



การออกแบบและติดตั้งอุปกรณ์เสริม เพื่อการทดลองการเชื่อม
แบบแก๊สทั้งสแตนเลสอาร์คด้วยแขนกลของเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด AISI 316L

นายกาญจน์สิทธิ์

โกศัย

รหัสนักศึกษา 590610254

นายณัฐวัฒน์

อยู่อ่อน

รหัสนักศึกษา 590610276

โครงการนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

ปีการศึกษา 2562

หัวข้อโครงการ	การออกแบบและติดตั้งอุปกรณ์เสริม เพื่อการทดลองการเชื่อมแบบแก๊ส ทั้งสแตนอาร์คด้วยแขนกลของเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด AISI 316L	
ผู้เขียน	นายกาญจน์สิทธิ์ โกศัย	รหัสนักศึกษา 590610254
	นายณัฐวัฒน์ อยู่อ่อน	รหัสนักศึกษา 590610276
ภาควิชา	วิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่	
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ.ดร.วสวัชร นาคเขียว	
ปีการศึกษา	2562	

ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ อนุมัติให้นับ
โครงการนี้ เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

กรรมการสอบโครงการ

..... ประธานกรรมการ

(ผศ.ดร.วสวัชร นาคเขียว)

..... กรรมการ

(ผศ.ดร.วริษา วิสิทธิพานิช)

..... กรรมการ

(อาจารย์ณรงค์ เพชรขารี)

กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยนี้สามารถสำเร็จไปได้ด้วยดีโดยได้รับคำปรึกษาจากผศ.ดร.วสวัชร นาคเขียว อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการซึ่งเป็นผู้มอบความรู้คำแนะนำแนวทางการศึกษาตลอดจนให้ความกรุณาในการตรวจทานแก้ไขโครงการวิจัยนี้จนทำให้ประสบความสำเร็จอย่างสมบูรณ์ทางผู้ทำโครงการจึงต้องขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงมา ณ โอกาสนี้

นอกจากนี้ต้องขอขอบพระคุณคณาจารย์ในภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ทุกท่านโดยเฉพาะอย่างยิ่ง อาจารย์ณรงค์ เพชรขารี รศ.ดร.วิมลสิน เหล่าศิริถาวร และ ผศ.ดร.วริษา วิสิทธิ์พานิช ที่ได้ให้ความรู้จากการเรียนแก่ผู้วิจัยและตลอดจนบุคลากรเจ้าหน้าที่ในภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการทุกท่านที่ให้คำแนะนำเสนอแนวทางและให้ความช่วยเหลือในการทำโครงการด้วยดีตลอดมา

ขอขอบพระคุณคุณอดิเรก ใบสุชนธ์ นักศึกษาปริญญาเอกที่คอยช่วยเหลือและให้ความรู้ด้านการออกแบบอุปกรณ์เสริมเพื่อใช้ในการเชื่อมแบบแก๊สทังสเตนอาร์ค (Gas Tungsten Arc) ตลอดจนให้คำแนะนำแก้ไขซึ่งทำให้โครงการนี้ประสบความสำเร็จสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณคุณณัฐวุฒิ รินโน พนักงานปฏิบัติงานช่วยสอน โรงประลองภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการที่สละเวลาให้คำแนะนำและให้ยืมอุปกรณ์ที่จำเป็นต่อการวิจัย

ขอขอบพระคุณคุณคุณวรินทร์ ธนะกุลวัฒนา นักศึกษาปริญญาโทที่คอยช่วยเหลือและให้ความรู้ด้านการเชื่อมแบบแก๊สทังสเตนอาร์ค (Gas Tungsten Arc) การติดตั้งระบบการเชื่อม การทำ 3D Printing การออกแบบการทดลอง ตลอดจนให้ความรู้ในเชิงทฤษฎีกับผู้วิจัย

ขอขอบพระคุณบิดามารดาญาติพี่น้องตลอดจนรุ่นพี่รุ่นน้องและเพื่อนๆในภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการทุกท่านที่ได้เป็นกำลังใจและให้การสนับสนุนในด้านการศึกษาและการดำเนินชีวิตตลอดมา

สุดท้ายนี้ทางผู้วิจัยทำหวังเป็นอย่างยิ่งว่าความรู้จากโครงการเล่มนี้จะสามารถเป็นประโยชน์ต่อผู้ที่สนใจในด้านการเชื่อมแก๊สทังสเตนอาร์ค (Gas Tungsten Arc) และผู้ที่ศึกษาเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด AISI 316L หากมีส่วนใดที่บกพร่องหรือมีความผิดพลาดประการใดทางผู้จัดทำต้องขออภัยเป็นอย่างสูงและขอน้อมรับคำแนะนำอันเป็นประโยชน์ทุกประการ

กัญจน์สิทธิ์ โกศัย

ณัฐวัฒน์ อยู่อ่อน

หัวข้อโครงการ	การออกแบบและติดตั้งอุปกรณ์เสริม เพื่อการทดลองการเชื่อมแบบแก๊ส ทั้งสแตนอาร์คด้วยแขนกลของเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด AISI 316L	
ผู้เขียน	นายกัญจน์สิทธิ์ โกศัย	รหัสนักศึกษา 590610254
	นายณัฐวัฒน์ อยู่อ่อน	รหัสนักศึกษา 590610276
ภาควิชา	วิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่	
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ.ดร.วสวัชร นาคเขียว	
ปีการศึกษา	2562	

บทคัดย่อ

โครงการฉบับนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบอุปกรณ์เสริมและติดตั้งเข้ากับแขนกลยี่ห้อ KUKA รุ่น KR16 เพื่อให้สามารถทำการเชื่อมแก๊สทั้งสแตนอาร์คแบบอัตโนมัติ และการใช้งานแขนกลร่วมกับโปรแกรม KUKA HMI 2.0 เพื่อช่วยในด้านการออกแบบการเคลื่อนไหวของแขนกลสามารถช่วยให้การเชื่อมแก๊สทั้งสแตนอาร์คอัตโนมัติมีประสิทธิภาพมากขึ้น เช่น ลดระยะเวลาการทดลอง และลดการเกิดความเสียหายของชิ้นงานเนื่องจากความผิดพลาดของระยะหรือตำแหน่งในการเชื่อม จากการออกแบบและนำไปติดตั้งเข้ากับแขนกล พบว่าแขนกลสามารถติดตั้งระบบเชื่อมแบบแก๊สทั้งสแตนอาร์คได้ โดยอุปกรณ์มีความแข็งแรง สามารถนำไปใช้ในงานเชื่อมแก๊สทั้งสแตนอาร์คแบบอัตโนมัติได้เป็นอย่างดี ทั้งนี้ได้มีการออกแบบการทดลองแบบเต็มรูปแบบ (Full Factorial) ของการเชื่อมแก๊สทั้งสแตนอาร์คแบบอัตโนมัติบนแผ่นชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 316L แบบรอยต่อชน (Butt Joint) เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อความแข็งแรงต่อแรงดึงของรอยเชื่อมซึ่งนำเข้า 3 ปัจจัย คือ อัตราการไหลของแก๊ส กระแสไฟฟ้า และความเร็วในการเชื่อม กำหนดให้แต่ละปัจจัยมี 2 ระดับ คือ ระดับสูงและระดับต่ำ ที่ระดับนัยสำคัญ $\alpha = 0.05$ พบว่ามีปัจจัยที่มีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อค่าความแข็งแรงต่อแรงดึง คือ อัตราการไหลของแก๊ส กระแสไฟฟ้า ความเร็วของการเชื่อม อันตรกิริยาของอัตราการไหลของแก๊ส และกระแสไฟฟ้า อันตรกิริยาของอัตราการไหลของแก๊สและความเร็วของการเชื่อม อันตรกิริยาของกระแสไฟฟ้าและความเร็วของการเชื่อม หลังจากการหาค่าความแข็งแรงต่อแรงดึงของรอยเชื่อมที่เกิดจากการเชื่อมแก๊สทั้งสแตนอาร์คแบบอัตโนมัติที่เหมาะสมที่สุด พบว่ากระแสไฟฟ้าควรใช้ค่า 100 แอมแปร์ และความเร็วในการเชื่อมควรใช้ค่า 1.5 มิลลิเมตรต่อวินาที เพื่อให้ได้ค่าความแข็งแรงต่อแรงดึงคือ 417.459 เมกะปาสคาล โดยมีค่าความพึงพอใจ (Desirability) อยู่ที่ 0.945873

Project Title	Accessories Design and Installation for Experiment of Gas Tungsten Arc Welding by Robotic Arm on AISI 316L Stainless Steel		
Name	Mr. Kunsit Kosai	Code 590610254	
	Mr. Nattawat Yooaon	Code 590610276	
Department	Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Chiang Mai University		
Project Advisor	Assistant Professor Wasawat Nakkiew, Ph.D.		
Academic	2019		

ABSTRACT

This project aims to design accessory and attach it to the KUKA KR16 robotic arm to be able to automate gas tungsten arc welding using the KUKA HMI 2.0 program to design the movement of the robotic arm, for example, to shorten the experiment time and reduce the damage of workpieces due to errors in arc length or welding position. After designed and attached the accessory to the robotic arm, found that the robotic arm can be equipped with gas tungsten arc welding system. The accessory is strong, durable and can be used in automatic gas tungsten arc welding. In this regard, a full factorial design of experiment of automatic gas tungsten arc butt joint welding is performed on 316L stainless steel to study factors affecting the tensile strength of welded seams. Including gas flow rate, electric current and welding speed. Specify that each factor has 2 levels which are high level and low level. At the significant level $\alpha = 0.05$, found factors that have a significant effect on the tensile strength are gas flow rate, electric current, welding speed, interaction of gas flow rate and electric current, interaction of gas flow rate and welding speed and interaction of electric current and welding speed. After determining of the most suitable tensile strength of the welding. It is found that the electric current should be 100 amperes and the

welding speed should be 1.5 millimeters per second to get the 417.459 MPa of tensile strength with desirability value at 0.945873

สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	ค
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญภาพ	ช
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความสำคัญ และที่มาของปัญหาที่ทำโครงการ	1
1.2 วัตถุประสงค์	2
1.3 ขอบเขตการศึกษา	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	
2.1 หลักการและทฤษฎีการเชื่อมโลหะแบบทั้งสแตนอาร์ค	4
2.2 การออกแบบการทดลอง	6
2.3 การทดสอบแรงดึง	8
2.4 การทดสอบแรงดึงแนวเชื่อม	8
2.5 มอก. 2172 เล่ม 1-2556	11
2.6 การออกแบบเครื่องมือ	16
2.7 ชนิดของรอยต่อในงานเชื่อมโลหะ (Type of Joint)	17
2.8 การตรวจสอบรอยเชื่อม	20
2.9 การยศาสตร์	20
2.10 หลักการพื้นฐานของหุ่นยนต์	22
2.11 เหล็กกล้าไร้สนิม	32
2.12 แขนกล KUKA KR16	34
2.13 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	36

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 ระเบียบวิธีการทำวิจัย	
3.1 วิธีการและขั้นตอนในการทำงานวิจัย	39
3.2 เครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย	40
3.3 ออกแบบอุปกรณ์เสริมสำหรับติดตั้งแขนกล	47
3.4 ทำการสั่งผลิตอุปกรณ์เสริม	50
3.5 ทำการเตรียมอุปกรณ์ที่ใช้ในการเชื่อม	50
3.6 ศึกษาวิธีการควบคุมหุ่นยนต์แขนกลในการทำงานแบบอัตโนมัติ	51
3.7 เตรียมแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมโดยใช้เครื่อง Waterjet	53
3.8 ศึกษาปัจจัยของการเชื่อมที่มีผลต่อความแข็งแรง	54
3.9 การออกแบบการทดลองแบบฟูลแฟคทอเรียล	55
3.10 ทำการเชื่อมแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม	55
3.11 ทำการทดสอบแรงดึง	56
3.12 สรุปผลและจัดทำรายงาน	56
บทที่ 4 ผลการทำวิจัย	
4.1 ผลการออกแบบอุปกรณ์เสริม	57
4.2 ผลการขึ้นรูปชิ้นส่วนตัวอย่างด้วย 3D Printer	58
4.3 ผลการผลิตชิ้นงาน	59
4.4 ประกอบตัวจับยึดชิ้นงานเข้ากับโต๊ะ	60
4.5 เขียนโปรแกรมควบคุมหุ่นยนต์	61
4.6 ผลการเชื่อมชิ้นงานจริง	62
4.7 เตรียมการก่อนการทดสอบแรงดึง	64
4.8 ผลการทดสอบแรงดึง	65
4.9 ผลการออกแบบการทดลองแบบฟูลแฟคทอเรียล	66
4.10 การหาค่าที่เหมาะสมที่สุด	71
บทที่ 5 สรุปผล และข้อเสนอแนะ	
5.1 การสรุปผล	73

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 5 สรุปผล และข้อเสนอแนะ	
5.2 ปัญหาที่ส่งผลในการดำเนินการวิจัย	74
5.3 ข้อเสนอแนะ	74
บรรณานุกรม	76
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก ชิ้นงานที่ขึ้นรูปสำเร็จแล้ว	77
ภาคผนวก ข ชิ้นงานที่ผลิตสำเร็จแล้ว	81
ภาคผนวก ค ชิ้นทดสอบที่เชื่อมแล้ว	86
ภาคผนวก ง ชิ้นทดสอบที่ลดรูปแล้ว	93
ภาคผนวก จ ผลการทดสอบแรงดึง	100
ประวัติผู้เขียน	117

สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
2.1 พารามิเตอร์ที่นำมาศึกษา	36
3.1 ส่วนประกอบทางเคมีของสแตนเลส 304 และ 316	48
3.2 ปัจจัย ระดับ ขอบเขต และสัญลักษณ์ ที่ใช้ในการออกแบบการทดลองแบบฟูลแฟคทอเรียล	54
3.3 ตารางการออกแบบการทดลองแบบฟูลแฟคทอเรียล จำนวน 2 ชั้น	55
4.1 ผลทดสอบแรงดึงที่จะได้จากการออกแบบการทดลองแบบฟูลแฟคทอเรียล	65

สารบัญภาพ

ภาพ	หน้า
2.1 แบบจำลองทั่วไปสำหรับกระบวนการหรือระบบ	7
2.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของวัสดุที่ปรากฏจุดครากตัว	9
2.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของวัสดุที่ไม่ปรากฏจุดครากตัว	9
2.4 จุดต่าง ๆ บนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียดของวัสดุที่ปรากฏบนจุดคราก	10
2.5 ส่วนประกอบของเครื่องทดสอบอเนกประสงค์ (Universal Testing Machine)	11
2.6 แบบหลักของชิ้นทดสอบ	12
2.7 การจำแนกชิ้นทดสอบ	13
2.8 การแบ่งการใช้งานของชิ้นงานทดสอบ	13
2.9 มิติของชิ้นงานทดสอบ	14
2.10 ค่าความคลาดเคลื่อนสำหรับความกว้างของชิ้นทดสอบ	15
2.11 ตัวอย่างมิติของชิ้นทดสอบ	15
2.12 รอยต่อชน (BUTT JOINT)	17
2.13 รอยต่อมุม (CORNER JOINT)	18
2.14 รอยต่อขอบ (EDGE JOINT)	18
2.15 รอยต่อเกย (LAP JOINT)	19
2.16 รอยต่อรูปตัวที (T-JOINT)	19
2.17 การเชื่อมแบบยื่น	21
2.18 การเชื่อมแบบนั่ง	22
2.19 ภาพเปรียบเทียบร่างกายของมนุษย์กับแขนกลของหุ่นยนต์อุตสาหกรรม	23
2.20 เครื่อง CNC ที่ทำงานแบบคาร์ทีเซียน	25
2.21 หุ่นยนต์ที่มีพื้นที่การทำงานมีลักษณะเป็นทรงกลม	25
2.22 หุ่นยนต์ที่มีพื้นที่การทำงานเป็นลักษณะทรงกระบอก	26
2.23 หุ่นยนต์ KUKA ที่แกนขนานกัน 2 แกน ควบคุมด้วยพีแอลซี (PLC)	26
2.24 การเคลื่อนแบบเลื่อน	28

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพ	หน้า
2.25 การเคลื่อนแบบหมุน	28
2.26 รอยต่อ 1 ลำดับชั้นความเป็นอิสระ	28
2.27 ลำดับชั้นความเป็นอิสระ	28
2.28 การเคลื่อนที่มี 3 ลำดับชั้นความเป็นอิสระ แบบเลื่อน	29
2.29 การเคลื่อนที่มี 3 ลำดับชั้นความเป็นอิสระ แบบหมุน	29
2.30 ก้านต่อแบบต่างๆ	30
2.31 ก้านต่อกลไกของเครื่องยนต์	31
2.32 โซ่กลไกแบบเปิดภาพ	31
2.33 โซ่กลไกแบบปิด	31
2.34 โซ่กลไก 4 ก้านต่อแบบต่างๆ	32
2.35 ข้อมูลทางเทคนิคของ KUKA KR16	35
2.36 ข้อมูลทางเทคนิคของ KUKA KR16 (ต่อ)	35
3.1 วิธีและขั้นตอนในการทำวิจัย	39
3.2 เครื่อง 3D Printer	40
3.3 เครื่องมิลลิ่ง (Milling Machine)	40
3.4 เครื่องกลึง	41
3.5 เวอร์เนียร์คาลิปเปอร์	41
3.6 ไชควงแบบต่างๆ	42
3.7 ไม้บรรทัดวัดมุม	42
3.8 ไม้วัดระดับน้ำ	43
3.9 แอลกอฮอล์	43
3.10 หน้ากากเชื่อม	44
3.11 มอเตอร์หินเจียร	44
3.12 เครื่อง Waterjet	45
3.13 เครื่องเชื่อม	45

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพ	หน้า
3.14 หุ่นยนต์ KUKA	46
3.15 เครื่องทดสอบแรงดึง	46
3.16 แบบร่างอุปกรณ์เสริม	47
3.17 3D Print ชิ้นงาน	47
3.18 ข้อมูลทางเทคนิคของ PEEK	49
3.19 เตรียมอุปกรณ์ที่ใช้ในการเชื่อม	50
3.20 Teach Pendant	51
3.21 แผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมขนาด 600X800X3 มิลลิเมตร	51
3.22 แผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมขนาด 100X150X3 มิลลิเมตร	52
3.23 ตัดแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมด้วยเครื่อง Waterjet	52
3.24 ขนาดของชิ้นงานสำหรับการทดสอบแรงดึง	56
4.1 ผลการออกแบบอุปกรณ์เสริม	57
4.2 แปลงโค้ดโดยโปรแกรม Prusa3D	58
4.3 ขึ้นรูปชิ้นส่วนโดยเครื่อง 3D Printer	58
4.4 ชิ้นส่วนที่ได้จากการขึ้นรูป	59
4.5 ปรับแก้ไขชิ้นส่วนอุปกรณ์เสริม	59
4.6 ประกอบชิ้นส่วนเข้ากับหุ่นยนต์	60
4.7 ประกอบตัวจับยึดชิ้นงาน	60
4.8 โปรแกรมอัตโนมัติ	61
4.9 การเคลื่อนที่ของหัวเชื่อม	62
4.10 ชิ้นงานที่ผ่านการเชื่อมแล้ว	63
4.11 ชิ้นงานที่ผ่านการเชื่อมแล้วทั้งหมด	63
4.12 ชิ้นทดสอบที่ผ่านการลดรูปแล้ว	64
4.13 ชิ้นทดสอบที่ผ่านการลดรูปแล้วทั้งหมด	64

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพ	หน้า
4.14 ชั้นทดสอบที่ผ่านการทดสอบแรงดึง	66
4.15 กราฟ Pareto Chart of the Standardized Effects	67
4.16 ผลการวิเคราะห์ Factorial Fit	68
4.17 กราฟ Normal Probability Plot	69
4.18 กราฟ Histogram	69
4.19 กราฟ Versus Fit	70
4.20 กราฟ Versus Order	70
4.21 ผลการวิเคราะห์ค่าที่เหมาะสมที่สุด	71
4.22 ค่าที่เหมาะสมที่สุดของแต่ละปัจจัย	72

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญ และที่มาของปัญหาที่ทำโครงการ

ปัจจุบันเหล็กกล้าไร้สนิมเป็นวัสดุที่สามารถพบเห็นได้ทั่วไปในรูปแบบของผลิตภัณฑ์และยังสามารถนำประยุกต์ใช้งานได้หลากหลาย เนื่องด้วยเหล็กกล้าไร้สนิมนั้นมีคุณสมบัติเด่นในด้านการต้านทานการกัดกร่อน มีความทนทานต่อการใช้งานอุณหภูมิสูง ง่ายต่อการขึ้นรูปและการนำไปเชื่อม จึงทำให้เหล็กกล้าไร้สนิมเป็นวัสดุที่ได้รับความนิยมในภาคอุตสาหกรรมทั้งในและต่างประเทศ โดยเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 316L นั้น เป็นเหล็กกล้าไร้สนิมที่มีประสิทธิภาพด้านต้านทานการกัดกร่อนที่ดีเยี่ยม มีความเหนียว (Ductility) ทำให้ง่ายต่อการขึ้นรูปและสามารถทนต่อแรงกระแทกที่อุณหภูมิ ต่ำ (Toughness) นอกจากนี้ยังได้รับการวิจัยแล้วว่าไม่เป็นอันตรายต่อร่างกายมนุษย์เมื่อนำไปใช้งาน

การเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมโดยมนุษย์นั้นเป็นการเชื่อมที่มีอยู่ทั่วไปและความยืดหยุ่นสูง เพราะสามารถทำงานได้หลากหลาย แต่ในบางงานของอุตสาหกรรม หากใช้มนุษย์ในการเชื่อมอาจก่อให้เกิดอันตรายต่อตัวผู้เชื่อมเอง เช่น การเชื่อมบนที่สูง หรือในสภาพแวดล้อมที่ไม่เอื้ออำนวย ดังนั้นหากเราสามารถใส่แขนกลแทนตัวมนุษย์ในงานเชื่อมที่ไม่ปลอดภัย เราก็จะสามารถลดความเสี่ยงที่จะเกิดอันตรายต่อมนุษย์ได้

โดยภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ มีหุ่นยนต์แขนกลที่สามารถประยุกต์ใช้ในการทำงานได้หลากหลาย แต่เนื่องจากตัวหุ่นยนต์ยังขาดแคลน อุปกรณ์เสริมที่จะมาช่วยในส่วนของการเชื่อมแบบอัตโนมัติ จึงยังไม่สามารถนำหุ่นยนต์ตัวนี้เข้ามาใช้กับงานเชื่อมได้ และหุ่นยนต์ที่ออกแบบมาเพื่อใช้ในงานเชื่อมโดยเฉพาะมีราคาสูงเป็นอย่างมาก การออกแบบและติดตั้งอุปกรณ์เสริมเพื่อให้หุ่นยนต์แขนกลที่มีอยู่สามารถใช้ในการทำงานเชื่อมได้นั้น

จึงเป็นทางเลือกที่ดีที่สามารถประหยัดค่าใช้จ่ายได้เป็นอย่างมากโดยไม่จำเป็นต้องซื้อหุ่นยนต์แขนกลตัวใหม่ และหุ่นยนต์แขนกลยังสามารถใช้งานในด้านอื่นได้อย่างหลากหลายตามเดิมเพียงแค่ถอดอุปกรณ์เสริมออก นอกจากนั้นการเชื่อมแบบอัตโนมัติจะมีความเที่ยงตรง (Accuracy) มากกว่าการเชื่อมด้วยมือที่ทำกันอยู่ทั่วไป เมื่อสามารถออกแบบและติดตั้งอุปกรณ์เสริมให้กับหุ่นยนต์แขนกลเสร็จสิ้น จะสามารถเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออกมาในรูปแบบและประสิทธิภาพที่ใกล้เคียงกัน เพื่อนำชิ้นงานที่เชื่อมเสร็จแล้วไปใช้ในการทดสอบความแข็งแรงของรอยเชื่อมโดยการทดลองแบบพูลแฟคทอเรียลต่อไปได้

1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 เพื่อออกแบบอุปกรณ์เสริมและติดตั้งเข้ากับหุ่นยนต์แขนกลให้สามารถเชื่อมอัตโนมัติได้

1.2.2 เพื่อให้แขนกลสามารถเชื่อมชิ้นงานอัตโนมัติได้ตามมาตรฐานการทดสอบความแข็งแรงต่อแรงดึงของรอยเชื่อม (มอก. 2172 เล่ม 1-2556)

1.3 ขอบเขตการศึกษา

1.3.1 เก็บข้อมูลและทำการทดลองด้วยแขนกล KUKA รุ่น KR16 ณ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

1.3.2 ประยุกต์ใช้เทคนิคการออกแบบการทดลองในการหาปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพของรอยเชื่อมแบบพูลแฟคทอเรียล โดยมี 3 ตัวแปร 2 ระดับ และทำการทดลอง 2 ซ้ำ (รวม 16 การทดลอง)

1.3.3 ทำการทดลองด้วยหุ่นยนต์แขนกลที่ติดตั้งอุปกรณ์เสริมสำหรับการเชื่อมแบบ TIG และทำการเชื่อมบนแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด AISI 316L เท่านั้น

1.3.4 อุปกรณ์เสริมประกอบด้วยตัวจับยึดหัวเชื่อมเข้ากับหุ่นยนต์และตัวจับแผ่นชิ้นงานยึดเข้ากับโต๊ะเชื่อม

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ได้ระบบเชื่อมอัตโนมัติแบบ GTAW (หรือในอีกชื่อหนึ่งว่า TIG)

1.4.2 ทราบความแข็งแรงของรอยเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด AISI 316L จากการเชื่อมอัตโนมัติด้วยหุ่นยนต์แขนกล KUKA รุ่น KR16

1.4.3 สามารถนำไปขยายผลต่อในการเชื่อมแบบอื่นได้ เช่นการเชื่อมแบบ MIG

บทที่ 2

หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 หลักการและทฤษฎีการเชื่อมโลหะแบบทังสเตนอาร์ค

การเชื่อมโลหะแบบทังสเตนอาร์ค (Gas Tungsten Arc Welding) หรือ การเชื่อมแบบ TIG (Tungsten Inert Gas Arc Welding) เป็นกรรมวิธีเชื่อมโลหะด้วยการอาร์คชนิดหนึ่งที่ใช้แท่งอิเล็กโทรดเป็นทังสเตนในการเชื่อม บริเวณบ่อหลอมจะมีแก๊สปกคลุมเพื่อป้องกันบ่อหลอมจากการปนเปื้อนหรือการทำปฏิกิริยากับอากาศรอบข้าง

2.1.1 กรรมวิธีการเชื่อมโลหะแบบทังสเตนอาร์ค

ความร้อนที่ทำให้โลหะหลอมละลายนั้นเกิดจากการอาร์คระหว่างทังสเตนอิเล็กโทรด (Tungsten Electrode) กับชิ้นงาน ขณะเดียวกันบริเวณที่เกิดการอาร์คจะมีแก๊สเฉื่อย (Inert Gas) ปกคลุมรอบบริเวณนั้น เพื่อป้องกันออกซิเจน ไนโตรเจน และความชื้นในอากาศ เข้ามารวมกับโลหะที่กำลังหลอมละลาย เรียกว่า การเติมออกซิเจน (Oxidation) จนกระทั่งความร้อนจากอาร์คหลอมละลายโลหะชิ้นงาน เกิดบ่อหลอมละลาย (Puddle) เมื่อบ่อหลอมละลายเกิดขึ้น ณ บริเวณรอยต่อ จึงทำให้ขอบของชิ้นงานติดกัน แต่เนื่องจากทังสเตนอิเล็กโทรดเป็นวัสดุที่ไม่ละลายในการเติมเป็นเนื้อโลหะเชื่อมและไม่สิ้นเปลือง (Non Consumable Electrode) จึงจำเป็นต้องเติมเนื้อโลหะเชื่อม (Filler Metal) ลงในบ่อหลอมละลายด้วย ในกรณีที่เชื่อมโลหะแผ่นบางๆ ไม่จำเป็นต้องเติมลวดเชื่อมลงในบ่อหลอมละลายก็ได้ การเชื่อมแบบทังสเตนอาร์คสามารถเชื่อมเหล็กที่มีความหนาตั้งแต่ 0.79 มิลลิเมตร ถึง 4 มิลลิเมตรได้ ได้

2.1.2 เครื่องเชื่อม

เครื่องเชื่อม (Power Source) ควรเป็นเครื่องเชื่อมที่มีการออกแบบเป็นพิเศษ ซึ่งต้องมีระบบความถี่สูง (H.F) และสวิตช์อัตโนมัติ (Solinoil Valve) สำหรับการควบคุมการไหลของแก๊สและน้ำ เพื่อทำให้สมบูรณ์ในการหลอมละลาย

การเชื่อมและมีการระบายความร้อนของหัวเชื่อมรวมอยู่ในเครื่องด้วย โดยทั่วไปเครื่องเชื่อมจะเป็นแบบทรานส์ฟอร์มเมอร์ – เรกติไฟเออร์ (Transformer - Rectifier) หรือเครื่องแบบเจนเนอเรเตอร์ ขับด้วยมอเตอร์หรือเครื่องยนต์รวมไปถึงเครื่องเชื่อมแบบ Inverter ที่สามารถนำมาใช้งานได้สะดวก และมี ฟังก์ชันเพื่อใช้ให้สะดวกมากยิ่งขึ้น ในแบบทรานส์ฟอร์มเมอร์เรกติไฟเออร์นั้น สามารถเลือกกระแสไฟฟ้าเชื่อมตามลักษณะงานได้คือ กระแสตรงขั้วลบ (DCEN, DC-) และ กระแสตรงขั้วบวก (DCEP, DC+) หรือ กระแสสลับ (AC) สำหรับระบบความถี่สูงช่วยให้การเริ่มต้นในการอาร์คง่ายขึ้น

2.1.3 อิเล็กโทรด

อิเล็กโทรดที่ใช้ในการเชื่อมแบบทั้งสแตนอาร์ค ทำจากทั้งสแตนหรือทั้งสแตนผสมกับโลหะอื่นๆ เนื่องจากทั้งสแตนมีจุดหลอมเหลวสูงที่สุดในบรรดาโลหะบริสุทธิ์ คือ 3,422 องศาเซลเซียส ทำให้หัวอิเล็กโทรดนี้ไม่หลอมละลายไปในระหว่างการเชื่อม แต่มีการสึกกร่อนเกิดขึ้นบ้าง ผิวของอิเล็กโทรดที่ใช้งานมีทั้งแบบที่ได้รับการทำความสะอาดด้วยกระบวนการทางเคมี และแบบที่ลับ เจียร ตัดแต่ง ด้วยวิธีทางกล โดยทั่วไปอิเล็กโทรดมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 0.5 ถึง 6.4 มิลลิเมตร และมีความยาวอยู่ในช่วง 75 ถึง 610 มิลลิเมตร

2.1.4 ระบบกระแสไฟที่ใช้ในการเชื่อม

1. กระแสตรงขั้วลบ DCEN. (Direct Current Electrode Negative) คือ หัวเชื่อมหรือทั้งสแตนอิเล็กโทรดใช้กระแสไฟเชื่อมเป็นขั้วลบ และกระแสไฟเชื่อมขั้วบวกเป็นตำแหน่งของชิ้นงาน โดยบรรจุไฟฟ้าลบไหลจากหัวเชื่อมหรืออิเล็กโทรดไปสู่ชิ้นงานดังนั้นความร้อนจะเกิดขึ้นที่ชิ้นงานมาก โดยเกิดที่ชิ้นงานประมาณ 70 เปอร์เซ็นต์ และเกิดที่ทั้งสแตนอิเล็กโทรดประมาณ 30 เปอร์เซ็นต์ แนวเชื่อมที่เกิดขึ้นจะมีลักษณะแคบแต่กินลึกมาก

2. กระแสตรงขั้วบวก DCEP. (Direct Current Electrode Positive) คือ หัวเชื่อมหรือทั้งสแตนอิเล็กโทรดใช้กระแสไฟฟ้าเชื่อมเป็นขั้วบวก และกระแสไฟฟ้าเชื่อมลบเป็นตำแหน่งของชิ้นงานดังนั้นความร้อนจะเกิดขึ้นที่ชิ้นงานมาก โดยเกิดที่ชิ้นงานประมาณ 30 เปอร์เซ็นต์ และเกิดที่ทั้งสแตนอิเล็กโทรดประมาณ 70 เปอร์เซ็นต์ แนวเชื่อมจะมีลักษณะแบนกว้างกินลึกน้อย แ่งทั้งสแตนอิเล็กโทรดที่ใช้กับกระแสไฟเชื่อมแบบนี้ จะมีขนาดใหญ่กว่าทั้งสแตนอิเล็กโทรดที่ใช้กับกระแสไฟฟ้าแบบอื่น

3. กระแสสลับความถี่สูง ACHF. (Alternating Current & High Frequency) เป็นสิ่งจำเป็นในการเชื่อมโลหะที่มีออกไซด์ฉาบอยู่บริเวณผิวของชิ้นงาน ถ้าพิจารณาคลื่นของกระแสไฟสลับจะพบว่าในครึ่งวัฏจักรแรกที่ทั้งสแตนอิเล็กโทรดเป็นขั้วบวก ออกไซด์ที่ผิวของชิ้นงานบริเวณที่ทำการอาร์คจะถูกขจัดออกไปจากบริเวณนั้น ในครึ่งวัฏจักรต่อมาทั้งสแตนอิเล็กโทรดเป็นขั้วลบ ขณะที่ทั้งสแตนอิเล็กโทรดจะเย็นลงแต่กลับเกิดความร้อนมากที่ชิ้นงานบริเวณที่เกิดการอาร์ค จึงทำให้เกิดบ่อหลอมละลายบนชิ้นงาน แต่ความเป็นจริงแล้วออกไซด์และความชื้นเป็นฉนวนกั้นไม่ให้กระแสผ่านจากแ่งทั้งสแตนอิเล็กโทรดไปยังชิ้นงานได้สะดวก เพื่อเป็นการขจัดปัญหาเหล่านี้จึงนำเอาระบบความถี่สูง

(High Frequency) มาช่วยกระตุ้นการอาร์คในช่วงแรกที่มีลักษณะเป็น กระแสบวก (AC) การทำเช่นนี้จะทำให้กระแสไหลออกจากแท่งทั้งสแตนเลสเหล็กโทรดไปสู่ชิ้นงานได้ตลอดเวลาและสม่ำเสมอ

2.1.5 แก๊สปกคลุม

ทำหน้าที่ปกคลุมแนวเชื่อมและบ่อหลอมละลายเพื่อไม่ให้อากาศโดยรอบเข้าไปทำปฏิกิริยาในขณะที่เชื่อม หากปราศจากแก๊สปกคลุมจะทำให้ได้คุณภาพงานเชื่อมที่ต่ำ เช่นทำให้เกิดรอยความไม่ต่อเนื่อง รอยแตก รู ช่องว่าง หรือทำให้โลหะเชื่อมที่ได้มีความเปราะ นอกจากนี้แก๊สปกคลุมยังทำหน้าที่แตกตัวเป็นไอออน เป็นสื่อนำพาอิเล็กตรอนและความร้อนจากหัวเชื่อมเข้าสู่ชิ้นงานทำให้เกิดการหลอมขึ้น

- แก๊สอาร์กอน (Argon) เป็นแก๊สเฉื่อยที่ได้จากกรรมวิธีผลิตออกซิเจน ซึ่งจะมีอยู่ในอากาศประมาณ 0.9 เปอร์เซ็นต์ แก๊สอาร์กอน จะทำให้การเริ่มต้นเชื่อมง่ายให้อาร์คที่เปลวเรียบและสม่ำเสมอ แก๊สอาร์กอนมีความหนาแน่นมากกว่าบรรยากาศและถึงสำหรับเก็บอาร์กอนเหลวจะต้องมีฉนวนที่ดีสามารถเก็บแก๊สอาร์กอนที่อุณหภูมิต่ำกว่า -184 องศาเซลเซียส การใช้งานกับโลหะทุกชนิดมีความบริสุทธิ์ 99.95 เปอร์เซ็นต์ ดีกว่า แก๊สฮีเลียม (He) คือ อาร์คเรียบและนิ่งกว่า ชีมีล็กน้อยกว่า Cleaning Effect ดีกว่า อัตราการไหลน้อยกว่า เริ่มต้นอาร์คดีกว่าและราคาถูกกว่า

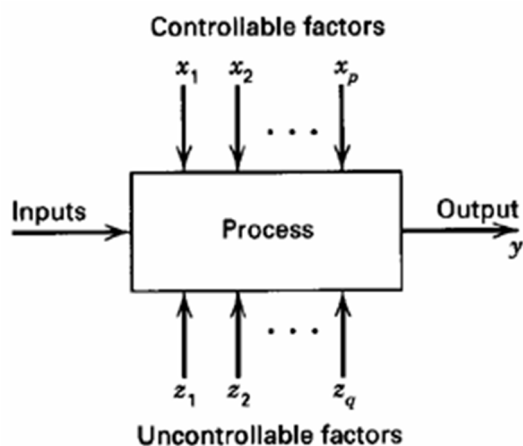
- แก๊สฮีเลียม (Helium) เป็นแก๊สเฉื่อยที่ได้จากกรรมวิธีผลิตแก๊สธรรมชาติ Ionization Potential มีคุณสมบัติเป็นตัวนำไฟฟ้าดี ทำให้เปลวอาร์คแผ่ขยายกว้างความเข้มของความร้อนสูงกว่า แก๊สอาร์กอน (Ar) ทำให้แนวเชื่อมชีมีล็กได้ดี การใช้แก๊สฮีเลียมเหมาะกับการเชื่อมด้วยวิธีอัตโนมัติ ที่ให้ความเร็วในการเชื่อมสูง ไม่เกิดรูพรุนและการกัดแท่งแนวเชื่อมรวมทั้งแนวเชื่อมมีบริเวณเขตอิทธิพลของความร้อนจากการเชื่อมแคบ การใช้งานกับโลหะทุกชนิดความบริสุทธิ์ 99.99 เปอร์เซ็นต์ ราคาค่อนข้างแพง

- แก๊สอาร์กอน (Ar) ผสม 15 ถึง 75 เปอร์เซ็นต์ ฮีเลียม (He) เหมาะกับการเชื่อมแบบทั้งสแตนเลสอาร์คอัตโนมัติ ฮีเลียม (He) ช่วยลดรูพรุนและการแตกร้อน เดินแนวเชื่อมได้เร็ว ลดการบิดงอ อาจทำให้เปลืองแก๊สมากขึ้น เพราะฮีเลียม (He) ลอยสูด้านบน ใช้โวลท์ (Volt) ในการจุดอาร์คสูงกว่าใช้งานกับโลหะทุกชนิด

2.2 การออกแบบการทดลอง

การออกแบบการทดลอง คือ การทดสอบเพียงครั้งเดียวหรือต่อเนื่อง โดยทำการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรนำเข้า (Input Variables) ในระบบหรือกระบวนการที่สนใจศึกษา เพื่อที่จะทำให้สามารถสังเกตและชี้ถึงสาเหตุต่าง ๆ ได้ที่ก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของผลลัพธ์ที่ได้ (Outputs or Responses) จากกระบวนการหรือระบบนั้น โดยตัวแปรนำเข้าจะถูกจัดแบ่งเป็น 2 กลุ่ม คือกลุ่มที่ควบคุมได้เรียกว่า ตัวแปรที่ควบคุมได้ (Controllable Variables) และกลุ่มที่ไม่สามารถควบคุมได้เรียกว่า ตัวแปรที่

รบกวนระบบ (Uncontrollable or Noise Variables) โดยมีแบบจำลองทั่วไปดังภาพ 2.1 (ประไพศรี สุทัศน์ ณ อยุธยา, 2551)



ภาพ 2.1 แบบจำลองทั่วไปสำหรับกระบวนการหรือระบบ

ที่มา : ปารเมศ ชูติมา (2545)

หลักการพื้นฐานที่สำคัญ 3 ประการ ที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบการทดลอง และเป็นหลักการ เพื่อช่วยให้ผลการทดลองมีความถูกต้อง เทียบตรง และแม่นยำมากขึ้นประกอบด้วย

1. การทดลองซ้ำ (Replications) คือการทำการทดลองภายใต้เงื่อนไขเดียวกันมากกว่า 1 ครั้ง เพื่อยืนยันและเพิ่มความถูกต้องของผลการทดลอง แต่มีข้อเสียคือสิ้นเปลืองทรัพยากรในการทดลอง การทดลองซ้ำมีคุณสมบัติที่สำคัญ 2 ประการ คือ ประการแรก การทดลองซ้ำทำให้ผู้ทดลองสามารถหา ค่าประมาณของความผิดพลาดในการทดลองได้ ประการที่สอง ถ้าค่าเฉลี่ยถูกนำมาใช้เพื่อประมาณผลที่เกิดจากปัจจัยหนึ่งในการทดลอง ดังนั้นการทดลองซ้ำทำให้ผู้ทดลองสามารถหาตัวประมาณที่ถูกต้องยิ่งขึ้น ในการประมาณผลกระทบนี้

2. หลักการสุ่ม (Randomization) หมายถึง การทดลองที่มีวัสดุที่ใช้ในการทดลอง และลำดับของ การทดลองแต่ละครั้งเป็นแบบสุ่ม (Random) วิธีการเชิงสถิติกำหนดว่าข้อมูลจะต้องเป็นตัวแปรแบบสุ่มที่มีการกระจายแบบอิสระ หลักการสุ่มจะทำให้สมมติฐานนี้เป็นจริงและทำให้สามารถลดผลของปัจจัยภายนอกที่อาจจะปรากฏในการทดลอง

3. การบล็อก (Blocking) เป็นเทคนิคที่ใช้สำหรับเพิ่มความเที่ยงตรง (Precision) ให้แก่การ ทดลอง บล็อกอันหนึ่งอาจจะหมายถึงส่วนหนึ่งของวัสดุที่ใช้ในการทดลองที่ควรจะมีความเป็นอันหนึ่งอัน เดียวกันมากกว่าเซตทั้งหมดของวัสดุ การเปรียบเทียบเงื่อนไขที่น่าสนใจต่าง ๆ ภายในแต่ละบล็อกจะเกิดขึ้นได้จากการทำบล็อกกิ้ง

2.3 การทดสอบแรงดึง

การทดสอบแรงดึง เป็นการทดสอบคุณสมบัติทางกล เพื่อหาค่าความแข็งแรงของวัสดุ (Strength) โดยใช้การกีดกันงานให้มีรูปร่างตามมาตรฐานการทดสอบต่าง ๆ และนำไปทดสอบโดยเครื่องทดสอบแรงดึง ซึ่งปกติแล้วจะดึงด้วยแรงดึงสม่ำเสมอตามข้อกำหนดในแต่ละมาตรฐาน ในหนึ่งทิศทาง (Uni-axial) จนชิ้นงานขาดออกจากกัน ระหว่างการทดสอบเครื่องจะวัดการยืดตัวของชิ้นงานอย่างต่อเนื่อง แล้วทำการสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและการยืดตัวในรูปของกราฟความเค้นและความเครียด และคำนวณค่าต่าง ๆ เชิงวิศวกรรม อันได้แก่ ความต้านทานแรงดึงที่จุดคราก, ความต้านทานแรงดึงสูงสุด และค่าเปอร์เซ็นต์ความยืดตัว

ค่าความเค้นเชิงวิศวกรรมคือค่าแรงกระทำหารด้วยค่าพื้นที่หน้าตัดชิ้นงานเริ่มต้น ซึ่งอาจจะมีหน่วยเป็นนิวตันต่อมิลลิเมตรกำลังสอง (N/mm^2) เมกะปาสคาล (MPa) กิโลกรัมแรงต่อมิลลิเมตรกำลังสอง (kgf/mm^2) ปอนด์ต่อตารางนิ้ว (psi) หรือ กิโลปอนด์ต่อตารางนิ้ว (ksi) ส่วนค่าเปอร์เซ็นต์ความเครียดเชิงวิศวกรรมคือค่าความยาวที่เพิ่มขึ้นของชิ้นงานหารด้วยความยาวเดิม

2.4 การทดสอบแรงดึงแนวเชื่อม

การทดสอบแรงดึงแนวเชื่อม เป็นการทดสอบหาค่าความต้านแรงดึง (Tensile Strength) และพลังงานที่รอยต่อเชื่อมสามารถรับภาระได้ โดยการดึงขึ้นทดสอบตามมาตรฐานด้วยแรงคงที่ จนกระทั่งชิ้นทดสอบขาดจากกัน (ชุชาติ ด้วงสงค์, 2550) วัตถุประสงค์ของการทดสอบแรงดึงแนวเชื่อมมีดังนี้

2.4.1 การหาสมบัติเชิงกลของแนวเชื่อม

1. ความเค้นแรงดึงสูงสุด (Tensile Stress)
2. ความเค้นจากจุดคราก (Yielded Stress)
3. ขีดจำกัดความยืดหยุ่น (Elastic Limit)
4. ความยืดตัว (Elongation)
5. เปอร์เซนต์การลดลงของพื้นที่หน้าตัด (Reduction of Area)

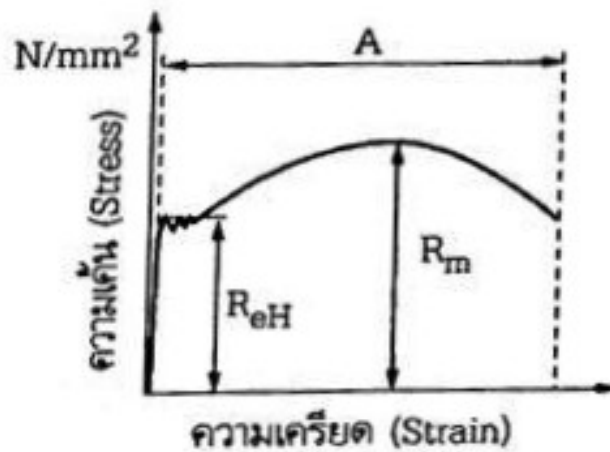
2.4.2 การหาประสิทธิภาพของรอยต่อเชื่อม (Joint Efficiency)

แสดงดังสมการ 2.1

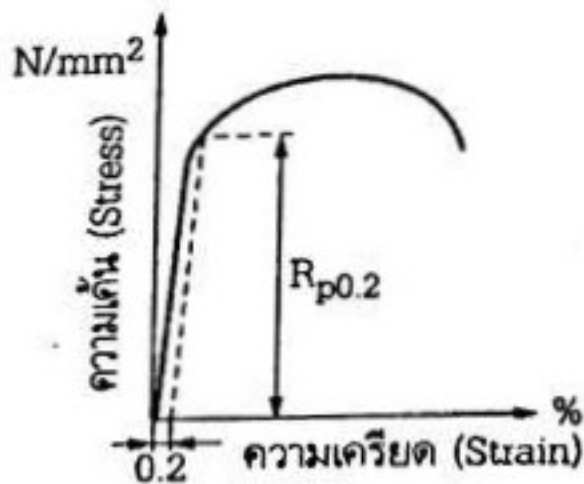
$$\text{ประสิทธิภาพของรอยต่อ} = \frac{\text{ความต้านแรงดึงของรอยต่อ}}{\text{ความต้านแรงดึงของแผ่นโลหะ}} \times 100 \quad (2.1)$$

2.4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด

ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น (Stress) และความเครียด (Strain) จะมีรูปแบบที่แน่นอน โดยขึ้นอยู่กับชนิดของส่วนผสมทางเคมีของโลหะ ดังภาพ 2.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ความเค้น กับความเครียดของแนวเชื่อมวัสดุที่ปรากฏความเค้นจุดครากตัว (Yielded Stress) และภาพ 2.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของแนวเชื่อมวัสดุที่ไม่ปรากฏความเค้นจุดครากตัว

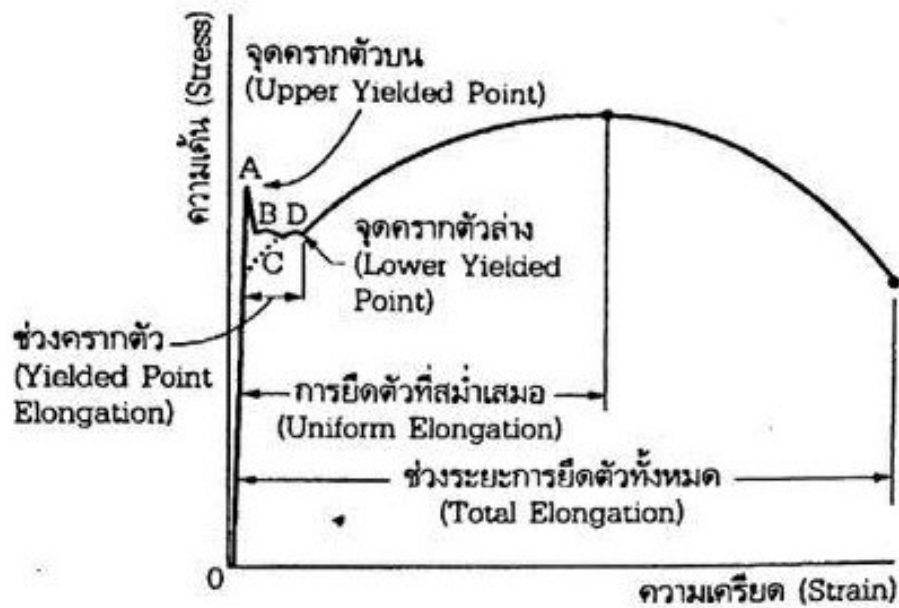


ภาพ 2.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของวัสดุที่ปรากฏจุดครากตัว
ที่มา : ชูชาติ ดั่งวงศ์ (2550)



ภาพ 2.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของวัสดุที่ไม่ปรากฏจุดครากตัว
ที่มา : ชูชาติ ดั่งวงศ์ (2550)

ผลการทดสอบวัสดุที่ปรากฏความเค้นจุดครากตัว (Yielded Stress) จะได้กราฟดังภาพ 2.4



ภาพ 2.4 จุดต่าง ๆ บนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียดของวัสดุที่ปรากฏบนจุดคราก

ที่มา : ชูชาติ ด้วงสงค์ (2550)

2.4.4 ความเค้นแรงดึงสูงสุด (Ultimate Tensile Strength)

ถ้าเพิ่มภาระขึ้นทดสอบเลยจุดคราก ชิ้นงานจะยืดขึ้นเรื่อย ๆ จนขนาดที่ภาระสูงสุด (R_m) สามารถคำนวณได้จากสูตร ดังสมการ 2.2

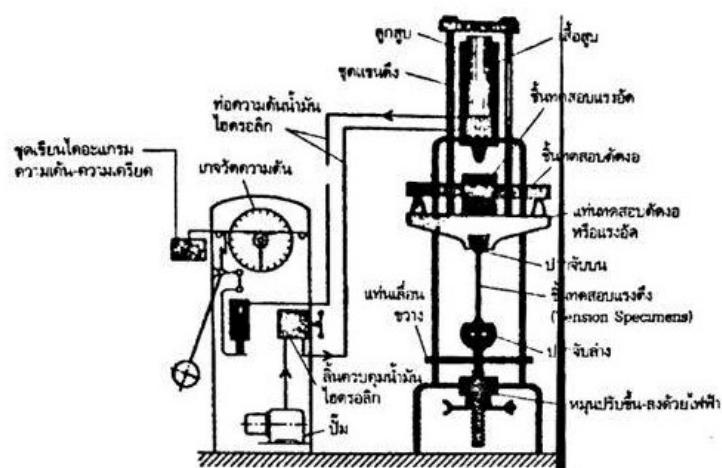
$$\text{ความเค้นแรงดึงสูงสุด} = \frac{\text{แรงที่กระทำที่ระดับ } R_m}{\text{พื้นที่หน้าตัดของชิ้นทดสอบก่อนทดสอบ}} \quad (2.2)$$

2.4.5 การยืดตัว (Elongation) และการลดลงของพื้นที่หน้าตัด (Reduction of Area) ใช้บอกสมบัติความอ่อนตัว (Ductility) ของแนวเชื่อมแสดงเป็นเปอร์เซ็นต์ สามารถคำนวณได้จากสูตร ดังสมการ 2.3

$$\text{เปอร์เซ็นต์การยืดตัว} = \frac{\text{ความยาวชิ้นทดสอบหลังขาด} - \text{ความยาวชิ้นทดสอบก่อนขาด}}{\text{ความยาวชิ้นทดสอบก่อนขาด}} \times 100 \quad (2.3)$$

2.4.6 เครื่องทดสอบ

ในการทดสอบแรงดึงจะใช้เครื่องทดสอบอเนกประสงค์ (Universal Testing Machine) แสดงดังภาพ 2.5 โดยชิ้นงานจะถูกยึดที่หัวจับชิ้นงาน (Grip) บนและล่าง ส่วนน้ำมันไฮดรอลิกจากปั๊มจะไหลเข้าตามท่อด้านล่าง ดับลูกสูบแทนหัวจับด้านบนให้ดึงแทนหัวจับด้านล่าง เพื่อดึงชิ้นทดสอบขาดออกจากกัน ในขณะที่ดึงชิ้นทดสอบนั้น ความดันของน้ำมันไฮดรอลิกในท่อบนจะดันระบบกลไกทางกลของเกจวัดซึ่งบอกความเค้น (Stress) และดันให้ตัวเขียนเส้นภาพความเค้นแรงดึงและความเครียด (Stress – Strain) ของชิ้นทดสอบจนกระทั่งชิ้นทดสอบถูกดึงออกจากกัน



ภาพ 2.5 ส่วนประกอบของเครื่องทดสอบอเนกประสงค์ (Universal Testing Machine)

ที่มา : ชูชาติ ดั่งสงค์ (2550)

2.5 มอก. 2172 เล่ม 1-2556

มอก. 2172 เล่ม 1-2556 คือ มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม การทดสอบโลหะโดยการดึง ที่อุณหภูมิโดยรอบ มาตรฐานฉบับนี้ กำหนดวิธีการทดสอบโลหะโดยการดึงและกำหนดสมบัติทางกล ซึ่งวัดได้ที่อุณหภูมิห้อง มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมนี้กำหนดขึ้นโดยรับ ISO 6892-1:2009 Metallic materials – Tensile testing – Part 1 : Method of test at room temperature มาใช้ในระดับดัดแปลง (modified)

2.5.1 หลักการ

การทดสอบนี้เกี่ยวข้องกับการทำให้ชิ้นทดสอบเกิดความเครียดด้วยแรงดึง โดยทั่วไปจะดึงจนชิ้นทดสอบขาด เพื่อการหาค่าสมบัติทางกลหนึ่งค่าหรือมากกว่า โดยให้ทดสอบที่อุณหภูมิห้องระหว่าง 10 องศาเซลเซียส ถึง 35 องศาเซลเซียส การทดสอบภายใต้สภาวะควบคุมให้ทดสอบที่อุณหภูมิระหว่าง 23 ± 5 องศาเซลเซียส

2.5.2 ชั้นทดสอบ

รูปร่างและมิติของชั้นทดสอบอาจขึ้นอยู่กับรูปร่างและมิติของผลิตภัณฑ์โลหะที่ถูกนำมาเป็นชั้นทดสอบ โดยปกติชั้นทดสอบจะได้รับการตัดแต่งตัวอย่างจากผลิตภัณฑ์ หรือชิ้นงานตัดขึ้นรูป หรือชิ้นงานหล่อ อาจทดสอบผลิตภัณฑ์ที่มีภาคตัดขวางและชั้นทดสอบในสภาพหล่อ (ทั้งเหล็กหล่อและโลหะเจือนอกกลุ่มเหล็ก) โดยไม่ตัดแต่งก็ได้

ให้หลีกเลี่ยงการตัดตรงชั้นทดสอบเท่าที่จะเป็นไปได้ หากจำเป็นให้กระทำด้วยวิธีการที่อาจส่งผลต่อสมบัติทางกลของชั้นทดสอบน้อยที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้

2.5.3 ชั้นทดสอบที่ถูกตัดแต่ง

หากส่วนปลายที่ถูกจับยึดและความยาวส่วนที่ขนานมีมิติแตกต่างกัน ชั้นทดสอบที่ถูกตัดแต่งต้องมีส่วนโค้งเป็นรอยต่อระหว่างสองส่วนนั้น มิติของรัศมีส่วนโค้งรอยต่อนี้มีความสำคัญจึงแนะนำให้กำหนดมิติของรัศมีไว้ในข้อกำหนดวัสดุ ส่วนปลายที่ถูกจับยึดอาจมีรูปร่างอย่างไรก็ได้ให้เหมาะสมกับชุดหัวจับของเครื่องทดสอบ แกนของชั้นทดสอบต้องอยู่ในแนวเดียวกับแนวแรงที่ให้กับชั้นทดสอบ

2.5.4 ชั้นส่วนทดสอบที่ไม่ถูกตัดแต่ง

หากชั้นทดสอบเป็นความยาวของผลิตภัณฑ์ที่ไม่ถูกตัดแต่งหรือเป็นท่อนโลหะที่ไม่ถูกตัดแต่ง ความยาวอิสระระหว่างชุดหัวจับต้องเพียงพอให้เครื่องหมายพิกัดอยู่ห่างจากหัวจับของเครื่องทดสอบด้วยระยะที่เหมาะสม ชั้นทดสอบในสภาพหล่อต้องมีส่วนโค้งเป็นรอยต่อระหว่างส่วนปลายที่ถูกจับยึดและความยาวส่วนขนานมิติของรัศมีส่วนโค้งรอยต่อนี้จึงมีความสำคัญจึงแนะนำให้กำหนดมิติของรัศมีไว้ในมาตรฐานผลิตภัณฑ์ ส่วนปลายที่ถูกจับยึดจะมีรูปร่างอย่างไรก็ได้ให้เหมาะสมกับชุดหัวจับของเครื่องทดสอบ

2.5.5 การเตรียมชั้นทดสอบ

การเก็บและเตรียมชั้นทดสอบ ต้องเป็นไปตามข้อกำหนดของมาตรฐานที่เกี่ยวข้องสำหรับวัสดุแต่ละประเภท โดยหลักของชั้นทดสอบตามรูปร่างและชนิดของผลิตภัณฑ์ แสดงดังภาพ 2.6 และภาพ 2.7 โดยมาตรฐานผลิตภัณฑ์สามารถกำหนดชั้นทดสอบแบบอื่นได้

หน่วยเป็นมิลลิเมตร

ประเภทของผลิตภัณฑ์		ภาคผนวก
แผ่นบาง – แผ่นหนา – เส้นแบน	ลวด – ท่อน – รูปทรง	
 ความหนา	   เส้นผ่านศูนย์กลาง หรือ ความกว้างระหว่างด้านแบน	
$0.1 \leq a_0 < 3$	-	ข
-	$d_0 < 4$	ค
$a_0 \geq 3$	$d_0 \geq 4$	ง
ท่อ		จ

ภาพ 2.6 แบบหลักของชั้นทดสอบ

ที่มา : มอก. 2172 เล่ม 1-2556

ลักษณะชั้นทดสอบ	ชั้นทดสอบ รูปร่างแบน	ชั้นทดสอบ รูปร่างท่อน	ชั้นทดสอบ รูปร่างทอ	ชั้นทดสอบ รูปร่างแถบ	ชั้นทดสอบ รูปร่างลวด
ชั้นทดสอบที่ได้สัดส่วน	No. 14B	No. 2, No. 14A	No. 14C	No. 14B	
ชั้นทดสอบที่ไม่ได้สัดส่วน	No. 1A, No. 1B, No. 5, No. 13A, No. 13B	No. 4, No. 10, No. 8A, No. 8B, No. 8C, No. 8D	No. 11	No. 12A, No. 12B, No. 12C	No. 9A, No. 9B

ภาพ 2.7 การจำแนกชั้นทดสอบ

ที่มา : มอก. 2172 เล่ม 1-2556

การเลือกชั้นทดสอบที่จะใช้งานต้องเป็นไปตามข้อกำหนดของมาตรฐานผลิตภัณฑ์ที่เกี่ยวข้อง
อย่างไรก็ตามควรอ้างอิงการแบ่งการใช้งาน ดังภาพ 2.8

ผลิตภัณฑ์		ชั้นทดสอบ		หมายเหตุ	ภาคผนวกที่ สอดคล้อง
ประเภท	มิติ	ที่ได้สัดส่วน	ที่ไม่ได้สัดส่วน		
แผ่นบาง แผ่นหนา รูปพรรณ แผ่นม้วน	ความหนาน้อยกว่าหรือเท่ากับ 3 mm	–	No. 5, No. 13A, No. 13B	ชั้นทดสอบรูปร่างแบน	ภาคผนวก ข
	ความหนามากกว่า 3 mm ถึง 6 mm	No. 14B	No. 1A, No. 5		
	ความหนามากกว่า 6 mm ถึง 20 mm			ภาคผนวก ง	
	ความหนามากกว่า 20 mm ถึง 40 mm	No. 14A	No. 4, No. 10		ชั้นทดสอบรูปร่างท่อน
	ความหนามากกว่า 40 mm	No. 14B	No. 1A		ชั้นทดสอบรูปร่างแบน
		No. 14A	No. 4, No. 10		ชั้นทดสอบรูปร่างท่อน
		No. 14B	–	ชั้นทดสอบรูปร่างแบน	
ลวด	–	-	No. 9A, No. 9B	–	ภาคผนวก ค
ท่อน	–	No. 2, No. 14A	No. 4, No. 10	–	ภาคผนวก ง
ทอ	เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกเล็ก	No. 14C	No. 11	ชั้นทดสอบรูปร่างทอ	ภาคผนวก จ
	เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกน้อยกว่าหรือเท่ากับ 50 mm	No. 14B	No. 12A	ชั้นทดสอบรูปร่างแถบ	
	เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกมากกว่า 50 mm ถึง 170 mm		No. 12B		
	เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกมากกว่า 170 mm		No. 12C		
	เส้นผ่านศูนย์กลางท่อตั้งแต่ 200 mm ขึ้นไป	No. 14B	No. 5	ชั้นงานทดสอบรูปร่างแบนหรือรูปร่างแถบ	
	ท่อผนังหนา	No. 14A	No. 4	ชั้นทดสอบรูปร่างท่อน	
หล่อ	–	No. 14A	No. 4, No. 10	–	–
	–		No. 8A, No. 8B, No. 8C, No. 8D	ใช้เมื่อไม่ต้องการหาค่าความยืดเตรียมจากชิ้นตัวอย่างที่หล่อขึ้นเพื่อทำชั้นทดสอบ	
ทาบขึ้นรูป	–	No. 14A	No. 4, No. 10	–	–

ภาพ 2.8 การแบ่งการใช้งานของชิ้นงานทดสอบ

ที่มา : มอก. 2172 เล่ม 1-2556

2.5.6 รูปร่างของชิ้นทดสอบ

โดยทั่วไปความหนาของชิ้นทดสอบต้องเท่ากับความหนาเดิมของผลิตภัณฑ์ และส่วนปลายที่ถูกจับยึดของชิ้นทดสอบจะมีความกว้างมากกว่าความยาวส่วนขนานความยาวส่วนขนาน (L_c) ต้องตรงกับส่วนปลายด้วยบ่าชิ้นทดสอบ (Transition curves) ที่มีรัศมีอย่างน้อย 20 มิลลิเมตร แต่ไม่เกิน 30 มิลลิเมตร ความกว้างของส่วนปลายนี้ควรมีค่าอย่างน้อย 1.2 เท่าของความกว้างเดิม (b_o) โดยข้อตกลง ชิ้นทดสอบอาจจะเป็นชิ้นทดสอบแบบด้านข้างขนานกันก็ได้และสำหรับผลิตภัณฑ์ที่มีความกว้างไม่เกิน 20 mm ความกว้างของชิ้นทดสอบอาจจะเท่ากับความกว้างของผลิตภัณฑ์

2.5.7 มิติของชิ้นทดสอบ

มิติของชิ้นทดสอบชิ้นทดสอบที่ไม่ได้สัดส่วนที่นิยมใช้ทั่วไปมี 3 แบบดังภาพ 2.9 ความยาวส่วนขนาน (L_c) ต้องไม่น้อยกว่าความยาวพิกัดเดิมบวกกับความกว้างเดิมหารด้วย 2 ($L_o + b_o / 2$) ยกเว้นชิ้นทดสอบหมายเลข 5 ในภาพ 2.9 หากมีข้อโต้แย้งควรใช้ความยาวเท่ากับความยาวพิกัดเดิมบวกกับ 2 เท่าของความกว้าง ($L_o + 2 b_o$) เว้นแต่มีวัสดุไม่เพียงพอสำหรับชิ้นทดสอบแบบด้านข้างขนานกันที่มีความกว้างน้อยกว่า 20 มิลลิเมตร หากมีได้ระบุไว้เป็นอย่างอื่นในมาตรฐานผลิตภัณฑ์ความยาวพิกัดเดิมต้องเท่ากับ 50 มิลลิเมตร สำหรับชิ้นทดสอบแบบด้านข้างขนานกันความยาวอิสระระหว่างชุดหัวจับต้องมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับความยาวพิกัดเดิมบวกกับ 3 เท่าของความกว้าง ($L_o + 3 b_o$)

หน่วยเป็นมิลลิเมตร

ชิ้นทดสอบ	ความกว้าง b_o	ความยาวพิกัดเดิม L_o	รัศมีบ่าชิ้นทดสอบ R	ความยาวส่วนขนาน L_c		ความยาวอิสระระหว่างชุดหัวจับ สำหรับชิ้นทดสอบแบบด้านข้างขนานกัน, ค่าสุด	ชิ้นทดสอบ ISO 6892-1 Annex B
				ต่ำสุด	แนะนำ		
No.13B	$12.5 \pm 0.5^{(1)}$	50	20 - 30 ⁽¹⁾	57	75	87.5	1
No.13A	$20 \pm 0.7^{(1)}$	80		90	120	140	2
No.5	$25 \pm 0.7^{(1)}$	50 ⁽¹⁾		60 ⁽¹⁾	—	ไม่กำหนด	3

⁽¹⁾ อัตราส่วน L_o/b_o และ L_c/b_o ของชิ้นทดสอบหมายเลข 5 มีค่าต่ำมากเมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นทดสอบหมายเลข 13B และ 13A ดังนั้นผลทดสอบโดยเฉพาะความยืดหยุ่นหลังจากขาด (ค่าสัมบูรณ์และช่วงการกระจาย) ที่วัดได้จากชิ้นทดสอบแบบนี้จะมีค่าแตกต่างจากที่วัดได้จากแบบอื่น

⁽²⁾ ช่วงของความกว้างที่ยอมรับได้ของชิ้นทดสอบแต่ละแบบ (ต้องเตรียมชิ้นทดสอบในช่วงของความคลาดเคลื่อนนี้) ISO 6892-1 กำหนดค่านี้เท่ากับ 1 mm

⁽³⁾ ISO 6892-1 กำหนดค่ารัศมีบ่าชิ้นทดสอบอย่างน้อย 20 mm ไม่ได้กำหนดค่าสูงสุดไว้

ภาพ 2.9 มิติของชิ้นงานทดสอบ

ที่มา : มอก. 2172 เล่ม 1-2556

เมื่อทำการวัดมิติของชิ้นทดสอบแต่ละชิ้นความคลาดเคลื่อนของรูปร่าง (ความแตกต่างระหว่างความกว้างสูงสุดกับความกว้างน้อยสุดที่วัดได้จากความยาวส่วนขนาน) ให้เป็นไปตามที่กำหนดไว้ แสดงดังภาพ 2.10 สำหรับชิ้นทดสอบที่มีความกว้างเท่ากับความกว้างของผลิตภัณฑ์พื้นที่ภาคตัดขวางเดิม S_0 ต้องคำนวณจากมิติของชิ้นทดสอบที่วัดได้ โดยตัวอย่างมิติของชิ้นทดสอบ แสดงดังภาพ 2.11

หน่วยเป็นมิลลิเมตร

ความกว้างระบุของชิ้นทดสอบ	ความคลาดเคลื่อนของการตัดแต่ง ^{ก)}	ความคลาดเคลื่อนของรูปร่าง ^{ข)}
12.5	± 0.02	0.06
20	± 0.02	0.10
25	± 0.04	0.10

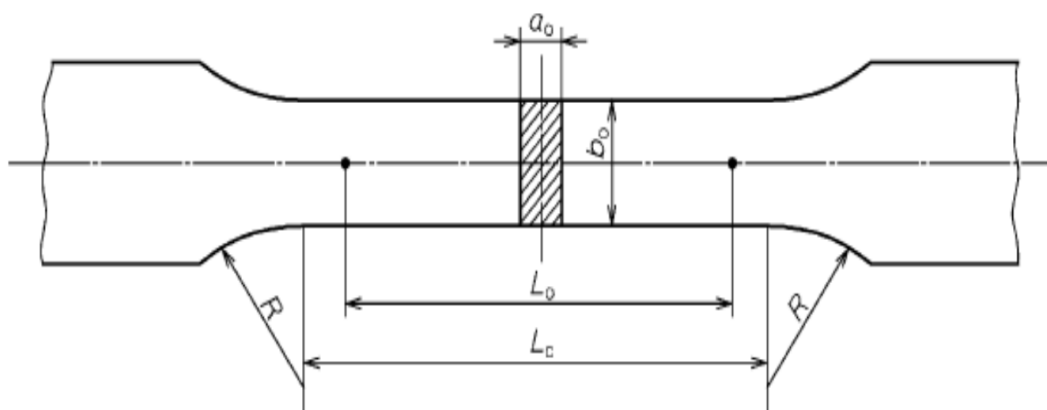
^{ก)} หากจะใช้ค่าระบุในการคำนวณพื้นที่ภาคตัดขวางเดิม S_0 โดยไม่ต้องทำการวัด ความคลาดเคลื่อนของการตัดแต่งต้องเป็นไปตามเกณฑ์ที่กำหนดไว้

^{ข)} ค่าเบี่ยงเบนสูงสุดของการวัดความกว้างตลอดความยาวส่วนขนาน L_c ของชิ้นทดสอบ

หมายเหตุ ISO 6892-1 กำหนดความคลาดเคลื่อนของการตัดแต่งเท่ากับ ± 0.05 , ± 0.10 , ± 0.10 และความคลาดเคลื่อนของรูปร่างเท่ากับ 0.06, 0.12, 0.12 ตามลำดับของความกว้างระบุ

ภาพ 2.10 ค่าความคลาดเคลื่อนสำหรับความกว้างของชิ้นทดสอบ

ที่มา : มอก. 2172 เล่ม 1-2556



ภาพ 2.11 ตัวอย่างมิติของชิ้นทดสอบ

ที่มา : มอก. 2172 เล่ม 1-2556

2.6 การออกแบบเครื่องมือ

การออกแบบเครื่องมือเป็นการออกแบบเพื่อสร้างและปรับปรุงเครื่องมือที่มีอยู่ให้มีประสิทธิภาพ กระบวนการของการออกแบบและปรับปรุงเครื่องมือที่มีอยู่แล้ว ที่เกี่ยวข้องกับเครื่องจักรในอุตสาหกรรม จำเป็นต้องใช้เทคนิคและวิธีการหลายๆ อย่าง เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของการทำงานในโรงงานอุตสาหกรรม และเพิ่มผลผลิตให้สูงขึ้น ลดการสูญเสียในกระบวนการ

2.6.1 จุดประสงค์ของการออกแบบเครื่องมือมีหลักการดังนี้

1. หาวิธีการทำงานของเครื่องมือให้เป็นแบบธรรมดาแต่มีประสิทธิภาพสูง
2. หาทางลดค่าใช้จ่ายในการผลิต
3. ออกแบบเครื่องมือให้มีคุณภาพสูง
4. หาทางเพิ่มอัตราการผลิตของเครื่องจักร
5. ออกแบบเครื่องมือให้มีความกะทัดรัด
6. ใช้วัสดุที่มีอายุการใช้งานเหมาะสม
7. ออกแบบเพื่อให้เกิดความปลอดภัยแก่ผู้ใช้

2.6.2 การวางแผนการออกแบบเครื่องมือ มีวิธีการดำเนินการดังนี้

1. แบบชิ้นส่วนที่จะผลิต ต้องวิเคราะห์เกี่ยวกับ
 - 1.1 รูปร่างขนาดชิ้นงาน
 - 1.2 ชนิดวัสดุชิ้นงาน
 - 1.3 วิธีการทำงานเครื่องมือและเครื่องจักร
 - 1.4 ความต้องการในเรื่องความถูกต้อง
 - 1.5 ปริมาณชิ้นงานที่จะผลิต
 - 1.6 ผิวหน้าชิ้นงานที่จะใช้เป็นตำแหน่งยึดจับ
2. การวางแผนการผลิตจะต้องคำนึงถึง
 - 2.1 รายละเอียดและชนิดของเครื่องมือตัด
 - 2.2 รายละเอียดและชนิดของเครื่องมือจักร
 - 2.3 จัดเรียงลำดับขั้นตอนการผลิตก่อนหลัง
 - 2.4 ข้อมูลชิ้นงานที่ถูกกระทำมาก่อนหน้านั้น

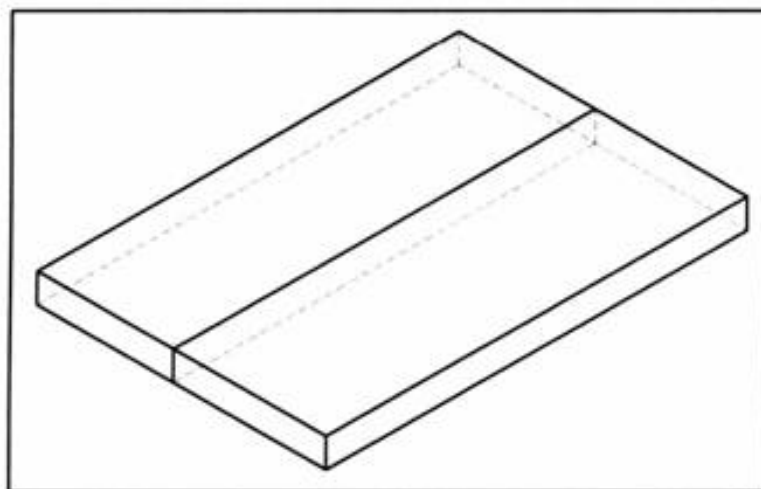
3. การเลือกเครื่องมือต้องพิจารณาถึง

- 3.1 จะใช้เครื่องมือพิเศษหรือเครื่องมือที่มีอยู่แล้ว
- 3.2 ใช้เครื่องมือที่มีจุดประสงค์เฉพาะอย่างหรือหลายอย่าง
- 3.3 จะใช้เครื่องจักรแบบหมุนแกนเดียวหรือหลายแกน
- 3.4 จะใช้เครื่องตรวจสอบอะไร
- 3.5 ค่าใช้จ่ายประหยัดหรือไม่

2.7 ชนิดของรอยต่อในงานเชื่อมโลหะ (Type of Joint)

รอยต่อ คือ การประสานหรือทำการต่อชิ้นงานสองชิ้น หรือมากกว่านั้น ซึ่งอาจจะกระทำได้โดยการยึดด้วยสกรู นัต การบัดกรี หรือการเชื่อมก็ตาม ชนิดของรอยต่อในงานเชื่อมโลหะ จะมีอยู่ 5 ลักษณะ ดังต่อไปนี้

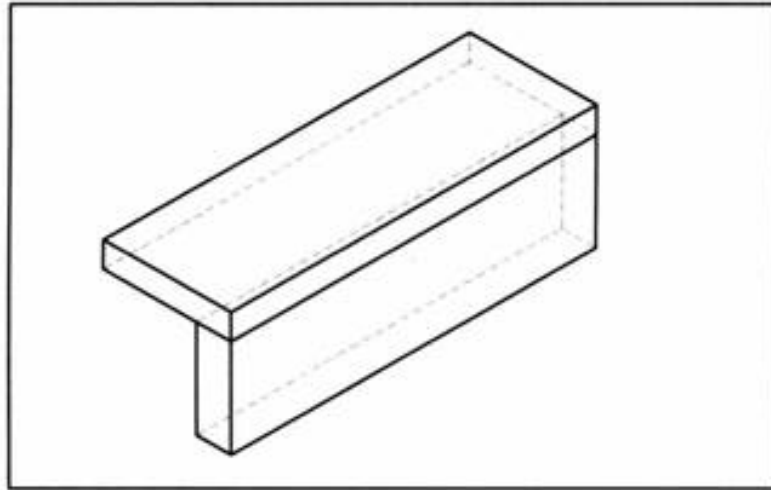
2.7.1 รอยต่อชน (BUTT JOINT) คือการนำชิ้นงานสองชิ้นมาชนกันโดยให้ขอบของชิ้นงานทั้งสองอยู่ในระดับเดียวกัน แสดงดังภาพ 2.12



ภาพ 2.12 รอยต่อชน (BUTT JOINT)

ที่มา : PCAT (2557)

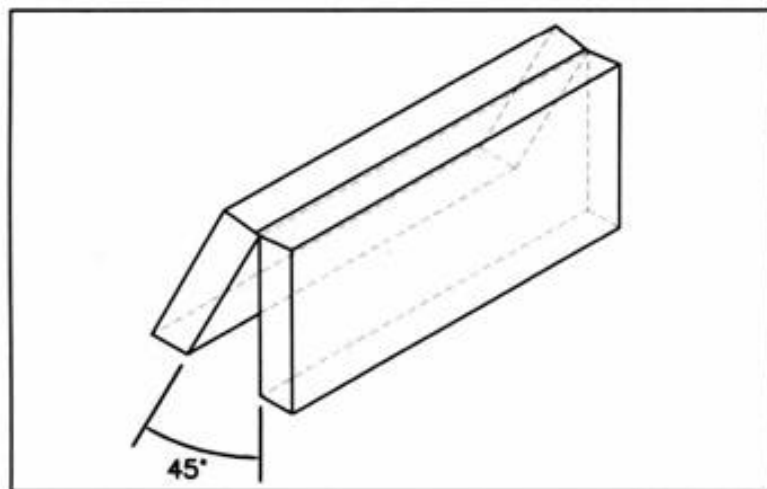
2.7.2 รอยต่อมุม (CORNER JOINT) คือการนำขอบของชิ้นงานทั้งสอง ขึ้นมาชน และจะอยู่ในบริเวณปลายสุดของชิ้นงานเกิดเป็นมุมตั้งฉาก 90 องศา หรืออาจจะมาน้อยกว่า 90 องศา มีอยู่หลายลักษณะขึ้นอยู่กับารออกแบบ แสดงดังภาพ 2.13



ภาพ 2.13 รอยต่อมุม (CORNER JOINT)

ที่มา : PCAT (2557)

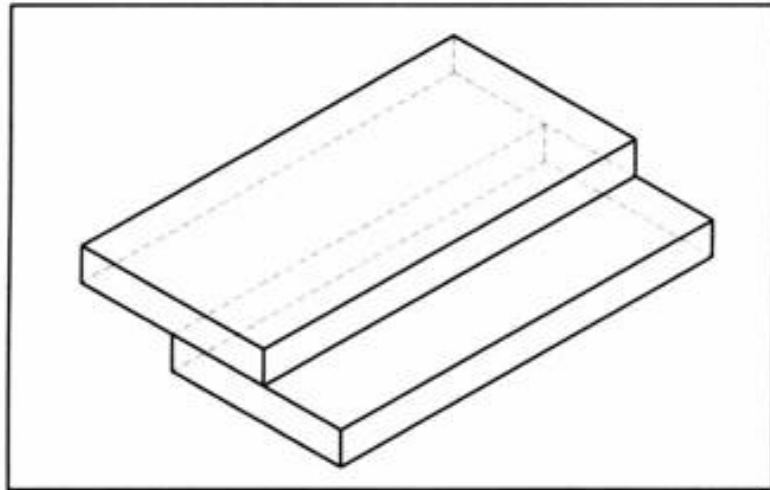
2.7.3 รอยต่อขอบ (EDGE JOINT) คือการนำขอบของชิ้นงานสองชิ้นมาชนในลักษณะให้ผิวงานทั้งสองชิ้นทาบแนบชิดกันขอบของงานทั้งสองจะชิดและขนานกันไปตลอดแนว เมื่อจะเชื่อมจะต้องเชื่อมที่ผิวหน้าของขอบชิ้นงาน แสดงดังภาพ 2.14



ภาพ 2.14 รอยต่อขอบ (EDGE JOINT)

ที่มา : PCAT (2557)

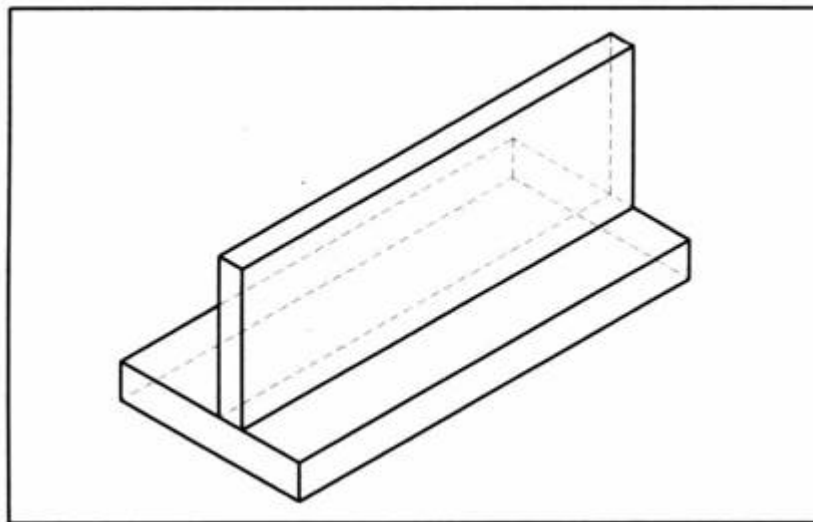
2.7.4 รอยต่อเกย (LAP JOINT) คือการนำชิ้นงานสองชิ้นมาวางในลักษณะซ้อนกัน แนวเชื่อมที่เกิดขึ้นจะรับแรงเฉือนใช้กับการเชื่อมด้วยความต้านทาน เช่น เชื่อมจุดหรือใช้รอยเชื่อมอุด แสดงดังภาพ 2.15



ภาพ 2.15 รอยต่อเกย (LAP JOINT)

ที่มา : PCAT (2557)

2.7.5 รอยต่อรูปตัวที (T-JOINT) คือ การนำขอบของชิ้นงานชิ้นหนึ่งวาง ตั้งลงบนผิวชิ้นงาน อีกชิ้นหนึ่งให้มีลักษณะเป็นรูปตัวอักษร T จะบากงานหรือไม่ขึ้นอยู่กับความหนาของชิ้นงาน รอยต่อ รูปตัวทีจัดเป็นรอยเชื่อมแบบ ฟิลเลต (Fillet Weld) แสดงดังภาพ 2.16



ภาพ 2.16 รอยต่อรูปตัวที (T-JOINT)

ที่มา : PCAT (2557)

2.8 การตรวจสอบรอยเชื่อม

มาตรฐานการตรวจสอบรอยเชื่อมโครงเหล็กgrupพรรณด้วยวิธีตรวจพินิจ (Standard Method for Weldment Examination in Steel Structure with Visual Method) (กรมโยธาธิการและผังเมือง, 2551)

2.8.1 มาตรฐานวิธีการตรวจสอบนี้ใช้สำหรับการตรวจสอบรอยเชื่อมโลหะแบบหลอมละลายของส่วนประกอบงานโครงสร้างเหล็กทั้งในโรงงานและภายนอกโรงงาน ได้แก่ รอยเชื่อมของรอยต่อชิ้นงาน เช่น ต่อชน ต่อเกย รอยเชื่อมฟิลเลท เป็นต้น รอยเชื่อมของชิ้นส่วนที่เป็นแผ่นและท่อของโครงสร้างเหล็ก

2.8.2 วัตถุประสงค์ของการตรวจสอบนี้ใช้สำหรับตรวจสอบหารอยบกพร่องที่ผิวด้านหน้าและด้านหลังของรอยเชื่อมที่อยู่ในบริเวณรอยเชื่อมและส่วนที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน (heat affected zone) ซึ่งมีผลต่อความแข็งแรงของโครงสร้างที่ได้รับภาระสถิต (static structure) และพลวัต (dynamic structure) ทั้งความไม่ต่อเนื่องของรอยเชื่อมที่เกิดขึ้นในระหว่างการเชื่อม รอยบกพร่องที่เกิดขึ้นจากการรับภาระระหว่างการใช้งาน และการทดสอบเมื่อครบวาระ

2.8.3 มาตรฐานนี้ระบุเกณฑ์ที่ใช้ในการตัดสินการยอมรับหรือไม่ยอมรับรอยบกพร่องของรอยเชื่อมไว้เป็นบรรทัดฐานในการประเมินรอยเชื่อม ข้อกำหนดในกระบวนการทดสอบด้วยวิธีตรวจพินิจสำหรับรอยเชื่อมในงานโครงสร้างเหล็ก

2.8.4 มาตรฐานนี้จะใช้ภายใต้เงื่อนไขดังต่อไปนี้

1. เหล็กโครงสร้างที่ระบุค่าหน่วยแรงดึงลากขึ้นต่ำไม่เกินกว่า 690 เมกะปาสคาล ($7,036 \text{ kg/cm}^2$)
2. เหล็กโครงสร้างต้องมีความหนาไม่น้อยกว่า 3 มิลลิเมตร
3. มาตรฐานนี้ใช้หน่วย SI (International System Units) เป็นหลักและมีหน่วยเมตริกกำกับในวงเล็บต่อท้าย โดยการแปลงหน่วยของแรง 1 กิโลกรัม เท่ากับ 9.806 นิวตัน

2.9 การยศาสตร์

การยศาสตร์ หมายถึง การศึกษาทางวิทยาศาสตร์ที่เกี่ยวกับความสัมพันธ์ระหว่างคนกับสภาพแวดล้อมในการทำงาน หากพิจารณาแล้ว วัตถุประสงค์ของการศึกษาทางการยศาสตร์นิยามอยู่ในความหมายของคำสองคำ คือ ประสิทธิภาพ และ ความปลอดภัย นั่นหมายความว่า ความรู้ในส่วน

ต่างๆ ไม่ว่าจะเป็นความรู้ที่เกี่ยวข้องกับคน เครื่องมือ เครื่องจักร วิธีการทำงาน ลักษณะงาน และสภาพแวดล้อม ที่ได้มาในขั้นตอนของการศึกษาทางกายศาสตร์จะถูกใช้เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพและความปลอดภัย

2.9.1 ความสำคัญของการยศาสตร์

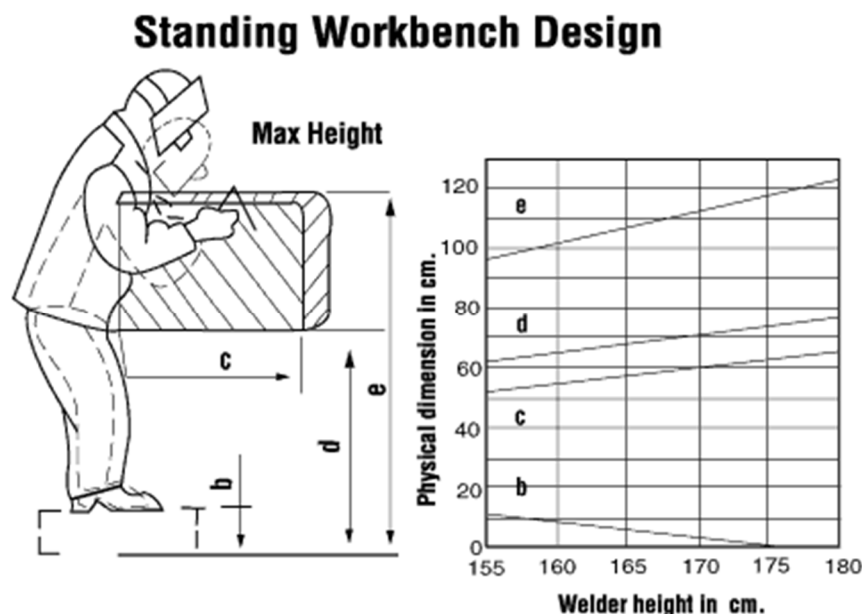
การนำเอาความรู้ทางด้านการยศาสตร์มาประยุกต์ใช้ในการทำงานนำไปสู่ความปลอดภัยในการทำงาน ซึ่งก่อให้เกิดประโยชน์ต่อองค์การและผู้ปฏิบัติงานดังนี้ลดความผิดพลาดในการปฏิบัติงานต่างๆ ลดความเมื่อยล้าในการบาดเจ็บจากการทำงานลดอุบัติเหตุจากการทำงานลดค่าใช้จ่ายในการฝึกอบรมเกิดขวัญ กำลังใจ ความพึงพอใจในการทำงานเพิ่มมากขึ้นเกิดการเพิ่มผลผลิตทั้งในเชิงปริมาณและคุณภาพ

2.9.2 ปัจจัยเสี่ยงด้านการยศาสตร์ที่เกี่ยวข้องกับการเชื่อม

1. การยกของหนัก (กระบอกสูบ สายแก๊สต่างๆ)
2. ท่าทางของร่างกายที่ไม่เป็นธรรมชาติ (แขนยื่นออกไป, ตำแหน่งที่ผิดแปลกของคอและศีรษะ, คูกเข่า)
3. การวางตำแหน่งร่างกายแบบคงที่ (ระยะเวลาของงาน ความเมื่อย)
4. แรงต่อนื่อง (แรงในการประคองหัวเชื่อม)

2.9.3 ตัวอย่างที่ดีของโต๊ะเชื่อม

1. ตัวอย่างที่ดีของการเชื่อมแบบยืน แสดงดังภาพ 2.17

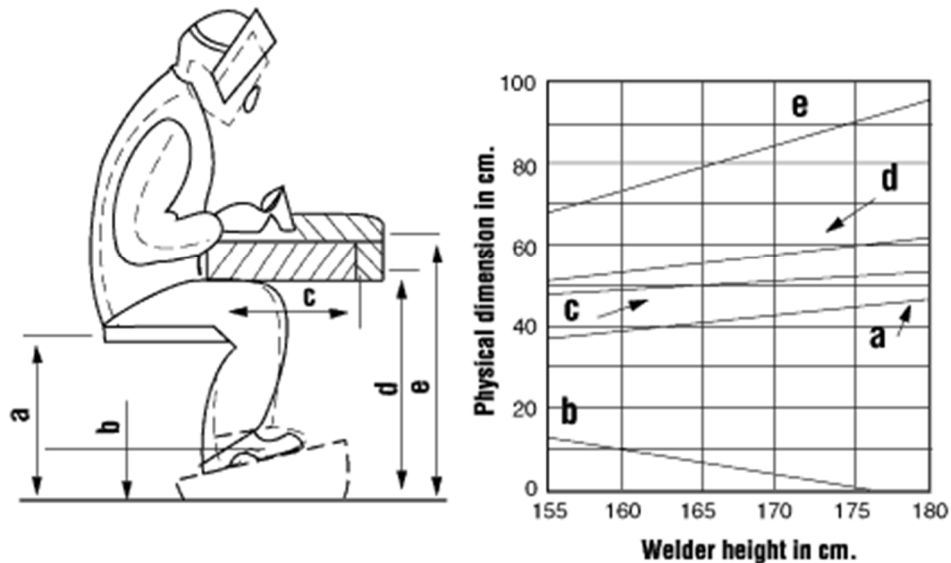


ภาพ 2.17 การเชื่อมแบบยืน

ที่มา : Golavatjuk et.al., Lisboa (1980)

2. ตัวอย่างที่ดีของการเชื่อมแบบนั่ง แสดงดังภาพ 2.18

Seated Workbench Designs



ภาพ 2.18 การเชื่อมแบบนั่ง

ที่มา : Golavatjuk et.al., Lisboa (1980)

2.10 หลักการพื้นฐานของหุ่นยนต์

หุ่นยนต์ (Robot) คือ เครื่องจักรกลชนิดหนึ่งที่ทำางานด้วยการควบคุมแบบอัตโนมัติ ที่มีลักษณะโครงสร้างและการทำงานคล้ายหรือเหมือนกับมนุษย์ และสามารถทำงานที่ซ้ำๆ และซับซ้อนได้ดี รวมทั้งงานที่มีความยากลำบากที่มนุษย์ไม่สามารถทำได้ เช่น งานสำรวจในพื้นที่บริเวณคับแคบ งานสำรวจใต้ท้องทะเลลึก หรืองานสำรวจดาวเคราะห์ที่ไม่มีสิ่งมีชีวิต หุ่นยนต์เป็นศาสตร์ทางวิศวกรรมที่รวมเอาวิศวกรรมเครื่องกล วิศวกรรมไฟฟ้า วิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ วิศวกรรมคอมพิวเตอร์ และ วิศวกรรมซอฟต์แวร์เข้าด้วยกันเพื่อสร้างหุ่นยนต์ขึ้น

2.10.1 กฎของหุ่นยนต์ ตั้งขึ้นโดย ไอแซค อสิมอฟ เพื่อใช้กับหุ่นยนต์ในนิยายวิทยาศาสตร์ของเขา โดยกฎ เหล่านี้ไม่ได้เกี่ยวข้องโดยตรงกับหุ่นยนต์ในชีวิตจริงแต่อย่างใดได้แก่

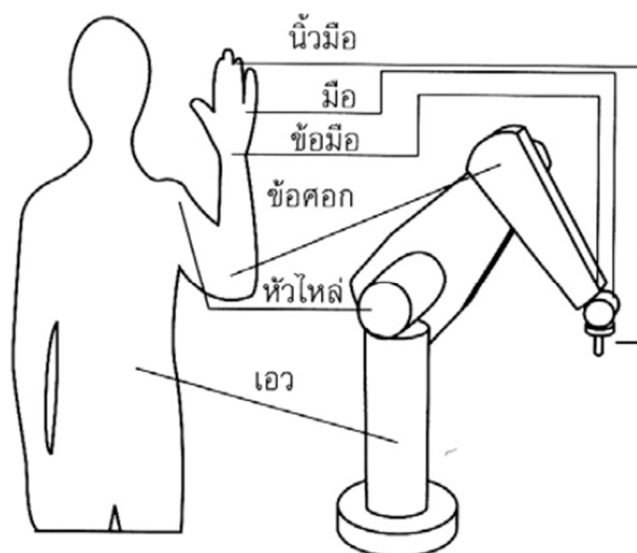
1. หุ่นยนต์จะต้องไม่ทำร้ายต่อมนุษย์ หรืออยู่เนืองเฉยปล่อยให้มนุษย์ตกอยู่ในอันตราย
 2. หุ่นยนต์ต้องเชื่อฟังคำสั่งที่ได้รับจากมนุษย์ ยกเว้นคำสั่งที่ขัดแย้งกับกฎข้อแรก
 3. หุ่นยนต์จะต้องปกป้องการดำรงคงอยู่ของตัวตนไว้ตราบเท่าที่การปกป้องนั้นมีได้
- ขัดแย้งต่อกฎข้อแรกหรือกฎข้อที่สอง

2.10.2 ชนิดของหุ่นยนต์

หุ่นยนต์สามารถแบ่งแยกได้หลากหลายรูปแบบตามลักษณะเฉพาะของการใช้งาน ได้แก่ การแบ่งแยกตามการใช้งาน การแบ่งแยกตามการเคลื่อนที่ การแบ่งแยกตามการควบคุมการเคลื่อนที่ และการแบ่งแยกตามลักษณะภายนอกของแขนกล

2.10.2.1 การแบ่งแยกตามการใช้งาน ได้แก่

1. หุ่นยนต์อุตสาหกรรม เป็นหุ่นยนต์ที่มีโครงสร้างคล้ายกับร่างกายของมนุษย์คือ มีเอว ข้อศอก แขน และข้อมือ คำว่า แขนกล หมายถึงแขนของหุ่นยนต์อุตสาหกรรม การออกแบบหุ่นยนต์อุตสาหกรรมเป็นการประยุกต์รวมเอาวิศวกรรมในหลายสาขาที่แตกต่างกัน ได้แก่ วิศวกรรมเครื่องกลและวิศวกรรมอุตสาหการมาออกแบบสร้างหุ่นยนต์ให้มีโครงสร้างกลไกเชื่อมโยงต่อกัน เลือกใช้วัสดุที่มีความแข็งแรง ทนทาน และวิศวกรรมไฟฟ้าเพื่อเลือกใช้ชนิดของมอเตอร์และการจ่ายพลังงานไฟฟ้าให้กับมอเตอร์ และวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์หรือพีแอลซี และหุ่นยนต์ เพื่อควบคุมการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ แสดงดังภาพ 2.19



ภาพ 2.19 ภาพเปรียบเทียบร่างกายของมนุษย์กับแขนกลของหุ่นยนต์อุตสาหกรรม

ที่มา : มุขिता สงฆ์จันทร์ (2558)

หุ่นยนต์ส่วนใหญ่ที่ใช้ในงานอุตสาหกรรมจะเป็นหุ่นยนต์ที่ติดตั้งอยู่กับที่ ไม่สามารถเคลื่อนที่ได้ (Fixed Robot) เคลื่อนที่ได้เฉพาะแขนกล เช่น หุ่นยนต์ที่ใช้ในการหยิบจับ และวางชิ้นงานการเชื่อมและการพ่นสี หุ่นยนต์ประเภทนี้จะมีลักษณะโครงสร้างที่ใหญ่โตและมีน้ำหนักมาก ใช้พลังงานจากแหล่งจ่ายภายนอก และจะมีการเขียนโปรแกรมกำหนดขอบเขตการเคลื่อนที่ของแขนกล ให้แขนกลของหุ่นยนต์สามารถเคลื่อนที่ได้ตามโปรแกรมที่กำหนดเอาไว้

2. หุ่นยนต์ที่ไม่ใช้ในงานอุตสาหกรรม ได้แก่

2.1 หุ่นยนต์ทางการศึกษา

2.2 หุ่นยนต์ที่ใช้ทางการแพทย์ เพราะหุ่นยนต์จะติดตั้งอยู่กับที่สามารถเคลื่อนไหวไปมาเฉพาะแขนกลที่ใช้ในการผ่าตัด

2.3 หุ่นยนต์ที่ใช้ในพื้นที่อันตราย เช่น สวมกับระเบิด ค้นหาระเบิด หรือบริเวณที่มีสารเคมีอันตราย

2.10.2.2 การแบ่งแยกตามการเคลื่อนที่ได้แก่

1. หุ่นยนต์ที่ไม่มีการเคลื่อนที่ (Fixed Robot) คือหุ่นยนต์ที่ใช้ในงานอุตสาหกรรมโดยหุ่นยนต์จะถูกติดตั้งอยู่กับที่ ไม่สามารถเคลื่อนที่ได้ เคลื่อนที่ได้เฉพาะแขนกล เช่น หุ่นยนต์ที่ใช้ในการหยิบจับและวางชิ้นงาน การเชื่อม การพ่นสี หุ่นยนต์ประเภทนี้จะมีลักษณะโครงสร้างที่ใหญ่โตและมีน้ำหนักมาก ใช้พลังงานจากแหล่งจ่ายภายนอก และจะมีการเขียนโปรแกรมกำหนดขอบเขตการเคลื่อนที่ของแขนกล ให้แขนกลของหุ่นยนต์สามารถเคลื่อนที่ไปตามโปรแกรมที่กำหนดเอาไว้

2. หุ่นยนต์ที่สามารถเคลื่อนที่ได้ (Mobile Robot) คือหุ่นยนต์ที่สามารถเคลื่อนที่จากตำแหน่งหนึ่งไปยังอีกตำแหน่งหนึ่ง หรือเคลื่อนที่ไปตามสถานที่ต่างๆตามโปรแกรมที่เขียนป้อนให้กับหุ่นยนต์ โดยหุ่นยนต์จะมีการออกแบบให้มีขนาดและรูปร่างต่างๆ ตามประโยชน์ใช้สอย เช่น หุ่นยนต์กู้ภัย หุ่นยนต์สำรวจดวงจันทร์ และหุ่นยนต์สำรวจใต้พิภพ โดยหุ่นยนต์จะถูกออกแบบให้มีระบบการเคลื่อนที่ไปตามพื้น อาจจะใช้ล้อตีนตะขาบหรือขาซึ่งอาจจะเป็น 2 ขา 4 ขา 6 ขา หรือมากกว่า 6 ขา และมีแหล่งจ่ายพลังงานและพลังงานสำรองอยู่ภายในหุ่นยนต์ ซึ่งจะมีขนาดเล็กและน้ำหนักเบาเพื่อไม่ให้เป็นการอุปสรรคต่อการเคลื่อนที่หรือการทำงานของหุ่นยนต์ แตกต่างจากหุ่นยนต์ที่ไม่มีการเคลื่อนที่ ซึ่งจะมีแหล่งจ่ายพลังงานอยู่ภายนอก

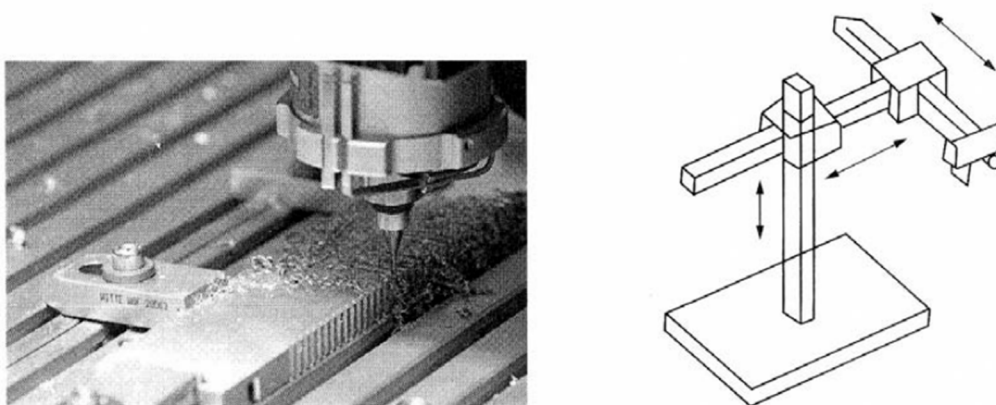
2.10.2.3 การแบ่งแยกตามการควบคุมการเคลื่อนที่ (Motion Control) ได้แก่

1. ชนิดไม่ใช้การควบคุมแบบเซอร์โว เป็นวิธีการควบคุมตำแหน่งทางกลเมื่อมีการเคลื่อนที่แล้วต้องการให้หยุดการเคลื่อนที่ จะไม่สามารถกำหนดตำแหน่งได้

2. ชนิดการควบคุมแบบเซอร์โว การควบคุมแบบนี้จะมีความยืดหยุ่นในการทำงานมากขึ้นและมีความแม่นยำในการกำหนดตำแหน่งโดยใช้ระบบการควบคุมแบบป้อนกลับ ซึ่งระบบจะมีการนำค่าตำแหน่งจริงจากเซนเซอร์มาเปรียบเทียบกับค่าความผิดพลาดในการเคลื่อนที่ตลอดเวลา

2.10.2.4 การแบ่งแยกตามลักษณะภายนอกของแขนกล (Arm Configuration) ได้แก่

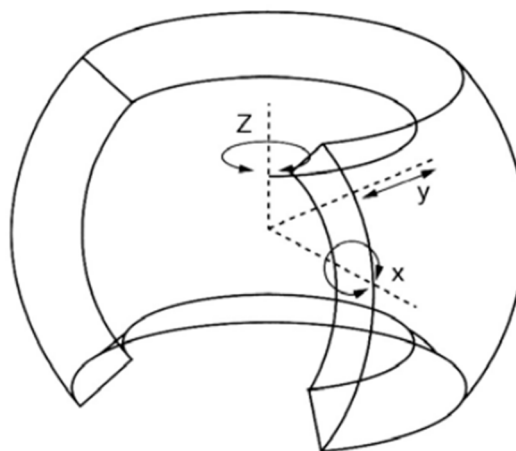
1. คาร์ทีเซียนหรือแกนทรีโรบอต (Cartesian or Gantry Robot) เป็นหุ่นยนต์ที่มีพื้นที่การทำงานในลักษณะลูกบาศก์มีการเคลื่อนที่อยู่ที่ 3 แกน คือ แกน X แกน Y แกน Z รอยต่อเป็นแบบเลื่อน (Prismatic) ดังนั้นจะง่ายต่อการโปรแกรม มีความละเอียดแม่นยำในการทำงานสูง ใช้ในงานหยิบจับและวางชิ้นงาน ประกอบชิ้นงาน เครื่องซีเอ็นซี (CNC) และงานเชื่อม ดังแสดง ในภาพ 2.20



ภาพ 2.20 เครื่อง CNC ที่ทำงานแบบคาร์ทีเซียน

ที่มา : มุทิตา สงฆ์จันทร์ (2558)

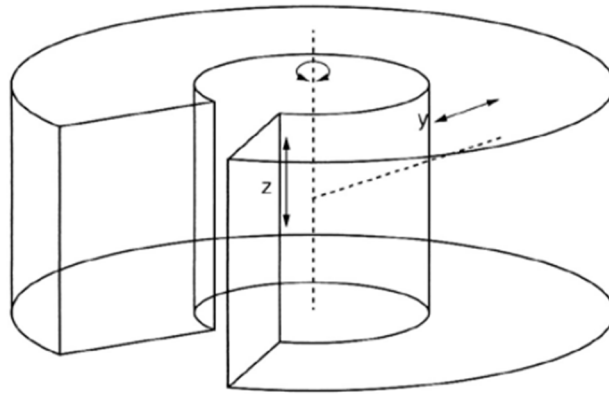
2. หุ่นยนต์ทรงกลมหรือหุ่นยนต์เชิงขั้ว (Spherical Robot or Polar Robot) เป็นหุ่นยนต์ที่มีรอยต่อ 2 รอยต่อเป็นแบบหมุน (Revolute) และ 1 รอยต่อเป็นแบบเลื่อน ด้วยแกนหมุน 2 แกนและแกนเลื่อน 1 แกน ทำให้แขนของหุ่นยนต์มีพื้นที่การทำงานมีลักษณะเป็นทรงกลมนิยมใช้ในงานจับยกหรือเคลื่อนย้ายสิ่งของ งานเชื่อมไฟฟ้า และเชื่อมแก๊ส ดังแสดงในภาพ 2.21



ภาพ 2.21 หุ่นยนต์ที่มีพื้นที่การทำงานมีลักษณะเป็นทรงกลม

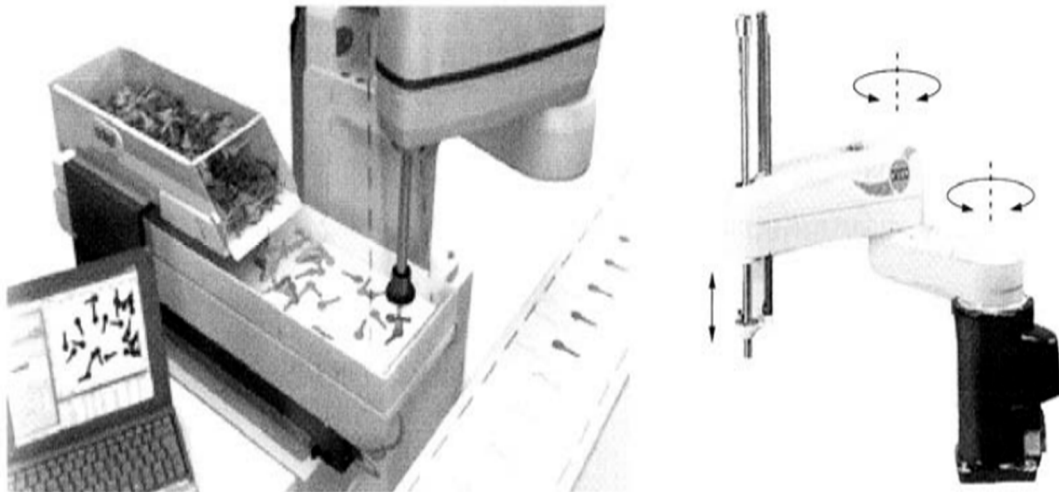
ที่มา : มุทิตา สงฆ์จันทร์ (2558)

3. หุ่นยนต์ทรงกระบอก (Cylindrical Robot) เป็นหุ่นยนต์ที่มีรอยต่อ 2 รอยต่อเป็นแบบเลื่อน และ 1 รอยต่อเป็นแบบหมุน ทำให้มีพื้นที่การทำงานในลักษณะเป็นทรงกระบอก นิยมใช้ในงานประกอบชิ้นส่วนและงานเชื่อมจุด ดังแสดงใน ภาพ 2.22



ภาพ 2.22 หุ่นยนต์ที่มีพื้นที่การทำงานเป็นลักษณะทรงกระบอก
ที่มา : มุจิตา สงฆ์จันทร์ (2558)

4. หุ่นยนต์สการ์ว (Scara Robots) เป็นหุ่นยนต์ที่มีแขนกลที่แกนหมุนขนานกัน 2 แกน ใช้ในงานหยิบจับและวางวัตถุ งานประกอบชิ้นส่วน และงานเครื่องมือกล ดังแสดงใน ภาพ 2.23



ภาพ 2.23 หุ่นยนต์ KUKA ที่แกนขนานกัน 2 แกน ควบคุมด้วยพีแอลซี (PLC)
ที่มา : มุจิตา สงฆ์จันทร์ (2558)

5. หุ่นยนต์ข้อต่อแขน (Joint Arm Robots) เป็นหุ่นยนต์ที่ประกอบด้วย รอยต่อหมุน การทำงานของจุดต่อต่างๆ จะคล้ายกับการทำงานของมนุษย์ โดยจุดต่อต่างๆ ได้แก่ เอว ไหล่ ข้อศอก และข้อมือ สามารถเคลื่อนที่ขึ้นลงและไปทางด้านข้างของตัวเองได้ เช่น หุ่นยนต์พума560 (Puma560) นิยมใช้ในโรงงานอุตสาหกรรม เพราะมีความแข็งแรงและความยืดหยุ่นในการทำงาน แต่จะมีค่าใช้จ่ายในการผลิตสูง อีกทั้งยังมีระบบการควบคุมที่ซับซ้อน

6. หุ่นยนต์งู (Spine Robot or Snake Robot) เป็นหุ่นยนต์ที่มีการเคลื่อนที่ไปมาคล้ายงู มีความซับซ้อนในการควบคุมพิกัดตำแหน่ง เหมาะสมอย่างยิ่งกับการทำงานในพื้นที่ที่ยากต่อการเข้าถึง เช่น การค้นหาสิ่งมีชีวิตในพื้นที่คับแคบ หรืองานสำรวจในพื้นที่คับแคบ หรือเป็นเครื่องมือในการผ่าตัด

7. หุ่นยนต์แบบคู่ขนานหรือหุ่นยนต์สามเหลี่ยม (Parallel Robot or Delta Robot) หุ่นยนต์แบบคู่ขนานจะเป็นโซ่กลไกแบบปิด ประด้วยฐานที่เป็นแผ่นและประกบด้วยแผ่นส่วนปลายสุด (End Effector) ทางด้านบน โดยวิธีติดตั้งขาต่อที่ยูนิเวอร์แซล (Universal Joint) ซึ่งกันต่อจะรับรู้เพียงการกอดอัดหรือการยืดตัว ไม่เกิดการโค้งงอ ทำให้เพิ่มความแม่นยำในตำแหน่งการทำงาน และโครงสร้างมีน้ำหนักเบา หุ่นยนต์สามเหลี่ยมนิยมใช้กับการบรรจุภัณฑ์โรงงาน ทางกายภาพ และยา ที่สามารถทำงานได้ค่อนข้างเร็ว บางงานมีความรวดเร็วได้ถึง 300 ครั้งต่อนาที

2.10.2.5 การแบ่งแยกตามส่วนปลายสุด (End Effector) ส่วนปลายสุดคืออุปกรณ์พิเศษที่ติดตั้งอยู่ที่ข้อมือของหุ่นยนต์ เพื่อให้หุ่นยนต์สามารถทำงานพิเศษเฉพาะได้อย่างสมบูรณ์ และจะมีการติดตั้งอุปกรณ์ที่เหมาะสมสำหรับงานต่างๆ อยู่ 2 ชนิด ได้แก่ เครื่องมือ ซึ่งอาจจะเป็นไขควง ประแจ หัวเชื่อมอาร์ก หัวพ่นสี ไขควง ดอกเจาะ และกริปเปอร์ (Gripper) เพื่องานหยิบจับชิ้นงานจากที่หนึ่งและวางไว้ที่หนึ่ง ซึ่งอาจจะเป็นมือจับทางกล มือจับแบบสุญญากาศและมือจับแบบแม่เหล็ก

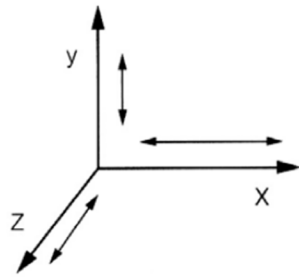
2.10.2.6 การแบ่งแยกตามรูปร่างภายนอก หุ่นยนต์สามารถจำแนกตามลักษณะรูปร่างภายนอก และมีชื่อเรียกเฉพาะต่างๆ ได้แก่

1. หุ่นยนต์ฮิวแมนนอยด์ (Humanoid Robot) เป็นหุ่นยนต์ที่มีลักษณะเหมือนกับมนุษย์คือ มีลำตัว หัว ใบหน้า ตา ปาก สองแขน สองขา หุ่นยนต์ฮิวแมนนอยด์บางรูปแบบอาจจะมีเฉพาะเอวขึ้นไป และหุ่นยนต์แอนดรอยด์ (Android) คือหุ่นยนต์ฮิวแมนนอยด์ที่คล้ายมนุษย์เพศชาย และจินอยด์ (Gynoid) คือหุ่นยนต์ฮิวแมนนอยด์ที่คล้ายมนุษย์เพศหญิง

2. แอ็คทรอยด์ (Actroid) เป็นหุ่นยนต์ที่เลียนแบบพฤติกรรมมนุษย์ เช่น กะพริบตา หายใจ เริ่มพัฒนาโดยมหาวิทยาลัยโอซาก้า และบริษัทโคโคโระ ประเทศญี่ปุ่น

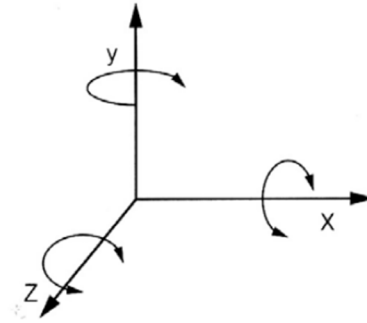
3. นาโนโรบอท (Nanorobot) เป็นหุ่นยนต์ที่มีขนาดเล็กมากๆ ประมาณ 0.5 ถึง 3 ไมครอน

2.10.3 ลำดับชั้นความเป็นอิสระและการบังคับ (Degrees of Freedom (DOF) and Constraints) การเคลื่อนที่ของวัตถุเกร็ง ส่วนมากจะเป็นการเคลื่อนที่แบบเลื่อนและแบบหมุนรวมกัน การเคลื่อนที่แบบเลื่อนสามารถเคลื่อนที่เลื่อนไปได้ใน 1 แกน 2 แกน หรือ 3 แกน และการเคลื่อนที่แบบหมุนก็สามารถเคลื่อนที่หมุนได้ใน 1 แกน 2 แกน หรือ 3 แกน เช่นเดียวกัน ดังแสดงในภาพ 2.24 และ ภาพ 2.25



ภาพ 2.24 การเคลื่อนที่แบบเลื่อน

ที่มา : มุทิตา สงฆ์จันทร์ (2558)

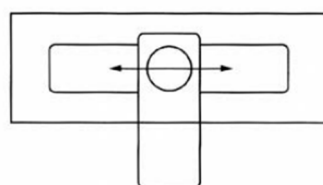


ภาพ 2.25 การเคลื่อนที่แบบหมุน

ที่มา : มุทิตา สงฆ์จันทร์ (2558)

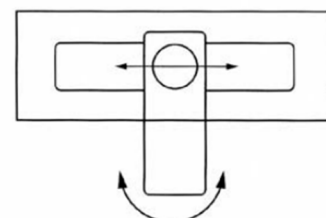
ลำดับชั้นความเป็นอิสระ คือจำนวนของส่วนประกอบของการเคลื่อนที่ที่ต้องการควบคุมการเคลื่อนที่ อีกนิยามหนึ่งของลำดับชั้นความเป็นอิสระคือ จำนวนพิกัดทั่วไปที่เป็นอิสระต่อกันที่ใช้ในการอธิบายการเคลื่อนที่ของระบบ จากภาพ 2.24 และภาพ 2.25 วัตถุมีการเคลื่อนที่ทั้งแบบเลื่อน (ตาม แกน X Y และ Z) จึงมี 3 ลำดับชั้นความเป็นอิสระ และแบบหมุน (รอบแกน X Y และ Z) จึงมี 3 ลำดับชั้นความเป็นอิสระ รวมกันก็จะมี 6 ลำดับชั้นความเป็นอิสระ (6 DOF)

จำนวนของลำดับชั้นความเป็นอิสระ คือจำนวนส่วนประกอบของการเคลื่อนที่ ที่ต้องการควบคุมการเคลื่อนที่ แสดงดังภาพ 2.26 และภาพ 2.27 โดยภาพ 2.26 รอยต่อของชิ้นส่วนกลไกถูกบังคับให้เคลื่อนที่แบบเลื่อนเพียงอย่างเดียว จึงมี 1 ลำดับชั้นความเป็นอิสระ และภาพ 2.27 รอยต่อของชิ้นส่วนกลไกถูกบังคับให้มีการเคลื่อนที่แบบหมุนด้วย จึงมี 2 ลำดับชั้นความเป็นอิสระ



ภาพ 2.26 รอยต่อ 1 ลำดับชั้นความเป็นอิสระ

ที่มา : มุทิตา สงฆ์จันทร์ (2558)



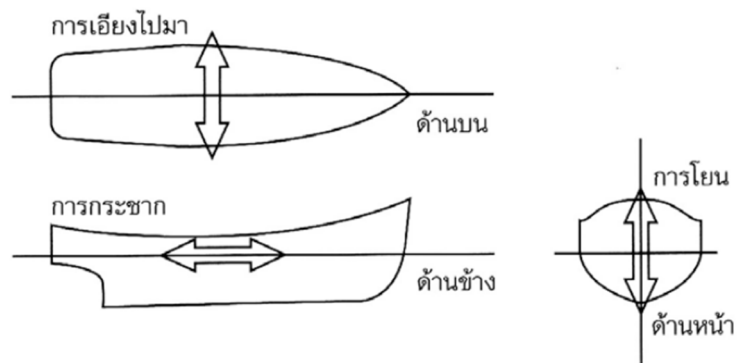
ภาพ 2.27 ลำดับชั้นความเป็นอิสระ

ที่มา : มุทิตา สงฆ์จันทร์ (2558)

ในระนาบสามมิติ และลำดับชั้นความเป็นอิสระ 6 ลำดับชั้นความเป็นอิสระของวัตถุแข็งเกร็ง (Rigid body) สามารถอธิบายโดยใช้ชื่อของการเดินเรือ ได้แก่

1. การเคลื่อนที่แบบเลื่อน จะมี 3 ลำดับชั้นความเป็นอิสระ ได้แก่
 - 1.1 การโยน (Heave) คือการเคลื่อนที่เชิงเส้นในแนวดิ่ง (ขึ้น - ลง)
 - 1.2 การโอนเอียงไปมา (Sway) คือการเคลื่อนที่เชิงเส้นทางด้านข้าง
 - 1.3 การกระชาก (Surge) คือการเคลื่อนที่เชิงเส้นในแนวนอน (หน้า - หลัง)

แสดงดังภาพ 2.28

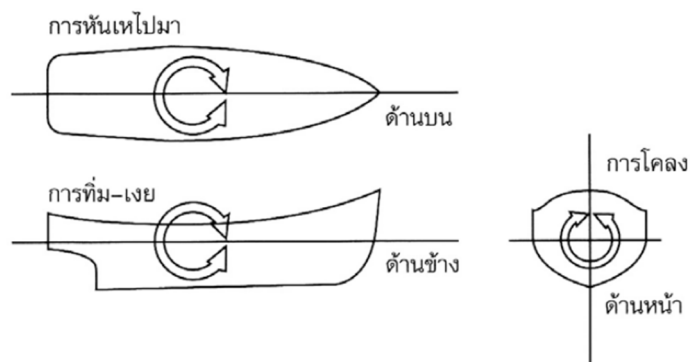


ภาพ 2.28 การเคลื่อนที่ที่มี 3 ลำดับชั้นความเป็นอิสระ แบบเลื่อน

ที่มา : มุขิตา สงฆ์จันทร์ (2558)

2. การเคลื่อนที่แบบหมุน จะมี 3 ลำดับชั้นความเป็นอิสระ ได้แก่
 - 2.1 การโคลง (Roll) คือการเคลื่อนที่แบบหมุนรอบแกนนอน
 - 2.2 การทิ่ม-เงย (Pitch) คือการเคลื่อนที่แบบหมุนรอบแกนทแยง
 - 2.3 การหันเหไปมา (Yaw) คือการเคลื่อนที่แบบหมุนรอบแกนตั้ง

แสดงดังภาพ 2.29



ภาพ 2.29 การเคลื่อนที่ที่มี 3 ลำดับชั้นความเป็นอิสระ แบบหมุน

ที่มา : มุขิตา สงฆ์จันทร์ (2558)

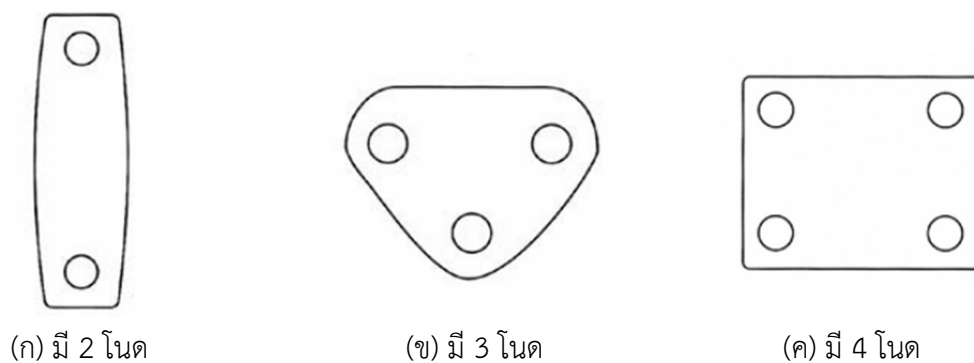
2.10.4 โซ่จลนศาสตร์ (Kinematic chain) โซ่จลนศาสตร์คือส่วนประกอบของก้านต่อและรอยต่อ ซึ่งก้านต่ออินพุตจะควบคุมการเคลื่อนที่ของก้านต่อเอาต์พุต โดยอย่างน้อยต้องมีก้านต่อ 1 ก้านต่อติดกับกราวด์ (Ground) หรือฐานอ้างอิง (Reference Frame) หรือยึดอยู่กับที่ค่าจำกัดความ

1. ก้านต่อ (Links) คือชิ้นส่วนของกลไกที่มีการเคลื่อนที่สัมพันธ์กับชิ้นส่วนอื่น ก้านต่อเป็นวัตถุแข็งเกร็ง

2. โหนด (Nodes) คือจุดต่อระหว่างก้านต่อ

3. รอยต่อ (Joints) เป็นรอยต่อระหว่างก้านต่อ 2 ก้านหรือมากกว่าต่อกันที่โหนด และเป็นที่ซึ่งมีการเคลื่อนที่ระหว่างรอยต่อนั้น

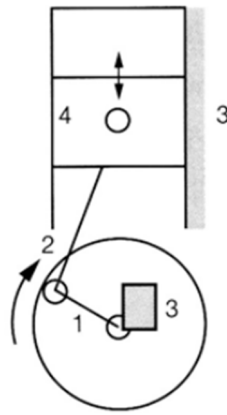
4. ก้านต่อโยง (Linkages) เป็นกลไกที่ประกอบขึ้นจากชิ้นส่วนของก้านต่อที่เชื่อมต่อกันที่โหนดเกิดเป็นรอยต่อ เพื่อทำให้เกิดการเคลื่อนที่แบบลูกโซ่หรือแบบต่อเนื่องตัวอย่างของก้านต่อ ได้แก่ คาน ข้อเหวี่ยง ก้านสูบ ก้านต่อ สไลเดอร์ พูลเลย์ สายพาน เพลา แสดงดังภาพ 2.30



ภาพ 2.30 ก้านต่อแบบต่างๆ

ที่มา : มุทิตา สงฆ์จันทร์ (2558)

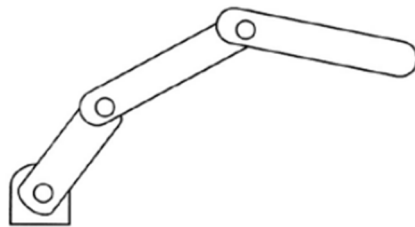
ตัวอย่างของโซ่จลนศาสตร์ที่อย่างน้อยต้องมีก้านต่อ 1 ก้านต่อยึดอยู่กับที่ ได้แก่ เครื่องยนต์ที่มีลูกสูบเคลื่อนที่ขึ้น-ลง แล้วเปลี่ยนเป็นการเคลื่อนที่หมุนของเพลาข้อเหวี่ยงบนแบร็งที่ยึดติดอยู่กับที่บนเสื้อเครื่องยนต์ แสดงดังภาพ 2.31 จะมีก้านต่อทั้งหมด 4 ก้านต่อ โดยก้านต่อ 1 คือเพลาข้อเหวี่ยง ก้านต่อ 2 คือก้านสูบ ก้านต่อ 3 คือกระบอกสูบยึดติดอยู่กับเสื้อเครื่องยนต์ และก้านต่อ 4 คือลูกสูบที่เคลื่อนขึ้น-ลง ซึ่งเคลื่อนที่สัมพันธ์กับเสื้อเครื่องยนต์



ภาพ 2.31 ก้านต่อกลไกของเครื่องยนต์

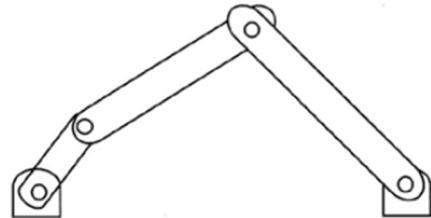
ที่มา : มุจิตา สงฆ์จันทร์ (2558)

โซ่จลนศาสตร์หรือกลไก อาจจะมีทั้งแบบเปิดและแบบปิด กลไกแบบเปิดจะมีก้านต่อมากกว่า 1 ก้านต่อ และมีลำดับชั้นความเป็นอิสระมากกว่า 1 และต้องการตัวขับเคลื่อน (มอเตอร์) เพื่อทำให้เกิดลำดับชั้นความเป็นอิสระ เช่น หุ่นยนต์ในอุตสาหกรรม ส่วนกลไกแบบปิด ส่วนปลายของชิ้นส่วนกลไกจะถูกต่อเข้ากับโนด การทำงานอาจจะมีลำดับชั้นความเป็นอิสระมากกว่า 1 แสดงดังภาพ 2.32 และภาพ 2.33



ภาพ 2.32 โซ่กลไกแบบเปิดภาพ

ที่มา : มุจิตา สงฆ์จันทร์ (2558)

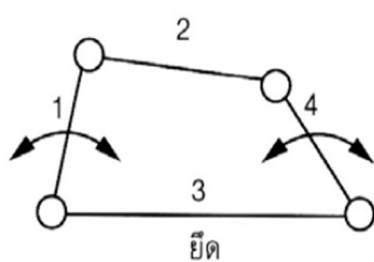


ภาพ 2.33 โซ่กลไกแบบปิด

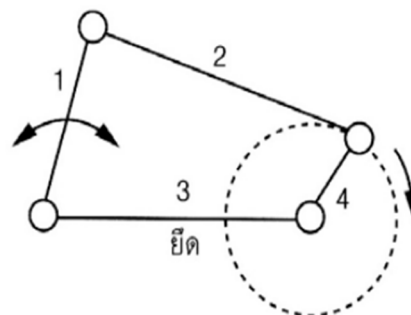
ที่มา : มุจิตา สงฆ์จันทร์ (2558)

สำหรับโซ่กลไก 4 ก้านต่อจะประกอบด้วยก้านต่อ 4 อันต่อกัน มี 4 รอยต่อ ซึ่งทำให้เกิดการหมุนขึ้นรูปแบบต่างๆ ของการเคลื่อนที่ของ 4 ก้านต่อขึ้นอยู่กับความยาวของก้านต่อ แสดงดังภาพ 2.34 โดยภาพ 2.34 (ก) ก้านต่อทั้งสี่ก้านต่อจะมีความยาวไม่เท่ากัน ก้านต่อ 3 ถูกยึดอยู่กับที่ก้านต่อ 1 และก้านต่อ 4 จะเกิดการเคลื่อนที่แกว่งไปมาเป็นข้อเหวี่ยงแต่ไม่หมุน หรือกลไกแบบคานคู่ (Double-lever Mechanism) ภาพ 2.34 (ข) ก้านต่อ 4 สั้นที่สุด และสามารถหมุนเป็นวงกลมได้ ขณะที่ก้านต่อ 1 เคลื่อนที่แกว่งไปมาเป็นข้อเหวี่ยง เรียกว่า กลไกแบบข้อเหวี่ยงคาน (Lever-crank

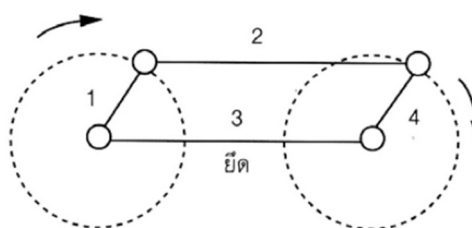
Mechanism) และภาพ 2.34 (ค) ก้านต่อ 1 และก้านต่อ 4 ยาวเท่ากัน และก้านต่อทั้งสองสามารถหมุนเป็นวงกลมได้ เรียกว่ากลไกข้อเหวี่ยงคู่ (Double-crank Mechanism)



(ก) กลไกแบบคานคู่



(ข) กลไกแบบข้อเหวี่ยงคาน



(ค) กลไกแบบข้อเหวี่ยงคู่

ภาพ 2.34 โซ่กลไก 4 ก้านต่อแบบต่างๆ

ที่มา : มุขिता สงฆ์จันทร์ (2558)

2.11 เหล็กกล้าไร้สนิม

เหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless Steels) คือ เหล็กกล้าที่มีสมบัติทนต่อการเกิดสนิม เนื่องมาจากการเติมธาตุโครเมียม (Chromium) ลงไประหว่างกระบวนการหลอมเหล็ก ในปริมาณที่เหมาะสม (ไม่ต่ำกว่าร้อยละ 12 โดยน้ำหนัก) โครเมียมที่เติมลงไปจะทำให้เกิดฟิล์มโครเมียมออกไซด์ (Cr_xO_y(OH)_z) ปกคลุมผิวเหล็กไว้ ทำให้เนื้อเหล็กไม่สามารถทำปฏิกิริยากับอากาศเกิดเป็นสนิมได้

2.11.1 ประเภทของสแตนเลส

เหล็กกล้าไร้สนิมแบ่งออกเป็น 5 ประเภทหลัก ตามลักษณะของโครงสร้างจุลภาค (Microstructure) ได้แก่

1. เหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ริติก (Ferritic grade) เป็นกลุ่มเหล็กกล้าไร้สนิมที่เป็นพื้นฐานของ เหล็กกล้าไร้สนิมทั้งหมดได้แก่ AISI 430 AISI 446 AISI 409 เป็นต้น เป็นเหล็กกล้าที่ผสมโครเมียมในปริมาณร้อยละ 12 ถึง 27 ขึ้นอยู่กับแต่ละเกรด โดยความต้านทานต่อการกัดกร่อน

จะขึ้นอยู่กับปริมาณของธาตุโครเมียมเป็นสำคัญ โดย เหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มนี้มีโครงสร้างจุลภาคเป็นเฟอร์ไรต์ (Ferrite) ซึ่งเป็นโครงสร้างพื้นฐานของเหล็กกล้าทั่วไปไม่สามารถทำการชุบแข็ง (Hardening) เพื่อเพิ่มความแข็งแรงได้ และยังคงสมบัติที่แม่เหล็กสามารถดูดติดได้

2. เหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก (Austenitic grade) เป็นกลุ่มเหล็กกล้าไร้สนิมที่มีการใช้งานอย่างแพร่หลาย เกรดที่รู้จักกันมาก เช่น AISI 304 304L 316 และ 316L เป็นต้น เหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มนี้มีโครงสร้างจุลภาคเป็นออสเทนไนต์ (Austenite) ซึ่งเป็นผลจากการเติมธาตุนิเกิล (Nickel) หรือธาตุ แมงกานีส (Manganese) ขึ้นอยู่กับแต่ละเกรด โครงสร้างจุลภาคแบบออสเทนไนต์ (Austenite) จะมีสมบัติโดดเด่นด้านการยืดตัวสูงกว่าโครงสร้างแบบเฟอร์ไรต์ (Ferrite) ทำให้สามารถขึ้นรูปเหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มนี้ได้โดยไม่เสี่ยงต่อการแตกร้าว นอกจากนี้โครงสร้างออสเทนไนต์ (Austenite) ยังเป็นโครงสร้างที่แม่เหล็กไม่สามารถดูดติดได้ แต่ถ้าหากทำการขึ้นรูปมาแล้วจะทำให้แม่เหล็กดูดติดบริเวณที่ทำการขึ้นรูปได้ เนื่องจากโครงสร้างบริเวณที่ถูกขึ้นรูปจะเปลี่ยนแปลงไปจากโครงสร้างออสเทนไนต์ (Austenite) แล้ว

3. เหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติก (Martensitic grade) เป็นเหล็กกล้าไร้สนิมที่มีลักษณะคล้ายคลึงกับเหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ริติก แต่มีปริมาณธาตุคาร์บอนที่สูงกว่าเพื่อให้เหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มนี้สามารถทำการชุบแข็ง (Hardening) เพื่อเพิ่มความแข็งแรงได้ โดยเกรดที่รู้จักกันอย่างแพร่หลาย เช่น AISI 403 420 เป็นต้น โครงสร้างจุลภาคภายหลังการชุบแข็งจะได้โครงสร้างมาร์เทนไซต์ (Martensite) การใช้งานเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติกส่วนใหญ่คำนึงถึงความแข็งแรงและความทนทานต่อการเกิดสนิมใน ระดับปานกลางเท่านั้น เนื่องจากปริมาณคาร์บอนที่สูงจะทำให้ความต้านทานต่อการกัดกร่อนลดลง แต่ก็ยังคงไม่เป็นสนิมในสารละลายที่มีการกัดกร่อนไม่สูงมากนักหรือในสารละลายที่เป็นกลางได้ ตัวอย่างการใช้งาน เช่น ลูกปืน เพลา เฟือง สปริง เป็นต้น

4. เหล็กกล้าไร้สนิมสองเฟส (Duplex Grade) เป็นเหล็กกล้าไร้สนิมที่มีลักษณะร่วมทางโครงสร้างจุลภาคระหว่างเหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ริติก (Ferritic Grade) กับเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก (Austenitic Grade) แต่มีความแข็งแรงสูงกว่าเหล็กกล้าไร้สนิมทั้ง 2 ชนิด โดยลักษณะโครงสร้างจุลภาคที่เกิดขึ้นในลักษณะนี้เกิดจากการมีปริมาณของธาตุนิเกิลไม่ถึงร้อยละ 8 และมีปริมาณของธาตุโครเมียมสูงมากกว่าร้อยละ 20 ซึ่งทำให้ได้โครงสร้างผสมระหว่างเฟอร์ไรต์ (Ferrite) และออสเทนไนต์ (Austenite) ตัวอย่างของกลุ่มนี้ เช่น AISI 329 เป็นต้น เหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มนี้มีราคาค่อนข้างแพง เนื่องจากมีความแข็งแรงและความทนทานต่อการกัดกร่อนสูง (เนื่องจากปริมาณโครเมียมสูง)

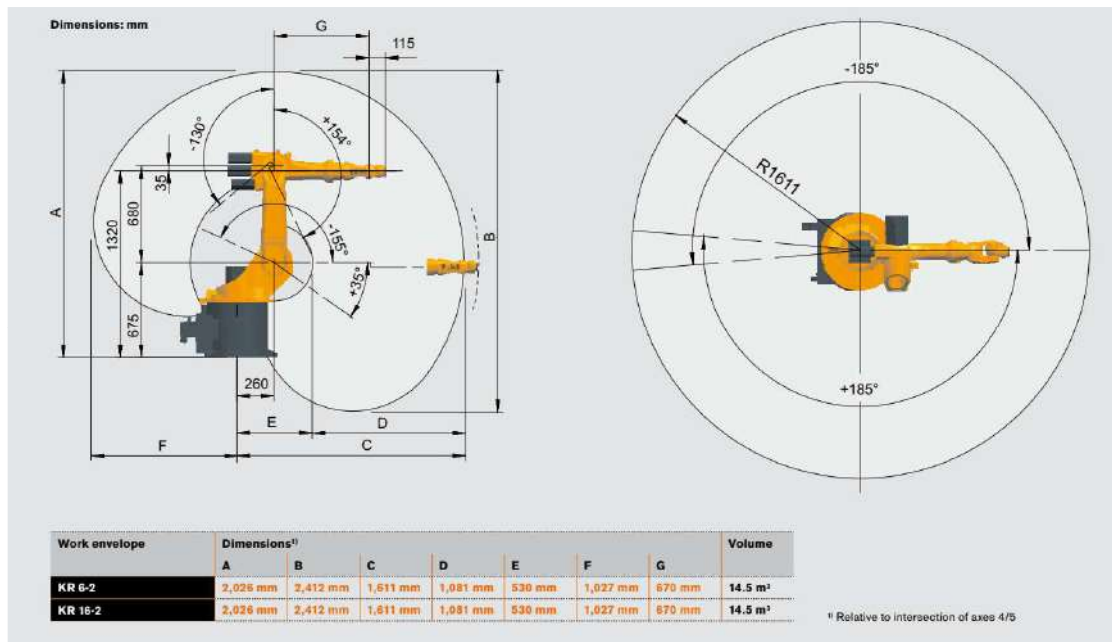
5. เหล็กกล้าไร้สนิมแบบตกผลึกแข็ง (Precipitation-Hardening Grade, PH Grade) เป็นเหล็กกล้าไร้สนิมที่มีการใช้งานน้อยในประเทศไทย โดยเหล็กกล้าไร้สนิมชนิดนี้มีความแข็งแรงสูง เนื่องจากเกิดการตกผลึกของเฟสต่างๆ เช่น Ni₃ Al Ni₃ Ti และ Ni₃ Cu ภายในเนื้อวัสดุที่มีโครงสร้างมาร์เทนไซต์ (เกรด AISI 17-4 PH), โครงสร้างกึ่งออสเทนไนต์ (เกรด AISI 17-7 PH) หรือโครงสร้างออสเทนไนต์ (เกรด AISI 600) ซึ่งจุดเด่นที่สำคัญของเหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มนี้คือชิ้นงานภายหลังจากการอบชุบมีโอกาสนบิดเบี้ยวน้อย

2.11.2 ประโยชน์ของการใช้งานเหล็กกล้าไร้สนิม

1. ใช้ในสิ่งแวดล้อมที่กัดกร่อน (Corrosive Environment)
2. งานอุณหภูมิเย็นจัด ป้องกันการแตกเปราะ
3. ใช้งานอุณหภูมิสูง (High Temperature) ป้องกันการเกิดคราบออกไซด์ (Scale) และยังคงความแข็งแรง
4. มีความแข็งแรงสูงเมื่อเทียบกับมวล (High Strength vs. Mass)
5. งานที่ต้องการสุขอนามัย (Hygienic Condition) ต้องการความสะอาดสูง
6. งานด้านสถาปัตยกรรม (Aesthetic Appearance) ไม่เป็นสนิม ไม่ต้องทาสี
8. ไม่ปนเปื้อน (No Contamination) ป้องกันการทำ ปฏิกิริยากับสารเร่งปฏิกิริยา
9. ต้านทานการขัดถูแบบเปียก (Wet Abrasion Resistance)

2.12 แขนกล KUKA KR16

KUKA เป็นบริษัทผู้ผลิตหุ่นยนต์อุตสาหกรรมและงานเกี่ยวกับระบบอัตโนมัติต่างๆ ในโรงงานอุตสาหกรรม โดย KUKA รุ่น KR16 นั้น จัดอยู่ใน KUKA Low Payload Robot Series แขนกลเคลื่อนไ้วที่รวดเร็วและแม่นยำของมันนั้น สามารถแบกรับน้ำหนักได้ถึง 16 กิโลกรัม และมีระยะการทำงานที่ครอบคลุมมากที่สุดที่ 1610 มิลลิเมตร ตอบโจทย์สำหรับการใช้งานที่หลากหลายและสามารถปรับแต่งได้ง่าย สร้างจากโลหะผสมน้ำหนักเบา การออกแบบให้ความแข็งแรงและความยืดหยุ่น โครงสร้างที่กะทัดรัดช่วยให้สามารถติดตั้งบนพื้นเพดานและผนังได้ ข้อต่อที่ได้รับการป้องกันจะทำให้ KR 16 เป็นโครงสร้างที่เรียบง่ายและคล่องตัว ติดตั้งและใช้งานง่าย มีประสิทธิภาพสูงสุดในทุกกระบวนการตั้งแต่การขนย้ายวัสดุ การเชื่อมการตัด หรือการเคลื่อน โดยข้อมูลทางเทคนิคของ KUKA KR16 แสดงดังภาพ 2.35 และภาพ 2.36



ภาพ 2.35 ข้อมูลทางเทคนิคของ KUKA KR16

ที่มา : <https://www.kuka.com>

Type	KR 6-2	KR 16-2
Maximum reach	1,611 mm	1,611 mm
Rated payload	6 kg	16 kg
Suppl. load, arm/link arm/rotating col.	10/variable/20 kg	
Suppl. load, arm + link arm, max.	Variable	
Maximum total load	36 kg	46 kg
Number of axes	6	
Mounting position	Floor, wall, ceiling	
Variant		Cleanroom, Foundry, Explosion-Proof
Positioning repeatability*	±0.05 mm	
Path repeatability*		
Controller	KR C2 edition2005	
Weight (excluding controller), approx.	235 kg	235 kg
Temperature during operation	+5 °C to +55 °C	
Protection classification	IP 65	
Robot footprint	500 mm x 500 mm	
Connection	7.3 kVA	
Noise level	< 75 dB	

Drive system: electromechanical with brushless AC servomotors

*to ISO 9283

Axis data	Range (software)	Speed with rated payload	
		6 kg	16 kg
Axis 1 (A1)	±185°	156°/s	156°/s
Axis 2 (A2)	+35°/-155°	156°/s	156°/s
Axis 3 (A3)	+154°/-130°	156°/s	156°/s
Axis 4 (A4)	±350°	343°/s	330°/s
Axis 5 (A5)	±130°	382°/s	330°/s
Axis 6 (A6)	±350°	659°/s	615°/s

Details provided about the properties and usability of the products are purely for information purposes and do not constitute a guarantee of these characteristics. The extent of goods delivered and services performed is determined by the subject matter of the specific contract. No liability accepted for errors or omissions.

ภาพ 2.36 ข้อมูลทางเทคนิคของ KUKA KR16 (ต่อ)

ที่มา : <https://www.kuka.com>

2.13 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.13.1 พารามิเตอร์ที่มีผลต่อการเชื่อมทั้งสแตนอาร์ค

จากงานวิจัยของ Korra et al., 2011 ได้ศึกษาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับการเชื่อมทั้งสแตนอาร์คของเหล็กกล้าไร้สนิม 316L ขนาด 250×100×3 มิลลิเมตร โดยใช้เทคนิคทาทุชิ ได้แก่ อัตราการไหลของแก๊ส กระแสไฟฟ้า และความเร็วการเชื่อม ที่ส่งผลต่อความกว้าง และความสูงของรอยเชื่อมที่น้อยลง รวมถึงระยะความลึกของรอยแตกที่ลดลง จากผลการทดลองพบว่าอัตราการไหลของแก๊ส 10 ลิตรต่อนาที กระแสไฟฟ้า 40 แอมแปร์ และความเร็วการเชื่อม 100 มิลลิเมตรต่อนาที เป็นพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุด เช่นเดียวกับงานวิจัยของ Bharath et al., 2014 ได้ศึกษาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมต่อความแข็งแรงรอยเชื่อมแบบต่อชนของชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิม 316 ยาว 100 มิลลิเมตร หนา 3 มิลลิเมตร โดยใช้เทคนิคทาทุชิ ได้แก่ ความเร็วการเชื่อม กระแสไฟฟ้า และระยะห่างระหว่างชิ้นงาน จากผลการวิจัยพบว่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่ส่งผลต่อความแข็งแรงต่อแรงดึงมากที่สุด 640 เมกะปาสคาล ได้แก่ กระแสไฟฟ้า 80 แอมแปร์ และระยะห่างระหว่างชิ้นงาน 1.0 มิลลิเมตร นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยของ Dadfar et al., 2007 ได้ศึกษาการเชื่อมทั้งสแตนอาร์คที่ส่งผลต่อพฤติกรรมการกัดกร่อนของแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม 316L หนา 2 มิลลิเมตร โดยใช้พารามิเตอร์การเชื่อมดังนี้ การไหลของแก๊ส 9 ลิตรต่อนาที แรงดันไฟฟ้า 11 โวลต์ ความเร็วการเชื่อม 70 มิลลิเมตรต่อนาที และกระแสไฟฟ้า 55 แอมแปร์ จากผลการวิจัยพบอัตราการกัดกร่อนเท่ากับ 0.240 บริเวณรอยเชื่อม และ 0.111 บริเวณเนื้อเหล็ก

จากการศึกษางานวิจัยในเบื้องต้นผู้วิจัยจึงได้เลือกพารามิเตอร์ที่จะนำมาศึกษาความแข็งแรงต่อการดึง ได้แก่ อัตราการไหลของแก๊ส กระแสไฟฟ้า และความเร็วของการเชื่อม แสดงดังตาราง 2.1

ตาราง 2.1 พารามิเตอร์ที่นำมาศึกษา

ผู้วิจัย	พารามิเตอร์		
	อัตราการไหลของแก๊ส (lpm)	กระแสไฟฟ้า (A)	ความเร็วของการเชื่อม (mm/min)
Dadfar et al., 2007	9	55	70
Korra et al., 2011	9 10 และ 11	40 50 และ 60	40 70 และ 100
Bharath et al., 2014	-	60 80 และ 100	50 65 และ 80

2.13.2 การวิเคราะห์ระดับของความเค้นตกค้างในการเชื่อมโลหะแบบแก๊สทั้งสแตนอาร์ก โดยการวิเคราะห์แบบไฟไนต์เอลิเมนต์ (อดิเรก ใบสุพันธ์, 2558) โดยงานวิจัยนี้มุ่งเน้นเพื่อวิเคราะห์หาระดับของความเค้นตกค้างในการเชื่อมโลหะแบบแก๊สทั้งสแตนอาร์กในสแตนเลสเกรด 304 ภายหลังการเชื่อมอันเนื่องมาจากความร้อนที่เกิดขึ้นในแนวเชื่อมโดยในงานวิจัยนี้จะใช้การวิเคราะห์แบบไฟไนต์เอลิเมนต์ในการหาระดับของความเค้นตกค้างจากการเชื่อมร่วมกับการออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียลเต็มรูปแบบและการใช้เทคนิคการหาพื้นผิวผลตอบด้วยวิธีการออกแบบส่วนประสมกลางในการที่จะคัดเลือกปัจจัยที่เกี่ยวข้องซึ่งส่งผลกระทบต่อระดับของความเค้นตกค้างที่เกิดขึ้นเพื่อสร้างสมการทำนายผลและหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของปัจจัยงานวิจัยนี้ได้ใช้แบบจำลองในการเชื่อมโดยการวิเคราะห์แบบไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วยเทคนิคแบบเกิดและตายเพื่อให้ได้ค่าความเค้นตกค้างที่มีความแม่นยำมากขึ้นโดยใช้หลักการออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียลเต็มรูปแบบเพื่อคัดเลือกปัจจัยที่เกี่ยวข้องซึ่งส่งผลกระทบต่อค่าของความเค้นตกค้างที่เกิดขึ้นโดยปัจจัยนำเข้า 4 ปัจจัยคือ 1) ประสิทธิภาพการเชื่อม 2) กระแสไฟฟ้า 3) ความเร็วในการเชื่อม 4) ความเร็วในการป้อนลวดเชื่อมจากการออกแบบการทดลองพบว่าปัจจัยที่มีผลอย่างมีนัยสำคัญคือ 1) ความเร็วในการเชื่อม 2) ความเร็วในการป้อนลวดเชื่อมจากนั้นใช้วิธีการออกแบบส่วนประสมกลางเพื่อหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของปัจจัยพบว่าค่าที่เหมาะสมที่สุดคือ 1) ความเร็วในการเชื่อมเท่ากับ 156 มิลลิเมตรต่อนาที 2) ความเร็วในการป้อนลวดเชื่อมเท่ากับ 739 มิลลิเมตรต่อนาที โดยค่าความเค้นตกค้างที่น้อยที่สุดจากสมการทำนายผลคือ 179. 618 เมกะปาสคาล และค่าความเค้นตกค้างที่น้อยที่สุดจากการวัดด้วยวิธีเลียวเบนของรังสีเอ็กซ์คือ 146. 1 เมกะปาสคาล สุดท้ายเมื่อไปทดสอบความต้านทานแรงดึงพบว่าได้ค่าความต้านทานแรงดึงเฉลี่ยเท่ากับ 433 นิวตันต่อตารางมิลลิเมตร

2.13.3 การวิเคราะห์ปัจจัยในกระบวนการเชื่อมลวดทองแดง (อิวิวัฒน์ ไตรวิวัฒนาภรณ์, 2553) การค้นคว้าแบบอิสระนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์ปัจจัยในกระบวนการเชื่อมลวดทองแดงโดยใช้เครื่องมือการออกแบบการทดลอง (Design of Experiment, DOE) มาช่วยในการหาค่าระดับปัจจัยที่เหมาะสมการทดลองได้นำปัจจัยที่สามารถควบคุมได้ 4 ปัจจัย คือ อุณหภูมิ ค่าแรงกดเชื่อม ระยะเวลากดเชื่อม และกำลังคลื่นอัลตราโซนิคออกแบบการทดลอง โดยใช้แฟคทอเรียลแบบเต็มรูปแบบเพื่อหาปัจจัยที่ผลอย่างมีนัยสำคัญต่อค่าความต้านทานแรงดึงเส้นลวดและแรงเฉือนลูกบอล จากนั้นใช้การออกแบบส่วนประสมกลาง (Central Composite Design, CCD) กับปัจจัยที่ได้คัดกรองแล้วโดยวัดค่าแรงดึงเส้นลวดและค่าแรงเฉือนของลูกบอล โดยผลการทดลองในการคัดกรองปัจจัยที่มีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อค่าแรงดึงเส้นลวดมี 3 ปัจจัย คือ อุณหภูมิ ระยะเวลากดบอน และกำลังคลื่นอัลตราโซนิค ส่วนปัจจัยที่มีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อค่าแรงเฉือนคือทั้ง 4 ปัจจัยดังนั้นการออกแบบส่วนประสมกลาง (CCD) จึงนำปัจจัยทั้ง 4 มาออกแบบได้ผลค่าระดับปัจจัยที่เหมาะสมคืออุณหภูมิ 250 องศา

เซลเซียส ค่าแรงกดบอน 80 กรัม ระยะเวลากดบอน 57 มิลลิวินาที และกำลังคลื่นอัลตราโซนิก 32 มิลลิวัตต์ โดยจะได้ผลลัพธ์ค่าแรงดึงเส้นลวด 55 กรัมและค่าแรงเหวี่ยงลูกบอล 127 กรัมเมื่อทำการยืนยันผลการทดลองโดยทดลองซ้ำผลค่าเฉลี่ยที่ได้มีค่าใกล้เคียงกับเป้าหมายที่ทำนายได้

บทที่ 3

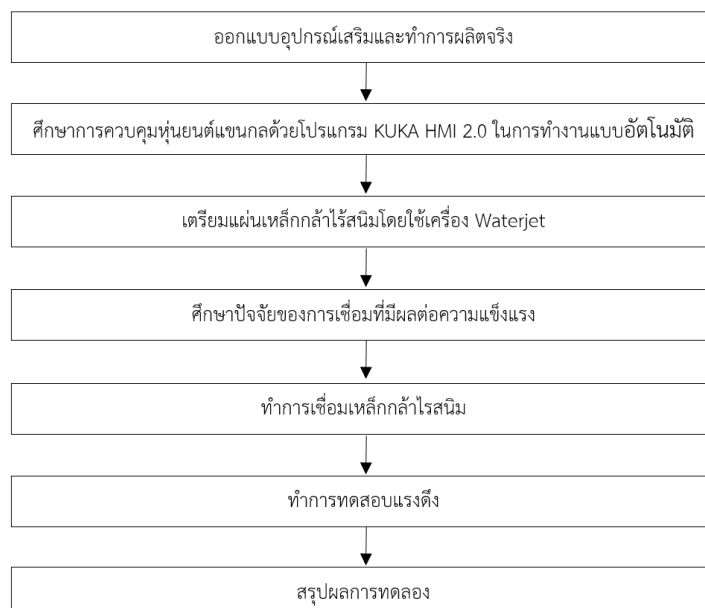
ระเบียบวิธีการทำวิจัย

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นการออกแบบอุปกรณ์สำหรับการเชื่อมทั้งสแตนอาร์คเพื่อติดตั้งในหุ่นยนต์แขนกลที่สามารถให้ประสิทธิภาพการเชื่อมได้ดี โดยทดสอบจากความแข็งแรงต่อแรงดึงของรอยเชื่อมหลังจบกระบวนการ ซึ่งมีการออกแบบการทดลองแบบฟูลแฟคทอเรียล (2^k Full Factorial Design) เพื่อหาปัจจัยที่เหมาะสมที่ส่งผลต่อความแข็งแรงต่อแรงดึงมากที่สุด

3.1 วิธีการและขั้นตอนในการทำงานวิจัย

วิธีการและขั้นตอนในการทำงานวิจัย เพื่อออกแบบอุปกรณ์เสริมและติดตั้งเข้ากับหุ่นยนต์แขนกลให้สามารถเชื่อมอัตโนมัติได้ตามมาตรฐานการทดสอบความแข็งแรงของรอยเชื่อม มีขั้นตอนดัง

ภาพ 3.1



ภาพ 3.1 วิธีและขั้นตอนในการทำวิจัย

3.2 เครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย

3.2.1 เครื่องทำแบบจำลอง 3D Printer

ใช้เครื่อง 3D Printer ในการพิมพ์แบบจำลองของชิ้นงานออกมา เพื่อตรวจสอบรายละเอียดของชิ้นงานที่ได้ว่าสามารถนำไปประกอบเข้ากับหุ่นยนต์ได้ก่อนทำการสั่งผลิตจริง แสดงดังภาพ 3.2



ภาพ 3.2 เครื่อง 3D Printer

3.2.2 เครื่องมิลลิ่ง (Milling Machine)

หลังจากสั่งผลิตชิ้นงาน ยังมีชิ้นงานบางส่วน และนอตบางตัวที่ต้องได้รับการแก้ไข จึงต้องใช้เครื่องมิลลิ่งในการกัดชิ้นงานให้ได้ความเรียบและขนาดตามต้องการ แสดงดังภาพ 3.3



ภาพ 3.3 เครื่องมิลลิ่ง (Milling Machine)

3.2.3 เครื่องกลึง

ใช้สำหรับกลึงหัวนอตที่ต้องนำมาแก้ไขขนาด เนื่องจากไม่สามารถหาซื้อหัวนอตขนาดตามที่ต้องการได้ แสดงดังภาพ 3.4



ภาพ 3.4 เครื่องกลึง

3.2.4 เวอร์เนียคาลิปเปอร์

ใช้เวอร์เนียคาลิปเปอร์สำหรับวัดความขนาดของชิ้นงานทดลอง ในขั้นตอนต่าง ๆ ระหว่างดำเนินการวิจัย แสดงดังภาพ 3.5



ภาพ 3.5 เวอร์เนียคาลิปเปอร์

3.2.5 ไชควง

ใช้สำหรับขันน็อตประกอบชิ้นส่วนต่าง ๆ ของอุปกรณ์เสริมเข้ากับหุ่นยนต์ โดยจะมีไขควงแบบต่าง ๆ ตามประเภทของการทำงาน แสดงดังภาพ 3.6



ภาพ 3.6 ไขควงแบบต่าง ๆ

3.2.6 ไม้บรรทัดวัดมุม

ใช้สำหรับวัดมุมของอุปกรณ์เสริมในการติดตั้งเข้ากับหุ่นยนต์ และหัวเชื่อมให้ได้องศาความเอียงตามต้องการ แสดงดังภาพ 3.7



ภาพ 3.7 ไม้บรรทัดวัดมุม

3.2.7 ไม้วัดระดับน้ำ

ใช้สำหรับวัดระดับของอุปกรณ์เสริมในการติดตั้งเข้ากับหุ่นยนต์ และหัวเชื่อมให้ได้ระนาบตามต้องการ แสดงดังภาพ 3.8



ภาพ 3.8 ไม้วัดระดับน้ำ

3.2.8 แอลกอฮอล์

ใช้สำหรับเช็ดทำความสะอาดพื้นผิวชิ้นงานทดสอบก่อนทำการทดลองเชื่อมชิ้นงานเข้าด้วยกัน แสดงดังภาพ 3.9



ภาพ 3.9 แอลกอฮอล์

3.2.9 หน้ากากเชื่อม

ใช้สำหรับสวมใส่ป้องกันลำแสงจากการเชื่อมที่จะเป็นอันตรายต่อดวงตา แสดงดังภาพ 3.10



ภาพ 3.10 หน้ากากเชื่อม

3.2.10 มอเตอร์หินเจียร

ใช้สำหรับตกแต่งส่วนหัวของแท่งทังสเตนที่ใช้สำหรับการเชื่อมให้แหลมและเรียบเสมอกัน แสดงดังภาพ 3.11



ภาพ 3.11 มอเตอร์หินเจียร

3.2.11 เครื่อง Waterjet

ใช้สำหรับเตรียมแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด AISI 316L ขนาดตามต้องการก่อนที่จะนำไปใช้ในการทดลอง และใช้สำหรับเตรียมชิ้นงานทดสอบในการทดสอบแรงดึง แสดงดังภาพ 3.12



ภาพ 3.12 เครื่อง Waterjet

3.2.12 เครื่องเชื่อม

เครื่องเชื่อมที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ได้ใช้เครื่องเชื่อมโลหะแบบแก๊สทังสเตนอาร์คในการเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด AISI 316L แสดงดังภาพ 3.13



ภาพ 3.13 เครื่องเชื่อม

3.2.13 หุ่นยนต์ KUKA

หุ่นยนต์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ได้ใช้หุ่นยนต์ยี่ห้อ KUKA รุ่น KR16 โดยจะควบคุมการทำงานผ่านโปรแกรม KUKA HMI 2.0 ซึ่งเป็นหุ่นยนต์ที่สามารถสั่งการและกำหนดค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ตามที่กำหนดไว้ แสดงดังภาพ 3.14



ภาพ 3.14 หุ่นยนต์ KUKA

3.2.14 เครื่องทดสอบแรงดึง

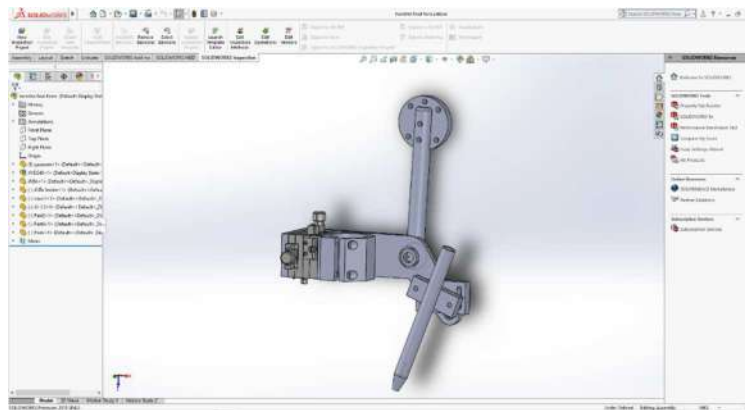
ใช้สำหรับวัดค่าความแข็งแรงต่อแรงดึงสูงสุดของชิ้นงานทดสอบ ภายหลังจากการเชื่อมตามเงื่อนไขที่ได้กำหนดไว้ตามการออกแบบการทดลอง แสดงดังภาพ 3.15



ภาพ 3.15 เครื่องทดสอบแรงดึง

3.3 ออกแบบอุปกรณ์เสริมสำหรับติดตั้งแขนกล

3.3.1 ออกแบบอุปกรณ์เสริมโดยใช้โปรแกรมโซลิดเวิร์ค (Solidwork) โดยหลักการออกแบบได้คำนึงถึงความง่าย (Simple) และสามารถปรับชิ้นส่วนต่างๆ ได้อย่างอิสระ (Variability) เพื่อรองรับความผิดพลาดที่อาจเกิดขึ้นได้ เช่น องศาในการป้อนหลอดเชื่อมต่อไม่สัมพันธ์กับหลอดเชื่อมต่อ และเพิ่มความแม่นยำ ความละเอียดในการเกิดระยะอาร์ค ในกรณีที่มีการป้อนค่าในคอมพิวเตอร์มีความละเอียดที่ไม่เพียงพอ ก็สามารถปรับได้ที่ตัวปรับค่าด้วยมือที่ละเอียดมากยิ่งขึ้นได้โดยตรง โดยรูปทรงและการวางตำแหน่งของอุปกรณ์เสริมจะได้แนวคิดมาจากการเลียนแบบระบบการทำงานเชื่อมต่อของแขนมนุษย์ แสดงดังภาพ 3.16



ภาพ 3.16 แบบร่างอุปกรณ์เสริม

3.3.2 ขึ้นรูปชิ้นส่วนตัวอย่างด้วย 3D Printer พิมพ์ชิ้นส่วนต้นแบบมาทดลองติดตั้งเข้ากับแขนกล เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของขนาดให้ได้ตามที่กำหนดและทราบถึงข้อผิดพลาดของชิ้นงานต้นแบบเพื่อนำไปปรับปรุงก่อนการสั่งผลิตชิ้นงานจริง แสดงดังภาพ 3.17



ภาพ 3.17 3D Print ชิ้นงาน

3.3.3 คัดเลือก Material ที่จะใช้ในการผลิตอุปกรณ์เสริม

1. การคัดเลือกสแตนเลส

สแตนเลสเกรด 304 (AISI 304) เป็นสแตนเลสที่มีสารโครเมียมอยู่ 18 เปอร์เซ็นต์ และนิกเกิลอยู่ 8 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งจะไม่มีการกัดกร่อน มีคาร์บอนต่ำ และเป็นสแตนเลสที่ทนต่อการเกิดสนิม (Oxidation) และทนการกัดกร่อนต่างๆ ได้เป็นอย่างดี (Corrosion) เนื่องจากมีสารนิเกิล (Nickel) จึงทำให้แม่เหล็กดูดไม่ติด มีคาร์บอนต่ำ (Low Carbon) จึงมีความเหนียวสูง สามารถใช้กับการปั๊มขึ้นรูปต่างๆ ได้ เช่น การทำอ่างล้างหรือภาชนะในครัวต่างๆ เพราะสามารถทนความร้อนได้ดี

สแตนเลสเกรด 316 (AISI 316) เป็นสแตนเลสที่นิยมใช้รองลงมาจากเกรด 304 เป็นสแตนเลสที่มีส่วนผสมคล้ายกับเกรด 304 แต่เกรด 316 จะมีส่วนผสมของสารโมลิบดีนัมเพิ่มเข้าไป ทำให้สแตนเลสเกรดนี้สามารถทนต่อการเกิดสนิม และการกัดกร่อนได้สูงกว่าเกรด 304 โดยเฉพาะการทนต่อสารคลอรีน (Warm Chlorine Environmental) จึงนิยมใช้ในงานทำอุปกรณ์ต่างๆ ในห้องแล็บ งานอุตสาหกรรมอาหาร อุตสาหกรรมสารเคมีต่างๆ อุปกรณ์เรือ จนถึงประเภทยานสปริง ที่ต้องให้ทนสนิม โดยการลดคาร์บอนลงจาก 0.08 เปอร์เซ็นต์ ลงมาเหลือ 0.03 เปอร์เซ็นต์ ทำให้สแตนเลสเหนียวขึ้นจนสามารถเป็นสปริงได้

ผู้วิจัยจะคำนึงถึงปัจจัยด้านราคาเป็นหลักในการเลือกระหว่างสแตนเลสเกรด AISI 304 และ AISI 316 เนื่องจากมีคุณสมบัติที่ใกล้เคียง แสดงดังตาราง 3.1 จึงเลือกเกรด AISI 304 ที่มีราคาถูกกว่า

ตาราง 3.1 ส่วนประกอบทางเคมีของสแตนเลส 304 และ 316

Chemical Composition	304	316
Carbon	0.08 (Max)	0.08 (Max)
Manganese	2.00 (Max)	2.00 (Max)
Silicon	0.75 (Max)	0.75 (Max)
Phosphorus	0.045 (Max)	0.045 (Max)
Sulphur	0.030 (Max)	0.030 (Max)
Chromium	18.00 - 20.00	16.00 - 18.00
Nickel	8.00 - 10.50	10.00 - 14.00

2. PEEK/Polyetheretherketone

PEEK/Polyetheretherketone เป็นพลาสติกวิศวกรรมคุณภาพสูง คือมีคุณสมบัติที่ดีเยี่ยมที่สุดในบรรดาพลาสติกวิศวกรรมทั้งหมด เพราะสามารถใช้งานได้ที่อุณหภูมิสูงมาก (310 องศาเซลเซียส) มีความแข็งแรงเชิงกลสูงมาก อีกทั้งยังมีความเหนียว ความแข็ง ความทนทานต่อการรับแรงดัดงอหรือแรงบิดที่สูงมากด้วยเช่นกัน PEEK มีความต้านทานต่อสารเคมีได้ดีเยี่ยม และมีคุณสมบัติเป็นฉนวนแม้ใช้งานที่อุณหภูมิสูงถึง 310 องศาเซลเซียส และมีความต้านทานต่อรังสีทุกชนิดได้ดีมาก และที่สำคัญ PEEK มีคุณสมบัติที่เมื่อติดไฟแล้วสามารถดับเองได้ ตามมาตรฐาน UL 94 เนื่องจากการเชื่อมมีระบบไฟฟ้าเข้ามาเกี่ยวข้อง แชนกซ์ใช้กำลังไฟมาก จึงต้องป้องกันการย้อนกลับของกระแสไฟฟ้าภายในวงจร PEEK เป็นพลาสติกดังนั้นจึงเป็นฉนวนโดยธรรมชาติ จึงเป็นตัวเลือกที่จำเป็นต้องมีในส่วนของอุปกรณ์เสริม และยังทนความร้อนสูง เหมาะกับการใช้ในการเชื่อมที่ใช้ความร้อนสูง เพื่อป้องกันการละลายหรือเสียหาย เสียรูป ของวัสดุ เมื่อทำการเชื่อมเป็นระยะเวลานาน แต่เนื่องจาก PEEK มีราคาที่สูง

ทางผู้วิจัยต้องทำการพิจารณาชิ้นส่วนที่จะใช้เพื่อลดงบประมาณในการจัดทำให้เกิดความคุ้มค่าที่สุด และสามารถตอบโจทย์ด้านการป้องกันกระแสไฟฟ้าไหลย้อนกลับด้วย โดยข้อมูลทางเทคนิคของ PEEK แสดงดังภาพ 3.18

	Test method	Unit	Value
General properties			
Density	DIN EN ISO 1183-1	g / cm ³	1,31
Water absorption	DIN EN ISO 62	%	0,2
Flammability (Thickness 3 mm / 6 mm)	UL 94		V0 / V0
Mechanical properties			
Yield stress	DIN EN ISO 527	MPa	110
Elongation at break	DIN EN ISO 527	%	20
Tensile modulus of elasticity	DIN EN ISO 527	MPa	4000
Shore hardness	DIN EN ISO 868	scale D	88
Thermal properties			
Crystalline grain melting range	ISO 11357-3	°C	343
Thermal conductivity	DIN 52612-1	W / (m * K)	0,25
Thermal capacity	DIN 52612	kJ / (kg * K)	1,34
Coefficient of linear thermal expansion	DIN 53752	10 ⁻⁶ / K	50
Service temperature, long term	Average	°C	-60 ... 250
Service temperature, short term (max.)	Average	°C	310
Heat deflection temperature	DIN EN ISO 75, Verf. A, HDT	°C	152
Electrical properties			
Dielectric constant	IEC 60250		3,2
Dielectric dissipation factor (50 Hz)	IEC 60250		0,001
Volume resistivity	IEC 60093	Ω * cm	4,9 * 10 ¹⁶
Surface resistivity	IEC 60093	Ω	10 ¹⁸
Dielectric strength	IEC 60243	kV / mm	20

ภาพ 3.18 ข้อมูลทางเทคนิคของ PEEK

ที่มา : <http://www.superlenethailand.com>

3.4 ทำการสั่งผลิตอุปกรณ์เสริม

หลังจากออกแบบอุปกรณ์เสริมลงในโปรแกรมคอมพิวเตอร์ เลือกวัสดุที่ต้องการจะใช้กับอุปกรณ์เสริม และทำการทดสอบขนาดด้วยการทำปริ้นท์สามมิติ (3D Print) เสร็จแล้ว จะทำการส่งแบบร่างให้ทางโรงงาน ประเมินราคาการผลิตชิ้นงาน หลังจากพิจารณาราคาเป็นที่เรียบร้อยแล้ว ก็จะวางมัดจำสั่งผลิต และรอรับอุปกรณ์เสริมแบบสมบูรณ์ต่อไป

3.5 ทำการเตรียมอุปกรณ์ที่ใช้ในการเชื่อม

ทำการติดต่อภาควิชาจัดหาอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่ต้องใช้ในงานเชื่อม เช่น เครื่องเชื่อม GTAW หัวเชื่อม ลวดเชื่อม ถังแก๊ส ตัวจับยึดชิ้นงานและฟีดเดอร์ (Feeder) เป็นต้น หลังจากได้รับอุปกรณ์ต่าง ๆ แล้ว จะนำมาประกอบเข้ากับแขนกล เพื่อพิจารณาตำแหน่งการเดินสายแก๊สเชื่อม และระบบอื่น ๆ เพื่อให้มีความเหมาะสมที่สุดในการเชื่อมแบบอัตโนมัติ และนำอุปกรณ์เสริมเข้ามาประกอบกับตัวแขนกลพร้อมทั้งระบบอื่น ๆ ด้วย และเมื่อทุกระบบมีความพร้อมแล้ว จะทำการทดสอบการเชื่อม และปรับค่าต่าง ๆ ให้เหมาะสมต่อไป แสดงดังภาพ 3.19



ภาพ 3.19 เตรียมอุปกรณ์ที่ใช้ในการเชื่อม

3.6 ศึกษาวิธีการควบคุมหุ่นยนต์แขนกลในการทำงานแบบอัตโนมัติ

ศึกษาวิธีการควบคุมหุ่นยนต์แขนกลโดย KUKA HMI 2.0 เป็นซอฟต์แวร์ที่ช่วยในการทำ Offline Programming สำหรับโปรแกรมสั่งการหุ่นยนต์ โดยมี Teach Pendant ในการช่วยสั่งการหุ่นยนต์ แสดงดังภาพ 3.20



ภาพ 3.20 Teach Pendant

3.7 เตรียมแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมโดยใช้เครื่อง Waterjet

3.7.1 ตัดแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด AISI 316L ขนาด 600X800X3 มิลลิเมตร ดังภาพ 3.21 ให้ได้ขนาด 150X100X3 มิลลิเมตร ดังภาพ 3.22 โดยเครื่อง Waterjet แสดงดังภาพ 3.23



ภาพ 3.21 แผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมขนาด 600X800X3 มิลลิเมตร



ภาพ 3.22 แผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมขนาด 100X150X3 มิลลิเมตร



ภาพ 3.23 ตัดแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมด้วยเครื่อง Waterjet

3.8 ศึกษาปัจจัยของการเชื่อมที่มีผลต่อความแข็งแรง

3.8.1 ระยะของการอาร์ก

การใช้ระยะอาร์กที่ถูกต้อง (Correct Arc Length) หมายถึง ระยะห่างระหว่างปลายลวดเชื่อม ขณะทำการเชื่อมกับชิ้นงาน ขนาดของระยะอาร์กขึ้นอยู่กับเส้นผ่าศูนย์กลางลวดเชื่อม โดยทั่วไประยะอาร์กจะเท่ากับความโตของแกนลวดเชื่อมหรือน้อยกว่าเล็กน้อย ซึ่งอิทธิพลของระยะอาร์กจะมีผลต่อคุณภาพของแนวเชื่อม ดังนี้

- ระยะอาร์กห่างมากเกินไป จะมีผลทำให้ อาร์กรุนแรง การควบคุมแนวเชื่อมหรือ
แอ่งหลอมเหลวทำได้ยาก และทำให้ความแข็งแรงของแนวเชื่อมลดลง

- ระยะอาร์กสั้นเกินไป จะมีผลทำให้ปลายลวดเชื่อมติดกับโลหะงานการอาร์คดับ
ง่ายและความแข็งแรงแนวเชื่อมลดลง

- ระยะอาร์กที่ถูกต้อง จะช่วยป้องกันไม่ให้อากาศภายนอกเข้ามารวมตัวในแอ่ง
หลอมเหลว ทำให้การอาร์กเกิดขึ้นสม่ำเสมอ เม็ดโลหะกระเด็นน้อย และแนวเชื่อมมีความแข็งแรง

3.8.2 กระแสไฟฟ้า

การปรับตั้งกระแสไฟฟ้าเชื่อมมีผลกระทบโดยตรงต่อคุณภาพของแนวเชื่อม โดยมีข้อควร
พิจารณาดังนี้

- การปรับกระแสไฟในการเชื่อมสามารถปรับได้ 2 ลักษณะ คือ ปรับเพิ่มและปรับลด
- การปรับกระแสไฟเชื่อมสูงจะทำให้การอาร์กรุนแรงและแนวเชื่อมเสียหาย
- การปรับกระแสไฟเชื่อมสูงหรือต่ำจะต้องคำนึงถึงความหนาของวัสดุงานเชื่อม
- การใช้กระแสไฟเชื่อมต่ำจะทำให้เกิดการดูดติดของลวดเชื่อมกับชิ้นงาน

3.8.3 ความเร็วในการเชื่อม

ความเร็วในการเชื่อมหมายถึง ระยะทางการเคลื่อนที่ของลวดเชื่อมในหนึ่งหน่วยเวลา
ความเร็วในการเชื่อมมีผลต่อคุณภาพและประสิทธิภาพของแนวเชื่อม โดยมีข้อพิจารณาดังนี้

- ความเร็วในการเชื่อมเร็วเกินไปมีผลทำให้แนวเชื่อมเล็กไม่แข็งแรง การซึมลึกไม่ดี
- ความเร็วในการเชื่อมช้าเกินไปมีผลทำให้แนวเชื่อมใหญ่แบน การซึมลึกไม่ดี
- ความเร็วในการเชื่อมที่เหมาะสม คือการเริ่มต้นเชื่อมและสิ้นสุดการเชื่อมโดยใช้
อัตราความเร็วคงที่สม่ำเสมอ

3.9 การออกแบบการทดลองแบบฟูลแฟคทอเรียล

ออกแบบการทดลองโดยใช้หลักการของการออกแบบการทดลอง เพื่อวิเคราะห์เกี่ยวกับ
อิทธิพลของปัจจัยที่ต้องการศึกษาว่าเกี่ยวข้องกับความแข็งแรงต่อแรงดึงมากน้อยเพียงใด โดยใช้การ
ออกแบบการทดลองแบบฟูลแฟคทอเรียล (2^k Full Factorial Design)

3.9.1 การเลือกปัจจัยและระดับ

จากการทบทวนงานวิจัยต่าง ๆ ที่ได้ศึกษาเกี่ยวกับการเชื่อมโลหะแบบแก๊สทั้งสแตน
อาร์ค พบว่า ปัจจัยที่น่าจะมีผลต่อค่าความแข็งแรงต่อแรงดึงสูงสุด มีทั้งหมด 3 ปัจจัย คือ อัตราการไหล

ของแก๊ส กระแสไฟฟ้า และความเร็วของการเชื่อม โดยงานวิจัยนี้ได้กำหนดให้แต่ละปัจจัยมี 2 ระดับ คือ ระดับสูงและระดับต่ำ ที่ระดับนัยสำคัญ α เท่ากับ 0.05 แสดงดังตาราง 3.2

ตาราง 3.2 ปัจจัย ระดับ ขอบเขต และสัญลักษณ์ ที่ใช้ในการออกแบบการทดลองแบบฟูลแฟคทอเรียล

ที่	ปัจจัย	หน่วย	สัญลักษณ์	ระดับ	
				ต่ำ (-)	สูง (+)
1	อัตราการไหลของแก๊ส	ลิตรต่อนาที	A	9	11
2	กระแสไฟฟ้า	แอมแปร์	B	80	100
3	ความเร็วของการเชื่อม	มิลลิเมตรต่อวินาที	C	1.5	2.5

โดยระดับของปัจจัยทั้ง 3 ปัจจัยที่เลือกใช้นี้ (Korra et al., 2011) พบว่าค่าที่เหมาะสมสำหรับการเชื่อมโลหะแบบแก๊สทั้งสแตนอาร์คกับเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด AISI 316L ควรอยู่ในช่วงดังกล่าว ดังนั้นในการทดลองนี้จะมีทั้งหมด $2^3 = 8$ การทดลอง

3.9.2 การทดลองซ้ำและการสุ่มการทดลอง

โดยงานวิจัยนี้ได้กำหนดการทดลองซ้ำ จำนวน 2 ซ้ำ เพื่อยืนยันความถูกต้องของผลการทดลอง และได้ใช้ลำดับการทดลองเป็นแบบสุ่มตามหลักการของการออกแบบการทดลอง ทำให้สามารถออกแบบตารางการทดลองแบบฟูลแฟคทอเรียล แสดงดังตาราง 3.3

3.9.3 การดำเนินการทดลอง

ในการดำเนินการทดลองตามที่ได้ออกแบบการทดลองไว้แล้วนั้น จะทำการทดลองเชื่อมโดยใช้หุ่นยนต์แขนกลด้วยโปรแกรม KUKA HMI 2.0 ในการทำงานแบบอัตโนมัติตามลำดับการดำเนินการทดลองที่กำหนดใน ตาราง 3.3

ตาราง 3.3 ตารางการออกแบบการทดลองแบบฟูลแฟคทอเรียล จำนวน 2 ชั้น

Standard Order	Run Order	ปัจจัย		
		A (ลิตรต่อนาที)	B (แอมแปร์)	C (มิลลิเมตรต่อวินาที)
10	1	11	80	1.5
5	2	9	80	2.5
12	3	11	100	1.5
13	4	9	80	2.5
6	5	11	80	2.5
11	6	9	100	1.5
9	7	9	80	1.5
7	8	9	100	2.5
1	9	9	80	1.5
16	10	11	100	2.5
3	11	9	100	1.5
8	12	11	100	2.5
4	13	11	100	1.5
2	14	11	80	1.5
15	15	9	100	2.5
14	16	11	80	2.5

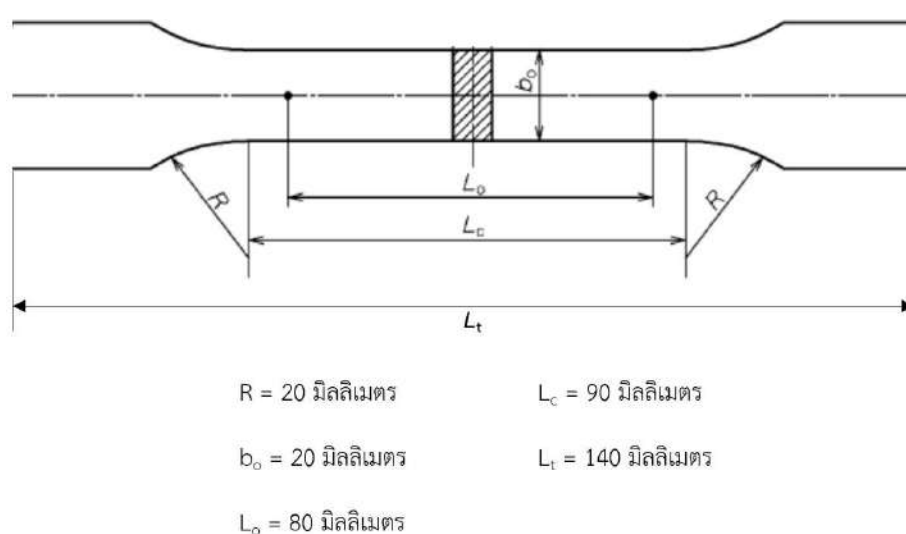
3.10 ทำการเชื่อมแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม

จับคู่แผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด AISI 316L ที่มีขนาด 100X150X3 มิลลิเมตร นำแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมที่จับคู่แล้วไปวางเตรียมไว้บนโต๊ะเชื่อม แล้วสั่งการหุ่นยนต์แขนกลที่ได้รับการติดตั้งอุปกรณ์เสริมแล้ว โดยใช้โปรแกรม KUKA HMI 2.0 สั่งการหุ่นยนต์ในการเชื่อมโลหะแบบแก๊สทั้งสแตนอาร์คอัตโนมัติให้ได้รอยต่อชน (BUTT JOINT) ตามปัจจัยและดับการทดลองที่ระบุไว้ โดยมีระยะของการอาร์ค 2.5 มิลลิเมตร มุมเชื่อมกับชิ้นงาน 80 องศา ใช้แก๊สอาร์กอนเป็นแก๊สปกคลุม

โดยผู้วิจัยได้ทำการเชื่อมในห้องปิดที่มีการปรับอากาศให้คงที่ตลอดการดำเนินการเป็นการใช้หลักการบล็อกกิ้งในการกำจัดสิ่งรบกวนปัจจัยในการเชื่อม

3.11 ทำการทดสอบแรงดึง

ก่อนที่จะนำชิ้นงานไปทดสอบแรงดึงนั้น จะต้องทำการลดรูปชิ้นงานให้ได้ตามมาตรฐาน มอก. 2172 เล่ม 1-2556 ที่ได้กำหนดไว้ โดยงานวิจัยฉบับนี้จะใช้เครื่อง Waterjet ในการลดรูปชิ้นงาน เพื่อให้ได้ขนาดตามมาตรฐานที่กำหนดไว้ และยังไม่ก่อให้เกิดความร้อนแก่ชิ้นงานที่จะส่งผลเสียต่อการทดสอบความแข็งแรงต่อแรงดึงของชิ้นงาน แสดงดังภาพ 3.24 เมื่อได้ชิ้นงานที่มีขนาดตามต้องการแล้ว จึงนำชิ้นงานที่ผ่านการลดรูปแล้วไปทำการทดสอบความแข็งแรงดึง (Tensile Test) ของรอยเชื่อม เพื่อหาปัจจัยและระดับที่เหมาะสมในการเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด AISI 316L



ภาพ 3.24 ขนาดของชิ้นงานสำหรับการทดสอบแรงดึง

3.12 สรุปผลการทดลอง

3.12.1 จัดทำตารางและกราฟแสดงค่าความแข็งแรงต่อแรงดึงของรอยเชื่อมตามตารางการออกแบบการทดลองแบบฟูลแฟคทอเรียล และวิเคราะห์ทางสถิติ ว่าปัจจัยใดที่มีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อความแข็งแรงต่อแรงดึงของรอยเชื่อม

3.12.2 หาค่าความแข็งแรงต่อแรงดึงที่มากที่สุด โดยใช้ฟังก์ชัน Response Optimizer ที่มีอยู่ในโปรแกรมมินิแทบ (Minitab) ว่าควรจะปรับค่าของปัจจัยให้อยู่ในระดับใด

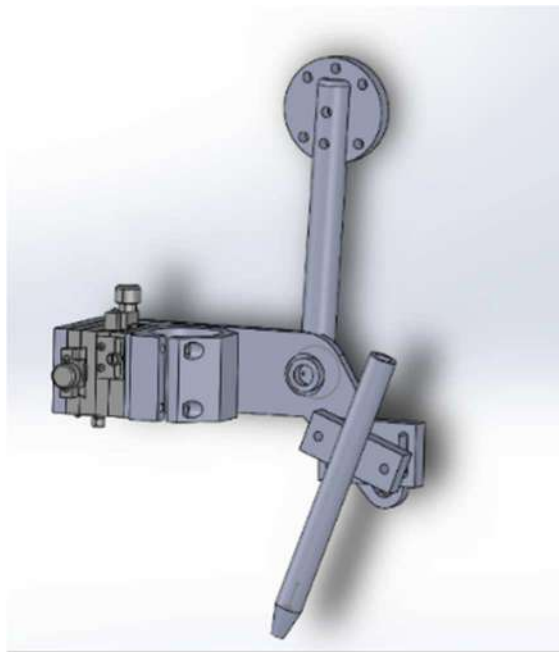
บทที่ 4

ผลการทำวิจัย

ผลจากการออกแบบอุปกรณ์เสริมสำหรับติดตั้งแขนกลโดยใช้โปรแกรม Solidwork และขึ้นรูปชิ้นส่วนตัวอย่างด้วย 3D Printer พิมพ์ชิ้นส่วนต้นแบบมาทดลองติดตั้งเข้ากับแขนกล เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของขนาดให้ได้ตามที่กำหนดและทราบข้อผิดพลาดของชิ้นงานต้นแบบเพื่อนำไปปรับปรุงก่อนการสั่งผลิตชิ้นงานจริง

4.1 ผลการออกแบบอุปกรณ์เสริม

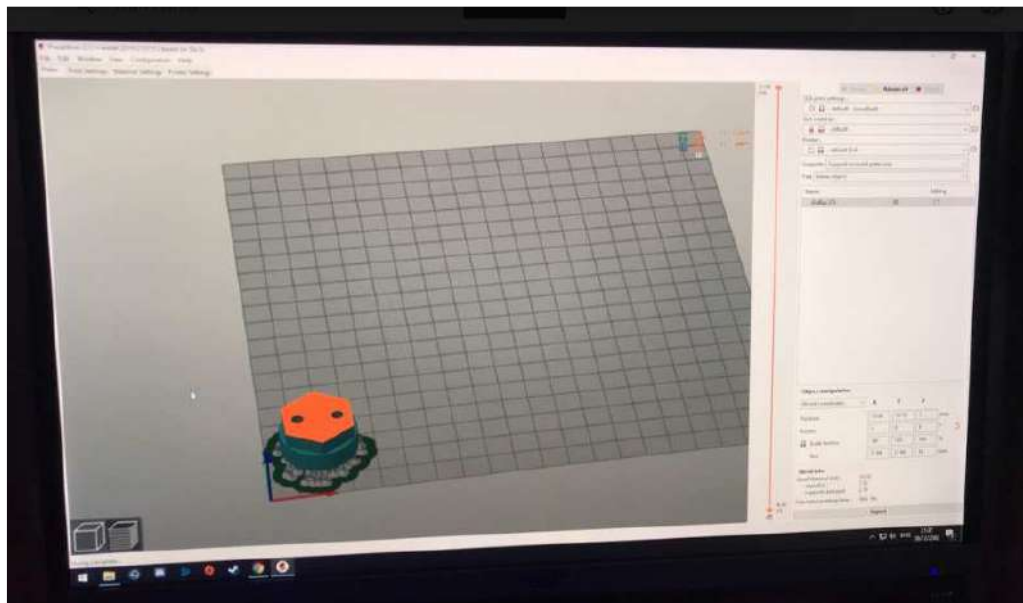
อุปกรณ์เสริมที่ได้จากการออกแบบ ประกอบไปด้วยชิ้นส่วนทั้งหมด 11 ชิ้นส่วน เมื่อนำมาประกอบกันแล้วจะมีลักษณะ แสดงดังภาพ 4.1



ภาพ 4.1 ผลการออกแบบอุปกรณ์เสริม

4.2 ผลการขึ้นรูปชิ้นส่วนตัวอย่างด้วย 3D Printer

ชิ้นส่วนอุปกรณ์เสริมที่ออกแบบโดยใช้โปรแกรมโซลิดเวิร์ค (Solidwork) จะถูกนำไปแปลงเป็นโค้ดนามสกุล .STL โดยใช้โปรแกรม Prusa3D แสดงดังภาพ 4.2 จากนั้นจึงจะสามารถนำไปขึ้นรูปด้วยเครื่อง 3D Printer แสดงดังภาพ 4.3 โดยชิ้นส่วนที่ได้จากการขึ้นรูป แสดงดังภาพ 4.4



ภาพ 4.2 แปลงโค้ดโดยโปรแกรม Prusa3D



ภาพ 4.3 ขึ้นรูปชิ้นส่วนโดยเครื่อง 3D Printer



ภาพ 4.4 ชิ้นส่วนที่ได้จากการขึ้นรูป

ชิ้นส่วนที่ได้จากการขึ้นรูปเมื่อนำไปประกอบเข้ากับหุ่นยนต์แล้วพบว่าขนาดของชิ้นส่วน ระยะ องศาของชิ้นส่วนยังไม่ได้ขนาดตามที่ต้องการและยังมีข้อผิดพลาด จึงต้องมีการปรับปรุงรูปแบบของชิ้นส่วนอุปกรณ์เสริมใหม่เพื่อแก้ปัญหาข้อผิดพลาด

4.3 ผลการผลิตชิ้นงาน

หลังจากการปรับปรุงรูปแบบชิ้นส่วนอุปกรณ์เสริมจนได้ชิ้นส่วนต้นแบบ และส่งผลิตชิ้นงานจริงทั้ง 11 ชิ้นส่วน ได้ผลลัพธ์ใกล้เคียงกับที่ออกแบบเอาไว้ ซึ่งจะมีบางตำแหน่งของชิ้นส่วนที่มีความคลาดเคลื่อนกับต้นแบบ อันเนื่องมาจากข้อจำกัดในการผลิตชิ้นงานของโรงงาน ทางผู้วิจัยจึงนำมาปรับแก้ไขด้วยเครื่องจักรและอุปกรณ์ภายในโรงประลองของภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ แสดงดังภาพ 4.5 เมื่อนำชิ้นงานที่ผ่านการปรับแก้ไขแล้วมาประกอบเข้ากับหุ่นยนต์ แสดงดังภาพ 4.6



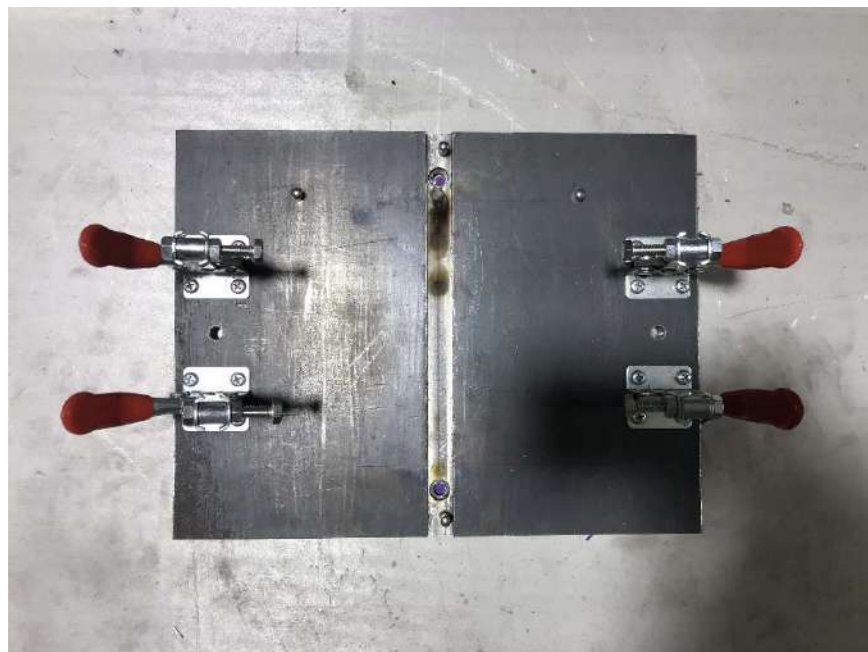
ภาพ 4.5 ปรับแก้ไขชิ้นส่วนอุปกรณ์เสริม



ภาพ 4.6 ประกอบชิ้นส่วนเข้ากับหุ่นยนต์

4.4 ประกอบตัวจับยึดชิ้นงานเข้ากับโต๊ะ

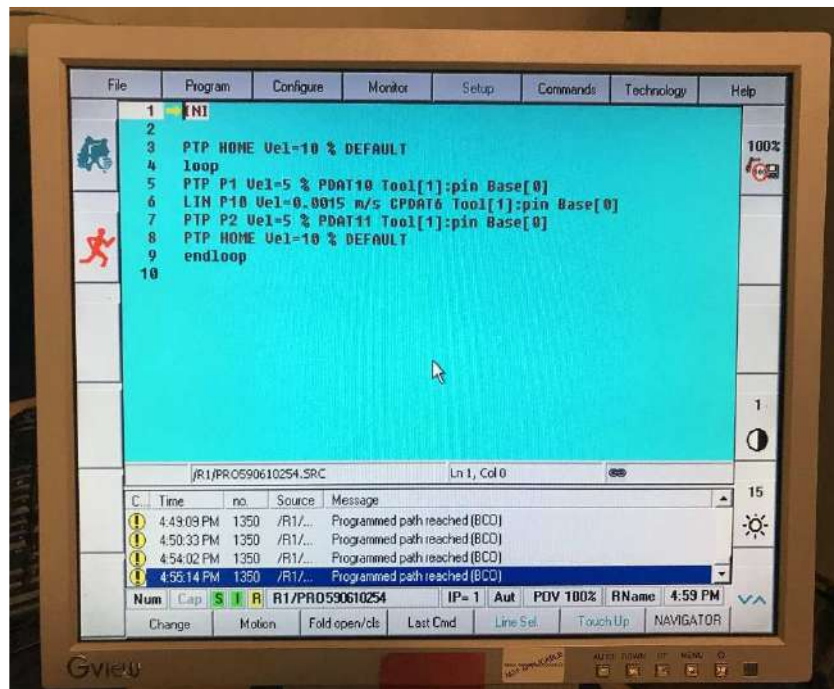
ตัวจับยึดชิ้นงานที่ประกอบเข้ากับโต๊ะเชื่อมต่อแล้ว แสดงดังภาพ 4.7



ภาพ 4.7 ประกอบตัวจับยึดชิ้นงาน

4.5 เขียนโปรแกรมควบคุมหุ่นยนต์

เมื่อศึกษาวิธีการใช้งานโปรแกรม KUKA HMI 2.0 และทำการทดลองควบคุมหุ่นยนต์ให้เคลื่อนที่ตามคำสั่งในรูปแบบต่าง ๆ จนสามารถเขียนโปรแกรมควบคุมหุ่นยนต์ที่จะใช้ในการทดลองเชื่อมแบบอัตโนมัติ แสดงดังภาพ 4.8



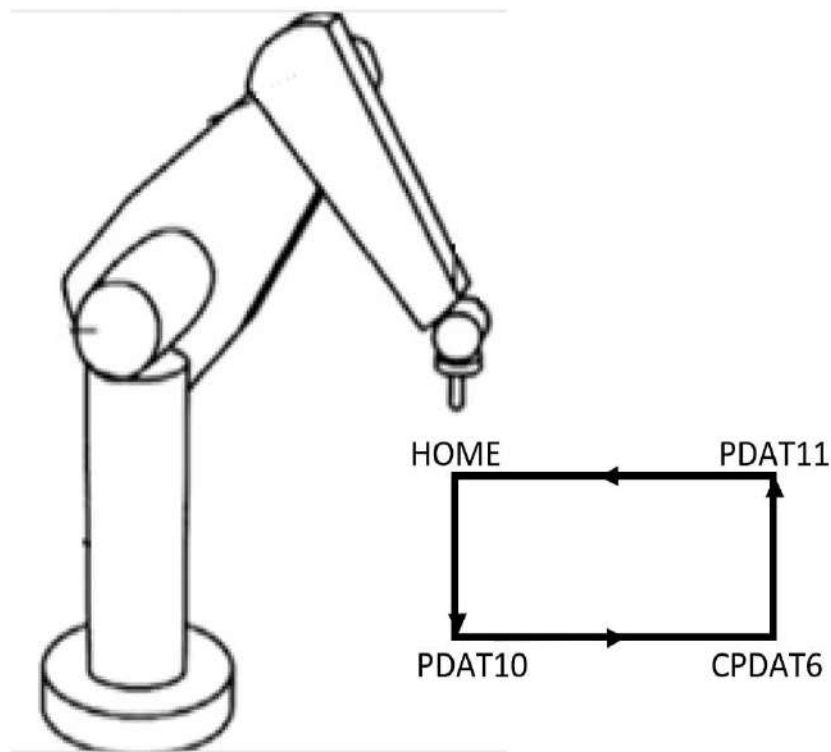
ภาพ 4.8 โปรแกรมเชื่อมอัตโนมัติ

โดยโปรแกรมอัตโนมัติจะมีลำดับขั้นตอนการทำงานอยู่ 5 ลำดับ จากภาพ 4.8 จะแสดงให้เห็นถึงลำดับการทำงานของโปรแกรม มีรายละเอียดดังนี้

1. สั่งการให้หุ่นยนต์เคลื่อนที่ไปยังตำแหน่ง HOME ด้วยความเร็ว 10 เปอร์เซ็นต์ โดยตัวแปร HOME จะเก็บค่าตำแหน่งปลอดภัยที่ตั้งค่าไว้
2. สั่งการให้หัวเชื่อมเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่ง PDAT10 ด้วยความเร็ว 5 เปอร์เซ็นต์ โดยตัวแปร PDAT 10 จะเก็บค่าตำแหน่งปลายทางเอาไว้
3. สั่งการให้หัวเชื่อมเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่ง CPDAT6 ด้วยความเร็วในการเชื่อมตามปัจจัยที่กำหนด หน่วยเป็นเมตรต่อวินาที โดยตัวแปร CPDAT6 จะเก็บค่าตำแหน่งปลายทางเอาไว้
4. สั่งการให้หัวเชื่อมเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่ง PDAT11 ด้วยความเร็ว 5 เปอร์เซ็นต์ โดยตัวแปร PDAT 11 จะเก็บค่าตำแหน่งปลายทางเอาไว้

5. สั่งการให้หุ่นยนต์เคลื่อนที่กลับไปยังตำแหน่ง HOME ด้วยความเร็ว 10 เปอร์เซ็นต์ โดยตัวแปร HOME จะเก็บค่าตำแหน่งปลอดภัยที่ตั้งค่าไว้

โดยทิศทางของการเคลื่อนที่ของหัวเชื่อมแบบอัตโนมัติของหุ่นยนต์ที่เขียนโปรแกรมเอาไว้ใน KUKA HMI 2.0 จะมีลักษณะการเคลื่อนที่ แสดงดังภาพ 4.9



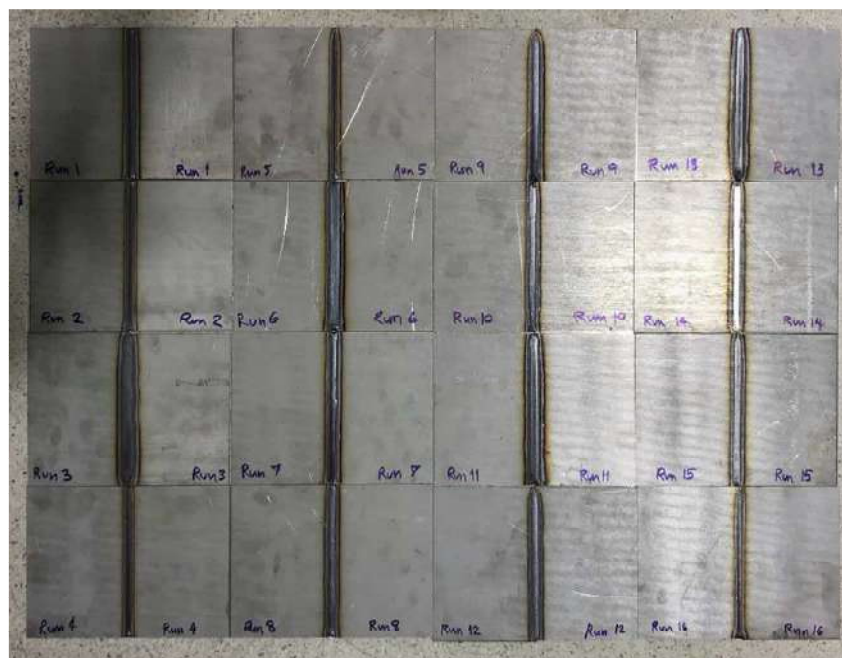
ภาพ 4.9 การเคลื่อนที่ของหัวเชื่อม

4.6 ผลการเชื่อมชิ้นงานจริง

ชิ้นงานที่ได้จากการเชื่อมโลหะแบบแก๊สทั้งสแตนเลสอาร์คอัตโนมัติ จำนวน 16 แผ่น ได้รอยเชื่อมที่สวยงาม บ่อหลอมละลายสม่ำเสมอและมีลักษณะแสดงดังภาพ 4.10 และ ภาพ 4.11 โดยจะถูกนำไปตัดด้วยเครื่อง Waterjet เพื่อเตรียมชิ้นงานก่อนการนำไปทดสอบแรงดึง (Tensile Test)



ภาพ 4.10 ชิ้นงานที่ผ่านการเชื่อมแล้ว



ภาพ 4.11 ชิ้นงานที่ผ่านการเชื่อมแล้วทั้งหมด

4.7 เตรียมชิ้นงานก่อนการทดสอบแรงดึง

ก่อนที่จะนำชิ้นงานไปทดสอบแรงดึงนั้น จะต้องทำการลดรูปชิ้นงานให้ได้ตามมาตรฐาน มอก. 2172 เล่ม 1-2556 ที่ได้กำหนดไว้ โดยงานวิจัยฉบับนี้จะใช้เครื่อง Waterjet ในการลดรูปชิ้นงาน เพื่อให้ได้ขนาดตามมาตรฐานที่กำหนดไว้ และยังไม่ก่อให้เกิดความร้อนแก่ชิ้นงานที่จะส่งผลเสียต่อการทดสอบความแข็งแรงต่อแรงดึงของชิ้นงาน แสดงดังภาพ 4.12 และภาพ 4.13



ภาพ 4.12 ชิ้นทดสอบที่ผ่านการลดรูปแล้ว



ภาพ 4.13 ชิ้นทดสอบที่ผ่านการลดรูปแล้วทั้งหมด

4.8 ผลการทดสอบแรงดึง

เมื่อนำชิ้นงานที่ผ่านการลดรูปด้วยเครื่อง Waterjet แล้วมาทำการทดสอบแรงดึงด้วยปัจจัยต่าง ๆ ได้ผล แสดงดังตาราง 4.1 และภาพ 4.14

ตาราง 4.1 ผลทดสอบแรงดึงที่จะได้จากการออกแบบการทดลองแบบฟูลแฟคทอเรียล

Standard Order	Run Order	ปัจจัย			Tensile Stress (MPa)
		A (ลิตรต่อนาที)	B (แอมแปร์)	C (มิลลิเมตรต่อวินาที)	
10	1	11	80	1.5	141.917
5	2	9	80	2.5	88.741
12	3	11	100	1.5	397.589
13	4	9	80	2.5	139.418
6	5	11	80	2.5	70.228
11	6	9	100	1.5	294.562
9	7	9	80	1.5	194.771
7	8	9	100	2.5	115.074
1	9	9	80	1.5	150.009
16	10	11	100	2.5	119.902
3	11	9	100	1.5	287.463
8	12	11	100	2.5	171.991
4	13	11	100	1.5	437.329
2	14	11	80	1.5	191.609
15	15	9	100	2.5	161.416
14	16	11	80	2.5	84.168

จากตาราง 4.1 พบว่าค่าที่วัดได้จากการทดสอบแรงดึงมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 181.517 เมกะปาสคาล และค่าสูงสุดที่วัดได้คือ 437.329 เมกะปาสคาล



ภาพ 4.14 ชิ้นทดสอบที่ผ่านการทดสอบแรงดึง

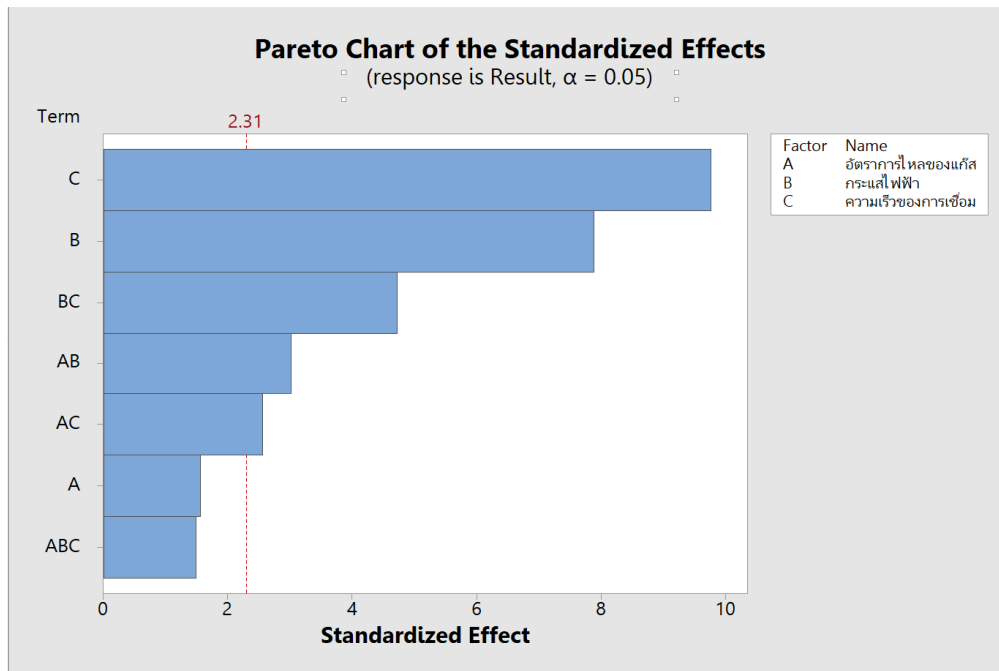
4.9 ผลการออกแบบการทดลองแบบฟูลแฟคทอเรียล

ในขณะนี้ได้นำผลการทดสอบแรงดึงจากระดับปัจจัยต่าง ๆ มาทำการวิเคราะห์ทางสถิติด้วยโปรแกรมมินิแทบ (Minitab) โดยหลังจากที่โปรแกรมได้วิเคราะห์ทางสถิติแล้วจึงได้ทำการพล็อต (Plot) กราฟและสร้างตารางการวิเคราะห์ออกมาเพื่อแปลผลการทดลอง

4.9.1 กราฟ Pareto Chart of the Standardized Effects

จากกราฟ Pareto Chart of the Standardized Effects ที่ได้ ซึ่งผลตอบ คือค่าความเค้นที่เกิดขึ้น แสดงดังภาพ 4.15 ทำให้ทราบว่าปัจจัยใดที่มีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อค่าความเค้นตกค้าง ที่ระดับนัยสำคัญ $\alpha = 0.05$ โดยปัจจัยที่มีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อค่าความแข็งแรงต่อแรงดึง มีจำนวน 6 ปัจจัย คือ

1. อัตราการไหลของแก๊ส (A)
2. กระแสไฟฟ้า (B)
3. ความเร็วของการเชื่อม (C)
4. อันตรกิริยาของอัตราการไหลของแก๊สและกระแสไฟฟ้า (AB)
5. อันตรกิริยาของอัตราการไหลของแก๊สและความเร็วของการเชื่อม (AC)
6. อันตรกิริยาของกระแสไฟฟ้าและความเร็วของการเชื่อม (BC)



ภาพ 4.15 กราฟ Pareto Chart of the Standardized Effects

4.9.2 ผลจากการวิเคราะห์ Factorial Fit

จากภาพ 4.16 เมื่อพิจารณา P-Value ของปัจจัยกระแสไฟฟ้า (B) ความเร็วในการเชื่อม (C) อันตรกิริยาของอัตราการไหลของแก๊สและกระแสไฟฟ้า (AB) อันตรกิริยาของอัตราการไหลของแก๊สและความเร็วของการเชื่อม (AC) อันตรกิริยาของกระแสไฟฟ้าและความเร็วของการเชื่อม (BC) พบว่าค่าที่ได้มีค่าเท่ากับ 0.000 0.000 0.017 0.034 และ 0.002 ตามลำดับ ซึ่งมีค่าน้อยกว่าค่าระดับนัยสำคัญ $\alpha = 0.05$ แสดงว่าปัจจัยดังกล่าวมีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อค่าความแข็งแรงต่อแรงดึง แต่เนื่องด้วยการที่ปัจจัยอันตรกิริยาของอัตราการไหลของแก๊สและกระแสไฟฟ้า (AB) และอันตรกิริยาของอัตราการไหลของแก๊สและความเร็วของการเชื่อม (AC) มีผลอย่างมีนัยสำคัญ จึงทำให้ปัจจัยอัตราการไหลของแก๊ส (A) มีผลอย่างมีนัยสำคัญด้วย

เมื่อพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจ (R^2) พบว่าค่าที่ได้มีค่าเท่ากับ 96.16 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งหลังจากได้ปรับค่าของสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจแล้ว จะได้ค่า (R^2 -adj) เท่ากับ 92.80 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งค่า (R^2 -adj) นี้มีค่าเข้าใกล้ 100 เปอร์เซ็นต์ หมายความว่าแบบจำลองนี้มีความสามารถที่ดีมากในการอธิบายผลที่เกิดขึ้น และสามารถนำไปสร้างสมการถดถอยเพื่อหาค่าที่เหมาะสมได้อย่างถูกต้อง

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
29.2894	96.16%	92.80%	84.63%

Coded Coefficients

Term	Effect	Coef	SE Coef	T-Value
Constant		190.39	7.32	26.00
อัตราการใช้ของแก๊ส	22.91	11.45	7.32	1.56
กระแสไฟฟ้า	115.56	57.78	7.32	7.89
ความเร็วของการเชื่อม	-143.04	-71.52	7.32	-9.77
อัตราการใช้ของแก๊ส*กระแสไฟฟ้า	44.16	22.08	7.32	3.02
อัตราการใช้ของแก๊ส*ความเร็วของการเชื่อม	-37.50	-18.75	7.32	-2.56
กระแสไฟฟ้า*ความเร็วของการเชื่อม	-69.10	-34.55	7.32	-4.72
อัตราการใช้ของแก๊ส*กระแสไฟฟ้า*ความเร็วของการเชื่อม	-21.87	-10.94	7.32	-1.49

Term	P-Value	VIF
Constant	0.000	
อัตราการใช้ของแก๊ส	0.156	1.00
กระแสไฟฟ้า	0.000	1.00
ความเร็วของการเชื่อม	0.000	1.00
อัตราการใช้ของแก๊ส*กระแสไฟฟ้า	0.017	1.00
อัตราการใช้ของแก๊ส*ความเร็วของการเชื่อม	0.034	1.00
กระแสไฟฟ้า*ความเร็วของการเชื่อม	0.002	1.00
อัตราการใช้ของแก๊ส*กระแสไฟฟ้า*ความเร็วของการเชื่อม	0.174	1.00

ภาพ 4.16 ผลการวิเคราะห์ Factorial Fit

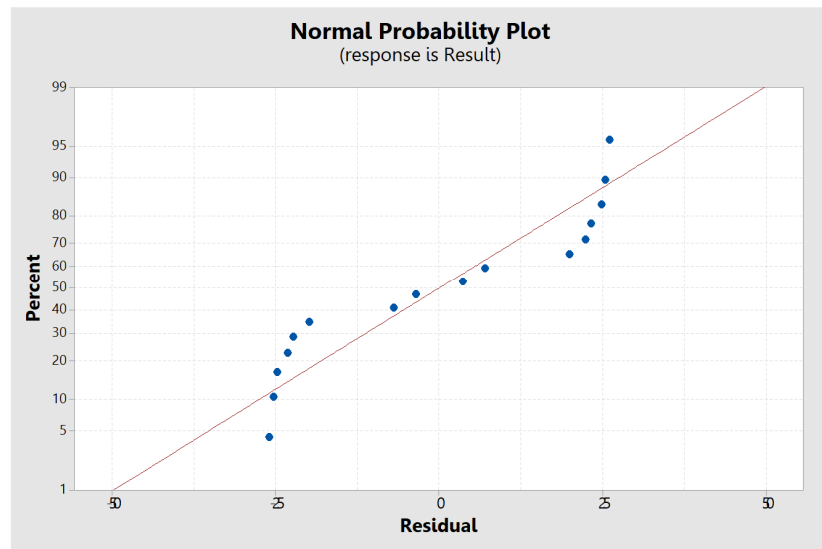
4.9.3 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง

ในขั้นตอนนี้จะต้องทำการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองก่อนนำแบบจำลองไปใช้งานว่ามีความเหมาะสมหรือไม่โดยมีหลักอยู่ 3 ประการคือ

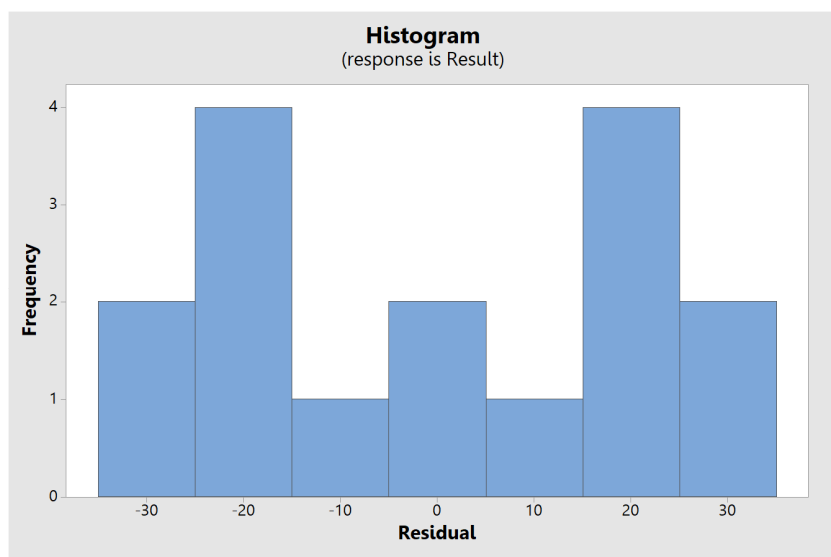
1. ตรวจสอบว่าข้อมูลส่วนตกค้างมีการกระจายตัวแบบปกติจากการสร้างกราฟ Normal Probability Plot แสดงดังภาพ 4.17 พบว่าข้อมูลมีแนวโน้มเป็นเส้นตรง ไม่มีจุดใด ๆ ออกนอกเส้นตรง เนื่องจากจุดของส่วนตกค้างมีการเรียงตัวกันเป็นแนวเส้นตรงจึงสรุปได้ว่ามีแนวโน้มการกระจายตัวแบบปกติ และจากกราฟฮิสโตแกรม (Histogram) แสดงดังภาพ 4.18 พบว่าการกระจายตัวของส่วนตกค้างในทุกช่วงของกราฟฮิสโตแกรม (Histogram) จึงสรุปได้ว่าค่าเฉลี่ยเข้าใกล้ศูนย์

2. ตรวจสอบว่าส่วนตกค้างต้องมีความแปรปรวนคงตัวจากการสร้างกราฟ Versus Fits แสดงดังภาพ 4.19 พบว่าส่วนมีการกระจายอย่างสม่ำเสมอและไม่มีรูปแบบแนวโน้มที่ชัดเจน จึงสรุปได้ว่าส่วนตกค้างมีการกระจายตัวอิสระ

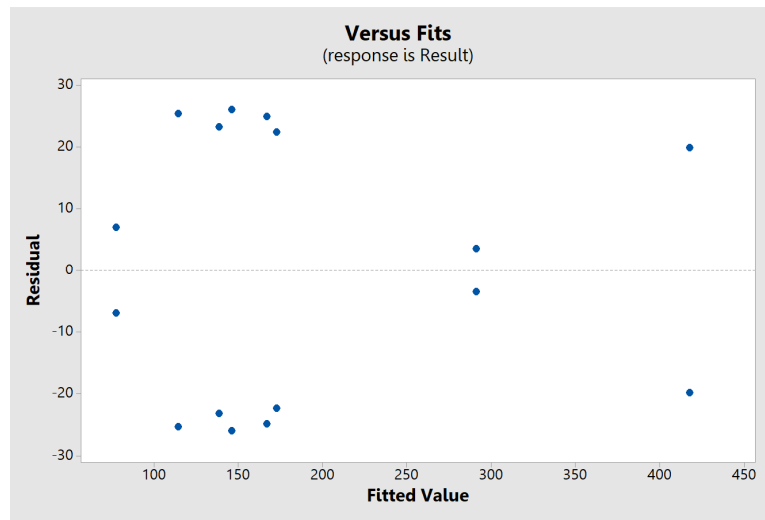
3. ตรวจสอบว่าส่วนตกค้างต้องมีการกระจายตัวเป็นอิสระจากการสร้างกราฟ Versus Order แสดงดังภาพ 4.20 พบว่าส่วนมีการกระจายอย่างสม่ำเสมอและไม่มีรูปแบบ แนวโน้มที่ชัดเจน จึงสรุปได้ว่าส่วนตกค้างมีการกระจายตัวอิสระไม่ขึ้นอยู่กับการทดลอง



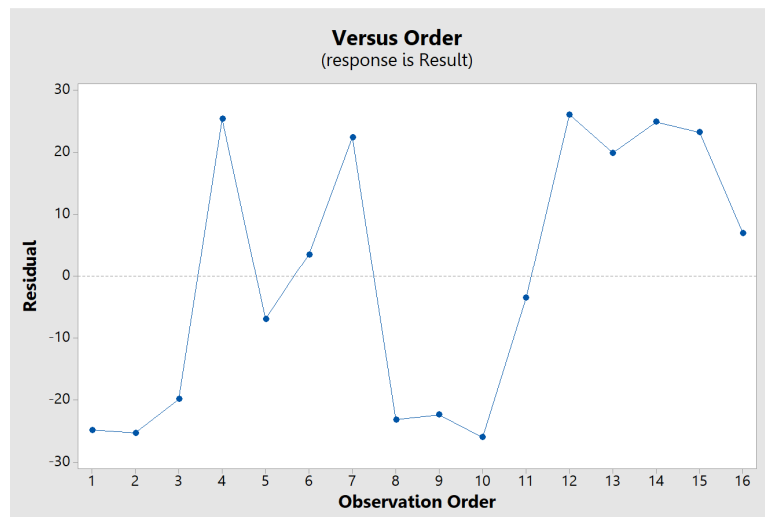
ภาพ 4.17 กราฟ Normal Probability Plot



ภาพ 4.18 กราฟ Histogram



ภาพ 4.19 กราฟ Versus Fit



ภาพ 4.20 กราฟ Versus Order

สรุปผลการออกแบบการทดลองแบบฟูลแฟคทอเรียล พบว่ามีปัจจัยที่มีผลอย่างมีนัยสำคัญ ต่อค่าความแข็งแรงจ่อแรงดึง ที่ระดับนัยสำคัญ $\alpha = 0.05$ มีจำนวน 6 ปัจจัย คือ

1. อัตราการไหลของแก๊ส (A)
2. กระแสไฟฟ้า (B)
3. ความเร็วของการเชื่อม (C)
4. อันตรกิริยาของอัตราการไหลของแก๊สและกระแสไฟฟ้า (AB)
5. อันตรกิริยาของอัตราการไหลของแก๊สและความเร็วของการเชื่อม (AC)
6. อันตรกิริยาของกระแสไฟฟ้าและความเร็วของการเชื่อม (BC)

4.10 การหาค่าที่เหมาะสมที่สุด

การหาค่าความแข็งแรงต่อแรงดึงของรอยเชื่อมที่เกิดจากการเชื่อมโลหะแบบแก๊สทั้งสแตนอาร์คที่เหมาะสมที่สุด โดยใช้ฟังก์ชัน Response Optimizer ของโปรแกรม Minitab ซึ่งเป็นฟังก์ชันในการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของปัจจัยโดยค่าความพึงพอใจโดยรวมจะมีค่าอยู่ระหว่าง 0 - 1 หากค่าความพึงพอใจโดยรวมมีค่าใกล้เคียง 1 แสดงว่ามีความพึงพอใจอย่างสมบูรณ์ โดยในงานวิจัยฉบับนี้ได้เลือกค่าเป้าหมาย (Goal) เป็นค่าเป้าหมายที่ต้องการ (Target) โดยกำหนดค่าเป้าหมายที่ต้องการไว้ที่ 437.329 ± 25 เมกะปาสคาล เนื่องจากเป็นค่าความแข็งแรงต่อแรงดึงที่สูงที่สุดจากผลการออกแบบการทดลองแบบฟูลแฟคทอเรียลตามตารางที่ 4.1

จากการวิเคราะห์พบว่ากระแสไฟฟ้าควรใช้ค่า 100 แอมแปร์ และความเร็วในการเชื่อมควรใช้ค่า 1.5 มิลลิเมตรต่อวินาที เพื่อให้ได้ค่าความแข็งแรงต่อแรงดึงคือ 417.459 เมกะปาสคาล โดยมีค่าความพึงพอใจ (Desirability) อยู่ที่ 0.945873 แสดงดังภาพ 4.21 และภาพ 4.22

โดยค่าความแข็งแรงต่อแรงดึงที่คำนวณได้คือ 417.459 เมกะปาสคาล ซึ่งค่าที่ได้นี้มีค่าน้อยกว่าค่าที่ได้จากการออกแบบการทดลองแบบฟูลแฟคทอเรียลตามตาราง 4.1 คือ 437.329 เมกะปาสคาล อันเนื่องมาจากการคำนวณที่อาจจะมีเปอร์เซ็นต์ค่าความผิดพลาดแฝงอยู่

Response Optimization: Result

Parameters

Response	Goal	Lower	Target	Upper	Weight	Importance
Result	Maximum	70.228	437.329		1	1

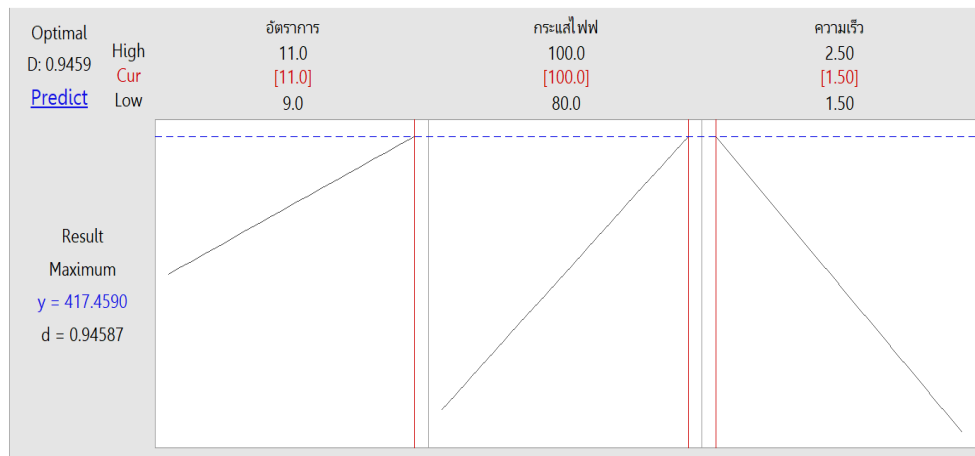
Solution

Solution	อัตรา การไหล		ความเร็ว ของการ เชื่อม	Result Fit	Composite Desirability
	ของ แก๊ส	กระแส ไฟฟ้า			
1	11	100	1.5	417.459	0.945873

Multiple Response Prediction

Variable	Setting			
อัตราการไหลของแก๊ส	11			
กระแสไฟฟ้า	100			
ความเร็วของการเชื่อม	1.5			
Response	Fit	SE Fit	95% CI	95% PI
Result	417.5	20.7	(369.7, 465.2)	(334.7, 500.2)

ภาพ 4.21 ผลการวิเคราะห์ค่าที่เหมาะสมที่สุด



ภาพ 4.22 ค่าที่เหมาะสมที่สุดของแต่ละปัจจัย

บทที่ 5

สรุปผล และข้อเสนอแนะ

ในการออกแบบอุปกรณ์เสริมเพื่อให้หุ่นยนต์แขนกลสามารถเชื่อมแบบแก๊สทั้งสแตนอาร์คอัตโนมัตินี้ ตั้งแต่ต้นจนจบการดำเนินการตลอดจนได้ผลการวิเคราะห์ ทางผู้วิจัยได้รับเทคนิค และประสบการณ์ด้านต่าง ๆ โดยผลการทำวิจัยและผลการทดลองที่ได้ออกมาอยู่ในระดับที่น่าพอใจ

5.1 การสรุปผล

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นเพื่อออกแบบอุปกรณ์เสริมและติดตั้งเข้ากับหุ่นยนต์แขนกลให้สามารถเชื่อมอัตโนมัติได้ และเพื่อให้แขนกลสามารถเชื่อมชิ้นงานอัตโนมัติได้ตามมาตรฐานการทดสอบความแข็งแรงต่อแรงดึงของรอยเชื่อม (มอก. 2172 เล่ม 1-2556) ซึ่งการวิเคราะห์หาระดับของความแข็งแรงต่อแรงดึงของรอยเชื่อมทำให้ทราบถึงความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยในการเชื่อมที่มีผลต่อความแข็งแรงของรอยเชื่อม โดยในงานวิจัยนี้จะใช้การออกแบบการทดลองแบบฟูลแฟคทอเรียล และการวิเคราะห์ทางสถิติด้วยโปรแกรมมินิแทบ (Minitab) ในการที่จะคัดเลือกปัจจัยที่เกี่ยวข้องซึ่งส่งผลกระทบต่อความแข็งแรงต่อแรงดึงของรอยเชื่อม และหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของปัจจัย

จากการออกแบบอุปกรณ์เสริมและนำไปติดตั้งเข้ากับหุ่นยนต์แขนกล พบว่าหุ่นยนต์สามารถติดตั้งอุปกรณ์เชื่อมแบบแก๊สทั้งสแตนอาร์คได้ โดยอุปกรณ์มีความแข็งแรงทนทานสามารถนำไปใช้ในงานเชื่อมแบบแก๊สทั้งสแตนอาร์คอัตโนมัติได้เป็นอย่างดี

จากการออกแบบการทดลองแบบฟูลแฟคทอเรียล (2 Full Factorial Design) โดยผลของการทดลอง คือ ความแข็งแรงต่อแรงดึงของรอยเชื่อมหลังจากการเชื่อมโลหะแบบแก๊สทั้งสแตนอาร์คซึ่งนำเข้า 3 ปัจจัย คือ

1. อัตราการไหลของแก๊ส
2. กระแสไฟฟ้า
3. ความเร็วในการเชื่อม

กำหนดให้แต่ละปัจจัยมี 2 ระดับคือระดับสูงและระดับต่ำที่ระดับนัยสำคัญ $\alpha = 0.05$ พบว่ามีปัจจัยที่มีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อค่าความแข็งแรงต่อแรงดึง คือ

1. อัตราการไหลของแก๊ส (A)
2. กระแสไฟฟ้า (B)
3. ความเร็วของการเชื่อม (C)
4. อันตรกิริยาของอัตราการไหลของแก๊สและกระแสไฟฟ้า (AB)
5. อันตรกิริยาของอัตราการไหลของแก๊สและความเร็วของการเชื่อม (AC)
6. อันตรกิริยาของกระแสไฟฟ้าและความเร็วของการเชื่อม (BC)

หลังการหาค่าความแข็งแรงต่อแรงดึงของรอยเชื่อมที่เกิดจากการเชื่อมโลหะแบบแก๊สทั้งสแตนอาร์คที่เหมาะสมที่สุด จากการวิเคราะห์พบว่ากระแสไฟฟ้าควรใช้ค่า 100 แอมแปร์ และความเร็วในการเชื่อมควรใช้ค่า 1.5 มิลลิเมตรต่อวินาที เพื่อให้ได้ค่าความแข็งแรงต่อแรงดึงคือ 417.459 เมกะปาสคาล โดยมีค่าความพึงพอใจ (Desirability) อยู่ที่ 0.945873

5.2 ปัญหาที่ส่งผลในการดำเนินโครงการวิจัย

1. ก่อนดำเนินการวิจัยหุ่นยนต์ในภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการยังไม่สามารถใช้งานได้ ต้องรอช่างผู้ชำนาญการมาซ่อมแซมและติดตั้งโปรแกรม
2. หุ่นยนต์ในภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการยังมีผู้ชำนาญในการใช้งานน้อย ผู้วิจัยจะต้องศึกษาค้นคว้าวิธีการใช้งานและควบคุมด้วยตนเอง
3. การสั่งผลิตอุปกรณ์เสริม มีความล่าช้าอันเนื่องมาจากการติดต่อสื่อสารกับทางโรงงานจะต้องมีระเบียบเป็นขั้นตอนของโรงงาน และต้องใช้เวลาในการพิจารณามูลค่าของชิ้นงานว่าเหมาะสมแก่การผลิตหรือไม่
4. ระบบไฟฟ้าในห้องดำเนินการวิจัยมีเหตุขัดข้องที่ส่งผลทำให้ไม่สามารถดำเนินการวิจัยได้ โดยมีช่างผู้ชำนาญการมาตรวจสอบ แต่ไม่พบทราบสาเหตุของปัญหา โดยผู้วิจัยจะต้องคิดหาวิธีแก้ไขปัญหาเพื่อดำเนินการวิจัยต่อไป

5.3 ข้อเสนอแนะ

5.3.1 ในการออกแบบอุปกรณ์เพื่อนำมาผลิตใช้งานนั้น ควรที่จะคำนึงถึงมูลค่าของวัสดุที่จะนำมาใช้ผลิตอุปกรณ์

5.3.2 ควรที่จะศึกษาการเชื่อมโลหะแบบแก๊สทั้งสแตนอาร์ค (GTAW) ในเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด AISI 316L ที่มีความหนาแตกต่างกันเพื่อดูว่าผลลัพธ์ที่ได้มีความแตกต่างกันอย่างไรบ้าง

5.3.3 ควรศึกษาการออกแบบการทดลองก่อนดำเนินการทดลอง เพื่อให้การทดลองดำเนินการไปได้ด้วยความถูกต้องสมบูรณ์และรวดเร็ว

5.3.4 ควรศึกษาและฝึกฝนวิธีการควบคุมหุ่นยนต์แขนกลก่อนดำเนินการทดลอง เพื่อจะได้ทราบถึงข้อจำกัดของหุ่นยนต์และสามารถประยุกต์การควบคุมได้

5.3.5 ศึกษาวิธีการทดสอบชิ้นงานก่อนทำการทดสอบ เพื่อให้เกิดความรวดเร็วในการใช้เครื่องมือและห้องปฏิบัติการ

บรรณานุกรม

- “การทดสอบแรงดึง”: บริษัท สหวิริยาสตีลอินดัสตรี จำกัด(มหาชน) อาคารประภาวิทย์ สุรศักดิ์ 28/1
แขวง สีลม เขตบางรัก กรุงเทพมหานคร, 2556
- ปารเมศ ชูติมา, (2545). การออกแบบการทดลองทางวิศวกรรม. กรุงเทพฯ: โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์
มหาวิทยาลัย
- ภานุพงศ์ พัฒนสิน และชาคริต ถานา ความเค้นตกค้างและความแข็งจุลภาคของรอยเชื่อมเสียดทาน
แบบกวนอลูมิเนียมต่างชนิด : ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, 2561
- วัสดุโลหะ - การทดสอบแรงดึง “มอก. 2172 เล่ม 1-2556”: สำนักงานมาตรฐาน
ผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม ถนนพระรามที่ 6 กรุงเทพมหานคร, 2556
- สรรรถติชัย ชิวสุทธิศิลป์. “กลยุทธ์การออกแบบการทดลองสำหรับวิศวกรรม”. เชียงใหม่ : บริษัทนนท
พันธ์พรีนติ้งจำกัด, 2557
- อดิเรก ใบสุคันธ์ การวิเคราะห์ระดับของความเค้นตกค้างในการเชื่อมโลหะแบบแก๊สทั้งสแตนอาร์คโดย
การวิเคราะห์แบบไฟไนต์เอลิเมนต์ : บริษัท เชียงใหม่เมคเทคซิสเต็มส์ จำกัด, 2558
- อริวัฒน์ ไตรวัฒนารณ์ การวิเคราะห์ปัจจัยในกระบวนการเชื่อมลวดทองแดง : บริษัท เคอีซี
(ประเทศไทย) จำกัด, 2553
- Milton H Hamilton, Gordon R. Sullivan. “U.S. Army Welding Manual”: Department of the
Army, Washington, DC, 1993

ภาคผนวก ก

ชั้นงานที่ขึ้นรูปสำเร็จแล้ว

ชั้นงานที่ขึ้นรูปสำเร็จแล้วชั้นงานที่ 1

ชั้นงานที่ขึ้นรูปสำเร็จแล้วชั้นงานที่ 2

ชั้นงานที่ขึ้นรูปสำเร็จแล้วชั้นงานที่ 3

ชั้นงานที่ขึ้นรูปสำเร็จแล้วชั้นงานที่ 4

ชั้นงานที่ขึ้นรูปสำเร็จแล้วชั้นงานที่ 5

ชั้นงานที่ขึ้นรูปสำเร็จแล้วชั้นงานที่ 6

ชั้นงานที่ขึ้นรูปสำเร็จแล้วชั้นงานที่ 7

ชั้นงานที่ขึ้นรูปสำเร็จแล้วชั้นงานที่ 8

ชั้นงานที่ขึ้นรูปสำเร็จแล้วชั้นงานที่ 9



ภาพ ก-1 ชิ้นงานที่ขึ้นรูปสำเร็จแล้วชิ้นงานที่ 1



ภาพ ก-2 ชิ้นงานที่ขึ้นรูปสำเร็จแล้วชิ้นงานที่ 2



ภาพ ก-3 ชิ้นงานที่ขึ้นรูปสำเร็จแล้วชิ้นงานที่ 3



ภาพ ก-4 ชิ้นงานที่ขึ้นรูปสำเร็จแล้วชิ้นงานที่ 4



ภาพ ก-5 ชิ้นงานที่ขึ้นรูปสำเร็จแล้วชิ้นงานที่ 5



ภาพ ก-6 ชิ้นงานที่ขึ้นรูปสำเร็จแล้วชิ้นงานที่ 6



ภาพ ก-7 ชิ้นงานที่ขึ้นรูปสำเร็จแล้วชิ้นงานที่ 7



ภาพ ก-8 ชิ้นงานที่ขึ้นรูปสำเร็จแล้วชิ้นงานที่ 8



ภาพ ก-9 ชิ้นงานที่ขึ้นรูปสำเร็จแล้วชิ้นงานที่ 9

ภาคผนวก ข

ชั้นงานที่ผลิตสำเร็จแล้ว

- ชั้นงานที่ผลิตสำเร็จแล้วชั้นงานที่ 1
- ชั้นงานที่ผลิตสำเร็จแล้วชั้นงานที่ 2
- ชั้นงานที่ผลิตสำเร็จแล้วชั้นงานที่ 3
- ชั้นงานที่ผลิตสำเร็จแล้วชั้นงานที่ 4
- ชั้นงานที่ผลิตสำเร็จแล้วชั้นงานที่ 5
- ชั้นงานที่ผลิตสำเร็จแล้วชั้นงานที่ 6
- ชั้นงานที่ผลิตสำเร็จแล้วชั้นงานที่ 7
- ชั้นงานที่ผลิตสำเร็จแล้วชั้นงานที่ 8
- ชั้นงานที่ผลิตสำเร็จแล้วชั้นงานที่ 9



ภาพ ข-1 ชิ้นงานที่ผลิตสำเร็จแล้วชิ้นงานที่ 1



ภาพ ข-2 ชิ้นงานที่ผลิตสำเร็จแล้วชิ้นงานที่ 2



ภาพ ข-3 ชิ้นงานที่ผลิตสำเร็จแล้วชิ้นงานที่ 3



ภาพ ข-4 ชิ้นงานที่ผลิตสำเร็จแล้วชิ้นงานที่ 4



ภาพ ข-5 ชิ้นงานที่ผลิตสำเร็จแล้วชิ้นงานที่ 5



ภาพ ข-6 ชิ้นงานที่ผลิตสำเร็จแล้วชิ้นงานที่ 6



ภาพ ข-7 ชิ้นงานที่ผลิตสำเร็จแล้วชิ้นงานที่ 7



ภาพ ข-8 ชิ้นงานที่ผลิตสำเร็จแล้วชิ้นงานที่ 8

ภาคผนวก ค

ขั้นตอนสอบที่เชื่อมแล้ว

- ขั้นตอนสอบที่เชื่อมแล้วชิ้นงานที่ 1
- ขั้นตอนสอบที่เชื่อมแล้วชิ้นงานที่ 2
- ขั้นตอนสอบที่เชื่อมแล้วชิ้นงานที่ 3
- ขั้นตอนสอบที่เชื่อมแล้วชิ้นงานที่ 4
- ขั้นตอนสอบที่เชื่อมแล้วชิ้นงานที่ 5
- ขั้นตอนสอบที่เชื่อมแล้วชิ้นงานที่ 6
- ขั้นตอนสอบที่เชื่อมแล้วชิ้นงานที่ 7
- ขั้นตอนสอบที่เชื่อมแล้วชิ้นงานที่ 8
- ขั้นตอนสอบที่เชื่อมแล้วชิ้นงานที่ 9
- ขั้นตอนสอบที่เชื่อมแล้วชิ้นงานที่ 10
- ขั้นตอนสอบที่เชื่อมแล้วชิ้นงานที่ 11
- ขั้นตอนสอบที่เชื่อมแล้วชิ้นงานที่ 12
- ขั้นตอนสอบที่เชื่อมแล้วชิ้นงานที่ 13
- ขั้นตอนสอบที่เชื่อมแล้วชิ้นงานที่ 14
- ขั้นตอนสอบที่เชื่อมแล้วชิ้นงานที่ 15
- ขั้นตอนสอบที่เชื่อมแล้วชิ้นงานที่ 16



ชั้นทดสอบที่เชื่อมแล้วชิ้นงานที่ 1



ชั้นทดสอบที่เชื่อมแล้วชิ้นงานที่ 2



ชั้นทดสอบที่เชื่อมแล้วชิ้นงานที่ 3



ชั้นทดสอบที่เชื่อมแล้วชิ้นงานที่ 4



ชั้นทดสอบที่เชื่อมแล้วชิ้นงานที่ 5



ชั้นทดสอบที่เชื่อมแล้วชิ้นงานที่ 6



ชั้นทดสอบที่เชื่อมแล้วชิ้นงานที่ 7



ชั้นทดสอบที่เชื่อมแล้วชิ้นงานที่ 8



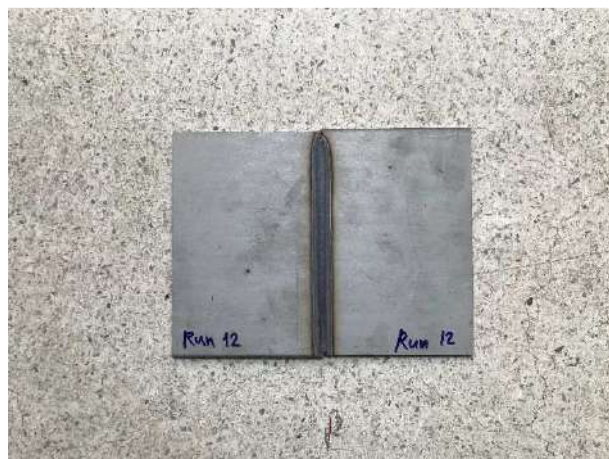
ชั้นทดสอบที่เชื่อมแล้วชิ้นงานที่ 9



ชิ้นทดสอบที่เชื่อมแล้วชิ้นงานที่ 10



ชิ้นทดสอบที่เชื่อมแล้วชิ้นงานที่ 11



ชิ้นทดสอบที่เชื่อมแล้วชิ้นงานที่ 12



ชั้นทดสอบที่เชื่อมแล้วชิ้นงานที่ 13



ชั้นทดสอบที่เชื่อมแล้วชิ้นงานที่ 14



ชั้นทดสอบที่เชื่อมแล้วชิ้นงานที่ 15



ชิ้นทดสอบที่เชื่อมแล้วชิ้นงานที่ 16

ภาคผนวก ง

ขั้นตอนสอบที่ลดรูปแล้ว

- ขั้นตอนสอบที่ลดรูปแล้วชิ้นงานที่ 1
- ขั้นตอนสอบที่ลดรูปแล้วชิ้นงานที่ 2
- ขั้นตอนสอบที่ลดรูปแล้วชิ้นงานที่ 3
- ขั้นตอนสอบที่ลดรูปแล้วชิ้นงานที่ 4
- ขั้นตอนสอบที่ลดรูปแล้วชิ้นงานที่ 5
- ขั้นตอนสอบที่ลดรูปแล้วชิ้นงานที่ 6
- ขั้นตอนสอบที่ลดรูปแล้วชิ้นงานที่ 7
- ขั้นตอนสอบที่ลดรูปแล้วชิ้นงานที่ 8
- ขั้นตอนสอบที่ลดรูปแล้วชิ้นงานที่ 9
- ขั้นตอนสอบที่ลดรูปแล้วชิ้นงานที่ 10
- ขั้นตอนสอบที่ลดรูปแล้วชิ้นงานที่ 11
- ขั้นตอนสอบที่ลดรูปแล้วชิ้นงานที่ 12
- ขั้นตอนสอบที่ลดรูปแล้วชิ้นงานที่ 13
- ขั้นตอนสอบที่ลดรูปแล้วชิ้นงานที่ 14
- ขั้นตอนสอบที่ลดรูปแล้วชิ้นงานที่ 15
- ขั้นตอนสอบที่ลดรูปแล้วชิ้นงานที่ 16
- ขั้นตอนสอบที่ลดรูปแล้วทั้งหมด



ชิ้นทดสอบที่ลดรูปแล้วชิ้นงานที่ 1



ชิ้นทดสอบที่ลดรูปแล้วชิ้นงานที่ 2



ชิ้นทดสอบที่ลดรูปแล้วชิ้นงานที่ 3



ชิ้นทดสอบที่ลดรูปแล้วชิ้นงานที่ 4



ชิ้นทดสอบที่ลดรูปแล้วชิ้นงานที่ 5



ชิ้นทดสอบที่ลดรูปแล้วชิ้นงานที่ 6



ขั้นตอนทดสอบที่ลดรูปแล้วชิ้นงานที่ 7



ขั้นตอนทดสอบที่ลดรูปแล้วชิ้นงานที่ 8



ขั้นตอนทดสอบที่ลดรูปแล้วชิ้นงานที่ 9



ชิ้นทดสอบที่ลวดรูปแล้วชิ้นงานที่ 10



ชิ้นทดสอบที่ลวดรูปแล้วชิ้นงานที่ 11



ชิ้นทดสอบที่ลวดรูปแล้วชิ้นงานที่ 12



ชิ้นทดสอบที่ลดรูปแล้วชิ้นงานที่ 13



ชิ้นทดสอบที่ลดรูปแล้วชิ้นงานที่ 14



ชิ้นทดสอบที่ลดรูปแล้วชิ้นงานที่ 15



ชิ้นทดสอบที่ลดรูปแล้วชิ้นงานที่ 16

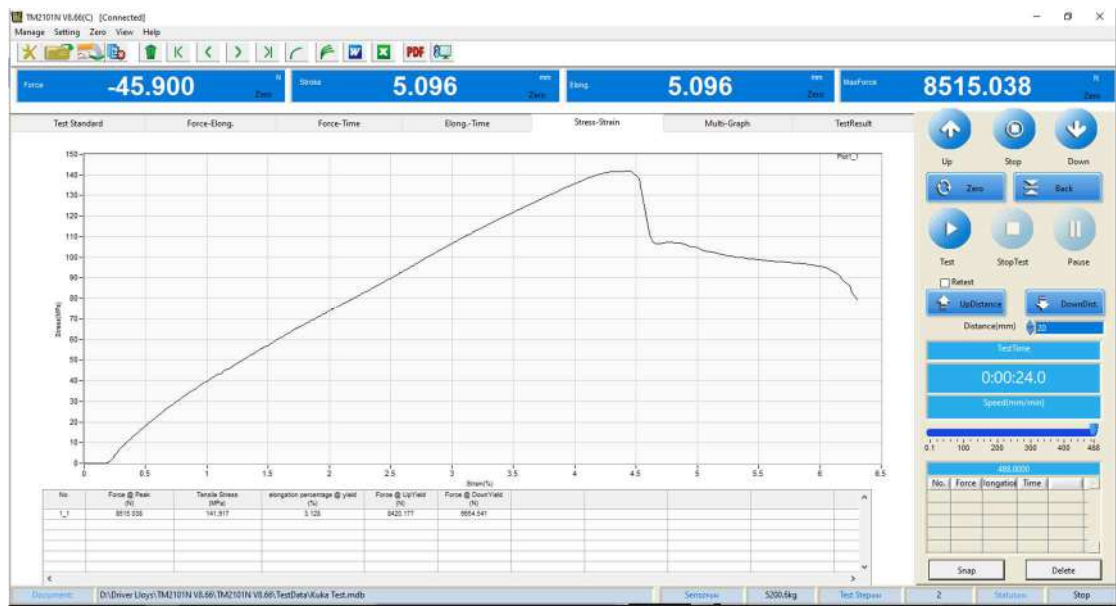


ชิ้นทดสอบที่ลดรูปแล้วทั้งหมด

ภาคผนวก จ

ผลการทดสอบแรงดึง

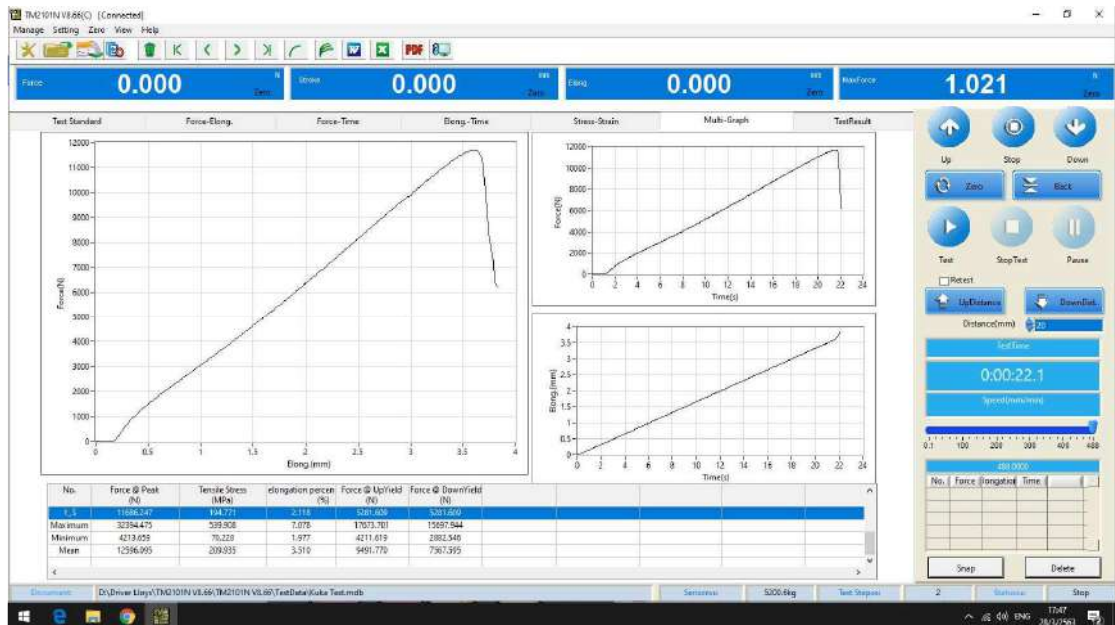
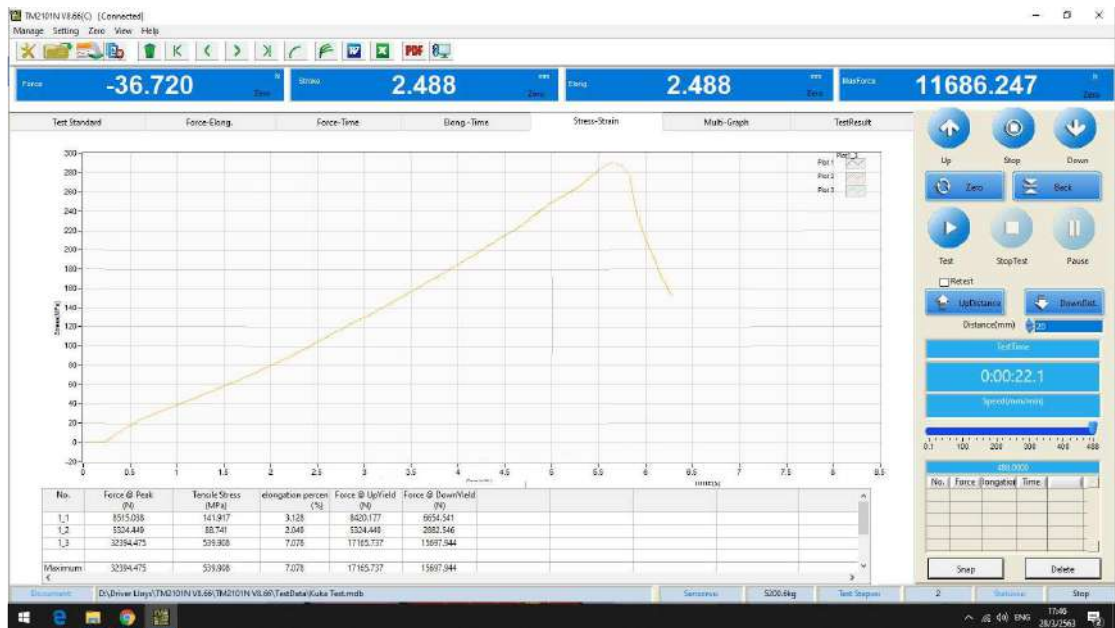
- ผลการทดสอบแรงดึงชิ้นงานที่ 1
- ผลการทดสอบแรงดึงชิ้นงานที่ 2
- ผลการทดสอบแรงดึงชิ้นงานที่ 3
- ผลการทดสอบแรงดึงชิ้นงานที่ 4
- ผลการทดสอบแรงดึงชิ้นงานที่ 5
- ผลการทดสอบแรงดึงชิ้นงานที่ 6
- ผลการทดสอบแรงดึงชิ้นงานที่ 7
- ผลการทดสอบแรงดึงชิ้นงานที่ 8
- ผลการทดสอบแรงดึงชิ้นงานที่ 9
- ผลการทดสอบแรงดึงชิ้นงานที่ 10
- ผลการทดสอบแรงดึงชิ้นงานที่ 11
- ผลการทดสอบแรงดึงชิ้นงานที่ 12
- ผลการทดสอบแรงดึงชิ้นงานที่ 13
- ผลการทดสอบแรงดึงชิ้นงานที่ 14
- ผลการทดสอบแรงดึงชิ้นงานที่ 15
- ผลการทดสอบแรงดึงชิ้นงานที่ 16



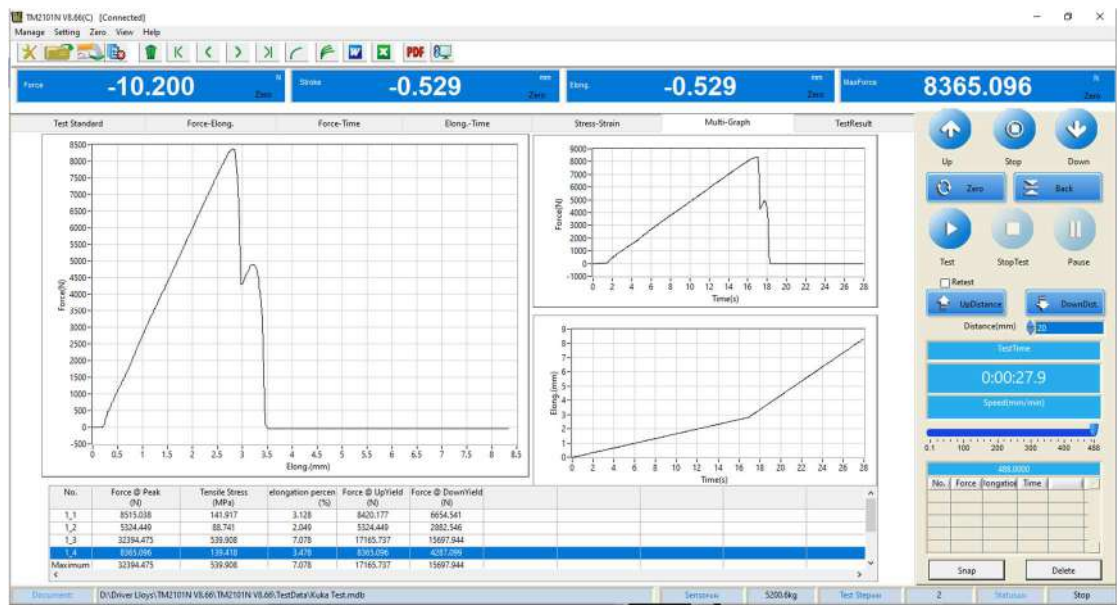
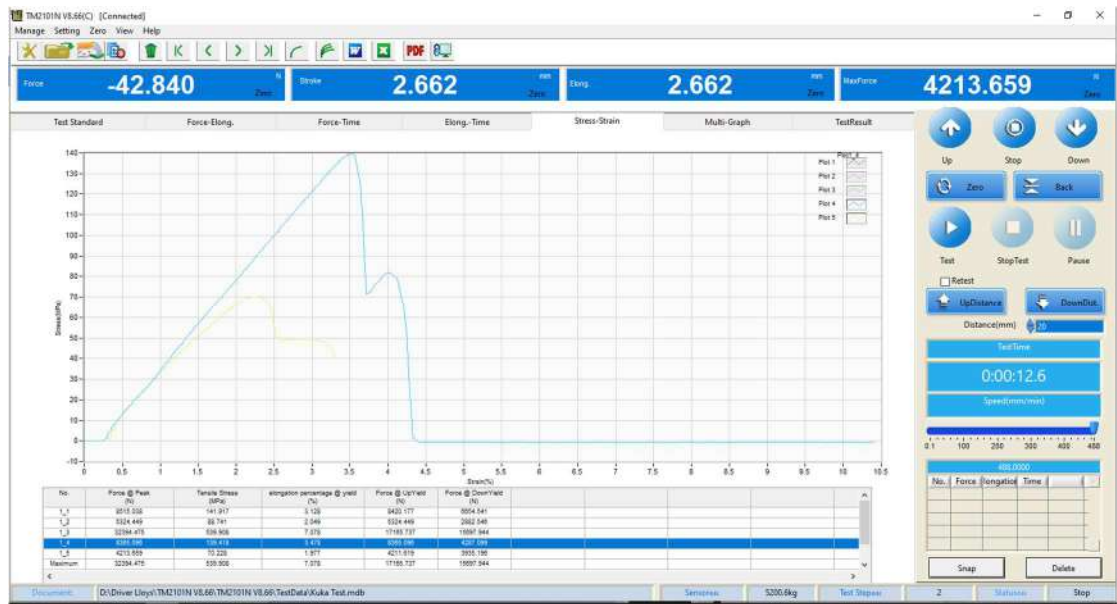
ผลการทดสอบแรงดึงชิ้นงานที่ 1



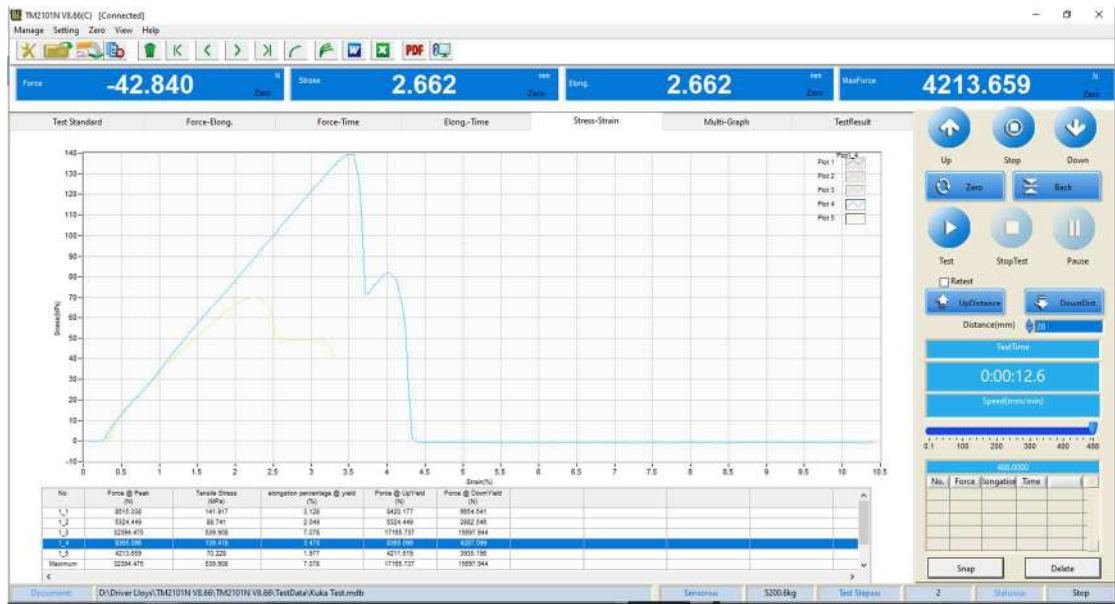
ผลการทดสอบแรงดึงชิ้นงานที่ 2



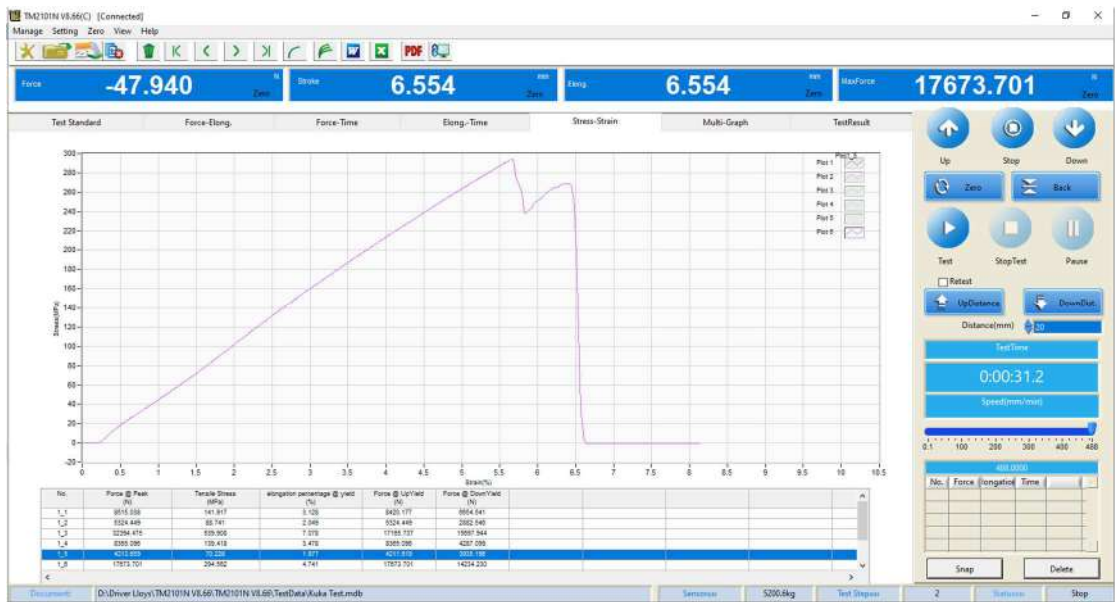
ผลการทดสอบแรงดึงชิ้นงานที่ 3



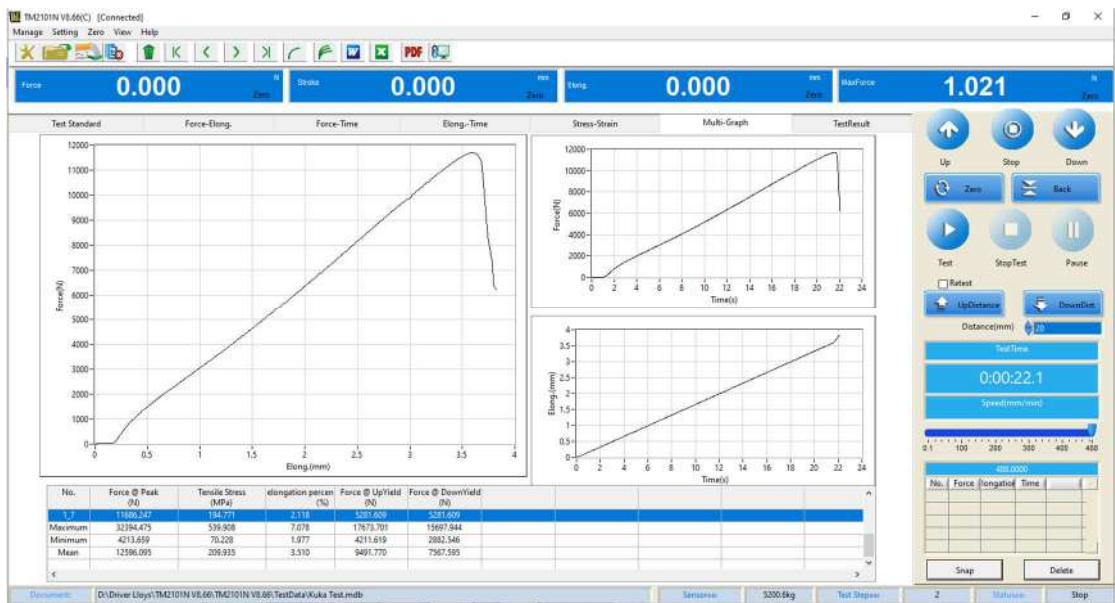
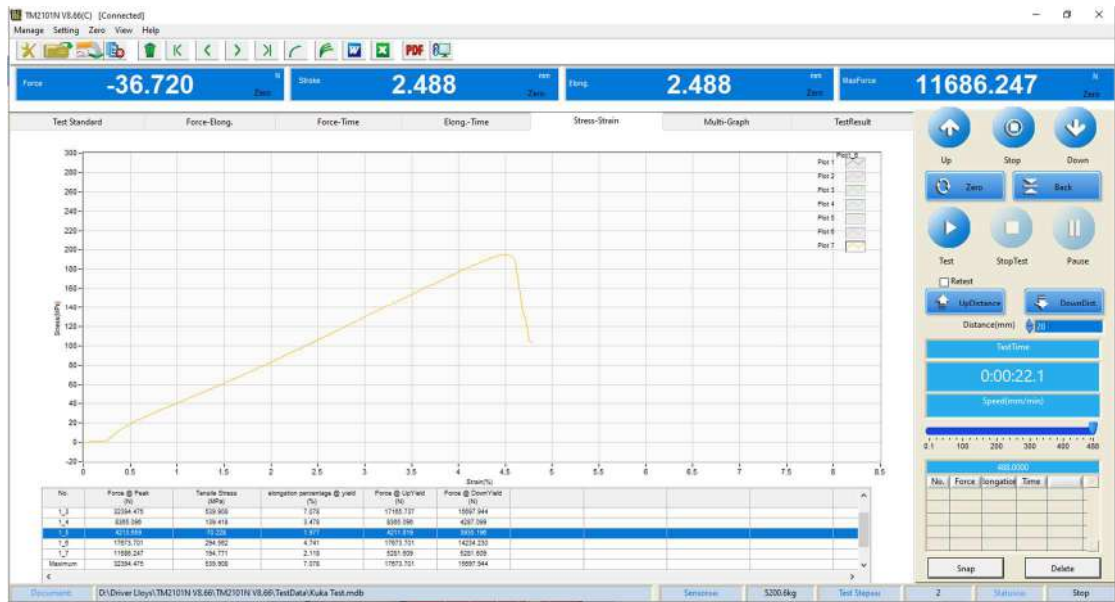
ผลการทดสอบแรงดึงชิ้นงานที่ 4



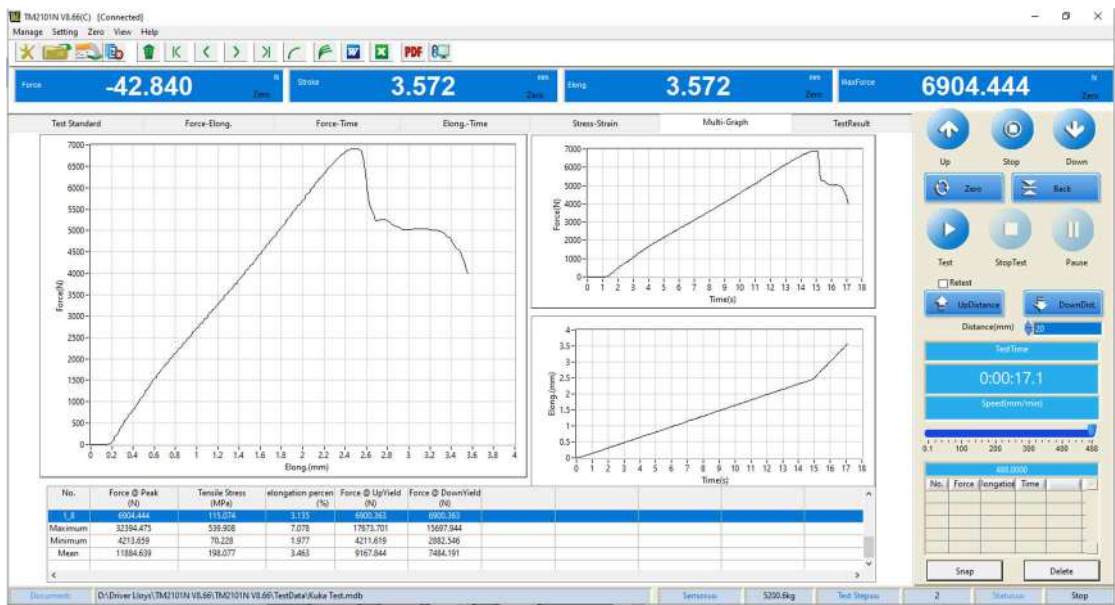
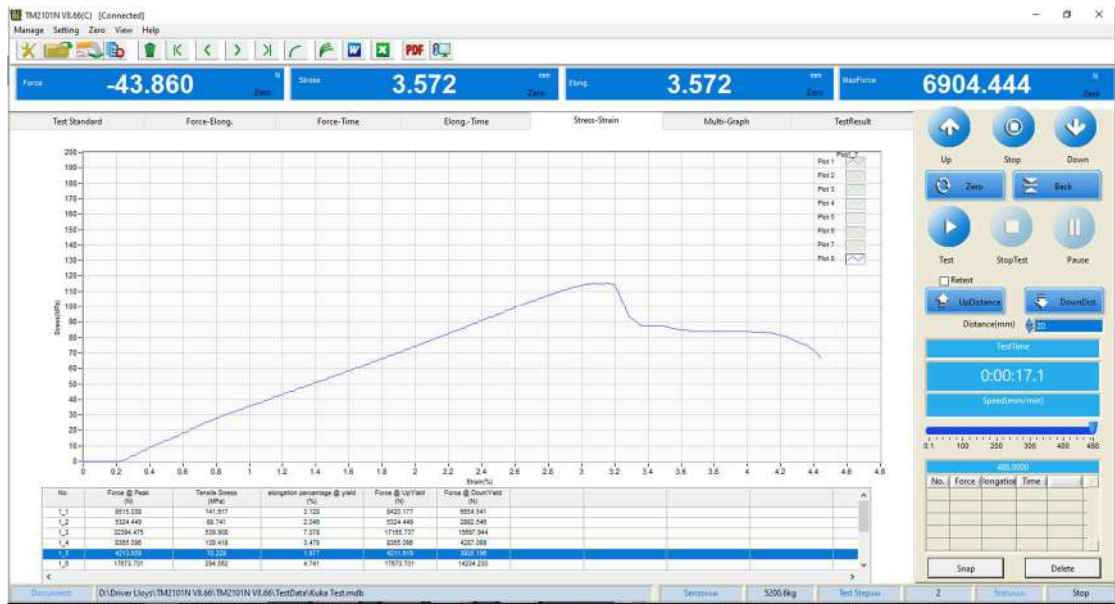
ผลการทดสอบแรงดึงชิ้นงานที่ 5



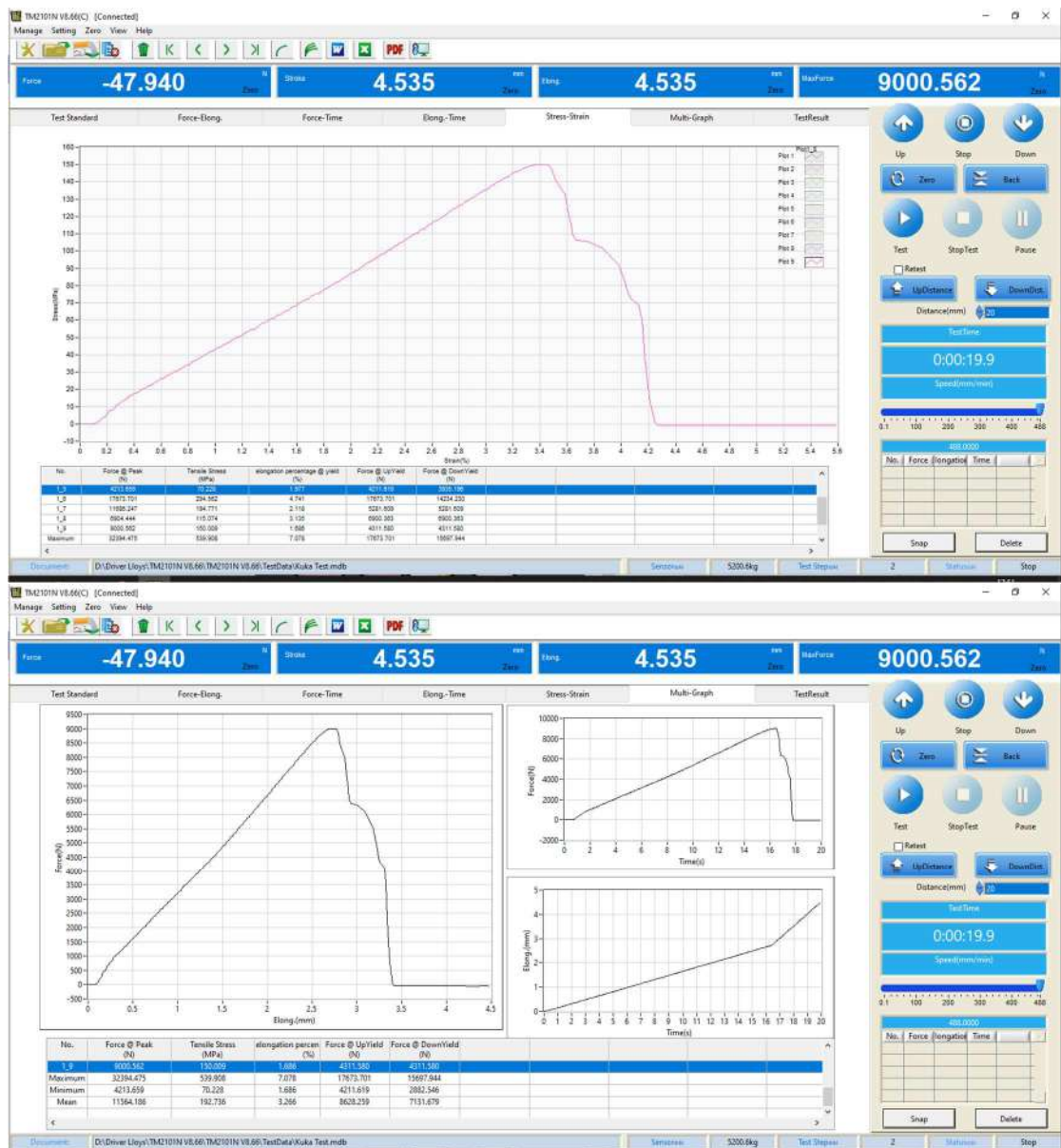
ผลการทดสอบแรงดึงชิ้นงานที่ 6



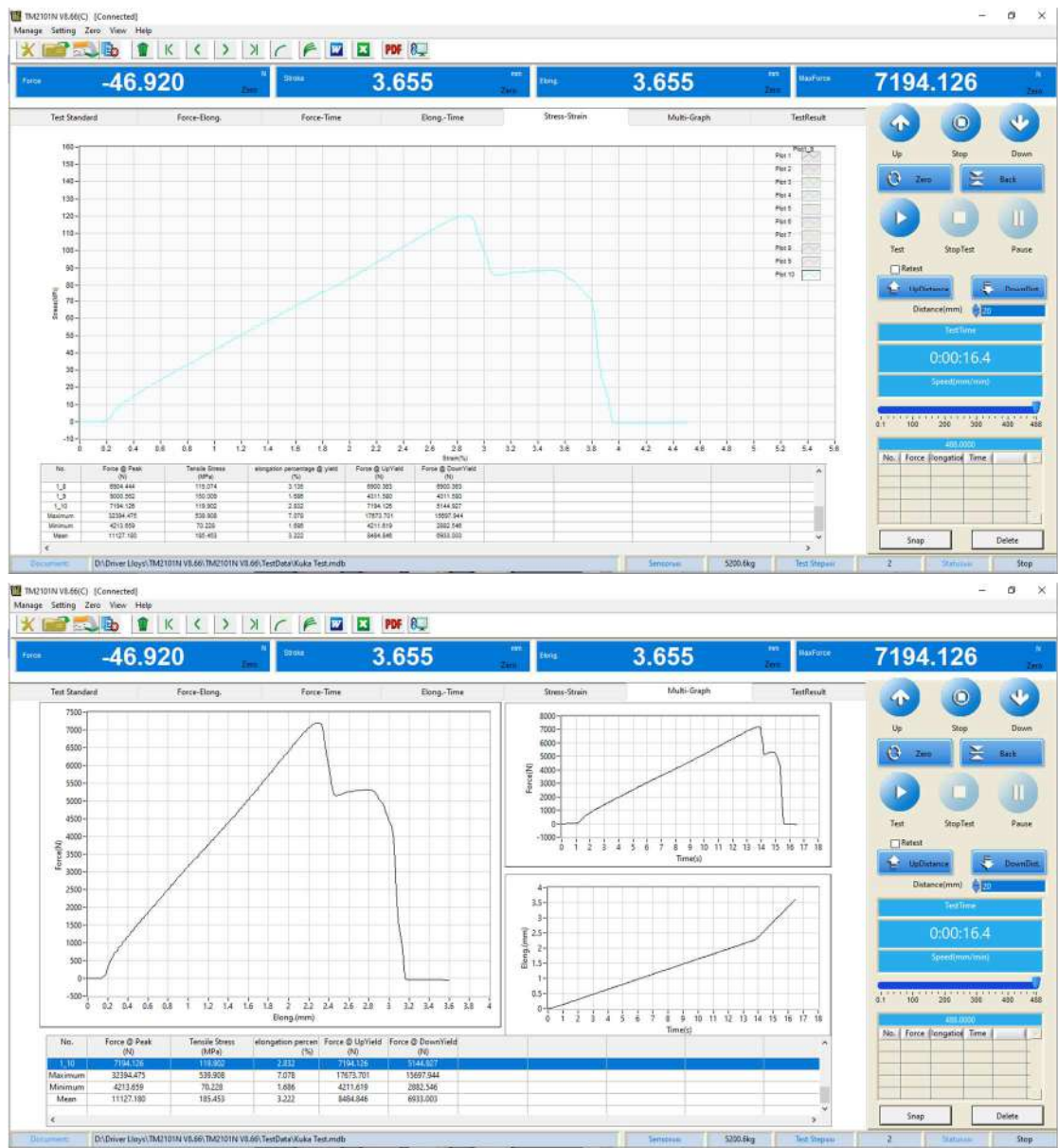
ผลการทดสอบแรงดึงชิ้นงานที่ 7



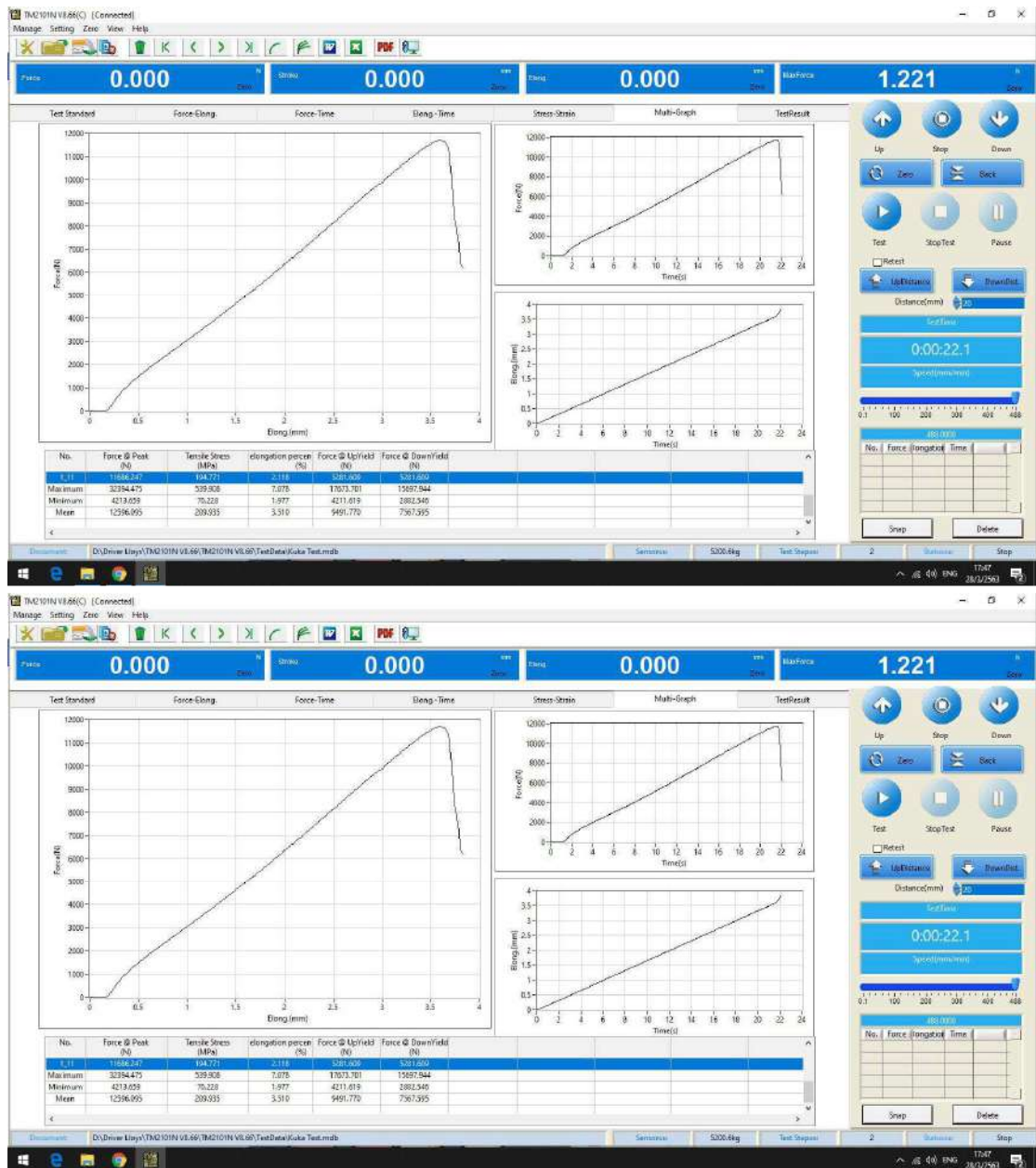
ผลการทดสอบแรงดึงชิ้นงานที่ 8



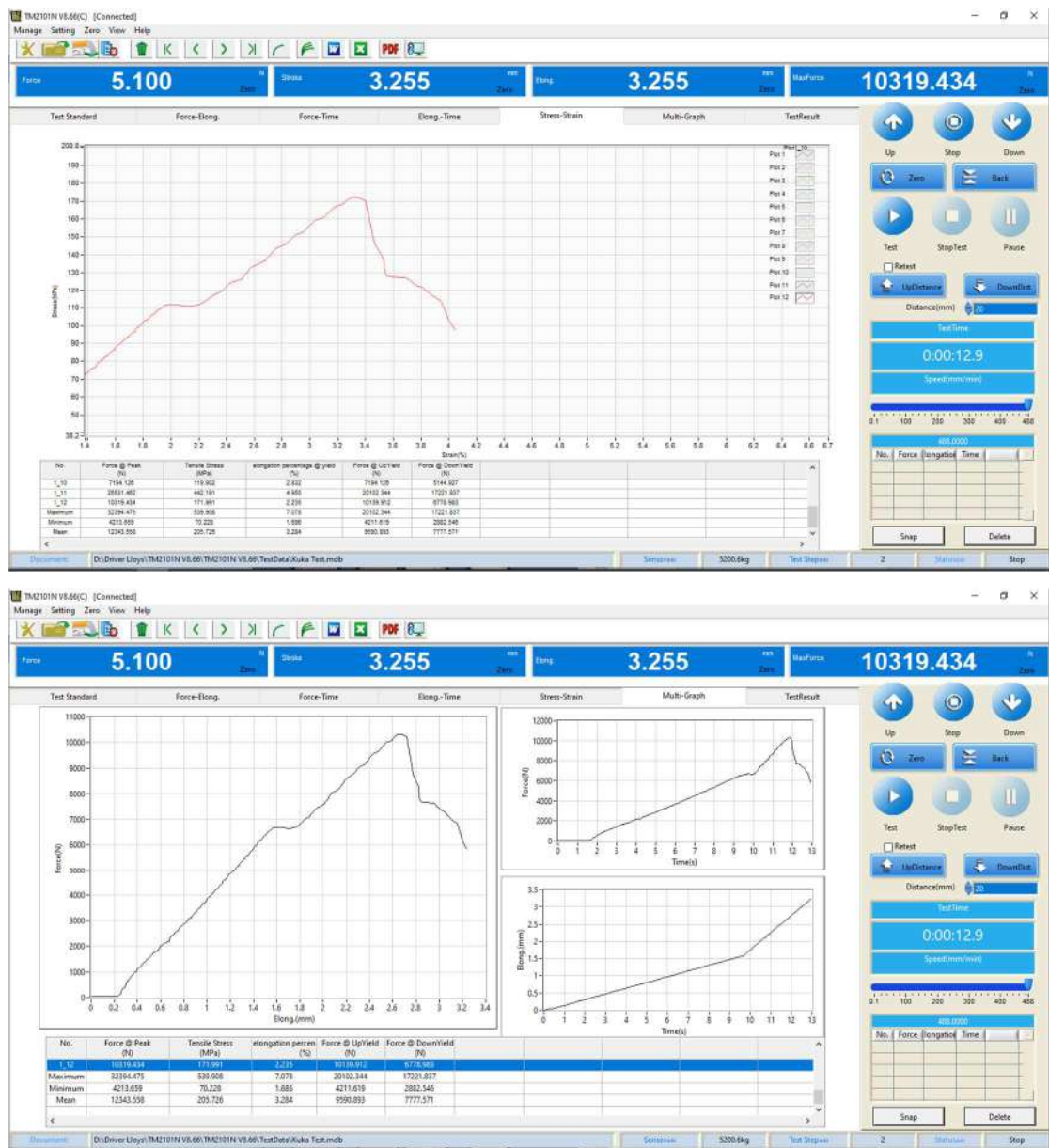
ผลการทดสอบแรงดึงชิ้นงานที่ 9



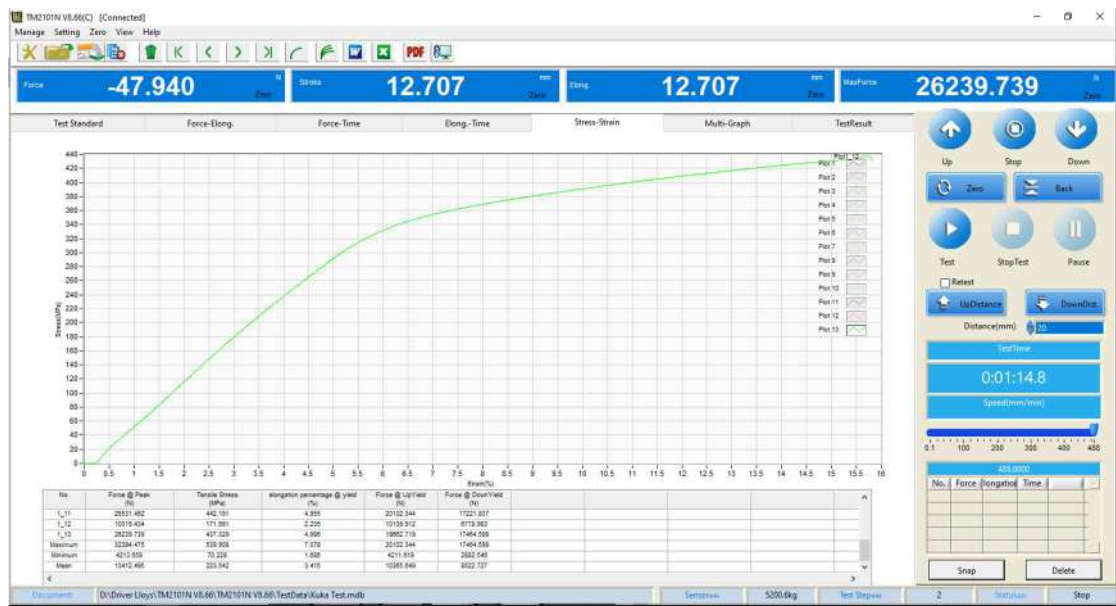
ผลการทดสอบแรงดึงชิ้นงานที่ 10



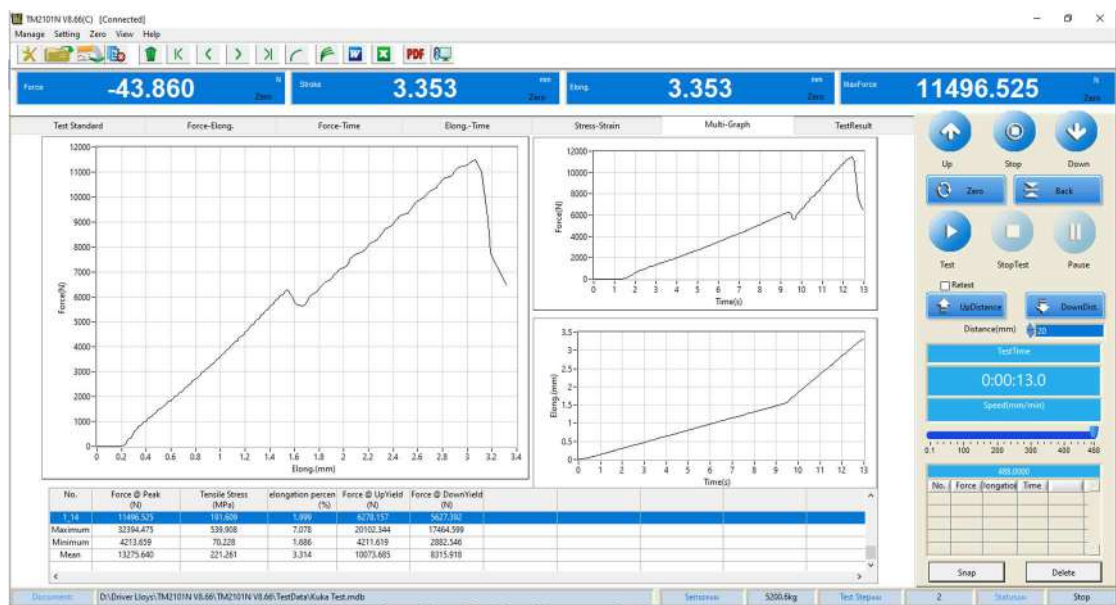
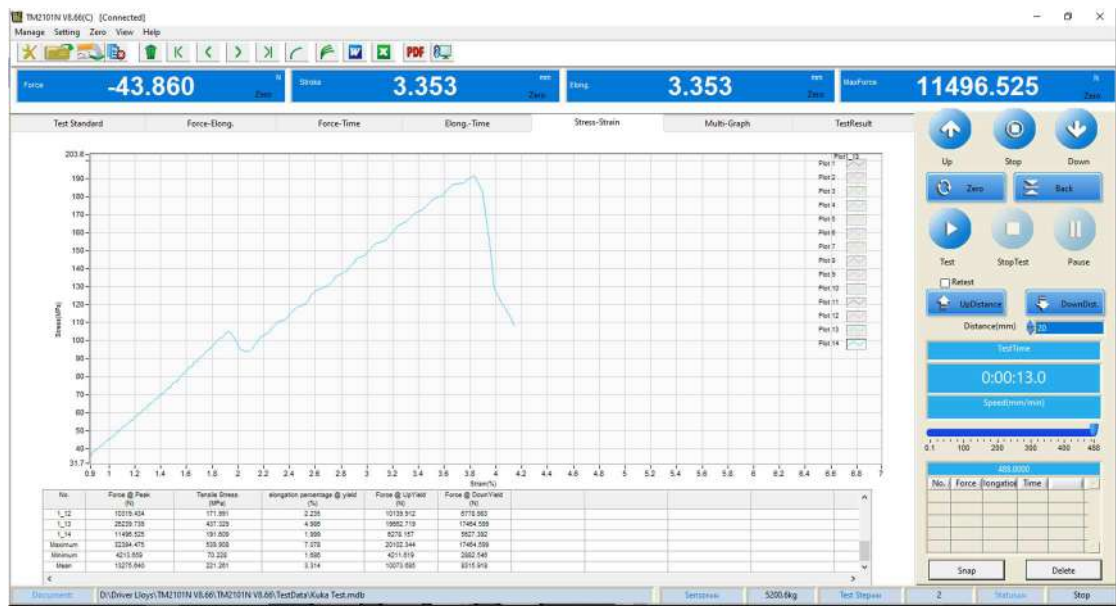
ผลการทดสอบแรงดึงชิ้นงานที่ 11



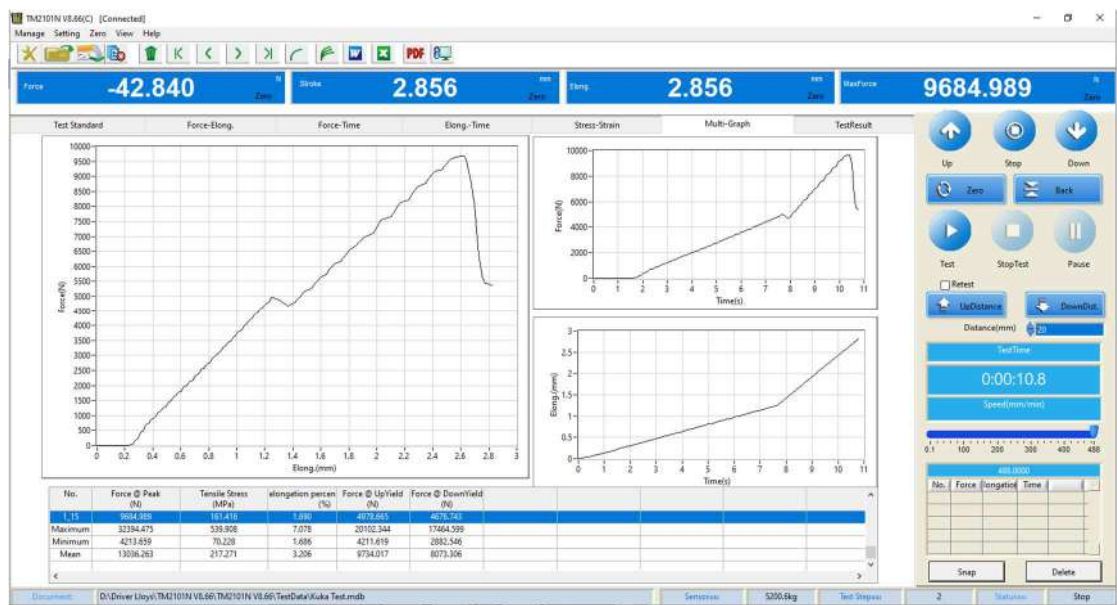
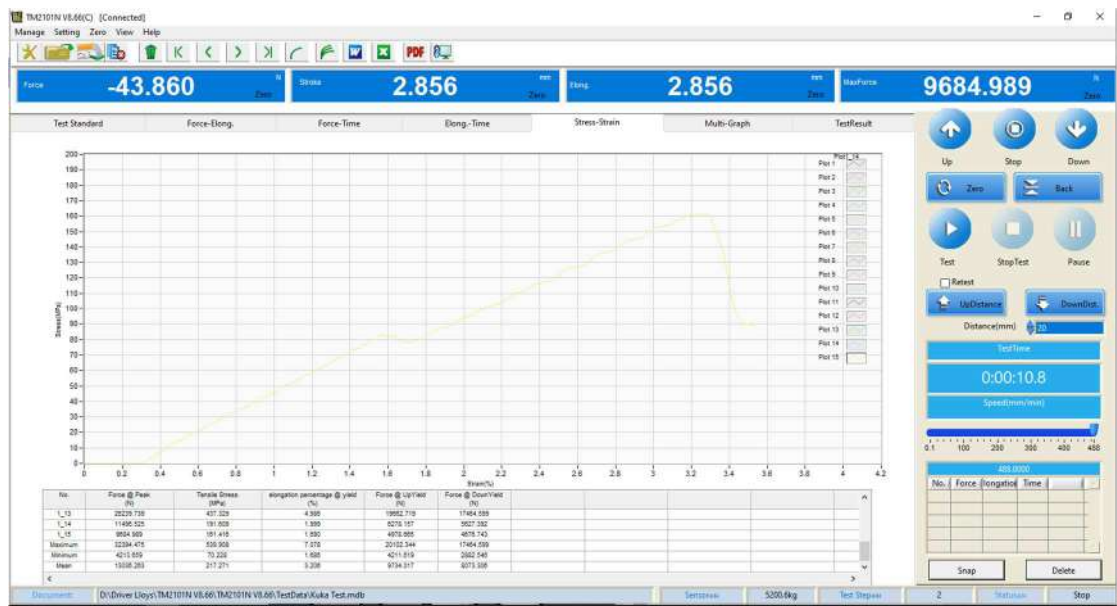
ผลการทดสอบแรงดึงชิ้นงานที่ 12



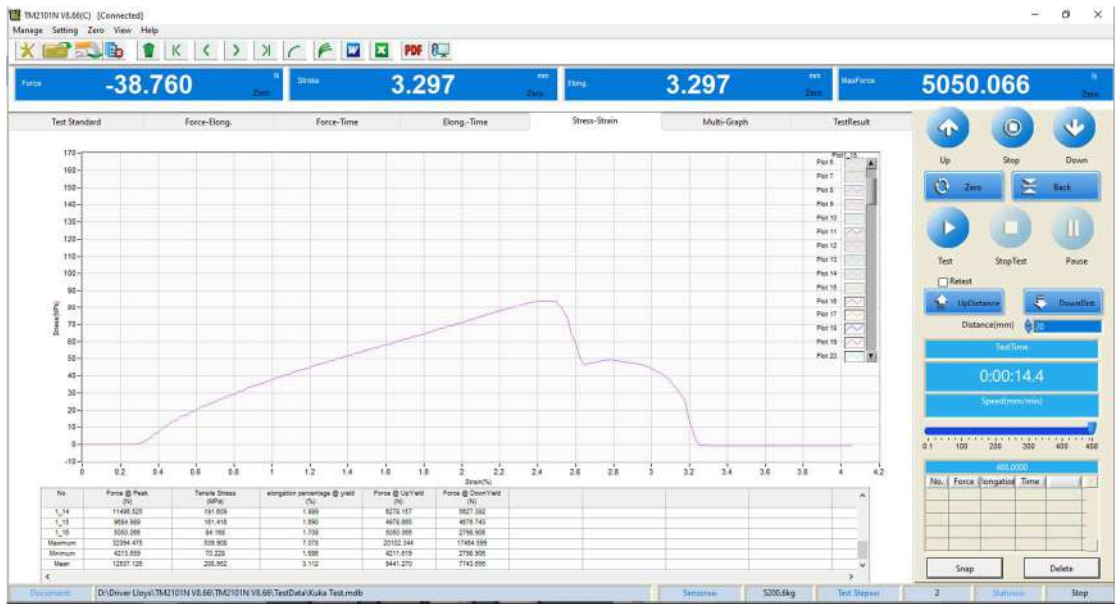
ผลการทดสอบแรงดึงชิ้นงานที่ 13



ผลการทดสอบแรงดึงชิ้นงานที่ 14



ผลการทดสอบแรงดึงชิ้นงานที่ 15



ผลการทดสอบแรงดึงชิ้นงานที่ 16

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ นาย กัญจน์สิทธิ์ โกศัย รหัสนักศึกษา 590610254

วัน เดือน ปี เกิด 12 กันยายน 2540

ภูมิลำเนา 13 หมู่ที่ 14 ต.เวียง อ.เทิง จ.เชียงราย 57160

ประวัติการศึกษา

- สำเร็จการศึกษาจากชั้นมัธยมศึกษาตอนต้นจากโรงเรียน
เทิงวิทยาคม
- สำเร็จการศึกษาจากชั้นมัธยมศึกษาตอนปลายจากโรงเรียน
สามัคคีวิทยาคม
- ปัจจุบันกำลังศึกษาอยู่ที่ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่



ชื่อ นาย ณัฐวัฒน์ อยู่อ่อน รหัสนักศึกษา 590610276

วัน เดือน ปี เกิด 12 กันยายน 2540

ภูมิลำเนา 187/78 ชนภูมิ ม.4 ต.บ้านดู่ อ.เมือง จ.เชียงราย 57100

ประวัติการศึกษา

- สำเร็จการศึกษาจากชั้นมัธยมศึกษาตอนต้นจากโรงเรียนสามัคคีวิทยาคม
- สำเร็จการศึกษาจากชั้นมัธยมศึกษาตอนปลายจากโรงเรียน
สามัคคีวิทยาคม
- ปัจจุบันกำลังศึกษาอยู่ที่ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

