

บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 วัสดุหน้าสัมผัสไฟฟ้า

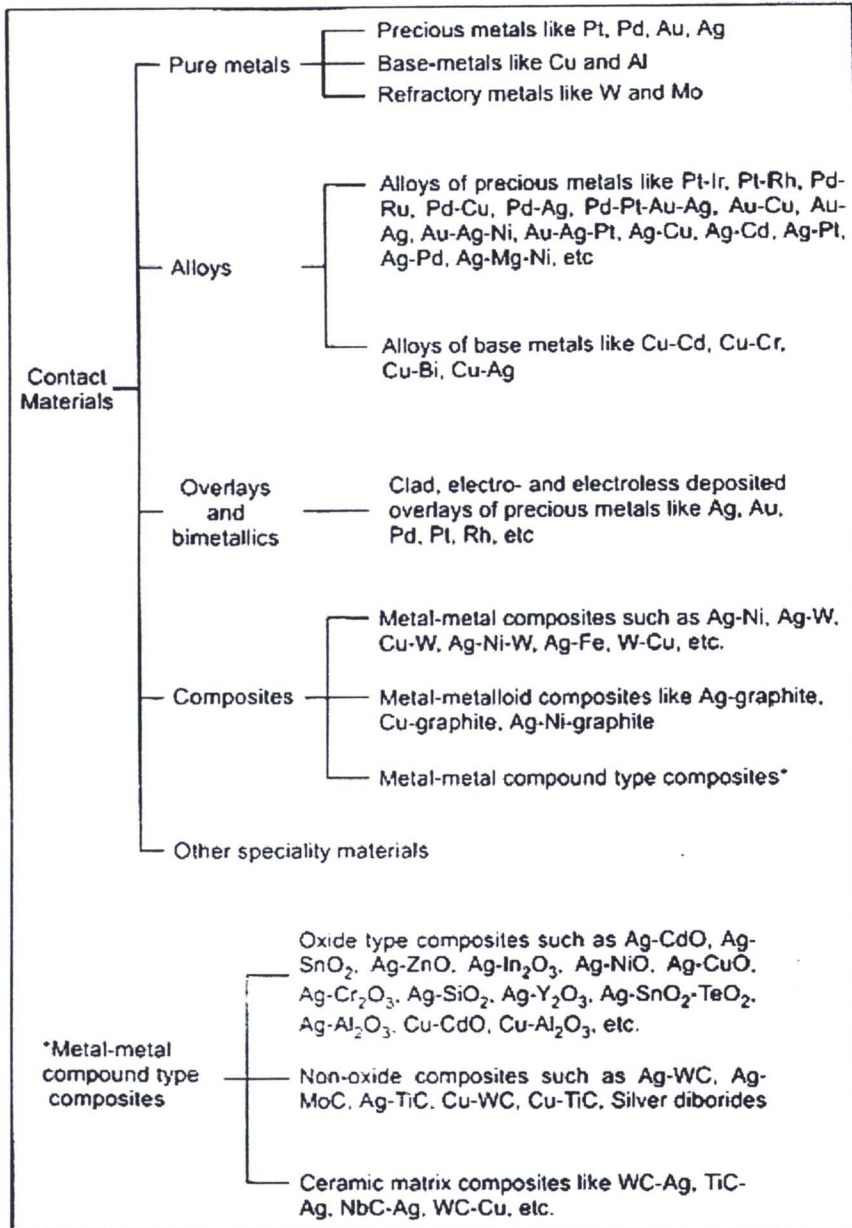
วัสดุหน้าสัมผัสไฟฟ้า (Electrical Contact Materials) เป็นส่วนหนึ่งของอุปกรณ์ไฟฟ้าหลายประเภท เช่น สวิตช์ไฟฟ้า เบรกเกอร์ รีเลย์ เป็นต้น วัสดุหน้าสัมผัสไฟฟ้านั้นมีหน้าที่หลักในการเชื่อมต่อ (เปิด/ปิด) กระแสไฟฟ้ากับส่วนต่างๆ ของอุปกรณ์ หน้าสัมผัสไฟฟ้าในอุดมคตินั้นต้องนำไฟฟ้าได้สูง เกิดความร้อนต่ำขณะมีการส่งผ่านของกระแสไฟฟ้า ความต้านทานต่อการสึกกร่อนทางสภาพแวดล้อมและความแข็งแรงสูง ประเภทของหน้าสัมผัสไฟฟ้าสามารถแบ่งได้เป็น 4 ประเภทหลัก [6] ดังนี้

2.1.1 การแบ่งประเภทหน้าสัมผัสตามลักษณะการใช้งาน

ลักษณะการใช้งาน (Operational Function) ของวัสดุหน้าสัมผัสไฟฟ้าสามารถแบ่งได้ 3 กลุ่ม คือ (ก) กลุ่ม Stationary Contact เป็นวัสดุหน้าสัมผัสไฟฟ้าที่ไม่มีการเคลื่อนที่ระหว่างการทำงาน มีการเชื่อมต่ออย่างถาวร เช่น Bus Joint, Soldered Joint เป็นต้น โลหะที่นิยมนำมาทำ Stationary Contact ได้แก่ ทองแดง และอลูมิเนียม (ข) กลุ่ม Sliding Contact วัสดุหน้าสัมผัสกลุ่มนี้สามารถเคลื่อนที่ได้ เช่น หน้าสัมผัสของ Rotary Switch, Motor Commutators วัสดุที่นิยมนำมาใช้ใน Sliding Contact ได้แก่ กราไฟต์หรือคาร์บอน เนื่องจากมีผิวลื่น และค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานต่ำ และ (ค) กลุ่ม Make and Break Contacts วัสดุหน้าสัมผัสในกลุ่มนี้จะมีลักษณะการใช้งานแบบเปิด/ปิด สลับไปสลับมาระหว่างการใช้งาน

2.1.2 การแบ่งประเภทหน้าสัมผัสตามส่วนผสมทางเคมีของโลหะ

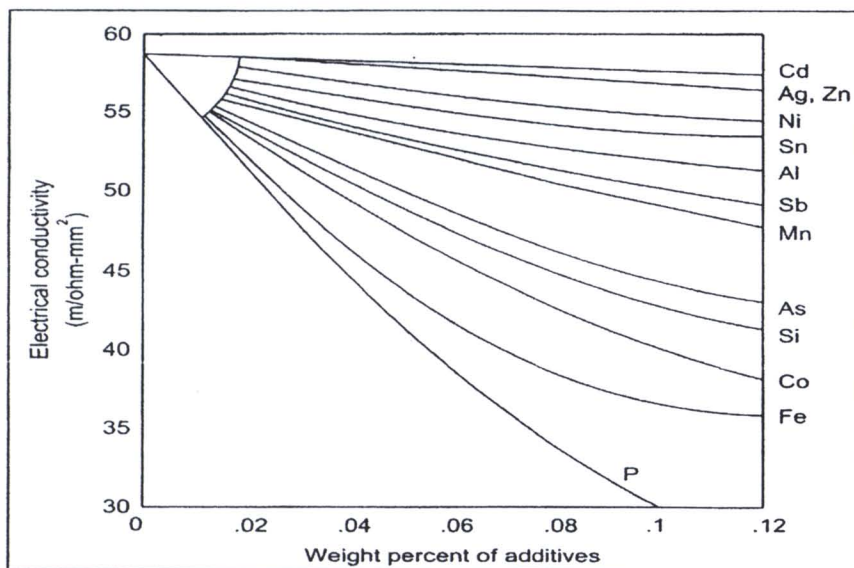
การแบ่งประเภทหน้าสัมผัสตามส่วนผสมทางเคมีของโลหะ (Composition of Material) สำหรับทำหน้าสัมผัสไฟฟ้า แสดงดังแผนภูมิรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 แผนภูมิจำแนกประเภทหน้าสัมผัสไฟฟ้าจากส่วนผสมทางเคมี [6]

(ก)-กลุ่มโลหะมีค่าบริสุทธิ์และโลหะมีค่าผสม (Precious Metal and Alloy of Precious Metal) โลหะมีค่าส่วนใหญ่ถูกนำไปใช้ในงาน ไมโครอิเล็กทรอนิกส์ งานโทรคมนาคม เนื่องจากโลหะกลุ่มนี้มีความต้านทานการผุกร่อนจากเคมีสูง และมีความต้านทานการสึกกร่อนจากการอาร์ค (Arc Erosion Resistance) โลหะแพลทินัม และแพลเลเดียม เป็นวัสดุที่นิยมนำมาใช้ในงานประเภทนี้ เพราะมีจุดหลอมเหลวที่สูง ต้านทานการไหม้และทนต่อการอาร์คได้ดี

(ข) กลุ่มโลหะหลักและโลหะหลักผสม (Base Metal and Alloy of Base Metal) โลหะที่นิยมใช้ในกลุ่มนี้คือ ทองแดง และอะลูมิเนียม ทองแดงบริสุทธิ์มีความแข็งแรงต่ำ เหนียวขึ้นรูปง่าย นำความร้อนและไฟฟ้าได้ดี เป็นอันดับสองรองจากเงิน ในบรรยากาศปกติทองแดงมีความต้านทานการผุกร่อนได้ดี เนื่องจากเกิดฟิล์มคิวปริสออกไซด์ (Cuprous Oxide film) ทำให้ไม่เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันกับเนื้อโลหะ แต่เมื่ออุณหภูมิสูงฟิล์มนี้จะสลายตัว การเพิ่มสมบัติทางกลให้แก่ทองแดงนั้นสามารถทำได้โดยการเติมธาตุผสมลงไป ช่วยเพิ่มความแข็งแรงให้กับทองแดง แต่ทำให้ค่าการนำไฟฟ้าของทองแดงลดลง ดังแสดงในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 ปริมาณธาตุผสมที่เติมต่อค่าการนำไฟฟ้าของทองแดง [6]

สำหรับโลหะอะลูมิเนียมบริสุทธิ์นั้นมีความสามารถในการขึ้นรูปได้ง่าย น้ำหนักเบา ราคาถูก มีค่าการนำไฟฟ้าเป็นอันดับสี่รองจากเงิน ทองแดง และทอง อะลูมิเนียมเกรดที่ใช้ในการนำไฟฟ้าเป็นเกรด EC ซึ่งมีค่าการนำไฟฟ้าที่ 61 %IACS แต่ข้อเสียที่พบคือการต้านทานการเกิดออกซิเดชันไม่ดัดนัก ดังนั้นการใช้งานจึงนำไปทำเป็นแผ่นรีดติดกับทองแดงหรือเงิน

(ค) กลุ่มโลหะทนไฟ (Refractory Metal) กลุ่มนี้นิยมใช้ทั้งสแตนเลสและโมลิบดีนัม ซึ่งทั้งสแตนเลสเป็นธาตุที่มีจุดหลอมเหลวสูง ความแข็งแรงสูง มีความต้านทานการสึกกร่อนที่ดี แต่มีน้ำหนักมากและทนการผุกร่อนได้ไม่ดี ใช้สำหรับผลิตวัสดุหน้าสัมผัสของเซอร์กิตเบรกเกอร์ความต่างศักย์สูง (High Voltage Circuit Breaker) สำหรับโมลิบดีนัมนิยมใช้ผสมกับทั้งสแตนเลสเพื่อช่วยทำให้เกรนมีขนาดเล็กลง หรือบางครั้งนำไปใช้แทนทั้งสแตนเลสเมื่อวัสดุหน้าสัมผัสนั้นต้องการน้ำหนักเบา ราคาถูก ใช้สำหรับผลิตสวิตช์เกียร์ความต่างศักย์สูง (High Voltage Switchgear)

(ง) กลุ่มคอมโพสิต (Composite Contacts) เป็นการผสมของโลหะที่มีจุดหลอมเหลวสูง ความแข็งแรงสูง ทนการสึกหรอที่ดี แต่มีการนำไฟฟ้าไม่ดี เช่น ทังสเทน โมลิบดีนัม ซิลิคอนคาร์ไบด์ เป็นต้น กับโลหะที่นำไฟฟ้าได้ดี ได้แก่ เงิน ทองแดง เป็นต้น จากงานวิจัยของ Zhan และ Zhang [15] พบว่าการผสมผงซิลิคอนคาร์ไบด์ร้อยละ 10 โดยปริมาตร กับทองแดง มีค่าการนำไฟฟ้า 82.6 %IACS หากทำการเคลือบด้วยซิลิคอนคาร์ไบด์ด้วยนิกเกิลก่อนผสมกับทองแดง เพื่อเพิ่มการยึดเกาะที่ดีขึ้น เพิ่มความแข็งแรง และลดปริมาณรูพรุนลง แต่ค่าการนำไฟฟ้ามีค่าลดลงเหลือ 80.2 %IACS นอกจากนี้ Akhtar และคณะ [10] พบว่าเมื่อทำการเติมไทเทเนียมคาร์ไบด์ ในคอมโพสิตที่มีทองแดงเป็นส่วนผสมหลักที่ไม่ใช้ตัวประสาน และใช้ตัวประสาน โครงสร้างจุลภาคของผงไทเทเนียมคาร์ไบด์ มีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ ไม่เกิดรอยต่อระหว่างเฟสสองเฟสค่าความแข็งแรงและค่าการนำไฟฟ้าของคอมโพสิตนี้ มีค่าขึ้นกับปริมาณของไทเทเนียมคาร์ไบด์ที่เติม กล่าวคือเมื่อปริมาณของไทเทเนียมคาร์ไบด์มากขึ้นค่าความแข็งแรงที่ได้มีค่าเพิ่มขึ้นในขณะที่ค่าการนำไฟฟ้ามีค่าลดลง

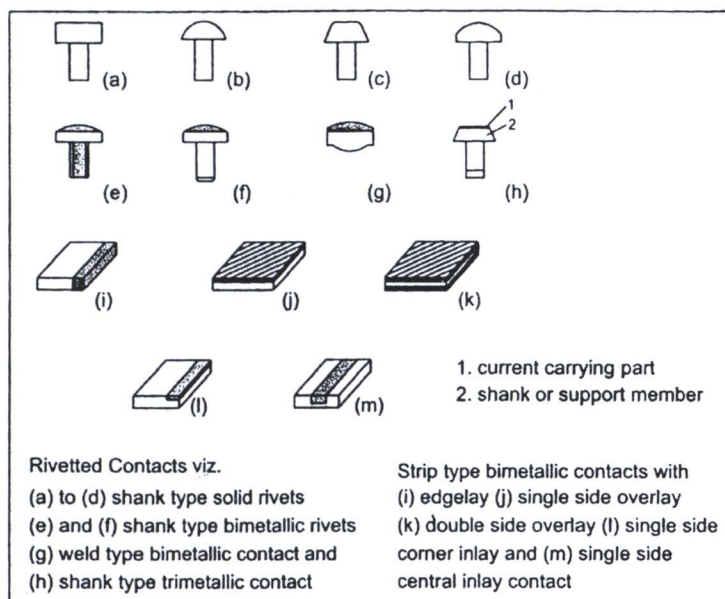
2.1.3 การแบ่งประเภทหน้าสัมผัสตามกำลังไฟฟ้า

สามารถแบ่งได้ 4 ประเภท ตามปริมาณกำลังไฟฟ้าที่วัสดุหน้าสัมผัสไฟฟ้ารับได้ ได้แก่ (ก) กลุ่มวัสดุที่รอบทำงานเบามากๆ (Very Light Duty Contact) เป็นวัสดุที่อยู่ในงานที่เกี่ยวข้องกับแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic) และงานอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้กระแสต่ำ (ข) กลุ่มวัสดุที่รอบทำงานเบา (Light Duty Contact) เป็นวัสดุที่ใช้กระแสในการทำงานไม่เกิน 10 แอมแปร์ เช่น รีเลย์ (Relay) (ค) กลุ่มวัสดุที่รอบทำงานปานกลาง (Medium Duty Contact) เป็นวัสดุที่ใช้กระแสในการทำงานช่วง 10 ถึง 300 แอมแปร์ เช่น สวิตช์แบบหมุน (Rotary Switch) สวิตช์แบบเลื่อน (Sliding Switch) และ (ง) กลุ่มวัสดุที่รอบทำงานหนัก (Heavy Duty Contact) เป็นวัสดุที่ใช้กระแสในการทำงาน 300 แอมแปร์ขึ้นไป เช่น เบรกเกอร์แบบน้ำมัน (Oil Circuit Breaker)

2.1.4 การแบ่งประเภทหน้าสัมผัสตามลักษณะรูปร่าง

ลักษณะรูปร่าง (Shape) ของวัสดุหน้าสัมผัสไฟฟ้าที่ผลิตส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปแบบของหน้าสัมผัสของแข็งรูปทรงก้อนตัน (Solid Contacts) หรือในลักษณะที่เป็นคอมโพสิต (Composite Contacts) ซึ่งหน้าสัมผัสของแข็งรูปทรงก้อนตัน นั้นจะประกอบด้วยวัสดุเพียงชนิดเดียว ขณะที่หน้าสัมผัสที่เป็นคอมโพสิตนั้นจะมีส่วนประกอบของวัสดุตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไป ลักษณะรูปร่างของวัสดุหน้าสัมผัสแสดงในรูปที่ 2.3 โดยปกติส่วนที่ทำหน้าที่นำกระแส (Current Carrying Part) จะเป็นโลหะที่นำไฟฟ้าได้สูง หรือเป็นโลหะผสม ขณะที่ส่วนปลาย (Shank or Support Member) จะเป็น

โลหะที่ทำมาจากทองแดง ทองเหลือง หรือ เหล็กกล้า (Steel) รูปร่างของวัสดุหน้าสัมผัสไฟฟ้าส่วนใหญ่ นั้น มีลักษณะเป็นแผ่นกลม ทรงโดม สี่เหลี่ยมจัตุรัสหรือสี่เหลี่ยมผืนผ้า



รูปที่ 2.3 ลักษณะรูปร่างของวัสดุหน้าสัมผัสไฟฟ้า [6]

2.2 สมบัติทั่วไปของโลหะทองแดงและถังสแตนคาร์ไบด์

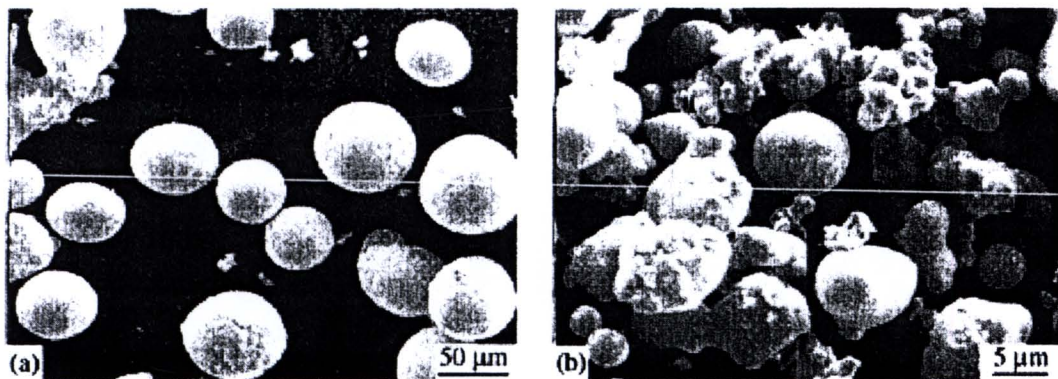
2.2.1 ทองแดง

ทองแดง (Copper: Cu) เป็นโลหะที่มีสีแดงอมส้ม มีความแวววาว โครงสร้างผลึกแบบ FCC มีจุดหลอมเหลวที่ 1,084 องศาเซลเซียส ค่าการนำไฟฟ้าอยู่ที่ 5.9×10^7 ซีเมนต์ (100 %IACS) ค่าความแข็งที่ 369 วิกเกอร์ และค่าความหนาแน่นที่ 8.96 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร นอกจากนี้ยังมีความต้านทานการกัดกร่อนได้ดี มีความเหนียวสูง ไม่เป็นสนิม ไม่ทำปฏิกิริยากับเหล็ก ผสมกับธาตุอื่นได้ดี

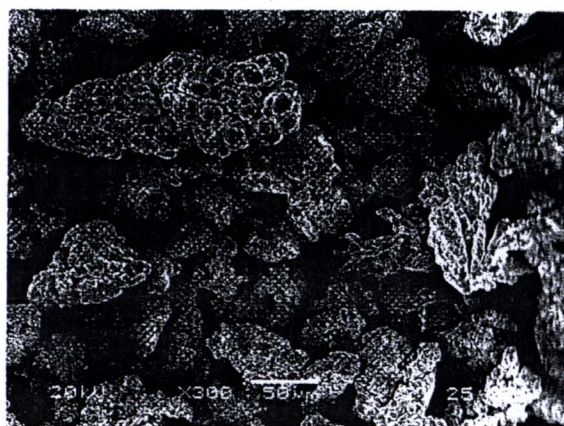
เกรดของทองแดงบริสุทธิ์มีอยู่หลายเกรดขึ้นอยู่กับความบริสุทธิ์ของทองแดงและปริมาณของออกซิเจนที่เป็นส่วนประกอบ เกรดของทองแดงในทางการค้านี้จะเขียนในรูปของ UNS เช่น ทองแดงเกรด C10100 (Oxygen Free Electronic: OFE) เป็นเกรดที่มีทองแดงบริสุทธิ์ร้อยละ 99.99 มีออกซิเจนอยู่ร้อยละ 0.0005 ทองแดงเกรด C11000 (Electrolytic Tough Pitch: ETP) เป็นเกรดที่นำไปใช้เป็นมาตรฐานการนำไฟฟ้า โดยมีทองแดงบริสุทธิ์ร้อยละ 99.9 และออกซิเจนอยู่ร้อยละ 0.02-

0.04 ทองแดงบริสุทธิ์เกรด C11000 มีค่าการนำไฟฟ้าอยู่ที่ 5.9×10^7 ซีเมนส์ กำหนดให้มีค่าเป็นร้อยละ 100 ของค่า IACS (100 %IACS : International Annealed Copper Standard)

การผลิตผงโลหะทองแดงบริสุทธิ์ร้อยละ 99 ในเชิงพาณิชย์มีอยู่ 4 วิธี [16] คือ (ก) Oxide Reduction (ข) Hydrometallurgy (ค) Atomization เป็นการผลิตด้วยการเปลี่ยนรูปโลหะที่ถูกหลอมเหลวให้เป็นผงโดยการฉีดก๊าซหรือน้ำด้วยความดันสูงไปยังโลหะที่ถูกหลอมเหลวให้มีลักษณะเป็นละอองที่เล็กมาก ผงที่ได้มีลักษณะดังรูปที่ 2.4 และ (ง) Electrolysis เป็นการผลิตโดยการนำสารที่ฟอर्मตัวที่ขั้วแคโทดที่มีลักษณะพรุน ไปล้าง ทำให้แห้ง แล้วบดละเอียด ซึ่งสารที่ฟอर्मตัวที่ขั้วนี้เกิดจากโลหะเริ่มต้นเกิดการละลายที่ขั้วแอโนด เคลื่อนที่ไปสะสมยังขั้วแคโทด ภายใต้ความต่างศักย์จากภายนอกจึงทำให้เกิดการฟอर्मตัวขึ้น ลักษณะผงที่ผลิตด้วยวิธีนี้แสดง ดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.4 ลักษณะรูปร่างผงที่ได้จากวิธี Atomization ด้วยก๊าซและน้ำตามลำดับ [16]

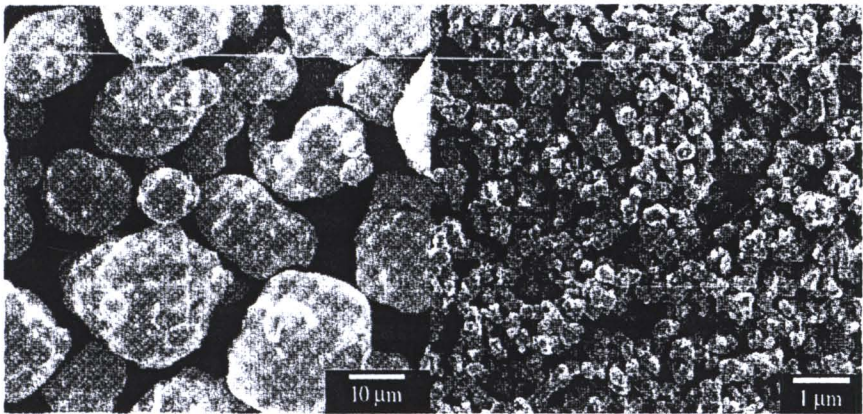


รูปที่ 2.5 ลักษณะรูปร่างผงทองแดงที่ได้จากวิธี Electrolysis [16]

2.2.2 ทังสเทนคาร์ไบด์

ทังสเทนคาร์ไบด์ (Tungsten Carbide: WC) เป็นเคมีอนินทรีย์ที่ประกอบด้วยอะตอมของทังสเทนและอะตอมของคาร์บอน มีลักษณะเป็นผงสีเทา มีโครงสร้างผลึกแบบ Hexagonal มีจุดหลอมเหลวที่สูงอยู่ที่ 2,870 องศาเซลเซียส ค่าการนำไฟฟ้าอยู่ที่ 5.23×10^6 ซีเมนต์ (8.86%IACS) ค่าความแข็งที่ 2,200 วิกเกอร์ และค่าความหนาแน่น 15.6 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร [17] นิยมนำไปใช้ในงานสำหรับตัด เพราะมีความแข็งและทนความร้อนได้สูง

Conventional Technique เป็นกระบวนการที่ใช้ในการผลิตผงโลหะทังสเทนคาร์ไบด์ เริ่มจากใช้ผงทังสเทนบริสุทธิ์กับผงคาร์บอนบริสุทธิ์ที่ผสมเรียบร้อยแล้ว บรรจุใน โถกราไฟต์แล้วนำเข้าเตาอบอุณหภูมิสูงอยู่ระหว่าง 1,400 ถึง 1,500 องศาเซลเซียส คั้นบรรยากาศด้วยก๊าซไฮโดรเจน ผงที่ได้หลังอบมีลักษณะเป็น Agglomerated ดังรูปที่ 2.6 จากนั้นนำผงที่ได้ไปทำให้ขนาดเล็กและบริสุทธิ์มากขึ้น



รูปที่ 2.6 ลักษณะรูปร่างผงทังสเทนคาร์ไบด์ [16]

กระบวนการคาร์บูไรเซชัน (Carburization) เป็นอีกกระบวนการหนึ่งที่ใช้ในการผลิตทังสเทนคาร์ไบด์ โดยเริ่มจากการนำทังสเทนไดรอกไซด์กับคาร์บอนทำปฏิกิริยากันที่อุณหภูมิประมาณ 2,000 องศาเซลเซียส ซึ่งจะได้ W, W₂C ,WC และ C ผสมกันอยู่ จากนั้นนำไปทำ Conventional Technique และคาร์บูไรเซชันอีกรอบ ขนาดของผงจะถูกทำให้มีขนาดเล็กลงโดยการควบคุมเวลาในการบด ปริมาณของคาร์บอน การเติมสารยับยั้ง และอุณหภูมิในการอบผืนิก ซึ่งผงที่ได้จะมีขนาดอยู่ในช่วง 0.1-0.8 ไมโครเมตร

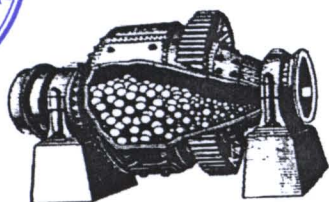
จากสมบัติของทั้งสแตนคาร์ไบด์ที่มีความแข็งสูง และทนต่อการสึกกร่อนได้ดี จึงนิยมนำทั้งสแตนคาร์ไบด์มาช่วยในการปรับปรุงสมบัติของธาตุอื่นในด้านนี้ โดยอาจจะทำให้ในรูปของการพ่นเคลือบผิว (Thermal Spray) การปรับปรุงให้วัสดุหน้าสัมผัสมีความต้านการสึกกร่อนทางกล หรือการสึกกร่อนจากการอาร์คสูงขึ้น

2.3 กรรมวิธีการขึ้นรูปโลหะผง

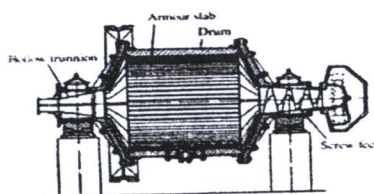
กรรมวิธีการขึ้นรูปโลหะผง (Metal Powder Fabrication) สามารถแบ่งออกเป็นขั้นตอนหลัก 3 ขั้นตอน ดังนี้

2.3.1 การผสมผง

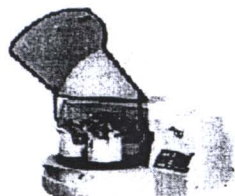
การผสมผง (Powder Mixing) เป็นการผสมผสานโลหะตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไปกับตัวประสานเข้าด้วยกัน เพื่อให้ผลผลิตสุดท้ายมีการกระจายตัวของผงสม่ำเสมอ ขั้นตอนของการผสมผงนั้นเริ่มจาก การทำให้ผงที่ต้องการผสมที่มีขนาดต่างกัน เพื่อให้เกิดการคลุกเคล้าและการเกาะตัวของผงที่ทำการผสมเข้ากันได้มากขึ้น การใช้ลูกบด (Ball Mill) ช่วยในการผสมผงนั้น เป็นอีกวิธีหนึ่งที่ช่วยให้การผสมผงมีความเข้ากันได้ดีขึ้น เครื่องมือที่ใช้ในการผสมผงด้วยลูกบดนั้นมีหลายประเภท ดังรูปที่ 2.7 ซึ่งการผสมด้วยวิธีนี้สามารถใช้ได้กับผงที่ขนาดใหญ่และเล็ก ทั้งการผสมแบบแห้งและแบบเปียก



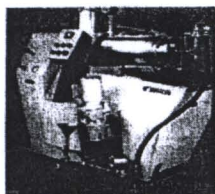
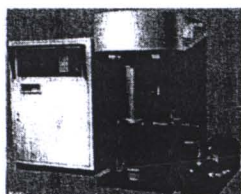
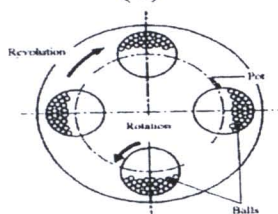
(ก)



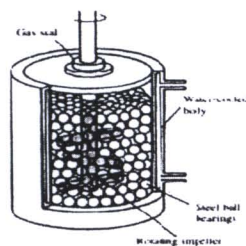
(ข)



(ค)



(ง)



รูปที่ 2.7 ประเภทของการผสมผงด้วยลูกบด [16]

(ก) Conical Ball Mill

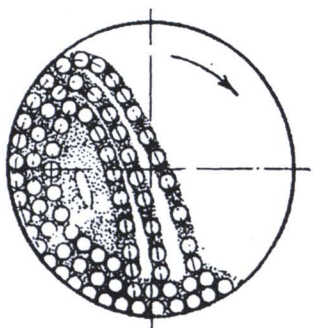
(ข) Cylindrical Ball Mill

(ค) Planetary Ball Mill

(ง) Attrition Ball Mill

ในการผสมผงโดยใช้ลูกบดช่วยนั้น ขณะที่ตัวเครื่องบด (Mill Body) หมุนทำให้เกิดการชนกันของลูกบดกับผงที่อยู่ภายในเครื่องบด และเกิดการเสียดสีของลูกบดกับผนังของตัวเครื่องบด เกิดการเคลื่อนที่ของลูกบดในทิศทางเดียวกับตัวเครื่อง แล้วตกลงสู่ที่พื้นของตัวเครื่อง มีลักษณะการเคลื่อนที่คล้ายเกลียว (Helix) ซึ่งจะทำให้การวนเข้าไปเรื่อยๆ ขณะที่เครื่องบดยังหมุนอยู่ ดังรูปที่ 2.8 โดยทั่วไปความเร็วที่ใช้ในการบดด้วยวิธีนี้จะอยู่ที่ร้อยละ 65-80 ของความเร็วที่จุดวิกฤติ ซึ่งความเร็ววิกฤติหมายถึงความเร็วที่ทำให้ลูกบดและผงผสมเกิดการเคลื่อนไปพร้อมกับตัวเครื่องบด โดยไม่มีการตกลงสู่พื้นเครื่องของลูกบด ทำให้การผสมกันของผงเกิดการคลุกเคล้าได้น้อยหรือไม่เกิดเลย ความเร็ววิกฤติสามารถหาได้จากสมการที่ 2.1 [16]

สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ	
หักสมุดงานวิจัย	
วันที่.....	17 ต.ค. 2555
เลขทะเบียน.....	249437
เลขเรียกหนังสือ.....	



รูปที่ 2.8 ลักษณะการเคลื่อนที่ของลูกบดภายในเครื่องบด [16]

$$n = \frac{42.3}{\sqrt{D_m}}$$

..... 2.1

เมื่อ	n	คือ	ความเร็ววิกฤติ (รอบต่อนาที)
	D_m	คือ	เส้นผ่านศูนย์กลางของเครื่องบด (เมตร)

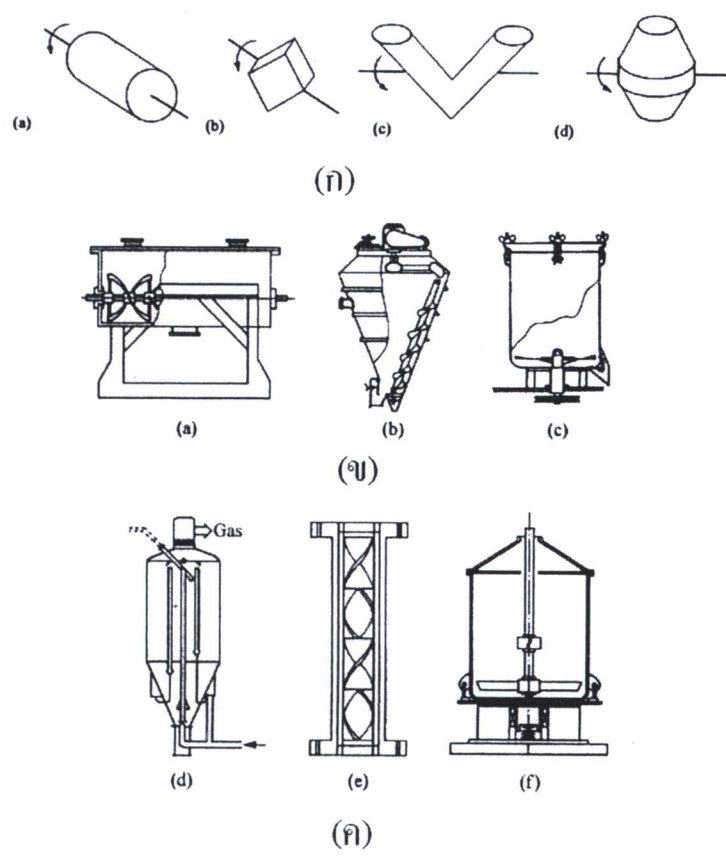
ในการผสมผงนั้นนอกจากความเร็วของการผสมแล้วยังต้องคำนึงถึงปริมาตรของลูกบดที่ทำการเติม และขนาดของลูกบดอีกด้วย โดยทั่วไปแล้วจะทำการใส่ลูกบดไม่เกินกว่าร้อยละ 30-35 ของปริมาตร ที่ทำการผสม และขนาดของลูกบดที่เล็กที่สุดในการผสมผงสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 2.2 [16] ขณะที่ขนาดของลูกบดที่ใหญ่ที่สุดควรมีขนาดอยู่ในช่วง $D/18$ ถึง $D/24$

$$d_{b.min} = 10d_{b.max} \sqrt[3]{\frac{\sigma^2}{0.128E\rho_bD}}$$

..... 2.2

เมื่อ	$d_{b.min}$	คือ	เส้นผ่านศูนย์กลางของลูกบดที่เล็กที่สุด (มิลลิเมตร)
	$d_{b.max}$	คือ	เส้นผ่านศูนย์กลางของลูกบดที่ใหญ่ที่สุด (มิลลิเมตร)
	σ	คือ	ความเค้นจากการกดอัด (เมกะพาสกาล)
	E	คือ	ค่ามอดูลัสของความยืดหยุ่น (เมกะพาสกาล)
	ρ_b	คือ	ค่าความหนาแน่นของวัสดุของลูกบด (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)
	D	คือ	เส้นผ่านศูนย์กลางภายในของเครื่องบด (เมตร)

สำหรับเครื่องมือที่ใช้ในการผสมผงนั้น แบ่งได้เป็น 3 ประเภท ดังรูปที่ 2.9 ได้แก่ (ก) Rotary Vessel Type เป็นการผสมผงโดยการหมุนของตัวบรรจุผงตามแนวของแกนซึ่งการผสมด้วยเครื่องประเภทนี้จะทำได้ในปริมาณน้อย (ข) Stationary Vessel Type เป็นการผสมผงโดยอาศัยการเคลื่อนที่ของกลไกการหมุนของเกลียว การผสมด้วยเครื่องนี้สามารถทำการผสมผงได้ในปริมาณมาก แม้จะมีพื้นที่ในการผสมเพียงเล็กน้อย (ค) Complex type เป็นการพัฒนาเครื่องผสมแบบ Stationary Vessel type ให้เกิดการสั่น สามารถเติมแก๊สได้ เพื่อให้การเคลื่อนที่ของผงภายในตัวเครื่องเป็นอิสระจากแรงโน้มถ่วง ซึ่งเป็นการปรับปรุงให้สามารถผสมผงที่มีสมบัติทางกายภาพแตกต่างกันได้ ข้อจำกัดของเครื่องมือผสมผงของแต่ละประเภทรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.9 เครื่องมือที่ใช้ในการผสมผง [16]

(ก) Rotary Vessel Type

(ข) Stationary Vessel Type

(ค) Complex type

ตารางที่ 2.1 ข้อจำกัดของเครื่องมือผสมผงของแต่ละประเภท [16]

ประเภท	ทิศทางและลักษณะการหมุน	ตัวผสม	การทำงาน		สมบัติของชนิดผง			Differences in ingredients properties	ส่วนประกอบของน้ำ
			Batch wise	Continuous	Range of particle size (mm)		Flow ability angle of repose (deg)		
1. Rotary Vessel (ก)	Horizontal axis of rotation	Horizontal Cylinder (a)	O	O	Over 1.0	O	Under 35	Small	Dry
		Double Cones (d)	O		1.0- 0.1	O	35-45	Large	
		V-type (c)	O		0.1- 0.01	X	Over 45		
		Cubic (d)	O			O			
		Continuous V-type	O			O			
2. Stationary Vessel (ข)	Horizontal axis of rotation	Ribbon agitator (a)	O	O	Over 1.0	O	O	O	O
		Screw agitator	O	O	1.0- 0.1	O	O	X	O
		Rod or pin agitator	O	O	0.1- 0.01	O	O	O	O
		Double-axle paddles agitator	O	O		O	O	O	O
	Vertical axis of rotation	Ribbon agitator (b)	O	O	Over 1.0	O	O	O	O
		Screw in cone agitator (b)	O		1.0- 0.1	O	O	X	O
		High speed Screw agitator (c)	O		0.1- 0.01	O	O	O	O
		Rotating disk agitator	O	O		X	X	O	O
		Muller Screw agitator	O	O	Over 1.0	O	O	O	O

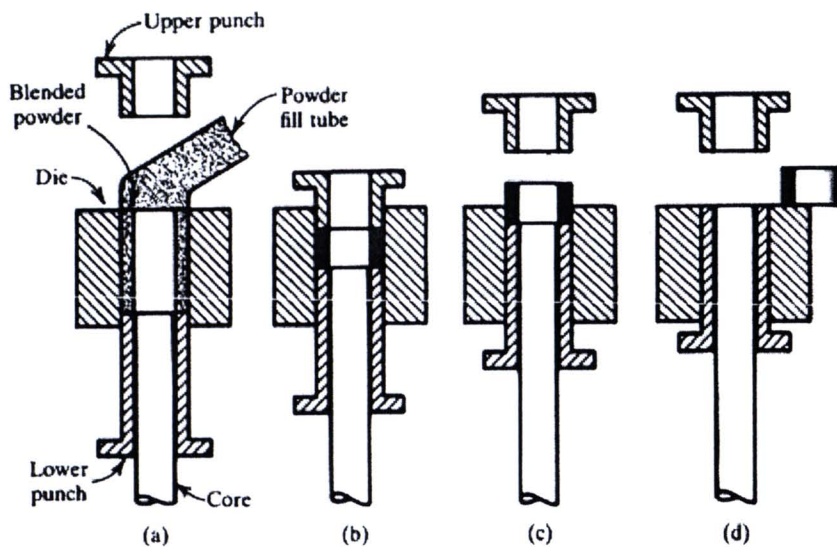
ตารางที่ 2.1 (ต่อ) ข้อจำกัดของเครื่องมือผสมผงของแต่ละประเภท [16]

ประเภท	เทคนิคและอุปกรณ์	ส่วนผสม	การทำงาน	สมบัติของชนิดผง			Differences in ingredients properties	ส่วนประกอบของน้ำ
				Range of particle size (mm)	Flow ability angle of repose (deg)			
3. Complex (ค)	Vibration Gas flow Gravity Internals in rotating vessel Gas flow and mechanical agitation Vibration and mechanical agitation (f)	Vibratory toroidal mixer Vibratory mill Sieve Moving other fluidized (d) Falling under gravity action (e) Horizontal cylinder V-type Double cones	Batch wise	Continuous	Over 1.0 1.0- 0.1 0.1- 0.01 Under	Under 35 35-45 Over 45 Cohesive	Small Large Abrasive	Dry Wet
			O	O	O	O	O	O
			O	O	O	O	X	O
			O	O	X	X	O	O
			O	O	O	X	O	O
			O	O	O	O	O	O
			O	O	O	O	O	O
			O	O	O	O	O	O
			O	O	O	O	O	O
			O	O	O	O	O	O

O : Suitable , X : Unsuitable

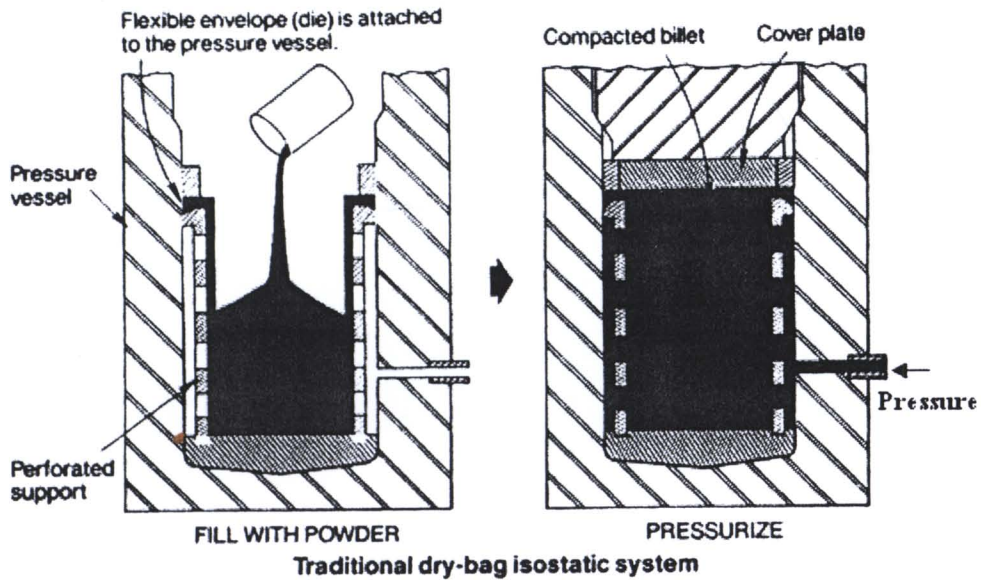
2.3.2 การอัดขึ้นรูป

การอัดขึ้นรูป (Compaction) เป็นการนำผงโลหะไปอัดผ่านแม่พิมพ์โลหะเพื่อได้ชิ้นงานที่มีขนาดตามความต้องการ ซึ่งการอัดขึ้นรูปสามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ (ก) การอัดขึ้นรูปแบบทิศทางเดียว (Uniaxial Pressing) ดังแสดงในรูปที่ 2.10 โดยเริ่มจากการบรรจุผงโลหะผสมลงในแม่พิมพ์ จากนั้นเลื่อนพunchตัวบนเข้าสู่แม่พิมพ์ ทำให้แรงกดอัดแก่พunchตัวบนโดยพunchตัวล่างอยู่กับที่ เมื่ออัดเสร็จพunchตัวบนถูกเลื่อนออกไป ใช้พunchตัวล่างเป็นต้นชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์



รูปที่ 2.10 การอัดขึ้นรูปแบบทิศทางเดียว [18]

(ข) การอัดขึ้นรูปแบบแรงอัดเท่ากันทุกทิศทาง (Isostatic Pressing) ซึ่งการอัดขึ้นประเภทนี้สามารถแบ่งได้อีกหลายประเภท เช่น Cold Isostatic Pressing (CIP), Hot Isostatic Pressing (HIP), Powder Forging เป็นต้น

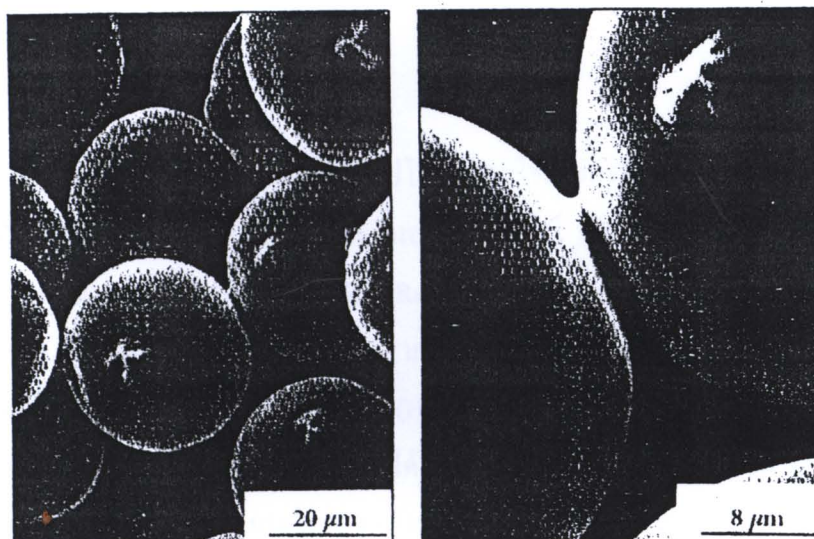


รูปที่ 2.11 การอัดขึ้นรูปแบบ Cold Isostatic Pressing [18]

หลังจากการอัดขึ้นรูปชิ้นงานที่มีรูปร่างดังต้องการ ชิ้นงานลักษณะนี้เรียกว่า Green Compact คือ ชิ้นงานที่มีความแข็งแรงของโครงสร้างจากการเข้ารูปกันตัวเอง (Inter Lock) แต่ยังไม่สามารถใช้งานได้

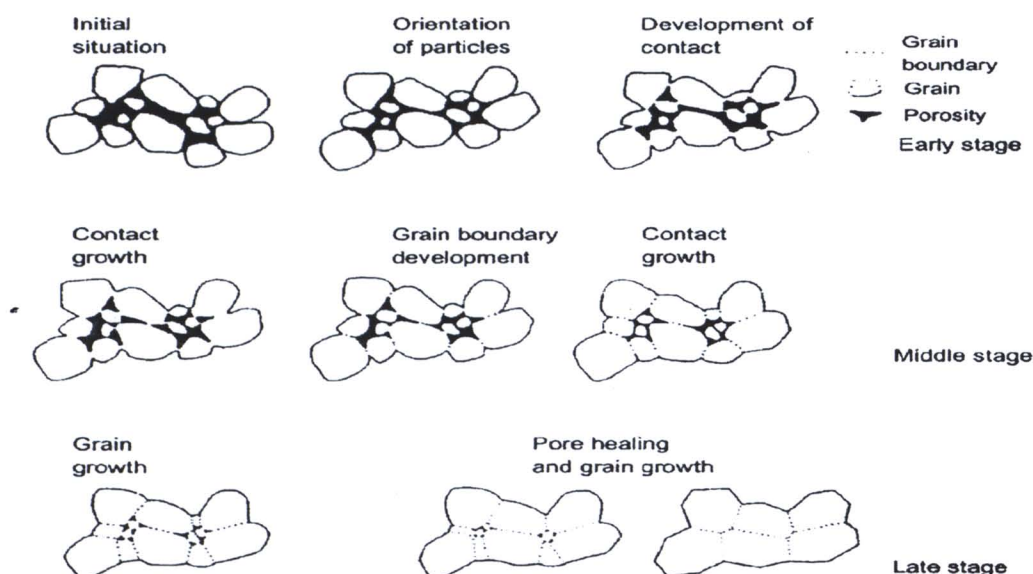
2.3.3 การอบผนึก

การอบผนึก (Sinter) เป็นการทำให้อนุภาคเชื่อมติดกันที่อุณหภูมิสูง หรืออาจเกิดขึ้นที่อุณหภูมิต่ำกว่า จุดหลอมเหลวของวัสดุนั้นๆ [19] เมื่อพิจารณาโครงสร้างจุลภาค การเพิ่มขนาดของคอคอด (Neck Growth) ที่เชื่อมต่อกันบริเวณจุดสัมผัสของอนุภาคสองอนุภาค ดังรูปที่ 2.12 การเปลี่ยนรูปคอคอดในสถานะของแข็ง (Solid State Neck) ระหว่างการอบผนึกอนุภาคทรงกลม ซึ่งการเพิ่มขนาดของคอคอดนี้ทำให้สมบัติการนำไฟฟ้า ความแข็งแรง ของชิ้นงานเพิ่มขึ้นหลังอบผนึก



รูปที่ 2.12 การเปลี่ยนรูปคอคอดในสถานะของแข็งระหว่างการอบผนึกอนุภาคทรงกลม [19]

การอบผนึกจะเกิดขึ้นในระดับโครงสร้างจุลภาค เมื่ออบผนึกนานขึ้น โครงสร้างของรูพรุนจะสม่ำเสมอขึ้น การอบผนึกแบ่งเป็น 3 ขั้นตอน ดังรูปที่ 2.13 ขั้นตอนที่ 1 (Early Stage) เกิดการเชื่อมต่อกันที่จุดสัมผัสระหว่างอนุภาค เมื่อเข้าสู่ขั้นตอนกลาง (Middle Stage) อัตราการอบผนึกจะลดลง รูปร่างของรูพรุนมีการเปลี่ยนแปลง มีการโตของเกรนและรูพรุนกลายเป็นทรงกลมและแยกกระจายออกไป ทำให้การกำจัดรูพรุนเริ่มยากขึ้น ความหนาแน่นที่ได้จะอยู่ประมาณ 70-92% ของความหนาแน่นทางทฤษฎี ในขั้นตอนสุดท้าย ของการอบผนึก (Late Stage) รูพรุนทรงกลมจะเล็กลงหดตัว ซ้ำลงอันเนื่องมาจากการแพร่ของช่องว่างไปยังขอบเกรน จะขัดขวางการแน่นตัวขั้นสุดท้าย

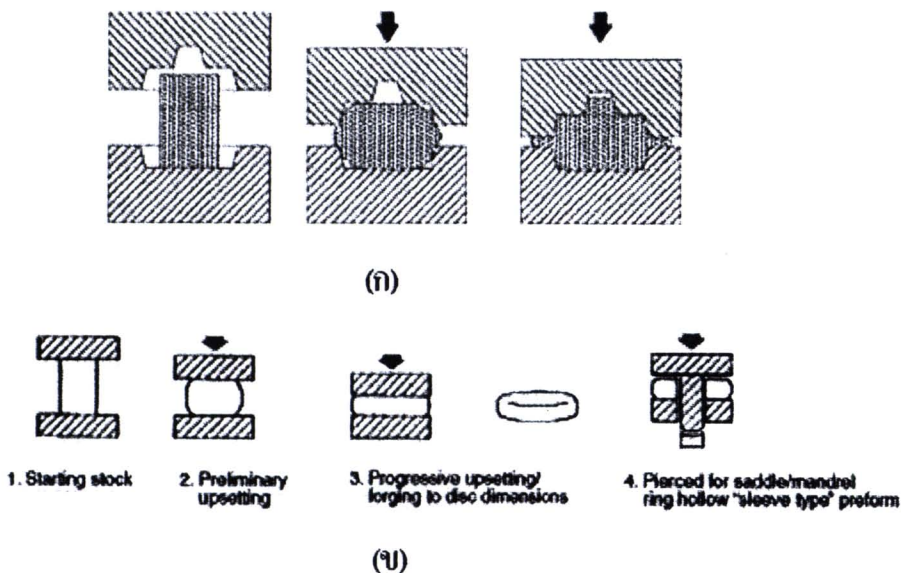


รูปที่ 2.13 การเปลี่ยนลักษณะโครงสร้างขณะทำการอบผนึกทั้ง 3 ขั้นตอน [19]

2.4 การทุบขึ้นรูป

การทุบขึ้นรูป (Forging) เป็นกระบวนการแปรรูปโลหะโดยใช้แรงกระแทก เพื่อให้โลหะเกิดการเปลี่ยนรูปร่างไปจากเดิม ซึ่งรูปร่างใหม่ที่ได้จะขึ้นอยู่กับแม่พิมพ์ สำหรับการทุบขึ้นรูปนั้น ถ้าทำการทุบขึ้นรูปที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิเกิดผลึกใหม่ (Recrystallization Temperature) ของที่วัสดุทำการทุบ เรียกว่า การทุบขึ้นรูปเย็น (Cold Forging) และหากทำการทุบที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิเกิดผลึกใหม่ ของที่วัสดุทำการทุบ เรียกว่า การทุบขึ้นรูปร้อน (Hot Forging) ซึ่งคุณลักษณะเฉพาะของการทุบขึ้นรูปเย็นนั้นจะเกิด Work Hardening ทำให้วัสดุที่ได้มีความแข็งแรงสูงขึ้น และวัสดุมีขนาดความเที่ยงตรงสูง ผิวเรียบ ลดการตัดปาดด้วยเครื่องกลในภายหลังทำให้ประหยัดวัสดุเป็นอย่างมาก ซึ่งเหมาะกับการผลิตปริมาณมาก ขณะที่คุณลักษณะเฉพาะของการทุบรูปร้อน นั้นจะไม่เกิด Work hardening ขนาดจะไม่เที่ยงตรงนัก ผิวไม่เรียบ อันเนื่องมาจากความร้อนที่ให้กับโลหะ ทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันเกิดเป็นสะเก็ดที่ผิว ทำให้ผิวไม่เรียบ

สำหรับกระบวนการทุบขึ้นรูปแบ่งตามลักษณะแม่พิมพ์ได้ 2 แบบ [20, 21] ได้แก่ คือ การทุบด้วยแม่พิมพ์ปิด (Closed Die Forging) และการทุบด้วยแม่พิมพ์เปิด (Open Die Forging) ดังแสดงในรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 ลักษณะการทุบขึ้นรูปเมื่อแบ่งตามลักษณะแม่พิมพ์ [18]

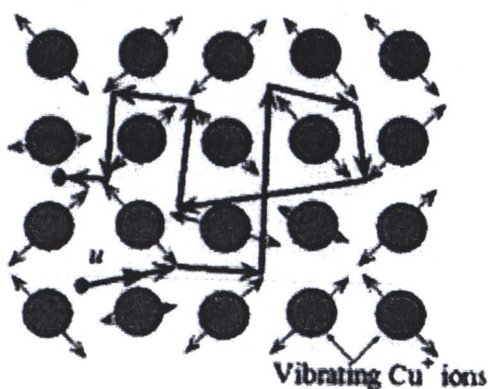
(ก) การทุบด้วยแม่พิมพ์ปิด

(ข) การทุบด้วยแม่พิมพ์เปิด

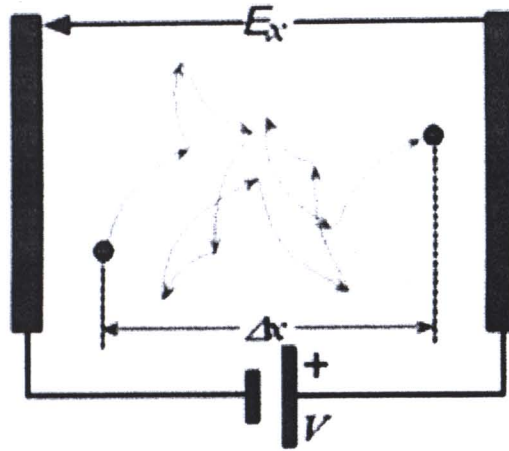
การทุบด้วยแม่พิมพ์ปิดทำให้โลหะได้รับแรงทุบ การไหลตัวของโลหะจะถูกจำกัด ทำให้โลหะที่ขึ้นรูปมีขนาดและรูปร่างตามแบบของแม่พิมพ์ ส่วนการทุบขึ้นรูปแบบแม่พิมพ์เปิด ชิ้นงานจะถูกตีหรือกระหว่งผิวที่เรียบของแม่พิมพ์ รูปร่างที่ได้ส่วนจากแม่พิมพ์เปิดจะมีลักษณะเป็นแท่ง แผ่นหนา หรือแผ่นบาง มีหน้าตัดเป็นสี่เหลี่ยม วงกลม และรูปทรงง่ายๆ เป็นต้น ซึ่งชิ้นงานที่ผ่านการทุบขึ้นรูปแบบแม่พิมพ์ปิดนั้นจะมีลักษณะเฉพาะ คือ มีสมบัติทางกลสูงเพราะสามารถควบคุมการไหลของเกรนในโลหะได้ ทุบขึ้นรูปชิ้นงานที่มีรูปร่าง รูปทรง ซับซ้อนได้ เหมาะสำหรับการผลิตจำนวนมาก และเร็ว ไม่จำเป็นต้องใช้บุคลากรที่ชำนาญงาน มีความสามารถในการออกแบบได้ถูกต้อง มีการเผื่อสำหรับตัดปาดด้วยเครื่องกลน้อยมาก เป็นการลดเวลาในการ ตัดปาดด้วยเครื่องกลและลดการสิ้นเปลืองวัสดุและแม่พิมพ์เปิด ส่วนลักษณะเฉพาะของชิ้นงานที่ผ่านการทุบขึ้นรูปแบบแม่พิมพ์เปิดนั้นมีลักษณะดังนี้ คือ มีสมบัติทางกลต่ำเพราะการควบคุมการไหลของเกรนในโลหะทำได้ยาก ใช้ได้กับชิ้นงานที่มีรูปร่างง่ายๆ ผลิตได้ในช่วงสั้นๆ ต้องใช้บุคลากรที่ชำนาญงาน ยากที่จะรักษาระยะเพื่อไว้ได้พอประมาณ และต้นทุนในขั้นสุดท้ายจะสูงกว่าการทุบด้วยวิธีอื่น เพราะต้องนำไปตัดปาดด้วยเครื่องกลอีกครั้งหนึ่ง

2.5 การนำไฟฟ้าของวัสดุ

เมื่ออะตอมของโลหะมีการจัดเรียงตัวอย่างมีระเบียบเกิดเป็นโครงร่างผลึก อะตอมเหล่านั้นจะเกิดพันธะ ระหว่างกัน การเคลื่อนที่ของวาเลนซ์อิเล็กตรอนของแต่ละอะตอมจะเคลื่อนที่อย่างอิสระ ดังรูปที่ 2.15 เมื่อมีการใส่ความต่างศักย์ทางไฟฟ้าเข้าไป วาเลนซ์อิเล็กตรอนเหล่านี้จะเคลื่อนที่ไปในทิศทางเดียวกันด้วยความเร็วลอยเลื่อน ทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าไหลขึ้น ดังรูปที่ 2.16

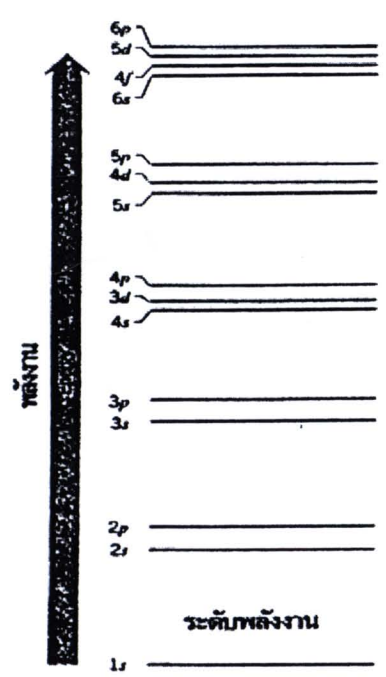


รูปที่ 2.15 แบบจำลองการเคลื่อนที่อย่างอิสระของอิเล็กตรอน [22]



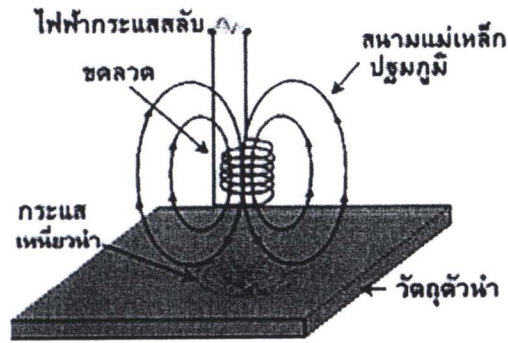
รูปที่ 2.16 แบบจำลองการเคลื่อนที่ด้วยความเร็วลอยเลื่อนของอิเล็กตรอน [22]

จากเหตุนี้ทำให้เข้าใจว่า ธาตุที่มีวาเลนซ์อิเล็กตรอนสูงจะนำไฟฟ้าได้ดีกว่าธาตุที่มีวาเลนซ์อิเล็กตรอนต่ำ แต่ในบางกรณีไม่ได้เป็นเช่นนั้น ดังเช่นกรณีของอะลูมิเนียมซึ่งมีวาเลนซ์อิเล็กตรอนเท่ากับสาม ($1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^1$) แต่มีการนำไฟฟ้าน้อยกว่าทองแดงซึ่งมีวาเลนซ์อิเล็กตรอนเท่ากับหนึ่ง ($1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 3d^{10} 4s^1$) จึงต้องอาศัยทฤษฎีทางควอนตัมอธิบาย ซึ่งกล่าวว่า กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านวัตถุขึ้นอยู่กับ การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนอิสระที่หลุดออกจากอะตอมเมื่อได้รับศักย์ไฟฟ้า และความสามารถของอิเล็กตรอนที่จะเคลื่อนที่จากอะตอมหนึ่งไปยังอะตอมหนึ่ง ดังนั้นธาตุที่มีอิเล็กตรอนอยู่ในชั้น $4s$ จะมีโอกาสอยู่ห่างจากนิวเคลียสมากกว่าอิเล็กตรอนที่อยู่ในชั้นพลังงานที่ต่ำกว่าชั้น $3p$ ดังรูปที่ 2.17 เป็นผลให้ธาตุที่มีอิเล็กตรอนตัวสุดท้ายอยู่ในชั้น $4s$ มีการนำไฟฟ้ามากกว่าอิเล็กตรอนที่อยู่ในชั้นพลังงานที่ต่ำกว่าจึงทำให้ทองแดงนำไฟฟ้าได้ดีกว่าอะลูมิเนียมแม้จะมีวาเลนซ์อิเล็กตรอนน้อยกว่า

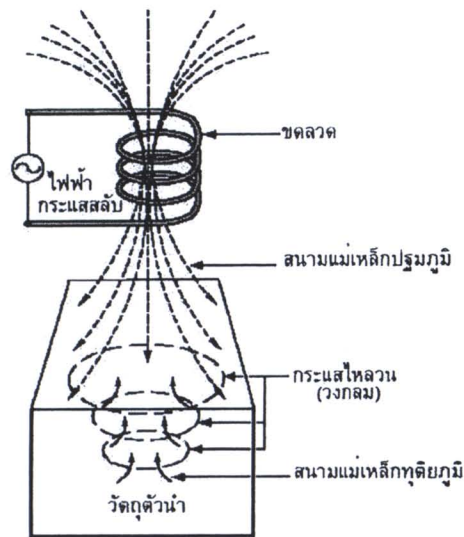


รูปที่ 2.17 ระดับพลังงานชั้นย่อยของอะตอมโดยเรียงตามลำดับพลังงาน [23]

หลักการทดสอบการนำไฟฟ้าด้วยกระแสไหลวนการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กเหนี่ยวนำทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าในวัตถุตัวนำที่อยู่ในบริเวณที่สนามแม่เหล็กมีการเปลี่ยนแปลงแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำจะทำให้เกิดกระแสเหนี่ยวนำไหลในวัตถุตัวนำนั้น กระแสเหนี่ยวนำนั้นเกิดจากการนำขดลวดที่ขดเป็นวงกลมที่ต่อปลายทั้งสองเข้าด้วยกันเมื่อเอาขดลวดนี้เข้าไปอยู่ในสนามแม่เหล็กที่เปลี่ยนแปลงจะมีกระแสไหลในขดลวดตามกฎของฟาราเดย์ ถ้าพิจารณาว่าแผ่นวัตถุตัวนำประกอบด้วยขดลวดขนาดต่างๆ จำนวนมากวางเรียงซ้อนเป็นเนื้อเดียวกัน และเมื่อนำไปวางในบริเวณที่สนามแม่เหล็กมีการเปลี่ยนแปลง จะเกิดการไหลเป็นวงกลมของกระแสเหนี่ยวนำขึ้นที่ขดลวดตัวนำแต่ละตัว ดังรูปที่ 2.18



รูปที่ 2.18 การเกิดกระแสเหนี่ยวนำบนแผ่นวัตถุตัวนำ [24]



รูปที่ 2.19 กระแสไหลวนบนวัตถุตัวนำ [24]

จากรูปที่ 2.19 เมื่อป้อนไฟฟ้ากระแสสลับให้กับตัวนำ เช่น ลวดทองแดงจะเกิดสนามแม่เหล็กปฐมภูมิ (Primary Magnetic Field) ขึ้นรอบๆ ตัวนำ สนามแม่เหล็กนี้จะเพิ่มมากขึ้นเมื่อกระแสเพิ่มขึ้นสูงสุด และหายไปเมื่อกระแสลดลงเป็นศูนย์ ถ้าเอาวัตถุตัวนำอีกอันหนึ่งเข้ามาอยู่ภายใต้สนามแม่เหล็กที่กำลังเปลี่ยนแปลงนี้ สนามแม่เหล็กปฐมภูมิจะสร้างกระแสไหลวนขึ้นบนวัตถุตัวนำไฟฟ้า เมื่อมีกระแสไหลวนปริมาณมากอยู่ในวัตถุตัวนำนานๆ จะทำให้วัตถุตัวนำ มีอุณหภูมิสูงขึ้นเนื่องจาก พลังงานไฟฟ้าของกระแสไหลวนจะเปลี่ยนไปเป็นพลังงานความร้อน ในขณะที่เกิดกระแสไหลวนขึ้นตัวกระแสไหลวนเองก็จะสร้างสนามแม่เหล็กเหนี่ยวนำขึ้นต่อต้านการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กปฐมภูมิด้วยตามกฎของเลนส์ เรียกว่า สนามแม่เหล็กทุติยภูมิ (Secondary Magnetic Field) ในด้านอุตสาหกรรมกระแสไหลจะใช้ในการตรวจสอบรอยร้าวหรือความผิดปกติของโลหะที่อยู่ลึกลงไปใต้ผิว บริเวณที่มีรอยร้าวหรือมีฟองอากาศจะทำให้มีกระแสไหลวนผิดปกติสนามแม่เหล็กทุติยภูมิก็

ผิดปกติ ตัวรับรู้กระแสไหลวนจะแสดงให้ผู้ตรวจสอบทราบ เครื่องมือวัดระยะกระจัดแบบกระแสไหลวนหรือเหนี่ยวนำ (Eddy Current or Inductive Displacement) มีหลักการทำงาน คือ ตัวรับรู้ระยะกระจัดแบบกระแสไหลวน ใช้ประโยชน์จากสนามแม่เหล็กความถี่สูงที่สร้างโดยการผ่านกระแสสลับความถี่สูงผ่านขดลวดที่อยู่หัวของตัวรับรู้ เมื่อโลหะเป้าหมายปรากฏขึ้นภายในสนามแม่เหล็ก การเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กไฟฟ้าจะทำให้เกิดกระแสไหลวนตั้งฉากกับสนามแม่เหล็กที่ผ่านเข้าไปบนพื้นผิวของโลหะเป้าหมาย ซึ่งผลของกระแสไหลวนก็จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงอิมพีแดนซ์ของขดลวดที่หัวตัวรับรู้และแปลงผันเป็นระยะกระจัด ระหว่างตัวรับรู้กับโลหะเป้าหมาย

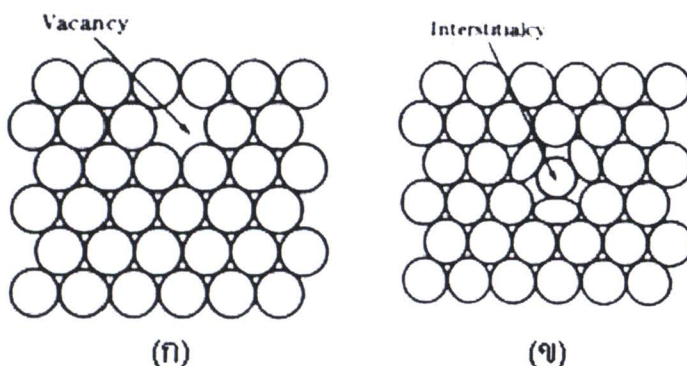
2.6 ความไม่สมบูรณ์ของผลึก

ความไม่สมบูรณ์ของผลึกคือความบกพร่องในการจัดเรียงอะตอมในโครงสร้างผลึก ส่งผลให้สมบัติทางกลและสมบัติทางกายภาพของวัสดุเปลี่ยนไปจากเดิม ความไม่สมบูรณ์ของผลึกสามารถแบ่งออกตามเรขาคณิตและรูปร่างได้ 4 แบบ คือ ความไม่สมบูรณ์แบบจุด ความไม่สมบูรณ์แบบเส้น ความไม่สมบูรณ์แบบระนาบ และความไม่สมบูรณ์แบบปริมาตร

2.6.1 ความไม่สมบูรณ์แบบจุด

ความไม่สมบูรณ์แบบจุดหรือ แบบศูนย์มิติ (Point or Zero-Dimension Defects) เป็นความไม่สมบูรณ์ที่เกิดเฉพาะแห่งหรือเฉพาะที่ โดยสามารถเกิดได้หลายลักษณะเนื่องมาจากสาเหตุต่างๆ เช่น อะตอมอยู่ผิดตำแหน่ง อะตอมหายไปจากตำแหน่งเดิม หรือมีอะตอมแปลกปลอมเข้ามาในผลึก เป็นต้น ความไม่สมบูรณ์แบบจุด เกิดขึ้นได้หลายลักษณะ ดังรูปที่ 2.20 คือ (ก) การเกิดช่องว่าง (Vacancy Defect) เป็นความไม่สมบูรณ์ที่พบได้บ่อยที่สุด อาจเกิดระหว่างกระบวนการแข็งตัวของของแข็ง (Solidification) หรือการสั่นของอะตอมเมื่อได้รับความร้อน (ข) การแทรกของอะตอม (Interstitial Defect) เป็นความไม่สมบูรณ์ที่เกิดขึ้นเนื่องจากอะตอมหนึ่งเข้าไปแทรกตัวอยู่ในช่องว่างระหว่างอะตอม ถ้าอะตอมที่เกิดการแทรกตัวในช่องเป็นชนิดเดียวกันจะเรียกว่า Self-Interstitial ซึ่งการแทรกตัวแบบนี้ทำให้โครงสร้างผลึกไม่เสถียร และเกิดความบิดเบี้ยว (Distortion) (ค) Schottky Defect เป็นความไม่สมบูรณ์ที่เกิดในวัสดุที่มีพันธะไอออนิก โดยไอออนบวกและไอออนลบหลุดออกจากโครงสร้างเป็นคู่ เพื่อรักษาประจุโครงสร้างให้เป็นกลางอยู่เสมอ ทำให้เกิดช่องว่าง 2 ช่องของประจุบวกและประจุลบขึ้น โดยช่องว่างที่เกิดขึ้นสามารถนำไปใช้ในกระบวนการผลิตวัสดุกึ่งตัวนำ (Semiconductor) ได้ และ (ง) Frenkel Defect เป็นความไม่สมบูรณ์แบบจุดที่เกิดช่องว่างขึ้น เนื่องจาก

ไอออนบวกที่มีขนาดเล็กเข้าไปแทรกตัวอยู่ระหว่างไอออนบวกกับไอออนลบอีกตัวหนึ่งทำให้เกิดช่องว่างของประจุบวกขึ้น



รูปที่ 2.20 ลักษณะความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบจุด [25]

(ก) การเกิดช่องว่าง (Vacancy Defect)

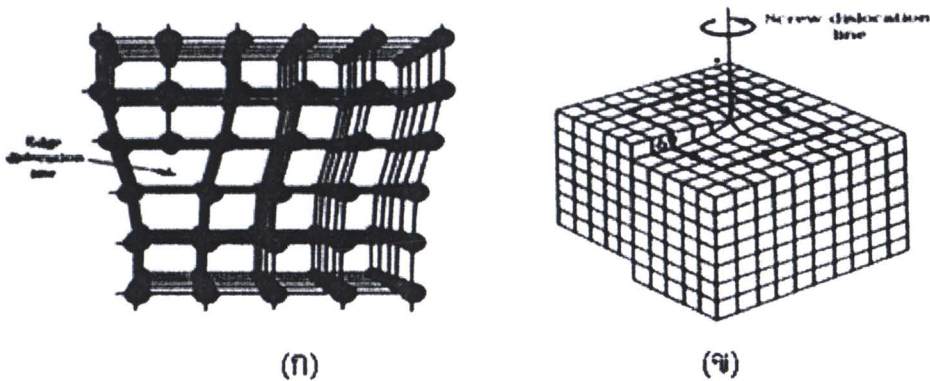
(ข) การแทรกของอะตอม (Interstitial Defect)

โดยปกติโลหะมักจะมีธาตุอื่นเจือปนอยู่เสมอ การที่โลหะถูกเจือปนด้วยธาตุอื่นนั้น ทำให้อะตอมของแต่ละธาตุเกาะกันเป็นผลึกทำให้ผลึกของโลหะเกิดความไม่สมบูรณ์ ความไม่สมบูรณ์ของผลึกที่เกิดขึ้นนั้นถือเป็นความไม่สมบูรณ์แบบจุด ซึ่งเกิดขึ้นได้จาก 2 ลักษณะ คือ (ก) การแทนที่ด้วยอะตอมของธาตุอื่น (Substitutional Impurity Atom) มักเกิดขึ้นเมื่ออะตอมของธาตุนั้นมีขนาดใกล้เคียงกัน และ (ข) การแทรกตัวในช่องว่างของอะตอมธาตุอื่น (Interstitial Impurity Atom) มักเกิดขึ้นในกรณีที่อะตอมของธาตุเจือปนนั้นมีขนาดเล็กเพียงพอที่จะแทรกลงไปอยู่ในช่องว่างระหว่างอะตอมของธาตุหลักได้ โดยทั่วไปสมบัติของวัสดุที่เกิดจากความไม่สมบูรณ์ของผลึกประเภทนี้ จะขึ้นอยู่กับธาตุที่เจือปน โดยธาตุบางชนิดที่ทำการเติมอาจทำให้สมบัติทางกล ทางกายภาพ ดีขึ้นหรือลดลงได้ เช่น สมบัติทางกลด้านความแข็งแรงดีขึ้นเนื่องจากอะตอมเหล่านั้นจะทำหน้าที่ขัดขวางการเคลื่อนที่ของดิสโลเคชัน ทำให้วัสดุชิ้นนั้นมีความแข็งแรงขึ้น หรือสมบัติด้านการนำไฟฟ้าลดลง เนื่องจากว่าอะตอมที่ทำการแทรกตัวหรือเข้าไปแทนที่ในอะตอมของธาตุนั้นไปขัดขวางการส่งผ่านของอิเล็กตรอนอิสระ

2.6.2 ความไม่สมบูรณ์แบบเส้น

ความไม่สมบูรณ์แบบเส้น หรือ แบบหนึ่งมิติ (Line or One-Dimension Defects) เป็นความบกพร่องเชิงเส้น สามารถเรียกได้อีกอย่างหนึ่งว่า ดิสโลเคชัน (Dislocation) เป็นความบกพร่องที่ทำให้เกิดการบิดเบี้ยวของผลึก หรือการผิดรูป (Plastic Deformation) ของวัสดุ มักจะเกิดขึ้นในขณะที่โลหะ

หลอมเหลวที่แข็งตัว มี 2 ลักษณะ ดังรูปที่ 2.21 คือ (ก) Edge Dislocation เกิดจากระนาบครึ่งระนาบพิเศษ (Extra Half Plane) แทรกในโครงสร้างผลึก ทำให้เกิดสถานะถูกอัดในบริเวณที่ถูกแทรก โดยเบอร์เกอร์สเวกเตอร์ (Burgers Vector) ที่เกิดขึ้นจะตั้งฉากกับระนาบครึ่งระนาบพิเศษ (ข) Screw Dislocation เกิดจากการใส่แรงเฉือนเข้าไปในโครงสร้างผลึกที่สมบูรณ์ทำให้โครงสร้างผลึกเกิดการเสียรูปหรือบิดเบี้ยวไป โดยเวกเตอร์เบอร์เกอร์สที่เกิดขึ้นใน Screw Dislocation จะมีทิศขนานกับเส้นดิสโลเคชัน (Dislocation Line)



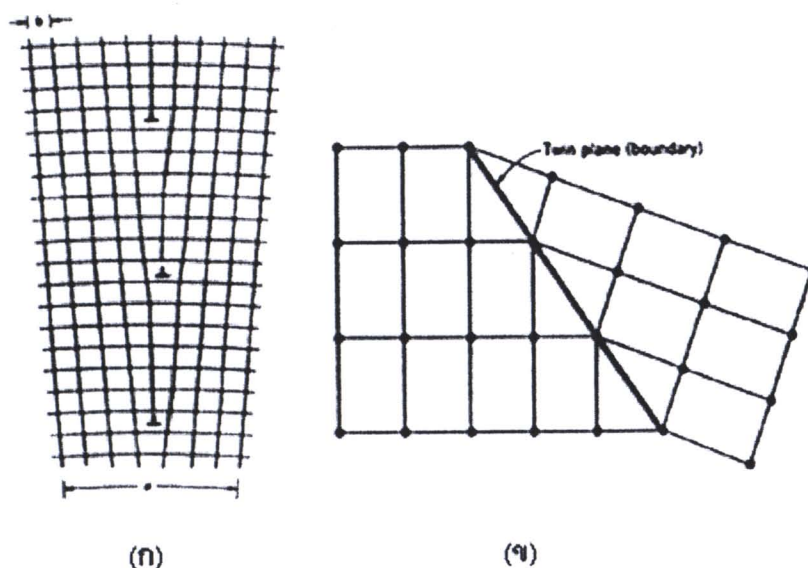
รูปที่ 2.21 ลักษณะความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบเส้น [25]

(ก) Edge Dislocation

(ข) Screw Dislocation

2.6.3 ความไม่สมบูรณ์แบบระนาบ

ความไม่สมบูรณ์แบบระนาบ หรือ แบบสองมิติ (Planar or Two-Dimension Defects) คือบริเวณที่แบ่งแยกระหว่างพื้นที่ที่มีโครงสร้างผลึกหรือการจัดเรียงตัวของผลึกที่แตกต่างกัน ความไม่สมบูรณ์แบบระนาบมีหลายประเภท ดังรูปที่ 2.22 เช่น ความไม่สมบูรณ์แบบระนาบบริเวณขอบเกรน (Grain Boundary) ความไม่สมบูรณ์แบบระนาบแบบขอบเขตแฝด (Twin Boundary) เป็นต้น



รูปที่ 2.22 ลักษณะความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบระนาบ [25]

(ก) ความไม่สมบูรณ์แบบระนาบบริเวณขอบเกรน

(ข) ความไม่สมบูรณ์แบบระนาบแบบขอบเขตแฝด

2.6.4 ความไม่สมบูรณ์แบบสามมิติ

ความไม่สมบูรณ์แบบสามมิติ หรือ แบบปริมาตร (Three-Dimension or Bulk Defects) เป็นความบกพร่องที่มักเกิดขึ้นระหว่างการขึ้นรูป เช่น รูพรุน (Pore) รอยแตก (Crack) การมีสิ่งปลอมปน (Foreign Inclusion) หรือการเฟสอสัณฐาน (Amorphous Phase)

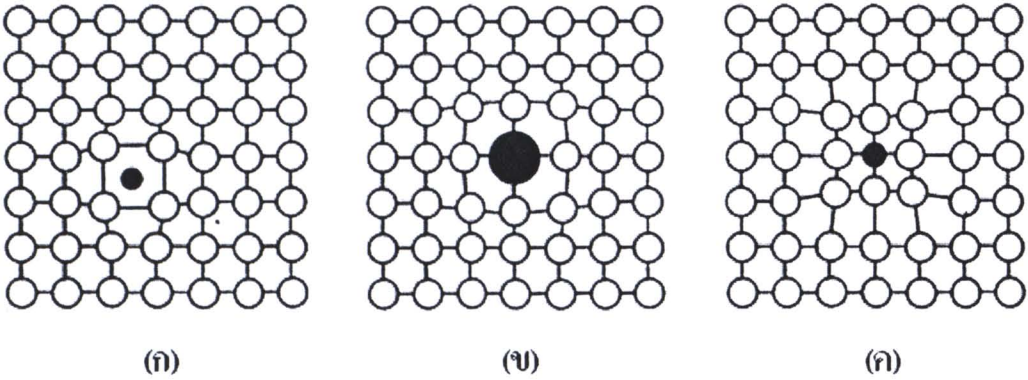
2.7 ความแข็งแรงของวัสดุ

การเพิ่มความแข็งแรงให้แก่วัสดุนั้นมีหลายวิธี [25, 26] เช่น การลดขนาดเกรน การเพิ่มความแข็งแรงโดยการทำให้เกิดสารละลายของแข็ง การเพิ่มความแข็งแรงจากความเครียด การตกผลึกใหม่ เป็นต้น

2.7.1 การเพิ่มความแข็งแรงด้วยสารละลายของแข็ง

โลหะบริสุทธิ์มีความแข็งแรงและความแข็งแรงน้อยกว่าโลหะผสม เนื่องจากอะตอมทุกตัวจะเหมือนกันและมีขนาดเท่ากัน ความผิดปกติของโครงสร้างผลึกจึงมีน้อยเมื่อเทียบกับโลหะผสม ในกรณีของโลหะผสมนั้นอะตอมของธาตุผสมจะไปแทรกหรือแทนที่อะตอมของธาตุหลัก เนื่องจากมีความ

แตกต่างกันในเรื่องของขนาดจึงทำให้เกิดสนามความเครียดขึ้น ซึ่งสนามความเครียดนี้จะส่งผลให้ ดิสโลเคชัน (Dislocation) เคลื่อนที่ได้ยากขึ้น ทำให้สมบัติทางกลเปลี่ยนไป ถ้าอะตอมของธาตุผสม มีขนาดเล็กกว่ากว่าอะตอมธาตุหลักจะเกิดสารละลายของแข็งแบบแทรก (Interstitial Solid Solution) ขณะที่อะตอมของธาตุผสมมีขนาดใหญ่กว่าหรือใกล้เคียงกับอะตอมธาตุหลักจะเกิดสารละลาย ของแข็งแบบแทนที่ (Substitutional Solid Solution) แสดงดังรูปที่ 2.23



รูปที่ 2.23 ลักษณะของอะตอมที่เกิดเป็นสารละลายของแข็ง [23]

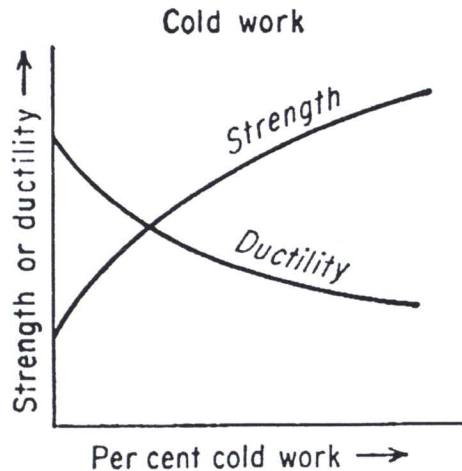
(ก) การเกิดสารละลายของแข็งแบบแทรก

(ข) และ (ค) การเกิดสารละลายของแข็งแบบแทนที่

2.7.2 การเพิ่มความแข็งแรงจากความเครียด

โดยทั่วไปเมื่อโลหะเหนียวผ่านการขึ้นรูปเย็น (Cold Working) หรือแปรรูป (Work Hardening) โลหะ จะมีความแข็งแรง (Strength) สูงขึ้นแต่ความเหนียว (Ductility) ลดลง ดังรูปที่ 2.24 ซึ่งจากรูปพบว่า เมื่อปริมาณการขึ้นรูปเย็นสูงขึ้น ความแข็งแรงก็ยังมีค่าสูงขึ้น แต่ขณะเดียวกันค่าความเหนียวกลับมี ค่าลดลง





รูปที่ 2.24 การเปลี่ยนแปลงความแข็งแรงและความเหนียวเมื่อปริมาณการขึ้นรูปเย็นเปลี่ยนไป [26]

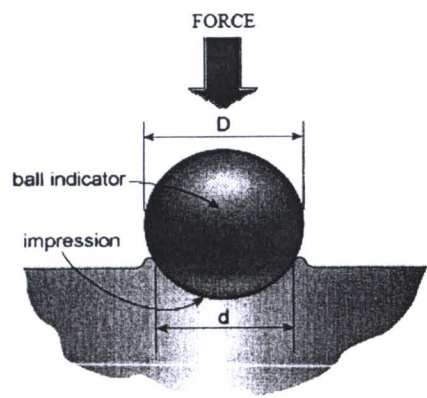
การเพิ่มความแข็งแรงจากความเครียดเกิดจากการขึ้นรูปเย็นทำให้ปริมาณของดิสโลเคชันมากขึ้น มีความหนาแน่นสูงขึ้น ระยะห่างระหว่างดิสโลเคชันแต่ละดิสโลเคชันจะลดลงหรือชิดกันมากขึ้น ส่งผลให้ดิสโลเคชันแต่ละดิสโลเคชันออกแรงผลักดันกันมากขึ้น การเคลื่อนที่ของดิสโลเคชันจะถูกขัดขวางด้วยดิสโลเคชันตัวอื่น ทำให้การขึ้นรูปเย็นต้องใช้แรงมากขึ้นซึ่งหมายถึงการทนต่อความเค้นมากขึ้นหรือมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นนั่นเอง ดังนั้นเมื่อปริมาณของการขึ้นรูปเย็นมีค่าสูงขึ้น จะส่งผลโลหะมีค่าความแข็งแรงและความแข็งแรงเพิ่มขึ้นไปด้วย

2.8 การทดสอบความแข็งของวัสดุ

ความแข็งหมายถึง ความต้านทานการเกิดรอยกดอย่างถาวร ปัจจุบันวิธีการทดสอบความแข็งอาจจำแนกออกเป็น 3 กลุ่มย่อย คือ (ก) การทดสอบความแข็งโดยใช้หัวกระแทกแบบสะท้อน (Rebound Hardness Test) ซึ่งใช้หลักการทดสอบที่อาศัยการสะท้อนของหัวกระแทกที่มีรูปทรงและมิติตามมาตรฐานกับชิ้นงานที่ต้องการทดสอบ (ข) การทดสอบความแข็งด้วยการขีดขีด (Scratch Test) เป็นการทดสอบหาความต้านทานต่อการถูกขีดข่วน นิยมใช้ในงานทางธรณีวิทยาและวิศวกรรมเหมืองแร่ ในการทดสอบจะนำวัสดุชนิดหนึ่งมาขีดบนวัสดุอีกชนิดหนึ่ง หากวัสดุที่อ่อนกว่าวัสดุที่นำมาขีดก็จะปรากฏรอยขีดบนวัสดุนั้น นิยมใช้สเกลของโมห์ (Moh's Scale) ซึ่งกำหนดความแข็งเป็นตัวเลข และ (ค) การทดสอบความแข็งโดยใช้หัวกด (Static Indentation Test) เป็นการทดสอบที่นิยมใช้มากที่สุดในงานโลหวิทยา สามารถจำแนกออกเป็น 3 กลุ่มย่อยตามลักษณะวิธีการทดสอบ [27] ซึ่งได้แก่

2.8.1 การทดสอบความแข็งแบบบริเนลล์

หลักการของการทดสอบความแข็งแบบบริเนลล์ (Brinell Hardness Testing) คือ อาศัยแรงกดลงบนผิวชิ้นงานที่ทำการทดสอบผ่านลูกบอลมาตรฐานที่ทำมาจากเหล็กกล้าชุบแข็ง ขนาดของหัวกดมีอยู่หลายขนาด แต่ที่นิยมใช้มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 2.25 โดยขนาดของแรงกดจะขึ้นอยู่กับผิวของชิ้นงานที่ทำการทดสอบ



รูปที่ 2.25 การทดสอบความแข็งแบบบริเนลล์ [27]

ค่าความแข็งบริเนลล์ (HB) คำนวณจากอัตราส่วนของน้ำหนักที่ใช้กดต่อพื้นที่ส่วน โค้งรอยกด คำนวณได้ดังสมการที่ 2.3 [27] มีหน่วยเป็น กิโลกรัมต่อตารางมิลลิเมตร

$$HB = \frac{P}{(\pi D/2)(D-\sqrt{D^2-d^2})} = \frac{P}{\pi Dt} \dots\dots\dots (2.3)$$

- | | | | |
|-------|-----|-----|---|
| เมื่อ | P | คือ | น้ำหนักที่ใช้กด (กิโลกรัม) |
| | D | คือ | ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวกดทรงกลม (มิลลิเมตร) |
| | d | คือ | ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรอยกดบนผิวชิ้นทดสอบ (มิลลิเมตร) |
| | t | คือ | ขนาดระยะลึกของรอยกดจากผิวหน้าถึงลงไป (มิลลิเมตร) |

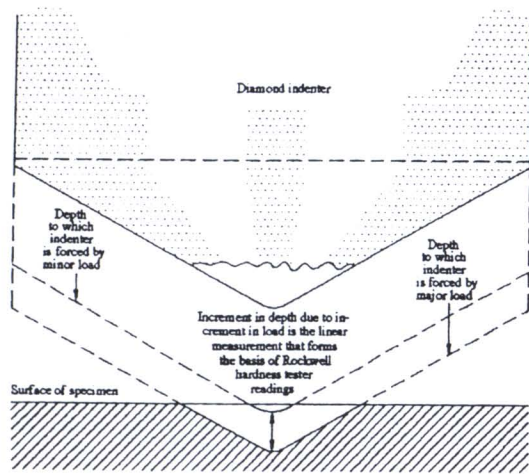
ในการเลือกน้ำหนักกดต้องพิจารณาจากความแข็งและชนิดของวัสดุที่ต้องทำการทดสอบ เพื่อป้องกันไม่ให้หัวกดจมลงชิ้นงานมากเกินไป และในกรณีที่วัสดุที่ต้องการทดสอบเป็นวัสดุที่แข็งมากอาจ

จำเป็นต้องเปลี่ยนหัวกดที่ทำจากเหล็กกล้าชุบแข็งเป็น ชนิดที่ทำจากทังสเตนคาร์ไบด์ เนื่องจากว่า หัวกดทั้ง 2 ชนิดมีความแข็งที่แตกต่างกัน โดยหัวกดชนิดที่ทำจากเหล็กกล้าชุบแข็งมีความแข็งเพียง 444 HB ขณะที่ชนิดที่ทำจากทังสเตนคาร์ไบด์ มีความแข็ง 627 HB ดังนั้นถ้าใช้ไม่เหมาะสมจะทำให้ หัวกดเกิดการเสียความกลม หรืออาจเกิดจุดครากบนตัววัสดุหัวกดทำให้เสียรูปถาวร อย่างไรก็ตาม ความแข็งที่อ่านได้จาก หัวกดแบบทังสเตนคาร์ไบด์จะต่างไปจากหัวที่อ่านได้จากหัวกดเหล็กกล้าชุบแข็งเล็กน้อยทำให้ต้องใช้ตารางแปลงค่าความแข็ง

การทดสอบความแข็งแบบบริเนลล์นั้นหัวกดทรงกลมจะมีขนาดค่อนข้างใหญ่ ดังนั้น พื้นที่ของรอยกดจึงมากกว่าการทดสอบชนิดอื่น ซึ่งจากจุดนี้มีข้อดีที่ว่า หากวัสดุมีโครงสร้างจุลภาคที่ไม่สม่ำเสมอ แต่ผู้ทดสอบต้องการหาความแข็งเฉลี่ย การทดสอบแบบบริเนลล์จะดีกว่าเนื่องจากพื้นที่รอยกดขนาดใหญ่ช่วยให้เฉลี่ยความแตกต่างในระดับจุลภาคได้ แต่ถ้าผู้ทดสอบต้องการทดสอบหาความเปลี่ยนแปลงความแข็งหรือสมบัติของวัสดุในระดับจุลภาค ผู้ทดสอบจะไม่สามารถใช้การทดสอบความแข็งแบบบริเนลล์ได้

2.8.2 การทดสอบความแข็งแบบร็อคเวลล์

หลักการทดสอบความแข็งแบบร็อคเวลล์ (Rockwell Hardness Testing) จะแตกต่างกับการทดสอบความแข็งวิธีอื่นคือ ค่าความแข็งแบบร็อคเวลล์จะตัดสินจากระยะที่หัวกดจะจมลงไปในตัวชิ้นงาน สำหรับวัสดุแข็งหัวกดจะจมลงไปได้น้อย และถ้าสำหรับวัสดุอ่อนหัวกดจะจมลงไปได้มาก ดังรูปที่ 2.26 แสดงหลักการหาค่าความแข็งแบบร็อคเวลล์จากความลึกของรอยกด



รูปที่ 2.26 หลักการหาค่าความแข็งแบบร็อคเวลล์จากความลึกของรอยกด [27]

จากหลักการนี้ทำให้ช่วยลดขั้นตอนในการเตรียมผิวชิ้นงาน และตรวจสอบพื้นที่รอยกด เหมือนวิธีการทดสอบอื่นๆ แต่มีข้อบกพร่องตรงที่ระยะการจมลึกของหัวกดไม่ได้เป็นความสัมพันธ์เชิงเส้นกับความแข็ง ทำให้เกิดการแบ่งการทดสอบออกเป็นการทดสอบย่อยๆ ซึ่งเรียกว่า สเตล การทดสอบแต่ละสเตลนั้นจะกำหนดรูปทรงพื้นฐานของหัวกดรวมทั้งน้ำหนักกดแตกต่างกันไปตามแต่ละสเตลนั้นๆ ดังตารางที่ 2.2 โดยทั่วไปจะมีหัวกดหลักอยู่ 2 ชนิด คือ หัวกดรูปโคน (Brale Indenter) ส่วนปลายจะทำจากเพชร มุมของโคนเท่ากับ 120 องศา และหัวกดชนิดทรงกลมที่ทำมาจากเหล็กกล้าชุบแข็ง

ตารางที่ 2.2 สเตลการทดสอบความแข็งแบบรอกเวลล์ แสดงชนิดหัวกดและน้ำหนักกดหลัก [27]

สเตล	ชนิดของหัวกด (ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง)	น้ำหนักกดหลัก (กิโลกรัม)
A	Diamond	60
B	Steel ball (1.588 mm dia.)	100
C	Diamond	150
D	Diamond	100
E	Steel ball (3.175 mm dia.)	100
F	Steel ball (1.588 mm dia.)	60
G	Steel ball (1.588 mm dia.)	150
H	Steel ball (3.175 mm dia.)	60
K	Steel ball (3.175 mm dia.)	150
L	Steel ball (6.350 mm dia.)	60
M	Steel ball (6.350 mm dia.)	100
P	Steel ball (6.350 mm dia.)	150
S	Steel ball (12.70 mm dia.)	60
R	Steel ball (12.70 mm dia.)	100
V	Steel ball (12.70 mm dia.)	150

สำหรับการทดสอบในแบบที่ใช้หัวกดแบบโคนที่ทำจากเพชรจะไม่มีปัญหาในเรื่องความแข็งของวัสดุชิ้นงานที่สูงเกินไป แต่หากวัสดุที่นำมาทดสอบค่อนข้างนิ่มหัวกดจะจมลึกลงไปมาก ทำให้ค่าที่ได้มีความคลาดเคลื่อน ดังนั้นการทดสอบแบบที่ใช้หัวกดแบบโคนที่ทำจากเพชร จะมีขีดจำกัดล่างอยู่ที่ความแข็งประมาณ 20 ส่วนการทดสอบแบบใช้หัวกดทรงกลม เช่น สเตลทดสอบแบบ B จะมีค่าความแข็งสูงสุดได้ถึง 130 แต่หากค่าความแข็งที่ทดสอบอยู่ในช่วง 100 ถึง 130 ควรหลีกเลี่ยงการทดสอบ

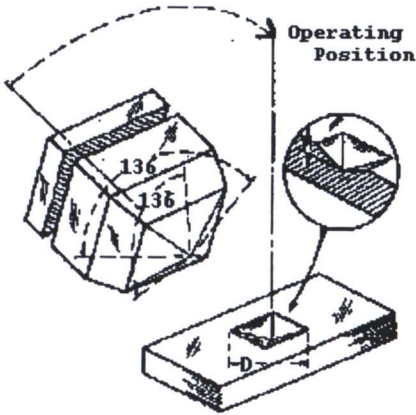
ในสเกลนั้น โดยค่าความแข็งแบบร็อคเวลล์นั้นสามารถอ่านค่าจากเครื่องทดสอบได้เลยไม่ต้องใช้สูตรคำนวณ

2.8.3 การทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์ส

หลักการทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์ส (Vicker Hardness Testing) มีลักษณะคล้ายกับการทดสอบแบบบริเนลล์ ที่กำหนดให้ค่าความแข็งมีค่าเท่ากับอัตราส่วนของน้ำหนักที่ใช้กดต่อพื้นที่รอยกด แต่ต่างกันที่รูปทรงพื้นฐานของหัวกดแบบวิกเกอร์สเป็นหัวกดจตุรัสที่ทำจากเพชร มุมระหว่างหน้าพีรามิดด้านที่ตรงข้ามกันจะเท่ากับ 136 องศา ดังรูปที่ 2.27 ค่าความแข็งแบบวิกเกอร์ส (HV) คำนวณได้ดังสมการที่ 2.4 [27] มีหน่วยเป็น กิโลกรัมต่อตารางมิลลิเมตร

$$HV = \frac{2P\sin(136^\circ/2)}{d^2} = 1.8544 \frac{P}{d^2} \dots\dots\dots (2.4)$$

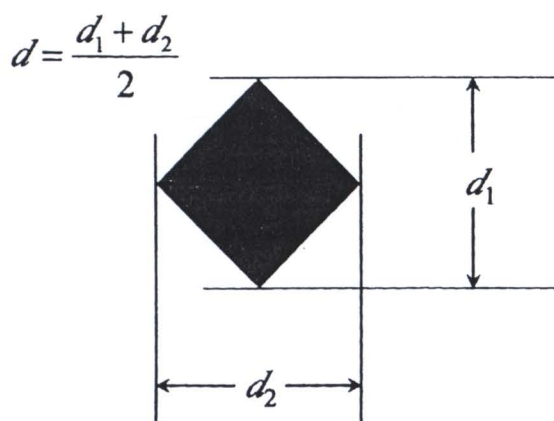
เมื่อ P คือ น้ำหนักที่ใช้กด (กิโลกรัม)
 d คือ ขนาดเส้นทแยงมุมของรอยกดรูปทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัส (มิลลิเมตร)



รูปที่ 2.27 ลักษณะหัวกดและรอยกดของการทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์ส [27]



โดยขนาดของเส้นทแยงมุมเฉลี่ยสามารถหาได้ดังรูปที่ 2.28



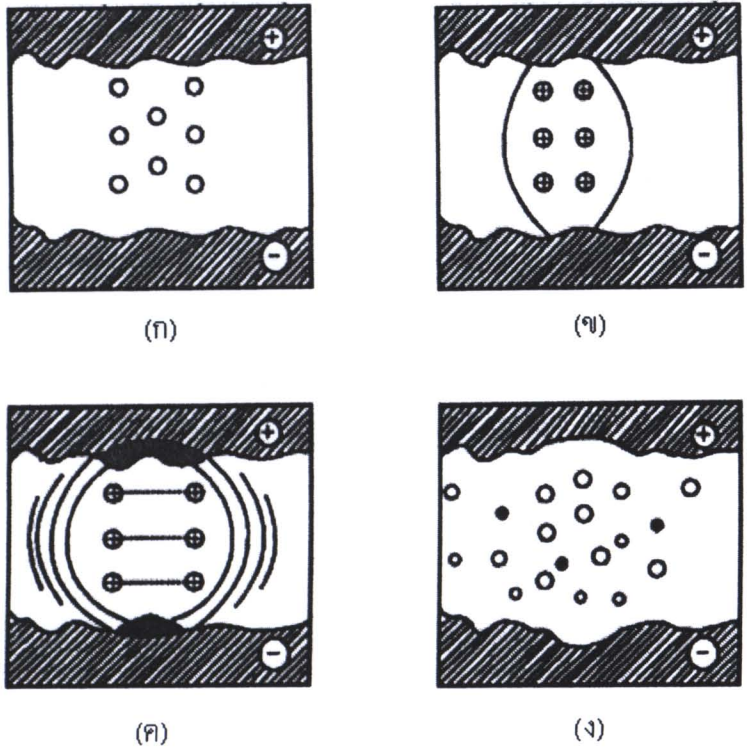
รูปที่ 2.28 การหาขนาดเส้นทแยงมุมเฉลี่ยจากเส้นทแยงมุมในสองแนวซึ่งทำมุมกัน 90 องศา [27]

หัวข้อสำหรับการทดสอบความแข็งแรงแบบวิกเกอร์สจะมีอยู่เพียงแบบเดียว การทดสอบวัสดุที่มีความแข็งแรงหลากหลายแตกต่างกันจะใช้การปรับน้ำหนักที่ใช้กดแทน ในการทดสอบแบบวิกเกอร์ส ธรรมดา นั้นน้ำหนักกดจะใช้อยู่ที่ 1 ถึง 20 กิโลกรัม สำหรับการทดสอบวัสดุที่มีความแข็งแรงสูงจะใช้น้ำหนักกดมากเพื่อให้ได้รอยกดที่ใหญ่พอจะตรวจวัดขนาดเส้นทแยงมุมได้แม่นยำ ในทางกลับกันวัสดุที่จะทดสอบค่อนข้างอ่อนจะต้องเลือกน้ำหนักกดที่น้อยเพื่อป้องกันไม่ให้หัวกดจมลึกลงไปในงานมากเกินไป ซึ่งจุดเด่นของการทดสอบความแข็งแรงแบบวิกเกอร์สอยู่ตรงที่ค่าความแข็งที่ตรวจได้จะไม่ขึ้นกับน้ำหนักที่ใช้กด ทำให้การทดสอบมีความต่อเนื่องกันตลอดตั้งแต่วัสดุอ่อนจนถึงวัสดุแข็งด้วยการทดสอบเพียงสเกลเดียว ทั้งนี้เนื่องจากหัวกดแบบพีรามิดของวิกเกอร์สนั้น มุมของหน้าพีรามิดด้านตรงข้ามกันเท่ากันเท่ากับ 136 องศา ช่วยให้รอยกดสามารถรักษาสัดส่วนรูปทรงเรขาคณิตไว้ได้แม้การการจมลึกของหัวกดจะแตกต่างกันไป ในขณะที่หัวกดที่เป็นทรงกลมนั้น เมื่อทำการทดสอบวัสดุชนิดเดียวกันสองครั้ง โดยใช้น้ำหนักกดที่แตกต่างกัน การจมลึกของหัวกดจะแตกต่างกันไป เนื่องจากหัวกดมีลักษณะเป็นทรงกลม การจมลึกที่แตกต่างกันทำให้รอยกดที่ได้มีลักษณะทางเรขาคณิตที่แตกต่างกันส่งผลให้การกระจายของความเค้นตรงรอยกดมีสถานะแตกต่างกันทำให้ความแข็งที่คำนวณได้ต่างกัน

2.9 หลักการทำงานของอีดีเอ็ม

อีดีเอ็ม (EDM: Electrical Discharge Machining) เป็นกระบวนการกัดเซาะโลหะโดยใช้ประจุไฟฟ้า ชี้นำงานที่นำมาใช้ในกระบวนการต้องสามารถนำไฟฟ้าได้ ลักษณะการแยกอนุภาคของวัสดุด้วยอีดีเอ็ม แสดงดังรูปที่ 2.29 กระบวนการกัดเซาะโลหะโดยใช้ประจุไฟฟ้าจะเกิดขึ้นในสารไดอิเล็กตริก ดังรูปที่ 2.29 (ก) ซึ่งทำหน้าที่เป็นฉนวนระหว่างอิเล็กโทรดกับชิ้นงาน และช่วยระบายความร้อนจากชิ้นงาน และอิเล็กโทรด เมื่อความร้อนที่สูงเกินไปนั้น จะทำให้อิเล็กโทรดเกิดการสึกหรอสูง

เมื่อนำชิ้นงานและอิเล็กโทรดวางในตำแหน่งที่พร้อมจะทำงานและต่อกับแหล่งกำเนิดไฟฟ้า กระแสตรง ซึ่งกระแสไฟฟ้าเหล่านี้จะถูกเปิด/ปิด ด้วยสวิตช์ เมื่อทำการต่อวงจร ความต่างศักย์ ระหว่างอิเล็กโทรดกับชิ้นงานจะถูกสร้างขึ้นเป็นสนามไฟฟ้าระหว่างแอโนดกับคาโทด ดังรูปที่ 2.29 (ข) เมื่อเคลื่อนอิเล็กโทรดเข้าหาชิ้นงานจนถึงระยะห่างค่าหนึ่ง สารไดอิเล็กตริกจะเกิดการสูญเสียความเป็นฉนวน ทำให้เกิดการสปาร์คขึ้น ดังรูปที่ 2.29 (ค) เนื่องจากกระบวนการนี้เป็น กระบวนการที่เปลี่ยนกระแสไฟฟ้าเป็นความร้อน จึงส่งผลให้พื้นผิวรอบๆบริเวณที่เกิดการสปาร์ค มีความร้อนเกิดขึ้นประมาณ 8,000 – 12,000 องศาเซลเซียส จนบางส่วนของชิ้นงานถูกหลอม ละลาย ขณะที่สารไดอิเล็กตริกบริเวณที่เกิดการสปาร์คจะกลายเป็นก๊าซอันเนื่องมาจากความร้อนที่เกิดขึ้น และมีความดันที่สูงขึ้นบางส่วน โดยความดันที่เกิดขึ้นนี้จะทำให้ส่วนที่หลอมละลายชิ้นงาน หลุดกระเด็นออกไปกลายเป็นเศษผงชิ้นเล็กๆ ดังรูปที่ 2.29 (ง) จากนั้นรอสารไดอิเล็กตริกกลับคืนสู่ ความเป็นฉนวนโดยไม่มีการใส่แรงดันไฟฟ้า



รูปที่ 2.29 ลักษณะการแยกอนุภาควัสดุด้วยอีดีเอ็ม [29]

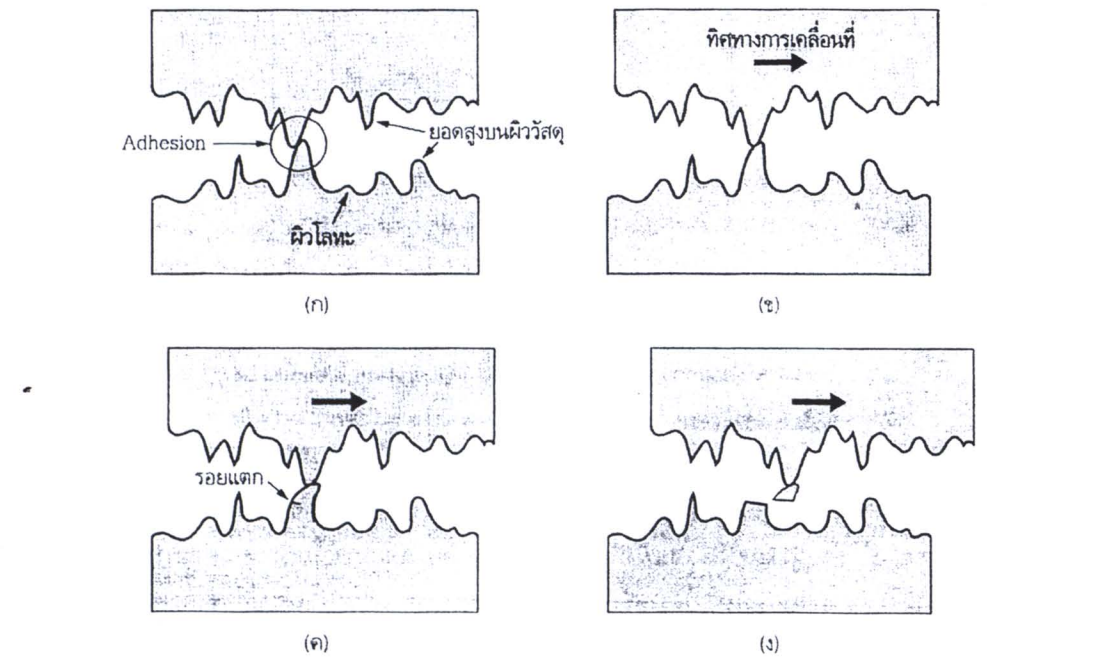
จากหลักการทำงานของเครื่องอีดีเอ็มมีงานวิจัยหลายฉบับนำมาใช้ศึกษาถึงปัจจัยที่มีผลต่อการกัดชิ้นงาน โดยข้อมูลที่น่ามาวิเคราะห์นั้นมีอยู่ 4 ประเภท [28] คือ อัตราการกำจัดเนื้อวัสดุ (Material Removal Rate, MRR) การสึกหรอของอิเล็กโทรด (Electrode Wear, EW) ความหยาบผิว (Surface Roughness, SR) และคุณภาพของพื้นผิว (Quality Surface) โดยทั่วไปอัตราการกำจัดเนื้อวัสดุจะไม่ได้ขึ้นอยู่กับวัสดุของชิ้นงานและคุณภาพของอิเล็กโทรดเพียงอย่างเดียว แต่จะขึ้นอยู่กับพารามิเตอร์ที่ใช้และสมบัติของสารไดอิเล็กตริก ขณะที่ความหยาบผิวนั้นจะขึ้นอยู่กับพารามิเตอร์ที่ใช้ขณะที่เครื่องทำงาน ประเภทของชิ้นงาน และคุณภาพของวัสดุที่เป็นอิเล็กโทรด [29, 30, 31] เช่น ถ้าปริมาณของกระแสไฟฟ้าที่สูงและพัลส์เวลา (Pulse time) ที่ใช้มาก อัตราการกำจัดเนื้อวัสดุก็จะสูงขึ้น ค่าความหยาบของชิ้นงานก็จะมีค่าสูงขึ้น [32] จากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมาของ Wang และ Saka [33] ทำการศึกษาพฤติกรรมการสึกหรอจากการสปาร์คของคอมโพสิตที่มีเงินเป็นส่วนผสมหลัก พบว่า Ag-W, Ag-CdO และ (Ag-15CdO)-W สึกกร่อนต่ำกว่าเงินบริสุทธิ์เพียงอย่างเดียว และเมื่อปริมาณของทั้งสแตน แคลเมียมออกไซด์มีปริมาณเพิ่มขึ้น จะมีการสึกหรอที่ต่ำลง

2.10 การสึกหรอของวัสดุ

การสึกหรอ (Wear) เป็นการหลุดของผิววัสดุจากการถูแรงกระทำขณะที่ผิวเคลื่อนที่สัมผัสกับอีกผิวหนึ่ง การสึกหรอเกิดได้หลายรูปแบบ เช่น การสึกหรอที่เกิดจากการไถระหว่างผิว (Sliding Wear) การขัดถูของอนุภาคกับผิว (Abrasion) เป็นต้น ลักษณะหรือกลไกการเกิดการสึกหรอของวัสดุแต่ละชนิดก็แตกต่างกันไป จะเกิดช้าหรือเร็วขึ้นอยู่กับองค์ประกอบหลายอย่าง เช่น โครงสร้างจุลภาคของผิว ชนิดของวัสดุ ลักษณะการเคลื่อนที่ของวัสดุ ปฏิกิริยาเคมี และอุณหภูมิ เป็นต้น ซึ่งโดยทั่วไปการสึกหรอที่พบมักมีความซับซ้อนหลายกลไกเกิดพร้อมๆกัน บางทีไม่สามารถระบุประเภทการสึกหรอที่เกิดได้แน่นอนว่าเป็นชนิดใด

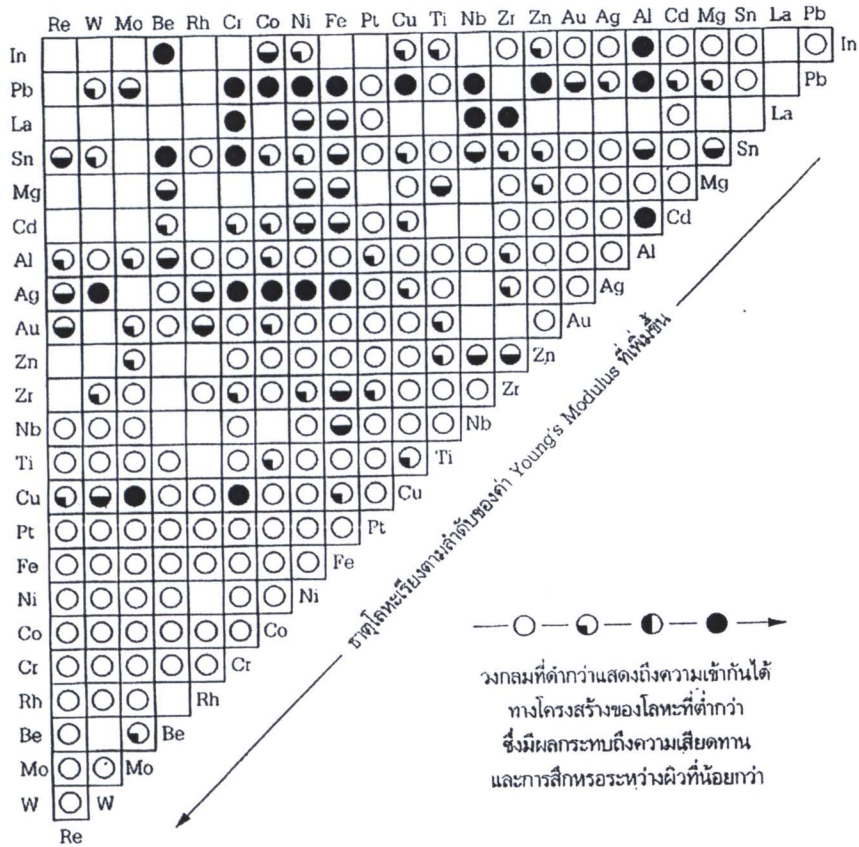
2.10.1 การสึกหรอของเนื้อโลหะบนเนื้อโลหะ

เมื่อผิวหน้าของโลหะ 2 ผิวหน้าเคลื่อนที่สัมผัสกันภายใต้แรงกด พันธะของโลหะสามารถเกิดขึ้นได้ ณ บริเวณจุดสัมผัส ซึ่งพันธะที่เกิดขึ้นในบริเวณยอดสูง (Asperity) ของวัสดุมาแตะยอดกันนี้เรียกว่า การยึดเกาะแบบแนบติด (Adhesion) ขณะที่ผิวหน้า 2 ผิวเคลื่อนที่สัมผัสระหว่างกัน การยึดเกาะแบบแนบติดจะสามารถขยับและหลุดออกจากกันได้ ขณะเดียวกันยอดสูงเหล่านี้ก็สามารถเกิดการแตกหักได้เช่นกัน ถ้าพันธะโลหะความแข็งแรงของโลหะนี้มีค่าสูงกว่าความแข็งแรงของยอดสูงของผิวหน้าหนึ่ง ยอดสูงนั้นจะแตกและผิวหน้านั้นจะสูญเสียเนื้อวัสดุไปให้กับคู่ผิวสัมผัส ดังรูปที่ 2.30



รูปที่ 2.30 ลักษณะการเกิดการสึกหรอของเนื้อโลหะบนเนื้อโลหะ [34]

ขณะเกิดการสีกหรือนั้นจะเกิดพันธะแบบแนบติดและการแตกหักของวัสดุพร้อมๆกันอย่างต่อเนื่อง เป็นเหตุให้เกิดการสูญเสียเนื้อวัสดุจากผิวหนึ่งไปยังอีกผิวหนึ่ง ซึ่งมักจะเกิดขึ้นทั้ง 2 ทาง ถ้าวัสดุทั้ง 2 ชนิดมีโครงสร้างลักษณะคล้ายกัน หรือมีความเข้ากันได้ทางโครงสร้าง (Structure Compatibility) ที่ดี เนื่องจากค่าความเสียดทานระหว่างผิววัสดุจะขึ้นอยู่กับความเข้ากันได้นี้ ดังรูปที่ 2.31



รูปที่ 2.31 ผลกระทบจากลักษณะโครงสร้างของคู่ผิวสัมผัสกับการสีกหรือ [34]

ถ้าหากว่าวัสดุ A มีความแข็งแรงทางกลมากกว่าวัสดุ B วัสดุ B จะสูญเสียเนื้อให้กับวัสดุ A ในขณะที่วัสดุที่แตกออก ผิวหน้าใหม่ที่เปิดขึ้นบริเวณรอยแตกจะเกิดการออกซิเดชัน ซึ่งปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจะถูกเร่งโดยความร้อนที่เกิดจากการเสียดสีทำให้เกิดออกไซด์บนผิววัสดุ เมื่อการสีกหรือดำเนินต่อไปเศษของเนื้อวัสดุที่แตกจะทับถมบนผิวหน้า สร้างเป็นชั้นขึ้นมา บางครั้งชั้นของเศษทับถมก็จะหลุดล่อนออกมาทั้งนี้เนื่องจากการปะปนของออกไซด์ของโลหะอยู่ ทำให้เกิดการสูญเสียเนื้อวัสดุจากทั้ง 2 ผิวสัมผัส ดังนั้น พฤติกรรมการเกิดการสีกหรือจึงขึ้นอยู่กับลักษณะของวัสดุโลหะทั้ง 2 ที่เข้าสัมผัสกัน โดยการยึดเกาะแบบแนบติดจะเกิดขึ้นได้ง่ายเมื่อผิวสัมผัสทั้งคู่มีความสะอาด มีความเข้ากันได้ทางเคมีและทางโครงสร้างของวัสดุ

2.10.2 การสึกกร่อนของวัสดุประเภทคอมโพสิตเสริมแรงด้วยอนุภาค

การสึกกร่อนของวัสดุประเภทคอมโพสิตเสริมแรงด้วยอนุภาค จะขึ้นอยู่กับระยะห่างระหว่างอนุภาค และ ขนาดของอนุภาคเสริมแรง ที่สัดส่วนโดยปริมาตรของวัสดุเสริมแรงเท่ากันพบว่าอัตราการสึกกร่อนของวัสดุเสริมแรงที่มีขนาดอนุภาคใหญ่ และระยะห่างกันของอนุภาคมาก จะเกิดการสึกกร่อนสูงกว่าวัสดุคอมโพสิตที่มีขนาดของอนุภาคเสริมแรงขนาดเล็กและระยะห่างกันเพียงเล็กน้อย ทั้งนี้ เนื่องจากการสึกกร่อนจะเกิดขึ้นทั่วทั้งบริเวณผิวหน้าสัมผัสที่อัตราเท่ากัน เหมือนเป็นวัสดุเดียวกันที่มีค่าความแข็งแรงรวมทั้งผิวหน้าของวัสดุคอมโพสิต จากงานวิจัยของ Akhtar และคณะ [10] ได้ศึกษาเกี่ยวกับพฤติกรรมการสึกกร่อนของ Cu-TiC ด้วยวิธี Sphere on Flat พบว่า เมื่อปริมาณของ TiC มีปริมาณสูงขึ้น การสึกกร่อนของ Cu-TiC มีปริมาณลดลง