่ากับการลงทุน หรือ จุดที่แสดงค่าใช้จ่ายกับรายรับเท่ากัน

8.5.1.1 วิเคราะห์เพื่อเปรียบเทียบราคาผลิตภัณฑ์

ตารางที่ 8.5 แสดงราคาขายของโลหะผงทังสเตนคาร์ไบด์ (ไม่รวม vat 7%)

ประเทศผู้ผลิต	คุณสมบัติทางเคมี		คุณสมบัติทางฟิสิกส์		ราคา บาท/กก.	ค่าขนส่ง บาท/ครั้ง	ภาษีนำเข้า 8%	ราคาขาย บาท/กก.
	WC	Co	Grain size (nm)	Density (g/cm^3)				
ไต้หวัน	99.95%	0.05%	70	15.63	29,400	1,120	2,352	32,872
จีน	99.9%	0.1%	70	15.63	21,820	1,120	1,745	24,685
สวีเดน	99.9%	0.1%	70	15.63	23,729	1,820	1,898	27,447

หมายเหตุ* อัตราแลกเปลี่ยนที่ 35 บาท/ดอลล่าร์ เมื่อวันที่ 1 มีนาคม 2553

จากตารางที่ 8.5 พบว่า ราคาขายโลหะผงทังสเตนคาร์ไบด์ที่นำเข้าจากประเทศไต้หวัน 840 ดอลล่าร์/กิโลกรัม คิดเป็น 29,400 บาท/กิโลกรัม ราคาขายโลหะผงทังสเตนคาร์ไบด์ที่นำเข้าจากประเทศจีน 623 ดอลล่าร์/กิโลกรัม คิดเป็น 21,820 บาท/กิโลกรัม และ ราคาขายโลหะผงทังสเตนคาร์ไบด์ที่นำเข้าจากประเทศสวีเดน 677.98 ดอลล่าร์/กิโลกรัม คิดเป็น 23,729 บาท/กิโลกรัม

สำหรับค่าขนส่งจากประเทศในทวีปเอเชียมายังประเทศไทย 32 ดอลล่าร์/ครั้ง คิดเป็น 1,120 บาท/ครั้ง ค่าขนส่งจากประเทศในทวีปยุโรปมายังประเทศไทย 52 ดอลล่าร์/ครั้ง คิดเป็น 1,820 บาท/ครั้ง และ สินค้าที่นำเข้าจากต่างประเทศ ต้องเสียภาษีนำเข้าซึ่งโลหะผงทังสเตนคาร์ไบด์มีค่าภาษีนำเข้าอยู่ในประเภทโลหะที่ 8% ของราคาสินค้า

พบว่าต้นทุนโลหะผงทังสเตนคาร์ไบด์จากประเทศ ไต้หวัน จีน และ สวีเดน มีค่าใช้จ่ายอยู่ที่ 32,872 บาท/กิโลกรัม 24,685 บาท/กิโลกรัม และ 27,447 บาท/กิโลกรัม ตามลำดับ ดังนั้นในการกำหนดราคาจำหน่ายเริ่มต้นโดยประมาณสำหรับการผลิตในโครงการกำหนดไว้ที่ราคาเท่ากับ 20,000 บาท/กิโลกรัม เป็นราคาที่เหมาะสมซึ่งมีมูลค่าจำหน่ายน้อยกว่าโลหะผงทังสเตนคาร์ไบด์

นำเข้าจากต่างประเทศ ได้แก่ ประเทศไต้หวันคิดเป็น 12,872 บาท/กิโลกรัม ประเทศจีนคิดเป็น 4,685 บาท/กิโลกรัม และ ประเทศสวีเดนคิดเป็น 7,447 บาท/กิโลกรัม

ที่มา: www.advancedmaterials.us

8.5.1.2 ต้นทุนสำหรับค่าใช้จ่ายที่ลงทุน

1) อาคารโรงงาน[1] 500,000 บาท คาดคะเนว่าจะมีอายุการใช้งาน 10 ปี

ราคาประเมินค่าก่อสร้างอาคาร พ.ศ.2552 กำหนดโดยสมาคมผู้ประเมินค่าทรัพย์สินแห่งประเทศไทย อาคารพาณิชย์ชั้นเดียว 5,300 บาทต่อตารางเมตร

500,000/10 = 50,000 บาท/ปี

2) ค่าเครื่องจักรที่ใช้ในการผลิตโลหะผงโดยรวม 3,010,000 คาดคะเนว่าจะมีอายุการใช้งาน 10 ปี

7,510,000/10 = 751,000 บาท/ปี

3) ค่าติดตั้งระบบน้ำประปา 55,000 บาท คาดคะเนว่าจะมีอายุการใช้งาน 5 ปี

55,000/5 = 11,000 บาท/ปี

4) ค่าติดตั้งระบบไฟฟ้า 75,000 บาท คาดคะเนว่าจะมีอายุการใช้งาน 5 ปี

75,000/5 = 15,000 บาท/ปี

ตารางที่ 8.6 แสดงต้นทุนการผลิต

ลำดับ	รายการ	ต้นทุนของการผลิต (บาท)
1	ค่าเครื่องจักร	7,510,000บาท
2	ค่าแรงงาน	161,324 บาท
3	ค่าวัตถุดิบ	51,555 บาท
4	ค่าโสหุ้ย	39,482 บาท
รวม		**7,762,361 บาท**

8.5.2 ระยะเวลาคืนทุน

ระยะเวลาคืนทุนคือ จำนวนเวลา(ปี)ในการดำเนินงาน ซึ่งจะทำให้มูลค่าการลงทุนเท่ากับมูลค่าผลตอบแทนสะสม โดย

จากสมการ 2.37

$$\text{ระยะคืนทุน} = \frac{\text{เงินลงทุนทั้งหมด}}{\text{จำนวนเงินที่ได้}}$$

1) ข้อมูลค่าใช้จ่ายในการคำนวณระยะเวลาคืนทุน

ค่าแรง 161,324 (จากตารางที่ 8.4) x 12 = 1,971,888 บาท

จากตารางที่ (8.2) ค่าใช้จ่ายในการจัดตั้งโรงงาน ประกอบด้วย

ค่าเครื่องจักร 7,510,000 บาท

ค่าอาคาร 500,000 บาท

ค่าติดตั้งระบบไฟฟ้า 75,000 บาท

ค่าติดตั้งระบบน้ำประปา 55,000 บาท

ค่าใช้จ่ายเบ็ดเตล็ด 20,000 บาท

รวมค่าใช้จ่ายทั้งหมดในการจัดตั้งโรงงานโดยไม่รวมค่าที่ดินเป็นเงินทั้งสิ้น

7,510,000+500,000+75,000+55,000+20,000 = 8,160,000 บาท

มูลค่าในการลงทุนในปีปัจจุบัน คิดจากค่าใช้จ่ายด้านแรงงานรวมกับค่าใช้จ่ายในการซื้อเครื่องจักรมีมูลค่ารวม

1,971,888 + 7,510,000 = 9,481,888 บาท

2) ต้นทุนค่าดำเนินงานประจำปี ต้นทุนในการดำเนินงานในแต่ละปี คิดจากค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานในแต่ละเดือนตลอด 1 ปี มีค่าเท่ากับ

252,361 x 12 = 3,028,332 บาท

3) มูลค่าผลตอบแทนประจำปี มูลค่าผลตอบแทนในแต่ละปี ได้แก่ รายได้จากการขายผลิตภัณฑ์ กิโลกรัมล่ะ 20,000 บาท ซึ่งเครื่องจักรทำงาน 303 วัน วันละ 24 ชั่วโมง กำลังการผลิตโลหะผงทังสเตนคาร์ไบด์ คือ 0.58 กิโลกรัม/วัน จะทำให้มีรายรับปีละ

20,000 x 175.74 = 3,514,800 บาท

เนื่องจากกำไรสุทธิของการดำเนินงานที่จะนำมาวัดหาระยะเวลาในการคืนทุนนั้น จะต้องนำไปเสียภาษีรายได้ส่วนบุคคล ซึ่งกิจการประเภทนี้เป็นกิจการประเภทอุตสาหกรรม และทางภาษีอากรได้กำหนดอัตราภาษีเอาไว้กับ 30% ต่อปีของกำไรสุทธิ

8.6 สรุปวิเคราะห์ต้นทุนเชิงเศรษฐศาสตร์

จากการศึกษาวิเคราะห์สามารถสรุปต้นทุนต่าง ๆ ในการผลิตโลหะผงทังสเตนคาร์ไบด์ได้ดังนี้

1) มูลค่าในการลงทุนในการจัดตั้งโรงงานมีมูลค่าเท่ากับ 8,160,000 บาท โดยไม่รวมค่าจัดซื้อที่ดินในการตั้งโรงงานผลิตโลหะผงทังสเตนคาร์ไบด์

2) มูลค่าในการลงทุนในปีปัจจุบันมีมูลค่าเท่ากับ 9,481,888 บาท

3) ต้นทุนค่าดำเนินงานในแต่ละปีมีมูลค่าเท่ากับ 3,028,332 บาท

4) ผลตอบแทนในแต่ละปี ซึ่งเป็นรายได้จากการขายผลิตภัณฑ์ โดยจะทำให้มีรายรับประมาณปีละ 3,514,800 บาท

บทที่ 9
สรุปผลและข้อเสนอแนะ

9.1 สรุปผลการพัฒนากระบวนการผลิตผงโลหะคาร์ไบด์จากเศษทังสเตนคาร์ไบด์กลับคืนมาใช้ใหม่

สังคมมนุษย์ทั่วโลกในปัจจุบันโดยเฉพาะนักวิทยาศาสตร์ นักชีววิทยา นักปรัชญาและจิตวิทยายุคใหม่ ซึ่งเป็นผู้มีประสบการณ์ด้านการวิจัยและพัฒนาอย่างเป็นระบบครอบคลุมถึงการพัฒนาเทคโนโลยีเพื่อชีวิต (Technology with life) การพัฒนาเทคโนโลยีและผลกระทบต่อธรรมชาติโดยรวม ผลกระทบต่อการดำรงชีวิตของมนุษย์และสิ่งมีชีวิตอื่น จนกระทั่งการเข้าใจถึงกฎของธรรมชาติได้อย่างลึกซึ้งสูงสุด เกิดการตื่นตัวอย่างมากด้านการพัฒนาเทคโนโลยีเพื่อความยั่งยืน สาเหตุเนื่องมาจากธรรมชาติถูกทำลาย และที่สำคัญผู้ที่มีความรู้เหล่านั้นมีความมั่นใจอย่างเต็มที่ในประเด็นสำคัญ คือ มนุษย์ไม่สามารถสร้างเทคโนโลยีใด ๆ เพื่อความชนะเหนือกฎของธรรมชาติได้และปัจจุบัน(ค.ศ.2010) ยิ่งมีความชัดเจนมากยิ่งขึ้นระบบดุลยภาพของโลกลดลงโดยเฉพาะการเกิดผลกระทบและความสูญเสียทั้งทางตรงและทางอ้อมต่อสิ่งมีชีวิต ซึ่งมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นโดยลำดับ ดังนั้นการวิจัยและพัฒนาโดยเฉพาะด้านเทคโนโลยีกับการมีชีวิตของมนุษย์และสรรพสิ่ง ต่อจากนี้เป็นต้นไป จึงต้องศึกษาค้นคว้าอย่างจริงจังให้เกิดความเข้าใจในกลุ่มคนมากขึ้นในประเด็นดังกล่าว เป้าหมายคือการพัฒนาเพื่อความยั่งยืน ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ของสรรพสิ่งส่งเสริมซึ่งกันและกันเพื่อความยั่งยืน นั่นคือ ความมีชีวิตที่เป็นไปตามกฎเกณฑ์แห่งธรรมชาติ ความเป็นไปโดยกฎธรรมชาติกับความเข้าใจที่ถูกต้องของมุษย์เพื่อความอยู่รอดร่วมกันตามกฎของธรรมชาติ ให้เกิดความปลอดภัยภายใต้การสร้างดุลยภาพอย่างเป็นระบบเชิงมิตรภาพระหว่างวัสดุเพื่อสร้างเทคโนโลยี กระบวนการสร้างเทคโนโลยีเพื่อสิ่งชีวิต การลดมลภาวะและการดำรงอยู่ของสิ่งมีชีวิตกับสิ่งแวดล้อมอย่างยั่งยืน การพัฒนาเพื่อความยั่งยืนอีกด้านหนึ่งที่สำคัญคือการลดอัตราการทำลายธรรมชาติให้น้อยลง ๆ เทคนิคหนึ่งที่ช่วยได้ดีคือการ Recovered of materials โดยเฉพาะวัสดุในกลุ่มโลหะที่เป็นต้นน้ำของอุตสาหกรรมสนับสนุนการผลิตหรือสร้างเทคโนโลยีต่าง ๆ เพื่อสนองความต้องการและอำนวยความสะดวกให้แก่มนุษย์ นั่นคือ วัสดุเพื่อผลิตเครื่องมือสำหรับการขึ้นรูปโลหะ(Metal forming) สำหรับการตัดปาดผิวโลหะความเที่ยงตรงสูง(Metal removal process for machining and precision)โดยเฉพาะเครื่องมือตัด(Cutting tools) ที่ผลิตจากโลหะผงทังสเตนคาร์ไบด์(Tungsten carbides powder : WC powder) ผสมกับโลหะประสาน(Binder) ชนิดโลหะโคบอลต์(Co) และโลหะผงชนิดอื่น ด้วยกรรมวิธีการผสม การอัดขึ้นรูปและการผบผนึก(Sintering) ให้เป็นเครื่องมือตัด(Cutting tools) เมื่อเครื่องมือตัดถูกใช้งานจนไม่สามารถตัดเฉือนชิ้นงานต่อไปได้ กลายเป็นเศษโลหะ(Scraps) หรือวัสดุที่ใช้ประโยชน์ไม่ได้ (Waste) ดังนั้น การ Recovered of

WC form cemented carbide scraps จึงเป็นส่วนหนึ่งของกระบวนการพัฒนาเพื่อความยั่งยืน การนำทังสเตนคาร์ไบด์กลับมาใช้ใหม่ด้วยการออกแบบกระบวนการ Recovered of WC การวิจัยเริ่มจากทำการทดลองการสลายชิ้นงานตัวอย่างชนิดเศษซีเมนต์ทังสเตนคาร์ไบด์ด้วยอุปกรณ์ในห้องปฏิบัติการเคมี โดยการใช้สารละลายกรดไฮโดรคลอลิก 1 N ที่อุณหภูมิต่างกันที่ 50, 60, และ 70 องศาเซลเซียส ด้วยแรงดันไฟฟ้าต่างกันประกอบด้วย 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0, และ 1.2 โวลต์ พบว่าการทดลองแยกสลายด้วยแรงดันไฟฟ้า 1.0 V ที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส ขณะที่กระแสไฟฟ้าอยู่ในช่วง 0.22-1.56 แอมแปร์ ผลิตโลหะผงทังสเตนคาร์ไบด์ได้ถึง 123.52 กรัม ปรากฏว่าผงโลหะทังสเตนคาร์ไบด์(WC powder) มีขนาดอนุภาคในช่วง 0.30-89 μm ผลการทดลองข้างต้นจึงเป็นแนวทางพื้นฐานในการศึกษาการออกแบบพัฒนาเครื่องจักรเพื่อใช้ในการผลิตโลหะผงทังสเตนคาร์ไบด์ ซึ่งเป็นเทคโนโลยีที่สำคัญ การวิจัยจึงได้ ออกแบบและสร้างเครื่องสลายชิ้นงานด้วยระบบเคมีไฟฟ้าเป็นเครื่องต้นแบบ(Prototype) การทำงานแบบกึ่งอัตโนมัติ เพื่อใช้ในห้องปฏิบัติการ (Laboratory) นับว่าเป็นเทคโนโลยีที่พัฒนาขึ้นใหม่(Invention of technology) เป็นนวัตกรรม(innovation) ที่เกิดจากการวิจัยและพัฒนาโดยทีมวิจัยของคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร เครื่องจักรกลที่พัฒนาขึ้นใหม่มีหน้าที่เพื่อการสลายเศษโลหะทังสเตนคาร์ไบด์(dissolution of cemented tungsten carbide scraps) โดยที่ระหว่างการสลายชิ้นงาน ระบบการทำงานของเครื่องจักรกลดังกล่าวสามารถรักษาหรือป้องกันการเสียหายบริเวณพื้นผิวของอนุภาคทังสเตนคาร์ไบด์(WC particle) สามารถคงสมบัติเดิมของผงทังสเตนคาร์ไบด์ได้ดี เครื่องจักรกลดังกล่าวมีขนาดบรรจุชิ้นงานสูงสุด 2.50 กิโลกรัม ควบคุมการไหลของสารละลายที่อัตราการไหล 0-15 ลิตรต่อนาที สามารถปรับความเร็วรอบของถังบรรจุชิ้นงานให้หมุนรอบแกนในช่วง 0-25 รอบต่อนาที ศักย์ไฟฟ้าสูงถึง 24 โวลต์ สามารถจ่ายกระแสไฟฟ้าได้ในช่วง 0-50 แอมแปร์ ควบคุมอุณหภูมิสารละลายได้สูงสุด 90°c

เครื่องจักรสำหรับการผลิตโลหะหรือแยกสลายเศษซีเมนต์ทังสเตนคาร์ไบด์ มีส่วนประกอบ 3 ส่วนหลัก คือ ชุดถังบรรจุชิ้นงาน (Barrel) ถังบรรจุสารละลายและ ถังพักสารละลาย วัสดุที่ใช้ในการสร้างเครื่องแยกสลายเศษซีเมนต์ทังสเตนคาร์ไบด์ คือ สแตนเลส 304 และโพลีโพรพีลีนซึ่งมีคุณสมบัติไม่ทำปฏิกิริยากับสารละลายกรด โดยชุดบรรจุชิ้นงาน (Barrel) มีขนาด 160x260x380 มิลลิเมตรม ถังบรรจุสารละลายมีขนาด 430x430x410 มิลลิเมตร และถังบรรจุสารละลายมีขนาด 400 × 300 × 535 มิลลิเมตร ทดสอบการทำงานโดยสลายเศษซีเมนต์ทังสเตนคาร์ไบด์ ด้วยสารละลายไฮโดรคลอริกความเข้มข้นสาร 3 N ที่ณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ด้วยแรงดันไฟฟ้า 6 โวลต์ พบว่าเศษซีเมนต์ทังสเตนคาร์ไบด์ละลายได้มากถึง 700 กรัม ในเวลา 42 ชั่วโมง กระแสไฟฟ้าอยู่ในช่วง 2.5 – 43.7 แอมแปร์

เพื่อทดสอบประสิทธิภาพในการผลิตโลหะผงทังสเตนคาร์ไบด์โดย กำหนดเงื่อนไขในการทดลอง เก็บตัวอย่างทั้งหมด 20 การทดลอง เน้นกระบวนการย่อยสลายเศษทังสเตนคาร์ไบด์ที่อุณหภูมิ 30-70 °C สรุปได้ว่าการทดลองภายใต้ปัจจัยแรงดันไฟฟ้า 0.6 V ความเข้มข้นของสารละลาย HCl 7 N อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส กระแสไฟฟ้าอยู่ในช่วง 0.3- 1.3โวลต์ อัตราส่วนการผลิตผงทังสเตนคาร์ไบด์สูงสุดร้อยละ 92.86 ทังสเตนคาร์ไบด์ มีขนาดอนุภาคอยู่ระหว่าง 0.41-4.57 ไมคอน จากนั้นนำผงโลหะที่ได้ผลิตเป็นชิ้นงานซีเมนต์ทังสเตนคาร์ไบด์ แท่งสี่เหลี่ยมและเครื่องมือตัด โดยบดให้อนุภาคโลหะผงทังสเตนคาร์ไบด์มีขนาดเล็กลงเฉลี่ย 1.09 ไมคอน ผสมโคบอลต์ 3%,6%,9%, และ 15% อัดขึ้นรูปแล้วนำไปอบผนึกที่อุณหภูมิ 1,410 ^{0}c นำชิ้นงานเจียระไนแต่งผิวสำเร็จ พบว่าชิ้นงานแผ่นมีดตัดมีความแข็งอยู่ระหว่าง 1,437-1,634 HV มีความหนาแน่นอยู่ระหว่าง 13.995-14.100 กรัม/ลูกบศก์เซนติเมตร ซึ่งมีสมบัติเทียบเท่าเมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นงานที่ผลิตจากผงโลหะนำเข้าจากต่างประเทศ

ผลการศึกษาการลงทุนผลิตผลิตโลหะผงด้วยการพัฒนาเทคโนโลยีการผลิตโลหะผงทังสเตนคาร์ไบด์ที่ครอบคุม การเตรียมชิ้นงาน การล้าง การสลาย การกรอง การบด การอบ การคัดขนาดโลหะผง สามารถผลิตโลหะผงที่มีความบริสุทธิ์มากกว่าร้อยละ 99 นั้น ค่าใช้จ่ายในการลงทุนเฉพาะเครื่องจักรกลการผลิต มีมูลค่าไม่ต่ำกว่า 9,481,888 บาท เพื่อการผลิตในโรงงานขนาดเล็กและกระบวนการผลิตที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม

9.2 ข้อเสนอแนะ

สำหรับประเทศไทยมีอุตสาหกรรมการผลิตที่เป็นอุตสาหกรรมต้นน้ำขนาดใหญ่โดยเฉพาะอุตสาหกรรมการผลิตแม่พิมพ์และผลิตชิ้นส่วน แต่มีปัญาว่าต้นทุนการผลิตสูงมากเนื่องจากว่า เป็นผู้นำเทคโนโลยี และวัสดุ แบบ 100% อาทิ นำเข้าโลหะทังสเตนคาร์ไบด์ซึ่งเป็นโลหะที่ใช้ในการผลิตจำนวนมากที่สุด โดยนำเข้าในรูปของโลหะผงเพื่อการผลิตชิ้นงานซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ในรูปของซีเมนต์คาร์ไบด์ และการนำเข้าซีเมนต์คาร์ไบด์ ซึ่งมีมูลค่าสูงหลายพันล้านบาทต่อปี ดังนั้นจึงทำให้ต้นทุนการผลิตสินค้าทุกชนิดมีต้นทุนสูงมาโดยตลอด และที่สำคัญ คืออุตสาหกรรมการผลิตไม่มีเทคโนโลยีการผลิตโลหะทังสเตนคาร์ไบด์ภายในประเทศ ซึ่งเป็น Know How ทำให้ไม่สามารถนำมาใช้ในประเทศได้ และหากต้องซื้อและนำเข้าความรู้และเทคโนโลยีเหล่านั้น ต้องใช้งบการลงทุนสูงกว่า 1,550 ล้านบาท สำหรับการผลิตในอุตสาหกรรม

ดังนั้น ผลจากการวิจัยนี้สามารถเป็นผู้คิดค้น ต้นแบบกระบวนการผลิตและเทคโนโลยีการผลิตที่เป็นส่วนสำคัญเป็นผลสำเร็จ เพื่อการ Recycling โลหะทังสเตนคาร์ไบด์กลับมาใช้ใหม่ เป็น

ผลงานวิจัยรายแรกในเมืองไทย (ปี ค.ศ. 2010) การ Recycling ดังกล่าว สามารถผลิตผงโลหะมีความบริสุทธิ์ มากกว่า 99%

ดังนั้น หากมีการส่งเสริมและสนับสนุนจากรัฐบาลเพื่อพัฒนาอุตสาหกรรมการผลิตโลหะดังกล่าวได้ภายในประเทศ ซึ่งพบว่าสามารถใช้วัตถุดิบ(Raw materials) ในประเทศซึ่งมีอยู่เป็นจำนวนมาก และจะช่วยส่งเสริมให้เพิ่มความสามารถและเพิ่มศักยภาพของอุตสาหกรรมไทยไปได้ในระยะยาว สามารถลดการนำเข้าและเป็นการพัฒนาตามแนวทางการพัฒนาอุตสาหกรรมเพื่อความยั่งยืนได้อย่างดียิ่งต่ออุตสาหกรรมการผลิตของประเทศไทย

บรรณานุกรม

ภาษาไทย

[1] สหรัตน์ วงษ์ศรีษะ, การพัฒนาผลิตภัณฑ์จากเศษทังสเตนคาร์ไบด์กลับมาใช้ใหม่ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร 2552.

[2] เดลิงก์, ไฮนริช. ทฤษฎีเครื่องมือกล. แปลและเรียบเรียงโดยบุญศักดิ์ ใจจงดี.พระนคร: คุรุสภา, 2519.

[3] จำเนียน ศิลปะวานิช. 2538 , เฟือง , พิมพ์ครั้งที่ 1 , นนทบุรี , สกายบุ๊กส์.

[4] มานพ ตันตระบัณฑิตย์, วัสดุวิศวกรรม (ฉบับปรับปรุง).กรุงเทพฯ, สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย – ญี่ปุ่น), 2545.

[5] บรรเลง ศรนิลและประเสริฐ ก๊วยสมบูรณ์, ตารางโลหะ, กรุงเทพฯ, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, พิมพ์ครั้งที่ 1 2549.

[6] วีระพันธ์ สิทธิพงศ์, โลหะวิทยาทางกายภาพสำหรับวิศวกร 2, โรงพิมพ์นิยมวิทยา, 2533.

[7] สุริย์พร จารุวัสตร์, 2542, การบัญชีต้นทุน, พิมพ์ครั้งที่ 4, มหาวิทยาลัยหอการค้าไทย, หน้า 1- 15.

[8] สมนึก เอื้อจิระพงษ์พันธ์, 2537, การบัญชีต้นทุน 1, แมคกรอฮิล อินเตอร์เนชั่นแนล เอ็นเตอร์ ไพร์ส อิ้งค์, หน้า 1-45.

[9] วันชัย ริจิรวนิช และ สุทัศน์ รัตนเกื้อกังวาน, 2540, การวิเคราะห์ต้นทุนอุตสาหกรรมและงบประมาณ, พิมพ์ครั้งที่ 1, สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, หน้า 87-106.

[10] วิจิตรา พูลเพิ่มทรัพย์, 2543, หลักการบัญชีต้นทุน, พิมพ์ครั้งที่ 3, สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตร- ศาสตร์, หน้า 77-82.

[11] จิรพัฒน์ เงาประเสริฐวงศ์, 2543, การวิเคราะห์ต้นทุนอุตสาหกรรมและการจัดทำงบประมาณ, พิมพ์ ครั้งที่1, สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, หน้า 33-40.

[12] โซเฮ ฮิบิ, 2540, คู่มือปฏิบัติการลดต้นทุนในสถานประกอบการ, พิมพ์ครั้งที่6, สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น), หน้า 103-237.

[13] บรรเลง ศรนิล, (รศ.), เทคโนโลยีพลาสติก (ฉบับปรับปรุง). กรุงเทพฯ, สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย – ญี่ปุ่น), พิมพ์ครั้งที่ 19 2546.

[14] มนัส สถิรจินดา, โลหะนอกหลุ่มเหล็ก, โรงพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กรุงเทพมหานคร, 2541.

[15] สหรัตน์ วงษ์ศรียะ, การพัฒนาชิ้นส่วนวัสดุผงอัดขึ้นรูปที่ผ่านการใช้งานกลับมาใช้ใหม่ มหาวิทยาลัย เทคโนโลยีราชมงคลพระนคร 2552.

ภาษาอังกฤษ

[16] T.Madhavi Latha and S. Venkatachalam, Electrolytic Recovery of Tungsten and Cobalt from Tungsten Carbide Scrap, Department of Metallurgical Engineering, Indian Institute of Technology, Bombay (India),1988

[17] Jing-Chie Lin, Jain-Yuan Lin, Shie-Peir Jou, 1996, Selective Dissolution of the cobalt binder from scraps of cemented tungsten carbide in acids containing additive, Taiwan.

[18] T.Kojima,T.Shimizu,R.Sasai, H.Itoh, Recycling process of WC-Co cermets by Hydrothermal treatmebt, Ecotopia Science Institute, Division of Environmental Research, Nagoya University,2005,5167-5172.

[19] Process for recovering tungsten carbide from cemented tungsten carbide scraps by selective electrolysis (United Patent Number: 5, 384, 016, Jun.24, 1995)

[20] Sankaran Venkateswaran Wolf-Dieter Schubert & Benno Lux, 1995, W-Scrap Recycling by the Melt Bath Technique, Intitute for Chemical Technology of Inorganic Materials, Vienna University of Technology, A-1060 Vienna, Austria.

[21] Mohammad H. and Mortimer Schussler. 1980, Process for recovering metat carbide Powder from cemented carbides. United States Patent Number : 4,234,333.

[22] B.F. Kieffer and E. Lassner. Tungsten recycling in today environment. United State, 1994

[23] Lin, J.C. Lin, J.Y. and Lee S.L., " Process for Recovering Tungsten Carbide from Cemented Carbide Scraps by Selective Electrolysis", US Patent, 5.384.016, 1995.

[24] C. Edtmaier, R. Schiesser, C. Meissl, W.D. Schubert, A. Bock, A. Schoen, B.Zeiler. Selective removal of the cobalt binder in WC/Co based hadmetal scraps by acetic acid leaching. Vienna, Austria, 2005.

[25] Clarence D. Vanderpool, Tai K. Kim, Electrolytic Method for Producing Ammonium Paratungstate from Cemented Tungsten Carbide, US Patent, 5,021,133 , 1991.

[26] http://www.mindbranch.com, Cutting tools-World Markets ,End-Users & Competitors : 2005-2010 Analysis & Forecasts

[27] http://www.Google.com

[28] http://www.ies-thailand.com

[29] http://www.Chainatungsten .com /tcpgrade .htm

[30] http://www.snadvik.com

ภาคผนวก ก

ผลการทดลองการแยกสลายเศษซีเมนต์ทังสเตนคาร์ไบด์

ตารางที่ ก. 1 การทดลองย่อยสลายเศษซีเมนต์ทังสเตนคาร์ไบด์ด้วยกรดไฮโดรคลอริก (HCl) 1N แรงดัน 1.2 v ที่อุณหภูมิห้อง

แรงดัน (V)	เวลา (h)	อุณหภูมิ (°C)	กระแสไฟฟ้า(A)			ค่าไฟฟ้า(บาท)		น้ำหนักเศษซีเมนต์คาร์ไบด์ (g)		น้ำหนักที่สูญสลายไป(g)		ผงทังสเตน (g)	
			เฉลี่ยต่ำสุด	เฉลี่ยค่ากลาง	เฉลี่ยสูงสุด	kwh	จำนวนเงิน	น้ำหนักเศษเริ่มต้น	เศษเล็กที่คัดออก	น้ำหนักที่ลดลง	นน.สูญสลายในสารละลาย	ถังทำงาน	ถังพัก
0	0	0	0	0	0	0	0	1500	0	0	0	0	0
1.2	12	24.88	0.24	0.42	0.60			1485		15			
1.2	24	24.48	0.24	0.39	0.55			1470		15			
1.2	36	25.96	0.20	0.38	0.56			1445		25			
1.2	48	24.60	0.20	0.37	0.53	3.4		1420		25			
Total		**25.9**				**3.4**	**8.38**	**1355**	**ไม่ได้แยก**	**145**	**65**		**80**

เศษเล็กที่คัดออก ขนาด Ø < 2 mm.

ตารางที่ ก. 2 การทดลองย่อยสลายเศษซีเมนต์ทังสเตนคาร์ไบด์ด้วยกรดไฮโดรคลอริก (HCl) 1 N แรงดัน 1.0 V ที่อุณหภูมิห้อง

แรงดัน (V)	เวลา (h)	อุณหภูมิ (°C)	กระแสไฟฟ้า(A)			ค่าไฟฟ้า(บาท)		น้ำหนักเศษซีเมนต์คาร์ไบด์ (g)		น้ำหนักที่สูญสลาย(g)		ผงทังสเตน (g)	
			เฉลี่ยต่ำสุด	เฉลี่ยค่ากลาง	เฉลี่ยสูงสุด	kwh	จำนวนเงิน	เศษเริ่มต้น	เศษเล็กที่คัดออก	น.น.ที่ลดลง	นน.สูญสลายในสารละลาย	ถังทำงาน	ถังพัก
0	0	0	0	0	0	0	0	1500	0	0	0	0	0
1.0	12	28.24	0.43	0.66	0.89			1465		35			
1.0	24	29.32	0.13	0.27	0.38			1430		35			
1.0	36	28.68	0.15	0.27	0.39			1400		30			
1.0	48	28	0.14	0.27	0.40	3.4		1370	15	30		70	25
Total		**28.56**				**3.4**	8.38	**1370**	**15**	**130**	**20**		**95**

เศษเล็กที่คัดออก ขนาด Ø < 2 mm.

ตารางที่ ก. 3 การทดลองย่อยสลายเศษซีเมนต์ทังสเตนคาร์ไบด์ด้วยกรดไฮโดรคลอริก (HCl) 1 N แรงดัน 0.8 V ที่อุณหภูมิห้อง

แรงดัน (V)	เวลา (h)	อุณหภูมิ (°C)	กระแสไฟฟ้า(A)			ค่าไฟฟ้า(บาท)		น้ำหนักเศษซีเมนต์คาร์ไบด์ (g)		น้ำหนักที่สูญสลาย(g)		ผงทังสเตน (g)	
			เฉลี่ยต่ำสุด	เฉลี่ยค่ากลาง	เฉลี่ยสูงสุด	kwh	จำนวนเงิน	เศษเริ่มต้น	เศษเล็กที่คัดออก	น.น.ที่ลดลง	นน.สูญสลายในสารละลาย	ถังทำงาน	ถังพัก
0	0	0	0	0	0	0	0	1500	0	0	0	0	0
0.8	12	27.20	0.47	0.62	0.77	1		1470		30			
0.8	24	28.20	0.16	0.25	0.32	1.9		1460		10			
0.8	36	28.40	0.11	0.17	0.23	2.8		1410		50			
0.8	48	28.00	0.09	0.15	0.20	4.1		1380	10	30		60	30
Total		**27.95**				**4.1**	**10.1**	**1380**	**10**	**120**	**20**		**90**

เศษเล็กที่คัดออก ขนาด Ø < 2 mm.

ตารางที่ ก. 4 การทดลองย่อยสลายเศษซีเมนต์ทังสเตนคาร์ไบด์ด้วยกรดไฮโดรคลอริก (HCl) 1N แรงดัน 0.6 V ที่อุณหภูมิห้อง

แรงดัน (V)	เวลา (h)	อุณหภูมิ (°C)	กระแสไฟฟ้า(A)			ค่าไฟฟ้า(บาท)		น้ำหนักเศษซีเมนต์คาร์ไบด์ (g)		น้ำหนักที่สูญสลายไป(g)		ผงทังสเตน (g)	
			เฉลี่ยต่ำสุด	เฉลี่ยค่ากลาง	เฉลี่ยสูงสุด	kwh	จำนวนเงิน	เศษเริ่มต้น	เศษเล็กที่คัดออก	น.น.ที่ลดลง	นน.สูญสลายในสารละลาย	ถังทำงาน	ถังพัก
0	0	0	0	0	0	0	0	1500	0	0	0	0	0
0.6	12	27	0.41	0.55	0.68	0.8		1440		60			
0.6	24	27.44	0.32	0.44	0.55	1.9		1420		20			
0.6	36	27.56	0.19	0.29	0.42	2.8		1405		15			
0.6	48	27	0.15	0.24	0.32	3.7		1340	10	65		80	20
Total		**27.25**				**3.7**	**9.12**	**1340**	**10**	**160**	**50**		**100**

เศษเล็กที่คัดออก ขนาด Ø < 2 mm.

ตารางที่ ก. 5 การทดลองย่อยสลายเศษซีเมนต์ทังสเตนคาร์ไบด์ด้วยกรดไฮโดรคลอริก (HCl) 1 N แรงดัน 0.4 V ที่อุณหภูมิห้อง

แรงดัน (V)	**เวลา (h)**	**อุณหภูมิ (°C)**	**กระแสไฟฟ้า(A)**			**ค่าไฟฟ้า(บาท)**		**น้ำหนักเศษซีเมนต์คาร์ไบด์ (g)**		**น้ำหนักที่สูญสลายไป(g)**		**ผงทังสเตน (g)**	
			เฉลี่ยต่ำสุด	**เฉลี่ยค่ากลาง**	**เฉลี่ยสูงสุด**	**kwh**	**จำนวนเงิน**	**เศษเริ่มต้น**	**เศษเล็กที่คัดออก**	**น.น.ที่ลดลง**	**นน.สูญสลายในสารละลาย**	**ถังทำงาน**	**ถังพัก**
0	0	0	0	0	0	0	0	1500	0	0	0	0	0
0.4	12	28.00	0.14	0.23	0.31			1480		20			
0.4	24	27.64	0.11	0.21	0.31			1435		45			
0.4	36	27.80	0.09	0.16	0.22			1400		35			
0.4	48	27.12	0.08	0.14	0.19	3.4		1370	ไม่ได้แยก	30		65	30
Total		**27.64**				**3.4**	**8.38**	**1370**	ไม่ได้แยก	**130**	**35**		**95**

เศษเล็กที่คัดออก ขนาด Ø < 2 mm.

ตารางที่ ก. 6 การทดลองย่อยสลายเศษซีเมนต์ทังสเตนคาร์ไบด์ด้วยกรดไฮโดรคลอริก (HCl) 1 N แรงดัน 0.2 V ที่อุณหภูมิห้อง

แรงดัน (V)	เวลา (h)	อุณหภูมิ (°C)	กระแสไฟฟ้า(A)			ค่าไฟฟ้า(บาท)		น้ำหนักเศษซีเมนต์คาร์ไบด์ (g)		น้ำหนักที่สูญสลายไป(g)		ผงทังสเตน (g)	
			เฉลี่ยต่ำสุด	เฉลี่ยค่ากลาง	เฉลี่ยสูงสุด	kwh	จำนวนเงิน	เศษเริ่มต้น	เศษเล็กที่คัดออก	น.น.ที่ลดลง	นน.สูญสลายในสารละลาย	ถังทำงาน	ถังพัก
0	0	0	0	0	0	0	0	1500	0	0	0	0	0
0.2	12	26.40	0.03	0.07	0.31	0.8		1490		10			
0.2	24	26.72	0.03	0.07	0.31	1.9		1430		60			
0.2	36	27.40	0.06	0.09	0.22	2.9		1400		30			
0.2	48	28.52	0.06	0.09	0.19	3.9		1370	10	30		50	30
Total		**27.26**				**3.9**	**9.61**	**1370**		**130**	**40**		**80**

เศษเล็กที่คัดออก ขนาด Ø < 2 mm.

ตารางที่ ก. 7 การทดลองย่อยสลายเศษซีเมนต์ทังสเตนคาร์ไบด์ด้วยกรดไฮโดรคลอริก 3 N แรงดัน 0.2 V ที่อุณหภูมิห้อง

แรงดัน (V)	**เวลา (h)**	**อุณหภูมิ (°C)**	**กระแสไฟฟ้า(A)**			**ค่าไฟฟ้า(บาท)**		**น้ำหนักเศษซีเมนต์คาร์ไบด์ (g)**		**น้ำหนักที่สูญสลายไป(g)**		**ผงทังสเตน (g)**	
			เฉลี่ยต่ำสุด	**เฉลี่ยค่ากลาง**	**เฉลี่ยสูงสุด**	**kwh**	**จำนวนเงิน**	**เศษเริ่มต้น**	**เศษเล็กที่คัดออก**	**น.น.ที่ลดลง**	**นน.สูญสลายในสารละลาย**	**ถังทำงาน**	**ถังพัก**
0	0	0	0	0	0	0	0	1500	0	0	0	0	0
0.2	12	29.08	0.22	0.31	0.40	0.8		1435		65			
0.2	24	29.08	0.13	0.21	0.28	1.7		1370		65			
0.2	36	29.00	0.03	0.05	0.08	2.7		1320		50			
0.2	48	30.68	0.02	0.03	0.05	4.2		1280	8.42	40		120	55
Total		**29.46**				**4.2**	**10.35**	**1280**	**8.42**	**220**	**36.58**		**175**

เศษเล็กที่คัดออก ขนาด Ø < 2 mm.

ตารางที่ ก. 8 การทดลองย่อยสลายเศษซีเมนต์ทังสเตนคาร์ไบด์ด้วยกรดไฮโดรคลอริก 5 N แรงดัน 0.2 V ที่อุณหภูมิห้อง

แรงดัน (V)	เวลา (h)	อุณหภูมิ (°C)	กระแสไฟฟ้า(A)			ค่าไฟฟ้า(บาท)		น้ำหนักเศษซีเมนต์คาร์ไบด์ (g)		น้ำหนักที่สูญสลายไป(g)		ผงทังสเตน (g)	
			เฉลี่ยต่ำสุด	เฉลี่ยค่ากลาง	เฉลี่ยสูงสุด	kwh	จำนวนเงิน	เศษเริ่มต้น	เศษเล็กที่คัดออก	น.น.ที่ลดลง	นน.สูญสลายในสารละลาย	ถังทำงาน	ถังพัก
0	0	0	0	0	0	0	0	1500	0	0	0	0	0
0.2	12	30.32	0.24	0.28	0.32	0.8		1440		60			
0.2	24	30.92	0.06	0.09	0.11	1.5		1380		60			
0.2	36	30.16	0.06	0.08	0.10	2.7		1350		30			
0.2	48	30	0.04	0.06	0.08	4.4		1300	6.57	50		105	50
Total		**30.35**				**4.4**	**10.76**	**1300**	**6.57**	**200**	**38.43**		**155**

เศษเล็กที่คัดออก ขนาด Ø < 2 mm.

ตารางที่ ก. 9 การทดลองย่อยสลายเศษซีเมนต์ทังสเตนคาร์ไบด์ด้วยกรดไฮโดรคลอริก 7 N แรงดัน 0.2 V ที่อุณหภูมิห้อง

แรงดัน (V)	เวลา (h)	อุณหภูมิ (°C)	กระแสไฟฟ้า(A)			ค่าไฟฟ้า(บาท)		น้ำหนักเศษซีเมนต์คาร์ไบด์ (g)		น้ำหนักที่สูญสลายไป(g)		ผงทังสเตน (g)	
			เฉลี่ยต่ำสุด	เฉลี่ยค่ากลาง	เฉลี่ยสูงสุด	kwh	จำนวนเงิน	เศษเริ่มต้น	เศษเล็กที่คัดออก	น.น.ที่ลดลง	นน.สูญสลายในสารละลาย	ถังทำงาน	ถังพัก
0	0	0	0	0	0	0	0	1500	0	0	0	0	0
0.2	12	30.60	0.31	0.37	0.42	0.8		1430		70			
0.2	24	29.16	0.06	0.08	0.10	1.7		1380		50			
0.2	36	31.00	0.05	0.06	0.07	2.7		1310		70			
0.2	48	30.96	0.05	0.29	0.52	4.2		1270	11.33	40		130	75
Total		**30.72**				**4.2**	**10.35**	**1270**	**11.33**	**230**	**13.67**		**205**

เศษเล็กที่คัดออก ขนาด Ø < 2 mm.

ตารางที่ ก. 10 การทดลองย่อยสลายเศษซีเมนต์ทังสเตนคาร์ไบด์ด้วยกรดไฮโดรคลอริก 3N แรงดัน 0.6 V ที่อุณหภูมิห้อง

แรงดัน (V)	**เวลา (h)**	**อุณหภูมิ (°C)**	**กระแสไฟฟ้า(A)**			**ค่าไฟฟ้า(บาท)**		**น้ำหนักเศษซีเมนต์คาร์ไบด์ (g)**		**น้ำหนักที่สูญสลายไป(g)**		**ผงทังสเตน (g)**	
			เฉลี่ยต่ำสุด	**เฉลี่ยค่ากลาง**	**เฉลี่ยสูงสุด**	**kwh**	**จำนวนเงิน**	**เศษเริ่มต้น**	**เศษเล็กที่คัดออก**	**น.น.ที่ลดลง**	**นน.สูญสลายในสารละลาย**	**ถังทำงาน**	**ถังพัก**
0	0	0	0	0	0	0	0	1500	0	0	0	0	0
0.6	12	30.48	0.51	0.72	0.92	0.8		1445		55			
0.6	24	29.80	0.25	0.53	0.76	1.7		1400		45			
0.6	36	30.00	0.35	0.52	0.69	2.5		1355		45			
0.6	48	30	0.39	0.48	0.57	4.2		1310	5.9	45		100	60
Total		**30.37**				**4.2**	**10.35**	**1310**	**5.9**	**190**	**24.1**		**160**

เศษเล็กที่คัดออก ขนาด Ø < 2 mm.

ตารางที่ ก. 11 การทดลองย่อยสลายเศษซีเมนต์ทังสเตนคาร์ไบด์ด้วยกรดไฮโดรคลอริก 5 N แรงดัน 0.6 V ที่อุณหภูมิห้อง

แรงดัน (V)	เวลา(h)	อุณหภูมิ (°C)	กระแสไฟฟ้า(A)			ค่าไฟฟ้า(บาท)		น้ำหนักเศษซีเมนต์คาร์ไบด์ (g)		น้ำหนักที่สูญสลายไป(g)		ผงทังสเตน (g)	
			เฉลี่ยต่ำสุด	เฉลี่ยค่ากลาง	เฉลี่ยสูงสุด	kwh	จำนวนเงิน	เศษเริ่มต้น	เศษเล็กที่คัดออก	น.น.ที่ลดลง	นน.สูญสลายในสารละลาย	ถังทำงาน	ถังพัก
0	0	0	0	0	0	0	0	1500	0	0	0	0	0
0.6	12	30.12	0.34	0.52	0.69	0.8		1440		60			
0.6	24	31.52	0.26	0.41	0.53	1.8		1395		45			
0.6	36	31.00	0.40	0.48	0.57	2.7		1350		45			
0.6	48	30.72	0.30	0.35	0.41	4.3		1330	4	20		100	55
Total		**30.84**				**4.3**	**10.60**	**1330**	**4**	**170**	**11**		**155**

เศษเล็กที่คัดออก ขนาด Ø < 2 mm.

ตารางที่ ก. 12 การทดลองย่อยสลายเศษซีเมนต์ทังสเตนคาร์ไบด์ด้วยกรดไฮโดรคลอริก 7 N แรงดัน 0.6 V ที่อุณหภูมิห้อง

แรงดัน (V)	เวลา (h)	อุณหภูมิ (°C)	กระแสไฟฟ้า(A)			ค่าไฟฟ้า(บาท)		น้ำหนักเศษซีเมนต์คาร์ไบด์ (g)		น้ำหนักที่สูญสลายไป(g)		ผงทังสเตน (g)	
			เฉลี่ยต่ำสุด	เฉลี่ยค่ากลาง	เฉลี่ยสูงสุด	kwh	จำนวนเงิน	เศษเริ่มต้น	เศษเล็กที่คัดออก	น.น.ที่ลดลง	นน.สูญสลายในสารละลาย	ถังทำงาน	ถังพัก
0	0	0	0	0	0	0	0	1500	0	0	0	0	0
0.6	12	30.12	0.87	1.06	1.24	0.8		1460		40			
0.6	24	30.16	0.48	0.65	0.76	1.8		1400		60			
0.6	36	30.44	0.46	0.56	0.66	2.7		1355		45			
0.6	48	30.20	0.37	0.49	0.61	4.1		1290	5.19	65		125	70
Total		**30.22**				**4.1**	**10.11**	**1290**	**5.19**	**210**	**9.81**		**195**

เศษเล็กที่คัดออก ขนาด Ø < 2 mm.

ตารางที่ ก. 13 การทดลองย่อยสลายเศษซีเมนต์ทังสเตนคาร์ไบด์ด้วยกรดไฮโดรคลอริก 3 N แรงดัน 1.0 v ที่อุณหภูมิห้อง

แรงดัน (V)	เวลา (h)	อุณหภูมิ (°C)	กระแสไฟฟ้า(A)			ค่าไฟฟ้า(บาท)		น้ำหนักเศษซีเมนต์คาร์ไบด์ (g)		น้ำหนักที่สูญสลายไป(g)		ผงทังสเตน (g)	
			เฉลี่ยต่ำสุด	เฉลี่ยค่ากลาง	เฉลี่ยสูงสุด	kwh	จำนวนเงิน	เศษเริ่มต้น	เศษเล็กที่คัดออก	น.น.ที่ลดลง	นน.สูญสลายในสารละลาย	ถังทำงาน	ถังพัก
0	0	0	0	0	0	0	0	1500	0	0	0	0	0
1.0	12	29.04	0.62	0.87	1.13	1.1		1495		5			
1.0	24	31.56	0.33	0.56	0.75	1.9		1450		45			
1.0	36	30.00	0.22	0.39	0.56	3		1435		15			
1.0	48	29.16	0.18	0.32	0.46	4.3		1410	5	25		55	25
Total		**29.94**				**4.3**	**10.51**	**1410**	**5**	**90**	**5**		**80**

**เศษเล็กที่คัดออก ขนาด Ø < 2 mm. **

ตารางที่ ก. 14 การทดลองย่อยสลายเศษซีเมนต์ทังสเตนคาร์ไบด์ด้วยกรดไฮโดรคลอริก (HCl) 5 N แรงดัน 1.0 v ที่อุณหภูมิห้อง

แรงดัน (V)	**เวลา (h)**	**อุณหภูมิ (°C)**	**กระแสไฟฟ้า(A)**			**ค่าไฟฟ้า(บาท)**		**น้ำหนักเศษซีเมนต์คาร์ไบด์ (g)**		**น้ำหนักที่สูญสลายไป(g)**		**ผงทังสเตน (g)**	
			เฉลี่ยต่ำสุด	**เฉลี่ยค่ากลาง**	**เฉลี่ยสูงสุด**	**kwh**	**จำนวนเงิน**	**เศษเริ่มต้น**	**เศษเล็กที่คัดออก**	**น.น.ที่ลดลง**	**นน.สูญสลายในสารละลาย**	**ถังทำงาน**	**ถังพัก**
0	0	0	0	0	0	0	0	1500	0	0	0	0	0
1.0	12	28.96	0.21	0.35	0.50	1.3		1475		25			
1.0	24	30.00	0.11	0.19	0.26	1.9		1410		65			
1.0	36	29.76	0.07	0.15	0.22	2.7		1380		30			
1.0	48	28.64	0.13	0.24	0.35	3.7		1355	3	25		70	40
Total		**29.34**				**3.7**	**9.05**	**1355**	**3**	**145**	**32**		**110**

เศษเล็กที่คัดออก ขนาด Ø < 2 mm.

ตารางที่ ก. 15 การทดลองย่อยสลายเศษซีเมนต์ทังสเตนคาร์ไบด์ด้วยกรดไฮโดรคลอริก (HCl) 7 N แรงดัน 1.0 v ที่อุณหภูมิห้อง

แรงดัน (V)	เวลา (h)	อุณหภูมิ (°C)	กระแสไฟฟ้า(A)			ค่าไฟฟ้า(บาท)		น้ำหนักเศษซีเมนต์คาร์ไบด์ (g)		น้ำหนักที่สูญสลายไป(g)		ผงทังสเตน (g)	
			เฉลี่ยต่ำสุด	เฉลี่ยค่ากลาง	เฉลี่ยสูงสุด	kwh	จำนวนเงิน	เศษเริ่มต้น	เศษเล็กที่คัดออก	น.น.ที่ลดลง	นน.สูญสลายในสารละลาย	ถังทำงาน	ถังพัก
0	0	0	0	0	0	0	0	1500	0	0	0	0	0
1.0	12	28.68	0.18	0.31	0.44	0.9		1475		25			
1.0	24	30.96	0.07	0.16	0.24	1.9		1430		45			
1.0	36	28.80	0.07	0.16	0.24	2.8		1380		50			
1.0	48	28.8	0.05	0.11	0.18	4.3		1340	1.94	40		90	50
Total		**29.31**				**4.3**	**10.51**	**1340**	**1.94**	**160**	**18.06**		**140**

เศษเล็กที่คัดออก ขนาด Ø < 2 mm.

ตารางที่ ก. 16 การทดลองย่อยสลายเศษซีเมนต์ทังสเตนคาร์ไบด์ด้วยกรดไฮโดรคลอริก (HCl) 1 N แรงดัน 1.0 v ที่อุณหภูมิ 50 °C

แรงดัน (V)	เวลา (h)	อุณหภูมิ (°C)	กระแสไฟฟ้า(A)			ค่าไฟฟ้า(บาท)		น้ำหนักเศษซีเมนต์คาร์ไบด์ (g)		น้ำหนักที่สูญสลายไป(g)		ผงทังสเตน (g)	
			เฉลี่ยต่ำสุด	เฉลี่ยค่ากลาง	เฉลี่ยสูงสุด	kwh	จำนวนเงิน	เศษเริ่มต้น	เศษเล็กที่คัดออก	น.น.ที่ลดลง	นน.สูญสลายในสารละลาย	ถังทำงาน	ถังพัก
0	0	0	0	0	0	0	0	1500	0	0	0	0	0
1.0	12	49.24	1.31	1.79	2.28	9		1460		40			
1.0	24	49.28	2.12	2.75	3.17	16.9		1410		50			
1.0	36	49.40	2.73	2.99	3.25	24.6		1370		40			
1.0	48	49.36	2.19	2.95	3.71	30.6		1330	5	40		90	30
Total		**49.32**				**30.6**	**73.65**	**1330**	**5**	**170**	**45**		**120**

เศษเล็กที่คัดออก ขนาด Ø < 2 mm.

ตารางที่ ก. 17 การทดลองย่อยสลายเศษซีเมนต์ทังสเตนคาร์ไบด์ด้วยกรดไฮโดรคลอริก (HCl) 1 N แรงดัน 1.0 v ที่อุณหภูมิ 70 °C

แรงดัน (V)	เวลา (h)	อุณหภูมิ (°C)	กระแสไฟฟ้า(A)			ค่าไฟฟ้า(บาท)		น้ำหนักเศษซีเมนต์คาร์ไบด์ (g)		น้ำหนักที่สูญสลายไป(g)		ผงทังสเตน (g)	
			เฉลี่ยต่ำสุด	เฉลี่ยค่ากลาง	เฉลี่ยสูงสุด	kwh	จำนวนเงิน	เศษเริ่มต้น	เศษเล็กที่คัดออก	น.น.ที่ลดลง	นน.สูญสลายในสารละลาย	ถังทำงาน	ถังพัก
0	0	0	0	0	0	0	0	1500	0	0	0	0	0
1.0	12	68.88	0.96	1.15	1.35	21.9		1440		60			
1.0	24	68.96	0.68	0.92	1.08	40.8		1400		40			
1.0	36	68.96	0.71	0.89	1.08	59.5		1360		40			
1.0	48	68.88	0.54	0.75	0.96	77.9		1320	10	40		110	25
Total		**68.92**				**77.9**	**192.02**	**1320**	**10**	**180**	**35**		**135**

เศษเล็กที่คัดออก ขนาด Ø < 2 mm.

ตารางที่ ก. 18 การทดลองย่อยสลายเศษซีเมนต์ทังสเตนคาร์ไบด์ด้วยกรดไฮโดรคลอริก (HCl) 3 N แรงดัน 1.0 v ที่อุณหภูมิ 50 °C

แรงดัน (V)	เวลา (h)	อุณหภูมิ (°C)	กระแสไฟฟ้า(A)			ค่าไฟฟ้า(บาท)		น้ำหนักเศษซีเมนต์คาร์ไบด์ (g)		น้ำหนักที่สูญสลายไป(g)		ผงทังสเตน (g)	
			เฉลี่ยต่ำสุด	เฉลี่ยค่ากลาง	เฉลี่ยสูงสุด	kwh	จำนวนเงิน	เศษเริ่มต้น	เศษเล็กที่คัดออก	น.น.ที่ลดลง	นน.สูญสลายในสารละลาย	ถังทำงาน	ถังพัก
0	0	0	0	0	0	0	0	1500	0	0	0	0	0
1.0	12	49.32	0.39	0.68	0.97			1460		40			
1.0	24	49.44	0.31	0.47	0.59			1411		49			
1.0	36	49.36	0.19	0.38	0.57			1380		31			
1.0	48	48.92	0.31	0.62	0.93	32.6		1360	1.94	20		85	40
Total		**49.26**				**32.6**	**80.35**	**1360**	**1.94**	**140**	**13.06**		**125**

เศษเล็กที่คัดออก ขนาด Ø < 2 mm.

ตารางที่ ก. 19 การทดลองย่อยสลายเศษซีเมนต์ทังสเตนคาร์ไบด์ด้วยกรดไฮโดรคลอริก (HCl) 5 N แรงดัน 1.0 v ที่อุณหภูมิ 50 °C

แรงดัน (V)	**เวลา (h)**	**อุณหภูมิ (°C)**	**กระแสไฟฟ้า(A)**			**ค่าไฟฟ้า(บาท)**		**น้ำหนักเศษซีเมนต์คาร์ไบด์ (g)**		**น้ำหนักที่สูญสลายไป(g)**		**ผงทังสเตน (g)**	
			เฉลี่ยต่ำสุด	**เฉลี่ยค่ากลาง**	**เฉลี่ยสูงสุด**	**kwh**	**จำนวนเงิน**	**เศษเริ่มต้น**	**เศษเล็กที่คัดออก**	**น.น.ที่ลดลง**	**นน.สูญสลายในสารละลาย**	**ถังทำงาน**	**ถังพัก**
0	0	0	0	0	0	0	0	1500	0	0	0	0	0
1.0	12	48.92	0.78	1.13	1.48			1445		55			
1.0	24	49.24	0.76	1.08	1.32			1425		20			
1.0	36	49.08	0.57	0.84	1.11			1390		35			
1.0	48	49.32	0.48	0.73	0.97	31.8		1365	1.2	25		80	30
Total		**49.14**				**31.8**	**78.38**	**1365**	**1.2**	**135**	**23.8**		**110**

เศษเล็กที่คัดออก ขนาด Ø < 2 mm.

ตารางที่ ก. 20 การทดลองย่อยสลายเศษซีเมนต์ทังสเตนคาร์ไบด์ด้วยกรดไฮโดรคลอริก (HCl) 7 N แรงดัน 1.0 v ที่อุณหภูมิ 50 °C

แรงดัน (V)	**เวลา (h)**	**อุณหภูมิ (°C)**	**กระแสไฟฟ้า(A)**			**ค่าไฟฟ้า(บาท)**		**น้ำหนักเศษซีเมนต์คาร์ไบด์ (g)**		**น้ำหนักที่สูญสลายไป(g)**		**ผงทังสเตน (g)**	
			เฉลี่ยต่ำสุด	**เฉลี่ยค่ากลาง**	**เฉลี่ยสูงสุด**	**kwh**	**จำนวนเงิน**	**เศษเริ่มต้น**	**เศษเล็กที่คัดออก**	**น.น.ที่ลดลง**	**นน.สูญสลายในสารละลาย**	**ถังทำงาน**	**ถังพัก**
0	0	0	0	0	0	0	0	1500	0	0	0	0	0
1.0	12	49.28	0.68	1.05	1.42			1465		35			
1.0	24	49.28	0.70	1.08	1.36			1430		35			
1.0	36	49.20	0.52	0.78	1.05			1400		30			
1.0	48	49.24	0.34	0.54	0.73	29.1		1365	6.43	35		70	30
Total		**49.25**				**29.1**	**71.72**	**1365**	**6.43**	**135**	**28.57**		**100**

เศษเล็กที่คัดออก ขนาด Ø < 2 mm.

ตารางที่ ก. 21 การทดลองย่อยสลายเศษซีเมนต์ทังสเตนคาร์ไบด์ด้วยกรดไฮโดรคลอริก (HCl) 3 N แรงดัน 1.0 v ที่อุณหภูมิ 70 °C

แรงดัน (V)	เวลา (h)	อุณหภูมิ (°C)	กระแสไฟฟ้า(A)			ค่าไฟฟ้า(บาท)		น้ำหนักเศษซีเมนต์คาร์ไบด์ (g)		น้ำหนักที่สูญสลายไป(g)		ผงทังสเตน (g)	
			เฉลี่ยต่ำสุด	เฉลี่ยค่ากลาง	เฉลี่ยสูงสุด	kwh	จำนวนเงิน	เศษเริ่มต้น	เศษเล็กที่คัดออก	น.น.ที่ลดลง	นน.สูญสลายในสารละลาย	ถังทำงาน	ถังพัก
0	0	0	0	0	0	0	0	1500	0	0	0	0	0
1.0	12	69.04	0.28	0.55	0.81			1450		50			
1.0	24	69.60	0.28	0.72	1.12			1400		50			
1.0	36	69.76	1.35	2.10	2.85			1350		50			
1.0	48	69.96	1.12	1.77	2.43	70.4		1320	10	30		130	30
Total		**69.59**				**70.4**	**173.52**	**1320**	**10**	**180**	**10**		**160**

เศษเล็กที่คัดออก ขนาด Ø < 2 mm.

ตารางที่ ก. 22 การทดลองย่อยสลายเศษซีเมนต์ทังสเตนคาร์ไบด์ด้วยกรดไฮโดรคลอริก (HCl) 5 N แรงดัน 1.0 v ที่อุณหภูมิ 70 °C

แรงดัน (V)	เวลา (h)	อุณหภูมิ (°C)	กระแสไฟฟ้า(A)			ค่าไฟฟ้า(บาท)		น้ำหนักเศษซีเมนต์คาร์ไบด์ (g)		น้ำหนักที่สูญสลายไป(g)		ผงทังสเตน (g)	
			เฉลี่ยต่ำสุด	เฉลี่ยค่ากลาง	เฉลี่ยสูงสุด	kwh	จำนวนเงิน	เศษเริ่มต้น	เศษเล็กที่คัดออก	น.น.ที่ลดลง	นน.สูญสลายในสารละลาย	ถังทำงาน	ถังพัก
0	0	0	0	0	0	0	0	1500	0	0	0	0	0
1.0	12	69.48	0.98	1.47	1.95			1440		60			
1.0	24	69.80	1.61	2.23	2.69			1390		50			
1.0	36	69.84	2.15	2.77	3.40			1335		55			
1.0	48	69.68	2.16	3.04	3.91	66.3		1290	5.29	45		130	30
Total		**69.70**					**163.42**	**1290**	**5.29**	**210**	**14.71**		**160**

เศษเล็กที่คัดออก ขนาด Ø < 2 mm.

ตารางที่ ก. 23 การทดลองย่อยสลายเศษซีเมนต์ทังสเตนคาร์ไบด์ด้วยกรดไฮโดรคลอริก (HCl) 7 N แรงดัน 1.0 v ที่อุณหภูมิ 70 °C

แรงดัน (V)	เวลา (h)	อุณหภูมิ (°C)	กระแสไฟฟ้า(A)			ค่าไฟฟ้า(บาท)		น้ำหนักเศษซีเมนต์คาร์ไบด์ (g)		น้ำหนักที่สูญสลายไป(g)		ผงทังสเตน (g)	
			เฉลี่ยต่ำสุด	เฉลี่ยค่ากลาง	เฉลี่ยสูงสุด	kwh	จำนวนเงิน	เศษเริ่มต้น	เศษเล็กที่คัดออก	น.น.ที่ลดลง	นน.สูญสลายในสารละลาย	ถังทำงาน	ถังพัก
0	0	0	0	0	0	0	0	1500	0	0	0	0	0
1.0	12	69.76	1.31	1.79	2.28	16.4		1430		70			
1.0	24	69.76	2.12	2.75	3.17	31.9		1330		100			
1.0	36	69.84	2.73	2.99	3.25	49.3		1240		90			
1.0	48	69.88	2.19	2.95	3.71	65.3		1155	54	85		230	36.78
Total		**69.81**				**65.3**	**160.95**	**1155**	**54**	**345**	**24.22**		**266.78**

เศษเล็กที่คัดออก ขนาด Ø < 2 mm.

ตารางที่ ก. 24 การทดลองย่อยสลายเศษซีเมนต์ทังสเตนคาร์ไบด์ด้วยกรดไฮโดรคลอริก 1 N แรงดัน 0.2 V ที่อุณหภูมิ 50 ºC

แรงดัน (V)	เวลา (h)	อุณหภูมิ (°C)	กระแสไฟฟ้า(A)			ค่าไฟฟ้า(บาท)		น้ำหนักเศษซีเมนต์คาร์ไบด์ (g)		น้ำหนักที่สูญสลายไป(g)		ผงทังสเตน (g)	
			เฉลี่ยต่ำสุด	เฉลี่ยค่ากลาง	เฉลี่ยสูงสุด	kwh	จำนวนเงิน	เศษเริ่มต้น	เศษเล็กที่คัดออก	น.น.ที่ลดลง	นน.สูญสลายในสารละลาย	ถังทำงาน	ถังพัก
0	0	0	0	0	0	0	0	1500	0	0	0	0	0
0.2	12	49.24	0.26	0.32	0.38	8.3		1460		40			
0.2	24	49.44	0.26	0.35	0.41	15.7		1420		40			
0.2	36	49.40	0.17	0.25	0.33	23.6		1390		30			
0.2	48	49.44	0.20	0.25	0.31	31.4		1360	5	30		90	20
Total		**49.38**				**31.4**	**77.40**	**1360**	**5**	**140**	**25**		**110**

เศษเล็กที่คัดออก ขนาด Ø < 2 mm.

ตารางที่ ก. 25 การทดลองย่อยสลายเศษซีเมนต์ทังสเตนคาร์ไบด์ด้วยกรดไฮโดรคลอริก 1 N แรงดัน 0.2 V ที่อุณหภูมิ 70 ºC

แรงดัน (V)	เวลา (h)	อุณหภูมิ (°C)	กระแสไฟฟ้า(A)			ค่าไฟฟ้า(บาท)		น้ำหนักเศษซีเมนต์คาร์ไบด์ (g)		น้ำหนักที่สูญสลายไป(g)		ผงทังสเตน (g)	
			เฉลี่ยต่ำสุด	เฉลี่ยค่ากลาง	เฉลี่ยสูงสุด	kwh	จำนวนเงิน	เศษเริ่มต้น	เศษเล็กที่คัดออก	น.น.ที่ลดลง	นน.สูญสลายในสารละลาย	ถังทำงาน	ถังพัก
0	0	0	0	0	0	0	0	1500	0	0	0	0	0
0.2	12	68.88	0.27	0.39	0.50	20.4		1460		40			
0.2	24	68.96	0.25	0.42	0.55	40.1		1440		20			
0.2	36	69.00	0.24	0.40	0.53	59.3		1410		30			
0.2	48	68.84	0.25	0.38	0.50	78.4		1370	2	40		75	10
Total		**68.92**				**78.4**	**193.25**	**1370**	**2**	**130**	**43**		**85**

เศษเล็กที่คัดออก ขนาด Ø < 2 mm.

ตารางที่ ก. 26 การทดลองย่อยสลายเศษซีเมนต์ทังสเตนคาร์ไบด์ด้วยกรดไฮโดรคลอริก 1 N แรงดัน 0.6 V ที่อุณหภูมิ 50 ºC

แรงดัน (V)	เวลา (h)	อุณหภูมิ (°C)	กระแสไฟฟ้า(A)			ค่าไฟฟ้า(บาท)		น้ำหนักเศษซีเมนต์คาร์ไบด์ (g)		น้ำหนักที่สูญสลายไป(g)		ผงทังสเตน (g)	
			เฉลี่ยต่ำสุด	เฉลี่ยค่ากลาง	เฉลี่ยสูงสุด	kwh	จำนวนเงิน	เศษเริ่มต้น	เศษเล็กที่คัดออก	น.น.ที่ลดลง	นน.สูญสลายในสารละลาย	ถังทำงาน	ถังพัก
0	0	0	0	0	0	0	0	1500	0	0	0	0	0
0.2	12	49.24	0.35	0.48	0.60	8.5		1490		10			
0.2	24	49.28	0.26	0.35	0.42	16.5		1460		30			
0.2	36	49.32	0.21	0.31	0.36	23.6		1420		40			
0.2	48	49.48	0.17	0.25	0.33	31.6		1380	5	40		60	20
Total		**49.33**				**31.6**	**77.89**	**1380**	**5**	**120**	**35**		**80**

เศษเล็กที่คัดออก ขนาด Ø < 2 mm.

ตารางที่ ก. 27 การทดลองย่อยสลายเศษซีเมนต์ทังสเตนคาร์ไบด์ด้วยกรดไฮโดรคลอริก 1 N แรงดัน 0.6 V ที่อุณหภูมิ 70 ºC

แรงดัน (V)	เวลา (h)	อุณหภูมิ (°C)	กระแสไฟฟ้า(A)			ค่าไฟฟ้า(บาท)		น้ำหนักเศษซีเมนต์คาร์ไบด์ (g)		น้ำหนักที่สูญสลายไป(g)		ผงทังสเตน (g)	
			เฉลี่ยต่ำสุด	เฉลี่ยค่ากลาง	เฉลี่ยสูงสุด	kwh	จำนวนเงิน	เศษเริ่มต้น	เศษเล็กที่คัดออก	น.น.ที่ลดลง	นน.สูญสลายในสารละลาย	ถังทำงาน	ถังพัก
0	0	0	0	0	0	0	0	1500	0	0	0	0	0
0.2	12	69.88	0.37	0.53	0.70	22.2		1480		20			
0.2	24	69.72	0.44	0.69	0.89	42.9		1470		10			
0.2	36	69.80	0.71	1.05	1.32	62.2		1450		20			
0.2	48	69.76	0.67	0.91	1.15	82		1410	3	40		65	15
Total		**69.79**				**82**	**202.12**	**1410**	**3**	**90**	**7**		**80**

เศษเล็กที่คัดออก ขนาด Ø < 2 mm.

ตารางที่ ก. 28 การทดลองย่อยสลายเศษซีเมนต์ทังสเตนคาร์ไบด์ด้วยกรดไฮโดรคลอริก 1 N แรงดัน 1.4 V ที่อุณหภูมิ 30 ºC

แรงดัน (V)	เวลา (h)	อุณหภูมิ (°C)	กระแสไฟฟ้า(A)			ค่าไฟฟ้า(บาท)		น้ำหนักเศษซีเมนต์คาร์ไบด์ (g)		น้ำหนักที่สูญสลายไป(g)		ผงทังสเตน (g)	
			เฉลี่ยต่ำสุด	เฉลี่ยค่ากลาง	เฉลี่ยสูงสุด	kwh	จำนวนเงิน	เศษเริ่มต้น	เศษเล็กที่คัดออก	น.น.ที่ลดลง	นน.สูญสลายในสารละลาย	ถังทำงาน	ถังพัก
0	0	0	0	0	0	0	0	1500	0	0	0	0	0
1.4	12	32.44	0.00	0.85	1.70	0.9		1480		20			
1.4	24	31.56	0.00	0.50	0.96	1.8		1475		5			
1.4	36	32.68	0.00	0.53	1.03	2.8		1470		5			
1.4	48	31.32	0.00	0.54	1.07	4.3		1460	1	10		17	14
Total		**32.00**				**4.3**	**10.60**	**1460**	**1**	**40**	**8**		**31**

เศษเล็กที่คัดออก ขนาด Ø < 2 mm.

ตารางที่ ก. 29 การทดลองย่อยสลายเศษซีเมนต์ทังสเตนคาร์ไบด์ด้วยกรดไฮโดรคลอริก 3 N แรงดัน 1.4 V ที่อุณหภูมิ 30 ºC

แรงดัน (V)	เวลา (h)	อุณหภูมิ (°C)	กระแสไฟฟ้า(A)			ค่าไฟฟ้า(บาท)		น้ำหนักเศษซีเมนต์คาร์ไบด์ (g)		น้ำหนักที่สูญสลายไป(g)		ผงทังสเตน (g)	
			เฉลี่ยต่ำสุด	เฉลี่ยค่ากลาง	เฉลี่ยสูงสุด	kwh	จำนวนเงิน	เศษเริ่มต้น	เศษเล็กที่คัดออก	น.น.ที่ลดลง	นน.สูญสลายในสารละลาย	ถังทำงาน	ถังพัก
0	0	0	0	0	0	0	0	1500	0	0	0	0	0
1.4	12	31.40	0.00	0.52	1.04	0.8		1495		5			
1.4	24	33.20	0.00	0.47	0.89	2		1490		5			
1.4	36	33.20	0.00	0.50	0.95	3		1485		5			
1.4	48	33.48	0.00	0.50	1.00	4.4		1480	0	5		7	4
Total		**32.82**				**4.4**	**10.85**	**1480**	**0**	**20**	**9**		**11**

เศษเล็กที่คัดออก ขนาด Ø < 2 mm.

ตารางที่ ก. 30 การทดลองย่อยสลายเศษซีเมนต์ทังสเตนคาร์ไบด์ด้วยกรดไฮโดรคลอริก 5 N แรงดัน 1.4 V ที่อุณหภูมิ 30 ºC

แรงดัน (V)	เวลา (h)	อุณหภูมิ (°C)	กระแสไฟฟ้า(A)			ค่าไฟฟ้า(บาท)		น้ำหนักเศษซีเมนต์คาร์ไบด์ (g)		น้ำหนักที่สูญสลายไป(g)		ผงทังสเตน (g)	
			เฉลี่ยต่ำสุด	เฉลี่ยค่ากลาง	เฉลี่ยสูงสุด	kwh	จำนวนเงิน	เศษเริ่มต้น	เศษเล็กที่คัดออก	น.น.ที่ลดลง	นน.สูญสลายในสารละลาย	ถังทำงาน	ถังพัก
0	0	0	0	0	0	0	0	1500	0	0	0	0	0
1.4	12	33.04	0.30	0.84	1.38	0.9		1490		10			
1.4	24	34.32	0.22	0.72	1.12	1.8		1480		10			
1.4	36	36.12	0.18	0.67	1.10	2.8		1470		10			
1.4	48	36	0.07	0.41	0.75	4.2		1460	2	10		13	8
Total		**34.87**				**4.2**	**10.35**	**1460**	**2**	**40**	**17**		**21**

เศษเล็กที่คัดออก ขนาด Ø < 2 mm.

ตารางที่ ก. 31 การทดลองย่อยสลายเศษซีเมนต์ทังสเตนคาร์ไบด์ด้วยกรดไฮโดรคลอริก 7 N แรงดัน 1.4 V ที่อุณหภูมิ 30 ºC

แรงดัน (V)	เวลา (h)	อุณหภูมิ (°C)	กระแสไฟฟ้า(A)			ค่าไฟฟ้า(บาท)		น้ำหนักเศษซีเมนต์คาร์ไบด์ (g)		น้ำหนักที่สูญสลายไป(g)		ผงทังสเตน (g)	
			เฉลี่ยต่ำสุด	เฉลี่ยค่ากลาง	เฉลี่ยสูงสุด	kwh	จำนวนเงิน	เศษเริ่มต้น	เศษเล็กที่คัดออก	น.น.ที่ลดลง	นน.สูญสลายในสารละลาย	ถังทำงาน	ถังพัก
0	0	0	0	0	0	0	0	1500	0	0	0	0	0
1.4	12	35.68	1.02	1.58	2.14	0.9		1480		20			
1.4	24	37.00	0.83	1.34	1.74	1.8		1460		20			
1.4	36	35.64	0.54	0.94	1.23	2.8		1450		10			
1.4	48	34.4	0.56	0.96	1.31	4.3		1420	5	30		17	11
Total		**35.68**				**4.3**	**10.60**	**1420**	**5**	**80**	**47**		**28**

เศษเล็กที่คัดออก ขนาด Ø < 2 mm.

ตารางที่ ก. 32 การทดลองย่อยสลายเศษซีเมนต์ทังสเตนคาร์ไบด์ด้วยกรดไฮโดรคลอริก 7 N แรงดัน 1.8 V ที่อุณหภูมิ 30 ºC

แรงดัน (V)	เวลา (h)	อุณหภูมิ (°C)	กระแสไฟฟ้า(A)			ค่าไฟฟ้า(บาท)		น้ำหนักเศษซีเมนต์คาร์ไบด์ (g)		น้ำหนักที่สูญสลายไป(g)		ผงทังสเตน (g)	
			เฉลี่ยต่ำสุด	เฉลี่ยค่ากลาง	เฉลี่ยสูงสุด	kwh	จำนวนเงิน	เศษเริ่มต้น	เศษเล็กที่คัดออก	น.น.ที่ลดลง	นน.สูญสลายในสารละลาย	ถังทำงาน	ถังพัก
0	0	0	0	0	0	0	0	1500	0	0	0	0	0
1.4	12	33.32	0.86	1.80	2.73	0.9		1470		30			
1.4	24	35.48	1.50	1.74	2.57	1.9		1450		20			
1.4	36	36.16	2.32	1.63	2.52	2.9		1420		30			
1.4	48	36.08	0.82	1.62	2.42	4.4		1400	7	20		22	17
Total		**35.26**				**4.4**	**10.85**	**1400**	**7**	**100**	**54**		**39**

เศษเล็กที่คัดออก ขนาด Ø < 2 mm.

ตารางที่ ก. 33 การทดลองย่อยสลายเศษซีเมนต์ทังสเตนคาร์ไบด์ด้วยกรดไฮโดรคลอริก 7 N แรงดัน 2.2 V ที่อุณหภูมิ 30 ºC

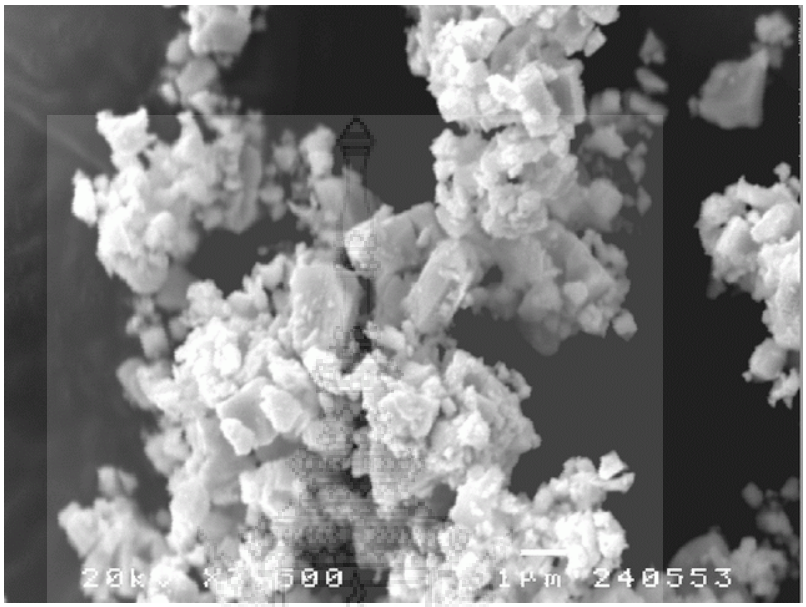
แรงดัน (V)	เวลา (h)	อุณหภูมิ (°C)	กระแสไฟฟ้า(A)			ค่าไฟฟ้า(บาท)		น้ำหนักเศษซีเมนต์คาร์ไบด์ (g)		น้ำหนักที่สูญสลายไป(g)		ผงทังสเตน (g)	
			เฉลี่ยต่ำสุด	เฉลี่ยค่ากลาง	เฉลี่ยสูงสุด	kwh	จำนวนเงิน	เศษเริ่มต้น	เศษเล็กที่คัดออก	น.น.ที่ลดลง	นน.สูญสลายในสารละลาย	ถังทำงาน	ถังพัก
0	0	0	0	0	0	0	0	1500	0	0	0	0	0
1.4	12	33.96	0.13	1.42	2.72	0.9		1480		20			
1.4	24	35.00	0.55	1.90	3.06	1.9		1460		20			
1.4	36	35.40	0.60	1.80	2.89	2.9		1440		20			
1.4	48	34.08	0.59	1.59	2.60	4.5		1420	5	20		45	24
Total		**34.61**				**4.5**	**11.09**	**1420**	**5**	**80**	**6**		**69**

เศษเล็กที่คัดออก ขนาด Ø < 2 mm.

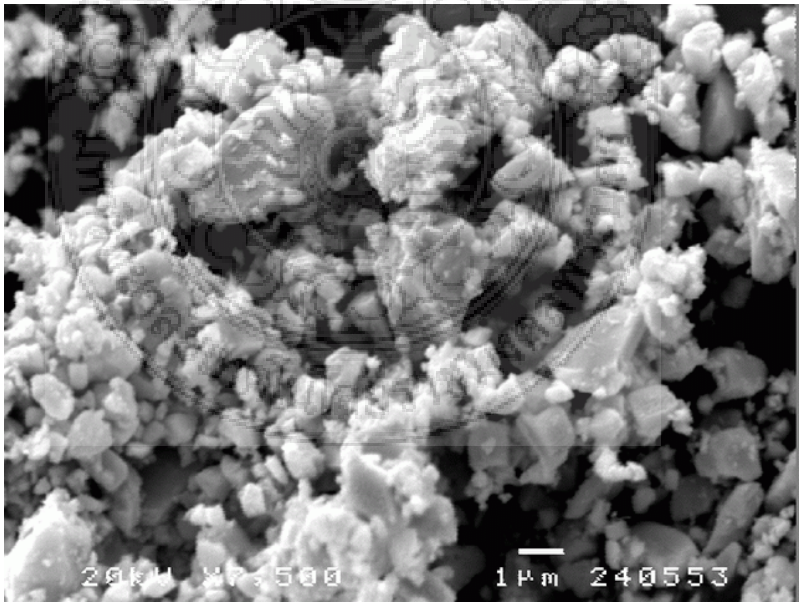
ภาคผนวก ข

ผลการตรวจวิเคราะห์คุณสมบัติโลหะผงทังสเตนคาร์ไบด์

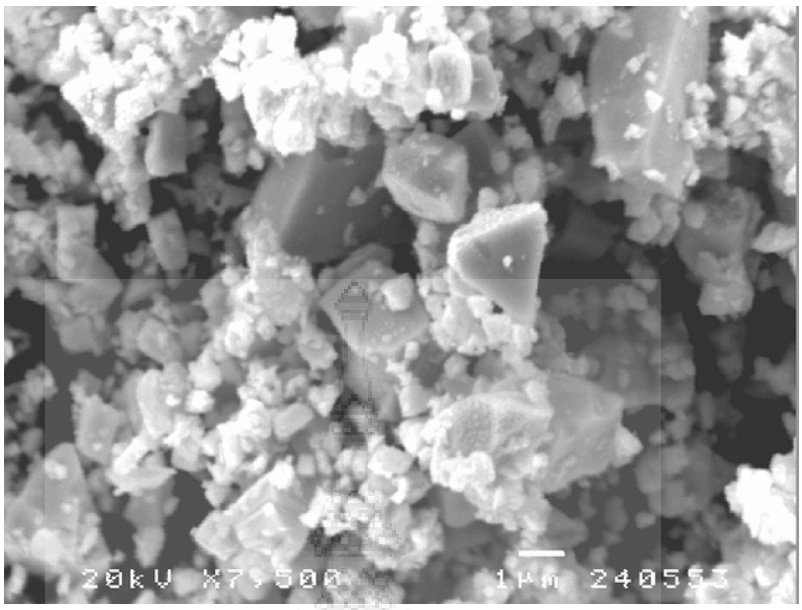
1. ผลการทดสอบโลหะผงทังสเตนคาร์ไบด์ด้วยเทคนิค Scanning Electron Microscope (SEM)



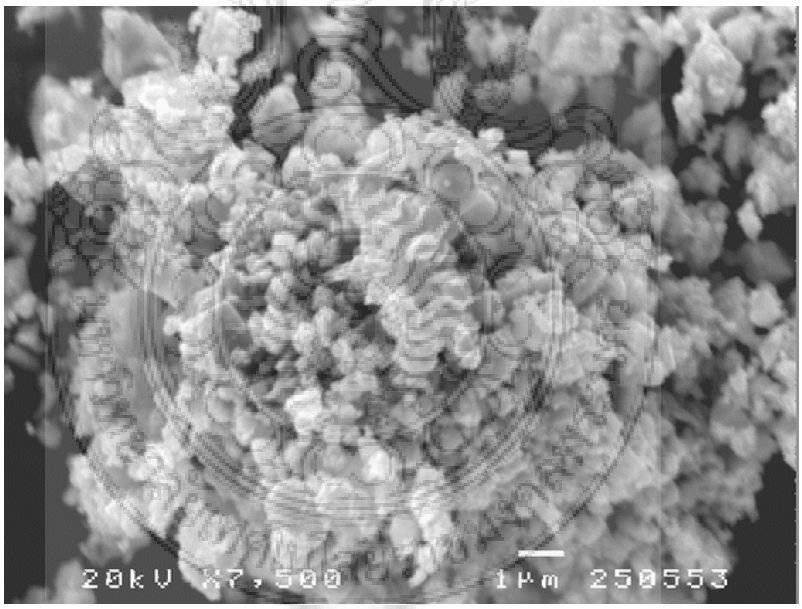
ภาพที่ ข.1 โลหะผงหลังการแยกสลาย กำลังขยาย 7,500 เท่า แยกสลายด้วยปัจจัยแรงดันไฟฟ้า 0.2 V อุณหภูมิ 30 ºC สารละลาย HCl ความเข้มข้น 3 N



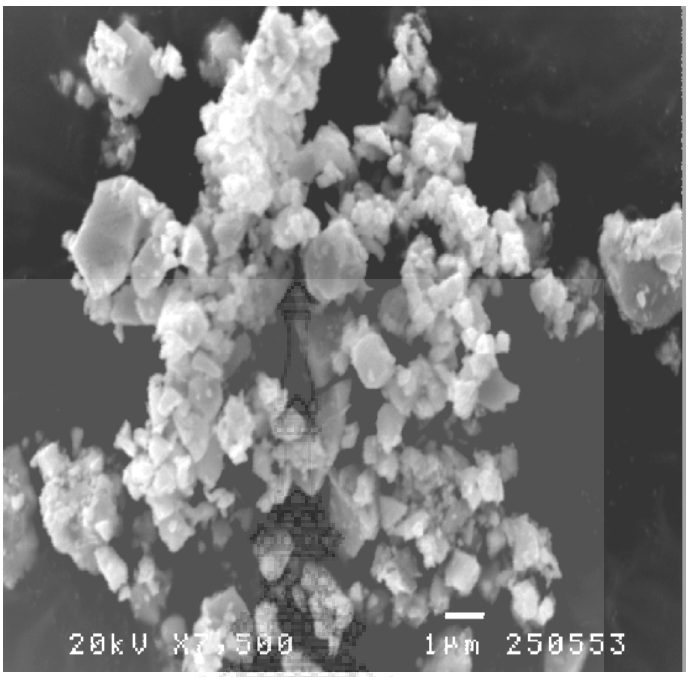
ภาพที่ ข.2 โลหะผงหลังการแยกสลาย กำลังขยาย 7,500 เท่า แยกสลายด้วยปัจจัยแรงดันไฟฟ้า 0.2 V อุณหภูมิ 30 ºC สารละลาย HCl ความเข้มข้น 5 N



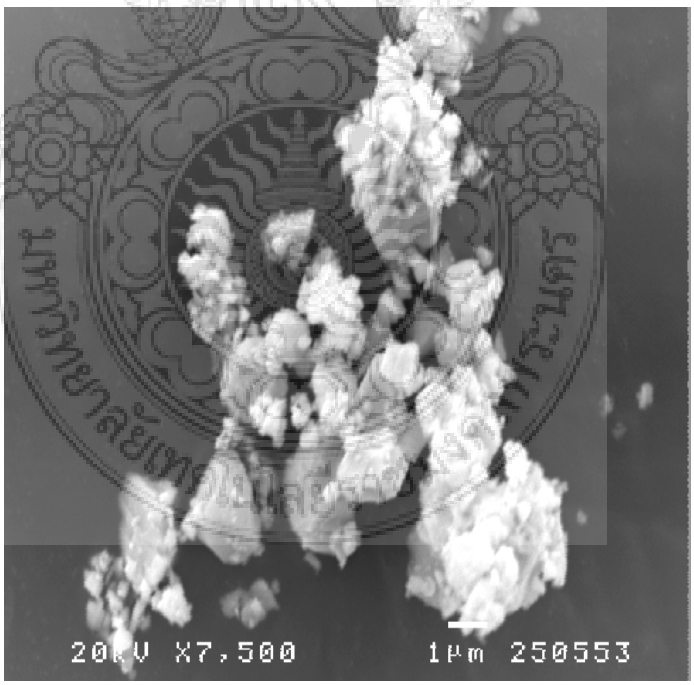
ภาพที่ ข.3 โลหะผงหลังการแยกสลาย กำลังขยาย 7,500 เท่า แยกสลายด้วยปัจจัยแรงดันไฟฟ้า 0.2 V อุณหภูมิ 30 ºC สารละลาย HCl ความเข้มข้น 7 N



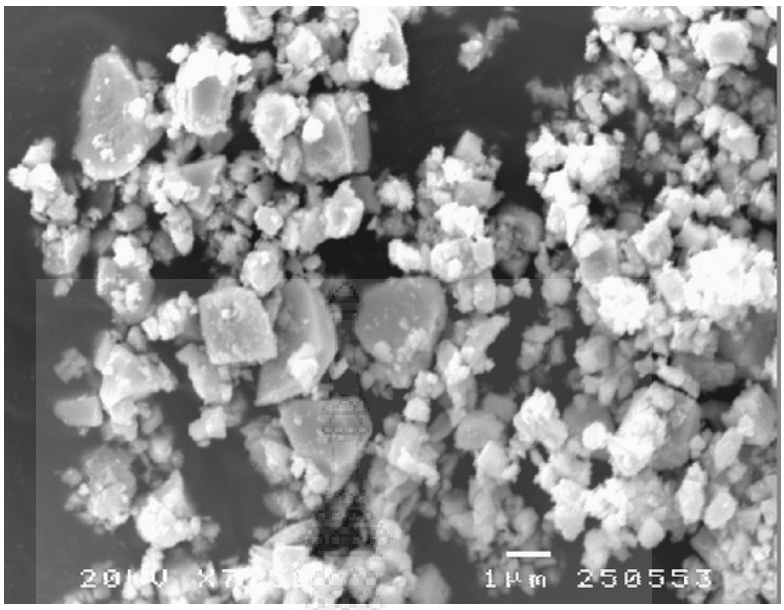
ภาพที่ ข.4 โลหะผงหลังการแยกสลาย กำลังขยาย 7,500 เท่า แยกสลายด้วยปัจจัยแรงดันไฟฟ้า 0.6 V อุณหภูมิ 30 ºC สารละลาย HCl ความเข้มข้น 3 N



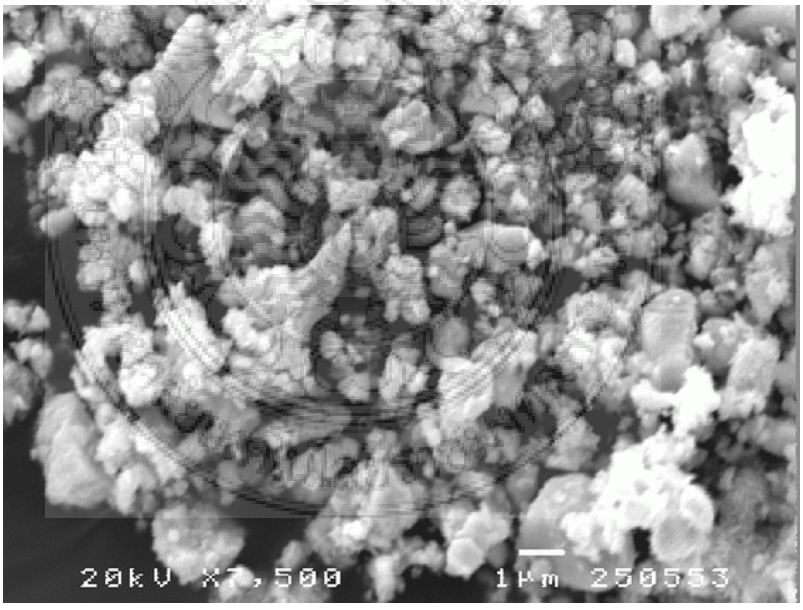
ภาพที่ ข.5 โลหะผงหลังการแยกสลาย กำลังขยาย 7,500 เท่า แยกสลายด้วยปัจจัยแรงดันไฟฟ้า 0.6 V อุณหภูมิ 30 ºC สารละลาย HCl ความเข้มข้น 5 N



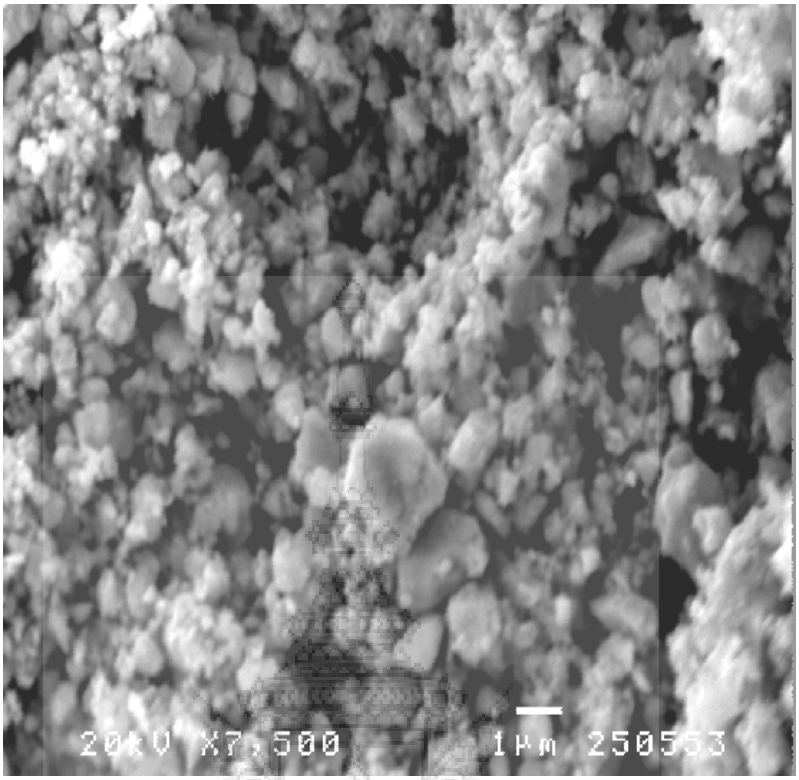
ภาพที่ ข.6 โลหะผงหลังการแยกสลาย กำลังขยาย 7,500 เท่า แยกสลายด้วยปัจจัยแรงดันไฟฟ้า 0.6 V อุณหภูมิ 30 ºC สารละลาย HCl ความเข้มข้น 7 N



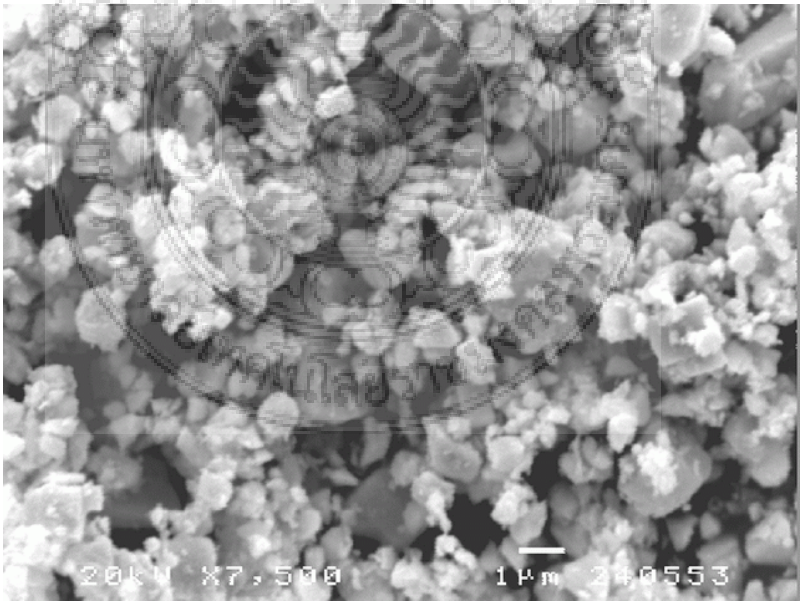
ภาพที่ ข.7 โลหะผงหลังการแยกสลาย กำลังขยาย 7,500 เท่า แยกสลายด้วยปัจจัยแรงดันไฟฟ้า 1.0 V อุณหภูมิ 50 ºC สารละลาย HCl ความเข้มข้น 3 N



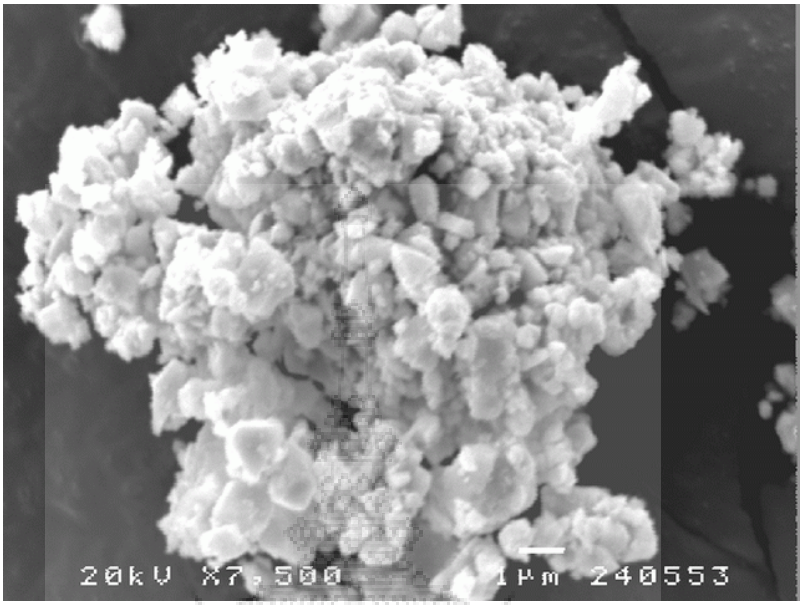
ภาพที่ ข.8 โลหะผงหลังการแยกสลาย กำลังขยาย 3,500 เท่า แยกสลายด้วยปัจจัยแรงดันไฟฟ้า 1.0 V อุณหภูมิ 50 ºC สารละลาย HCl ความเข้มข้น 5 N



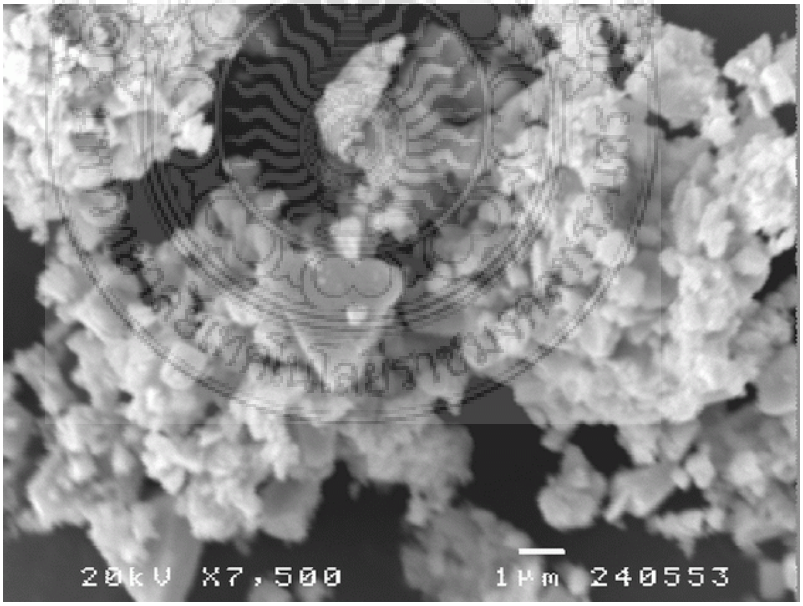
ภาพที่ ข.9 โลหะผงหลังการแยกสลาย กำลังขยาย 7,500 เท่า แยกสลายด้วยปัจจัยแรงดันไฟฟ้า 1.0 V อุณหภูมิ 50 ºC สารละลาย HCl ความเข้มข้น 7 N



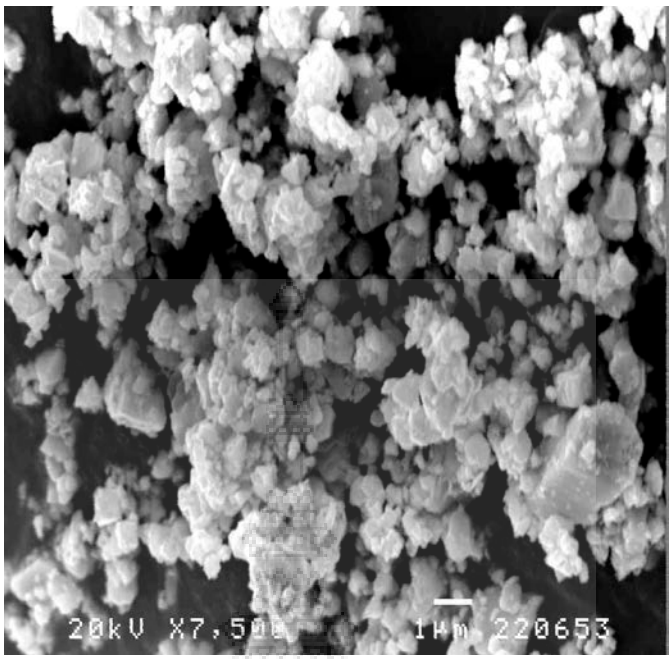
ภาพที่ ข.10 โลหะผงหลังการแยกสลาย กำลังขยาย 7,500 เท่า แยกสลายด้วยปัจจัยแรงดันไฟฟ้า 1.0 V อุณหภูมิ 70 ºC สารละลาย HCl ความเข้มข้น 3 N



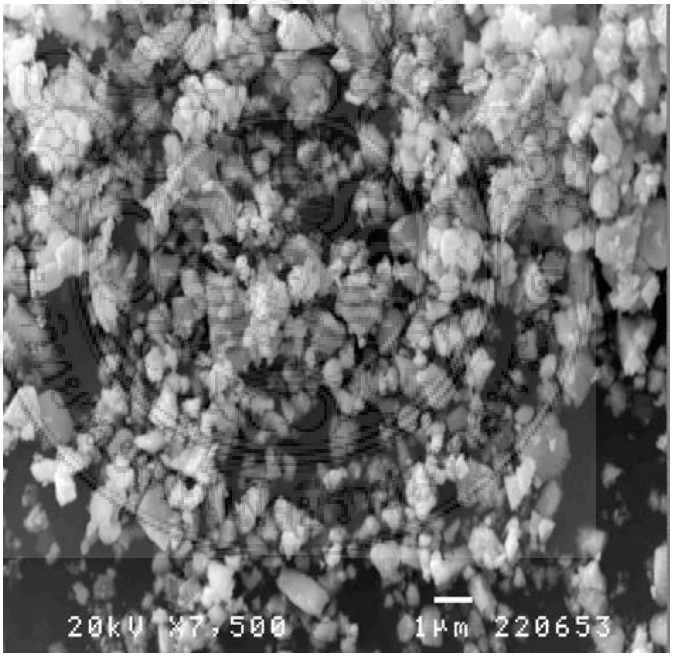
ภาพที่ ข.11 โลหะผงหลังการแยกสลาย กำลังขยาย 7,500 เท่า แยกสลายด้วยปัจจัยแรงดันไฟฟ้า 1.0 V อุณหภูมิ 70 ºC สารละลาย HCl ความเข้มข้น 5 N



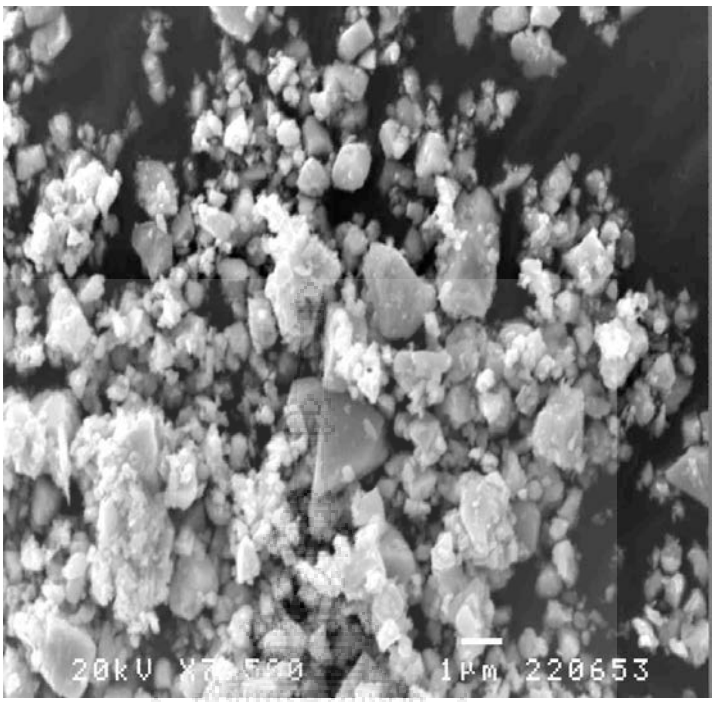
ภาพที่ ข.12 โลหะผงหลังการแยกสลาย กำลังขยาย 7,500 เท่า แยกสลายด้วยปัจจัยแรงดันไฟฟ้า 1.0 V อุณหภูมิ 70 ºC สารละลาย HCl ความเข้มข้น 7 N



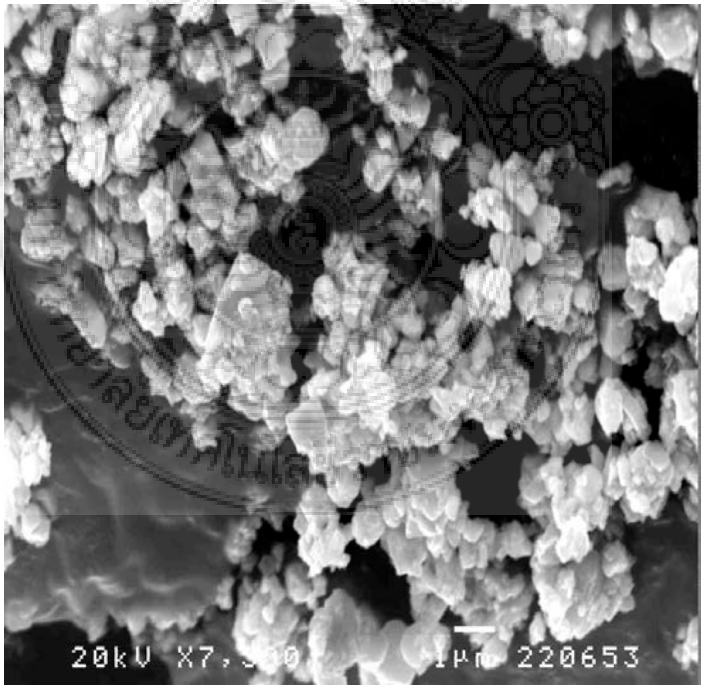
ภาพที่ ข.13 โลหะผงหลังการแยกสลาย กำลังขยาย 7,500 เท่า แยกสลายด้วยปัจจัยแรงดันไฟฟ้า 0.2 V อุณหภูมิ 50 ºC สารละลาย HCl ความเข้มข้น 1 N



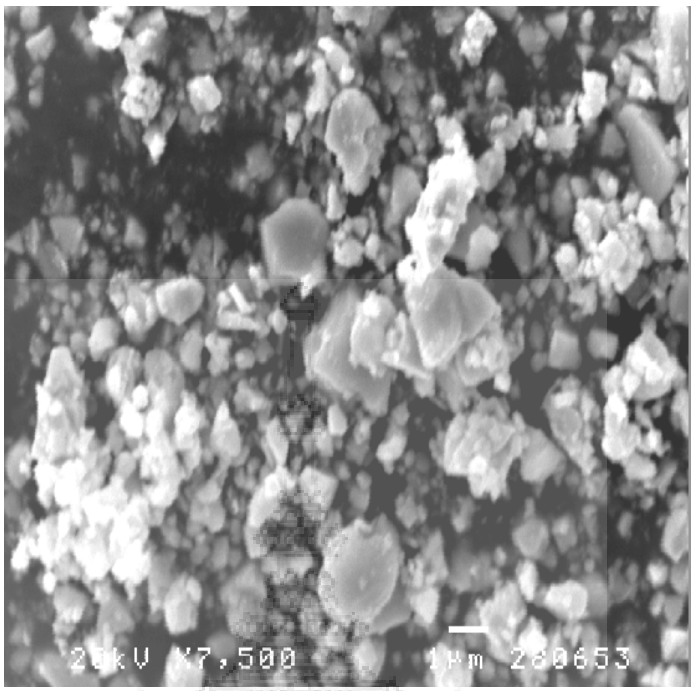
ภาพที่ ข.14 โลหะผงหลังการแยกสลาย กำลังขยาย 7,500 เท่า แยกสลายด้วยปัจจัยแรงดันไฟฟ้า 0.2 V อุณหภูมิ 70 ºC สารละลาย HCl ความเข้มข้น 1 N



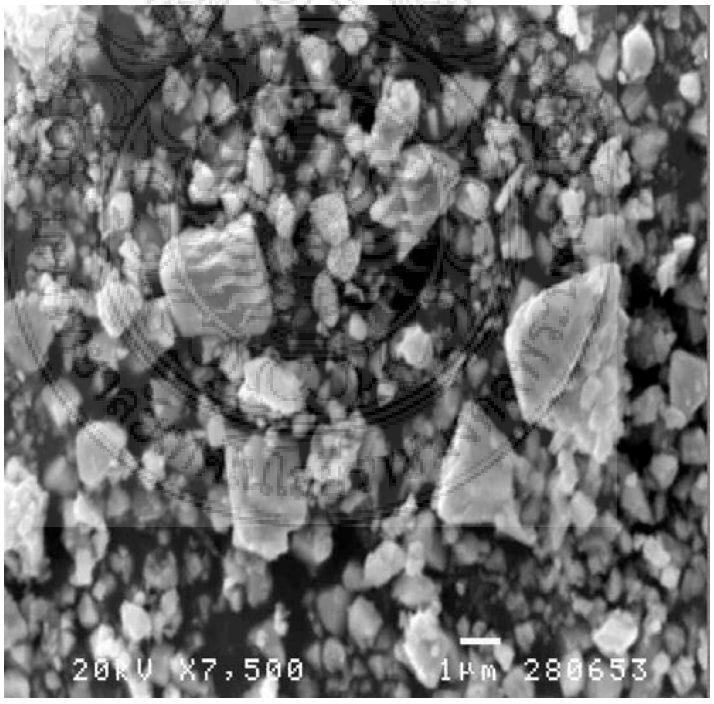
ภาพที่ ข.15 โลหะผงหลังการแยกสลาย กำลังขยาย 7,500 เท่า แยกสลายด้วยปัจจัยแรงดันไฟฟ้า 0.6 V อุณหภูมิ 50 ºC สารละลาย HCl ความเข้มข้น 1 N



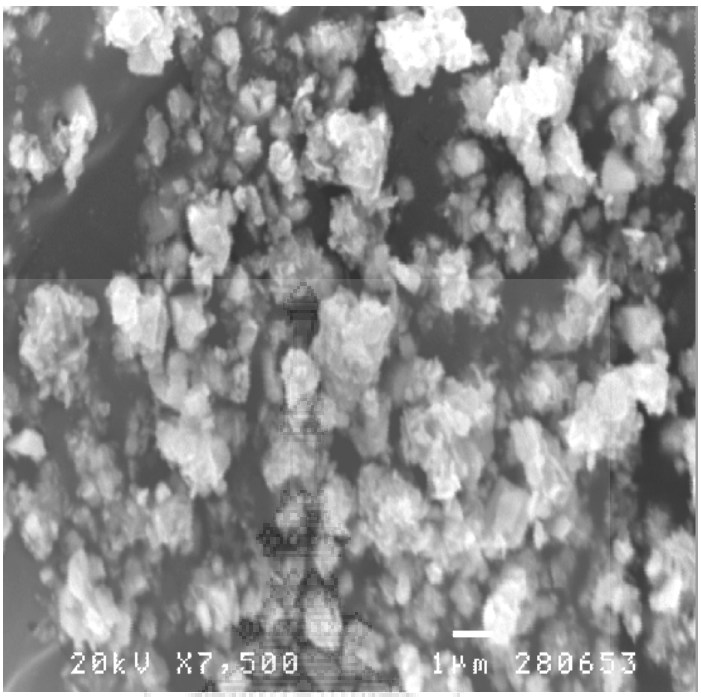
ภาพที่ ข.16 โลหะผงหลังการแยกสลาย กำลังขยาย 7,500 เท่า แยกสลายด้วยปัจจัยแรงดันไฟฟ้า 0.6 V อุณหภูมิ 70 ºC สารละลาย HCl ความเข้มข้น 1 N



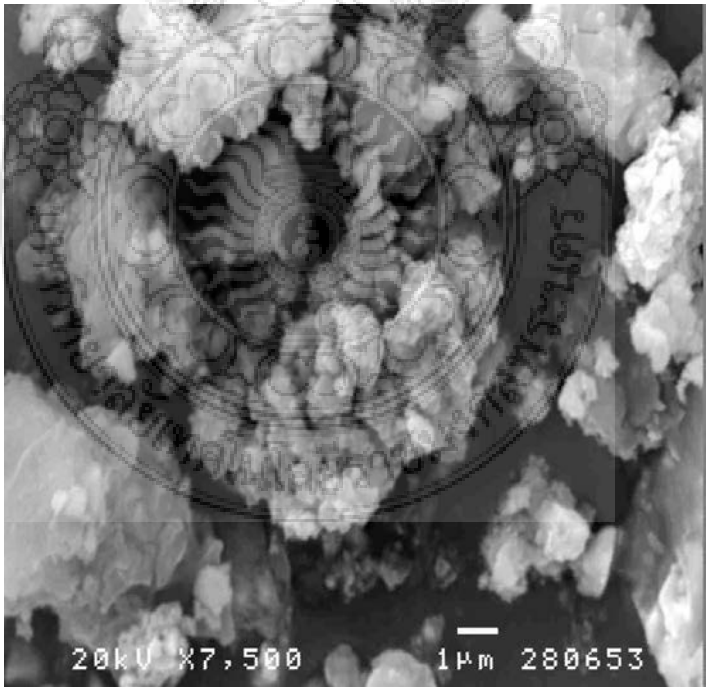
ภาพที่ ข.17 โลหะผงหลังการแยกสลาย กำลังขยาย 7,500 เท่า แยกสลายด้วยปัจจัยแรงดันไฟฟ้า 1.0 V อุณหภูมิ 50 ºC สารละลาย HCl ความเข้มข้น 1 N



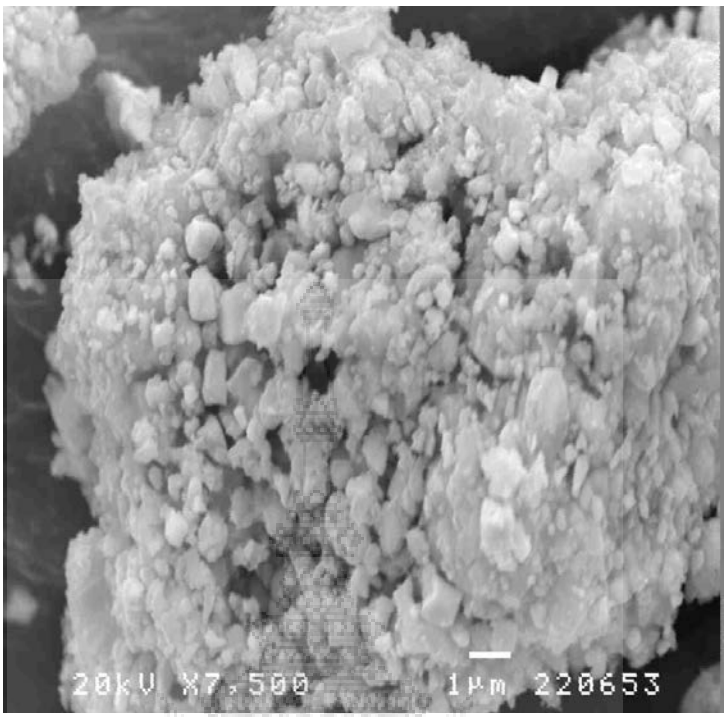
ภาพที่ ข.18 โลหะผงหลังการแยกสลาย กำลังขยาย 7,500 เท่า แยกสลายด้วยปัจจัยแรงดันไฟฟ้า 1.0 V อุณหภูมิ 70 ºC สารละลาย HCl ความเข้มข้น 1 N



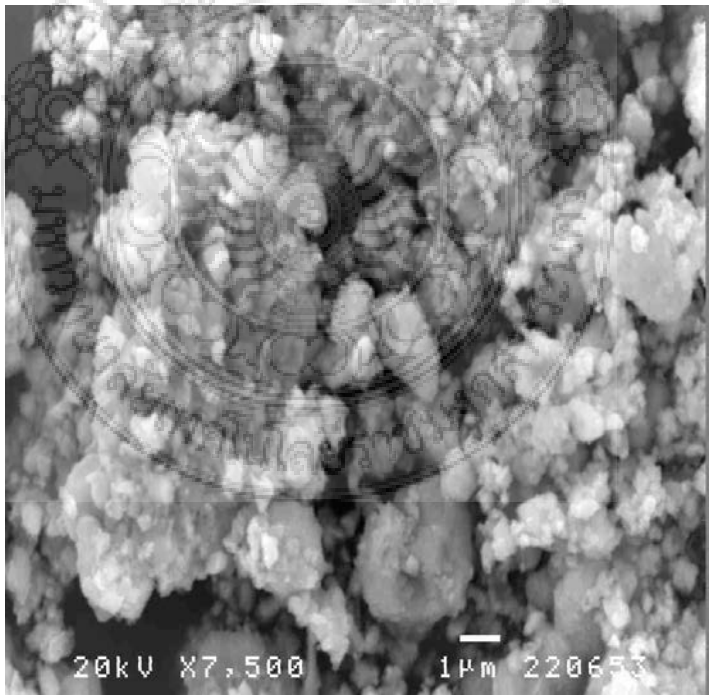
ภาพที่ ข.19 โลหะผงหลังการแยกสลาย กำลังขยาย 7,500 เท่า แยกสลายด้วยปัจจัยแรงดันไฟฟ้า 1.4 V อุณหภูมิ 30 ºC สารละลาย HCl ความเข้มข้น 1 N



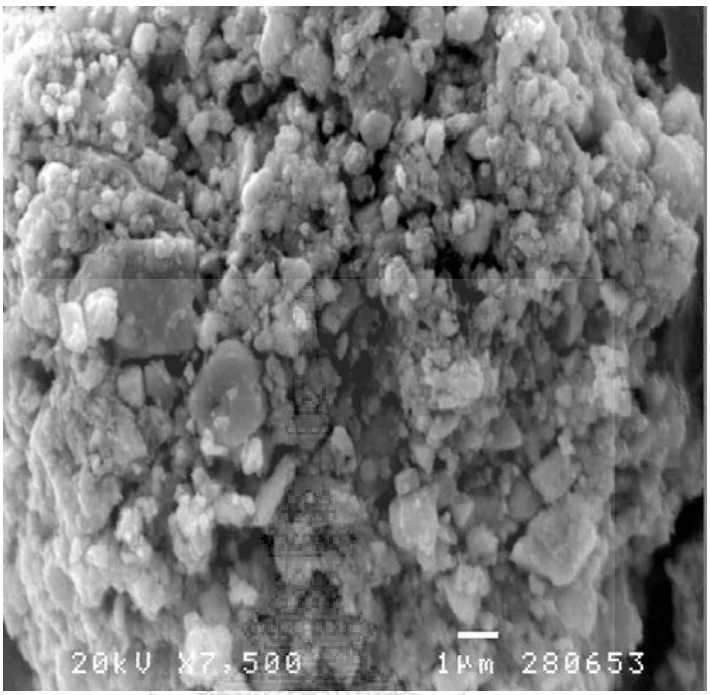
ภาพที่ ข.20 โลหะผงหลังการแยกสลาย กำลังขยาย 7,500 เท่า แยกสลายด้วยปัจจัยแรงดันไฟฟ้า 1.4 V อุณหภูมิ 30 ºC สารละลาย HCl ความเข้มข้น 3 N



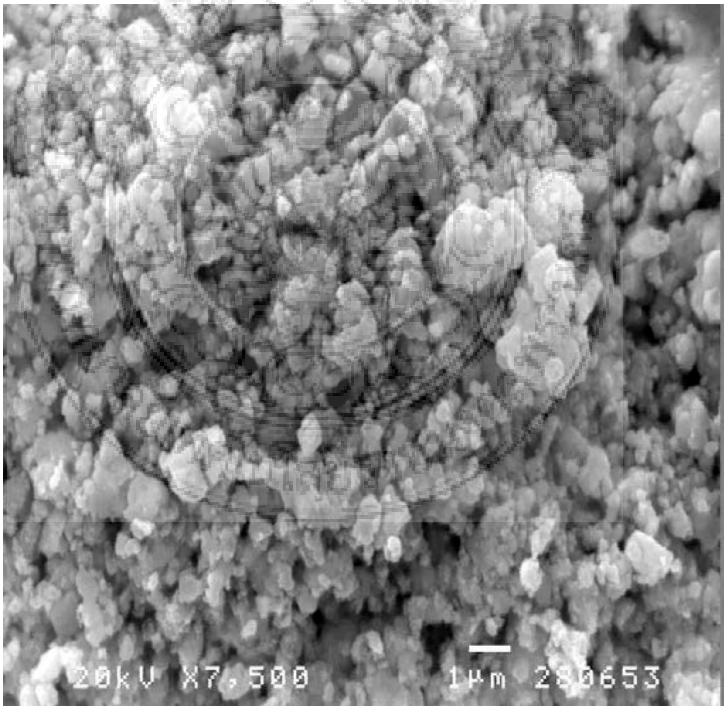
ภาพที่ ข.21 โลหะผงหลังการแยกสลาย กำลังขยาย 7,500 เท่า แยกสลายด้วยปัจจัยแรงดันไฟฟ้า 1.4 V อุณหภูมิ 30 ºC สารละลาย HCl ความเข้มข้น 5 N



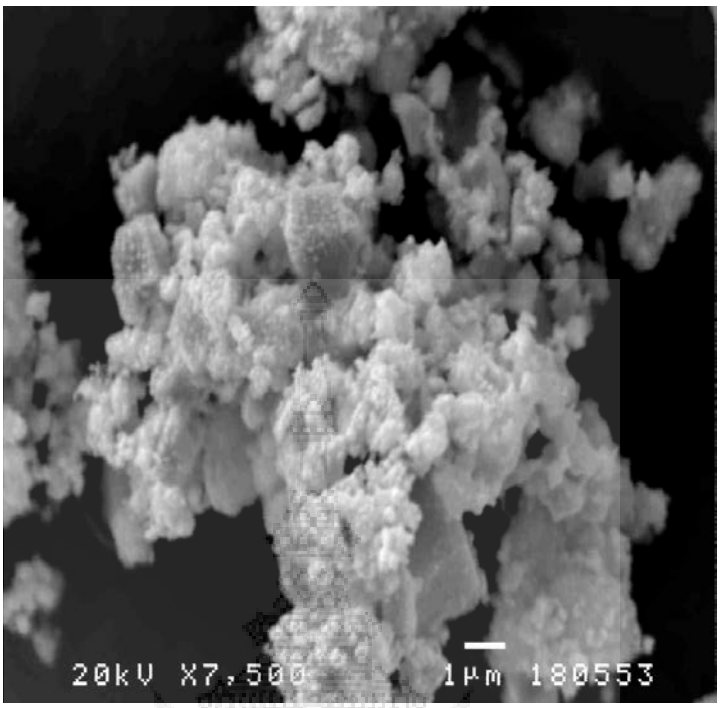
ภาพที่ ข.22 โลหะผงหลังการแยกสลาย กำลังขยาย 7,500 เท่า แยกสลายด้วยปัจจัยแรงดันไฟฟ้า 1.4 V อุณหภูมิ 30 ºC สารละลาย HCl ความเข้มข้น 7 N



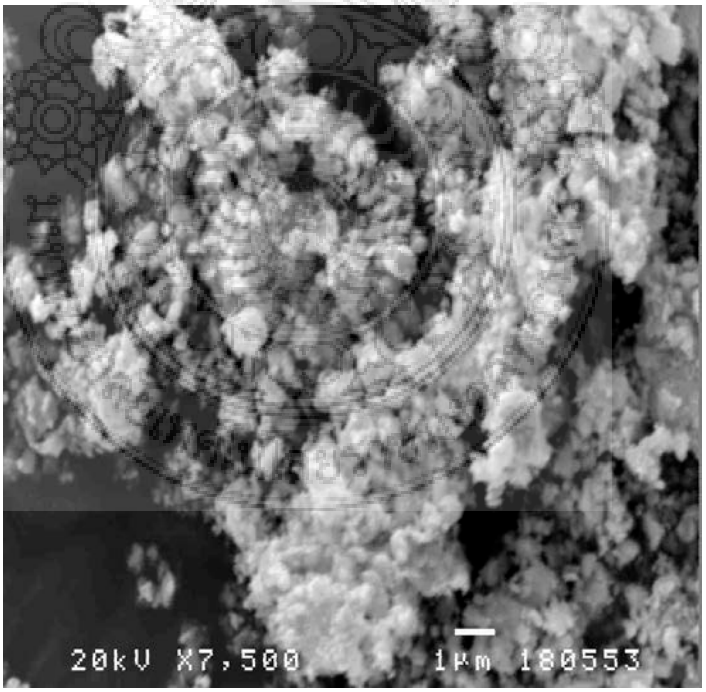
ภาพที่ ข.23 โลหะผงหลังการแยกสลาย กำลังขยาย 7,500 เท่า แยกสลายด้วยปัจจัยแรงดันไฟฟ้า 1.8 V อุณหภูมิ 30 ºC สารละลาย HCl ความเข้มข้น 7 N



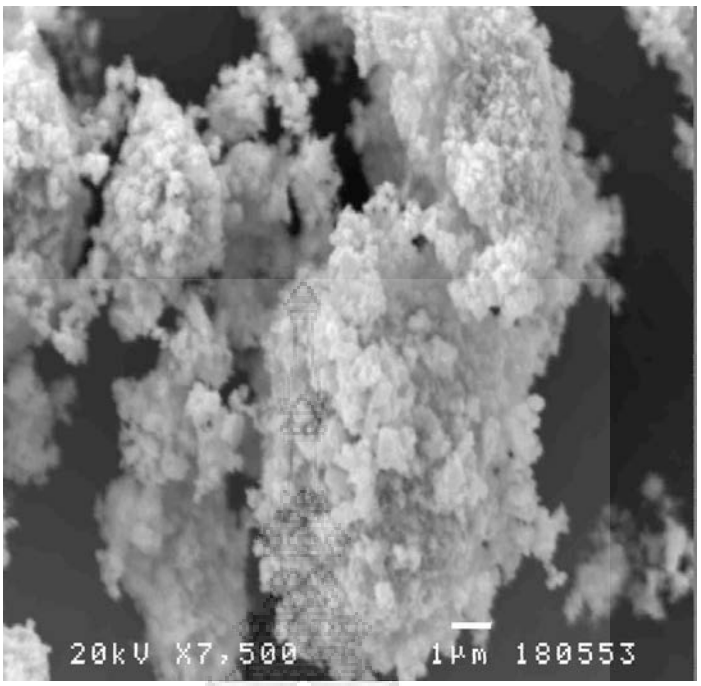
ภาพที่ ข.24 โลหะผงหลังการแยกสลาย กำลังขยาย 7,500 เท่า แยกสลายด้วยปัจจัยแรงดันไฟฟ้า 2.2 V อุณหภูมิ 30 ºC สารละลาย HCl ความเข้มข้น 7 N



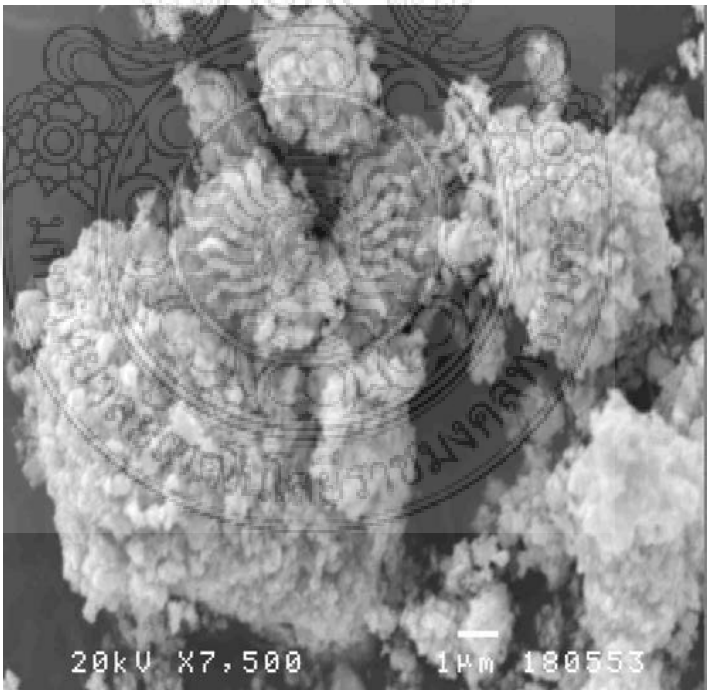
ภาพที่ ข.25 โลหะผงหลังการแยกสลาย กำลังขยาย 7,500 เท่า แยกสลายด้วยปัจจัยแรงดันไฟฟ้า 1.0 V อุณหภูมิ 30 ºC สารละลาย HCl ความเข้มข้น 3 N



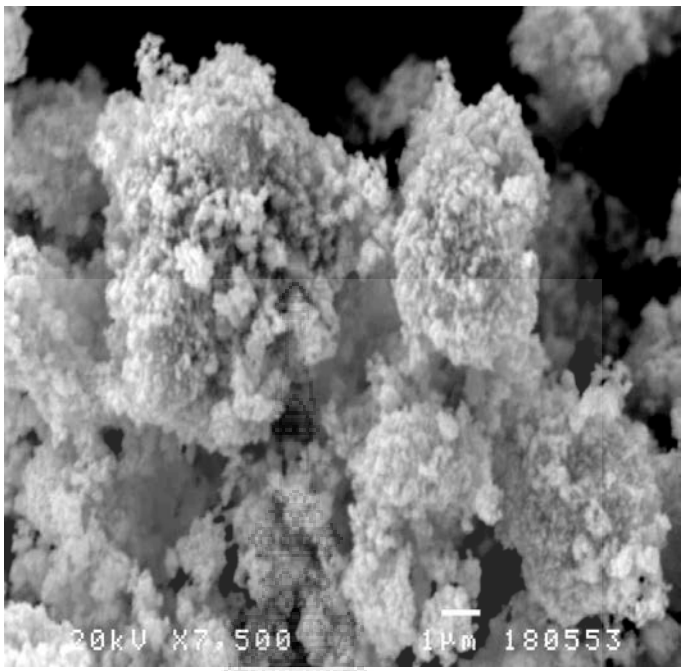
ภาพที่ ข.26 โลหะผงหลังการบด กำลังขยาย 7,500 เท่า แยกสลายด้วยปัจจัยแรงดันไฟฟ้า 1.0 V อุณหภูมิ 30 ºC สารละลาย HCl ความเข้มข้น 3 N



ภาพที่ ข.27 โลหะผงหลังการบด กำลังขยาย 7,500 เท่า แยกสลายด้วยปัจจัยแรงดันไฟฟ้า 1.0 V อุณหภูมิ 30 ºC สารละลาย HCl ความเข้มข้น 5 N

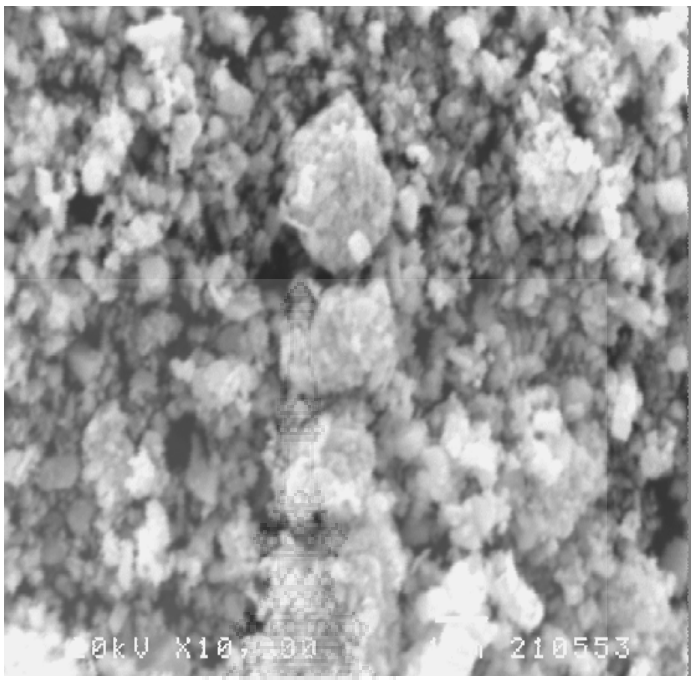


ภาพที่ ข.28 โลหะผงหลังการบด กำลังขยาย 7,500 เท่า แยกสลายด้วยปัจจัยแรงดันไฟฟ้า 1.0 V อุณหภูมิ 30 ºC สารละลาย HCl ความเข้มข้น 7 N (ไม่กรองก่อนบด)

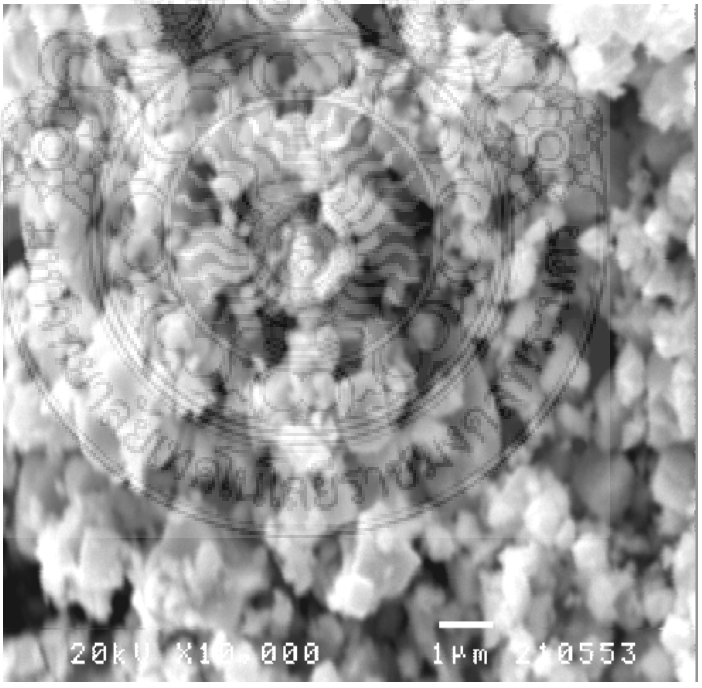


ภาพที่ ข.29 โลหะผงหลังการบด กำลังขยาย 7,500 เท่า แยกสลายด้วยปัจจัยแรงดันไฟฟ้า 1.0 V อุณหภูมิ 30 ºC สารละลาย HCl ความเข้มข้น 7 N (กรอง< 26 μm ก่อนบด)

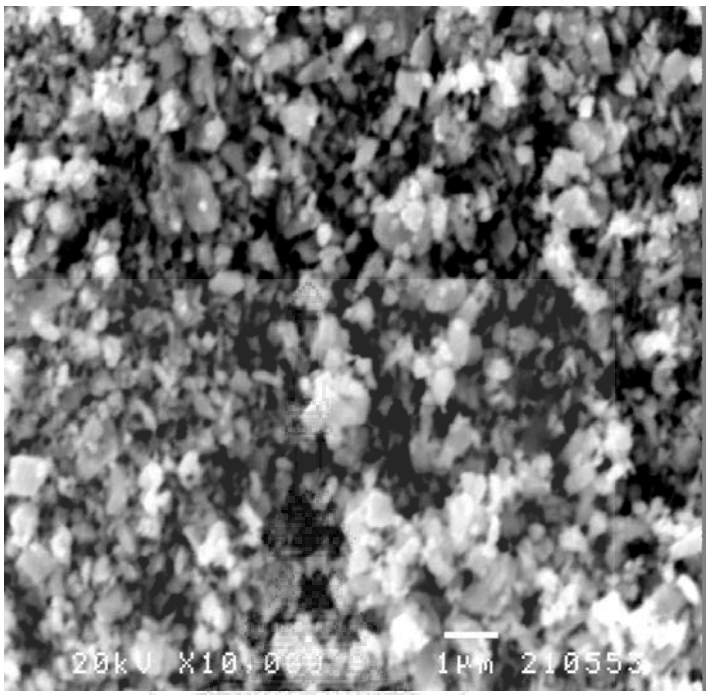
ภาพที่ ข.30 โลหะผงหลังการแยกสลาย กำลังขยาย 10,000 เท่า แยกสลายด้วยปัจจัยแรงดันไฟฟ้า 0.4 V อุณหภูมิ 30 ºC สารละลาย HCl ความเข้มข้น 1 N



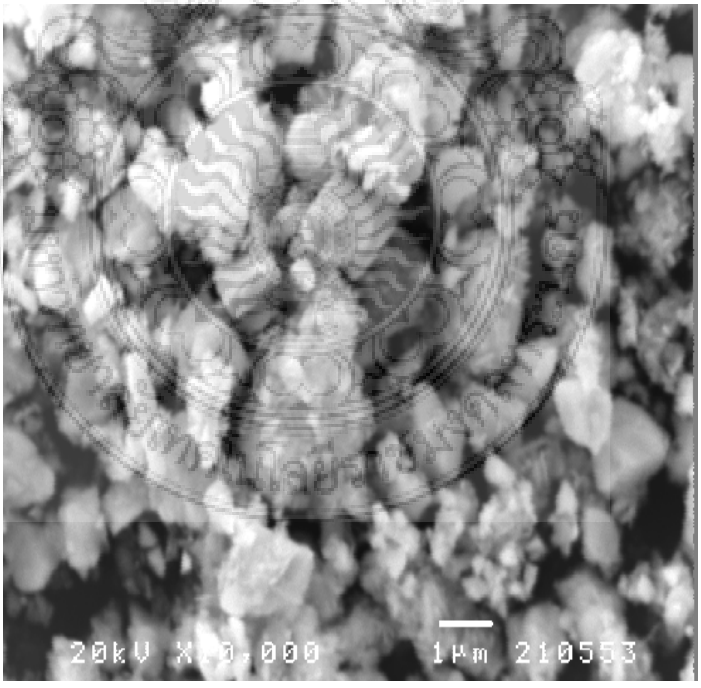
ภาพที่ ข.31 โลหะผงหลังการบด กำลังขยาย 10,000 เท่า แยกสลายด้วยปัจจัยแรงดันไฟฟ้า 0.4 V อุณหภูมิ 30 ºC สารละลาย HCl ความเข้มข้น 1 N



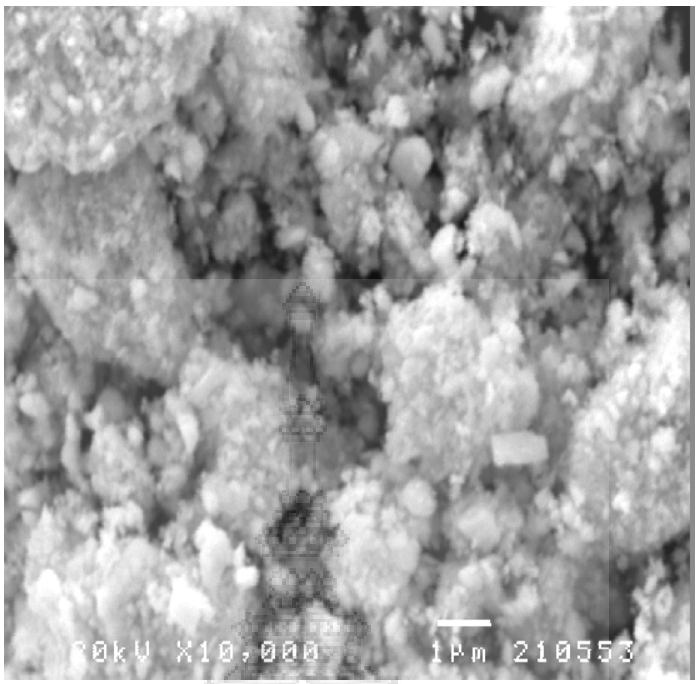
ภาพที่ ข.32 โลหะผงหลังการแยกสลาย กำลังขยาย 10,000 เท่า แยกสลายด้วยปัจจัยแรงดันไฟฟ้า 0.8 V อุณหภูมิ 30 ºC สารละลาย HCl ความเข้มข้น 1 N



ภาพที่ ข.33 โลหะผงหลังการบด กำลังขยาย 10,000 เท่า แยกสลายด้วยปัจจัยแรงดันไฟฟ้า 0.8 V อุณหภูมิ 30 ºC สารละลาย HCl ความเข้มข้น 1 N



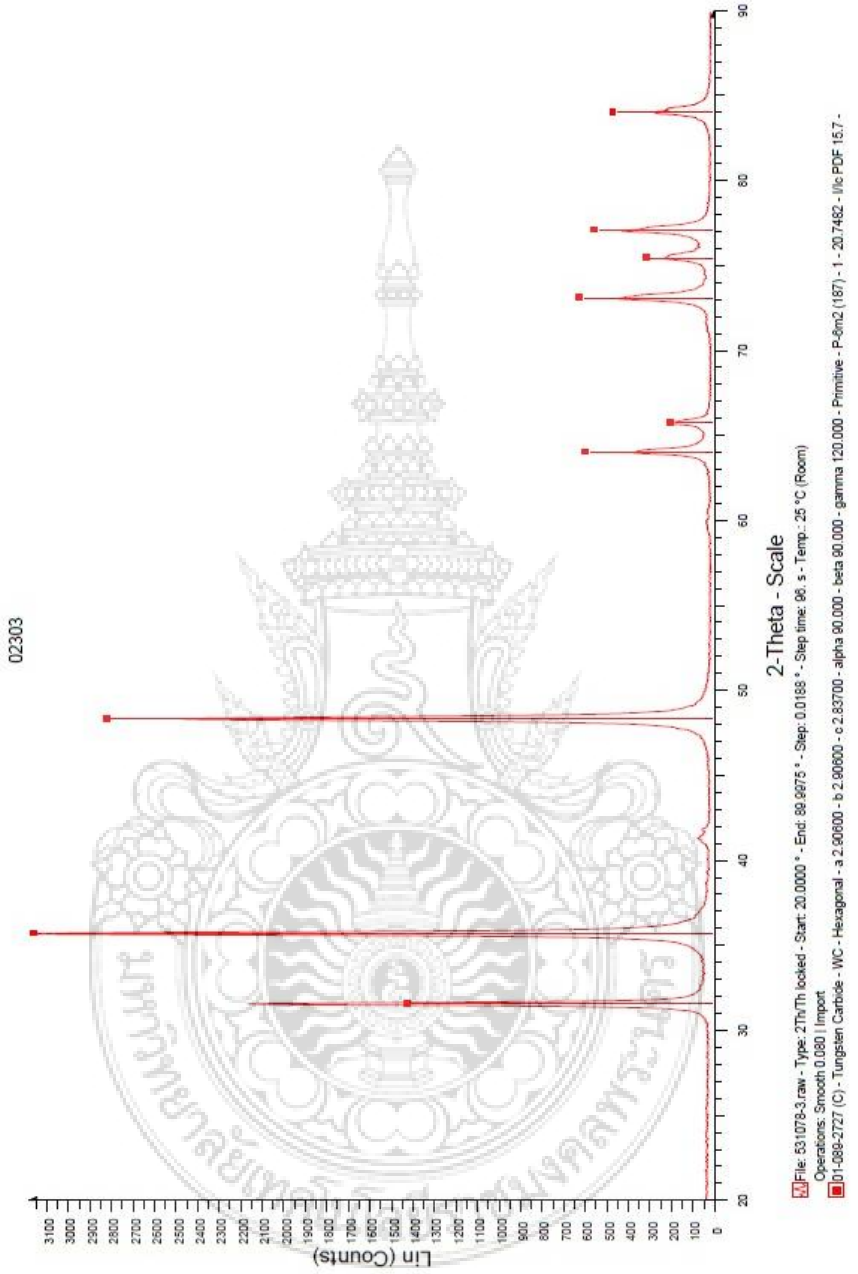
ภาพที่ ข.34 โลหะผงหลังการแยกสลาย กำลังขยาย 10,000 เท่า แยกสลายด้วยปัจจัยแรงดันไฟฟ้า 1.2 V อุณหภูมิ 30 ºC สารละลาย HCl ความเข้มข้น 1 N



ภาพที่ ข.35 โลหะผงหลังการบด กำลังขยาย 10,000 เท่า แยกสลายด้วยปัจจัยแรงดันไฟฟ้า 1.2 V อุณหภูมิ 30 ºC สารละลาย HCl ความเข้มข้น 1 N

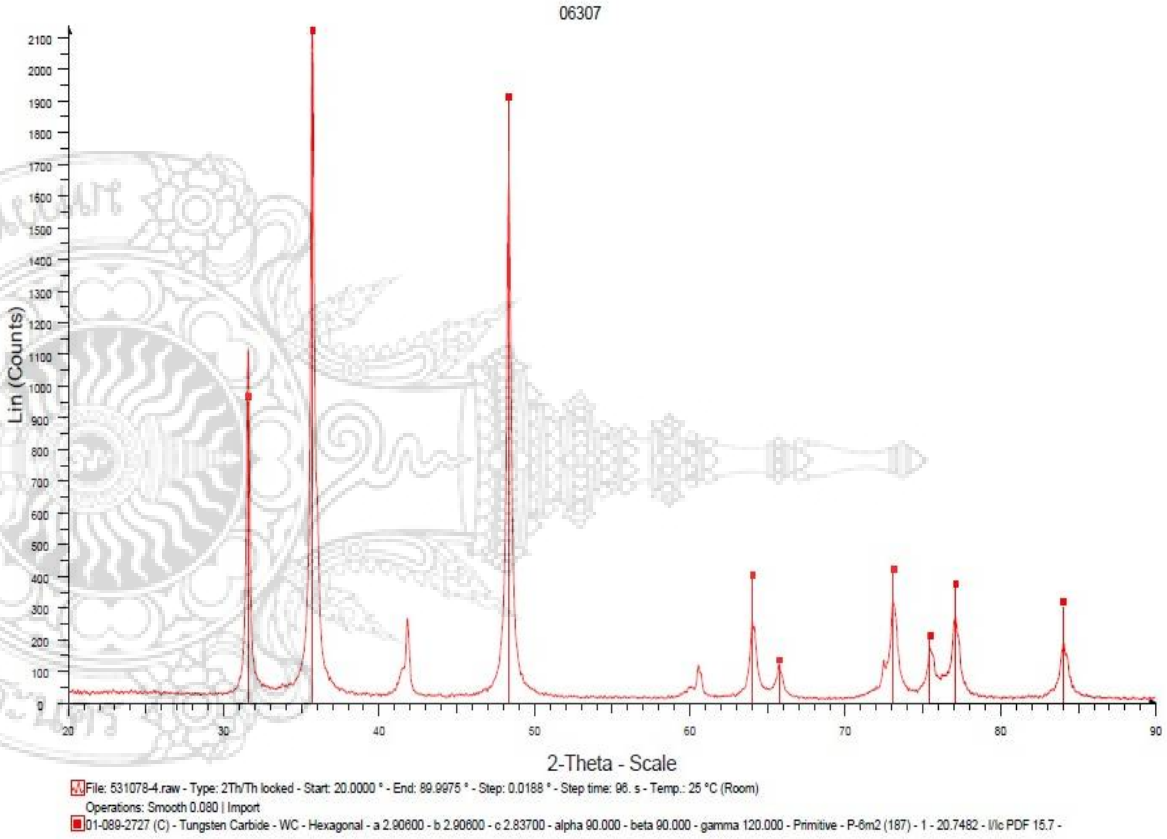
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

2. ผลการทดสอบโลหะผงทังสเตนคาร์ไบด์ด้วยเทคนิค X-Ray Diffract meter (XRD)



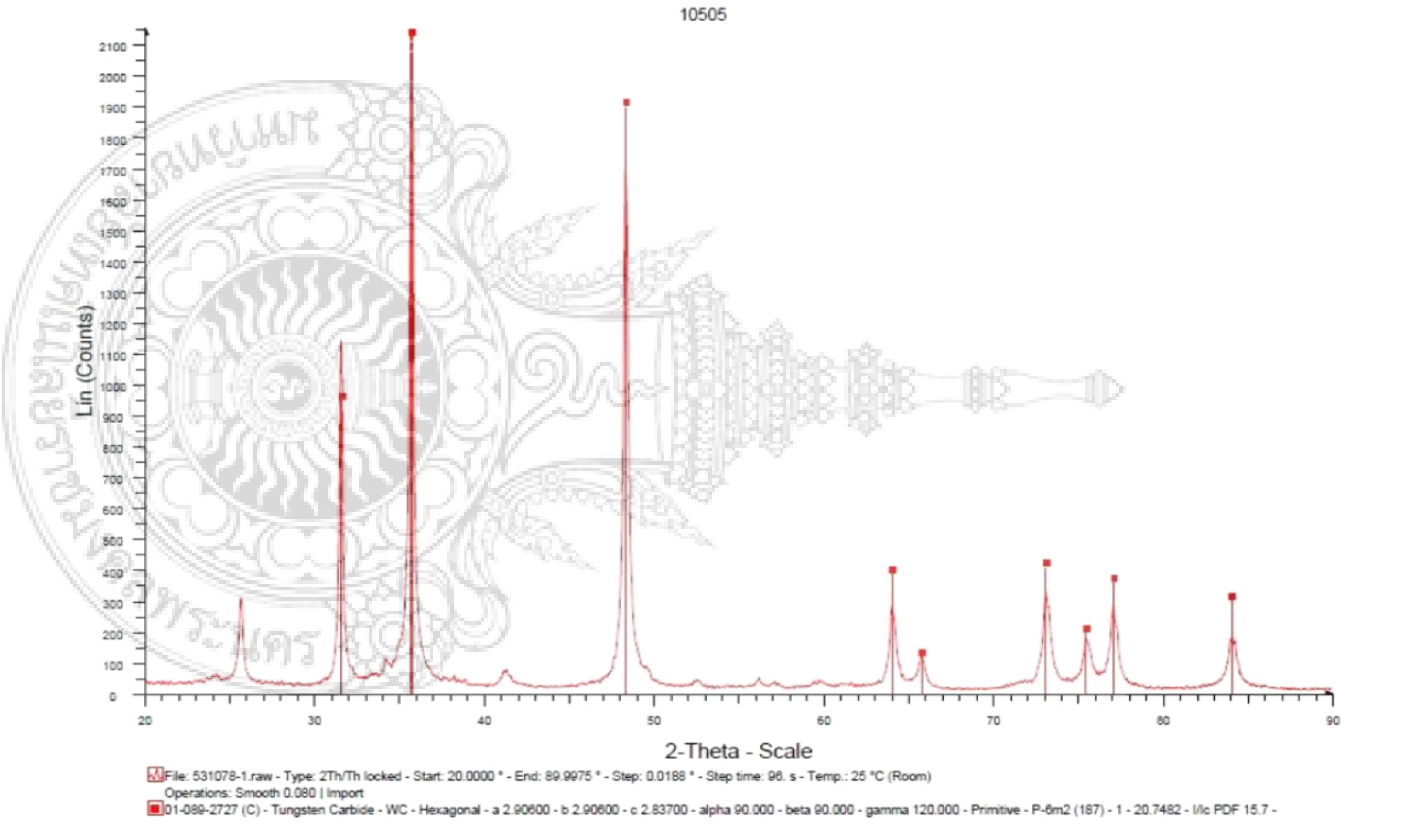
ภาพที่ ข.36 ใบรายงานผลการตรวจสอบผงโลหะด้วย X-ray Diffractometer (XRD)

ที่แรงดัน 0.2 โวลต์ อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส กรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 3 N



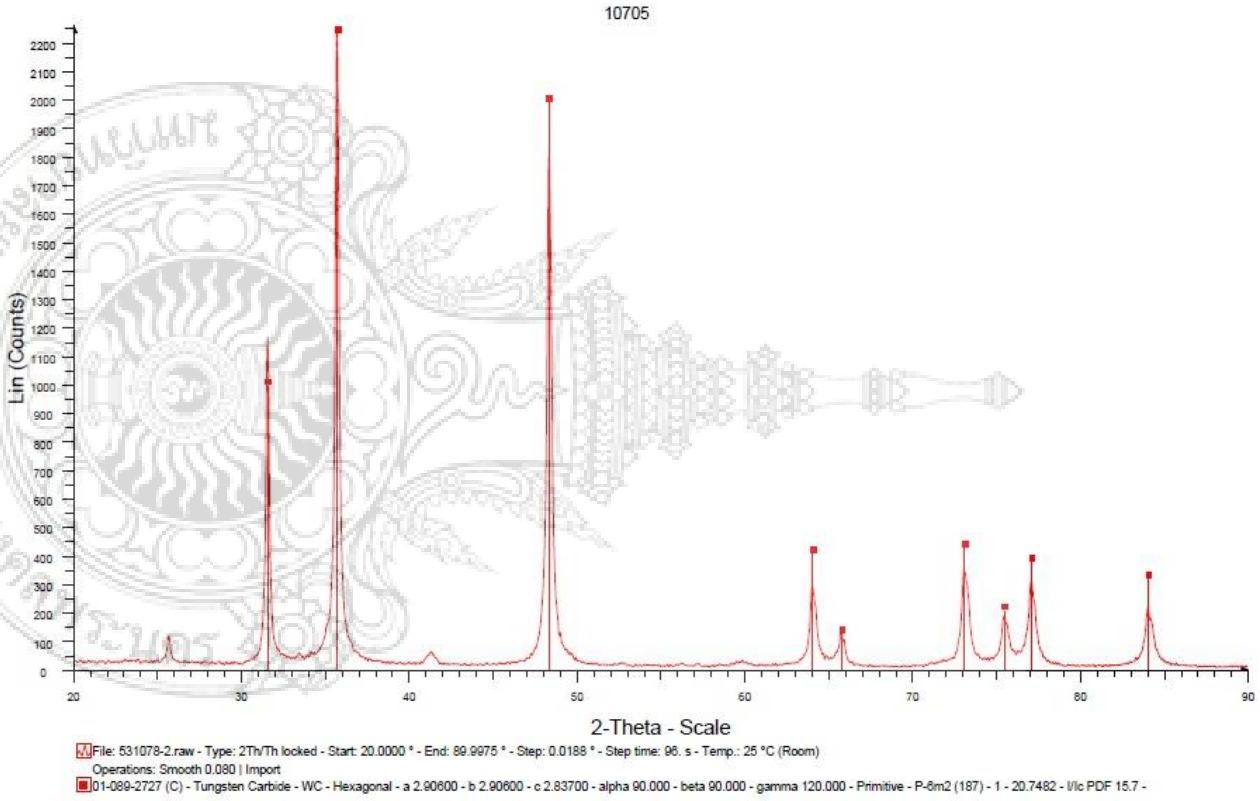
ภาพที่ ข.37 ผลการตรวจสอบผงโลหะด้วย X-ray Diffractrometer (XRD)

ที่แรงดัน 0.6 โวลต์ อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส กรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 7 N



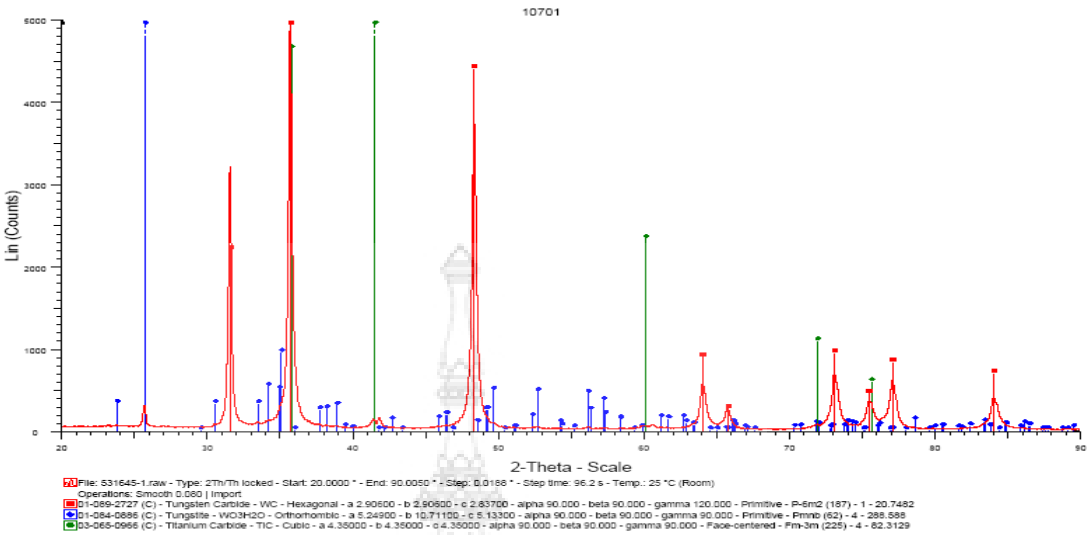
ภาพที่ ข.38 รายงานผลการตรวจสอบผงโลหะด้วย X-ray Diffractrometer (XRD)

ที่แรงดัน 1.0 โวลต์ อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส กรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 5 N

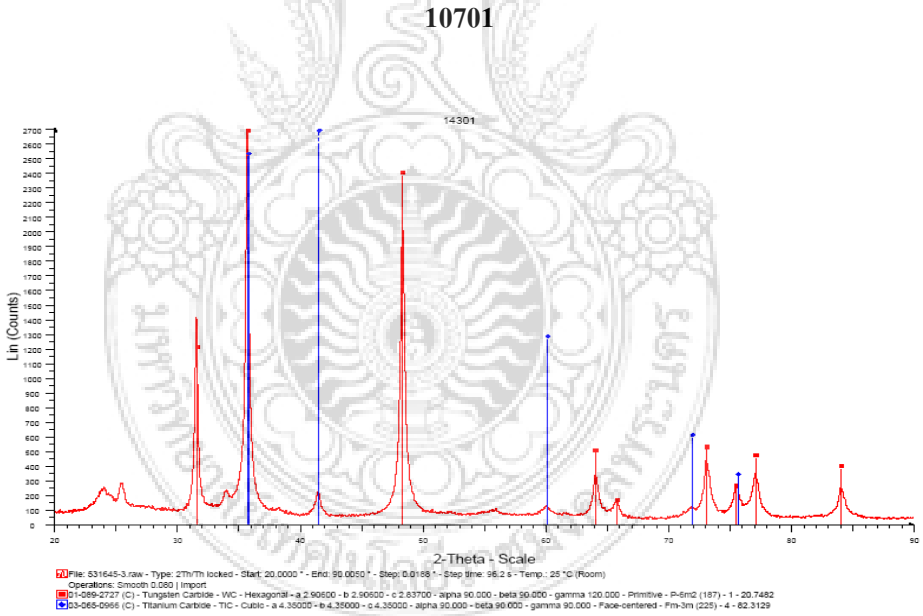


ภาพที่ ข.39 ผลการตรวจสอบผงโลหะด้วย X-ray Diffractrometer (XRD)

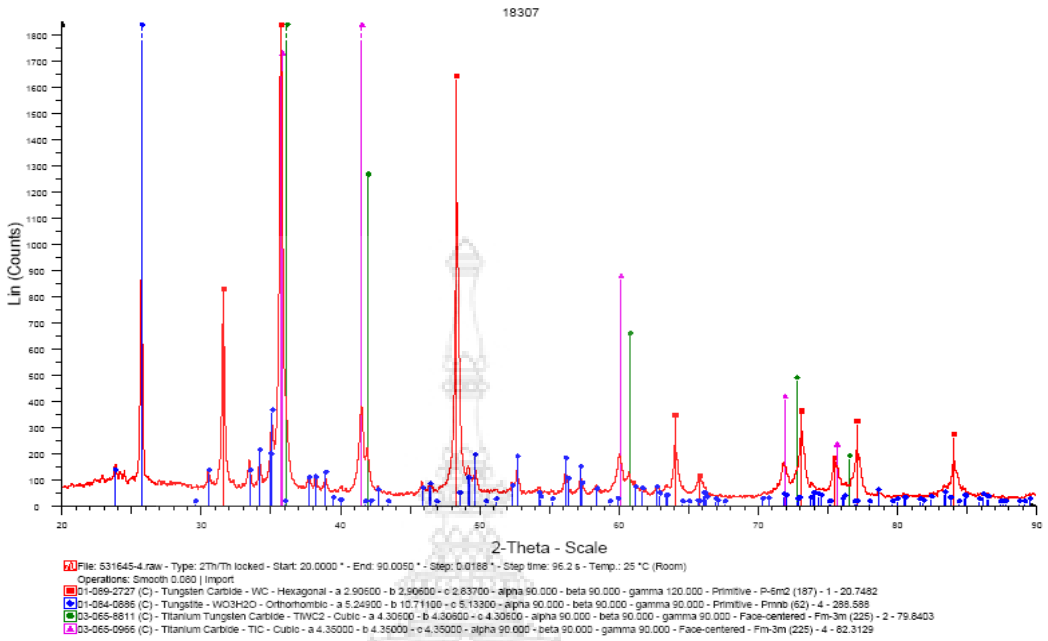
ที่แรงดัน 1.0 โวลต์ อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส กรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 5 N



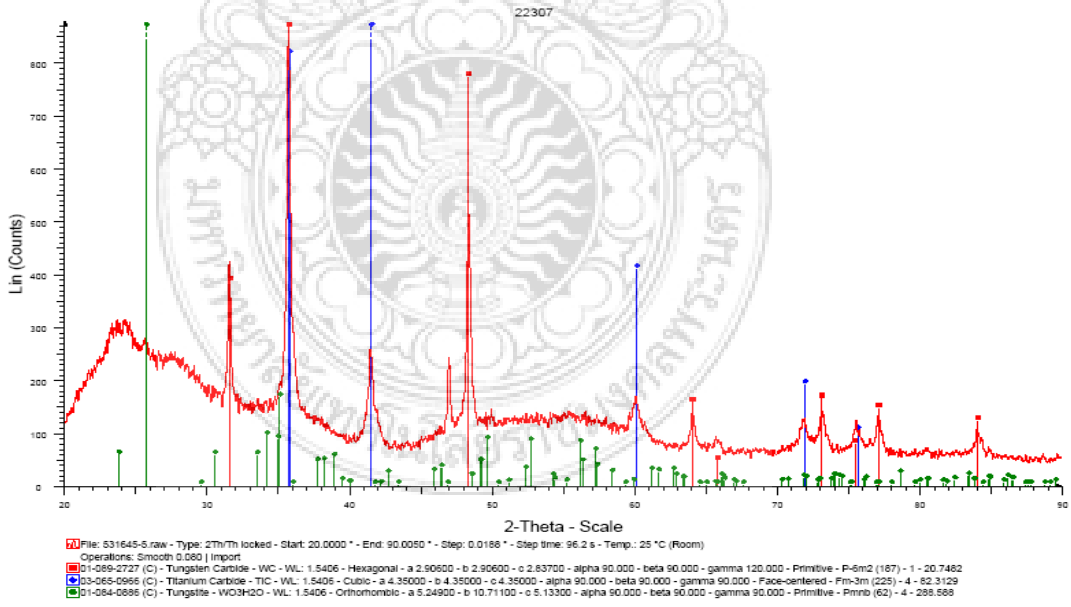
ภาพที่ ข.40 ผลการตรวจสอบผงโลหะด้วย X-ray Diffractrometer (XRD) ที่แรงดัน 1.0 โวลต์ อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส กรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 7 N



ภาพที่ ข.41 ผลการตรวจสอบผงโลหะด้วย X-ray Diffractrometer (XRD) ที่แรงดัน 1.4 โวลต์ อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส กรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 1 N

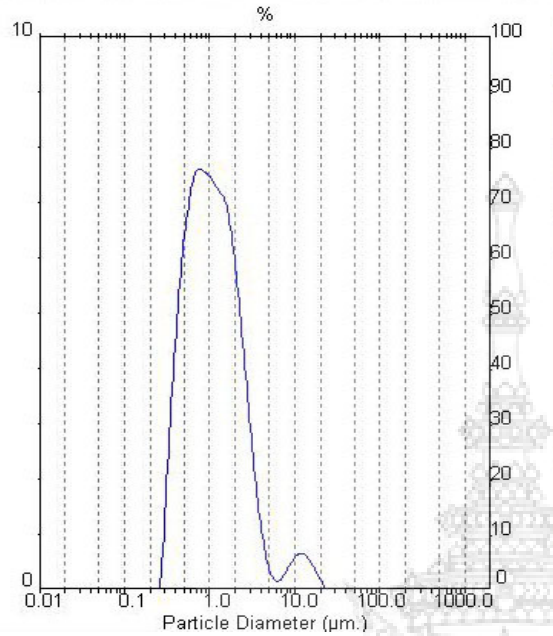


ภาพที่ ข.42 ผลการตรวจสอบผงโลหะด้วย X-ray Diffractrometer (XRD) ที่แรงดัน 1.8 โวลต์ อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส กรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 7 N



ภาพที่ ข.43 ผลการตรวจสอบผงโลหะด้วย X-ray Diffractrometer (XRD)ที่แรงดัน 2.2 โวลต์ อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส กรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 7 N

3. ผลการตรวจสอบขนาดและการกระจายตัวของโลหะผงทังสเตนคาร์ไบด์



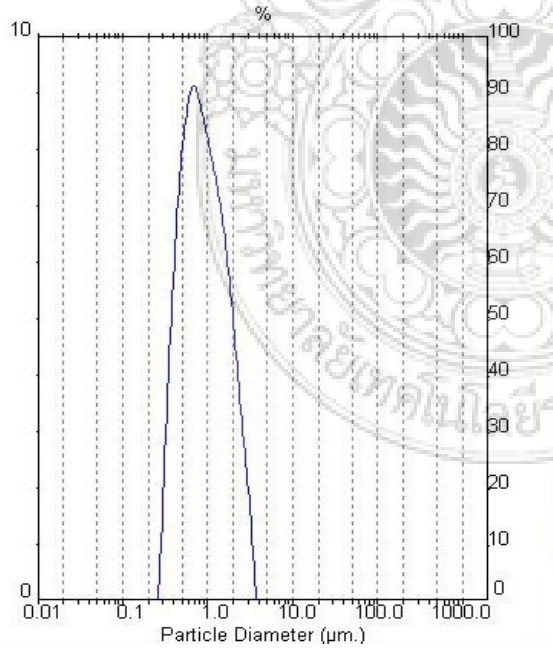
ID: P&D 02303 | Run No: 9 | Measured: 3/29/2010 1:45PM
File: CHULA13 | Rec. No: 4 | Analysed: 3/29/2010 1:46PM
Path: C:\SIZERS\DATA\ | Source: Analysed

Range: 300RF mm | Beam: 2.40 mm | Sampler: MS1 | Obs': 14.5 %
Presentation: 3_WIW | Analysis: Polydisperse | Residual: 7.130 %
Modifications: None

Conc. = 0.0015 %Vol | Density = 1.000 g/cm^3 | S.S.A.= 6.8305 m^2/g
Distribution: Volume | D[4, 3] = 1.67 um | D[3, 2] = 0.88 um
D(v, 0.1) = 0.45 um | D(v, 0.5) = 1.05 um | D(v, 0.9) = 2.83 um
Span = 2.271E+00 | Uniformity = 9.807E-01

Size (um)	Volume In %	Size (um)	Volume In %	Size (um)	Volume In %	Size (um)	Volume In %
0.05	0.00	0.58	7.32	6.63	0.23	76.32	0.00
0.06	0.00	0.67	7.59	7.72	0.40	88.91	0.00
0.07	0.00	0.78	7.56	9.00	0.57	103.58	0.00
0.08	0.00	0.91	7.47	10.48	0.66	120.67	0.00
0.09	0.00	1.06	7.33	12.21	0.64	140.58	0.00
0.11	0.00	1.24	7.17	14.22	0.52	163.77	0.00
0.13	0.00	1.44	7.00	16.57	0.34	190.80	0.00
0.15	0.00	1.68	6.42	19.31	0.16	222.28	0.00
0.17	0.00	1.95	5.54	22.49	0.00	258.95	0.00
0.20	0.00	2.28	4.47	26.20	0.00	301.68	0.00
0.23	0.00	2.65	3.31	30.53	0.00	351.46	0.00
0.27	1.02	3.09	2.23	35.56	0.00	409.45	0.00
0.31	2.80	3.60	1.33	41.43	0.00	477.01	0.00
0.36	4.40	4.19	0.68	48.27	0.00	555.71	0.00
0.42	5.72	4.88	0.30	56.23	0.00	647.41	0.00
0.49	6.67	5.69	0.16	65.51	0.00	754.23	0.00
0.58		6.63		76.32		878.67	

ภาพที่ ข.44 ผลการตรวจสอบขนาดและการกระจายตัวของโลหะผงที่แรงดัน 0.2 โวลต์ อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส กรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 3 N



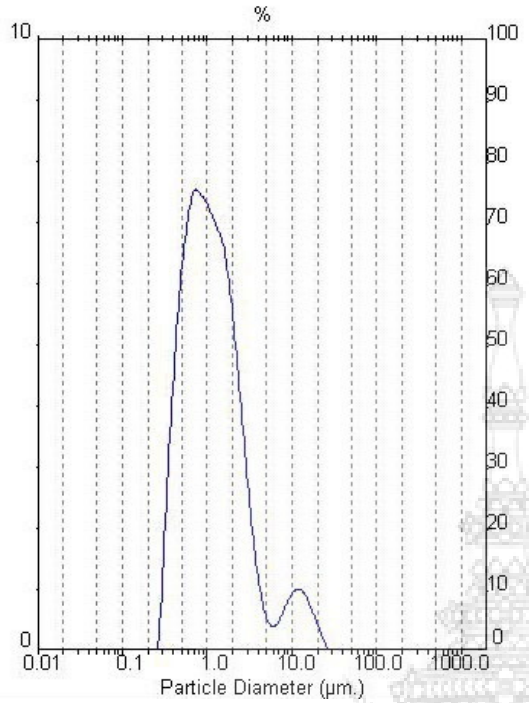
ID: P&D 02305 | Run No: 5 | Measured: 4/5/2010 2:19PM
File: CHULA13 | Rec. No: 136 | Analysed: 4/5/2010 2:19PM
Path: C:\SIZERS\DATA\ | Source: Analysed

Range: 300RF mm | Beam: 2.40 mm | Sampler: MS1 | Obs': 13.2 %
Presentation: 3_WIW | Analysis: Polydisperse | Residual: 8.025 %
Modifications: None

Conc. = 0.0011 %Vol | Density = 1.000 g/cm^3 | S.S.A.= 7.9016 m^2/g
Distribution: Volume | D[4, 3] = 1.07 um | D[3, 2] = 0.76 um
D(v, 0.1) = 0.42 um | D(v, 0.5) = 0.86 um | D(v, 0.9) = 2.04 um
Span = 1.886E+00 | Uniformity = 5.775E-01

Size (um)	Volume In %	Size (um)	Volume In %	Size (um)	Volume In %	Size (um)	Volume In %
0.05	0.00	0.58	8.99	6.63	0.00	76.32	0.00
0.06	0.00	0.67	9.08	7.72	0.00	88.91	0.00
0.07	0.00	0.78	8.69	9.00	0.00	103.58	0.00
0.08	0.00	0.91	8.24	10.48	0.00	120.67	0.00
0.09	0.00	1.06	7.75	12.21	0.00	140.58	0.00
0.11	0.00	1.24	7.22	14.22	0.00	163.77	0.00
0.13	0.00	1.44	6.57	16.57	0.00	190.80	0.00
0.15	0.00	1.68	5.67	19.31	0.00	222.28	0.00
0.17	0.00	1.95	4.54	22.49	0.00	258.95	0.00
0.20	0.00	2.28	3.41	26.20	0.00	301.68	0.00
0.23	0.00	2.65	2.28	30.53	0.00	351.46	0.00
0.27	1.40	3.09	1.16	35.56	0.00	409.45	0.00
0.31	3.67	3.60	0.00	41.43	0.00	477.01	0.00
0.36	5.67	4.19	0.00	48.27	0.00	555.71	0.00
0.42	7.28	4.88	0.00	56.23	0.00	647.41	0.00
0.49	8.37	5.69	0.00	65.51	0.00	754.23	0.00
0.58		6.63		76.32		878.67	

ภาพที่ ข.45 ผลการตรวจสอบขนาดและการกระจายตัวของโลหะผงที่แรงดัน 0.2 โวลต์ อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส กรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 3 N



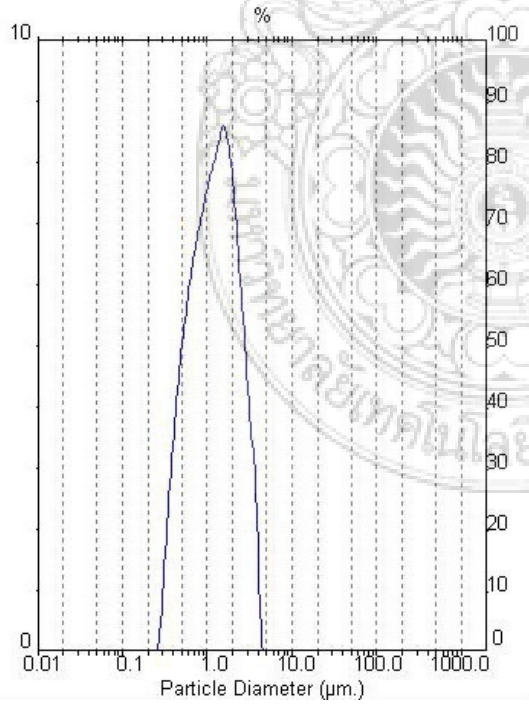
ID: P&D 02307 Run No: 8 Measured: 3/29/2010 1:58PM
File: CHULA13 Rec. No: 23 Analysed: 3/29/2010 1:58PM
Path: C:\SIZERS\DATA\ Source: Analysed

Range: 300RF mm Beam: 2.40 mm Sampler: MS1 Obs': 16.3 %
Presentation: 3_WIW Analysis: Polydisperse Residual: 6.940 %
Modifications: None

Conc. = 0.0017 %Vol Density = 1.000 g/cm^3 S.S.A.= 6.6631 m^2/g
Distribution: Volume D[4, 3] = 2.01 um D[3, 2] = 0.90 um
D(v, 0.1) = 0.45 um D(v, 0.5) = 1.07 um D(v, 0.9) = 3.37 um
Span = 2.727E+00 Uniformity = 1.269E+00

Size (um)	Volume In %	Size (um)	Volume In %	Size (um)	Volume In %	Size (um)	Volume In %
0.05	0.00	0.58	7.24	6.63	0.51	76.32	0.00
0.06	0.00	0.67	7.53	7.72	0.72	88.91	0.00
0.07	0.00	0.78	7.46	9.00	0.91	103.58	0.00
0.08	0.00	0.91	7.32	10.48	1.01	120.67	0.00
0.09	0.00	1.06	7.12	12.21	0.99	140.58	0.00
0.11	0.00	1.24	6.89	14.22	0.84	163.77	0.00
0.13	0.00	1.44	6.64	16.57	0.62	190.80	0.00
0.15	0.00	1.68	6.02	19.31	0.40	222.28	0.00
0.17	0.00	1.95	5.16	22.49	0.17	258.95	0.00
0.20	0.00	2.28	4.15	26.20	0.00	301.68	0.00
0.23	0.00	2.65	3.09	30.53	0.00	351.46	0.00
0.27	0.00	3.09	2.12	35.56	0.00	409.45	0.00
0.31	0.92	3.60	1.34	41.43	0.00	477.01	0.00
0.36	2.69	4.19	0.78	48.27	0.00	555.71	0.00
0.42	4.29	4.88	0.48	56.23	0.00	647.41	0.00
0.49	5.61	5.69	0.41	65.51	0.00	754.23	0.00
0.58	6.58	6.63		76.32		878.67	0.00

ภาพที่ ข.46 ผลการตรวจสอบขนาดและการกระจายตัวของโลหะผงที่แรงดัน 0.2 โวลต์ อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส กรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 7 N



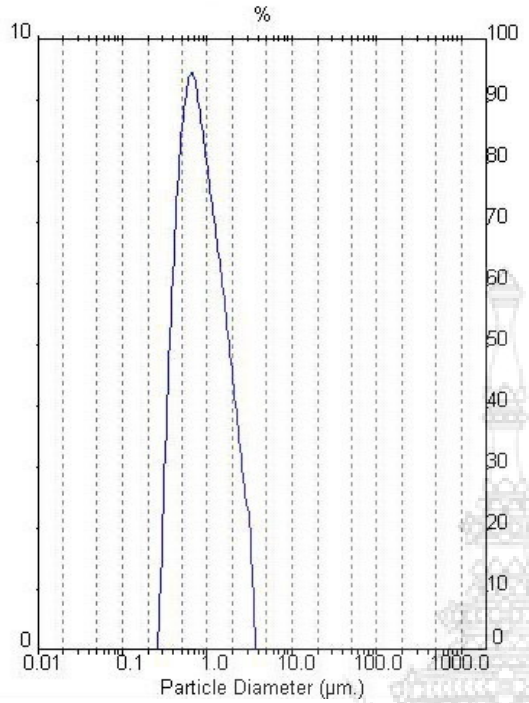
ID: P&D 06303 Run No: 8 Measured: 3/29/2010 2:06PM
File: CHULA13 Rec. No: 34 Analysed: 3/29/2010 2:06PM
Path: C:\SIZERS\DATA\ Source: Analysed

Range: 300RF mm Beam: 2.40 mm Sampler: MS1 Obs': 24.1 %
Presentation: 3_WIW Analysis: Polydisperse Residual: 7.075 %
Modifications: None

Conc. = 0.0029 %Vol Density = 1.000 g/cm^3 S.S.A.= 6.2393 m^2/g
Distribution: Volume D[4, 3] = 1.42 um D[3, 2] = 0.96 um
D(v, 0.1) = 0.49 um D(v, 0.5) = 1.21 um D(v, 0.9) = 2.70 um
Span = 1.821E+00 Uniformity = 5.622E-01

Size (um)	Volume In %	Size (um)	Volume In %	Size (um)	Volume In %	Size (um)	Volume In %
0.05	0.00	0.58	6.03	6.63	0.00	76.32	0.00
0.06	0.00	0.67	6.58	7.72	0.00	88.91	0.00
0.07	0.00	0.78	7.07	9.00	0.00	103.58	0.00
0.08	0.00	0.91	7.50	10.48	0.00	120.67	0.00
0.09	0.00	1.06	7.88	12.21	0.00	140.58	0.00
0.11	0.00	1.24	8.24	14.22	0.00	163.77	0.00
0.13	0.00	1.44	8.58	16.57	0.00	190.80	0.00
0.15	0.00	1.68	8.23	19.31	0.00	222.28	0.00
0.17	0.00	1.95	7.36	22.49	0.00	258.95	0.00
0.20	0.00	2.28	6.08	26.20	0.00	301.68	0.00
0.23	0.00	2.65	4.80	30.53	0.00	351.46	0.00
0.27	0.00	3.09	3.53	35.56	0.00	409.45	0.00
0.31	0.70	3.60	2.25	41.43	0.00	477.01	0.00
0.36	2.09	4.19	0.00	48.27	0.00	555.71	0.00
0.42	3.35	4.88	0.00	56.23	0.00	647.41	0.00
0.49	4.43	5.69	0.00	65.51	0.00	754.23	0.00
0.58	5.30	6.63		76.32		878.67	0.00

ภาพที่ ข.47 ผลการตรวจสอบขนาดและการกระจายตัวของโลหะผงที่แรงดัน 0.6 โวลต์ อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส กรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 3 N



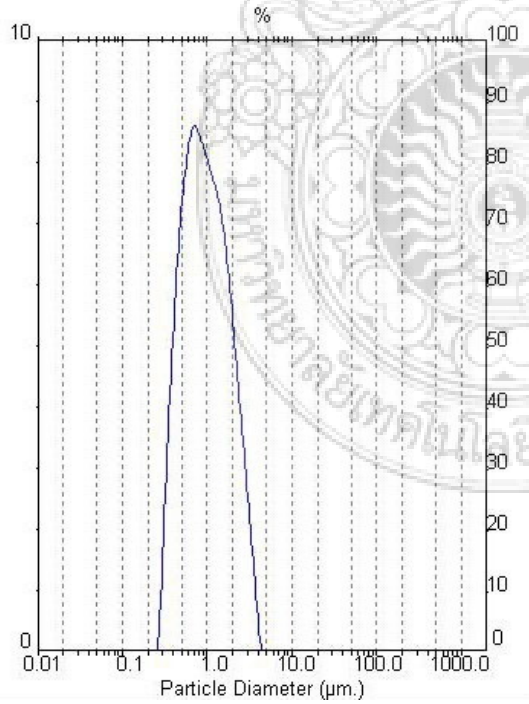
ID: P&D 06305 Run No: 7 Measured: 3/29/2010 2:22PM
File: CHULA13 Rec. No: 47 Analysed: 3/29/2010 2:22PM
Path: C:\SIZERS\DATA\ Source: Analysed

Range: 300RF mm Beam: 2.40 mm Sampler: MS1 Obs': 17.0 %
Presentation: 3_WIW Analysis: Polydisperse Residual: 8.789 %
Modifications: None

Conc. = 0.0014 %Vol Density = 1.000 g/cm^3 S.S.A.= 8.1182 m^2/g
Distribution: Volume D[4, 3] = 1.05 um D[3, 2] = 0.74 um
D(v, 0.1) = 0.41 um D(v, 0.5) = 0.82 um D(v, 0.9) = 2.06 um
Span = 2.010E+00 Uniformity = 6.065E-01

Size (um)	Volume In %	Size (um)	Volume In %	Size (um)	Volume In %	Size (um)	Volume In %
0.05	0.00	0.58	9.38	6.63	0.00	76.32	0.00
0.06	0.00	0.67	9.30	7.72	0.00	88.91	0.00
0.07	0.00	0.78	8.68	9.00	0.00	103.58	0.00
0.08	0.00	0.91	8.00	10.48	0.00	120.67	0.00
0.09	0.00	1.06	7.28	12.21	0.00	140.58	0.00
0.11	0.00	1.24	6.58	14.22	0.00	163.77	0.00
0.13	0.00	1.44	5.88	16.57	0.00	190.80	0.00
0.15	0.00	1.68	5.03	19.31	0.00	222.28	0.00
0.17	0.00	1.95	4.17	22.49	0.00	258.95	0.00
0.20	0.00	2.28	3.32	26.20	0.00	301.68	0.00
0.23	0.00	2.65	2.47	30.53	0.00	351.46	0.00
0.27	1.58	3.09	1.62	35.56	0.00	409.45	0.00
0.31	4.00	3.60	0.00	41.43	0.00	477.01	0.00
0.36	6.11	4.19	0.00	48.27	0.00	555.71	0.00
0.42	7.77	4.88	0.00	56.23	0.00	647.41	0.00
0.49	8.84	5.69	0.00	65.51	0.00	754.23	0.00
0.58		6.63	0.00	76.32	0.00	878.67	0.00

ภาพที่ ข.48 ผลการตรวจสอบขนาดและการกระจายตัวของโลหะผงที่แรงดัน 0.6 โวลต์ อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส กรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 5 N



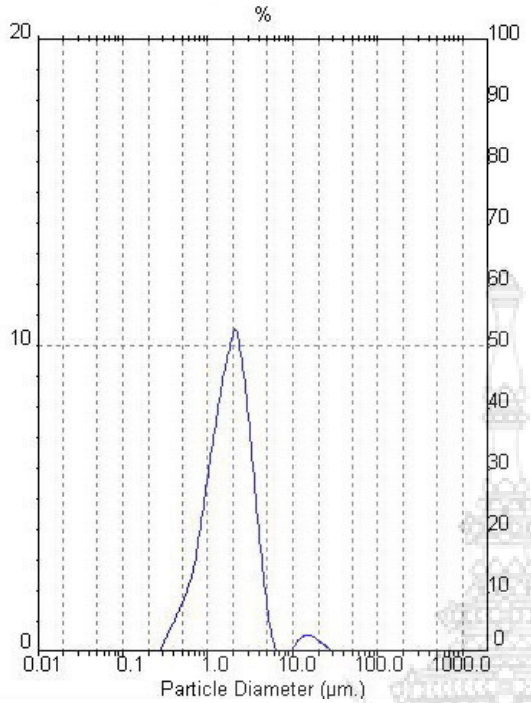
ID: P&D 06307 Run No: 6 Measured: 3/29/2010 2:31PM
File: CHULA13 Rec. No: 55 Analysed: 3/29/2010 2:31PM
Path: C:\SIZERS\DATA\ Source: Analysed

Range: 300RF mm Beam: 2.40 mm Sampler: MS1 Obs': 17.9 %
Presentation: 3_WIW Analysis: Polydisperse Residual: 8.016 %
Modifications: None

Conc. = 0.0017 %Vol Density = 1.000 g/cm^3 S.S.A.= 7.4970 m^2/g
Distribution: Volume D[4, 3] = 1.15 um D[3, 2] = 0.80 um
D(v, 0.1) = 0.43 um D(v, 0.5) = 0.93 um D(v, 0.9) = 2.24 um
Span = 1.953E+00 Uniformity = 6.023E-01

Size (um)	Volume In %	Size (um)	Volume In %	Size (um)	Volume In %	Size (um)	Volume In %
0.05	0.00	0.58	8.36	6.63	0.00	76.32	0.00
0.06	0.00	0.67	8.59	7.72	0.00	88.91	0.00
0.07	0.00	0.78	8.37	9.00	0.00	103.58	0.00
0.08	0.00	0.91	8.10	10.48	0.00	120.67	0.00
0.09	0.00	1.06	7.77	12.21	0.00	140.58	0.00
0.11	0.00	1.24	7.46	14.22	0.00	163.77	0.00
0.13	0.00	1.44	6.93	16.57	0.00	190.80	0.00
0.15	0.00	1.68	6.12	19.31	0.00	222.28	0.00
0.17	0.00	1.95	5.05	22.49	0.00	258.95	0.00
0.20	0.00	2.28	3.98	26.20	0.00	301.68	0.00
0.23	0.00	2.65	2.90	30.53	0.00	351.46	0.00
0.27	1.18	3.09	1.83	35.56	0.00	409.45	0.00
0.31	3.25	3.60	0.76	41.43	0.00	477.01	0.00
0.36	5.09	4.19	0.00	48.27	0.00	555.71	0.00
0.42	6.60	4.88	0.00	56.23	0.00	647.41	0.00
0.49	7.68	5.69	0.00	65.51	0.00	754.23	0.00
0.58		6.63	0.00	76.32	0.00	878.67	0.00

ภาพที่ ข.49 ผลการตรวจสอบขนาดและการกระจายตัวของโลหะผงที่แรงดัน 0.6 โวลต์ อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส กรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 7 N



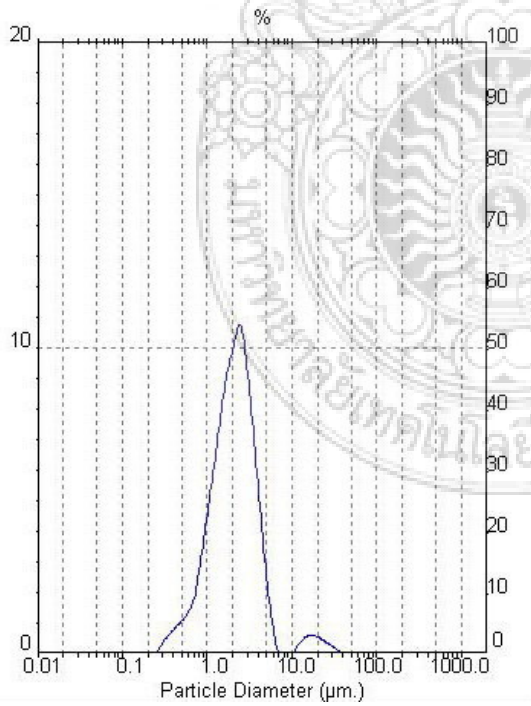
ID: P&D 10503 Run No: 8 Measured: 3/29/2010 2:45PM
File: CHULA13 Rec. No: 67 Analysed: 3/29/2010 2:45PM
Path: C:\SIZERS\DATA\ Source: Analysed

Range: 300RF mm Beam: 2.40 mm Sampler: MS1 Obs': 23.3 %
Presentation: 3_WtW Analysis: Polydisperse Residual: 4.681 %
Modifications: None

Conc. = 0.0043 %Vol Density = 1.000 g/cm^3 S.S.A.= 4.1554 m^2/g
Distribution: Volume D[4, 3] = 2.38 um D[3, 2] = 1.44 um
D(v, 0.1) = 0.77 um D(v, 0.5) = 1.84 um D(v, 0.9) = 3.70 um
Span = 1.596E+00 Uniformity = 6.641E-01

Size (um)	Volume In %	Size (um)	Volume In %	Size (um)	Volume In %	Size (um)	Volume In %
0.05	0.00	0.58	2.34	6.63	0.00	76.32	0.00
0.06	0.00	0.67	3.07	7.72	0.00	88.91	0.00
0.07	0.00	0.78	4.32	9.00	0.09	103.58	0.00
0.08	0.00	0.91	5.57	10.48	0.36	120.67	0.00
0.09	0.00	1.06	6.82	12.21	0.54	140.58	0.00
0.11	0.00	1.24	8.02	14.22	0.58	163.77	0.00
0.13	0.00	1.44	9.09	16.57	0.51	190.80	0.00
0.15	0.00	1.68	9.90	19.31	0.37	222.28	0.00
0.17	0.00	1.95	10.54	22.49	0.23	258.95	0.00
0.20	0.00	2.28	9.77	26.20	0.10	301.68	0.00
0.23	0.00	2.65	8.29	30.53	0.00	351.46	0.00
0.27	0.00	3.09	6.39	35.56	0.00	409.45	0.00
0.31	0.20	3.60	4.37	41.43	0.00	477.01	0.00
0.36	0.59	4.19	2.53	48.27	0.00	555.71	0.00
0.42	0.98	4.88	1.10	56.23	0.00	647.41	0.00
0.49	1.36	5.69	0.20	65.51	0.00	754.23	0.00
0.58	1.79	6.63		76.32		878.67	0.00

ภาพที่ ข.50 ผลการตรวจสอบขนาดและการกระจายตัวของโลหะผงที่แรงดัน 10. โวลต์ อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส กรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 3 N



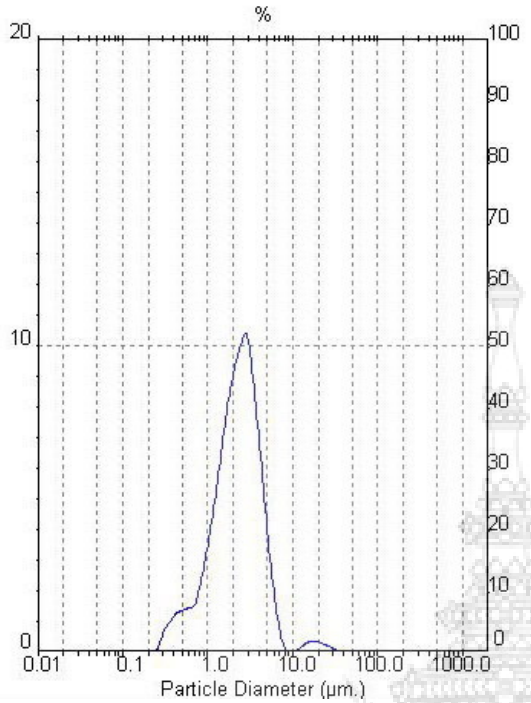
ID: P&D 10505 Run No: 4 Measured: 3/29/2010 2:54PM
File: CHULA13 Rec. No: 75 Analysed: 3/29/2010 2:54PM
Path: C:\SIZERS\DATA\ Source: Analysed

Range: 300RF mm Beam: 2.40 mm Sampler: MS1 Obs': 19.1 %
Presentation: 3_WtW Analysis: Polydisperse Residual: 3.545 %
Modifications: None

Conc. = 0.0039 %Vol Density = 1.000 g/cm^3 S.S.A.= 3.6983 m^2/g
Distribution: Volume D[4, 3] = 2.84 um D[3, 2] = 1.62 um
D(v, 0.1) = 0.89 um D(v, 0.5) = 2.09 um D(v, 0.9) = 4.20 um
Span = 1.579E+00 Uniformity = 7.205E-01

Size (um)	Volume In %	Size (um)	Volume In %	Size (um)	Volume In %	Size (um)	Volume In %
0.05	0.00	0.58	1.48	6.63	0.01	76.32	0.00
0.06	0.00	0.67	1.96	7.72	0.00	88.91	0.00
0.07	0.00	0.78	3.13	9.00	0.00	103.58	0.00
0.08	0.00	0.91	4.36	10.48	0.22	120.67	0.00
0.09	0.00	1.06	5.69	12.21	0.47	140.58	0.00
0.11	0.00	1.24	7.09	14.22	0.60	163.77	0.00
0.13	0.00	1.44	8.41	16.57	0.62	190.80	0.00
0.15	0.00	1.68	9.45	19.31	0.55	222.28	0.00
0.17	0.00	1.95	10.19	22.49	0.44	258.95	0.00
0.20	0.00	2.28	10.74	26.20	0.32	301.68	0.00
0.23	0.05	2.65	9.68	30.53	0.20	351.46	0.00
0.27	0.34	3.09	7.97	35.56	0.07	409.45	0.00
0.31	0.58	3.60	5.90	41.43	0.00	477.01	0.00
0.36	0.79	4.19	3.81	48.27	0.00	555.71	0.00
0.42	0.98	4.88	2.01	56.23	0.00	647.41	0.00
0.49	1.18	5.69	0.72	65.51	0.00	754.23	0.00
0.58		6.63		76.32		878.67	0.00

ภาพที่ ข.51 ผลการตรวจสอบขนาดและการกระจายตัวของโลหะผงที่แรงดัน 1.0 โวลต์ อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส กรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 5 N



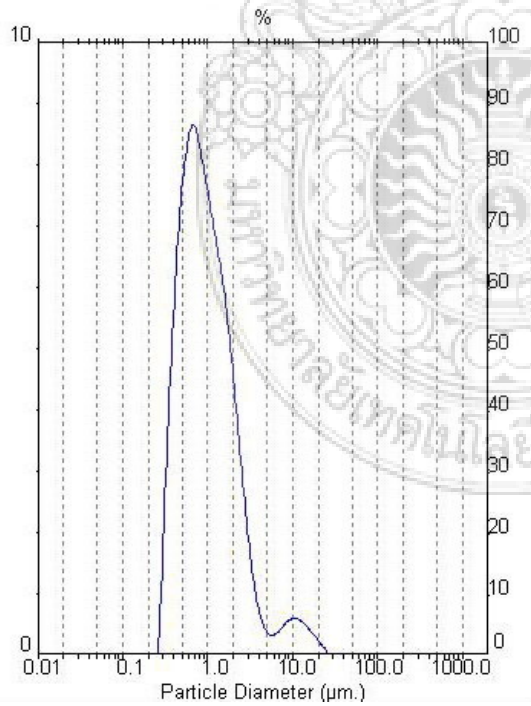
ID: P&D 10507 Run No: 5 Measured: 3/29/2010 3:02PM
File: CHULA13 Rec. No: 84 Analysed: 3/29/2010 3:02PM
Path: C:\SIZERS\DATA\ Source: Analysed

Range: 300RF mm Beam: 2.40 mm Sampler: MS1 Obs': 17.0 %
Presentation: 3_WIW Analysis: Polydisperse Residual: 3.409 %
Modifications: None

Conc. = 0.0034 %Vol Density = 1.000 g/cm^3 S.S.A.= 3.6733 m^2/g
Distribution: Volume D[4, 3] = 2.80 um D[3, 2] = 1.63 um
D(v, 0.1) = 0.86 um D(v, 0.5) = 2.29 um D(v, 0.9) = 4.57 um
Span = 1.622E+00 Uniformity = 6.172E-01

Size (um)	Volume In %	Size (um)	Volume In %	Size (um)	Volume In %	Size (um)	Volume In %
0.05	0.00	0.58	1.48	6.63	0.67	76.32	0.00
0.06	0.00	0.67	1.63	7.72	0.12	88.91	0.00
0.07	0.00	0.78	2.44	9.00	0.00	103.58	0.00
0.08	0.00	0.91	3.36	10.48	0.08	120.67	0.00
0.09	0.00	1.06	4.48	12.21	0.24	140.58	0.00
0.11	0.00	1.24	5.80	14.22	0.35	163.77	0.00
0.13	0.00	1.44	7.19	16.57	0.38	190.80	0.00
0.15	0.00	1.68	8.42	19.31	0.35	222.28	0.00
0.17	0.00	1.95	9.36	22.49	0.27	258.95	0.00
0.20	0.00	2.28	10.00	26.20	0.18	301.68	0.00
0.23	0.10	2.65	10.39	30.53	0.10	351.46	0.00
0.27	0.55	3.09	9.22	35.56	0.01	409.45	0.00
0.31	0.90	3.60	7.45	41.43	0.00	477.01	0.00
0.36	1.18	4.19	5.39	48.27	0.00	555.71	0.00
0.42	1.34	4.88	3.40	56.23	0.00	647.41	0.00
0.49	1.42	5.69	1.77	65.51	0.00	754.23	0.00
0.58		6.63		76.32		878.67	0.00

ภาพที่ ข.52 ผลการตรวจสอบขนาดและการกระจายตัวของโลหะผงที่แรงดัน 1.0 โวลต์ อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส กรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 7 N



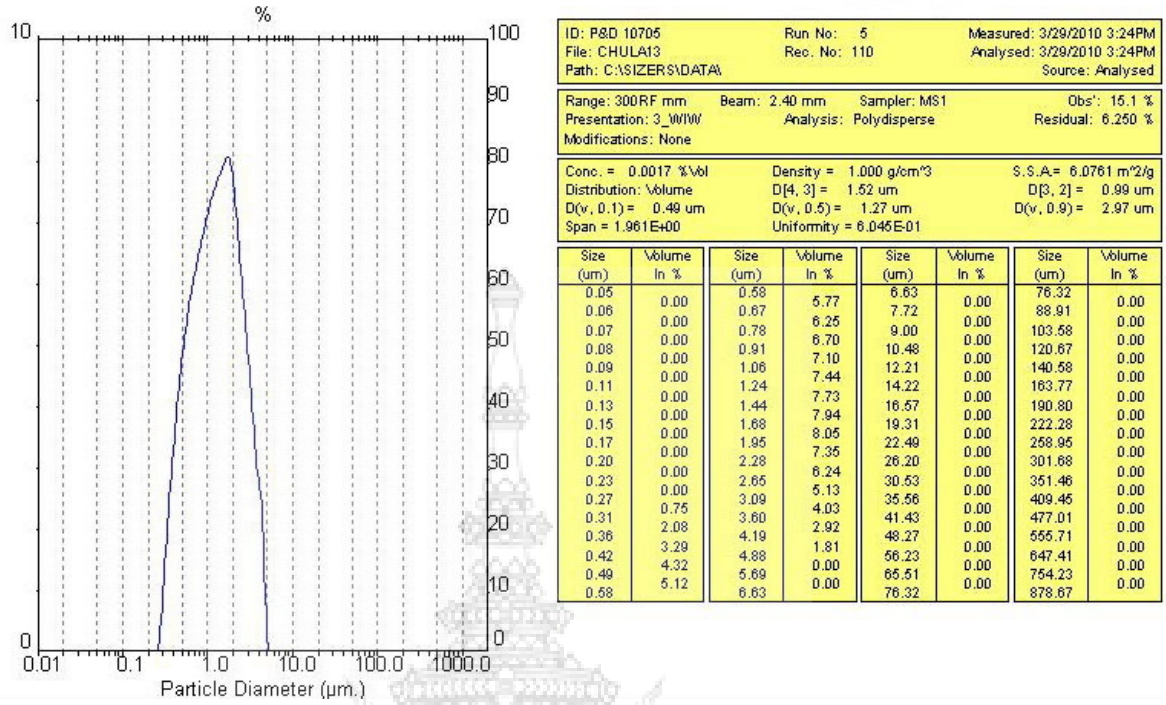
ID: P&D 10703 Run No: 5 Measured: 3/29/2010 3:16PM
File: CHULA13 Rec. No: 98 Analysed: 3/29/2010 3:17PM
Path: C:\SIZERS\DATA\ Source: Analysed

Range: 300RF mm Beam: 2.40 mm Sampler: MS1 Obs': 15.2 %
Presentation: 3_WIW Analysis: Polydisperse Residual: 7.636 %
Modifications: None

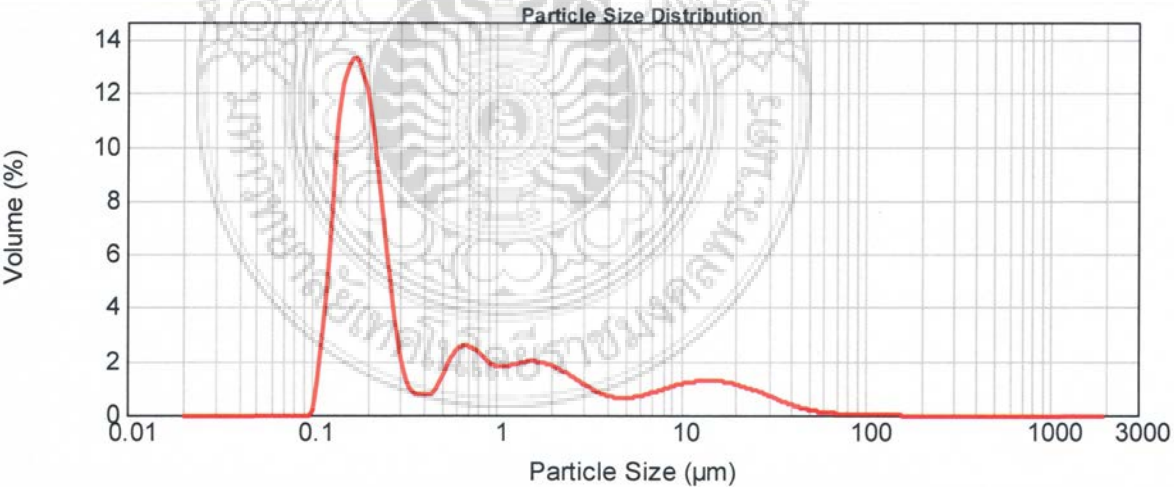
Conc. = 0.0014 %Vol Density = 1.000 g/cm^3 S.S.A.= 7.5476 m^2/g
Distribution: Volume D[4, 3] = 1.57 um D[3, 2] = 0.79 um
D(v, 0.1) = 0.42 um D(v, 0.5) = 0.90 um D(v, 0.9) = 2.58 um
Span = 2.403E+00 Uniformity = 1.108E+00

Size (um)	Volume In %	Size (um)	Volume In %	Size (um)	Volume In %	Size (um)	Volume In %
0.05	0.00	0.58	8.56	6.63	0.43	76.32	0.00
0.06	0.00	0.67	8.58	7.72	0.53	88.91	0.00
0.07	0.00	0.78	8.14	9.00	0.60	103.58	0.00
0.08	0.00	0.91	7.63	10.48	0.61	120.67	0.00
0.09	0.00	1.06	7.09	12.21	0.55	140.58	0.00
0.11	0.00	1.24	6.53	14.22	0.46	163.77	0.00
0.13	0.00	1.44	5.98	16.57	0.33	190.80	0.00
0.15	0.00	1.68	5.18	19.31	0.22	222.28	0.00
0.17	0.00	1.95	4.20	22.49	0.11	258.95	0.00
0.20	0.00	2.28	3.17	26.20	0.00	301.68	0.00
0.23	0.00	2.65	2.20	30.53	0.00	351.46	0.00
0.27	1.41	3.09	1.41	35.56	0.00	409.45	0.00
0.31	3.57	3.60	0.84	41.43	0.00	477.01	0.00
0.36	5.48	4.19	0.50	48.27	0.00	555.71	0.00
0.42	7.00	4.88	0.35	56.23	0.00	647.41	0.00
0.49	8.01	5.69	0.35	65.51	0.00	754.23	0.00
0.58		6.63		76.32		878.67	0.00

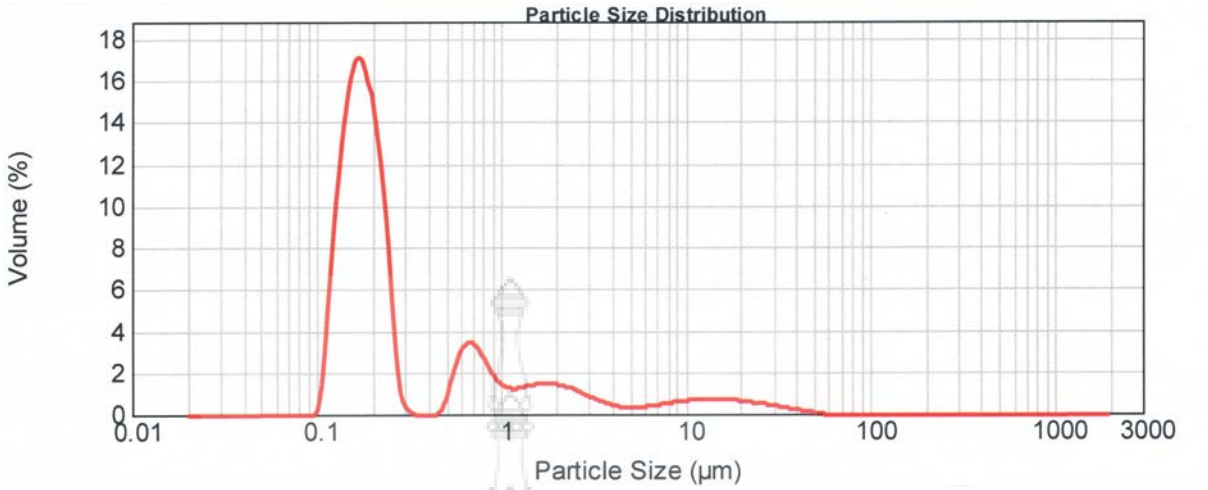
ภาพที่ ข.53 ผลการตรวจสอบขนาดและการกระจายตัวของโลหะผงที่แรงดัน 1.0 โวลต์ อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส กรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 3 N



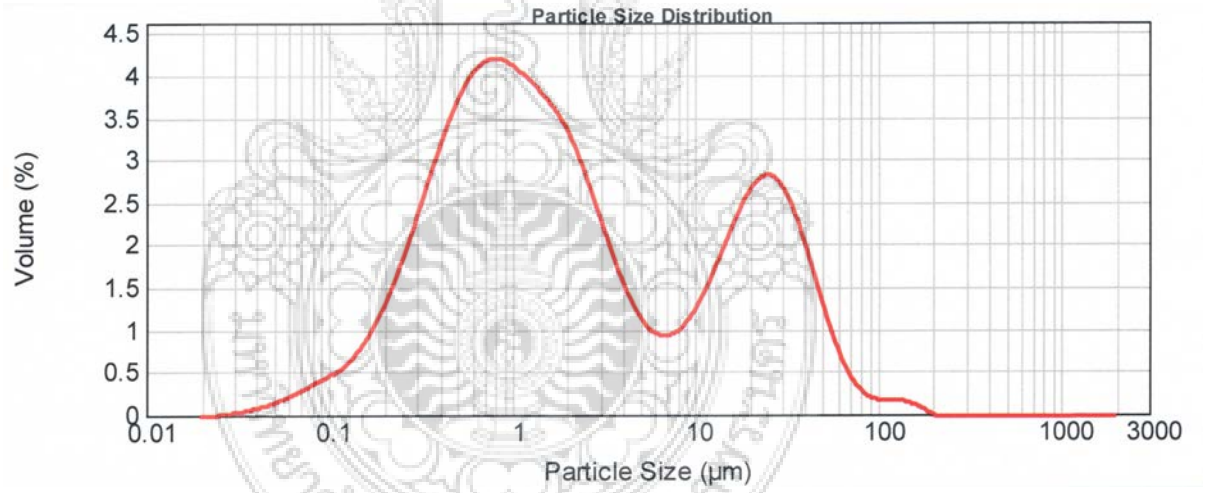
ภาพที่ ข.54 ผลการตรวจสอบขนาดและการกระจายตัวของโลหะผงที่แรงดัน 1.0 โวลต์ อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส กรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 5 N



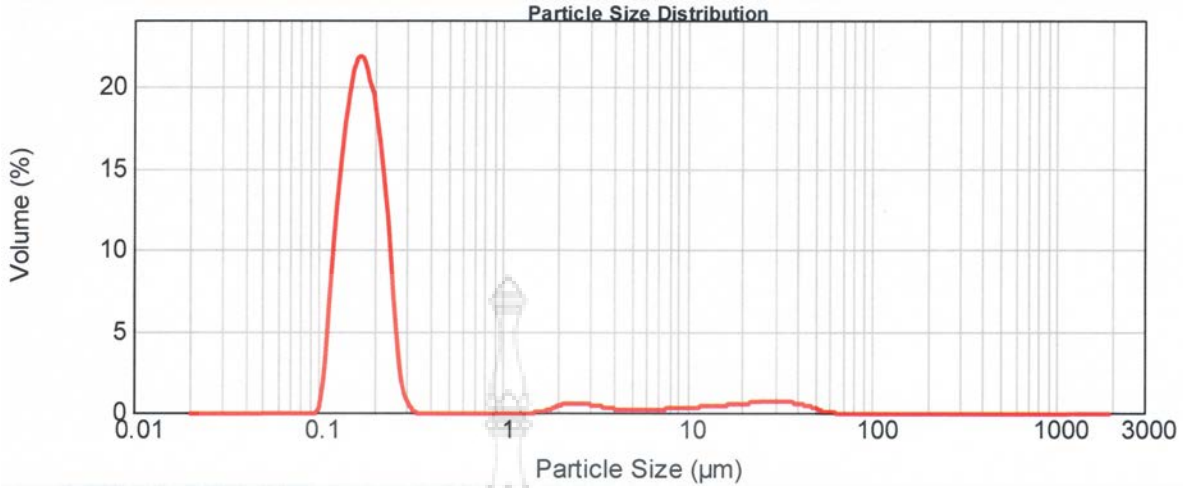
ภาพที่ ข.55 ผลการตรวจสอบขนาดและการกระจายตัวของโลหะผงที่แรงดัน 0.4 โวลต์ อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส กรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 1 N



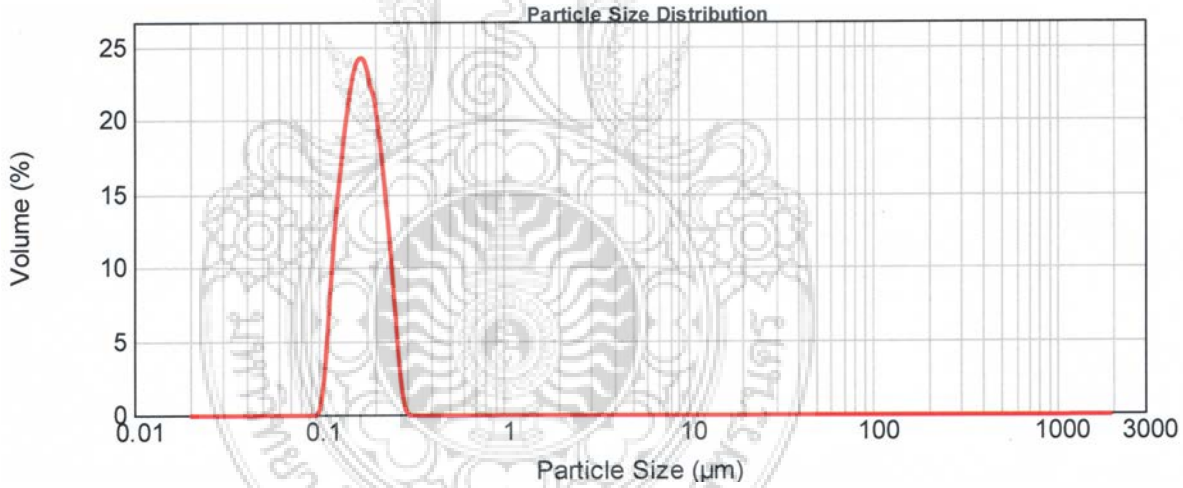
ภาพที่ ข.56 ผลการตรวจสอบขนาดและการกระจายตัวของโลหะผงที่แรงดัน 0.8 โวลต์ อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส กรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 1 N



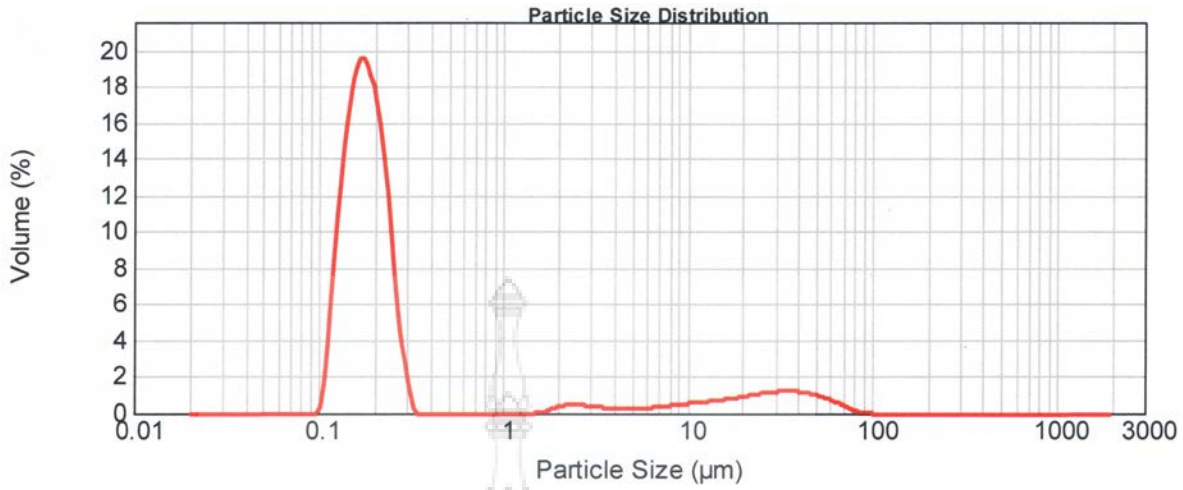
ภาพที่ ข.57 ผลการทดสอบขนาดและการกระจายตัวของลหะผงที่ แรงดัน 1.2 โวลต์ อุณหภูมิ 30 องศาเซลเศียส กรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 1



ภาพที่ ข.58 ผลการตรวจสอบขนาดและการกระจายตัวของโลหะผงที่แรงดัน 0.4 โวลต์ อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส กรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 1 N (โลหะผงหลังบด)



ภาพที่ ข.59 ผลการตรวจสอบขนาดและการกระจายตัวของโลหะผงที่แรงดัน 0.8 โวลต์ อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส กรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 1 N (โลหะผงหลังบด)



ภาพที่ ข.60 ผลการตรวจสอบขนาดและการกระจายตัวของลหะผงที่ แรงดัน 1.2 โวลต์ อุณหภูมิ 30 องศาเซลเศียส กรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 1 (โลหะผงหลังบด)

ภาคผนวก ค

ปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าและสารละลายในแต่ละการทดลอง

ตารางที่ ค.1 ปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าและสารละลาย ที่ปัจจัยการแยกสลาย แรงดันไฟฟ้า 1.2 V อุณหภูมิ 30 ºC สารละลาย HCl ความเข้มข้น 1 N

แรงดัน (V)	**เวลา (h)**	**ค่าไฟฟ้า(บาท)**		**สารละลาย HCl (L)**				**Ethanol ที่ใช้(ml)**
		kwh	**จำนวนเงิน**	**ปริมาณเริ่มต้น**	**สารละลายที่เติมเพิ่ม**	**ปริมาณคงเหลือ**	**สารละลายที่ระเหยไป**	
0	0	0	0	78				
1.2	12							
1.2	24							
1.2	36				5			
1.2	48	3.4				73		500
Total		**3.4**	**8.38**	**83**		**73**	**10**	**500**

ตารางที่ ค.2 ปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าและสารละลาย ที่ปัจจัยการแยกสลาย แรงดันไฟฟ้า 1.0 V อุณหภูมิ 30 ºC สารละลาย HCl ความเข้มข้น 1 N

แรงดัน (V)	**เวลา (h)**	**ค่าไฟฟ้า(บาท)**		**สารละลาย HCl (L)**				**Ethanol ที่ใช้(ml)**
		kwh	**จำนวนเงิน**	**ปริมาณเริ่มต้น**	**สารละลายที่เติมเพิ่ม**	**ปริมาณคงเหลือ**	**สารละลายที่ระเหยไป**	
0	0	0	0	77				
1.0	12							
1.0	24							
1.0	36				2			
1.0	48	3.4				71		800
Total		**3.4**	**8.38**	**79**		**71**	**8**	**800**

สำหรับการใช้ไฟฟ้า ธุรกิจรวมกับที่อยู่อาศัย อุตสาหกรรมและหน่วยงานรัฐวิสาหกิจ หรืออื่นๆ แรงดัน 12 - 24 กิโลโวลต์ อัตรารายเดือน: ค่าพลังงานไฟฟ้า หน่วยละ 2.4649 บาท

ตารางที่ ค.3 ปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าและสารละลาย ที่ปัจจัยการแยกสลาย แรงดันไฟฟ้า 0.8 V อุณหภูมิ 30 ºC สารละลาย HCl ความเข้มข้น 1 N

แรงดัน (V)	**เวลา (h)**	**ค่าไฟฟ้า(บาท)**		**สารละลาย HCl (L)**				**Ethanol ที่ใช้(ml)**
		kwh	**จำนวนเงิน**	**ปริมาณเริ่มต้น**	**สารละลายที่เติมเพิ่ม**	**ปริมาณคงเหลือ**	**สารละลายที่ระเหยไป**	
0	0	0	0	78				
0.8	12	1						
0.8	24	1.9						
0.8	36	2.8			2			
0.8	48	4.1				74		900
Total		**4.1**	**10.1**	**80**		**74**	**6**	**900**

ตารางที่ ค.4 ปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าและสารละลาย ที่ปัจจัยการแยกสลาย แรงดันไฟฟ้า 0.6 V อุณหภูมิ 30 ºC สารละลาย HCl ความเข้มข้น 1 N

แรงดัน (V)	**เวลา (h)**	**ค่าไฟฟ้า(บาท)**		**สารละลาย HCl (L)**				**Ethanol ที่ใช้(ml)**
		kwh	**จำนวนเงิน**	**ปริมาณเริ่มต้น**	**สารละลายที่เติมเพิ่ม**	**ปริมาณคงเหลือ**	**สารละลายที่ระเหยไป**	
0	0	0	0	78				
0.6	12	0.8						
0.6	24	1.9						
0.6	36	2.8			2			
0.6	48	3.7				73.9		700
Total		**3.7**	**9.12**	**80**		**73.9**	**6.1**	**700**

สำหรับการใช้ไฟฟ้า ธุรกิจรวมกับที่อยู่อาศัย อุตสาหกรรมและหน่วยงานรัฐวิสาหกิจ หรืออื่นๆ แรงดัน 12 - 24 กิโลโวลต์ อัตรารายเดือน: ค่าพลังงานไฟฟ้า หน่วยละ 2.4649 บาท

ตารางที่ ค.5 ปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าและสารละลาย ที่ปัจจัยการแยกสลาย แรงดันไฟฟ้า 0.4 V อุณหภูมิ 30 ºC สารละลาย HCl ความเข้มข้น 1 N

แรงดัน (V)	เวลา (h)	ค่าไฟฟ้า(บาท)		สารละลาย HCl (L)				Ethanolที่ใช้(ml)
		kwh	จำนวนเงิน	ปริมาณเริ่มต้น	สารละลายที่เติมเพิ่ม	ปริมาณคงเหลือ	สารละลายที่ระเหยไป	
0	0	0	0	70				
0.4	12							275
0.4	24							
0.4	36				5			
0.4	48	3.4				70		800
Total		**3.4**	**8.38**	**75**		**70**	**5**	**1075**

ตารางที่ ค.6 ปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าและสารละลาย ที่ปัจจัยการแยกสลาย แรงดันไฟฟ้า 0.2 V อุณหภูมิ 30 ºC สารละลาย HCl ความเข้มข้น 1 N

แรงดัน (V)	เวลา (h)	ค่าไฟฟ้า(บาท)		สารละลาย HCl (L)				Ethanol ที่ใช้(ml)
		kwh	จำนวนเงิน	ปริมาณเริ่มต้น	สารละลายที่เติมเพิ่ม	ปริมาณคงเหลือ	สารละลายที่ระเหยไป	
0	0	0	0	78				
0.2	12	0.8						
0.2	24	1.9						
0.2	36	2.9			2			
0.2	48	3.9				77		1050
Total		**3.9**	**9.61**	**80**		**77**	**3**	**1050**

สำหรับการใช้ไฟฟ้า ธุรกิจรวมกับที่อยู่อาศัย อุตสาหกรรมและหน่วยงานรัฐวิสาหกิจ หรืออื่นๆ แรงดัน 12 - 24 กิโลโวลต์ อัตรารายเดือน: ค่าพลังงานไฟฟ้า หน่วยละ 2.4649 บาท

ตารางที่ ค.7 ปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าและสารละลาย ที่ปัจจัยการแยกสลาย แรงดันไฟฟ้า 1.0 V อุณหภูมิ 30 ºC สารละลาย HCl ความเข้มข้น 3 N

แรงดัน (V)	**เวลา (h)**	**ค่าไฟฟ้า(บาท)**		**สารละลาย HCl (L)**				**Ethanol ที่ใช้(ml)**
		kwh	**จำนวนเงิน**	**ปริมาณเริ่มต้น**	**สารละลายที่เติมเพิ่ม**	**ปริมาณคงเหลือ**	**สารละลายที่ระเหยไป**	
0	0	0	0	80				
1.0	12							
1.0	24							
1.0	36				0			
1.0	48	4.3				72		710
Total		**4.3**	**10.51**	**80**		**72**	**8**	**710**

ตารางที่ ค.8 ปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าและสารละลาย ที่ปัจจัยการแยกสลาย แรงดันไฟฟ้า 1.0 V อุณหภูมิ 30 ºC สารละลาย HCl ความเข้มข้น 5 N

แรงดัน (V)	**เวลา (h)**	**ค่าไฟฟ้า(บาท)**		**สารละลาย HCl (L)**				**Ethanol ที่ใช้(ml)**
		kwh	**จำนวนเงิน**	**ปริมาณเริ่มต้น**	**สารละลายที่เติมเพิ่ม**	**ปริมาณคงเหลือ**	**สารละลายที่ระเหยไป**	
0	0	0	0	84				
1.0	12							
1.0	24							
1.0	36				0			
1.0	48	3.7				68.8		800
Total		**3.7**	**9.05**	**84**		**68.8**	**15.2**	**800**

สำหรับการใช้ไฟฟ้า ธุรกิจรวมกับที่อยู่อาศัย อุตสาหกรรมและหน่วยงานรัฐวิสาหกิจ หรืออื่นๆ แรงดัน 12 - 24 กิโลโวลต์ อัตรารายเดือน: ค่าพลังงานไฟฟ้า หน่วยละ 2.4649 บาท

ตารางที่ ค.9 ปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าและสารละลาย ที่ปัจจัยการแยกสลาย แรงดันไฟฟ้า 1.0 V อุณหภูมิ 30 ºC สารละลาย HCl ความเข้มข้น 7 N

แรงดัน (V)	เวลา (h)	ค่าไฟฟ้า(บาท)		สารละลาย HCl (L)				Ethanol ที่ใช้(ml)
		kwh	จำนวนเงิน	ปริมาณเริ่มต้น	สารละลายที่เติมเพิ่ม	ปริมาณคงเหลือ	สารละลายที่ระเหยไป	
0	0	0	0	86				
1.0	12							
1.0	24							
1.0	36				0			
1.0	48	4.3				76		400
Total		**4.3**	**10.51**	**86**		**76**	**10**	**400**

ตารางที่ ค.10 ปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าและสารละลายที่ปัจจัยการแยกสลายแรงดันไฟฟ้า 1.0 V อุณหภูมิ 50 ºC สารละลาย HCl ความเข้มข้น 3 N

แรงดัน (V)	เวลา (h)	ค่าไฟฟ้า(บาท)		สารละลาย HCl (L)				Ethanol ที่ใช้(ml)
		kwh	จำนวนเงิน	ปริมาณเริ่มต้น	สารละลายที่เติมเพิ่ม	ปริมาณคงเหลือ	สารละลายที่ระเหยไป	
0	0	0	0	80				
1.0	12				7.6			
1.0	24				3.6			
1.0	36				5.95			
1.0	48	32.6				78		400
Total		**32.6**	**80.35**	**97.15**		**78**	**19.15**	**400**

สำหรับการใช้ไฟฟ้า ธุรกิจรวมกับที่อยู่อาศัย อุตสาหกรรมและหน่วยงานรัฐวิสาหกิจ หรืออื่นๆ แรงดัน 12 - 24 กิโลโวลต์ อัตรารายเดือน: ค่าพลังงานไฟฟ้า หน่วยละ 2.4649 บาท

ตารางที่ ค.11 ปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าและสารละลายที่ปัจจัยการแยกสลายแรงดันไฟฟ้า 1.0 V อุณหภูมิ 50 ºC สารละลาย HCl ความเข้มข้น 5 N

แรงดัน (V)	เวลา (h)	ค่าไฟฟ้า(บาท)		สารละลาย HCl (L)				Ethanol ที่ใช้(ml)
		kwh	จำนวนเงิน	ปริมาณเริ่มต้น	สารละลายที่เติมเพิ่ม	ปริมาณคงเหลือ	สารละลายที่ระเหยไป	
0	0	0	0	80				
1.0	12				7.2			
1.0	24				2			
1.0	36				2			
1.0	48	31.8			1.8	85.8		400
Total		**31.8**	**78.38**	**93**		**85.8**	**7.2**	**400**

ตารางที่ ค.12 ปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าและสารละลายที่ปัจจัยการแยกสลายแรงดันไฟฟ้า 1.0 V อุณหภูมิ 50 ºC สารละลาย HCl ความเข้มข้น 7 N

แรงดัน (V)	เวลา (h)	ค่าไฟฟ้า(บาท)		สารละลาย HCl (L)				Ethanol ที่ใช้(ml)
		kwh	จำนวนเงิน	ปริมาณเริ่มต้น	สารละลายที่เติมเพิ่ม	ปริมาณคงเหลือ	สารละลายที่ระเหยไป	
0	0	0	0	80				
1.0	12				2.2			
1.0	24				6			
1.0	36				1.8			
1.0	48	29.1				78		400
Total		**29.1**	**71.72**	**90**		**78**	**12**	**400**

สำหรับการใช้ไฟฟ้า ธุรกิจรวมกับที่อยู่อาศัย อุตสาหกรรมและหน่วยงานรัฐวิสาหกิจ หรืออื่นๆ แรงดัน 12 - 24 กิโลโวลต์ อัตรารายเดือน: ค่าพลังงานไฟฟ้า หน่วยละ 2.4649 บาท

ตารางที่ ค.13 ปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าและสารละลายที่ปัจจัยการแยกสลายแรงดันไฟฟ้า 1.0 V อุณหภูมิ 70 ºC สารละลาย HCl ความเข้มข้น 3 N

แรงดัน (V)	เวลา (h)	ค่าไฟฟ้า(บาท)		สารละลาย HCl (L)				Ethanol ที่ใช้(ml)
		kwh	จำนวนเงิน	ปริมาณเริ่มต้น	สารละลายที่เติมเพิ่ม	ปริมาณคงเหลือ	สารละลายที่ระเหยไป	
0	0	0	0	82				
1.0	12				6.6			
1.0	24				14.4			
1.0	36				9.2			
1.0	48	70.4			12.5	78.7		550
Total		**70.4**	**173.52**	**173.52**		**78.7**	**46**	**550**

ตารางที่ ค.14 ปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าและสารละลายที่ปัจจัยการแยกสลายแรงดันไฟฟ้า 1.0 V อุณหภูมิ 70 ºC สารละลาย HCl ความเข้มข้น 5 N

แรงดัน (V)	เวลา (h)	ค่าไฟฟ้า(บาท)		สารละลาย HCl (L)				Ethanol ที่ใช้(ml)
		kwh	จำนวนเงิน	ปริมาณเริ่มต้น	สารละลายที่เติมเพิ่ม	ปริมาณคงเหลือ	สารละลายที่ระเหยไป	
0	0	0	0	86				
1.0	12				7.9			
1.0	24				10.6			
1.0	36				9			
1.0	48	66.3			9.2	96.5		450
Total		**66.3**	**163.42**	**119.7**		**96.5**	**23.2**	**450**

สำหรับการใช้ไฟฟ้า ธุรกิจรวมกับที่อยู่อาศัย อุตสาหกรรมและหน่วยงานรัฐวิสาหกิจ หรืออื่นๆ แรงดัน 12 - 24 กิโลโวลต์ อัตรารายเดือน: ค่าพลังงานไฟฟ้า หน่วยละ 2.4649 บาท

ตารางที่ ค.15 ปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าและสารละลายที่ปัจจัยการแยกสลายแรงดันไฟฟ้า 1.0 V อุณหภูมิ 70 ºC สารละลาย HCl ความเข้มข้น 7 N

แรงดัน (V)	**เวลา (h)**	**ค่าไฟฟ้า(บาท)**		**สารละลาย HCl (L)**				**Ethanol ที่ใช้(ml)**
		kwh	**จำนวนเงิน**	**ปริมาณเริ่มต้น**	**สารละลายที่เติมเพิ่ม**	**ปริมาณคงเหลือ**	**สารละลายที่ระเหยไป**	
0	0	0	0	86				
1.0	12	16.4			6.6			
1.0	24	31.9			12.9			
1.0	36	49.3			9.6			
1.0	48	65.3			6.3	68		
Total		**65.3**	**160.95**	**121.4**		**68**	**53.4**	**500**

ตารางที่ ค.16 ปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าและสารละลายที่ปัจจัยการแยกสลายแรงดันไฟฟ้า 0.2 V อุณหภูมิ 30 ºC สารละลาย HCl ความเข้มข้น 3 N

แรงดัน (V)	เวลา (h)	อุณหภูมิ (°C)	ค่าไฟฟ้า (บาท)		สารละลาย HCl (L)				Athanol ที่ใช้ (ml)
			kwh	จำนวนเงิน	ปริมาณเริ่มต้น	สารละลายที่เติมเพิ่ม	ปริมาณคงเหลือ	สารละลายที่ระเหยไป	
0	0	0	0	0	86				
0.2	12	29.08	0.8						
0.2	24	29.08	1.7						
0.2	36	29.00	2.7			3			
0.2	48	30.68	4.2				74.7		500
Total		**29.46**	**4.2**	**10.35**	**89**		**74.7**	**14.3**	**500**

สำหรับการใช้ไฟฟ้า ธุรกิจรวมกับที่อยู่อาศัย อุตสาหกรรมและหน่วยงานรัฐวิสาหกิจ หรืออื่นๆ แรงดัน 12 - 24 กิโลโวลต์ อัตรารายเดือน: ค่าพลังงานไฟฟ้า หน่วยละ 2.4649 บาท

ตารางที่ ค.17 ปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าและสารละลายที่ปัจจัยการแยกสลายแรงดันไฟฟ้า 0.2 V อุณหภูมิ 30 ºC สารละลาย HCl ความเข้มข้น 5 N

แรงดัน (V)	เวลา (h)	อุณหภูมิ (°C)	ค่าไฟฟ้า (บาท)		สารละลาย HCl (L)				Athanol ที่ใช้ (ml)
			kwh	จำนวนเงิน	ปริมาณเริ่มต้น	สารละลายที่เติมเพิ่ม	ปริมาณคงเหลือ	สารละลายที่ระเหยไป	
0	0	0	0	0	86				
0.2	12	30.32	0.8						
0.2	24	30.92	1.5						
0.2	36	30.16	2.7						
0.2	48	30	4.4				84		500
Total		**30.35**	**4.4**	**10.76**	**86**		**84**	**2**	**500**

ตารางที่ ค.18 ปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าและสารละลายที่ปัจจัยการแยกสลายแรงดันไฟฟ้า 0.2 V อุณหภูมิ 30 ºC สารละลาย HCl ความเข้มข้น 7 N

แรงดัน (V)	เวลา (h)	อุณหภูมิ (°C)	ค่าไฟฟ้า (บาท)		สารละลาย HCl (L)				Athanol ที่ใช้ (ml)
			kwh	จำนวนเงิน	ปริมาณเริ่มต้น	สารละลายที่เติมเพิ่ม	ปริมาณคงเหลือ	สารละลายที่ระเหยไป	
0	0	0	0	0	86				
0.2	12	30.60	0.8						
0.2	24	29.16	1.7						
0.2	36	31.00	2.7						
0.2	48	30.96	4.2				81		500
Total		**30.72**	**4.2**	**10.35**	**86**		**81**	**5**	**500**

สำหรับการใช้ไฟฟ้า ธุรกิจรวมกับที่อยู่อาศัย อุตสาหกรรมและหน่วยงานรัฐวิสาหกิจ หรืออื่นๆ แรงดัน 12 - 24 กิโลโวลต์ อัตรารายเดือน: ค่าพลังงานไฟฟ้า หน่วยละ 2.4649 บาท

ตารางที่ ค.19 ปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าและสารละลายที่ปัจจัยการแยกสลายแรงดันไฟฟ้า 0.6 V อุณหภูมิ 30 ºC สารละลาย HCl ความเข้มข้น 3 N

แรงดัน (V)	เวลา (h)	อุณหภูมิ (°C)	ค่าไฟฟ้า (บาท)		สารละลาย HCl (L)				Athanol ที่ใช้ (ml)
			kwh	จำนวนเงิน	ปริมาณเริ่มต้น	สารละลายที่เติมเพิ่ม	ปริมาณคงเหลือ	สารละลายที่ระเหยไป	
0	0	0	0	0	86				
0.6	12	30.48	0.8						
0.6	24	29.80	1.7						
0.6	36	30.00	2.5						
0.6	48	30	4.2				79		300
Total		**30.37**	**4.2**	**10.35**	**86**		**79**	**7**	**300**

ตารางที่ ค.20 ปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าและสารละลายที่ปัจจัยการแยกสลายแรงดันไฟฟ้า 0.6 V อุณหภูมิ 30 ºC สารละลาย HCl ความเข้มข้น 5 N

แรงดัน (V)	เวลา (h)	อุณหภูมิ (°C)	ค่าไฟฟ้า(บาท)		สารละลาย HCl (L)				Athanol ที่ใช้ (ml)
			kwh	จำนวนเงิน	ปริมาณเริ่มต้น	สารละลายที่เติมเพิ่ม	ปริมาณคงเหลือ	สารละลายที่ระเหยไป	
0	0	0	0	0	86				
0.6	12	30.12	0.8						
0.6	24	31.52	1.8						
0.6	36	31.00	2.7						
0.6	48	30.72	4.3				76		600
Total		**30.84**	**4.3**	**10.60**	**86**		**76**	**10**	**600**

สำหรับการใช้ไฟฟ้า ธุรกิจรวมกับที่อยู่อาศัย อุตสาหกรรมและหน่วยงานรัฐวิสาหกิจ หรืออื่นๆ แรงดัน 12 - 24 กิโลโวลต์ อัตรารายเดือน: ค่าพลังงานไฟฟ้า หน่วยละ 2.4649 บาท

ตารางที่ ค.21 ปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าและสารละลายที่ปัจจัยการแยกสลายแรงดันไฟฟ้า 0.6 V อุณหภูมิ 30 ºC สารละลาย HCl ความเข้มข้น 7 N

แรงดัน (V)	เวลา (h)	อุณหภูมิ (°C)	ค่าไฟฟ้า(บาท)		สารละลาย HCl (L)				Athanol ที่ใช้(ml)
			kwh	จำนวนเงิน	ปริมาณเริ่มต้น	สารละลายที่เติมเพิ่ม	ปริมาณคงเหลือ	สารละลายที่ระเหยไป	
0	0	0	0	0	86				
0.6	12	30.12	0.8						
0.6	24	30.16	1.8						
0.6	36	30.44	2.7						
0.6	48	30.20	4.1				80		400
Total		**30.22**	**4.1**	**10.11**	**86**		**80**	**6**	**400**

ตารางที่ ค.22 ปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าและสารละลายที่ปัจจัยการแยกสลายแรงดันไฟฟ้า 0.2 V อุณหภูมิ 50 ºC สารละลาย HCl ความเข้มข้น 1 N

แรงดัน (V)	เวลา (h)	อุณหภูมิ (°C)	ค่าไฟฟ้า(บาท)		สารละลาย HCl (L)				Athanol ที่ใช้(ml)
			kwh	จำนวนเงิน	ปริมาณเริ่มต้น	สารละลายที่เติมเพิ่ม	ปริมาณคงเหลือ	สารละลายที่ระเหยไป	
0	0	0	0	0	80				0
0.2	12	49.24	8.3			8.8			0
0.2	24	49.44	15.7			4.4			
0.2	36	49.40	23.6			4.4			
0.2	48	49.44	31.4			4.4	81.7		400
Total		**49.38**	**31.4**	**77.40**	**102**		**81.7**	**20.3**	**400**

สำหรับการใช้ไฟฟ้า ธุรกิจรวมกับที่อยู่อาศัย อุตสาหกรรมและหน่วยงานรัฐวิสาหกิจ หรืออื่นๆ แรงดัน 12 - 24 กิโลโวลต์ อัตรารายเดือน: ค่าพลังงานไฟฟ้า หน่วยละ 2.4649 บาท

ตารางที่ ค.23 ปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าและสารละลายที่ปัจจัยการแยกสลายแรงดันไฟฟ้า 0.2 V อุณหภูมิ 70 ºC สารละลาย HCl ความเข้มข้น 1 N

แรงดัน (V)	เวลา (h)	อุณหภูมิ (°C)	ค่าไฟฟ้า(บาท)		สารละลาย HCl (L)				Athanol ที่ใช้(ml)
			kwh	จำนวนเงิน	ปริมาณเริ่มต้น	สารละลายที่เติมเพิ่ม	ปริมาณคงเหลือ	สารละลายที่ระเหยไป	
0	0	0	0	0	64	0	0		0
0.2	12	68.88	20.4			6.6			
0.2	24	68.96	40.1			19.8			
0.2	36	69.00	59.3			10.2			
0.2	48	68.84	78.4			13.2	57		300
Total		**68.92**	**78.4**	**193.25**	**113.8**		**57**	**56.8**	**300**

ตารางที่ ค.24 ปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าและสารละลายที่ปัจจัยการแยกสลายแรงดันไฟฟ้า 0.6 V อุณหภูมิ 50 ºC สารละลาย HCl ความเข้มข้น 1 N

แรงดัน (V)	เวลา (h)	อุณหภูมิ (°C)	ค่าไฟฟ้า(บาท)		สารละลาย HCl (L)				Athanol ที่ใช้(ml)
			kwh	จำนวนเงิน	ปริมาณเริ่มต้น	สารละลายที่เติมเพิ่ม	ปริมาณคงเหลือ	สารละลายที่ระเหยไป	
0	0	0	0	0	64	0	0		0
0.6	12	49.24	8.5			4.4			
0.6	24	49.28	16.5			4.4			
0.6	36	49.32	23.6			4.4			
0.6	48	49.48	31.6			6.8	58		250
Total		**49.33**	**31.6**	**77.89**	**84**		**58**	**26**	**250**

สำหรับการใช้ไฟฟ้า ธุรกิจรวมกับที่อยู่อาศัย อุตสาหกรรมและหน่วยงานรัฐวิสาหกิจ หรืออื่นๆ แรงดัน 12 - 24 กิโลโวลต์ อัตรารายเดือน: ค่าพลังงานไฟฟ้า หน่วยละ 2.4649 บาท

ตารางที่ ค.25 ปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าและสารละลายที่ปัจจัยการแยกสลายแรงดันไฟฟ้า 0.6 V อุณหภูมิ 70 ºC สารละลาย HCl ความเข้มข้น 1 N

แรงดัน (V)	เวลา (h)	อุณหภูมิ (°C)	ค่าไฟฟ้า(บาท)		สารละลาย HCl (L)				Athanol ที่ใช้(ml)
			kwh	จำนวนเงิน	ปริมาณเริ่มต้น	สารละลายที่เติมเพิ่ม	ปริมาณคงเหลือ	สารละลายที่ระเหยไป	
0	0	0	0	0	64	0	0		0
0.6	12	69.88	0	0	64	0	0		0
0.6	24	69.72	22.2			8.8			
0.6	36	69.80	42.9			17.6			
0.6	48	69.76	62.2			15.4			
Total		**69.79**	**82**			**13.2**	**60**		**300**

ตารางที่ ค.26 ปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าและสารละลายที่ปัจจัยการแยกสลายแรงดันไฟฟ้า 1.0 V อุณหภูมิ 50 ºC สารละลาย HCl ความเข้มข้น 1 N

แรงดัน (V)	เวลา (h)	อุณหภูมิ (°C)	ค่าไฟฟ้า(บาท)		สารละลาย HCl (L)				Athanol ที่ใช้(ml)
			kwh	จำนวนเงิน	ปริมาณเริ่มต้น	สารละลายที่เติมเพิ่ม	ปริมาณคงเหลือ	สารละลายที่ระเหยไป	
0	0	0	0	0	76	0	0		500
1.0	12	49.24	9			3.3			
1.0	24	49.28	16.9			6.2			
1.0	36	49.40	24.6			6.5			
1.0	48	49.36	30.6			6.6	63.8		
Total		**49.32**	**30.6**	**75.42**	**98.6**		**63.8**	**34.8**	**500**

สำหรับการใช้ไฟฟ้า ธุรกิจรวมกับที่อยู่อาศัย อุตสาหกรรมและหน่วยงานรัฐวิสาหกิจ หรืออื่นๆ แรงดัน 12 - 24 กิโลโวลต์ อัตรารายเดือน: ค่าพลังงานไฟฟ้า หน่วยละ 2.4649 บาท

ตารางที่ ค.27 ปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าและสารละลายที่ปัจจัยการแยกสลายแรงดันไฟฟ้า 1.0 V อุณหภูมิ 70 ºC สารละลาย HCl ความเข้มข้น 1 N

แรงดัน (V)	เวลา (h)	อุณหภูมิ (°C)	ค่าไฟฟ้า(บาท)		สารละลาย HCl (L)				Athanol ที่ใช้(ml)
			kwh	จำนวนเงิน	ปริมาณเริ่มต้น	สารละลายที่เติมเพิ่ม	ปริมาณคงเหลือ	สารละลายที่ระเหยไป	
0	0	0	0	0	80	0	0		500
1.0	12	68.88	21.9			14.9			
1.0	24	68.96	40.8			15.3			
1.0	36	68.96	59.5			17.6			
1.0	48	68.88	77.9			7	78		
Total		**68.92**	**77.9**	**192.02**	**134.8**		**78**	**56.8**	**500**

ตารางที่ ค.28 ปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าและสารละลายที่ปัจจัยการแยกสลายแรงดันไฟฟ้า 1.4 V อุณหภูมิ 30 ºC สารละลาย HCl ความเข้มข้น 1 N

แรงดัน (V)	เวลา (h)	อุณหภูมิ (°C)	ค่าไฟฟ้า(บาท)		สารละลาย HCl (L)				Athanol ที่ใช้(ml)
			kwh	จำนวนเงิน	ปริมาณเริ่มต้น	สารละลายที่เติมเพิ่ม	ปริมาณคงเหลือ	สารละลายที่ระเหยไป	
0	0	0	0	0	80	0	0		0
1.4	12	32.44	0.9			0			
1.4	24	31.56	1.8			0			
1.4	36	32.68	2.8			0			
1.4	48	31.32	4.3			0	75		300
Total		**32.00**	**4.3**	**10.60**	**80**		**75**	**5**	**300**

สำหรับการใช้ไฟฟ้า ธุรกิจรวมกับที่อยู่อาศัย อุตสาหกรรมและหน่วยงานรัฐวิสาหกิจ หรืออื่นๆ แรงดัน 12 - 24 กิโลโวลต์ อัตรารายเดือน: ค่าพลังงานไฟฟ้า หน่วยละ 2.4649 บาท

ตารางที่ ค.29 ปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าและสารละลายที่ปัจจัยการแยกสลายแรงดันไฟฟ้า 1.4 V อุณหภูมิ 30 ºC สารละลาย HCl ความเข้มข้น 3 N

แรงดัน (V)	เวลา (h)	อุณหภูมิ (°C)	ค่าไฟฟ้า(บาท)		สารละลาย HCl (L)				Athanol ที่ใช้(ml)
			kwh	จำนวนเงิน	ปริมาณเริ่มต้น	สารละลายที่เติมเพิ่ม	ปริมาณคงเหลือ	สารละลายที่ระเหยไป	
0	0	0	0	0	80	0	0		0
1.4	12	31.40	0.8			0			
1.4	24	33.20	2			0			
1.4	36	33.20	3			0			
1.4	48	33.48	4.4			0	78		300
Total		**32.82**	**4.4**	**10.85**	**80**		**78**	**2**	**300**

ตารางที่ ค.30 ปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าและสารละลายที่ปัจจัยการแยกสลายแรงดันไฟฟ้า 1.4 V อุณหภูมิ 30 ºC สารละลาย HCl ความเข้มข้น 5 N

แรงดัน (V)	เวลา (h)	อุณหภูมิ (°C)	ค่าไฟฟ้า(บาท)		สารละลาย HCl (L)				Athanol ที่ใช้(ml)
			kwh	จำนวนเงิน	ปริมาณเริ่มต้น	สารละลายที่เติมเพิ่ม	ปริมาณคงเหลือ	สารละลายที่ระเหยไป	
0	0	0	0	0	80	0	0		0
1.4	12	33.04	0.9			0			
1.4	24	34.32	1.8			0			
1.4	36	36.12	2.8			0			
1.4	48	36	4.2			0	78		300
Total		**34.87**	**4.2**	**10.35**	**80**		**78**	**2**	**300**

สำหรับการใช้ไฟฟ้า ธุรกิจรวมกับที่อยู่อาศัย อุตสาหกรรมและหน่วยงานรัฐวิสาหกิจ หรืออื่นๆ แรงดัน 12 - 24 กิโลโวลต์ อัตรารายเดือน: ค่าพลังงานไฟฟ้า หน่วยละ 2.4649 บาท

ตารางที่ ค.31 ปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าและสารละลายที่ปัจจัยการแยกสลายแรงดันไฟฟ้า 1.4 V อุณหภูมิ 30 ºC สารละลาย HCl ความเข้มข้น 7 N

แรงดัน (V)	เวลา (h)	อุณหภูมิ (°C)	ค่าไฟฟ้า(บาท)		สารละลาย HCl (L)				Athanol ที่ใช้(ml)
			kwh	จำนวนเงิน	ปริมาณเริ่มต้น	สารละลายที่เติมเพิ่ม	ปริมาณคงเหลือ	สารละลายที่ระเหยไป	
0	0	0	0	0	66	0	0		0
1.4	12	35.68	0.9			0			
1.4	24	37.00	1.8			0			
1.4	36	35.64	2.8			0			
1.4	48	34.4	4.3			0	64		300
Total		**35.68**	**4.3**	**10.60**	**66**		**64**	**2**	**300**

ตารางที่ ค.32 ปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าและสารละลายที่ปัจจัยการแยกสลายแรงดันไฟฟ้า 1.8 V อุณหภูมิ 30 ºC สารละลาย HCl ความเข้มข้น 7 N

แรงดัน (V)	เวลา (h)	อุณหภูมิ (°C)	ค่าไฟฟ้า(บาท)		สารละลาย HCl (L)				Athanol ที่ใช้(ml)
			kwh	จำนวนเงิน	ปริมาณเริ่มต้น	สารละลายที่เติมเพิ่ม	ปริมาณคงเหลือ	สารละลายที่ระเหยไป	
0	0	0	0	0	66	0	0		0
1.8	12	33.32	0.9			0			
1.8	24	35.48	1.9			0			
1.8	36	36.16	2.9			0			
1.8	48	36.08	4.4			0	64		350
Total		**35.26**	**4.4**	**10.85**	**66**		**64**	**2**	**350**

สำหรับการใช้ไฟฟ้า ธุรกิจรวมกับที่อยู่อาศัย อุตสาหกรรมและหน่วยงานรัฐวิสาหกิจ หรืออื่นๆ แรงดัน 12 - 24 กิโลโวลต์ อัตรารายเดือน: ค่าพลังงานไฟฟ้า หน่วยละ 2.4649 บาท

ตารางที่ ค.33 ปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าและสารละลายที่ปัจจัยการแยกสลายแรงดันไฟฟ้า 2.2 V อุณหภูมิ 30 ºC สารละลาย HCl ความเข้มข้น 7 N

แรงดัน (V)	เวลา (h)	อุณหภูมิ (°C)	ค่าไฟฟ้า(บาท)		สารละลาย HCl (L)				Athanol ที่ใช้(ml)
			kwh	จำนวนเงิน	ปริมาณเริ่มต้น	สารละลายที่เติมเพิ่ม	ปริมาณคงเหลือ	สารละลายที่ระเหยไป	
0	0	0	0	0	74	0	0		0
2.2	12	33.96	0.9			0			
2.2	24	35.00	1.9			0			
2.2	36	35.40	2.9			0			
2.2	48	34.08	4.5			0	70		300
Total		**34.61**	**4.5**	**11.09**	**74**		**70**	**4**	**300**

สำหรับการใช้ไฟฟ้า ธุรกิจรวมกับที่อยู่อาศัย อุตสาหกรรมและหน่วยงานรัฐวิสาหกิจ หรืออื่นๆ แรงดัน 12 - 24 กิโลโวลต์ อัตรารายเดือน: ค่าพลังงานไฟฟ้า หน่วยละ 2.4649 บาท

Present value tables

Present value of $1 $P = \frac{1}{(1+i)}^{n}$

Where : P = Present value factor
i = Interest rate
n = Number of periods

periods (n)	2%	4%	5%	6%	8%	10%	12%	14%	15%	16%	18%	20%	22%	24%	25%	30%	40%
0.....	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
1.....	0.980	0.962	0.952	0.943	0.926	0.909	0.893	0.877	0.870	0.862	0.847	0.833	0.820	0.806	0.800	0.769	0.714
2.....	0.901	0.925	0.907	0.890	0.857	0.826	0.797	0.769	0.756	0.743	0.718	0.694	0.672	0.650	0.640	0.592	0.510
3…. .	0.942	0.889	0.864	0.840	0.794	0.751	0.712	0.675	0.658	0.641	0. 609	0.579	0.551	0.524	0.512	0.455	0.364
4.....	0.924	0.855	0. 823	0.792	0.735	0.683	0.636	0.592	0.572	0.552	0.516	0.482	0.451	0.423	0.410	0.350	0.260
5.....	0.906	0.822	0.784	0. 747	0.681	0.621	0.567	0.519	0.497	0.476	0.437	0.402	0.370	0.341	0.328	0.269	0.186
6…..	0.888	0.790	0.746	0.705	0.630	0.564	0.507	0.456	0.432	0.410	0.370	0.335	0.303	0.275	0.262	0. 207	0.133
7.... .	0.871	0.760	0.711	0.665	0.583	0.513	0.452	0.400	0.376	0.354	0.314	0.279	0.249	0.222	0.210	0.159	0.095
8.....	0.853	0.730	0.677	0.627	0.540	0.467	0.404	0.351	0.327	0.305	0.266	0.233	0.204	0.179	0.168	0.123	0.068
9.....	0.837	0.703	0.45	0.592	0.500	0.424	0.361	0.308	0.284	0.263	0.225	0.194	0.167	0.144	0.134	0.094	0.048
10….	0.820	0.676	0.614	0.558	0.463	0.386	0.322	0.270	0.247	0.227	0.191	0.162	0.137	0.116	0.107	0.073	0.035

ตารางที่ ง . 1 มูลค่าปัจจุบันเงินทบงวด (Present value of Annuity)

Present value of $1 $P = \frac{1}{(1+i)^n}$

Where : P = Present value factor
i = Interest rate
n = Number of periods

periods (n)	2%	4%	5%	6%	8%	10%	12%	14%	15%	16%	18%	20%	22%	24%	25%	30%	40%
11.....	0.804	0.650	0.585	0.527	0.429	0.350	0.287	0.237	0.215	0.195	0.162	0.135	0.112	0.094	0.086	0.056	0.025
12.....	0.788	0.625	0.557	0.497	0.397	0.319	0. 357	0.280	0.187	0.168	0.137	0.112	0.092	0.070	0.069	0.043	0.018
13.....	0.773	0.601	0.530	0.469	0.368	0.290	0.229	0.182	0.163	0.145	0.116	0.093	0.075	0.061	0.055	0.033	0.013
14.....	0.758	0.577	0.505	0.442	0.340	0.263	0.205	0.160	0.141	0.125	0.099	0.078	0.062	0.049	0.044	0.025	0.009
15.....	0.743	0.555	0. 481	0.417	0.315	0.239	0.183	0.140	0.123	0.108	0.084	0.065	0.051	0.040	0.035	0.020	0.006
16....	0.728	0.534	0.458	0.394	0.292	0.218	0.163	0.123	0.107	0.093	0.071	0.054	0.042	0.032	0.028	0.015	0.005
17.....	0.741	0.513	0. 436	0.371	0.270	0.198	0.146	0.108	0.093	0.080	0.060	0.045	0.034	0.026	0.023	0.012	0.003
18....	0.700	0.494	0. 416	0.350	0.250	0.180	0.130	0.095	0.081	0.069	0.051	0.038	0.028	0.021	0.018	0.009	0.002
19.....	0.686	0. 475	0.396	0.33	0.232	0.164	0.116	0.083	0.070	0.060	0.043	0.031	0.023	0.017	0.014	0.007	0.002

ตารางที่ ง. 1มูลค่าปัจจุบันเงินทบงวด (Present value of Annuity) (ต่อ)

Present value of $1 $P = \frac{1}{(1+i)}^{n}$

Where : P = Present value factor
i = Interest rate
n = Number of periods

periods (n)	2%	4%	5%	6%	8%	10%	12%	14%	15%	16%	18%	20%	22%	24%	25%	30%	40%
20…..	0.673	0. 456	0.377	0.312	0.215	0.149	0.104	0.073	0.061	0.051	0.037	0.026	0.019	0.014	0.012	0.005	0.001
21….	.0.660	0. 439	0.359	0.294	0.199	0.135	0.093	0.064	0.053	0.044	0.031	0.022	0.015	0.011	0.009	0.004	0.001
22…..	0.647	0. 422	0.342	0.278	0.184	0.123	0.083	0.056	0.046	0.038	0.026	0.018	0.013	0.009	0.007	0.003	0.001
23…..	0.634	0.406	0.326	0.262	0.170	0.112	0.074	0.049	0.040	0.033	0.022	0.015	0.010	0.007	0.006	0.002	0.000
24….	0.622	0. 390	0.390	0.247	0.158	0.102	0.066	0.043	0.035	0.028	0.019	0.013	0.008	0.006	0.005	0.002	0.000
25….	0.610	0. 375	0.375	0.233	0.146	0.092	0.059	0.038	0.030	0.024	0.016	0.010	0.007	0.005	0.004	0.001	0.000

ตารางที่ ง .1 มูลค่าปัจจุบันเงินทบงวด (Present value of Annuity) (ต่อ)

Present Value of an Annuity of $ per period

$$P = 1 - \frac{1}{(l+i)^{n}} \Big/ i$$

where : P = Present value factor

I = Interes rate

N = Number of Periods

Periods (n)	2%	4%	5%	6%	8%	10%	12%	14%	15%	16%	18%	20%	22%	24%	25%	30%	40%
0	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
1	0.980	0.962	0.952	0.943	0.926	0.949	0.893	0.877	0.870	0.862	0.847	0.833	0.820	0.806	0.800	0.769	0.714
2	1.042	1.886	1.859	1.833	1.783	1.736	1.690	1.647	1.626	1.605	1.566	1.528	1.492	1.457	1.440	1.361	1.224
3	2.884	2.775	2.723	2.673	2.577	2.487	2.402	2.322	2.283	2.246	2.174	2.106	2.042	1.981	1.952	1.816	1.589
4	3.808	3.630	3.546	3.465	3.312	3.170	3.037	2.914	2.855	2.798	2.690	2.589	2.494	2.404	2.362	2.166	1.849
5	4.713	4.452	4.329	4.212	3.993	3.791	3.605	3.3433	3.352	3.274	3.127	2.991	2.864	2.745	2.689	2.436	2.035
6	5.601	5.242	5.076	4.917	4.623	4.355	4.111	3.889	3.784	3.685	3.498	3.326	3.167	3.020	2.951	2.643	2.168
7	6. 472	6.002	5.786	5.582	5.206	4.868	4.564	4.288	4. 160	4.039	3.812	3.065	3.416	3.242	3.161	2.802	2.263
8	7.325	6.733	6. 463	6.210	5.747	5.335	4.968	4.639	4.487	4.344	4.078	3.837	3.619	3.421	3.329	2.925	2.331

ตารางที่ ง. 2 มูลค่าปัจจุบันเงินทบงวด (Present value of Annuity)

Present Value of an Annuity of $ per period

$$P = 1 - \frac{1}{(l+i)^{n}} \Big/ i$$

where : P = Present value factor

I = Interes rate

N = Number of Period

Periods (n) 2%	4%	5%	6%	8%	10%	12%	14%	15%	16%	18%	20%	22%	24%	25%	30%	40%
9.....8.162	7.435	7.108	6. 802	6.247	5.759	5.328	4.946	4.872	4.607	4.030	4.031	3.786	3.566	3.463	3.019	2.379
10.....8.983	8.111	7.722	7.360	6.710	6.145	5.650	5.216	5.019	4.833	4.494	4.192	3.923	3.682	3.571	3.092	2.438
11.....9.787	8.760	8.306	7.887	7.139	6. 495	5.938	5.453	5.234	5.029	4.656	4.327	4.035	3.776	3.656	3.147	2.438
12.....10.575	9. 385	8.863	8. 384	7.536	6.814	6.194	5.660	5.421	5.197	4.793	4.439	4.127	3.851	3.725	3.190	2.456
13..... 11.348	9.986	9.394	8. 853	7.904	7.103	6.424	5.842	5.583	5.342	4.910	4.533	4.203	3.512	3.780	3.223	2.469
14..... 12.1406	10.563	9.899	9.295	8.244	7.367	6.628	6.002	5.724	5.468	5.008	4.644	4.265	3.962	3.824	3.249	2.478
15..... 12.849	11.118	10.380	9.712	8.559	7.606	6.811	6.142	5.847	5.575	5.092	4.675	4.315	4.004	3.859	3.268	2.484
16.....13.578	11.652	10.838	10.106	8.851	7.824	6.974	6.265	5.954	5.668	5.162	4.730	4.357	4.033	3.887	3.283	2.489
17 .....14.292	12.166	11.274	10.477	9.122	8.022	7.120	6.373	6.047	5.749	5.222	4.775	4.391	4.059	3.910	3.295	2.492

ตารางที่ ง. 2 มูลค่าปัจจุบันเงินทบงวด (Present value of Annuity) (ต่อ)

Present Value of an Annuity of $ per period

$$P = 1 - \frac{1}{(l+i)^{n}}$$
$$i$$

where : P = Present value factor

I = Interes rate

N = Number of Periods

Periods (n)	2%	4%	5%	6%	8%	10%	12%	14%	15%	16%	18%	20%	22%	24%	25%	30%	40%
18.....	14.992	12.659	11.690	10.828	9.372	8.204	7. 250	6.467	6.128	5.818	5.273	4.812	4.419	4.080	3.928	3. 304	2.494
19.....	15.678	13.134	12.085	11.158	9.604	8.365	7.366	6.550	6.198	5.877	5.316	4.743	4.442	4.097	3.942	3.311	2.498
20.....	16351	16.590	12.462	11.470	9.818	8.514	7.469	6.523	6.259	5.929	5.353	4.870	4.450	4.140	3.954	3.316	2.498
21.....	17.044	14.029	12.821	11.764	10.017	8.649	7.562	6.687	6.312	5.973	5.381	4.891	4.475	4.121	3.963	3.320	2.499
22.....	17.658	14.451	13.163	12.042	10.210	8.772	7.645	6.743	6.359	6.011	5.440	4.009	4.488	4.130	3.970	3.323	2.499
23.....	18.292	14.857	13.489	12.303	10.371	8.883	7. 718	6.792	6.399	6.044	5.432	4.925	4.499	4.137	3.976	3.325	2.499
24.....	18.914	15.247	13.799	12.550	10.529	8.985	7.784	6.835	6.434	6.073	5.451	4.937	4.507	4.143	3.981	3.327	2.499
25.....	19.523	15.622	14.094	12.783	10.675	9.077	7.843	6.873	6.464	6.097	5.467	4.948	4.514	4.147	3.958	3.329	2.499

ตารางที่ ง. 2 มูลค่าปัจจุบันเงินทบงวด (Present value of Annuity) (ต่อ)