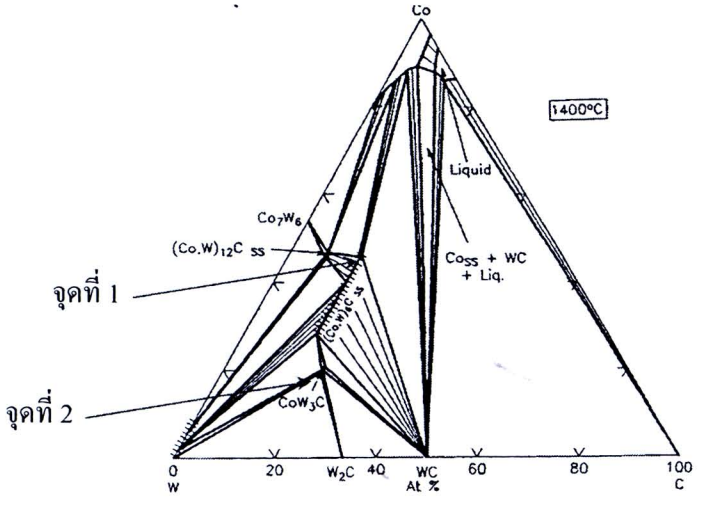
บทที่ 2
แนวคิดและทฤษฎีที่สำคัญ

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 1450 - 1600 °C โครงสร้างเป็น Co/WC/C ตามรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 โครงสร้างโลหะผสม ทังสเตน โคบอลต์และคาร์บอน [12]

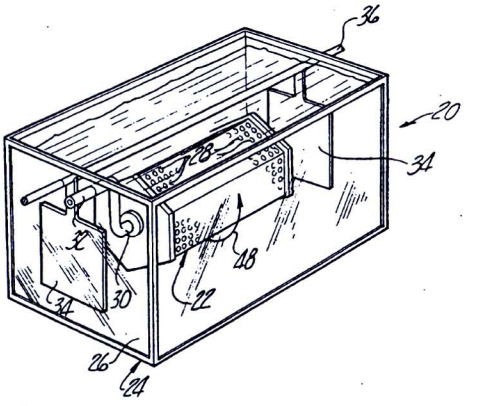
จากรูปที่ 2.1 จากจุดที่ 1 องค์ประกอบของธาตุที่พบคือ $(Co,W)_{12}C_{55}$ จะมีส่วนผสมของทังสเตน (W) ระหว่าง 60 - 70% คาร์บอน (C) ประมาณ 30 - 40% และมีโคบอลต์ประมาณ 50% เมื่อได้รับความร้อนถึง 1400 °C และจุดที่ 2 องค์ประกอบของธาตุที่พบคือ CoW_3C มีส่วนผสมของทังสเตน (W) ประมาณ 75 - 80% คาร์บอน (C) ประมาณ 35% และมีโคบอลต์ประมาณ 20% เมื่อได้รับความร้อนถึง 1400 °C จากสมดุลเฟสไดอะแกรมจะแสดงให้เห็นถึงอัตราส่วนผสมที่แตกต่างกันหลังจากได้รับความร้อนที่ 1400 °C องค์ประกอบของธาตุ 3 ชนิด จะเกิดการเปลี่ยนแปลงไปตามเปอร์เซ็นต์ของส่วนผสม

สำหรับการรีไซเคิลเศษซีเมนต์คาร์ไบด์ด้วยกระบวนการทางเคมีไฟฟ้าพบว่าอุณหภูมิมีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อการเพิ่มอัตราการแยกสลาย ความสามารถในการสลายสารประกอบโคบอลต์ในสารละลายขึ้นกับส่วนประกอบและขนาดเกรน (Grain size) การใช้กรดอซิติก (acetic acid) ที่อุณหภูมิ 80 °C ในเวลานานกว่า 50-300 ชั่วโมง ส่งผลให้ชิ้นงานเกิดการละลายลดลงประมาณ 65-99 μm ทั้งนี้ ขึ้นกับชนิดของเศษวัสดุที่มีสารประกอบโคบอลต์ วัสดุแต่ละชนิดมีสัดส่วนลดลงต่างกันได้แก่ สว่าน (Circuit board drill) 7.9% แผ่นมีดตัด(Cutting insert) 8-14.6% ชิ้นงานทนการสึกหรอ (Wear part) 10%-13% มีดตัด (Cutting knife) 10-12% [15] จากการแยกสลายชิ้นงานซีเมนต์ทังสเตนคาร์ไบด์ขนาดเกรนทังสเตนคาร์ไบด์อยู่ในช่วง 1-5 μm ส่วนผสมโคบอลต์ 20% อบผนึกที่อุณหภูมิ 1380 °C ชิ้นงานมีความแข็ง 83.1 HRA เพื่อแยกสารประกอบโคบอลต์ด้วยสารละลายไฮโดรคลอริก (HCl) ให้อัตราการแยกสารประกอบเพิ่มขึ้นโดยเพิ่มอุณหภูมิสารละลายสูงขึ้นถึง 110 °C ปรากฏว่าสามารถสกัดโคบอลต์ออกได้โดยใช้เวลา 24 ชั่วโมง [13] จากการละลายสารประกอบโคบอลต์ด้วยการใช้ตระกล้าไทเทนียม (Titanium) บรรจุชิ้นงานและคงอุณหภูมิที่ 25 °C แรงเคลื่อนไฟฟ้าอยู่ระหว่าง 200-600 มิลลิโวลต์ (mV) ในสารละลายไฮโดรคลอริกผสมกรดซิตริกประมาณ 40 กรัม/ลิตร ปรากฏว่าโคบอลต์ละลายได้ในช่วงร้อยละ 20.5-80.7 [14] และการนำเศษซีเมนต์ทังสเตนคาร์ไบด์กลับมาใช้ใหม่ด้วยกระบวนการหลอมในสังกะสี (Zinc process) ใช้อุณหภูมิสูงกว่า 1,000 °C ซึ่งเป็นกระบวนการที่ใช้ต้นทุนสูง [13] ขณะที่การแยกสลายชิ้นงานซีเมนต์ทังสเตนคาร์ไบด์ที่เป็นเครื่องมือขนาดใหญ่ (Larger the piece) จ่ายแรงดันไฟฟ้าในช่วง 0.5-20 โวลต์ กระแสไฟฟ้าในช่วง 0.5-30 แอมแปร์ ในสารละลายแอมโมเนียม (Ammonium solution) ปรากฏว่าวัสดุที่ได้มีความบริสุทธิ์ถึง 99% [15]

ปัจจุบันเครื่องมือตัด (Cutting tools) ซีเมนต์ทังสเตนคาร์ไบด์ที่ใช้งานในอุตสาหกรรมมีผู้ผลิตจำนวนมาก เงื่อนไขและตัวแปร (Parameters) ในการผลิตของแต่ละรายมีความแตกต่างกัน อาทิ อุณหภูมิ เวลา แรงดัน เป็นต้น ซึ่งเป็นองค์ประกอบสำคัญต่อคุณภาพด้านความแข็ง (Hardness) หากความแข็งมากมูลค่าของชิ้นงานก็สูงขึ้น [15] งานวิจัยพบว่าขนาดเกรนเล็กลงจะส่งผลให้ชิ้นงานมีความแข็งสูงขึ้น [16] และพบว่าเศษชิ้นงานเครื่องมือตัดที่ใช้งานในอุตสาหกรรมมีค่าความแข็งสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง และเศษซีเมนต์คาร์ไบด์มีปริมาณเพิ่มกว่า 20 ตัน ในปี พ.ศ.2550

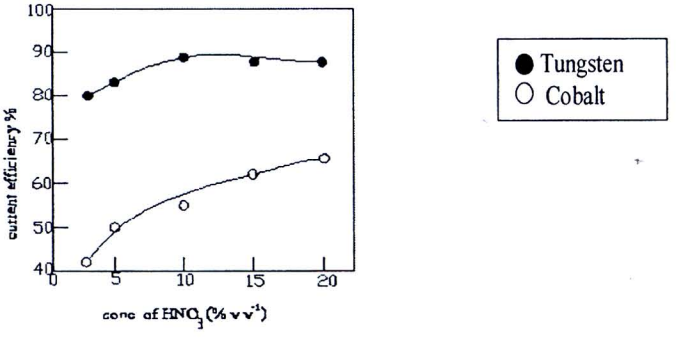
ดังนั้น ในการวิจัยนี้จึงเห็นความสำคัญเพื่อศึกษาการแยกสารประกอบโคบอลต์จากเศษแผ่นมีดความแข็งกว่า 90 HRA และผ่านการใช้งานในอุตสาหกรรม เพื่อค้นหาความสามารถของการสลายวัสดุความแข็งสูง ด้วยการแยกโลหะด้วยเคมีไฟฟ้า (Electrolysis) และพบว่าการแยกวัสดุดังกล่าวได้ผลดีขึ้นด้วยการใช้ hydrothermal treatment [7] เป็นงานวิจัยที่ทำการทดลองโดยเพิ่มอุณหภูมิและต้องใช้วัสดุและอุปกรณ์ที่มีคุณลักษณะเหมาะสมต่อการแยกสลายในสารละลาย ต่าง ๆ

กัน ตามสิทธิบัตร US.Patent 4,234,333 เป็นการสร้างอุปกรณ์ (Apparatus) สำหรับแยกสลายเศษซีเมนต์ทังสเตนคาร์ไบด์ แสดงรายการอุปกรณ์ตามรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 อุปกรณ์แยกสลายซีเมนต์ทังสเตนคาร์ไบด์ US Patent 4,234,333 [17]

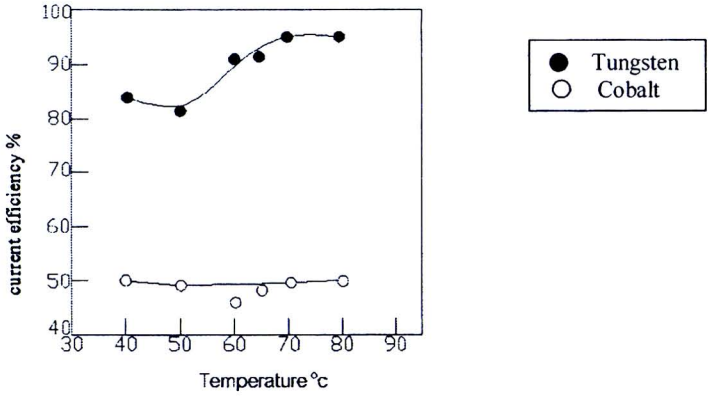
จากรูปที่ 2.2 แสดงอุปกรณ์ในการแยกสลายซีเมนต์ทังสเตนคาร์ไบด์ ชิ้นส่วนสำคัญหมายเลข 34 เป็นชิ้นส่วนแผ่นสเตนเลสสำหรับขั้วบวกและลบ ส่วนหมายเลข 48 เป็นถังบรรจุชิ้นงาน และหมายเลข 24 เป็นถังบรรจุสารละลาย



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

จากรูปที่ 2.3 แสดงความสัมพันธ์ของสารละลายกรดไนตริก (HNO_3) 5-20% กับกระแสไฟฟ้า 0-100% จากกราฟแสดงถึงประสิทธิภาพการสลายของโคบอลต์-ทังสเตน ที่ 2.5-20% ในการสลายของโคบอลต์ (Co) โดยกรดไนตริก (HNO_3) ใช้กระแสไฟฟ้า 41-65 % และการสลาย

ของทังสเตน (W) ที่ 2.5-20% ใช้กระแสไฟฟ้าอยู่ในช่วง 80-90% ซึ่งประสิทธิภาพของทังสเตน (W) ในการสลายสูงสุดอยู่ที่ การใช้สารละลายกรดไนตริก 10%



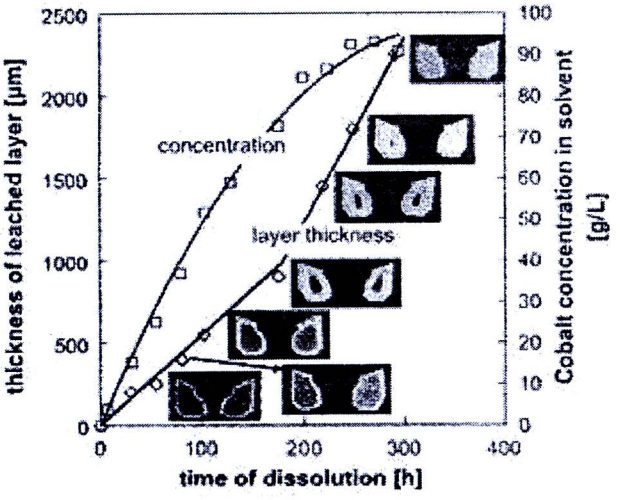
รูปที่ 2.4 Effect of temperature on current efficiency (current density 10 kA m^{-2} electrolyte 10% HNO_3) [11]

จากรูปที่ 2.4 แสดงความสัมพันธ์ของอุณหภูมิในการแยกสลายโคบอลต์ (Co) อยู่ในช่วง 30-90 องศาเซลเซียส (°C) กับกระแสไฟฟ้าอยู่ระหว่าง 40-100% โดยที่ โคบอลต์ถูกสลายด้วยอุณหภูมิระหว่าง 40-80 องศาเซลเซียส (°C) และทังสเตน (W) สลายตัวด้วยกระแสไฟฟ้า 80-95% โดยประสิทธิภาพที่ดีที่สุด ใช้อุณหภูมิ 80% องศาเซลเซียส (°C) ใช้กระแสไฟฟ้า 95%

จากรายงาน USGS Science for a changing world Report เกี่ยวกับการนำชิ้นงานซีเมนต์ทังสเตนคาร์ไบด์กลับมาใช้ใหม่ สำหรับประเทศสหรัฐอเมริกา โดย Kim B.Shedd เรื่อง Tungsten Recycling in the United States in 2000 ผลการวิจัยนี้ได้ตีพิมพ์เมื่อ ปี พ.ศ. 2548 พบว่าที่การใช้ทังสเตนมีแนวโน้มมากขึ้นและสัดส่วนการใช้งานสูงกว่าวัสดุอื่น ในกลุ่มวัสดุที่นำกลับมาใช้ใหม่ จากรายงานสรุปว่า สัดส่วนการใช้วัสดุทังสเตนที่เรียกว่า New scrap ต่อ Old scrap ในอัตราส่วน 20 ต่อ 80 และเมื่อพิจารณาสัดส่วนการนำวัสดุเก่าใช้งานแล้วกลับมาใช้ใหม่ปรากฏว่าเป็นวัสดุชนิดทังสเตน มากกว่าชนิดอื่นร้อยละ 66 ของวัสดุนำกลับมาใช้ใหม่ทั้งหมด ในปี ค.ศ.2000 สหรัฐอเมริกามีทังสเตนที่เป็น New scrap สูงถึง 10,400 ตัน ส่วนใหญ่ผลิตเป็นโลหะผงและผลิตชิ้นงานความแข็งสูง (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 อเมริกาใต้และ

อุซเบกิสถานร้อยละ 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) 3,387-3,422 องศาเซลเซียส จากรายงานพบว่าการนำวัสดุในอุตสาหกรรมกลับมาใช้ใหม่ (Recycling) ทั่วโลกมีทังสเตนมากกว่าร้อยละ 30 และหากนับรวมการนำทังสเตนและเหล็กกล้ารอบสูงกลับมาใช้ใหม่ผสมกับวัสดุอื่น ๆ แล้วมีสัดส่วนการใช้สูงถึงร้อยละ 60-70 และในส่วนของทังสเตนคาร์ไบด์ (WC) ส่วนมากผลิตเป็นผง (Powder) โดยมีคาร์บอนบริสุทธิ์ (Pure carbon Powder) ในสัดส่วนที่เหมาะสม สามารถทำการผลิตด้วยอุณหภูมิในช่วง 900 -2,000 องศาเซลเซียส ผลการศึกษาตัวอย่างผลิตภัณฑ์ที่จำหน่ายในตลาดทั่วโลก ชิ้นงานที่ผลิตด้วยผงทังสเตนคาร์ไบด์ วัสดุที่นิยมทำเป็นตัวประสาน (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 ทังสเตนคาร์ไบด์สามารถประยุกต์ใช้งานได้หลายแบบ ได้แก่ ผลิตเป็นชิ้นส่วนสำหรับอุปกรณ์และเครื่องมือในงานด้านการต้านทานการสึกหรอสูง (Abrasion machine part) ชิ้นส่วนเครื่องจักรกลหนัก อุปกรณ์ขุดเจาะ(Excavator) ชิ้นส่วนเครื่องจักรกลส่งกำลังสูง เช่น เฟือง ลูกรีด ชิ้นส่วนในเครื่องใช้เครื่องประดับที่คงทน ได้แก่ ชิ้นส่วนนาฬิกา ของเล่น ที่แข็งแรงสูง ทนทานต่อการกัดกร่อน และผลิตเครื่องมือตัด (Cutting tools) การเลือกวัสดุผสมขึ้นกับความต้องการด้านใช้งาน โดยเฉพาะโคบอลต์เป็นวัสดุประสานที่ดีสามารถผสมในสัดส่วนสูงถึง ร้อยละ 30 เป็นต้น



รูปที่ 2.5 Dissolution of Co [11]

จากรูปที่ 2.5 แสดงความสัมพันธ์ของเวลาในการแยกสลายชิ้นงาน อยู่ระหว่าง 0-400 ชั่วโมง (h) กับความหนาของชั้นวัตถุ อยู่ระหว่าง 0-2,500 ไมครอน (µm) และแกนตั้งด้านขวาเป็น ความเข้มข้นสารละลายโคบอลต์ (Co) อยู่ระหว่าง 0-100 กรัม/ลิตร (g/L) จากกราฟอธิบายได้ว่า การฟเส้นที่ 1 คือความหนาของชั้นวัตถุ เมื่อใช้เวลาในการแยกสลายนานมีค่าอยู่ระหว่าง 0-300 ชั่วโมง (h) ทำให้ผิวหน้าของชิ้นงานถูกกัดกร่อนมากขึ้นเรื่อยๆ มีค่าอยู่ระหว่าง 0-2,250 ไมครอน (µm) ความเข้มข้นสารละลายโคบอลต์มีค่าอยู่ระหว่าง 0-90 กรัม/ลิตร (g/L) และกราฟเส้นที่ 2 คือ ความเข้มข้น เมื่อใช้เวลาในการแยกสลายนานอยู่ระหว่าง 0-300 ชั่วโมง (h) ความหนาของวัตถุมีค่าอยู่ระหว่าง 0-2,250 ไมครอน (µm) ปริมาณความเข้มข้นสารละลายโคบอลต์ มีปริมาณสูงขึ้นมีค่าอยู่ระหว่าง 0-90 กรัม/ลิตร (g/L) สรุปได้ว่า เมื่อใช้เวลาในการแยกสลายเพิ่มขึ้นทำให้อัตราการถูกกัดกร่อนของชั้นผิวหน้าชิ้นงานเพิ่มสูงขึ้นและทำให้ระดับความเข้มข้นของสารละลายโคบอลต์เพิ่มสูงขึ้นตามไปด้วย

2.2 ชนิดและสมบัติโลหะผงทังสเตนคาร์ไบด์มาตรฐาน

ตารางที่ 2.1 ตารางแสดงเกรดของโลหะผงทังสเตนคาร์ไบด์ [49]

Carbide Grade Powder Grade	ความหนาแน่นก่อนอบผนึก (g/cm^3)	ความหนาแน่นหลังอบผนึก (g/cm^3)	ค่าความแข็ง HRC
FK-50F	7.8-8.0	13.90-14.10	90.7-91.7
YG-6	7.4-7.5	14.0-14.25	89.5-92.0
YG-6X	7.4-7.5	13.80-14.0	89.0-91.0
YG-8	8.1-8.2	14.64-14.74	88.0-89.0
YG-11	8.0-8.2	14.20-14.60	87.0-88.2
YG-12	8.0-8.2	14.10-14.40	88.0-88.4
YG-20	7.3-7.45	13.45-13.55	85.2-86.2
H-17	8.1-8.3	14.25-14.50	91.0-92.3
H-19	8.1-8.3	14.20-14.50	89.32-90.1
P-10	7.4-7.5	13.70-14.10	91.2-91.8
P-20	6.8-6.9	12.30-12.60	90.1-91.5
K-10	-	14.65-14.95	92.2-92.6
M-15	8.2-8.4	13.25-13.85	90.2-90.8
YG-20-C	7.4-7.5	12.50-12.90	90.7-91.8
YS-25	7.4-7.5	14.40-13.80	90.7-91.3
YC-30S	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

จากตารางที่ 2.1 แสดงเกรดของโลหะผงทังสเตนคาร์ไบด์มาตรฐาน จากการพิจารณาปรากฏว่าโลหะผงทังสเตนคาร์ไบด์

เกรด FK-50F ความหนาแน่นก่อนการอบผนึกอยู่ระหว่าง 7.8-8.0 (g/cm^3) ความหนาแน่นหลังอบผนึกอยู่ระหว่าง 14.0-14.25 (g/cm^3) และมีความแข็งอยู่ระหว่าง 90.7-91.7 HRC

เกรด YG-8 ความหนาแน่นก่อนการอบผนึกอยู่ระหว่าง 8.1-8.2 (g/cm^3) ความหนาแน่นหลังอบผนึกอยู่ระหว่าง 13.90-14.10 8.0 (g/cm^3) และมีความแข็งอยู่ระหว่าง 89.5-92.0 HRC

เกรด YG-6X ความหนาแน่นก่อนการอบผนึกอยู่ระหว่าง 7.4-7.5 (g/cm^3) ความหนาแน่นหลังอบผนึกอยู่ระหว่าง 14.0-14.25 (g/cm^3) และมีความแข็งอยู่ระหว่าง 89.5-92.0HRC

เกรด YG-8 ความหนาแน่นก่อนการอบผนึกอยู่ระหว่าง 8.1-8.2 (g/cm^3) ความหนาแน่นหลังอบผนึกอยู่ระหว่าง 14.64-14.74 (g/cm^3) และมีความแข็งอยู่ระหว่าง 88.0-89.0 HRC

เกรด YG-11 ความหนาแน่นก่อนการอบผนึกอยู่ระหว่าง 8.0-8.2 (g/cm^3) ความหนาแน่นหลังอบผนึกอยู่ระหว่าง 14.20-14.60 (g/cm^3) และมีความแข็งอยู่ระหว่าง 87.0-88.2 HRC

เกรด YG-12 ความหนาแน่นก่อนการอบผนึกอยู่ระหว่าง 8.0-8.2 (g/cm^3) ความหนาแน่นหลังอบผนึกอยู่ระหว่าง 14.10-14.40 (g/cm^3) และมีความแข็งอยู่ระหว่าง 88.0-88.4 HRC

เกรด YG-20 ความหนาแน่นก่อนการอบผนึกอยู่ระหว่าง 7.3-7.45 (g/cm^3) ความหนาแน่นหลังอบผนึกอยู่ระหว่าง 13.45-13.55 (g/cm^3) และมีความแข็งอยู่ระหว่าง 85.2-86.2 HRC

ตารางที่ 2.2 สมบัติของโลหะผงทังสเตนคาร์ไบด์ของบริษัท เอทีไอแอดีนี [51]

ประเภท (Type)	**ช่วงของอนุภาค (Particle Range) (μm)**	**คาร์บอนรวม (Carbon Total) (%)**	**ออกซิเจน (Oxygen) (%)**
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

จากตารางที่ 2.2 แสดงสมบัติโลหะผงทังสเตนคาร์ไบด์ บริษัท เอทีไอแอดีนี (ATI Alldyne) โดยแบ่งตามประเภทดังนี้

ประเภท O ขนาดอนุภาคอยู่ระหว่าง 0.5 ~ 0.99μm %คาร์บอนอยู่ระหว่าง 6.10 ~ 6.16% และ %ออกซิเจนน้อยกว่า 0.28%

ประเภท I ขนาดอนุภาคอยู่ระหว่าง 1.00 ~ 1.69μm %คาร์บอนมอยู่ระหว่าง 6.10 ~ 6.16% และ %ออกซิเจนน้อยกว่า 0.20%

ประเภท II ขนาดอนุภาคอยู่ระหว่าง 1.70 ~ 5.99μm %คาร์บอนมอยู่ระหว่าง 6.10 ~ 6.16% และ% ออกซิเจนน้อยกว่า 0.18%

ประเภท III ขนาดอนุภาคอยู่ระหว่าง 6.0 ~ 8.99μm %คาร์บอนอยู่ระหว่าง 6.10 ~ 6.16% และ %ออกซิเจนน้อยกว่า 0.01%

ประเภท IV ขนาดอนุภาคอยู่ระหว่าง 9.0 ~ 15.0μm %คาร์บอนอยู่ระหว่าง 6.10 ~ 6.16% และ %ออกซิเจนน้อยกว่า 0.08%

ประเภท V ช่วงของขนาดอนุภาคมากกว่า 15 μm เปอร์เซ็นต์คาร์บอนรวมอยู่ในช่วงระหว่าง6.10 ~ 6.16 เปอร์เซ็นต์ เปอร์เซ็นต์ออกซิเจนน้อยกว่า 0.08 เปอร์เซ็นต์

ตารางที่ 2.3 สมบัติของโลหะผงทังสเตนคาร์ไบด์ของบริษัท เอทีไอแอดีนี [51]

ประเภท (Type)	**ช่วงของอนุภาค (Particle Range) (μm)**	**คาร์บอนรวม (Carbon Total) (%)**	**คาร์บอนอิสระ (Free Carbon O_2) (%)**
WC/O	0.80-0.99	6.10-6.18	0.07
WC/I	1.00-1.99	6.10-6.18	0.07
WC/II	2.00-5.99	6.10-6.18	0.07
WC/III	6.00-8.99	6.10-6.18	0.07
WC/IV	9.00-13.99	6.10-6.18	0.07
WC/V	14.00-24.99	6.10-6.18	0.07
WC/VI	25.00-50.00	6.10-6.18	0.07

จากตารางที่ 2.3 แสดงสมบัติของโลหะผงทังสเตนคาร์ไบด์ของบริษัท บัฟฟาโลทังสเตน (Buffalo Tungsten) โดยแบ่งตามประเภทดังนี้

ประเภท WC/O อนุภาคอยู่ระหว่าง 0.80-0.99 μm %คาร์บอนรวม 6.10-6.18% และคาร์บอนอิสระ 0.07%

ประเภท WC/I อนุภาคอยู่ระหว่าง 1.00-1.99 μm %คาร์บอนรวม 6.10-6.18% และคาร์บอนอิสระ 0.07%

ประเภท WC/II อนุภาคอยู่ระหว่าง 1.00-1.99 μm %คาร์บอนรวม 6.10-6.18% และคาร์บอนอิสระ 0.07%

ประเภท WC/III อนุภาคอยู่ระหว่าง 6.00-8.99 μm %คาร์บอนรวม 6.10-6.18% และคาร์บอนอิสระ 0.07%

ประเภท WC/IV อนุภาคอยู่ระหว่าง 9.00-13.99 μm %คาร์บอนรวม 6.10-6.18% และคาร์บอนอิสระ 0.07%

ประเภท WC/V อนุภาคอยู่ระหว่าง 14.00-24.99 μm %คาร์บอนรวม 6.10-6.18% และคาร์บอนอิสระ 0.07%

ประเภท WC/VI อนุภาคอยู่ระหว่าง 25.00-50.00 μm %คาร์บอนรวม 6.10-6.18% และคาร์บอนอิสระ 0.07%

ตารางที่ 2.4 แสดงสมบัติชิ้นงานซีเมนต์คาร์ไบด์ [48]

ส่วมผสม	**ความแข็ง, HV**	**TRS, MPa**	**ความหนาแน่น, g/cm^3**
WC-20 wt% Co	1050	2850	13.55
WC-10wt% Co	1625	2280	14.50
WC-3 wt% Co	1900	1600	15.25
WC-10 wt% Co-22 wt% (Ti, Ta, Nb) C	1500	2000	11.40

จากตารางที่ 2.4 แสดงสมบัติของชิ้นงานซีเมนต์คาร์ไบด์ที่ส่วนผสมโคบอลต์ต่างๆ กันดังนี้

ชิ้นงานส่วนผสม WC-20wt%Co ความแข็ง 1050 HV ค่า TRS 2850 MPa และความหนาแน่นอยู่ที่ 15.25 g/cm^3

ชิ้นงานส่วนผสม WC-10wt% Co ความแข็ง 1625 HV ค่า TRS 2280 MPa และความหนาแน่นอยู่ที่ 14.50 g/cm^3

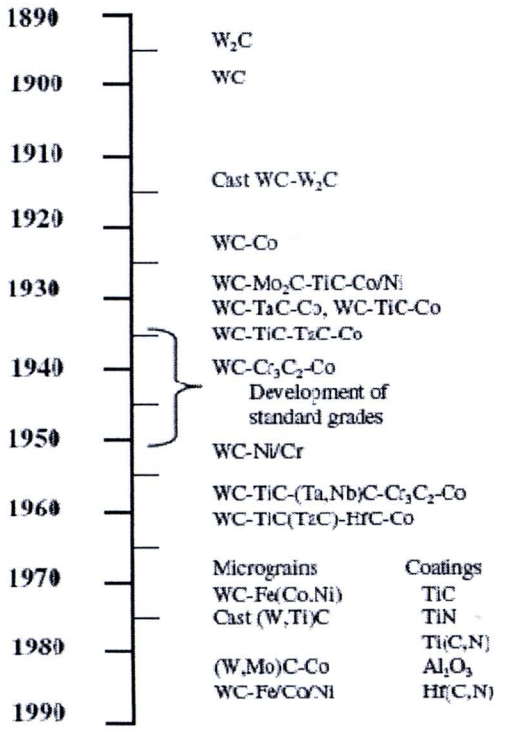
ชิ้นงานส่วนผสม WC-3wt% Co ความแข็ง 1900 HV ค่า TRS 1600 MPa และความหนาแน่นอยู่ที่ 15.25 g/cm^3

ชิ้นงานส่วนผสม WC-10 wt% Co-22 wt% (Ti, Ta, Nb) C ความแข็ง 1500 HV ค่า TRS 2000 MPa และความหนาแน่นอยู่ที่ 11.40 g/cm^3

2.3 กระบวนการผลิตซีเมนต์คาร์ไบด์

2.3.1 การพัฒนาซีเมนต์คาร์ไบด์ในอุตสาหกรรมเครื่องมือตัด

การใช้งานทังสเตนคาร์ไบด์ มีการพัฒนาต่อเนื่อง ซึ่งการผลิตชิ้นงานซีเมนต์คาร์ไบด์ที่ผสมธาตุหลายชนิด เพื่อพัฒนาขีดความสามารถในการใช้งาน โดยสามารถอธิบายได้ดังนี้



รูปที่ 2.6 พัฒนาการซีเมนต์คาร์ไบด์ กลุ่มเครื่องมือตัดในช่วงศตวรรษที่ผ่านมา [18]

จากรูปที่ 2.6 แสดงการผลิตชิ้นงานซีเมนต์คาร์ไบด์โดยพัฒนาการผสมธาตุต่างๆ เพื่อคุณภาพของวัสดุ โดยเริ่มต้นจากปี ค.ศ.1890-1900 จากวัตถุดิบทังสเตน (W) มีการพัฒนาสมบัติโดยการผสมธาตุคาร์บอน มีสมบัติเป็นวัสดุ W_2C และ WC ส่วนปี ค.ศ.1900-ค.ศ.1915 มีการนำ W_2C และ WC เพื่อใช้ในงานหล่อขึ้นรูป (Cast WC-W_2C) ส่วนปี ค.ศ.1920 พัฒนาชิ้นงานทังสเตนคาร์ไบด์มีการผสมธาตุโคบอลต์และสามารถผลิตชิ้นงานที่มีส่วนผสม WC-Co นอกจากการผสมโคบอลต์แล้วต่อมาในปี ค.ศ.1925 มีการผสมธาตุ WC-Mo_2C-TiC-Co/Ni, ในปี ค.ศ. 1930 ชิ้นงานซีเมนต์คาร์ไบด์ผสมด้วย Tac-Co และTiC-Co ต่อมาระหว่างปี ค.ศ. 1935-1950 เป็นช่วงเวลาการสร้างมาตรฐานชิ้นงานซีเมนต์ทังสเตนคาร์ไบด์ โดยการผสมต่างๆ ดังนี้ ในปี 1935 ผสมธาตุ Tic-Co และ Tic-Tac-Co, ในปี ค.ศ.1940 ผสมธาตุ Cr_3 C_3-Co จากปี ค.ศ.1950 ผสม Ni/Cr ในปี ค.ศ.1955 ชิ้นงานซีมเมนต์ทังสเตนคาร์ไบด์ผสมด้วยธาตุ TiC-(Ta,Nb)C-Cr_3C_2-Co และอีกห้าปีต่อมาคือ ในปี ค.ศ. 1960 มีการพัฒนาโดยผสมทังสเตนคาร์ไบด์ผสมด้วย TiC(TaC)-HfC-Co ในปี ค.ศ.1965 ได้มีการผลิตชิ้นงานซีเมนต์คาร์ไบด์ในระดับ Micrograins โดยปี ค.ศ.1970 นำชิ้นงานที่มีส่วนผสม WC-Fe(Co,Ni) ทำการ Coating ด้วย TiC ส่วนปี 1975 ผลิตชิ้นงานประเภท Cast (W,Ti)C ทำการ

Coating ด้วย TiN และ $Ti(C_3N)$ ในปี ค.ศ.1980 ผลิตชิ้นงานไมโครเกรนคือ (W,Mc)C-Co ทำการ Coating ด้วย Al_2O_3 ต่อมานำชิ้นงานระดับไมโครเกรนที่ส่วนผสม WC-FeCo/Ni มาทำการ Coating ด้วย Hf (C,N) เป็นต้น

2.3.2 ขั้นตอนการผลิตชิ้นงานโลหะแข็ง

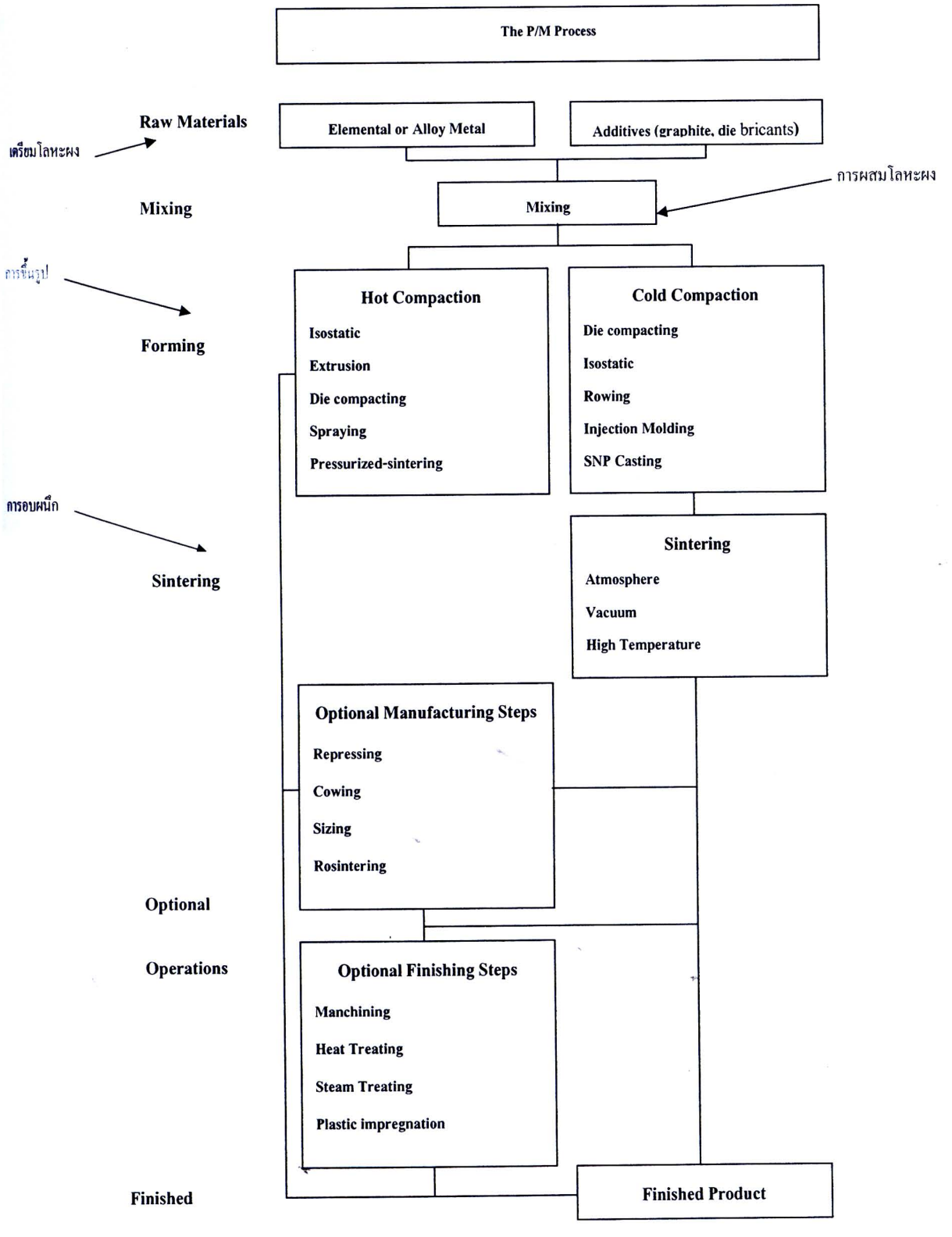
กรรมวิธีทางโลหะผง หรือ PM คือกรรมวิธีการผลิตที่ได้รับการพัฒนาอย่างต่อเนื่องสำหรับการผลิตชิ้นส่วนโลหะทั้งในและนอกกลุ่มเหล็กที่มีคุณภาพดี โดยขั้นตอนการผลิตสำหรับโลหะผงโดยทั่วไปจะประกอบด้วย 4 ขั้นตอนดังรูปที่ 2.7 คือ

2.3.2.1 การผลิตและการเตรียมโลหะผง แบ่งออกได้อย่างกว้างๆ คือ วิธีทางกล, ฟิสิกส์, และเคมี

2.3.2.2 การผสมโลหะผง เป็นขั้นตอนการผสมโลหะผงเข้ากับ สารหล่อลื่น, สารเพิ่มการยึดเกาะ, หรือโลหะผงชนิดอื่น

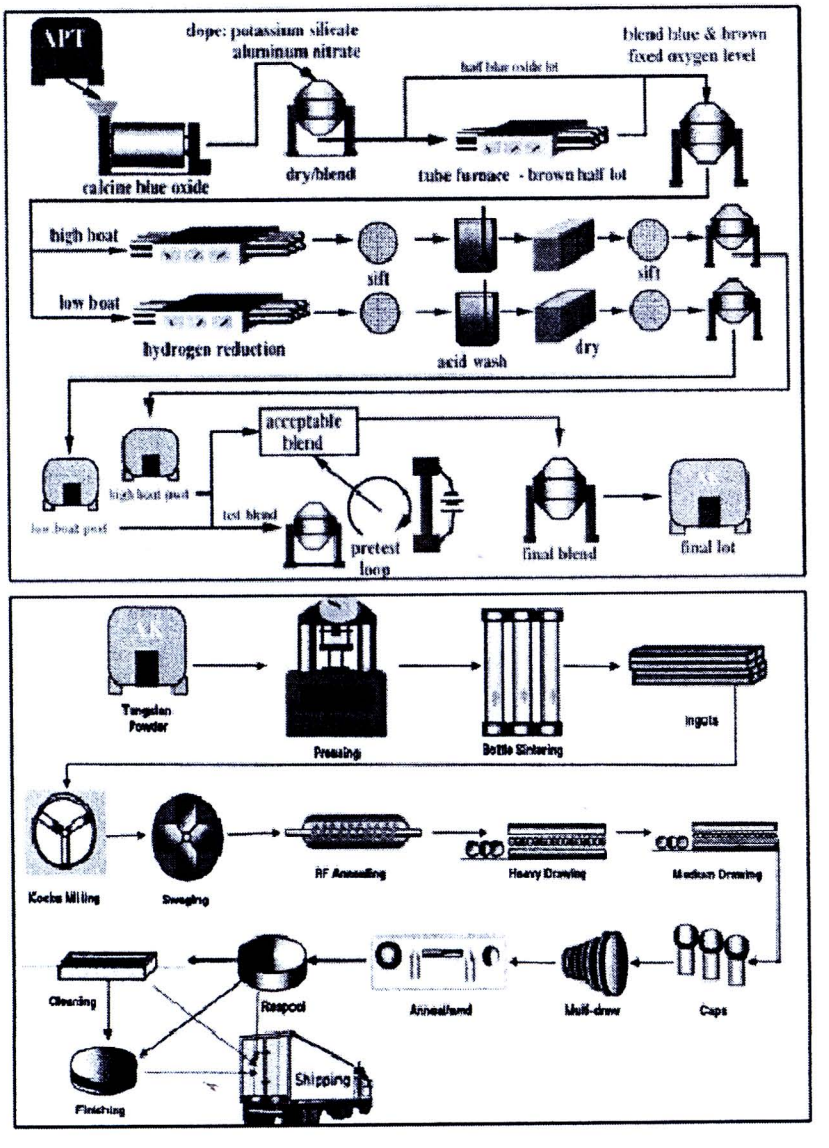
2.3.3.3 การอัดขึ้นรูปโลหะผง เป็นการอัดขึ้นรูปโลหะผงด้วยแม่พิมพ์ ผลิตผลที่ได้เรียกว่า Green Compact โลหะผงจะยึดเกาะกันจนมีความแข็งแรง (Green Strength)

2.3.3.4 การอบผนึก (Sintering) เป็นการอบเผา Green Compact ที่อุณหภูมิต่ำกว่าจุดหลอมเหลวของโลหะผง โดยทั่วไปจะต้องมีการควบคุมบรรยากาศภายในเตาเพื่อยับยั้งการเกิดปฏิกิริยาเคมี โลหะผงจะเชื่อมติดกันที่อุณหภูมินั้นเนื่องมาจากพลังงานที่เกิดขึ้นจากการลดลงของพื้นที่ผิว ตามหลักการทางเทอร์โมไดนามิกส์ โดยชิ้นงานที่ได้จะมีความแข็งแรงมากพอที่จะนำไปใช้งานต่อไปได้



รูปที่ 2.7 แสดงขั้นตอนการผลิตชิ้นงานด้วยกรรมวิธีทางโลหะผง [1]

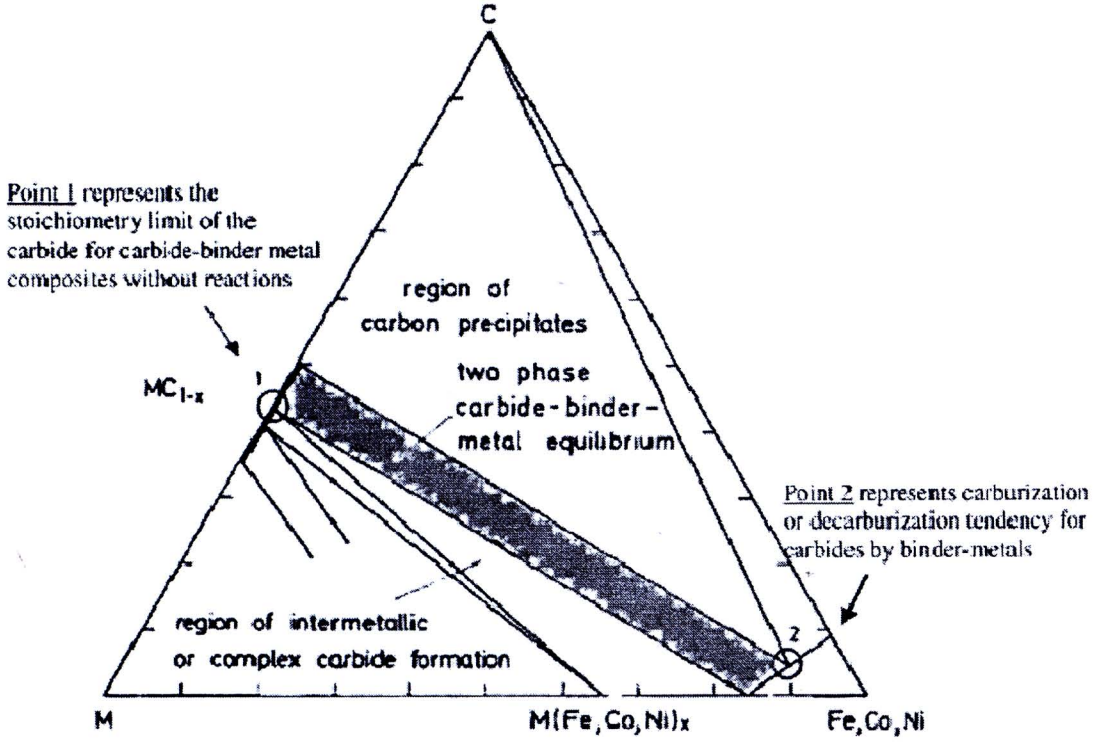
ภายหลังการอบผนึก ชิ้นงานที่ได้สามารถนำไปใช้งานได้ทันที หรืออาจจะต้องนำไปผ่านกระบวนการทางกล (Machining) อีกเพียงเล็กน้อย ดังนั้นจึงอาจกล่าวได้ว่า ด้วยกรรมวิธีทางโลหะผงนี้ สามารถผลิตชิ้นงานขึ้นได้โดยไม่เกิดการสูญเสียเนื้อวัสดุหรือเกิดการสูญเสียในอัตราที่ต่ำมาก โดยทั่วไปประสิทธิผล (Yielding) ของกระบวนการโลหะผงจะมีค่าประมาณร้อยละ 97 [1] ซึ่งจัดได้ว่าเป็นกระบวนการผลิตที่มีประสิทธิผลอย่างยิ่งต่อการอนุรักษ์พลังงานและวัตถุดิบ



รูปที่ 2.8 PM processing steps of tungsten. Courtesy of E. Kimmel, Towanda, PA. [19]

จากรูปที่ 2.8 แสดงกรรมวิธีทางโลหะผงแบ่งออกเป็นสองส่วน ส่วนที่ 1 เป็นการผลิต Tungsten Powder เริ่มต้นจาก calcine blue oxide ผสมด้วย potassium silicte และ aluminum nitrate และทำให้แห้ง ครึ่งหนึ่งนำไปผ่านการให้ความร้อน tube furnace-brown half lot จะได้เป็นสีน้ำตาล และนำอีกครึ่งที่เป็น half blue oxide lot รวมกับ brown half lot ทำการผสม oxygen ได้เป็น high boat นำไปผ่านการกรอง และ low boat เติม hydrogen และกรอง จากนั้นได้ทำการล้างด้วยกรด และทำให้แห้ง แล้วกรองอีกครั้ง ขั้นตอนต่อไปทำการ test blend และสำเร็จเป็นเป็นผงทังสเตนที่สามารถนำไปผลิตชิ้นงานคาร์ไบด์หรือจำหน่ายได้

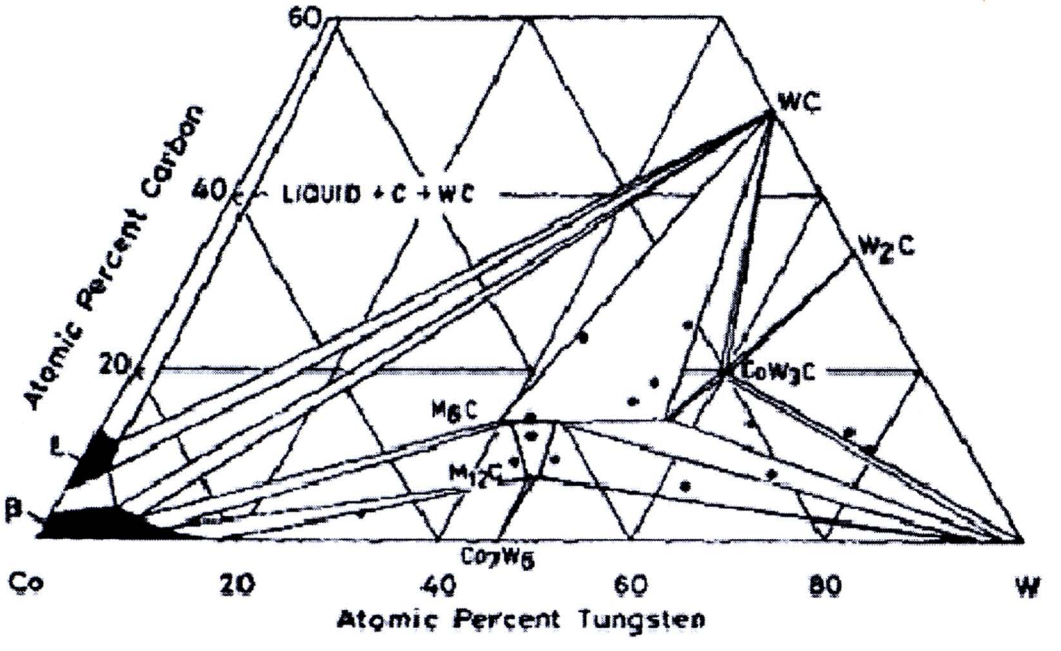
ส่วนที่ 2 เริ่มต้นด้วยผงทังสเตน ทำการอัดขึ้นรูป Bottle sintering ได้ผลิตภัณฑ์ เช่น Ingots ใช้งานเกิดเป็นเศษ นำมาผ่านการบดแล้วหลอม ปรับปรุงคุณภาพ ผลิตเป็นชิ้นส่วนฝาครอบ เครื่องเสียง อิเล็กทรอนิกส์ ทำเป็นไส้หลอดไฟ ขดลวด ทำความสะอาดและจัดจำหน่าย



รูปที่ 2.9 Hard metal phase equilibria schematically [20]

จากรูปที่ 2.9 แสดงเฟสไดอะแกรมชิ้นงานโลหะแข็ง จุดที่ 1 อธิบายถึงจุดสูงสุดของธาตุประกอบคาร์บอนในการยึดเหนี่ยวธาตุ M โดยปราศจากปฏิกิริยาตอบกลับ โครงสร้างชิ้นงานมีธาตุ

คาร์บอน (C) ประมาณ 60% มี ธาตุ M ประมาณ 20% Fe, Co, Ni ประมาณ 80% จุดที่ 2 อธิบายแนวโน้มสารประกอบธาตุคาร์บอนใกล้ธาตุโลหะมีปริมาณคาร์บอน (C) ประมาณ 95% ธาตุ M ประมาณ 85% และ Fe, Co, Ni ประมาณ 15%



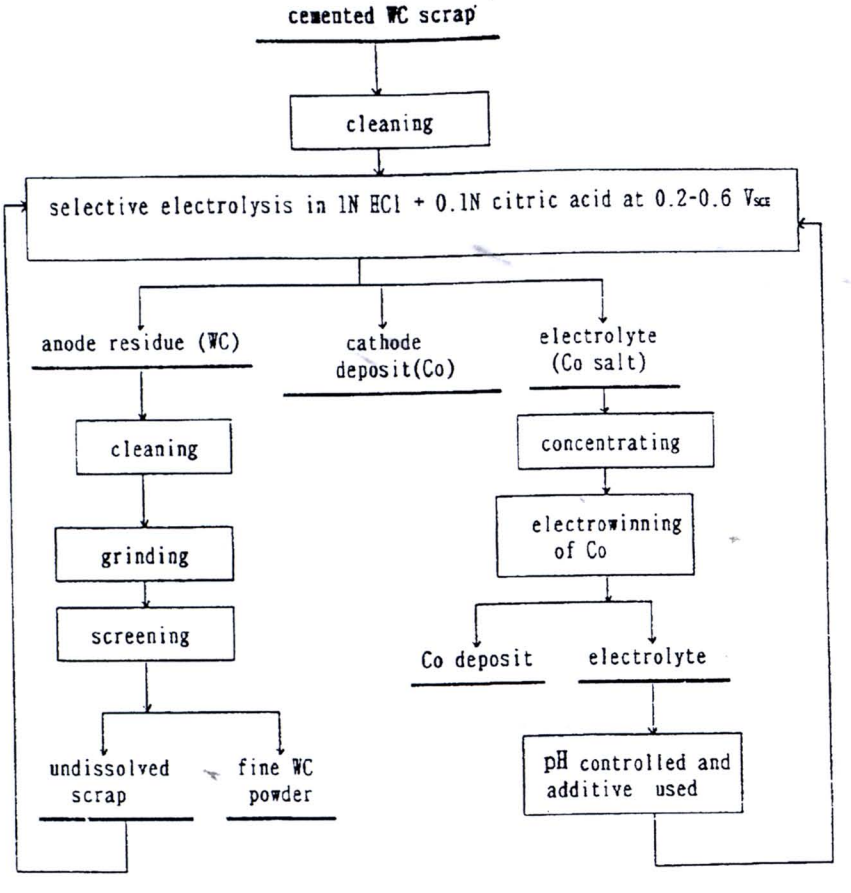
จากรูปที่ 2.10 Isothermal section of the W-C-Co phase diagram at 1400 °C [21]

จากรูปที่ 2.10 แสดงเฟสไดอะแกรม W-C-Co จากจุด Co_7W_6 ส่วนผสมของทังสเตน (W) ประมาณ 55 % โคบอลต์ (Co) ประมาณ 45 % คาร์บอน จุด $M_{12}C$ ส่วนผสมทังสเตน (W) ประมาณ 55 % โคบอลต์ (Co) ประมาณ 45 % คาร์บอน (C) ประมาณ 5 % จุด M_6C ส่วนผสมทังสเตน (W) ประมาณ 55 % โคบอลต์ (Co) ประมาณ 45% คาร์บอน (C) ประมาณ 15 % จุด CoW_3C ส่วนผสมทังสเตน (W) ประมาณ 30 % โคบอลต์ (Co) ประมาณ 70 % คาร์บอน (C) ประมาณ 20 % จุด W_2C ส่วนผสมทังสเตน (W) ประมาณ 18 % โคบอลต์ (Co) ประมาณ 92 % คาร์บอน (C) ประมาณ 35 % จุด WC ส่วนผสมทังสเตนประมาณ 25 % โคบอลต์ประมาณ 75 % และคาร์บอนประมาณ 50 %

2.4 การแยกสลายเศษซีเมนต์คาร์ไบด์

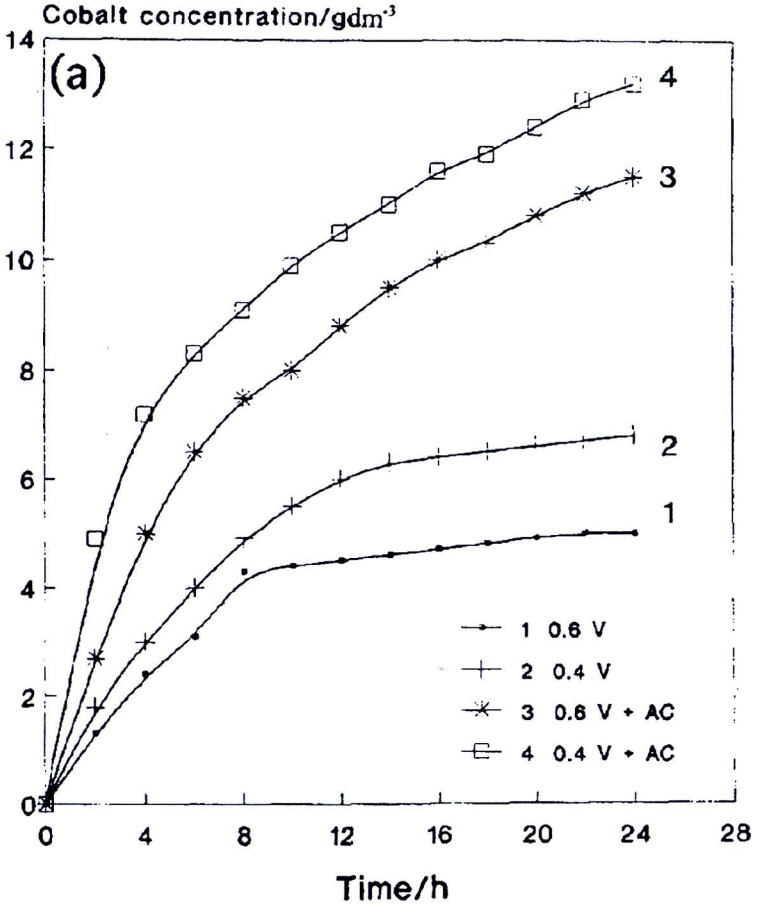
2.4.1 ทฤษฎีการแยกสลายทางเคมีไฟฟ้า (Electrolysis)

หลักการแยกสลายโลหะด้วยเคมีไฟฟ้าโดยให้กระแสไหลผ่านสารละลายทำให้ตัวทำละลายเกิดการเปลี่ยนแปลงที่ขั้วไฟฟ้า เกิดออกซิเดชั่น (Oxidation) ที่ขั้วบวก (Anode) ไอออนลบเคลื่อนที่เข้าหา Anode เพื่อถ่ายเทอิเล็กตรอนและการรีดักชั่น (Reduction) ที่ขั้วลบ (Cathode) ไอออนบวกเคลื่อนที่เข้าหา Cathode เพื่อรับอิเล็กตรอน กฎการแยกสลายด้วยไฟฟ้าของฟาราเดย์อธิบายความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณไฟฟ้าที่ผ่านสารละลายอิเล็กโตรไลต์กับปริมาณสารละลายที่เกิดขึ้น ประกอบด้วย มวลของสารเกิดขึ้นที่ขั้วไฟฟ้าจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับปริมาณไฟฟ้าที่ไหลผ่านสารละลาย และมวลของสารเกิดขึ้นที่ขั้วไฟฟ้าเมื่อใช้ปริมาณไฟฟ้าเท่ากันจะเป็นสัดส่วนเดียวกันกับน้ำหนักสมมูลของสาร



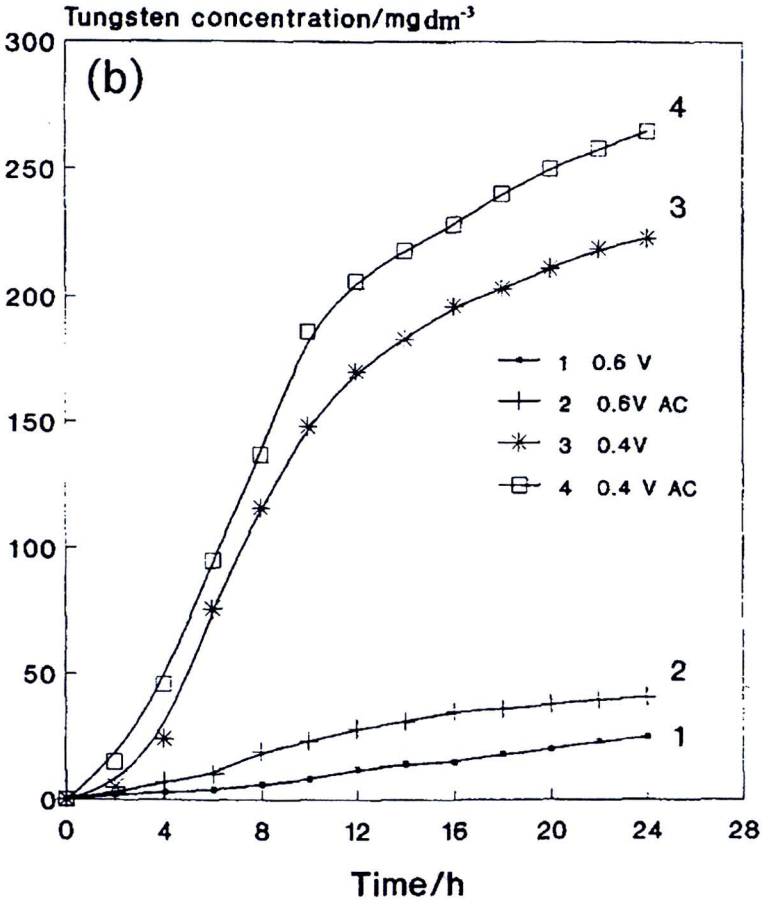
รูปที่ 2.11 แสดงขั้นตอนการแยกสลายโคบอลต์ออกจากทังสเตนโดยวิธีการเคมีไฟฟ้า [11]

จากรูปที่ 2.11 แสดงขั้นตอนการผลิตโลหะผงทังสเตนคาร์ไบด์ โดยการแยกสลายด้วยสารละลายกรด 1N HCl + 0.1N Citric acid ที่แรงดันไฟฟ้าอยู่ระหว่าง 0.2-0.6 V



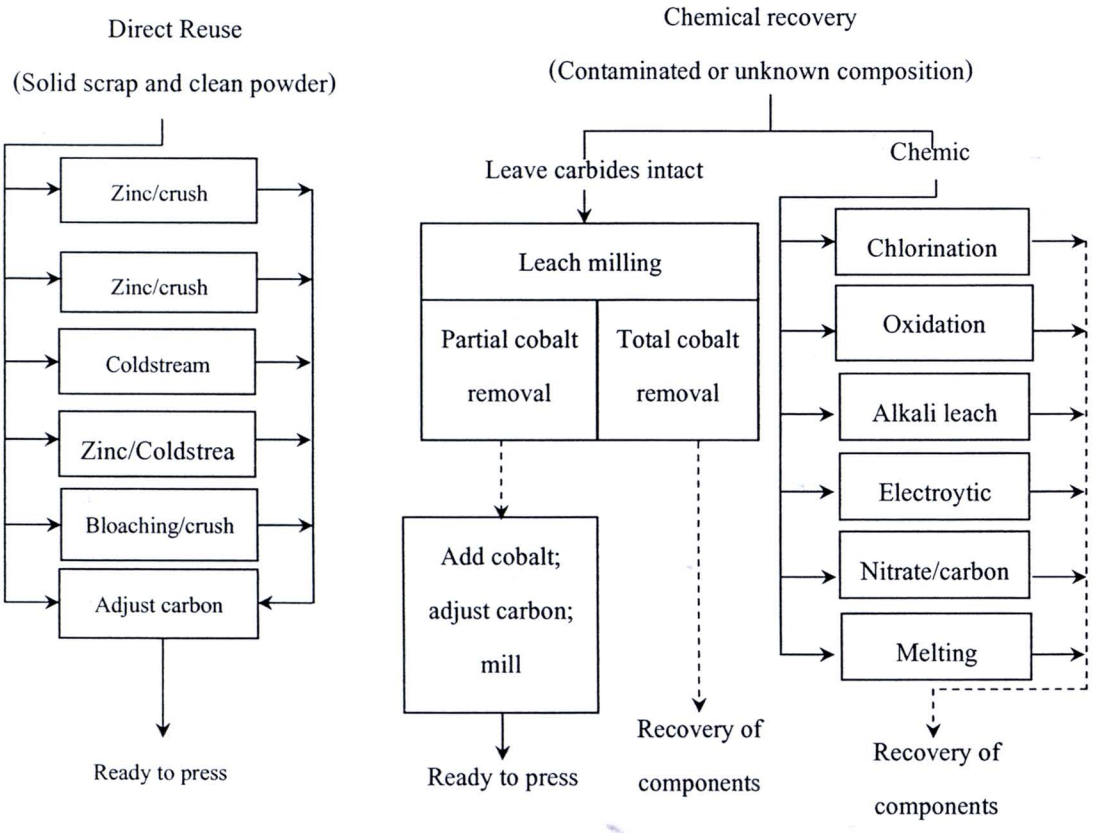
รูปที่ 2.12 แสดงความเข้มข้นของโคบอลต์ (Co) ภายใต้แรงดันไฟฟ้า (V) ระหว่าง 0.4-0.6 โวลต์ [11]

จากรูปที่ 2.12 แสดงความเข้นข้นของโคบอลต์ (Co) ภายใต้ปัจจัยการแยกสลายแรงดันไฟฟ้าอยู่ระหว่าง 0.4-0.6 V ในสารละลายกรดไฮโดรครอลิก 1N + 0.1N citric acid โดยใช้เวลา 24 ชั่วโมง



รูปที่ 2.13 แสดงความสัมพันธ์ของเวลาและความเข้มข้นของทังสเตน (WC) ภายใต้แรงดันไฟฟ้า (V) ระหว่าง 0.4-0.6 โวลต์ [11]

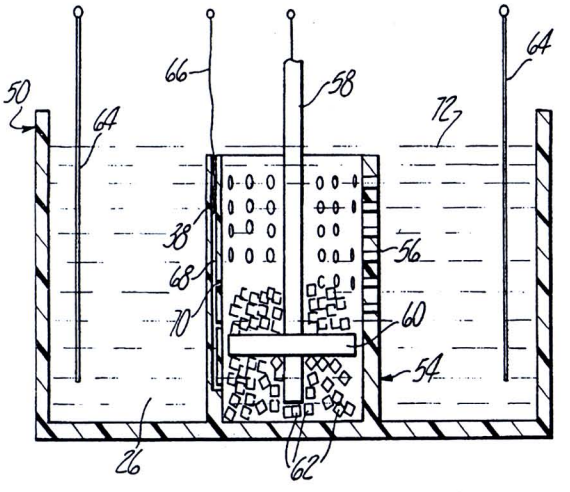
จากรูปที่ 2.13 แสดงความเข้นข้นของทังสเตนภายใต้ปัจจัยการแยกสลายแรงดันไฟฟ้าอยู่ระหว่าง 0.4-0.6 V ในสารละลายกรดไฮโดรครอลิก 1 N + 0.1 citric acid โดยใช้เวลา 24 ชั่วโมง



รูปที่ 2.14 Recycling cemented carbide scrap [8]

จากรูปที่ 2.14 อธิบายถึงกระบวนการนำเศษซีเมนต์คาร์ไบด์กลับมาใช้ใหม่ มีวิธีการใน 2 ลักษณะ คือ การรีไซเคิลพร้อมทำให้บริสุทธิ์ใช้งานได้ทันที และอีกวิธีคือ การแยกสลายด้วยการใช้เคมีในการกัดกร่อน

2.4.2 หลักการนำทฤษฎีจาก สิทธิบัตร United States Patent No. 4,234,333 ได้บอกรายละเอียดเกี่ยวกับกระบวนการผลิตทังสเตนคาร์ไบด์ด้วยวิธีไฟฟ้า โดยคิดค้นเกี่ยวกับ Barral และตำแหน่งของอุปกรณ์ต่างๆ ดังรูปและกราฟแสดงผล [17]

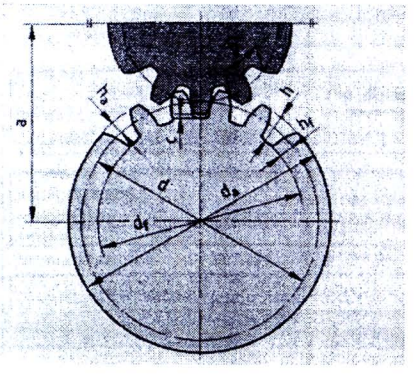


รูปที่ 2.15 เครื่องกัดกร่อนโลหะแนวตั้ง (เคมีไฟฟ้า) [17]

จากรูปที่ 2.15 ตามสิทธิบัตร United States Patent No. 4,234,333 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. เพลาใบพัดหมุนใบกวนหมายเลข60. 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 ทังสเตนคาร์ไบต์ในอิเล็กโทรไลต์ระหว่างการสลายตัวโดยการหมุนตัว

2.5 การออกแบบและการส่งกำลังด้วยเฟือง

2.5.1 การคำนวณเฟืองสเปอร์แบบฟันตรง (Spur gear)



รูปที่ 2.16 เฟืองสเปอร์แบบฟันตรง (Spur gear) [2]

M =โมดุล

P = ระยะพิตช์

D = เส้นผ่าศูนย์กลางพิตช์

Da = เส้นผ่านศูนย์กลางยอดฟัน

Df = เส้นผ่าศูนย์กลางโคนฟัน

Z = จำนวนฟัน

Ha =ความสูงยอดฟัน

H = ความสูงของฟัน

Hf = ความสูงโคนฟัน

C = ช่องว่างยอดฟัน

เฟืองสเปอร์แบบฟันตรงขนาดโมดุล m = 1 mm. มีระยะพิตช์ p = π x 1 mm. = 3.142 mm. ซึ่งวัดได้จากส่วนโค้งของวงกลมพิตช์

1) ขนาดต่างๆ ของเฟืองสเปอร์ขบด้านนอกแบบฟันตรง

จำนวนฟัน $m = \frac{p}{\pi} = \frac{d}{z}$ (2.1)

ระยะพิตช์ $p = p \cdot m$ (2.2)

จำนวนฟันเฟือง $z = \frac{d}{m} = \frac{d_{a-2\cdot m}}{m}$ (2.3)

ช่องว่างยอดฟัน $c = 0.1 \cdot m$ ถึง $0.3 \cdot m$ ส่วนใหญ่ใช้ $= 0.167 \cdot m$

ความสูงยอดฟัน $h_a = \mathrm{m}$ (2.4)

เส้นผ่าศูนย์กลางพิตช์ $d = m \cdot z = \frac{z \cdot p}{\pi}$ (2.5)

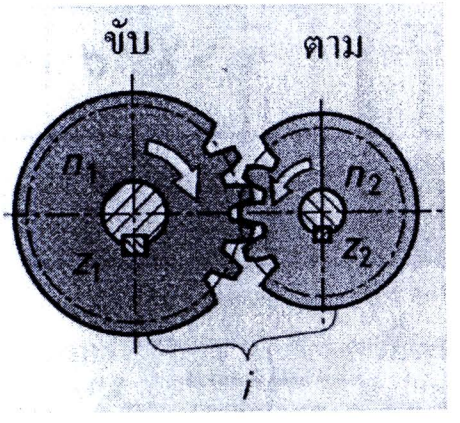
เส้นผ่าศูนย์กลางยอดฟัน $d_a = d + 2 \cdot m = m \cdot (z + 2)$ (2.6)

เส้นผ่าศูนย์กลางโคนฟัน $d_f = d - 2 \cdot (m + c)$ (2.7)

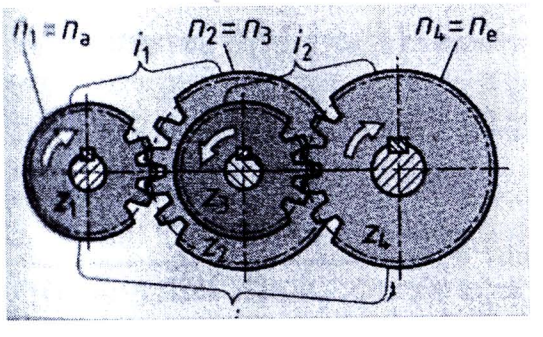
ความสูงของฟัน $h = 2 \cdot m + c$ (2.8)

ความสูงโคนฟัน $h_f = m + c$ (2.9)

2.5.2 การส่งกำลังด้วยเฟือง



รูปที่ 2.17 การทดเฟืองชั้นเดียว [2]



รูปที่ 2.18 การทดเฟืองหลายชั้น [2]

การทดความเร็วรอบ

$$N_2 Z_2 = N_3 Z_3 \quad (2.10)$$

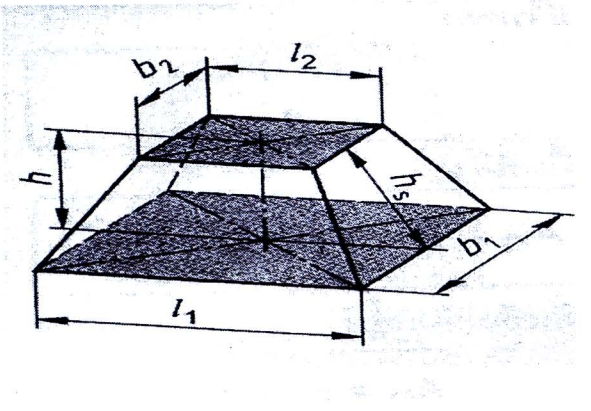
$$N_3 = \frac{N_2 N_2}{N3} \quad (2.11)$$

การหาอัตราทดรวม

$$\text{อัตราทดรวม} \quad i = \frac{Z_2 \times Z_3}{Z_1 \times Z_2} \quad (2.12)$$

2.5.3 การหาพื้นและปริมาตร

2.5.3.1 ปีระมิดตัด

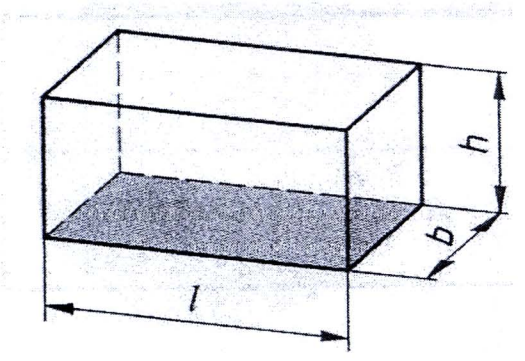


รูปที่ 2.19 ปีระมิดตัด [2]

V	=	ปริมาตร	H	=	ความสูง
b_1, b_2	=	ความกว้าง	l_1, l_2	=	ความยาวด้าน
A_1	=	พื้นที่ฐาน	A_2	=	พื้นที่ยอด
h_s	=	ความสูงของผิวเอียง			

สูตร $V = \frac{h}{3} \times (A_1 + A_2 + \sqrt{A_1 \times A_2})$ (2.13)

2.5.3.2 ปริมาตรแท่งสี่เหลี่ยม

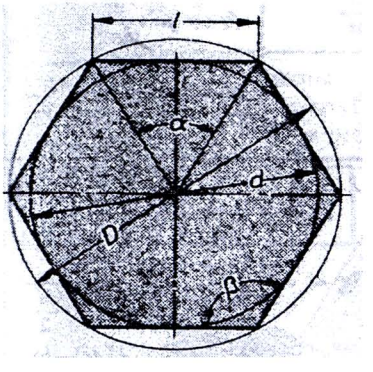


รูปที่ 2.20 แท่งสี่เหลี่ยม [2]

V	=	ปริมาตร	l	=	ความยาวด้านข้าง
h	=	ความสูง			

สูตร $V = l \times b \times h$ (2.14)

2.5.3.3 สามเหลี่ยมด้านเท่า



รูปที่ 2.21 สามเหลี่ยมด้านเท่า [2]

A	=	พื้นที่	l	=	ความยาวด้านต่างๆ
D	=	เส้นผ่านศูนย์กลางวงกลมรอบรูป	n	=	จำนวนด้าน
d	=	เส้นผ่านศูนย์กลางวงกลมในรูป	α	=	มุมที่ศูนย์กลาง
β	=	มุมที่ด้าน			

สูตรพื้นที่ A $= \frac{n \times l \times d}{4}$ (2.15)

สูตรปริมาตร V $= \frac{n \times l \times d}{4} \times h$ (2.16)

2.5.4 มอเตอร์ [50]

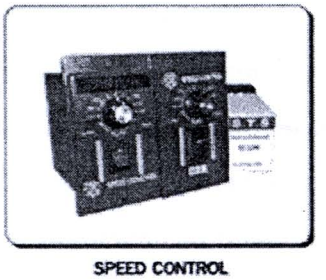
ปัจจุบันนี้การทำงานทางด้านอุตสาหกรรมมีมากมายหลายชนิด ดังนั้นการเลือกใช้มอเตอร์ให้เหมาะสมกับชนิดของงานจึงมีความสำคัญซึ่งทำให้งานมีประสิทธิภาพสูง ลดอุบัติเหตุและประหยัดค่าใช้จ่ายมากที่สุด

ชนิดของมอเตอร์และกำลังงานนั้น ๆ ต้องการ เช่น เมื่อต้องการใช้มอเตอร์ในการยกของมอเตอร์นั้นจะต้องมีแรงบิดมากเพื่อมีต้นกำลังม้า (hp) พอเพียงที่จะยกของได้

ลักษณะของพลังงานไฟฟ้าซึ่งจะต้องจ่ายให้มอเตอร์เหมาะสมกัน เช่น เมื่อมีระบบจ่ายไฟ 3 เฟส 380 โวลต์ ก็ควรเลือกใช้มอเตอร์ที่ใช้กับไฟฟ้า 3 เฟส 380 โวลต์ ราคาของมอเตอร์ต้องเลือกมอเตอร์ที่ใช้งานได้ตรงตามจุดประสงค์และมีราคาถูกที่สุด

2.5.4.1 มอเตอร์เกียร์ AC ขนาดตั้งแต่ 6-180W ทั้งแบบไฟ 220V, 220/380V ความเร็วรอบมอเตอร์อยู่ที่ 1450 RPM รอบของเกียร์ตั้งแต่ 8-500 RPM มีทั้งรุ่น อินดั๊กชั่น (IK), รีเวอร์ซิเบิ้ล (RK), ปรับรอบหมุน(RG), ติดเบรก (CM)

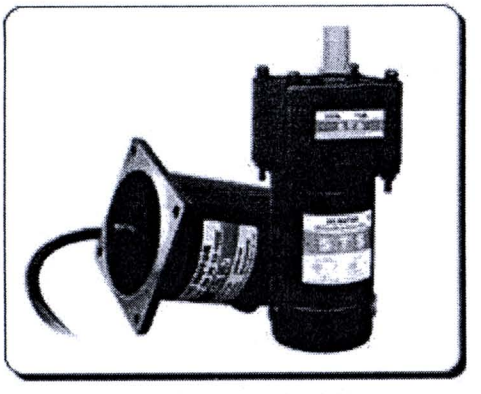
INDUCTION AC 220V ,380V 6W-180W



SPEED CONTROL

รูปที่ 2.22 แสดงมอเตอร์เกียร์ AC พร้อมกล่อง Control [50]

2.5.4.2 มอเตอร์เกียร์ DC ขนาดตั้งแต่ 6 - 300W ทั้งแบบไฟ 12V, 24V, 90V, 180V ความเร็วรอบมอเตอร์อยู่ที่ 1800 RPM และ 3600 RPM เกียร์ทดตั้งแต่ 10- 1200 RPM []



รูปที่ 2.23 แสดงมอเตอร์เกียร์ DC พร้อมกล่อง [50]

2.5.5 วัสดุและโลหะที่มีสมบัติทนความร้อนและไม่เกิดการกัดกร่อนจากกรดไฮโดรคลอริก

2.5.5.1 พอลิโพรไพลีน (Polypropylene: PP) [52] พอลิโพรไพลีน มีลักษณะขาวขุ่น ทึบแสงกว่าพอลิเอทิลีน มีความหนาแน่นในช่วง 0.890 – 0.905 ด้วยเหตุนี้จึงสามารถลอยน้ำได้เช่นเดียวกันกับพอลิเอทิลีน ลักษณะอื่น ๆ คล้ายกับพอลิเอทิลีน

1) สมบัติทั่วไป

ก) มีผิวแข็ง ทนทานต่อการขีดข่วนคงตัวไม่เสียรูปง่าย

ข) สามารถทำเป็นบานพับในตัว มีความทนทานมาก

ค) เป็นฉนวนไฟฟ้าที่ดีมากแม้ที่อุณหภูมิสูง

ง) ทนทานต่อสารเคมี แต่สารเคมีบางชนิดอาจทำให้ออนตัวได้

จ) มีความเหนียวที่อุณหภูมิตั้งแต่ 105 องศาฟาเรนไฮต์ไปจนถึง 15 องศาฟาเรนไฮต์ (40 องศาเซลเซียส ถึง -10 องศาเซลเซียส) แต่ที่ 0 องศาฟาเรนไฮต์ จะเปราะ

ฉ) มีความต้านทานการซึมผ่านของไอน้ำและก๊าซได้ดี

ช) สามารถทนอุณหภูมิสูงได้ (100 °C)

ซ) ผสมสีได้ง่ายทั้งลักษณะโปร่งแสงและทึบแสง

2.5.5.2 พอลิเอทิลีน (Polyethylene: PE) [52] โดยทั่วไปแล้ว พอลิเอทิลีน มีสีขาวขุ่นโปร่งแสง มีความลื่นมันในตัว ยืดหยุ่นตัวได้ ไม่มีกลิ่น ไม่มีรส มีความเหนียว ทนความร้อนได้ไม่มาก แต่ทนการกัดกร่อนของสารเคมี เป็นฉนวนไฟฟ้า ใส่สีผสมได้ง่ายมีความหนาแน่นต่ำกว่าน้ำ จึงลอยน้ำได้ เมื่อความหนาแน่นสูงขึ้นจะทำให้มีความแข็งและความเหนียวเพิ่มขึ้น อุณหภูมิหลอมตัวสูงขึ้น และอัตราการคายก๊าซเพิ่มขึ้น เมื่อความหนาแน่นลดลง จะทำให้อัตราการเสื่อมสลายของผิวเพิ่มขึ้น

1) สมบัติทั่วไป

ก) ยืดหยุ่นได้ดี เหนียวมากที่อุณหภูมิต่ำ ความทนทานต่อสารเคมีได้ดีมาก

ข) ทนต่อสภาวะอากาศได้ดีพอสมควรอากาศสามารถซึมผ่านได้ดี

ค) หดตัวแม่พิมพ์ได้ดีมาก ทำให้ถอดจากแม่พิมพ์ได้ง่าย เป็นฉนวนไฟฟ้าที่ดีมาก

ง) ผสมสีได้ง่าย ทำให้ผลิตเป็นฟิล์มใส ฟิล์มสี ฟิล์มโปร่งแสงหรือทึบแสง

2.5.5.3 พีวีซี PVC_h (Polyvinylchloride: PVC - hard) [53] PVC, PE, PPและ PS เป็นพลาสติกที่ใช้งานได้ทั่วไป ส่วนประกอบและโครงสร้างโมเลกุลของพลาสติกจะเป็นตัวกำหนดสมบัติการใช้งานพลาสติกแต่ละชนิดโครงสร้างโมเลกุลของพลาสติก PVCซึ่งมีคลอรีนเป็นส่วนประกอบ มีรูปร่างไม่แน่นอน อะตอมของคลอรีนจะอยู่ติดกับโครงสร้างเนื้อพลาสติก ถึงแม้ว่าพลาสติกหลายชนิดจะถูกนำใช้แทนกันได้ในชีวิตประจำวันแต่ พีวีซีมีสมบัติเฉพาะตัวในด้านประสิทธิภาพและการใช้งานที่แตกต่างเมื่อเทียบกับพลาสติกอื่นที่โครงสร้างมีแต่คาร์บอนและไฮโดรเจน ความคงทนต่อปฏิกิริยาเคมี(Chemical stability) เป็นสมบัติทั่วไปของสารที่มีธาตุฮาโลเจนเช่นคลอรีนหรือฟลูโอคารีนประกอบอยู่ พีวีซีก็เป็นสารตัวหนึ่งที่ทนต่อปฏิกิริยาเคมีเช่นทำให้ติดไฟได้ช้า คงทน และทนต่อสารเคมีและน้ำมันการติดไฟช้าของพีวีซี

2.5.6 โลหะ (Metal) คือ วัสดุที่ประกอบด้วยธาตุโลหะที่มีอิเล็กตรอนอิสระอยู่มากมาย นั่นคืออิเล็กตรอนเหล่านี้ไม่ได้เป็นของอะตอมใดอะตอมหนึ่งโดยเฉพาะ ทำให้มันมีสมบัติพิเศษหลายประการ เช่น เป็นตัวนำไฟฟ้าและความร้อนได้ดีมากไม่ยอมให้แสงผ่าน ผิวของโลหะที่ขัดเรียบจะเป็นมันวาวโลหะมีความแข็งแรงพอสมควรและสามารถแปรรูปได้จึงถูกใช้งานในด้านโครงสร้างอย่างกว้างขวางเป็นต้น

2.5.6.1 ไทเทเนียม (Titanman) [54] ไทเทเนียม (Titanium, Ti) เป็นโลหะชนิดหนึ่งที่อุตสาหกรรมต่างให้ความสนใจเนื่องจาก โลหะมีความต้านทานแรงสูง แต่มีความหนาแน่นต่ำ ทนการกัดกร่อนได้ดีมาก มีค่าความแข็งแรงที่อุณหภูมิสูง (high temperature strength) จึงเหมาะกับงานพิเศษในงานสร้างเครื่องบินระบบไอพ่นขับและมอเตอร์ที่มีกำลังงานสูง

1) สมบัติของไทเทเนียม (Titanman) [54]

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

2.5.6.2 ทองแดง (Copper) [54] เป็นโลหะที่เป็นตัวนำไฟฟ้าที่ดี ทนต่ออากาศ น้ำร้อน และกรดบางชนิดได้ เป็นโลหะที่สำคัญที่สุดอันดับสอง ทองแดงที่ทำการขึ้นรูปในขณะเย็นจะทำให้ความเค้นที่ต่ำลงอยู่แล้วสูงมากขึ้น

มีสมบัติทางกล ที่อุณหภูมิต่ำดีเหมือนเดิม 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

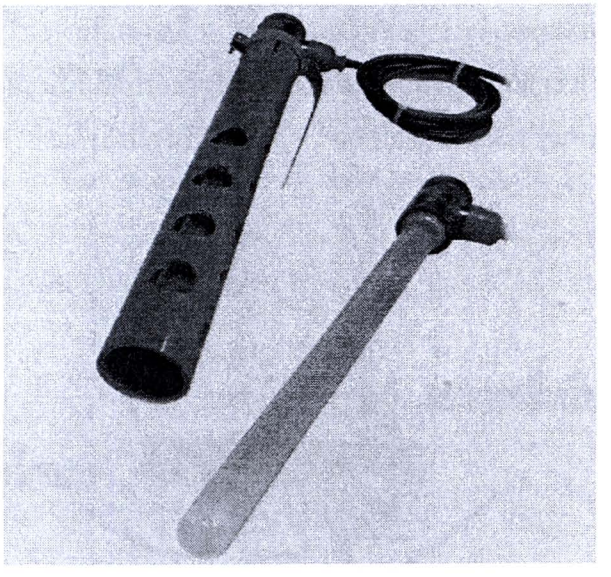
ความยืดอยู่ระหว่าง 2 - 45%

สินแร่ทองแดง จะมีทองแดงอยู่ประมาณ 4% หลังจากการคั้วแล้วจะทำให้หินทองแดงมีปริมาณทองแดง 30 ถึง 60% เมื่อผ่านเตาถลุงด้วยก๊าซแบบนอน ทองแดงจากเตาผ่านการแปรสภาพ จะมีความบริสุทธิ์ตั้งแต่ 97.5 ถึง 99.5% โดยการอัดลมเข้าไปยังหินทองแดงเหลวในระหว่างที่เป่าลมเข้าไป เหล็กออกไซด์จะรวมตัวเป็นขี้ตะกรันกำมะถันไดออกไซด์ซึ่งเป็นก๊าซเสียที่นำไปผลิตเป็นกรดกำมะถัน

ทองแดงที่ผ่านเตาถลุงบริสุทธิ์ด้วยก๊าซ ทำให้มีความบริสุทธิ์ถึงประมาณ 99.9% แต่ยังมีปริมาณทองแดงออกไซด์ อยู่เล็กน้อย ใช้ทำเป็นวัสดุกึ่งสำเร็จรูปเป็นแผ่น แถบ และแผ่นอะไนด์สำหรับนำไปหลอมด้วยวิธีอิเล็กโตรไลต์ต่อไป

2.5.7 อุปกรณ์การเพิ่มความร้อนในสารละลายหรือของเหลว

ฮีตเตอร์บ้อบบิน (Bobbin Heater) ฮีตเตอร์บ้อบบิน (Bobbin Heater) ชนิดแก้วควอทซ์ (Quartz Heater)



รูปที่ 2.24 ฮีตเตอร์แก้วควัอท [55]

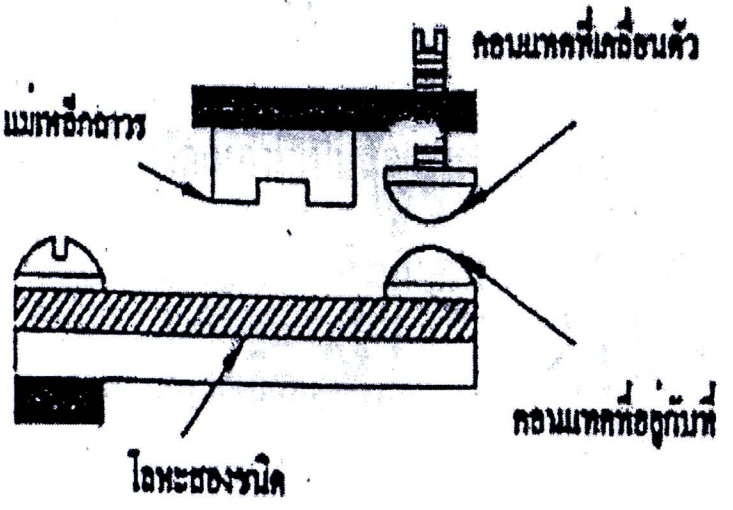
จากรูปที่ 2.24 เป็นฮีตเตอร์แก้วควัอทมีสมบัติใช้ต้มน้ำยาเคมี ที่มีความเป็นกรดสูงมาก ทนความร้อน และระบายความร้อนได้ดี มีปลอกหุ้มป้องกันการกระแทกเป็นอุปกรณ์เสริมสามารถทนการกัดกร่อนของสารเคมีได้ดีกว่าท่อ PVC

2.5.8 การตรวจวัดความร้อน (Thermal Sensors)

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

2.5.9 เทอร์โมสตัท (Thermostat) [56]

ตัวควบคุมอุณหภูมิของระบบการทำงานเราเรียกกันทั่วไปว่า เทอร์โมสตัท (Thermostat) เมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลงจะทำให้ความดันในตัวเปราะ (Thermo bulb) ไปดันคอนแทคไฟฟ้าเปิด/ปิด การเปิด/ปิดคอนแทคที่รวดเร็ว (Snap Action) นี้จะเกิดประกายไฟในช่องห่างระหว่างคอนแทคขึ้นในขณะที่แรงเคลื่อนไฟฟ้ากำลังไหลอยู่ระหว่างคอนแทคนั้นทำให้หน้าคอนแทคเสียหาย เพื่อป้องกันมิให้เกิดประกายไฟดังกล่าว จึงจำเป็นจะต้องมีตัวช่วยดึงแบบแม่เหล็กหรือสปริง ดังรูปที่ 2.25 ตัวช่วยดึงยังป้องกันไม่ให้ตัด – ต่อ บ่อยเกินไปเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย

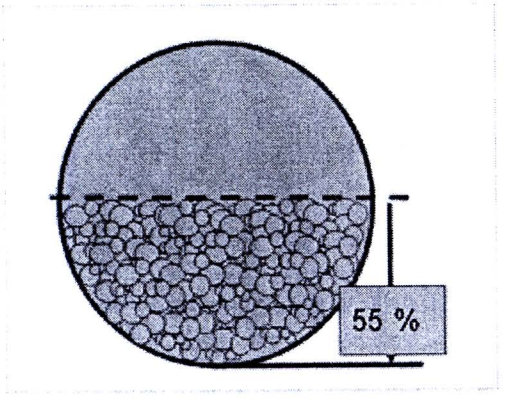


รูปที่ 2.25 เทอร์โมสตัทแบบดูดติด [56]

เพื่อป้องกันไม่ให้คอนแทคชำรุดเนื่องจากประกายไฟ เราอาจทำได้โดยประกอบคอนแทคให้อยู่ในหลอดแก้วสูญญากาศดังรูปที่ 2.25

2.6 ทฤษฎีการบดละเอียดโลหะผง

การบดละเอียด (Grinding or Milling) เป็นการบดวัตถุให้มีขนาดของอนุภาคเล็กลงจนถึงขั้นละเอียดมาก (Pulverization) โดยใช้การกระทบ, กระแทก และการเสียดสีกันระหว่างวัตถุดิบ ตัวลูกบด (Grinding Media) และตัวบุผนังของหม้อบด (Lining) ปริมาณของลูกบดที่ใช้ในหม้อบด เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพในการบดสูงสุดนั้น การเติมลูกบดลงไปในหม้อบด (Ball Mill) นั้นจะเติมประมาณ 50-55 เปอร์เซ็นต์ ของปริมาตรภายในทั้งหมดของหม้อบดดังรูปที่ 2.26 จากการทดสอบพบว่า ช่วงของการเติมลูกบดในช่วงนี้จะช่วยให้การกระจายตัวของอนุภาค (Particle Size Distribution) ดีที่สุด



รูปที่ 2.26 ระดับของลูกบดใน Ball mill ที่เหมาะสม [57]

เมื่อเราเติมลูกบดลงไป 55 เปอร์เซ็นต์ ของปริมาตรหม้อบดแล้วนั้น การจัดเรียงตัวของลูกบดในแต่ละขนาดยังทำให้เกิดช่องว่างภายในระหว่างลูกบด ถึงแม้ว่าเราจะเติมลูกบดหลาย ๆ ขนาดลงไปเพื่อให้การรวมตัวของลูกบดดีที่สุด ปริมาตรของลูกบดที่หักช่องว่าง (Void) ต่างๆ ออกไปแล้ว จะอยู่ที่ประมาณ 60 เปอร์เซ็นต์ ของปริมาตรรวมทั้งหมด (ที่ 55 เปอร์เซ็นต์ ของ Mill Volume)

ดังนั้นปริมาตรของลูกบดที่อยู่ในหม้อบด

= 55 % x 60 %

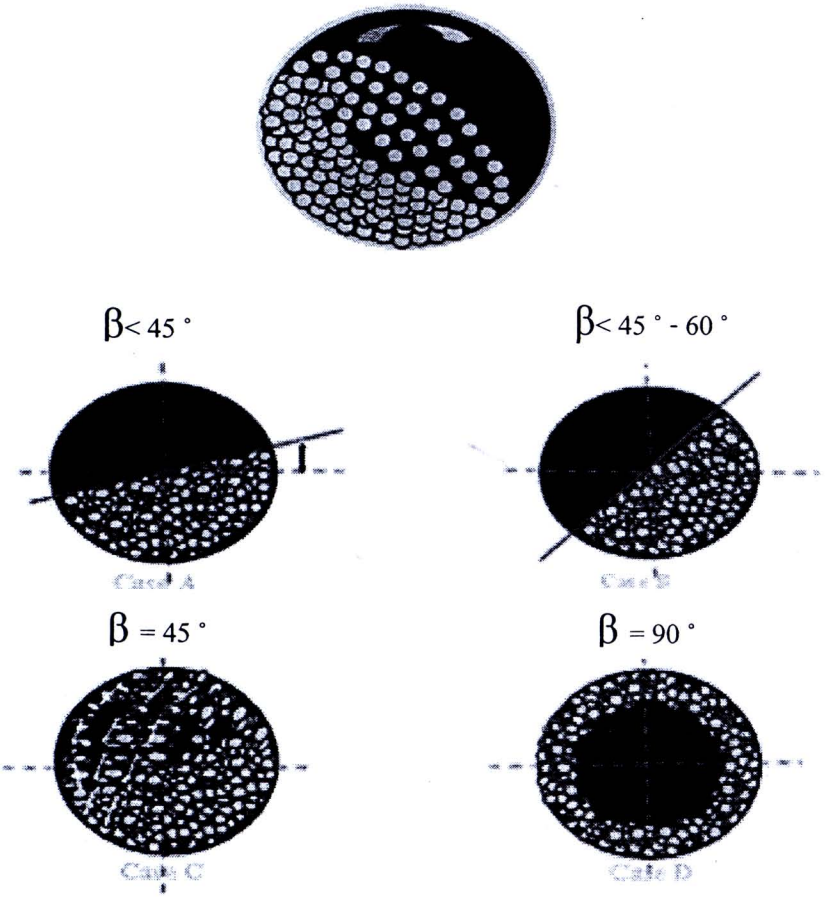
= 33 เปอร์เซ็นต์ ของปริมาตรหม้อบด

ดังนั้น ในหม้อบดจะเหลือช่องว่างที่สามารถเติมวัตถุดิบและน้ำลงไปได้อีกประมาณ 67 %

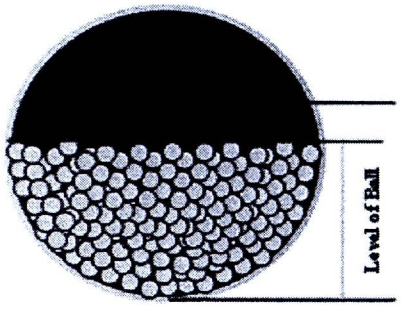
2.6.1 มุมสำหรับการบด

มุมคาราเรคติ้ง (Cataracting) คือ มุมที่เหมาะสมที่ความเร็วของหม้อบดยกเอาลูกบดขึ้นไป จนถึงจุดที่สมดุลกันระหว่างแรงสู่ศูนย์กลางและแรงโน้มถ่วง ทำให้ลูกบดตกลงมากระแทกกับลูกบดอื่นๆ และวัตถุดิบ มุมที่เหมาะสมนี้จะเท่ากับ 45 องศา ทำมุมกับแนวเพลาของหม้อบด

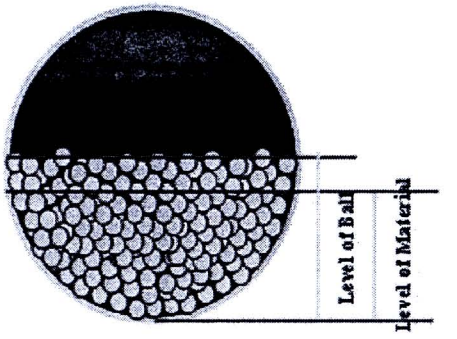
การเคลื่อนตัวของลูกบดในหม้อบด



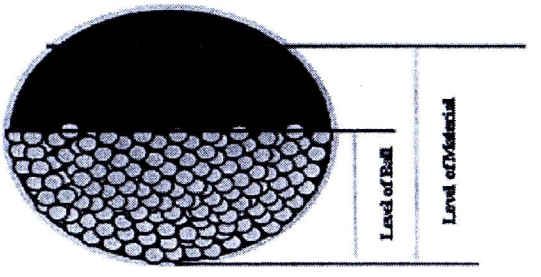
รูปที่ 2.27 แสดงมุมตกกระทบที่เหมาะสมของหม้อบด [57]



ระดับการเติมวัตถุดิบที่เหมาะสม



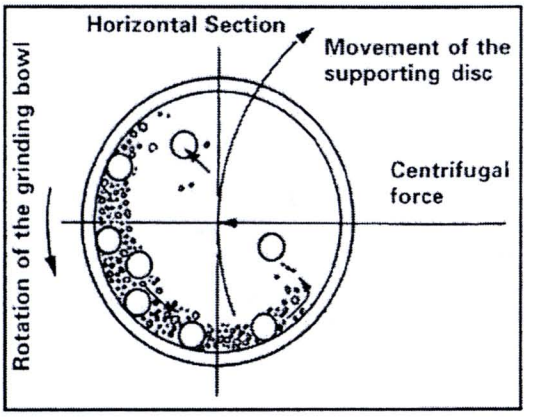
ระดับของวัตถุดิบน้อยเกินไปทำให้หม้อบดสึกหรอเร็ว



ระดับของวัตถุไม่เหมาะสม (มากเกินไป) ทำให้ประสิทธิภาพการบดลดลง

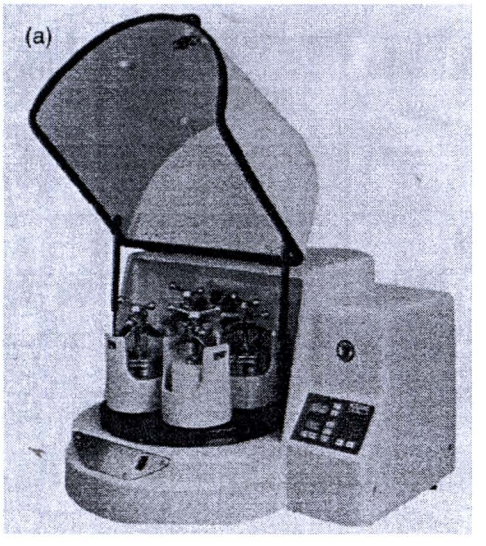
รูปที่ 2.28 ระดับของลูกบดและวัตถุดิบในหม้อบด [57]

ความสม่ำเสมอของวัตถุดิบและความแข็ง (Hardness) ของวัตถุดิบ วัตถุดิบที่เติมลงในหม้อบดควรมีขนาดหลังจากผ่านกระบวนการบดหยาบมาแล้ว ใกล้เคียงกัน ไม่ควรมีขนาดใหญ่มากเกินไปปนเข้ามาด้วย เพราะจะทำให้การบดมีประสิทธิภาพด้อยลง โดยลูกบดต้องทำหน้าที่บดย่อย วัตถุดิบที่มีขนาดใหญ่ให้เล็กลงก่อน ขนาดที่ใหญ่ที่สุดของวัตถุดิบนั้นไม่ควรเกิน 5 มิลลิเมตร

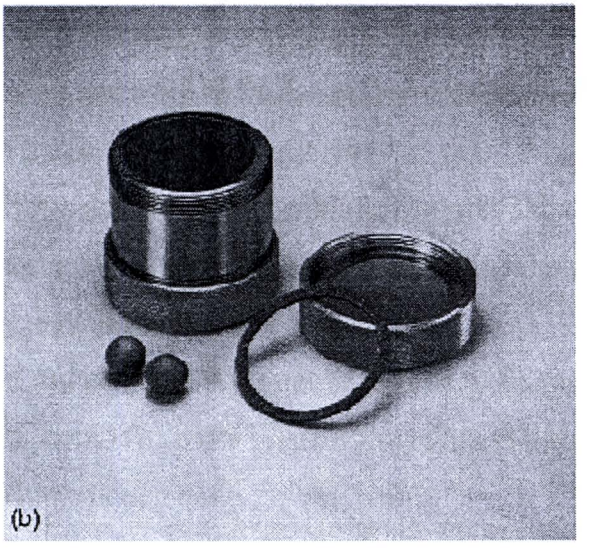


รูปที่ 2.29 แสดงลักษณะการเคลื่อนที่ของลูกบอล [22]

จากรูปที่ 2.29 แสดงการบดแบบแพลเนต การเลือกใช้ตัวกลางในการบดวิธีนี้มีความสำคัญมาก เพื่อให้ได้พลังงานสูง เพราะวัสดุที่ต้องการบดและลูกบอลทำให้แรงหนีศูนย์กลางมีค่าเพิ่มขึ้นเป็นยี่สิบเท่าของแรงโน้มถ่วงของโลก เนื่องจากทิศทางการหมุนถาดรองและหม้อบรรจุมีทิศตรงข้ามกัน จึงเกิดแรงหนีศูนย์กลางขึ้นในเวลาเดียวกันและมีทิศตรงข้ามกัน ดังนั้นจึงมีแรงส่งให้ตัวกลางที่ใช้บดและผงกลิ้งไปมาตามผนังของหม้อบดตกลงมาอีกด้านด้วยความเร็วสูง (ประมาณ 360 รอบต่อนาที)



รูปที่ 2.30 แสดงลักษณะเครื่องบดพลังงานสูงด้วยลูกบอลแบบแพลเนต [22]



รูปที่ 2.31 แสดงชุดหม้อบดทังสเตนคาร์ไบด์ของเครื่องบดรุ่น SPEX 800 [22]

รูปที่ 2.31 แสดงชุดหม้อบดทังสเตนคาร์ไบด์แบบแพลเนต ซึ่งประกอบด้วย หม้อบดทังสเตนคาร์ไบด์ พร้อมฝาปิด ลูกบอลและแหวนรองกันซึม

ตารางที่ 2.5 แสดงองค์ประกอบของปัจจัยที่ใช้ในการบดโลหะผงทังสเตนคาร์ไบด์ [49]

น้ำหนักลูกบดต่อโลหะผง	ขนาดลูกบด (mm)	สารช่วยบด	ปริมาณสารช่วยบด (ml)	รอบในการบด (RPM/min)
5:1	6	น้ำกลั่น	0	100
10:1	6+8	เอทานอล	4	150
15:1	8+12	อะซิโตน	8	200
20:1	12+18	เอทานอล75%	12	250

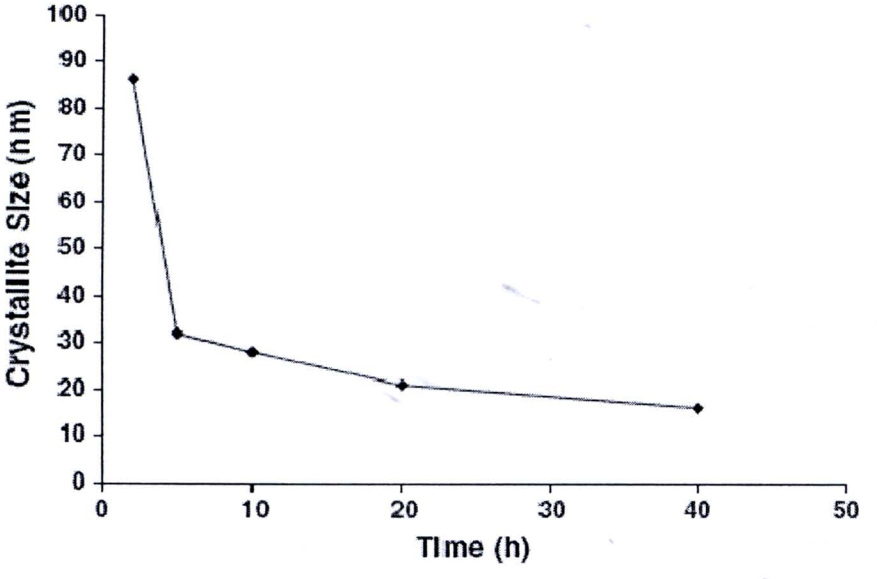
จากตารางที่ 2.5 แสดงเงื่อนไขที่ใช้ในการทดลองบดโลหะผงทังสเตนคาร์ไบด์

กรณีที่ 1 ใช้อัตราส่วนน้ำหนักระหว่างลูกบดและโลหะผง 5 ต่อ 1 ขนาดของลูกบด 6 มิลลิเมตร ประเภทสารละลายที่ใช้เป็นตัวกลางในการบดละเอียดคือ น้ำกลั่น จำนวนรอบในการบดละเอียดคือ 100 รอบ/นาที

กรณีที่ 2 ใช้อัตราส่วนน้ำหนักระหว่างลูกบดและโลหะผง 10 ต่อ 1 ขนาดของลูกบด 6 และ 8 มิลลิเมตร ประเภทสารละลายที่ใช้เป็นตัวกลางในการบดละเอียดคือ เอทานอลใช้ปริมาณ 4 มิลลิลิตร จำนวนรอบในการบดละเอียดคือ 150 รอบ/นาที

กรณีที่ 3 ใช้อัตราส่วนน้ำหนักระหว่างลูกบดและโลหะผง 15 ต่อ 1 ขนาดของลูกบด 8 และ 12 มิลลิเมตร ประเภทสารละลายที่ใช้เป็นตัวกลางในการบดละเอียดคือ อะซิโตน ใช้ปริมาณ 8 มิลลิลิตร รอบในการบดละเอียดคือ 200 รอบ/นาที

กรณีที่ 4 ใช้อัตราส่วนน้ำหนักระหว่างลูกบดและโลหะผง 20 ต่อ 1 ขนาดของลูกบด 12 และ 18 มิลลิเมตร ประเภทสารละลายที่ใช้เป็นตัวกลางในการบดละเอียดคือ สารละลาย Ethanol 75 เปอร์เซ็นต์ รอบในการบดละเอียดคือ 250 รอบ/นาที



รูปที่ 2.32 Reduction of WC Crystallite Size versus Ball Milling Time [23]

จากรูปที่ 2.32 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการบดและขนาดของโลหะทังสเตนคาร์ไบด์ที่ลดลง แกนตั้งเป็นขนาดของทังสเตนคาร์ไบด์ ระหว่าง 0-100 nm แกนนอนเป็นเวลาในการบด อยู่ระหว่าง 0-50 ชั่วโมง พิจารณาแล้วพบว่า ใช้เวลาในการบด ระหว่าง 0-40 ชั่วโมง ทังสเตนคาร์ไบด์มีขนาดเล็กลงจากประมาณ 85 nm ลดลงมาอยู่ที่ประมาณ 15 nm

2.6.2 การเลือกลูกบดและวัตถุดิบสำหรับบดละเอียด

การบดละเอียดเพื่อปรับลดขนาดของวัสดุนั้น ปัจจัยที่ต้องพิจารณามีดังนี้ ชนิดของวัสดุ ชนิดของหม้อบด และชนิดของลูกบด เป็นต้น

ตารางที่ 2.6 แสดงชนิดลูกบดและการเลือกวัตถุดิบ [58]

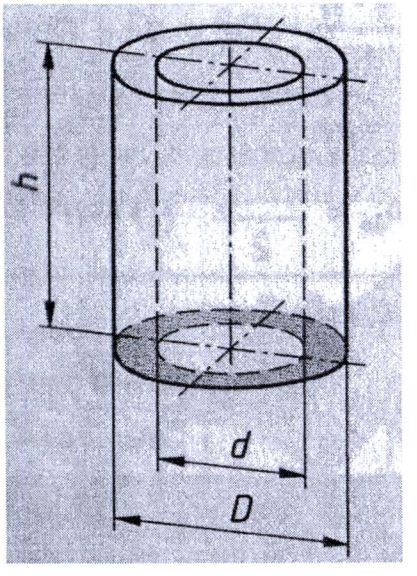
ชนิดของลูกบด	**Main component of the material**	**ความหนาแน่น g/cm^3**	**วัตถุดิบสำหรับบดละเอียด**
หินโมรา	SiO	2.65	เหมาะสำหรับตัวอย่างที่มีความแข็งน้อย - ปานกลาง
อะลูมินัมออกไซด์	Al2O	3.8	เหมาะสำหรับตัวอย่างที่มีความแข็งปานกลาง – แข็ง
ซิลิกอนไนไตรด์	Si3N4	3.1	เหมาะสำหรับตัวอย่างที่ต้องการขัดผิว, มีความแข็งเทียบเท่าเหล็ก
ไซโครเนียมออกไซด์	ZrO2	5.7	เหมาะสำหรับการ ขัดผิวตัวอย่าง
สเตนเลส	Fe – Cr – Ni	7.8	เหมาะสำหรับวัตถุดิบมีความแข็งปานกลาง – แข็ง, มีมีความเปราะ
โลหะผสม	Fe – Cr	7.9	เหมาะสำหรับวัตถุดิบที่มีความแข็งแต่เปราะ
โลหะแข็งทังสเตนคาร์ไบด์	WC	14.89	เหมาะสำหรับวัตถุดิบที่มีความแข็ง, ทนทานการกัดกร่อน

จากตารางที่ 2.6 แสดงชนิดของลูกบดประเภทต่างๆ ที่ใช้ในการบดละเอียดวัสดุ เช่น ลูกบดชนิดหินโมรา ความหนาแน่นประมาณ 2.65 g/cm^3 เหมาะสำหรับบดละเอียดวัตถุดิบที่มีความแข็งในระดับน้อยถึงแข็งปานกลาง

ลูกบดชนิดโลหะแข็งทังสเตนคาร์ไบด์ ความหนาแน่นประมาณ 14.89 g/cm^3 เหมาะสำหรับบดละเอียดวัตถุดิบที่มีความแข็งและทนทานการกัดกร่อนได้ดี

2.6.3 การคำนวณปริมาตรหม้อบด

การคำนวณแท่งกระบอกกลวง



รูปที่ 2.33 แท่งกระบอกทรงกลวง [2]

จากรูปที่ 2.33 สามารถคำนวณปริมาตรได้ดังนี้

V ปริมาตร D, d เส้นผ่านศูนย์กลาง

H ความสูง

เพราะฉะนั้นการหาปริมาตรคือ $V = \frac{\pi.h}{4} \cdot (D^2 - d^2)$ (2.17)

2.7 การออกแบบเตาอบไฟฟ้าระบบควบคุมการเกิดออกซิเดชั่น (Oxidation)

2.7.1 การแผ่รังสีความร้อน (Heat Radiation)

การแผ่รังสีความร้อน คือ การเคลื่อนที่ของความร้อนแบบที่วัตถุที่ความร้อนจะแผ่รังสีความร้อนออกรอบๆ ตัว เมื่อรังสีนี้ไปกระทบกับวัตถุอื่นๆ บางส่วนของความร้อนก็จะสะท้อนออกมาและบางส่วนจะถูกดูดเอาไว้ ภายในเตาอบที่ใช้ลวดต้านทานเป็นตัวกำเนิดความร้อน การถ่ายเทความร้อนสู่ชิ้นงานจะเป็นการแผ่รังสีเกือบทั้งสิ้น เนื่องจากภายในเตาอากาศมีการไหลเวียนน้อยมาก การพาความร้อนจึงมีผลน้อย

การแผ่รังสีความร้อน เกิดจากวัสดุตั้งแต่ 2 ชิ้น ซึ่งอาจจะเป็นชนิดเดียวกันต่างชนิดกัน สถานะเดียวกัน หรือต่างสถานะกัน มีอุณหภูมิต่างกัน วัสดุที่มีความร้อนสูงจะแผ่รังสีความร้อนสู่วัสดุที่เย็นกว่า สำหรับเตาอบไฟฟ้าที่ทำการสร้างนี้จะเกิดแผ่รังสี ระหว่างลวดต้านทานที่อุณหภูมิสูงกับชิ้นงานที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า โดยการแผ่รังสีไปยังชิ้นงาน ดังนั้นการแผ่รังสีจะเป็นการแผ่รังสีระหว่างของแข็งกับของแข็ง

โดยทั่วไปในการแผ่รังสีความร้อนจะถ่ายเทจากวัสดุที่มีอุณหภูมิสูงสู่ของแข็งที่อุณหภูมิต่ำกว่า การแผ่รังสีความร้อนจากของแข็งหาได้จากสมการ

$$q_r = \delta \varepsilon A T^4 \qquad (2.18)$$

q_r = อัตราความร้อนจากการแผ่รังสี (Watt)

A = พื้นที่ผิวของตัวแผ่รังสีความร้อน (m^2)

T = อุณหภูมิของตัวแผ่รังสี (k)

δ = ค่าคงที่ Stefan-Boitzmann Constant มีค่าเท่ากับ 5.67×10^{-8} $w/m^2.k^4$

ε = ค่าการแผ่รังสี (Emittance) ของวัตถุมีค่าเท่ากับอัตราส่วนของความร้อนจากการแผ่รังสีของวัตถุเท่ากับวัตถุดำเมื่ออุณหภูมิเท่ากันสัมประสิทธิ์การถ่านเทความร้อนโดยการแผ่รังสีในสมการ (2.18) มีค่าน้อยแต่อุณหภูมิสมดุล (T) กำลัง 4 มีค่ามาก ทำให้ต้องเขียนสมการใหม่ดังนี้

$$q_r = \delta \varepsilon_1 A_1 (T_1^4 - T_2^4) \qquad (2.19)$$

T1 = อุณหภูมิผิวของวัตถุดำ (k)

T2 = อุณหภูมิผิวของวัตถุที่อยู่รอบๆ (เป็นวัตถุดำด้วย) (k)

ค่าการแผ่รังสี (Emissivity, e) ซึ่งมีค่าเท่ากับการดูดซับความร้อน (Absorbivity) ค่าการดูดซับความร้อน คือ ปริมาณความร้อนที่วัสดุดูดซับไว้ต่อหน่วยเวลาต่อพื้นที่ ค่าสัมประสิทธิ์ (ε) เรียกว่า (Black body Coefficient) ในสมการ (2.19) แสดงค่าความร้อนที่แพร่กระจายออกมาจากของแข็งโดยการแผ่รังสี ในความเป็นจริงปริมาณความร้อนที่ถ่ายเทระหว่างของแข็งกับของแข็ง มีค่าเท่ากับผลต่างระหว่างความร้อนที่ส่งออกจากวัสดุที่ร้อน กับความร้อนที่ของแข็งที่เย็นรับไว้จากสิ่งแวดล้อม

ซึ่งค่านี้เท่ากับปริมาณความร้อนที่ถ่ายเทจากวัสดุสีดำ (Black body) โดยการแผ่รังสีไม่ว่าจะเป็นวัสดุดำจะเป็นชิ้นงานในเตา หรือใช้เป็นผนังเตา

2.7.2 การออกแบบเตาไฟฟ้า

2.7.2.1 แนวความคิด

อุณหภูมิภายในเตาอบโลหะจะถูกผลิตโดยการให้ความร้อน ซึ่งการกำเนิดความร้อนที่ใช้กันทั่วไปมี 2 วิธีคือ

1) การเผาไหม้ของเชื้อเพลิง

2) การเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานความร้อน

จากข้อเปรียบเทียบทางด้านราคาของเชื้อเพลิง รวมทั้งความสะดวกสบายในการสร้างเตาอบที่ใช้พลังงานไฟฟ้าได้รับความนิยมเพิ่มขึ้นโดยเตาอบประเภทนี้ที่ใช้กันมาก ได้แก่ เตาความต้านทาน (Resistance Furnace)

เตาที่ถูกให้ความร้อนในการเปลี่ยนพลังงานความร้อน จะมีการเปลี่ยนแปลงโดยกระแสเหนี่ยวนำตัวเอง เตาที่ใช้ความต้านทาน (Resistor) จะใช้วัสดุต่างชนิดกันในการทำเป็นลวดต้านทานไฟฟ้า ลวดต้านทานส่วนใหญ่จะเป็นโลหะ การออกแบบเตาอบต้องพิจารณาถึงอุณหภูมิสูงสุดที่ต้องการ หลังจากนั้นพิจารณาเลือกวัสดุที่จะทำลวดต้านทานให้อุณหภูมิสูงตามที่กำหนดไว้ ในที่นี้เลือกลวดต้านทาน Kanthal A-1 ซึ่งมีส่วนผสมของโครเมียม อลูมิเนียม ซิลิกอน และนิเกิล (Cr, Al, Si, Ni) และทนอุณหภูมิได้ถึง 1,350 °C ซึ่งมีลักษณะเป็นขดลวดหรือมีลักษณะเป็นตะแกรง ในการออกแบบลวดต้านทานจะต้องพิจารณาจากข้อมูลต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับสภาพการใช้งาน เช่น อุณหภูมิที่ต้องการ กำลังไฟฟ้าและแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่มีปริมาณเหมาะสมต่อการใช้งาน เป็นต้น

2.7.2.2 อุณหภูมิของเตาอบไฟฟ้า

อุณหภูมิที่ต้องการใช้สำหรับวัสดุ เวลาที่จะอบและอุณหภูมิแตกต่างระหว่างตัวกำเนิดความร้อนและวัสดุ โดยทั่วไฟจะให้อุณหภูมิเตาสูงกว่าอุณหภูมิที่ต้องการอบประมาณ 2-10 เปอร์เซ็นต์

2.7.2.3 กำลังไฟฟ้า

กำลังไฟฟ้าคำนวณได้จากความร้อนที่ต้องการใช้ต่อหน่วยเวลา รวมทั้งการคำนวณค่าความร้อนที่ต้องการหาได้จากความร้อนของวัสดุทั้งหมดในเตา พิจารณาร่วมกับประสิทธิภาพของเตาด้วย ต้องเผื่อการสูญเสียความร้อนด้วยเพื่อให้ได้ความร้อนที่ต้องการทั้งหมด

แม้กำลังไฟฟ้าจะถูกกำหนดได้ค่อนข้างสูง ซึ่งไม่มีผลต่อพลังงานที่ได้รับจริงๆ และประสิทธิภาพของเตา เพราะอุณหภูมิของเตาจะถูกกำหนดด้วยระบบอัตโนมัติ ดังนั้นพลังงานที่ต้องการและประสิทธิภาพของเตาขึ้นอยู่กับการสูญเสียความร้อนจากผนังเตา อย่างไรก็ตามพลังงานที่ป้อนเข้า

สูงเกินไป ความร้อนจากผนังเตาจะทำให้ตัวกำเนิดความร้อนมีอุณหภูมิสูง ซึ่งมีผลต่ออายุการใช้งานของขดลวด

2.7.3 การเลือกใช้งานฮีตเตอร์สำหรับเตาอบไฟฟ้า

1) โครงสร้างของ Tubular Heater

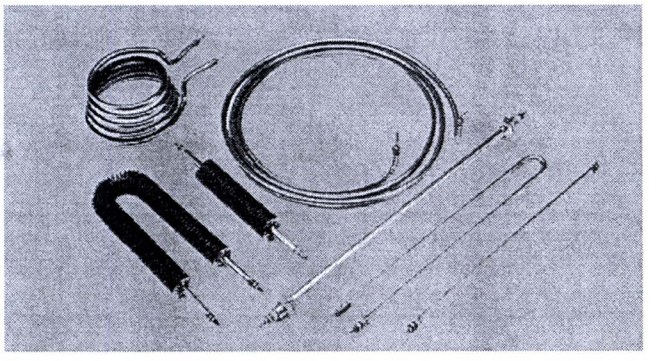
คือ มีขดลวดความร้อนบรรจุอยู่ในท่อโลหะช่องว่างระหว่างขดลวดความร้อนและท่อโลหะ จะถูกอัดแน่นด้วยผงแมกนีเซี่ยมออกไซด์ และถูกรีดลงให้มีความหนาแน่นตามมาตรฐาน วัสดุที่ใช้ทำ Tubular Heater มีหลายชนิดต่างกันตามลักษณะการใช้งาน ดัง

ตารางที่ 2.7 ชนิดของวัสดุที่ใช้ทำ Tubular Heater [59]

ทองแดง	ใช้กับ	น้ำสะอาด
สแตนเลส 304	ใช้กับ	อากาศที่มีการหมุนเวียน , เตาอบ , น้ำ , น้ำมัน , ของเหลว หรือในอุตสาหกรรมอาหารที่มี pH 5-9
สแตนเลส 316	ใช้กับ	อากาศที่มีการหมุนเวียน กรด , สารละลาย , สารเคมี หรือของเหลวที่มีลักษณะกัดกร่อน
อินโคลอย 800	ใช้กับ	อากาศที่ไม่มีการหมุนเวียน เช่น ในเตาอบ , น้ำ , น้ำมัน

2) ฮีตเตอร์ครีม (Finned Heaters) และฮีตเตอร์ท่อกลม (Tubular Heater)

ฮีตเตอร์ครีบ ทำจาก Tubular Heater ที่ดัดเป็นรูปต่างๆและเพิ่มแผ่นครีบม้วนติดกับท่อฮีตเตอร์อย่างต่อเนื่องจากปลายด้านหนึ่งไปอีกด้านหนึ่ง ส่วนของแผ่นครีบที่เพิ่มขึ้นมาจะทำให้ฮีตเตอร์สามารถถ่ายเทความร้อนได้เร็วขึ้นส่วน ฮีตเตอร์ท่อกลมคือ Tubullar Heater ที่ใช้ความร้อนโดยตรงโดยไม่ติดครีบ



รูปที่ 2.34 ฮีตเตอร์สำหรับเตาอบไฟฟ้า [59]

3) ฮีตเตอร์และฮีตเตอร์ท่อกลม ใช้กับงานต่อไปนี้

ก) ใช้ในเตาอบ

ข) ใช้ในท่อ DUCT

ค) ใช้กับเครื่องปรับอากาศ

การติดตั้งสามารถทำได้ 2 วิธีคือติดตั้งแบบให้ความร้อนโดยตรง และ แบบส่งผ่านความร้อนจากห้องเผาไปยังห้องอบโดยใช้ลมร้อนเป็นฮีตเตอร์ที่ใช้กับอากาศ ไม่ควรใช้กับของเหลว เนื่องจากจะเกิดตะกรันจับที่ครีบของฮีตเตอร์ทำให้ความร้อนไม่สามารถถ่ายเทได้ ในกรณีที่ให้ความร้อนกับอากาศที่ไม่หมุนเวียนควรเลือกวัสดุที่ใช้ทำฮีตเตอร์เป็นอินโคลอย เนื่องจากมีคุณสมบัติถ่ายเทความร้อนได้ดีและทนอุณภูมิได้สูงกว่าชนิดอื่น

2.8 การคัดขนาดอนุภาค

เป็นเทคนิคที่ใช้มากในการวิเคราะห์ขนาดอนุภาคอย่างรวดเร็ว ถึงแม้การคัดขนาดเป็นที่นิยมโดยทั่วไปแต่พบว่ายังประสบปัญหาในการใช้งาน คัดขนาดจะมีขนาดแปรผันโดยเฉลี่ยตั้งแต่ 3% ถึง 7% ซึ่งอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ ปัญหาที่เกิดเป็นประจำคือการใส่โลหะผงในตะแกรงมากเกินไป โดยเฉพาะผงที่มีขนาดเล็ก การวิเคราะห์ด้วยการคัดขนาดมีความคลาดเคลื่อนประมาณ 8%

การใช้คัดขนาดมีประโยชน์ในการเลือกขนาดผงให้ได้ตามต้องการ วิธีการนี้เรียกว่าการจำแนกอนุภาคและใช้ในการปรับปรุงแจกแจงขนาดอนุภาค ในการนำไปประยุกต์การใช้งานหลายอย่าง

ความสามารถของกระบวนการผลิตผงขึ้นอยู่กับการควบคุมขนาดอนุภาค ดังนั้นการคัดขนาดจะช่วยกำจัดขนาดผงที่ไม่ต้องการออกไปได้

ตารางที่ 2.8 ขนาดมาตรฐานการคัดขนาด (Standard sieve sizes) [60]

No.	ขนาดอนุภาค (μm)
70	212
80	180
100	150
120	125
140	106
170	90
200	75
230	63
270	53
325	45
400	38
450	32
500	25
635	20

การวิเคราะห์ด้วยการคัดขนาดเริ่มต้นจากการตะแกรงซ้อนกันโดยเรียงขนาดช่องตะแกรงใหญ่ไว้ด้านบนและขนาดลดลงจากบนงล่าง ดังนั้นขนาดช่องตะแกรงเล็กสุดอยู่ด้านล่างสุด นำผงวัสดุใส่ในตะแกรงอับบนสุดและเขย่าชั้นตะแกรง สำหรับการวิเคราะห์ขนาดตัวอย่างผงวัสดุประมาณ 100 กรัม ใช้ตะแกรงขนาด 20 เซนติเมตร เมื่อเขย่าเสร็จนำโลหะผงที่ค้างอยู่ในตะแกรงไปชั่งน้ำหนักและคำนวณเปอร์เซ็นน้ำหนักของผงแต่ละขนาด เป็นต้น

2.8.1 ประเภทของคัดขนาด

การจำแนกตะแกรงคัดขนาดโดยทั่วไปแยกตามวัสดุที่ใช้ในการคัดขนาด ในที่นี้ขอกล่าวถึงเฉพาะสองชนิดคือ ตะแกรงลวดทองเหลือง และตะแกรงลวดสเตนเลส

1) ตะแกรงทองเหลืองและตะแกรงสเตนเลส

รูปที่ 2.35 ตะแกรงชนิดลวดทองเหลือง [60]

จากรูปที่ 2.35 แสดงตะแกรงคัดขนาดมาตรฐาน ซึ่งมีทั้งชนิดทำด้วยทองเหลือง ออกแบบมาพื่อเพิ่มความสะดวกในการพกพา หรือต้องการตรวจหาขนาด จากตัวอย่างที่มีปริมาณน้อย สามารถนำิดตัว หรือใส่กระเป๋าเดินทางได้หลายอัน มีทั้งมาตรฐาน BS: 410-1/ ISO 3310-1 ผลิตขนาดส้นผ่าศูนย์กลาง 100 มม. หรือ มาตรฐาน ASTM E11: ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 3 นิ้ว สามารถคัดขนาดวนุภาคเล็กสุดได้ 20 ไมครอน

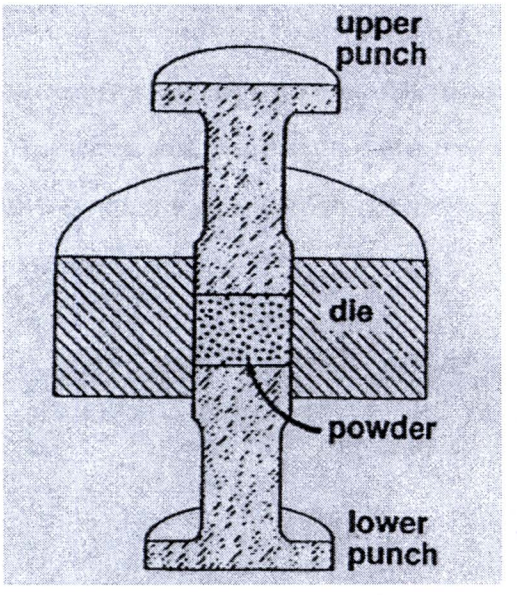
รูปที่ 2.36 ตะแกรงคัดขนาดชนิดลวดสเตนเลส [60]

จากรูปที่ 2.36 แสดงตะแกรงคัดขนาด ขนาด Diameter 100 mm. หรือขนาด 3 นิ้วพร้อมใบรับรอง Certificate of Compliance ผลิตตามมาตรฐานสากลทั้งระบบ ASTM E: 11 และหรือระบบ BS:410-1/ISO:3310-1 สะดวกในการพกพา ออกปฏิบัติงานภาคสนาม หรือใช้ในห้องปฏิบัติการวิทยาศาสตร์เพื่องานวิเคราะห์ เป็นต้น

2.9 การอัดแน่นของโลหะผงด้วยแม่พิมพ์

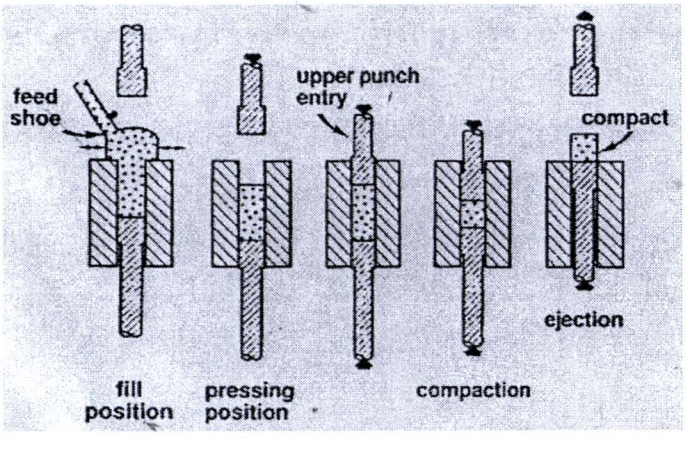
การอัดแน่นเป็นการอัดในแนวแกนเดี่ยว (uniaxial compaction) โดยใช้เครื่องมือที่มีความแข็งมากดังแสดงในรูปที่ 2.37 ลำดับขั้นตอนการเคลื่อนที่ของเครื่องมือขณะอัดแน่นแสดงในรูปที่ 2.38 โดยเริ่มต้นจากบรรจุโลหะผงลงในแม่พิมพ์และอัดผ่านพันช์ (punch) ซึ่งอาจเป็นพันช์ตัวเดียว (ส่วนใหญ่เป็นตัวบน) หรือพันช์ทั้งสองตัวคือทั้งตัวบน (upper punch) และ ตัวล่าง (lower punch)

ในการอัดแน่นความดันถูกส่งผ่านจากพันช์ตัวเดียวเรียกว่า การอัดแน่นแบบทางเดียว (Single action pressing) ดังรูปที่ 2.39 ถ้าความดันถูกส่งผ่านจากพันช์ทั้งสองตัว บนและล่างเราเรียกว่าการอัดแน่นแบบสองทาง (double action pressing)



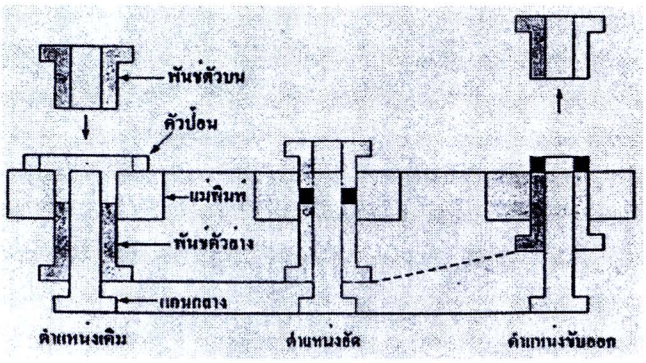
รูปที่ 2.37 ชุดพันช์และแม่พิมพ์สำหรับอัดแน่น [3]

จากรูปที่ 2.37 แสดงชุดแม่พิมพ์สำหรับอัดขึ้นรูปแบบดั้งเดิม ประกอบด้วย แม่พิมพ์ตัวบน (upper punch) แม่พิมพ์ตัวกลาง (die) แม่พิมพ์ตัวล่าง (lower punch) และ โลหะผงสำหรับอัดเป็นชิ้นงาน (powder)



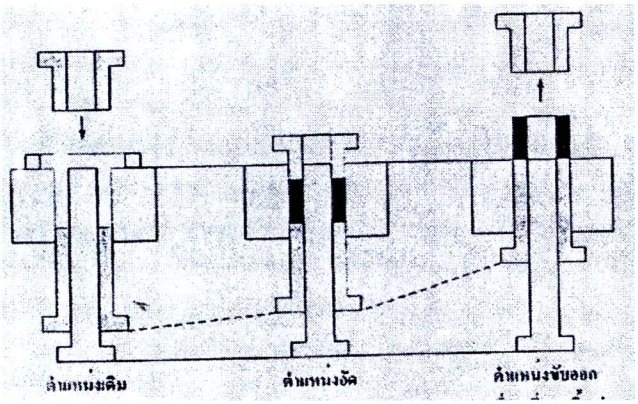
รูปที่ 2.38 แสดงลำดับขั้นตอนการเคลื่อนที่ของเครื่องมือในวัฏจักรการอัดแน่นโลหะผง [3]

จากรูปที่ 2.38 แสดงขั้นตอนการเคลื่อนที่ของเครื่องมือในการอัดขึ้นรูปโลหะผง เริ่มต้นเทโลหะผงลงในช่องใส่โลหะผง (ก่อนเทจะต้องเลื่อนพันช์ออกมาด้านนอกก่อน) แม่พิมพ์ตัวล่างอยู่ในตำแหน่งที่เรียกว่าตำแหน่งเติมในแม่พิมพ์ ต่อมาตำแหน่งอัด เลื่อนพันช์ตัวล่างให้อยู่ในตำแหน่งอัดแล้วเลื่อนพันช์ตัวบนลงมาในตำแหน่งอัดแน่น ขั้นตอนสุดท้ายพันช์ตัวบนถูกเลื่อนออกไปใช้พันช์ตัวล่างดันเอาชิ้นงานตำแหน่งออกจากแม่พิมพ์

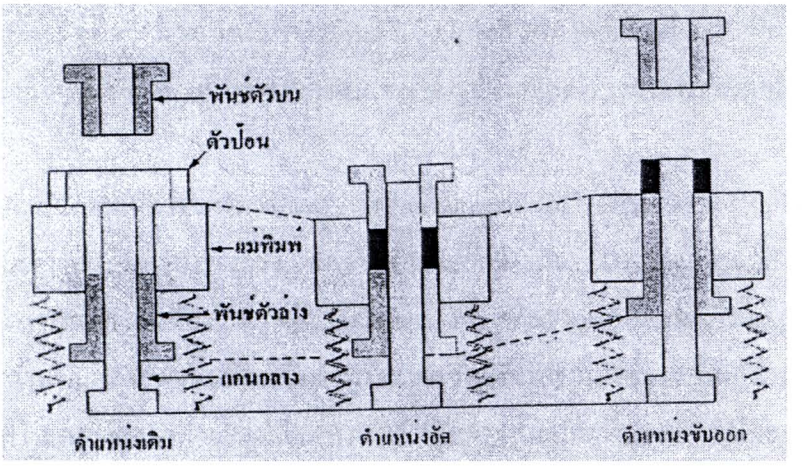


รูปที่ 2.39 แสดงเครื่องมืออัดแบบทิศทางเดียว (เส้นประแนวการเคลื่อนที่ของชิ้นส่วน) [3]

จากรูปที่ 2.39 แสดงตำแหน่งการอัดแน่นแต่ละขั้นตอน เริ่มต้นตำแหน่งเติมโลหะผง พันช์ตัวบนอยู่ในตำแหน่งเลื่อนออก ป้อนโลหะผง ตำแหน่งต่อมาเลื่อนพันช์ตัวบนมาในตำแหน่งอัดแน่น ขั้นตอนสุดท้ายเลื่อนพันช์ตัวบนออกและดันพันช์ตัวล่างขึ้นมา เรียกว่าตำแหน่งขับออกหรือปดชิ้นงาน



รูปที่ 2.40 แสดงเครื่องมืออัดแน่นแบบสองทิศทาง (เส้นประแสดงแนวการเคลื่อนที่ของชิ้นงาน) [3]



รูปที่ 2.41 เป็นเครื่องมืออัดแบบโฟลทิงดาย (เส้นประแสดงแนวการเคลื่อนที่ของชิ้นงาน) [3]

กรณีการอัดแน่นที่มีความดันถูกส่งผ่านจากพันช์ตัวเดียวเรียกว่าการอัดแน่นแบบทางเดียว ทั้งตัวบนและตัวล่างเราเรียกว่า (Single action pressing) ดังรูปที่ 2.40 แต่ถ้าความดันถูกส่งผ่านจากพันช์ทั้งตัวบนและตัวล่างเราเรียก กระบวนการอัดแน่นลักษณะนี้ว่า การอัดแน่นแบบสองทาง (Double action pressing) แสดงดังรูปที่ 2.41 ส่วนลักษณะการอัดผ่านแม่พิมพ์ในรูปที่เรียกว่าโฟลทิงดาย (floating die) เป็นตัวอย่างที่แสดงให้เห็นการเคลื่อนที่ของพันช์และแม่พิมพ์ที่ดูเสมือนว่าพันช์ทั้งสองเคลื่อนที่เข้าหาจุดกึ่งกลางของม่พิมพ์ในเวลาเดียวกัน ทั้งๆ ที่มีการส่งความดันมาจากด้านเดียวคือพันช์ตัวบน แต่การมีสปริงช่วยทำให้แม่พิมพ์มีการเคลื่อนที่เล็กน้อย การเคลื่อนที่ของทั้งพันช์ตัวบนและแม่พิมพ์ลักษณะนี้ทำให้ผงวัสดุได้รับแรงอย่างทั่วถึง และการอัดโลหะผงทำได้อย่างสม่ำเสมอเสมือนกับการอัดแน่นสองทาง

โดยทั่วไประบบการจำแนกชิ้นส่วนแบ่งตามความซับซ้อนของรูปร่างชิ้นงาน การจำแนกชิ้นส่วนเพิ่มขึ้นตามจำนวนระดับการอัดแน่นและความซับซ้อนในทิศทางการอัดที่เพิ่มขึ้น วิธีอัดมีรูปแบบตามลักษณะชิ้นงาน เช่น การอัดไฮดรอลิก (Hydraulic) การอัดเชิงกล (Mechanical) การอัดแบบหมุน (Rotary) การอัดแบบทุกทิศทาง (Isostatic) และ การอัดบนทั่ง (Anvil) เป็นต้น

2.9.1 หลักการพื้นฐานทางทฤษฎี (Theoretical basis)

การอัดแน่นในแนวแกนเดี่ยวคือแรงเสียดทานที่ผนังแม่พิมพ์ แรงเสียดทานทำให้แรงกระทำลดลงตามความลึกของผงวัสดุ (Powder bed) คุณลักษณะที่สำคัญภายในของโลหะผงมีผลต่อความสัมพันธ์ระหว่างความดัน-ความหนาแน่น-ความแข็งแรงในชิ้นงานอัด หมายถึงสมบัติของวัสดุ

อไปนี้ เช่น ความแข็ง อัตราการเกิดเวิร์กฮาร์ดเดนนิง แรงสียดทานที่พื้นผิวและพันธะเคมีระหว่างนุภาค ซึ่งมีความสำคัญเท่ากับปัจจัยภายนอก เช่น ขนาด รูปร่างของโลหะผง การหล่อลื่นและกรรมวิธีารอัดแน่น

2.9.1.1 หลักการของการอัดแน่น (Fundamentals of compaction)

พิจารณาชิ้นงานทรงกระบอกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง (D) ความสูง (H) การวิเคราะห์นส่วนขนาดเล็กรูปร่างบางที่มีความสูง (dH) เมื่อมีแรงกระทำภายนอก แสดงให้เห็นความแตกต่างะหว่างความดันด้านบน (P) ของชิ้นส่วนเล็กบางนี้และความดันที่ส่งผ่านชิ้นส่วนนี้สู่ด้านล่างคือ (Pb) มีาเท่ากับแรงที่ให้ในแนวตั้งฉากด้วยแรงเสียดทาน ใช้หลักการสมดุลของแรงทางคณิตศาสตร์

การอัดได้ หรือความสามารถในการอัด (Compressibility or compact ability) การประยุกต์ใช้านที่สำคัญของโลหะผงคือการขึ้นรูปงานที่ซับซ้อนโดยวิธีการอัด ดังนั้นพฤติกรรมการอัดจึงเป็นักษณะที่สำคัญ ความสามารถในการอัดหรือการอัดได้เป็นการวัดความสามารถในการทำให้โลหะผงัดแน่นขึ้นภายใต้แรงกระทำ รูปทรงเรขาคณิตที่ใช้ในการทดสอบเป็นรูปทรงกระบอกหรือแท่งี่เหลี่ยมอย่างง่าย ให้แรงกระทำผ่านแม่พิมพ์ที่มีผงบรรจุอยู่ภายในและวัดความหนาแน่นหลังการอัดแรงอัดที่ใช้โดยทั่วไปประมาณ 414 MPa หรือ 30 ตัน/ตารางนิ้ว หรือ 60,000 ปอนด์/ตารางนิ้ว ความหนาแน่นที่ได้เรียกว่าความหนาแน่นกรีน (green density) หรือความหนาแน่นก่อนอบผนึก ซึ่งใช้เป็นกณฑ์ในการบอกความสามารถในการอัด โดยทั่วไปผงเหล็กหรือเหล็กกล้ามีความหนาแน่นกรีนประมาณ 85 ถึง 90% ของความหนาแน่นทางทฤษฎี [3]

2.9.2 การเลือกวัสดุสำหรับผลิตแม่พิมพ์

วัตถุดิบหลักที่ใช้ในการผลิตแม่พิมพ์และเครื่องมือสำหรับงานแม่พิมพ์คือเหล็ก โดยหล็กที่ใช้ในการทำแม่พิมพ์จะอยู่ในกลุ่มของเหล็กกล้าเครื่องมือ ซึ่งเหล็กกล้าเครื่องมือจัดเป็นเหล็กกล้าที่มีคาร์บอนและธาตุผสมอื่นๆ ในปริมาณสูงเพื่อให้มีความสามารถในการชุบแข็งสูง เหมาะสำหรับการปรับปรุงสมบัติต้านทานการสึกหรอ

เหล็กกล้าเครื่องมือที่นำมาใช้ในการผลิตแม่พิมพ์และเครื่องมือนั้นสามารถแบ่งออกได้ตามลักษณะการใช้งานมี 6 ประเภทดังนี้

1) เหล็กกล้าเครื่องมือชุบแข็งด้วยน้ำ เป็นเหล็กกล้าคาร์บอน (Plain carbon steel) ที่ผสมคาร์บอน ตั้งแต่ 0.60-1.40% ดังนั้นคุณสมบัติด้านการชุบแข็ง หรือความลึกของผิวชุบแข็งจึงต่ำและจำเป็นต้องชุบแข็งด้วยน้ำ เหล็กกล้ากลุ่มนี้จะมีราคาถูกกว่ากลุ่มอื่น และมีจุดเด่น คือ สามารถกลึงไสเพื่อปรับแต่งชิ้นงานได้ง่าย สูญเสียคาร์บอนที่ผิวยาก

2) เหล็กกล้าเครื่องมืองานเย็น (Cold work tool steels) เป็นกลุ่มที่ใช้ผลิตเครื่องมือสำหรับนำไปใช้ในงานแปรรูปโลหะที่ไม่ได้ให้ความร้อนก่อนการแปรรูป เช่น แม่พิมพ์ตัดแผ่นโลหะเย็น ใบมีดตัดกระดาษ คัตเตอร์ เป็นต้น

3) เหล็กกล้าเครื่องมือทนต่อแรงกระแทก (Shock resisting tool steels) เป็นเหล็กกล้าเครื่องมือ ที่พัฒนาให้มีความเหนียว ความแข็งแรง และความต้านทานการสึกหรอสูง เพื่อใช้สำหรับงานที่ต้องรับแรงกระแทกซ้ำๆ กัน เช่น สิ่ว (Chisel) หัวกด (Punch) และแม่พิมพ์โลหะ (die) เป็นต้น

4) เหล็กกล้าเครื่องมืองานร้อน (Hot work tool steels) ในงานบางประเภทที่ต้องอาศัยอุณหภูมิสูงในการแปรรูป เช่น งานตีขึ้นรูปร้อน (Hot forging) งานฉีดหล่อ (Die casting) งานรีดร้อน (Hot extrusion) งานตัดร้อน (Hot shear blade) งานอัดร้อน (Hot press) สิ่งสำคัญ คือ เหล็กกล้าเครื่องมือจะต้องรักษาสมบัติความแข็งที่อุณหภูมิสูงได้ดี (Red hardness) ต้านทานต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ (Thermal shock) ต้านทานต่อการอ่อนตัวที่อุณหภูมิสูง และมีความเหนียว

5) เหล็กกล้าเครื่องมือความเร็วสูง (High speed tool steels) เป็นเหล็กกล้าเครื่องมือที่มีจุดมุ่งหมายหลัก สำหรับใช้เป็นวัสดุในการตัดโลหะด้วยความเร็วสูง เช่น ใบเลื่อย (Saws) ใบตัด (Milling cutters) เป็นต้น

6) เหล็กกล้าเครื่องมือสำหรับทำแม่พิมพ์พลาสติก (Plastic mold steels) เหล็กกล้าเครื่องมือกลุ่มนี้ส่วนใหญ่จะใช้งานที่ช่วงอุณหภูมิ 175-200°C ภายใต้ความดันสูง

ตารางที่ 2.9 กรรมวิธีการผลิตและสมบัติเหล็กกล้าเครื่องมือ [4]

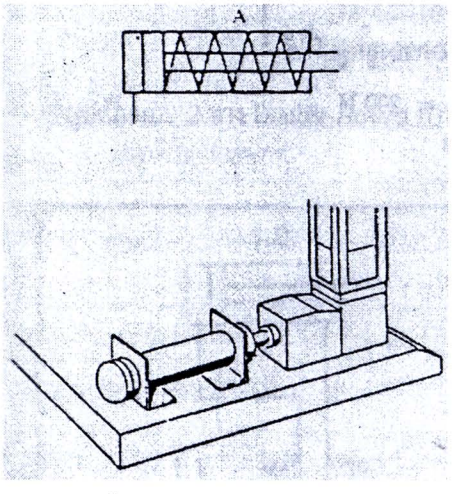
กระบวนการ	สมบัติที่ต้องการ
งานฉีดหล่อ (Die casting)	รักษาความแข็งไว้ได้ที่อุณหภูมิสูง ต้านทานต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ (Thermal shock) ต้านทานต่อการอ่อนตัวที่อุณหภูมิสูง การบิดเบี้ยวต่ำ ความสามารถในการกลึงไสสูง มีความแน่นอนของขนาดภายหลังการชุบแข็ง
แม่พิมพ์สำหรับพลาสติกและยาง (Plastic mould and Rubber mould)	ความต้านทานแรงอัด ความแข็งที่ผิวสูง ความแข็งแรงที่แกนสูง ความสามารถในการกลึงไส ความแน่นอนของขนาดภายหลังการชุบแข็ง ความสามารถในการขัดผิวให้เรียบ ความต้านทานการกัดกร่อนที่ผิว (เฉพาะกรณีที่ใช้งานในสภาวะที่มีกัดกร่อนสูง)
งานตีขึ้นรูปร้อน (Hot forging)	ความเหนียว รักษาความแข็งไว้ได้ที่อุณหภูมิสูง ต้านทานต่อการอ่อนตัวที่อุณหภูมิสูง ต้านทานต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ (Thermal shock) ทนการสึกหรอ
งานรีดขึ้นรูปร้อน (Hot extrusion)	ความเหนียว รักษาความแข็งไว้ได้ที่อุณหภูมิสูง ต้านทานต่อการอ่อนตัวที่อุณหภูมิสูง ต้านทานต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ (Thermal shock) ทนการสึกหรอ
งานทุบหัวเย็น (Cold heading)	ความเหนียว ความแข็ง ทนการสึกหรอ รักษาความแข็งไว้ได้ที่อุณหภูมิสูง จากการแปรรูป ต้านทานต่อการอ่อนตัวที่อุณหภูมิสูง
หัวกดรีดขึ้นรูปเย็น (Cold extrusion punch)	ความแข็ง ทนการสึกหรอ ทนการเสียดสี รักษาความแข็งไว้ได้ที่อุณหภูมิสูง (ถ้ามีการใช้งานที่อุณหภูมิสูง) ต้านทานต่อการอ่อนตัวที่อุณหภูมิสูงจากการแปรรูป
แม่พิมพ์รีดขึ้นรูปเย็น (Cold extrusion die)	ความเหนียว ทนการสึกหรอ
งานตัดโลหะร้อน (Hot shearing)	ความเหนียว สามารถรักษาคมตัดได้ดี รักษาความแข็งไว้ได้ที่อุณหภูมิสูง ต้านทานต่อการอ่อนตัวที่อุณหภูมิสูง สามารถรับแรงกระแทกซ้ำๆได้ ทนการสึกหรอ ต้านทานต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ (Thermal shock)
งานตัดโลหะเย็น (Cold shearing)	ความแข็ง ความเหนียว สามารถรักษาคมตัดได้ดี สามารถรับแรงกระแทกซ้ำๆ ได้
แม่พิมพ์ดึงขึ้นรูปลึก (Deep draw die)	ความแข็ง ความเหนียว ทนต่อการสึกหรอ

2.10 ทฤษฎีการออกแบบเครื่องอัดไฮดรอลิกส์ (Hydraulic press)

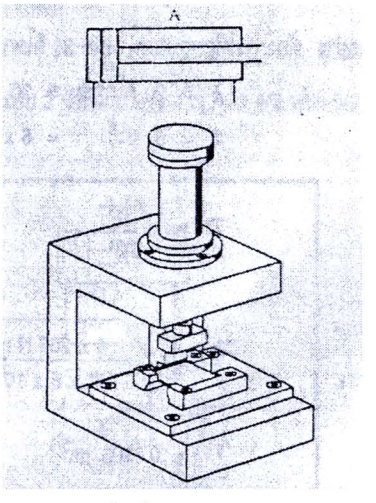
ระบบไฮดรอลิกส์ คือ ระบบการทำงานที่ใช้ของไหลเป็นตัวการส่งถ่ายกำลังทำให้เกิดการเคลื่อนที่และเกิดแรงกระทำขึ้น ซึ่งถ้าเป็นนิวแมติกส์จะใช้ลม

2.10.1 ชนิดลูกสูบ

การเลือกชนิดของลูกสูบพิจารณาได้จากลักษณะของงานซึ่งจะต้องคำนึงถึงแรงที่ต้องใช้ ระยะชักของกระบอกสูบ เช่น ถ้างานที่ต้องการแรงไม่มากและระยะชักไม่เกิน 10 ซม. ก็ควรจะเลือกใช้ลูกสูบแบบทางเดียว แต่ถ้างานต้องการแรงมากและระยะชักที่ยาวกว่า 10 ซม. ก็ควรใช้ลูกสูบสองทาง



รูปที่ 2.42 การเลื่อนชิ้นงานที่ต้องการระยะตามที่กำหนด [5]



รูปที่ 2.43 ปั๊มขึ้นรูปที่ต้องการระยะชักตามที่กำหนด [5

2.10.2 การเลือกขนาดลูกสูบ

2.10.2.1 การหาขนาดลูกสูบและแรงของกระบอกสูบ สามารถคำนวณได้จากสูตรการคำนวณและน้ำหนักของภาระงานที่ลูกสูบกระทำ

สูตร $F = PxA$ (2.20)

$A = F/P$

หรือ $A = \pi.D2/4$

$D = \sqrt{4F/\pi P}$

P = แรงดันของระบบ 6 บาร์ = $6x10^5$ N/m^2

F = แรงที่ลูกสูบต้องรับภาระ

1 กิโลกรัม (แรง) = 9.81 N ≈ 10 N

2.10.2.2 การหาความเร็วของกระบอกสูบ

สูตร $$V = \frac{GPM \times 231}{A\,(in^2) \times 60} \quad (2.21)$$

V = ความเร็วของกระบอกสูบ (in/sec หรือ mm/sec)

GPM = ขนาดของปั๊มไฮดรอลิกส์ที่ใช้ส่งน้ำมันเข้ามอเตอร์ไฮดรอลิกส์

A = พื้นที่ (in^2)

2.10.2.3 การหาขนาดของมอเตอร์ไฟฟ้า

สูตร $$HP = \frac{GPM \times psi}{1{,}714} \quad (2.22)$$

หรือ $$HP = \frac{P \times LPM}{450 \times 0.8}$$

P = ความดัน (kgf/cm^2)

1 lbf/in^2 = 1 psi

3.10.2.4 อัตราการไหลของน้ำมันสำหรับมอเตอร์ไฮดรอลิกส์

LPM = อัตราการไหล (1 LMP = 0.26 GMP)

V = อัตราการไหลที่ใช้กับมอเตอร์

$$GPM = \frac{V(in^3 \times rpm)}{231} \quad (2.23)$$

2.10.2.5 การหาขนาดของปั๊ม

สูตร $$Q = VA \quad (2.24)$$

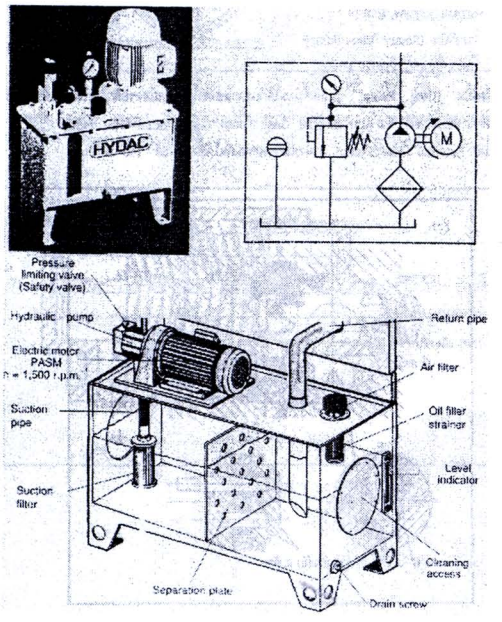
Q = ขนาดของปั๊ม (GPM)

V = ความเร็วของกระลูกสูบ (mm/sec)

A = พื้นที่กระบอกสูบ (cm^2)

2.10.3 ชุดต้นกำลังในระบบไฮดรอลิกส์

1) ชุดต้นกำลังไฮดรอลิกส์ ทำหน้าที่เป็นตัวจ่ายน้ำมันทำให้เกิดความดันขึ้น ซึ่งชุดต้นกำลังจะประกอบด้วยมอเตอร์ไฟฟ้า (Electric Motor) ปั๊มไฮดรอลิกส์ (Hydraulic Pump) และวาล์วควบคุมความดัน (Pressure Relief Valves)



รูปที่ 2.44 แสดงส่วนประกอบของชุดต้นกำลังไฮดรอลิกส์ [5]

2) ปั๊มไฮดรอลิกส์ (Hydraulic Pump)

ปั๊มไฮดรอลิกส์ (Hydraulic Pump) ทำหน้าที่ดูดและส่งน้ำมันจากถังเก็บน้ำมันไฮดรอลิกส์ไปยังอุปกรณ์ต่างๆ ในระบบไฮดรอลิกส์มีอยู่ด้วยกันหลายชนิด ควรเลือกใช้ให้เหมาะสมกับลักษณะของงานไฮดรอลิกส์แต่ละรูปแบบของงาน

ชนิดของปั๊มไฮดรอลิกส์ที่ใช้กันอยู่ทั่วไปในงานอุตสาหกรรมแบ่งออกตามลักษณะการใช้งานได้ดังนี้

ก) เกียร์ปั๊ม (Gear Pump)

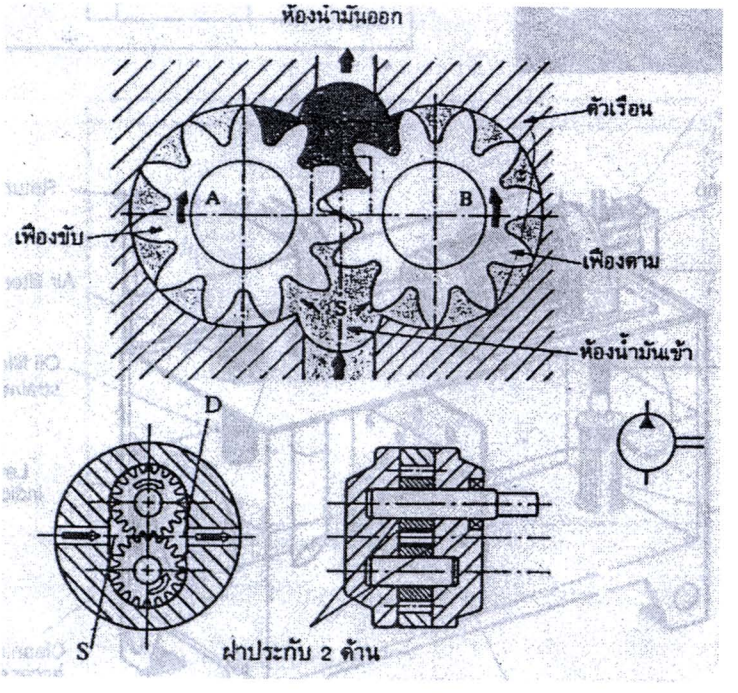
ข) สกรูปั๊ม (Screw Pump)

ค) โรตารี่ปั๊ม (Rotary Pump)

ง) ปั๊มแบบลูกสูบ (Piston Pump)

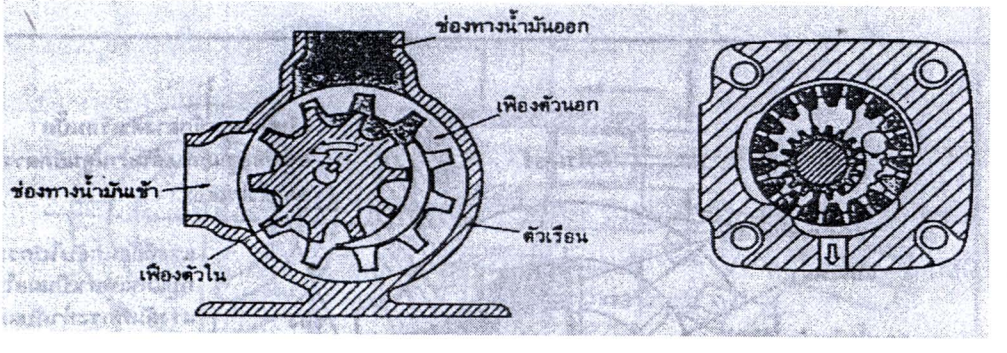
เกียร์ปั๊ม (Gear Pump) เป็นปั๊มที่นิยมใช้กันมากโดยทั่วไปในงานไฮดรอลิกส์โครงสร้างเป็นแบบง่ายๆ ไม่ยุ่งยาก มี 2 แบบ คือ แบบ External Gear Pump และ Internal Gear Pump

แบบ External Gear Pump สามารถสร้างความดันได้ตั้งแต่ 63 – 160 bar



รูปที่ 2.45 แสดงส่วนประกอบของเกียร์ปั๊มแบบ External [5]

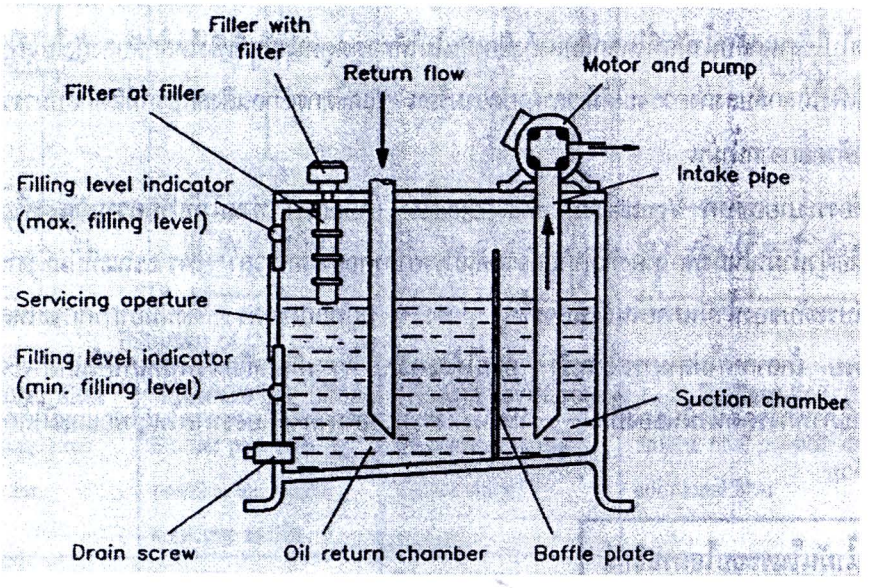
แบบ Internal Gear Pump สามารถสร้างความดันได้ตั้งแต่ 160 – 250 bar



รูปที่ 2.46 แสดงส่วนประกอบของเกียร์ปั๊มแบบ Internal [5]

3) ถังพักน้ำมันไฮดรอลิกส์ (Oil Reservoir หรือ Tank)

เป็นส่วนที่เก็บน้ำมันไฮดรอลิกส์ที่จะนำไปใช้ในระบบการทำงานของวงจรไฮดรอลิกส์ทั้งหมด ทำหน้าที่ระบายความร้อนออกจากน้ำมันที่ไหลกลับจากการใช้งานในระบบเป็นตัว ทำให้ฟองอากาศค่อยๆ หมดไปก่อนจะดูดไปใช้งานใหม่



รูปที่ 2.47 แสดงส่วนประกอบของถังพักน้ำมันไฮดรอลิกส์ [5]

ปริมาณของน้ำมันที่ถูกปั๊มดูดไปใช้งาน 3-5 นาที ต้องมีปริมาณเพียงพอที่จะใช้ได้ ฉะนั้น ถังน้ำมันไฮดรอลิกส์ ควรจะต้องมีขนาดความจุที่เพียงพอและควรเพิ่มปริมาณน้ำมันในถังพักไว้เป็น 3 เท่า ของกำลังดูดของปั๊ม เช่น ปั๊มมีกำลังดูด 100 ลิตร/นาที ถังพักควรจุได้ 300 ลิตร เป็นต้น

4) การกรองน้ำมันไฮดรอลิกส์

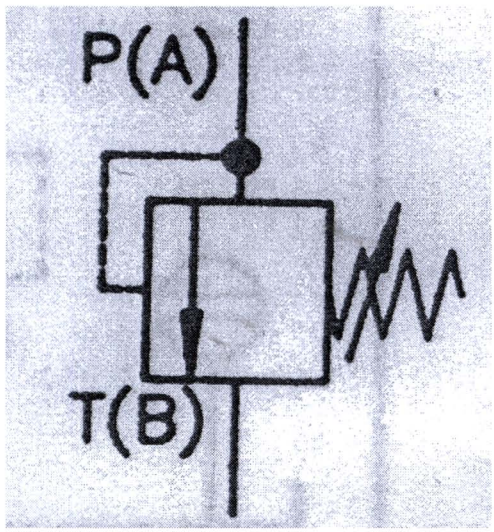
ไส้กรอง (Filters) มีหน้าที่ป้องกันฝุ่นละออง สิ่งสกปรกรวมทั้งเศษโลหะที่ปะปนมากับน้ำมัน ไม่ให้ผ่านเข้าไปกับน้ำมันที่จะถูกส่งไปใช้ในระบบ ระบบการกรองน้ำมันไฮดรอลิกส์ แบ่งเป็น 2 แบบ คือ การกรองหยาบจะใช้ไส้กรองแบบฟิลเตอร์ (Filter) ความละเอียดของไส้วัดเป็น ไมคอน (Microns) 1 ไมคอนเทียบได้เท่ากับ 1/1,000 มิลลิเมตร หรือ 25 ไมครอน = 0.001 นิ้ว

การควบอุณหภูมิของน้ำมันหรือระบบระบายความร้อน (Cooling System) ในระบบไฮดรอลิกส์ วามเสียดทานที่เกิดจากการไหลของน้ำมันผ่านอุปกรณ์ต่างๆ รวมทั้งถังพักน้ำมันด้วย ซึ่งอุณหภูมิปกติ ่ใช้งานของน้ำมันในระบบไฮดรอลิกส์ ควรจะอยู่ที่ 50 – 60 °C

5) วาล์วความดัน (Pressure Valves) วาล์วความดัน มีหน้าที่ควบคุม ความดันในระบบไฮดรอ ิกส์ให้อยู่ในระดับที่ต้องการ ได้แก่

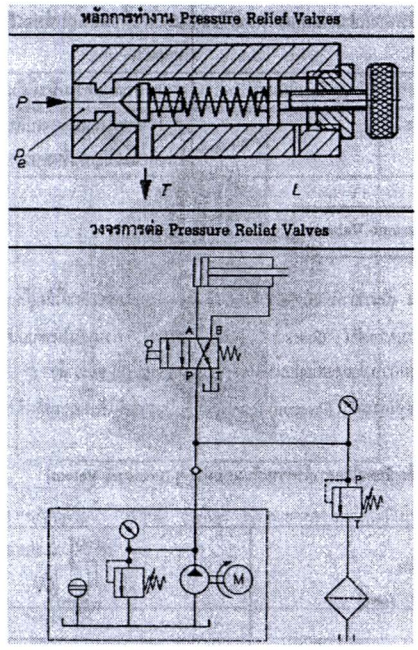
ก) วาล์วระบายความดัน (Pressure Relief Valve) ความดันในระบบไฮดรอลิกส์จะถูกกำหนดโดยวาล์วชนิดนี้ ซึ่งจะควบคุมโดยต่อท่อน้ำมันแรงดันที่ Input (P) ของวาล์ว

ข) วาล์วควบคุมความดัน (Pressure Regulators) เป็นวาล์วที่ใช้ลดความดันด้านเข้าให้ได้ตามที่กำหนดไว้ ซึ่งแสดงสัญลักษณ์ของวาล์วความดันแบบต่างๆดังนี้

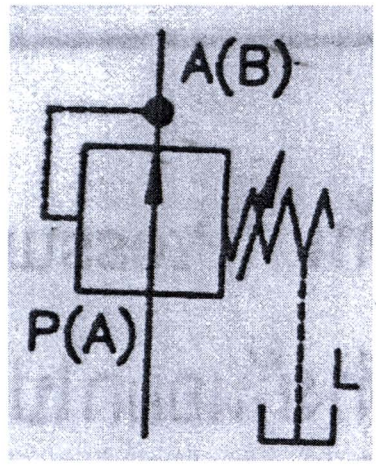


รูปที่ 2.48 แสดงวาล์วระบายแรงดัน (Pressure Relief Valve) [5]

วาล์วระบายความดัน (Pressure Relief Valves) ทำงานโดยอาศัยหลักกการทำงานของสปริงกด ชีลวาล์วปิดทางไหลของน้ำมันเมื่อแรงดันน้ำมันในวงจรมีมากเกินกว่ากำหนด ก็จะดันชีลให้สปริงถอย หลังเปิดให้น้ำมันไหลกลับลงถังกลับ

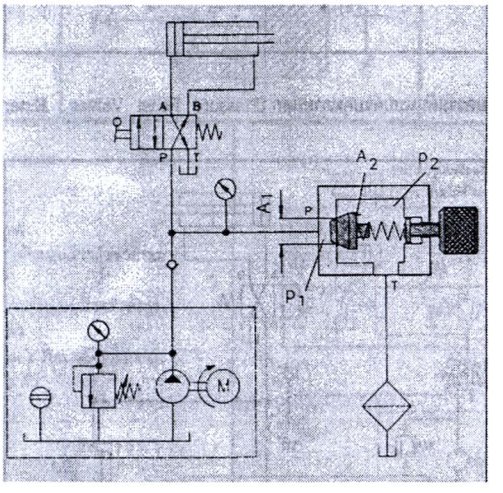


รูปที่ 2.49 แสดงลักษณะการทำงานและวงจรการต่อ Pressure Relief Valves [5]

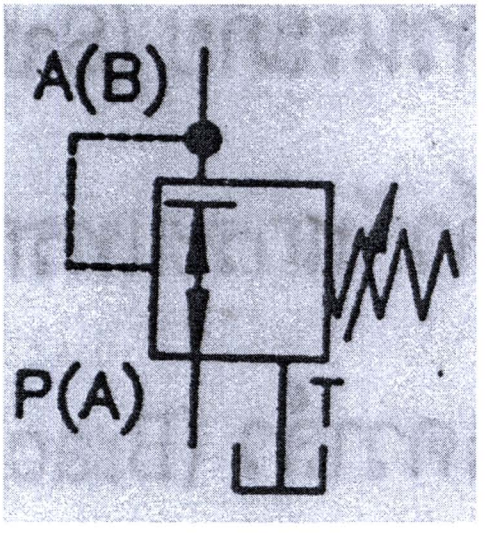


รูปที่ 2.50 แสดงวาล์วควบคุมความดันแบบ 2 ทาง (2-Way Pressure Regulator) [5]

วาล์วควบคุมความดันแบบ 2 ทาง (2-Way Pressure Regulator) เป็นวาล์วปกติเปิดให้น้ำมันไหลผ่านไปยังช่องทางออกได้ทันที

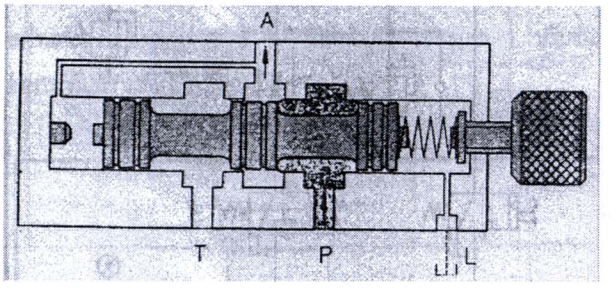


รูปที่ 2.51 แสดงวงจรการต่อวาล์วควบคุมความดันแบบ 2 ทาง (2-Way Pressure Regulator) [5]

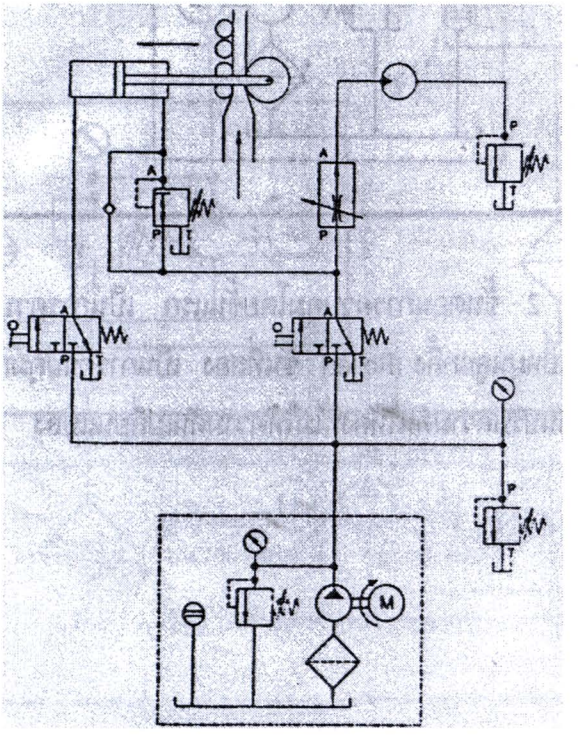


รูปที่ 2.52 แสดงวาล์วควบคุมความดันแบบ 3 ทาง (3-Way Pressure Regulator) [5]

วาล์วควบคุมความดันแบบ 3 ทาง (3-Way Pressure Regulator) เป็นวาล์วควบคุมความดันที่แก้ปัญหากรณีเกิดความดันเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากแรงดันของ Load วาล์วควบคุมความดันแบบ 3 ทาง จะทำหน้าที่เป็นวาล์วระบายความดันไปในตัว

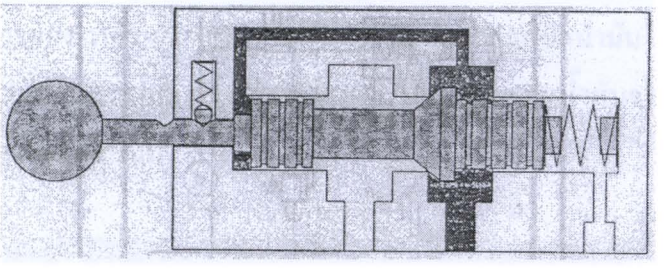


รูปที่ 2.53 แสดงวาล์วควบคุมความดันแบบ 3 ทาง [5]



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

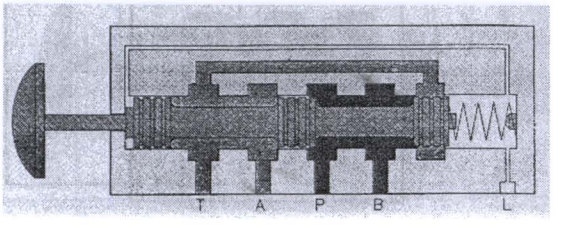
6) วาล์วควบคุมทิศทางการไหล คือ ส่วนที่ทำหน้าที่เปิด-ปิด และเปลี่ยนทิศทางการไหลของ
ามันในระบบไฮดรอลิกส์



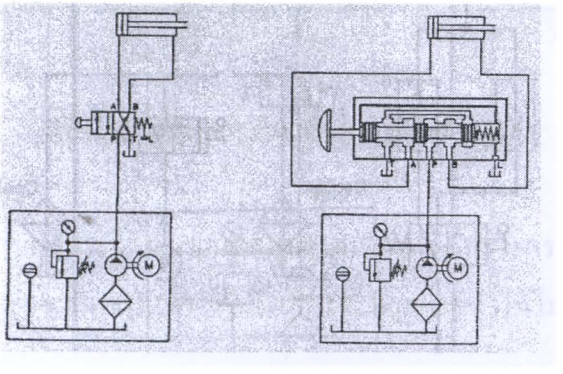
รูปที่ 2.55 แสดงภาวะการณ์ทำงานของวาล์วแบบลิ้นนั่งบ่า [5]

โครงสร้างการทำงานของวาล์ว 4/2 (4/2 – Way Valve) การทำงานของวาล์ว 4/2 ทางออกน้ำมันเข้าทางรู P และต่อลงถังทางรู T

ตำแหน่งปกติน้ำมันไหลจาก P ไป B และจาก A ไป T เมื่อเลื่อนเปลี่ยนตำแหน่งน้ำมันไหลจาก P ไป A และน้ำมันจาก B ไป T วาล์ว 4/2 จะใช้ควบคุมการทำงานของลูกสูบแบบ 2 ทาง (Double Acting Cylinder)

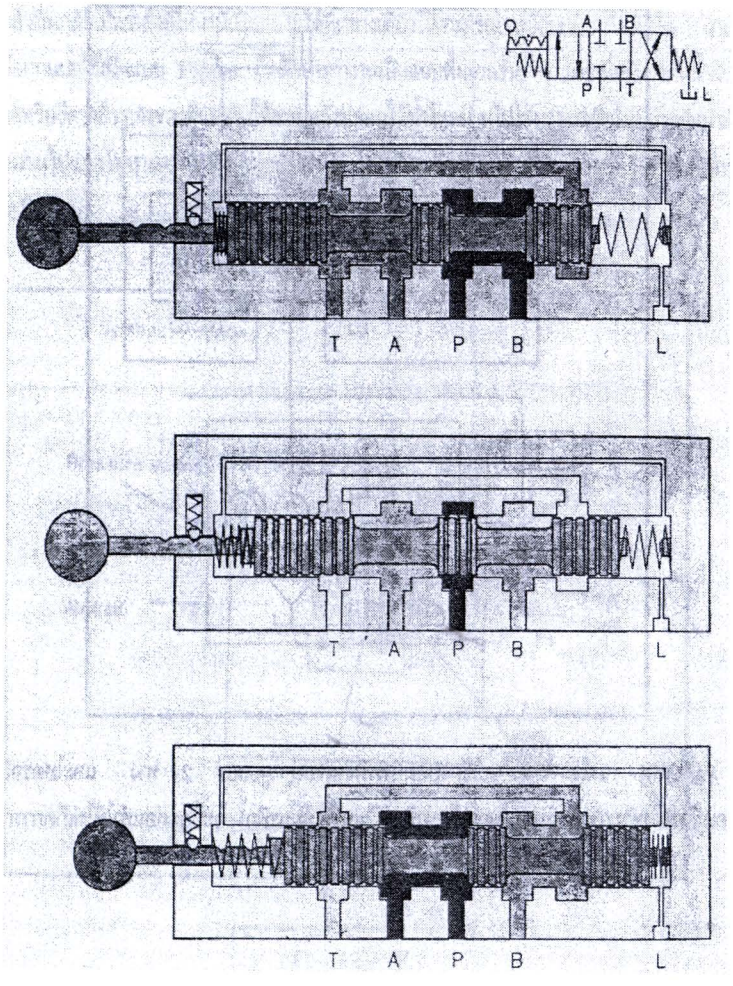


รูปที่ 2.56 แสดงโครงสร้างการทำงานของวาล์ว 4/2 [5]



รูปที่ 2.57 แสดงการต่อวงจรการของวาล์ว 4/2 [5]

โครงสร้างการของ วาล์ว 4/3 แบบตำแหน่งกลางรูต่อทุกรูถูกปิดน้ำมันไหลผ่านไม่ได้ การใช้งานเหมือนกันแบบน้ำมันไหลวนกลับถัง แต่วาล์วแบบนี้ ตำแหน่งกลางน้ำมันจไหลกลับลงถังได้โดยไหลผ่านวาล์วระบายความดันเท่านั้น



รูปที่ 2.58 แสดงการทำงานของวาล์ว 4/3 [5]

วาล์ว 4/3 จะใช้ควบคุมการทำงานของลูกสูบแบบ 2 ทาง และไฮดรอลิกส์มอเตอร์เพราะเมื่อเปลี่ยนการทำงานหมุนตามเข็มนาฬิกาเป็นทวนเข็มนาฬิกา จะหยุดก่อนทำให้ไม่เกิดการกระตุก