

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การศึกษาข้อมูลทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาอิทธิพลของตัวแปรการเชื่อมเลเซอร์ เทเลอร์แบบดิ่งต่อการยึดตัวของรอยต่อชนแผ่นเหล็กเคลือบสังกะสีเกรด SGACD 45/45 ได้ค่าความลึกของรอยทดสอบไม่ต่ำกว่ามาตรฐาน 7.00 มิลลิเมตร และค่าการยึดตัวของแนวเชื่อมสูงสุดและต่ำสุดโดยใช้เครื่องอิริทเซนเทส (Erichsen test) และศึกษาโครงสร้างมหภาคกับความสามารถในการขึ้นรูปมีหัวข้อดังต่อไปนี้

2.1 เหล็กแผ่นเคลือบสังกะสี

เหล็กแผ่นเคลือบสังกะสีคือ เหล็กแผ่นที่เคลือบสังกะสีเพื่อป้องกัน การกัดกร่อนที่เนื้อเหล็ก ซึ่งในบรรยากาศที่มีการกัดกร่อนสังกะสีที่เคลือบจะทำหน้าที่เป็นตัวถูกกัดกร่อนแทนเหล็ก [3]

2.1.1 ประเภทของเหล็กแผ่นเคลือบสังกะสี

เหล็กแผ่นเคลือบสังกะสีในประเทศไทยแบ่งเป็น 2 ประเภท [4]

(ก) เหล็กแผ่นเหล็กเคลือบสังกะสีชนิดแผ่นเรียบสังกะสีชนิดนี้ส่วนใหญ่ใช้ในอุตสาหกรรมต่อเนื่อง เช่น อุตสาหกรรมการผลิตชิ้นส่วนรถยนต์ เครื่องใช้ไฟฟ้า เฟอร์นิเจอร์ เครื่องทำความร้อน ท่อของเครื่องปรับอากาศรางน้ำ ฝ้าโอง และแท่งค้ำน้ำ เป็นต้น

(ข) เหล็กแผ่นเคลือบสังกะสีแผ่นลอนหรือแบบลูกฟูก มีลักษณะการใช้งานในการก่อสร้างขนาดเล็ก สำหรับใช้กันเป็นอาณาเขตของสถานที่ก่อสร้างและที่พักคนงาน รวมถึงการนำมาสร้างเป็นสังกะสีมุงหลัง และฝ้าบ้าน เช่นกลุ่มลูกค้ำในภาคเกษตรกรรม

2.1.2 เกรดและสัญลักษณ์ แบ่งตามโลหะพื้นฐานของเหล็ก (Base metal) ในเหล็กที่รีดร้อนแบ่งเป็น 6 เกรด ดังแสดงในตารางที่ 2.1 และสำหรับเหล็กที่รีดเย็นแบ่งเป็น 10 เกรด ดังแสดงในตารางที่ 2.2 [2]

ตารางที่ 2.1 เกรดและสัญลักษณ์สำหรับเหล็กที่รีดร้อนทั้งประเภทเหล็กแผ่นและเหล็กม้วน

สัญลักษณ์ของเกรด	ความหนา (มิลลิเมตร)	การใช้
SGHC	มากกว่า 1.6 ถึง 6.0	เกี่ยวกับการค้าคุณภาพ
SGHC340		โครงสร้างคุณภาพ
SGH400		
SGH440		
SGH490		
SGH540		

ตารางที่ 2.2 เกรดและสัญลักษณ์สำหรับเหล็กรีดเย็นทั้งประเภทเหล็กแผ่นและเหล็กม้วน

สัญลักษณ์ของเกรด	ความหนา (มิลลิเมตร)	การใช้
SGCC	มากกว่า 0.25 ถึง 3.2	เกี่ยวกับการค้าคุณภาพ
SGCH	มากกว่า 0.11 ถึง 1.0	เกี่ยวกับการค้าคุณภาพ, ชั้นความแข็ง
SGCD1(SGACD 45/45)	มากกว่า 0.40 ถึง 2.3	คุณภาพการขึ้นรูป, ชั้น 1
SGCD2(SGACD 45/45)		คุณภาพการขึ้นรูป, ชั้น 2
SGCD3	มากกว่า 0.60 ถึง 2.3	คุณภาพการขึ้นรูป, ชั้น 3
SGC340	มากกว่า 0.25 ถึง 3.2	โครงสร้างคุณภาพ
SGC400		
SGC440		
SGC490		
SGC570	มากกว่า 0.25 ถึง 2.0	

2.1.3 สมบัติของเหล็กเคลือบสังกะสี [3]

(ก) ความต้านทานต่อการกัดกร่อน สังกะสีมีคุณสมบัติเด่นในการป้องกันการกัดกร่อนแบบการเสียสละ(Sacrificial) โดยการเสียสละตัวเองเกิดการทำให้ปฏิกิริยาการกัดกร่อนแทนเหล็กช่วยป้องกันการเกิดสนิมบริเวณผิวเปิด หรือขอบตัดซึ่งเป็นจุดที่เกิดการกัดกร่อนได้ง่าย

(ข) การเชื่อมเหล็กเคลือบสังกะสี เหล็กเคลือบสังกะสี ซึ่งผ่านกระบวนการเคลือบสังกะสีด้วยวิธีชุบร้อนแบบต่อเนื่องทำให้แผ่นเหล็กมีผิวเคลือบที่ทนทานไม่แตกกระเทาะหรือลอกในระหว่าง การเชื่อม การรีดขึ้นรูป คัดโค้ง และปั๊มลึก

(ค) ความเรียบเหล็กเคลือบสังกะสี สามารถนำไปรีด เพื่อปรับสภาพผิว (Skin pass) เพื่อสะดวกในการทาสี เคลือบ

(ง) ความหนา ความกว้าง เหล็กเคลือบสังกะสี มีขนาดความหนา ตั้งแต่ 0.23 มิลลิเมตร ถึง 1.60 มิลลิเมตร ส่วนความกว้างมีให้เลือก 710-1265 มิลลิเมตร และระดับมวลสารของชั้นเคลือบตั้งแต่ Z12 ถึง Z35 ขึ้นอยู่กับการใช้งาน

2.1.4 การนำเหล็กเคลือบสังกะสีไปใช้งาน [5]

การใช้ประโยชน์ของแผ่นเหล็กเคลือบสังกะสีในปัจจุบันนี้อุตสาหกรรมการผลิตชิ้นส่วนรถยนต์ได้มีการนำเข้ามาใช้กันอย่างแพร่หลายโดยเฉพาะการผลิตประตูรถยนต์ (Door Car) ซึ่งมีอยู่ทั้งหมด 3 ลักษณะด้วยกัน [5] มีดังต่อไปนี้

(ก) PNL FR DRINR LH/RH(S/CAB) ขนาดเหล็กหนา 1.2 มิลลิเมตร กว้าง 280 มิลลิเมตร ยาว 1660 มิลลิเมตรและขนาดเหล็กหนา 0.7 มิลลิเมตร กว้าง 1050 มิลลิเมตร ยาว 1680 มิลลิเมตร ซึ่งเป็นประตูลูกปืนอัดประเภท 2 ประตูลูก 1 ตอน

(ข) PNL FR DRINR LH/RH (C/CAB) ขนาดเหล็กหนา 1.2 มิลลิเมตร กว้าง 255 มิลลิเมตร ยาว 1670 มิลลิเมตรและขนาดเหล็กหนา 0.7 มิลลิเมตร กว้าง 1140 มิลลิเมตร ยาว 1690 มิลลิเมตร ซึ่งเป็นประตูลูกปืนอัดประเภท 2 ประตูลูก 2 ตอน

(ค) PNL RR RH (D/CAB) ขนาดตัดเหล็กหนา 1.2 มิลลิเมตร กว้าง 255 มิลลิเมตร ยาว 905 มิลลิเมตรและขนาดเหล็กหนา 0.7 มิลลิเมตร กว้าง 925 มิลลิเมตร ยาว 1285 มิลลิเมตรซึ่งเป็นประตูลูกปืนอัดประเภท 4 ประตูลูก

2.2 รอยต่อชนแผ่นเหล็กเคลือบสังกะสี

การเชื่อมเลเซอร์เทเลอร์แบบลิ้งค์ ระยะห่างของรอยต่อชนระหว่างแผ่นงานเชื่อม กำหนดให้ไม่เกิน 0.10 มิลลิเมตรตามมาตรฐานการเชื่อมเลเซอร์เทเลอร์แบบลิ้งค์ Nd: YAG (Neodymium yttrium aluminum garnet) เพื่อให้เกิดการโอนถ่ายของน้ำโลหะจากแผ่นเหล็กที่หนากว่าไปยังแผ่นเหล็กที่บางกว่ามีความสมบูรณ์มากที่สุดขณะทำการเชื่อม [6,7]

2.3 ทฤษฎีการเชื่อมเลเซอร์เทเลอร์แบบลิ้งค์ (Laser Tailored Blank Welded History)

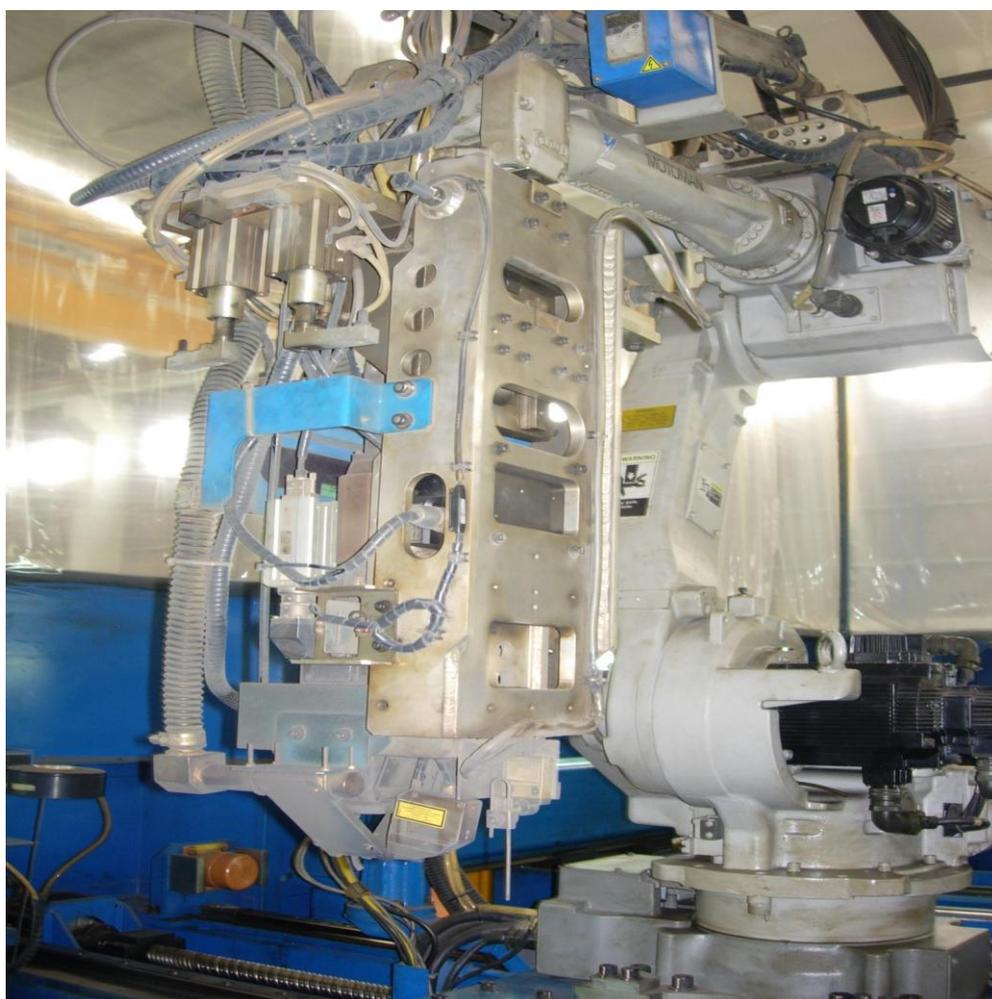
2.3.1 การเชื่อมเลเซอร์ [6]

การเชื่อมเลเซอร์ (Laser welding) คือการนำโลหะสองชิ้นซึ่งอาจจะเป็นโลหะชนิดเดียวกันหรือต่างชนิดกันก็ได้มาสัมผัสกัน ทำการให้ความร้อนบริเวณที่สัมผัสกันให้ร้อนจนถึงจุดละลายแล้วเชื่อมจนติดกัน ฉะนั้นความร้อนที่ใช้จะต้องมากพอทำให้โลหะละลายแต่ต้องไม่มากจนกระทั่งทำให้เกิดการระเหยกลายเป็นไอซึ่งจะทำให้เกิดรอยเชื่อมต่อเป็นรูพรุน โลหะส่วนมากมีค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนลดลงอย่างรวดเร็วเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจนถึงจุดละลาย ดังนั้นจึงต้องระมัดระวังให้มีการควบคุมปริมาณพลังของเลเซอร์ให้ดีซึ่งพบว่าจะมีปัญหาเมื่อโลหะมีจุดละลายต่างกันมากๆ โดยเฉพาะมักทำให้เกิดการระเหยเป็นไอได้

การเชื่อมด้วยเลเซอร์ อาจจะใช้แทนการบัดกรี (Soldering) การเชื่อมด้วยการอาร์ค (Arc welding) การเชื่อมด้วยความต้านทาน (Resistance welding) และการเชื่อมด้วยลำอิเล็กตรอน (Electron beam welding) เนื่องจากการเชื่อมที่ไม่มีการสัมผัสกับอุปกรณ์ภายนอกใดๆเลย การให้ความร้อนเกิดขึ้นเฉพาะที่ สามารถเชื่อมโลหะต่างชนิดกันได้ สามารถเชื่อมชิ้นงานที่ควบคุมอยู่ในเตาเผาที่ยอมให้แสงผ่านได้

การเชื่อมเลเซอร์ในปัจจุบันนี้สามารถทำได้ทั้งการตัดและยึดติดวัสดุ สำหรับสื่อกระตุ้น (Active Medium) เป็นได้ทั้งในสถานะของแข็งและก๊าซดังนั้นจึงได้แบ่งเครื่องเชื่อมเลเซอร์ออกเป็นสองชนิดคือเลเซอร์ชนิดของแข็ง (Solid Laser) และเลเซอร์ชนิดก๊าซ (Gas Laser)

หนึ่งในเลเซอร์ชนิดของแข็งที่นิยมใช้กันมากก็คือ Nd:YAG (Neodymium Yttrium Aluminum Garnet) ซึ่งสามารถให้ความยาวคลื่นที่ 1.064 ไมครอนสามารถให้กำลังที่สูงภายใต้ช่วงเวลาการปฏิบัติงานที่ยาวนานโดยปราศจากการเกินภาระทางความร้อน (Overheat) ด้วยข้อดีของ Nd:YAG ดังกล่าวอุตสาหกรรมการผลิตรถยนต์จึงนิยมใช้ Nd:YAG ดังแสดงในรูปที่ 2.1 ซึ่งเป็น Nd:YAG เลเซอร์ ขนาด 3 กิโลวัตต์ [6,7]



รูปที่ 2.1 Nd: YAG เลเซอร์ขนาด 3 กิโลวัตต์

2.3.2 ลักษณะอุปกรณ์การเชื่อมเลเซอร์

(ก) เครื่องผลิตลำแสงเลเซอร์ (Laser generator) ดังแสดงในรูปที่ 2.2

(ข) ระบบการถ่ายความร้อน (Chiller system) ที่เกิดจากเครื่องผลิตลำแสงเลเซอร์ (Laser Generator) ดังแสดงในรูป 2.3

(ค) การเคลื่อนหัวเชื่อมไปในทิศทางที่ต้องการ (Welding robot) ดังแสดงในรูป 2.4

(ง) การเคลื่อนชิ้นงานที่มีความหนาต่างกันเข้าตำแหน่งการตรวจสอบความหนา(Distracting robot) ดังแสดงในรูปที่ 2.5

(จ) การเคลื่อนชิ้นงานจากโต๊ะที่ตรวจสอบความหนาแล้วเข้าวางที่โต๊ะเชื่อม>Loading robot) ดังแสดงในรูปที่ 2.6

(ฉ) การเคลื่อนชิ้นงานที่เชื่อมเสร็จออกจากจิ๊กเชื่อม (Unloading robot) ดังแสดงในรูปที่ 2.7

(ช) การปล่อยลำแสงเลเซอร์ลงบนชิ้นงาน (Laser head) ดังแสดงในรูปที่ 2.8

(ซ) แผงควบคุมเครื่องจักรของพนักงาน (Operation panel) ดังแสดงในรูปที่ 2.9

(ฌ) ชุดรับข้อมูลสั่งการไปยังอุปกรณ์ต่างๆในเครื่องเชื่อม ดังแสดงในรูปที่ 2.10

(ญ) โต๊ะวางชิ้นงานที่ตรวจสอบความหนาแล้ว (Centering table) ดังแสดงในรูปที่ 2.11

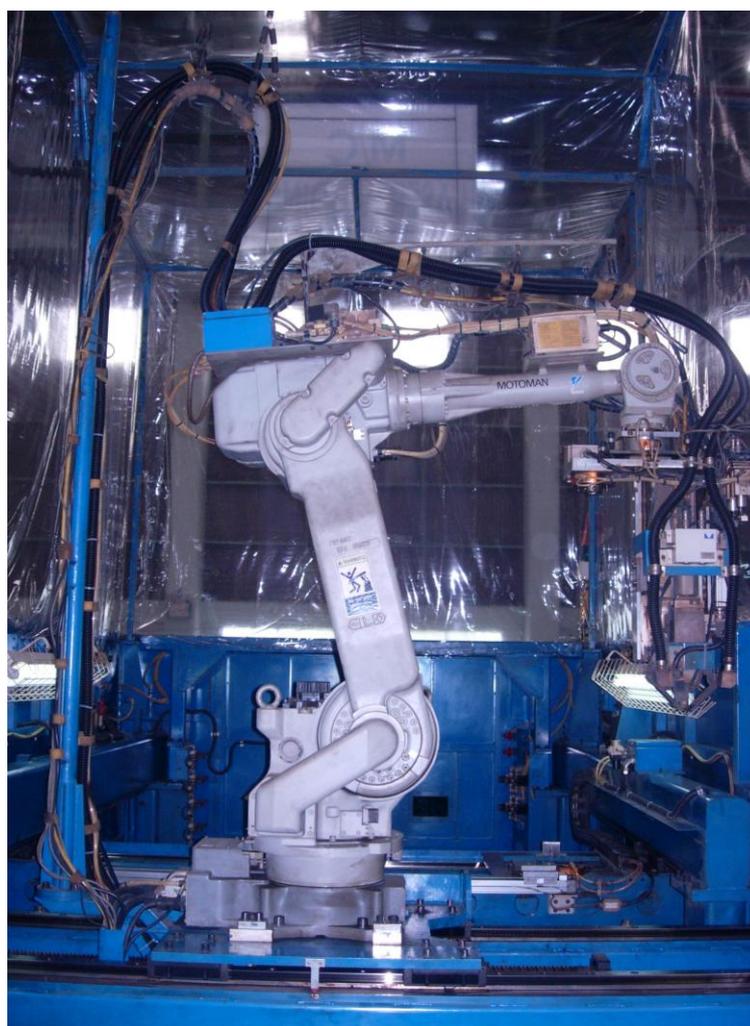
(ฎ) โต๊ะวางชิ้นงานก่อนวัดความหนา (Blank supply table) ดังแสดงในรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.2 เครื่องผลิตลำแสงเลเซอร์



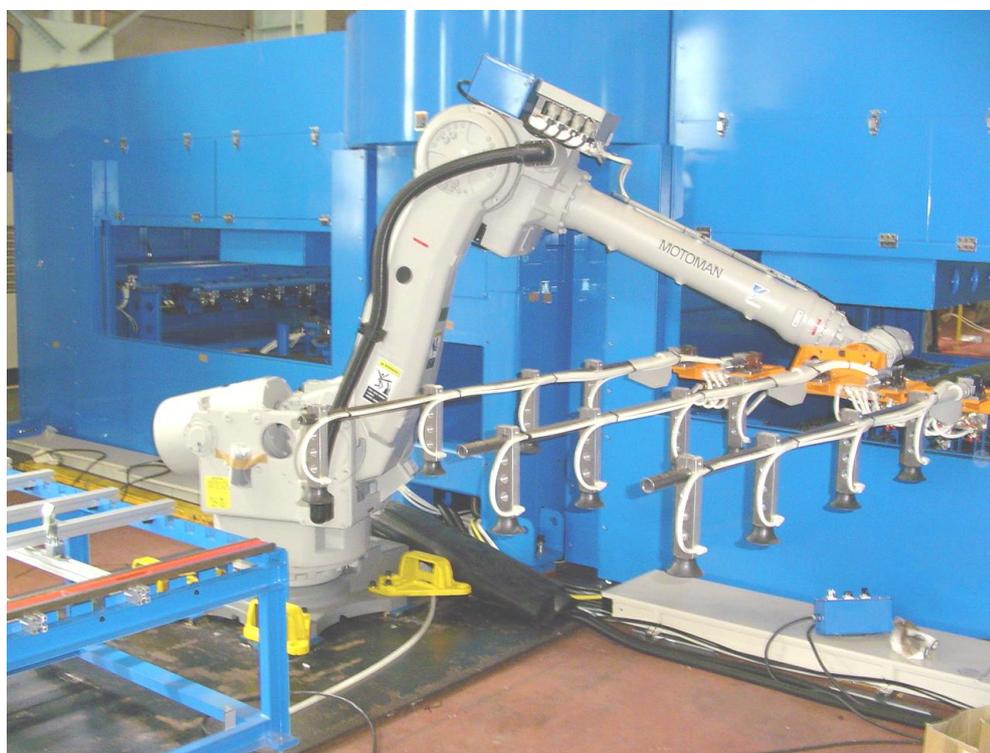
รูปที่ 2.3 เครื่องถ่ายเทความร้อน



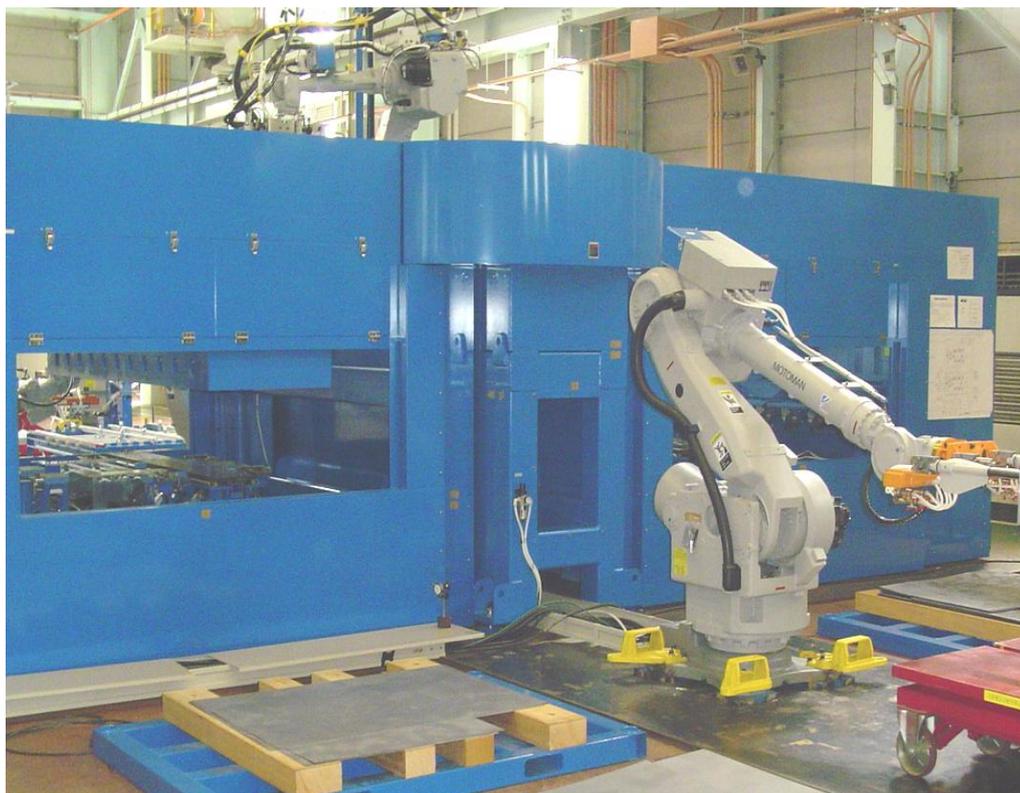
รูปที่ 2.4 การเคลื่อนที่หัวเชื่อม



รูปที่ 2.5 การตรวจสอบความหนา



รูปที่ 2.6 นำชิ้นงานวางที่โต๊ะเชื่อม



รูปที่ 2.7 นำชิ้นงานออกจากที่โต๊ะเชื่อม



รูปที่ 2.8 การปล่อยลำแสง



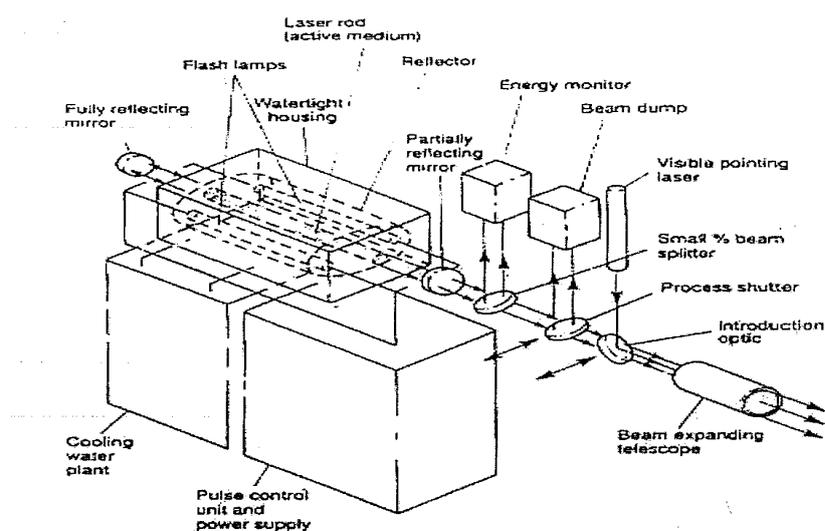
รูปที่ 2.11 วางชิ้นงานที่ตรวจสอบความหนาแล้ว



รูปที่ 2.12 โตะวางชิ้นงานก่อนตรวจสอบความหนา

2.3.3 รายละเอียดหลักการทำงาน

การเชื่อมเลเซอร์นั้นลำแสงเลเซอร์จะถูกยิงไปยังผิวชิ้นงานและเกิดการถ่ายถอดพลังงานไปยังชิ้นงาน ชิ้นงานจะดูดซับพลังงานทำให้เกิดรูหลอมละลาย (Key hole) จากนั้นลำแสงจะเข้าไปในรูหลอมละลาย (Key hole) และกระจายพลังงานไปด้านข้าง และเกิดการหลอมละลายโดยรอบของรูหลอมละลาย (Key hole) ทำให้เกิดการหลอมละลายของชิ้นงานอย่างต่อเนื่องบริเวณแนวเชื่อม และขณะที่ทำการเชื่อมแก๊สไนโตรเจน (Nitrogen gas) จะถูกปล่อยมาทำความสะอาดแนวอย่างต่อเนื่องเพื่อให้แนวเชื่อมสมบูรณ์มากที่สุด หลักการทำงานของเครื่องกำเนิดลำแสงเลเซอร์ (Light amplification by stimulated emission of radiation) ดังแสดงในรูปที่ 2.13 คือหลอดไฟ (Flash lamps) จะถูกกระตุ้นให้ส่งพลังงานแสงออกมาจากชุด จ่ายพลังงาน (Power supply) ซึ่งพลังงานแสงจะสะท้อนไปมาภายในห้องสะท้อน (Reflector) แล้วไปกระตุ้นให้อนุภาคของแกนเลเซอร์ (Laser rod) ให้เกิดการเคลื่อนที่ของอนุภาคแสง (Photon) ในแกนเลเซอร์และอนุภาคแสงจะวิ่งออกจากแกนเลเซอร์สะท้อนกระจกสะท้อนกลับ 100% (Fully reflecting mirror) กลับมาผ่านแกนเลเซอร์ ออกไปสะท้อนกระจกที่ยอมให้แสงผ่านบางส่วน (Partially reflecting mirror) ลำแสงที่มีพลังงานมากพอจะทะลุผ่านกระจกที่ยอมให้แสงผ่านและจะถูกวัดค่าพลังงานโดยชุดติดตามพลังงาน (Energy monitor) ในการนำลำแสงเลเซอร์ไปใช้งานลำแสงจะถูกเปิด-ปิดให้วิ่งผ่านไปยังกล้องขยายลำแสง (Beam expanding telescope) โดยลิ้นเปิด-ปิด (Process shutter) ในกรณีที่ไม่ต้องการใช้งานลำแสงลิ้นเปิด-ปิดจะเปลี่ยนทิศทางลำแสงไปยังตัวดูดซับพลังงาน (Absorber) เครื่องกำเนิดลำแสงจะถูกรักษาอุณหภูมิโดยระบบน้ำหล่อเย็น (Cooling water plant) โดยทั่วไปจะเป็นระบบซิลเลอร์ (chiller) และน้ำที่ใช้เป็นตัวถ่ายเทความร้อนต้องเป็นน้ำปราศจากไอออน (Deionized water) [6,7,8]



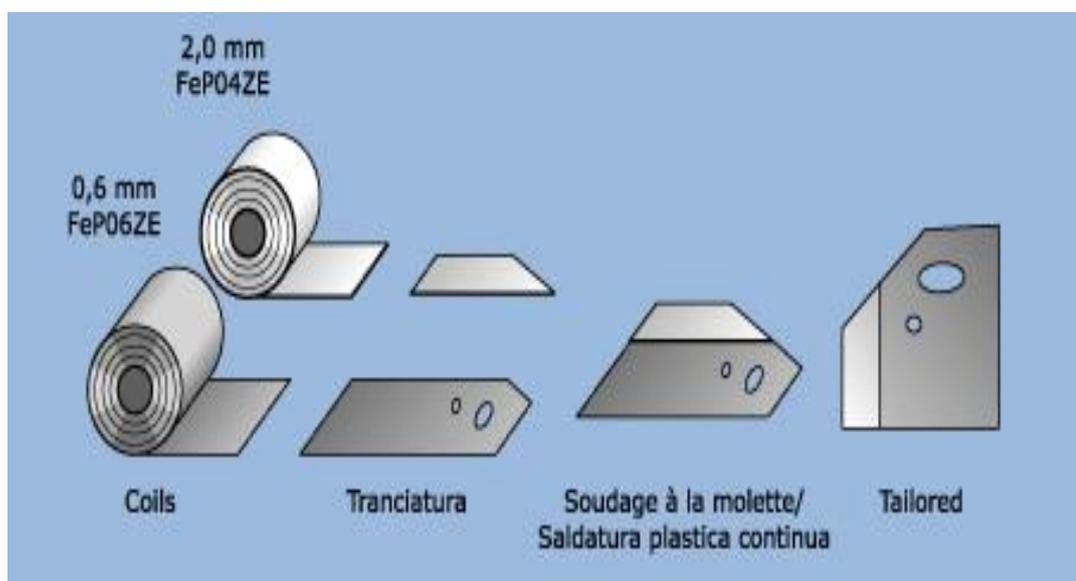
รูปที่ 2.13 แผนภาพของ Nd: YAG เลเซอร์ [6]

2.3.4 เทเลอร์แบลิ่งค์ (Tailor blank) [7]

เทเลอร์แบลิ่งค์ คือกระบวนการผลิตชิ้นส่วนยานยนต์ โดยนำเหล็กแผ่นที่มีความหนาแตกต่างกัน รวมไปถึงเหล็กที่มีคุณสมบัติ หรือชั้นเคลือบที่ต่างกัน ดังแสดงในรูป 2.14 มาเชื่อมต่อให้เป็นเหล็กแผ่นชิ้นเดียวกันก่อนที่จะนำไปทำการขึ้นรูป แนวคิดในการรวมเหล็กประเภทต่างๆ เข้ามาเป็นแผ่นเดียวกันด้วยการเชื่อมถูกพัฒนา เพื่อผลิตผลิตภัณฑ์ทางวิศวกรรมโดยนำเหล็กที่มีสมบัติแตกต่างกันมาต่อให้อยู่ในบริเวณที่เหมาะสมที่สุด เพื่อผลิตให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีสมบัติที่ดีที่สุดวิธีนี้ไม่เพียงแต่จะช่วยลดน้ำหนักของชิ้นส่วนให้ลดลง แต่ยังช่วยให้สามารถผลิตชิ้นส่วนได้โดยลดการใช้อุปกรณ์ยึดต่างๆ ด้วย

กระบวนการนี้ถูกนำไปใช้และพัฒนาอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมยานยนต์ โดยมีแรงผลักดันมาจากข้อบังคับทางด้านสิ่งแวดล้อม ความปลอดภัย และการอนุรักษ์พลังงาน ซึ่งต้องการให้ออกแบบรถยนต์ที่มีน้ำหนักเบา เพื่อประหยัดพลังงาน และก่อให้เกิดมลภาวะน้อยลง พร้อมกับการปรับปรุงโครงสร้างของตัวรถให้มีความปลอดภัยยิ่งขึ้น

ชิ้นส่วนที่ผลิตมาจากเทเลอร์แบลิ่งค์ได้แก่ โครงประตูรถ ประตูด้านใน รางวางแท่นเครื่องยนต์ เสากลางโครงรถยนต์ โครงหน้าต่าง เป็นต้น

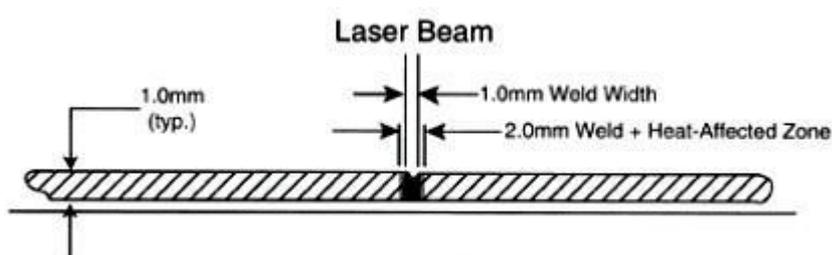


รูปที่ 2.14 แผ่นเทเลอร์แบลิ่งค์ [7]

2.3.5 การเชื่อมเทเลอร์แบลิ่งค์ (Laser tailor blank welding) [6]

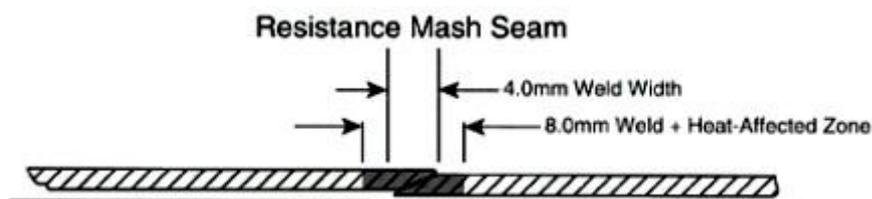
การเชื่อมเทเลอร์แบลิ่งค์ มีด้วยกัน 4 วิธี

(ก) การเชื่อมรอยต่อชนด้วยเลเซอร์ เป็นการเชื่อมแบบเต็ม (Full penetration) ซึ่งสามารถเชื่อมให้ได้รอยเชื่อมที่มีอัตราส่วนของความลึกต่อความหนาสูง ดังนั้นวิธีนี้จึงสามารถเชื่อมได้แนวเชื่อมที่ลึกและแคบ อัตราการเย็นตัวของแนวเชื่อมที่สูงมาก ทำให้ได้ความแข็งของรอยเชื่อมที่สูงกว่าการเชื่อมด้วยวิธีความต้านทาน และควบคุมแนวเชื่อมได้แม่นยำ ดังแสดงในรูปที่ 2.15 ซึ่งเป็นการเชื่อมที่เหล็กหนา 1.0 มิลลิเมตร ความกว้างลำแสงเลเซอร์ 1.0 มิลลิเมตรบริเวณแนวเชื่อมรวมกับบริเวณพื้นที่ผลกระทบร้อนเท่ากับ 2.0 มิลลิเมตร



รูปที่ 2.15 การเชื่อมรอยต่อชนด้วยเลเซอร์ [6]

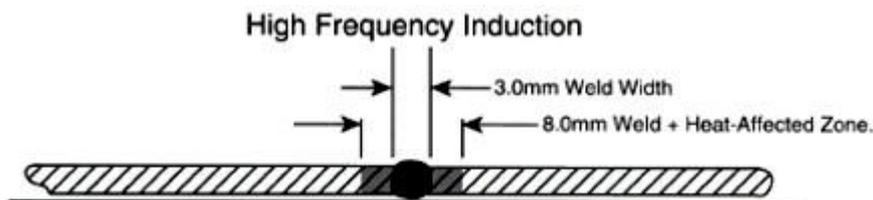
(ข) การเชื่อมรอยต่อเกยด้วยความต้านทาน เป็นกระบวนการเชื่อมโดยใช้ลู่กริด ซึ่งต้องอาศัยรอยเชื่อมที่ต่อเหลื่อมกันอัดเนื้อเหล็กเข้าด้วยกัน ขณะที่ปล่อยกระแสไฟฟ้าไหลผ่าน วิธีนี้เป็นการเชื่อมในสถานะของแข็ง (Solid state) จะได้แนวเชื่อมที่กว้างกว่าการเชื่อมด้วยเลเซอร์เล็กน้อย ดังแสดงในรูปที่ 2.16 ซึ่งความกว้างของการต่อเกยเท่ากับ 4.0 มิลลิเมตรบริเวณแนวเชื่อมรวมกับบริเวณพื้นที่ผลกระทบร้อนเท่ากับ 8.0 มิลลิเมตรและวิธีแบบนี้จะใช้กับการผลิตรถยนต์ในยุโรปของ วิศววาเจน วอลโว่ซีต เป็นต้น



รูปที่ 2.16 การเชื่อมรอยต่อเกยด้วยความต้านทาน [6]

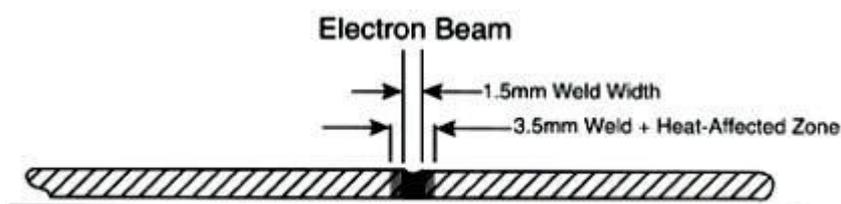
(ค) การเชื่อมแบบการหนียวนำความถี่สูงเป็นการเชื่อมแบบต่อชน (Butt upset weld) ซึ่งพัฒนาโดยบริษัทวอลโว่ใช้สำหรับเชื่อมงานเหล็กแผ่นการเชื่อมทำโดยนำเหล็กแผ่น 2 แผ่นมากดเข้าหากันตรงขอบด้วยตัวยึดตลอดแนวความยาวของเหล็กแผ่น และหน้าสัมผัสของชิ้นงานจะถูกกดด้วยแรงอัดในระหว่างการเชื่อม ซึ่งเหล็กจะหลอมติดกันปัจจุบันมีการใช้สำหรับงานเชื่อมที่มี

ความยาวของแนวเชื่อมสูงสุด 1 เมตรรอยเชื่อมที่ได้จะมีความสูงกว่าความหนาของเหล็กแผ่นประมาณ 50% ซึ่งต้องทำการขัดออกภายหลังการเชื่อม ดังแสดงในรูปที่ 2.17 ซึ่งมีความกว้างรอยเชื่อม 3.0 มิลลิเมตร บริเวณแนวเชื่อมรวมกับบริเวณพื้นที่ผลกระทบร้อนเท่ากับ 8.0 มิลลิเมตร



รูปที่ 2.17 การเชื่อมแบบการเหนี่ยวนำความถี่สูง [6]

(ง) การเชื่อมด้วยลำแสงอิเล็กตรอน เป็นเชื่อมแบบหลอมละลาย เช่นเดียวกับวิธีอื่นๆ โดยทั่วไปใช้กำลังไฟฟ้าประมาณ 25 - 35 กิโลวัตต์ วิธีนี้เหมาะ สำหรับการเชื่อมวัสดุที่มีขนาดหน้าจก ดังแสดงในรูปที่ 2.18 มีความกว้างรอยเชื่อมลำแสงอิเล็กตรอน 1.5 มิลลิเมตร บริเวณแนวเชื่อมรวมกับ บริเวณพื้นที่ผลกระทบร้อนเท่ากับ 3.5 มิลลิเมตรและเมื่อเปรียบเทียบกับ การเชื่อมด้วยเลเซอร์ พบว่า การเชื่อมด้วยลำอิเล็กตรอน สามารถเชื่อมได้โดยที่มีระยะห่างของแผ่นโลหะ (Gap) มากกว่าการเชื่อม ด้วยเลเซอร์เล็กน้อย นอกจากนี้ยังทำการเชื่อมได้เร็วกว่า และกระแสของอิเล็กตรอน ควบคุมได้ง่าย กว่า แต่มีข้อจำกัดที่สำคัญของการเชื่อมด้วยลำอิเล็กตรอน คือ จำเป็นต้องมีอุปกรณ์ป้องกันการแผ่รังสี เอ็กซ์ที่เกิดขึ้นในระหว่างการเชื่อม



รูปที่ 2.18 การเชื่อมด้วยลำอิเล็กตรอน [6]

2.4 การทดสอบและตรวจสอบสมบัติของแนวเชื่อม

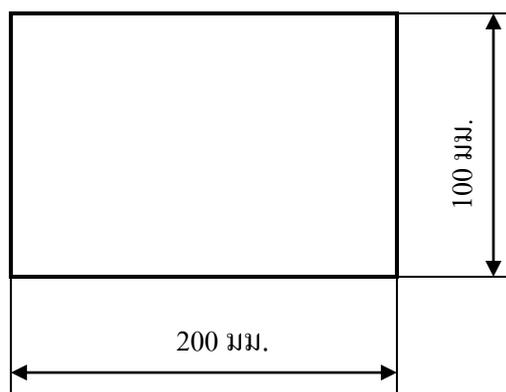
2.4.1 การทดสอบด้วยอิริทเซน

เป็นการทดสอบสมบัติทางกลการยึดตัวของแนวเชื่อม ซึ่งชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการเชื่อม เลเซอร์เทเลอร์เบิ้ลิ่งค์ นั้นต้องผ่านการทดสอบคุณสมบัติทางกลการยึดตัวของรอยเชื่อม จากการ ทดสอบด้วยเครื่อง อิริทเซนคัปปีงเทส ตามมาตรฐาน JIS B7729 และ JIS-Z-2247 [2] ดังแสดงในรูป

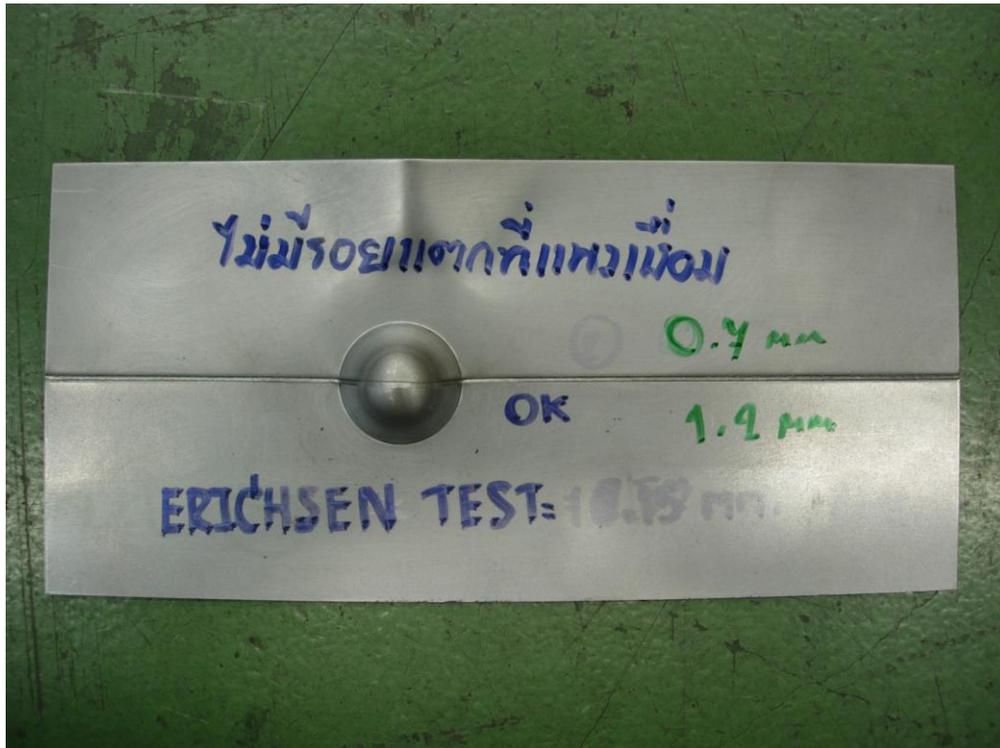
ที่ 2.19 และมีขนาดชิ้นงานทดสอบ ความกว้าง 100 มิลลิเมตร ยาว 200 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 2.20 และค่าที่ได้จากการวัดความลึกของรอยทดสอบต้องมากกว่าหรือเท่ากับ 7.00 มิลลิเมตร โดยผิวรอยเชื่อมไม่แตกร้าว ดังแสดงในรูปที่ 2.21



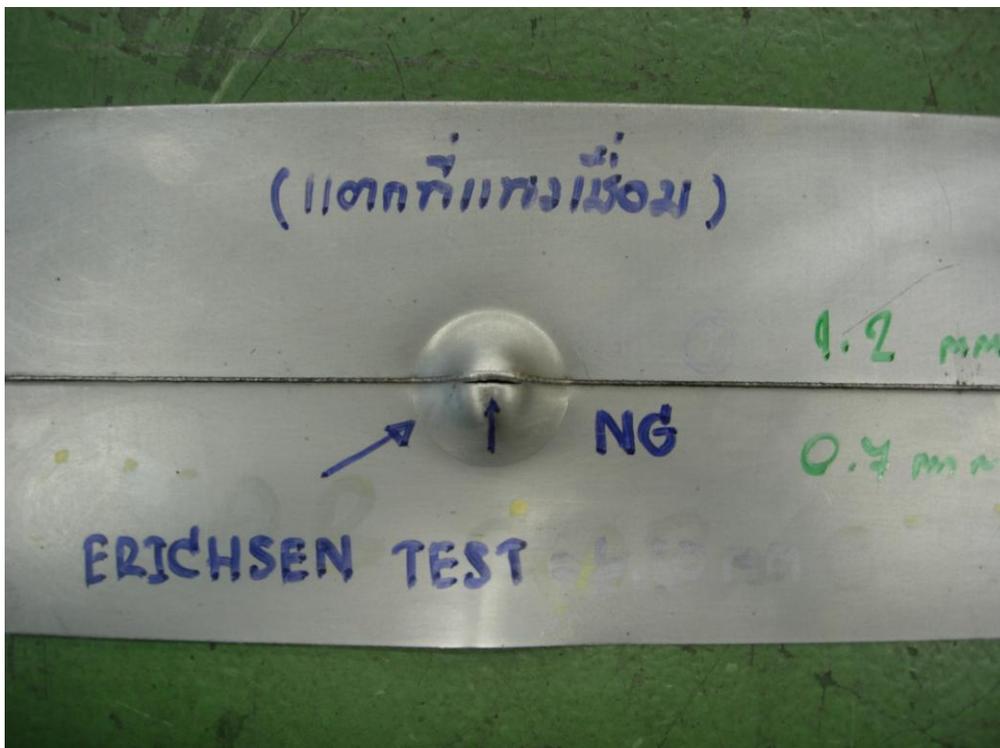
รูปที่ 2.19 เครื่องทดสอบอัลตราซาวด์



รูปที่ 2.20 ขนาดชิ้นงานทดสอบค่าการยึดตัว (หน่วย: มิลลิเมตร)



ไม่แตกร้าว (OK)



แตกร้าว (NG)

รูปที่ 2.21 ผลการทดสอบค่าการขีด

2.4.2 การศึกษาโครงสร้างของโลหะ

การศึกษาโครงสร้างของโลหะ (Metallography) หมายถึงเป็นการตรวจสอบ โครงสร้างจุลภาค (Microstructure examination) หรือโครงสร้างเล็กๆ ของโลหะด้วยกล้องไมโครสโคปเพื่อขยายดูรูปร่างของเม็ดเกรน (Grain) และบรรดาสารหรือสิ่งที่เป็นอนุภาคในเนื้อของโลหะที่ได้หลังการรีดโลหะ หรือการหล่อหลอมด้วยกรรมวิธีแบบต่างๆ การศึกษาโครงสร้างของโลหะนั้น จะแบ่งวิธีการออกเป็น 2 วิธีด้วยกันคือ วิธีแบบไมโคร เป็นการใช้อุปกรณ์ขยายดูโครงสร้างที่มีขนาดกำลังขยายตั้งแต่ 40 เท่า (4 x) ลงมา จะเป็นการศึกษาโครงสร้างของโลหะแบบหยาบๆ และวิธีแบบมาโคร เป็นการใช้อุปกรณ์ขยายดูโครงสร้างที่มีขนาดกำลังขยายตั้งแต่ 40 เท่า (4x) ขึ้นไป จะเป็นการศึกษาโครงสร้างของโลหะแบบละเอียดมากในกระบวนการ [9]

การศึกษาโครงสร้างของโลหะ (Micro structure) มีวิธีการและขั้นตอนต่างๆ ดังนี้

(ก) การเตรียม หรือการตัดชิ้นทดสอบ (Sawing) ชิ้นงานที่จะเตรียมมา ทำการตัดเพื่อใช้เป็นสเปกซีเมนนั้นต้องรู้จักสังเกตดูก่อนทุกครั้งว่าเป็นโลหะแข็งหรือโลหะอ่อน เพื่อที่จะได้เลือกใช้เครื่องมือและอุปกรณ์ในการตัดได้ถูก เช่น ตัดด้วยเลื่อยมือ ตัดด้วยเลื่อยกลหรือล้อตัดไฟเบอร์ (Abrasive cutt off wheel)

(ข) การตัดหรืออัดชิ้นทดสอบ (Mounting) ในกรณีชิ้นทดสอบ มีขนาดเล็กหรือรูปร่างบางมาก เช่น ใบมีด แผ่นทองเหลือง หรือเส้นลวดทองแดง ฯลฯ ซึ่งทำให้เราไม่สามารถจับต้องในการทำงานได้สะดวก ให้ใช้วิธีการอัดด้วยวัสดุจำพวกพลาสติก เช่น ถ้าเป็นจำพวก เทอร์โมเซตติง เรซิน จะได้แก่เบคคาไลต์ จะมีลักษณะเป็นเม็ดเล็กๆ ส่วนใหญ่จะเป็นสีดำมันเงา นำมาใส่ในบล็อกรูปทรงกระบอกเพื่อหุ้มผิวชิ้นงานที่มีขนาดต่างๆ ดังกล่าว โดยใช้ความร้อนในการทำให้ละลายเข้าเป็นเนื้อเดียวกัน ประมาณ 150 °C และใช้แรงอัด (Pessure) ประมาณ 4000 PSI

ส่วนจำพวก เทอร์โมเซตติง เรซิน จะได้แก่ ลักไค์ จะมีลักษณะเป็นเม็ดเล็กๆ ใสหรือขาวๆ จะใช้หลักการในการอัดในบล็อกรูปทรงกระบอก โดยใช้อุณหภูมิและแรงอัดเหมือนกันกับ เบคคาไลต์

(ค) วิธีการขัดชนิดหยาบ (Hand grinding) จะทำการขัดด้วยกระดาษทรายน้ำโดยมีน้ำวิ่งผ่านบริเวณผิวหน้าสเปกซีเมนและกระดาษทรายน้ำโดยตลอดเวลาที่ทำการขัดหยาบ โดยเรียงลำดับนัมเบอร์ของกระดาษทรายน้ำตั้งแต่ขนาดเม็ดทรายหยาบๆ ไปหาขนาดเม็ดทรายละเอียดๆ เช่น เริ่มตั้งแต่ นัมเบอร์ 150 180 220 240 320 400 600 800 1000 และ 1200 เป็นต้น โดยที่นัมเบอร์ที่มีขนาดเม็ดละเอียดจะมีตัวเลขเพิ่มมากขึ้นเช่นกัน

(ง) วิธีการขัดชนิดมัน (Polishing) เมื่อขัดด้วยกระดาษทรายน้ำจนผ่านนัมเบอร์ 1200 มาแล้วก็ให้นำสเปกซีเมนดังกล่าวมาทำการขัดบนล้อ ผ้าสักหลาดที่ผนึกติดกับจานล้อขัดที่ใช้มอเตอร์ในการขับประมาณ 300 รอบต่อนาที และต้องคอยเติมสารช่วยขัดเงา

(จ) วิธีการกัดกรด (Etching) หลังจากผ่านกระบวนการขัดชนิดมันมาแล้วก็จะนำสเปกซีเมน

ดังกล่าวมาทำการกัดด้วยกรด 2 เปอร์เซ็นต์ในไตร ซึ่งจะมีส่วนผสมระหว่างกรดไนตริกปริมาณ 2 เปอร์เซ็นต์ ผสมกับเมทิลแอลกอฮอล์ปริมาณ 98 เปอร์เซ็นต์ เพื่อให้เจือจางลงกว่าเดิม โดยใช้เวลาในการกัดกรดประมาณ 15 ถึง 20 นาที ให้สังเกตดูผิวหน้าสเปกซิเมนจะเป็นสีดำเป็นใช้ได้ เมื่อเสร็จแล้วให้รีบจุ่มหรือล้างลงในเมทิลแอลกอฮอล์อีกครั้ง เพื่อชำระล้างคราบที่หลงเหลือจากกระบวนการกัดกรดอีกครั้ง

(จ) ส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์ (Metallurgical microscope) ชิ้นทดสอบ (Specimen) ที่ได้ผ่านกรรมวิธีการกัดกรด (Etching) มาแล้วเราจะนำมาทำการส่องดูโครงสร้าง (Structure) ด้วยกล้องไมโครสโคปที่มีกำลังขยายขนาดต่างๆ ไล่จากน้อยไปหามาก เช่น 50 เท่า (5x) 100 เท่า (10x) 200 เท่า (20x) 500 เท่า (50x) และ 1000 เท่า (100x) ตามลำดับ

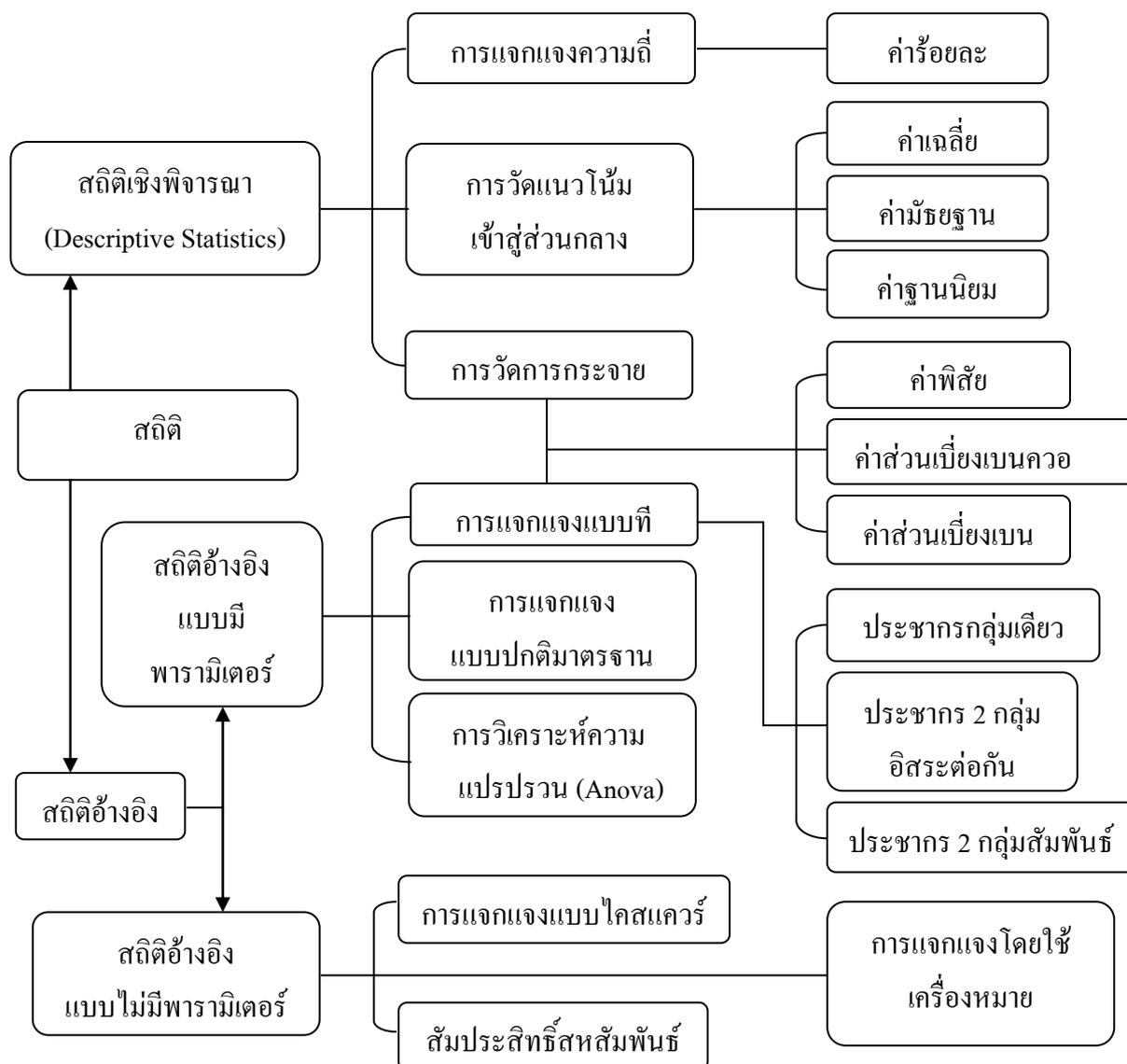
การทำงานของกล้องดังกล่าวจะใช้หลักการที่แสงวิ่งมาตกกระทบกับสเปกซิเมนจนเกิดการหักเหของลำแสง แล้วจะเกิดการสะท้อนกลับเข้าสู่ตาเรานั้นเอง

ซึ่งเมื่อปรับจนเป็นที่พอใจในความคมชัดของกราฟโครงสร้าง (Structure) แล้วถ้าเป็นกล้องชนิดพิเศษมีกล้อง ถ่ายภาพติดในตัวก็สามารถใช้ระบบการถ่ายภาพเก็บภาพโครงสร้างดังกล่าวลงบนแผ่นฟิล์มเพื่อนำไปล้างอัดต่อไป [9]

2.5 ทฤษฎีการประเมินทางสถิติ

สถิติ (Statistics) คือ วิธีการจัดการข้อมูลโดยเริ่มตั้งแต่ การเก็บรวบรวมข้อมูล ไปจนถึงการวิเคราะห์และแปลผลข้อมูล เพื่อช่วยในการตัดสินใจ ในภาวะไม่แน่นอน (Uncertain) โดยอาศัยรากฐานของหลักความน่าจะเป็น (Probability) เป็นพื้นฐานสำคัญ และสถิติที่นิยมใช้ในงานวิจัยโดยสรุปเป็นโครงสร้างสถิติดังแสดงในรูปที่ 2.22

สำหรับการวิจัยในครั้งนี้ ผู้วิจัยได้ทำการศึกษาทฤษฎี สถิติอ้างอิง แบบมีพารามิเตอร์ (Parametric inference) และใช้วิธีการทดสอบสมมติฐาน การทดสอบโดยการแจกแจงแบบ เอฟ-เทส (F-Test) และการวิเคราะห์ความแปรปรวนโดยอะโนวา (Anova) ซึ่งเป็นการวิเคราะห์หาผลกระทบจากหลายๆปัจจัยที่ส่งผล ต่อผลลัพธ์ที่เราสนใจ (Response) กล่าวคือเป็นชุดของการทดลอง ซึ่งในแต่ละครั้งจะทำการปรับเปลี่ยนค่าของปัจจัย (Input variables) อย่างเป็นระบบตามรูปแบบที่ได้วางแผนเอาไว้ แล้วทำการบันทึกผลลัพธ์ที่ได้จากการทดลองแต่ละครั้ง และงานวิจัยนี้ออกแบบการทดลองเป็นแบบ 3 ปัจจัย ตัวแปรการเชื่อมที่ศึกษาที่จะมีผลต่อสมบัติทางกลการยึดตัวบริเวณแนวเชื่อม และโครงสร้างจุลภาคกับความสามารถในการขึ้นรูปได้แก่ (A) ความเร็วการเชื่อม (B) ตำแหน่งหัวเชื่อม (C) ระยะห่างของชิ้นงานเชื่อม ซึ่งทั้งสามปัจจัยประกอบด้วย 3 ระดับและทำการทดลองซ้ำ 4 ครั้ง [10] ดังแสดงในตารางที่ 3.4



รูปที่ 2.22 โครงสร้างทางสถิติที่นิยมใช้ในปัจจุบัน [11]

2.5.1 พารามิเตอร์ (Parameter)

เป็นค่าที่คำนวณได้จากข้อมูลประชากร (Population data) และจากข้อมูลกลุ่มตัวอย่างของประชากร (Sample data) ซึ่งเป็นค่าที่บรรยายหรือแสดงลักษณะของประชากรและกลุ่มตัวอย่างของประชากร เช่น ค่าเฉลี่ยของประชากร μ ดังแสดงในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 แบบพารามิเตอร์ [12]

ค่าพารามิเตอร์หรือตัวแปร	ประชากร	กลุ่มตัวอย่างของประชากร
ค่าเฉลี่ย	μ	\bar{y}
ค่าความแปรปรวน	σ^2	S^2
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	σ	S

2.5.2 การทดสอบสมมติฐาน (Test of Hypothesis)

สมมติฐาน (Hypothesis) หมายถึง ข้อสมมติหรือข้อความที่เกี่ยวกับสิ่งที่ทำการศึกษา ซึ่งเป็นข้อสันนิษฐานอาจจะเป็นจริงหรือไม่เป็นจริงก็ได้ [12] สมมติฐานที่กำหนด จะมี 2 อย่างคือ สมมติฐานหลัก (Null hypothesis: H_0) เป็นสมมติฐานที่ถูกกำหนดขึ้นเพื่อจุดมุ่งหมายที่ต้องการและ สมมติฐานรอง (Alternative hypothesis: H_1) เป็นสมมติฐานที่ถูกกำหนดให้ตรงกันข้ามกับสมมติฐานหลักและการทดสอบสมมติฐาน จะมี 2 ลักษณะคือ

(ก) การทดสอบแบบมีทิศทางหรือแบบหางเดียว (One tailed test) จะเป็นการทดสอบเพื่อ บอกว่ามีค่ามากกว่าหรือน้อยกว่า ตัวอย่างเช่น

$$H_0; \mu = 150$$

$$H_0; \mu = 150$$

$$H_1; \mu > 150$$

$$H_1; \mu < 150$$

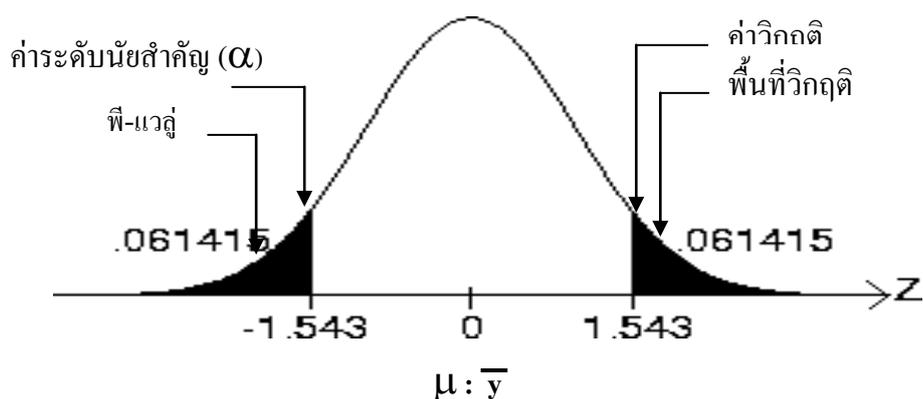
(ข) การทดสอบแบบไม่มีทิศทางหรือแบบสองหาง (Two tailed test) จะเป็นการทดสอบ เพื่อบอกว่ามีค่าเท่ากันหรือไม่ ตัวอย่างเช่น

$$H_0; \mu = 150$$

$$H_1; \mu \neq 150$$

2.5.3 ค่าวิกฤต พื้นที่วิกฤต และระดับนัยสำคัญ

ค่าวิกฤต หมายถึง ค่าที่เป็นจุดแบ่งของการยอมรับหรือปฏิเสธสมมติฐานหลัก
พื้นที่วิกฤต หมายถึง พื้นที่ของการปฏิเสธสมมติฐานหลัก
ค่าระดับนัยสำคัญ หมายถึง ระดับการผิดพลาดสูงสุดที่ผู้ศึกษายอมรับให้เกิดขึ้นได้ดังแสดงในรูปที่ 2.23 [12]



รูปที่ 2.23 ค่าวิกฤติ พื้นที่วิกฤติ ระดับนัยสำคัญ และค่าพี-แวลู [12]

2.5.4 การทดสอบโดยการแจกแจงแบบ เอฟ-เทส

เป็นการแจกแจงของตัวแปรสุ่มที่สร้างจากการแจกแจงแบบไคสแควร์ดงนิยาม ต่อไปนี้ ให้ U และ V เป็นตัวแปรสุ่มที่มีการแจกแจงแบบไคสแควร์พร้อมด้วยองศาความเป็นอิสระเท่ากับ V_1 และ V_2 ตามลำดับ ถ้า U และ V เป็นตัวแปรสุ่มที่เป็นอิสระต่อกันแล้วตัวแปรสุ่ม F เท่ากับ U / V_1 หากด้วย V / V_2 จะมีการแจกแจงแบบเอฟ พร้อมด้วยองศาความเป็นอิสระเท่ากับ V_1 และ V_2 ตามลำดับ [5]

คุณสมบัติการแจกแจงแบบ เอฟ-เทส

- ตัวแปร F มีค่าตั้งแต่ 0 ถึง ∞ นั่นคือ $0 < F < \infty$
- เส้นโค้งการแจกแจงมีลักษณะเบ้ขวา โดยขึ้นอยู่กับองศาความเป็นอิสระ V_1 และ V_2
- เส้นโค้งการแจกแจงแบบเอฟมีลักษณะคล้ายกับเส้นโค้งการแจกแจงแบบไคสแควร์ และมีจุด

ศูนย์กลางที่ 1

แล้วตัวแปร F จะมีการแจกแจงแบบเอฟ (F distribution) โดยมีองศาความเป็นอิสระเท่ากับ

$v_1 = n_1 - 1$ และ $v_2 = n_2 - 1$ ค่าของเอฟที่มีองศาความเป็นอิสระเท่ากับ V_1 และ V_2 และทำให้พื้นที่ใต้โค้งด้านขวาของโค้งการแจกแจงเท่ากับ α เขียนแทนด้วย $f_{\alpha; v_1 v_2}$ ดังแสดงในรูปที่ 2.24

2.5.5 การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียล 3 ปัจจัย

การออกแบบเชิงแฟกทอเรียล (Factorial design) [10] เป็นวิธีการทดลองที่มีประสิทธิภาพสูงสุด การออกแบบเชิงแฟกทอเรียล หมายถึง การทดลองที่พิจารณาถึงผลที่เกิดจากการรวมกันของระดับ (Level) ของปัจจัยทั้งหมดที่เป็นไปได้ในการทดลองนั้น ตัวอย่างผลที่เกิดจากปัจจัยหนึ่งหมายถึง การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นกับผลตอบ (Response) ที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงระดับของปัจจัยนั้นๆ ซึ่งเรียกว่า ผลหลัก (Main effect) และในการทดลองบางอย่าง อาจพบว่าความแตกต่างของผลตอบที่เกิดขึ้นบนระดับต่างๆ ของปัจจัยหนึ่งจะมีค่าไม่เท่ากันที่ระดับอื่นๆ ทั้งหมดของปัจจัยอื่นซึ่ง

หมายถึงผลตอบของปัจจัยหนึ่งจะขึ้นอยู่กับระดับของปัจจัยอื่น ๆ นั้นเอง และเรียกเหตุการณ์นี้ว่าการมีอันตรกิริยา (Interaction) ต่อกันระหว่างปัจจัยที่เกี่ยวข้องและการออกแบบเชิงแฟกทอเรียล 3 ปัจจัยนี้คือ A B และ C ปัจจัย A จะประกอบด้วย a ระดับ ปัจจัย B จะประกอบด้วย b ระดับและปัจจัย C จะประกอบด้วย c ระดับ ซึ่งทั้งหมดนี้ถูกจัดให้อยู่ในรูปของการออกแบบเชิงแฟกทอเรียล นั่นคือ ในแต่ละการทดสอบของการทดลองจะประกอบด้วยการทดลองร่วมปัจจัยทั้งหมด $a \times b \times c$ การทดลองโดยปกติจะมีจำนวนการทดสอบทั้งหมด n ครั้ง กำหนดให้ y_{ijkl} คือผลตอบที่สังเกตได้เมื่อปัจจัย A อยู่ที่ระดับ i ($i = 1, 2, \dots, a$) ปัจจัย B อยู่ที่ระดับ j ($j = 1, 2, \dots, b$) และปัจจัย C อยู่ที่ระดับ k ($k = 1, 2, \dots, c$) สำหรับการทดสอบที่ l ($l = 1, 2, \dots, n$) รูปแบบทั่วไปของการออกแบบเชิงแฟกทอเรียล 3 ปัจจัยเนื่องจากลำดับของการสังเกตทั้ง $a \times b \times c \times n$ ครั้ง ถูกเลือกมาอย่างสุ่ม ซึ่งเป็นการออกแบบสุ่มบริบูรณ์ (Completely randomized design)

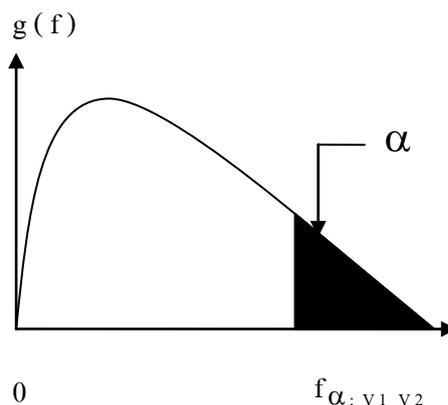
ในกรณีที่ปัจจัย A มีจำนวนระดับเท่ากับ a ปัจจัย B มีจำนวนระดับเท่ากับ b ปัจจัย C มีจำนวนระดับเท่ากับ c ต่อไปเช่นนี้เรื่อย ๆ และทั้งหมดนี้ถูกจัดให้อยู่ในลักษณะของการทดลองเชิงแฟกทอเรียล ซึ่งจะมีจำนวนข้อมูลที่ได้ทั้งหมดในการทดลองเท่ากับ $abc \dots n$ และจะต้องมีเรพลีเคตอย่างน้อย 2 การทดสอบ ($n \geq 2$) เพื่อที่จะทำให้สามารถหาค่าผลรวมของกำลังสองที่เกิดจากความผิดพลาดได้ถ้าอันตรกิริยาที่เป็นไปได้ทั้งหมดถูกนำไปพิจารณาในแบบจำลอง

ถ้าปัจจัยในการทดลองทั้งหมดเป็นแบบค่าตายตัวเราสามารถที่จะคิดสูตร และทดสอบสมมติฐานเกี่ยวกับผลหลักและอันตรกิริยาได้โดยง่าย สำหรับแบบจำลองแบบผลตายตัว ตัวทดสอบเชิงสถิติสำหรับผลหลักและอันตรกิริยาสามารถหาได้โดยสร้างค่ากำลังสองเฉลี่ยของสิ่งนั้นขึ้น แล้วหารด้วยค่ากำลังสองเฉลี่ยของความผิดพลาด (เหมือนกับกรณีของ 2 ปัจจัย) และการทดสอบสมมติฐานจะใช้ F-Test แบบทดสอบปลายด้านบนหนึ่งด้าน (Upper-Tail, One-Tail Test) จำนวนระดับขึ้นความเสรีสำหรับผลหลักของปัจจัยใด ๆ มีค่าเท่ากับจำนวนระดับของปัจจัยนั้นลบด้วย 1 และจำนวนระดับขึ้นความเสรีของอันตรกิริยามีค่าเท่ากับผลคูณของระดับขึ้นความเสรีของส่วนประกอบของอันตรกิริยานั้น ๆ

ตัวอย่างเช่น พิจารณาแบบจำลองการวิเคราะห์ความแปรปรวน 3 ปัจจัย ตามสมการ 2.1 [10]

$$y_{ijkl} = \mu + \tau_i + \beta_j + \gamma_k + (\tau\beta)_{ij} + (\tau\gamma)_{ik} + (\beta\gamma)_{jk} + (\tau\beta\gamma)_{ijk} + \varepsilon_{ijkl} \quad \left. \begin{array}{l} i = 1, 2, \dots, a \\ j = 1, 2, \dots, b \\ k = 1, 2, \dots, c \\ l = 1, 2, \dots, n \end{array} \right\} \quad (2.1)$$

สมมติว่า A, B และ C มีค่าตายตัว ตารางสำหรับการวิเคราะห์ความแปรปรวนแสดงได้ดังตารางที่ 2.4 ค่าของเอฟ-เทส ของผลหลักและอันตรกิริยาหาได้โดยตรงจากค่ากำลังสองเฉลี่ยคาดหมายที่ได้



รูปที่ 2.24 พื้นที่ใต้โค้งด้านขวาการแจกแจงเอฟ [12]

ตารางที่ 2.4 ตารางการวิเคราะห์ความแปรปรวนสำหรับแบบจำลอง 3 ปัจจัย แบบผลตายตัว [10]

สาเหตุของ ความแตกต่าง	ผลบวก กำลังสอง	ระดับขั้นความเสรี กำลังสอง	ค่าเฉลี่ย กำลังสอง	ผลค่าเฉลี่ย กำลังสอง	ตัวสถิติ F_0
A	SS_A	$a-1$	MS_A	$\frac{\sigma^2 + bnc \sum \tau_i^2}{a-1}$	$F_0 = \frac{MS_A}{MS_F}$
B	SS_B	$b-1$	MS_B	$\frac{\sigma^2 + acn \sum \beta_j^2}{b-1}$	$F_0 = \frac{MS_B}{MS_F}$
C	SS_C	$c-1$	MS_C	$\frac{\sigma^2 + abn \sum \gamma_k^2}{c-1}$	$F_0 = \frac{MS_C}{MS_E}$
AB	SS_{AB}	$(a-1)(b-1)$	MS_{AB}	$\frac{\sigma^2 + cn \sum \sum (\tau\beta)_{ij}^2}{(a-1)(b-1)}$	$F_0 = \frac{MS_{AB}}{MS_F}$
AC	SS_{AC}	$(a-1)(c-1)$	MS_{AC}	$\frac{\sigma^2 + bn \sum \sum (\tau\gamma)_{ik}^2}{(a-1)(c-1)}$	$F_0 = \frac{MS_{AC}}{MS_F}$
BC	SS_{BC}	$(b-1)(c-1)$	MS_{BC}	$\frac{\sigma^2 + an \sum \sum (\beta\gamma)_{ik}^2}{(b-1)(c-1)}$	$F_0 = \frac{MS_{BC}}{MS_F}$
ABC	SS_{ABC}	$(a-1)(b-1)(c-1)$	MS_{ABC}	$\frac{\sigma^2 + n \sum \sum \sum (\tau\beta\gamma)_{ijk}^2}{(a-1)(b-1)(c-1)}$	$F_0 = \frac{MS_{ABC}}{MS_F}$
Error	SS_E	$abc(c-1)$	MS_E	σ^2	
Total	SS_T	$abcn-1$			

การคำนวณด้วยมือสำหรับค่าผลรวมทั้งหมดของกำลังสองในตารางที่ 2.4 มีสูตรในการคำนวณดังนี้ [10]

$$SS_T = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^c \sum_{l=1}^n \gamma_{ijkl}^2 - \frac{\gamma^2 \dots}{abcn} \quad (2.2)$$

ค่าผลรวมของกำลังสองของผลหลักหาได้จากสูตรต่อไปนี้ [10]

$$SS_A = \frac{1}{bcn} \sum_{i=1}^a \gamma_{i..}^2 - \frac{\gamma^2 \dots}{abcn} \quad (2.3)$$

$$SS_B = \frac{1}{acn} \sum_{j=1}^b \gamma_{.j.}^2 - \frac{\gamma^2 \dots}{abcn} \quad (2.4)$$

$$SS_C = \frac{1}{abn} \sum_{k=1}^c \gamma_{.k.}^2 - \frac{\gamma^2 \dots}{abcn} \quad (2.5)$$

เพื่อที่จะคำนวณค่าผลรวมของกำลังสองแบบ 3 ปัจจัยของอันตรกิริยา จะต้องสร้างตามผลรวมซึ่งประกอบด้วยเซลล์จำนวน $A \times B$, $A \times C$ และ $B \times C$ เซลล์ขึ้นมา ซึ่งเกิดจากการยุบตารางข้อมูลเบื้องต้นให้อยู่ในรูปของตารางแบบ 2 ทาง จำนวน 3 ตาราง เพื่อคำนวณค่าต่างๆ เหล่านี้ ค่าผลรวมของกำลังสองหาได้จาก [10]

$$\begin{aligned} SS_{AB} &= \frac{1}{cn} \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \gamma_{ij.}^2 - \frac{\gamma^2 \dots}{abcn} - SS_A - SS_B \\ &= SS_{\text{Subtotals (AB)}} - SS_A - SS_B \end{aligned} \quad (2.6)$$

$$\begin{aligned} SS_{AC} &= \frac{1}{bn} \sum_{i=1}^a \sum_{k=1}^c \gamma_{i.k.}^2 - \frac{\gamma^2 \dots}{abcn} - SS_A - SS_C \\ &= SS_{\text{Subtotals (AC)}} - SS_A - SS_C \end{aligned} \quad (2.7)$$

$$\begin{aligned} SS_{BC} &= \frac{1}{an} \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^c \gamma_{.jk.}^2 - \frac{\gamma^2 \dots}{abcn} - SS_B - SS_C \\ &= SS_{\text{Subtotals (BC)}} - SS_B - SS_C \end{aligned} \quad (2.8)$$

ค่าผลรวมของกำลังสองของอันตรกิริยาแบบ 3 ปัจจัย หาได้จากสูตร [10]

$$SS_{ABC} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^c \gamma_{ijk}^2 - \frac{\gamma_{...}^2}{abcn} - SS_A - SS_B - SS_C - SS_{AB} - SS_{AC} - SS_{BC} \quad (2.9)$$

$$= SS_{\text{Subtotals (ABC)}} - SS_A - SS_B - SS_C - SS_{AB} - SS_{AC} - SS_{BC} \quad (2.10)$$

ค่าผลรวมของกำลังสองของความผิดพลาดหาได้จากการลบผลรวมของกำลังสองทั้งหมดที่เกิดจากผลหลักและอันตรกิริยาจากผลรวมทั้งหมดของกำลังสอง [10]

$$SS_E = SS_T - SS_{\text{Subtotals (ABC)}} \quad (2.11)$$

2.5.6 การวิเคราะห์ข้อมูลด้วยวิธีการทางสถิติ

เป็นการนำวิธีการทางสถิติใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูล เพื่อให้ผลลัพธ์และข้อสรุปที่เกิดขึ้นเป็นไปตามวัตถุประสงค์ของการทดลอง เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการตัดสินใจที่มีประสิทธิภาพ ข้อสรุปที่ได้มีเหตุผลและความน่าเชื่อถือ การวิเคราะห์ผลการทดสอบค่าการยึดตัว ของชิ้นทดสอบบันทึกผลการทดลอง สถิติที่ใช้ในการวิจัย ซึ่งต้องใช้ในการวิเคราะห์ ค่าทดสอบของชิ้นทดสอบที่ใช้ในงานวิจัยคือ สถิติเชิงพรรณนา (Descriptive statistics) ซึ่งเป็นการศึกษาเกี่ยวกับการเก็บรวบรวมข้อมูล การนำเสนอข้อมูล การวิเคราะห์ข้อมูล การแปลความหมายของข้อมูล ตลอดจนทฤษฎีและการวิวัฒนาการทางสถิติ เพื่อหาค่าเฉลี่ย ค่าสูงสุด ค่าต่ำสุด และ สถิติเชิงอนุมาน (Inferential statistic) เป็นผลมาจากการรวบรวมทฤษฎีความน่าจะเป็นกับการใช้ข้อมูลทางสถิติเข้าด้วยกัน และค่าทางสถิติที่หาได้ไปใช้เป็นเครื่องมือในการประมาณ การทดสอบสมมติฐาน การทำนาย การตัดสินใจเกี่ยวกับปัญหาบางอย่างที่ต้องการ เพื่อหาค่าความแปรปรวน และอิทธิพลของตัวแปรที่เกี่ยวข้อง [8,12]

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.6.1 นิพนธ์ บัวแก้ว [13] ศึกษาผลกระทบของปัจจัยการเชื่อมเลเซอร์ที่มีต่อความแข็งแรงของรอยเชื่อมในแกน จับหัวอ่านสำหรับงานแม่เหล็กแบบแข็ง เพื่อศึกษาถึงปัจจัยการเชื่อมเลเซอร์ที่มีต่อกำลังเลเซอร์ (Power) ขนาดของรอยเชื่อม ความลึกของรอยเชื่อม (Penetration) แรงหนีกรอยเชื่อม และความแข็งแรงของรอยเชื่อม การวิจัยใช้เครื่องเชื่อมแบบนีโอไดมียมแฉีกเลเซอร์ (Nd: YAG laser) โดยทำการเชื่อมสแตนเลส 304 ที่มีความหนา 51,102 และ 200 ไมครอน จำนวนสองแผ่นเข้าด้วยกัน โดยแปรเปลี่ยนค่าแรงดันไฟฟ้าและค่าระยะเวลาในการเชื่อม โดยที่ปัจจัยอื่นๆ เช่น ระยะรวมแสง (Focal length) ขนาดของสายไฟเบอร์ออฟติก กระจกต่างๆ และแรงกดอุปกรณ์จับยึด (Clamping force) ถูกกำหนดให้คงที่ตลอดการวิจัย ผลทดลองได้ตรวจสอบกำลังของเลเซอร์ ขนาดของรอยเชื่อม ความลึก

ของรอยเชื่อม แรงฉีก (Peel force) และความแข็งแรงของรอยเชื่อม ผลการวิจัยพบว่า (1) ระยะเวลาของการเชื่อมเพิ่มขึ้น มีผลให้การทนต่อแรงฉีกขาดและความแข็งแรงของรอยเชื่อมสูงขึ้น (2) ระยะลึกของรอยเชื่อมแปรผันตามแรงดันไฟฟ้าที่ใช้ในการเชื่อมขณะที่ระยะเวลาการเชื่อมคงที่ (3) ขนาดของรอยเชื่อมแปรผันตามระยะเวลาของการเชื่อมขณะที่แรงดันไฟฟ้าที่ใช้ในการเชื่อมคงที่ (4) กำลังเลเซอร์แปรผันตามระยะเวลาและแรงดันไฟฟ้าโดยระยะเวลาของการเชื่อมมีอิทธิพลสูงกว่า (5) เงื่อนไขของปัจจัยที่ 476 โวลท์และระยะเวลาการเชื่อมที่ 1.1 มิลลิวินาที ให้ความแข็งแรงของรอยเชื่อมสูงสุดคือ $8.76 \text{ Kg}_f / \text{mm}^2$

2.6.2 ฉัตรทอง ไสแสง [14] อิทธิพลของพารามิเตอร์การเชื่อมต่อโครงสร้างและสมบัติทางกลของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกเกรด 304 เพื่อศึกษาอิทธิพลของพารามิเตอร์การเชื่อมต่อสมบัติทางกล และโครงสร้างของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก เกรด 304 การวิจัยเป็นการออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียลดีไซน์ (Factorial design) ที่มีพารามิเตอร์ในการศึกษาได้แก่ กระแสการเชื่อม ความเร็วในการเชื่อม และแก๊สปกคลุม โดยทำการศึกษาด้านความแข็งแรงดึงสูงสุด ความแรงดึงจุดคราก อัตราการยืดตัว และความแข็ง ผลการวิจัยพบว่า ผลการศึกษาต่อความแข็งแรงดึงสูงสุด (Ultimate tensile) พบว่าปัจจัยหลักที่มีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนแปลง คือ ความเร็วในการเชื่อม ความสัมพันธ์กระแส*ความเร็ว*แก๊สปกคลุม โดยพารามิเตอร์การเชื่อมที่กระแส 90 แอมป์ ความเร็ว 500 มิลลิเมตรต่อนาที และปกคลุมด้วยแก๊ส $\text{Ar}+5\%\text{O}_2$ จะให้ค่าความแข็งแรงดึงสูงสุด มีค่าเท่ากับ 95.85 Kg/mm^2 ผลการศึกษาต่อความแข็งแรงดึงจุดคราก (Yield point) พบว่าปัจจัยหลักทั้งสามตัวไม่มีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนแปลงความสัมพันธ์ คือ กระแส*ความเร็ว*แก๊สปกคลุม โดยพารามิเตอร์การเชื่อมที่กระแส 90 แอมป์ ความเร็ว 300 มิลลิเมตรต่อนาที และปกคลุมด้วยแก๊ส $\text{Ar}+3\%\text{N}_2$ มีค่าเท่ากับ 66.09 Kg/mm^2 ผลการศึกษาต่ออัตราการยืดตัว (Elongation) พบว่าปัจจัยหลักที่มีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนแปลง คือ พารามิเตอร์การเชื่อมทั้งสาม ความสัมพันธ์ คือ กระแส*ความเร็ว*แก๊สปกคลุม โดยพารามิเตอร์การเชื่อมที่กระแส 100 แอมป์ ความเร็ว 400 มิลลิเมตรต่อนาที และปกคลุมด้วยแก๊ส $\text{Ar}+5\%\text{H}_2$ มีค่าเท่ากับ 20% ผลการศึกษาต่อความแข็ง (Hardness) พบว่าปัจจัยหลักที่มีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนแปลง คือ ความเร็ว และ แก๊สปกคลุม ความสัมพันธ์ คือ กระแส*ความเร็ว*แก๊สปกคลุม โดยพารามิเตอร์การเชื่อมที่กระแส 90 แอมป์ ความเร็ว 300 มิลลิเมตรต่อนาที และปกคลุมด้วยแก๊ส $\text{Ar}+5\%\text{H}_2$ มีค่าเท่ากับ 273.33 HV ผลการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่มีค่าความแข็งแรงดึงสูงสุด (Ultimate tensile) ที่มีค่ามากที่สุดกับชิ้นงานที่มีค่าต่ำสุด พบว่าลักษณะโครงสร้างของ Columnar dendrite และการโตของเกรนในบริเวณ HAZ มีความแตกต่างกันมาก กล่าวคือ ขนาดของ Columnar dendrite จะเล็กกว่าในกรณีของชิ้นงานที่มี Ultimate tensile สูงกว่า และขนาดของเกรนที่โตในบริเวณ HAZ ก็โตได้น้อยกว่า ส่วนโครเมียมคาร์ไบด์ (Cr_{23}C_6) สามารถเกิดขึ้นได้กับทั้งสอง

2.6.3 Kenji UNO [15] ศึกษาการผลิตของเทเลอร์แบลิ่งค์โดยวิธีการทางเทคนิคต่อชนเป็นเส้นตรง เป็นการพัฒนาของการผลิตชิ้นส่วนรถยนต์เพื่อความต้องการด้านการป้องกัน ผลกระทบต่อ

สิ่งแวดล้อม ในกระบวนการผลิต บอร์ดี้ และชิ้นส่วนประกอบ ใช้เหล็กที่มีน้ำหนักต่ำและได้ค่าความยึดตัวสูง โดยการใช้เทอร์เบลิ่งค์ ลักษณะชิ้นงาน ที่ผลิต เช่น ประตูลอยน้ต โครงการประตูลอยน้ต ผลการวิจัยพบว่า การผลิตของเทอร์เบลิ่งค์โดยวิธีการทางเทคนิคต่อชนเป็นเส้นตรง นั้นสามารถประยุกต์ใช้กับการผลิต การต่อชนของชิ้นส่วนที่เป็นมุม เช่นการผลิตชิ้นส่วน คออินเนอร์พานเนล ซึ่งคุณลักษณะของการเชื่อมได้ตามที่ต้องการ และกลุ่มบริษัทมิตซูบิชิ มอเตอร์ ได้ยอมรับและให้การสนับสนุนการนำเทอร์เบลิ่งค์เข้ามาใช้ในกระบวนการผลิต

2.6.4 J. LISOK, A. PIELA [16] ศึกษาวิธีการประเมินค่าความสามารถการยึดตัวของ Laser Weld Tailored Blanks เป็นการประเมินความสามารถของการยึดตัวของ ส่วนประกอบของยานพาหนะ ที่ความสามารถดัดงอได้โดยไม่แตกหักของแผ่นเหล็ก โดยประเมินค่า คุณสมบัติทางกล และเทคโนโลยีการทดสอบการเชื่อม ที่มีความแตกต่างกันเกี่ยวกับความหนาของส่วนประกอบ ซึ่งเกิดไปถึงรอยแตกของชิ้นงานขึ้นรูป ทำให้รู้ล่วงหน้าของพฤติกรรมของ Tailored Blank ของกระบวนการขึ้นรูปชิ้นส่วน รอยน้ตที่มีการเปลี่ยนแปลงการขึ้นรูปอย่างถาวร โดยใช้คอมพิวเตอร์เป็นตัวแทนในการทดสอบลักษณะชิ้นงาน ผลการวิจัยพบว่า วิธีพิจารณาความสามารถของการยึดตัวยอมรับที่การประเมินของความสามารถดัดงอได้โดยไม่แตกหักของแผ่นเหล็กโดยใช้ Finite Elements Method (FEM) ทดสอบ