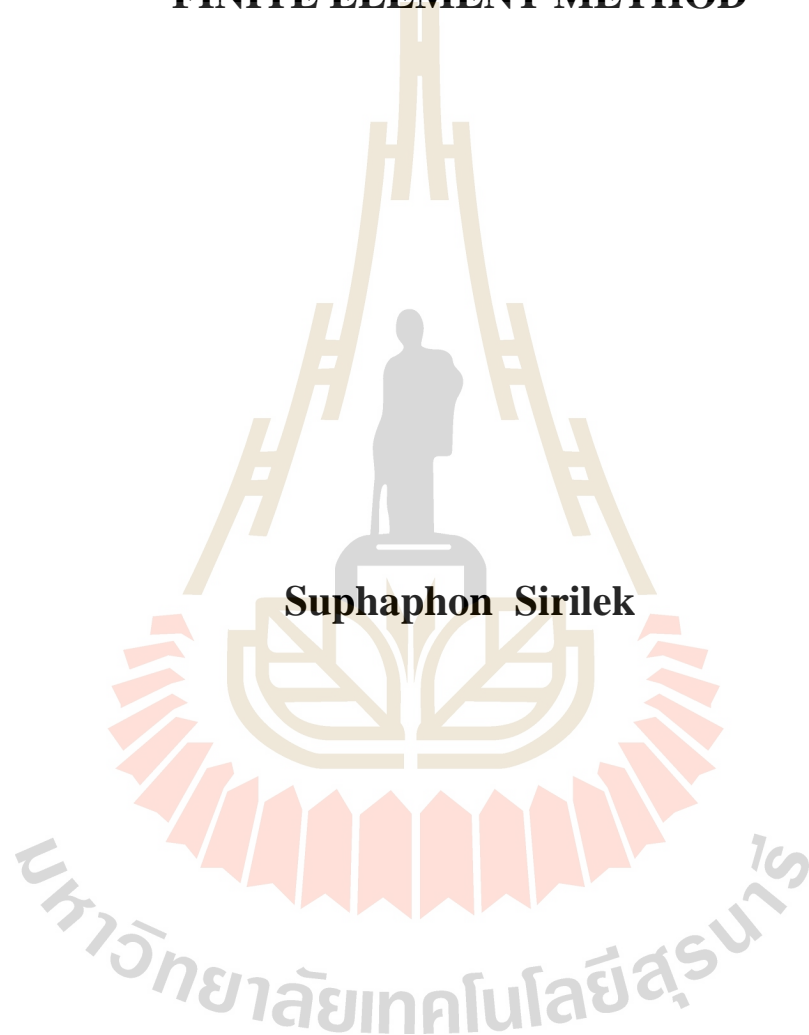


การวิเคราะห์ความเค้นเนื่องจากแรง-ความร้อนบนหัวเชื่อมอิเล็กทรอนิกส์  
ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี  
ปีการศึกษา 2560

**ANALYSIS OF THERMO-MECHANICAL STRESS ON  
ELECTRODE WELDING HEAD BY USING  
FINITE ELEMENT METHOD**



**Suphaphon Sirilek**

**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirement for the  
Degree of Master of Engineering in Mechanical Engineering**

**Suranaree University of Technology**

**Academic Year 2017**

การวิเคราะห์ความเค้นเนื่องจากแรง-ความร้อนบนหัวเชื่อมอิเล็กทรอนิกส์  
ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นักวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา  
ตามหลักสูตรปริญญาโทบริหารบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



(รศ. ดร. จิตพร ทองศิริ)

ประธานกรรมการ



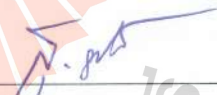
(ผศ. ดร. กীরติ สุกฤษณ์)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)



(ผศ. ดร. กระวี ตรีอำรรค)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม)



(ผศ. ดร. สุกกิจ รูปจันทร์)

กรรมการ



(ดร. เสฏฐวรรธ สุขริตภวัตสกุล)

กรรมการ



(รศ. ร.อ. ดร. กนต์ธร ชำนิประศาสน์)



(รศ. ดร. พรศิริ จงกล)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและพัฒนาความเป็นสากล คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

สุภาพร ศิริเล็ก : การวิเคราะห์ความเค้นเนื่องจากแรง-ความร้อนบนหัวเชื่อมอเล็กโตรด  
ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (ANALYSIS OF THERMO-MECHANICAL STRESS  
ON ELECTRODE WELDING HEAD BY USING FINITE ELEMENT METHOD)

อาจารย์ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กิริติ สุลักษณะ, 99 หน้า.

อเล็กโตรดของขบวนการใช้ในการเชื่อมประกอบชิ้นส่วนอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ขนาดเล็ก  
มีราคาสูง เนื่องจากมีขนาดเล็กและผลิตจากทั้งสแตน เมื่อมีใช้งานสักระยะเวลาหนึ่งจะเกิด  
การเสื่อมสภาพบริเวณพื้นที่ผิวสัมผัสของอเล็กโตรด ส่งผลให้รอยเชื่อมที่เกิดขึ้นมีคุณภาพลดลง  
งานวิจัยนี้จึงมุ่งศึกษาพฤติกรรมการเชื่อมและวิเคราะห์หาปัจจัยที่ส่งผลต่อการเสื่อมสภาพบน  
อเล็กโตรดของขบวนการจากแรงและความร้อนในกระบวนการเชื่อม ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์  
ร่วมกับแบบจำลอง Electrical/Thermal/Mechanical บนซอฟต์แวร์ MSC Mentat ผลการศึกษาพบว่า  
ในการเชื่อมเกิดอุณหภูมิสูงสุดบนอเล็กโตรดเท่ากับ 1,040.77 เคลวิน และ Normal Stress สูงสุด  
เท่ากับ 646.08 เมกะปาสคาล บริเวณขอบหน้าสัมผัสของอเล็กโตรดของขบวนการที่อยู่ติดกับบริเวณ  
การเกิดอุณหภูมิสูงสุดบนเส้นลวดทองแดง โดยความร้อนเป็นปัจจัยหลักที่ส่งผลให้เกิดความเค้นสูง  
ซึ่งความเค้นที่เกิดขึ้นมีค่าน้อยกว่าความเค้นสูงสุดที่ทั้งสแตนจะต้านได้ จากการทดสอบแรงกด  
จึงไม่ทำให้อเล็กโตรดเกิดการแตกหักหรือเสียรูปโดยทันที แต่หากอเล็กโตรดมีการใช้งานมากขึ้น  
จะส่งผลให้เกิดการเสื่อมสภาพเพิ่มมากขึ้นด้วย

สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล

ปีการศึกษา 2560

ลายมือชื่อนักศึกษา สุภาพร ศิริเล็ก

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา กิริติ

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม วิไล

SUPHAPHON SIRILEK : ANALYSIS OF THERMO-MECHANICAL  
STRESS ON ELECTRODE WELDING HEAD BY USING FINITE  
ELEMENT METHOD. THESIS ADVISOR : ASST. PROF. KEERATI  
SULUKSNA, Ph.D., 99 PP.

#### PARALLEL GAP ELECTRODE/FINITE ELEMENT/DETERIORATION

The parallel gap electrode welding used for assembly of small electronic components. It is an expensive due to small size and made from tungsten. When used for a period of times, it will degrade in the contact surface area of the electrode tip, resulting in reduced weld quality. This research aims to study welding behavior and to analyze the factors affecting the deterioration of the parallel gap electrode from the force and heat in the welding process. With Finite Element Methodology in conjunction with Electrical / Thermal / Mechanical model on MSC Marc software. The results showed that in welding the maximum temperature on the electrode was 1,040.77 K and the maximum normal stress was 646.08 MPa at the contact edge of the parallel gap electrode adjacent to the maximum temperature on the copper wire. The heat is the main factor resulting in high stress, which resulting stress is less than the maximum stress form compressive testing on tungsten specimen, so it does not cause the electrode to be instantly broken or deformed. But if the electrode is used more, it will also cause more deterioration.

School of Mechanical Engineering

Academic year 2017

Student's Signature Suphaphon S.

Advisor's Signature K. Sukk

Co-Advisor's Signature Kanee Freemul

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้จะสำเร็จลุล่วงไปได้โดยหากไม่ได้รับความกรุณาจาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เกียรติ สุกฤษณ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่มอบโอกาสในการศึกษาต่อระดับบัณฑิตศึกษา อีกทั้งยังเป็นผู้ให้ความรู้ คอยแนะนำ และชี้แนะแนวทางในการทำวิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กระวี ตรีอำรรค อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม สำหรับทุนการศึกษาในระดับบัณฑิตศึกษา

ขอขอบคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศุภกิจ รูปจันทร์ ที่จัดอบรมการใช้ซอฟต์แวร์ MSC Marc Mentat อีกทั้งยังคอยให้คำแนะนำ แนวทางการทำวิทยานิพนธ์ ติดตามงาน และข้อคิดดี ๆ

ขอขอบคุณ ดร. เสฏฐวรรธ สุจริตทวัฒน์กุล นักวิจัยศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่ง ประเทศไทย สำหรับการอบรมการใช้ซอฟต์แวร์ MSC Marc คำแนะนำและแนวทางการทำวิจัย อีกทั้งคอยติดตามการดำเนินงาน และการช่วยเหลืออื่น ๆ

ขอขอบคุณ อาจารย์ และเลขานุการ ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ที่คอยให้คำปรึกษา คอยแนะนำแนวทางต่าง ๆ และความช่วยเหลือของการจัดเตรียมเอกสาร

ขอขอบคุณ พี่ ๆ น้อง ๆ กลุ่มวิจัยกลศาสตร์เชิงคำนวณ รวมถึงพี่ ๆ น้อง ๆ บัณฑิตศึกษา สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกลทุกคน ที่คอยให้ความช่วยเหลือให้คำแนะนำในการเรียนและการทำวิจัยด้วยดีเสมอมา

สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ผู้วิจัยขอมอบให้กับบิดา มารดา ซึ่งเป็นที่รักและเคารพยิ่ง ตลอดจนครูอาจารย์ที่เคารพทุกท่าน ที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ และถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดีให้แก่ผู้วิจัยตลอดมา จนทำให้ประสบความสำเร็จในชีวิต

สุภาพร ศิริเล็ก

# สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูป.....	ซ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ.....	ฎ
<b>บทที่</b>	
<b>1 บทนำ.....</b>	<b>1</b>
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
<b>2 ปรีक्षणวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....</b>	<b>5</b>
2.1 การเชื่อมจุดความต้านทานไฟฟ้า.....	5
2.1.1 อิเล็กโทรดช่องว่างขนาน.....	6
2.1.2 หลักการเชื่อมจุดความต้านทาน.....	8
2.1.3 กระบวนการเชื่อมจุดความต้านทาน.....	9
2.1.4 พารามิเตอร์การเชื่อมจุดความต้านทาน.....	11
2.1.5 การเสื่อมสภาพของอิเล็กโทรด.....	14
2.2 ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์.....	16
2.3 การจำลองปัญหาการเชื่อมจุดความต้านทานไฟฟ้า.....	18
2.4 ทฤษฎีความเสียหายของวัสดุทางวิศวกรรม.....	24
<b>3 วิธีดำเนินงานวิจัย.....</b>	<b>29</b>
3.1 การทวนสอบความน่าเชื่อถือของการใช้ซอฟต์แวร์.....	29

## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.2	การจำลองปัญหาการเชื่อมจุดความต้านทานไฟฟ้าบนอิเล็กทรอนิกส์	
	ช่องขนาน.....	34
	3.2.1 การสร้างแบบเขียนคอมพิวเตอร์.....	35
	3.2.2 การสร้างเมชและการทดลองความเป็นอิสระของเมช.....	37
	3.2.3 การกำหนดขนาดขั้นเวลาและความเป็นอิสระของขนาดขั้นเวลา.....	39
	3.2.4 การตั้งค่า.....	40
3.3	การวิเคราะห์ความเสียหายและปัจจัยที่มีผลต่อการเสื่อมสภาพของอิเล็กทรอนิกส์.....	45
4	ผลการวิจัยและวิเคราะห์ผล.....	47
4.1	ผลการทบทวนการใช้งานของซอฟต์แวร์ MSC Marc Mentat.....	47
4.2	การจำลองปัญหาการเชื่อมจุดความต้านทานไฟฟ้าบนอิเล็กทรอนิกส์	
	ช่องขนาน.....	51
	4.2.1 พฤติกรรมอุณหภูมิ.....	51
	4.2.2 พฤติกรรมความเค้น.....	54
	4.2.3 พฤติกรรมความเครียด.....	56
	4.2.4 พฤติกรรม Displacement.....	59
4.3	การวิเคราะห์ความเสียหายและปัจจัยที่ส่งผลต่อการเสื่อมสภาพของอิเล็กทรอนิกส์.....	60
	4.3.1 การวิเคราะห์ความเสียหายของอิเล็กทรอนิกส์ช่องขนาน.....	60
	4.3.2 การวิเคราะห์ปัจจัยที่ส่งผลต่อการเสื่อมสภาพของอิเล็กทรอนิกส์	
	ช่องขนาน.....	62
5	สรุปงานวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	65
	5.1 สรุปผลการวิจัย.....	65
	5.2 ข้อเสนอแนะ.....	67
	รายการอ้างอิง.....	69
	ภาคผนวก	
	ภาคผนวก ก. สมบัติวัสดุ.....	73



## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

ภาคผนวก ข. บทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา.....	84
ประวัติผู้เขียน.....	99



## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1	การจำแนกประเภทการเชื่อมจุดความต้านทานไฟฟ้า .....6
2.2	กระแสเชื่อมสำหรับการเชื่อมจุดความต้านทานไฟฟ้า..... 11
2.3	เวลาเชื่อมสำหรับการเชื่อมจุดความต้านทานไฟฟ้า ..... 12
2.4	แรงอิเล็กทรอนิกส์สำหรับการเชื่อมจุดความต้านทานไฟฟ้า ..... 13
3.1	การกำหนดสมบัติวัสดุบนซอฟต์แวร์ Marc Mentat ..... 41
3.2	การกำหนดสมบัติการสัมผัส ..... 42
3.3	เงื่อนไขขอบสำหรับการจำลองพฤติกรรมบนอิเล็กทรอนิกส์โทรดช่องขนาน ..... 43
3.4	การตั้งค่า Load Cases สำหรับการจำลองพฤติกรรมบนอิเล็กทรอนิกส์โทรด..... 44
3.5	การตั้งค่า Jobs สำหรับการจำลองพฤติกรรมบนอิเล็กทรอนิกส์โทรด ..... 45
4.1	อุณหภูมิและการเคลื่อนที่ของเนื้ออิเล็กทรอนิกส์โทรดที่เวลาการเชื่อม 315 และ 415 มิลลิวินาที..... 50
5.1	สรุปผลการจำลองปัญหาการเชื่อมจุดความต้านทานไฟฟ้าด้วยอิเล็กทรอนิกส์ ช่องขนาน ..... 66
ก.1	สมบัติวัสดุของ C1500 ..... 74
ก.2	สมบัติวัสดุของ SS304..... 75
ก.3	ค่าความต้านทานไฟฟ้าของการสัมผัส ..... 76
ก.4	สมบัติวัสดุทางกลของทั้งสแตน ..... 77
ก.5	สมบัติวัสดุทางความร้อนของทั้งสแตน ..... 80
ก.6	การแผ่รังสีและความร้อนของทั้งสแตน..... 80
ก.7	ค่าความต้านทานไฟฟ้าของทั้งสแตน..... 81
ก.8	สมบัติวัสดุของทองแดง ..... 83

## สารบัญรูป

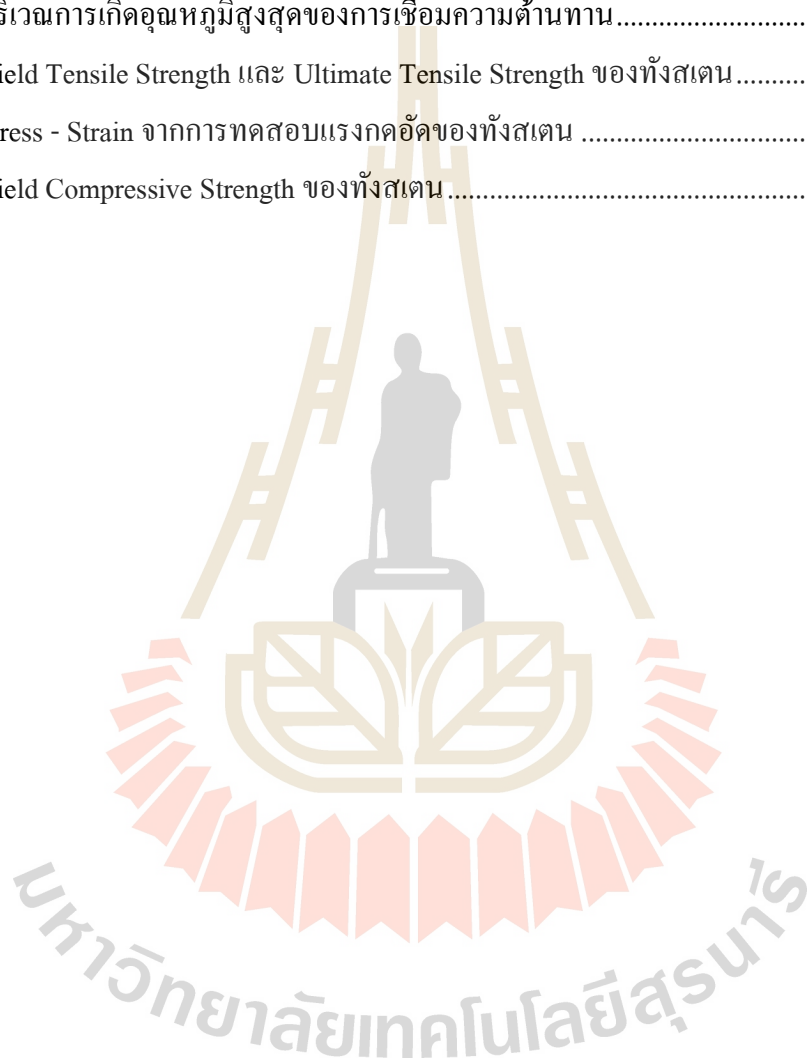
รูปที่	หน้า
1.1	ลักษณะปลายอิเล็กโทรดช่องขนานที่ผ่านการใช้งานมาเป็นระยะเวลาหนึ่ง ..... 1
1.2	ขนาดและอิเล็กโทรดช่องขนาน ..... 3
2.1	ลักษณะการวางอิเล็กโทรดสำหรับการเชื่อมจุดความต้านทานไฟฟ้า ..... 7
2.2	แบบจำลองการเชื่อมจุดความต้านทานด้วยอิเล็กโทรดช่องว่างขนาน ..... 7
2.3	หลักการเชื่อมจุดความต้านทานไฟฟ้า ..... 8
2.4	แผนผังกระบวนการเชื่อมจุดความต้านทาน ..... 10
2.5	ลักษณะพื้นผิวสัมผัสระหว่างรอยต่อ ..... 13
2.6	การเสื่อมสภาพบนอิเล็กโทรดในลักษณะดอกเห็ด ..... 15
2.7	แผนผังขั้นตอนระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ..... 17
2.8	รูปทรงเอลิเมนต์ 3 มิติ ..... 17
2.9	ความสัมพันธ์ของปรากฏการณ์ในกระบวนการเชื่อมจุดความต้านทาน ..... 19
2.10	ความต้านทานการไหลของกระแสไฟฟ้าบริเวณพื้นผิวสัมผัส ..... 22
2.11	การนำความร้อนบริเวณพื้นผิวสัมผัส ..... 23
2.12	การจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วยแบบจำลอง Electrical-Thermo-Mechanical ..... 24
2.13	พฤติกรรมที่เกิดความเสียหาย ..... 25
2.14	แผนผังทฤษฎีความเสียหายของวัสดุ ..... 26
3.1	ขนาดและรูปทรงของอิเล็กโทรดตรงข้าม ..... 30
3.2	แบบเขียนคอมพิวเตอร์ของอิเล็กโทรดตรงข้ามในการเชื่อม ..... 30
3.3	เมชสำหรับการเชื่อมจุดความต้านทานไฟฟ้าด้วยอิเล็กโทรดตรงข้าม ..... 31
3.4	แผนผังรูปแบบจำลองการเชื่อมจุดความต้านทานไฟฟ้าบนซอฟต์แวร์ Marc Mentat ..... 32
3.5	กระบวนการเชื่อมจุดความต้านทานไฟฟ้าด้วยอิเล็กโทรดตรงข้าม ..... 33
3.6	เงื่อนไขขอบการจำลองปัญหาการเชื่อมจุดความต้านทานไฟฟ้าผ่านอิเล็กโทรด ตรงข้าม ..... 34

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.7	แผนผังกระบวนการจำลองปัญหาทางไฟไนต์เอลิเมนต์บนซอฟต์แวร์ Marc Mentat.....35
3.8	แบบเขียนคอมพิวเตอร์ของอีเล็กโทรดช่องขนาน .....36
3.9	ระนาบพื้นผิวและจุดรองรับแรงกดของอีเล็กโทรดช่องขนาน .....36
3.10	เมชบนอีเล็กโทรดช่องขนาน .....37
3.11	อุณหภูมิสูงสุดของการเชื่อมเทียบกับจำนวนเอลิเมนต์ .....38
3.12	อุณหภูมิสูงสุดของการเชื่อมเทียบกับชั้นเวลาการคำนวณ .....40
3.13	แผนผังกระบวนการเชื่อมจุดความต้านทานไฟฟ้าด้วยอีเล็กโทรดช่องขนาน .....42
3.14	เงื่อนไขขอบสำหรับการจำลองพฤติกรรมบนอีเล็กโทรดช่องขนาน .....44
4.1	อุณหภูมิของการเชื่อมจุดความต้านทานด้วยอีเล็กโทรดตรงข้าม.....47
4.2	อุณหภูมิการเชื่อมความต้านทานด้วยอีเล็กโทรดตรงข้ามที่เวลาการเชื่อม 315 มิลลิวินาที.....48
4.3	การเคลื่อนตัวของเนื้อโลหะบนอีเล็กโทรดตรงข้าม .....49
4.4	อุณหภูมิเทียบกับแรงดันไฟฟ้าที่เวลาใด ๆ ของการเชื่อม .....51
4.5	พฤติกรรมอุณหภูมิของการเชื่อมจุดความต้านทานด้วยอีเล็กโทรดช่องขนาน.....52
4.6	พฤติกรรมอุณหภูมิบนอีเล็กโทรดช่องขนาน.....53
4.7	ความเค้นบนอีเล็กโทรดช่องขนานที่เวลาใด ๆ ของการเชื่อม.....54
4.8	พฤติกรรม Equivalent Stress บนอีเล็กโทรดช่องขนาน .....55
4.9	พฤติกรรม Normal Stress บนอีเล็กโทรดช่องขนาน .....55
4.10	ตำแหน่งความเค้นบนหน้าสัมผัสของอีเล็กโทรด .....56
4.11	ความเครียดบนอีเล็กโทรดที่เวลาใด ๆ ของการเชื่อม .....57
4.12	พฤติกรรมความเครียดรวมบนอีเล็กโทรดช่องขนาน.....58
4.13	พฤติกรรมความเครียดเนื่องจากความร้อนบนอีเล็กโทรดช่องขนาน .....58
4.14	ระยะการเคลื่อนที่ของเนื้อโลหะบนอีเล็กโทรดช่องขนานที่เวลาใด ๆ ของ การเชื่อม.....59
4.15	พฤติกรรมของการเคลื่อนที่ของเนื้อโลหะบนอีเล็กโทรดช่องขนาน .....60
4.16	การเปรียบเทียบความเค้นบนความสัมพันธ์ของความเค้นและความเครียด .....61
4.17	การเปรียบเทียบความเค้นบนอีเล็กโทรดช่องขนาน .....62

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.18 การเปรียบเทียบการเคลื่อนที่ของเนื้อโลหะบนอิเล็กโทรดช่องขนาน .....	63
5.1 บริเวณการเกิดอุณหภูมิสูงสุดของการเชื่อมความต้านทาน.....	66
ก.1 Yield Tensile Strength และ Ultimate Tensile Strength ของทั้งสแตน .....	78
ก.2 Stress - Strain จากการทดสอบแรงกดอัดของทั้งสแตน .....	78
ก.3 Yield Compressive Strength ของทั้งสแตน .....	79



## คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

$\Omega$	=	โอห์ม (หน่วยของค่าความต้านทานไฟฟ้า)
$\{C_T\}$	=	เวกเตอร์สัมประสิทธิ์ความร้อน
$\rho_E$	=	สภาพความต้านทานไฟฟ้า
$\sigma_{uc}$	=	ความเค้นสูงสุดจากการทดสอบแรงกด
$\sigma_{ut}$	=	ความเค้นสูงสุดจากการทดสอบแรงดึง
$\sigma_y$	=	ความเค้นคราก
[C]	=	เมทริกซ์ Elastic-Plastic
$\rho_c$	=	สภาพความต้านทานไฟฟ้าบริเวณสัมผัส
$\sigma_y$	=	ความเค้นคราก
$\phi$	=	ศักย์ไฟฟ้า
$\Delta\phi$	=	ความต่างศักย์ไฟฟ้า
$\Delta T$	=	ความแตกต่างของอุณหภูมิบริเวณพื้นผิวสัมผัส
A	=	แอมแปร์ (หน่วยของกระแสไฟฟ้า)
A	=	พื้นที่หน้าตัด
AC	=	ไฟฟ้ากระแสสลับ
c	=	ความจุความร้อนจำเพาะ
DC	=	ไฟฟ้ากระแสตรง
FEM	=	ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์
I	=	กระแสไฟฟ้า
k	=	สัมประสิทธิ์การนำความร้อน
K	=	เคลวิน (หน่วยของอุณหภูมิ)
kg	=	กิโลกรัม
L	=	ความยาว
L	=	ค่าคงที่ของ Lorentz เท่ากับ $2.44 \times 10^{-8} \text{ W} \cdot \Omega \cdot \text{K}^{-2}$
LSRSW	=	การเชื่อมจุดความต้านทานขนาดใหญ่
M	=	เมกะ
m	=	เมตร

## คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

Micro-RSW	=	การเชื่อมจุดความต้านทานขนาดไมโคร
mm	=	มิลลิเมตร (หน่วยของความยาว)
ms	=	มิลลิวินาที
N	=	นิวตัน (หน่วยของแรง)
°C	=	องศาเซลเซียส
Pa	=	ปาสคาล (หน่วยของความเค้น)
Q	=	ความร้อนที่เกิดขึ้น
R	=	ความต้านทานไฟฟ้า
RSW	=	การเชื่อมจุดความต้านทาน
SSRSW	=	การเชื่อมจุดความต้านทานขนาดเล็ก
t	=	เวลาที่กระแสไฟฟ้าไหลผ่านวงจร
T	=	อุณหภูมิ
W	=	วัตต์ (หน่วยของพลังงานความร้อน)
P	=	แรงอิเล็กทรอนิกส์
$d\{\sigma\}$	=	ความแตกต่างของเวกเตอร์ความเค้น
$d\{\epsilon\}$	=	ความแตกต่างของเวกเตอร์ความเครียด
dT	=	ความแตกต่างของอุณหภูมิ
$\rho$	=	ความหนาแน่นของมวล

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหาการวิจัย

เทคโนโลยีการเชื่อมจุดความต้านทานด้วยอิเล็กโทรดช่องขนานถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมด้านอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งมีการนำมาใช้มากกว่า 90% สำหรับการเชื่อมต่อแผงวงจร และการประกอบชิ้นส่วนอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ขนาดเล็ก เนื่องจากการเชื่อมที่ทำได้ง่าย มีความรวดเร็ว สามารถควบคุมพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องได้ง่าย และทำให้เกิดผลกระทบจากความร้อนในวงแคบ อีกทั้งยังมีความสะอาดและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมอีกด้วย (Chenxi et al., 2003) นอกจากนี้ยังเป็นการเชื่อมที่ทำให้เกิดรอยเชื่อมขนาดเล็ก และใช้พื้นที่ในการปฏิบัติการเชื่อมน้อย (Dong et al., 2002) ซึ่งมีความสะดวกต่อการเชื่อมชิ้นส่วนขนาดเล็ก ดังนั้นจึงทำให้เทคโนโลยีนี้เป็นที่นิยมใช้ในการการเชื่อมประกอบชิ้นส่วนอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์



รูปที่ 1.1 ลักษณะปลายอิเล็กโทรดช่องขนานที่ผ่านใช้งานมาเป็นระยะเวลาหนึ่ง

การเชื่อมจุดความต้านทานทำได้โดยการกดอิเล็กโทรดช่องขนานลงบนวัสดุ ณ ตำแหน่งที่ต้องการเชื่อม จากนั้นจ่ายพลังงานไฟฟ้าไหลผ่านอิเล็กโทรด พลังงานไฟฟ้าจะเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อน เนื่องจากความต้านทานการไหลกระแสไฟฟ้าของวัสดุ โดยขนาดความต้านทานขึ้นอยู่กับพื้นที่หน้าตัดและสมบัติวัสดุ กล่าวคือหากวัสดุที่มีขนาดและพื้นที่หน้าตัดเท่ากัน วัสดุที่มีความต้านทานสูงจะเกิดความร้อนสูงเมื่อกระแสไฟฟ้าไหลผ่านรูปทรง หากกรณีวัสดุชนิดเดียวกัน



ส่วนที่มีพื้นที่หน้าตัดเล็กกว่าจะเกิดความร้อนสูงกว่าเมื่อกระแสไฟฟ้าไหลผ่าน ดังนั้นบริเวณปลายอิเล็กโทรดซึ่งมีพื้นที่หน้าตัดแคบจึงมีอุณหภูมิสูง โดยจากขั้นตอนการเชื่อมข้างต้นบริเวณปลายอิเล็กโทรดเป็นส่วนที่รับภาระกรรมทั้งแรงกดและอุณหภูมิสูง เมื่อใช้งานเป็นระยะเวลานาน ผิวสัมผัสปลายอิเล็กโทรดจะเกิดการสึกหรอ และส่งผลให้รอยเชื่อมที่ได้มีคุณภาพไม่ดีพอ

การรับภาระกรรมจากแรงกดและอุณหภูมิสูงของอิเล็กโทรดทำให้เกิดความเค้นเป็นสาเหตุให้ผิวสัมผัสปลายอิเล็กโทรดเกิดการสึกกร่อน โดยนิยามความเค้นเป็นแรงกระทำต่อพื้นที่ด้วยขนาดแรงค่าหนึ่งบริเวณที่มีพื้นที่รับแรงน้อยจะเกิดความเค้นสูง ส่งผลให้วัสดุเกิดการเสียรูปได้ หากการเสียรูปเกิดขึ้นจนเกินขีดจำกัดความสามารถที่วัสดุรับได้ วัสดุจะเกิดการพังเสียหาย ขีดความสามารถหมายความว่า กรณีวัสดุเหนียว การแตกหักจะเกิดเมื่อมีความเค้นในเนื้อวัสดุเกินกว่าค่าความเค้นสูงสุดที่วัสดุจะรับได้ กรณีวัสดุเปราะ ความเสียหายเกิดเมื่อค่าความเค้นในเนื้อวัสดุเกินกว่าค่าความเค้นที่จุดคราก เนื่องจากความเค้นที่จุดครากและความเค้นสูงสุดของวัสดุเปราะมีค่าใกล้เคียงกัน โดยทั่วไปสมบัติที่เกี่ยวข้องกับความเสียหายทางวัสดุมักได้มาจากการทดสอบด้วยชิ้นงานจริง เช่น การทดสอบแรงดึงและแรงอัด จนทราบค่าความเค้นสูงสุดที่วัสดุทนรับได้ การทดสอบการเสียรูปของรอยเชื่อมต่อการรับแรงและภาระกรรมความร้อน เป็นต้น สำหรับการทดสอบชิ้นงานจริงต้องกำหนดเงื่อนไขต่าง ๆ ให้เหมาะสม ใช้ระยะเวลานาน และต้นทุนการดำเนินการสูง ดังนั้นการออกแบบทางวิศวกรรมสมัยใหม่จึงนำเอาระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มาช่วยวิเคราะห์ ซึ่งช่วยลดต้นทุนและเวลาได้เป็นอย่างมาก

ปัจจุบันมีการนำเอาเทคนิคระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มาใช้วิเคราะห์กระบวนการเชื่อมขึ้นส่วนอิเล็กโทรดชนิดหลากหลายรูปแบบ สำหรับการเชื่อมจุดความต้านทานไฟฟ้า งานวิจัยที่เกี่ยวข้องส่วนใหญ่เน้นการศึกษาคุณภาพรอยเชื่อมเป็นหลัก แต่งานวิจัยนี้มุ่งเน้นศึกษาพฤติกรรมอิเล็กโทรดต่อการใช้งานเชื่อมจุดความต้านทาน โดยมุ่งศึกษาพฤติกรรมและปัจจัยที่มีผลต่อการเสื่อมสภาพบนอิเล็กโทรดของขนานจากผลความเค้นเนื่องจากของแรงและความร้อน โดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์บนซอฟต์แวร์ Marc Mentat จำลองการกระจายอุณหภูมิ ความเค้น ความเครียด และการเคลื่อนที่ของเนื้อโลหะบนอิเล็กโทรด ภายใต้กระบวนการเชื่อมความต้านทานใน 1 รอยเชื่อม โดยผลวิจัยนี้จะช่วยให้ทราบปัจจัยหลักที่ส่งผลให้อิเล็กโทรดเกิดเสื่อมสภาพและนำไปสู่แนวการออกแบบที่เหมาะสมเพื่อลดต้นทุนได้

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

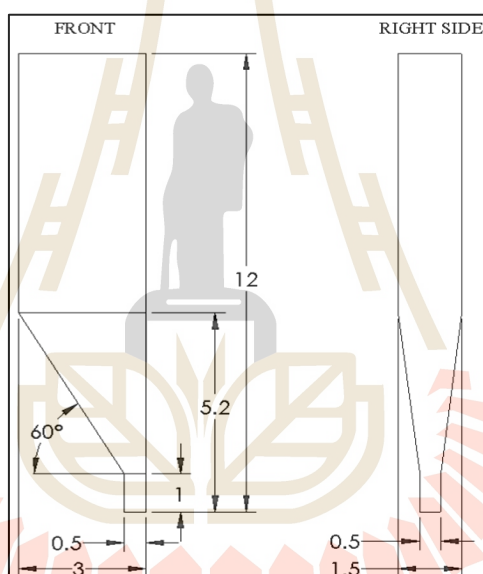
1.2.1 เพื่อศึกษาพฤติกรรมอุณหภูมิ ความเค้น ความเครียด และการเคลื่อนที่ของเนื้อโลหะบนอิเล็กโทรดของขนานจากการเชื่อมความต้านทานไฟฟ้า

1.2.2 เพื่อศึกษาและหาปัจจัยที่มีผลต่อการเสื่อมสภาพของอิเล็กทรอนิกส์เชื่อมช่องขนาน ภายใต้กระบวนการเชื่อมความต้านทานไฟฟ้า

### 1.3 ขอบเขตของการวิจัย

งานวิจัยนี้ศึกษาหาปัจจัยที่ส่งผลให้อิเล็กทรอนิกส์เชื่อมช่องขนานเกิดการเสื่อมสภาพภายใต้ปรากฏการณ์ของกระบวนการเชื่อมความต้านทานไฟฟ้าแบบจุดใน 1 รอยเชื่อม โดยใช้ซอฟต์แวร์ทางด้านไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับจำลองพฤติกรรมอุณหภูมิ ความเค้น ความเครียด และการเคลื่อนที่ของเนื้อโลหะบนอิเล็กทรอนิกส์เชื่อมช่องขนาน

1.3.1 อิเล็กทรอนิกส์เชื่อมช่องขนานผลิตจากวัสดุทองแดง โดยมียูปร่างและขนาด ดังรูปที่ 1.2



รูปที่ 1.2 ขนาดและรูปร่างอิเล็กทรอนิกส์เชื่อมช่องขนาน

1.3.2 เส้นลวดทองแดงสำหรับเชื่อมยึดวงจรขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางกลาง 190 ไมโครเมตร

1.3.3 ค่าพารามิเตอร์อ้างอิงของกระบวนการเชื่อม ได้แก่ แรงอิเล็กทรอนิกส์ขนาด 0.56 นิวตัน กระแสเชื่อมขนาด 0.75 กิโลแอมแปร์ และเวลาเชื่อม 25 มิลลิวินาทีต่อรอยเชื่อม โดยแบ่งเป็น 3 ขั้นตอนดังนี้ Squeeze 4 มิลลิวินาที, Weld 16 มิลลิวินาที และ Hold 5 มิลลิวินาที

1.3.4 จำลองพฤติกรรมอุณหภูมิ ความเค้น ความเครียด และการเคลื่อนที่ของเนื้อโลหะบนอิเล็กทรอนิกส์ที่มีลักษณะ 3 มิติ ภายใต้กระบวนการเชื่อมจุดความต้านทาน ไฟฟ้าด้วยซอฟต์แวร์ MSC Marc

1.3.5 ไม่พิจารณารูปทรงของหัวอิเล็กทรอนิกส์ที่มีผลต่อการเสียดรูป การสูญเสียพลังงานจากการเหนี่ยวนำไฟฟ้าและความร้อน และไม่พิจารณาการหลอมละลายของเส้นลวด

#### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 พฤติกรรมการกระจายอุณหภูมิ ความเค้น ความเครียด และการเคลื่อนที่ของเนื้อโลหะบนอิเล็กทรอนิกส์ของขบวนการจากการเชื่อมความต้านทานไฟฟ้า

1.4.2 ปัจจัยที่มีผลต่อการเสื่อมสภาพของอิเล็กทรอนิกส์ของขบวนการ

1.4.3 เป็นแนวทางสำหรับการลดต้นทุนการผลิตชิ้นส่วนและอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ขนาดเล็ก และอุตสาหกรรมต่าง ๆ ที่ใช้การเชื่อมแบบต้านทานไฟฟ้าในการผลิต



## บทที่ 2

### ปรีทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การศึกษาความเค้นเนื่องจากแรง-ความร้อน บนอิเล็กโทรดช่องขนานในกระบวนการเชื่อมจุดความต้านทาน เพื่อวิเคราะห์หาปัจจัยที่ส่งผลต่อการเสื่อมสภาพของผิวสัมผัสอิเล็กโทรด อันเป็นสาเหตุให้คุณภาพของรอยเชื่อมลดลง ผู้ศึกษาต้องทราบข้อมูลของอิเล็กโทรดช่องขนาน กระบวนการและพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับการเชื่อม และกลไกการเสื่อมสภาพของอิเล็กโทรดจากการเชื่อมจุดความต้านทาน โดยอาศัยหลักการและความเข้าใจในเรื่องระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ทฤษฎีพลังงานไฟฟ้า ความร้อน และกลศาสตร์วัสดุ รวมถึงทฤษฎีความเสียหายของวัสดุ เพื่อทำนายพฤติกรรมและวิเคราะห์ปัจจัยที่ส่งผลต่อการเสื่อมสภาพของอิเล็กโทรดช่องขนาน

#### 2.1 การเชื่อมจุดความต้านทานไฟฟ้า

การเชื่อมจุดความต้านทานไฟฟ้า (Resistance Spot Welding : RSW) เป็นกระบวนการเชื่อมที่ทำงานบนหลักการสร้างความร้อนจากความต้านทานไฟฟ้า โดยไม่อาศัยลวดเติมหรือก๊าซปกคลุม และปราศจากมลพิษ โดย Govindan, P. and Sankar, S., (2013) ได้อธิบายว่าเป็นเทคโนโลยีที่มีการนำมาใช้อย่างกว้างขวางและเป็นที่ยอมรับมากที่สุดสำหรับการเชื่อมโลหะแผ่นบาง โดยเฉพาะกระบวนการผลิตและการประกอบตัวถังของรถยนต์ เนื่องจากเป็นเทคโนโลยีที่ได้รับการพิสูจน์แล้วว่ามีการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ รอยเชื่อมมีคุณภาพสูง และมีความคุ้มค่า เนื่องจากมีต้นทุนของวัสดุสิ้นเปลืองที่ใช้ในกระบวนการที่ต่ำ อีกทั้ง Hee S.C. and Hyo C.K., (2011) ยังชี้ว่าเป็นเทคโนโลยีระบบอัตโนมัติขั้นสูงที่สามารถใช้หุ่นยนต์ในสายการผลิตได้ มีความเร็วในการทำงานสูงจึงสามารถช่วยปรับปรุงประสิทธิภาพของระบบเชื่อมได้เป็นอย่างดี ซึ่งถือได้ว่าเป็นวิธีการเชื่อมประกอบชิ้นส่วนที่มีประสิทธิภาพสูง

การเชื่อมจุดความต้านทานไฟฟ้าจะแบ่งออกเป็น 3 ประเภท ได้แก่ 1) การเชื่อมจุดความต้านทานขนาดใหญ่ (Large Resistance Spot Welding : LRSW) 2) การเชื่อมจุดความต้านทานขนาดเล็ก (Small-Scale Resistance Spot Welding : SSRSW) และ 3) การเชื่อมจุดความต้านทานขนาดไมโคร (Micro-Resistance Spot Welding : Micro-RSW) ซึ่งสามารถจำแนกประเภทได้จากความหนาของชิ้นงาน โลหะและลักษณะงานที่ต้องการเชื่อมแสดงดังในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 การจำแนกประเภทการเชื่อมจุดความต้านทานไฟฟ้า (Meranda S., 2011)

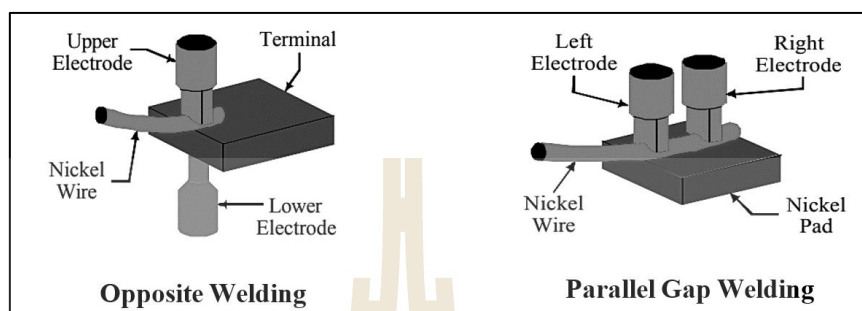
ประเภท	ความหนาชิ้นงาน (mm)	ตัวอย่างการใช้งาน
LSRSW	0.41-1.57	เครื่องใช้ไฟฟ้า, ตัวถังรถยนต์, เพอร์นิเจอร์ เป็นต้น
SSRSW	0.125-0.51	ชิ้นส่วนเครื่องบินขนาดเล็ก, แผงวงอิเล็กทรอนิกส์, หน้าสัมผัสรีเลย์, เครื่องมือผ่าตัดขนาดเล็ก เป็นต้น
Micro - RSW	0.000125-0.125	แผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์, ชิ้นส่วนสำหรับการรักษาทางการแพทย์, เครื่องตัดไมโคร เป็นต้น

D. F. Farson et al., (2004) และ Meranda S., (2011) ได้อธิบายเกี่ยวกับการตรวจสอบและควบคุมคุณภาพของกระบวนการเชื่อมจุดความต้านทานไฟฟ้าขนาดเล็กและขนาดไมโครมีข้อมูลการศึกษาและงานวิจัยปริมาณน้อยกว่าการเชื่อมจุดความต้านทานไฟฟ้าขนาดใหญ่ ถึงแม้ว่ากระบวนการเชื่อมจะมีความแตกต่างที่สำคัญหลายประการ เช่น กระบวนการเชื่อมจุดความต้านทานขนาดเล็กและไมโครมีชิ้นงานขนาดที่บางกว่า มีการตรวจสอบการเสีรูบบนอิเล็กทรอนิกส์ที่ต้องใช้ความละเอียดสูงและยากกว่า ใช้เวลาการเชื่อมที่ค่อนข้างน้อยกว่า ซึ่งโดยทั่วไปจะใช้เวลาในการเชื่อมประมาณหลักสิบลิวินาที ในขณะที่การเชื่อมจุดความต้านทานขนาดใหญ่ใช้เวลาการเชื่อมหลายร้อยมิลิวินาที นอกจากนี้ Kuang-Hung and Ko-Jui, (2012) ยังระบุด้วยว่าการเชื่อมจุดความต้านทานขนาดเล็กและขนาดไมโครใช้อิเล็กโทรดมีขนาดเล็ก จึงทำให้ได้ผลลัพธ์ที่มีคุณภาพสม่ำเสมอ ซึ่งสามารถช่วยลดการทดสอบแบบไม่ทำลายได้อีกด้วย

### 2.1.1 อิเล็กโทรดช่องว่างขนาน

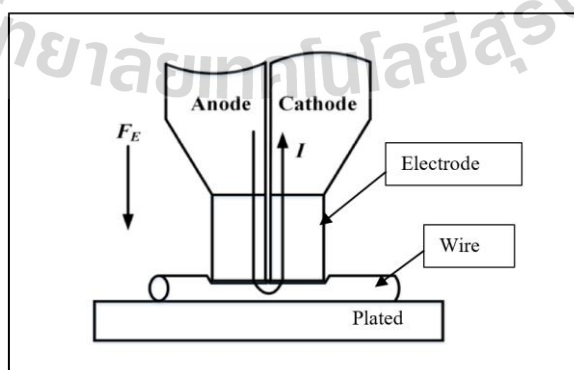
ปัจจุบันความต้องการใช้งานอุปกรณ์ที่มีขนาดเล็กและน้ำหนักเบาที่มีปริมาณสูง ทำให้อุตสาหกรรมการผลิตชิ้นส่วนและอุปกรณ์ขนาดเล็กมีการเติบโตเป็นอย่างมาก ความต้องการกระบวนการเชื่อมประกอบชิ้นส่วนอุปกรณ์ขนาดเล็กที่เชื่อถือได้และมีประสิทธิภาพสูงเพิ่มมากขึ้น จึงทำให้มีการวิจัยและพัฒนาการเชื่อมความต้านทานไฟฟ้าให้สามารถสร้างรอยเชื่อมที่มีขนาดเล็กและมีการผลิตที่แม่นยำมากยิ่งขึ้นด้วย (Kasper S.F., 2010) ด้วยเหตุนี้เทคโนโลยีการเชื่อมจุดความต้านทานไฟฟ้าขนาดไมโครจึงได้รับความสนใจและเป็นที่ยอมรับเป็นอย่างมากในการผลิตชิ้นส่วนและอุปกรณ์ขนาดเล็ก เช่น ชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ ส่วนประกอบโทรคมนาคม และผลิตภัณฑ์ทางการแพทย์ เป็นต้น แต่เนื่องด้วยการเชื่อมโดยทั่วไปมีการวางอิเล็กโทรดลักษณะตรงข้าม (Opposite Welding) เมื่อชิ้นส่วนอุปกรณ์ที่ต้องการเชื่อมมีขนาดเล็ก การเข้าถึงพื้นที่การเชื่อมจึงเป็นไปได้ยากลำบาก ดังนั้นเพื่อความสะดวกในการเชื่อมจึงมีการออกแบบให้อิเล็กโทรดมีการวางตัวด้านเดียวกันและมีระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดทั้ง 2 ขา ขนาดน้อยกว่า

1 มิลลิเมตร แสดงดังรูปที่ 2.1 เรียกว่าอิเล็กโทรดลักษณะนี้ว่า “อิเล็กโทรดช่องขนาน (Parallel Gap Welding)”



รูปที่ 2.1 ลักษณะการวางอิเล็กโทรดสำหรับการเชื่อมจุดความต้านทานไฟฟ้า (David W., 1998)

เทคโนโลยีการเชื่อมจุดความต้านทานด้วยอิเล็กโทรดช่องขนาน (Parallel Gap Resistance Welding) ถูกนำมาใช้ในการเชื่อมต่อแผงวงจรและชิ้นส่วนของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่าง ๆ มากกว่า 90% ของกระบวนการผลิตในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ (Yang Liu et al., 2016) เนื่องจากสามารถเข้าถึงพื้นที่ที่เชื่อมได้โดยง่าย ทำให้มีความสะดวกต่อการใช้งาน ควบคุมพารามิเตอร์ต่าง ๆ ได้ง่าย เกิดผลกระทบจากความร้อนในวงแคบ ดังนั้นการเชื่อมความต้านทานแบบช่องขนานจึงมีความสำคัญต่อการผลิตชิ้นส่วนอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เป็นอย่างมาก ซึ่งกระบวนการเชื่อมข้างต้นใช้หลักการส่งผ่านแรงกดจากอิเล็กโทรดช่องว่างขนานการไปยังชิ้นงานเชื่อม และสร้างความร้อนจากความต้านทานการไหลผ่านของไฟฟ้าจากอิเล็กโทรดด้านซ้ายไปยังด้านขวา แสดงดังรูปที่ 2.2 เพื่อให้ชิ้นงานเชื่อมหลอมละลายเกิดเป็นรอยเชื่อมประสานกัน



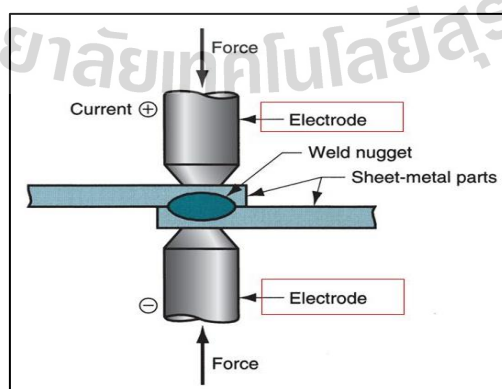
รูปที่ 2.2 แบบจำลองการเชื่อมความต้านทานด้วยอิเล็กโทรดช่องว่างขนาน (Yong Liu et al., 2016)



ทั้งนี้ อิเล็กโทรดช่องขนานเป็นเทคโนโลยีที่เหมาะสมสำหรับงานเชื่อมที่มีขนาดเล็ก อิเล็กโทรดที่ใช้ในการเชื่อมจึงต้องมีขนาดเล็กด้วยเช่นกัน ในการดำเนินการเชื่อมจึงต้องใช้ความระมัดระวัง เพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่มีความแม่นยำและเกิดผลกระทบต่อส่วนประกอบอื่นของงานเชื่อมน้อยที่สุด ดังนั้นพารามิเตอร์ที่ใช้ในกระบวนการเชื่อมจึงต้องมีความเหมาะสมกับอิเล็กโทรดและงานเชื่อม จึงทำให้มีงานวิจัยต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับการเชื่อม เช่น การทดสอบหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของ Xuguang Guo et al., (2014) และ W. W. Zang et al., (2017) ให้ค่ากระแสไฟฟ้า 0.75 แอมแปร์ แรงอิเล็กโทรดเท่ากับ 0.56 นิวตัน เวลาการไหลของกระแส 16 มิลลิวินาที และระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดทั้งสองด้านเท่ากับ 0.1 มิลลิเมตร ซึ่งเป็นค่าที่ทำให้ได้รอยเชื่อมมีคุณภาพและอิเล็กโทรดไม่เกิดความเสียหาย การทำนายอุณหภูมิและพฤติกรรมของการกระจายอุณหภูมิบนชิ้นงานเชื่อมของ Yang Liu et al., (2016) และการศึกษาพฤติกรรมของการกระจายอุณหภูมิ ความเค้น และการเสีรูปร่างของเส้นลวดทองแดงโดย Bingying Wu et al., (2018) เป็นต้น

### 2.1.2 หลักการเชื่อมจุดความต้านทาน

Nielsen Chris Valentin and Zhang Wenqi, (2013) ชี้ว่าการเชื่อมความต้านทานเป็นเทคนิคการเชื่อมที่รวดเร็วและมีประสิทธิภาพใช้ในสายการประกอบจำนวนมาก เนื่องจากการเชื่อมแต่ละครั้งใช้เวลาตั้งแต่ไม่กี่วินาทีถึงหนึ่งวินาทีขึ้นอยู่กับลักษณะงาน แต่ในช่วงเวลาดำเนินการสั้น ๆ จะมีปรากฏการณ์ทางกายภาพหลายอย่างเกี่ยวข้อง จึงทำให้เกิดเป็นกระบวนการที่ซับซ้อน ซึ่งลักษณะทางกายภาพพื้นฐานของการเชื่อมความต้านทานคือ ลักษณะทางกล ไฟฟ้าและความร้อน โดยไฟฟ้าเป็นกลไกพื้นฐานสำหรับการสร้างความร้อนจากความต้านทานการไหลไฟฟ้าบริเวณรอยต่อระหว่างวัสดุที่ถูกกดแน่นด้วยแรงอิเล็กโทรด ดังรูปที่ 2.3 ความร้อนที่เกิดขึ้นจะต้องสามารถหลอมละลายวัสดุเชื่อมได้ (Govindan P. and Sankar S., 2013)



รูปที่ 2.3 หลักการเชื่อมจุดความต้านทาน ไฟฟ้า (Moen E. and et al, 2016)

Y., Zhou et al., (2000) ระบุว่า การสร้างความร้อนจากการเปลี่ยนไฟฟ้าไปเป็น ความร้อนนั้น เกิดจากตัวกลางที่นำความร้อนได้สามารถเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าให้เป็นพลังงาน ความร้อน โดยจากกฎการเกิดความร้อนของจูล (Joule Heating) ปริมาณความร้อน (Q) จะขึ้นอยู่กับ เวลาการไหลไฟฟ้า (t) ซึ่งหาได้จากขนาดของกระแสไฟฟ้า (I) ที่ไหลผ่านตัวนำซึ่งเป็นวัสดุที่มี ความต้านทานการไหลไฟฟ้า (R) ดังสมการที่ 2.1

$$Q = I^2 R t \quad (2.1)$$

ค่าความต้านทานการไหลไฟฟ้าหาได้จากความสัมพันธ์ระหว่างความยาว (L) และ พื้นที่หน้าตัด (A) ดังสมการที่ 2.2

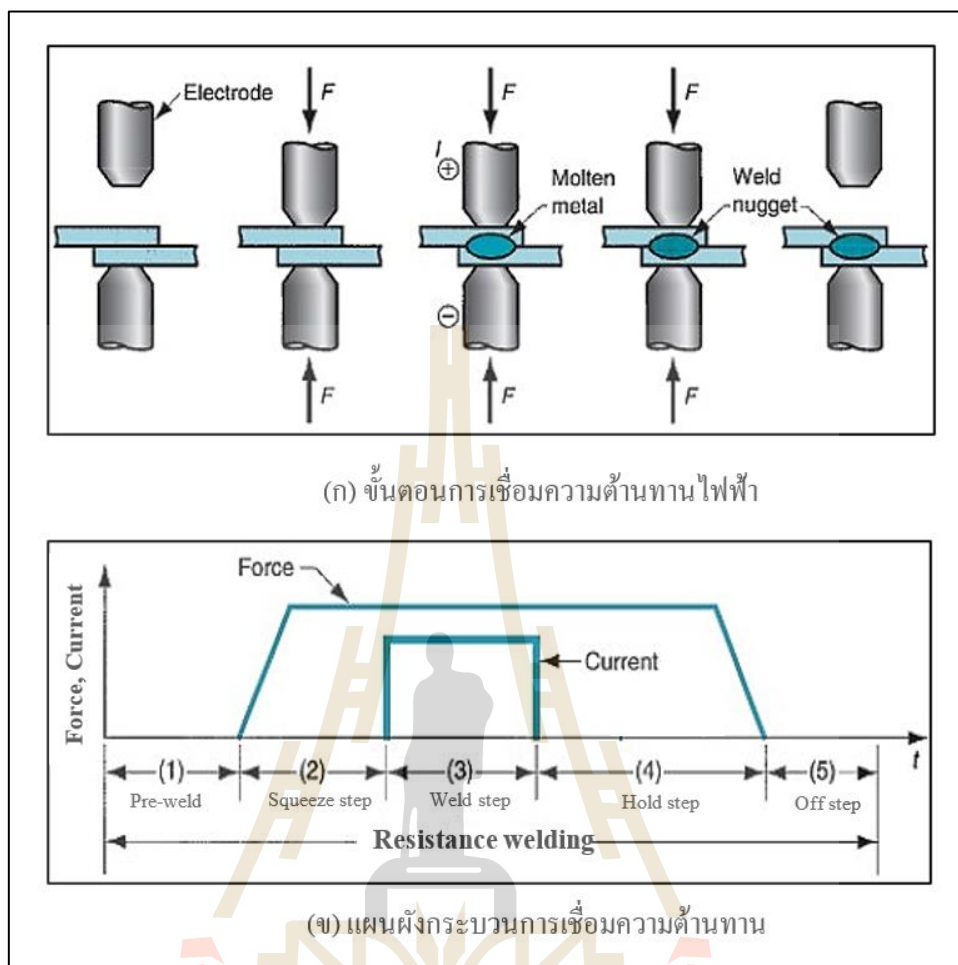
$$R = \rho_E \frac{L}{A} \quad (2.2)$$

เมื่อ  $\rho$  คือ ค่าคงที่ ซึ่งเป็นสมบัติเฉพาะของตัวกลางที่บ่งบอกถึงประสิทธิภาพ ในการนำไฟฟ้า เรียกว่า “สภาพความต้านทานไฟฟ้า (Electrical Resistivity)” มีหน่วยเป็น  $\Omega \cdot m$  โดยแต่ละตัวกลางจะมีค่าสภาพความต้านทานไฟฟ้าแตกต่างกันขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและชนิดของวัสดุ อย่างไรก็ตาม การเชื่อมความต้านทานในงานบางชนิดอาจใช้การสร้างความร้อน จากการเปลี่ยนรูปพลังงานไฟฟ้าไปสู่การเปลี่ยนแปลงของความร้อนหรือระดับอุณหภูมิของ ปรากฏการณ์ Peltier Effect เนื่องจากความร้อนที่เกิดขึ้นส่งผลกระทบต่อที่มีขนาดเล็กกว่าปรากฏการณ์ Joule Heating ซึ่งโดยทั่วไปจะน้อยกว่า 10 เปอร์เซ็นต์ (David Loveborn, 2016) โดย Peltier effect จะเกิดเมื่อกระแสไฟฟ้าไหลผ่านวัสดุสองชนิดที่เชื่อมต่อกัน ระดับอุณหภูมิจะสูงขึ้นที่บริเวณ รอยต่อข้างหนึ่ง แต่ระดับอุณหภูมิจะลดลงอีกข้างหนึ่ง ทั้งนี้เกิดจากอิเล็กตรอนในวัสดุสองชนิด มีระดับพลังงานไม่เท่ากัน การให้ความแตกต่างศักย์ไฟฟ้าเพื่อให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ หากอิเล็กตรอน ถูกเหนี่ยวนำด้วยศักย์ไฟฟ้าและเคลื่อนที่จากบริเวณที่มีมีระดับพลังงานสูงกว่าไปสู่ระดับพลังงาน ต่ำกว่าอิเล็กตรอนจะปล่อยพลังงานออกมาในรูปความร้อนทำให้อุณหภูมิสูงขึ้นนั่นเอง ซึ่งวัสดุ ที่จะแสดงปรากฏการณ์นี้จึงเป็นวัสดุกึ่งตัวนำและวัสดุจำพวกโลหะเท่านั้น

### 2.1.3 กระบวนการเชื่อมจุดความต้านทาน

การเชื่อมจุดความต้านทานไฟฟ้าโดยทั่วไปมักแบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอน ซึ่งแสดง ดังรูปที่ 2.3 (ก) และมีแผนผังกระบวนการเชื่อมดังรูปที่ 2.3 (ข)





รูปที่ 2.4 (ก) ขั้นตอนการเชื่อมความต้านทานไฟฟ้า (ข) แผนผังกระบวนการเชื่อมความต้านทานไฟฟ้า  
(Moeen E. and et al, 2016)

โดย สักดิ์ชัย จันทศรี และคณะ (2555) ให้นิยามและรายละเอียดของแต่ละขั้นตอนการเชื่อมความต้านทานดังต่อไปนี้

- 1) Squeeze (ช่วงกด) คือ ช่วงที่อิเล็กโทรดเคลื่อนตัวลงมากดชิ้นงานทั้งสองชิ้นด้วยแรงกดที่เพียงพอก่อนจะจ่ายกระแสเชื่อมยังอิเล็กโทรด แรงอิเล็กโทรดที่ชิ้นงานได้รับเป็นตัวแปรสำคัญของการเกิดความต้านทาน ซึ่งจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างอย่างมีนัยสำคัญ
- 2) Weld (ช่วงเชื่อม) คือ ช่วงที่ปล่อยกระแสเชื่อมไปยังหัวอิเล็กโทรด เพื่อให้ความร้อนหลอมรอยต่อของชิ้นงานเกิดเป็นรอยเชื่อม โดยการเกิดความร้อนจะทำให้พื้นที่หน้าสัมผัสของอิเล็กโทรดอ่อนตัวลงและทำให้ความต้านทานลดลงด้วยเช่นกัน
- 3) Hold (ช่วงกดค้าง) คือ ช่วงที่อิเล็กโทรดยังคงกดชิ้นงานอยู่หลังจากหยุดจ่ายกระแสไฟฟ้าเพื่อให้รอยเชื่อมเย็นตัวชิ้นงานจะได้ติดแน่น

### 2.1.4 พารามิเตอร์การเชื่อมจุดความต้านทาน

การเชื่อมจุดความต้านทานเป็นกระบวนการที่สามารถทำได้อย่างรวดเร็วแต่มีความซับซ้อน และมีปัจจัยจำนวนมากที่มีผลต่อการเชื่อม อีกทั้งยังมีบางปัจจัยที่ยากจะระบุจากการทดลอง ดังนั้นจึงจำเป็นต้องเข้าใจพารามิเตอร์ที่มีผลต่อคุณภาพการเชื่อม (Wenqi Z., 2000) โดยสมบัติ รูปร่าง ขนาด และวัสดุ ของชิ้นงานเชื่อมและอิเล็กโทรดเป็นพื้นฐานในการศึกษาพารามิเตอร์ของกระบวนการเชื่อม เช่น แรง กระแสเชื่อม และเวลาเชื่อม เป็นตัวกำหนดคุณภาพการเชื่อม ความเสถียร และผลผลิต ซึ่งจำนวนพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องสามารถแสดงให้เห็นว่ากระบวนการเชื่อมนั้นมีความซับซ้อนเพียงใด ซึ่ง Song W., (2003) ระบุว่า ในกระบวนการเชื่อมสิ่งที่น่าสนใจไม่เพียงแต่คุณภาพของงานเชื่อมเท่านั้น แต่ยังรวมถึงอายุการใช้งานของอิเล็กโทรดด้วย เพราะนอกจากค่าใช้จ่ายแล้ว การเสียรูปของอิเล็กโทรดยังส่งผลต่อคุณภาพการเชื่อมอีกด้วย เนื่องจากอิเล็กโทรดทำหน้าที่นำกระแสไฟฟ้าไปยังชิ้นงาน และการส่งแรงกดยึด ดังนั้นการเชื่อมความต้านทานไฟฟ้าจึงมีพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องดังนี้

#### 1) กระแสเชื่อม

กระแสเชื่อมเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญเนื่องจากความร้อนที่เกิดขึ้นเป็นสัดส่วนกับกำลังสองของกระแสในสมการ (2.1) ขนาดของรอยเชื่อมจะเพิ่มขึ้นเมื่อกระแสเพิ่มขึ้น หากกระแสสูงเกินไปอาจนำไปสู่การเสียรูปและรอยแห้วบนแผ่นโลหะ รวมถึงทำให้เกิดการสึกกร่อนบนอิเล็กโทรดเพิ่มขึ้น และในทางตรงกันข้ามกระแสที่ต่ำเกินไปจะทำให้เกิดรอยเชื่อมได้ไม่ดี โดยการเชื่อมจุดความต้านทานทั่วไปมักใช้กระแสไฟฟ้าแบบสลับ (AC) หากอิเล็กโทรดและรอยเชื่อมมีขนาดเล็กจะใช้เป็นกระแสตรง (DC) เนื่องจากให้ความแม่นยำและความเร็วสูงกว่า และสามารถควบคุมกระแสและแรงอิเล็กโทรดได้ง่ายกว่า อีกทั้งยังสามารถควบคุมเวลาการไหลของกระแสได้ถึง 0.1 มิลลิวินาที เนื่องจากความละเอียดของช่วงเวลาเป็นตัวควบคุมการสร้างความร้อนได้อย่างแม่นยำ ทำให้เป็นที่นิยมใช้มากสำหรับการเชื่อมชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์และทางการแพทย์ โดยปริมาณกระแสเชื่อมที่เหมาะสมสำหรับการเชื่อมจุดความต้านทานแต่ละประเภทแสดงดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 กระแสเชื่อมสำหรับการเชื่อมจุดความต้านทานไฟฟ้า (David W., 1998)

ประเภทการเชื่อม	กระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)
LSRSW	2,000 - 20,000
SSRSW	200 - 2,000
Micro - RSW	20 - 200

กระแสเชื่อมจะใช้งานได้ดีก็ต่อเมื่อวัสดุมีการนำไฟฟ้าและนำความร้อนที่ดี เนื่องจากความสามารถของการเชื่อมขึ้นกับสมบัติทางไฟฟ้าและความร้อนของวัสดุ ทั้งนี้การเชื่อมที่มีรูปแบบการจ่ายกระแสเชื่อมไม่เหมาะสมอาจทำให้เกิดการขับออกของโลหะและการติดของอิเล็กโทรดได้ ซึ่งส่งผลต่อคุณภาพของรอยเชื่อมและการเสื่อมสภาพของอิเล็กโทรดอีกด้วย ดังนั้นเพื่อลดขนาดของรอยเชื่อม ลดการเสียรูปและการติดของอิเล็กโทรด จึงใช้เทคนิคการจ่ายกระแสเชื่อมค่อย ๆ เพิ่มกระแสจากระดับต่ำไประดับกระแสที่ต้องการเรียกว่า “Up Slope”

## 2) เวลาเชื่อม

เวลาเชื่อมเป็นช่วงเวลาที่กระแสไหลผ่านวัสดุ ซึ่งเป็นสัดส่วนโดยตรงกับการสร้างความร้อนในสมการที่ 2.1 เมื่อกระแสเชื่อมสูงพอจะทำให้ขนาดรอยเชื่อมเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาในการเชื่อมที่เพิ่มขึ้น กระทั่งมีขนาดใกล้เคียงกับขนาดปลายอิเล็กโทรด ซึ่งหากเวลาเชื่อมนานเกินไปอาจทำให้อิเล็กโทรดยึดติดกับชิ้นงาน และหากเวลาเชื่อมน้อยอาจไม่เกิดรอยเชื่อมเนื่องจากความร้อนต่ำ โดยเวลาที่เหมาะสมสำหรับการเชื่อมจุดความต้านทานแต่ละประเภทแสดงดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 เวลาเชื่อมสำหรับการเชื่อมจุดความต้านทาน (David W., 1998)

ประเภท	เวลาเชื่อม
LSRSW	50 Hz: 20 วินาที, 60 Hz: 167 วินาที
SSRSW	1 มิลลิวินาที - 100 มิลลิวินาที
Micro - RSW	0.1 มิลลิวินาที - 50 มิลลิวินาที

## 3) แรงอิเล็กโทรด

แรงอิเล็กโทรดที่ใช้ในการกดยึดชิ้นงานมีผลต่อการเกิดความต้านทานการไหลของกระแสเชื่อม หากแรงกดต่ำจะทำให้เกิดความต้านทานสูงเกินไปและเกิดความร้อนอย่างรวดเร็ว ซึ่งอาจส่งผลให้เกิดรอยแหวนบนชิ้นงานและรอยเชื่อมที่ได้มีคุณภาพต่ำและหากแรงกดมากเกินไปจะทำให้มีความหนาแน่นของกระแสเชื่อมและความต้านทานการสัมผัสต่ำ ส่งผลให้มีการเชื่อมเกิดความร้อนต่ำและรอยเชื่อมที่ได้มีขนาดลดลง ดังนั้นในช่วงเวลาการเชื่อมจึงจำเป็นต้องควบคุมแรงอิเล็กโทรดและกระแสไฟฟ้าให้แม่นยำ ซึ่งการควบคุมแรงอิเล็กโทรดสำหรับการเชื่อมจุดความต้านทานขนาดเล็กมักใช้เทคโนโลยีการควบคุมแรงโดยตรง มวลเคลื่อนที่ทั้งหมดของกลไก (ตัวจับยึดและอิเล็กโทรด) ควรหนักน้อยกว่า 0.2 กิโลกรัม ในการเชื่อมจะใช้แรงและการเคลื่อนที่

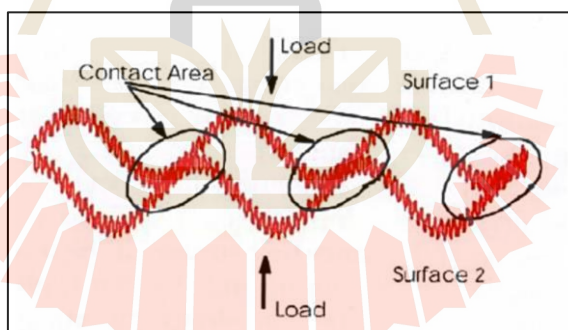
ของอเล็กโทรดต่ำ เพื่อให้สามารถจัดการกับพื้นที่การเชื่อมขนาดเล็กได้โดยง่าย ซึ่งแรงอเล็กโทรดที่เหมาะสมกับการเชื่อมมีปริมาณแสดงดังตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 แรงอเล็กโทรดสำหรับการเชื่อมจุดความต้านทาน (David W., 1998)

ประเภทการเชื่อม	แรง (นิวตัน)
LSRSW	660 -15,480
SSRSW	4.4 - 80.8
Micro - RSW	0.44 - 4.4

#### 4) ความต้านทานการสัมผัส

ความต้านทานการสัมผัสเป็นพารามิเตอร์ที่มีอิทธิพลต่อการเชื่อม เนื่องจากความต้านทานบริเวณพื้นผิวสัมผัสระหว่างรอยต่อในรูปที่ 2.4 มีผลต่อการไหลของกระแสเชื่อม ส่งผลต่อการเกิดความร้อนและขนาดของรอยเชื่อม โดยความต้านทานสัมผัสโดยทั่วไปจะลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น



รูปที่ 2.5 ลักษณะพื้นผิวสัมผัสระหว่างรอยต่อ (David Loveborn, 2016)

#### 5) รูปทรงและขนาดอเล็กโทรด

รูปทรงและขนาดของอเล็กโทรดมีผลอย่างมากต่อการกระจายความหนาแน่นของกระแสเชื่อมและแรงสัมผัสที่ปลายอเล็กโทรด รวมถึงอายุการใช้งานของปลายอเล็กโทรด โดยปลายอเล็กโทรดเป็นจุดควบคุมความหนาแน่นกระแสและขนาดของรอยเชื่อม การออกแบบรูปทรงอเล็กโทรดมีความสำคัญอย่างยิ่งในการเชื่อม ซึ่งควรพิจารณาพร้อมกับสมบัติของวัสดุ

โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อเชื่อมโลหะที่มีสมบัติวัสดุแตกต่างกัน เพื่อให้ได้สมดุลความร้อนบริเวณรอยต่อที่ดีขึ้น ส่งผลให้รอยเชื่อมที่ได้มีคุณภาพดีขึ้นอีกด้วย

#### 6) วัสดุอิเล็กทรอนิกส์

หน้าที่หลักของอิเล็กทรอนิกส์คือการกักยึดวัสดุเข้าด้วยกัน เป็นตัวนำไฟฟ้าและความร้อนในกระบวนการเชื่อม ดังนั้นสมบัติที่สำคัญที่สุดของอิเล็กทรอนิกส์คือ วัสดุต้องสามารถต้านทานแรงกดจากอิเล็กทรอนิกส์ สามารถนำไฟฟ้าและความร้อนได้ดี ซึ่งสมบัติวัสดุจะเปลี่ยนไปตามอุณหภูมิที่เกิดขึ้นบนวัสดุ โดยความต้านทานการไหลกระแสเชื่อมของวัสดุมีผลต่อการเกิดความร้อน การนำความร้อนและความจุความร้อนมีผลต่อการถ่ายเทความร้อนของวัสดุ

#### 2.1.5 การเสื่อมสภาพของอิเล็กทรอนิกส์

การเสื่อมสภาพของอิเล็กทรอนิกส์เป็นปัญหาสำคัญสำหรับกระบวนการเชื่อมจุด ความต้านทานไฟฟ้า อายุการใช้งานที่ค่อนข้างสั้นของปลายอิเล็กทรอนิกส์อาจกลายเป็นอุปสรรคสำคัญในการผลิตจำนวนมาก โดยอิเล็กทรอนิกส์ในระยะเริ่มแรกจะทำให้ได้รอยเชื่อมที่มีคุณภาพ แต่เมื่ออิเล็กทรอนิกส์มีระยะเวลาการใช้งานที่เพิ่มมากขึ้นจะทำให้คุณภาพของรอยเชื่อมลดลงตามไปด้วย ดังนั้นการวิเคราะห์และปรับปรุงอายุการใช้งานของอิเล็กทรอนิกส์สำหรับการเชื่อมความต้านทานจึงจำเป็นต้องมีความรู้เกี่ยวกับการกลไกและผลกระทบจากการเสื่อมสภาพของอิเล็กทรอนิกส์

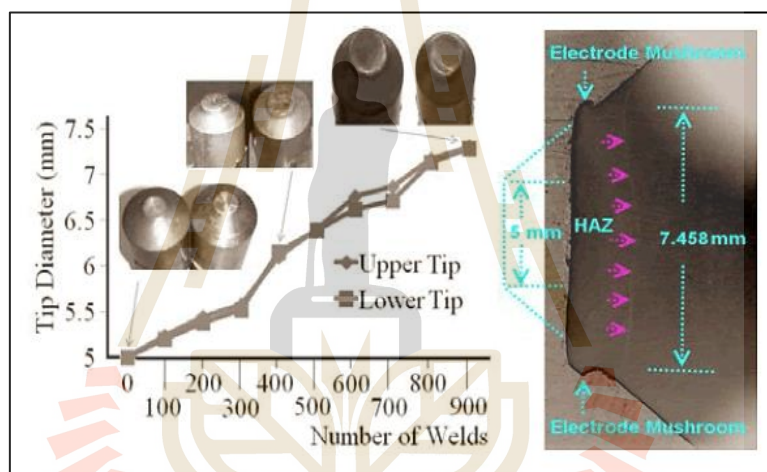
##### 1) กลไกการเสื่อมสภาพอิเล็กทรอนิกส์

การเสื่อมสภาพของอิเล็กทรอนิกส์เป็นผลมาจากการใช้แรงอิเล็กทรอนิกส์และกระแสเชื่อมสูง เพื่อให้เกิดความร้อนเพียงพอต่อการสร้างรอยเชื่อม โดย M. Al-Jader (2014) ชี้ว่าสภาพความร้อนที่พื้นผิวรอยต่อระหว่างชิ้นงานกับชิ้นงานและอิเล็กทรอนิกส์กับชิ้นงานมีความสำคัญต่อคุณภาพของการเชื่อม พื้นผิวสัมผัสระหว่างชิ้นงานกับชิ้นงานและอิเล็กทรอนิกส์กับชิ้นงานที่สูงขึ้นทำให้กระแสเชื่อมมีการกระจายที่สม่ำเสมอมากขึ้น ส่งผลให้พื้นผิวรอบปลายอิเล็กทรอนิกส์มีความร้อนสม่ำเสมอ แต่หากมีความร้อนที่มากเกินไปจะทำให้อิเล็กทรอนิกส์มีอายุการใช้งานสั้นลงเนื่องจากการเสื่อมสภาพของอิเล็กทรอนิกส์ทำให้ความหนาแน่นของกระแสเชื่อมบริเวณพื้นผิวสัมผัสลดลงจนกระทั่งไม่สามารถสร้างรอยเชื่อมได้อีกต่อไป ดังนั้นการเชื่อมที่ใช้กระแสเชื่อมและแรงอิเล็กทรอนิกส์สูงจึงมีความเสี่ยงสูงที่จะทำให้อิเล็กทรอนิกส์เกิดการเสื่อมสภาพ นอกจากนี้ระยะเวลาการใช้งานยังส่งผลต่อการเสื่อมสภาพของอิเล็กทรอนิกส์อีกด้วย โดย J. D. Parker et al. (2003) ระบุว่า การเสื่อมสภาพของอิเล็กทรอนิกส์มีสาเหตุมาจากการเปลี่ยนแปลง 2 ประการ ดังนี้

(ก) การเปลี่ยนแปลงทางโลหะวิทยา เกิดจากการเปลี่ยนแปลงสมบัติวัสดุที่ปลายอิเล็กทรอนิกส์ เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในการเชื่อมทำให้เกิดปรากฏการณ์การก่อตัวเม็ดผลึกใหม่ของเนื้อโลหะ ซึ่งส่งผลให้ความแข็งแรงของอิเล็กทรอนิกส์ลดลง



(ข) การเปลี่ยนแปลงรูปทรง เป็นผลจากการเสีรูปร่างของอิเล็กโทรด เนื่องจากการดูดซับความร้อนในบริเวณที่อยู่ติดกับพื้นผิวสัมผัสระหว่างอิเล็กโทรดกับชิ้นงานที่สูงขึ้น จนทำให้เกิดการขบออกของเนื้อโลหะในลักษณะดอกเห็ด (Mushrooming Effect) ส่งผลให้ปลายอิเล็กโทรดมีขนาดเพิ่มขึ้น ซึ่งมีลักษณะตามผลการศึกษาของ Nachimani Charde, (2012) แสดงดังรูปที่ 2.5 นอกจากนี้การเสีรูปร่างของอิเล็กโทรดอาจเป็นผลมาจากการสึกหรอและการหลอมติดระหว่างชิ้นงานกับอิเล็กโทรดเนื่องจากความร้อน ได้อีกด้วย จึงทำให้มีการนำวิธีต่าง ๆ มาใช้เพื่อลดปัญหาเหล่านี้และเพิ่มอายุการใช้งาน เช่น การใช้น้ำในการระบายความร้อน การใช้ น้ำมันหล่อลื่นลดการหลอมติดสำหรับงานเชื่อมบางชนิด ซึ่งวิธีการเหล่านี้ดังกล่าวได้รับการพิสูจน์แล้วว่าสามารถช่วยลดการสึกหรอของปลายอิเล็กโทรดได้



รูปที่ 2.6 การเชื่อมสภาพบนอิเล็กโทรดในลักษณะดอกเห็ด (Nachimani Charde, 2012)

## 2) ผลการเชื่อมสภาพของอิเล็กโทรด

การเชื่อมสภาพของอิเล็กโทรดดังรูปที่ 2.6 ส่งผลกระทบต่อคุณภาพของรอยเชื่อมทันที ซึ่งอาจทำให้เกิดปรากฏการณ์ เช่น Cavitation, Pick up และ Pitting บนงานชิ้นเชื่อม โดยการเพิ่มขึ้นของขนาดปลายอิเล็กโทรดส่งผลให้ความหนาแน่นของกระแสเชื่อมลดลง การหลอมติดของงานเชื่อมกับอิเล็กโทรดทำให้การนำไฟฟ้าของอิเล็กโทรดลดลง ซึ่งพฤติกรรมดังกล่าวเป็นการลดความเข้มข้นของอุณหภูมิบริเวณรอยเชื่อม อันนำไปสู่การลดลงของขนาดรอยเชื่อมอย่างต่อเนื่อง เมื่อทำการเชื่อมไปประมาณหนึ่งจะทำให้รอยเชื่อมที่เกิดขึ้นมีคุณภาพต่ำกว่าเกณฑ์ ทั้งนี้อิเล็กโทรดสามารถดำเนินการเชื่อมต่อไปได้จนกระทั่งรอยเชื่อมที่เกิดขึ้น

มีคุณภาพลดลงจนถึงขีดจำกัด เรียกว่า “อายุการใช้งานของอิเล็กทรอนิกส์” ซึ่งขึ้นอยู่กับรูปทรงและวัสดุของอิเล็กทรอนิกส์ (Hua W. et al., 2009)

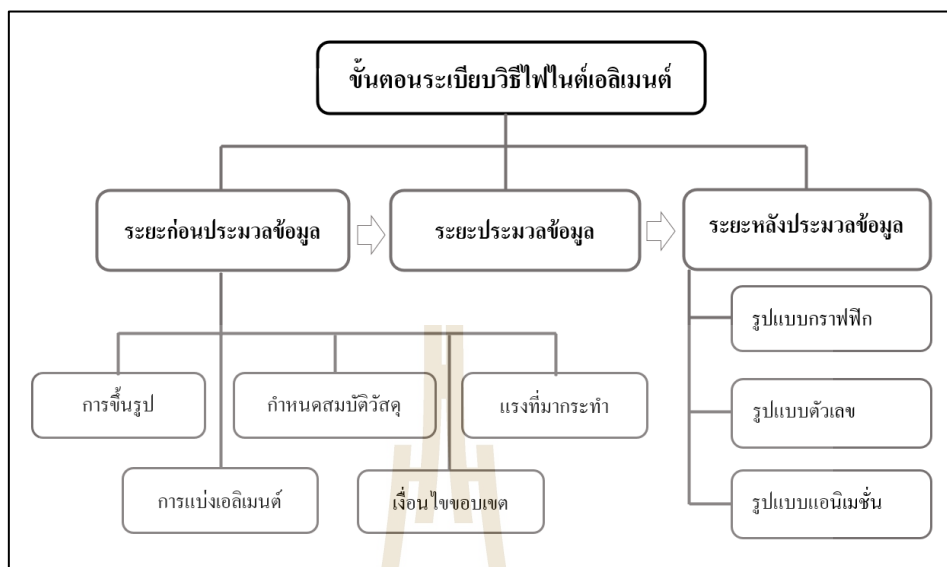
อย่างไรก็ตาม กระบวนการเสื่อมสภาพต่าง ๆ ที่เกิดบนอิเล็กทรอนิกส์แล้ว ส่งผลต่อคุณภาพของรอยเชื่อม การขยายตัวทางความร้อน การสึกหรอและการขับออกของโลหะบนอิเล็กทรอนิกส์เป็นตัวแปรที่สามารถบ่งชี้เวลาการใช้งานที่เป็นประโยชน์ต่อการตรวจสอบและควบคุมคุณภาพการเชื่อม แต่สำหรับอิเล็กทรอนิกส์ขนาดเล็กเป็นการยากที่จะตรวจสอบคุณภาพการเชื่อมจากการขยายตัวทางความร้อน

## 2.2 ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method : FEM หรือ Finite Element Analysis : FEA) เป็นการนำหลักการทางคณิตศาสตร์มาประยุกต์ใช้เพื่อแก้ปัญหาทางวิศวกรรมในเชิงพฤติกรรมของวัสดุ เชิงโครงสร้าง ความร้อน หรือของไหล ภายใต้สภาวะแวดล้อมที่กำหนดขึ้น โดยอาศัยการแก้ปัญหาาระบบสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลขในการหาผลเฉลยผ่านคอมพิวเตอร์ โดยใช้การแบ่งโดเมนออกเป็นเอลิเมนต์ขนาดเล็กวางเรียงตัวกันตลอดทั้งโดเมนโดยไม่ทับซ้อนกันเรียกว่า “ตาข่าย (Mesh)” (สุทธิศักดิ์ พงษ์ชนะพานิช, 2560) จากนั้นสร้างสมการแต่ละเอลิเมนต์บนหลักการที่ว่า “สมการที่สร้างขึ้นต้องสอดคล้องกับสมการควบคุมของปัญหาที่พิจารณาอยู่” ข้อดี คือ สามารถสร้างเอลิเมนต์ที่มีขนาดต่างกันได้ง่าย จึงสามารถจำลองรูปร่างของปัญหาได้อย่างใกล้เคียงกับรูปร่างของปัญหาจริงได้มากที่สุด ดังนั้นค่าของผลเฉลยโดยประมาณที่คำนวณออกมาได้จึงมีความแม่นยำมากตามไปด้วย (ปราโมทย์ เศษอำไพ, 2560)

### ขั้นตอนระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

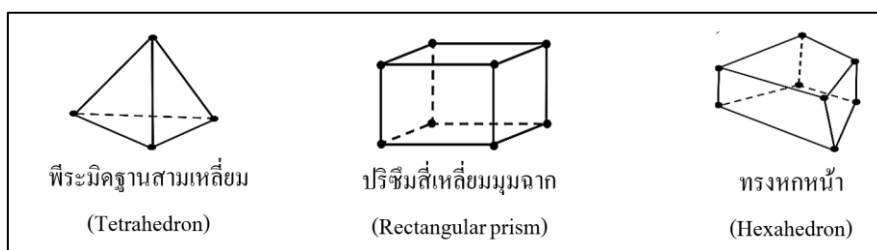
องค์ประกอบพื้นฐานของระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ประกอบด้วยแบบจำลองสำหรับวิเคราะห์ ค่าเฉพาะของวัสดุ เงื่อนไขขอบ และแรงกระทำ ซึ่งการจำลองแบ่งเป็น 3 ขั้นตอน ได้แก่ ระยะเวลาประมวลข้อมูล (Pre-Processing) ระยะเวลาประมวลข้อมูล (Processing) และระยะหลังประมวลข้อมูล (Post-Processing Phase) แสดงดังรูปที่ 2.7 โดย ฉัฐ ดวงรัตน์ประทีป และคณะ (2561) อธิบายรายละเอียดของขั้นตอนการจำลองดังต่อไปนี้



รูปที่ 2.7 แผนผังขั้นตอนระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (ณัฐ ดวงรัตน์ประทีป และคณะ, 2561)

### 1) ระยะก่อนประมวลข้อมูล

เป็นขั้นตอนการเตรียมแบบจำลองก่อนประมวลผล แบบจำลองที่ดีควรมีความเหมือนหรือใกล้เคียงภาวะจริงมากที่สุดเพื่อความแม่นยำของผลลัพธ์ แบบจำลองสามารถเป็นได้ทั้งสองและสามมิติขึ้นกับวัตถุประสงค์การศึกษา แต่แบบจำลองสามมิติให้ปฏิริยาและการตอบสนองที่แม่นยำมากกว่า โดยแบบจำลองสามมิติมีการแบ่งเอลิเมนต์ลักษณะเป็นปริมาตรรูปทรงเรขาคณิต ดังรูปที่ 2.8 การเลือกรูปทรงของเอลิเมนต์ต้องพิจารณาจากรูปร่างและลักษณะของแบบจำลอง เมื่อแบบจำลองถูกแบ่งเป็นหน่วยย่อยแล้วควรมีรูปร่างใกล้เคียงกับรูปร่างเดิมมากที่สุด ทั้งนี้แบบจำลองสามมิติที่มีความซับซ้อนหรือมีขนาดเล็กมาก ๆ นิยมใช้เป็นเอลิเมนต์รูปทรงพีระมิดฐานสามเหลี่ยมหรือรูปทรงสี่หน้า เนื่องจากสามารถเข้ากับรูปร่างได้ง่ายกว่า จึงทำให้แบบจำลองมีรูปร่างที่ใกล้เคียงกับรูปร่างเดิมมากกว่าเอลิเมนต์รูปทรงอื่น



รูปที่ 2.8 รูปทรงเอลิเมนต์ 3 มิติ (สุทธิศักดิ์ พงษ์ธนาพานิช, 2560)



สุทธิศักดิ์ พงษ์ชนะพานิช (2560) กล่าวว่า ความแม่นยำของผลเฉลยขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย โดยขนาดของเอลิเมนต์และฟังก์ชันการประมาณบนเอลิเมนต์เป็นปัจจัยที่มีผลต่อความแม่นยำของผลเฉลยสูงสุด การปรับเอลิเมนต์ให้มีขนาดเล็กจึงส่งผลให้การประมวลข้อมูลมีความแม่นยำเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นการลดความผิดพลาดและทำให้การจำลองใกล้เคียงกับความเป็นจริงมากขึ้น แต่ก็ส่งผลให้เวลาในการประมวลข้อมูลมากขึ้นด้วย ซึ่งการปรับขนาดของเอลิเมนต์สามารถแก้ไขได้ด้วยการปรับความละเอียดของเอลิเมนต์เฉพาะตำแหน่งที่ต้องการพิจารณา

## 2) ระยะประมวลข้อมูล

เป็นการนำซอฟต์แวร์คอมพิวเตอร์ทางงานวิศวกรรม เช่น Abaqus, Ansys, MSC, SOPAS หรือ SolidWorks เป็นต้น มาใช้ในการประมวลผลของสมการบนแต่ละเอลิเมนต์ทำให้ได้ค่าผลเฉลยโดยประมาณ โดยความแม่นยำของผลเฉลยขึ้นอยู่กับข้อกำหนดขนาด รูปร่าง จำนวนเอลิเมนต์ และเงื่อนไขขอบเขต หากกำหนดได้ใกล้เคียงกับความเป็นจริงจะทำให้ผลเฉลยที่ได้มีความแม่นยำมากขึ้นตามไปด้วย

## 3) ระยะหลังประมวลข้อมูล

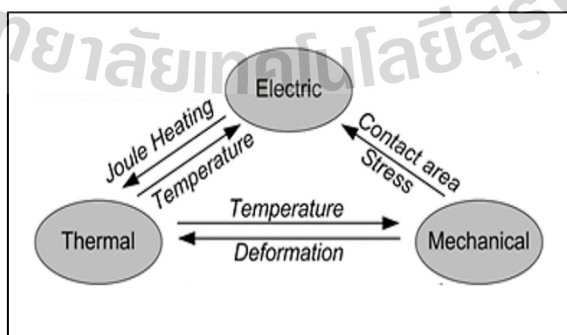
ผลเฉลยจากการวิเคราะห์ขึ้นอยู่กับข้อมูลและค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ป้อนเข้าสู่ซอฟต์แวร์ โดยผลเฉลยที่ได้อยู่ในรูปของอุณหภูมิ ความเค้น และความเครียด เป็นต้น ซึ่งสามารถแสดงผลข้อมูลได้หลากหลายรูปแบบ เช่น กราฟฟิก ซึ่งเป็นรูปแบบที่นิยมใช้แสดงผลเป็นแถบสีในรูปแบบการกระจายอุณหภูมิ ความเค้น และความเครียด หรือการแสดงผลเชิงตัวเลข เป็นต้น

อย่างไรก็ตามการเข้าใจความหมายทางกายภาพของปัญหาที่สนใจจะช่วยทำให้สามารถเลือกระเบียบวิธีทางตัวเลขที่เหมาะสมกับปัญหานั้น ๆ และสามารถวิเคราะห์ปัญหาได้อย่างมีประสิทธิภาพ ถึงแม้ว่าปัจจุบันจะมีซอฟต์แวร์ทางคอมพิวเตอร์ที่สามารถแก้ปัญหาวงการวิศวกรรมได้โดยตรง แต่หากผู้ใช้ไม่มีความเข้าใจในพื้นฐานของระเบียบวิธีเชิงตัวเลข อาจส่งผลให้เลือกใช้ซอฟต์แวร์ไม่เหมาะสมกับปัญหาได้ เนื่องจากไม่มีระเบียบวิธีเชิงตัวเลขใดสามารถแก้ปัญหได้ทุกชนิด ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขมักให้ผลเฉลยที่มีความคลาดเคลื่อนในการคำนวณ และไม่มีระเบียบวิธีเชิงตัวเลขวิธีใดที่ดีที่สุดสำหรับการวิเคราะห์ปัญหาในทุก ๆ กรณี (ปราโมทย์ เตชะอำไพ และนิพนธ์ วรรณ โสภากย์, 2555)

## 2.3 การจำลองปัญหาการเชื่อมจุดความต้านทานไฟฟ้า

ปัญหากระบวนการเชื่อมจุดความต้านทานไฟฟ้าถือได้ว่าเป็นกระบวนการที่ค่อนข้างมีความซับซ้อนเป็นอย่างมาก เนื่องจากเป็นปัญหา Multiphysics ที่เกิดจากความสัมพันธ์ทางกายภาพพื้นฐานระหว่างปรากฏการณ์ทางกล ไฟฟ้า และความร้อน แสดงดังรูปที่ 2.9 นอกจากนี้ยังเป็นปัญหาที่ไม่เป็นเชิงเส้นตรง (Nonlinear Structural) อีกด้วย (Song Q., 2003) โดย Nielsen C.V. and

Zhang W., (2013) ระบุว่าเป็นการยากที่จะหาผลเฉลยได้อย่างแม่นยำด้วยแบบจำลองและวิธีการจำลองเดิมที่เกิดจากการจำลองหาอุณหภูมิของการเชื่อมด้วยแบบจำลอง Electrical - Thermal แล้วจึงนำค่าอุณหภูมิที่ได้มาใช้ในการจำลองพฤติกรรมทางกลต่าง ๆ เช่น ความเค้น ความเครียด หรือการเสียรูปด้วยแบบจำลอง Thermal - Mechanical ซึ่งการจำลองในรูปแบบนี้จะทำให้เกิดความยุ่งยากในการจำลองและความคาดเคลื่อนของผลเฉลยได้ จึงเหมาะกับการจำลองพฤติกรรมของกระแสเชื่อมและการเกิดอุณหภูมิของการเชื่อมเท่านั้น อย่างเช่นการศึกษาพฤติกรรมความร้อนบนอิเล็กโทรดช่องขนานและเส้นลวดวงจรเซ็นเซอร์ของ Mingqiang Ma et al., (2020) และการกระจายความหนาแน่นของกระแสเชื่อมและอุณหภูมิในการเชื่อมของ Yang Liu et al., (2016) เป็นต้น ด้วยเหตุนี้ในปี ค.ศ. 2008 Z. Feng และ J.E. Gould จึงทำการพัฒนาแบบจำลองไฟไนต์-เอลิเมนต์ในรูปแบบ Electrical - Thermal - Mechanical ขึ้นมาใช้สำหรับการจำลองปัญหาความสัมพันธ์ควบคู่ระหว่างกายภาพทางกล ไฟฟ้า และความร้อนโดยตรง เพื่อลดความยุ่งยากในการจำลองและความแม่นยำของผลเฉลย จึงทำให้เป็นแบบจำลองที่ดีที่สุดสำหรับการจำลองปัญหาทางด้านการเชื่อมจุดความต้านทานไฟฟ้า โดยสามารถช่วยลดต้นทุนในการทดสอบคุณภาพงานเชื่อม การตรวจสอบสภาพการใช้งานและอายุการใช้งานของอิเล็กโทรด และยังทำให้กระบวนการเชื่อมได้รับการพัฒนาที่หลากหลายยิ่งขึ้นอีกด้วย ซึ่งทำให้แบบจำลองนี้ถูกนำมาใช้ในการทำนายพฤติกรรมของปัญหาการเชื่อมจุดความต้านทานอย่างแพร่หลายจนถึงปัจจุบัน อาทิ การใช้แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์บนซอฟต์แวร์ SOPAS ในการจำลองพฤติกรรมการกระจายกระแสเชื่อม อุณหภูมิ ความเค้น ความเครียด และการเสียรูป บนเส้นลวดทองแดงที่เกิดจากการเชื่อมความต้านทานด้วยอิเล็กโทรดช่องขนานของ Bingying Wu et al., (2018) และพฤติกรรมบนอิเล็กโทรดตรงข้ามของ David Loveborn, (2016), Chris Valentin Nielsen (2012) และ Chris V. Nielsen et al., (2015) เป็นต้น



รูปที่ 2.9 ความสัมพันธ์ของปรากฏการณ์ในกระบวนการเชื่อมจุดความต้านทาน (Song Q., 2003)

### สมการสำหรับการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

การจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วยแบบจำลองควบคู่ Electrical - Thermo - Mechanical มีหลักมาจากพื้นฐานทางกายภาพได้แก่ แบบจำลองทางกล (Mechanical model) มีหน้าที่ในการเปลี่ยนรูปและการกระจายความเค้น ในขณะที่แบบจำลองทางไฟฟ้า (Electrical model) เป็นกลไกพื้นฐานสำหรับการสร้างความร้อน ทำหน้าที่ในการกระจายความหนาแน่นของสนามไฟฟ้าที่ก่อให้เกิดเป็นความร้อนตามกฎของจูล และแบบจำลองทางความร้อน (Thermal model) ทำหน้าที่ควบคุมการกระจายอุณหภูมิและการเปลี่ยนแปลงของสมบัติวัสดุเนื่องจากอุณหภูมิ ซึ่งสมการสำหรับการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของปัญหาการเชื่อมความต้านทานมีดังนี้

#### 1) แบบจำลองทางไฟฟ้า

แบบจำลองทางไฟฟ้าเป็นการพิจารณาการกระจายแรงดันไฟฟ้าในการเชื่อมที่กำหนด โดยการกระจายแรงดันไฟฟ้านี้ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของวัสดุและสมการควบคุมในการคำนวณแรงดันไฟฟ้าและการสร้างความร้อน ซึ่งสร้างขึ้นจากการรวมสมการลาปลาซของศักย์ไฟฟ้าในพิกัด 3 มิติ ดังสมการที่ 2.3

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[ \frac{1}{\rho_E} \cdot \frac{\partial \phi}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ \frac{1}{\rho_E} \cdot \frac{\partial \phi}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[ \frac{1}{\rho_E} \cdot \frac{\partial \phi}{\partial z} \right] = 0 \quad (2.3)$$

โดยที่  $\phi$  คือ ศักย์ไฟฟ้า  
 $\rho_E$  คือ สภาพความต้านทานไฟฟ้าเป็นสมบัติความต้านทานไฟฟ้าของวัสดุและพื้นที่ผิวสัมผัส ซึ่งขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ

#### 2) แบบจำลองทางความร้อน

แบบจำลองทางความร้อนเป็นการจำลองผลกระทบของอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากการเปลี่ยนไฟฟ้าเป็นความร้อนและการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิเนื่องจากการแลกเปลี่ยนความร้อน ด้วยการคำนวณจากสมการถ่ายเทความร้อน โดยการนำความร้อนระหว่างวัสดุและการสร้างความร้อนดังสมการที่ 2.4 ซึ่งการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิจะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของวัสดุ

$$\rho_c \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[ k \frac{\partial T}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ k \frac{\partial T}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[ k \frac{\partial T}{\partial z} \right] + \frac{1}{\rho_E} \nabla \phi \cdot \nabla \phi \quad (2.4)$$

โดยที่	$\rho$	คือ ความหนาแน่นของมวล
	$c$	คือ ความจุความร้อนจำเพาะ
	$k$	คือ สัมประสิทธิ์การนำความร้อน
	$T$	คือ อุณหภูมิ
	$\phi$	คือ ศักย์ไฟฟ้า
	$\rho_E$	คือ ความต้านทานไฟฟ้า

### 3) แบบจำลองทางกล

แบบจำลองทางกลครอบคลุมถึงแรงที่ใช้ในการสร้างพื้นผิวสัมผัส (Contact interfaces) เริ่มต้นที่มีการเปลี่ยนแปลงในระหว่างกระบวนการเชื่อม และครอบคลุมการเสีรูปร่างโดยรวมของวัสดุในลักษณะ Elastic-Plastic และสนามความเค้นที่เกิดขึ้น ซึ่งเป็นปรากฏการณ์ที่ไม่เป็นเชิงเส้น โดยมีสมการหลักที่ใช้ในการวิเคราะห์สร้างจากความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น ความเครียด และการขยายตัวทางความร้อน แสดงดังสมการที่ 2.5 ซึ่งเป็นสมการที่ใช้สำหรับการแก้ปัญหา Thermal-Mechanical

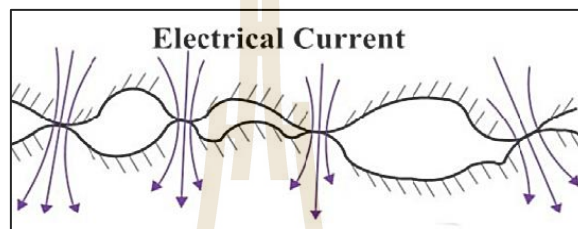
$$d\{\sigma\} = [C]d\{\varepsilon\} - \{C_T\}dT \quad (2.5)$$

โดยที่	$[C]$	คือ เมทริกซ์ Elastic-Plastic
	$dT$	คือ ความแตกต่างของอุณหภูมิ
	$\{C_T\}$	คือ เวกเตอร์สัมประสิทธิ์ความร้อน
	$d\{\varepsilon\}$	คือ ความแตกต่างของเวกเตอร์ความเครียด
	$d\{\sigma\}$	คือ ความแตกต่างของเวกเตอร์ความเค้น

### 4) การสัมผัส

การพิจารณาการสัมผัสระหว่างงานเชื่อมกับงานเชื่อมและงานเชื่อมกับอิเล็กทรอนิกส์ โทรด มีผลต่อความแม่นยำของผลเฉลยจากการจำลอง ความต้านทานการสัมผัสขึ้นอยู่กับพื้นผิวสัมผัส และการเปลี่ยนแปลงระหว่างกระบวนการอันเป็นผลมาจากการเสีรูปร่าง การเพิ่มขึ้นของพื้นผิวสัมผัส เกิดจากแรงอิเล็กทรอนิกส์ โทรดและความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าที่ลดลง ส่งผลให้เกิดความร้อนลดลง ดังนั้นการสัมผัสทางกลจึงพิจารณาจากแรงปฏิกิริยาแนวตั้งของความเค้นและความเครียด ซึ่งส่งผลต่อการสัมผัสทางไฟฟ้าและความร้อน โดยเป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิดังนี้

(ก) การสัมผัสทางไฟฟ้า มีความสำคัญในช่วงเริ่มต้นของกระบวนการเชื่อม เนื่องจากการไหลของกระแสไฟฟ้าทำให้เกิดความร้อน ( $q_e$ ) ตามกฎของจูลในสมการที่ 2.6 โดยความต้านทานการไหลของกระแสไฟฟ้าบริเวณพื้นผิวสัมผัส (Electrical Contact Resistance, ECR) ในรูปที่ 2.10 หาได้จากสูตรวิเคราะห์ของ Zhang and Bay (1998) แสดงดังสมการที่ 2.8 ซึ่งเป็นส่วนกลับของสภาพการนำไฟฟ้าบริเวณพื้นผิวสัมผัส (Electrical Contact Conductivity: ECC)



รูปที่ 2.10 ความต้านทานการไหลของกระแสไฟฟ้าบริเวณพื้นผิวสัมผัส (Zixuan Wan et al., 2016)

$$q_e = \frac{(\Delta\phi)^2}{ECC} \quad (2.6)$$

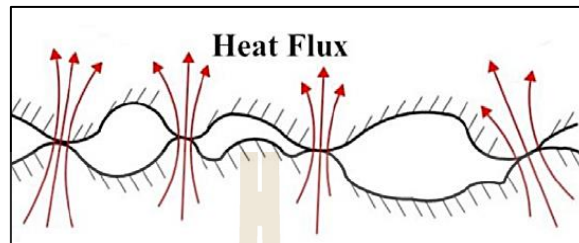
$$ECC = \frac{1}{ECR} \quad (2.7)$$

$$ECR(T) = 3d \left( \frac{\sigma_Y(T)}{P} \right) \cdot \left( \frac{\rho_1(T) + \rho_2(T)}{2} \right) \quad (2.8)$$

โดยที่	$\Delta\phi$	คือ ความต่างศักย์ไฟฟ้า
	$\sigma_Y$	คือ ความเค้นคราก
	P	คือ แรงอิเล็กทรอนิกส์
	d	คือ แรงอิเล็กทรอนิกส์
	$\rho_c$	คือ สภาพความต้านทานไฟฟ้าบริเวณสัมผัส
	T	คือ อุณหภูมิบริเวณสัมผัส

(ข) การสัมผัสทางความร้อน มีความสำคัญอย่างยิ่งในขั้นตอนการเชื่อม โดยควบคุมการถ่ายเทความร้อนจากผิวสัมผัสอุณหภูมิสูงไปยังอุณหภูมิต่ำ การหาความร้อนต่อพื้นผิวสัมผัส ( $q_h$ ) จึงคำนวณได้จากสมการที่ 2.10 โดยการนำความร้อนระหว่างวัสดุที่บริเวณพื้นผิวสัมผัส

(Thermal Contact Conductivity: TCC) ในรูปที่ 2.11 มีค่าแปรผันตามการนำไฟฟ้าที่บริเวณพื้นผิวสัมผัส ซึ่งคำนวณได้จากกฎของ Wiedemann - Franz แสดงดังสมการที่ 2.9



รูปที่ 2.11 การนำความร้อนบริเวณพื้นผิวสัมผัส (Zixuan Wan et al., 2016)

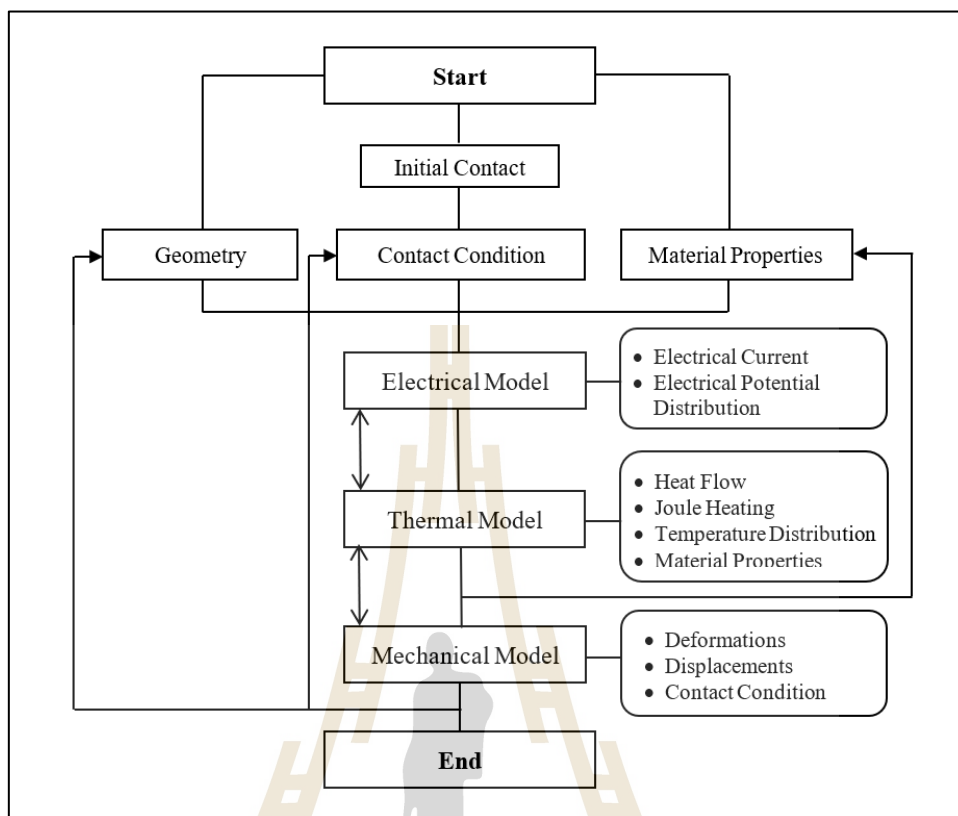
$$q_h = \frac{\Delta T}{TCC} \quad (2.9)$$

$$TCC = ECC(T) \cdot L \cdot T \quad (2.10)$$

- โดยที่ L คือ ค่าคงที่ของ Lorentz เท่ากับ  $2.44 \times 10^{-8} \text{ W} \cdot \Omega \cdot \text{K}^{-2}$   
 $\Delta T$  คือ ความแตกต่างของอุณหภูมิบริเวณพื้นผิวสัมผัส  
T คือ อุณหภูมิบริเวณพื้นผิวสัมผัส

แบบจำลองที่นำเสนอข้างต้นเป็นการตอบสนองของความสัมพันธ์กายภาพทางกล ความร้อน และไฟฟ้า เพื่อใช้สำหรับการหาผลลัพธ์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ของโปรแกรมคอมพิวเตอร์ โดยแบบจำลองแต่ละแบบจะมีการเชื่อมโยงกันแต่ให้รายละเอียดของผลลัพธ์และการแสดงพฤติกรรมที่แตกต่างกัน ซึ่งการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ Electrical-Thermo-Mechanical บนโปรแกรมคอมพิวเตอร์มีขั้นตอนดังแผนผังในรูปที่ 2.31





รูปที่ 2.12 การจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วยแบบจำลอง Electrical-Thermo-Mechanical

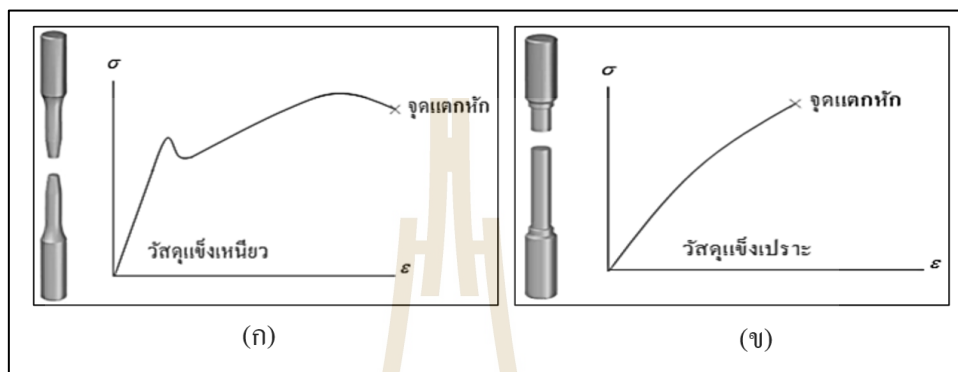
(Mehdi Jafari Vardanjani et al., 2016)

สำหรับการวิเคราะห์ปัจจัยที่ส่งผลต่อการเสื่อมสภาพของอิเล็กทรอนิกส์ของการศึกษานี้ใช้การจำลองพฤติกรรมต่าง ๆ ของปัญหาการเชื่อมจุดความต้านทานไฟฟ้าบนอิเล็กทรอนิกส์ของขานานด้วยซอฟต์แวร์ Marc Mentat เนื่องจากเป็นซอฟต์แวร์สำหรับวิเคราะห์ปัญหาด้านโครงสร้างแบบไม่เชิงเส้นตรงโดยตรงแบบแรกของโลกที่ถูกพัฒนาในเชิงพาณิชย์ตั้งแต่ปี 1971 และเป็นซอฟต์แวร์ที่สามารถวิเคราะห์ปัญหาทางวิศวกรรมขั้นสูงด้านต่าง ๆ เช่น การถ่ายเทความร้อน และปัญหา Multiphysics แบบต่าง ๆ ได้อีกด้วย ฉะนั้นความน่าเชื่อถือของผลการคำนวณจึงเป็นที่ยอมรับและได้ถูกอ้างอิงในการศึกษาและงานวิจัยตีพิมพ์ในวารสารทางด้านการคำนวณเชิงวิศวกรรมเป็นจำนวนมาก (MSC.Software Corporation, 2017)

## 2.4 ทฤษฎีความเสียหายของวัสดุทางวิศวกรรม

ในการออกแบบชิ้นงานทางวิศวกรรมมีการกำหนดขีดจำกัดของภาระกระทำเพื่อเป็นเกณฑ์การใช้งานและใช้อธิบายถึงความเสียหายของชิ้นส่วน โดยการเปรียบเทียบกับสิ่งที่สามารถ

ตรวจสอบด้วยการทดสอบ เช่น Yield Strength ( $\sigma_y$ ) หรือ Ultimate Strength ( $\sigma_u$ ) ซึ่งเรียกว่า “ทฤษฎีความเสียหาย (Failure Theories)” แต่เนื่องจากวัสดุเหนียว (Ductile Material) และเปราะ (Brittle Material) มีพฤติกรรมการเกิดความเสียหายที่ต่างกันแสดงดังรูปที่ 2.13

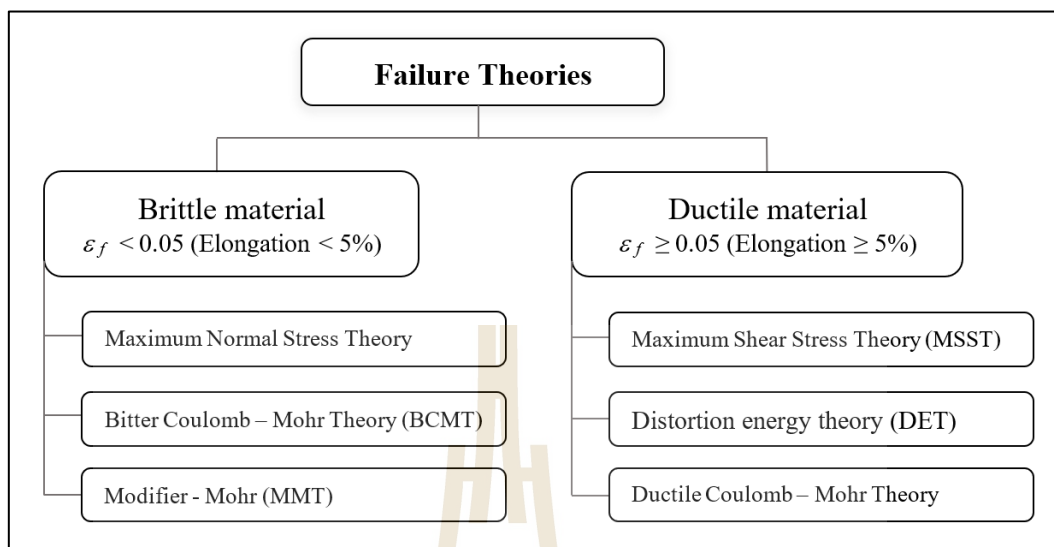


รูปที่ 2.13 พฤติกรรมการเกิดความเสียหาย (ก) วัสดุเหนียว และ (ข) วัสดุเปราะ

โดยวัสดุเหนียวมีการเปลี่ยนแปลงขนาดแบบถาวรก่อนเกิดความเสียหายสุดท้ายสูง ซึ่งเมื่อความเค้นที่เกิดขึ้นเกินค่าความเค้นครากวัสดุจะเกิดความเสียหายและไม่สามารถคืนรูปกลับสู่สภาพเริ่มต้นได้ และเกิดการแตกหักในที่สุด ส่งผลให้ความเค้นครากมีขนาดต่ำกว่าความเค้นสูงสุด ดังนั้นความเค้นครากจึงถูกนำมาเป็นเกณฑ์ประเมินความเสียหายของวัสดุเหนียว ส่วนวัสดุเปราะมีการเปลี่ยนแปลงขนาดแบบถาวรก่อนการเกิดความเสียหายสุดท้ายน้อยมาก ความเค้นครากและความเค้นสูงสุดมีขนาดใกล้เคียงกันมาก โดยความเสียหายจะเกิดขึ้นก็ต่อเมื่อวัสดุรับความเค้นจนเกินค่าความเค้นแตกหักของวัสดุ ดังนั้นค่าความเค้นสูงสุดที่วัสดุจะรับได้จึงถูกนำมาเป็นเกณฑ์ประเมินความเสียหายของวัสดุเปราะ อย่างไรก็ตามวัสดุเปราะสามารถแสดงพฤติกรรมความเสียหายเช่นเดียวกับวัสดุเหนียวได้เช่นกัน หากวัสดุนั้นอยู่ภายใต้สภาพแวดล้อมที่รุนแรงจะสามารถเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกลได้ (ภายใต้อุณหภูมิสูงหรือต่ำ) ตัวอย่างเช่น ทั้งสแตนมีการเปลี่ยนแปลงขนาดแบบถาวรเล็กน้อยที่อุณหภูมิห้องก่อนแตกหักหรือแตกหักแบบเปราะ แต่แสดงการแตกหักแบบเหนียวที่อุณหภูมิสูงกว่า 0.5 เท่าของจุดหลอมเหลว (Muyuan Li, 2015)

การประเมินความเสียหายของวัสดุมีหลายทฤษฎีให้เลือกแสดงดังรูปที่ 2.14 จึงจำเป็นต้องเลือกให้เหมาะสมกับสถานการณ์ ซึ่งบ่อยครั้งที่การประเมินความเสียหายเกิดจากการคำนวณผิดพลาดเนื่องจากการเลือกใช้ทฤษฎีที่ไม่สอดคล้องกับสถานการณ์จริง ความรู้พื้นฐานในทฤษฎีความเสียหายของวัสดุจึงมีความจำเป็นต่อการออกแบบทางวิศวกรรมอย่างถูกต้อง





รูปที่ 2.14 แผนผังทฤษฎีความเสียหายของวัสดุ (Robert L. Norton, 2011)

สำหรับการศึกษานี้เป็นการวิเคราะห์ความเสียหายบนอิเล็กทรอนิกส์โทรดช่องขนานที่ผลิตจากวัสดุทั้งสแตน ซึ่งเป็นวัสดุที่มีพฤติกรรมความเสียหายแบบเปราะ แต่เนื่องจากกระบวนการเชื่อมจุดความต้านทานมีกลไกการเกิดความร้อนสูง จึงอาจส่งผลให้ทั้งสแตนสามารถเปลี่ยนพฤติกรรมของการเสียรูปเป็นแบบวัสดุเหนียวได้ หากความร้อนที่เกิดบนอิเล็กทรอนิกส์โทรดมีขนาดเกิน 0.5 เท่าของจุดหลอมเหลวทั้งสแตน ดังนั้นการประเมินความเสียหายบนอิเล็กทรอนิกส์โทรดนี้จึงจำเป็นต้องศึกษาทั้งสองทฤษฎี เพื่อให้สามารถนำมาใช้ในการวิเคราะห์ผลลัพธ์จากการจำลองและการประเมินความเสียหายได้เหมาะสมกับสถานการณ์ที่ศึกษามากที่สุด

1) ทฤษฎีความเสียหายสำหรับวัสดุเปราะ

ทฤษฎีความเสียหายที่นิยมนำมาใช้ประเมินความเสียหายของวัสดุเปราะมี 3 ทฤษฎี ดังแสดงในรูปที่ 2.14 ได้แก่ MNST, BCMT และ MMT ซึ่งปกติแล้ว MMT จะให้ผลที่ใกล้เคียงกับการทดสอบแรงดึงวัสดุเปราะในกรณีความเค้นระนาบใน 2 มิติ มากกว่าทฤษฎีอื่น แต่หากเป็นการทดสอบแรงกดอัดทั้งสามทฤษฎีจะให้ผลที่ใกล้เคียงกับการทดสอบเหมือนหรือใกล้เคียงกันมาก ดังนั้นการประเมินความเสียหายของวัสดุเปราะที่เกิดจากแรงกดอัดหรือแรงดึงโดยไม่มีแรงบิดเข้ามาเกี่ยวข้องนิยมใช้ MNST เพื่อลดความซับซ้อนในการพิจารณา (Robert L. Norton, 2011) ซึ่งสำหรับการศึกษานี้เป็นการพิจารณาแรงที่เกิดจากแรงกดอัดระหว่างอิเล็กทรอนิกส์โทรดและงานเชื่อมโดยไม่มีแรงบิดเข้ามาเกี่ยวข้อง ทฤษฎี MNST จึงมีความเหมาะสมสำหรับใช้ประเมินความเสียหายบนอิเล็กทรอนิกส์โทรดมากกว่าทฤษฎีอื่น โดยใช้การเปรียบเทียบค่าความเค้นตั้งฉากสูงสุดบนอิเล็กทรอนิกส์โทรดที่ได้จากการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์กับความเค้นสูงสุดของวัสดุด้วยหลักการทางทฤษฎีความเค้น

ตั้งฉากสูงสุด (MNST) ซึ่งมีนิยามว่า “ความเสียหายของวัสดุจะเกิดขึ้นเมื่อความเค้นตั้งฉากหรือความเค้นหลักสูงสุดที่เกิดขึ้นภายในเนื้อวัสดุมีขนาดมากกว่าหรือเท่ากับความเค้นสูงสุดที่วัสดุต้านได้จากแรงดึง  $\sigma_{\max} \geq \sigma_{ut}$  หรือแรงกดอัด  $\sigma_{\max} \leq \sigma_{uc}$ ” หากใช้ประเมินความเสียหายสำหรับวัสดุเหนียวจะเป็นการเทียบกับค่าความเค้นที่จุดครากของวัสดุนั้น

## 2) ทฤษฎีความเสียหายสำหรับวัสดุเหนียว

ทฤษฎีที่นิยมใช้ประเมินความเสียหายสำหรับวัสดุเหนียวในปัจจุบันมีอยู่ 2 ทฤษฎี คือ MSST และ DET เนื่องจากให้ผลใกล้เคียงกับการใช้งานจริงมากกว่า ส่วนทฤษฎีอื่นไม่เป็นที่นิยมเนื่องจากไม่สอดคล้องกับผลการทดสอบของวัสดุเหนียว ซึ่งโดยทั่วไป MSST จะให้ความปลอดภัยต่อการใช้วัสดุมากกว่า ในขณะที่ DET ให้ผลที่มีความใกล้เคียงกับการทดสอบและแม่นยำมากกว่า จึงทำให้ DET เป็นที่นิยมนำมาใช้ประเมินความเสียหายของวัสดุอย่างกว้างขวาง

ทฤษฎีพลังงานแปรรูป (DET) หรืออาจเรียกว่า “ความเค้นเฉือนบนระนาบอ็อกตะฮีดรัล (Octahedral - Shear Stress Theory)” หรือ “Von Mises หรือ Von Mises - Hencky Theory” นิยามว่า “ความเสียหายของวัสดุจะเกิดขึ้นเมื่อพลังงานความเครียดแปรรูปต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรที่เกิดขึ้นในวัสดุมีค่ามากกว่าพลังงานความเครียดแปรรูปต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรของวัสดุ” ซึ่งแบ่งเป็นสองส่วนคือ ส่วนที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงปริมาตร เรียกว่า ความเค้นจากการขยายตัว (Dilatational stress) หรือ ความเค้นหยุดนิ่ง (Hydrostatic stress) ซึ่งเกิดความเค้นเท่ากันทุกทิศทาง ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงปริมาตรโดยการขยายตัวแต่ไม่เกิดการเสียรูปทรงไปจากเดิม จึงไม่ทำให้เกิดการคราก (สภาพเช่นเดียวกับของไหลที่อยู่นิ่งและมีความดันเท่ากันทุกทิศทาง) และไม่มี ความเค้นเฉือน และส่วนที่ทำให้เกิดการผิดรูปจากความเค้นเฉือน เรียกว่า ความเค้นจากการบิดเบี้ยว หรือผิดรูป (Distortional stress) จะไม่ทำให้วัสดุเกิดการเปลี่ยนแปลงปริมาตรแต่ทำให้เกิดการผิดรูปเนื่องจากความเค้นเฉือนและการเกิดการครากได้ ซึ่งความเค้นกดและความเค้นดึงบนระนาบที่ตั้งฉากซึ่งกันและกันจะมีค่าเทียบเท่ากับความเค้นเฉือน โดยการประเมินความเสียหายของวัสดุเหนียวสามารถพิจารณาจากผลของความเค้น Von Mises ที่เกิดขึ้นเทียบกับค่าความเค้นครากของวัสดุชนิดเดียวกัน ซึ่งวัสดุจะเกิดการครากหรือการเสียรูปถาวรก็ต่อเมื่อความเค้น Von Mises ( $\sigma'$ ) ในสมการที่ 2.11 มีค่ามากกว่าหรือเท่ากับค่าความเค้นคราก ( $\sigma_y$ ) ของวัสดุ ( $\sigma' \geq \sigma_y$ )

$$\sigma' = \left[ \frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}{2} \right]^{1/2} \quad (2.11)$$

ดังนั้นในการจำลองผลลัพธ์ของความเค้นบนอิเล็กทรอนิกส์ทรานซิสเตอร์ซึ่งเป็นวัสดุเปราะบนซอฟต์แวร์ไฟไนต์เอลิเมนต์ จึงควรพิจารณาความเค้นบนอิเล็กทรอนิกส์ทรานซิสเตอร์ในรูปแบบ Normal Stress

เพื่อให้สอดคล้องกับการประเมินความเสียหายของวัสดุเปราะด้วยทฤษฎี MNST หากกระบวนการเชื่อมความต้านทานมีอุณหภูมิที่เกิดขึ้นบนอิเล็กโทรดสูงกว่า 0.5 เท่าของจุดหลอมเหลวทั้งสแตน จะต้องพิจารณาความเค้นบนอิเล็กโทรดในรูปแบบ Von Mises เพื่อประเมินความเสียหายของอิเล็กโทรดเป็นแบบวัสดุเหนียวด้วยทฤษฎี DET ซึ่งการพิจารณาเช่นนี้จะทำให้ผลการประเมินความเสียหายและการคำนวณค่าความปลอดภัยของการใช้งานวัสดุนั้น ๆ เกิดความผิดพลาดน้อยลง



## บทที่ 3

### วิธีดำเนินงานวิจัย

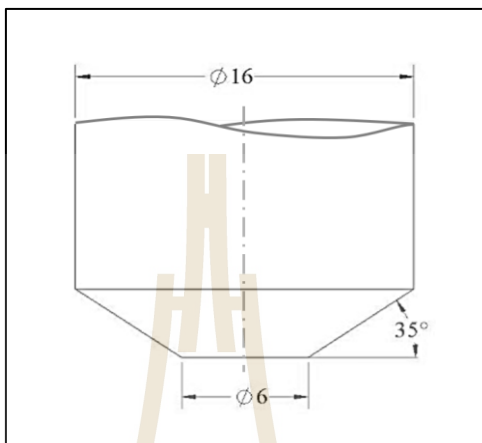
การศึกษาความเค้นเนื่องจากแรง-ความร้อนบนอิเล็กโทรดช่องขนานของกระบวนการเชื่อมจุดความต้านทานไฟฟ้าขนาดไมโคร สำหรับงานเชื่อมขนาดเล็กที่ต้องการความแม่นยำสูง อย่างเช่น แผงวงจรของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์หรือบัดกรีอิเล็กทรอนิกส์ (บัดกรีอาร์เอฟไอดี) อาศัยเทคนิคระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มาใช้ในการจำลองพฤติกรรมบนอิเล็กโทรด โดยขั้นตอนการศึกษาแบ่งเป็น 3 ส่วน คือ 1) การทวนสอบความน่าเชื่อถือการใช้ซอฟต์แวร์เพื่อให้เกิดความมั่นใจในการนำไปจำลองปัญหา 2) จำลองพฤติกรรมของอุณหภูมิ ความเค้น ความเครียด และการเคลื่อนตัวของเนื้ออิเล็กโทรด ภายใต้เงื่อนไขศึกษาและกระบวนการเชื่อมจุดความต้านทานไฟฟ้า และ 3) ประเมินความเสียหายและวิเคราะห์ปัจจัยที่ส่งผลต่อการเสื่อมสภาพของอิเล็กโทรด

#### 3.1 การทวนสอบความน่าเชื่อถือของการใช้ซอฟต์แวร์

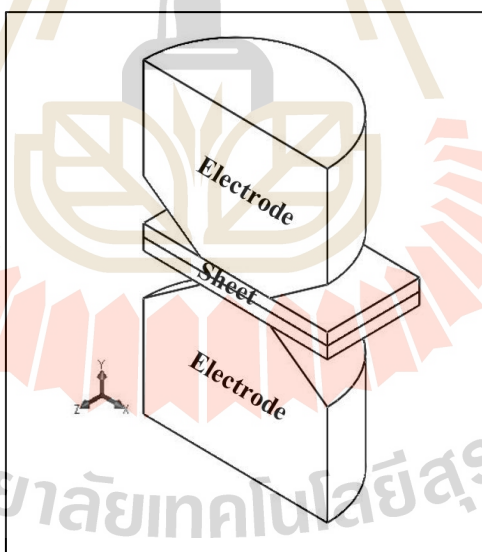
หัวข้อนี้นำเสนอการทวนสอบความน่าเชื่อถือของการใช้ซอฟต์แวร์ Marc Mentat เลือกกรณีทวนสอบเป็นอิเล็กโทรดตรงข้ามลักษณะทรงโดมปลายตัด (มาตรฐาน ISO 5821: 2009) ด้วยการเปรียบเทียบผลการจำลองพฤติกรรมอุณหภูมิและการเสียรูปจากการเคลื่อนตัวของเนื้ออิเล็กโทรดด้วยซอฟต์แวร์ Marc Mentat กับผลจากการทดลองและการจำลองด้วยซอฟต์แวร์ SOPAS 3D ซึ่งเป็นผลการศึกษาการเกิดรอยเชื่อมและผลกระทบที่เกิดกับอิเล็กโทรดภายใต้กระบวนการเชื่อมจุดความต้านทานไฟฟ้า ของ C.V. Nielsen et al., (2013)

อิเล็กโทรดตรงข้ามใช้สำหรับการเชื่อมจุดความต้านทานไฟฟ้าขนาดใหญ่ (LSRSW) นิยมใช้ในอุตสาหกรรมด้านยานยนต์ ซึ่งพฤติกรรมการเชื่อมเช่นเดียวกับอิเล็กโทรดช่องขนาน (Parallel Gap Electrode) ของกระบวนการเชื่อมจุดความต้านทานไมโคร (Micro-RSW) เนื่องจากเป็นอิเล็กโทรดที่อยู่ในกลุ่มการเชื่อมความต้านทานไฟฟ้าชนิดเกิดรอยเชื่อมลักษณะเป็นจุดเช่นเดียวกัน ต่างเพียงขนาดของพารามิเตอร์ที่ใช้ในกระบวนการเชื่อม ตำแหน่งการวาง รูปทรง และขนาดของอิเล็กโทรด โดยอิเล็กโทรดสำหรับกรณีทวนสอบนี้เป็นอิเล็กโทรดชนิดตรงข้ามลักษณะเป็นทรงโดมปลายตัด มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 16 มิลลิเมตร และหน้าสัมผัสขนาด 6 มิลลิเมตร แสดงในรูปที่ 3.1 และในการเชื่อมอิเล็กโทรดมีตำแหน่งการวางตรงข้ามกัน โดยมีแผ่นชิ้นงานเชื่อมขนาดหนา 1 มิลลิเมตร จำนวน 2 ชิ้น อยู่ระหว่างอิเล็กโทรดทั้ง 2 ด้าน แต่เนื่องจากอิเล็กโทรดตรงข้ามมีลักษณะเป็นทรงกระบอกที่มีความสมมาตรรอบแกน  $y$  เพื่อเป็นการลดระยะเวลา

และการใช้ทรัพยากรเครื่องคอมพิวเตอร์ในการจำลองผลเฉลย จึงจำลองปัญหาการเชื่อมจุดความต้านทานไฟฟ้าบนอิเล็กทรอนิกส์โทรดตรงข้ามเพียงครั้งเดียว แสดงดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.1 ขนาดและรูปทรงของอิเล็กทรอนิกส์โทรดตรงข้าม (มิลลิเมตร)

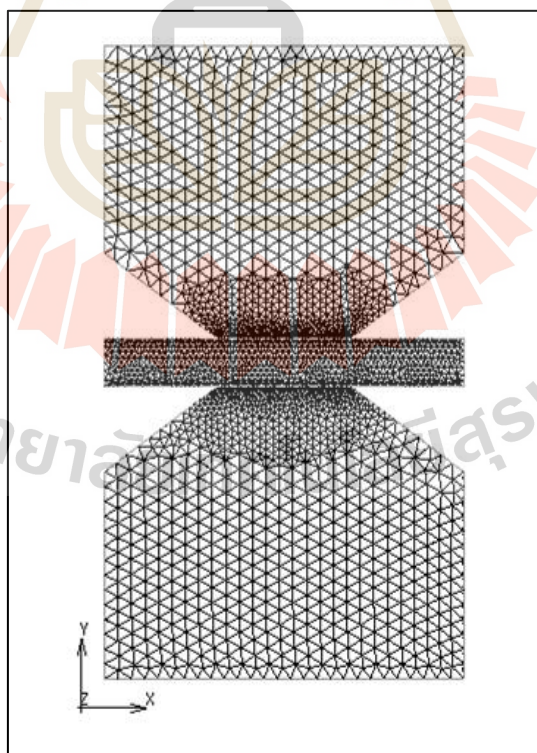


รูปที่ 3.2 แบบเขียนคอมพิวเตอร์ของอิเล็กทรอนิกส์โทรดตรงข้ามในการเชื่อม

ขั้นตอนการทวนสอบการใช้ซอฟต์แวร์และการพิจารณารูปแบบการจำลองที่เหมาะสมกับการจำลองพฤติกรรมการเชื่อมจุดความต้านทานไฟฟ้าผ่านอิเล็กทรอนิกส์โทรดตรงข้าม เพื่อนำไปใช้กับการจำลองพฤติกรรมบนอิเล็กทรอนิกส์โทรดช่องขนานในการเชื่อมจุดความต้านทานไฟฟ้าขนาดไมโครมีดังนี้

### 1. การสร้างเมช

การสร้างเมชมีความสำคัญต่อการจำลองปัญหาทางคอมพิวเตอร์ โดยเมชที่ทำการสร้างต้องเพียงพอสำหรับใช้ทำนายพฤติกรรมอุณหภูมิและการเสียดรูปที่เกิดขึ้นกับแบบจำลอง เนื่องจากเมชส่งผลโดยตรงต่อความแม่นยำของผลเฉลย เมชคุณภาพต่ำส่งผลให้ความถูกต้องของผลเฉลยลดลง ซึ่งขั้นตอนการสร้างเมชนี้เป็นขั้นตอนต่อจากการสร้างแบบเขียนคอมพิวเตอร์ของอิเล็กโทรดในการเชื่อมชิ้นงานแสดงในรูปที่ 3.2 เมชที่ใช้เป็นแบบ 3 มิติ รูปทรงสี่หน้า โดยกำหนดให้ชิ้นงานเชื่อมและบริเวณหน้าสัมผัสของอิเล็กโทรดมีขนาดเล็กกว่าบริเวณอื่น เนื่องจากเป็นบริเวณที่มีแรงกดอัดและอุณหภูมิสูงจากการเกิดความต้านทานการไหลของการสัมผัสระหว่างวัสดุ จากนั้นทดลองความเป็นอิสระของเมชเพื่อให้มั่นใจต่อผลเฉลยที่ได้ไม่ขึ้นกับจำนวนเอลิเมนต์ ด้วยการสร้างเมชที่ใช้ในการจำลองปัญหาการเชื่อมจุดความต้านทานไฟฟ้าด้วยอิเล็กโทรดตรงข้ามที่มีจำนวนต่างกัน โดยผลการทดลองความเป็นอิสระของเมชทำให้ได้เมชสำหรับการจำลองที่จำนวน 90,940 เอลิเมนต์ 20,699 จุดต่อ จากการกำหนดขนาดเมชของชิ้นงานเชื่อม 0.005 มิลลิเมตร, ขนาดเมชของอิเล็กโทรดใหญ่สุด 0.05 มิลลิเมตร และเล็กสุด 0.005 มิลลิเมตร แสดงดังรูปที่ 3.3

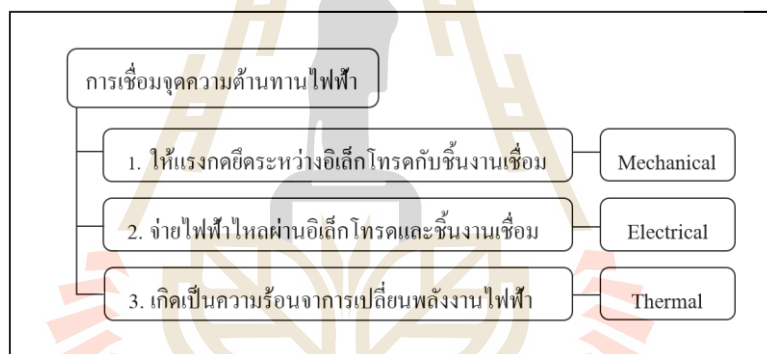


รูปที่ 3.3 เมชสำหรับการเชื่อมจุดความต้านทานไฟฟ้าด้วยอิเล็กโทรดตรงข้าม



## 2. การกำหนดรูปแบบการจำลอง

ขั้นตอนการกำหนดรูปแบบการจำลองปัญหาทางไฟไนต์เอลิเมนต์บนซอฟต์แวร์ Marc Mentat เป็นขั้นตอนที่ต้องกำหนดก่อนการตั้งค่าอื่น ๆ เนื่องจากรูปแบบการจำลองมีผลต่อความถูกต้องในการกำหนดสมบัติวัสดุและเงื่อนไขขอบ การกำหนดรูปแบบการจำลองต้องเลือกให้เหมาะสมกับกระบวนการทำงานและพฤติกรรมของปัญหาเพื่อความแม่นยำของผลเฉลย โดยรูปแบบการจำลองสำหรับปัญหาการเชื่อมจุดความต้านทานไฟฟ้าพิจารณาได้จากหลักการเชื่อมซึ่งเกิดจากการให้แรงอเล็กโทรดกดยึดชิ้นงานเชื่อมมีผลต่อความสามารถในการต้านทานการไหลของกระแสไฟฟ้าที่บริเวณผิวสัมผัส เมื่อไฟฟ้าไหลผ่านวัสดุหนึ่งไปยังวัสดุหนึ่งจะเปลี่ยนเป็นความร้อนเนื่องจากความต้านทานไฟฟ้า ความร้อนที่เกิดขึ้นส่งผลต่อกายภาพเชิงกลวัสดุของชิ้นงานเชื่อมและอเล็กโทรดที่ใช้เชื่อม ผลกระทบที่เกิดขึ้นเป็นผลมาจากความสัมพันธ์ระหว่างทางกลหรือโครงสร้าง ไฟฟ้า และความร้อน แสดงดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 แผนผังรูปแบบจำลองการเชื่อมจุดความต้านทานไฟฟ้าบนซอฟต์แวร์ Marc Mentat

จากรูปที่ 3.4 ทำให้ได้รูปแบบการจำลองที่มีความสอดคล้องกับลักษณะของปัญหา เป็น Electrical-Thermal-Mechanical โดยกระบวนการเชื่อมจุดความต้านทานไฟฟ้ามีแรงกดยึดอยู่ในสถานะหยุดนิ่งเมื่ออเล็กโทรดสัมผัสกับชิ้นงานเชื่อม ไฟฟ้าที่จ่ายให้แก่ระบบมีการไหลลงที่และความร้อนที่เกิดขึ้นมีการเปลี่ยนแปลงตามเวลาการไหลของไฟฟ้า จำลองจึงวิเคราะห์ภายใต้สถานะ Steady State/Transient/Static

## 3. การกำหนดสมบัติวัสดุ

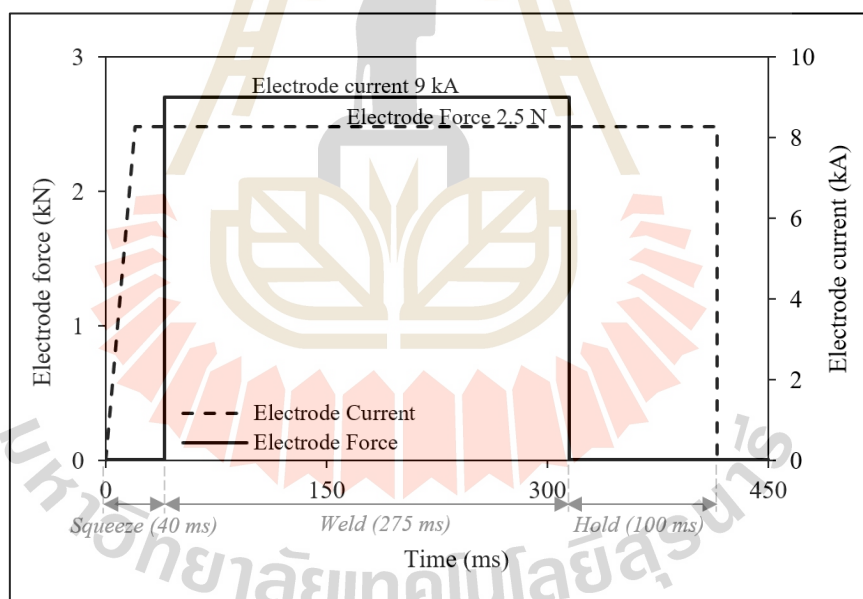
การกำหนดสมบัติวัสดุสำหรับการจำลองปัญหาไฟไนต์เอลิเมนต์ต้องกำหนดให้ตรงตามกับวัสดุที่ใช้งานจริง เพื่อความถูกต้องของผลเฉลย โดยกรณีทวนสอบนี้ใช้อเล็กโทรดตรงข้ามเป็นวัสดุชนิด C1500 ซึ่งเป็นโลหะผสม มีสมบัติวัสดุดังตารางที่ ก.1 ในภาคผนวก ก. และใช้ชิ้นงาน



เชื่อมเป็นวัสดุชนิด SS304 (Stainless Steel-Grade 304) ซึ่งเหล็กกล้าไร้สนิมจัดเป็นโลหะประเภท Elastic-Plastic มีสมบัติวัสดุตั้งตารางที่ ก.2 ในภาคผนวก ก. โดยการกำหนดสมบัติวัสดุบนซอฟต์แวร์ Marc Mentat ต้องกำหนดให้สอดคล้องกับรูปแบบการจำลองที่เลือกด้วย ซึ่งรูปแบบการจำลองที่เลือกใช้แบ่งสมบัติวัสดุออกเป็น 3 ส่วน ได้แก่ สมบัติวัสดุทางกล ความร้อน และไฟฟ้า

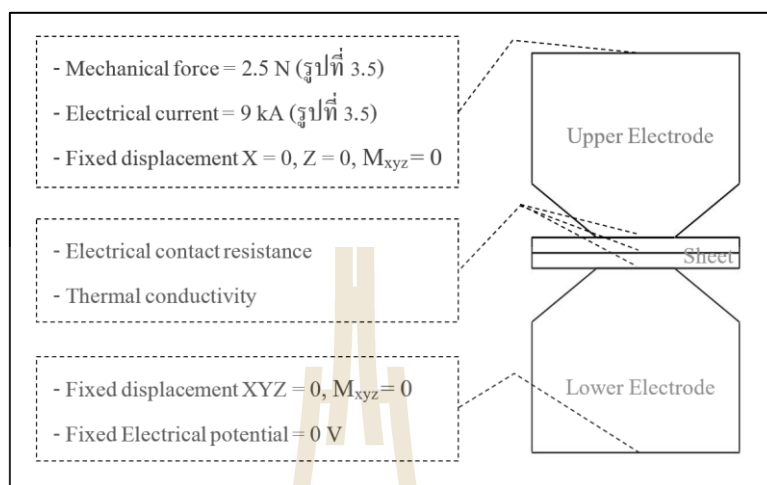
#### 4. การกำหนดเงื่อนไขขอบ

การกำหนดเงื่อนไขขอบสำหรับการจำลองปัญหาด้วยซอฟต์แวร์คอมพิวเตอร์ต้องกำหนดให้สอดคล้องกับเงื่อนไขที่เกิดขึ้นจริงมากที่สุด ทั้งนี้เพื่อความถูกต้องของผลเฉลย โดยการเชื่อมจุดความต้านทานไฟฟ้าสำหรับกรณีทดสอบนี้มีขั้นตอนการเชื่อมเริ่มจากการกดยึดชิ้นงานเชื่อมด้วยอิเล็กโทรดเป็นเวลา 40 มิลลิวินาที จากนั้นปล่อยไฟฟ้าไหลผ่านอิเล็กโทรดเป็นเวลา 275 มิลลิวินาที เมื่อไฟฟ้าเปลี่ยนเป็นความร้อนทำให้เกิดเป็นรอยเชื่อมประสานชิ้นงานเชื่อมเข้าด้วยกัน จึงหยุดจ่ายไฟฟ้า แต่ยังคงการกดยึดระหว่างอิเล็กโทรดกับชิ้นงานเชื่อมเป็นเวลา 100 มิลลิวินาที เพื่อให้รอยเชื่อมเย็นตัวและยึดติดกันแน่น แสดงดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 กระบวนการเชื่อมจุดความต้านทานไฟฟ้าด้วยอิเล็กโทรดตรงข้าม

จากกระบวนการเชื่อมในรูปที่ 3.5 จึงกำหนดเงื่อนไขขอบสำหรับการจำลองปัญหาการเชื่อมจุดความต้านทานไฟฟ้าผ่านอิเล็กโทรดตรงข้ามแสดงดังรูปที่ 3.6 โดยเงื่อนไขเริ่มต้นของแบบจำลองมีการเคลื่อนที่เป็น 0 mm และอุณหภูมิเป็น 27 องศาเซลเซียส (อุณหภูมิห้องของวัสดุ)



รูปที่ 3.6 เงื่อนไขขอบการจำลองปัญหาการเชื่อมจุดความต้านทานไฟฟ้าผ่านอิเล็กโทรดตรงข้าม

ทั้งนี้ Electrical Contact Resistance คือ ค่าการนำไฟฟ้าระหว่างผิวสัมผัสของวัสดุสองชนิด และ Thermal Conductivity คือ ค่าการนำความร้อนของวัสดุ ซึ่งทั้งสองค่าเป็นสมบัติการสัมผัสของวัสดุที่แปรผันตามอุณหภูมิที่เกิดขึ้นบริเวณผิวสัมผัสระหว่างอิเล็กโทรดด้านกับชิ้นงานเชื่อม และชิ้นงานเชื่อมกับชิ้นงานเชื่อมแสดงดังตารางที่ ก.3 ในภาคผนวก ก.

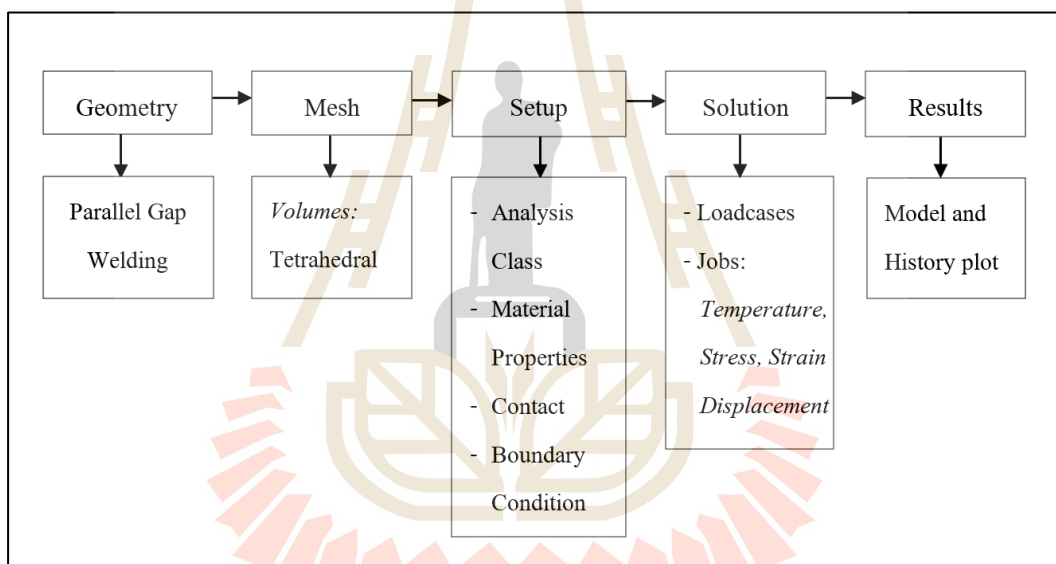
#### 5. การวิเคราะห์และเปรียบเทียบผล

ภายหลังจากการจำลองปัญหาการเชื่อมจุดความต้านทานไฟฟ้าผ่านอิเล็กโทรดตรงข้ามบนซอฟต์แวร์ Marc Mentat ด้วยรูปแบบการจำลอง Electrical/Thermal/Mechanical ภายใต้สภาวะ Steady State/Transient/Static เป็นเวลา 415 มิลลิวินาที จำนวน 200 รอบการคำนวณ ขนาดขั้นเวลา 6.92 มิลลิวินาที แล้ว จึงทำการเปรียบเทียบผลอุณหภูมิของการเชื่อมและระยะการเคลื่อนตัวของเนื้อโลหะบนอิเล็กโทรดตรงข้ามในแต่ละเวลาการเชื่อม กับผลการทดลองและการจำลองของ C.V. Nielsen et al. (2013) พร้อมทั้งหาความคลาดเคลื่อนจากผลการทดลองการเชื่อม เพื่อให้เกิดความมั่นใจในการนำไปจำลองปัญหาสำหรับกรณีศึกษาต่อไป

### 3.2 การจำลองปัญหาการเชื่อมจุดความต้านทานไฟฟ้าบนอิเล็กโทรดช่องขนาน

ภายหลังการทวนสอบความน่าเชื่อถือของการใช้ซอฟต์แวร์รวมถึงการเลือกรูปแบบการจำลองปัญหาที่เหมาะสมกับกระบวนการเชื่อมจุดความต้านทานไฟฟ้าแล้ว ขั้นตอนต่อไปเป็นการจำลองปัญหาการเชื่อมจุดความต้านทานไฟฟ้าบนอิเล็กโทรดช่องขนาน ด้วยเงื่อนไขการเชื่อม

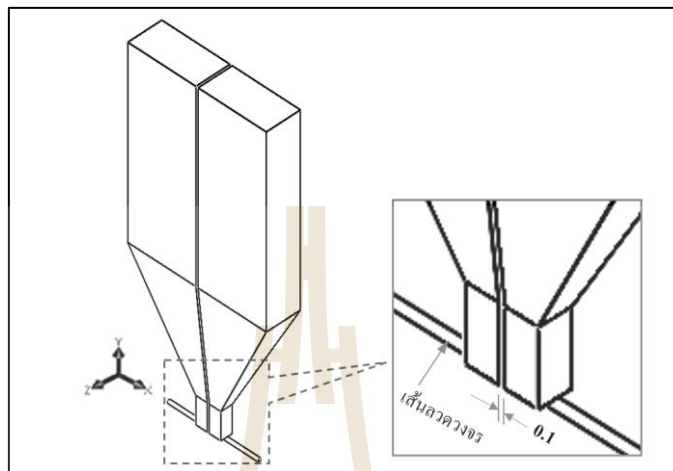
จากการทดลองเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมต่ออิเล็กทรอนิกส์และชิ้นงานเชื่อม สำหรับการเชื่อมจุดความต้านทานขนานไมโครในการผลิตวงจรสัญญาณและชิ้นส่วนอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ขนาด เล็กของ Xuguang Guo et al. (2014) เพื่อศึกษาพฤติกรรมการเกิดอุณหภูมิ ความเค้น ความเครียด และการเสียรูปจากการเคลื่อนตัวของเนื้อโลหะบนอิเล็กทรอนิกส์โทรดของขนาน อันนำไปสู่การวิเคราะห์ ความเสียหายและหาสาเหตุการเสื่อมสภาพของอิเล็กทรอนิกส์โทรดที่มีผลต่อคุณภาพการเชื่อม โดยใช้วิธีการ จำลองเชิงตัวเลขบนพื้นฐานระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วยซอฟต์แวร์ Marc Mentat วิเคราะห์บน พื้นฐานความสัมพันธ์ระหว่างปรากฏการณ์ทางไฟฟ้า ความร้อน และทางกล โดยกระบวนการ จำลองพฤติกรรมของปัญหาการเชื่อมจุดความต้านทานไฟฟ้าบนอิเล็กทรอนิกส์โทรดของขนานด้วย ซอฟต์แวร์ Marc Mentat แสดงดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 แผนผังกระบวนการจำลองปัญหาทางไฟไนต์เอลิเมนต์บนซอฟต์แวร์ Marc Mentat

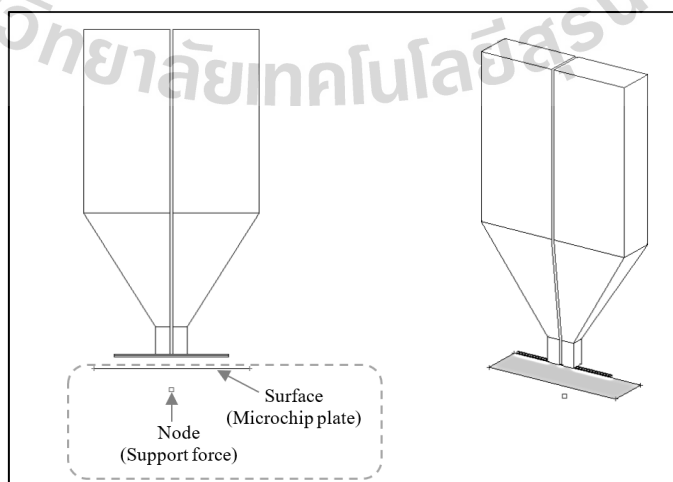
### 3.2.1 การสร้างแบบเขียนคอมพิวเตอร์

สร้างแบบเขียนคอมพิวเตอร์สามมิติของอิเล็กทรอนิกส์โทรดของขนานสำหรับการจำลอง ปัญหาการเชื่อมจุดความต้านทานไฟฟ้า ด้วยซอฟต์แวร์ SolidWorks ตามขนาดในรูปที่ 1.2 หัวข้อที่ 1.3 โดยในการเชื่อมมีเส้นลวดวงจรพื้นที่หน้าตัดเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 190 ไมโครเมตร ความยาว 4 มิลลิเมตร สัมผัสกับปลายอิเล็กทรอนิกส์โทรดที่มีระยะห่างระหว่างอิเล็กทรอนิกส์โทรด 0.1 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 แบบเขียนคอมพิวเตอร์ของอิเล็กโทรดช่องขนาน

หลังจากได้แบบเขียนคอมพิวเตอร์ในรูปที่ 3.9 แล้ว ก่อนทำการจำลองปัญหาการเชื่อมจุดความต้านทานไฟฟ้าบนอิเล็กโทรดช่องขนานดังซอฟต์แวร์ Marc Mentat นั้น ต้องทำการเตรียมแบบจำลองให้เหมือนกับพฤติกรรมการเชื่อมในการผลิตวงจรภายในบัตรอาร์เอฟไอดีเพื่อความแม่นยำของผลเฉลย โดยการสร้างแผ่นไมโครชิปในลักษณะสองมิติด้วยระนาบพื้นผิว (Surface) มีระยะห่างจากอิเล็กโทรดเล็กน้อย เพื่อให้สามารถเคลื่อนที่ได้เมื่อมีแรงกระทำ และสร้างจุดต่อ (Node) ที่ตำแหน่งกึ่งกลางระนาบพื้นผิวเพื่อรองรับการกำหนดแรงในการกดยึดระหว่างอิเล็กโทรดกับเส้นลวดวงจร แสดงดังรูปที่ 3.9

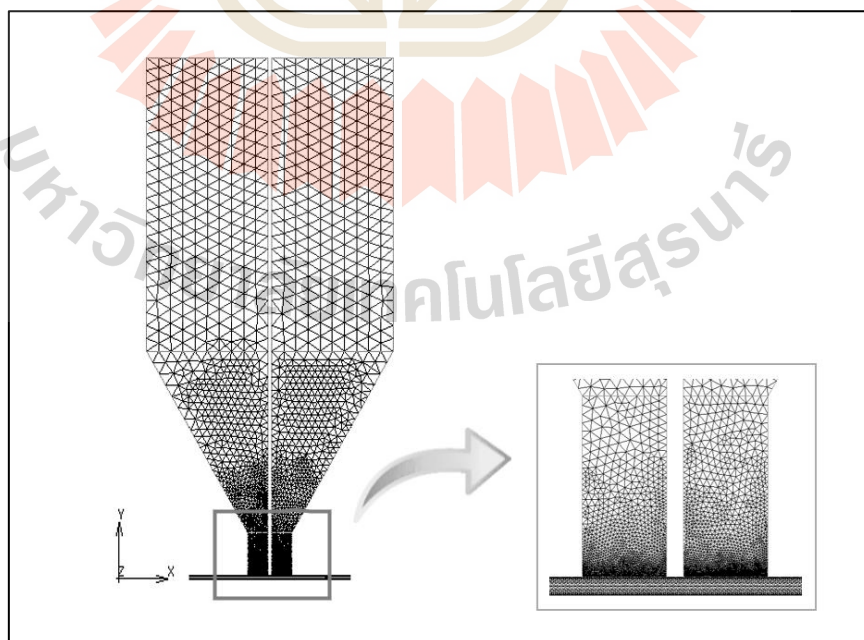


### รูปที่ 3.9 ระบายพื้นผิวและจุดรองรับแรงกดของอิเล็กโทรดช่องขนาน

#### 3.2.2 การสร้างเมชและการทดลองความเป็นอิสระของเมช

##### 1. การสร้างเมช

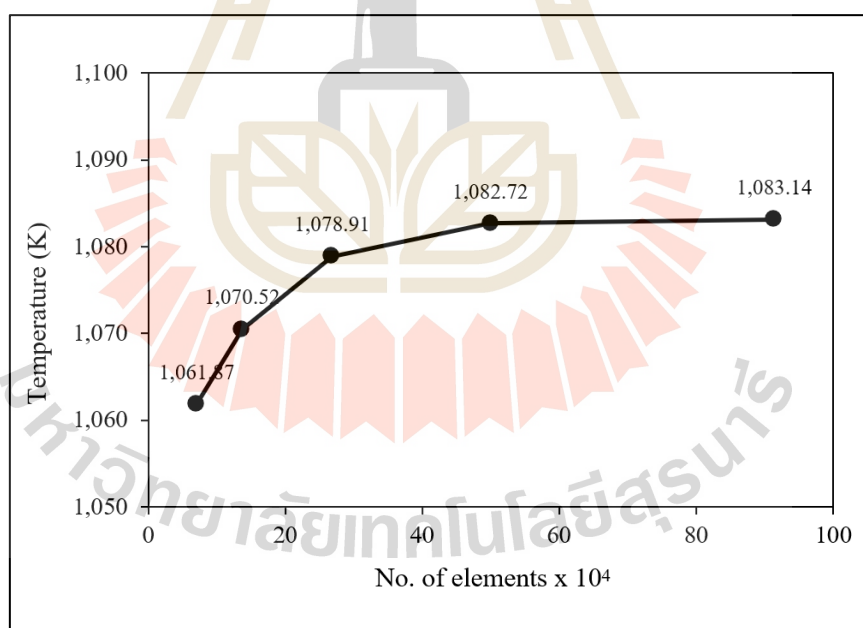
การสร้างเมช คือ การแบ่งโดเมนหรือวัตถุที่ต้องการจำลองออกเป็นเอลิเมนต์ขนาดเล็กที่วางเรียงตัวกันตลอดทั้งโดเมน โดยไม่ทับซ้อนกัน โดยเอลิเมนต์ที่ใช้กับการจำลองปัญหาโครงสร้างมีหลายรูปทรง สำหรับเอลิเมนต์แบบสามมิติรูปทรงหกหน้าและปริซึมสี่เหลี่ยมให้ผลเฉลยที่แม่นยำกว่ารูปทรงอื่น แต่เอลิเมนต์รูปทรงสี่หน้าสามารถจัดวางเข้ารูปทรงได้ง่ายกว่า ทำให้วัตถุที่มีรายละเอียดซับซ้อนหรือขนาดเล็กมีการจัดวางเอลิเมนต์ใกล้เคียงกับรูปร่างเดิมมากกว่า ดังนั้นจึงเลือกใช้เอลิเมนต์รูปทรงสี่หน้าสำหรับการสร้างเมชของรูปทรงอิเล็กโทรดช่องขนานและเส้นลวดวงจร และเพื่อเป็นการประหยัดเวลาและทรัพยากรของเครื่องคอมพิวเตอร์ที่ใช้คำนวณผลเฉลย จึงกำหนดเอลิเมนต์ให้มีความละเอียดเฉพาะเส้นลวดทองแดง เนื่องจากเส้นลวดวงจรที่มีผลต่อการเสถียรของอิเล็กโทรดทั้งทางตรงและทางอ้อม และบริเวณปลายของอิเล็กโทรด เนื่องจากบริเวณดังกล่าวมีผลกระทบจากแรงกดยี้ระหว่างอิเล็กโทรดกับเส้นลวดวงจร และมีอุณหภูมิสูงจากความต้านทานไฟฟ้า จึงอาจเกิดการเสถียรที่นำไปสู่การเสื่อมสภาพของอิเล็กโทรด ดังนั้นการสร้างเมชรูปทรงของอิเล็กโทรดจึงกำหนดบริเวณส่วนปลายอิเล็กโทรดให้มีเอลิเมนต์ขนาดเล็กที่สุดและเอลิเมนต์ของชั้นถัดไปจะมีขนาดใหญ่ขึ้นตามขนาดอิเล็กโทรดที่เพิ่มขึ้น โดยเมชสำหรับอิเล็กโทรดช่องขนานและเส้นลวดวงจรแสดงในรูปที่ 3.10



### รูปที่ 3.10 เมชบนอิเล็กโทรดช่องขนาน

#### 2. การทดสอบความเป็นอิสระของเมช

การทดสอบความเป็นอิสระของเมชเป็นขั้นตอนทดลองหาขนาดและจำนวนของอิเล็กเมนต์ที่เหมาะสมสำหรับใช้จำลองปัญหา ทำได้โดยการสร้างเมชที่มีจำนวนของอิเล็กเมนต์ที่แตกต่างกันหลาย ๆ ชุด ตั้งแต่หยาบและละเอียดขึ้นเรื่อย ๆ จากนั้นทำการจำลองอุณหภูมิด้วยเมชชุดต่าง ๆ แล้วนำผลลัพธ์ที่ได้มาเปรียบเทียบกัน หากเมชสองชุดใดให้ผลลัพธ์ใกล้เคียงกัน ให้เลือกใช้เมชชุดที่มีจำนวนอิเล็กเมนต์น้อยกว่า ทั้งนี้เพื่อประหยัดเวลาและทรัพยากรของเครื่องคอมพิวเตอร์ที่ใช้คำนวณ สำหรับการจำลองอุณหภูมิของการเชื่อมจุดความต้านทานไฟฟ้าด้วยอิเล็กโทรดช่องขนานได้ทำการสร้างเมชที่มีจำนวนอิเล็กเมนต์ต่างกัน 5 ชุด ได้แก่เมชที่มีจำนวน 70,851, 137,043, 268,769, 499,538 และ 914,236 อิเล็กเมนต์ ตามลำดับ จากนั้นนำเมชแต่ละชุดไปจำลองหาผลลัพธ์ด้วยการคำนวณจำนวน 200 รอบ แล้วนำผลลัพธ์ที่ได้มาพล็อตกราฟค่าอุณหภูมิสูงสุดของการเชื่อมจุดความต้านทานไฟฟ้าด้วยอิเล็กโทรดช่องขนานเทียบกับจำนวนอิเล็กเมนต์ของเมชแต่ละชุด แสดงดังรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 อุณหภูมิสูงสุดของการเชื่อมเทียบกับจำนวนอิเล็กเมนต์

จากทดลองหาขนาดและจำนวนของอิเล็กเมนต์ที่เหมาะสมในรูปที่ 3.12 พบว่าเมชชุดที่มีจำนวน 499,538 และ 914,236 อิเล็กเมนต์ ให้ผลลัพธ์ของอุณหภูมิมบนอิเล็กโทรดเท่ากับ 1,082.72 และ 1,083.14 เคลวิน ตามลำดับ ซึ่งเมชทั้งสองชุดมีค่าอุณหภูมิที่ใกล้เคียงกัน ดังนั้น



จึงเลือกใช้เมชชุดที่มี 499,538 เอลิเมนต์ ในการจำลองพฤติกรรมของปัญหาการเชื่อมจุด ความต้านทานไฟฟ้าบนอิเล็กทรอนิกส์โทรดช่องขนาน ซึ่งได้จากการกำหนดเมชของรูปทรงอิเล็กทรอนิกส์ด้วย เอลิเมนต์ขนาดเล็กลที่สุด 0.001 มิลลิเมตร ใหญ่สุด 0.03 มิลลิเมตร กำหนด Internal Coarsening Factor มีค่า 1.1 และ Chordal deviation เป็น 0.005 และกำหนดเมชรูปทรงของเส้นลวดวงจรด้วยเอลิเมนต์ ขนาดใหญ่สุด 0.01 มิลลิเมตร และเล็กสุด 0.0005 มิลลิเมตร

### 3.2.3 การกำหนดขนาดขั้นเวลาและความเป็นอิสระของขนาดขั้นเวลา

#### 1. การกำหนดขั้นเวลา

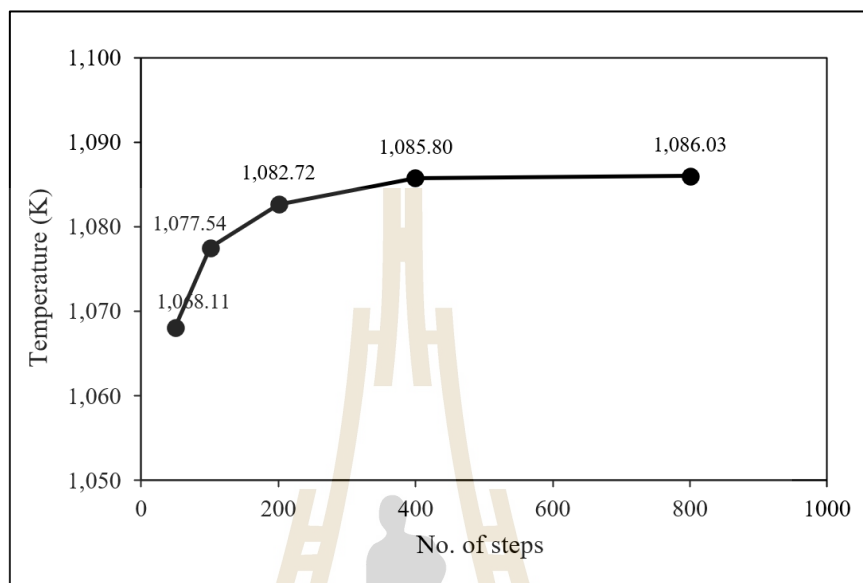
หลังจากได้เมชที่เหมาะสมกับการจำลองปัญหาแล้ว จากนั้นเป็นขั้นตอน การกำหนดขั้นเวลา (Time Step) สำหรับการจำลองปัญหาบนคอมพิวเตอร์ คือการแบ่งโดเมนเวลา ของปัญหาในการคำนวณผลลัพธ์ออกเป็นช่วงเวลาย่อย ๆ ซึ่งแต่ละช่วงมีระยะเวลาห่างเท่ากัน การกำหนดขั้นเวลาการคำนวณบนซอฟต์แวร์ Marc Mentat ทำได้โดยการกำหนดเป็นจำนวนรอบ การคำนวณ ซึ่งจำนวนรอบการคำนวณเป็นสัดส่วนของขั้นเวลา กล่าวคือขั้นเวลาการคำนวณจะมี ระยะเวลาห่างน้อยลงเมื่อมีจำนวนรอบการคำนวณเพิ่มขึ้น ขั้นเวลาการคำนวณที่ห่างกันน้อยลงจะทำให้ ได้ผลลัพธ์แม่นยำขึ้นตามไปด้วย ทั้งนี้การกำหนดขั้นเวลาต้องคำนึงถึงความเหมาะสมของ ระยะเวลาที่ใช้ในการคำนวณและทรัพยากรของเครื่องคอมพิวเตอร์ที่ใช้ เพื่อลดความผิดพลาดที่ จะเกิดขึ้นในการจำลอง ดังนั้นจึงต้องหาความเหมาะสมของขั้นเวลาสำหรับการจำลองปัญหา เพื่อให้ได้มาซึ่งผลลัพธ์ที่มีความแม่นยำและระยะเวลาการคำนวณที่น้อย

#### 2. การทดลองความเป็นอิสระของขั้นเวลา

ขั้นตอนนี้เป็นการทดลองหาขั้นเวลาการคำนวณที่เหมาะสมกับการจำลอง ปัญหา เพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่ไม่ขึ้นอยู่กับขนาดขั้นเวลาการคำนวณ โดยใช้หลักการเช่นเดียวกับการทดลองความเป็นอิสระของเมช ต่างเพียงการทดลองความเป็นอิสระของขั้นเวลาเป็นการกำหนด ขนาดของขั้นเวลาหรือจำนวนรอบการคำนวณ ซึ่งหากผลลัพธ์ที่ได้จากชุดขั้นเวลาสองชุดใด มีค่าใกล้เคียงกัน ให้เลือกใช้ชุดขั้นเวลาที่มีรอบการคำนวณน้อยกว่าหรือมีระยะห่างเวลามากกว่า เพื่อลดระยะเวลาในการคำนวณผลลัพธ์ของซอฟต์แวร์ สำหรับการจำลองอุณหภูมิของปัญหา การเชื่อมจุดความต้านทานไฟฟ้าด้วยอิเล็กทรอนิกส์โทรดช่องขนานใช้เชื่อม 25 มิลลิวินาที ได้กำหนด ชุดขั้นเวลาการคำนวณต่างกันจำนวน 5 ชุด ได้แก่ 0.5 (50 รอบ), 0.25 (100 รอบ), 0.125 (200 รอบ), 0.0625 (400 รอบ) และ 0.03125 (800 รอบ) มิลลิวินาที ตามลำดับ จากนั้นนำผลลัพธ์ที่ได้มา พล็อตกราฟอุณหภูมิสูงสุดเทียบกับขั้นเวลาการคำนวณ (จำนวนรอบ) ดังรูปที่ 3.13 พบว่า ชุดขั้น เวลาการคำนวณจำนวน 400 และ 800 รอบ มีค่าอุณหภูมิของการเชื่อมสูงสุดเท่ากับ 1,085.80 และ 1,086.03 เคลวิน ซึ่งขั้นเวลาการคำนวณทั้งสองชุดให้ผลลัพธ์ที่ใกล้เคียงกัน โดยมีผลต่างของ อุณหภูมิ 0.025 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้นจึงเลือกใช้ชุดขั้นเวลาการคำนวณ 0.0625 มิลลิวินาที จำนวน



400 รอบ ในการจำลองพฤติกรรมของปัญหาการเชื่อมจุดความต้านทานบนอิเล็กทรอนิกส์ของขนานต่อไป



รูปที่ 3.12 อุณหภูมิสูงสุดของการเชื่อมเทียบกับขั้นตอนการคำนวณ

### 3.2.4 การตั้งค่า

#### 1. การเลือกรูปแบบการจำลอง

เลือกใช้แบบจำลองที่ได้จากการวิเคราะห์ความสอดคล้องของการเชื่อมความต้านทานในขั้นตอนการทวนสอบความน่าเชื่อถือของการใช้ซอฟต์แวร์ที่ได้กล่าวไว้ก่อนหน้านี้

#### 2. การกำหนดสมบัติวัสดุ

การจำลองปัญหาการเชื่อมจุดความต้านทานไฟฟ้าบนซอฟต์แวร์ Marc Mentat ด้วยแบบจำลอง Electrical-Thermal-Mechanical ซอฟต์แวร์จะแบ่งการกำหนดสมบัติวัสดุเป็น 3 ส่วน ได้แก่ สมบัติวัสดุเชิงกลหรือโครงสร้าง ความร้อน และไฟฟ้า ซึ่งแต่ละส่วนมีการกำหนดสมบัติวัสดุที่เกี่ยวข้องดังแสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 การกำหนดสมบัติวัสดุบนซอฟต์แวร์ Marc Mentat

Material Properties	Properties Type	Properties
General Properties		Mass Density
Other Properties		
- Structural	Elastic-Plastic-Isotropic	Young's Modulus Poisson's Ratio Thermal Expansion Yield strength
- Thermal	Isotropic	Conductivity Specific Heat Emissivity Ref. Temperature
- Electric	Isotropic	Resistivity Conductivity

โดยการเชื่อมจุดความต้านทานของกรณีศึกษาที่ใช้อิเล็กทรอนิกส์ช่องขนานผลิตจากทั้งสแตน มีสมบัติวัสดุดังตารางที่ ก. 4 - 6 ในภาคผนวก ก. และใช้เส้นลวดวงจรเป็นทองแดง มีสมบัติวัสดุดังตารางที่ ก.7 ในภาคผนวก ก. ทั้งนี้การเชื่อมจุดความต้านทานไฟฟ้าเป็นปัญหาที่มีความร้อนเข้ามาเกี่ยวข้อง ซึ่งความร้อนมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมของสมบัติวัสดุ ดังนั้นเพื่อความถูกต้องของผลลัพธ์ในการจำลองพฤติกรรมการเชื่อมบนอิเล็กทรอนิกส์ ช่องขนาน จึงกำหนดสมบัติวัสดุค่าเริ่มต้นการจำลองที่อุณหภูมิ 293 เคลวิน และสมบัติวัสดุที่มีการเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิด้วยกราฟสมบัติวัสดุเทียบกับอุณหภูมิ

### 3. การกำหนดสัมผัส

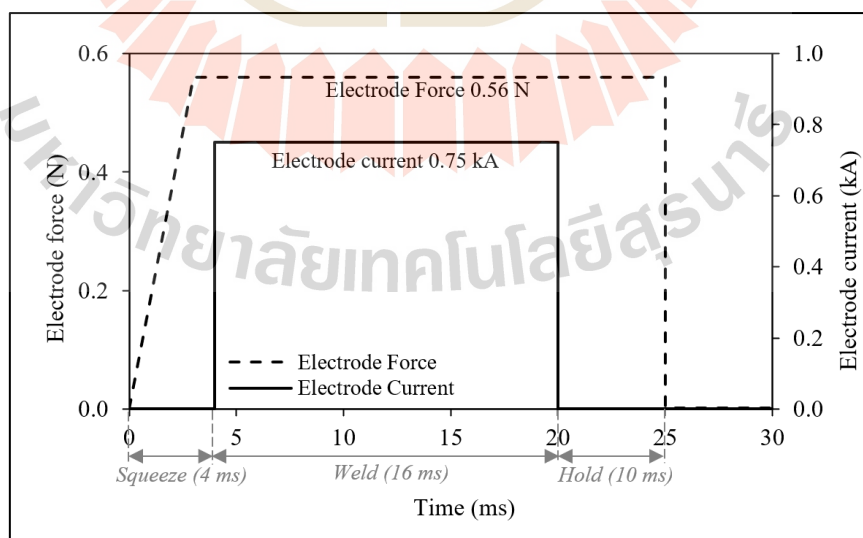
การกำหนดสัมผัสเป็นการกำหนดสมบัติรูปทรงและลักษณะการสัมผัสของวัตถุแต่ละชิ้นให้มีความสัมพันธ์กัน ซึ่งถือว่าเป็นขั้นตอนสำคัญสำหรับการจำลองปัญหา โครงสร้างที่มีชิ้นส่วนมากกว่าหนึ่ง สำหรับการจำลองปัญหาการเชื่อมจุดความต้านทานไฟฟ้าบนอิเล็กทรอนิกส์ ช่องขนานกำหนดการสัมผัสดังแสดงในตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 การกำหนดสมบัติการสัมผัส

Name	Type	Contact		
		Electrode	Coil	Surface
Electrode	Mashed (Deformable)	-	Glued	-
Coil	Mashed (Deformable)	Glued	-	Touch
Surface	Geometric			

#### 4. การกำหนดเงื่อนไขขอบ

การเชื่อมจุดความต้านทานไฟฟ้าด้วยอิเล็กโทรดช่องขนานมีหลักการและกระบวนการเชื่อมเช่นเดียวกับการเชื่อมจุดความต้านทานไฟฟ้าด้วยอิเล็กโทรดตรงข้าม โดยมีขั้นตอนการเชื่อมจากการเคลื่อนที่ของอิเล็กโทรดลงมากดยึดเส้นลวดวงจรเข้ากับไมโครชิปบนตำแหน่งที่ต้องการด้วยแรง 0.56 นิวตัน เป็นเวลา 4 มิลลิวินาที จากนั้นจ่ายกระแสไฟฟ้าขนาด 0.75 กิโลแอมแปร์ ไหลผ่านอิเล็กโทรดจากทางด้านหนึ่งไปยังอีกด้านหนึ่งเป็นเวลา 16 มิลลิวินาที ความต้านทานการไหลไฟฟ้าทำให้เกิดเป็นความร้อนหลอมเส้นลวดวงจรให้เชื่อมติดกับไมโครชิปแล้วจึงหยุดจ่ายกระแสไฟฟ้า แต่ยังคงแรงกดยึดไว้เป็นเวลา 5 มิลลิวินาที เพื่อให้รอยเชื่อมเย็นตัวและยึดติดกันแน่น โดยกระบวนการเชื่อมจุดความต้านทานไฟฟ้าด้วยอิเล็กโทรดช่องขนานสำหรับกรณีศึกษาแสดงดังรูปที่ 3.13



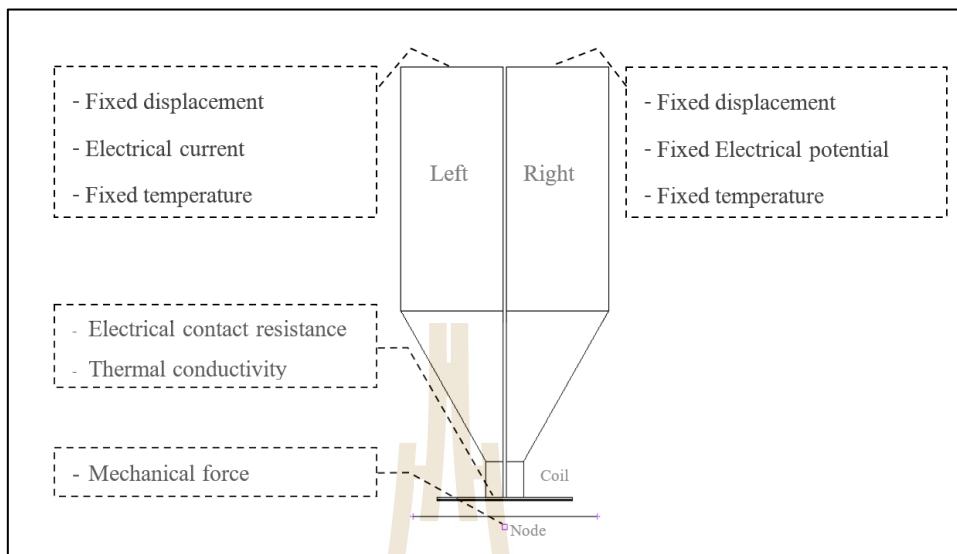
รูปที่ 3.13 แผนผังกระบวนการเชื่อมจุดความต้านทานไฟฟ้าด้วยอิเล็กโทรดช่องขนาน

จากพฤติกรรมการเชื่อมจุดความต้านทานไฟฟ้าด้วยอิเล็กโทรดช่องขนานพบว่า แรงกระทำต่ออิเล็กโทรดเป็นแรงปฏิกิริยาที่เกิดจากการกดขี่ระหว่างอิเล็กโทรดกับเส้นลวดวงจร การจำลองพฤติกรรมบนซอฟต์แวร์ Marc Mentat จึงกำหนดให้อิเล็กโทรดสัมผัสกับเส้นลวดวงจรและไม่มีการเคลื่อนที่ แต่ให้แผ่นไมโครชิป (ระนาบพื้นผิว) เคลื่อนที่ขึ้นมากดเส้นลวดด้วยขนาดแรงที่กำหนดลงบนจตุรกรับแรง ซึ่งการกำหนดเงื่อนไขขอบสำหรับการจำลองปัญหาแสดงดังในตารางที่ 3.3 และรูปที่ 3.14

ตารางที่ 3.3 เงื่อนไขขอบสำหรับการจำลองพฤติกรรมบนอิเล็กโทรดช่องขนาน

ขอบเขต (Boundary)	เงื่อนไขขอบ (Boundary Conditions)	ขนาด
อิเล็กโทรดด้านซ้าย (Left Electrode)	Fixed displacement XYZ	0 m
	Electrical current	0.75 kA
	Fixed temperature	293
อิเล็กโทรดด้านขวา (Right Electrode)	Fixed displacement XYZ	0 m
	Fixed Electrical potential	0 V
	Fixed temperature	293
จตุรกรับแรงกด (Node)	Mechanical force	- 0.56 N
อิเล็กโทรดสัมผัสเส้นลวดวงจร	Electrical contact resistance	ตารางที่ ก.5
	Thermal conductivity	(ภาคผนวก ก.)

ทั้งนี้การเชื่อมจุดความต้านทานไฟฟ้าเป็นปัญหาที่เกี่ยวข้องกับเวลาในการจำลองปัญหาบนซอฟต์แวร์ Marc Mentat จึงกำหนดเงื่อนไขขอบของแรง (Mechanical Force) และไฟฟ้า (Electrical Current) ในรูปแบบกราฟความสัมพันธ์เทียบกับเวลาของกระบวนการเชื่อม ดังรูปที่ 3.15 เพื่อให้การจำลองสอดคล้องกับการเชื่อมจริงและเพื่อความถูกต้องของผลลัพธ์



รูปที่ 3.14 เงื่อนไขขอบสำหรับการจำลองพฤติกรรมบนอิเล็กทรอนิกส์ของขดลวด

#### 5. การกำหนดวิธีการแก้ปัญหา

การจำลองพฤติกรรมการเชื่อมจุดความต้านทานไฟฟ้าบนอิเล็กทรอนิกส์ของขดลวดบนซอฟต์แวร์ Marc Mantet มีขั้นตอนการกำหนดวิธีการแก้ปัญหา 2 ขั้นตอน ดังนี้

(1) Loadcases เป็นขั้นตอนการกำหนดรูปแบบและเวลาสำหรับการคำนวณผลลัพธ์ของปัญหา โดยมีการตั้งค่าดังในตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 การตั้งค่า Load Cases สำหรับการจำลองพฤติกรรมบนอิเล็กทรอนิกส์

Loadcases	Steady State/Transient/Static
Resistance Calculation	Electrode and Coil
Solution Control	Structural, Thermal
Total Load Case Time	0.025 s
Stepping Procedure	Constant Time Step = 0.000065 s, Step = 400

(2) Jobs เป็นขั้นตอนการกำหนดลักษณะการจำลองและการแสดงผลของปัญหา โดยมีการตั้งค่าดังในตารางที่ 3.5

ตารางที่ 3.5 การตั้งค่า Jobs สำหรับการจำลองพฤติกรรมบนอิเล็กทรอนิกส์โทรด

Jobs	Electrical/Thermal/Mechanical
Contact Control Advanced Contact (Separation)	Criterion = Stress (Derivation: Force, Increment: Current)
Analysis Options	Nonlinear Procedure = Large Strain (Follower Force)
Jobs Results Available Element Tensors Available Element Scalars	Stress, Total strain, Thermal strain, Voltage, Temperature, von mises stress, normal stress
Run Job Solver/Parallelization Style	Multi Solver = DDM with 4 Domains - Use GPU(s) Multi - Physics

## 6. การแสดงผล

ซอฟต์แวร์ Marc Mentat มีการแสดงผลผลจากการคำนวณหลายรูปแบบ สำหรับการจำลองปัญหาการเชื่อมจุดความต้านทานไฟฟ้าบนอิเล็กทรอนิกส์โทรดใช้การแสดงผลเป็นกราฟ ความสัมพันธ์ในลักษณะ History Plot ด้วยการพล็อตค่าทุก ๆ 0.5 มิลลิวินาที เพื่อแสดงพฤติกรรมของอุณหภูมิ ความเค้น ความเครียด และการเคลื่อนที่ของเนื้อโลหะบนอิเล็กทรอนิกส์โทรดเทียบกับเวลา การเชื่อม และใช้รูปแบบเจดสี (Model Plot) ลักษณะพื้นผิว (Contour Bands) สำหรับแสดงพฤติกรรมของอุณหภูมิ ความเค้น ความเครียด และการเคลื่อนที่ของเนื้อโลหะบนอิเล็กทรอนิกส์โทรด เนื่องจากเจดสีลักษณะพื้นผิวสามารถแสดงการเปลี่ยนแปลงของพฤติกรรมได้ชัดเจนกว่าเจดสีลักษณะอื่น โดยกำหนดการเปลี่ยนแปลงของพฤติกรรมแสดงเป็นแบบ Deformed & Original ด้วย Factor เท่ากับ 1

## 3.3 การวิเคราะห์ความเสียหายและปัจจัยที่มีผลต่อการเสื่อมสภาพของอิเล็กทรอนิกส์โทรด

### 1. การวิเคราะห์ความเสียหายของอิเล็กทรอนิกส์โทรดช่องขนาน

ขั้นตอนนี้เป็นประเมินความเสียหายเบื้องต้นของอิเล็กทรอนิกส์โทรดช่องขนานจากการเชื่อมจุดความต้านทานไฟฟ้า โดยการเปรียบเทียบผลความเค้นสูงสุดบนอิเล็กทรอนิกส์โทรดจาก

การจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์กับค่าความเค้นสูงสุดที่วัสดุทั้งสองชั้นรับได้จากการทดสอบแรงกดอัดบนชิ้นทดสอบในรูปที่ ก.5 ภาคผนวก ก. ทั้งนี้อิเล็กทรอนิกส์ของขงานที่ใช้ในการศึกษาผลิตจากวัสดุทั้งสองชั้น ซึ่งสามารถเปลี่ยนพฤติกรรมความเสียหายแบบวัสดุเปราะเป็นแบบวัสดุเหนียวได้ก็ต่อเมื่อได้รับอุณหภูมิสูงกว่า 0.5 เท่าของจุดหลอมเหลวทั้งสองชั้น จึงทำให้อุณหภูมิสูงสุดที่เกิดบนอิเล็กทรอนิกส์มีผลต่อการเลือกทฤษฎีที่จะนำมาใช้ในการประเมินความเสียหายของอิเล็กทรอนิกส์ของขงาน โดยทฤษฎีความเสียหายของวัสดุทางวิศวกรรมที่นิยมนำมาใช้สำหรับการประเมินความเสียหายของวัสดุเปราะคือ Maximum Normal Stress Theory และวัสดุเหนียวคือ Distortion energy theory

## 2. การวิเคราะห์หาปัจจัยที่ส่งผลต่อการเสื่อมสภาพของอิเล็กทรอนิกส์ของขงาน

สำหรับขั้นตอนนี้เป็นการประเมินปัจจัยของการเชื่อมจุดความต้านทานไฟฟ้าที่สามารถส่งผลให้อิเล็กทรอนิกส์เกิดการเสื่อมสภาพได้มากที่สุด ซึ่งพิจารณาจากกระบวนการเชื่อมในหัวข้อ 3.2 พบว่า กระบวนการเชื่อมในขั้นตอน Weld มีพฤติกรรมการเชื่อมจากการให้แรงกดยึดพร้อม จากนั้นจึงจ่ายไฟฟ้าไหลผ่านอิเล็กทรอนิกส์เพื่อสร้างความร้อนหลอมชิ้นงานกลายเป็นรอยเชื่อมซึ่งเป็นผลทำให้เกิดปรากฏการณ์กายภาพทางไฟฟ้า ทางความร้อน และทางกลที่สามารถนำไปสู่การเสื่อมสภาพของอิเล็กทรอนิกส์ได้มากกว่าขั้นตอนการเชื่อมอื่น ดังนั้นจึงใช้พฤติกรรมการเชื่อมในขั้นตอน Weld ประเมินหาปัจจัยที่ส่งผลให้อิเล็กทรอนิกส์เกิดการเสื่อมสภาพมากที่สุด โดยแบ่งปัจจัยการเชื่อมออกเป็น 3 กรณีดังนี้

(1) แรง (Force) เกิดจากการให้แรงเคลื่อนอิเล็กทรอนิกส์เพื่อกดยึดเส้นลวดทองแดงลงบนแผ่นไมโครชิปในตำแหน่งที่ต้องการเชื่อม

(2) ความร้อน (Thermal) เกิดจากการจ่ายไฟฟ้าให้ไหลผ่านอิเล็กทรอนิกส์โดยความต้านทานการไหลไฟฟ้าภายในวัสดุและพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างวัสดุทำให้อุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น

(3) แรง-ความร้อน (Force - Thermal) เป็นการทำงานร่วมกันระหว่างแรงที่เกิดจากการกดยึดของอิเล็กทรอนิกส์และความร้อนที่เกิดจากความต้านทานการไหลไฟฟ้า ดังนั้นเงื่อนไขการจำลองจึงเป็นไปตามเงื่อนไขของการให้แรงและความร้อน

จากนั้นการจำลองพฤติกรรมความเค้นและการเคลื่อนที่ของเนื้อโลหะบนอิเล็กทรอนิกส์ของขงานของทั้งสามกรณี ด้วยขนาดพารามิเตอร์เดียวกับเงื่อนไขขอบของกระบวนการเชื่อมในหัวข้อ 3.2.4 และใช้เวลาการจำลองเท่ากันที่ 20 มิลลิวินาที และวิเคราะห์หาปัจจัยที่ส่งผลต่อการเสื่อมสภาพของอิเล็กทรอนิกส์ของขงานในการเชื่อมจุดความต้านทานไฟฟ้าโดยการเปรียบเทียบผลการจำลองพฤติกรรมความเค้นและการเคลื่อนที่ของเนื้อโลหะบนอิเล็กทรอนิกส์ของทั้งสามกรณี

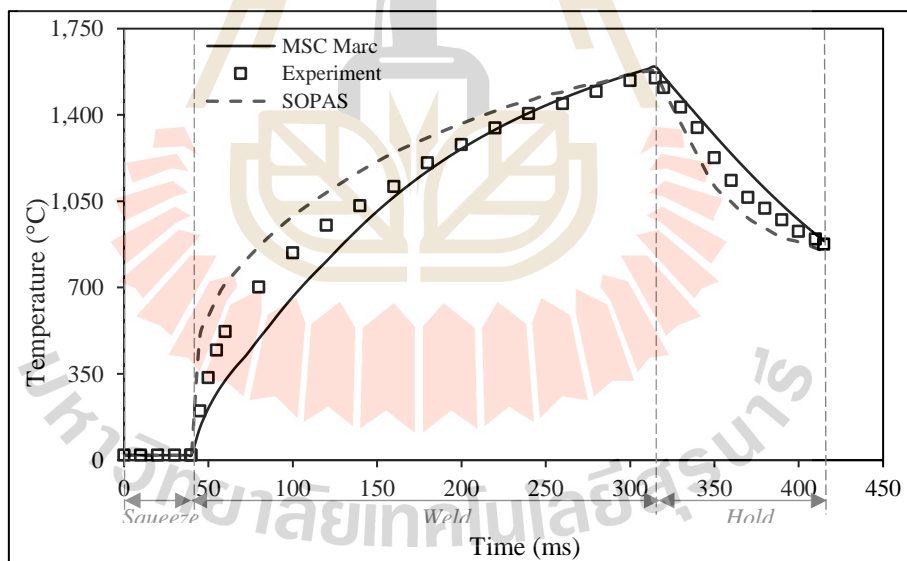


## บทที่ 4

### ผลการวิจัยและการวิเคราะห์ผล

#### 4.1 ผลการทวนสอบความน่าเชื่อถือของการใช้ซอฟต์แวร์

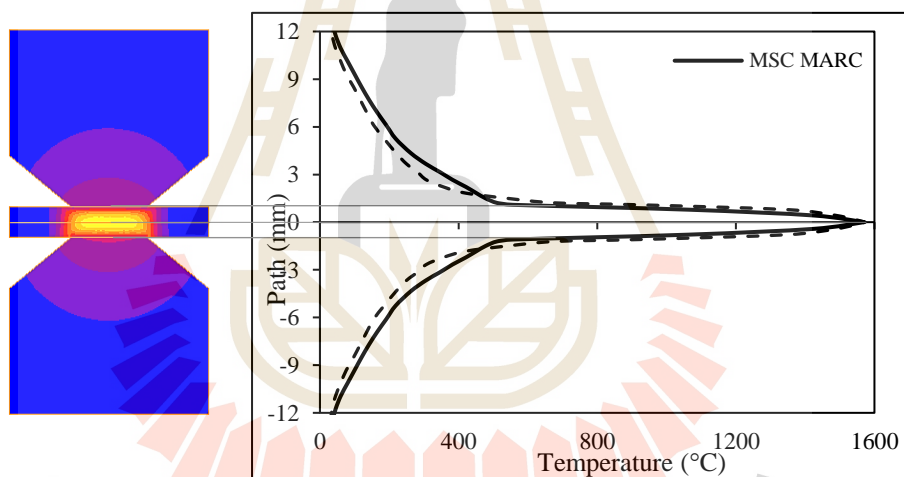
การทวนสอบความน่าเชื่อถือของการใช้ซอฟต์แวร์กับกรณีทดสอบของ C.V. Nielsen et al., (2013) มีรายละเอียดดังแสดงในหัวข้อ 3.1 การจำลองปัญหาการเชื่อมจุดความต้านทานไฟฟ้าด้วยซอฟต์แวร์ทางคอมพิวเตอร์ได้กำหนดเงื่อนไขขอบให้สอดคล้องกับการทดลองทุกประการ และใช้การคำนวณผลเฉลยบนพื้นฐานความสัมพันธ์ควมคู่แบบ Electrical/Thermal/Mechanical โดยผลการจำลองอุณหภูมิและการเคลื่อนตัวของเนื้ออิเล็กทรอนิกส์ที่เวลาการเชื่อมต่าง ๆ ของการเชื่อมด้วยซอฟต์แวร์ Marc Mentat ถูกนำมาเปรียบเทียบกับผลการทดลองและผลการจำลองด้วยซอฟต์แวร์ SOPAS ดังนี้



รูปที่ 4.1 อุณหภูมิของการเชื่อมจุดความต้านทานด้วยอิเล็กทรอนิกส์ตรงข้าม

เมื่อพล็อตกราฟอุณหภูมิเทียบกับเวลาการเชื่อมจุดความต้านทานไฟฟ้าด้วยอิเล็กทรอนิกส์ตรงข้ามจากการเชื่อม 1 รอยเชื่อม เป็นเวลา 415 มิลลิวินาที ของการทดสอบและการจำลองด้วยซอฟต์แวร์ทางคอมพิวเตอร์ในรูปที่ 4.1 พบว่า ผลการทดสอบด้วยชิ้นงานเชื่อมให้แนวโน้มการเกิด

อุณหภูมิของกระบวนการเชื่อมสอดคล้องกับการจำลองด้วยซอฟต์แวร์ SOPAS แต่อุณหภูมิของแต่ละขั้นตอนการเชื่อมมีค่าใกล้เคียงกับผลการจำลองด้วยซอฟต์แวร์ Marc Mentat มากกว่า โดยกระบวนการเชื่อมในขั้นตอน Squeeze มีค่าคงที่เท่ากับอุณหภูมิบรรยากาศที่ 27 องศาเซลเซียส เนื่องจากในขั้นตอนนี้ไม่มีการสร้างความร้อน จากนั้นอุณหภูมิมักเพิ่มสูงขึ้นในขั้นตอน Weld จากการจ่ายไฟฟ้าไหลผ่านอิเล็กโทรดด้านบนไปยังอิเล็กโทรดด้านล่าง เพื่อสร้างความร้อน หลอมละลายชิ้นงานเชื่อมทั้งสองแผ่นระหว่างอิเล็กโทรดให้เกิดเป็นรอยเชื่อมประสานกัน จึงทำให้เป็นขั้นตอนที่สำคัญที่สุดของกระบวนการเชื่อมจุดความต้านทานไฟฟ้า และเมื่อเข้าสู่ขั้นตอน Hold อุณหภูมิมีค่าลดลง เนื่องจากเป็นขั้นตอนการทำให้รอยเชื่อมเย็นตัวและยึดติดแน่น ดังนั้นกระบวนการเชื่อมจุดความต้านทานไฟฟ้าข้างต้น จึงมีการเกิดอุณหภูมิสูงสุดจากความต้านทานการไหลไฟฟ้าจากอิเล็กโทรดด้านบนไปยังอิเล็กโทรดด้านล่างในขั้นตอน Weld ที่เวลาการเชื่อม 315 มิลลิวินาที โดยมีพฤติกรรมกระจายอุณหภูมิดังแสดงในรูปที่ 4.2

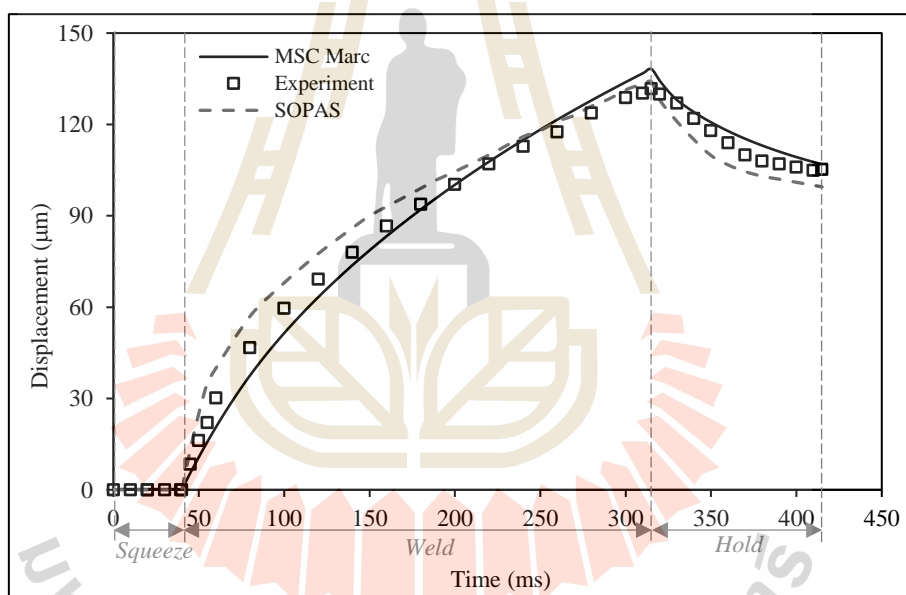


รูปที่ 4.2 พฤติกรรมอุณหภูมิของการเชื่อมจุดความต้านทานด้วยอิเล็กโทรดตรงข้ามที่เวลาการเชื่อม 315 มิลลิวินาที

จากรูปที่ 4.2 พฤติกรรมกระจายอุณหภูมิของการเชื่อมจุดความต้านทานไฟฟ้าด้วยอิเล็กโทรดตรงข้ามที่เวลาการเชื่อม 315 มิลลิวินาที จากการจำลองด้วยซอฟต์แวร์ SOPAS และ Marc Mentat ให้แนวโน้มอุณหภูมิในแนวแกน Y ที่จุดศูนย์กลางอิเล็กโทรด ( $x = 8$  mm) มีลักษณะสมมาตร โดยมีอุณหภูมิต่ำสุดที่บริเวณขอบอิเล็กโทรดด้านบนและด้านล่าง ( $y = 12$  และ  $-12$  mm) และเมื่อไฟฟ้ามีระยะการไหลเพิ่มขึ้นและอิเล็กโทรดมีพื้นที่หน้าตัดที่เล็กลง จะส่งผลให้อุณหภูมิบนอิเล็กโทรดมีค่าเพิ่มสูงขึ้นเรื่อย ๆ จนกระทั่งบริเวณการสัมผัสระหว่างอิเล็กโทรดกับแผ่นชิ้นงาน

เชื่อม ( $y = 1$  และ  $-1$  mm) จากนั้นความต้านทานการไหลไฟฟ้าของการสัมผัสระหว่างวัสดุมีค่าเพิ่มสูงขึ้น อุณหภูมิบนแผ่นชิ้นงานเชื่อมจึงมีค่าเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็วจนถึงบริเวณการสัมผัสระหว่างชิ้นงานเชื่อมกับชิ้นงานเชื่อม ( $y = 0$  mm) ซึ่งเป็นบริเวณที่ชิ้นงานเชื่อมเกิดการหลอมละลายเป็นรอยเชื่อมประสานกัน ดังนั้นที่ตำแหน่ง  $y = 0$  mm จึงเป็นบริเวณที่มีการเกิดอุณหภูมิสูงสุดของการเชื่อมจุดความต้านทานไฟฟ้าด้วยอิเล็กโทรดตรงข้ามนี้

จากกระบวนการเชื่อมและพฤติกรรมอุณหภูมิที่เกิดจากความต้านทานการไหลภายในเนื้อโลหะและการสัมผัสระหว่างวัสดุของกระบวนการเชื่อม นอกจากทำให้ชิ้นงานเชื่อมเกิดการเสียรูปโดยการหลอมละลายเป็นรอยเชื่อมแล้ว ยังส่งผลให้อิเล็กโทรดที่ใช้ในการเชื่อมเกิดการเสียรูปอีกด้วย โดยพฤติกรรมการเสียรูปของอิเล็กโทรดตรงข้ามที่เป็นผลมาจากจากการเคลื่อนตัวของเนื้อโลหะแสดงดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 การเคลื่อนตัวของเนื้อโลหะบนอิเล็กโทรดตรงข้าม

จากรูปที่ 4.3 การเคลื่อนตัวของเนื้ออิเล็กโทรดตรงข้ามจากการทดสอบและการจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์มีพฤติกรรมเช่นเดียวกับการเกิดอุณหภูมิของกระบวนการเชื่อม ซึ่งแนวโน้มการเคลื่อนตัวของเนื้ออิเล็กโทรดตรงข้ามที่ได้รับการจำลองด้วยซอฟต์แวร์ Marc Mentat มีความสอดคล้องกับผลการทดสอบและการจำลองด้วยซอฟต์แวร์ SOPAS โดยการเคลื่อนตัวของเนื้อโลหะบนอิเล็กโทรดตรงข้ามในขั้นตอน Squeeze จากการให้แรงกดยึกระหว่างชิ้นงานเชื่อมกับอิเล็กโทรดมีค่าน้อยมากหรือเท่ากับศูนย์ จึงทำให้แนวโน้มของขั้นตอนนี้ไม่มีการเปลี่ยนแปลง

และเมื่อเข้าสู่ขั้นตอน Weld กระบวนการเชื่อมมีอุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น ส่งผลให้อิเล็กโทรดมีการเคลื่อนตัวของเนื้อโลหะเพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน และเพิ่มสูงขึ้นเรื่อยๆ จนกระทั่งเวลาการเชื่อม 315 มิลลิวินาที ซึ่งเป็นเวลาที่อิเล็กโทรดเกิดการเคลื่อนตัวของเนื้อโลหะมากที่สุด จากนั้นในช่วงขั้นตอน Hold การเคลื่อนตัวของเนื้ออิเล็กโทรดมีค่าลดลงจากการลดลงของอุณหภูมิ

จากการทวนสอบความน่าเชื่อถือของการใช้ซอฟต์แวร์ด้วยการเปรียบเทียบพฤติกรรม การเกิดอุณหภูมิและการเคลื่อนตัวของเนื้ออิเล็กโทรดที่ได้จากการจำลองด้วยซอฟต์แวร์ Marc Mentat กับผลการทดลองและผลการจำลองด้วยซอฟต์แวร์ SOPAS ของ C.V. Nielsen et al., (2013) จะเห็นว่าผลที่ได้จากการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของทั้งสองซอฟต์แวร์ให้แนวโน้มสอดคล้องกับผลการทดลอง แต่ซอฟต์แวร์ SOPAS ให้แนวโน้มที่สอดคล้องกว่า ดังนั้นเพื่อให้มั่นใจต่อผลเฉลย จากจำลองด้วยซอฟต์แวร์ Marc Mentat มีความแม่นยำสำหรับการจำลองปัญหาการเชื่อมนี้ จึงทำการเปรียบเทียบผลเฉลยจากการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของ Marc Mentat และ SOPAS เทียบกับผลการทดลองในขั้นตอน Weld ที่เวลาการเชื่อม 315 มิลลิวินาที เนื่องจากเป็นเวลาที่มีการเกิดอุณหภูมิและการเคลื่อนตัวของเนื้ออิเล็กโทรดสูงสุดในกระบวนการเชื่อม และขั้นตอน Hold ที่เวลาการเชื่อม 415 มิลลิวินาที เนื่องจากเป็นเวลาสุดท้ายของกระบวนการเชื่อม และหาค่า ความคลาดเคลื่อนเพื่อเปรียบเทียบความแม่นยำของผลเฉลยจากซอฟต์แวร์ Marc Mentat แสดง ดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 อุณหภูมิและการเคลื่อนที่ของเนื้ออิเล็กโทรดที่เวลาการเชื่อม 315 และ 415 มิลลิวินาที

Model		Time 315 ms	% Different	Time 415 ms	% Different
Temperature (°C)	Experiment	1550	-	876	-
	SOPAS	1573	1.48	847	3.31
	Marc Mentat	1591.20	2.66	888.32	1.41
Displacement ( $\mu\text{m}$ )	Experimental	131.78	-	105.30	-
	SOPAS	135.50	2.82	99.50	5.51
	Marc Mentat	136.80	3.81	106.89	1.51

ตารางที่ 4.1 แสดงการเปรียบเทียบผลเฉลยของอุณหภูมิและการเคลื่อนตัวของเนื้ออิเล็กโทรดที่เวลาการเชื่อม 315 และ 415 มิลลิวินาที พบว่า ซอฟต์แวร์ Marc Mentat ให้ผลเฉลยใกล้เคียงกับผลการทดลองของ C.V. Nielsen et al., (2013) มากกว่า โดยมีค่าความคลาดเคลื่อนอุณหภูมิสูงสุด 2.91 เปอร์เซ็นต์ และการเคลื่อนตัวของอิเล็กโทรดสูงสุด 3.81 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งแม้ว่า

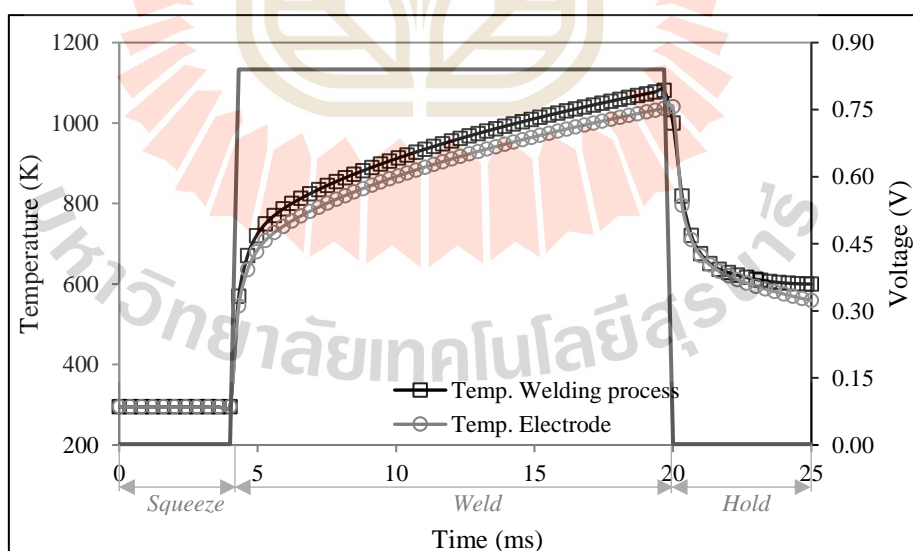
ผลการจำลองด้วยซอฟต์แวร์ SOPAS ของ C.V. Nielsen et al., (2013) จะให้แนวโน้มอุณหภูมิและการเคลื่อนตัวของอิเล็กโทรดที่ใกล้เคียงกับการทดลอง แต่ซอฟต์แวร์ Marc Mentat ให้ค่าคลาดเคลื่อนน้อยกว่าที่ตำแหน่งเวลาสำคัญของกระบวนการเชื่อม ดังนั้นการจำลองไฟไนต์-เอลิเมนต์ด้วยซอฟต์แวร์ Marc Mentat จึงมีความแม่นยำมากพอสำหรับนำไปใช้ในการจำลองปัญหาการเชื่อมจุดความต้านทานไฟฟ้าของกรณีศึกษาต่อไป

## 4.2 ผลการจำลองปัญหาการเชื่อมจุดความต้านทานไฟฟ้าบนอิเล็กโทรดของขนาน

การจำลองปัญหาการเชื่อมจุดความต้านทานไฟฟ้าบนอิเล็กโทรดของขนานในการเชื่อมเส้นลวดทองแดงเข้ากับแผ่นไมโครชิพ จำนวน 1 รอยเชื่อม มีรายละเอียดดังแสดงในหัวข้อ 3.2 โดยการจำลองไม่พิจารณารูปทรงอิเล็กโทรดที่มีผลต่อการเสียดรูป การสูญเสียพลังงานไฟฟ้าและความร้อน และการหลอมละลายของเส้นลวดทองแดง แสดงให้เห็นพฤติกรรมอุณหภูมิ การความเค้น ความเครียด และการเคลื่อนที่ของเนื้อวัสดุบนอิเล็กโทรดของขนานที่เกิดขึ้นภายใต้กระบวนการเชื่อมจุดความต้านทานไฟฟ้าขนาดไมโคร ดังนี้

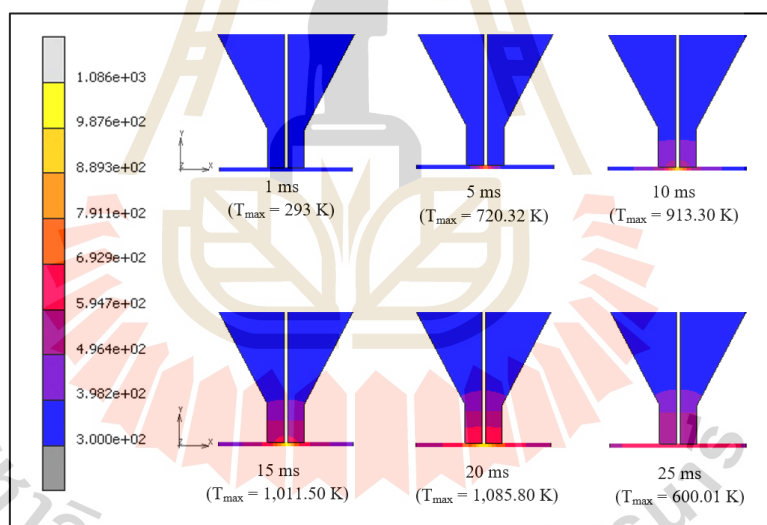
### 4.2.1 พฤติกรรมอุณหภูมิ

กระบวนการเชื่อมจุดความต้านทานไฟฟ้าเป็นการสร้างรอยเชื่อม โดยการเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นความร้อนหลอมละลายโลหะ ซึ่งมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 อุณหภูมิเทียบกับแรงดันไฟฟ้าที่เวลาใด ๆ ของการเชื่อม

ความสัมพันธ์อุณหภูมิเทียบกับแรงดันไฟฟ้าแสดงดังรูปที่ 4.4 ให้แนวโน้มนอุณหภูมิบนเส้นลวดทองแดงและอิเล็กโทรดสอดคล้องกับพฤติกรรมของการจ่ายไฟฟ้าของกระบวนการเชื่อม โดยมีการจ่ายไฟฟ้าไหลผ่านอิเล็กโทรดเพื่อสร้างรอยเชื่อมเป็นเวลา 16 มิลลิวินาที (เวลาการเชื่อมที่ 4-20 มิลลิวินาที) จึงส่งผลให้ช่วงเวลา 0-4 มิลลิวินาที (ขั้นตอน Squeeze) อุณหภูมิไม่เปลี่ยนแปลงมีค่าคงที่ 293 เคลวิน และมีค่าเพิ่มสูงขึ้นในช่วงเวลา 4-20 มิลลิวินาที (ขั้นตอน Weld) จากการกดยึดอิเล็กโทรดลงบนเส้นลวดทองแดงพร้อมกับการจ่ายไฟฟ้า การไหลของไฟฟ้าทำให้เกิดเป็นอุณหภูมิจากความต้านทานภายในเนื้อวัสดุและผิวสัมผัสระหว่างวัตถุ และจะมีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ ตามระยะเวลาที่ไฟฟ้าไหลผ่านอิเล็กโทรด จากนั้นมีค่าลดลงในช่วงเวลา 20-25 มิลลิวินาที (ขั้นตอน Hold) เนื่องจากไม่มีไฟฟ้าไหลผ่าน ดังนั้นจะเห็นว่าการเชื่อมจุดความต้านทานนี้เกิดอุณหภูมิตั้งแต่บนเส้นลวดทองแดงและอิเล็กโทรดในขั้นตอน Weld ที่เวลา 20 มิลลิวินาที เนื่องจากเป็นเวลาการเชื่อมสุดท้ายที่มีไฟฟ้าไหลผ่าน โดยพฤติกรรมอุณหภูมิของการเชื่อมและบนอิเล็กโทรดของขนานแสดงดังรูปที่ 4.5 และ 4.7 ตามลำดับ

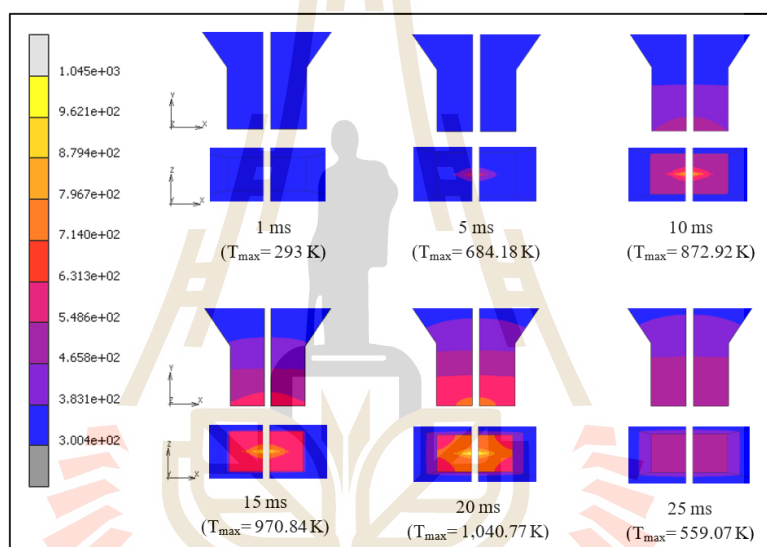


รูปที่ 4.5 พฤติกรรมอุณหภูมิของการเชื่อมจุดความต้านทานด้วยอิเล็กโทรดของขนาน

พฤติกรรมอุณหภูมิของกระบวนการเชื่อมเกิดจากความต้านทานการไหลไฟฟ้าระหว่างอิเล็กโทรดด้านซ้ายไปยังอิเล็กโทรดด้านขวา โดยมีเส้นลวดทองแดงเป็นตัวกลางในการไหล แสดงให้เห็นอุณหภูมิในช่วงขั้นตอน Weld (เวลาการเชื่อม 5, 10, 15 และ 20 มิลลิวินาที) เกิดบนเส้นลวดทองแดงบริเวณช่องว่างระหว่างอิเล็กโทรดทั้งสองด้าน ( $x = 8 \text{ mm}$ ) ซึ่งเมื่อเวลาการเชื่อมเพิ่มขึ้นจะทำให้อุณหภูมิตั้งแต่บนเส้นลวดทองแดงมีค่าเพิ่มสูงขึ้นและมีการกระจายอุณหภูมิเป็นบริเวณ



กว้างมากขึ้นอีกด้วย ส่งผลให้กระบวนการเชื่อมเกิดอุณหภูมิสูงสุดถึง 1,085.80 เคลวิน ที่เวลาการเชื่อม 20 มิลลิวินาที ซึ่งอุณหภูมิดังกล่าวสามารถหลอมเส้นลวดทองแดงให้เชื่อมติดกับไมโครชิปได้ โดยไม่ส่งผลต่อความเสียหายกับส่วนประกอบอื่นของแผ่นวงจร เนื่องจากมีค่าต่ำกว่าจุดหลอมเหลวทองแดงมีค่า 1,356 เคลวิน เส้นลวดทองแดงที่ถูกหลอมจึงยังไม่มีลักษณะเป็นเนื้อโลหะเหลวที่ยังคงสถานะของแข็ง เมื่ออุณหภูมิลดลงรอยเชื่อมก็จะคงสภาพ แต่หากเส้นลวดทองแดงมีอุณหภูมิถึงจุดหลอมเหลวจะเปลี่ยนสถานะกลายเป็นน้ำโลหะ ซึ่งสามารถไหลออกนอกพื้นที่ส่งผลกระทบและความเสียหายต่อชิ้นส่วนอื่นได้ และเมื่อสิ้นสุดกระบวนการเชื่อม (เวลา 25 มิลลิวินาที) อุณหภูมิที่เกิดขึ้นบนเส้นลวดทองแดงมีค่าลดลงเหลือ 600.01 เคลวิน



รูปที่ 4.6 พฤติกรรมอุณหภูมิบนอิเล็กโทรดของขนาน

จากรูปที่ 4.6 ให้พฤติกรรมอุณหภูมิบนอิเล็กโทรดของขนานลักษณะเช่นเดียวกับอุณหภูมิของกระบวนการเชื่อม โดยจะเห็นที่เวลาการเชื่อม 1 มิลลิวินาที (ขั้นตอน Squeeze) ไม่แสดงการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ และมีการเปลี่ยนแปลงที่เวลาการเชื่อม 5 วินาที บริเวณการสัมผัสระหว่างอิเล็กโทรดกับเส้นลวดทองแดงใกล้กับช่องว่างระหว่างอิเล็กโทรดทั้งสองด้าน จากนั้นบริเวณการเกิดอุณหภูมิบนอิเล็กโทรดจะค่อย ๆ ขยายพื้นที่ที่กว้างขึ้นตามระยะเวลาการไหลของไฟฟ้า จึงทำให้ที่เวลา 20 มิลลิวินาที บนอิเล็กโทรดมีอุณหภูมิสูงสุด 1,040.77 เคลวิน และเมื่อสิ้นสุดกระบวนการเชื่อมหน้าสัมผัสของอิเล็กโทรดมีอุณหภูมิลดลงเหลือ 559.07 เคลวิน

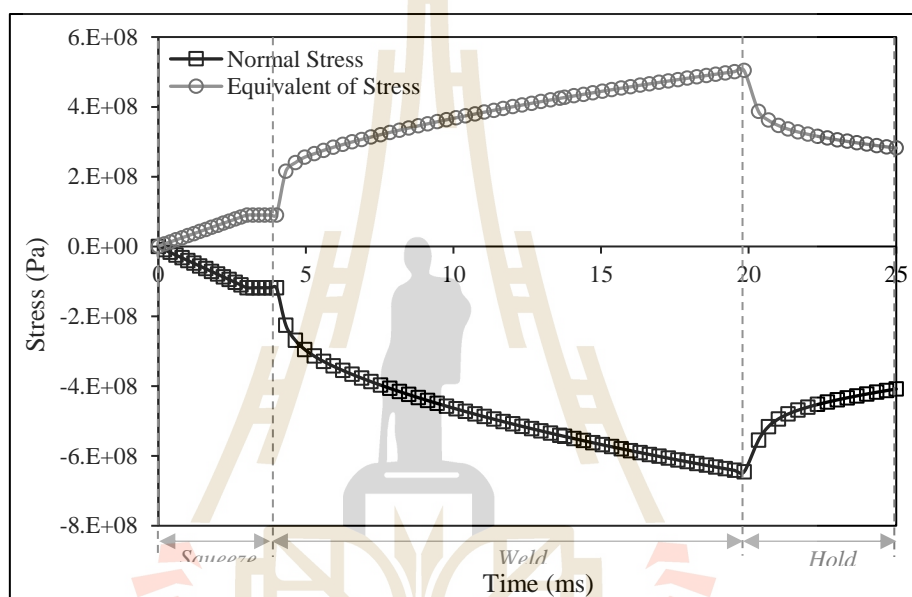
ทั้งนี้ในกระบวนการเชื่อมจุดความต้านทานไฟฟ้าด้วยอิเล็กโทรดของขนานนี้มีการเกิดอุณหภูมิบนเส้นลวดทองแดงสูงกว่าบนอิเล็กโทรด เนื่องจากเส้นลวดทองแดงเป็นบริเวณ



ของการเกิดอุณหภูมิโดยตรงจากความต้านทานไฟฟ้า อุณหภูมิที่แสดงบนอิเล็กทรอนิกส์เกิดจากการถ่ายเทความร้อนบนเส้นลวดทองแดงมายังอิเล็กทรอนิกส์

#### 4.2.2 พฤติกรรมความเค้น

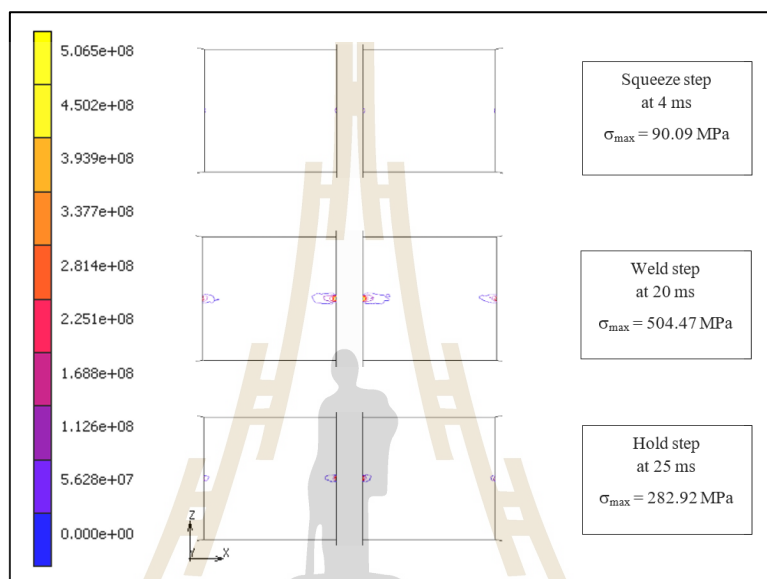
การเชื่อมจุดความต้านทานไฟฟ้าเป็นกระบวนการที่เกิดจากแรงกดอัดระหว่างอิเล็กทรอนิกส์กับเส้นลวดทองแดงและการเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นความร้อนส่งผลต่อพฤติกรรมความเค้นบนอิเล็กทรอนิกส์ช่องขนาดนี้



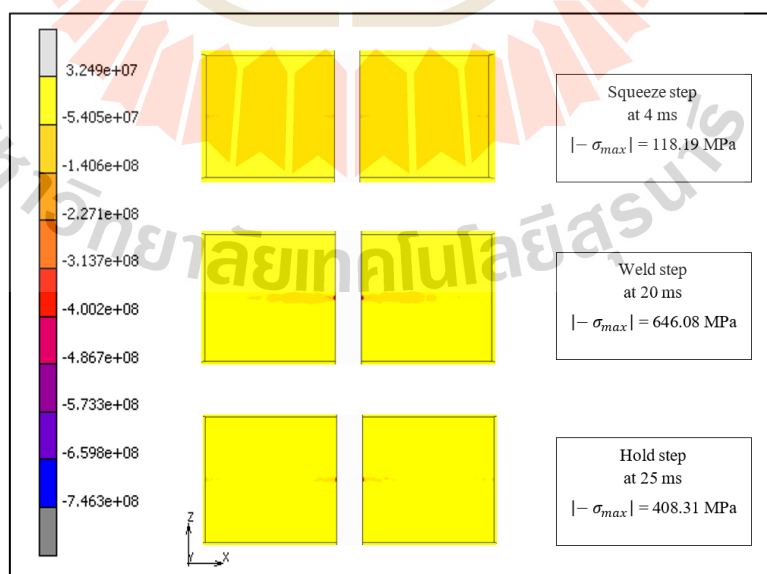
รูปที่ 4.7 ความเค้นบนอิเล็กทรอนิกส์ช่องขนาดนี้เวลาใด ๆ ของการเชื่อม

จากความสัมพันธ์ความเค้นบนอิเล็กทรอนิกส์ในรูปที่ 4.7 พบว่า เส้นแนวโน้มของ Normal stress มีค่าเป็นลบ เนื่องจาก Normal stress สามารถมีค่าเป็นได้ทั้งบวกและลบ ซึ่งจะมีค่าเป็นบวกเมื่อแรงที่เกิดขึ้นเป็นแรงดึงและมีค่าเป็นลบเมื่อแรงที่เกิดขึ้นเป็นแรงกดอัด ดังนั้นเมื่อพิจารณาพฤติกรรมที่เกิดความเค้นจากเส้นแนวโน้มโดยไม่พิจารณาทิศทางของแรงจะเห็นได้ว่า เส้นแนวโน้มของ Normal Stress และ Equivalent Stress ให้พฤติกรรมที่เกิดความเค้นใกล้เคียงกัน และสอดคล้องกับกระบวนการเชื่อมคือ ในขั้นตอน Squeeze เป็นการให้แรงกดอัดระหว่างอิเล็กทรอนิกส์กับเส้นลวดทองแดง ความเค้นที่เกิดในขั้นตอนนี้จึงมีพฤติกรรมเช่นเดียวกับลักษณะการให้แรงกด และในขั้นตอน Weld และ Hold พฤติกรรมความเค้นมีความสอดคล้องกับพฤติกรรมอุณหภูมิบนอิเล็กทรอนิกส์ โดยขั้นตอน Weld เป็นขั้นตอนการจ่ายไฟฟ้าให้แก่กระบวนการเชื่อมอุณหภูมิบนอิเล็กทรอนิกส์จึงมีค่าเพิ่มสูงขึ้น ส่งผลให้ความเค้นบนอิเล็กทรอนิกส์มีค่าเพิ่มสูงขึ้นด้วย

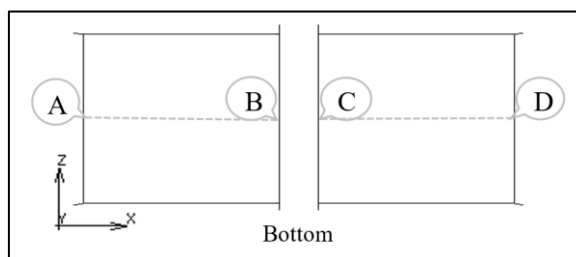
จากนั้นขั้นตอน Hold เป็นการหยุดจ่ายไฟฟ้า ทำให้อุณหภูมิที่เกิดบนอิเล็กโทรดมีค่าลดลง ค่าความเค้นบนอิเล็กโทรดจึงมีค่าลดลงด้วยเช่นกัน ซึ่งขอบเขตการเกิดความเค้นและการกระจายความเค้น Normal Stress และ Equivalent Stress ในแต่ละขั้นตอนเชื่อมแสดงดังรูปที่ 4.8 และรูปที่ 4.9 ตามลำดับ โดยใช้รูปที่ 4.11 ในการแสดงตำแหน่งความเค้นบนหน้าสัมผัสของอิเล็กโทรด



รูปที่ 4.8 พฤติกรรม Equivalent Stress บนอิเล็กโทรดของขบวนการ



รูปที่ 4.9 พฤติกรรม Normal Stress บนอิเล็กโทรดของขบวนการ

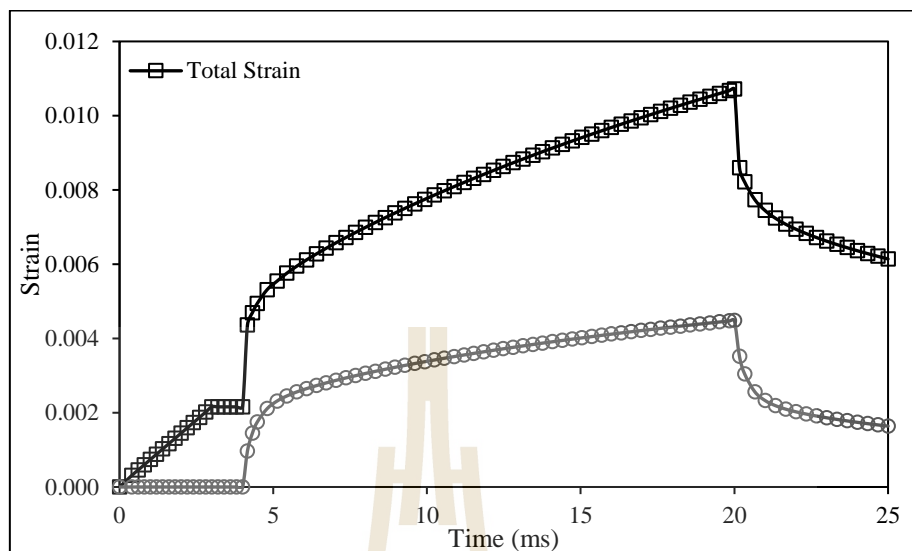


รูปที่ 4.10 ตำแหน่งความเค้นบนหน้าสัมผัสของอเล็กโทรด

ความเค้นบนอเล็กโทรดช่องขนานในรูปที่ 4.8 และรูปที่ 4.9 แสดงให้เห็น Equivalent Stress และ Normal Stress มีพฤติกรรมและขอบเขตการเกิดความเค้นบนอเล็กโทรดเหมือนกัน โดยขั้นตอน Squeeze เกิดความเค้นบริเวณขอบหน้าสัมผัสของอเล็กโทรดที่มีการสัมผัสกับเส้นลวดทองแดง (ตำแหน่ง A, B, C และ D ในรูปที่ 4.10) เนื่องจากขอบหน้าสัมผัสอเล็กโทรดมีลักษณะเป็นมุมฉากจึงมีพื้นที่ในการกระจายแรงกระทำน้อย เมื่อมีการให้แรงกดยี้ระหว่างอเล็กโทรดกับเส้นลวดทองแดง บริเวณดังกล่าวจึงเกิด Equivalent Stress เท่ากับ 90.09 MPa และ Normal Stress เท่ากับ 118.19 MPa ซึ่งสูงกว่าบริเวณอื่นบนหน้าสัมผัสของอเล็กโทรดที่เวลาเชื่อมเดียวกัน จากนั้นในขั้นตอน Weld ความเค้นบนอเล็กโทรดมีค่าเพิ่มสูงขึ้นและมีการกระจายความเค้นมากขึ้นจากการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ จึงทำให้ขั้นตอนนี้มีค่าความเค้นและการกระจายความเค้นมากกว่าขั้นตอนการเชื่อมอื่น โดย Equivalent Stress และ Normal Stress มีค่าสูงสุดถึง 504.47 MPa และ 646.08 MPa ที่ตำแหน่ง B และ C (รูปที่ 4.10) ซึ่งเป็นบริเวณเดียวกับการเกิดอุณหภูมิสูงสุดบนอเล็กโทรด และในขั้นตอน Hold เกิดความเค้นสูงสุดตำแหน่งเดียวกับความเค้นสูงสุดในขั้นตอน Weld โดยในขั้นตอนนี้อุณหภูมิที่เกิดขึ้นบนอเล็กโทรดมีปริมาณลดลงจึงส่งผลให้ Equivalent of Stress และ Normal Stress มีค่าลดลงเหลือ 282.92 MPa และ 408.31 MPa ดังนั้นการเชื่อมจุดความต้านทานนี้มีความเค้นสูงสุดในขั้นตอน Weld และเกิดบริเวณเดียวกับอุณหภูมิสูงสุดบนอเล็กโทรด บริเวณดังกล่าวจึงเป็นบริเวณที่คาดว่าอเล็กโทรดจะเกิดความเสียหายหากมีความเค้นเกินกว่าความเค้นจุดครากหรือความเค้นสูงสุดที่วัสดุรับได้

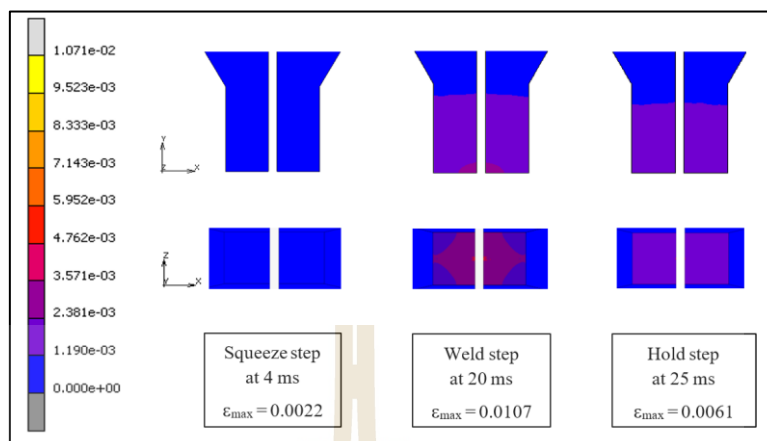
#### 4.2.3 พฤติกรรมความเครียด

กระบวนการเชื่อมจุดความต้านทานไฟฟ้าทำให้เกิดพฤติกรรมความเครียดผลรวมของกระบวนการเชื่อม (Total Strain) และความเครียดจากความร้อน (Thermal Strain) บนอเล็กโทรดช่องขนานดังรูปที่ 4.11

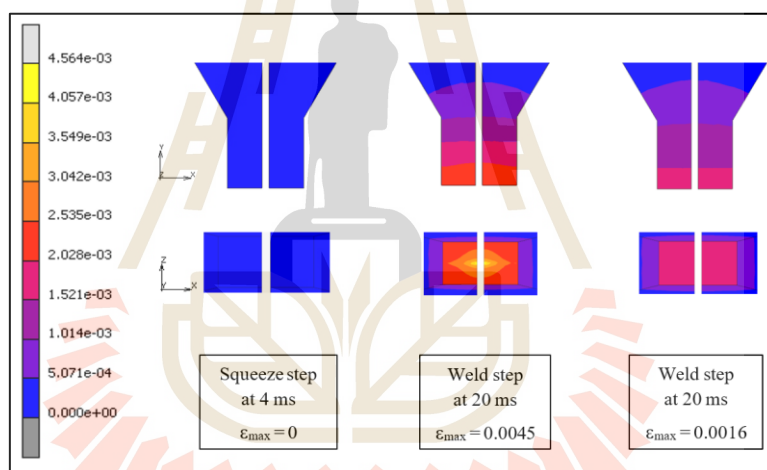


รูปที่ 4.11 ความเครียดบนอิเล็กโทรดที่เวลาใด ๆ ของการเชื่อม

จากรูปความสัมพันธ์ของความเครียดที่เวลาใด ๆ ของการเชื่อมแสดงให้เห็นเส้นแนวโน้มของ Total Strain และ Thermal Strain มีความแตกต่างกันคือ ในช่วงขั้นตอน Squeeze ความเครียดของ Total Strain มีค่าเพิ่มขึ้นในช่วงเวลา 0-3 มิลลิวินาที และคงที่ในช่วงเวลา 3-4 มิลลิวินาที ตามลักษณะการให้แรงกดขี่ระหว่างอิเล็กโทรดกับเส้นลวดทองแดง แต่ Thermal Strain มีค่าคงที่เท่ากับศูนย์ เนื่องจากไม่มีการจ่ายไฟฟ้าจึงไม่ทำให้อุณหภูมิเปลี่ยนแปลง ในขั้นตอนนี้จึงมีความเครียดจากแรงกดขี่เพียงอย่างเดียว จากนั้นผลของความเครียดทั้งสองจะมีค่าเพิ่มสูงขึ้นในขั้นตอน Weld ซึ่งเป็นขั้นตอนที่เกิดอุณหภูมิสูงเพื่อให้สามารถหลอมเส้นลวดทองแดงเกิดเป็นรอยเชื่อมได้ จึงทำให้ที่เวลาการเชื่อม 20 มิลลิวินาที Thermal Strain มีค่าที่สูงขึ้นถึง 0.0045 แต่ต่ำกว่า Total Strain ที่มีค่าสูงสุดเท่ากับ 0.0107 และปริมาณความเครียดบนอิเล็กโทรดของ Total Strain และ Thermal Strain มีอัตราการลดลงที่เท่ากันในช่วงขั้นตอน Hold เนื่องจากขั้นตอนนี้เป็นช่วงเวลาที่ทำให้อรอยเชื่อมเย็นตัวลง มีเพียงแรงของการกดขี่ระหว่างอิเล็กโทรดกับเส้นลวดทองแดง อุณหภูมิที่เกิดบนอิเล็กโทรดในขั้นตอน Weld จึงมีค่าลดลง ซึ่งส่งผลให้ปริมาณความเครียดบนอิเล็กโทรดลดลงด้วยเช่นกัน ดังนั้นความเครียดที่เกิดบนอิเล็กโทรดจากการได้รับแรงกดขี่พร้อมกับการจ่ายไฟฟ้าผ่านอิเล็กโทรดจึงมีปริมาณมากกว่าความเครียดที่เกิดจากความจากความร้อนจากความต้านทานการไหลไฟฟ้าเพียงอย่างเดียว พฤติกรรมการเกิดความเครียดของ Total Strain และ Thermal Strain บนอิเล็กโทรดจึงมีความแตกต่างกันแสดงดังรูปที่ 4.12 และรูปที่ 4.13 ตามลำดับ



รูปที่ 4.12 พฤติกรรมความเค้นรวมบนอิเล็กโทรดช่องขนาน



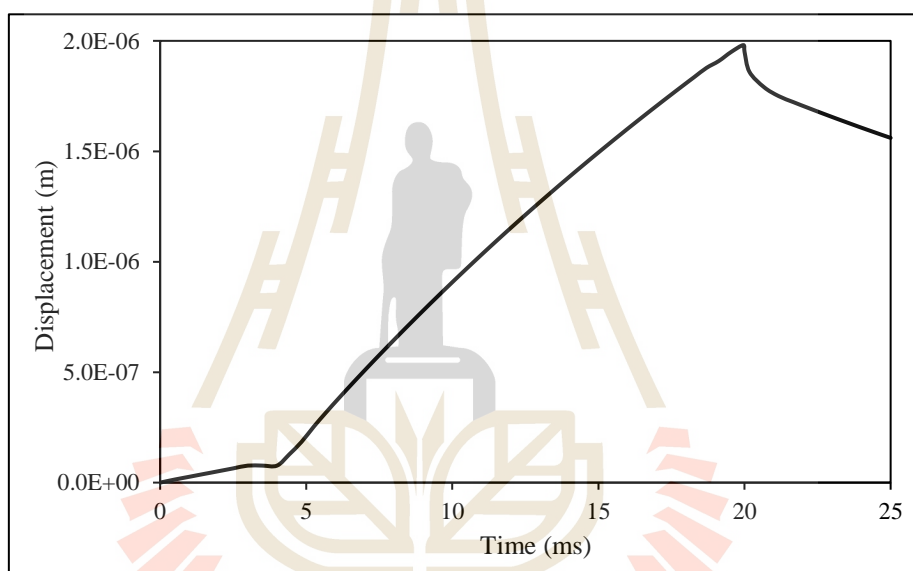
รูปที่ 4.13 พฤติกรรมความเค้นเนื่องจากความร้อนบนอิเล็กโทรดช่องขนาน

จากรูปที่ 4.12 ในขั้นตอน Squeeze ความเค้นที่เกิดขึ้นบนอิเล็กโทรดมีค่า 0.0022 ซึ่งเป็นค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับขั้นตอนการเชื่อมอื่น จึงทำให้ไม่เห็นการเปลี่ยนแปลงของความเค้นในขั้นตอนนี้ สำหรับขั้นตอน Weld เป็นขั้นตอนที่แสดงการเปลี่ยนแปลงความเค้นบนอิเล็กโทรดชัดเจนและมีค่าปริมาณความเค้นสูงกว่าขั้นตอนการเชื่อมอื่น ซึ่งในขั้นตอนนี้มีค่าความเค้นสูงถึง 0.0107 ที่ตำแหน่ง B และ C (รูปที่ 4.10) เมื่อสิ้นสุดกระบวนการที่เวลาการเชื่อม 25 มิลลิวินาที ปริมาณความเค้นบนอิเล็กโทรดลดลงลงเหลือ 0.0061 เท่ากันทั้งหน้าสัมผัส ซึ่งจากรูปที่ 4.13 ในขั้นตอน Squeeze บนอิเล็กโทรดมีความเค้นคงที่เท่ากับศูนย์ จากนั้นในขั้นตอน Weld จึงมีการเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมจากการเกิดอุณหภูมิ ความเค้นจาก

ความร้อนในขั้นตอนนี้จึงมีค่าสูงสุด 0.0045 ที่บริเวณเดียวกับการเกิดอุณหภูมิ ซึ่งจะเห็นว่าทั้ง Total Strain และ Thermal Strain มีค่าสูงสุดที่ตำแหน่งเดียวกับอุณหภูมิสูงสุด แต่ Thermal Strain มีลักษณะการกระจายความเครียดบนอิเล็กโทรด ในขั้นตอน Weld ใกล้เคียงกับอุณหภูมิมากกว่า เนื่องจากเป็นความเครียดที่เกิดจากความร้อนเพียงอย่างเดียวไม่มีแรงเข้ามาเกี่ยวข้องจึงทำให้มีพฤติกรรมเหมือนกับอุณหภูมิ

#### 4.2.4 พฤติกรรม Displacement

การเชื่อมจุดความต้านทานให้ผลการจำลองพฤติกรรมระยะการเคลื่อนที่ของเนื้อโลหะอิเล็กโทรดช่องขนาน ดังรูปที่ 4.14

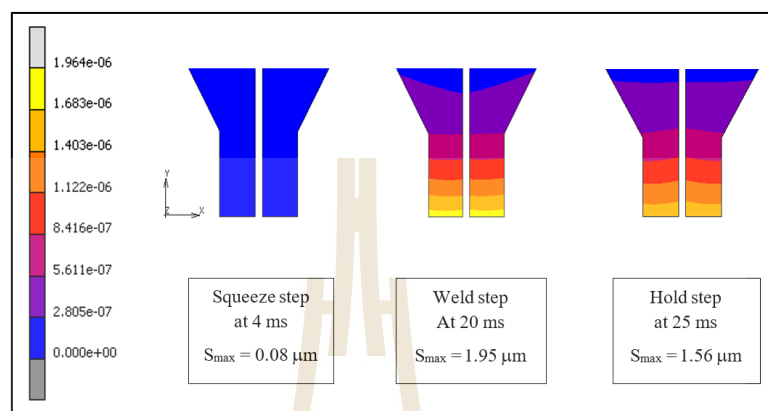


รูปที่ 4.14 ระยะการเคลื่อนที่ของเนื้อโลหะบนอิเล็กโทรดช่องขนานที่เวลาใดๆ ของการเชื่อม

ระยะการเคลื่อนที่ของเนื้อโลหะบนอิเล็กโทรดในรูปที่ 4.16 มีแนวโน้มสอดคล้องกับพฤติกรรมของกระบวนการเชื่อม โดยอิเล็กโทรดมีระยะการเคลื่อนที่ของเนื้อโลหะสูงสุดในขั้นตอน Weld ซึ่งเป็นผลมาจากการให้แรงกดขี่ระหว่างอิเล็กโทรดกับเส้นลวดทองแดงร่วมกับการเกิดอุณหภูมิจากความต้านทานการไหลไฟฟ้า ซึ่งตำแหน่งการเคลื่อนที่ของเนื้อโลหะบนอิเล็กโทรดแสดงดังรูปที่ 4.15

จากรูปที่ 4.15 พบว่า ขั้นตอน Squeeze เนื้อโลหะบนอิเล็กโทรดมีระยะการเคลื่อนที่  $7.69 \times 10^{-8}$  m ซึ่งเป็นปริมาณที่น้อยมากหรือกล่าวได้ว่าไม่เกิดการเคลื่อนที่ในขั้นตอนนี้ และอิเล็กโทรดมีระยะการเคลื่อนที่ของเนื้อโลหะปริมาณสูงในขั้นตอน Weld เท่ากับ  $1.95 \times 10^{-6}$  m และ Hold เท่ากับ  $1.56 \times 10^{-6}$  m ที่บริเวณปลายอิเล็กโทรดจากการรับแรงกดขี่และอุณหภูมิ ดังนั้น

สาเหตุการเคลื่อนที่ของเนื้อโลหะบนอิเล็กโทรดของการเชื่อมจุดความต้านทานไฟฟ้ามาจากการขยายและหดตัวบริเวณปลายของอิเล็กโทรด เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของกระบวนการเชื่อม



รูปที่ 4.15 พฤติกรรมเคลื่อนที่ของเนื้อโลหะบนอิเล็กโทรดช่วงขนาน

จากผลการจำลองพฤติกรรมอุณหภูมิ ความเค้น ความเครียด และการเคลื่อนที่ของเนื้อโลหะบนอิเล็กโทรดช่วงขนาน ภายใต้กระบวนการเชื่อมจุดความต้านทานไฟฟ้าและพารามิเตอร์ที่ได้จากการทดลองว่ามีความเหมาะสมกับการเชื่อมของ Xuguang Guo et al., (2014) แสดงให้เห็นว่ากระบวนการเชื่อมทำให้เกิดอุณหภูมิ ความเค้น ความเครียด และการเคลื่อนตัวของเนื้อโลหะบนอิเล็กโทรดช่วงขนานสูงสุดในขั้นตอนการเชื่อม Weld จากการให้แรงกดยึดพร้อมกับจ่ายไฟฟ้าที่เวลาการเชื่อม 4-20 มิลลิวินาที ส่งผลให้อิเล็กโทรดช่วงขนานในขั้นตอนนี้ได้รับผลกระทบจากการเชื่อมมากกว่าขั้นตอนอื่น และอาจนำไปสู่การเกิดความเสียหายหรือการเสื่อมสภาพบนอิเล็กโทรดได้อีกด้วย จึงทำการประเมินความเสียหายบนอิเล็กโทรดจากการเชื่อม 1 รอยเชื่อม และหาปัจจัยที่สามารถส่งผลให้อิเล็กโทรดเกิดการเสื่อมสภาพเมื่อมีการใช้งานที่เพิ่มมากขึ้นต่อไป

#### 4.3 การวิเคราะห์ความเสียหายและปัจจัยที่ส่งผลต่อการเสื่อมสภาพของอิเล็กโทรด

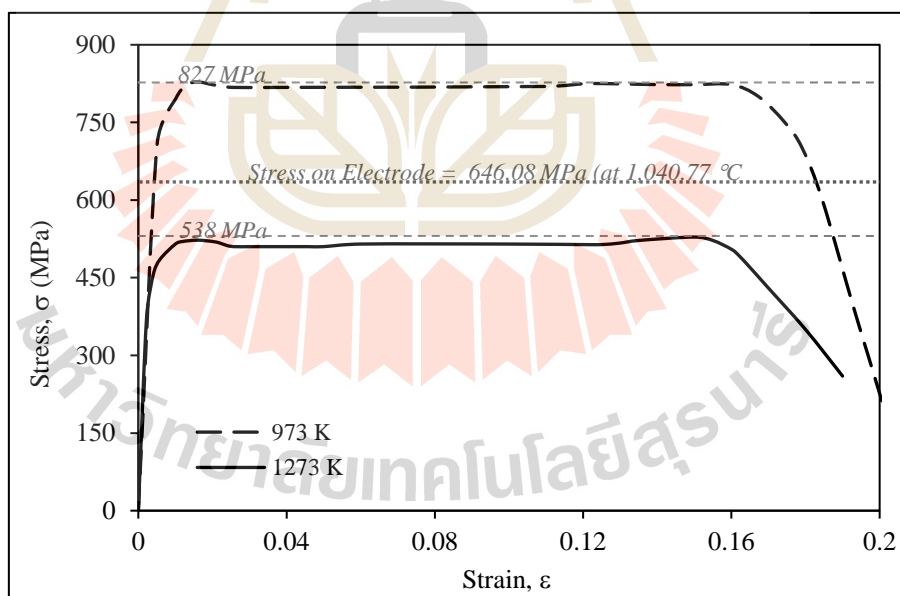
##### 4.3.1 การวิเคราะห์ความเสียหายของอิเล็กโทรดช่วงขนาน

จากการจำลองพฤติกรรมของปัญหาการเชื่อมจุดความต้านทานด้วยอิเล็กโทรดช่วงขนานให้ผลอุณหภูมิสูงสุดบนอิเล็กโทรด 1,040.77 เคลวิน ซึ่งมีค่าต่ำกว่าอุณหภูมิหลอมเหลวของวัสดุทั้งสแตนที่มีค่าเท่ากับ 3,695 เคลวิน จึงไม่ส่งผลให้อิเล็กโทรดเกิดการหลอมละลาย อีกทั้งอุณหภูมิดังกล่าวยังมีค่าน้อยกว่า 0.5 เท่าของอุณหภูมิหลอมเหลวทั้งสแตน จึงไม่สามารถ



เปลี่ยนพฤติกรรมความเสียหายของอิเล็กโทรดช่องขนานจากวัสดุเปราะเป็นวัสดุเหนียวได้อีกด้วย เนื่องจากวัสดุจะสามารถเปลี่ยนพฤติกรรมความเสียหายจากวัสดุเปราะเป็นวัสดุเหนียวได้ก็ต่อเมื่อมีการใช้งานที่อุณหภูมิสูงกว่า 0.5 เท่าของอุณหภูมิหลอมเหลวของวัสดุนั้น ดังนั้นอิเล็กโทรดช่องขนานนี้จึงคงพฤติกรรมความเสียหายเป็นแบบวัสดุเปราะเช่นเดิม

การประเมินความเสียหายเบื้องต้นของอิเล็กโทรดช่องขนานจากการเชื่อมจุด ความต้านทานไฟฟ้าจึงใช้เป็นทฤษฎี Maximum Normal Stress (MNS) เนื่องจากอิเล็กโทรดช่องขนานมีพฤติกรรมความเสียหายแบบวัสดุเปราะ มีแรงกระทำจากการกดอัดของอิเล็กโทรดโดยไม่มีแรงบิดเข้ามาเกี่ยวข้อง โดยทฤษฎี MNS วัสดุจะเกิดความเสียหายเมื่อ Normal Stress สูงสุดที่เกิดขึ้นในวัสดุมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับค่า Ultimate stress ของวัสดุนั้น ( $\sigma_{\max} \geq \sigma_u$ ) ความปลอดภัยการใช้งานของวัสดุนั้นมีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับ 1 ( $n \leq 1$ ) ทั้งนี้วัสดุเปราะไม่มีค่า Yield Strength ที่ชัดเจน จึงมักใช้ค่า Ultimate Tensile Stress หรือ Ultimate Compressive Stress แทน ดังนั้นการวิเคราะห์ความเสียหายของอิเล็กโทรดช่องขนานจึงใช้การเปรียบเทียบความเค้นของผลการจำลอง Normal Stress สูงสุดบนอิเล็กโทรดที่อุณหภูมิ 1,040.77 เคลวิน กับค่า Ultimate Stress จากการทดสอบแรงกดอัดด้วยชิ้นทดสอบของวัสดุทั้งสแตนที่อุณหภูมิ 973 และ 1,273 เคลวิน แสดงดังรูปที่ 4.16



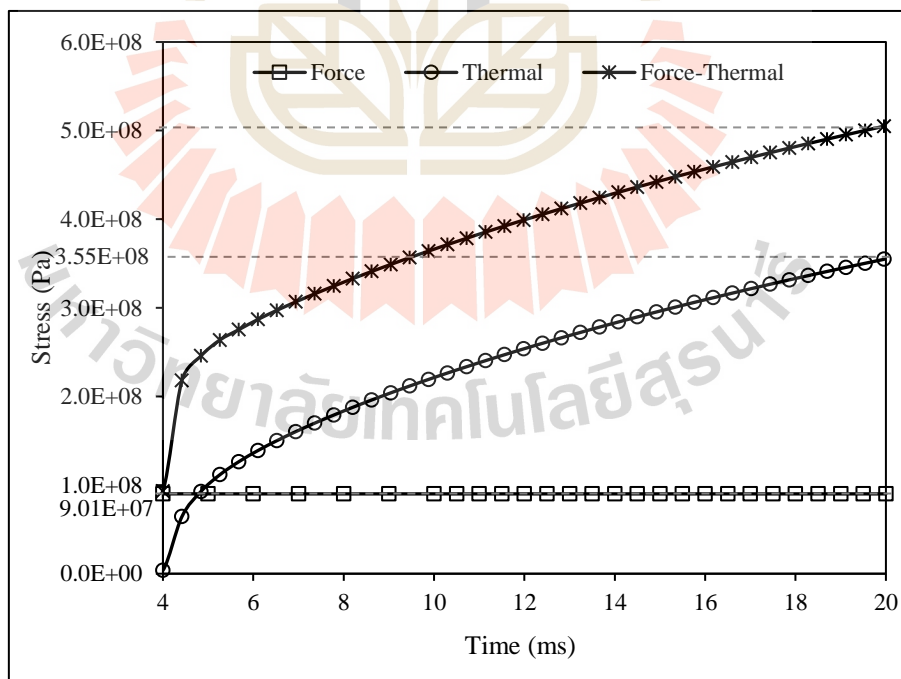
รูปที่ 4.16 การเปรียบเทียบความเค้นบนความสัมพันธ์ของความเค้นและความเครียด

ความสัมพันธ์ของความเค้นและความเครียดจากการทดสอบแรงกดของทั้งสแตน ในรูปที่ 4.16 ที่อุณหภูมิ 1,073 และ 1,273 เคลวิน ให้ค่า Ultimate Stress เท่ากับ 827 และ 538 MPa

ตามลำดับ เมื่อนำผลการจำลองความเค้นบนอิเล็กโทรดในข้อที่ 4.2 มาเปรียบเทียบ พบว่า Ultimate Stress ของทั้งสแตนเลสและ Normal Stress ของอิเล็กโทรดเกิดขึ้นที่อุณหภูมิไม่เท่ากัน การวิเคราะห์ความเสียหายของวัสดุจึงไม่สามารถทำได้อย่างแม่นยำ หากพิจารณาที่อุณหภูมิ 1,040.77 เคลวินเท่ากัน การทดสอบแรงกดอัดของทั้งสแตนเลสจะให้ค่า Ultimate Stress ในช่วง 700-750 MPa ทำให้ Normal Stress สูงสุดของอิเล็กโทรดเท่ากับ 646.08 MPa มีค่าต่ำกว่า Ultimate Stress ของวัสดุทั้งสแตนเลส ความปลอดภัยการใช้งานอิเล็กโทรดช่องขนานนี้จึงมีค่ามากกว่า 1 ดังนั้นความเค้นจากการเชื่อมจุดความต้านทานจึงไม่ส่งผลให้อิเล็กโทรดเกิดความเสียหายจากการแตกหักได้ทันที แต่สามารถทำให้เกิดการเสีรูปร่างจากความร้อนได้ แม้การเชื่อมในแต่ละครั้งจะทำให้อิเล็กโทรดเกิดการเสีรูปร่างเพียงเล็กน้อยหรือบางครั้งอาจไม่เกิดการเสีรูปร่าง ก็สามารถส่งผลให้อิเล็กโทรดเกิดการเสื่อมสภาพได้หากมีการใช้งานซ้ำเป็นเวลานาน

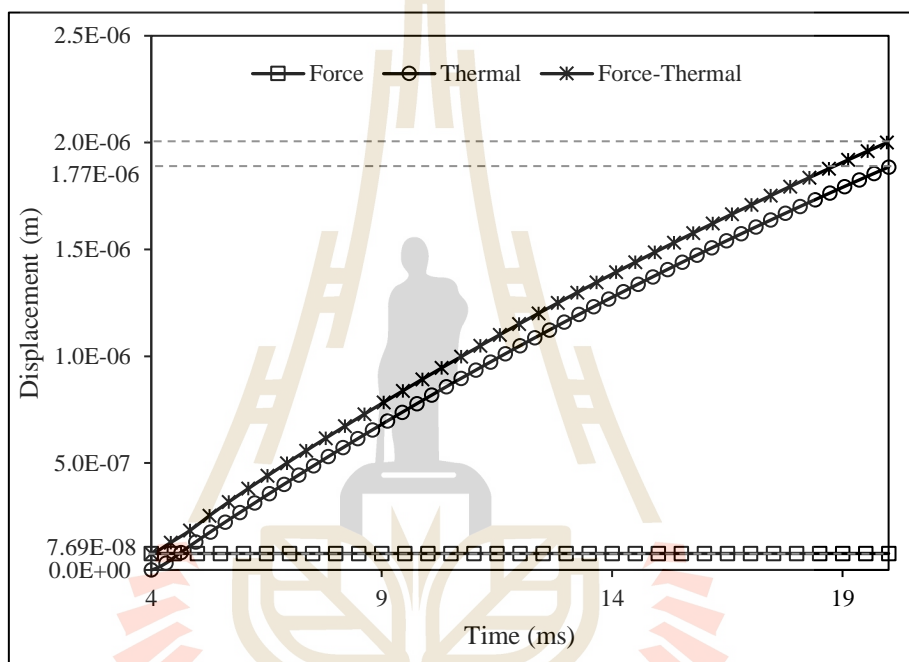
#### 4.3.2 การวิเคราะห์ปัจจัยที่ส่งผลต่อการเสื่อมสภาพของอิเล็กโทรดช่องขนาน

วิเคราะห์หาปัจจัยการเชื่อมที่สามารถส่งผลให้อิเล็กโทรดเกิดการเสื่อมสภาพได้มากที่สุด โดยเปรียบเทียบผลการจำลองความเค้นและการเคลื่อนที่ของเนื้อโลหะบนอิเล็กโทรดช่องขนานของพฤติกรรมเชื่อมในขั้นตอน Weld ทั้ง 3 กรณี คือ Force, Thermal และ Force-Thermal แสดงดังรูปที่ 4.17 และรูปที่ 4.18 ตามลำดับ



รูปที่ 4.17 การเปรียบเทียบความเค้นบนอิเล็กโทรดช่องขนาน

การเปรียบเทียบผลการจำลองความเค้นบนอิเล็กโทรดช่องขนานของทั้งสามกรณี ในรูปที่ 4.19 แสดงให้เห็นแนวโน้มความเค้นของ Force มีลักษณะเช่นเดียวกับพฤติกรรมในการให้ แรงกดขี่ของอิเล็กโทรด โดยมีค่าความเค้นสูงสุดที่เวลา 20 มิลลิวินาที เท่ากับ 90.1 MPa แต่มีค่า ต่ำกว่าความเค้นจาก Thermal ซึ่งมีค่าสูงสุดเท่ากับ 355 MPa และเมื่ออิเล็กโทรดที่มีภาระกระทำจาก แรงกดขี่ได้รับความร้อนร่วมด้วยจะส่งผลต่อความเค้นบนอิเล็กโทรดให้มีค่าเพิ่มสูงขึ้นถึง 505 MPa จึงทำให้ค่าความเค้นสูงสุดจาก Force-Thermal มีค่าสูงกว่าความเค้นจากปัจจัยอื่น



รูปที่ 4.18 การเปรียบเทียบการเคลื่อนที่ของเนื้อโลหะบนอิเล็กโทรดช่องขนาน

รูปที่ 4.18 แสดงการเปรียบเทียบการเคลื่อนที่ของเนื้อโลหะบนอิเล็กโทรด ช่องขนาน พบว่า Thermal และ Force-Thermal ให้ลักษณะแนวโน้มและระยะการเคลื่อนที่ของ เนื้อโลหะบนอิเล็กโทรดสูงสุดที่ใกล้เคียงกัน ซึ่งมีค่าเท่ากับ  $1.77 \times 10^{-6}$  เมตร และ  $2.0 \times 10^{-6}$  เมตร ตามลำดับ ในขณะที่ Force ให้การเคลื่อนที่ของเนื้อโลหะบนอิเล็กโทรดมีค่าเท่ากับ  $7.69 \times 10^{-8}$  เมตร โยจะเห็นว่ามิต้าน้อยกว่าปัจจัยอื่นมาก ซึ่งอาจมองได้ว่าแรงกดขี่ที่ใช้ในกระบวนการเชื่อมนี้ ไม่ส่งผลให้เนื้อโลหะบนอิเล็กโทรดเกิดการเปลี่ยนแปลง

จากการเปรียบเทียบผลการจำลองความเค้นและการเคลื่อนที่ของเนื้อโลหะบน อิเล็กโทรดของทั้งสามปัจจัย จะเห็นได้ว่าผลที่เกิดจาก Thermal ให้ค่าที่สูงกว่าปัจจัยที่เกิดจาก Force อยู่มาก แต่ให้ค่าที่ต่ำกว่า Force-Thermal อยู่เพียงเล็กน้อย จึงกล่าวได้ว่าปัจจัยที่เกิดจากแรงกดขี่

ระหว่างอิเล็กโทโรดและเส้นลวดทองแดงส่งผลกระทบต่อการศึกษาปรากฏการณ์กายภาพบนอิเล็กโทโรดเพียงเล็กน้อยหรือบางครั้งอาจไม่ส่งผลกระทบ จึงไม่ทำให้อิเล็กโทโรดเกิดการแตกหักเสียหายหรือเกิดการเสีรูปร่าง แต่อิเล็กโทโรดสามารถเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างหรือเสีรูปร่างได้ด้วยความร้อนที่เกิดขึ้นในกระบวนการเชื่อม ซึ่งหากอิเล็กโทโรดได้รับแรงกดดันร่วมกับการเกิดความร้อนด้วยนั้นจะยิ่งส่งผลให้เกิดปรากฏการณ์กายภาพบนอิเล็กโทโรดที่รุนแรงขึ้น การเปลี่ยนแปลงรูปร่างหรือการเสีรูปร่างก็จะมีมากขึ้นด้วย ดังนั้นการเชื่อมของอิเล็กโทโรดจึงมีสาเหตุหลักมาจากการสร้างความร้อนสูงของกระบวนการเชื่อม ซึ่งจากข้อมูลการเชื่อมสภาพของอิเล็กโทโรดที่ใช้ในกระบวนการเชื่อมจุดความต้านทานไฟฟ้านั้น ความร้อนที่เกิดขึ้นจะทำให้อิเล็กโทโรดเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างได้ตั้งแต่ครั้งแรกที่ใช้งาน ขนาดและความรุนแรงของการเปลี่ยนแปลงรูปร่างนั้นจะขึ้นอยู่กับปริมาณความร้อนและระยะเวลาของการใช้งาน หากมีการใช้งานอิเล็กโทโรดดังกล่าวซ้ำ ๆ ระยะเวลาเวลานาน การเปลี่ยนแปลงรูปร่างหรือการเสีรูปร่างที่เกิดขึ้นบนอิเล็กโทโรดจะยิ่งมีความรุนแรงเป็นทวีคูณ ทั้งนี้ปริมาณความร้อนที่เกิดขึ้นในกระบวนการเชื่อมขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย ได้แก่ ขนาดพลังงานไฟฟ้าที่ไหลผ่านอิเล็กโทโรด เวลาการไหลของไฟฟ้า ขนาดของแรงกดดันระหว่างอิเล็กโทโรดกับเส้นลวดทองแดง รูปร่างของอิเล็กโทโรดที่ใช้ ซึ่งหากอยากให้การเชื่อมความต้านทานมีประสิทธิภาพและมีการเชื่อมสภาพของอิเล็กโทโรดลดลง ต้องทำการวิจัยและทดสอบหาค่าพารามิเตอร์ในแต่ละตัวให้เหมาะสมกับงานเชื่อม นั้น ๆ

อย่างไรก็ตามการเชื่อมสภาพของอิเล็กโทโรดอาจไม่ได้มีสาเหตุมาจากความจากการเสีรูปร่างของอิเล็กโทโรดเมื่อได้รับความร้อนจากการทำงานซ้ำเป็นเวลานานเท่านั้น อิเล็กโทโรดที่ใช้ในการเชื่อมจุดความต้านทานไฟฟ้ามักมีการเชื่อมสภาพของหน้าสัมผัสที่เกิดมาจากการหลอมติดของชิ้นงานเชื่อมเข้ากับผิวอิเล็กโทโรด ซึ่งส่งผลให้หน้าสัมผัสของอิเล็กโทโรดมีผิวขรุขระและจะมีปริมาณเพิ่มมากขึ้นเรื่อย ๆ จนกระทั่งปลายอิเล็กโทโรดมีลักษณะเป็นดอกเห็ด พื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างวัสดุเกิดเป็นช่องว่างเป็นจำนวนมากขึ้น ซึ่งการเชื่อมสภาพของอิเล็กโทโรดจะส่งผลให้สภาพความต้านทานไฟฟ้าและการนำความร้อนของอิเล็กโทโรดลดลง ทำให้อุณหภูมิในการเชื่อมมีปริมาณลดลง รอยเชื่อมที่เกิดขึ้นจึงมีคุณภาพลดลงตามไปด้วย

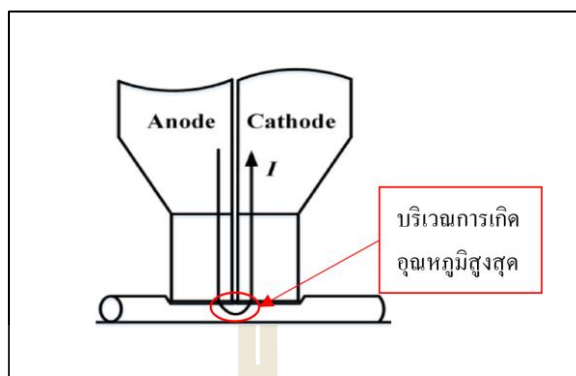
## บทที่ 5

### บทสรุปและข้อเสนอแนะ

งานวิจัยเรื่องการวิเคราะห์ความเค้นเนื่องจากแรง-ความร้อนบนอิเล็กโทรดช่องขนาน ในกระบวนการเชื่อมจุดความต้านทานไฟฟ้า ใช้เทคนิคระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ร่วมกับแบบจำลอง Electrical/Thermal/Mechanical บนซอฟต์แวร์ Marc Mentat ในการจำลองอุณหภูมิ ความเค้น ความเครียด และการเคลื่อนที่ของเนื้อโลหะบนอิเล็กโทรดภายใต้กระบวนการเชื่อมจุด ความต้านทานไฟฟ้าและพารามิเตอร์การเชื่อมของ Xuguang Guo et al. (2014) เพื่อศึกษาพฤติกรรมการเชื่อมและวิเคราะห์หาปัจจัยทางการเชื่อมที่ส่งผลต่อการเสื่อมสภาพของอิเล็กโทรด โดยพิจารณาจากพฤติกรรมการเชื่อมในขั้นตอน Weld แต่ไม่พิจารณารูปทรงของอิเล็กโทรด ซึ่งจากการศึกษาสามารถสรุปผลและข้อเสนอแนะดังนี้

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

1. การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิในกระบวนการเชื่อมความต้านทานขึ้นอยู่กับขนาดของกระแสไฟฟ้า ความต้านทานการไหลไฟฟ้าของวัสดุและพื้นที่ผิวสัมผัส และเวลาการไหลของไฟฟ้า เป็นไปตามหลักการเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นความร้อนด้วยกฎของจูลน์ โดยการจ่ายไฟฟ้าไหลผ่านอิเล็กโทรดในกระบวนการเชื่อมเกิดขึ้นที่เวลาการเชื่อม 4-20 มิลลิวินาที ทำให้เกิดอุณหภูมิสูงสุดบนเส้นลวดทองแดงที่เวลาการเชื่อม 20 มิลลิวินาที เท่ากับ 1,085.80 เคลวิน ที่บริเวณช่องว่างของอิเล็กโทรดทั้งสองข้างหรือจุดกึ่งกลางของเส้นลวดทองแดง ( $x = 8 \text{ mm}$ ) เป็นผลมาจากการไหลของไฟฟ้าแสดงดังรูปที่ 5.1 ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่บนเส้นลวดทองแดงนั้นสามารถหลอมเส้นลวดให้เชื่อมติดกับแผ่นไมโครชิปได้ แต่ไม่สามารถหลอมเส้นลวดให้เป็นน้ำโลหะไหลออกนอกพื้นที่และส่งผลกระทบต่อชิ้นส่วนอื่นของอุปกรณ์ได้



รูปที่ 5.1 บริเวณการเกิดอุณหภูมิสูงสุดของการเชื่อมความต้านทาน

2. การเชื่อมความต้านทานมีการให้แรงกดยึดในขั้นตอน Squeeze (0-4 มิลลิวินาที) จากนั้นให้แรงกดยึดพร้อมกับการจ่ายไฟฟ้าไหลผ่านในขั้นตอน Weld (4-20 มิลลิวินาที) และหยุดจ่ายไฟฟ้าแต่ยังคงแรงกดในขั้นตอน Hold (20-25 มิลลิวินาที) เพื่อให้การสร้งรอยเชื่อมมีความสมบูรณ์และมีคุณภาพ พฤติกรรมการเชื่อมความต้านทานมีกายภาพพื้นฐานของปรากฏการณ์ทางไฟฟ้า ความร้อน และทางกล เป็นผลให้เกิดอุณหภูมิ ความเค้น ความเครียด และการเคลื่อนที่ของเนื้อโลหะบนอิเล็กโทรดช่องขนานในแต่ละขั้นตอนการเชื่อมที่แตกต่างกันดังในตารางที่ 5.1 โดยแสดงค่าสูงสุดในการเชื่อมขั้นตอน Weld เนื่องเป็นขั้นตอนการเชื่อมเดียวที่มีการจ่ายไฟฟ้า

ตารางที่ 5.1 สรุปผลการจำลองปัญหาการเชื่อมจุดความต้านทานไฟฟ้าด้วยอิเล็กโทรดช่องขนาน

Model Results	Squeeze	Weld	Hold
Temperature (K)	293	1,040.77	559.07
Equivalent Stress (MPa)	90.09	504.47	281.92
Normal Stress (MPa)	118.19	646.08	408.31

พฤติกรรมต่าง ๆ ที่เกิดบนอิเล็กโทรดช่องขนานจากการเชื่อมจุดความต้านทานไฟฟ้าในตารางที่ 5.1 แสดงค่าสูงสุดในขั้นตอน Weld เนื่องเป็นขั้นตอนการเชื่อมเดียวที่มีการจ่ายไฟฟ้า โดยอุณหภูมิสูงสุดเกิดขึ้นที่บริเวณขอบหน้าสัมผัสของอิเล็กโทรดช่องขนานที่อยู่ติดกับบริเวณการเกิดอุณหภูมิสูงสุดบนเส้นลวดทองแดงในรูปที่ 5.1 ซึ่งเป็นผลจากความต้านทานการไหลไฟฟ้าและการนำความร้อนที่พื้นผิวสัมผัสของอิเล็กโทรดกับเส้นลวดทองแดง อุณหภูมิที่เกิดขึ้นบนอิเล็กโทรดมีค่าต่ำกว่าจุดหลอมเหลวของวัสดุทั้งสแตนเลสจึงไม่ทำให้อิเล็กโทรดเกิดการหลอมละลาย



ในขณะที่เชื่อม และความเค้นสูงสุดเกิดขึ้นที่ขอบหน้าสัมผัสของอิเล็กโทรด ซึ่งเป็นบริเวณ ที่ได้รับแรงปฏิกิริยาจากการกดยึดเส้นลวดทองแดงและอุณหภูมิสูง และเป็นบริเวณดังกล่าวยังมีพื้นที่สำหรับรับแรงกระทำขนาดเล็กกว่าบริเวณอื่น จึงทำให้เกิดความเค้นสูงตามหลักทางทฤษฎีที่ว่า “วัสดุที่มีพื้นที่ในการรับแรงขนาดเล็กจะมีความเข้มของความเค้นสูง” และการเคลื่อนที่ของเนื้อโลหะบนอิเล็กโทรดสูงสุดเกิดขึ้นที่ปลายอิเล็กโทรด เป็นผลจากการขยายตัวจากความร้อนของอิเล็กโทรด

3. การประเมินความเสียหายเบื้องต้นของอิเล็กโทรดช่องขนานจากการเชื่อมด้วยทฤษฎีความเสียหายสำหรับวัสดุเปราะ Maximum Normal Stress โดยเปรียบเทียบ Normal Stress จากการจำลองมีค่าสูงสุดที่อุณหภูมิ 1,040.77 เคลวิน เท่ากับ 646.08 เมกะปาสคาล กับ Ultimate Compressive Stress จากการทดสอบวัสดุทั้งสแตน เมื่อเทียบที่อุณหภูมิเดียวกันความเค้นสูงสุดของการทดสอบจะอยู่ในช่วง 700-750 เมกะปาสคาล ทำให้อิเล็กโทรดช่องขนานไม่เกิดการแตกหักเสียหายหรือเกิดการเสียรูปโดยทันที แต่ความเค้นทั้งสองมีค่าใกล้เคียงกันจึงอาจส่งผลให้อิเล็กโทรดเกิดความเสียหายหากมีการใช้งานในระยะยาว

4. การเสื่อมของอิเล็กโทรดมีสาเหตุหลักมาจากความร้อน ความร้อนที่เกิดขึ้นจะทำให้ อิเล็กโทรดเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างได้ตั้งแต่ครั้งแรกที่ใช้งาน หากมีการใช้งานซ้ำเป็นเวลานานจะทำให้การเสื่อมสภาพของอิเล็กโทรดจะมีความรุนแรงมากขึ้น การเสื่อมสภาพยังมีสาเหตุมาจากการหลอมติดของชิ้นงานเชื่อมซึ่งให้หน้าสัมผัสของอิเล็กโทรดมีผิวขรุขระ และหากมีการหลอมติดมากขึ้นปลายอิเล็กโทรดจะมีลักษณะเป็นดอกเห็ด พื้นที่ผิวสัมผัสจะเกิดเป็นช่องว่างจำนวนมาก ส่งผลให้สภาพความต้านทานไฟฟ้าและการนำความร้อน พื้นที่สัมผัสลดลง อันนำไปสู่การเสื่อมสภาพของอิเล็กโทรด รอยเชื่อมที่เกิดขึ้นจึงมีคุณภาพลดลงด้วยเช่นกัน

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

1. งานวิจัยนี้เป็นการวิเคราะห์หาปัจจัยที่ส่งต่อการเสื่อมสภาพของอิเล็กโทรดเพียงอย่างเดียว หากต้องการทราบสาเหตุของเสื่อมสภาพและการเสียรูปของอิเล็กโทรดที่ชัดเจนขึ้น ควรศึกษาหาอายุการใช้งานของอิเล็กโทรดนี้เพิ่มเติม

2. หากนำอิเล็กโทรดที่ใช้ในการศึกษาไปใช้งานที่มีปริมาณของแรงอิเล็กโทรดที่ต่างจากการศึกษา ควรทำการศึกษหาปัจจัยที่มีผลต่อการเสื่อมสภาพของอิเล็กโทรดใหม่ เนื่องจากอิเล็กโทรดมีขนาดเล็กหากใช้แรงอิเล็กโทรดที่เพิ่มขึ้น ปัจจัยหลักที่ทำให้อิเล็กโทรดเกิดการเสื่อมสภาพและการเสียรูปอาจไม่ได้เกิดมาจากความร้อนเพียงอย่างเดียว ซึ่งอาจมีผลมาจากแรงกดยึดร่วมด้วย และหากใช้แรงอิเล็กโทรดมากเกินไปอาจนำไปสู่การเกิดความเสียหายโดยการแตกหักจากการกดยึดได้



3. รูปทรงของอิเล็กทรอนิกส์มีผลต่อการเกิดความร้อน การเสียรูปของอิเล็กทรอนิกส์ และคุณภาพของรอยเชื่อม ซึ่งการใช้งานแต่ละงานหรือแต่ละประเภทจะมีการใช้อิเล็กทรอนิกส์ที่มีลักษณะแตกต่างกัน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับงานที่เชื่อมและลักษณะของที่ยึดจับของอิเล็กทรอนิกส์อีกด้วย

4. ตัวแปรสำคัญของกระบวนการเชื่อมความต้านทานไฟฟ้าคือ กระแสเชื่อม แรงอิเล็กทรอนิกส์ และเวลาเชื่อม ซึ่งทั้งสามค่ามีความสัมพันธ์กัน ก่อนทำการเชื่อมทุกครั้งควรหาค่าที่เหมาะสมต่อการเชื่อม เพื่อคุณภาพของงานและอายุการใช้งานของอิเล็กทรอนิกส์

5. การเชื่อมความต้านทานไฟฟ้าโดยทั่วไป จะคำนึงถึงคุณภาพของรอยเชื่อมเป็นหลัก โดยไม่ได้คำนึงถึงประสิทธิภาพของอิเล็กทรอนิกส์อันมีผลต่อคุณภาพของรอยเชื่อม บางครั้งทำให้การเลือกใช้ค่าในปริมาณที่ไม่เหมาะสมกับอิเล็กทรอนิกส์จะทำให้อิเล็กทรอนิกส์เกิดการเสื่อมสภาพอย่างรวดเร็วและส่งผลกระทบต่อรอยเชื่อมมีคุณภาพลดลง ดังนั้นในการเชื่อมต้องคำนึงถึงความเหมาะสมทั้งสองอย่างไปพร้อมกัน จึงจะทำให้อิเล็กทรอนิกส์มีอายุการใช้งานที่นานขึ้นและรอยเชื่อมได้มีคุณภาพ อีกทั้งยังประหยัดต้นทุนการผลิตได้อีกด้วย

6. หากต้องการใช้อิเล็กทรอนิกส์มีระยะเวลาการใช้งานเพิ่มขึ้น ควรศึกษาสมบัติวัสดุ การเลือกใช้วัสดุ การขึ้นรูปวัสดุ ตลอดจนการปรับปรุงคุณภาพวัสดุสำหรับใช้ทำอิเล็กทรอนิกส์ให้เกิดความเหมาะสมกับการเชื่อม ซึ่งวัสดุที่ใช้ควรมีสมบัติดังนี้ มีความแข็งแรงสูง ทนความร้อนและทนการกัดกร่อนสูง และมีการนำไฟฟ้าและความร้อนที่ดี



## รายการอ้างอิง

- ณัฐ ดวงรัตน์ประทีป, พิมพ์เดือน รังสิยากุล, ชาย รังสิยากุล และกุลภพ สุทธิอาจ. (2561). ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์และการประยุกต์ใช้ในทางทันตกรรมรากเทียม. *เชียงใหม่ทันตแพทยสาร*. ปีที่ 39. ฉบับที่ 3. 29-42.
- ปราโมทย์ เดชะอำไพ. (2560). *ไฟไนต์เอลิเมนต์ในงานวิศวกรรม*. พิมพ์ครั้งที่ 6. กรุงเทพฯ: โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ปราโมทย์ เดชะอำไพ และนิพนธ์ วรรณโสภากย์. (2555). *ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขในงานวิศวกรรม*. พิมพ์ครั้งที่ 8. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- สุทธิศักดิ์ พงษ์ธนาพานิช. (2560). *วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์และการสร้างตาข่ายสามเหลี่ยม (Finite Element Methods and Mesh Triangulation)*. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ศักดิ์ชัย จันทศรี, ไพบุลย์ เข้มเฟื่อน และกิตติพงษ์ กิมะพงศ์. (2555). *โครงการวิจัย การศึกษาสมบัติรอยเชื่อมต้านทานแบบจุดระหว่างอลูมิเนียมและเหล็กกล้าเคลือบสังกะสี*. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี.
- Chenxi Wang, Chunging Wang. (2003). Parallel Gap Bonding Mechanism of joint Formation for Thin-Film Metallization. *IEEE Transactions on Electrical Packaging Manufacturing*. pp.184-186.
- D. F. Farson, J. Z. Chen, K. Ely, T. Frech. (2004). Monitoring resistance spot nugget size by electrode displacement. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*. Vol. 126. pp.391-394.
- David L. (2016). 3D FE Simulations of Resistance Spot Welding. *Degree Project in Engineering Mechanics 120 Credits*. Stockholm. Sweden.
- David W. (1998). "Downsizing" in the World of Resistance Welding. *Steinmeier-micro-Joining Solutions*. pp.1-15.
- Donald R. Askeland, Pradeep P. Fula, Wendelin J. Wright (2011). *The Science and Engineering of Materials*. Edition 6th. United States of America.

- Donald R. Johnson, Richard E. Knutson. (1976). Parallel Gap Welding to thick-Film Metallization. **IEEE Transactions on Parts, Hybrids and Packaging**. Vol. 12 (3). pp. 187-194.
- Erik Lassner, Wolf-Dieter Schubert. (1998). **Tungsten Properties, Chemistry, Technology of the Element, Alloy And Chemical Compounds**. United States of America.
- Frank P., David P., Theodore L., Adrienne S. (2007). **Fundamentals of Heat and Mass Transfer**. Edition 6th. Asia.
- Friis Kasper Storgaard. (2010). Resistance Welding of Advanced Materials and Micro Components. **Degree Philosophiæ Doctor. Technical University of Denmark**.
- Govindan P., Sankar S. (2013). Modeling of resistance spot welding process - a review. **International Journal of Management, Information Technology and Engineering**. Vol. 1(3). pp.67-78.
- H. S. Cho, Y. J. Cho. (1989). A Study of the Thermal Behavior in Resistance Spot Welds. **Welding Journal**. Vol. 68 (6). pp. 236-244.
- Hamid Eisazadeh, Mohsen Hamed, Ayob Halvae. (2010). New parametric study of nugget size in resistance spot welding process using finite element method. **Materials and Design**. pp. 149-157.
- Hassamoddin Moshayedi, Iradj Sattari-Far. (2014). Resistance Spot Welding and the effect of welding time and current on residual Stress. **Journal of Materials Processing Technology**. pp. 2545-2552.
- Hee Seok Chang, Hyo Chul Kwon. (2011). In-Process Monitoring of Micro Resistance Spot Weld Quality using Accelerometer. **Journal of KWJS**. Vol. 29(1). pp. 115-122.
- Hua Wang, Yansong Zhang, Guanlong Chen (2009). Resistance Spot Welding Processing Monitoring based on Electrode Displacement Curve using Moving Range Chart. **Journal Measurement**. Vol. 42(7). pp. 1032-1038.
- J. D. Parker, N. T. Williams, R. J. Holliday. (1998). Mechanisms of electrode degradation when spot welding coated steels. **Science and Technology of Welding and Joining**. Vol. 3. pp. 65-74.
- J. Z. Chen, D. F. Farson. (2004). Electrode Displacement Measurement Dynamics in Monitoring of Small Scale Resistance Spot Welding. **Measurement Science and Technology**. Vol. 15(12). pp. 2419-2425.

- J.J. Fendrock , L.M. Hong. (1990). Parallel-gap welding to very-thin metallization for high temperature microelectronic interconnection. **IEE Trans. Conmp., Hybrids. Manufact. Thecnol.** Vol. 13. pp. 376-382.
- Jianzhong Chen. (2005). Fundamental Studies for Development of Real-Time Modelbased Feedback Control with Model Adatation for Small Scale Resistance Spot Welding. **Degree Doctor of Philosophy in the Graduate School of The Ohio State University.**
- K. J. Ely and Y. Zhou. (2001). Micro-resistance spot welding of Kovar, steel, and nickel. **Science and Technology of Welding and Joining.** Vol. 6(2). pp. 63-72.
- Kuang-Hung Tseng, Ko-Jui Chuang. (2012). Monitoring Nugget Size of Micro Resistance Spot Welding (Micro RSW) using Electrode Displacement-Time Curve. **Advanced Materials.** Vol. 463-464. pp. 107-111.
- Larry J. Segerlind. (1984). **Applied Finite Element Analysis.** 2th Edition. Unite States of America.
- Liang GONG, Cheng-Liang LIU, Yan-Ming LI. (2012). Control Criteria Determination and Quality Inference for Resistance Spot Welding through Monitoring the Electrode Displacement Using Bayesian Belief Networks. **Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing.** Vol. 6(4). pp. 432-444.
- Meranda Salem. (2011). Control and Power Supply for Resistance Spot Welding (RSW). **Degree of Doctor of Philosophy the School of Graduate and Postdoctoral Studies the University of Western Ontario London, Ontario, Canada.**
- Moeen Enami, Mohammadreza Farahani, Majid Sohrabian. (2016). Evaluation of mechanical properties of Resistance Spot Welding and Friction Stir Spot Welding on Aluminum Alloys. **International Conference on researches in Science and Engineering.** 28 July 2016, Istanbul University, Turkey.
- Nachimani Charde. (2012). Effect of Eelectrode Deformation on Carbon Steel Weld Geometry of Resistance Spot Welding. **IJAITI 2012.** Vol. 5. pp. 5-12.
- Nielsen Chris Valentin, Zhang Wenqi. (2013). 3D Simulation of resistance welding processes and weld strength testing. **In Simulationsforum: Schweissenund Wärmebehandlung. Denmark.**
- Robert L. Norton. (2011). **Machine Design an Integrated Approach.** 4th Edition. Unite States of America.
- S. W. H. Yih, C. T. Wang, (1979). **Tungsten, Plenum Press,** New York, London.

- S.J. Dong, G.P. Kelkar, Y. Zhou. (2002). Electrode Stricking During Micro-Resistance Welding of Thin Metal Sheets. **IEEE Transactions on Electrical Packaging Manufacturing**. Vol. 25(4). pp. 355-361.
- Song, Quanfeng (2003). Testing and Modeling of Contact Problems in Resistance Welding. **Ph.D. Thesis. Technical University of Denmark**.
- Vural M., Akkus A., Eryurek B. (2006). Effect of Welding nugget diameter on the fatigue strength of resistance spot welder joint of different steel sheets. **Journal of Materials Processing Thehnology**. Vol. 176. pp. 127-132.
- Xuguang Guo, Yanhong Tian, Shang Wang, Chunqing Wang. (2014). Parallel Gap Resistance Thick Wire Bonding for Vertical Interconnection in 3D Assembly. **IEEE International Conference on Electronic Packaging Technology**. pp. 6-9.
- Y. ZHOU, P. GORMAN, W. TAN, K.J. ELY. (2000). Weldability of Thin Sheet Metals during Small-Scale Resistance Spot Welding using an Alternating-Current Power Supply. **Journal of Electronic Materials**. Vol. 29(9). pp. 1090-1099.
- Y. Zhou, S.J. Dong, K.J. Ely. (2001). Weldability of thin sheet metals by small-scale resistance spot welding using high-frequency inverter and capacitor-discharge power supplies. **Electronic Materials Journal**. Vol. 30(8). pp. 1012-1020.
- Y.Y. Zhao, Y.S. Zhang, X.M. Lai, Pei Chung Wang. (2014). Effect Inserted Strips on Electrode Degradation in Resistance Spot Welding. **Welding Journal**. Vol. 9. pp. 411- 420.
- Z. Feng, J. E. Gould, S.S. Babu, M.L. Santella, B.W. Riemer (1999). An Incrementally Coupled Electrical-Thermal-Mechanical Model for Resistance Spot Welding. **Welding Research, Proceedings of the 5th International Conference**. ASM International. Materials Park, Ohio. pp. 599-604.



ภาคผนวก ก

สมบัติวัสดุ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

# 1. สมบัติวัสดุสำหรับกรณีทวนสอบการใช้งานซอฟต์แวร์

## 1.1 C1500 (อิเล็กทรอนิกส์)

C1500 (อิเล็กทรอนิกส์) เป็นโลหะผสม มีส่วนประกอบของทองแดง (Cu) 99.80 เปอร์เซ็นต์ และเซอร์โคเนียม (Zr) 0.20 เปอร์เซ็นต์ โดยมีสมบัติวัสดุ ดังในตารางที่ ก.1

ตารางที่ ก.1 สมบัติวัสดุของ C1500

Temperature	Density	Yield Strength	Young's Modulus	Poisson's Ratio	Electrical Resistance	Thermal Expansion Coefficient	Specific Heat	Thermal Conductivity
[°C]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[MPa]	[GPa]		[Ω.m) × 10 <sup>-8</sup>	[1/°C) × 10 <sup>-5</sup>	[J/kg.°C]	[W/m.°C]
20			124		2.64	1.656	397.80	390.30
93			105		3.00	1.674	401.90	380.60
204			93		4.00	1.710	418.70	370.10
316			82		5.05	1.746	431.20	355.10
427			55		6.19	1.782	439.60	345.40
538			38		6.99	1.836	452.20	334.90
649	8900	83	25	0.32	8.00	1.854	464.70	320.00
760			16		8.98	1.890	477.30	315.50
871			14		9.48	1.926		310.30
982			7		9.98			305.00



## 1.2 SS304 (ชิ้นงานเชื่อม)

SS304 (Stainless Steel-Grade 304) คือ เหล็กกล้าไร้สนิม (เหล็กที่มีความต้านทานการกัดกร่อนสูง) เป็นโลหะผสมระหว่างเหล็กและคาร์บอน จัดเป็นโลหะประเภท Elastic-plastic โดยมีสมบัติวัสดุแสดงดังในตารางที่ ก.2

ตารางที่ ก.2 สมบัติวัสดุของ SS304

Temperature	Density	Yield Strength	Young's Modulus	Poisson's Ratio	Electrical Resistance	Thermal Expansion Coefficient	Specific Heat	Thermal Conductivity
[°C]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[MPa]	[GPa]		[Ω.m] × 10 <sup>-8</sup>	[1/°C] × 10 <sup>-5</sup>	[J/kg.°C]	[W/m.°C]
20	7900	353	198.5	0.294	6.04	1.656	462	14.6
100	7880	307	193	0.295	7.02	1.674	496	15.1
200	7830	268	185	0.301	7.74	1.710	512	16.1
300	7790	224	176	0.310	8.58	1.746	525	17.9
400	7750	203	167	0.318	9.22	1.782	540	18.0
600	7660	177	159	0.326	10.01	1.836	577	20.8
800	7560	112	151	0.333	11.20	1.854	604	23.9
1200	7370	32	60	0.339	12.10	1.890	676	32.2
1500	7320	8	10	0.388		1.926	700	120.0

For Thermal: Melting Point: 1400 - 1455 °C, Solidus Temperature: 1400 °C, Liquidus Temperature: 1455 °C, Latent Heat of Fusion: 2.60 x 10<sup>5</sup> J/kg

ทั้งนี้อิเล็กโทรด (C1500) และแผ่นโลหะชิ้นงานเชื่อม (SS304) มีค่าความต้านทานไฟฟ้าของการสัมผัส (Electrical Contact Resistance : ECR) ระหว่างแผ่นโลหะกับแผ่นโลหะและอิเล็กโทรดกับแผ่นโลหะ ดังแสดงในตารางที่ ก.3

ตารางที่ ก.3 ค่าความต้านทานไฟฟ้าของการสัมผัส

Temperature [°C]	Electrical Contact Resistance (ERC) [ $\Omega.m$ ]	
	Sheet - Sheet	Electrode - Sheet
20	$8.39 \times 10^{-8}$	$7.08 \times 10^{-6}$
100	$8.68 \times 10^{-8}$	$7.49 \times 10^{-6}$
200	$8.85 \times 10^{-8}$	$7.72 \times 10^{-6}$
300	$9.37 \times 10^{-8}$	$8.22 \times 10^{-6}$
400	$10.12 \times 10^{-8}$	$9.08 \times 10^{-6}$
550	$11.35 \times 10^{-8}$	$10.95 \times 10^{-6}$
650	$15.31 \times 10^{-8}$	$14.06 \times 10^{-6}$
750	$34.13 \times 10^{-8}$	$31.97 \times 10^{-6}$
900	$39.79 \times 10^{-8}$	$38.22 \times 10^{-6}$
1000	$46.88 \times 10^{-8}$	$45.24 \times 10^{-6}$

## 2. สมบัติวัสดุสำหรับกรณีศึกษา

### 2.1 Tungsten (อิเล็กโทรด)

ทั้งสแตนเป็นโลหะที่มีความแข็งแรง ทนต่อการกัดกร่อน ทนต่อความร้อนสูง มีสภาพการนำไฟฟ้าและความร้อนที่ดี อีกทั้งยังมีความร้อนจำเพาะต่ำ จึงทำให้เป็นที่นิยมนำมาใช้เป็นอิเล็กโทรดในงานเชื่อมและแผ่นระบายความร้อน เนื่องจากอัตราการใช้พลังงานที่ต่ำระหว่างการทำงานที่มีความร้อนเป็นไปได้อย่างรวดเร็วกว่าโลหะชนิดอื่น อย่างไรก็ตามหากทั้งสแตนทำงานที่อุณหภูมิสูงกว่า  $1,370^{\circ}\text{C}$  จะทำให้การตกผลึกของเนื้อโลหะเกิดขึ้น ซึ่งส่งผลให้สมบัติวัสดุเปลี่ยนแปลงไป

จากการศึกษาสมบัติวัสดุของทั้งสแตนมักได้จากการทดสอบ เช่น การทดสอบสะท้อนและการหักเหของรังสีเอกซ์ ของ S.W.H. Yih and C. T. Wang (1979) การทดสอบแรงดึงและแรงกดอัดที่อุณหภูมิต่างกัน (Thermo - Mechanical Test) และการวิเคราะห์ที่โครงสร้างจุลภาคของ Dmitry Terentyev et al. (2015), C.C. Zhu et al. (2016) และ Michail Athanasakis et al. (2019)

เป็นต้น ซึ่งจากการทดสอบดังกล่าว ทำให้ได้สมบัติวัสดุทางกล ทางความร้อนและทางไฟฟ้าของทั้งสแตนดิ่งต่อไปนี้

### 1) สมบัติวัสดุทางกล

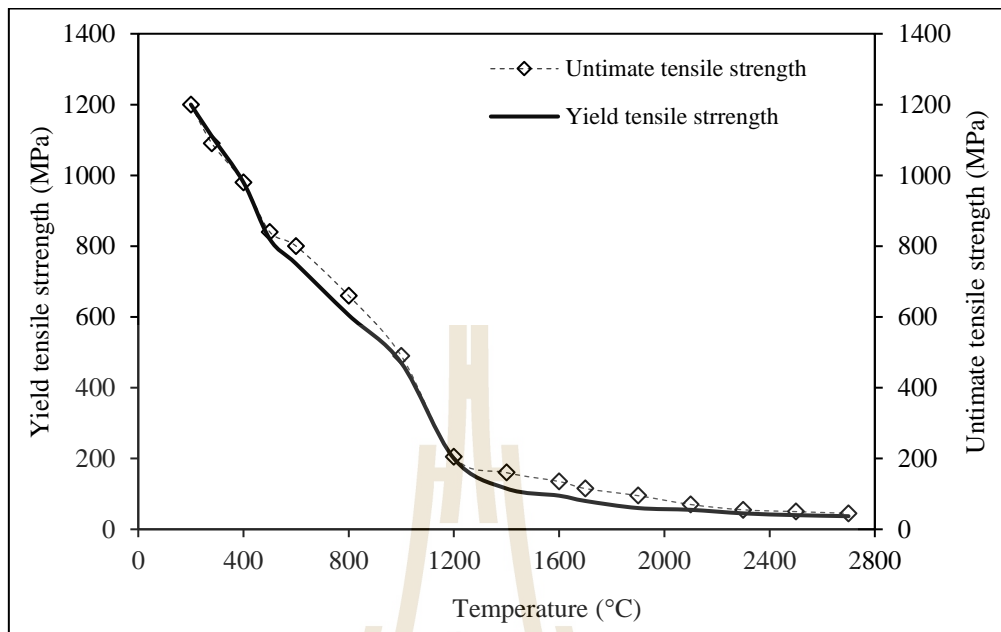
สมบัติวัสดุทางกลเป็นสมบัติวัสดุที่ได้จากการทดสอบแรงดึงและแรงกดอัดของชิ้นทดสอบขนาดหน้า 1 มิลลิเมตร ที่อุณหภูมิต่าง ๆ ด้วยหลักการทดสอบแบบ Thermo-Mechanical โดยมีค่าความหนาแน่นที่อุณหภูมิ 293 K เท่ากับ  $19,262 \text{ kg/m}^3$  ที่อุณหภูมิ 3,695 K (จุดหลอมเหลว) เท่ากับ  $16,740 \text{ kg/m}^3$  และมีค่าสมบัติทางกลดังแสดงในตารางที่ ก.4 และรูปที่ ก.1 ถึงรูปที่ ก.3 ตามลำดับ

ตารางที่ ก.4 สมบัติวัสดุทางกลของทั้งสแตน (Micheal Bauccio, 1993)

Temperature		Young's Modulus	Shear modulus	Bulk modulus	Poisson's ratio
[°C]	[K]	[GPa]	[GPa]	[GPa]	
20	293	410.0	159.0	310.0	0.280
200	473	407.6	157.5	307.2	0.281
400	673	397.2	154.0	304.7	0.283
600	873	386.4	146.7	391.5	0.285
800	1073	379.1	146.5	297.5	0.288
1000	1273	368.7	142.6	293.3	0.291
1200	1473	359.0	138.2	288.8	0.295
1600	1873	338.5	129.1	280.6	0.303
1800	2073	312.8	117.3	270.2	0.310
2000	2273	285.3	101.8	257.5	0.319

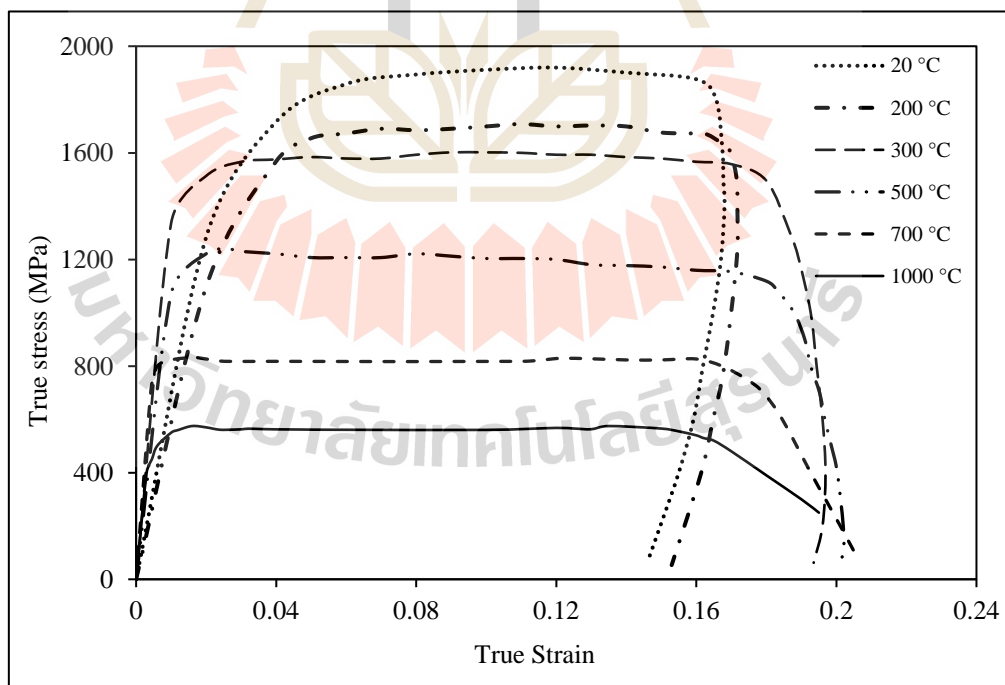
At 293 K; Tensile Strength: 1670 - 3900 MPa, Compressive Strength: 1350 - 3500 MPa, Elastic Limit: 1350 - 3500 MPa, Modulus of Rupture: 1350 - 3500, Endurance Limit: 665 - 1950 MPa

At 1923 K; Modulus of Rupture: 47 MPa

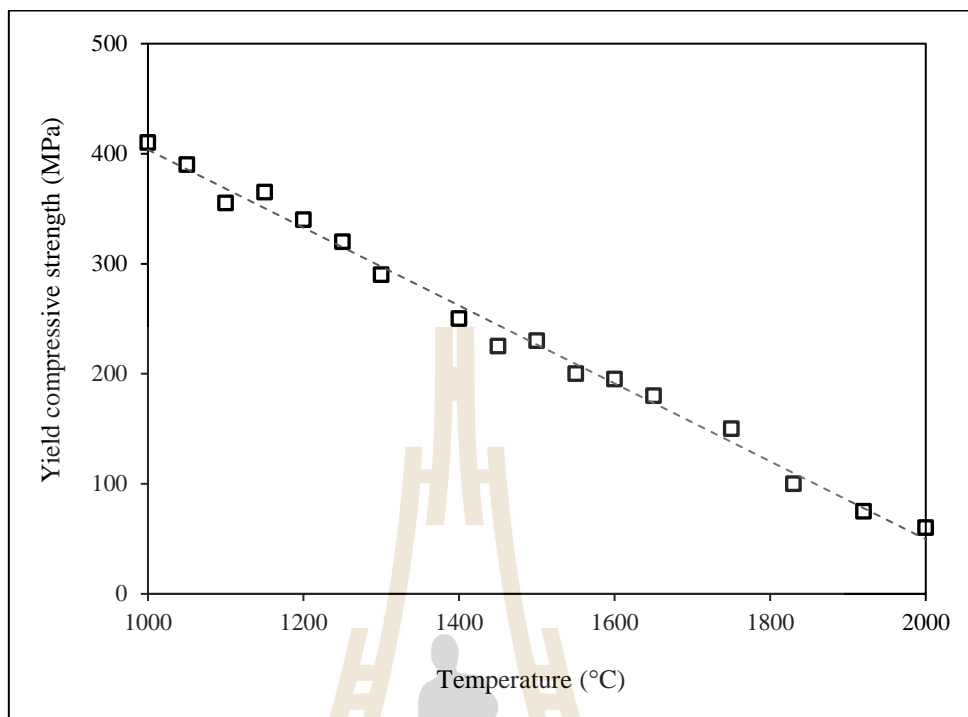


รูปที่ ก.1 Yield Tensile Strength และ Ultimate Tensile Strength ของทังสเตน

(J. R. J. Bennett et al., 2007 และ G.P. Skoro et al., 2012)



รูปที่ ก.2 Stress-Strain จากการทดสอบแรงกดอัดของทังสเตน (C.C. Zhu et al., 2016)



รูปที่ 3.3 Yield Compressive Strength ของทั้งสแตน (Michail Athanasakis et al., 2019)

แม้ว่าทั้งสแตนจะมีโมดูลัสความยืดหยุ่นสูง แต่เป็นวัสดุที่ค่อนข้างเปราะในอุณหภูมิห้อง โดยทั้งสแตนสามารถเปลี่ยนพฤติกรรมของความเสียหายจากวัสดุเปราะเป็นวัสดุเหนียวได้ หากทำงานภายใต้อุณหภูมิที่สูงกว่า 500 °C ทั้งนี้ความสามารถของการเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมของวัสดุจะขึ้นอยู่กับความบริสุทธิ์ของเนื้อโลหะและพฤติกรรมของอุณหภูมิ

## 2) สมบัติวัสดุทางความร้อน

ทั้งสแตนเป็นโลหะที่มีจุดหลอมเหลวสูง (กว่าโลหะชนิดอื่น) มีค่าประมาณ 3,695 K จุดเดือดประมาณ 5,936 K และมีความร้อนแฝงของการหลอมเหลว  $1.95 \times 10^5$  J/kg ทั้งนี้ทั้งสแตนสามารถทำงานได้ที่อุณหภูมิสูงสุดประมาณ 2500 K โดยมีสมบัติทางความร้อนและการแผ่รังสีความร้อนดังแสดงในตารางที่ ก.5 และตารางที่ ก.6 ตามลำดับ

ตารางที่ ก.5 สมบัติวัสดุทาคความร้อนของทั้งสแตน (Erik Lassner and Wolf - Dieter Schubert, 1999)

Temperature [K]	Thermal Conductivity [W/m.K]	Specific Heat [J/kg.K]	Thermal Expansion
			Coefficient [1/K] × 10 <sup>-6</sup>
293	174	132.33	4.49
300	174	132	4.50
400	159	137	4.61
600	137	142	4.75
800	125	145	4.87
1000	118	148	5.02
1200	113	152	5.26
1500	107	157	5.93
2000	100	167	6.42
2500	95	176	7.76
3400	90	218	11.60

ตารางที่ ก.6 การแผ่รังสีและความร้อนของทั้งสแตน (S.W.H. Yih and C. T. Wang, 1979)

Temperature		Radiated heat	Emissivity
[°C]	[K]	[W/m <sup>2</sup> ] × 10 <sup>3</sup>	
3327	3600	3274	0.354
2927	3200	1970	0.341
2527	2800	1082	0.323
2127	2400	533	0.296
1727	2000	226	0.260
1327	1600	77.2	0.207
927	1200	18.7	0.143
527	800	2.38	0.088
127	400	0.042	0.042

### 3) สมบัติวัสดุทางไฟฟ้า

สมบัติวัสดุทางไฟฟ้าเป็นสิ่งกำหนดความสามารถของวัสดุสำหรับการใช้งานทางไฟฟ้า โดยทั้งสแตนต์มีศักย์ไฟฟ้า (Electrode Potential) เท่ากับ 4.5 V และมีสมบัติวัสดุทางไฟฟ้า ได้แก่ ค่าสภาพความต้านทานและการนำไฟฟ้า โดยความต้านทานไฟฟ้าของทั้งสแตนต์ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 0.07 K จะเป็นอิสระจากอุณหภูมิและไม่เป็นอิสระกับอุณหภูมิเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น และค่าปรากฏการณ์เทอร์โมอิเล็กทริก ที่เกิดจากความแตกต่างของความต่างศักย์ไฟฟ้า (Thomson Effect) แสดงดังในตารางที่ ก.7

ตารางที่ ก.7 ค่าความต้านทานไฟฟ้าของทั้งสแตนต์ (L. Abadlia et al., 2014)

Temperature [K]	Electrical Resistivity [ $\Omega \cdot m$ ] $\times 10^{-8}$	Electrical Conductivity [S/m] $\times 10^6$	Thermoelectric Power [V/K] $\times 10^{-9}$
273	4.82	20.75	0.56
293	5.50	18.18	1.44
300	5.54	18.05	1.53
400	8.05	12.42	4.65
500	10.70	9.35	7.58
600	13.35	7.49	10.75
800	18.85	5.31	15.51
1000	24.75	4.04	18.46
1200	30.95	3.23	20.06
1400	37.20	2.69	20.63
1800	44.68	2.24	19.15
2000	55.70	1.80	

Temperature Coefficient of Resistivity: 0.0046 1/K, Electrical Conductivity: 31 % IACS

## 2.2 Copper (เส้นลวดวงจร)

ทองแดงเป็นวัสดุทางวิศวกรรมที่สามารถนำไปใช้งานได้หลากหลาย และเป็นโลหะที่มีความสำคัญในการผลิตอุปกรณ์ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ เพราะสมบัติวัสดุหลายประการที่มีความเหมาะสมต่อการนำไปใช้งาน เช่น เป็นโลหะที่มีความแข็งแรง มีสภาพการนำไฟฟ้าและความร้อนที่ดี ถ่ายเทความร้อนได้ดี และมีความต้านทานการกัดกร่อน อีกทั้งเป็นโลหะที่มี



ความเหนียว เนื้ออ่อน ทำให้สามารถตัดหรือขึ้นรูปได้ง่าย ซึ่งจากสมบัติวัสดุข้างต้นสามารถแสดงรายละเอียดสมบัติวัสดุของทองแดง (เส้นลวดวงจร) ได้ดังแสดงในตารางที่ ก.7



ตารางที่ ก.8 สมบัติวัสดุของทองแดง (Bingying Wu et al., 2018)

Temperature	Density	Young's Modulus	Yield Strength	Ultimate Strength	Poisson's Ratio	Electrical Resistance	Thermal Expansion Coefficient	Specific Heat	Thermal Conductivity
[K]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[GPa]	[MPa]	[MPa]		[ $\Omega \cdot m$ ] $\times 10^{-8}$	[1/K] $\times 10^{-6}$	[J/kg.K]	[W/m.K]
293	8900	125.05	210.74	250.42	0.34	1.72	15.40	383.48	400.68
373		105.72	205.65	230.07		2.25	15.94	394.74	395.20
473		97.13	197.81	204.85		2.91	16.60	405.90	388.35
573		82.51	156.74	162.12		3.57	17.49	414.80	381.50
673		55.09	85.00	93.59		4.24	18.30	422.42	374.65
773		33.82	26.32	70.00		4.90	19.10	429.76	367.80
873		25.36	10.00	30.00		5.56	20.00	437.82	360.96
1000		15.21		16.15		6.45	21.00	451.24	352.00
1073		13.45				6.89	21.60	460.07	347.26
1296		7.52				8.39	23.67	506.00	331.71
1356	7940	7.01							
1473	7846								
1573	7764								

For Thermal; Melting Point: 1,083 °C, Solidus Temperature: 1,083 °C, Liquidus Temperature: 1,048 °C, Latent Heat of Fusion: 2.048 x 10<sup>5</sup> J/kg



ภาคผนวก ข

บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา

## รายชื่อบทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา

สุภาพร ศิริเล็ก, ภัทรพันธ์ ทมาตกรุ่ง, ณัฐฐา จันโส และกิริติ สุกัญจน์ (2557). การวิเคราะห์หัวเชื่อม  
อิเล็กโทรดภายใต้สภาวะการใช้งาน. การประชุมวิชาการเครือข่ายเครื่องกลแห่งประเทศไทย  
ไทย ครั้งที่ 28 (ME-NETT). 15-17 ตุลาคม 2557 จังหวัดขอนแก่น. 686-693.

Suphaphon S., and Keerati S. (2017). Analysis of Thermo-Mechanical Stress on Welding Electrode  
by Using Finite Element Method. **The 8<sup>th</sup> TSME International Conference on  
Mechanical Engineering (ICoME)**. 12-15 December 2017. Bangkok, Thailand. 88-93.



CST-38

## การวิเคราะห์หัวเชื่อมอิเล็กทรอนิกส์ภายใต้สภาวะการใช้งาน Analysis of Bonding Electrode under the Operating Condition

สถาพร ศิริเล็ก, ภัทรพันธ์ ทามาตรเก็ง, ณัฐฐา จันโส และ กิรติ สุลักษณ์\*

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี  
111 ถ.มหาวิทยาลัย ต.สุรนารี อ.เมือง นครราชสีมา 30000

\*ติดต่อ: Email: keerati@sut.ac.th โทร. 044-224410, 044-224235 โทรสาร 044-224613

### บทคัดย่อ

การเชื่อมวงจรของบัตริอิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ ส่วนใหญ่ใช้หัวเชื่อมอิเล็กทรอนิกส์ ทำงานโดยอาศัยการกดปลายหัวเชื่อมลงบนเส้นลวดวงจรซึ่งทำจากทองแดงให้ติดเข้ากับแผ่นไมโครชิป จากนั้นปล่อยพลังงานไฟฟ้าให้ไหลผ่านหัวเชื่อม ผลจากความต้านทานในเนื้อโลหะที่ใช้ทำหัวเชื่อมจะทำให้เกิดความร้อนจนหลอมเส้นลวดวงจรเข้าติดกับแผ่นไมโครชิปดังกล่าว งานวิจัยนี้ศึกษาผลกระทบของแรงกดและความร้อนที่มีต่อการใช้งานและความเสียหายของหัวเชื่อมอิเล็กทรอนิกส์ การศึกษาใช้การจำลองด้วยซอฟต์แวร์ไฟไนต์เอลิเมนต์วิเคราะห์การกระจายความเค้นและความร้อน ผลการจำลองพบความเค้นสูงสุดขนาด 8.2689 MPa เกิดที่บริเวณปลายหัวเชื่อม ดังนั้นการกดอัดในขณะเชื่อมจึงไม่ทำให้หัวเชื่อมเกิดการเสียรูปร่างถาวร จากการวิเคราะห์อุณหภูมิพบว่าค่าสูงสุดเท่ากับ 852.64 °C ที่บริเวณปลายหัวเชื่อม ซึ่งอุณหภูมิดังกล่าวมีค่าสูงกว่าค่าสภาพ Solderability (390 °C) และต่ำกว่าจุดหลอมเหลวของลวดวงจร (1083 °C) ตามลำดับ ดังนั้นการเชื่อมจึงเกิดขึ้นในขณะที่ลวดวงจรเกิดการอ่อนตัวแต่ยังไม่หลอมเหลวจนเสียสภาพ

**คำสำคัญ** หัวเชื่อมอิเล็กทรอนิกส์, บัตริอิเล็กทรอนิกส์, ไฟไนต์เอลิเมนต์, การเชื่อม, ความเค้น

### Abstract

Bonding Electrode uses for electronic cards circuit welding. Bonding Electrode is compressed on copper wire circuit. After that, heat energy from electric energy releasing is used to melt copper wire circuit with electronic chips. This research presents the effects of pressing force and heating load on usability and damage of Bonding Electrode. I used computer simulation by using Finite element Software for static stress and thermal stress distributed. The results of computer simulation found that the maximum stress was about 8.2689 MPa at the end of Bonding Electrode. Therefore, pressing force during welding not occurs fracture and permanent deformation. Moreover, the analysis of temperature found that the maximum temperature was about 852.64 °C and it occurred at the end of Bonding Electrode that was higher than solderability state (390 °C) but it was lower than melting point of copper wire (1083 °C). So, welding occurs while copper wire circuit is weakened but it not loses state to melting.

**Keywords:** Bonding Electrode, Electronic cards, Finite element, Welding, strength

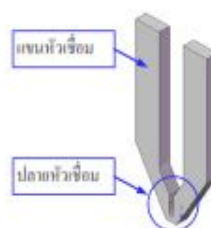
## CST-38

## 1. บทนำ

ปัจจุบันการผลิตอิเล็กทรอนิกส์ อาทิ บัตร สมาร์ทการ์ด บัตรพนักงาน ใช้หลักการ RFID อาศัย การเชื่อมวงจรเส้นลวดทองแดงขนาดเล็กที่ขดอยู่ใน แผ่นวัสดุ ซึ่งทำหน้าที่เป็นสายอากาศ สำหรับส่ง สัญญาณคลื่นความถี่วิทยุ เข้ากับ แผ่นไมโครชิป ซึ่ง ทำหน้าที่เก็บข้อมูล การเชื่อมเป็นกระบวนการที่ต้อง อาศัยความแม่นยำเพื่อให้ได้ชิ้นงานตามเกณฑ์ มาตรฐานที่กำหนด หลักการเชื่อมจะใช้ปลายหัวเชื่อม อิเล็กโทรดกดเส้นลวดวงจรให้ติดกับแผ่นไมโครชิปบน ตำแหน่งที่ต้องการเชื่อม จากนั้นให้กำลังไฟฟ้าแก่หัว เชื่อมเพื่อให้หัวเชื่อมร้อนจนสามารถหลอมเส้นลวดให้ ติดเข้ากับแผ่นไมโครชิป ดังนั้น หัวเชื่อมจึงต้องมี คุณสมบัติและถูกออกแบบเป็นพิเศษเพื่อรองรับภาวะ การรวมจากแรงกดและความร้อนสูงขณะเชื่อมได้ โดยทั่วไปหัวเชื่อมมักทำจากทั้งสแตน เพราะมีความ แข็งแรงและทนความร้อนได้สูง ทั้งสแตนแผ่นหนา ประมาณ 1 มิลลิเมตร จะถูกนำไปตัดให้มีรูปทรงตาม ที่ ออกแบบ โดยพื้นที่หน้าตัดในแต่ละช่วงมีขนาดไม่ เท่ากัน บริเวณปลายมีพื้นที่หน้าตัดเล็กที่สุด เพื่อ ต้องการให้มีความต้านทานไฟฟ้าสูงที่สุด(พื้นที่หน้าตัด เล็กมีความต้านทานไฟฟ้ามากกว่าพื้นที่หน้าตัดใหญ่ ) ดังแสดงในรูปที่ 1 เมื่อปล่อยกระแสและความต่าง ศักย์ไฟฟ้าให้ไหลผ่านหัวเชื่อม กำลังไฟฟ้าขนาด  $P=I^2R$  วัตต์ จะถูกเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อนจาก ผลของความต้านทานในเนื้อวัสดุ ส่งผลให้บริเวณ ปลายหัวเชื่อมซึ่งมีความต้านทานสูง มีความร้อนสูง จากการใช้งานจริงพบว่าหัวเชื่อมที่ใช้เชื่อมประมาณ 2,000 ครั้งจะถูกเปลี่ยนออก เพราะผิวหน้าของปลาย หัวเชื่อมจะสึกกร่อนจนไม่สามารถใช้เชื่อมได้อย่างมี ประสิทธิภาพ

งานวิจัยนี้ศึกษาสภาพการใช้งานของหัวเชื่อม อิเล็กโทรด การศึกษาใช้การจำลองปัญหาเพื่อ วิเคราะห์หาพารามิเตอร์ที่สำคัญของการถ่ายเทความ ร้อนของระบบ ข้อมูลที่ได้จะถูกนำไปป้อนให้กับ ซอฟต์แวร์ด้านไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อวิเคราะห์สภาพ

ความเค้นและการกระจายความร้อนที่เกิดขึ้นบนหัว เชื่อม ผลที่ได้จากการวิเคราะห์ จะถูกนำไป เปรียบเทียบกับชิ้นงานจริง ซึ่ง จะนำไปสู่ความเข้าใจ สภาพการใช้งานของหัวเชื่อมได้ดียิ่งขึ้น อันนำไปสู่การ ออกแบบหัวเชื่อมที่เหมาะสมและมีอายุการใช้งานที่ ยาวนานขึ้น ซึ่งช่วยลดต้นทุนและเพิ่มประสิทธิภาพใน การผลิตได้



รูปที่ 1 รูปทรงของหัวเชื่อมที่จะถูกวิเคราะห์

## 2. การดำเนินงานและผลการดำเนินงาน

## 2.1 คุณสมบัติของวัสดุและคุณลักษณะการใช้งาน ของหัวเชื่อม

ตารางที่ 1 สมบัติของวัสดุและสภาพการใช้งานของหัว เชื่อม

Material	Tungsten
Density	19,000 kg/m <sup>3</sup>
Elastic modulus	1.24×10 <sup>11</sup> N/m <sup>2</sup>
Poisson's ratio	0.28
Shear modulus	1.6×10 <sup>11</sup> N/m <sup>2</sup>
Tensile strength	3.1×10 <sup>11</sup> N/m <sup>2</sup>
Thermal expansion coefficient	5×10 <sup>-6</sup> K
Thermal conductivity	200 W/mK
Specific heat	130 J/kgK
Melting point	3,480°C
Emissivity	0.07
Surface area	201 mm <sup>2</sup>
Electrical power	I <sub>RMS</sub> =173 A, V <sub>RMS</sub> = 0.8 V



## CST-38

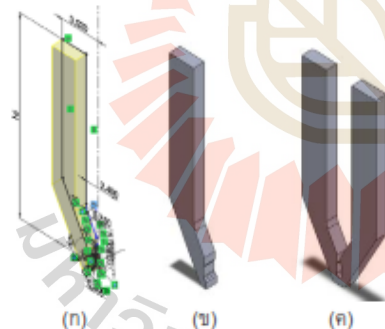
supplied	
Applied load	2 N normal load applied

ตารางที่ 2 สมบัติของวัสดุและสภาพการใช้งานของ  
ลวดวงจร

Material	Grade 1 Self Bonding Polyurethane Enameled $\emptyset$ 0.112 mm Copper Wire "S180"
Melting Point	1083.4 $\pm$ 0.2 $^{\circ}$ C
Yield strength	2.58646 $\times 10^8$ N/m $^2$
Poisson's ratio	0.33
Shear modulus	4.1 $\times 10^{10}$ N/m $^2$
Density	8,900 kg/m $^3$
Thermal Conductivity	390 W/mK
Solderability	390 $\pm$ 5 $^{\circ}$ C with dipping time of 2 sec

## 2.2 การขึ้นรูปแท่งหัวเชื่อม

หัวเชื่อมถูกขึ้นรูปโดยใช้ซอฟต์แวร์คอมพิวเตอร์  
ด้วยขนาดและมีมิติตามจริง



รูปที่ 2 (ก) ขึ้นรูปด้วยขนาดและมีมิติตามจริง  
(ข) โดเมนครึ่งสมมาตร  
(ค) หัวเชื่อมขนาดเต็ม

2.3 ค่าเงื่อนไขสำหรับการวิเคราะห์ความเค้นและ  
อุณหภูมิ

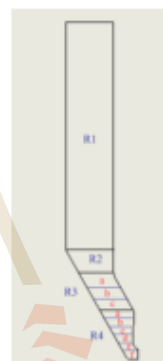
หัวเชื่อมมีพลังงานไฟฟ้าไหลผ่านพื้นที่หน้าตัด  
ของหัวเชื่อมที่มีขนาดไม่เท่ากัน ก่อให้เกิดความร้อน  
จากผลของความต้านทานไฟฟ้าที่เกิดขึ้นกับเนื้อวัสดุด้วย  
ขนาดเท่ากับ

$$P_{in} = I_{in}^2 R \quad (1)$$

โดยค่าความต้านทานไฟฟ้า  $R$  ขึ้นอยู่กับสมบัติของ  
วัสดุ คำนวณได้ดังนี้

$$R = \rho \frac{L}{A} \quad (2)$$

$\rho$  คือ ค่าสภาพความต้านทานไฟฟ้า (Resistivity)  
สำหรับทั้งสแตนมีค่าเท่ากับ  $1.8607 \times 10^{-8} \Omega m$  ที่  
อุณหภูมิ 786 K



รูปที่ 3 แบบจำลองสำหรับคำนวณหาค่าความ  
ต้านทานบนแท่งหัวเชื่อม

จากรูปทรงของหัวเชื่อมสามารถแบ่งส่วนการ  
วิเคราะห์ค่าความต้านทานเป็น 4 ส่วนใหญ่ ต่ออนุกรม  
กันได้ดังแสดงในรูปที่ 3 ทำการ section view เพื่อวัด  
ความสูงและพื้นที่หน้าตัดของแต่ละส่วนที่แบ่ง

ตารางที่ 3 ค่าความต้านทานแต่ละส่วนวิเคราะห์

Position	L (mm)	A(mm $^2$ )	R $\times 10^8$ ( $\Omega$ )
R1	10.80	2.30	87.372
R2	0.90	2.04	8.209
R3a	0.60	1.71	6.548
R3b	0.70	1.63	7.990
R3c	0.74	1.63	8.447



## CST-38

R4a	0.41	1.51	5.052
R4b	0.35	1.26	5.189
R4c	0.34	1.02	6.202
R4d	0.34	0.82	7.715
R4e	0.32	0.76	7.886
R4f	0.50	0.68	13.783
Sum	16.00	15.34	19.408

ค่าความต้านทานรวมทั้งหมดของแท่งหัวเชื่อม (สอง  
แท่งของทรงสมมาตร) คำนวณได้เป็น

$$R_{\text{sum}} = 2(R_1 + R_2 + R_3 + R_4)$$

$$R_{\text{sum}} = 2(1.9408 \times 10^{-4} \Omega) = 3.882 \times 10^{-4} \Omega \quad (3)$$

กำลังไฟฟ้าที่เกิดขึ้นบนหัวเชื่อมจึงมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ

$$P_{\text{sum}} = I_{\text{sum}}^2 R = (173)^2 (3.882 \times 10^{-4} \Omega)$$

$$P_{\text{sum}} = 1.16 \text{ W} \quad (4)$$

ดังนั้นเป็นปริมาณของพลังงานความร้อนเท่ากับ

$$Q = P_{\text{sum}} = 1.16 \text{ W} \quad (5)$$

บนพื้นที่ผิวของแท่งหัวเชื่อมครึ่งสมมาตร ขนาด  
100.5 mm<sup>2</sup> สามารถคำนวณหาฟลักซ์ความร้อนต่อ  
หน่วยพื้นที่ q ได้เป็น

$$q = \frac{Q}{A} = \frac{1.16 \text{ W}}{100.5 \text{ mm}^2} = 11,542.280 \text{ W/m}^2 \quad (6)$$

ฟลักซ์ความร้อนจะไหลผ่านทุกผิวของแท่งหัว  
เชื่อม ยกเว้นผิวหน้าของระนาบสมมาตรที่ปลายหัว  
เชื่อมที่ ฟลักซ์ความร้อนมีค่าเป็นศูนย์ เนื่องจากเกิด  
ความสมดุลในครึ่งไหลของความร้อน ดังนั้นจึงเสมือน  
ว่าไม่มีความร้อนไหลผ่านระนาบนี้  
การถ่ายเทความร้อนออกจากแท่งหัวเชื่อม  
อาศัยการพาความร้อนเป็นหลัก ดังนั้นจึงจำเป็นต้อง  
ทราบค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน เพื่อ  
นำไปคำนวณหาอัตราการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้น  
ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนวิเคราะห์ได้บนพื้นฐาน  
ของสภาพแวดล้อมในห้องเชื่อม ซึ่งมีความเร็วอากาศ

รอบแท่งหัวเชื่อม ซึ่งเกิดจากการฉีดแก๊สอาร์กอนคลุม  
(แก๊สเฉื่อย ทำหน้าที่แทนฟลักซ์สำหรับปกคลุมแนว  
เชื่อม ไม่ให้ออกซิเจนและไนโตรเจนจากบรรยากาศมา  
รวมตัวกับแนวเชื่อมหรือโลหะงานขณะหลอมละลาย  
แท่งหัวเชื่อมขณะทำการเชื่อม ประมาณ  $v = 34.85$   
km/h (9.68 m/s) [1] อุณหภูมิสิ่งแวดล้อมปกติ  $T_{\infty} =$   
27°C = 300 K และอุณหภูมิผิวของแท่งหัวเชื่อม  
 $T_s = 1000^\circ\text{C} = 1273 \text{ K}$  (เป็นอุณหภูมิที่คาดว่าจะเกิดขึ้น  
โดยประมาณการจากจุดหลอมเหลวของทองแดงซึ่งมี  
ค่าเท่ากับ 1083°C ซึ่งใช้ทำวงจรถึงจะถูกเชื่อม) ดังนั้น  
จึงคำนวณหาอุณหภูมิฟิล์ม (Film temperature:  $T_f$ )  
ซึ่งจะถูกนำไปคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน  
ได้ดังนี้

$$T_f = \frac{T_s + T_{\infty}}{2} = \frac{1273 \text{ K} + 300 \text{ K}}{2} = 786.5 \text{ K} \quad (7)$$

ที่อุณหภูมิฟิล์ม 786.5 K ดังกล่าวนำไปสู่การได้ค่า  
สมบัติของแก๊ส [2] ดังแสดงในตารางที่ 4

ตารางที่ 4 สมบัติของแก๊สที่อุณหภูมิฟิล์ม 786.5 K

Specific Heat Capacity ( $c_p$ )	520 J/kg.K
Dynamic Viscosity ( $\mu$ )	$4.6 \times 10^{-5} \text{ kg/m.s}$
Thermal Conductivity ( $k$ )	0.016 W/m.K
Prandtl Number (Pr)	1.495
Density ( $\rho$ )	1.784 kg/m <sup>3</sup>

เมื่อวิเคราะห์ให้เป็นลักษณะการพาความร้อนแบบ  
บังคับจะได้ Reynolds number ( $Re_L$ ) ดังนี้

$$Re_L = \frac{\rho V L_c}{\mu} = \frac{(1.784 \text{ kg/m}^3)(9.68 \text{ m/s})(0.016 \text{ m})}{4.6 \times 10^{-5} \text{ kg/m.s}}$$

$$Re_L = 6006.65 \quad (8)$$

คำนวณหาค่า Nusselt number (Nu) ได้ดังนี้

$$Nu = 0.664 Re_L^{1/2} Pr^{1/4} \quad ; Pr \geq 0.6, Re \leq 10^5$$

$$Nu = 0.664(6006.65)^{1/2} (1.495)^{1/4} = 58.84 \quad (9)$$

**CST-38**

จาก  $Nu = h_L L_c / k$  ดังนั้นสามารถหาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนได้จาก

$$h_L = \frac{Nu k}{L_c} = \frac{58.84(0.016 \text{ W/m.K})}{0.016 \text{ m}}$$

$$h_L = 209.63 \text{ W/m}^2 \text{K} \tag{10}$$

ตารางที่ 5 สรุปค่าเงื่อนไขสำหรับการวิเคราะห์ความร้อนและความเค้น

- Electrical power	$I_{rms} = 173 \text{ A}$ , $V_{rms} = 0.8 \text{ V}$
- Heat transfer coefficient	$h_L = 209.63 \text{ W/m}^2 \text{K}$
- Ambient temperature	$T_{\infty} = 27^\circ \text{C}$ (300 K)
- Applied load	2 N normal force applied at tip of the bonding electrode

**2.4 การวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์**

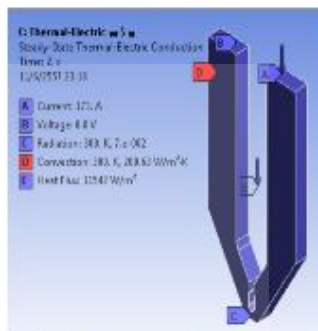
พฤติกรรมความเสียหายที่เกิดขึ้นกับหัวเชื่อมในขณะที่หัวเชื่อมสัมผัสกับเส้นลวดทองแดง เมื่อมีแรงกระทำในแนวตั้ง 2 N ซึ่งการกำหนดเงื่อนไขการวิเคราะห์ แสดงดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 เงื่อนไขการวิเคราะห์ความเสียหาย

การกระจายอุณหภูมิบนแท่งหัวเชื่อม ซึ่งกำหนดเงื่อนไขสำหรับการ วิเคราะห์ แสดงดังรูปที่ 5 โดยให้กระแสไฟฟ้าและความต่างศักย์เป็นเวลา 2 วินาที (เนื่องจากทิศการไหลของกระแสไฟฟ้าและความต่างศักย์ไฟฟ้าต้องมีทิศสวนทางกัน จึงจะทำให้เกิดความ

ต้านทานไฟฟ้า) การพาความร้อนมีค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนเป็นตัวแปรสำคัญ



รูปที่ 5 เงื่อนไขการวิเคราะห์การกระจายอุณหภูมิ

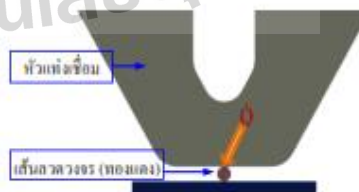
**2.5 การวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนกับลวดวงจร**

จากค่าสมบัติของลวดวงจร ทองแดงในตารางที่ 3 ความสามารถด้านการเชื่อมเมื่อให้ความร้อนต่อเนื่องเป็นเวลา 2 วินาที สามารถประมาณหาอุณหภูมิที่ใช้ในการเชื่อมได้ โดยกำหนดอุณหภูมิของลวดวงจรที่ยังไม่ถูกเชื่อมเป็น  $T_1 = 27^\circ \text{C}$  และอุณหภูมิของลวดวงจรในสภาวะที่ถูกเชื่อมบนเงื่อนไข Solderability เป็น  $T_2 = 390^\circ \text{C}$  ดังนั้นจึงได้  $\Delta T = T_2 - T_1 = 363^\circ \text{C}$  เมื่อความยาวของลวดทองแดง  $L = 1 \text{ mm}$  (เท่ากับความกว้างของหัวเชื่อม) ลักษณะการถ่ายเทความร้อนให้กับลวดเชื่อมแสดงในรูปที่ 6 ดังนั้นจึงได้ว่า

$$A = d \times L = 0.112 \text{ mm}^2 = 0.112 \times 10^{-6} \text{ m}^2$$

$$\Delta L = d = 0.112 \text{ mm} = 0.112 \times 10^{-3} \text{ m}$$

เมื่อ A เป็นพื้นที่หน้าตัดที่ตั้งฉากกับทิศทางการให้ความร้อน และ  $\Delta L$  เป็นความยาวในช่วงการให้ความร้อน



## CST-38

รูปที่ 6 การถ่ายเทความร้อนให้กับลวดวงจ

พลังงานความร้อนคำนวณได้จากสมการการนำความร้อน

ร้อน

$$\dot{Q}_{\text{con}} = kA \frac{\Delta T}{\Delta L}$$

$$\dot{Q}_{\text{con}} = (390 \text{ W/mK})(0.112 \times 10^{-4} \text{ m}^2) \frac{363 \text{ K}}{0.112 \times 10^{-2} \text{ m}}$$

$$\dot{Q}_{\text{con}} = 142 \text{ W} \quad (11)$$

ได้ค่าพลังงานเท่ากับ 142 W (หรือ 142 J ในเวลา 1 วินาที) แต่เนื่องจากรับความร้อนต่อเนื่องนาน 2 วินาที ดังนั้นจึงได้ค่าพลังงาน  $142 \times 2 = 284 \text{ W}$  ซึ่งสามารถนำไปคำนวณอุณหภูมิ ( $\Delta T$ ) ได้จาก

$$248 \text{ W} = (390 \text{ W/mK})(0.112 \times 10^{-4} \text{ m}^2) \frac{\Delta T}{0.112 \times 10^{-2} \text{ m}}$$

$$\Delta T = 762^\circ \text{C}$$

$$\therefore T_2 = \Delta T + T_1 = 762^\circ \text{C} + 27^\circ \text{C} = 799^\circ \text{C} \quad (12)$$

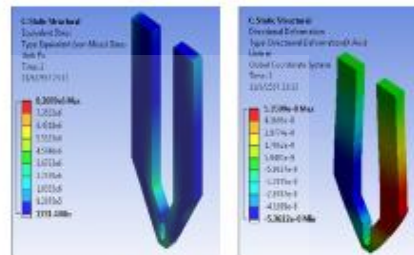
จากแบบจำลองและผลวิเคราะห์จะเห็นว่าความร้อนที่ถ่ายเทให้กับลวดวงจทำให้ลวดวงจรมีอุณหภูมิเพิ่มเป็น  $799^\circ \text{C}$  ซึ่งมากกว่าค่าในสภาพ Solderability ที่  $390^\circ \text{C}$  ประมาณ 2 เท่า แต่น้อยกว่าจุดหลอมเหลวที่  $1083.4^\circ \text{C}$  จึงส่งผลให้ลวดวงจรถูกเชื่อมติดกับแผ่นไมโครชิป ณ ตำแหน่งที่ต้องการเชื่อมโดยที่ยังไม่หลอมละลาย

### 3. ผลการจำลองด้วยซอฟต์แวร์คอมพิวเตอร์ และวิเคราะห์ผล

#### 3.1 ผลวิเคราะห์ความเค้น

ปลายหัวเชื่อมมีแรงกระทำขนาด 2 N เกิดจากแรงกดระหว่างหัวเชื่อมกับลวดวงจรในขณะเชื่อม เงื่อนไขสำหรับการวิเคราะห์แรงแสดงในรูปที่ 4 ขอบด้านบนของขาทั้งเชื่อมยึดแน่นอยู่กับที่ ขอบด้านล่างหรือหน้าสัมผัสมีแรงกระทำ เนื่องจากการกด ขนาด 2 N ในทิศตั้งฉากกับหน้าสัมผัส ผลวิเคราะห์ความเค้น

และลักษณะการเสียรูปของแท่งหัวเชื่อม เป็นดังแสดงในรูปที่ 7



(ก) (ข)

รูปที่ 7 ลักษณะความเค้นและการเสียรูปของแท่งเชื่อม

(ก) การกระจายความเค้น

(ข) การเสียรูปของแท่งหัวเชื่อม

จากรูปที่ 7 จะพบว่าความเค้นสูงสุดเกิดขึ้นที่บริเวณปลายหัวเชื่อมซึ่งบริเวณดังกล่าวมีพื้นที่หน้าตัดน้อยที่สุดและถูกแรงกระทำอันเนื่องมาจากการกดอัดหัวเชื่อมเข้ากับลวดวงจรในขณะเชื่อม ความเค้นสูงสุดมีค่าประมาณ  $8.2689 \times 10^6 \text{ N/m}^2$  ซึ่งน้อยกว่าค่า Yield strength ของวัสดุที่ใช้ทำแท่งหัวเชื่อมทั้งสแตนเลส ซึ่งมีค่า  $3.1 \times 10^{11} \text{ N/m}^2$  ดังนั้นการรับแรงของแท่งหัวเชื่อมอยู่ในช่วงยืดหยุ่นที่ไม่เกิดการแตกหักเสียหาย สำหรับการเสียรูปของหัวเชื่อมในขณะรับแรงเกิดขึ้นมากที่สุดบริเวณคอโค้ง ดังนั้นแท่งหัวเชื่อมจึงไม่ก่อให้เกิดการเสียรูปอย่างถาวรเมื่อใช้งาน

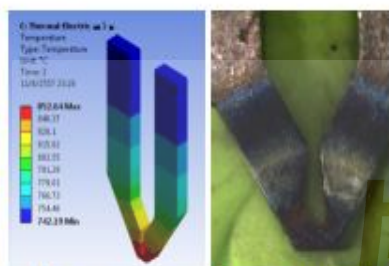
#### 3.2 การวิเคราะห์การกระจายอุณหภูมิ

ผลวิเคราะห์การกระจายอุณหภูมิบนแท่งหัวเชื่อมเมื่อให้กระแสไฟฟ้าขนาด 173 แอมแปร์ และความต่างศักย์ไฟฟ้าขนาด 0.8 โวลต์ เงื่อนไขสำหรับการวิเคราะห์แรงแสดงในรูปที่ 5 ให้กระแสไฟฟ้าที่ขอบด้านบนของขาทั้งเชื่อมข้างขวาแลให้ความต่างศักย์ไฟฟ้าขอบด้านบนขาทั้งเชื่อมข้างซ้าย (กระแสไฟฟ้าที่สกรูไหลสวนทางความต่างศักย์ไฟฟ้า เพื่อให้เกิดความต้านทานไฟฟ้า) การพาความร้อนและการแผ่รังสีความร้อน เกิดขึ้นทุกพื้นผิวของแท่งหัว



## CST-38

เชื่อม ซึ่งเปรียบเทียบกับหัวเชื่อมชิ้นงานจริง ได้ผลดัง  
แสดงในรูปที่ 8



รูปที่ 8 ลักษณะการกระจายอุณหภูมิบนแท่งเชื่อม  
(ก) ทำนายด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์  
(ข) ลักษณะการไหม้ของแท่งหัวเชื่อมที่ผ่าน  
การใช้งานจริง

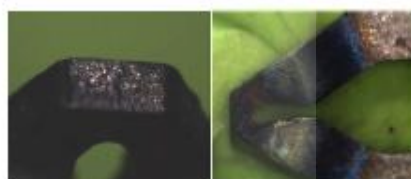
จากรูปที่ 8(ก) พบว่าอุณหภูมิสูงสุดเกิดขึ้นที่  
บริเวณปลายหัวเชื่อม ซึ่งเป็นบริเวณที่พื้นที่หน้าตัด  
เล็กที่สุด ก่อให้เกิดความต้านทานไฟฟ้ามากที่สุด  
ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนรูปพลังงานไฟฟ้าเป็นความ  
ร้อนได้มากที่สุด จากการจำลองผลทางไฟไนต์เอลิ  
เมนต์ พบว่าอุณหภูมิบริเวณดังกล่าวมีค่าประมาณ  
852.64 °C ซึ่งมีค่าสูงกว่าสภาพ Solderability ของลวด  
วงจรถูกเชื่อม ซึ่งมีค่า 390 °C อยู่ประมาณ 462 °C  
แต่ต่ำกว่าจุดหลอมเหลวของลวดวงจร ซึ่งมีค่า  
1083 °C อยู่ประมาณ 230 °C ดังนั้นการเชื่อมเกิดขึ้นได้  
โดยที่ลวดวงจรยังไม่เสียสภาพไปถึงการหลอมเหลว  
เมื่อเปรียบเทียบการกระจายความอุณหภูมิที่เกิดขึ้น  
บนแท่งเชื่อมจริง(รูปที่ 8(ข)) กับผลการจำลองทางไฟ  
ไนต์เอลิเมนต์ ซึ่งพบว่าทั้งสองมีลักษณะการกระจาย  
ของอุณหภูมิที่สอดคล้องกัน

### 3.3 วิเคราะห์ความเสียหายที่เกิดขึ้นบนหัวเชื่อม จริง

เปรียบเทียบกับความเสียหายที่เกิดขึ้นกับแท่งหัว  
เชื่อมระหว่างหัวเชื่อมที่ยังไม่ผ่านการใช้งาน และหัว  
เชื่อมที่ถูกใช้งานมาแล้ว 2,000 ครั้ง จากภาพถ่ายแท่ง  
หัวเชื่อมขยาย 35 เท่า



(ก)



(ข)

รูปที่ 9 ภาพถ่ายขยายแสดงความเสียหายที่เกิดขึ้น  
(ก) หัวเชื่อมที่ยังไม่ผ่านการใช้งาน  
(ข) หัวเชื่อมที่ผ่านการใช้งานแล้ว

จากรูปที่ 9 พบว่าพื้นผิวหน้าของปลายหัวเชื่อมที่  
ผ่านการใช้งานแล้ว (รูปที่ 9(ข)) มีความสึกกร่อนเป็น  
ร่องลึกตลอดหน้าตัดและเป็นไปอย่างไม่สม่ำเสมอ  
ส่วนผิวหน้าปลายหัวเชื่อมที่ยังไม่ผ่านการใช้งาน (รูปที่  
9(ก)) มีความเรียบและสม่ำเสมอมากกว่า หน้าสัมผัสที่  
ไม่เรียบดังกล่าวอาจเกิดจากการกัดกร่อนจากผลของ  
ความร้อนซ้ำๆ ร่วมกับแรงกดกระแทกระหว่างหัวเชื่อม  
กับลวดวงจร นอกจากนี้พบว่าที่บริเวณปลายหัวเชื่อม  
ที่ใช้งานแล้วมีคราบสีดำปกคลุมอยู่เป็นบริเวณกว้าง  
ขณะที่หัวเชื่อมที่ยังไม่ผ่านการใช้งานมีความสะอาด  
และเงาว่า ความดังกล่าวเกิดจากเนื้อโลหะถูกเผา  
ไหม้ด้วยความร้อนสูงและถูกออกซิไดซ์ด้วยออกซิเจน  
ในอากาศเกิดเป็นออกไซด์หรือสนิม สนิมดังกล่าว  
ส่งผลเสียต่อประสิทธิภาพการเชื่อมอย่างมาก ซึ่งปิด  
กั้นการถ่ายเทความร้อนระหว่างผิวหน้าของหัวเชื่อม  
กับลวดวงจร นอกจากนี้ยังก่อให้เกิดความสกปรกต่อ  
ชิ้นงานที่เชื่อมทำให้การเชื่อมติดของลวดวงจรกับแผ่น  
ไมโครชิปไม่ดีเท่าที่ควร

## CST-38

## 4. สรุป

1. ผลการวิเคราะห์ความเค้น พบว่าความเค้นสูงสุดมีค่าประมาณ  $8.2689 \times 10^6 \text{ N/m}^2$  เกิดขึ้นที่บริเวณปลายหัวเชื่อม เป็นผลจากแรงกระทำที่เกิดจากการกดอัดของหน้าตัดปลายหัวเชื่อมกับลวดวงจรถึงจะเชื่อม ค่าความเค้นดังกล่าวต่ำกว่าค่า Yield strength ที่มีค่า  $3.1 \times 10^{11} \text{ N/m}^2$  และยังอยู่ในช่วงยืดหยุ่นสมบูรณ์ ดังนั้นการกดอัดในขณะเชื่อมจึงไม่ก่อให้เกิดความแตกหักเสียหายแก่หัวเชื่อม และไม่ก่อให้เกิดการเสียรูปอย่างถาวร ดังนั้นรูปทรงของหัวเชื่อมที่ใช้อยู่ในปัจจุบันมีความคงทนเพียงพอต่อการรับแรง

2. ผลการวิเคราะห์อุณหภูมิ พบว่าอุณหภูมิสูงสุดมีค่าประมาณ  $852.64^\circ\text{C}$  เกิดขึ้นที่บริเวณปลายแหงหัวเชื่อม ซึ่งค่าอุณหภูมิดังกล่าวมีค่าสูงกว่าสภาพ Solderability ของลวดวงจรถึงถูกเชื่อมประมาณ  $462^\circ\text{C}$  แต่ต่ำกว่าจุดหลอมเหลวของลวดวงจรถึงอยู่ประมาณ  $230^\circ\text{C}$  ดังนั้นการเชื่อมจึงเกิดขึ้นได้ในขณะที่ลวดวงจรถึงเกิดความอ่อนตัว แต่ยังไม่เสียสภาพสู่การหลอมเหลว

3. ผลวิเคราะห์หัวเชื่อมจากภาพถ่ายจริงที่ผ่านการใช้งานมาแล้ว ประมาณ 2000 ครั้ง เปรียบเทียบกับที่ยังไม่ผ่านการใช้งาน พบว่าหัวเชื่อมที่ผ่านการใช้งานแล้วมีการสึกกร่อนที่ผิวหน้าของปลายหัวเชื่อม มีลักษณะเป็นหลุมลึกลงไปในตัววัสดุอย่างกระจัด

กระจาย การสึกกร่อนลักษณะเช่นนี้ไม่น่าเกิดจากการกดอัดในขณะเชื่อม ทั้งนี้เพราะการกดอัดก่อให้เกิดแนวแรงแบบเส้น หากความเสียหายเกิดจากแรงกดจริง รูปแบบการสึกกร่อนควรมีลักษณะเป็นร่องยาวไปตามแนวของเส้นลวด นอกจากนี้หากมองในแง่วัสดุที่ใช้ทำหัวเชื่อม ทั้งสแตนเลสเป็นวัสดุที่แข็งแกร่งคงทนสูงในด้านการรับแรงกดกระแทกในรูปแบบต่างๆ ได้ดี ดังนั้น การสึกกร่อนจึงไม่น่ามีสาเหตุมาจากโครงสร้างและความแข็งแรงของวัสดุที่ใช้ทำหัวเชื่อม แต่น่าจะมีสาเหตุหลักมาจากรับภาวะความร้อนซ้ำๆ และการเกิดออกไซด์เป็นสำคัญ ทั้งนี้เพราะการเกิดออกไซด์เป็นสาเหตุให้เกิดการกัดกร่อนตามมาด้วยเสมอ ส่วนภาวะ

ความร้อนจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่รุนแรงตลอดคาบการเชื่อมมีส่วนทำให้วัสดุเกิดการสึกกร่อนได้เช่นกัน ดังนั้นอาจมีการเพิ่มความคงทนในการรับภาระอุณหภูมิสูงแก่หัวเชื่อม ซึ่งทำได้โดยการปรับปรุงวัสดุที่ใช้ทำหัวเชื่อมด้วยการเพิ่มเติมสารบางอย่างลงไป ขั้นตอนนี้ต้องดำเนินการตั้งแต่กระบวนการผลิตวัสดุที่ใช้ทำหัวเชื่อม ซึ่งต้องอาศัยการวิเคราะห์ทางด้านโลหะวิทยาร่วมกับการทดลอง

## 5. เอกสารอ้างอิง

## 5.1 หนังสือ

- [1] Outdoor Human Comfort and its Assesment : State of the Artb (Paperback), ASCEb (American Society of Civil Engineers); 2003, page10.  
[2] Yunus A. Cengel, "Heat Transfer A Practical Approach", McGraw-Hill; 2<sup>nd</sup> Edition, 2003, page 468.

## 5.2 เว็บไซต์

- [1] [http://www.engineeringtoolbox.com/dry-air-properties-d\\_973.html](http://www.engineeringtoolbox.com/dry-air-properties-d_973.html)  
[2] [http://www.rfid.or.th/webdatas/download/dl\\_34](http://www.rfid.or.th/webdatas/download/dl_34)  
[3] <http://www.geocities.ws/kitalo17/Papers/RFID>



CST0001

## Analysis of thermo-mechanical stress on welding electrode by using finite element method

Suphaphon S.<sup>1,\*</sup>, Keerati S.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> School of Mechanical Engineering, Suranaree University of Technology,  
111 University Avenue, Muang District, Nakhon Ratchasima 30000, Thailand

<sup>2</sup> School of Mechanical Engineering, Suranaree University of Technology,  
111 University Avenue, Muang District, Nakhon Ratchasima 30000, Thailand

\* E-mail: neung-shaaphao@hotmail.com

**Abstract.** RFID tag manufacturing has one of the most important processes: the welding of the circuit to the microchip. In this process, the electrode tip will press the circuit coil on the microchip and then release the electrical power through the welding tip to heat up the welding tip. The heat transfers to the circuit coil and then melted the circuit coil to microchip. The quality of the welding depends on the efficiency of the electrodes used in which the welding tip that have been used for a long time will be less effective due to receiving repeated heat and force, causing a stress on the welding tip. As a result, the end of the weld tip is deformed. This research studied the deformation behavior of welding electrodes under thermal-mechanical stress effect. The study based on simulation with using finite element software (MSC Marc). This leads to improvement for further optimal shape design.

### 1. Introduction

Present the Radio Frequency Identification (RFID) is popular. Because high security in private data and convenient to use. The major part of RFID is Transponder or Tag is act to stores data and sends signals to the data reader. RFID tag manufacturing has one of the most important processes: the welding of the circuit to the microchip. The quality of the welding depends on the efficiency of the electrodes welding used. RFID tag circuit is very small so welds must be small and must have a high precision in welding. The electrode welding tip used to connect the circuit is a micro resistance spot welding. Micro resistance spot welding is a group of micro joining processes [4]. Micro-resistance spot welding has been used to join high temperature microelectronic interconnects [5]. In this process, the electrode tip will press the circuit coil on the microchip and then release the electrical power through the tungsten welding. Effect of electrical resistance in material and change of cross section for electrode welding to heat up. The heat transfers to the circuit coil and then melted the circuit coil to microchip. Based on the principle above, Electrode welding receiving repeated heat and force, causing a stress on the welding tip. As a result, the end of the weld tip is deformed and will be less effective.



## 2. Computational model

### 2.1. Governing equations

The governing equation for calculation of the heat generation per unit volume may be shown as [1]:

$$q = \frac{1}{R} [\nabla \Phi] \quad (1)$$

where  $q$  is the heat generation per unit,  $R$  is the electrical resistivity and  $U$  is the electrical potential.

For stress and strain analysis, since the thermal-elastic-plastic behavior is a highly nonlinear phenomenon, the stress-strain relation is described in incremental form [2]:

$$d\{\sigma\} = [D]d\{\varepsilon\} - \{C\}T \quad (2)$$

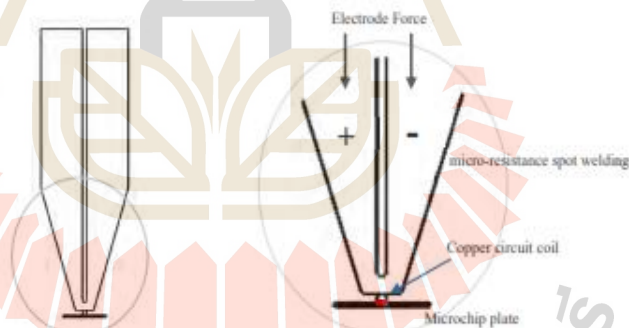
where

$$\{C\} = -D_e \left( \{\alpha\} + \frac{\partial [D_e]^{-1}}{\partial T} \{\sigma\} \right) \quad (3)$$

$[D]$  is the elastic-plastic matrix, in the elastic area  $[D] = [D_e]$ , while in the plastic area  $[D] = [D_e] - [D_p]$ .  $[D_e]$  is the elastic matrix and  $[D_p]$  is the plastic matrix,  $\varepsilon$  is the coefficient of thermal expansion.

### 2.2. Geometry and boundary conditions

Electrode welding is micro resistance spot welding type parallel gap will be melted the top material connect to the material below and the material below should not be damaged.



**Figure 1.** Schematic diagram for the model of micro-resistance spot welding.

In this process, the electrode welding will press the copper circuit coil 0.1 mm to microchip in the desired position to weld. Then applied the electrical current through the welding 170 A to heat up the welding tip can melted copper coil circuit attached to microchip. Detach the electrical current, but still hold the electrode welding on copper circuit coil. When detach is complete and then lift the electrode welding from the weld to move position to welding the next point. As shown in the diagram of the Schematic of the welding schedule. (Figure 2.)



### 3.1. Temperature Distribution

Simulate of temperature distribution on the electrode welding. When applied the electrical current through the welding on time 0.25-0.45 s

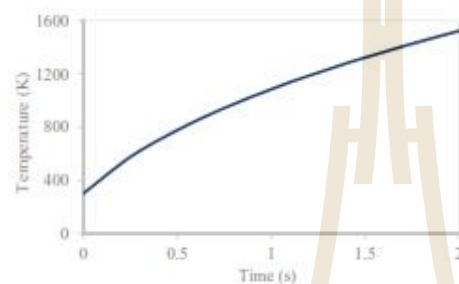


Figure 3. Temperature dependent on time

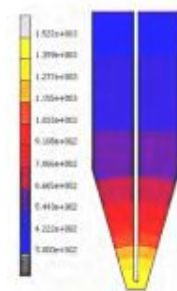


Figure 4. Temperature distribution

From the simulation of temperature distribution on the electrode welding. Found, the temperature varies with the duration of the electrical current time. When time increases the temperature is raised and applied the current to times 0.2 s, the maximum temperature is 1.522 K occurs at the tip of the electrode welding. Because it is a small area the flow resistance of the material is very high. This resulted in higher temperatures than elsewhere in the same period.

### 3.2. Stress, Strain and Displacement

Simulation of behavior for Stress, Strain and Displacement is divided into 3 case to compare the results from each load, whichever type of load results in the most deformed electrode welding. Simulate with Schematic of the welding schedule. (Figure 2.) But show the simulation results at 0.45 s is end of weld time. Because it does not simulate the time on hold time. Since the weld time range is the most load, this will cause the highest stress, strain and displacement.

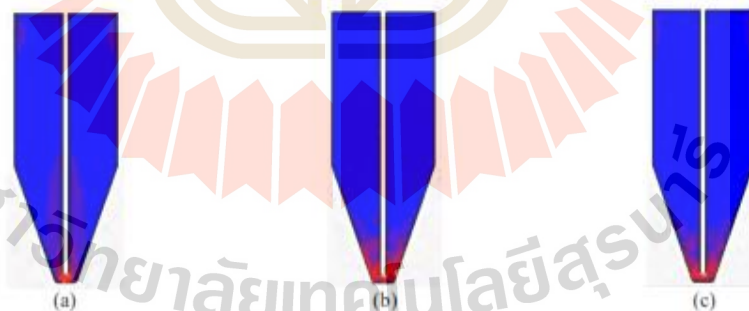
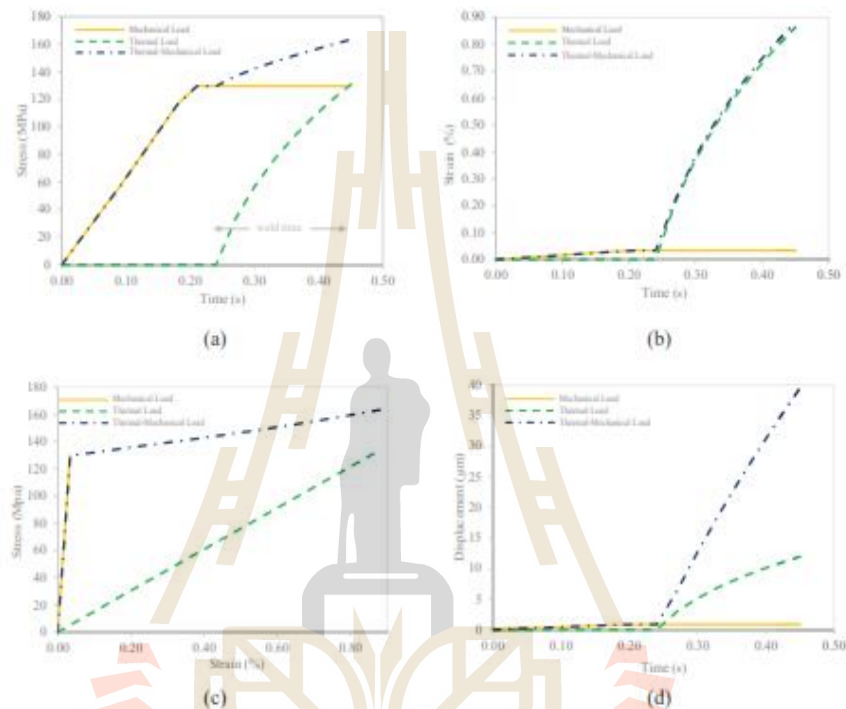


Figure 5. Schematic of stress distribution on the micro-resistance spot welding. (a) Mechanical Load, (b) Thermal Load and (c) Thermal-Mechanical Load

From simulation of stress behavior on 3 case of electrode welding. Found, all 3 cases have the highest stress and there is a dense distribution of stress at the tip of the electrode welding. Because the tip of the

electrode welding is the contact between the wire and microchip, and also the smallest. This area receive the pressure and heat more than other area.



**Figure 6.** A graph the comparison between Mechanical load, Thermal load and Thermal-Mechanical load in welding process.

From (a) Stress, (b) Strain, (c) Stress-Strain and (d) Displacement when applied with force to the current flowing through the welding head (weld time 0.25-0.45s). The result is Thermal-Mechanical load is higher than the other two cases and tends to correspond to Mechanical load and Thermal load. But the effect of the strain for trend line of the thermal-mechanical load is approach to the thermal load, so the effect of the thermal expansion rate on the electrode welding. Displacement values clearly show that case. The thermal-mechanical load is higher than the other load due to electrode welding pressures and heat into action. This causes the weld head to expand laterally, rather than just pressing several times. When the electrode welding has both pressure and expansion at the same time. Affect stress is higher than pressure or heat alone. But the higher stress of this electrode welding is not higher than the Yield Strength of tungsten then electrode welding is not damaged. But the electrode welding has been repeatedly pressure and heat for a long time this will result in electrode welding gradually deformed and eventually lead to damage.

From the graph, compare the effect of load. . Found, (a) Stress of Mechanical Load approximate to Stress of Thermal Load but Thermal-Mechanical Load is higher than other cases. It will gradually increase over the load in both cases during the weld time. As a result, the stress of the Thermal-

Mechanical Load is higher than other ranges. But the stress is still lower than the Yield Strength of tungsten. (b) Strain of thermal load and thermal-mechanical load are very similar, but both loads are higher than mechanical load. Can be seen that in simulate Thermal-Mechanical Load the strain that occurs on all electrode welding. The result from the expansion of heat. (c) Stress-strain of the thermal-mechanical load is higher than that of other loads in weld time. (d) Displacement of Thermal-Mechanical Load is highest. The result is a combination of mechanical and thermal load. When the electrode welding is pressurized, it will expand laterally but it is very small. And when the welding head is heated together the electrode welding is more than doubled. Of course, heat can have a significant effect on the deformation of the electrode welding.

#### 4. Conclusion

Deformation occurs on tip the electrode welding. The result of being heated during weld time because the material is heated, its Yield Strength will decrease with increasing temperature. When applied force on electrode welding is deformed at the tip of the electrode welding at high heated. Then heat causes the welding head to expand and shrink when it is not heated. The RFID Tag welding process is heated and cooled and welding head must expand and shrink for a long time. This results in fatigue in the material and the electrode welding may cause deformation. Therefore, heat is the main factor affecting the deformation of the electrode welding.

#### References

- [1] Hamid E, Mohsen H, Ayob H. 2010 *J. Mater. and Design* 31
- [2] Zhigang H., Il-Soo K., Yuanxun W., Chunzhi L., Chuanyao C. 2007 *J. Mater. Process Technol.* 180 [3] Chang BH, Zhou Y. 2003 *J. Mater Process Technol.* 139(1-3)
- [3] Feulvareh , Robin V, Bergheau JM. 2004 *J. Mater Process Technol.* 153
- [4] S. J. Dong, G. P. Kelkar, and Y. Zhou 2002 *Proc. IEEE Trans. Comp. Hybrids. Manufact. Technol.* vol. 25, pp 355-361
- [5] J. J. Fendrock and L. M. Hong, 1990 *IEEE Trans. Comp. Hybrids. Manufact. Technol.* vol. 13, pp. 376-382.
- [6] Incropera FP, DeWitt DP. 1990 *Introduction to heat transfer. 2nd ed.* (New York: JohnWiley & Sons)

## ประวัติผู้เขียน

นางสาวสุภาพร ศิริเล็ก เกิดเมื่อวันที่ 5 มกราคม พ.ศ. 2535 เริ่มศึกษาชั้นประถมศึกษาปีที่ 1-6 ที่โรงเรียนวัดช้างข้าม จังหวัดจันทบุรี ชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 1-6 ที่โรงเรียนท่าใหม่ “พูลสวัสดิ์ราษฎร์นุกูล” จังหวัดจันทบุรี และสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมเครื่องกล) จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ในปี พ.ศ. 2556 จากนั้นได้ศึกษาต่อในระดับปริญญาโท วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ในปี พ.ศ. 2557 ได้รับทุน OROG จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีและในขณะที่ศึกษาได้ทำหน้าที่เป็นผู้ช่วยสอนในรายวิชาพื้นฐานวิศวกรรมเครื่องกล ปฏิบัติการวิศวกรรมเครื่องกล และเขียนแบบวิศวกรรม

ผลงานวิจัยได้เสนอบทความเข้าร่วมในการประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 28 ประจำปี พ.ศ. 2557 ในหัวข้อ “การวิเคราะห์หัวเชื่อมอิเล็กโทรดภายใต้สภาวะการใช้งาน” และการประชุมวิชาการระดับนานาชาติด้านวิศวกรรมเครื่องกล ครั้งที่ 8 ประจำปี พ.ศ. 2560 ที่ประเทศไทย ในหัวข้อ “Analysis of Thermo-Mechanical Stress on Welding Electrode by using Finite Element Method”

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี