



การศึกษาการกระจายตัวของอุณหภูมิในเหล็กที่เชื่อมด้วยวิธีเสียดทาน

ปกรณ์ อุ่นไธสง

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
ปีการศึกษา 2557
ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยอุบลราชธานี



**THE STUDY OF TEMPERATURE DISTRIBUTION IN STEEL RODS
WELDED BY FRICTION WELDING**

PAKORN AUNTAISONG

**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENTS
FOR THE DEGREE OF MASTER OF ENGINEERING
MAJOR IN MECHANICAL ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
UBON RATCHATHANI UNIVERSITY
ACADAMIC YEAR 2014
COPYRIGHT OF UBON RATCHATHANI UNIVERSITY**



ใบรับรองวิทยานิพนธ์
มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์

เรื่อง การศึกษาการกระจายตัวของอุณหภูมิในเหล็กที่เชื่อมด้วยวิธีเสียดทาน

ผู้วิจัย นายปรกรณ์ อุ่นไธสง

คณะกรรมการสอบ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เกียรติฟ้า ตั้งใจจิต	ประธานกรรมการ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ เรือโท ดร.สมญา ภูณะยา	กรรมการ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชวลิต ถิ่นวงศ์พิทักษ์	กรรมการ
ดร.รัชดา โสภาคะยัง	กรรมการ

อาจารย์ที่ปรึกษา

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ เรือโท ดร.สมญา ภูณะยา)

.....
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นท แสงเทียน)

รักษาราชการแทนคณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

.....
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อริยาภรณ์ พงษ์รัตน์)

รักษาราชการแทนรองอธิการบดีฝ่ายวิชาการ

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

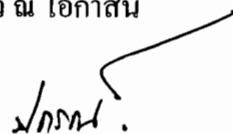
ปีการศึกษา 2557

กิตติกรรมประกาศ

ผู้ทำวิจัยขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ รท. ดร. สมญา ภูณะยา ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษา ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชวลิต ถิ่นวงศ์พิทักษ์ และ ดร. รัชดา โสภาคะยัง ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ที่กรุณาให้คำแนะนำ ข้อคิดเห็นต่างๆ รวมถึงสร้างกำลังใจในการทำวิทยานิพนธ์ตลอดระยะเวลาของการศึกษา ซึ่งส่งผลให้งานวิจัยนี้บรรลุผลและสำเร็จตามวัตถุประสงค์

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เกียรติฟ้า ตั้งใจจิต อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น ซึ่งให้เกียรติเป็นประธานกรรมการสอบเค้าโครงวิทยานิพนธ์และสอบป้องกันวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาให้คำแนะนำและความคิดเห็นที่เป็นประโยชน์ต่อวิทยานิพนธ์ ขอขอบคุณนักวิจัยทุกท่านที่มีส่วนเกี่ยวข้องกับเครื่องเชื่อมด้วยวิธีเสียดทานที่ใช้ในการศึกษา ซึ่งได้ร่วมกันสร้าง และปรับปรุงพัฒนาเครื่องเชื่อมให้สามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ ทำให้การทดลองประสบผลสำเร็จ และขอขอบคุณ นาย วีระพงษ์ จงวัฒน์ เพื่อนร่วมรุ่นวิศวกรรมเครื่องกล รุ่นที่ 19 มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี ที่ให้คำแนะนำและให้ความรู้เกี่ยวกับการสร้างแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ ที่ใช้จำลองการเชื่อมด้วยวิธีเสียดทาน

สุดท้ายนี้ ขอขอบพระคุณ ครอบครัว อุ่น ไชสง ที่เป็นกำลังใจและเป็นแรงผลักดันที่สำคัญต่อการศึกษาและการทำวิทยานิพนธ์ และที่สำคัญเป็นอย่างยิ่ง ขอกราบขอบพระคุณ คุณแม่ พิไลวรรณ อุ่น ไชสง ผู้ล่วงลับ ซึ่งเป็นผู้วางแนวทางและเห็นถึงความสำคัญของการศึกษา คุณประโยชน์ใดอันเกิดจากงานวิจัยนี้ ย่อมเป็นผลจากความเมตตาและกรุณาของท่านทั้งหลายที่ได้กล่าวไปในเบื้องต้น ผู้ทำวิจัยจึงใคร่ขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้



(นายปรกรณ์ อุ่นไชสง)

ผู้ทำวิจัย

บทคัดย่อ

ชื่อเรื่อง : การศึกษาการกระจายตัวของอุณหภูมิในเหล็กที่เชื่อมด้วยวิธีเสียดทาน
 โดย : ปกรณ์ อุ่นไชสง
 ชื่อปริญญา : วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
 สาขาวิชา : วิศวกรรมเครื่องกล
 ประธานกรรมการที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ รท. ดร. สมญา ภูณะยา

ศัพท์สำคัญ : การกระจายตัวของอุณหภูมิ เชื่อมด้วยวิธีเสียดทาน เหล็กคาร์บอนต่ำ
 ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อ ศึกษาการกระจายตัวของอุณหภูมิในเหล็กที่ถูกเชื่อมด้วยวิธีเสียดทาน โดยใช้การสร้างแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (FEA) ซึ่งผลที่ได้จากการทำนายของแบบจำลองจะใช้เทียบผลกับการทดลอง วัสดุที่ใช้ในการทดลองเป็นเหล็กคาร์บอนต่ำ ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 15 mm. ยาว 80 mm. ทำการทดลองวัดอุณหภูมิโดยใช้เทอร์โมคัปเปิล Type - K วัดอุณหภูมิห่างจากพื้นที่หน้าตัดเสียดทานเป็นระยะ 3 mm., 6 mm. และ 9 mm. ตามลำดับ ซึ่งงานถูกเชื่อมภายใต้เงื่อนไขที่แตกต่างกัน 3 ชุด ได้แก่ $P_1 = 20, 30$ และ 40 bar, $T_1 = 15, 18$ และ 21 sec., $P_2 = 60$ bar, $T_2 = 5$ sec. และความเร็วรอบ (Speed) = 1,300 rpm เพื่อให้ผลการทดลองมีความหลากหลาย

ส่วนในแบบจำลอง FEA ใช้การจำลองในแบบ 2D โดยกำหนดคุณสมบัติวัสดุ และเงื่อนไขเหมือนกับการทดลองทุกประการ จากการเปรียบเทียบผลการทดลองและการทำนายของแบบจำลอง พบว่า ผลจากการทดลองในช่วงแรกอุณหภูมิที่วัดได้มีค่าน้อยกว่าค่าจากแบบจำลอง เนื่องจากในการทดลองเครื่องจักรต้องการเวลาในการสร้างแรงบิด แต่เมื่อเครื่องทำงานเข้าสู่สภาวะปกติ ผลการทดลองมีค่าใกล้เคียงกับผลการทำนายของแบบจำลอง จึงอาจกล่าวได้ว่า แบบจำลอง FEA ที่ใช้สามารถทำนายการกระจายตัวของอุณหภูมิได้อย่างแม่นยำ และยังพบอีกว่า เมื่อมีการเพิ่มแรงดันเสียดทานและเวลาเสียดทานขึ้น ค่าอุณหภูมิของรอยเชื่อมจะมีการเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว

นอกจากนี้ ได้นำเอาแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นไปใช้ในการศึกษาอิทธิพลของตัวแปรแรงดันเสียดทาน (P_1) และอิทธิพลของตัวแปรเวลาเสียดทาน (T_1) ที่มีผลต่อการกระจายตัวของอุณหภูมิ ผลพบว่า การเพิ่มขึ้นของค่า P_1 จะส่งผลให้ชิ้นงานมีอัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิมากขึ้น โดยจะสูงขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงต้นของการเชื่อม และอัตราการเพิ่มขึ้นจะลดลงเมื่ออุณหภูมิของ

ชิ้นงานสูงกว่า $1,000\text{ }^{\circ}\text{C}$ ส่วนในกรณี T_1 พบว่า T_1 มีอิทธิพลมากในกรณีของการเชื่อมที่มีค่า P_1 น้อยๆ แต่อิทธิพลของ T_1 จะลดลงเมื่อ P_1 มีค่าสูงขึ้น

ABSTRACT

TITLE : THE STUDY OF TEMPERATURE DISTRIBUTION IN STEEL RODS
WELDED BY FRICTION WELDING
BY : PAKORN AUNTAISONG
DEGREE : MASTER OF ENGINEERING
MAJOR : MECHANICAL ENGINEERING
CHAIR : ASST. PROF. SOMYA POONAYA, Ph.D.

KEYWORDS : TEMPERATURE DISTRIBUTION / FINITE ELEMENT ANALYSIS /
FRICTION WELDING / LOW CARBON STEEL

This research is aimed to investigate the temperature distribution in steel rods welded by friction welding technique. The study was conducted using experiment and FEA simulation. The experiment was conducted with a number of specimens made from low carbon steel rods with 15 mm diameter and 80 mm long. The temperature in rod was measured by K-type thermocouple, measure at distance of 3, 6 and 9 mm from interface. The welding conditions were $P_1 = 20, 30$ and 40 bar, $T_1 = 15, 18$ and 21 sec., $P_2 = 60$ bar, $T_2 = 5$ sec. and rotation Speed = 1,300 rpm. The results from FEA and experiment were compared.

The result shown that at the beginning of friction process, the temperature rise from experiment is much lower than that of FEA. This is because the friction welding machine needs time to improve it's speed at the early step. After the welding process undergoes steady the result from FEA is going well with experiment. This implies that the FEA can be used to predict the temperature distribution on specimen.

In addition, the FEA was, alone, used to study further on the effect of P_1 and T_1 . The results indicated that P_1 and T_1 highly affect to the increment of temperature in specimens. The increment of P_1 leads to high temperature rise in specimens, especially in the early step of welding. Considering the effect of T_1 , it was found that T_1 has high influence on temperature rise when P_1 is low. For high value of P_1 the influence of T_1 seems to be reduced.

สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	ก
บทคัดย่อภาษาไทย	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ง
สารบัญ	จ
สารบัญตาราง	ช
สารบัญภาพ	ซ
บทที่	
1 บทนำ	
1.1 ที่มาและความสำคัญ	1
1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย	2
1.3 ขอบเขตการศึกษา	2
1.4 ประโยชน์ที่จะได้รับจากการศึกษา	3
2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	
2.1 การเชื่อมด้วยวิธีเสียดทาน (Friction Welding)	4
2.2 หลักการเชื่อมด้วยวิธีเสียดทาน	5
2.3 อิทธิพลของตัวแปรที่มีความสัมพันธ์ต่ออุณหภูมิ	6
2.4 การเชื่อมด้วยวิธีเสียดทานในแบบต่างๆ	11
2.5 เหล็กคาร์บอน (Plain carbon steels)	14
2.6 ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Analysis, FEA)	15
2.7 หลักการเบื้องต้นเกี่ยวกับการถ่ายเทความร้อน	17
2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	22
3 อุปกรณ์และวิธีการทดลอง	
3.1 อุปกรณ์การทดลอง	28
3.2 วิธีการทดลอง	31
3.3 การสร้างแบบจำลองโดยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์	40

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4 ผลการทดลองและการอภิปรายผล	
4.1 การวิเคราะห์ผลการทดลองกับแบบจำลองโดย ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์	49
4.2 การศึกษาอิทธิพลของตัวแปร โดยใช้แบบจำลองโดยระเบียบวิธี ไฟไนต์เอลิเมนต์	55
5 สรุปผลและข้อเสนอแนะ	
5.1 การกระจายตัวของอุณหภูมิจากการทดลองและแบบจำลอง โดยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์	64
5.2 การศึกษาอิทธิพลของตัวแปร โดยใช้แบบจำลองโดยระเบียบวิธี ไฟไนต์เอลิเมนต์	65
5.3 ข้อเสนอแนะ	66
เอกสารอ้างอิง	67
ภาคผนวก	73
ประวัติผู้วิจัย	95

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
3.1	ส่วนประกอบทางเคมีของเหล็กคาร์บอนต่ำ (wt %)	32
3.2	คุณสมบัติทางความร้อนของเหล็กคาร์บอนต่ำ	33
3.3	เงื่อนไขที่ใช้ทดสอบการวัดอุณหภูมิ	34
3.4	เงื่อนไขการทดลอง	38
3.5	สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานที่ใช้ในแบบจำลอง	48
4.1	การเทียบผลอุณหภูมิสูงสุดของเงื่อนไขชุดที่ 1 ชุดที่ 2 และชุดที่ 3	52
4.2	เงื่อนไขแบบจำลอง	55
4.3	ค่าความแตกต่างของอุณหภูมิสูงสุด ($^{\circ}\text{C}$) จากการเพิ่มตัวแปรแรงดันเสียดทาน (P_1) และเวลาเสียดทาน (T_1)	59

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
2.1	ความสัมพันธ์ของตัวแปรที่เกี่ยวข้องในการเชื่อมด้วยวิธีเสียดทาน	4
2.2	หลักการเชื่อมด้วยวิธีเสียดทานที่ใช้ในการศึกษา	5
2.3	(A) อิทธิพลของความเร็วรอบที่ส่งผลต่อลักษณะของรอยเชื่อม (B) อิทธิพลของแรงในแนวแกนที่ส่งผลต่อลักษณะของรอยเชื่อม	7
2.4	ลักษณะความชันของอุณหภูมิที่เกิดจากอิทธิพลของแรงในแนวแกน	7
2.5	ลักษณะของเกรนตรงรอยเชื่อมและบริเวณใกล้เคียงที่เกิดจากแรงดันอัด	8
2.6	อิทธิพลระหว่างความเร็วรอบกับแรงดันที่ส่งผลต่อกำลังบิด (Torque)	9
2.7	ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานกับแรงดันในแนวแกน	10
2.8	การเชื่อมด้วยวิธีเสียดทานแบบธรรมดา	11
2.9	การเชื่อมด้วยวิธีเสียดทานแบบเฉื่อย	12
2.10	การเชื่อมด้วยวิธีเสียดทานแบบกวน	13
2.11	การเชื่อมด้วยวิธีเสียดทานแบบเชิงเส้น	14
2.12	(A) แผ่นอะลูมิเนียมประกอบด้วยขอบโค้งและขอบตรงรวมทั้งรูปกลมสองขนาดภายใน (B) การวิเคราะห์ผลเฉลยบนแผ่นอะลูมิเนียมด้วยระเบียบวิธีผลต่างสี่เหลี่ยม (FDM) (C) การวิเคราะห์ผลเฉลยบนแผ่นอะลูมิเนียมด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (FEA)	16
3.1	เครื่องเชื่อมด้วยวิธีเสียดทานที่ใช้ในการทดลอง	29
3.2	เครื่องบันทึกอุณหภูมิ (Data logger) ยี่ห้อ Supcon รุ่น R 3000	30
3.3	หลักการทำงานของสายวัดอุณหภูมิ	30
3.4	สายวัดอุณหภูมิ ชนิด K-Type	31
3.5	ขนาดของเหล็กคาร์บอนต่ำที่ใช้ในการทดลอง	32
3.6	ลักษณะชิ้นงานที่ผ่านการกลึงผิวหน้าสัมผัส	33
3.7	การทดสอบวิธีการวัดอุณหภูมิ	34
3.8	ผลการวัดอุณหภูมิก่อนทำการทดลองจริง (เงื่อนไขชุดที่ 1)	35
3.9	ผลการวัดอุณหภูมิก่อนทำการทดลองจริง (เงื่อนไขชุดที่ 2)	35
3.10	เจาะรูเพื่อกำหนดจุดวัดอุณหภูมิที่ระยะ 3 mm., 6 mm. และ 9 mm.	36
3.11	แนวการเจาะรูรอบชิ้นงาน (A, B และ C)	36

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
3.12	การเชื่อมต่อสายวัดอุณหภูมิกับชิ้นงาน	37
3.13	การติดตั้งชิ้นงานที่เชื่อมสายวัดอุณหภูมิเข้ากับเครื่องเชื่อมด้วยวิธีเสียดทาน	37
3.14	ชุดควบคุมเวลา (Timer)	38
3.15	ชุดควบคุมแรงดัน (Electric solenoid valve)	39
3.16	เครื่องควบคุมความเร็วรอบ (Inverter)	39
3.17	การแบ่งส่วนที่แข็ง (Rigid zone) และส่วนที่เสียรูป (Plastic zone)	40
3.18	ลักษณะแรงเฉือนบริเวณส่วน Plastic zone	41
3.19	ขั้นตอนการวิเคราะห์ของซอฟต์แวร์ CAE	41
3.20	ลักษณะการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (CAD)	42
3.21	การกำหนดขนาดของเอลิเมนต์ (Element size)	43
3.22	การกำหนดจุดวัดอุณหภูมิในแบบจำลอง	44
3.23	ลักษณะการกำหนดเงื่อนไขขอบเขต (BC)	45
3.24	พฤติกรรมของแรงดันและพฤติกรรมการนำความร้อนบริเวณผิวสัมผัส	48
4.1	การเปรียบเทียบผลการกระจายตัวของอุณหภูมิโดยเงื่อนไขชุดที่ 1 : $T_1=15 \text{ sec.}, P_1=20 \text{ bar}$	51
4.2	การเปรียบเทียบผลการกระจายตัวของอุณหภูมิโดยเงื่อนไขชุดที่ 2 : $T_1=18 \text{ sec.}, P_1=30 \text{ bar}$	52
4.3	การเปรียบเทียบผลการกระจายตัวของอุณหภูมิโดยเงื่อนไขชุดที่ 3 : $T_1=21 \text{ sec.}, P_1=40 \text{ bar}$	52
4.4	การกระจายตัวของอุณหภูมิในแบบจำลองโดยเงื่อนไขชุดที่ 1 : $T_1=15 \text{ sec.}, P_1=20 \text{ bar}$	54
4.5	การกระจายตัวของอุณหภูมิในแบบจำลองโดยเงื่อนไขชุดที่ 2 : $T_1=18 \text{ sec.}, P_1=30 \text{ bar}$	55
4.6	การกระจายตัวของอุณหภูมิในแบบจำลองโดยเงื่อนไขชุดที่ 3 : $T_1=21 \text{ sec.}, P_1=40 \text{ bar}$	55
4.7	กราฟอิทธิพลของแรงดันเสียดทานที่ส่งผลต่อการกระจายตัวของอุณหภูมิ ($T_1=12 \text{ sec.}$)	57

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
4.8	กราฟอิทธิพลของแรงดันเสียดทานที่ส่งผลต่อการกระจายตัวของอุณหภูมิ ($T_1=15$ sec.)	58
4.9	กราฟอิทธิพลของแรงดันเสียดทานที่ส่งผลต่อการกระจายตัวของอุณหภูมิ ($T_1=18$ sec.)	58
4.10	กราฟอิทธิพลของแรงดันเสียดทานที่ส่งผลต่อการกระจายตัวของอุณหภูมิ ($T_1=21$ sec.)	59
4.11	กราฟอิทธิพลของแรงดันเสียดทานที่ส่งผลต่อการกระจายตัวของอุณหภูมิ ($T_1=25$ sec.)	59
4.12	กราฟอิทธิพลของเวลาเสียดทานที่ส่งผลต่อการกระจายตัวของอุณหภูมิ ($P_1=10$ bar)	62
4.13	กราฟอิทธิพลของเวลาเสียดทานที่ส่งผลต่อการกระจายตัวของอุณหภูมิ ($P_1=20$ bar)	62
4.14	กราฟอิทธิพลของเวลาเสียดทานที่ส่งผลต่อการกระจายตัวของอุณหภูมิ ($P_1=30$ bar)	63
4.15	กราฟอิทธิพลของเวลาเสียดทานที่ส่งผลต่อการกระจายตัวของอุณหภูมิ ($P_1=40$ bar)	63
4.16	กราฟอิทธิพลของเวลาเสียดทานที่ส่งผลต่อการกระจายตัวของอุณหภูมิ ($P_1=50$ bar)	64

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

ปัจจุบันภาคอุตสาหกรรมได้มีการนำเอากระบวนการเชื่อมที่มีความหลากหลายมาใช้ในกรรมวิธีการผลิต เพื่อตอบสนองต่อตลาดอุตสาหกรรมที่กำลังเติบโตมากขึ้น ได้แก่ การเชื่อมไฟฟ้า (Shield Metal Arc Welding: SMAW) การเชื่อมแก๊ส (Oxy-acetylene Gas Welding) การเชื่อมอาร์คด้วยลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์ (Flux-cored Arc Welding) การเชื่อมอาร์คด้วยทังสเตน (Gas Tungsten Arc Welding) การเชื่อมอาร์คพลาสมา (Plasma Arc Welding) การเชื่อมอาร์คคาร์บอน (Carbon Arc Welding) การเชื่อมอาร์คสตั๊ด (Stud Arc Welding) และการเชื่อมด้วยวิธีเสียดทาน (Friction Welding) เป็นต้น

การเชื่อมด้วยวิธีเสียดทาน เป็นกระบวนการเชื่อมที่อาศัยการเสียดทานระหว่างชิ้นงานสองชิ้น โดยการให้ชิ้นงานหนึ่งหมุนด้วยความเร็วคงที่ (Rotation) อีกชิ้นงานหนึ่งอยู่กับที่ (Static) จากนั้นทำการเพิ่มแรงดันให้กับชิ้นงานที่อยู่กับที่ จนทำให้ชิ้นงานทั้งสองเกิดแรงเสียดทานที่สูงมาก และเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อนที่ทำให้โลหะทั้งสองมีอุณหภูมิที่สูง ซึ่งอุณหภูมิจะอยู่ในช่วงที่ต่ำกว่าจุดหลอมเหลว จากนั้นจึงหยุดหมุนพร้อมทั้งใช้แรงดันอัดชิ้นงานทั้งสองให้ติดกัน การเชื่อมด้วยวิธีเสียดทานเป็นกระบวนการเชื่อมที่สามารถสร้างรอยเชื่อมให้มีความแข็งแรงและมีเอกลักษณ์เฉพาะในทางการเชื่อม จึงทำให้เกิดการพัฒนาและคิดค้นวิธีการเชื่อมด้วยวิธีเสียดทานให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น เพื่อตอบสนองต่องานภาคอุตสาหกรรมที่มีความหลากหลาย สำหรับการเชื่อมด้วยวิธีเสียดทาน เป็นรูปแบบการเชื่อมที่ได้รับความนิยมมากขึ้นในปัจจุบัน เนื่องจากมีข้อดีในการเชื่อมอยู่หลายประการ เช่น สามารถเชื่อมวัสดุที่ต่างชนิดกันได้ ไม่ใช่วัสดุที่เป็นตัวช่วยประสาน ไม่ต้องใช้ช่างฝีมือในการเชื่อม เป็นการเชื่อมที่รวดเร็ว ช่วยประหยัดเวลา เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม และให้ผลตอบแทนที่คุ้มค่าต่อการลงทุน จากข้อดีต่างๆเหล่านี้ จึงทำให้เกิดงานวิจัยที่ศึกษาเกี่ยวกับการเชื่อมด้วยวิธีเสียดทานมากมายทั้งในประเทศและต่างประเทศ เพื่อที่จะพัฒนาการเชื่อมด้วยวิธีเสียดทานให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

ในกระบวนการเชื่อมด้วยวิธีเสียดทานนั้น มีตัวแปรที่เกี่ยวข้องจำนวนมากโดยตัวแปรทุกตัวมีผลทำให้อุณหภูมิของชิ้นงานเปลี่ยนไป และส่งผลต่อโครงสร้างและคุณภาพของรอยเชื่อม โดยความร้อนจะถูกสร้างขึ้นจากแรงเสียดทานระหว่างพื้นชิ้นงานสองชิ้นซึ่งเกิดที่บริเวณพื้นที่เสียด

ทาน แล้วกระจายตัวจากบริเวณพื้นที่เสียดทานหรือบริเวณรอยเชื่อมออกไปตามความยาวของแท่ง เหล็ก ซึ่งปัจจัยดังกล่าวถือว่าเป็นปัจจัยหลักที่มีความสำคัญ เพราะการกระจายตัวของอุณหภูมิใน เหล็กที่เชื่อมด้วยวิธีเสียดทานนั้น ส่งผลโดยตรงต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของเหล็กที่ทำการ เชื่อมดังกล่าวมาแล้ว

ปัจจุบันการนำเอาโปรแกรมคอมพิวเตอร์มาใช้จำลองพฤติกรรมและปรากฏการณ์ต่างๆ ในงานทางวิศวกรรมนั้นกำลังเป็นที่นิยมและเป็นที่แพร่หลาย ในการศึกษานี้ก็เช่นเดียวกัน คือ เป็น การนำเอาโปรแกรมมาช่วยวิเคราะห์และศึกษากระบวนการทางความร้อนที่เกิดจากการเชื่อม เนื่องจากการศึกษาพฤติกรรมทางความร้อนที่เกิดจากการเชื่อมจริงๆ นั้นทำได้ยากด้วยการทดลอง จึง ทำให้เกิดการนำเอาโปรแกรมที่ทันสมัยและสามารถวิเคราะห์พฤติกรรมทางความร้อนได้มา ประยุกต์ใช้กับงานวิจัยนี้ จากที่กล่าวมาทั้งหมดในข้างต้น เป็นที่มาของวัตถุประสงค์งานวิจัย คือ เพื่อ ศึกษาการกระจายตัวของอุณหภูมิในเหล็กที่เชื่อมด้วยวิธีเสียดทาน โดยใช้โปรแกรมทางคอมพิวเตอร์ ช่วยสร้างแบบจำลอง (Computer Aided Engineering, CAE) จากนั้นจะนำเอาระเบียบวิธีไฟไนต์ เอลิเมนต์ (Finite Element analysis, FEA) มาช่วยในการวิเคราะห์ปัญหาและทำนายผลที่เกิดขึ้น ใน กระบวนการ โดยจะทำการทดลองวัดอุณหภูมิขณะทำการเชื่อมเพื่อทำการเปรียบเทียบผล

1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย

เพื่อศึกษาการกระจายตัวของอุณหภูมิในเหล็กที่เชื่อมด้วยวิธีเสียดทาน โดยใช้การจำลอง ทางคอมพิวเตอร์เป็นเครื่องมือในการศึกษาและเปรียบเทียบผลกับการทดลอง

1.3 ขอบเขตการศึกษา

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการกระจายตัวของอุณหภูมิในเหล็กที่เชื่อมด้วยวิธีเสียดทาน โดยทำการทดลองวัดอุณหภูมิขณะทำการเชื่อม และสร้างแบบจำลองโดยระเบียบวิธีไฟไนต์ เอลิเมนต์ จากนั้นทำการเปรียบเทียบผลและสรุปผล ซึ่งขอบเขตของงานวิจัย ประกอบไปด้วย

1.3.1 การทดลองวัดอุณหภูมิ

1.3.1.1 วัสดุที่ใช้ในการทดลอง คือ เหล็กคาร์บอนต่ำ เส้นผ่าศูนย์กลาง 15 mm. ยาว 80 mm.

1.3.1.2 วัดการกระจายตัวของอุณหภูมิในเหล็กจากการเชื่อมด้วยวิธีเสียดทาน

1.3.1.3 ทำการทดลองภายใต้เงื่อนไขการเชื่อมที่แตกต่างกัน 3 ชุด เพื่อให้เกิดแหล่ง ความร้อนที่แตกต่างกัน

1.3.2 การสร้างแบบจำลองโดยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

1.3.2.1 วัสดุที่ใช้ในการสร้างแบบจำลอง เป็นเหล็กคาร์บอนต่ำซึ่งมีคุณสมบัติเหมือนกัน (Homogenous) ทั้งสองชิ้นงาน

1.3.2.2 ใช้เงื่อนไขเดียวกันกับการทดลองในการทำนายผลการกระจายตัวของอุณหภูมิจากการเชื่อมด้วยวิธีเสียดทาน

1.4 ประโยชน์ที่จะได้รับจากการศึกษา

1.4.1 ทราบผลการกระจายตัวของอุณหภูมิในเหล็กที่เชื่อมด้วยวิธีเสียดทาน ซึ่งได้จากการทดลองและการสร้างแบบจำลองโดยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

1.4.2 สามารถประยุกต์ใช้โปรแกรมทำนายผลงานประเภทอื่นๆได้

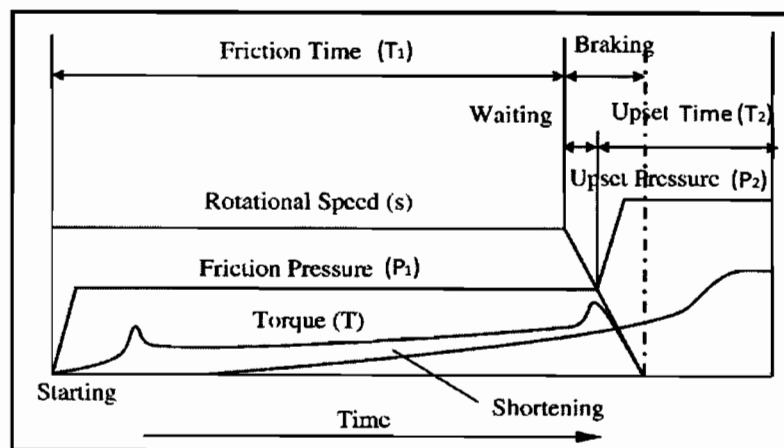
บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 การเชื่อมด้วยวิธีเสียดทาน (Friction welding)

ในกระบวนการเชื่อมโดยทั่วไปจะอาศัยความร้อนในการหลอมโลหะหรือทำให้โลหะมีอุณหภูมิที่อยู่ในสถานะที่ต่ำกว่าจุดหลอมเหลวเพื่อเชื่อมโลหะให้ติดกัน กระบวนการดังกล่าวจะเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของโลหะบริเวณรอยเชื่อม จึงกล่าวได้ว่าความร้อนหรืออุณหภูมิที่เกิดขึ้นขณะทำการเชื่อมมีความสำคัญเป็นอย่างยิ่งต่อกระบวนการเชื่อมโลหะ ดังนั้นความร้อนในการเชื่อมจึงเป็นปัจจัยที่ผู้วิจัยต้องการที่จะศึกษา

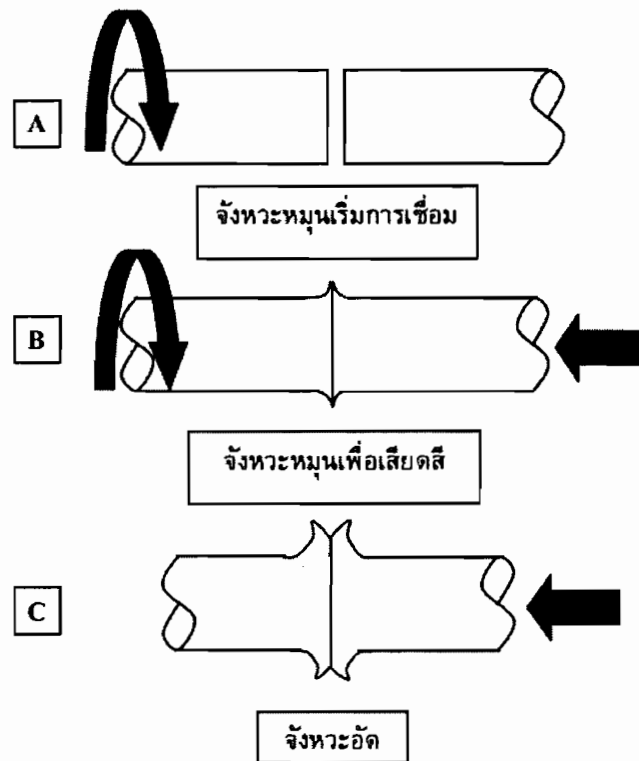
การเชื่อมด้วยวิธีเสียดทานจัดเป็นกระบวนการเชื่อมชิ้นงานที่อยู่ในสถานะกึ่งของแข็ง (Semi-solid state) คือ เป็นการเชื่อมต่อโลหะสองชิ้นเข้าด้วยกัน โดยอาศัยแรงเสียดทานที่เกิดจากการหมุนชิ้นงานแล้วใช้แรงดันในแนวแกนอัดชิ้นงาน ซึ่งใช้เนื้อของชิ้นงานเป็นตัวประสานกันเอง วัสดุที่ใช้เชื่อมจะเป็นโลหะชนิดเดียวกัน มีคุณสมบัติที่ใกล้เคียงกันหรือต่างชนิดกันก็ได้ การเชื่อมด้วยวิธีเสียดทานนั้นจะต้องอาศัยตัวแปรที่มีความสัมพันธ์กันในการทำงาน และตัวแปรเหล่านั้นมีความสัมพันธ์ที่ซับซ้อนอยู่พอสมควร ซึ่งได้แก่ เวลาเสียดทาน (T_1) เวลาอัด (T_2) แรงดันเสียดทาน (P_1) แรงดันอัด (P_2) ความเร็วรอบ (S) และแรงบิด (T) โดยทุกตัวแปรจะทำงานภายในช่วงเวลาที่มีความเหมาะสม สอดคล้องซึ่งกันและกัน ดังความสัมพันธ์ที่แสดงในภาพที่ 2.1



ภาพที่ 2.1 ความสัมพันธ์ของตัวแปรในการเชื่อมด้วยวิธีเสียดทาน [39]

2.2 หลักการเชื่อมด้วยวิธีเสียดทาน

การเชื่อมด้วยวิธีเสียดทานเป็นกระบวนการเชื่อมที่เปลี่ยนพลังงานกลเป็นพลังงานความร้อน ซึ่งจะใช้เนื้อของวัสดุประสานกันเอง หลักการเชื่อมเบื้องต้นทำได้โดยการนำเอาโลหะสองชิ้นมาเสียดทานกันด้วยความเร็วและแรงดันในแนวแกนที่คงที่ค่าหนึ่ง โดยชิ้นงานชิ้นหนึ่งจะอยู่กับที่ อีกชิ้นหนึ่งจะหมุนด้วยความเร็วที่คงที่ (ภาพที่ 2.2 A) จากนั้นใช้แรงดันในแนวแกนดันชิ้นงานให้เสียดทานซึ่งกันและกัน ในขั้นตอนนี้ความร้อนที่เกิดจากแรงเสียดทาน จะทำให้พื้นที่หน้าตัดเกิดความร้อนและเกิดอุณหภูมิที่ต่ำกว่าจุดหลอมเหลว (ภาพที่ 2.2 B) เมื่อชิ้นงานเกิดการเสียดทานภายในช่วงเวลาที่เหมาะสม จึงทำการหยุดหมุนพร้อมทั้งให้แรงดันในแนวแกนที่มากกว่าเดิม ดันอัดชิ้นงานเข้าหากันเพื่อให้ชิ้นงานติดกัน ในช่วงนี้ชิ้นงานจะเกิดการเสียรูปร่างอย่างถาวรหรือเกิดการเสียรูปแบบพลาสติก (Plastic deformation) ดังแสดงในภาพที่ 2.2 C



ภาพที่ 2.2 หลักการเชื่อมด้วยวิธีเสียดทานที่ใช้ในการศึกษา [4]

2.3 อิทธิพลของตัวแปรที่มีความสัมพันธ์ต่ออุณหภูมิ

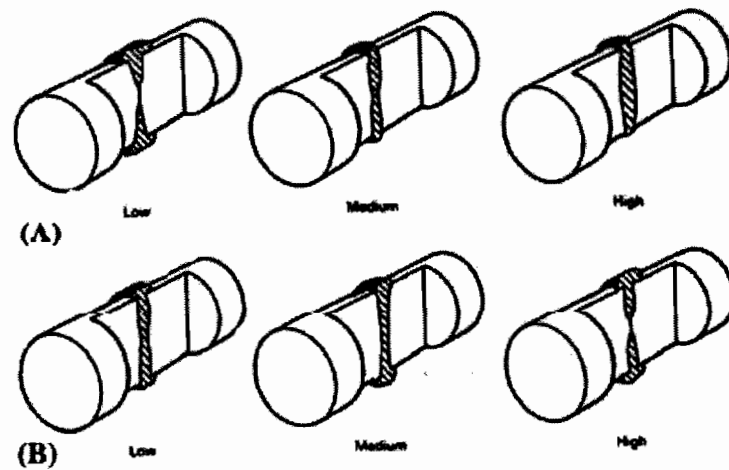
เนื่องจากอิทธิพลของตัวแปรต่างๆในกระบวนการเชื่อมด้วยวิธีเสียดทานนั้นมีความเกี่ยวข้องกับที่จับซ้อนกันอยู่พอสมควร ดังนั้นเพื่อให้เกิดความเข้าใจและเห็นภาพอิทธิพลของตัวแปรต่างๆเหล่านั้นซึ่งมีความสัมพันธ์ต่ออุณหภูมิชัดเจนยิ่งขึ้น จึงได้ทำการแบ่งอิทธิพลของตัวแปรเหล่านั้นออกเป็นหัวข้อย่อย เพื่ออธิบายหน้าที่ของตัวแปรรวมถึงความสัมพันธ์ระหว่างอิทธิพลของตัวแปรเหล่านั้นกับอุณหภูมิที่เกิดขึ้น ซึ่งจะได้อธิบายดังต่อไปนี้

2.3.1 อิทธิพลของเวลาเสียดทาน (T_1)

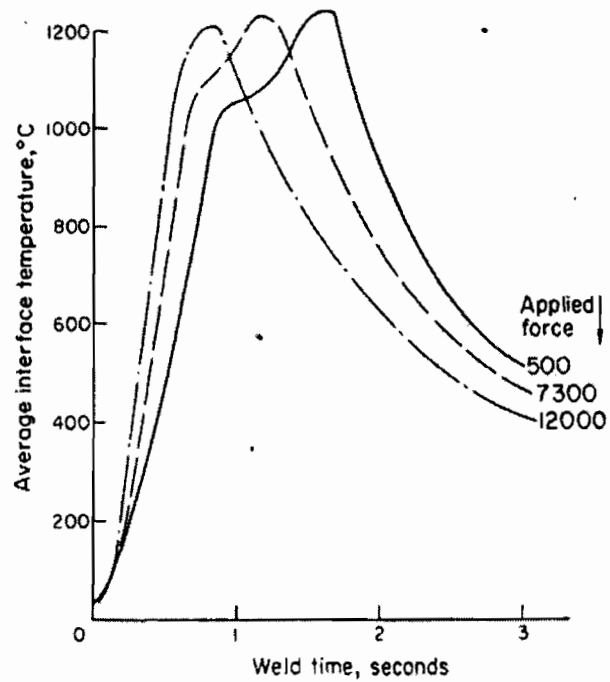
เวลาเสียดทานเป็นตัวแปรที่ทำหน้าที่ในช่วงเริ่มต้นของกระบวนการ มีหน้าที่ควบคุมตัวแปรแรงดันเสียดทานให้เสียดทานอยู่ภายในช่วงเวลาที่เหมาะสม หรืออาจกล่าวได้ว่าเป็นตัวแปรที่กำหนดสถานะอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการเพิ่มแรงดันอัดในแนวแกนเพื่ออัดชิ้นงานให้ติดกัน เมื่อชิ้นงานเริ่มเกิดการสัมผัสหรือเริ่มเสียดทาน บริเวณผิวสัมผัสจะเกิดความร้อนซึ่งจะทำให้เกิดแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเนื้อของวัสดุ และเนื้อของวัสดุจะเกิดการเกาะติดกันเป็นชั้นบางๆ จากการเชื่อมด้วยวิธีเสียดทานภายในระยะเวลาที่กำหนด จะทำให้เกิดแรงบิดและความเค้นเฉือนบริเวณผิวสัมผัสซึ่งเป็นผลมาจากความร้อนที่เกิดขึ้นสูง ในทางตรงกันข้ามถ้าเวลาในการเสียดทานน้อยเกินไป จะทำให้อรอยเชื่อมมีความร้อนที่ไม่สม่ำเสมอ ทำให้เนื้อของวัสดุไม่เกิดการเกาะติดกันและรอยเชื่อมจะไม่มี ความแข็งแรง โดยเฉพาะที่บริเวณจุดศูนย์กลาง ดังนั้นเวลาเสียดทานจึงมีความสำคัญต่อการกำหนดอุณหภูมิในช่วงแรกเริ่ม เพราะเปรียบเสมือนเป็นการอุ่นชิ้นงานให้เกิดความร้อน สังเกตได้เมื่อชิ้นงานเริ่มเกิดการเสียดรูป [32]

2.3.2 อิทธิพลของแรงดันเสียดทาน (P_1)

แรงดันเสียดทานจะทำงานควบคู่กันกับเวลาเสียดทาน ซึ่งเป็นการทำงานในช่วงแรกของกระบวนการ ตัวแปรแรงดันเสียดทานจะเป็นตัวกำหนดอัตราของแรงบิดและความเค้นเฉือนที่มีต่อพื้นที่หน้าตัดเสียดทาน ซึ่งถ้าให้แรงดันเสียดทานมากลักษณะการเสียดรูปของวัสดุก็จะมากตามแรงบิดและความเค้นเฉือนที่มีผลตามแรงดัน แต่บริเวณจุดศูนย์กลางจะไม่เกิดการเชื่อมต่อหรือถ้าเชื่อมต่อก็จะเกิดการเชื่อมต่อเพียงเล็กน้อย ดังแสดงในภาพที่ 2.3 (B) นอกจากนี้ยังมีอิทธิพลต่อความชันของอุณหภูมิ กล่าวคือ เมื่อทำการเพิ่มแรงในแนวแกนจะส่งผลให้อุณหภูมิบริเวณพื้นที่เสียดทานมีความชันที่สูงขึ้นตามแรงในแนวแกนที่เพิ่มขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 2.4 ดังนั้นจึงถือได้ว่าตัวแปรแรงดันเสียดทานมีความสำคัญต่อการกำหนดอัตราความชันของเส้นอุณหภูมิที่จะส่งผลกระทบต่อการใช้แรงดันอัดในช่วงต่อไป



ภาพที่ 2.3 (A) อิทธิพลของความเร็วรอบที่ส่งผลต่อลักษณะของรอยเชื่อม
 (B) อิทธิพลของแรงในแนวแกนที่ส่งผลต่อลักษณะของรอยเชื่อม [20]



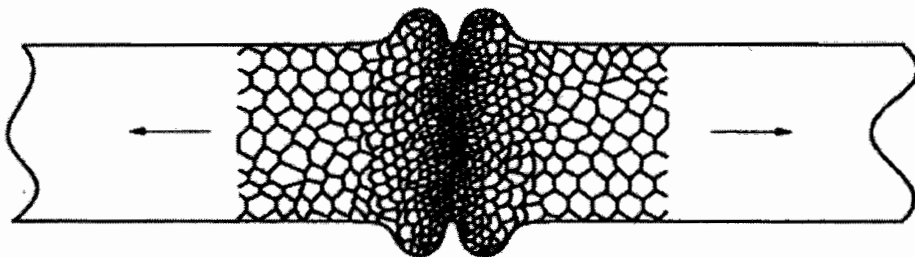
ภาพที่ 2.4 ลักษณะความชันของอุณหภูมิที่เกิดจากอิทธิพลของแรงในแนวแกน [23]

2.3.3 อิทธิพลของเวลาอัด (T_2)

เมื่อชิ้นงานเริ่มมีการเสียคาน โดยแรงในแนวแกนภายใต้เวลาเสียคานที่เหมาะสมแล้ว จากนั้นจะเป็นหน้าที่ของเวลาอัด คือ ทำหน้าที่ควบคุมแรงดันอัดในแนวแกนให้อยู่ภายในช่วงเวลาที่เหมาะสม ซึ่งการใช้เวลาและแรงดันอัดที่เหมาะสมนั้นจะต้องคำนึงถึงสถานะของอุณหภูมิในช่วงเสียคาน เพราะถ้าชิ้นงานมีอุณหภูมิที่ไม่เพียงพอสอดคล้องโลหะถึงแม้จะใช้เวลาอัดมากเพียงใดชิ้นงานก็จะไม่เกิดการเสียรูป แต่ถ้าหากอุณหภูมิถึงจุดที่เหมาะสม การใช้เวลาอัดชิ้นงานเพียงเล็กน้อยชิ้นงานก็จะเกิดการเสียรูป ซึ่งหมายถึง ความร้อนจากการเสียคานทำให้ความแข็งแรงของวัสดุลดลง จากนั้นเพิ่มแรงดันในแนวแกนให้มีค่ามากกว่าความแข็งแรงของวัสดุชิ้นงานให้ติดกันภายในช่วงเวลาที่เหมาะสม จึงถือว่ากระบวนการของเวลาอัดเสร็จสิ้นอย่างสมบูรณ์

2.3.4 อิทธิพลของแรงดันอัด (P_2)

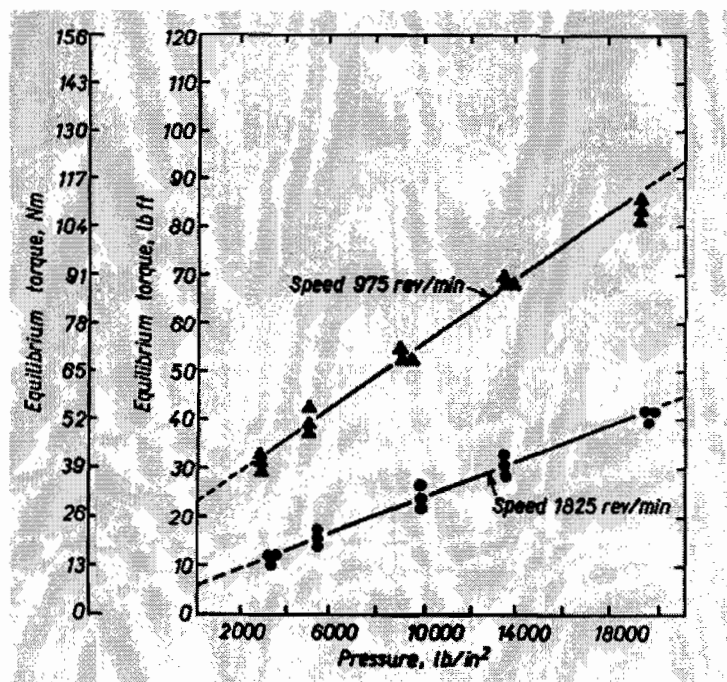
แรงดันอัด คือ กระบวนการอัดชิ้นงานให้ติดกัน ซึ่งจะใช้แรงดันที่มากกว่าเดิมดันอัดชิ้นงานให้ติดกัน สำหรับความสัมพันธ์ต่ออุณหภูมิ แรงดันอัดเป็นตัวกำหนดลักษณะความชันของอุณหภูมิบริเวณรอยเชื่อม หรือกล่าวได้ว่าการใช้แรงดันอัดเสมือนเป็นการรีดอุณหภูมิให้สูงขึ้น และอุณหภูมิจะมีการกระจายตัวออกไปตามครีบของการเสียรูปที่เกิดจากแรงอัดนั้น จากนั้นอุณหภูมิบริเวณรอยเชื่อมจะลดลงอย่างรวดเร็ว และถ้าใช้แรงดันอัดที่มากหรือเหมาะสมชิ้นงานจะเกิดการเสียรูปมาก แต่ถ้าหากแรงดันอัดมีค่าน้อย ความร้อนที่บริเวณรอยเชื่อมจะเกิดขึ้นอย่างจำกัด และระยะการอัดตัวจะเกิดขึ้นเพียงเล็กน้อยหรืออาจจะไม่เกิดขึ้นเลย ซึ่งกล่าวได้ว่าคุณภาพรอยเชื่อมของโลหะทุกชนิดจะขึ้นอยู่กับตัวแปรแรงดันอัด ผลจากการใช้แรงดันเสียคานแล้วใช้แรงดันอัด อัดให้ชิ้นงานติดกันนั้น จะทำให้โครงสร้างระดับจุลภาคของวัสดุบริเวณรอยเชื่อมนั้นเปลี่ยนไป (Recrystallisation) คือ ทำให้เกรนตรงรอยเชื่อมและบริเวณรอยเชื่อมมีความละเอียดและมีความแข็งแรงมากขึ้นกว่าชิ้นงานเดิม ดังแสดงไว้ในภาพที่ 2.5



ภาพที่ 2.5 ลักษณะของเกรนตรงรอยเชื่อมและบริเวณ ใกล้เคียงที่เกิดจากแรงดันอัด [20]

2.3.5 อิทธิพลของความเร็วยรอบ (S)

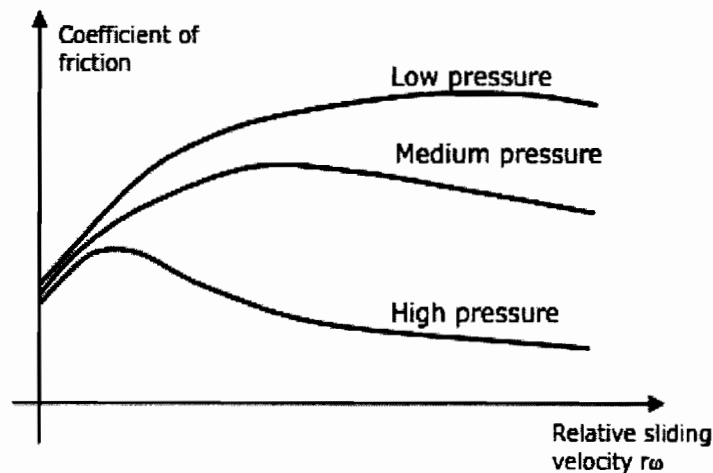
ความเร็วยรอบมีความสำคัญมากต่อการควบคุมคุณภาพของรอยเชื่อม และความเร็วยรอบจะมีผลอย่างมากต่อการเชื่อมวัสดุที่ต่างชนิดกัน นอกจากนี้ความเร็วยรอบยังเป็นตัวแปรที่ช่วยควบคุมสารประกอบเชิงโลหะ โดยความเร็วยรอบที่ต่ำจะสามารถลดสารประกอบเชิงโลหะได้จากภาพที่ 2.6 เป็นการเชื่อมเหล็กคาร์บอนต่ำที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 25 mm. ซึ่งแสดงให้เห็นว่าความเร็วยรอบที่ต่ำจะมีกำลังบิดหรือทอร์ก (Torque) สูงกว่าความเร็วยรอบที่สูงเมื่อเทียบกับที่แรงดันเท่ากัน นอกจากนี้ในภาพที่ 2.3 (A) ยังแสดงให้เห็นว่า ที่ความเร็วยรอบต่ำการเชื่อมจะเกิดขึ้นที่บริเวณขอบของชิ้นงานเท่านั้น และที่ความเร็วยรอบสูงจะเกิดการเชื่อมกันตลอดทั้งพื้นที่หน้าตัด คือ จากจุดศูนย์กลางถึงขอบของชิ้นงาน ซึ่งหมายความว่า การใช้ความเร็วยรอบที่สูงนั้นจะให้ความร้อนที่มากกว่า และอุณหภูมิเกิดการกระจายตัวทั่วทั้งพื้นที่เสียดทานได้ดีกว่าความเร็วยรอบต่ำ



ภาพที่ 2.6 อิทธิพลระหว่างความเร็วยรอบกับแรงดันที่ส่งผลต่อกำลังบิด (Torque) [22]

2.3.6 สัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน

สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานเป็นอีกตัวแปรหนึ่งที่มีความสำคัญเป็นอย่างยิ่งต่อกระบวนการเชื่อมด้วยวิธีเสียดทาน และมีผลที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา ซึ่งสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานจะเกิดขึ้นที่บริเวณพื้นที่เสียดทาน แล้วส่งผลกระทบต่อปัจจัยอื่นๆ เช่น การกระจายตัวของอุณหภูมิ ลักษณะการเสียดรูปของวัสดุ ความเค้น ความเครียด เป็นต้น ซึ่งปัจจัยเหล่านี้เกิดจากแรงดันในแนวแกนและความเร็วรอบ จากภาพที่ 2.7 แสดงให้เห็นว่า ถ้าแรงดันในแนวแกนมีค่าต่ำ ชิ้นงานที่เชื่อมจะมีค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานที่ค่อนข้างสูงหรือมีความผิดมาก ชิ้นงานจะเสียดรูปน้อย แต่ถ้าแรงในแนวแกนมีค่าสูงชิ้นงานที่เชื่อมจะมีค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานที่ค่อนข้างต่ำ หรือมีความผิดน้อย ชิ้นงานจะเสียดรูปมาก สำหรับแรงดันสูงความผิดจะเกิดขึ้นเฉพาะในช่วงแรกของการเสียดทานเท่านั้น หลังจากนั้นความผิดหรือค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานจะลดลง เนื่องจากความแข็งแรงของวัสดุมีค่าน้อยกว่าแรงในแนวแกน ซึ่งจะเป็นผลแปรผกผันกันระหว่างแรงดันสูงกับแรงดันต่ำ ส่วนแรงดันที่อยู่ในระดับกลางค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานจะอยู่ในระดับปานกลาง



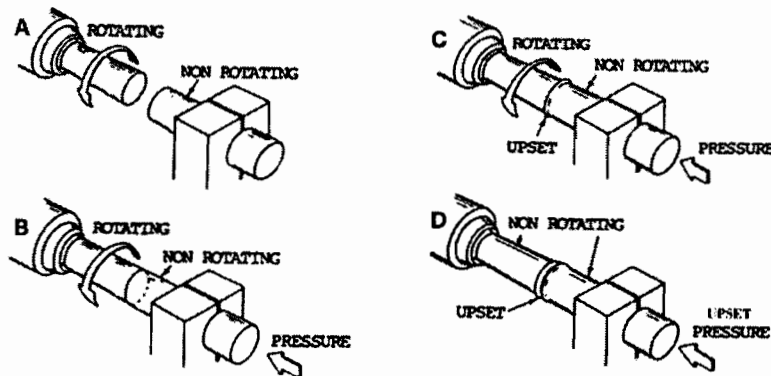
ภาพที่ 2.7 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานกับแรงดันในแนวแกน [17]

2.4 การเชื่อมด้วยวิธีเสียดทานแบบต่างๆ

การเชื่อมด้วยวิธีเสียดทานในปัจจุบันนั้นมีด้วยกันอยู่หลายแบบ ซึ่งเป็นการเชื่อมวัสดุในสถานะกึ่งของแข็ง (Semi-solid state) กล่าวคือ เป็นการเชื่อมต่อวัสดุสองชิ้นเข้าด้วยกัน โดยโลหะบริเวณรอยต่อของวัสดุทั้งสองชิ้นไม่เกิดการหลอมละลาย หรืออุณหภูมิของรอยเชื่อมต้อมีค่าต่ำกว่าจุดหลอมเหลวของวัสดุที่ทำการเชื่อม โดยปกติรอยต่อของวัสดุเกิดจากการเชื่อมยึดกันได้ด้วยแรงทางกลหรือแรงเสียดทาน รูปแบบการเชื่อมในสถานะกึ่งของแข็งประกอบไปด้วยการเชื่อมชนิดต่างๆ เช่น การเชื่อมด้วยการแพร่ (Diffusion welding) การเชื่อมด้วยแรงต้านทานแบบจุด (Resistance spot welding) การเชื่อมด้วยอัลตราโซนิก (Ultrasonic welding) การเชื่อมด้วยแรงเสียดทานแบบจุด (Friction spot joint) หรือการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานแบบกวน (Friction stir welding) เป็นต้น แต่ในปัจจุบันการศึกษาและวิจัยที่เกี่ยวกับการเชื่อมด้วยวิธีเสียดทานที่แพร่หลายมีด้วยกันอยู่ 4 แบบ ดังนี้

2.4.1 การเชื่อมด้วยวิธีเสียดทานแบบธรรมดา

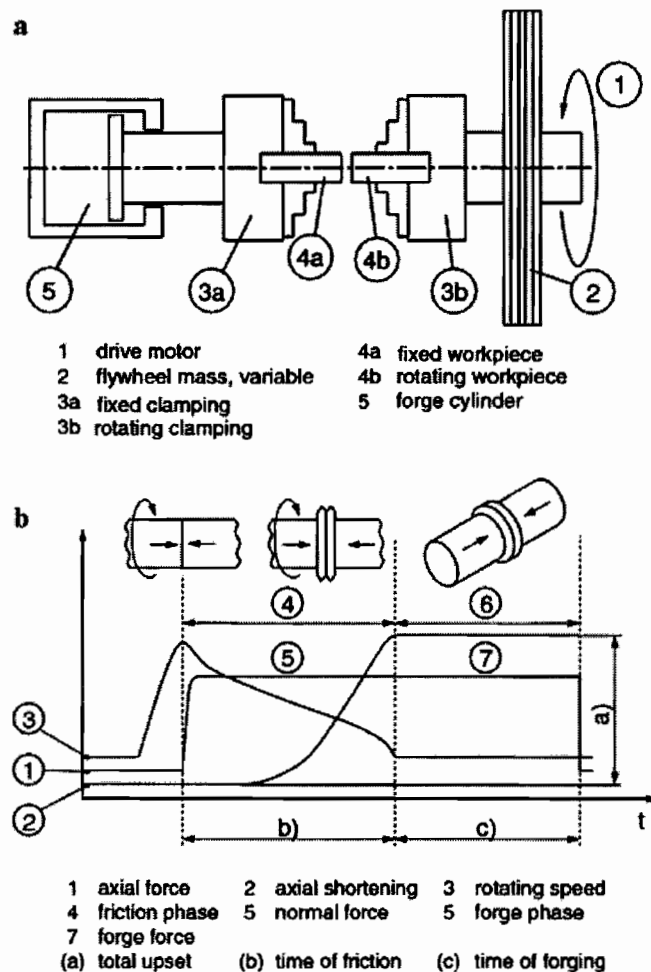
การเชื่อมด้วยวิธีเสียดทานแบบธรรมดา หรือ Conventional friction welding เป็นการนำเอาโลหะสองชิ้นมาเชื่อมต่อกันโดยการเสียดสีและเกิดเป็นแรงเสียดทาน โดยนำโลหะชิ้นหนึ่งมาหมุนด้วยความเร็วคงที่ แสดงในภาพที่ 2.8 (A) จากนั้นนำโลหะอีกชิ้นหนึ่งมาด้านทานการหมุนโดยเพิ่มแรงในแนวแกน ดังภาพที่ 2.8 (B) กระทั่งวัตถุทั้งสองเกิดการเสียดทานและเกิดความร้อนที่บริเวณผิวสัมผัส ในขั้นตอนนี้ชิ้นงานทั้งสองจะเกิดการเสียดรูปเล็กน้อย ดังภาพที่ 2.8 (C) และเมื่อบริเวณพื้นผิวสัมผัสเกิดความร้อนที่เหมาะสมต่อการเชื่อมจึงหยุดการหมุนพร้อมทั้งเพิ่มแรงดันที่มากกว่าเดิม ดังภาพที่ 2.8 (D) ดันอัดชิ้นงานเข้าหากัน ในขั้นตอนนี้ชิ้นงานจะเชื่อมติดกันและเกิดการเสียดรูปแบบพลาสติก (Plastic deformation)



ภาพที่ 2.8 การเชื่อมด้วยวิธีเสียดทานแบบธรรมดา [43]

2.4.2 การเชื่อมด้วยวิธีเสียดทานแบบเฉื่อย

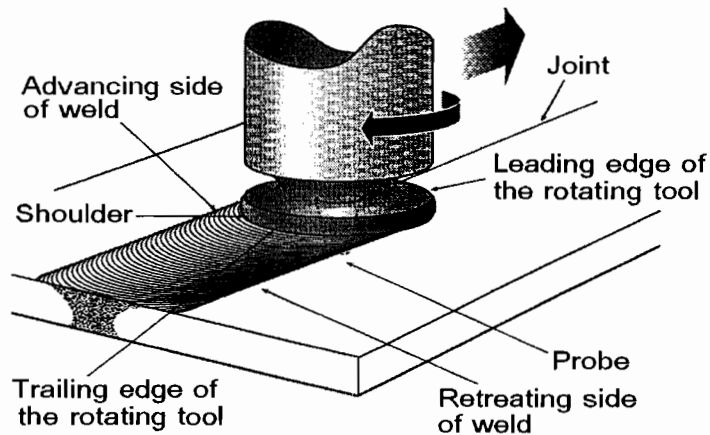
การเชื่อมด้วยวิธีเสียดทานแบบเฉื่อย หรือ Inertia friction welding มีลักษณะการเชื่อมที่คล้ายกันกับการเชื่อมด้วยวิธีเสียดทานแบบธรรมดา แต่จะมีอุปกรณ์เพิ่มเติม คือ ล้อช่วยแรง (flywheel, 2) ทำหน้าที่รับแรงค้ำจากมอเตอร์ (drive motor, 1) แล้วทำการหมุนด้วยตัวเองด้วยแรงเฉื่อย จากนั้นนำชิ้นงาน (fixed work piece, 4a) ที่จับยึดอยู่กับหัวจับ (fixed clamping, 3a) มาเสียดทานกับชิ้นงานที่หมุน (rotating work piece, 4b) ที่จับยึดอยู่กับหัวจับที่หมุนได้ (rotating clamping, 3b) ภายใต้แรงดันคงที่ (axial force, 5) ทำการเสียดทานที่เวลาค่าหนึ่ง (time of friction) จึงหยุดหมุนแล้วใช้แรงดันที่คงที่ดันชิ้นงานให้เชื่อมติดกัน ซึ่งอาจกล่าวได้ว่าหลักการเสียดทานแบบเฉื่อยมีความคล้ายคลึงกันกับการเชื่อมเสียดทานแบบธรรมดา แต่ต่างกันที่การเสียดทานแบบเฉื่อยใช้แรงดันคงที่ ไม่มีการเพิ่มแรงดันอัด หลักการเบื้องต้นแสดงในภาพที่ 2.9 a และ b



ภาพที่ 2.9 การเชื่อมด้วยแรงเสียดทานแบบเฉื่อย [45]

2.4.3 การเชื่อมด้วยวิธีเสียดทานแบบกวน

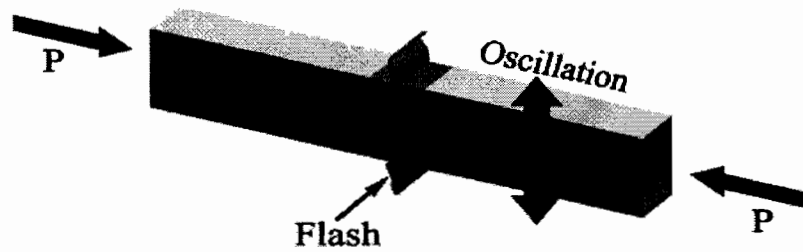
การเชื่อมด้วยวิธีเสียดทานแบบกวน หรือ Friction stir welding เป็นกระบวนการเชื่อมที่ถูกคิดค้นโดยสถาบันการเชื่อมประเทศอังกฤษ TWI (The Welding Institute) เพื่อเชื่อมวัสดุที่มีความยากต่อการเชื่อมแบบหลอมละลาย (Conventional fusion welding) การเชื่อมด้วยวิธีเสียดทานแบบกวนนี้ เป็นกระบวนการเชื่อมในสภาวะกึ่งของแข็งที่มีการใช้งานอย่างแพร่หลายในงานอุตสาหกรรม ลักษณะการเชื่อมโดยสังเขปแสดงไว้ในภาพที่ 2.10 ซึ่งแสดงตัวกวน (Probe or stirrer) ที่เป็นส่วนประกอบของเครื่องเชื่อม (Rotating tool) สอดลงไป ในรอยต่อของวัสดุจนกระทั่งบ่า (Shoulder) ของเครื่องมือเชื่อมสัมผัสกับผิวของรอยต่อ ความร้อนที่เกิดจากการเสียดทานระหว่างเครื่องมือกับวัสดุ ทำให้วัสดุเกิดการอ่อนตัวอยู่ในสภาวะคล้ายของไหล (Plastic fluid-like state) และเคลื่อนที่รอบตัวกวนภายใต้บ่าของเครื่องมือเชื่อม เมื่อเครื่องมือเชื่อมเริ่มเคลื่อนที่วัสดุในสภาวะคล้ายของไหลจะเคลื่อนที่เข้ามารวมตัวกันและบ่าเครื่องมือด้านหลัง (Trailing edge of the rotating tool) จะกดอัดและผสมวัสดุทำให้เกิดการรวมตัวกันขึ้นเป็นแนวเชื่อม



ภาพที่ 2.10 การเชื่อมด้วยวิธีเสียดทานแบบกวน [10]

2.4.4 การเชื่อมด้วยวิธีเสียดทานแบบเชิงเส้น

การเชื่อมด้วยวิธีเสียดทานแบบเชิงเส้น หรือ Linear friction welding การเชื่อมด้วยวิธีเสียดทานในลักษณะนี้จะอาศัยการสั่นของชิ้นงานสั่นขัดสีกัน ในแนวระนาบ ในระหว่างการเสียดทานนั้นจะต้องใช้ความถี่และแรงที่เหมาะสมในแนวแกนตั้งชิ้นงานทั้งสองเข้าหากัน กระทั่งผิวสัมผัสของชิ้นงานเสียดสีกันจนเกิดความร้อนที่เหมาะสมต่อการเชื่อมวัสดุให้ติดกันจึงหยุดการสั่น แล้วใช้แรงดันอัดชิ้นงานเพื่อดันอัดชิ้นงานทั้งสองชิ้นให้ติดกัน ลักษณะการเชื่อมแสดงในภาพที่



ภาพที่ 2.11 การเชื่อมด้วยวิธีเสียดทานแบบเชิงเส้น [29]

2.5 เหล็กกล้าคาร์บอน (Plain Carbon Steels)

เหล็กกล้าคาร์บอน คือ เหล็กกล้าที่มีคาร์บอนเป็นธาตุผสมหลัก และมีปริมาณธาตุอื่นๆ ผสมอยู่ในปริมาณน้อย ตามนิยามของ AISI (American Iron and Steel Institute) มีปริมาณธาตุผสม ดังนี้ แมงกานีสไม่เกิน 1.65% ซิลิกอนไม่เกิน 0.60% ทองแดงไม่เกิน 0.60% และปริมาณของ ฟอสฟอรัสรวมกับกำมะถันไม่เกิน 0.50% โดยทั่วไปถือได้ว่า เฉพาะธาตุคาร์บอนเท่านั้นที่มีอิทธิพล ต่อคุณสมบัติของเหล็กกล้าชนิดนี้ ธาตุผสมในเหล็กกล้าประเภทนี้ นอกจากจะมีคาร์บอนแล้วยังมี ซิลิกอนและแมงกานีส ส่วนกำมะถันและฟอสฟอรัสจะอยู่ในรูปของสารมลทิน เราสามารถแบ่ง ชนิดของเหล็กกล้าคาร์บอนตามเปอร์เซ็นต์ของคาร์บอนที่อยู่ในเหล็กได้ ดังนี้

เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ (Mild steel หรือ Low carbon steel) เป็นเหล็กที่มีปริมาณธาตุ คาร์บอนผสมอยู่น้อย ($C < 0.25\%$) โครงสร้างจะประกอบไปด้วยเฟอร์ไรต์เป็นส่วนใหญ่ โดยมีความ แข็งแรงไม่สูงนักแต่ขึ้นตัวได้ดี

เหล็กกล้าคาร์บอนปานกลาง (Medium carbon steel) เมื่อปริมาณคาร์บอนเพิ่มขึ้นความ แข็งจะเพิ่มขึ้น โดยมีคาร์บอนอยู่ในระดับปานกลาง ($0.25\% \leq C < 0.60\%$) สามารถใช้ทำชิ้นส่วน เครื่องจักรกล เช่น เหล็กกล้าที่มีคาร์บอน 0.45% ซึ่งมีโครงสร้างเฟอร์ไรต์-เพิร์ลไลท์ และสามารถ ปรับเปลี่ยนโครงสร้างจุลภาคให้แข็งเพิ่มขึ้นได้โดยการอบชุบทางความร้อน

เหล็กกล้าคาร์บอนสูง (High carbon steel) มีปริมาณคาร์บอนสูง ($C \geq 0.60\%$) มักใช้ผลิต เครื่องมือหรืออุปกรณ์ที่ต้องการความแข็งแรงสูง หรือความต้านทานการสึกหรอ เช่น เหล็กกล้า คาร์บอน 1.4% จะมีโครงสร้างเป็นเพิร์ลไลท์ผสมกับซีเมนไตต์ ซึ่งสามารถใช้ทำพวกเลื่อยหรือ ใบมีดที่ต้องการความแข็งแรง



2.6 ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Analysis : FEA)

การออกแบบงานทางวิศวกรรมด้วยวิธีการคำนวณในปัจจุบันส่วนมากต้องอาศัยโปรแกรมทาง Computer-Aided Engineering หรือ CAE โปรแกรมเหล่านี้ใช้ระเบียบวิธีในการคำนวณขั้นสูง เช่น Finite Difference Method (FDM), Finite Element Method (FEM) หรือ Finite Element Analysis (FEA) และ Finite Volume Method (FVM) เป็นต้น ซึ่งวิธีต่างๆเหล่านี้ล้วนตั้งอยู่บนพื้นฐานขององค์ความรู้ทางระเบียบวิธีเชิงตัวเลข (Numerical methods) ทำให้ความรู้ความเข้าใจในระเบียบวิธีเชิงตัวเลขกลายเป็นสิ่งที่จำเป็น เพื่อให้สามารถใช้โปรแกรมต่างๆในการคำนวณได้อย่างมีประสิทธิภาพ และเกิดความเข้าใจในกระบวนการที่เราศึกษา

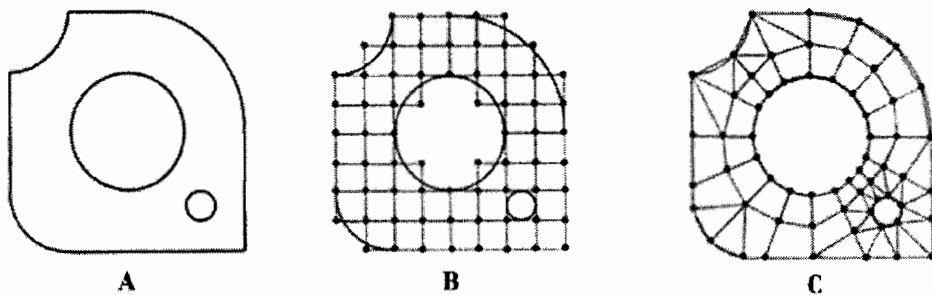
การนำเอาสมการเชิงอนุพันธ์ (Differential equation) หรือ สมการอินทิเกรต (Integral equation) มาอธิบายปรากฏการณ์ต่างๆที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติ โดยใช้กฎเกณฑ์ทางฟิสิกส์มาช่วยในการอธิบาย และการสร้างนวัตกรรมสิ่งประดิษฐ์ใหม่ๆ ในทางวิศวกรรมศาสตร์และวิทยาศาสตร์นั้นก็สามารถทำได้ เช่น การนำเอาสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยที่สอดคล้องกันมาวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนและอุณหภูมิ ณ จุดต่างๆในลูกสูบได้ [6] การศึกษาความแข็งแรงของพระพุทธรูปขนาดใหญ่ โดยใช้สมการเชิงอนุพันธ์ย่อยอธิบายความแข็งแรงของ โครงสร้าง ภายใต้อิทธิพลที่มาจากปฏิกิริยา รวมถึงการทำนายที่เกี่ยวกับของไหล โดยเริ่มจากการใช้สมการเชิงอนุพันธ์ที่สามารถอธิบายลักษณะความสมดุลและสถานะภาพของของไหล [11] เป็นต้น จากการยกตัวอย่างเบื้องต้นจะเห็นว่า ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขนั้นมีความหลากหลาย ซึ่งสามารถเลือกและประยุกต์ใช้สมการเชิงอนุพันธ์ที่เหมาะสม และสอดคล้องกับปัญหานั้นๆ ได้ ปกติจะประดิษฐ์ขึ้นได้โดยไม่ยาก แต่ผลเฉลยแม่นยำ (Exact solution) ที่ต้องการและจำเป็นต้องประดิษฐ์ขึ้นโดยระเบียบวิธีวิเคราะห์ (Analytical method) นั้นทำได้ยากมากหรือทำไม่ได้เลยก็ได้ เหตุผลดังกล่าวทำให้เกิดวิธีการหาผลเฉลยโดยประมาณขึ้น (Approximate solution) ระเบียบวิธีหาผลเฉลยโดยประมาณนั้นมีหลายวิธี ซึ่งวิธีที่ได้รับความนิยมอย่างกว้างขวางในอดีตที่ผ่านมา คือ ระเบียบวิธีผลต่างสี่เหลี่ยม (Finite Difference Method, FDM)

หลักการที่สำคัญของระเบียบวิธีผลต่างสี่เหลี่ยม คือ การหาค่าผลเฉลยโดยประมาณ โดยเริ่มจากการแปลงสมการเชิงอนุพันธ์ให้อยู่ในรูปแบบของระบบสมการผลต่างสี่เหลี่ยม (System of difference equation) ที่ประกอบด้วย การ บวก ลบ คูณ และหาร ข้อดีของระเบียบวิธีผลต่างสี่เหลี่ยม คือ เป็นวิธีที่ง่ายต่อการศึกษาและทำความเข้าใจ รวมไปถึงความสะดวกในการประดิษฐ์ขึ้นเป็นโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อใช้ในการคำนวณ ส่วนข้อเสียของระเบียบวิธีผลต่างสี่เหลี่ยมนี้ก็มีหลายประการ เช่น ความไม่สะดวกในการกำหนดเงื่อนไขขอบเขต (Application of boundary condition) และที่สำคัญที่สุด คือ ความยากลำบากในการประยุกต์ระเบียบวิธีนี้เข้ามาวิเคราะห์ปัญหาที่มีรูปร่าง

ลักษณะซับซ้อน ซึ่งการออกแบบชิ้นงานที่มีรูปร่างลักษณะที่ซับซ้อนนั้นกลายเป็นสิ่งสำคัญและเป็นสิ่งที่จำเป็นต้องพัฒนาเพื่อให้สามารถแก้ไขปัญหานั้นๆ ได้ [7]

ต่อไปนี้จะเป็นการยกตัวอย่างการแก้ปัญหาที่มีความซับซ้อนที่ระเบียบวิธีผลต่างสลับเนื่องไม่สามารถหาผลเฉลยที่มีความซับซ้อนนั้นได้ ซึ่งเป็นการนำเอาระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มาใช้ในการวิเคราะห์ปัญหา ดังแสดงในภาพที่ 2.12 จากภาพที่ 2.12 (A) แสดงลักษณะแผ่นโลหะอะลูมิเนียมที่ใช้เสริมความแข็งแรงของโครงสร้างภายในปีกของเครื่องบิน โดยแผ่นโลหะนี้ประกอบด้วยขอบรอบนอกที่มีขอบโค้งและขอบตรง ภายในมีรูกลมสองขนาดในตำแหน่งต่างกัน เป็นการวิเคราะห์หาการกระจายของความเค้น (Stress distribution) บนแผ่นอะลูมิเนียมภายใต้แรงกระทำโดยใช้ระเบียบวิธีผลต่างสลับเนื่อง (FDM) เริ่มจากการแบ่งแผ่นอะลูมิเนียมออกเป็นช่องตารางสี่เหลี่ยมดังแสดงในภาพที่ 2.12 (B) โดยตารางสี่เหลี่ยมเหล่านี้คือที่จุดต่อ (Grid point) ตามหัวมุมของสี่เหลี่ยมต่างๆ ซึ่งขนาดของปัญหาหรือจำนวนตัวไม่รู้ค่า (Number of unknowns) จะขึ้นอยู่กับจำนวนของจุดต่อนี้เอง

ภาพที่ 2.12 (B) แสดงให้เห็นว่า ตารางสี่เหลี่ยมที่ใช้ในระเบียบวิธีผลต่างสลับเนื่องไม่สามารถจำลองรูปร่างลักษณะดั้งเดิมที่แท้จริงของแผ่นอะลูมิเนียมดังกล่าวได้อย่างเที่ยงตรง หากจะลดขนาดของแผ่นสี่เหลี่ยมให้ละเอียดหรือเล็กลงก็หมายถึงต้องเพิ่มจำนวนสี่เหลี่ยมให้มากขึ้น ถึงจะสามารถจำลองรูปร่างลักษณะได้ใกล้เคียงกับลักษณะเดิม แต่ในขณะเดียวกันจำนวนจุดต่อที่เพิ่มมากขึ้นจะทำให้จำนวนสมการผลต่างสลับเนื่องมากตามไปด้วย รวมถึงระยะเวลาในการคำนวณก็จะมากตามไปด้วยเช่นกัน [8]



ภาพที่ 2.12 (A) แผ่นอะลูมิเนียมที่ประกอบด้วยขอบโค้งและขอบตรงรวมทั้งรูกลมสองขนาดภายใน
 (B) การวิเคราะห์หาผลเฉลยบนแผ่นอะลูมิเนียมด้วยระเบียบวิธีผลต่างสลับเนื่อง (FDM)
 (C) การวิเคราะห์หาผลเฉลยบนแผ่นอะลูมิเนียมด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (FEA)

อุปสรรคและความไม่เหมาะสมดังกล่าวทำให้เกิดระเบียบวิธีหาผลเฉลยโดยประมาณอีกวิธีหนึ่ง เรียกว่า ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Analysis, FEA) ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (FEA) นี้สามารถนำมาใช้กับปัญหาที่มีรูปร่างลักษณะที่ซับซ้อนได้เป็นอย่างดี สามารถจำลองรูปร่างลักษณะเดิมที่แท้จริงได้เที่ยงตรงกว่า กล่าวคือ หลักการในขั้นต้นก็คล้ายกับระเบียบวิธีผลต่างสี่เหลี่ยม คือ เริ่มจากการแบ่งชิ้นงานออกเป็นส่วนเล็กๆที่เรียกว่าเอลิเมนต์ (Element) แต่แตกต่างกันที่รูปแบบของสามเหลี่ยมหรือสี่เหลี่ยมด้านไม่เท่าก็ได้ ดังแสดงในภาพที่ 2.12 (C) ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (FEA) สามารถหาผลเฉลยโดยประมาณได้ใกล้เคียงกับของจริงกว่า มีความเที่ยงตรงและแม่นยำสูง

2.7 หลักการเบื้องต้นเกี่ยวกับการถ่ายเทความร้อน

การถ่ายเทความร้อนตามธรรมชาตินั้นจะเกิดขึ้นได้ก็ต่อเมื่ออุณหภูมิระหว่างตำแหน่งสองตำแหน่งมีค่าต่างกัน โดยความร้อนจะมีการถ่ายเทจากบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงไปยังบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำเสมอ สำหรับการเชื่อมด้วยวิธีเสียดทานนี้ก็เช่นเดียวกัน ถือว่าเป็นการถ่ายเทความร้อนในอีกลักษณะหนึ่ง คือ เป็นการให้ความร้อนกับชิ้นงานที่เป็น โลหะ โดยการนำโลหะสองชิ้นมาเสียดสีซึ่งกันและกัน โดยชิ้นหนึ่งอยู่กับที่อีกชิ้นหนึ่งหมุน จากนั้นเพิ่มแรงในแนวแกนกับชิ้นงานที่อยู่กับที่เพื่อให้เกิดแรงเสียดทานระหว่างพื้นที่สัมผัสของทั้งสองชิ้นงาน ในกระบวนการนี้ชิ้นงานจะเกิดความร้อนและเกิดการถ่ายเทความร้อนในแท่งเหล็กจนเกิดเป็น โซนความร้อนที่มีอุณหภูมิสูง แล้วเกิดการถ่ายเทออกไปตามความยาวของแท่งโลหะและความร้อนบางส่วนถูกถ่ายเทออกที่อุณหภูมิห้อง สำหรับงานทางโลหะวิทยาที่มีการศึกษาและประยุกต์ใช้อย่างกว้างขวาง เพราะกระบวนการทางโลหะวิทยาต้องอาศัยหลักการถ่ายเทความร้อนในการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของโลหะ ซึ่งเมื่ออุณหภูมิของโลหะเปลี่ยนไปถึงจุดวิกฤตค่าหนึ่งจะทำให้เฟสในเนื้อโลหะเกิดการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติ หรือเกิดการเปลี่ยนแปลงเฟส เช่น กระบวนการอบชุบเหล็กกล้า การอบชุบโลหะผสมอะลูมิเนียม หรือการเปลี่ยนแปลงเฟสระหว่างของเหลวกับของแข็ง เป็นต้น

การถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติที่มีการศึกษา มีอยู่ 3 วิธี คือ การนำความร้อน (Conduction) การพาความร้อน (Convection) และการแผ่รังสี (Radiation) ซึ่งใน ส่วน ของ กระบวนการเชื่อมด้วยวิธีเสียดทานนั้น ถือว่าเป็นกระบวนการการนำความร้อน ซึ่งจะได้อธิบายหลักการและการประยุกต์ใช้สมการความร้อน ดังต่อไปนี้

2.7.1 การนำความร้อน (Heat Conduction)

การนำความร้อนเป็นปรากฏการณ์ส่งผ่านความร้อนของวัสดุจากบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงไปยังบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำ สมบัติที่แสดงถึงความสามารถในการส่งผ่านความร้อนของวัสดุนี้เรียกว่า การนำความร้อน (Heat Conduction) โดยสมการแสดงพฤติกรรมการนำความร้อนนั้น ได้ถูกนำเสนอโดยฟูเรียร์ (Fourier's law) และรู้จักกันในนาม กฎข้อที่ 1 ของฟูเรียร์ สำหรับการนำความร้อน สามารถเขียนเป็นสมการนำความร้อนในแกนเดียวได้ ดังสมการ (2.1)

$$q = -k \frac{\partial T}{\partial X} \quad (2.1)$$

เมื่อ	q	คือ	ค่าการถ่ายเทความร้อน, W/m^2
	k	คือ	ค่าการนำความร้อน (Thermal conductivity), $W/m^{\circ}C$
	$\frac{\partial T}{\partial X}$	คือ	เกรเดียนต์ของอุณหภูมิในแนวแกน x , $^{\circ}C/m$

ซึ่งค่าทั้งสามในสมการสามารถเปลี่ยนแปลงได้ตามหน่วยการวัด ที่ใช้วัดความร้อน อุณหภูมิ และความยาว นอกจากนี้ในระบบพิกัดฉากสามารถหาอัตราการถ่ายเทความร้อน โดยการนำความร้อนต่อพื้นที่ แบบ 3 มิติ ทั่วๆ ไปตามกฎของข้อที่ 1 ของ Fourier ได้ดังนี้ แสดงในสมการที่ (2.2)

$$q = -k \left(\frac{\partial T}{\partial X} + \frac{\partial T}{\partial Y} + \frac{\partial T}{\partial Z} \right) = -k \nabla T \quad (2.2)$$

โดยที่	$q_x = -k \frac{\partial T}{\partial X}$
	$q_y = -k \frac{\partial T}{\partial Y}$
	$q_z = -k \frac{\partial T}{\partial Z}$

เมื่อทำการประยุกต์รวมกฎข้อที่ 1 ของ Fourier สำหรับการนำความร้อน เข้ากับกฎข้อที่ 1 ของเทอร์โมไดนามิกส์ ซึ่งกล่าวไว้ว่าพลังงานในจักรวาลนี้เป็นปริมาณคงที่ และสมมติให้ทำการศึกษาการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้น โดยการนำความร้อนเท่านั้น ทำให้เกิดสมการสำหรับกรณี

การนำความร้อนในแกนเดียว ซึ่งเรียกสมการดังกล่าวว่า กฎข้อที่ 2 ของ Fourier สำหรับการนำความร้อน แสดงในสมการ (2.3)

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial X^2} \quad (2.3)$$

เมื่อ	$\frac{\partial T}{\partial t}$	คือ	อัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ, °C/sec.
	$\alpha = \frac{k}{\rho C_p}$	คือ	ความสามารถในการกระจายความร้อน
เมื่อ	ρ	คือ	ความหนาแน่น, kg/m ³
	C_p	คือ	ความจุความร้อนจำเพาะเมื่อความดันคงที่, kJ/kg·K

2.7.2 ความเค้นจากความร้อน (Thermal stress)

ความเค้นจากความร้อนเป็นความเค้นในวัสดุที่มีผลมาจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ เมื่อพิจารณาแท่งวัสดุของแข็งที่เป็นเนื้อเดียวกันและมีการขยายตัวแบบเดียวกัน ซึ่งได้รับความร้อนและการเย็นตัวแบบสม่ำเสมอ ในกรณีนี้จะไม่เกิดความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างสองบริเวณ ทำให้เกิดการหดและขยายตัวได้อย่างอิสระส่งผลให้วัสดุปราศจากความเค้นจากความร้อน แต่ในส่วนของการเชื่อมด้วยวิธีเสียดทาน ได้ทำการยึดปลายด้านหนึ่งตายตัวแล้วปล่อยให้ปลายอีกด้านเคลื่อนที่ด้วยความฝืดค่าหนึ่ง กล่าวคือ การเพิ่มแรงในแนวแกนให้ชิ้นงานได้รับการเสียดทานจนเกิดความฝืดค่าหนึ่ง ทำให้เกิดความร้อนที่พื้นที่หน้าตัด โดยขนาดของความเค้น (σ) ที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิสามารถหาได้จากสมการ (2.4)

$$\sigma = E\alpha_f(T_0 - T_f) = E\alpha_f\Delta T \quad (2.4)$$

เมื่อ	E	คือ	โมดูลัสความยืดหยุ่น
	α_f	คือ	สัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงเส้นทางความร้อนเมื่อให้ความร้อนกับแท่งวัสดุของแข็ง คือ T_f สูงกว่า T_0 ความเค้นที่เกิดขึ้นจะเป็นความเค้นอัด
เมื่อ	T_0	คือ	อุณหภูมิเริ่มต้น
	T_f	คือ	อุณหภูมิสุดท้าย

ΔT คือ ความต่างของอุณหภูมิ

2.7.3 ทฤษฎีการถ่ายเทความร้อนกับการเชื่อมด้วยวิธีเสียดทาน

ตามทฤษฎีการถ่ายเทความร้อนที่สภาวะกึ่งคงที่ของของแข็ง (Semi-Infinite Solid) เป็นการวิเคราะห์ปัญหาทางความร้อนอีกวิธีหนึ่ง กล่าวคือ เป็นการวิเคราะห์ปัญหาสำหรับของแข็งที่มีความยาว ยกเว้นด้านหนึ่งของระบบที่สามารถกำหนดเป็นพื้นผิวความร้อนได้ และเกิดการถ่ายเทความร้อนไปยังปลายอีกด้านหนึ่ง ซึ่งที่ผิวสัมผัสจะเกิดการนำความร้อนที่ไม่คงที่ (Transient heat conduction) ซึ่งจะส่งผลต่อระยะ x เพื่อประมาณค่าโซนความร้อนที่ได้รับผลกระทบ ดังสมการ (2.5)

$$x = 4\sqrt{at} \quad (2.5)$$

เมื่อ a คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน
 t คือ เวลา

การเกิดความร้อนในระหว่างการเสียดทาน จะทำให้เกิดการเสียดรูปแบบพลาสติก (Plastic deformation) บริเวณรอยต่อ ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการการกระจายตัวของความร้อน (Heat flux) บริเวณพื้นที่หน้าตัด แสดงไว้ในสมการ (2.6)

$$q = \frac{\eta\tau\omega r^2}{R} + (1 + \eta)\tau\omega R \quad (2.6)$$

เมื่อ q คือ ฟลักซ์ความร้อนบริเวณพื้นที่หน้าตัด
 η คือ สัมประสิทธิ์ที่มีความสัมพันธ์ต่อการกระจายตัวของแรงดันบริเวณพื้นที่หน้าตัด
 τ คือ ความเค้นเฉือน
 ω คือ ความเร็วรอบ
 r คือ ระยะจากจุดศูนย์กลางถึงขอบของชิ้นงาน
 R คือ รัศมีของชิ้นงาน

ในช่วงแรกของการเสียดทาน เนื่องจากความแข็งแรงของวัสดุมีค่าสูง ทำให้อุณหภูมิบริเวณพื้นที่หน้าตัดยังไม่เพิ่มขึ้นมากนัก จากทฤษฎีแรงเสียดทานของคูลอมบ์ สามารถคำนวณหาความร้อนและความเค้นเฉือน (τ) ได้ ซึ่งจะถูกกำหนดให้เป็น τ_f แสดงในสมการ (2.7)

$$\tau_f = P/\sqrt{3} \quad (2.7)$$

เมื่อ P คือ แรงในแนวแกน
 $1/\sqrt{3}$ คือ ค่าคงที่สัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน

ด้วยแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นเสมือนเป็นการอุ่นชิ้นงานหรือสะสมความร้อน ส่งผลให้อุณหภูมิบริเวณพื้นที่เสียดทานเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว และความแข็งแรงของวัสดุก็ลดลงอย่างรวดเร็วเช่นเดียวกัน ดังอธิบายไว้ในกระบวนการเบื้องต้น เมื่อแรงในแนวแกนมีค่ามากกว่าความแข็งแรงของวัสดุ (σ_y) ที่บริเวณผิวสัมผัส สามารถคำนวณหาความเค้นเฉือนได้ ตามทฤษฎีของ Von Mises ในสมการ (2.8)

$$\tau_y = \sigma_y/\sqrt{3} \quad (2.8)$$

2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวกับความร้อนและอุณหภูมิ ถือเป็นประเด็นที่สำคัญของการศึกษาในงานวิจัยนี้ รวมถึงประเด็นที่เกี่ยวข้องอื่นๆที่มีความสำคัญและแตกต่างกันตามลำดับ ในกระบวนการเชื่อมด้วยวิธีเสียดทานนั้น ได้มีการศึกษาทดลองอย่างแพร่หลายทั้งในประเทศและต่างประเทศ โดยมีการนำเอาทฤษฎีทางด้านความร้อนมาประยุกต์ใช้ให้สอดคล้องและเหมาะสมต่อการเชื่อมด้วยวิธีเสียดทาน ซึ่งเป็นประโยชน์อย่างมากสำหรับงานวิจัยนี้ โดยจะทำการศึกษาให้ทราบถึงหลักการทางทฤษฎีต่างๆ และเทคนิควิธีการนำไปใช้ ซึ่งจะส่งผลให้การวิเคราะห์ การปฏิบัติการทดลองที่เป็นขั้นตอนและมีประสิทธิภาพ ซึ่งงานวิจัยที่เกี่ยวข้องมีดังต่อไปนี้

2.8.1 งานวิจัยที่เกี่ยวกับการวัดอุณหภูมิการเชื่อมด้วยวิธีเสียดทาน

Celik and Ersozlu (2009) [19] ได้ทดลองวัดอุณหภูมิระหว่างทำการเชื่อมด้วยวิธีเสียดทาน โดยใช้เหล็กเบอร์ AISI 4140 และ AISI 1050 ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 10 mm. ยาว 80 mm. ทำการวัดอุณหภูมิโดยใช้กล้องอินฟราเรดวัดขณะทำการเชื่อมด้วยวิธีเสียดทาน โดยใช้เวลาในการเสียดทาน 4, 6 และ 8 sec. ผลการทดลองพบว่า ที่เวลา 0-2 sec. อุณหภูมิเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ประมาณ 800-900 °C และสูงสุดในเหล็กเบอร์ AISI 1050 อุณหภูมิประมาณ 1,100 °C ที่ 10 sec. หลังจากนั้นอุณหภูมิเริ่มลดลงอย่างรวดเร็วตามลำดับ

Hazman *et al.* (2010) [25] ได้ทดลองวัดอุณหภูมิการเชื่อมด้วยวิธีเสียดทานและการคำนวณ โดยใช้โปรแกรม Matlab ระหว่างเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำกับอลูมิเนียม ทำการทดลองโดยใช้สายวัดอุณหภูมิ ชนิด K (Thermo couple Type-K) โดยเชื่อมสายวัดอุณหภูมิตัดกับชิ้นงานที่อยู่กับที่ (อลูมิเนียม) โดยจุดที่เชื่อมสายวัดมีระยะห่างจากพื้นที่เสียดทาน 2 mm. และ 10 mm. เงื่อนไขในการเชื่อมด้วยวิธีเสียดทานมี ความเร็วรอบ 900 rpm แรงดันในการเสียดทาน 15 MPa เวลาในการเสียดทาน 3.15 sec. เวลาในการอัด 0.86 sec. แรงดันในการอัด 25 MPa ผลการทดลองพบว่า การถ่ายเทความร้อนจากการเชื่อมด้วยวิธีเสียดทานมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นสูงสุด 568 °C ที่เวลา 3.15 sec. ระยะ 2 mm. และ อุณหภูมิลดลงเหลือ 112 °C ที่เวลา 6.3 sec. ในระยะ 10 mm.

Eder *et al.* (2012) [21] ได้ทดลองวัดอุณหภูมิในระหว่างการเชื่อมด้วยวิธีเสียดทานระหว่างอลูมิเนียม (AA1050) กับ สแตนเลส (AISI 304) เครื่องเชื่อมด้วยวิธีเสียดทานที่ใช้เป็นเครื่องยี่ห้อ GATWIK ความเร็วรอบ 3,200 rpm แรงดันเสียดทาน 2.1 MPa เวลาเสียดทาน 32 sec. แรงดันอัด 1.4 MPa เวลาเสียดทาน 2 sec. วัดอุณหภูมิโดยใช้สายวัดอุณหภูมิ (Type-k) ต่อเข้ากับเครื่องบันทึกอุณหภูมิ (Data logger) และคอมพิวเตอร์ โดยเจาะรูที่สแตนเลส (AISI 304) ที่จุดศูนย์กลางตามความยาวของแท่งสแตนเลส ซึ่งจะเจาะให้เหลือระยะไว้ประมาณ 1.2 mm. เพื่อสอดสายวัดอุณหภูมิทำการวัดอุณหภูมิ ผลการทดลองพบว่า ที่เวลา 0-10 sec. อุณหภูมิยังไม่เพิ่มขึ้นมาก แต่

หลังจากนั้นอุณหภูมิค่อยๆเพิ่มขึ้น และสูงสุดที่เวลา 32 sec. อุณหภูมิ 392°C จากนั้นอุณหภูมิลดลงตามลำดับ

Rud-di *et al.* (2012) [36] ได้ศึกษาและทดลองเกี่ยวกับความร้อนที่เกิดขึ้นจากการเชื่อมด้วยวิธีเสียดทานระหว่างแมกนีเซียม (Mg) และไทเทเนียม (Ti) วัดความร้อนโดยใช้กล้องอินฟราเรด (Infrared, VarioCAM® hr head-HS) การทดลองถูกแบ่งออกเป็น 4 สถานะ เวลาทดลองเชื่อม 6 sec. สถานะที่ 1 เป็นสถานะเริ่มต้นของกระบวนการอุณหภูมิยังไม่เพิ่มขึ้นสูงมากนัก สถานะที่ 2 เป็นช่วงที่ชิ้นงานสัมผัสกันมากขึ้น สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานคงที่ อุณหภูมิเพิ่มขึ้น ชิ้นงานยังไม่เสีรูปร่าง (0 sec. - 1.5 sec.) สถานะที่ 3 ชิ้นงานสัมผัสกันมากขึ้นจากการเพิ่มแรง สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานเพิ่มมากขึ้น อุณหภูมิเพิ่มขึ้นถึงจุดคงที่และชิ้นงานเริ่มเสีรูปร่างมากขึ้น (1.5 sec. - 2.5 sec.) สถานะที่ 4 ภาพถ่ายอุณหภูมิเริ่มเห็นการเกิดและกระจายตัวของอุณหภูมิอย่างชัดเจน สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานคงที่ ชิ้นงานเริ่มมีการเสีรูปร่างมากขึ้น (2.5 sec. - 6 sec.)

Sirajuddin *et al.* (2012) [40] ได้ทดลองวัดอุณหภูมิการเชื่อมด้วยวิธีเสียดทานระหว่างเหล็กเบอร์ 304 steel และเหล็กยูเทคทอยด์ (Eutectoid steel) ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 15 mm. ยาว 80 mm. ทำการวัดโดยใช้สายวัดอุณหภูมิ ชนิด K (Thermo Couple Type-K) ที่เหล็กเบอร์ 304 steel วัดห่างจากรอยเชื่อมเป็นระยะ 7 mm., 14 mm. และ 21 mm. ใช้ความเร็วรอบ 900 rpm แรงดันเสียดทาน 20 bar แรงดันอัด 30 bar ใช้เวลาเชื่อม 2 sec. เวลาในการอัด 0.5 sec. ทำการทดลองควบคู่กับการใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ในการคำนวณหาอุณหภูมิที่เกิดขึ้น เพื่อทำการเปรียบเทียบค่า จากผลการทดลองพบว่า ผลการทดลองและผลการคำนวณจากโปรแกรมมีแนวโน้มที่มีค่าใกล้เคียงกัน

2.8.2 งานวิจัยที่เกี่ยวกับการสร้างแบบจำลองการเชื่อมด้วยวิธีเสียดทาน

Alvise *et al.* (2002) [16] ได้ทดลองการเชื่อมด้วยวิธีเสียดทาน โดยได้ทำการทดลองเชื่อมและสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยการจำลองด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อทำการเปรียบเทียบค่าจากผลการทดลองและแบบจำลอง จากผลการทดลอง พบว่า แนวโน้มของอุณหภูมิที่เกิดขึ้น ในการทดลองทั้งสองแบบ มีค่าที่ใกล้เคียงกัน และมีความคาดเคลื่อนเล็กน้อย ซึ่งค่าจากผลการทดลองมีค่าสูงกว่าเล็กน้อยและยอมรับได้

Sahin (2004) [37] ได้สร้างแบบจำลองการเชื่อมด้วยวิธีเสียดทาน เพื่อหาค่าการเสีรูปร่างของวัสดุจากการเชื่อมเหล็กคาร์บอนปานกลางเบอร์ AISI 1040 ที่มีขนาดพื้นที่หน้าตัดที่เท่ากันและไม่เท่ากัน โปรแกรมที่ใช้เป็นโปรแกรมที่สร้างขึ้นสำหรับงานเชื่อมด้วยวิธีเสียดทาน โดยเฉพาะ (Friction Welding Simulation V 1.0) แบบจำลองเป็นแบบ 3 มิติ โดยมีเงื่อนไขดังนี้ คือ เวลาในการเสียดทาน 5 sec. แรงดันในการเสียดทาน 30 MPa เวลาในการอัด 20 sec. แรงดันในการเสียดทาน 110 MPa และชิ้นงานที่มีขนาดเล็กที่สุดมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 10 mm. นอกจากนี้ยังได้อธิบายการป้อน

ค่าคุณสมบัติต่างๆที่ใช้ในโปรแกรม เช่น ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน (Friction Coefficient) คือ 0.1 เงื่อนไขขอบเขตของอุณหภูมิ (Boundary condition of Temperature) คือ $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ และ $1,200\text{ }^{\circ}\text{C}$ ผลการทดลองพบว่า ขนาดพื้นที่หน้าตัดและความยาวที่มีผลต่อการเชื่อมโดยอัตราส่วน D/d ที่เพิ่มขึ้นทำให้ความต้านทานแรงดึงของรอยเชื่อมลดลง และตัวแปรที่เหมาะสมที่สุดของการเชื่อมได้จากอัตราส่วน D/d ที่เท่ากัน

Can *et al.* (2009) [18] ได้สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เพื่อจำลองการเชื่อมด้วยวิธีเสียดทาน โดยวัสดุที่ใช้ คือ เหล็กเบอร์ AISI 1040 ทำการจำลองชิ้นงานสองชิ้นที่มีขนาดไม่เท่ากัน มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 20 mm. และ 10 mm. เวลาเสียดทาน 5 sec. แรงดันเสียดทาน 30 MPa เวลาอัด 20 sec. แรงดันอัด 110 MPa และความเร็วรอบ 1,410 rpm โปรแกรมที่ใช้ในการสร้างแบบจำลอง คือ Quick-Field V 4.2T และ Auto CAD in DXF ผลการทดลองพบว่า อุณหภูมิที่เกิดขึ้นบริเวณผิวสัมผัสประมาณ $920\text{ }^{\circ}\text{C}$ - $930\text{ }^{\circ}\text{C}$ และกระจายตัวออกไปซึ่งอยู่ในระดับสูงเป็นระยะ 4 mm.

Li and Wang (2011) [28] ได้ศึกษาและสร้างแบบจำลองการเชื่อมด้วยวิธีเสียดทาน โดยใช้โปรแกรมออบาคัส (ABAQUS) ช่วยสร้างแบบจำลอง และใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (FEM) ในการวิเคราะห์ วัสดุที่ใช้จำลองเป็นเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ จำลองในแบบ 2 มิติ มีเงื่อนไขดังนี้ คือ เวลาในการเสียดทาน 3.5 sec. เวลาในการอัด 0.1 sec. แรงดันในการเสียดทาน 200 MPa แรงดันในการอัด 400 MPa และความเร็วรอบในการหมุนเสียดทาน 1,200 rpm ผลการทดลองพบว่า อุณหภูมิเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วตั้งแต่เริ่มกระบวนการเชื่อม โดยที่เวลา 0.1 – 1.5 sec. อุณหภูมิอยู่ที่ประมาณ $1,000\text{ }^{\circ}\text{C}$ และเพิ่มขึ้นถึงประมาณ $1,200\text{ }^{\circ}\text{C}$ ที่เวลา 3.5 sec. ตามลำดับ

Takeshi *et al.* (2012) [41] ได้สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (FEM) ของกระบวนการเชื่อมด้วยวิธีเสียดทานเพื่อคำนวณการกระจายตัวของอุณหภูมิ (Stefan-Boltzman) และการเสียดรูปของวัสดุ (Newton-Raphson) ของวัสดุสองชนิด ระหว่างเหล็กเบอร์ S50C แผ่นสี่เหลี่ยมกับ อลูมิเนียมอัลลอยด์ เบอร์ A2017 ขนาดพื้นที่หน้าตัด 11.6 mm. ยาว 50 mm. โดยใช้โปรแกรมแอนซิส (Ansys Mechanical) ในการคำนวณ ทำการเชื่อมด้วยแรงดันเสียดทาน 45.8 MPa ใช้ความเร็วรอบ 5,000 rpm เก็บผลการทดลอง ที่เวลา 1 sec., 2 sec. และ 3 sec. ตามลำดับ ผลการคำนวณที่แรงดันเสียดทาน 45.8 MPa พบว่า เหล็กเบอร์ S50C อุณหภูมิอยู่ที่ $438\text{ }^{\circ}\text{C}$, $785\text{ }^{\circ}\text{C}$, $989\text{ }^{\circ}\text{C}$ และอลูมิเนียมอัลลอยด์ เบอร์ A2017 อุณหภูมิอยู่ที่ $281\text{ }^{\circ}\text{C}$, $521\text{ }^{\circ}\text{C}$, $640\text{ }^{\circ}\text{C}$ ตามลำดับ

2.8.3 งานวิจัยที่เกี่ยวกับการเชื่อมด้วยวิธีเสียดทานอื่นๆ

Ramadhan and Kako (2013) [34] ได้ทำการศึกษาประสิทธิภาพของรอยเชื่อมในกระบวนการเชื่อมด้วยวิธีเสียดทานระหว่าง สแตนเลส เบอร์ SAF 2507 กับเหล็กคาร์บอนต่ำ (Mild Steel) ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 20 mm. ยาว 60 mm. ทดสอบหาส่วนประกอบทางเคมีของวัสดุ โดยเครื่องสเปกโตรมิเตอร์ (Spectrometer) ซึ่งแบ่งการทดลองออกเป็น 3 ชุด เงื่อนไขการทดลอง ได้แก่ แรงดันเสียดทาน 33 MPa, 53 MPa และ 80 MPa แรงดันอัด 80 MPa, 90 MPa และ 134 MPa เวลาเสียดทาน 20 sec. และความเร็วย้อน 1,800 rpm ผลการทดลองพบว่า ระยะการเสียดทานของวัสดุ คือ 0.8 mm., 1.5 mm. และ 2.9 mm. ตามลำดับ การทดสอบความแข็งแรง (Ultimate Tensile Strength) พบว่า สแตนเลส เบอร์ SAF 2507 ได้ค่าความเค้น (Stress) สูงสุด 1,210 MPa และเหล็กคาร์บอนต่ำ (Mild Steel) ได้ค่าความเค้น (Stress) สูงสุด 810 MPa สำหรับประสิทธิภาพของรอยเชื่อมของการทดลองทั้ง 3 ชุด มีดังต่อไปนี้ ประสิทธิภาพรอยเชื่อมคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ได้ 79.17%, 74.96% และ 66.12% ตามลำดับ และการทดสอบความแข็งแรงของรอยเชื่อม (Ultimate Tensile Strength) ได้ 642 MPa, 568 MPa และ 536 MPa ตามลำดับ

Kumar *et al.* (2012) [27] ได้ศึกษาการกระจายตัวของอุณหภูมิในกระบวนการเชื่อมด้วยวิธีเสียดทาน ระหว่างอลูมิเนียมอัลลอยด์ และเหล็กคาร์บอนต่ำ ซึ่งงานมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเท่ากัน คือ 12 mm. ยาว 75 mm. ทำการเชื่อมโดยให้อลูมิเนียมอัลลอยด์หมุนด้วยความเร็วย้อน 1,440 rpm และ 1,800 rpm เวลาในการเชื่อม 20 sec. และ 30 sec. เหล็กคาร์บอนต่ำเป็นชิ้นงานที่อยู่กับที่ ทำการวัดอุณหภูมิโดยใช้กล้องอินฟราเรด วัดอุณหภูมิบริเวณรอยเชื่อม ผลการทดลอง พบว่า อลูมิเนียมอัลลอยด์เกิดการเสียดทานมาก และอุณหภูมิสูงสุดของอยู่ที่ประมาณ 130 °C

Sahin (2005) [38] ได้ทดลองเชื่อมด้วยวิธีเสียดทาน ระหว่างเหล็กคาร์บอนสูง เบอร์ HSS-S6-5-2 กับ เหล็กคาร์บอนปานกลาง เบอร์ AISI 1040 ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 10 mm. ทดลองเพื่อหาค่าความแข็งแรงดึง (Tensile Test) และหาค่าความแข็ง (Vicker Hardness, HV) โดยมีเงื่อนไขการทดลอง ดังนี้ ได้แก่ เวลาเสียดทาน 1 sec. - 5 sec. แรงดันเสียดทาน 30 MPa - 150 MPa เวลาอัด 20 sec. แรงดันในการอัด 150 MPa ผลการทดลองพบว่า ที่แรงดันเสียดทาน 110 MPa ให้ค่าความแข็งแรงสูงสุด คือ 600 MPa สำหรับเวลาเสียดทานที่ให้ค่าความแข็งแรงที่สูงที่สุด คือ 4 sec. จากนั้นทำการวัดค่าความแข็ง (Vicker Hardness, HV) โดยวัดจากรอยเชื่อมห่างออกไปเป็นระยะ 4 mm. ทั้งสองทาง พบว่าความแข็ง (HV) สูงสุดอยู่ที่ประมาณ 700 HV สัดส่วนความแข็งแรงของวัสดุ เหล็กคาร์บอนสูง เบอร์ HSS-S6-5-2 มีแนวโน้มที่สูงกว่า เหล็กคาร์บอนปานกลาง เบอร์ AISI 1040

2.8.4 งานวิจัยที่ศึกษาตัวแปรเกี่ยวกับการเชื่อมด้วยวิธีเสียดทาน

สุรสิงห์ อารยางค์กูร และชวลิต ถิ่นวงศ์พิทักษ์ (2551) [12] ได้ทำการทดลองเชื่อมเหล็กกล้าชนิด เบอร์ AISI 1015 โดยทำการทดลองเปลี่ยนค่าตัวแปรต่างๆ ได้แก่ แรงดันในการเสียดทาน (Friction Pressure) ที่ 10, 15, 20, 25, 30, 35 และ 40 bar โดยกำหนดตัวแปรที่มีค่าคงที่ ได้แก่ เวลาในการเสียดทาน (Friction Time) ที่ 9 sec. แรงดันในการเชื่อม (Upset Pressure) ที่ 60 bar เวลาในการเชื่อม (Upset Time) ที่ 3 sec. และความเร็วรอบในการหมุน (Rotational Speed) ที่ 1,200 rpm เป็นเงื่อนไขในการทดลอง ผลที่ได้จากการทดลองพบว่าแรงดันในการเสียดทาน (Friction Pressure) ที่ 10 bar และเวลาในการเสียดทาน (Friction Time) ที่ 9 sec. ให้ผลในการเชื่อมดีที่สุด โดยรอยเชื่อมมีความต้านทานแรงดึงเท่ากับ 1,826.67 Kg-f ซึ่งมากกว่าชิ้นงานเดิม 17.09 %

สุรสิงห์ อารยางค์กูร และคณะ (2552) [13] ได้ทำการทดลองเชื่อมเหล็กกล้า เบอร์ AISI 1015 ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 10 mm. ความยาว 100 mm. ภายใต้เงื่อนไขการทดลอง คือ แรงดันในการเสียดทาน 10 bar เวลาในการเสียดทาน 9 sec. แรงดันในการอัด 60 bar เวลาในการอัด 3 sec. และความเร็วรอบในการหมุน 1,200 rpm แล้วนำมาศึกษาคุณสมบัติของรอยเชื่อมพบว่า รอยเชื่อมที่ได้มีความแข็งแรง (Strength) เพิ่มมากขึ้น ในขณะที่ค่าความแข็ง (Hardness) นั้นลดลง นอกจากนี้การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อมยังพบว่าที่บริเวณกลางรอยเชื่อมมีสัดส่วนของเฟลไลต์ (Pearlite) ลดลง แต่สัดส่วนของเฟอร์ไรต์ (Ferrite) กลับเพิ่มมากขึ้นซึ่งเป็นสาเหตุที่ให้ความแข็งแรงของรอยเชื่อมลดลง นอกจากนี้ยังพบอีกว่า จำนวนเกรนที่บริเวณจุดต่อของรอยเชื่อมมีค่ามากขึ้น ส่งผลให้รอยเชื่อมมีความแข็งแรงสูงขึ้น

ช่วงชัย ชูปวา และชวลิต ถิ่นวงศ์พิทักษ์ (2553) [2] ได้ทำการศึกษาอิทธิพลของเวลาในการเสียดทาน ที่มีผลต่อความแข็งแรงของรอยเชื่อมของเหล็กเบอร์ AISI 1015 ที่เชื่อมด้วยวิธีเสียดทาน ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 10 mm. ยาว 100 mm. เวลาเสียดทาน 6, 8, 10 และ 12 sec. เวลาในการอัด 1, 2, 3 และ 4 sec. แรงดันเสียดทาน 103, 206 และ 309 MPa แรงดันในการอัด 309, 412, 516 และ 619 MPa และความเร็วรอบในการเสียดทาน 1,100, 1,200, 1,300 และ 1,400 rpm ผลการทดลองพบว่า เวลาเสียดทานที่ให้ความแข็งแรงสูงสุด คือ 6 sec.

ช่วงชัย ชูปวา และชวลิต ถิ่นวงศ์พิทักษ์ (2554) [3] ได้ทำการศึกษาอิทธิพลของเวลาในการเสียดทานและความเร็วรอบในการเสียดทาน ที่มีผลต่อความแข็งแรงของรอยเชื่อมของเหล็ก เบอร์ AISI 1015 ที่เชื่อมด้วยวิธีเสียดทาน โดยใช้ชิ้นงานขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 10 mm. ยาว 100 mm. เวลาเสียดทาน 6, 8, 10 และ 12 sec. เวลาในการอัด 1-4 sec. แรงดันเสียดทาน 10 bar - 30 bar แรงดันในการอัด 30 bar - 60 bar และความเร็วรอบในการเสียดทาน 1,100, 1,200, 1,300 และ

1,400 rpm ผลการทดลองพบว่า ตัวแปรที่ให้ความแข็งแรงสูงสุด คือ เวลาเสียดทาน 6 sec. ความเร็วรอบ 1,300 rpm แรงดันเสียดทาน 30 bar เวลาในการอัด 4 sec. และ แรงดันในการอัด 60 bar

ธานี ทุมประแสน และคณะ (2553) [4] ได้ทำการศึกษาคุณสมบัติของรอยเชื่อมระหว่างเหล็กกล้าผสม เบอร์ AISI 4140และเหล็กกล้าไร้สนิมเบอร์ AISI 304 ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 13 mm. ยาวขึ้นละ 70 mm. แรงดันเสียดทาน 183 MPa เวลาเสียดทาน 12 sec. แรงดันในการอัด 428 MPa เวลาในการอัด 7 sec. ความเร็วรอบ 1,400 rpm ผลการศึกษาพบว่ารอยเชื่อมที่ได้มีความแข็งแรงสูงขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่ารอยเชื่อมมีความต้านทานแรงดึงเท่ากับ 1,005 MPa ซึ่งมีค่ามากกว่าชิ้นงานเดิม เมื่อเทียบกับเหล็กกล้าผสมเพิ่มขึ้น 5% และเมื่อเทียบกับเหล็กกล้าไร้สนิมเพิ่มขึ้น 48%

บทที่ 3

อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

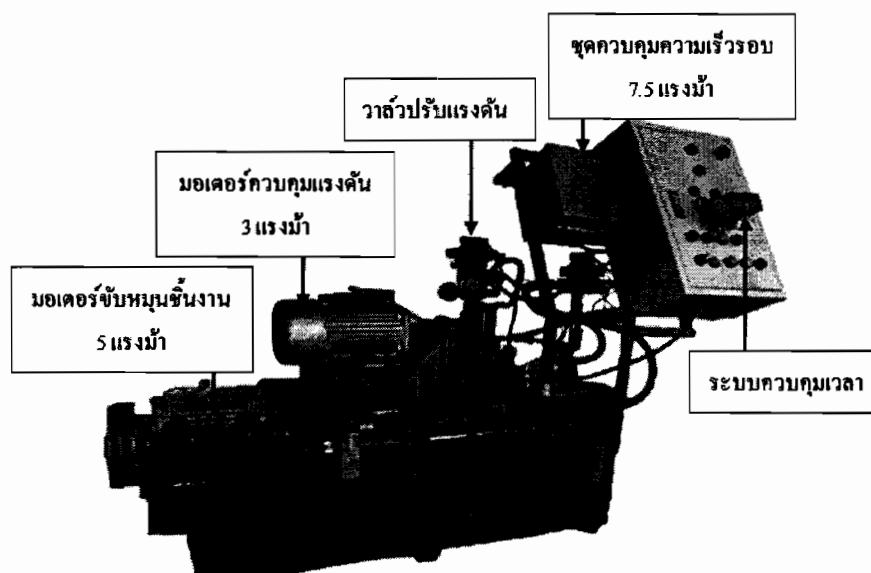
ในวิทยานิพนธ์นี้ มีวัตถุประสงค์ เพื่อ ศึกษาการกระจายตัวของอุณหภูมิในเหล็กคาร์บอนต่ำ ที่เชื่อมด้วยวิธีเสียดทาน ซึ่งต่อไปนี้จะเป็นการนำเสนอและอธิบายอุปกรณ์การทดลองที่เกี่ยวข้อง รวมถึงสาระสำคัญที่ทำการศึกษา โดยได้ถูกแบ่งออกเป็น 2 วิธี ได้แก่ วิธีการทดลองและวิธีการสร้างแบบจำลอง โดยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ สำหรับวัตถุประสงค์ของการทดลองคือ เพื่อให้ทราบถึงลักษณะการกระจายตัวของอุณหภูมิที่เกิดขึ้นจากแรงเสียดทาน ซึ่งจะใช้เป็นข้อมูลหลัก โดยอาศัยเครื่องเชื่อมด้วยวิธีเสียดทาน ที่สร้างขึ้นในภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี จากนั้นจะใช้ข้อมูลจากการคำนวณในแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ มาเปรียบเทียบกับและวิเคราะห์ผล ซึ่งรายละเอียดทั้งหมด มีดังต่อไปนี้

3.1 อุปกรณ์การทดลอง

3.1.1 เครื่องเชื่อมด้วยวิธีเสียดทาน

เครื่องเชื่อมด้วยวิธีเสียดทานที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ได้ถูกจำลองมาจากเครื่องเชื่อมด้วยวิธีเสียดทานที่ใช้งานในภาคอุตสาหกรรม โดยได้สร้างขึ้นใน ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี การทำงานของเครื่องเชื่อมด้วยวิธีเสียดทานที่สร้างนี้ทำงานด้วยระบบควบคุมด้วยมือ ผู้ทำการทดลองจะต้องเข้าใจวิธีการทำงานของตัวเครื่อง และตรวจสอบการปรับตั้งค่าเงื่อนไขก่อนทำการทดลองทุกครั้ง เครื่องเชื่อมด้วยวิธีเสียดทานในงานวิจัยนี้ ได้พัฒนาตามแนวคิดและหลักการเชื่อมของเครื่องเชื่อมด้วยวิธีเสียดทานเบื้องต้น โดยมีรายละเอียดของอุปกรณ์ต่างๆในเครื่องเชื่อม ได้แก่ มอเตอร์ขนาด 5 แรงม้า เป็นต้นกำลังในการหมุนชิ้นงาน มีชุดควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ (Inverter) ขนาด 7.5 แรงม้า ที่สามารถปรับและช่วยควบคุมความเร็วรอบ (Rotation speed) โดยมีระบบไฮดรอลิกส์ในการสร้างแรงดัน (Friction pressure) ในการเชื่อม ซึ่งควบคุมโดยมอเตอร์ขนาด 3 แรงม้า และแรงดันในการอัด (Upset pressure) เพื่อเชื่อมและอัดชิ้นงานให้ติดกัน มีระบบควบคุมแรงดัน (Electric solenoid valve) เป็นชุดควบคุมแรงดัน สำหรับเวลาที่ใช้เชื่อม (Friction time) และเวลาที่ใช้อัด (Upset time) มีระบบควบคุมเวลา (Timer) เป็นตัวควบคุมเวลาที่ใช้เชื่อมและอัดชิ้นงาน ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่าอุปกรณ์ต่างๆเหล่านี้มี

วิธีการทำงานที่มีความสัมพันธ์สอดคล้องกัน อุปกรณ์ต่างๆของเครื่องเชื่อมด้วยวิธีเสียดทานที่ได้กล่าวเบื้องต้น แสดงอยู่ในภาพที่ 3.1



ภาพที่ 3.1 เครื่องเชื่อมด้วยวิธีเสียดทานที่ใช้ในการทดลอง

3.1.2 เครื่องมือวัดอุณหภูมิ

การวัดอุณหภูมิเป็นขั้นตอนที่ถือได้ว่าสำคัญมากในการทดลองนี้ ซึ่งจะต้องอาศัยเครื่องมือวัดอุณหภูมิที่ละเอียดพอสมควร โดยเครื่องมือวัดอุณหภูมิประกอบไปด้วย เครื่องบันทึกอุณหภูมิ (Data logger) และสายวัดอุณหภูมิ หรือ เทอร์โมคัปเปิ้ล โดยมีรายละเอียด ดังนี้

3.1.2.1 เครื่องบันทึกอุณหภูมิ (Data logger)

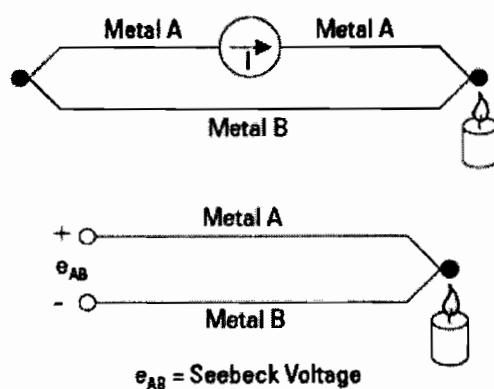
เครื่องบันทึกอุณหภูมิ (Data logger) เป็นอุปกรณ์รับสัญญาณจากสายวัดอุณหภูมิ (Thermo couple) ที่เชื่อมต่อกับชิ้นงานที่ทำการเชื่อม โดยการแปลงแรงเคลื่อนไฟฟ้า (Emf) เป็นสัญญาณแสดงบนหน้าจอในรูปแบบของดิจิตอลและมีตัวเก็บข้อมูล (Memory) บันทึกข้อมูล เครื่องวัดอุณหภูมิที่ใช้ในการทดลองเป็นเครื่อง ยี่ห้อ Supcon รุ่น R 3000 สามารถแสดงผลและบันทึกอุณหภูมิได้ 12 ช่องสัญญาณ มีช่วงการวัดอุณหภูมิอยู่ระหว่าง -100°C ถึง $1,300^{\circ}\text{C}$ ค่าความถูกต้อง $\pm 2^{\circ}\text{C}$ ลักษณะของเครื่องแสดงในภาพที่ 3.2



ภาพที่ 3.2 เครื่องบันทึกอุณหภูมิ (Data logger) ยี่ห้อ Supcon รุ่น R 3000

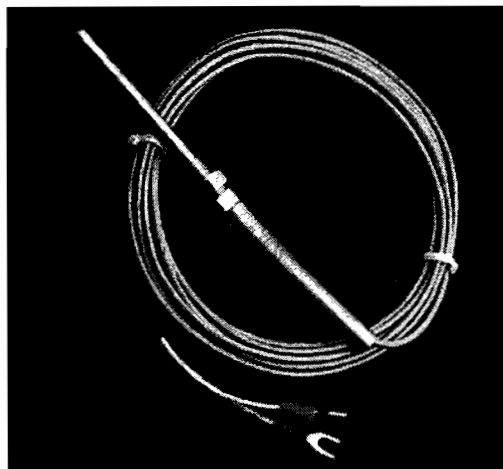
3.1.2.2 สายวัดอุณหภูมิ (Thermo couple)

สายวัดอุณหภูมิ (Thermo couple) คือ อุปกรณ์วัดอุณหภูมิโดยอาศัยหลักการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิหรือความร้อนเป็นแรงเคลื่อนไฟฟ้า (Emf) สายวัดอุณหภูมิทำจากโลหะตัวนำที่ต่างชนิดกัน นำปลายสายมาเชื่อมต่อไว้ด้วยกัน โดยการหลอมรวมหรือการพันปลายสายโลหะทั้งสองให้เกิดการเชื่อมต่อกัน เรียกว่า จุดวัดอุณหภูมิ โดยอีกปลายด้านหนึ่งจะถูกติดตั้งเข้ากับเครื่องบันทึกอุณหภูมิ เรียกว่า จุดอ้างอิง หากจุดวัดอุณหภูมิและจุดอ้างอิงมีอุณหภูมิที่ต่างกันก็จะทำให้มีการนำกระแสในวงจรสายวัดอุณหภูมิทั้งสองข้าง ปรากฏการณ์ดังกล่าวถูกค้นพบโดยนักวิทยาศาสตร์ชาวเยอรมัน ชื่อ Thomus Seebeck ค.ศ.1821 หลักการดังกล่าวแสดงในภาพที่ 3.3



ภาพที่ 3.3 หลักการทำงานของสายวัดอุณหภูมิ [5]

สายวัดอุณหภูมิที่ใช้วัดอุณหภูมิในการทดลอง เป็นสายวัด ชนิด K-Type (Sensor high temperature thermocouple) ซึ่งเป็นสายวัดตามมาตรฐาน ของ ANSI และ ASTM ช่วง การวัดอุณหภูมิต่อเนื่องอยู่ที่ -270°C ถึง $+1,370^{\circ}\text{C}$ ให้อัตราการเปลี่ยนแปลงเคลื่อน ไฟฟ้าต่ออุณหภูมิ ดีกว่าแบบอื่นๆ ซึ่งเป็นแบบที่นิยม และแพร่หลายมากในปัจจุบัน เนื่องจากมีช่วงการวัดที่สามารถวัด อุณหภูมิได้สูงและราคาถูก ลักษณะของสายวัดอุณหภูมิแสดงในภาพที่ 3.4



ภาพที่ 3.4 สายวัดอุณหภูมิ ชนิด K-Type

3.2 วิธีการทดลอง

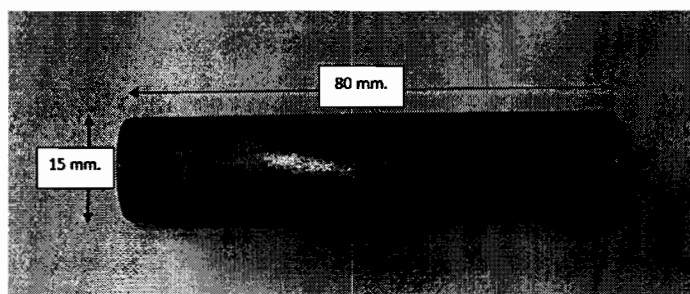
ในวิธีการทดลองจะอธิบายถึงขั้นตอนการทดลองตั้งแต่กระบวนการเตรียมชิ้นงาน ข้อมูลของวัสดุที่ใช้ทดลอง วิธีการทดลองและขั้นตอนการสร้างแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์โดย ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 หัวข้อหลักๆ ดังนี้

3.2.1 การเชื่อมด้วยวิธีเสียดทาน

โดยปกติการเชื่อมด้วยวิธีเสียดทานนั้นจะไม่ยุ่งยากและซับซ้อนมากนัก จะ ประกอบด้วยชิ้นงานสองชิ้นก็ทำการเชื่อมได้ แต่ในการวิจัยนี้จะทำการเชื่อมและวัดอุณหภูมิไป พร้อมกัน จึงจะต้องมีขั้นตอนที่เพิ่มขึ้นอีกหนึ่งถึงสองขั้นตอน คือ การเจาะรูที่ชิ้นงาน และการเชื่อม สายวัดอุณหภูมิเข้ากับรูที่เจาะกับชิ้นงาน ซึ่งต่อไปนี้จะเป็นการลำดับขั้นตอนการทดลอง ตั้งแต่การ อธิบายรายละเอียดข้อมูลของวัสดุที่ใช้ทดลอง การเตรียมชิ้นงานก่อนทดลอง การทดสอบวิธีการวัด อุณหภูมิก่อนทำการทดลอง การปรับปรุงวิธีการวัดหรือการทดลองเชื่อมจริง รวมถึงเงื่อนไขการ ทดลองและการตั้งค่าเงื่อนไขการทดลอง ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.2.1.1 วัสดุที่ใช้ในการทดลอง

วัสดุที่ใช้ในการทดลองเป็นเหล็กคาร์บอนต่ำ (Low carbon steel) ความยาว 80 mm. ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 15 mm. ขนาดของเหล็กคาร์บอนต่ำแสดงไว้ในภาพที่ 3.5 นอกจากนี้ยังได้ทำการวิเคราะห์หาส่วนประกอบทางเคมี โดยส่งชิ้นงานไปทดสอบกับศูนย์ทดสอบสถาบันเหล็กและเหล็กกล้าแห่งประเทศไทย ด้วยเครื่องสเปกโตรมิเตอร์ (Spectrometer) ทำการทดสอบชิ้นงานจำนวน 3 ชิ้น แล้วหาค่าเฉลี่ย ซึ่งผลการทดสอบได้แสดงไว้ในตารางที่ 3.1



ภาพที่ 3.5 ขนาดของเหล็กคาร์บอนต่ำที่ใช้ในการทดลอง

ตารางที่ 3.1 ส่วนประกอบทางเคมีของเหล็กคาร์บอนต่ำ (wt %)

ส่วนผสม ชั้นที่	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al	Cu
ชั้นที่ 1	0.116	0.238	0.315	0.010	0.010	0.032	0.004	0.036	0.014	0.048
ชั้นที่ 2	0.116	0.245	0.318	0.011	0.011	0.032	0.004	0.027	0.014	0.049
ชั้นที่ 3	0.118	0.238	0.315	0.011	0.011	0.032	0.004	0.036	0.014	0.048
เฉลี่ย	0.116	0.240	0.316	0.011	0.010	0.032	0.004	0.033	0.014	0.048

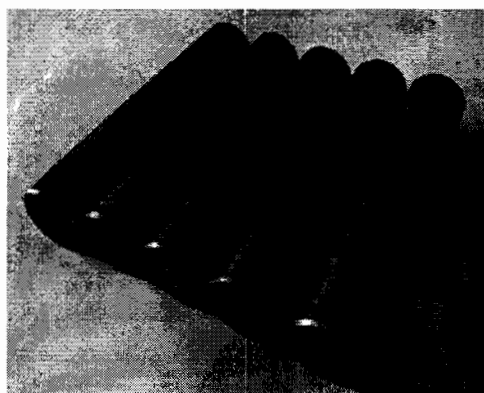
ผลที่ได้จากการทดสอบจากตารางที่ 3.1 คือ ส่วนประกอบทางเคมีของเหล็กคาร์บอนต่ำที่มีธาตุคาร์บอน (C) ผสมอยู่โดยเฉลี่ย 0.116 % และสามารถนำไปหาค่าคุณสมบัติในทางความร้อน (Thermal properties) ได้แก่ ค่าการนำความร้อน (Thermal conductivity) และค่าความร้อนจำเพาะ (Specific heat) ดังแสดงไว้ในตารางที่ 3.2 [26] รวมถึงคุณสมบัติทางกล (Mechanical properties) ซึ่งมีความสำคัญต่อการคำนวณผลของแบบจำลองที่จะต้องกำหนดในโปรแกรม ซึ่งจะอธิบายในหัวข้อการกำหนดคุณสมบัติของวัสดุต่อไป

ตารางที่ 3.2 คุณสมบัติทางความร้อนของเหล็กคาร์บอนต่ำ

อุณหภูมิ (°C)	27	100	200	400	600	800	1,000	1,200
ค่าการนำความร้อน (W/mK)	51.6	51.1	49.0	42.7	35.6	26.0	5.0	0.6
ค่าความร้อนจำเพาะ (J/kgK)	473	486	520	599	749	950	644	661

3.2.1.2 กลึงผิวหน้าสัมผัสชิ้นงาน

หลังจากที่ตัดเตรียมชิ้นงานให้ได้ความยาว 80 mm. ตามที่ต้องการ จากนั้นนำชิ้นงานที่ได้ไปกลึงปาดผิวหน้าสัมผัส เพื่อช่วยให้บริเวณพื้นที่สัมผัสของชิ้นงานทั้งสองมีความเรียบเสมอกัน ซึ่งจะช่วยลดความผิดเพี้ยนเมื่อชิ้นงานเริ่มสัมผัสเสียดทานกันในช่วงแรกของการเชื่อม ลักษณะของชิ้นงานที่ผ่านการกลึงผิวหน้าสัมผัส แสดงในภาพที่ 3.6



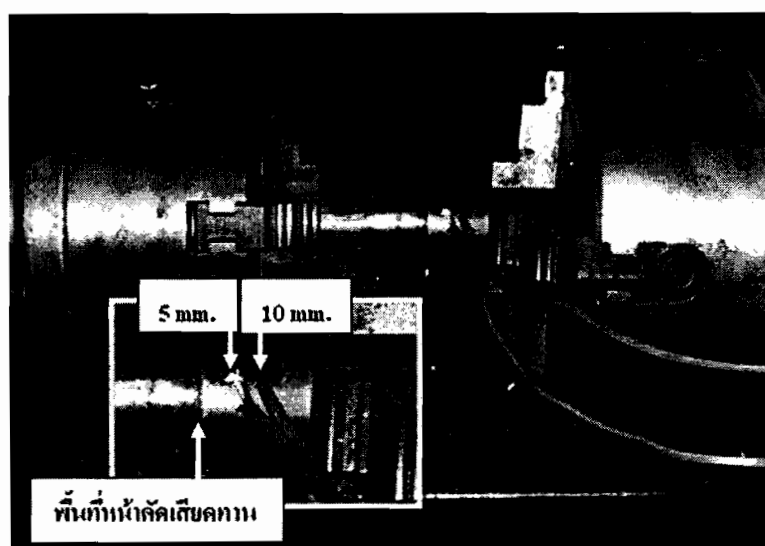
ภาพที่ 3.6 ลักษณะชิ้นงานที่ผ่านการกลึงผิวหน้าสัมผัส

3.2.1.3 การทดสอบวิธีการวัดอุณหภูมิ

ก่อนทำการทดลองวัดอุณหภูมิ เราไม่ทราบว่าการเจาะรูเพื่อทำการเชื่อมสายวัดอุณหภูมิกับชิ้นงานแล้ววัดอุณหภูมิขณะทำการเชื่อมนั้นจะสามารถทำได้ และผลของการวัดอุณหภูมินั้นจะมีความถูกต้องแม่นยำมากน้อยเพียงใด ดังนั้นก่อนจะทำการทดลองจริงจึงเกิดการทดสอบวิธีการวัดดังกล่าวว่าสามารถวัดและบันทึกอุณหภูมิได้ โดยเริ่มจากการเจาะรูที่ชิ้นงานจำนวน 2 รู เพื่อทำการเชื่อมสายวัดอุณหภูมิ ซึ่งจะเจาะให้ห่างจากพื้นที่เสียดทาน เป็นระยะ 5 mm. และ 10 mm. ดังแสดงในภาพที่ 3.7 และทำการทดลอง 2 ครั้ง โดยใช้เงื่อนไขในตารางที่ 3.3

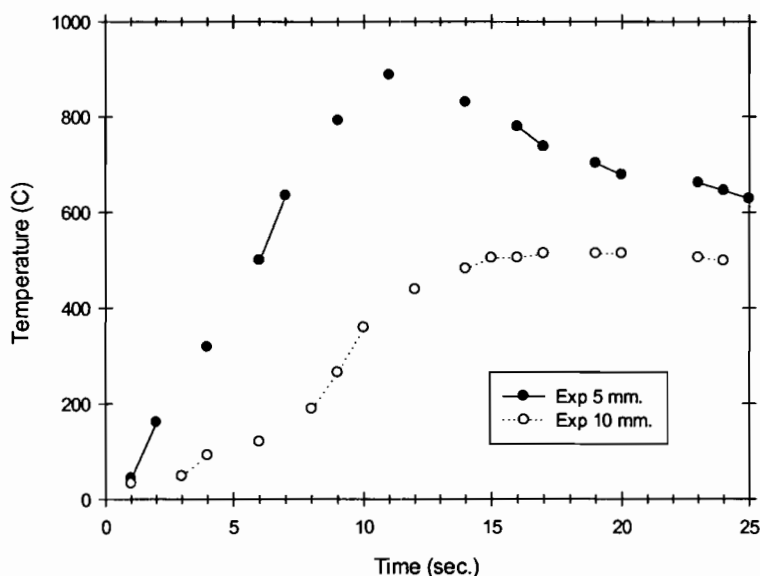
ตารางที่ 3.3 เงื่อนไขที่ใช้ทดสอบการวัดอุณหภูมิ

ตัวแปร เงื่อนไข	แรงดันเสียดทาน P_1 (bar)	เวลาเสียดทาน T_1 (sec.)	แรงดันอัด P_2 (bar)	เวลาอัด T_2 (sec.)	ความเร็วรอบ (rpm)
1	20	10	60	5	1,300
2	30	15	60	5	1,300

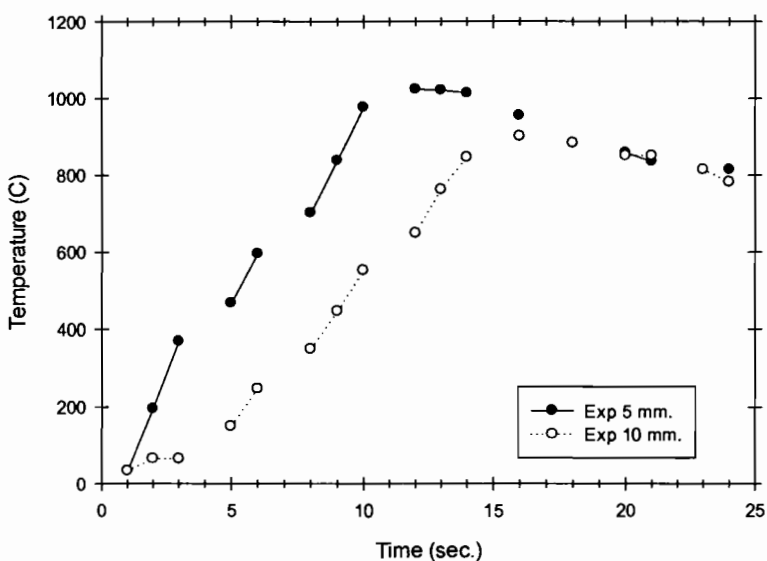


ภาพที่ 3.7 การทดสอบวิธีการวัดอุณหภูมิ

ผลจากการทดสอบวิธีการวัดอุณหภูมิ พบว่า สามารถวัดและบันทึกผลอุณหภูมิที่เกิดขึ้นได้ จากภาพที่ 3.8 และ 3.9 เป็นกราฟแสดงผลการกระจายตัวของอุณหภูมิจากการเชื่อม ซึ่งกราฟทั้งสองเส้นเป็นกราฟอุณหภูมิของจุดวัด 5 mm. และ 10 mm. โดยพบว่า เมื่อทำการเพิ่มเวลา จาก 10 sec. เป็น 15 sec. และแรงดันเสียดทานจาก 20 bar เป็น 30 bar แนวโน้มของอุณหภูมิมิค่าที่เพิ่มขึ้น จากประมาณ 900 °C เป็น 1,000 °C (อ้างอิงที่จุดวัด 5 mm.)



ภาพที่ 3.8 ผลการวัดอุณหภูมิก่อนทำการทดลองจริง (เงื่อนไขชุดที่ 1)

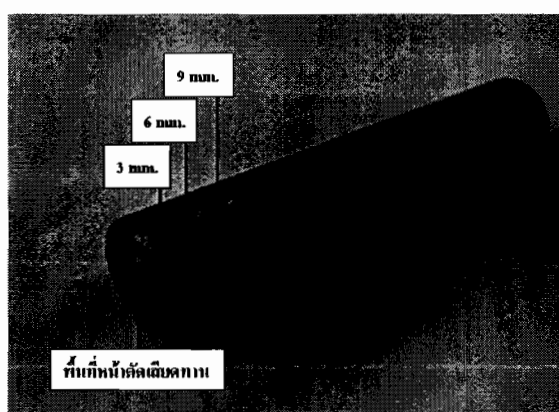


ภาพที่ 3.9 ผลการวัดอุณหภูมิก่อนทำการทดลองจริง (เงื่อนไขชุดที่ 2)

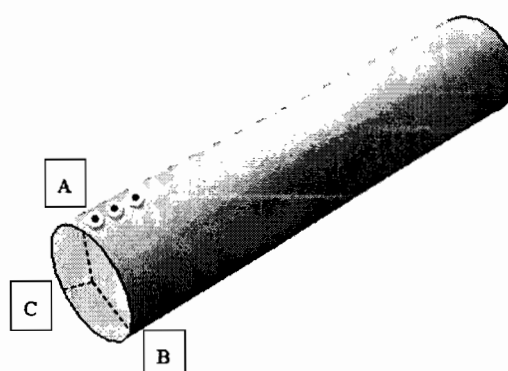
เมื่อทราบว่าผลการวัดอุณหภูมิตามวิธีการดังกล่าว สามารถวัดและบันทึกผลอุณหภูมิที่เกิดขึ้นตามกระบวนการได้แล้ว ขั้นตอนต่อไปจะเป็นขั้นตอนการปรับปรุงวิธีการวัดอุณหภูมิให้เหมาะสมกับการทดลอง รวมถึงเงื่อนไขการทดลองและการตั้งค่าเงื่อนไขการทดลอง โดยจะได้อธิบายดังต่อไปนี้

3.2.1.4 การปรับปรุงวิธีการวัดอุณหภูมิ

สุรสิงห์ อารยางค์กูร และคณะ (2552) [13] ได้ทำการทดลองหาความแข็งของรอยเชื่อมในเหล็กคาร์บอนต่ำที่เชื่อมด้วยวิธีเสียดทาน ผลการทดลองพบว่า พื้นที่ที่ได้รับผลกระทบจากความร้อนและส่งผลต่อความแข็งแรงของรอยเชื่อมนั้นจะมีระยะประมาณ 0-6 mm. ดังนั้นจุดที่จะทำการวัดอุณหภูมิจึงอ้างอิงจากพื้นที่ที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน หรือ เรียกว่า โซนความร้อน (Heat effected zone) โดยจะเจาะรูที่ชิ้นงานให้ลึกประมาณ 3 mm. และห่างจากพื้นที่เสียดทานเป็นระยะ 3 mm., 6 mm. และ 9 mm. รวม 3 จุด เพื่อให้สามารถวัดอุณหภูมิได้อย่างละเอียด และทราบการกระจายตัวของอุณหภูมิจากจุดสู่จุด ดังแสดงในภาพที่ 3.10 จากนั้นเจาะรูรอบชิ้นงานให้ได้ทั้งหมด 3 แนว (A, B, และ C) แสดงในภาพที่ 3.11 จะได้จุดวัดทั้งหมดรวม 9 จุด เพื่อทำการวัดอุณหภูมิโดยรอบชิ้นงาน



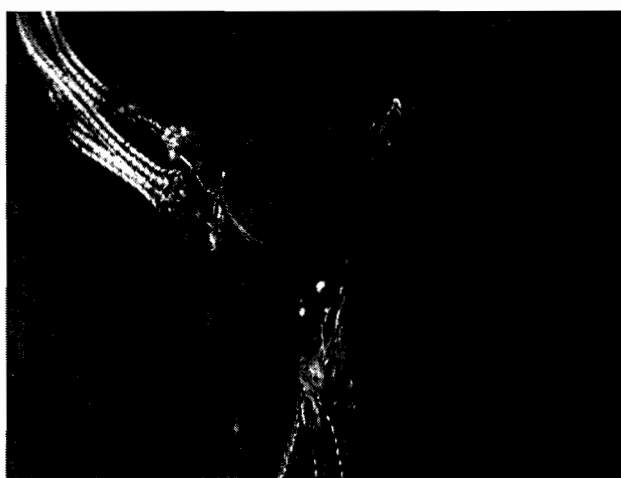
ภาพที่ 3.10 เจาะรูเพื่อกำหนดจุดวัดอุณหภูมิที่ระยะ 3 mm., 6 mm. และ 9 mm.



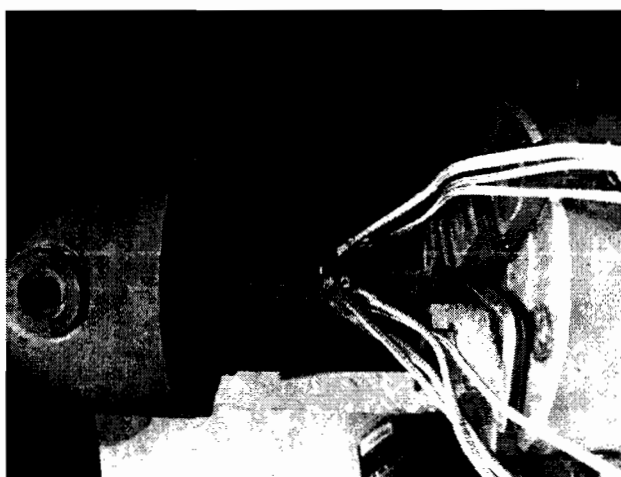
ภาพที่ 3.11 แนวการเจาะรูรอบชิ้นงาน (A, B และ C)

3.2.1.5 การเชื่อมต่อสายวัดอุณหภูมิกับชิ้นงาน

เมื่อเจาะรูทั้งหมดเรียบร้อยแล้ว นำสายวัดอุณหภูมิเชื่อมเข้ากับรูที่เจาะไว้ โดยใช้การบัดกรีด้วยตะกั่ว ในขั้นตอนนี้จะต้องเชื่อมสายวัดอุณหภูมิกับรูของชิ้นงานให้แน่น เพราะถ้าเชื่อมไม่แน่นเวลาทดลองตะกั่วที่ใช้เชื่อมจะละลายเนื่องจากความร้อน แล้วทำให้สายวัดอุณหภูมิหลุดออก ทำให้ไม่สามารถวัดอุณหภูมิได้ หรือวัดผลได้ไม่จบกระบวนการ ดังนั้นจะต้องตรวจสอบการเชื่อมสายวัดอุณหภูมิและการวางแนวสายวัดอุณหภูมิให้เรียบร้อยก่อนทำการทดลองทุกครั้ง ลักษณะการเชื่อมสายวัดอุณหภูมิกับชิ้นงาน แสดงในภาพที่ 3.12 สำหรับภาพที่ 3.13 เป็นภาพการติดตั้งชิ้นงานเข้ากับเครื่องเชื่อมด้วยวิธีเสียดทาน



ภาพที่ 3.12 การเชื่อมต่อสายวัดอุณหภูมิกับชิ้นงาน



ภาพที่ 3.13 การติดตั้งชิ้นงานที่เชื่อมสายวัดอุณหภูมิเข้ากับเครื่องเชื่อมด้วยวิธีเสียดทาน

3.2.1.6 เงื่อนไขการทดลอง

เงื่อนไขการทดลองในการวิจัยนี้จะแบ่งออกเป็น 3 กลุ่ม โดยแต่ละกลุ่มจะมีความแตกต่างกันที่แรงดันเสียดทาน (Friction pressure) คือ 20 bar, 30 bar และ 40 bar และ เวลาเสียดทาน (Friction time) คือ 15 sec., 18 sec. และ 21 sec. จะเห็นว่าเงื่อนไขการทดลองมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้น ทั้งนี้เพื่อให้ผลการทดลองมีแนวโน้มที่แตกต่างกัน และเงื่อนไขที่ใช้ในการทดลองเป็นเงื่อนไขเดียวกันกับการคำนวณในแบบจำลอง ตัวแปรที่เกี่ยวข้องมีอยู่ 5 ตัวแปร แสดงในตารางที่ 3.4 [1] ทั้งนี้ในแต่ละเงื่อนไขนั้นจะทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง แล้วเฉลี่ยผลการทดลอง

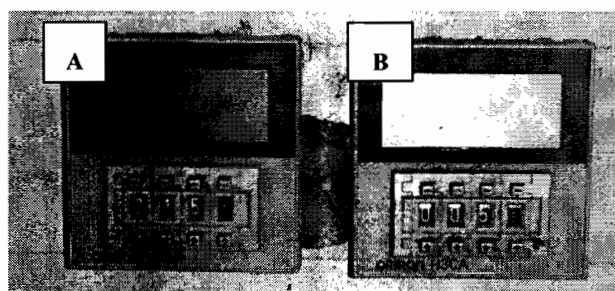
ตารางที่ 3.4 เงื่อนไขการทดลอง

ตัวแปร เงื่อนไข	แรงดันเสียดทาน P_1 (bar)	เวลาเสียดทาน T_1 (sec.)	แรงดันอัด P_2 (bar)	เวลาอัด T_2 (sec.)	ความเร็วรอบ (rpm)
1	20	15	60	5	1,300
2	30	18	60	5	1,300
3	40	21	60	5	1,300

เหตุผลของการเลือกทำการทดลองเพียงบางคู่ก็เพราะว่า ต้องการสอบเทียบแบบจำลองเท่านั้น และการเลือกคู่ที่แตกต่างกันบางคู่ก็เพื่อใช้เป็นฐานในการสอบเทียบแบบจำลอง

3.2.1.7 ชุดควบคุมเวลา (Timer)

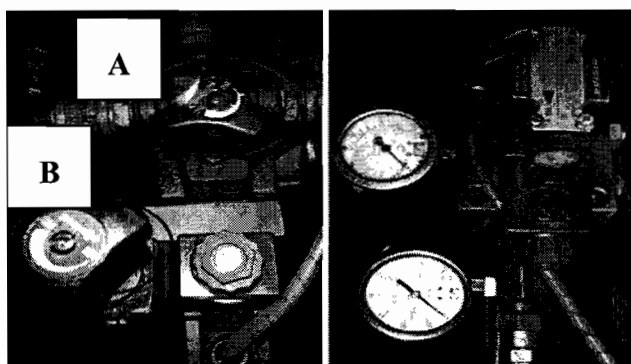
ชุดควบคุมเวลา (Timer) มีหน้าที่ควบคุมเวลาในการเชื่อมให้อยู่ภายใต้ช่วงเวลาที่เหมาะสม ซึ่งมีด้วยกันอยู่ 2 ชุด คือ ชุดควบคุมเวลาเสียดทาน (A) ทำการตั้งเวลาตามเงื่อนไขการทดลอง 3 ค่า ได้แก่ 15 sec. 18 sec. และ 21 sec. และ ชุดควบคุมเวลาในการอัด (B) ทำการตั้งเวลาตามเงื่อนไขการทดลอง 1 ค่า คือ 5 sec. ชุดควบคุมเวลาแสดงในภาพที่ 3.14



ภาพที่ 3.14 ชุดควบคุมเวลา (Timer)

3.2.1.8 ชุดควบคุมแรงดัน (Electric solenoid valve)

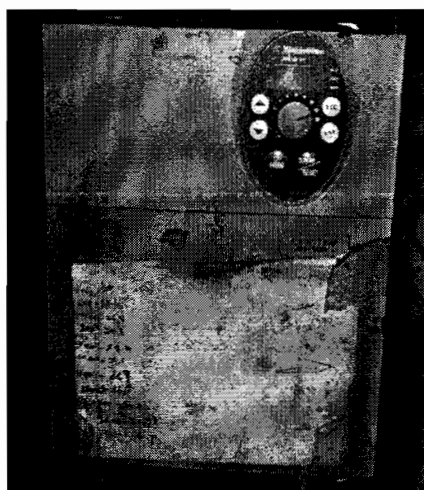
ชุดควบคุมแรงดัน (Electric solenoid valve) ทำหน้าที่ควบคุมแรงดันให้เหมาะสมต่อกระบวนการเชื่อม ซึ่งมีด้วยกันอยู่ 2 ชุด คือ ชุดควบคุมแรงดันเสียดทาน (A) ทำการปรับแรงดันตามเงื่อนไขการทดลอง 3 ค่า ได้แก่ 20 bar 30 bar และ 40 bar และชุดควบคุมแรงดันอัด (B) ทำการปรับแรงดันตามเงื่อนไขการทดลอง 1 ค่า คือ 60 bar ลักษณะชุดควบคุมแรงดัน แสดงในภาพที่ 3.15



ภาพที่ 3.15 ชุดควบคุมแรงดัน (Electric solenoid valve)

3.2.1.9 ชุดควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ (Inverter)

ชุดควบคุมความเร็ว (Inverter) มีหน้าที่ควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ให้มีความคงที่ โดยจะทำการปรับตั้งค่าตามเงื่อนไขการทดลอง คือ 1,300 rpm ลักษณะของเครื่องควบคุมความเร็วรอบ แสดงในภาพที่ 3.16



ภาพที่ 3.16 เครื่องควบคุมความเร็วรอบ (Inverter)

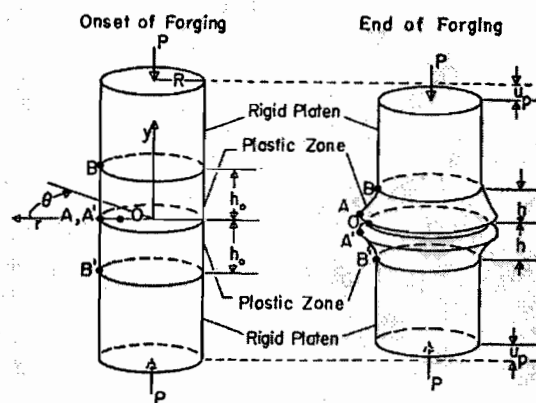
3.3 การสร้างแบบจำลองโดยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

ในการศึกษานี้ใช้วิธีการสร้างแบบจำลอง (Model) ตามรูปร่างลักษณะของชิ้นงานเดิม แล้วแบ่งชิ้นงานออกเป็นส่วนเล็กๆที่เรียกว่าเอลิเมนต์ (Element) และจะต้องกำหนดรายละเอียดที่สำคัญในแบบจำลอง เช่น การกำหนดคุณสมบัติของวัสดุ (Material properties) การกำหนดเงื่อนไขขอบเขต (Boundary condition) และกำหนดขั้นตอนการทำงาน (Step) โดยคอมพิวเตอร์จะทำการทำนายตามเงื่อนไขต่างๆที่เราป้อนค่าเข้าไปแล้ววิเคราะห์พฤติกรรม หรือ ประมวลผลแล้วหาคำตอบของระบบภายใต้ข้อกำหนดที่วางไว้

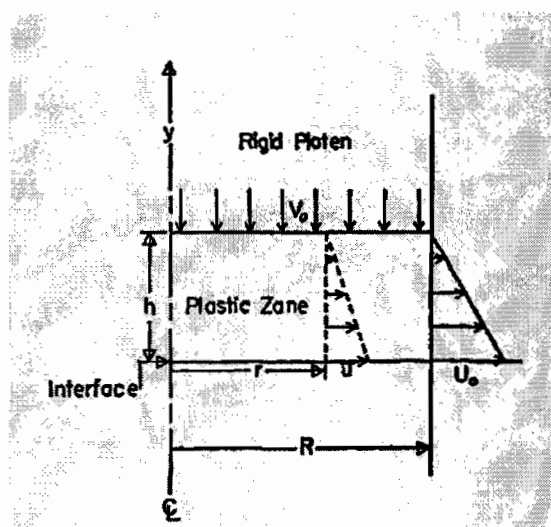
3.3.1 พฤติกรรมของโลหะในแบบจำลอง

ก่อนการสร้างแบบจำลองนั้นจะต้องศึกษาพฤติกรรมต่างๆที่เกิดขึ้นในวัสดุจากกระบวนการทดลอง เช่น แรงภายนอกที่กระทำและคุณสมบัติภายในของวัสดุ เพราะถ้าการจำลองมีความสมจริงแล้วจะส่งผลให้เกิดข้อผิดพลาดน้อยเวลาคอมพิวเตอร์คำนวณ หรือเมื่อเกิดข้อผิดพลาดก็จะทำให้ตรวจสอบและติดตามหาข้อผิดพลาดนั้นได้ง่ายจากขั้นตอนที่เรากำหนดขึ้น

ในแบบจำลองจะทำการแบ่งชิ้นงานออกเป็นสองส่วน คือ ส่วนที่แข็ง (Rigid zone) และส่วนที่เสียรูป (Plastic zone) ดังภาพที่ 3.17 แสดงการแบ่งส่วนที่แข็ง (Rigid zone) และส่วนเสียรูป (Plastic zone) ให้กับชิ้นงาน ซึ่งส่วนแข็ง จะรับแรงจากแรงในแนวแกน (P) แล้วส่งต่อไปยังส่วนที่เสียรูป กล่าวคือ ก่อนเชื่อมชิ้นงานจะยังไม่เกิดการเสียรูป (h_0) เมื่อเริ่มทำการเชื่อมเสียดทานภายใต้แรงดันในแนวแกนและหมุนด้วยความเร็วรอบ ชิ้นงานจะเกิดความร้อนและเกิดการเสียรูป (Plastic deformation) (h) และภาพที่ 3.18 แสดงลักษณะการเสียรูปจากแรงเฉือนบริเวณส่วนที่เสียรูป (Plastic zone)

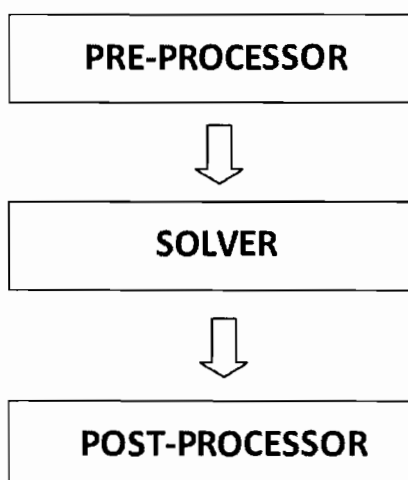


ภาพที่ 3.17 การแบ่งส่วนที่แข็ง (Rigid zone) และส่วนที่เสียรูป (Plastic zone) [35]



ภาพที่ 3.18 ลักษณะแรงเฉือนบริเวณส่วน Plastic zone [35]

เมื่อทำการศึกษาพฤติกรรมของวัสดุที่เกิดจากการเชื่อมด้วยวิธีเสียดทานในเบื้องต้นแล้ว ขั้นตอนต่อไปจะเป็นกระบวนการสร้างแบบจำลอง โดยแบ่งออกเป็น 3 กระบวนการ ได้แก่ กระบวนการขั้นต้น (Pre-processor) กระบวนการประมวลผล (Solver) และ กระบวนการประมวลผล (Post-processor) ดังแสดงในภาพที่ 3.19



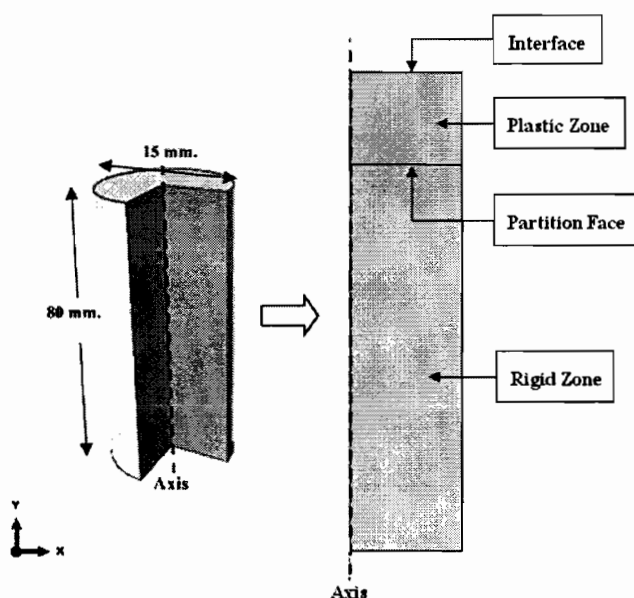
ภาพที่ 3.19 ขั้นตอนการวิเคราะห์ของซอฟต์แวร์ CAE

3.3.2 กระบวนการขั้นต้น (Pre-processor)

กระบวนการขั้นต้น (Pre-processor) เป็นการเตรียมข้อมูลจากงานจริงทั้งหมดก่อนส่งให้ส่วนกระบวนการวิเคราะห์ (Analysis) ประกอบไปด้วยขั้นตอนต่างๆ ดังนี้

3.3.2.1 การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (CAD)

แบบจำลองที่ใช้ในการวิเคราะห์ผลจะจำลองตามลักษณะสำคัญของชิ้นงานจริง ชนิดของแบบจำลองที่สร้างในซอฟต์แวร์เป็นแบบแผ่นบาง (Shell) ชนิด 2D Axisymmetric และแบ่งชิ้นงานออกเป็นสองส่วน ได้แก่ ส่วนที่จะเกิดการเสียรูปแบบพลาสติก (Plastic zone) และส่วนที่ไม่เกิดการเสียรูป (Rigid zone) โดยใช้คำสั่งการแบ่งส่วน (Partition face) เป็นตัวแบ่งส่วน ดังแสดงในภาพที่ 3.20

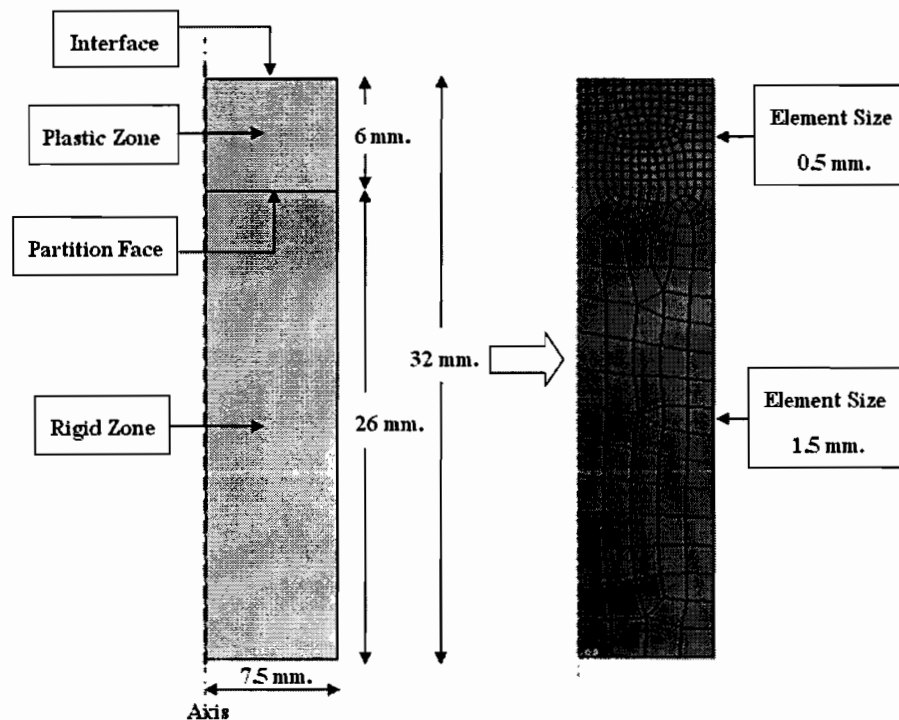


ภาพที่ 3.20 ลักษณะการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (CAD)

การสร้างแบบจำลองชิ้นงานจะจำลองให้เป็นแบบแผ่นบาง (Shell element) ที่มีความหนา 2 มม. ใช้เอลิเมนต์ชนิด CGAX4HT:A4-node และ CGAX3HT:A3-node ข้อดีของการจำลองในลักษณะนี้คือ สามารถลดจำนวนของเอลิเมนต์ และลดระยะเวลาในการคำนวณ นอกจากนี้ยังลดความยาวของชิ้นงานจาก 80 mm. ให้เหลือ 32 mm. และลดความกว้าง 15 mm. ให้เหลือ 7.5 mm. จากนั้นจะแบ่งชิ้นงานให้เป็นสองส่วน ได้แก่ ส่วนที่ยาว 26 mm. เอลิเมนต์มีขนาด 1.5 mm. คือส่วนที่แข็ง (Rigid Zone) และส่วนที่ยาว 6 mm. เอลิเมนต์มีขนาด 0.5 mm. คือส่วนที่เสียรูป (Plastic Zone) ดังแสดงในภาพที่ 3.21

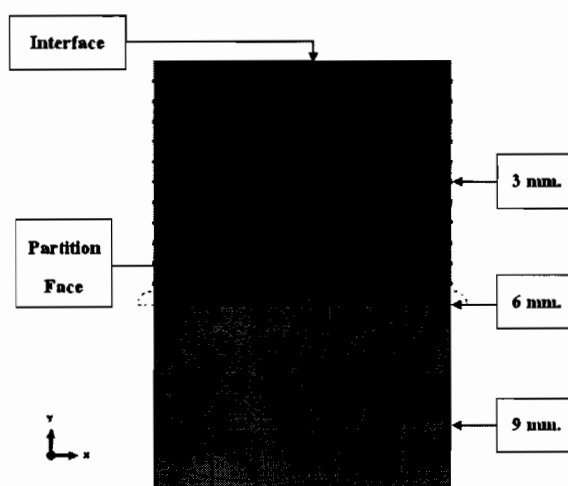
เอลิเมนต์ที่มีขนาดเล็ก (0.5 mm.) จะเป็นส่วนที่ถูกจำลองให้เกิดเกิดการเสียรูปแบบพลาสติก (Plastic deformation) จากแรงคั้นในแนวแกนและความเร็วรอบ ซึ่งเป็นการจำลองให้เหมาะสมตามลักษณะการเสียรูปที่เกิดขึ้นจริง นอกจากนี้เอลิเมนต์ที่มีขนาดเล็กจะสามารถทำนายผลได้อย่างละเอียดกว่าเอลิเมนต์ที่มีขนาดใหญ่ (1.5 mm.)

สำหรับกรณีการสร้างแบบจำลองที่มีการลดขนาดลงจากขนาดของชิ้นงานจริงนั้น จะไม่ส่งผลกระทบต่อแบบจำลอง เพราะส่วนที่ให้ความสนใจและต้องการที่จะศึกษาคือส่วนที่ทำการวัดอุณหภูมิตามการทดลอง คือ 3 mm., 6mm. และ 9mm. เท่านั้น ดังนั้นส่วนที่ตัดออกจึงเป็นส่วนที่อยู่นอกเหนือขอบเขตของการศึกษา



ภาพที่ 3.21 การกำหนดขนาดของเอลิเมนต์ (Element size)

การกำหนดจุดบันทึกอุณหภูมิ จากแบบจำลองการเชื่อมนั้นจะกำหนดให้บันทึกอุณหภูมิที่ โหนด (Node) ซึ่งเป็น โหนดที่อยู่บริเวณขอบของชิ้นงาน ตามระยะที่ทำการทดลองวัดอุณหภูมิ คือ 3 mm., 6 mm. และ 9 mm. แสดงในภาพที่ 3.22



ภาพที่ 3.22 การกำหนดจุดวัดอุณหภูมิในแบบจำลอง

3.3.2.2 การกำหนดคุณสมบัติของวัสดุ (Material properties)

การกำหนดคุณสมบัติของวัสดุ (Material properties) ถือเป็นขั้นตอนที่มีความสำคัญสำหรับการทำนายผลของแบบจำลอง เพราะเป็นขั้นตอนที่กำหนดคุณสมบัติเฉพาะให้การจำลองออกมาเสมือนจริงและมีความแม่นยำ ปัจจุบัน โปรแกรมหลายโปรแกรมได้นำเอาคุณสมบัติของวัสดุมาเก็บไว้ในฐานข้อมูล ซึ่งผู้ใช้โปรแกรมในการสร้างแบบจำลอง (CAE) สามารถเลือกใช้งานได้ แต่ถ้าหากคุณสมบัติของวัสดุไม่มีอยู่ในฐานข้อมูลของโปรแกรมที่ใช้สร้างแบบจำลอง (CAE) ก็สามารถทำการทดสอบคุณสมบัติของวัสดุหรือ ค้นหาข้อมูลได้จากเว็บไซต์ เช่น www.Matweb.com สำหรับรายละเอียดคุณสมบัติของวัสดุที่กำหนดในแบบจำลอง FEA มีอยู่ 2 ส่วน ดังนี้

1) คุณสมบัติเชิงกล (Mechanical properties) เป็นคุณสมบัติที่เกี่ยวข้องกับปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นของวัสดุ เมื่อมีแรงภายนอกกระทำต่อวัสดุ ค่าที่กำหนดในแบบจำลอง ได้แก่

- ค่าความหนาแน่น (Density) $7,870 \text{ kg} / \text{m}^3$

- ค่ามอดูลัสของยัง (Young's modulus) 210 GPa และอัตราส่วนปัว

ซอง (Poisson's ratio) 0.29

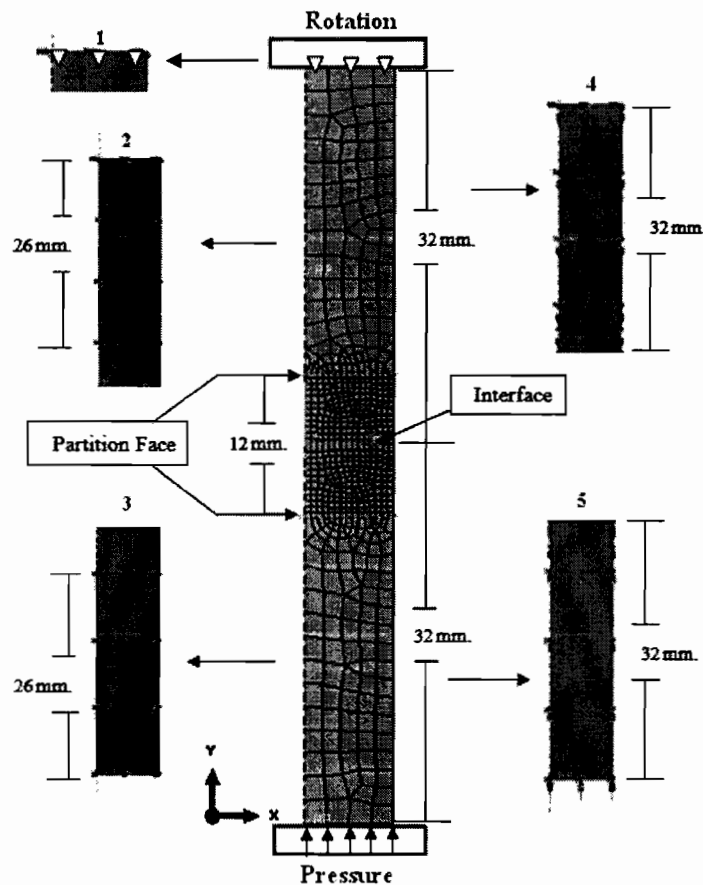
- ค่าการเปลี่ยนรูปแบบพลาสติก (Plastic deformation) โดยใช้ค่าความเค้นที่จุดคราก (Yield stress) คือ 425 MPa

2) คุณสมบัติทางความร้อน (Thermal properties) เป็นคุณสมบัติการตอบสนองของวัสดุต่อปฏิบัติการทางความร้อน เช่น การดูดซับพลังงานของของแข็งในรูปของความร้อนด้วยการเพิ่มอุณหภูมิ และพลังงานจะถ่ายเทไปยังบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า โดยวัสดุอาจ

เกิดการหลอมเหลวในบริเวณที่มีอุณหภูมิสูง ซึ่งค่าความร้อนจำเพาะ (Specific heat) และค่าการนำความร้อน (Thermal conductivity) เป็นค่าที่เกี่ยวข้องโดยตรงและจะต้องกำหนดในแบบจำลอง ซึ่งได้อธิบายไว้แล้วในส่วนต่อจากหัวข้อ วัสดุที่ใช้ในการทดลอง ในตารางที่ 3.2

3.3.2.3 การกำหนดเงื่อนไขขอบเขต (Boundary condition : BC)

ขั้นตอนนี้เป็นอีกขั้นตอนหนึ่งที่มีความสำคัญมาก เนื่องจากการกำหนดเงื่อนไขขอบเขต (BC) จะทำให้ได้ผลลัพธ์ที่สอดคล้องกับพฤติกรรมที่เกิดขึ้นจริง เช่น หากต้องการวิเคราะห์การเสียรูปของวัสดุ (Material deformation) และการวิเคราะห์ถ่ายเทความร้อน (Temperature distribution) ซึ่งจะต้องแบ่งชิ้นงานออกเป็นส่วนๆ โดยกำหนดจุดที่จะรับแรงและบริเวณที่จะเกิดการเสียหายตามปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นจริง กระบวนการนี้โดยปกติจะใช้เวลามากในทางปฏิบัติ เพราะจำเป็นต้องสร้างรูปร่างของปัญหาอย่างถูกต้องขึ้นมาก่อน ซึ่งรูปร่าง (Geometry) ของปัญหาอาจจะประกอบไปด้วยหลายส่วนที่มีความซับซ้อน ดังนั้นจึงจะต้องอาศัยความละเอียดเป็นอย่างมากในการวิเคราะห์



ภาพที่ 3.23 ลักษณะการกำหนดเงื่อนไขขอบเขต (BC)

จากนั้นจึงประยุกต์เงื่อนไขขอบเขต (BC) ของปัญหานั้นๆ เพื่อแก้สมการ และหาผลลัพธ์ตรงจุดที่เราต้องการทราบผล ซึ่งหากแก้ปัญหาการถ่ายเทความร้อน ผลลัพธ์ที่ออกมา จะอยู่ในรูปของอุณหภูมิ หรือหากวิเคราะห์การเสีขรูป ผลลัพธ์เหล่านั้นจะแสดงผลเป็นการเคลื่อนตัวของโครงสร้าง ลักษณะการกำหนดเงื่อนไขขอบเขต (BC) ให้กับชิ้นงานที่จะเชื่อมด้วยวิธีเสียดทานในงานวิจัยนี้ แสดงในภาพที่ 3.23

จากภาพที่ 3.23 แสดงการกำหนดเงื่อนไขขอบเขต (BC) ให้กับแบบจำลอง คือ ชิ้นงานสองชิ้นที่จะทำการเชื่อมด้วยวิธีเสียดทาน ได้แก่ ชิ้นงานที่อยู่ด้านบนและด้านล่าง ชิ้นงานที่อยู่ด้านบนคือชิ้นงานที่จะต้องหมุนด้วยความเร็วรอบค่าหนึ่ง (Rotation) และชิ้นงานด้านล่างคือชิ้นงานที่จะต้องได้รับแรงดัน (Pressure) ซึ่งจะอธิบายรายละเอียดของการกำหนดเงื่อนไขขอบเขต (BC) ทั้งหมด ดังต่อไปนี้

1) การกำหนดจุดยึดบริเวณส่วนท้ายของชิ้นงานที่หมุน เพื่อไม่ให้ชิ้นงานเคลื่อนที่ขึ้นลงในแนวแกน Y แต่สามารถหมุนรอบแกน Y ได้ โดยใช้คำสั่ง YSYMM ($U_2=U_{R1}=U_{R3}=0$)

2) การกำหนดให้ชิ้นงานที่หมุนสามารถเสีขรูปได้ในแนวแกน Y (Displacement/Rotation) เลือเฉพาะส่วนที่ยาว 26 mm. โดยกำหนดให้ $U_1=0$ สำหรับ U_2 และ U_{R2} จะปล่อยให้เป็นการคำนวณของแบบจำลอง (U_{R3}, U_{R2} : Radians Unit)

3) การกำหนดให้ชิ้นงานที่อยู่ด้านล่างหรือชิ้นงานที่รับแรงในแนวแกนให้สามารถเคลื่อนที่หรือเสีขรูปได้ในแนวแกน Y (Displacement/Rotation) เลือเฉพาะส่วนที่ยาว 26 mm. โดยกำหนดให้ $U_1=0$ สำหรับ U_2 และ U_{R2} จะปล่อยให้เป็นการคำนวณของแบบจำลอง (U_{R3}, U_{R2} : Radians Unit) ซึ่งในตอนที 2 และตอนที 3 จะมีความคล้ายกัน

4) การกำหนดให้ชิ้นงานหมุนด้วยความเร็วตามเงื่อนไขเดียวกันกับการทดลอง คือ 1,300 rpm ให้หมุนในแนวแกน Y (Velocity/Angular Velocity) ทำการเลือกทั้งหมดของส่วนที่หมุน คือ 32 mm. แต่เนื่องจากหน่วยที่ใช้ในโปรแกรม CAE มีหน่วยเป็นความเร็วเชิงมุม (ω) rad/s จึงทำการแปลงหน่วยได้ดังนี้

$$\text{จากสูตร} \quad \omega = \frac{2\pi N}{T}, \text{ rad / s} \quad (3.1)$$

$$\text{จะได้} \quad \omega = \left(1,300 \frac{\text{rev}}{\text{min}}\right) \left(2\pi \frac{\text{rad}}{\text{rev}}\right) \left(\frac{\text{min}}{60\text{s}}\right) \quad (3.2)$$

$$\omega = 136 \quad \text{rad / s}$$

จากนั้นจึงกำหนดให้ $VR_2 = -136 \text{ rad / s}$ (ติดลบเพราะมีทิศลงหรือ -Y)

5) การกำหนดให้ชิ้นงานที่อยู่ด้านล่างหรือชิ้นงานที่รับแรงดัน (Pressure Load) ทำการเลือกทั้งหมดของชิ้นงานซึ่งยาว 32 mm. ที่เคลื่อนที่เข้าหาชิ้นงานที่หมุนด้วยความเร็วรอบ ในทิศแกน Y (Displacement/Rotation) โดยกำหนดให้ $UR_2=0$, $UR_3=0$ สำหรับ U_1 และ U_2 ปล่อยให้เป็นอิสระตามทิศการเคลื่อนที่ตามโหนด (Y) และทิศการเสี้ยวรูป (X)

สำหรับเงื่อนไขในการคำนวณการเชื่อม ที่สำคัญและจะต้องกำหนดในโปรแกรม ใช้เงื่อนไขเดียวกันกับการทดลอง ดังแสดงในตารางที่ 3.4 โดยจะขอยกตัวอย่างการกำหนดเงื่อนไขในโปรแกรม จากเงื่อนไขชุดที่ 1 ดังนี้

1) การกำหนดขั้นตอน (Step) การทำงานของตัวแปร เวลาเสียดทาน (T_1) 15 sec. และเวลาอัด (T_2) 5 sec. ซึ่งเป็นการทำงาน 2 ขั้นตอน ดังนั้น จะต้องสร้างขั้นตอนขึ้นมา 2 ขั้นตอนในแถบเครื่องมือ (Step Manager) ได้แก่ ขั้นตอนการทำงานของตัวแปรเวลาเชื่อมเสียดทาน (Step Weld) และ ขั้นตอนการทำงานของตัวแปรเวลาอัด (Step Upset)

2) การกำหนดภาระ (Load) ให้กับแบบจำลอง เป็นการทำงานของตัวแปร แรงดันเสียดทาน (P_1) 20 bar และแรงดันอัด (P_2) 60 bar ซึ่งเป็นการทำงาน 2 ขั้นตอน ดังนั้น จะต้องสร้างขั้นตอนขึ้นมา 2 ขั้นตอนในแถบเครื่องมือ (Load Manager) ได้แก่ ขั้นตอนการทำงานของตัวแปรแรงดันเสียดทาน (Load Weld) ซึ่งทำงานคู่กันกับเวลาเสียดทาน (Step weld) และ ขั้นตอนการทำงานของตัวแปรแรงดันอัด (Load Upset) ซึ่งทำงานคู่กันกับเวลาอัด (Step upset)

3) การกำหนดความเร็วรอบให้กับแบบจำลอง เป็นการทำงานของตัวแปร ความเร็วรอบ (Speed) 1,300 rpm ซึ่งจะต้องสร้างในแถบเครื่องมือ (Boundary Condition Manager) โดยกำหนดให้กับชิ้นงานที่อยู่ด้านบน (Top velocity) ทำงานคู่กันกับเวลาเสียดทาน (Step weld)

สำหรับการสร้างหรือกำหนดเงื่อนไขในชุดอื่นๆ ก็กำหนดในลักษณะเดียวกัน เพียงแต่เปลี่ยนเงื่อนไขตามตัวแปรที่เปลี่ยนแปลงหรือเพิ่มขึ้น

นอกจากนี้ยังมีเงื่อนไขที่สำคัญและจะต้องกำหนดในแบบจำลองอีกส่วนหนึ่ง คือ ส่วนของพฤติกรรมของแรงดันและพฤติกรรมการนำความร้อนบริเวณผิวสัมผัส รวมถึงสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน (Friction coefficient) ซึ่งมีผลเปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิบริเวณพื้นที่หน้าตัดเสียดทาน โดยจะต้องสร้างในแถบเครื่องมือ (Interaction Property Manager) กำหนดที่หน้าสัมผัสของชิ้นงาน (Interface) ดังแสดงในภาพที่ 3.2.4 และตารางที่ 3.5 [30]

Pressure	Overclosure
18000	0
	0.1
Conductance	Clearance
1000	0
0	1

ภาพที่ 3.24 พฤติกรรมของแรงดันและพฤติกรรมการนำความร้อนบริเวณผิวสัมผัส

ตารางที่ 3.5 สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานที่ใช้ในแบบจำลอง

อุณหภูมิ (°C)	20	200	400	600	800	1,000	1,200
ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน	0.4	0.577	0.577	0.577	0.4	0.2	0.1

สำหรับรายละเอียดเกี่ยวกับค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน ในตารางที่ 3.5 ได้อธิบายไว้ในบทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง หัวข้อ 2.3.6 สัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน

3.3.3 กระบวนการประมวลผล (Solve)

เมื่อได้รับข้อมูลจากกระบวนการขั้นต้นแล้ว ขั้นตอนการประมวลผลจะพิจารณาว่าเป็นปัญหาประเภทใด จากนั้นจึงเริ่มต้นคำนวณผลลัพธ์ ซึ่งใช้ระยะเวลาในการคำนวณผลลัพธ์แตกต่างกันออกไปตามลักษณะของปัญหา ปริมาณของเอลิเมนต์ และประสิทธิภาพของคอมพิวเตอร์ โดยหลังจากการคำนวณผลลัพธ์เรียบร้อยแล้ว โปรแกรมจะรวบรวมข้อมูลแล้วส่งให้ส่วนแสดงผล (Post-processor) ต่อไป หากการคำนวณผิดพลาด ทำให้โปรแกรมไม่สามารถคำนวณผลลัพธ์ได้ นั่นแสดงว่า ในส่วนกระบวนการขั้นต้น (Pre-processor) มีการป้อนข้อมูลไม่ครบถ้วนหรือป้อนข้อมูลผิดพลาด โดยวิธีการแก้ไขมีความแตกต่างกันออกไป ขึ้นอยู่กับสาเหตุของปัญหา ซึ่งสามารถอ่านได้จากข้อความที่แสดงในจอแสดงสถานะ การคำนวณ (Monitor)

3.3.4 กระบวนการแสดงผล (Post-processor)

ขั้นตอนการแสดงผลเป็นขั้นตอนสุดท้ายของการวิเคราะห์ปัญหาทางด้านวิศวกรรมด้วยโปรแกรม CAE โดยการนำผลลัพธ์ที่ได้จากส่วนของ Solver มาแสดงในรูปแบบแถบชั้นสีต่างๆ ซึ่งผู้ทำการทดลองจะสามารถเข้าใจปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นได้ง่าย สำหรับรูปแบบของการแสดงผลนั้นสามารถแสดงได้หลายวิธี เช่น การแสดงด้วยแถบสี (Fringe plot) การแสดงด้วยเส้นชั้นสี (Contour lines) การแสดงด้วยเวกเตอร์ (Vector plot) และตัวเลขหรือกราฟ เป็นต้น สำหรับการแสดงผลการคำนวณจะทำการวิเคราะห์และอภิปรายในบทต่อไป

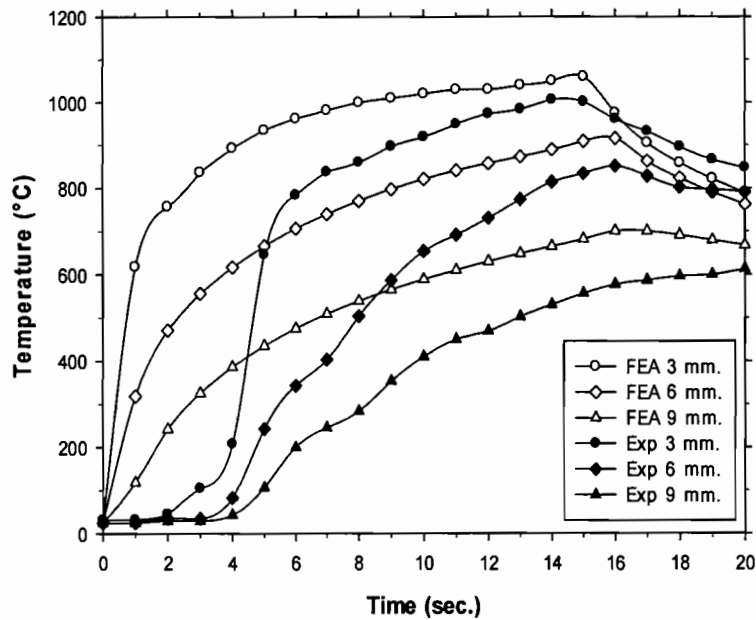
บทที่ 4

ผลการทดลองและอภิปรายผล

เนื้อหาในบทนี้กล่าวถึง การวิเคราะห์เปรียบเทียบผลการกระจายตัวของอุณหภูมิในเหล็กที่เชื่อมด้วยวิธีเสียดทาน โดยวิธีการทดลองวัดอุณหภูมิจากการเชื่อมและการสร้างแบบจำลองโดยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ จากนั้นทำการขยายผลเพื่อศึกษาอิทธิพลของตัวแปร โดยใช้แบบจำลองโดยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยการขยายเงื่อนไขตัวแปรเวลาเสียดทาน (T_1) และเวลาอัด (T_2) แล้วจับคู่ให้ตัวแปรพบกันทุกตัวแปร จากนั้นวิเคราะห์อิทธิพลที่ส่งผลกระทบต่อการกระจายตัวของอุณหภูมิ ซึ่งผลการทดลองมีดังต่อไปนี้

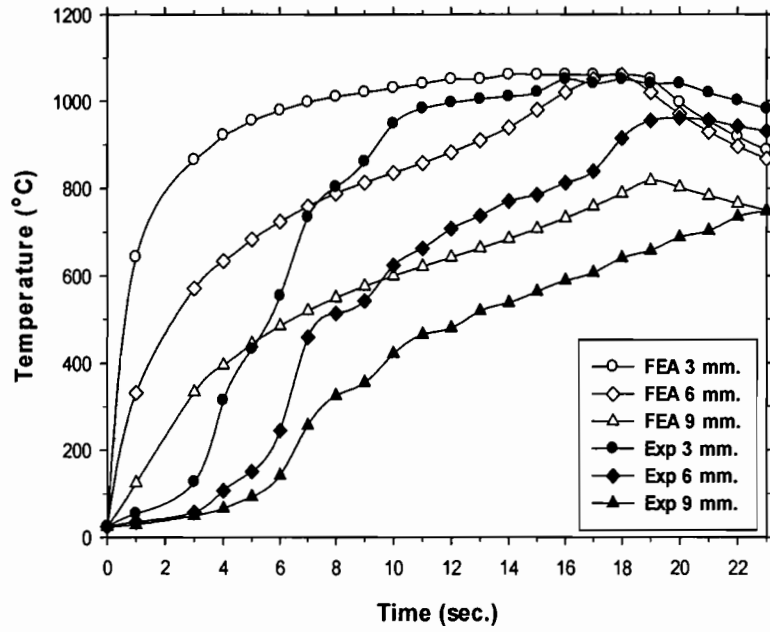
4.1 การวิเคราะห์ผลการทดลองกับแบบจำลองโดยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

การวิเคราะห์ผลในงานวิจัยนี้อาศัยเงื่อนไขการทดลองเป็นหลักในการวิเคราะห์เชื่อมโยงถึงปัจจัยอื่นๆที่เกี่ยวข้อง โดยเงื่อนไขที่ใช้ทดลองและใช้คำนวณของแบบจำลองนั้นเป็นเงื่อนไขเดียวกันและมีทั้งหมด 3 ชุด ลำดับการวิเคราะห์มีดังนี้ (1) ทำการวิเคราะห์และเปรียบเทียบผลของเงื่อนไขชุดที่ 1 เพราะเป็นเงื่อนไขเริ่มต้น โดยกล่าวถึงรายละเอียดของการเชื่อมที่ทำให้เกิดค่าความแตกต่างของอุณหภูมิตั้งแต่ระหว่างการทดลองกับการคำนวณของแบบจำลอง (2) ทำการวิเคราะห์เงื่อนไขที่มีความแตกต่างกันว่าจะส่งผลอย่างไรต่อการกระจายตัวของอุณหภูมิ และค่าความแตกต่างของอุณหภูมิเป็นอย่างไร (3) ทำการวิเคราะห์และเปรียบเทียบลักษณะการเสียดทานของวัสดุจากการทดลองและการคำนวณของแบบจำลอง ซึ่งการวิเคราะห์เทียบผลการทดลองและแบบจำลองทั้งหมดมีดังต่อไปนี้

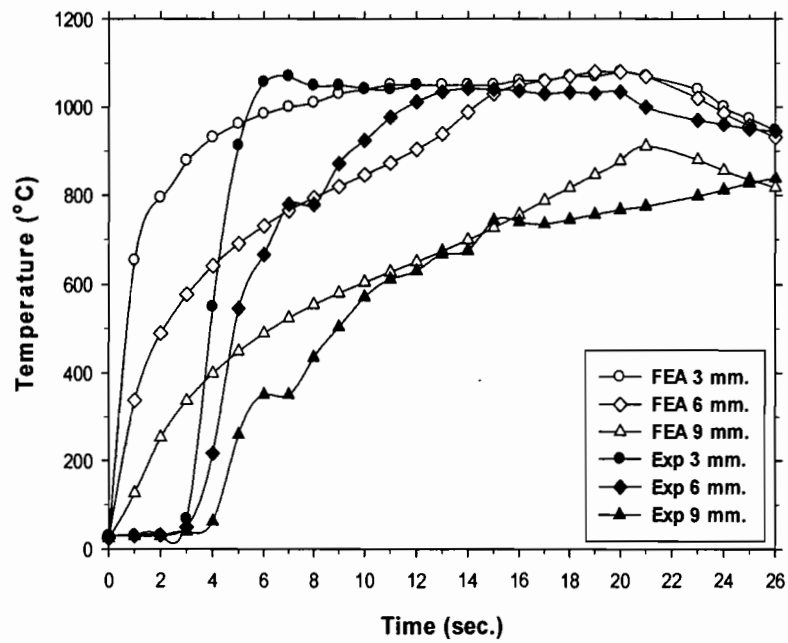


ภาพที่ 4.1 การเปรียบเทียบผลการกระจายตัวของอุณหภูมิโดยเงื่อนไขชุดที่ 1 : $T_1=15$ sec.,
 $P_1=20$ bar

จากภาพที่ 4.1 เป็นกราฟการเทียบผลอุณหภูมิของเงื่อนไขชุดที่ 1 ซึ่งเป็นเงื่อนไขเริ่มต้นที่ใช้ในการทดลองและใช้ในการคำนวณของแบบจำลอง โดยพบว่า การกระจายตัวของอุณหภูมิก่อนข้างที่จะแตกต่างกันอยู่พอสมควร โดยเฉพาะในช่วงแรกระหว่าง 0-4 sec. อุณหภูมิจากการทดลองมีค่าต่ำกว่าแบบจำลองมาก ซึ่งสาเหตุเกิดจาก ในช่วงเริ่มต้นของกระบวนการเชื่อม (0-4 sec.) เครื่องเชื่อมต้องใช้เวลาในการสร้างความเร็วรอบและสร้างแรงดันในแนวแกนที่มากพอต่อการดันชิ้นงานเข้าหากันและหมุนเสียดทานซึ่งกันและกัน ซึ่งในช่วงเริ่มต้นของการเชื่อมอุณหภูมิจึงมีบริเวณพื้นที่หน้าตัดเสียดทานยังไม่เพิ่มสูงมากนัก แต่เมื่อเวลาผ่านไป (หลังจาก 4 sec.) เมื่อความเร็วรอบและแรงดันเริ่มคงที่ อุณหภูมิเกิดการคิดตัวสูงขึ้นอย่างรวดเร็วและมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง เมื่อจบกระบวนการเสียดทาน อุณหภูมิจึงค่อยๆ ลดลง โดยเฉพาะจุดวัดที่อยู่ใกล้กับรอยเชื่อม สำหรับจุดวัดที่อยู่ห่างออกไปอุณหภูมิยังคงเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องจนกระทั่งจบสิ้นกระบวนการเชื่อมสิ้นสุด



ภาพที่ 4.2 การเปรียบเทียบผลการกระจายตัวของอุณหภูมิโดยเงื่อนไขจุดที่ 2 : $T_1=18$ sec.,
 $P_1=30$ bar



ภาพที่ 4.3 การเปรียบเทียบผลการกระจายตัวของอุณหภูมิโดยเงื่อนไขจุดที่ 3 : $T_1=21$ sec.,
 $P_1=40$ bar

จากภาพที่ 4.2 และ 4.3 เป็นกราฟการเทียบผลอุณหภูมิระหว่างการทดลองกับการคำนวณของแบบจำลอง จากเงื่อนไขชุดที่ 2 และชุดที่ 3 ซึ่งเป็นเงื่อนไขที่เพิ่มขึ้นจากชุดที่ 1 โดยการเพิ่มตัวแปรแรงดันเสียดทาน (P_1) จาก 20 bar เป็น 30 bar และ 40 bar และเวลาเสียดทาน (T_1) จาก 15 sec. เป็น 18 sec. และ 21 sec. เมื่อเปรียบเทียบผลกันกับเงื่อนไขชุดที่ 1 พบว่า กราฟความชันของอุณหภูมิพุ่งขึ้นเร็วกว่าและอุณหภูมิลู่ในระดับที่สูงกว่าตามลำดับแรงดันเสียดทาน (P_1) ที่เพิ่มขึ้น ส่วนการเพิ่มตัวแปรเวลาเสียดทาน (T_1) เป็นการเพิ่มเวลาให้อุณหภูมิจากรอยเชื่อมสามารถกระจายตัวผ่านจุดวัดอุณหภูมิ 6 mm. และ 9 mm. ได้มากขึ้น สังเกตได้จากกราฟอุณหภูมิที่พุ่งสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง สำหรับที่จุดวัดอุณหภูมิ 3 mm. เป็นจุดที่อยู่ใกล้กับรอยเชื่อมมากที่สุด ความร้อนจากรอยเชื่อมจึงไหลผ่านได้มากจนถึงระดับอิมิตัวที่อุณหภูมิประมาณ 1,000 – 1,100 °C และเมื่อถึงระดับอิมิตัวอุณหภูมิจะไม่พุ่งสูงขึ้นอีก แต่จะเป็นการรักษาระดับของอุณหภูมิให้เกือบคงที่ แล้วกระจายตัวสู่จุดอื่นๆต่อไป

ตารางที่ 4.1 การเทียบผลอุณหภูมิสูงสุดของเงื่อนไขชุดที่ 1 ชุดที่ 2 และชุดที่ 3

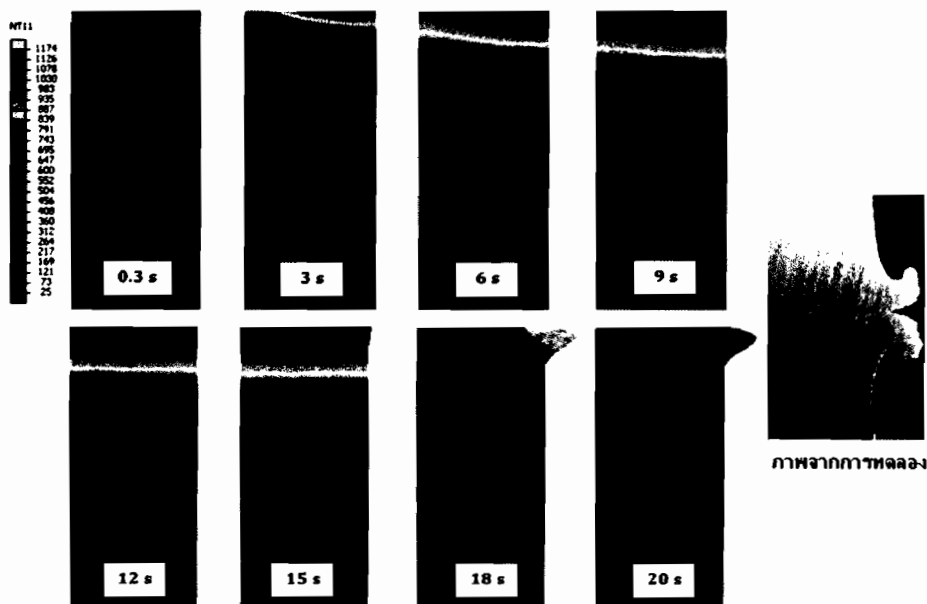
เงื่อนไขการทดลอง	จุดที่วัดอุณหภูมิ (mm.)	การทดลอง (°C)	แบบจำลอง (°C)	ค่าความแตกต่าง (%)
ชุดที่ 1	3	1,006	1,060	5.0
	6	851	916	8.9
	9	613	700	12.4
ชุดที่ 2	3	1,050	1,060	0.9
	6	961	1,060	9.3
	9	754	817	7.7
ชุดที่ 3	3	1,070	1,080	0.9
	6	1,040	1,080	3.5
	9	839	911	7.9

จากตารางที่ 4.1 เป็นการเปรียบเทียบผลอุณหภูมิสูงสุดจากการทดลองและการคำนวณ ทั้ง 3 จุด จากเงื่อนไขชุดที่ 1 พบว่า จุดวัดที่ระยะ 3 mm. วัดอุณหภูมิสูงสุดจากการทดลองได้ 1,006 °C และจากการคำนวณได้ 1,060 °C ค่าความแตกต่างของอุณหภูมิ 5 % ที่จุด 6 mm. วัดอุณหภูมิสูงสุดจากการทดลองได้ 851 °C และจากการคำนวณได้ 916 °C ค่าความแตกต่างของ

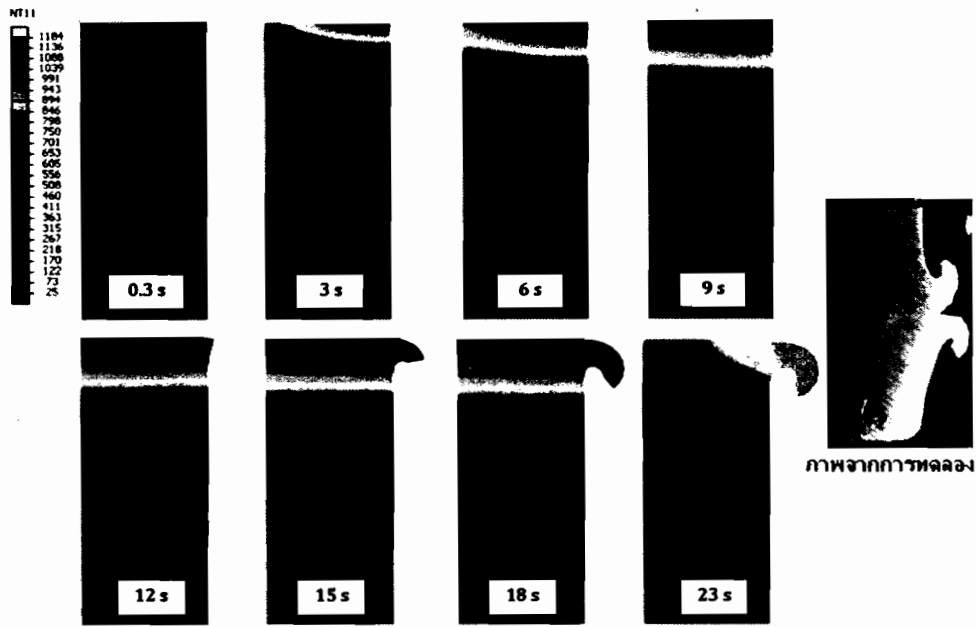
อุณหภูมิ 8.9 % และที่จุด 9 mm. วัสดุอุณหภูมิสูงสุดจากการทดลองได้ 613 °C และจากการคำนวณได้ 700 °C ค่าความแตกต่างของอุณหภูมิ 12.4 % จะเห็นได้ว่า อุณหภูมิสูงสุดที่ระยะ 3 mm. อยู่ที่เวลา 15 sec. ที่ระยะ 6 mm. และ 9 mm. อยู่ที่ 16 sec. เมื่อสิ้นสุดกระบวนการเชื่อม คือเวลา 15 sec. อุณหภูมิยังคงสามารถกระจายตัว ได้อีก 1 sec. ที่ระยะ 6 mm. และ 9 mm. ก่อนที่อุณหภูมิจะลดลง

จากตารางที่ 4.1 การเทียบผลอุณหภูมิสูงสุดจากการทดลองและจากแบบจำลองของเงื่อนไขชุดที่ 2 และชุดที่ 3 จากการเพิ่มตัวแปรแรงดันเสียดทาน (P_1) และเวลาเสียดทาน (T_1) พบว่า อุณหภูมิโดยรวมนั้นเพิ่มขึ้นเร็วและมากกว่าเงื่อนไขชุดที่ 1 ตามแรงดันเสียดทาน (P_1) และเวลาเสียดทาน (T_1) ที่เพิ่มขึ้น โดยให้ค่าความแตกต่างตามจุดวัดอุณหภูมิ ดังนี้ เงื่อนไขชุดที่ 2 คือ 0.9%, 9.3% และ 7.7% และเงื่อนไขชุดที่ 3 คือ 0.9%, 3.5% และ 7.9%

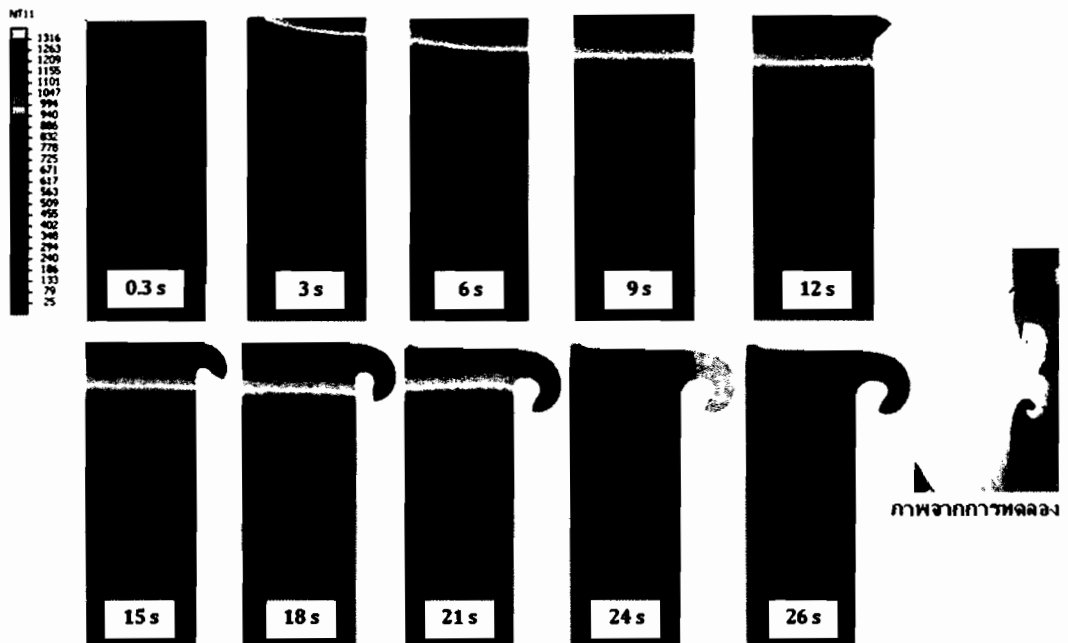
ค่าความแตกต่างของอุณหภูมิที่วัดได้จากการทดลองและจากแบบจำลองทาง FEA อาจเกิดจากหลายสาเหตุ ได้แก่ อุณหภูมิภายนอก เมื่อชิ้นงานเกิดการหมุนเสียดทาน ความร้อนจากการเสียดทานบางส่วนจะถูกถ่ายเทออกสู่บรรยากาศโดยรอบได้ อีกสาเหตุเกิดจากลักษณะรูของชิ้นงานที่ทำการเจาะเพื่อเชื่อมสายวัดอุณหภูมิ ถ้ารูมีขนาดลึกและกว้างมากเกินไปจะทำให้ชิ้นงานเกิดพื้นที่ว่าง และอุณหภูมิบางส่วนก็จะถ่ายเทออกตามพื้นที่ว่างเหล่านั้นได้มากกว่าปกติ และตะกั่วจากการเชื่อมสายวัดอุณหภูมิกับชิ้นงานก็ส่งผลเช่นเดียวกัน ซึ่งตะกั่วกับเหล็กคาร์บอนต่ำเป็นธาตุที่มีคุณสมบัติการนำความร้อนที่ต่างกัน โดยตะกั่วมีค่าการนำความร้อนที่ต่ำกว่าเหล็กคาร์บอนต่ำมาก จึงส่งผลโดยตรงต่อการไหลของความร้อนในชิ้นงาน



ภาพที่ 4.4 การกระจายตัวของอุณหภูมิในแบบจำลองโดยเงื่อนไขชุดที่ 1 : $T_1=15$ sec., $P_1=20$ bar



ภาพที่ 4.5 การกระจายตัวของอนุภาคน้ำในแบบจำลองโดยเงื่อนไขชุดที่ 2 : $T_1=18$ sec., $P_1=30$ bar



ภาพที่ 4.6 การกระจายตัวของอนุภาคน้ำในแบบจำลองโดยเงื่อนไขชุดที่ 3 : $T_1=21$ sec., $P_1=40$ bar

จากภาพที่ 4.4, 4.5 และ 4.6 เป็นภาพการแสดงผลลักษณะการกระจายตัวของอุณหภูมิในแบบจำลองชิ้นงานเชื่อม โดยทำการจำลองทั้งหมด 3 กรณี และแสดงผลในรูปของแถบสีแทนอุณหภูมิ (Temperature contour) จากภาพแสดงให้เห็นว่า แบบจำลองสามารถทำนายผลการกระจายตัวของอุณหภูมิ และสามารถแสดงผลลักษณะการเสียหายของวัสดุได้ โดยคล้ายคลึงกับการทดลองพอสมควร

เมื่อพิจารณาการกระจายตัวของอุณหภูมิในแบบจำลอง พบว่า กรณีของเงื่อนไขชุดที่ 3 ในภาพที่ 4.6 เกิดการกระจายตัวของอุณหภูมิในระยะที่ไกลและสูงกว่ากรณีอื่น ทั้งนี้เนื่องจากการใช้แรงดันเสียดทาน (P_1) ที่สูงกว่านั้น ส่งผลให้น้ำสัมผัสของชิ้นงานเกิดแรงเสียดทานที่มากขึ้น ความร้อนจึงเกิดมากขึ้น นอกจากนี้การใช้แรงดันอัด (P_2) ที่มากยังส่งผลให้เกิดการไหลของเนื้อโลหะมากขึ้น จึงเกิดการส่งต่อความร้อนได้มากขึ้นจากการไหลของมวลโลหะร้อน

นอกจากนี้จะพบว่า จากการทดลองและจากแบบจำลองจะเห็นการไหลของเนื้อโลหะออกมาในลักษณะเป็นครีบริบที่รอยต่อของชิ้นงาน ซึ่งผลจากการทดลองก็เหมือนกับแบบจำลอง

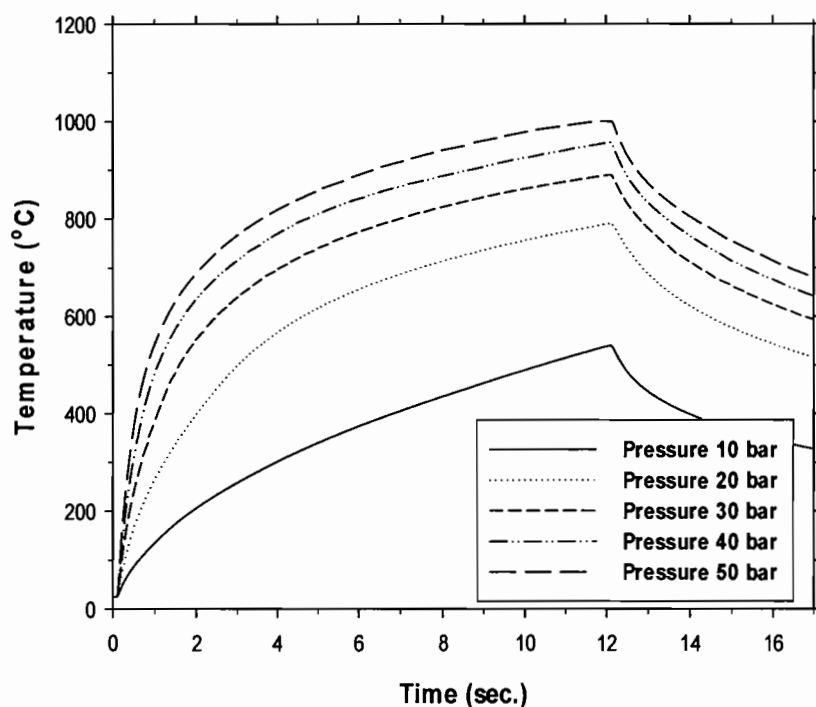
4.2 การศึกษาอิทธิพลของตัวแปรโดยใช้แบบจำลองโดยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

จากผลการศึกษาที่ผ่านมา พบว่า แบบจำลองโดยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ที่พัฒนาขึ้นสามารถทำนายผลการกระจายตัวของอุณหภูมิภายใต้เงื่อนไขต่างๆ ได้เป็นอย่างดี ดังนั้นจึงได้ขยายผลการศึกษา โดยนำแบบจำลองโดยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ มาใช้ศึกษาอิทธิพลของเงื่อนไขต่างๆ โดยใช้เงื่อนไขตามที่แสดงในตารางที่ 4.2

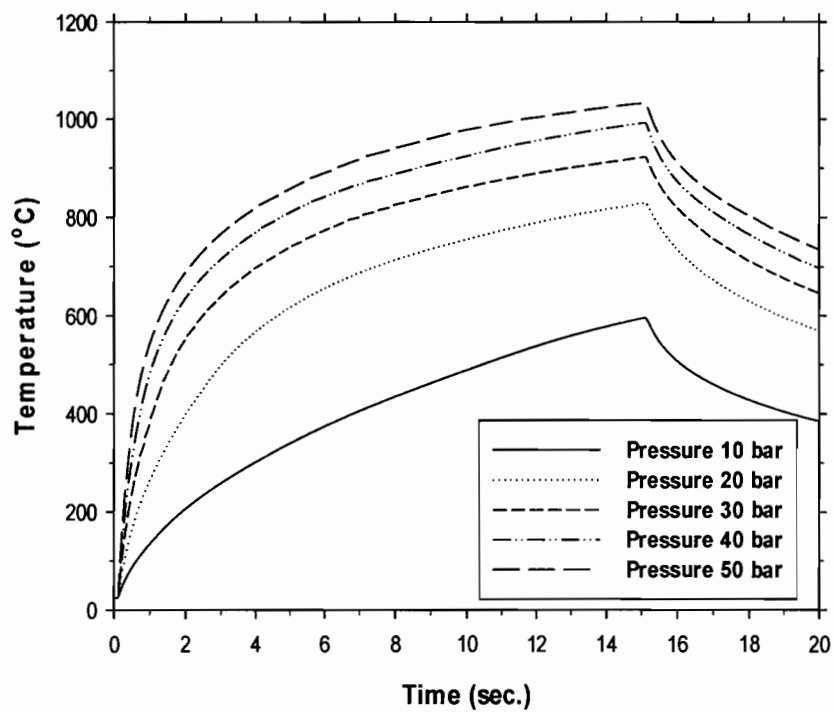
ตารางที่ 4.2 เงื่อนไขแบบจำลอง

ตัวแปร	ช่วงของตัวแปร				
P_1 (bar)	10	20	30	40	50
T_1 (sec.)	12	15	18	21	25
P_2 (bar)	60	60	60	60	60
T_2 (sec.)	5	5	5	5	5
Speed(rpm)	1,300	1,300	1,300	1,300	1,300

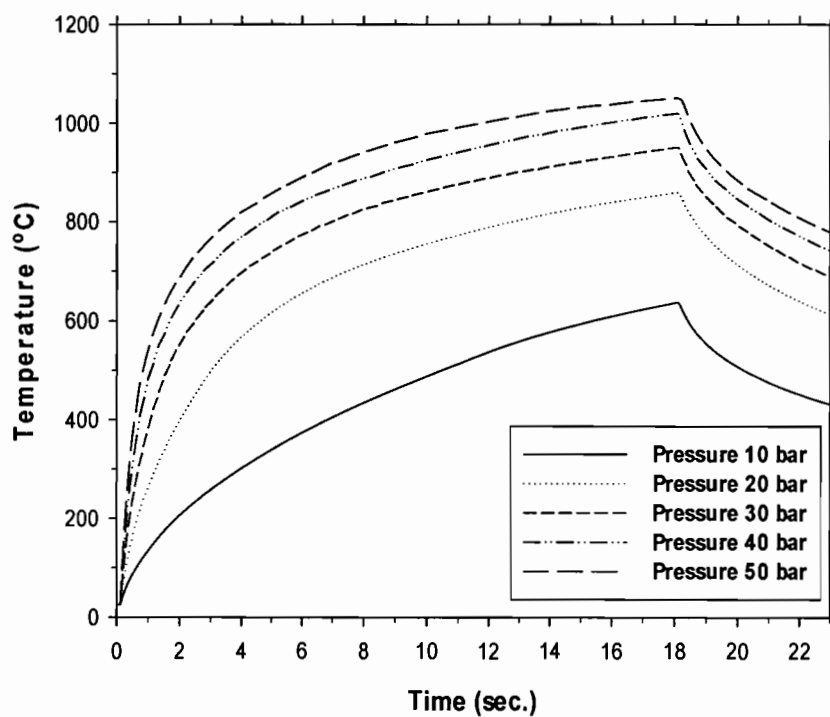
สำหรับวิธีการศึกษาอิทธิพลของตัวแปรในการเชื่อมเพิ่มเติมนั้น จะแบ่งเงื่อนไขออกเป็น 5 ชุด ดังแสดงในตารางที่ 4.2 ซึ่งเป็นการขยายเงื่อนไขจากการวิเคราะห์ผลในตอนที่แล้ว 3 ชุด โดยทำการเพิ่มตัวแปรแรงดันเสียดทาน (P_1) 10 bar และ 50 bar และเวลาเสียดทาน (T_1) 12 sec. และ 25 sec. สำหรับตัวแปรอื่นๆนั้นให้คงที่ ซึ่งจะได้เงื่อนไขใหม่ทั้งหมด 5 ชุด จากนั้นใช้แบบจำลองที่สร้างขึ้นคำนวณผลโดยการจับคู่ให้ตัวแปรพบกันทุกตัวแปร แล้ววิเคราะห์อิทธิพลของแรงดันเสียดทาน (P_2) และ เวลาเสียดทาน (T_1) ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้



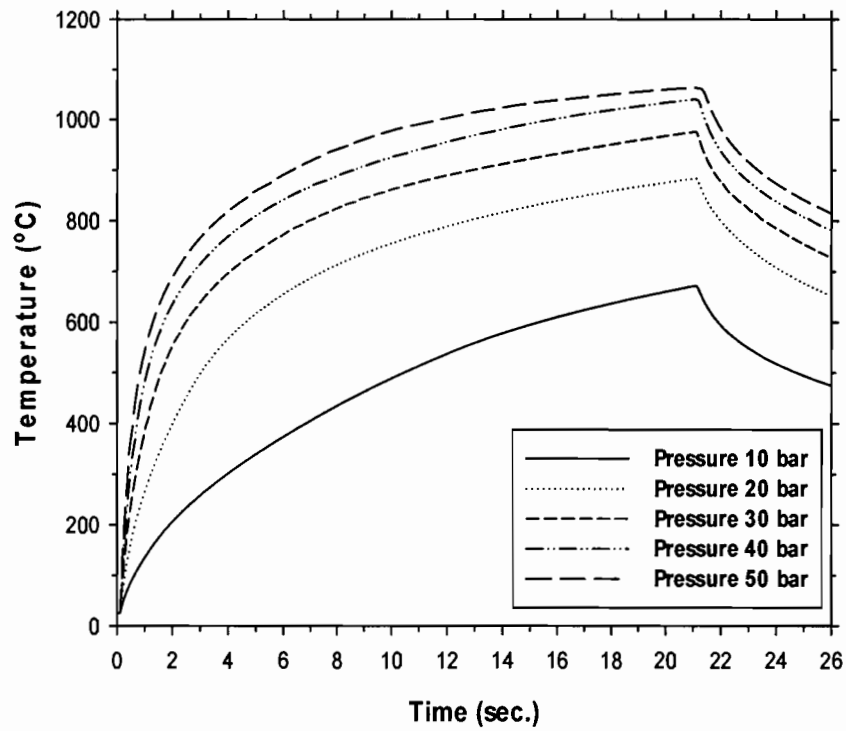
ภาพที่ 4.7 กราฟอิทธิพลของแรงดันเสียดทานที่ส่งผลต่อการกระจายตัวของอุณหภูมิ ($T_1 = 12$ sec.)



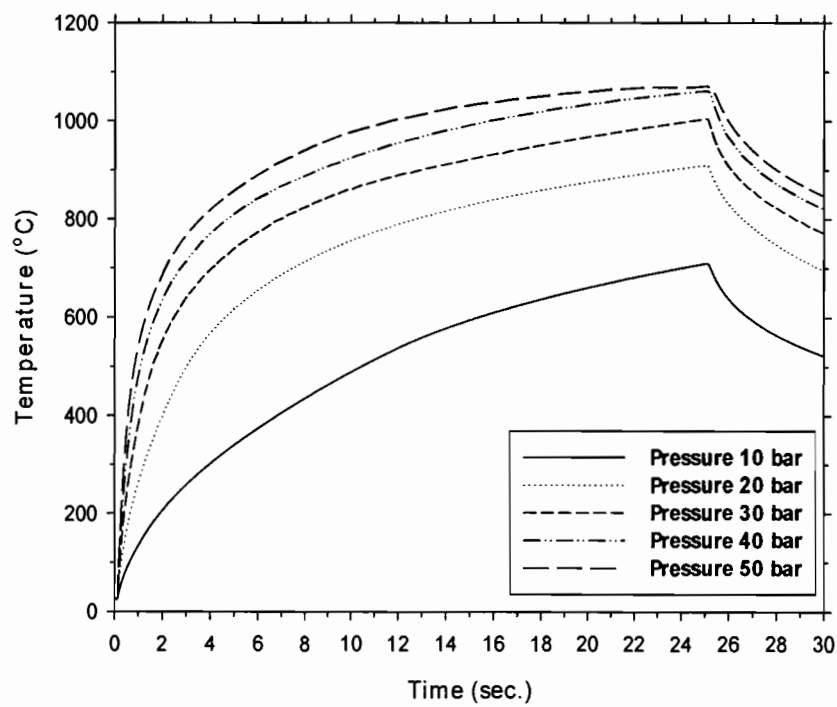
ภาพที่ 4.8 กราฟอิทธิพลของแรงดันเสียดทานที่ส่งผลต่อการกระจายตัวของอุณหภูมิ ($T_1 = 15$ sec.)



ภาพที่ 4.9 กราฟอิทธิพลของแรงดันเสียดทานที่ส่งผลต่อการกระจายตัวของอุณหภูมิ ($T_1 = 18$ sec.)



ภาพที่ 4.10 กราฟอิทธิพลของแรงดันเสียดทานที่ส่งผลต่อการกระจายตัวของอุณหภูมิ ($T_1 = 21$ sec.)



ภาพที่ 4.11 กราฟอิทธิพลของแรงดันเสียดทานที่ส่งผลต่อการกระจายตัวของอุณหภูมิ ($T_1 = 25$ sec.)

4.2.1 อิทธิพลของตัวแปรแรงดันเสียดทาน (P_1)

จากการใช้แบบจำลองโดยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ที่ผ่านการสอบเทียบมาแล้ว นำมาขยายผลเพื่อศึกษาอิทธิพลของแรงดันเสียดทาน (P_1) และเวลาเสียดทาน (T_1) สามารถเขียนเป็นเส้นกราฟความสัมพันธ์ของอุณหภูมิที่หน้าสัมผัสที่เวลาต่างๆ ภายใต้แรงดันเสียดทานและเวลาเสียดทานที่ต่างกัน ดังแสดงในภาพที่ 4.7-4.11 จากภาพที่ 4.7-4.11 จะเห็นว่า ในช่วงแรกของการเชื่อม (ตั้งแต่เริ่มต้นถึงเวลาประมาณ 2-3 sec.) อุณหภูมิตรงหน้าสัมผัสมีอัตราการเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว จนกระทั่งอุณหภูมิดีถึงค่าประมาณ 600 °C หรือ 700 °C อุณหภูมิจึงเริ่มมีอัตราการเพิ่มขึ้นที่น้อยลง และเริ่มเข้าสู่สภาวะเกือบคงตัว ทั้งนี้สังเกตว่า อุณหภูมิจะมีค่าสูงขึ้นจนถึงจุดสิ้นสุดของเวลาเสียดทาน จากนั้นอุณหภูมิก็ตกลงอย่างรวดเร็ว

เมื่อพิจารณาอิทธิพลของแรงดันเสียดทาน (P_1) จากภาพที่ 4.7-4.11 จะเห็นว่า เมื่อค่า P_1 มีค่าสูงขึ้น จะส่งผลให้อัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิมิมากขึ้น ซึ่งจะเห็นได้จากเส้นอุณหภูมิของหน้าสัมผัสในกรณี $P_1 = 50$ bar มีความชันและมีค่าที่สูงกว่ากรณี $P_1 = 40$ bar, 30 bar, 20 bar และ 10 bar ตามลำดับ ในทุกๆเงื่อนไข T_1

นอกจากนี้ หากพิจารณาความสามารถในการเข้าสู่อุณหภูมิสำคัญ เช่น อุณหภูมิประมาณ 720 °C ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่เหล็กคาร์บอนต่ำเริ่มมีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้าง (ดูของคณา ติ, 2553) จะเห็นว่า ในกรณีให้ $P_1 = 50$ bar ชีงงานจะใช้เวลาประมาณ 2 sec. ในการทำให้หน้าสัมผัสมีอุณหภูมิประมาณ 720 °C และหากใช้ $P_1 = 40$ bar จะใช้เวลา 3 sec. หากใช้ $P_1 = 30$ bar จะใช้เวลาประมาณ 4 sec. หากใช้ $P_1 = 20$ bar จะใช้เวลาประมาณ 7 sec. หากใช้ $P_1 = 10$ bar ชีงงานจะไม่มีโอกาสที่อุณหภูมิจะได้ถึง 720 °C เลย จากผลดังกล่าวชี้ให้เห็นว่า การใช้ P_1 ที่สูงขึ้นจะส่งผลให้ ชีงงานสามารถสร้างอุณหภูมิต่รอยเชื่อมได้มากขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่า หากใช้ค่า P_1 น้อยเกินไป (เช่น $P_1 = 10$ bar) ชีงงานจะไม่สามารถไ้ระดับอุณหภูมิไปสู่อุณหภูมิเป้าหมายได้เลย

ตารางที่ 4.3 เปรียบเทียบค่าอุณหภูมิสูงสุด (°C) จากการเพิ่มตัวแปรแรงดันเสียดทาน (P_1) และเวลาเสียดทาน (T_1)

ตัวแปร	$T_1 = 12$ sec.	$T_1 = 15$ sec.	$T_1 = 18$ sec.	$T_1 = 21$ sec.	$T_1 = 25$ sec.
$P_1 = 10$ bar	538	594	636	674	709
$P_1 = 20$ bar	789	828	858	883	909
$P_1 = 30$ bar	889	921	950	975	1,004
$P_1 = 40$ bar	955	991	1,019	1,040	1,061
$P_1 = 50$ bar	1,000	1,032	1,050	1,063	1,070

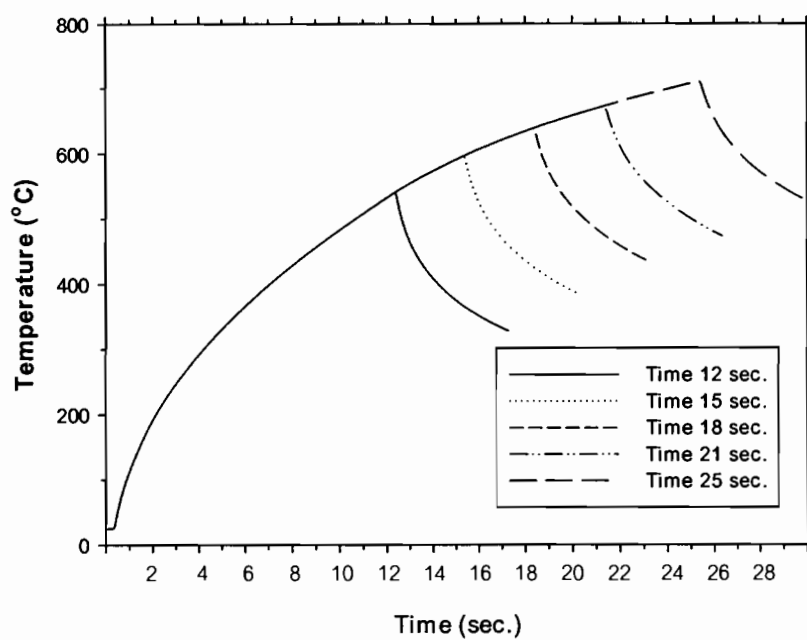
จากตารางที่ 4.3 ซึ่งแสดงค่าอุณหภูมิสูงสุดที่วัดได้โดยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ที่ผิวสัมผัสของชิ้นงานที่เชื่อมภายใต้ P_1 และ T_1 ต่างๆ จากข้อมูลในตารางจะเห็นได้ว่า เมื่อค่า P_1 มีค่าสูงขึ้นจาก 10 bar ถึง 50 bar ค่าอุณหภูมิสูงสุดที่การเชื่อมนั้นสามารถทำได้ก็จะมีค่าสูงขึ้นด้วยในทุกๆเงื่อนไขของ T_1 อย่างไรก็ตาม จะพบว่า ค่าอุณหภูมิที่ทำได้จะมีอัตราการเพิ่มขึ้นที่ต่ำลงเมื่ออุณหภูมิมีค่าเกิน 1,000 °C ซึ่งเกิดจากอุณหภูมิของเหล็กที่เริ่มอึดตัว

4.2.2 อิทธิพลของตัวแปรเวลาเสียดทาน (T_1)

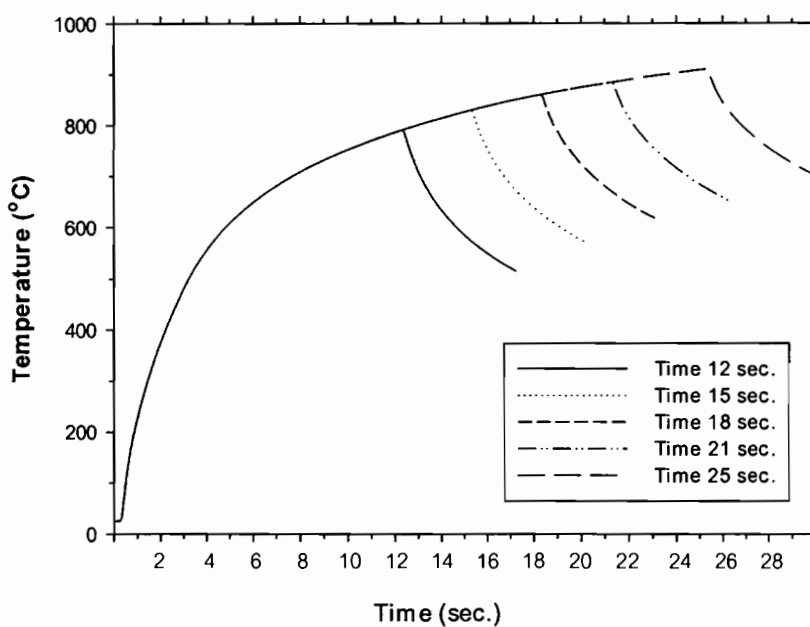
ในกรณีการนำแบบจำลองโดยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ มาใช้ศึกษาอิทธิพลของเวลาเสียดทาน (T_1) ได้ผลการศึกษาดังแสดงในภาพที่ 4.12-4.16 ซึ่งจากข้อมูลในทุกๆกราฟจะเห็นว่า อุณหภูมิของรอยเชื่อมจะมีการเพิ่มขึ้นในอัตราที่คงที่ หากใช้เงื่อนไข P_1 เดียวกัน โดยอุณหภูมิจะวิ่งขึ้นไปเรื่อยๆจนกระทั่งถึงเวลาสุดท้ายของ T_1 อุณหภูมิก็จะลดลง เนื่องจากหมดช่วงเวลาเสียดทาน

ทั้งนี้หากพิจารณาลักษณะกราฟของอุณหภูมิกกรณี $P_1 = 10$ bar ในภาพที่ 4.12 เทียบกับ $P_1 = 20, 30, 40$ และ 50 bar ในภาพที่ 4.13-4.16 ตามลำดับ จะเห็นว่าในกรณีที่ P_1 มีค่าต่ำๆ T_1 จะมีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิมากดังจะเห็นได้จากความชันของเส้นกราฟจะมีค่าสูงอย่างต่อเนื่อง แต่ในกรณีที่ P_1 มีค่าสูง เช่น ในกรณีที่ $P_1 = 40$ หรือ $P_1 = 50$ bar เมื่อ T_1 มีค่ามากขึ้น พบว่า อุณหภูมิมีการเพิ่มขึ้น ไปอีกน้อยมาก หรือ แทบจะไม่เพิ่มเลย ทั้งนี้เนื่องจาก ค่า P_1 ที่สูงจะผลักดันให้ชิ้นงานมีอุณหภูมิไต่ระดับไปจนถึงจุดอึดตัว การเพิ่มค่า T_1 จึงไม่สามารถเพิ่มอุณหภูมिरอยเชื่อมได้มากนัก จากผลการทดลองนี้อาจกล่าวได้ว่า ในกรณีที่ใช้แรงดัน P_1 สูงๆ ไม่จำเป็นต้องใช้เวลาเสียดทาน T_1 นานก็ได้ เพราะไม่เกิดประโยชน์ใดๆเพิ่มเติม นอกจากต้องการใช้อุณหภูมิของชิ้นงานให้กระจายตัวออกไปไกลมากขึ้น

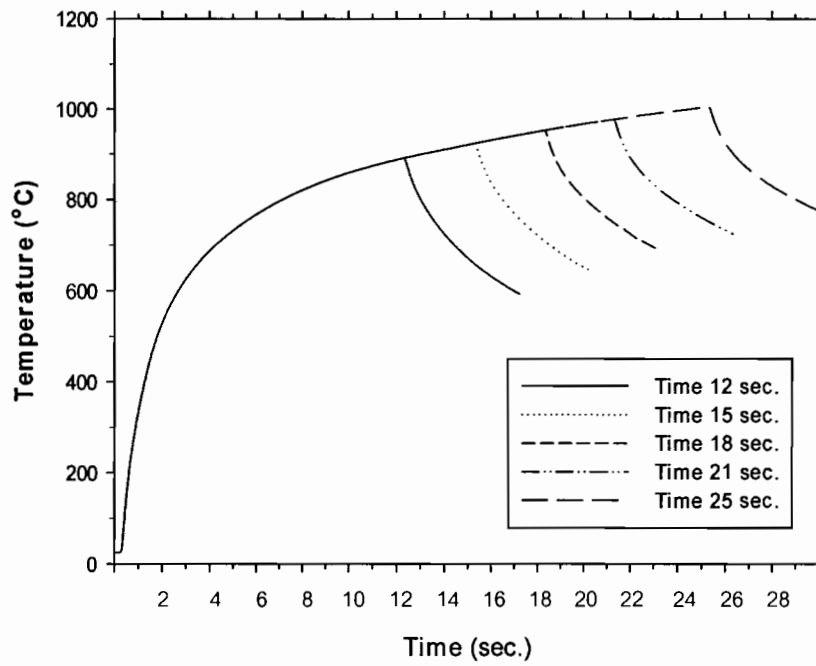
อย่างไรก็ตาม สังเกตได้ว่า ในการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมินั้น ค่า P_1 และ T_1 มีผลด้วยกันทั้งคู่ ดังนั้น จึงอาจต้องพิจารณาควบคู่กันไป ยกเว้นในกรณีที่ P_1 มีค่าสูงมากๆ ค่า T_1 อาจมีอิทธิพลน้อยลง



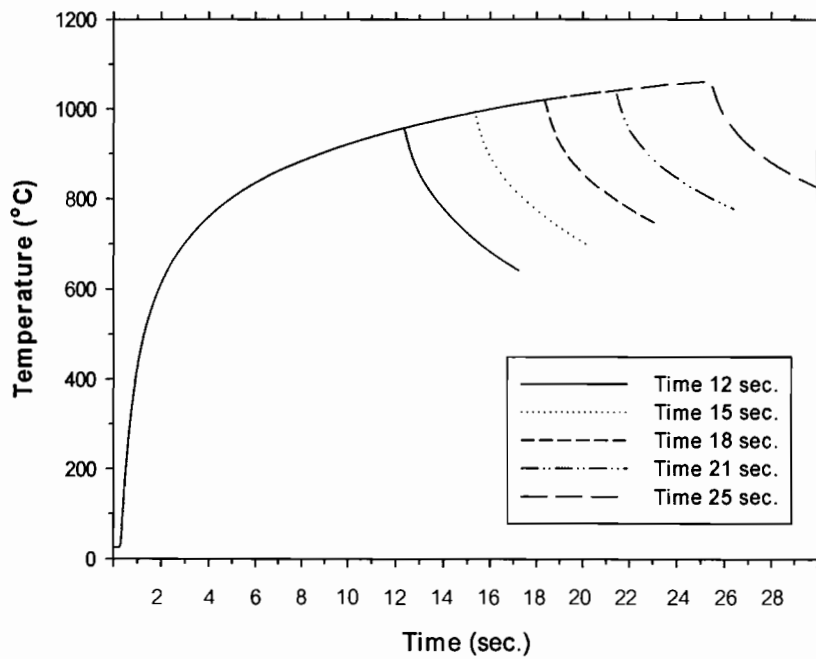
ภาพที่ 4.12 กราฟอิทธิพลของเวลาเสียดทานที่ส่งผลต่อการกระจายตัวของอุณหภูมิ ($P_1 = 10$ bar)



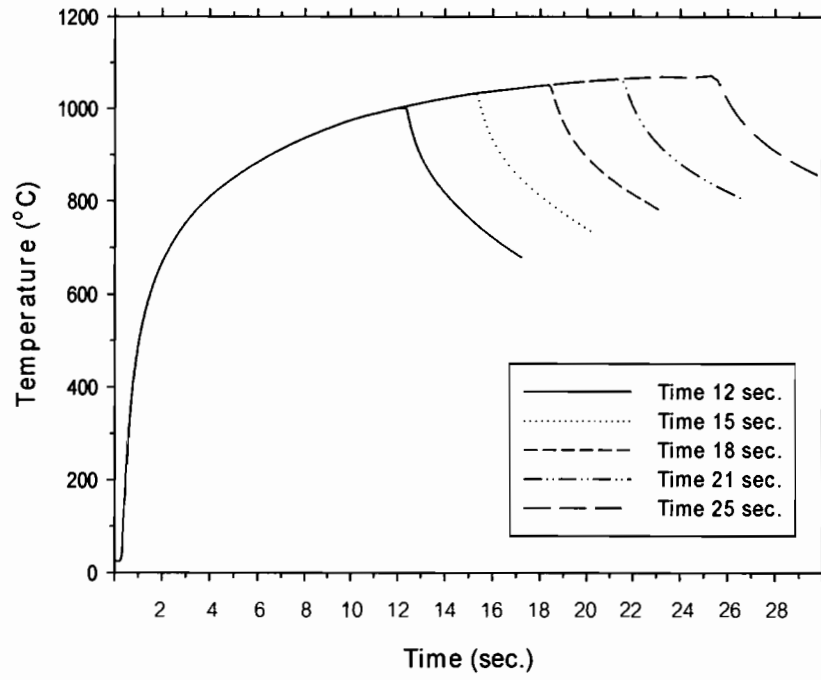
ภาพที่ 4.13 กราฟอิทธิพลของเวลาเสียดทานที่ส่งผลต่อการกระจายตัวของอุณหภูมิ ($P_2 = 20$ bar)



ภาพที่ 4.14 กราฟอิทธิพลของเวลาเสียดทานที่ส่งผลต่อการกระจายตัวของอุณหภูมิ ($P_2 = 30$ bar)



ภาพที่ 4.15 กราฟอิทธิพลของเวลาเสียดทานที่ส่งผลต่อการกระจายตัวของอุณหภูมิ ($P_2 = 40$ bar)



ภาพที่ 4.16 กราฟอิทธิพลของเวลาเสียดทานที่ส่งผลต่อการกระจายตัวของอุณหภูมิ ($P_2 = 50$ bar)

บทที่ 5

สรุปผลและข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้ เป็นการศึกษาการกระจายตัวของอุณหภูมิในเหล็กที่เชื่อมด้วยวิธีเสียดทาน โดยการทดลองวัดอุณหภูมิและการสร้างแบบจำลอง โดยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ แล้วใช้ผลเปรียบเทียบกัน จากการศึกษา พบว่า แบบจำลอง โดยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ที่จำลองขึ้นมา นั้นสามารถทำนายผลและอธิบายผลการกระจายตัวของอุณหภูมิได้ใกล้เคียงกับผลของการทดลอง ในระดับที่ยอมรับได้ นอกจากนี้ยังได้ขยายผลเพื่อศึกษาอิทธิพลของตัวแปรที่สำคัญ 2 ตัวแปร ได้แก่ ตัวแปรแรงดันเสียดทาน (P_1) และตัวแปรเวลาเสียดทาน (T_1) ซึ่งสามารถสรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะได้ ดังรายละเอียดต่อไปนี้

5.1 การกระจายตัวของอุณหภูมิจากการทดลองและแบบจำลองโดยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

จากการวิเคราะห์เทียบผลการกระจายตัวของอุณหภูมิระหว่างการทดลองและแบบจำลองโดยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ สามารถสรุปผลได้ ดังนี้

(1) การวัดอุณหภูมิในเหล็กที่ทำการเชื่อมด้วยวิธีเสียดทาน โดยการใช้สายวัดอุณหภูมิ (Thermo couple K-type) นั้นพบว่า สามารถวัดอุณหภูมิได้ และมีผลสอดคล้องกันกับงานวิจัยของ Yang *et al.* (2004), Nguyen and Weckman (2006), Sirajuddin *et al.* (2012) ซึ่งอุณหภูมิจากการเชื่อมจะพุ่งสูงขึ้นตามแรงดันเสียดทาน (P_1) และเวลาเสียดทาน (T_1) ที่เพิ่มขึ้น โดยพบว่า จุดวัดที่อยู่ใกล้กับแหล่งความร้อนจากการเชื่อม จะได้รับอิทธิพลจากความร้อนมากกว่าจุดวัดอื่นๆที่อยู่ห่างออกไป ซึ่งอุณหภูมิสูงสุดที่วัดได้จากการทดลองอยู่ที่ 1,070 °C

(2) การสร้างแบบจำลองการเชื่อมด้วยวิธีเสียดทาน โดยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ นั้นสามารถทำนายผลการกระจายตัวของอุณหภูมิจากการทดลองได้ โดยให้ผลการคำนวณที่ใกล้เคียงกับการทดลองและสอดคล้องกับงานวิจัยของ Grant *et al.* (2009), Kimura *et al.* (2010), Li and Wang (2011) โดยอุณหภูมิสูงสุดที่คำนวณได้จากแบบจำลองอยู่ที่ 1,080 °C

เมื่อพิจารณาเทียบผลจากค่าความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างการทดลองกับแบบจำลองโดยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ พบว่า ค่าความแตกต่างของอุณหภูมิมากสุดอยู่ที่ 12.4 % ซึ่งอยู่ในเงื่อนไขชุดที่ 1 และค่าความแตกต่างของอุณหภูมิต่ำสุดอยู่ที่ 0.9 % ซึ่งอยู่ในเงื่อนไขชุดที่ 2

และชุดที่ 3 โดยพบว่า อุณหภูมิเพิ่มขึ้นจริงตามตัวแปรแรงดันเสียดทาน (P_1) และเวลาเสียดทาน (T_1) ที่เพิ่มขึ้น ตามลำดับ และเป็นการเพิ่มขึ้นในอัตราคงที่

(3) เมื่อพิจารณาการกระจายตัวของอุณหภูมิในแบบจำลอง พบว่า กรณีเงื่อนไขชุดที่ 3 ซึ่งมีแรงดันเสียดทานสูงสุด เกิดการกระจายตัวของอุณหภูมิในระยะที่ไกลและสูงกว่ากรณีอื่น ทั้งนี้ เนื่องจากการใช้แรงดันเสียดทาน (P_1) ที่สูงกว่านั้น ส่งผลให้หน้าสัมผัสของชิ้นงานเกิดแรงเสียดทานที่มากขึ้น ความร้อนจึงเกิดมากขึ้น นอกจากนี้การใช้แรงดันอัด (P_2) ที่มากยิ่งขึ้นส่งผลให้เกิดการไหลของเนื้อโลหะมากขึ้น จึงเกิดการส่งต่อความร้อนได้มากขึ้นจากการไหลของมวลโลหะร้อน

(4) ในช่วงแรกของการเชื่อม อุณหภูมิที่ได้จากการทดลองมีค่าต่ำกว่าค่าแบบจำลองโดยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ในทุกเงื่อนไข เนื่องจากการทดลอง เครื่องจักรต้องการเวลาในการสร้างแรงบิดก่อนเกิดความร้อน

5.2 การศึกษาอิทธิพลของตัวแปรโดยใช้แบบจำลองโดยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

จากการขยายผลของเงื่อนไขที่ใช้ในการทดลอง เพื่อศึกษาอิทธิพลของตัวแปร 2 ตัวแปร ได้แก่ ตัวแปรแรงดันเสียดทาน (P_1) และตัวแปรเวลาเสียดทาน (T_1) โดยใช้แบบจำลองโดยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ซึ่งสามารถสรุปผลการศึกษาอิทธิพลของตัวแปรได้ดังนี้

5.2.1 อิทธิพลของตัวแปรแรงดันเสียดทาน (P_1)

แรงดันเสียดทาน (P_1) ส่งผลอย่างมากต่อการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิบริเวณผิวสัมผัส ซึ่งพบว่า เมื่อแรงดัน P_1 มีค่าสูงขึ้นจาก 10 bar ถึง 50 bar อุณหภูมิจะเพิ่มขึ้นทุกๆเงื่อนไขของ T_1 โดยการใช้แรงดัน P_1 สูงๆ จะทำให้อุณหภูมิบริเวณผิวสัมผัสเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วและทำให้อุณหภูมิได้ระดับถึงอุณหภูมิอ้างอิงได้รวดเร็วขึ้น และเมื่ออุณหภูมิมียิ่งเกินกว่า 1,000 °C พบว่า อุณหภูมิมีอัตราการเพิ่มขึ้นที่ต่ำลง ซึ่งเกิดจากอุณหภูมิจนกระทั่งเริ่มเกิดการอิมิตัว สำหรับที่แรงดันต่ำ $P_1 = 10$ bar พบว่า อุณหภูมิที่ผิวสัมผัสไม่สามารถได้ระดับถึงอุณหภูมิอ้างอิงได้

5.2.2 อิทธิพลของตัวแปรเวลาเสียดทาน (T_1)

เวลาเสียดทาน (T_1) จะส่งผลอย่างมากเมื่อเป็นการเชื่อมที่ใช้แรงดันเสียดทาน (P_1) ที่ต่ำๆ ซึ่งจะเห็นได้จากความชันของเส้นกราฟ อุณหภูมิจะมีค่าพุ่งสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง แต่ในกรณีที่ P_1 มีค่าสูง เช่นที่ $P_1 = 40$ หรือ $P_1 = 50$ bar แต่เมื่อ T_1 เพิ่มขึ้น พบว่า อุณหภูมิมีการเพิ่มขึ้นไปอีกน้อยมากหรือแทบจะไม่เพิ่มขึ้นเลย ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่า ในกรณีที่ใช้แรงดัน P_1 ที่สูงๆ แล้วไม่จำเป็นต้องใช้เวลาเสียดทาน T_1 นาน เพราะไม่ส่งอิทธิพลใดๆต่ออุณหภูมิตรงผิวสัมผัส นอกจากจะต้องการให้อุณหภูมิกระจายตัวออกไปได้ไกลมากขึ้นเท่านั้น

5.3 ข้อเสนอแนะ

1) มีปัจจัยภายนอกหลายปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อข้อมูลในการทดลอง โดยสาเหตุหลักๆ ที่ส่งผลกระทบต่อการกระจายตัวของอุณหภูมิ ได้แก่ สภาพของแรงดันในการเชื่อมในช่วงเริ่มแรก และปัจจัยอื่นๆ ได้แก่ การกำหนดจุดวัดและเชื่อมสายวัดอุณหภูมิเข้ากับชิ้นงาน รวมถึงสภาพอากาศขณะกำลังเชื่อม ปัจจัยต่างๆเหล่านี้ส่งผลกระทบต่อการกระจายตัวของอุณหภูมิจากการทดลองที่ทำให้เกิดความแตกต่างในระดับที่สูง เมื่อเทียบกับแบบจำลองโดยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ดังนั้นในการศึกษาต่อไปอาจควบคุมตัวแปรเหล่านี้ด้วย

การนำगेจวัดความดัน มาเป็นเครื่องมือวัดการสัมผัสบริเวณพื้นที่เสียดทานน่าจะเป็นวิธีการที่เหมาะสมสำหรับการแก้ปัญหาของแรงดันในการเชื่อมช่วงเริ่มต้น โดยการสั่งให้เครื่องทำงานผ่านช่วงที่แรงดันตกในช่วงแรก จากนั้นเมื่อแรงดันและความเร็วรอบเริ่มเข้าที่แล้วค่อยสั่งให้เริ่มเครื่องเริ่มทำการเชื่อม โดยสังเกตเมื่อเข็มของगेจวัดความดัน เกิดการเปลี่ยนแปลง เมื่อผิวสัมผัสของทั้งสองชิ้นงานเริ่มเกิดการสัมผัสและเสียดทานซึ่งกันและกัน

2) แบบจำลองโดยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ที่สร้างขึ้นเพื่อจำลองการเชื่อมด้วยวิธีเสียดทานนั้น สามารถทำนายผลการกระจายตัวของอุณหภูมิจากการเชื่อมได้ในระดับหนึ่ง อย่างไรก็ตามแบบจำลองโดยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ยังคงต้องพัฒนาและปรับปรุงต่อไป เพื่อให้เกิดผลที่แม่นยำและสามารถประยุกต์ใช้และคำนวณการเชื่อมด้วยวิธีเสียดทานกับวัสดุประเภทอื่นๆได้

เอกสารอ้างอิง

เอกสารอ้างอิง

- [1] ชวงชัย ชูปวา. การศึกษาตัวแปรสำหรับการเชื่อมด้วยวิธีเสียดทานด้วยวิธีทางสถิติ. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต: มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี, 2553.
- [2] ชวงชัย ชูปวา และชวลิต ถิ่นวงศ์พิทักษ์. “อิทธิพลของเวลาในการเสียดทานที่มีผลต่อความแข็งแรงของรอยเชื่อมของเหล็ก AISI 1015 ที่เชื่อมด้วยการเชื่อมเสียดทาน”, วารสารวิชาการ วิศวกรรมศาสตร์ ม.อ.บ. 3(2): 17-24, กรกฎาคม – ธันวาคม, 2553.
- [3] ชวงชัย ชูปวา และชวลิต ถิ่นวงศ์พิทักษ์. “อิทธิพลของเวลาในการเสียดทานและความเร็วรอบในการเสียดทาน ที่มีผลต่อความแข็งแรงของรอยเชื่อมของเหล็ก เบอร์ AISI 1015 ที่เชื่อมเสียดทาน”, วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี. 13(1): 73-81, มกราคม – มีนาคม, 2554.
- [4] ธาณี ประทุมแสน และคณะ. “การศึกษาสมบัติทางกลของรอยเชื่อมแบบความเสียดทานต่อเหล็กกล้าผสมต่ำไร้สนิม”, ในการประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกล ครั้งที่ 24. มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี, 2553.
- [5] ธนรัฐ ศรีวีระกุล. การวัดและเครื่องมือวัดทางอุณหภูมิ 2. ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี, 2552.
- [6] ภาณุฤทธิ์ ยุคตะทัด. “ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ตอนที่ 1”, วารสารโรงเรียนนายเรือ. 7(2): 1-11; เมษายน – มิถุนายน, 2550.
- [7] ปราโมทย์ เดชะอำไพ. ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขในงานวิศวกรรม. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2549.
- [8] ปราโมทย์ เดชะอำไพ. ไฟไนต์เอลิเมนต์ในงานวิศวกรรม. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2550.
- [9] ก่อสุข วีระถาวร. สมการเชิงอนุพันธ์ย่อย (Partial Differential Equation). กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยรามคำแหง, 2542.
- [10] บรรเจิด ดอนเนตรงาม. อิทธิพลรูปร่างสลักแกนหมุนแบบหัวโค้งของการเชื่อมอลูมิเนียมเจือ AA6063-T6 ต่อคุณสมบัติทางกลด้วยกระบวนการเชื่อมเสียดทานหมุนกวน. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต: สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, 2550.

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [11] วีรพงษ์ นิจโรจน์กุล และ อภิชาติ แจ่มบำรุง. “การใช้วิศวกรรมย้อนรอยและระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในการวิเคราะห์ความแข็งแรงของพระพุทธรูป”, วิศวกรรมมก. 23(72): 95-108 ; พฤษภาคม – กรกฎาคม, 2553.
- [12] สุรสิงห์ อารยางค์กูร และชวลิต ถิ่นวงศ์พิทักษ์. “อิทธิพลของแรงดันเสียดทานต่อคุณสมบัติของเหล็กที่เชื่อมด้วยความเสียดทาน”, ใน การประชุมวิชาการมหาวิทยาลัยอุบลราชธานี ครั้งที่ 2: อุบลราชธานี: มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี, 2551.
- [13] สุรสิงห์ อารยางค์กูร, อติศักดิ์ บุตรวงษ์ และชวลิต ถิ่นวงศ์พิทักษ์. “การศึกษาคุณสมบัติของรอยเชื่อมของเหล็กกล่มที่เชื่อมด้วยความเสียดทาน”, วารสารวิชาการมหาวิทยาลัยอุบลราชธานี. 11(1); มกราคม-เมษายน, 2552.
- [14] สถาบันเหล็กและเหล็กกล้าแห่งประเทศไทย. มาตรฐานและสมบัติของเหล็กกล้าที่ใช้งานในงานอุตสาหกรรม, 2554.
- [15] วิชาการ.คอม. “ขั้นตอนการวิเคราะห์ปัญหาทางวิศวกรรมด้วยซอฟต์แวร์ CAE”, บทความวิชาการ. <http://www.vcharkarn.com/varticle/41925>. 2553.
- [16] Alvisé, L. D., Massoni, E. and Walloe, S.J. “Finite element modeling of the inertia friction welding process between dissimilar materials”, Journal of Materials Processing Technology. 125-126: 387-391; 2002.
- [17] Astrom, P. Simulation of Manufacturing Process in Product Development. Department of Applied Physics and Manufacturing Engineering: Lulea University of Technology, 2004.
- [18] Can, A., Sahin, M. and Kucuk, M. “Thermically Evaluation and Modelling of Friction Welding”, Thermically Evaluation and Modelling. 51(1): 5-13; 2009.
- [19] Celik, S. and Ersozlu, I. “Investigation of the mechanical properties and microstructure of friction welding joint between AISI 4140 and AISI 1050 steel”, Material and Design. 30: 970-976; 2009.
- [20] Da Silva, A. A. M. An Investigate on the Structure/Property Relationship of Solid State Welding Process in a Titanium Matrix Composite Alloy. Faculty of Mechanical Engineering: Duisburg-Essen University, Brazil, 2006.

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [21] Eder, P. A., Neto, F. P., An, C. Y., Silva, E. C. “Experimental Determination of Temperature During Rotary Friction Welding of AA1050 Aluminium with AISI 304 Stainless Steel”, J Aerosp. Technol. Manag. SaoJose dos Campus. 4(1): 61-67; 2012.
- [22] Ellis, C.R.G. “Continuous drive friction welding of mild steel”, Welding Research Supplement. 51(169): 183-197; 1972.
- [23] Fletcher, M.J. Friction welding. London: Mills and boon limited, 1972.
- [24] Grant, B., Withers, P.J., Baxter, G., Rowlson, M. “Finite element process modeling of inertia friction welding advance nickel-based superalloy”, Materials Science and Engineering A. 512(1-2): 366-375; 2009.
- [25] Hazman, S. “Mechanical evaluation and thermal modelling of friction welding of mild steel and aluminium”, Journal of Materials Processing Technology. 210(3): 1209-1216; 2010.
- [26] Kimura, M., Kimura, M., Inoue, H., Kusaka, M.,Kaizu, K. and Fuji, A. “Analysis of friction welding torque and weld interface temperature during friction process of steel friction welding”, Journal of Solid Mechanics and Materials Engineering. 4(3): 401-413; 2010.
- [27] Kumar, S., Kumar, R., Singla, Y. K. “To study the mechanical behaviour of friction welding of aluminium alloy and mild steel”, International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research. 1(3): 43-50; 2012.
- [28] Li, W. and Wang, F. “Modeling of continuous drive friction welding of mild steel”, Materials Science and Engineering A. 528(18): 5921-5926; 2011.
- [29] Li, W., Shi, S., Wang, F., Zhang, Z., Ma, T. and Li, J. “Numerical simulation of friction welding processes based on ABAQUS environment”, Journal of Engineering Science and Technology Review. 5(3): 10-19; 2012.
- [30] Li, W., Shi, S. X., Wang, F. F., Ma, T. J., Li, L., Gao, D. L. and Vairis, A. “Heat reflux in flash and its effect on joint temperature history during linear friction welding of steel”, International Journal of Thermal Sciences. 67(216): 192-199; 2013

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [31] Nguyen, T.C. and Weckman D. C. “A thermal and microstructure evolution model of direct-drive friction welding of plain carbon steel”, Metallurgical And Materials Transactions. 37(2): 275-292; 2006.
- [32] Ogawa, K. “Friction Welding of Aluminium Alloy and Carbon Steel Using Insert Metal”, Bulletin of University of Osaka Prefecture. 43(2): 113-117; 1994.
- [33] Rajamani, G. P., Shunmugam, M. S., and Rao, K. P., “Parameter optimization and properties of friction welded quenched and tempered steel”, Welding Research Supplement. 225-230, June 1992.
- [34] Ramadhan, H. and Kako, S. A. “Efficiency of Dissimilar Friction Welding (Super Duplex Stainless Steel SAF 2507-Mild Steel) Joint”, AI-Rafidain Engineering. 21(1), 2013.
- [35] Rich, T. and Roberts, R. “A plastic model is designed to theoretically describe the movement of interface material during the forging phase of friction welding”, Welding Research Supplement. March, 1971.
- [36] Rud-di, L., Jing, L., Jiang, X., Fu, Z., Ke, Z. and Cheng, J. “Friction heat production and atom diffusion behaviors during Mg-Ti rotating friction welding process”, Transactions of Nonferrous Metals Society of China. 22(11): 2665-2671; 2012.
- [37] Sahin, M. “Simulation of friction welding using a developed computer program”, Journal of Materials Processing Technology. 153(3): 1011-1018; 2004.
- [38] Sahin, M. “Joining with friction welding of high-speed steel and medium-carbon steel”, Journal of Materials Processing Technology. 168:202-210, 2005.
- [40] Sirajuddin, E. K. “Study of transient temperature distribution in a friction welding process and its effect on its joint”, International Journal of Computational Engineering Research. 2(5): 2250-3005; 2012.
- [41] Takeshi, H., Kiyoshi, M. and Ryoji, T. “Numerical simulation of new friction welded joint”, International Symposium on Advanced Science and Technology in Experimental Mechanics. 2012.

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [42] Wither, P. J. and Preuss, M. "Simulation of rotational welding operation", Metals Process Simulation. Volume 22(11): 432-442; 2010.
- [43] Weldguru.com. "Guide to the Friction Welding Process" Process.
www.weldguru.com/friction-weld.html. 2557.
- [44] Yang, H. "Effect of austenite conditioning on austenite/ferrite phase transformation of HSLA steel", Material Transaction. 45(1): 137-142; 2004.
- [45] Zaeh, M. F. and Poecher, A. "Vibration in friction welding", Prod. Eng. Res. Devel. 5(4): 159-165, 2011.

ภาคผนวก

ผลงานตีพิมพ์จากวิทยานิพนธ์นี้

บทความที่นำเสนอในที่ประชุมทางวิชาการระดับชาติ

- [1] ปกรณ์ อุ่นไธสง, ขวลิต ถิ่นวงศ์พิทักษ์ และ รัชดา โสภาคะยัง. “การศึกษาการกระจายตัวของอุณหภูมิในกระบวนการเชื่อมเสียดทาน”, ใน การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 26. 15-17 ตุลาคม 2555 จังหวัดเชียงราย โดยสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, paper no. AMM 2029.

บทความที่ตีพิมพ์ในวารสารวิชาการระดับชาติ

- [2] ปกรณ์ อุ่นไธสง, ขวลิต ถิ่นวงศ์พิทักษ์, สมญา ภูณะยา และ รัชดา โสภาคะยัง. “การศึกษาการกระจายตัวของอุณหภูมิในเหล็กที่เชื่อมด้วยวิธีเสียดทานโดยใช้วิธีการจำลองด้วยคอมพิวเตอร์”, วารสารวิศวกรรมสาร มข. ปีที่ 42 ฉบับที่ 2 ประจำเดือน เมษายน – มิถุนายน 2558

การศึกษาการกระจายตัวของอุณหภูมิในกระบวนการเชื่อมเสียดทาน The Study of Thermal Distribution in Friction Welding

ปกรณ์ อุ่นไธสง*, ขวลิต ถิ่นวงศ์พิทักษ์ และ รัชดา โสภาคะยัง

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี อ.วารินชำราบ จ.อุบลราชธานี 34190

*ติดต่อ: E-mail: papa_a15@hotmail.com เบอร์โทรศัพท์ 045-353309, เบอร์โทรสาร 045-353308

บทคัดย่อ

ในกระบวนการเชื่อมเสียดทานมีปัจจัยหลายปัจจัยที่มีผลต่อคุณภาพและความแข็งแรงของรอยเชื่อม ซึ่งงานวิจัยนี้ได้ศึกษาปัจจัยที่ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างชัดเจนในการเชื่อมเสียดทาน คือ การกระจายตัวของอุณหภูมิระหว่างทำการเชื่อมเสียดทาน หรือ ความร้อนที่เกิดขึ้นจากการเชื่อมเสียดทาน วัสดุที่ใช้ทำการทดลองเป็นเหล็กคาร์บอนปานกลาง AISI 1040 ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 13 mm. ยาว 70 mm. ภายใต้เงื่อนไขการทดลอง ได้แก่ เวลาในการเสียดทาน 10 sec แรงดันในการเสียดทาน 30 bar เวลาในการใช้แรงอัด 5 sec แรงดันในการอัด 30 bar และความเร็วรอบในการเสียดทาน 1,300 rpm ทำการวัดอุณหภูมิระหว่างทำการเชื่อมเสียดทานโดยใช้กล้องอินฟราเรด ได้อุณหภูมิสูงสุดอยู่ที่ 1,122 °C บทความนี้จะนำเสนอลักษณะการกระจายตัวของอุณหภูมิในช่วงเวลาต่างๆ เพื่อใช้อธิบายปรากฏการณ์หลังจากการเชื่อม

คำหลัก: กระบวนการเชื่อมเสียดทาน การกระจายตัวของอุณหภูมิ เหล็กคาร์บอนปานกลาง

Abstract

There are many factors in friction welding process that result to quality and strength of joint. This study is aimed in to investigate the most important factor which is temperature distribution. The experiment was conducted using AISI 1040 steel rods. The specimen was 13 mm. of diameter and 70 mm. long. The welding condition was 10 sec of friction time, 30 bar of friction pressure, 5 sec of upset time, 30 bar of upset pressure and 1,300 rpm of rotational speed. The temperature distribution was recorded by infrared camera. The maximum temperature during welding process was 1,122 °C. This paper presents temperature distribution through the welding process. The data in useful to explain the property of joint after welding.

Keywords: Friction welding process Thermal distribution steel rods

1. บทนำ

การเชื่อมนับเป็นกระบวนการที่สำคัญในงานทางด้านวิศวกรรม จึงมีการคิดค้นและพัฒนาเทคนิคการเชื่อมในรูปแบบต่างๆอย่างต่อเนื่อง สำหรับกระบวนการเชื่อมเสียดทานนั้นถือว่าได้รับ

ความนิยมมากขึ้นจากในอดีตจนถึงปัจจุบัน เนื่องจากข้อดีหลายๆด้านของกระบวนการเชื่อมเสียดทาน เช่น สามารถเชื่อมวัสดุที่ต่างชนิดกันได้ ได้งานที่ละเอียด เชื่อมติดกันทั้งพื้นที่หน้าตัด ไม่ใช่วัสดุที่เป็นตัวช่วยประสาน จากคุณสมบัติที่เกิดขึ้น



ของกระบวนการเชื่อมเสียดทานเองส่งผลโดยตรงต่อคุณภาพและความแข็งแรงของรอยเชื่อม

โดยมีผู้ที่ศึกษาวิจัยเกี่ยวกับอุณหภูมิที่เกิดขึ้นในระหว่างการเชื่อมเสียดทาน ได้แก่ Hazman Seli , Ahmad Izani Md. [1] ได้ทำการทดลองวัดอุณหภูมิการเชื่อมเสียดทาน ระหว่างเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำกับอลูมิเนียม ทำการทดลองโดยใช้ Thermo couple (Typ-k) โดยเชื่อมสาย Thermo couple ติดกับอลูมิเนียมซึ่งเป็นชิ้นงานที่อยู่กับที่มีระยะห่างจากจุดเสียดทาน 2 mm และ 10 mm เงื่อนไขในการเชื่อมเสียดทานมีความเร็วรอบ 900 rpm แรงดันในการเสียดทาน 15 MPa เวลาในการเสียดทาน 3.15 Sec เวลาในการอัด 0.86 Sec แรงดันในการอัด 25 MPa ผลการทดลองพบว่า การถ่ายเทความร้อนจากการเชื่อมเสียดทานมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นสูงสุด 568 °C ที่เวลา 3.15 Sec ระยะ 2 mm และ อุณหภูมิค่อยๆลดลงเหลือ 112 °C ที่เวลา 6.3 Sec ในระยะ 10 mm Wen-Ya Li , Tiejun Ma , Jinglong Li. [2] ได้ศึกษาการเชื่อมเสียดทานเชิงเส้นหรือในแนวเส้นตรง โดยแบบคำนวณทางคณิตศาสตร์ ใช้โปรแกรม ABAQUS/Explicit 2D ชิ้นงานที่ใช้ทดลองเป็น อลูมิเนียมอัลลอยด์ ทั้งสองชิ้นงาน มีขนาดความกว้าง 17 mm ความยาว 40 mm ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษา ได้แก่ ความกว้าง (Amplitude) 2.5,3.5,4.5 mm ความถี่ (Oscillation frequency) 25,35,45 Hz และเวลาในการเสียดทาน (Friction pressure) 20,40,60 MPa จากผลการทดลองพบว่า ที่เวลา 1 Sec อุณหภูมิอยู่ที่ 974.72 °C ที่ 2 Sec อุณหภูมิอยู่ที่ 1015.02°C ที่ 3 Sec อุณหภูมิอยู่ที่ 1003.31 °C ที่ 4 Sec อุณหภูมิอยู่ที่ 1002.87°C Wenya Li , Feifan Wang. [3] ได้ทำการศึกษาทดลอง โดยการใช้โปรแกรม ABAQUS ออกแบบทดลองการเชื่อมเสียดทานโดยเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ ในแบบ 2D มีเงื่อนไขดังนี้ คือ เวลาในการเสียดทาน 3.5 Sec เวลาในการอัด 0.1 Sec แรงดันในการเสียด

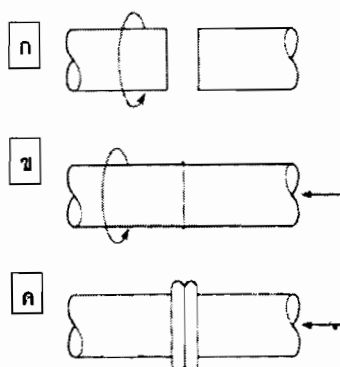
ทาน 200 MPa แรงดันในการอัด 400 MPa และความเร็วยรอบ 1,200 rpm ผลการทดลองพบว่าอุณหภูมิเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงเวลาต่างๆ โดยที่เวลา 0.1 – 1.5 Sec อุณหภูมิอยู่ที่ประมาณ 1,000 °C และเพิ่มขึ้นถึงประมาณ 1,200 °C ที่เวลา 3.5 Sec

ในส่วนของการศึกษาเกี่ยวกับการกระจายตัวของอุณหภูมิระหว่างการเชื่อมเสียดทานนี้ ผู้ที่ศึกษาเรื่องการเชื่อมเสียดทานยังให้ความสำคัญน้อย งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการกระจายตัวของอุณหภูมิระหว่างทำการเชื่อมเสียดทานและการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของชิ้นงานหลังการเชื่อม

2. เครื่องมือและวิธีการทดลอง

2.1 แนวคิดเบื้องต้นของกระบวนการเชื่อมเสียดทาน

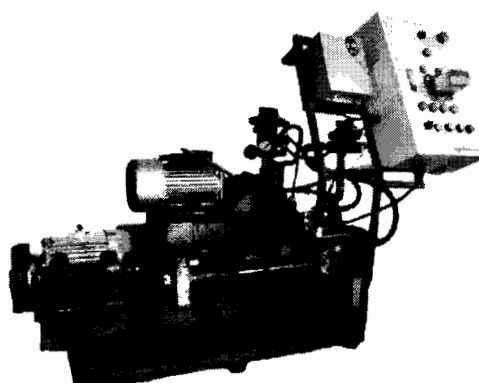
หลักการเชื่อมเสียดทาน อาศัยหลักการเปลี่ยนแรงเสียดทานของการเชื่อมเสียดทานเป็นพลังงานความร้อนให้พื้นที่สัมผัสของชิ้นงานหลอมติดกันที่เวลาค่าหนึ่ง ในการเชื่อมนั้นทำได้โดยการหมุนชิ้นงานหนึ่งด้วยความเร็วและแรงบิดค่าหนึ่ง ดังได้แสดงในรูปที่ 1 (ก) จากนั้นเพิ่มแรงดัน ดันชิ้นงานให้สัมผัสและเสียดสีกันกับชิ้นงานที่ยึดติดอยู่กับที่ โดยกำหนดเวลาในการเสียดทานที่เหมาะสมขึ้นมาจนชิ้นงานทั้งสองเกิดความร้อนและหลอมละลายติดกันดังได้แสดงในรูปที่ 1 (ข) ขั้นตอนสุดท้ายเป็นขั้นตอนของการเพิ่มแรงดันในการอัด อัดชิ้นงานอีกครั้งหนึ่งเพื่อให้ชิ้นงานเกิดการเชื่อมติดกันมากขึ้น และแข็งแรง ดังแสดงในรูปที่ 1 (ค) หลักการดังกล่าวอาศัยตัวแปรที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ ความเร็วรอบ แรงบิด ระยะเวลาในการเพิ่มแรงในแนวแกน และค่าของแรงดันในแนวแกนที่เพิ่มในแต่ละช่วงของการเชื่อม เป็นต้น



รูปที่ 1 หลักการเบื้องต้นของกระบวนการเชื่อม
เสียดทาน

2.2 เครื่องเชื่อมเสียดทาน

เครื่องเชื่อมเสียดทานมีหลักการทำงานตามขั้นตอนต่างๆ ที่ได้แสดงไว้แล้วในตอนต้น ซึ่งเกือบจะทั้งหมดของเครื่องเชื่อมเสียดทานอาศัยการปรับตั้งค่าก่อนทำการทดลองที่เป็นแบบ Manual ผู้ทำการทดลองเองจะต้องมีความละเอียดและรอบคอบในการปรับตั้งค่าก่อนทำการทดลองทุกครั้ง เครื่องเชื่อมเสียดทานที่ใช้ในการศึกษาเป็นเครื่องต้นแบบที่ได้พัฒนาตามแนวคิดและหลักการทำงานเบื้องต้น โดยมีมอเตอร์ขนาด 5 Hp เป็นต้นกำลังในการหมุนชิ้นงาน และระบบไฮดรอลิกใช้ในการสร้างแรงดันอัดชิ้นงานเพื่อเชื่อมให้ติดกัน เครื่องเชื่อมนี้ทำงานโดยใช้ระบบ Electric Solenoid Valve ควบคุมแรงดันไฮดรอลิกในช่วงต่างๆ ใช้ Timer ควบคุมเวลาการเปลี่ยนค่าแรงดันในช่วงต่างๆ ของระบบ ในส่วนของการควบคุมความเร็วรอบการหมุนของชิ้นงานที่จะทำการเชื่อม นั้นใช้ Inverter ขนาด 7.5 Hp ช่วยควบคุมความเร็วรอบในการทำงานขณะทำการเชื่อมเสียดทาน รูปที่ 2 แสดงเครื่องเชื่อมเสียดทานที่ใช้ในการศึกษา



รูปที่ 2 เครื่องเชื่อมเสียดทาน

2.3 วัสดุที่ใช้ในการทดลอง

วัสดุที่ใช้ทำการทดลองในงานวิจัยนี้เป็นเหล็กคาร์บอนปานกลาง AISI1040 (Medium Carbon Steel) ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 13 mm. ยาว 70 mm. ทั้งสองชิ้นงาน ดังแสดงในรูปที่ 3

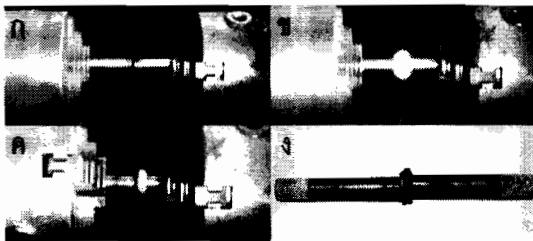


รูปที่ 3 เหล็กคาร์บอนปานกลาง (AISI 1040)
(Medium Carbon Steel) ที่เชื่อมเสร็จ

2.4 วิธีการทดลอง

วิธีการทดลองนี้ใช้เครื่องเชื่อมเสียดทานดังแสดงในรูปที่ 2 เชื่อมวัสดุชนิดเดียวกัน คือ เหล็กกล้าคาร์บอนปานกลาง AISI 1040 (Medium Carbon Steel) ภายใต้เงื่อนไขการทดลอง ได้แก่ เวลาในการเสียดทาน 10 sec แรงดันในการเสียดทาน 30 bar เวลาในการใช้แรงอัด 5 sec แรงดันในการอัด 30 bar และความเร็วรอบในการเสียดทาน 1,300 rpm ทำการวัดอุณหภูมิระหว่างทำการเชื่อมเสียดทานโดยใช้กล้องอินฟาเรด (VarioCAM® high resolution 1.23 Megapixel)

จากเงื่อนไขข้างต้น เริ่มทำการทดลอง ชิ้นงานทางด้านซ้ายหมุนด้วยความเร็วรอบ 1,300 rpm ดังแสดงในรูปภาพที่ 4 (ก) จากนั้นชิ้นงานด้านขวาเคลื่อนที่เข้าเสียดทานด้วยเวลา 10 sec และแรงดันเสียดทาน 30 bar แสดงในรูปภาพที่ 4(ข) จนชิ้นงานทั้งสองเกิดความร้อนและหลอมติดกัน เมื่อครบเวลาเสียดทานมอเตอร์จะหยุดหมุนและดันชิ้นงานทางด้านขวาโดยใช้แรงดันในการอัด 30 bar เป็นเวลา 5 Sec ดังแสดงในรูปภาพที่ 4(ค) ในขณะที่ทำการเชื่อมเสียดทานก็ใช้กล้องอินฟราเรด (VarioCAM® high resolution 1.23 Megapixel) วัดอุณหภูมิไปพร้อมๆกัน

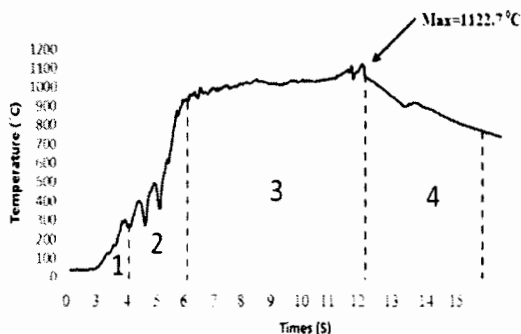


รูปที่ 4 กระบวนการเชื่อมเสียดทาน

3. ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง

3.1 ผลการวิเคราะห์อุณหภูมิ

จากการทดลองตามกระบวนการเชื่อมเสียดทานและทำการวัดอุณหภูมิโดยกล้องอินฟราเรด ขณะทำการเชื่อมเสียดทาน ทำให้ได้กราฟอุณหภูมิดังนี้

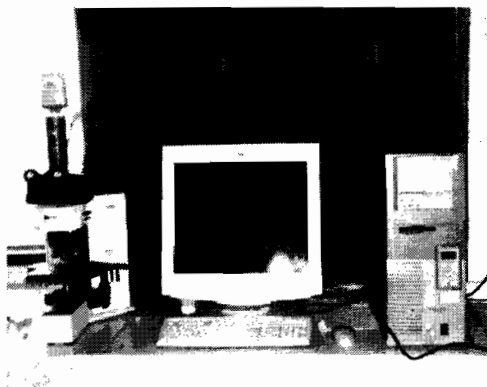


รูปที่ 5 กราฟแสดงอุณหภูมิในช่วงเวลาต่างๆ

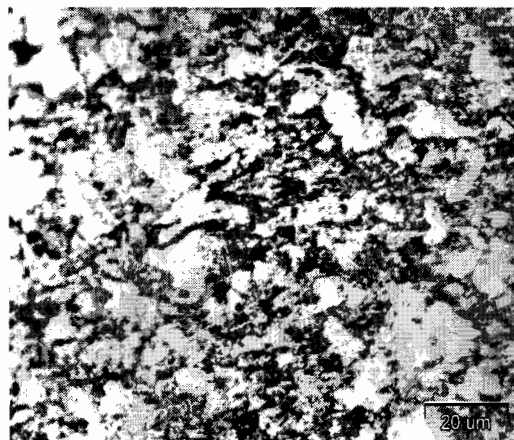
จากรูปที่ 5 จะเห็นได้ว่าเมื่อเครื่องเริ่มทำงานและชิ้นงานเกิดการเสียดทาน จนเกิดความร้อนเปรียบเหมือนการอุ่นพื้นที่หน้าตัดของชิ้นงาน ทำให้เกิดความร้อนทั่วทั้งพื้นที่หน้าตัดดังแสดงในรูปที่ 5 ช่วงที่ 1 จากกราฟอุณหภูมิยังไม่สูงมาก อุณหภูมิอยู่ที่ประมาณ 300°C ที่เวลา 4 Sec ความร้อนที่เกิดจากการเสียดทานของชิ้นงานทั้งสองเพิ่มมากขึ้น เห็นได้จากกราฟที่มีแนวโน้มสูงขึ้น พร้อมทั้งความร้อนเกิดการถ่ายเทที่อุณหภูมิห้อง ดังแสดงในรูปที่ 5 ช่วงที่ 2 ที่เวลา 4-6 Sec อุณหภูมิเพิ่มขึ้นอยู่ที่ประมาณ 900 °C จากการเสียดทานที่แรงขึ้นทำให้อุณหภูมิเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว และเริ่มคงตัว อยู่ในช่วงที่ 3 ของกราฟ ดังแสดงในรูปที่ 5 ช่วงที่ 3 อุณหภูมิอยู่ที่ประมาณ 1,100 °C และสูงสุดที่ 1,122 °C ในระยะเวลา 6-12 Sec ช่วงสุดท้ายของการกระจายตัวของอุณหภูมิหลังจากที่มอเตอร์หยุดหมุนพร้อมทั้งเพิ่มแรงอัดชิ้นงานทั้งสองชิ้นให้ติดกัน อุณหภูมิลดลงอย่างต่อเนื่องตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 5 ช่วงที่ 4

3.2 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค

ในการทดลองนี้ยังสามารถอธิบายการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างจุลภาคและค่าความแข็งแรงของรอยเชื่อม โดยนำชิ้นงานที่ผ่านการทดลองเชื่อมเสียดทานมาส่องดูโครงสร้างจุลภาคโดยกล้องจุลทรรศน์ ซึ่งได้ผลดังแสดงในรูปที่ 7 และ 8



รูปที่ 6 อุปกรณ์และกล้องจุลทรรศน์ ที่ใช้ในการวิเคราะห์ผลและถ่ายภาพของโครงสร้าง



รูปที่ 8 ภาพถ่ายเกรนของชิ้นงานหลังทำการเชื่อมเสียดทาน



รูปที่ 7 ภาพถ่ายเกรนของชิ้นงานก่อนทำการเชื่อมเสียดทาน

จากรูปที่ 7 แสดงภาพโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานก่อนการเชื่อม ซึ่งจะเห็นว่าโครงสร้างก่อนการเชื่อมนั้นประกอบด้วย เฟอร์ไรท์ (Ferrite) กับ เพียร์ไลท์ (Pearlite) ซึ่งจะคงสภาพในระบบผลึกแบบ BCC (Body Centered Cubic) จนกว่าอุณหภูมิประมาณ 700°C ส่วนในรูปที่ 8 เป็นภาพโครงสร้างจุลภาคหลังจากการเชื่อม ซึ่งจะเห็นว่าโครงสร้างจุลภาคเปลี่ยนมาเป็น เฟอร์ไรท์ (Ferrite) และ ออสเทนไนท์ (Austenite) ซึ่งมีลักษณะของระบบผลึกแบบ FCC (Face Centered Cubic) จะเกิดโครงสร้างในลักษณะนี้ที่อุณหภูมิระหว่าง $700^{\circ}\text{C} - 1,200^{\circ}\text{C}$ ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองที่ได้แสดงไว้ในกราฟข้างต้น ดังแสดงในรูปที่ 5

ในส่วนของความแข็งแรงของรอยเชื่อมนี้ พบว่า รอยเชื่อมมีค่าความแข็งแรงที่สูงขึ้นจากความแข็งแรงเดิม 704.44 MPa มาเป็น 828.94 MPa ดังแสดงในตารางที่ 1 คุณภาพเพิ่มขึ้นคิดเป็น 17%

ตารางที่ 1 แสดงค่าความแข็งแรงของชิ้นงาน

ชนิดของวัสดุ	ค่าความแข็งแรงเฉลี่ย (MPa)	จำนวนชิ้นงาน



	ก่อนเชื่อม	หลังเชื่อม	
AISI 1040	704.44	828.94	3

4. สรุป

จากการศึกษาลักษณะการกระจายตัวของอุณหภูมิ สามารถแยกออกเป็นช่วงของลักษณะการถ่ายเทออกเป็น 4 ช่วง คือ ช่วงที่ 1 ช่วงของการอุ่นชิ้นงาน อุณหภูมิอยู่ที่ประมาณ 300°C ที่เวลา 4 Sec ช่วงที่ 2 ช่วงของการเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วของอุณหภูมิ อุณหภูมิเพิ่มขึ้นอยู่ที่ประมาณ 900 °C ที่เวลา 4-6 Sec ช่วงที่ 3 ช่วงของการคงที่ของอุณหภูมิ อุณหภูมิอยู่ที่ประมาณ 1,100 °C และสูงสุดที่ 1,122 °C ในระยะเวลา 6-12 Sec และช่วงที่ 4 ช่วงการลดลงของอุณหภูมิ อุณหภูมิลดลงตามลำดับ

ในส่วนของโครงสร้างจุลภาคนั้น ช่วงก่อนการเชื่อมโครงสร้างประกอบด้วยเฟอร์ไรท์ (Ferrite) กับ เพียร์ไลท์ (Pearlite) อุณหภูมิประมาณ 700 °C หลังการเชื่อม โครงสร้างจุลภาคเปลี่ยนมาเป็น เฟอร์ไรท์ (Ferrite) และ ออสเทนไนท์ (Austenite) อุณหภูมิระหว่าง 700 °C – 1,200 °C และการวัดค่าความแข็งแรงที่รอยเชื่อม มีค่าความแข็งแรงเพิ่มขึ้นจาก 704.44 Mpa เป็น 828.94 Mpa คิดเป็น 17%

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ บริษัท Entech Associate Co.,Ltd ที่ให้การสนับสนุนกล้องวัดอุณหภูมิในการทดลอง และคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี ที่ให้การสนับสนุนเครื่องมือในงานวิจัย

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Hazman Seli, Ahmad Izani Md., (2010). Mechanical evaluation and thermal modeling of friction welding of mild steel and aluminium, Journal of Materials Processing Technology 210(2010) 1209-1216
- [2] Wen-Ya Li , Tiejun Ma , Jinglong Li.,(2009). Numerical simulation of linear friction welding of titanium alloy : Effect of processing parameter, Material and Design 31 (2010) 1497-1507
- [3] Wenya Li , Feifan Wang.,(2011). Modeling of continuous drive friction welding of mild steel, Materials Science and Engineering A 528(2011) 5921-5926



การศึกษาการกระจายตัวของอุณหภูมิในเหล็กที่เชื่อมด้วยวิธีเสียดทานโดยวิธีการจำลองด้วยคอมพิวเตอร์

The study of temperature distribution in steel rods welded by friction welding using computer simulation

ปกรณ อุ่นโธสง, ชวาลิต ถิ่นวงศ์พิทักษ์, รัชดา โสภาคะยัง และสมญา ปูนะยา

Pakorn Aunteisong, Chawalit Thinwongpituk, Ratchada Sopakayang and somya poonaya

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี จังหวัดอุบลราชธานี 34190

Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Ubon Ratchathani University, Ubon Ratchathani,

34190, Thailand.

Received

Accepted

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการกระจายตัวของอุณหภูมิในเหล็กที่เชื่อมด้วยวิธีเสียดทาน โดยศึกษาจากการสร้างแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์และการคำนวณโดยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Analysis, FEA) และเงื่อนไขที่ใช้คำนวณเป็นแบบ 2D ซึ่งผลที่ได้จากการคำนวณของแบบจำลอง FEA จะถูกเทียบกับผลการทดลองวัดอุณหภูมิ วัดจุดที่ใช้ในการทดลองเป็นวัสดุประเภทเหล็กคาร์บอนต่ำ ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 15 mm ยาว 80 mm ระยะที่วัดอุณหภูมิห่างจากพื้นที่หน้าตัด 3, 6 และ 9 mm ทดลองภายใต้เงื่อนไขที่แตกต่างกัน 3 ชุด เพื่อให้เกิดแนวโน้มการกระจายตัวของอุณหภูมิที่แตกต่างกัน จากการเปรียบเทียบผลแบบจำลอง FEA และการทดลอง พบว่า ในช่วงแรกค่าของอุณหภูมิที่วัดได้มีค่าต่ำกว่าค่าจากแบบจำลอง FEA แต่เมื่อเครื่องทำงานเข้าสู่สภาวะปกติ ผลการทดลองมีค่าใกล้เคียงกับผลของแบบจำลอง FEA มาก โดยพบว่า ค่าอุณหภูมิสูงสุดที่ได้จากแบบจำลอง FEA และจากการทดลองทั้ง 3 ชุด มีความแตกต่างกันเฉลี่ยประมาณ 5.6%, 7.3% และ 14% ในจุดที่ 1 1.6%, 9.3% และ 9.4% ในจุดที่ 2 และ 0.3%, 0.4% และ 0.9% ในจุดที่ 3 นอกจากนี้ผลการวิเคราะห์กราฟของอุณหภูมิ พบว่า เมื่อมีการเพิ่มแรงดันเสียดทานและเวลาเสียดทานขึ้น ค่าอุณหภูมิของรอยเชื่อมจะมีการเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ซึ่งปรากฏการณ์นี้มีผลที่สอดคล้องกัน ทั้งจากการทดลองและจากแบบจำลอง FEA ดังนั้น จึงอาจกล่าวได้ว่า แบบจำลอง FEA ที่ใช้สามารถทำนายการกระจายตัวของอุณหภูมิได้อย่างแม่นยำ

คำสำคัญ : การกระจายตัวของอุณหภูมิ, เชื่อมด้วยวิธีเสียดทาน, เหล็กคาร์บอนต่ำ, ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

Abstract

This study is aimed to investigate the temperature distribution in steel rods welded by friction welding. The study is conducted by experiment and FEA simulation and conditions for calculations is

from 2D. The experiment is conducted using low carbon steel rods with a diameter 15 mm and 80 mm long. The temperature is measured at the distance of 3, 6 and 9 mm. The welding conditions are designed in 3 sets in order to compare. The experimental result is compared with FEA. It is found that the temperature archived from experiment is lower than that of FEA in the beginning of the welding process. However, the result from experiment is agreed very well with the FEA result after the welding process is steady. The average differences of maximum temperature between FEA and experiment from 3 sets are about 5.6%, 7.3% and 14% for group 1, 1.6%, 9.3% and 9.4% for group 2 and 0.3%, 0.4% and 0.9% for group 3 in averages. In addition it is revealed that when the friction process and friction temperature increases the temperature rise is also increased. This phenomena is similar for both FEA and experiment. This implies that the FEA model can be used to predict the temperature distribution in welding process.

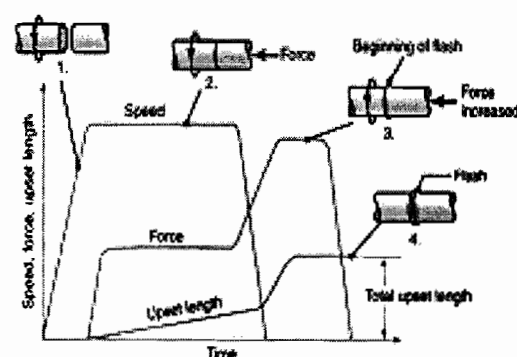
Keywords : Temperature distribution, Friction welding, Low carbon steel, Finite element analysis.

1. บทนำ

การเชื่อมด้วยวิธีเสียดทาน (Friction Welding) เป็นการเชื่อมที่กำลังได้รับความนิยมในหลายอุตสาหกรรม กระบวนการเชื่อมสามารถทำได้โดย นำโลหะที่จะเชื่อมชิ้นหนึ่งยึดอยู่กับที่อีกชิ้นหนึ่งหมุนด้วยความเร็ว (Speed) คงที่ค่าหนึ่ง จากนั้นเพิ่มแรงดันในแนวแกน (Force) ดันให้ชิ้นงานที่อยู่กับที่เสียดทานกับชิ้นงานที่หมุนอยู่ ส่งผลให้เกิดความร้อนทั่วบริเวณพื้นที่เสียดทาน เมื่อชิ้นงานทั้งสองเข้าสู่ภาวะเกือบหลอมละลายซึ่งจะเห็นเป็นโซนของความร้อนบริเวณรอยเชื่อมอย่างชัดเจน จึงทำการหยุดหมุนพร้อมทั้งใช้แรงดันในแนวแกนที่มีค่าเท่ากับหรือมากกว่าเดิม ชักชิ้นงานให้ติดกันอย่างรวดเร็ว ซึ่งในสถานะนี้โลหะที่ร้อนจะเย็นตัวลงภายใต้แรงดันอัดอย่างรวดเร็วและเกิดการเชื่อมต่อนิ่ง [1, 2] ดังแสดงในรูปที่ 1

อิทธิพลของตัวแปรเบื้องต้นที่เกี่ยวข้องในกระบวนการเชื่อมนั้นส่งผลให้เกิดความร้อนที่สูง และวัสดุเกิดการเสียรูปแบบฟลาลคิก (Flash) บริเวณรอยต่อจากการเชื่อมอย่างเด่นชัด ซึ่งในการเสียรูปนี้ จะกำหนดการเคลื่อนที่ของสารปนเปื้อน เช่น เศษออกไซด์จากบริเวณรอยเชื่อม และทำให้สามารถควบคุมคุณภาพของรอยเชื่อมได้ [4, 5] สำหรับข้อดีของการเชื่อมด้วยวิธีเสียดทานนั้นก็มีอยู่หลายประการ

เช่น ใช้ระยะเวลาในการเชื่อมสั้น ไม่ต้องใช้ช่างฝีมือ รอยเชื่อมมีความแข็งแรงสูงเพราะเชื่อมผสานติดกันทั้งพื้นที่หน้าตัด สามารถเชื่อมวัสดุต่างชนิดกันได้ ประหยัดพลังงาน รวมถึงเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม



รูปที่ 1 กระบวนการเชื่อมด้วยวิธีเสียดทาน [3]

2. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในระยะเวลาสามสิบกว่าปีที่ผ่านมามีการวิจัยและพัฒนาการเชื่อมด้วยวิธีเสียดทานได้รับความนิยมเป็นอย่างมากทั้งทางทฤษฎีและการทดลอง ทั้งในประเทศและต่างประเทศ ผู้วิจัยนำเอางานวิจัยของตนเองได้ศึกษาแล้วมานำเสนอ ส่งผลให้เกิดการพัฒนาองค์ความรู้เกี่ยวกับการเชื่อมด้วยวิธีเสียดทานอย่างหลากหลาย ซึ่งจะยกตัวอย่างได้ดังต่อไปนี้

เบื้องต้นงานวิจัยในประเทศที่เกี่ยวข้องและสอดคล้องกับงานวิจัยนี้ ได้แก่ การศึกษาคุณลักษณะโครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อมของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ ที่เชื่อมด้วยวิธีเสียดทาน ซึ่งชิ้นงานที่ผ่านการเชื่อมมีค่าความแข็งแรงที่รอยเชื่อมเพิ่มมากขึ้นกว่าชิ้นงานเดิม [6] การศึกษาอิทธิพลของตัวแปร ซึ่งได้แก่ อิทธิพลของเวลาและความเร็วรอบในการเสียดทาน ที่มีผลต่อความแข็งแรงของรอยเชื่อมของเหล็ก AISI 1015 จากการทดลองพบว่า ที่เวลา 6 วินาที และความเร็วยรอบ 1,300 rpm ให้ค่าความแข็งแรงสูงสุด [7] นอกจากนี้ ยังได้ศึกษาอิทธิพลของเวลาเสียดทาน ที่มีผลต่อความแข็งแรงของรอยเชื่อม โดยศึกษาเทียบกับตัวแปรอื่นๆ เช่น เวลาในการอัด (Upset time) แรงดันในการอัด (Upset pressure) แรงดันในการเสียดทาน (Friction pressure) และความเร็วยรอบ (Speed) ตัวอย่างผลการทดลองพบว่า เมื่อเพิ่มแรงดันอัดสูงขึ้นแนวโน้มของความแข็งแรงจะสูงขึ้นตามแรงดัน และเวลาอัดที่ 4 วินาที จะให้ค่าความแข็งแรงสูงสุด [8]

สำหรับการศึกษาการกระจายตัวของอุณหภูมิ (Temperature distribution) การเสียรูปของวัสดุ (Material deformation) ความเค้น (Stress) ความเครียด (Strain) และพลังงาน (Energy) ที่เกิดจากการเชื่อมด้วยวิธีเสียดทานนั้นมีนักวิจัยที่ทำการศึกษาโดยใช้แบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ เช่น Sluzalec ได้นำเสนอการจำลองแบบจำลองแบบ 2 มิติ (2D Axisymmetry) โดยวิธี FEA ในกระบวนการเชื่อมด้วยวิธีเสียดทาน และเป็นงานวิจัยแรกๆที่นำเสนอกระบวนการทางความร้อน (Heat treatment) ที่ส่งผลกระทบต่อวัสดุที่ทำการทดลอง ผลพบว่า แบบจำลองแบบ 2 มิติ (2D Axisymmetry) เหมาะสมและใช้ได้กับกระบวนการเชื่อมด้วยวิธีเสียดทาน [9] ต่อมา Sahin ได้ใช้ซอฟต์แวร์คอมพิวเตอร์สร้างแบบจำลองการเชื่อมด้วยวิธีเสียดทานที่มีพื้นที่หน้าตัดต่างกัน เพื่อศึกษาคุณลักษณะของรอยเชื่อมแล้วเปรียบเทียบกับ

การทดลอง ผลพบว่า การสร้างแบบจำลองและการทดลองให้ผลที่ใกล้เคียงกัน และยังให้ความสำคัญต่อการกำหนดคุณสมบัติของวัสดุในซอฟต์แวร์ [10] นอกจากนี้ Li และคณะ ยังได้สร้างแบบจำลองแบบ 2 มิติ (2D) ตามประเภทของการเชื่อมเสียดทานในแบบต่างๆ โดยทำการศึกษากลไกการเกิดและกระจายตัวของความร้อน ผลการศึกษาพบว่า การเชื่อมเสียดทานแบบใช้แรงดันอัดด้านเดียว ใช้วัสดุเหล็กคาร์บอนต่ำ อุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นตั้งแต่เริ่มกระบวนการแล้วคงที่ประมาณ 1,200°C ส่วนการเชื่อมทอแบบใช้แรงดันอัดด้านเดียว ใช้วัสดุประเภท ขุบเปอร์อัลลอยด์ FG96 พบว่า การกระจายตัวของอุณหภูมิจากพื้นที่หน้าตัดสู่ระยะ 2 mm และ 4 mm ประมาณ 1,130°C, 1,030°C และ 750°C ตามลำดับ และการเชื่อมเสียดทานแบบเชิงเส้น ใช้วัสดุเหล็กแผ่นคาร์บอนต่ำ กว้าง 18 mm. ยาว 45 mm ผลพบว่า เมื่อเริ่มกระบวนการอุณหภูมิเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วและขึ้นขึ้นเป็นเส้นตรง อุณหภูมิประมาณ 750°C แล้วลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อหยุดกระบวนการ [11]

การวัดอุณหภูมิในการเชื่อมด้วยวิธีเสียดทาน ในเบื้องต้นนั้นเมื่ออยู่ 2 วิธี ได้แก่ วิธีที่หนึ่งเป็นการใช้กล้องวัดอุณหภูมิอินฟราเรด วิธีนี้จะสามารถวัดอุณหภูมิที่บริเวณพื้นที่เสียดทานได้ ซึ่งเราจะเห็นการกระจายตัวของอุณหภูมิอย่างชัดเจน [12] และวิธีที่สอง คือ การวัดอุณหภูมิโดยใช้เทอร์โมคัปเปิล ซึ่งจะเชื่อมหลายวัดอุณหภูมิให้ติดกับชิ้นงานที่ไม่ได้หมุนให้ได้ระยะห่างจากพื้นที่หน้าตัดตั้งแต่ 2 mm ขึ้นไป ตามความยาวของแท่งเหล็ก เพื่อทำการเปรียบเทียบผลอุณหภูมิที่เกิดขึ้นตามระยะที่ทำการวัด [13] จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องเบื้องต้น พบว่า ยังไม่มีงานวิจัยใดที่ทำการทดลองวัดอุณหภูมิในเหล็กคาร์บอนต่ำที่เชื่อมด้วยวิธีเสียดทาน สำหรับงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการสร้างแบบจำลองโดยวิธี FEA ในกระบวนการเชื่อมด้วยวิธีเสียดทานโดยใช้เหล็กคาร์บอนต่ำ เพื่อศึกษาการกระจายตัวของอุณหภูมิ

จากผิวสัมผัสที่เกิดขึ้นจากการเสียดทาน บริเวณพื้นที่ที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน ผลของอุณหภูมิที่ได้จากการสร้างแบบจำลองจะถูกเทียบกับผลการทดลองวัดอุณหภูมิ เพื่อดูลักษณะของแนวโน้มการกระจายตัวของอุณหภูมิ

3. วิธีการวิจัย

ต่อไปนี้จะเป็นการอธิบายถึงกระบวนการสร้างแบบจำลองและการทำการทดลองวัดอุณหภูมิ ซึ่งสามารถแบ่งออกเป็นหัวข้อย่อยได้ดังนี้

3.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ตามทฤษฎีการถ่ายเทความร้อนที่สภาวะกึ่งคงที่ของของแข็ง (Semi-Infinite Solid) เป็นการวิเคราะห์ปัญหาทางความร้อนอีกวิธีหนึ่ง กล่าวคือเป็นการวิเคราะห์ปัญหาสำหรับของแข็งที่มีความยาวยกเว้นด้านหนึ่งของระบบที่สามารถกำหนดเป็นพื้นผิวความร้อนได้ และเกิดการถ่ายเทความร้อนไปยังปลายอีกด้านหนึ่ง ซึ่งที่ผิวสัมผัสจะเกิดการนำความร้อนที่ไม่คงที่ (Transient heat conduction) ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อระยะ x ดังสมการ (1) [14]

$$x = 4\sqrt{at} \quad (1)$$

โดยที่ a คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน และ t คือ เวลา เพื่อประมาณค่าโหนดความร้อนที่ได้รับผลกระทบ

การเกิดความร้อนในระหว่างการเสียดทาน จะทำให้เกิดการเสียรูปแบบพลาสติก (Plastic deformation) บริเวณรอยต่อ ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการการกระจายตัวของความร้อน (Heat flux) บริเวณพื้นที่หน้าตัด แสดงไว้ในสมการ (2)

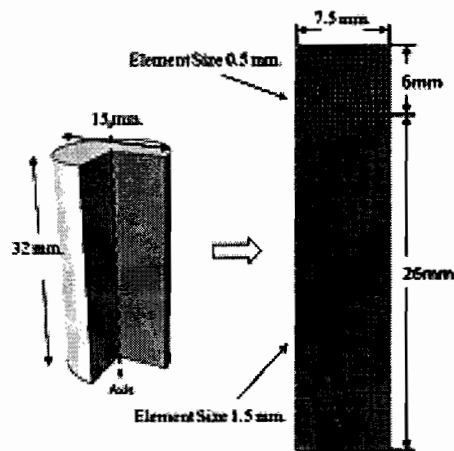
$$q = \frac{\eta\tau ar^2}{R} + (1 + \eta)\tau ar \quad (2)$$

จากสมการ q คือ ฟลักซ์ความร้อนบริเวณพื้นที่หน้าตัด η คือ สัมประสิทธิ์ที่มีความสัมพันธ์ต่อการกระจายตัวของแรงต้านบริเวณพื้นที่หน้าตัด τ คือ ความดันเฉือน a คือ ความเร็วรอบ r คือ ระยะจากจุดศูนย์กลางถึงขอบของชิ้นงาน R คือ รัศมีของชิ้นงาน

3.2 การสร้างแบบจำลอง

แบบจำลอง FEA ที่ใช้ในการศึกษาจะจำลองตามลักษณะของชิ้นงานจริง คือ มีความยาว 80 mm พื้นที่หน้าตัด 15 mm เพื่อให้ได้รูปร่างของแบบจำลอง FEA ที่เหมาะสมและเพื่อลดจำนวนของเอลิเมนต์ รวมถึงลดระยะเวลาในการคำนวณของคอมพิวเตอร์ จึงทำการลดความยาวของชิ้นงานลงกว่าครึ่งหนึ่งของความยาวเดิม โดยลดความยาวของหัวให้เหลือ 32 mm และกว้างครึ่งหนึ่งของความกว้างเดิม คือ 7.5 mm สำหรับการลดความกว้างและความยาวของหัวให้เหลืออย่างละครึ่งนั้น จะไม่ส่งผลกระทบต่อการคำนวณใดๆ ในแบบจำลอง เพราะส่วนที่ให้ความสนใจและให้ความสำคัญ คือ จุดที่ทำการบันทึกอุณหภูมิตามการทดลอง คือ ที่ระยะ 3, 6 และ 9 mm เพราะฉะนั้นระยะที่ตัดออกจึงไม่ใช่ระยะที่ต้องการศึกษา

แบบจำลอง FEA ที่สร้างขึ้นจะใช้เอลิเมนต์ด้วยแผ่นบาง (Shell element) ชนิด 2D Axisymmetric [11] แบบ CGAX4HT: A4-node โดยทำการแบ่งชิ้นงานออกเป็นสองช่วง คือ ช่วงที่ความร้อนมีอิทธิพลมาก มีระยะประมาณ 0-6 mm จากหน้าสัมผัส จะใช้เอลิเมนต์ละเอียดเพื่อความแม่นยำของข้อมูล ส่วนช่วงที่ความร้อนมีอิทธิพลน้อย คือ ที่ระยะประมาณ 6 mm เป็นต้นไป จะใช้เอลิเมนต์ที่หยาบลง เพื่อประหยัดเวลาในการคำนวณ ทั้งนี้ ส่วนที่เอลิเมนต์มีความละเอียดมีขนาดเท่ากับ 0.5 mm ส่วนเอลิเมนต์หยาบมีขนาดประมาณ 1.5 mm รูปที่ 2 แสดงการกำหนดเอลิเมนต์ให้แบบจำลอง FEA



รูปที่ 2 การกำหนดเอลิเมนต์ให้แบบจำลอง FEA

ทั้งนี้จะต้องสังเกตว่าลักษณะของเอลิเมนต์ตรงช่วงรอยต่อระหว่างเอลิเมนต์ละเอียดและเอลิเมนต์หยาบนั้นจะมีการบิดเบี้ยวเล็กน้อย ซึ่งเกิดจากการเปลี่ยนแปลงขนาดของเอลิเมนต์ ทำให้เกิดการบิดเบี้ยวกันในบางเอลิเมนต์

หลังจากที่สร้างแบบจำลอง FEA ของทั้งสองชิ้นงานแล้ว จากนั้นจะถูกนำมาเชื่อมต่อกัน ดังแสดงในรูปที่ 3 แล้วใส่ภาระภายใต้เงื่อนไขที่เหมือนกับการทดลอง โดยแบบจำลอง FEA มีการกำหนดเงื่อนไขขอบเขต ดังนี้

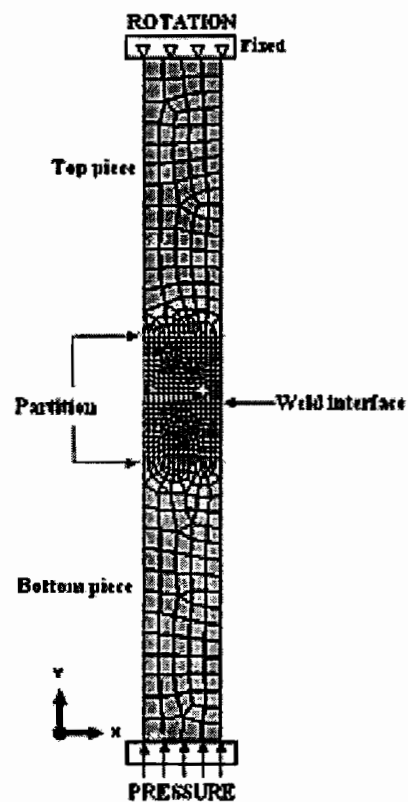
(1.) ชิ้นงานด้านบน (Top piece) กำหนดให้ขอบด้านบนไม่สามารถเคลื่อนที่ในแนวแกน X และ Y ได้ (Fixed) และกำหนดให้ชิ้นงานหมุนรอบแกน Y ด้วยความเร็วรอบที่กำหนด

(2.) ชิ้นงานด้านล่าง (Bottom piece) กำหนดให้รับภาระแรงดัน (Pressure) ที่ขอบด้าน

ล่างสุด และเคลื่อนที่เข้าหาชิ้นงานด้านบนในแนวแกน Y ด้วยความเร็วค่าหนึ่ง

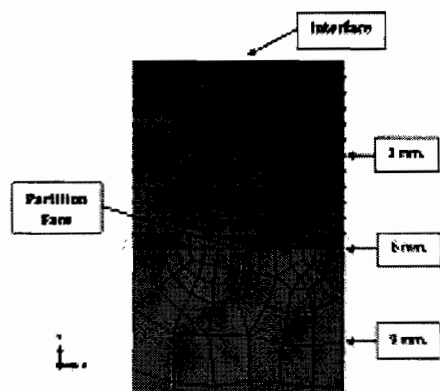
(3.) ที่ผิวสัมผัสระหว่างชิ้นล่างและชิ้นบน กำหนดให้มีสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานซึ่งเปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิของแบบจำลอง ดังแสดงในตารางที่ 2

(4.) ความร้อนที่เกิดขึ้นที่ผิวสัมผัส กำหนดในรูปฟังก์ชันความร้อน (Heat flux) ซึ่งจะเปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไปเช่นกัน



รูปที่ 3 การกำหนดเงื่อนไขขอบเขตของทั้งสองชิ้นงาน (Boundary Condition, BC)

สำหรับการบันทึกผลข้อมูล จากแบบจำลอง FEA นั้น จะกำหนดให้บันทึกผลที่โหนด (Node) ซึ่งอยู่บริเวณขอบของชิ้นงาน ตามระยะที่ทำการทดลองวัด อุณหภูมิ คือ ห่างจากหน้าสัมผัสเป็นระยะ 3, 6 และ 9 mm ดังแสดงในรูปที่ 4



รูปที่ 4 การกำหนดจุดบันทึกอุณหภูมิในแบบจำลอง FEA

สำหรับการบันทึกผลในลักษณะนี้ Seil H และคณะ [15] ได้ทำการสร้างแบบจำลองการเชื่อมเสียดทานระหว่าง Mild Steel-AI6061-Aluminium ซึ่งแผ่น AI6061 จะอยู่ตรงกลาง ผลพบว่า การบันทึกอุณหภูมิที่โหนดนั้นสามารถทำได้ และโหนดที่อยู่บริเวณขอบของชิ้นงานมีอุณหภูมิสูงกว่าโหนดที่อยู่บริเวณจุดกึ่งกลางของพื้นที่เสียดทาน

3.3 คุณสมบัติของวัสดุ

จากผลการวิเคราะห์ส่วนประกอบทางเคมีโดยเครื่อง Spectrometer พบว่า วัสดุที่ใช้ทดลองเชื่อมเป็นเหล็กคาร์บอนต่ำที่มีธาตุคาร์บอนผสมอยู่ 0.12% ดังแสดงในตารางที่ 1 ซึ่งมีความสอดคล้องกับงานวิจัยของ Li และคณะ [16] กับ Kimura และคณะ [17] ที่ได้สร้างแบบจำลองและคำนวณอุณหภูมิจากการเชื่อมเสียดทานโดยใช้เหล็กคาร์บอนต่ำ โดยใช้ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน (Friction Coefficient) แสดงไว้ในตารางที่ 2 และค่าคุณสมบัติทางความร้อน (Thermal properties) โดยมีค่าการนำความร้อน และ (Thermal conductivity) ค่าความร้อนจำเพาะ (Specific heat) ได้แสดงไว้ในตารางที่ 3

ตารางที่ 1 ส่วนประกอบทางเคมีของวัสดุ (wt%)

Composition	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al	Cu
Low carbon Steel	0.12	0.24	0.31	0.01	0.01	0.32	0.004	0.037	0.013	0.049

ตารางที่ 2 สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานที่ใช้ในแบบจำลอง FEA

Temperature °C	20	200	400	600	800	1,000	1,200
Friction Coefficient	0.4	0.577	0.577	0.577	0.4	0.2	0.1

ตารางที่ 3 คุณสมบัติทางความร้อนของเหล็กคาร์บอนต่ำ

Temperature °C	27	100	200	400	600	800	1000	1200
Thermal conductivity (W/mK)	51.6	51.1	49.0	42.7	33.6	26.0	3	0.8
Specific heat (J/kgK)	473	486	520	599	749	920	644	661

3.4 เงื่อนไขการทดลอง

เงื่อนไขการทดลองมีทั้งเงื่อนไขที่เป็นตัวแปร และเงื่อนไขที่เป็นค่าคงที่ โดยเงื่อนไขที่เป็นตัวแปร ได้แก่ แรงดันเสียดทาน (Friction pressure) มีขนาด 20, 30 และ 40 bar เวลาเสียดทาน (Friction time) มีขนาด 15, 18 และ 21 วินาที ส่วนเงื่อนไขที่คงที่ ได้แก่ แรงดันอัด (Upset pressure) เวลาอัด (Upset time) และ ความเร็วรอบ (Speed) สำหรับเงื่อนไขที่เป็นตัวแปรนั้น จะเป็นส่วนที่ใช้วิเคราะห์การกระจายตัวของ อุณหภูมิ เงื่อนไขที่ใช้ในแบบจำลอง FEA เป็นเงื่อนไข เดียวกันกับการทดลอง ดังแสดงไว้ในตารางที่ 4

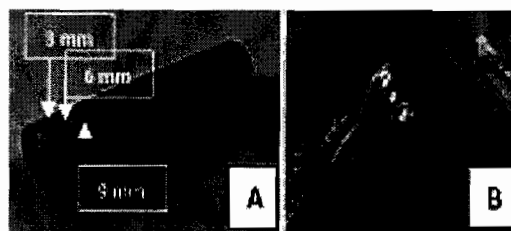
ตารางที่ 4 เงื่อนไขการทดลองและแบบจำลอง FEA

Exp	Friction Pressure (bar)	Friction Time (sec)	Upset Pressure (bar)	Upset Time (sec)	Speed (rpm)
1	20	15	60	5	1,300
2	30	18	60	5	1,300
3	40	21	60	5	1,300

3.5 การวัดอุณหภูมิ

ในการศึกษานี้ได้ทำการวัดอุณหภูมิจากการทดลองเพื่อเปรียบเทียบกับแบบจำลอง FEA โดยในส่วนของการทดลองนั้น ทำการวัดอุณหภูมิโดยการเจาะชิ้นงานให้ลึกประมาณ 3 มม ห่างจากหน้าสัมผัสเป็นระยะ 3, 6 และ 9 มม รวมเป็น 3 จุด และเจาะเป็นแนวรอบชิ้นงาน 3 แนว รวมทั้งหมดเป็น 9 จุด เพื่อทำการเชื่อมสายวัดอุณหภูมิ ดังแสดงในรูปที่ 5A จากนั้นเชื่อมสายวัดอุณหภูมิ (เทอร์โมคัปเบิล ชนิด K) ตามรูที่ทำการเจาะ ซึ่งชิ้นงานที่ติดตั้งสายวัดอุณหภูมิ จะเป็นชิ้นงานที่ไม่ได้หมุน โดยจะทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้งต่อหนึ่งเงื่อนไขแล้วจะเทียบผลการทดลอง ทำการบันทึกผลโดยเครื่องบันทึกอุณหภูมิ (Data logger)

ลักษณะการเชื่อมต่อสายวัดอุณหภูมิกับระยะที่ทำการวัด แสดงในรูปที่ 5B และลักษณะของชิ้นงานเมื่อเสร็จสิ้นกระบวนการเชื่อม แสดงในรูปที่ 6



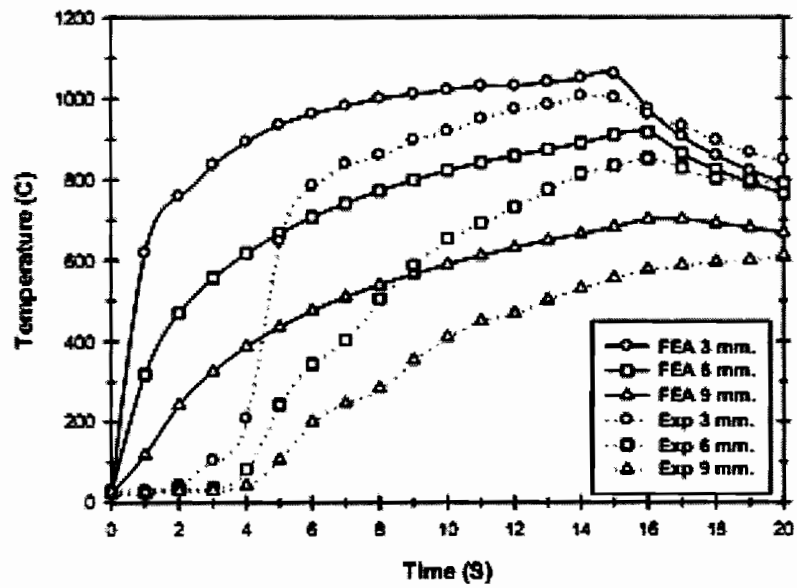
รูปที่ 5 ลักษณะการเจาะรูเพื่อติดตั้งสายวัดอุณหภูมิ



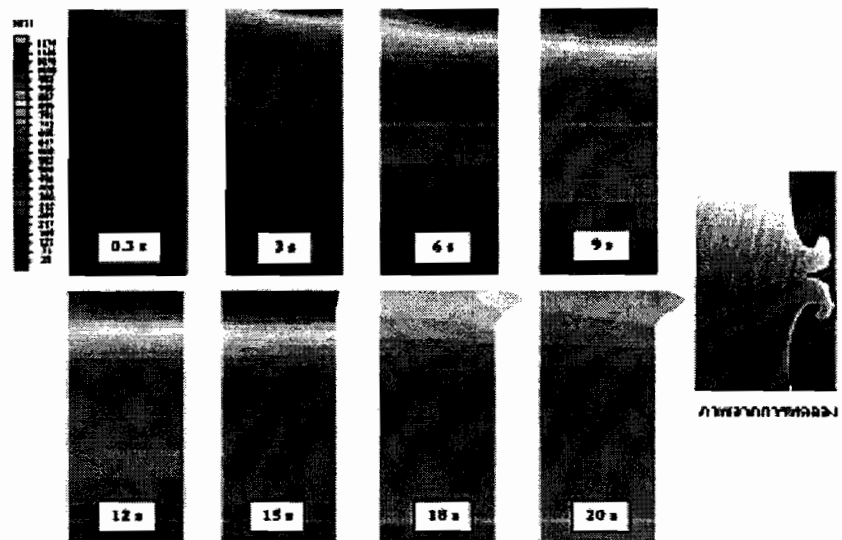
รูปที่ 6 ลักษณะของชิ้นงานเมื่อเสร็จสิ้นกระบวนการ

4. ผลการวิจัยและอภิปราย

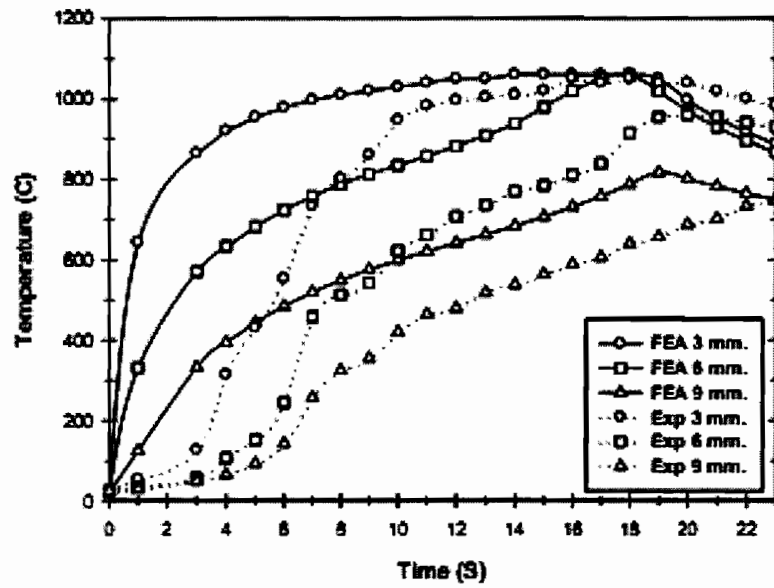
การกระจายตัวของอุณหภูมิที่ได้จากแบบจำลอง FEA และการทดลอง จะได้รับอิทธิพลภายใต้เงื่อนไขหรือตัวแปรหลัก ซึ่งได้แก่ แรงดันเสียดทาน (Friction pressure) เวลาเสียดทาน (Friction time) แรงดันอัด (Upset pressure) เวลาอัด (Upset time) และความเร็วรอบ (Speed) ซึ่งแบ่งเงื่อนไขออกเป็น 3 จุด ตามรายละเอียดในตารางที่ 4



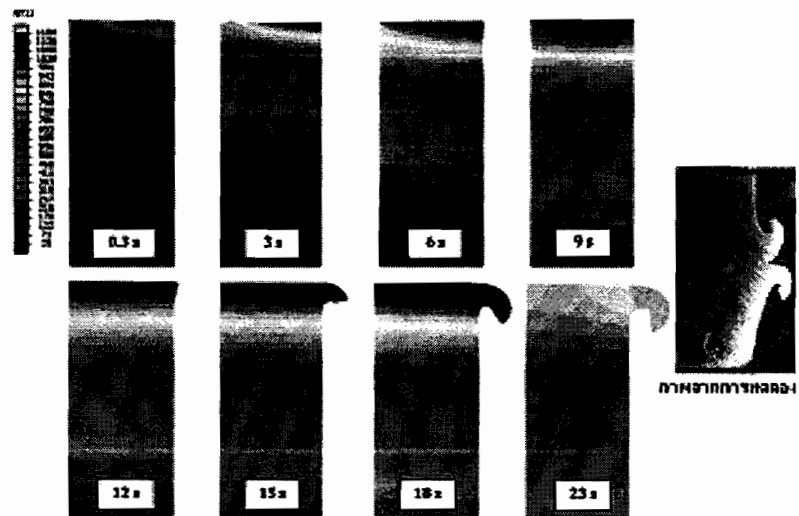
รูปที่ 7 กราฟเปรียบเทียบผลการกระจายตัวของอุณหภูมิระหว่างแบบจำลอง FEA กับการทดลองในเงื่อนไขชุดที่ 1



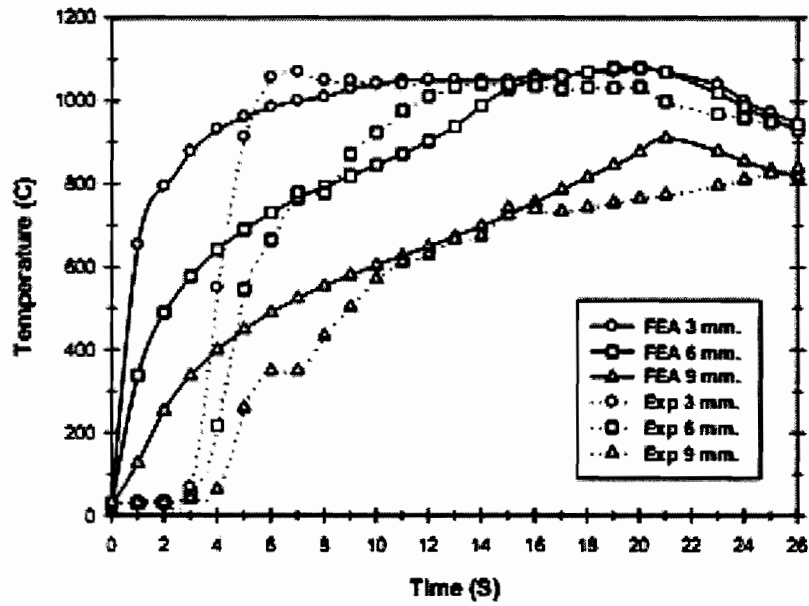
รูปที่ 8 การกระจายตัวของอุณหภูมิในแบบจำลอง FEA ของเงื่อนไขชุดที่ 1



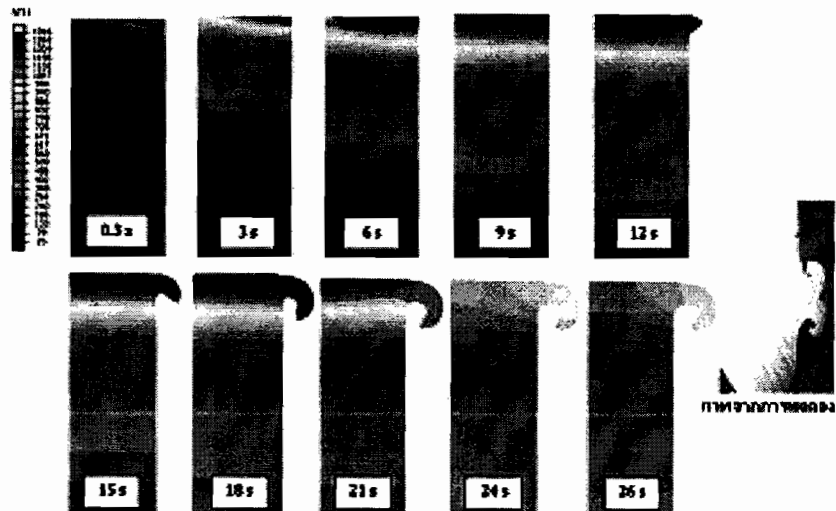
รูปที่ 9 กราฟเปรียบเทียบผลการกระจายตัวของอุณหภูมิระหว่างแบบจำลอง FEA กับการทดลองในเงื่อนไขที่ 2



รูปที่ 10 การกระจายตัวของอุณหภูมิในแบบจำลอง FEA ของเงื่อนไขที่ 2



รูปที่ 11 กราฟเปรียบเทียบผลการกระจายตัวของอุณหภูมิระหว่างแบบจำลอง FEA กับการทดลองในเฟืองโซ่ที่ 3



รูปที่ 12 การกระจายตัวของอุณหภูมิในแบบจำลอง FEA ของเฟืองโซ่ชุดที่ 3

จากกราฟในรูปที่ 7, 9 และ 11 เมื่อพิจารณาเทียบผลกัน ระหว่างการทดลองและแบบจำลอง FEA พบว่า ในช่วงแรกของการกระบวนการ (0-5 วินาที) อุณหภูมิที่วัดได้จากการทดลองและแบบจำลอง FEA นั้น มีผลค่อนข้างที่จะแตกต่างกันพอสมควร เนื่องจากการทดลองจริง ๆ นั้น เครื่องเชื่อมต้องใช้เวลาในการทำความเร็วรอบและสร้างแรงดัน เพื่อให้เกิดความร้อนที่ผิวสัมผัส ดังนั้น ในช่วงแรกๆ อุณหภูมิที่วัดได้จากการทดลอง จึงมีค่าต่ำกว่าอุณหภูมิที่ได้จากแบบจำลอง FEA อย่างไรก็ตามหลังจากผ่านช่วงแรกของการเชื่อมไปแล้ว จะสังเกตได้ว่าอุณหภูมิที่วัดได้จากการทดลอง เริ่มพุ่งสูงขึ้นจนเกือบใกล้เคียงกับแบบจำลอง FEA โดยเฉพาะในช่วงท้ายของการเชื่อม โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ในเงื่อนไขชุดที่ 3 ซึ่งเป็นเงื่อนไขที่เพิ่มตัวแปรแรงดันเสียดทานมากที่สุด ส่งผลให้อุณหภูมิพุ่งขึ้นเร็วกว่าและสูงกว่าเงื่อนไขชุดที่ 1 และ ชุดที่ 2

นอกจากนี้ หากนำค่าอุณหภูมิสูงสุดที่ได้จากการทดลองและแบบจำลอง FEA มาคำนวณหาค่าความแตกต่างเฉลี่ยโดยคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ จะพบว่า ในเงื่อนไขชุดที่ 1 ความแตกต่างเฉลี่ยอยู่ที่ 5.6%, 7.3% และ 14% ที่ระยะ 3, 6 และ 9 mm ตามลำดับ เงื่อนไขชุดที่ 2 ความแตกต่างเฉลี่ยอยู่ที่ 1.6%, 9.3% และ 9.4% ที่ระยะ 3, 6 และ 9 mm ตามลำดับ เงื่อนไขชุดที่ 3 ความแตกต่างเฉลี่ยอยู่ที่ 0.3%, 0.4% และ 9% ที่ระยะ 3, 6 และ 9 mm ตามลำดับ ซึ่งจากข้อมูลจะเห็นว่า อุณหภูมิสูงสุดที่วัดได้จากการทดลองและแบบจำลอง FEA มีความแตกต่างกันมากที่สุด 14%

จากรูปที่ 8, 10 และ 12 จะเห็นว่า เมื่อชิ้นงานเริ่มเกิดการเสียดทาน แผลงความร้อนจะเกิดขึ้นที่ขอบของชิ้นงานก่อนแล้วจึงกระจายตัวเข้าสู่แกนกลาง และกระจายตัวออกไปตามความยาวของชิ้นงานเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น โดยอุณหภูมิสูงสุดจะเกิดขึ้นบริเวณ

พื้นที่หน้าตัดเสียดทาน และลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อชิ้นงานหลุดหมุน โดยพบว่า เงื่อนไขชุดที่ 1 อุณหภูมิสูงสุดอยู่ที่ 1,174 °C ที่เวลา 15 วินาที เงื่อนไขชุดที่ 2 อุณหภูมิสูงสุดอยู่ที่ 1,184 °C ที่เวลา 18 วินาที เงื่อนไขชุดที่ 3 อุณหภูมิสูงสุดอยู่ที่ 1,316 °C เริ่มที่เวลา 18 – 21 วินาที และเมื่อพิจารณาการกระจายตัวของอุณหภูมิ จะพบว่า ในกรณีเงื่อนไขชุดที่ 3 นั้นเกิดการกระจายตัวของอุณหภูมิที่ไกลกว่าและสูงกว่า ทั้งนี้ เนื่องจากการใช้แรงดันยึดที่สูงกว่า ส่งผลให้หน้าสัมผัสของชิ้นงานเกิดการเสียดทานมากขึ้น ทำให้สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานนั้นลดลง และเกิดความร้อนมากขึ้น การที่ใช้แรงดันยึดมากยังส่งผลให้เกิดการไหลของเนื้อโลหะมากขึ้น จึงเกิดการส่งต่อความร้อนได้มากขึ้นจากการไหลของมวลโลหะร้อน

5. สรุป

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการกระจายตัวของอุณหภูมิในเหล็กคาร์บอนต่ำ (Low carbon steel) ที่เชื่อมด้วยวิธีเสียดทาน ทำการศึกษาจากการสร้างแบบจำลอง FEA และเทียบผลกับการทดลอง เงื่อนไขที่ใช้เป็นเงื่อนไขเดียวกันกับการทดลอง ซึ่งแบ่งเงื่อนไขการทดลองออกเป็น 3 ชุด โดยแต่ละชุดมีความแตกต่างกันที่แรงดันเสียดทาน (Friction pressure) และเวลาเสียดทาน (Friction time) ที่มีการเพิ่มขึ้นตามลำดับ ทั้งนี้ก็เพื่อให้ผลแบบจำลอง FEA และการทดลองมีแนวโน้มที่ใกล้เคียงกันและมีทิศทางที่สอดคล้องกัน

ผลการศึกษา พบว่า แบบจำลอง FEA สามารถทำนายผลการกระจายตัวของอุณหภูมิได้ใกล้เคียงกับผลการทดลองในระดับที่ยอมรับได้ โดยในช่วงแรกพบว่า ผลแบบจำลอง FEA มีความแตกต่างกันกับผลการทดลองอยู่พอสมควร เนื่องจากการทดลองนั้น เครื่องเชื่อมต้องใช้เวลาในการเพิ่ม

ENGINEERING JOURNAL, 2012; 39(1):

ความเร็วรอบและแรงดัน อย่างไรก็ตาม เมื่อเครื่องเชื่อมเข้าสู่วิธีการทำงานได้เต็มที่แล้ว พบว่า ผลการทดลองและแบบจำลอง FEA ให้ค่าอุณหภูมิที่ใกล้เคียงกันมาก และมีความใกล้เคียงกันมากยิ่งขึ้น เมื่อแรงดันเสียดทานและเวลาเสียดทานเพิ่มขึ้น โดยการเพิ่มแรงดันเสียดทานเป็นการเร่งให้การเชื่อมผลิตความร้อนได้สูงขึ้น และการเพิ่มเวลาเสียดทานเป็นการเพิ่มเวลาให้ความร้อนจากการเชื่อมกระจายตัวออกไปตามความยาวของชิ้นงานได้มากและนานขึ้น

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ที่ให้ทุนสนับสนุนการวิจัยนี้ และขอขอบคุณ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี ที่ให้การสนับสนุนทุนวิจัย และอุปกรณ์การทดลอง รวมถึงคณาจารย์ทุกท่าน ที่ได้คำปรึกษาและคำแนะนำเป็นอย่างดี

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] Arayangkun S, Boctarawong A, Thinvongpituk C. A study of properties of round steel rod joints welded by friction welding. *Journal of Ubon Ratchathani University*. 2009; 11(1) January-April. (In Thai)
- [2] D'Alvise L, Massoni E, Wallace S J. Finite element modelling of the inertia friction welding process between dissimilar materials. *Journal of Materials Processing Technology*. 2002; 125-126, 387-391.
- [3] Kalpakjian S, Steven R. Schmid. Solid - state welding processes. *Manufacturing Engineering and Technology*. 2006.
- [4] Richard T, Robert R. A Plastic model is designed to theoretically describe the movement of interface material during the

forging phase of friction welding. *Welding Research Supplement*. March 1971.

- [5] Sketchley P D, Threadgill P L, Wright I G. Rotary friction welding of an Fe3Al based ODS alloy. Presented at 5th International Conference on Structural and Functional Intermetallics, Vancouver, Canada, 17-19 July 2000 and to be published in *Intermetallics Journal*.
- [6] Arayangkun S, Thinvongpituk C, Payom C. Micro-structure characteristic of the low carbon steel jointed by friction welding. The 23rd Conference of the Mechanical Engineering Network of Thailand; 2009 November 4-7; Chiang Mai. Chiang Mai University; 2009. (In Thai)
- [7] Chuppava C, Thinvongpituk C. The influence of friction time and rotational speed on the strength of AISI 1015 steel rods welded by friction welding. *Journal of Science and Technology Ubonratchathani University*. 2011; 13(1): 73-81. (In Thai)
- [8] Chuppava C, Thinvongpituk C. Influence of friction time on the strength of AISI 1015 steel rods welded by friction welding. *UBU Engineering Journal*. 2010; 3(2): 17-21. (In Thai)
- [9] Sluzalec, A. Thermal effect in friction welding. *Journal of Mechanical Science*. 1990; Vol.32, No.6, pp 467-478.
- [10] Sahin M. Simulation of friction welding using a developed computer program. *Journal of Materials Processing Technology*. 2004; 153-154, 1011-1018.
- [11] Li W, Shi S, Wang F, Zhang Z, Ma T, Li J. Numerical simulation of friction welding

ENGINEERING JOURNAL, 2012; 33(1):

- process based on abaqus environment. *Journal of Engineering and Technology Review*. 2012; 5(3): 10-19.
- [12] Rud-di L, Jing-long L, Jing-tao X, Fu-sheng Z, Ke Z, Zhong J C. Friction heat production and atom diffusion behaviors during Mg-Ti rotating friction welding process. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. 2012; 22, 2665-2671.
- [13] Khany S E, Krishnan K N, Wahed M A. Study of transient temperature distribution in a friction welding process and its effects on its joints. *International Journal of Computational Engineering Research*. 2012; Vol.2, Issue.5, Issn 2250-3005.
- [14] Li W, Wang F. Modeling of continuous drive friction welding of mild steel. *Materials Science and Engineering A*. 2011; 528, 5921-5926.
- [15] Seli H, Awang M, Izani A, Ismail M D., Rachman E, Ahmad A. Evaluation of Properties and FEM Model of the Friction Welded Mild Steel-AI6061-Alumina. *Materials Research*. 2013; 16(2): 453-467.
- [16] Li W Y, Shi S X, Wang F F, Ma T J, Li J L, Gao D L, Vainis A. Heat reflux in flash and its effect on joint temperature history during linear friction welding of steel. *International Journal of Thermal Sciences* 67 (2013) 192-199.
- [17] Kimura M, Inoue H, Kasaka M, Kaizu K, Fuji A. Analysis Method of Friction Torque and Weld Interface Temperature During Friction Process of Steel Friction Welding. *Journal of Solid Mechanics and Materials Engineering*. 2010; Vol.4, No.3.

ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ นาย ปกรณ์ อุ่นไธสง

เกิดวันที่ 15 มิถุนายน พ.ศ. 2530

ภูมิลำเนา บ้านเลขที่ 78 หมู่ที่ 5 บ้านซ่ง
ตำบลนาแก อำเภอนาแก จังหวัดนครพนม 48130

ประวัติการศึกษา พ.ศ. 2542-2548
มัธยมศึกษาตอนต้นและตอนปลาย
โรงเรียนนาแกพิทยาคม
อำเภอนาแก จังหวัดนครพนม
พ.ศ. 2549-2552
วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
พ.ศ. 2553-2557
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

