

การหาต้นตอของความเสียหายของเทอร์โมเด  
และเพิ่มอายุการใช้งานของเทอร์โมเดในกระบวนการ  
ANISOTROPIC CONDUCTIVE FILM BONDING  
กรณีศึกษา บริษัท เวสเทิร์น ดิจิตอล (ประเทศไทย) จำกัด  
INVESTIGATION OF THERMODE FAILURE AND THERMODE  
LIFETIME IMPROVEMENT IN ANISOTROPIC CONDUCTIVE  
FILM BONDING: A CASE STUDY OF WESTERN DIGITAL  
(THAILAND) CO., LTD.

นายกิตติทัต พยุงนิกร  
MR. KITTITUT PAYUNGNIKORN  
นายธนกิจ คำมา  
MR. THANAKIT KAMMA

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2558

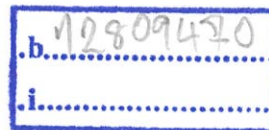
สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การหาต้นตอของความเสียหายของเทอร์โหมด  
และเพิ่มอายุการใช้งานของเทอร์โหมดในกระบวนการ  
ANISOTROPIC CONDUCTIVE FILM BONDING  
กรณีศึกษา บริษัท เวสเทิร์น ดิจิตอล (ประเทศไทย) จำกัด  
INVESTIGATION OF THERMODE FAILURE AND THERMODE  
LIFETIME IMPROVEMENT IN ANISOTROPIC CONDUCTIVE  
FILM BONDING: A CASE STUDY OF WESTERN DIGITAL  
(THAILAND) CO., LTD.



T143888

นายกิตติทัต พยุงนิกร  
MR. KITTITUT PAYUNGNIKORN  
นายธนกิจ คำมา  
MR. THANAKIT KAMMA



เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน 143888  
วันเดือนปี 04 ต.ค. 2559

ปริญญาานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2558

INVESTIGATION OF THERMODE FAILURE AND THERMODE  
LIFETIME IMPROVEMENT IN ANISOTROPIC CONDUCTIVE  
FILM BONDING: A CASE STUDY OF WESTERN DIGITAL  
(THAILAND) CO., LTD.

MR. KITTITUT PAYUNGNIKORN

MR. THANAKIT KAMMA

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 2015

คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ใบรับรองปริญญาานิพนธ์

หัวข้อปริญญาานิพนธ์

การหาต้นตอของความเสียหายของเทอร์โมด และเพิ่มอายุ  
การใช้งานของเทอร์โมดในกระบวนการ ANISOTROPIC  
CONDUCTIVE FILM BONDING  
กรณีศึกษา บริษัท เวสเทิร์น ดิจิตอล (ประเทศไทย) จำกัด  
INVESTIGATION OF THERMODE FAILURE AND  
THERMODE LIFETIME IN ANISOTROPIC CONDUCTIVE  
FILM BONDING: A CASE STUDY OF WESTERN DIGITAL  
(THAILAND) CO., LTD.

นักศึกษา

นายกิตติทัต พยุงนิกร รหัสประจำตัว 55010087  
นายธนกิจ คำมา รหัสประจำตัว 55010480

หลักสูตร

วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ

อาจารย์ผู้ควบคุมปริญญาานิพนธ์

(ดร.นิรันดร์ พิสุทธอนนท์)

หัวข้อปริญญานิพนธ์	การหาต้นตอของความเสียหายของเทอร์โมต และเพิ่มอายุการใช้งานของเทอร์โมตในกระบวนการ ANISOTROPIC CONDUCTIVE FILM BONDING กรณีศึกษา บริษัท เวสเทิร์น ดิจิตอล (ประเทศไทย) จำกัด
นักศึกษา	นายกิตติทัต พยุงนิกร นายธนกิจ คำมา
หลักสูตร	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา	2558
อาจารย์ผู้ควบคุมปริญญานิพนธ์	ดร.นิรันดร์ พิสุทธอานนท์

#### บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อระบุสาเหตุที่แท้จริงที่ทำให้เทอร์โมตเกิดการเสียหายก่อนอายุจริง และเพิ่มอายุการใช้งานของเทอร์โมต รวมไปถึงการลดค่าใช้จ่ายในกระบวนการตามนโยบายของบริษัท เวสเทิร์น ดิจิตอล (ประเทศไทย) จำกัด สำหรับสายการผลิตสินค้าชนิด Diablo ในขั้นตอนกระบวนการ Anisotropic Conductive Film (ACF) Bonding ซึ่งเป็นกระบวนการหลักในการทำให้ชิ้นส่วน Head Stack Assembly (HSA) ติดกับแผงวงจรไฟฟ้าโดยใช้วิธีการให้ความร้อนแก่สารยึดติด ACF ซึ่งเครื่องมือหลักที่ใช้ในกระบวนการนี้คือเทอร์โมตที่ทำจากวัสดุไทเทเนียม เทอร์โมตในสายการผลิตนี้มีอายุการใช้งานเฉลี่ยอยู่ประมาณ 60% ของอายุการใช้งานมาตรฐาน เพื่อหาสาเหตุที่แท้จริงและเพิ่มอายุการใช้งานของเทอร์โมตนั้น ผู้จัดทำได้อิงขั้นตอนในการแก้ไขปัญหาภายใต้เงื่อนไขการพัฒนาบุคลากร ให้เข้าใจถึงหลักการในการบริหารโครงการด้วยวงจร P-D-C-A ประกอบด้วยวิธีการต่างๆ ดังนี้ การศึกษาอุณหภูมิผิวพื้นของเทอร์โมต การวิเคราะห์อุณหภูมิการทำงานจริง การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค การใช้แบบจำลองทางสถิติในการวิเคราะห์ปัจจัยต่างๆ รวมทั้งการคัดเลือกวัสดุในการทำเทอร์โมตใหม่ อ้างอิงจากการศึกษาคุณสมบัติทางวัสดุศาสตร์ ผลการดำเนินงานพบว่าต้นตอความเสียหายที่ทำให้เทอร์โมตเสียก่อนอายุการใช้งานจริงมาจากการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน สำหรับจุดประสงค์ที่สองทางคณะผู้จัดทำได้เลือกวัสดุที่มีการต้านทานออกซิเดชันที่ตอบสนองต่อความจำเป็นในสายการผลิตทางคณะผู้จัดทำหวังว่าอายุการใช้งานของเทอร์โมตจะเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ

Thesis Title	Investigation of Thermode Failure and Thermode Lifetime in Anisotropic Conductive Film Bonding: A Case Study of Western Digital (Thailand) Co., Ltd.
Student	Mr. Kittitit Payungnikorn Mr. Thanakit Kamma
Degree	Bachelor of Engineering in Industrial Engineering King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
Academic Year	2015
Thesis Advisor	Dr. Nirand Pisutha-arnond

## ABSTRACT

The objective of the thesis is twofold. The first objective is to identify the root cause of the premature thermode failure in the anisotropic conductive film (ACF) bonding process; the ACF bonding process is used in the hard-disk drive assembly process to establish an electrical/mechanical connection between a head gimbal assembly (HGA) and an actuator pivot flex assembly (APFA) in the head-stack-assembly (HSA) line. The second objective is to improve the thermode lifetime through materials and geometry design. For the first objective, the problem lies in the fact that the thermodes lasted for only about 60% of their intended lifetime. To find the root-cause and improve thermode lifetime, we followed the QC story which consists of studying thermode surface temperature, analyzing operating temperature, analyzing microstructures, using statistical model to analyze factors, and choosing of new material to make new thermode from consideration of material properties, and reducing the downtime cost. After the overall operation, we have found that the root-cause of the premature thermode failure is oxidation. For the second objective, we select new materials that have higher oxidation resistance and optimizing the geometry to satisfy the production requirement. We expect that the thermode lifetime will be improved significantly.

## กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์เรื่อง การหาต้นตอของความเสียหายของเทอร์โมตและเพิ่มอายุการใช้งานของเทอร์โมตในกระบวนการ Anisotropic Conductive Film Bonding ภาควิชา วิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี (ประเทศไทย) จำกัด สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี คณะผู้จัดทำขอกราบขอบพระคุณบุคคลทุกคนที่มีส่วนเกี่ยวข้องส่งผลให้ปริญญานิพนธ์นี้เสร็จสมบูรณ์

ดร.นิรันดร์ พิสุทธิอนันท์ อาจารย์ที่ปรึกษาปริญญานิพนธ์ คณะผู้จัดทำขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง สำหรับการให้โอกาสในการศึกษาปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ รวมทั้งความรู้ คำแนะนำ ความช่วยเหลือ และความเอาใจใส่ อีกทั้งยังเป็นตัวอย่างที่ดีให้กับคณะผู้จัดทำได้นำเอาไปปรับปรุงและพัฒนาตนเองให้ดีขึ้น ได้เรียนรู้แง่คิดดีๆ ในการทำงานและการดำรงชีวิต และทุกสิ่งทุกอย่างตลอดเวลาที่ผ่านมา

ผศ.ดร.สรรพสิทธิ์ ลิ้มบรรณรัตน์ คณะผู้จัดทำขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง สำหรับคำแนะนำ กำลังใจ ความเอาใจใส่ ความช่วยเหลือในทุกๆ ด้าน และทุกสิ่งทุกอย่างตลอดการศึกษาระดับปริญญาตรี ในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ

ดร.ศาศวัต มหบุญพาชัย และทีมงาน MTEC ที่ได้อำนวยความสะดวกต่างๆ ทั้งเรื่องสถานที่การทำงานวิจัย การใช้งานห้องทดลองและอุปกรณ์ต่างๆ ใน MTEC รวมทั้งได้ถ่ายทอดองค์ความรู้ที่หาไม่ได้จากที่ไหนง่ายๆ รวมไปถึงแง่คิดที่ดีต่างๆ ที่ทางคณะผู้จัดทำสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในชีวิตในอนาคตได้ ขอขอบพระคุณอย่างสูง

ทีมงาน WD ที่ได้อำนวยความสะดวกต่างๆ การเข้าถึงสถานที่ที่บุคคลภายนอกไม่สามารถเข้าหากันได้ ได้รับความอนุญาติใน บริษัท เวสเทิร์น ดิจิตอล (ประเทศไทย) จำกัด และคอยแนะนำให้ความรู้ รวมไปถึงวิธีการแก้ปัญหาในรูปแบบต่างๆ และให้ความช่วยเหลืออย่างเต็มที่ทั้งในรูปแบบของข้อมูลและอื่นๆ ด้วยดี มาตลอด ขอขอบพระคุณ

ขอบคุณเพื่อนทุกคนสำหรับความช่วยเหลือจนทำให้ปริญญานิพนธ์สำเร็จลุล่วง และคอยเป็นกำลังใจที่ดีตลอดมา

นายกิตติทัต พยุงนิกร

นายธนกิจ คำมา

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูป.....	ซ
<b>บทที่ 1    บทนำ</b>	
1.1    ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2    วัตถุประสงค์ของโครงการ.....	3
1.3    ขอบเขตของโครงการ.....	3
1.4    ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
<b>บทที่ 2    ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง</b>	
2.1    ไทเทเนียม (Titanium).....	5
2.1.1    โครงสร้างและโครงสร้างจุลภาคของ Ti-6Al-4V.....	6
2.2    ปฏิกริยาเคมีที่เกิดจากการรวมตัวของออกซิเจนกับสารอื่น.....	9
2.2.1    ปฏิกริยาออกซิเดชันของไทเทเนียมและโลหะผสมไทเทเนียม.....	9
2.3    การเชื่อมสารยึดติดที่มีการนำไฟฟ้าในแต่ละทิศทางต่างกัน.....	10
2.3.1    การเกิดการเชื่อมต่อ.....	11
2.3.2    ชนิดของสารยึดติด.....	12
2.3.3    กระบวนการเชื่อมต่อด้วยการให้ความร้อนเป็นจังหวะ.....	14
2.3.4    ขั้นตอนของกระบวนการเชื่อมต่อ.....	15
2.3.5    สรุปการเชื่อมสารยึดติดที่มีการนำไฟฟ้าในแต่ละทิศทางต่างกัน.....	16

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
<b>บทที่ 3</b>	<b>วิธีการดำเนินงาน</b>
3.1	การกำหนดหัวข้อการแก้ไขปัญหา..... 20
3.1.1	ปัจจัยทางด้านความร้อน..... 20
3.1.2	ปัจจัยทางด้านวัสดุศาสตร์..... 20
3.1.3	ปัจจัยทางด้านการจัดแนว (Alignment)..... 20
3.1.4	ปัจจัยทางด้านการทำงานของเครื่องจักร..... 21
3.2	การกำหนดเป้าหมาย..... 21
3.3	การตรวจสอบสภาพปัจจุบันก่อนการปรับปรุง..... 22
3.3.1	กระบวนการที่ 3 Temperature Ramp-Up & Hold..... 23
3.3.2	กระบวนการที่ 4 Thermode Lifting & Temperature Ramp-Down..... 23
3.4	การวิเคราะห์สาเหตุของปัญหา..... 24
3.5	การกำหนดแนวทางการปรับปรุงและปฏิบัติตามแนวทางที่วางไว้..... 26
3.5.1	การกำหนดแนวทางการปรับปรุง..... 26
3.5.2	แผนการดำเนินงาน..... 27
3.5.3	การปฏิบัติตามแนวทางที่วางไว้..... 27
3.6	การตรวจสอบผลลัพธ์..... 32
3.7	การสรุปผลและจัดทำเป็นมาตรฐาน..... 33
<b>บทที่ 4</b>	<b>ผลการดำเนินงาน</b>
4.1	ผลการดำเนินงานที่ได้ปฏิบัติตามแนวทางที่วางไว้..... 34
4.1.1	การระบุสาเหตุที่แท้จริงที่ทำให้เทอร์โมตเกิดการเสียหาย..... 34
4.1.1.1	การศึกษาอุณหภูมิผิวพื้นของเทอร์โมต..... 34
4.1.1.2	การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของวัสดุ..... 38
4.1.2	การเพิ่มอายุการใช้งานของเทอร์โมต..... 49
4.1.2.1	การคัดเลือกวัสดุใหม่มาใช้งาน..... 49
4.1.2.2	การวิเคราะห์อายุการใช้งานของเทอร์โมตด้วยวิธีการทางสถิติ..... 51
4.1.2.3	การนำเทอร์โมตที่สร้างขึ้นจากวัสดุใหม่มาทดลองใช้งาน..... 53

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 5   สรุปผลการดำเนินการและข้อเสนอแนะ	
5.1 สรุปผลการดำเนินงาน.....	55
5.1.1 สรุปผลการระบุนหาสาเหตุที่แท้จริงที่ทำให้เทอร์โมมดเกิดการเสียหาย.....	55
5.1.2 สรุปการเพิ่มอายุการใช้งานของเทอร์โมมด.....	56
5.2 ปัญหาระหว่างการทำการศึกษา.....	56
5.3 ข้อเสนอแนะ.....	57
เอกสารอ้างอิง.....	58

## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 ส่วนผสมของ Ti-6Al-4V (Dragolich et al., 1994).....	6
ตารางที่ 3.1 หัวข้อปัญหา.....	26
ตารางที่ 3.2 โลหะผสมไทเทเนียมที่ถูกใช้สำหรับเป็นส่วนประกอบของคอมเพรสเซอร์ในเครื่องยนต์ อากาศยาน-องค์ประกอบทางเคมี และอุณหภูมิใช้งานสูงสุด (Davis, 1997).....	31
ตารางที่ 3.3 ปริมาณการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันในโลหะผสมแต่ละชนิด ที่การใช้งานอุณหภูมิต่างๆ เป็นเวลา 1,008 ชั่วโมง (McGuire, 2008).....	31
ตารางที่ 4.1 ปริมาณการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันในโลหะผสมแต่ละชนิด ที่การใช้งานอุณหภูมิต่างๆ เป็นเวลา 1,008 ชั่วโมง (McGuire, 2008).....	50
ตารางที่ 4.2 ตัวอย่างคุณสมบัติต่างๆ ของวัสดุกลุ่มไทเทเนียม.....	51

## สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 1.1 ขั้นตอนการทำงานในกระบวนการ ACF Bonding.....	2
รูปที่ 1.2 ลักษณะการเสียหายของเทอร์โมมด.....	2
รูปที่ 1.3 ขั้นตอนการทำงาน และเป้าหมายในช่วงที่ 1 และช่วงที่ 2.....	3
รูปที่ 2.1 การเรียงตัวของโครงสร้างจุลภาค Lamellar ของโลหะผสมไทเทเนียม (Shenoy et al., 1986).....	6
รูปที่ 2.2 โครงสร้าง Lamellar ของโลหะผสมไทเทเนียม (Shenoy et al., 1986).....	7
รูปที่ 2.3 โครงสร้างจุลภาคทั่วไปของโลหะผสม Ti-6Al-4V (a) โครงสร้าง Lamellar (b) โครงสร้าง Bimodal (c) โครงสร้าง Equiaxed (Dragolich, et al., 1994).....	8
รูปที่ 2.4 การเกิดโครงสร้างฟิล์มออกไซด์แบบหลายชั้นของ Ti-6Al-4V (Gulbransen et al., 1963)	10
รูปที่ 2.5 โครงแบบของจุดเชื่อมต่อสำหรับ ACF และ HSCs (Brackell, 2000).....	11
รูปที่ 2.6 หลักการของการเชื่อมต่อด้วยสารยึดติด (Brackell, 2000).....	12
รูปที่ 2.7 รูปจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน (Scanning Electron Microscope, SEM) แสดงอนุภาคขนาด 5 $\mu\text{m}$ ที่ถูกกักอยู่ระหว่างตัวนำ (Brackell, 2000).....	12
รูปที่ 2.8 เทอร์โมมดมีรูปร่างแบบตัว “U” (Brackell, 2000).....	14
รูปที่ 2.9 เทอร์โมมดยึดตำแหน่งเบื้องต้นของแผ่นพอยส์กับ PCB จากนั้นแผ่นวางแนวจะถูกนำออก แล้วจึงวางตำแหน่งของ Flex (Brackell, 2000).....	15
รูปที่ 2.10 ขั้นตอนการเชื่อมติด และการบ่ม (Brackell, 2000).....	16
รูปที่ 2.11 ตำแหน่งของเทอร์โมมด แผ่นวงจรแบบโค้งงอ (Flex) และสารยึดติด (Brackell, 2000).....	16
รูปที่ 3.1 แผนภาพแสดงวิธีการดำเนินงานการตรวจสอบการเสียหายและเพิ่มอายุการใช้งานของ เทอร์โมมดในกระบวนการ ACF Bonding.....	19
รูปที่ 3.2 กราฟแสดงอายุการใช้งานของเทอร์โมมดกลุ่มตัวอย่าง.....	21
รูปที่ 3.3 ขั้นตอนการทำงานในกระบวนการ ACF Bonding.....	23
รูปที่ 3.4 ตัวอย่างเทอร์โมมดที่เสียหายก่อนอายุการใช้งานจริง.....	24
รูปที่ 3.5 แผนภูมิแก๊งปลาแสดงเหตุและผล.....	25
รูปที่ 3.6 Fluke Ti400 (Fluke Corporation).....	27
รูปที่ 3.7 Anritsu ST-11K-010-TS1-ANP (Anritsu Meter Co., Ltd.).....	28
รูปที่ 3.8 Omega GG-K-30 (Omega Engineering, INC.).....	28
รูปที่ 3.9 Cheral TM-11 (Trimech Technology Pte. Ltd.).....	28

## สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.1 ตัวอย่างข้อมูลอุณหภูมิจากเครื่องวัดอุณหภูมิแบบแสดงภาพ.....	35
รูปที่ 4.2 ลักษณะการติดตั้งเทอร์โมคัปเปิลเข้ากับชิ้นงาน ณ จุดที่จะเกิดการสัมผัสกับเทอร์โมมอด.....	36
รูปที่ 4.3 ผลการวัดอุณหภูมิ (°C) จากเครื่องเก็บข้อมูลอุณหภูมิ โดยกราฟแกน X แสดงระยะเวลา แกน Y แสดงอุณหภูมิที่วัดได้ ตัวเลขในช่อง CH1 CH2 และ CH3 คือค่าอุณหภูมิที่วัดได้จากเทอร์โมคัปเปิล ที่ติดอยู่ ณ ตำแหน่งการกดของพื้นที่ 0 2 และ 5 ตามลำดับ.....	36
รูปที่ 4.4 ตำแหน่งการติดตั้งเทอร์โมคัปเปิลเข้ากับเทอร์โมมอด.....	37
รูปที่ 4.5 ผลการวัดอุณหภูมิจากเครื่องเก็บข้อมูลอุณหภูมิ โดยกราฟแกน X แสดงระยะเวลา แกน Y แสดงอุณหภูมิที่วัดได้ตัวเลขในช่อง CH2 CH3 และ CH4 คือค่าอุณหภูมิที่วัดได้จากเทอร์โมคัปเปิลที่ติดอยู่ ณ ตำแหน่งการกดของพื้นที่ 0 2 และ 5 ตามลำดับ.....	37
รูปที่ 4.6 ลักษณะความเสียหายบริเวณผิวพื้น ผ่านกล้องจุลทรรศน์แบบแสงของตัวอย่างทั้ง 6 ชิ้น.....	39
รูปที่ 4.7 (a-b) รูปจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกนแสดงเกล็ดออกไซด์ และการสูญเสียเนื้อวัสดุ (b) ลักษณะการขยายของรอยแตก บนตัวอย่างหมายเลข 1.....	40
รูปที่ 4.8 (a-b) รูปจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกนแสดงเกล็ดออกไซด์ และการสูญเสียเนื้อวัสดุ (b) ลักษณะการขยายของรอยแตก บนตัวอย่างหมายเลข 2.....	40
รูปที่ 4.9 (a-b) รูปจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน แสดงเกล็ดออกไซด์และการสูญเสียเนื้อวัสดุ (b) ลักษณะการขยายของรอยแตก บนตัวอย่างหมายเลข 3.....	41
รูปที่ 4.10 (a-b) รูปจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน แสดงเกล็ดออกไซด์และการสูญเสียเนื้อวัสดุ (b) ลักษณะการขยายของรอยแตก บนตัวอย่างหมายเลข 4.....	41
รูปที่ 4.11 (a-b) รูปจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน แสดงเกล็ดออกไซด์และการสูญเสียเนื้อวัสดุ (b) ลักษณะการขยายของรอยแตก บนตัวอย่างหมายเลข 5.....	42
รูปที่ 4.12 ลักษณะการสูญเสียเนื้อโลหะบริเวณบนผิวพื้นของเทอร์โมมอด.....	42
รูปที่ 4.13 โครงสร้างจุลภาคของ ตัวอย่างหมายเลข 1.....	43
รูปที่ 4.14 โครงสร้างจุลภาคของ ตัวอย่างหมายเลข 2.....	43
รูปที่ 4.15 โครงสร้างจุลภาคของ ตัวอย่างหมายเลข 3.....	43
รูปที่ 4.16 โครงสร้างจุลภาคของ ตัวอย่างหมายเลข 4.....	44
รูปที่ 4.17 โครงสร้างจุลภาคของ ตัวอย่างหมายเลข 5.....	44
รูปที่ 4.18 โครงสร้างจุลภาคของ ตัวอย่างหมายเลข 6 (เทอร์โมมอดที่ยังไม่ผ่านการใช้งาน).....	44

## สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.19 ผลลัพธ์ของการวิเคราะห์ห้อยค์ประกอบทางเคมี และการกร่อนบนผิวที่มีการเสียหายของ ตัวอย่างหมายเลข 1.....	46
รูปที่ 4.20 ผลลัพธ์ของการวิเคราะห์ห้อยค์ประกอบทางเคมีบริเวณพื้นที่ใกล้กับการเสียหาย และพื้นที่ ที่ไม่ได้รับความเสียหายของตัวอย่างหมายเลข 5.....	47
รูปที่ 4.21 ผลลัพธ์ของการวิเคราะห์ห้อยค์ประกอบทางเคมีบริเวณพื้นที่ใกล้กับการเสียหาย และพื้นที่ที่ไม่ได้รับความเสียหาย.....	48
รูปที่ 4.22 ผลลัพธ์ของการวิเคราะห์ห้อยค์ประกอบทางเคมีบริเวณพื้นที่ใกล้กับการเสียหาย และพื้นที่ ที่ไม่ได้รับความเสียหาย.....	49
รูปที่ 4.23 ผลการวิเคราะห์ด้วยวิธี ANOVA ของเทอร์โมดเค่า เทอร์โมดเพิ่มพินพิเศษ และ เทอร์โมดรุ่นเพิ่มความหนา ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%.....	52
รูปที่ 4.24 กราฟแสดงผลการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ด้วยวิธี ANOVA.....	52
รูปที่ 4.25 แสดงภาพเทอร์โมดต้นแบบชนิด A หลังผ่านการใช้งาน 30,000 และ 60,000 รอบ.....	53
รูปที่ 4.26 แสดงภาพเทอร์โมดต้นแบบชนิด B หลังผ่านการใช้งาน 15,000 และ 40,000 รอบ.....	54

# บทที่ 1

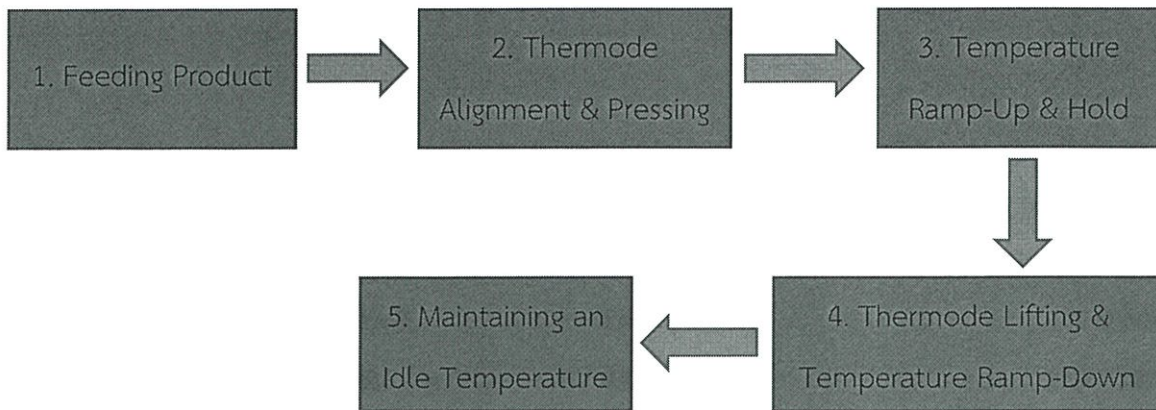
## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

บริษัท เวสเทิร์น ดิจิตอล (ประเทศไทย) จำกัด เป็นผู้ผลิตอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์จำพวก ฮาร์ดดิสก์กึ่งชั้นนำของโลก โดยใช้เทคโนโลยีการผลิตระดับสูง และมีการติดตั้งระบบอัตโนมัติอันทันสมัย พร้อมทั้งมีบุคลากรที่มีความสามารถ สายการผลิตโรงงานได้ออกแบบให้มีการควบคุมด้านคุณภาพอย่างสูงสุด เพื่อรองรับการผลิตฮาร์ดดิสก์ให้ได้คุณภาพตรงตามความต้องการของตลาดปัจจุบัน โดยตั้งอยู่ที่ นิคมอุตสาหกรรมบางปะอิน จ.พระนครศรีอยุธยา

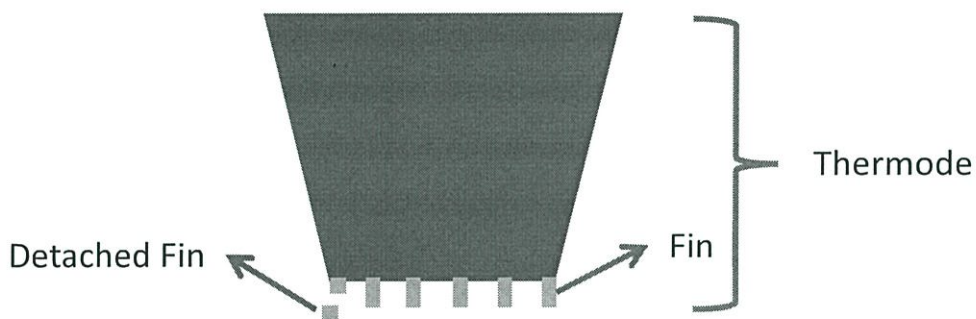
ปัจจุบันพบว่าบริษัท เวสเทิร์น ดิจิตอล (ประเทศไทย) จำกัด กำลังประสบปัญหาด้านคุณภาพของ สายการผลิตการผลิตฮาร์ดดิสก์ ในขั้นตอนการผลิต Anisotropic Conductive Film (ACF) Bonding เนื่องมาจากการเสียของเทอร์โมटक่อนอายุการใช้งานจริง ส่งผลให้บริษัทเสียต้นทุนในการสั่งซื้อ เทอร์โมटकใหม่ รวมถึงการหยุดสายการผลิตเพื่อเปลี่ยนเทอร์โมटक เป็นจำนวนมากต่อเดือน ทั้งนี้จะเกิด จากปัจจัยในหลายๆด้านที่เกี่ยวข้องภายในกระบวนการ ไม่ว่าจะเป็นปัจจัยทางความร้อน ปัจจัยทางกลไก ปัจจัยทางด้านเนื้อวัสดุ ปัจจัยทางด้านการวางแผน และอื่นๆ ทางบริษัท เวสเทิร์น ดิจิตอล (ประเทศไทย) จำกัด จึงมีนโยบายที่จะลดค่าใช้จ่ายของกระบวนการผลิตต่างๆ รวมถึงกระบวนการ ACF Bonding เพื่อ ลดค่าใช้จ่ายที่ไม่ควรเกิดขึ้นและทำให้เกิดการลดต้นทุนในการผลิตต่อไป โดยบริษัทมีการตั้งมาตรฐาน อายุการใช้งานของเทอร์โมटकไว้ที่ 38,000 รอบ แต่อายุการใช้งานเฉลี่ยของเทอร์โมटकอยู่ ประมาณ 22,000 รอบ ณ ปัจจุบัน

จากการศึกษากระบวนการผลิต ACF Bonding ประกอบด้วย สายการผลิตการผลิตสินค้า 2 ชนิด คือ Diablo และ Giant ซึ่งวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะกล่าวถึงเฉพาะการปรับปรุงในกระบวนการผลิตสินค้า ชนิด Diablo เท่านั้น กระบวนการ ACF Bonding เริ่มจากการป้อนชิ้นงานเข้ามาจากกระบวนการก่อน หน้า แล้วทำการนำเทอร์โมटकกลงไปค้างประมาณ 7 วินาที ในระหว่างที่กีดค้างจะเกิดการเพิ่มขึ้นของ อุณหภูมิ (Ramp-Up) เพื่อให้ได้อุณหภูมิที่ 450°C ทำให้เกิดการละลายตัวของสารยึดติด เทอร์โมटकขึ้น และลดอุณหภูมิลงเหลือประมาณ 300°C เพื่อรอชิ้นงานต่อไปป้อนเข้ามา จากนั้นป้อนชิ้นงานสู่ กระบวนการตรวจสอบการนำไฟฟ้า (Q-Code) เพื่อตรวจสอบคุณภาพของชิ้นงาน เป็นอันเสร็จ กระบวนการ 1 รอบการทำงาน ดังแสดงในแผนภาพต่อไปนี้



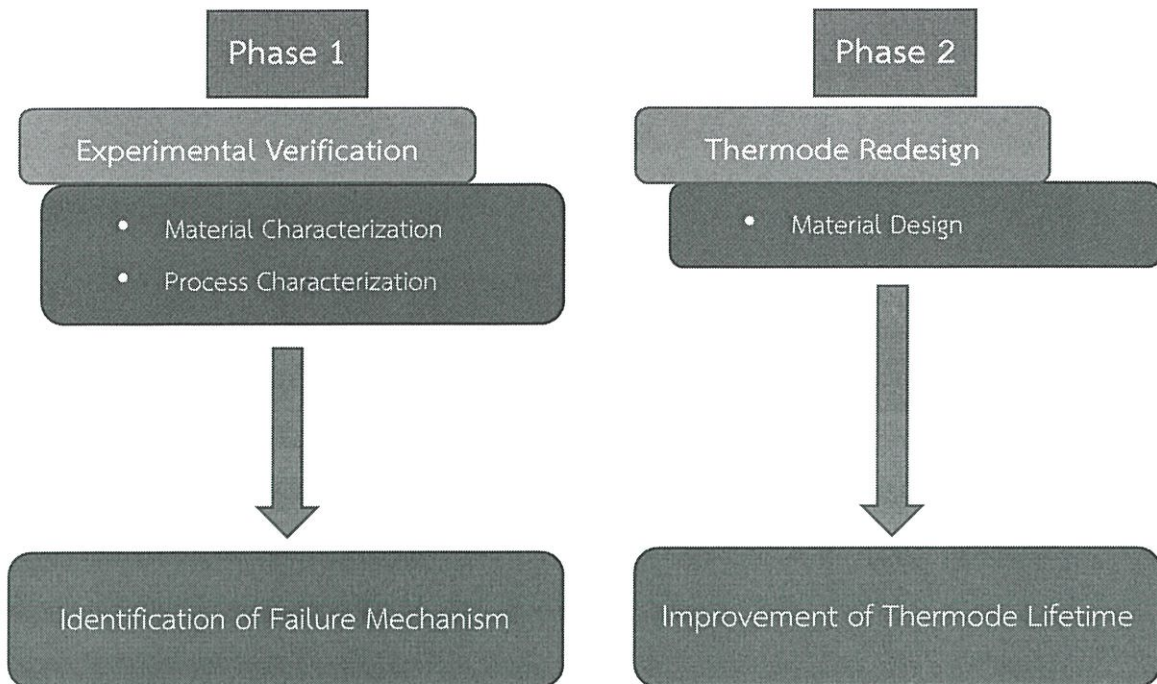
รูปที่ 1.1 ขั้นตอนการทำงานในกระบวนการ ACF Bonding

เมื่อพิจารณาทั้ง 5 กระบวนการแล้ว พบว่ากระบวนการที่มีส่วนเกี่ยวข้องกับเทอร์โมมอดมากที่สุดคือกระบวนการที่ 2 3 และ 5 ซึ่งเป็นกระบวนการที่ใช้ทั้ง ความร้อน และ กลไกในการกดทับลงไป และปัจจัยอื่นๆ ส่งผลให้เกิดความเสียหายแก่เทอร์โมมอดโดยตรง ซึ่งความเสียหายที่เกิดขึ้นมักเกิดด้านบริเวณพื้นด้านนอกของเทอร์โมมอดดังรูป



รูปที่ 1.2 ลักษณะการเสียหายของเทอร์โมมอด

ทางผู้จัดทำจึงทำการเพิ่มอายุการใช้งานของเทอร์โมมอด โดยเริ่มจากการระบุสาเหตุ (Phase 1) ที่ทำให้เทอร์โมมอดเกิดการเสียหาย ทางด้านวัสดุ (Material Characterization) ด้านกลไก (Mechanical Characterization) และด้านกระบวนการ (Process Characterization) เพื่อที่จะหาว่าสาเหตุที่แท้จริงที่ทำให้เทอร์โมมอดเกิดการเสียหายก่อนอายุการใช้งานที่ควรจะเป็น นำไปสู่การแก้ไข ป้องกัน ลดปัญหาเทอร์โมมอดเสียหายก่อนอายุการใช้งานให้ได้มากที่สุด รวมถึงเพิ่มอายุการใช้งานของเทอร์โมมอด (Phase 2) ด้วยการออกแบบทางด้านวัสดุ (Material Design) ให้สอดคล้องต่อนโยบายของทางบริษัทที่จะลดค่าใช้จ่ายที่เกิดขึ้นในจุดนี้



รูปที่ 1.3 ขั้นตอนการทำงาน และเป้าหมายในช่วงที่ 1 และช่วงที่ 2

## 1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

- 1.2.1 เพื่อระบุสาเหตุที่แท้จริง ที่ทำให้เทอร์โมตเกิดการเสียหายก่อนอายุจริง
- 1.2.2 เพื่อระบุกลไกการเสียหายที่เกิดขึ้นกับเทอร์โมต
- 1.2.3 เพื่อเพิ่มอายุการใช้งานของเทอร์โมต
- 1.2.4 เพื่อลดค่าใช้จ่ายในการหยุดสายการผลิต

## 1.3 ขอบเขตของโครงการ

- 1.3.1 โครงการนี้จะศึกษากระบวนการ ACF Bonding โดยพิจารณาเฉพาะสายการผลิต Diablo แบบ กิ่งอัตโนมัติซึ่งเป็นสายการผลิตที่ใช้เป็นส่วนมากของบริษัทในปัจจุบัน
- 1.3.2 เพิ่มอายุการใช้งานให้มากกว่า 22,000 รอบ

## 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.4.1 สามารถเพิ่มอายุการใช้งานของเทอร์โมตได้ ทำให้ลดการหยุดสายการผลิตซึ่งจะทำให้สายการผลิต การผลิตชะงัก ส่งผลให้เกิดการลดต้นทุนในกระบวนการ ACF Bonding โดยตรงสอดคล้องกับ นโยบายของบริษัท

- 1.4.2 ลดเวลาว่างงานของพนักงาน จากการต้องรอพนักงานซ่อมบำรุงทำการตรวจสอบและเปลี่ยนเทอร์โมสตัทน้อยๆ เนื่องจากการเสีย ทำให้พนักงานมีการทำงานอย่างเต็มประสิทธิภาพ
- 1.4.3 ได้เรียนรู้กระบวนการทำงานจริง และได้ทำงานร่วมกับนักวิจัย รวมถึงไปถึงพนักงานของบริษัท เวสเทิร์น ดิจิตอล (ประเทศไทย) จำกัด

## บทที่ 2

### ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีทั้งหมดที่เกี่ยวข้องในการทำวิจัย โดยการรวบรวมและเรียบเรียงมาจากบทความทางวิชาการต่างๆ ได้แก่

#### 2.1 ไทเทเนียม (Titanium)

ไทเทเนียมสามารถมีโครงสร้างผลึก (Crystallographic Form) ได้หลายรูปแบบ ไทเทเนียมที่อุณหภูมิต่ำจะมีการเรียงตัวของโครงสร้างผลึกแบบ Hexagonal Close-Packed (HCP) ซึ่งเรียกว่าเป็นโครงสร้างแอลฟา (Alpha,  $\alpha$ ) ที่อุณหภูมิสูงขึ้น โครงสร้างผลึก HCP จะเปลี่ยนรูปร่างเป็น Body-Centered Cubic (BCC) เรียกว่าโครงสร้างเบต้า (Beta,  $\beta$ ) ไทเทเนียมบริสุทธิ์จะมีโครงสร้างแอลฟาที่เสถียรที่อุณหภูมิต่ำกว่า 883°C และโครงสร้างเบต้าที่เสถียรที่อุณหภูมิระหว่าง 883°C และจุดหลอมเหลว อุณหภูมิการเปลี่ยนโครงสร้างจากแอลฟาเป็นเบต้า (Alpha-To-Beta Transition Temperature) เรียกว่า Beta Transus Temperature สำหรับโลหะผสมไทเทเนียม Beta Transus Temperature หมายถึงอุณหภูมิสมมูลที่ต่ำที่สุดที่วัสดุจะมีโครงสร้างเบต้าทั้งหมด ที่อุณหภูมิต่ำกว่า Beta Transus Temperature โลหะผสมไทเทเนียมจะมีโครงสร้างผสมระหว่างแอลฟาและเบต้า Beta Transus มีความสำคัญ เพราะว่าการอบชุบ (Heat Treatment) จะทำให้อุณหภูมิสูงกว่าหรือต่ำกว่า โดยอ้างอิงจาก Beta Transus Temperature. (Dragolich et al., 1994, Donachie, 2000)

Ti6-Al-4V เป็นโลหะผสมที่มีโครงสร้างแอลฟาและเบต้าที่รู้จักกันมากที่สุด สามารถพบได้ในยานอวกาศ ภาชนะความดัน อากาศยาน และอุปกรณ์ทางการแพทย์ ส่วนประกอบทางเคมีของโลหะผสมนี้ได้ถูกรวบรวมไว้ดังตารางที่ 2.1 โลหะผสมนี้จะมีโครงสร้างเบต้าทั้งหมดที่อุณหภูมิเหนืออุณหภูมิประมาณ 1000°C ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 1000°C จะมีโครงสร้างแอลฟาและเบต้าร่วมกัน ที่อุณหภูมิห้อง 90% ของปริมาตรจะเป็นโครงสร้างแอลฟา หมายความว่าโครงสร้างแอลฟาเป็นโครงสร้างหลักของคุณสมบัติทางกายภาพ คุณสมบัติทางเคมี และคุณสมบัติทางกลของโลหะผสมนี้ การมีโครงสร้างเบต้าทำให้อุณหภูมิการทำงานถูกจำกัดไว้ที่ 300°C ถึง 450°C (Dragolich et al., 1994, Charles et al., 1997, Donachie, 2000)

ตารางที่ 2.1 ส่วนผสมของ Ti-6Al-4V (Dragolich et al., 1994)

Ti-6Al-4V and equivalents: specifications and compositions

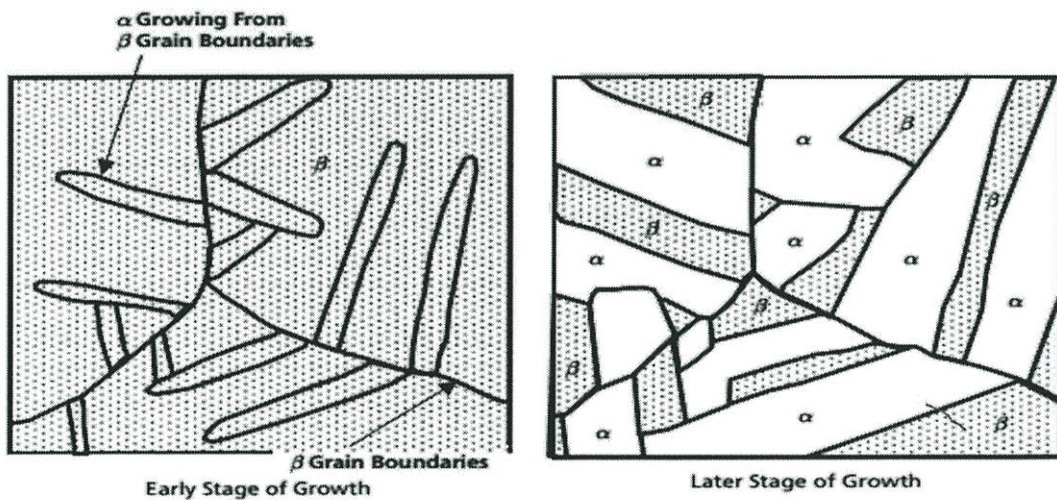
Specification	Designation	Description	Al	C	Fe	H	N	O	V	UT	Other
UNS	R56400	Weld Wire	5.5-6.75	0.1	0.4	0.015	0.05	0.2	3.5-4.5		bal Ti
UNS	R56401		6						4		bal Ti
UNS	R56402	Fill Met	5.5-6.75	0.04	0.15	0.005	0.012	0.1	3.5-4.5		bal Ti

2.1.1 โครงสร้างและโครงสร้างจุลภาคของ Ti-6Al-4V (Ti-6Al-4V Phases and Microstructures)

โครงสร้างจุลภาคของ Ti-6Al-4V สามารถขึ้นรูปให้มีโครงสร้างจุลภาคได้หลากหลาย ด้วยการเรียงตัวของโครงสร้างแอลฟาและเบต้า ขึ้นอยู่กับ Thermo-Mechanical Treatment ที่เฉพาะ โครงสร้างแอลฟาที่มีสัณฐานวิทยา (Morphology) โครงสร้างจุลภาคที่แตกต่างกันนี้ สามารถแบ่งได้เป็น 3 โครงสร้างหลักๆ ได้แก่

2.1.1.1 โครงสร้างที่มีลักษณะเป็นแผ่น (Lamellar Structure)

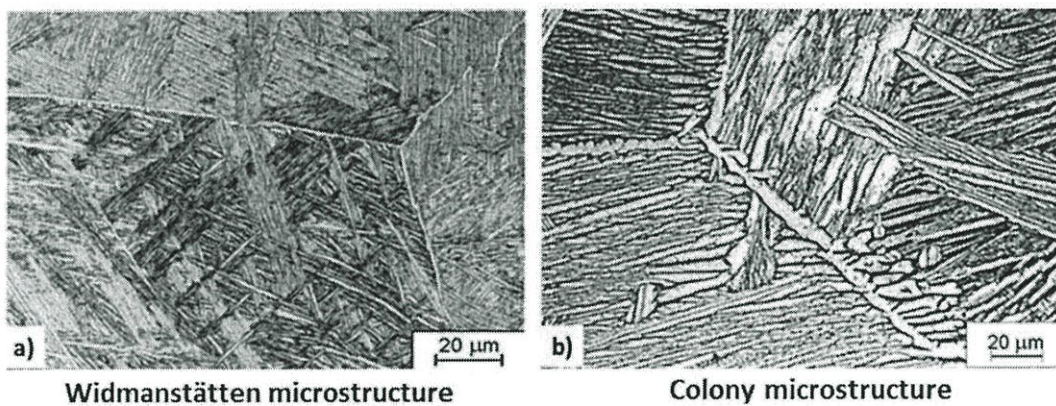
โครงสร้างนี้จะเกิดขึ้นเมื่อโลหะผสมมีการเย็นตัวอย่างช้าๆ ที่อุณหภูมิเหนือ Beta Transus Temperature ที่อุณหภูมิต่ำกว่านี้ โครงสร้างแอลฟาจะเรียงตัวเป็นรูปร่างคล้ายแผ่น (Plate-Like Geometry) และมีขนาดโตขึ้นจากขอบเกรน (Grain Boundary) ของโครงสร้างเบต้า ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 การเรียงตัวของโครงสร้างจุลภาค Lamellar ของโลหะผสมไทเทเนียม (Shenoy et al., 1986)

ถ้าอัตราการเย็นตัวเร็ว โครงสร้างแอลฟาที่ละเอียด มีลักษณะคล้ายเข็มเกิดขึ้น เรียกว่า โครงสร้างตะกร้าสาน (Basket Weave) หรือโครงสร้าง Widmanstätten อัตราการเย็นตัวที่ช้ากว่าจะมี เกิดโครงสร้างที่หยาบกว่า เรียกว่าโครงสร้างจุลภาค Colony เมื่อโครงสร้าง Lamellar เกิดการเรียงตัวขึ้น โครงสร้างจุลภาคจะไม่สามารถถูกเปลี่ยนโดยปราศจากการให้ความร้อนแก่โลหะผสมที่อุณหภูมิใกล้เคียง หรือสูงกว่า Beta Transus Temperature เพื่อเปลี่ยนโครงสร้างแอลฟาเป็นโครงสร้างเบต้า กระบวนการ นี้เรียกว่าการอบชุบสารละลาย (Solution Heat Treatment) รูปที่ 2.2 จะมีการเปรียบเทียบโครงสร้าง Widmanstätten กับโครงสร้าง Colony และแสดงความแตกต่างของขนาดของโครงสร้าง

ถ้าโลหะผสมนี้ถูกชุบแข็ง (Quench) จากอุณหภูมิสูง จะเกิดโครงสร้างมาร์เทนไซต์ (Martensite) แทนโครงสร้างแอลฟา การเกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างมาร์เทนไซต์ (Martensitic Transformation) ไม่ขึ้นกับเวลา แต่จะขึ้นกับอุณหภูมิเพียงอย่างเดียว เรียกว่าการเปลี่ยนแปลงโดยไม่เกิดการแพร่ (Diffusionless Transformation) ไทเทเนียมที่มีโครงสร้างมาร์เทนไซต์มี 2 ชนิด ได้แก่ Hexagonal Alpha Prime ( $\alpha'$ ) และ Orthorhombic Alpha Double-Prime ( $\alpha''$ ) โครงสร้าง  $\alpha'$  จะพบได้ทั่วไปใน ไทเทเนียมที่มีธาตุเจือปนน้อย (Low Alloy-Content Titanium) เช่น Ti-6Al-4V โครงสร้าง  $\alpha''$  พบได้ใน วัสดุที่มีธาตุเจือปนมาก (Highly-Alloyed Material) โครงสร้างจุลภาคของโครงสร้างมาร์เทนไซต์ในไทเทเนียม สามารถตรวจสอบได้ด้วยกล้องจุลทรรศน์ โดยจะมีรูปร่างคล้ายเข็ม ซึ่งจะแตกต่างจากโครงสร้าง มาร์เทนไซต์ในเหล็กกล้า แต่โครงสร้างมาร์เทนไซต์ในไทเทเนียมจะไม่มีผลในการเพิ่มความแข็งแรง (Substantial Strengthening) (Froes and Eylon, 2000)



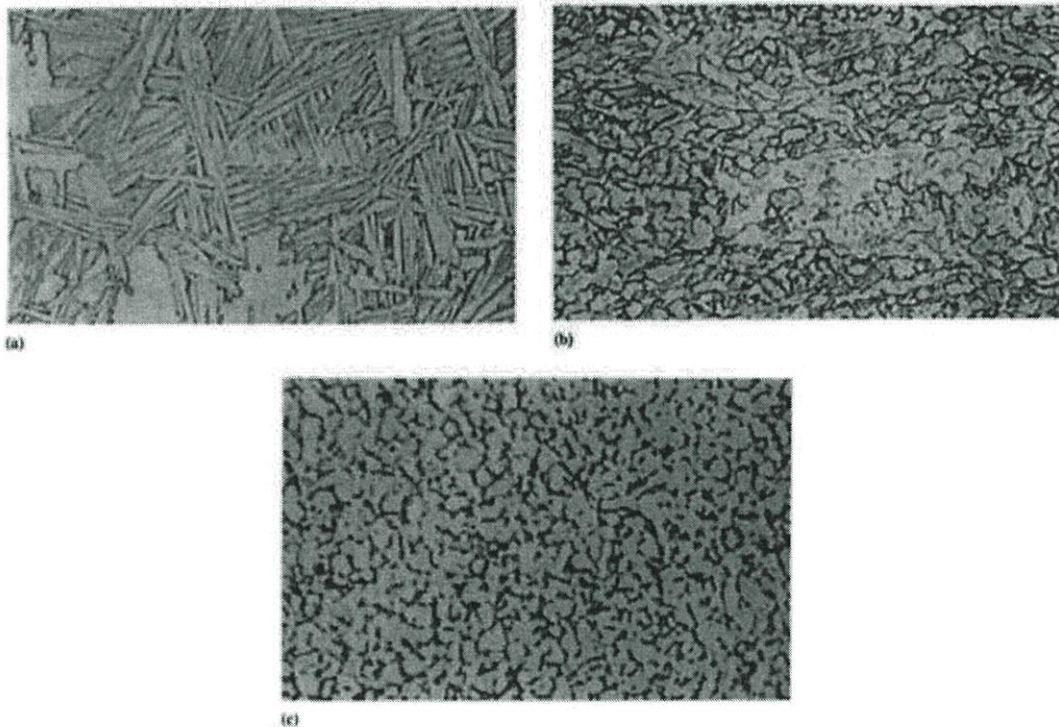
รูปที่ 2.2 โครงสร้าง Lamellar ของโลหะผสมไทเทเนียม (Shenoy et al., 1986)

### 2.1.1.2 โครงสร้างแบบทรงกลม (Equiaxed Structure)

ถ้าโลหะผสมถูกขึ้นรูปเย็น (Cold Work) ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างอย่างมากที่อุณหภูมิห้อง และถูกนำไปไว้ที่อุณหภูมิสูงที่ต่ำกว่า Beta Transus Temperature ผลึกแอลฟาทรงกลมสามารถเกิดได้จากเกรนที่มีการเสียรูปมาก เรียกกระบวนการนี้ว่ากระบวนการเกิดผลึกใหม่ (Recrystallization) เวลาที่นานขึ้นที่อุณหภูมิสูงจะส่งผลให้เกิดโครงสร้างที่หยาบ โครงสร้างแบบทรงกลมจะมีคุณสมบัติที่นุ่ม และมีความแข็งแรงต่ำ ซึ่งเหมาะกับการขึ้นรูปและการตัด (Machining) โครงสร้างนี้แสดงในรูปที่ 2.3 (c)

### 2.1.1.3 โครงสร้างแบบที่มีสองโครงสร้าง (Bimodal Structure)

โครงสร้างแบบนี้เป็นการรวมตัวกันระหว่างโครงสร้าง Lamellar และ Equiaxed ได้มาจากการให้ความร้อนโลหะผสมที่ถูกทำให้เสียรูปร่างไปที่อุณหภูมิต่ำกว่า Beta Transus Temperature เพียงเล็กน้อย ซึ่งจะทำให้เกิดการเกิดผลึกใหม่ของโครงสร้างแอลฟา และเกิดการเปลี่ยนโครงสร้างจากแอลฟาเป็นเบต้า (Leyens และ Peters, 2003) โครงสร้างนี้แสดงในรูปที่ 2.3 (b)



รูปที่ 2.3 โครงสร้างจุลภาคทั่วไปของโลหะผสม Ti-6Al-4V (a) โครงสร้าง Lamellar (b) โครงสร้าง Bimodal (c) โครงสร้าง Equiaxed (Dragolich et al., 1994)

## 2.2 ปฏิกริยาเคมีที่เกิดจากการรวมตัวของออกซิเจนกับสารอื่น (Oxidation)

โลหะเกือบทุกชนิด ภายใต้สภาวะของการเกิดการรวมตัวกับออกซิเจน (Oxidizing Environment) ปฏิกริยาออกซิเดชันจะเกิดขึ้นเสมอ เนื่องมาจากความมั่นคงทางเทอร์โมไดนามิกส์ที่สูงของออกไซด์ของโลหะ ที่อุณหภูมิห้อง การเกิดของชั้นออกไซด์จะน้อยและไม่ส่งผลกระทบต่อคุณสมบัติของวัสดุ (Material Properties) ที่อุณหภูมิต่ำ การเกิดของชั้นออกไซด์จะแข็งแรงพอที่จะทำให้วัสดุเกิดการเสียหาย โดยในกรณีนี้ ปฏิกริยาออกซิเดชันสามารถพิจารณาเป็นรูปแบบหนึ่งของการกัดกร่อนที่อุณหภูมิสูง (High-Temperature Corrosion) นอกจากการเสียหายของโลหะจากการเกิดปฏิกริยาออกซิเดชันที่บริเวณผิวนอก บางครั้งการแพร่ของออกซิเจนเข้าไปในเนื้อโลหะจะทำให้เกิดการสูญเสียความเหนียว (Embrittlement) ส่งผลให้โลหะแข็งขึ้น ความแกร่งลดลง ความสามารถในการต้านทานปฏิกริยาออกซิเดชันของวัสดุขึ้นอยู่กับธรรมชาติของการเกิดฟิล์มออกไซด์ ถ้าฟิล์มออกไซด์บาง แน่น และยึดติดได้ดี จะป้องกันไม่ให้เนื้อวัสดุเกิดปฏิกริยาออกซิเดชันต่อไป แต่หากฟิล์มออกไซด์มีรูพรุน จะไม่ได้ป้องกันการเกิดปฏิกริยาออกซิเดชันของเนื้อวัสดุ และจะเกิดชั้นของฟิล์มออกไซด์ที่หนาขึ้น

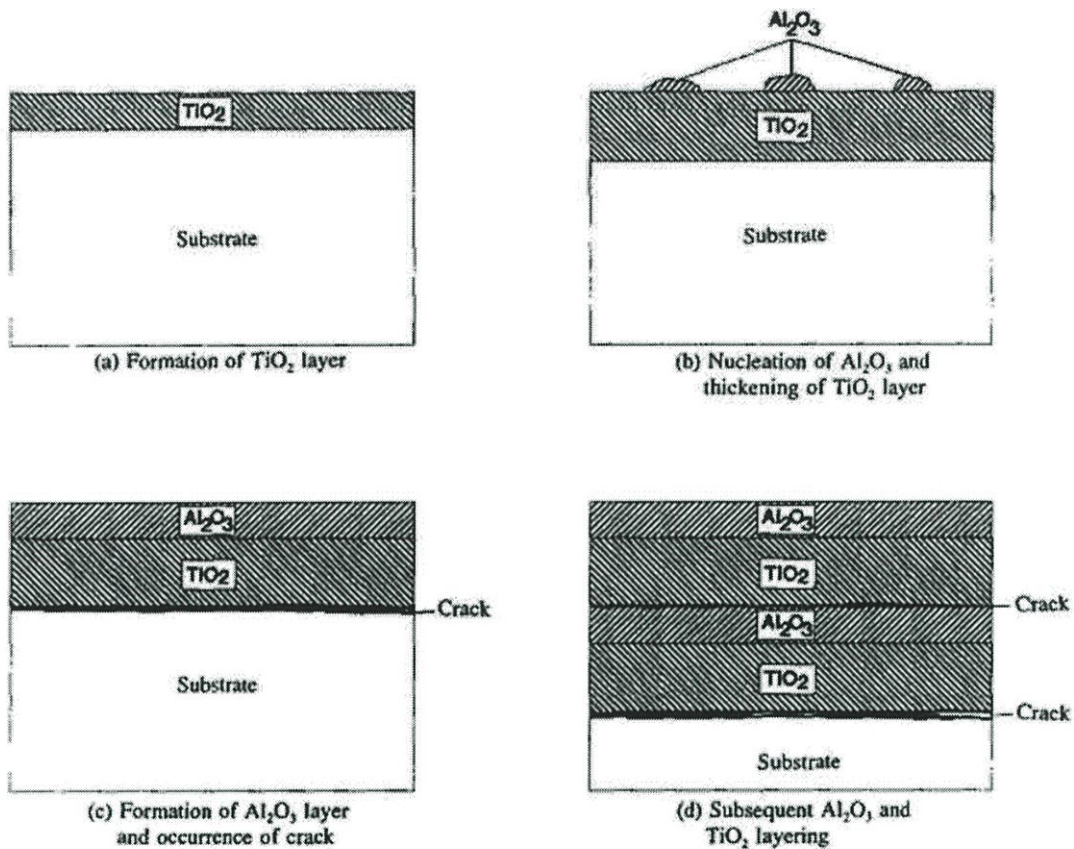
### 2.2.1 ปฏิกริยาออกซิเดชันของไทเทเนียมและโลหะผสมไทเทเนียม (Oxidation of Titanium and Titanium Alloy)

ไทเทเนียมจะทำปฏิกริยากับออกซิเจนทันที เกิดเป็นสารประกอบ  $TiO_2$  เมื่ออยู่ในสภาวะของการเกิดการรวมตัวกับออกซิเจน ที่อุณหภูมิห้องจะมีชั้นออกไซด์เกิดขึ้น ปกป้องเนื้อวัสดุจากการเกิดปฏิกริยาออกซิเดชันและการกัดกร่อน ซึ่งเป็นคุณสมบัติการป้องกันการกัดกร่อนของไทเทเนียมที่รู้จักกันดี อย่างไรก็ตาม ที่อุณหภูมิสูงขึ้น ชั้นออกไซด์จะสูญเสียความสามารถในการปกป้อง ส่งผลให้ออกซิเจนสามารถแพร่ผ่านชั้นออกไซด์ไปทำปฏิกริยากับเนื้อโลหะข้างใต้ (Sefer, 2014) จากแผนภูมิสมดุล (Phase Diagram) Ti-O ออกไซด์ที่เสถียรอื่นๆของไทเทเนียม ได้แก่  $Ti_2O$ ,  $TiO$ ,  $Ti_2O_3$  และ  $TiO_5$  อย่างไรก็ตาม ที่อุณหภูมิต่ำกว่า  $1,000^{\circ}C$  ภายใต้แรงดันบรรยากาศ จะมีเพียง  $TiO_2$  เท่านั้น (Guleryuz and Cimenoglu, 2009)

ปฏิกริยาออกซิเดชันของ Ti-6Al-4V จะมีความซับซ้อนกว่า เนื่องจากมีธาตุโลหะผสม มีการรายงานว่ปฏิกริยาออกซิเดชัน ของโลหะผสมนี้จะมีลักษณะเป็นโครงสร้างแบบหลายชั้น (Multi-Layered) ที่ประกอบไปด้วยชั้นของ  $TiO_2$  และ  $Al_2O_3$  (Gulbransen et al., 1963) กลไกของการเกิดโครงสร้างแบบหลายชั้นจะถูกแสดงดังรูปที่ 2.1 ในขั้นแรกสุด ออกซิเจนจะทำปฏิกริยากับไทเทเนียม เกิดเป็นชั้นออกไซด์  $TiO_2$  จากนั้นจะเกิดชั้นออกไซด์  $Al_2O_3$  เหนือ  $TiO_2$  โดยการแพร่ของอลูมิเนียมจากเนื้อวัสดุออกสู่บรรยากาศที่มีออกไซด์อยู่

เมื่อออกไซด์ทั้งสองชั้นเกิดขึ้นและมีความหนาพอที่เพียงพอ จะส่งผลให้เกิดรอยร้าวที่ผิวของชั้นออกไซด์ของโลหะ การเกิดรอยร้าวจะทำให้เนื้อโลหะสัมผัสกับบรรยากาศของการเกิดการรวมตัวกับออกซิเจน ส่งผลให้เกิดชั้นออกไซด์  $TiO_2$  และ  $Al_2O_3$  ชั้นใหม่ เกิดเป็นโครงสร้างฟิล์มออกไซด์แบบหลาย

ชั้น โดยการเกิดชั้นฟิล์มหลายชั้นนี้จะขึ้นอยู่กับเวลาและอุณหภูมิ จำนวนของชั้น  $Al_2O_3$  จะเพิ่มขึ้นตามเวลาและอุณหภูมิ จากการศึกษาโครงสร้างจุลภาคพบว่าส่งผลต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันกล (Oxidation Kinetics) โครงสร้างจุลภาคที่ละเอียดจะมีอัตราการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันที่เร็วกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับโครงสร้างจุลภาคที่หยาบ (Kofstad, 1988)

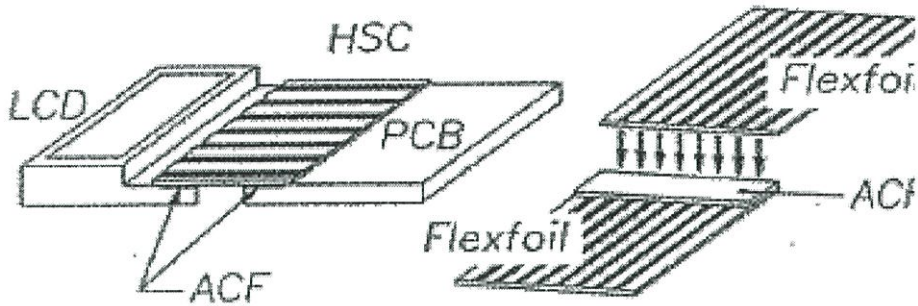


รูปที่ 2.4 การเกิดโครงสร้างฟิล์มออกไซด์แบบหลายชั้นของ Ti-6Al-4V (Gulbransen et al., 1963)

### 2.3 การเชื่อมสารยึดติดที่มีการนำไฟฟ้าในแต่ละทิศทางต่างกัน (Anisotropic Conductive Adhesive Bonding, ACA Bonding)

ACA Bonding คือการสร้างการนำไฟฟ้าด้วยสารยึดติดระหว่างแผ่นวงจรแบบโค้งงอ (Flexible Printed Circuit (FPC), Flex Circuit, Flex) กับแผ่นวงจรแข็ง (Printed Circuit Board, PCB) และระหว่างจอแสดงผลแบบแก้วกับฟอยล์ที่โค้งงอ (Flexfoil) ซึ่งหมายถึงการกักเก็บความร้อน (Heat Sealing) ลักษณะสำคัญของกระบวนการนี้คือการให้ความร้อนและการเย็นตัวของสารยึดติดภายใต้แรงดัน โดยภายในสารยึดติดจะมีอนุภาคนำไฟฟ้าขนาดเล็กที่เมื่อถูกบีบอัดและได้รับความร้อน จะสร้างการเชื่อมต่อทางไฟฟ้าระหว่างชิ้นส่วน สารยึดติดมีการใช้งานอย่างกว้างขวางเพื่อเชื่อมต่อพื้นที่การนำไฟฟ้า

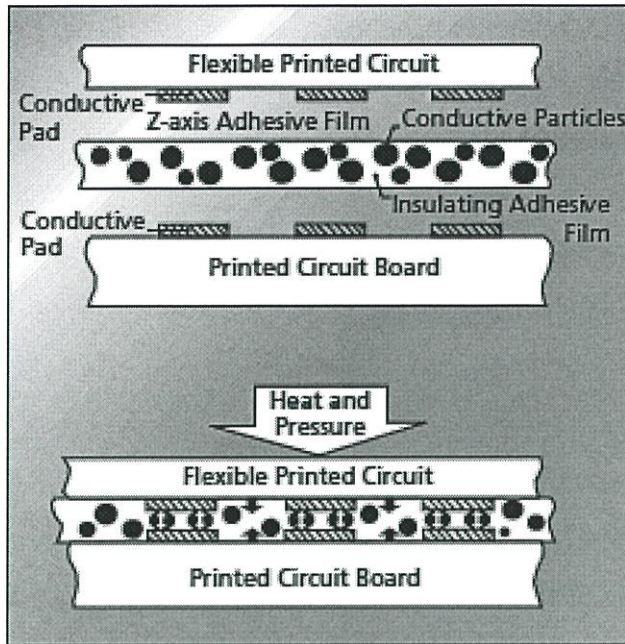
บนจอแสดงภาพแบบผลึกเหลว (Liquid Crystal Display, LCD) กับแผ่นวงจรไฟฟ้า (Printed Circuit Board, PCB) ด้วย Flex Circuit ที่มีเส้นทางการนำไฟฟ้า (Flexible Circuit with Conductive Tracks) อีกรูปแบบหนึ่งของการใช้งานก็คือ การเชื่อมต่อการนำไฟฟ้าระหว่าง Flex Circuit 2 แผ่น ดังรูปที่ 2.5



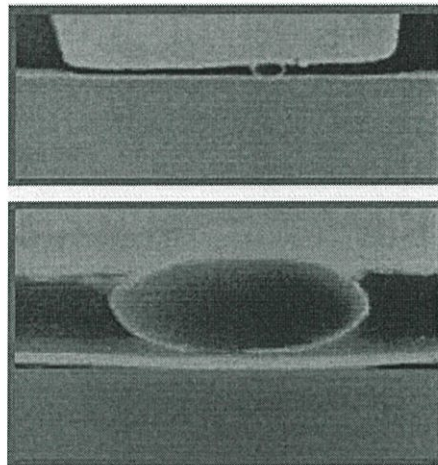
รูปที่ 2.5 โครงแบบของจุดเชื่อมต่อสำหรับ ACF และ HSCs (Brackell, 2000)

### 2.3.1 การเกิดการเชื่อมต่อ

ภายในสารยึดติดจะมีอนุภาคสารยึดติดขนาดเล็กที่เคลื่อนที่ได้อยู่ภายใน ก่อนการเชื่อมติด (Bonding) อนุภาคจะถูกแยกออกจากกันด้วยเนื้อของสารยึดติด วัสดุสองชั้นที่ต้องการยึดติดกันจะถูกคั่นด้วยสารยึดติดระหว่างกลาง อุณหภูมิและแรงดันจะถูกใส่ให้กับแผ่นฟิล์มโดยขึ้นกับเวลา เพื่อให้เกิดการเสียรูปถาวรของสารยึดติดและการบีบอัดของอนุภาค ดังรูปที่ 2.6 อนุภาคที่ถูกกักให้อยู่ระหว่างตัวนำ จะสร้างหน้าสัมผัสที่นำไฟฟ้าขึ้นระหว่างผิวสัมผัสของวัสดุสองชั้นและตัวนำ เฉพาะในแนวแกน Z เท่านั้น ดังรูปที่ 2.7 ตามมาด้วยการเย็นตัวและการบ่มอย่างเต็มที่ของสารยึดติดในขณะที่อยู่ในสภาวะการบีบอัดจะทำให้จุดเชื่อมต่อมีความเสถียร



รูปที่ 2.6 หลักการของการเชื่อมต่อด้วยสารยึดติด (Brackell, 2000)



รูปที่ 2.7 รูปจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน (Scanning Electron Microscope, SEM) แสดงอนุภาคขนาด  $5\ \mu\text{m}$  ที่ถูกกักอยู่ระหว่างตัวนำ (Brackell, 2000)

### 2.3.2 ชนิดของสารยึดติด (Adhesive Types)

รูปแบบของสารยึดติดที่รู้จักกันโดยทั่วไปจะมีสองชนิดคือตัวเชื่อมต่อหรือ Flex ที่มีสารยึดติดอยู่ในฟอยล์ หรือฟิล์มยึดติด (Adhesive Film) โดยทั่วไปฟิล์มยึดติดที่มีการนำไฟฟ้าในแต่ละทิศทางต่างกัน (Anisotropic Conductive Film, ACF) จะใช้ในงานที่มีช่องว่างขนาดเล็กมาก ประมาณ 0.15 มม. เนื่องจากอนุภาคเล็กกว่าตัวเชื่อมต่อผนึกความร้อน (Heat Seal Connectors, HSCs) สารยึดติดสามารถ

เป็นได้ทั้งเทอร์โมเซต (Thermoset) เทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic) หรือแบบผสม โดยขึ้นอยู่กับชนิดของพอลิเมอร์ (Polymer) ที่ใช้ สารยึดติดชนิดเทอร์โมเซตจะมีการบ่มที่อุณหภูมิเฉพาะ แต่สารยึดติดชนิดเทอร์โมพลาสติกทั่วไปจะใช้เวลาและการบ่มที่นานกว่าในขณะเย็นตัว สารยึดติดชนิดเทอร์โมเซตทั่วไปจะมีความแข็งแรงสูงกว่า และมีความทนทาน กว่าชนิดเทอร์โมพลาสติก สารยึดติดโดยปกติแล้วจะมีส่วนผสมของเทอร์โมพลาสติกและเทอร์โมเซต เพื่อให้ได้คุณสมบัติที่ดีที่สุดของสารทั้งสองชนิด

อนุภาคนำไฟฟ้าโดยทั่วไปจะมีขนาด 3 ถึง 12  $\mu\text{m}$ . และมีส่วนประกอบของโลหะ เช่น คาร์บอน (แกรไฟต์) พลาสติกเคลือบโลหะ แก้วเคลือบโลหะ หรือทั้งสามชนิดผสมกัน อนุภาคที่มีการใช้กันมากที่สุดคือแกรไฟต์ ทอง และพลาสติกเคลือบทอง อนุภาคพลาสติกเคลือบทองสามารถถูกบีบอัด (Compressible) ภายใต้แรงดันการเชื่อมติด (Bonding Pressure) เมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุแกรไฟต์ที่มีความแข็งแรงมากกว่า อนุภาคพลาสติกเคลือบทองจะสร้างจุดเชื่อมต่อที่มีความต้านทาน (Resistance) ต่ำกว่า เนื่องจากทองสามารถสัมผัสกับชิ้นส่วนด้านบนและด้านล่างได้มากกว่า วัสดุที่สามารถบีบอัดได้ยังมีการคลายความเค้น (Stress Relief) ที่ดีกว่า เนื่องจากช่องว่างในแก้ว (สารยึดติด) จะถูกชดเชยด้วยการขยายตัวของอนุภาค จุดเชื่อมต่อที่เกิดจากอนุภาคแกรไฟต์ส่วนมากจะมีความต้านทานที่สูงกว่าทอง แต่อย่างไรก็ตาม ยิ่งอนุภาคแกรไฟต์มีความแข็งแรงมากเท่าไรก็จะยิ่งลดการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของพื้นผิวที่จะเชื่อมติดได้ เนื่องจากมุมที่แหลมคมของอนุภาคจะช่วยให้การแทรกผ่านชั้นออกไซด์ ระยะห่าง (Pitch) ของตัวนำที่จะเชื่อมติดจะเป็นตัวกำหนดตัวเลือกขนาดของอนุภาค เพื่อป้องกันการลัดวงจร อนุภาคขนาดเล็กจะใช้กับระยะห่างตัวนำที่แคบ โดยทั่วไปจะมี 1,250,000 อนุภาคต่อตารางนิ้ว

ความหนาของสารยึดติดสามารถขึ้นอยู่กับระยะห่างของตัวนำได้เช่นกัน สารยึดติดที่บางจะใช้กับระยะห่างที่แคบ เนื่องจากช่องว่างระหว่างผิววัสดุจะแคบ ช่องว่าง (Voids) สามารถเกิดขึ้นได้ถ้าสารยึดติดมีความหนามากเกินไป เนื่องจากไม่สามารถบีบอัดให้อยู่ภายในร่องได้ ส่งผลให้ความแข็งแรงของจุดเชื่อมต่อลดลงหรือเกิดเป็นทางผ่านของความชื้นเข้าไปสู่จุดเชื่อมต่อ

สารยึดติดมีข้อได้เปรียบกว่าการสร้างการเชื่อมต่อระหว่างวัสดุแบบดั้งเดิม เช่น การบัดกรี หรือการใช้ตัวเชื่อมต่อ ดังนี้

- ระยะห่างน้อยมาก (ต่ำกว่า 100  $\mu\text{m}$ )
- จุดเชื่อมต่อมีความยืดหยุ่น และทนต่อการถูกกระตุ้นด้วยไฟฟ้า
- สามารถใช้งานได้กับตัวนำที่ไม่สามารถบัดกรีได้ เช่น Indium Tin Oxide (ITO) ส่วนมากใช้ในส่วนของภาพที่เป็นแก้ว (Glass Display)
- ใช้อุณหภูมิต่ำในกระบวนการสร้างการเชื่อมต่อ
- กระบวนการไร้สารตะกั่ว ไม่มีการทำให้เป็นของเหลว และไม่มีสารตกค้าง
- มีความทนทานต่อการลอก มีเสถียรภาพในการต้านทานไฟฟ้า และการป้องกันความชื้นที่ดี

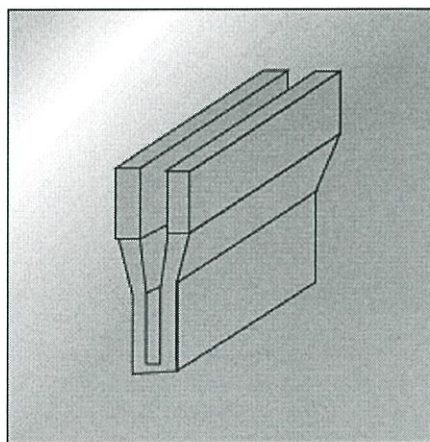
### 2.3.3 กระบวนการเชื่อมต่อการให้ความร้อนเป็นจังหวะ (Pulse-Heated Bonding Process)

สิ่งสำคัญของการระบบการเชื่อมติดมี 4 ส่วนประกอบ คือ

- แหล่งจ่ายไฟ (Power Supply)—ควบคุมอุณหภูมิ และเวลา
- หัวเชื่อมติด (Bonding Head) —ควบคุมแรง
- เทอร์โมท (Thermode)—อุปกรณ์ความร้อน (Heating Element)
- เครื่องมือและตัวยึด (Tooling and Fixturing)—จัดตำแหน่ง และแนวของชิ้นส่วน

แหล่งจ่ายไฟจะสร้างกระแสไฟฟ้าที่ควบคุมไว้ส่งผ่านไปยังเทอร์โมทที่ทำจากโลหะต้านทานไฟฟ้า ซึ่งจะก่อให้เกิดความร้อนขึ้น พื้นที่ผิวหน้าตัดของเทอร์โมทควรจะมีเล็กที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ เพื่อให้ อุณหภูมิเพิ่มขึ้นและลดลงได้อย่างรวดเร็ว Thermocouple ที่ติดอยู่กับเทอร์โมทจะส่งข้อมูลอุณหภูมิ กลับไปที่แหล่งจ่ายไฟ การให้ความร้อนเป็นจังหวะ (Pulse Heating) หมายถึงการปรับข้อมูลให้เป็น ปัจจุบัน ของพลังงานที่ส่งออกมาจากแหล่งจ่ายไปยังเทอร์โมท โดยอ้างอิงจากข้อมูลอุณหภูมิที่ส่งมาแบบ วนซ้ำ (Loop) ของ Thermocouple จึงทำให้แหล่งจ่ายไฟสามารถควบคุมรูปร่างของอุณหภูมิ (Temperature Profile) ของเทอร์โมท และการถ่ายเทความร้อนไปสู่ชิ้นส่วน

รูปร่างของเทอร์โมทจะมีลักษณะเป็นตัว “U” ดังรูปที่ 2.8 กระแสไฟฟ้าจะไหลในทิศทางขนาน กับตัวนำ และไม่มีการตกลงของแรงดันไฟฟ้าระหว่างตัวนำสองตัว กระบวนการให้ความร้อนเป็นจังหวะทำให้เทอร์โมทร้อนและเย็นตัวได้อย่างรวดเร็ว การเย็นตัวอย่างรวดเร็วจะทำให้สามารถรักษาแรงดัน ณ จุดสิ้นสุดรอบการให้ความร้อน หมายความว่าอนุภาคนำไฟฟ้าจะมีความเสถียรในตำแหน่งของการบีบอัด ในระหว่างการบ่ม หัวเชื่อมติดจะทำให้เกิดแรงอย่างต่อเนื่อง เพื่อให้แน่ใจว่าการถ่ายเทความร้อนได้เต็มที่ เครื่องมือที่มีความแม่นยำมีความจำเป็นต่อการจัดตำแหน่งและแนวของชิ้นงาน

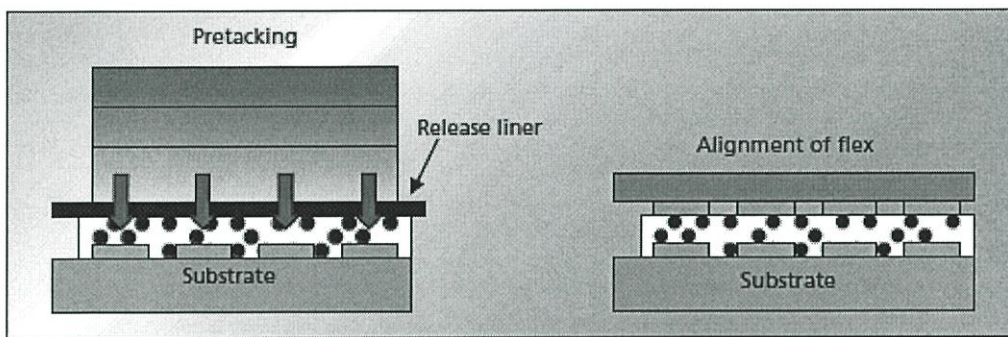


รูปที่ 2.8 เทอร์โมทมีรูปร่างแบบตัว “U” (Brackell, 2000)

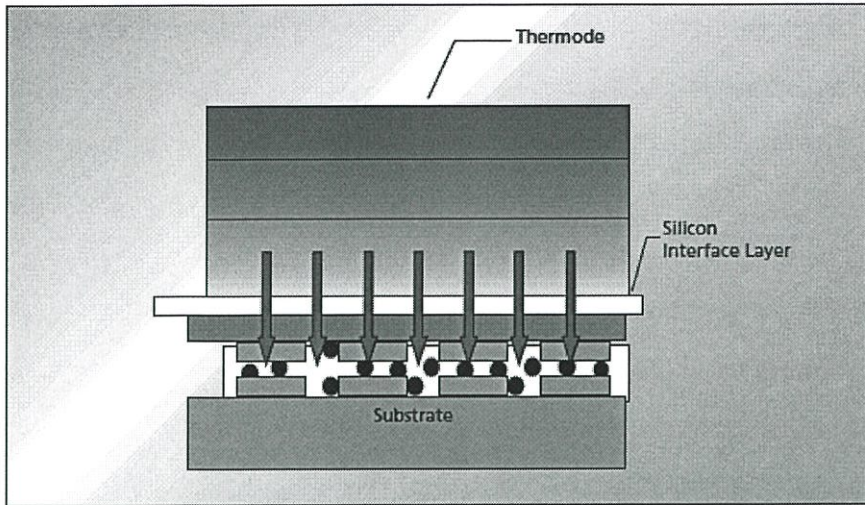
### 2.3.4 ขั้นตอนของกระบวนการเชื่อมติด (Bonding Methods, Process Steps)

ACF ประกอบไปด้วยสารยึดติดและชั้นปกป้อง ACF ที่มีฟิล์ม 3 ชั้นจะมีชั้นกระดาษป้องกันที่จะถูกนำออกก่อนการเชื่อมติด จากนั้นเทปสารยึดติดจะถูกแปะลงบนสารตั้งต้น (Substrate) และจะถูกยึดตำแหน่ง (Tacking) เบื้องต้น ในการยึดสารยึดติดจะใช้เวลา 3-5 วินาที ที่อุณหภูมิ 80-100°C ดังรูปที่ 2.9

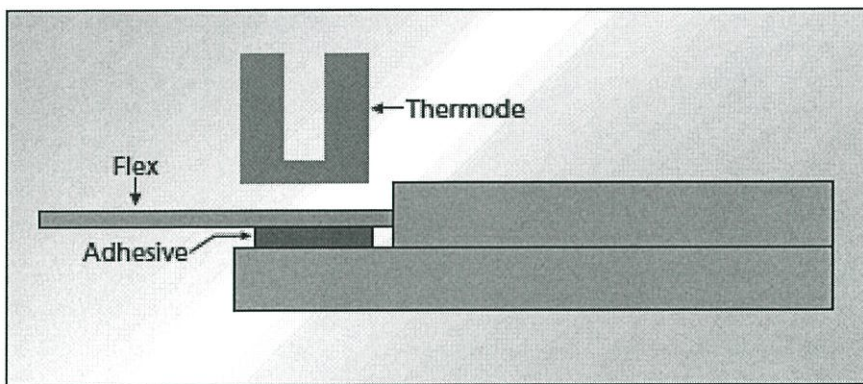
หลังจากถูกยึดแล้ว Flex จะถูกวางบนแนวร่องของสารตั้งต้น เทอร์โมทจะถูกให้ความร้อนอีกรอบจนถึงอุณหภูมิการเชื่อมติด (Bonding Temperature) ดังรูปที่ 2.10 ในขั้นตอนนี้จะมีการแทรกแผ่นซิลิกอน (Silicon Interface Layer) หรือวัสดุคั่น (Interposer Material) ระหว่างเทอร์โมทและ Flex เนื่องจากอนุภาคมีขนาดเล็กมาก เทอร์โมทจึงต้องวางตัวในระนาบเดียวกันกับชิ้นส่วนเพื่อให้ได้การบีบอัดที่ถูกต้อง แผ่นซิลิกอนช่วยให้แรงดันคงที่ตลอดจุดเชื่อมต่อ และยังช่วยกีดสารยึดติดให้อยู่ในร่องของสารตั้งต้น และยิ่งพื้นที่ผิวสัมผัสของสารยึดติดมากความแข็งแรงของการเชื่อมติดก็จะยิ่งมาก เมื่อบ่มแล้วสารยึดติดจะหดลงและกักอนุภาคโลหะไว้ระหว่างร่องบน Flex และสารตั้งต้น



รูปที่ 2.9 เทอร์โมทยึดตำแหน่งเบื้องต้นของแผ่นฟอยล์กับ PCB จากนั้นแผ่นวางแนวจะถูกนำออกแล้วจึงวางตำแหน่งของ Flex (Brackell, 2000)



รูปที่ 2.10 ขั้นตอนการเชื่อมติด และการบ่ม (Brackell, 2000)



รูปที่ 2.11 ตำแหน่งของเทอร์โมทด์ แผ่นวงจรแบบโค้งงอ (Flex) และสารยึดติด (Brackell, 2000)

กระบวนการเชื่อมติดสำหรับ HSC จะง่ายกว่ามาก เพราะสารยึดติดอยู่บน Flex อยู่แล้ว จึงไม่จำเป็นต้องทำการยึดตำแหน่งเบื้องต้น ชิ้นส่วนสามารถจัดแล้วและเชื่อมติด ดังรูปที่ 2.10 ในขั้นตอนเดียว เนื่องจากธรรมชาติของเทอร์โมพลาสติกของสารยึดติด HSC กระบวนการจะมีความรวดเร็วมาก เพราะสารยึดติดต้องการแค่ให้มีอุณหภูมิสูงถึงอุณหภูมิการบ่ม

### 2.3.5 สรุปรูปการเชื่อมสารยึดติดที่มีการนำไฟฟ้าในแต่ละทิศทางต่างกัน (ACA Bonding)

กระบวนการเชื่อมติดที่กักเก็บความร้อนด้วยเทอร์โมทด์ที่มีการให้ความร้อนเป็นจังหวะ (Pulse-Heated Thermode Heat Seal Bonding) เป็นกระบวนการที่มีความเสถียรและมีการควบคุมเป็นอย่างดี การออกแบบชิ้นส่วนที่ดีโดยมีความเข้าใจตัวแปรของกระบวนการ (Process Parameter) เป็นอย่างดี จะสามารถออกแบบวิธีการเชื่อมต่อนำเข้าเชื่อถือ และมีความคงทนต่อการเปลี่ยนแปลงในการผลิตเป็น

## สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

จำนวนมาก (Mass Production) การเติบโตของความต้องการสินค้าที่มีขนาดเล็กและน้ำหนักที่เบาลง เป็นแรงขับเคลื่อนหลักที่ทำให้มีการใช้เทคโนโลยีแผ่นวงจรแบบโค้งงอได้ (Flexible Circuit Technology) ในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์มากขึ้น การควบคุมกระบวนการเชื่อมตูดด้วยเทอร์โมตเป็นการกำหนดทิศทางของระบบการผลิต และเป็นการตอบสนองที่นำเชื่อถือต่ออุปสงค์ที่เพิ่มขึ้นของตลาดสินค้าอิเล็กทรอนิกส์ในปัจจุบัน

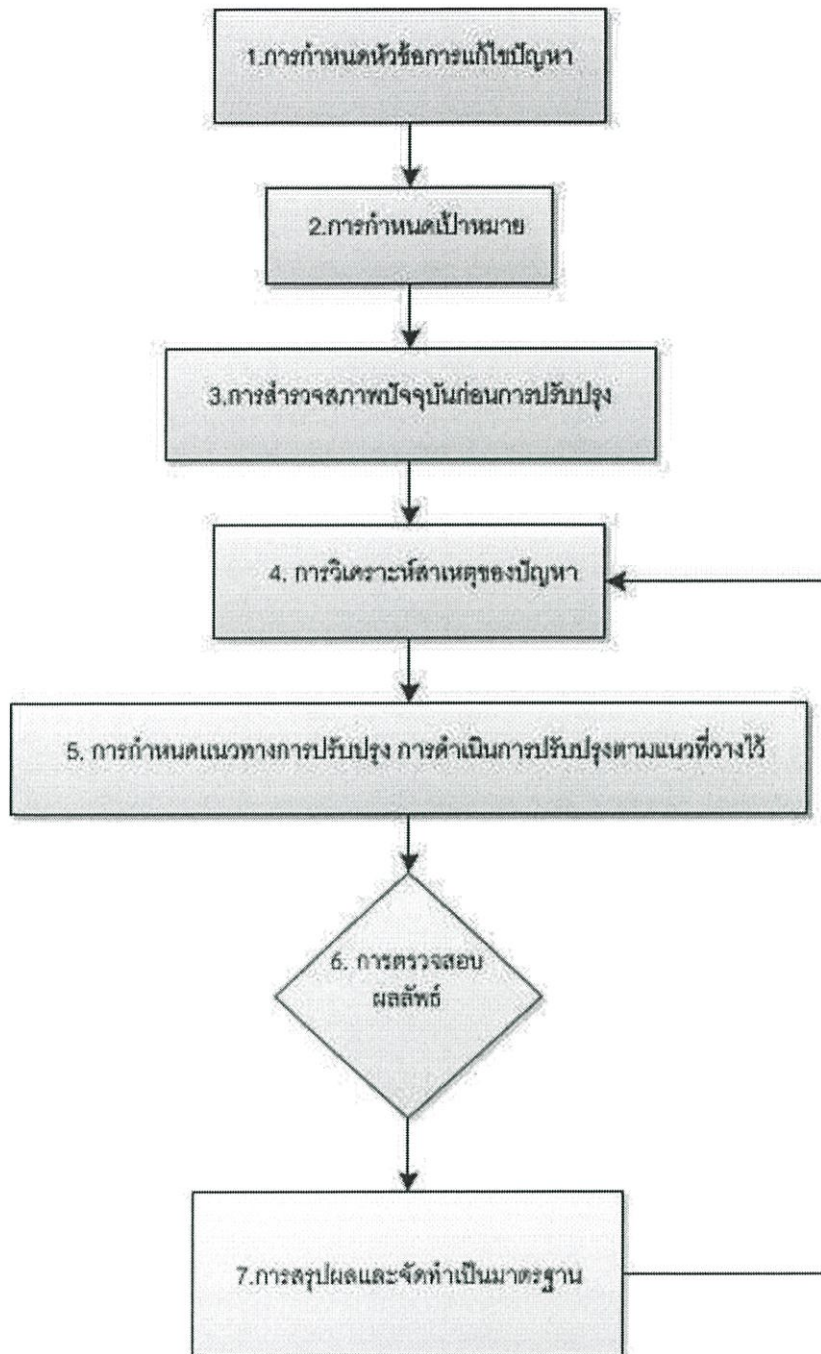
143888

## บทที่ 3

### วิธีการดำเนินงาน

ในการจัดทำปฏิญญานิพนธ์ เรื่องการตรวจสอบการเสียหายของเทอร์โหมตในกระบวนการ Anisotropic Conductive Film (ACF) Bonding บริษัท เวสเทิร์น ดิจิตอล (ประเทศไทย) จำกัด ซึ่งจากการสำรวจปัญหาที่เกิดขึ้นภายในบริษัทกรณีศึกษา และการศึกษาทฤษฎีหรืองานวิจัยที่เกี่ยวข้องที่ได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 1 และบทที่ 2 ในบทนี้จะเป็นการกล่าวถึงขั้นตอนวิธีการดำเนินงานทั้งหมดโดยคณะผู้จัดทำได้เลือกใช้วิธีการทางวิศวกรรมศาสตร์ขั้นตอนในการแก้ไขปัญหาภายใต้เงื่อนไขการพัฒนาบุคลากรให้เข้าใจถึงหลักการในการบริหารโครงการด้วยวงจร P-D-C-A เพื่อใช้ในการแก้ปัญหาและพัฒนาต่อไปอย่างไม่มีสิ้นสุด ซึ่งประกอบด้วยวิธีการต่างๆ ที่คณะผู้จัดทำใช้ในการตรวจสอบหาการเสียหายของเทอร์โหมต ดังนี้ การศึกษาอุณหภูมิที่ผิวพื้น การวิเคราะห์อุณหภูมิการทำงานจริงของเทอร์โหมตจากการบินที่กของเครื่องเก็บข้อมูล การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของวัสดุ และการคัดเลือกวัสดุใหม่มาใช้งาน เป็นต้น โดยคณะผู้จัดทำได้แบ่งกลุ่มวิธีการออกเป็น 2 ช่วง คือ 1. เพื่อทำการระบุสาเหตุที่แท้จริง ที่ทำให้เทอร์โหมตเสียหายโดยวิธีการทางวัสดุศาสตร์ หรือวิธีการทางกระบวนการ และ 2. เพื่อหาวิธีการแก้ไขที่ถูกต้องที่ทำให้จำนวนครั้งในการใช้งานให้มากขึ้นจากเดิม รวมถึงการตรวจสอบผลลัพธ์ (เปรียบเทียบก่อน-หลังการปรับปรุง) สรุปผล และจัดทำเป็นมาตรฐานในลำดับท้ายที่สุด

## QC Story



รูปที่ 3.1 แผนภาพแสดงวิธีการดำเนินงานการตรวจสอบการเสียหายและเพิ่มอายุการใช้งานของเทอร์โมตในกระบวนการ ACF Bonding

### 3.1 การกำหนดหัวข้อการแก้ไข้ปัญหา

สำหรับการคัดเลือกและกำหนดปัญหาที่จะดำเนินการปรับปรุง จะกำหนดจากการที่คณะผู้จัดทำได้เข้าไปสำรวจสภาพโดยรวมของโรงงานกรณีศึกษา บริษัท เวสเทิร์น ดิจิตอล (ประเทศไทย) จำกัด เนื่องจากสายการผลิตในขั้นตอน ACF Bonding มีขั้นตอนการผลิตที่ซับซ้อนและมีจำนวนสายการผลิตจำนวนมาก จึงจำเป็นต้องกำหนดหัวข้อเรื่องให้ชัดเจน และต้องเป็นปัญหาที่สามารถดำเนินการให้สำเร็จลุล่วงไปได้ ซึ่งการที่คณะผู้จัดทำมีความรู้ ความคุ้นเคยกับเรื่องที่ศึกษาจะส่งผลให้สามารถมองเห็นแนวทางในการดำเนินงานได้ชัดเจน

จากการที่คณะผู้จัดทำได้เข้าไปสำรวจสภาพการดำเนินงานของบริษัท ในสายการผลิตสินค้า Diablo ในกระบวนการผลิต ACF Bonding พบว่าปัจจัยต่างๆที่เกี่ยวข้องที่ทำให้เทอร์โมตเกิดการเสียหายก่อนอายุการใช้งานนั้น เกิดจาก 4 ปัจจัยต่างๆ ดังนี้

#### 3.1.1 ปัจจัยทางด้านความร้อน

เนื่องจากเทอร์โมตใช้อุณหภูมิที่สูงมากและต่อเนื่องเป็นเวลานาน พร้อมทั้งมีการเพิ่มขึ้น-ลดลงของอุณหภูมิในอัตราที่รวดเร็ว จึงน่าจะเป็นสาเหตุที่ทำให้เทอร์โมตเกิดการเสียหายได้จากปัจจัยนี้ และนับเป็นปัจจัยหลักที่อาจส่งผลให้เทอร์โมตมีอายุการใช้งานที่สั้นลง

#### 3.1.2 ปัจจัยทางด้านวัสดุศาสตร์

บริษัท เวสเทิร์น ดิจิตอล (ประเทศไทย) จำกัด ได้ใช้วัสดุจำพวกไทเทเนียม ในการขึ้นรูปเป็นเทอร์โมต ซึ่งมีคุณสมบัติทางกลที่ดีมาก น้ำหนักเบา แต่มีการทนการกัดกร่อนได้ค่อนข้างต่ำ รวมไปถึงการอบชุบ (Heat Treatment) วัสดุจากผู้ผลิต หรือจากการขึ้นรูปขึ้นงานที่ไม่ดี ผิวชิ้นงานมีความขรุขระ อาจเป็นอีกปัจจัยที่ทำให้เทอร์โมตเกิดการแตกหักแบบเปราะได้ง่าย

#### 3.1.3 ปัจจัยทางการจัดแนว (Alignment)

เนื่องด้วยในปัจจุบันยังใช้การจัดแนวด้วยมือ โดยให้พนักงานเป็นคนจัดแนวอยู่ จึงอาจจะทำให้เกิดการผิดพลาดเนื่องจากการจัดแนวที่ไม่เที่ยงตรง ทำให้เทอร์โมตเอียง ส่งผลให้ระหว่างกระบวนการ ACF Bonding บางพื้นของเทอร์โมตได้รับแรงที่มากกว่าพื้นอื่นๆหลายเท่า อาจทำให้เทอร์โมตเสียหายก่อนอายุการใช้งานจริง

### 3.1.4 ปัจจัยทางด้านการทำงานของเครื่องจักร

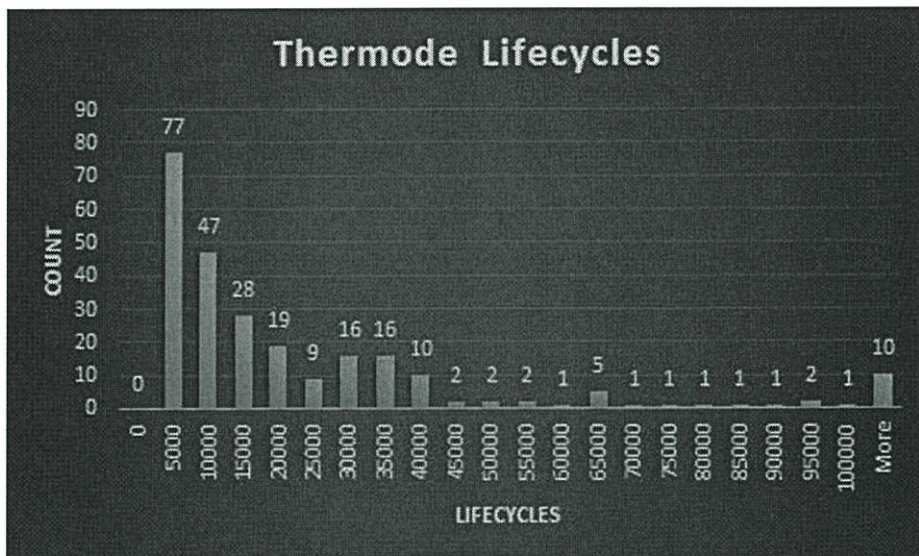
การทำงานของเครื่องจักรมีกลไกการถ่วงน้ำหนักที่จะกดเทอร์โมมดให้กดลงบนชิ้นงาน ถ้าน้ำหนักถ่วงน้อยไปจะทำให้น้ำหนักกดลงชิ้นงานไม่พอ ส่งผลให้การถ่ายเทความร้อนระหว่างเทอร์โมมดกับชิ้นงานไม่ดี สารยึดติดจะไม่เกิดการบ่มตัว แต่น้ำหนักถ่วงมากไปก็จะทำให้เกิดการเสียหายของชิ้นงานและตัวเทอร์โมมดเองด้วย และยังมีอาการเร่งการลดอุณหภูมิของเทอร์โมมดโดยการเป่าแก๊สออกซิเจนในระหว่างการลดอุณหภูมิอีกด้วย

ปัจจัยที่กล่าวมาทั้งหมดข้างต้นเป็นปัจจัยที่อาจทำให้เทอร์โมมดเกิดการเสียหายก่อนอายุการใช้งานจริง สืบเนื่องมาจากการเข้าไปศึกษาดูงานของคณะผู้จัดทำที่ บริษัท เวสเทิร์น ดิจิตอล (ประเทศไทย) จำกัด ผู้จัดทำจึงได้ทำการออกแบบแผน และกำหนดเป้าหมายของการดำเนินงานดังจะเห็นในหัวข้อที่ 3.5 ในลำดับต่อไป

### 3.2 การกำหนดเป้าหมาย

เนื่องจากบริษัท เวสเทิร์น ดิจิตอล (ประเทศไทย) จำกัด มีนโยบายต้องการเพิ่มอายุการใช้งานของเทอร์โมมดในกระบวนการ ACF Bonding ในผลสัมฤทธิ์สูงสุด เพื่อลดอัตราการหยุดสายการผลิตเพื่อเปลี่ยนเทอร์โมมดใหม่

จากตัวอย่างเทอร์โมมดที่เสียหาย ได้เก็บข้อมูลมาทั้งหมด 268 ชิ้น



รูปที่ 3.2 กราฟแสดงอายุการใช้งานของเทอร์โมมดกลุ่มตัวอย่าง

อายุการใช้งานเฉลี่ยของเทอร์โมมด = 22,000 รอบ  
 (ข้อมูลของเทอร์โมมดตั้งแต่เดือนที่ 7/2014 – 11/2015)  
 อายุการใช้งานมาตรฐานที่กำหนดไว้ = 38,000 รอบ

$$\begin{aligned} \text{เปอร์เซ็นต์อายุการใช้งาน} &= \frac{\text{อายุการใช้งานเฉลี่ย}}{\text{อายุการใช้งานมาตรฐาน}} \\ &= \frac{22,000 \text{ รอบ}}{38,000 \text{ รอบ}} \times 100 \\ &\approx 57.89 \% \end{aligned}$$

จากนโยบายของบริษัทที่จะทำการเพิ่มเปอร์เซ็นต์ผลิตผลหรืออายุการใช้งานของเทอร์โมมดในกระบวนการ ACF Bonding คณะผู้จัดทำจึงทำการหาข้อมูลเพื่อระบุสาเหตุที่ทำให้เทอร์โมมดเกิดการเสียหายก่อนอายุการใช้งานในลำดับแรก และเพิ่มอายุการใช้งานของเทอร์โมมดในลำดับต่อมา โดยใช้การรวบรวมข้อมูลทั้งหมด พร้อมทั้งวิเคราะห์ข้อมูลต่างๆ เพื่อประกอบกับการตัดสินใจทั้งในด้านวัสดุศาสตร์และด้านกระบวนการทำงาน

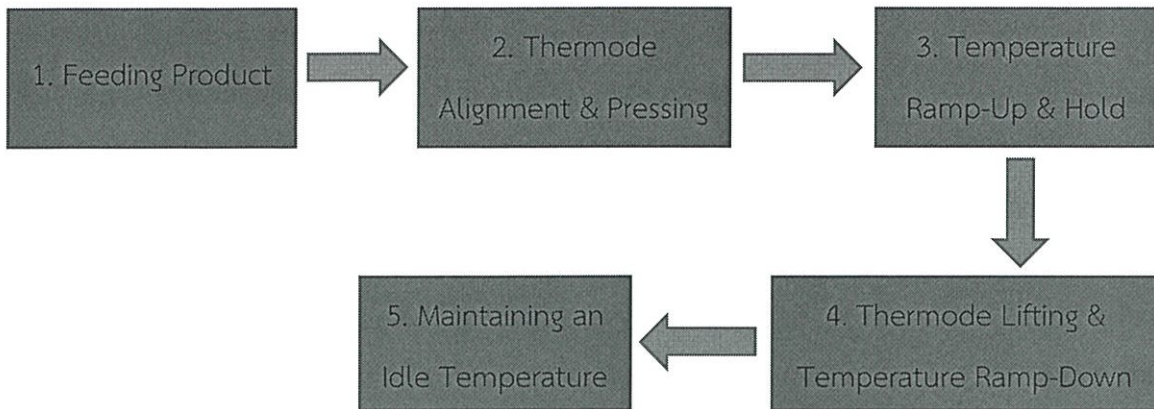
ทั้งนี้จากการสรุปและหารือจากคณะผู้จัดทำ เป้าหมายที่กำหนดขึ้นใหม่เป็นดังนี้

$$\begin{aligned} \text{อายุการใช้งานมาตรฐานที่กำหนดไว้ (เดิม)} &= 38,000 \text{ รอบ} \\ \text{อายุการใช้งานมาตรฐานใหม่} &= 40,000 \text{ รอบ} \\ \text{เปอร์เซ็นต์อายุการใช้งานที่กำหนดใหม่} &= \frac{40,000}{38,000} \times 100 \\ &\approx 105.26 \% \text{ (จากเดิม 57.89\%)} \end{aligned}$$

### 3.3 การสำรวจสภาพปัจจุบันก่อนการปรับปรุง

ในขั้นตอนการศึกษาสภาพปัจจุบันก่อนการปรับปรุง ทางคณะผู้จัดทำจะทำการเข้าไปสำรวจโรงงานกรณีศึกษา บริษัท เวสเทิร์น ดิจิตอล (ประเทศไทย) จำกัด เพื่อทำการศึกษาและเก็บข้อมูลเบื้องต้นเกี่ยวกับขั้นตอนการทำงานในสายการผลิตสินค้า Diablo ในกระบวนการ ACF Bonding ซึ่งจะช่วยให้สามารถเข้าใจถึงลำดับงานก่อนหลังในการทำให้ชิ้นส่วน Head Stack Assembly (HSA) ติดกับแผงวงจร โดยกลไกการบ่มตัวของสารยึดติด

สำหรับกระบวนการผลิตในขั้นตอน ACF Bonding สามารถแบ่งออกเป็น 5 ขั้นตอน ดังนี้



รูปที่ 3.3 ขั้นตอนการทำงานในกระบวนการ ACF Bonding

จากการสำรวจสภาพปัจจุบันคณะผู้จัดทำพบว่ากระบวนการที่อาจส่งผลทำให้เทอร์โมทเกิด ความเสียหายมากที่สุด คือกระบวนการที่ 3 และ 4 ซึ่งส่งผลกระทบต่อหลายๆ ปัจจัยดังได้กล่าวไว้ใน หัวข้อ 3.1 อันได้แก่ ปัจจัยทางด้านความร้อน และปัจจัยทางด้านวัสดุศาสตร์ สามารถอธิบายโดยละเอียด ได้ดังนี้

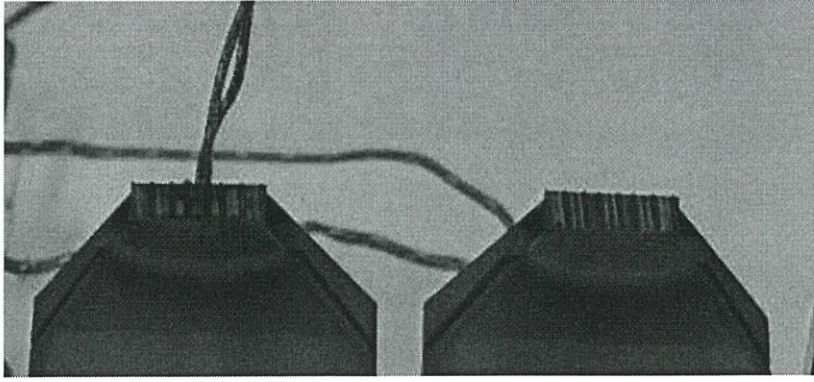
### 3.3.1 กระบวนการที่ 3 Temperature Ramp-Up & Hold

เป็นกระบวนการต่อจากกระบวนการที่ 2 ซึ่งเทอร์โมทได้ทำการกดลงมารอที่ตัวชิ้นงานแล้วโดย ใช้ระบบอัตโนมัติ ซึ่งในขั้นตอนที่ 3 เทอร์โมทจะทำการกดลงไปบนชิ้นงานและมีการปล่อยกระแสไฟฟ้า เพื่อให้ความร้อนบริเวณพื้นของเทอร์โมทอย่างรวดเร็ว (Ramp-Up) ใช้เวลาประมาณ 1 วินาที อุณหภูมิ เทอร์โมทจะเพิ่มขึ้นไปถึงประมาณ 450°C และค้างไว้เป็นเวลา 7 วินาที

### 3.3.2 กระบวนการที่ 4 Thermode Lifting & Temperature Ramp-Down

เป็นกระบวนการที่ต่อจากกระบวนการที่ 3 เทอร์โมทจะถูกยกขึ้น และลดอุณหภูมิอย่างรวดเร็ว (Ramp-Down) ใช้เวลาประมาณ 1 วินาที ด้วยการเป่าออกซิเจนลงไปบนเทอร์โมท และรอชิ้นงานขึ้น ต่อไปป้อนเข้ามา

จากกระบวนการทั้งสองที่กล่าวมาข้างต้น จะเห็นได้ว่าเทอร์โมทมีการใช้งานที่อุณหภูมิสูง และมีการ อัตราเพิ่มขึ้น-ลดลงของอุณหภูมิอย่างรวดเร็วเป็นเวลานาน ด้วยวัสดุที่เป็นไทเทเนียมนั้น ทำให้เกิดการ เสียหายก่อนอายุการใช้งานจริง ดังจะเห็นได้ดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 ตัวอย่างเทอร์โมทที่เสียหายก่อนอายุการใช้งานจริง

เทอร์โมทที่เสียหายก่อนอายุการใช้งานจริงจะมีสภาพเหมือนโดนไหม้ เป็นรีวิสีฟ้ามีลักษณะเป็นวงที่บริเวณปลายเทอร์โมท จากการสำรวจพบว่าเทอร์โมทจะเสียที่อายุการใช้งาน ประมาณ 5,000 ถึง 40,000 รอบ และลักษณะการเสียเป็นบริเวณพื้นริมทั้งสองข้าง โดยอาจจะเสียที่ข้างใดข้างหนึ่ง หรือทั้งสองข้างก็ได้ ซึ่งส่งผลให้มีเปอร์เซ็นต์อายุการใช้งานน้อย รวมถึงการเสียต้นทุนเนื่องจากการหยุดสายการผลิตเพื่อเปลี่ยนเทอร์โมทใหม่ ซึ่งเป็นค่าใช้จ่ายจำนวนมากในแต่ละเดือน

### 3.4 การวิเคราะห์สาเหตุของปัญหา

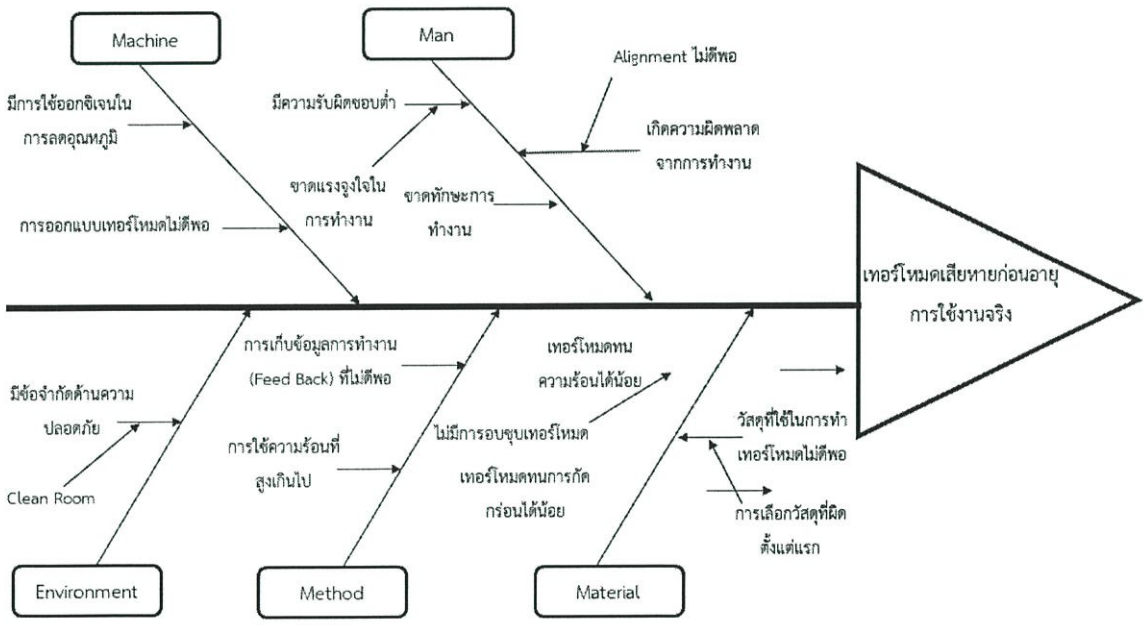
หลังจากที่ได้เข้าไปสำรวจสภาพปัญหาปัจจุบันที่บริษัท เวสเทิร์น ดิจิตอล (ประเทศไทย) จำกัด คณะผู้จัดทำเลือกใช้แผนภูมิแก๊งปลา (Fishbone Diagram) เพื่อวิเคราะห์สาเหตุของปัญหาที่เกิดขึ้นในการบวนาการ ACF Bonding ซึ่งเครื่องมือดังกล่าวจะแสดงให้เห็นถึงปัญหา และสาเหตุของปัญหาได้อย่างชัดเจน (ดังแสดงในรูปที่ 3.5)

จากที่คณะผู้จัดทำได้ทำการวิเคราะห์หาสาเหตุของปัญหาโดยใช้แผนภูมิแก๊งปลา หรือผังแสดงเหตุและผล ที่แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างปัญหากับสาเหตุทั้งหมดที่เป็นไปได้ในการเสียหายของเทอร์โมทก่อนอายุการใช้งานจริง เพื่อให้ทราบถึงสาเหตุหลักและสาเหตุย่อยของปัญหา และนำไปสู่การค้นหาค่าสาเหตุที่แท้จริง ในการวิเคราะห์หาสาเหตุ คณะผู้จัดทำได้ระดมสมองร่วมกันโดยยึดหลัก 4M 1E ที่ประกอบด้วย คนงานหรือพนักงาน (Man, M) เครื่องจักรหรืออุปกรณ์อำนวยความสะดวก (Machine, M) วัตถุดิบหรือชิ้นงาน (Material, M) กระบวนการทำงาน (Method, M) อากาศ สถานที่ ความสว่าง และบรรยากาศการทำงาน (Environment, E) เพื่อกำหนดสาเหตุหลัก และทำการหาสาเหตุย่อยของปัญหาต่างๆ โดยละเอียด เพื่อนำไปสู่แนวทางในการปรับปรุงแก้ไขที่ดีที่สุด

จากการวิเคราะห์ปัจจัยต่างๆ จากการใช้แผนภูมิแก๊งปลาและการรวบรวมข้อมูลทั้งหมด คณะผู้จัดทำมองเห็นสาเหตุที่ส่งผลต่อการเสียหายของเทอร์โมตมากที่สุดคือ วัสดุ เครื่องจักร อุปกรณ์ และกระบวนการทำงาน ซึ่งมีสาเหตุย่อยต่างๆ ดังนี้

- การใช้อุณหภูมิที่สูงเกินไป
- อุปกรณ์หรือเทอร์โมตไม่มีคุณสมบัติพอในการใช้งานที่อุณหภูมิสูง
- การจัดแนว (Alignment) มีความผิดพลาดทำให้เทอร์โมตเกิดการเสียหายขณะทดลองบนชิ้นงาน ในลักษณะการทำงานปกติ
- มีการใช้ออกซิเจนในการเร่งการลดอุณหภูมิ (Ramp-Down) ส่งผลให้เทอร์โมตมีการทำปฏิกิริยาออกซิเดชันอย่างรวดเร็ว

ปัญหาย่อยต่างๆ ที่กล่าวมาข้างต้นเป็นปัญหาสำคัญที่ส่งผลต่อปัญหาหลัก หรือการเสียหายของเทอร์โมตก่อนอายุการใช้งานจริง ซึ่งคณะผู้จัดทำได้ทำการวางแผนการดำเนินงานและกำหนดแนวทางการทำงานในลำดับต่อไป



รูปที่ 3.5 แผนภูมิแก๊งปลาแสดงเหตุและผล

### 3.5 การกำหนดแนวทางการปรับปรุงและปฏิบัติตามแนวทางที่วางไว้

#### 3.5.1 การกำหนดแนวทางการปรับปรุง

หลังจากการวิเคราะห์สาเหตุโดยใช้แผนภูมิก้างปลา พบว่าสาเหตุที่ส่งผลต่อการเสียหายของเทอร์โมตก่อนอายุการใช้งานจริงมีอยู่ 3 หัวข้อหลัก ได้แก่ วัสดุ เครื่องจักร และกระบวนการทำงาน ซึ่งสาเหตุย่อยที่ทำให้เกิดปัญหาอายุการใช้งานของเทอร์โมตต่ำกว่ามาตรฐาน ได้กล่าวไปในหัวข้อ 3.4 แล้ว คณะผู้จัดทำได้การนำเสนอแนวทางการแก้ไข ทั้งการวัดอุณหภูมิที่ผิวพื้น การวัดความขรุขระของพื้นผิวพื้น การเปลี่ยนอุปกรณ์ในการวัด (เทอร์โมคัปเปิล (Thermocouples)) การเคลือบด้วยทอง การวิเคราะห์อุณหภูมิโดยใช้โปรแกรม Matlab การทำการตรวจสอบทางวัสดุ การวิเคราะห์อายุการใช้งานทางสถิติ การคัดเลือกวัสดุในการทำเทอร์โมตต้นแบบใหม่ โดยจัดลำดับขั้นตอนการทำงานอย่างเหมาะสม และคณะผู้จัดทำได้ระดมความคิดกับคณะทำงานที่ประกอบด้วยวิศวกร หัวหน้างานหรือผู้ควบคุมงาน นักวิจัยที่ชำนาญงานร่วมกับพนักงานปฏิบัติการ ซึ่งจะช่วยให้เห็นถึงแง่มุมของความเป็นไปได้ในการตรวจสอบหาต้นตอความเสียหายที่แท้จริง พร้อมทั้งสามารถที่จะเพิ่มอายุการใช้งานของเทอร์โมตได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด

เมื่อทำการค้นหาแนวทางในการแก้ปัญหาได้แล้วทางคณะผู้จัดทำก็ได้เสนอแนวทางการแก้ปัญหา กับผู้ที่เกี่ยวข้องทุกฝ่าย เพื่อประเมินความเป็นไปได้ของแนวทางการดำเนินการค้นหาต้นตอ พร้อมทั้งประเมินความเป็นไปได้ในการเพิ่มอายุการใช้งานของเทอร์โมต โดยหัวข้อปัญหาแสดงในตารางที่ 3.1 และแนวทางการดำเนินงานนั้นจะถูกแบ่งลำดับขั้นตอนออกเป็น 2 ช่วง ดังจะกล่าวต่อไปในหัวข้อ 3.5.2

ตารางที่ 3.1 หัวข้อปัญหา

ประเภทปัจจัย	สาเหตุย่อย
Machine	การใช้อุณหภูมิที่สูงเกินไป
Machine	มีการใช้ออกซิเจนในการเร่งการลดอุณหภูมิ (Ramp-Down) ส่งผลให้เทอร์โมตมีการทำปฏิกิริยาออกซิเดชันอย่างรวดเร็ว
Material	อุปกรณ์หรือเทอร์โมตไม่มีคุณสมบัติที่พอในการใช้งานที่อุณหภูมิสูง
Method	การจัดแนว (Alignment) มีความผิดพลาดทำให้เทอร์โมตเกิดการเสียหายขณะกดลงบนชิ้นงาน ในลักษณะการทำงานปกติ

### 3.5.2 แผนการดำเนินงาน

#### 3.5.2.1 ช่วงที่ 1 เพื่อหาต้นตอความเสียหายของเทอร์โมเมตร

1. การศึกษาอุณหภูมิผิวพื้นของเทอร์โมเมตร
  - 1.1 การศึกษาโดยใช้เครื่องวัดอุณหภูมิแบบแสดงภาพ (Thermal Imager) ในการวัดอุณหภูมิ
  - 1.2 การศึกษาโดยใช้เทอร์โมคัปเปิล (Thermocouples) ในการวัดอุณหภูมิ
2. การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของวัสดุ

#### 3.5.2.2 ช่วงที่ 2 เพื่อเพิ่มหาวิธีการแก้ไขที่ถูกต้องที่ทำให้อายุการใช้งานของเทอร์โมเมตรเพิ่มขึ้น

1. การคัดเลือกวัสดุใหม่มาใช้งาน
2. การวิเคราะห์อายุการใช้งานของเทอร์โมเมตรด้วยวิธีการทางสถิติ
3. การนำเทอร์โมเมตรที่สร้างขึ้นจากวัสดุใหม่มาทดลองใช้งาน

### 3.5.3 การปฏิบัติตามแนวทางที่วางไว้

หลังจากได้ทำการกำหนดแนวทางการแก้ไขปัญหาแล้ว คณะผู้จัดทำจึงได้ทำการปรับปรุงแก้ไขโดยเข้าไปศึกษากระบวนการ รวมถึงรวบรวมข้อมูลที่บริษัท เวสเทิร์น ดิจิตอล (ประเทศไทย) จำกัด และนำข้อมูลที่ได้พร้อมทั้งชิ้นงานตัวอย่างมาวิเคราะห์ทางด้านวัสดุศาสตร์ ณ ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ โดยอยู่ในความควบคุมดูแลของนักวิจัยที่มีประสบการณ์ตลอดช่วงเวลาที่ทำงาน ระยะเวลาในการดำเนินการวิจัย 6 เดือน คณะผู้จัดทำได้แบ่งช่วงเวลาการดำเนินงานออกเป็น 2 ช่วงเวลา คือ ช่วงที่ 1 ใช้เวลา 3 เดือน และช่วงที่ 2 ใช้เวลาอีก 3 เดือน โดยมีหัวข้อย่อย ดังต่อไปนี้

#### 3.5.3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการดำเนินงาน

1. เครื่องวัดอุณหภูมิแบบแสดงภาพ (Thermal Imager) Fluke Ti400



รูปที่ 3.6 Fluke Ti400 (Fluke Corporation)

## 2. เทอร์โมคัปเปิล ชนิด K (Thermocouples K Type)

2.1 Anritsu ST-11K-010-TS1-ANP

2.2 Omega GG-K-30

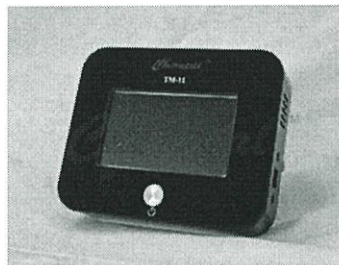


รูปที่ 3.7 Anritsu ST-11K-010-TS1-ANP (Anritsu Meter Co., Ltd.)



รูปที่ 3.8 Omega GG-K-30 (Omega Engineering, INC.)

## 3. เครื่องเก็บข้อมูลอุณหภูมิ (Thermal Data Logger) Cherusal TM-11



รูปที่ 3.9 Cherusal TM-11 (Trimech Technology Pte. Ltd.)

### 3.5.3.2 การศึกษาอุณหภูมิผิวพื้นของเทอร์โมคัปเปิล

ในการศึกษาอุณหภูมิผิวพื้นของเทอร์โมคัปเปิล ผู้ดำเนินการวิจัยได้มีการทดลองใช้เครื่องวัดอุณหภูมิแบบแสดงภาพ ยี่ห้อ Fluke รุ่น Ti400 และเทอร์โมคัปเปิล ชนิด K ยี่ห้อ Anritsu รุ่น ST-11K-010-TS1-ANP และยี่ห้อ Omega รุ่น GG-K-30 ซึ่งเป็นแบบหัวแบน (Flat Probe) และหัวเม็ด (Beaded Wire) ตามลำดับ และนำเทอร์โมคัปเปิลเชื่อมต่อเข้ากับเครื่องเก็บข้อมูลอุณหภูมิ ยี่ห้อ Cherusal รุ่น TM-11 ในการวัดอุณหภูมิที่ผิวพื้นของเทอร์โมคัปเปิล

## วิธีการดำเนินงาน

1. การศึกษาอุณหภูมิผิวพื้นของเทอร์โมท ด้วยเครื่องวัดอุณหภูมิแบบแสดงภาพ
  - 1.1 จัดเตรียมเครื่องวัดอุณหภูมิแบบแสดงภาพ
  - 1.2 จัดพื้นที่การทำงานให้เหมาะสมแก่การเก็บข้อมูล
  - 1.3 เริ่มต้นการวัดอุณหภูมิผิวพื้นของเทอร์โมทในขณะที่ทำงาน ด้วยเครื่องวัดอุณหภูมิแบบแสดงภาพ
2. การศึกษาอุณหภูมิผิวพื้นของเทอร์โมทด้วยเทอร์โมคัปเปิล
  - 2.1 จัดเตรียมเทอร์โมคัปเปิลทั้ง 2 รุ่น
  - 2.2 จัดเตรียมชิ้นงาน เทอร์โมท และเทอร์โมคัปเปิล โดยการติดตั้งเทอร์โมคัปเปิล ณ จุดที่ต้องการวัดอุณหภูมิ และเชื่อมต่อเทอร์โมคัปเปิลเข้ากับเครื่องเก็บข้อมูลอุณหภูมิ
    - 2.2.1 วัดอุณหภูมิผิวพื้นของเทอร์โมท โดยการติดตั้งเทอร์โมคัปเปิล ณ จุดที่จะเกิดการสัมผัสระหว่างเทอร์โมทกับชิ้นงานที่จะทำ ACF Bonding
    - 2.2.2 วัดอุณหภูมิผิวพื้นของเทอร์โมทโดยการติดตั้งเทอร์โมคัปเปิลที่ผิวพื้นของเทอร์โมทโดยตรง
  - 2.3 เริ่มต้นการวัดอุณหภูมิผิวพื้นของเทอร์โมทในขณะที่ทำงาน

### 3.5.3.4 การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของวัสดุ

การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของวัสดุ เป็นการศึกษาว่าอุณหภูมิการทำงานของเทอร์โมทในสายการผลิตจริง รวมถึงการศึกษาทฤษฎีโครงสร้างของวัสดุไทเทเนียม จึงได้มีการนำเอาเทอร์โมทตัวอย่างทั้งชั้นที่ยังไม่ผ่านการใช้งาน กับชั้นที่ผ่านการใช้งานที่เกิดความเสียหายจนไม่สามารถใช้การต่อได้ และได้มีการนำโครงสร้างจุลภาคมาเปรียบเทียบกันระหว่างเทอร์โมทตัวอย่างสองชิ้นนี้ เพื่อศึกษาว่าปัจจัยทางความร้อนจากกระบวนการทำงาน มีผลต่อโครงสร้างจุลภาค และส่งผลต่ออายุการใช้งานของเทอร์โมทหรือไม่ ซึ่งผลการดำเนินงานจะกล่าวต่อไปในบทที่ 4

## วิธีการดำเนินงาน

1. จัดเตรียมเทอร์โมทที่ต้องการศึกษาโครงสร้างจุลภาค
2. นำเทอร์โมทไปตัด โดยเลือกเฉพาะบริเวณที่ต้องการศึกษา
3. นำชิ้นส่วนของเทอร์โมทที่ตัดมาไปหล่อในเรซิน (Resin) เพื่อเตรียมนำไปขัดด้วยเครื่องขัด เพื่อศึกษาโครงสร้างต่อไป
4. นำชิ้นส่วนของเทอร์โมทที่หล่อเรซินแล้วไปขัดด้วยเครื่องขัด โดยใช้ฐานงานขัดสำหรับกระดาษทราย แล้วทำการขัดชิ้นส่วนเทอร์โมทด้วยกระดาษทรายเบอร์ 80 แล้วค่อยๆ เพิ่มความละเอียดจนถึงเบอร์ 2400

5. เปลี่ยนฐานงานขัดของเครื่องขัดเป็นฐานแม่เหล็กสำหรับผ้าสักหลาด โดยใช้ผงเพชรในการขัดที่ความละเอียด 9  $\mu\text{m}$  6  $\mu\text{m}$  3  $\mu\text{m}$  และ 1  $\mu\text{m}$  ตามลำดับ
6. นำชิ้นส่วนเทอร์โมทที่ขัดแล้วไปกัดกรดเพื่อศึกษาโครงสร้างจุลภาค โดยใช้กรดที่มีส่วนผสมคือน้ำกลั่น 92 มล. กรดไนตริก 6 มล. กรดไฮโดรฟลูออริก 2 มล.
7. นำชิ้นส่วนเทอร์โมท ที่ทำการกัดกรดเรียบร้อยแล้ว ไปตรวจสอบเพื่อเก็บข้อมูลโครงสร้างด้วยเครื่อง Olympus STM7 Measuring Microscope
8. นำภาพโครงสร้างจุลภาคที่ได้มาเปรียบเทียบกัน

### 3.5.3.5 การคัดเลือกวัสดุใหม่มาใช้งาน

โลหะผสมไทเทเนียมนั้นเป็นที่รู้จักกันดีด้วยคุณสมบัติความแข็งแรงสูง น้ำหนักเบา และมีความต้านทานการกัดกร่อนที่ดีในการใช้งานที่อุณหภูมิสูง ดังแสดงในตารางที่ 3.2 อย่างไรก็ตามเมื่อโลหะผสมไทเทเนียมถูกใช้ในอุณหภูมิที่สูงกว่าอุณหภูมิการใช้งาน ดังในตัวอย่างของไทเทเนียมที่ใช้กับเทอร์โมทในกระบวนการผลิต ACF Bonding แสดงให้เห็นว่าโลหะผสมไทเทเนียมกลายมาเป็นโลหะที่เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันอย่างรวดเร็ว และสามารถที่จะสร้างชั้นออกไซด์ ซึ่งชั้นออกไซด์เหล่านั้นสามารถหลุดออกจากโลหะเนื้อพื้นได้อย่างง่ายดาย ในรูปแบบของการแตกหัก และการร่อนแตกแพร่ไปตามผิวหน้าของชิ้นงานในท้ายที่สุดส่งผลให้เกิดความเสียหายบริเวณผิวหน้าของชิ้นงาน

ดังนั้นปัจจัยในการเลือกวัสดุใหม่จึงมีดังนี้

1. วัสดุภายในตัวมันเองจะไม่สร้างชั้นออกไซด์ที่อุณหภูมิการทำงานจริง หรือมีการเกิดชั้นออกไซด์ที่ช้า ดังแสดงในรูปที่ 3.3
2. ชั้นออกไซด์ไม่เกิดการแตกหักง่ายจากบริเวณเนื้อพื้นวัสดุ หรือมีการป้องกันการหลุดร่อนได้ดี (Spalling Resistance)
3. มีความต้านทานไฟฟ้า (Electrical Resistance) ที่ใกล้เคียงกับโลหะผสมไทเทเนียมเดิม เพราะเทอร์โมทจะเปลี่ยนกระแสไฟฟ้าเป็นพลังงานความร้อน โดยการต้านการเคลื่อนที่ของกระแสไฟฟ้า วัสดุที่มีความต้านทานไฟฟ้าต่ำจะไม่สามารถเปลี่ยนกระแสไฟฟ้าเป็นพลังงานความร้อนได้อย่างรวดเร็ว และเพียงพอในกระบวนการ ACF Bonding
4. วัสดุนั้นสามารถต้านทานความคืบที่อุณหภูมิการใช้งานจริงได้ โดยทั่วไปแล้วความคืบจะเริ่มเกิดขึ้นที่ครึ่งหนึ่งของจุดหลอมเหลวของวัสดุ ดังนั้นเราควรพิจารณาวัสดุทางเลือกที่มีจุดหลอมเหลวของวัสดุอย่างน้อย 1,000  $^{\circ}\text{C}$  โดยประมาณ
5. วัสดุควรมีความเค้นวิกฤตที่ทำให้เกิดการครากที่ไม่ต่างจากโลหะผสมไทเทเนียมที่มากจนเกินไป

6. ราคาของวัสดุใหม่ไม่ควรจะต่างจากโลหะผสมไทเทเนียมมากจนเกินไปด้วยเช่นกัน กล่าวคือ ความสัมพันธ์ระหว่างราคาของวัสดุ โลหะผสม Ni และโลหะผสม Ti มีราคาที่สูงกว่า และวัสดุที่มีราคาแพงที่สุด คือวัสดุจำพวกทังสเตน (Tungsten, W)

ตารางที่ 3.2 โลหะผสมไทเทเนียมที่ถูกใช้สำหรับเป็นส่วนประกอบของคอมเพรสเซอร์ในเครื่องยนต์อากาศยาน-องค์ประกอบทางเคมี และอุณหภูมิใช้งานสูงสุด (Davis, 1997)

Grade designation	Nominal chemical composition	Maximum service temperature (°C)
Ti64	Ti-6Al-4V	315
Ti811	Ti-8Al-1Mo-1V	400
Alloy 685	Ti-6Al-5Zr-0.5Mo-0.25Si	520
Alloy 829	Ti-5.5Al-3.5Sn-3Zr-1Nb-0.25Mo-0.3Si	550
Alloy 834	Ti-5.8Al-4Sn-3.5Zr-0.7Nb-0.5Mo-0.35Si-0.06C	600
Ti1100	Ti-6Al-2.8Sn-4Zr-0.4Mo-0.4Si	600
Ti6242	Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo	
Ti6242S	Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo-0.2Si	540

ตารางที่ 3.3 ปริมาณการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันในโลหะผสมแต่ละชนิด ที่การใช้งานอุณหภูมิต่างๆ เป็นเวลา 1,008 ชั่วโมง (McGuire, 2008)

Alloy	Average Metal Affected in 1008 Hours**							
	1800°F (980°C)		2000°F (1095°C)		2100°F (1150°C)		2200°F (1205°C)	
	Mils	µm	Mils	µm	Mils	µm	Mils	µm
HAYNES* 230* alloy	0.7	18	1.3	33	3.4	86	7.9	201
HAYNES 188 alloy	0.6	15	1.3	33	8.0	203	>21.7	>551
INCONEL alloy 601	1.3	33	2.6	66	5.3	135	7.5***	191***
HASTELLOY* X alloy	0.9	23	2.7	69	5.8	147	>35.4	>889
Alloy 625	0.7	18	4.8	122	18.2	462	>47.6	>1209
Alloy 800H	1.8	46	7.4	188	8.9	226	13.6	289
Type 446 Stainless Steel	2.3	58	14.5	368	>21.7	>551	>23.3	>592
Type 316 Stainless Steel	14.3	363	>68.4	>1737	>105.0	>2667	>140.4	>3566

\*Flowing air at a velocity of 7.0 feet/minute (213.4 cm/minute) past the samples. Samples cycled to room temperature once-a-week.

\*\*Metal Loss + Average Internal Penetration

\*\*\*601 Sample exhibited very large internal voids.

### 3.5.3.6 การนำเทอร์โมทที่สร้างขึ้นจากวัสดุใหม่มาทดลองใช้งาน

หลังจากที่ทางคณะผู้จัดทำได้ทำการคัดเลือกกลุ่มวัสดุทั้งหมดแล้ว จึงได้มีการคัดเลือกวัสดุที่สนใจมาสองชนิด เนื่องจากในการทดลองนำวัสดุใหม่มาใช้งานนั้น มีค่าใช้จ่ายที่สูง และใช้เวลาในการขึ้นรูปเป็นเทอร์โมท รวมไปถึงเวลาที่ใช้ในการทดสอบความสามารถของเทอร์โมทต้นแบบจากวัสดุใหม่ที่นาน ซึ่งวัสดุที่ทางคณะผู้จัดทำเลือกนั้นคือ Nickel-Based Superalloy ทั้งนี้ทางคณะผู้จัดทำไม่สามารถบอกชนิดที่ทางบริษัทใช้งานจริงได้เนื่องจากถือเป็นความลับของบริษัท จึงขอกล่าวเป็น Nickel-Based Superalloy A และ Nickel-Based Superalloy B นับแต่บทนี้เป็นต้นไป โดยมีขั้นตอนดังนี้

1. สั่งซื้อวัสดุที่ต้องการ โดยการค้นหารายชื่อบริษัทที่จัดจำหน่ายผ่านทางเว็บไซต์
2. นำวัสดุที่ได้รับส่งไปยังโรงงาน เพื่อทำการขึ้นรูปเทอร์โมทต้นแบบจากวัสดุใหม่
3. ส่งเทอร์โมทต้นแบบไปทำการทดสอบที่ บริษัท เวสเทิร์น ดิจิตอล ประเทศไทย (จำกัด) ซึ่งแบ่งเป็น 2 ชนิด คือ Nickel-Based Superalloy A และ Nickel-Based Superalloy B
4. เก็บข้อมูลอายุการใช้งาน รวมไปถึงลักษณะทางกายภาพ เพื่อเปรียบเทียบระหว่างวัสดุเก่าและวัสดุใหม่

### 3.5.3.7 การวิเคราะห์อายุการใช้งานของเทอร์โมทด้วยวิธีการทางสถิติ

จากการที่ทางบริษัท ได้มีการทดลองเปลี่ยนการออกแบบเทอร์โมทใหม่อีกสองรูปแบบ ได้แก่ เทอร์โมทเพิ่มพื้นที่พิเศษ คือเทอร์โมทที่มีการเพิ่มพื้นที่พิเศษด้านละ 1 ฟัน และเทอร์โมทรุ่นเพิ่มความหนา คือเทอร์โมทที่มีการเพิ่มพื้นที่พิเศษด้านละ 1 ฟัน และทำให้มีความหนาของฐานฟันเพิ่มขึ้นจาก 0.6  $\mu\text{m}$  เป็น 0.75  $\mu\text{m}$  รวมทั้งสิ้นมีรูปแบบของ เทอร์โมท จำนวน 3 แบบ ได้แก่เทอร์โมทเก่า เทอร์โมทรุ่นเพิ่มพื้นที่พิเศษ และเทอร์โมทรุ่นเพิ่มความหนา

จากข้อมูลจากบันทึกการเปลี่ยนเทอร์โมท ที่มีการบันทึกค่าอายุการใช้งานของเทอร์โมทแต่ละชิ้นไว้ ในช่วงเดือนกันยายน พ.ศ. 2557 ถึงมกราคม พ.ศ. 2559 แบ่งเป็นเทอร์โมทเก่า จำนวน 85 ชิ้น เทอร์โมทรุ่นเพิ่มพื้นที่พิเศษ จำนวน 9 ชิ้น และเทอร์โมทรุ่นเพิ่มความหนา จำนวน 12 ชิ้น นำไปวิเคราะห์หาความแตกต่างของอายุการใช้งานเทอร์โมท ด้วยวิธีการทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% โดยใช้วิธี ANOVA ด้วยโปรแกรม Minitab

## 3.6 การตรวจสอบผลลัพธ์

หลังจากดำเนินการหาสาเหตุที่ทำให้เทอร์โมทเกิดการเสียหายก่อนอายุการใช้งาน และการนำเทอร์โมทต้นแบบชนิดใหม่มาใช้งานเพื่อเพิ่มอายุการใช้งานของเทอร์โมท ทางคณะผู้จัดทำได้ทำการเก็บข้อมูลทางการวิจัยเพื่อตรวจสอบ และเปรียบเทียบผลก่อนและหลังการปรับปรุง ซึ่งมีรายละเอียดการเก็บข้อมูลหลังการปรับปรุง ดังนี้

1. การตัดปัจจัยที่ไม่เกี่ยวข้องซึ่งทำให้เทอร์โมมดเกิดการเสียหายก่อนอายุการใช้งานจริง
2. การระบุสาเหตุที่ทำให้เทอร์โมมดเกิดการเสียหายก่อนอายุการใช้งานจริง
3. การเก็บข้อมูลอายุการใช้งาน และลักษณะทางกายภาพของเทอร์โมมดต้นแบบชนิดใหม่ ที่ทำจากวัสดุใหม่ทั้ง Nickel-Based Superalloy A และ Nickel-Based Superalloy B และทำการเปรียบเทียบ

### 3.7 การสรุปผลและจัดทำเป็นมาตรฐาน

ในขั้นตอนการสรุปผลการดำเนินงานนี้ เป็นการนำผลจากการวิจัยทางด้านวัสดุศาสตร์มาระบุสาเหตุที่แท้จริงที่ทำให้เทอร์โมมดเกิดการเสียหายก่อนอายุการใช้งาน และเป็นการนำผลจากการเก็บข้อมูลอายุการใช้งานของเทอร์โมมดวัสดุเก่า และวัสดุใหม่ มาเปรียบเทียบผลก่อนและหลังการปรับปรุง ซึ่งการปรับปรุงในครั้งนี้ได้เป็นไปตามวัตถุประสงค์ของปฏิญานิพนธ์ฉบับนี้ทุกประการ รวมทั้งได้มีการเสนอแนะจากคณะผู้จัดทำและกลุ่มนักวิจัย สำหรับใช้เป็นแนวทางในการปรับปรุงครั้งต่อไปในอนาคต เพื่อเป็นประโยชน์ต่อผู้ที่ต้องการศึกษาข้อมูลในปฏิญานิพนธ์ฉบับนี้ โดยในส่วนี้จะอยู่ในบทที่ 5 ซึ่งสามารถแบ่งได้เป็น 3 หัวข้อ ดังนี้

1. สรุปผลการดำเนินงาน
2. ปัญหาระหว่างการทำการศึกษา
3. ข้อเสนอแนะ

ทั้งนี้คณะผู้จัดทำและกลุ่มผู้วิจัยได้ทำปฏิญานิพนธ์นี้เพื่อเป็นทางเลือกให้กับทางบริษัท เวสเทิร์น ดิจิตอล (ประเทศไทย) จำกัด ซึ่งเป็นกรณีศึกษา รวมถึงบทความทางด้านวิชาการเพื่อต่อยอดในการพัฒนาโครงการต่อไปในอนาคต

## บทที่ 4

### ผลการดำเนินงาน

ในบทนี้จะกล่าวถึงผลการดำเนินงานที่คณะผู้จัดทำได้ทำตามวิธีการดำเนินงานจากบทที่แล้วโดยผลการดำเนินงานจะแบ่งออกเป็นสองส่วน คือช่วงที่ 1 และช่วงที่ 2 ผลการดำเนินงานอ้างอิงตามผลการทดลองที่ทางคณะผู้จัดทำและกลุ่มนักวิจัยได้ทำการทดลองจริง รวมถึงการศึกษาจากเอกสารทางวิชาการต่างๆ ดังกล่าวไว้ในบทที่ 2 เพื่อให้ผลการดำเนินงานเกิดความถูกต้องมากที่สุด ทุกขั้นตอนการดำเนินงานมีผู้เชี่ยวชาญคอยแนะนำอยู่เสมอ และได้มีการเปรียบเทียบผลก่อนและหลังการปรับปรุง หรือที่เรียกว่า การตรวจสอบผลลัพธ์ และนำไปสู่การจัดทำเป็นมาตรฐานต่อไป

#### 4.1 ผลการดำเนินงานที่ได้ปฏิบัติตามแนวทางที่วางไว้

จากบทที่แล้วในหัวข้อที่ 3.5 ซึ่งจะกล่าวถึงวิธีดำเนินงานในปริศยานิพนธ์ฉบับนี้ ทั้งนี้ทางผู้จัดทำได้ดำเนินงานตามขั้นตอนการดำเนินงานที่ได้กล่าวไว้ จากการเก็บรวบรวมข้อมูลที่ได้จากการวิจัย และการดำเนินงาน ทางผู้จัดทำสามารถแยกผลการดำเนินงานแบ่งออกได้เป็น 2 หัวข้อ ดังต่อไปนี้

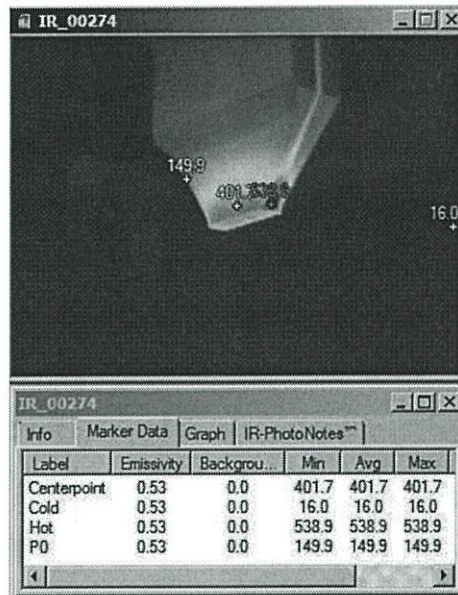
##### 4.1.1 การระบุสาเหตุที่แท้จริงที่ทำให้เทอร์โมมิตเกิดการเสียหาย

ทางผู้จัดทำได้ทำการแบ่งออกเป็น 2 หัวข้อดังนี้

###### 4.1.1.1 การศึกษาอุณหภูมิผิวพื้นของเทอร์โมมิต

###### 1. การศึกษาโดยใช้เครื่องวัดอุณหภูมิแบบแสดงภาพ (Thermal Imager) ในการวัดอุณหภูมิ

จากการศึกษาโดยใช้เครื่องวัดอุณหภูมิแบบแสดงภาพ พบว่าอุณหภูมิที่ผิวพื้นของเทอร์โมมิตมีการกระจายตัวที่เท่าๆ กันในทุกๆ ส่วน แต่จากข้อจำกัดของการใช้เครื่องวัดอุณหภูมิแบบแสดงภาพทำให้ไม่สามารถอ่านค่าอุณหภูมิที่แน่นอนของเทอร์โมมิตได้ จึงใช้ผลการศึกษาเป็นเพียงข้อมูลอ้างอิงว่าการกระจายตัวของอุณหภูมิบริเวณผิวพื้นของเทอร์โมมิตมีความเท่าๆ กันเท่านั้น

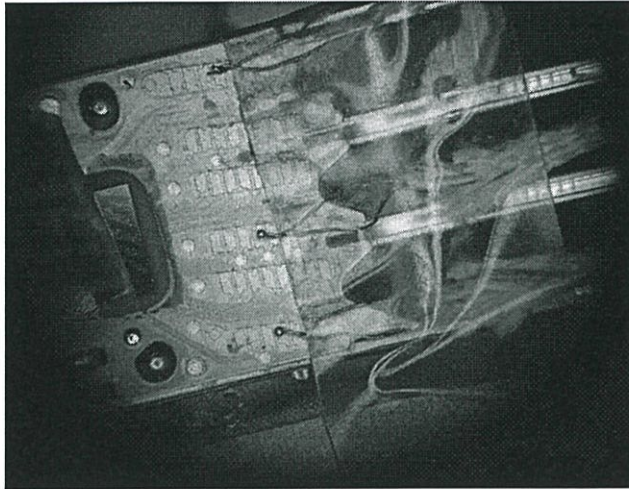


รูปที่ 4.1 ตัวอย่างข้อมูลอุณหภูมิจากเครื่องวัดอุณหภูมิแบบแสดงภาพ

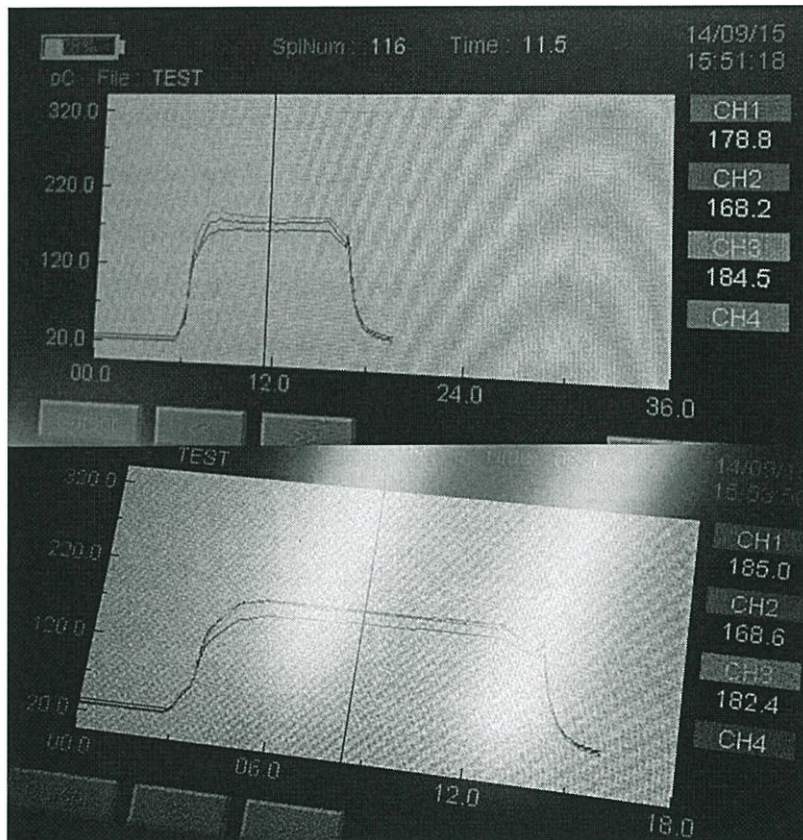
## 2. การศึกษาโดยใช้เทอร์โมคัมป์เปิลในการวัดอุณหภูมิ

### 2.1 วัดอุณหภูมิผิวพื้นของเทอร์โมตโดยการติดตั้งเทอร์โมคัมป์เปิล ณ จุดที่จะเกิดการสัมผัสระหว่างเทอร์โมตกับชิ้นงานที่จะทำ ACF Bonding

จากการศึกษาด้วยเทอร์โมคัมป์เปิล ยี่ห้อ Omega รุ่น GG-K-30 จำนวน 3 ตัวที่เชื่อมต่อเข้ากับเครื่องเก็บข้อมูลอุณหภูมิ ยี่ห้อ Cherusal รุ่น TM-11 ในการวัดอุณหภูมิที่ผิวพื้นของเทอร์โมต ดังรูปที่ 4.2 โดยผลที่นำมาแสดงเป็นผลการเก็บข้อมูลจำนวน 2 ครั้ง จากการทดลองหลายๆ ครั้ง ได้ผลการวัดอุณหภูมิจากเครื่องเก็บข้อมูลอุณหภูมิดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.2 ลักษณะการติดตั้งเทอร์โมคัปเปิลเข้ากับชิ้นงาน ณ จุดที่จะเกิดการสัมผัสกับเทอร์โมท



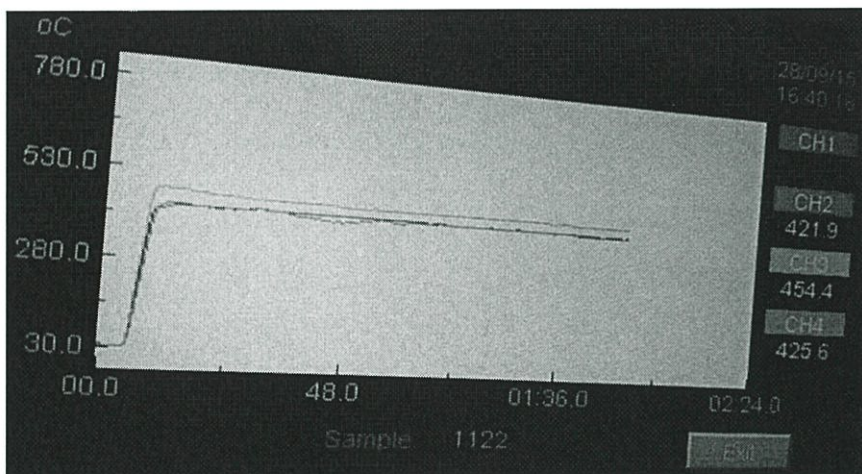
รูปที่ 4.3 ผลการวัดอุณหภูมิ (°C) จากเครื่องเก็บข้อมูลอุณหภูมิ โดยกราฟแกน X แสดงระยะเวลา แกน Y แสดงอุณหภูมิที่วัดได้ ตัวเลขในช่อง CH1 CH2 และ CH3 คือค่าอุณหภูมิที่วัดได้จากเทอร์โมคัปเปิล ที่ติดตั้งอยู่ ณ ตำแหน่งการกดของพื้นที่ 0 2 และ 5 ตามลำดับ

จากผลการทดลองพบว่าอุณหภูมิของแต่ละพินมีความใกล้เคียงกัน แต่ในการทดลองครั้งอื่นๆที่ไม่ได้นำผลการทดลองมาแสดง พบว่าอุณหภูมิที่วัดได้มีค่าระหว่าง 140-200 °C ซึ่งผู้ทำการทดลองไม่สามารถหาวิธีการวัดเพื่อให้อุณหภูมิที่วัดได้ในแต่ละครั้งของการทดลองมีความใกล้เคียงกันได้ จากการศึกษาผู้จัดทำสามารถสรุปจากหัวข้อนี้ได้ว่าอุณหภูมิของแต่ละพินของการทดลองในแต่ละครั้ง มีอุณหภูมิที่ใกล้เคียงกัน

2.2 วัดอุณหภูมิผิวพินของเทอร์โมคัปเปิลโดยการติดตั้งเทอร์โมคัปเปิล ที่ผิวพินของเทอร์โมคัปเปิลโดยตรง นำเทอร์โมคัปเปิล ยี่ห้อ Omega รุ่น GG-K-30 จำนวน 3 ตัว ชุดเดิมไปติดตั้งที่บริเวณผิวพินที่ 0 2 และ 5 ของเทอร์โมคัปเปิล ดังรูปที่ 4.4 และได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.4 ตำแหน่งการติดตั้งเทอร์โมคัปเปิลเข้ากับเทอร์โมคัปเปิล



รูปที่ 4.5 ผลการวัดอุณหภูมิจากเครื่องเก็บข้อมูลอุณหภูมิ โดยกราฟแกน X แสดงระยะเวลา แกน Y แสดงอุณหภูมิที่วัดได้ตัวเลขในช่อง CH2 CH3 และ CH4 คือค่าอุณหภูมิที่วัดได้จากเทอร์โมคัปเปิลที่ติดอยู่ ณ ตำแหน่งการกดของพินที่ 0 2 และ 5 ตามลำดับ

จากผลการทดลองพบว่าอุณหภูมิของแต่ละพื้นมีความใกล้เคียงกัน และมีความใกล้เคียงกับอุณหภูมิที่วัดได้จากเทอร์โมคัปเปิล ที่ติดอยู่กับเทอร์โมมิตมาจากโรงงานผู้ผลิต ซึ่งแสดงค่าไว้ในโปรแกรมที่บันทึกค่าการทำงานไว้ อยู่ที่ 438.5°C แต่ไม่สามารถหาวิธีการวัดเพื่อให้อุณหภูมิที่วัดได้ในแต่ละครั้งของการทดลองมีความใกล้เคียงกันได้ จากการศึกษาผู้จัดทำสามารถสรุปจากหัวข้อนี้ได้ว่าอุณหภูมิของแต่ละพื้นของการทดลองในแต่ละครั้ง มีอุณหภูมิที่ใกล้เคียงกัน

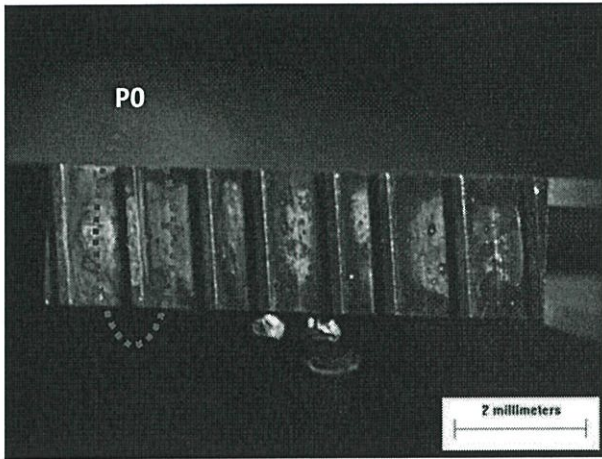
#### 4.1.1.2 การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของวัสดุ

ในหัวข้อการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของวัสดุนี้ ผู้จัดทำได้แสดงผลการทดลองทั้งหมดที่ได้ทำการทดลองจริง โดยผู้จัดทำได้แบ่งผลการทดลองในหัวข้อนี้ออกเป็น 3 หัวข้อย่อย โดยแต่ละหัวข้อมีความสำคัญอย่างยิ่งในการที่จะหาต้นตอความเสียหายของเทอร์โมมิต โดยใช้วิธีการและเครื่องมือที่แตกต่างกัน กระบวนการวิเคราะห์และผลลัพธ์ที่ได้ เป็นดังนี้

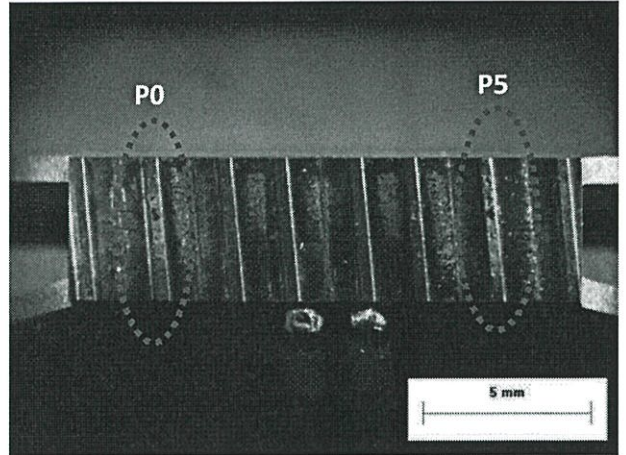
##### 1. การทดสอบความเสียหายของพื้นผิวพื้น

เทอร์โมมิตที่เกิดการเสียหายแล้วถูกนำมาตรวจสอบผ่านการส่องกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง โดยทางคณะผู้จัดทำได้กำหนดหมายเลขของเทอร์โมมิตที่เสียหายออกเป็นหมายเลข 1 – 5 (อายุการใช้งานประมาณ 2,500 5,000 10,000 15,000 และ 30,000 รอบ) และหมายเลข 6 คือ เทอร์โมมิตที่ยังไม่ผ่านการใช้งาน

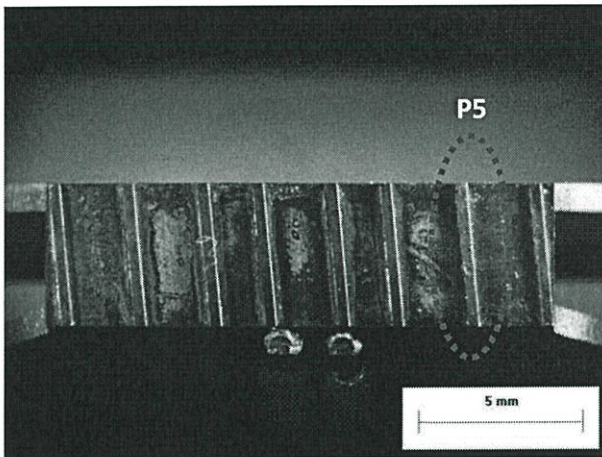
การทดสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์นั้นแสดงให้เห็นถึงการเสียหายที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวพื้นหลายตำแหน่ง ดังแสดงใน รูปที่ 4.6 ความเสียหายบริเวณผิวของเทอร์โมมิตนั้นถูกปกคลุมไปด้วยเกล็ดสีดำ (ชั้นออกไซด์) นอกเหนือจากนั้นยังมีการพองขึ้นเนื่องจากการก่อตัวของเกล็ดออกไซด์ ซึ่งสามารถสังเกตเห็นได้เช่นเดียวกับบริเวณใกล้ๆ กับร่องรอยความเสียหายของพื้นผิว



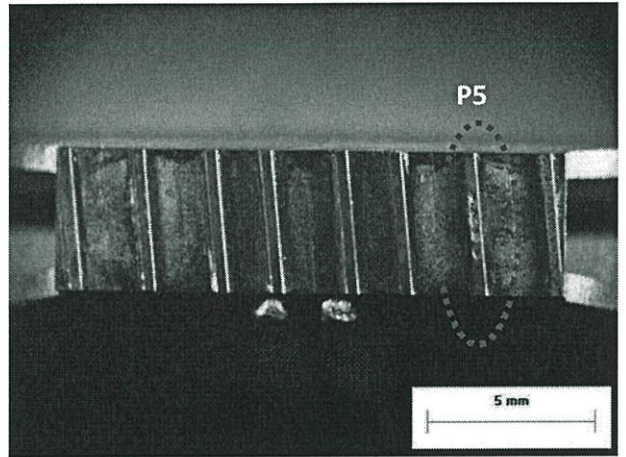
(1) เสียหายที่พื้นที่ 1 (P0) (อายุการใช้งาน 2,500 รอบ)



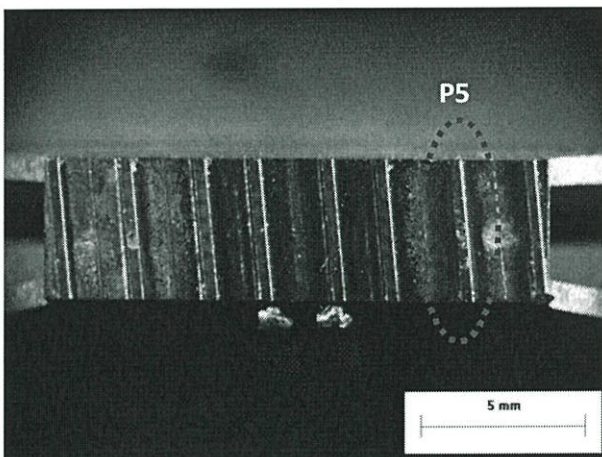
(2) เสียหายที่พื้นที่ 1 (P0) และพื้นที่ 6 (P5) (อายุการใช้งาน 5,000 รอบ)



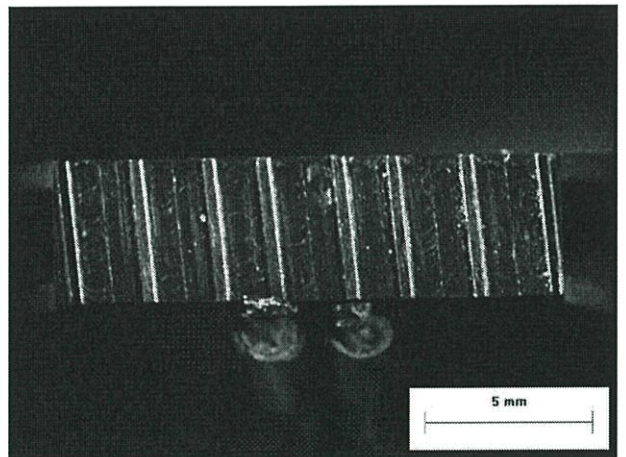
(3) เสียหายที่พื้นที่ 6 (P5) (อายุการใช้งาน 10,000 รอบ)



(4) เสียหายที่พื้นที่ 6 (P5) (อายุการใช้งาน 15,000 รอบ)



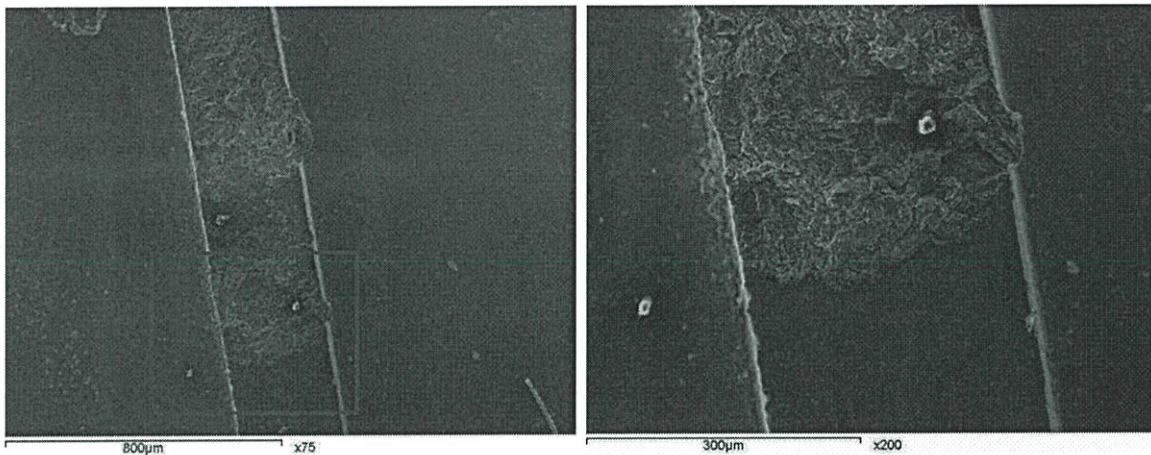
(5) เสียหายที่พื้นที่ 6 (P5) (อายุการใช้งาน 30,000 รอบ)



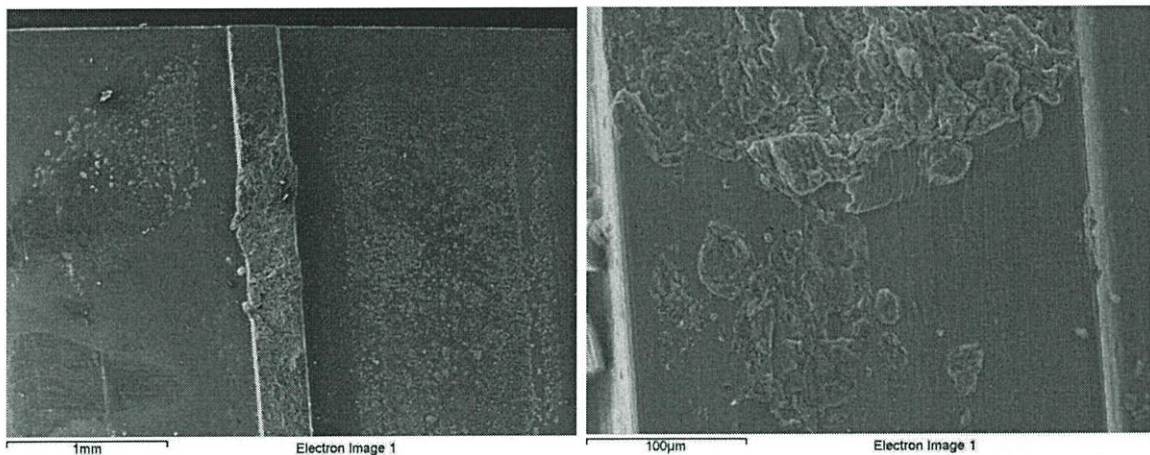
(6) เทอร์โมดที่ยังไม่ผ่านการใช้งาน

รูปที่ 4.6 ลักษณะความเสียหายบริเวณผิวพื้น ผ่านกล้องจุลทรรศน์แบบแสงของตัวอย่างทั้ง 6 ชิ้น

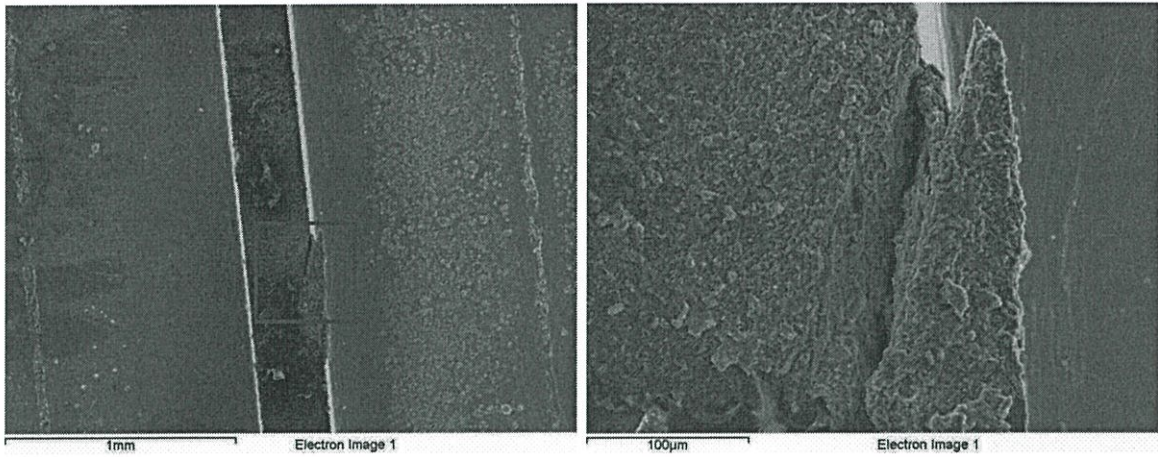
การตรวจสอบการเสียหายด้วยการขยายภาพกำลังสูงโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน (SEM) แสดงให้เห็นว่าการเสียหายมีจุดเริ่มต้นเกิดขึ้นบริเวณผิวพื้นของเทอร์โมต ดังรูปที่ 4.7 ถึงรูปที่ 4.11 รูปภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนกำลังขยายสูง แสดงให้เห็นถึงการสูญเสียเนื้อโลหะบริเวณผิวพื้นของเทอร์โมต และพบการแตกร้าวด้วยเช่นกัน กล้องจุลทรรศน์แบบคอนโฟคอล (Confocal Microscope) แสดงเกล็ดออกไซด์ที่ใกล้ๆ กับบริเวณที่สูญเสียเนื้อโลหะ ดังรูปที่ 4.12



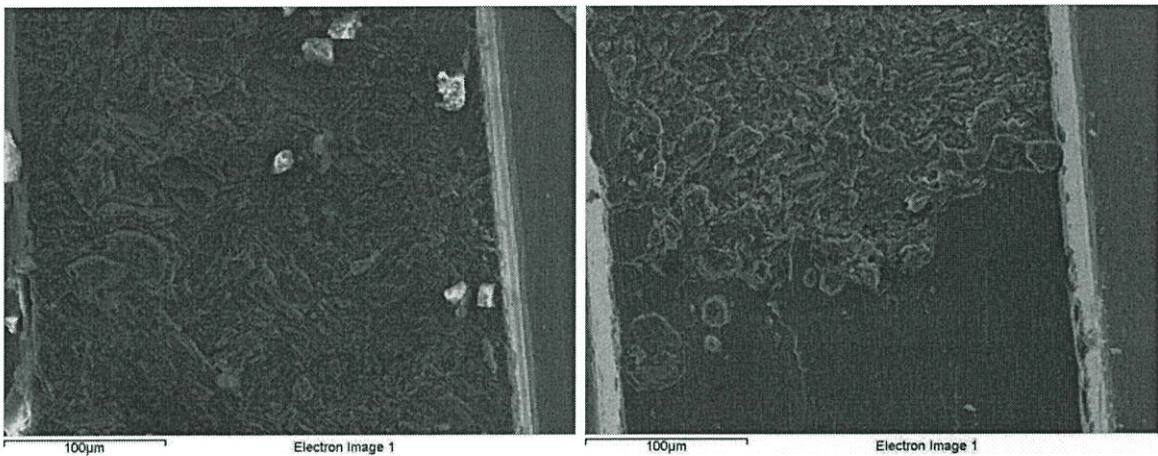
รูปที่ 4.7 (a-b) รูปจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกนแสดงเกล็ดออกไซด์ และการสูญเสียเนื้อวัสดุ (b) ลักษณะการขยายของรอยแตก บนตัวอย่างหมายเลข 1



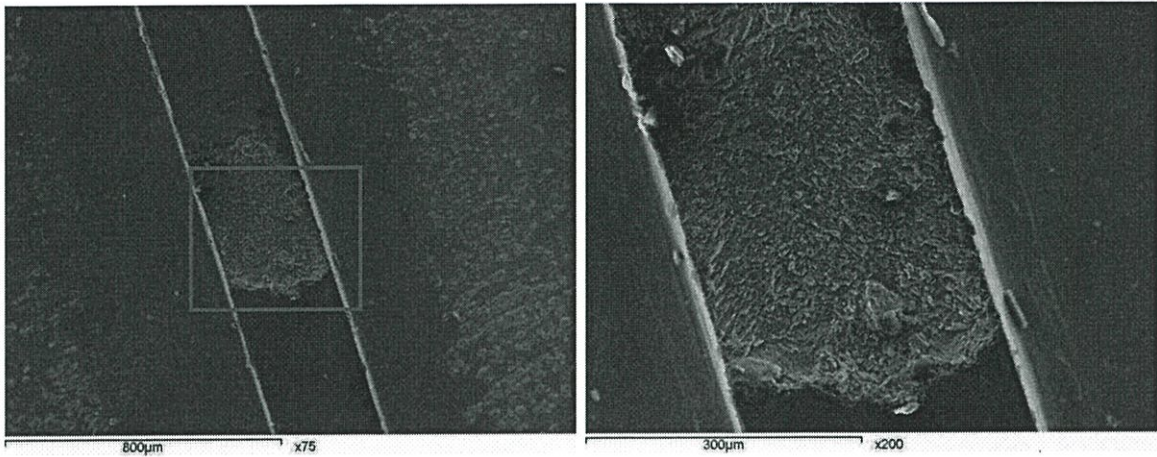
รูปที่ 4.8 (a-b) รูปจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกนแสดงเกล็ดออกไซด์ และการสูญเสียเนื้อวัสดุ (b) ลักษณะการขยายของรอยแตก บนตัวอย่างหมายเลข 2



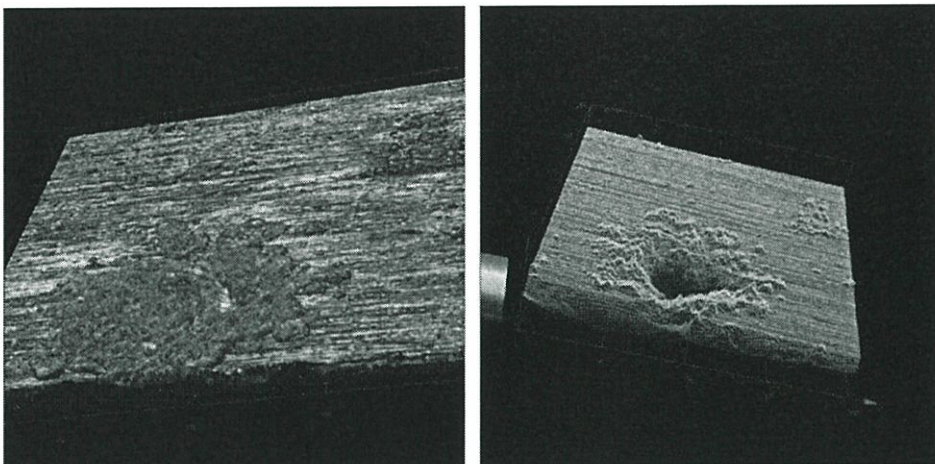
รูปที่ 4.9 (a-b) รูปจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน แสดงเกล็ดออกไซด์และการสูญเสียเนื้อวัสดุ (b) ลักษณะการขยายของรอยแตก บนตัวอย่างหมายเลข 3



รูปที่ 4.10 (a-b) รูปจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน แสดงเกล็ดออกไซด์และการสูญเสียเนื้อวัสดุ (b) ลักษณะการขยายของรอยแตก บนตัวอย่างหมายเลข 4



รูปที่ 4.11 (a-b) รูปจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน แสดงเกล็ดออกไซด์และการสูญเสียเนื้อวัสดุ (b) ลักษณะการขยายของรอยแตก บนตัวอย่างหมายเลข 5

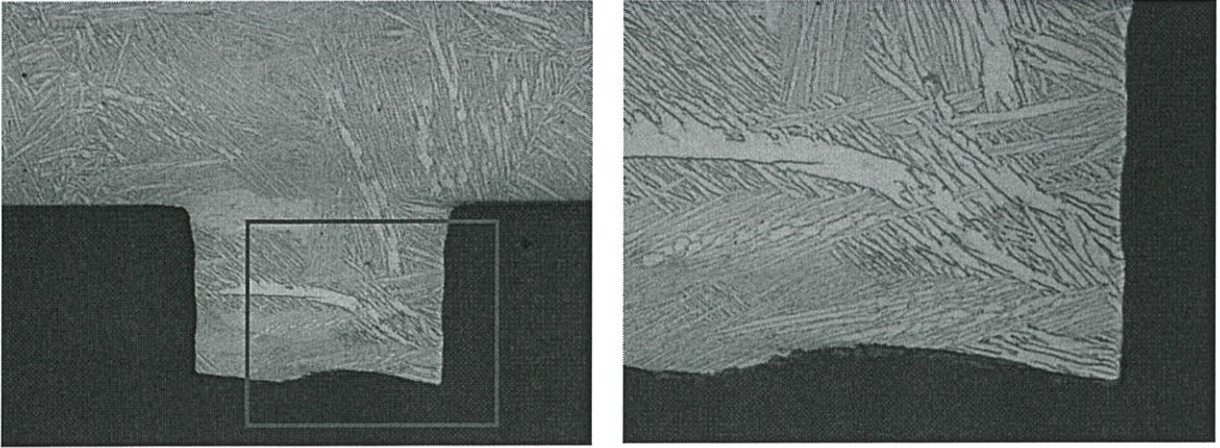


รูปที่ 4.12 ลักษณะการสูญเสียเนื้อโลหะบริเวณบนผิวพื้นของเทอร์โมด

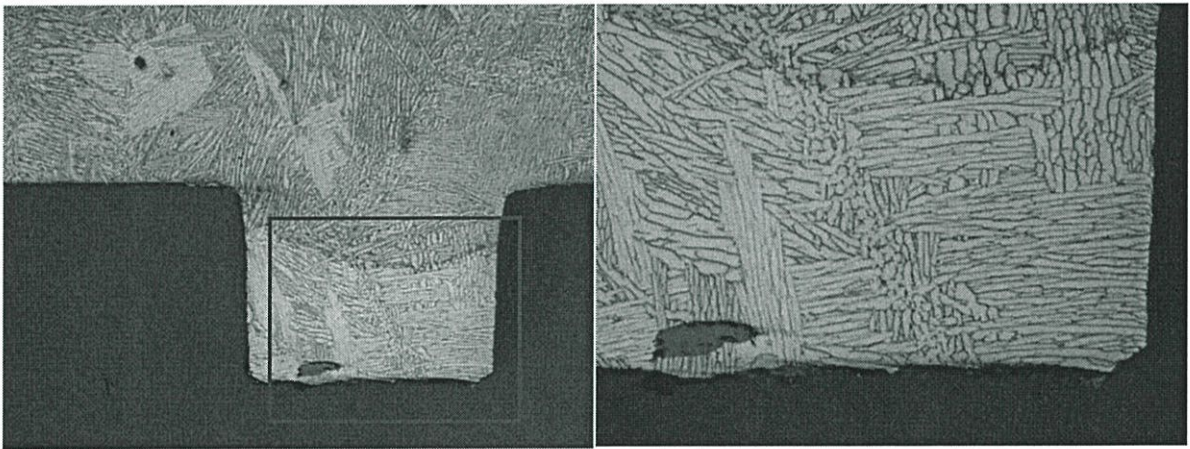
## 2. การวิเคราะห์รอยตัดแนวขวางและโครงสร้างจุลภาค

โครงสร้างของเทอร์โมดที่เสียหายในรูปที่ 4.13 ถึงรูปที่ 4.17 แสดงให้เห็นว่าพื้นผิวของเทอร์โมดนั้นถูกปกคลุมไปด้วยเกล็ดออกไซด์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งตรงบริเวณที่เกิดการสูญเสียเนื้อของโลหะ โดยรูปแบบการเสียหายหลักของเทอร์โมดที่เสียหายนั้น สรุปได้ว่าเป็นการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันบนผิวชิ้นงาน

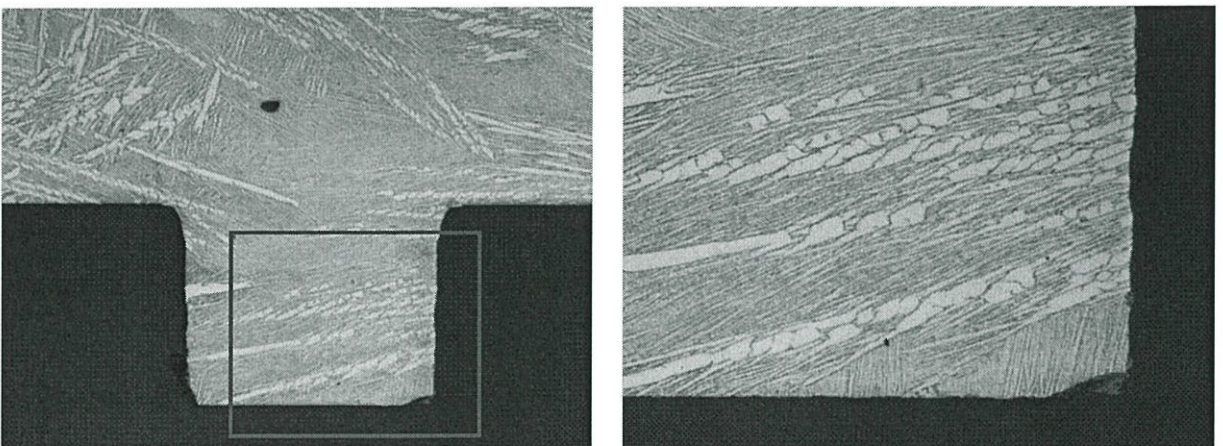
จากการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของเทอร์โมดที่เสียหายและเทอร์โมดใหม่ดังรูปที่ 4.18 โครงสร้างจุลภาคของเทอร์โมดประกอบด้วยโครงสร้างแอลฟาแบบ Widmanstätten ในโลหะเนื้อพื้น



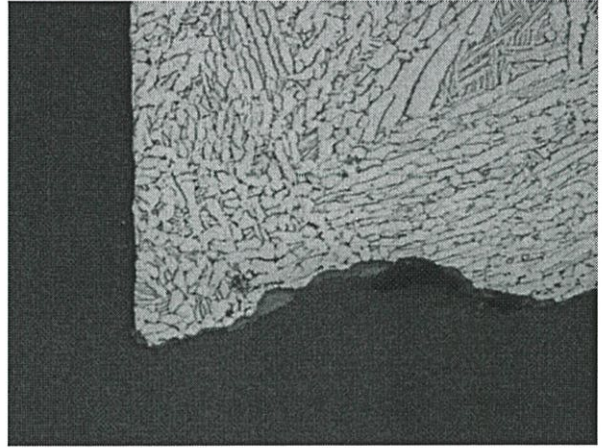
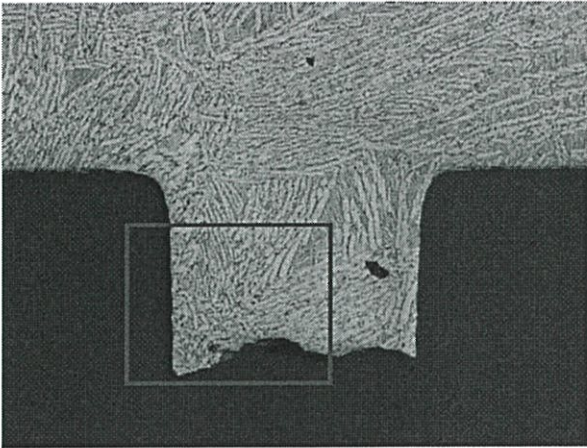
รูปที่ 4.13 โครงสร้างจุลภาคของ ตัวอย่างหมายเลข 1



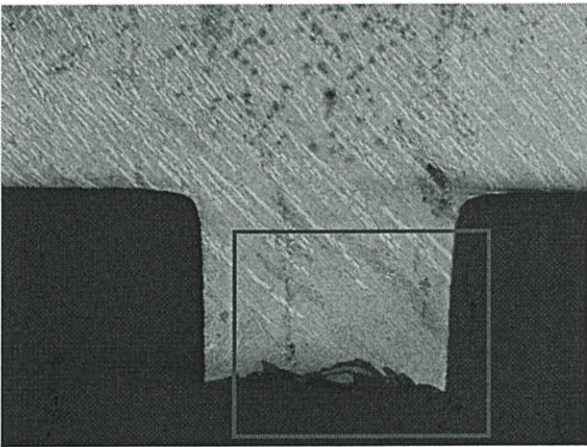
รูปที่ 4.14 โครงสร้างจุลภาคของ ตัวอย่างหมายเลข 2



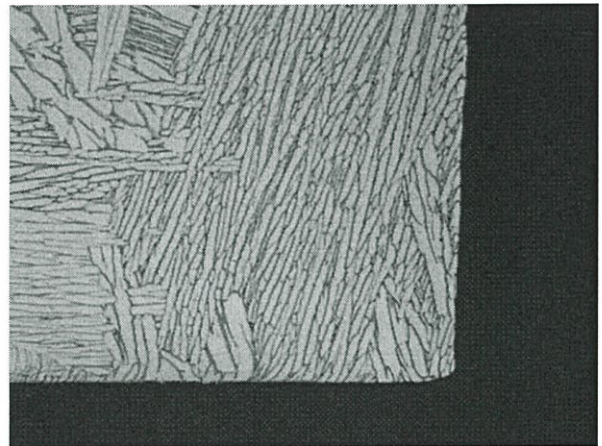
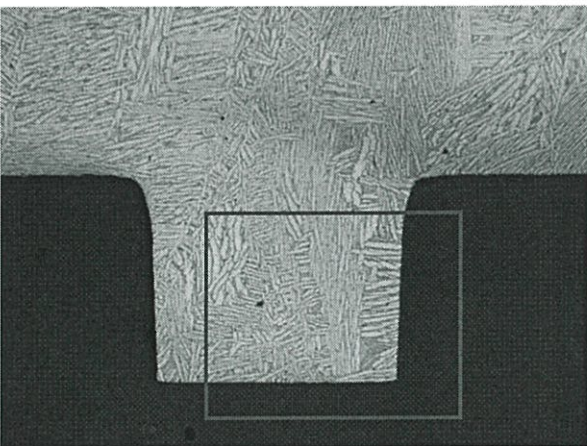
รูปที่ 4.15 โครงสร้างจุลภาคของ ตัวอย่างหมายเลข 3



รูปที่ 4.16 โครงสร้างจุลภาคของ ตัวอย่างหมายเลข 4



รูปที่ 4.17 โครงสร้างจุลภาคของ ตัวอย่างหมายเลข 5

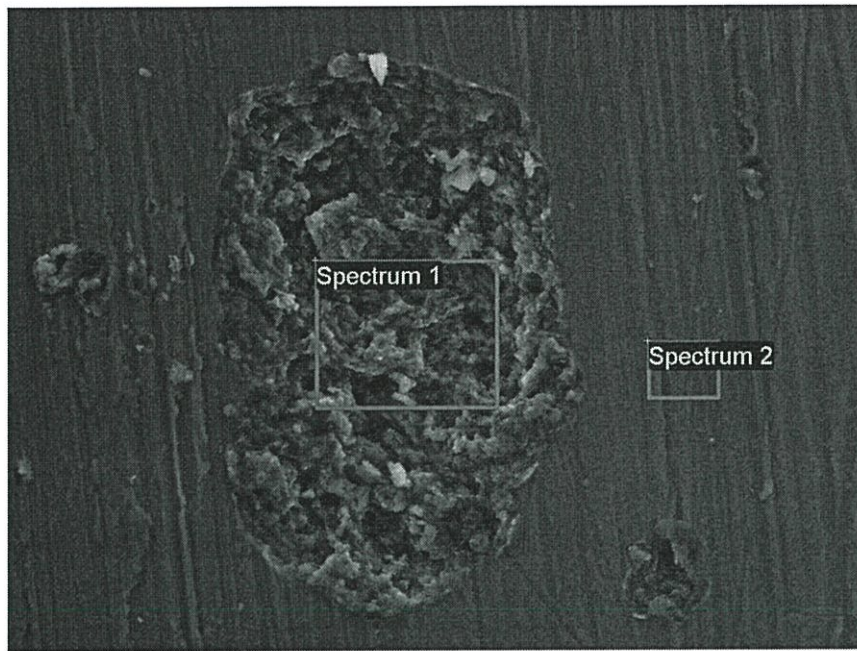


รูปที่ 4.18 โครงสร้างจุลภาคของ ตัวอย่างหมายเลข 6 (เทอร์โมดที่ยังไม่ผ่านการใช้งาน)

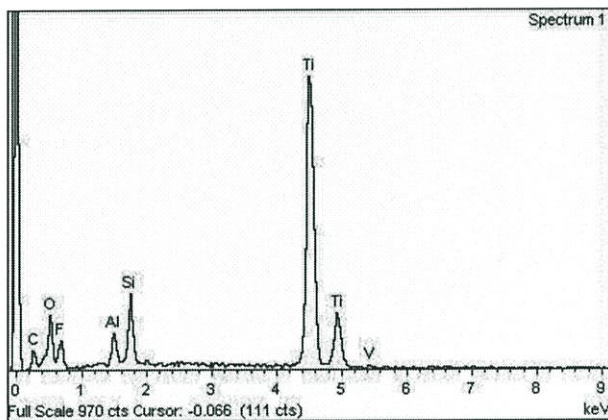
### 3. การวิเคราะห์ทางเคมี

#### 3.1 การวิเคราะห์ทางเคมีโดยการใช้เทคนิคการศึกษาสเปกตรัมแบบรับการกระจายพลังงานของรังสีเอ็กซ์ (Energy-Dispersive X-Ray Spectroscopy, EDS)

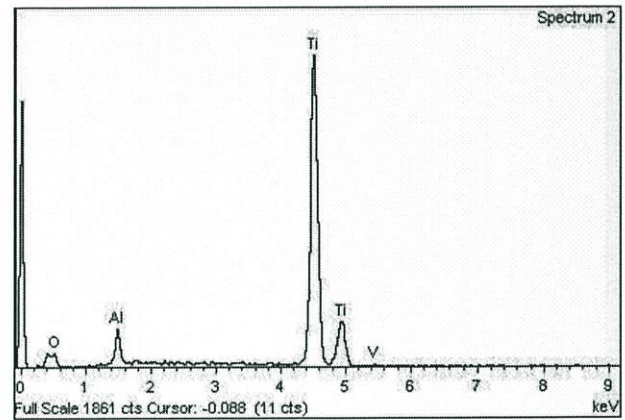
การวิเคราะห์ทางเคมีบริเวณพื้นผิวรอยแตกนั้น ทางคณะผู้จัดทำได้ใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน (SEM) ร่วมกับเทคนิคการศึกษาสเปกตรัมแบบรับการกระจายพลังงานของรังสีเอ็กซ์ (EDS) โดยการฉายรังสีเอ็กซ์ไปในบริเวณที่เสียหายเหล่านั้น ภาพโครงสร้างจุลภาค รูปที่ 4.19 และ รูปที่ 4.20 แสดงให้เห็นการสะสมความเสียหาย และร่องรอยความเสียหายจากการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันบนผิวพื้นของเทอร์โมคอตของตัวอย่างหมายเลข 1 และหมายเลข 5 ผลลัพธ์ที่ได้แสดงถึงธาตุองค์ประกอบต่างๆ ได้แก่ ซิลิคอน (Si) คาร์บอน (C) ฟลูออรีน (F) และพบธาตุออกซิเจน (O) ในปริมาณสูง ถูกพบใกล้เคียงกับบริเวณที่สูญเสียเนื้อโลหะ (บริเวณการฉายรังสีที่ 1 (Spectrum 1)) ในขณะที่บริเวณอื่นๆ ของเทอร์โมคอตประกอบด้วยธาตุไทเทเนียม (Ti) อลูมิเนียม (Al) วานาเดียม (V) และพบธาตุออกซิเจน (O) เล็กน้อย



Electron Image 1  
 ภาพจาก SEM แสดงตำแหน่งของการฉาย EDS

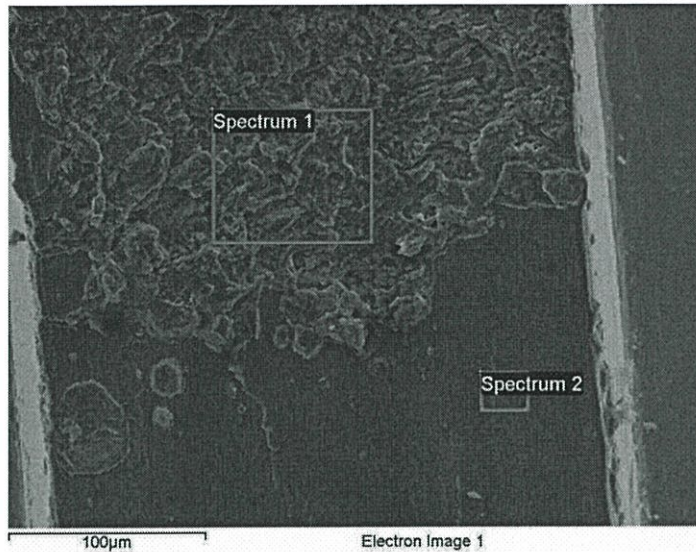


ภาพจาก EDS แสดงองค์ประกอบธาตุต่างๆ  
 บริเวณการฉายรังสีที่ 1

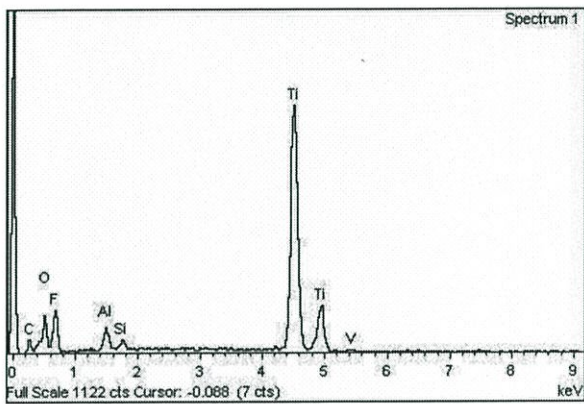


ภาพจาก EDS แสดงองค์ประกอบธาตุต่างๆ  
 บริเวณการฉายรังสีที่ 2 (ผิวโลหะที่ปกติ)

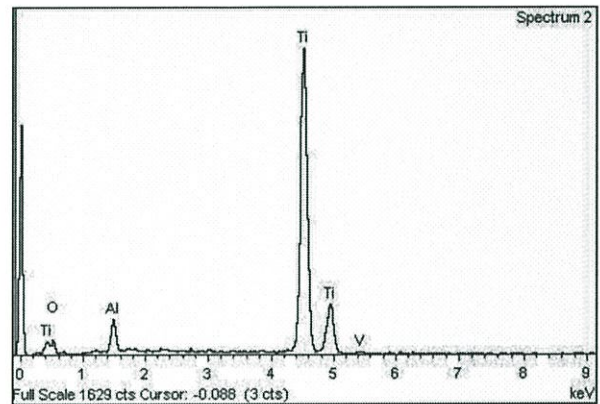
รูปที่ 4.19 ผลลัพธ์ของการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี และการกร่อนบนผิวที่มีการเสียหาย  
 ของตัวอย่างหมายเลข 1



ภาพจาก SEM แสดงตำแหน่งของการฉาย EDS



ภาพจาก EDS แสดงองค์ประกอบธาตุต่างๆ  
บริเวณการฉายรังสีที่ 1

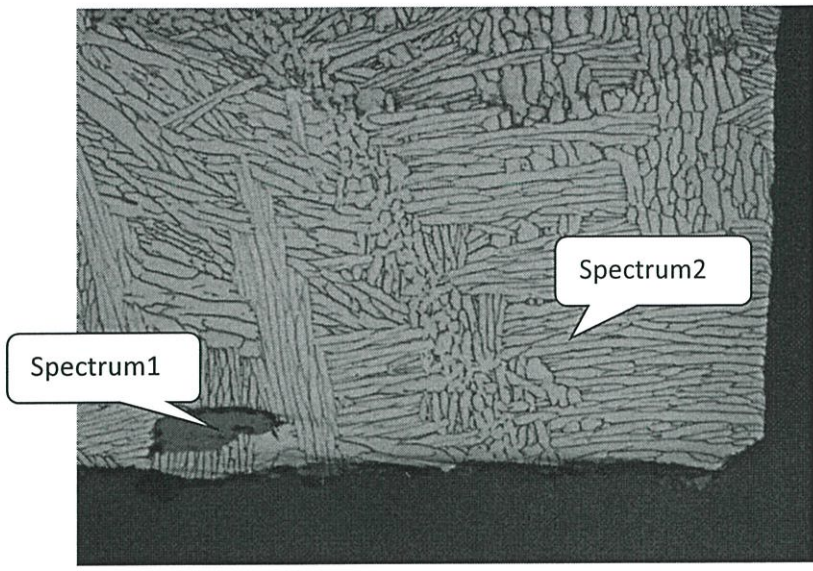


ภาพจาก EDS แสดงองค์ประกอบธาตุต่างๆ  
บริเวณการฉายรังสีที่ 2 (ผิวโลหะที่ปกติ)

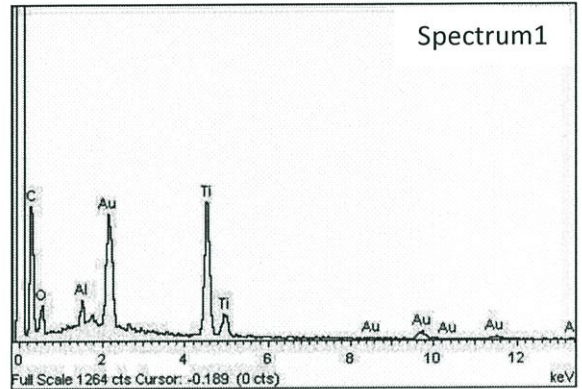
รูปที่ 4.20 ผลลัพธ์ของการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีบริเวณพื้นที่ใกล้กับการเสียหาย และพื้นที่ที่ไม่ได้รับความเสียหายของตัวอย่างหมายเลข 5

### 3.2 การวิเคราะห์ทางเคมีโดยการยิง EDS บนพื้นที่รอยตัดของเทอร์โมมด

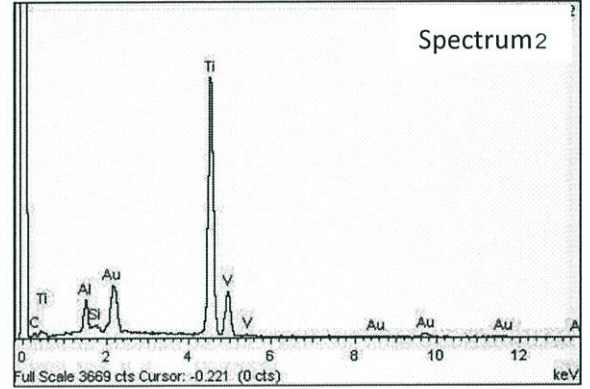
องค์ประกอบทางเคมีในพื้นที่แนวตดเนื้อพื้นพื้นของเทอร์โมมด (บริเวณการฉายรังสีที่ 1 ของรูปที่ 4.21 และรูปที่ 4.22) แสดงให้เห็นสารประกอบแปลกปลอมที่พบในเทอร์โมมดใกล้กับบริเวณรอยแตกหัก



ภาพจาก SEM แสดงตำแหน่งของการฉาย EDS

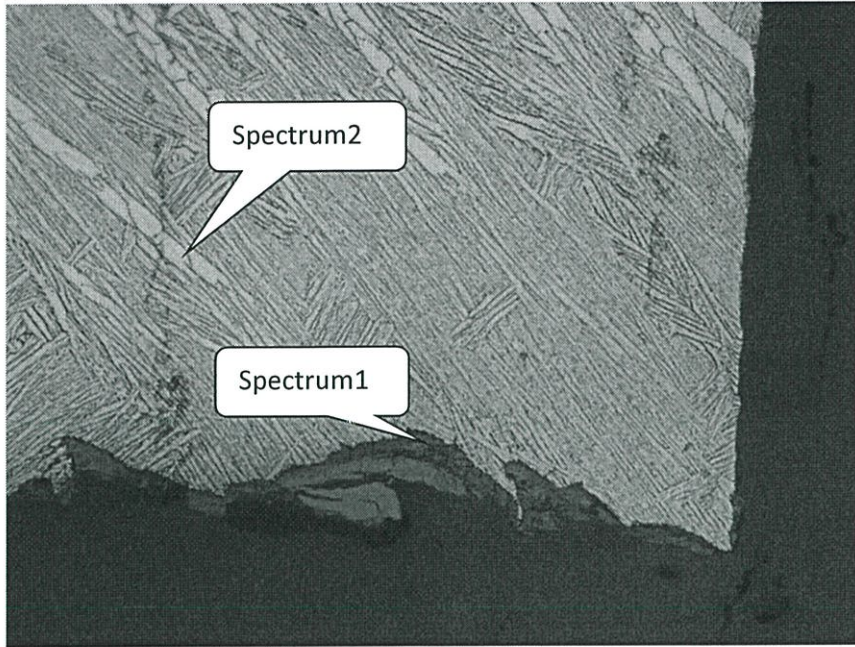


ภาพจาก EDS แสดงองค์ประกอบธาตุต่างๆ บริเวณการฉายรังสีที่ 1

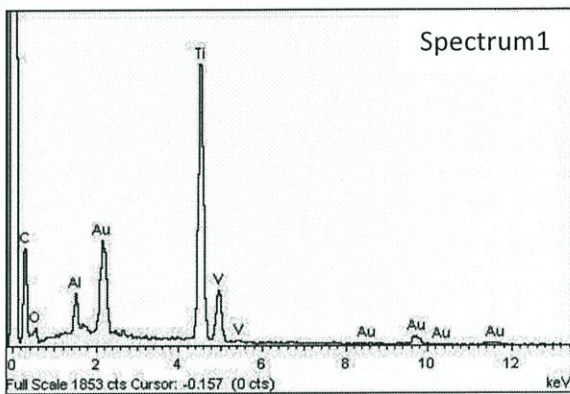


ภาพจาก EDS แสดงองค์ประกอบธาตุต่างๆ บริเวณการฉายรังสีที่ 2 (ผิวโลหะที่ปกติ)

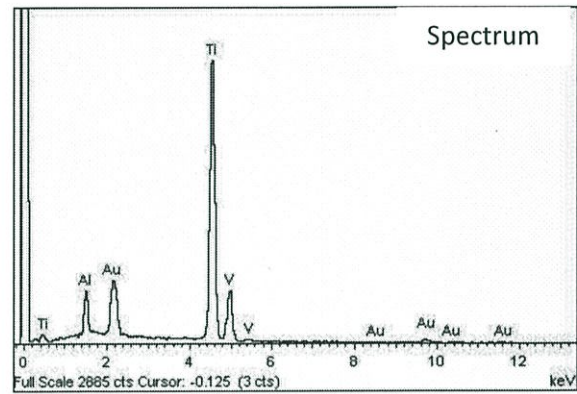
รูปที่ 4.21 ผลลัพธ์ของการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีบริเวณพื้นที่ใกล้กับการเสียหาย และพื้นที่ที่ไม่ได้รับความเสียหาย



ภาพจาก SEM แสดงตำแหน่งของการฉาย EDS



ภาพจาก EDS แสดงองค์ประกอบธาตุต่างๆ  
บริเวณการฉายรังสีที่ 1



ภาพจาก EDS แสดงองค์ประกอบธาตุต่างๆ  
บริเวณการฉายรังสีที่ 2 (ผิวโลหะที่ปกติ)

รูปที่ 4.22 ผลลัพธ์ของการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีบริเวณพื้นที่ใกล้กับการเสียหาย และพื้นที่ที่ไม่ได้รับความเสียหาย

#### 4.1.2 การเพิ่มอายุการใช้งานของเทอร์โมด

##### 4.1.2.1 การคัดเลือกวัสดุใหม่มาใช้งาน

จากหัวข้อที่ 3.5.3.5 ได้แสดงถึงวิธีการที่ทางคณะผู้จัดทำได้เลือกใช้เพื่อนำมาเป็นตัวเลือกในการคัดเลือกวัสดุใหม่มาใช้งาน จากการใช้วิธีการดังกล่าวทั้งการสืบค้นข้อมูล การใช้โปรแกรมช่วยในการคัดเลือก หรือจะเป็นการปรึกษาจากผู้เชี่ยวชาญ ทำให้ผู้จัดทำโครงการได้จำแนกวัสดุใหม่ที่เหมาะสมออกมาเป็น 3 กลุ่มใหญ่ๆ ดังนี้

- Stainless Steel ได้แก่ 310, 330, 442, 446
- Titanium ได้แก่ IMI 834, Ti 1100, Ti 6242, Ti 6246, Ti 17, IMI 829
- Superalloy ได้แก่ Inconel 600, Inconel 617, Inconel 625, Incoloy 800

ซึ่งจากการวิเคราะห์ของกลุ่มนักวิจัยและผู้จัดทำโดยอ้างอิงจากข้อมูลที่มีดังรูปภาพที่ 4.23 และ 4.24 ได้ข้อสรุปมาว่าวัสดุที่น่าสนใจที่สุดคือกลุ่ม Superalloy ทางคณะผู้จัดทำจึงได้เลือกใช้วัสดุในกลุ่มนี้ และขอใช้ชื่ออย่างเป็นทางการเป็น Nickel-Based Superalloy A และ Nickel-Based Superalloy B

ตารางที่ 4.1 ปริมาณการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันในโลหะผสมแต่ละชนิด ที่การใช้งานอุณหภูมิต่างๆ เป็นเวลา 1,008 ชั่วโมง (McGuire, 2008)

Alloy	Average Metal Affected in 1008 Hours**							
	1800 °F (980 °C)		2000 °F (1095 °C)		2100 °F (1150 °C)		2200 °F (1205 °C)	
	Mils	µm	Mils	µm	Mils	µm	Mils	µm
HA YNES* 230* alloy	0.7	18	1.3	33	3.4	86	7.9	201
HA YNES 188 alloy	0.6	15	1.3	33	8.0	203	>21.7	>551
INCONEL alloy 601	1.3	33	2.6	66	5.3	135	7.5***	191***
HASTELOY* X alloy	0.9	23	2.7	69	5.8	147	>35.4	>889
Alloy 625	0.7	18	4.8	122	18.2	462	>47.6	>1209
Alloy 800H	1.8	46	7.4	188	8.9	226	13.6	289
Type 446 Stainless Steel	2.3	58	14.5	368	>21.7	>551	>23.3	>592
Type 316 Stainless Steel	14.3	363	>68.4	>1737	>105.0	>2667	>140.4	>3566

\*Flowing air at a velocity of 7.0 feet/minute (213.4 cm/minute) past the samples.

Samples cycled to room temperature once-a-week.

\*\*Metal Loss + Average Internal Penetration

\*\*\*601 Sample exhibited very large internal voids.

ตารางที่ 4.2 ตัวอย่างคุณสมบัติต่างๆ ของวัสดุกลุ่มไทเทเนียม

Folder: Ti Manage This Folder	TIMET TIMETAL® 1100 Titanium Alloy (Ti-6Al- 2.7Sn- 4Zr-0.4Mo- 0.45Si)	Titanium IMI 829 (Ti-5.5Al- 3.56n 3Zr-1Nb- 0.25Mo-0.3Si)	Titanium IMI 834	Titanium Ti-5Al-2Sn-2Zr- 4Mo 4Cr (Ti 17) Alpha-Beta Processed	Titanium Ti-6Al- 2Sn-4Zr-2Mo {Ti 6 2 4 2}, Duplex Annealed	Titanium Ti-6Al- 2Sn-4Zr-6Mo (Ti 6 2 4 6) Annealed	Titanium Ti-6Al-4V (Grade 5), Annealed Bar
<b>REMOVE SELECTED</b>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
<b>Vendors for these materials</b>							
	Vendors	Advertise Here!	Vendors	Vendors	Vendors	Titanium Engineers	Vendors
<b>Physical</b>							
Density (g/cc)	4.50	4.54	4.55	4.65	4.54	4.65	4.43
<b>Mechanical</b>							
Hardness, Brinell ( )	--	--	326	369	304	342	334
Hardness, Knoop ( )	--	--	354	403	330	373	363
Hardness, Rockwell C ( )	--	32	35	40	32	37	36
Hardness, Vickers ( )	--	320	350	386	318	358	349
Tensile Strength, Ultimate (MPa)	1000	>= 930	1050	1185	940	1110	900
Tensile Strength, Yield (MPa)	910	>= 820	925	1140	860	1020	830
Elongation at Break (%)	8.0	>= 9.0	12	8.0	15	15	10
Reduction of Area (%)	--	15	15	--	35	--	33
Modulus of Elasticity (GPa)	120	125	120	115	113.8	114	114
Compressive Yield Strength	--	--	--	--	1070	--	860

4.1.2.2 การวิเคราะห์อายุการใช้งานของเทอร์โมเซตด้วยวิธีการทางสถิติ

จากการวิเคราะห์หาความแตกต่างของอายุเทอร์โมเซตด้วยวิธีการทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% โดยใช้วิธี ANOVA ด้วยโปรแกรม Minitab ของข้อมูลจากบันทึกการเปลี่ยนเทอร์โมเซต ที่มีการบันทึกค่าอายุการใช้งานของเทอร์โมเซต แต่ละตัวไว้ในช่วงเดือนกันยายน พ.ศ. 2557 ถึงมกราคม พ.ศ. 2559 แบ่งเป็นเทอร์โมเซตเก่า จำนวน 85 ชิ้น เทอร์โมเซตเพิ่มพื้นที่พิเศษ จำนวน 9 ชิ้น และเทอร์โมเซตรุ่นเพิ่มความหนา จำนวน 12 ชิ้น ได้ผลการวิเคราะห์ดังนี้

**One-way ANOVA: Old Thermode, Extra-wall, Thicker**

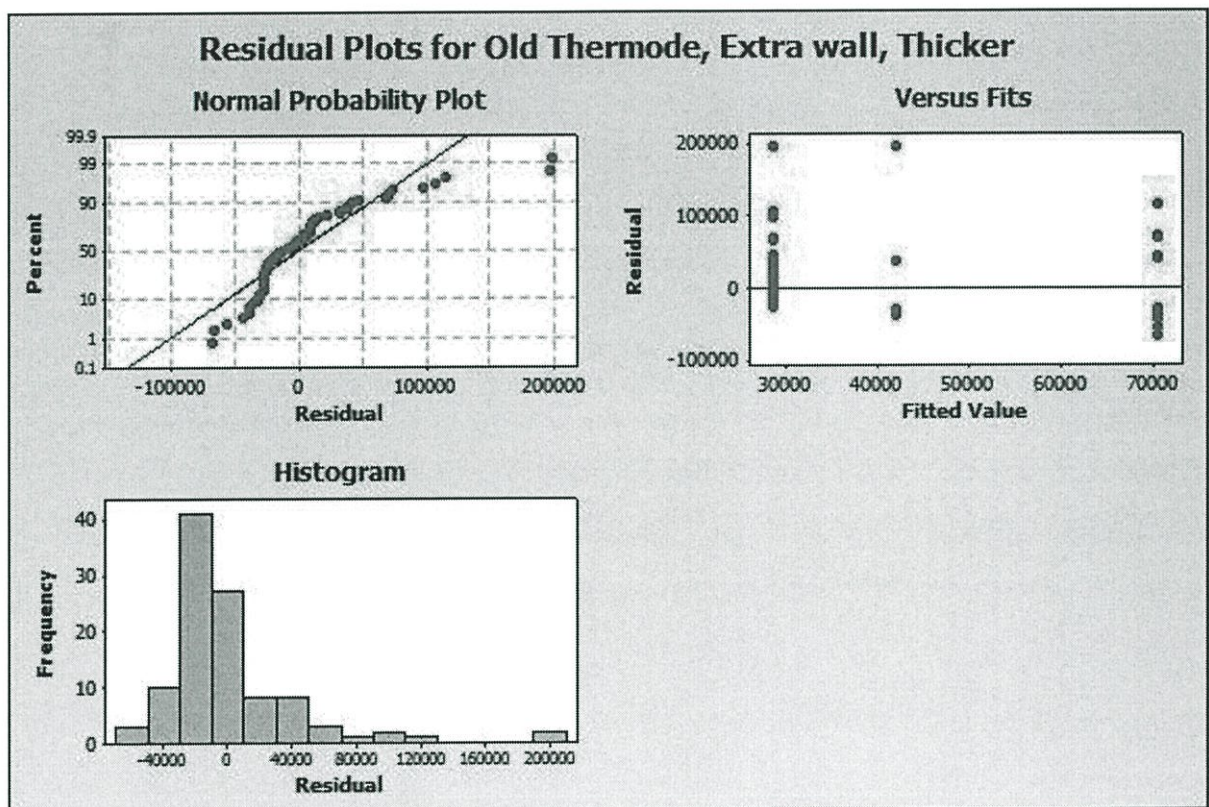
Source	DF	SS	MS	F	P
Factor	2	19008847618	9504423809	5.04	0.008
Error	103	1.94350E+11	1886889255		
Total	105	2.13358E+11			

S = 43438    R-Sq = 8.91%    R-Sq(adj) = 7.14%

Level	N	Mean	StDev	Individual 95% CIs For Mean Based on Pooled StDev
Old Thermode	85	28667	34741	(--*--)
Extra wall	9	42123	77492	(-----*-----)
Thicker	12	70549	63907	(-----*-----)

Pooled StDev = 43438

รูปที่ 4.23 ผลการวิเคราะห์ด้วยวิธี ANOVA ของเทอร์โมเดเก่า เทอร์โมเดเพิ่มพื้นที่พิเศษ และเทอร์โมเดรุ่นเพิ่มความหนา ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

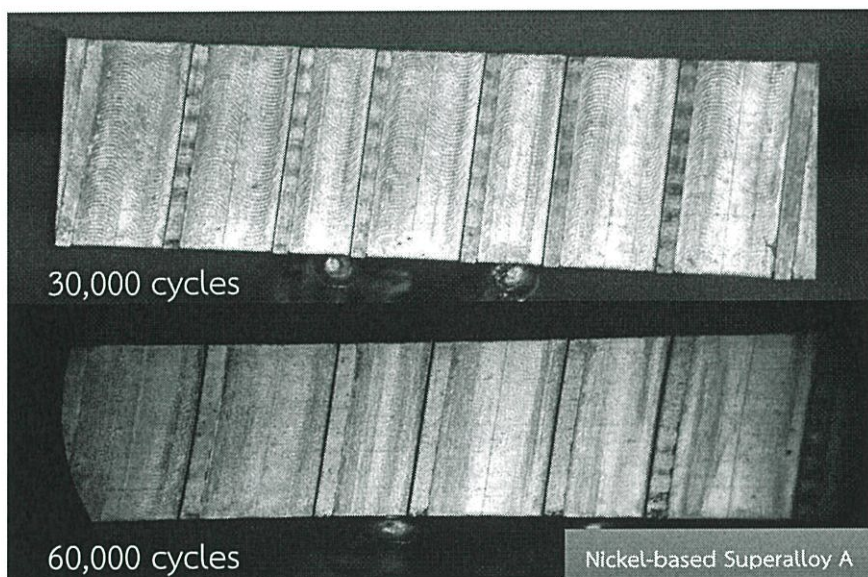


รูปที่ 4.24 กราฟแสดงผลการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ด้วยวิธี ANOVA

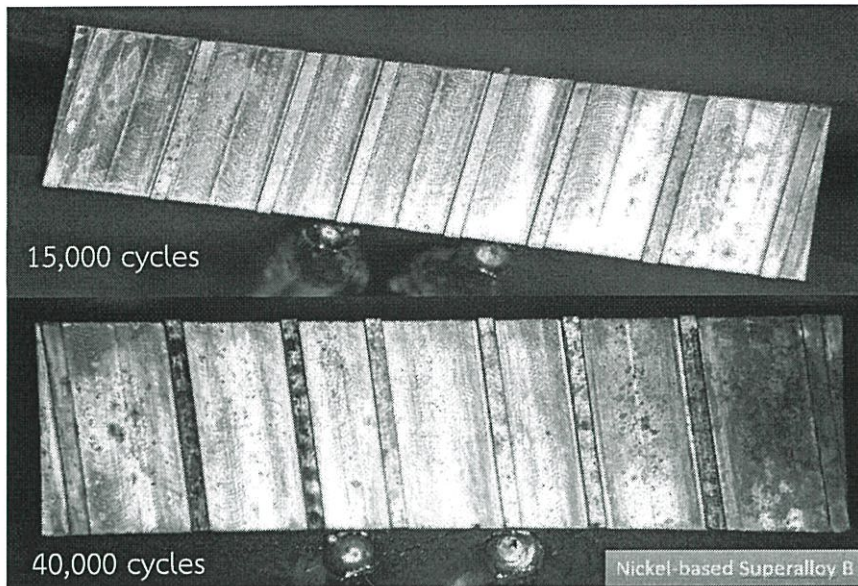
ค่า P-Value = 0.008 ซึ่งมีค่าน้อยกว่า 0.05 หมายความว่า จะสามารถปฏิเสธสมมติฐานหลักที่ว่า ทุกเทอร์ไบน์มีอายุการใช้งานที่เท่ากัน และสรุปได้ว่าเทอร์ไบน์แต่ละการออกแบบ มีอายุการใช้งานที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ

#### 4.1.2.3 การนำเทอร์ไบน์ที่สร้างขึ้นจากวัสดุใหม่มาทดลองใช้งาน

จากหัวข้อที่ 3.5.3.6 นั้นทางผู้จัดทำได้ทำการเลือกกลุ่มโลหะ Nickel-Based Superalloy ซึ่งทางผู้จัดทำได้แบ่งเป็น ชนิด A และ B อย่างละ 2 ชิ้น หลังจากทดสอบการใช้งานไปได้ 30,000 และ 60,000 รอบ ของชนิด A และชนิด B ใช้ 15,000 และ 40,000 รอบ ผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 4.25 และ 4.26



รูปที่ 4.25 แสดงภาพเทอร์ไบน์ต้นแบบชนิด A หลังผ่านการใช้งาน 30,000 และ 60,000 รอบ



รูปที่ 4.26 แสดงภาพเทอร์โมคแตนต์แบบชนิด B หลังผ่านการใช้งาน 15,000 และ 40,000 รอบ

จากภาพด้านบนจะเห็นว่า ผลลัพธ์ที่ได้จากการทดสอบเทอร์โมคแตนต์แบบที่ทำจากวัสดุใหม่นั้น ค่อนข้างเป็นไปได้ดีเนื่องจากในตอนแรกทางบริษัทตั้งอายุการใช้งานมาตรฐานไว้เพียง 38,000 รอบ แต่เมื่อนำเทอร์โมคแตนต์แบบชนิดใหม่มาใช้งาน ที่ 15,000, 30,000, 40,000 และ 60,000 รอบ เทอร์โมคแตนต์ทั้งสองชนิด ยังไม่พบรอยการเสียหายที่รุนแรง เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันเพียงเล็กน้อย (สังเกตจากสีที่เปลี่ยนไป ซึ่งหมายถึงปริมาณชั้นออกไซด์ที่เกิดขึ้น) และเทอร์โมคแตนต์แบบทั้ง 4 ชั้นยังสามารถใช้งานได้ตามปกติ

ขณะนี้เทอร์โมคแตนต์แบบทั้งสองชนิดนั้นกำลังอยู่ในระหว่างการทดสอบ ซึ่งใช้เวลาในการเก็บข้อมูลเป็นเวลานาน ทั้งนี้ทางคณะผู้จัดทำจะทำการทดสอบเทอร์โมคแตนต์แบบนี้ใช้งานต่อไปโดยคณะผู้จัดทำหวังว่าเทอร์โมคแตนต์แบบทั้งหมดนี้จะสามารถใช้งานได้มากกว่า 40,000 รอบ

## บทที่ 5

### สรุปผลการดำเนินงานและข้อเสนอแนะ

บทนี้จะเป็นการแสดงถึงการสรุปผลการดำเนินงานทั้งหมด ข้อเสนอแนะ รวมทั้งอุปสรรคต่างๆ ที่ผู้จัดทำได้พบเจอจากการทำปฏิญานิพนธ์ฉบับนี้ โดยทั้งหมดนี้อ้างอิงจากในบทที่ 1 ถึง 4 เพื่อให้ผู้ที่สนใจในเรื่องเกี่ยวกับปฏิญานิพนธ์ได้เห็นถึงภาพรวมข้อสรุปทั้งหมดที่เกิดขึ้นจากการทำปฏิญานิพนธ์ในเรื่อง การหาต้นตอความเสียหายและการเพิ่มอายุการใช้งานของเทอร์โหมด ในกระบวนการ Anisotropic Conductive Film Bonding ทางคณะผู้จัดทำหวังว่าปฏิญานิพนธ์ฉบับนี้จะมีประโยชน์ต่อผู้ที่สนใจ

#### 5.1 สรุปผลการดำเนินงาน

จากที่คณะผู้จัดทำได้ทำการเสนอผลการดำเนินการในบทที่ 4 ทางคณะผู้จัดทำจะทำการสรุปเนื้อหาของปฏิญานิพนธ์ การระบุหาสาเหตุความเสียหาย และเพิ่มอายุการใช้งานของเทอร์โหมด ซึ่งได้ถูกแบ่งออกเป็น 2 หัวข้อหลักดังนี้

##### 5.1.1 สรุปผลการระบุสาเหตุที่แท้จริงที่ทำให้เทอร์โหมดเกิดการเสียหาย

1. กลไกการเกิดการเสียหายด้วยปฏิกิริยาออกซิเดชันเป็นเหตุผลหลักที่ทำให้เทอร์โหมดเกิดการเสียหาย เนื่องจากจากรูปที่ 4.12 แสดงให้เห็นถึงการแตกแบบเปราะ รูปที่ 4.17 แสดงให้เห็นถึงชั้นของเนื้อวัสดุที่แตกออกไปเช่นเดียวกับกลไกการเสียหายจากปฏิกิริยาออกซิเดชันในรูปที่ 2.4 และรูปที่ 4.19 (b) แสดงให้เห็นถึงธาตุออกซิเจนในบริเวณที่เกิดความเสียหาย
2. การสูญเสียเนื้อวัสดุของเทอร์โหมดนั้นมีจุดเริ่มต้นมาจากผิวหน้าของเทอร์โหมด เป็นลักษณะการหลุดร่อน ดังรูปที่ 4.12 และรูปที่ 4.17 (b) กลไกการแตกของชั้นออกไซด์จะแสดงในรูปที่ 2.4
3. โครงสร้างจุลภาคของเทอร์โหมดที่เสียหาย กับเทอร์โหมดที่ยังไม่ผ่านการใช้งานไม่มีความแตกต่างกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.14 และ 4.18 ซึ่งมีลักษณะเดียวกัน คือ Bimodal Structure ดังรูปที่ 2.3 (b)
4. โครงสร้างจุลภาคของเทอร์โหมดนั้นเป็นโครงสร้าง Lamellar แบบ Widmanstätten เป็นโครงสร้างแอลฟาบนเนื้อเมตริก ดังจะเห็นได้จากรูปที่ 4.17 ซึ่งมีลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคเหมือนกับรูปที่ 2.2 (a)

5. การกระจายตัวของอุณหภูมิบริเวณแต่ละผิวพื้นของเทอร์โมมอด ไม่ได้ส่งผลต่ออายุการใช้งานของเทอร์โมมอดอย่างมีนัยสำคัญ ดังรูปที่ 4.5 แสดงให้เห็นว่า ถึงอุณหภูมิในแต่ละพื้นจะใกล้เคียงกัน แต่การเสียหายก็ยังคงเกิดที่พื้นที่ 1 หรือ 6 เท่านั้น

#### 5.1.2 สรุปการเพิ่มอายุการใช้งานของเทอร์โมมอด

1. เทอร์โมมอดที่ทำจากวัสดุเก่า (ไทเทเนียม) มีอายุการใช้งานเฉลี่ย 22,000 รอบ
2. เทอร์โมมอดทดสอบที่ทำจากวัสดุใหม่ (Nickel-Based Superalloy A และ B) ที่ผ่านการใช้งาน 15,000, 30,000, 40,000 และ 60,000 รอบ ยังมีสภาพการใช้งานที่อยู่ในสภาพเกือบปกติ กล่าวคือยังสามารถใช้งานได้
3. เทอร์โมมอดที่ทำจาก Nickel-Based Superalloy A เหมาะที่จะนำมาใช้งานมากกว่า Nickel-Based Superalloy B ดูจากลักษณะของเทอร์โมมอดที่ทำจาก Nickel-Based Superalloy A ในรูปที่ 4.25 และ Nickel-Based Superalloy B ในรูปที่ 4.26

#### 5.2 ปัญหาระหว่างการทำการศึกษา

- เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ภาควิชาไม่มีพร้อม จึงต้องไปขอใช้อุปกรณ์ที่ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (National Metal and Materials Technology Center, MTEC)
- การเดินทางไป-กลับ MTEC ใช้เวลานาน เนื่องจากตั้งอยู่ห่างจาก สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.) ทำให้เสียเวลาในการเดินทาง และส่งผลต่อเวลาที่ใช้ในการทำงานวิจัยในแต่ละวัน มีระยะเวลาที่น้อย
- ข้อมูลบางอย่างเป็นความลับของทางบริษัท เวสเทิร์น ดิจิตอล (ประเทศไทย) จึงอาจมีการขาดตกบกพร่องของข้อมูลที่ได้รับ และไม่สามารถนำมาเผยแพร่ได้
- การสั่งซื้อวัสดุบางชนิดสามารถทำได้ยากเนื่องจากต้องนำเข้า และบางชนิดต้องได้รับการตรวจสอบอย่างละเอียด
- การทำงานกับบริษัทชั้นนำ จะมีกระบวนการทำงานที่ค่อนข้างช้า เนื่องจากการทำงานเป็นระบบ และหลายขั้นตอนต้องมีการอนุมัติแต่ละคำสั่งอย่างชัดเจน จึงทำให้การดำเนินการบางอย่างไม่สามารถทำได้โดยสะดวกนัก
- ในการทำงานในขั้นตอนการตรวจสอบ วิเคราะห์วัสดุ บางขั้นตอนต้องมีการรอการใช้เครื่องมืออุปกรณ์ เนื่องจากมีนักวิจัยท่านอื่นใช้อยู่ จึงทำให้เกิดการล่าช้าของงานมากขึ้น

### 5.3 ข้อเสนอแนะ

1. จากการทำปริญญานิพนธ์โครงการ การหาต้นตอของความเสียหายของเทอร์โมทและเพิ่มอายุการใช้งานของเทอร์โมทในกระบวนการ ACF Bonding ทางผู้จัดทำได้เรียนรู้อะไรหลายอย่างที่ เป็นประโยชน์ในการใช้ชีวิตในอนาคตอย่างมาก เป็นสิ่งที่มีคุณค่าและหาที่ไหนไม่ได้ หาได้จากการทำงาน ผู้จัดทำได้มองเห็นมุมมองการทำงานที่กว้างขึ้นและทำให้ได้รู้จักการทำงานกับคนอื่นในหลายๆ หน่วยงานรวมถึงได้มาซึ่งการรู้จักกับบุคคลต่างๆ ที่เกี่ยวข้องในการทำงานโครงการนี้เป็นการสร้างสัมพันธ์ในอนาคต ผู้จัดทำคิดว่าการทำโครงการนี้ให้จบลงไปด้วยดีนั้น ขาดไม่ได้เลยซึ่งผู้มีพระคุณใน ด้านส่วนงานต่างๆ ดังได้ขอบคุณไว้ในกิตติกรรมประกาศแล้ว และอีกสิ่งหนึ่งที่สำคัญคือควรจะมีเวลา ในการทำโครงการนี้ให้มาก เพราะเป็นโครงการที่ต้องออกไปทำนอกสถานที่ อีกทั้งยังส่งผลให้คน ภายนอกได้มองกลับเข้ามายังสถาบัน ซึ่งทางผู้จัดทำได้ตระหนักถึงและเป็นเกียรติอย่างยิ่ง
2. ในการศึกษาที่จะทำโครงการในครั้งต่อไปนั้น ควรไม่ใช่แค่ศึกษาในด้านของวัสดุเท่านั้น ยังมีอีกหลายจุด ที่สามารถเข้าไปปรับปรุงในกระบวนการ ACF Bonding นี้ได้ทั้งในด้านการออกแบบระบบการทำงาน หรือการออกแบบกลไกต่างๆ ทั้งนี้ในการทำโครงการนี้นั้นทางคณะผู้จัดทำไม่ได้มีโอกาสในการที่จะ ปรับเปลี่ยนอะไรมากมายนัก จึงอยากแนะนำไว้ว่าถ้าสามารถนำมาซึ่งการปรับปรุงทางด้าน กระบวนการที่ดีได้จะเป็นสิ่งที่ดี ทางคณะผู้จัดทำหวังว่าปริญญานิพนธ์ฉบับนี้จะเป็นแนวทางใน การศึกษาปรับปรุง ไม่ใช่แค่ในกระบวนการ ACF Bonding แต่เป็นกระบวนการอื่นๆ อีกต่อไปใน อนาคตแก่ผู้ที่สนใจในเรื่องนี้

## เอกสารอ้างอิง

- Champin, B., L. Graff, M. Armand, G. Beranger and C. Coddet (1980). "Oxidation of Titanium Alloys at Temperatures Used in Turbine Engines." J. Less-Common Met. 69(1): 163-183.
- Crane, F. A. A., J. A. Charles and J. Furness (1997). Selection and use of engineering materials, Butterworth-Heinemann.
- Donachie, M. J. (2000). Titanium: a technical guide, ASM international.
- Dragolich, K. S., N. D. DiMatteo and S. D. Henry (1994). Fatigue data book: light structural alloys, ASM International.
- Froes, F. and D. Eylon (2000). Titanium: Physical Metallurgy, Processing, and Applications, Elsevier, Oxford, UK.
- Gulbransen, E., K. Andrew and F. Brassart (1963). "Vapor pressure of molybdenum trioxide."
- Guleryuz, H. and H. Cimenoglu (2009). "Oxidation of Ti-6Al-4V alloy." Journal of Alloys and Compounds 472(1): 241-246.
- Higgins, R. A. (1994). The properties of engineering materials, Industrial Press Inc.
- Kofstad, P. (1988). "High temperature corrosion." Elsevier Applied Science Publishers, Crown House, Linton Road, Barking, Essex IG 11 8 JU, UK, 1988.
- Leyens, C. and M. Peters (2003). Titanium and Titanium Alloys.
- Lütjering, G. and J. C. Williams (2003). Titanium, Springer.
- Brackell, P. (2000). "Achieving Interconnection with Pulse-Heated Bonding."
- Sefer, B. (2014). "Oxidation and Alpha-Case Phenomena in Titanium Alloys used in Aerospace Industry: Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo and Ti-6Al-4V."
- Unnam, J., R. Shenoy and R. Clark (1986). "Oxidation of commercial purity titanium." Oxidation of Metals 26(3-4): 231-252.
- Zenner, R. L., C. T. Murray and C. Fisher (2008). "Temperature characterization in anisotropic conductive film adhesive bonding." Journal of Adhesion Science and Technology 22(14): 1781-1797.