

การศึกษาความเป็นไปได้ของการเชื่อมประสานโลหะแผ่นบาง  
ด้วยตัวยึดจับชิ้นงานโดยใช้อุณหภูมิต่ำ



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2546

ร/น.

ร/1477

2546

เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน 55630  
วันเดือนปี 20 พ.ค. 2548

APLUBA69  
.....  
.....

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์อื่นนอกเหนือจากนี้ หากต้องการนำเอกสารนี้ไปใช้ซ้ำหรือทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาตจากสำนักหอสมุดกลาง สำนักหอสมุดกลาง ขอสงวนสิทธิ์ในสิ่งที่ปรากฏ และไม่รับผิดชอบต่อความเสียหายใดๆ ที่อาจเกิดขึ้นจากการนำเอกสารนี้ไปใช้

**INVESTIGATION OF POSSIBILITY OF USING THERMAL CLAMP FOR  
JOINING METAL SHIMS**



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF  
BACHELOR OF ENGINEERING IN INDUSTRIAL ENGINEERING  
FACULTY OF ENGINEERING  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG  
ACADEMIC YEAR 2003

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้


คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ใบรับรองปริญญาานิพนธ์

หัวข้อปริญญาานิพนธ์ การศึกษาความเป็นไปได้ของการเชื่อมประสาน โลหะแผ่นบางด้วยตัวยึดจับ  
ชิ้นงาน โดยใช้อุณหภูมิจับ  
INVESTIGATION OF POSSIBILITY OF USING THERMAL CLAMP  
FOR JOINING METAL SHIMS

นักศึกษา นางสาวปณิศา เหลืองโรจนกุล รหัสประจำตัว 43010684  
นายพิสิฐ เจือไทย รหัสประจำตัว 43010720  
นางสาวลลันสีรี ศรีรานูรัตน์ รหัสประจำตัว 43010750

หลักสูตร วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ

อาจารย์ผู้ควบคุมปริญญาานิพนธ์

The seal of King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang is a large circular emblem. It features a central five-tiered umbrella (parasol) on a pedestal, flanked by two smaller three-tiered umbrellas. The background is filled with intricate floral and geometric patterns. The Thai text 'สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง' is written around the perimeter of the seal.  
ภจจณชัย กัลยาศิริ

(ดร.ภจจณชัย กัลยาศิริ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ การศึกษาความเป็นไปได้ของการเชื่อมประสานโลหะแผ่นบางด้วย  
ตัวยึดจับชิ้นงาน โดยใช้อุณหภูมิต่ำ

นักศึกษา นางสาวปณิตา เหลืองโรจนกุล  
นายพิสิฐ เจือไทย  
นางสาวลัคณ์ศิริ ตรีรานูรัตน์

หลักสูตร วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2546

อาจารย์ผู้ควบคุมปริญญาานิพนธ์ ดร.กรรมชัย กัลยาศิริ

### บทคัดย่อ

ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้เกี่ยวข้องกับการศึกษาความเป็นไปได้ การออกแบบ และการพัฒนาตัวยึดจับชิ้นงาน โดยใช้อุณหภูมิต่ำ ตัวยึดจับชิ้นงานโดยใช้อุณหภูมิต่ำที่พัฒนาขึ้นนี้ ประกอบไปด้วยวัสดุที่มีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อนต่ำ ส่วนชิ้นงานที่ใช้จะมีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อนค่อนข้างสูง เมื่อให้ความร้อนแก่ชิ้นงานและตัวยึดจับ ความร้อนจะทำให้ชิ้นงานขยายตัว ส่วนตัวยึดจับจะขยายตัวน้อย ทำให้เกิดแรงบีบอัดระหว่างตัวยึดจับชิ้นงาน ซึ่งชิ้นงานที่ใช้เป็นโลหะแผ่นบางที่อยู่ระหว่างตัวยึดจับจะเกิดการเชื่อมประสานกัน โดยการแพร่ของอะตอม การศึกษาความเป็นไปได้ครั้งนี้ใช้เป็นแนวทางสำหรับการศึกษาในอนาคต เกี่ยวกับการพัฒนาตัวยึดจับชิ้นงานโดยใช้อุณหภูมิต่ำ

Thesis Title Investigation of possibility of using thermal clamp for joining metal shims

Student Miss Panita Leongrojanagul  
Mr. Phisit Juathai  
Miss Luksiri Triranurat

Degree Bachelor of Engineering in Industrial Engineering  
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

Academic Year 2003

Thesis Advisor Dr.Kannachai Kanlayasiri

## ABSTRACT

This project involves possibility study, design and development of a thermal clamp. It is made from low coefficient of thermal expansion material, and work pieces are made from high coefficient of thermal expansion material. When they are heated at an elevated temperature the work pieces are expanded at a higher rate than the thermal clamp. The restraint of work pieces generates a pressing force between work pieces' surfaces. Under the elevated temperature and pressing force, diffusion bonding of work pieces might be successful. Results from this study could be used to develop a practical thermal clamp.

# กิตติกรรมประกาศ

ระหว่างการทำโครงการ “การศึกษาความเป็นไปได้ในการเชื่อมประสานโลหะแผ่นบางด้วยตัวยึดจับชิ้นงานโดยใช้อุณหภูมิจึงได้มีอุปสรรคมากมายที่ผ่านเข้ามาให้ได้ขบคิดและแก้ไขปัญหานั้นๆอยู่ตลอด ซึ่งคงจะไม่มีผลงานชิ้นนี้ออกมาให้ได้เห็นเป็นตัวเป็นตนอย่างแน่นอนหากปราศจากผู้มีพระคุณทุกท่านที่คอยช่วยเหลือ และดูแล

## กราบขอขอบคุณ

บิดา - มารดา ที่มอบชีวิตและบันดลสิ่งดีๆ ทุกสิ่งทุกอย่างให้ผ่านเข้ามาในชีวิต รวมถึงพระคุณที่ไม่มีวันทดแทนได้หมด

อาจารย์ภรณ์ชัย กัลยาศิริ ที่ทำให้พวกเราได้สัมผัสถึงความเ็นอาจารย์ในอุดมคติของพวกเรา สำหรับคำแนะนำ และความไว้วางใจที่อาจารย์มีให้กับพวกเรา

อาจารย์พรศักดิ์ อรรถวานิช สำหรับคำแนะนำ และความคิดดีๆ ที่อาจารย์มอบให้อย่างจริงจัง คณาจารย์ในภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการทุกท่าน ที่คอยอบรมสั่งสอน และให้คำแนะนำจนพวกเราวันนี้

## ขอบคุณอย่างยิ่ง

ทุกคนในครอบครัว “เหลื่องโรจนกุล” “เจือไทย” และ “ตรีรานูรัตน์” ที่คอยเป็นกำลังใจงานสำเร็จลุล่วงด้วยดี

พี่วรเทพ กูสมานเกียรติ ที่คอยให้คำปรึกษา และถ่ายทอดประสบการณ์ในการใช้โปรแกรม Finite Element เพื่อนภาคอื่น ๆ (เคมี, อาหาร) ที่ให้หีบหุ้มอุปกรณ์ต่าง ๆ

บริษัท ชุงค์ ยูไนเต็ด คาร์บอน จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์ และให้คำปรึกษาในโครงการนี้ เพื่อน ๆ ทุกคนในภาควิชาอุตสาหกรรม ที่คอยช่วยเหลือ และเป็นกำลังใจให้กับพวกเราตลอดมา และทุก ๆ ท่านที่ผ่านเข้ามาในชีวิตตลอดสี่ปีในสถาบันแห่งนี้

ปณิดา เหลื่องโรจนกุล

พิสิฐู เจือไทย

ลัคน์สิริ ตรีรานูรัตน์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ

บทที่	เรื่อง	หน้า
	บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
	บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
	กิตติกรรมประกาศ.....	III
	สารบัญ.....	IV
	สารบัญตาราง.....	VI
	สารบัญรูป.....	VII
1	บทนำ	
	1.1 ความสำคัญของโครงการ / ที่มาของโครงการ.....	1
	1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ.....	2
	1.3 ขอบเขตการศึกษา.....	3
	1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
2	ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	
	2.1 สัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อน.....	4
	2.1.1 ความเครียดจากการขยายตัว, ความเครียดที่เกิดจากความร้อน (Extensional Strain; Thermal Strain).....	5
	2.1.2 นิยามของความเครียดจากการขยายตัว (Definition of Extensional Strain).....	6
	2.1.3 ความเครียดที่เกิดจากความร้อน (Thermal strain).....	6
	2.1.4 ผลกระทบจากความร้อนต่อการเปลี่ยนรูปบนแนวแกน (Thermal Effects on Axial Deformation).....	8
	2.2 การยึดติดกันของวัสดุเนื่องจากการแพร่ (Diffusion Bonding).....	10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ

บทที่	เรื่อง	หน้า
3	การออกแบบ / การดำเนินงาน	
	3.1 การวางแผนการดำเนินงาน.....	11
	3.2 การออกแบบและการคำนวณ.....	12
	3.3 การออกแบบการทดลองการเชื่อมประสาน โลหะแผ่นบางด้วยตัวยึดจับชิ้นงาน โดยใช้ อุณหภูมิจาก.....	14
	3.3.1 วัตถุประสงค์ของการทดลอง.....	14
	3.3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ.....	14
	3.3.3 วิธีการทดลอง.....	15
4	ผลการดำเนินงาน	
	4.1 ผลการดำเนินงาน.....	17
	4.1.1 การศึกษาความเป็นไปได้ของหัวข้อโครงการ.....	17
	4.1.2 การศึกษารายละเอียดของโครงการ.....	17
	4.1.3 การออกแบบและคำนวณส่วนประกอบของชิ้นงาน.....	17
	4.1.4 การสร้างตัวยึดจับชิ้นงาน.....	20
	4.1.5 การทดสอบประสิทธิภาพของตัวยึดจับชิ้นงาน.....	20
5	สรุปและวิเคราะห์ผลการดำเนินงาน	
	5.1 สรุปผลการดำเนินงาน.....	46
	5.2 สรุปผลการทดลอง.....	47
	5.2.1 วิเคราะห์ผลการทดลอง.....	47
	5.2.2 ข้อผิดพลาดที่เกิดจากการทดลอง.....	47
	5.2.3 สรุปผลที่ได้จากการทำโครงการ.....	48
	5.3 แนวทางพัฒนา และ ปรับปรุงในอนาคต.....	48
	5.3.1 ส่วนที่ต้องแก้ไข.....	48
	5.3.2 แนวทางในการพัฒนา.....	49
	5.4 ประโยชน์ที่ได้รับจากการทำโครงการนี้.....	49
	บรรณานุกรม.....	50
	ภาคผนวก.....	52

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญตาราง

ตารางที่	ชื่อตาราง	หน้า
3.1	แสดงแผนการดำเนินการของโครงการ.....	12
3.2	แสดงค่าคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ทำโครงการ.....	13
3.3	แสดงค่าที่ได้จากการคำนวณในช่วงเวลาที่ต่างกันของการทดลอง.....	14
3.4	ตารางบันทึกผลการทดลอง.....	16
5.1	ตารางผลการทดลอง ณ อุณหภูมิ และ เวลาต่างๆ ที่กำลังขยาย 100X.....	46



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญรูป

รูปที่	ชื่อรูป	หน้า
1.1	แสดงลักษณะการผลิตด้วยวิธี microlamination.....	1
1.2	แสดงลักษณะการเชื่อมประสานด้วยวิธี diffusion bonding ที่ใช้กันในปัจจุบัน.....	2
2.1	แสดงวัสดุเมื่อเกิดการขยายตัว.....	5
2.2	แสดงแนวการขยายตัวของวัสดุทรงสี่เหลี่ยมลูกบาศก์.....	7
2.3	แสดงผลจากการขยายตัวของวัสดุได้รับความร้อน.....	8
3.1	แสดงส่วนประกอบของตัวยึดจับชิ้นงาน.....	11
4.1	แสดงชิ้นส่วนทั้งหมดของตัวยึดจับชิ้นงานที่เป็นกราฟไฟต์.....	18
4.2	แสดงภาพกำหนดขนาดของ Bolt.....	18
4.3	แสดงการบอกขนาดส่วนของตัวยึดจับชิ้นงาน.....	19
4.4	แสดงขนาดของแผ่นทองแดงที่ใช้ในการทดสอบ.....	19
4.5	ระยะห่างระหว่างรอยเชื่อม ณ อุณหภูมิที่ 758 °c หรือที่ 75% ที่เวลาการอบ 1 ชั่วโมง.....	21
4.6	ระยะห่างระหว่างรอยเชื่อม ณ. อุณหภูมิที่ 758 °c หรือที่ 75% ที่เวลาการอบ 1 ชั่วโมง 30 นาที.....	22
4.7	ระยะห่างระหว่างรอยเชื่อม ณ. อุณหภูมิที่ 758 °c หรือที่ 70% ที่เวลาการอบ 2 ชั่วโมง.....	23
4.8	ระยะห่างระหว่างรอยเชื่อม ณ. อุณหภูมิที่ 758 °c หรือที่ 75% ที่เวลาการอบ 2 ชั่วโมง 30 นาที.....	24
4.9	ระยะห่างระหว่างรอยเชื่อม ณ. อุณหภูมิที่ 758 °c หรือที่ 75% ที่เวลาการอบ 3 ชั่วโมง.....	25
4.10	ระยะห่างระหว่างรอยเชื่อม ณ. อุณหภูมิที่ 812 °c หรือที่ 80% ที่เวลาการอบ 1 ชั่วโมง.....	26
4.11	ระยะห่างระหว่างรอยเชื่อม ณ. อุณหภูมิที่ 812 °c หรือที่ 80% ที่เวลาการอบ 1 ชั่วโมง 30 นาที.....	27
4.12	ระยะห่างระหว่างรอยเชื่อม ณ. อุณหภูมิที่ 812 °c หรือที่ 80% ที่เวลาการอบ 2 ชั่วโมง.....	28
4.13	ระยะห่างระหว่างรอยเชื่อม ณ. อุณหภูมิที่ 812 °c หรือที่ 80% ที่เวลาการอบ 2 ชั่วโมง 30 นาที.....	29
4.14	ระยะห่างระหว่างรอยเชื่อม ณ. อุณหภูมิที่ 812 °c หรือที่ 80% ที่เวลาการอบ 3 ชั่วโมง.....	30
4.15	ระยะห่างระหว่างรอยเชื่อม ณ. อุณหภูมิที่ 866 °c หรือที่ 85% ที่เวลาการอบ 1 ชั่วโมง.....	31
4.16	ระยะห่างระหว่างรอยเชื่อม ณ. อุณหภูมิที่ 866 °c หรือที่ 80% ที่เวลาการอบ 1 ชั่วโมง 30 นาที.....	32
4.17	ระยะห่างระหว่างรอยเชื่อม ณ. อุณหภูมิที่ 866 °c หรือที่ 85% ที่เวลาการอบ 2 ชั่วโมง.....	33

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญรูป

รูปที่	ชื่อรูป	หน้า
4.18	ระยะห่างระหว่างรอยเชื่อม ณ อุณหภูมิที่ 866 °c หรือที่ 85% ที่เวลาการอบ 2 ชั่วโมง 30 นาที.....	34
4.19	ระยะห่างระหว่างรอยเชื่อม ณ อุณหภูมิที่ 866 °c หรือที่ 85% ที่เวลาการอบ 3 ชั่วโมง.....	35
4.20	ระยะห่างระหว่างรอยเชื่อม ณ อุณหภูมิที่ 920 °c หรือที่ 90% ที่เวลาการอบ 1 ชั่วโมง.....	36
4.21	ระยะห่างระหว่างรอยเชื่อม ณ อุณหภูมิที่ 920 °c หรือที่ 90% ที่เวลาการอบ 1 ชั่วโมง 30 นาที.....	37
4.22	ระยะห่างระหว่างรอยเชื่อม ณ อุณหภูมิที่ 920 °c หรือที่ 90% ที่เวลาการอบ 2 ชั่วโมง.....	38
4.23	ระยะห่างระหว่างรอยเชื่อม ณ อุณหภูมิที่ 920 °c หรือที่ 90% ที่เวลาการอบ 2 ชั่วโมง 30 นาที.....	39
4.24	ระยะห่างระหว่างรอยเชื่อม ณ อุณหภูมิที่ 920 °c หรือที่ 90% ที่เวลาการอบ 3 ชั่วโมง.....	40
4.25	ระยะห่างระหว่างรอยเชื่อม ณ อุณหภูมิที่ 974 °c หรือที่ 95% ที่เวลาการอบ 1 ชั่วโมง.....	41
4.26	ระยะห่างระหว่างรอยเชื่อม ณ อุณหภูมิที่ 974 °c หรือที่ 95% ที่เวลาการอบ 1 ชั่วโมง 30 นาที.....	42
4.27	ระยะห่างระหว่างรอยเชื่อม ณ อุณหภูมิที่ 974 °c หรือที่ 95% ที่เวลาการอบ 2 ชั่วโมง.....	43
4.28	ระยะห่างระหว่างรอยเชื่อม ณ อุณหภูมิที่ 974 °c หรือที่ 95% ที่เวลาการอบ 2 ชั่วโมง 30 นาที.....	44
4.29	ระยะห่างระหว่างรอยเชื่อม ณ อุณหภูมิที่ 974 °c หรือที่ 95% ที่เวลาการอบ 3 ชั่วโมง.....	45

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความสำคัญของโครงการ / ที่มาของโครงการ

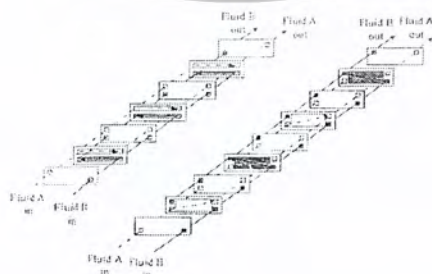
ในปัจจุบันอุปกรณ์ต่างๆ ที่ใช้กับของไหลมีแนวโน้มที่มีขนาดเล็กลง ซึ่งขนาดที่เล็กลงนี้ทำให้อัตราส่วนของพื้นที่ผิวต่อปริมาตร (Surface area to volume ratio) มีค่าเพิ่มขึ้น ทำให้ประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อนของอุปกรณ์ดังกล่าวดีขึ้น

วิธีการผลิตวิธีหนึ่งที่น่าสนใจในการผลิตอุปกรณ์ของไหลขนาดเล็กคือ วิธีที่มีชื่อว่า microlamination ซึ่งเป็นการผลิตอุปกรณ์ต่างๆ โดยการนำวัสดุที่มีลักษณะเป็นแผ่นบางๆ เช่น แผ่นโลหะมาเรียงซ้อนกันให้ได้รูปร่างลักษณะตามที่ต้องการ วิธีการผลิตแบบ microlamination ประกอบด้วย 3 ขั้นตอนใหญ่ๆ ด้วยกันคือ

1. Patterning เป็นการตัดแผ่นวัสดุให้มีรูปร่างตามที่ต้องการซึ่งกรรมวิธีในการตัดแผ่นวัสดุมีอยู่หลายวิธี เช่น micromilling, laser micromachining, electrochemical machining, electric discharge machining หรือ chemical etching การจะเลือกใช้วิธีใดในการตัดแผ่นวัสดุนั้นขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุรวมทั้งปัจจัยทางเศรษฐศาสตร์ในการผลิต

2. Registration ขั้นตอนนี้เป็นการนำแผ่นวัสดุที่ผ่านการตัดแล้วมาเรียงเป็นชั้นๆ ให้ได้ตามรูปร่างลักษณะของอุปกรณ์ที่ได้ออกแบบไว้ โดยอาจจะต้องใช้ alignment method บางวิธีมาช่วยเรียงแผ่นวัสดุ

3. Bonding แผ่นวัสดุที่ถูกเรียงซ้อนกันตามรูปแบบที่ต้องการจะถูกเชื่อมประสานเข้าด้วยกันด้วยวิธีใดวิธีหนึ่ง เช่น soldering, brazing หรือ diffusion bonding ในการเชื่อมประสานแผ่นวัสดุเข้าด้วยกันนั้นถ้าจำเป็นต้องใช้ filler metal ที่มีลักษณะเป็นแผ่นบาง ๆ filler metal ดังกล่าว อาจจะสอดเข้าไประหว่างแผ่นวัสดุในระหว่างขั้นตอน registration ก็ได้

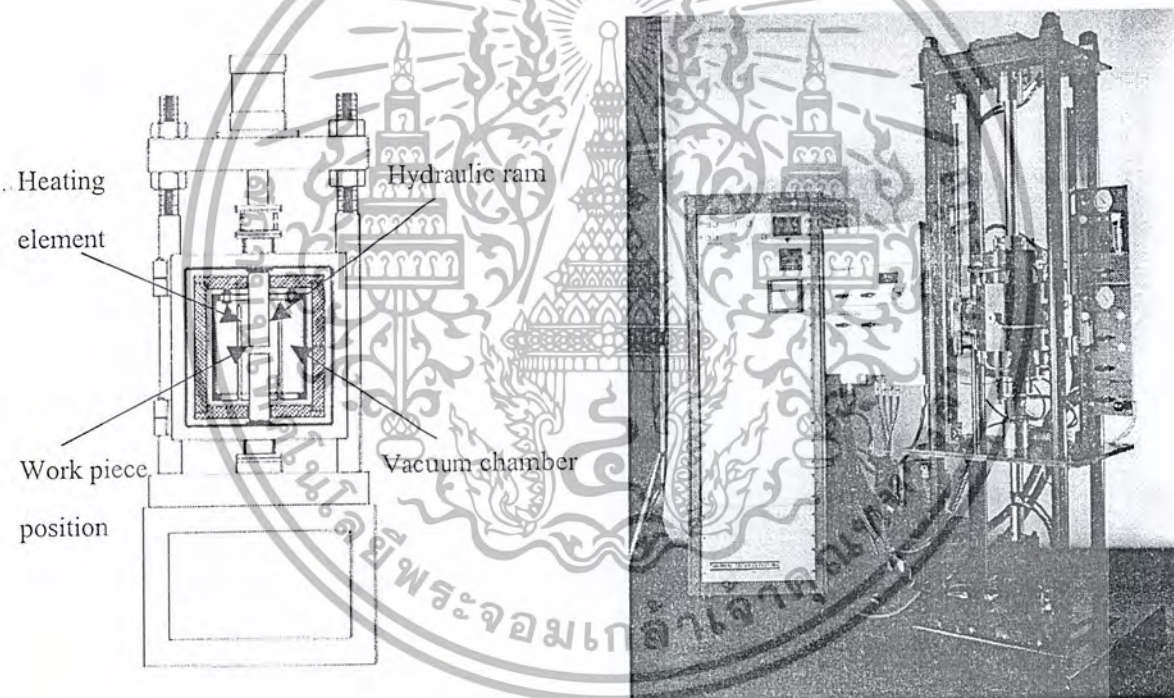


รูปที่ 1.1 แสดงลักษณะการผลิตด้วยวิธี microlamination

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการเชื่อมประสานแผ่นโลหะด้วยวิธี diffusion bonding นั้น จะให้คุณภาพของรอยเชื่อมที่ดีที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับรอยเชื่อมที่ได้จากวิธีอื่นตามที่ได้อธิบายมาข้างต้น รอยเชื่อมที่ได้จะเป็นเนื้อเดียวกับวัสดุตั้งต้นและมีความแข็งแรงของรอยเชื่อมสูง สามารถทนต่ออุณหภูมิการใช้งาน ได้สูงเท่ากับแผ่นโลหะตั้งต้น อุปกรณ์ที่ได้จากการเชื่อมประสานแบบ diffusion bonding ที่สมบูรณ์สามารถที่ใช้บรรจุหรือเก็บของไหลได้โดยไม่มีกรรั่วซึม ดังนั้นการเชื่อมประสานด้วยวิธี diffusion bonding จึงเหมาะกับการผลิตอุปกรณ์ของไหลชนิดต่าง ๆ แต่ในการเชื่อมประสานด้วยวิธี diffusion bonding นั้นก็มีข้อด้อยคือ มีต้นทุนในการผลิตสูง สาเหตุหนึ่งเนื่องมาจากต้องใช้แรงกดขึ้นงานจากไฮดรอลิกเป็นระยะเวลานาน

ปริญญาพนธ์นี้เป็นการศึกษาถึงความเป็นไปได้ที่จะใช้วิธีการเชื่อมประสานโลหะแผ่นด้วยวิธี diffusion bonding โดยไม่ใช่แรงกดจากไฮดรอลิกแต่จะใช้แรงกดที่เกิดขึ้นเนื่องจากความแตกต่างของค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อนของแผ่นโลหะและตัวยึดจับชิ้นงาน



รูปที่ 1.2 แสดงลักษณะเครื่องเชื่อมประสานด้วยวิธี diffusion bonding ที่ใช้กันในปัจจุบัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

ศึกษาความเป็นไปได้ของการเชื่อมประสานโลหะแผ่นบาง โดยใช้หลักการของค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัว เนื่องจากความร้อนที่ต่างกันของวัสดุ

## 1.3 ขอบเขตการศึกษา

1.3.1 ศึกษา ออกแบบและพัฒนาตัวยึดจับชิ้นงาน โดยใช้อุณหภูมิต่ำ

1.3.2 ทดสอบประสิทธิภาพของตัวยึดจับชิ้นงานที่พัฒนาขึ้น โดยการทดลองเชื่อมประสานชิ้นงานทดสอบ

## 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 สามารถเชื่อมประสานโลหะแผ่นบางได้โดยไม่ต้องอาศัยไฮดรอลิก

1.4.2 สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องได้

1.4.3 เพื่อเป็นแนวทางในการศึกษาและพัฒนาตัวยึดจับชิ้นงานต่อไปในอนาคต



## บทที่ 2

### ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 สัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อน

การขยายตัวเนื่องจากความร้อนของวัสดุสามารถส่งผลกระทบต่อสิ่งสำคัญได้หลายอย่าง โดยทั่วไป ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อนจะเป็นส่วนกลับกับจุดหลอมละลายของวัสดุ วัสดุที่มีโลหะผสมจะมีผลกระทบต่อค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อนน้อยกว่าโลหะ

ประโยชน์ของการหดและขยายตัวเนื่องจากความร้อน เช่น ชิ้นส่วนที่มีรูซึ่งติดตั้งไว้ที่เพลลา เช่น บริเวณหน้าแปลนหรือคาน เมื่อให้ความร้อนกับชิ้นงานส่วนนั้นแล้วปล่อยให้เย็น ชิ้นส่วนนั้นจะหดตัวจนสามารถเข้าไปอยู่ในรูนั้นได้

ตัวอย่างอื่นที่เกี่ยวกับการหด ขยายตัวที่สำคัญ คือ ชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์ รอยเชื่อมระหว่างแก้วกับโลหะ เสาค้ำในเครื่องยนต์ไอพ่น และชิ้นส่วนที่เคลื่อนที่ของเครื่องจักรซึ่งต้องการระยะห่างเป็นคุณสมบัติเพื่อที่จะทำงานได้อย่างเหมาะสม การใช้ชิ้นส่วนเซรามิกส์ในเครื่องจักรเหล็กหล่อจำเป็นต้องพิจารณาถึงความสัมพันธ์ของการขยายตัวด้วย

การเลือกวัสดุและส่วนประกอบที่ไม่เหมาะสมอาจเป็นสาเหตุของการเกิดความเครียดเนื่องจากความร้อนและเป็นผลให้เกิดการแตกหัก การบิดเบี้ยว หรือหลวมของส่วนประกอบในโครงสร้างระหว่างทำงาน การนำความร้อนร่วมกับการขยายตัวเนื่องจากความร้อน เป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้เกิดความเครียดเนื่องจากความร้อนที่รู รวมทั้งในการผลิตส่วนประกอบ ในเครื่องมือและแม่พิมพ์ การพิจารณานี้เป็นส่วนสำคัญ เช่น ในระหว่างที่เผาเหล็กกล้าทำงาน ซึ่งชิ้นงานที่ร้อนถูกวางให้เย็นอย่างค่อยเป็นค่อยไป ทำให้ผิวของแม่พิมพ์ผ่านกระบวนการวัฏจักรความร้อน เพื่อที่จะลดความเครียดที่เกิดจากความร้อน การรวมของการนำความร้อนสูงและการขยายตัวเนื่องจากความร้อนต่ำเป็นสิ่งที่ต้องการ

ความเครียดเนื่องจากความร้อน สามารถนำมาซึ่งการแตกร้าวในชิ้นส่วนของเซรามิกส์และในเครื่องมือและแม่พิมพ์ ความด้าเนื่องจากความร้อน (Thermal Fatigue) เป็นผลมาจากวัฏจักรทางความร้อนและเป็นสาเหตุของผิวที่แตกร้าวโดยเฉพาะอย่างยิ่งในเครื่องมือและแม่พิมพ์ที่ใช้ในงานหล่อและขึ้นรูป การช็อกเนื่องจากความร้อน (Thermal Shock) มันพัฒนาจากการแตกร้าวหลังวัฏจักรทางความร้อน ความเครียดเนื่องจากความร้อน อาจเป็นสาเหตุจากทั้งตัวประกอบอุณหภูมิและการขยายตัวเนื่องจากความร้อน ซึ่งจะสังเกตได้ใน โครงสร้างที่เป็นแบบเฮกซะโกนัลแบบปิด (Hexagonal close-packed) ของโลหะและในเซรามิกส์

การแบ่งเบาปัญหาที่เกิดจากการขยายตัวเนื่องจากความร้อน ในตระกูลของโลหะผสมเหล็ก-นิกเกิล ซึ่งมีสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อนต่ำมาก ได้ถูกพัฒนาขึ้นมาเรียกว่า โลหะผสมขยายตัวต่ำ (Low-expansion alloys) คุณสมบัติการขยายตัวเนื่องจากความร้อนต่ำของโลหะผสมเรียกว่า Invar effect สัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อนอยู่ในช่วง  $2 \times 10^{-6}$  ถึง  $9 \times 10^{-6}$   $1/^{\circ}\text{C}$  Invar มีเหล็กเป็นส่วนผสม 64% และนิกเกิล 36% วัสดุอื่นๆเช่น โลหะผสม เหล็ก-นิกเกิล-โคบอลต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โลหะผสมมีความต้านทานการล้าเนื่องจากอุณหภูมิและเนื่องจากนำความร้อนดี เป็นผลให้โลหะเหล่านี้สามารถขึ้นรูปได้ง่ายได้ในหลายรูปร่าง การนำไปใช้ประโยชน์ คือ

1. Bimetallic เอาส่วนประกอบของโลหะผสมที่มีการขยายตัวออกจากกัน จนเป็นโลหะผสมที่มีการขยายตัวสูง
2. รอยเชื่อมของแก้วกับโลหะมีคุณภาพสูงเนื่องจากการขยายตัวทางความร้อนที่เหมาะสม

### 2.1.1 ความเครียดจากการขยายตัว, ความเครียดที่เกิดจากความร้อน (Extensional Strain; Thermal Strain)

เมื่อวัตถุที่เป็นของแข็งถูกแรงกระทำจากภายนอกกระทำ หรือจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ วัตถุที่เป็นของแข็งนั้นจะเกิดการเปลี่ยนรูปไปโดยอาจจะเกิดการเปลี่ยนแปลงขนาดหรือรูปร่างของตัววัตถุที่เป็นของแข็ง ซึ่งโดยทั่วไปในความหมายของการเปลี่ยนรูป (Deformation) นั้นจะรวมทั้งการเปลี่ยนแปลงทางด้านความยาวและการเปลี่ยนแปลงขอบมุมต่างๆ ด้วย

สำหรับตัวอย่างที่จะใช้พิจารณาในเรื่องการเปลี่ยนรูปตามแนวแกนของแท่งวัตถุรูปสี่เหลี่ยมนี้ แสดงดังรูปที่ 1



รูปที่ 2.1 แสดงวัตถุเมื่อเกิดการขยายตัว

จากรูปแสดงให้เห็นถึงว่าจะเกิดการเปลี่ยนรูปของแท่งวัตถุที่ตำแหน่งหนึ่งๆ เมื่อวัตถุที่เป็นของแข็งถูกดึงให้ยืดออกตามแนวแกน ซึ่งมีสี่เหลี่ยม 2 รูป บนผิวหน้าของแท่งสี่เหลี่ยมซึ่งไม่เกิดการเสียรูป (รูปที่ 2.1a) จะมีรูปสี่เหลี่ยมรูปหนึ่งตั้งแนวระดับกับแนวแกนของแท่งวัตถุและรูปสี่เหลี่ยมอีกรูปหนึ่งเอียงทำมุม  $45^\circ$  กับแนวแกนของแท่งวัตถุ ซึ่งจะมีตำแหน่งที่มีการเปลี่ยนแปลงของความยาว เช่น ส่วนของเส้นตรง BC เมื่อมันยืดยาวออกไปจะกลายเป็นส่วนของเส้นตรง  $B^* C^*$  ซึ่งถูกกล่าวว่ามันเป็นความเครียดที่เกิดจากการขยายตัว (Extensional strain) ส่วนตัวอักษรที่มีเครื่องหมายดอกจันเขียนอยู่ข้างบนนั้น คือหลังจากที่เกิดการเปลี่ยนรูปเกิดขึ้นจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของมุมทำให้ผิดแปลกออกไปเหมือนดังเช่น การเปลี่ยนแปลงของมุม DEF กลายเป็นมุมแหลม คือมุม  $D^* E^* F^*$  ซึ่งเหตุการณ์ลักษณะนี้ถูกกล่าวไว้ว่ามันคือ ความเครียดที่เกิดจากการฉีกขาด (Shear strain) ชนิดของความเครียดทั้งสองชนิดนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำคัญมากในการใช้สำหรับการบรรยายการเปลี่ยนรูปร่างทางเรขาคณิต (Geometry of deformation) ของการเปลี่ยนรูปของวัตถุ

### 2.1.2 นิยามของความเครียดจากการขยายตัว (Definition of Extensional Strain)

คำอธิบายเกี่ยวกับความเครียดจากการขยายตัวนั้น ได้ถูกนำมาพิจารณาในกรณีของการเปลี่ยนรูปตามแนวแกน ดังแสดงดังรูปที่ 2.1 ซึ่งพิจารณาถึง แรงรวมทั้งหมดในการยืด (Total Elongation) ของแท่งวัตถุ สัญลักษณ์ที่ใช้คือ  $\Delta L$  ส่วนความเครียดจากการขยายตัว (Extensional strain) หรือความเครียดปกติ (normal strain) มีสัญลักษณ์ที่ใช้เป็นตัวอักษรกรีกคือ  $\epsilon$  โดยที่ความเครียดจากการขยายตัวเฉลี่ย (average extensional strain) ถูกนิยามและให้คำจำกัดความว่าเป็นอัตราส่วนของแรงรวมทั้งหมดในการยืด (Total elongation) กับความยาวปกติ (original length,  $L$ ) มีสมการดังนี้

$$\epsilon_{avg} = \frac{\Delta L}{L} = \frac{L^* - L}{L} \quad (2.1)$$

ถ้าแท่งวัตถุยืดออก (เช่น  $L^* > L$ ), ความเครียด  $\epsilon$  ที่มีค่าเป็นบวกจะถูกเรียกว่า ความเครียดจากการดึง (Tensile strain) ส่วนถ้าแท่งวัตถุหดสั้นลงมีผลเป็นลบ ความเครียด  $\epsilon$  ที่เกิดขึ้นเปรียบได้กับความเครียดจากการกดอัด (Compressive strain) ความเครียดเป็นปริมาณที่ไม่มีหน่วย หรืออาจใช้หน่วยเป็น in./in.,  $\mu\text{in./in.}$  หรือ  $\mu\text{m/m}$  ค่าความเครียดจากการขยายตัวโดยทั่วๆ ไปมีค่าน้อยมากอาจกล่าวได้ว่าน้อยกว่า 0.001 บ่อยครั้งที่จะใช้สัญลักษณ์  $\mu$  แทน microstrain เช่น  $100\mu$  อ่านว่า 100 microstrain

สำหรับส่วนที่เหลือของหัวข้อนี้จะพิจารณาเพียงแคกรณีของความเครียดที่เกิดจากการขยายตัวที่เป็นการขยายตัวตามความยาวที่ไม่เปลี่ยนแปลงองค์ประกอบ ซึ่งชนิดของความเครียดที่ไม่เปลี่ยนแปลงนี้เรียกว่า ความเครียดตามแนวแกน (axial strain) ซึ่งมีสมการดังนี้

$$\epsilon = \epsilon_{avg} = \frac{\Delta L}{L} \quad (2.2)$$

### 2.1.3 ความเครียดที่เกิดจากความร้อน (Thermal strain)

ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดจากการขยายตัวและการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของแท่งวัตถุ นั่นคือความเครียดที่เกิดจากความร้อน แม้ว่าจะมีบางอย่างอาจได้รับการยกเว้น วัสดุศาสตร์ทางด้านวิศวกรรมส่วนใหญ่เมื่อมีการเพิ่มอุณหภูมิหรือมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิไป ( $\Delta T$ ) จะมีการขยายตัวในทุกทิศทาง โดยที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\epsilon_T = \alpha \Delta T \quad (2.3)$$

- เมื่อ  $\epsilon_T$  คือ ความเครียดเนื่องจากความร้อน (Thermal strain)  
 $\alpha$  คือ สัมประสิทธิ์ของการขยายตัวเนื่องจากความร้อน  
 $\Delta T$  คือ อุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไป

ซึ่ง  $\Delta T$  ที่เป็นบวก สอดคล้องกับการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิที่เหนือกว่าอุณหภูมิอ้างอิง เมื่ออุณหภูมิลดลงค่า  $\Delta T$  ก็จะเป็นลบ และวัตถุก็จะเกิดการหดตัว

วัตถุที่เป็นกล่องรูปสี่เหลี่ยมลูกบาศก์ ที่แสดงดังรูปที่ 2.2 จะเกิดการเปลี่ยนรูปเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น  $\Delta T$  ซึ่งจะเกิดการขยายตัวในทุกทิศทาง

$$\epsilon_{xT} = \epsilon_{yT} = \epsilon_{zT} = \alpha \Delta T$$

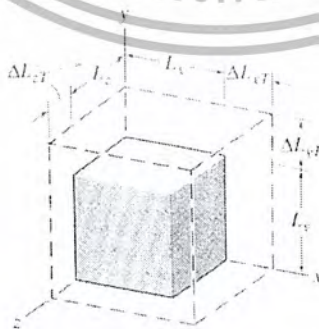
จากสมการ 1 และ 3 สามารถรวมสมการ ได้ดังนี้

$$\Delta L_{xT} = (\alpha \Delta T) L_x$$

$$\Delta L_{yT} = (\alpha \Delta T) L_y$$

$$\Delta L_{zT} = (\alpha \Delta T) L_z$$

สัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อนนั้นเป็นคุณสมบัติของแต่ละวัตถุ สามารถหาได้จากการทดลอง โดยการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ และทำการวัดมิติ (ขนาดกว้าง, ยาว และหนา) ที่เปลี่ยนแปลงไปของตัวอย่างหรือแบบอย่างเดิม เช่นดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 แสดงแนวการขยายตัวของวัตถุทรงสี่เหลี่ยมลูกบาศก์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.1.4 ผลกระทบจากความร้อนต่อการเปลี่ยนรูปบนแนวแกน (Thermal Effects on Axial Deformation)

ในหัวข้อที่ 2.1.3 ได้ให้สมการ (2.3) ของความเครียดที่เกิดจากความร้อนดังนี้

$$\epsilon_T = \alpha \Delta T$$

ซึ่ง  $\alpha$  เป็นค่าสัมประสิทธิ์ของการขยายตัวเนื่องจากความร้อน และ  $\Delta T$  เป็นอุณหภูมิที่เพิ่มเหนืออุณหภูมิอ้างอิง (อุณหภูมิห้อง) โดยทั่วๆ ไปแล้ว  $\Delta T$  ที่มีค่าเป็นบวกมีแนวโน้มที่จะก่อให้เกิดการขยายตัวของแท่งวัตถุ เนื่องจาก  $\alpha$  ก็เป็นค่าบวกเช่นเดียวกัน ในบางกรณี วัสดุบางชนิดมีค่า  $\alpha$  เป็นศูนย์ หรือมีค่าเป็นลบ (เช่น วัสดุที่สามารถทนต่อการเปลี่ยนรูปคือไม่เปลี่ยนรูป หรืออยู่ในสภาพเดิมเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น) แต่ในกรณีดังกล่าวนี้หาได้ยากมาก

ในหัวข้อนี้ จะตรวจสอบถึงผลกระทบจากความร้อนที่เกิดขึ้นบนแท่งที่มีลักษณะยาวเรียบที่มีการเปลี่ยนรูปบนแนวแกน พิจารณาแท่งวัตถุที่เกิดการเปลี่ยนรูปตามแนวแกนทั้ง 2 แท่ง ดังแสดงในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 แสดงผลจากการขยายตัวเนื่องจากวัตถุได้รับความร้อน

โดยที่แท่งวัตถุ AB ถูกวางอยู่ที่แท่นรองรับ โดยที่ผิวหน้าของแท่นรองรับนั้นแบนเรียบและถูกยึดไว้ที่ตำแหน่งปลายสุดของ A เท่านั้น ดังนั้นเมื่อได้รับความร้อนหรือความเย็น จะเกิดการขยายตัวหรือหดตัวในทุกทิศทางอย่างอิสระ ซึ่งจะไม่มีแรงกระทำกับแท่งวัตถุนี้ เนื่องจากมันสามารถขยายหรือหดตัวอย่างอิสระ เมื่อสมมติว่าที่แท่งวัตถุ CD ไม่มีแรงกระทำใดๆ มากระทำและถูกยึดติดตรงส่วนปลายทั้งสองของทั้งสองด้านบนฐานที่ตายตัว ถ้าให้ความร้อนขึ้นเรื่อยๆ ซึ่งจะมีแนวโน้มที่จะเกิดการขยายตัวตามสมการ (2.3) อย่างไรก็ตาม เนื่องจากมันถูกป้องกันการขยายตัวจากผนังที่คงตัวจึงเกิดแรงกดอัดในแท่งวัตถุนี้ ในทางกลับกันถ้าให้ความเย็น จะเกิดการหดตัวและดึงส่วนที่ติดกับผนังด้วย และจะทำให้เกิดการยึดในแท่งวัตถุนี้ ถึงแม้ว่าฐานที่รองรับของแท่งวัตถุ CD นั้นจะถูกผูกยึดติดอย่างไม่สมบูรณ์ สิ่งที่น่าประหลาดใจกับโครงสร้างคือจะเกิดแรงกดอัดในแท่ง CD เมื่อให้ความร้อนที่แท่งวัตถุและการยึดจะเกิดจากการที่เราให้ความเย็นแก่แท่งวัตถุนั้นเอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถ้าพิจารณาเพียงแค่แท่งวัตถุที่ยาวเรียบเท่านั้น (แท่งทดสอบ) จะทำการสมมติให้แรงกดปกติ (normal stress) มีค่าเท่ากับแรงกดตามแนวแกน ( $\sigma \equiv \sigma_x$ ) (ซึ่งเราสมมติว่า  $\sigma_y$  และ  $\sigma_z$  มีค่าน้อยมากเลยสามารถตัดทิ้งได้) ซึ่งมีสมการค่าความเครียดรวม (Total strain equation) ดังนี้

$$\begin{aligned} \epsilon &= \epsilon_\sigma + \epsilon_T \\ &= \frac{\sigma}{E} + \alpha \Delta T \end{aligned} \quad (2.4)$$

สมการที่ (2.4) เป็นสมการที่เกี่ยวกับ ความเค้น-ความเครียด-อุณหภูมิ (stress-strain-temperature equation) สำหรับการเปลี่ยนรูปตามแนวแกนและจากสมการนี้สามารถสรุปได้ว่า ความเครียดรวม  $\epsilon$  มีค่าเท่ากับผลรวมของความเครียดที่เกิดจากความเค้น  $\sigma$  กับความเครียดที่เกิดจากความร้อนระหว่างที่อุณหภูมิเปลี่ยนแปลง  $\Delta T$

ในการแก้ปัญหาการเปลี่ยนรูปตามแนวแกนนั้นเกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิด้วย ใช้สมการความเค้น-ความเครียด-อุณหภูมิ (The stress-strain-temperature equation) ในสมการที่ (2.4) แต่ต้องพิจารณาความคลuyภาพ และการเปลี่ยนแปลงรูปทรงทางเรขาคณิตด้วย ถ้าเราไม่ทำการพิจารณาตำแหน่งของ  $E$ ,  $\alpha$  และ  $\Delta T$  ซึ่งอาจจะพิจารณาในแกน  $X$  จะได้สมการออกมาเป็นดังนี้

$$\sigma \equiv \sigma(x) = \frac{F(x)}{A(x)} \quad (2.5)$$

รวมสมการ (2.4) และ (2.5) จะได้สมการความเครียดตามแนวแกนรวม (total axial strain) ดังนี้

$$\epsilon(x) = \frac{F(x)}{A(x)E(x)} + \alpha(x)\Delta T(x) \quad (2.6)$$

ความยาวที่ยืดออกรวม (total elongation) สัมพันธ์กับความเครียดตามแนวแกนรวม (total axial strain) โดย

$$e = \int_0^L \epsilon(x) dx \quad (2.7)$$

เพราะฉะนั้นจะได้สมการความยาวที่ยืดออกรวม (total elongation) ของแท่งวัตถุดังนี้

$$e = \int_0^L \frac{F(x)dx}{A(x)E(x)} + \int_0^L \alpha(x)\Delta T(x)dx \quad (2.8)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.2 การยึดติดกันของวัสดุเนื่องจากการแพร่ (Diffusion Bonding)

การยึดติดกันของวัสดุเนื่องจากการแพร่ หรือการเชื่อมติดกันของวัสดุเนื่องจากการแพร่ (DFW) เป็นกระบวนการที่ความแข็งแรงของรอยเชื่อมเป็นผลเนื่องมาจากการแพร่ (การเคลื่อนที่ของอะตอมข้ามรอยต่อระหว่างพื้นผิว) และจากการเสียรูปอย่างถาวร (plastic deformation) ของพื้นผิว กระบวนการนี้ต้องการอุณหภูมิประมาณ  $0.5T_m$  ( $T_m$  คือจุดหลอมเหลวของโลหะในหน่วย Kelvin) เพื่อที่จะมีอัตราการแพร่ที่สูงพอที่จะทำให้เกิดการเชื่อมระหว่างกันของชิ้นงาน

รอยเชื่อมที่ได้จาก Diffusion welding จะมีคุณสมบัติทางกายภาพและทางกลเหมือนกับโลหะพื้นฐาน ส่วนความแข็งแรงของรอยเชื่อมขึ้นอยู่กับ ความดัน อุณหภูมิ เวลาของการเชื่อม และความสะอาดของพื้นผิว ความต้องการเหล่านี้สามารถลดลงได้ โดยใช้ filler metal ใสเข้าไประหว่างชิ้นงานที่เชื่อม

ในการยึดติดกันของวัสดุเนื่องจากการแพร่ ความดันที่ใช้ อาจจะมาจากการใช้น้ำหนักกดทับด้วยการกดอัด โดยความแตกต่างของความดันเกิดขึ้น หรือโดยการขยายตัวเนื่องจากความร้อนของส่วนที่เชื่อมติดกันของชิ้นงาน ชิ้นงานถูกให้ความร้อนในเตาที่ใช้ความต้านทานไฟฟ้า หรือแหล่งพลังงานอื่นๆ การเชื่อมโดยอัตโนมัติเนื่องจากความดันสูงถูกใช้สำหรับการเชื่อมต่อของส่วนที่มีความซับซ้อน ถึงแม้ว่ากระบวนการนี้เพิ่งจะถูกพัฒนาในช่วงปี 1970-1979 แต่หลักการของการยึดติดกันของวัสดุเนื่องจากการแพร่ถูกค้นพบมาแล้วหลายศตวรรษ

ความสามารถของกระบวนการการยึดติดกันของวัสดุเนื่องจากการแพร่ สามารถใช้ได้กับวัสดุหลายชนิด เช่น ไททาเนียม เบอร์ลิเลียม เซอร์โคเนียม รวมทั้งโลหะผสมที่หลอมยาก และวัสดุที่ประกอบด้วยวัสดุหลายๆ ชนิด ถึงแม้ว่า DFW จะถูกใช้สำหรับสร้างชิ้นส่วนที่ซับซ้อนในปริมาณเพียงเล็กน้อย เช่น สำหรับยานอวกาศ นิวเคลียร์ และอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ แต่มันอาจสามารถพัฒนาให้เหมาะสมกับการผลิตในปริมาณที่มากขึ้นได้ การเชื่อมแบบนี้อาศัยการเคลื่อนย้ายของอะตอมข้ามรอยต่อของชิ้นงาน กระบวนการเชื่อมนี้จะช้ากว่าการเชื่อมในแบบอื่นๆ

กระบวนการนี้ต้องการความร้อนประมาณ  $0.5 T_m$  (เมื่อ  $T_m$  คือจุดหลอมเหลวของวัสดุ) จะทำให้เกิดการแพร่ได้ดีที่สุด นอกจากนั้นการยึดติดกัน ได้อย่างแข็งแรงขึ้นอยู่กับปัจจัยดังนี้

1. แรงกดคั้น
2. อุณหภูมิ
3. เวลา

นอกจากตัวแปรทั้งสามแล้วยังมีตัวแปรอื่น ๆ อีก เช่น ความสะอาดของผิวชิ้นงาน แต่สำหรับสามตัวแปรข้างต้นนั้นเป็นตัวแปรที่ควรให้ความสำคัญเป็นลำดับต้น ๆ

# บทที่ 3

## การออกแบบ / การดำเนินงาน

### 3.1 การวางแผนการดำเนินงาน

3.1.1 ศึกษาทฤษฎีและกระบวนการผลิตเดิม เพื่อทราบถึงความเป็นไปได้ในความสำเร็จของโครงการ

3.1.2 ศึกษาชนิดของวัสดุ คุณสมบัติต่างๆ ที่จะนำมาใช้ในโครงการทั้งหมด

3.1.3 ออกแบบ คำนวณ และสร้างตัวยึดจับชิ้นงาน ซึ่งจากการออกแบบและคำนวณแล้วตัวยึดจับชิ้นงานมีลักษณะดังนี้



รูปที่ 3.1 แสดงส่วนประกอบของตัวยึดจับชิ้นงาน

3.1.4 เมื่อได้ตัวยึดจับชิ้นงานมาแล้ว ทำการทดลองเชื่อมประสานโลหะแผ่นบางโดยการนำไปอบในตู้อบ ตามเวลาและอุณหภูมิต่างๆ ที่ได้ออกแบบไว้ เพื่อศึกษาถึงผลที่ได้ หลังจากการอบแล้วจะต้องทำการศึกษาถึงรอยเชื่อมประสานที่ได้ว่าโลหะทั้ง 2 แผ่นนี้รวมเป็นเนื้อเดียวกันหรือไม่

3.1.5 วิเคราะห์ผลลัพธ์ที่ได้จากการทดลอง

3.1.6 สรุปปัญหาที่เกิดขึ้นและทำการหาแนวทางการแก้ไข

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับระยะเวลาการดำเนินงานได้แสดงไว้ดังนี้

ตารางที่ 3.1 แสดงแผนการดำเนินการของโครงการ

รายละเอียดการดำเนินงาน	ม.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.
1.ศึกษาความเป็นไปได้ของหัวข้อโครงการ	■								
2.ศึกษารายละเอียดของโครงการ		■							
3.ออกแบบและคำนวณส่วนประกอบของชิ้นงาน			■						
4.จัดหาและเตรียมอุปกรณ์			■	■	■	■	■		
5.สร้างตัวยึดจับชิ้นงาน			■	■	■	■	■		
6.ทดสอบประสิทธิภาพตัวยึดจับชิ้นงาน			■	■	■	■	■	■	
7.สรุปผลการดำเนินงาน									■
8.ทำปริญญานิพนธ์									■

### 3.2 การออกแบบและการคำนวณ

ในขั้นต้นหลังจากการศึกษาถึงคุณสมบัติของวัสดุต่าง ๆ แล้ว ได้มีข้อสรุปถึงวัสดุที่จะนำมาทำการทดลองดังนี้

1. ใช้ทองแดงเป็นชิ้นงานทดสอบ
2. ใช้แกรไฟต์เป็นตัวยึดจับชิ้นงาน

สาเหตุที่ทำให้มีการเลือกวัสดุดังกล่าวเนื่องมาจาก การพิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อนของวัสดุ กล่าวคือวัสดุที่จะนำมาสร้างเป็นตัวยึดจับจะต้องมีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อนที่ต่ำเพื่อไม่ให้เกิดการขยายตัวเนื่องจากความร้อนหรือเกิดการขยายตัวน้อยที่สุด ส่วนตัวชิ้นงานทดสอบได้เลือกวัสดุที่มีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวที่สูงเพื่อให้เกิดการขยายตัวที่สูงเมื่อชิ้นงานได้รับความร้อน นอกจากค่าสัมประสิทธิ์การขยาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา ๑๒ ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวเนื่องจากความร้อนแล้ว ยังคำนึงปัจจัยรองลงมาอีกคือ สามารถหาได้ง่ายและเป็นวัสดุที่โรงงานอุตสาหกรรมนิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย ซึ่งผลสรุปที่ได้ก็คือ แกรไฟต์และทองแดงนั่นเอง

หลังจากที่ได้ทำการเลือกวัสดุที่เหมาะสมแล้วมีการศึกษาถึงคุณสมบัติของวัสดุที่ได้ทำการเลือกเพื่อนำข้อมูลเหล่านั้นไปคำนวณเพื่อใช้ในการออกแบบต่อไป ซึ่งข้อมูลของวัสดุดังกล่าวได้แสดงไว้ในภาคผนวกแล้ว ในการคำนวณมีข้อกำหนดดังนี้

ตารางที่ 3.2 แสดงค่าคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ทำโครงงาน

วัสดุ	คุณสมบัติ	ค่า
ทองแดง (Copper)	- Coefficient of thermal expansion	$16.2 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ หรือ $9 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{F}^{-1}$
	- Melting point	1083 $^\circ\text{C}$
	- Modulus of Elasticity	$21.8 \times 10^6 \text{ psi}$
กราไฟต์(Graphite)	- Coefficient of thermal expansion	$4.5 \times 10^{-6} \text{ } \text{K}^{-1}$
	- Modulus of Elasticity	$1.6 \times 10^6 \text{ psi}$

ทองแดง มีจุดหลอมเหลวที่  $1083 \text{ } ^\circ\text{C}$  เมื่อเริ่มการทดลองให้ทำการทดลองที่ 70% ซึ่งจะได้ความร้อนที่ให้แก่อินงาน  $758 \text{ } ^\circ\text{C}$  เมื่อกำหนดอุณหภูมิห้องที่  $25 \text{ } ^\circ\text{C}$  จะสามารถหาแรงที่เกิดขึ้นได้จาก

$$\epsilon = \epsilon_\sigma + \epsilon_T = \frac{\sigma}{E} + \alpha \Delta T$$

ถ้ากำหนดให้แกรไฟต์ไม่มีการขยายตัวเนื่องจากความร้อนที่เกิดขึ้น จะได้ว่า

$$\begin{aligned} \sigma &= E \alpha \Delta T \\ &= 21.8 \times 10^3 \text{ ksi} \times 9 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{F}^{-1} \times 1352 \text{ } ^\circ\text{F} \\ &= 265.2624 \text{ ksi} \end{aligned}$$

โดย

$$\begin{aligned} E &= 21.8 \times 10^3 \text{ ksi} \\ \alpha &= 9 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{F}^{-1} \\ \Delta T &= T_{70\% \text{ melting-point}} - T_{\text{room}} \\ &= 758 \text{ } ^\circ\text{C} - 25 \text{ } ^\circ\text{C} \\ &= 733 \text{ } ^\circ\text{C} \\ &= 1352 \text{ } ^\circ\text{F} \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อได้ค่าแรงที่คำนวณได้แล้วจึงนำข้อมูลทั้งหมดไปออกแบบตัวยึดจับชิ้นงาน สำหรับการออกแบบตัวยึดจับชิ้นงานทั้งหมด

จากการคำนวณช่วงอุณหภูมิที่ใช้ทำการทดลองที่ต่าง ๆ กัน สามารถแสดงได้ดังนี้

ตารางที่ 3.3 แสดงค่าที่ได้จากการคำนวณในช่วงเวลาที่ต่างกันของการทดลอง

เปอร์เซ็นต์จุดหลอมเหลวของทองแดง (Melting point ของทองแดง = 1083 °C)	อุณหภูมิที่ทำการทดลอง (°C)	ค่าที่ได้จากการคำนวณ ( $\sigma$ ) (ksi)
70%	758	256.2624
75%	812	284.2938
80%	866	303.4
85%	920	322.55
90%	974	341.68

### 3.3 การออกแบบการทดลองการเชื่อมประสานโลหะแผ่นบางด้วยตัวยึดจับชิ้นงานโดยใช้อุณหภูมิ

#### 3.3.1 วัตถุประสงค์ของการทดลอง

เพื่อทดสอบประสิทธิภาพของตัวยึดจับชิ้นงานที่พัฒนามาขึ้น โดยการทดลองเชื่อมประสานชิ้นงานทดสอบ

#### 3.3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

อุปกรณ์ที่ใช้ในโครงการนี้ แบ่งเป็น 3 ส่วนคือ

ส่วนที่ 1 อุปกรณ์ก่อนทำการทดลอง (ขั้นเตรียมการทดลอง) ประกอบด้วย

1. อะลูมินัมไดออกไซด์ (Aluminium Dioxide)
2. อะซิโตน
3. อุปกรณ์ที่ใช้ทำความสะอาดชิ้นงาน เช่น สำลี
4. เครื่องเป่าชิ้นงานให้แห้ง
5. แผ่นทองแดง
6. ตัวยึดจับชิ้นงาน
7. เครื่องทำความสะอาดชิ้นงาน โดยใช้อัลตราโซนิก

ส่วนที่ 2 อุปกรณ์ขณะทำการทดลอง (ขั้นทำการทดลอง) ประกอบด้วย

1. เตอบอาร์กอน
2. เครื่องสูบลม (vacuum pump)
3. ก๊าซอาร์กอน
4. นาฬิกาจับเวลา

ส่วนที่ 3 อุปกรณ์ภายหลังทำการทดลอง (ขั้นทดสอบผล) ประกอบด้วย

1. กล้องศึกษาโครงสร้างของวัสดุ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา 14 ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. เรซิน
3. แม่พิมพ์หล่อชิ้นงาน
4. เครื่องขัดทดสอบชิ้นงาน
5. กระดาษทราย
6. ผงอลูมินา ขนาด 1 ไมโครเมตร

ในบางอุปกรณ์นั้นต้องทำการจัดหามาใช้ใน โรงงาน เช่น ตัวยึดจับชิ้นงานซึ่งทำจากกราไฟต์ เรซิน เป็นต้น แต่ส่วนใหญ่แล้วจะได้รับความอนุเคราะห์จากทางภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม

### 3.3.3 วิธีการทดลอง

1. นำอะลูมินัม ไดออกไซด์ทาบริเวณผิวหน้าของตัวยึดจับชิ้นงานที่จะทำการประกบกับแผ่นทองแดงทั้งสองด้านให้ทั่ว ทิ้งไว้ให้แห้ง
2. ทำการยึดจับชิ้นงาน (แผ่นทองแดง) กับตัวยึดจับชิ้นงานที่ทำการทาอะลูมินัม ไดออกไซด์แล้ว
3. นำตัวยึดจับชิ้นงานที่ทำการยึดจับแผ่นทองแดงแล้วไปใส่ในเตาอบอาร์กอน
4. ทำการอบชิ้นงาน โดยตั้งอุณหภูมิ และทำการจับเวลาให้ได้ตรงตามตารางด้านล่างที่ได้ออกแบบไว้
5. เมื่ออบเสร็จแล้วนำชิ้นงานที่ได้ไปหล่อเรซินเพื่อทำการวิเคราะห์ระยะห่างของรอยเชื่อมที่เกิดขึ้นภายหลังการทดลอง
6. นำไปดูด้วยกล้องศึกษาโครงสร้างวัสดุ
7. สังเกตและบันทึกผลการทดลอง
8. วิเคราะห์และสรุปผล

ตารางที่ 3.4 ตารางบันทึกผลการทดลอง

วันที่	เวลา รวม (ชม.)	อุณหภูมิ ( $^{\circ}C$ )	ผลการทดลอง	หมายเหตุ
	1	758 หรือ 70%		
	1.5			
	2			
	2.5			
	3			
	1	812 หรือ 75%		
	1.5			
	2			
	2.5			
	3			
	1	866 หรือ 80%		
	1.5			
	2			
	2.5			
	3			
	1	920 หรือ 85%		
	1.5			
	2			
	2.5			
	3			
	1	974 หรือ 90%		
	1.5			
	2			
	2.5			
	3			

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### ผลการดำเนินงาน

#### 4.1 ผลการดำเนินงาน

จากการดำเนินงานตามแผนการดำเนินงานที่ได้ออกแบบไว้แล้วในบทที่ 3 นั้น ผลการดำเนินงานที่ได้สามารถอธิบายได้ดังนี้

##### 4.1.1 การศึกษาความเป็นไปได้ของหัวข้อโครงการ

จากการศึกษาหัวข้อ โครงการที่มีลักษณะใกล้เคียงกับหัวข้อ โครงการนี้รวมทั้งการศึกษาถึงทฤษฎีต่าง ๆ ที่มีความเกี่ยวข้องกับหัวข้อโครงการนี้และผลที่ได้จากการคำนวณค่าแรงที่อาจเกิดขึ้นนั้น ผลการดำเนินงานสรุปได้ว่า หัวข้อโครงการ “การศึกษาความเป็นไปได้ในการเชื่อมประสานโลหะแผ่นบางด้วยตัวยึดจับชิ้นงานโดยใช้อุณหภูมิต่ำ” นี้มีความเป็นไปได้ที่จะทำการเชื่อมประสานโลหะแผ่นบางด้วยตัวยึดจับชิ้นงานที่ได้ออกแบบไว้

##### 4.1.2 การศึกษารายละเอียดของโครงการ

การศึกษารายละเอียดของหัวข้อโครงการนี้แบ่งเป็นด้าน ๆ ซึ่งประกอบไปด้วย ส่วนแรก คือส่วนของทฤษฎี ซึ่งในส่วนทฤษฎีที่มีความเกี่ยวข้องกับหัวข้อโครงการนี้มี 2 เรื่องคือ

- เรื่องสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อน
- เรื่องการยึดติดกันของวัสดุเนื่องจากการแพร่

ส่วนต่อไป คือ การคำนวณแรงที่มีผลต่อชิ้นงาน ซึ่งมีความสำคัญเป็นอย่างมากในการวิเคราะห์ความเป็นไปได้ของหัวข้อโครงการ ส่วนเนื้อหารายละเอียดและผลการคำนวณของทั้ง 2 หัวข้อนี้ได้กล่าวไปแล้วในบทที่ 2

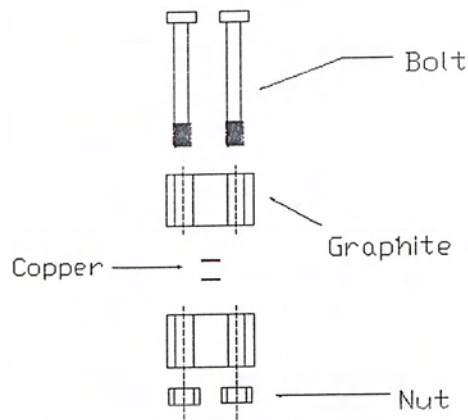
##### 4.1.3 การออกแบบและคำนวณส่วนประกอบของชิ้นงาน

ในการออกแบบและการคำนวณส่วนประกอบของตัวยึดจับชิ้นงานและตัวชิ้นงานนั้นมีผลการดำเนินงานดังนี้

- ส่วนของตัวยึดจับชิ้นงาน

ส่วนของตัวยึดจับชิ้นงานนั้นทำจากวัสดุกราไฟต์อันเนื่องมาจาก คุณสมบัติของกราไฟต์ที่ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อนที่ต่ำ คือ มีค่า 0.0000045 ต่อองศาเซลเซียส และจากการวิเคราะห์ถึงการขยายตัวของชิ้นงานที่อาจเกิดขึ้นจากการให้ความร้อนทำให้ได้ตัวยึดจับชิ้นงานที่มีลักษณะดังรูป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.1 แสดงชิ้นส่วนทั้งหมดของตัวยึดจับชิ้นงานที่เป็นกราไฟต์

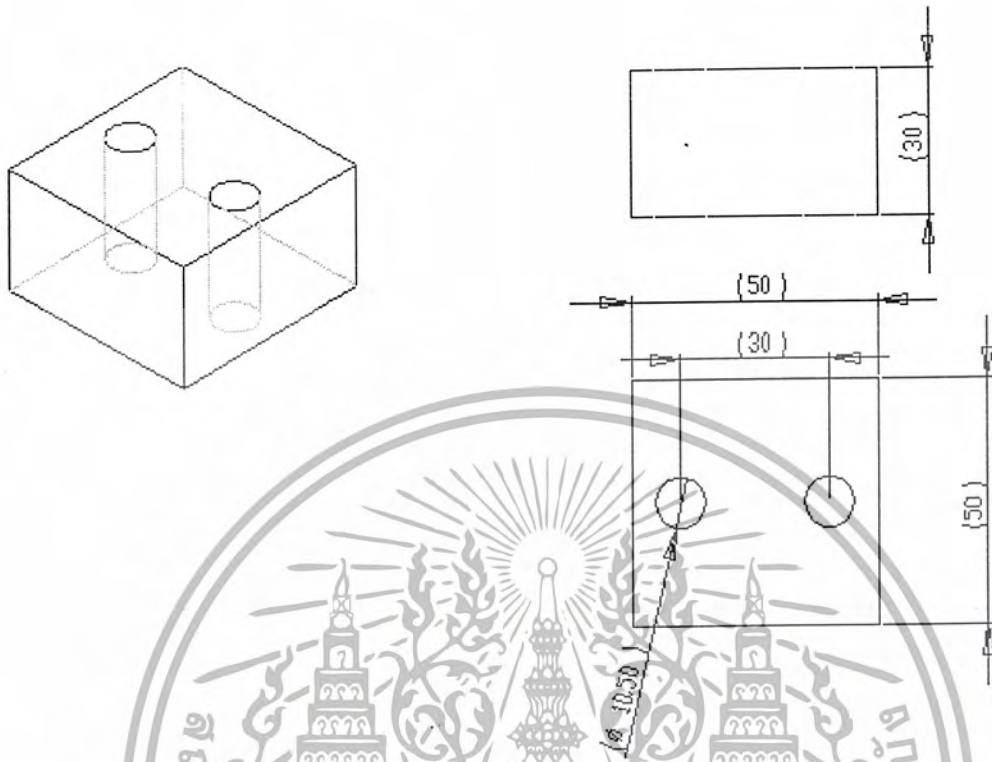
ซึ่งในส่วนของแท่ง Bolt และ Nut นั้นจากผลการดำเนินงาน ได้มีการออกแบบไว้ดังนี้



รูปที่ 4.2 แสดงภาพกำหนดขนาดของ Bolt

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา 18 ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

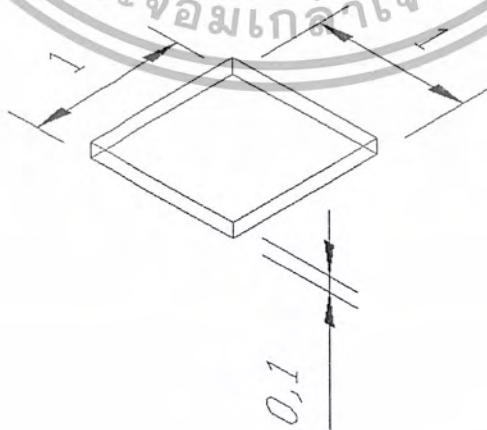
ในส่วนของตัวยึดจับชิ้นงานนั้นมีขนาดดังนี้



รูปที่ 4.3 แสดงการบอกขนาดสวนของตัวยึดจับชิ้นงาน

- ส่วนของชิ้นงาน

ชิ้นงานที่จะทำการเชื่อมติดกันนั้นมีลักษณะดังรูปที่ 4.4 ซึ่งมีหน่วยเป็น มิลลิเมตร ทำจากทองแดงมีความหนา 0.1 มิลลิเมตร ในการทดลองจะทำการเลือกชิ้นงานทองแดงที่มีลักษณะดังรูปมา 2 ชิ้น ทำการประกบเข้าด้วยกันแล้วจึงถือด้วยตัวยึดจับชิ้นงานอีกชิ้นหนึ่ง



รูปที่ 4.4 แสดงขนาดของแผ่นทองแดงที่ใช้ในการทดสอบ (หน่วยเป็น เซนติเมตร)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา 19 ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.1.4 การสร้างตัวยึดจับชิ้นงาน

สำหรับตัวยึดจับชิ้นงานซึ่งทำจากวัสดุพิเศษนั้นคือ กราไฟต์นั้นยากที่จะทำการกลึงหรือสร้างเกลียวเนื่องจาก กราไฟต์มีคุณสมบัติที่เปราะ แดกหักได้ง่าย ตัวยึดจับชิ้นงานนี้จึงได้ทำการสร้างจากบริษัทที่มีความเกี่ยวข้องโดยตรง ซึ่งก็ได้รับความอนุเคราะห์จาก บริษัท ชูงค์ ยูไนเต็ด कार्बอน จำกัด ตามที่ได้ออกแบบไว้

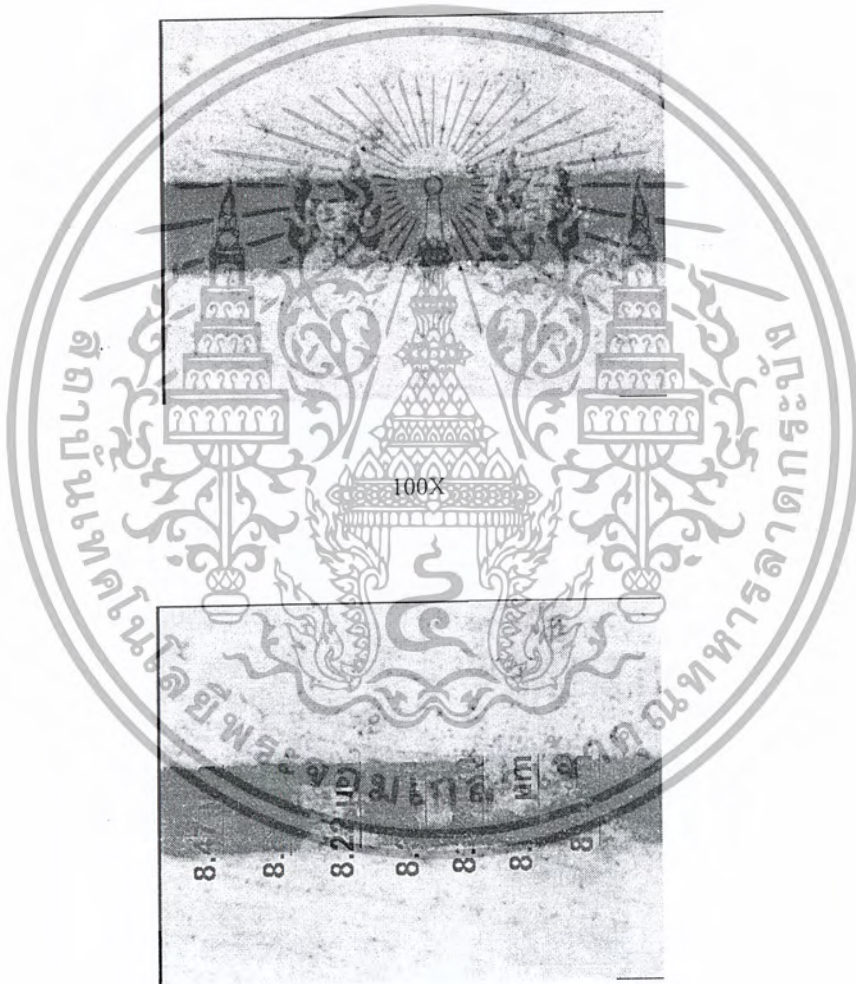
#### 4.1.5 การทดสอบประสิทธิภาพของตัวยึดจับชิ้นงาน

หลังจากการหล่อชิ้นงานทองแดงที่ผ่านการอบเรียบร้อยแล้วด้วยเรซินแล้ว หลังจากนั้นทำการขัดชิ้นงานด้วย เครื่องขัดชิ้นงานจนสามารถเห็นรอยเชื่อมต่อระหว่างแผ่นชิ้นงานทั้งสองซึ่งทำการส่องด้วยกล้องศึกษาโครงสร้างของ วัสดุ หลังจากนั้นได้ทำการเก็บบันทึกภาพที่ได้ ซึ่งจากจากออกแบบการทดลองนั้นได้ ทำการออกแบบไว้รวมชิ้นงานทั้งสิ้น 25 ชิ้นงานซึ่งแบ่งเป็น 5 ช่วงอุณหภูมิและ 5 ช่วงเวลาดังนี้





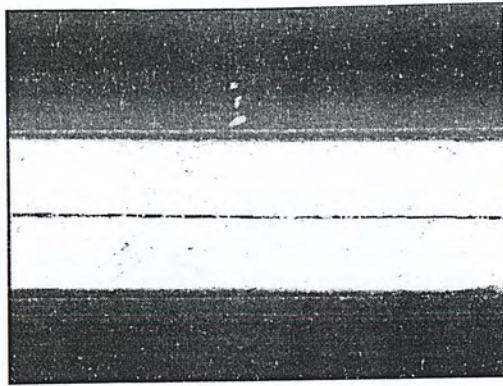
5X



100X

รูปที่ 4.5 ระยะห่างระหว่างรอยเชื่อม ณ อุณหภูมิที่ 758 °c หรือที่ 70% ที่เวลาการอบ 1 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา 21 ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

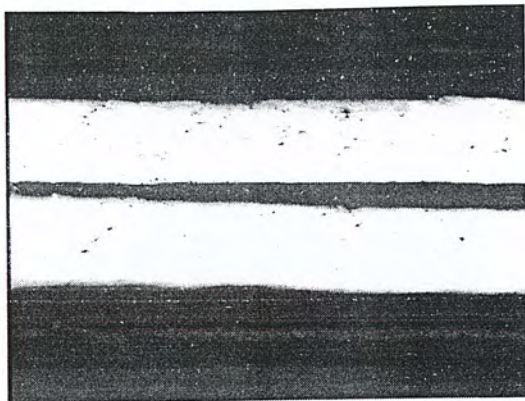


5X

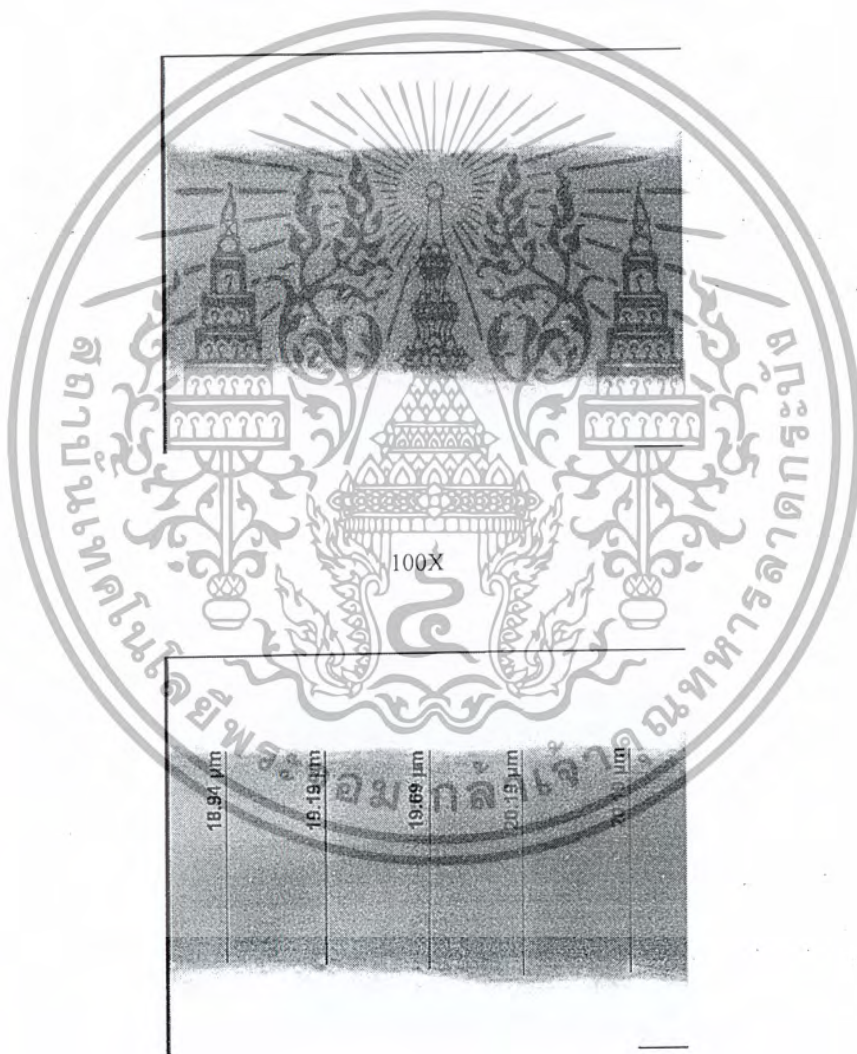


100X

รูปที่ 4.6 ระหว่างระหว่างรอยเชื่อม ณ อุณหภูมิที่ 758 °c หรือที่ 70% ที่เวลาการอบ 1 ชั่วโมง 30 นาที เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

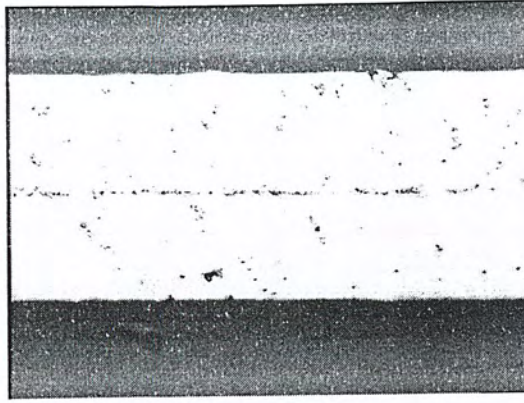


5X



100X

รูปที่ 4.7 ระยะห่างระหว่างรอยเชื่อม ณ อุณหภูมิที่ 758 °c หรือที่ 70% ที่เวลาการอบ 2 ชั่วโมง เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

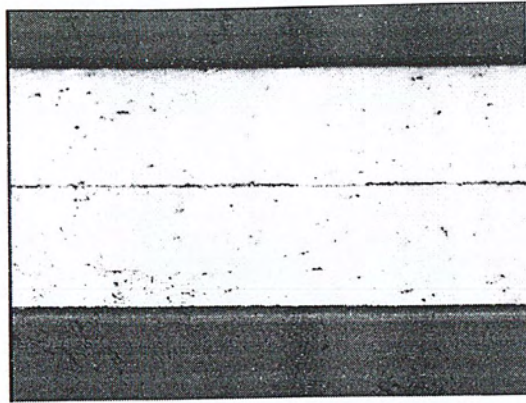


5X



100X

รูปที่ 4.8 ระยะห่างระหว่างรอยเชื่อม ณ อุณหภูมิที่ 758 °c หรือที่ 70% ที่เวลาการอบ 2 ชั่วโมง 30 นาที เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

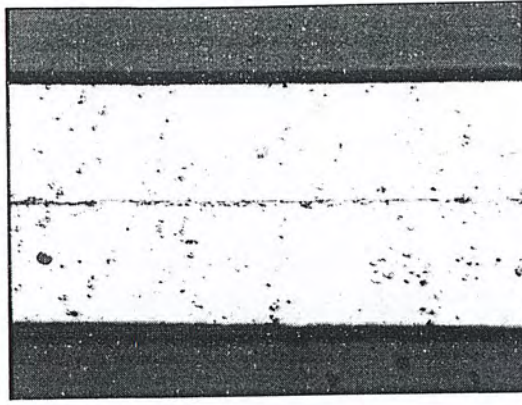


5X



100X

รูปที่ 4.9 ระยะห่างระหว่างรอยเชื่อม ณ อุณหภูมิที่ 758 °c หรือที่ 70% ที่เวลาการอบ 3 ชั่วโมง เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

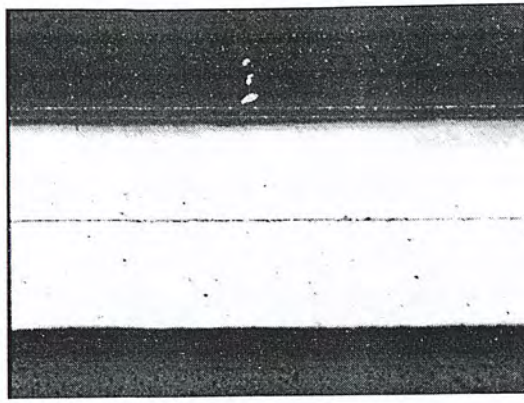


5X



100X

รูปที่ 4.10 ระยะเวลาห่างระหว่างรอยเชื่อม ณ อุณหภูมิที่ 812 °c หรือที่ 75% ที่เวลาการอบ 1 ชั่วโมง เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

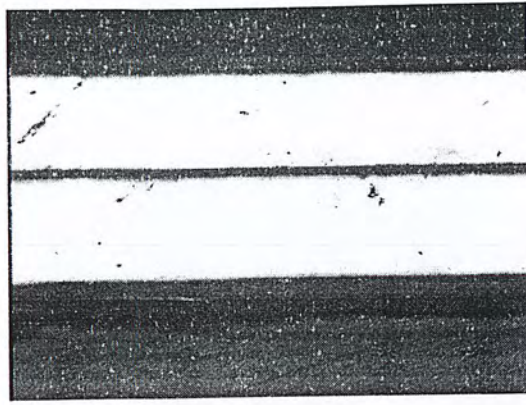


5X



100X

รูปที่ 4.11 ระยะห่างระหว่างรอยเชื่อม ณ อุณหภูมิที่ 812 °c หรือที่ 75% ที่เวลาการอบ 1 ชั่วโมง 30 นาที เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

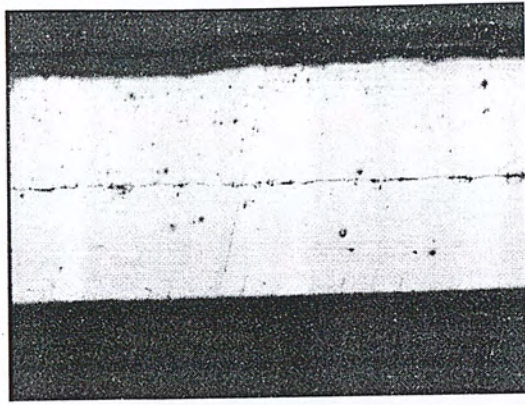


5X



100X

รูปที่ 4.12 ระยะห่างระหว่างรอยเชื่อม ณ อุณหภูมิที่ 812 °c หรือที่ 75% ที่เวลาการอบ 2 ชั่วโมง เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา 28 ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

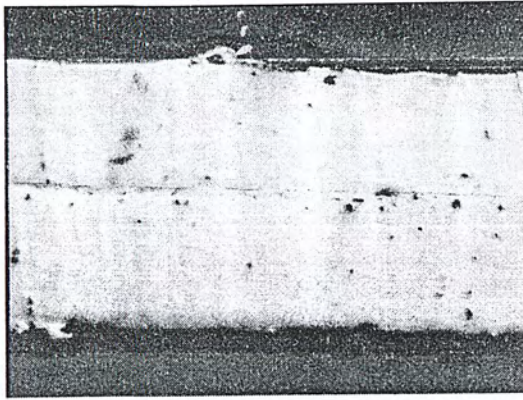


5x



100X

รูปที่ 4.13 ระยะห่างระหว่างรอยเชื่อม ณ อุณหภูมิที่ 812 °c หรือที่ 75% ที่เวลาการอบ 2 ชั่วโมง 30 นาที เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา <sup>29</sup>ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



5X



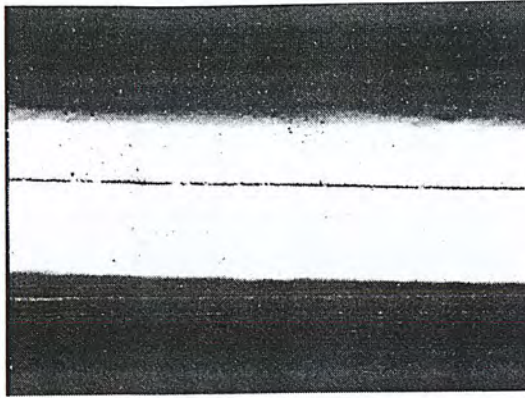
100X

1.68  $\mu\text{m}$     1.25  $\mu\text{m}$     1.18  $\mu\text{m}$     1.56  $\mu\text{m}$     1.99  $\mu\text{m}$     1.81  $\mu\text{m}$     2.12  $\mu\text{m}$     1.56  $\mu\text{m}$

100X

รูปที่ 4.14 ระยะห่างระหว่างรอยเชื่อม ณ อุณหภูมิที่ 812 °C หรือที่ 75% ที่เวลาการอบ 3 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา 30 ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



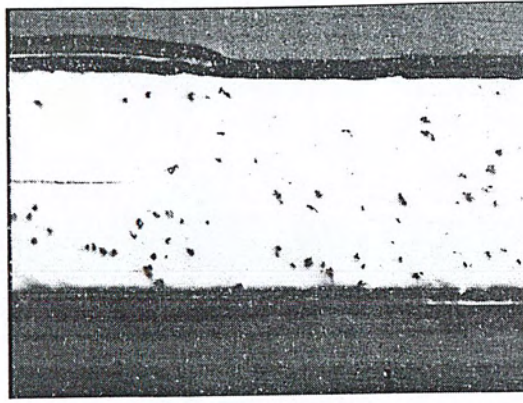
5X



100X

รูปที่ 4.15 ระยะห่างระหว่างรอยเชื่อม ณ อุณหภูมิที่ 866 °C หรือที่ 80% ที่เวลาการอบ 1 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา 31 ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

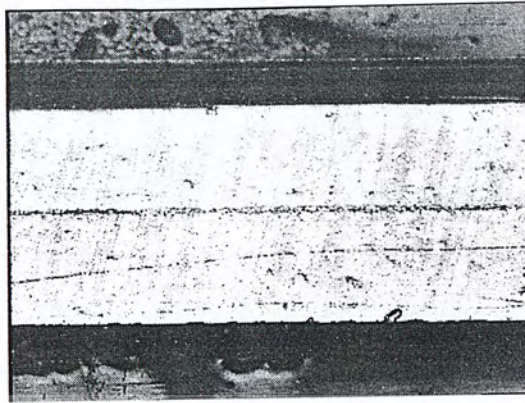


5X



100X

รูปที่ 4.16 ระยะห่างระหว่างรอยเชื่อม ณ อุณหภูมิที่ 866 °C หรือที่ 80% ที่เวลาการอบ 1 ชั่วโมง 30 นาที เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา 32 ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



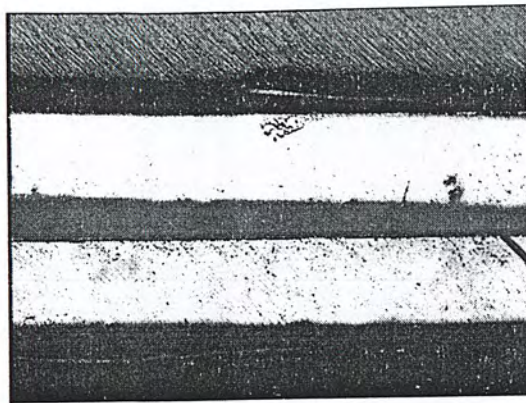
5X



100X

รูปที่ 4.17 ระยะห่างระหว่างรอยเชื่อม ณ อุณหภูมิที่ 866 °C หรือที่ 80% ที่เวลาการอบ 2 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา 33 ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



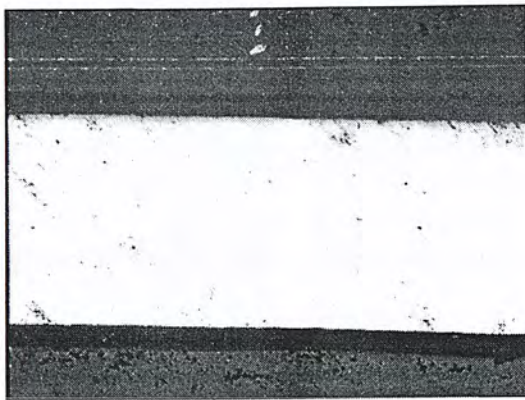
5X



100X

รูปที่ 4.18 ระยะห่างระหว่างรอยเชื่อม ณ อุณหภูมิที่ 866 °C หรือที่ 80% ที่เวลาการอบ 2 ชั่วโมง 30 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา ๖4 ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



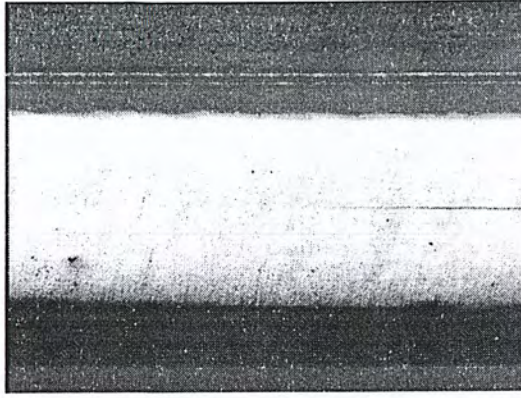
5X



100X

รูปที่ 4.19 ระยะห่างระหว่างรอยเชื่อม ณ อุณหภูมิที่ 866 °C หรือที่ 80% ที่เวลาการอบ 3 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา 35 ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



5X

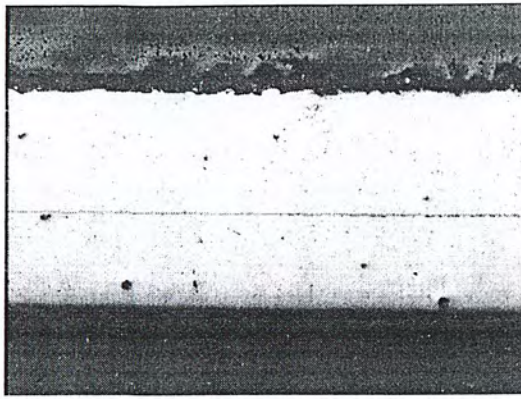


100X

1.62  $\mu\text{m}$   
 1.62  $\mu\text{m}$   
 1.06  $\mu\text{m}$   
 1.18  $\mu\text{m}$   
 1.62  $\mu\text{m}$   
 0.93  $\mu\text{m}$   
 0.87  $\mu\text{m}$   
 1.25  $\mu\text{m}$   
 1.18  $\mu\text{m}$   
 1  $\mu\text{m}$   
 1  $\mu\text{m}$   
 0.93  $\mu\text{m}$   
 0.93  $\mu\text{m}$

100X

รูปที่ 4.20 ระยะห่างระหว่างรอยเชื่อม ณ อุณหภูมิที่ 920 °C หรือที่ 85% ที่เวลาการอบ 1 ชั่วโมง เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



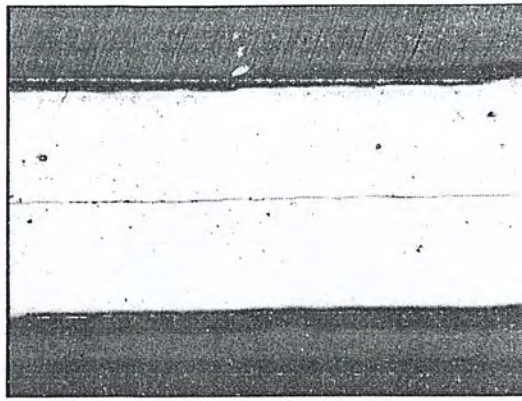
5X



100X

รูปที่ 4.21 ระยะห่างระหว่างรอยเชื่อม ณ อุณหภูมิที่ 920 °C หรือที่ 85% ที่เวลาการอบ 1 ชั่วโมง 30 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา 37 <sup>37</sup> ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



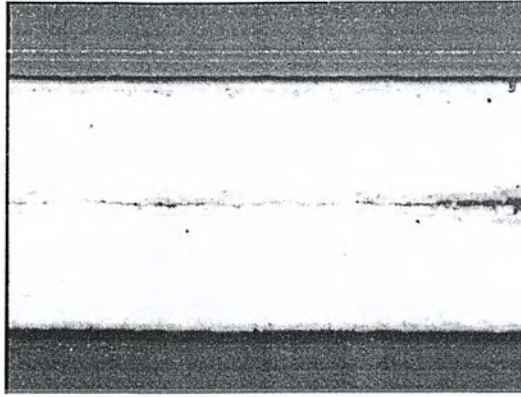
5X



100X

รูปที่ 4.22 ระยะห่างระหว่างรอยเชื่อม ณ อุณหภูมิที่ 920 °C หรือที่ 85% ที่เวลาการอบ 2 ชั่วโมง

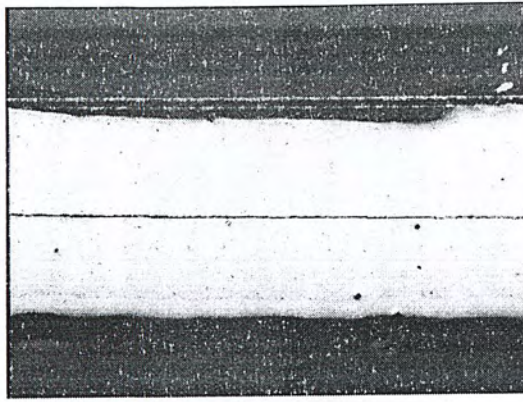
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา 38 ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



100X

รูปที่ 4.23 ระยะห่างระหว่างรอยเชื่อม ณ อุณหภูมิที่ 920 °C หรือที่ 85% ที่เวลาการอบ 2 ชั่วโมง 30 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



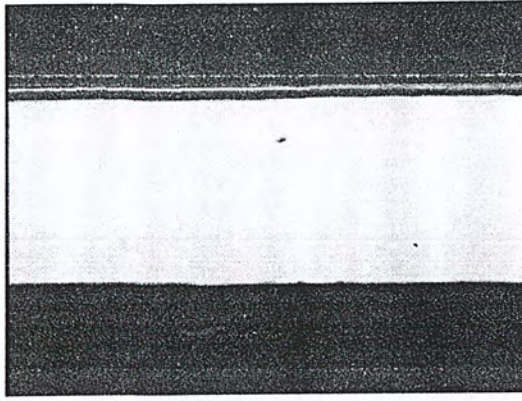
5X



100X

รูปที่ 4.24 ระยะห่างระหว่างรอยเชื่อม ณ. อุณหภูมิที่ 920 °C หรือที่ 85% ที่เวลาการอบ 3 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



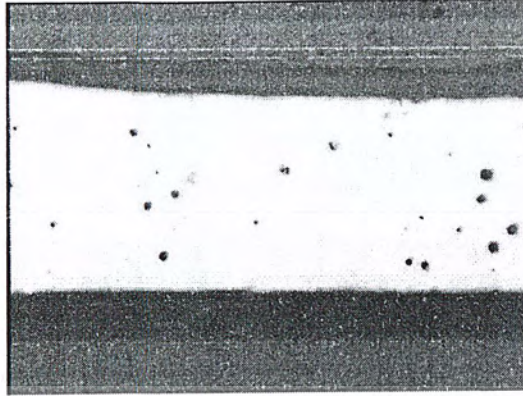
5X



100X

รูปที่ 4.25 ระยะห่างระหว่างรอยเชื่อม ณ อุณหภูมิที่  $974^{\circ}\text{C}$  หรือที่ 90% ที่เวลาการอบ 1 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



5X



100X

รูปที่ 4.26 ระยะห่างระหว่างรอยเชื่อม ณ อุณหภูมิที่ 974 °C หรือที่ 90% ที่เวลาการอบ 1 ชั่วโมง 30 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



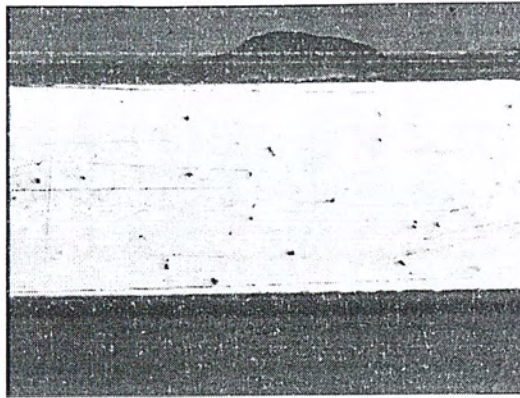
5X



100X

รูปที่ 4.27 ระยะห่างระหว่างรอยเชื่อม ณ อุณหภูมิที่ 974 °C หรือที่ 90% ที่เวลาการอบ 2 ชั่วโมง

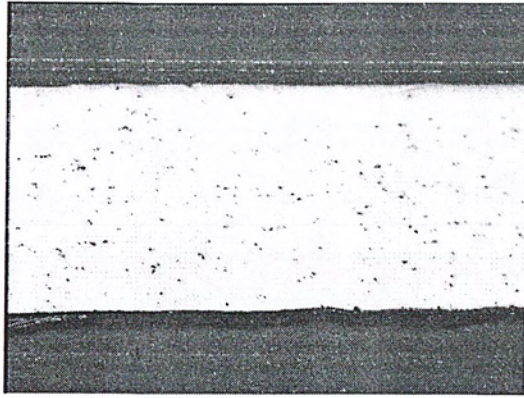
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



100X

รูปที่ 4.28 ระยะห่างระหว่างรอยเชื่อม ณ อุณหภูมิที่ 974 °C หรือที่ 90% ที่เวลาการอบ 2 ชั่วโมง 30 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา 44 ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



5X



100X

100X

รูปที่ 4.29 ระยะห่างระหว่างรอยเชื่อม ณ อุณหภูมิที่  $974^{\circ}\text{C}$  หรือที่ 90% ที่เวลาการอบ 3 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา 45 จะต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

# สรุปและวิเคราะห์ผลการดำเนินงาน

### 5.1 สรุปผลการดำเนินงาน

จากการศึกษาความเป็นไปได้ในการเชื่อมประสานโลหะแผ่นบางด้วยตัวยึดจับชิ้นงานโดยใช้อุณหภูมิดำเนินการทดลองนำแผ่นทองแดงมาทำการยึดจับด้วยตัวยึดจับชิ้นงาน โดยใช้อุณหภูมิตามสภาวะต่างๆ ที่ได้วางแผนไว้มีการปฏิบัติงานตามระยะเวลาที่ผ่านมาดังตาราง และการปฏิบัติงานตรงตามแผนที่วางไว้แต่ก็มีปัญหาบางเรื่องเช่น อุปกรณ์ในการอบชิ้นงาน ตัวยึดจับชิ้นงานเกิดขึ้น

ตารางที่ 5.1 ตารางผลการทดลอง ณ. อุณหภูมิ และ เวลาต่างๆ ที่กำลังขยาย 100X

อุณหภูมิ	เวลาการอบชิ้นงาน	ผลการวัดระยะห่าง	หมายเหตุ
758 องศาเซลเซียส	1 ชั่วโมง	8.47	
	1 ชั่วโมง 30 นาที	2.67	
	2 ชั่วโมง	19.64	
	2 ชั่วโมง 30 นาที	2.14	
	3 ชั่วโมง	2.1	
812 องศาเซลเซียส	1 ชั่วโมง	2.81	
	1 ชั่วโมง 30 นาที	2.85	
	2 ชั่วโมง	16.26	
	2 ชั่วโมง 30 นาที	0.39	
	3 ชั่วโมง	1.77	
866 องศาเซลเซียส	1 ชั่วโมง	3.77	
	1 ชั่วโมง 30 นาที	2.475	
	2 ชั่วโมง	3.62	
	2 ชั่วโมง 30 นาที	3.49	
	3 ชั่วโมง	0	ไม่มีระยะห่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.1(ต่อ) ตารางผลการทดลอง ณ อุณหภูมิ และ เวลาต่างๆ ที่กำลังขยาย 100X

920 องศาเซลเซียส	1 ชั่วโมง	1.17	
	1 ชั่วโมง 30 นาที	3.42	
	2 ชั่วโมง	1.79	
	2 ชั่วโมง 30 นาที	3.08	
	3 ชั่วโมง	3.57	
974 องศาเซลเซียส	1 ชั่วโมง	0	ไม่มีระยะห่าง
	1 ชั่วโมง 30 นาที	1.18	
	2 ชั่วโมง	0.8	
	2 ชั่วโมง 30 นาที	0.38	
	3 ชั่วโมง	0	ไม่มีระยะห่าง

จากการวิเคราะห์ห่างของรอยเชื่อมของแผ่นทองแดง โดยใช้อุณหภูมิที่ค่ากำลังขยาย 100X นำมาหาค่าเฉลี่ยได้ผลตามตารางที่ 5.1

## 5.2 สรุปผลการทดลอง

จากค่าเฉลี่ยของระยะห่างรอยเชื่อมของแผ่นทองแดง มี 3 ชิ้นงาน ไม่พบรอยเชื่อมประสาน ดังนี้

1. อุณหภูมิที่ 866 °c หรือที่ 80% ของจุดหลอมเหลวแผ่นทองแดง ระยะเวลาการอบ 3 ชั่วโมง
2. อุณหภูมิที่ 974 °c หรือที่ 90% ของจุดหลอมเหลวแผ่นทองแดง ระยะเวลาการอบ 1 ชั่วโมง
3. อุณหภูมิที่ 974 °c หรือที่ 90% ของจุดหลอมเหลวแผ่นทองแดง ระยะเวลาการอบ 3 ชั่วโมง

### 5.2.1 วิเคราะห์ผลการทดลอง

1. ค่าเฉลี่ยของระยะห่างของรอยเชื่อมประสานชิ้นงานทองแดงที่ ช่วงเวลาในการอบชิ้นงาน 1 ชั่วโมง, 1 ชั่วโมง 30 นาที, 2 ชั่วโมง, 2 ชั่วโมง 30 นาที, 3 ชั่วโมง พบว่ามีแนว ไน้มของระยะห่างระหว่างแผ่นทองแดง 2 ชิ้นแคบลง
2. ค่าเฉลี่ยของระยะห่างของรอยเชื่อมประสานชิ้นงานทองแดงที่ ช่วงเวลาในการอบชิ้นงานเวลาเดียวกัน พบว่าแนว ไน้มของระยะห่างระหว่างแผ่นทองแดง 2 ชิ้นที่อุณหภูมิสูงขึ้น หรือ อุณหภูมิใกล้จุดหลอมเหลวของทองแดงที่ 1083 °C (เมื่อเพิ่มอุณหภูมิจาก 70% ของจุดหลอมเหลว เป็น 75% , 80% , 85% และ 90% ) มีระยะห่างแคบลง ดังนั้นเมื่อมีเปอร์เซ็นต์ใกล้จุดหลอมเหลวมากจะทำให้ชิ้นทองแดง 2 ชิ้นติดกัน

### 5.2.2 ข้อผิดพลาดที่เกิดจากการทดลอง

1. จากอุปกรณ์ที่ใช้ในการยึดจับชิ้นงานมีประสิทธิภาพลดลง เนื่องจากผิวของชิ้นงานเกิดการสึกหรือจากการทำปฏิกิริยากับออกซิเจนขณะอบชิ้นงาน ทำให้การนำไปยึดจับชิ้นงานในครั้งต่อไปเกิดแรงที่ใช้ยึดจับลดน้อยลง ทำให้ค่าเฉลี่ยของระยะห่างของรอยเชื่อมประสานชิ้นงานทองแดงมีระยะห่างมาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. การนำชิ้นงาน ไปดูในกล้องศึกษาโครงสร้างของวัสดุ ทำให้เกิดความผิดพลาดจากการปรับความคมชัดของภาพ เนื่องจากจะต้องนำภาพที่ถ่ายจากกล้องศึกษาโครงสร้างของวัสดุ ไปวิเคราะห์หาค่าเฉลี่ยของระยะห่างของรอยเชื่อมประสานชิ้นงานทองแดง

3. ชิ้นงานทองแดงที่นำมาใช้ในการอบ เกิดการเสียรูปจากการตัดให้ได้ขนาด และเมื่อนำไปยึดจับภายในตัวยึดจับชิ้นงานจะทำให้ชิ้นทองแดง 2 ชิ้น เกิดช่องว่างระหว่างผิวทองแดง จึงทำให้การเชื่อมประสานชิ้นงานทองแดงเกิดขึ้นได้ยาก

### 5.2.3 สรุปผลที่ได้จากการทำโครงการงาน

1. จากตารางแสดงผลการทดลอง จะพบว่า ที่อุณหภูมิใกล้จุดหลอมเหลวของทองแดง ค่าเฉลี่ยของระยะห่างของรอยเชื่อมรอยต่อ และที่อุณหภูมิ 974 องศาเซลเซียส มี 2 ชิ้นงานที่อบ ณ. เวลา 1 ชั่วโมงและ 3 ชั่วโมง ไม่มีระยะห่าง

2. ที่อุณหภูมิเดียวกัน จะพบว่า ที่ระยะเวลาการอบที่นานขึ้น ชิ้นงานทองแดง 2 ชิ้นที่ได้จากการอบมีแนวโน้มของค่าเฉลี่ยของระยะห่างของรอยเชื่อมรอยต่อ

### 5.3 แนวทางพัฒนา และ ปรับปรุงในอนาคต

แนวทางในการพัฒนาจะแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ

- ส่วนของการออกแบบชิ้นงาน และ ลักษณะในการทดลอง
- ส่วนของข้อจำกัด

#### 5.3.1 ส่วนที่ต้องแก้ไข

ส่วนการออกแบบชิ้นงาน และ ลักษณะในการทดลอง

##### 1. อุปกรณ์ในการทดลอง

ตู้อบอาร์กอน ควรจะปรับปรุงให้ฝาของตู้อบปิดสนิท สามารถสูบลมอากาศออกจนเป็นสุญญากาศได้ และอากาศภายนอกไม่สามารถรั่วเข้าไปภายในตู้อบขณะทำการทดลอง เนื่องจากขณะทำการทดลองมีก๊าซออกซิเจน ไหลเข้าไปภายในตู้อบขณะอบชิ้นงาน ทำให้ ก๊าซออกซิเจนทำปฏิกิริยากับผิวของตัวยึดจับชิ้นงาน ทำให้ผิวของตัวยึดจับชิ้นงานเสียหาย

##### 2. ตัวยึดจับชิ้นงาน

วัสดุ ตัวยึดจับชิ้นงานที่ทำในโครงการนี้ทำจากกราไฟท์ ซึ่งกราไฟท์มีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อน เท่ากับ  $4.5 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$  เป็นค่าที่มีการขยายตัวเมื่อได้รับความร้อนมากกว่าตัวยึดจับชิ้นงานที่ทำจากเซรามิกส์ ทำให้แรงบีบอัดที่เกิดขึ้นภายในตัวยึดจับขณะได้รับความร้อนระหว่างการอบมีแรงบีบอัดน้อยกว่าแรงที่เกิดจากตัวยึดจับที่ทำจากเซรามิกส์ ซึ่งแรงบีบอัดที่เกิดจากตัวยึดจับชิ้นงานนี้สามารถทำให้เกิดการยึดติดกันของชิ้นงาน ซึ่งเซรามิกส์มีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อน เท่ากับ  $9 \times 10^{-6} \text{ F}^{-1}$  เป็นค่าที่มีการขยายตัวค่าเมื่อนำตัวยึดจับชิ้นงานที่ทำจากเซรามิกส์ไปทำการอบจะทำให้เกิดการขยายตัวน้อยกว่ากราไฟท์ ซึ่งตัวยึดจับชิ้นงานที่ทำจากเซรามิกส์นี้จะมีประสิทธิภาพในการบีบอัดที่ดีกว่าเนื่องจากการขยายตัวที่ต่ำกว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### การออกแบบ

-ในการออกแบบตัวลึ้กของตัวยึดจับชิ้นงานไม่ควรทำจากสกรู เนื่องจากตัวสกรูเมื่อได้รับความร้อนแล้วจะเกิดการขยายตัวระหว่างเกลียว ทำให้แรงยึดจับของตัวยึดจับชิ้นงานมีแรงลดน้อยลง

-ในการออกแบบ โบลต์และนัท เมื่อเกิดการขยายตัวของตัวยึดจับชิ้นงานทำให้ส่งผลไปยังคอกของ โบลต์ ซึ่งเกิดการฉีกขาดที่คอกโบลต์ได้

ผิวของตัวยึดจับชิ้นงาน ควรจะมีสารเคลือบผิวเพื่อป้องกันการทำปฏิกิริยากับอากาศ

### 3. ชิ้นงานทดสอบ

ผิวของชิ้นงานทดสอบ (ทองแดง) ไม่เรียบทำให้เมื่อทำการอบแล้ว การยึดติดกันระหว่างผิวของทองแดงเป็นไปได้อย่าง (เกิดช่องว่างระหว่างผิวทองแดงเมื่อมีการแลกเปลี่ยนพันธะของอะตอมของทองแดง 2 ชิ้น)

การล้างผิวของชิ้นงานทดสอบ (ทองแดง) ยังมีคราบไขมันตกค้างเหลืออยู่ ทำให้การเชื่อมประสานเกิดได้ยากขึ้น

### ส่วนของข้อจำกัด

สาเหตุที่ทำให้เกิดข้อจำกัดในการทำการทดลอง

1. งบประมาณที่ไม่เพียงพอในการจัดซื้ออุปกรณ์ให้เหมาะสมกับการออกแบบที่ทำให้เกิดความสมบูรณ์ในการทดลอง ทำให้ต้องเปลี่ยนวัสดุที่ใช้ในการยึดจับชิ้นงานจากเซรามิกส์ เป็นกราไฟต์แทน
2. อุปกรณ์ที่ใช้ในการยึดจับชิ้นงานที่ทำจากกราไฟต์ ไม่สามารถขึ้นรูปให้มีลักษณะเป็นหัวหกเหลี่ยมตามการออกแบบไว้ เนื่องจากหัวหกเหลี่ยมสามารถวัดทอร์คในการยึดจับให้มีความคงที่ในการหมุนของการทดลองแต่ละครั้ง
3. วัสดุที่ใช้ในการผลิตตัวยึดจับชิ้นงานที่ออกแบบไว้หาได้ยากและมีราคาสูง

### 5.3.2 แนวทางในการพัฒนา

1. สามารถนำโลหะชนิดอื่นที่มีค่าการขยายตัวได้เนื่องจากความร้อน มาใช้ในกระบวนการนี้
2. สามารถเปลี่ยนวัสดุ และ ลักษณะของตัวยึดจับชิ้นงานให้มีแรงบีบอัดที่มากขึ้นเพื่อลดระยะเวลาและอุณหภูมิในการอบชิ้นงาน

### 5.4 ประโยชน์ที่ได้รับจากการทำโครงการนี้

1. มีความรู้ความเข้าใจเรื่องโลหะวิทยาของโลหะเพิ่มมากขึ้น เช่น จุดหลอมเหลวของโลหะ ความเค้น ความเครียดของโลหะความสัมพันธ์ของการขยายตัวเนื่องจากความร้อนของโลหะ กับเวลาและอุณหภูมิในการอบโลหะ
2. ได้รับความรู้จากการนำกระบวนการในโครงการไปประยุกต์ใช้ในด้านต่าง ๆ ทั้งในด้านการศึกษาและในเชิงพาณิชย์ เช่น อุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ หรืออุตสาหกรรมคอมพิวเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บรรณานุกรม

- บรรณแดง สรณิด, ประเสริฐ ก๊ายสมบุรณ์, 2524. ตารางงานโลหะ. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.
- ปรีดา พิมพ์ขาวขำ, 2539. เซรามิกซ์. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ไพจิตร อังศิริวัฒน์, 2541. เนื้อดินเซรามิกซ์. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์โอเดียนสโตร์
- आयुर्वदन स्वंगफल, 2543. วัตถุดิบที่ใช้แพร่หลายในงานเซรามิกซ์. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์โอเดียนสโตร์.
- David L. Brenchley, 2001, May 27-30. Application for Micro Chemical and Thermal Systems. Pacific Northwest National Laboratory.  
<URL:<http://www.pnl.gov/microcats>>
- Holloway S., Norskov J. 1991. Bonding at Surfaces. Liverpool University.
- Klavs F. Jensen, 2001. Microreaction engineering-is small better?. Elsevier Science Ltd.  
<URL:[www.elsevier.nl/locate/ces](http://www.elsevier.nl/locate/ces)>
- Magaret Steinbugler, 1999, September 28. Micro-Processing and Micro-Devices. A United Technologies Company.  
<URL:[www.utrc.utc.com](http://www.utrc.utc.com)>
- Mark J. Wilter, 1994. Chemical Bonding. Oxford science publications.
- Martin PM, DW Matson and WD Bennett, 1999. Microfabrication Methods for Microchannel Reactors and Separations Systems. Chemical Engineering Communications.  
<URL:<http://www.pnl.gov/microcats/aboutus/publications.html>>
- Matson DW, PM Martin, DC Stewart, AY Tonkovich, M White, JL Zilka, and GL Roberts, April 1999. Fabrication of Microchannel Chemical Reactors Using a Metal Lamination Process. 3<sup>rd</sup> International Conference on Microreaction Thechnology, Frankfurt, Germany.  
<URL:<http://www.pnl.gov/microcats/aboutus/publications.html>>
- Palmer BJ and DR Rector, Lattice Boltzmann Algorithm for Simulating Thermal Flow in Compressible Fluids. 7<sup>th</sup> International Conference on the Discrete Simulation of Fluids, Oxford.  
<URL:<http://www.pnl.gov/microcats/aboutus/publications.html>>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Roy R., Craig, Jr., 1999. Mechanic of Matrial. Second Edition. the United states of America : John Wiley & Sons.
- Serope Kalpakjian, Steven R. Schmid, 2001. Manufacturing Engineering and Technology. Fourth Edition. New Jersey : Prentice-Hall.
- Tonkovich AY., JL Zilka, MJ Lamont, Y Wang, RS Wegeng, 1998. Microchannel Reactors for Fuel Processing Applications. I. Water Gas Shift Reactor. Chemical Engineering Science.
- <URL:<http://www.pnl.gov/microcats/aboutus/publications.html>>
- YanaGida H., Koumoto K., Miyayama M., 1995. The Chemistry of Ceramics. Wiley and Maruzen.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ที่ ศบ 0524.02.16/141

โครงการภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม  
คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยี  
พระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ถนนฉลองกรุง เขตลาดกระบัง  
กรุงเทพ ฯ 10520

4 กันยายน 2546

เรื่อง ขอบขออนุเคราะห์ทางด้านวัสดุกราฟิ์และ Machine กราฟิ์ตามแบบ

เรียน คุณสมชาย ปุยเจริญ ผู้จัดการแผนก Management บริษัท ชูศักดิ์ ในเต็ค คาร์บอน จำกัด

เนื่องด้วยนางสาวปณิศา เหลืองโรจนกุล นายพิสิฐ เจือไทย และนางสาวลัคน์สิริ ศรีรานุรัตน์  
นักศึกษารชั้นปีที่ 4 สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร  
ลาดกระบัง กำลังทำวิทยานิพนธ์หัวข้อ "การศึกษาความเป็นไปได้ของกั้เชื่อมประสาน โลหะแผ่นบางด้วยตัวยึดจับ  
ชิ้นงาน โดยใช้อุณหภูมิกั้" ขอบขออนุเคราะห์ทางด้านวัสดุกราฟิ์และ Machine กราฟิ์ตามแบบจากบริษัทของท่าน

จึงเรียนมาเพื่อโปรดพิจารณาอนุเคราะห์ จักเป็นพระคุณยิ่ง

ขอแสดงความนับถือ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์พรศักดิ์ อรรถวานิช)

หัวหน้าโครงการภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม

โทรศัพท์ 0-2739-0653 โทรสาร 0-2739-2392

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



# CERTIFICATE

The TÜV CERT Certification Body  
of TÜV Anlagentechnik GmbH

Unternehmensgruppe TÜV Rheinland/Berlin-Brandenburg

hereby certifies in accordance with  
TÜV CERT procedures that

**Schunk United Carbon Co., Ltd.**

7/8 Moo 11 Soi Ramkamhaeng 199,  
Ramkamhaeng Road, Minburi, Bangkok 10510

has established and applies a quality system for

**Manufacturing of Carbon Brushes for Industrial and  
Traffic Purposes, Seal Rings, Bearings, Bushings, Parts for  
Pumps and Compressors and Parts for High Temperature Applications**

An audit was performed.

Report No. 89388

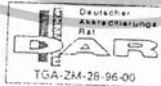
Proof has been furnished that the requirements according to

**DIN EN ISO 9001:2000**

are fulfilled.

The certificate is valid until **2004 November**

Certificate Registration No. 09 100 89388



TÜV Rheinland/  
Berlin-Brandenburg



TÜV CERT Certification Body of  
TÜV Anlagentechnik GmbH

Cologne, 2002-03-29  
First Certification, 1998

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# Schunk United Carbon Co., Ltd.



## DATA SHEET

7/8 Soi Kumrasi 1, Ramkamhaeng Road  
Minburi, Bangkok 10510 Thailand  
Tel. : (662) 517-1350 -  
Fax: (662) 517-6267

### GRADE - FU257T -

Apparent density	1.78	g/cm <sup>3</sup>
Porosity	15	%
Hardness	40	Shore
Flexural strength	40	N/mm <sup>2</sup>
Compressive strength	75	N/mm <sup>2</sup>
Tensile strength	25	N/mm <sup>2</sup>
Specific resistivity	10	μΩm
Thermal conductivity	110	W/mK
Coefficient of thermal exp.	4.5	10 <sup>-6</sup> /K

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# Thermal Expansion Coefficients at 20 C

Material	Fractional expansion per degree C x10 <sup>-6</sup>	Fractional expansion per degree F x10 <sup>-6</sup>
Glass, ordinary	9	5
Glass, pyrex	4	2.2
Quartz, fused	0.59	0.33
Aluminum	24	13
Brass	19	11
Copper	17	9.4
Iron	12	6.7
Steel	13	7.2
Platinum	9	5
Tungsten	4.3	2.4
Gold	14	7.8
Silver	18	10

Thermal expansion discussion

HyperPhysics\*\*\*\* Thermodynamics

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# Melting Points and Heat of Fusion

Substance	Melting point K	Melting point °C	Heat of fusion (10 <sup>3</sup> J/kg)
Helium	3.5	-269.65	5.23
Hydrogen	13.84	-259.31	58.6
Nitrogen	63.18	-209.97	25.5
Oxygen	54.36	-218.79	13.8
Ethyl alcohol	159	-114	104.2
Mercury	234	-59	11.8
Water	273.15	0.00	334
Sulfur	392	119	38.1
Lead	600.5	327.3	24.5
Antimony	903.65	630.50	165
Silver	1233.93	960.80	88.3
Gold	1336.15	1063.00	64.5
Copper	1356	1083	134

\*From Young, Hugh D., University Physics, 7th Ed. Table 15-4.

## Discussion of heat of fusion

HyperPhysics\*\*\*\* Thermodynamics

Table B.2 (Continued)

Material	Modulus of Elasticity	
	GPa	10 <sup>6</sup> psi
<b>Stainless Steels</b>		
Stainless alloy 304	193	28
Stainless alloy 316	193	28
Stainless alloy 405	200	29
Stainless alloy 440A	200	29
Stainless alloy 17-7PH	204	29.5
<b>Cast Irons</b>		
Gray irons		
• Grade G1800	66–97 <sup>a</sup>	9.6–14 <sup>a</sup>
• Grade G3000	90–113 <sup>a</sup>	13.0–16.4 <sup>a</sup>
• Grade G4000	110–138 <sup>a</sup>	16–20 <sup>a</sup>
Ductile irons		
• Grade 60-40-18	169	24.5
• Grade 80-55-06	168	24.4
• Grade 120-90-02	164	23.8
<b>Aluminum Alloys</b>		
Alloy 1100	69	10
Alloy 2024	72.4	10.5
Alloy 6061	69	10
Alloy 7075	71	10.3
Alloy 356.0	72.4	10.5
<b>Copper Alloys</b>		
C11000 (electrolytic tough pitch)	115	16.7
C17200 (beryllium-copper)	128	18.6
C26000 (cartridge brass)	110	16
C36000 (free-cutting brass)	97	14
C71500 (copper-nickel, 30%)	150	21.8
C93200 (bearing bronze)	100	14.5
<b>Magnesium Alloys</b>		
Alloy AZ31B	45	6.5
Alloy AZ91D	45	6.5
<b>Titanium Alloys</b>		
Commercially pure (ASTM grade 1)	103	14.9
Alloy Ti-5Al-2.5Sn	110	16
Alloy Ti-6Al-4V	114	16.5
<b>Precious Metals</b>		
Gold (commercially pure)	77	11.2
Platinum (commercially pure)	171	24.8
Silver (commercially pure)	74	10.7
<b>Refractory Metals</b>		
Molybdenum (commercially pure)	320	46.4
Tantalum (commercially pure)	185	27
Tungsten (commercially pure)	400	58
<b>Miscellaneous Nonferrous Alloys</b>		
Nickel 200	204	29.6
Inconel 625	207	30
Monel 400	180	26
Haynes alloy 25	236	34.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Table B.2 (Continued)

Material	Modulus of Elasticity	
	GPa	10 <sup>6</sup> psi
Invar	141	20.5
Super invar	144	21
Kovar	207	30
Chemical lead	13.5	2
Tin (commercially pure)	44.3	6.4
Lead-Tin solder (60Sn-40Pb)	30	4.4
Zinc (commercially pure)	104.5	15.2
Zirconium, reactor grade 702	99.3	14.4
<b>GRAPHITE, CERAMICS, AND SEMICONDUCTING MATERIALS</b>		
Aluminum oxide		
• 99.9% pure	380	55
• 96%	303	44
• 90%	275	40
Concrete	25.4–36.6 <sup>a</sup>	3.7–5.3 <sup>a</sup>
Diamond		
• Natural	700–1200	102–174
• Synthetic	800–925	116–134
Gallium arsenide, single crystal		
• In the (100) direction	85	12.3
• In the (110) direction	122	17.7
• In the (111) direction	142	20.6
Glass, borosilicate (Pyrex)	70	10.1
Glass, soda-lime	69	10
Glass ceramic (Pyroceram)	120	17.4
Graphite		
• Extruded	11	1.6
• Isostatically molded	11.7	1.7
Silica, fused	73	10.6
Silicon, single crystal		
• In the (100) direction	129	18.7
• In the (110) direction	168	24.4
• In the (111) direction	187	27.1
Silicon carbide		
• Hot pressed	207–483	30–70
• Sintered	207–483	30–70
Silicon nitride		
• Hot pressed	304	44.1
• Reaction bonded	304	44.1
• Sintered	304	44.1
Zirconia, 3 mol% Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	205	30
<b>POLYMERS</b>		
Elastomers		
• Butadiene-acrylonitrile (nitrile)	0.0034 <sup>b</sup>	0.00049 <sup>b</sup>
• Styrene-butadiene (SBR)	0.002–0.010 <sup>b</sup>	0.0003–0.0015 <sup>b</sup>
Epoxy	2.41	0.35
Nylon 6,6	1.59–3.79	0.230–0.550
Phenolic	2.76–4.83	0.40–0.70
Polybutylene terephthalate (PBT)	1.93–3.00	0.280–0.435
Polycarbonate (PC)	2.38	0.345
Polyester (thermoset)	2.06–4.41	0.30–0.64

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

TABLE B.4 (Continued)

Material/Condition	Yield Strength (MPa [ksi])	Tensile Strength (MPa [ksi])	Percent Elongation
<b>GRAPHITE, CERAMICS, AND SEMICONDUCTING MATERIALS<sup>a</sup></b>			
Aluminum oxide			
• 99.9% pure	—	282–551 (41–80)	—
• 96%	—	358 (52)	—
• 90%	—	337 (49)	—
Concrete <sup>b</sup>	—	37.3–41.3 (5.4–6.0)	—
Diamond	—	1050 (152)	—
• Natural	—	800–1400 (116–203)	—
• Synthetic	—		—
Gallium arsenide	—		—
• {100} orientation, polished surface	—	66 (9.6)	—
• {100} orientation, as-cut surface	—	57 (8.3)	—
Glass, borosilicate (Pyrex)	—	69 (10)	—
Glass, soda-lime	—	69 (10)	—
Glass ceramic (Pyroceram)	—	123–370 (18–54)	—
Graphite	—		—
• Extruded (with the grain direction)	—	13.8–34.5 (2.0–5.0)	—
• Isostatically molded	—	31–69 (4.5–10)	—
Silica, fused	—	104 (15)	—
Silicon	—		—
• {100} orientation, as-cut surface	—	130 (18.9)	—
• {100} orientation, laser scribed	—	81.8 (11.9)	—
Silicon carbide	—		—
• Hot pressed	—	230–825 (33–120)	—
• Sintered	—	96–520 (14–75)	—
Silicon nitride	—		—
• Hot pressed	—	700–1000 (100–150)	—
• Reaction bonded	—	250–345 (36–50)	—
• Sintered	—	414–650 (60–94)	—
Zirconia, 3 mol% Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (sintered)	—	800–1500 (116–218)	—
<b>POLYMERS</b>			
Elastomers			
• Butadiene-acrylonitrile (nitrile)	—	6.9–24.1 (1.0–3.5)	400–600
• Styrene-butadiene (SBR)	—	12.4–20.7 (1.8–3.0)	450–500
• Silicone	—	10.3 (1.5)	100–800
Epoxy	—	27.6–90.0 (4.0–13)	3–6
Nylon 6,6	—		
• Dry, as molded	55.1–82.8 (8–12)	94.5 (13.7)	15–80
• 50% relative humidity	44.8–58.6 (6.5–8.5)	75.9 (11)	150–300
Phenolic	—	34.5–62.1 (5.0–9.0)	1.5–2.0
Polybutylene terephthalate (PBT)	56.6–60.0 (8.2–8.7)	56.6–60.0 (8.2–8.7)	50–300
Polycarbonate (PC)	62.1 (9)	62.8–72.4 (9.1–10.5)	110–150
Polyester (thermoset)	—	41.4–89.7 (6.0–13.0)	<2.6
Polyetheretherketone (PEEK)	91 (13.2)	70.3–103 (10.2–15.0)	30–150
Polyethylene			
• Low density (LDPE)	9.0–14.5 (1.3–2.1)	8.3–31.4 (1.2–4.55)	100–650
• High density (HDPE)	26.2–33.1 (3.8–4.8)	22.1–31.0 (3.2–4.5)	10–1200
• Ultrahigh molecular weight (UHMWPE)	21.4–27.6 (3.1–4.0)	38.6–48.3 (5.6–7.0)	350–525
Polyethylene terephthalate (PET)	59.3 (8.6)	48.3–72.4 (7.0–10.5)	30–300

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Table B.6 (Continued)

Material	Coefficient of Thermal Expansion	
	$10^{-6} (^{\circ}\text{C})^{-1}$	$10^{-6} (^{\circ}\text{F})^{-1}$
Ductile irons		
• Grade 60-40-18	11.2	6.2
• Grade 80-55-06	10.6	5.9
<b>Aluminum Alloys</b>		
Alloy 1100	23.6	13.1
Alloy 2024	22.9	12.7
Alloy 6061	23.6	13.1
Alloy 7075	23.4	13.0
Alloy 356.0	21.5	11.9
<b>Copper Alloys</b>		
C11000 (electrolytic tough pitch)	17.0	9.4
C17200 (beryllium-copper)	16.7	9.3
C26000 (cartridge brass)	19.9	11.1
C36000 (free-cutting brass)	20.5	11.4
C71500 (copper-nickel, 30%)	16.7	9.0
C93200 (bearing bronze)	18.4	10.0
<b>Magnesium Alloys</b>		
Alloy AZ31B	26.0	14.4
Alloy AZ91D	26.0	14.4
<b>Titanium Alloys</b>		
Commercially pure (ASTM grade 1)	8.6	4.8
Alloy Ti-5Al-2.5Sn	9.4	5.2
Alloy Ti-6Al-4V	8.6	4.8
<b>Precious Metals</b>		
Gold (commercially pure)	14.2	7.9
Platinum (commercially pure)	9.1	5.1
Silver (commercially pure)	19.7	10.9
<b>Refractory Metals</b>		
Molybdenum (commercially pure)	4.9	2.7
Tantalum (commercially pure)	6.5	3.6
Tungsten (commercially pure)	4.5	2.5
<b>Miscellaneous Nonferrous Alloys</b>		
Nickel 200	13.3	7.4
Inconel 625	12.8	7.1
Monel 400	15.9	7.7
Haynes alloy 25	12.3	6.8
Invar	1.6	0.9
Super invar	0.72	0.40
Kovar	5.1	2.8
Chemical lead	29.3	16.3
Antimonial lead (6%)	27.2	15.1
Tin (commercially pure)	23.8	13.2
Lead-Tin solder (60Sn-40Pb)	24.0	13.3
Zinc (commercially pure)	23.0-32.5	12.7-18.1
Zirconium, reactor grade 702	5.9	3.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Table B.6 (Continued)

Material	Coefficient of Thermal Expansion	
	$10^{-6} (^{\circ}\text{C})^{-1}$	$10^{-6} (^{\circ}\text{F})^{-1}$
<b>GRAPHITE, CERAMICS, AND SEMICONDUCTING MATERIALS</b>		
Aluminum oxide		
• 99.9% pure	7.4	4.1
• 96%	7.4	4.1
• 90%	7.0	3.9
Concrete	10.0–13.6	5.6–7.6
Diamond (natural)	0.11–1.23	0.06–0.68
Gallium arsenide	5.9	3.3
Glass, borosilicate (Pyrex)	3.3	1.8
Glass, soda–lime	9.0	5.0
Glass ceramic (Pyroceram)	6.5	3.6
Graphite		
• Extruded	2.0–2.7	1.1–1.5
• Isostatically molded	2.2–6.0	1.2–3.3
Silica, fused	0.4	0.22
Silicon	2.5	1.4
Silicon carbide		
• Hot pressed	4.6	2.6
• Sintered	4.1	2.3
Silicon nitride		
• Hot pressed	2.7	1.5
• Reaction bonded	3.1	1.7
• Sintered	3.1	1.7
Zirconia, 3 mol% $\text{Y}_2\text{O}_3$	9.6	5.3
<b>POLYMERS</b>		
Elastomers		
• Butadiene-acrylonitrile (nitrile)	235	130
• Styrene-butadiene (SBR)	220	125
• Silicone	270	150
Epoxy	81–117	45–65
Nylon 6,6	144	80
Phenolic	122	68
Polybutylene terephthalate (PBT)	108–171	60–95
Polycarbonate (PC)	122	68
Polyester (thermoset)	100–180	55–100
Polyetheretherketone (PEEK)	72–85	40–47
Polyethylene		
• Low density (LDPE)	180–400	100–220
• High density (HDPE)	106–198	59–110
• Ultrahigh molecular weight (UHMWPE)	234–360	130–200
Polyethylene terephthalate (PET)	117	65
Polymethyl methacrylate (PMMA)	90–162	50–90
Polypropylene (PP)	146–180	81–100
Polystyrene (PS)	90–150	50–83
Polytetrafluoroethylene (PTFE)	126–216	70–120
Polyvinyl chloride (PVC)	90–180	50–100

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้