



**รายงานสหกิจศึกษาฉบับสมบูรณ์**

**การศึกษาเพื่อทดสอบความน่าเชื่อถือด้านการเกิดขนแมวในผลิตภัณฑ์  
อิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้สำหรับยานยนต์**

**Study on the whisker reliability testing in electronic products for  
automotive**

**นายไชยวัฒน์ โขมิตวิวัฒน์กุล**

**ภาควิชาวิศวกรรมเคมี**

**คณะวิศวกรรมศาสตร์**

**สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง**

**ปีการศึกษา 2560**



## รายงานสหกิจศึกษาระดับสมบูรณ

การศึกษาเพื่อทดสอบความน่าเชื่อถือด้านการเกิดขนแมวในผลิตภัณฑ์

อิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้สำหรับยานยนต์

**Study on the whisker reliability testing in electronic products for  
automotive**

นายไชยวัฒน์ โหมิตวิวัฒน์กุล

ภาควิชาวิศวกรรมเคมี

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2560

โครงการสหกิจศึกษาเรื่อง	การศึกษาเพื่อทดสอบความน่าเชื่อถือด้านการเกิดขนแมวในผลิตภัณฑ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้สำหรับยานยนต์	
โดย	นายไชยวัฒน์ โขจิตวิวัฒน์กุล	
คณะ	วิศวกรรมศาสตร์	
ภาควิชา	วิศวกรรมเคมี	
ปีการศึกษา	2560	
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ.รินฤดี เบญจางคประเสริฐ	
ผู้นิเทศงาน	นายบรรจง คำแพง	Assistant supervisor
	นางสาวกานต์ธีรา เจริญศึกษา	Assistant supervisor
สถานประกอบการ	บริษัท พานาโซนิค ออโต้โมทีฟ ซิสเต็มส์ เอเชีย แปซิฟิก จำกัด	

### บทคัดย่อ

ปัญหาอายุการใช้งานของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ต่ำกว่าค่าการประเมินอาจเกิดได้จากหลายสาเหตุ เช่น ความบกพร่องที่อาจเกิดขึ้นได้ในกระบวนการผลิต สภาพการใช้งานที่ไม่เหมาะสม รวมไปถึงการเกิดขนแมว (whisker) ในโลหะบัดกรีที่เป็นหนึ่งในหัวข้อซึ่งผู้ผลิตต้องทำการตรวจสอบด้านความน่าเชื่อถือของผลิตภัณฑ์ (reliability testing) นอกจากเป็นการสร้างความเชื่อมั่นด้านคุณภาพให้กับลูกค้าแล้ว ยังสามารถนำข้อมูลจากการทดสอบมาเป็นแนวทางในการปรับปรุงคุณภาพของผลิตภัณฑ์ให้ดียิ่งขึ้นได้ด้วย อย่างไรก็ตามการส่งชิ้นงานไปทดสอบยังหน่วยงานภายนอกบริษัทมีค่าใช้จ่ายสูงและใช้ระยะเวลานานในการดำเนินการ ดังนั้นโครงการนี้จึงได้ศึกษาวิธีการทดสอบชิ้นงานด้านความน่าเชื่อถือของผลิตภัณฑ์อิเล็กทรอนิกส์ในหัวข้อการเกิดขนแมว เพื่อเป็นแนวทางให้ผู้ผลิตสามารถตรวจสอบคุณภาพผลิตภัณฑ์ได้เอง ซึ่งจะสามารถลดค่าใช้จ่ายของบริษัทลงได้ โดยได้ทำการบ่มชิ้นงานอิเล็กทรอนิกส์ที่อุณหภูมิต่าง ๆ ตามที่มาตรฐานกำหนด จากนั้นนำไปทดสอบตามกระบวนการที่ได้ศึกษา แล้วจึงนำผลการทดสอบไปเปรียบเทียบกับผลการทดสอบจากบริษัทพานาโซนิค ประเทศญี่ปุ่น และสถาบันยานยนต์ ประเทศไทย พบว่า วิธีการทดสอบที่ใช้นี้ให้ผลสรุปสอดคล้องกับผลการทดสอบของทั้งสองหน่วยงานและบริษัท พานาโซนิค ออโต้โมทีฟ ซิสเต็มส์ เอเชีย แปซิฟิก จำกัด สามารถทดสอบเองได้ เมื่อเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายในการทดสอบของบริษัทพานาโซนิค ประเทศญี่ปุ่น และของสถาบันยานยนต์ สามารถลดค่าใช้จ่ายลงได้ 413,650 บาท/ชิ้นงาน และ 121,250 บาท/ชิ้นงาน ตามลำดับ รวมถึงระยะเวลา/ชิ้นงาน ในการทดสอบ ลดลง 14 วัน และ วัน ตามลำดับ

Cooperative Title	Study on the whisker reliability testing in electronic products of automotive
By	Mr. Chaiwat Kositwiwatkun
Faculty	Engineering
Department	Chemical Engineering
Year	2017
Advisor	Asst. Prof. Ruenruedee Benjangkaprasert
Mentor	Mr. Bunjong Kumpang Assistant Assistant supervisor Ms. Karnteera Charoensuksa Assistant Assistant supervisor
Company	PANASONIC AUTOMOTIVE SYSTEMS ASIA PACIFIC CO., LTD.

## ABSTRACT

There are many causes that effect to lifetime of electronic devices are lower than standard such as mistake in production, unsuitable use conditions and whisker phenomena is one of the items test in reliability testing of electronic devices that the manufacturer must inspect, in addition to ensuring quality assurance for their customers. The testing data can also be used to improve the quality of the products. According to cost of reliability testing is very expensive and take a long time to test products reliability at the external company, therefore the purpose of this study was to investigate the whisker reliability testing in automotive products for manufacturer who can operate the whisker reliability testing to check product quality by themselves and reduce cost. The study was experimental research by temperature and humidity cycling test in temperature and humidity chamber machine. The conditions for testing was set to follow the testing standard. The test results were compared with the results from external testing companies: Panasonic, JAPAN, and Thailand Automotive Institute, that were almost the same. The cost/ sample of testing was reduced for 413,650 baht and 121,250 baht, respectively, and the testing period /sample was reduced to 14 days and 7 days, respectively.

## กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณคณะผู้บริหาร บริษัท พานาโซนิค ออโตโมทีฟ ซิสเต็มส์ เอเชีย แปซิฟิก จำกัด ที่ให้โอกาสข้าพเจ้าทำโครงการสหกิจศึกษาภายใต้การดูแลจากทีมงานของบริษัท คือ คุณบรรจง คำแพง และ คุณกานต์ธีรา เจริญศึกษา Assistant supervisor ที่ให้คำแนะนำในการทำงานและการวิเคราะห์ปัญหา และทีมงานของบริษัททุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือและสอนความรู้ต่างๆ

ขอขอบพระคุณ ผศ. รุ่งฤดี เบญจางคประเสริฐ อาจารย์นิเทศที่ให้คำปรึกษาในการทำงานและความรู้ต่าง ๆ รวมถึงอบรมสั่งสอนเพื่อพัฒนาศักยภาพในการทำงานให้มากยิ่งขึ้น

สุดท้ายนี้ข้าพเจ้าหวังเป็นอย่างยิ่งว่ารายงานสหกิจศึกษานี้จะเป็นประโยชน์ต่อผู้สนใจและหากมีสิ่งใดผิดพลาด ข้าพเจ้าขออน้อมรับและขออภัยมา ณ ที่นี้

ไชยวัฒน์ โฆษิตวิวัฒน์กุล

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VI
สารบัญรูปภาพ.....	VII
<b>บทที่ 1 บทนำ.....</b>	<b>1</b>
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	1
1.3 ขอบเขตของโครงการ .....	2
1.4 วิธีดำเนินโครงการ .....	2
1.5 ประโยชน์ที่ได้รับ.....	3
<b>บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....</b>	<b>4</b>
2.1 การรับรองความเชื่อมั่นทางวิศวกรรม.....	4
2.2 ความไม่สมบูรณ์ของผลึก .....	5
2.3 ขนาดของเกรน .....	10
2.4 การบัดกรี .....	10
2.5 โลหะบัดกรี.....	11
2.6 ขนแมว .....	12
2.7 ทฤษฎีการเกิดขนแมว โดย Vianco .....	13
2.8 ทฤษฎีการเกิดขนแมว โดย Smetana .....	13
2.9 ทฤษฎีความเค้นกดที่มีผลต่อการเกิดขนแมว .....	14
2.10 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด .....	16
<b>บทที่ 3 วิธีดำเนินโครงการ.....</b>	<b>18</b>
3.1 วัสดุและอุปกรณ์.....	18
3.2 ขั้นตอนการทดสอบ .....	21
3.3 การประเมินความเหมาะสมและความคุ้มค่าเชิงเศรษฐศาสตร์เบื้องต้น.....	22

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 ผลการดำเนินงาน.....	23
4.1 การวิเคราะห์โครงสร้างของโลหะบัดกรี.....	23
4.2 การวิเคราะห์ค่าทางไฟฟ้าของตัวอย่างแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์.....	25
4.3 การประเมินความเหมาะสมและความคุ้มค่าเชิงเศรษฐศาสตร์.....	36
บทที่ 5 สรุปผลการดำเนินโครงการและข้อเสนอแนะ.....	38
5.1 สรุปผลการดำเนินโครงการ.....	38
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	39
บรรณานุกรม.....	41
ภาคผนวก.....	42
ภาคผนวก ก ข้อมูลการคำนวณค่าใช้จ่ายในการทดสอบความน่าเชื่อถือ.....	43
ภาคผนวก ข ลักษณะรูปร่างของขนแมว (Whisker).....	44
ประวัติผู้เขียน.....	50

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
4.1 ลักษณะภายนอกของจุดบัดกรีในตัวอย่างแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ .....	23
4.2 โครงสร้างทางจุลภาคของจุดบัดกรีในตัวอย่างแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์.....	24
4.3 การเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายในการทดสอบความน่าเชื่อถือ .....	36
4.4 การเปรียบเทียบระยะเวลาในการทดสอบความน่าเชื่อถือ.....	37
ก.1 การคำนวณค่าใช้จ่ายในการทดสอบความน่าเชื่อถือของโครงการ .....	43
ก.2 การคำนวณค่าใช้จ่ายในการทดสอบความน่าเชื่อถือของ TAI .....	43

## สารบัญรูปภาพ

รูปที่	หน้า
2.1 กราฟเส้นโค้งรูปร่างน้ำ (Bathtub curve).....	4
2.2 กราฟฟังก์ชันความเชื่อมั่น (Reliability function).....	5
2.3 ความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบ Vacancy และ Interstitial.....	6
2.4 การเกิด Frenkel Imperfection และ Schottky Imperfection.....	6
2.5 การมี Impurity atom.....	7
2.6 การเกิด Edge dislocation .....	7
2.7 การเกิด Screw Dislocation .....	8
2.8 ความไม่สมบูรณ์ของเกรน.....	9
2.9 การเกิดTwin boundaries .....	11
2.10 ลักษณะการเกิดขนแมว .....	12
2.11 แผนภาพแบบจำลองการเติบโตของ Whisker ภายใต้ DRX.....	13
2.12 แผนภาพแบบจำลอง Whisker ของ Smetana.....	14
2.13 ส่วนประกอบและการทำงานของกล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราด .....	17
3.1 แผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์สำหรับการทดสอบ .....	18
3.2 เครื่อง Temperature Humidity Chamber.....	18
3.3 เครื่อง Regulated DC Power Supply .....	19
3.4 เครื่อง Oscilloscope .....	19
3.5 เครื่อง Multimeter .....	19
3.6 เครื่อง AC/DC Current Probe ยี่ห้อ TEKTRONIX.....	20
3.7 เครื่อง 3D Microscope.....	20
3.8 เครื่อง Scanning Electron Microscope.....	20
4.1 แผนภูมิเวลาในการชาร์จประจุไฟฟ้าของชิ้นงานตัวอย่าง .....	25
4.2 แผนภูมิค่ากระแสไฟฟ้าขณะชาร์จประจุไฟฟ้าของชิ้นงานตัวอย่าง .....	26
4.3 แผนภูมิค่ากระแสไฟฟ้าหลังชาร์จประจุไฟฟ้าของชิ้นงานตัวอย่าง .....	26
4.4 แผนภูมิค่าแรงดันไฟฟ้าที่ออกจากชิ้นงานตัวอย่างหลังชาร์จประจุไฟฟ้าเต็มแล้ว .....	27
4.5 แผนภูมิเวลาในการชาร์จประจุไฟฟ้าของชิ้นงานตัวอย่าง .....	27
4.6 แผนภูมิค่ากระแสไฟฟ้าขณะชาร์จประจุไฟฟ้าของชิ้นงานตัวอย่าง .....	28

## สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.7 แผนภูมิค่ากระแสไฟฟ้าหลังชาร์จประจุไฟฟ้าของชิ้นงานตัวอย่าง .....	28
4.8 แผนภูมิค่าแรงดันไฟฟ้าที่ออกจากชิ้นงานตัวอย่างหลังชาร์จประจุไฟฟ้าเต็มแล้ว .....	29
4.9 แผนภูมิเวลาในการชาร์จประจุไฟฟ้าของชิ้นงานตัวอย่าง .....	29
4.10 แผนภูมิค่ากระแสไฟฟ้าขณะชาร์จประจุไฟฟ้าของชิ้นงานตัวอย่าง .....	30
4.11 แผนภูมิค่ากระแสไฟฟ้าหลังชาร์จประจุไฟฟ้าของชิ้นงานตัวอย่าง .....	30
4.12 แผนภูมิค่าแรงดันไฟฟ้าที่ออกจากชิ้นงานตัวอย่างหลังชาร์จประจุไฟฟ้าเต็มแล้ว .....	31
4.13 แผนภูมิเวลาในการชาร์จประจุไฟฟ้าของชิ้นงานตัวอย่าง.....	31
4.14 แผนภูมิค่ากระแสไฟฟ้าขณะชาร์จประจุไฟฟ้าของชิ้นงานตัวอย่าง .....	32
4.15 แผนภูมิค่ากระแสไฟฟ้าหลังชาร์จประจุไฟฟ้าของชิ้นงานตัวอย่าง .....	32
4.16 แผนภูมิค่าแรงดันไฟฟ้าที่ออกจากชิ้นงานตัวอย่างหลังชาร์จประจุไฟฟ้าเต็มแล้ว .....	33
4.17 แผนภูมิเปรียบเทียบค่าแรงดันไฟฟ้าที่ออกจากชิ้นงานตัวอย่าง .....	33
4.18 แผนภูมิเปรียบเทียบค่ากระแสไฟฟ้าขณะชาร์จประจุไฟฟ้าของชิ้นงานตัวอย่าง .....	34
4.19 แผนภูมิเปรียบเทียบค่ากระแสไฟฟ้าหลังชาร์จประจุไฟฟ้าของชิ้นงานตัวอย่าง .....	34
4.20 แผนภูมิเปรียบเทียบค่าแรงดันไฟฟ้าที่ออกจากชิ้นงานตัวอย่างหลังชาร์จประจุไฟฟ้า .....	35
4.21 แผนภูมิเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายในการทดสอบความน่าเชื่อถือ.....	36
4.22 แผนภูมิเปรียบเทียบระยะเวลาในการทดสอบความน่าเชื่อถือ .....	37
ข.1 Tin whisker filaments .....	44
ข.2 Whisker with a consistent cross section .....	45
ข.3 Kinked whisker.....	45
ข.4 Kinked whiskers growing from a nodule .....	46
ข.5 Branched tin whiskers on bright tin .....	46
ข.6 Whisker initiating from a hillock.....	47
ข.7 Tin whisker filament with striations .....	47
ข.8 Tin whisker filament with striations .....	48
ข.9 Kinked whisker on odd-shaped eruptions.....	48
ข.10 Tin whisker with ring.....	49

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

เทคโนโลยีมีบทบาทสำคัญในการดำรงชีวิต อุปกรณ์เกี่ยวกับเทคโนโลยีล้วนมีส่วนประกอบของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ โดยในยานยนต์ก็มีอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์อยู่มากมาย เช่น กล้อง Wi-Fi ,ECU, เครื่องเสียงรถยนต์และเสาอากาศ ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่ช่วยอำนวยความสะดวก ทำให้ผู้ผลิตต้องพัฒนาและเพิ่มประสิทธิภาพของอุปกรณ์เหล่านี้ เพื่อให้สามารถตอบสนองความพึงพอใจของผู้ใช้ แต่ปัญหาหลักของผู้ผลิตอุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์คือปัญหาเกี่ยวกับอายุการใช้งานของอุปกรณ์ซึ่งต่ำกว่าที่ได้ประเมินไว้ สาเหตุอาจมาจากปัจจัยหลายประการ เช่น ความบกพร่องในการผลิตหรืออาจเกิดจากสภาพการใช้งานที่ไม่เหมาะสม นักวิทยาศาสตร์จึงได้ศึกษาเกี่ยวกับปัญหานี้อย่างจริงจัง และค้นพบถึงหนึ่งในสาเหตุสำคัญของปัญหาดังกล่าว คือ การเกิดขนแมว ทำให้ต้องทำการทดสอบความน่าเชื่อถือของผลิตภัณฑ์ในหัวข้อนี้ซึ่งเป็นการทดสอบให้ทราบว่าผลิตภัณฑ์ของตัวนั้นมีปัญหาเรื่องการเกิดขนแมวหรือไม่เพื่อเป็นแนวทางในการปรับปรุงแก้ไขคุณภาพของผลิตภัณฑ์ให้ดียิ่งขึ้น และเป็นการสร้างความเชื่อมั่นให้กับลูกค้าในคุณภาพของผลิตภัณฑ์ ทั้งในการทดสอบต้องเสียค่าใช้จ่าย ซึ่งถ้าบริษัทของตัวไม่สามารถทำการทดสอบเองได้ จะต้องเสียค่าใช้จ่ายมากกว่ารวมถึงเสียระยะเวลาในการส่งไปทดสอบที่สถาบันภายนอก

### 1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

1.2.1 เพื่อศึกษาการเกิดขนแมว

1.2.2 เพื่อศึกษาวิธีการทดสอบความน่าเชื่อถือของผลิตภัณฑ์ในหัวข้อการเกิดขนแมว

1.2.3 เพื่อลดค่าใช้จ่ายในที่ใช้การทดสอบ

1.2.4 เพื่อลดระยะเวลาที่ใช้ในการทดสอบ

### 1.3 ขอบเขตของโครงการงาน

1.3.1 วิเคราะห์การเกิดขุ่นเมวกับโลหะบัดกรีในแผงวงจรของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ในยานยนต์ที่ผลิตในประเทศไทยจากบริษัท พานาโซนิค ออโตโมทีฟ ซิสเต็มส์ เอเชีย แปซิฟิก จำกัด

1.3.2 โลหะบัดกรีที่ใช้ในแผงวงจรของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ มีส่วนประกอบคือ Sn97% Ag3%

1.3.3 สถาบันภายนอกที่ส่งชิ้นงานไปทำการทดสอบ คือ บริษัท พานาโซนิค ประเทศญี่ปุ่น และสถาบันยานยนต์ ประเทศไทย

### 1.4 วิธีการดำเนินโครงการงาน

1.4.1 ศึกษาวิธีการทดสอบความน่าเชื่อถือของผลิตภัณฑ์และวิธีการใช้เครื่องมือวิเคราะห์

1.4.2 ศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1.4.3 ออกแบบวิธีการและขั้นตอนการทดสอบความน่าเชื่อถือของผลิตภัณฑ์สำหรับโครงการงาน

1.4.4 จัดหาชิ้นงานตัวอย่างผลิตภัณฑ์เพื่อใช้ในการทดสอบ

1.4.5 แบ่งกลุ่มชิ้นงานตัวอย่างผลิตภัณฑ์ตามสภาวะอุณหภูมิต่างๆที่ใช้ในการทดสอบ

1.4.6 เก็บข้อมูลของชิ้นงานตัวอย่างก่อนการทดสอบ

1.4.6.1 ถ่ายภาพชิ้นงานตัวอย่างด้วยกล้อง microscope

1.4.6.2 วิเคราะห์ชิ้นงานตัวอย่างด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

1.4.6.3 ตรวจวัดค่าทางไฟฟ้าของชิ้นงาน

1.4.7 นำชิ้นงานตัวอย่างผลิตภัณฑ์มาทดสอบโดยการบ่มที่อุณหภูมิต่างๆด้วยตู้อบความร้อน

1.4.8 บันทึกและวิเคราะห์ผลการทดสอบ

## 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 สามารถทำการทดสอบความน่าเชื่อถือของผลิตภัณฑ์ในหัวข้อการเกิดขนแมวได้

1.5.2 สามารถลดค่าใช้จ่ายที่ใช้ในการทดสอบความน่าเชื่อถือของผลิตภัณฑ์ในหัวข้อการเกิดขนแมวได้

1.5.3 สามารถลดระยะเวลาที่ใช้ในการทดสอบความน่าเชื่อถือของผลิตภัณฑ์ในหัวข้อการเกิดขนแมวได้

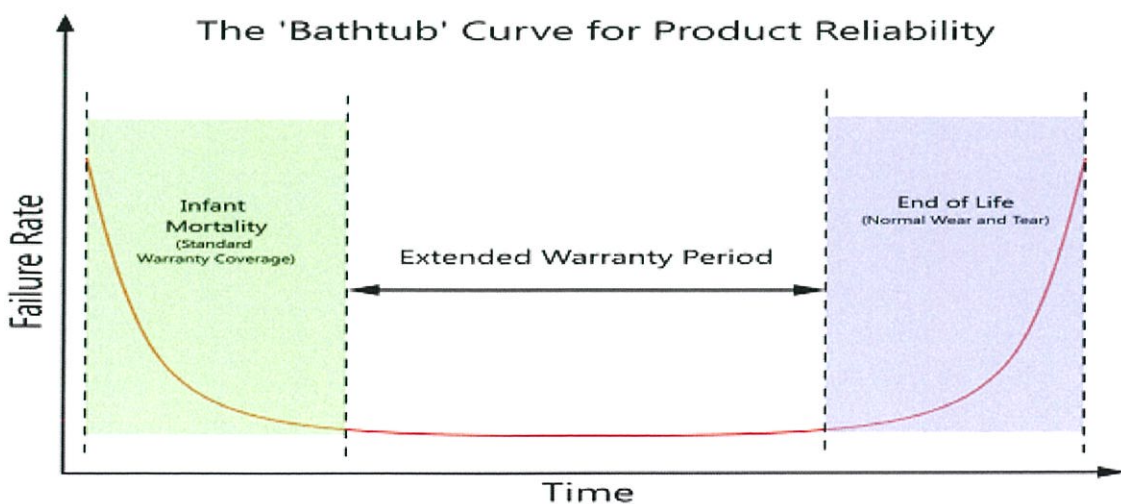
## บทที่ 2

### แนวคิด ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 การรับรองความเชื่อมั่นทางวิศวกรรม (Certified Reliability Engineer)

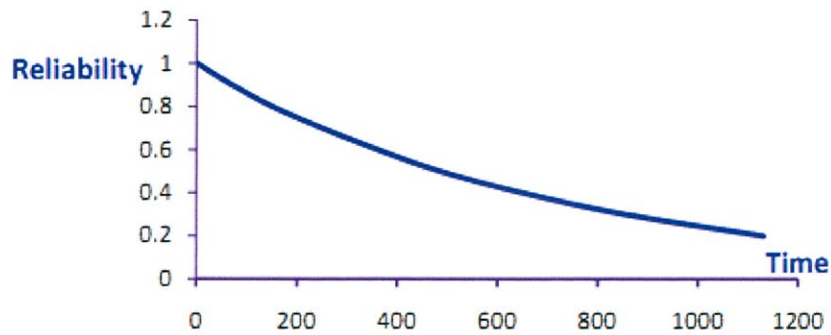
มนุษย์ในยุคปัจจุบันคาดหวังให้ผลิตภัณฑ์หรือสิ่งอำนวยความสะดวกในชีวิตประจำวันสามารถทำงานได้ดีจนกระทั่งผลิตภัณฑ์ชิ้นนั้นหมดอายุการใช้งานตามระยะเวลาที่เหมาะสม แต่มักพบปัญหาที่ต้องมีการเรียกคืนผลิตภัณฑ์หรือการยกเลิกการผลิตสินค้า เช่น การเกิดอุบัติเหตุร้ายแรงหรือการไร้ความน่าเชื่อถือของอุปกรณ์ทางการแพทย์ที่มีต่อความเชื่อมั่นของผู้ป่วยยังคงเป็นปัญหาที่เกิดขึ้นประจำอย่างต่อเนื่อง ผู้บริโภคมีความเป็นกังวลและไม่มีความเชื่อมั่นหากผลิตภัณฑ์สินค้าหรือเครื่องจักรเสียหายก่อนระยะเวลาที่เหมาะสม ชื่อเสียงของบริษัทผู้ผลิตที่ส่งสินค้าให้กับลูกค้าอาจถูกทำลายลงในช่วงเวลาอันสั้นหลังจากพบว่าสินค้ามีข้อบกพร่อง ซึ่งการสร้างความเชื่อถือขึ้นมาใหม่นั้นเป็นเรื่องที่ใช้เวลานาน Ishikawa (1990) ให้ความหมายของการประกันคุณภาพไว้ว่า “หลักประกันที่แสดงว่าผู้บริโภคสามารถซื้อผลิตภัณฑ์หรือการบริการด้วยความมั่นใจ และใช้งานอย่างพึงพอใจตลอดช่วงการใช้งาน”

ในการวิเคราะห์เรื่องความเชื่อมั่นทางวิศวกรรมต้องเข้าใจธรรมชาติของการสึกหรอหรือวงจรชีวิตของชิ้นส่วนซึ่งอธิบายได้ดังกราฟเส้นโค้งรูปอ่างน้ำ ดังแสดงตามรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 กราฟเส้นโค้งรูปอ่างน้ำ (Bathtub curve)

กราฟฟังก์ชันความเชื่อมั่น (Reliability function) แสดงได้ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 กราฟฟังก์ชันความเชื่อมั่น (Reliability function)

จากกราฟฟังก์ชันความเชื่อมั่นเมื่อเริ่มต้นมีค่า = 1 ซึ่งหมายถึงยังไม่มีของเสียเกิดขึ้นและเมื่อเวลาผ่านไปมีของเสียเกิดขึ้นค่าความเชื่อมั่นในตัวสินค้าจะค่อยๆลดลง จนเมื่อผลิตภัณฑ์นั้นเสียหายหมดค่าความเชื่อมั่นจะเป็น 0 หมายถึงผู้บริโภคต้องพิจารณาเปลี่ยนชิ้นผลิตภัณฑ์ใหม่ ซึ่งการทดสอบด้านความเชื่อมั่นมีความสำคัญในงานอุตสาหกรรมมาก เพราะผู้ผลิตจะได้พัฒนาผลิตภัณฑ์ให้มีอายุใช้งานยืนยาวตลอดช่วงความเชื่อมั่นที่ได้ให้การรับประกันไว้กับลูกค้าตลอดจนหากมีความเสียหายเกิดขึ้นสามารถทำการปรับปรุงแก้ไขให้สามารถใช้งานได้ก่อนที่จะหมดระยะเวลาประกัน

## 2.2 ความไม่สมบูรณ์ของผลึก

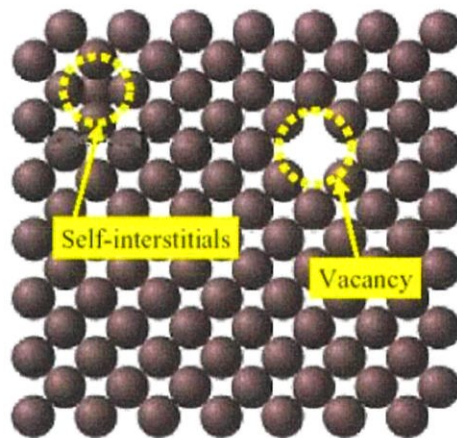
โครงสร้างของผลึกที่มีอนุภาคหรืออะตอมเรียงตัวกันอยู่อย่างเป็นระเบียบเรียบร้อยถูกต้องตามระบบผลึก อาจเรียกได้ว่าเป็น Perfect crystals แต่ในทางปฏิบัติแล้วผลึกที่สมบูรณ์ทุกอย่างนั้นหาได้ยาก เพราะมักจะมีขอบกพร่องอยู่เสมอและส่วนมากเป็นผลึกที่ไม่สมบูรณ์ใน space lattice เพราะ space lattice มีรูปทรงเรขาคณิต ความไม่สมบูรณ์ที่เกิดขึ้นสามารถแบ่งได้ตามลักษณะเรขาคณิต ซึ่งในที่นี้จะพิจารณาถึงความไม่สมบูรณ์ในผลึกเพียง 3 ลักษณะ คือ

1. ความไม่สมบูรณ์แบบจุด (Point Defects)
2. ความไม่สมบูรณ์แบบเส้น (Line Defects)
3. ความไม่สมบูรณ์แบบตามผิวหน้า (Surface Defects)

### 2.2.1 ความไม่สมบูรณ์แบบจุด (Point Defects)

เป็นความไม่สมบูรณ์ที่เกี่ยวข้องของกับอะตอมจำนวนไม่มากภายในผลึก อาจแบ่งออกเป็นลักษณะต่างๆ ได้ดังนี้

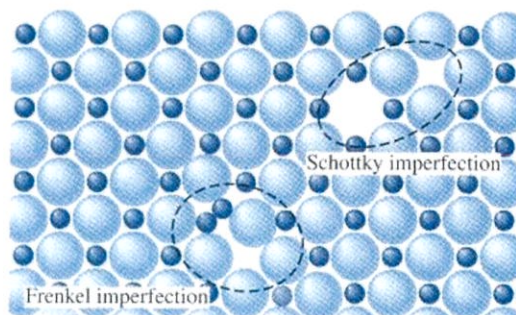
2.2.1.1 Vacancy เกิดขึ้นเนื่องจากบางอะตอมที่ควรอยู่ในผลึกที่สมบูรณ์หายไปจาก matrix อาจเกิดขึ้นระหว่างการเกิดผลึกของโลหะ (Crystallization) ขณะกำลังแข็งตัวจากสภาพหลอมละลาย หรือเกิดขึ้นเนื่องจากการสั่นสะเทือนของอะตอม (Thermal Vibration) เมื่อโลหะถูกทำให้ร้อนขึ้น ดังแสดงรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 ความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบ Vacancy และ Interstitials

2.2.1.2 Interstitials เกิดขึ้นเนื่องจากมีอะตอมที่เกินมามากกว่าปกติและเขาไปอยู่ระหว่างของว่างระหว่างอะตอมภายในผลึก ซึ่งเป็นสาเหตุทำให้ตำแหน่งอะตอมที่อยู่ใกล้เคียงบิดเบี้ยวไปโดยทั่วไปแล้วมักจะเกิดขึ้นในโลหะที่มีค่า Atomic Packing Factor; APF ต่ำ

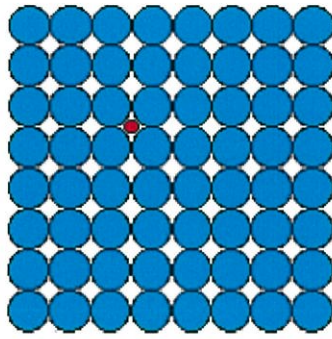
2.2.1.3 Frenkel Imperfection เป็นลักษณะที่อะตอมจากตำแหน่งที่ขาดหายไปได้เข้าไปแทรกที่ช่องว่างระหว่างอะตอมใกล้เคียงในผลึกที่มีโครงสร้างอัดแน่น (Close packed Structure) มักเกิดความไม่สมบูรณ์ในลักษณะนี้ได้น้อย ดังแสดงในรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 การเกิด Frenkel Imperfection และ Schottky Imperfection

2.2.1.4 Schottky Imperfection เป็นลักษณะที่การที่ประจุบวกและประจุลบหายไป ดังที่  
เกิดขึ้นตามรูปที่ 2.3

2.2.1.5 Impurity atom ไตแกการที่มีอะตอมของโลหะหรือธาตุอื่นเข้ามาแทรก (Interstitial  
impurity atom) ดังรูปที่ 2.5

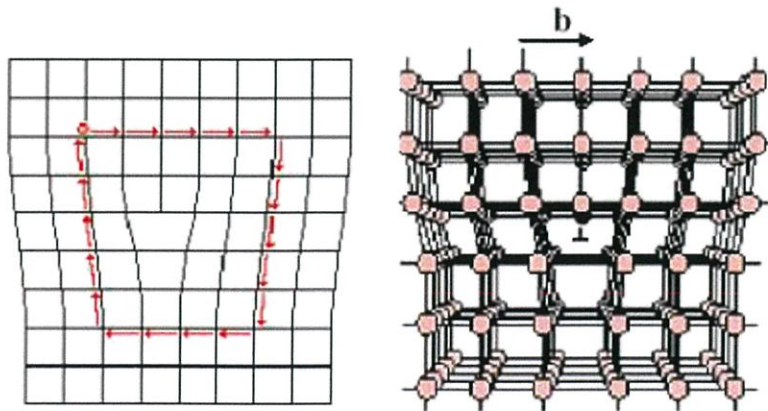


รูปที่ 2.5 การมี Impurity atom

## 2.2.2 ความไม่สมบูรณ์แบบเส้น (Line Imperfections)

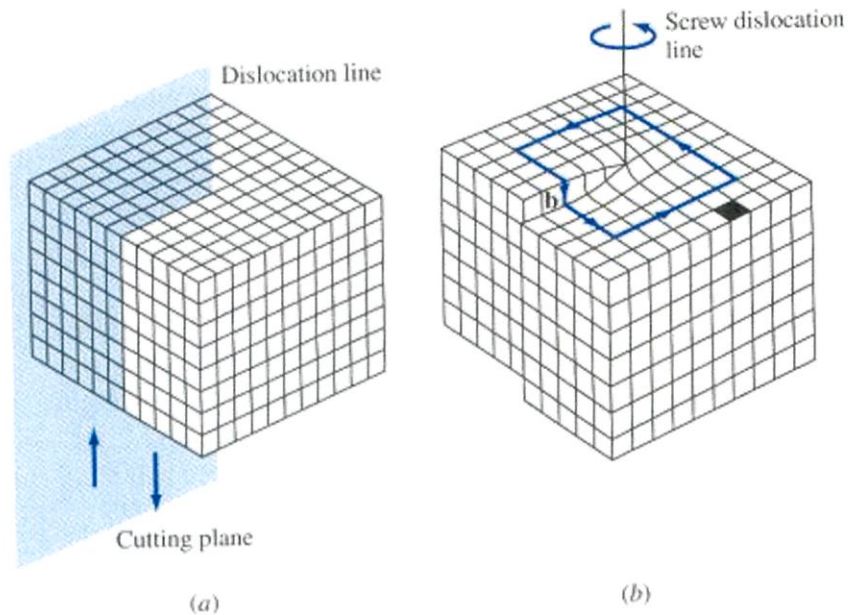
เป็นความไม่สมบูรณ์ที่เกิดขึ้นเนื่องจากการอยู่ผิดสภาพหรือผิดที่ของกลุ่มอะตอมตลอดทั้งแนวหรือ  
ระนาบภายในผลึกบางครั้งเรียกว่า Dislocations อาจแบ่งออกได้เป็น 2 ลักษณะคือ

2.2.2.1 Edge dislocation เกิดจากการที่มีแนวหรือระนาบของอะตอมมากกว่าปกติ (Extra  
half-plane of atoms) เข้ามาในผลึกทำให้เกิดแรงและความไม่สมดุลขึ้น และเกิดการบิดเบี้ยว (Lattice  
distortion) ภายในผลึก ดังแสดงในรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 การเกิด Edge dislocation

2.2.2.2 Screw dislocation เป็นลักษณะที่แถวหรือระนาบของอะตอมที่อยู่ผิดสภาพ โดยมีรูปร่างคล้ายเกลียวหรือเป็นขั้นบันได (Helicoidally plane) แทนที่จะเป็นระนาบซึ่งขนานกัน ดังแสดงในรูปที่ 2.7



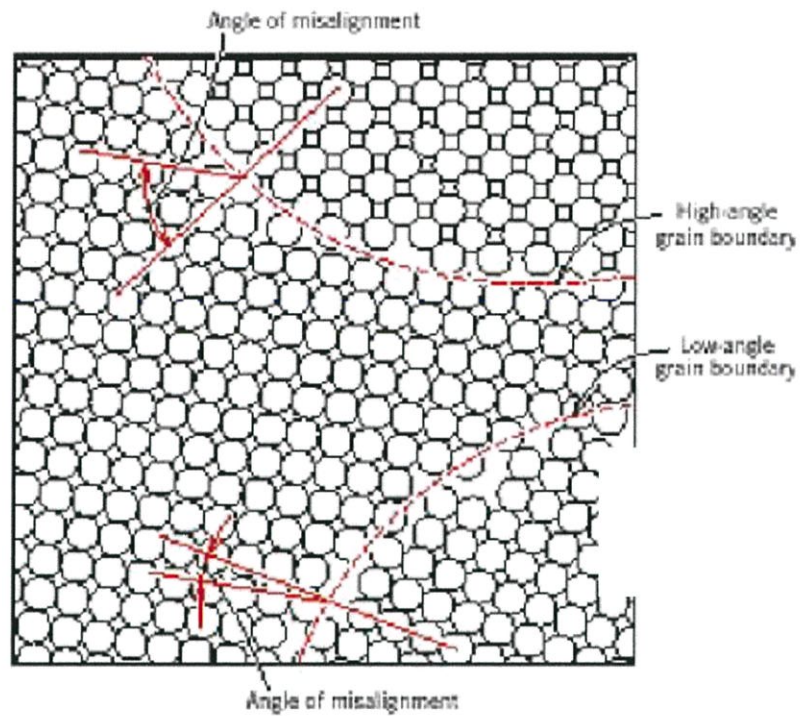
รูปที่ 2.7 การเกิด Screw Dislocation

จากรูปที่ 2.7 โคร่งผลึกที่ได้รับแรงอัด (Compression) บนด้านของระนาบซึ่งมีระนาบสวนเกินอยู่ (Edge dislocation) และด้านตรงข้ามจะได้รับแรงดึง (Tension) ส่วน Screw dislocation ไม่มีแรงดึงหรือแรงอัดแต่มีเฉพาะแรงเฉือน (shear)

### 2.2.3 ความไม่สมบูรณ์แบบผิวหน้า (Surface Imperfections)

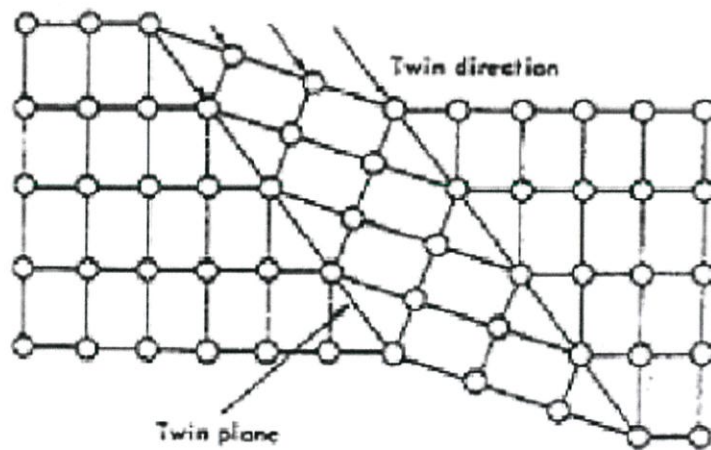
ความไม่สมบูรณ์แบบนี้เกิดจากการเปลี่ยนแปลงของระนาบอะตอมที่กองรวมกันอยู่ขามขอบเกรนไป การเปลี่ยนแปลงอาจเป็นการจัดตัวหรือการจัดลำดับของระนาบที่รวมตัวอัดกันอยู่ซึ่งความไม่สมบูรณ์แบบผิวหน้ามีหลายชนิดดังนี้

2.2.3.1 ขอบเกรน (Grain boundaries) เป็นความไม่สมบูรณ์ที่ผิวหน้าซึ่งแบ่งผลึกที่มีการเรียงตัวทิศทางต่างๆกันออกเป็นหลายเกรน รูปที่ 2.8 เป็นรูป 3 มิติซึ่งอะตอมที่ขอบของทั้งสองเกรนที่มีการเรียงตัวไม่เป็นระเบียบมีอะตอมล้อมรอบไม่สมบูรณ์ ดังนั้นขอบเขตที่อะตอมอัดตัวกันไม่สมบูรณ์จะเป็นความไม่สมบูรณ์ในสามมิติ การเปลี่ยนแปลงนี้เกิดขามผิวที่แบ่งระหว่างเกรน นับได้ว่าเป็นความไม่สมบูรณ์ตามธรรมชาติของขอบเกรนที่สามารถมองเห็นได้จากโดยไขกลองจุลทรรศน์ สำหรับวัตถุโปร่งใสจะมองเห็นโดยไขแสงสองผาน ถ้าในวัตถุทึบแสงต้องนำไปกัดกรดก่อน แสดงดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 ความไม่สมบูรณ์ของเกรน

ความไม่สมบูรณ์แบบผิวหน้ามีการเรียงตัวแตกต่างกันโดยแบ่งออกเป็น 2 ส่วน และมีลักษณะคล้ายกับว่าส่วนหนึ่งเป็นเงาของอีกส่วนหนึ่งเมื่อมองดูจากกระจกที่เรียกว่า Twin boundaries ดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 การเกิด Twin boundaries

2.2.3.2 Stacking fault เป็นความไม่สมบูรณ์แบบผิวที่เป็นผลมาจากการที่ระนาบของอะตอมระนาบหนึ่ง ไม่เรียงลำดับกับระนาบอื่นๆ ในขณะที่โครงสร้างผลึกบนด้านใดด้านหนึ่งของระนาบอื่นนั้นสมบูรณ์ เช่นการเรียงลำดับในผลึก FCC มีลักษณะเป็นABCABCABC... ถ้าเกิด stacking fault จะเปลี่ยนเป็น ABCABABCA... การเกิด stacking fault ขึ้นอยู่กับระนาบ A ที่อยู่ถัดจากระนาบที่ 2 “B” และอาจจะอธิบายได้ว่าเป็นบริเวณที่มี HCP ปะปนอยู่ในผลึก FCC ซึ่งอาจจะเกิดในระนาบที่ผลึกกำลังเติบโตและอาจเป็นผลจากการแบ่งแยกของ Partial dislocation สองส่วน

## 2.3 ขนาดของเกรน (Grain Size)

ขนาดของเกรนในโลหะ Polycrystalline มีความสำคัญเนื่องจากจำนวนของขอบเกรนที่ผิวหน้าจะมีผลโดยตรงกับคุณสมบัติต่างๆ ของโลหะ เช่น คุณสมบัติทางดานความแข็งแรง คือที่อุณหภูมิต่ำ (น้อยกว่าหนึ่งเท่าครึ่งของอุณหภูมิจุดหลอมเหลว) ที่ขอบเกรนจะมีความแข็งแรงมากกว่าที่เนื้อของโลหะ แต่ที่อุณหภูมิสูงขึ้นที่ขอบเกรนก็จะเกิดการเลื่อนไหลและที่ขอบเกรนความแข็งแรงก็จะลดลงมาก

## 2.4 การบัดกรี(Solder)

การบัดกรี คือ การประสานโลหะสองชิ้นเข้าด้วยกันซึ่งโลหะทั้งสองชิ้นนี้อาจเป็นโลหะชนิดเดียวกันหรือต่างชนิดกันก็ได้ โดยใช้โลหะบัดกรีที่มีอุณหภูมิหลอมละลายต่ำเป็นตัวประสาน อุณหภูมิหลอมละลายของตัวประสานนี้ต้องต่ำกว่าโลหะที่เป็นชิ้นงาน การเชื่อมประสานโดยทั่วไปจะมีอุณหภูมิหลอมละลายไม่เกิน 450°C หลักการประสานด้วยการบัดกรี คือการทำให้ผิวของชิ้นงานที่จะบัดกรีสะอาดทำให้เกิดการประสานกันอย่างสมบูรณ์ และใช้ฟลักซ์ ช่วยขจัดผิวออกไซด์ที่จุดเชื่อมต่อทำให้ชิ้นงานสะอาดขึ้นในขณะบัดกรี ฟลักซ์ที่ใช้ควรเป็นสารเคมีบริสุทธิ์ เช่น กรดบอริก เกลือโซเดียมไซยาไนด์ อัลคาไลน์ ไบฟลูออไรด์ เป็นต้น ทำให้โลหะบัดกรีที่หลอมเหลวด้วยความร้อนสามารถยึดเกาะผิวโลหะ การยึดเกาะระหว่างชิ้นงานกับโลหะบัดกรีเกิดจากการหดตัวของโมเลกุลโลหะบัดกรีทำให้เกิดการยึดติดกับโมเลกุลของชิ้นงานเหนียวแน่นยิ่งขึ้น

## 2.5 โลหะบัดกรี(Solder)

โลหะบัดกรี หมายถึง โลหะที่มีจุดหลอมละลายต่ำ ใช้เป็นตัวเชื่อมประสานชิ้นงานโลหะเข้าด้วยกัน ทั้งนี้อุณหภูมิหลอมละลายของตัวเชื่อมประสานจะต่ำกว่าอุณหภูมิหลอมละลายของชิ้นงานที่ต้องการเชื่อมต่อกันเสมอ และโลหะบัดกรีนี้ทำหน้าที่เป็นตัวเชื่อมประสานเท่านั้น ไม่ได้ทำปฏิกิริยากับโลหะที่ถูกเชื่อม โลหะบัดกรีชนิดที่เป็นส่วนผสมของดีบุกและตะกั่ว (Sn-Pb) มีการใช้กันมากในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ โดยข้อดีคือราคาถูก มีสมบัติการบัดกรีที่ดี อุณหภูมิหลอมเหลวอยู่ในช่วงที่เหมาะสม มีสมบัติทางกายภาพ ทางกล ทางโลหะวิทยาที่ดี และสมบัติต้านทานความล้าที่ดี อย่างไรก็ตามยังคงมีความเป็นพิษ เนื่องจากมีตะกั่วผสมอยู่ในปริมาณสูง ดังนั้น จึงมีการนำโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วมาใช้ทดแทนโลหะบัดกรีชนิดดีบุก-ตะกั่ว (Sn-Pb) เพื่อลดปัญหาเรื่องความเป็นพิษที่มีผลต่อสิ่งแวดล้อม ซึ่งโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วที่นำมาทดแทนต้องมีสมบัติต่างๆ ใกล้เคียงกับโลหะบัดกรีชนิดที่มีตะกั่วผสม คุณสมบัติเบื้องต้นของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วที่ใช้เป็นเกณฑ์ในการพิจารณามีดังนี้

- อุณหภูมิหลอมเหลวใกล้เคียงกับโลหะบัดกรีชนิด Sn-Pb
- มีสมบัติทางกายภาพไม่ด้อยกว่าโลหะบัดกรีชนิด Sn-Pb
- มีสมบัติต้านทานการล้าที่ดี
- ไม่เป็นพิษ
- ราคาถูก

### สมบัติของธาตุเจือชนิดต่างๆ

เงิน (Ag) เป็นโลหะที่ใช้เป็นส่วนผสมในบัดกรี มีราคาสูง โลหะเงินช่วยเพิ่มความแข็งแรงให้กับโลหะบัดกรี ทำให้สมบัติการแผ่กระจายดีขึ้นและมีจุดหลอมเหลวต่ำลง

บิสมัท (Bi) โลหะดีบุกผสมบิสมัทในอัตราส่วน 42Sn-58Bi มีโครงสร้างแบบยูเทคติก โลหะบัดกรีกลุ่มนี้มีจุดเด่นคือ มีอุณหภูมิหลอมเหลวต่ำมากคือ 139°C จึงเป็นข้อดีเพราะสามารถใช้งานกับอุปกรณ์ที่ไม่สามารถทนความร้อนในการบัดกรีสูงได้ ลักษณะทางโครงสร้างของโลหะบัดกรีชนิดนี้เป็นแผ่นแบบ lamellar มีความสามารถในการเชื่อมประสานดีมาก แต่มีข้อเสียคือบิสมัทราคาแพง

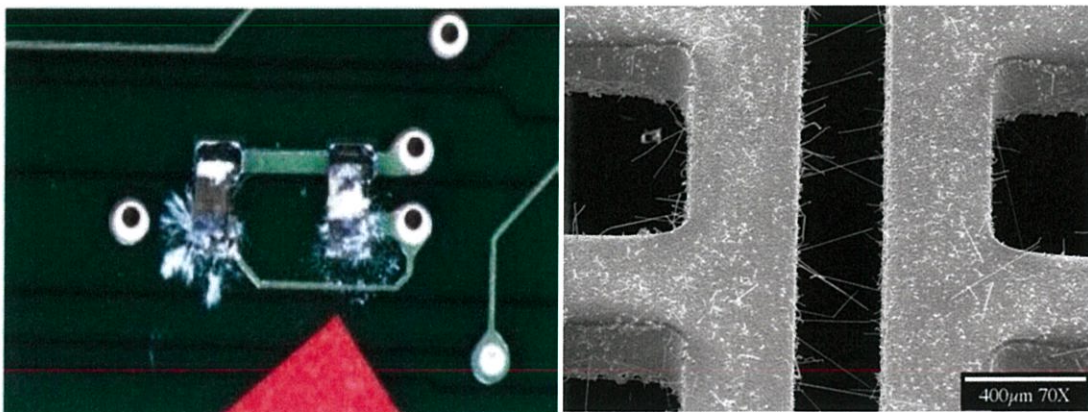
พลวง (Sb) การเติมพลวงในปริมาณที่พอเหมาะจะช่วยเพิ่มสมบัติการต้านทานคืบและการต้านทานการล้าของโลหะบัดกรีให้ดีขึ้น แต่การใช้พลวงมีข้อเสียคือทำให้สมบัติการเปียกและการแผ่กระจายของโลหะบัดกรีน้อยลง

ทองแดง (Cu) เมื่อผสมดีบุกกับทองแดงในอัตราส่วน 99.3Sn-0.7Cu จะทำให้เกิดโครงสร้างยูเทคติกที่มีจุดหลอมเหลว 227°C โครงสร้างจุลภาคประกอบด้วยเฟส  $Cu_6Sn_5$  ลักษณะเป็นแท่งฝังอยู่ในเนื้อดีบุกทองแดงจะทำให้โลหะบัดกรีมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น ข้อเสียของโลหะบัดกรีในกลุ่ม Sn-Cu คือการมีธาตุเจือปนผสมอยู่น้อยจึงอาจเกิดเส้นใยดีบุกขึ้น ซึ่งทำให้เกิดปัญหากระแสไฟฟ้าลัดวงจร

สังกะสี (Zn) เป็นโลหะที่มีจุดเด่นด้านอุณหภูมิหลอมเหลวต่ำ ราคาถูก โลหะบัดกรีชนิดดีบุก-สังกะสีที่จุดยูเทคติก (Sn-9wt.%Zn) มีอุณหภูมิหลอมเหลว 199°C ซึ่งใกล้เคียงกับโลหะบัดกรีชนิดดีบุก-ตะกั่ว (Sn-Pb) ที่จุดยูเทคติก (183°C) Sn-9wt.%Zn ประกอบด้วยเฟส 2 เฟส คือเนื้อดีบุก และ Hexagonal Zn การรวมตัวกับดีบุกอยู่ในลักษณะสารละลายของแข็งที่มีดีบุกน้อยกว่า 1% โครงสร้างจุลภาคของ Sn-Zn มีลักษณะเป็นแผ่นบางสลับกันระหว่างเฟส Sn กับ Zn ซึ่งทั้งดีบุกและสังกะสีต่างก็สามารถทำปฏิกิริยากับ Substrate ที่เป็นทองแดงได้ โลหะบัดกรีในกลุ่ม Sn-Zn มีข้อด้อยบางประการเช่น Zn สามารถทำปฏิกิริยากับออกซิเจนได้ง่าย เกิดเป็นสังกะสีออกไซด์มากเมื่อใช้งานในกระบวนการบัดกรีแบบ Wave Soldering นอกจากนี้ Zn ยังเกิดปฏิกิริยาได้ไวกับสารเคมีซึ่งผสมอยู่ในฟลักซ์ที่ใช้กับโลหะบัดกรีในกลุ่ม Sn-Pb ทำให้เกิดการกัดกร่อน

## 2.6 ขนแมว (Whisker)

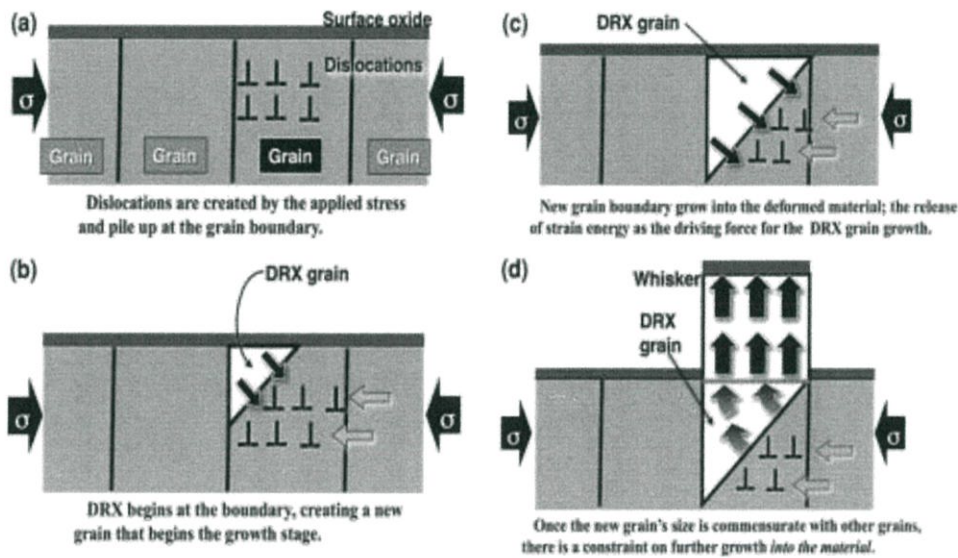
การเกิดขนแมวเป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นในอุปกรณ์ไฟฟ้า นักวิจัยได้ทำการค้นพบและได้บันทึกไว้ในช่วงต้นศตวรรษที่ 20 ว่าเป็นปรากฏการณ์ที่เกิดในอุปกรณ์ที่ใช้ดีบุกบริสุทธิ์หรือในการผลิตดีบุกบริสุทธิ์ สังเกตได้ว่ามีเศษโลหะหรือเส้นใยโลหะเล็กๆ เกิดขึ้นระหว่างแผ่นโลหะบัดกรี ดังรูปที่ 2.10 ซึ่งก่อให้เกิดการลัดวงจรได้



รูปที่ 2.10 ลักษณะการเกิดขนแมว

## 2.7 ทฤษฎีการเกิดขนแมว โดย Vianco

การเติบโตของขนแมว (Whisker) เป็นรูปแบบของ Dynamics Recrystallization (DRX) ดังแสดงในรูปที่ 2.11 ประกอบด้วยกระบวนการที่ต่อเนื่องของการเสียรูปที่จะเพิ่มพลังงานความเครียดของการเกิดเกรนใหม่และการเติบโตของเกรนซึ่งก่อให้เกิดการสร้างขนแมว การเสียรูปอย่างต่อเนื่องการเสียรูปอย่างต่อเนื่องภายใต้ความเค้นกดจะผลักดันกลไกขนส่งมวล โดยความเค้นกดสร้างความไม่สมบูรณ์เส้นที่ขอบเกรนที่มีอยู่ก่อนและส่งผลให้พลังงานความเครียดเพิ่มขึ้นถึงจุดที่เกรนใหม่เกิดขึ้น แบบจำลองของ Vianco นี้ขนแมวไม่ได้เติบโตจากเกรนที่มีอยู่ จึงคล้ายกับแบบจำลองที่เสนอโดย Smetana



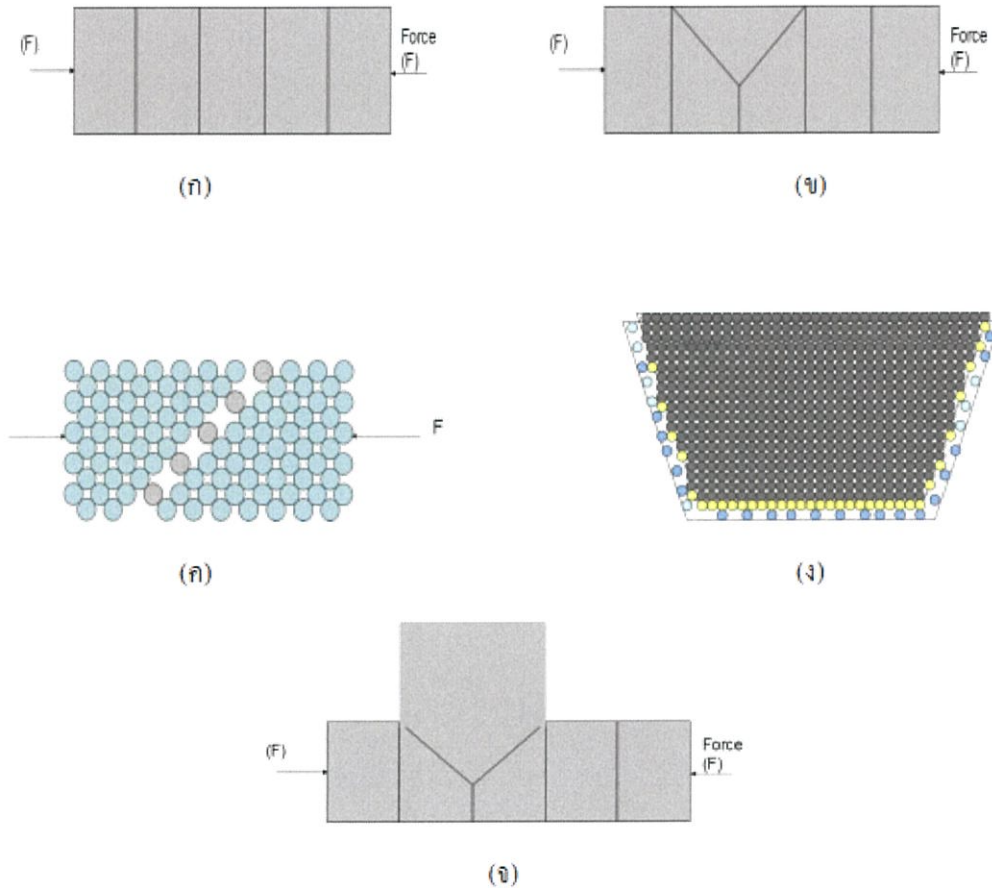
รูปที่ 2.11 แผนภาพแบบจำลองการเติบโตของ Whisker ภายใต้ DRX

## 2.8 ทฤษฎีการเกิดขนแมว โดย Smetana

ในแบบจำลองของ Smetana อะตอมบริเวณขอบเกรนขนแมวที่ฐานของขนแมวแสดงให้เห็นว่า โดยเฉลี่ยแล้วระดับพลังงานหรือระดับความเค้นจะต่ำกว่าบริเวณโดยรอบ ซึ่งแบบจำลองนี้ช่วยแสดงการเคลื่อนที่ของอะตอมดีบุกโดยไม่ให้ไปที่บริเวณพลังงานที่สูงกว่าฐานของขนแมว คือขอบของเกรนพื้นที่ร่วมระหว่างขนแมวกับกับเกรนของขนแมวอื่นๆ (ไม่ใช่ผิวของธาตุดีบุกในบริเวณขอบเกรนขนแมว) ในแบบจำลองนี้การเกิดผลึกใหม่จำเป็นต้องมีช่องว่างที่ฐานของขอบเกรนขนแมวจึงจะทำให้อะตอมดีบุกสามารถเคลื่อนที่ตามแบบที่กล่าวมาได้

รูปที่ 2.12 (ก) แสดงขอบเกรนรูปเสาที่เสื่อมภายใต้ความเค้นกด หลังจากการเกิดผลึกใหม่ใน (ข) จะทำให้ขอบเกรนเป็นมุมเอียง ซึ่งส่งผลให้ความเค้นขอบเกรนต่ำกว่าขอบเกรนแนวตั้ง เป็นจุดกำเนิดของความเค้นลาดเอียงตั้งแต่ของเกรนที่มีบริเวณช่องว่างสูงกับความหนาแน่นที่บรรจุอะตอมมีระดับต่ำ ทั้งหมด

อาจทำหน้าที่เป็นแหล่งหรืออ่างสำหรับที่ว่าง (ค) แสดงถึงการแพร่ของอะตอมตึบุกที่เคลื่อนเข้าไปตามขอบเกรนที่มุมเอียง เนื่องจากความเค้นลาดเอียงตั้งแต่ขอบเกรนไม่คงที่ การเลื่อนของขอบเกรนสามารถเกิดขึ้นตามแนวขอบ นอกจากนี้ อะตอมตึบุกแพร่กระจายเข้าสู่ขอบเกรน (ความหนาแน่นบรรจุต่ำ) บางอะตอมจากขอบเกรนเคลื่อนเข้าสู่เกรนขนานแนวหนึ่ง ตัวอย่างที่เป็นไปได้ของการเกิดปรากฏการณ์นี้ซึ่งแสดงใน (จ) ขึ้นอยู่กับตำแหน่งอะตอมตึบุกที่จะนำเข้าสู่เกรนขนานแนว



รูปที่ 2.12 แผนภาพแบบจำลอง Whisker ของ Smetana

## 2.9 ทฤษฎีความเค้นกดที่มีผลต่อการเกิดขนแมว

ความเค้นกด (Compressive Stress) ขึ้นอยู่กับแหล่งที่มา สามารถแบ่งได้ 2 ประเภท คือ

- ความเค้นกดเนื่องจากเคมี (Chemical)
- ความเค้นกดเนื่องจากทางกล (Mechanical) หรือ ทางความร้อน (Thermal)

### 2.9.1 ความเค้นกดเนื่องจากเคมี(Chemical)

ความเค้นกดเนื่องจากเคมีจะเกิดขึ้นมาจากปริมาณการขยายตัวในช่วงการเติบโตของสารประกอบเชิงโลหะ (Intermetallic Compounds - IMCs) ซึ่งส่วนใหญ่จะก่อตัวขึ้นที่บริเวณขอบเกรนของดีบุก ในระหว่างบัดกรี วัสดุของแข็งของสารตั้งต้น (Substrate) จะละลายและผสมกับโลหะบัดกรี ช่วยให้เกิดการก่อตัวของสารประกอบเชิงโลหะ ในโลหะผสมประกอบด้วยดีบุกและทองแดง ความแตกต่างของสารประกอบโลหะทั้งสอง คือ  $Cu_6Sn_5$  หรือ  $Cu_3Sn$  การมีทองแดงเป็นองค์ประกอบในวงจรที่ผลิตด้วยเทคโนโลยีไร้สารตะกั่วจากสองแหล่งกำเนิดที่มีดีบุกกับทองแดง เริ่มด้วยสารตั้งต้นชั้นทองแดงหรือชั้นรองที่ประกอบด้วยทองแดงและแหล่งการเพิ่มของทองแดงที่มีความไม่บริสุทธิ์ในธาตุเจือของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว ในช่วง 0.5%-0.7% โดยน้ำหนัก แม้โลหะผสมมีปริมาณทองแดงได้ถึง 3% โดยน้ำหนัก อัตราในการก่อตัวของ  $Cu_6Sn_5$  จะสูงกว่า  $Cu_3Sn$  ซึ่งหมายถึง  $Cu_6Sn_5$  เป็นปัจจัยสำคัญในการกระตุ้นการเติบโตของขนแมวมากกว่า  $Cu_3Sn$  ลักษณะของขนแมวมีสาเหตุมาจากการก่อตัวของ  $Cu_6Sn_5$  ที่จุดยูเทคติกของโลหะผสม SnCu และดีบุกบริสุทธิ์ นักวิจัยสังเกตเห็นขนแมวบนผิวของชั้น SnCu ซึ่งมีความยาวพอที่จะเกิดไฟฟ้าลัดวงจร (Short-Circuit) และจะเกิดเส้นสั้นๆบนผิวของดีบุกบริสุทธิ์ การเติมทองแดงจะกระตุ้นการเกิดขนแมวและมีอิทธิพลต่อความยาว รูปร่าง และอัตราการเติบโต

### 2.9.2 ความเค้นกดเนื่องจากทางกล (Mechanical) หรือทางความร้อน (Thermal)

ความเค้นทางความร้อนในช่วงการก่อตัวของขนแมวมีผลอย่างมากในเรื่องขนาดของขนแมว โดยความเค้นกดที่มีผลมาจากสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อน (Compressive Stress Resulting from The Thermal Expansion Coefficient - CTE) ในแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่สองชั้นแตกต่างกัน (PCB) ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อนของสารตั้งต้นจะน้อยกว่าของโลหะดีบุกผสม การให้ความร้อนที่ชั้นดีบุกจะมีการขยายตัวมากกว่าการให้ความร้อนที่สารตั้งต้นซึ่งเป็นสาเหตุในการดึงของวัสดุ ดังนั้นการเพิ่มความเค้นกดทำให้เกิดขนแมว

ความเค้นเนื่องจากความร้อนสามารถแบ่งได้เป็น 3 ประเภท ดังนี้

1. ความเค้นเนื่องจากความร้อนคงที่ (Isothermal stress)
2. ความเค้นเนื่องจากความร้อนที่เปลี่ยนแปลงแบบวัฏจักร (Thermal cycling - TC)

### 3. ความเค้นเนื่องจากความร้อนที่เปลี่ยนแปลงอย่างฉับพลัน (Thermal shocks -TS)

ความเค้นเนื่องจากความร้อนทั้ง 3 ประเภทนี้ เป็นผลให้เกิดความเค้นกดทำให้วัสดุมีการดัดงอในช่วงการบ่มที่ความร้อนคงที่ วัสดุจะเกิดการดัดงอจนกว่าทุกชั้นจะเข้าสู่อุณหภูมิแวดล้อม แต่การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในช่วง TC และ TS จะเป็นสาเหตุทำให้เกิดการดัดงอและการยืดออกของวัสดุ ซึ่งสามารถอธิบายวัฏจักรการเปลี่ยนแปลงของความเค้นกดและความเค้นดึงในชั้นดีบุก TC และ TS สามารถเร่งการเติบโตของสารประกอบเชิงโลหะเมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการบ่มที่ความร้อนคงที่ เนื่องจากการมีสารประกอบเชิงโลหะจะกระตุ้นการเกิดขุ่นขาว ซึ่งในช่วง TC และ TS การเติบโตของขุ่นขาวจะมากกว่าการบ่มที่ความร้อนคงที่

## 2.10 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope (SEM))

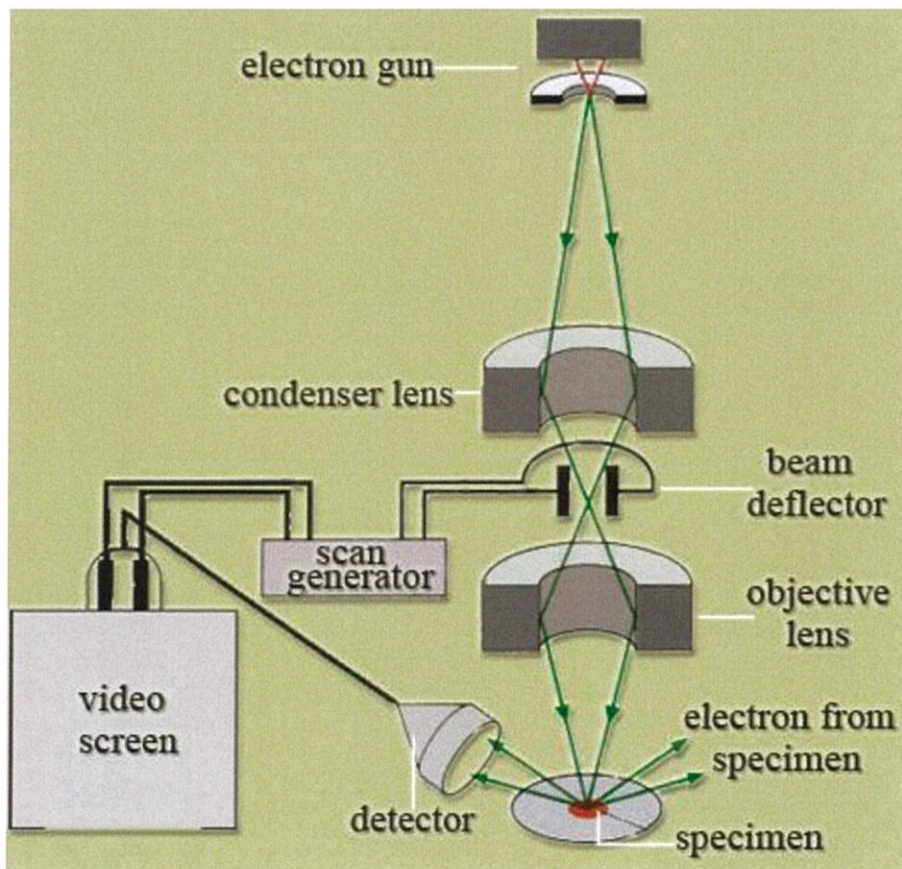
กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนเป็นกล้องจุลทรรศน์ที่ใช้ลำอนุภาคอิเล็กตรอนพลังงานสูงในการตรวจสอบวัตถุแทนแสงธรรมดา เนื่องจากความยาวคลื่นของลำอนุภาคอิเล็กตรอนสั้นกว่าความยาวคลื่นแสงถึง 100,000 เท่า ทำให้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนมีประสิทธิภาพของกำลังขยายสูง และสามารถแจกแจงรายละเอียดได้มากกว่ากล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง โดยสามารถแจกแจงรายละเอียดของวัตถุที่เล็กขนาด 10 อังสตรอม หรือ 0.1 นาโนเมตร (กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงจะแจกแจงรายละเอียดได้ประมาณ 0.2 ไมโครเมตร) จึงทำให้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนมีกำลังขยายสูงมากถึง 500,000 เท่า และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนมี 2 ชนิด ได้แก่ Transmission Electron Microscope (TEM) และ Scanning Electron Microscope (SEM)

Scanning Electron Microscope (SEM) เป็นกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่มีกำลังขยายไม่สูงเท่ากับเครื่อง TEM (เครื่อง SEM มีกำลังขยายสูงสุดประมาณ 10 นาโนเมตร) ขนาดของตัวอย่างที่เตรียมเพื่อดูด้วยเครื่อง SEM ไม่จำเป็นต้องบางเท่ากับที่ดูด้วยเครื่อง TEM เพราะไม่ได้ตรวจวัดจากการที่อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ทะลุผ่านตัวอย่าง การสร้างภาพทำได้โดยการตรวจวัดอิเล็กตรอนที่สะท้อนจากพื้นผิวหน้าของตัวอย่างที่วิเคราะห์ ซึ่งภาพที่ได้จากเครื่อง SEM นี้จะเป็นภาพที่มีลักษณะ 3 มิติ ดังนั้นจึงมีการนำเครื่อง SEM มาใช้ในการศึกษาพื้นฐานและรายละเอียดของลักษณะพื้นผิวของตัวอย่าง เช่น ลักษณะพื้นผิวด้านนอกของเนื้อเยื่อและเซลล์ หน้าตัดของโลหะและวัสดุ เป็นต้น

ข้อดีของเครื่อง SEM เมื่อเปรียบเทียบกับเครื่อง TEM คือ ภาพโครงสร้างที่เห็นจากเครื่อง SEM จะเป็นภาพลักษณะ 3 มิติ ในขณะที่ภาพจากเครื่อง TEM จะให้ภาพลักษณะ 2 มิติ อีกทั้งการใช้เครื่อง SEM มีความรวดเร็วและใช้ง่ายกว่าเครื่อง TEM มาก

### 2.10.1 หลักการทำงานของกล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราด

กล้องชนิดนี้ประกอบด้วยแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนซึ่งทำหน้าที่ผลิตอิเล็กตรอนเพื่อป้อนให้กับระบบ โดยมีการเร่งกลุ่มอิเล็กตรอนที่ได้จากแหล่งกำเนิดด้วยสนามไฟฟ้า จากนั้นกลุ่มอิเล็กตรอนจะผ่านเลนส์รวบรวมรังสี (condenser lens) เพื่อทำให้กลุ่มอิเล็กตรอนกลายเป็นลำอิเล็กตรอน ซึ่งสามารถปรับให้ขนาดของลำอิเล็กตรอนใหญ่หรือเล็กได้ตามต้องการ หากต้องการภาพที่มีความคมชัดจะปรับให้ลำอิเล็กตรอนมีขนาดเล็ก จากนั้นจึงปรับระยะโฟกัสโดยเลนส์ใกล้วัตถุ (objective lens) ลงไปบนผิวชิ้นงานที่ต้องการศึกษา หลังจากลำอิเล็กตรอนกราดลงบนชิ้นงานจะทำให้เกิดอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (secondary electron) ขึ้น เมื่อบันทึกสัญญาณจากอิเล็กตรอนทุติยภูมิและแปลงไปเป็นสัญญาณทางอิเล็กทรอนิกส์แล้วจะนำไปสร้างเป็นภาพบนจอโทรทัศน์ และสามารถบันทึกภาพจากหน้าจอโทรทัศน์ได้ต่อไป



รูปที่ 2.13 ส่วนประกอบและการทำงานของกล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราด

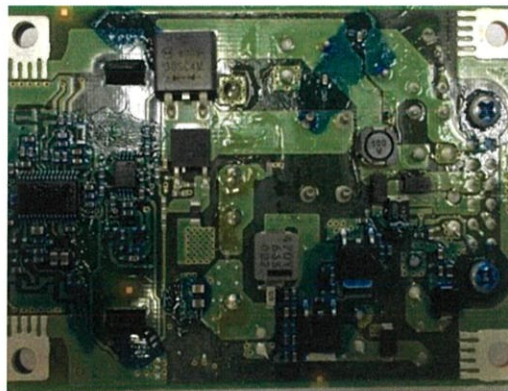
## บทที่ 3

### วิธีดำเนินโครงการ

#### 3.1 วัสดุและอุปกรณ์

##### 3.1.1 ตัวอย่างผลิตภัณฑ์ที่นำมาทดสอบ

ทางบริษัท พานาโซนิค ออโตโมทีฟ ซิสเต็มส์ เอเชีย แปซิฟิก จำกัด ได้มอบตัวอย่างผลิตภัณฑ์ ซึ่งสุ่มมาจากการผลิตจริง คือ แผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่อยู่ในผลิตภัณฑ์ที่ผ่านการบัดกรีโดยโลหะบัดกรีสูตร Sn97% Ag3%



รูปที่ 3.1 แผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์สำหรับการทดสอบ

##### 3.1.2 เครื่องมือที่ใช้ในการทำการทดสอบ

เครื่อง Temperature Humidity Chamber ยี่ห้อ ESPEC



รูปที่ 3.2 เครื่อง Temperature Humidity Chamber

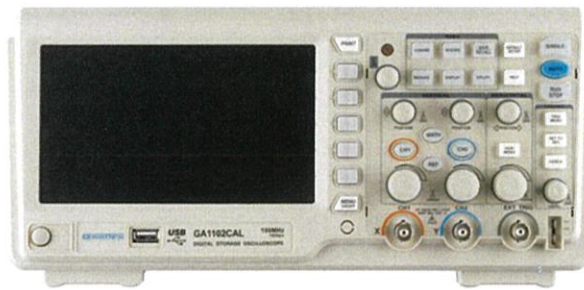
### 3.1.3 เครื่องมือที่ใช้ในการทำการวิเคราะห์ผลการทดสอบ

#### 3.1.3.1 เครื่อง Regulated DC Power Supply ยี่ห้อ KIKUSUI



รูปที่ 3.3 เครื่อง Regulated DC Power Supply

#### 3.1.3.2 เครื่อง Oscilloscope ยี่ห้อ GRATTEN



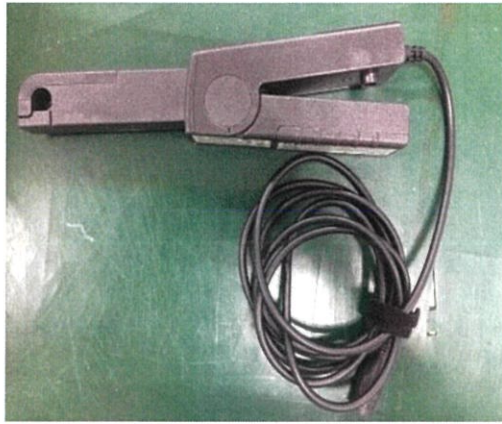
รูปที่ 3.4 เครื่อง Oscilloscope

#### 3.1.3.3 เครื่อง Multimeter ยี่ห้อ UNION



รูปที่ 3.5 เครื่อง Multimeter

## 3.1.3.4 เครื่อง AC/DC Current Probe ยี่ห้อ TEKTRONIX



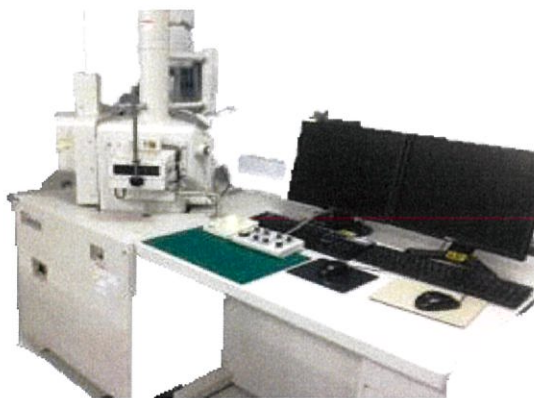
รูปที่ 3.6 เครื่อง AC/DC Current Probe ยี่ห้อ TEKTRONIX

## 3.1.3.5 เครื่อง 3D Microscope ยี่ห้อ KEYEN



รูปที่ 3.7 เครื่อง 3D Microscope

## 3.1.3.6 เครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) ยี่ห้อ HITACHI



รูปที่ 3.8 เครื่อง Scanning Electron Microscope

## 3.2 ขั้นตอนการทดสอบ

3.2.1 ออกแบบการทดสอบโดยอ้างอิงวิธีการทดสอบจาก Standard TSC7038G ซึ่งเป็นมาตรฐานที่ใช้ในการทดสอบความน่าเชื่อถือของผลิตภัณฑ์ในหัวข้อการเกิดขนแมว โดยแบ่ง conditions ในการทดสอบออกเป็น 3 conditions ดังนี้

- 85°C , 85%RH
- 25°C , 85%RH
- -40°C , 85%RH

3.2.2 เตรียมตัวอย่างแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่จะนำมาทดสอบโดยแบ่งตัวอย่างออกเป็น 3 กลุ่มๆ ละ 3 ตัวอย่าง ตาม conditions ที่ใช้ในการทดสอบจาก Standard TSC7038G

3.2.3 วิเคราะห์ตัวอย่างก่อนทำการทดสอบเพื่อตรวจสอบสภาพเริ่มต้นเพื่อให้ทราบว่าตัวอย่างที่ได้รับมาสามารถใช้งานได้ตามปกติหรือไม่ โดยทำการวิเคราะห์ดังต่อไปนี้

3.2.3.1 วิเคราะห์ค่าทางไฟฟ้าของตัวอย่าง โดยค่าทางไฟฟ้าที่วิเคราะห์มีดังนี้

- เวลาในการชาร์จประจุไฟฟ้าจนเต็ม หน่วยเป็น วินาที (s)
- ค่ากระแสไฟฟ้าขณะชาร์จประจุไฟฟ้า หน่วยเป็น แอมแปร์ (A)
- ค่ากระแสไฟฟ้าหลังชาร์จประจุไฟฟ้าเต็มแล้ว หน่วยเป็น มิลลิแอมแปร์ (mA)
- ค่าแรงดันไฟฟ้าที่ออกจากตัวอย่างหลังชาร์จประจุไฟฟ้าเต็มแล้ว หน่วยเป็น โวลต์ (V)

3.2.3.2 วิเคราะห์โครงสร้างของโลหะบัดกรีในตัวอย่าง

- วิเคราะห์ลักษณะภายนอกของจุดบัดกรีด้วยเครื่อง 3D Microscope
- วิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างจุลภาคของจุดบัดกรีอย่างละเอียดด้วยเครื่อง Scanning

Electron Microscope

### 3.2.4 ทำการทดสอบการเกิด Whiskers ด้วยวิธี Temperature Humidity Test

นำตัวอย่างเข้าเครื่อง Temperature Humidity Chamber ทำการทดสอบที่ condition 85°C/85%RH, 25°C/85%RH และ -40°C/85%RH เป็นเวลา 5 cycles โดยแต่ละ cycle ใช้เวลา 200 ชั่วโมง รวมเป็นเวลา 1,000 ชั่วโมง ตามมาตรฐาน TSC7038G โดยแบ่งตัวอย่างออกเป็น 3 กลุ่มๆละ 3 ตัวอย่าง ตามconditions

3.2.5 วิเคราะห์ตัวอย่างหลังทำการทดสอบเพื่อเปรียบเทียบกับผลที่ได้ก่อนทำการทดสอบ โดยทำการวิเคราะห์เหมือนกับขั้นตอนที่ 3.2.3

## 3.3 การประเมินความเหมาะสมและความคุ้มค่าเชิงเศรษฐศาสตร์เบื้องต้น

การประเมินค่าใช้จ่ายต่างๆ ในการดำเนินงาน เช่น ค่าเครื่องมือ ค่าแรง เป็นต้น แล้วจึงนำมาคำนวณค่าใช้จ่ายและเวลาที่ใช้ในการทดสอบเพื่อเปรียบเทียบกันระหว่างการทดสอบโดยผู้จัดทำโครงการนี้กับผลจากบริษัทพานาโซนิค ประเทศญี่ปุ่น และสถาบันยานยนต์ ประเทศไทย เพื่อประเมินความเหมาะสมและความคุ้มค่าเชิงเศรษฐศาสตร์

## บทที่ 4

### ผลการดำเนินโครงการ

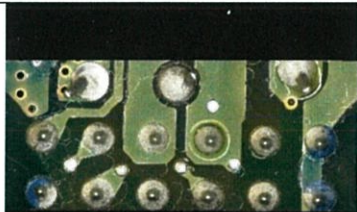
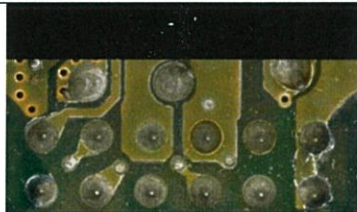
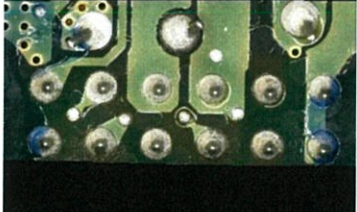
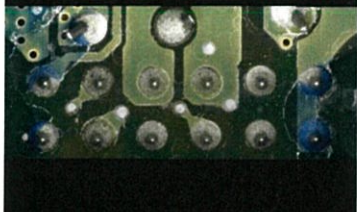
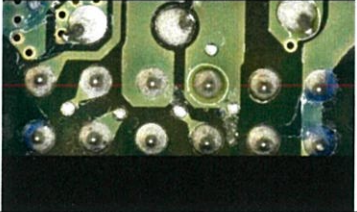
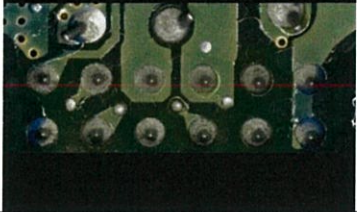
#### 4.1 การวิเคราะห์โครงสร้างของโลหะบัดกรี

จากการทดสอบการเกิด Whiskers โดยนำตัวอย่างแผงวงจรรีเลย์ทรอนิกส์ไปบ่มเพื่อให้โลหะบัดกรีในตัวอย่างได้รับความเค้นสะสมภายใต้อุณหภูมิต่างๆ เป็นเวลา 1,000 ชั่วโมง

##### 4.1.1 ผลการวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวของจุดบัดกรี

จากรูปถ่ายจุดบัดกรีของตัวอย่างแผงวงจรรีเลย์อิเล็กทรอนิกส์ด้วยเครื่อง 3D Microscope ทั้งก่อนผ่านกระบวนการทดสอบและหลังผ่านกระบวนการทดสอบด้วยการบ่มที่อุณหภูมิต่างๆ โดยรูปบัดกรีของตัวอย่างแผงวงจรรีเลย์อิเล็กทรอนิกส์แสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ลักษณะภายนอกของจุดบัดกรีในตัวอย่างแผงวงจรรีเลย์อิเล็กทรอนิกส์

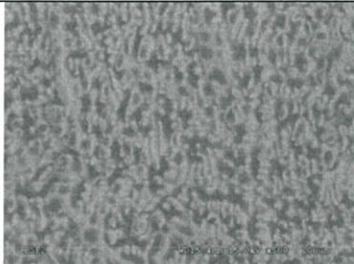
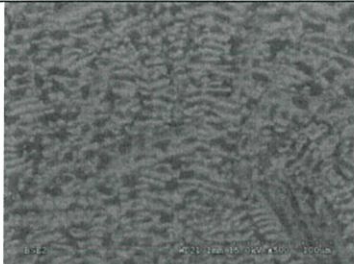
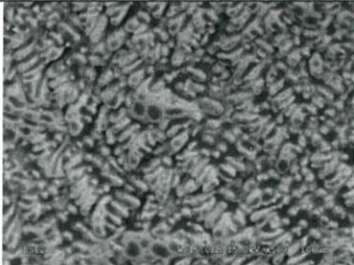
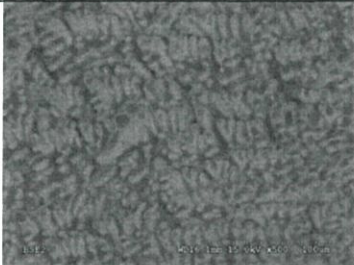
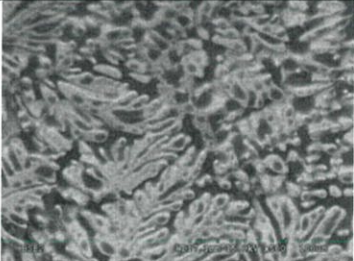
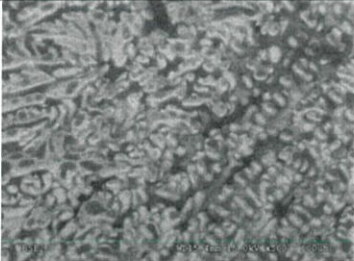
conditions	Before test	After test
85°C , 85%RH		
25°C , 85%RH		
-40°C , 85%RH		

จากตาราง พบว่าลักษณะภายนอกของจุดบัดกรีในตัวอย่างแผงวงจรรีเลย์อิเล็กทรอนิกส์ทั้งก่อนและหลังทดสอบที่อุณหภูมิต่างๆ มีลักษณะปกติทุกตัวอย่าง

#### 4.1.2 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของจุดบัดกรี

เมื่อนำตัวอย่างแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ทั้งก่อนผ่านกระบวนการทดสอบและหลังผ่านกระบวนการทดสอบด้วยการบ่มที่อุณหภูมิต่างๆ มาทำการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) ด้วยกำลังขยาย 500 เท่า ได้ผลการวิเคราะห์ดังนี้

ตารางที่ 4.2 โครงสร้างจุลภาคของจุดบัดกรีในตัวอย่างแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์

conditions	Before test	After test
85 °C , 85%RH		
25 °C , 85%RH		
-40 °C , 85%RH		

จากตารางรูปที่ถ่ายด้วยเครื่อง scanning electron microscope (SEM) ซึ่งแสดงโครงสร้างจุลภาคของจุดบัดกรีในตัวอย่างแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ พบว่า ผิวของโลหะบัดกรีในตัวอย่างมีร่องลึกเป็นเส้น และหลังจากนำไปทดสอบบ่มที่อุณหภูมิต่างๆ ผิวของโลหะบัดกรีในตัวอย่างมีการยุบตัวเป็นแนวมีช่องว่างระหว่างเกรนอยู่มาก ทำให้ความหนาแน่นของโลหะบัดกรีค่อนข้างต่ำ แต่ไม่มีลักษณะการเกิดขนแมวขึ้นในทุกตัวอย่างของทุกอุณหภูมิที่ทำการทดสอบ

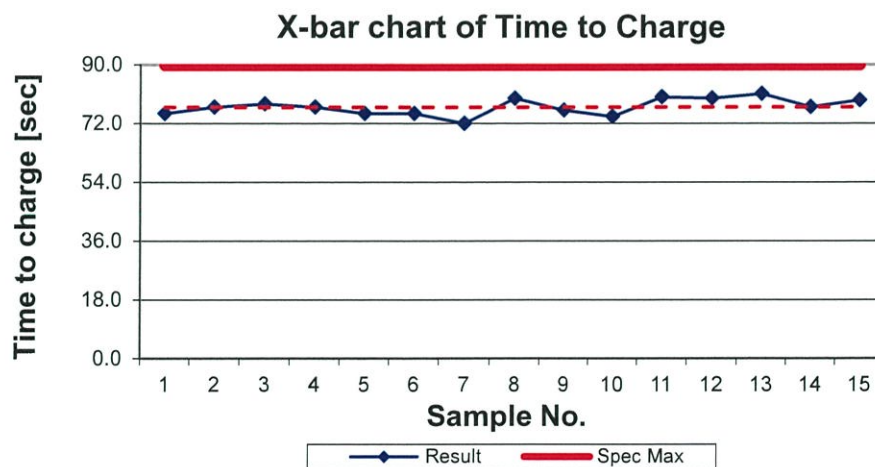
## 4.2 การวิเคราะห์ค่าทางไฟฟ้าของตัวอย่างแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์

เมื่อนำตัวอย่างแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ทั้งก่อนผ่านกระบวนการทดสอบและหลังผ่านกระบวนการทดสอบด้วยการบ่มที่อุณหภูมิต่างๆ มาทำการวิเคราะห์ค่าทางไฟฟ้า โดยใช้เครื่องมือทางไฟฟ้าต่างๆในการวัด ค่าทางไฟฟ้าที่วิเคราะห์มีดังนี้

- เวลาในการชาร์จประจุไฟฟ้าจนเต็ม หน่วยเป็น วินาที (s)
- ค่ากระแสไฟฟ้าขณะชาร์จประจุไฟฟ้า หน่วยเป็น แอมแปร์ (A)
- ค่ากระแสไฟฟ้าหลังชาร์จประจุไฟฟ้าเต็มแล้ว หน่วยเป็น มิลลิแอมแปร์ (mA)
- ค่าแรงดันไฟฟ้าที่ออกจากตัวอย่างหลังชาร์จประจุไฟฟ้าเต็มแล้ว หน่วยเป็น โวลต์ (V)

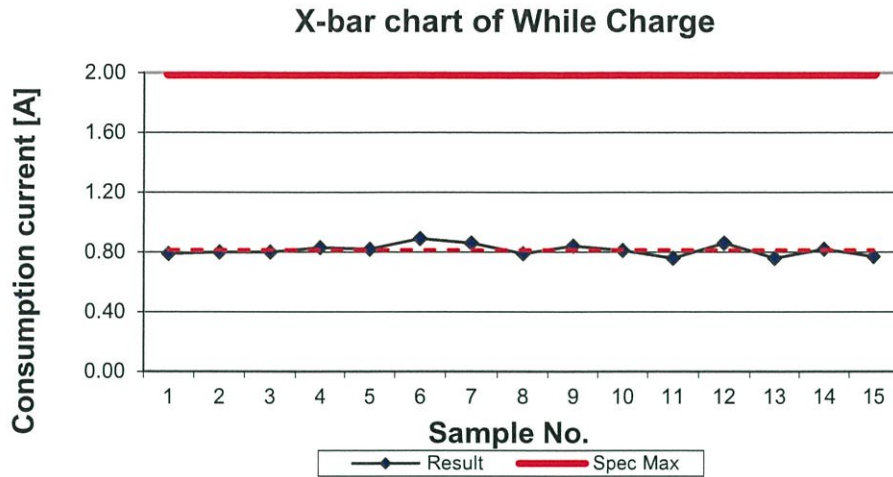
ผลการวิเคราะห์ค่าทางไฟฟ้าต่างๆของตัวอย่างแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์มีดังนี้

4.2.1 ผลการวิเคราะห์ค่าทางไฟฟ้าต่างๆของตัวอย่างแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ก่อนผ่านกระบวนการทดสอบ



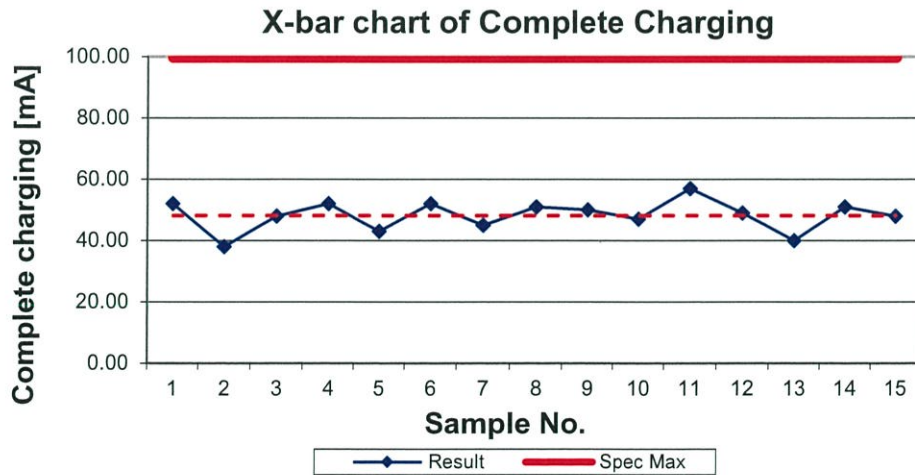
รูปที่ 4.1 แผนภูมิเวลาในการชาร์จประจุไฟฟ้าของตัวอย่างแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์จนเต็ม

จากแผนภูมิเส้น พบว่า เวลาที่ใช้ในการชาร์จประจุไฟฟ้าของตัวอย่างแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ทุกตัวมีค่าเฉลี่ย 75 วินาที ซึ่งเป็นค่าต่ำกว่าเส้นขีดจำกัดสูงสุดคือ 90 วินาที แสดงว่าทุกตัวอย่างอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานตามที่ Drawing กำหนด



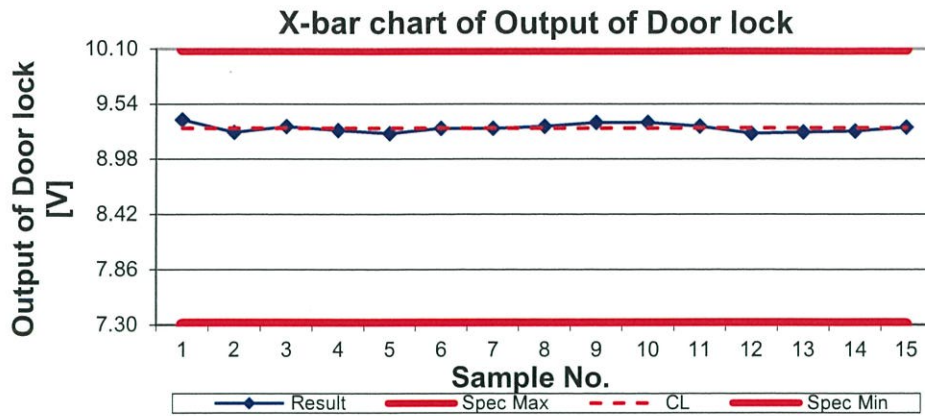
รูปที่ 4.2 แผนภูมิค่ากระแสไฟฟ้าขณะชาร์จประจุไฟฟ้าของตัวอย่างแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์

จากแผนภูมิเส้น พบว่า ค่ากระแสไฟฟ้าที่ใช้ขณะชาร์จประจุไฟฟ้าของตัวอย่างแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ทุกตัวอย่างมีค่าเฉลี่ย 0.80 A ซึ่งเป็นค่าต่ำกว่าเส้นขีดจำกัดสูงสุดคือ 2 A แสดงว่าทุกตัวอย่างอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานตามที่ Drawing กำหนด



รูปที่ 4.3 แผนภูมิค่ากระแสไฟฟ้าหลังชาร์จประจุไฟฟ้าของตัวอย่างแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์เต็มแล้ว

จากแผนภูมิเส้น พบว่า ค่ากระแสไฟฟ้าที่ใช้หลังชาร์จประจุไฟฟ้าของตัวอย่างแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ทุกตัวอย่างมีค่าเฉลี่ย 50 mA ซึ่งเป็นค่าต่ำกว่าเส้นขีดจำกัดสูงสุดคือ 100 mA แสดงว่าทุกตัวอย่างอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานตามที่ Drawing กำหนด

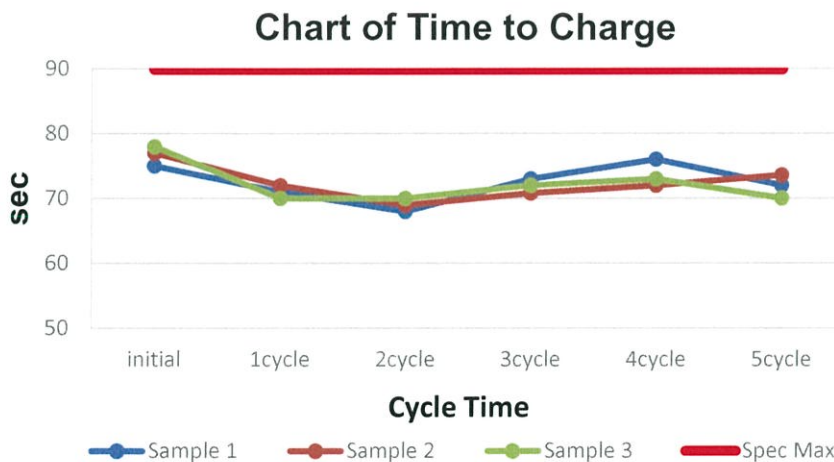


รูปที่ 4.4 แผนภูมิค่าแรงดันไฟฟ้าที่ออกจากตัวอย่างหลังชาร์จประจุไฟฟ้าเต็มแล้ว

จากแผนภูมิเส้น พบว่า ค่าแรงดันไฟฟ้าที่ออกจากตัวอย่างหลังชาร์จประจุไฟฟ้าเต็มแล้วของตัวอย่างแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ทุกตัวอย่างมีค่าเฉลี่ย 9.30 V ซึ่งเป็นค่าต่ำกว่าเส้นขีดจำกัดสูงสุดคือ 10.1 V แสดงว่าทุกตัวอย่างอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานตามที่ Drawing กำหนด

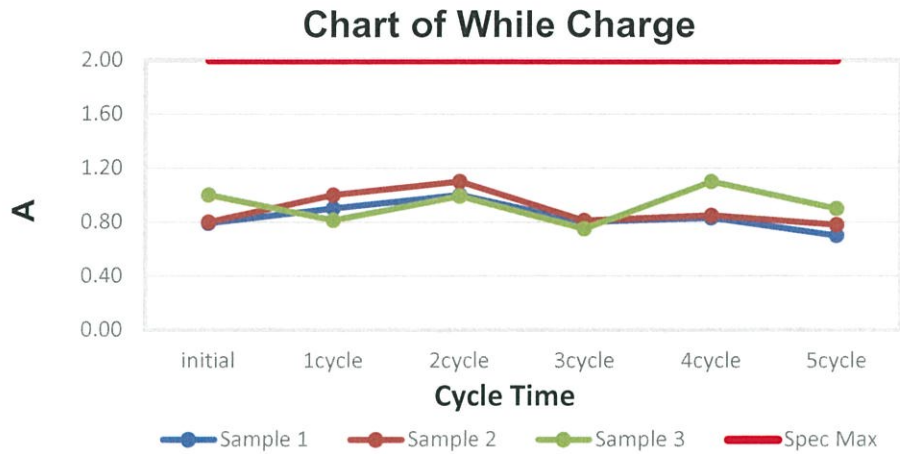
4.2.2 ผลการวิเคราะห์ค่าทางไฟฟ้าต่างๆของตัวอย่างแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์หลังผ่านกระบวนการทดสอบโดยการบ่มที่อุณหภูมิต่างๆ

4.2.2.1 ผลการวิเคราะห์ค่าทางไฟฟ้าต่างๆหลังผ่านการทดสอบที่ 85°C , 85%RH



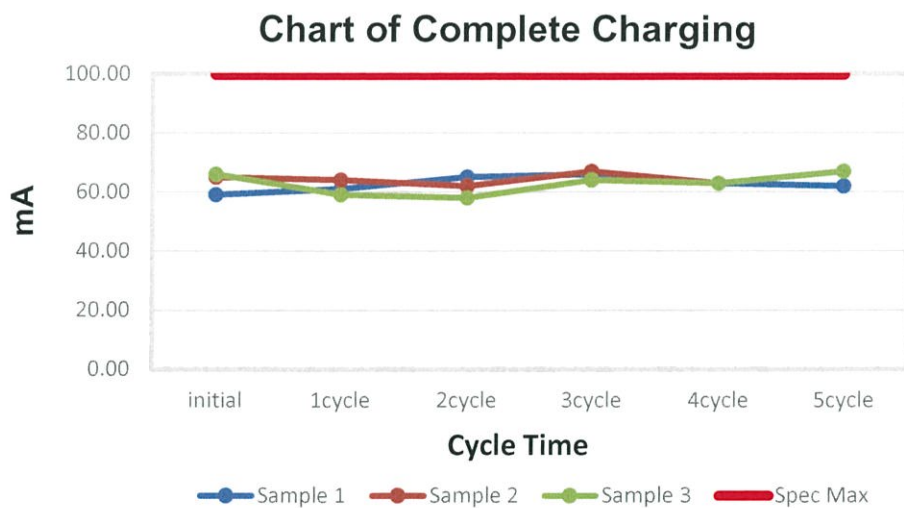
รูปที่ 4.5 แผนภูมิเวลาในการชาร์จประจุไฟฟ้าของตัวอย่างแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์จนเต็ม

จากแผนภูมิเส้น พบว่า เวลาที่ใช้ในการชาร์จประจุไฟฟ้าของตัวอย่างแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ทุกตัวอย่างมีค่าเฉลี่ย 75 วินาที ซึ่งเป็นค่าต่ำกว่าเส้นขีดจำกัดสูงสุดคือ 90 วินาที แสดงว่าทุกตัวอย่างอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานตามที่ Drawing กำหนด



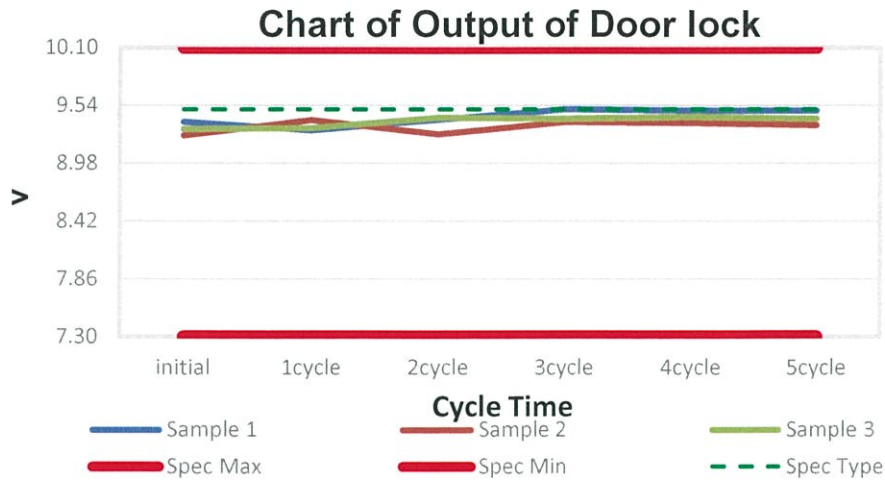
รูปที่ 4.6 แผนภูมิค่ากระแสไฟฟ้าขณะชาร์จประจุไฟฟ้าของตัวอย่างแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์

จากแผนภูมิเส้น พบว่า ค่ากระแสไฟฟ้าที่ใช้ขณะชาร์จประจุไฟฟ้าของตัวอย่างแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ทุกตัวอย่างมีค่าเฉลี่ย 0.95 A ซึ่งเป็นค่าต่ำกว่าเส้นขีดจำกัดสูงสุดคือ 2 A แสดงว่าทุกตัวอย่างอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานตามที่ Drawing กำหนด



รูปที่ 4.7 แผนภูมิค่ากระแสไฟฟ้าหลังชาร์จประจุไฟฟ้าของตัวอย่างแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์เต็มแล้ว

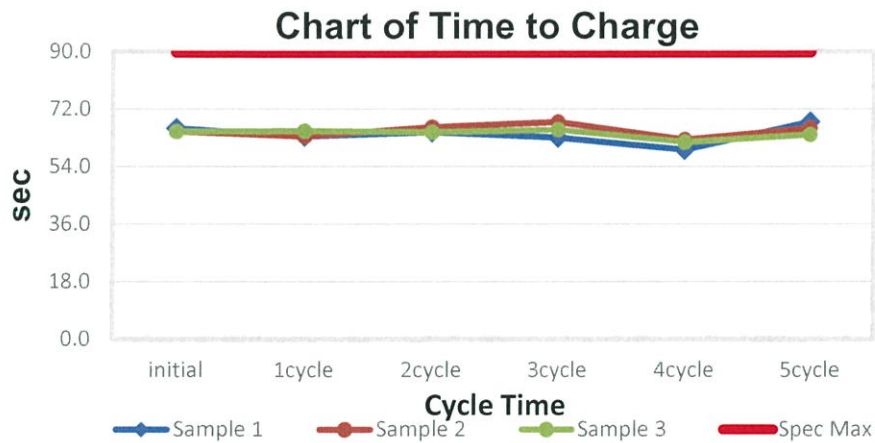
จากแผนภูมิเส้น พบว่า ค่ากระแสไฟฟ้าที่ใช้หลังชาร์จประจุไฟฟ้าของตัวอย่างแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ทุกตัวอย่างมีค่าเฉลี่ย 65 mA ซึ่งเป็นค่าต่ำกว่าเส้นขีดจำกัดสูงสุดคือ 100 mA แสดงว่าทุกตัวอย่างอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานตามที่ Drawing กำหนด



รูปที่ 4.8 แผนภูมิค่าแรงดันไฟฟ้าที่ออกจากตัวอย่างหลังชาร์จประจุไฟฟ้าเต็มแล้ว

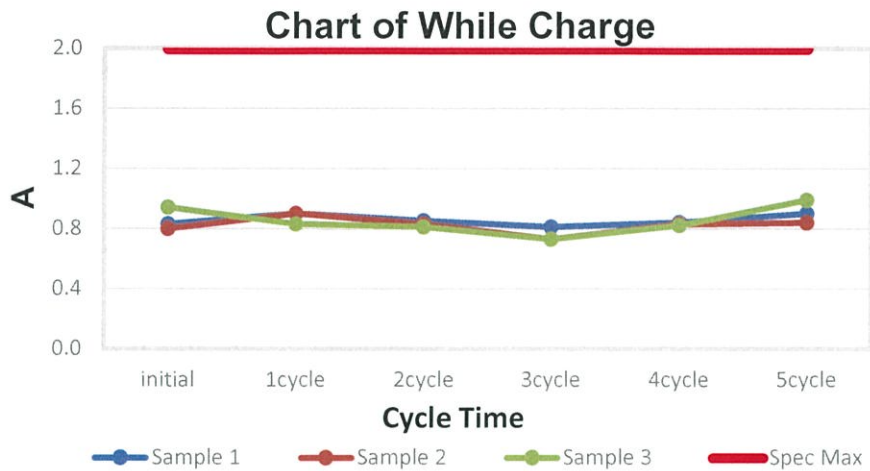
จากแผนภูมิเส้น พบว่า แรงดันไฟฟ้าที่ออกจากตัวอย่างหลังชาร์จประจุไฟฟ้าเต็มแล้วของตัวอย่างแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ทุกตัวอย่างมีค่าเฉลี่ย 9.40 V ซึ่งเป็นค่าต่ำกว่าเส้นขีดจำกัดสูงสุดที่ 10.1 V แสดงว่าทุกตัวอย่างอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานตามที่ Drawing กำหนด

#### 4.2.2.2 การวิเคราะห์ค่าทางไฟฟ้าต่างๆหลังผ่านการทดสอบที่ 25°C , 85%RH



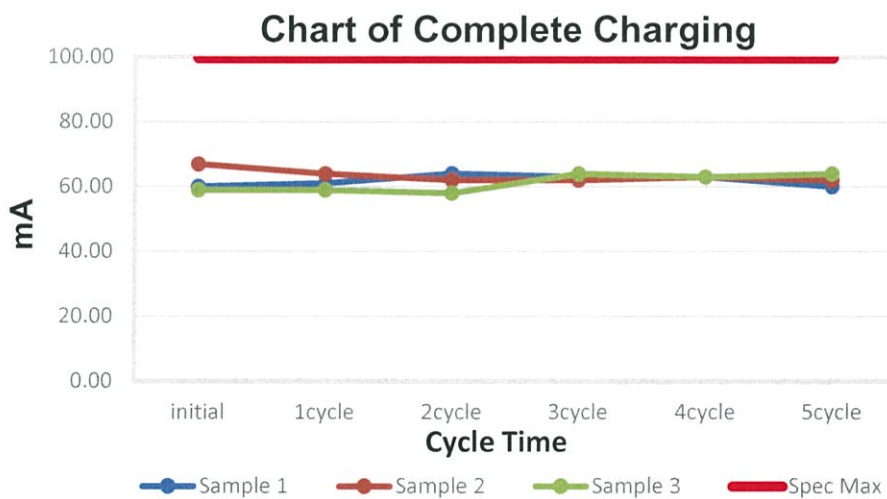
รูปที่ 4.9 แผนภูมิเวลาในการชาร์จประจุไฟฟ้าของตัวอย่างแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์จนเต็ม

จากแผนภูมิเส้น พบว่า เวลาที่ใช้ในการชาร์จประจุไฟฟ้าของตัวอย่างแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ทุกตัวอย่างมีค่าเฉลี่ย 75 วินาที ซึ่งเป็นค่าต่ำกว่าเส้นขีดจำกัดสูงสุดคือ 90 วินาที แสดงว่าทุกตัวอย่างอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานตามที่ Drawing กำหนด



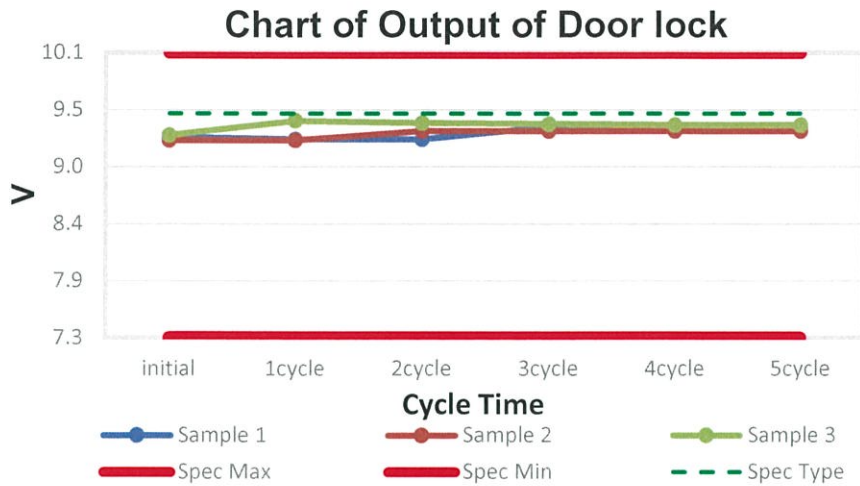
รูปที่ 4.10 แผนภูมิค่ากระแสไฟฟ้าขณะชาร์จประจุไฟฟ้าของตัวอย่างแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์

จากแผนภูมิเส้น พบว่า ค่ากระแสไฟฟ้าที่ใช้ขณะชาร์จประจุไฟฟ้าของตัวอย่างแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ทุกตัวอย่างมีค่าเฉลี่ย 0.81 A ซึ่งเป็นค่าต่ำกว่าเส้นขีดจำกัดสูงสุดคือ 2 A แสดงว่าทุกตัวอย่างอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานตามที่ Drawing กำหนด



รูปที่ 4.11 แผนภูมิค่ากระแสไฟฟ้าหลังชาร์จประจุไฟฟ้าของตัวอย่างแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์เต็มแล้ว

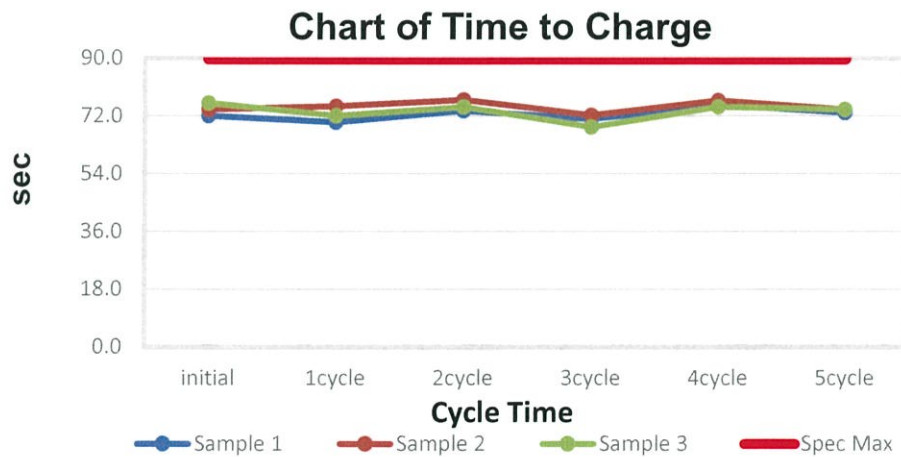
จากแผนภูมิเส้น พบว่า ค่ากระแสไฟฟ้าที่ใช้หลังชาร์จประจุไฟฟ้าของตัวอย่างแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ทุกตัวอย่างมีค่าเฉลี่ย 64 mA ซึ่งเป็นค่าต่ำกว่าเส้นขีดจำกัดสูงสุดคือ 100 mA แสดงว่าทุกตัวอย่างอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานตามที่ Drawing กำหนด



รูปที่ 4.12 แผนภูมิค่าแรงดันไฟฟ้าที่ออกจากตัวอย่างหลังชาร์จประจุไฟฟ้าเต็มแล้ว

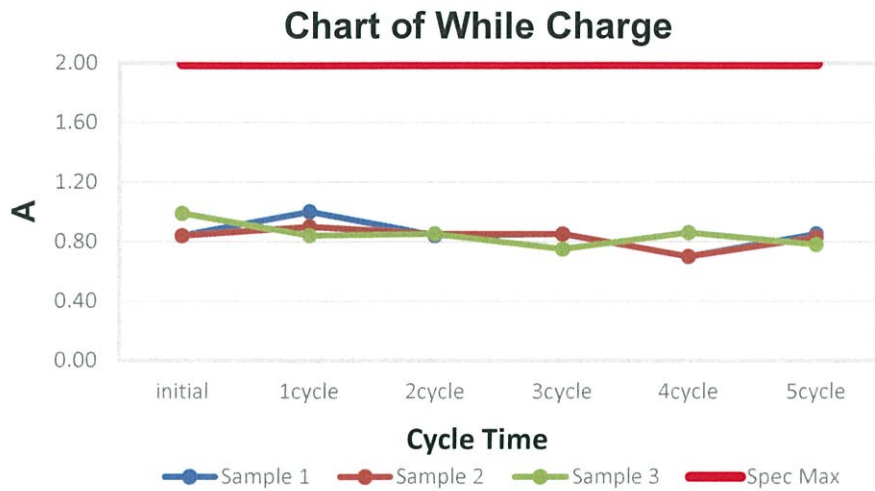
จากแผนภูมิเส้น พบว่า ค่าแรงดันไฟฟ้าที่ออกจากตัวอย่างหลังชาร์จประจุไฟฟ้าเต็มแล้วของตัวอย่างแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ทุกตัวอย่างมีค่าเฉลี่ย 9.25 V ซึ่งเป็นค่าต่ำกว่าเส้นขีดจำกัดสูงสุดคือ 10.1 V แสดงว่าทุกตัวอย่างอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานตามที่ Drawing กำหนด

#### 4.2.2.3 การวิเคราะห์ค่าทางไฟฟ้าต่างๆหลังผ่านการทดสอบที่ $-40^{\circ}\text{C}$ , 85%RH



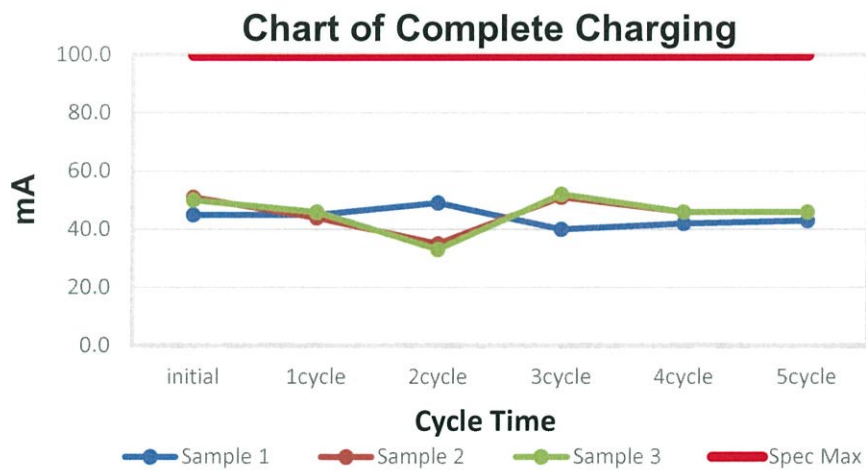
รูปที่ 4.13 แผนภูมิเวลาในการชาร์จประจุไฟฟ้าของตัวอย่างแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์จนเต็ม

จากแผนภูมิเส้น พบว่า เวลาที่ใช้ในการชาร์จประจุไฟฟ้าของตัวอย่างแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ทุกตัวอย่างมีค่าเฉลี่ย 73 วินาที ซึ่งเป็นค่าต่ำกว่าเส้นขีดจำกัดสูงสุดคือ 90 วินาที แสดงว่าทุกตัวอย่างอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานตามที่ Drawing กำหนด



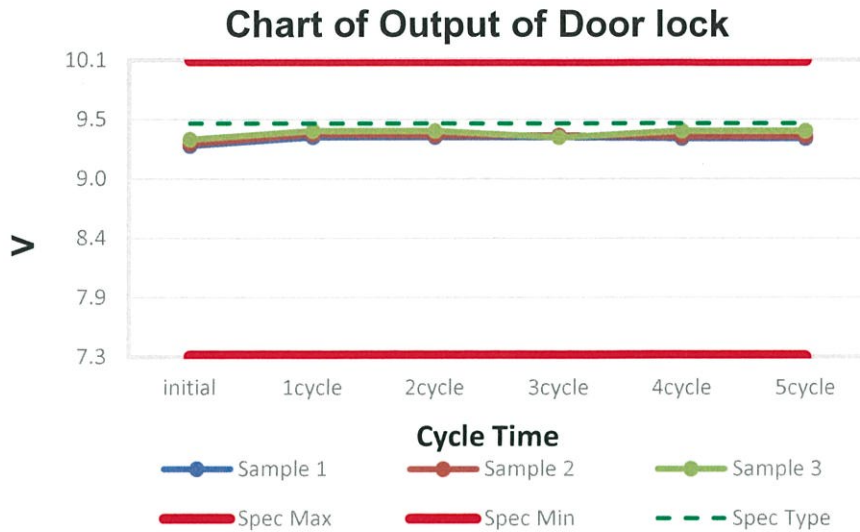
รูปที่ 4.14 แผนภูมิค่ากระแสไฟฟ้าขณะชาร์จประจุไฟฟ้าของตัวอย่างแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์

จากแผนภูมิเส้น พบว่า ค่ากระแสไฟฟ้าที่ใช้ขณะชาร์จประจุไฟฟ้าของตัวอย่างแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ทุกตัวอย่างมีค่าเฉลี่ย 0.85 A ซึ่งเป็นค่าต่ำกว่าเส้นขีดจำกัดสูงสุดคือ 2 A แสดงว่าทุกตัวอย่างอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานตามที่ Drawing กำหนด



รูปที่ 4.15 แผนภูมิค่ากระแสไฟฟ้าหลังชาร์จประจุไฟฟ้าของตัวอย่างแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์เต็มแล้ว

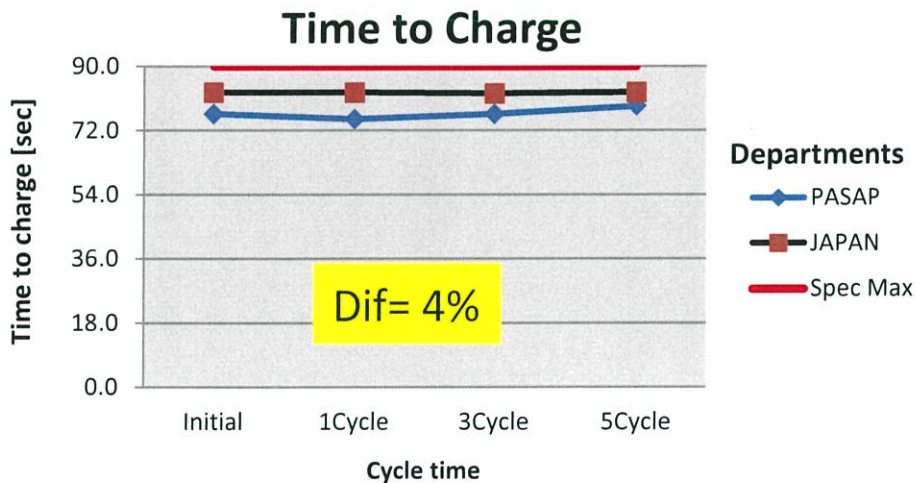
จากแผนภูมิเส้น พบว่า ค่ากระแสไฟฟ้าที่ใช้หลังชาร์จประจุไฟฟ้าของตัวอย่างแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ทุกตัวอย่างมีค่าเฉลี่ย 45 mA ซึ่งเป็นค่าต่ำกว่าเส้นขีดจำกัดสูงสุดคือ 100 mA แสดงว่าทุกตัวอย่างอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานตามที่ Drawing กำหนด



รูปที่ 4.16 แผนภูมิค่าแรงดันไฟฟ้าที่ออกจากตัวอย่างหลังชาร์จประจุไฟฟ้าเต็มแล้ว

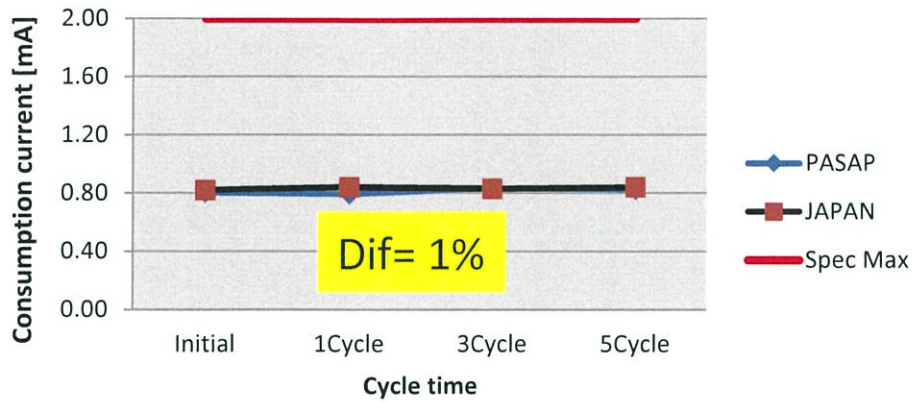
จากแผนภูมิเส้น พบว่า ค่ากระแสไฟฟ้าที่ใช้หลังชาร์จประจุไฟฟ้าของตัวอย่างแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ทุกตัวอย่างมีค่าเฉลี่ย 9.37 V ซึ่งเป็นค่าต่ำกว่าเส้นขีดจำกัดสูงสุดคือ 10.1 V แสดงว่าทุกตัวอย่างอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานตามที่ Drawing กำหนด

4.2.2 เปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ค่าทางไฟฟ้าต่างๆของตัวอย่างแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์หลังผ่านกระบวนการทดสอบโดยการบ่มที่อุณหภูมิต่างๆ ที่ทำการทดสอบโดยผู้จัดทำโครงการนี้กับทางห้องปฏิบัติการของบริษัทพานาโซนิคในประเทศไทยญี่ปุ่น



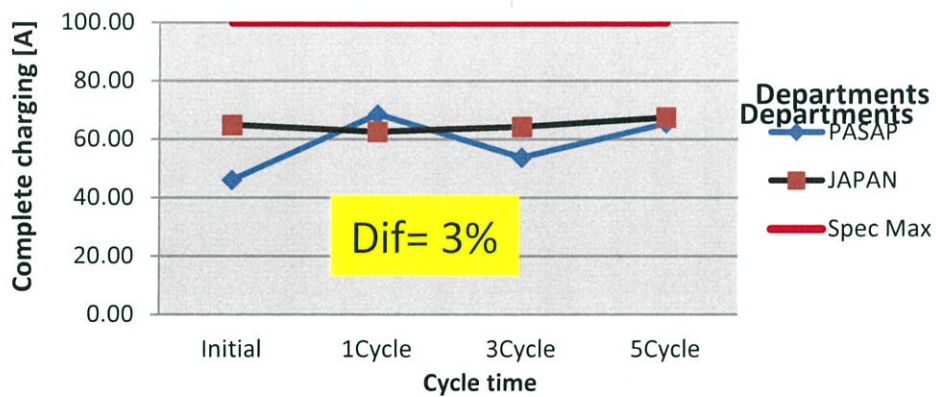
รูปที่ 4.17 แผนภูมิเปรียบเทียบค่าแรงดันไฟฟ้าที่ออกจากตัวอย่างหลังชาร์จประจุไฟฟ้าเต็มแล้วที่ทำการทดสอบโดยผู้จัดทำโครงการและโดยห้องปฏิบัติการในประเทศไทยญี่ปุ่น

## Time to While Charge



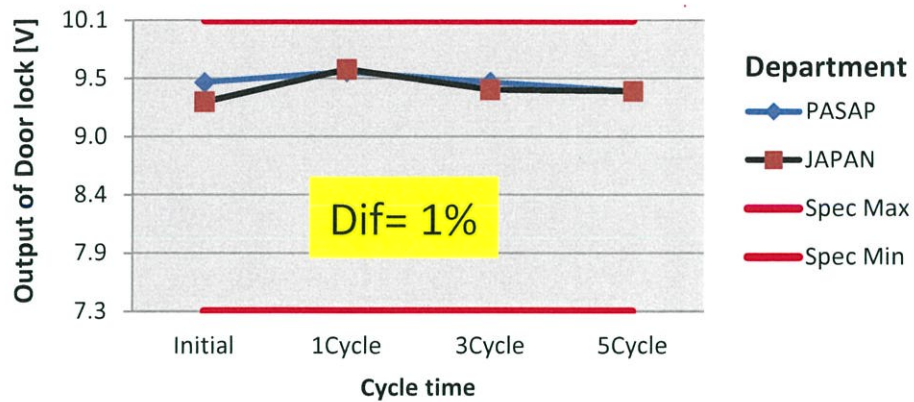
รูปที่ 4.18 แผนภูมิเปรียบเทียบค่ากระแสไฟฟ้าขณะชาร์จประจุไฟฟ้าของตัวอย่างแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่ทำการทดสอบโดยผู้จัดทำโครงการและโดยห้องปฏิบัติการในประเทศญี่ปุ่น

## Chart of Complete Charging



รูปที่ 4.19 แผนภูมิเปรียบเทียบค่ากระแสไฟฟ้าหลังชาร์จประจุไฟฟ้าของตัวอย่างแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์เต็มแล้วที่ทำการทดสอบโดยผู้จัดทำโครงการและโดยห้องปฏิบัติการในประเทศญี่ปุ่น

## Output of Door lock



รูปที่ 4.20 แผนภูมิเปรียบเทียบค่าแรงดันไฟฟ้าที่ออกจากตัวอย่างหลังชาร์จประจุไฟฟ้าเต็มแล้วที่ทำการทดสอบโดยผู้จัดทำโครงการและโดยห้องปฏิบัติการในประเทศญี่ปุ่น

จากแผนภูมิเส้นทั้ง 4 พบว่า การเปรียบเทียบค่าทางไฟฟ้าต่างๆของตัวอย่างผลิตภัณฑ์หลังผ่านกระบวนการทดสอบโดยการบ่มที่อุณหภูมิต่างๆ ที่ทำการทดสอบโดยผู้จัดทำโครงการนี้กับทางห้องปฏิบัติการบริษัทพานาโซนิค ประเทศญี่ปุ่น มีผลการทดสอบค่าทางไฟฟ้าต่างๆที่ใกล้เคียงกัน

### 4.3 การประเมินความเหมาะสมและความคุ้มค่าเชิงเศรษฐศาสตร์

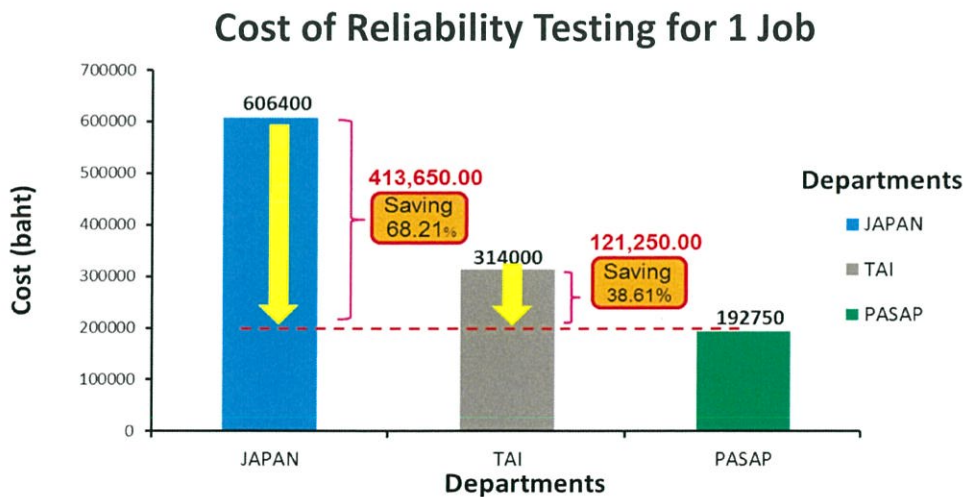
4.3.1 การประเมินค่าใช้จ่ายที่ใช้ในการทดสอบความน่าเชื่อถือหัวข้อการเกิดชนแมวในผลิตภัณฑ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้สำหรับยานยนต์

ตารางที่ 4.3 การเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายในการทดสอบความน่าเชื่อถือหัวข้อการเกิดชนแมวที่หน่วยงานต่างๆ

Departments		JAPAN	TAI	PASAP
Cost (baht)		606,400.00	314,000.00	192,750.00
Saving	(baht)	413,650.00	121,250.00	
	(%)	68.21%	38.61%	

TAI = Thailand Automotive Institute

PASAP = Panasonic Automotive Systems Asia Pacific Co.,Ltd.



รูปที่ 4.21 แผนภูมิเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายในการทดสอบความน่าเชื่อถือหัวข้อการเกิดชนแมวที่หน่วยงานต่างๆ

จากตารางและแผนภูมิแสดงการเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายในการทดสอบความน่าเชื่อถือหัวข้อการเกิดชนแมวที่หน่วยงานต่างๆ พบว่า ค่าใช้จ่ายในการทดสอบความน่าเชื่อถือของผลิตภัณฑ์ในหัวข้อการเกิดชนแมวโดยเปรียบเทียบกันระหว่างการทดสอบโดยผู้จัดทำโครงการนี้กับบริษัทพานาโซนิค ประเทศญี่ปุ่น และสถาบันยานยนต์ สามารถลดค่าใช้จ่ายลงได้ 413,650 บาท/ชิ้นงาน และ 121,250 บาท/ชิ้นงาน ตามลำดับ

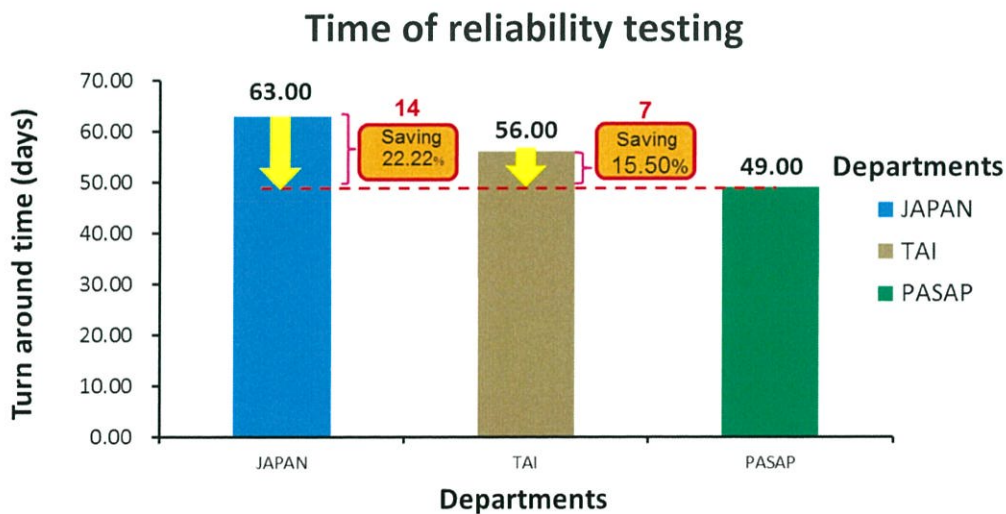
4.3.2 การประเมินระยะเวลาที่ใช้ในการทดสอบทดสอบความน่าเชื่อถือหัวข้อการเกิดชนแมวในผลิตภัณฑ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้สำหรับยานยนต์

ตารางที่ 4.4 การเปรียบเทียบระยะเวลาในการทดสอบความน่าเชื่อถือหัวข้อการเกิดชนแมวที่หน่วยงานต่างๆ

Departments		JAPAN	TAI	PASAP
Time (days)		63	56	49
Saving	(days)	14	7	
	(%)	22.22%	15.50%	

TAI = Thailand Automotive Institute

PASAP = Panasonic Automotive Systems Asia Pacific Co.,Ltd.



รูปที่ 4.22 แผนภูมิเปรียบเทียบระยะเวลาที่ใช้ทดสอบความน่าเชื่อถือหัวข้อการเกิดชนแมวจากหน่วยงานต่างๆ

จากตารางและแผนภูมิเปรียบเทียบระยะเวลาที่ใช้ทดสอบความน่าเชื่อถือของผลิตภัณฑ์ในหัวข้อการเกิดชนแมวจากหน่วยงานต่างๆ พบว่า การทดสอบโดยผู้จัดทำโครงการใช้ระยะเวลา/ชิ้นงาน น้อยกว่าการส่งไปทดสอบที่บริษัทพานาโซนิค ประเทศญี่ปุ่น และสถาบันยานยนต์ ประเทศไทย 14 วัน และ 7 วัน ตามลำดับ

## บทที่ 5

### สรุปผลการดำเนินโครงการและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการดำเนินโครงการ

จากการทดสอบเปรียบเทียบแนวโน้มการเกิดชนแมวของโลหะบัดกรีในแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์โดยการบ่มที่อุณหภูมิต่างๆ พบว่า ทุกอุณหภูมิที่ทำการทดสอบไม่มีชนแมวเกิดขึ้น และค่าทางไฟฟ้าต่างๆ ได้แก่ เวลาในการชาร์จประจุไฟฟ้าจนเต็ม ค่ากระแสไฟฟ้าขณะชาร์จประจุไฟฟ้า ค่ากระแสไฟฟ้าหลังชาร์จประจุไฟฟ้าจนเต็ม และค่าแรงดันไฟฟ้าที่ออกจากตัวอย่างหลังชาร์จประจุไฟฟ้าเต็มแล้วของตัวอย่างผลิตภัณฑ์ที่ผ่านกระบวนการทดสอบมีค่าผ่านเกณฑ์มาตรฐานทุกตัวอย่าง รวมถึงการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ค่าทางไฟฟ้าของตัวอย่างผลิตภัณฑ์หลังผ่านกระบวนการทดสอบด้วยการบ่มที่อุณหภูมิต่างๆ โดยผู้จัดทำโครงการนี้กับผลที่ได้จากบริษัท พานาโซนิคในประเทศญี่ปุ่น ผลที่ได้มีค่าทางไฟฟ้าที่ใกล้เคียงกันและเป็นที่ยอมรับได้ แสดงว่าบริษัท พานาโซนิค ออโตโมทีฟ ซิสเต็มส์ เอเชีย แปซิฟิก จำกัด สามารถทำการทดสอบความน่าเชื่อถือของผลิตภัณฑ์ในหัวข้อการเกิดชนแมวเองได้โดยใช้เครื่องมือและวิธีการทดสอบจากโครงการนี้

จากการคำนวณค่าใช้จ่ายและเวลาที่ใช้ในการทดสอบความน่าเชื่อถือของผลิตภัณฑ์ในหัวข้อการเกิดชนแมวโดยเปรียบเทียบระหว่างการทดสอบโดยผู้จัดทำโครงการนี้กับการส่งไปทดสอบที่บริษัทพานาโซนิคประเทศญี่ปุ่น และสถาบันยานยนต์ ประเทศไทย พบว่าสามารถลดค่าใช้จ่ายลงได้ 413,650 บาท/ชิ้นงาน และ 121,250 บาท/ชิ้นงาน ตามลำดับ และระยะเวลา/ชิ้นงาน ในการทดสอบลดลง 14 วัน และ 7 วัน ตามลำดับ

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

ในการศึกษาปัญหาการเกิดขนแมวจากแหล่งความรู้ต่างๆ พบว่าโดยส่วนใหญ่การแก้ปัญหาการเกิดขนแมวทำได้เพียงการบรรเทาหรือชะลอการเกิดขนแมวเท่านั้น ไม่สามารถที่จะกำจัดขนแมวได้อย่างถาวร ซึ่งแนวทางหลักในการป้องกันการเกิดขนแมวสามารถแบ่งได้ 4 วิธี คือ

1. การปรับปรุงสมบัติของวัสดุด้วยกรรมวิธีทางความร้อน
2. การควบคุมอุณหภูมิใช้งาน
3. การเติมธาตุเจือ
4. การเคลือบผิวชิ้นงาน

### 5.2.1 การปรับปรุงสมบัติของวัสดุด้วยกรรมวิธีทางความร้อน

หลังจากกระบวนการผลิตโลหะบัดกรี ผู้ผลิตควรนำโลหะบัดกรีไปทำการอบคืนรูปผลึก (Recrystallized) เพื่อคลายความเค้นตกค้างที่อาจเกิดจากการขึ้นรูปโลหะบัดกรี ทำให้ลดปัญหาการเกิดขนแมว ในการศึกษาครั้งต่อไปอาจมีการทดสอบการอบคืนรูปผลึก รวมถึงการเปรียบเทียบหาอุณหภูมิที่เหมาะสมในการอบคืนรูปผลึกสำหรับโลหะบัดกรีแต่ละชนิด เพื่อให้มีประสิทธิภาพในการคลายความเค้นตกค้างภายในโลหะบัดกรีให้ดียิ่งขึ้น ซึ่งเป็นการแก้ไขสาเหตุหลักของการเกิดขนแมว

### 5.2.2 การควบคุมอุณหภูมิใช้งาน

หากต้องใช้แผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์อย่างต่อเนื่องเป็นเวลานานไม่ควรใช้อุณหภูมิสูง เพราะอาจจะทำให้เกิดความเค้นสะสมภายในโลหะบัดกรีจนเกิดเป็นขนแมวได้ แต่ลักษณะการใช้งานที่มีการเปิด-ปิดบ่อยๆ ก็มีโอกาสดเกิดขนแมวได้ด้วยเช่นกัน ซึ่งอาจต้องทำการศึกษาเปรียบเทียบอัตราการเกิดขนแมวจากการใช้งานทั้งสองลักษณะ

### 5.2.3 การเติมธาตุเจือ

จากแนวทางการป้องกันการแพร่กระจายของอะตอมในโครงงานของ Lamprecht และ Hutchinson การป้องกันการแพร่กระจายอะตอมตามแนวขอบเกรนจะช่วยป้องกันการก่อตัวของขนแมว ซึ่งทำได้โดยการเติมธาตุที่สามารถกีดขวางวิถีการเคลื่อนที่ของอะตอมดีบุกตามแนวขอบเกรน

ไม่ควรใช้ดีบุกบริสุทธิ์ในการทำงาน ควรมีการเติมตะกั่วอย่างน้อย 3% หรือเติมโลหะหนักเพื่อช่วยลดการเกิดขนแมวและควรใช้ X-ray Fluorescence (XRF) ในการตรวจสอบผิวสำเร็จเพื่อหาจุดที่เกิดความเสี่ยงในการเกิดขนแมว ในอนาคตอาจศึกษาปริมาณธาตุเจือที่สามารถกีดขวางการเกิดขนแมว

#### 5.2.4 การเคลือบผิวชิ้นงาน

การเคลือบผิวชิ้นงานก่อนเกิดการแทรกตัวของขนแมว สารเคลือบจะทำปฏิกิริยากับดีบุกออกไซด์ทำให้เกิดเป็นพันธะระหว่างสารเคลือบกับผิวหน้าของดีบุก จึงช่วยยับยั้งการเกิดความเค้นกดและการสะสมตัวของดีบุกซึ่งเป็นสาเหตุในการเกิดขนแมว

การใช้ชั้นเคลือบจำพวกโลหะหนักในการยับยั้งการเกิดขนแมว โลหะหนักจะช่วยลดความเค้นได้ในขั้นต้นระหว่างผิวบริเวณที่จะเกิดการสะสมของดีบุก จากการศึกษาวิจัยของ Crandall โลหะหนักทำหน้าที่คล้ายสารเคลือบบริเวณผิวภายนอกทำให้ไม่สามารถก่อตัวเป็นขนแมวขึ้นมาบนผิวเคลือบได้

## บรรณานุกรม

- ปริญญา เลิศวิริยะศักดิ์ และรัชชวลัย ลือนาม. 2555. “การศึกษาการเกิดขนแมวกับโลหะบัดกรีในแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
- Jay Brusse and Jong Kim. 2009. Basic Information Regarding Tin Whiskers. [Online]. Available: <https://nepp.nasa.gov/whisker/background/>
- Boettinger, William J. 2012. Lead-Free Surface Finishes for Electronic Component: Tin Whisker Growth[Online]. Available: [https://www.nist.gov/mml/msed/thermodynamics\\_kinetics/lead-free\\_surface\\_finishes.cfm](https://www.nist.gov/mml/msed/thermodynamics_kinetics/lead-free_surface_finishes.cfm)
- Horvath, Barbara et al. 2012. Whisker Growth on Annealed and Recrystallized Tin Plating Thin Solid Films.[Online]. Available : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0040609012004270>
- Lamprecht, Sven et al. 2013. Immersion Tin-Kinetics of Whisker Growth. [Online]. Available: <https://ebookbrowse.com/immersion-tin-kinetics-of-whisker-growth-pdf-d151340384>
- Skwarek, Agata et al. 2012. Analysis of Tin Whisker Growth on Lead-Free Alloy with Ni Presence under Thermal Shock Stress. Materials Science and Engineering B. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921510710005970>
- TOYOTA ENGINEERING : STANDARD TSC7038G, General rules for test method of automotive electronic equipment.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

ข้อมูลการคำนวณค่าใช้จ่ายในการทดสอบความน่าเชื่อถือหัวข้อการเกิดขนแมว

ตารางที่ ก.1 การคำนวณค่าใช้จ่ายในการทดสอบความน่าเชื่อถือหัวข้อการเกิดขนแมวของชิ้นงานใน  
โครงการที่บริษัท พานาโซนิก ออโตโมทีฟ ซิสเต็มส์ เอเชีย แปซิฟิก จำกัด

**PASAP**

Testing cost

No.	Test item	Condition	Item	Unit price (THB)	Duration	Unit price (THB)
1	Whisker (Temperature/Humidity cycling)	+85°C,85%RH	Apparatus usage (Time base charge)	1500	3	4,500.000
			Testing charge	50	1000	50,000.000
2	Whisker (Temperature/Humidity cycling)	+25°C, 85%RH	Testing charge	50	1000	50,000.000
3	Whisker (Temperature/Humidity cycling)	-40°C, 85%RH	Testing charge	50	1000	50,000.000
4	SCANNING ELECTRON MICROSCOPY (USED) S-3600N	-	Scanning	950	15	14,250.000
	ENERGY DISPERSIVE X-RAY SPECTROMETER (EDX) EX-250			1100	15	16,500.000
6	DIGITAL MICROSCOPE	-	Photograph	500	15	7,500.000
						192,750.000

PASAP = Panasonic Automotive Systems Asia Pacific Co.,Ltd.

ตารางที่ ก.2 การคำนวณค่าใช้จ่ายในการทดสอบความน่าเชื่อถือหัวข้อการเกิดขนแมวของ Thailand  
Automotive Institute

**TAI**

Testing cost

No.	Test item	Condition	Item	Unit price (THB)	Duration	Unit price (THB)
1	Whisker (Temperature/Humidity cycling)	+85°C,85%RH	Apparatus usage (Time base charge)	3000	3	9,000.000
			Testing charge	100	1000	100,000.000
2	Whisker (Temperature/Humidity cycling)	+25°C, 85%RH	Testing charge	100	1000	100,000.000
3	Whisker (Temperature/Humidity cycling)	-40°C, 85%RH	Testing charge	100	1000	100,000.000
4	SCANNING ELECTRON MICROSCOPY (USED) S-3600N	-	Scanning	500	5	2,500.000
	ENERGY DISPERSIVE X-RAY SPECTROMETER (EDX) EX-250			500	5	2,500.000
						314,000.000

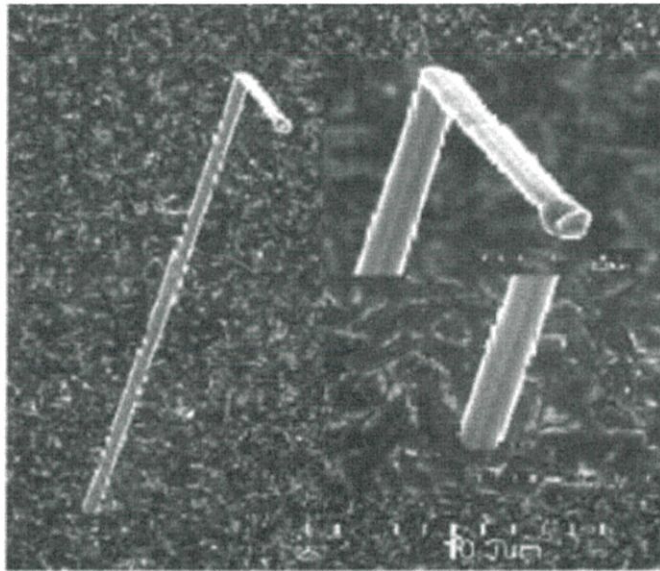
TAI = Thailand Automotive Institute

## ภาคผนวก ข

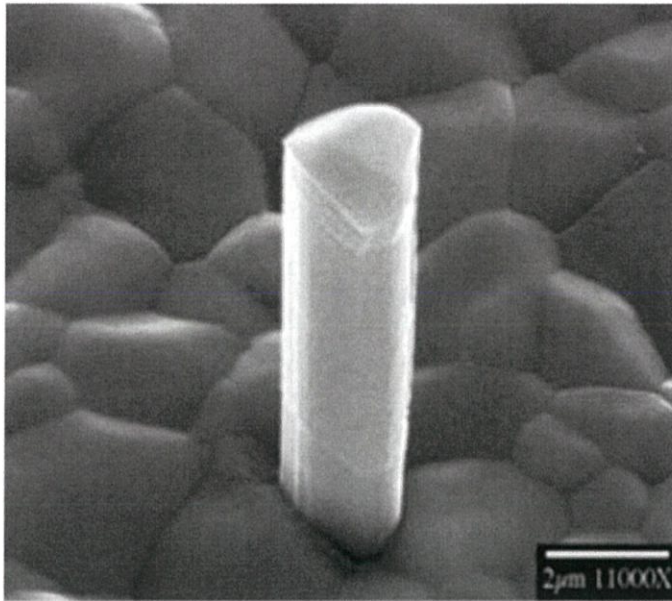
### ลักษณะรูปร่างของขนแมว (Whisker)

#### ลักษณะรูปร่างของขนแมว (Whisker)

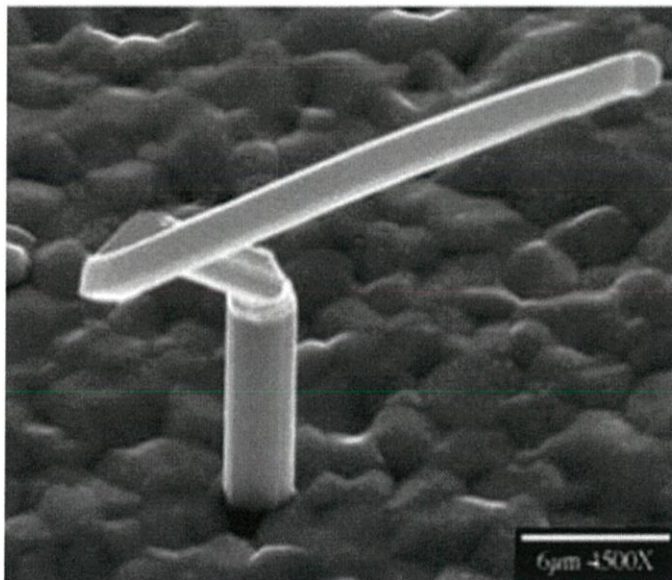
ภาพการเกิดขนแมวที่ปรากฏในลักษณะต่าง ๆ จากกล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope SEM)



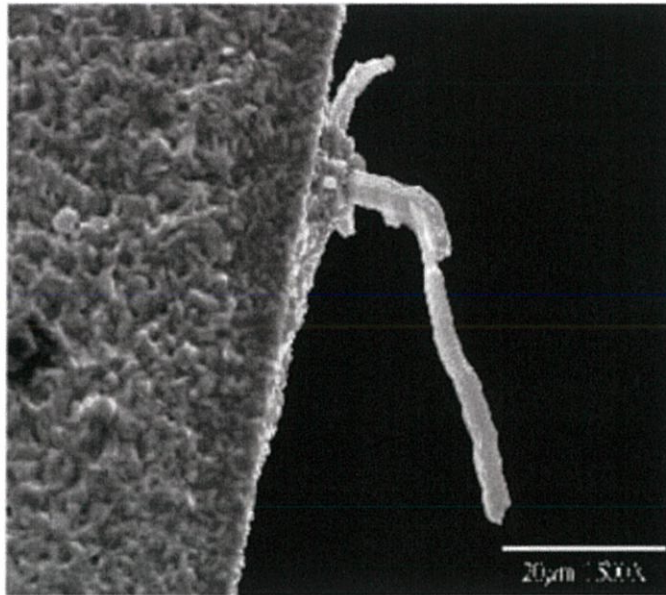
รูปที่ ข.1 Tin whisker filaments



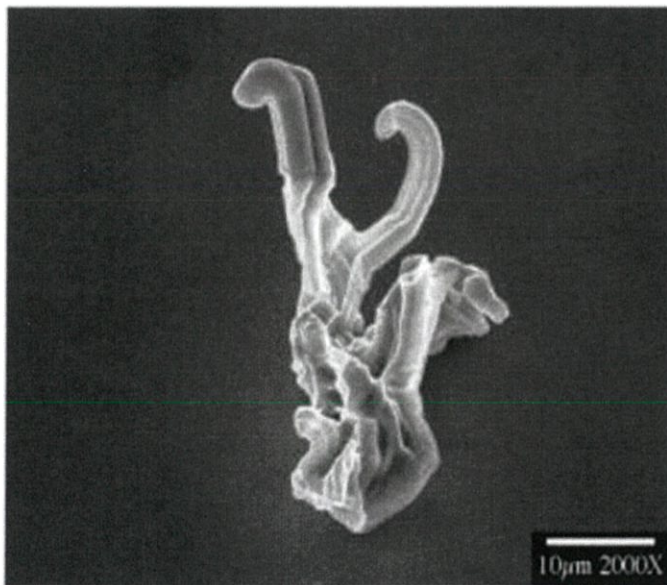
รูปที่ ข.2 Whisker with a consistent cross section



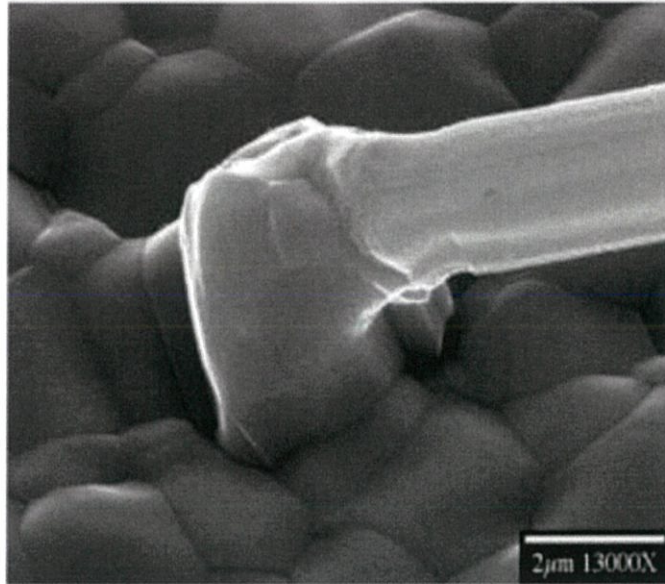
รูปที่ ข.3 Kinked whisker



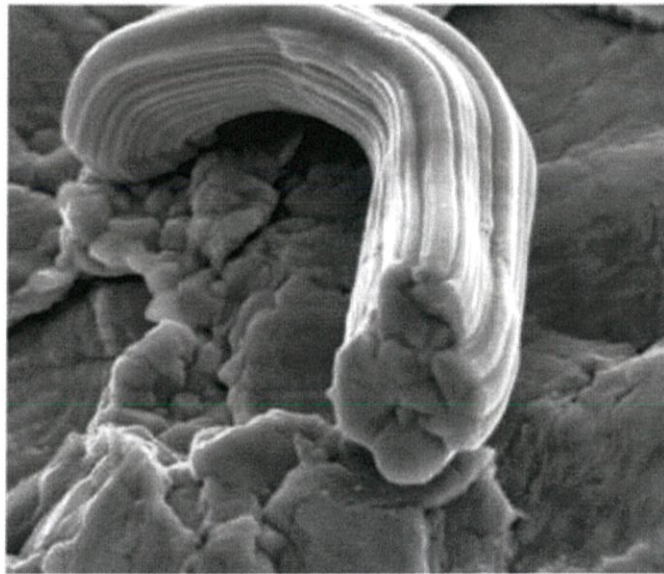
รูปที่ ๔.4 Kinked whiskers growing from a nodule



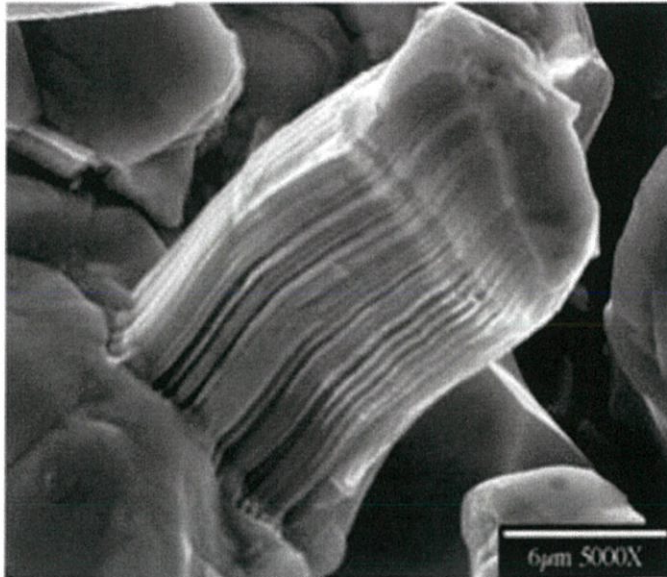
รูปที่ ๔.5 Branched tin whiskers on bright tin



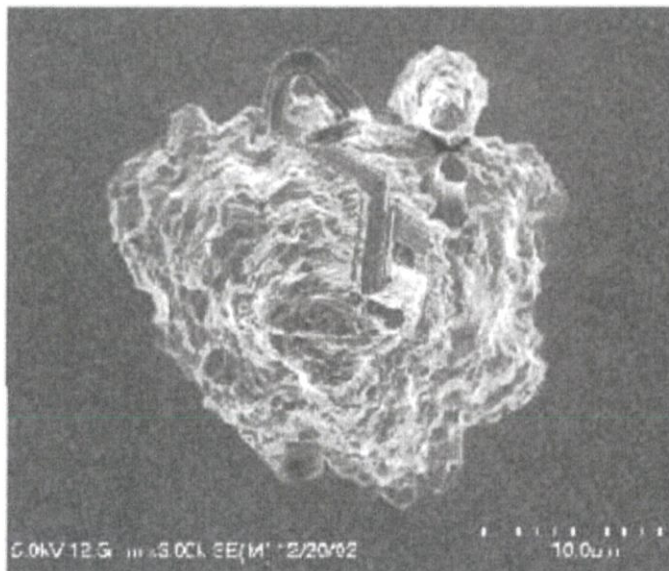
รูปที่ ข.6 Whisker initiating from a hillock



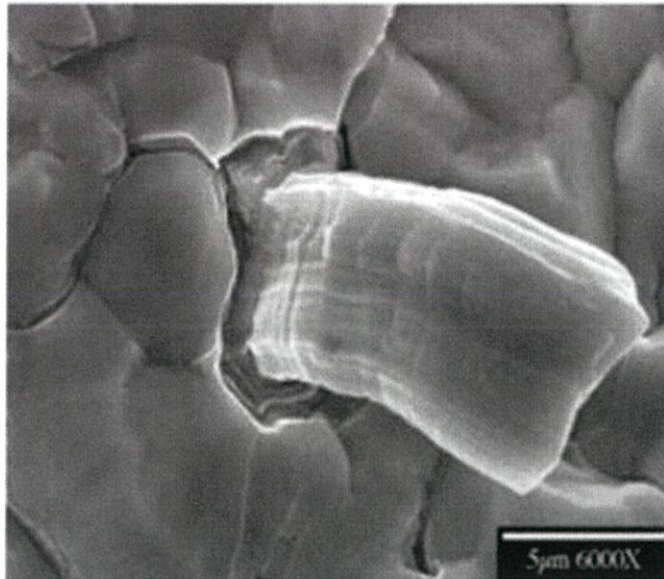
รูปที่ ข.7 Tin whisker filament with striations



รูปที่ ข.8 Tin whisker filament with striations



รูปที่ ข.9 Kinked whisker on odd-shaped eruptions



รูปที่ ข.10 Tin whisker with ring

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล นายไชยวัฒน์ โฆษิตวิวัฒน์กุล

วัน เดือน ปีเกิด 16 พฤษภาคม 2538

ที่อยู่ 11/9 หมู่ที่ 11 ตำบล ท่าทอง อำเภอ เมือง จังหวัด พิชณุโลก 65000

E-mail chaiwat\_pccpl@hotmail.com

โทรศัพท์ 064-2614-240

## ประวัติการศึกษา

- พ.ศ. 2551 - 2556 ระดับมัธยมศึกษา โรงเรียนพิชณุโลกพิทยาคม
- พ.ศ. 2557 - ปัจจุบัน วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วศ.บ.) สาขาวิศวกรรมเคมี  
คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

## ประสบการณ์

- นักศึกษาฝึกงาน แผนก Quality Control  
บริษัท พานาโซนิค ออโต้โมทีฟ ซิสเต็มส์ เอเชีย แปซิฟิก จำกัด  
ตั้งแต่วันที่ 1 มิถุนายน พ.ศ. 2559 ถึงวันที่ 27 กรกฎาคม พ.ศ. 2560
- นักศึกษาโครงการสหกิจศึกษา แผนก Quality Control  
บริษัท พานาโซนิค ออโต้โมทีฟ ซิสเต็มส์ เอเชีย แปซิฟิก จำกัด  
ตั้งแต่วันที่ 7 สิงหาคม พ.ศ. 2559 ถึงวันที่ 24 พฤศจิกายน พ.ศ. 2560