

การศึกษาการลดการบิดตัวระหว่างกระบวนการเชื่อมเหล็กกล้า SS400



นายอริปัตย์ ไชยชาญ

สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2551

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A STUDY ON REDUCTION DISTORTION DURING WELDING OF SS400 STEEL



Mr. Athipat Chaicham

สถาบันวิทยบริการ
A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering Program in Mechanical Engineering

Department of Mechanical Engineering

Faculty of [Engineering]

Chulalongkorn University

Academic Year 2008

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การศึกษาการลดการบิดตัวของกระบวนกรเชื่อม
เหล็กกล้า SS400

โดย

นาย อธิปต์ ไชยชาญ

สาขาวิชา

วิศวกรรมเครื่องกล

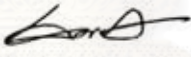
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ก่อเกียรติ บุญชูกุล

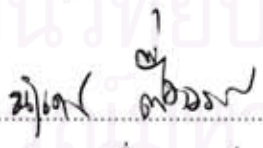
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบัณฑิต


.....คณะบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร. บุญสม เลิศหิรัญวงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


.....ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ฉัตรชัย หงษ์อุเทน)


.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ก่อเกียรติ บุญชูกุล)


.....กรรมการ
(อาจารย์ ดร. ณัฐเดช เพ็ญวรรณวงศ์)


.....กรรมการ
(อาจารย์ ดร. มาวิน สุประดิษฐ์ ณ อุทยา)

4870717721 : MAJOR MECHANICAL ENGINEERING

KEYWORDS : WELDING / DISTORTION / REDUCTION / HEAT FLUX

ATHIPAT CHAICHARN: A STUDY ON REDUCTION DISTORTION DURING
WELDING OF SS400 STEEL. ADVISOR : ASST. PROF. KAUKEART
BOONCHUKOSOL, D.ENG ,83 pp.

This research studied distortion control of SS400 steel by applying heat flux side by side of welding torch during welding process in order to create two uneven temperature distribution to produce an appropriate stress distribution to reduce cool down distortion in the ordinary welding process.

The temperature control technique done by applying heat flux from Air-LPG torch along with welding torch. The result temperature distribution shown one more uneven significant temperature rise up in the area beneath Air-LPG torch. The cool down distortion reduce to 40 percent down from the ordinary welding process. The finite element solution shown good agreement in both temperature analysis and mechanical analysis.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Department : Mechanical Engineering.....

Student's Signature

Athipat Chaicharn
Kaukeart

Field of Study : Mechanical Engineering..

Advisor's Signature

Academic Year : 2008.....

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณครูประยงค์ คำบัวโคตร ซึ่งทำหน้าที่เป็นผู้ดำเนินการเชื่อมชิ้นงานทดลอง
ขอขอบพระคุณครูสุบิน ขันดี เป็นผู้สอนการใช้เครื่องกัดแนวตั้ง ในการขึ้นรูปชิ้นทดลอง
สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร. ก่อเกียรติ บุญชูกุล และคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์
ทุกท่าน ที่ช่วยให้คำแนะนำดีชม ทำให้วิทยานิพนธ์ออกมาสมบูรณ์ยิ่งขึ้น



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฎ
สารบัญภาพ.....	ฏ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ.....	ฅ
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	1
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.4 วิธีการดำเนินงาน โดยสรุป.....	2
1.5 ประโยชน์ที่ได้รับ.....	2
บทที่ 2 ทฤษฎีพื้นฐาน	
21 การกระจายอุณหภูมิของแผ่น โลหะที่ถูกกระทำด้วยฟลักซ์ความร้อนเคลื่อนที่.....	3
22 Heat flow in weldments.....	4
23 กลไกการหดตัวที่เกิดขึ้นในงานเชื่อมเนื่องจากแหล่งความร้อนจากหัวเชื่อม.....	5
บทที่ 3 ทฤษฎีพื้นฐานของการวิเคราะห์ปัญหาด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์	
31 ความสำคัญและที่มาของปัญหา.....	8
31.1 การวิเคราะห์ปัญหาทางความร้อน (Heat Transfer Analysis).....	9
31.2 แบบจำลองของฟลักซ์ความร้อนจากหัวเชื่อม.....	10
31.3 การคำนวณฟลักซ์ความร้อนบนพื้นผิวเอลิเมนต์จากหัวเชื่อม.....	12

31.4	แบบจำลองของฟลักซ์ความร้อนจากหัวเผา Air-LPG	14
31.5	การคำนวณฟลักซ์ความร้อนบนพื้นผิวอิเล็กเมนต์จากหัวเผาควบคุม อุณหภูมิ.....	16
31.6	การวิเคราะห์ปัญหาการนำความร้อนบนชิ้นทดลองด้วยโปรแกรม ไฟไนต์เอลิเมนต์สำเร็จรูป.....	16
32	การวิเคราะห์ปัญหาทางกลศาสตร์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์.....	18
321	การวิเคราะห์ปัญหาทางไฟไนต์เอลิเมนต์เมื่อวัสดุยังไม่เกิด การครากตัว(linear-elastic theory).....	19
322	การวิเคราะห์ปัญหาทางไฟไนต์เอลิเมนต์เมื่อวัสดุเกิดการครากตัว (non-linear theory).....	20
323	การวิเคราะห์ปัญหาทางกลศาสตร์โดยใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ สำเร็จรูป.....	22
บทที่ 4 การดำเนินการทดลอง		
41	อุปกรณ์การทดลอง.....	25
42	กระบวนการเชื่อมที่ใช้ในการทดลอง.....	25
43	การวัดการหดตัวตามขวางของชิ้นงานเชื่อม.....	26
44	การควบคุมการกระจายอุณหภูมิขณะทำการเชื่อม.....	29
45	การบันทึกการกระจายอุณหภูมิและการติดตั้ง Thermocouple ที่ผิวชิ้นงาน.....	31
46	ขั้นตอนการดำเนินการทดลองโดยสรุป.....	32
บทที่ 5 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง		
51	การกระจายอุณหภูมิเมื่อทำการเชื่อมด้วยกระบวนการเชื่อมแบบปกติ.....	33
51.1	ผลการกระจายอุณหภูมิบริเวณแนวเชื่อม.....	33
51.2	ผลการวิเคราะห์กระจายอุณหภูมิบริเวณแนวเชื่อมด้วยโปรแกรม ไฟไนต์เอลิเมนต์สำเร็จรูป.....	35
52	การหดตัวตามแนวขวางเมื่อชิ้นงานเย็นตัวลงสู่อุณหภูมิห้องเมื่อทำการ เชื่อมด้วยกระบวนการเชื่อมแบบปกติ.....	39
52.1	ค่าการหดตัวตามแนวขวางเมื่อชิ้นงานเย็นตัวลงสู่อุณหภูมิห้อง.....	39

5.22 ผลการวิเคราะห์การหัดตัวตามขวางด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์สำเร็จรูป.....	41
5.3 ความเค้นที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการเชื่อมโดยการควบคุมการกระจายอุณหภูมิ.....	42
5.31 ผลการวิเคราะห์การกระจายความเค้นจากฮีทอินพุตจากหัวเชื่อม.....	42
5.32 การประมาณขนาดของ heat input จากหัวเผาควบคุมการกระจายอุณหภูมิ.....	43
5.4 การกระจายอุณหภูมิเมื่อทำการเชื่อมพร้อมหัวเผาควบคุมอุณหภูมิ.....	47
5.41 ผลการกระจายอุณหภูมิบริเวณแนวเชื่อมและบริเวณที่มีการควบคุมการกระจายอุณหภูมิด้วยหัวเผา Air-LPG	47
5.42 ผลการคำนวณกระจายอุณหภูมิบริเวณแนวเชื่อมและบริเวณที่มีการควบคุมการกระจายอุณหภูมิด้วยหัวเผา Air-LPG ด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์สำเร็จรูป.....	49
5.5 การหัดตัวตามแนวขวางเมื่อชิ้นงานเย็นตัวลงสู่อุณหภูมิห้องเมื่อทำการเชื่อมด้วยกระบวนการเชื่อมพร้อมหัวเผาควบคุมอุณหภูมิ.....	52
5.51 ค่าการหัดตัวตามแนวขวางเมื่อชิ้นงานเย็นตัวลงสู่อุณหภูมิห้องของกระบวนการเชื่อมพร้อมหัวเผาควบคุมอุณหภูมิ.....	52
5.52 ผลการวิเคราะห์การหัดตัวตามขวางด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์สำเร็จรูป.....	53
5.6 แนวโน้มความกว้างของขอบเขตการครากตัว.....	53
บทที่ 6 สรุปผลการวิจัย และวิจารณ์ผลการทดลอง	
6.1 สรุปผลการวิจัย.....	54
6.2 ข้อเสนอแนะ.....	55
รายการอ้างอิง.....	56
ภาคผนวก.....	57
ภาคผนวก ก. การกระจายอุณหภูมิและค่าการหัดตัวตามขวางของชิ้นงาน.....	58

ภาคผนวก ข. การกระจายอุณหภูมิระหว่างกระบวนการเชื่อมแบบปกติและ กระบวนการเชื่อมแบบควบคุมการกระจายอุณหภูมิกำหนดด้วย โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์สำเร็จรูป.....	68
ภาคผนวก ค. ผลการคำนวณการเคลื่อนตัวของเนื้อโลหะระหว่างกระบวนการ เชื่อมแบบปกติด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์สำเร็จรูป.....	72
ภาคผนวก ง. คุณสมบัติทางความร้อนและทางกลที่เปลี่ยนแปลงตาม อุณหภูมิของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ SS 400.....	74
ภาคผนวก จ. Ansys Command file.....	77
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	83

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
5.1	ค่าการเคลื่อนตัวของชิ้นงานที่บริเวณแนวเชื่อม.....	40
5.2	ค่าการเคลื่อนตัวของชิ้นงานที่บริเวณแนวเชื่อมจากผลการคำนวณด้วย โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์สำเร็จรูป.....	41
5.3	ค่าการเคลื่อนตัวของชิ้นงานที่บริเวณแนวเชื่อมทำการเชื่อมพร้อมหัวเผา ควบคุมการกระจายอุณหภูมิ.....	52
5.4	ผลการคำนวณค่าการเคลื่อนตัวของชิ้นงานเชื่อมพร้อมหัวเผาควบคุมการ กระจายอุณหภูมิด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์สำเร็จรูป.....	53
ก.1	ค่าการเคลื่อนตัวของชิ้นงานที่บริเวณแนวเชื่อมชิ้นงานที่ 1(NH-01).....	61
ก.2	ค่าการเคลื่อนตัวของชิ้นงานที่บริเวณแนวเชื่อมชิ้นงานที่ 2(NH-02).....	61
ก.3	ค่าการเคลื่อนตัวของชิ้นงานที่บริเวณแนวเชื่อมชิ้นงานที่ 3(NH-03).....	62
ก.4	ค่าการเคลื่อนตัวของชิ้นงานที่บริเวณแนวเชื่อมชิ้นงานที่ 1(H-01).....	66
ก.5	ค่าการเคลื่อนตัวของชิ้นงานที่บริเวณแนวเชื่อมชิ้นงานที่ 2(H-02).....	66
ก.6	ค่าการเคลื่อนตัวของชิ้นงานที่บริเวณแนวเชื่อมชิ้นงานที่ 3(H-03).....	67
ง.1	ค่าการคุณสมบัติการนำความร้อนของเหล็กกล้า SS400 ที่เปลี่ยนแปลง ตามอุณหภูมิ.....	74
ง.2	ค่าการคุณสมบัติการนำความร้อนของเหล็กกล้า SS400 ที่เปลี่ยนแปลง ตามอุณหภูมิ.....	74
ง.3	ค่าการคุณสมบัติความจุความร้อนจำเพาะของเหล็กกล้า SS400 ที่เปลี่ยนแปลง ตามอุณหภูมิ.....	74
ง.4	ค่าการคุณสมบัติความจุความร้อนจำเพาะของเหล็กกล้า SS400 ที่เปลี่ยนแปลง ตามอุณหภูมิ.....	75
ง.5	ค่าการคุณสมบัติโมดูลัสยืดหยุ่นของเหล็กกล้า SS400 ที่เปลี่ยนแปลง ตามอุณหภูมิ.....	75
ง.6	ค่าการคุณสมบัติโมดูลัสยืดหยุ่นของเหล็กกล้า SS400 ที่เปลี่ยนแปลง ตามอุณหภูมิ.....	75
ง.7	คุณสมบัติ Bilinear ของเหล็กกล้า SS400 ที่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ.....	76
ง.8	คุณสมบัติ Bilinear ของเหล็กกล้า SS400 ที่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ.....	76

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
2.1	Schematic diagramme ของการกระจายของอุณหภูมิบนพื้นผิวชิ้นงานเชื่อม ซึ่งถูกกระทำโดยฟลักซ์ความร้อนแบบเคลื่อนที่.....	3
2.2	ผลจำลองการกระจายอุณหภูมิ เมื่อฟลักซ์ความร้อนแบบ Concentrated เคลื่อนที่เหนือพื้นผิว.....	4
2.3	แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ การกระจายอุณหภูมิบนชิ้นงาน ซึ่งมีภาระความร้อนเคลื่อนที่เหนือชิ้นงาน.....	5
2.4	ภาพตัดสมมาตรตามขวางเฉพาะเนื้อ โลหะที่ตำแหน่งตามความยาวเดียวกันกับ หัวเชื่อม.....	6
2.5	(ก) ก่อนหัวเชื่อมวิ่งผ่าน.....	6
2.5	(ข) ขณะหัวเชื่อมวิ่งผ่าน.....	7
2.5	(ค) หัวเชื่อมเคลื่อนที่ผ่านไปแล้ว.....	7
3.1	หัวเชื่อมเดินทางผ่านแนวเชื่อม.....	10
3.2	ฟลักซ์ความร้อน กระจายตัวแบบเกาส์ เคลื่อนที่ไปตามแนวเชื่อมในทิศทาง x	11
3.3	หัวเชื่อมและหัวเผาควบคุมอุณหภูมิเดินทางตามแนวเชื่อม.....	14
3.4	configuration ของหัวเผาที่ใช้ในการทดลอง ลูกศรแสดงการไหลของของผสม ระหว่าง LPG กับอากาศ.....	15
3.5	ฟลักซ์ความร้อน กระจายตัวสม่ำเสมอ เคลื่อนที่ไปตามแนวเชื่อม ในทิศทาง x	15
3.6	แสดง mesh ของไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ใช้ในการวิเคราะห์กระบวนการ นำความร้อน.....	18
3.7	mesh ของไฟไนต์เอลิเมนต์และค่าขอบ.....	23
4.1	เครื่องเชื่อมที่ใช้ในการทดลอง.....	26
4.2	schematic ตำแหน่งของเส้นจีดที่ใช้ศึกษาการหดตัวตามขวางของชิ้นงานเชื่อม..	27
4.3	ภาพขยายแสดงระยะห่างของ ตำแหน่งของเส้นจีดที่ใช้ศึกษาการหดตัวตามขวางของชิ้นงานเชื่อม.....	27
4.4	การจับยึดชิ้นงานและกล้องวัดระยะการหดตัวตามขวางติดตั้งบน linear	28
4.5	เส้นจีดที่ใช้ศึกษาการหดตัวตามขวางของชิ้นงานเชื่อม.....	28

ภาพที่		หน้า
46	กล้องส่องกำลังขยาย 20 เท่า ติดตั้งบนแกนของ digital vernier caliper	29
47	หัวเผาควบคุมอุณหภูมิแบบ Air-LPG ที่ใช้ในการทดลอง.....	30
48	ลักษณะของเปลวไฟที่ใช้ในการควบคุมอุณหภูมิจนขณะดำเนินการเชื่อม.....	30
49	เครื่องชั่งดิจิตอลวัดความเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของถังแก๊ส LPG เพื่อกำหนดอัตรา การไหลของแก๊ส.....	31
410	ดาต้าล็อกเกอร์ที่ใช้บันทึกการกระจายอุณหภูมิของชิ้นทดลอง.....	31
411	การติดตั้ง thermocouple บริเวณแนวเชื่อมและแนว heating line	32
51	กระบวนการเชื่อมแบบปกติ.....	33
52	แนวเชื่อมพร้อมเส้นอ้างอิงที่ขีดไว้ก่อนทำการเชื่อมโดยใช้ Heigh Gauge	34
53	การกระจายอุณหภูมิบริเวณแนวเชื่อมของกระบวนการเชื่อมแบบปกติ.....	35
54	การกระจายอุณหภูมิบริเวณแนวเชื่อมจากแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ สำเร็จรูป.....	36
55	การกระจายอุณหภูมิบริเวณแนวเชื่อม (5 มิลลิเมตร).....	37
56	การกระจายอุณหภูมิบริเวณแนวเชื่อม (10 มิลลิเมตร).....	37
57	การกระจายอุณหภูมิบริเวณแนวเชื่อม (15 มิลลิเมตร).....	38
58	การกระจายอุณหภูมิบริเวณภายในชิ้นงาน (55 มิลลิเมตร).....	39
59	ค่าหัดตัวตามขวางตามความยาวแนวเชื่อม ที่ตำแหน่ง 5 มิลลิเมตร.....	40
510	การกระจายความเค้นจากฮีทอินพุตเดี่ยวจากหัวเชื่อมขนาด 540 วัตต์.....	42
511	การเปลี่ยนแปลงความเครียดรวมของเนื้อโลหะบริเวณแนวเชื่อม ในกระบวนการเชื่อมแบบปกติ.....	43
512	schematic diagram ของบริเวณความเค้นตามแนวเชื่อมและความเค้น Octa hedral	44
513	การกระจายความเค้นจากฮีทอินพุตจากหัวเชื่อมขนาด 540 วัตต์และ หัวเผาขนาด 95 วัตต์.....	44
514	การเปลี่ยนแปลงความเครียดรวมของเนื้อโลหะบริเวณแนวเชื่อม ในกระบวนการเชื่อมแบบควบคุมอุณหภูมิ.....	45
515	การกระจายความเค้นจากฮีทอินพุตจากหัวเชื่อมขนาด 540 วัตต์และ หัวเผาขนาด 180 วัตต์.....	46
516	การเปลี่ยนแปลงความเครียดรวมของเนื้อโลหะบริเวณแนวเชื่อม ในกระบวนการเชื่อมแบบควบคุมอุณหภูมิเมื่อใส่ฮีทอินพุตขนาด 180 วัตต์.....	46

ภาพที่		หน้า
5.17	กระบวนการเชื่อมควบคุมการกระจายอุณหภูมิ.....	47
5.18	แสดงการกระจายอุณหภูมิบริเวณแนวเชื่อมด้วยกระบวนการเชื่อมพร้อมหัวเผาควบคุมอุณหภูมิ.....	48
5.19	การกระจายอุณหภูมิบริเวณแนวเชื่อมเมื่อเชื่อมพร้อมหัวเผาควบคุมการกระจายอุณหภูมิกำหนดด้วยแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์สำเร็จรูป.....	49
5.20	การกระจายอุณหภูมิบริเวณแนวเชื่อมของชิ้นงานควบคุมอุณหภูมิ(5 มิลลิเมตร).....	50
5.21	การกระจายอุณหภูมิบริเวณแนวเชื่อมของชิ้นงานควบคุมอุณหภูมิ(10 มิลลิเมตร).....	50
5.22	การกระจายอุณหภูมิบริเวณแนวเชื่อมของชิ้นงานควบคุมอุณหภูมิ(15 มิลลิเมตร).....	51
5.23	การกระจายอุณหภูมิภายในชิ้นงานของชิ้นงานควบคุมอุณหภูมิ(55 มิลลิเมตร)....	51
ก. 1	การกระจายอุณหภูมิของชิ้นทดลองของกระบวนการเชื่อมปกติที่ 1.....	58
ก. 2	การกระจายอุณหภูมิของชิ้นทดลองของกระบวนการเชื่อมปกติที่ 2.....	59
ก. 3	การกระจายอุณหภูมิของชิ้นทดลองของกระบวนการเชื่อมปกติที่ 3.....	60
ก. 4	การกระจายอุณหภูมิของชิ้นทดลองของกระบวนการเชื่อมควบคุมอุณหภูมิชิ้นที่ 1 (H-01).....	63
ก. 5	การกระจายอุณหภูมิของชิ้นทดลองของกระบวนการเชื่อมควบคุมอุณหภูมิชิ้นที่ 2(H-02).....	64
ก. 6	การกระจายอุณหภูมิของชิ้นทดลองของกระบวนการเชื่อมควบคุมอุณหภูมิชิ้นที่ 3(H-03).....	65
ข. 1	การกระจายอุณหภูมิของกระบวนการเชื่อมแบบปกติบริเวณแนวเชื่อม.....	68
ข. 2	การกระจายอุณหภูมิของกระบวนการเชื่อมแบบปกติภายในชิ้นงาน.....	69
ข. 3	การกระจายอุณหภูมิของกระบวนการเชื่อมควบคุมอุณหภูมิบริเวณแนวเชื่อม.....	70
ข. 4	การกระจายอุณหภูมิของกระบวนการเชื่อมควบคุมอุณหภูมิตำแหน่งควบคุมอุณหภูมิ.....	71
ค. 1	การกระจายอุณหภูมิของกระบวนการเชื่อมควบคุมอุณหภูมิบริเวณแนวเชื่อม.....	72
ค. 2	การกระจายอุณหภูมิของกระบวนการเชื่อมควบคุมอุณหภูมิภายในชิ้นงาน.....	73

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

สัญลักษณ์	คำอธิบาย
e_{total}	ความเครียดรวม
$e_{elastic}$	ความเครียดยืดหยุ่น
$e_{plastic}$	ความเครียดพลาสติก
a	สัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อน
ΔT	ผลต่างของอุณหภูมิ
r	ความหนาแน่นของวัสดุ
c	ค่าความร้อนจำเพาะ
k	ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน
q	ค่าความร้อนที่เกิดขึ้นในเนื้อวัสดุต่อปริมาตร
Q	พลังงานความร้อนที่ถูกส่งผ่านจากวัตถุไปสู่สิ่งแวดล้อม
h	สัมประสิทธิ์การพาความร้อน
A	พื้นที่ผิวของวัตถุ
T_{∞}	อุณหภูมิของของไหล
T_w	อุณหภูมิของวัตถุ
q''_{rad}	ฟลักซ์ความร้อนจากการแผ่รังสี
e	ค่าอิมิตซีทิฟวิตี้
s_s	ค่าคงที่สเตฟัน-โบลทซ์มัน
T	อุณหภูมิของวัสดุ
T_{sur}	อุณหภูมิของสิ่งแวดล้อม
$[C(T)]$	เมตริกซ์ค่าความร้อนเพาะ
$[K(T)]$	เมตริกซ์การนำความร้อน
$\{T\}$	เวกเตอร์อุณหภูมิที่จุดต่อ
$\{\dot{T}\}$ </td <td>เวกเตอร์อนุพันธ์ของอุณหภูมิที่จุดต่อ</td>	เวกเตอร์อนุพันธ์ของอุณหภูมิที่จุดต่อ
q	การกระจายความร้อน

q_{\max}	ค่าฟลักซ์ความร้อนที่ตำแหน่ง
r	ระยะทางตามแนวรัศมีซึ่งภาระทาง
	ความร้อน 9% กระทำกับพื้นผิว
C	width factor
Q_{total}	ปริมาณความร้อนสุทธิที่ได้จาก
	ปลายหัวเชื่อม
h_{arc}	ประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อน
	ของกระบวนการเชื่อมมิก
V	ความต่างศักย์ที่เกิดขึ้นระหว่าง
	ปลายอิเล็กโตรดกับชิ้นงานเชื่อม
I	กระแสที่ใช้ในกระบวนการเชื่อม
$F \nabla$	ตัวดำเนินการดิฟเฟอเรนเชียล
	แรงเนื่องมาจากน้ำหนักของวัตถุ
K	เมตริกซ์ความแข็งแกร่ง
$\{u\}$	เวกเตอร์ของค่าการเคลื่อนตัว
$\{F^a\}$	เวกเตอร์ของแรงภายนอกที่มา
	กระทำ
$\{s\}$	เมตริกซ์ความเค้น
$[D]$	เมตริกซ์ความแข็งแกร่ง
$\{e^{el}\}$	เมตริกซ์ความเครียดยืดหยุ่น
T_{ref}	อุณหภูมิเริ่มต้น
$\{R\}$	เวกเตอร์ของแรงภายใน
$[K_i^T]$	เมตริกซ์เส้นสัมผัส
$\{\Delta u_i\}$	ผลต่างของการประมาณค่าการ
	เคลื่อนตัว
$O(\{\Delta u_i\})^2$	ฟังก์ชันเศษตกค้าง
$\{F_i^r\}$	เวกเตอร์ของแรงกระทำภายใน
$\ \ $	Vector Norm
e_u, e_R	ค่า Tolerance
u_{ref}, R_{ref}	ค่า Reference Value

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของวิทยานิพนธ์

ปัญหาที่สำคัญของการเชื่อมเหล็กกล้าแผ่นบาง คือ การบิดตัวที่เกิดขึ้นกับชิ้นงานเชื่อม หลังจากเสร็จสิ้นกระบวนการเชื่อมแล้ว จึงต้องทำ **Post Heat treatment** ตามความยาวแนวเชื่อม พร้อมกับดึงชิ้นงานตามแนวเชื่อมคืนกลับด้วยรอกโซ่ หรืออาจจะต้องพอกสีทับลงไป เพื่อปกปิดบริเวณรอบตะเข็บแนวเชื่อมที่ขูดตัวลงไป ซึ่งสิ้นเปลืองเวลามาก

ในกระบวนการเชื่อมฟลักซ์ความร้อนแบบเคลื่อนที่จากหัวเชื่อมกระทำบนพื้นผิวโลหะตามแนวเชื่อม การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิแบบไม่สม่ำเสมอที่เกิดขึ้นทำให้เนื้อโลหะบริเวณแนวเชื่อมขยายตัวอย่างมากจนเกิดการร้าวแตก ซึ่งเป็นสาเหตุของการบิดตัว ดังนั้น เทคนิคในการเชื่อมแบบใหม่ เช่น **Friction stir welding** หรือเทคนิคการเชื่อมแบบการแกว่งลำแสงเลเซอร์ จึงได้ถูกพัฒนาขึ้นมา ซึ่งทั้งสองเทคนิคจะเว้นช่องว่างระหว่างชิ้นงาน (**gap**) หลังจากนั้นจึงทำให้เนื้อโลหะบริเวณขอบรอยต่อไหลเข้าหากันโดยไม่ใช้ลวดเชื่อม โลหะไหลเข้าหากันโดยไม่ดันชิ้นงาน และโดยเฉพาะเทคนิคการเชื่อมแบบ **friction stir** มี **temperature gradient** ต่ำมาก ดังนั้น จึงเป็นเทคนิคที่สามารถลดการบิดตัวได้ แบบตรงไปตรงมา แต่เป็นเทคนิคซึ่งผู้ผลิตภายในประเทศยังไม่มีความพร้อม

จากความรู้พื้นฐานทาง **thermal stress** ความเค้นของโลหะที่ได้รับความร้อน ขึ้นอยู่กับ **temperature history** โดยเฉพาะบริเวณที่มี **temperature gradient** สูง [1] ดังนั้น ถ้าสามารถควบคุมรูปแบบของการกระจายของอุณหภูมิให้เหมาะสม จะควบคุมการร้าวแตกของชิ้นงานได้

1.1 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์

ศึกษาวิธีการควบคุมการกระจายอุณหภูมิที่บริเวณแนวเชื่อม เพื่อควบคุมการบิดตัวของชิ้นงาน

1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์

1. ศึกษากระบวนการควบคุมการกระจายอุณหภูมิขณะทำการเชื่อมเหล็กกล้าแผ่นบาง SS400 เพื่อควบคุมการบิดตัวของชิ้นงาน โดยการทดลอง
2. ศึกษาการเคลื่อนตัวของโลหะบริเวณแนวเชื่อมของชิ้นทดลองกับแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์สำเร็จรูป

1.4 วิธีการดำเนินงานโดยสรุป

1. ศึกษาการกระจายอุณหภูมิและการเคลื่อนตัวของชิ้นงานเมื่อเย็นตัวลง บริเวณแนวเชื่อม ซึ่งเป็นบริเวณที่มีการครากตัว
2. ศึกษาคุณลักษณะการกระจายความร้อนของหัวเผา ที่จะใช้ควบคุมการกระจายอุณหภูมิของชิ้นงานเชื่อม
3. ทำการทดลองเชื่อมตามแบบปกติตามมาตรฐานของ AWS และทำการทดลองเชื่อมพร้อมด้วยหัวเผาควบคุมการกระจายอุณหภูมิ เปรียบเทียบและวิเคราะห์ผลการทดลองที่ได้
4. ทำการวิเคราะห์ผลการทดลองเพื่อเปรียบเทียบความกว้างของบริเวณครากตัวของกระบวนการเชื่อมแบบปกติ และกระบวนการเชื่อมพร้อมด้วยหัวเผาควบคุมอุณหภูมิ

1.5 ประโยชน์ที่ได้รับ

1. สามารถทำการควบคุมการบิดตัว ที่เกิดขึ้นบริเวณแนวเชื่อมของเหล็กกล้าแผ่นบางด้วยอุปกรณ์ที่มีราคาถูก
2. ลดเวลาในการ fabrication ชิ้นงานแผ่นบาง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

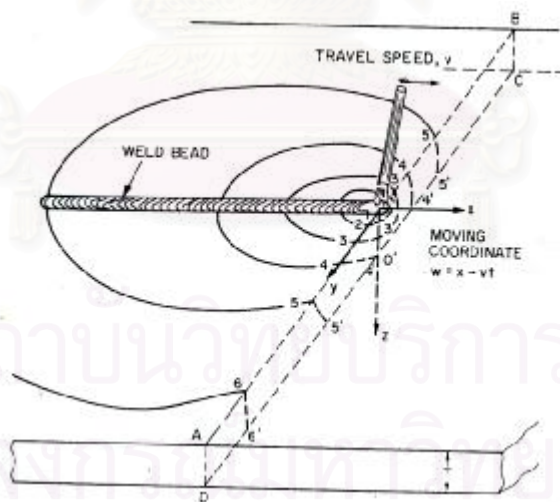
บทที่ 2

ทฤษฎีพื้นฐาน

2.1 การกระจายอุณหภูมิของแผ่นโลหะที่ถูกกระทำด้วยฟลักซ์ความร้อนเคลื่อนที่

ฟลักซ์ความร้อนจากหัวเชื่อมเคลื่อนที่ที่กระทำบนพื้นผิววัสดุ **isotropic** จากสมมูลพลังงาน ความร้อน ของวัสดุที่จุดใด ๆ วัสดุจะพยายามกระจายความร้อนไปจากจุดที่มีอุณหภูมิสูงไปหา บริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำ โดยลักษณะการกระจายความร้อนของวัสดุ **isotropic** ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติทาง ความร้อนและความเร็วการเคลื่อนที่ของฟลักซ์ความร้อน ทำให้ได้การกระจายอุณหภูมิ ดังรูปที่ 2.1

รูปที่ 2.1 แสดง **schematic diagramme** ของการกระจายของอุณหภูมิที่ผิวของชิ้นงาน เมื่อ พื้นผิวแนวเชื่อมถูกกระทำด้วยฟลักซ์ความร้อนเคลื่อนที่ได้ ซึ่งมีความเร็วคงที่ v เส้นโค้ง 1-6 แสดง ถึงเส้น **isothermal** บนพื้นผิว โดยเส้น **isothermal** ที่ 1 เป็นขอบเขตอุณหภูมิสูงสุด เส้น **isothermal** เส้นที่ 2-6 เป็นขอบเขตอุณหภูมิลดลงไปตามลำดับ ทิศทางการนำความร้อนจะตั้งฉากกับเส้น **isothermal** [1]

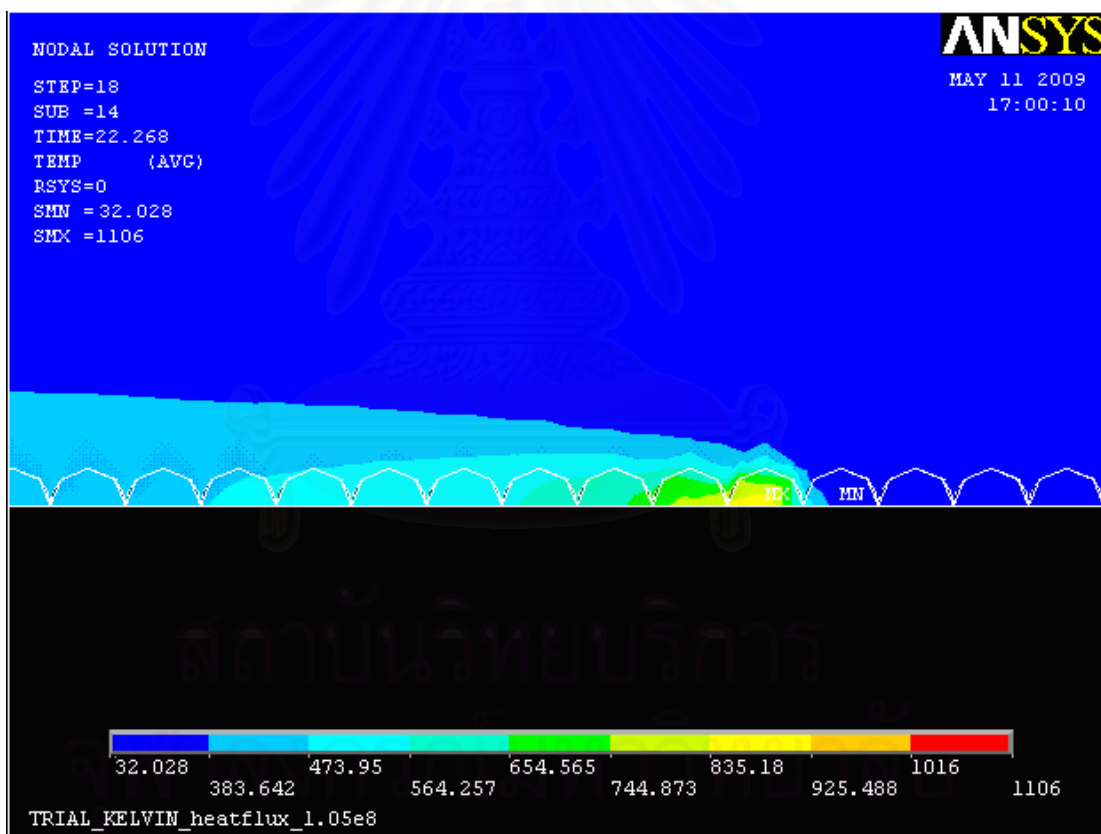


รูปที่ 2.1 **schematic diagramme** ของการกระจายของอุณหภูมิมบนพื้นผิวชิ้นงานเชื่อม ซึ่งถูกกระทำโดยฟลักซ์ความร้อนแบบเคลื่อนที่ [2]

2.2 heat flow in weldments

กระบวนการเชื่อมเป็นการใส่พลังงานความร้อน (**heat input**) ไปตามรอยต่อที่เว้นช่องว่างไว้ โดยเคลื่อน **heat input** ไปด้านหน้า ตามแนวเชื่อม ปริมาณการไหลของพลังงานความร้อนที่วิ่งไปในทิศทางต่างๆ มีค่าแปรผันตาม **temperature gradient** จากลักษณะการไหลของความร้อน เราอาจแบ่งลักษณะของ การกระจายอุณหภูมิ ที่ช่วงเวลาใดๆ โดยใช้ขอบเขตของเส้น **isothermal**

รูปที่ 2.2 บริเวณภายในขอบเขตอุณหภูมิสูง มองจากด้านบน เป็นบริเวณที่มี **temperature gradient** สูง แต่ที่อุณหภูมิสูงค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนมีค่าต่ำ เมื่อหัวเชื่อมวิ่งผ่านไป เนื้อโลหะคายพลังงานความร้อนออกไปด้วยการแผ่รังสีความร้อนกลับไปสู่สิ่งแวดล้อม ทำให้บริเวณนี้มีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิลดเร็ว



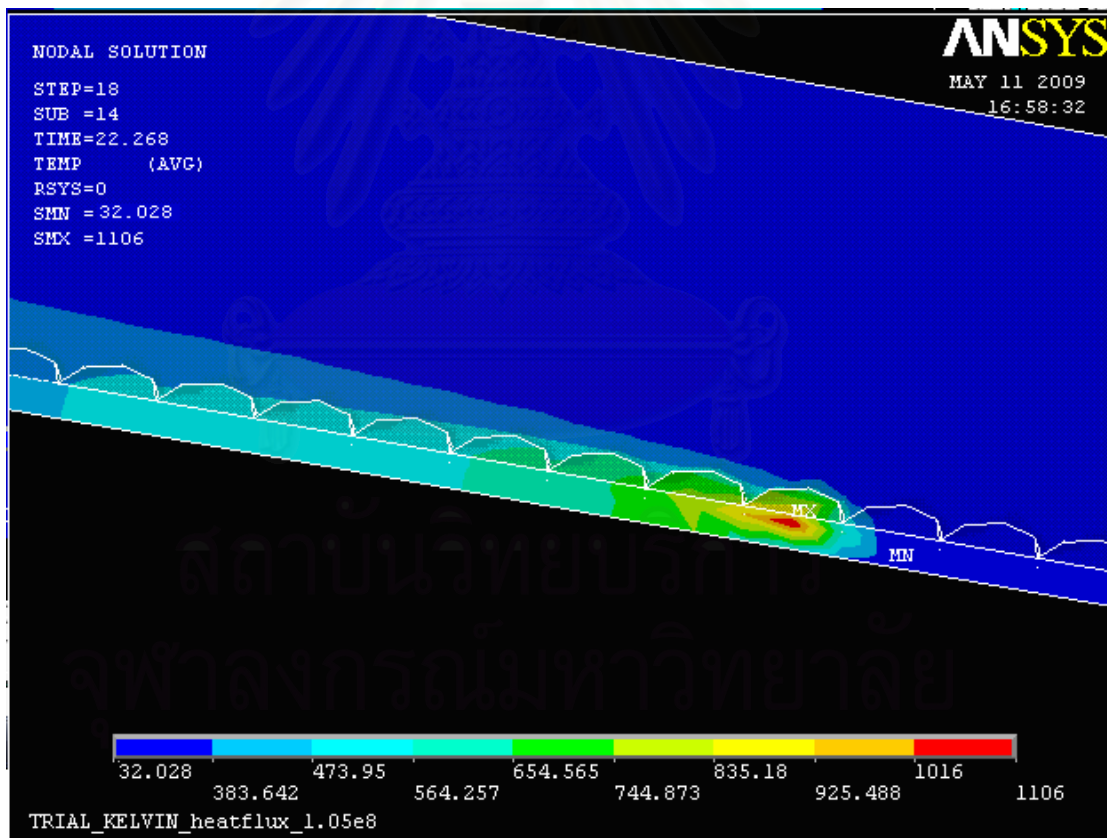
รูปที่ 2.2 ผลการจำลองการกระจายอุณหภูมิ เมื่อฟลักซ์ความร้อนแบบ **concentrated** เคลื่อนที่เหนือพื้นผิว

บริเวณถัดออกจากขอบเขตอุณหภูมิสูง เนื้อโลหะได้รับพลังงานความร้อนจากขอบเขตอุณหภูมิสูงผ่านกระบวนการนำความร้อน ความร้อนเริ่มไหลไปยังขอบของชิ้นงานร้อน อุณหภูมิยังมีความแตกต่างกับภายในชิ้นงานมาก

บริเวณด้านหน้าหัวเชื่อมถัดเข้าไปในชิ้นงานและบริเวณปีกชิ้นงาน มีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิต่ำ การกระจายอุณหภูมิสม่ำเสมอ

2.3 กลไกการหดตัวที่เกิดขึ้นในชิ้นงานอันเนื่องมาจากแหล่งความร้อนจากหัวเชื่อม

จากหัวข้อ 2.2 ผลจากการกระจายอุณหภูมิที่ไม่สม่ำเสมอบนชิ้นงานเชื่อมทำให้บริเวณส่วนใหญ่ของชิ้นงานที่มีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิต่ำมีการเคลื่อนตัวของโลหะน้อยมากมีสภาพเป็น ตัวจับยึดต้านทานการขยายตัวของเนื้อโลหะบริเวณที่ได้รับภาระความร้อนสูง ค่าความเค้นที่เกิดขึ้นเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิจนอาจเกิดการร้าวได้



รูปที่ 2.3 แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ การกระจายอุณหภูมิตั้งแต่บริเวณที่มีภาระความร้อนเคลื่อนที่เหนือชิ้นงาน

ในกรณีของกระบวนการเชื่อมเนื้อโลหะบริเวณแนวเชื่อมได้รับความร้อนสูงกว่าบริเวณชิ้นงานอย่างมาก เนื้อโลหะขยายตัวแบบไม่สม่ำเสมอ เกิดแรงภายในชิ้นงาน ค่าคุณสมบัติการครากตัวของเนื้อวัสดุที่มีอุณหภูมิสูงมีค่าต่ำลง ความเค้นที่เกิดขึ้นเพิ่มจนถึงจุดครากตัวได้โดยง่าย ค่าความเครียดรวมเป็นผลรวมของผลรวมของความเครียดแบบอิลาสติก, ความเครียดทางความร้อนและความเครียดแบบพลาสติก

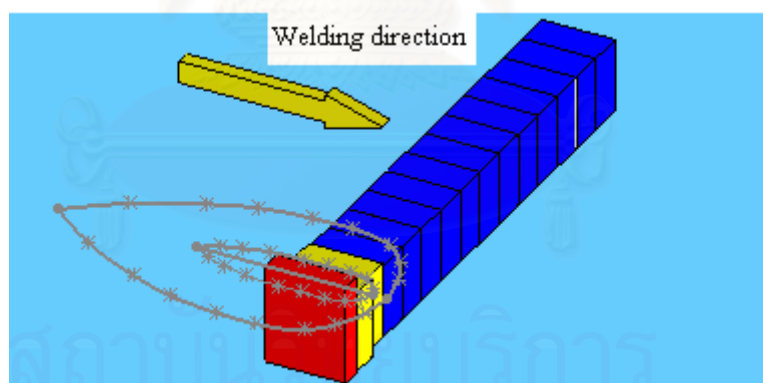
$$e_{total} = e_{elastic} + e_{plastic} + a\Delta T \quad (21)$$

แหล่งความร้อนจากหัวเชื่อมเคลื่อนผ่านไปวัสดุคลายความร้อนเย็นตัวสู่อุณหภูมิห้อง ความเครียดทางความร้อนออกไปยังคงเหลือความเครียดอิลาสติกซึ่งเป็นสาเหตุของแรงตึงในชิ้นงาน และความเครียดพลาสติกบริเวณแนวเชื่อมเป็นสาเหตุของการหดตัวแบบถาวรของชิ้นงาน

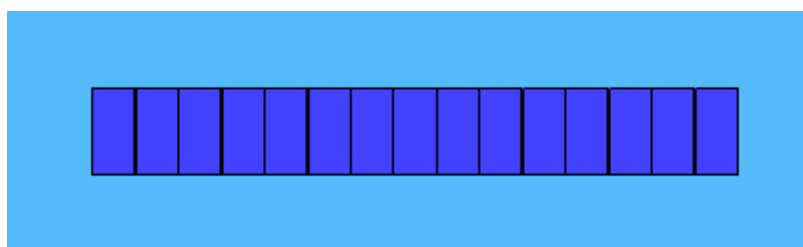
$$e = e_{elastic} + e_{plastic} \quad (22)$$

กระบวนการบิดตัวของชิ้นงานเชื่อมแสดงในรูป 24 และ 25

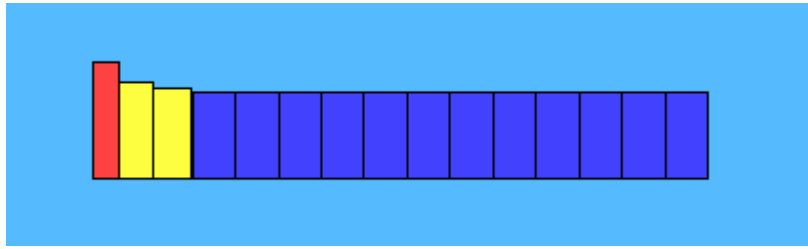
รูปที่ 24 schematic ภาพตัดสมมาตรตามขวางเฉพาะเนื้อโลหะที่ตำแหน่งตามความยาวเดียวกันกับหัวเชื่อมแบ่งเป็น element ย่อยขนาดเท่ากัน



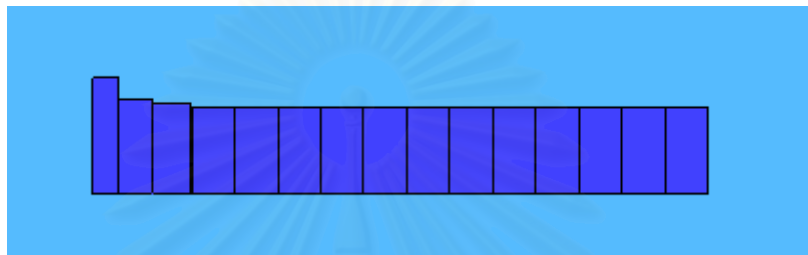
รูปที่ 24 schematic ภาพตัดสมมาตรตามขวางเนื้อโลหะที่ตำแหน่งตามความยาวเดียวกันกับหัวเชื่อม



รูปที่ 25(ก) displacement ก่อนหัวเชื่อมวิ่งผ่าน



รูปที่ 25(บ) displacement ขณะหัวเชื่อมวิ่งผ่าน



รูปที่ 25(ค) displacement หัวเชื่อมเคลื่อนผ่านไป

รูปที่ 25 คัดแปลงจากผลการจำลองกระบวนการเชื่อมโดยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์สำเร็จรูป ขณะที่หัวเชื่อมยังเคลื่อนที่ไม่ถึง ที่หน้าตัดใด ๆ ของชิ้นงานไม่มีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเกิดขึ้น ไม่มีการเคลื่อนตัวของเนื้อวัสดุ เมื่อแนวเชื่อมได้รับความร้อนจากการเคลื่อนที่ผ่านของหัวเชื่อม เกิดการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิแบบไม่สม่ำเสมอ เนื้อโลหะที่แนวเชื่อมและบริเวณใกล้เคียงที่มีอุณหภูมิสูงต้องขยายตัวแต่ไม่สามารถขยายตัวออกไปตามแนวขวางได้เนื่องจากถูกต้านทานจากเนื้อโลหะโดยรอบจึงขยายตัวขึ้นด้านบน การขยายตัวที่ไม่สม่ำเสมอระหว่างเนื้อโลหะบริเวณแนวเชื่อมและเนื้อโลหะโดยรอบที่เย็นกว่าทำให้เกิดแรงภายในจนเกิดการร้าวตัวขึ้น การเสียรูปแบบพลาสติกเกิดบริเวณแนวเชื่อม

แหล่งความร้อนจากหัวเชื่อมเคลื่อนผ่านไปชิ้นงานเย็นตัวลงสู่อุณหภูมิห้อง เนื้อโลหะที่เป็นแนวเชื่อมพยายามกลับสู่ปริมาตรเดิมที่อุณหภูมิห้องแต่ถูกต้านทานโดยเนื้อโลหะที่เย็นกว่าโดยรอบแรงภายในที่เกิดจากการหดตัวไม่สม่ำเสมอนี้เรียกว่าความเค้นตกค้าง การเสียรูปแบบพลาสติกจากการะความร้อนขณะหัวเชื่อมวิ่งผ่าน (รูปที่25บ) เป็นสาเหตุของการบิดตัวแบบถาวร

บทที่ 3

ทฤษฎีพื้นฐานของการวิเคราะห์ปัญหาด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

ทฤษฎีพื้นฐานที่ใช้ในการวิเคราะห์ปัญหาทางความร้อนและทางกลที่เกิดขึ้นในกระบวนการเชื่อมประกอบด้วย ทฤษฎีการนำความร้อนในเนื้อวัสดุ (heat conduction theory) และ ทฤษฎีพลาสติกซิตี (plasticity theory) และระเบียบวิธีการวิเคราะห์ปัญหาทางกลศาสตร์ของแข็งทั้งแบบเชิงเส้นและไม่เชิงเส้น (linear and non-linear problem analysis)

3.1 ทฤษฎีการนำความร้อนในวัสดุ (Theory of Thermal conduction)

ในกระบวนการเชื่อมมีรูปแบบการส่งผ่านความร้อน (thermal transmission) อยู่ 3 รูปแบบ [2] คือ การนำความร้อน (heat conduction) ในเนื้อโลหะ การพาความร้อน (heat convection) และการแผ่รังสีความร้อน (heat radiation)

เมื่อมีความแตกต่างของอุณหภูมิ (temperature gradient) เกิดขึ้นในของแข็งใด พลังงานจะไหลจากบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงไปสู่บริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า การไหลของพลังงานนี้เรียกว่า “การนำความร้อน (thermal conduction)” สมการควบคุม (governing equation) แสดงในสมการที่ 3.1

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + q = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (3.1)$$

เมื่อ ρ คือ ความหนาแน่นของวัสดุ (material density)

c คือ ค่าความร้อนจำเพาะ (specific heat)

k คือ ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน (coefficient of thermal conduction)

q คือ ค่าความร้อนที่เกิดขึ้นในเนื้อวัสดุต่อปริมาตร (heat produced per cubic meter)

การพาความร้อนเกิดจากการส่งผ่านความร้อนอันเนื่องมาจากความแตกต่างของอุณหภูมิด้วยของไหล ในการศึกษานี้ของไหลคืออากาศ ดังแสดงในสมการที่ 3.2

$$Q = hA(T_w - T_\infty) \quad (3.2)$$

เมื่อ Q คือ พลังงานความร้อนที่ถูกส่งผ่านจากวัตถุไปสู่สิ่งแวดล้อม (energy of thermal transmission)

h คือ สัมประสิทธิ์การพาความร้อน (coefficient of thermal convection)

A คือ พื้นที่ผิวของวัตถุ

T_w คือ อุณหภูมิของวัตถุ

T_∞ คือ อุณหภูมิของของไหล

การแผ่รังสีความร้อน (radiation heat transfer) คือ การส่งผ่านความร้อนโดยไม่ต้องผ่านตัวกลางใดๆ โดยเฉพาะบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงดังสมการ 3.3

$$q_{rad}'' = se(T^4 - T_\infty^4) \quad (3.3)$$

เมื่อ q_{rad}'' คือ ฟลักซ์ความร้อนจากการแผ่รังสี

e คือ ค่าอิมิตซีฟิวิตี (emissivity)

s คือ ค่าคงที่สเตฟาน-โบลทซ์มันน์ (stefan - botmann constant)

T คือ อุณหภูมิของวัตถุ

T_∞ คือ อุณหภูมิของสิ่งแวดล้อม

3.1.1 การวิเคราะห์ปัญหาทางความร้อน (Heat Transfer Analysis)

จุดประสงค์ของการวิเคราะห์ปัญหาทางความร้อนที่เกิดขึ้นในกระบวนการเชื่อมเป็นการวิเคราะห์ผลของอุณหภูมิ (temperature history) ที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการเชื่อม โดยใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ซึ่งรูปแบบของสมการสำหรับแต่ละเอลิเมนต์ย่อยแสดงอยู่ในสมการที่ 3.4[2]

$$[C(T)]\{T\} + [K(T)]\{T\} = \{Q(T)\} \quad (3.4)$$

เมื่อ $[C(T)]$ คือ เมตริกซ์ค่าความร้อนเพาะ (specific heat matrix)

$[K(T)]$ คือ เมตริกซ์การนำความร้อน (conduction matrix)

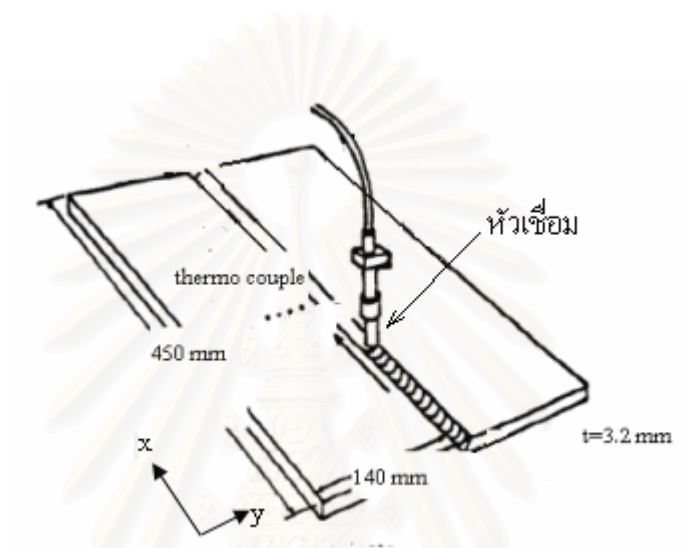
$\{T\}$ คือ เวกเตอร์อุณหภูมิที่จุดต่อ (vector of node temperature)

$\{T\}$ คือ เวกเตอร์อนุพันธ์ของอุณหภูมิที่จุดต่อ (vector of derivative temperature)

ในการแก้ระบบสมการเพื่อหาค่าอุณหภูมิที่จุดต่อใดๆ โปรแกรมสำเร็จรูปจะใช้ระเบียบวิธีการของ Crank-Nicholson [3] โดยวิธี Crank-Nicholson เป็นระเบียบวิธีแบบ implicit อีกวิธีหนึ่งที่ทำให้ค่าความผิดพลาดอันดับสองทั้งกับเวลาและระยะทาง กล่าวคือจะให้ผลลัพธ์ที่มีความ

เที่ยงตรงมากกว่าระเบียบวิธีแบบชัดแจ้ง หลักการระเบียบวิธีของ **Crank-Nicholson method** คือ การประมาณอนุพันธ์อันดับหนึ่งที่แปรผันกับเวลาที่กึ่งกลางระหว่างช่วงเวลาของการคำนวณครั้งที่ n และ $n+1$

31.2 แบบจำลองของฟลักซ์ความร้อนจากหัวเชื่อม



รูปที่ 31 หัวเชื่อมเดินทางผ่านแนวเชื่อม

ฟลักซ์ความร้อนจากหัวเชื่อมกระทำกับพื้นผิวโลหะตามแนวเชื่อม ก่อให้เกิดการกระจายอุณหภูมิไม่สม่ำเสมอบนชิ้นงาน ทำให้เกิดความเค้นเนื่องมาจากความร้อน การศึกษาในอดีตที่ผ่านมานิยมจำลองการกระจายความร้อนจากหัวเชื่อมโดยใช้รูปแบบการกระจายความร้อนสมมาตรรอบแกนกลางรูประฆังคว่ำแบบเกาส์ (**Gaussian**) กระทำบนพื้นผิวเคลื่อนที่ไปตามแนวเชื่อม ดังสมการที่ 35 [3]

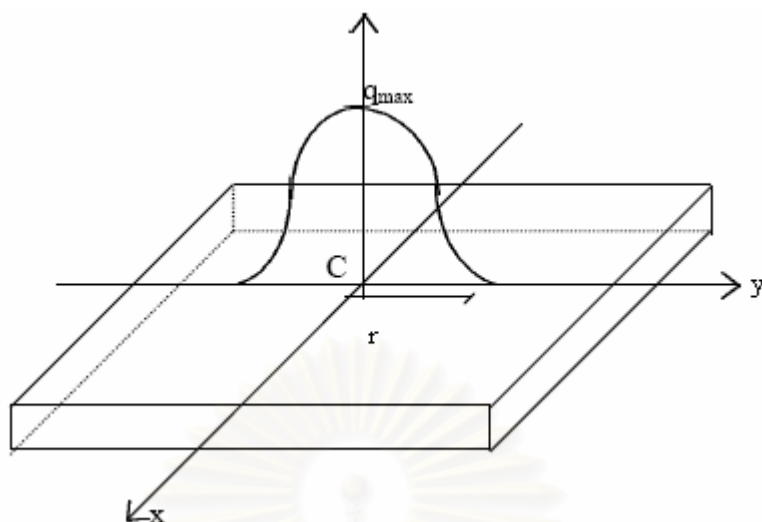
$$q(r) = q_{\max} \exp[-Cr^2] \quad (35)$$

เมื่อ q คือ การกระจายความร้อน

q_{\max} คือ ค่าฟลักซ์ความร้อนที่ตำแหน่ง $r = 0$

r คือ ระยะทางตามแนวรัศมีซึ่งการกระจายความร้อน 1% กระทำกับพื้นผิว

C คือ **width factor**



รูปที่ 32 ฟลักซ์ความร้อน กระจายตัวแบบเกาส์ เคลื่อนที่ไปตามแนวเชื่อมในทิศทาง X

โดยที่ q_{\max} และ C คำนวณได้ตามขั้นตอนต่อไปนี้

ภาระความร้อนรวม Q_{total} คือปริมาณความร้อนสุทธิที่ได้จากปลายหัวเชื่อม

$$Q_{total} = h_{arc} VI \quad (36)$$

เมื่อ h_{arc} คือ ประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนของกระบวนการเชื่อม MIG

V คือ ความต่างศักย์ที่เกิดขึ้นระหว่างปลายอิเล็กโตรดกับชิ้นงานเชื่อม

I คือ กระแสที่ใช้ในกระบวนการเชื่อม

$$Q_{arc} = \int_0^{\infty} 2pq_{\max} e^{-Cr^2} r dr \quad (37)$$

$$Q_{arc} = 2pq_{\max} \int_0^{\infty} r e^{-Cr^2} dr \quad (38)$$

$$Q_{arc} = \frac{pq_{\max}}{C} \quad (39)$$

$$q_{\max} = \frac{Q_{arc} C}{p} \quad (310)$$

โดยค่า r_h เป็นตำแหน่งรัศมีที่ $q(r)$ มีค่าเป็น 1 เปอร์เซ็นต์ของค่า q_{\max} หรือ $q(r) = 0.01 q_{\max}$

$$q_r = 0.01 q_{\max} \quad (311)$$

$$q_r = q_{\max} e^{-Cr_h^2} \quad (312)$$

$$e^{-Cr_h^2} = 0.01 \quad (313)$$

$$Cr_h^2 = \ln(100) \quad (314)$$

จะได้ความหมายทางกายภาพของค่า C เป็น

$$C = \frac{\ln(100)}{r_{\text{torch}}^2} \quad (315)$$

อย่างไรก็ตามจากการศึกษา ของ **Koichi Masubushi** จาก **analysis of welded structure** แนะนำให้ใช้ค่า C สำหรับ กระบวนการเชื่อม **MIG** มีค่าโดยประมาณ 18 cm^{-2} [1]

31.3 การคำนวณฟลักซ์ความร้อนบนพื้นผิวอิเล็กโทรดจากหัวเชื่อม

ในการหาค่าความร้อนอินพุตจากการสมมติการกระจายแบบเกาส์จะต้องทราบค่าพารามิเตอร์ q_{\max} และ C

พลังงานความร้อนอินพุตจากหัวเชื่อมที่ถูกขึ้นงานคูดซับ

$$\text{กระแสไฟฟ้า} = 55 \text{ แอมแปร์}$$

$$\text{ความต่างศักย์} = 20 \text{ โวลต์}$$

ประสิทธิภาพการถ่ายเทพลังงานในกระบวนการเชื่อม **MIG** [3] $h_{\text{arc}} = 0.5$

พลังงานความร้อนที่ถูกขึ้นงานคูดซับ

$$Q_{\text{total}} = h_{\text{arc}} VI$$

$$Q_{\text{total}} = 550 \text{ watt}$$

ความร้อนสุทธิจากหัวเชื่อมที่ถูกขึ้นงานคูดซับต้องมีค่าเท่ากับอินทิเกรตฟลักซ์ความร้อนสมมติแบบเกาส์เหนือพื้นที่ทั้งหมดเพื่อหาค่า q_{\max}

$$Q_{\text{total}} = \text{อินทิเกรตฟลักซ์ความร้อนทั้งแผ่น}$$

$$Q_{total} = \int_0^{\infty} 2pq_{max} e^{-Cr^2} r dr \quad (316)$$

$$Q_{total} = 2pq_{max} \int_0^{\infty} r e^{-Cr^2} dr \quad (317)$$

$$Q_{total} = \frac{pq_{max}}{C} \quad (318)$$

$$q_{max} = \frac{Q_{total} C}{p} \quad (319)$$

แทนค่า C ที่ได้จากการศึกษากระบวนการเชื่อมของ **Koichi Masubushi** และคณะ
นำไปสู่ค่า ความร้อนที่จุดกึ่งกลาง

$$q_{max} = 34 \times 10^6 \text{ วัตต์/ตารางเมตร}$$

นอกจากนี้พื้นที่ที่ถูกพลักซ์ความร้อนสมมติแบบเกาส์กระทำต้อง มีขนาดเท่ากับ
พื้นที่สี่เหลี่ยมของเอลิเมนต์

พื้นที่จริงที่ถูกพลักซ์ความร้อนสมมติแบบเกาส์กระทำเท่ากับพื้นที่แบบจำลอง ไฟ
ในต์เอลิเมนต์

$$pr^2 = (\text{elementwidth})(\text{elementwidth}) \quad (320)$$

element width เท่ากับ 5 มิลลิเมตรจะได้ $r = 0.0028$ เมตร อินทิเกรตเพื่อหาพลักซ์
ความร้อนที่จะเป็นฮีท อินพุต

$$Q_{input} = \int_0^{0.0028} 2pq_{max} e^{-Cr^2} r dr \quad (321)$$

$$Q_{input} = 2pq_{max} \int_0^{0.0028} e^{-Cr^2} r dr \quad (322)$$

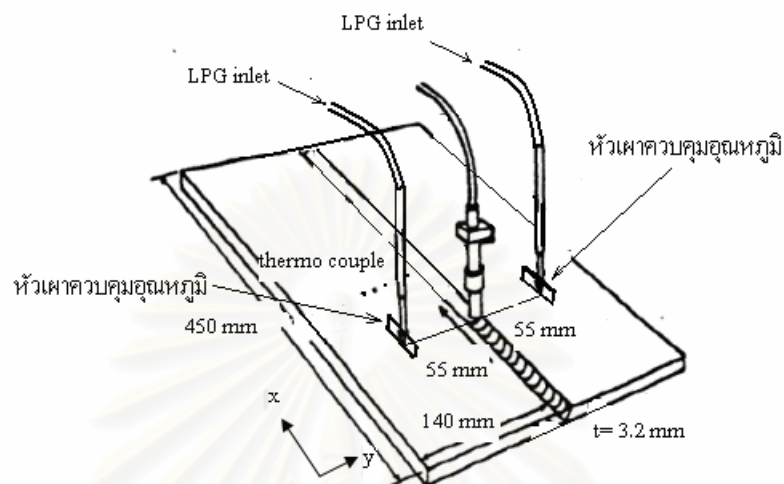
$$Q_{input} = 2p(34e6) \left(\frac{-1}{2(18e4)} \right) (-0.82) \quad (323)$$

$$Q_{input} = 520 \text{ วัตต์}$$

ในการคำนวณเนื่องจากชิ้นงานชิ้นงานสมมาตร จะได้ความร้อนอินพุตแต่ละข้างเท่ากับ **260 วัตต์**

ฮีท อินพุตดังกล่าวกระทำบนพื้นที่ **5x5** ตารางมิลลิเมตร จะได้พลักซ์ความร้อนสุทธิ
กระทำบนแต่ละเอลิเมนต์ $q'' = 18$ เมกกะวัตต์ต่อตารางเมตร

31.4 แบบจำลองของฟลักซ์ความร้อนจากหัวเผา Air-LPG

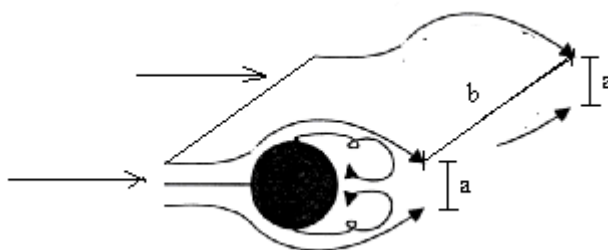


รูปที่ 33 หัวเชื่อมและหัวเผาควบคุมอุณหภูมิเดินทางตามแนวเชื่อม [2]

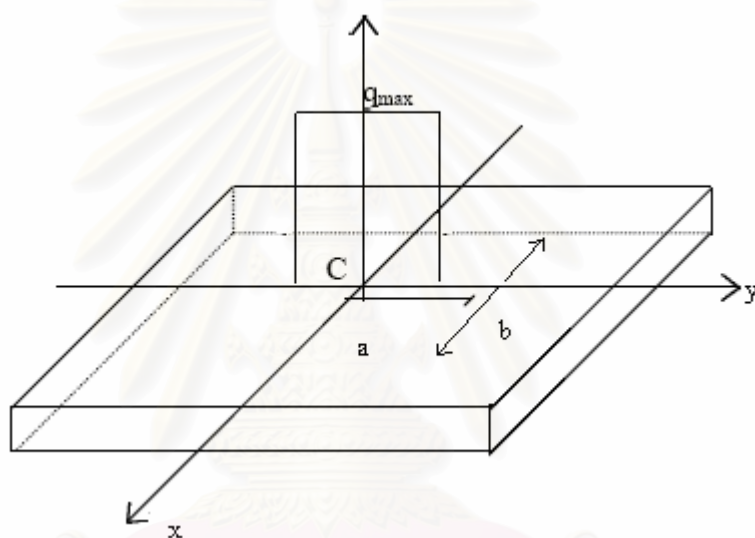
การศึกษาในอดีต [2] มีการศึกษาการลดการบิดตัวระหว่างกระบวนการเชื่อมด้วยการทำการเชื่อมพร้อมกันกับหัวเผาควบคุมการกระจายอุณหภูมิเพื่อสร้างรูปแบบการกระจายความเค้นที่เหมาะสม แต่เนื่องจากหัวเผา **oxy-acetylene** ที่ใช้ ให้ฟลักซ์ความร้อนที่ไม่สม่ำเสมอทำให้ต้องติดตั้งหัวเผา **oxy-acetylene** ควบคุมอุณหภูมิที่ระยะห่างจากหัวเชื่อม

เพื่อให้ได้ฟลักซ์ความร้อนที่มีขนาดสม่ำเสมอตลอดพื้นที่หน้าตัด เลือกหัวเผารูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า ที่มีโครงสร้างของสิ่งกีดขวางเส้นทางไหล เมื่อของผสมระหว่างอากาศและแก๊ส **LPG** ไหลผ่าน ชนกับสิ่งกีดขวาง จะเกิดการหมุนตัวขึ้น ที่บริเวณปลายหัวเผา ความเร็วของแก๊สที่เกิดการเผาไหม้มีขนาดสม่ำเสมอตลอดพื้นที่หน้าตัด

จากรูปที่ 34 มีสิ่งกีดขวางเส้นทางไหล ของไหลที่วิ่งเข้าชนสิ่งกีดขวางจะหมุนตัว การเผาไหม้เกิดเฉพาะบริเวณที่ต้องการ เปลวไฟกระจายตัวสม่ำเสมอ โดยมีความกว้าง **a** ความยาว **b** [4]



รูปที่ 34 configuration ของหัวเผาที่ใช้ในการทดลอง ลูกศรแสดงการไหลของของผสมระหว่าง LPG กับอากาศ



รูปที่ 35 ฟลักซ์ความร้อน กระจายตัวสม่ำเสมอ เคลื่อนที่ไปตามแนวเชื่อมในทิศทาง X

ดังนั้นกำหนดให้ ฟลักซ์ความร้อนมีการกระจายตัวแบบคงที่เท่ากับ q_{max} ตลอดหน้าตัดความยาวของหัวเผาตามสมการ

$$Q_{Flame} = \int_{-a}^a q_{max}(b) dx \quad (3.24)$$

$$Q_{Flame} = q_{max}(a)(b) \quad (3.25)$$

ภาระทางความร้อนสุทธิจากหัวเผา Air-LPG คำนวณได้จาก

$$Q_{flame} = h_{flame} (FlamePower)$$

flame power ได้จากอัตราการไหลของแก๊ส LPG คูณกับค่าความร้อนที่ได้จากการทดลองของแก๊ส LPG ในประเทศไทย โดย สำเร็จ จักรใจ และคณะ [4] มีค่าประมาณ 49 MJ/kg

31.5 การคำนวณฟลักซ์ความร้อนบนพื้นผิวเอลิเมนต์จากหัวเผาควบคุมอุณหภูมิ

ขนาดของ ฮีท อินพุต จากฟลักซ์ความร้อนจากหัวเผา LPG ขึ้นอยู่กับอัตราการไหลของแก๊ส LPG วัดอัตราการไหลของแก๊ส LPG โดยการชั่งน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงในช่วงเวลาหนึ่ง ค่าความร้อนอ้างอิงจากการทดลองของ สำเร็จ จักรใจ ซึ่งเป็นค่าความร้อนของ LPG ที่ใช้ในประเทศไทย

$$Q_{flame} = h_{flame} (\text{Flow rate})(\text{Specific Heat})$$

$$h_{flame} = 0.40$$

$$\text{flow rate} = 0.3 \text{ g/min}$$

$$\text{specific heat} = 49 \text{ MJ/kg}$$

$$\text{ความร้อนสุทธิจากหัวเผา Air-LPG } Q_{flame} = 90 \text{ Watt}$$

ฮีท อินพุตจากหัวเผา ขนาด 90 วัตต์ ซึ่งมีขนาดประมาณ เศษหนึ่งส่วนสามของฮีท อินพุต จากหัวเชื่อม กระจายตัวแบบสม่ำเสมอกระทำบนพื้นที่สี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาด 10x40 ตาราง มิลลิเมตรซึ่งมีค่าเท่ากับพื้นที่หน้าตัดของเปลวไฟ จะได้ ฟลักซ์ความร้อนสุทธิกระทำบนแต่ละเอลิเมนต์ $q'' = 0.22$ เมกกะวัตต์/ตารางเมตร

ผลลัพธ์ที่ได้จากกระบวนการวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อน คือ การกระจายอุณหภูมิ ณ เวลาใด ๆ ที่เกิดขึ้นตลอดกระบวนการเชื่อม ซึ่งจะนำไปใช้เป็นภาระทางความร้อนสำหรับการวิเคราะห์ปัญหาทางกลศาสตร์จะกล่าวถึงในส่วนต่อไป

31.6 การวิเคราะห์ปัญหาการนำความร้อนบนชิ้นทดลองด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์สำเร็จรูป

ฟลักซ์ความร้อนจาก หัวเชื่อมขนาด $q'' = 18$ เมกกะวัตต์/ตารางเมตร กระทำบนพื้นที่ 5x5 ตารางมิลลิเมตร ที่แนวเชื่อม อัตราเร็วของกระบวนการเชื่อม 3.75 มม.ต่อวินาที จะได้เวลาที่หัวเผาและหัวเชื่อมอยู่เหนือพื้นผิวเอลิเมนต์เท่ากับ 0.6667 วินาที

เช่นเดียวกับฟลักซ์ความร้อนจากหัวเชื่อม ฟลักซ์ความร้อนจากหัวเผาขนาด $q'' = 0.22$ เมกกะวัตต์ต่อตารางเมตร กระทำเหนือเอลิเมนต์ ที่แนวเส้น 55 มิลลิเมตร จากศูนย์กลางแนวเชื่อม ในช่วงเวลา 0.6667 วินาที

เพื่อให้ได้คำตอบของแบบจำลองใกล้เคียงกับปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นจริง ใช้พารามิเตอร์สัมประสิทธิ์การนำความร้อน จากการศึกษาของ **Masmoudi** และคณะ [9]

ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน ที่ใช้ในการศึกษาในการทำแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ $k = 85 - 0.052T$ ($W / m^2 K$)

รูปที่ 36 แสดงการแบ่ง **mesh** ของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยใช้เอลิเมนต์ชนิด **isoparametric 4** จุดต่อการกระจายค่าของคำตอบแบบเชิงเส้น โดยที่เอลิเมนต์แฉวข้างเป็นเอลิเมนต์รับภาระความร้อนเคลื่อนที่จากหัวเชื่อมและเอลิเมนต์ที่ตำแหน่ง 55 มม. จากแนวเชื่อม เป็นเอลิเมนต์ซึ่งรับภาระความร้อนเคลื่อนที่จากหัวเผาควบคุมอุณหภูมิ ค่าขอบรวมการพาความร้อนและการแผ่รังสีเข้าด้วยกัน $H = 24.1 \times 10^{-4} eT^{1.61}$ ซึ่งต้องสร้าง **table** ในโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์สำเร็จรูปหลังจากกำหนดค่า **properties** ของวัสดุแล้ว โดยให้แฉวแรกเป็นอุณหภูมิ ณ ตำแหน่งใดๆ บนชิ้นงานและแฉวหลังเป็นค่าการพาความร้อนรวมการแผ่รังสีที่ตำแหน่งนั้น ($W / m^2 K$) โดยเขียนชุดคำสั่งต่อไปนี้

*DIM,Conv1,TABLE,10,1,1,,,

Conv1(1,0,1)=30

Conv1(1,1,1)=14

Conv1(2,0,1)=175

Conv1(2,1,1)=38

Conv1(3,0,1)=375

Conv1(3,1,1)=69

Conv1(4,0,1)=575

Conv1(4,1,1)=106

Conv1(5,0,1)=775

Conv1(5,1,1)=149

Conv1(6,0,1)=975

Conv1(6,1,1)=198

Conv1(7,0,1)=1075

Conv1(7,1,1)=250

Conv1(8,0,1)=1275

Conv1(8,1,1)=310

$$\text{Conv1}(9,0,1)=1575$$

$$\text{Conv1}(9,1,1)=370$$

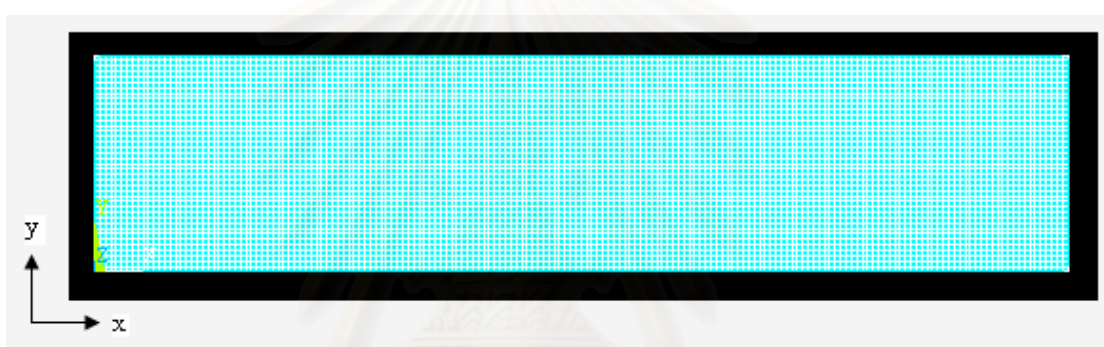
$$\text{Conv1}(10,0,1)=1775$$

$$\text{Conv1}(10,1,1)=1800$$

กำหนดเป็นภาระทางความร้อนที่พื้นผิว(**surface load**) บนด้านที่สองของเอลิเมนต์ โดยมีอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมเท่ากับ **30** องศาเซลเซียส

$$\text{SFE,ALL,,CONV,0\%Conv1\%}$$

$$\text{SFE,ALL,,CONV,2,30}$$



รูปที่ 3.6 แสดง **mesh** ของไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ใช้ในการวิเคราะห์กระบวนการนำความร้อน

3.2 การวิเคราะห์ปัญหาทางกลศาสตร์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

ผลลัพธ์การกระจายของอุณหภูมิของอุณหภูมิ ณ เวลาใด ๆ ที่เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการเชื่อม (**temperature history**) จากการวิเคราะห์ปัญหาทางความร้อนจะถูกนำมาเก็บไว้ในไฟล์ **Thermal.rth** ซึ่งจะทำหน้าที่เป็นอินพุตไฟล์ของการวิเคราะห์ปัญหาทางด้านกลศาสตร์ต่อไป

ในการวิเคราะห์ปัญหาทางด้านกลศาสตร์ จะทำการสร้างสมการไฟไนต์เอลิเมนต์แต่ละเอลิเมนต์ด้วยการอินทิเกรตสมการสมดุล วัสดุจะต้องอยู่ในสภาวะสมดุล ไม่ว่าจะเกิดการครากตัวหรือไม่ ดังแสดงในสมการที่ 3.26 ด้วยฟังก์ชันการประมาณค่าภายในของแต่ละเอลิเมนต์กับฟังก์ชันถ่วงน้ำหนัก [2]

$$\nabla s + F = 0 \quad (3.26)$$

เมื่อ ∇ คือ ตัวดำเนินการดิฟเฟอเรนเชียล (**differential operator**)

s คือ ความเค้น (**stress**)

F คือ แรงเนื่องมาจากน้ำหนักของวัตถุ (**Body Force**)

ทำให้ได้สมการไฟไนต์เอลิเมนต์ของแต่ละเอลิเมนต์ ซึ่งเมื่อนำมารวมจะทำให้ได้ระบบสมการไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ใช้หาค่าการเคลื่อนตัวของแต่ละจุดต่อ

3.21 การวิเคราะห์ปัญหาทางไฟไนต์เอลิเมนต์เมื่อวัสดุยังไม่เกิดการครากตัว (linear-elastic theory)

สมการไฟไนต์เอลิเมนต์ของระบบ แสดงได้ด้วยสมการที่ 3.27

$$[K]\{u\} = \{F^a\} \quad (3.27)$$

เมื่อ K คือ เมตริกซ์ความแข็งแกร่ง ซึ่งได้จากการอินทิเกรตสมการ constitutive กับฟังก์ชันการประมาณค่าภายในของแต่ละเอลิเมนต์

$\{u\}$ คือ เวกเตอร์ของค่าการเคลื่อนตัว

$\{F^a\}$ คือ เวกเตอร์ของแรงภายนอกที่มากระทำ

สำหรับสมการ Constitutive แสดงได้ด้วยสมการที่ 3.28

$$\{s\} = [D]\{e^{el}\} \quad (3.28)$$

เมื่อ $\{s\}$ คือ เมตริกซ์ความเค้น (stress matrix)

$[D]$ คือ เมตริกซ์ความแข็งแกร่ง (stiffness matrix)

$\{e^{el}\} = \{e\} - \{e^{th}\}$ คือ เมตริกซ์ความเครียดยืดหยุ่น (elastic strain matrix)

$\{e\}$ คือ เมตริกซ์ความเครียดรวม (total strain matrix) = $[e_x e_y e_z e_{xy} e_{yz} e_{zx}]$

$\{e^{th}\}$ คือ เมตริกซ์ความเครียดอันเนื่องมาจากความร้อน (thermal strain matrix)

$$\{e^{th}\} = \begin{bmatrix} a\Delta T & 0 & 0 \\ 0 & a\Delta T & 0 \\ 0 & 0 & a\Delta T \end{bmatrix}$$

$$\Delta T = T - T_{ref}$$

เมื่อ T คือ อุณหภูมิที่จุดใดๆ ของวัตถุ

T_{ref} คือ อุณหภูมิเริ่มต้น

3.2.2 การวิเคราะห์ปัญหาทางไฟไนต์เอลิเมนต์เมื่อวัสดุเกิดการครากตัว (non-linear theory)

การแก้ระบบสมการไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ไม่เป็นเชิงเส้น ไม่สามารถทำการแก้ระบบสมการได้โดยตรง จึงจำเป็นต้องใช้เทคนิคเชิงตัวเลข (numerical method) ซึ่งในโปรแกรมสำเร็จรูปใช้กระบวนการทำซ้ำ (iteration) ของนิวตัน-ราฟสัน (Newton-Raphson method)

3.2.2.1 ระบบสมการไฟไนต์เอลิเมนต์ของปัญหาไม่เชิงเส้น โดยจะแสดงอยู่ในสมการที่ 3.29 ซึ่งเมตริกซ์ความแข็งเกร็งขึ้นอยู่กับค่าการเคลื่อนตัวของวัสดุ (เมตริกซ์ความแข็งเกร็งเมื่อวัสดุครากตัวแล้วขึ้นอยู่กับค่าความเค้นที่เกิดขึ้น)

$$[K(u)]\{u\} = \{F^a\} \quad (3.29)$$

เมื่อ $K(u)$ คือ เมตริกซ์ความแข็งเกร็ง

$\{u\}$ คือ เวกเตอร์ของค่าการเคลื่อนตัว

$\{F^a\}$ คือ เวกเตอร์ของแรงภายนอกที่มากกระทำ

3.2.2.2 เวกเตอร์เศษเหลือ $\{R\}$ ในการแก้ระบบสมการไม่เชิงเส้นเพื่อประมาณค่าการเคลื่อนตัว โดยวิธีการทำซ้ำเพื่อให้ค่าของแรงภายใน (internal nodal force $[K]\{u\}$) และค่าเวกเตอร์ของแรงกระทำซึ่งได้จากการรวมแรงของแต่ละเอลิเมนต์มีค่าน้อยที่สุดดังสมการที่ 3.30

$$\{R\} \equiv [K]\{u\} - \{F^a\} = \{F^r\} - \{F^a\} \equiv \{0\} \quad (3.30)$$

เมื่อ $\{R\}$ คือ เวกเตอร์ของแรงภายใน (Vector of Internal Load)

3.2.2.3 การกระจายอนุกรมเทย์เลอร์ (Taylor Series) ของเวกเตอร์เศษตกค้างเทียบกับค่าการเคลื่อนตัว ดังสมการที่ 3.31

$$\{0\} = \{R\} = \{R_i\} + \left(\frac{\partial \{R\}}{\partial \{u\}} \right)_i (\{u_{i+1}\} - \{u_i\}) + \frac{1}{2!} \left(\frac{\partial^2 \{R\}}{\partial \{u\}^2} \right)_i (\{u_{i+1}\} - \{u_i\})^2 + \mathbf{K} \quad (3.31)$$

เมื่อตัดเทอมที่มีกำลังมากกว่าสองของสมการที่ 3.31 ทิ้ง จะได้สมการที่ 3.32

$$\{0\} = \{R_i\} + [K_i^T] \{\Delta u_i\} + O(\{\Delta u_i\}^2) \quad (3.32)$$

เมื่อ $[K_i^T]$ คือ เมทริกซ์เส้นสัมผัส (**tangent matrix**) $= \left(\frac{\partial \{R\}}{\partial \{u\}} \right)_i$

$\{\Delta u_i\}$ คือ ผลต่างของการประมาณค่าการเคลื่อนตัว $= \{u_{i+1}\} - \{u_i\}$

$O(\{\Delta u_i\})^2$ คือ พังก์ชันเศษตกค้าง $= \frac{1}{2!} \left(\frac{\partial^2 \{R\}}{\partial \{u\}^2} \right)_i (\{u_{i+1}\} - \{u_i\})^2 + \mathbf{K}$

ดังนั้นจะได้ว่า ค่าความแตกต่างของโหนดเวกเตอร์ของแรงภายนอกและแรงภายในสามารถเขียนได้ดังสมการที่ **333**

$$\{0\} = \{R_i\} + [K_i^T] \{\Delta u_i\} \quad (333)$$

ในแต่ละขั้นตอนของการทำซ้ำสามารถหาค่าการเคลื่อนตัวได้จากการผกผันเมทริกซ์ความแข็งแกร่งดังสมการที่ **334**

$$\{\Delta u_i\} = \{u_{i+1}\} - \{u_i\} = [K_i^T]^{-1} \{R_i\} = [K_i^T]^{-1} (\{F^a\} - [K]\{u_i\}) \quad (334)$$

ซึ่งในแต่ละขั้นตอนของการทำซ้ำ จะต้องทำการคำนวณค่าเมทริกซ์ $[K]$ และ $[K_i^T]$ ใหม่ เนื่องจากเป็นฟังก์ชันของค่าการเคลื่อนตัว u

เมื่อ $[K_i^T]$ คือ เมทริกซ์เส้นสัมผัสของการทำซ้ำครั้งที่ i

$\{u_i\}$ คือ เวกเตอร์ของค่าการเคลื่อนตัวครั้งที่ i

$\{u_{i+1}\}$ คือ เวกเตอร์ของค่าการเคลื่อนตัวของการทำซ้ำครั้งที่ $i+1$

$\{F^a\}$ คือ โหนดเวกเตอร์ของแรงกระทำภายนอก

$\{F_i^r\}$ คือ เวกเตอร์ของแรงกระทำภายใน

3.2.2.4 อัลกอริทึมของกระบวนการทำซ้ำด้วยระเบียบวิธีของ นิวตัน-ราฟสัน สามารถแบ่งออกเป็น 6 ขั้นตอนย่อย ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 ค่าเริ่มต้น u_i ของกระบวนการทำซ้ำ

ขั้นตอนที่ 2 คำนวณค่า K_i^T และ F_i^r

ขั้นตอนที่ 3 คำนวณค่า $\{\Delta u_i\}$ ซึ่งจะให้ค่า u_{i+1}

ขั้นตอนที่ 4 ซึ่งจะให้ค่า u_{i+1}

ขั้นตอนที่ 5 กระทำซ้ำขั้นตอนที่ 2 ถึง ขั้นตอนที่ 4 (ขั้นตอนที่ $i+2$) จะ

ทำให้ได้ค่า u_{i+2}

ขั้นตอนที่ 6 หาเวกเตอร์เศษตกค้างจากสมการที่ **330**

3.2.2.5 การลู่เข้าของกระบวนการทำซ้ำ ตรวจสอบได้โดยการใช้กฎเกณฑ์ของค่าการเคลื่อนตัวและเศษตกค้าง ดังสมการที่ **3.35** และ สมการที่ **3.36** ตามลำดับ

$$\|\{\Delta u_i\}\| < e_u u_{ref} \quad (3.35)$$

$$\|\{R\}\| < e_R R_{ref} \quad (3.36)$$

เมื่อ $\|\ \|$ คือ **vector norm**

$\{\Delta u_i\}$ คือ ค่าการเคลื่อนตัวของการทำซ้ำครั้งที่ i

$\{R\} = \{F^a\} - \{F_i^r\}$

e_u, e_R คือ ค่า **tolerance**

u_{ref}, R_{ref} คือ ค่า **reference value**

3.2.3 การวิเคราะห์ปัญหาทางกลศาสตร์โดยใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์สำเร็จรูป

โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์สำเร็จรูปจะเปลี่ยนชนิดของเอลิเมนต์จากเอลิเมนต์ที่ใช้ในการคำนวณกระจายความร้อนไปเป็นเอลิเมนต์ที่เหมาะสมในการคำนวณปัญหาการบิดตัวของชิ้นงานซึ่งเป็นปัญหาทางกลศาสตร์โดยมีภาระทางความร้อนเป็นโหลดซึ่งก็คือ อุณหภูมิที่จุดต่อต่างๆ และมีค่าขอบ (**boundary condition**) เป็นจุด **pivot** ที่จุดเริ่มต้นของกระบวนการเชื่อมและมีค่าขอบแบบ **translation** ตลอดความยาวแนวเชื่อม ดังรูปที่ **3.7** โดยเขียนชุดคำสั่งขึ้นดังต่อไปนี้

```
/prep7
```

```
etchg,tts
```

```
nset,s,loc,x,0
```

```
nset,r,loc,y,0
```

```
d,all,all
```

```
allsel,all
```

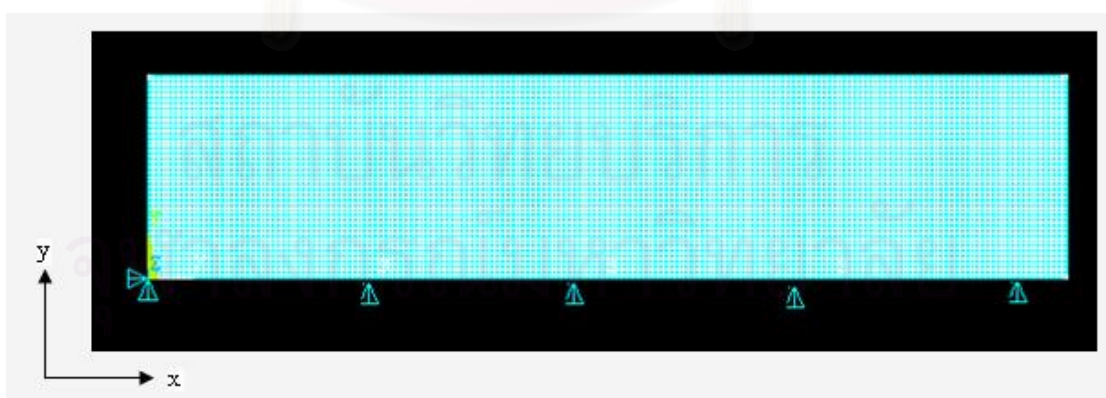
```
dl,1,,symm
```

```

finish

/solu
eresx,no
tref,30
time,1e-6
LDREAD,TEMP,1,1,, 'SS400','rth',''
solve
*do,t,1.25,120.75,1.25
time,t
LDREAD,TEMP,,,t, 'SS400','rth',''
solve
*enddo
*do,i,1,26,1
time,50+i*25
LDREAD,TEMP,4,i,, 'SS400','rth',''
solve
*enddo
finish

```



รูปที่ 3.7 mesh ของไฟไนต์เอลิเมนต์และค่าขอบ

รูปที่ 37 แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ใช้วิเคราะห์ปัญหาทางกลศาสตร์ ใช้ **mesh** ขนาด **25x25** มิลลิเมตร ค่าขอบ การขจัดที่จุดเริ่มต้น u_x และ u_y เท่ากับ **0** และที่ขอบล่าง $\frac{\partial u}{\partial y} = 0$



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 4

การดำเนินการทดลอง

ในกระบวนการเชื่อมเหล็กกล้าแผ่นบางกว้าง 140 มม. ยาว 450 มม. ความหนา 3.2 มม. ขั้นตอนแรกทำการจำลองกระบวนการเชื่อมด้วยการ **fill gap** ช่องว่างระหว่างชิ้นงานซึ่งมีความกว้าง 2.3 มม. ด้วยกระบวนการเชื่อม MIG จนกระทั่ง **filler metal** เสมอขอบผิวด้านบนของชิ้นทดลอง

ในส่วนของการจำลองกระบวนการควบคุมการกระจายอุณหภูมิขณะดำเนินการเชื่อม ทำการเชื่อมพร้อมหัวเผา **Air-LPG** เคลื่อนที่พร้อมกันกับหัวเชื่อม

การวัดการกระจายอุณหภูมิขณะดำเนินการเชื่อม ใช้ **data logger** แบบ 4 ช่องทำการบันทึกอุณหภูมิบริเวณแนวเชื่อมและภายในชิ้นงานเพื่อยืนยันผลของการควบคุมการกระจายอุณหภูมิ การวัดค่าการหดตัวตามขวางทำโดยการบันทึกค่าความแตกต่างระยะห่างของเส้นที่ขีดไว้ก่อนและหลังดำเนินการเชื่อมด้วย **height gauge** ด้วยกล้องกำลังขยาย 20 เท่า ติดตั้งบนแกนของ **digital vernier caliper**

4.1 อุปกรณ์การทดลอง

1. เครื่องเชื่อม MIG
2. หัวเผา Air-LPG ควบคุมการกระจายอุณหภูมิ
3. **height-gauge** ใช้ขีดเส้นอ้างอิงบริเวณแนวเชื่อมก่อนทำการเชื่อม เพื่อศึกษาค่าการหดตัวตามขวางของชิ้นงาน
4. **data logger** บันทึกอุณหภูมิขนาด 4 ช่อง
5. กล้องกำลังขยาย 20 เท่า ติดตั้งบนแกนของ **vernier caliper** เพื่อวัดค่าการหดตัวตามขวางของชิ้นงานเชื่อม
6. เครื่อง **spot welding** เพื่อติด **thermocouple** บนผิวชิ้นงาน

4.2 กระบวนการเชื่อมที่ใช้ในการทดลอง

การถ่ายเทพลังงานในของไหลทุกชนิดจะเกิดขึ้นเมื่อของไหลที่มีอุณหภูมิต่างกันชนกับสิ่งกีดขวาง แล้วเกิดการหมุนตัว การหมุนตัวจะทำให้พลังงานความร้อนถ่ายเทไปสู่ส่วนที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า เมื่อโลหะเหลวชนกับแนวเชื่อม เกิดเป็นบ่อหลอมเหลวที่มีการหมุนตัวของโลหะก่อนเย็นตัวลง ความร้อนจำนวนมากไหลไปสู่ชิ้นงาน กระบวนการเชื่อมที่ใช้รูปเชื่อมมีลักษณะการถ่ายเทพลังงานดังกล่าว ดังนั้นในการศึกษานี้เลือกกระบวนการเชื่อม MIG การถ่ายโลหะเป็นแบบหยดโลหะ พลังงานความร้อนมีแนวโน้มจะถ่ายเทไปสู่บรรยากาศโดยตรง แนวเชื่อมเย็นตัวอย่างเร็ว กระแสที่ใช้ในการศึกษา 55แอมแปร์ ความต่างศักย์ 20 โวลต์



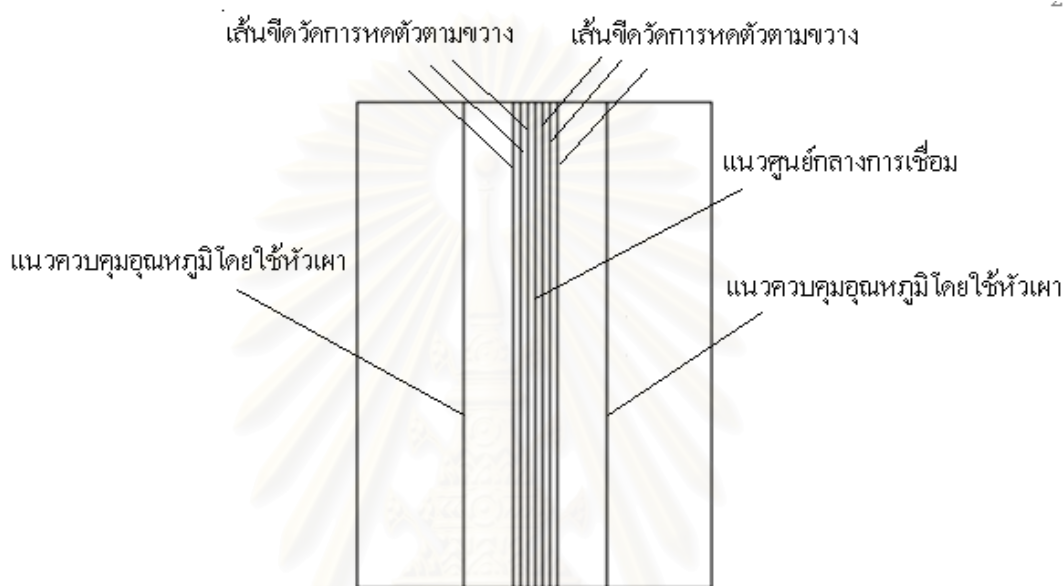
รูปที่ 41 เครื่องเชื่อมที่ใช้ในการทดลอง

4.3 การวัดการหดตัวตามขวางของชิ้นงานเชื่อม

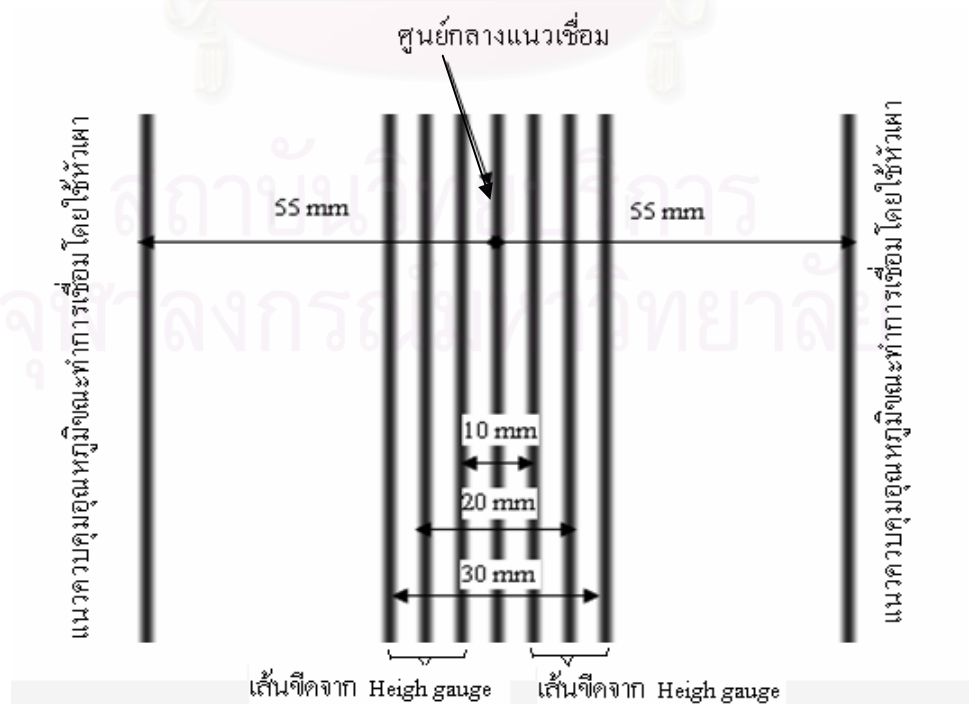
ก่อนดำเนินการเชื่อม ทำการขีดเส้นตามความยาวแนวเชื่อม ที่ตำแหน่ง 5, 10 และ 15 มม. เนื่องจาก ที่ตำแหน่ง 5 มม. เป็นตำแหน่งที่มีการหดตัวตามขวางมากที่สุด [5] ตำแหน่งของเส้นขีดถัดมาเป็นตำแหน่งของ จุดต่อของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ ทำการวัดระยะห่างของเส้นขีดก่อนดำเนินการเชื่อม เมื่อทำการเชื่อมเสร็จแล้ว ปล่อยให้ชิ้นงานเย็นตัวลงสู่อุณหภูมิห้อง ทำการวัด

ระยะห่างของเส้นขีดอีกครั้ง ครึ่งหนึ่งของค่าความแตกต่างของค่าที่อ่านได้คือค่าการหดตัวตามขวางของชิ้นงานนั้น

รูปที่ 42 ตำแหน่งของเส้นขีดที่ใช้ศึกษาการหดตัวตามขวางของชิ้นงานเชื่อม รูปที่ 45 กล้องส่องกำลังขยาย 20 เท่า ติดตั้งบนแกนของ digital vernier caliper ใช้ในการวัดค่าการหดตัวตามขวาง



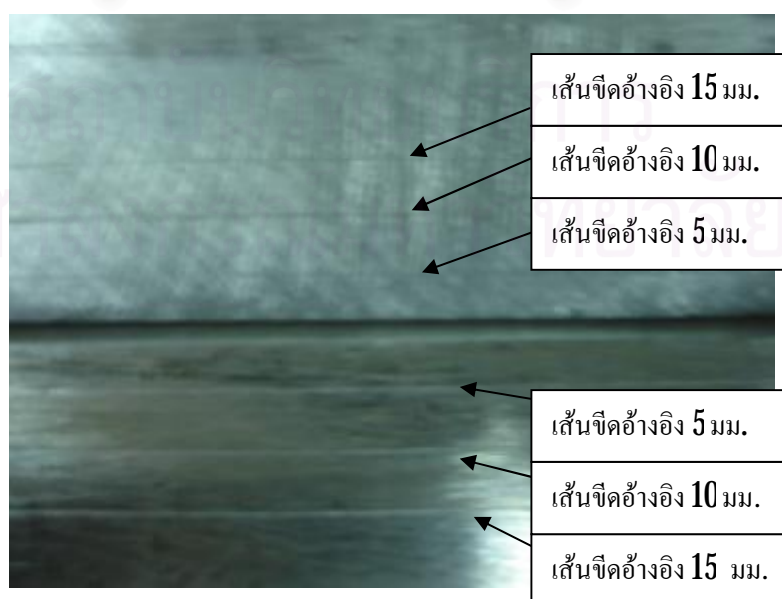
รูปที่ 42 schematic ตำแหน่งของเส้นขีดที่ใช้ศึกษาการหดตัวตามขวางของชิ้นงานเชื่อม



รูปที่ 43 ภาพขยายแสดงระยะห่างของ ตำแหน่งของเส้นขีดที่ใช้ศึกษาการหดตัวตามขวางของ
ชิ้นงานเชื่อม



รูปที่ 44 การจับยึดชิ้นงานและกล้องวัดระยะการหดตัวตามขวางติดตั้งบน linear



รูปที่ 45 เส้นขีดที่ใช้ศึกษาการหดตัวตามขวางของชิ้นงานเชื่อม



รูปที่ 46 กิ่งต่องกำลังขยาย 20 เท่า ติดตั้งบนแกนของ digital vernier caliper

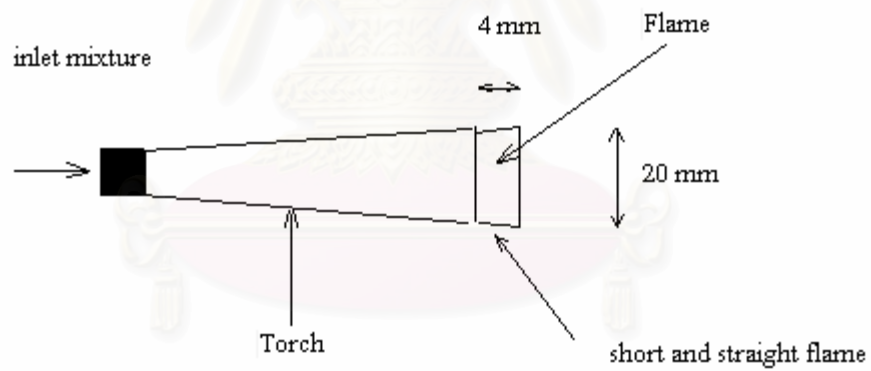
4.4 การควบคุมการกระจายอุณหภูมิขณะทำการเชื่อม

จากการศึกษาการลดการบิดตัวระหว่างกระบวนการเชื่อมที่ผ่านมา[2] ผู้ศึกษาใช้หัวเผา **oxy-acetylene** ในการเพิ่มค่าอุณหภูมิที่ระยะห่างจากแนวเชื่อม เพื่อควบคุมการกระจายอุณหภูมิใกล้บริเวณแนวเชื่อม เพื่อเหนี่ยวนำความเค้นแรงดึงให้เกิดขึ้นระหว่างแหล่งความร้อนจากหัวเชื่อมและหัวเผา การศึกษานี้เลือกหัวเผาควบคุมอุณหภูมิแบบ **Air-LPG** ที่กระจายตัวเป็นรูปสี่เหลี่ยม รูปที่ 4.2 หัวเผาควบคุมอุณหภูมิแบบ **Air-LPG**

การกำหนดขนาดของ **Heat input** จากหัวเผา **Air-LPG** ซึ่งขึ้นอยู่กับอัตราการไหลของแก๊ส **LPG** ในการศึกษาวิจัยการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของแก๊ส **LPG** ขนาด 31 กิโลกรัม บนเครื่องชั่งดิจิตอลขนาดพิกัด 5 กิโลกรัม ให้ได้อัตราการไหลที่ต้องการก่อนทำการเชื่อม ควบคุมอัตราการไหลให้คงที่โดยใช้ **pressure regulator** ปรับค่าความดันแก๊สที่ 1 บาร์



รูปที่ 47 หัวเผาควบคุมอุณหภูมิแบบ Air-LPG ที่ใช้ในการทดลอง



รูปที่ 48 ลักษณะของเปลวไฟที่ใช้ในการควบคุมอุณหภูมิขณะดำเนินการเชื่อม



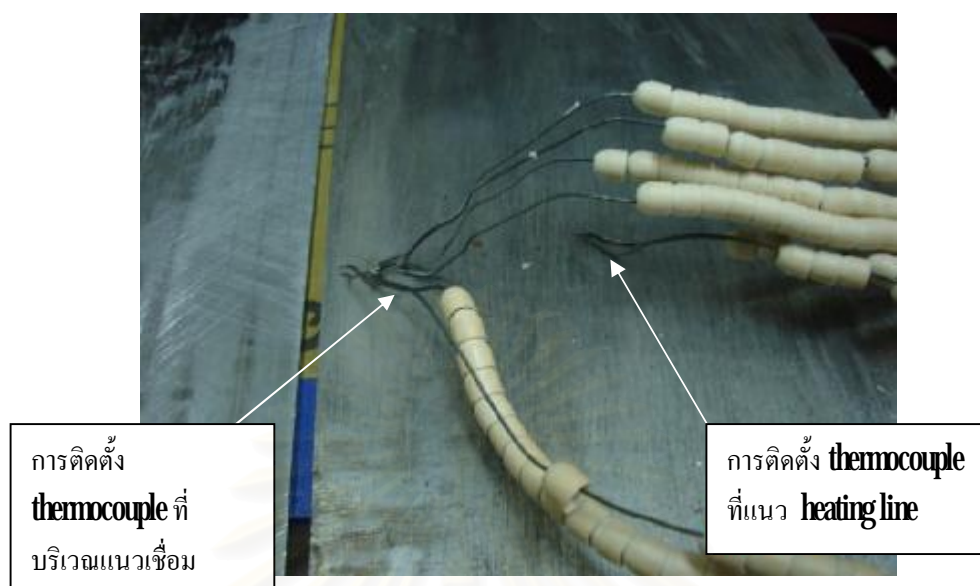
รูปที่ 49 เครื่องชั่งดิจิตอลวัดความเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของถังแก๊ส LPG เพื่อกำหนดอัตราการไหลของแก๊ส

4.5 การบันทึกการกระจายอุณหภูมิและการติดตั้ง thermocouple ที่ผิวชิ้นงาน

บันทึกการกระจายอุณหภูมิบริเวณแนวเชื่อมที่ตำแหน่งเดียวกับเส้นจีดใช้ data logger แบบ 4 ช่องการติดตั้ง thermocouple ทำโดยกระบวนการ spot welding บนผิวชิ้นงานด้วยเครื่อง spot welding ที่ตำแหน่งเดียวกันกับสันจีดที่ใช้วัดค่าการหดตัวตามขวาง



รูปที่ 410 คาต้าลอกเกอร์ที่ใช้บันทึกการกระจายอุณหภูมิของชิ้นทดลอง



รูปที่ 411 การติดตั้ง thermocouple บริเวณแนวเชื่อมและแนว heating line

4.6 ขั้นตอนการดำเนินการทดลองโดยสรุป

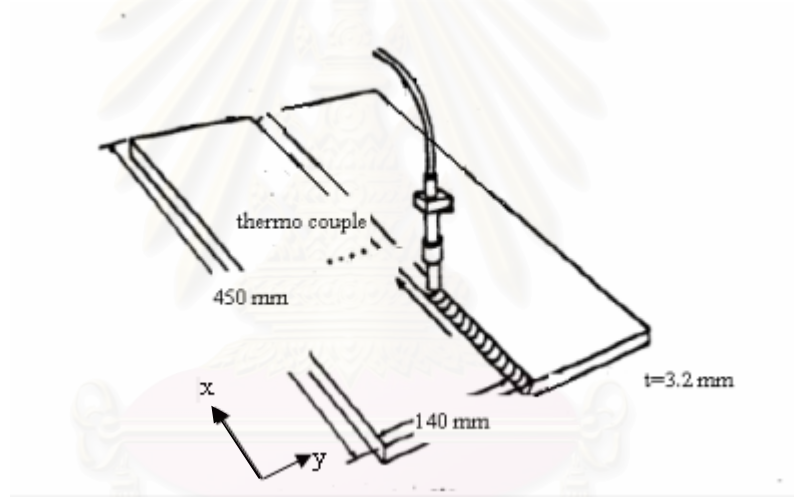
1. ทำการเชื่อมขึ้นทดลองเหล็กกล้า SS400 ขนาดกว้าง 140 มม. ยาว 450 มม. หนา 3.2 มม. ด้วยกระบวนการเชื่อม MIG กระแสที่ใช้ 55 แอมแปร์ ความต่างศักย์ 20 โวลต์ ความเร็วในการเชื่อม 375 มม./วินาที บันทึกการกระจายอุณหภูมิที่ตำแหน่ง 5,10,15 และ 55 มิลลิเมตร และค่าการหดตัวตามขวางที่ตำแหน่ง 5,10 และ 15 มิลลิเมตร เมื่อขึ้นงานเย็นตัวลงสู่อุณหภูมิห้อง
2. ทำการเชื่อมขึ้นทดลองพร้อมด้วยหัวเผาควบคุมอุณหภูมิที่ปรับค่า ฮีท อินพุตให้ได้ค่าประมาณเศษหนึ่งส่วนสามของ ฮีท อินพุต จากหัวเชื่อม บันทึกการกระจายอุณหภูมิและค่าการหดตัวตามขวางที่ตำแหน่งเดียวกันกับหัวข้อที่ 1
3. วิเคราะห์ผลการทดลองและแนวโน้มความกว้างบริเวณครากตัวของแนวเชื่อมด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์สำเร็จรูป การวิเคราะห์ผลการทดลองแบ่งเป็นการวิเคราะห์ปัญหาการนำความร้อนแล้วนำผลการกระจายอุณหภูมิที่ได้ไปวิเคราะห์ปัญหาทางกลศาสตร์ที่ทำการศึกษาคือค่าการหดตัวตามขวางของชิ้นงานเชื่อม

บทที่ 5

ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

5.1 การกระจายอุณหภูมิเมื่อทำการเชื่อมด้วยกระบวนการเชื่อมแบบปกติ

ในการศึกษานี้เริ่มจากศึกษาปรากฏการณ์ทางความร้อนและทางกล ของกระบวนการเชื่อมแบบปกติ เพื่อใช้เป็นชิ้นงานอ้างอิงในการเปรียบเทียบความแตกต่างของผลในการศึกษาทาง **thermal stresses** ได้แก่ **temperature history** และค่าการเคลื่อนตัวตามขวาง ระหว่างชิ้นงานซึ่งได้รับการระทางทางความร้อน ที่แตกต่างกัน



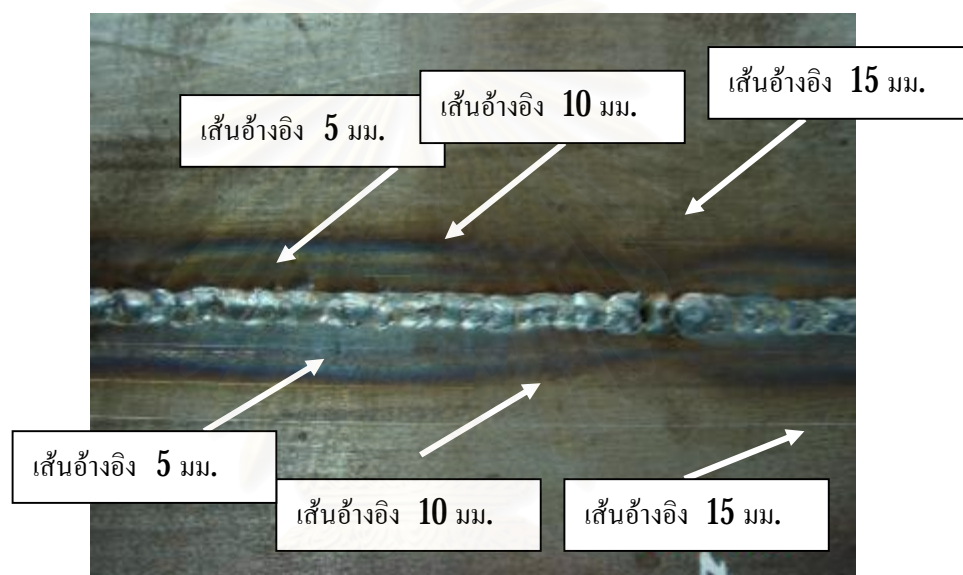
รูปที่ 5.1 กระบวนการเชื่อมแบบปกติ

5.1.1 ผลการกระจายอุณหภูมิบริเวณแนวเชื่อม

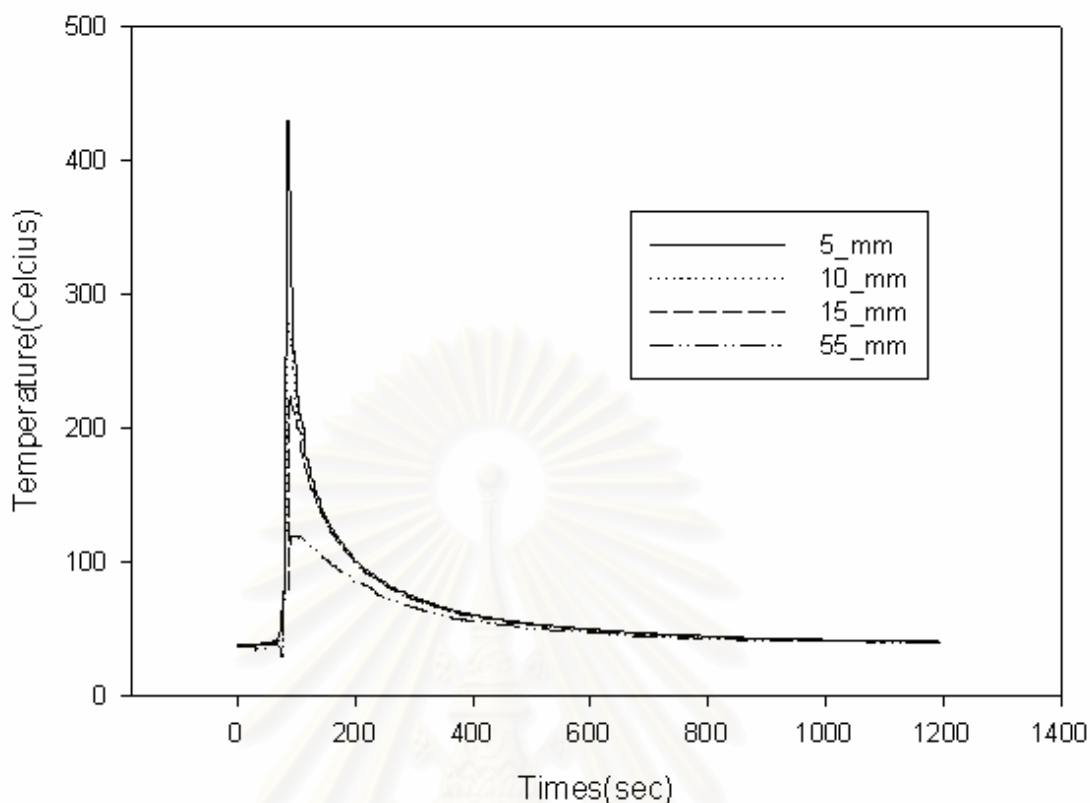
ในการศึกษานี้ใช้ชิ้นงานขนาด **450x140** มิลลิเมตร ซึ่งเป็นขนาดที่เกิดปรากฏการณ์ ทางความร้อนและทางกลศาสตร์ใกล้เคียงกับ โครงสร้างเหล็กจริงอ้างอิงจากการศึกษาของ **Dergamo** และคณะ [8] ในการบันทึกการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของชิ้นงานเชื่อม จะทำการบันทึกการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิบริเวณแนวเชื่อม ซึ่งเป็นบริเวณที่มีการครากตัวของชิ้นงานเกิดขึ้น เริ่มบันทึกอุณหภูมิที่ระยะ **5 มม.** ซึ่งจากการศึกษาของ **Mohktar Awang [10]** พบว่าการหดตัวตามขวางของชิ้นงานมีลักษณะเป็นเชิงเส้น โดยที่ระยะตามขวางแนวเชื่อมที่ **5 มม.** เป็นจุดที่มีการหดตัวสูงสุด

และที่ระยะ 55 มิลลิเมตร เป็นบริเวณภายในชิ้นงานเชื่อมที่มีอุณหภูมิสม่ำเสมอ เป็นบริเวณเหมาะสมที่ใช้ในการควบคุมการกระจายอุณหภูมิด้วยหัวเผา Air-LPG จึงต้องทำการติดตั้ง **thermocouple** ที่ตำแหน่ง 55 มิลลิเมตรด้วย

การติดตั้ง **thermocouple** บริเวณแนวเชื่อมได้กล่าวถึงแล้วในหัวข้อ 4.5 กระบวนการเชื่อม ทำโดย **fill gap** ช่องว่างให้เต็มเท่านั้น ใช้กระแสในกระบวนการเชื่อม 55 แอมแปร์ ความต่างศักย์ 20 โวลต์ความเร็วในการเชื่อม 3.75 มม. ต่อวินาที



รูปที่ 5.2 แนวเชื่อมพร้อมเส้นอ้างอิงที่ขีดไว้ก่อนทำการเชื่อมโดยใช้ **Heigh Gauge**

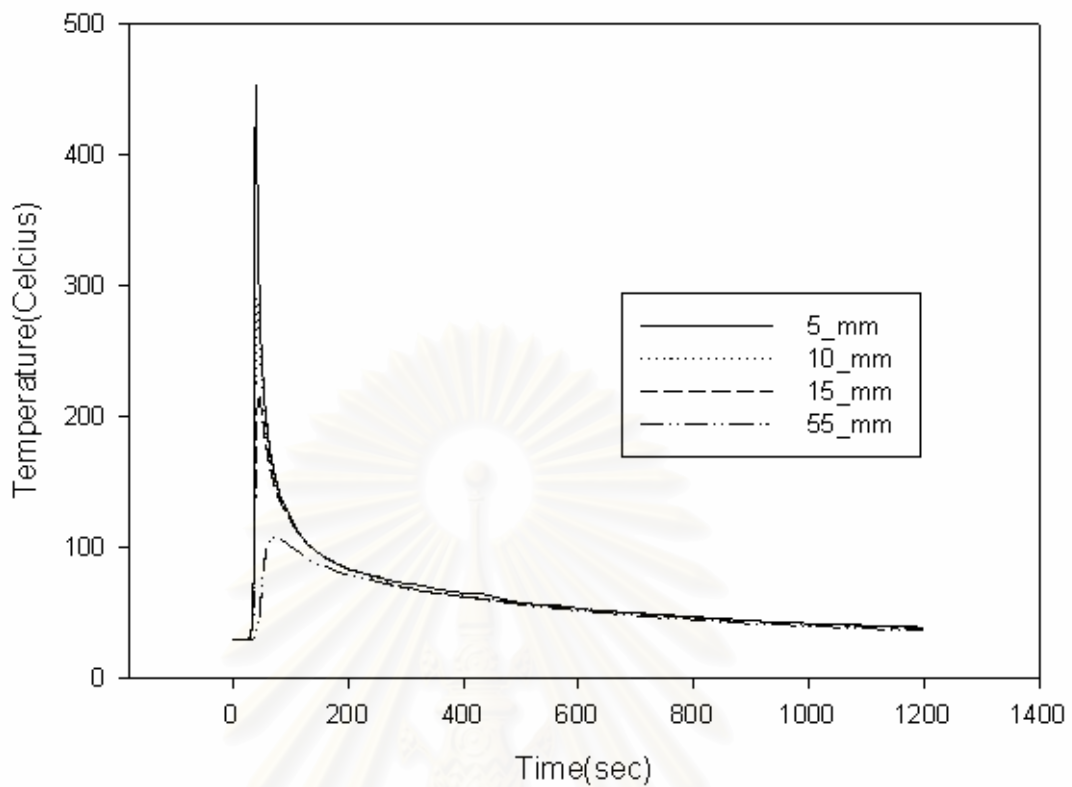


รูปที่ 5.3 การกระจายอุณหภูมิบริเวณแนวเชื่อมของกระบวนการเชื่อมแบบปกติ

รูปที่ 5.3 ผลการทดลองการกระจายอุณหภูมิบริเวณแนวเชื่อม พบว่าที่ตำแหน่ง 5 มม. จากศูนย์กลางแนวเชื่อม มีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างรวดเร็ว เนื่องจากค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของเหล็กกล้า SS400 มีค่าต่ำมากที่อุณหภูมิสูง การถ่ายเทพลังงานมีแนวโน้มจะเกิดขึ้นกับบรรยากาศ ที่ตำแหน่ง 10 มิลลิเมตร และ 15 มิลลิเมตร อุณหภูมิชิ้นงานมีค่าไม่สูง ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนยังคงมีค่าสูง การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิต่ำกว่าที่ตำแหน่ง 5 มิลลิเมตร และที่ตำแหน่ง 55 มิลลิเมตร การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเป็นไปอย่างราบเรียบ

5.1.2 ผลการวิเคราะห์การกระจายอุณหภูมิบริเวณแนวเชื่อมด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์สำเร็จรูป

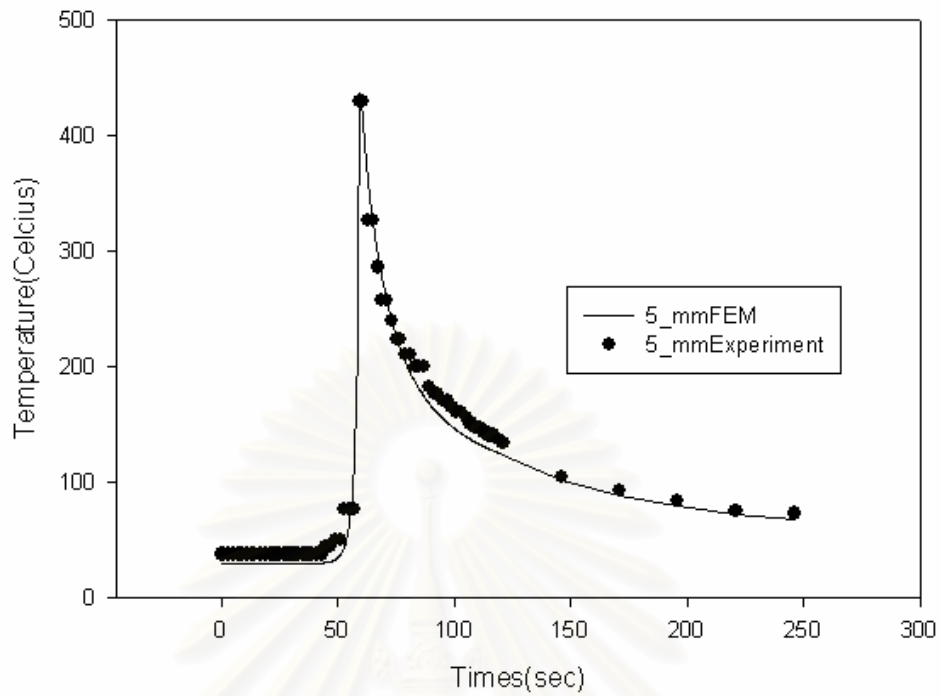
การวิเคราะห์การกระจายอุณหภูมิขณะทำการเชื่อมใช้แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์สองมิติ ขนาด mesh 2.5 มิลลิเมตร x 2.5 มิลลิเมตร ค่าอุณหภูมิเริ่มต้น 30 องศาเซลเซียส ค่าขอบของแบบจำลองรวมการพาความร้อนและการแผ่รังสีความร้อนเข้าด้วยกันดังอธิบายไว้ในหัวข้อ 3.1.6



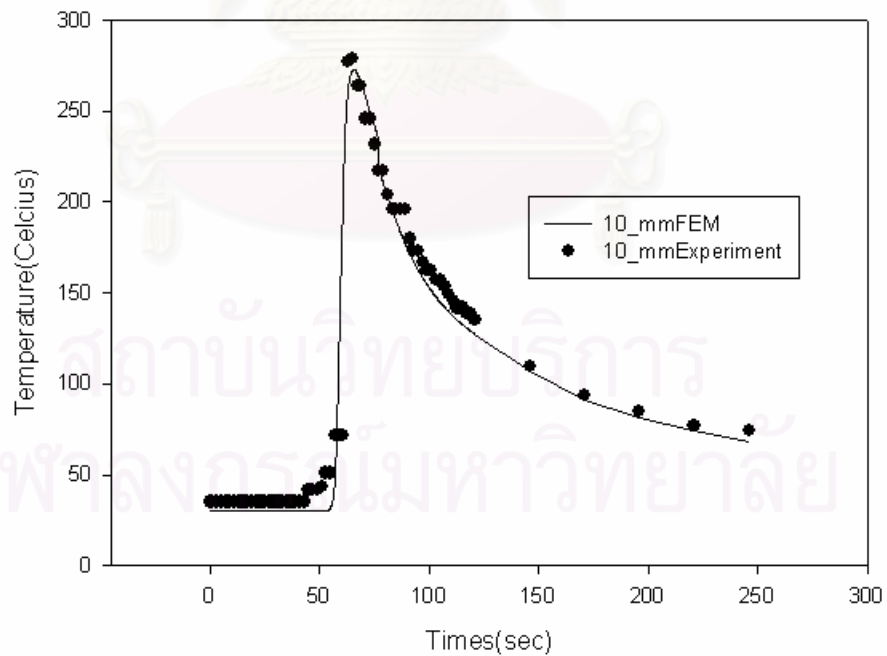
รูปที่ 5.4 การกระจายอุณหภูมิบริเวณแนวเชื่อมจากแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์สำเร็จรูป

รูปที่ 5.4 ผลการคำนวณการกระจายอุณหภูมิด้วยแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์สำเร็จรูป พบว่า แนวโน้มการเปลี่ยนแปลงการกระจายอุณหภูมิที่แต่ละตำแหน่งของจุดที่ทำการวัดอุณหภูมิ และค่าอุณหภูมิสูงสุดของแต่ละจุดมีค่าสอดคล้องกับผลการทดลอง ดังนั้นแบบจำลองนี้จึงมีความน่าเชื่อถือเพียงพอที่จะนำไปใช้ศึกษาปรากฏการณ์จากกระบวนการเชื่อมได้

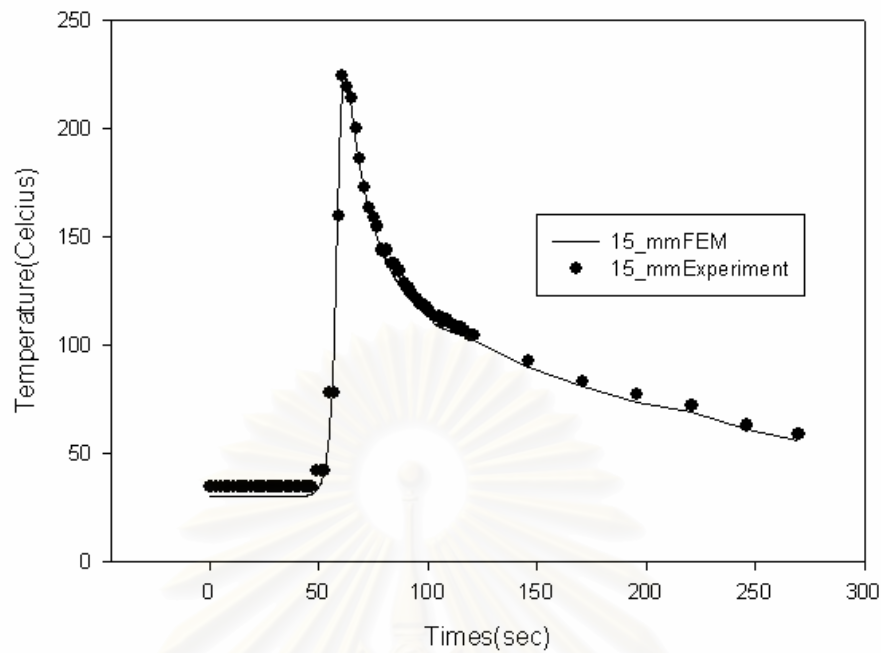
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 5.5 การกระจายอุณหภูมิบริเวณแนวเชื่อม (5 มิลลิเมตร)

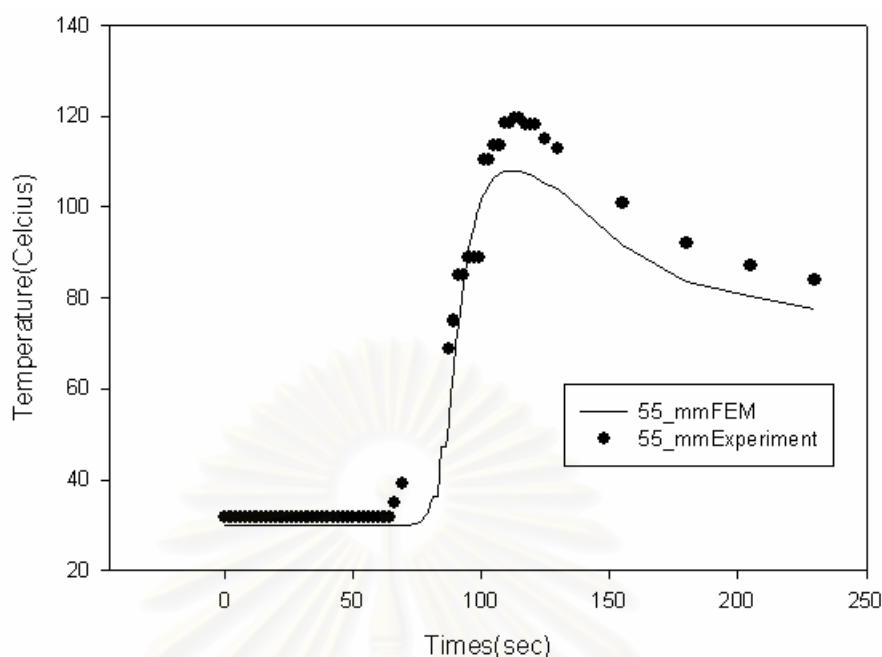


รูปที่ 5.6 การกระจายอุณหภูมิบริเวณแนวเชื่อม (10 มิลลิเมตร)



รูปที่ 5.7 การกระจายอุณหภูมิบริเวณแนวเชื่อม (15 มิลลิเมตร)

รูปที่ 5.5-5.7 เปรียบเทียบรายละเอียดการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของชิ้นทดลองกับผลการคำนวณด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิจากผลการคำนวณมีความสอดคล้องกับผลการทดลอง ที่ตำแหน่ง 5 มิลลิเมตร (รูปที่ 5.5) เมื่อหัวเชื่อมเคลื่อนที่เข้ามา (60 วินาที) อุณหภูมิเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว เมื่อหัวเชื่อมวิ่งผ่านไป ช่วงแรกอุณหภูมิตกลงอย่างรวดเร็ว แต่เมื่ออุณหภูมิชิ้นงานต่ำลง ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนเริ่มมีค่าสูงขึ้น อัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิมียุ่ต่ำลง



รูปที่ 5.8 การกระจายอุณหภูมิบริเวณภายในชิ้นงาน (55 มิลลิเมตร)

รูปที่ 5.8 เปรียบเทียบรายละเอียดการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของชิ้นทดลองกับผลการคำนวณด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ ผลการคำนวณมีความสอดคล้องกับผลการทดลอง ที่ตำแหน่ง 55 มิลลิเมตร ที่อุณหภูมิค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนมีค่าสูง การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเป็นไปอย่างสม่ำเสมอ ซึ่งบริเวณนี้เหมาะเป็นตำแหน่งที่จะทำการสร้างการกระจายอุณหภูมิจากพลังความร้อนจากหัวเผาเพื่อควบคุมการกระจายอุณหภูมิให้เหมาะสม ซึ่งจะกล่าวถึงในหัวข้อ 5.3

5.2 การหัดวัดตามแนวขวางเมื่อชิ้นงานเย็นตัวลงสู่อุณหภูมิห้องเมื่อทำการเชื่อมด้วยกระบวนการเชื่อมแบบปกติ

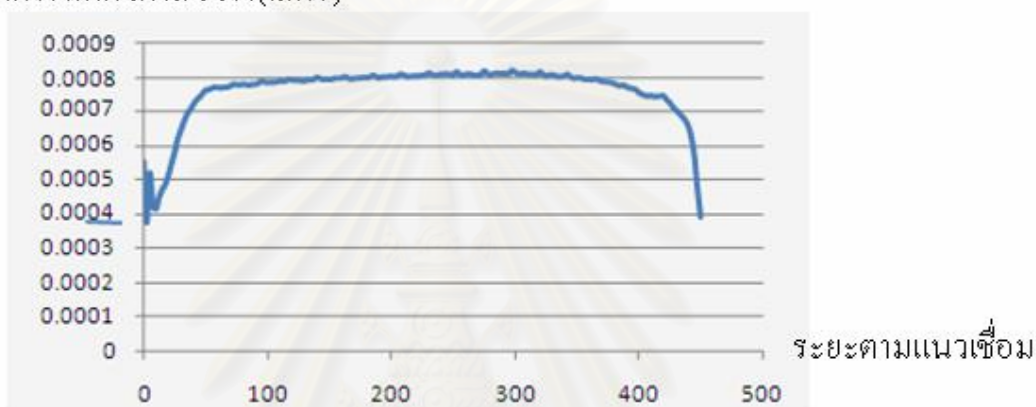
5.2.1 ค่าการหัดวัดตามแนวขวางเมื่อชิ้นงานเย็นตัวลงสู่อุณหภูมิห้อง

ในการศึกษาการหัดวัดตามขวางจะทำการขีดเส้นตามความยาวแนวเชื่อมก่อนทำการเชื่อมด้วย **height gauge** ที่ตำแหน่ง 5 มม. ซึ่งเป็นตำแหน่งที่มีค่าการหัดวัดตามขวางสูงสุด [10] และขีดเส้นอีกสองเส้นที่ตำแหน่ง 10 และ 15 มม. ตามลำดับ

ผลการคำนวณค่าการหัดวัดตามขวางด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ ค่าการหัดวัดตามขวางจะมีค่าสูงสุดภายใน **range 200** มิลลิเมตร ตามความยาวกลางชิ้นงาน คือที่ตำแหน่ง 150 ถึง 350

มิลลิเมตรจากจุดเริ่มต้นความยาวแนวเชื่อม จากความยาวชิ้นงานหรือความยาวแนวเชื่อมซึ่งมีความยาวรวมเป็น 450 มิลลิเมตร ดังนั้นทำการศึกษาค่าการหดตัวตามขวางที่ตำแหน่งเริ่มต้น 150 มิลลิเมตร ตำแหน่งกึ่งกลางชิ้นงาน 225 มิลลิเมตร และตำแหน่งสุดท้าย 350 มิลลิเมตร ตามลำดับ รูปที่ 5.9 ค่าการหดตัวตามขวางตามความยาวแนวเชื่อม ตารางที่ 5.1 แสดงค่าการหดตัวตามขวางของชิ้นงานที่บริเวณแนวเชื่อม

ค่าการหดตัวตามขวาง(เมตร)



รูปที่ 5.9 ค่าการหดตัวตามขวางตามความยาวแนวเชื่อม ที่ตำแหน่ง 5 มิลลิเมตร

ตารางที่ 5.1 ค่าการหดตัวตามขวางของชิ้นงานที่บริเวณแนวเชื่อม

ตำแหน่งตามขวาง ตำแหน่งตามความยาว	5 mm	10 mm	15 mm
150 mm	0.12	0.10	0.08
225 mm	0.13	0.11	0.08
350 mm	0.12	0.10	0.08

จากผลการทดลองพบว่าค่าการหดตัวที่ระยะ 5 มม. มีค่าสูงสุด และค่าการหดตัวที่ตำแหน่งถัดออกมามีค่าลดลงตามลำดับ จากผลการศึกษาระจายอุณหภูมิในหัวข้อ 5.1 บริเวณนี้มี **temperature gradient** หมายความว่าวัสดุพยายามขยายตัวออกไปในขณะที่วัสดุโดยรอบที่มีอุณหภูมิต่ำจะต้านการขยายตัวไว้และค่าคุณสมบัติการครากตัวที่อุณหภูมิสูงมีค่าต่ำ ตำแหน่งนี้จึงเป็นบริเวณ

ที่มีโอกาสเกิดการครากตัวมากกว่าบริเวณอื่น ซึ่งจะทำการคำนวณความกว้างบริเวณครากตัวด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ในหัวข้อถัดไป

5.2.2 ผลการวิเคราะห์การหดตัวตามขวางด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์สำเร็จรูป

แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์เป็นวัสดุที่มีความต่อเนื่องต่อเนื่อง ถูกกระทำโดยความฟลักซ์ร้อนที่พื้นผิวเอลิเมนต์ ค่าคุณสมบัติของวัสดุขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ บริเวณแนวเชื่อม ค่า **temperature gradient** มีค่าสูงทำให้เนื้อโลหะไม่สามารถขยายตัวได้อย่างอิสระ เนื้อวัสดุพยายามขยายตัวออกไปจนเกินค่าความเค้นครากตัวซึ่งมีค่าต่ำที่อุณหภูมิสูง เมื่ออุณหภูมิลดลงเนื้อวัสดุไม่คืนตัวกลับสู่ตำแหน่งเดิม ตารางที่ 5.2 ค่าการเคลื่อนตัวของชิ้นงานที่บริเวณแนวเชื่อมจากการคำนวณด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์สำเร็จรูป

ตารางที่ 5.2 ค่าการหดตัวตามขวางของชิ้นงานที่บริเวณแนวเชื่อมจากการคำนวณด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์สำเร็จรูป

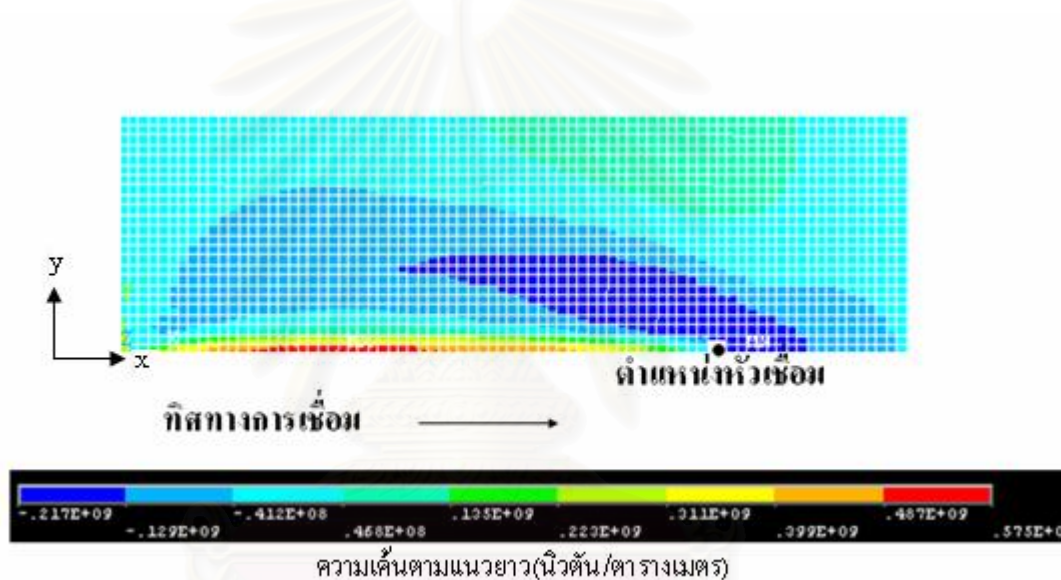
ตำแหน่งตามขวาง ตำแหน่งตามยาว	5 mm	10 mm	15 mm
150 mm	0.09	0.09	0.06
225 mm	0.09	0.09	0.06
350 mm	0.09	0.09	0.06

ผลจากการคำนวณด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์สำเร็จรูปพบว่าที่ตำแหน่ง 5 มม. จากศูนย์กลางแนวเชื่อม มีการเคลื่อนตัวสูงสุด คำนวณความกว้างบริเวณครากตัวโดยใช้ค่าความเค้นเฉือนออกตะฮีดรัลเฉลี่ยของแต่ละเอลิเมนต์โดยใช้เอลิเมนต์ขนาด 1 มิลลิเมตร ในการทำแบบจำลองได้ความกว้างบริเวณครากตัว ประมาณ 9 มม. จากแนวเชื่อม

5.3 ความเค้นที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการเชื่อมโดยการควบคุมการกระจายอุณหภูมิ

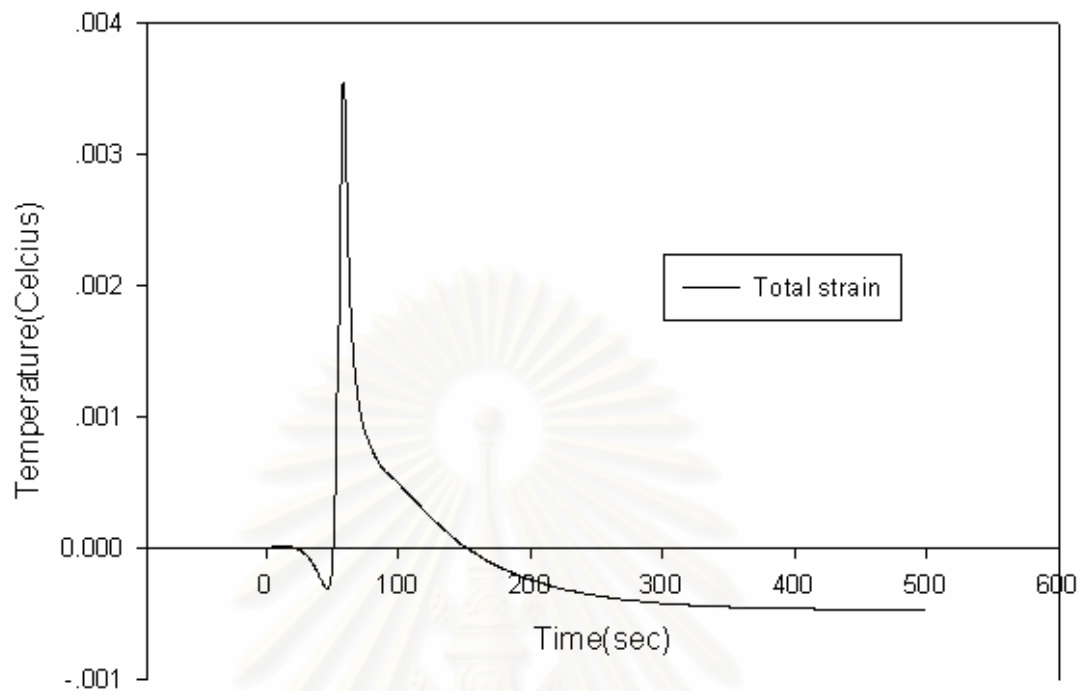
5.3.1 ผลการวิเคราะห์การกระจายความเค้นจากฮีท อินพุตจากหัวเชื่อม

ในการเลื่อนเนื้อโลหะไปด้านหน้าความเค้นแรงอัดไม่สามารถดันเนื้อโลหะออกไปตรงๆ ได้ รูปที่ 5.10 การกระจายความเค้นเนื่องจากฮีท อินพุตเดี่ยวจากหัวเชื่อมเคลื่อนที่ไปตามทิศทางการเชื่อม ปรากฏความเค้นแรงอัดค่าสูงทอดตัวยาวเป็นด้านของสามเหลี่ยม ด้านเนื้อโลหะที่ปลายยอดให้เลื่อนตัว



รูปที่ 5.10 การกระจายความเค้นจากฮีท อินพุตเดี่ยวจากหัวเชื่อมขนาด 540 วัตต์

การเปลี่ยนแปลงความเครียดรวมของเนื้อโลหะบริเวณแนวเชื่อม รูปที่ 5.11 ที่ตำแหน่งกึ่งกลางชิ้นงาน 225 มิลลิเมตร ความเร็วในการเชื่อม 3.75 มิลลิเมตรต่อวินาที ก่อนหัวเชื่อมเคลื่อนที่เข้ามาเนื้อโลหะบริเวณแนวเชื่อมได้รับความเค้นชนิดแรงกด ความเครียดทางกลที่เกิดขึ้นมีค่าเป็นลบ (-500 ไมโครเมตร) เมื่อหัวเชื่อมเคลื่อนที่เข้ามาโลหะบริเวณแนวเชื่อมได้รับภาระความร้อน ความร้อนจากการนำความร้อน ชิ้นงานขยายตัว เกิดความเครียดทางความร้อน ความเครียดรวมเพิ่มขึ้นอย่างมากอย่างมาก (2000 ไมโครเมตร) เมื่อหัวเชื่อมเคลื่อนที่ผ่านไป ชิ้นงานเย็นตัวลงอย่างรวดเร็ว เนื้อโลหะคลายความเครียดทางความร้อนออกไป คงเหลือความเครียดรวมมีค่าเป็นลบ

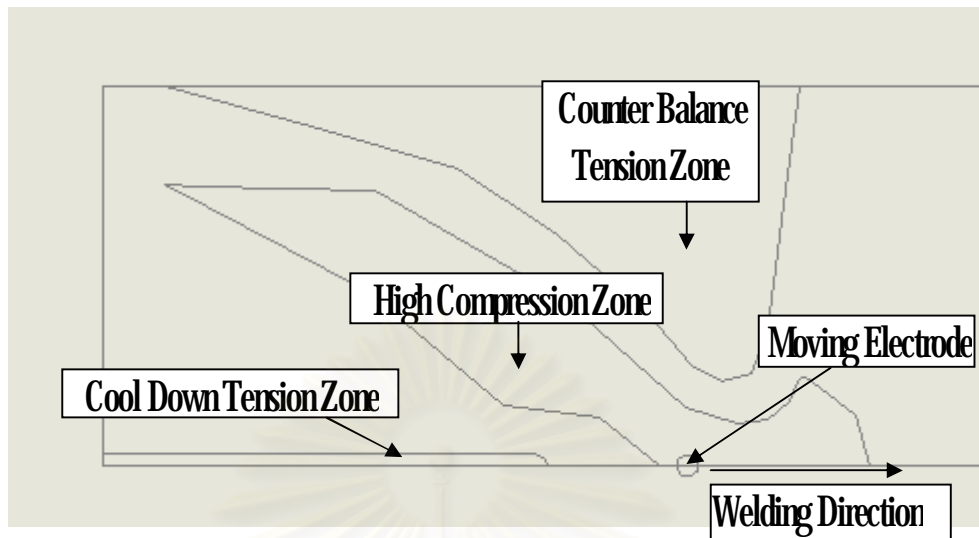


รูปที่ 5.11 การเปลี่ยนแปลงความเครียดรวมของเนื้อโลหะบริเวณแนวเชื่อม ในกระบวนการเชื่อมแบบปกติ

5.32 การประมาณขนาดของ ฮีท อินพุต ที่เหมาะสมจากหัวเผาควบคุมการกระจายอุณหภูมิ

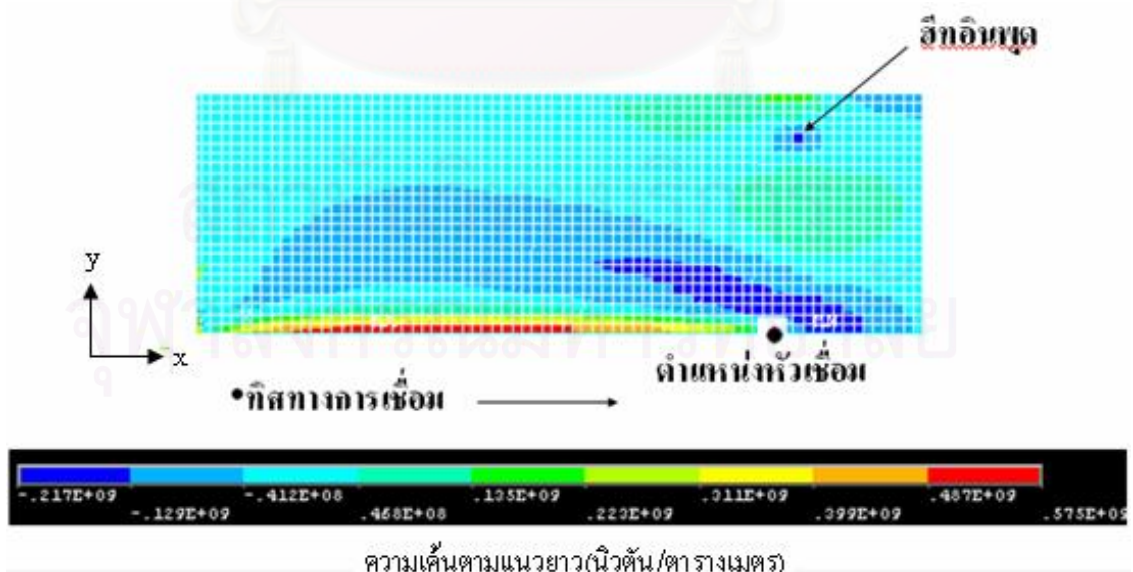
รูปที่ 5.12 ผลการคำนวณความเค้นที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการเชื่อมด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์สำเร็จรูป แนวความเค้นอัดที่เกิดขึ้นที่เพิ่มขึ้นด้านหลังหัวเชื่อมต้นเนื้อโลหะด้านหน้าหัวเชื่อมให้ครากตัว เพื่อลดความเค้นแรงอัดนี้จะทำการเดินหัวเชื่อมพร้อมกับหัวเผาควบคุมอุณหภูมิ เพื่อเหนี่ยวนำความเค้นแรงดึงให้ต้านกับความเค้นแรงอัด ที่เป็นสาเหตุของครากตัว

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



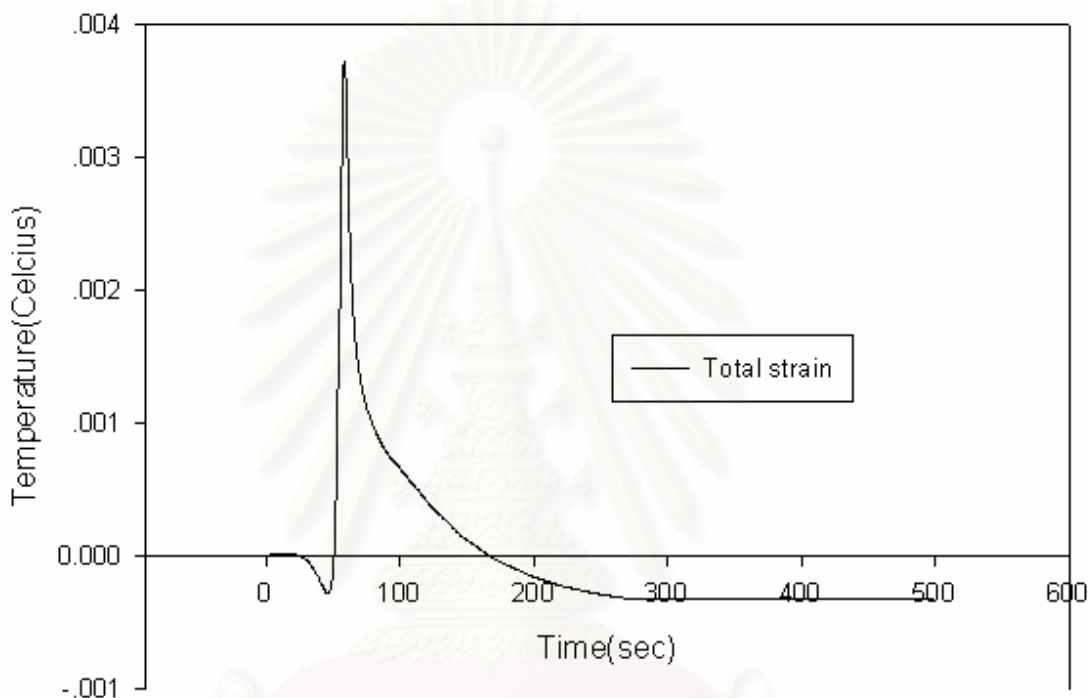
รูปที่ 5.12 schematic diagram ของบริเวณความเค้นตามแนวเชื่อมและความเค้น Octa hedral

รูปที่ 5.13 การกระจายความเค้นเนื่องจากฮีท อินพุตจากหัวเชื่อมและหัวเผาเคลื่อนที่คู่กันไป ตามทิศทางเชื่อม จากการประมาณจากระบวนการคำนวณด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ สำเร็จรูปพบว่า ฮีท อินพุตของฟลักซ์ความร้อนสม่ำเสมอขนาดเศษหนึ่งส่วนสามของฮีท อินพุต จาก หัวเชื่อม สามารถสร้างความเค้นแรงดึงในเนื้อโลหะระหว่างฟลักซ์ความร้อนทั้งสองได้เพียงพอที่จะ ควบคุมค่าความเค้นอัดที่กระจายตัวอยู่เดิมให้มีแนวโน้มลดลง การศึกษานี้ปรับ ฮีท อินพุต จากหัว เผาให้ได้ค่าประมาณ 90 วัตต์



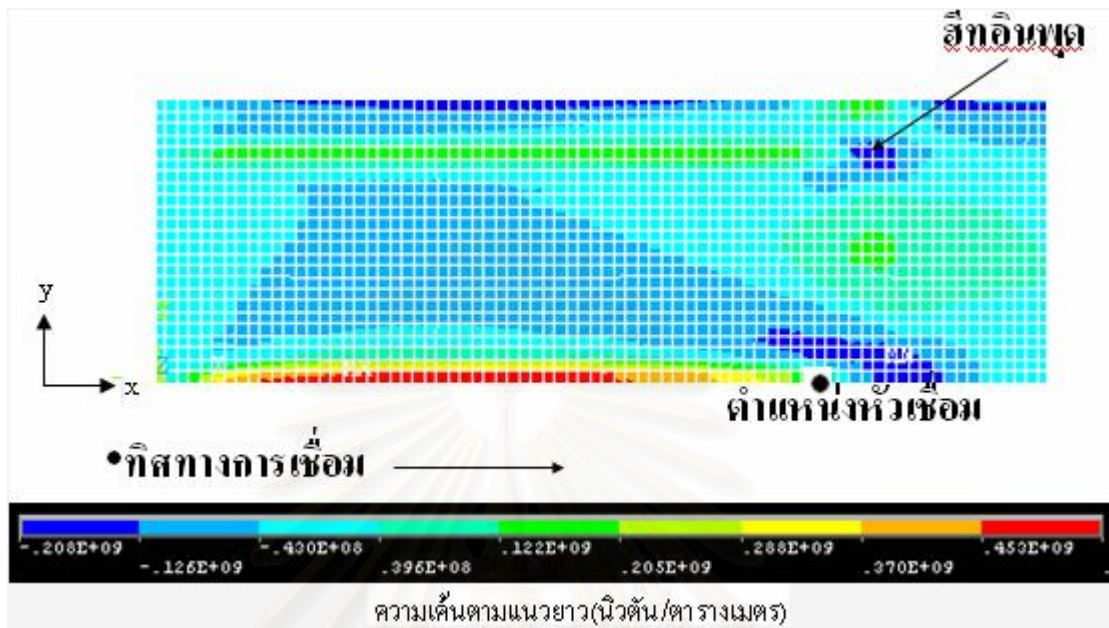
รูปที่ 5.13 การกระจายความเค้นจากฮีท อินพุตจากหัวเชื่อมขนาด 540 วัตต์และหัวเผาขนาด 95 วัตต์

รูปที่ 5.14 แสดงการเปลี่ยนแปลงความเครียดรวมของเนื้อโลหะบริเวณแนวเชื่อมเมื่อทำการเชื่อมพร้อมหัวเผาควบคุมการกระจายอุณหภูมิ โดยหัวเผาควบคุมการกระจายอุณหภูมิ สามารถควบคุมความเครียดรวมเมื่อชิ้นงานเย็นตัวลงได้อย่างมีประสิทธิภาพ แนวโน้มของความเครียดรวมลดลง

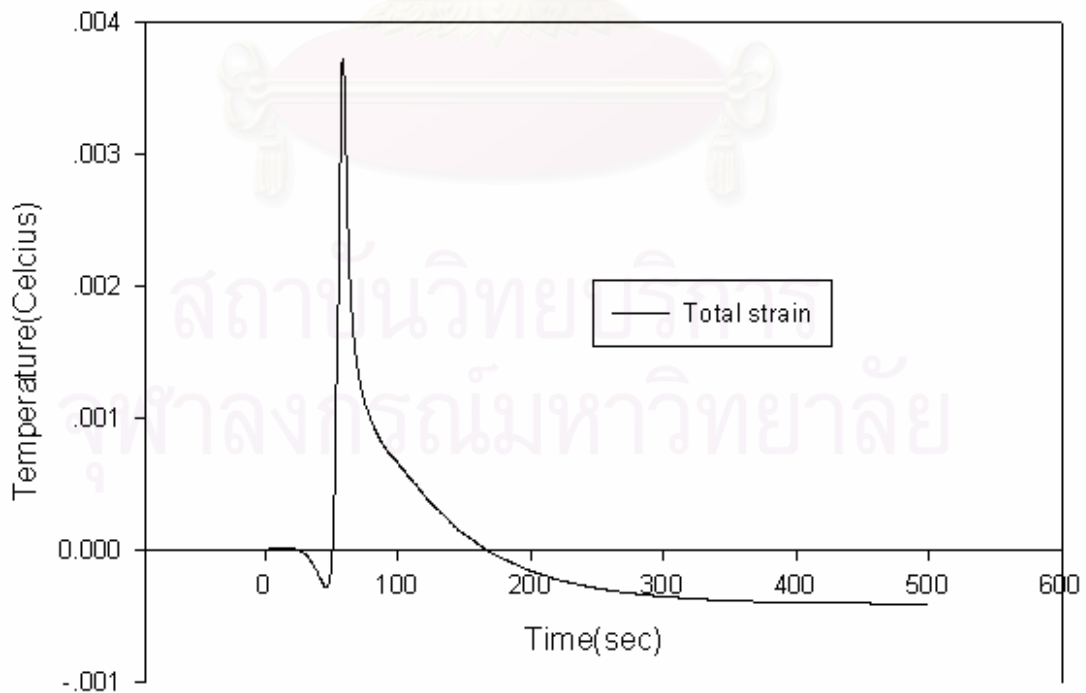


รูปที่ 5.14 การเปลี่ยนแปลงความเครียดรวมของเนื้อโลหะบริเวณแนวเชื่อม ในกระบวนการเชื่อมแบบควบคุมอุณหภูมิ

เมื่อใส่ฮีท อินพุตจากหัวเผามากเกินไป ตามรูปแสดงผลการคำนวณการกระจายความเค้นบนชิ้นงานที่ใส่ฮีท อินพุตประมาณครึ่งหนึ่งของฮีท อินพุตจากหัวเชื่อม ฮีท อินพุตจากหัวเผาสามารถเหนี่ยวนำความเค้นแรงดึงระหว่างหัวเผากับหัวเชื่อมได้ แต่ความเค้นอัดกระจายตัวกว้างมากขึ้น ความเครียดรวมมีแนวโน้มจะติดลบมากขึ้นอีก

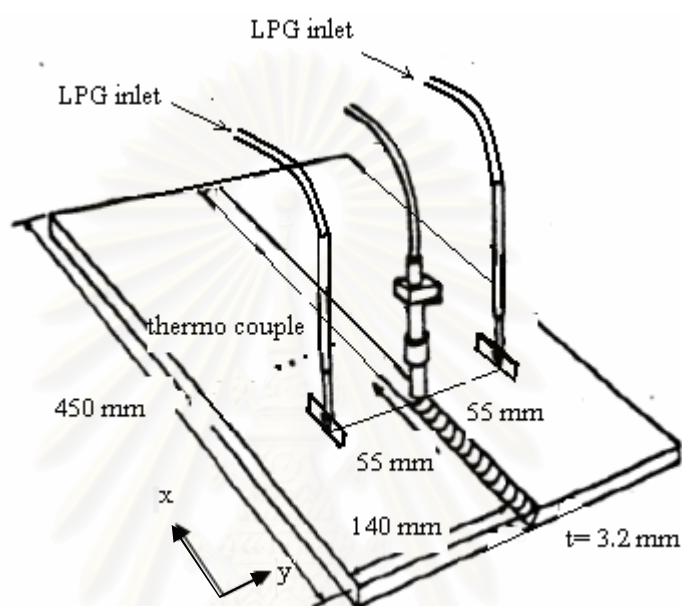


รูปที่ 5.15 การกระจายความเค้นจากฮีท อินพุตจากหัวเชื่อมขนาด 540 วัตต์และหัวเผาขนาด 180 วัตต์



รูปที่ 5.16 การเปลี่ยนแปลงความเครียดรวมของเนื้อโลหะบริเวณแนวเชื่อม เมื่อใส่ฮีท อินพุตควบคุม อุณหภูมิ 180 วัตต์

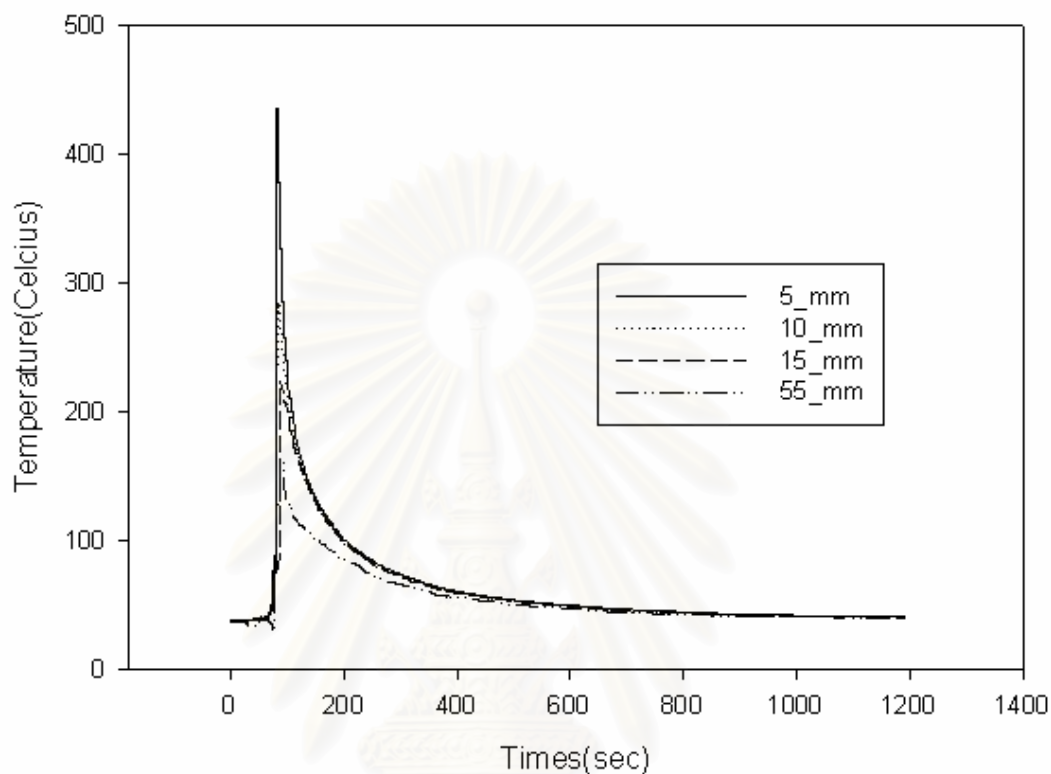
5.4 การกระจายอุณหภูมิเมื่อทำการเชื่อมพร้อมหัวเผาควบคุมอุณหภูมิ



รูปที่ 5.17 กระบวนการเชื่อมควบคุมการกระจายอุณหภูมิ

5.41 ผลการกระจายอุณหภูมิบริเวณแนวเชื่อมเมื่อทำการเชื่อมพร้อมหัวเผาควบคุมอุณหภูมิ Air-LPG

ในส่วนของการศึกษาการกระจายอุณหภูมิตั้ง **thermocouple** ที่ตำแหน่ง 5,10,15 มิลลิเมตรและที่ตำแหน่ง 55 มิลลิเมตร เพื่อยืนยันว่าหัวเผาควบคุมอุณหภูมิสามารถจ่ายพลังงาน ความร้อนอินพุตให้กับชิ้นงาน ที่ส่งผลต่อการกระจายอุณหภูมิในบริเวณที่ในกระบวนการเชื่อม แบบปกติมีอุณหภูมิสม่ำเสมอ ให้กลายเป็นบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงขึ้นจากเดิมซึ่งส่งผลต่อการกระจาย ความเค้น รูปที่ 5.18 แสดงผลการทดลองการกระจายอุณหภูมิบริเวณแนวเชื่อมด้วยกระบวนการ เชื่อมพร้อมหัวเผาควบคุมอุณหภูมิ

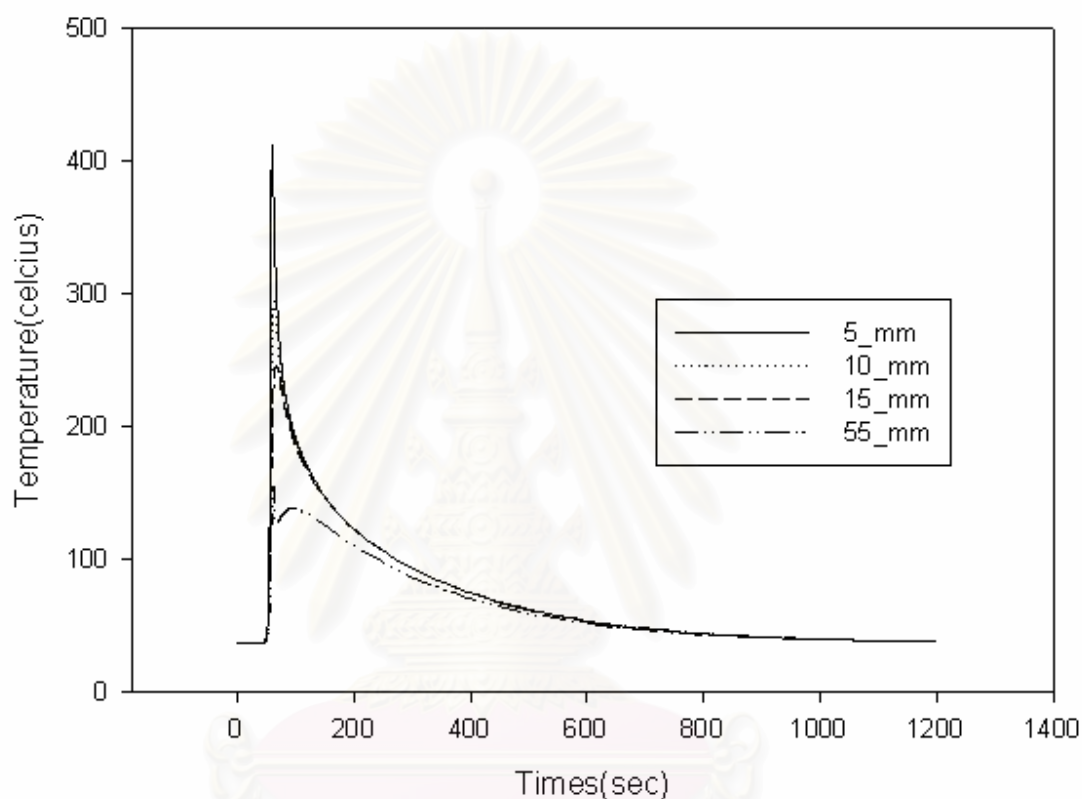


รูปที่ 5.18 แสดงการกระจายอุณหภูมิบริเวณแนวเชื่อมด้วยกระบวนการเชื่อมพร้อมหัวเผาควบคุมอุณหภูมิ

รูปที่ 5.18 แสดงผลการทดลองการกระจายอุณหภูมิบริเวณแนวเชื่อมของกระบวนการเชื่อมพร้อมหัวเผาควบคุมอุณหภูมิ พบว่าที่ตำแหน่ง 5 มม. ,10 มม และ 15 มม. มีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเพิ่มขึ้นเล็กน้อย เนื่องจากหัวเผาควบคุมอุณหภูมิ จ่ายพลังงานไปด้านการเดินทางไปสู่ปีกชิ้นงานของพลังงานความร้อนจากหัวเชื่อม

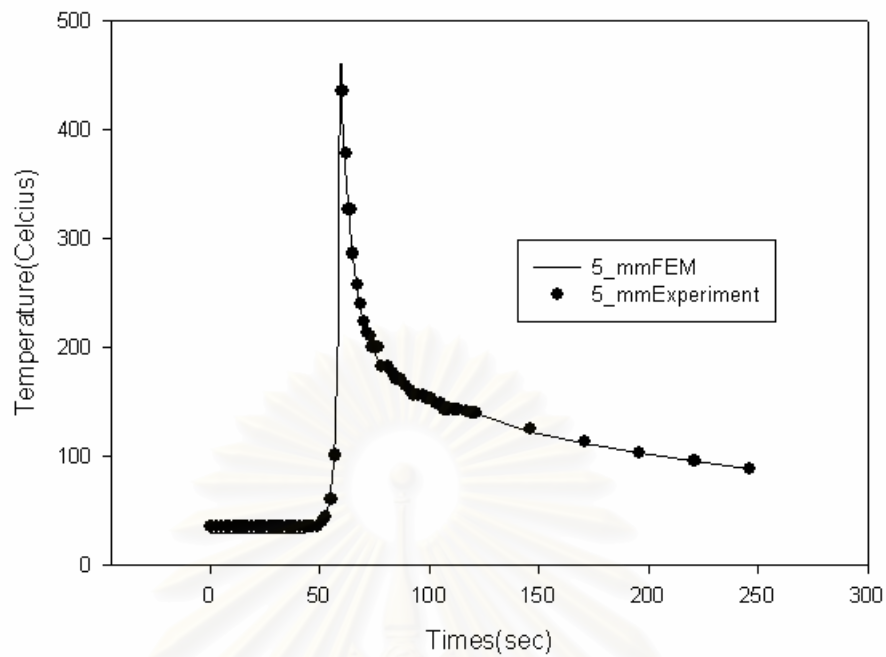
ที่ตำแหน่ง 55 มม. พบว่ามีการอุณหภูมิเพิ่มขึ้นจากกระบวนการเชื่อมแบบปกติประมาณ 30 องศาเซลเซียส ดังนั้นความร้อนจากหัวเผาควบคุมอุณหภูมิสามารถ เพิ่มอุณหภูมิในบริเวณที่แต่เดิมมีการกระจายอุณหภูมิมั่วเสมอในชิ้นงานให้มีอุณหภูมิสูงขึ้นได้ โดยไม่กระทบการกระจายอุณหภูมิบริเวณแนวเชื่อม

5.42 ผลการคำนวณกระจายอุณหภูมิบริเวณแนวเชื่อมและบริเวณที่มีการควบคุมการกระจายอุณหภูมิด้วยหัวเผาAir-LPG ด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์สำเร็จรูป

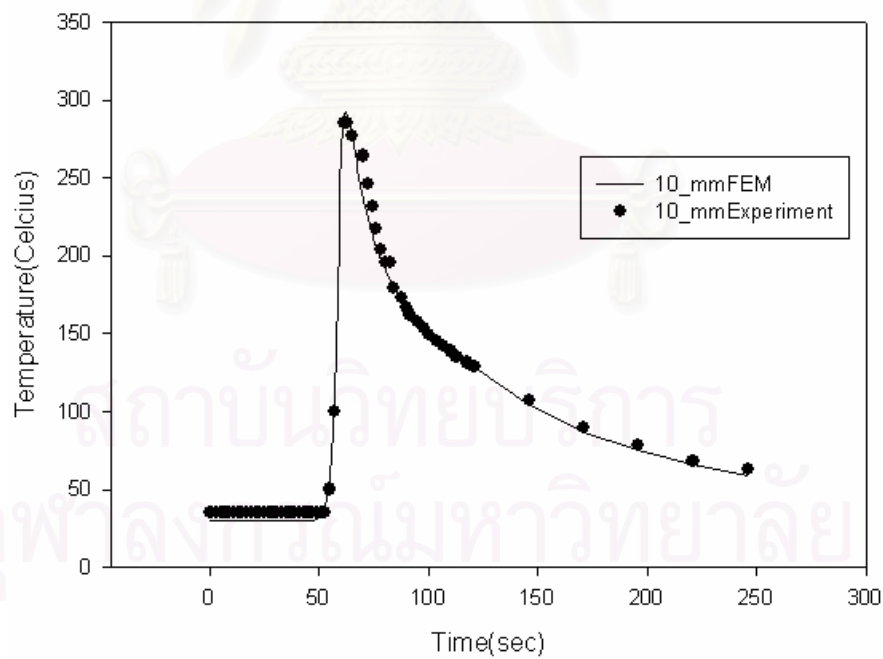


รูปที่ 5.19 การกระจายอุณหภูมิบริเวณแนวเชื่อมเมื่อเชื่อมพร้อมหัวเผาควบคุมการกระจายอุณหภูมิคำนวณด้วยแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์สำเร็จรูป

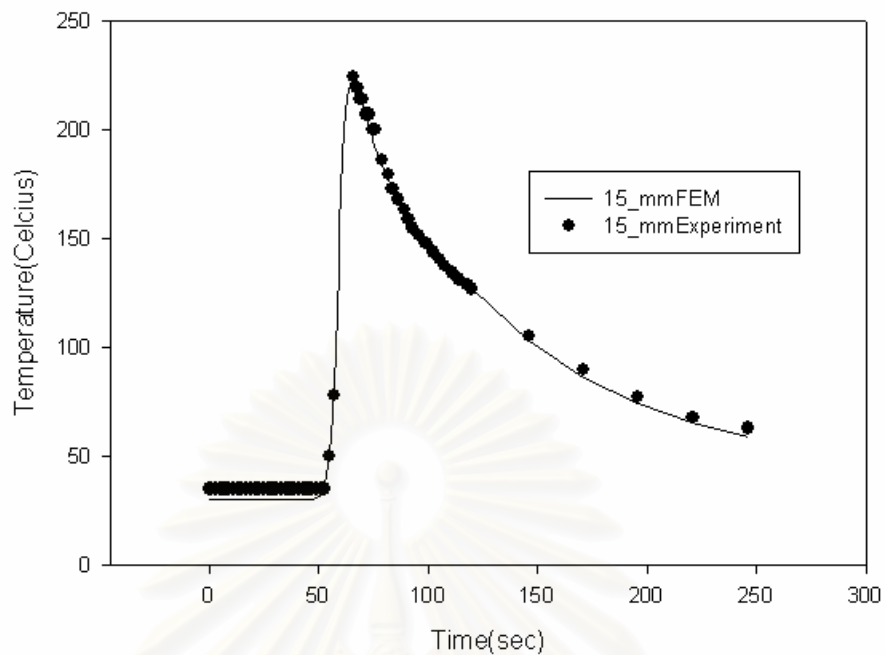
ที่บริเวณแนวเชื่อมค่าอุณหภูมิสูงสุดมีค่าเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย เนื่องจากที่อุณหภูมิสูงวัสดุมีแนวโน้มแลกเปลี่ยนพลังงานกับสิ่งแวดล้อม เนื่องจากผลกระทบทางความร้อนของฮีท อินพุตที่ตำแหน่ง 55 มิลลิเมตร ด้านการไหลของความร้อนไว้ รูปที่ 5.20-5.22 เปรียบเทียบรายละเอียดแนวโน้มนการกระจายอุณหภูมิจากการทดลองและจากการคำนวณด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์สำเร็จรูป



รูปที่ 5.20 การกระจายอุณหภูมิบริเวณแนวเชื่อมของชิ้นงานควบคุมอุณหภูมิ (5 มิลลิเมตร)

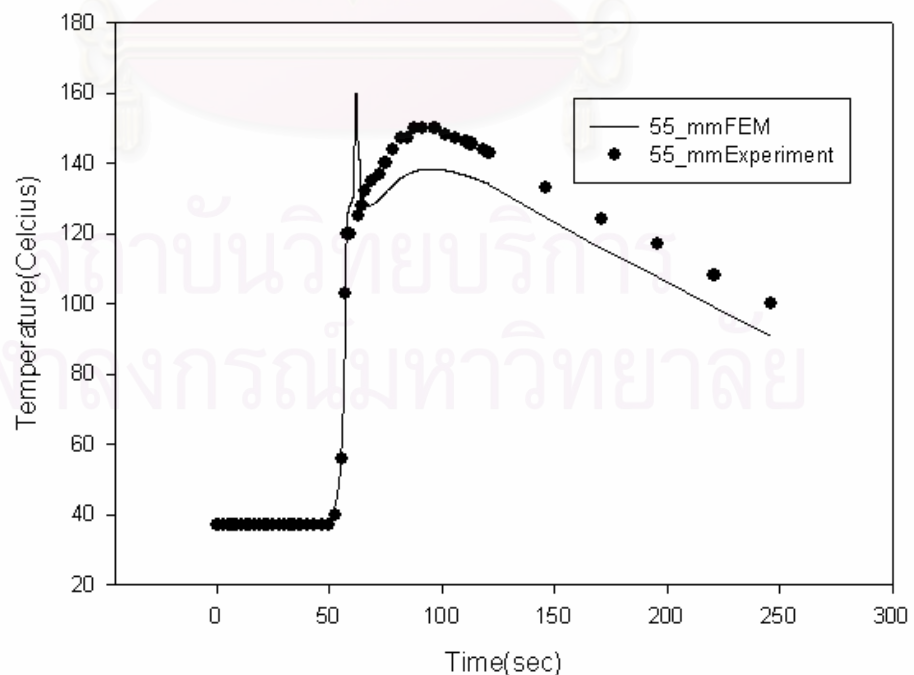


รูปที่ 5.21 การกระจายอุณหภูมิบริเวณแนวเชื่อมของชิ้นงานควบคุมอุณหภูมิ (10 มิลลิเมตร)



รูปที่ 5.22 การกระจายอุณหภูมิบริเวณแนวเชื่อมของชิ้นงานควบคุมอุณหภูมิ (15 มิลลิเมตร)

รูปที่ 5.23 รายละเอียดการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิบริเวณแนวเชื่อม ที่ตำแหน่ง 5 มิลลิเมตร ค่าอุณหภูมิสูงสุดมีค่า เพิ่มขึ้นจากกระบวนการเชื่อมแบบปกติเล็กน้อย แนวโน้มการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่ตำแหน่ง 10 และ 15 mm เป็นไปในแนวทางเดียวกันคือมีอุณหภูมิสูงสุดเพิ่มขึ้นเล็กน้อย



รูปที่ 5.23 การกระจายอุณหภูมิภายในชิ้นงานของชิ้นงานควบคุมอุณหภูมิ (55 มิลลิเมตร)

รูปที่ 5.23 รายละเอียดการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิบริเวณภายในชิ้นงานที่ตำแหน่ง 55 มิลลิเมตร ค่าอุณหภูมิสูงสุดมีค่าเพิ่มขึ้นประมาณ 30 องศาเซลเซียส โดยที่อุณหภูมิบริเวณแนวเชื่อม (รูปที่ 5.20-5.22) ยังไม่เปลี่ยนแปลง จากความรู้พื้นฐานทาง **thermal stresses** ตำแหน่งตรงกลาง บริเวณอุณหภูมิสูงสองบริเวณคือบริเวณแนวเชื่อมและที่ตำแหน่งภายในชิ้นงาน 55 มิลลิเมตรมี แนวโน้มจะเป็นความเค้นแรงดึง

5.5 การหัดตัวตามแนวขวางเมื่อชิ้นงานเย็นตัวลงสู่อุณหภูมิห้องเมื่อทำการเชื่อมด้วยกระบวนการเชื่อมพร้อมหัวเผาควบคุมอุณหภูมิ

5.5.1 ค่าการหัดตัวตามแนวขวางเมื่อชิ้นงานเย็นตัวลงสู่อุณหภูมิห้องของกระบวนการเชื่อมพร้อมหัวเผาควบคุมอุณหภูมิ

จากผลการทดลองพบว่า ค่าเคลื่อนตัวที่ตำแหน่ง 5 มม. ยังคงมีค่าการเคลื่อนตัวคงเดิม ในขณะที่ ที่ตำแหน่ง 10 และ 15 มม. ค่าการเคลื่อนตัวของเนื้อโลหะมีค่าต่ำกว่าค่าการเคลื่อนตัวของเนื้อโลหะที่ทำการเชื่อมด้วยกระบวนการเชื่อมแบบปกติ ประมาณ 40 เปอร์เซ็นต์ ดังตารางที่ 5.3

ตารางที่ 5.3 ค่าการเคลื่อนตัวของชิ้นงานที่บริเวณแนวเชื่อมทำการเชื่อมพร้อมหัวเผาควบคุมการกระจายอุณหภูมิ

ตำแหน่งตามยาว \ ตำแหน่งตามขวาง	5 mm	10 mm	15 mm
150 mm	0.11	0.06	0.05
225 mm	0.12	0.06	0.05
350 mm	0.11	0.07	0.05

5.5.2 ผลการวิเคราะห์การหดตัวตามขวางด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์สำเร็จรูป

ผลการคำนวณด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ แสดงในตารางที่ 5.4 การเคลื่อนตัวตามขวางที่ตำแหน่ง 5 มิลลิเมตร มีค่าคงเดิม ที่ตำแหน่ง 10 และ 15 มิลลิเมตรค่าการเคลื่อนตัวมีแนวโน้มลดลง

ตารางที่ 5.4 ผลการคำนวณค่าการเคลื่อนตัวของชิ้นงานเชื่อมพร้อมหัวเผาควบคุมการกระจายอุณหภูมิด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์สำเร็จรูป

ตำแหน่งตามขวาง \ ตำแหน่งตามยาว	5 mm	10mm	15 mm
150mm	0.09	0.06	0.04
225 mm	0.09	0.06	0.04
350mm	0.09	0.06	0.04

5.6 แนวโน้มความกว้างของขอบเขตการครากตัว

โดยการใช้เกณฑ์การครากตัวของ Von Misses หรือ ทฤษฎีความเค้น Octahedral ซึ่งมีความหมายทางกายภาพอ้างอิงถึงการเคลื่อนตัวของเนื้อวัสดุอันเนื่องด้วยความเค้นเฉือนบนระนาบ Octahedral ที่มีค่าเกินความเค้นเฉือน Octahedral ของวัสดุนั้น (มีค่าเกินค่า 0.47 เท่าของค่าความเค้นแรงดึง เมื่อทดสอบด้วยวิธีดึงแกนเดียว)

เมื่อทำการเชื่อมโดยไม่ใช้หัวเผาควบคุมอุณหภูมิ พบว่าความกว้างของบริเวณครากตัวโดยหาค่าเฉลี่ยของความเค้นทั้งสี่จุดบนเอลิเมนต์ โคนใช้เอลิเมนต์ขนาดขนาด 1 มิลลิเมตรได้ค่าความเค้นครากตัวเฉลี่ยอยู่ที่เอลิเมนต์แถวที่ 9 จากศูนย์กลางแนวเชื่อม ดังนั้นความกว้างบริเวณครากตัวจากการกระบวนกรเชื่อมปกติเป็น 9 มม. เมื่อทำการเชื่อมโดยใช้หัวเผาควบคุมการกระจายอุณหภูมิ พบว่าความกว้างบริเวณครากตัวลดลงเหลือ 6 มม. หรือแนวโน้มความกว้างของบริเวณครากตัวลดลงประมาณ 30 เปอร์เซ็นต์

บทที่ 6

สรุปผลการวิจัย และวิจารณ์ผลการทดลอง

6.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ศึกษาการลดการบิดตัวของชิ้นงานเชื่อมระหว่างกระบวนการเชื่อมด้วยเทคนิคการควบคุมการกระจายของอุณหภูมิระหว่างกระบวนการเชื่อมด้วยหัวเผา Air-LPG ที่มีการกระจายของฟลักซ์ความร้อนสม่ำเสมอที่ระยะ 55 มิลลิเมตรจากแนวเชื่อม ซึ่งจากผลการคำนวณด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์สำเร็จรูปพบว่า ค่าของฟลักซ์ความร้อนจากหัวเผา Air-LPG ที่มีขนาดสัดส่วนของฮีท อินพุต ประมาณเศษหนึ่งส่วนสามของฟลักซ์ความร้อนจากหัวเชื่อม MIG สามารถสร้างความเค้นชนิดแรงดึงเพื่อด้านทานความเค้นชนิดแรงกดที่เกิดขึ้นด้านข้างหัวเชื่อมจากกระบวนการเชื่อมแบบปกติได้

ในขั้นตอนของกระบวนการทดลองได้ทำการเชื่อมด้วยกระบวนการเชื่อมแบบปกติ โดยมีการบันทึกค่าการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและค่าการหดตัวตามขวางที่ระยะ 5 มิลลิเมตร ซึ่งเป็นระยะที่มีค่าการหดตัวตามแนวขวางสูงสุดและที่ระยะ 10 และ 15 มิลลิเมตร และบันทึกอุณหภูมิการทดลองที่ตำแหน่งสุดท้ายที่ระยะ 55 มิลลิเมตร ซึ่งเป็นระยะที่ทำการควบคุมการกระจายของอุณหภูมิด้วยฟลักซ์ความร้อนจากหัวเผา Air-LPG

ระหว่างกระบวนการเชื่อมพบว่า ค่าการกระจายของอุณหภูมิที่บริเวณใกล้แนวเชื่อมมีค่าไม่แตกต่างกันมาก โดยกระบวนการเชื่อมที่ควบคุมการกระจายของอุณหภูมิมียุณหภูมิสูงสุดที่ตำแหน่ง 5, 10 และ 15 มิลลิเมตร สูงกว่ากระบวนการเชื่อมแบบปกติไม่เกิน 10 องศาเซลเซียส แต่ที่ตำแหน่ง 55 มิลลิเมตร ซึ่งเป็นตำแหน่งที่มีการควบคุมการกระจายของอุณหภูมิ มีค่าอุณหภูมิสูงสุดสูงกว่าอุณหภูมิของกระบวนการเชื่อมแบบปกติประมาณ 30 องศาเซลเซียส

หลังจากชิ้นงานเย็นตัวลงสู่อุณหภูมิห้องแล้ว พบว่า ค่าการหดตัวตามขวางที่ตำแหน่ง 5 ลดลงจาก 0.12 มิลลิเมตร เป็น 0.11 มิลลิเมตร และที่ตำแหน่ง 10 มิลลิเมตร ลดลงจาก 0.11 มิลลิเมตรเป็น 0.07 มิลลิเมตร ส่วนที่ตำแหน่ง 15 มิลลิเมตร ค่าการหดตัวตามขวางมีค่าลดลงจากกระบวนการเชื่อมแบบปกติ 0.08 มิลลิเมตร เป็น 0.05 มิลลิเมตร สามารถควบคุมการหดตัวบริเวณแนวเชื่อมให้ลดลงได้ประมาณ 40 เปอร์เซ็นต์

6.2 ข้อเสนอแนะ

ในการศึกษาการกระจายอุณหภูมิที่เกิดจากระบวนการเชื่อมควรทำการทดลองในห้องปิดที่ควบคุมสภาวะแวดล้อมที่ส่งผลกระทบต่อกระบวนการนำความร้อนของชิ้นงานได้ เพื่อที่จะสามารถควบคุมผลการทดลองในส่วนของ **temperature history** มีความน่าเชื่อถือมากยิ่งขึ้น

ในการวิเคราะห์การกระจายของอุณหภูมิของกระบวนการเชื่อมโดยใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ ผลการคำนวณให้ความสอดคล้องกับการกระจายของอุณหภูมิของชิ้นทดลองเฉพาะบริเวณแนวเชื่อมเท่านั้น ทำให้การศึกษาปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นของกระบวนการเชื่อมมีความคลาดเคลื่อนกับสิ่งที่เกิดขึ้นจริง ดังนั้น ควรมีการศึกษาค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการนำความร้อน ณ อุณหภูมิสูง เพื่อที่จะสามารถนำค่าพารามิเตอร์เหล่านี้ไปใช้ในการศึกษาในการทำแบบจำลองทางความร้อนให้ได้ผลใกล้เคียงกับปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นจริงมากขึ้น



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการอ้างอิง

- [1] Dechaumpai, P. Thermal stresses Lecture Note. กรุงเทพมหานคร: ศ.จ.พ., 2001.
- [2] Vitoorapom, C. Experimental and Analytical Study on Reduction of Residual Stresses and Distortion During Welding in High Strenght Steel. Doctor's Thesis, Naval engineering Massachusetts Institute of Technology, 1990.
- [3] Masabuchi, K. Analysis of Welded Structure. USA: Pergamon, 1990.
- [4] สำเรึง จักรใจ. การเผาไหม้. กรุงเทพฯ: ศ.จ.พ., 2005.
- [5] Neils S., and Matti, R. The mechanic of constitutive Modelling. USA: McGraw hill, 2005.
- [6] Nakasone, Y. Ansys user manual. USA: McGraw hill, 2000.
- [7] Goldak John, A. Computational Welding Mechanics. USA: Springer, 2004.
- [8] Dergamo, E.P. The Effect of Weld Length Upon the Residual Stresses of Unrestrained Butt Welds. Welding Journal 30(1946): 340-343.
- [9] Ranhouan, A.M. Modelling and Control of Geometry and Thermal Properties in Arc Welding. Doctor's Thesis, Naval engineering Massachusetts Institute of Technology, 1993.
- [10] Mohktar, A. The Effects of Process Parameters on Steel Welding Response in Curved. Master's Thesis, Mechanical Engineering West Verginia, 2002.



ภาคผนวก

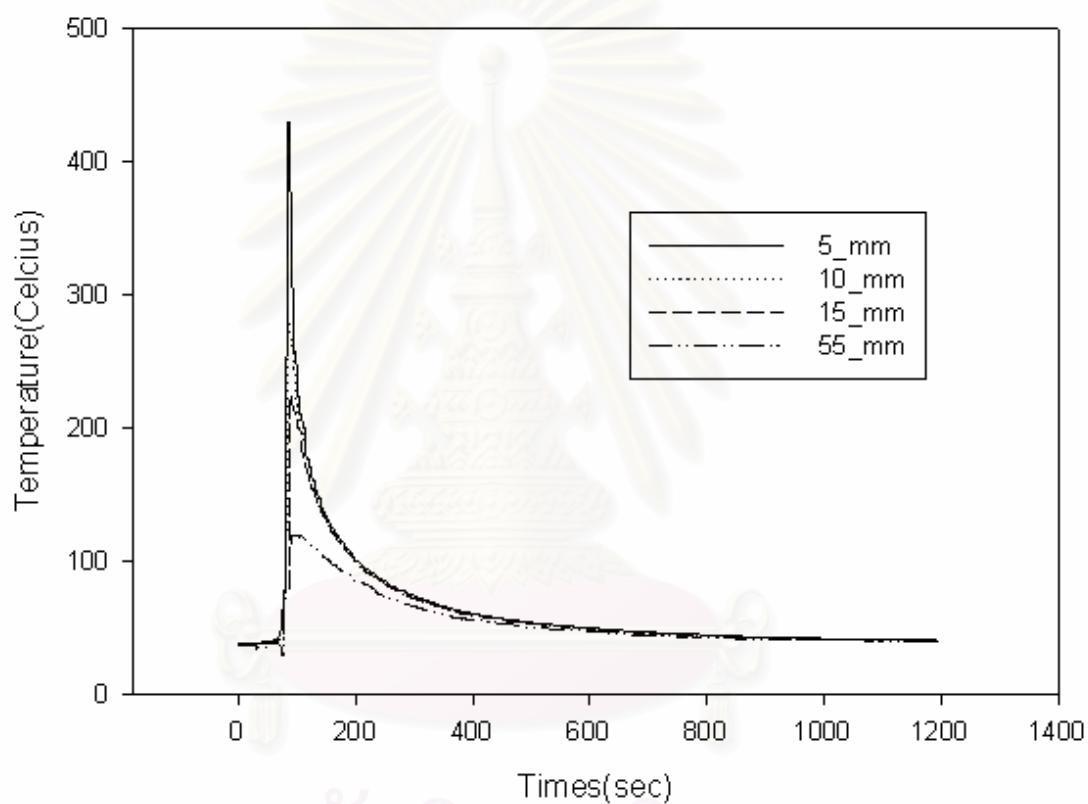
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก.

การกระจายอุณหภูมิและค่าการหดตัวตามขวางของชิ้นงาน

การกระจายอุณหภูมิ

ชิ้นงานหมายเลข NH-01 (No Heat ชั้นที่ 1)

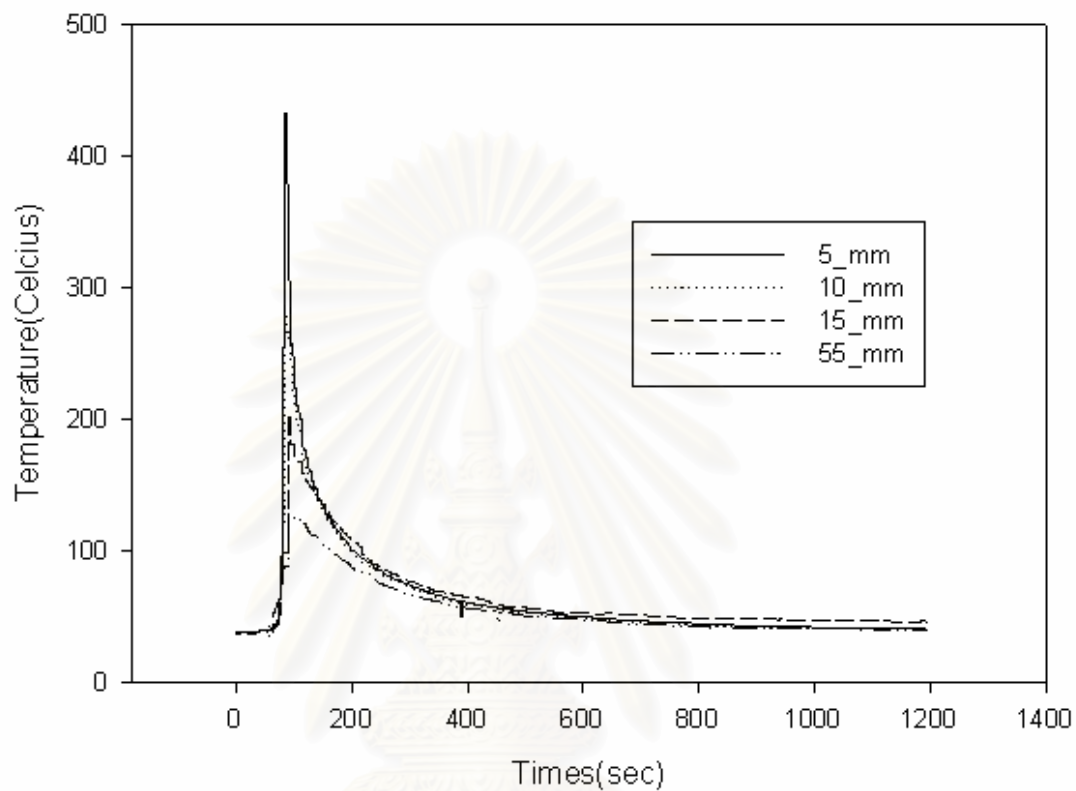


รูปที่ ก. 1 การกระจายอุณหภูมิของชิ้นทดลองของกระบวนการเชื่อมปกติที่ 1(NH-01)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

การกระจายอุณหภูมิ

ชิ้นงานหมายเลข NH-02 (No Heat ชั้นที่ 2)

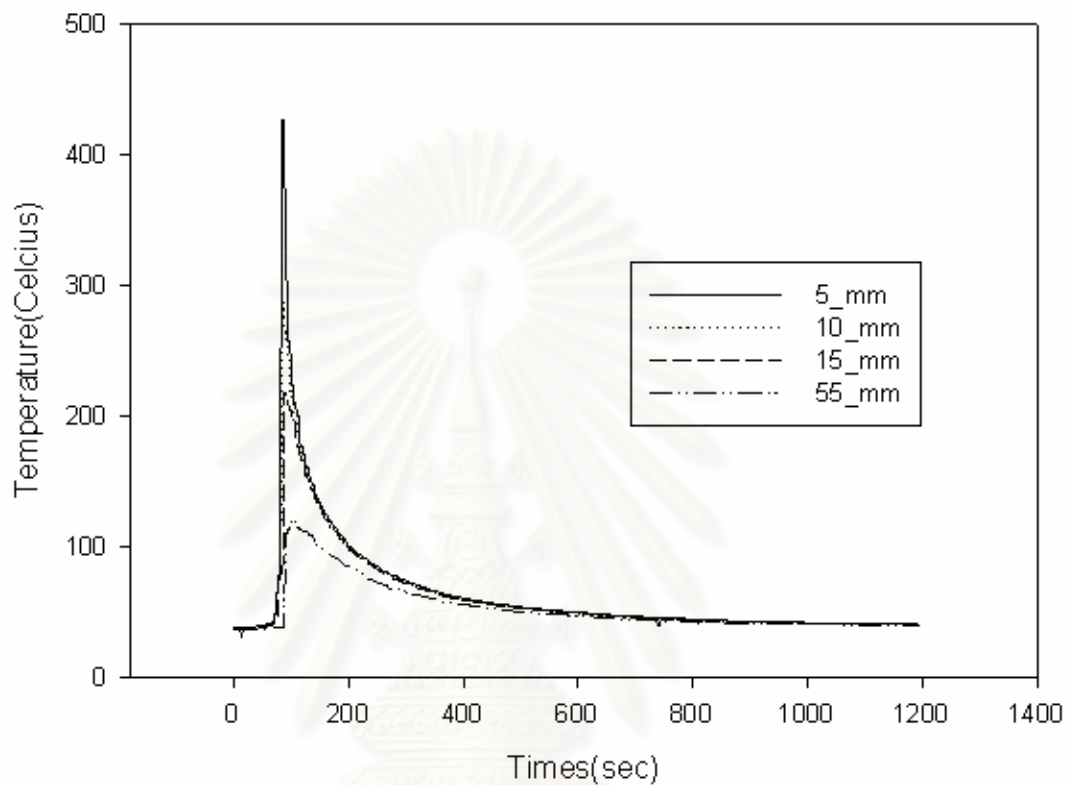


รูปที่ ก. 2 การกระจายอุณหภูมิของชิ้นทดลองของกระบวนการเชื่อมปกติที่ 2 (NH-02)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

การกระจายอุณหภูมิ

ชั้นงานหมายเลข NH-03 (No Heat ชั้นที่ 3)



รูปที่ ก. 3 การกระจายอุณหภูมิของชั้นทดลองของกระบวนการเชื่อมปกติที่ 3 (NH-03)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ค่าการหดตัวตามขวางของชิ้นงานบริเวณที่ผ่านกระบวนการเชื่อมแบบปกติเมื่อเย็นตัวแล้ว

ตารางที่ ก.1 ค่าการเคลื่อนตัวของชิ้นงานที่บริเวณแนวเชื่อมชิ้นงานที่ 1(NH-01)

ตำแหน่งตาม ขวาง	5mm	10mm	15mm
ตำแหน่งตามยาว			
150mm	0.12	0.10	0.08
225mm	0.13	0.11	0.08
350mm	0.12	0.10	0.08

ตารางที่ ก.2 ค่าการเคลื่อนตัวของชิ้นงานที่บริเวณแนวเชื่อมชิ้นงานที่ 2(NH-02)

ตำแหน่งตาม ขวาง	5mm	10mm	15mm
ตำแหน่งตามยาว			
150mm	0.12	0.10	0.08
225mm	0.14	0.10	0.09
350mm	0.13	0.11	0.08

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

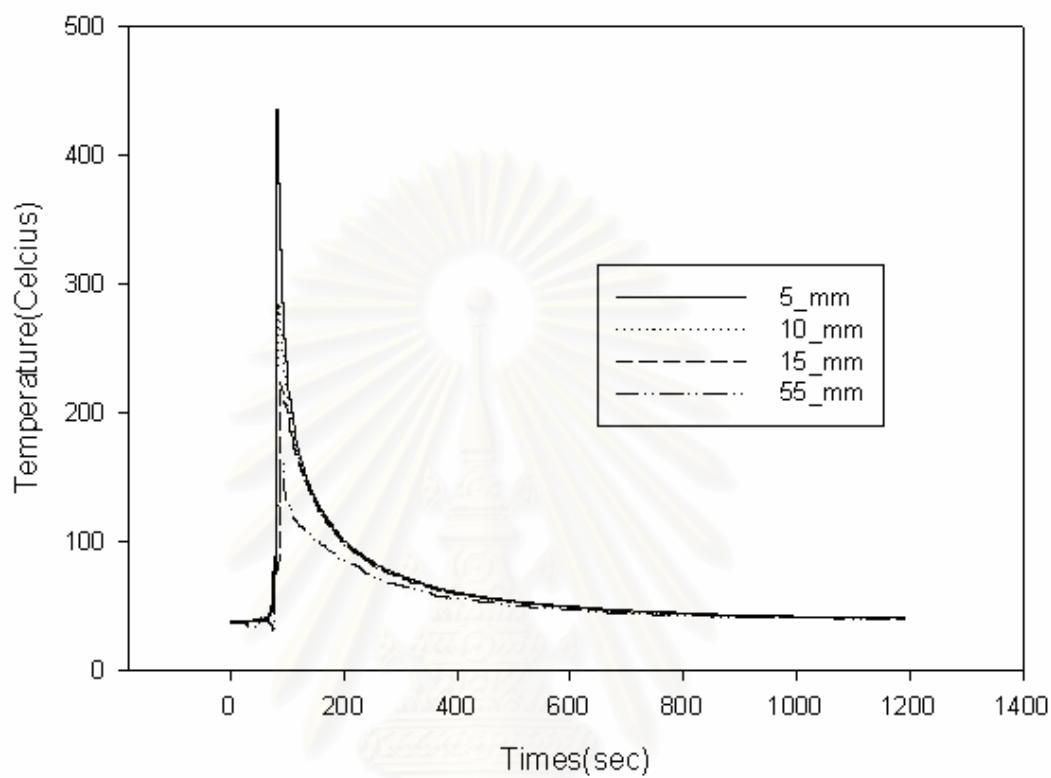
ตารางที่ ก.3 ค่าการเคลื่อนตัวของชิ้นงานที่บริเวณแนวเชื่อมชิ้นงานที่ 3(NH-03)

ตำแหน่งตาม ขวาง	5mm	10mm	15mm
ตำแหน่งตามยาว			
150mm	0.12	0.11	0.08
225 mm	0.13	0.11	0.09
350mm	0.13	0.11	0.09

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

การกระจายอุณหภูมิ

ชิ้นงานหมายเลข H-01 (Heat ชั้นที่ 1)

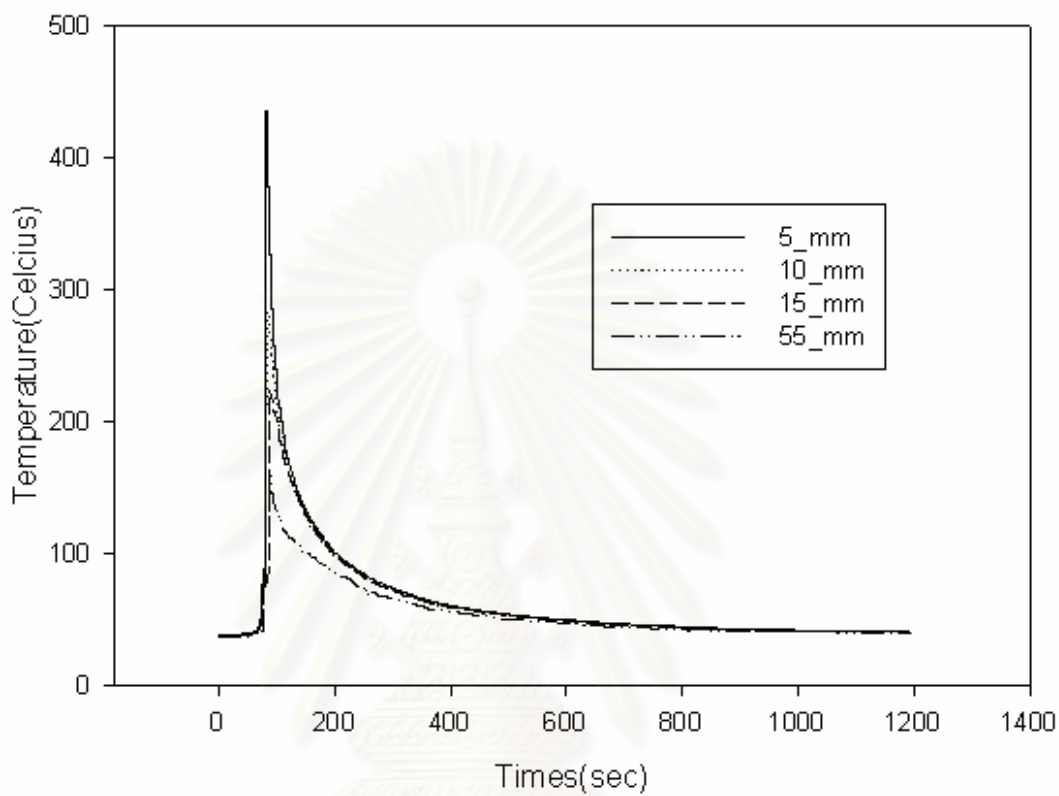


รูปที่ ก. 4 การกระจายอุณหภูมิของชิ้นทดลองของกระบวนการเชื่อมควบคุมอุณหภูมิชั้นที่ 1 (H-01)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

การกระจายอุณหภูมิ

ชิ้นงานหมายเลข H-02 (Heat ชั้นที่ 2)

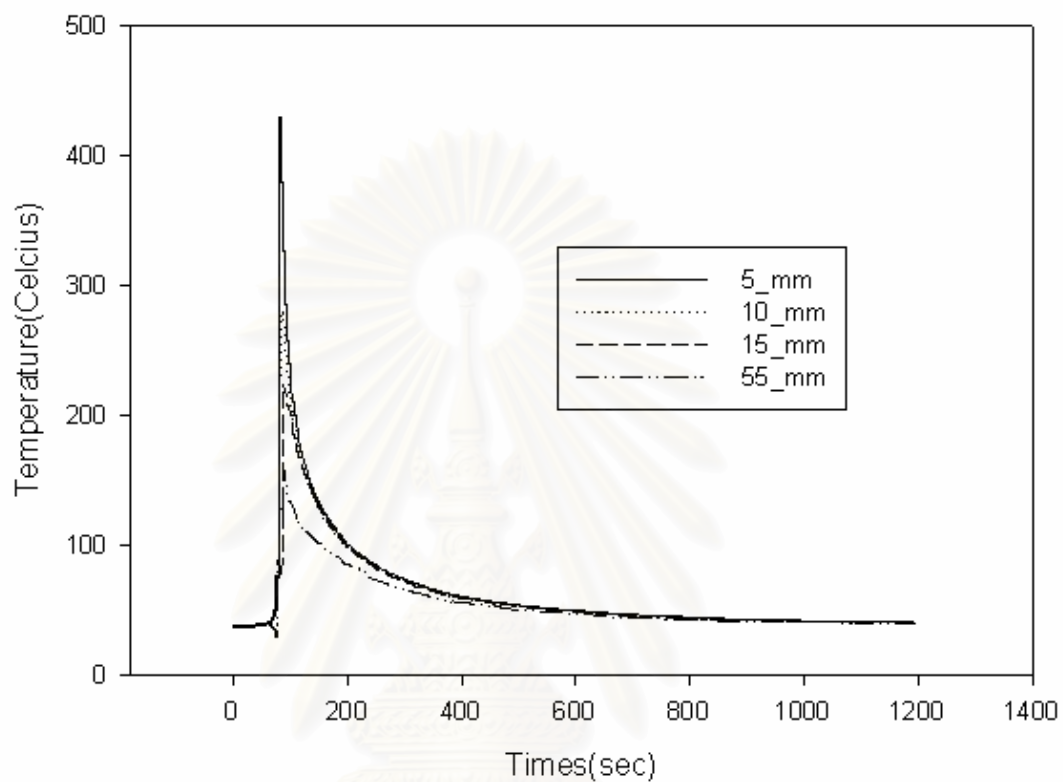


รูปที่ ก. 5 การกระจายอุณหภูมิของชิ้นทดลองของกระบวนการเชื่อมควบคุมอุณหภูมิชั้นที่ 2(H-02)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

การกระจายอุณหภูมิ

ชิ้นงานหมายเลข H-03 (Heat ชั้นที่ 3)



รูปที่ ก. 6 การกระจายอุณหภูมิของชิ้นทดลองของกระบวนการเชื่อมควบคุมอุณหภูมิชั้นที่ 3(H-03)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ค่าการหดตัวตามขวางของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการเชื่อมแบบควบคุมการกระจายอุณหภูมิเมื่อเย็นตัวแล้ว

ตารางที่ ก.4 ค่าการเคลื่อนตัวของชิ้นงานที่บริเวณแนวเชื่อมชิ้นงานที่ 1(H-01)

ตำแหน่งตามขวาง ตำแหน่งตามยาว	5mm	10mm	15mm
150mm	0.11	0.06	0.05
225mm	0.12	0.06	0.05
350mm	0.11	0.07	0.05

ตารางที่ ก.5 ค่าการเคลื่อนตัวของชิ้นงานที่บริเวณแนวเชื่อมชิ้นงานที่ 2(H-02)

ตำแหน่งตามขวาง ตำแหน่งตามยาว	5mm	10mm	15mm
150mm	0.11	0.07	0.05
225mm	0.12	0.07	0.06
350mm	0.11	0.07	0.05

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

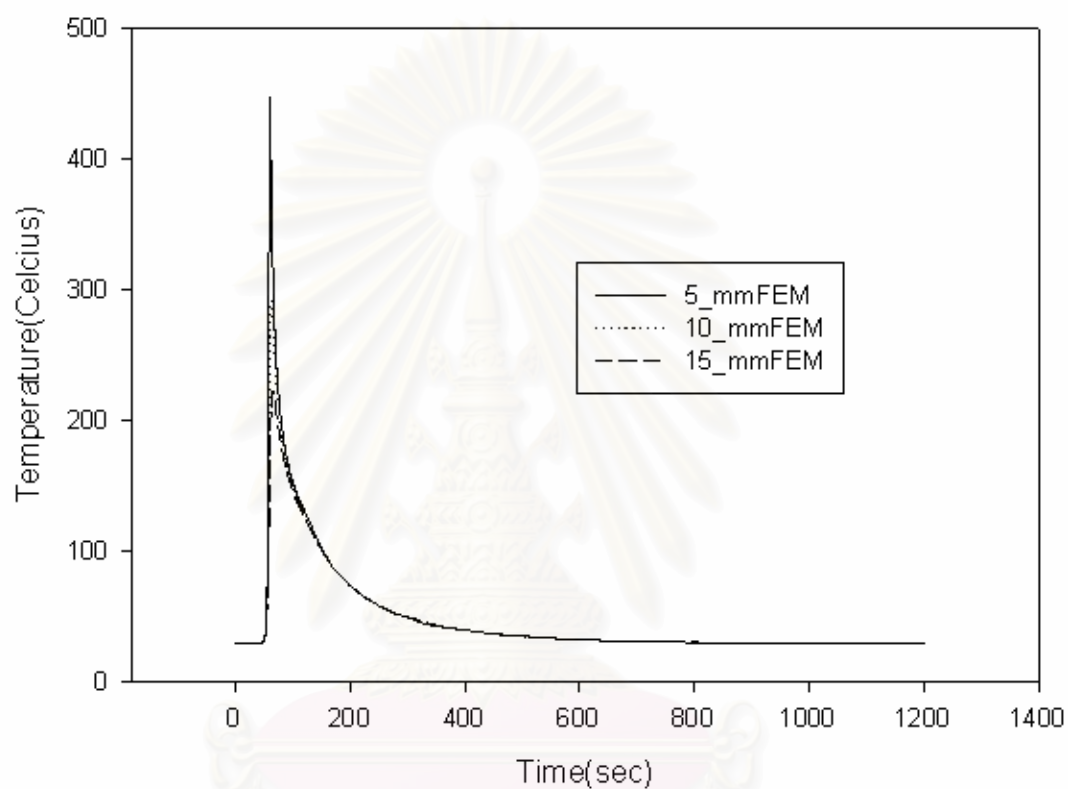
ตารางที่ ก.6 ค่าการเคลื่อนตัวของชิ้นงานที่บริเวณแนวเชื่อมชิ้นงานที่ 3(H-03)

ตำแหน่งตามขวาง ตำแหน่งตามยาว	5mm	10mm	15mm
150mm	0.11	0.06	0.05
225mm	0.12	0.06	0.05
350mm	0.13	0.07	0.06

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

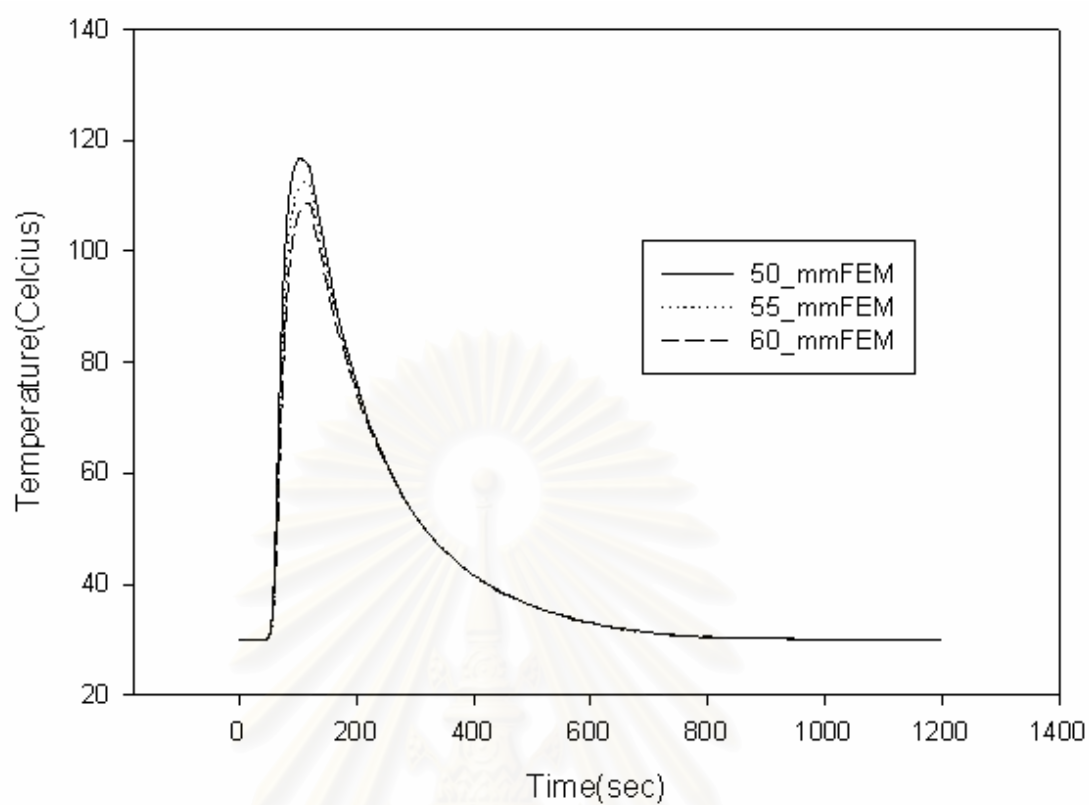
ภาคผนวก ข

การกระจายอุณหภูมิระหว่างกระบวนการเชื่อมแบบปกติและกระบวนการเชื่อมแบบควบคุมการ
กระจายอุณหภูมิกำนวนด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์สำเร็จรูป



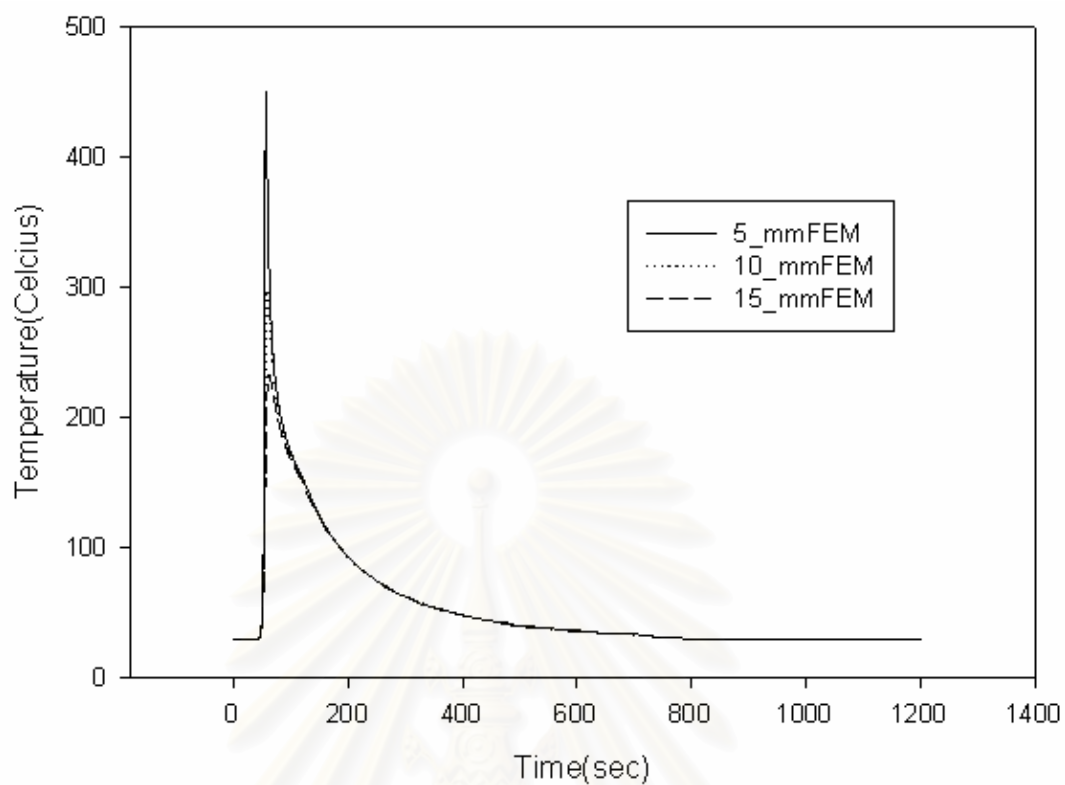
รูปที่ ข.1 การกระจายอุณหภูมิจากกระบวนการเชื่อมแบบปกติบริเวณแนวเชื่อม

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



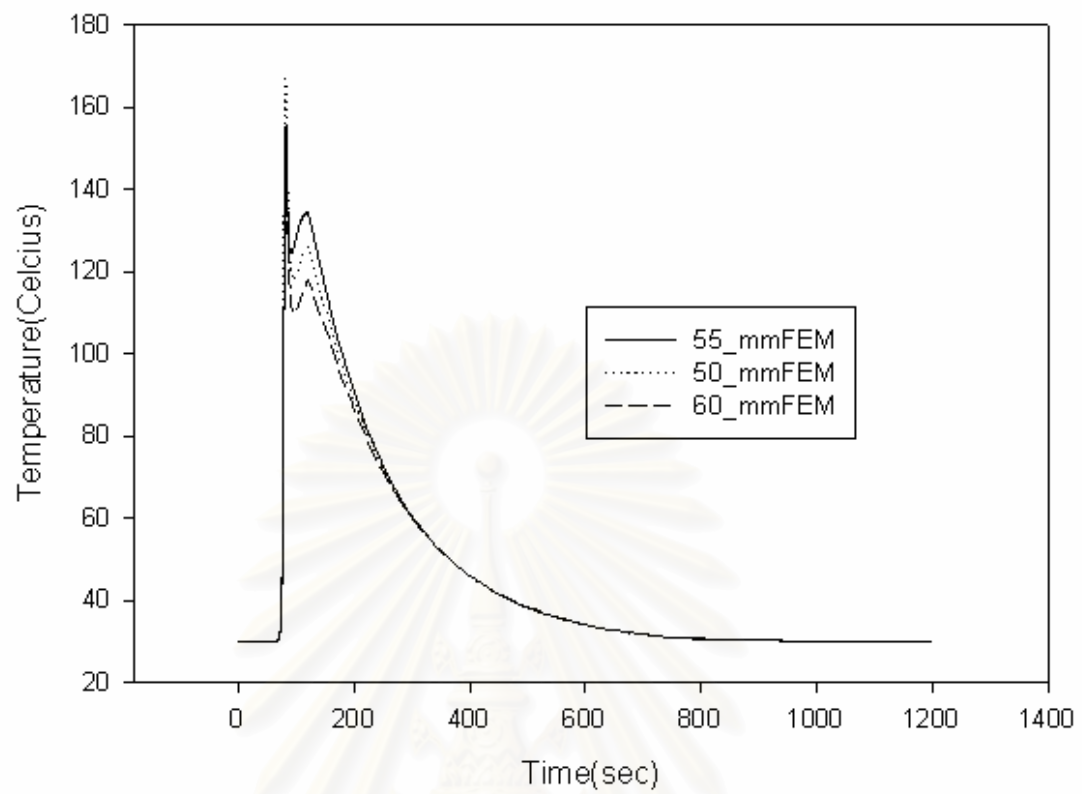
รูปที่ ข.2 การกระจายอุณหภูมิของกระบวนการเชื่อมแบบปกติบริเวณภายในชิ้นงาน

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ ข.3 การกระจายอุณหภูมิของกระบวนการเชื่อมควบคุมอุณหภูมิบริเวณแนวเชื่อม

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

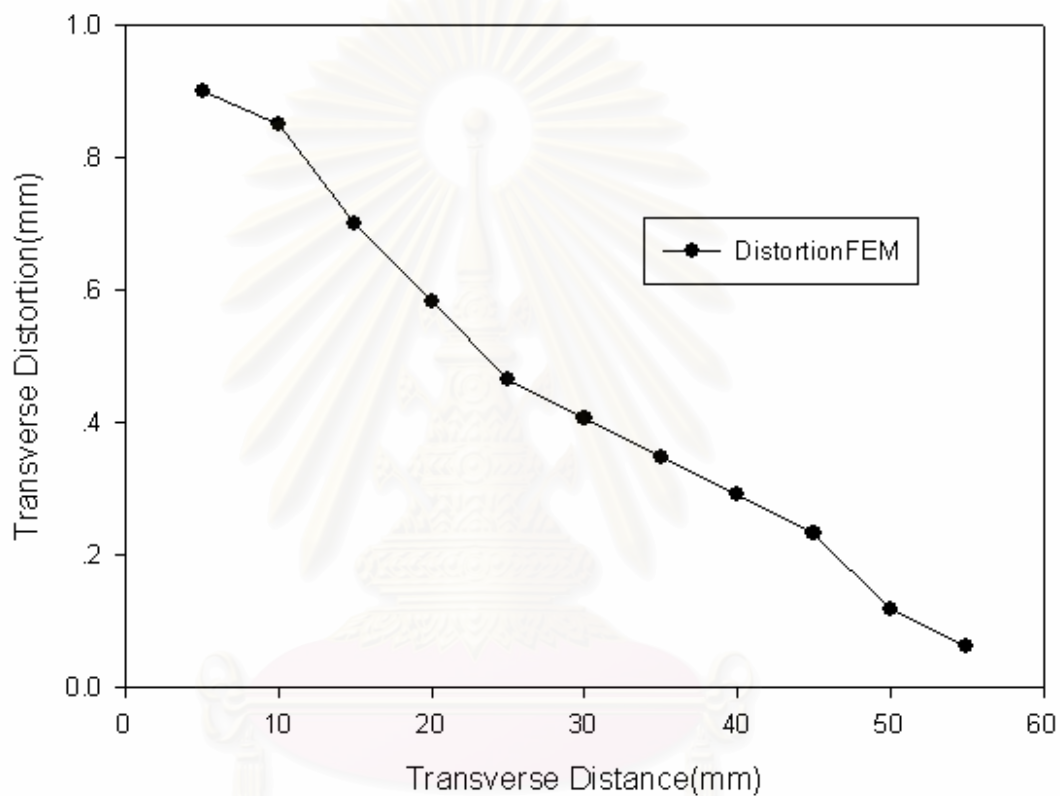


รูปที่ ข.4 การกระจายอุณหภูมิของกระบวนการเชื่อมควบคุมอุณหภูมิตำแหน่งควบคุมอุณหภูมิ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ค.

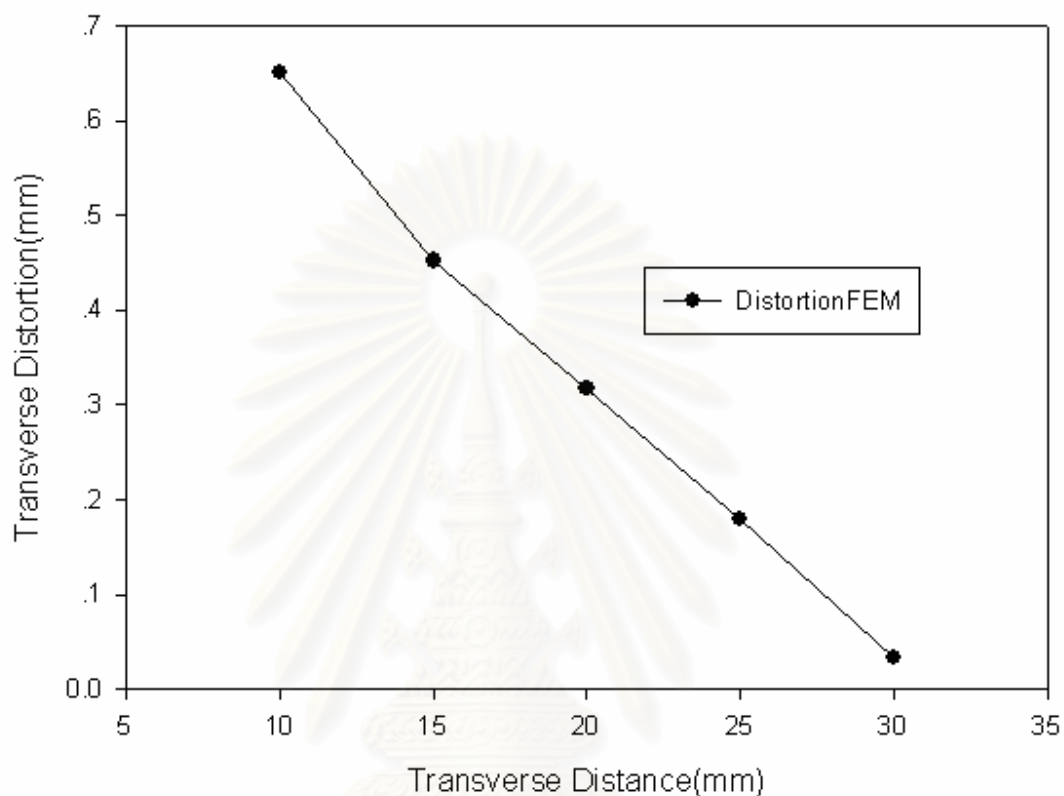
ผลการคำนวณการเคลื่อนตัวของเนื้อโลหะระหว่างกระบวนการเชื่อมแบบปกติด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์สำเร็จรูป



รูปที่ ค.1 การเคลื่อนตัวของเนื้อโลหะของกระบวนการเชื่อมแบบปกติ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ผลการคำนวณการเคลื่อนตัวของเนื้อโลหะระหว่างกระบวนการเชื่อมแบบควบคุมการกระจาย
อุณหภูมิด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์สำเร็จรูป



รูปที่ ค.2 การเคลื่อนตัวของเนื้อโลหะของกระบวนการเชื่อมที่มีการควบคุมการกระจายอุณหภูมิ

ภาคผนวก ง.

คุณสมบัติทางความร้อนและทางกลที่เปลี่ยนแปลงตาม อุณหภูมิของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ SS 400

ตารางที่ ง.1 ค่าการคุณสมบัติการนำความร้อนของเหล็กกล้า SS400 ที่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	20	250	500	750
Thermal conductivity	85	85	85	85
อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	1000	1500	1700	2500
Thermal conductivity	30	30	140	142

ตารางที่ ง.2 ค่าการคุณสมบัติการนำความร้อนของเหล็กกล้า SS400 ที่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	20	250	500	750
Density(kg/m³)	7820	7700	7610	7550
อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	1000	1500	1700	2500
Density(kg/m³)	7490	7350	7300	7090

ตารางที่ ง.3 ค่าการคุณสมบัติความจุความร้อนจำเพาะของเหล็กกล้า SS400 ที่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	20	250	500	750
ความจุความร้อนจำเพาะ	460	480	530	675
อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	1000	1500	1700	2500
ความจุความร้อนจำเพาะ	670	660	780	820

ตารางที่ ง.4 ค่าการคุณสมบัติความจุความร้อนจำเพาะของเหล็กกล้า SS400 ที่เปลี่ยนแปลงตาม อุณหภูมิ

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	20	250	500	750
Possar's ratio	0.28	0.29	0.31	0.35
อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	1000	1500	1700	2500
Possar's ratio	0.4	0.45	0.48	0.5

ตารางที่ ง.5 ค่าการคุณสมบัติโมดูลัสยืดหยุ่นของเหล็กกล้า SS400 ที่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	20	250	500	750
Young's modulus(N/m ²)	2.05E+11	1.87E+11	1.50E+11	7.00E+10
อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	1000	1500	1700	2500
Young's modulus(N/m ²)	2.00E+10	1.90E+10	1.80E+10	1.20E+10

ตารางที่ ง.6 ค่าการคุณสมบัติโมดูลัสยืดหยุ่นของเหล็กกล้า SS400 ที่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	20	250	500	750
สัมประสิทธิ์การขยายตัว	1.10E-05	1.22E-05	1.39E-05	1.48E-05
อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	1000	1500	1700	2500
สัมประสิทธิ์การขยายตัว	1.34E-05	1.33E-05	1.32E-05	1.31E-05

ตารางที่ ง.7 คุณสมบัติ **Bilinear** ของเหล็กกล้า **SS400** ที่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	20	250	500	750
Young's modulus(N/m ²)	2.05E+11	1.87E+11	1.50E+11	7.00E+10
อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	1000	1500	1700	2500
Young's modulus(N/m ²)	2.00E+10	1.90E+10	1.80E+10	1.20E+10

ตารางที่ ง.8 คุณสมบัติ **Bilinear** ของเหล็กกล้า **SS400** ที่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	20	250	500	750
Tangent modulus(N/m ²)	2.20E+08	2.20E+08	1.30E+08	4.00E+07
อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	1000	1500	1700	2500
Tangent modulus(N/m ²)	2.50E+07	2.50E+07	1.00E+06	1.00E+05

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก จ.

Ansys Command file

```
/filname,SS400
/title,SS400welding 2-D FEA
/units,si
/prep7
et,1,plane55
et,2,surf151
keyopt,2,8,4
mpTEMP,1,20,250,500,750,1000,1500
mpTEMP,7,1700,2500
mpDATA,kxx,1,1,85,85,85,85,85,85
mpDATA,kxx,1,7,140,142
mpDATA,dens,1,1,7820,7700,7610,7550,7490,7350
mpDATA,dens,1,7,7300,7090
mpDATA,c,1,1,460,480,530,675,670,660
mpDATA,c,1,7,780,820
mpDATA,prxy,1,1,0.28,0.29,0.31,0.35,0.4,0.45
mpDATA,prxy,1,7,0.48,0.5
mpDATA,alpx,1,1,1.10e-5,1.22e-5,1.39e-5,1.48e-5,1.34e-5,1.33e-5
mpDATA,alpx,1,7,1.32e-5,1.31e-5
mpDATA,ex,1,1,2.05e11,1.87e11,1.50e11,7.0e10,2.0e10,1.9e10
mpDATA,ex,1,7,1.8e10,1.2e10
tb,biso,1,6,2
tbTEMP,20
tbDATA,2,2.0e8,2.05e10
tbTEMP,500
tbDATA,1,3e8,1.50e10
```

```

tbtemp,750
tbdata,,4.0e7,7.0e9
tbtemp,1000
tbdata,,2.50e7,2.0e9
tbtemp,1700
tbdata,,1.0e6,1.8e9
tbtemp,2500
tbdata,,1.0e5,1.2e9
pi=3.1415926
I=100
U=23
efficient=0.85
r=0.005
 $Q_m = 3 * I * U * \text{efficient} / (\pi * r^{**2})$ 
kk=0.85
Qmax=Qm*kk
ly=0.06
lx=0.3
lsize=0.0025
v=0.004
tm=lx/v
tinc=lsize/v max_time=1+tm/tinc
max_x=1+lx/lsize
max_y=1+ly/lsize
rectng 0,lx,0,ly
lesize,all,LSIZE
mshape,0,2d
mshkey,1
amesh,all
nsl,s
type,2

```



ศูนย์วิทยบริการ
 วิทยาลัย

```

esurf
allsel,all
save
finish

*dim,flux2,table,max_x,max_y,max_time,x,y,time
*do,k,1,max_time,1
  *do,i,1,max_x,1
    flux2(i,0,k)=(i-1)*lsize
  *enddo

  *do,j,1,max_y,1
    flux2(0,j,k)=(j-1)*lsize
  *enddo

  *do,i,1,max_x,1
    *do,j,1,max_y,1
      xcenter=v*(k-1)*tinc
      ycenter=0
      distance=sqrt(((i-1)*lsize-xcenter)**2+((j-1)*lsize-ycenter)**2)
      *if,distance,le,r,then
        flux2(i,j,k)=Qmax/exp(3*distance**2/(r**2))
      *else
        flux2(i,j,k)=0
      *endif
    *enddo
  *enddo
flux2(0,0,k)=(k-1)*tinc
*enddo
finish
/solu

```

```

antype,trans
tintp,0.005,,1,,
kbc,1
timint,off
autots,on

```

```

ESEL,S,TYPE,,2
SFE,ALL,,CONV,,100
SFE,ALL,,CONV,2,20
ALLSEL,ALL
tref,20
time,1e-6
d,all,temp,20
NSUBST,1
solve
ddelete,all,temp
timint,on
outres,all,all
tsres,erase
kbc,0
esel,s,type,,1
nsle,s
sf,all,hflux,%flux2%
allsel,all
time,73.75
autots,off
deltim,tinc,tinc,tinc
solve
sfdelete,all,hflux
time,75
solve

```



สถาบันวิทยบริการ
 วิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา


```

time,725
autots,0
deltim,25,25,25
solve
finish

```

```

/prep7

```

```

etchgts
nrel,s,loc,x,0
nrel,r,loc,y,0
d,all,all
allsel,all
dl,1,,symm
finish

```

```

/solu

```

```

eresx,no

```

```

tref,30

```

```

time,1e-6

```

```

LDREAD,TEMP,1,1,, 'SS400','rth,'

```

```

solve

```

```

*do,t,1.25,120.75,1.25

```

```

time,t

```

```

LDREAD,TEMP,,,t, 'SS400','rth,'

```

```

solve

```

```

*enddo

```

```

*do,i,1,26,1

```

```

time,50+i*25

```

```

LDREAD,TEMP,4,i,, 'SS400','rth,'

```

```

solve

```

*endo
finish



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายอชิปต์ ไชยชาญ เกิดวันที่ 2 ตุลาคม พ.ศ. 2516 จบการศึกษาระดับมัธยมจากโรงเรียนสวนกุหลาบวิทยาลัย สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต จากภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปีการศึกษา 2540 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ที่ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปีการศึกษา 2548



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย