# บทที่ 2
# การศึกษาสภาวะทั่วไปของอุตสาหกรรมรางสายไฟฟ้าและตู้ควบคุมระบบไฟฟ้า

## 2.1 สภาวะทั่วไป

เนื่องมาจากการขยายตัวของภาคธุรกิจ และอุตสาหกรรมในประเทศไทย เป็นไปอย่างรวดเร็ว ทำให้ปริมาณความต้องการพลังงานไฟฟ้าสูงขึ้นอย่างมาก ในปี พ.ศ. 2538 การไฟฟ้านครหลวง ( กฟน. ) ซึ่งดูแลระบบจำหน่ายในกรุงเทพมหานคร นนทบุรี และสมุทรปราการ มีความต้องการใช้พลังงานเฉลี่ยสูงสุด 5,336 เมกกะวัตต์ หรือประมาณ 45% ของความต้องการพลังงานไฟฟ้าทั่วประเทศ อัตราเพิ่มของความต้องการพลังงานไฟฟ้าเฉลี่ยในรอบ 5 ปี ของ กฟน. สูงขึ้นประมาณปีละ 10 - 12% ด้วยความต้องการใช้ไฟฟ้าของลูกค้ามีปริมาณสูงขึ้น กฟน. จึงจำเป็นต้องจ่ายไฟฟ้าให้กับลูกค้า ในระดับแรงดันกลาง ( 12 กิโลโวลต์ หรือ 24 กิโลโวลต์ ) หรือระดับแรงดันสูง ( 69 กิโลโวลต์ หรือ 115 กิโลโวลต์ ) ตามปริมาณความต้องการของลูกค้า โดยลูกค้าจะต้องมีสถานีย่อยสำหรับติดตั้งหม้อแปลงสวิตช์เกียร์ และห้องควบคุมเพื่อรับไฟจาก กฟน. ให้เหมาะสม

ระบบไฟฟ้ากำลังเป็นระบบหนึ่งที่ใช้สำหรับเปลี่ยนรูปพลังงาน และส่งจ่ายพลังงานให้แก่ภาคอุตสาหกรรม โดยทั่วไประบบไฟฟ้ากำลังจะเป็นระบบขนาดใหญ่ ประกอบด้วยอุปกรณ์ต่างๆ มากมาย การตรวจสอบภาวะการทำงานเพื่อดำเนินการควบคุม ให้ระบบไฟฟ้ากำลังทำงานได้ถูกต้องและมีความน่าเชื่อถือสูง ถือได้ว่าเป็นงานที่สำคัญมากงานหนึ่ง

สถานการณ์ของการผลิตรางสายไฟฟ้า และตู้ควบคุมระบบไฟฟ้าในประเทศไทย มีการแข่งขันกันสูงมากพอสมควร โดยเฉพาะตู้ควบคุมระบบไฟฟ้า ซึ่งในขณะนี้บริษัทของต่างประเทศซึ่งเป็นเจ้าของอุปกรณ์ไฟฟ้า ได้เข้ามาผลิตแผงสวิตช์บอร์ดเองในประเทศไทยแล้ว สาหตุเนื่องจากลักษณะงานเป็น Turn Key Project

นอกจากนี้โรงงานผลิตตู้ควบคุมระบบไฟฟ้าในประเทศไทยยังแข่งขันกันสูง โดยผู้ใช้งาน ( ลูกค้า ) จะคำนึงถึงราคาเป็นส่วนใหญ่ สำหรับผู้ประกอบการรายย่อย จะซื้อตู้เปล่าแล้วมาประกอบเองก็จะราคาถูก ค่อนข้างจะเป็นงานคุณภาพไม่สูงนัก

ปัญหาของอุตสาหกรรมการผลิตตู้ควบคุมระบบไฟฟ้าในประเทศไทย อาจจะแบ่งปัญหาใหญ่ๆ ได้ 4 หัวข้อ คือ

1. ปัญหาทางด้านราคา ที่มีการแข่งขันกันสูงมาก
2. ปัญหาทางด้านบุคลากร ซึ่งจะต้องพัฒนาบุคลากรให้สามารถตอบสนองต่อลูกค้าได้

เนื่องจากผู้ที่ได้รับผลกระทบโดยตรงคือ ผู้ใช้หรือลูกค้า

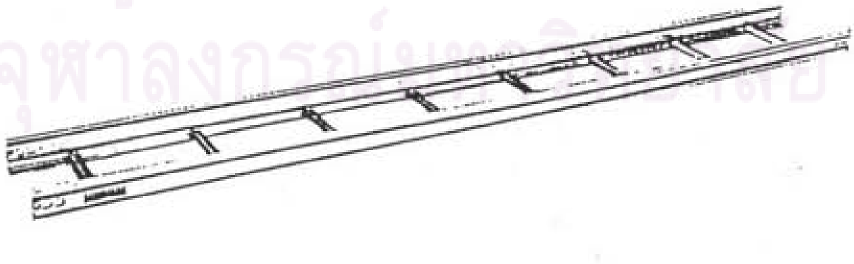
3. ปัญหาในการเลือกใช้วัสดุอุปกรณ์ ถ้าเลือกใช้ไม่ถูกต้อง ผลกระทบก็จะเกิดขึ้นกับเจ้าของโครงการ

4. ปัญหาทางด้านเทคนิคในการผลิต หรือการประกอบ เนื่องจากพนักงานขาดความรู้ ขาดทักษะ หรือขาดประสบการณ์ เป็นต้น

2.1.1 <u>รางสายไฟฟ้า</u>

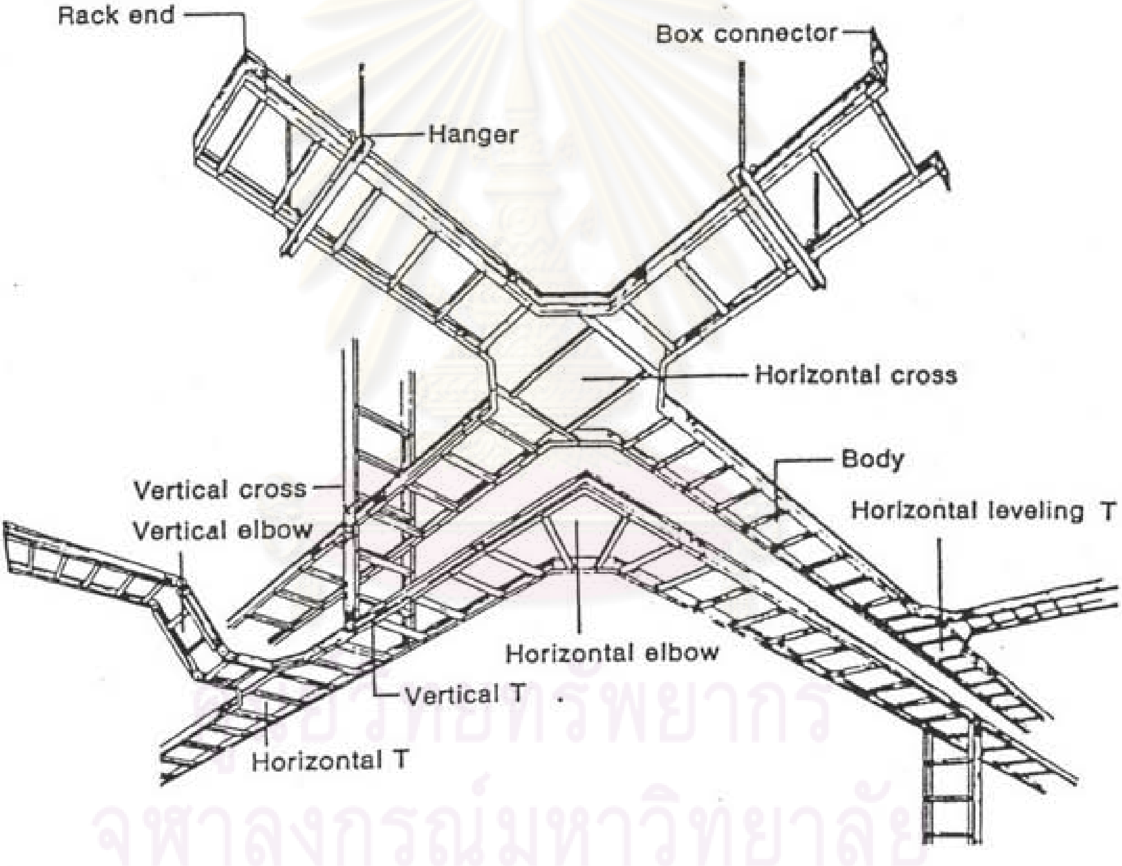
รางสายไฟฟ้าเป็นวัสดุที่ใช้ในการติดตั้ง เคเบิลไฟฟ้ากำลัง, เคเบิลระบบควบคุม และเคเบิลโทรคมนาคม รางสายไฟฟ้าจะทำด้วยเหล็กชุบสังกะสี หรือเคลือบสี หรืออลูมิเนียมเจาะเป็นช่องเพื่อระบายความร้อนและมัดเคเบิลเพื่อให้อยู่กับที่ อาจเป็นแบบมีฝาครอบ เมื่อติดตั้งอยู่นอกอาคาร หรือไม่มีฝาครอบก็ได้เมื่อใช้ภายในอาคาร ส่วนโครงยึดเคเบิลมีลักษณะคล้ายบันได ( Ladder ) ลูกบันไดเจาะช่องเป็นรูกลมและร่องยาว เพื่อใช้มัดเคเบิลให้อยู่กับที่ โครงยึดและถาดเคเบิลนี้มีหลายขนาด สามารถจับยึงเคเบิลและแยกไปยังที่ต่างๆ ได้ค่อนข้างง่าย ติดตั้งได้ง่ายและราคาถูก จึงเป็นที่นิยมใช้ในโรงงานอุตสาหกรรม รางสายไฟฟ้าแบบบันไดเหมาะสำหรับวางและฝังสายเคเบิล ที่มีเกราะป้องกันทั้งภายในและภายนอกอาคารด้วย รูปที่ 2.1 แสดงตัวอย่างรางสายไฟฟ้าที่ใช้กันอยู่ทั่วไป รางสายไฟฟ้ามีหลายขนาดแบบและรายละเอียดซึ่งผู้ผลิตจะบอกวัสดุที่ใช้ทำ ขนาดกว้างXยาวXสูง น้ำหนักของโครงยึดและน้ำหนักบรรทุก ในการเลือกจะพิจารณาจากจำนวนสายเคเบิลที่จะจับยึด ชนิดของเคเบิล และสภาวะแวดล้อมของบริเวณที่ติดตั้งด้วย

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.1 แสดงตัวอย่างรางสายไฟฟ้าที่ใช้กันอยู่ทั่วไป

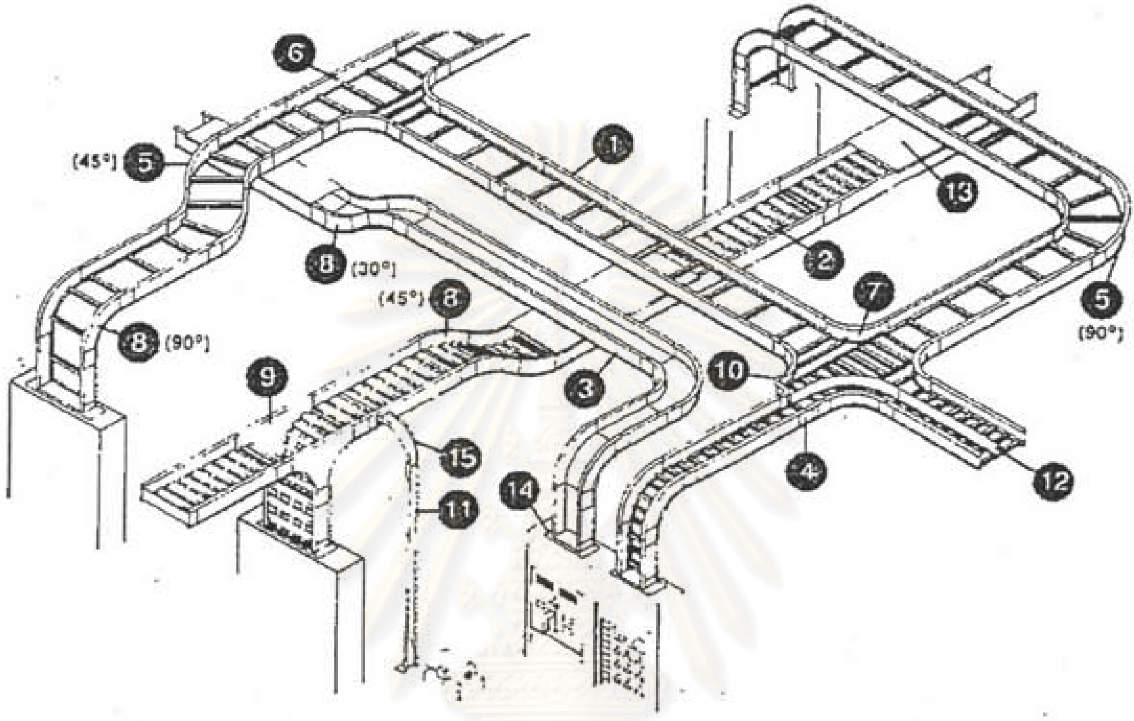
การวางเคเบิลโดยวิธีนี้เชื่อถือได้ และสายไม่มีโอกาสชำรุดเมื่อเทียบกับการร้อยสายโดยการดึงผ่านท่อไฟ ซึ่งอาจทำให้ฉนวนชำรุดได้ง่ายมากกว่า ในการติดตั้งระบบรางสายไฟฟ้าจะประกอบด้วย ท่อนตรง หักมุม หรือโค้ง เพื่อเปลี่ยนทิศทางและเปลี่ยนระดับ ท่อนลดขนาดทุกส่วนจะต่อกันและต่อลงดินด้วย ตัวอย่างรายละเอียดแสดงการประกอบชิ้นส่วนการจับยึง แสดงในรูปที่ 2.2




รูปที่ 2.2 ตัวอย่างรายละเอียดแสดงการประกอบชิ้นส่วนการจับยึง

2.1.1.1 ส่วนปะกอบต่างๆ ของระบบรางสายไฟฟ้า

ดังที่ได้กล่าวมาแล้วว่า ในการติดตั้งระบบรางสายไฟฟ้านั้น จะต้องประกอบไปด้วยส่วนต่างๆ เช่น รางสายไฟฟ้าท่อนตรง ท่อนโค้ง หักมุม เปลี่ยนระดับ ฯลฯ ดังแสดงในรูปที่ 2.3




รูปที่ 2.3 แสดงส่วนประกอบต่างๆ ที่ติดตั้งในระบบรางสายไฟฟ้า

ซึ่งส่วนประกอบต่างๆ ของระบบรางสายไฟฟ้าในแต่ละหมายเลข มีชื่อเรียกดังนี้

1. Ladder Cable Tray
2. Trough Cable Tray
3. Solid Bottom Cable Tray
4. Cable Tray Connector
5. Horizontal Elbow
6. Horizontal Tee
7. Horizontal Cross
8. Vertical Elbow
9. Vertical Tee
10. Reducer
11. Channel Cable Tray
12. Divider
13. Cover
14. Tray-to-box Connector
15. Channel Vertical Elbow

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.1.2 ตู้ควบคุมระบบไฟฟ้า

ตู้ควบคุมระบบไฟฟ้าเป็นอุปกรณ์รับกำลังไฟฟ้า จากสายจ่ายไฟของการไฟฟ้าฯ และจ่ายให้โหลดในบริเวณต่างๆ ที่ใช้ไฟ ตัวตู้ทำด้วยเหล็กแผ่น ภายในประกอบด้วยสวิทช์ตัดต่อวงจร อุปกรณ์ป้องกัน และเครื่องวัดไฟฟ้าต่างๆ อุปกรณ์ตัดต่อวงจรหลัก ได้แก่ สวิตช์ใบมีด, สวิตช์ตัดต่อโหลด, ฟิวส์ไฟฟ้ากำลัง, เซอกิตเบรคเกอร์ และคอนแทคเตอร์ มาตรฐานรูปร่างและขนาดของตู้ควบคุมระบบไฟฟ้าจะแตกต่างกันไป แบบและรูปร่างขึ้นอยู่กับบริเวณที่ใช้ เช่น ตู้ควบคุมระบบไฟฟ้าภายในอาคาร, ภายนอกอาคาร หรือบริเวณอันตรายที่มีวัสดุไวไฟ

ตู้ควบคุมระบบไฟฟ้าเหล่านี้ อาจประกอบเป็นตู้เดี่ยวๆ หรือหลายๆตู้มาต่อกันเป็นแถวยาว บางแบบมีตู้แต่ละตู้แบ่งออกเป็นช่องๆ ด้วย ตู้รับไฟส่วนใหญ่จะติดตั้งอยู่กลางบริเวณที่ใช้ไฟ บัสบาร์ของแต่ละตู้ที่ต่อเข้าด้วยกันจะต้องเท่ากัน และมีขนาดตามกระแสทั้งหมดที่รับเข้า ตู้ที่ต่อเรียงเป็นแถวจะต้องสามารถต่อที่ปลายทั้งสองข้างได้เมื่อขยาย สายเมนของตู้ควรมีขนาดโตพอที่สามารถรับการขยายตัวของโหลด และการติดตั้งตู้ควบคุมระบบไฟฟ้าเพิ่มเติมได้

ตู้ควบคุมระบบไฟฟ้าจะต้องมีที่ว่างและระบายความร้อนได้เพียงพอ ตำแหน่งที่ติดตั้งตำแหน่ง สายเข้าและสายออกต้องกำหนดอย่างละเอียด โดยเฉพาะอย่างยิ่งถ้ามีการใช้บัสเวย์ ( BUSWAY ) สายเคเบิลและบัสบาร์ทำด้วยโลหะตัวนำทองแดงหรืออลูมิเนียม ในการต่อสายหรือบัสบาร์อลูมิเนียมจะต้องระวังเป็นพิเศษ

ในตู้ควบคุมระบบไฟฟ้าจะมีเครื่องวัด เช่น โวลต์มิเตอร์และแอมมิเตอร์ เป็นต้น ถ้าแรงดัน ญ.ที่จ่ายไม่คงที่แน่นอน อาจต้องติดเครื่องบันทึกแรงดันไว้ด้วย

ตู้ควบคุมระบบไฟฟ้า อาจแบ่งได้เป็นสองชนิดคือชนิดที่หนึ่งตู้ควบคุมระบบไฟฟ้าภายในอาคาร และชนิดที่สองภายนอกอาคาร

ตู้ควบคุมระบบไฟฟ้าภายในอาคารส่วนมากติดตั้งภายในห้องควบคุม ไม่กันฝนและกันระเบิด แต่ต้องระบายความร้อนได้เพียงพอ ตรวจตราดูแลและบำรุงรักษาได้ง่าย ซึ่งต่างไปจากผู้ที่ออกแบบสร้างให้ติดตั้งกลางแจ้ง ตู้ชนิดนี้จะต้องตากแดดตากฝนและลม ซึ่งจะต้องกันน้ำและก็กันฝุ่นได้ ถ้าเป็นผู้ที่ติดตั้งในบริเวณที่มีวัสดุไวไฟ ก็จะต้องเป็นแบบกันระเบิด ซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นแบบตู้ที่ติดตั้งบนฐานหรือเสา

ตู้ควบคุมระบบไฟฟ้า อาจแบ่งตามลักษณะหน้าตู้ได้เป็นสามพวกด้วยกันคือ

1. ตู้แบบธรรมดา ไม่มีรูปกราฟฟิคบนหน้าตู้เพื่อให้เห็นไดอะแกรมต่างๆ ในกรณีนี้สามารถติดตั้งเครื่องวัดติดๆ กันจำนวนมากได้ เจ้าหน้าที่ควบคุมสังเกตและแยกแยะเครื่องมือวัดจำนวนมากได้จากป้ายฉลากประจำเครื่องแต่ละเครื่องที่ติดไว้หน้าตู้

2. ตู้รูปกราฟฟิคเต็มหน้าตู้ มีภาพขยายไดอะแกรมแสดงโปรเซสเต็มหน้าตู้ และมีเครื่องมือวัดของส่วนนั้นติดอยู่ด้วยตามตำแหน่ง ตู้ชนิดนี้ใช้งานได้สะดวกและง่ายต่อเจ้าหน้าที่ในการปฏิบัติงาน การผิดพลาดสับสนของเจ้าหน้าที่เกิดขึ้นได้น้อยมาก หรือเกือบไม่มีเลย แต่ตู้ชนิดนี้มีขนาดใหญ่และกินที่มาก ซึ่งต้องติดตั้งในห้องควบคุม และต้องใช้ห้องควบคุมขนาดใหญ่ด้วย

3. ตู้กึ่งรูปกราฟฟิค เป็นที่นิยมใช้กันมาก โปรเซสอุตสาหกรรมมีขนาดใหญ่และสลับซับซ้อนมากขึ้น การออกแบบให้ประหยัดซึ่งมีความจำเป็นในตู้กึ่งรูปกราฟฟิค จะมีการวางเครื่องมือวัดเป็นกลุ่มตามโปรเซสอย่างมีระเบียบและประหยัดที่ แต่ละกลุ่มอยู่ตรงตำแหน่งที่แสดงรูปโปรเซสขนาดเล็ก ซึ่งส่วนใหญ่ทำไว้ส่วนบนของหน้าตู้ และติดป้ายฉลากประจำเครื่องไว้อย่างชัดเจน อุปกรณ์ที่สังเกตและเครื่องมือวัดจะติดในระดับที่ตามองถนัดขณะนั่งทำงาน และอาจเลือกที่ตั้งให้มองเห็นโปรเซสได้ด้วย ตู้เครื่องมือวัดที่ติดตั้งในห้องควบคุมส่วนใหญ่จะเป็นแบบวางบนพื้น สายเคเบิลหรือท่อลมเข้าทางด้านล่างหรือด้านบนของตู้

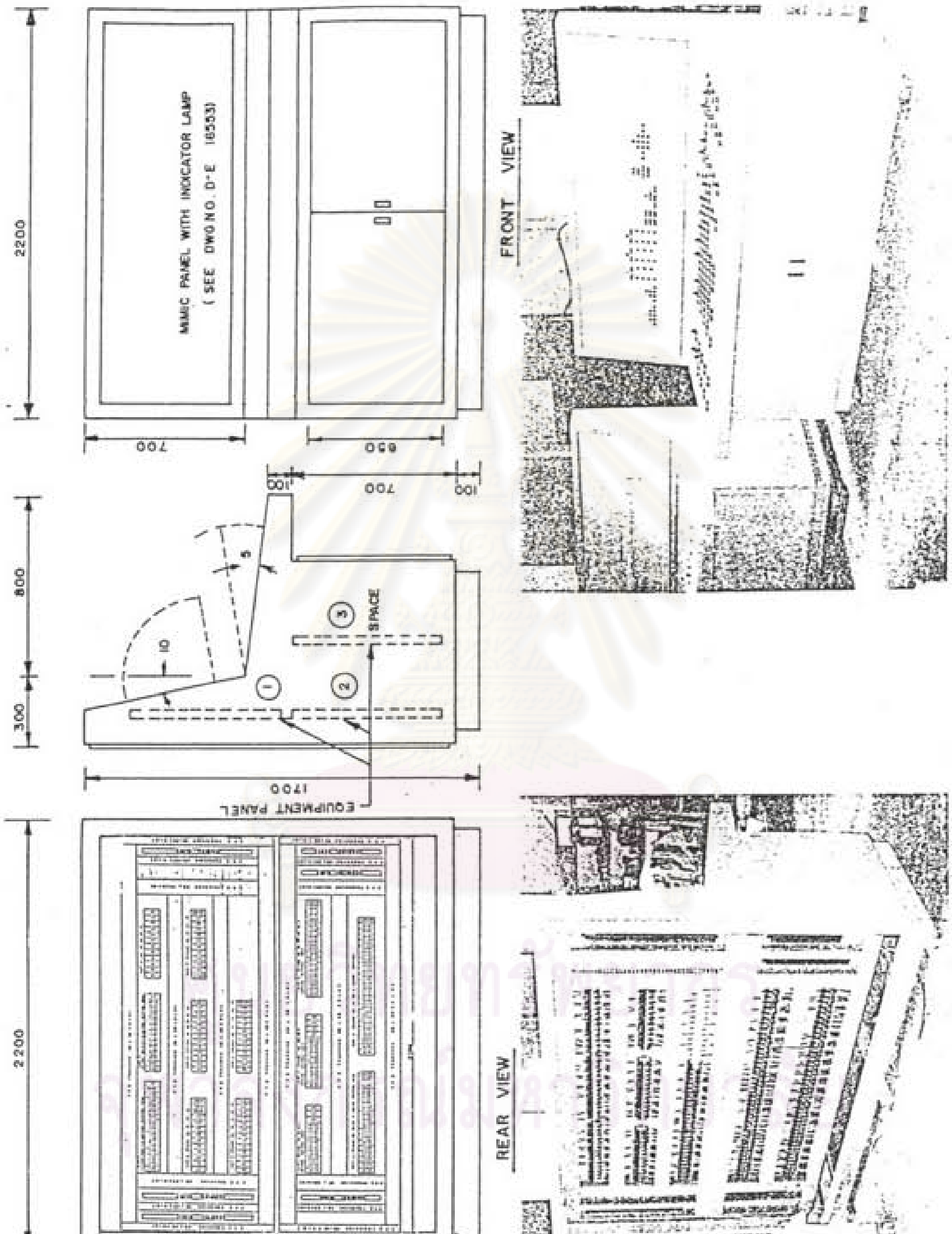
ท่อลม สำหรับสัญญาณลมและท่อจ่ายลม ส่วนใหญ่เป็นท่อทองแดง ท่อเหล็กไม่ขึ้นสนิม หรือท่อพลาสติกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 4 มม. ท่อทองแดงดัดโค้ง หรือวางเรียงเป็นแถวอย่างสวยงาม ส่วนท่อลมพลาสติกหรือสายไฟจะวางในรางสายพลาสติกอย่างมีระเบียบ ท่อลมแบบพลาสติกติดตั้งในตู้ได้ง่ายมากกว่าท่อทองแดง และกินที่น้อย

ท่อจ่ายลม จะต้องมีขนาดโตพอจ่ายลมที่ใช้กับเครื่องมือวัด โดยต่อเข้ากับหัวจ่ายลมและต่อเข้ากับเครื่องมือวัดแต่ละตัว โดยผ่านวาล์วปิดเปิดได้ ท่อจ่ายลมต่อกับท่อลมที่อยู่ข้างบนหรือใต้ตู้

สายไฟ เดินเข้าเครื่องมือวัดแต่ละตัว จะต้องมีโค๊ดสีตามชนิดของเครื่องวัด และเดินในรางพลาสติกอย่างมีระเบียบ ปลายสายและขั้วต่อสายต้องมีเบอร์สายร้อยกำกับไว้อย่างมีระบบ ภายในตู้จะต้องจัดให้มีขั้วต่อสาย เป็นแถวสำหรับสายอินพุทและเอาท์พุท ติดไว้ด้านล่างหรือด้านข้างตู้

ตัวอย่างตู้ควบคุมสายพานลำเลียง เป็นตู้ควบคุมสายพานลำเลียงกระเป๋าเดินทางของผู้โดยสารขาเข้าที่ท่าอากาศยานดอนเมือง ใช้ควบคุมสายพานลำเลียงกระเป๋าชุดละตู้ ตามรูปที่ 2.4 ตัวตู้เป็นแบบปิดมิดชิดและกันฝุ่นได้ สร้างตามมาตรฐาน NEMA CLASS I มีปุ่มกดและหลอดไฟติดตั้งไว้ที่ฝาตู้ เพื่อให้เจ้าหน้าที่สามารถเดินสายพานและหยุดสายพานได้ที่หน้าตู้ อุปกรณ์อื่นๆ เช่น เบรคเกอร์ มอเตอร์สตาร์ทเตอร์ และรีเลย์ต่างๆ ติดตั้งไว้ภายในตู้ ตามรูปที่ 2.4 สายไฟของวงจรไฟฟ้ากำลัง และวงจรควบคุมเดินในรางสายพลาสติกอย่างมีระเบียบ ปลายสายที่ต่อระหว่าง

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย




รูปที่ 2.4 ตัวอย่างตู้ควบคุมสายพานลำเลียง

อุปกรณ์และขั้วต่อสายมีหมายเลขกำกับไว้อย่างชัดเจน และตรงแบบวงจรที่สร้างจริง ระบบควบคุมสายพานลำเลียงนี้ เป็นวงจรควบคุมซีเควนซ์ การทำงานตั้งแต่เริ่มกดปุ่มสตาร์ทจนมอเตอร์สายพานวิ่ง จะทำตามลำดับขั้นตอน และหยุดตามลำดับขั้นตอน

## 2.2 วัตถุดิบ

### 2.2.1 วัตถุดิบในการผลิตรางสายไฟฟ้า

รางสายไฟฟ้าจะทำมาจากวัสดุที่เป็นเหล็กแผ่น ซึ่งจะผ่านขั้นตอนในการผลิตจนได้รางสายไฟฟ้าสำเร็จออกมา เหล็กแผ่นที่นำมาใช้จะเป็นเหล็กกล้าละมุนรีดร้อนชนิดแผ่นหนา, แผ่นบาง และแผ่นแถบ ( Hot-rolled mild steel plate, sheet and strip ) ตามมาตรฐานอุตสาหกรรม เลขที่ มอก. 528 - 2527 ซึ่งมีความหนาต่างๆ กัน ตั้งแต่ 1.2 มิลลิเมตร จนถึง 50 มิลลิเมตร แต่ที่จะนำมาใช้ในการผลิตนั้น จะใช้ที่ความหนา 1.6, 2 และ 2.3 มิลลิเมตร ขึ้นอยู่กับขนาดของรางสายไฟฟ้าที่จะนำมาผลิต

สำหรับรางสายไฟฟ้าที่ทำมาจากวัสดุ ที่เป็นแผ่นเหล็กเคลือบสังกะสี จะใช้แผ่นเหล็กเคลือบสังกะสีโดยกรรมวิธีจุ่มร้อน ( Hot-dip zinc-coated steel sheet ) ตามมาตรฐานอุตสาหกรรม เลขที่ มอก. 50 - 2538 ซึ่งแผ่นเหล็กเคลือบสังกะสีจะมีความทนทานต่อการเกิดสนิม และสังกะสีที่เคลือบอยู่จะทำหน้าที่เป็นตัวหล่อลื่น ทำให้มีคุณสมบัติดัดขึ้นรูปได้ดี และเชื่อมได้ง่าย โดยความหนาระบุของแผ่นเหล็กดำก่อนเคลือบสังกะสีอยู่ระหว่าง 0.25 ถึง 3.15 มิลลิเมตร

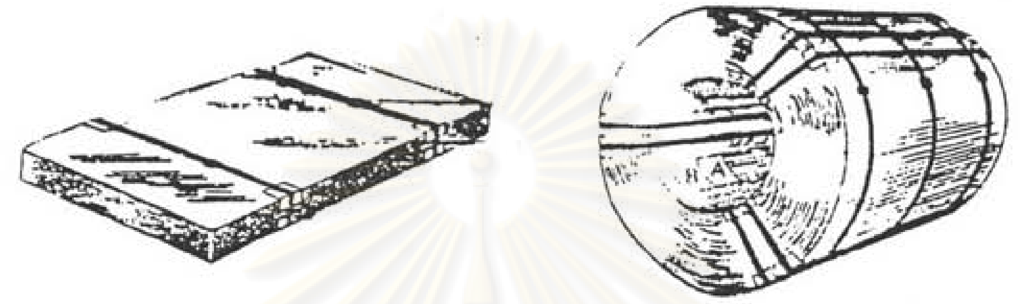
### 2.2.2 วัตถุดิบในการผลิตตู้ควบคุมระบบไฟฟ้า

ในการผลิตตู้ควบคุมระบบไฟฟ้านั้น จะสามารถแบ่งวัตถุดิบออกเป็น 3 กลุ่ม ได้แก่ แผ่นเหล็ก, เหล็กรูปพรรณ และอุปกรณ์ไฟฟ้า สำหรับแผ่นเหล็กนั้นได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อข้างต้น ส่วนวัตถุดิบอีกสองกลุ่มมีรายละเอียดดังนี้

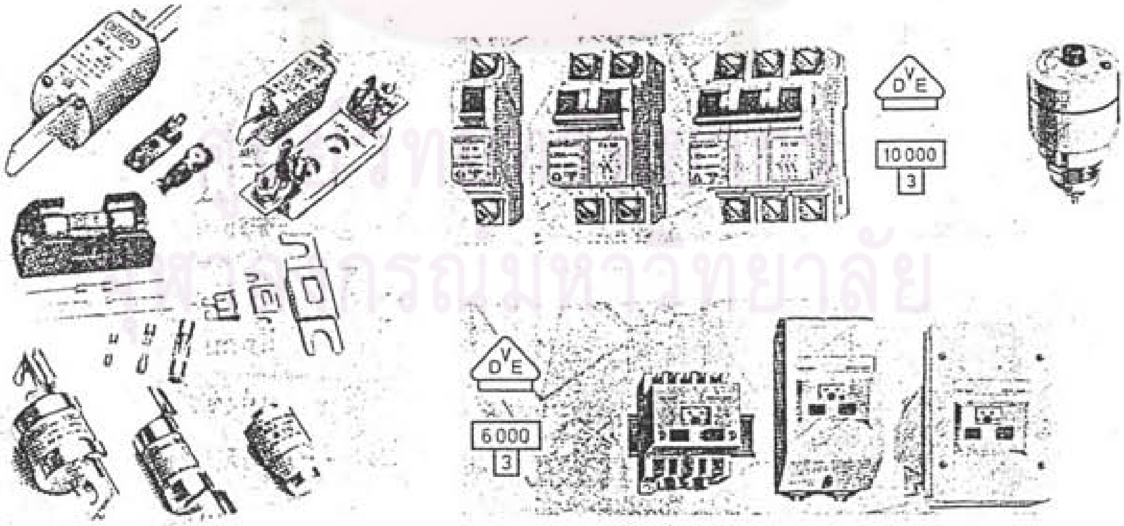
เหล็กรูปพรรณที่นำมาใช้ ในการผลิตตู้ควบคุมระบบไฟฟ้านั้น จะเป็นเหล็กโครงสร้างรูปพรรณรีดร้อน ( Hot rolled structure steel sections ) ตามมาตรฐานอุตสาหกรรม เลขที่ มอก. 1227 - 2537 โดยเหล็กรูปพรรณที่ใช้ส่วนมากแล้ว ได้แก่ เหล็กฉาก และเหล็กรูปรางน้ำ ขนาดต่างๆ ขึ้นอยู่กับขนาดของตู้ควบคุมระบบไฟฟ้าที่ผลิต เหล็กรูปพรรณต่างๆ เหล่านี้ จะถูกนำไปใช้ในส่วนของโครงตู้ควบคุมระบบไฟฟ้า โดยการเชื่อมประกอบเป็นโครงตู้

ส่วนอุปกรณ์ไฟฟ้าต่างๆ ที่นำมาใช้ในตู้ควบคุมระบบไฟฟ้าส่วนมากแล้ว จะได้แก่ ฟิวส์, สายไฟฟ้าทองแดง, ขั้วต่อสาย, หางปลา, อุปกรณ์ปิดเปิด, หลอดไฟแสดงสถานะ, สวิตช์ต่างๆ, บัสบาร์ทองแดง, รีเลย์, คอนแทกเตอร์, เซอร์กิตเบรกเกอร์, เครื่องมือวัดต่างๆ เช่น โวลต์มิเตอร์,

แอมมิเตอร์, วัตต์มิเตอร์ และอุปกรณ์อื่นๆ ซึ่งจะขึ้นอยู่กับรูปแบบทางวงจรไฟฟ้าที่ถูกออกแบบมาเพื่อจุดประสงค์ในการใช้งานในแต่ละประเภท ตามความต้องการของลูกค้า



รูปที่ 2.5 เหล็กแผ่นและแผ่นแถบที่ใช้ในการทำรางสายไฟฟ้า และตู้ควบคุมระบบไฟฟ้า




รูปที่ 2.6 แสดงตัวอย่างฟิวส์, เซอร์กิตเบรคเกอร์ และรีเลย์ป้องกันกระแสเกิน

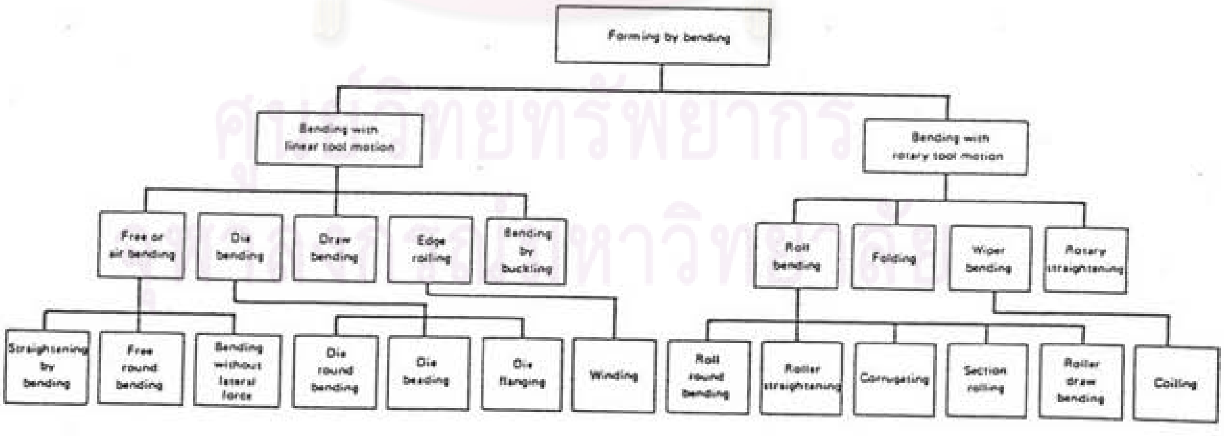
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## 2.3 งานดัดขึ้นรูปโลหะแผ่น

การดัดเป็นวิธีการขึ้นรูปโลหะแผ่นที่นิยมใช้กันกว้างขวางมากที่สุด ซึ่งมีทั้งส่วนประกอบของชิ้นส่วนขนดเล็กที่ผลิตจำนวนมาก จนถึงการแปรรูปชิ้นส่วนอันเดียว ในการสร้างเรือและการสร้างเครื่องจักรขนาดใหญ่ นอกจากนั้นยังมีวัสดุที่เป็นแผ่น ท่อ ลวด และแท่งวัตถุดิบ ซึ่งมีรูปร่างและหน้าตัดหลายอย่างที่ใช้ขึ้นรูปโดยกระบวนการดัดอีกมากมาย ส่วนใหญ่การดัดจะกระทำกันที่อุณหภูมิปกติ แต่สำหรับการขึ้นรูปชิ้นงานที่มีหน้าตัดขนาดใหญ่หรือรัศมีการดัดที่น้อยมาก จะกระทำกันที่อุณหภูมิสูงขึ้น เพื่อให้ใช้แรงในการขึ้นรูปอยู่ในวงจำกัด และหลีกเลี่ยงการลดหรือการสูญเสียความอ่อนหรือความเหนียว ( Embrittlement )

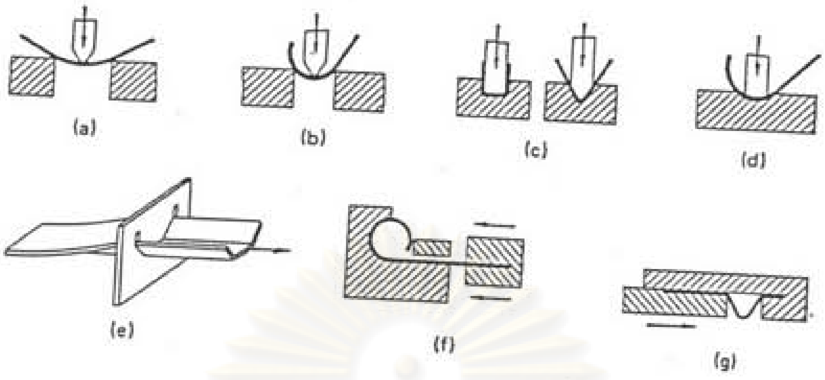
การขึ้นรูปโดยการดัดที่กำหนดเป็นมาตรฐานในอุตสาหกรรมเยอรมัน DIN 8586 นั้น ประกอบไปด้วยกลุ่มย่อย 2 กลุ่ม คือ การดัดโดยใช้ Tool เคลื่อนที่ในแนวตรง และการดัดโดยใช้ Tool เคลื่อนที่ในลักษณะหมุน รูปที่ 2.7 เป็นนิยามของคำว่าการดัด ที่รวบรวมในชื่อของกรรมวิธีในเรื่องนี้ ในบางครั้งการรวบรวมที่ผิดออกไป ก็อาจทำให้เป็นการกำหนดแบ่งออกเป็นประเภทๆ ตามความเหมาะสมเป็นส่วนใหญ่

ยกตัวอย่างกรณีของการดัดแบบถู ( Wiper bending ) คือความหมายของ Coiling เมื่อมีการเปลี่ยนรูปไปมากกว่า 360° ตามการคัดเลือกโดยจัดระบบที่ใกล้เคียงกัน ในระหว่างกลางของการแบ่งกลุ่มที่ประกอบไปด้วยการดัดม้วนกลม Roll round bending, Roller straightening, Corrugating, Section rolling และ Roll draw bending ดูรูปที่ 2.8 และ 2.9




รูปที่ 2.7 การแบ่งแยกประเภทกรรมวิธีการดัด

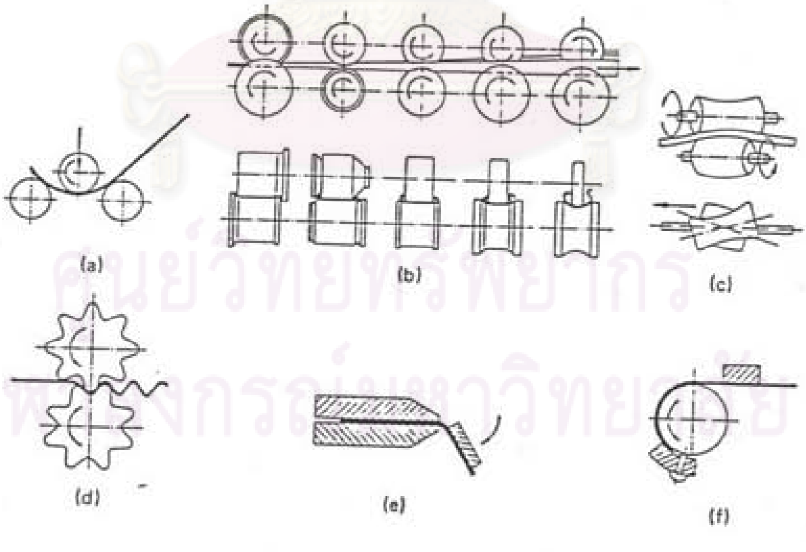
ศูนย์วิทยทรัพยากร จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย




รูปที่ 2.8 ตัวอย่างของการดัดโดย Tool เคลื่อนที่ในแนวตรง

(a) Free or air bending, (b) Free round bending, (c) Die bending, (d) Die round bending,

(e) Draw bending, (f) Edge rolling, (g) Bending by buckling




รูปที่ 2.9 ตัวอย่างของการดัดโดย Tool ที่เคลื่อนที่ในลักษณะหมุน

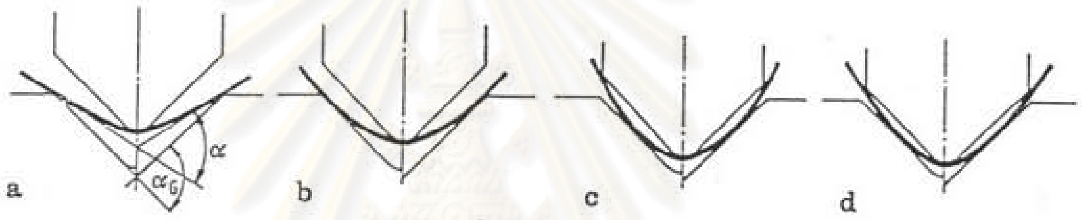
(a) Roll bending, (b) Section rolling, (c) Roller straightening,

(d) Corrugation, (e) Folding, (f) Wiper bending

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.3.1 การดัดรูปตัววี ( V-bending )

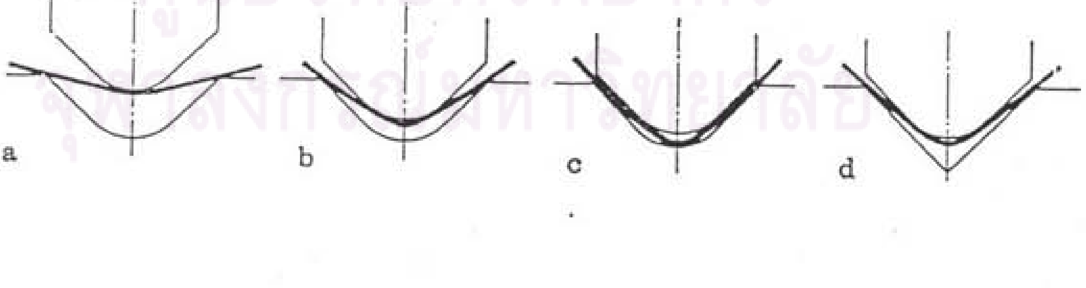
กรรมวิธีของแม่พิมพ์ที่ใช้ดัดรูปตัววี ประกอบด้วยส่วนที่ต่างกันชัดเจน 2 อย่าง คือ การดัดในอากาศ ( Air bending ) และการ Coining การดัดในอากาศเริ่มต้นขณะที่พั้นช์สัมผัสกับแผ่นโลหะ และปลายของชิ้นงานสัมผัสกับผิวดายโดยสมบูรณ์ ( คือ $\alpha = \alpha_D$ , รูปที่ 2.10 ) หรือเมื่อรัศมีด้านในที่น้อยที่สุดของชิ้นงาน กลายสภาพเป็นเล็กกว่ารัศมีของพั้นช์ ทั้งสองกรณีนี้รูปทรงทางเรขาคณิตของ Tool มีผลกระทบต่อการเปลี่ยนรูปของโลหะแผ่น ในขั้นสุดท้ายของ Air bending ส่วนโค้งของแผ่นชิ้นงานยังมีรูปร่างที่ไม่แน่นอน




รูปที่ 2.10 การดัด V-bending 90° ด้วยรัศมีพั้นช์ขนาดเล็ก

(a) Air bending, (b) End of air bending, (c) End of overbending, (d) Re-forward bending

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย




รูปที่ 2.11 การดัด V-bending 90° ด้วยรัศมีพั้นช์ขนาดใหญ่

(a) Air bending, (b) Continued air bending with two-point contact at punch curvature,

(c) Start of coining, (d) Semiclosed-die bending

การ Coining มีวัตถุประสงค์ที่จะกำจัดรูปทรงที่ไม่แน่นอน ของส่วนโค้งที่โลหะแผ่น โดยใช้แรงย้ำตรงรอยนั้นด้วยวิธีของ Punch-die system ในระหว่างการ Coining ด้านในส่วนโค้งที่เป็นยอดแหลม ( คือบริเวณใต้พั้นช์ ) จะมีผลต่อเนื่องกับขั้นตอนสุดท้ายของ Air bending ที่เสร็จสมบูรณ์ การใช้แรงจะเกิดขึ้นสามจุดคือ ที่พั้นช์และที่สองหน้าของดาย มุมดัดด้านนอกจะเท่ากับมุมของดาย ด้วยการเคลื่อนที่อย่างต่อเนื่องของพั้นช์ จุดที่สัมผัสกันของแผ่นโลหะและดาย จะเลื่อนตามลงยังจุดศูนย์กลางของดาย จนกระทั่งปลายขาชิ้นงานสัมผัสติดกับพั้นช์ รูปที่ 2.10 ชิ้นงานถูกดัดมากเกินไป และมุมดัดด้านนอกใหญ่กว่ามุมดาย ในขณะที่พั้นช์ดำเนินไปอย่างต่อเนื่อง แผ่นโลหะจะกางออกจากมุมของพั้นช์ และมุมดัดวิ่งเข้าหามุมของดาย รัศมีด้านในของแผ่นชิ้นงานก็จะลดลงโดยแรงที่ส่งมาจากพั้นช์ ปรากฏการณ์ที่กล่าวมานี้ ใช้เหมือนกันกับการทำงานด้วยพั้นช์ที่มีรัศมีเล็กและใหญ่ สำหรับกรณีเมื่อรัศมีด้านในของชิ้นงานเล็กกว่ารัศมีพั้นช์ หลังการดัดแบบ Air bending ซึ่งเป็นข้อขัดแย้งกันเล็กน้อย โดยทั่วไปการทำ Coining จะไม่มีผลกระทบต่อการเปลี่ยนแปลงรัศมีของชิ้นงาน รูปที่ 2.11 มีข้อสังเกตอยู่ว่ารัศมีชิ้นส่วนด้านใน จะมีค่าเท่ากับรัศมีพั้นช์ที่ขั้นสุดท้ายในการดัดแบบ Air bending สำหรับอัตราส่วนความกว้างของ V-die กับรัศมีของพั้นช์จะมี ค่าอยู่ระหว่าง 5 ถึง 8

การดัดแบบ V-die สามารถทำเป็นแม่พิมพ์แบบปิดได้ คือ ด้านล่างของดายจะมีรัศมีเท่ากับผลรวมของรัศมีพั้นช์บวกความหนาแผ่นชิ้นงาน หรือเป็นแบบ Semiclosed die ซึ่งด้านล่างของดายมีรัศมีน้อยกว่ารัศมีของพั้นช์บวกกับความหนาแผ่นชิ้นงาน ( ดายมีรูปร่างเหมือนมุมแหลมตัว V ) สำหรับกรณีที่ส่วนโค้งด้านในชิ้นงาน มีขนาดเล็กกว่าส่วนโค้งของพั้นช์ Semiclose die ไม่สามารถทำให้พั้นช์กดลงตรงโค้งด้านในของชิ้นงานโดยการ Coining ได้

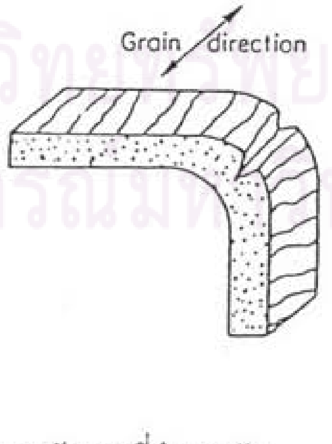
### 2.3.2 ข้อบกพร่องในการดัด

ข้อบกพร่องหลักในการทำงานดัดคือ การแตกบริเวณเส้นรอบนอกหรือเส้นรอบในของรัศมีการดัด ถ้าความเครียดที่เป็นจริงบริเวณที่ทำการดัด มากกว่าความเครียดที่เกิดขึ้นจริงสูงสุดของวัสดุ จะทำให้ชิ้นงานแตกได้ รวมทั้งทิศทางของ grain direction ของโลหะแผ่น ก็เป็นปัญหาสำคัญมากขึ้นด้วย ถ้าทำการดัดขนานกับทิศทางของ grain direction ตามที่แสดงในรูปที่ 2.12 จะเกิดรอยแตกและการแยกจะขยายกว้างขึ้น การดัดที่ได้ผลดีที่สุดคือ แนวการดัดที่เป็นมุม $90^{0}$ กับตำแหน่ง grain direction รูปที่ 2.13 วัสดุอาจจะดัดได้โดยไม่เสียหายด้วยการทำมุม $45^{0}$ กับ grain direction

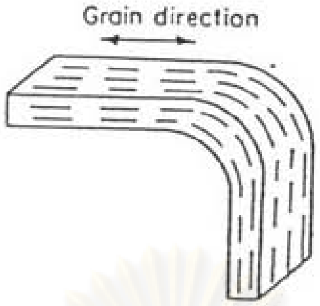
ส่วนปัญหาอื่นๆ ที่ทำให้เกิดการแตกบริเวณเส้นขอบด้านในคือ รัศมีการดัดที่เล็กมาก การดัดโลหะแผ่นที่เกิดขึ้นบ่อยคือ การขึ้นรูปตะเข็บและพับขอบต่างๆ ซึ่งการดัดจะพับเป็นมุม

$180^0$ นั่นคือ การขึ้นรูปมุมครั้งสุดท้ายโดยปลายขาของชิ้นงานเป็นมุม $0^0$ การทำตะเข็บซึ่งต่อแผ่นโลหะสองชิ้นที่ส่วนปลายโดยเกี่ยวล็อคเข้าด้วยกัน ซึ่งปกติต้องใช้รัศมีการดัดด้านในที่มีขีดจำกัด การพับขอบเป็นการดัด $180^0$ ซึ่งแผ่นโลหะจะถูกพับให้แบนติดกับตัวมัน โดยรัศมีการดัดด้านในเกือบจะเป็นศูนย์ ขั้นตอนที่หนึ่งของการดัดขั้นต้น ต้องใช้พั้นซ์ที่มีปลายรัศมีขนาดเล็ก กรรมวิธีการดัดขั้นต้นแบบธรรมดาคือ V-die และ Air bending หรือการพับ รูปที่ 2.14ในระหว่างขั้นตอนสุดท้ายขาทั้วสองข้างของชิ้นงานรูปตัววีถูกบีบเข้าด้วยกัน โดยไม่มีการบังคับที่ด้านในของส่วนโค้งในการดัดผิวด้านใน สันนิษฐานไว้ว่ามีความหยาบด้วยรูปร่างสัณฐานของความเครียด และขนาดเม็ดเกรน ในขณะที่รัศมีด้านในเกือบเป็นศูนย์ รอยย่นมีแนวโน้มที่จะเป็นรอยแตกและพับติดกัน รูปที่ 2.15 แสดงรูปขยายของรอยแตกหรือรอยพับที่เกิด ขึ้นอยู่กับเทคนิคการทำงานดัด ด้วยเหตุที่ข้อบกพร่องจะเป็นตัวนำให้เกิดผลเสียในการใช้โหลดในบางจังหวะ จึงน่าที่จะหลีกเลี่ยงมุมคม และควบคุมรัศมีด้านในให้มีความใหญ่พอสมควรโดยดายแบบปิด

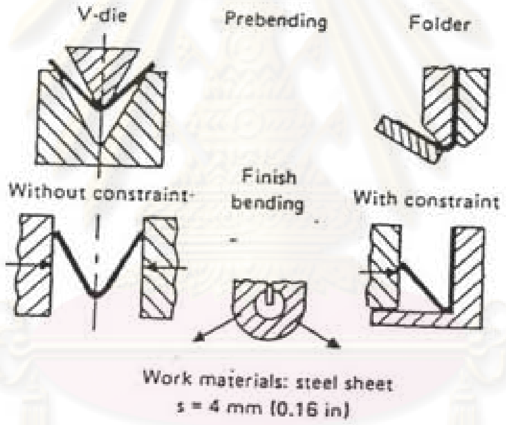
ผลของความเค้นสามสภาวะ ( Triaxial stress state ) คือ Tangential, Tensile และ Compressive stress ที่เกิดขึ้นในการดัดด้วยรัศมีการดัดขนาดต่างๆ ทำให้เกิดการเสียรูปใกล้ขอบของแผ่นโลหะ จนกระทั่งแผ่นโลหะถูกดัดออกมาทางพั้นช์ดังรูปที่ 2.16 ดังนั้นแผ่นโลหะจึงไม่สัมผัสติดกับดาย ตลอดบริเวณความกว้างทั้งหมด และถ้าต้องการหน้าสัมผัสที่สมบูรณ์ยิ่งขึ้น ต้องนำไปขึ้นรูปโดยการ Coining บริเวณนั้นอีกครั้งหนึ่ง ซึ่งต้องใช้แม่พิมพ์แบบปิดที่เหมาะสมถูกต้อง การออกแบบชิ้นส่วนต่างๆ มีความสำคัญกับผลเสียเหล่านี้ เช่น บานพับประตู ซึ่งทำโดยการม้วนขอบเพื่อยึดด้วยสกรู ด้านหน้าของชิ้นงานภายหลังจากดัดจะไม่เป็นมุมฉาก



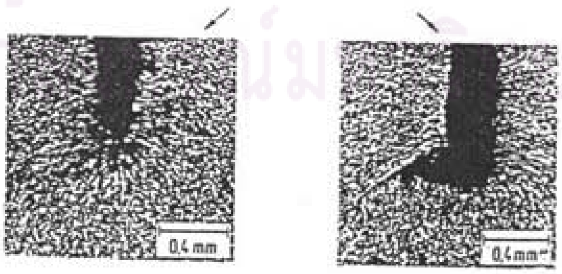

รูปที่ 2.12 grain direction ที่ขนานกับแนวที่ทำการดัด




รูปที่ 2.13 grain direction ที่ทำมุม $90^0$ กับแนวที่ทำการดัด



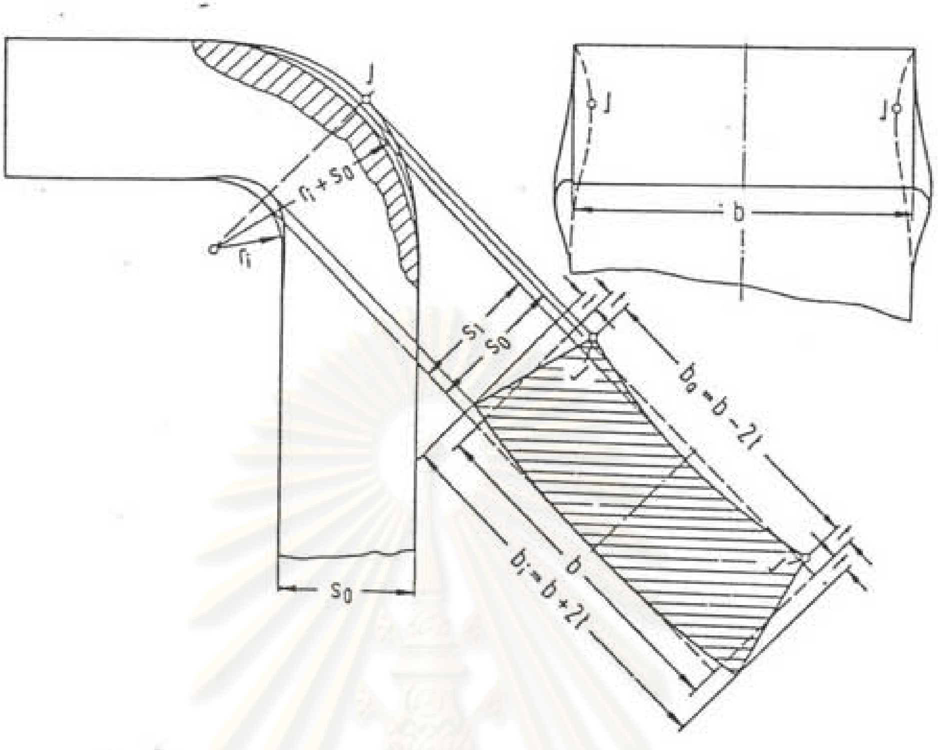

รูปที่ 2.14 การทำงานดัดด้วยรัศมีดัดขนาดเล็ก




รูปที่ 2.15 รอยแตกหลังการดัด $180^0$

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย


รูปที่ 2.16 ขอบที่เสียรูปในการตัด

2.3.3 เครื่องจักรที่ใช้ในการพับขึ้นรูปโลหะ

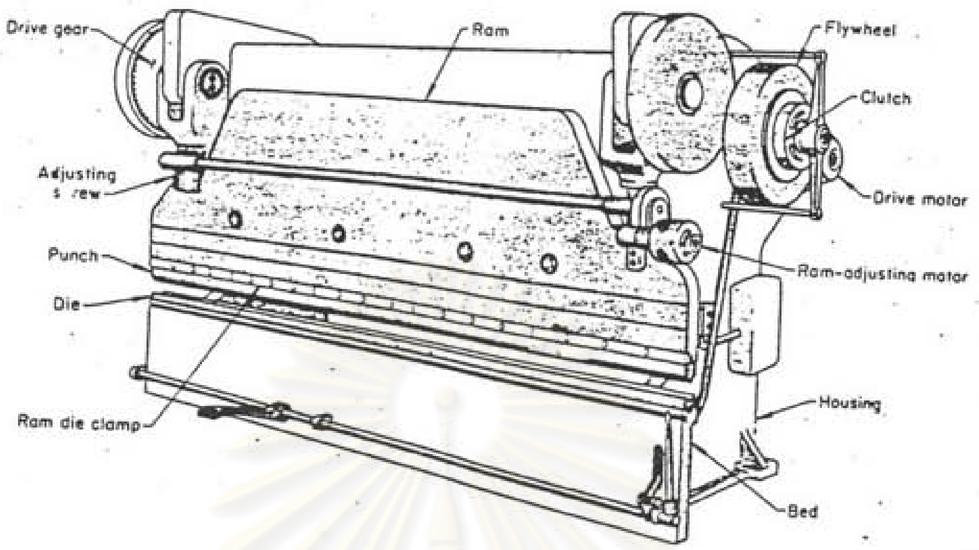
เครื่องเพรสเบรก เป็นเครื่องจักรที่ใช้ในการพับขึ้นรูปโลหะ ซึ่งมีรูปร่างและลักษณะดังรูปที่ 2.17 เครื่องจักรประเภทนี้เป็นที่นิยมใช้กันอย่างกว้างขวาง ในการพับขึ้นรูปโลหะแผ่นบาง ซึ่งมีความหนาไม่เกิน 1 นิ้ว สาเหตุที่นิยมใช้กันมากเนื่องจากสะดวก และง่ายต่อการติดตั้งอุปกรณ์ต่างๆ และยังสามารถปรับมุมพับของชิ้นงานได้โดยการปรับ Shut height ของเครื่อง ให้พันซ์เข้าไปในดายมากหรือน้อยตามต้องการ

เครื่องเพรสเบรกสามารถแบ่งออกเป็นประเภทใหญ่ๆ ได้ 2 ประเภท คือ

1. แมคคานิคคัล เพรสเบรก ( Mechanical Press Break )

แรมของเครื่องเพรสเบรกจะขับเคลื่อนด้วยการหมุนของข้อเหวี่ยง และส่งแรงมาตาม Gear train ซึ่งประกอบด้วยล้อหมุน ( Fly whell ) และคลัทช์ เกียร์ชุดจะถูกออกแบบไว้เพื่อทำให้แรมเคลื่อนที่ได้อย่างรวดเร็ว

Shut height ( ระยะระหว่างแรมกับฐานของเครื่อง ในตำแหน่งต่ำสุดของช่วงชัก )นั้นสามารถปรับระยะได้โดยการหมุนสกรูใน Pit man




รูปที่ 2.17 ลักษณะของเครื่องเพรสเบรก

ข้อได้เปรียบอย่างหนึ่งของเครื่องประเภทนี้ก็คือ ให้แรงกดได้มากกว่า Rated ton--nage ของเครื่อง เนื่องจากแรงเฉื่อยของล้อหมุนที่ไปขับเคลื่อนแรม ข้อได้เปรียบอีกข้อหนึ่งก็คือ เครื่องปั้มประเภทนี้ จะให้แรงกดมากที่สุดตรงตำแหน่งที่ ก่อนจะถึงจุดศูนย์ตายล่างของช่วงชัก ด้วยเหตุนี้ แมคคานิคคัล เพรสเบรก ส่วนมากจึงถูกสร้างให้มีโครงสร้างที่แข็งแรง เพื่อป้องกันการเกิดโอเวอร์โหลด ข้อได้เปรียบอีกอย่างหนึ่งก็คือ เครื่องประเภทนี้มีความเร็วของช่วงชัก สูงกว่า ไฮดรอลิค เพรสเบรก จึงเหมาะสำหรับใช้ในการผลิตชิ้นงานจำนวนมากๆ สำหรับข้อเสียก็มีตรงที่ไม่สามารถปรับช่วงชัก หรือควบคุมการขึ้นลงของแรมได้เหมือนกับ ไฮดรอลิค เพรสเบรก

2. ไฮดรอลิค เพรสเบรก ( Hydraulic press brake )

แรมของเครื่องปั้มประเภทนี้ เคลื่อนที่ขึ้นลงด้วยแรงที่ได้รับจากกระบอกสูบ 2 ตัว ที่ปลายทั้งสองด้าน แรงอัดของเครื่องปั้มประเภทนี้ จะไม่เกิน Rated tonnage อย่างแน่นอน ดังนั้น โอกาสที่จะเกิดโอเวอร์โหลดจึงไม่มี โครงสร้างของเครื่องก็ไม่จำเป็นต้องทำให้แข็งแรงนัก ดังนั้นจึงเสียค่าใช้จ่ายน้อยกว่าเครื่องปั้มแบบ แมคคานิคคัล เพรสเบรก

เครื่องเพรสเบรกประเภทนี้ สามารถปรับช่วงชักและตำแหน่งของศูนย์ตายบน, ศูนย์ตายล่างของเครื่องได้ ( ไม่เกินช่วงความยาวของกระบอกสูบ ) นอกจากนี้ยังสามารถเลื่อนแรมขึ้น หรือเปลี่ยนความเร็วในการขึ้นลงของแรมได้ที่ทุกๆ จุดของช่วงชัก ซึ่งไม่สามารถทำได้โดยการใช้เครื่องปั้มแบบ แมคคานิคคัล เพรสเบรก

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.3.3.1 การเลือกชนิดของเครื่องจักร

ในการพิจารณาว่าจะใช้เครื่องจักรเพรสเบรกประเภทใดนั้น ต้องพิจารณาจากข้อดีข้อเสียของเครื่องจักร เช่น ถ้าต้องการผลิตชิ้นงานจำนวนมากๆ และเสียเวลาน้อย ก็เลือกใช้ แมคคานิคคัล เพรสเบรก แต่ถ้าต้องการผลิตงานจำนวนไม่มากนัก ควรเลือกใช้ ไฮดรอลิค เพรสเบรก เนื่องจากติดตั้งอุปกรณ์ต่างๆ ได้สะดวกและควบคุมง่าย

ในการเลือกใช้เครื่องจักร นอกจากจะพิจารณาจากลักษณะการทำงานของแรมแล้ว ยังต้องพิจารณาจาก ขนาดของเครื่องจักร, ความยาวช่วงชัก, และกำลังของเครื่อง( Tonnage capacity ) อีกด้วย จากตารางที่ 2.1 จะเป็นตัวอย่างของการแสดงกำลังของเครื่องจักร และรายละเอียดอื่นๆ

1. ขนาดของเครื่องจักร ( Size )

ใช้ความยาวของแท่น ( Bed ) ที่รองรับดาย และความยาวช่วงชัก เป็นตัวบอกขนาดของเครื่องจักร ที่แท่นเพรสเบรกนี้สามารถติดตั้งแม่พิมพ์มากกว่า 1 ชุดได้ เช่น ในการผลิตชิ้นส่วนที่มีขั้นตอนในการผลิตหลายขั้นตอน จึงต้องใช้แม่พิมพ์หลายตัว มาติดตั้งบนแท่นเดียวกันซึ่งอาจต้องมีการใส่แผ่นรอง ( Shim ) ที่ดายตัวใดตัวหนึ่ง ก็เพื่อให้พันช์แต่ละตัวสัมผัสชิ้นงานพร้อมๆ กัน มาตรฐานความยาวของแท่นโดยทั่วไปไม่เกิน 24 ฟุต แต่อาจมีความยาวมากกว่านี้ ในกรณีที่สั่งทำงานเฉพาะอย่าง

2. ความยาวช่วงชัก ( Length of stroke )

ความยาวช่วงชักเป็นสิ่งสำคัญที่ต้องระมัดระวังเป็นอย่างยิ่งในขณะปฏิบัติงาน เนื่องจากส่วนของชิ้นงานที่พับแล้วจะงอขึ้นด้านบน และอาจกระแทกกับแรมได้ ซึ่งกรณีเช่นนี้อาจเกิดขึ้นได้ในการพับขึ้นรูป Channel หรือกล่องลึกๆ ด้านปลายของชิ้นงานหลังจากพับขึ้นรูปแล้วยิ่งมีความสูงมากเท่าไร ความยาวของช่วงชักยิ่งต้องมีค่ามากขึ้นด้วยเช่นกัน ปกติ แมคคานิคคัล เพรสเบรก จะมีความยาวช่วงชักสูงสุดประมาณ 6 นิ้ว และ ไฮดรอลิค เพรสเบรก มีความยาวช่วงชักประมาณ 18 นิ้ว

3. กำลังของเครื่องจักร ( Capacity )

กำลังของเครื่องเพรสเบรก กำหนดได้จากแรงกดของแรม และมีหน่วยเป็นตัน เพรสเบรกที่ใช้กันอยู่ในวงการอุตสาหกรรม มีกำลังอยู่ระหว่าง 8 - 2500 ตัน แรงที่ใช้ในการพับขึ้นอยู่กับขนาดและลักษณะการพับของโลหะ

ในการพับแบบธรรมดานั้น แรงที่ใช้ในการพับจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามความยาวของการพับ หรือความหนาของชิ้นงานที่เพิ่มขึ้น แต่ในการพับแบบเยื้องศูนย์ ( Off set ) นั้น

ต้องใช้แรงเป็น 4 เท่าของการพับแบบตัววี

ตารางที่ 2.1 แสดง กำลัง,ขนาด,ความเร็ว และอัตราส่วนต่างๆ ของเครื่องเพรสเบรก

| Capacity, tons: Mid-stroke | Capacity, tons: Near bottom of stroke | Bed length, ft | Stroke length, in. | Speed, strokes per min | Bending capacity (ft) with standard stroke, for low-carbon steel with thickness of: 1/16 in. | 3/16 in. | 1/4 in. | 1/2 in. | 3/4 in. | 1 in. | Motor, hp |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | **Mechanical Press Brakes** | | | | | | | |
| ... | 15 | 4 to 10 | 2 | 20 to 50 | 4 | ¾ | | | | | |
| ... | 25 | 6 to 12 | 2 | 20 to 50 | 6½ | 1½ | ... | ... | ... | ... | ¾ to 1 |
| 36 | 55 | 6 to 12 | 2½ | 40 | 12 | 3 | ... | ... | ... | ... | 1½ |
| 60 | 90 | 6 to 14 | 3 | 40 | ... | 6 | ... | ... | ... | ... | 3 |
| 90 | 135 | 6 to 14 | 3 | 36, 12 | ... | 11 | ... | ... | ... | ... | 5 |
| 115 | 175 | 6 to 14 | 3 | 36, 12 | ... | ... | 6 | ... | ... | ... | 7½ |
| 150 | 225 | 6 to 16 | 3 | 33, 11 | ... | ... | 10 | ... | ... | ... | 10 |
| 200 | 300 | 8 to 18 | 4 | 30, 10 | ... | ... | 13 | ... | ... | ... | 15 |
| 260 | 400 | 8⅔ to 18⅔ | 4 | 30, 10 | ... | ... | 18 | 6 | ... | ... | 20 |
| 335 | 500 | 8⅔ to 18⅔ | 4 | 30, 10 | ... | ... | ... | 8 | ... | ... | 20 |
| 400 | 600 | 10 to 24 | 4 | 30, 10 | ... | ... | ... | 10 | 5 | ... | 25 |
| 520 | 750 | 10 to 24 | 4 | 23, 7 | ... | ... | ... | 12 | 5 | ... | 30 |
| 650 | 1000 | 10 to 24 | 5 | 23, 7 | ... | ... | ... | 18 | 10 | ... | 40 |
| 825 | 1250 | 14 to 22 | 6 | 20, 6 | ... | ... | ... | 24 | 12 | 6 | 40 |
| 1000 | 1500 | 14 to 24 | 6 | 20, 6 | ... | ... | ... | ... | 17 | 10 | 50 |
| | | | | | ... | ... | ... | ... | 21 | 12 | 50 |
| | | | | **Hydraulic Press Brakes** | | | | | | | |
| ... | 200 | 8⅔ to 18⅔ | 12 | 21, 34(a,b) | ... | 14 | 12 | ... | ... | ... | 25 |
| ... | 300 | 8⅔ to 18⅔ | 12 | 25(a,c) | ... | ... | 16 | 8 | ... | ... | 30 |
| ... | 400 | 8⅔ to 18⅔ | 12 | 26(a,d) | ... | ... | ... | 12 | 6 | ... | 40 |
| ... | 500 | 8⅔ to 18⅔ | 12 | 25(a,e) | ... | ... | ... | 14 | 9 | ... | 40 |
| ... | 600 | 10 to 24 | 12 | 25(a,f) | ... | ... | ... | 16 | 10 | ... | 50 |
| ... | 750 | 14 to 24 | 12 | 21(a,g) | ... | ... | ... | 22 | 14 | 10 | 60 |
| ... | 1000 | 14 to 24 | 18 | 21(a,h) | ... | ... | ... | ... | 18 | 14 | 75 |

(a) Normal press speed gives rated capacity. High press speeds, in inches per minute (ipm) together with press tonnage ratings, are as follows: (b) 57 and 65 ipm at 70 tons; (c) 44 and 62 ipm at 120 tons; (d) 51 and 62 ipm at 160 tons; (e) 54 and 58 ipm at 200 tons; (f) 56 and 51 ipm at 240 tons; (g) 48 and 47 ipm at 300 tons; (h) 58 and 44 ipm at 400 tons.

2.3.3.2 ประเภทของดายและพันช์

รูปที่ 2.18 เป็นประเภทของพันช์และดายที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย ในการพับขึ้นรูปแบบตัววี ขนาดความกว้างของปากดาย หรือดายโอเพ็นนิ่ง ( Die opening ) ที่น้อยที่สุดมีค่าเท่ากับ 8 เท่าของความหนาของชิ้นงาน ในการพับขึ้นรูปเหล็กที่มีจำนวนคาร์บอนต่ำนั้น รัศมีของ Punch nose ควรมีค่าไม่น้อยกว่า 1 เท่าของความหนาของโลหะ ส่วนรัศมีของดายควรมีค่าเท่ากับรัศมีของพันช์บวกด้วยความหนาของโลหะ หรือมากกว่าเล็กน้อย เพื่อให้ชิ้นงานถูกอัดตัวอยู่ระหว่างผิวหน้าของพันช์และดาย

ในการผลิตชิ้นงานที่มีมุมพับ 90 องศาโดยใช้ Bottoming die นั้น ที่ดายมักจะทำเป็นมุมประมาณ $85^{0}$ - $87^{0}$ และอาจต้องมีการทดลองรวมทั้งปรับขนาดของพันช์หลายครั้ง จึงจะได้ชิ้นงานที่มีมุมพับ $90^{0}$ ตามต้องการ

1. ออฟเซ็ตดาย ( Offset die )

รูปที่ 2.18 (b) เป็นแม่พิมพ์ที่ใช้ในการพับแบบออฟเซ็ต ซึ่งมีข้อกำหนดใน

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

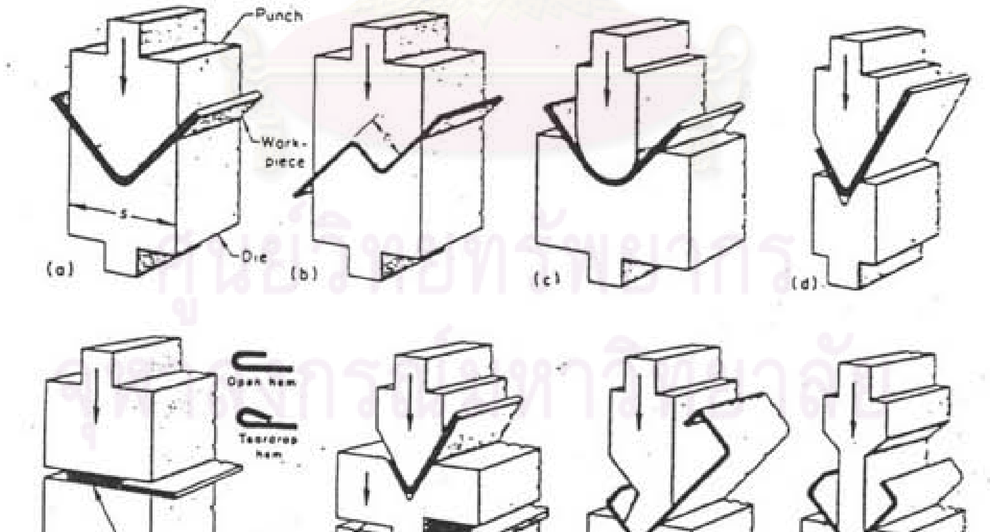
การ ใช้คือ ไม่สามารถพับโลหะที่มีความหนาเกินกว่า 0.125 นิ้วได้ เนื่องจากการพับในลักษณะนี้ต้องใช้แรงมากกว่าการพับแบบตัววีถึง 4 เท่า และความลึกของออฟเซ็ตต้องไม่น้อยกว่า 6 เท่าของความหนาของโลหะ

2. เรเดียน ฟอร์มมิ่ง ( Radius forming )

ใช้ในการพับชิ้นงานโดยที่พันช์และดายมีรัศมีขนาดใหญ่ ดังรูปที่ 2.18 (c) เมื่อพันช์อัดตัวลงมายังดาย รัศมีด้านในของโลหะจะถูกพับขึ้นรูปตามขนาดรัศมีของพันช์ พันช์ยิ่งออกแรงอัดกับดายมากเท่าไร โลหะก็จะยิ่งห่อตัวรอบรัศมีของพันช์มากขึ้นเท่านั้น และการสปริงแบ็กก็เกิดขึ้นน้อยด้วย

3. แอคชวล แองเจิล ( Actual angle )

เป็นการพับโลหะเป็นมุมแหลม โดยใช้พันช์และดาย ดังรูปที่ 2.18 (d) การพับลักษณะเช่นนี้สามารถพับได้ทั้งแบบ Air bend die และแบบ Bottoming die แต่ถ้าใช้เป็นการพับครั้งแรกก่อนที่จะนำไปพับแบบ Hem ต่อ ก็จะใช้แบบ Bottoming die ซึ่งมีข้อเสียตรงที่โลหะจะแข็งตัวขึ้น เมื่อนำไป Hem ต่อก็อาจเกิดการแตกได้




รูปที่ 2.18 ลักษณะของพั้นช์และดายที่ใช้ในการพับขึ้นรูปโดยเครื่องเพรสเบรค

4. แฟลตเทนนิ่งดาย ( Flattening die )

รูปที่ 2.18 (c) เป็นแม่พิมพ์ที่ใช้ในการพับแบบ Hem ซึ่งมีอยู่ 3 ลักษณะ ดังรูป โดยชิ้นงานต้องถูกพับให้เป็นมุมแหลมก่อน สำหรับรูปที่ 2.18 (f) เป็นแม่พิมพ์ที่พับได้ 2 ขั้นตอนในตัวเดียวกันคือ ด้านบนใช้พับเป็นมุมแหลมก่อน ส่วนด้านล่างใช้พับแบบ Hem

5. กูสเนคพันช์ ( Goose neck punch )

รูปที่ 2.18 (g) เป็นรูปของกูสเนคพันช์ และในรูปที่ 2.18 (h) เป็น Special clearance punch ที่ใช้ในการพับขึ้นรูปชิ้นงานที่มีรูปร่างแคบ และไม่สามารถใช้พันช์แบบธรรมดาพับได้

## 2.4 งานเชื่อมโลหะ

การเชื่อมโลหะมีหลายวิธี ถ้าแยกประเภทโดยยึดเอาจุดสำคัญต่างๆ เป็นเกณฑ์ จะมีจุดสำคัญที่ใช้ในการแยกประเภทได้มากกว่า 40 วิธี ด้วยเหตุนี้จึงไม่มีวิธีการแยกประเภทวิธีใดที่จะทำให้ทุกคนยอมรับว่าเป็นวิธีที่ดีที่สุดได้ ปัจจุบันการแยกประเภทวิธีการเชื่อมโลหะตามปกติ จะแยกประเภทวิธีการเชื่อมได้กว้างโดยถือหลักการแยกประเภทจากกลไกทำงานในการเชื่อม หรืออีกทางหนึ่งจะแยกประเภทตามพลังงานที่ใช้ในการเชื่อม

การแยกประเภทวิธีการเชื่อมตามปกติ จะแยกออกเป็นหมู่ใหญ่ๆ ได้คือ การเชื่อมโดยโลหะถูกหลอมละลาย ( Fusion welding ), การเชื่อมแบบใช้แรงกดดัน ( Pressure welding ), การบัดกรีแข็ง ( Brazing ) และอื่นๆ ซึ่งจะแยกย่อยออกเป็นหมู่ๆ ของการใช้พลังงานคือ พลังงานไฟฟ้า , พลังงานเคมี, พลังงานกล และอื่นๆ รายละเอียดของการแยกประเภทการเชื่อมจะแบ่งเป็นหมู่ได้หลายหมู่ ในรูปที่ 2.19 แสดงการจำแนกประเภทของการเชื่อมแบบต่างๆ

การจำแนกประเภทวิธีการเชื่อมอย่างกว้างๆ จะแยกออกเป็น 3 หมู่ คือ

1. การเชื่อมโดยโลหะถูกหลอมละลาย การเชื่อมวิธีนี้ส่วนที่เป็นรอยต่อจะถูกหลอมละลายด้วยความร้อนจากการอาร์ค ( arc ) หรือเปลวก๊าซติดไฟ ( inflamable gas ) การเชื่อมวิธีนี้ไม่จำเป็นต้องใช้แรงกดกับรอยเชื่อม

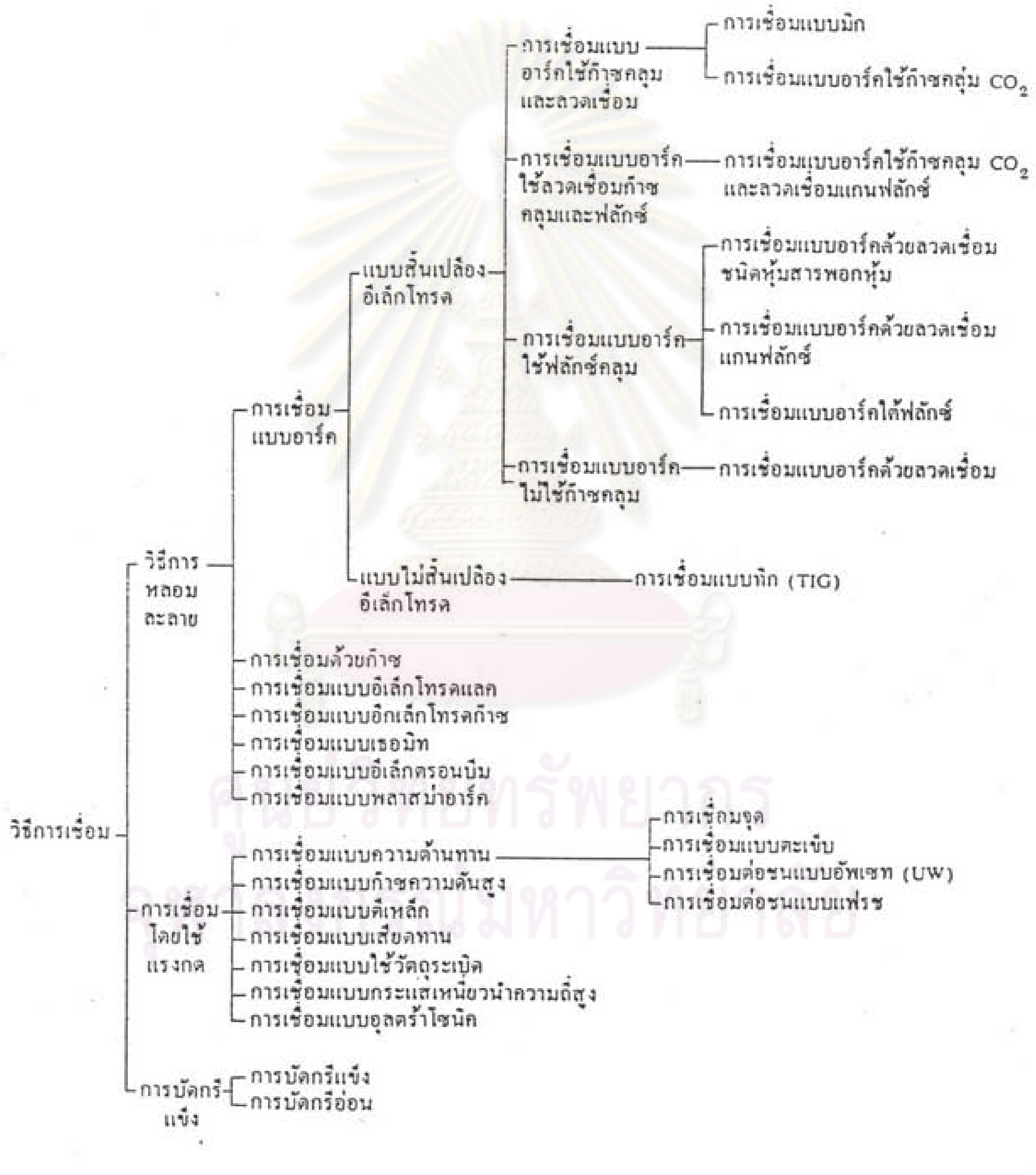
2. การเชื่อมโดยใช้แรงกด การเชื่อมวิธีนี้จะใช้ความร้อนกับแรงกด

3. การบัดกรีแข็ง เป็นวิธีประสานโลหะด้วยโลหะเจือ ( alloy ) ซึ่งมีจุดหลอมเหลวต่ำ เช่น ตะกั่วบัดกรี ( solder ) ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวประสานให้โลหะงานติดกัน การประสานโลหะวิธีนี้โลหะงานจะไม่ถูกหลอมละลาย

สำหรับในกรณีของโรงงานตัวอย่าง ซึ่งมีการเชื่อมในกระบวนการผลิตรางสายไฟฟ้าและ

ศูนย์วิทยทรัพยากร จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตู้ควบคุมระบบไฟฟ้า โดยจะใช้การเชื่อมแบบอาร์คใช้ก๊าซคลุมคาร์บอนไดออกไซด์ และการเชื่อมแบบอาร์คด้วยลวดเชื่อมชนิดหุ้มสารพอกหุ้ม ตามลำดับ ดังนั้นจะกล่าวเฉพาะการเชื่อมที่ใช้กับโรงงานตัวอย่างนี้เท่านั้น



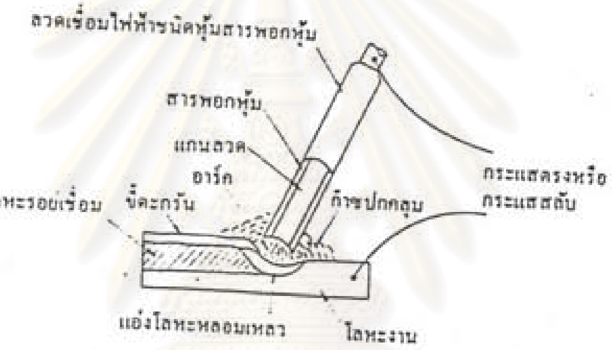

รูปที่ 2.19 แสดงการแยกประเภทวิธีการเชื่อม

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

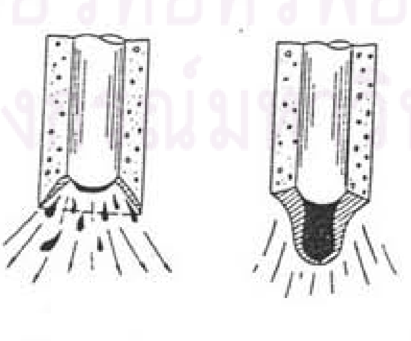
2.4.1 การเชื่อมแบบอาร์คด้วยลวดเชื่อมชนิดหุ้มสารพอกหุ้ม ( Covered arc welding )

การเชื่อมแบบอาร์คด้วยลวดเชื่อมชนิดหุ้มสารพอกหุ้ม เป็นการเชื่อมที่แพร่หลายมากที่สุดในปัจจุบัน การเชื่อมแบบนี้จะใช้ลวดเชื่อมซึ่งมีแกนกลาง เป็นเส้นลวดโลหะหุ้มด้วยสารพอกหุ้ม ( Flux ) ดังแสดงในรูปที่ 2.20 ขณะเชื่อมจะเกิดการอาร์คขึ้นระหว่าง โลหะงานกับปลายลวดเชื่อม ความร้อนจากการอาร์คจะหลอมละลายวัสดุทั้งสอง และผสมรวมกันเป็นรอยเชื่อม

โลหะลวดเชื่อมซึ่งถูกหลอมเหลวจะหยดลงในแอ่งโลหะหลอมเหลว ( metal pool ) ซึ่งเกิดอยู่บนโลหะงาน หยดโลหะจากลวดเชื่อมตามปกติจะมีขนาดเล็กๆ ถ้าใช้กระแสเชื่อมสูง ดังแสดงในรูปที่ 2.21 (ก) หยดโลหะจะมีขนาดใหญ่ขึ้นเมื่อกระแสเชื่อมต่ำ ดังแสดงในรูปที่ 2.21 (ข)




รูปที่ 2.20 แสดงการเชื่อมแบบอาร์คด้วยลวดเชื่อมชนิดสารพอกหุ้ม



(ก) กระแสสูง (ข) กระแสต่ำ

รูปที่ 2.21 แสดงคุณลักษณะของการถ่ายเทโลหะจากลวดเชื่อม

รูปแบบของการถ่ายเทโลหะดังที่กล่าวมาแล้วนั้น จะมีอิทธิพลกับคุณภาพของรอยเชื่อม ปกติคุณภาพของรอยเชื่อมจะสูงเมื่อหยดโลหะมีขนาดเล็ก รูปแบบของการถ่ายเทโลหะจะเปลี่ยนแปลงได้ตามขนาดกระแสที่ใช้ในการเชื่อม และส่วนประกอบของสารพอกหุ้มของลวดเชื่อมที่ใช้ สารพอกหุ้มของลวดเชื่อมเมื่อถูกหลอมเหลวจะกลายเป็นขี้ตะกรัน ( slag ) ปกคลุมแอ่งโลหะหลอมเหลว และยังทำหน้าที่กำจัดสิ่งเจือปนที่มีโลหะหลอมเหลวอีกด้วย ส่วนประกอบบางชนิดในสารพอกหุ้มลวดเชื่อมมีคุณสมบัติไม่ติดไฟ แต่จะสลายตัวเป็นก๊าซปกคลุมแอ่งโลหะหลอมเหลวไว้ และจะทำให้อาร์คเรียบคงที่

สารพอกหุ้มลวดเชื่อมมีบทบาทสำคัญ สำหรับการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมชนิดนี้ หน้าที่พื้นฐานของสารพอกหุ้มลวดเชื่อมที่สำคัญคือ

1. ทำให้อาร์คได้เรียบ และช่วยในการถ่ายเทหยดโลหะให้เรียบและสม่ำเสมอ
2. สลายตัวเป็นก๊าซ หรือขี้ตะกรันปกคลุมแอ่งโลหะหลอมเหลว ไม่ให้สัมผัสกับบรรยากาศ และยังทำให้โลหะที่ถูกเติมลงในแนวเชื่อมมีความบริสุทธิ์มากขึ้น
3. ทำหน้าที่ควบคุมคุณสมบัติการใช้งานของลวดเชื่อม
4. ทำหน้าที่เพิ่มเติมธาตุเจือ ( allay element ) ที่ต้องการให้กับโลหะรอยเชื่อม

สารพอกหุ้มลวดเชื่อมปกติจะประกอบด้วย สารชนิดต่างๆ ผสมกันเป็นสัดส่วนที่ต้องการ การจำแนกประภทของสารพอกหุ้มตามสมรรถนะของมัน จะแบ่งสารที่ใช้ผสมเป็นหมู่ๆ ได้แก่ หมู่สารซึ่งทำหน้าที่ช่วยให้อาร์คเรียบ หมู่สารซึ่งเป็นวัสดุเมื่อถูกความร้อนแล้วกลายเป็นขี้ตะกรัน หมู่สารที่สลายตัวกลายเป็นก๊าซ หมู่สารตัวลดออกซิเจน หมู่สารที่ทำให้เกิดปฏิกิริยารวมตัวกับออกซิเจน ธาตุเจือ และสารซึ่งทำหน้าที่เป็นกาว ฉะนั้นวัสดุสำหรับผสมทำเป็นสารพอกหุ้มที่สำคัญๆ ได้แก่ โลหะออกไซด์ชนิดต่างๆ คาร์บอนเนท, ซิลิเกต, ฟลูออไรด์, สารอินทรีย์, เหล็กเจือ และผงเหล็ก ในตารางที่ 2.2 แสดงพื้นฐานของสารพอกหุ้มและสมรรถนะ

ลวดเชื่อมที่มีอยู่ในตลาดจะหุ้มด้วยสารพอกหุ้ม ซึ่งมีอัตราส่วนผสมของส่วนประกอบตามขนาดที่ต้องการของการใช้งาน ถึงแม้ว่าลวดเชื่อมจะมีหลายชนิด แต่ก็อาจแบ่งเป็นหมู่กว้างๆ ดังนี้

1. ชนิดที่มีไตตาเนียมออกไซด์สูง ( high titanium oxide type ) ลวดเชื่อมชนิดนี้มีชื่อเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า ชนิดรูไทล์ ( rutile ) หรือไตตาเนีย ( titania ) และมีรูไทล์ ( $TiO_2$ ) ผสมอยู่มาก ลวดเชื่อมชนิดนี้อาร์คไม่รุนแรงการซึมลึกของแอ่งโลหะหลอมเหลวต่ำและรอยเชื่อมมีลักษณะเรียบ ลวดเชื่อมชนิดนี้เหมาะสำหรับเชื่อมโลหะแผ่นบาง และใช้สำหรับการเชื่อมขั้นทับหน้าโลหะแผ่นหนา

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2.2 แสดงชนิดและผลกระทบของฟลักซ์

| ผลกระทบ / สารฟลักซ์ | อาร์คเรียบ | เป็นขี้ตะกรัน | ตัวลดอ๊อกซิเจน | ปฏิกิริยารวมตัวอ๊อกซิเจน | ตัวทำให้เกิดก๊าซ | ธาตุเจือเพิ่มเติม | เสริมให้ฟลักซ์แข็งแรง | กาวผสมฟลักซ์ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Cellulose | | | ○ | | ⊙ | | ○ | |
| Porcelain clay | ○ | ⊙ | | | | | | |
| Tarc | ○ | ⊙ | | | | | | |
| Titanium oxide | ⊙ | ⊙ | | | | | | |
| Ilmenite | ⊙ | ⊙ | | | | | | |
| Ferroxide | ○ | ⊙ | | ⊙ | | | | |
| Calcium carbonate | ○ | ⊙ | | ⊙ | ⊙ | | | |
| Ferromanganese | | ⊙ | ⊙ | | | ○ | | |
| Manganese dioxide | | ⊙ | | ○ | | ○ | ○ | |
| Silica sand | | ⊙ | | ○ | | ○ | | |
| Potassium silicate | ⊙ | ⊙ | | | | | | ⊙ |
| Sodium silicate | ○ | ⊙ | | | | | | ⊙ |

⊙ หน้าที่หลัก ( Main function )
○ หน้าที่รอง ( Secondary function )

2. ชนิดไลม์-ไตตาเนีย ( lime-titania type ) ลวดเชื่อมชนิดนี้นอกจากจะมีส่วนผสมของไตตาเนีย จะมีไลม์ ( หินปูน ) ผสมอยู่ด้วย คุณสมบัติทางกลของโลหะรอยเชื่อมมีคุณภาพดีรองจากลวดเชื่อมชนิดไฮโดรเจนต่ำ ( low-hydrogen ) คุณลักษณะของลวดเชื่อมที่มีไตตาเนียออกไซด์สูงชนิดนี้ การซึมลึกของรอยเชื่อมต่ำมาก รอยเชื่อมมีลักษณะเป็นเกล็ดละเอียด ลวดเชื่อมชนิดนี้ใช้สำหรับการเชื่อมได้ทุกตำแหน่ง และโดยเฉพาะเหมาะสำหรับการเชื่อมในแนวตั้งและเหนือศรีษะ

3. ชนิดแอลมีไนท์ ( ilmenite type ) ลวดเชื่อมชนิดนี้มีคุณสมบัติกึ่งกลางระหว่างลวดเชื่อมชนิดไตตาเนียมออกไซด์สูง กับชนิดเหล็กออกไซด์สูง สารพอกหุ้มของลวดเชื่อมชนิดนี้ส่วนใหญ่ประกอบด้วยแอลมีไนท์ อาร์คของลวดเชื่อมชนิดนี้ค่อนข้างรุนแรง และการซึมลึกในรอยเชื่อมสูง ขี้ตะกรันเหลวและไหลได้ง่าย คุณสมบัติทางกลของโลหะรอยเชื่อมและมีสมรรถนะในการตรวจสอบด้วยการเอ็กซ์เรย์ได้ผลเป็นที่น่าพอใจ ฉะนั้นลวดเชื่อมชนิดนี้มีคุณสมบัติในการใช้งานและคุณสมบัติในการเชื่อมเป็นที่น่าพอใจ ดังนั้นจึงสามารถเรียกลวดชนิดนี้ได้ว่า เป็นชนิดเอนกประสงค์ใช้สำหรับงานทั่วไป

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4. ชนิดไฮโดรเจนต่ำ ( low-hydrogen type ) ลวดเชื่อมชนิดนี้มีชื่อเรียกอีกชื่อหนึ่ง คือ ชนิดไลม์ ( lime type ) ส่วนประกอบส่วนใหญ่คือหินปูน ( lime ) และฟลูออไรท์ ( fluorite ) ถ้าโลหะรอยเชื่อมมีไฮโดรเจนผสมอยู่ด้วยเพียงเล็กน้อย รอยเชื่อมนั้นจะไวต่อการเกิดรอยร้าว ความเหนียวและการยืดหยุ่นของโลหะรอยเชื่อม ได้ผลดีเป็นที่น่าพอใจเช่นเดียวกัน แต่อาร์คไม่คงที่เล็กน้อย และหยดโลหะหลอมเหลวจะมีขนาดใหญ่กว่า เมื่อใช้ลวดเชื่อมชนิดอื่น ฉะนั้นผู้ใช้ลวดเชื่อมชนิดนี้จะต้องมีความชำนาญและคุ้นเคย กับลวดเชื่อมชนิดนี้มาก่อน เนื่องจากลวดเชื่อมชนิดนี้มีคุณสมบัติการเชื่อมดีเยี่ยม จึงใช้สำหรับเชื่อมโครงสร้างซึ่งต้องการคุณภาพเชื่อถือได้ เช่น โครงสร้างซึ่งเป็นโลหะแผ่นหนา และถังทนแรงดัน ( pressure vessel )

5. ชนิดเซลลูโลสสูง ( high cellulose type ) ลวดเชื่อมชนิดนี้มีสารอินทรีย์ผสมอยู่ด้วยประมาณ 30% เมื่อใช้เชื่อม สารอินทรีย์ถูกเผาไหม้กลายเป็นก๊าซจำนวนมาก อาร์คมีกำลังแรงการซึมลึกในรอยเชื่อมสูง มีขี้ตะกรันเพียงเล็กน้อย จึงใช้เชื่อมในแนวตั้งได้ง่าย โดยที่ลวดเชื่อมชนิดนี้มีสะเก็ดเชื่อม ( spatter ) จำนวนมาก รอยเชื่อมจึงมีลักษณะไม่เรียบร้อย ปัจจุบันลวดเชื่อมชนิดนี้ใช้น้อย

6. ชนิดเหล็กออกไซด์สูง ( high iron oxide type ) วัสดุพื้นฐานของสารพอกหุ้มคือเหล็กออกไซด์ ขณะอาร์คจะมีความรุนแรงและการซึมลึกในรอยเชื่อมสูง ลวดเชื่อมชนิดนี้เหมาะสำหรับการเชื่อมรอยเชื่อมฟิลเลทในแนวขนานนอน แต่อย่างไรก็ตามปริมาณการใช้ลวดเชื่อมชนิดนี้ ในปัจจุบันมีใช้น้อยมาก

7. ชนิดผงเหล็ก เหล็กออกไซด์ ( iron power, iron oxide type ) พื้นฐานของส่วนผสมของสารพอกหุ้มคือ ซิลิเกต และผงเหล็กประมาณ 15 - 50 % หยดโลหะหลอมเหลวที่ถ่ายเทจะอยู่ในสภาวะเป็นละออง ( spray ) เนื่องจากลวดเชื่อมชนิดนี้มีสะเก็ดเชื่อมน้อย จึงทำให้กำจัดขี้ตะกรันได้ง่าย อัตราการเติมโลหะสูง ดังนั้นประสิทธภาพการเชื่อมจึงสูง ลวดเชื่อมชนิดนี้ใช้มากสำหรับการเชื่อมรอยเชื่อมฟิลเลทแนวขนานนอน และการเชื่อมระบบกราวิทดิ ( gravity welding )

8. ชนิดผงเหล็ก-ไตตาเนีย ( iron power - titania type) ลวดเชื่อมชนิดนี้มีอาร์ครุนแรงปานกลาง ผิวหน้ารอยเชื่อมมีลักษณะดี ข้อดีทั้งสองเป็นผลมาจากมีเหล็กออกไซด์ผสมอยู่ในสารพอกหุ้มเป็นปริมาณสูง ผงเหล็กที่ใช้ผสมจะช่วยทำให้ประสิทธิภาพในการเชื่อมสูง ลวดเชื่อมชนิดนี้เหมาะสำหรับ การเชื่อมรอยเชื่อมฟิลเลทในแนวขนานนอนรอยเชื่อมชั้นเดียว การเชื่อมรอยเชื่อมฟิลเลทในแนวราบและการเชื่อมอื่นๆ

ในประเทศอุตสาหกรรมต่างๆ จะมีมาตรฐานการใช้ลวดเชื่อมไฟฟ้าชนิดหุ้มสารพอกหุ้มกับเหล็กกล้า ตัวอย่างเช่นประเทศญี่ปุ่นจะมีมาตรฐาน JIS สำหรับลวดเชื่อมไฟฟ้าชนิด

หุ้มสารพอกหุ้มใช้กับเหล็กกล้าละมุน ซึ่งแสดงไว้ในตารางที่ 2.3 JIS จะจำแนกประเภทของลวดเชื่อมตามชนิดสารพอกหุ้มตำแหน่งการเชื่อม และชนิดกระแสที่ใช้เชื่อม สัญลักษณ์ที่ใช้สำหรับการจำแนกประเภทตามมาตรฐาน JIS มีความหมายดังนี้

ตารางที่ 2.3 การแบ่งประเภทของลวดเชื่อมไฟฟ้าชนิดเหล็กเหนียว ( JIS Z 3211 - 1976 )

| การแบ่งประเภท (เจไอเอส) | ชนิดสาร พวกหุ้ม | ท่าเชื่อม* | ชนิดกระแสไฟ** | คุณสมบัติทางกลของเนื้อโลหะเชื่อม | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | ความต้านแรงดึง (กก.แรง-ม.) เมกาปาสคาล | จุดคราก (กก.แรง-ม.) เมกาปาสคาล | จุดยืด (%) | ค่าแรงกระแทกที่ 0 °ซ (กก.แรง-ม) (J)*** |
| D 4301 | อิลเมไนท์ | F,V,OH,H | AC or DC ( ± ) | ≥ 43 (420) | ≥ 35 (340) | ≥ 22 | ≥ 4.8 (47) |
| D 4303 | ไลม์-ติตาเนีย | F,V,OH,H | AC or DC ( ± ) | ≥ 43 (420) | ≥ 35 (340) | ≥ 22 | ≥ 2.8 (27) |
| D 4311 | ไฮเซลลูเลส | F,V,OH,H | AC or DC ( + ) | ≥ 43 (420) | ≥ 35 (340) | ≥ 22 | ≥ 2.8 (27) |
| D 4313 | ไฮติตาเนีย อ็อกไซด์ | F,V,OH,H | AC or DC ( − ) | ≥ 43 (420) | ≥ 35 (340) | ≥ 17 | — |
| D 4316 | ไฮโดรเย็นต่ำ | F,V,OH,H | AC or DC ( + ) | ≥ 43 (420) | ≥ 35 (340) | ≥ 25 | ≥ 4.8 (47) |
| D 4324 | ผงเหล็กติตาเนีย | F,H-Fil | AC or DC ( ± ) | ≥ 43 (420) | ≥ 35 (340) | ≥ 17 | — |
| D 4326 | ผงเหล็กไฮโดรเย็นต่ำ | F,H-Fil | AC or DC ( + ) | ≥ 43 (420) | ≥ 35 (340) | ≥ 25 | ≥ 4.8 (47) |
| D 4327 | ผงเหล็ก อ็อกไซด์ | F,H-Fil | AC or DC ( ± ) for F, AC or DC ( − ) for H-Fil | ≥ 43 (420) | ≥ 35 (340) | ≥ 25 | ≥ 2.8 (27) |
| D 4340 | พิเศษ | All of F,V,OH H,H-Fil or one of them | AC or DC ( ± ) | ≥ 43 (420) | ≥ 35 (340) | ≥ 22 | ≥ 2.8 (27) |

หมายเหตุ * สัญลักษณ์สำหรับท่าเชื่อมมีความหมายดังนี้
F : ท่าราบ, V : ท่าตั้ง, OH : ท่าเหนือหัว, H : ท่าขนานนอน
H-Fil : ท่าขนานนอนต่อมุมประชิด
** สัญลักษณ์สำหรับกระแสไฟมีความหมายดังนี้
AC กระแสสลับ, DC (±) กระแสตรงลวดเชื่อมขั้ว + หรือ −
DC (+) กระแสตรงลวดเชื่อมขั้ว +, DC (−) กระแสตรงลวดเชื่อมขั้ว − (รูปที่ 2.3)
*** J = จูลย์

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

D : สัญลักษณ์หมายถึงลวดเชื่อมไฟฟ้าชนิดหุ้มสารพอกหุ้ม

43 xx : เลขสองหลักนี้หมายถึง ขนาดความเค้นแรงดึงของโลหะรอยเชื่อม 43 คือความเค้นแรงดึงรับประกันว่าสูงกว่า 43 กก./มม.$^2$

xx 01 : เลขสองหลักหลังนี้หมายถึง ชนิดของสารพอกหุ้มและตำแหน่งการเชื่อม เฉพาะเลขหลักแรก 0 และ 1 หมายถึงใช้เชื่อมได้ทุกตำแหน่ง 2 หมายถึงใช้เชื่อมได้ในตำแหน่งท่าราบและขนานนอน, 4 หมายถึงใช้เชื่อมได้ทุกตำแหน่ง หรือตำแหน่งหนึ่งตำแหน่งใด จากตำแหน่งทุกตำแหน่ง

ในตารางที่ 2.4 แสดงมาตรฐานลวดเชื่อมไฟฟ้า สำหรับเชื่อมเหล็กกล้าละมุน ตามมาตรฐานของสหรัฐอเมริกา ถึงแม้ว่ามาตรฐานนี้จะแตกต่างจากมาตรฐาน JIS แต่รายละเอียดส่วนใหญ่จะเหมือนกัน

ตารางที่ 2.4 การแบ่งประเภทลวดเชื่อมไฟฟ้าชนิดเหล็กกล้าละมุน ( AWS A5.1 - 78 )

| การแบ่งประเภท (AWS-ASTM) | ชนิดพอกหุ้ม | ท่าเชื่อม* | ชนิดกระแสไฟ | ความต้านแรงดึงต่ำสุด กก./มม.$^2$ (MPa**) | จุดคราก ต่ำสุด กก./มม.$^2$ (MPa**) | จุดยืดต่ำสุด 50.8 มม. (%) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| E 60 | กลุ่มค่าต้านแรงดึงของเนื้อโลหะเชื่อมต่ำสุด 60,000 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว (42.2 กก./มม.$^2$) | | | | | |
| E 6010 ...... | เซลลูโลสโซเดียมสูง | F,V,OH,H | กระแสตรงลวดเชื่อมขั้ว (+) | 43.6 (430) | 35.2 (340) | 22 |
| E 6011 ...... | เซลลูโลสโปแตสเซียมสูง | F,V,OH,H | กระแสสลับหรือกระแสตรงลวดเชื่อมขั้ว (+) | 43.6 (430) | 35.2 (340) | 22 |
| E 6012 ...... | ติตาเนียมโซเดียมสูง | F,V,OH,H | " " (−) | 47.1 (460) | 38.7 (380) | 17 |
| E 6013 ...... | ติตาเนียมโปแตสเซียมสูง | F,V,OH,H | " " (±) | 47.1 (460) | 38.7 (380) | 17 |
| E 6020 ...... | เหล็กออกไซด์สูง | H-Fillet | " " (−) | 43.6 (430) | 35.2 (340) | 25 |
| E 6022 ...... | | F | " " (±) | 47.5 (460) | ไม่ระบุ | ไม่ระบุ |
| E 6027 ...... | ผงเหล็ก, เหล็กออกไซด์สูง | H-Fillet F | " " (−) | 47.6 (430) | 35.2 (340) | 25 |
| E 70 | กลุ่มค่าต้านแรงดึงของเนื้อโลหะเชื่อมต่ำสุด 70,000 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว (49.2 กก./มม.$^2$) | | | | | |
| E 7014 ...... | ผงเหล็ก, ติตาเนีย | F,V,OH,H | กระแสสลับหรือกระแสตรงลวดเชื่อมขั้ว (±) | | | 17 |
| E 7015 ...... | ไฮโดรเจนต่ำโซเดียม | F,V,OH,H | กระแสตรงลวดเชื่อมขั้ว (+) | | | 22 |
| E 7016 ...... | ไฮโดรเจนต่ำโปแตสเซียม | F,V,OH,H | กระแสสลับหรือกระแสตรงลวดเชื่อมขั้ว (+) | | | 22 |
| E 7018 ...... | ผงเหล็ก, ไฮโดรเจนต่ำ | F,V,OH,H | กระแสสลับหรือกระแสตรงลวดเชื่อมขั้ว ( ) | 50.5 (509) | 42.2 (420) | 22 |
| E 7024 ...... | ผงเหล็กติตาเนีย | H-Fillet,F | กระแสสลับหรือกระแสตรงลวดเชื่อมขั้ว (±) | | | 17 |
| E 7027 ...... | เหล็กออกไซด์สูงผงเหล็ก | H-Fillet,F | " " (−) | | | 22 |
| E 7028 ...... | ผงเหล็กไฮโดรเจนต่ำ | H-Fillet,F | " " (+) | | | 22 |
| E 7048 ...... | ไฮโดรเจนต่ำโปแตสเซียมผงเหล็ก | F,OH,H,V-Down | " " (+) | (500) | (420) | 22 |

หมายเหตุ
- * ท่าเชื่อม ได้แก่
- F : ท่าราบ V : ท่าตั้ง (เชื่อมขึ้น)
- V-Down : ท่าตั้ง (เชื่อมลง)
- H : ท่าขนานนอน
- H-Fillet : ท่าขนานนอนต่อประชิดมุมฉาก
- OH : ท่าเหนือหัว
- ** MPa : เมกาปาสคาล
- *** J : จูลล์

| การแบ่งประเภท AWS-ASTM | ค่าแรงกระแทกต่ำสุดที่ต้องการ | |
|---|---|---|
| E 6010, E 6011 ....<br>E 6027, E 7015 ....<br>E 7016, E 7018 .... | 2.8 กก.-เมตรที่ | 28.9 °ซ (27J*** ที่ − 29 °ซ) |
| E 7208 .................. | 2.8 กก.-เมตรที่ | 17.8 °ซ (27J ที่ − 18 °ซ) |
| E 6012, E 6013 ....<br>E 6020, E 7014 ....<br>E 7024 | ไม่ระบุ | |

ตารางที่ 2.5 ลวดเชื่อมไฟฟ้าชนิดหุ้มสารพอกหุ้มสำหรับเชื่อมพอกผิวแข็ง ( JIS Z - 3251 - 1972 )

| การจำแนกประเภท | ส่วนประกอบทางเคมีของโลหะรอยเชื่อม C | Cr | Ni | Mn | Si | Mo | อื่น ๆ | ความแข็ง | หมายเหตุ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| DF 2A | ≤ 0.20 | ≤ 3.0 | | | ≤ 1.0 | | – | 2หรือ3 | สำหรับการขูดขีดของสารระหว่างโลหะเล็กน้อย |
| DF 2B | 0.20 ~0.60 | ≤ 5.0 | | | ≤ 1.5 | ≤ 1.5 | ≤1.0 | 3หรือ4 | สำหรับการขูดขีดของสารระหว่างโลหะและทรายเล็กน้อย |
| DF 2C | 0.60 ~ 1.00 | | | ≤ 3.0 | ≤ 1.0 | | – | 4หรือ5 | |
| DF 3A | ≤ 0.30 | | – | | | | | 3หรือ4 | |
| DF 3B | 0.30 ~0.60 | 3.0 ~9.0 | | | | | ≤ 1.0 | 4หรือ5 | สำหรับการขูดขีดของทรายและการเจียระไน |
| DF 3C | 0.60 ~ 1.50 | | | | ≤ 1.5 | ≤ 2.0 | ≤ 2.5 | | |
| DF 4A | ≤ 0.30 | | | | | | – | | |
| DF 4B | 0.30 ~ 0.70 | 9.0 ~ 14.0 | | ≤ 4.0 | | | ≤ 6.5 | 3หรือ4 | สำหรับการขูดขีดของสารมีคมและการกัดกร่อนจากความร้อน |
| DF 4C | 0.70 ~ 1.50 | | | | | | ≤ 11.0 | | |
| DFMA | | ≤ 0.5 | ≤ 3.0 | | | | | | |
| DFMB | | | 3.0 ~ 6.0 | 11.0 ~ 18.0 | | – | ≤ 1.0 | | สำหรับการขูดขีดที่มีแรงกระแทกสูง |
| DFMC | ≤ 1.10 | | | | | | | 1หรือ2 | |
| DFMD | | 1.0 ~ 4.0 | ≤ 3.0 | | ≤ 0.8 | 1.0 ~ 2.5 | | | |
| DFME | | 14.0 ~ 18.0 | | 12.0 ~ 18.0 | | – | ≤ 4.0 | | สำหรับการกัดกร่อนที่มีอุณหภูมิสูงมากระทบ |

| การจำแนกประเภท | ชนิดของสารพอกหุ้ม | ตำแหน่งการเชื่อม | การจำแนกประเภท | ชนิดของสารพอกหุ้ม | ตำแหน่งการเชื่อม |
|---|---|---|---|---|---|
| DF 2A | B | F.V.H | DF4B | | |
| | R | | | | |
| DF 2B | BR | | DF 4C | | |
| | | F | | | |
| DF 2C | | | DFMA | | |
| DF 3A | | F.V.H. | DFMB | B | F |
| DF 3B | B | | DFMC | | |
| DF 3C | | F | DFMD | | |
| DF 4A | | | DFME | | |

หมายเหตุ 1. สัญลักษณ์ความแข็งมีความหมายดังนี้

1 : 150 ~ 200 2 : 200 ~ 350

3 : 350 ~ 550 4 : 550 ~ 700

5 : 700 (Hv)

2. สัญลักษณ์สารพอกหุ้มมีความหมายดังนี้

B : ด่าง R : ไลคาเนีย BR : ด่างไลคาเนีย

นอกจากที่ได้กล่าวมาแล้วในตอนต้น ยังมีลวดเชื่อมสำหรับเชื่อมเหล็กกล้าทนแรงดึงสูง ( high tension steel ), เหล็กกล้าทนอุณหภูมิต่ำ ( low temperature stell ), เหล็กกล้าทนความร้อน, เหล็กไร้สนิม, เหล็กหล่อ, ทองแดงเจือ, นิเกิลเจือ และสำหรับพอกผิวแข็ง( hard facing ) ตารางที่ 2.5 แสดงเพียงส่วนหนึ่งของลวดเชื่อมพอกผิวแข็ง ลวดเชื่อมชนิดไตตาเนียมออกไซด์สูงหรือชนิดไลม์-ไตตาเนีย ใช้สำหรับเชื่อมพอกผิวแข็งที่มีขนาดความแข็งต่ำ สำหรับทำให้ผิวงานทนต่อการสึกกร่อนดีขึ้น เมื่อใช้ลวดเชื่อมชนิดนี้รอยเชื่อมจะมีลักษณะดี ลวดเชื่อมชนิดไลม์-ไตตาเนียจะใช้เสมอ เพราะรอยเชื่อมมีคุณสมบัติมีความไวต่อการแตกร้าว สารพอกหุ้มของลวดเชื่อมชนิดนี้มีส่วนผสมของสารประกอบของโลหะอยู่ด้วย เพื่อช่วยให้รอยเชื่อมมีความแข็งเป็นขนาดที่ต้องการ สารประกอบของโลหะเหล่านี้ จะทำให้ขนาดความโตเส้นผ่าศูนย์กลางของลวดเชื่อมใหญ่ขึ้น แกนกลางของลวดเชื่อมตามปกติจะเป็นลวดเหล็กกล้าละมุน เช่นเดียวกับลวดเชื่อมชนิดอื่น

การเชื่อมแบบอาร์คด้วยลวดไฟฟ้าชนิดหุ้มสารพอกหุ้ม สามารถใช้เชื่อมได้ทั้งเครื่องเชื่อมกระแสสลับ ( AC ) และเครื่องกระแสตรง ( DC ) เครื่องเชื่อมกระแสสลับเป็นชนิดเครื่องเชื่อมที่ใช้แพร่หลายมากที่สุด เพราะเครื่องเชื่อมแบบนี้มีราคาปานกลาง ใช้ได้ง่าย และบำรุงรักษาเครื่องได้ง่าย

ข้อดีอย่างหนึ่งของเครื่องเชื่อมกระแสตรงคือ อาร์คได้เรียบ ข้อเสียคือ เครื่องมีราคาแพง ในระหว่างข้อดีและข้อเสียนี้ เครื่องเชื่อมกระแสตรงจะใช้สำหรับการเชื่อมในกรณีพิเศษ เช่น การเชื่อมโลหะแผ่นบางๆ เครื่องเชื่อมกระแสตรงบางแบบ เป็นเครื่องที่ขับเคลื่อนด้วยเครื่องยนต์ เครื่องเชื่อมแบบนี้มีประโยชน์สำหรับการเชื่อมในสถานที่ซึ่งไม่มีแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้า

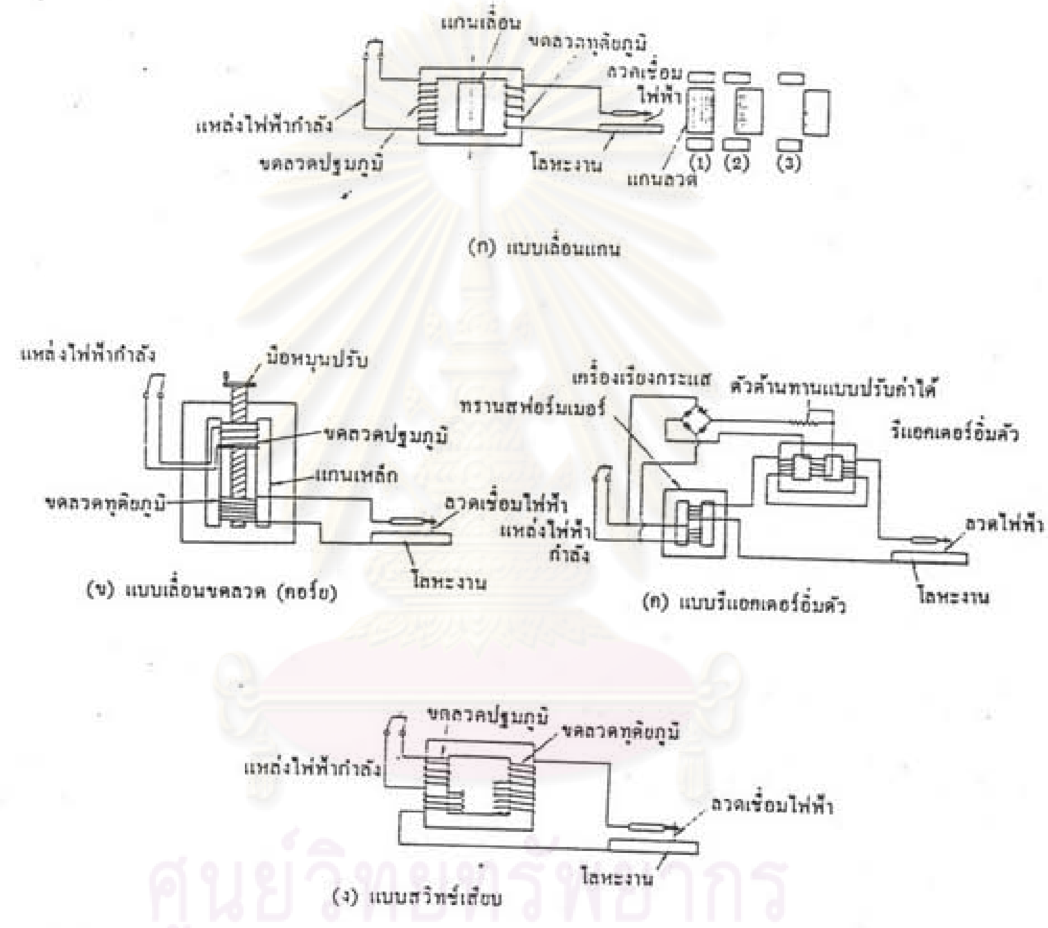
โดยระบบบังคับกระแสของเครื่องเชื่อมกระแสสลับ จะจำแนกประเภทของเครื่องเชื่อมออกเป็น 4 แบบ คือ แบบเคลื่อนแกน ( moving core ) ( ดูรูปที่ 2.22 (ก) ), แบบเคลื่อนคอล์ย ( moving coil ) ( ดูรูปที่ 2.22 (ข) ), แบบทำให้รีแอคเตอร์อิ่มตัว ( saturable reactor )( ดูรูปที่ 2.22 (ค) ), และแบบสวิต์ซเลียบ ( tap switching )( ดูรูปที่ 2.22 (ง) )

กระแสเชื่อม ของเครื่องเชื่อมแบบเคลื่อนคอล์ย จะบังคับโดยการเปลี่ยนตำแหน่งของคอล์ย หรือขดลวดปฐมภูมิ ( primary coil ) สัมพันธ์กับขดลวดทุติยภูมิ สำหรับเครื่องเชื่อมแบบทำให้รีแอคเตอร์อิ่มตัว ตัวรีแอคเตอร์จะต่ออนุกรมกับวงจรทุติยภูมิ และจะใช้กระแสตรงจากแหล่งอื่นเป็นกระแสกระตุ้นรีแอคเตอร์ กระแสเหนี่ยวนำที่เกิดจากรีแอคเตอร์ จะถูกบังคับให้เปลี่ยนแปลงค่า เพื่อใช้บังคับกระแสเชื่อม

เครื่องเชื่อมแบบทำให้รีแอคเตอร์อิ่มตัว เป็นเครื่องเชื่อมที่สามารถปรับขนาด

I20503210

กระแสเชื่อมได้ง่ายและเที่ยงตรง นอกจากนี้ยังสามารถบังคับกระแสเชื่อมโดยใช้รีโมทคอนโทรล จากข้อดีต่างๆ ของเครื่องเชื่อมแบบนี้ จึงเป็นเครื่องเชื่อมแบบที่ใช้แพร่หลายในปัจจุบัน

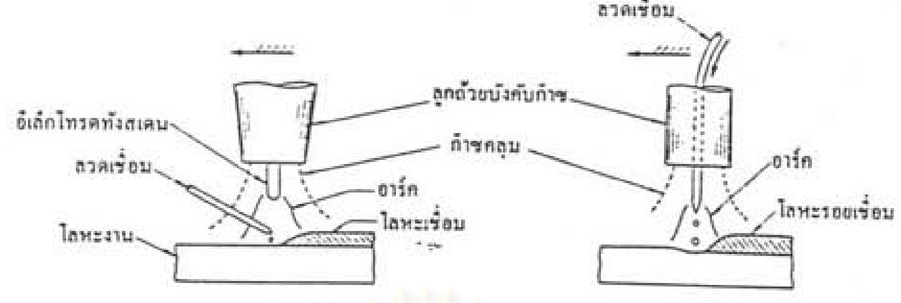



รูปที่ 2.22 เครื่องเชื่อมกระแสสลับ

2.4.2 การเชื่อมแบบอาร์คใช้ก๊าซคลุม ( Gas shielded arc welding )

การเชื่อมแบบอาร์คใช้ก๊าซคลุม เป็นวิธีการเชื่อมซึ่งใช้ก๊าซคลุม ( shield gas ) พ่นปกคลุมบริเวณรอยเชื่อม เพื่อป้องกันอาร์คและแอ่งโลหะหลอมเหลวไว้จากบรรยากาศ ก๊าซคลุมที่ใช้ตามปกติคือ ก๊าซฮีเลียม ( He ), ก๊าซอาร์กอน ( Ar ), ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ( $Co_2$ ) หรือก๊าซผสมระหว่างก๊าซต่างๆ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย




(ก) แบบอิเล็กโทรดไม่สิ้นเปลือง (ข) แบบอิเล็กโทรดสิ้นเปลือง

รูปที่ 2.23 แสดงหลักการเชื่อมแบบอาร์คใช้ก๊าซคลุม

การเชื่อมแบบอาร์คใช้ก๊าซคลุม ดังแสดงในรูปที่ 2.23 จะแบ่งการเชื่อมออกเป็นสองหมู่ คือ แบบไม่สิ้นเปลืองอิเล็กโทรด ( non-consumable electrode type ) และแบบสิ้นเปลืองอิเล็กโทรด ( consumable electrode type ) การเชื่อมแบบไม่สิ้นเปลืองอิเล็กโทรดจะใช้อิเล็กโทรดซึ่งเป็นแท่งทังสเตนเป็นตัวทำให้เกิดอาร์คระหว่างปลายอิเล็กโทรดกับโลหะงาน การเชื่อมแบบนี้ยังแยกออกเป็นชนิดใช้ลวดเชื่อม ( filler ) และชนิดไม่ใช้ลวดเชื่อม การเชื่อมแบบสิ้นเปลืองอิเล็กโทรดจะใช้เส้นลวด ( welding wire ) เป็นอิเล็กโทรด

การเชื่อมแบบอาร์คใช้ก๊าซปกคลุม คุณลักษณะของการเชื่อม จะขึ้นอยู่กับก๊าซคลุมที่ใช้ทั้งการเชื่อมแบบสิ้นเปลืองอิเล็กโทรด และไม่สิ้นเปลืองอิเล็กโทรด

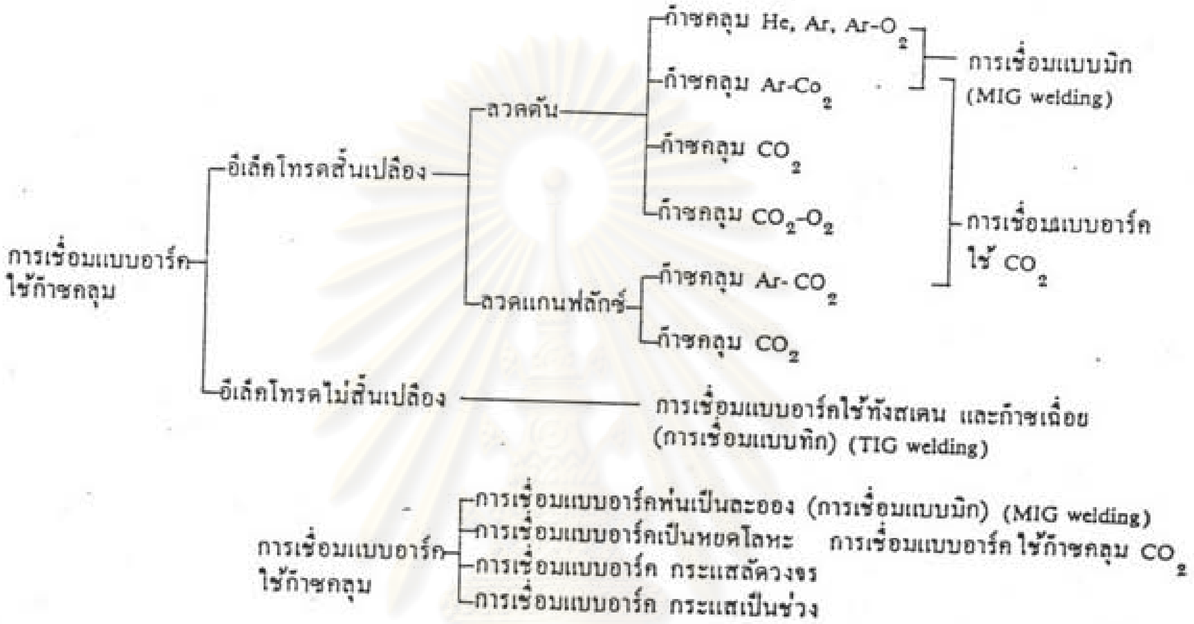
การเชื่อมแบบสิ้นเปลืองอิเล็กโทรดจะใช้ก๊าซเฉื่อย เช่น ก๊าซฮีเลียม, ก๊าซอาร์กอน ซึ่งจะเรียกการเชื่อมแบบนี้ว่า การเชื่อมแบบมิก ( MIG = Metal Inert-Gas arc welding ) การเชื่อมแบบสิ้นเปลืองอิเล็กโทรดอีกแบบหนึ่งเรียกว่า การเชื่อมแบบอาร์คใช้ก๊าซคลุมคาร์บอนไดออกไซด์ ( $Co_2$ arc welding ) การเชื่อมแบบนี้ใช้ก๊าซ $Co_2$ หรือก๊าซผสม $Co_2$ - Ar เป็นก๊าซคลุมสำหรับการเชื่อมในปัจจุบัน การเชื่อมแบบสิ้นเปลืองอิเล็กโทรดใช้ก๊าซคลุม บางครั้งก็เรียกว่า การเชื่อมแบบ GMAW ( Gas Metal Arc welding )

การเชื่อมแบบไม่สิ้นเปลืองอิเล็กโทรด ซึ่งใช้ก๊าซเฉื่อยคลุมหรืออีกนัยหนึ่งจะเรียกการเชื่อมแบบนี้ว่า GTAW ( Gas Tungsten Arc welding ) หรือ TIG ( Tungsten Inert Gas welding )

การเชื่อมแบบอาร์คใช้ก๊าซคลุม บางครั้งจะแบ่งหมู่ออกเป็นสองหมู่ตามชนิดของลวดที่ใช้คือ การเชื่อมแบบใช้เส้นลวดตัน ( soild wire ) และการเชื่อมแบบใช้ลวดแกนกลางบรรจุฟลั๊กซ์ ( flux cored wire )

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

การเชื่อมแบบอาร์คใช้ก๊าซคลุม จะสามารถจำแนกประเภทตามคุณลักษณะของการอาร์ค ปัจจุบันมีเครื่องแบบต่างๆ ถูกพัฒนานำมาใช้กับการเชื่อม ดังนั้นจำแนกประเภทแบบการเชื่อมด้วยคุณลักษณะดังกล่าวจึงได้รับความนิยม




รูปที่ 2.24 การจำแนกประเภทวิธีการเชื่อมแบบอาร์คใช้ก๊าซคลุม

2.4.2.1 การเชื่อมแบบอาร์คใช้ก๊าซคลุมคาร์บอนไดออกไซด์

การเชื่อมวิธีนี้ผันแปรมาจากการเชื่อมมิก โดยใช้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ หรือก๊าซผสมที่มีก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นก๊าซหลัก ซึ่งก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จะถูกนำมาใช้แทนก๊าซอาร์กอน เนื่องจากก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นตัวทำปฏิกิริยารวมตัวกับโลหะ การเชื่อมวิธีนี้ส่วนใหญ่จึงใช้สำหรับการเชื่อมเหล็กกล้าโครงสร้าง ต้นทุนการเชื่อมด้วยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ จะต่ำกว่าการเชื่อมซึ่งใช้ก๊าซคลุมชนิดอื่น เพราะก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ มีราคาต่ำกว่าก๊าซชนิดอื่น จากเหตุผลดังกล่าว การเชื่อมแบบอาร์คใช้ก๊าซคลุมคาร์บอนไดออกไซด์ จึงกลายเป็นวิธีการเชื่อมหลักสำหรับการเชื่อมแบบอาร์คใช้ก๊าซคลุม

ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ จะสลายตัวเป็นก๊าซคาร์บอนมอนน็อกไซด์

( CO ) และออกซิเจน ( $O_2$ ) เมื่ออยู่ในอุณหภูมิสูง ในขณะที่ดำเนินการเชื่อมแบบอาร์คใช้ก๊าซคลุมคาร์บอนไดออกไซด์ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จะทำปฏิกิริยาดังสมการ

$$2\ CO_2 \leftrightarrow 2\ CO + O_2 \qquad (2.1)$$

จากสมการข้างบนนี้จะเห็นได้ว่า เป็นปฏิกิริยาที่ทำให้เกิดบรรยากาศของปฏิกิริยารวมตัวของออกซิเจนได้สูง และหลอมเหลวจะถูกทำปฏิกิริยารวมตัวกับออกซิเจนกลายเป็นเหล็กออกไซด์ ( FeO ) เหล็กออกไซด์รวมตัวกับคาร์บอน ( C ) ในเหล็กเกิดเป็นก๊าซคาร์บอนมอนน็อกไซด์ ( CO ) ดังสมการ

$$C + FeO = Fe + CO \qquad (2.2)$$

เนื่องจากอัตราการแข็งตัวของโลหะหลอมเหลวมีอัตราสูง ในการเชื่อมแบบอาร์ค ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จะถูกดักติดเนื้อโลหะรอยเชื่อม และเป็นสาเหตุทำให้รูพรุน ( blow holes ) ถ้าตัวลดออกซิเจน ( deoxidized ) เช่น ซิลิกอน ( Si ) หรือแมงกานีส ( Mn ) ถูกผสมรวมอยู่กับลวดเชื่อมได้อย่างถูกต้อง ก็จะเกิดปฏิกิริยาเช่นนี้ขึ้น

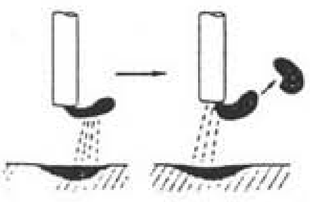
$$Si + 2\ FeO = 2\ Fe + SiO_2 \qquad (2.3)$$

$$Mn + FeO = Fe + MnO \qquad (2.4)$$

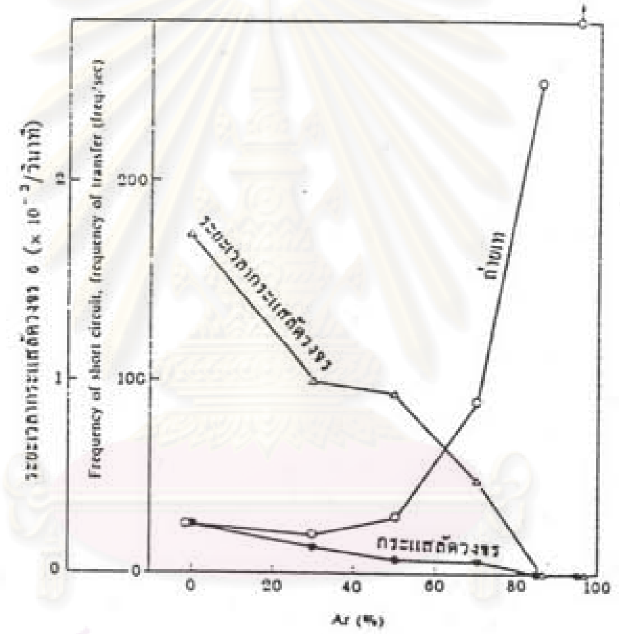
ปฏิกิริยาเหล่านี้ จะป้องกันไม่ให้เกิดปฏิกิริยาในสมการ (2.2) ต่อไปอีก จากหลักการพื้นฐานดังที่กล่าวมาแล้วนั้น ลวดเชื่อมสำหรับการเชื่อมแบบอาร์คใช้ก๊าซคลุมคาร์บอนไดออกไซด์ จะมีส่วนผสมของซิลิกอนและแมงกานีส ผสมอยู่มากกว่าชนิดลวดเชื่อมสำหรับการเชื่อมแบบมิก

เมื่อใช้ก๊าซคาร์บอนไดเป็นก๊าซคลุม การถ่ายเทโลหะจะเป็นแบบหยดขนาดใหญ่ซึ่งเรียกว่า globular transfer รูปแบบของการถ่ายเทโลหะแบบนี้ หยดโลหะหลอมเหลวจะติดอยู่กับปลายลวดเชื่อม และมีขนาดใหญ่มากขึ้นและจะหยดลงมา โดยเหตุนี้จึงทำให้อาร์คแกว่งเล็กน้อย และมีสะเก็ดเชื่อมเกิดขึ้นในการเชื่อมมากกว่าการเชื่อมแบบมิก กลไกที่ทำให้เกิดสะเก็ดเชื่อมขึ้นมากมีหลายสาเหตุ ตัวอย่างสาเหตุซึ่งแสดงไว้ในรูปที่ 2.25 ในตัวอย่างนี้หยดโลหะจะถูกเหวี่ยงออกไปด้วยแรงที่เกิดจากอาร์ค ( arc force ) ซึ่งจะกระทำในทิศทางตรงข้ามกับอาร์ค เพื่อหลีกเลี่ยงสะเก็ดเชื่อมเกิดขึ้นมาก จะต้องรักษาระยะอาร์คให้สั้นมากที่สุด จนมีความรู้สึกว่าปลายลวดเชื่อมจุ่มอยู่ในแอ่งโลหะหลอมเหลว

บางครั้งจะผสมก๊าซอาร์กอนหรือออกซิเจน กับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สำหรับการเชื่อมแบบอาร์คใช้ก๊าซคลุมคาร์บอนไดออกไซด์ในรูปที่ 2.26 แสดงผลของการอาร์คเมื่อก๊าซอาร์กอนผสมอยู่กับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ เมื่อเพิ่มปริมาณอาร์กอนมากขึ้น โลหะจะ



รูปที่ 2.25 แสดงการเกิดสะเก็ดเชื่อมของการเชื่อมแบบอาร์คใช้ก๊าซคลุม $CO_2$




รูปที่ 2.26 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ของหยดโลหะถ่ายเท กับความถี่ของกระแสลัดวงจร ระยะเวลากระแสลัดวงจร และอัตราอาร์กอนผสมในก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

หยดถ่ายเทได้เร็วขึ้น และความถี่ของการลัดวงจรระหว่างหยดโลหะกับแอ่งโลหะหลอมเหลวจะลดลง การเพิ่มความถี่ การถ่ายเทของหยดโลหะหรือการลดความถี่ของการลัดวงจร จะมีผลทำให้อาร์คได้เรียบขึ้น

จากเหตุผลดังกล่าว จะเห็นว่าอาร์กอน คือตัวที่ทำหน้าที่ทำให้อาร์ได้เรียบ และเป็นตัวลดสะเก็ดเชื่อมให้น้อยลง เมื่อมีอาร์กอนผสมอยู่มากกว่า 85% ความถี่ของการถ่ายเทหยดโลหะจะเพิ่มมากขึ้นทันที และจะไม่เกิดการลัดวงจรขึ้น ในสภาวะเช่นนี้รูปแบบของการ

ถ่ายเทโลหะจะเปลี่ยนแปลงไป จากการถ่ายเทโลหะแบบหยดเป็นแบบละอองพ่น นี่แสดงว่าการเชื่อมแบบอาร์คใช้ก๊าซคลุมคาร์บอนไดออกไซด์ จะเปลี่ยนไปที่จุดนี้เมื่อก๊าซคลุมมีอาร์กอนผสมอยู่ประมาณ 85%

เมื่อออกซิเจนผสมกับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ใช้เป็นก๊าซคลุม อัตราการหลอมเหลวของลวดเชื่อม การซึมลึกและปริมาณของขี้ตะกรัน จะเพิ่มขึ้นและเป็นสาเหตุทำให้ลักษณะของรอยเชื่อมดีขึ้น จากข้อเท็จจริงบางครั้งจะผสมก๊าซออกซิเจนกับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สูงประมาณ 10% เนื่องจากผลกระทบของปฏิกิริยารวมตัวของออกซิเจนจะเพิ่มมากขึ้น ในกรณีนี้จะต้องใช้ลวดเชื่อมที่มีส่วนผสมของสารตัวลดออกซิเจนมากขึ้น รูปแบบของหยดโลหะที่ถ่ายเทเมื่อใช้ก๊าซคลุมคาร์บอนไดออกไซด์ ออกซิเจนจะคล้ายกับรูปแบบหยดโลหะที่ถ่ายเท เมื่อใช้ก๊าซคลุมคาร์บอนไดออกไซด์บริสุทธ์

ตารางที่ 2.6 แสดงรายละเอียดทางเทคนิคของลวดเชื่อมสำหรับการเชื่อมแบบอาร์คใช้ก๊าซคลุม ( AWS 5.18 - 79 )

| ประเภทลวดเชื่อม | ส่วนผสมทางเคมีโดยน้ำหนักร้อยละ | | | | | | ก๊าซคลุม | คุณสมบัติเชิงกล (เชื่อมโดยใช้ลวดเชื่อมเป็นขั้วบวก) | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | C | Mn | Si | P | S | อื่น ๆ | | T.S. (กก./มม.$^2$) | Y.P. (กก./มม.$^2$) | EL (50 มม.) (%) | ค่าทนแรงกระแทก (กก.-เมตร) |
| ER 70S - 2 | 0.07 | 0.90 - 1.40 | 0.40 - 0.70 | 0.025 | 0.035 | Ti 0.05 - 0.15<br>Zr 0.02 - 0.12<br>Al 0.05 - 0.15 | $CO_2$ | ≥ 50.6 (500 MPa) | ≥ 42.2 (420 MPa) | ≥ 22 | ≥ 2.76 ที่ - 29°ซ (20 ฟุต-ปอนด์ ที่ - 20°ฟ) |
| ER 70S - 3 | 0.07 - 0.15 | 0.90 - 1.40 | 0.45 - 0.70 | 0.025 | 0.035 | — | $CO_2$ | ≥ 50.6 (500 MPa) | ≥ 42.2 (420 MPa) | ≥ 22 | ≥ 2.76 ที่ - 18°ซ |
| ER 70S - 4 | 0.07 - 0.15 | 1.00 - 1.50 | 0.65 - 0.85 | 0.025 | 0.035 | — | $CO_2$ | ≥ 50.6 (500 MPa) | ≥ 42.2 (420 MPa) | ≥ 22 | ไม่ระบุ |
| ER 70S - 5 | 0.07 - 0.19 | 0.90 - 1.40 | 0.30 - 0.60 | 0.025 | 0.035 | Al 0.05 - 0.90 | $CO_2$ | ≥ 50.6 (500 MPa) | ≥ 42.2 (420 MPa) | ≥ 22 | ไม่ระบุ |
| ER 70S - 6 | 0.07 - 0.15 | 1.40 - 1.85 | 0.80 - 1.15 | 0.025 | 0.035 | — | $CO_2$ | ≥ 50.6 (500 MPa) | ≥ 42.2 (420 MPa) | ≥ 22 | ≥ 2.76 ที่ - 29°ซ |
| ER 70S - 7 | 0.07 - 0.15 | 1.50 - 2.00 | 0.50 - 0.80 | 0.025 | 0.035 | — | $CO_2$ | ≥ 50.6 (500 MPa) | ≥ 42.2 (420 MPa) | ≥ 22 | ≥ 2.76 ที่ - 29°ซ |
| ER 70S - G | ไม่ระบุส่วนผสมทางเคมี | | | | | | ตามความตกลงของผู้จำหน่ายและผู้ซื้อ | ≥ 50.6 | ≥ 42.2 | ≥ 22 | ตามความตกลงของผู้จำหน่ายและผู้ซื้อ |

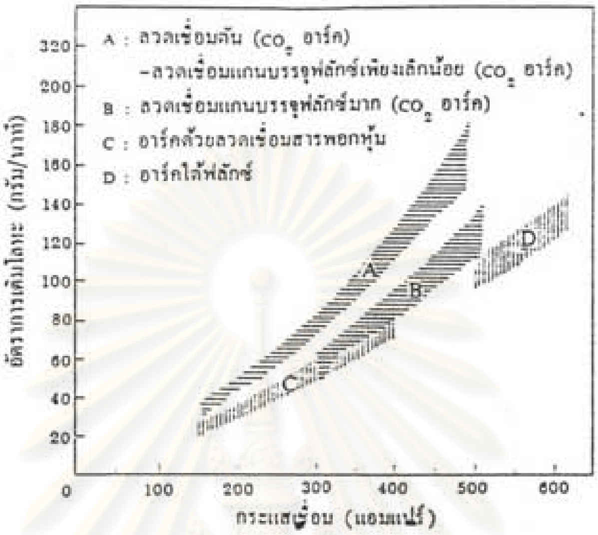
ตารางที่ 2.7 แสดงรายละเอียดทางเทคนิคของลวดเชื่อม สำหรับการเชื่อมแบบอาร์คใช้ก๊าซคลุม $CO_2$ ( JIS Z 3312 - 1974 )

| | ส่วนประกอบทางเคมีลวดเชื่อม (%) | | | | | | | คุณสมบัติเชิงกลของโลหะรอยเชื่อม | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| การแยกประเภท | C | Si | Mn | P | S | Al | Ti + Zr | T.S. (กก./มม.$^2$) | Y.P. (กก./มม.$^2$) | El (%) | Impact valve ที่ 0 °C 2 mm V notch (กก.-ม.) |
| YCW - 1 | | | | | | ≤ 0.10 | ≤ 0.30 | | | ≥ 22 | ≥ 4.8 |
| YCW - 2 | ≤ 0.15 | 0.50 - 1.20 | 0.90 - 1.90 | | | - | - | ≥ 50 | ≥ 40 | | |
| YCW - 3 | | | | ≤ 0.030 | ≤ 0.030 | 0.10 - 0.50 | ≤ 0.30 | | | ≥ 20 | |
| YCW - 4A | - | - | - | | | - | - | ≥ 43 | ≥ 35 | ≥ 22 | ≥ 2.8 |
| YCW - 4B | - | - | - | | | - | - | ≥ 50 | ≥ 40 | ≥ 20 | |

ลวดเชื่อมสำหรับการเชื่อม แบบอาร์คใช้ก๊าซคลุมคาร์บอนไดออกไซด์ ปกติจะเป็นลวดเชื่อมตัน ( solid wire ) แต่บางครั้งจะใช้ลวดเชื่อมชนิดที่มีแกนกลางบรรจุฟลักซ์ ( flux cored wire ) ซึ่งจะอธิบายในรายละเอียดของลวดเชื่อมนี้ต่อไป ปัจจุบันอัตราการใช้วิธีการเชื่อมแบบอาร์คใช้ก๊าซคลุมได้แพร่หลายมากขึ้น จึงทำให้มีการผลิตลวดเชื่อมชนิดต่างๆ เพื่อความมุ่งหมายในการใช้งานต่างๆ มากขึ้น เช่น ลวดเชื่อมสำหรับเชื่อมเหล็กกล้าละมุน ชนิดความเค้นแรงดึงสูงระดับ 50 กก./ มม.$^2$ , ชนิดที่มีความเค้นแรงดึงสูงระดับ 60-70 กก./ มม.$^2$ และ เหล็กชนิด Mo หรือชนิด Cr-Mo, เหล็กกล้าชนิดทนความร้อนที่มีขายอยู่ในตลาด ตัวอย่างลวดเชื่อมมาตรฐานของ JIS และ AWS ใช้สำหรับเหล็กกล้าละมุน ความเค้นแรงดึงระดับ 50 กก./ มม.$^2$ จะแสดงไว้ในตารางที่ 2.6 และตารางที่ 2.7 ข้อบังคับของ AWS ที่เกี่ยวกับลวดเชื่อมนั้นมีอยู่มาก ซึ่งรวมทั้งลวดเชื่อมสำหรับการเชื่อมแบบมิกด้วย

เนื่องจากการเชื่อมแบบอาร์คใช้ก๊าซคลุมคาร์บอนไดออกไซด์ เป็นวิธีการเชื่อมที่ปฏิบัติได้ง่าย และมีประสิทธิภาพในการเชื่อมสูง จึงทำให้การเชื่อมวิธีนี้เป็นที่นิยมแพร่หลายมากขึ้นอย่างรวดเร็ว รองจากการเชื่อมแบบอาร์คด้วยลวดเชื่อมไฟฟ้า ชนิดหุ้มสารพอกหุ้ม รูปที่ 2.27 แสดงการเปรียบเทียบอัตราการเติมโลหะลงในแนวเชื่อม ระหว่างการเชื่อมแบบอาร์คใช้ก๊าซคลุมคาร์บอนไดออกไซด์ กับการเชื่อมแบบอาร์คด้วยลวดเชื่อมไฟฟ้าชนิดหุ้มสารพอกหุ้ม การเชื่อมที่แสดงการเปรียบเทียบนี้ เป็นการเชื่อมซึ่งบังคับการเชื่อมด้วยมือ การเชื่อมแบบอาร์คใช้ก๊าซคลุมคาร์บอนไดออกไซด์มีประสิทธิภาพสูงกว่า และยังเป็นการเชื่อมที่สามารถเลือกใช้ขนาด

กระแสเป็นพิกัดกว้างมากกว่า ด้วยอุปกรณ์การเชื่อมแบบมิก สามารถใช้สำหรับการเชื่อมแบบอาร์คใช้ก๊าซคลุมคาร์บอนไดออกไซด์ โดยไม่ต้องเปลี่ยนแปลง หรือเพิ่มอุปกรณ์แต่อย่างใด นอกจากนี้ยังใช้วงจรต่อขั้วไฟของกระแสเชื่อมเช่นเดียวกัน หรือใช้กระแสตรงต่อกลับขั้ว




รูปที่ 2.27 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเติมโลหะ และกระแสเชื่อม

## 2.5 กระบวนการผลิตรางสายไฟฟ้า

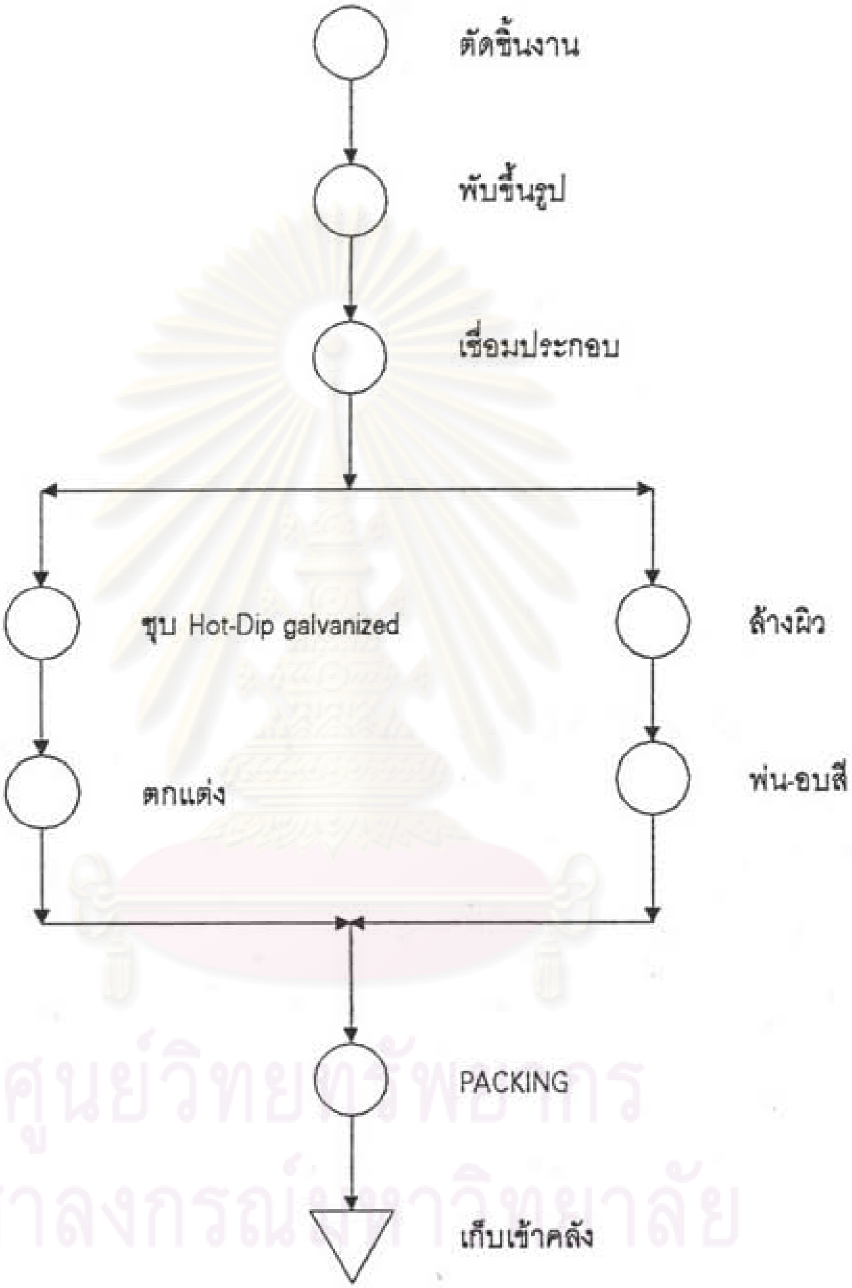
ในกระบวนการผลิตรางสายไฟฟ้าในโรงงานตัวอย่างนั้น จะเริ่มจากการนำวัตถุดิบที่เป็นเหล็กแผ่น มาทำการตัดพับขึ้นรูปในแต่ละชิ้นส่วน ให้ได้ขนาดที่ต้องการตามมาตรฐานของโรงงาน หลังจากนั้นจึงเชื่อมประกอบชิ้นงาน แล้วจึงชุบผิวโลหะหรือพ่นสีต่อไป ซึ่งในกระบวนการผลิตจะประกอบด้วยขั้นตอนใหญ่ๆ อยู่ 5 ขั้นตอน คือ การเตรียมการผลิต, การตัดชิ้นงาน, การพับขึ้นรูปชิ้นงาน, การเชื่อมประกอบชิ้นงาน และการพ่นสีหรือชุบผิวโลหะ

2.5.1 <u>การเตรียมการผลิต</u> เมื่อเริ่มจะทำการผลิต จำเป็นที่จะต้องมีการเตรียมการให้พร้อมใน 2 ส่วนนี้ก่อนคือ

1. อุปกรณ์ที่ใช้ในการผลิต ได้แก่ แม่พิมพ์ตัด แม่พิมพ์ที่ใช้ในการพับขึ้นรูป, พันช์และดายที่ใช้ในการตัดเจาะ,จิ๊กที่ใช้สำหรับจับในขณะเชื่อมประกอบ และอุปกรณ์ที่ช่วยในการผลิตอื่นๆ จำเป็นที่จะต้องเตรียมการไว้ล่วงหน้า

2. วัตถุดิบ ได้แก่ เหล็กแผ่น ทั้งขนาดและจำนวนจะต้องพอเหมาะ กับการผลิตในล๊อตหนึ่งๆ รวมทั้งวัตถุดิบที่ใช้จะต้องมีคุณภาพด้วย เพื่อเป็นการป้องกันปัญหาที่จะเกิดขึ้น ในระหว่างกระบวนการผลิต

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย




ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ 2.28 ขั้นตอนการผลิตรางสายไฟฟ้า

2.5.2 <u>การตัดชิ้นงาน</u> เป็นการนำชิ้นงานที่เป็นเหล็กแผ่นมาตัดให้ได้ขนาด ในแต่ละส่วนของรางสายไฟฟ้า เครื่องจักรที่ใช้จะเป็นเครื่องตัดโลหะแผ่น

2.5.3 <u>การพับขึ้นรูป</u> เมื่อเหล็กแผ่นที่ได้มาจากเครื่องตัด มีขนาดตามที่ต้องการแล้ว ก็จะนำเหล็กแผ่นนั้นมาป้อนเข้าเครื่องพับขึ้นรูป จำนวนครั้งในการพับขึ้นรูปขึ้นอยู่กับรายละเอียดของชิ้นงานนั้นๆ เครื่องจักรที่ใช้จะประกอบด้วย เครื่องปั๊มข้อเสือ,เครื่องเพรสไฮดรอลิค,เครื่องพับโลหะแผ่น

2.5.4 <u>การเชื่อมประกอบชิ้นงาน</u> เป็นการนำชิ้นส่วนต่างๆ ของรางสายไฟฟ้าภายหลังจากที่พับขึ้นรูปมาแล้ว มาเชื่อมประกอบเข้าด้วยกัน เครื่องจักรและอุปกรณ์ที่ใช้ในการผลิตจะประกอบด้วย เครื่องเชื่อม CO2 , เครื่องเชื่อมจุด, หุ่นยนต์เชื่อม และอุปกรณ์ที่สำคัญในการเชื่อมประกอบก็คือ จิ๊กจับยึดชิ้นงาน

2.5.5 <u>การพ่นสีหรือชุบผิวโลหะ</u> ภายหลังจากที่เชื่อมประกอบชิ้นงาน จนเป็นที่เรียบร้อยแล้ว จากนั้นจะนำชิ้นงานที่ได้ไปทำการพ่นสีหรือชุบผิวโลหะ จะขึ้นอยู่กับความต้องการของลูกค้า ถ้าหากเป็นการพ่นสี ก็จะนำชิ้นงานไปทำความสะอาดผิวก่อน จากนั้นจึงส่งชิ้นงานไปเข้าห้องพ่นสีและอบสีต่อไป แต่ถ้าหากเป็นการชุบผิวโลหะ( Hot Dip Galvanized ) ทางโรงงานก็จะนำชิ้นงานไปส่งชุบผิวโลหะข้างนอกโรงงานอีกต่อหนึ่ง การพ่นสีและการชุบผิวโลหะ เป็นกระบวนการเพื่อป้องกันการกัดกร่อนจากสนิมและสภาพการใช้งาน

กระบวนการผลิตรางสายไฟฟ้าที่กล่าวมาแล้วนั้น เป็นกระบวนการผลิตที่ใช้อยู่ในในโรงงานตัวอย่างที่เข้าไปทำการศึกษา ซึ่งจะพอสรุปได้ดังขั้นตอนตามรูปที่ 2.28

## 2.6 กระบวนการผลิตตู้ควบคุมระบบไฟฟ้า

สำหรับกระบวนการผลิตตู้ควบคุมระบบไฟฟ้า ในโรงงานตัวอย่างนั้น จะเป็นการผลิตตามลูกค้าสั่ง ดังนั้นจึงไม่เป็นการผลิตซ้ำกันคราวละมากๆ จะผลิตตามลูกค้าสั่งเพียงหนึ่งตู้หรือมากกว่าเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ในกระบวนการผลิตจะประกอบด้วยขั้นตอนหลักๆ อยู่ 4 ขั้นตอนด้วยกัน คือ การเตรียมการผลิต, การผลิตตู้, การติดตั้งอุปกรณ์ไฟฟ้าและเดินสายไฟ และการทดสอบการทำงาน

2.6.1 <u>การเตรียมการผลิต</u> เมื่อเริ่มจะทำการผลิต จำเป็นที่จะต้องเตรียมการให้พร้อมใน 3 ส่วนนี้ก่อนคือ

1. อุปกรณ์ที่ใช้ในการผลิตตู้ ได้แก่ แม่พิมพ์ตัด แม่พิมพ์ที่ใช้ในการพับขึ้นรูป พันช์และดายที่ใช้ในการตัดเจาะ และอุปกรณ์ที่ช่วยในการผลิตที่จำเป็นอื่นๆ จำเป็นที่จะต้องเตรียมการ

ไว้ล่วงหน้า

2. วัตถุดิบ ได้แก่ เหล็กแผ่น, เหล็กรูปพรรณ, อุปกรณ์มาตรฐานทางไฟฟ้า เช่น ฟิวส์, สายไฟฟ้าทองแดง, ขั้วต่อสาย, หางปลา, อุปกรณ์ปิดเปิด, หลอดไฟแสดงสถานะ, สวิตช์ต่างๆ, บัสบาร์ทองแดง, รีเลย์, คอนแทกเตอร์, เซอร์กิตเบรกเกอร์ ฯลฯ ทั้งขนาดและจำนวนจะต้องพอเหมาะกับการผลิตในครั้งหนึ่งๆ รวมทั้งวัตถุดิบที่ใช้จะต้องมีคุณภาพด้วย เพื่อเป็นการป้องกันปัญหาที่จะเกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการผลิต

3. เครื่องมือที่ใช้ในการตรวจสอบและทดสอบ ได้แก่ โวลต์มิเตอร์, แอมป์มิเตอร์, เครื่องวัดอุณภูมิ และความชื้น, เครื่องทดสอบความเป็นฉนวน, เครื่องทดสอบเฟส, เครื่องทดสอบความต้านทานแรงดันไฟฟ้าแรงสูง,เครื่องทดสอบกระแสไฟฟ้าตรง/สลับ ฯลฯ จำเป็นจะต้องเตรียมให้พร้อม และควรจะมีการสอบเทียบเป็นระยะๆ ด้วย เพื่อความถูกต้องแม่นยำของเครื่องมือวัด

2.6.2 <u>การผลิตตู้</u> สำหรับในกระบวนการผลิตตู้จะแบ่งขั้นตอนเป็น 5 ส่วน คือ โครงตู้, ฝาตู้, การประกอบฝาตู้เข้ากับโครงตู้, การเจาะตำแหน่งติดตั้งอุปกรณ์ไฟฟ้า และการพ่นสี

1. โครงตู้ จะสร้างขึ้นจากเหล็กรูปพรรณได้แก่ เหล็กฉากและเหล็กตัวยู ในการผลิตจะนำเหล็กรูปพรรณตามขนาดที่ระบุไว้แบบ มาตัดให้ได้ขนาดตามส่วนต่างๆ ของโครงตู้ จากนั้นจึงเชื่อมประกอบขึ้นเป็นโครงตู้ เครื่องจักรและอุปกรณ์ที่ใช้ประกอบด้วย เครื่องตัดเหล็กรูปพรรณ, เครื่องเชื่อมไฟฟ้า, เครื่องเจียรมือ ฯลฯ

2. ฝาตู้ ในส่วนของการผลิตฝาตู้ จะผลิตโดยการนำเหล็กแผ่นมาทำการตัดพับขึ้นรูปให้ได้ตามขนาดที่ต้องการ ในแต่ละด้านซึ่งประกอบด้วย ด้านหน้า, ด้านหลัง, ด้านบน และด้านข้าง

3. การประกอบฝาตู้เข้ากับโครงตู้ จะเป็นการนำฝาตู้ และโครงตู้ที่ผ่านกระบวนการผลิตแล้ว มาประกอบเข้าด้วยกัน การประกอบจะยึดติดกันโดยใช้บานพับ หรือขันสกรูยึดแน่นเข้าด้วยกัน

4. การเจาะตำแหน่งติดตั้งอุปกรณ์ไฟฟ้า ภายหลังจากที่ประกอบตู้แล้ว จะนำอุปกรณ์ไฟฟ้ามาตรฐาน มากำหนดตำแหน่งที่เจาะยึดตามแบบที่กำหนด หลังจากนั้นจึงเจาะตามตำแหน่งที่กำหนดไว้นั้น

5. การพ่นสี เมื่อตู้ได้ผ่านกระบวนการที่กล่าวมาแล้วทั้งหมดนั้น ขั้นตอนถัดไปก็จะทำการถอดชิ้นส่วนต่างๆ ออก เพื่อนำไปทำความสะอาดผิวโลหะ หลังจากนั้นจึงนำชิ้นส่วนเหล่านั้นไปพ่นสีและอบสีต่อไป หลังจากนั้นจึงประกอบชิ้นส่วนต่างๆเข้าด้วยกัน

2.6.3 <u>การติดตั้งอุปกรณ์ไฟฟ้าและเดินสายไฟ</u> เมื่อสิ้นสุดกระบวนการผลิตตู้ตามที่กล่าว

มาแล้ว จากนั้นจะเป็นการนำอุปกรณ์ไฟฟ้ามาตรฐาน มาติดตั้งตามตำแหน่งที่กำหนดไว้แล้วจนครบ หลังจากนั้นจึงทำการเดินสายไฟฟ้าเข้ากับอุปกรณ์ไฟฟ้าเหล่านั้น ตามวงจรที่ระบุไว้ในแบบวงจรควบคุมไฟฟ้า

2.6.4 การทดสอบการทำงาน เป็นการทดสอบการทำงานในส่วนต่างๆ ของตู้ควบคุมระบบไฟฟ้า จะประกอบด้วย การทดสอบโวลต์มิเตอร์, การทดสอบแอมป์มิเตอร์, การตรวจสอบวงจรของสายเมน, การตรวจสอบอุณหภูมิ และความชื้น, การตรวจสอบความต้านทานของฉนวน, การทดสอบความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า, การทดสอบความต้านการของการต่อลงดิน

กระบวนการผลิตตู้ควบคุมระบบไฟฟ้าที่กล่าวมาแล้วข้างต้น เป็นกระบวนการผลิตที่ใช้อยู่ในปัจจุบันของโรงงานตัวอย่าง ซึ่งจะพอสรุปเป็นแผนผังขั้นตอนได้ดังรูปที่ 2.29

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ 2.29 ขั้นตอนการผลิตตู้ควบคุมระบบไฟฟ้า