

อธิบดีพัฒนาการ



คำสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อนของเหล็กชนิด SPCD
ในการอบทางความร้อนและการเชื่อมแบบมิกซ์

THERMAL EXPANSION COEFFICIENTS OF SPCD STEEL IN HEAT
TREATMENT AND MIG WELDING PROCESSES

นางสาวนฤมล ทองเมือง 56364489
นางสาวทักษิณากร จากนั้นาน 56364588
นางสาวลักขิกา อยู่ขนาด 56364618

สำนักหอสมุด มหาวิทยาลัยนเรศวร
วันลงทะเบียน 02 ก.พ. 2561
เลขทะเบียน 17222415
เลขเรียกหนังสือ ป6

น ๒๗๖ ค
๒๕๕๙

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมวัสดุ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร
ปีการศึกษา 2559




ใบรับรองปริญญาานิพนธ์

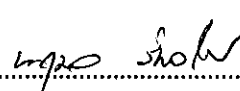
ชื่อหัวข้อโครงการ คำสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อนของเหล็กชนิด SPCD
ในการอบทางความร้อนและการเชื่อมแบบมิกซ์


ผู้ดำเนินโครงการ นางสาวนฤมล ทองเมือง รหัสสนิสิต 56364489
นางสาวทักษิณามร จากน่าน รหัสสนิสิต 56364588
นางสาวลักขิกา อยู่นาค รหัสสนิสิต 56364618

ที่ปรึกษาโครงการ ดร.ชูลีพรย์ ป่าไร่
สาขาวิชา วิศวกรรมวัสดุ
ภาควิชา วิศวกรรมอุตสาหการ
ปีการศึกษา 2559

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร อนุมัติให้ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมวัสดุ


.....ที่ปรึกษาโครงการ
(ดร.ชูลีพรย์ ป่าไร่)


.....กรรมการ
(ดร.นฤมล สีพลไกร)


.....กรรมการ
(อาจารย์กฤษณา พูลสวัสดิ์)

ชื่อหัวข้อโครงการ	ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อนของเหล็กชนิด SPCD ในการอบทางความร้อนและการเชื่อมแบบมิกซ์		
ผู้ดำเนินโครงการ	นางสาวนฤมล	ทองเมือง	รหัสบัณฑิต 56364489
	นางสาวทักษิณา	จากน่าน	รหัสบัณฑิต 56364588
	นางสาวลักชิกา	อยู่นาค	รหัสบัณฑิต 56364618
ที่ปรึกษาโครงการ	ดร.ชูลีพรย์	ป่าไร่	
สาขาวิชา	วิศวกรรมวัสดุ		
ภาควิชา	วิศวกรรมอุตสาหการ		
ปีการศึกษา	2559		

บทคัดย่อ

โครงการวิจัยได้ทำการศึกษาค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อนของเหล็กชนิด SPCD ที่ผ่านการเชื่อมมิกซ์ (MIG) และการอบที่ 1200 องศาเซลเซียส และปล่อยให้เย็นตัวในอากาศ เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อนด้วยวิธีการให้ความร้อนที่ต่างกัน จากนั้นทำการวัดค่าความยาวที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่ออุณหภูมิลดลงทุกๆ 15 องศาเซลเซียส และวิเคราะห์ความเหมาะสมของสมการเส้นตรงที่ได้จากข้อมูลการทดลอง พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อนของเหล็กชนิด SPCD ที่ผ่านการเชื่อมมิกซ์ (MIG) (α) มีค่าเท่ากับ $0.0002 \text{ (}^\circ\text{C)}^{-1}$ ซึ่งสามารถหาได้จากสมการในรูปแบบเชิงเส้น และค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อนของเหล็กชนิด SPCD ที่ผ่านการอบ (α_1) มีค่าเท่ากับ $0.00002 \text{ (}^\circ\text{C)}^{-1}$ ซึ่งหาได้จากสมการในรูปแบบไม่เชิงเส้น จากผลการทดลองทำให้ทราบว่าวิธีการให้ความร้อนมีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อนของเหล็กชนิด SPCD

Project title Thermal expansion coefficients of SPCD steel in heat treatment and mig welding processes

Name Ms. Naruemon Thongmueang ID. 56364489
Ms.Thaksinaporn Jaknan ID. 56364588
Ms. Laksika Yunak ID. 56364618

Project advisor Dr. Chuleeporn Paa-rai

Major Materials Engineering

Department Industrial engineering

Academic year 2015

.....

Abstract

The present study aims to determine the values of thermal expansion coefficient of welded SPCD steels and heat treated SPCD steels. Metal inert gas (MIG) welding was applied here and the steels were heat treated at 1200 °C followed by air cooling in order to provide different heating rate. The samples were measured the length at every 15 °C cooling temperature. The data of the length change and temperatures will then be analysed using linear regression. The results shows that the data of welded SPCD steels are linear relationship and provide the value of thermal expansion coefficient (α) as $0.0002 \text{ (}^\circ\text{C)}^{-1}$ On the other hand, the heat treated SPCD steels data are non-linear relationship and present the thermal expansion coefficient (α_1) of $0.00002 \text{ (}^\circ\text{C)}^{-1}$ This can be summarised that the difference in heating rate affects the value of thermal expansion expansion coefficient.

กิตติกรรมประกาศ

ในการทำโครงการวิจัยนี้ผู้เขียนขอขอบพระคุณอาจารย์ชูลีพรย์ ป่าไร่ ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาในโครงการในการให้ความรู้คำปรึกษาข้อแนะนำ เกี่ยวกับการค้นหาข้อมูลในการวิเคราะห์ข้อมูลต่างๆ และความช่วยเหลือทางด้านต่างๆตลอดจนแนะนำวิธีการในการแก้ไขปัญหา และให้กำลังใจในการทำงานตลอดมาจนสามารถทำงานลุล่วงไปได้ด้วยดี ผู้จัดทำขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอบพระคุณอาจารย์กฤษณาพูลสวัสดิ์และ อาจารย์นฤมล สีพลไกรที่กรุณาเสียสละเวลามาเป็นอาจารย์สอนโครงการพร้อมทั้งให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์และข้อเสนอแนะในการปรับปรุงแก้ไขโครงการนี้

ขอบพระคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยนเรศวรที่เป็นสถานที่ในการศึกษาหาความรู้ให้กับผู้ทำโครงการจนงานลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณอาคารปฏิบัติการอุตสาหกรรมและคณะวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยนเรศวรที่เป็นสถานที่ในการใช้เตาอบโลหะ และเครื่องมือต่างๆภายในอาคารจนงานเสร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณอาคารปฏิบัติการแผนกช่างเชื่อมโลหะและวิทยาลัยเทคนิคพิษณุโลก ที่เป็นสถานที่ในการใช้เครื่องเชื่อมมิคซ์และเครื่องมือต่างๆภายในอาคารจนงานเสร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณบริษัท ไทยรุ่งยูเนี่ยนคาร์ จำกัด (มหาชน) ที่ได้สนับสนุนวัสดุมาทำการทดลองจนงานเสร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอบพระคุณบิดามารดาและครอบครัวที่คอยสนับสนุนในเรื่องค่าใช้จ่ายและกำลังใจจนสามารถศึกษาทำโครงการวิจัยเล่มนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณพี่เพื่อนและน้องทุกคนที่คอยช่วยเหลือและให้กำลังใจในการทำงานนี้จนสำเร็จไปได้ด้วยดี

ขอขอบคุณนางสาวปาริฉัตร ป้อมไยที่คอยช่วยเหลือคำปรึกษาข้อแนะนำ เกี่ยวกับการค้นหาข้อมูลต่างๆและให้กำลังใจในการทำงานนี้จนสำเร็จไปได้ด้วยดี

คณะผู้จัดทำ

นางสาวนฤมล	ทองเมือง
นางสาวทักษิณากร	จากน่าน
นางสาวลักขิกา	อยู่นาค

สารบัญ

เรื่อง	หน้า
ใบรับรองปริญญาโท.....	ก
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญรูป.....	ช
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมา และความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ.....	1
1.3 เกณฑ์ชี้วัดผลงาน (Outputs).....	1
1.4 เกณฑ์ชี้วัดความสำเร็จ (Outcomes).....	2
1.5 ขอบเขตการดำเนินงานวิจัย.....	2
1.6 สถานที่ในการดำเนินงานวิจัย.....	2
1.7 ระยะเวลาในการดำเนินงานวิจัย.....	2
1.8 แผนการดำเนินโครงการ.....	3
บทที่ 2 หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 เหล็กกล้าคาร์บอน.....	4
2.2 สมบัติทางความร้อนของโลหะ.....	11
2.3 กระบวนการเชื่อมมิก (Mig welding).....	15
2.4 การเลือกเส้นกราฟที่เหมาะสมกับข้อมูล(Curve Fitting).....	21
2.5 การวิเคราะห์สมการถดถอย (Regression Analysis).....	22
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	27

สารบัญ (ต่อ)

เรื่อง	หน้า
บทที่ 3 วิธีดำเนินงานโครงการ.....	29
3.1 วัสดุและอุปกรณ์.....	30
3.2 การหาค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงเส้นเนื่องจากความร้อนจากชิ้นงาน ที่ผ่านการเชื่อม Mig (CO ₂).....	30
3.3 การหาค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงเส้นเนื่องจากความร้อนโดยการอบ.....	31
3.4 วิเคราะห์ผลการทดลอง.....	31
3.5 การจัดทำรูปเล่มรายงาน.....	32
บทที่ 4 ผลการทดลอง และการวิเคราะห์.....	33
4.1 การวิเคราะห์หาค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงเส้นเนื่องจากความร้อน จากการเชื่อม (MIG).....	33
4.2 การวิเคราะห์หาค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงเส้นเนื่องจากความร้อน จากการอบ.....	36
4.3 เปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์ของผลทดลองจากการเชื่อมมิกซ์(MIG)กับการอบ.....	39
บทที่ 5 บทสรุป และข้อเสนอแนะ.....	40
5.1 ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงเส้นเนื่องจากความร้อน.....	40
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	40
5.3 ปัญหาที่พบ และแนวทางการแก้ไขปัญหา.....	41
เอกสารอ้างอิง.....	42
ภาคผนวก ก.....	44

สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
1.1 แผนการดำเนินโครงการ.....	3
2.1 ส่วนผสมธาตุในเกรดเหล็กรีดร้อนและรีดเย็นมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (สมอ.) มอก. 2512- 2543ภายใต้มาตรฐาน JIS G 3141.....	7
3.1 องค์ประกอบทางเคมีของเหล็กกระบวนการขึ้นรูปและขนาด.....	30
4.1 ค่าความยาวที่เปลี่ยนแปลงไปของเหล็กชนิด SPCD ที่ผ่านจากการเชื่อมมิกซ์ (MIG)เมื่อ อุณหภูมิลดลงทุกๆ 15 องศาเซลเซียส.....	33
4.2 ค่าความยาวที่เปลี่ยนแปลงไปของเหล็กชนิด SPCD ที่ผ่านการอบเมื่ออุณหภูมิลดลงทุกๆ 15 องศาเซลเซียส.....	35
4.3 ข้อมูลต่างๆ ที่ได้จากการทดลองเชื่อมมิกซ์ (MIG)ในการนำมาวิเคราะห์หาความเหมาะสม ของสมการ.....	37
4.4 ข้อมูลต่างๆ ที่ได้จากการทดลองอบในการนำมาวิเคราะห์หาความเหมาะสมของสมการ.....	38

สารบัญรูป

รูป	หน้า
2.1 การขยายตัวตามอุณหภูมิสำหรับของแข็งแบบไอโซโทรปิก.....	12
2.2 แสดงความยาวของแท่งวัตถุเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลง.....	13
2.3 กระบวนการเชื่อมมิก (Mig Welding).....	15
2.4 อุปกรณ์เครื่องเชื่อมมิก (Mig welding).....	16
2.5 แสดงตำแหน่งท่าเชื่อมมาตรฐาน.....	19
2.6 ความร้อนที่ส่งผลต่อบริเวณแนวเชื่อม.....	20
2.7 กราฟของเทคนิคการ Interpolation.....	21
2.8 กราฟของเทคนิค Least Square Regression.....	22
2.9 การกระจายของข้อมูลและเส้นกราฟถดถอย.....	23
2.10 กราฟสมการเส้นตรงของการถดถอย.....	24
2.11 สมการเส้นตรงของการถดถอยเมื่อ b มีค่าแตกต่างกัน.....	25
3.1 แสดงขั้นตอนการดำเนินงาน.....	29
3.2 ความยาว (L) ที่เปลี่ยนไปของตัวอย่างชิ้นงานที่ฟังก์ชันอุณหภูมิ (T).....	32
4.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ค่าเฉลี่ยที่เปลี่ยนแปลงไปกับอุณหภูมิที่ลดลงทุกๆ 15 องศาเซลเซียส ของเหล็ก SPCD ผ่านการเชื่อมมิกซ์(MIG).....	34
4.2 กราฟมาตรฐานของข้อมูลการเชื่อมมิกซ์(MIG).....	35
4.3 เปรียบเทียบการแสดงความสัมพันธ์ค่าความยาวเฉลี่ยที่เปลี่ยนแปลงไปกับอุณหภูมิที่ลดลงทุกๆ 15 องศาเซลเซียสของเหล็กชนิด SPCD ที่ผ่านการเชื่อมมิกซ์ (MIG)และที่ผ่านการอบ.....	37
4.4 กราฟมาตรฐานของข้อมูลการอบ.....	38
4.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความยาวเฉลี่ยที่เปลี่ยนแปลงไปกับอุณหภูมิที่ลดลงทุกๆ 15 องศาเซลเซียส ของเหล็กชนิด SPCD ที่ผ่านการอบ.....	39

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

ในปัจจุบันเหล็กมีบทบาทอย่างมากในอุตสาหกรรมและมีแนวโน้มการใช้งานเพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่องทั้งนี้เพราะเหล็กมีคุณสมบัติเด่นหลายประการ เช่น ความสามารถในการหล่อ (Castability) ความแข็ง (Hardness) ความแข็งแรง (Strength) และความสามารถในการเชื่อม (Weldability) เป็นต้น เหล็กจึงเป็นที่รู้จักและใช้ในงานด้านอุตสาหกรรมยานยนต์อย่างแพร่หลาย เช่น ผลิตเป็น ถังน้ำมัน หลังคารถ แผงข้างตัวรถ ประตู เป็นต้น

เหล็กชนิด SPCD เป็นเหล็กกลุ่มหนึ่งที่ถูกใช้ในการผลิตชิ้นส่วนรถยนต์ กระบวนการผลิตชิ้นส่วนดังกล่าวจำเป็นต้องมีการเชื่อม ด้วยวิธีเชื่อม เช่น การเชื่อมแบบ Metal Inert Gas (MIG) หรือ MIG(CO₂) เป็นต้น ความร้อนจากแนวเชื่อมแพร่ไปยังบริเวณเนื้อของเหล็กที่อยู่ใกล้เคียงบริเวณแนวเชื่อม ส่งผลให้เกิดการเสียรูปร่างของเหล็กเกิดความเสียหายแก่ชิ้นงานไม่สามารถนำไปใช้งานได้ ต้องมีการนำเหล็กมาปรับปรุงแก้ไขหรือมีการผลิตชิ้นงานขึ้นมาใหม่ จึงมีความเสียหายด้านต้นทุน เวลา อาจมีการจ่ายค่าเพื่อชดเชยความเสียหายให้แก่ลูกค้า

การขยายตัวของชิ้นงานสามารถคำนวณได้ หากทราบค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อนของชิ้นงาน ซึ่งสามารถใช้เป็นข้อมูลช่วยในการแก้ไขปัญหาที่กล่าวมาได้ ในการศึกษาครั้งนี้ จึงมีความสนใจที่จะตรวจวัดค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อนเมื่อเหล็กชนิด SPCD ได้รับความร้อนจากการอบ และการเชื่อมแบบ MIG

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

1.2.2 หาค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อน (Coefficient of thermal expansion – COE)

1.2.2 เพื่อศึกษาผลของวิธีการให้ความร้อนที่มีต่อค่า COE

1.2.3 เพื่อวิเคราะห์ความเหมาะสมของสมการเส้นตรงกับข้อมูลจากการทดลอง

1.3 เกณฑ์ชี้วัดผลงาน

1.3.1 ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อนของเหล็กชนิด SPCD

1.3.2 ผลของวิธีการให้ความร้อนที่มีต่อค่า COE (Coefficient of thermal expansion)

1.3.3 ผลของการวิเคราะห์ชุดข้อมูลให้เหมาะสมกับสมการ

1.4 เกณฑ์ชี้วัดผลสำเร็จ

1.4.1 ทราบค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อน ซึ่งสามารถใช้ในการคำนวณหาการขยายตัวของเหล็กเนื่องจากความร้อน

1.4.2 สามารถวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างวิธีการให้ความร้อนที่แตกต่างกัน และค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อน

1.4.3 สามารถวิเคราะห์ชุดข้อมูลที่ได้ให้เหมาะสมกับสมการ

1.5 ขอบเขตในการดำเนินงานวิจัย

1.5.1 ชิ้นงานที่ใช้ในการทดลองเป็นเหล็ก SPCD ขนาด 100 มิลลิเมตร *100 มิลลิเมตรและมีความหนา 1.4 มิลลิเมตร

1.5.2 กระบวนการอบทางความร้อนที่ใช้ในการหาค่า COE นำชิ้นงานไปอบในเตาที่อุณหภูมิ 1200 องศาเซลเซียสเวลา 1 ชั่วโมง และเชื่อมที่อุณหภูมิ 3100 องศาเซลเซียส และให้ชิ้นงานเย็นตัวในอากาศ

1.5.3 กระบวนการเชื่อมที่ใช้หาค่า COE ใช้การเชื่อมแบบ MIG(CO₂) โดยกำหนด

- ลวดเชื่อม ER 80 S - B2 ขนาด 0.8 มิลลิเมตร
- เครื่องเชื่อมด้วยวิธี MIG (CO₂) รุ่น Miller CP 300
- แรงดันไฟฟ้า 16 - 20 โวลต์
- ค่าความเร็วในการป้อนลวดเชื่อม 100 - 200 รอบ/นาที
- ค่าแรงดันการไหลของแก๊สปกคลุม 2 - 5 บาร์
- ขนาดแนวเชื่อม 3 มิลลิเมตร และความยาวของการเชื่อม 100 มิลลิเมตร

1.5.4 ทำการวัดขนาดชิ้นงานในระหว่างการเย็นตัวทุกๆ 15 องศาเซลเซียส

1.6 สถานที่ในการดำเนินการวิจัย

1.6.1 วิทยาลัยเทคนิคพิษณุโลก

1.6.2 ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

1.7 ระยะเวลาในการดำเนินการวิจัย

- วันที่ 8 สิงหาคม 2559 ถึงวันที่ 30 พฤษภาคม 2560

บทที่ 2

หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ยานยนต์ 1 คัน ประกอบด้วยชิ้นส่วน 20,000 - 30,000 ชิ้น ชิ้นส่วนยานยนต์รวมถึงวัสดุอุปกรณ์หลักที่ใช้ในการประกอบยานยนต์แบ่งได้เป็น 3 กลุ่มหลักคือ ชิ้นส่วนที่เป็นเหล็ก (Cast Iron Engine Parts) เช่น Cylinder blocks ชิ้นส่วนที่เป็นเหล็กกล้า เช่น Chassis Frames Wheel Parts และชิ้นส่วนที่เป็นโลหะพิเศษ โดยเหล็กและเหล็กกล้าซึ่งเป็นวัตถุดิบที่สำคัญในการผลิตชิ้นส่วนยานยนต์คือ เหล็กที่มีรูปทรงแบน เช่น เหล็กแผ่นรีดร้อน เหล็กแผ่นรีดเย็นและเหล็กแผ่นเคลือบ เป็นต้น (สถาบันยานยนต์, 2557)

2.1 เหล็กกล้าคาร์บอน

เหล็กกล้า (steel) คือโลหะผสมชนิดหนึ่งโดยทั่วไปเหล็กกล้าหมายถึง เหล็กกล้าคาร์บอน (carbon steel) ซึ่งประกอบด้วยธาตุหลักๆ คือ เหล็ก Fe คาร์บอน (C) แมงกานีส (Mn) ซิลิคอน (Si) และธาตุอื่นๆ อีกเล็กน้อยเหล็กกล้าเป็นวัสดุโลหะที่ไม่ได้มีอยู่ตามธรรมชาติแต่ถูกผลิตขึ้นโดยฝีมือมนุษย์และเครื่องจักรโดยตั้งอยู่บนพื้นฐานของการปรับปรุงเหล็ก (Fe หรือ Iron) ให้มีสมบัติโดยรวมดียิ่งขึ้น เช่น แปรเปลี่ยนรูปได้ตามที่ต้องการ แข็งแรง ยืดหยุ่น ทนทานต่อแรงกระแทกหรือสภาวะทางธรรมชาติ สามารถรับน้ำหนักได้มาก ไม่ฉีกขาดหรือแตกหักง่าย เป็นต้น เหมาะสมในการใช้งานในด้านต่างๆ ในชีวิตประจำวันของคนเราได้อย่างหลากหลายด้วยต้นทุนที่ต่ำ เพื่อให้ขายได้ในระดับราคาที่คนทั่วไปซื้อหามาใช้ได้ซึ่งนับว่ามีข้อได้เปรียบดีกว่าวัสดุอื่น ๆ มาก(บริษัท แมกซ์สตีล จำกัด, 2557)

2.1.1 เหล็กกล้าแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิดหลัก คือ

2.1.1.1 เหล็กกล้าคาร์บอน (Carbon Steel)

คือ เหล็กกล้าที่เพิ่มธาตุคาร์บอนเข้าไปเพื่อเพิ่มสมบัติทางกลให้กับเหล็กมีส่วนผสมของคาร์บอนเป็นหลักที่ไม่เกิน 1.7 เปอร์เซ็นต์ และมีธาตุอื่นผสมเช่นซิลิคอนฟอสฟอรัส กำมะถันและแมงกานีสในปริมาณน้อยจะติดมากับเนื้อเหล็กตั้งแต่เป็นสินแร่ที่มีสมบัติทางความแข็งแรง (Strength) ความอ่อนตัว (Ductility) ที่เปลี่ยนแปลงตามปริมาณของคาร์บอนที่มีอยู่ในเหล็ก ทำให้เหมาะที่จะเลือกใช้ได้ตามความเหมาะสมของลักษณะงานบางครั้งที่เรียกว่า "Mild Steel" เหล็กกล้าคาร์บอนแบ่งได้เป็น 3 ชนิด คือ

ก. เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ (Low Carbon Steel) คาร์บอนที่ผสมอยู่ในเนื้อเหล็กมีผสมอยู่ประมาณ 0.05 เปอร์เซ็นต์ - 0.35 เปอร์เซ็นต์เป็นเหล็กเหนียวแต่ไม่แข็งแรงนักสามารถนำไปกลึง กัด ไส เจาะได้ง่ายเนื่องจากเป็นเหล็กที่อ่อนสามารถรีดหรือตีเป็นแผ่นได้ง่ายเหมาะกับงานที่ไม่ต้องการความแข็งแรงสูงนักไม่สามารถนำมาชุบแข็งได้เพราะมีคาร์บอนน้อย(ไม่เกิน 0.2 เปอร์เซ็นต์) แต่ถ้าต้องการชุบแข็งต้องใช้วิธีเติมคาร์บอนที่ผิวก่อนตัวอย่างการใช้งานเช่น

เหล็กแผ่นหมอน้ำ ท่อน้ำประปา เหล็กเส้นในอุตสาหกรรมก่อสร้าง เหล็กเคลือบดีบุก เหล็กอาบสังกะสี เช่น แผ่นสังกะสีมุงหลังคา ตัวถังรถยนต์ ถังน้ำมัน งานย้ำหมุด สกรู ลวด สลักเกลียว ชิ้นส่วนอะไหล่เครื่องจักรโซ่ บานพับประตู

ข. เหล็กกล้าคาร์บอนปานกลาง (Medium Carbon Steel) มีส่วนผสมของคาร์บอนอยู่ในเนื้อเหล็กประมาณ 0.35 เปอร์เซ็นต์ - 0.50 เปอร์เซ็นต์เป็นเหล็กที่มีความแข็งแรงและความเค้นแรงดึงมากกว่าเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำแต่มีความเหนียวน้อยกว่า นอกจากนี้ยังให้คุณภาพในการแปรรูปที่ดีกว่าและยังสามารถนำไปชุบผิวแข็งได้ เหมาะกับงานที่ต้องการความเค้นดึงปานกลาง ต้องการป้องกันการสึกหรอที่ผิวหน้าและต้องการความแข็งแรง แต่มีความแข็งบ้างพอสมควร เช่น ทำชิ้นส่วนเครื่องจักรกล ทำรางรถไฟ เพลารถือรถกล เฟือง หัวค้อน ก้านสูบ สปริง ชิ้นส่วนรถไถนา ไขควง ท่อเหล็ก น็อต สกรูที่ต้องแข็งแรง

ค. เหล็กกล้าคาร์บอนสูง (High Carbon Steel) เปอร์เซ็นต์คาร์บอน 0.5 เปอร์เซ็นต์ - 1.5 เปอร์เซ็นต์ เป็นเหล็กมีความแข็งแรงและทนความเค้นแรงดึงสูง สามารถทำการชุบแข็งได้แต่จะเปราะ เหมาะสำหรับงานที่ต้องการความต้านทานต่อการสึกหล่อ เช่น ดอกสว่าน สกัดกรรไกร มีดคulling ใบเลื่อยตัดเหล็ก ดอกทำเกลียวใบมีดโกน ตะไบ แผ่นเกจ เหล็กกัด สปริงแหนบ ลูกบอล แบริ่งลูกปืน (Chalermchai Marketing, 2558)

2.1.1.2 เหล็กกล้าผสม (Alloy Steel)

คือ เป็นเหล็กกล้าผสมคาร์บอนไม่เกิน 1.7 เปอร์เซ็นต์และมีธาตุอื่นๆผสม เช่น แมงกานีส นิกเกิล โครเมียม วาเนเดียม โมลิบดีนัม โคบอลต์ หังส เตน การผสมธาตุต่างๆ ช่วยปรับสมบัติให้เหมาะสมกับความต้องการ เช่น การทนต่อความร้อนเพื่อใช้ทำเตากระหะเตาไฟฟ้า เป็นต้น จุดมุ่งหมายของการผสมธาตุอื่นๆ คือ

- เพิ่มความแข็งแรง
- เพิ่มทนทานต่อการสึกหรอและทนการเสียดสี
- เพิ่มความเหนียวทนต่อแรงกระแทก
- เพิ่มสมบัติต้านทานการกัดกร่อน
- ปรับปรุงคุณสมบัติด้านแม่เหล็ก

เหล็กกล้าผสมสามารถแบ่งตามปริมาณของวัสดุที่ผสมได้ 2 ชนิด คือ

ก. เหล็กกล้าผสมสูง (High Alloy Steel) เป็นเหล็กที่ผสมธาตุอื่นๆกว่า 10 เปอร์เซ็นต์ เหล็กกล้าในกลุ่มนี้รวมถึง เหล็กเครื่องมือประสม (Alloy Tool Steel) มีสมบัติในด้าน ทนต่อการกัดกร่อน ทนต่อการสึกหรอได้ดี จึงถูกใช้งานในการทำงานเหล็กเครื่องมือต่างๆ

ข. เหล็กกล้าผสมต่ำ (Low Alloy Steel) เป็นเหล็กที่ผสมธาตุอื่นๆไม่เกิน 10 เปอร์เซ็นต์ มีโครงสร้างคล้ายเหล็กคาร์บอนธรรมดา (Plain Carbon Steel) และมีสมบัติเหมือนเหล็กกล้าผสมสูง (บริษัท วีแอนด์ พี เอ็กซ์เพนด์เมทัล จำกัด, 2555)

2.1.2 กระบวนการผลิตเหล็กแผ่นรีดร้อนและเหล็กแผ่นรีดเย็น

เป็นเหล็กรูปทรงแบน เป็นวัตถุดิบที่สำคัญในการผลิตชิ้นส่วนยานยนต์กระบวนการผลิตเหล็กแผ่น แบ่งเป็น 2 กระบวนการ คือ การรีดร้อนและการรีดเย็น

2.1.2.1 การรีดร้อนของเหล็กแผ่น (Hot Rolling of Flat Products)

โดยทั่วไปการผลิตเหล็กแผ่นรีดร้อนในประเทศไทยจะเริ่มจากการหลอมเศษเหล็กด้วยเตาไฟฟ้า (Electric Arc Furnace) เพื่อผลิตน้ำเหล็กให้ได้ตามส่วนผสมทางเคมีที่ต้องการ จากนั้นน้ำเหล็กจะถูกทำให้แข็งตัวโดยผ่านกระบวนการหล่อแบบต่อเนื่อง เพื่อหล่อเป็นเหล็กแผ่นหนา (Slab) จะถูกตัดด้วยเครื่องตัด เพื่อให้ได้ขนาดที่เหมาะสมก่อนที่จะผ่านเตาอบเพื่อให้ความร้อน สำหรับบางโรงงานที่ไม่มีเตาไฟฟ้าสำหรับหลอมเศษเหล็ก จะนำเข้า Slab จากต่างประเทศเข้ามาเป็นวัตถุดิบ โดยอุณหภูมิที่ใช้ออบอยู่ในช่วงประมาณ 1100 - 1250 องศาเซลเซียส จากนั้น Slab ที่ผ่านเตาออกมาจะผ่านการขจัดสนิมด้วยน้ำที่พ่นมาที่ผิวเหล็กด้วยแรงดันสูงและผ่านสู่การรีดลดขนาดที่อุณหภูมิสูง โดยอุณหภูมิขณะที่เหล็กผ่านแท่นการรีดสุดท้ายโดยทั่วไปจะสูงกว่า 870 องศาเซลเซียส หลังจากผ่านแท่นรีดสุดท้ายเหล็กแผ่นจะถูกทำให้เย็นลงโดยการผ่านน้ำหล่อเย็น (Cooling table) และเข้าสู่เครื่องม้วนซึ่งโดยทั่วไปอุณหภูมิที่ใช้อม้วน จะอยู่ในช่วงประมาณ 550 - 710 องศาเซลเซียส เหล็กแผ่นรีดร้อนที่ได้จะมีผิวสีเทาดำ หรือ เรียกอีกชื่อหนึ่งว่า Black coil หรืออาจนำไปผ่านการกัดกรดและเคลือบน้ำมันจะเรียกว่า Pickled and Oiled (P&O) เหล็กแผ่นรีดร้อนสามารถนำไปใช้งานในลักษณะที่ไม่ต้องการคุณภาพผิวสูงนัก เช่น

- ก. นำไปพับเป็นเหล็กสำหรับงานโครงสร้าง เช่น เหล็กรูปตัว C (C-channel)
- ข. นำไปม้วนทำท่อขนาดเล็ก เช่น ท่อน้ำมัน
- ค. นำไปม้วนทำท่อขนาดใหญ่ เช่น ท่อประปาขนาดใหญ่
- ง. นำไปถึงแก๊สหุงต้ม
- จ. นำไปทำตู้คอนเทนเนอร์
- ฉ. ใช้สำหรับอุตสาหกรรมต่อเรือ
- ช. ใช้ขึ้นรูปเป็นชิ้นส่วนยานยนต์หรือใช้เป็นวัตถุดิบสำหรับการผลิตเหล็กแผ่นรีด

เย็น

เหล็กแผ่นรีดร้อนสำหรับงานขึ้นรูปทั่วไปตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก. 528 - 2548 ที่ใช้เป็นข้อกำหนดในการซื้อขายในประเทศไทย เราจึงยกตัวอย่างเหล็กแผ่นรีดร้อนชั้นคุณภาพ SPHC และ SS400P คือเหล็กแผ่นรีดร้อนสำหรับงานขึ้นรูปทั่วไป ซึ่งอ้างอิงตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมของประเทศญี่ปุ่น JIS G3131-2005

2.1.2.2 การรีดเย็นของเหล็กแผ่น (Cold Rolling of Flat Products)

การผลิตเหล็กแผ่นรีดเย็นจะใช้เหล็กแผ่นรีดร้อนชนิดม้วน เป็นวัตถุดิบในการผลิต โดยเริ่มจากการตัดส่วนปลายของม้วนเหล็กแผ่นรีดร้อนและทำการเชื่อม เพื่อให้สามารถผ่านกระบวนการกัดกรดอย่างต่อเนื่องได้ จากนั้นเหล็กแผ่นรีดร้อนจะถูกทำให้เคลื่อนตัวผ่านเครื่องกำจัดสนิมเหล็กทางกล (Scale

breaker) เพื่อให้สนิมที่ผิวแตกและง่ายต่อการกัดกรอด เหล็กแผ่นที่ผ่าน Scale breaker จะถูกทำให้เคลื่อนตัวลงสู่อ่างกรดเพื่อทำการกัดสนิม เหล็กแผ่นที่ผ่านการกัดกรอดขจัดสนิมแล้วจะมีสีขาวเทา ซึ่งจะผ่านเครื่องตัดขอบ เพื่อให้ขอบเรียบและลดการฉีกขาดจากขอบของเหล็กเมื่อทำการรีดลดขนาดปริมาณมาก เหล็กที่ผ่านการกัดขอบแล้วจะถูกนำไปรีดเย็นต่อเพื่อลดขนาดความหนาลง โดยการรีดเย็น (Cold rolling) จะทำที่อุณหภูมิห้อง (แตกต่างจากเหล็กแผ่นรีดร้อนซึ่งโดยทั่วไปรีดที่อุณหภูมิสูงกว่า 870 องศาเซลเซียส ซึ่งเนื้อเหล็กขณะรีดร้อนยังมีสีเหลืองและสามารถเกิดสนิมขณะรีดได้) เหล็กแผ่นที่ผ่านการรีดเย็นมาจะมีผิวที่มันกว่าเหล็กแผ่นรีดร้อนซึ่งมีผิว ที่ด้าน อย่างไรก็ตามเหล็กแผ่นที่ผ่านการรีดมา ยังมีความเครียดภายในเนื้อเหล็กเหลือค้าง ทำให้มีความแข็งสูง ความสามารถในการยืดตัว (Elongation) ต่ำตลอดจนมีความไม่สม่ำเสมอของสมบัติเชิงกลในทิศทางต่างๆ สูงจึงไม่เหมาะแก่การใช้งานในลักษณะที่ต้องการนำไปขึ้นรูปจึงต้องผ่านการอบ (Annealing) เพื่อให้คลายความเครียดในเนื้อเหล็กลง เหล็กที่ผ่านการอบแล้วจะผ่านการรีดเย็นอีกเล็กน้อยโดยที่ความหนาเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย เพื่อปรับความเรียบ คุณภาพผิวและขจัดคาร์บอนจุดตก (Yield Point Elongation) ซึ่งช่วยให้เหล็กแผ่นแปรรูปได้อย่างสม่ำเสมอยิ่งขึ้น เหล็กแผ่นรีดเย็นสามารถนำไปใช้งานในลักษณะที่ต้องการคุณภาพผิวสูงกว่าและความหนาท่ำกว่าเหล็กแผ่นรีดร้อน เช่น

- ก. นำไปทำเฟอร์นิเจอร์ เครื่องใช้ไฟฟ้า
- ข. ใช้สำหรับงานด้านยานยนต์
- ค. นำไปเคลือบสีบุกเพื่อทำเหล็กแผ่นสำหรับงานกระป๋อง

เหล็กรีดเย็น (Cold Rolled Steel Sheets) แบ่งออกเป็นชนิดต่างๆ มีสินแร่ที่เป็นส่วนผสมอยู่ 5 - 6 ชนิด (METAL TH, 2555)

ตาราง 2.1 ส่วนผสมธาตุในเกรดเหล็กรีดร้อนและรีดเย็นมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (สมอ.) มอก. 2012-2543 ภายใต้มาตรฐาน JIS G 3141

ชนิดเหล็ก	องค์ประกอบทางเคมี (%)						การทดสอบแรงดึง		
	C	Mn	P	S	Si	Al	ความเค้น วิกฤต N/mm ²	แรง ต้านทาน การดึง N/mm ²	การยืดของ วัสดุ %
SPCD	0.02	0.07	0.018	0.005	0.07	-	164	306	48

ที่มา : ใบรับรองผลการทดสอบ บริษัท สหวิริยาสติลอันดีสตรี จำกัด มหาชน(2557)

ในการศึกษาครั้งนี้ได้เลือกใช้เหล็กแผ่นรีดร้อนและเหล็กแผ่นรีดเย็นทั้งหมด 1 ชนิด SPCD ซึ่งเป็นเหล็กแผ่นที่มีการใช้งานมากในการผลิตชิ้นส่วนยานยนต์และจำเป็นต้องผ่านการเชื่อม เหล็กทั้ง 4 ชนิด มีสมบัติเชิงกล ส่วนผสมทางเคมีแสดงดังตารางและการใช้งาน แตกต่างกันดังนี้

1 SPCD เป็นเหล็กแผ่นรีดเย็น สมบัติขึ้นรูปได้ดีในการใช้งานหลัก เช่น พันและหลังคารถยนต์ เพราะมีค่า %Elongation ถึง 48 เปอร์เซ็นต์ และมีค่า Yield Point ต่ำถึง 164 N/mm² ดังตารางที่ 2.1 จึงทำให้สามารถขึ้นรูปได้ดีกว่าและสามารถขึ้นรูปในพวงงาน Draw หรือ Deep Draw ได้ ซึ่งค่าของจุด Yield Point ต่ำมาก แรงที่สามารถทำให้มันเปลี่ยนรูปไปจึงมีค่าต่ำไปด้วยและค่า %Elongation นั้นมีค่าที่สูง เหล็กชนิดนี้จึงยืดขึ้นรูปได้มากกว่าและง่ายกว่าเหล็กชนิดอื่นๆ (Thai Cold Rolled Steel Sheet Public Company Limited, 2554 มีนาคม) ดังแสดงในตารางที่ 2.1

2.1.4 สมบัติของธาตุเมื่อผสมในเหล็กกล้า

เป็นสมบัติที่เกี่ยวข้องกับปฏิกิริยาทางเคมีของวัสดุ การเลือกวัสดุเพื่อนำไปใช้ในงานช่าง จะต้องพิจารณาถึงสมบัติทางเคมีของวัสดุได้แก่ การกัดกร่อน ส่วนผสมและลักษณะโครงสร้างทางเคมีของส่วนผสมในเหล็ก เป็นต้น ข้อมูลจาก บริษัท เอส.ซี.พี.ซันติเดท จำกัด (บริษัท เอส.ซี.พี.ซันติเดท จำกัด, 2555) ธาตุแต่ละธาตุที่ปะปนอยู่ในเหล็กมีผลกระทบต่อสมบัติของเหล็กดังนี้

2.1.4.1 คาร์บอน (Carbon) สัญลักษณ์ทางเคมี คือ C เป็นธาตุที่สำคัญที่สุด

จะต้องมีผสมอยู่ในเนื้อเหล็ก มีคุณสมบัติทำให้เหล็กแข็งเพิ่มขึ้นหลังจากนำไปอบชุบ (Heat Treatment) โดยรวมตัวกับเนื้อเหล็ก เป็นโครงสร้างที่เรียกว่า มาร์เทนไซต์ (Martensite) และ ซีเมนไต์ (Cementite) นอกจากนั้น คาร์บอนยังสามารถรวมตัวกับเหล็กและธาตุอื่น ๆ กลายเป็นคาร์ไบด์ (Carbide) ซึ่งจะช่วยให้เพิ่มความต้านทานต่อการสึกหรอของเหล็ก อย่างไรก็ตามถ้าปริมาณคาร์บอนสูงๆคาร์บอนจะลดความยืดหยุ่น (Elasticity) ความสามารถในการตีขึ้นรูป (Forging) ความสามารถในการเชื่อม (Welding) และไม่มีผลต่อความต้านทานการกัดกร่อน

2.1.4.2 อลูมิเนียม (Aluminium) สัญลักษณ์ทางเคมี คือ Al เป็นธาตุที่นิยมใช้เป็นตัวไล่แก๊สออกซิเจนและไนโตรเจน (Deoxidizer และ Denitrizer) มากที่สุด ซึ่งผสมอยู่เล็กน้อยในเนื้อเหล็ก มีผลทำให้โครงสร้างมีความละเอียดขึ้น เมื่อใช้ผสมลงในเหล็กที่จะนำไปผ่านกระบวนการอบชุบแข็ง โดยวิธีไนไตรดิง (Nitriding) ทั้งนี้เนื่องจากอลูมิเนียมสามารถรวมตัวกับไนโตรเจน เป็นสารที่แข็งแรง ใช้ผสมลงในเหล็กทนความร้อนบางชนิด เพื่อให้ต้านทานต่อการตกสะเก็ด (Scale) ได้ดีขึ้น

2.1.4.3 โบรอน (Boron) สัญลักษณ์ทางเคมี คือ B ช่วยเพิ่มความสามารถชุบแข็งแก่เหล็ก ที่ใช้ทำชิ้นส่วนเครื่องจักรทั่วไป จึงทำให้ใจกลางของงานที่ทำด้วยเหล็กชุบผิวแข็ง มีความแข็งแรงสูงขึ้น โบรอนสามารถดูดกลืนนิวตรอนได้สูง จึงนิยมเติมในเหล็กที่ใช้ทำฉากกั้นอุปกรณ์นิวเคลียร์

2.1.4.4 เบริลเลียม (Beryllium) สัญลักษณ์ทางเคมี คือ Be ส่วนใหญ่นำมาทำสปริงนาฬิกาซึ่งทำจากทองแดงผสมเบริลเลียม (Beryllium-Coppers Alloys) โลหะผสมนิกเกิล-เบริลเลียม (Ni-Be Alloys) มีความแข็งแรง ทนการกัดกร่อนได้ดี ส่วนใหญ่ใช้ทำเครื่องมือผ่าตัด

2.1.4.5 แคลเซียม (Calcium) สัญลักษณ์ทางเคมี คือ Ca แคลเซียมจะใช้ในลักษณะแคลเซียมซิลิไซด์ (CaSi) เพื่อลดออกซิเดชัน (Deoxidation) นอกจากนั้นแคลเซียมยังช่วยเพิ่มความต้านทานการเกิดสเกลของวัสดุที่ใช้เป็นตัวนำความร้อน

2.1.4.6 ซีเรียม (Cerium) สัญลักษณ์ทางเคมี คือ Ce เป็นตัวลดออกซิเจนและกำมะถันได้ดี ช่วยปรับปรุงสมบัติด้าน Hot Working ของเหล็กกล้าและปรับปรุงความต้านทานการเกิดสเกลของเหล็กทนความร้อน

2.1.4.7 โคบอลต์ (Cobalt) สัญลักษณ์ทางเคมี คือ Co ไม่ทำให้เกิดคาร์ไบด์แต่สามารถป้องกันไม่ให้เกิดเนื้อหยาบที่อุณหภูมิสูง ดังนั้นจึงช่วยปรับปรุงให้เหล็กมีความแข็งแรงที่อุณหภูมิสูง ด้วยเหตุนี้จึงใช้ผสมในเหล็กขึ้นรูปงานร้อน เหล็กทนความร้อนและเหล็กไฮสปีด ธาตุโคบอลต์เมื่อได้รับรังสีนิวตรอนจะเกิดเป็น โคบอลต์ 60 ซึ่งเป็นสารกัมมันตภาพรังสีอย่างรุนแรง ดังนั้นจึงไม่ควรเติมโคบอลต์ลงในเหล็กที่ใช้ทำเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณู

2.1.4.8 โครเมียม (Chromium) สัญลักษณ์ทางเคมี คือ Cr ทำให้เหล็กอบชุบได้ง่ายขึ้น เพราะลดอัตราการเย็นตัววิกฤตลงอย่างมาก สามารถชุบในน้ำมันหรืออากาศได้ (Oil or Air Quenching) เพิ่มความแข็งให้เหล็ก แต่ลดความทนทานต่อแรงกระแทก (Impact) ลง โครเมียมที่ผสมในเหล็กจะรวมตัวกับคาร์บอน เป็นสารประกอบพวกคาร์ไบด์ ซึ่งมีความแข็งมาก ดังนั้นจึงทำให้เหล็กทนทานต่อแรงเสียดสีและบริเวณที่เป็นรอยคม ทำให้เหล็กเป็นสนิมได้ยาก เพิ่มความแข็งแรงของเหล็กที่ใช้งานที่อุณหภูมิสูงและยังเพิ่มความทนทานต่อการกัดกร่อนของสารต่างๆ ได้ดีขึ้น

2.1.4.9 ทองแดง (Copper) สัญลักษณ์ทางเคมี คือ Cu จะเพิ่มความแข็งแรง ถ้ามีทองแดงผสมอยู่ในเหล็กเพียงเล็กน้อย เหล็กจะไม่เกิดสนิมเมื่อใช้งานในบรรยากาศ ทองแดงจะไม่มีผลเสียต่อความสามารถในการเชื่อมของเหล็ก

2.1.4.10 แมงกานีส (Manganese) สัญลักษณ์ทางเคมี คือ Mn ใช้เป็นตัวไล่กำมะถัน (S) ซึ่งเป็นตัวที่ไม่ต้องการในเนื้อเหล็ก จะถูกกำจัดออกในขณะหลอม ทำให้เหล็กอบชุบแข็งง่ายขึ้น เนื่องจากเป็นตัวลดอัตราการเย็นตัววิกฤต (Critical Cooling Rate) ทำให้เหล็กทนทานต่อแรงดึงได้มากขึ้น เพิ่มสัมประสิทธิ์การขยายตัวของเหล็กเนื่องจากความร้อน แต่จะลดสมบัติในการเป็นตัวนำไฟฟ้าและความร้อน นอกจากนั้นแมงกานีสยังมีอิทธิพลต่อการขึ้นรูปหรือเชื่อม เหล็กกล้าคาร์บอนที่มีปริมาณแมงกานีสเพิ่มขึ้น จะทนต่อการเสียดสีได้ดีขึ้นมาก

2.1.4.11 โมลิบดีนัม (Molybdenum) สัญลักษณ์ทางเคมี คือ Mo ปกติจะใช้ผสมร่วมกับธาตุอื่น ๆ เป็นตัวลดอัตราการเย็นตัววิกฤต ทำให้ออบชุบง่ายขึ้น ป้องกันการเปราะขณะอบคืนตัว (Temper Brittleness) ทำให้เหล็กมีเนื้อละเอียด เพิ่มความทนทานต่อแรงดึงแก่เหล็กมากขึ้น สามารถรวมตัวกับคาร์บอนเป็นคาร์ไบด์ได้ง่าย ดังนั้นจึงปรับปรุงคุณสมบัติในการตัดโลหะ (Cutting) ของเหล็กไฮสปีดได้ดีขึ้นและยังเพิ่มความต้านทานต่อการกัดกร่อน (Corrosion Resistance) แก่เหล็ก แต่อย่างไรก็ตามเหล็กที่มีโมลิบดีนัมสูงจะตีขึ้นรูปยาก

2.1.4.12 ไนโตรเจน (Nitrogen) สัญลักษณ์ทางเคมี คือ N ขณะทำไนตรรายดิ้ง (Nitriding) ไนโตรเจนจะรวมตัวกับธาตุบางชนิดในเหล็ก เกิดเป็นสารประกอบไนไตรต์ ซึ่งทำให้ผิวงานมีความแข็งที่สูงมากและต้านทานการสึกหรอได้ดีเยี่ยม

2.1.4.13 นิกเกิล (Nickel) สัญลักษณ์ทางเคมี คือ Ni เป็นตัวที่เพิ่มความทนทานต่อแรงกระแทกของเหล็ก ดังนั้นจึงใช้ผสมในเหล็กที่จะนำไปชุบแข็งที่ผิว ใช้ผสมกับโครเมียมจะทำให้เหล็กทนทานต่อการกัดกร่อนได้ดีไม่เป็นสนิมง่ายและยังสามารถทนความร้อน

2.1.4.14 ออกซิเจน (Oxygen) สัญลักษณ์ทางเคมี คือ O ออกซิเจน เป็นอันตรายต่อเหล็ก ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับ ชนิด ส่วนผสม รูปร่างและการกระจายตัวของสารประกอบที่เกิดจากออกซิเจนนั้น ออกซิเจนยังส่งผลต่อสมบัติเชิงกล โดยเฉพาะอย่างยิ่งความต้านทานแรงกระแทกจะลดลง (ตามแนวขวาง) และจำทำให้เปราะยิ่งขึ้น

2.1.4.15 ตะกั่ว (Lead) สัญลักษณ์ทางเคมี คือ Pb โดยตะกั่วจะเป็นอนุภาคละเอียด กระจายตัวอย่างสม่ำเสมอภายในเนื้อเหล็ก เมื่อนำไปกลึงหรือตัดแต่งด้วยเครื่องมือกล จะทำให้เศษกลึงขาดง่าย จึงทำให้ตัดแต่งได้ง่ายและตะกั่วไม่มีผลกระทบต่อสมบัติเชิงกลของเหล็ก

2.1.4.16 ฟอสฟอรัส (Phosphorus) และกำมะถัน (Sulphur) สัญลักษณ์ทางเคมี คือ P และ S ตามลำดับเป็นตัวทำลายสมบัติของเหล็ก แต่มักผสมอยู่ในเนื้อเหล็ก มักจะเรียกสารเหล่านี้ว่า สารมลทิน (Impurities) เหล็กเกรดสูงจะต้องมีฟอสฟอรัสไม่เกิน 0.03 เปอร์เซ็นต์ - 0.05 เปอร์เซ็นต์ ส่วนกำมะถันจะทำให้เหล็กเกิด Red Shortness จึงแตกเปราะง่าย โดยทั่วไปจึงจำกัดปริมาณกำมะถันในเหล็กไม่เกิน 0.025 เปอร์เซ็นต์ หรือ 0.03 เปอร์เซ็นต์ ยกเว้น เหล็กฟรีแมชชีนนิ่ง (Free Machining) ที่เติมกำมะถันถึง 0.30 เปอร์เซ็นต์ เพื่อให้เกิดซัลไฟด์ขนาดเล็กกระจายทั่วเนื้อเหล็ก ทำให้เศษกลึงขาดง่าย จึงตัดแต่งด้วยเครื่องมือกลได้ง่าย

2.1.4.17 ซิลิคอน (Silicon) สัญลักษณ์ทางเคมี คือ Si ซิลิคอน จะปรากฏในเหล็กทุกชนิด เนื่องจากสินแร่เหล็กมักมีซิลิคอนผสมอยู่ด้วยเสมอ ซิลิคอนไม่ใช่โลหะแต่มีสภาพเหมือนโลหะ ใช้เป็นตัวทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิไดซิง (Oxidizing) ทำให้เหล็กแข็งแรงและทนทานต่อการเสียดสีได้ดีขึ้น เพิ่มค่าแรงดึงที่จุดคราก (Yield Point) ของเหล็กให้สูงขึ้น ดังนั้นจึงใช้ผสมในการทำเหล็กสปริง (Spring Steels) ช่วยทำให้เหล็กทนทานต่อการตกสะเก็ด (Scale) ที่อุณหภูมิสูงได้ดี จึงใช้ผสมในเหล็กทนความร้อน เหล็กกล้าที่มีส่วนผสมซิลิคอนสูงจะมีเกรนหยาบ

2.1.4.18 ไทเทเนียม (Titanium) สัญลักษณ์ทางเคมี คือ Ti ไทเทเนียมเป็นโลหะที่มีความแข็งแรงมาก ทำให้เกิดคาร์ไบด์ได้ดี เป็นธาตุผสมที่สำคัญในเหล็กสแตนเลส เพื่อป้องกันการผุกร่อนตามขอบเกรน นอกจากนั้นไทเทเนียมยังช่วยทำให้เหล็กมีเกรนละเอียด

2.1.4.19 วาเนเดียม (Vanadium) สัญลักษณ์ทางเคมี คือ V ทำให้เหล็กทนต่อความร้อนได้ดี เพิ่มความแข็งแรงให้กับเหล็ก โดยไม่ทำให้สมบัติในการเชื่อมและแรงดึงเสียไป ทำให้โครงสร้างจุลภาคมีความละเอียด รวมทั้งกับคาร์บอนที่เป็นคาร์ไบด์ได้ง่าย จึงทำให้ทนทานต่อการสึกกร่อน มักจะผสมในเหล็กขึ้นรูปร้อน (Hot Working Steels) และเหล็กไฮสปีด

2.1.4.20 ทังสเตน (Tungsten) สัญลักษณ์ทางเคมี คือ W สามารถรวมตัวกับคาร์บอนเป็นคาร์ไบด์ที่แข็งแรงมาก จึงทำให้เหล็กชนิดอื่นๆที่ส่วนผสมทังสเตนมีความแข็งแรงมาก หลังจากผ่านการอบชุบ ทำให้เหล็กมีความเหนียวขึ้นและป้องกันไม่ให้เกิดการเกิดโครงสร้างจุลภาคที่หยาบ ซึ่ง

เกิดจากอนุภาคขนาดใหญ่และมีการตกระกอน เนื่องจากเกรนขยายตัวจะเพิ่มความทนทานต่อการเสียดสีของเหล็ก ดังนั้นจึงนิยมเติมทั้งสแตนในเหล็กไฮสปีด (Hi-Speed) และเหล็กที่ต้องอบชุบแข็งโดยทั่วไป

2.2 สมบัติทางความร้อนของโลหะ

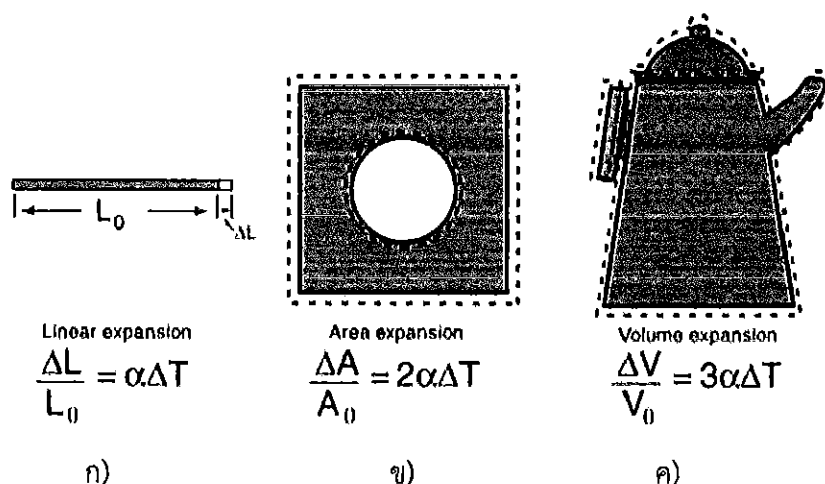
2.2.1 การขยายตัวเนื่องจากความร้อน (Thermal Expansion)

วัตถุเมื่อได้รับความร้อนนอกจากจะมีอุณหภูมิสูงขึ้นและอาจทำให้วัตถุเกิดการขยายตัว สำหรับวัตถุที่เฉลี่ยความร้อนได้ทั่วทั้งก้อน (Isotropic) เช่น เหล็ก ของแข็ง จะขยายตัวออกเท่ากันทุกทาง เนื่องจากอะตอมของวัตถุเมื่อได้รับพลังงานเพิ่มขึ้น จะเกิดการสั่นไปมารอบจุดหนึ่งภายในโครงสร้างของวัตถุ เป็นเหตุให้ระยะห่างระหว่างอะตอมเปลี่ยนแปลง โดยถ้าระยะห่างระหว่างอะตอมเพิ่มมากขึ้น วัตถุนั้นก็ขยายตัว แต่ถ้าระยะห่างระหว่างอะตอมลดลง วัตถุนั้นก็จะหดตัวขึ้น ซึ่งการขยายตัวของแข็ง ของเหลวและก๊าซจะแตกต่างกัน ซึ่งจะอธิบายเกี่ยวกับการขยายตัวของของแข็งโดยทั่วไปเมื่อให้ความร้อนแก่ของแข็งใดๆ ของแข็งนั้นจะขยายตัวทุกทิศทาง จึงมีผลทำให้รูปทรงของวัตถุนั้นเหมือนเดิมแต่จะมีการเปลี่ยนแปลงในด้านของความยาว พื้นที่และปริมาตร โดยการขยายตัวจะมีค่ามากหรือน้อยขึ้นอยู่กับชนิดของของแข็งนั้นๆ การขยายตัวของของแข็งแบ่งการพิจารณาได้เป็น 3 แบบ คือ

2.2.1.1 การขยายตัวเชิงเส้นเนื่องจากความร้อน (Linear Thermal Expansion) แสดงดังรูปที่ 2.1 ก)

2.2.1.2 การขยายตัวเชิงพื้นที่เนื่องจากความร้อน (Area Thermal Expansion) แสดงดังรูปที่ 2.1 ข)

2.2.1.3 การขยายตัวเชิงปริมาตรเนื่องจากความร้อน (Volume Thermal Expansion) แสดงดังรูปที่ 2.1 ค) (ดร.คชินท์ สายอินทวงศ์, 2557)



รูปที่ 2.1 การขยายตัวตามอุณหภูมิสำหรับของแข็งแบบไอโซโทรปิก

ก) การขยายตัวเชิงเส้นเนื่องจากความร้อน (Linear Thermal Expansion)

ข) การขยายตัวเชิงพื้นที่เนื่องจากความร้อน (Area Thermal Expansion)

ค) การขยายตัวเชิงปริมาตรเนื่องจากความร้อน (Volume Thermal Expansion)

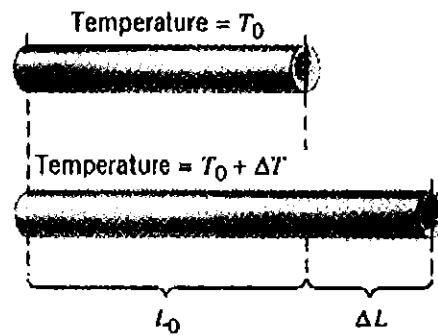
ที่มา : ดร.คชินท์ (2555)

2.2.1.1 การขยายตัวเชิงเส้นเนื่องจากความร้อน (Linear Thermal Expansion)

สมมติมีท่อนวัตถุยาว L_0 ที่อุณหภูมิเริ่มต้น T_0 เมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนไป ΔT ความยาวของท่อนวัตถุเปลี่ยนไป (เพิ่มขึ้น) ΔL จากการทดลองพบว่า ถ้า ΔT น้อยกว่า 100 องศาเซลเซียส ΔL จะแปรผันตรงกับ ΔT ถ้ามีท่อนวัตถุประเภทเดียวกันสองท่อนและต่างก็มีอุณหภูมิเท่ากัน โดยที่ท่อนหนึ่งยาวกว่าอีกท่อนหนึ่งเป็นสองเท่า เมื่อทั้งสองมีอุณหภูมิเปลี่ยนไปเป็นปริมาณเท่ากัน ท่อนที่ยาวกว่าจะเพิ่มความยาวขึ้นเป็นสองเท่าของท่อนที่สั้นกว่า ดังนั้น ΔL จะแปรผันตรงกับความยาวตั้งต้น L_0

(ดร.คชินท์ สายอินทวงศ์, 2557)

$$\Delta L = \alpha L_0 \Delta T \quad (2.4)$$



รูปที่ 2.2 แสดงความยาวของแท่งวัตถุเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลง
ที่มา : ผศ.ปรียา (2554)

เมื่อ α คือ สัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงเส้นเนื่องจากความร้อน (Coefficient of Linear Thermal Expansion)ซึ่งมีค่าต่างกันสำหรับสารแต่ละชนิด α มีหน่วยเป็น K^{-1} หรือ $(^{\circ}C)^{-1}$ ถ้าวัตถุมีความยาวเริ่มต้น L_0 ที่อุณหภูมิ T_0 ดังนั้นความยาวใหม่ L ที่อุณหภูมิ $T=T_0+\Delta T$ จะได้เป็น $L=L_0+\Delta L = L_0+\alpha L_0\Delta T$

$$L = L_0(1+\alpha\Delta T) \quad (2.5)$$

“ เมื่อวัสดุเกิดการขยายตัวหรือหดตัวอย่างอิสระนั้นจะไม่ทำให้เกิดความเค้นเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ ” (ASM International for Materials Engineering and Scientists, 2008) แต่ในกรณีของการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่เกิดขึ้นภายในวัสดุที่ถูกยึดหรือมีความไม่ต่อเนื่องของชิ้นวัสดุ เช่น มีรูอยู่ตรงกลาง วัสดุจะเกิดการขยายตัวเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงไปของอุณหภูมิ ซึ่งในกรณีนี้วัสดุจะเกิดความเค้นขึ้นภายในตัววัสดุ อันเนื่องมาจากผลของการขยายตัวของวัสดุจะทำให้เกิดแรงต้านการขยายตัว ซึ่งเมื่ออยู่ในสภาวะสมดุลภายในจะเกิดความเค้นขึ้น ซึ่งนิยมเรียกว่า ความเค้นทางความร้อน (Thermal Stress)(ผศ. เขียวโชค ศรขวัญ, 2555)

2.2.1.2 การขยายตัวเชิงพื้นที่เนื่องจากความร้อน (Area Thermal Expansion)

จากการทดลองพบว่าถ้าอุณหภูมิเปลี่ยนแปลงไป ΔT ในปริมาณน้อย พื้นที่ที่เปลี่ยนแปลงไป ΔA จะแปรผันตรงกับ ΔT และพื้นที่ตั้งต้น ΔA_0 ซึ่ง α มีหน่วยเป็น K^{-1} หรือ $(^{\circ}C)^{-1}$

$$\Delta A = \gamma A_0 \Delta T \quad (2.6)$$

เมื่อ γ คือ สัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงพื้นที่ (Coefficient of Area Expansion) สำหรับของแข็งแบบไอโซทรอปิก (Isotropic) นั่นคือของแข็งที่ขยายตัวในทุกทิศเหมือนกันหมด จะได้ว่า $\gamma = 2\alpha$ (ดร. คชินท์ สายอินทวงศ์, 2557)

2.2.1.3 การขยายตัวเชิงปริมาตรเนื่องจากความร้อน (Volume Thermal Expansion)

โดยส่วนใหญ่ของแข็งจะมีปริมาตรเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น เช่นเดียวกับการขยายตัวเชิงเส้นและเชิงพื้นที่ ถ้าอุณหภูมิเปลี่ยนไปไม่มากปริมาตรที่เพิ่มขึ้น (ΔV) จะแปรผันตรงกับ (ΔT) และปริมาตรตั้งต้น (V_0) ดังสมการที่ 2.7 ซึ่ง α มีหน่วยเป็น K^{-1} หรือ $(^{\circ}C)^{-1}$

$$\Delta V = \beta V_0 \Delta T \quad (2.7)$$

เมื่อ β คือ สัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงปริมาตร (Coefficient of Volume Expansion) สำหรับสสารแบบไอโซโทรปิก คืออัตราการขยายตัวในทิศต่างๆ เท่ากันจะได้ว่า $\beta=3\alpha$ (ดร.คชินท์ สายอินทวงศ์, 2557)

2.2.2 การนำความร้อน (Thermal Conductivity)

การนำความร้อนเป็นปรากฏการณ์การส่งผ่านความร้อนของวัสดุจากบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงไปยังบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำสมบัติที่แสดงถึงความสามารถในการส่งผ่านความร้อนของวัสดุนี้เรียกว่า การนำความร้อนซึ่งสามารถนิยามด้วยสมการดังต่อไปนี้ (Fieldhouse, I.B, Lang and J.I., 1961)

$$Q = -kA \frac{dT}{dx} \quad (2.8)$$

โดยที่ A คือ พื้นที่หน้าตัดขวาง หน่วย m^2

ΔT คือ ความแตกต่างอุณหภูมิ หน่วย $^{\circ}C$

L คือ ความยาว หน่วย m

K คือ ค่าการนำความร้อน (Thermal Conductivity) หน่วย W/m.K

เมื่อ Q คือ ปริมาณความร้อนที่ถ่ายเท เทียบกับเวลาและพื้นที่ (heat flux) ในแนวตั้งฉากกับทิศทางการถ่ายเท k คือค่าการนำความร้อนและ dT/dx คือค่าระดับความต่างของอุณหภูมิ (Thermal Gradient)ตลอดแนววัสดุในทิศทางนำความร้อน Q และ k มีหน่วยเป็น W/m^2 และ W/m.K ตามลำดับสมการที่ (2.8) ใช้ได้เฉพาะขั้นการถ่ายเทความร้อนช่วง Steady - State เท่านั้นซึ่งเป็นช่วงที่การถ่ายเทความร้อนเปลี่ยนแปลงไปตามเวลาโดยเครื่องหมายติดลบในสมการแสดงถึงทิศทางการถ่ายเทความร้อนจากบริเวณอุณหภูมิสูงไปยังอุณหภูมิต่ำ (R.B. Bird, W.E. Stewart and E.N. Lightfoot., 2009) ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนของวัสดุนั้นโดยทั่วไปสามารถหาได้ดังสมการที่ (2.5) แต่เมื่อเขียนความสัมพันธ์ของอัตราส่วนของการเพิ่มของความยาวต่อความยาวเดิมกับผลต่างของอุณหภูมิในรูปของสมการไม่เชิงเส้นสามารถเขียนได้ดังสมการที่ (2.9)

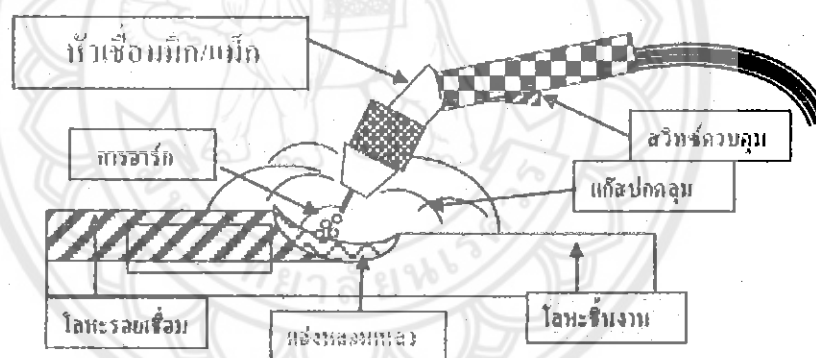
$$\left(\frac{l_0 - l_1}{l_0}\right) = \alpha_1(T_0 - T_1) + \alpha_2(T_0 - T_1)^2 + \dots + \alpha_n(T_0 - T_1)^n \quad (2.9)$$

โดยที่ α_1 คือ ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนที่ผลต่างของอุณหภูมิที่ $n = 1$

$\alpha_2, \alpha_3, \dots$, คือ ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนที่ผลต่างของอุณหภูมิที่ $n = 2, \dots, n$ ในการตรวจสอบความแม่นยำของสมการนั้นจะค่าของ Adjusted R-squared เป็นตัวกำหนดซึ่งค่าได้จะต้องมากกว่าสมการการขยายตัวเชิงเส้น (เสกสรร วินยางค์กุล, 2557)

2.3 กระบวนการเชื่อมมิก (Mig Welding)

การเชื่อมโลหะภายใต้แก๊สปกคลุมหรือการเชื่อมมิก (Metal Active Gas (MIG) Welding) เป็นกระบวนการเชื่อมไฟฟ้าแบบอาร์คเกิดขึ้นระหว่างลวดเชื่อมเปลือยที่ถูกป้อนมาอย่างต่อเนื่องกับโลหะชิ้นงานความร้อนแรงจากอาร์คทำให้ปลายลวดเชื่อมหลอมละลายเติมลงไปรวมตัวกับน้ำโลหะชิ้นงานได้เป็นแนวเชื่อม ขณะเดียวกันบริเวณการอาร์คจะถูกปกคลุมด้วยแก๊สซึ่งจ่ายมาจากหัวเชื่อมเพื่อเป็นการป้องกันแก๊สออกซิเจนหรือแก๊สอื่นๆจากบรรยากาศ



รูปที่ 2.3 กระบวนการเชื่อมมิก (Mig Welding)

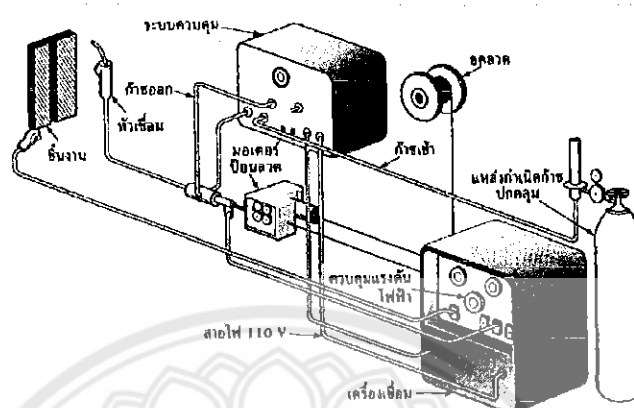
ที่มา : วัสดุศาสตร์(2556)

แก๊สที่ใช้ปกคลุมในกระบวนการเชื่อมมิก (MIG) คือ แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์หรือแก๊สผสมคาร์บอนไดออกไซด์กับแก๊สอาร์กอนใช้เชื่อมเหล็กกล้าคาร์บอน (Carbon Steel) และเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ (Low Carbon Steel) นิยมใช้แพร่หลายทั้งวิธีการเชื่อมกึ่งอัตโนมัติและวิธีอัตโนมัติ

วิธีกึ่งอัตโนมัติช่างเชื่อมจะเป็นผู้ดำเนินการเองทั้งหมด ตั้งแต่ตั้งแรงดัน ปรับอัตราการไหลของแก๊สและการเคลื่อนที่ของหัวเชื่อม ส่วนการเชื่อมอัตโนมัติส่วนใหญ่จะใช้กับอุตสาหกรรมการผลิตปริมาณงานเชื่อมมากๆ ขนาดลวดเชื่อมที่นิยมใช้กันมีตั้งแต่ 0.8 มิลลิเมตร ถึง 3.2 มิลลิเมตร บรรจุในม้วน (Spool) การเลือกใช้จะพิจารณาตามความหนาและชนิดของชิ้นงานโลหะที่นิยมใช้กับกระบวนการเชื่อมมิก (MIG) มีหลายประเภทคือ เชื่อมได้ด้วยอัตราความเร็วสูง ความร้อนไม่สะสมที่

ชิ้นงานมากลวดเชื่อมบ่อนอย่างต่อเนื่องไม่เสียเวลาเปลี่ยนให้การเชื่อมที่ตึกว่าไม่ต้องขจัดสแลคสามารถเชื่อมได้ทั้งโลหะและอโลหะ (มงคล เพิ่มฉลาด, 2556)

2.3.1 อุปกรณ์ที่ใช้สำหรับการเชื่อมโลหะด้วยวิธีมิก (MIG)



รูปที่ 2.4 อุปกรณ์เครื่องเชื่อมมิก (Mig Welding)

ที่มา: วัสดุศาสตร์ (2556)

2.3.1.1 เครื่องเชื่อม (Welding Machine) หรือต้นกำลังเป็นเครื่องต้นกำลังในการจ่ายกระแสไฟเชื่อมควบคุมการป้อนลวดและระบบควบคุมการจ่ายแก๊สคลุมเป็นเครื่องเชื่อมชนิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าคงที่ซึ่งแรงเคลื่อนทางออกจะคงที่ตลอดเวลาไม่ว่ากระแสไฟเชื่อมจะเปลี่ยนไปอย่างไร เครื่องเชื่อมประเภทนี้จะเพิ่มหรือลดพลังงานในการเชื่อมโดยปรับปริมาณแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ใช้ปกติจะเป็นเครื่องเชื่อมชนิดกระแสตรงกลับขั้ว (DCEP) มีทั้งแบบหม้อแปลงไฟฟ้าเรียงกระแสและแบบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ขนาด 150 แอมแปร์ - 1000 แอมแปร์รอบทำงาน (Duty Cycle) 60 เปอร์เซ็นต์ - 100 เปอร์เซ็นต์ (มงคล เพิ่มฉลาด, 2556)

2.3.1.2 ระบบการป้อนลวดและตัวควบคุม (Wire feeder System and Control) ชุดป้อนลวดจะประกอบอยู่ในชุดควบคุมการเชื่อม (Welding Control) ลักษณะการทำงานเป็นแบบความเร็วคงที่เพื่อใช้กับเครื่องเชื่อมแบบแรงเคลื่อนคงที่ สามารถเลือกระดับความเร็วในการป้อนลวดได้ตามความเหมาะสมกับงานที่จะเชื่อม(มงคล เพิ่มฉลาด, 2556)

2.3.1.3 หัวเชื่อมและชุดสายประกอบการเชื่อม (Welding Gun and Cable Assembly) ทำด้วยทองแดงหรือทองแดงผสมทำหน้าที่เป็นทางผ่านของลวดเชื่อมไปยังหัวฉีด (Nozzle) นอกจากนี้ยังทำหน้าที่เป็นตัวกลางจ่ายกระแสไฟให้กับลวดเชื่อมด้วยคุณสมบัติการเป็นตัวนำไฟฟ้า (มงคล เพิ่มฉลาด, 2556)

2.3.1.4 แหล่งจ่ายแก๊สเพื่อใช้ปกป้องและอุปกรณ์ควบคุมแก๊ส (Shielding Gun Supply and Controls) ทำหน้าที่ในการลดและควบคุมแรงดันให้ได้ปริมาณตามความต้องการหรือเหมาะสมกับการเชื่อมโพลาร์มีเตอร์ทำหน้าที่ในการควบคุมปริมาณการไหลของแก๊สซึ่งมีหน่วยวัดเป็น

ลูกบาศก์ฟุตต่อชั่วโมงหรือเป็นลิตรต่อนาทีอุปกรณ์ปรับความดันแก๊สจะมีลักษณะแตกต่างกันเช่นกรณีใช้อุปกรณ์ปรับความดันแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จะติดอุปกรณ์ทำความร้อน (Heater) เพื่อช่วยลดความชื้นของแก๊ส (มงคล เพิ่มฉลาด, 2556)

2.3.1.5 ลวดเชื่อม (Electrode Wire) เป็นลวดแบบสิ้นเปลือง (Consumable Electrode) ลักษณะของลวดเชื่อมเป็นเส้นโลหะเหมือนเส้นลวดไม่มีสารพอกหุ้มเรียกว่าลวดเปลือย (Solid Wire) เชื่อมจะถูกขับออกมาจากอุปกรณ์ควบคุมในอัตราเร็วที่เหมาะสมอย่างต่อเนื่อง (Continuous) ถูกผลิตเป็นเส้นยาวขดไว้ในม้วนมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางที่นิยมใช้ตั้งแต่ 0.8 มิลลิเมตร - 1.2 มิลลิเมตร การเลือกลวดเชื่อมให้มีสมบัติเหมาะสมกับชิ้นงานนั้นสามารถเลือกตามมาตรฐานต่างๆเช่น AWS,A 5.18 - 79, A5.28 - 9 (มงคล เพิ่มฉลาด, 2556)

2.3.2 วงจรการเชื่อมและกระแสเชื่อม

การเชื่อมมิก (MIG) มีลักษณะวงจรการเชื่อมประกอบด้วยระบบป้อนลวดเชื่อม (Wire Feeder System) จะเป็นตัวควบคุมการป้อนลวดเชื่อม เครื่องเชื่อมมักใช้เป็นชนิดแรงดันคงที่ (CV) กระแสเชื่อม การไหลของแก๊สคลุมและน้ำหล่อเย็น ส่วนหัวเชื่อมจะทำหน้าที่ให้ลวดเชื่อมและแก๊สคลุมไหลผ่านออกมาที่อาร์ค กระบวนการเชื่อมนี้จะใช้ไฟกระแสตรงและกระแสตรงที่ใช้ให้ประสิทธิภาพการเชื่อมสูงสุด คือตรงกลับขั้ว โดยลวดเชื่อมจะเป็นขั้วบวก (DCEP) ความร้อนที่ได้รับจากการอาร์คจะหนาแน่นที่ป้อหลอมเหลว จึงเกิดการซึมลึกมากผิวงานสะอาดเหมาะสมกับงานเชื่อมที่มีออกไซด์บนผิวงานหนา (มงคล เพิ่มฉลาด, 2556)

2.3.2.1 หลักการพิจารณาเลือกใช้แก๊สปกคลุมแนวเชื่อม

2.3.2.2 ชนิดของโลหะชิ้นงานและกระบวนการเชื่อมที่ใช้

2.3.2.3 ลักษณะการส่งถ่ายไอออนโลหะและลักษณะการอาร์ค

2.3.2.4 อัตราความเร็วของการเชื่อม

2.3.2.5 ความต้องการการหลอมลึกความกว้างรูปร่างและขนาดของรอยเชื่อม

2.3.2.6 สมบัติทางกลของรอยเชื่อมที่ต้องการ

2.3.2.7 ราคาของแก๊สที่ใช้

2.3.2.8 ความยาก - ง่ายในการจัดหาซื้อ

2.3.3 การเลือกใช้ลวดเชื่อมในการเชื่อมด้วยวิธีมิก (MIG)

ลวดเชื่อมชนิดเป็นสายยาวต่อเนื่องที่ใช้สำหรับการเชื่อมแบบมิก (MIG) โดยทั่วไปจะมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเล็กกว่าลวดเชื่อมชนิดที่เป็นแท่งยาวขนาดของลวดเชื่อมที่มีตั้งแต่ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.5 มิลลิเมตร ถึง 3.2 มิลลิเมตร เป็นขนาดของลวดเชื่อมมิกหรือลวดเชื่อมชนิดที่เป็นแท่งยาว สำหรับชิ้นงานบางปกติจะใช้ลวดเชื่อมที่มีตั้งแต่ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางที่ 0.5 มิลลิเมตร 0.8 มิลลิเมตรหรือ 0.9 มิลลิเมตรชิ้นงานความหนาปานกลางจะใช้ขนาด 1 มิลลิเมตรและชิ้นงานหนาจะใช้ขนาด 2.4 มิลลิเมตรหรือ 3.2 มิลลิเมตร

การเลือกใช้ขนาดของลวดเชื่อมให้เหมาะสมกับงานนั้น สิ่งสำคัญที่ต้องคำนึงถึง ได้แก่ ตำแหน่งของการเชื่อม โดยทั่วไปในการเชื่อมตำแหน่งอื่นๆ ที่ไม่ใช่ตำแหน่งในแนวราบ เช่น การเชื่อมในแนวตั้งหรือในแนวเหนือศีรษะ (Overhead) จะใช้ลวดเชื่อมขนาดเล็กๆ นอกจากนี้ต้องคำนึงถึงราคาของลวดเชื่อมด้วย ลวดเชื่อมที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางเล็กจะมีราคาต่ำน้ำหนักสูงกว่าลวดเชื่อมที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางใหญ่กว่า อย่างไรก็ตามสิ่งที่ต้องคำนึงอีกอย่างก็คืออัตราการเติมเนื้อโลหะ (Metal Deposition Rates) บนชิ้นงานการเลือกลวดเชื่อมให้เหมาะสมกับงานแต่ละชนิดด้วยเหตุผลต่อไปนี้

2.3.3.1 เพื่อให้โลหะของลวดเชื่อมเหมาะสมกับโลหะชิ้นงาน

2.3.3.2 เพื่อควบคุมสมบัติในการเชื่อม

2.3.3.3 เพื่อกำจัดออกซิเจนออกจากรอยเชื่อม

2.3.3.4 เพื่อปรับปรุงความสม่ำเสมอของเปลวไฟเชื่อมและเพื่อให้ได้ลักษณะการถ่ายเทโลหะตามที่ต้องการ (Metal Transfer Characteristics)

โดยปกติโลหะจากลวดเชื่อมจะเป็นชนิดเดียวกับโลหะชิ้นงานแต่ในหลายๆ กรณีก็จำเป็นต้องใช้ลวดที่มีโลหะจากลวดเชื่อมแตกต่างไปจากโลหะชิ้นงานโดยสิ้นเชิงเพราะโลหะผสมบางชนิดจะสูญเสียองค์ประกอบไปในขณะเชื่อม ในกรณีนี้จึงต้องเลือกใช้ลวดเชื่อมที่เหมาะสมสำหรับการเชื่อมและลวดเชื่อมนี้ต้องให้องค์ประกอบของโลหะงานที่ขาดหายไปโลหะชนิดที่ต้องใช้ลวดเชื่อมที่มีองค์ประกอบแตกต่างจากโลหะชิ้นงานได้แก่โลหะผสมระหว่างทองแดงกับ สังกะสี (Copper and Zinc Alloys) อะลูมิเนียมที่มีกำลังต่อทานแรงดึงสูงและโลหะผสมของเหล็กกล้าที่มีกำลังต้านทานแรงดึง (High - Strength Steel Alloys) นอกจากนี้จะต้องเติมองค์ประกอบของโลหะผสม (Alloying Elements) ลงในลวดเชื่อมแล้วยังต้องเติมตัวกำจัดออกซิเจน (Deoxidizers) และตัวขับไล่ (Expel) อื่นๆ ด้วยการเติมสารพวกนี้ลงไปเพื่อป้องกันการเกิดรูพรุนหรือความเสียหายที่จะเกิดต่อคุณสมบัติเชิงกลของโลหะชิ้นงาน ในการเชื่อมเหล็กกล้าคาร์บอน โดยใช้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เป็นแก๊สปกป้องรอยเชื่อม จะมีการสูญเสียองค์ประกอบของโลหะผสมไปด้วยวิธีการรวมตัวกับออกซิเจนตัวกำจัดออกซิเจนที่ใช้มากในลวดเชื่อมเหล็กกล้า (Steel Filler Wires) ได้แก่ แมงกานีส ซิลิกอนและอลูมิเนียม (มงคล เพิ่มฉลาด, 2556)

2.3.5 ลักษณะท่าเชื่อม

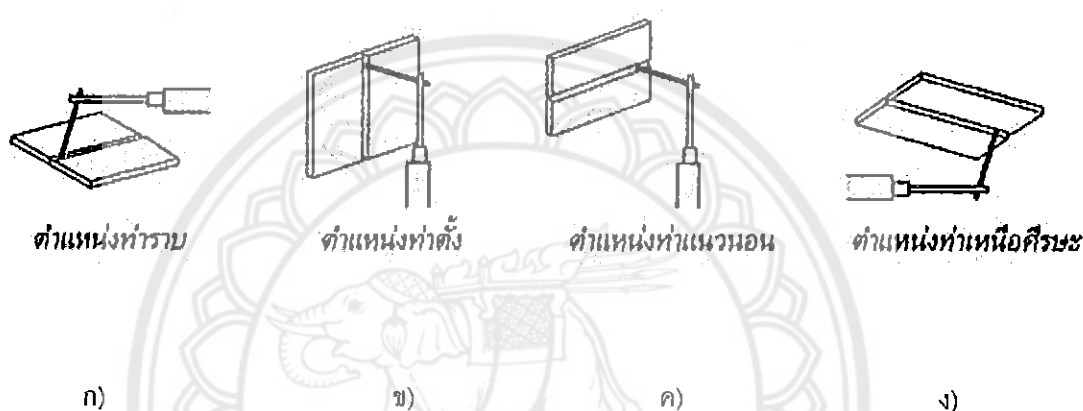
ท่าเชื่อมพื้นฐานทั่วไปมี 4 ตำแหน่งแสดงดังรูปที่ 2.5 คือ

2.3.5.1 ท่าราบ Flat Position (F) เป็นการเชื่อมชิ้นงานที่วางอยู่ในเดียวกันกับพื้นราบซึ่งจะไม่มีปัญหาเรื่องแรงดึงคูดของโลกจึงเป็นท่าที่ง่ายกว่าท่าเชื่อมอื่น แสดงดังรูป (ก)

2.3.5.2 ท่าระดับ Horizontal Position (H) เป็นตำแหน่งท่าเชื่อมที่ชิ้นงานจะวางอยู่ในแนวระดับซึ่งขนานกับแนวระนาบ แต่จะมีปัญหาเรื่องแรงดึงคูดของโลก ทำให้เกิดอุปสรรคในการเชื่อมส่วนใหญ่จะเกิดข้อบกพร่องคือรอยแห้วต้องใช้เทคนิคพิเศษในการเชื่อมจึงจะไม่เกิดข้อบกพร่องแสดงดังรูป (ข)

2.3.5.3 ท่าตั้ง Vertical Position (V) เป็นตำแหน่งท่าเชื่อมที่ชิ้นงานวางอยู่ในแนวตั้ง ซึ่งตั้งฉากกับแนวระนาบแต่จะมีปัญหาเรื่องแรงดึงดูดของโลกเช่นกัน ทำให้เกิดอุปสรรคในการเชื่อม เกิดเป็นข้อบกพร่องในการเชื่อมโดยทั่วไปจะเกิด Overlap ต้องใช้เทคนิคพิเศษในการเชื่อมจึงจะไม่เกิดข้อบกพร่องแสดงดังรูป (ค)

2.3.5.4 ท่าเหนือศีรษะ Overhead Position (O) เป็นตำแหน่งท่าเชื่อมที่ชิ้นงานวางอยู่ในตำแหน่งแนวระนาบแต่ต้องเชื่อมด้านบนดังนั้นอาจเกิดอันตรายขึ้นต่อผู้ปฏิบัติงานเชื่อมจากสะเก็ดไฟโลหะที่หลอมละลายเปลวไฟที่สะท้อนกลับเพราะฉะนั้นจะต้องสวมใส่อุปกรณ์ป้องกันอันตราย แสดงดังรูป (ง)



รูปที่ 2.5 แสดงตำแหน่งท่าเชื่อมมาตรฐานท่า

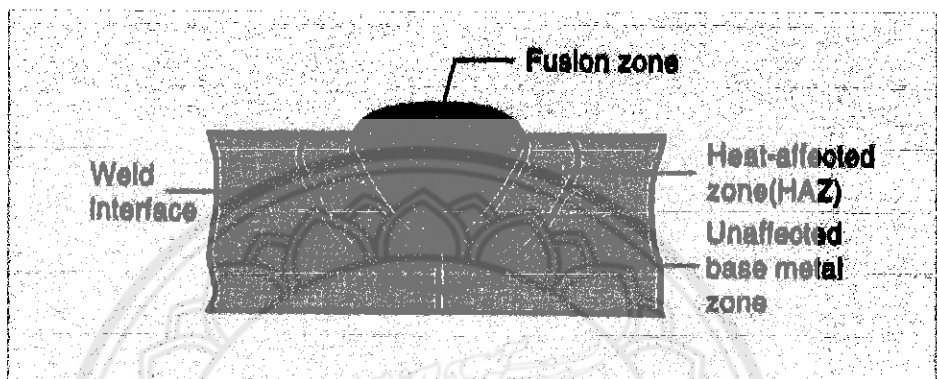
- ก) ท่าราบ
- ข) ท่าตั้ง
- ค) ท่าแนวนอน
- ง) ท่าเหนือศีรษะ

ที่มา : วัสดุศาสตร์ (2556)

2.3.6 ความร้อนที่เกิดขึ้นบริเวณแนวเชื่อม

ความร้อนที่เกิดขึ้นจากการเชื่อมไม่เพียงแต่จะทำให้เกิดการหลอมละลายของโลหะตรงรอยต่อหรือรอยประสาน (Weld Interface) ของชิ้นงานเท่านั้น ยังส่งผลต่อโครงสร้างของโลหะชิ้นงานที่อยู่ใกล้เคียงบริเวณที่หลอมละลายของรอยเชื่อมอีกด้วย บริเวณรอยเชื่อมแบ่งออกเป็น 3 ส่วน ส่วนแรก คือ รอยเชื่อม (Fusion Zone) ซึ่งเป็นส่วนที่เกิดจากการเย็นตัวของบริเวณหลอมละลายแสดงดังรูป 2.6 ส่วนที่สอง Heat Affected Zone (HAZ) เป็นบริเวณที่อยู่ใกล้เคียงแนวรอยเชื่อม ซึ่งมีอุณหภูมิสูงมากขณะทำการเชื่อมแต่มีอุณหภูมิต่ำกว่าที่จะเกิดการหลอมละลายเป็นเนื้อรอยเชื่อมและจะเกิดการเย็นตัวอย่างรวดเร็ว โดยเฉพาะชิ้นงานที่มีพื้นที่หน้าตัดมากหรือมีความหนาของชิ้นงานมาก จากการเย็นตัวที่รวดเร็วทำให้บริเวณ Heat Affected Zone (HAZ) มีโครงสร้างที่แข็ง

เปราะและมีความต้านทานต่อการแตกร้าวได้ต่ำจึงเป็นบริเวณที่มีโอกาสเกิดความเสียหายได้มากที่สุดแสดงดังรูป 2.6 ส่วนที่สาม (Unaffected Based Metal) เป็นบริเวณที่ต่อจาก Heat Affected Zone แสดงดังรูป 2.6 เป็นส่วนของโลหะชิ้นงานโดยความร้อนจากการเชื่อมและการเย็นตัวของรอยเชื่อมไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงเฟสเกิดขึ้นกับโครงสร้างของโลหะตลอดจนส่วนผสมทางเคมีเดิมหรืออาจกล่าวได้ว่าเนื้อโลหะชิ้นงานในบริเวณนี้ไม่ได้รับอิทธิพลจากความร้อนที่เกิดจากการเชื่อม (มงคล เพิ่มฉลาด, 2556)



รูปที่ 2.6 ความร้อนที่ส่งผลต่อบริเวณแนวเชื่อม
ที่มา : วัสดุศาสตร์ (2556)

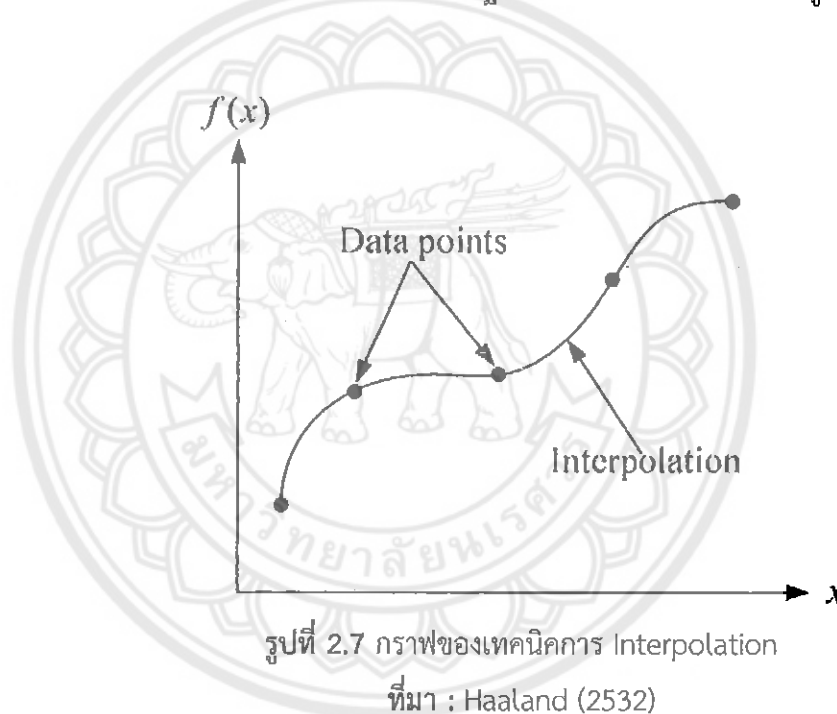


2.4 การเลือกเส้นกราฟที่เหมาะสมกับข้อมูล (Curve Fitting)

เมื่อพิจารณาปัญหาทางวิศวกรรมรวมถึงการทดลองทางวิทยาศาสตร์ต่างๆ จะพบว่าข้อมูลที่ได้โดยส่วนใหญ่จะเป็นจุดไม่ต่อเนื่อง (Discrete Points) อาจมีความต้องการที่จะวาดเส้นกราฟที่ต่อเนื่องผ่านจุดเหล่านั้น (To Fit a Curve Over Those Data points) เพื่อเป็นการอธิบายข้อมูลหรือต้องการทราบค่าที่อยู่ระหว่างจุดของข้อมูล ในทางวิศวกรรมจะอาศัยเทคนิคที่เรียกว่า Curve Fitting ซึ่งสามารถกระทำได้ 2 แนวทาง คือ

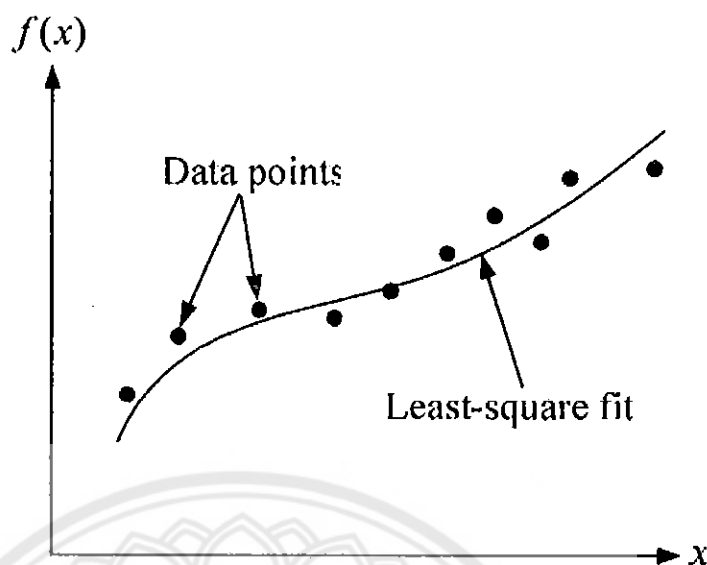
2.4.1 Interpolation

วิธีการ Interpolation จะลากเส้นกราฟซึ่งก็คือ ฟังก์ชัน ผ่านจุดทุกจุดของข้อมูลดังรูปที่ 2.7 เทคนิคนี้เหมาะสำหรับจุดข้อมูลที่ทราบหรือแน่ใจว่ามีความถูกต้องสูง เช่น ข้อมูลที่ได้จากการคำนวณที่ซับซ้อนหรือได้จากการทดลองตามวิธีมาตรฐานด้วยเครื่องมือวัดที่มีความถูกต้องสูง



2.4.2 Regression

เราจะสร้างเส้นกราฟหรือลาก Curve ให้ผ่านจุดข้อมูลที่เรามีให้มากที่สุดโดยเส้นกราฟที่สร้างขึ้นจะเป็นตัวแทนของข้อมูลบอกว่าข้อมูลมีความสัมพันธ์กันแบบใดหรือมีแนวโน้มจะเปลี่ยนแปลงไปอย่างไรเมื่อปริมาณในแกนหนึ่งเพิ่มขึ้น เทคนิคนี้จะเหมาะกับข้อมูลที่ได้จากการทดลอง (Experimental Data) โดยเฉพาะข้อมูลจากการทดลองจริง (ซึ่งมีความแปรปรวนได้มาก) เราอาจรู้จักเทคนิคนี้ในชื่อ Least Square Regression (Hu, 2542)



รูปที่ 2.8 กราฟของเทคนิค Least Square Regression
ที่มา : Haaland (2532)

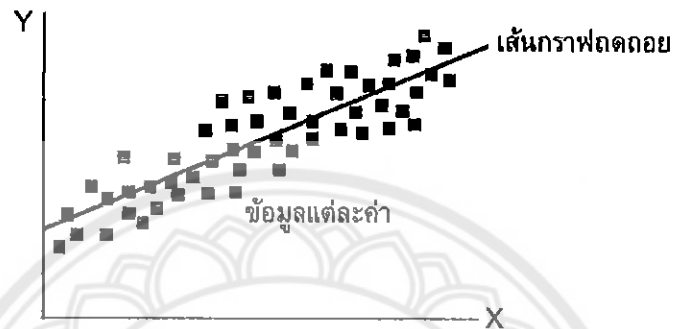
2.5 การวิเคราะห์สมการถดถอย (Regression Analysis)

การวิเคราะห์การถดถอย (Regression Analysis) เป็นวิธีทางสถิติที่ใช้หาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรเชิงปริมาณตั้งแต่สองตัวขึ้นไปเพื่อใช้ในการพยากรณ์ค่าของตัวแปรหนึ่งจากตัวแปรอื่นๆ ตัวแปรที่ใช้ในการวิเคราะห์การถดถอยมีสองแบบใหญ่ๆ คือ ตัวแปรอิสระ (Independent Variable or Regressor or Predictor) กับตัวแปรตาม (Dependent Variable) โดยที่ตัวแปรอิสระนั้นเป็นตัวแปรที่ทราบค่าและเป็นผู้กำหนดค่าของตัวแปรอิสระในการทดลองโดยที่คาดว่าตัวแปรอิสระนี้จะมีผลต่อตัวแปรตาม ซึ่งเป็นตัวแปรที่ไม่ทราบค่าและต้องการพยากรณ์หรือต้องการหาความสัมพันธ์ ตัวแปรอิสระมักแทนด้วย X และตัวแปรตามมักแทนด้วย Y การวิเคราะห์ การถดถอยระหว่างตัวแปรอิสระหนึ่งตัวและตัวแปรตามหนึ่งตัวโดยที่ ตัวแปร ทั้งสองมีความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงกันเรียก การวิเคราะห์ การถดถอยเชิงเส้นอย่างง่าย (Simple Linear Regression Analysis) หากความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรที่ไม่เป็นเส้นตรง เรียก (Nonlinear Regression Analysis) หากมีตัวแปรอิสระมากกว่าหนึ่งตัว แต่ตัวแปรตามเพียงตัวเดียวเรียก การวิเคราะห์การถดถอยพหุ (Multiple Regression Analysis) หากมีตัวแปรตามมากกว่า 1 ตัวแล้วการวิเคราะห์การถดถอยนั้นจะเรียกว่า (Multivariate Regression Analysis)

2.5.1 การวิเคราะห์การถดถอยอย่างง่าย (Simple Regression Analysis)

การวิเคราะห์การถดถอยอย่างง่าย (Simple Regression Analysis) เป็นการศึกษาคือความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร 2 ตัว (ในที่นี้คือตัวแปร X และ Y) ที่มีความสัมพันธ์ในลักษณะเชิงเส้น (Linear) โดยมีสมการถดถอย คือ $Y = \alpha + \beta X$ ในที่นี้ Y ก็คือ ค่าเฉลี่ยของ Y (ไม่ใช่ค่า Y

แต่ละค่า) เนื่องจากในการวิเคราะห์การถดถอยอย่างง่ายนั้น ตัวแปร X จะถูกกำหนดค่าไว้ก่อนและค่า Y จะเปลี่ยนแปลงไปตามตัวแปร X เนื่องจากค่า X ค่าหนึ่งจะมีค่า Y ที่เป็นคู่ของค่า X หลายๆค่าและเมื่อนำค่า X และ Y ทั้งหมดไปพล็อตบนแกน X, Y แล้วลากเส้นเชื่อมระหว่างจุดที่ปรากฏเส้นกราฟที่ได้จะเป็นเส้นตรงแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยของตัวแปร X กับตัวแปร Y ซึ่งคือ เส้นกราฟถดถอย (Regression Line)



รูปที่ 2.9 การกระจายของข้อมูลและเส้นกราฟถดถอย
ที่มา : พงระภี ศรีสวัสดิ์ (2557)

จากสมการเส้นตรง $Y = \alpha + \beta X$ ซึ่ง α และ β เป็นพารามิเตอร์ที่ไม่ทราบค่าจึงจะต้องประมาณค่าโดยใช้ข้อมูลจากตัวอย่าง โดยที่วิธีที่นิยมใช้ในการประมาณค่าของ α และ β ก็คือวิธีกำลังสองน้อยที่สุด (The Least Squares Method) ซึ่งจะแทนค่าของ α และ β ด้วยค่า a และ b โดยที่ a คือค่าคงที่ (Constant) เป็นค่าที่เส้นกราฟถดถอยตัดกับแกน Y ส่วน b เป็นความชัน (Slope) ของเส้นกราฟ ซึ่งแสดงถึงอัตราการเปลี่ยนแปลงของ Y เมื่อ X เปลี่ยนแปลง เรียกส่วนนี้ว่า สัมประสิทธิ์การถดถอย (Regression Coefficient) หรือสัมประสิทธิ์การพยากรณ์ สมการถดถอยอย่างง่ายเขียนได้ดังนี้

$$Y = a + bX \quad (2.10)$$

เมื่อ

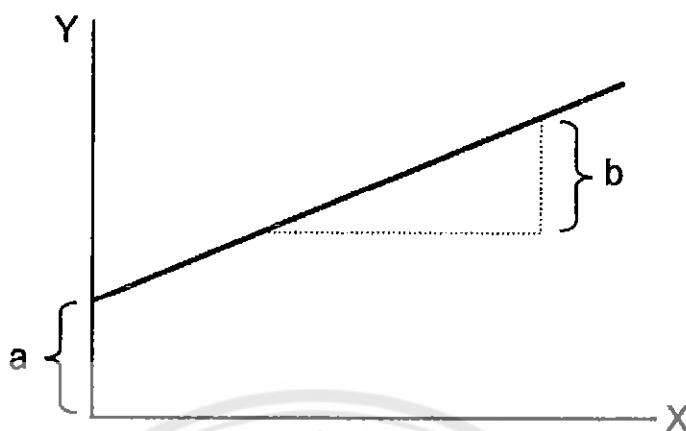
Y คือ ตัวแปรตาม (เนื่องจากค่าของ Y ขึ้นอยู่กับค่าของ X)

X คือ ตัวแปรอิสระหรือตัวแปรต้น

a คือ ค่าคงที่ (Constant) เป็นค่าที่ตัดกับแกน Y

b คือ ความชัน (Slope) ของเส้นกราฟ

สามารถเขียนเป็นกราฟสมการเส้นตรงได้ดังนี้



รูปที่ 2.10 กราฟสมการเส้นตรงของการถดถอย
ที่มา : พงระภี ศรีสวัสดิ์ (2557)

ค่าของตัวแปรในแนวแกน Y จากสมการถดถอยเชิงเส้นนั้นจะเป็นค่าที่มีการกระจายหรือข้อมูลจากการทดลองจริงมีความแปรปรวนได้มาก แน่แน่นอนว่าสมการถดถอยเชิงเส้นไม่สามารถจะลากผ่านค่าข้อมูลทุกค่าในแผนภาพการกระจาย ซึ่งสมการถดถอยเชิงเส้นไม่สามารถใช้คาดคะเนค่าตัวแปรตาม Y ทุกค่าได้ถูกต้องจากค่าตัวแปรอิสระ X ดังนั้น Regression Line คือเส้นที่ลากผ่านจุดๆ หนึ่งของกลุ่มค่าแนวแกน Y โดยมีเงื่อนไขว่า ค่า Y ทั้งหมดจะห่างจากเส้นตรงนี้อย่างสมดุลกันมากที่สุด ไม่ใช่ค่า Y ทุกค่าที่อยู่บนเส้นนี้ นั่นแปลว่ายังต้องมีสิ่งหนึ่งที่ต้องนึกถึงคือค่าความห่างของค่า Y ใดๆ กับจุดบนเส้น Regression Line ในแนวขนานกับเส้นแกน Y ค่าความห่างนี้เราเรียกว่า Error ใช้สัญลักษณ์แทนคือ ϵ แต่การหาค่า a และ b ตามวิธีที่ผ่านมานั้นเป็นการใช้กราฟ อาจจะทำให้เราได้ค่าที่ผิดพลาดไปบ้างอันเนื่องจากการเทียบค่าจาก Regression Line มายังแกน X และ Y อาจมีความคลาดเคลื่อนไป ซึ่งในทางปฏิบัติจึงไม่นิยมนำมาใช้ในการประมาณค่า แต่ต้องการสมการถดถอยหรือค่า a และ b ที่ทำให้คาดคะเนค่าตัวแปรตามได้ดีที่สุดหรือผิดพลาดน้อยที่สุด การประมาณค่า a และ b จากข้อมูล $(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_n, y_n)$ เพื่อให้ได้เส้นตรงที่เข้ากับข้อมูลได้ดีที่สุด

2.5.2 การวิเคราะห์ด้วยวิธีกำลังสองน้อยที่สุด (Method of Least Square) วิธีนี้เป็นการทำให้ผลรวมของค่าคลาดเคลื่อนมีค่าน้อยที่สุดและเป็นการรวมวิเคราะห์ จุด x_i และ y_i ทุกๆจุด ถ้าใช้สัญลักษณ์ \hat{y} แทนค่าคาดคะเนของตัวแปรตาม สมการถดถอยที่จะประมาณขึ้นคือ

$$\hat{y} = a + bx + \epsilon \quad (2.11)$$

การหาความชันของเส้นถดถอยที่ประมาณด้วยวิธีกำลังสองน้อยที่สุด มีสูตรดังนี้

$$a = \bar{y} - b\bar{x} \quad (2.12)$$

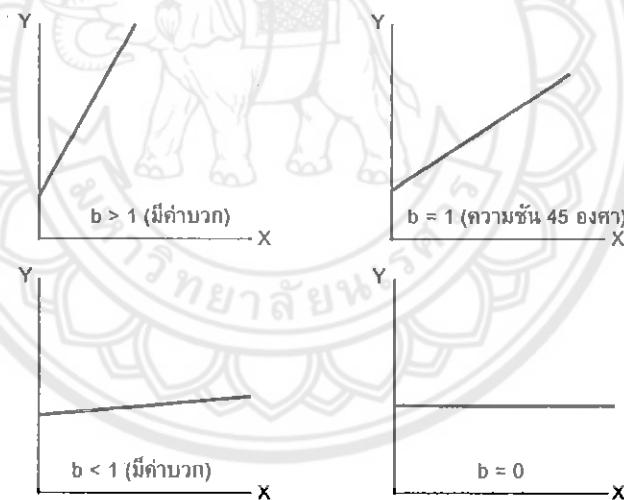
17222415

$$b = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$$

(2:13)

สัมประสิทธิ์การถดถอย (Regression Coefficient) หรือสัมประสิทธิ์การพยากรณ์เป็นค่าของ b ที่เป็นความชันของกราฟเส้นตรงที่เกิดจากสมการเชิงเส้นถ้าทราบค่าของ b และค่าของ a แล้วก็จะสามารถพยากรณ์ค่าของตัวแปร Y ได้ ซึ่งสรุปได้ดังนี้

1. ถ้า $b > 0$ แสดงว่า X และ Y มีความสัมพันธ์กันในทิศทางเดียวกัน กล่าวคือ ถ้า X มีค่าสูงขึ้นค่าของ Y ก็จะมีค่าสูงขึ้นตามไปด้วย
2. ถ้า $b < 0$ แสดงว่า X และ Y มีความสัมพันธ์กันในทิศทางตรงข้าม กล่าวคือ ถ้า X มีค่าสูงขึ้นค่าของ Y จะต่ำลง
3. ถ้า b มีค่าใกล้ 0 แสดงว่า X และ Y มีความสัมพันธ์กันน้อย
4. ถ้า $b = 0$ แสดงว่า X และ Y ไม่มีความสัมพันธ์กันเลย เส้นกราฟที่ได้จะเป็นเส้นตรงค่าของ Y จะมีค่าเท่ากับค่าคงที่ (a)
5. ถ้า $b = 1$ แสดงว่าความชันของเส้นกราฟมีค่าเท่ากับ 45 องศา ค่า X และ Y จะมีค่าเท่ากันในกรณีที่ค่าคงที่ a เท่ากับศูนย์



รูปที่ 2.11 สมการเส้นตรงของการถดถอยเมื่อ b มี ค่าแตกต่างกัน

ที่มา : พงระภี ศรีสวัสดิ์ (2557)

ลักษณะของเส้นกราฟถดถอยอย่างง่ายมีดังนี้

1. ค่า a เป็นค่าคงที่จะมีค่าเป็นบวก เมื่อเส้นกราฟตัดกับแกน Y เหนือเส้นแกน X ขึ้นไป ถ้าเส้นกราฟตัดที่จุดกำเนิดหรือจุดกำเนิด $(0,0)$ ค่า a จะมีค่าเป็นศูนย์ ณ จุดนี้ ค่า Y จะขึ้นอยู่กับผลของค่า X กับสัมประสิทธิ์การถดถอยเท่านั้น แต่ถ้าเส้นกราฟตัดกับแกน Y ต่ำกว่าเส้นแกน X ค่า a จะมีค่าเป็นลบ

2. ค่า b ที่เป็นค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยเป็นความชันของเส้นกราฟเป็นค่าที่แสดงถึงการเปลี่ยนแปลงของเส้นกราฟ เมื่อตัวแปรอิสระหรือตัวแปรต้น (X) เปลี่ยนแปลงไปหนึ่งหน่วย จะทำให้ตัวแปร Y เปลี่ยนแปลงไป b หน่วย ถ้าเส้นกราฟมีความชันมากการเปลี่ยนแปลงของตัวแปร X จะทำให้ค่าของ Y เปลี่ยนแปลงไปเป็นจำนวนมาก แต่ถ้าความชันมีค่าเท่ากับ 1 การเปลี่ยนแปลงของตัวแปร X จะส่งผลให้ค่าของ Y เปลี่ยนแปลงไปเป็นจำนวนที่เป็นสัดส่วนกับค่า X และถ้าความชันมีค่าต่ำ ($b < 1$) จะทำให้ค่าของ Y เปลี่ยนแปลงเป็นจำนวนน้อยกว่าค่าของ X

3. ในกรณีที่ a มีค่าเป็นศูนย์ และ b มีค่าเท่ากับ 1 เส้นกราฟจะผ่านจุดกำเนิดและความชันเป็น 45 องศา ซึ่งทำให้ค่าของ X และ Y มีค่าเท่ากัน

4. ถ้าเป็นกราฟชี้ไปทางควอดแรนท์ที่ 1 ($Q1$) ค่า b จะมีค่าเป็นบวก แต่ถ้าเส้นกราฟชี้ไปทางควอดแรนท์ที่ 2 ($Q2$) ค่า b จะมีค่าเป็นลบ จากสมการถดถอยอย่างง่าย (2.10) สามารถหาค่าของ a และ b ได้ จากสูตรดังนี้

$$a = \bar{Y} - b\bar{X} \quad (2.14)$$

$$b = \frac{\sum xy}{\sum y^2} \quad (2.15)$$

เมื่อ

a คือ ค่าคงที่ของสมการถดถอยอย่างง่าย

b คือ สัมประสิทธิ์การถดถอยหรือสัมประสิทธิ์การพยากรณ์

\bar{X} คือ มัชฌิมเลขคณิตของตัวแปรอิสระหรือตัวแปรต้น

\bar{Y} คือ มัชฌิมเลขคณิตของตัวแปรตาม

x คือ ค่าเบี่ยงเบนจากมัชฌิมเลขคณิตของตัวแปรต้นมีค่าเท่ากับ $X - \bar{X}$

y คือ ค่าเบี่ยงเบนจากมัชฌิมเลขคณิตของตัวแปรตามมีค่าเท่ากับ $Y - \bar{Y}$

2.5.3 เบื้องต้นในการวิเคราะห์การถดถอยอย่างง่ายมีดังนี้

2.5.3.1 ตัวแปรอิสระหรือตัวแปรต้น (X) และตัวแปรตาม (Y) มีความสัมพันธ์กันในแบบเชิงเส้นตามสมการเส้นตรงก็คือ $Y = a + bX$

2.5.3.2 ตัวแปรตามต้องเป็นข้อมูลชนิดต่อเนื่อง ในขณะที่ตัวแปรอิสระหรือตัวแปรต้นจะต้องเป็นตัวแปรที่ผู้วิจัยสามารถกำหนดค่าได้ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการเปลี่ยนแปลงของค่า X จะทำให้ค่าของ Y ที่เกิดจากการสุ่มเปลี่ยนแปลงไป

2.5.3.3 ความแปรปรวนของ Y สำหรับแต่ละค่าของ X ที่กำหนดจะต้องมีค่าเท่ากัน คุณสมบัติข้อนี้ของการวิเคราะห์การถดถอยเรียกว่า Homoscedasticity (พงระภี ศรีสวัสดิ์, 2557)

2.5.4 การวิเคราะห์สหสัมพันธ์ (Correlation Analysis)

เมื่อทำการหาตัวแบบเชิงเส้นด้วยการวิเคราะห์การถดถอยจะต้องมีการประเมินตัวแบบนั้นด้วยว่ามีความเหมาะสมในการนำไปใช้งานหรือไม่ ในที่นี้จะพูดถึงตัวสถิติ ค่า R^2 (R - Squared)

โดยพูดถึงข้อจำกัดและความหมายอื่นๆ ซึ่งในบางครั้งการที่ค่า R^2 มีค่าต่ำอาจไม่ได้หมายความว่าไม่ดี ทุกครั้งไปและเช่นกันค่า R^2 ที่มีค่าสูงก็ไม่ได้มีความหมายในเชิงบวกเสมอไป

การหา Coefficient of Determination เป็นการคำนวณหาตัวชี้วัดว่าสมการนี้สมควร จะได้รับการยอมรับมากน้อยเพียงใด หลักการคือหาค่า Error จากการเปลี่ยนแปลงค่า X ซึ่งเป็นการ เปลี่ยนแปลงกับค่า Error รวมทั้งหมดถ้าค่าที่ได้ใกล้เคียงกันแสดงว่า ยอมรับได้ ถ้าน้อยก็แสดงว่าค่า Error อื่นๆ มีปนอยู่มาก อาจจะไม่สามารถยอมรับสมการนี้ได้ เราเรียกตัวชี้วัดนี้ว่า R – Square (R^2)

$$R^2 = \frac{(SS_{Regression})100}{SS_{Total}} \% \quad (2.16)$$

R Square (\bar{R}) หมายถึง ค่า R Square ที่มีการปรับแก้ให้เหมาะสมใช้ในกรณีที่กลุ่มตัวอย่างมีจำนวน น้อย

$$\bar{R} = [1 - \frac{(n-1)}{n-p}(1-R^2)]100\% \quad (2.17)$$

Predicted R – Squared หมายถึง ค่า R Square จะเป็นตัวบ่งชี้ว่าตัวแบบที่เราใช้นั้นสามารถทำนาย ค่าตอบสนองค่าใหม่ได้ดีขนาดไหน (สวดี นำพาเจริญ, 2559)

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

เสกสรรค วินยางคกุล (2557) ได้ทำการศึกษาการประมาณค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทาง ความร้อนแบบไม่เชิงเส้นของโลหะผสม และหาความสัมพันธ์ของค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความ ร้อนกับอัตราส่วนของโลหะแต่ละชนิด ได้แก่ เหล็ก (Fe), คาร์บอน (C), นิกเกิล (Ni), โครเมียม (Cr), โมลิบดีนัม (Mo), ซิลิกอน (Si) และแมงกานีส (Mn) ที่ผสมอยู่จากผลการศึกษาพบว่า โลหะผสมแต่ละ ชนิดนั้นจะเห็นได้ว่าสมการไม่เชิงเส้นจะให้ค่าของ R-squared ดีกว่าสมการเส้นตรงในการประมาณ ค่าของสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนในส่วนขององค์ประกอบของโลหะผสมที่แยกวิเคราะห์ ในแต่ละชนิดของโลหะนั้นโลหะเหล็ก, นิกเกิล และโครเมียม นั้นจะส่งผลต่อการลดลง ของค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนในส่วนของโลหะที่ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทาง ความร้อนเพิ่มขึ้นนั้นได้แก่ คาร์บอน, โมลิบดีนัม, ซิลิกอน และแมงกานีส

C.P. WONG and RAJA S. BOLLAMPALLY (1999) ได้ทำการศึกษาปัจจัยค่าการนำความ ร้อน ค่าความยืดหยุ่นและค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่เติมอนุภาคเซรามิก สำหรับบรรจุภัณฑ์อิเล็กทรอนิกส์ผลการศึกษาพบว่า ผลกระทบค่าการนำความร้อนและสัมประสิทธิ์ การขยายตัวของเรซินอีพ็อกซีที่เติมด้วยสารตัวเติมเซรามิก เช่น ซิลิกา อะลูมินา และไนไตรด์ อลูมิเนียม ซึ่งข้อมูลที่ได้นำมาเปรียบเทียบกับสมการทางทฤษฎีที่ใช้ในการวิเคราะห์สมบัติของสาร ผสมสองเฟส พบว่ารูปแบบของ Agari ให้ค่าการนำความร้อนแบบคอมโพสิตได้ดี ในส่วนรูปแบบของ Hashin –Shtrikman ให้ค่าความยืดหยุ่นค่อนข้างดีที่ความเข้มข้นต่ำของสารเติมเต็ม

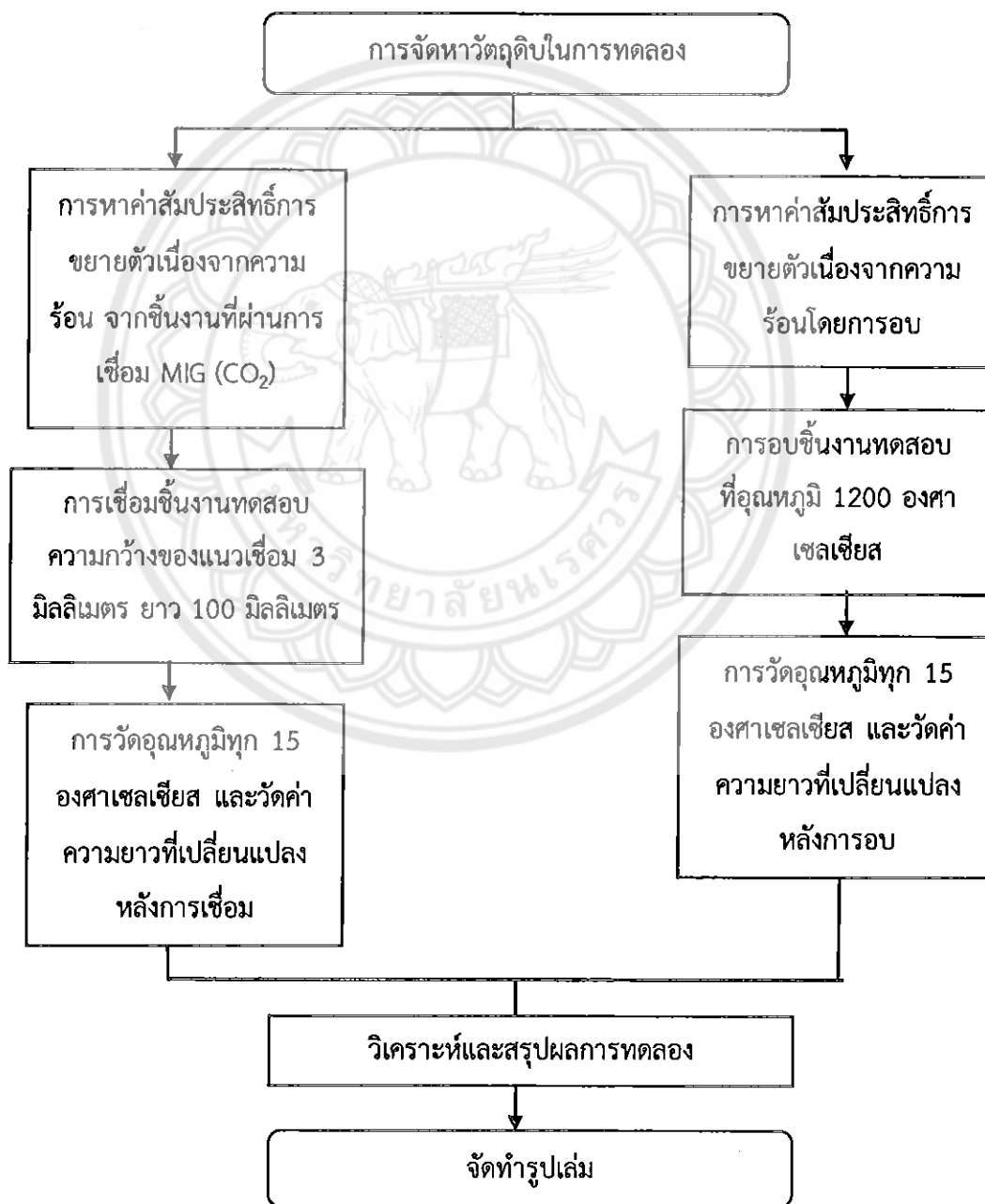
J D James and J A Spittle (2000) กระบวนการที่อุณหภูมิสูงเช่นที่เกี่ยวข้องกับการแข็งตัวและการเสีรูปเชิงกลอาจได้รับอิทธิพลอย่างมากจากความเค้นและความเครียดที่เกิดจากการขยายตัวและการหดตัวของวัสดุในรูปของอุณหภูมิ ด้วยการใชแบบจำลองกระบวนการคอมพิวเตอร์ที่เพิ่มขึ้นสำหรับการดำเนินงานเหล่านี้จึงมีความต้องการข้อมูลเชิงปริมาณมากขึ้นเกี่ยวกับค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนของโลหะผสมที่เกี่ยวข้องในอุณหภูมิที่เกี่ยวข้อง วัสดุที่มีอุณหภูมิลดลงสูงกว่ามีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนที่ต่ำกว่าโดยประมาณสำหรับวัสดุที่หลอมละลายที่อุณหภูมิสูงกว่า 600 องศาเซลเซียส คือ มีการขยายตัวเชิงเส้นประมาณ 2% เมื่อถูกทำให้ร้อนจากอุณหภูมิห้องไปยังอุณหภูมิลดลง



บทที่ 3

วิธีดำเนินงานโครงการ

การดำเนินงานในการหาค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อน (Coefficient of Thermal Expansion – COE) เมื่อชิ้นงานได้รับการเชื่อมด้วยวิธี MIG (CO_2) และความร้อนจากการอบ (Heat Treatment) ซึ่งค่า COE อาจได้รับผลกระทบจากโครงสร้างจุลภาค มีขั้นตอนการดำเนินงานดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แสดงขั้นตอนการดำเนินงาน

3.1 วัสดุและอุปกรณ์

3.1.1 วัสดุที่ใช้ในโครงการงาน

วัสดุที่ใช้ในโครงการงานนี้ จะใช้เหล็กแผ่นชนิด SPCD ซึ่งผ่านกระบวนการขึ้นรูปแบบรีดเย็น มีขนาดและส่วนผสมทางเคมี แสดงดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 องค์ประกอบทางเคมีของเหล็ก กระบวนการขึ้นรูปและขนาด

ชนิดเหล็ก	องค์ประกอบทางเคมี%					ขนาด (มิลลิเมตร)		
	C	Mn	Si	P	S	กว้าง	ยาว	หนา
SPCD	0.02	0.08	0.07	0.018	0.005	21.100	100	1.4

3.1.2 เครื่องมือ อุปกรณ์ และสารเคมีที่ใช้ในการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

3.1.2.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ในการทดสอบ

- ก. ลวดเชื่อม ER 80 S - B2 ขนาด 0.8 มิลลิเมตร
- ข. เครื่องเชื่อมด้วยวิธี MIG (CO_2) รุ่น Miller CP 300
 - แรงดันไฟฟ้า 16 - 20 โวลต์
 - ค่าความเร็วในการป้อนลวดเชื่อม 100 - 200 รอบ/นาที
 - ค่าแรงดันการไหลของแก๊สปกคลุม 2 - 5 บาร์
- ค. ฉนวนกันความร้อน (Insulator)
- ง. เครื่องเทอร์โมคัปเปิล
- จ. เต้าอบชิ้นงาน
- ช. เวอร์เนียคาลิเปอร์ชนิดดิจิตอล

3.2 การหาค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อน จากชิ้นงานที่ผ่านการเชื่อม MIG (CO_2)

การเชื่อม MIG (CO_2) มีการใช้งานมากในโรงงานอุตสาหกรรมซึ่งชิ้นงานที่ต้องการเชื่อมจะได้รับความร้อนในกระบวนการดังกล่าวและมีการขยายตัว การหาค่า COE จะทำในระหว่างการเย็นตัว ภายหลังจากการเชื่อม โดยมีขั้นตอนเตรียมชิ้นงาน ดังต่อไปนี้

3.2.1 การตั้งกระแสนเชื่อมแบบประเภทกลับหัว (DCEP) โดยอิเล็กโตรดจับที่หัวบวกและชิ้นงานถูกจับที่หัวลบ ตั้งระยะห่างระหว่างลวดเชื่อมกับชิ้นงาน 5 มิลลิเมตร ทำการเชื่อมชิ้นงานในตำแหน่งท่าราบ (Flat Position) มุมของลวดเชื่อมตั้งฉาก 45 องศา กับชิ้นงานเชื่อมโดยใช้กระบวนการเชื่อมอาร์คด้วยเส้นลวดภายใต้แก๊สปกคลุม CO_2

3.2.2 การตั้งค่าในการปฏิบัติงานเชื่อม ได้แก่ กระแสไฟฟ้าที่ 95 แอมป์ แรงดันไฟฟ้าที่ 16 - 20 โวลต์และความเร็วในการป้อนลวดเชื่อมที่ 100 - 200 รอบต่อนาทีและแรงดันไหลของแก๊ส CO₂ ที่ปกคลุมที่ 2 - 5 บาร์ ของแนวเชื่อมตามการออกแบบการทดลองที่ได้กำหนดไว้

3.2.3 ทำการเชื่อมแนวเชื่อมบนชิ้นงานทดลอง ขนาดและแนวเชื่อม 3 มิลลิเมตร ความยาวของการเชื่อมเท่ากับ 100 มิลลิเมตร

3.2.4 นำชิ้นงานที่ผ่านการเชื่อม ใส่ลงไปในกล่องฉนวนกันความร้อน (Insulator)

3.2.5 ทำการตรวจวัดขนาดที่เปลี่ยนแปลงไปด้วยเครื่องเวอร์เนียคาลิเปอร์ชนิดดิจิตอลของชิ้นงานในระหว่างการเย็นตัวในอากาศที่ทุกๆ 15 องศาเซลเซียส จนถึงอุณหภูมิห้องด้วยเทอร์โมคัปเปิล

3.2.6 ทำการเชื่อมและวัดขนาดชิ้นงานจำนวน 3 ครั้ง

3.3 การหาค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อนโดยการอบ

นำชิ้นงานเหล็ก SPCD ไปตรวจหาค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อนด้วยการอบ (Heat Treatment) โดยมีขั้นตอนเตรียมชิ้นงาน ดังต่อไปนี้

3.3.1 เตรียมชิ้นงานให้มีขนาด กว้าง 200 มิลลิเมตร และยาว 200 มิลลิเมตร

3.3.2 นำชิ้นงานนำไปอบที่อุณหภูมิ 1200 องศาเซลเซียส

3.3.3 ทำการตรวจวัดขนาดที่เปลี่ยนแปลงไปด้วยเครื่องเวอร์เนียคาลิเปอร์ชนิดดิจิตอลของชิ้นงานในระหว่างการเย็นตัวในอากาศที่ทุกๆ 15 องศาเซลเซียส จนถึงอุณหภูมิห้องด้วยเทอร์โมคัปเปิล

3.3.4 ทำการอบและวัดขนาดชิ้นงานจำนวน 3 ครั้ง ครั้งละ 1 ชิ้น

3.4 วิเคราะห์ผลการทดลอง

ภายหลังจากการอบและเชื่อมเสร็จสิ้นแล้วทำการบันทึกผลการทดลองโดยการบันทึกค่าอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไปตามที่เรากำหนดและค่าการขยายตัวของเหล็กเนื่องจากความร้อนจากการอบและจากการเชื่อม ซึ่งจะต้องนำค่าที่เราบันทึกมาหาค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อนทั้ง 2 วิธี วิธีแรก การหาค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อนจากการอบ วิธีที่สอง การหาค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อนจากการเชื่อม ซึ่งจะมีวิธีขั้นตอนในการวิเคราะห์ข้อมูลดังนี้

นำค่าความยาวของชิ้นงาน (ΔL) และอุณหภูมิ (ΔT) ที่ได้จากการตรวจวัดภายหลังการเชื่อม (3.2) และการอบทางความร้อน (3.3) มาสร้างความสัมพันธ์และหาค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อน (α) ตามสมการ (3.1) (Touloukian Y S, Kirby R K, Taylor R E and Desai P D, 1975)

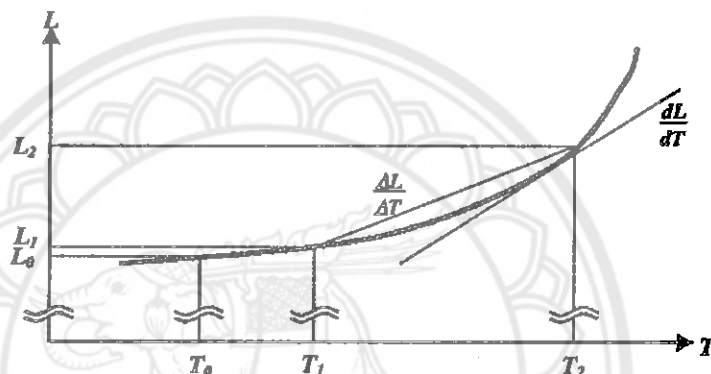
$$\alpha = \frac{dL/L}{dT} \quad (3.1)$$

โดย

$$dL = L_2 - L_1$$

$$dT = T_2 - T_1$$

เมื่อ L_0 = ความยาวเริ่มต้นที่อุณหภูมิ T_0 เมื่อชิ้นงานได้รับความร้อนมีการขยายตัวเป็น L_1 ที่อุณหภูมิ T_1 และขยายตัวต่อไปมีความยาวเป็น L_2 ที่อุณหภูมิ T_2



รูปที่ 3.2 ความยาว (L) ที่เปลี่ยนไปของตัวอย่างชิ้นงานที่ฟังก์ชันอุณหภูมิ (T)
ที่มา : Touloukian Y S, Kirby R K, Taylor R E and Desai P D (1975)

นำค่าความยาวของชิ้นงาน (ΔL) และอุณหภูมิ (ΔT) ที่ได้จากการตรวจวัดภายหลังการเชื่อม (3.2) และการอบทางความร้อน (3.3) มาสร้างความสัมพันธ์โดยที่ค่าความยาวของชิ้นงาน (ΔL) เป็นแกน Y และอุณหภูมิ (ΔT) เป็นแกน X นำมาหาค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อน (α) และนำชุดข้อมูลที่ได้จากการพล็อตกราฟมาหาความเหมาะสมของสมการด้วยวิธีกำลังสองน้อยที่สุด (Method of least square) ตามสมการ (2.13)

3.5 การจัดทำรูปเล่มรายงาน

รวบรวมข้อมูลจากการปฏิบัติจริง และทฤษฎีต่างๆที่เกี่ยวข้องกับมาประกอบ เพื่อจัดทำรูปเล่มรายงานวิจัยโครงการตามรูปแบบรายงานที่ถูกต้อง

บทที่ 4

ผลการทดลอง และการวิเคราะห์

เมื่อนำชิ้นงานเหล็กกล้าชนิด SPCD ไปทำการเชื่อมมิกซ์ (MIG) และอบตามขั้นตอนในหัวข้อ 3.2 และ 3.3 ผลของการเปลี่ยนแปลงความยาวของชิ้นงานดังกล่าวจะได้ผลการทดลอง และวิเคราะห์หาค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อนในบทนี้

4.1 การวิเคราะห์หาค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อนจากการเชื่อมมิกซ์ (MIG)

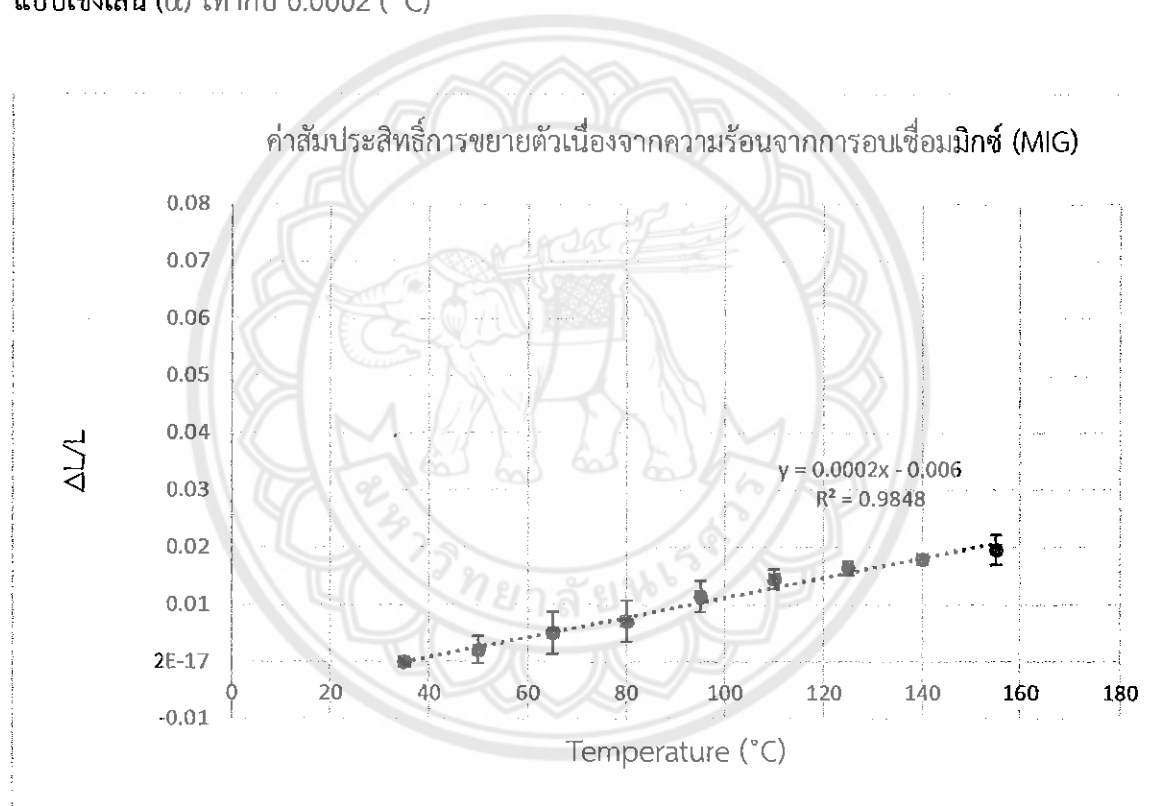
ค่าความยาวที่เปลี่ยนแปลงไปของเหล็กชนิด SPCD ที่ผ่านการเชื่อม (MIG) โดยวัดค่าความยาวเมื่ออุณหภูมิลดลงทุกๆ 15 องศาเซลเซียส แสดงได้ดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ค่าความยาวที่เปลี่ยนแปลงไปของเหล็กชนิด SPCD ที่ผ่านจากการเชื่อมมิกซ์ (MIG) เมื่ออุณหภูมิลดลงทุกๆ 15 องศาเซลเซียส

อุณหภูมิ(°C)		ค่าความยาวที่เปลี่ยนแปลงไปเฉลี่ย (μm)								
		155	140	125	110	95	80	65	50	35
ชิ้นงาน										
1		21.589	21.570	21.564	21.532	21.455	21.425	21.398	21.312	21.210
2		21.685	21.682	21.687	21.632	21.597	21.467	21.396	21.321	21.296
3		21.736	21.654	21.576	21.521	21.439	21.321	21.288	21.262	21.255
ค่าเฉลี่ย		21.670	21.635	21.609	21.562	21.497	21.404	21.361	21.298	21.254

เมื่อนำค่าเฉลี่ยของความยาวที่เปลี่ยนแปลงในตารางที่ 4.1 มาสร้างความสัมพันธ์กับอุณหภูมิมีความสัมพันธ์ แสดงได้ดังรูปที่ 4.1 เป็นกราฟการถดถอยเชิงเส้น (linear regression) ที่ได้จากการสร้างกราฟด้วย Excel จากรูปจะเห็นว่าความยาวของเหล็กมีค่าลดลงตามอุณหภูมิลดลง เนื่องจากที่อุณหภูมิสูงเหล็กจะได้รับพลังงานทำให้อะตอมภายในโครงสร้างเกิดการสั่น เป็นเหตุให้ระยะห่างระหว่างอะตอมเปลี่ยนแปลงไปเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้ค่าความยาวที่เปลี่ยนแปลงเพิ่มมากขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น (ดร.คชินท์-สายอินทวงศ์, 2557)

เมื่อหาความสัมพันธ์เชิงเส้นจากชุดข้อมูลที่ได้จะเขียนความสัมพันธ์ระหว่างค่าความยาวที่เปลี่ยนแปลงไปกับอุณหภูมิได้ดังสมการ $y = 0.0002x - 0.006$ มีค่าความแม่นยำ (R^2) = 0.9848 ซึ่งมีค่าเข้าใกล้ 1 แสดงว่าสมการเส้นตรงดังกล่าว มีความสอดคล้องกับชุดข้อมูลและเมื่อเปรียบเทียบกับสมการเส้นตรงที่ได้จากกราฟในรูปที่ 4.1 กับสมการ (2.5) จะได้ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อนแบบเชิงเส้น (α) เท่ากับ $0.0002 \text{ (}^\circ\text{C)}^{-1}$



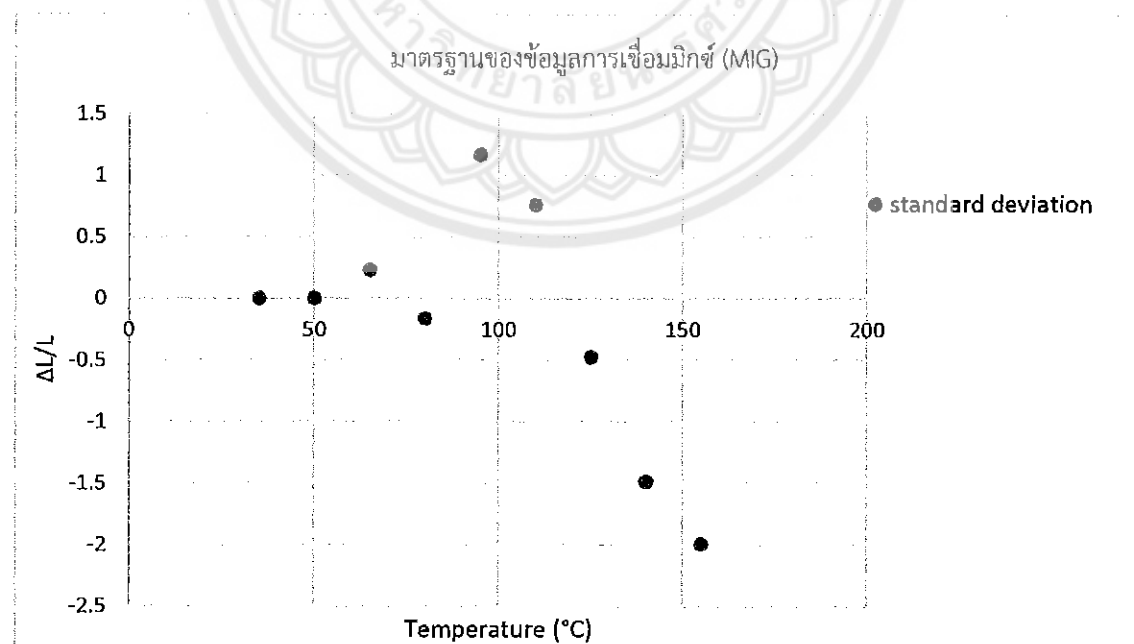
รูปที่ 4.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ค่าความยาวเฉลี่ยที่เปลี่ยนแปลงไปกับอุณหภูมิที่ลดลงทุกๆ 15 องศาเซลเซียสของเหล็ก SPCD ที่ผ่านการเชื่อมมิกซ์ (MIG)

นอกจากวิธีการถดถอยเชิงเส้น (linear regression) ที่สามารถใช้ตรวจสอบความเหมาะสมของสมการกับชุดข้อมูลจากการทดลอง ยังสามารถหาได้โดยใช้วิธีกำลังสองน้อยที่สุด (least square method) ดังที่อธิบายรายละเอียดไว้ใน 2.5.2 การทำนายค่า y จากชุดข้อมูลการทดลองด้วยวิธีกำลังสองน้อยที่สุด (least square method) โดยใช้ Excel สามารถคำนวณได้ด้วยการใช้ฟังก์ชัน TREND จากการทดลองได้ค่า y จากการทำนายมีค่าแสดงได้ดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ข้อมูลต่างๆ ที่ได้จากการทดลองเชื่อมมิกซ์ (MIG) ในการนำมาวิเคราะห์หาความเหมาะสมของสมการ

Temperature (°C)	Average	$\Delta L/L$	TREND	Residual	standard deviation
155	21.67	0.019573	0.02042	-0.00085	-1.19511
140	21.635	0.017926	0.018479	-0.00055	-0.78014
125	21.602	0.016373	0.01634	0.0000336	0.047425
110	21.562	0.014491	0.013783	0.000708	0.999084
95	21.497	0.011433	0.01069	0.000743	1.049039
80	21.404	0.007057	0.007632	-0.00057	-0.81002
65	21.361	0.005034	0.006454	-0.00142	-2.00291
50	21.398	0.006775	0.006775	0	0
35	21.254	0	0	0	0

จากตารางที่ 4.2 จะเห็นว่าค่า Residual ซึ่งคือค่าความต่างระหว่างค่า y ของจากการทดลองกับค่า y ที่ได้จากการคำนวณโดยวิธีกำลังสองน้อยที่สุด (least square method) และ standard deviation ได้มาจากค่า Residual สามารถสร้างความสัมพันธ์กับอนุกรม แสดงได้ดังรูปที่ 4.2 ซึ่งจะเห็นได้ว่าการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ แสดงว่าข้อมูลนี้เหมาะสมกับสมการเชิงเส้น



รูปที่ 4.2 กราฟมาตรฐานของข้อมูลการเชื่อมมิกซ์ (MIG)

4.2 การวิเคราะห์หาค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อนจากการอบ

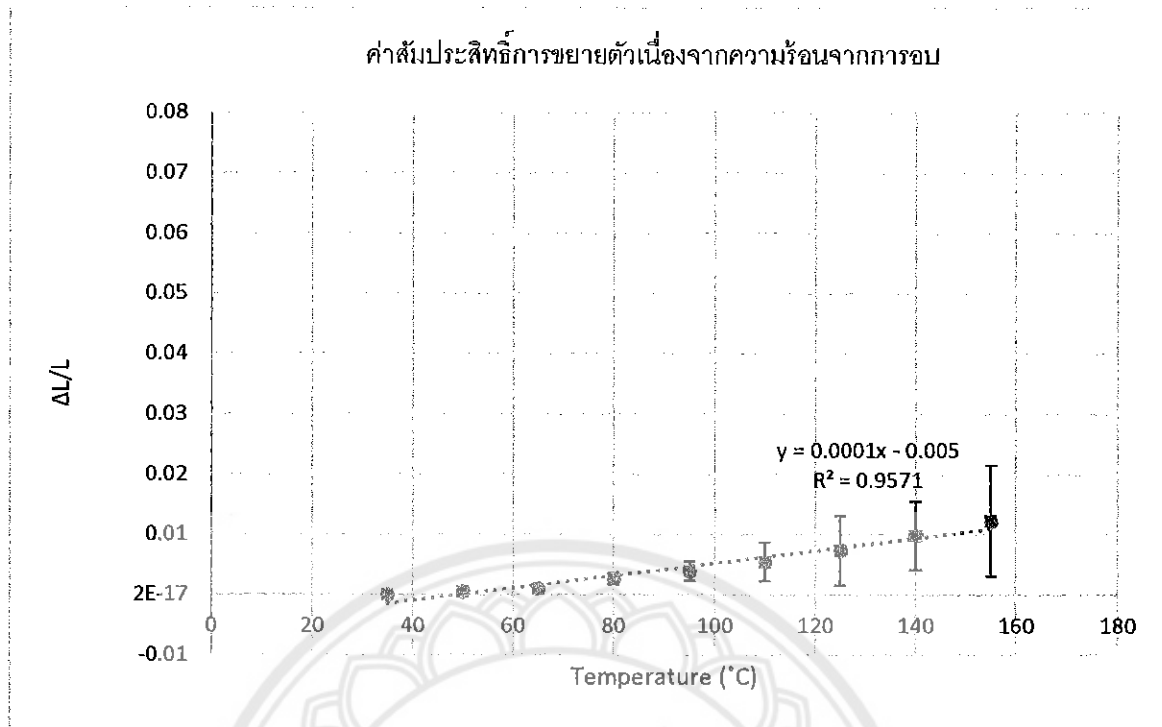
ค่าความยาวที่เปลี่ยนแปลงไปของเหล็กชนิด SPCD ที่ผ่านการอบโดยวัดค่าความยาวเมื่ออุณหภูมิ ลดลงทุกๆ 15 องศาเซลเซียส แสดงดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.3 ค่าความยาวที่เปลี่ยนแปลงไปเนื่องจากความร้อนของเหล็กชนิด SPCD ที่ผ่านการอบเมื่อ อุณหภูมิลดลงทุกๆ 15 องศาเซลเซียส

		ค่าความยาวที่เปลี่ยนแปลงไป(μm)								
		155	140	125	110	95	80	65	50	35
อุณหภูมิ(°C)	ชิ้นงาน									
	1	21.506	21.528	21.460	21.462	21.455	21.443	21.438	21.420	21.406
2	21.877	21.744	21.689	21.586	21.511	21.475	21.401	21.399	21.395	
3	21.604	21.559	21.523	21.502	21.489	21.453	21.422	21.411	21.398	
เฉลี่ย	21.662	21.610	21.557	21.517	21.485	21.457	21.420	21.410	21.400	

เมื่อนำค่าเฉลี่ยของความยาวที่เปลี่ยนแปลงในตารางที่ 4.3 มาสร้างความสัมพันธ์กับอุณหภูมิ มีความสัมพันธ์แสดงได้ดังรูปที่ 4.3 เป็นกราฟการถดถอยเชิงเส้น (linear regression) ที่ได้จากการสร้างกราฟด้วย Excel เช่นเดียวกับชิ้นงานที่ผ่านการเชื่อมมิกซ์ (MIG)

เมื่อหาความสัมพันธ์เชิงเส้นจากชุดข้อมูลที่ได้จะเขียนความสัมพันธ์ระหว่างค่าความยาวที่เปลี่ยนแปลงไปกับอุณหภูมิ ได้ดังสมการ $y = 0.0001x - 0.005$ มีค่าความแม่นยำ (R^2) = 0.9571



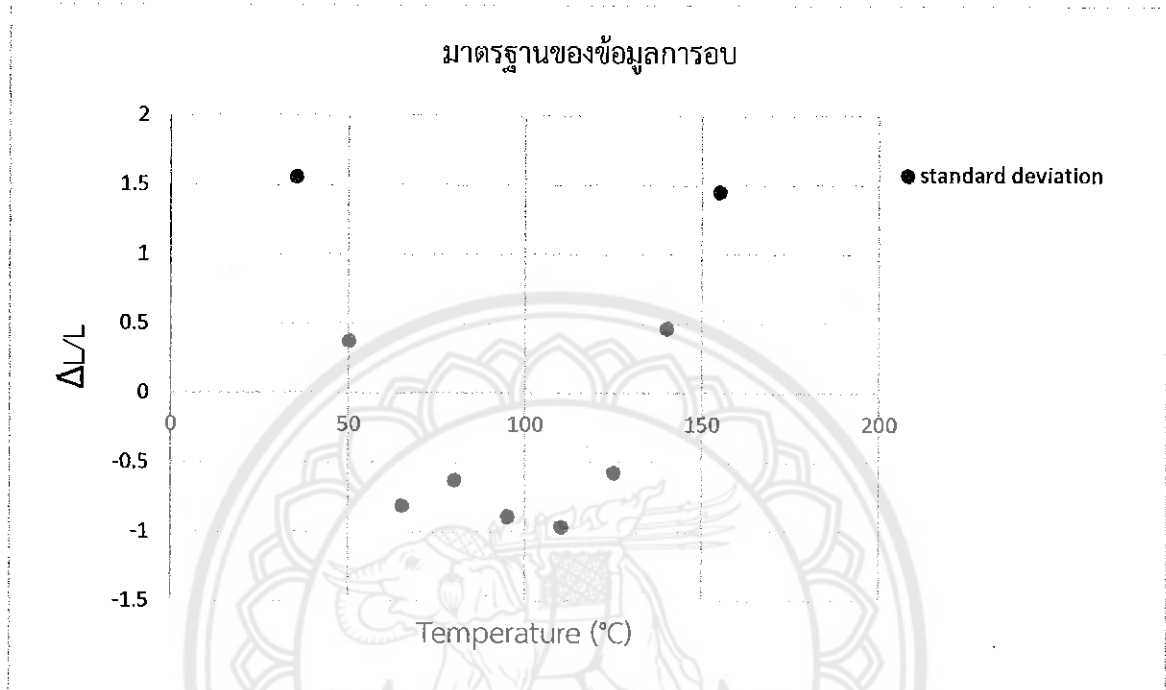
รูปที่ 4.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ค่าความยาวเฉลี่ยที่เปลี่ยนแปลงไปกับอุณหภูมิที่ลดลงทุกๆ 15 องศาเซลเซียสของเหล็ก SPCD ที่ผ่านการอบ

นอกจากวิธีการถดถอยเชิงเส้น (linear regression) สมการเส้นตรงที่เหมาะสมกับชุดข้อมูลจากการทดลองยังสามารถทำได้โดยใช้วิธีกำลังสองน้อยที่สุด (least square method) ดังที่อธิบายรายละเอียดไว้ใน 2.5.2 การทำนายค่า y จากชุดข้อมูลการทดลองด้วยวิธีกำลังสองน้อยที่สุด (least square method) โดยใช้ Excel สามารถคำนวณได้ด้วยการใช้ฟังก์ชัน TREND จากการทดลองได้ค่า y จากการทำนายมีค่าแสดงดังในตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 ข้อมูลต่างๆ ที่ได้จากการทดลองอบ ในการนำมาวิเคราะห์หาความเหมาะสมของสมการ

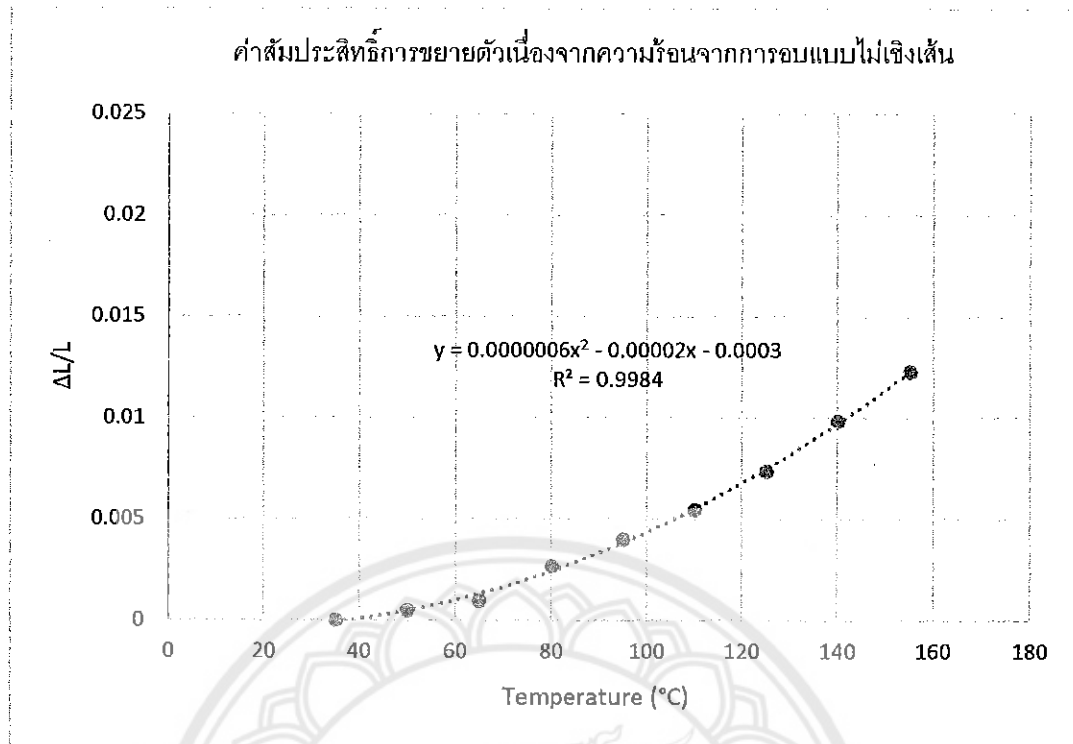
Temperature (°C)	Average	$\Delta L/L$	TREND	Residual	standard deviation
155	21.66233	0.012274	0.01097	0.001304	1.453887
140	21.61033	0.009844	0.009424	0.00042	0.468548
125	21.55733	0.007368	0.007878	-0.00051	-0.5689
110	21.51667	0.005467	0.006332	-0.00086	-0.96373
95	21.485	0.003987	0.004785	-0.0008	-0.88962
80	21.457	0.002679	0.003239	-0.00056	-0.62447
65	21.42033	0.000966	0.001693	-0.00073	-0.81089
50	21.41	0.000483	0.000147	0.000336	0.374761
35	21.39967	-0.00000016	-0.0014	0.001399	1.560411

จากตารางที่ 4.4 จะมีค่า Residual ซึ่งคือค่าความต่างระหว่างค่า y ของจากการทดลองกับค่า y ที่ได้จากการคำนวณโดยวิธีกำลังสองน้อยที่สุด (least square method) และ standard deviation ที่ได้จากค่า Residual สามารถสร้างความสัมพันธ์กับอุณหภูมิ แสดงได้ดังรูปที่ 4.4 ซึ่งจะเห็นได้ว่าการกระจายตัวลักษณะเป็นเส้นโค้งหรือพาราโบลา แสดงว่าข้อมูลนี้ไม่เหมาะสมกับสมการเชิงเส้น



รูปที่ 4.4 กราฟมาตรฐานของข้อมูลการอบ

ดังนั้นสำหรับชุดข้อมูลของชิ้นงานที่ผ่านจากการอบ จึงควรมหาค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อน โดยใช้รูปสมการแบบไม่เชิงเส้น จากงานวิจัยของดร.คชินท์ สายอินทวงศ์ (ดร.คชินท์ สายอินทวงศ์, 2557) ได้นำเสนอการหาค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อนของชิ้นงานโดยใช้รูปแบบสมการโพลิมีเนียล จากการทดลองครั้งนี้ เพื่อหาเส้นแนวโน้มแบบโพลิมีเนียล ได้ตั้งสมการ $y = 0.0000006x^2 - 0.00002x - 0.0003$ มีค่าความแม่นยำ (R^2) = 0.9984 จะได้ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อนแบบไม่เชิงเส้น (α_1) เท่ากับ 0.00002 ($^{\circ}\text{C}$)⁻¹ แสดงได้ดังรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความยาวเฉลี่ยที่เปลี่ยนแปลงไปกับอุณหภูมิที่ลดลงทุกๆ 15 องศาเซลเซียส ของเหล็กชนิด SPCD ที่ผ่านการอบ

4.3 เปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์ของผลการทดลองจากการเชื่อมมิกซ์(MIG) กับการอบ

เมื่อนำข้อมูลความยาวที่เปลี่ยนแปลงของชิ้นงานเฉลี่ยที่ผ่านการเชื่อมมิกซ์ (MIG) มาเปรียบเทียบกับข้อมูลความยาวที่เปลี่ยนแปลงของชิ้นงานเฉลี่ยที่ผ่านการอบ จะแสดงได้ดังรูปที่ 4.3 พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อนจากการเชื่อมมิกซ์ (MIG) แบบเชิงเส้น มีค่าเท่ากับ $0.0002 \text{ (}^\circ\text{C)}^{-1}$ ซึ่งมีค่ามากกว่าค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อนจากการอบแบบไม่เชิงเส้น ซึ่งมีค่าเท่ากับ $0.00002 \text{ (}^\circ\text{C)}^{-1}$ โดยทั่วไปชิ้นงานที่ผ่านการเชื่อมมิกซ์ (MIG) จะรับอุณหภูมิสูงถึง $3600 \text{ (}^\circ\text{C)}$ (บริษัทไทยรุ่งยูเนี่ยน-คาร์จำกัดมหาชน) อีกทั้งเมื่อชิ้นงานเชื่อมเย็นตัวลง ชิ้นงานจะค่อยๆ ถ่ายเทความร้อนไปยังชิ้นงานบริเวณ Weld interface และ Heat Affected Zone (HAZ) (มงคล เพิ่มฉลาด, 2556) ส่งผลให้อัตราการเย็นตัวสูง ทั้งปริมาณความร้อนที่ชิ้นงานได้รับ และอัตราการเย็นตัวนี้ อาจเป็นปัจจัยที่ส่งผลให้เกิดความแตกต่างระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อนจากการเชื่อมมิกซ์ (MIG) แบบเชิงเส้น และค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อนจากการอบแบบไม่เชิงเส้น

บทที่ 5

บทสรุป และข้อเสนอแนะ

ในบทนี้กล่าวถึงบทสรุป ข้อเสนอแนะและการพัฒนา รวมทั้งปัญหาที่พบ และแนวทางการแก้ไขของโครงการนี้มีรายละเอียดดังนี้

5.1 ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงเส้นเนื่องจากความร้อน (Coefficient of linear - thermal expansion – COE)

5.1.1 จากการทดลองพบว่าชิ้นงานทุกชิ้นที่ทำการเชื่อมมิกซ์ (MIG) สัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อนแบบเชิงเส้น (Coefficient of linear thermal expansion – COE) จากการเชื่อมเหล็กชนิด SPCD (α) มีค่าเท่ากับ 0.0002 ($^{\circ}\text{C}$)⁻¹

5.1.2 จากการทดลองพบว่าชิ้นงานทุกชิ้นที่ผ่านการอบที่อุณหภูมิ 1200 $^{\circ}\text{C}$ สัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อนไม่แบบเชิงเส้น (Coefficient of non-linear thermal expansion – COE) จากการอบเหล็กชนิด SPCD (α_1) มีค่าเท่ากับ 0.00002 ($^{\circ}\text{C}$)⁻¹

5.1.3 ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อนที่มีค่าไม่เท่ากัน ซึ่งอาจได้รับผลกระทบมาจากอัตราการให้ความร้อนของชิ้นงานที่ผ่านการเชื่อม และชิ้นงานที่ผ่านการอบที่แตกต่างกัน ส่งผลทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อนจึงมีค่าที่ไม่เท่ากัน

5.2 ข้อเสนอแนะ และการพัฒนา

5.2.1 ควรควบคุมตำแหน่งของชิ้นงานที่จะทำการวัดค่าความยาวที่เปลี่ยนแปลงไป รวมไปถึงเครื่องมือที่ทำการวัดเวอร์เนียร์คลิปเปอร์ โดยอาจสร้าง Jig Fixture ในการจับชิ้นงาน ขณะทำการวัดค่าของชิ้นงานให้ได้ตำแหน่งที่มั่นคง เพื่อลดค่าความคลาดเคลื่อนของค่าความยาวที่เปลี่ยนแปลงไป

5.2.2 ควรทำการศึกษา และเพิ่มทักษะในการเชื่อมมิกซ์ (MIG)

5.2.3 ควรทำการทดสอบซ้ำให้มากขึ้นจากเดิม เพื่อทดสอบข้อมูลที่ได้

5.2.4 กระบวนการและวิธีการให้ความร้อนมีหลากหลายเทคนิค อาจนำเทคนิคอื่นๆมาทำการศึกษาเพื่อเปรียบเทียบผลทดลองที่ได้

5.2.5 ผลการทดลองที่ได้สามารถนำค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อน (Coefficient of thermal expansion – COE) ไปวิเคราะห์การขยายตัวของชิ้นงานเหล็กชนิด SPCD ในอุตสาหกรรมยานยนต์

5.2.6 สามารถนำผลการทดลองไปประยุกต์ใช้เพื่อทำนายหรือจำลอง (Simulation) รูปร่างของชิ้นงานที่มีการขยายตัวเนื่องจากความร้อน

5.3 ปัญหาที่พบ และแนวทางการแก้ไขปัญหา

5.3.1 อุณหภูมิในการทดลองลดลงอย่างรวดเร็ว ส่งผลทำให้มีเวลาที่สั้นในการวัดค่าความยาวที่เปลี่ยนแปลง ทำให้ได้ค่าที่ไม่มีความแม่นยำเที่ยงตรง ซึ่งอาจต้องทำการทดลองในกล่องควบคุมอุณหภูมิ

5.3.2 การวัดค่าความยาวที่เปลี่ยนแปลงไปได้ยาก เนื่องจากชิ้นงานมีอุณหภูมิที่สูง ผู้ทำการทดลองควรใส่อุปกรณ์ Safety ให้ครบ

5.3.3 ชิ้นงานทดสอบที่จะทำการวัดค่าความยาวที่เปลี่ยนแปลงไปขยับและเคลื่อนที่ได้ง่าย ส่งผล
ทำให้วัดค่าได้ยาก ผู้วัดควรจับชิ้นงานให้แน่น



เอกสารอ้างอิง

- ครูณพงศ์ หมี่ทอง. (2 มกราคม 2558). การเขียนโปรแกรมภาษา C# Visual Studio. สืบค้นเมื่อ 1 กันยายน 2559, จาก www.tanateach.com/wordpress/topic/2-1/
- ครูสมชัย เสกสรร. (21 ธันวาคม 2555). ฝึกเขียนโปรแกรมพื้นฐานด้วย Visual C#. สืบค้นเมื่อ 3 พฤศจิกายน 2559, จาก <http://computer.bps.in.th/suteerat/start>
- ดร. คชินท์ สายอินทวงศ์. (12 มกราคม 2557). สัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อน. Thai ceramic Society. สืบค้นเมื่อ 22 สิงหาคม 2559, จาก www.thaiceramicsociety.com/
- วัสดุวิศวกรรม. (12 กุมภาพันธ์ 2554). โลหะผสม. สืบค้นเมื่อ 12 ธันวาคม 2559, จาก www.carbidee.com
- ชาญชัย วิเศษแก้ว.(3 มกราคม 2555). แผนภาพของเฟส. Phase diagram. สืบค้นเมื่อ 12 ธันวาคม 2559 , จาก www.ie.eng.cmu.ac.th
- บริษัท สหวิริยาสตีลอินดัสตริ จำกัด (มหาชน). (5 มิถุนายน 2556). เหล็กแผ่นรีดร้อนชั้นคุณภาพ SS400เหมาะกับการนำไปใช้ในงานประเภทใด. สืบค้นเมื่อ 29 สิงหาคม 2559, จาก www.ssi-steel.com/
- บริษัท วี แอนด์ พี เอ็กซ์แพนดี เมทัล จำกัด. (19 ธันวาคม 2555). เหล็กกล้า(Steel). ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับเหล็ก. สืบค้น เมื่อ 8 สิงหาคม 2559, จาก www.vpexpand.com/ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับเหล็ก/Steel.html
- บริษัท เอส.ซี.พี.ซินดิเคท จำกัด. (17 กรกฎาคม 2555). คุณสมบัติของธาตุต่างๆ เมื่อผสมลงในเหล็ก. SCP Syndicate. สืบค้นเมื่อ 19 สิงหาคม 2559, จาก www.scpsyndicate.com/
- บริษัท เอเชียนพลัส ซัพพลาย จำกัด. (10 ตุลาคม 2554). เหล็ก SS400P, SS41, เหล็กแผ่นดำ SS400เหล็กแผ่นดำ,จำหน่ายเหล็ก SS400, ขายเหล็ก SS400, เหล็กเกรด SS400, เหล็กแผ่นบาง SS400, เหล็กแผ่นรีดเย็น, เหล็กแผ่นรีดร้อน. สืบค้น 29 สิงหาคม 2559, จาก <http://sites.google.com/site/specialmetalthailand/hot-news-1>
- บริษัท แมกซ์สตีล จำกัด. เหล็กกล้า (steel). (2 พฤษภาคม 2557). ข้อมูลความรู้. สืบค้นเมื่อ 25 สิงหาคม 2559, จาก www.maxsteelthai.com/
- ผศ. เชิญโชค ทรขวัญ. (2 กันยายน 2555). อุณหภูมิและความร้อน. ฟิสิกส์สำหรับโครงการเรียนล่วงหน้า. สืบค้นเมื่อ 8 ตุลาคม 2559, จาก www.il.mahidol.ac.th

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- มงคล เพิ่มฉลาด. (2556). วิศวกรรมการเชื่อม. (2). กรุงเทพฯ: โอ. เอส. พรินติ้ง เฮ้าส์
 วัสดุศาสตร์. (9 ตุลาคม 2556) ชนิดและหน้าที่ของแก๊สปกคลุมและหลักการเลือกวัสดุประสานงาน
 เชื่อม. หลักการของกระบวนการเชื่อมมิก/แม็ก. สืบค้นเมื่อ 16 ตุลาคม 2559, จาก
[http://202.29.239.245 /media/welder/3103_2005/](http://202.29.239.245/media/welder/3103_2005/)
- สถาบันยานยนต์. (19 พฤศจิกายน 2557). การศึกษาโครงสร้างการผลิตชิ้นส่วนของอุตสาหกรรม
 ยานยนต์ไทย. อุตสาหกรรมยานยนต์และชิ้นส่วนรถยนต์-FTA. สืบค้นเมื่อ 2 สิงหาคม 2559,
 จาก <http://data.thaiaoto.or.th/>
- ASM International for materials engineering and scientists. (2008). Thermal
 Properties of Metal. American: Technical Publishers Ltd.
- Chalermchai Marketing.co.ltd. (17 ธันวาคม 2558). เหล็ก. นานาสาระ. สืบค้นเมื่อ 12 สิงหาคม
 2559, จาก <http://chalermchaimkt.wordpress.com/nanasara/>
- Fieldhouse, i.B., Lang and J.I. (1961). Measurement of the thermal Properties.
 Technical report 60-904, United States: Air Force
- Metal TH. (27 สิงหาคม 2555). กระบวนการผลิตเหล็กแผ่นรีดร้อนและเหล็กแผ่นรีดเย็น. สืบค้น
 เมื่อ 14 สิงหาคม 2559, จาก <http://metalth.wordpress.com/>
- R. B. Bird, W. E. Stewart and E. N. Lightfoot. (2009). Transport Phenomena. 2nd edition.
 USA: John Wiley & Sons inc.
- (29 January 2013). “ Thermal Conductivity ”. Available at [http://www.ndt-ed.org
 /EducationResources/communitycollege/material/physical_Chemical/Thermal
 Conductivity.htm](http://www.ndt-ed.org/EducationResources/communitycollege/material/physical_Chemical/ThermalConductivity.htm)[online]retrieved
- Thai cold Rolled. Steel Sheet Public company Limited. (22 มีนาคม 2554). Knowledge-
 TCRSS. สืบค้นเมื่อ 29 สิงหาคม 2559, จาก www.tcrss.com/knowledge_html
- Touloukian Y S, Kirby R K, Taylor R E and Desai P D. (1975). Thermophysical
 Properties of Matter, Volume 12—Thermal Expansion, Metallic Elements
 and Alloys. New York : IFI – Plenum



ส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้าชนิด SPCD

ประเภท	เหล็กกล้า
หมวดหมู่	เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ
กระบวนการ	รีดเย็น
ชนิด	SPCD

ส่วนประกอบทางเคมี

ธาตุ	น้ำหนักของส่วนผสม (%)
คาร์บอน (C)	0.02
แมงกานีส (Mn)	0.08
ซิลิกอน (Si)	0.07
ฟอสฟอรัส (P)	0.018
ซัลเฟอร์ (S)	0.005

คุณสมบัติทางกล (%)

ความเค้นวิกฤต	164 N/mm ²
แรงต้านทานการดึง	306 N/mm ²
การยืดของวัสดุ	48%

ตารางที่ 1 ผลค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อนของเหล็กชนิด SPCD ที่ผ่านการเชื่อมมิกซ์

เหล็กชนิด SPCD	ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อน ($^{\circ}\text{C}$) ⁻¹
ชั้นที่ 1	0.0002
ชั้นที่ 2	0.0002
ชั้นที่ 3	0.0001
ค่าเฉลี่ย	0.0002

ตารางที่ 2 ผลค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อนของเหล็กชนิด SPCD ที่ผ่านการอบ

เหล็กชนิด SPCD	ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อน ($^{\circ}\text{C}$) ⁻¹
ชั้นที่ 1	0.0001
ชั้นที่ 2	0.0001
ชั้นที่ 3	0.0001
ค่าเฉลี่ย	0.0001

ประวัติผู้ดำเนินโครงการ



ชื่อ นางสาวนฤมล ทองเมือง
ภูมิลำเนา 37 หมู่ที่ 7 ต. ท่อแท้ อ.วัดโบสถ์ จ.พิษณุโลก
ประวัติการศึกษา

- จบระดับมัธยมศึกษาจากโรงเรียนเตรียมอุดมศึกษา จ.พิษณุโลก
- ปัจจุบันกำลังศึกษาในระดับปริญญาตรีชั้นปีที่ 4 สาขาวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

E-mail: naruemonmint09@gmail.com



ชื่อ นางสาวทักษิณากร จากมาน
ภูมิลำเนา 207/2 หมู่ที่ 5 ต.บ้านป็น อ. ลอง จ. แพร่
ประวัติการศึกษา

- จบระดับมัธยมศึกษาจากโรงเรียนวังชันวิทยา จ.แพร่
- ปัจจุบันกำลังศึกษาในระดับปริญญาตรีชั้นปีที่ 4 สาขาวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

E-mail: thaksinapron@gmail.com



ชื่อ นางสาวลักขิกา อยู่นาค
ภูมิลำเนา 48/7 ถ. พุทธบูชา ต.ในเมือง อ. เมือง จ. พิษณุโลก
ประวัติการศึกษา

- จบระดับมัธยมศึกษาจากโรงเรียนจ่านกร้อง จ. พิษณุโลก
- ปัจจุบันกำลังศึกษาในระดับปริญญาตรีชั้นปีที่ 4 สาขาวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

E-mail: vanilra_sugar@hotmail.com