

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 หน้าสัมผัสไฟฟ้า

หน้าสัมผัสไฟฟ้าเป็นส่วนที่ติดตั้งในอุปกรณ์เครื่องใช้ไฟฟ้าหลายชนิด เช่น รีเลย์ เบรกเกอร์ พัดลม หม้อหุงข้าวไฟฟ้า เป็นต้น โดยชิ้นส่วนหน้าสัมผัสไฟฟ้ามีหน้าที่ให้กระแสไฟฟ้าไหลครบวงจรเมื่อต้องการใช้งาน และตัดกระแสไฟฟ้าเมื่อต้องการหยุดการใช้งาน

**การควบคุมวงจรไฟฟ้าโดยใช้หน้าสัมผัสไฟฟ้ามีข้อดี คือ**

- ตัดต่อวงจรไฟฟ้าที่มีปริมาณกระแสไฟฟ้ามากให้สามารถไหลผ่านได้ด้วยอุปกรณ์ควบคุมซึ่งอุปกรณ์ควบคุมนี้จะใช้กระแสไฟฟ้าต่ำ
- ใช้กับวงจรไฟฟ้าที่ทำงานต่อเนื่อง และลักษณะงานที่ต้องตัดต่อวงจรไฟฟ้าบ่อยๆ
- สามารถควบคุมการทำงานของวงจรไฟฟ้าได้จากระยะไกล โดยใช้สายไฟฟ้าขนาดเล็ก
- มีสถานีควบคุมได้หลายจุด สามารถติดตั้งได้ใกล้กับผู้ใช้ปฏิบัติงาน

#### 2.2 การจำแนกประเภทของวัสดุหน้าสัมผัสไฟฟ้า

การแบ่งประเภทของวัสดุหน้าสัมผัสไฟฟ้า สามารถแบ่งได้หลายวิธี คือ แบ่งตามลักษณะการใช้งาน แบ่งตามส่วนผสมทางเคมีของโลหะ แบ่งตามประสิทธิภาพในการนำกระแสไฟฟ้า หรือความต่างศักย์ รายละเอียดแสดงได้ดังนี้

##### 2.2.1 การแบ่งตามหน้าที่การใช้งาน

วัสดุหน้าสัมผัสไฟฟ้าที่มีการใช้ในท้องตลาดสามารถแบ่งได้ 3 กลุ่ม ได้แก่ กลุ่ม Stationary Contacts กลุ่ม Sliding Contacts และกลุ่ม Switching or Make and Break Contacts

- **Stationary Contacts** บางที่เรียกว่า Static Contacts เป็นวัสดุหน้าสัมผัสไฟฟ้า ที่ไม่มีการเคลื่อนที่ระหว่างการใช้งาน มีการเชื่อมต่ออย่างถาวร เช่น Bus Joint, Soldered Joint, Welded Joint, Terminal Connections ทำหน้าที่เป็นตัวนำกระแสไฟฟ้า โลหะที่นิยมนำมาผลิตได้แก่ ทองแดงและอะลูมิเนียม ใช้ทำชิ้นส่วน Bus Bars และชิ้นส่วน Connector ในอุปกรณ์ Switchgear ค่าการนำไฟฟ้าของอะลูมิเนียมมีค่าประมาณ 61 %IACS มีค่าต่ำกว่าทองแดง ซึ่งมีค่าการนำไฟฟ้า 100 %IACS แต่อะลูมิเนียมก็ยังเป็นที่นิยมใช้ เนื่องจากอะลูมิเนียมมี น้ำหนักเบา มีความแข็งแรง ต่อน้ำหนักสูง และราคาถูกกว่าทองแดง รวมทั้งทนต่อการผุกร่อนได้ดี ทนการเกิดออกซิเดชันดีกว่าทองแดง ระหว่างการใช้งานหากเกิดออกไซด์ของโลหะที่ไม่เป็นตัวนำไฟฟ้า (Non-Conducting Oxide) จะส่งผลให้บริเวณนั้นเกิดความต้านทานขึ้น และค่าความต่างศักย์ลดลง สำหรับการใช้งานที่อุณหภูมิสูงเกินไป อาจนำไปสู่การไหม้และมีการอาร์คเกิดขึ้น จึงมีการพัฒนาวัสดุโดยการเคลือบ

โลหะเงิน ที่ผิวของทองแดงหรืออะลูมิเนียมก่อนนำไปใช้งาน พบว่าสามารถช่วยป้องกันการไหม้ และการอาร์คได้

- **Sliding Contacts** หน้าสัมผัสไฟฟ้ากลุ่มนี้มีการเคลื่อนที่ได้ เช่น หน้าสัมผัสไฟฟ้าของ Rheostats, Slip Ring, Brush Assemblies, Motor Commutators, Potentionmeter และ Rotary Switches วัสดุที่นิยมนำมาใช้เป็นพวก กราไฟต์หรือคาร์บอนเนื่องจากมีผิวลื่น และค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานต่ำมีค่าประมาณ 0.07–0.13 ทำให้วัสดุที่ต้องถูกเสียดสีขณะใช้งานสึกกร่อนเพียงเล็กน้อย เหมาะสำหรับงานที่ต้องใช้แรงเคลื่อนไฟฟ้าสูง (High Voltage) และกระแสต่ำ (Low Currents) โลหะบริสุทธิ์ที่มีค่าการนำไฟฟ้าสูง เช่น เงิน ทองแดง ทอง แต่มีข้อเสียเรื่องความแข็งแรงของโลหะเหล่านี้ ซึ่งมีความแข็งต่ำ ทำให้เกิดการสึกหรือจากการขัดสีระหว่างใช้งาน จึงต้องมีการนำสารหล่อลื่นมาใช้ป้องกันการสึกกร่อน แต่จะส่งผลต่อค่าการนำไฟฟ้าลดลง เนื่องจากสารหล่อลื่นที่ไม่นำไฟฟ้า โดยทั่วไปใช้วัสดุผสมของ Au-G, Ag-G, Ag-Ni-G แทน เนื่องจาก กราไฟต์สามารถสร้างฟิล์มขึ้นที่ผิวอย่างต่อเนื่อง ช่วยป้องกันการสึกของผิวชิ้นงานได้

- **Switching or Make and Break Contacts** เป็นกลุ่มหน้าสัมผัสไฟฟ้าที่มีการใช้งานในลักษณะเปิด และปิดสลับกันโดยทำงานซ้ำๆระหว่างการใช้งาน เรียกว่า Make and Break หรือ Switching

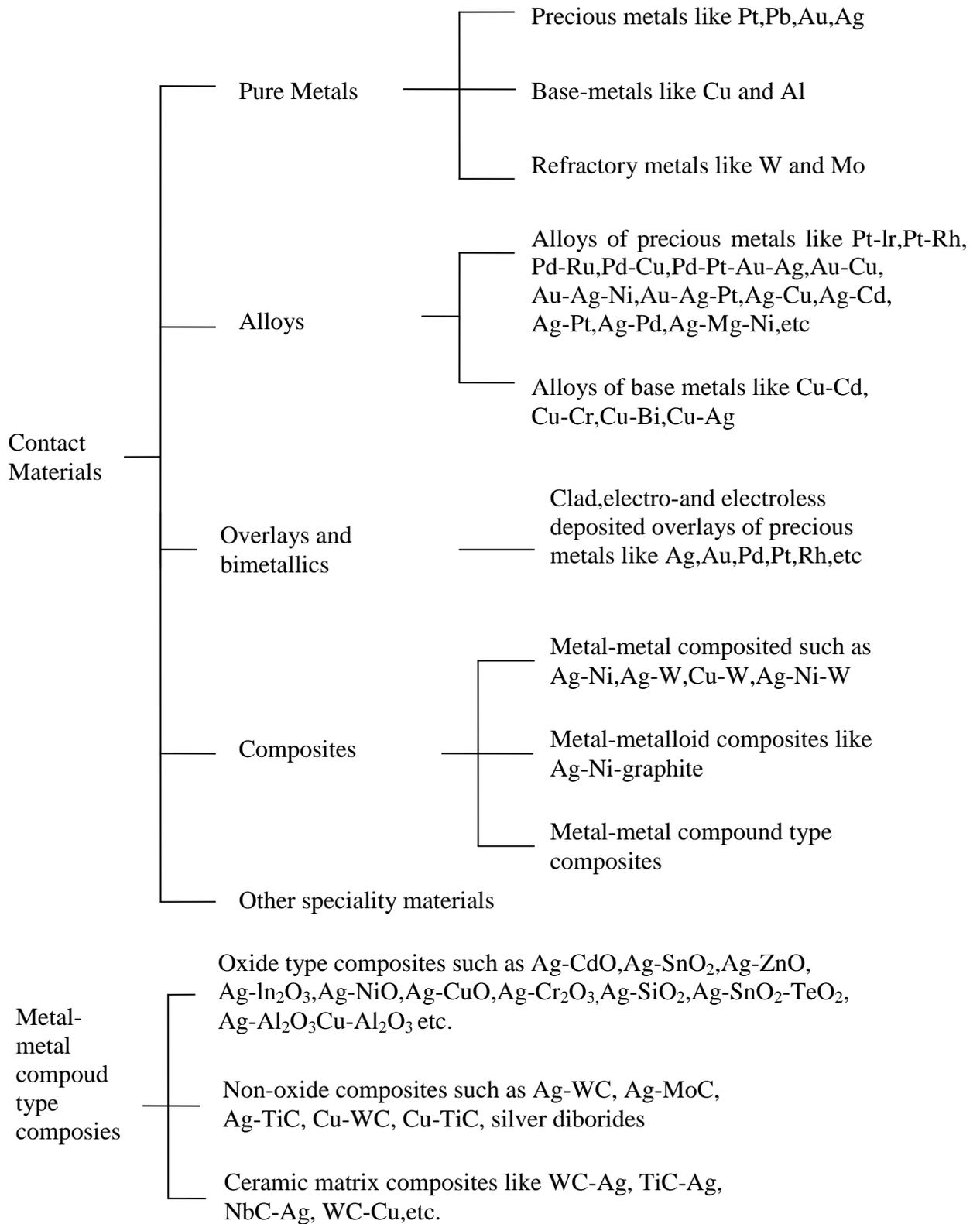
### 2.2.2 การแบ่งตามส่วนผสมของโลหะหลัก

วัสดุหน้าสัมผัสที่สามารถใช้กับงานที่มีลักษณะ Make and Break สามารถใช้วัสดุหลากหลายชนิด ทั้งโลหะบริสุทธิ์และโลหะผสม ตัวอย่างของวัสดุที่ใช้งานแสดงในรูปที่ 2.1 ซึ่งเป็นภาพรวมของชนิดวัสดุที่สามารถใช้งานได้ในแต่ละกลุ่ม

#### - โลหะมีค่าบริสุทธิ์และโลหะมีค่าผสม (Precious Metal and Their Alloy)

โลหะมีค่าถูกนำไปใช้งานไมโครอิเล็กทรอนิกส์ งานโทรคมนาคม เป็นส่วนใหญ่ เนื่องจากโลหะกลุ่มนี้มีค่าความต้านทานการกัดกร่อนจากสารเคมีสูง และมีความต้านทานต่อการอาร์ค (Arc Erosion Resistance)

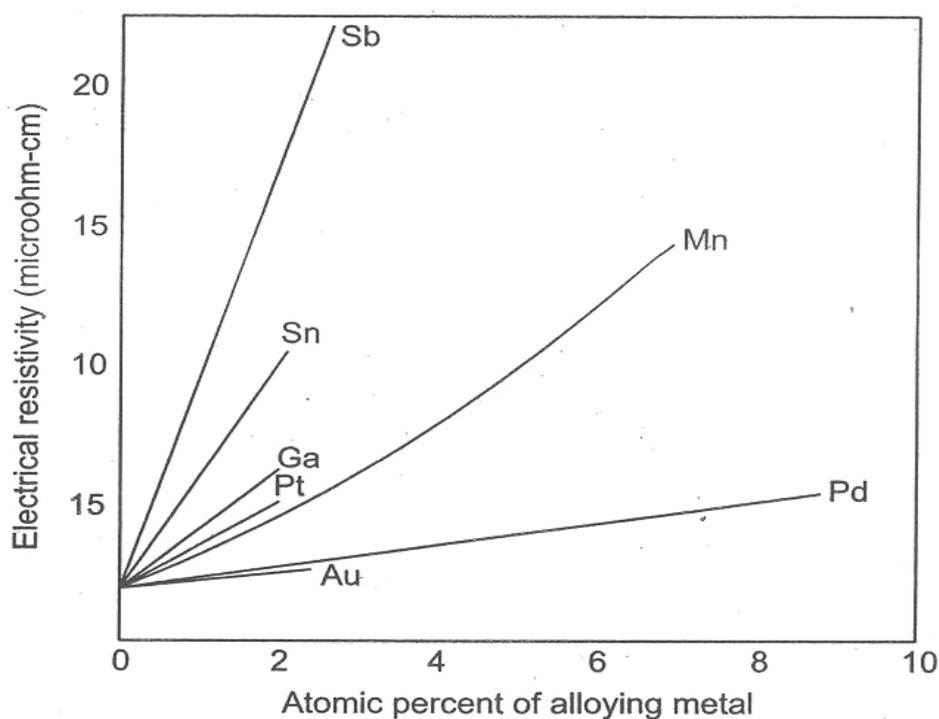
โลหะแพลตตินัมและพัลลาเดียม เป็นโลหะที่นิยมนำมาใช้งานเนื่องจากเป็นโลหะที่มีจุดหลอมเหลวสูง ความดันไอต่ำ ต้านทานการหมองและทนการถูกอาร์คได้ดี อย่างไรก็ตามเมื่อเทียบค่าการนำความร้อนและค่าการนำไฟฟ้า มีค่าต่ำกว่าโลหะเงินมาก ดังนั้นการนำไปใช้งานจึงมีขีดจำกัด สามารถใช้ได้กับงานที่มีกระแสไฟฟ้าต่ำกว่า 1 แอมแปร์ โลหะพัลลาเดียมบริสุทธิ์ร้อยละ 99.9 มีความต้านทานการเกิดออกซิเดชันได้เป็นอันดับสอง รองจากแพลตตินัม ราคาถูกกว่าแพลตตินัม 4 เท่า สามารถเพิ่มความแข็งแรงได้ โดยการเติมธาตุต่างๆ พวก รูทีเนียม, เงิน หรือทองแดง โลหะผสม Pd-Ru นิยมใช้ทำรีเวต (Rivet) เนื่องจากขึ้นรูปได้ยาก ส่วนโลหะผสม Pd-40Ag เป็นที่นิยมใช้เนื่องจากไม่เกิดปัญหาของการทำปฏิกิริยากับซัลเฟอร์ (Sulphidation)



รูปที่ 2.1 การแบ่งชนิดของวัสดุที่นำมาใช้ทำหน้าที่สัมผัสตามลักษณะส่วนผสมองค์ประกอบ [2]

โลหะทองสามารถนำมาใช้ทำหน้าที่สัมผัสไฟฟ้าได้เนื่องซึ่งงานสามารถทนการเกิดออกซิเดชันและซัลไฟเดชันได้ดี แต่มีข้อเสียคือ จุดหลอมเหลวต่ำ ความแข็งต่ำมีค่าประมาณ 65 วิกเกอร์ อาจเติมธาตุผสมของเงินและนิกเกิล ช่วยเพิ่มความแข็งแรงได้ ทำการบ่มแข็งได้

โลหะเงินบริสุทธิ์มีค่าการนำไฟฟ้าสูงสุด สามารถใช้งานที่มีกระแสไฟฟ้าสูงไม่เกิน 30 แอมแปร์ โลหะเงินผสมสามารถใช้งานที่มีกระแสไฟฟ้าสูงขึ้นถึง 600 แอมแปร์ โลหะเงินออกไซด์มีความต้านทานการสึกหรอสูง แต่ออกไซด์ของเงินไม่เสถียรภาพเกิดการสลายตัวได้ง่ายเมื่อให้อุณหภูมิช่วง 175 ถึง 350 องศาเซลเซียส ขีดจำกัดการใช้งานของโลหะเงินคือการเกิดปฏิกิริยากับซัลเฟอร์หรือซัลไฟต์ในบรรยากาศที่มีความชื้น ทำให้เกิดฟิล์มที่มีความต้านทานการนำไฟฟ้า การเพิ่มความแข็งทำได้โดยการเติมธาตุผสม เช่น แพลตตินัม พัลลาเดียม ทอง ทองแดง และแคดเมียม การเติมทองแดงช่วยเพิ่มความแข็งได้แต่การนำไฟฟ้าลดลง การเติมแคดเมียมช่วยเพิ่มความสามารถในการชุบแข็งได้ แต่แคดเมียมเป็นพิษจึงไม่นิยมใช้ อิทธิพลของธาตุผสมที่มีผลต่อความต้านทานไฟฟ้า แสดงในรูปที่ 2.2



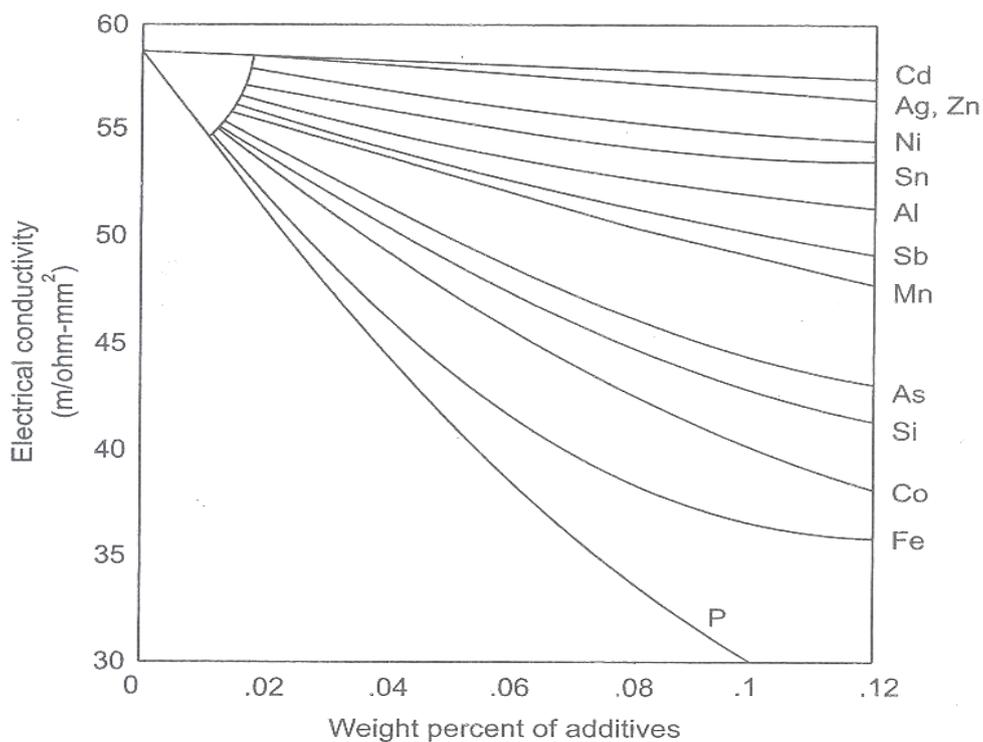
รูปที่ 2.2 อิทธิพลของธาตุผสมที่มีต่อความต้านทานกระแสไฟฟ้าต่อโลหะเงิน [2]

#### - โลหะและโลหะผสม (Base-Metals and Their Alloys)

โลหะที่นิยมใช้ในกลุ่มนี้ คือ ทองแดง และอะลูมิเนียม ทองแดงมีความแข็งต่ำ เหนียว ขึ้นรูปได้ดี นำความร้อน นำไฟฟ้าได้ดีเป็นอันดับสองรองจากโลหะเงิน มีค่า 100 %IACS ทองแดงบริสุทธิ์มีหลายเกรด เกรดที่เรียก ETP (Electrolytic Tough Pitch) มีออกซิเจนเจือปนอยู่ด้วย ทำให้

การนำไฟฟ้ามีค่าลดลง ถ้าใช้งานที่อุณหภูมิสูงมากกว่า 370 องศาเซลเซียส ในบรรยากาศที่มีก๊าซไฮโดรเจน มักทำให้เกิดการแตกหักภายในได้ (Internal Cracking) ทองแดงบริสุทธิ์เกรด Deoxidized Copper เหมาะสำหรับงานเชื่อม งานบัดกรี ทองแดงเกรด OFHC (Oxygen-Free High-Conductivity copper) ไม่มีออกซิเจนเจือปน เหมาะสำหรับใช้งานด้านไฟฟ้า

ในบรรยากาศปกติ ทองแดงมีความต้านทานการกัดกร่อนได้ดี เนื่องจากมีการเกิดฟิล์มของคิวปริสออกไซด์ (Cuprous Oxide film) ช่วยป้องกันไม่ให้เกิดออกซิเดชันกับเนื้อโลหะเพิ่มขึ้น เมื่อให้อุณหภูมิสูงขึ้นฟิล์มนี้สลายตัวได้ในอากาศ เกิดเป็นฟิล์มคิวปริกอออกไซด์ (Cupric Oxide film) การเพิ่มสมบัติทางกลของทองแดง ทำได้โดยการแปรรูปเย็น หรือการเติมธาตุผสม ธาตุผสมที่นิยมเติมเป็น โลหะเงิน เบอริเลียม แคลเมียม โครเมียม และเซอร์โคเนียม การแปรรูปเย็นและการเติมธาตุผสม ช่วยเพิ่มความแข็งแรงได้แต่ความสามารถในการนำไฟฟ้าลดลง รูปที่ 2.3 แสดงปริมาณของธาตุผสมที่มีผลต่อค่าการนำไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไป จากรูปจะเห็นได้ว่าการเติมโลหะแคลเมียม เงิน สังกะสี เข้าไปในทองแดงทำให้ค่าการนำไฟฟ้าลดลงเล็กน้อยต่างจากการเติมโคบอลต์ เหล็ก ที่ทำให้ค่าการนำไฟฟ้าลดลงอย่างมาก โลหะทองแดงผสมนิยมใช้ทำปลั๊ก, Sockets, Connector และ Sliding Contact โลหะทองแดงผสมที่มีใช้ทางการค้า เป็นพวกทองเหลือง ฟอสฟอรัสบรอนซ์ นิกเกิลซิลเวอร์ อย่างไรก็ตามโลหะทองแดงผสมมีข้อเสีย คือมีความต้านทานการอาร์คและการเชื่อมติดกันไม่ดี จึงนิยมทำเป็นวัสดุผสมระหว่างทองแดงกับทั้งสแตน หรือใช้ทองแดงผสมกราไฟต์



รูปที่ 2.3 ปริมาณธาตุผสมที่มีผลต่อค่าการนำไฟฟ้าของทองแดง [2]

โลหะอะลูมิเนียมบริสุทธิ์มีความสามารถในการขึ้นรูปได้ง่าย น้ำหนักเบา มีค่าการนำไฟฟ้าเป็นอันดับสี่รองจากทอง มีค่าการนำไฟฟ้า 61 %IACS และราคาถูก จึงถูกนำมาใช้ทำวัสดุหน้าสัมผัสไฟฟ้า โลหะอะลูมิเนียมมีสมบัติในการผลิตเป็นวัสดุหน้าสัมผัสไฟฟ้าไม่ดีเท่าโลหะที่ใช้ผลิตหน้าสัมผัสไฟฟ้ากลุ่มทองแดง โลหะอะลูมิเนียมเหมาะสำหรับทำหน้าสัมผัสไฟฟ้าที่ต้องการความสามารถในการขึ้นรูปได้ดี ต้องการน้ำหนักเบา เนื่องจากอะลูมิเนียมมีน้ำหนักเบา มีราคาถูกหาซื้อได้ง่าย สำหรับอะลูมิเนียมเกรดที่ใช้ในการนำไฟฟ้าเป็นเกรด EC มีค่าการนำไฟฟ้าประมาณ 61 %IACS ข้อเสียของหน้าสัมผัสไฟฟ้าที่ทำจากอะลูมิเนียม คือ ความสามารถในการต้านการเกิดออกซิเดชันต่ำ ดังนั้นในการใช้งานที่มีลักษณะการเชื่อมต่อของหน้าสัมผัสไฟฟ้า จึงควรนำไปทำเป็นแผ่นหรือรีดติดกันกับทองแดงหรือเงิน

#### - โลหะทนความร้อน (Refractory Metal)

โลหะกลุ่มนี้ใช้ทั้งสแตนเป็นส่วนใหญ่จนกระทั่งมานานแล้ว เนื่องจากมีจุดหลอมเหลวสูงถึง 3110 องศาเซลเซียส ความแข็งแรงสูง มีความต้านทาน Erosion ดี ป้องกันการเชื่อมติดกันได้ดี แต่มีน้ำหนักมาก และทนการกัดกร่อนไม่ดี การเกิดฟิล์มออกไซด์ของทั้งสแตน เป็นฟิล์มที่มีเสถียรภาพสูง มักเกิดที่ผิวของชิ้นงาน มีความแข็งแรงสูง ทำให้เพิ่มความต้านทานไฟฟ้าสูงขึ้น การใช้งานของทั้งสแตนบริสุทธิ์เหมาะสำหรับงานที่เป็น High Voltage Circuit Breaker

นอกจากนี้ยังมีโลหะโมลิบดีนัม ที่ใช้สำหรับทำ High Voltage Switchgear โมลิบดีนัมมีจุดหลอมเหลว 2,623 องศาเซลเซียส บ่อยครั้งที่มีการนำโมลิบดีนัมไปใช้ผสมกับทั้งสแตนเพื่อช่วยให้เกรนเล็กลง บางครั้งนำไปใช้งานแทนทั้งสแตนเมื่อต้องการน้ำหนักเบา ราคาถูกลง โลหะทนไฟบริสุทธิ์เหมาะสำหรับใช้ทำหน้าสัมผัสที่รับกระแสต่ำ

#### - Conductive Overlays

วัสดุกลุ่มนี้ถูกพัฒนาขึ้นมา เพื่อต้องการปรับปรุงสมบัติตามต้องการใช้งาน เป็นการนำโลหะ 2 ถึง 3 ชนิด มาขึ้นรูปเป็นแผ่นติดกัน กระบวนการขึ้นรูปทำโดยการรีด (Roll-Cladding Process) เป็นการรีดเย็นหรือรีดร้อนในบรรยากาศที่ควบคุม หรืออาจได้จากการชุบเคลือบผิวแบบใช้และไม่ใช้ไฟฟ้า การยึดเกาะของโลหะต่างชนิดกัน เกิดจากการแพร่ของอะตอมที่อยู่ระหว่างชั้นการทำ Overlay อาจทำที่ผิวด้านเดียวหรือที่ผิวทั้งสองด้านก็ได้ ขึ้นกับการใช้งาน โลหะที่นิยมใช้เป็นผิวหน้า ได้แก่ โลหะทองบริสุทธิ์ โลหะเงินกับทองคำ โลหะผสมเงิน-ทอง-แพลทตินัม โลหะที่นิยมใช้เป็นโลหะพื้น ได้แก่ นิกเกิล ทองแดงบริสุทธิ์หรือ ทองแดงผสม เหล็กกล้าสแตนเลส

วัสดุหน้าสัมผัสที่เป็นวัสดุคอมโพสิตหลายชั้น สามารถผลิตได้โดยใช้กระบวนการเคลือบผิวด้วยไฟฟ้าหรือเคลือบโดยไม่ใช้ไฟฟ้า ในการชุบเคลือบชิ้นงานต่อกับขั้วแคโทด โลหะที่จะไปเคลือบทำเป็นขั้วแอโนด โดยปกติทองแดง ทองเหลือง บรอนซ์ เงินนิกเกิล เบอริลเลียม บรอนซ์ ใช้ทำแคโทด ซึ่งเคลือบผิวด้วยทอง เงิน โรเดียม พัลลาเดียม ใช้เป็นขั้วแอโนดในการชุบเคลือบด้วยไฟฟ้า ตารางที่ 2.1 แสดงสมบัติของโลหะกลุ่มนี้

ตารางที่ 2.1 สมบัติของโลหะ [2]

โลหะ	ความหนาแน่น (กรัม/ลูกบาศก์ มิลลิเมตร)	จุดหลอมเหลว (องศาเซลเซียส)	ค่าการนำไฟฟ้า (%IACS)	ความแข็ง(HV)
Pt	21.45	1,769	15	40
Pd	12.00	1,552	16	45
Rh	12.40	1,963	40	130
Ir	22.50	2,443	33	220
Ru	12.20	2,310	26	-

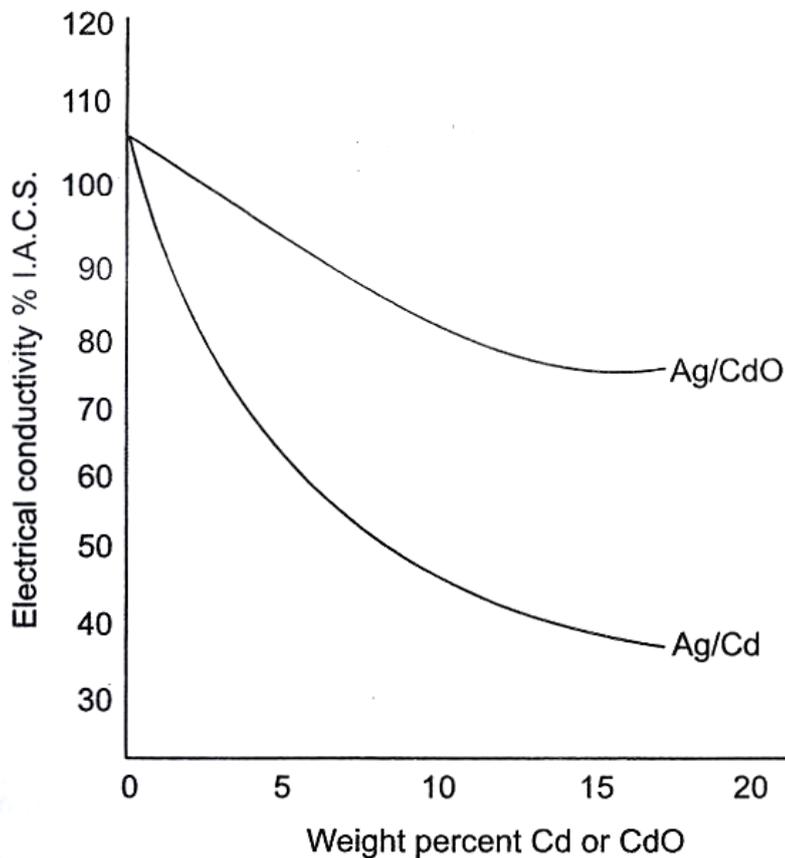
#### - หน้าสัมผัสไฟฟ้าคอมโพสิต (Composite Contacts)

วัสดุกลุ่มคอมโพสิต เป็นการผสมของโลหะที่มีจุดหลอมเหลวสูง มีความแข็งสูง ทนการสึกหรอดี แต่มีการนำไฟฟ้าไม่ดี ทนการเกิดออกซิเดชันไม่ดี ได้แก่ ทังสเตน และโมลิบดีนัม ผสมกับโลหะที่นำไฟฟ้าดี ได้แก่ เงิน ทองแดง ซึ่งมีปัญหาเรื่องความแข็ง และทนการสึกหรอไม่ดี วัสดุหน้าสัมผัสไฟฟ้าที่เป็นคอมโพสิตโดยทั่วไปมี 3 กลุ่ม ขึ้นกับประเภทของโลหะที่นำมาผสมกันอาจเป็น กลุ่มโลหะผสมกับโลหะ กลุ่มโลหะผสมกับอโลหะ และ กลุ่มโลหะผสมสารประกอบโลหะ

วัสดุคอมโพสิตกลุ่มโลหะผสมโลหะที่สำคัญ เช่น Ag-W, Ag-Mo, Ag-Ni, Cu-W, Cu-Mo, W-Ag, Cu-Ag เป็นต้น สำหรับคอมโพสิตที่เป็นโลหะที่มีเงินเป็นโลหะหลัก และมีอนุภาคขนาดเล็กของเฟสที่สอง (Secondary Phase) กระจายในเนื้อพื้นโครงสร้าง ช่วยเพิ่มความแข็งด้วยกลไก (Dispersion Hardening) เพิ่มความต้านทานการเชื่อมติด เนื่องจากระหว่างการใช้งานในสภาวะ Make and Break เฟสที่สองเกิดขึ้นจากการเกิดออกซิเดชันการอาร์คของหน้าสัมผัส โลหะเงินผสมนิกเกิล สามารถนำไปใช้งานได้ทั้งประเภท Make and Break Contacts และงาน Sliding Contact ขึ้นกับปริมาณนิกเกิลส่วนผสมที่มีนิกเกิลสูง เหมาะกับงาน Sliding Contacts ส่วนผสมที่มีนิกเกิลต่ำเหมาะกับการใช้งานที่เป็น Arcing Contact

โลหะเงินผสมเหล็ก (Ag-Fe) ร้อยละ 10-40 เหมาะสำหรับงานที่ต้องการความแข็งแรงทางกลทนต่อการ sticking และ pitting แต่มีข้อเสียคือทนการผุกร่อนไม่ดี นอกจากนี้ยังมีโลหะผสมของ Ag-Cu, Ag-W, Ag-Mo

โลหะเงินผสมโลหะออกไซด์ มีการนำไปใช้งานในระดับกระแสไฟฟ้าไม่เกิน 5000 แอมแปร์ ดังนั้นจึงเหมาะกับหน้าสัมผัสไฟฟ้าระดับแรงดันต่ำถึงปานกลาง โดยโลหะออกไซด์ส่งผลให้การนำไฟฟ้าดีกว่าโลหะเงินผสมดังรูปที่ 2.4 ขณะเดียวกันความแข็ง ความต้านทานการสึกหรอ ความต้านทานการอาร์ค มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ทำให้โลหะชนิดนี้เป็นที่นิยม โดยโลหะออกไซด์ที่นิยมใช้คือโลหะเงินผสมแคดเมียมออกไซด์ แต่ในปัจจุบันมีการคำนึงถึงผลทางสิ่งแวดล้อมมากขึ้น จึงมีการหาโลหะออกไซด์มาทดแทน เช่น ดีบุกออกไซด์ สังกะสีออกไซด์ อินเดียมออกไซด์ เป็นต้น



รูปที่ 2.4 การนำไฟฟ้าของโลหะเงินผสมและโลหะเงินผสมออกไซด์[2]

การพัฒนาวัสดุหน้าสัมผัสกลุ่มที่เป็นคอมโพสิต เพื่อให้ได้วัสดุประสงค์ตามที่ต้องการใช้งานทนกับกระแสไฟฟ้าที่สูงขึ้น และทนการอาร์คได้ดีขึ้น ทำให้มีวัสดุที่หลากหลายชนิดขึ้นที่สามารถใช้งานที่มีแรงเคลื่อนไฟฟ้าสูง

### 2.2.3 การแบ่งตามกำลังไฟฟ้า

วัสดุที่ใช้ทำหน้าที่สับผัสแบ่งออกตามกำลังไฟฟ้าได้ 4 ชนิด แบ่งตาม Current Rate

- **Very Light Duty Contact** ใช้กับงานที่เป็น Electromagnetic และ Voltage Relay Micro Switch และหน้าสัมผัสสำหรับงาน อิเล็กทรอนิกส์
- **Light Duty Contacts** วัสดุสามารถใช้ได้กับกระแสไม่เกิน 10 แอมแปร์ จำพวก Relay
- **Medium Duty Contacts** ใช้กับการทำงานช่วงที่มีกระแส 10-300 แอมแปร์ ใช้ในอุปกรณ์ สวิตช์แบบหมุน (Rotary Switches) สวิตช์แบบเลื่อน (Sliding Switches)
- **Heavy Duty Contacts** ใช้กับงานที่มีกระแสช่วง 300 แอมแปร์ ถึงหลายพันแอมแปร์ ใช้กับงานอุปกรณ์เบรกเกอร์ระบบน้ำมัน (Oil Circuit Breaker) เบรกเกอร์ระบบสุญญากาศ (Vacuum Circuit Breaker) เป็นต้น

## 2.3 กระบวนการผลิตโลหะหน้าสัมผัสไฟฟ้า

### 2.3.1 กระบวนการหล่อและขึ้นรูป (Casting and Forming)

กระบวนการหล่อและขึ้นรูปจัดเป็นกระบวนการที่นิยมนำมาใช้ผลิตหน้าสัมผัสไฟฟ้ามาตั้งแต่สมัยอดีต โดยกลุ่มโลหะที่นิยมได้แก่ โลหะบริสุทธิ์ และ โลหะผสม ขั้นตอนเบื้องต้นในการผลิตหน้าสัมผัสไฟฟ้าด้วยกระบวนการนี้ประกอบด้วย การหลอมด้วยเตาไฟฟ้าซึ่งบางครั้งอาจมีการเติมฟลักซ์เพื่อป้องกันการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันระหว่างการหลอม หรือ อาจใช้การป้อนแก๊สอาร์กอนเพื่อควบคุมบรรยากาศ การหล่อลงในแบบหล่อแกรไฟต์ หรือ แบบหล่อเหล็กเพื่อให้ได้แท่งโลหะ การขึ้นรูปด้วยกระบวนการรีด หรือ ดึงขึ้นรูป ทั้งแบบการขึ้นรูปร้อนหรือเย็น กรณีงานแผ่นนำไปป้อนขึ้นรูปเป็นแผ่นหน้าสัมผัสไฟฟ้า ส่วนกรณีเส้นลวดนำไปทำหน้าสัมผัสไฟฟ้าแบบรีเวท เป็นต้น

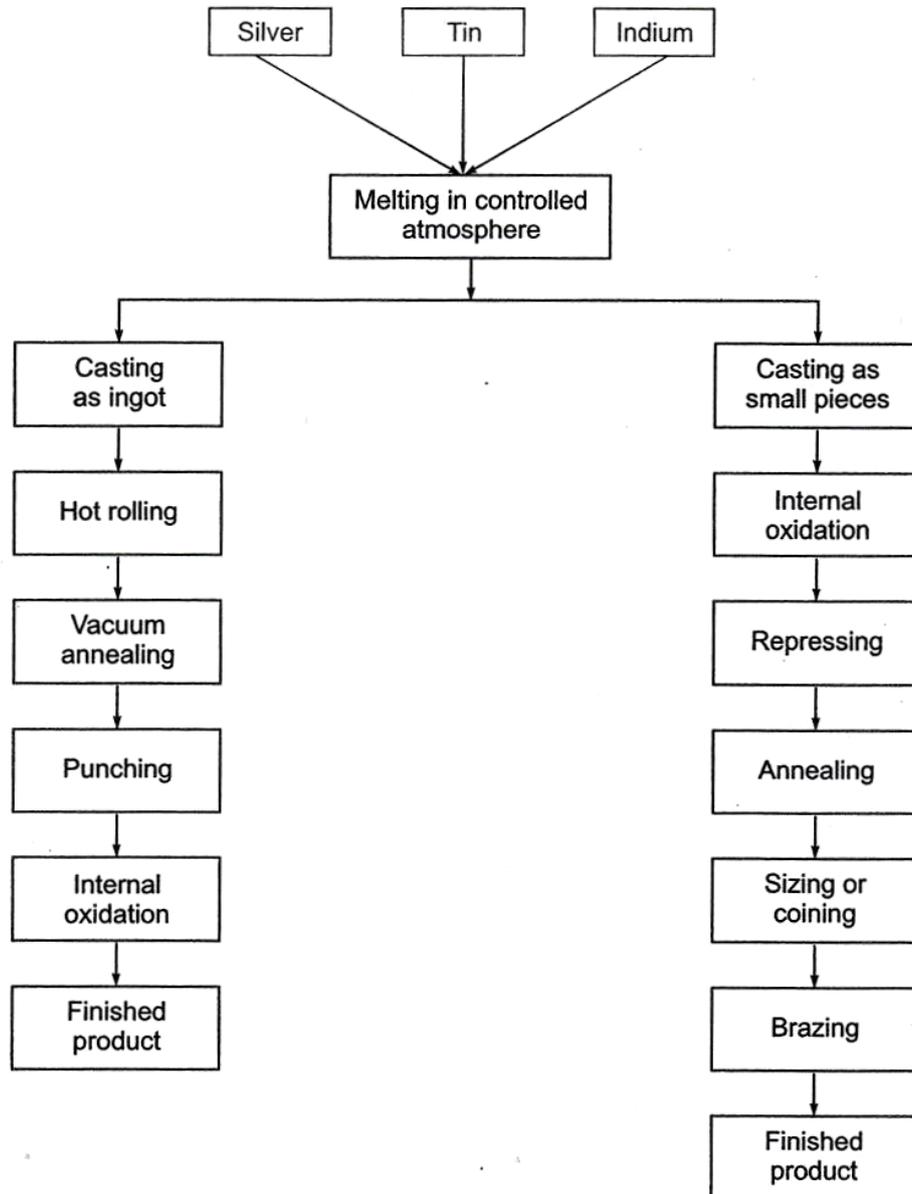
ตัวอย่างการหลอมหน้าสัมผัสไฟฟ้า Cu-Be ด้วยเตาหลอมไฟฟ้า ที่อุณหภูมิ 1100 องศาเซลเซียส จากนั้นทำการหล่อให้ได้ชิ้นงานอีกทอด จากนั้นทำการรีดขึ้นรูปร้อน และ ทำการอบแข็ง โดยทำกระบวนการอบละลาย (Solution Annealing) ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส แล้วปล่อยให้เย็นตัวอย่างรวดเร็ว จากนั้นทำกระบวนการบ่มแข็ง (Aging) ที่ช่วงอุณหภูมิ 275-320 องศาเซลเซียส ประมาณ 1 ชั่วโมงแล้วปล่อยให้เย็นตัวอย่างช้าๆ ชิ้นงานที่ได้จากกระบวนการหล่อจะให้โครงสร้างจุลภาคที่สม่ำเสมอส่งผลให้สมบัติต่างๆของวัสดุสม่ำเสมอเช่นเดียวกัน

### 2.3.2 กระบวนการออกซิเดชันภายใน

กระบวนการออกซิเดชันภายใน (Internal Oxidation Process) เป็นกระบวนการผลิตหน้าสัมผัสไฟฟ้ากลุ่มคอมโพสิต โดยกระบวนการผลิตมีลักษณะคล้ายกับกระบวนการหลอมและหล่อ แต่เพิ่มกระบวนการออกซิเดชันภายใน ซึ่งสามารถทำก่อนหรือหลังขึ้นรูปชิ้นงานดังแสดงในรูปที่ 2.5 โดยกระบวนการออกซิเดชันจะทำที่อุณหภูมิสูงแต่ไม่เกินอุณหภูมิหลอมเหลว และมีการ

ป้อนก๊าซออกซิเจนเข้าสู่ระบบเพื่อเร่งให้เกิดออกซิเดชันแพร่ซึมเข้าไปในเนื้อโลหะ ปรากฏการณ์การเกิดกระบวนการออกซิเดชันภายในของโลหะผสม 2 ชนิดประกอบด้วย

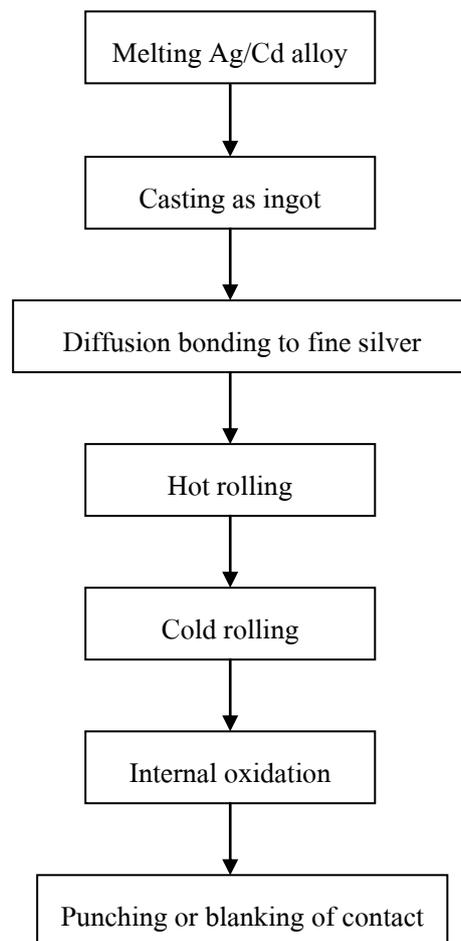
- เมื่ออะตอมออกซิเจนมีการถูกละลายได้ในเนื้อโลหะสูง
- อัตราการแพร่ของออกซิเจนในเนื้อโลหะเร็วกว่าโลหะอัลลอยด์
- พลังงานอิสระของการก่อตัวของออกไซด์ของโลหะอัลลอยด์มีความสำคัญมากกว่าเนื้อโลหะ



รูปที่ 2.5 กระบวนการผลิตโลหะหน้าสัมผัสไฟฟ้าแบบกระบวนการออกซิเดชันภายใน [2]

กระบวนการออกซิเดชันมีหลายวิธี ได้แก่กระบวนการ Post Oxidation, One Sided Oxidation และ Pre Oxidation

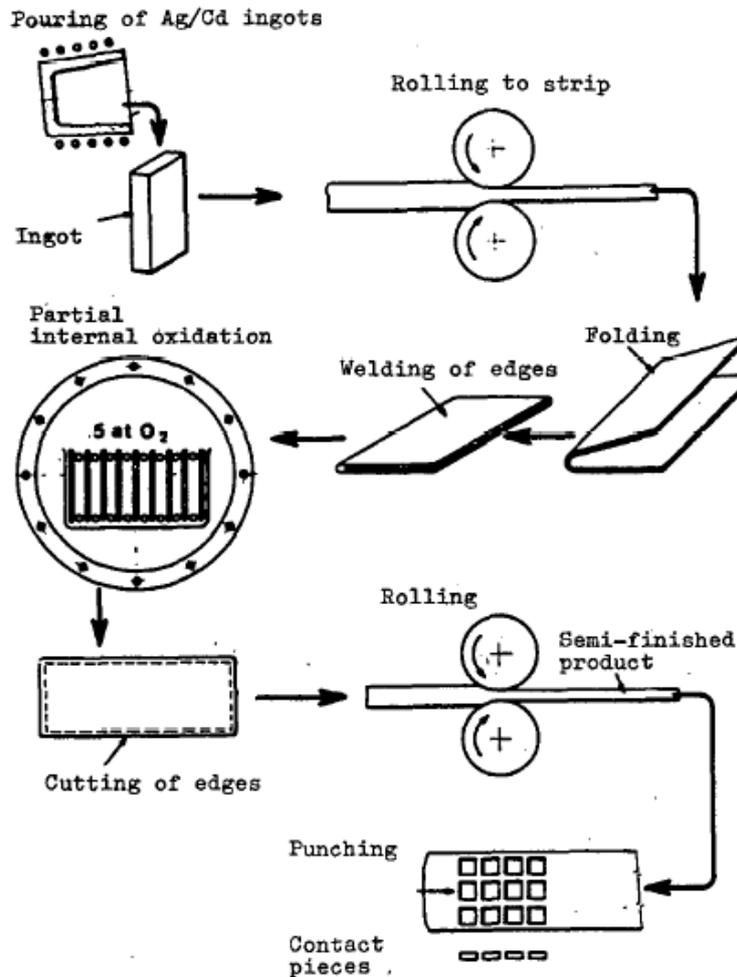
- **กระบวนการ Post Oxidation** แสดงดังรูปที่ 2.6 ประกอบด้วยกระบวนการหลอม และหล่อเป็นอินกอต จากนั้นทำการสร้างพันธะกับโลหะเงินบริสุทธิ์ที่ด้านหลังของอินกอตโดยมีความหนาประมาณร้อยละ 20 ของความหนาอินกอต จากนั้นทำการรีดขึ้นรูปร้อน และตามด้วยรีดขึ้นรูปเย็น แล้วทำกระบวนการออกซิเดชันที่สภาวะบรรยากาศออกซิเจน ที่อุณหภูมิสูง เป็นระยะเวลาหนึ่ง จากนั้นทำการกำจัดโลหะเงินบริสุทธิ์ด้วยการขัด หรือ การกลึง กัด ไส แล้วนำไปป้อนขึ้นรูปหน้าสัมผัสไฟฟ้าต่อไป



รูปที่ 2.6 การผลิตหน้าสัมผัสไฟฟ้าด้วยกระบวนการ Post Oxidation [2]

- **กระบวนการ One Sided Oxidation** โลหะผสมหลังจากผ่านการหล่อ การหลอม และการรีดขึ้นรูปทั้งแบบร้อนและแบบเย็น ขึ้นตอนต่อไปทำการม้วนหรือพับพร้อมทั้งเชื่อมขอบก่อนนำไปทำกระบวนการออกซิเดชัน จากนั้นทำการตัดขอบเชื่อมแล้วนำแผ่นชิ้นงานที่ได้ไปป้อนขึ้นรูปต่อไป ดังแสดงในรูปที่ 2.7

- กระบวนการ **Pre Oxidation** เป็นกระบวนการที่มีการเปลี่ยนแปลงจากกระบวนการออกซิเดชันทั่วไปคือ มีการทำโลหะผสมให้มีขนาดเล็กมีลักษณะเป็น flakes, slug, shot shots หรือ shredded foil จากนั้นนำเศษโลหะไปทำกระบวนการออกซิเดชัน แล้วจึงนำมาอัดขึ้นรูปเป็นเส้นลวดหรือแผ่นโลหะต่อไป



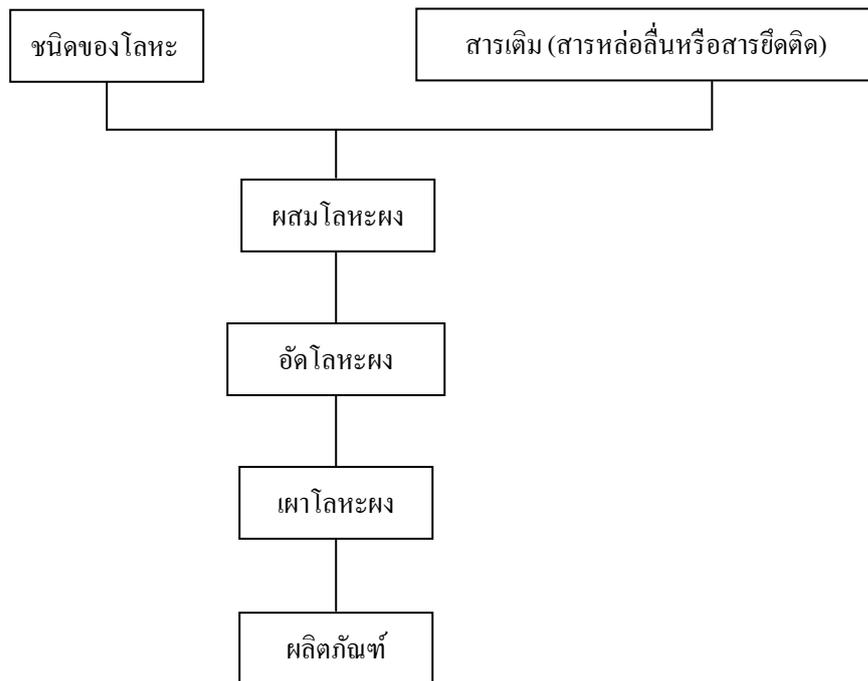
รูปที่ 2.7 การผลิตหน้าสัมผัสไฟฟ้าด้วยกระบวนการ One Sided Oxidation [2]

### 2.3.3 กระบวนการโลหะผง (Powder Metallurgy)

กระบวนการโลหะผง เป็นกระบวนการที่ใช้ผลิตโลหะหน้าสัมผัสไฟฟ้ากลุ่มคอมโพสิตที่มีธาตุผสมกลุ่มโลหะทนไฟ โลหะคาร์ไบด์ หรือโลหะออกไซด์บางชนิดประกอบอยู่ เนื่องจากธาตุผสมเหล่านี้มีอุณหภูมิหลอมเหลวสูงไม่สามารถผลิตโดยใช้กระบวนการหลอมและหล่อแบบทั่วไปได้ นอกจากนั้นการรวมตัวของโลหะกลุ่มนี้กับโลหะเนื้อพื้นเป็นไปได้ยากเมื่อใช้กระบวนการหลอมแบบทั่วไป เช่น การหลอมโลหะเงินกับทังสเตน เป็นต้น กระบวนการโลหะผงมีเทคโนโลยีการผลิตที่ซับซ้อน และต้นทุนการผลิตสูง เมื่อเปรียบเทียบกับ 2 กระบวนการที่ผ่านมา

การผลิตหน้าสัมผัสไฟฟ้าด้วยกระบวนการโลหะผงเริ่มจากนำผงโลหะใส่ลงในแบบที่เตรียมไว้ (Die) แล้วอัดโลหะผงด้วยความดันสูง จนทำให้โลหะผงอัดตัวกันแน่นเป็นรูปร่างตามที่ต้องการ ในขั้นตอนนี้โลหะผงที่เป็นรูปร่างจะยังไม่มี ความแข็งแรงมากนัก จึงต้องนำไปเผาที่อุณหภูมิสูง แต่ต่ำกว่าจุดหลอมเหลวของโลหะเล็กน้อย เพื่อให้อะตอมของโลหะมีการเคลื่อนไหวเชื่อมโยงกันระหว่างจุดสัมผัสของเม็ดผงโลหะ อันเป็นผลมาจากการแพร่ของอะตอมในสภาพของแข็ง (Diffusion Solid State) ทำให้โลหะเมื่อผ่านการเผา มีความแข็งแรงมากขึ้น กรรมวิธีการผลิตแสดงดังรูปที่ 2.8 จากนั้นนำโลหะนั้นไปผ่านกระบวนการบ่มขึ้นรูป อัดขึ้นรูปเพื่อให้ได้ชิ้นส่วนหน้าสัมผัสไฟฟ้า ขั้นตอนกระบวนการโลหะผงสามารถสรุปได้เป็น 4 ขั้นตอน คือ

1. ขั้นตอนผลิตโลหะผง (Powder Manufacture)
2. ขั้นตอนผสมผงโลหะให้เข้ากัน (Mixing or Blending)
3. อัดโลหะผงในแบบตามรูปร่างที่ต้องการ (Compacting)
4. เผาโลหะผงที่อุณหภูมิต่ำกว่าจุดหลอมตัว (Sintering)



รูปที่ 2.8 การผลิตหน้าสัมผัสไฟฟ้าด้วยกระบวนการโลหะผง [5]

## 2.4 วัสดุสำหรับงานวิจัย

### 2.4.1 โลหะเงิน (Ag) [6]

โลหะเงินมีสีขาวแวววาว สามารถดึงเป็นเส้นและตีเป็นแผ่นบางๆ ได้ดี นอกจากนั้นยังสามารถทำเป็นผงโลหะเงินได้ โลหะชนิดนี้มีความสามารถในการนำไฟฟ้าและนำความร้อนได้ดีที่สุดในบรรดาโลหะทั้งหมด เงินสามารถดูดกลืนออกซิเจนได้ประมาณ 20 เท่า นอกจากนั้นโลหะเงินยังเป็นโลหะที่ค่อนข้างเฉื่อยต่อการทำปฏิกิริยาเคมี เช่น ไม่ละลายในกรด และ/หรือ ต่างเจือจาง การนำไปใช้ประโยชน์สามารถนำโลหะเงินไปใช้ทำขดลวดแลกเปลี่ยนความร้อน อุปกรณ์สำหรับใช้ทำปฏิกิริยาเคมี ใช้ทำหน้าที่สัมผัสไฟฟ้า อุปกรณ์ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ เครื่องประดับ เป็นต้น

#### สมบัติของโลหะเงิน [4]

ชื่อธาตุ	Silver
สัญลักษณ์ธาตุ	Ag
เลขอะตอม (Atomic Number)	47
โครงสร้างผลึก (Crystal Structure)	Face Centered Cubic (FCC)
น้ำหนักอะตอม (Atomic Weight)	107.87
ความหนาแน่น (Density)	10.49 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร
จุดหลอมเหลว (Melting Temperature)	961 องศาเซลเซียส
ความสามารถนำไฟฟ้า (Electrical Conductivity)	$63 \text{ (m}\Omega^{-1} \text{ mm}^{-2}\text{)}$
ความต้านทานไฟฟ้า (Electrical Resistance)	$1.59 \text{ (}\mu\Omega \text{ cm)}$

### 2.4.2 ดีบุกออกไซด์ (SnO<sub>2</sub>) [7]

ดีบุกออกไซด์เป็นสารประกอบระหว่างดีบุกกับออกซิเจน ชื่อตาม IUPAC เรียกว่า Tin dioxide ธรรมชาติอยู่ในกลุ่มของแร่ธาตุเรียกว่า Cassiterite ลักษณะทั่วไปของดีบุกออกไซด์เป็นผงสีขาว ดีบุกออกไซด์เกิดขึ้นตามธรรมชาติแต่สามารถทำให้บริสุทธิ์ได้ด้วยการเผาดีบุกในสภาวะอากาศแล้วเกิดการทำปฏิกิริยาระหว่างดีบุกและออกซิเจน ดีบุกออกไซด์ไม่ละลายในน้ำ แต่ละลายในกรด เช่น Halogen acid, Sulfuric acid เป็นต้น นอกจากนั้นยังสามารถละลายในเบสเข้มข้น เช่น Sodium Hydroxide ความแข็งของสินแร่ดีบุกออกไซด์มีค่าระหว่าง 1239-1467 HV หรือมีค่า 6-7 Mohs scale [8] กลุ่มงานที่นำดีบุกออกไซด์ไปใช้ประโยชน์ เช่น อุตสาหกรรมเซรามิกเป็นสารเคลือบเครื่องดินเผา เช่น เซอร์ซิงของ combustible gases เป็นต้น

### สมบัติทางกายภาพของดีบุกออกไซด์

ชื่อ	Tin dioxide
สัญลักษณ์	SnO <sub>2</sub>
โครงสร้างผลึก (Crystal Structure)	Rutile (Tetragonal)
ความหนาแน่น (Density)	6.95 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร
จุดหลอมเหลว (Melting Temperature)	1,630 องศาเซลเซียส
จุดเดือด (Boiling Point)	1,800-1,900 องศาเซลเซียส

### 2.4.2 สังกะสีออกไซด์ (ZnO) [9]

สังกะสีออกไซด์เป็นสารประกอบระหว่างสังกะสีกับออกซิเจน โดยทั่วไปเป็นผงสีขาว ไม่ละลายในน้ำและแอลกอฮอล์ ผงสังกะสีออกไซด์นิยมนำไปเป็นส่วนผสมของวัสดุต่างๆ เช่น พลาสติก ยาง เซอร์เมท แก้ว เซรามิก สารหล่อลื่น สี กาว แบตเตอรี่ และอาหาร เป็นต้น ในทางวิทยาศาสตร์ นิยมเรียกว่า II-VI Semiconductor ส่วนทางสินแร่เรียกว่า Zincite สังกะสีออกไซด์สามารถละลายในกรดได้เกือบทุกชนิด เช่น Hydrochloric acid นอกจากนั้นยังสามารถละลายได้ในเบสเช่น Sodium Hydroxide ความแข็งของสินแร่สังกะสีออกไซด์ มีค่า 205-221 HV หรือ 4.5 Mohs scale [8] มีความจุความร้อนจำเพาะและการนำความร้อนที่สูง การขยายตัวทางความร้อนต่ำ การนำไปใช้งานมีความหลากหลายประกอบด้วย กลุ่มอาหารและยา การผลิตยาง การผลิตคอนกรีต ตัวป้องกันการกัดกร่อน กลุ่มอิเล็กทรอนิกส์ เช่น เซ็นเซอร์ เป็นต้น

### สมบัติของสังกะสีออกไซด์

ชื่อ	Zinc oxide
สัญลักษณ์	ZnO
โครงสร้างผลึก (Crystal Structure)	hexagonal wurtzite, cubic zincblende และ cubic rocksalt
ความหนาแน่น (Density)	5.606 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร
จุดหลอมเหลว (Melting Temperature)	1,975 องศาเซลเซียส
จุดเดือด (Boiling Point)	2,360 องศาเซลเซียส

### 2.4.4 ทองแดงออกไซด์ (CuO) [10]

ทองแดงออกไซด์ มีชื่อเรียกอีกอย่างว่า Copper (II) oxide หรือ Cupric oxide ชื่อทางสินแร่เรียกว่า Tenorite มีลักษณะเป็นผงสีดำ ไม่สามารถละลายในน้ำแต่สามารถละลายได้ในตัวทำละลาย Ammonium Hydroxide และกรดต่างๆเช่น Hydrochloric acid, Sulfuric acid และ Nitric acid ความแข็ง

ของสินแร่ทองแดงออกไซด์มีค่า 190-300 HV หรือ 3.5 Mohs scale [8] ทองแดงออกไซด์ถูกนำไปใช้ใน งานสีของอุตสาหกรรมเซรามิก และ กลุ่มงาน Semiconductor นอกจากนั้นยังนำไปผลิตแบตเตอรี่ชนิดแห้ง และ ผลิตเป็นเกลือทองแดงสำหรับนำไปเชื่อมทองแดง

#### สมบัติของโลหะทองแดงออกไซด์

ชื่อ	Copper(II) oxide
สัญลักษณ์	CuO
โครงสร้างผลึก (Crystal Structure)	Monoclinic
ความหนาแน่น (Density)	6.31 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร
จุดหลอมเหลว (Melting Temperature)	1,201 องศาเซลเซียส
จุดเดือด (Boiling Point)	2,000 องศาเซลเซียส

## 2.5 การตรวจสอบการนำไฟฟ้า

โลหะเป็นตัวนำไฟฟ้าและความร้อนที่ดี เพราะมีอิเล็กตรอนอิสระจำนวนมากอยู่ในเนื้อโลหะ วัสดุที่มีสภาพนำ(Conductivity) ที่ดีนั้นเนื่องจากการใช้พลังงานเพียงเล็กน้อยในการกระตุ้นให้อิเล็กตรอนไม่ประจำที่ (Delocalized Electron) กระโดดข้ามช่องว่างพลังงาน (Energy Gap) เข้าไปอยู่ในแถบการนำ (Conduction Band) วัสดุที่เป็นฉนวนไฟฟ้าจะมีช่องว่างพลังงานที่กว้างมาก ส่วนวัสดุกึ่งตัวนำจะมีช่องว่างพลังงานที่แคบกว่า จึงมีอิเล็กตรอนจำนวนหนึ่งกระโดดข้ามช่องว่างพลังงานไปยังแถบการนำแสดงว่ามีการถ่ายเทประจุเกิดขึ้น ทำให้เกิดช่องว่างอิเล็กตรอน (Electron Hole) ไว้ในแถบระดับล่าง [5]

สภาพนำไฟฟ้า คือ การเคลื่อนที่ของประจุไฟฟ้า จากตำแหน่งหนึ่งไปยังอีกตำแหน่งหนึ่ง โดยมีตัวนำพาประจุ ได้แก่ ไอออน และอิเล็กตรอน ค่าการนำไฟฟ้าของโลหะแต่ละชนิดต่างๆ แสดงในตารางที่ 2.2

ตัวนำพาประจุลบ (Negative Charge Carriers) จะมีทั้งอิเล็กตรอนและแอนไอออน ในขณะที่ แคลทไอออน เช่น  $Pb^{2+}$  เป็นตัวนำพาประจุบวก (Positive Charge Carrier) นอกจากนี้ ยังมีตัวนำพาประจุบวกอีกแบบหนึ่งที่มีความสำคัญในวัสดุกึ่งตัวนำ คือ “ช่องว่างอิเล็กตรอน” อันเนื่องมาจากอิเล็กตรอนที่อยู่ในแถบพลังงาน (Energy Band) ได้หลุดออกไป ทำให้ช่องว่างเกิดขึ้น

การนำไฟฟ้าของไอออน คือ การนำไฟฟ้าที่มีไอออนบวกและไอออนลบเป็นตัวนำพาประจุ ส่วน Electronic Conductivity จะมีอิเล็กตรอนหรือช่องว่างอิเล็กตรอนเป็นตัวนำพาประจุ

สภาพนำไฟฟ้าของโลหะ (Metallic Conductivity) ปกติโลหะจะนำไฟฟ้าหรือความร้อนได้ดี เนื่องจากมีพันธะโลหะ ซึ่งอธิบายได้จากการที่วาเลนซ์อิเล็กตรอนของโลหะจะอยู่ในรูปของ

อิเล็กทรอนิกส์ไม่ประจำที่ หรืออิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งเคลื่อนที่ได้ตลอดทั้งโครงสร้างของโลหะ ในลักษณะที่เป็นคลื่น

ตารางที่ 2.2 ค่าการนำไฟฟ้าของโลหะชนิดต่างๆที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส [4]

ชนิดของโลหะ	การนำไฟฟ้า (Electrical Conductivity @20°C) ( $m\Omega^{-1} mm^{-2}$ )
Ag	6.3
Cu	5.8
Au	4.3
Al	3.4
W	1.8
Zn	1.7
Sn	8.7

จากตารางสามารถทราบค่าสภาพการนำไฟฟ้าของโลหะและอโลหะบางชนิด ซึ่งจะเห็นว่าโลหะเงินบริสุทธิ์สามารถนำไฟฟ้าได้ดีที่สุด สามารถคำนวณหาการนำไฟฟ้าได้โดยใช้สมการข้างล่างนี้

$$i = \frac{V}{R} \dots\dots\dots (2.1)$$

- เมื่อ  $i$  = กระแสไฟฟ้า, A (แอมแปร์)
- $V$  = ความต่างศักย์ทางไฟฟ้า, V (โวลต์)
- $R$  = ความต้านทานของขดลวด,  $\Omega$  (โอห์ม)

ความต้านทานทางไฟฟ้า  $R$  ของลวดตัวนำ จะเป็นปฏิภาคโดยตรงกับความยาวของลวดตัวนำ  $l$  และเป็นปฏิภาคส่วนกลับกับพื้นที่หน้าตัดของลวดตัวนำ  $A$  ดังสมการที่ 2.2

$$R = \frac{\rho l}{A} \text{ หรือ } \rho = \frac{RA}{l} \dots\dots\dots (2.2)$$

เมื่อ  $\rho$  คือ สภาพต้านทานไฟฟ้า หน่วยของค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของวัสดุที่อุณหภูมิใดๆ (โอห์ม-เมตร)

- $R$  คือ ความต้านทานของเส้นลวด (โอห์ม)
- $A$  คือ พื้นที่หน้าตัดของลวดตัวนำ (ตารางเมตร)
- $l$  คือ ความยาวของลวดตัวนำ (เมตร)

ส่วนค่าสภาพการนำไฟฟ้า (Electrical Conductivity) จะเป็นปฏิภาคส่วนกลับค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า ดังนี้

$$\sigma = \frac{1}{\rho} \quad \dots\dots\dots (2.3)$$

เมื่อ  $\sigma$  คือ สภาพการนำไฟฟ้า (โอห์ม-เมตร)<sup>-1</sup>

$\rho$  คือ สภาพต้านทานไฟฟ้า หน่วยของค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของวัสดุที่อุณหภูมิใดๆ (โอห์ม-เมตร)

### ความเร็วลอยเลื่อนของอิเล็กตรอนในโลหะตัวนำ

ที่อุณหภูมิห้องแกนไอออนบวก (Positive-ion Cores) ที่อยู่ในโครงสร้างผลึกของโลหะตัวนำจะเกิดการสั่น จึงมีค่าพลังงานจลน์ในตัวจำนวนหนึ่ง ส่วนอิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่อย่างอิสระชนแกนไอออนบวก ทำให้เกิดการแลกเปลี่ยนพลังงานกัน และเนื่องจากไม่มีสนามไฟฟ้าภายนอกใส่เข้าไป จึงทำให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่อย่างไม่เป็นระเบียบ ดังนั้น จึงไม่มีกระแสไหล

ถ้าความเข้มของสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ  $E$  ถูกใส่เข้าไปในตัวนำ อิเล็กตรอนจะถูกเร่งให้เคลื่อนที่ด้วยความเร็วค่าหนึ่งในทิศทางตรงข้ามกับสนามไฟฟ้าที่ใส่เข้าไป อิเล็กตรอนจะวิ่งชนแกนไอออน ในโครงสร้าง ทำให้ตัวมันสูญเสียพลังงานจลน์ หลังจากเกิดการชนอิเล็กตรอนจะมีความเป็นอิสระที่ถูกเร่งอีกครั้ง ซึ่งเป็นผลทำให้ความเร็วของอิเล็กตรอนเปลี่ยนแปลงตามเวลาในลักษณะคล้ายฟันเลื่อย (Sawtooth Manner)

สภาพการต้านไฟฟ้าของโลหะ (Electrical Resistivity of Metals) ค่าสภาพการต้านทานไฟฟ้าของโลหะนั้นสามารถประมาณค่าได้จากสมการ 2.4 โดยค่า

$$p_{\text{total}} = p_T + p_r \quad \dots\dots\dots (2.4)$$

$p_T$  เกิดจากสั่นของแกนไอออนบวก ในโครงสร้างผลึกของโลหะเนื่องจากอุณหภูมิ เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น จะทำให้แกนไอออนบวกสั่นมากขึ้น ซึ่งเป็นผลทำให้ขัดขวางการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน ทำให้โลหะมีสภาพการต้านทานมากขึ้น

ส่วน  $p_r$  เกิดจากความบกพร่องภายในโครงสร้างผลึกของโลหะ เช่น (ดิสโลเคชัน) ขอบเขตของเกรน (Grain Boundary) และสารเจือปนต่างๆ ซึ่งจะไปขัดขวางการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน ค่า  $p_r$  จะไม่ขึ้น กับอุณหภูมิ และโดดเด่นในสภาวะอุณหภูมิต่ำเท่านั้น

ที่อุณหภูมิสูงกว่า -200 องศาเซลเซียส ค่าสภาพการนำไฟฟ้าของโลหะส่วนใหญ่จะมีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิเป็นเส้นตรง ซึ่งสามารถหาได้จากสมการ 2.5

$$P_T = p_{0c}(1+\alpha_T T) \quad \dots\dots\dots (2.5)$$

เมื่อ  $p_{0c}$  = ค่าสภาพต้านทานทางไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียส  
 $\alpha_T$  = Temperature Resistivity Coefficients ( $^{\circ}\text{C}^{-1}$ ) ดังตารางที่ 2.3  
 $T$  = อุณหภูมิของโลหะ ( $^{\circ}\text{C}$ )

ตารางที่ 2.3 ค่า Temperature Resistivity Coefficients ของโลหะ [11]

โลหะ	Resistivity 0 $^{\circ}\text{C}$ (โอห์ม)	Temperature resistivity coefficients $\alpha_T$ ( $^{\circ}\text{C}^{-1}$ )
อะลูมิเนียม	$2.7 \times 10^{-8}$	0.0039
ทองแดง	$1.6 \times 10^{-8}$	0.0039
ทอง	$2.3 \times 10^{-8}$	0.0034
เหล็ก	$9.0 \times 10^{-8}$	0.0045
โลหะเงิน	$1.5 \times 10^{-8}$	0.0038

## 2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การทำโครงการวิจัยควรศึกษางานวิจัยอื่นที่เกี่ยวข้อง เพื่อเป็นแนวทางในการตรวจสอบผลและวิธีการดำเนินงานวิจัย จึงได้นำเสนองานวิจัยและเอกสารสิทธิบัตรที่เกี่ยวข้องดังนี้

P.B. Joshi และ คณะ [12] ทำการศึกษาการผลิตวัสดุหน้าสัมผัสไฟฟ้า Ag-10CdO Ag-12CdO Ag-15CdO Ag-7.1ZnO Ag-8.6ZnO และ Ag-10.8ZnO ด้วยกระบวนการโลหะผง และกระบวนการ Electroless Coating โดยกระบวนการโลหะผงเริ่มจากผสมผงโลหะเงินบริสุทธิ์กับผงโลหะออกไซด์ชนิดต่างๆด้วยกระบวนการผสมแบบเปียกจากนั้นทำการอัดที่ความดัน 400 เมกะปาสคาล ได้ชิ้นงานกรีน(Green)ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 มิลลิเมตร หนา 1.5 มิลลิเมตร แล้วนำไปซินเตอร์(Sintering) ที่อุณหภูมิ 930 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 นาทีในอากาศ โดย Heating rate เท่ากับ 6-7 องศาเซลเซียสต่อนาที ชิ้นงานถูกนำไปอัดอีกครั้งที่ความดัน 960 เมกะปาสคาล แล้วนำไปอบอ่อนที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 30 นาที ชิ้นงานที่ได้มีความหนาแน่น 97% ของความหนาแน่นตามทฤษฎี ค่าความแข็งของโลหะ Ag-ZnO มีค่าประมาณ 74 HV ส่วนโลหะ

Ag-CdO มีค่าความแข็งประมาณ 72 HV ค่าการนำไฟฟ้าของ Ag-CdO มีค่ามากกว่าค่าการนำไฟฟ้าของ Ag-ZnO ส่วนกระบวนการ Electroless Coating เป็นกระบวนการผลิตวัสดุหน้าสัมผัสไฟฟ้าที่ส่งผลดีต่อการกระจายตัวของโลหะออกไซด์ในเนื้อพื้นโลหะเงินทำให้เกิดการสึกกร่อนที่สม่ำเสมอ

H.Schreiner และ คณะ [13] ได้ศึกษาวิธีการซินเตอร์โลหะเงินผสมโลหะออกไซด์สำหรับวัสดุหน้าสัมผัสไฟฟ้า โดยนำผงที่ได้จากกระบวนการอะตอมไมเซชัน (Atomization Process) เช่น AgCd, AgSn, และ AgZn ซึ่งมีขนาดของผงระหว่าง 0.2-1 มิลลิเมตร ไปอบในสภาวะบรรยากาศแล้วนำไปอัดขึ้นรูป กระจกโลหะ AgCdO ถูกอัดที่ความดัน 4.5 ตันต่อตารางเซนติเมตร และทำซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 ชั่วโมง ส่วนโลหะ AgSnO<sub>2</sub> ถูกอัดที่ความดัน 8 ตันต่อตารางเซนติเมตร และทำซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 ชั่วโมง เช่นเดียวกับโลหะ AgZnO

P.B. Joshi และคณะ [14] ทำการศึกษากระบวนการผลิต Ag-ZnO จากผงโลหะที่ผลิตด้วยกระบวนการ Mechanochemical Synthesis หรือกระบวนการ Reactive Milling ซึ่งมีขนาดของผงในระดับนาโนเมตร ทำการอัดผงโลหะที่ความดัน 250 เมกะปาสคาล ได้ชิ้นงานกรีนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร หนา 2 มิลลิเมตร จากนั้นนำไปอบซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 930 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 60 นาที แล้วนำชิ้นงานที่ได้ไปทำการอัดที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส ความดัน 1250 เมกะปาสคาล ชิ้นงานที่ได้จากการอัดผงโลหะที่ผ่านกระบวนการ Mechanochemical Synthesis ให้ค่าความแข็งมากกว่าและค่าการนำไฟฟ้าสูงกว่าชิ้นงานที่ผลิตจากผงโลหะด้วยกระบวนการทั่วไป

A. Pandey และคณะ [15] ทำการเปรียบเทียบสมบัติของโลหะเงินผสมดีบุกออกไซด์ที่ได้จากกระบวนการผลิตโลหะผง กระบวนการออกซิเดชัน และกระบวนการออกซิเดชันผงโลหะ การผลิตโลหะผงทำได้ด้วยการนำผงโลหะเงินบริสุทธิ์และผงดีบุกออกไซด์ (SnO<sub>2</sub>) มาผสมกันด้วยเครื่อง Ball Mill เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นอัดขึ้นรูปที่ความดัน 618 เมกะปาสคาล แล้วนำไปซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นอัดขึ้นรูปที่ความดัน 1200 เมกะปาสคาลอีกครั้ง แล้วนำชิ้นงานไปอบอ่อนที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที การผลิตโลหะเงินผสมดีบุกออกไซด์ด้วยกระบวนการออกซิเดชันได้จากการนำโลหะเงิน ดีบุก และอินเดียม หลอมรวมกันแล้วนำไปรีดขึ้นรูปและบ่มแผ่นรีดให้ได้ขนาดชิ้นงานที่เหมาะสมแล้วจึงนำชิ้นงานไปอบเพื่อให้เกิดการออกซิเดชันที่อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 25 ชั่วโมง ที่ความดันออกซิเจน 6 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร กระจกการผลิตโดยใช้ผงโลหะที่ผ่านการออกซิเดชันทำได้โดยการหลอมโลหะดีบุก เงิน และอินเดียม รวมกัน จากนั้นนำมาทำโลหะผงด้วยกระบวนการอะตอมไมเซชัน (Atomization) นำผงที่ได้หลังจากผ่านการแยกขนาดมาทำกระบวนการออกซิเดชันที่อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง ที่สภาวะออกซิเจนความดัน 6 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร จากนั้นทำการอัดเช่นเดียวกับกระบวนการโลหะผง ผลการตรวจสอบพบว่าชิ้นงานที่ขึ้น

รูปด้วยกระบวนการโลหะ ให้ค่าการนำไฟฟ้าสูงที่สุดมีค่า 64 %IACS ค่าความแข็งมีค่า 89 HV น้อยกว่าค่าความแข็งของชิ้นงานออกซิเดชัน

Chi L. และคณะ [16] ได้ทำการศึกษาความสามารถการนำไฟฟ้า การต้านทานการสึกหรอทางด้านไฟฟ้าของ โลหะ  $\text{Ag/SnO}_2/\text{In}_2\text{O}_3$  ที่ผลิตด้วยกระบวนการออกซิเดชันภายในกับกระบวนการโลหะผง ชิ้นงานจากกระบวนการออกซิเดชันภายในได้จากการหล่อแล้วนำไปรีดให้ได้ความหนา 3.2 มิลลิเมตร แล้วอบที่อุณหภูมิ 840 องศาเซลเซียส ชิ้นงานจากกระบวนการโลหะผงได้จากการอัดผงโลหะต่างๆ ออบขึ้นเตอร์รี่แล้วนำไปอัดเพื่อเพิ่มความหนาแน่น ได้ชิ้นงานหนา 3.18 มิลลิเมตร ผลการทดสอบด้วยชุดทดสอบ Switching endurance test กระแสไฟฟ้า 90 แอมแปร์ ความต่างศักย์ 240 V แรงกด 400 กรัม ตรวจวัดที่ 10,000-100,000 รอบ พบว่าการสูญเสียเนื้อโลหะของ  $\text{Ag-10\%SnO}_2+\text{In}_2\text{O}_3$  ที่กระบวนการผลิตทั้ง 2 แบบ มีค่าใกล้เคียงกัน แต่ความแข็งและการนำไฟฟ้าของโลหะที่ผลิตด้วยกระบวนการออกซิเดชันภายในมีค่าสูง และที่ปริมาณโลหะออกไซด์มีปริมาณมากความแข็งมีค่าสูงชิ้นส่วนการนำไฟฟ้ามีค่าลดลง