



ใบรับรองวิทยานิพนธ์  
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (การจัดการวิศวกรรม)

ปริญญา

การจัดการวิศวกรรม

วิศวกรรมอุตสาหกรรม

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง การเพิ่มประสิทธิภาพการซ่อมบำรุงรักษาเรดาร์ภายในเรือรบโดยใช้เทคนิคการถ่ายภาพรังสีความร้อน

Efficiency Improvement of Warship Radar Maintenance by Using Infrared Thermography Technique

นามผู้วิจัย เรือเอกทักษกร ตันทาทุโธ

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

( รองศาสตราจารย์พัชราภรณ์ ญาณภีร์, D.Tech.Sc. )

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

( รองศาสตราจารย์พิรุทธิ์ ชาญเศรษฐิกุล, Ph.D. )

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

( รองศาสตราจารย์ณัฐภา หอมทรัพย์, Ph.D. )

หัวหน้าภาควิชา

( ผู้ช่วยศาสตราจารย์วิสุทธิ์ สุพิทักษ์, Ph.D. )

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

( รองศาสตราจารย์กัญญา ชีระกุล, D.Agr. )

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ ..... เดือน ..... พ.ศ. ....

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การเพิ่มประสิทธิภาพการซ่อมบำรุงรักษาเรดาร์ภายในเรือรบ โดยใช้เทคนิคการถ่ายภาพ  
รังสีความร้อน

Efficiency Improvement of Warship Radar Maintenance by Using Infrared  
Thermography Technique

โดย

เรือเอกทักษกร ตันทงุฑโต

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์  
เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (การจัดการวิศวกรรม)

พ.ศ. 2557

ทักษกร ตันทงุทโท, เรือเอก 2557: การเพิ่มประสิทธิภาพการซ่อมบำรุงรักษาเรดาร์ภายในเรือรบโดยใช้เทคนิคการถ่ายภาพรังสีความร้อน ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (การจัดการวิศวกรรม) สาขาการจัดการวิศวกรรม ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รองศาสตราจารย์พัชรภรณ์ ญาณภีร์, D.Tech.Sc. 63 หน้า

การวิจัยมีวัตถุประสงค์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการซ่อมบำรุงรักษาแบบพยากรณ์สำหรับเรดาร์ภายในเรือรบจากกรณีศึกษาเรดาร์ควบคุมการยิงบนเรือรบ ย่านความถี่ I-Band จำนวน 8 เครื่อง โดยใช้เทคนิคการถ่ายภาพรังสีความร้อนร่วมกับการออกแบบการทดลองด้วยแผนการทดลองแฟคทอเรียลเต็มรูปแบบเพื่อวิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลกระทบหลักและผลกระทบร่วมต่ออุณหภูมิของอุปกรณ์เรดาร์ที่มีสภาพดี และสร้างแบบจำลองเพื่อพยากรณ์อุณหภูมิสูงสุดของอุปกรณ์เรดาร์ที่มีสภาพดีจากปัจจัยต่างๆ โดยวิธีการวิเคราะห์การถดถอยรวมถึงการวิเคราะห์ความคุ้มค่าในการลงทุนเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการซ่อมบำรุง โดยการประยุกต์วิธีค่าเทียบเท่าปัจจุบันแบบการลงทุนเพิ่มระหว่างทางเลือกการซ่อมบำรุงแก้ไขหรือแบบเดิม กับทางเลือกการใช้เทคนิคการถ่ายภาพรังสีความร้อนภายใต้ความเสี่ยงของระยะเวลาการเสีย และความไม่แน่นอนของอายุการใช้งานของเรดาร์ภายในเรือรบ ผลการวิจัยพบว่าส่วนประกอบของเรดาร์ภายในเรือที่สามารถตรวจสอบการชำรุดโดยกระบวนการถ่ายภาพรังสีความร้อนประกอบด้วย ระบบภาคส่ง ระบบภาครับ และส่วนแสดงผลซึ่งสามารถสร้างแบบจำลองเพื่อพยากรณ์อุณหภูมิสูงสุดของอุปกรณ์เรดาร์ที่มีสภาพดีเพื่อใช้เป็นอุณหภูมิมาตรฐานในการเปรียบเทียบกับอุปกรณ์เรดาร์ที่ต้องการตรวจสอบเพื่อค้นหาอุปกรณ์ที่ชำรุดเสียหาย และปัจจัยที่มีผลต่อการอุณหภูมิของอุปกรณ์เรดาร์ภายในเรือคือ อายุการใช้งานของเรดาร์ ระยะเวลาตั้งแต่เริ่มเดินเครื่องจนถึงการวัดอุณหภูมิ และอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม นอกจากนี้พบว่าเทคนิคการถ่ายภาพรังสีความร้อนสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการซ่อมบำรุงเรดาร์ภายในเรือรบจากเดิมที่ใช้การซ่อมบำรุงแก้ไข โดยสามารถช่วยลดเวลาในการค้นหาอุปกรณ์ที่ชำรุด และลดความเสี่ยงอันตรายจากการสัมผัสอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงของช่างซ่อมบำรุง

---

ลายมือชื่อนิติ

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

Taksakorn Tantawutho, Lt. 2014: Efficiency Improvement of Warship Radar Maintenance by Using Infrared Thermography Technique. Master of Engineering (Engineering Management), Major Field: Engineering Management, Department of Industrial Engineering. Thesis Advisor: Associate Professor Patcharaporn Yanpirat, D.Tech.Sc. 63 pages.

The objective of this research was to improve efficiency of warship radar predictive maintenance with a case study of 8 I-band fire control radars by using infrared thermography technique. Design of experiment using Full Factorial experiment was employed to analyze the main effect as well as interaction effect to the radar temperature of each factors. The highest good conditioned radar temperature model was analyzed using regression analysis. Finally, cost reduction was estimated by net present value method and incremental analysis between current corrective maintenance and thermography technique under the risk of uncertain time between failure. The findings revealed the infrared thermography technique was used to locate failure parts of transmission system, receiver system and display system. The highest good conditioned radar temperature model was used to predict the standard highest temperature of radar system, to compare with the inspected sample for failure part locating. Infrared thermography can improve warship radar maintenance by reducing the failure part inspected time and reducing personnel exposure to hazards.

---

Student's signature

---

Thesis Advisor's signature

## กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยกราบขอขอบพระคุณคณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์  
ทุกๆ ท่าน ที่ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้แก่ผู้วิจัย ซึ่งเป็นความรู้ที่นำไปใช้ประโยชน์ทั้งใน  
การศึกษา และในการทำงาน ทั้งนี้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงตามวัตถุประสงค์ได้ ด้วยความอนุเคราะห์  
ของรองศาสตราจารย์ไพชราภรณ์ ญาณภีร์ รองศาสตราจารย์พิรุฑ์ ชาญเศรษฐิกุล และ  
รองศาสตราจารย์ณัฐภา หอมทรัพย์ ที่กรุณาให้คำปรึกษา

ขอขอบคุณผู้บริหารและข้าราชการ กองโรงงานไฟฟ้าอาวุธ กรมสรรพาวุธทหารเรือ  
นายทหารและข้าราชการประจำเรือที่สนับสนุนข้อมูลการศึกษาการค้นคว้าในครั้งนี้ และ  
เจ้าหน้าที่โครงการจัดการวิศวกรรมทุกคน ที่คอยช่วยเหลือให้ข้อมูล และติดต่อประสานงานให้  
เป็นอย่างดี

สุดท้ายนี้ กราบขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ สมาชิกในครอบครัว และเพื่อนๆ ทุกคนที่  
ช่วยเหลือสนับสนุนและให้กำลังใจตลอดมา

ผู้วิจัยซาบซึ้งในความกรุณาอันดีจากทุกท่าน และขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงมา ณ  
โอกาสนี้อีกครั้ง

ทักษกร ตันทงทโต  
กรกฎาคม 2557

## สารบัญ

## หน้า

สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(3)
สารบัญภาพ	(4)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	4
การตรวจเอกสาร	5
อุปกรณ์และวิธีการ	16
อุปกรณ์	16
วิธีการ	16
ผลและวิจารณ์	24
สรุปและข้อเสนอแนะ	55
สรุป	55
ข้อเสนอแนะ	55
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	57
ภาคผนวก	60
ประวัติการศึกษาและการทำงาน	63

## สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	เวลาที่ใช้ซ่อมบำรุงระบบสายอากาศเรดาร์	25
2	เวลาที่ใช้ซ่อมบำรุงระบบภาคส่งเรดาร์	26
3	เวลาที่ใช้ซ่อมบำรุงระบบภาครับเรดาร์	27
4	เวลาที่ใช้ซ่อมบำรุงส่วนแสดงผลเรดาร์	28
5	อุณหภูมิสูงสุดของภาคส่งเรดาร์ที่วัดได้โดยการถ่ายภาพรังสีความร้อนเพื่อวิเคราะห์ความแปรปรวนอุณหภูมิของภาคส่งของเรดาร์จากปัจจัยที่เกี่ยวข้อง	33
6	ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ของอุณหภูมิภาคส่งของเรดาร์จากปัจจัยที่เกี่ยวข้องเพื่อการศึกษาผลกระทบหลักและผลกระทบร่วมพร้อมกัน	33
7	อุณหภูมิสูงสุดของภาครับเรดาร์ที่วัดได้โดยการถ่ายภาพรังสีความร้อนเพื่อวิเคราะห์ความแปรปรวนอุณหภูมิของภาคส่งของเรดาร์จากปัจจัยที่เกี่ยวข้อง	35
8	ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ของอุณหภูมิภาครับของเรดาร์จากปัจจัยที่เกี่ยวข้องเพื่อการศึกษาผลกระทบหลักและผลกระทบร่วมพร้อมกัน	35
9	อุณหภูมิสูงสุดของส่วนแสดงผลเรดาร์ที่วัดได้โดยการถ่ายภาพรังสีความร้อนเพื่อวิเคราะห์ความแปรปรวนอุณหภูมิของภาคส่งของเรดาร์จากปัจจัยที่เกี่ยวข้อง	37
10	ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ของส่วนแสดงผลของเรดาร์จากปัจจัยที่เกี่ยวข้องเพื่อการศึกษาผลกระทบหลักและผลกระทบร่วมพร้อมกัน	37
11	ผลการวิเคราะห์การถดถอยของสมการพหุคูณอุณหภูมิภาคส่งเรดาร์ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%	40
12	ผลการวิเคราะห์การถดถอยของสมการพหุคูณอุณหภูมิภาครับเรดาร์ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%	42
13	ผลการวิเคราะห์การถดถอยของสมการพหุคูณอุณหภูมิส่วนแสดงผลเรดาร์ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%	44
14	เปรียบเทียบค่าใช้จ่ายในการซ่อมบำรุงเรดาร์ภายในเรือระหว่างการซ่อมบำรุงแก้ไขกับการใช้เทคนิคการถ่ายภาพรังสีความร้อน	46
15	การเปรียบเทียบเวลาในการซ่อมบำรุงเรดาร์แต่ละเครื่องภายในระยะเวลา 15 ปี	48

## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
16 จำนวนครั้งที่เรดาร์แต่ละเครื่องชำรุดเสียหายจนต้องเข้าซ่อมบำรุงจากรายงาน ภายในระยะเวลา 15 ปี ระหว่างปี พ.ศ. 2545 - 2550	49
17 จำนวนครั้งที่เรดาร์แต่ละเครื่องคาดว่าจะชำรุดเสียหายจนต้องเข้าซ่อมบำรุงนับ ต่อไปอีก 15 ปีจากปีที่ 15	51
18 ประมาณการค่าใช้จ่ายในการตรวจสอบการชำรุดของเรดาร์ต่อปีตั้งแต่ปีที่ 15 ถึงปี ที่ 30	53
<b>ตารางผนวกที่</b>	
1 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ด้วยวิธีวิเคราะห์ความถดถอยเพื่อสร้างแบบจำลองเพื่อ พยากรณ์อุณหภูมิสูงสุดของภาคส่งเรดาร์ด้วยโปรแกรมมินิแทบ	61
2 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ด้วยวิธีวิเคราะห์ความถดถอยเพื่อสร้างแบบจำลองเพื่อ พยากรณ์อุณหภูมิสูงสุดของภาครับเรดาร์ด้วย โปรแกรมมินิแทบ	61
3 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ด้วยวิธีวิเคราะห์ความถดถอยเพื่อสร้างแบบจำลองเพื่อ พยากรณ์อุณหภูมิสูงสุดของส่วนแสดงผลเรดาร์ด้วยโปรแกรมมินิแทบ	62

## สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	ส่วนประกอบของเรดาร์	7
2	ภาพถ่ายรังสีความร้อนแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ในไมโครคอมพิวเตอร์ที่เพิ่ม สัญญาณนาฬิกา	11
3	ขั้นตอนการวิจัยและรายละเอียดวิธีการวิจัยในแต่ละขั้น	23
4	ภาพถ่ายรังสีความร้อนระบบภาคส่งเรดาร์ภายในเรือ	29
5	ภาพถ่ายรังสีความร้อนระบบภาครับเรดาร์ภายในเรือ	30
6	ภาพถ่ายรังสีความร้อนส่วนแสดงผลเรดาร์ภายในเรือ	31
7	ผลการทดสอบทางสถิติเพื่อพิสูจน์การกระจายตัวของข้อมูลอุณหภูมิสูงสุดของ ภาคส่งเรดาร์ที่มีสภาพดีจากการวัดโดยการถ่ายภาพรังสีความร้อน	39
8	ผลการทดสอบทางสถิติเพื่อพิสูจน์การกระจายตัวของข้อมูลอุณหภูมิสูงสุดของ ภาครับเรดาร์ที่มีสภาพดีจากการวัดโดยการถ่ายภาพรังสีความร้อน	41
9	ผลการทดสอบทางสถิติเพื่อพิสูจน์การกระจายตัวของข้อมูลอุณหภูมิสูงสุดของ ส่วนแสดงผลเรดาร์ที่มีสภาพดีจากการวัดโดยการถ่ายภาพรังสีความร้อน	43
10	เปรียบเทียบจำนวนครั้งที่เกิดของระยะห่างระหว่างการชำรุดแต่ละครั้ง	50

# การเพิ่มประสิทธิภาพการซ่อมบำรุงรักษาเรดาร์ภายในเรือรบ โดยใช้เทคนิคการถ่ายภาพรังสีความร้อน

## Efficiency Improvement of Warship Radar Maintenance by Using Infrared Thermography Technique

### คำนำ

ระบบเรดาร์ทางเรือ (Marine Radar) เป็นเครื่องมือช่วยในการเดินเรือใช้สำหรับตรวจจับวัตถุ รวมทั้งการหาตำแหน่งและความเร็วของวัตถุ ในปัจจุบันเรดาร์ถูกนำมาใช้ประโยชน์ในงานต่างๆ หลายอย่าง เช่น เรดาร์ประจำเรือเดินทะเล เรดาร์ประจำหอควบคุมท่าเรือหรือสถานีชายฝั่ง เรดาร์ประจำหอบังคับการของสนามบิน และเรดาร์สำหรับตรวจสอบสภาพอากาศเพื่อแสดงภาพและการเคลื่อนที่ของก้อนเมฆ ในทางทหารเรดาร์ถูกใช้สำหรับตรวจหาอากาศยาน หรือเรือพิฆาตที่เข้ามาในพื้นที่ตรวจจับของเรดาร์ และควบคุมระบบอาวุธภายในเรือ ตามอนุสัญญา International Convention for the Safety of Life at Sea ซึ่งถือเป็นกฎหมายระหว่างประเทศที่รัฐชายฝั่งจำนวนมากรวมทั้งประเทศไทยได้ให้สัตยาบันกล่าวไว้ว่า “เรือทุกลำที่มีขนาดตั้งแต่ 300 ตันกรอสขึ้นไป และเรือโดยสารทุกขนาดต้องติดตั้งหรือเครื่องมืออื่นใดที่สามารถวัดและแสดงระยะทาง และทิศทางของเรือพิฆาต สิ่งกีดขวาง ทุ่น ขอบฝั่ง และเครื่องหมายเดินเรือเพื่อ ช่วยในการเดินเรือ และหลีกเลี่ยงการชนกัน” (International Maritime Organization, 1974) ทำให้เรือที่ไม่มีเรดาร์หรือเรดาร์ชำรุดนั้นขัดต่ออนุสัญญาดังกล่าวมีผลทำให้รัฐชายฝั่งที่ให้สัตยาบันมีสิทธิที่จะไม่ให้เดินเรือเข้ามายังน่านน้ำ ภายใน และ ทะเลอาณาเขต หรือเดินเรือออกจากท่าเรือของรัฐชายฝั่งนั้น

เรดาร์เป็นอุปกรณ์ที่มีความสำคัญต่อความปลอดภัยในการเดินเรือและการปฏิบัติการกิจที่ได้รับมอบหมายของเรือ หากเกิดการชำรุดเรือจะไม่สามารถออกปฏิบัติงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ จึงจำเป็นต้องทำให้เรดาร์มีความพร้อมใช้งานตลอดเวลา ในปัจจุบันการซ่อมบำรุงรักษาเรดาร์มี 2 วิธี คือ การซ่อมบำรุงแก้ไข (Corrective Maintenance) เป็นการซ่อมบำรุงภายหลังจากการชำรุด และการซ่อมบำรุงรักษาเชิงป้องกัน (Preventive Maintenance) เป็นการซ่อมบำรุงรักษาก่อนการชำรุดโดยกระทำเป็นคาบเวลาสม่ำเสมอ เรดาร์เป็นอุปกรณ์ที่มีความซับซ้อนและส่วนประกอบจำนวนมาก จากความเชื่อมั่นที่ต่ำทำให้เรดาร์มีอายุการใช้งานต่ำ โดยเฉพาะเรดาร์ควบคุมการยิงที่ใช้ทางทหารมีเพียงหลายร้อยชั่วโมงใช้งานเท่านั้น ดังนั้นระบบการซ่อม

บำรุงรักษาจึงเป็นสิ่งสำคัญเพื่อให้เรดาร์สามารถใช้งานได้ตลอดเวลา โดยต้องดำเนินการจัดหา เก็บรักษา อุปกรณ์ อะไหล่ที่มีความเชื่อมั่นสูงและมีจำนวนเพียงพอต่อการใช้งาน วิศวกรซ่อมบำรุงจะต้องซ่อมบำรุงอย่างรวดเร็วที่สุดในขั้นตอนแรกคือ การทดสอบประสิทธิภาพ และค้นหาจุดที่ชำรุดซึ่งเป็นกระบวนการที่ซับซ้อนและไม่มีระเบียบปฏิบัติที่แน่นอนการทดสอบนี้จะเริ่มจากส่วนบนที่สุดไปสู่ส่วนล่าง เมื่อพบส่วนของระบบที่ชำรุดแล้วจึงเปลี่ยนหรือซ่อมบำรุงส่วนนั้น (Chen *et al.*, 1996) การซ่อมบำรุงป้องกันแบบดั้งเดิมมุ่งเน้นที่การจัดตารางเป็นคาบเวลาจากประสบการณ์ของช่างและมักจะเกิดขึ้นเป็นช่วงเวลาซ้ำๆ ระบบนี้ไม่สามารถซ่อมแซมอุปกรณ์ให้เหมือนใหม่ได้ มีผลให้ความเชื่อมั่นของระบบลดลงนำไปสู่นโยบายการซ่อมบำรุงป้องกันแบบอนุกรมซึ่งระบบจะมีช่วงการใช้งานลดลงเป็นอนุกรม ต้องการการซ่อมบำรุงบ่อยขึ้นตามอายุการใช้งาน กระบวนการปรับปรุงตัวแปรใช้ในการตัดสินใจวางแผนซ่อมบำรุงในรูปแบบการวัดอัตราเสี่ยงหรือความเชื่อมั่นของระบบ (Zhuo *et al.*, 2007)

เมื่อพิจารณาที่ปัจจัยสิ่งแวดล้อมพบว่าความแตกต่างของสภาพอากาศในแต่ละพื้นที่ของโลกเป็นปัจจัยสำคัญเพื่อพิจารณาออกแบบระบบการซ่อมบำรุง โดยเฉพาะอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ การเสื่อมสภาพของอุปกรณ์มีหลายสิ่งต้องพิจารณาได้แก่ อุณหภูมิ ความชื้น มลภาวะ ฝุ่น เป็นต้น โดยเฉพาะในสภาพอากาศที่วิกฤต ได้แก่ เขตร้อนชื้นที่มีอุณหภูมิและความชื้นสูง เขตทะเลทรายที่มีความร้อนสูง และแตกต่างกันมากในเวลากลางวันและกลางคืน เขตอาร์กติกที่อุณหภูมิต่ำมากตลอดทั้งปี สภาพความชื้นสูงทำให้เชื้อราเติบโตได้ดี ส่งผลต่อค่าความเก็บประจุของตัวเก็บประจุ ทำให้วัสดุชีวภาพทุกชนิดเสื่อมสภาพ วัสดุที่เป็นฉนวนสามารถดูดซับความชื้นทำให้ความต้านทานลดลงเพราะน้ำนำไฟฟ้าได้ดีเป็นสาเหตุของการเกิดไฟฟ้าลัดวงจร สูญเสียพลังงาน สภาพอุณหภูมิสูงก่อให้เกิดการขยายตัวของวัสดุจนเกิดการแตกร้าว อุปกรณ์ที่เป็นยางแข็งตัวและทำให้ตัวเก็บประจุชนิดปรับค่าได้สูญเสียความสามารถในการปรับค่า ทำให้วัสดุที่จุดหลอมเหลวต่ำ เช่น จาระบี อ่อนตัวลงหรือหลุดหายไป นอกจากนี้อุณหภูมิยังมีอิทธิพลต่อสภาพทางแม่เหล็กของวัสดุ ค่าการเก็บประจุและความต้านทานจะเปลี่ยนแปลงเมื่ออุณหภูมิสูง สภาพแวดล้อมที่ไม่เหมาะสมเป็นสาเหตุให้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์มีความเชื่อมั่นลดลง ประสิทธิภาพลดลง อายุการใช้งานสั้นลงนำไปสู่การชำรุด และลดความเชื่อมั่นรวมของระบบ โดยทั่วไปการทดสอบอุปกรณ์ในระหว่างออกแบบของบริษัทผู้ผลิตกระทำภายในห้องควบคุมสภาพอากาศ เนื่องจากการจำลองสภาพแวดล้อมอาจมีความผิดพลาด หรือแตกต่างกับสภาพแวดล้อมจริงทำให้ความน่าเชื่อถือต่ำ (Oyebisi, 2000)

การซ่อมบำรุงเรดาร์ภายในเรือทำการศึกษาระดับควบคุมการยิงบนเรือรบของกองทัพเรือประเทศไทย ย่านความถี่ I-band ชนิดที่มีใช้จำนวนมากที่สุดบนเรือรบในกองทัพเรือจำนวน 8 เครื่อง โดยพิจารณาจากนโยบายด้านความพร้อมของกองทัพเรือที่กำหนดความพร้อมของ ยุทโธปกรณ์และเรือรบไว้ที่สัดส่วน 2 ใน 3 ของเรือรบที่มีอยู่ทั้งหมด 13 ลำที่มีเรดาร์แบบเดียวกัน ติดตั้งอยู่ อุปกรณ์เรดาร์ทุกส่วนยกเว้นสายอากาศติดตั้งไว้ภายในห้องที่ควบคุมอุณหภูมิ และความชื้นในระดับที่เหมาะสม เรดาร์แต่ละเครื่องมีอายุ และประสิทธิภาพการใช้งานที่แตกต่างกัน การซ่อมบำรุงเรดาร์ภายในเรือในปัจจุบันเป็นการซ่อมบำรุงตามตารางการซ่อมบำรุงที่บริษัทผู้ผลิต กำหนดจะมีค่าใช้จ่ายในการซ่อมบำรุงสูง เนื่องจากบริษัทผู้ผลิตจะกำหนดการซ่อมบำรุงเชิงป้องกัน โดยใช้ระยะเวลาเป็นตัวกำหนดการซ่อมบำรุงซึ่งมีวงรอบสั้น เพื่อความเชื่อมั่นในการใช้งานเรดาร์ แต่ในทางตรงกันข้าม ระยะเวลาการซ่อมบำรุงที่บริษัทผู้ผลิตกำหนดในบางงาน มีระยะเวลาซ่อมบำรุงเชิงป้องกันตามที่กำหนดนานเกินไปเกิดการชำรุดเสียหายก่อนกำหนด เนื่องจาก สภาพแวดล้อม อุณหภูมิ ความชื้น และการใช้งานที่แตกต่างกัน ทำให้เกิดการชำรุดก่อนระยะเวลาที่บริษัทผู้ผลิตกำหนดเพราะบริษัทผู้ผลิตส่วนใหญ่อยู่ในยุโรป อเมริกา และญี่ปุ่น ซึ่งเป็นภูมิอากาศ เขตอบอุ่น และเขตหนาว ที่แตกต่างจากสภาพการใช้งานในภูมิอากาศเขตร้อนชื้นในประเทศไทย นอกจากนี้การเก็บรักษาอะไหล่เรดาร์ภายในเรือสามารถกระทำได้อย่างถูกต้องเนื่องจากขนาดพื้นที่ที่จำกัด และสภาพแวดล้อมที่ทำให้อายุการเก็บรักษาลดลง และอาจก่อให้เกิดความเสียหายได้จาก ความชื้น อุณหภูมิ ความเค็มของอากาศในทะเล และการโคลงจากคลื่นลม จึงมีความจำเป็นต้องเก็บรักษา อะไหล่ภายในคลังหรือสถานที่บนบกที่เหมาะสม การซ่อมบำรุงรักษาภายในเรือกระทำด้วยความ ยากลำบากและมีความเสี่ยงต่ออันตรายของเจ้าหน้าที่จากไฟฟ้าแรงสูงภายในอุปกรณ์เรดาร์และการ โคลงของเรือ ดังนั้นแนวทางการประยุกต์ใช้เทคนิคการทดสอบแบบไม่ทำลายโดยใช้ภาพถ่าย รังสีความร้อนเพื่อการซ่อมบำรุงป้องกันจึงเป็นแนวทางที่คาดว่าจะสามารถเพิ่มประสิทธิภาพใน การซ่อมบำรุงเรดาร์ภายในเรือ ซึ่งไม่ใช่เครื่องมือวัดทางไฟฟ้าและไม่สัมผัสอุปกรณ์ โดยลดเวลา ในการตรวจสอบหาจุดที่ชำรุดเสียหาย ประเมินสภาพอุปกรณ์เรดาร์ ช่วยวางแผนการซ่อมบำรุง และเปลี่ยนอะไหล่ และเพิ่มความปลอดภัยจากไฟฟ้าแรงสูงแก่ผู้ปฏิบัติงาน

## วัตถุประสงค์

การวิจัยมีวัตถุประสงค์รวมเพื่อการเพิ่มประสิทธิภาพการซ่อมบำรุงรักษาเรดาร์ภายในเรือรบ โดยใช้เทคนิคการถ่ายภาพรังสีความร้อนเพื่อลดเวลาในการค้นหาการชำรุดเสียหายของอุปกรณ์เรดาร์ และลดความเสี่ยงอันตรายจากไฟฟ้าแรงสูงของเจ้าหน้าที่ปฏิบัติงาน จากกรณีศึกษาเรดาร์ควบคุมการยิงบนเรือรบ ย่านความถี่ I-Band จำนวน 8 เครื่องโดยกระทำภายในเรือรบของกองทัพเรือ ไทยที่มีสถานะการใช้งาน และสิ่งแวดล้อมปกติในทะเลบริเวณอ่าวไทยตอนบน สามารถแยกออกเป็นวัตถุประสงค์หลักดังนี้

1. จำแนกประเภทการชำรุดเสียหายของเรดาร์ภายในเรือที่สามารถตรวจพบโดยการถ่ายภาพรังสีความร้อน
2. วิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลต่ออุณหภูมิสูงสุดของเรดาร์เพื่อใช้เปรียบเทียบ ในการใช้เทคนิคการถ่ายภาพรังสีความร้อนเพื่อซ่อมบำรุงรักษาเรดาร์ภายในเรือ
3. เปรียบเทียบค่าใช้จ่ายการซ่อมบำรุงเรดาร์ภายในเรือรบระหว่างการซ่อมบำรุงเชิงพยากรณ์โดยใช้เทคนิคการถ่ายภาพรังสีความร้อนกับการซ่อมบำรุงแก้ไขซึ่งเป็นวิธีที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน

## การตรวจเอกสาร

### หลักการการทำงานของเรดาร์

หลักการการทำงานของเรดาร์คือ เรดาร์จะส่งสัญญาณพัลส์ (Pulse) ซึ่งเป็นสัญญาณช่วงสั้น ออกไปในลักษณะของคลื่นวิทยุ เมื่อคลื่นกระทบกับวัตถุที่กีดขวางเส้นทางของคลื่นวิทยุจะถูกสะท้อนกลับโดยวัตถุนั้น และสัญญาณสะท้อนกลับจะถูกรับมาวิเคราะห์ด้วยเครื่องรับของเรดาร์ ผลจากการวิเคราะห์ที่เครื่องเรดาร์จะสามารถบอกระยะทาง (ตำแหน่ง) และความเร็วของวัตถุ ระยะทางสามารถคำนวณจากเวลาที่สัญญาณใช้ในการเดินทางจากเครื่องส่ง แล้วสะท้อนกลับมาถึงเครื่องรับของเรดาร์ ระยะทางจึงเท่ากับครึ่งหนึ่งของผลคูณระหว่างความเร็วและเวลาที่คลื่นเดินทางไปและกลับ ส่วนความเร็วของวัตถุในทิศทางที่วิ่งสู่เครื่องเรดาร์นั้นคำนวณได้จากหลักของดอปเปลอร์ (Doppler Principle) กล่าวคือ เมื่อวัตถุวิ่งเข้าสู่เครื่องเรดาร์ สัญญาณสะท้อนกลับจะมีความถี่เพิ่มขึ้นจาก ความถี่ของสัญญาณที่ส่งออกไปสามารถหาระยะห่างของเป้าได้

ส่วนประกอบที่สำคัญของเรดาร์ (คำรณ, ม.ป.ป.) จำแนกไว้ดังภาพที่ 1

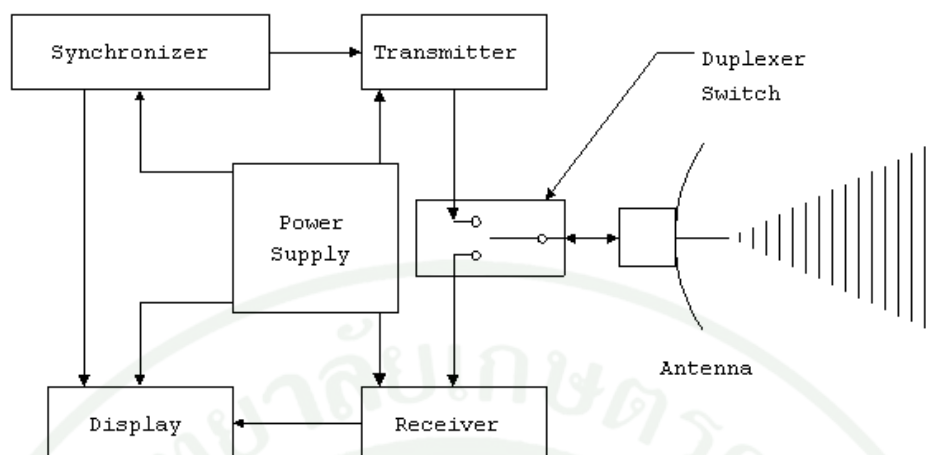
1. ซิงโครไนซ์เซอร์ (Synchronizer) เป็นอุปกรณ์เชื่อมโยงสัญญาณให้เข้ากัน ซึ่งเป็นตัวกำหนดเวลาในการส่งพัลส์ออกไป และเชื่อมต่อการทำงานของวงจรต่างๆในระบบเรดาร์
2. ระบบควบคุมสัญญาณ (Modulator) ทำหน้าที่จ่ายกระแสไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรงสำหรับให้หลอดกำเนิดสัญญาณ (Magnetron) ที่อยู่ในภาคเครื่องส่ง ทำงานโดยใช้ระบบเวลา (Timing) ควบคุมการสร้างสัญญาณเรดาร์โดยคำนึงถึงเวลา และความกว้างของพัลส์ซึ่งจะเป็นช่วงเวลาในการเริ่มต้นและสิ้นสุดการส่ง
3. ระบบภาคส่งสัญญาณ (Transmitter) ประกอบด้วยส่วนสำคัญซึ่งได้แก่ หลอดกำเนิดสัญญาณ โดยอยู่ร่วมกับแท่งแม่เหล็ก ดังนั้นจะเกิดสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าตัดกันในขณะที่เดียวกันกระแสไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรงจากระบบควบคุมสัญญาณจะทำให้หลอดกำเนิดทำงานสลับกัน มีผลทำให้เกิดคลื่นวิทยุที่มีความถี่หนึ่ง คลื่นวิทยุที่ได้จากระบบภาคเครื่องส่งจะผ่านไปยังระบบควบคุมการรับส่งสัญญาณ

4. ระบบควบคุมการรับส่งสัญญาณ (Duplexer) ทำหน้าที่รับและส่งโดยจะทำหน้าที่เป็นสวิตช์ต่อระหว่างระบบสายอากาศกับระบบภาคเครื่องรับและภาคเครื่องส่ง ซึ่งภายในมีลักษณะเป็นหลอด 2 หลอด (TR Tubes) มี 2 แบบ ขณะทำการส่งคลื่นวิทยุกำลังไฟฟ้าจะทำให้แก๊สที่บรรจุอยู่ภายในหลอดทั้งสองเกิดการแตกตัว ทำให้เกิดการลัดวงจร ระบบภาคเครื่องรับจะไม่ทำงาน เมื่อคลื่นวิทยุที่สะท้อนกลับมาผ่านไปยังสายอากาศในแก๊สที่อยู่ภายในหลอดทั้งสองจะไม่แตกตัว ระบบภาคเครื่องรับจึงทำงานและรับสัญญาณวิทยุที่สะท้อนกลับ

5. ระบบสายอากาศ (Antenna) สำหรับเรดาร์เดินเรือที่นิยมใช้ส่วนมากจะเป็นรูปแกนหมุน โดยด้านหน้าสายอากาศมีคุณลักษณะการนำที่ดี ลักษณะของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ออกจากสายอากาศเมื่อกระทบปีกสายอากาศจะถูกจัดให้มีลักษณะเป็นมุมระนาบกว้าง ส่วนในตอนรับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่สะท้อนกลับมาจากเป้า จะกระทบปีกสายอากาศแล้วรวมตัวกันเข้าสู่สายอากาศ เพื่อต่อไปยังระบบภาครับโดยผ่านท่อนำคลื่น (Wave Guide) และระบบควบคุมการรับส่งสัญญาณ

6. ระบบภาครับสัญญาณ (Receiver) ทำหน้าที่รับคลื่นวิทยุที่สะท้อนกลับมาจากเป้า เมื่อคลื่นวิทยุสะท้อนกลับมาเข้าสู่สายอากาศและระบบภาครับสัญญาณตามลำดับ ในระบบภาครับสัญญาณจะทำหน้าที่แปลงคลื่นวิทยุ ที่สะท้อนกลับมาเป็นสัญญาณความถี่กลาง (Intermediate Frequency) 30 MHz โดยใช้ร่วมกับวงจรออสซิลเลเตอร์ (Local Oscillator) และวงจรผสมสัญญาณ (mixer) สัญญาณความถี่กลางจะถูกขยายด้วยวงจรขยาย (Amplifier) เพื่อสำหรับแสดงบนจอภาพ

7. ระบบแสดงผล (Display) ทำหน้าที่สร้างภาพให้เห็นเป็นเป้าบนจอภาพ แสดงข้อมูลต่างๆของเป้าได้แก่ ทิศ ระยะห่าง ความเร็วของเป้า เป็นต้น



ภาพที่ 1 ส่วนประกอบของเรดาร์

ที่มา: คำนวณ (ม.ป.ป.)

### การซ่อมบำรุงเชิงป้องกัน

การซ่อมบำรุงป้องกัน (Edwards *et al*, 1998) สามารถจำแนกดังนี้

1. การซ่อมบำรุงป้องกันเชิงสถิติ เป็นการบันทึกการหยุดการทำงานของส่วนต่างๆ ในระบบและรวบรวมข้อมูลเพื่อสร้างแบบจำลองทางสถิติสำหรับพยากรณ์ความเสียหายเพื่อวางแผนการซ่อมบำรุง

2. การซ่อมบำรุงป้องกันเชิงตามสภาพ อาศัยหลักการที่ว่าความเสียหายจะไม่เกิดขึ้นทันที จะต้องมีการเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมของเครื่องจักรอย่างต่อเนื่อง วิธีนี้อาศัยการเฝ้าตรวจสอบสภาพของเครื่องจักร หาลักษณะที่แสดงถึงความเสียหายของเครื่องจักรที่กำลังจะเกิดในอนาคต สามารถใช้เทคนิคการทดสอบแบบไม่ทำลายวิเคราะห์ และค้นหาเวลาที่เหมาะสมในการซ่อมบำรุงป้องกัน เทคนิคการทดสอบแบบไม่ทำลายที่นิยมใช้ได้แก่

2.1 การตรวจการเสียดสี อาศัยการสังเกตการเคลื่อนที่ของของพื้นผิวและการหมุน การยับยั้งการเสียดสีและความร้อนที่เกิดจากเครื่องจักรอาศัยสารหล่อลื่นซึ่งเป็นส่วนผสมของ

ไฮโดรคาร์บอนกับสารเคมีพิเศษ ซึ่งคุณสมบัติพิเศษของโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนคือสามารถป้องกันการกระทบทางกายภาพได้ สารหล่อลื่นอาจถูกปนเปื้อนทำให้ลดคุณสมบัติดังนี้

2.1.1 ออกซิเดชัน (Oxidation) เป็นกระบวนการที่ทำให้สารหล่อลื่นสูญเสียไฮโดรเจนซึ่งทำให้โมเลกุลของสารหล่อลื่นสูญเสียคุณสมบัติ

2.1.2 การปนเปื้อนของเหลวอื่นโดยเฉพาะน้ำซึ่งพบได้บ่อยในสารหล่อลื่นสารปนเปื้อนเหล่านี้ไม่สามารถลดการเสียดสีได้ทำให้เครื่องจักรทรุดโทรมอย่างรวดเร็ว

2.1.3 การปนเปื้อนของแข็ง การทำงานทางกลบางครั้งก่อให้เกิดความเค้นสูงเกินกว่าขีดจำกัดความยืดหยุ่นทำให้พื้นผิวโลหะเกิดการแตกหัก ก่อให้เกิดชิ้นส่วนโลหะขนาดเล็กเจือปนในสารหล่อลื่นทำให้เกิดการกัดกร่อน สาเหตุของการปนเปื้อนของแข็งมีดังนี้

ก) การครูด (Scuffing) เกิดจากโหลดสูงหรือความเร็วสูงเกินไปจนเกิดความร้อนสูงและความเสียหายบริเวณพื้นผิว

ข) การเสียดสี (Sliding) ) เกิดจากโหลดสูงหรือความเร็วสูงเกินไปก่อให้เกิดเศษวัสดุขนาดใหญ่หลุดออกมา

ค) ความล้า (Fatigue) ส่งผลให้เกิดการแตกหักเป็นผลจากความเค้นตามแนวยาว

การซ่อมบำรุงเชิงตามสภาพโดยวิธีตรวจการเสียดสี ใช้เทคนิคการตรวจตัวอย่างสารหล่อลื่นเพื่อวิเคราะห์การปนเปื้อนโดยทำการตรวจวัดความหนืด ปริมาณน้ำ ความเป็นกรดและค่าทางกายภาพอื่นๆตามมาตรฐาน ในปัจจุบันถูกใช้แทนที่ด้วยเทคนิคสเปกโทรสโคปีซึ่งเป็นเทคนิคที่วัดความยาวคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ขีดจำกัดของเทคนิคนี้อยู่ที่ไม่สามารถวิเคราะห์เชิงปริมาณกับเศษวัสดุที่มีขนาดใหญ่กว่า 10 ไมครอนได้ เศษวัสดุขนาดใหญ่ต้องใช้เทคนิคเฟอโรกราฟีซึ่งเป็นเทคโนโลยีสำหรับตรวจคุณภาพสารหล่อลื่นใช้เป็นหลักในงานวิศวกรรมเครื่องกล โดยให้สารหล่อลื่นเคลื่อนที่ด้วยแรงดันผ่านสนามแม่เหล็กแรงสูง สำหรับเศษวัสดุที่ไม่มีอำนาจแม่เหล็กใช้แผ่นเยื่อกรอง แล้วทำการวิเคราะห์เชิงปริมาณเพื่อหาอัตราส่วนความเข้มข้นของเศษ

วัสดุ (Wear Particle Concentration Ratio) เพื่อเฝ้าตรวจแนวโน้มที่เพิ่มขึ้น โดยเฉพาะเศษวัสดุขนาดใหญ่แสดงถึงการผิดปกติของเครื่องจักร

2.2 การเฝ้าตรวจความสั่นสะเทือน อาศัยหลักการที่ว่าชิ้นส่วนที่เคลื่อนที่ของเครื่องจักรจะสร้างความถี่การสั่นสะเทือนที่แอมพลิจูดเฉพาะที่แตกต่างกันในแต่ละเครื่อง การสั่นสะเทือนเกิดจากแรงที่กระทำและระยะการเคลื่อนที่ การสั่นสะเทือนระดับสูงเพียงอย่างเดียวไม่ได้แสดงถึงการผิดปกติเพราะอาจเกิดจากระยะการเคลื่อนที่สูง การเฝ้าตรวจตามคาบเวลาพบว่าแอมพลิจูดจะคงที่จนกว่าจะมีการเปลี่ยนแปลงทางจลน์ การสั่นสะเทือนเฉพาะจะถูกทำเป็นเกณฑ์มาตรฐานเพื่อเปรียบเทียบกับการสั่นสะเทือนในอนาคต ในเครื่องจักรที่ซับซ้อนต้องจัดทำเป็นสเปกตรัมการสั่นสะเทือน การพัฒนาในปัจจุบันของคอมพิวเตอร์และโปรแกรมก่อให้เกิดระบบการควบคุมการสั่นสะเทือนช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการจับเก็บและวิเคราะห์ข้อมูล

2.3 การถ่ายภาพรังสีความร้อน อาศัยการตรวจวัดจากการแผ่รังสีอินฟราเรดจากอุปกรณ์ เริ่มใช้ในอุตสาหกรรมเหล็กเพื่อตรวจสอบสภาพของเตา เครื่องผสม และเครื่องไฟฟ้า ทางการซ่อมบำรุงอุปกรณ์ที่อุณหภูมิสูงหรือต่ำกว่าปกติแสดงถึงปัญหา เทคนิคนี้เหมาะที่จะใช้ตรวจหาความร้อนที่เกิดจากความผิดปกติของส่วนเคลื่อนที่ แต่เทคนิคนี้มีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงของสิ่งแวดล้อม ประโยชน์คือช่วยค้นหาจุดขัดข้องได้ทันทีและลดค่าแรงในการซ่อมบำรุง

2.4 การตรวจสอบทางสายตา อาศัยการตรวจสอบโดยผู้ที่มีประสบการณ์ สามารถตรวจพบข้อมูลที่สำคัญและความเสียหายโดยใช้ค่าใช้จ่ายต่ำ อย่างไรก็ตามการตรวจด้วยสายตาให้เพียงข้อมูลเชิงคุณภาพและขึ้นอยู่กับประสบการณ์และการตัดสินใจส่วนบุคคล

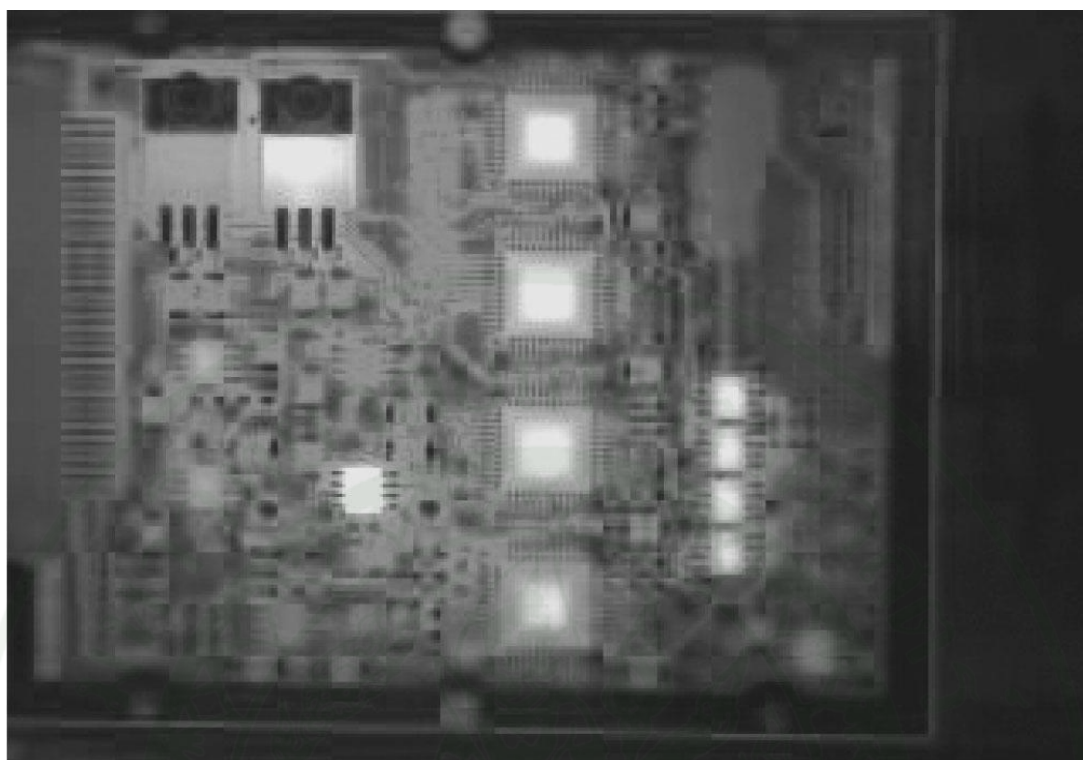
2.5 การวิเคราะห์หาต้นเหตุการชำรุด เน้นค้นหาสาเหตุที่ก่อให้เกิดการชำรุด ซึ่งแตกต่างจากการซ่อมบำรุงป้องกันที่เน้นเปลี่ยนชิ้นส่วนตามเวลาหรือการใช้งาน สามารถระบุสาเหตุของการชำรุดได้แก่ การฝึกอบรมที่ไม่เพียงพอ การใช้งานอุปกรณ์ นโยบายและระบบการซ่อมบำรุงที่ไม่เหมาะสม เป็นต้น

### การถ่ายภาพรังสีความร้อน

วัตถุของแข็งจะมีพลังงานที่แผ่ออกมาจากภายในและภายนอกวัตถุเท่ากัน วัตถุดำที่ภาวะสมดุลจะมีพลังงานที่ถูกดูดซับและพลังงานที่ส่งออกมาเท่ากัน แต่พลังงานที่เคลื่อนที่ผ่านวัตถุจะมี

ปริมาณเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นหรือลดลงเนื่องจากอุณหภูมิของวัตถุที่เปลี่ยนแปลง การถ่ายภาพรังสีความร้อนสามารถวัดอุณหภูมิของวัตถุจากรังสีที่ส่งออกมาซึ่งเป็นอัตราส่วนกับอุณหภูมิผิวในวัตถุดำ โดยการปรับค่าจากตัวแปรความสามารถการแผ่รังสี (Emissivity Factor) ซึ่งเป็นอัตราส่วนการแผ่รังสีของวัตถุต่อการแผ่รังสีของวัตถุดำ วัตถุทึบจะมีค่าสูง (ใกล้เคียง 1) วัตถุโปร่งแสงจะมีค่าต่ำ (ใกล้เคียง 0) กล้องถ่ายภาพรังสีความร้อนเป็นเครื่องมือที่แปลงรังสีที่แผ่ออกมาจากวัตถุเป็นภาพ ซึ่งสามารถแยกแยะระดับอุณหภูมิต่างๆ ได้จากสีที่แตกต่างกันของภาพ หลักการทำงานของกล้องถ่ายภาพรังสีความร้อนคือ อาศัยการนำและพาความร้อน ซึ่งเกิดจากการส่งผ่านความร้อนจากวัตถุทดสอบ เนื่องจากวัตถุทุกชนิดแผ่รังสีความร้อนออกมาโดยสัมพันธ์กับอุณหภูมิของวัตถุนั้น การแผ่รังสีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเกิดจากอิเล็กตรอนในวัตถุทดสอบลดระดับพลังงานลง ความเข้มและความยาวคลื่นที่แผ่ออกมาขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของอะตอมและโมเลกุลพื้นผิว เนื่องจากความผิดปกติต่างๆ ของเครื่องจักรและอุปกรณ์ไฟฟ้าจะแสดงออกมาในรูปของอุณหภูมิที่สูงหรือต่ำกว่าปกติ จึงสามารถใช้เทคนิคการถ่ายภาพรังสีความร้อนสำหรับการซ่อมบำรุงเชิงตามสภาพ เป็นกระบวนการทดสอบแบบไม่ทำลาย และไม่สัมผัส ใช้ตรวจหาการชำรุดเสียหายของอุปกรณ์ก่อนที่จะเกิดขึ้น เพื่อลดการเกิดความเสียหายร้ายแรงของเครื่องจักร ลดอันตรายของผู้ปฏิบัติงาน และลดสูญเสียทางการผลิต โดยสามารถตรวจสอบได้จากระยะห่าง กระทำได้ขณะเครื่องจักรทำงาน แสดงผลทั้งเชิงคุณภาพ และเชิงปริมาณ เป็นเครื่องมือที่ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการซ่อมบำรุง สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการซ่อมบำรุงรักษาได้หลายรูปแบบ ได้แก่ การซ่อมบำรุงด้านวิศวกรรมไฟฟ้าใช้ตรวจหาจุดเชื่อมต่อที่ชำรุด การชำรุดของฉนวน การเสื่อมสภาพของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ และ การใช้ไหลเดินกำลัง การซ่อมบำรุงด้านวิศวกรรมเครื่องกลใช้ตรวจสอบสภาพของส่วนเคลื่อนที่ในเครื่องจักรและการตรวจสอบการไหลของของเหลว ในปัจจุบันเทคนิคการถ่ายภาพรังสีความร้อนนิยมใช้งานกับระบบไฟฟ้ากำลัง หม้อแปลง สายส่งไฟฟ้า มอเตอร์ และเครื่องจักรในอุตสาหกรรม (Hoffer *et al.*, 1986; Epperly *et al.*, 1997; Trimm, 2003)

การถ่ายภาพรังสีความร้อนเป็นเครื่องมือหนึ่งในการซ่อมบำรุงพยากรณ์ สามารถใช้ตรวจสอบการชำรุดเสียหายของเครื่องจักรเนื่องจากก่อนที่จะชำรุดเสียหายเครื่องจักรจะมีอุณหภูมิสูงขึ้น เทคนิคนี้ใช้ค้นหาจุดที่เกิดความร้อนอันเป็นสาเหตุของการชำรุดเสียหาย โดยเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่แผ่ออกมาเป็นสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์แล้วแสดงผลเป็นภาพเพื่อบ่งบอกอุณหภูมิ จุดที่ภาพมีความสว่างมากกว่าแสดงถึงอุณหภูมิที่สูงกว่า ภาพที่ 2 แสดงการศึกษาใช้เทคนิคการถ่ายภาพรังสีความร้อนเพื่อวัดอุณหภูมิแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ในไมโครคอมพิวเตอร์ที่เพิ่มสัญญาณนาฬิกา ทำให้อุณหภูมิชิปและแผ่นระบายความร้อนสูงกว่าปกติ ปรากฏเป็นส่วนสีขาว และสว่างกว่าพื้นที่โดยรอบในภาพ (Connolly, 2005)



**ภาพที่ 2** ภาพถ่ายรังสีความร้อนแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ในไมโครคอมพิวเตอร์ที่เพิ่มสัญญาณนาฬิกา

**ที่มา:** Connolly (2005)

การวิเคราะห์ภาพถ่ายรังสีความร้อนเป็นเครื่องมือของวิศวกรเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการซ่อมบำรุง การถ่ายภาพในปัจจุบันสามารถแสดงอุณหภูมิพื้นผิวที่สัมผัสไม่ได้เนื่องจากไฟฟ้าแรงสูงซึ่งให้ผลเร็วกว่าเทอร์โมมิเตอร์ การถ่ายภาพรังสีความร้อนสามารถค้นหาปัญหาและลดค่าใช้จ่ายในการซ่อมบำรุง โดยสร้างแบบจำลองเพื่อกำหนดย่านอุณหภูมิการทำงานปกติของแต่ละระบบ ความแตกต่างของอุณหภูมิจากย่านปกติแสดงถึงการขัดข้องและความต้องการซ่อมบำรุง กล้องถ่ายภาพขนาดใหญ่ที่มีประสิทธิภาพสูงสามารถแยกอุณหภูมิของจุดที่มีขนาดเล็กได้ กล้องถ่ายภาพขนาดเล็กแบบพกพาเหมาะสำหรับวัดอุณหภูมิของวัตถุขนาดใหญ่ได้ จากการศึกษาพบว่าปัจจัยที่สำคัญมีผลต่อการถ่ายภาพรังสีความร้อนคือประสบการณ์ของผู้ถ่ายภาพ ซึ่งใช้ในการระบุจุดที่เกิดการชำรุดเสียหาย (McMenamin, 1990)

Viles *et al.* (2007) ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความแตกต่างของอุณหภูมิที่ตรวจวัดได้กับค่าอุณหภูมิมาตรฐานของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์โดยอ้างอิงจากเกณฑ์มาตรฐานของอุปกรณ์ทาง

การทหาร (Military Standard - MIL-STD2194(SH)) สามารถพยากรณ์สภาพของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์และกำหนดการซ่อมบำรุง ดังนี้

อุณหภูมิแตกต่างกัน 10 ถึง 25 องศาเซลเซียส แสดงว่าการชำรุดของอุปกรณ์ยังไม่เกิดขึ้น แต่จำเป็นต้องตรวจสอบอุปกรณ์ ในการซ่อมบำรุงตามคาบเวลาครั้งต่อไป

อุณหภูมิแตกต่างกัน 25 ถึง 40 องศาเซลเซียส แสดงว่าอุปกรณ์มีความน่าจะเป็นที่จะเกิดการชำรุดเสียหาย จนกว่าจะได้รับการซ่อมบำรุง

อุณหภูมิแตกต่างกัน 40 ถึง 70 องศาเซลเซียส แสดงว่าอุปกรณ์น่าจะเกิดการชำรุดเสียหาย จนกว่าจะได้รับการซ่อมบำรุง

อุณหภูมิแตกต่างกันมากกว่า 70 องศาเซลเซียส แสดงว่าอุปกรณ์ชำรุดเสียหายแน่นอน ให้หยุดการตรวจสอบโดยทันทีและซ่อมบำรุงแก้ไข

การทดลองใช้เทคนิคการถ่ายภาพรังสีความร้อนเพื่อวัดอุณหภูมิเครื่องช่วยในการทรงตัวของเรือ (Fin Stabilizer) โดยใช้กล้องถ่ายภาพรังสีความร้อนบนขาตั้งสามขา เครื่องบันทึกดิจิทัล ส่วนประมวลผลและจอภาพ กล้องจะตรวจพื้นผิวและแสดงข้อมูลความร้อนด้วยภาพดิจิทัล 20 ภาพต่อวินาที วัดได้ในช่วง -20 ถึง 280 องศาเซลเซียส ทำงานได้ต่อเนื่อง 4 ชั่วโมงเมื่อใช้ก๊าซอาร์กอนเพื่อระบายความร้อนเซนเซอร์เพิ่มความไวในการวัดและลดการแทรกสอดของอุณหภูมิภายนอก แปลความหมายภาพถ่ายโดยพิจารณาจากสเกลของสีที่แสดงอุณหภูมิ จากการศึกษาสามารถประมาณอุณหภูมิในระบบปิดได้โดยใช้การวิเคราะห์การถดถอยมีขั้นตอนดังนี้

1. ถ่ายพลังงานให้แก่ระบบจนความร้อนสมดุล
2. ไม่ถ่ายพลังงานและถ่ายภาพรังสีความร้อนเป็นคาบเวลา
3. ถ่ายพลังงานอีกครั้งถ่ายภาพรังสีความร้อนเป็นคาบเวลา
4. ตรวจสอบข้อมูลอุณหภูมิและเวลาที่สนใจ

## 5. สร้างกราฟ Exponential แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับอุณหภูมิ

ปัญหาที่พบในการทดลองคือค่าความสามารถแผ่รังสีทำให้การวัดถ่ายภาพรังสีความร้อนผิดพลาด อุณหภูมิต่ำกว่าความจริง การสะท้อนความร้อนจากคนหรือวัตถุที่สร้างความร้อนทำให้การวัดผิดพลาดให้อุณหภูมิสูงขึ้น แก้ปัญหาโดยเคลือบผิววัตถุบางด้วยวัสดุที่ทราบค่าการแผ่รังสีและปกคลุมโดยรอบด้วยวัสดุที่ไม่สะท้อนรังสี อีกปัญหาที่พบคือเมื่อถ่ายภาพรังสีความร้อนนอกอาคาร อุณหภูมิจะเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วเนื่องจากแสงแดดและลมแก้ปัญหาโดยใช้สิ่งปกคลุมวัตถุที่ต้องการถ่ายภาพ การลดเวลาในการเปิดปิดฝาครอบอุปกรณ์ให้น้อยที่สุดสามารถลดความคลาดเคลื่อนที่มีผลมาจากการไหลของอากาศขณะเปิดปิดฝาครอบอุปกรณ์ เทคนิคการออกแบบและจัดการความร้อนมีความสำคัญในระบบอิเล็กทรอนิกส์ ความเชื่อมั่นมีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิจนขณะปฏิบัติการ อุณหภูมิต่ำจะสามารถทำงานได้นานขึ้น (Hoffer *et al.*, 1986)

การทดลองใช้เทคนิคการถ่ายภาพรังสีความร้อนเพื่อค้นหาจุดสัมผัสในระบบไฟฟ้าแรงสูงที่ชำรุดเสียหาย อาศัยหลักการคือความต้านทานที่จุดสัมผัสในระบบไฟฟ้าแรงสูงเพิ่มขึ้นจากเวลาใช้งาน พลังงานที่ถูกดูดซับที่จุดสัมผัสจะถูกเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อน ทำให้อุณหภูมิอุปกรณ์เพิ่มขึ้น อุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงนี้สามารถใช้ประเมินสภาพจุดสัมผัสได้ การถ่ายภาพรังสีความร้อนเป็นกระบวนการทดสอบโดยไม่สัมผัสสามารถใช้เพื่อประเมินอุณหภูมิของจุดสัมผัสที่มีอายุ โหลด และสภาพแวดล้อมแตกต่างกัน โดยออกแบบการทดลองเป็น 3 ส่วน การทดลอง A กระทำในห้องทดลอง ตัวอย่างทดลองถูกจ่ายกระแส 1000 - 2500 A. ความต่างศักย์ 230 kV. โดยแขนของจุดสัมผัสใช้สำหรับกระแสแรงสูงโดยปราศจากฉนวน แล้วถ่ายภาพรังสีความร้อนเพื่อวัดอุณหภูมิพื้นผิว และทดลองจ่ายกระแสไฟฟ้าที่โหลดเปลี่ยนแปลงจาก 8 - 200% จากปกติ การทดลอง B กระทำเช่นเดียวกับการทดลอง A แต่กระทำภายนอกห้องทดลองที่อุณหภูมิสิ่งแวดล้อมที่แตกต่างกันและการทดลอง C กระทำเช่นเดียวกับการทดลอง A ที่ความเร็วลมที่แตกต่างกัน พบว่าอุณหภูมิและสภาพทางกายภาพของอากาศโดยรอบที่แตกต่างกันมีผลต่อความร้อนของอุปกรณ์ซึ่งส่งผลต่อความแม่นยำในการวัด ผลกระทบหลักจากสิ่งแวดล้อมคือความเย็นจากลม สภาพของอุปกรณ์สามารถประเมินจากอุณหภูมิที่สภาวะสมดุลที่ปราศจากปัจจัยจากสิ่งแวดล้อม ที่สภาวะเสถียรเมื่อเปรียบเทียบอุปกรณ์ที่มีอายุการใช้งานอุณหภูมิจะสูงกว่าอุปกรณ์ใหม่และมีรูปแบบภาพถ่ายที่แตกต่างกัน สามารถระบุถึงการเกิด Hot Spot จากภาพถ่ายรังสีความร้อน (Muhr *et al.*, 2006)

เนื่องจากการถ่ายภาพรังสีความร้อนมีปัจจัยหลายปัจจัยที่ส่งผลต่ออุณหภูมิที่วัดได้จากภาพถ่าย เพื่อค้นหาการแผ่รังสีของวัตถุจึงออกแบบการทดลองถ่ายภาพรังสีความร้อน

คอมพิวเตอรส์ส่วนบุคคล โดยเจาะช่องสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่ฝาครอบและนำแผ่นวัสดุที่ยอมให้รังสีอินฟราเรดผ่านมาติดแทนเพื่อให้การไหลและการถ่ายเทความร้อนไม่เปลี่ยนแปลงไปจากก่อนการเจาะฝาครอบอุปกรณ์ แล้วทำการทดลองเพื่อเลือกวัสดุที่ยอมให้รังสีอินฟราเรดผ่านที่เหมาะสม โดยทดลองกับฟิล์มพลาสติก 3 ชนิดคือ โพลีเอทิลีน โพลีโพรไพลีน และ โพลีสไตรีน แล้ววัดอุณหภูมิพื้นหลังของวัตถุเป้าหมายบนเมนบอร์ด โดยใช้แผ่นฟอยล์อลูมิเนียมหุ้มพื้นผิววัตถุเป้าหมายขณะทำงานปกติทำให้ค่าการแผ่รังสีเท่ากับ 1.00 เพื่อให้เกิดการสะท้อนในอุดมคติ หลังจากนั้นใช้เทปที่รู้ค่าการแผ่รังสีเท่ากับ 0.94 พันวัตถุเป้าหมายที่สภาวะการถ่ายเทความร้อนเสถียรสภาพการทำงานปกติแล้วถ่ายภาพไว้ นำเทปออกแล้วถ่ายภาพอีกครั้งเหมือนเดิมทุกประการ เปรียบเทียบสองภาพถ่าย ปรับการแผ่รังสีจนภาพที่ถ่ายได้มีอุณหภูมิแตกต่างกันไม่เกิน 0.2 °C จะได้ค่าการแผ่รังสีที่ได้เป็นของเฉพาะตำแหน่งนั้น (Yang *et al.*, 2002)

การศึกษาวิธีซ่อมบำรุงที่เหมาะสมที่สุดสำหรับอุปกรณ์ไฟฟ้ากำลังโดยสร้างแบบจำลองความเชื่อมั่นที่เป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิกับอายุของอุปกรณ์ โดยกระบวนการวัดอุณหภูมิอาศัยการถ่ายภาพรังสีความร้อน สามารถแสดงการแจกแจงทางสถิติสำหรับความไม่แน่นอนในการประมาณค่าได้จากการวัด กระบวนการแปลงค่าอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นของไหลในสภาวะไม่เสถียรเพื่อให้สอดคล้องกับสภาวะเสถียร การทดลองนี้ใช้ Monte Carlo Simulation เพื่อค้นหาจุดสัมผัสของระบบสายส่งไฟฟ้าที่ชำรุด กระบวนการนี้อาศัยความเชื่อที่ว่าอุณหภูมิของจุดสัมผัสที่เพิ่มขึ้นแสดงถึงการเสื่อมสภาพ (Linguist *et al.*, 2005)

### ประโยชน์ของการปรับปรุงการซ่อมบำรุง

ปัจจัยหลักที่ก่อให้เกิดความสูญเสียทางธุรกิจเกิดจากการสูญเสียในการผลิตซึ่งมีสาเหตุมาจากการซ่อมบำรุง โดยเฉพาะในปัจจุบันที่ความต้องการความพร้อม คุณภาพ และความปลอดภัยที่เพิ่มขึ้น การซ่อมบำรุงจึงส่งผลกระทบต่อต้นทุนรวมของผลิตภัณฑ์ การจัดการการซ่อมบำรุงจึงเป็นปัจจัยสำคัญที่สามารถลดค่าใช้จ่ายและเพิ่มกำไรได้ โดยอาศัยแนวคิดการจัดการรวมทั้งเทคโนโลยีและกลยุทธ์ซึ่งแตกต่างกันขึ้นอยู่กับสถานการณ์และต้องถูกดัดแปลงให้เหมาะสมกับแต่ละหน่วยงาน จากสถิติการซ่อมบำรุงของเครื่องจักรอุตสาหกรรมพบว่าน้อยกว่า 10 เปอร์เซ็นต์ที่สามารถใช้ได้จนถึงเวลาที่กำหนด การซ่อมบำรุงแก้ไขซึ่งเป็นสิ่งจำเป็นเพราะไม่มีผลิตภัณฑ์ที่สมบูรณ์แบบหรือผลิตภัณฑ์ที่สมบูรณ์แบบราคาสูงเกินไป เป้าหมายหลักของการซ่อมบำรุงคือการเพิ่มความพร้อมของระบบและอุปกรณ์ซึ่งจะเพิ่มความเชื่อมั่นและลดเวลาในการซ่อมบำรุง การซ่อมบำรุงที่เหมาะสมต้องมีค่าใช้จ่ายต่ำและใช้ทรัพยากรน้อย ดังนั้นจึงต้องอาศัยเครื่องมือหรือกระบวนการที่

สามารถช่วยลดเวลาในการค้นหาจุดชำรุดและสาเหตุการชำรุดเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของการซ่อมบำรุงแก้ไข (Viles *et al.*, 2007)

ระบบการผลิตในปัจจุบันได้เปลี่ยนไปจากการประหยัดเนื่องจากปริมาณเป็นการประหยัดเนื่องจากขอบเขต สภาพการตลาดในปัจจุบันมีความเฉพาะในด้านความหลากหลาย ประสิทธิภาพการจัดส่งและคุณภาพของผลิตภัณฑ์ วงจรชีวิตของผลิตภัณฑ์สั้นลงเพื่อตอบสนองความต้องการของผู้บริโภค ผู้ผลิตจำเป็นต้องใช้ระบบการผลิตที่ทันสมัย เลือกลงใช้การควบคุมวัสดุที่เหมาะสมเพื่อลดวัสดุคงคลัง ลดเวลาในการปรับแต่งและวางเครื่องจักรให้น้อยที่สุด โดยอาศัยการจัดการการซ่อมบำรุงที่ต้องการประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น (Raouf and Ben-Daya, 1995) การใช้เทคนิคการซ่อมบำรุงป้องกันประกอบกับเทคโนโลยีขั้นสูงทางอุตสาหกรรม สามารถช่วยลดค่าใช้จ่ายในอุตสาหกรรม ซึ่งค่าใช้จ่ายที่สามารถลดโดยใช้เทคนิคการซ่อมบำรุงป้องกันประกอบด้วย ความเสียหายของเครื่องมือ ค่าใช้จ่ายในการตรวจสอบ ค่าใช้จ่ายในการซ่อมบำรุง เวลาหยุดการผลิต และความเสียหายอาจก่อให้เกิดอันตรายต่อผู้ปฏิบัติงาน แต่การซ่อมบำรุงป้องกันแบบการซ่อมบำรุงตามคาบเวลา ซึ่งเปลี่ยนชิ้นส่วนต่างๆ โดยดูจากช่วงเวลาที่ใช้งาน ภาระงานที่คาดการณ์ไว้ และสภาพการทำงาน อาจเกิดความสิ้นเปลืองเนื่องจากค่าใช้จ่ายในการเปลี่ยนชิ้นส่วนที่สภาพยังคงอยู่ (Edwards *et al.*, 1998)

ประสิทธิผลภายในของการซ่อมบำรุงสามารถวัดจากผลผลิตในรูปของค่าใช้จ่ายในการซ่อมบำรุงต่อหน่วยผลิตภัณฑ์หรือจำนวนงานซ่อมบำรุงต่อหน่วยเวลา ประสิทธิผลภายนอก ได้แก่ ความสะดวกพอใจของผู้ใช้บริการและการเติบโตของส่วนแบ่งการตลาด การประเมินประสิทธิผลภายในและภายนอก เป็นความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพและประสิทธิผลการใช้ทรัพยากร ซึ่งเป็นผลระยะยาวต่อความสามารถในการทำไร้องค์กรและการให้บริการตรงตามความต้องการของผู้ใช้บริการทั้งในด้านคุณภาพและเวลา การประเมินประสิทธิผลแบบรวมต้องพิจารณาทั้งภายในและภายนอก (Parida and Kumar, 2006) นอกจากนี้การวัดประสิทธิภาพของการซ่อมบำรุงป้องกันสามารถพิจารณาเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายในการวางระบบซ่อมบำรุงใหม่ กับค่าใช้จ่ายในการซ่อมบำรุงในอดีต ประโยชน์ของการซ่อมบำรุงป้องกันสามารถช่วยเพิ่มอายุการใช้งานของเครื่องจักร และลดการซ่อมบำรุงจากชำรุด เช่น ลดเวลาหยุดการผลิต แสดงในรูปของการเพิ่มผลผลิต ลดปริมาณวัสดุในคลัง ลดค่าใช้จ่ายในการตรวจสอบ ลดอุบัติเหตุทั้งในการผลิตและการซ่อมบำรุง และลดกำลังคนในการซ่อมบำรุง (Edwards *et al.*, 1998)

## อุปกรณ์และวิธีการ

### อุปกรณ์

1. เรดาร์ควบคุมการยิงบนเรือรบ ย่านความถี่ I-band จำนวน 8 เครื่อง ซึ่งติดตั้งอยู่ในห้องปรับอากาศ
2. กล้องถ่ายภาพรังสีความร้อน ย่านการวัดอุณหภูมิตั้งแต่  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  ถึง  $350\text{ }^{\circ}\text{C}$  ความแม่นยำ  $\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$  ความถี่การถ่ายภาพ 9 Hz ย่านความยาวคลื่นที่ตรวจวัดตั้งแต่  $7.5\text{ }\mu\text{m}$  ถึง  $14\text{ }\mu\text{m}$
3. โปรแกรมสำเร็จรูป Fluke InsideIR 4.0 เพื่อเชื่อมต่อกับกล้องถ่ายภาพรังสีความร้อนกับคอมพิวเตอร์และประมวลผลแสดงค่าอุณหภูมิจากสีในภาพถ่าย
4. โปรแกรมสำเร็จรูป Minitab 13.20
5. โปรแกรมสำเร็จรูป Arena 13

### วิธีการ

การวิจัยเรื่อง การเพิ่มประสิทธิภาพการซ่อมบำรุงรักษาเรดาร์ภายในเรือรบโดยใช้เทคนิคการถ่ายภาพรังสีความร้อน มีขั้นตอนต่างๆ พร้อมรายละเอียด ดังนี้ (ภาพที่ 3)

#### 1. เก็บข้อมูลการชำรุดเสียหายของแต่ละระบบ

การศึกษาการชำรุดเสียหายและการซ่อมบำรุงเรดาร์ภายในเรือโดยเก็บข้อมูลจากรายงานการขอรับการซ่อมบำรุงที่ กองโรงงานไฟฟ้าอาวุธ ศูนย์ซ่อมสร้างสรรพาวุธ กรมสรรพาวุธทหารเรือ ซึ่งมีหน้าที่รับผิดชอบการซ่อมบำรุงรักษาเรดาร์ของเรือของกองทัพเรือไทย โดยเก็บข้อมูลเรดาร์ควบคุมการยิงภายในเรือรบชนิดที่มีใช้จำนวนมากที่สุดในกองทัพเรือจำนวน 8 เครื่อง ซึ่งเป็นเรดาร์ประเภทเดียวกัน โดยพิจารณาจากนโยบายด้านความพร้อมของกองทัพเรือที่ต้องมีความพร้อมของเรือรบจำนวน 2 ใน 3 ของเรือรบที่มีอยู่ทั้งหมด 15 ลำที่มีเรดาร์แบบเดียวกันติดตั้งอยู่ โดยกำหนดให้ 1 วันทำการเท่ากับ 6 ชั่วโมงโดยมีรายละเอียดดังนี้ ปฏิบัติงานช่วงเช้าเวลา 08.30 น. - 11.30 น. เก็บอุปกรณ์และทำความสะอาดพื้นที่ปฏิบัติงานเวลา 11.30 น. - 12.00 น. พักเที่ยงเวลา 12.00 น. - 13.00 น. ปฏิบัติงานช่วงบ่ายเวลา 13.00 น. - 16.00 น. เก็บอุปกรณ์และทำความสะอาดพื้นที่ปฏิบัติงานเวลา 16.00 น. - 16.30 น. ใช้เจ้าหน้าที่ซ่อมบำรุงงานละ 5 คน

ประกอบด้วย หัวหน้าชุดจำนวน 1 คน ชั้นยศพันจ่าหรือนายทหาร มีประสบการณ์ทำงาน ไม่น้อยกว่า 10 ปี หรือวุฒิการศึกษาปริญญาตรีขึ้นไปทางด้านวิศวกรรม และช่างเรดาร์จำนวน 4 คน วุฒิการศึกษาประกาศนียบัตรวิชาชีพขึ้นไปทางด้านช่างอิเล็กทรอนิกส์

จำแนกอุปกรณ์เรดาร์ออกเป็นระบบจำนวน 4 ระบบ โดยพิจารณาแบ่งอุปกรณ์ที่มีลักษณะการทำงานเกี่ยวข้องกัน อาการชำรุดเสียหายและการซ่อมบำรุงคล้ายคลึงกัน และมักจะพบการชำรุดเสียหายซึ่งส่งผลให้เรดาร์ไม่สามารถใช้งานได้ ประกอบด้วย สายอากาศ (Antenna), ภาคส่ง (Transmitter), ภาครับ (Receiver) และส่วนแสดงผล (Display)

เก็บข้อมูลการชำรุดเสียหายของแต่ละระบบย้อนหลัง 5 ปีระหว่างปี พ.ศ. 2546 – 2550 จากรายงานการขอรับการซ่อมบำรุง ในรายงานดังกล่าวแยกเป็นเฉพาะเรือแต่ละลำ ข้อมูลที่แสดงประกอบด้วย วันที่ดำเนินงาน อาการชำรุด วิธีการซ่อมบำรุง ชนิดอะไหล่ รายชื่อช่างที่ปฏิบัติงาน และข้อคิดเห็นอื่นๆ แล้วนำมาวิเคราะห์ระบุอาการชำรุดที่สามารถเกิดขึ้นได้ในแต่ละระบบ และระยะเวลาในการซ่อมบำรุงเฉลี่ยของแต่ละระบบ เพื่อศึกษาการซ่อมบำรุงเรดาร์แบบที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน โดยเก็บข้อมูลของแต่ละระบบจำนวน 4 ระบบที่จำแนกไว้ แยกเป็นเรดาร์จำนวน 8 เครื่อง รายละเอียดของข้อมูลประกอบด้วย

1. จำนวนครั้งของการเกิดการชำรุดของเรดาร์แต่ละเครื่อง
2. ระยะเวลาที่ใช้ในการซ่อมบำรุงในแต่ละการชำรุด

## 2. ทดลองหาอาการชำรุดที่สามารถตรวจสอบได้โดยเทคนิคการถ่ายภาพรังสีความร้อน

ทดลองเปรียบเทียบภาพถ่ายรังสีความร้อนของเรดาร์ที่มีสภาพดีกับเรดาร์ที่ชำรุดเสียหาย เพื่อพิสูจน์ว่าเทคนิคการถ่ายภาพรังสีความร้อนสามารถตรวจสอบการชำรุดเสียหายของเรดาร์ โดยควบคุมสิ่งแวดล้อมในการทดลองคือ ทำการทดลองในเรือบริเวณพื้นที่อ่าวไทยตอนบนที่จอดในท่าเรือไม่มีคลื่นลมแรง ทำการถ่ายภาพในห้องปรับอากาศซึ่งควบคุมอุณหภูมิ ทดลองกับเรดาร์ที่ชำรุดรวม 4 ระบบคือ สายอากาศ ภาคส่ง ภาครับ และส่วนแสดงผล นำภาพรังสีความร้อนที่ได้จากเรดาร์ที่มีสภาพดีมาเปรียบเทียบกับเรดาร์ที่ชำรุด โดยสีของภาพถ่ายรังสีความร้อนที่แตกต่างกัน แสดงถึงอุณหภูมิที่แตกต่างกัน ระบบใดที่สีของภาพถ่ายรังสีความร้อนมีความแตกต่างระหว่างเรดาร์ที่มีสภาพดีมาเปรียบเทียบกับเรดาร์ที่ชำรุด แสดงว่าสามารถใช้เทคนิคการถ่ายภาพรังสีความร้อน

ร้อนตรวจสอบหาอุปกรณ์ภายในระบบที่ชำรุดได้ (Muhur *et al.*, 2006) พลังงานที่เกิดขึ้นบริเวณจุดสัมผัสจะถูกเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อน ทำให้อุณหภูมิของอุปกรณ์ไฟฟ้าเพิ่มขึ้น อุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงนี้สามารถใช้ประเมินสภาพของอุปกรณ์ไฟฟ้า การชำรุดเสียหายที่เกิดขึ้นจะต้องก่อให้เกิดอุณหภูมิที่แตกต่างจากระบบปกติ

2.1 ถ่ายภาพรังสีความร้อนระบบของเรดาร์ภายในเรือจำนวน 4 ระบบ จากเรดาร์ที่มีสภาพดี สามารถใช้งานปกติ โดยมีขั้นตอนดังนี้

2.1.1 จ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับเรดาร์เป็นเวลา 15 นาทีเพื่อเตรียมระบบเรดาร์และอุปกรณ์ต่างๆ ให้มีอุณหภูมิเหมาะสมตามคำแนะนำในคู่มือของบริษัทผู้ผลิต

2.2.2 เริ่มการแพร์คลื่นและหมุนสายอากาศ

2.2.3 ตรวจสอบการทำงานของเรดาร์ว่าสามารถหมุนสายอากาศได้โดยรอบ 360 องศา สามารถแพร์คลื่นได้ สามารถตรวจจับเป้าพื้นน้ำที่สามารถมองเห็นด้วยสายตา ทราบทิศสัมพันธ์กับทิศหัวเรือและระยะห่างจากเรือ แล้วนำมาแสดงผลบนจอเรดาร์โดยให้ค่าของทิศสัมพันธ์กับทิศหัวเรือและระยะห่างจากเรือที่ถูกต้อง

2.2.4 เปิดฝากรอบอุปกรณ์เรดาร์ ถ่ายภาพรังสีความร้อนระบบของเรดาร์จำนวน 4 ระบบคือ สายอากาศ ภาคส่ง ภาครับ และส่วนแสดงผล เพื่อวัดอุณหภูมิของอุปกรณ์ต่างๆ ภายในระบบแต่ละระบบ ถ่ายภาพโดยกล้องถ่ายภาพรังสีความร้อนห่างจากจุดที่ต้องการถ่ายภาพ 0.5 เมตร

2.2 ถ่ายภาพรังสีความร้อนระบบของเรดาร์ภายในเรือที่ทราบอาการชำรุดแน่นอนจากการตรวจสอบของช่างโดยใช้สายคาหรือเครื่องมือวัดทางไฟฟ้า จำนวน 4 ระบบซึ่งเป็นเรดาร์ประเภทเดียวกันกับการทดลองที่ 2.1 โดยมีขั้นตอนดังนี้

2.2.1 ตรวจสอบรายงานการขอรับการซ่อมบำรุง เลือกเรือที่สายอากาศชำรุด ระบบภาคส่งชำรุด ระบบภาครับชำรุด และส่วนแสดงผลชำรุด อย่างน้อยระบบละ 1 ลำ โดยเรือแต่ละลำอาจมีการชำรุดเสียหายมากกว่า 1 ระบบได้ เพื่อทำการทดลอง

2.2.2 จ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับเรดาร์เป็นเวลา 15 นาที เพื่อเตรียมระบบเรดาร์และอุปกรณ์ต่างๆให้มีอุณหภูมิเหมาะสมตามคำแนะนำในคู่มือของบริษัทผู้ผลิต

2.2.3 เริ่มการแพร์คลื่นและหมุนสายอากาศ

2.2.4 ตรวจสอบอาการชำรุดเสียหายว่าตรงตามรายงานของช่างหรือไม่ดังนี้

ก ) เรดาร์ที่ระบบสายอากาศชำรุดเสียหายจะต้องไม่สามารถหมุนสายอากาศได้หรือไม่สามารถแพร์คลื่นได้

ข ) เรดาร์ที่ระบบภาคส่งชำรุดเสียหายจะต้องไม่สามารถแพร์คลื่นได้

ค ) เรดาร์ที่ระบบภาครับชำรุดเสียหายจะต้องไม่สามารถรับสัญญาณการสะท้อนกลับของคลื่นวิทยุและไม่สามารถแสดงภาพเป้าหมายเรดาร์ได้

ง ) เรดาร์ที่ส่วนแสดงผลชำรุดเสียหายจะต้องไม่สามารถเปิดหน้าจอ แสดงภาพเป้าหมายเรดาร์ หรือแสดงข้อมูลของเป้าหมายผิดพลาด

2.2.5 เปิดฝาครอบอุปกรณ์เรดาร์ส่วนที่ชำรุด ถ่ายภาพรังสีความร้อนระบบที่ได้รับแจ้งว่าชำรุด เพื่อวัดอุณหภูมิของอุปกรณ์ต่างๆภายในระบบแต่ละระบบ ถ่ายภาพโดยกล้องถ่ายภาพรังสีความร้อนห่างจากจุดที่ต้องการถ่ายภาพ 0.5 เมตร

### 3. วิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลต่ออุณหภูมิของอุปกรณ์เรดาร์ที่มีสภาพดีในแต่ละระบบ

ออกแบบการทดลองเพื่อวิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลต่ออุณหภูมิในภาพถ่ายจากการถ่ายภาพรังสีความร้อนของอุปกรณ์เรดาร์ โดยทดลองเฉพาะระบบที่สามารถตรวจสอบการชำรุดได้โดยใช้เทคนิคการถ่ายภาพรังสีความร้อน กำหนดปัจจัยหลักคือ อายุการใช้งานของเรดาร์ ระยะเวลาตั้งแต่เริ่มเดินเครื่องจนกระทั่งวัดอุณหภูมิด้วยกล้องถ่ายภาพรังสีความร้อน และอุณหภูมิของสิ่งแวดล้อมขณะทำการวัด โดยวิธีการออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียลเต็มรูปแบบ (Full Factorial Experiment) เพื่อวิเคราะห์ผลกระทบรวมของปัจจัยหลัก และพิสูจน์ว่าปัจจัยหลักทั้ง 3 มีอิสระต่อกัน โดยทดลองทั้งหมด 72 การทดลอง แบ่งออกเป็นเรดาร์ที่มีอายุการใช้งานแตกต่างกันจำนวน 8

เครื่อง ระยะเวลาตั้งแต่เริ่มเดินเครื่องจนถึงเวลาการวัดอุณหภูมิด้วยกล้องถ่ายภาพรังสีความร้อน 3 ช่วงเวลา และอุณหภูมิของสิ่งแวดล้อมขณะทำการวัด 3 ระดับอุณหภูมิ โดยวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance : ANOVA) กำหนดระดับนัยสำคัญของการทดสอบ  $\alpha = 0.05$  โดยขั้นตอนการทดลองมีดังนี้

3.1 เปิดฝาครอบอุปกรณ์เรดาร์เพื่อเตรียมการถ่ายภาพรังสีความร้อน จ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับเรดาร์ที่มีสภาพดี เริ่มการแพร์คลื่นและหมุนสายอากาศ

3.2 ตั้งอุณหภูมิเครื่องปรับอากาศไว้ที่  $30^{\circ}\text{C}$  ตรวจสอบอุณหภูมิด้วยเทอร์โมมิเตอร์จนกระทั่งเท่ากับ  $30^{\circ}\text{C}$

3.3 จ่ายไฟฟ้าให้กับระบบเรดาร์ เริ่มแพร์คลื่นและหมุนสายอากาศ

3.4 ถ่ายภาพด้วยกล้องถ่ายภาพรังสีความร้อนเมื่อเวลาตั้งแต่เดินระบบเท่ากับ 5 นาที 10 นาที และ 15 นาที

3.5 ตั้งอุณหภูมิเครื่องปรับอากาศไว้ที่  $25^{\circ}\text{C}$  ตรวจสอบอุณหภูมิด้วยเทอร์โมมิเตอร์จนกระทั่งเท่ากับ  $25^{\circ}\text{C}$  ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 3.4

3.6 ตั้งอุณหภูมิเครื่องปรับอากาศไว้ที่  $20^{\circ}\text{C}$  ตรวจสอบอุณหภูมิด้วยเทอร์โมมิเตอร์จนกระทั่งเท่ากับ  $20^{\circ}\text{C}$  ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 3.4

3.7 นำอุณหภูมิสูงสุดของแต่ละระบบเรดาร์มาวิเคราะห์เปรียบเทียบกับระบบเดียวกันในเรดาร์เครื่องอื่น โดยใช้เทคนิควิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance : ANOVA) กำหนดระดับนัยสำคัญของการทดสอบ  $\alpha = 0.05$  เพื่อวิเคราะห์ผลกระทบร่วมของปัจจัยหลัก

#### 4. สร้างแบบจำลองพยากรณ์อุณหภูมิสูงสุดของอุปกรณ์เรดาร์จากปัจจัยต่างๆ

สร้างแบบจำลองการพยากรณ์อุณหภูมิสูงสุดสำหรับอุปกรณ์เรดาร์ที่มีสภาพดีสามารถใช้งานได้โดยการวิเคราะห์การถดถอย (Regression Analysis) กำหนดระดับนัยสำคัญของการทดสอบ  $\alpha = 0.05$  ภายใต้เงื่อนไขของปัจจัยดังนี้

4.1 อายุการใช้งานของเรดาร์ มีหน่วยเป็นชั่วโมง โดยพิจารณาจากอุปกรณ์นับเวลาใช้งาน (Counter) ที่เรดาร์และการบันทึกการใช้งานในสมุดประจำเครื่องเรดาร์

4.2 ระยะเวลาตั้งแต่เริ่มเดินเครื่องจนถึงเวลาการวัดอุณหภูมิด้วยกล้องถ่ายภาพรังสีความร้อนมีหน่วยเป็นนาที นับตั้งแต่เริ่มจ่ายกระแสไฟฟ้าเข้าระบบเรดาร์จนถึงถ่ายภาพรังสีความร้อน

4.3 อุณหภูมิของสิ่งแวดล้อมขณะทำการวัด มีหน่วยเป็นองศาเซลเซียส โดยใช้เทอร์โมมิเตอร์วัดอุณหภูมิอากาศภายในห้องปรับอากาศซึ่งสามารถปรับอุณหภูมิได้

อุณหภูมิที่คำนวณได้จากแบบจำลองดังกล่าวใช้เพื่อเป็นค่ามาตรฐานของเรดาร์ที่มีสภาพดีสามารถใช้งานได้ เพื่อนำไปเปรียบเทียบกับเรดาร์ที่ต้องการทดสอบหาระบบที่ชำรุดโดยเทคนิคการถ่ายภาพรังสีความร้อน

## 5. วิเคราะห์ความคุ้มค่าของการลงทุนในการใช้เทคนิคถ่ายภาพรังสีความร้อนเพื่อซ่อมบำรุงเรดาร์ภายในเรือเปรียบเทียบกับ การซ่อมบำรุงแก้ไข

วิเคราะห์ค่าใช้จ่ายในการซ่อมบำรุงเรดาร์ภายในเรือ โดยใช้เทคนิคการถ่ายภาพรังสีความร้อนเพื่อหาความสามารถในการลดต้นทุนของการซ่อมบำรุงเรดาร์โดยเปรียบเทียบกับ การซ่อมบำรุงแก้ไขในระบบที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน โดยใช้เทคนิคการวิเคราะห์ส่วนเพิ่ม (Incremental Analysis) และมูลค่าเทียบเท่าปัจจุบัน (Net Present Value) เพื่อวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายที่สามารถประหยัดได้ระหว่างการใช้เทคนิคการถ่ายภาพรังสีความร้อนกับการซ่อมบำรุงแก้ไข โดยมีขั้นตอนดังนี้

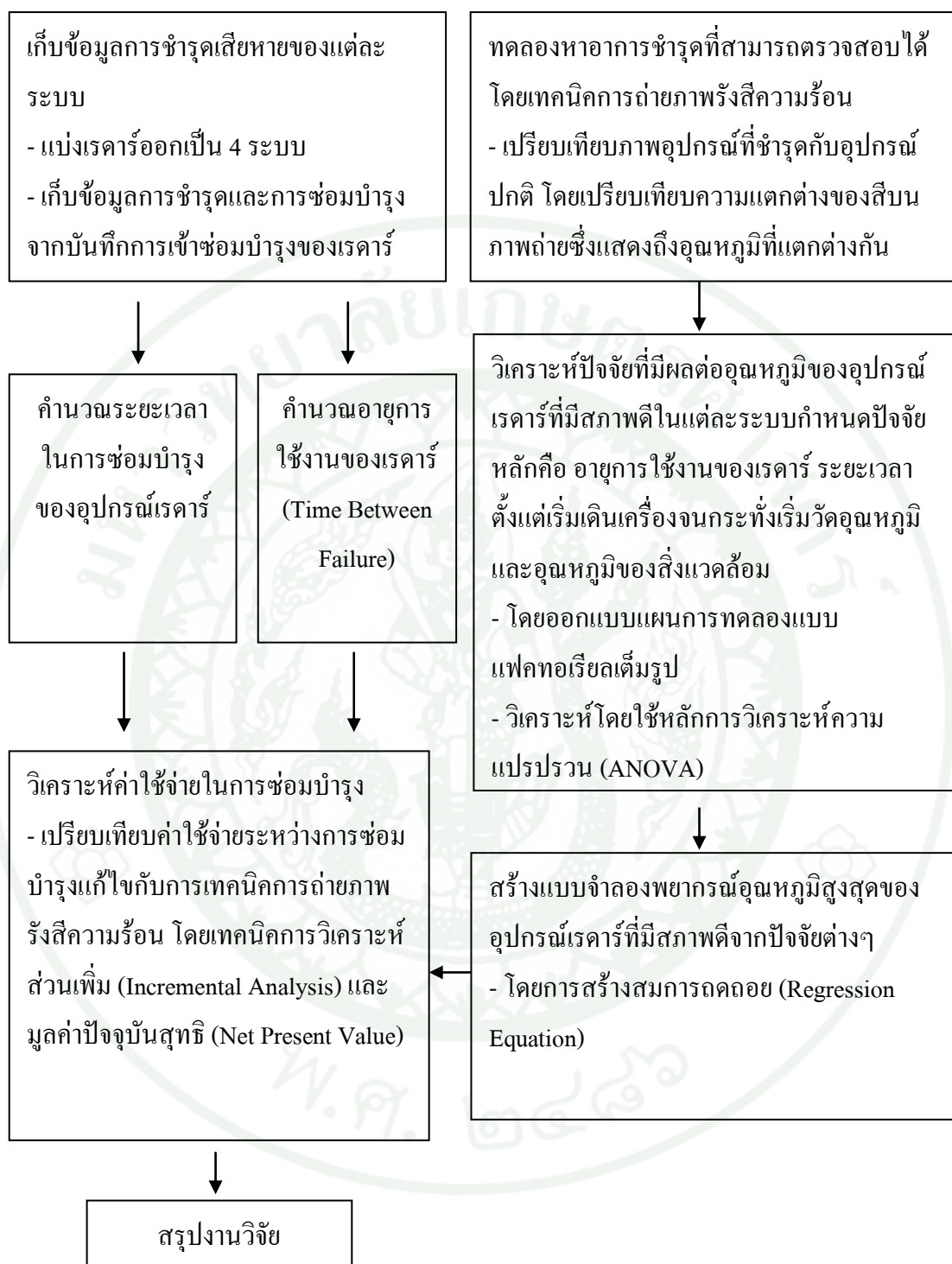
5.1 นำข้อมูลการชำรุดเสียหายของเรดาร์จำนวน 8 เครื่อง จากรายงานการซ่อมบำรุงที่เก็บได้ในข้อ 1 ใช้โปรแกรม Minitab วิเคราะห์หาการแจกแจงของการเกิดการชำรุดเสียหาย และเวลาเฉลี่ยก่อนการชำรุด (Mean Time Between Failure : MTBF)

5.2 ประเมินการเกิดการชำรุดเสียหายสำหรับเรดาร์ 8 เครื่อง ต่อไปข้างหน้าเป็นระยะเวลา 15 ปี เนื่องจากประมาณการอายุของกล้องถ่ายภาพรังสีความร้อนไว้ 15 ปี

5.3 จำแนกค่าใช้จ่ายในการซ่อมบำรุงเรดาร์โดยใช้เทคนิคการถ่ายภาพรังสีความร้อน และการซ่อมบำรุงแก้ไขออกเป็นรายการ และประมาณการค่าใช้จ่ายในแต่ละรายการ

5.4 พิจารณาเฉพาะรายการที่ค่าใช้จ่ายในการซ่อมบำรุงเรดาร์โดยใช้เทคนิคการถ่ายภาพรังสีความร้อน และการซ่อมบำรุงแก้ไขแตกต่างกัน โดยวิเคราะห์ความคุ้มค่าในการลงทุนเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการซ่อมบำรุง โดยการประยุกต์วิธีค่าเทียบเท่าปัจจุบันแบบการลงทุนเพิ่มระหว่างทางเลือกการซ่อมบำรุงแก้ไขหรือแบบเดิม กับทางเลือกการใช้เทคนิคการถ่ายภาพรังสีความร้อน ภายใต้ความเสี่ยงของระยะเวลาการเสีย และความไม่แน่นอนของอายุการใช้งานของเรดาร์ภายในเรือรบ





ภาพที่ 3 ขั้นตอนการวิจัยและรายละเอียดวิธีการวิจัยในแต่ละขั้น

## ผลและวิจารณ์

### 1. เก็บข้อมูลการชำรุดเสียหายของแต่ละระบบ

จากการเก็บข้อมูลการซ่อมบำรุงเรดาร์ภายในเรือและถ่ายภาพรังสีความร้อนจากรายงานการขอรับการซ่อมบำรุงระหว่างปี พ.ศ. 2536 – 2550 ได้ผลดังนี้

1.1 สายอากาศ (Antenna) ใช้เวลาเฉลี่ยในการซ่อมบำรุง 5.47 วันต่อครั้ง หรือคิดเป็น 32.82 ชั่วโมงต่อครั้ง ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation) = 1.67 วัน การชำรุดเกิดจากลูกปืนหรือขอบยางเสื่อมสภาพ การชำรุดทางกล การแตกหัก และการรั่วซึมของน้ำมันหล่อลื่น โดยมีอาการคือ การหมุนติดขัด มีเสียงดัง พบเห็นน้ำมันรั่วหรือรอยแตก สามารถตรวจสอบโดยการฟังเสียง และตรวจโดยสายตา ซ่อมบำรุงโดยเปลี่ยนชิ้นส่วน เติมน้ำมันหล่อลื่น เชื่อม หรืออุดปะ ตัวอย่างเช่น เรดาร์เครื่องที่ 1 เข้าซ่อมบำรุงระบบสายอากาศครั้งที่ 1 ใช้เวลารวมในการตรวจสอบหาจุดที่ชำรุด, เปลี่ยนอะไหล่ และทดสอบภายหลังการซ่อมบำรุง เป็นเวลา 8 วัน หรือ 48 ชั่วโมง เนื่องจากปฏิบัติงานวันละ 6 ชั่วโมง (ตารางที่ 1)

ตารางที่ 1 เวลาที่ใช้ซ่อมบำรุงระบบสายอากาศเรดาร์ (หน่วย : วัน)

เรดาร์เครื่องที่	งานซ่อมบำรุงลำดับที่							
	1	2	3	4	5	6	7	8
1	8	4	7	2				
2	5	9	5					
3	5	5	3	4	3	6	8	6
4	7	5	4	5	6	7		
5	3	8	5	6	6	5		
6	4	4	9	6	5	5		
7	6	4	5	4	8			
8	7	4	3	6	6	5	8	
ค่าเฉลี่ยรวม = 5.47								
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน = 1.67								

1.2 ภาคส่ง (Transmitter) ใช้เวลาเฉลี่ยในการซ่อมบำรุง 2.88 วันต่อครั้ง หรือคิดเป็น 17.28 ชั่วโมงต่อครั้ง ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation) = 1.21 วัน การชำรุดเกิดจากอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ สายไฟ หรือจุดเชื่อมต่อเสื่อมสภาพ โดยมีอาการคือไม่สามารถแพร์คลื่น หรือการแพร์คลื่นผิดปกติ สามารถตรวจสอบโดยการวัดค่าทางไฟฟ้าเปรียบเทียบกับค่าตามคู่มือ ถ้าอุปกรณ์ใดมีค่าแรงดันไฟฟ้า กระแส หรือความต้านทาน แตกต่างจากค่ามาตรฐานตามคู่มือ แสดงถึงการชำรุดเสียหาย ซ่อมบำรุงโดยเปลี่ยนอุปกรณ์ที่เสื่อมสภาพ และซ่อมบำรุงจุดเชื่อมต่อที่ชำรุดโดยอาศัยการบัดกรี (ตารางที่ 2)

ตารางที่ 2 เวลาที่ใช้ซ่อมบำรุงระบบภาคส่งเรดาร์ (หน่วย : วัน)

เรดาร์เครื่องที่	งานซ่อมบำรุงลำดับที่							
	1	2	3	4	5	6	7	8
1	3	3	1					
2	2	5	2					
3	5	1	4					
4	2	3	4	3				
5	2	4	3					
6	1	3	4					
7	4	2	3					
8	2	5	2	2				
ค่าเฉลี่ยรวม = 2.88								
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน = 1.21								

1.3 ภาครับ (Receiver) ใช้เวลาเฉลี่ยในการซ่อมบำรุง 6.46 วันต่อครั้ง หรือคิดเป็น 38.76 ชั่วโมงต่อครั้ง ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation) = 2.25 วัน การชำรุดเกิดจากอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ สายไฟ หรือจุดเชื่อมต่อเสื่อมสภาพ โดยมีอาการคือไม่สามารถรับคลื่นได้ หรือการรับคลื่นผิดปกติ สามารถตรวจสอบโดยการวัดค่าทางไฟฟ้าเปรียบเทียบกับค่าตามคู่มือ ถ้าอุปกรณ์ใดมีค่าแรงดันไฟฟ้า กระแส หรือความต้านทาน แตกต่างจากค่ามาตรฐานตามคู่มือ แสดงถึงการชำรุดเสียหาย ซ่อมบำรุงโดยเปลี่ยนอุปกรณ์ที่เสื่อมสภาพ และซ่อมบำรุงจุดเชื่อมต่อที่ชำรุดโดยอาศัยการบัดกรี (ตารางที่ 3)

ตารางที่ 3 เวลาที่ใช้ซ่อมบำรุงระบบภาครับเรดาร์ (หน่วย : วัน)

เรดาร์เครื่องที่	งานซ่อมบำรุงลำดับที่							
	1	2	3	4	5	6	7	8
1	11	6	7	6	3			
2	8	10	2					
3	5	6	9	4	3	10		
4	8	8	3	6	6	7		
5	5	5	9	6				
6	7	10	4	6				
7	6	8	6	3	10			
8	6	9	5	7	6	6		
ค่าเฉลี่ยรวม = 6.46								
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน = 2.25								

1.4 ส่วนแสดงผล (Display) ใช้เวลาเฉลี่ยในการซ่อมบำรุง 2.68 วันต่อครั้ง หรือคิดเป็น 16.08 ชั่วโมงต่อครั้ง ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation) = 1.19 วัน การชำรุดเสียหายสามารถแบ่งตามลักษณะการซ่อมบำรุงออกเป็น 2 กลุ่มคือ

1.4.1 กลุ่มของการชำรุดที่เกิดจากอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ สายไฟ หรือจุดเชื่อมต่อเสื่อมสภาพ เกิดจากอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ สายไฟ หรือจุดเชื่อมต่อเสื่อมสภาพ โดยมีอาการคือไม่สามารถเปิดหน้าจอได้ หน้าจอไม่แสดงผลหรือแสดงผลผิดปกติ แสดงค่าจากการคำนวณที่ผิดพลาด สามารถตรวจสอบโดยการวัดค่าทางไฟฟ้าเปรียบเทียบกับค่าตามคู่มือ ถ้าอุปกรณ์ใดมีค่าแรงดัน ไฟฟ้า กระแส หรือความต้านทาน แตกต่างจากค่ามาตรฐานตามคู่มือ แสดงถึงการชำรุดเสียหาย ซ่อมบำรุงโดยเปลี่ยนอุปกรณ์ที่เสื่อมสภาพ ซ่อมบำรุงจุดเชื่อมต่อที่ชำรุดโดยอาศัยการบัดกรี และปรับตั้งค่าการแสดงผลภายหลังการซ่อมแซมส่วนแสดงผลทุกครั้ง

1.4.2 กลุ่มของการชำรุดที่เกิดจากซอฟต์แวร์ โดยมีอาการคือ หน้าจอไม่แสดงผลหรือแสดงผลผิดปกติ แสดงค่าจากการคำนวณที่ผิดพลาด ระบบแสดงข้อความหรือรหัส Error Code

และเมื่อตรวจสอบตามข้อ 1.4.1 แล้วไม่พบสิ่งผิดปกติ ทำการซ่อมบำรุงโดยตรวจสอบ และปรับตั้งค่าซอฟต์แวร์ หรือติดตั้งซอฟต์แวร์ใหม่ ตามที่บริษัทผู้ผลิตกำหนดในคู่มือ (ตารางที่ 4)

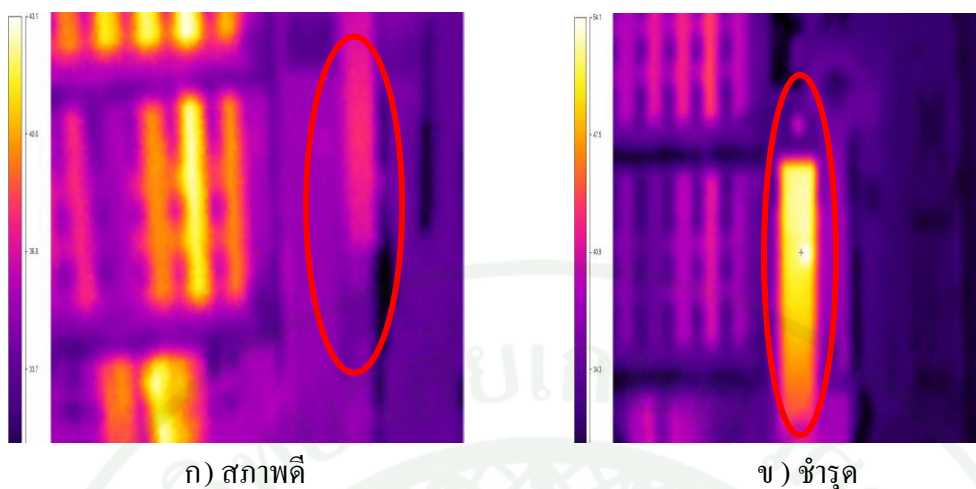
ตารางที่ 4 เวลาที่ใช้ซ่อมบำรุงส่วนแสดงผลเรดาร์ (หน่วย : วัน)

เรดาร์เครื่องที่	งานซ่อมบำรุงลำดับที่							
	1	2	3	4	5	6	7	8
1	2	3	2	2				
2	2	2	5	2				
3	1	2	5	5				
4	2	3	4	3				
5	3	1	4					
6	3	2	3	3				
7	1	4	4	3				
8	1	4	2					
ค่าเฉลี่ยรวม = 2.68								
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน = 1.19								

## 2. อาการชำรุดที่สามารถตรวจสอบได้โดยเทคนิคการถ่ายภาพรังสีความร้อน

2.1 สายอากาศ เมื่อเปรียบเทียบภาพถ่ายรังสีความร้อนสายอากาศที่มีสภาพดีกับสายอากาศที่ชำรุดไม่พบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ กล่าวคือ อุณหภูมิสายอากาศเรดาร์ที่มีการชำรุดเสียหาย และสายอากาศเรดาร์ที่มีสภาพดีที่แสดงโดยภาพถ่ายรังสีความร้อนเท่ากัน สรุปได้ว่าการชำรุดเสียหายของสายอากาศไม่ทำให้อุณหภูมิเปลี่ยนแปลง ทำให้ไม่สามารถตรวจโดยใช้เทคนิคการถ่ายภาพรังสีความร้อนได้

2.2 ภาคส่ง เมื่อเปรียบเทียบภาพถ่ายรังสีความร้อนภาคส่งเรดาร์ที่มีสภาพดีกับภาคส่งเรดาร์ที่ชำรุดพบความแตกต่างของสีบนภาพถ่ายเนื่องจากอุณหภูมิที่แตกต่างกัน โดยระบบภาคส่งที่ชำรุดมีอุณหภูมิสูงกว่ารับภาคส่งที่มีสภาพดี ดังภาพที่ 4

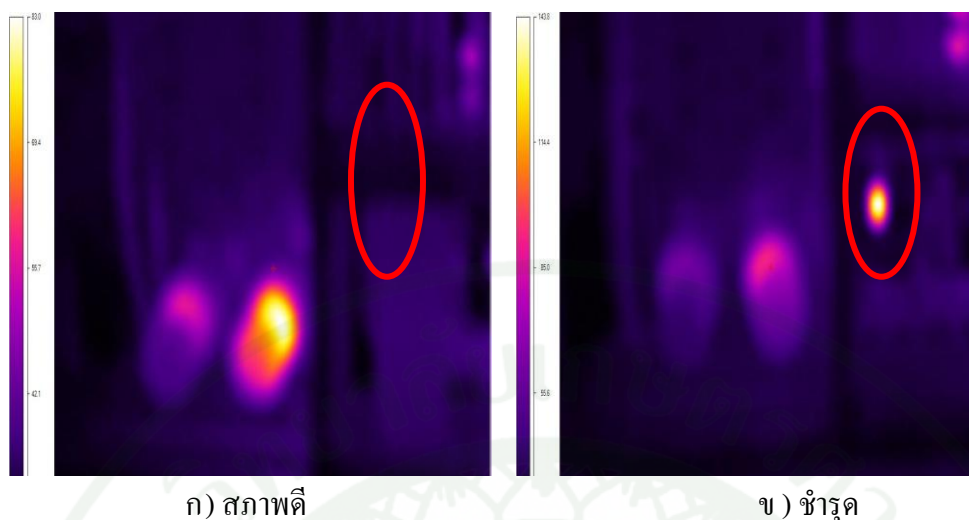


ภาพที่ 4 ภาพถ่ายรังสีความร้อนระบบภาคส่งเรดาร์ภายในเรือ

เปรียบเทียบภาพที่ 4(ก) กับภาพที่ 4(ข) พบว่าในภาพที่ 4(ข) จุดที่สร้างภาพวงรีครอบไว้เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่เสื่อมสภาพซึ่งเป็นสาเหตุให้ระบบภาคส่งไม่สามารถใช้งานได้ตามปกติ มีอุณหภูมิ 54 องศาเซลเซียส ซึ่งอุณหภูมิสูงกว่าอุปกรณ์ชนิดเดียวกันที่ตำแหน่งเดียวกันจากภาพถ่ายรังสีความร้อนภาคส่งเรดาร์ที่มีสภาพดีที่มีอุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส (ภาพที่ 4(ก) )

อุปกรณ์ในระบบภาคส่งที่ชำรุดเสียหายจะมีอุณหภูมิสูงกว่าปกติเนื่องจากพลังงานไฟฟ้าเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อน การถ่ายภาพรังสีความร้อนสามารถแสดงความแตกต่างของสีบนภาพถ่ายระหว่างอุปกรณ์ในระบบภาคส่งที่ชำรุดเสียหายกับอุปกรณ์ที่มีสภาพดีได้ การชำรุดเสียหายของระบบภาคส่งเรดาร์สามารถตรวจสอบโดยใช้เทคนิคการถ่ายภาพรังสีความร้อนได้

2.3 ภาครับ เมื่อเปรียบเทียบภาพถ่ายรังสีความร้อนภาครับเรดาร์ที่มีสภาพดีกับภาครับเรดาร์ที่ชำรุดพบความแตกต่างของสีบนภาพถ่ายเนื่องมาจากอุณหภูมิที่แตกต่างกัน โดยระบบภาครับที่ชำรุดมีอุณหภูมิสูงกว่ารับภาครับที่มีสภาพดี ดังภาพที่ 5



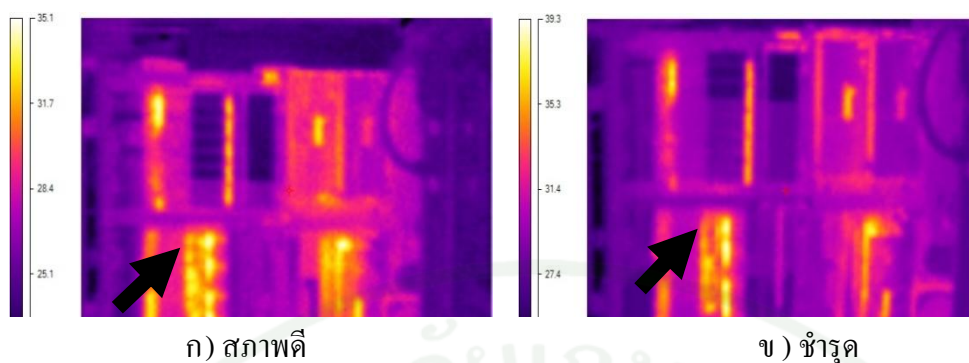
ภาพที่ 5 ภาพถ่ายรังสีความร้อนระบบภาครับเรดาร์ภายในเรือ

เปรียบเทียบภาพที่ 5(ก) กับภาพที่ 5(ข) พบว่าในภาพที่ 5(ข) จุดที่สร้างภาพวงรีครอบไว้เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่เสื่อมสภาพซึ่งเป็นสาเหตุให้ระบบภาครับไม่สามารถใช้งานได้ ตามปกติ มีอุณหภูมิ 144 องศาเซลเซียส ซึ่งอุณหภูมิสูงกว่าอุปกรณ์ชนิดเดียวกันที่ตำแหน่งเดียวกันของภาครับเรดาร์ที่มีสภาพดีซึ่งมีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิห้อง (ภาพที่ 5(ก))

อุปกรณ์ในระบบภาครับที่ชำรุดเสียหายจะมีอุณหภูมิสูงกว่าปกติเนื่องจากพลังงานไฟฟ้าเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อน การถ่ายภาพรังสีความร้อนสามารถแสดงความแตกต่างของสีบนภาพถ่ายระหว่างอุปกรณ์ในระบบภาครับที่ชำรุดเสียหายกับอุปกรณ์ที่มีสภาพดีได้ การชำรุดเสียหายของระบบภาครับเรดาร์สามารถตรวจสอบโดยใช้เทคนิคการถ่ายภาพรังสีความร้อนได้

## 2.4 ส่วนแสดงผล

2.4.1 อาการชำรุดที่เกิดจากอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ สายไฟ หรือจุดเชื่อมต่อเสื่อมสภาพเกิดจากอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ สายไฟ หรือจุดเชื่อมต่อเสื่อมสภาพ ของส่วนแสดงผลเรดาร์สามารถตรวจสอบได้จากภาพถ่ายรังสีความร้อนอุปกรณ์ส่วนแสดงผลที่ชำรุดมีอุณหภูมิสูงกว่าอุปกรณ์ภายในส่วนแสดงผลที่มีสภาพดี ดังภาพที่ 6



ภาพที่ 6 ภาพถ่ายรังสีความร้อนส่วนแสดงผลเรดาร์ภายในเรือ

เปรียบเทียบภาพที่ 6(ก) กับภาพที่ 6(ข) พบว่าในภาพที่ 6(ข) จุดที่ปลายลูกศรซึ่งเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่เสื่อมสภาพซึ่งเป็นสาเหตุให้ส่วนแสดงผลไม่สามารถใช้งานได้ตามปกติ มีอุณหภูมิ 39.3 องศาเซลเซียส ซึ่งมีอุณหภูมิสูงที่สุดในระบบส่วนแสดงผลเรดาร์ที่ชำรุดเสียหายและมีอุณหภูมิสูงกว่าอุปกรณ์ชนิดเดียวกันที่ตำแหน่งเดียวกันของระบบส่วนแสดงผลเรดาร์ที่มีสภาพดีที่มีอุณหภูมิ 34.0 องศาเซลเซียส (ภาพที่ 6(ก))

อุปกรณ์ในระบบภาครับที่ชำรุดเสียหายจะมีอุณหภูมิสูงกว่าปกติเนื่องจากพลังงานไฟฟ้าเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อน การถ่ายภาพรังสีความร้อนสามารถแสดงความแตกต่างของสีบนภาพถ่ายระหว่างอุปกรณ์ในระบบภาครับที่ชำรุดเสียหายกับอุปกรณ์ที่มีสภาพดีได้ การชำรุดเสียหายของระบบภาครับเรดาร์สามารถตรวจสอบโดยใช้เทคนิคการถ่ายภาพรังสีความร้อนได้

2.4.2 กลุ่มของการชำรุดที่เกิดจากซอฟต์แวร์ไม่สามารถตรวจสอบได้โดยเทคนิคการถ่ายภาพรังสีความร้อนเนื่องจากไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ

### 3. วิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลต่ออุณหภูมิสูงสุดของเรดาร์ที่มีสภาพดีในแต่ละระบบ

จากการตรวจสอบเอกสารพบว่าปัจจัยที่มีผลต่ออุณหภูมิของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงคือ อายุการใช้งานของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง และอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม (Hoffer *et al.*, 1986; Lindquist *et al.*, 2005; Muhr *et al.*, 2006) การใช้งานเรดาร์ภายในเรือรบในปัจจุบันจะต้องเปิดเครื่องก่อนการแพร์คลื่นประมาณ 5 – 15 นาที ตามแต่แบบของเรดาร์เพื่อเพิ่มอุณหภูมิของอุปกรณ์ในอยู่ในเกณฑ์ที่เหมาะสมตามที่บริษัทผู้ผลิตกำหนด

ออกแบบการทดลองเพื่อวิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลต่ออุณหภูมิในภาพถ่ายจากการถ่ายภาพรังสีความร้อนของอุปกรณ์เรดาร์ กำหนดปัจจัยหลักคือ อายุการใช้งานของเรดาร์ ระยะเวลาตั้งแต่เริ่มเดินเครื่องจนถึงเวลาการวัดอุณหภูมิด้วยกล้องถ่ายภาพรังสีความร้อน และอุณหภูมิของสิ่งแวดล้อมขณะทำการวัด โดยวิธีการออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียลเต็มรูป (Full Factorial Experiment) โดยทำการทดลองเฉพาะระบบที่สามารถตรวจสอบการชำรุดได้โดยใช้เทคนิคการถ่ายภาพรังสีความร้อน

### 3.1 ระบบภาคส่งของเรดาร์

นำข้อมูลอุณหภูมิของภาคส่งเรดาร์ตามตารางที่ 2 ไปวิเคราะห์เพื่อหาค่าความแปรปรวน (ANOVA) โดยใช้โปรแกรมมินิแทบ ทั้งนี้จะพิจารณาความแปรปรวนของผลกระทบหลักและผลกระทบร่วม (ตารางที่ 5 และ 6)

**ตารางที่ 5** อุณหภูมิสูงสุดของภาคส่งเรดาร์ที่วัดได้โดยการถ่ายภาพรังสีความร้อนเพื่อวิเคราะห์ความแปรปรวนอุณหภูมิของภาคส่งเรดาร์จากปัจจัยที่เกี่ยวข้อง (หน่วย : องศาเซลเซียส)

		อายุการใช้งานของเรดาร์ (ชั่วโมง)								
		อุณหภูมิ สิ่งแวดล้อม (องศา)	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8
เวลาก่อนการวัดอุณหภูมิ	5 นาที	20°C	38.9	35.6	41.4	36.5	41.3	38.9	37.8	37.5
		25°C	41.0	38.7	44.2	39.3	44.4	42.6	40.1	40.1
		30°C	44.3	41.5	47.6	42.1	47.8	45.3	43.2	43.0
	10 นาที	20°C	40.3	37.7	43.1	38.4	43.2	40.9	39.5	39.4
		25°C	43.1	40.9	46.3	41.5	46.6	44.1	42.3	42.1
		30°C	46.2	43.8	49.5	44.3	49.5	47.1	45.6	45.4
	15 นาที	20°C	41.6	40.3	45.3	40.8	45.6	43.2	41.6	41.4
		25°C	44.8	43.4	48.5	43.4	48.8	46.1	44.6	44.3
		30°C	47.5	46.1	51.3	46.4	51.4	49.2	47.7	47.2

**ตารางที่ 6** ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ของอุณหภูมิภาคส่งของเรดาร์จากปัจจัยที่เกี่ยวข้องเพื่อการศึกษาผลกระทบหลักและผลกระทบรวมพร้อมกัน

Source	DF	Seq SS	Adj SS	MS	F	P-value
Main Effects	3	901.556	899.930	299.977	2E+03	0.000
2-Way Interactions	3	0.541	0.542	0.181	1.31	0.278
3-Way Interactions	1	0.111	0.111	0.111	0.81	0.372
Residual Error	64	8.798	8.798	0.137		
Total	71	911.006				

สมมติฐานค่าอุณหภูมิสูงสุดของภาคส่งเรดาร์ที่มีสภาพดีจากปัจจัยคือ อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม อายุการใช้งานเรดาร์ และเวลาตั้งแต่เปิดเครื่องจนถึงการวัดอุณหภูมิ ได้ดังนี้

H0: อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม อายุการใช้งานเรดาร์ และเวลาตั้งแต่เปิดเครื่อง จนถึงการวัดอุณหภูมิ ไม่มีผลกระทบร่วมกันต่อค่าเฉลี่ยอุณหภูมิสูงสุดของ ภาคส่งเรดาร์ที่มีสภาพดี

H1: อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม อายุการใช้งานเรดาร์ และเวลาตั้งแต่เปิดเครื่องจนถึงการ วัดอุณหภูมิ มีผลกระทบร่วมกันต่อค่าเฉลี่ยอุณหภูมิสูงสุดของภาคส่งเรดาร์ที่ มีสภาพดี

โดยกำหนดระดับนัยสำคัญของการทดสอบสมมติฐาน เท่ากับ 0.05

จากตารางที่ 6 พบว่า เมื่อทำการวิเคราะห์ความแปรปรวนของอุณหภูมิภาคส่งของเรดาร์ จากปัจจัยที่เกี่ยวข้องเพื่อการศึกษาผลกระทบหลักและผลกระทบร่วมพร้อมกันที่ระดับความเชื่อมั่น ร้อยละ 95 พบว่าค่า P-value ของผลกระทบหลักระหว่างอายุการใช้งานของเรดาร์ เวลาตั้งแต่เริ่ม เดินเครื่องจนถึงการวัดอุณหภูมิ และอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม ได้เท่ากับ 0.000 ซึ่งน้อยกว่าค่าระดับ นัยสำคัญ 0.05 จึงปฏิเสธสมมติฐานหลักแสดงว่าผลกระทบหลักของปัจจัยทั้งสามมีนัยสำคัญต่อ อุณหภูมิของภาคส่งเรดาร์ แต่ผลกระทบร่วมทั้ง 2-Way Interactions และ 3-Way Interactions มีค่า P-value เท่ากับ 0.278 และ 0.372 ตามลำดับ ซึ่งมากกว่าค่าระดับนัยสำคัญ 0.05 จึงไม่สามารถ ปฏิเสธสมมติฐานหลักแสดงว่าผลกระทบร่วมของปัจจัยทั้งสามไม่มีนัยสำคัญต่ออุณหภูมิของ ภาคส่งเรดาร์

### 3.2 ระบบภาครับของเรดาร์

นำข้อมูลอุณหภูมิของภาครับเรดาร์ตามตารางที่ 3 ไปวิเคราะห์เพื่อหาค่าความ แปรปรวน (ANOVA) โดยใช้โปรแกรมมินิแทบ ทั้งนี้จะพิจารณาความแปรปรวนของผลกระทบ หลักและผลกระทบร่วม (ตารางที่ 7 และ 8)

ตารางที่ 7 อุณหภูมิสูงสุดของภาครับเรดาร์ที่วัดได้โดยการถ่ายภาพรังสีความร้อนเพื่อวิเคราะห์ ความแปรปรวนอุณหภูมิของภาครับเรดาร์จากปัจจัยที่เกี่ยวข้อง (หน่วย : องศาเซลเซียส)

		อายุการใช้งานของเรดาร์ (ชั่วโมง)								
		อุณหภูมิ สิ่งแวดล้อม (องศา)	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8
เวลาก่อนการวัดอุณหภูมิ	5 นาที	20 °C	35.1	33.1	37.8	33.9	37.6	35.8	34.6	34.2
		25 °C	38.5	36.4	41.1	37.1	40.8	39.6	37.9	37.6
		30 °C	42.0	39.8	45.2	40.3	45.0	43.2	41.6	41.0
	10 นาที	20 °C	37.6	35.3	40.5	36.0	40.4	38.4	36.9	36.3
		25 °C	40.9	38.5	44.0	39.5	43.8	41.7	40.2	39.6
		30 °C	44.1	41.9	47.3	42.7	47.1	45.8	43.3	42.8
	15 นาที	20 °C	39.3	36.8	42.5	37.7	42.4	40.7	38.8	38.5
		25 °C	43.1	41.2	46.6	41.8	46.5	43.9	42.5	42.0
		30 °C	46.4	44.2	49.8	45.2	49.7	45.1	45.7	45.4

ตารางที่ 8 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ของอุณหภูมิภาครับของเรดาร์จากปัจจัยที่เกี่ยวข้องเพื่อการศึกษาผลกระทบหลักและผลกระทบรวมพร้อมกัน

Source	DF	Seq SS	Adj SS	MS	F	P-value
Main Effects	3	1035.79	1035.73	345.243	2E+03	0.000
2-Way Interactions	3	0.46	0.46	0.153	0.73	0.539
3-Way Interactions	1	0.60	0.60	0.597	2.84	0.097
Residual Error	64	13.46	13.46	0.210		
Total	71	1050.30				

สมมติฐานค่าอุณหภูมิสูงสุดของภาครีบเรดาร์ที่มีสภาพดีจากปัจจัยคือ อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม อายุการใช้งานเรดาร์ และเวลาตั้งแต่เปิดเครื่องจนถึงการวัดอุณหภูมิ ได้ดังนี้

H0: อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม อายุการใช้งานเรดาร์ และเวลาตั้งแต่เปิดเครื่องจนถึงการวัดอุณหภูมิ ไม่มีผลกระทบร่วมกันต่อค่าเฉลี่ยอุณหภูมิสูงสุดของภาครีบเรดาร์ที่มีสภาพดี

H1: อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม อายุการใช้งานเรดาร์ และเวลาตั้งแต่เปิดเครื่องจนถึงการวัดอุณหภูมิ มีผลกระทบร่วมกันต่อค่าเฉลี่ยอุณหภูมิสูงสุดของภาครีบเรดาร์ที่มีสภาพดี

โดยกำหนดระดับนัยสำคัญของการทดสอบสมมติฐาน เท่ากับ 0.05

จากตารางที่ 8 พบว่า เมื่อทำการวิเคราะห์ความแปรปรวนของอุณหภูมิภาคส่งของเรดาร์จากปัจจัยที่เกี่ยวข้องเพื่อการศึกษาผลกระทบหลักและผลกระทบร่วมพร้อมกันที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 พบว่าค่า P-value ของผลกระทบหลักระหว่างอายุการใช้งานของเรดาร์ เวลาตั้งแต่เริ่มเดินเครื่องจนถึงการวัดอุณหภูมิ และอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม ได้เท่ากับ 0.000 ซึ่งน้อยกว่าค่าระดับนัยสำคัญ 0.05 จึงปฏิเสธสมมติฐานหลักแสดงว่าผลกระทบหลักของปัจจัยทั้งสามมีนัยสำคัญต่ออุณหภูมิของภาคส่งเรดาร์ แต่ผลกระทบร่วมทั้ง 2-Way Interactions และ 3-Way Interactions มีค่า P-value เท่ากับ 0.539 และ 0.097 ตามลำดับ ซึ่งมากกว่าค่าระดับนัยสำคัญ 0.05 จึงไม่สามารถปฏิเสธสมมติฐานหลักแสดงว่าผลกระทบร่วมของปัจจัยทั้งสามไม่มีนัยสำคัญต่ออุณหภูมิของภาครีบเรดาร์

### 3.3 ส่วนแสดงผลของเรดาร์

นำข้อมูลอุณหภูมิของส่วนแสดงผลเรดาร์ตามตารางที่ 4 ไปวิเคราะห์เพื่อหาค่าความแปรปรวน (ANOVA) โดยใช้โปรแกรมมินิแทบ ทั้งนี้จะพิจารณาความแปรปรวนของผลกระทบหลักและผลกระทบร่วม (ตารางที่ 9 และ 10)

**ตารางที่ 9** อุณหภูมิสูงสุดของส่วนแสดงผลเรดาร์ที่วัดได้โดยการถ่ายภาพรังสีความร้อน เพื่อวิเคราะห์ความแปรปรวนอุณหภูมิของส่วนแสดงผลเรดาร์จากปัจจัยที่เกี่ยวข้อง (หน่วย : องศาเซลเซียส)

		อายุการใช้งานของเรดาร์ (ชั่วโมง)								
		อุณหภูมิ สิ่งแวดล้อม (องศา)	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8
เวลาก่อนการวัดอุณหภูมิ	5 นาที	20 °C	33.0	31.3	35.6	31.6	35.7	33.5	32.5	32.0
		25 °C	36.3	34.5	39.3	34.8	38.6	37.5	36.0	35.6
		30 °C	40.1	37.9	43.0	38.0	42.9	41.0	39.4	38.9
	10 นาที	20 °C	35.4	33.3	38.0	33.9	38.1	36.4	34.9	34.4
		25 °C	38.5	36.1	41.9	37.3	41.9	39.6	38.5	37.8
		30 °C	42.2	39.7	45.5	40.8	45.1	44.0	41.0	40.6
	15 นาที	20 °C	37.0	34.5	40.4	35.9	40.5	38.9	36.9	36.6
		25 °C	41.1	39.3	44.4	40.0	44.5	41.7	40.3	40.0
		30 °C	44.3	42.4	47.5	43.3	47.9	43.2	43.5	43.2

**ตารางที่ 10** ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ของส่วนแสดงผลของเรดาร์จากปัจจัยที่เกี่ยวข้องเพื่อการศึกษาผลกระทบหลักและผลกระทบร่วมพร้อมกัน

Source	DF	Seq SS	Adj SS	MS	F	P-value
Main Effects	3	1048.32	837.470	279.157	1E+03	0.000
2-Way Interactions	3	0.80	0.748	0.249	1.27	0.293
3-Way Interactions	1	0.37	0.369	0.369	1.88	0.176
Residual Error	64	12.59	12.588	0.197		
Total	71	1062.08				

สมมติฐานค่าอุณหภูมิสูงสุดของส่วนแสดงผลเรดาร์ที่มีสภาพดีจากปัจจัยคือ อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม อายุการใช้งานเรดาร์ และเวลาตั้งแต่เปิดเครื่องจนถึงการวัดอุณหภูมิ ได้ดังนี้

H0: อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม อายุการใช้งานเรดาร์ และเวลาตั้งแต่เปิดเครื่องจนถึงการวัดอุณหภูมิ ไม่มีผลกระทบร่วมกันต่อค่าเฉลี่ยอุณหภูมิสูงสุดของส่วนแสดงผลเรดาร์ที่มีสภาพดี

H1: อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม อายุการใช้งานเรดาร์ และเวลาตั้งแต่เปิดเครื่องจนถึงการวัดอุณหภูมิ มีผลกระทบร่วมกันต่อค่าเฉลี่ยอุณหภูมิสูงสุดของส่วนแสดงผลเรดาร์ที่มีสภาพดี

โดยกำหนดระดับนัยสำคัญของการทดสอบสมมติฐาน เท่ากับ 0.05

จากตารางที่ 10 พบว่า เมื่อทำการวิเคราะห์ความแปรปรวนของส่วนแสดงผลของเรดาร์จากปัจจัยที่เกี่ยวข้องเพื่อการศึกษผลกระทบหลักและผลกระทบพร้อมกันที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 พบว่าค่า P-value ของผลกระทบหลักระหว่างอายุการใช้งานของเรดาร์ เวลาตั้งแต่เริ่มเดินเครื่องจนถึงการวัดอุณหภูมิ และอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม ได้เท่ากับ 0.000 ซึ่งน้อยกว่าค่าระดับนัยสำคัญ 0.05 จึงปฏิเสธสมมติฐานหลักแสดงว่าผลกระทบหลักของปัจจัยทั้งสามมีนัยสำคัญต่ออุณหภูมิของภาคส่งเรดาร์ แต่ผลกระทบร่วมทั้ง 2-Way Interactions และ 3-Way Interactions มีค่า P-value เท่ากับ 0.293 และ 0.176 ตามลำดับ ซึ่งมากกว่าค่าระดับนัยสำคัญ 0.05 จึงไม่สามารถปฏิเสธสมมติฐานหลักแสดงว่าผลกระทบร่วมของปัจจัยทั้งสามไม่มีนัยสำคัญต่ออุณหภูมิของส่วนแสดงผลเรดาร์

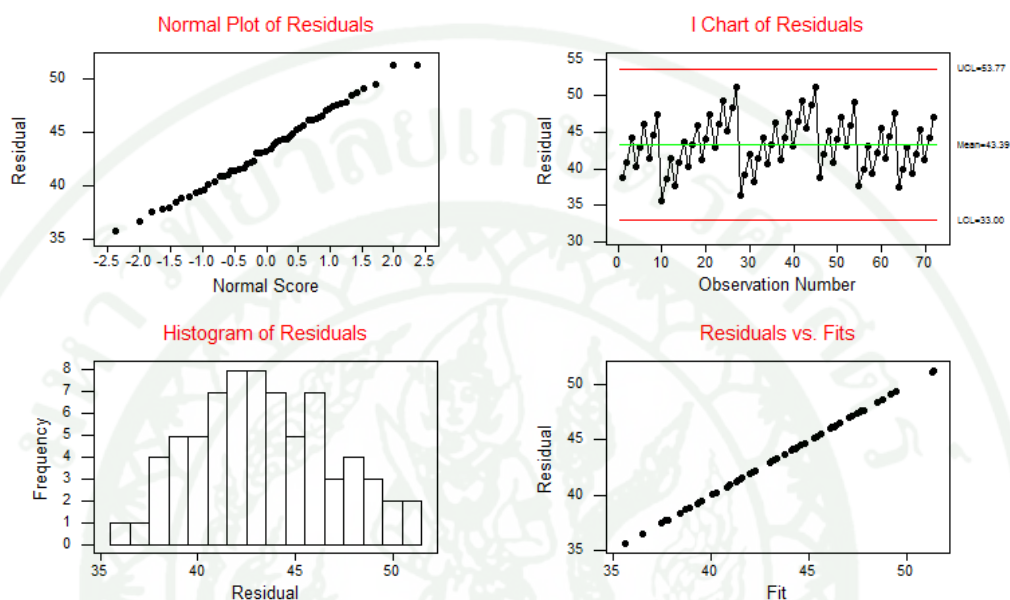
#### 4. สร้างแบบจำลองพยากรณ์อุณหภูมิสูงสุดของอุปกรณ์เรดาร์ที่มีสภาพดีจากปัจจัยต่างๆ

##### 4.1 ภาคส่ง

จากภาพที่ 7 เมื่อนำผลอุณหภูมิสูงสุดของภาคส่งเรดาร์ที่มีสภาพดีจากการวัดโดยการถ่ายภาพรังสีความร้อนไปวิเคราะห์ถึงการกระจายตัวของข้อมูลเพื่อพิจารณาความถูกต้อง พบว่าลักษณะของข้อมูลมีคุณภาพด้วยเหตุผลดังนี้ คือกราฟการกระจายแบบปกติ (Normal Probability Plot) มีลักษณะเป็นเส้นตรงแสดงว่าเศษเหลือ (Residuals) มีการกระจายตัวแบบปกติ กราฟฮิสโตแกรม (Histogram) มีลักษณะเป็นรูปทรงระฆังคว่ำ และข้อมูลมีลักษณะความแปรปรวนคงที่เพราะ

จากกราฟเศษเหลือ (Residuals Plot) มีแนวโน้มข้อมูลกระจายแบบสุ่มเป็นช่วง โดยสรุปสามารถนำข้อมูลอุณหภูมิสูงสุดของภาคส่งเรดาร์ที่มีสภาพดีจากการวัดโดยการถ่ายภาพรังสีความร้อนตามตารางที่ 5 ไปวิเคราะห์การถดถอย และตรวจสอบสมมติฐานได้

### Residual Model Diagnostics



ภาพที่ 7 ผลการทดสอบทางสถิติเพื่อพิสูจน์การกระจายตัวของข้อมูลอุณหภูมิสูงสุดของภาคส่งเรดาร์ที่มีสภาพดีจากการวัดโดยการถ่ายภาพรังสีความร้อน

ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์โดยการวิเคราะห์การถดถอย ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% รายละเอียดตามภาคผนวก ก ได้แบบจำลองเพื่อพยากรณ์อุณหภูมิสูงสุดของภาคส่งเรดาร์ที่มีสภาพดี ดังสมการที่ 1

$$C_{T4} = 9.35 + 0.00356 C_{T1} + 0.408 C_{T2} + 0.595 C_{T3} \quad (1)$$

$C_{T1}$  คือ อายุการใช้งานของเรดาร์ (ชั่วโมง)

$C_{T2}$  คือ เวลาตั้งแต่เริ่มเดินเครื่องจนถึงการวัด (นาที)

$C_{T3}$  คือ อุณหภูมิของสิ่งแวดล้อมขณะทำการวัด (องศาเซลเซียส)

$C_{T4}$  คือ อุณหภูมิสูงสุดของภาคส่งเรดาร์ที่วัดได้ (องศาเซลเซียส)

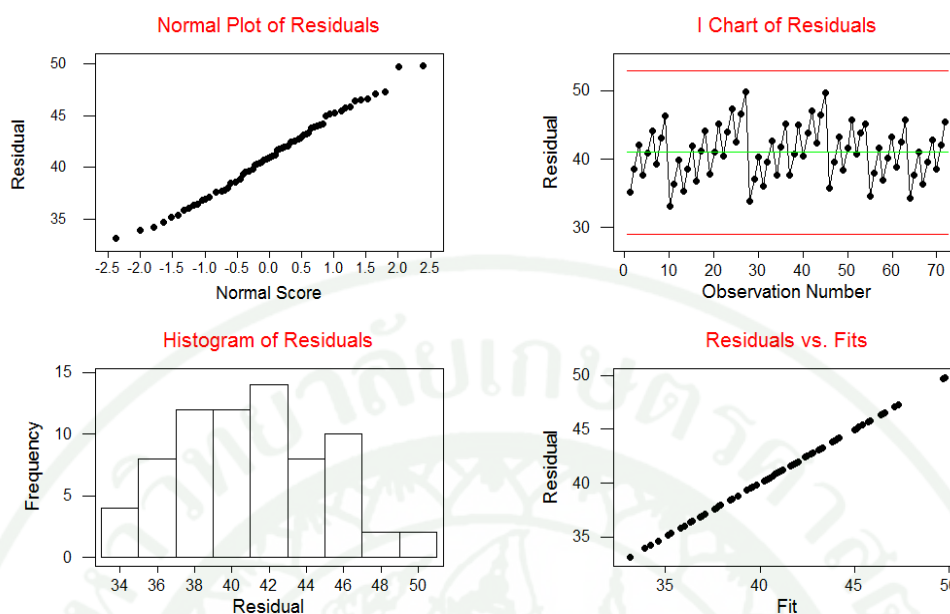
ตารางที่ 11 ผลการวิเคราะห์การถดถอยของสมการพยากรณ์อุณหภูมิภาคส่งเรดาร์ที่  
ระดับความเชื่อมั่น 95%

Term	Coef	SE Coef	P-value
Constant	9.3458	0.4474	0.000
C <sub>T1</sub>	0.00355697	0.00007973	0.000
C <sub>T2</sub>	0.40833	0.01076	0.000
C <sub>T3</sub>	0.59500	0.01076	0.000
S = 0.3728 R-Sq = 99.0% R-Sq(adj) = 98.9%			

#### 4.2 ภาครับ

จากภาพที่ 8 เมื่อนำผลอุณหภูมิสูงสุดของภาคส่งเรดาร์ที่มีสภาพดีจากการวัดโดยการถ่ายภาพรังสีความร้อน ไปวิเคราะห์ถึงการกระจายตัวของข้อมูลเพื่อพิจารณาความถูกต้อง พบว่าลักษณะของข้อมูลมีคุณภาพด้วยเหตุผลดังนี้ คือกราฟการกระจายแบบปกติ (Normal Probability Plot) มีลักษณะเป็นเส้นตรงแสดงว่าเศษเหลือ (Residuals) มีการกระจายตัวแบบปกติ กราฟฮิสโตแกรม (Histogram) มีลักษณะเป็นรูปทรงระฆังคว่ำ และข้อมูลมีลักษณะความแปรปรวนคงที่เพราะจากกราฟเศษเหลือ (Residuals Plot) มีแนวโน้มข้อมูลกระจายแบบสุ่มเป็นช่วง โดยสรุปสามารถนำข้อมูลอุณหภูมิสูงสุดของภาคส่งเรดาร์ที่มีสภาพดีจากการวัดโดยการถ่ายภาพรังสีความร้อนตามตารางที่ 7 ไปวิเคราะห์การถดถอย และตรวจสอบสมมติฐานได้

## Residual Model Diagnostics



ภาพที่ 8 ผลการทดสอบทางสถิติเพื่อพิสูจน์การกระจายตัวของข้อมูลอุณหภูมิสูงสุดของภาครับเรดาร์ที่มีสภาพดีจากการวัดโดยการถ่ายภาพรังสีความร้อน

ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์โดยการวิเคราะห์การถดถอย ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% รายละเอียดตามภาคผนวก ข ได้แบบจำลองเพื่อพยากรณ์อุณหภูมิสูงสุดของภาครับเรดาร์ที่มีสภาพดีดังสมการที่ 2

$$C_{R4} = 5.39 + 0.00332 C_{R1} + 0.444 C_{R2} + 0.685 C_{R3} \quad (2)$$

$C_{R1}$  คือ อายุการใช้งานของเรดาร์ (ชั่วโมง)

$C_{R2}$  คือ เวลาตั้งแต่เริ่มเดินเครื่องจนถึงการวัด (นาที)

$C_{R3}$  คือ อุณหภูมิของสิ่งแวดล้อมขณะทำการวัด (องศาเซลเซียส)

$C_{R4}$  คือ อุณหภูมิสูงสุดของภาครับเรดาร์ที่วัดได้ (องศาเซลเซียส)

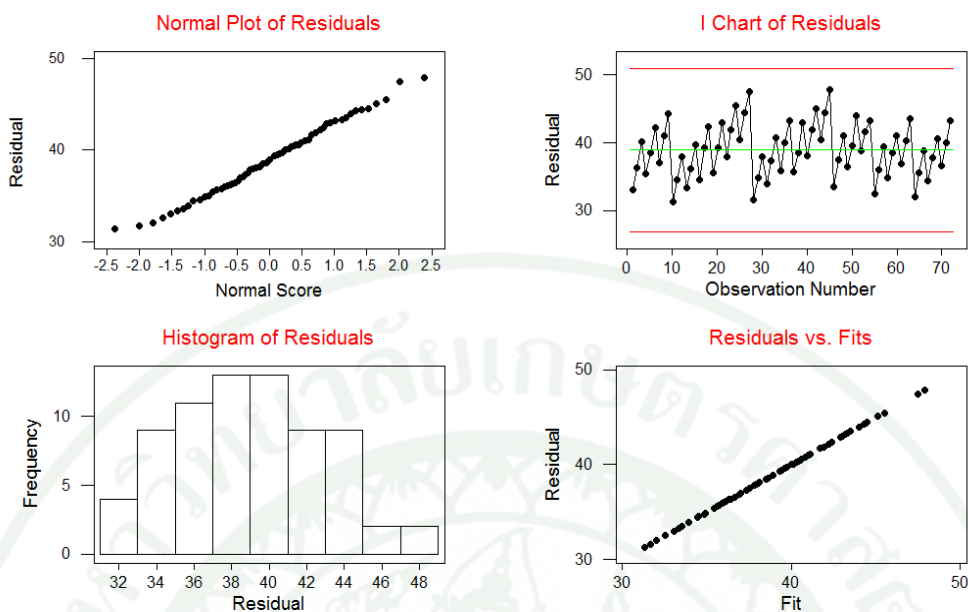
ตารางที่ 12 ผลการวิเคราะห์การถดถอยของสมการพยากรณ์อุณหภูมิภาครับเรดาร์ที่  
ระดับความเชื่อมั่น 95%

Term	Coef	SE Coef	P-value
Constant	5.3895	0.5563	0.000
C <sub>R1</sub>	0.00332239	0.00009992	0.000
C <sub>R2</sub>	0.44417	0.01334	0.000
C <sub>R3</sub>	0.68500	0.01334	0.000
S = 0.4620 R-Sq = 98.6% R-Sq(adj) = 98.6%			

#### 4.3 ส่วนแสดงผล

จากภาพที่ 9 เมื่อนำผลอุณหภูมิสูงสุดของภาครับเรดาร์ที่มีสภาพดีจากการวัดโดยการถ่ายภาพรังสีความร้อน ไปวิเคราะห์ถึงการกระจายตัวของข้อมูลเพื่อพิจารณาความถูกต้อง พบว่าลักษณะของข้อมูลมีคุณภาพด้วยเหตุผลดังนี้ คือกราฟการกระจายแบบปกติ (Normal Probability Plot) มีลักษณะเป็นเส้นตรงแสดงว่าเศษเหลือ (Residuals) มีการกระจายตัวแบบปกติ กราฟฮิสโตแกรม (Histogram) มีลักษณะเป็นรูปทรงระฆังคว่ำ และข้อมูลมีลักษณะความแปรปรวนคงที่เพราะจากกราฟเศษเหลือ (Residuals Plot) มีแนวโน้มข้อมูลกระจายแบบสุ่มเป็นช่วง โดยสรุปสามารถนำข้อมูลอุณหภูมิสูงสุดของภาครับเรดาร์ที่มีสภาพดีจากการวัดโดยการถ่ายภาพรังสีความร้อนตามตารางที่ 9 ไปวิเคราะห์การถดถอย และตรวจสอบสมมติฐานได้

## Residual Model Diagnostics



ภาพที่ 9 ผลการทดสอบทางสถิติเพื่อพิสูจน์การกระจายตัวของข้อมูลอุณหภูมิสูงสุดของส่วนแสดงผลเรดาร์ที่มีสภาพดีจากการวัดโดยการถ่ายภาพรังสีความร้อน

ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์โดยการวิเคราะห์การถดถอย ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% รายละเอียดยตามภาคผนวก ก ได้แบบจำลองเพื่อพยากรณ์อุณหภูมิสูงสุดของส่วนแสดงผลเรดาร์ที่มีสภาพดีดังสมการที่ 3

$$C_{D4} = 3.32 + 0.00305 C_{D1} + 0.451 C_{D2} + 0.688 C_{D3} \quad (3)$$

$C_{D1}$  คือ อายุการใช้งานของเรดาร์ (ชั่วโมง)

$C_{D2}$  คือ เวลาตั้งแต่เริ่มเดินเครื่องจนถึงการวัด (นาที)

$C_{D3}$  คือ อุณหภูมิของสิ่งแวดล้อมขณะทำการวัด (องศาเซลเซียส)

$C_{D4}$  คือ อุณหภูมิสูงสุดของภาครับเรดาร์ที่วัดได้ (องศาเซลเซียส)

ตารางที่ 13 ผลการวิเคราะห์การถดถอยของสมการพยากรณ์อุณหภูมิส่วนแสดงผลเรดาร์  
ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

Term	Coef	SE Coef	P-value
Constant	3.3237	0.5385	0.000
C <sub>D1</sub>	0.00305176	0.00008935	0.000
C <sub>D2</sub>	0.45125	0.01299	0.000
C <sub>D3</sub>	0.68792	0.01299	0.000
S = 0.4498 R-Sq = 98.7% R-Sq(adj) = 98.6%			

อุณหภูมิที่คำนวณได้จากแบบจำลองดังกล่าวใช้เพื่อเป็นค่ามาตรฐานของเรดาร์ที่มีสภาพดีสามารถใช้งานได้ เพื่อนำไปเปรียบเทียบกับเรดาร์ที่ต้องการทดสอบหาระบบที่ชำรุดโดยเทคนิคการถ่ายภาพรังสีความร้อนสามารถลดเวลาในการค้นหาจุดที่ชำรุดเสียหายในกระบวนการซ่อมบำรุง โดยมีหลักเกณฑ์การพิจารณาดังนี้

1. อุณหภูมิแตกต่างกัน 10 ถึง 25 องศาเซลเซียส แสดงว่าการชำรุดของอุปกรณ์ยังไม่เกิดขึ้น แต่จำเป็นต้องตรวจสอบอุปกรณ์ ในการซ่อมบำรุงตามคาบเวลาครั้งต่อไป
2. อุณหภูมิแตกต่างกัน 25 ถึง 40 องศาเซลเซียส แสดงว่าอุปกรณ์มีความน่าจะเป็นที่จะเกิดการชำรุดเสียหาย จนกว่าจะได้รับการซ่อมบำรุง
3. อุณหภูมิแตกต่างกัน 40 ถึง 70 องศาเซลเซียส แสดงว่าอุปกรณ์น่าจะเกิดการชำรุดเสียหาย จนกว่าจะได้รับการซ่อมบำรุง
4. อุณหภูมิแตกต่างกันมากกว่า 70 องศาเซลเซียส แสดงว่าอุปกรณ์ชำรุดเสียหายแน่นอน ให้อุบัติการตรวจสอบโดยทันทีและซ่อมบำรุงแก้ไข

เมื่ออุณหภูมิที่วัดได้จากการถ่ายภาพรังสีความร้อนมีความแตกต่างกับอุณหภูมิที่คำนวณได้จากแบบจำลองอุณหภูมิสูงสุดของอุปกรณ์เรดาร์ที่มีสภาพดีตามหลักเกณฑ์การพิจารณาจะสามารถประเมินสภาพของอุปกรณ์ และระบุอุปกรณ์ที่คาดว่าชำรุดเสียหาย สำหรับนำไปตรวจสอบโดยการวัดค่าทางไฟฟ้าเพื่อยืนยันการชำรุดเสียหาย เป็นการลดเวลาการค้นหาอุปกรณ์ที่ชำรุดเสียหายเมื่อ

เปรียบเทียบกับการค้นหาอุปกรณ์ชำรุดเสียหายแบบสุ่มในการซ่อมบำรุงในปัจจุบัน และลดอันตรายจากการสัมผัสไฟฟ้าแรงสูงของช่างซ่อมบำรุง

#### 5. วิเคราะห์ความคุ้มค่าของการลงทุนในการใช้เทคนิคถ่ายภาพรังสีความร้อนเพื่อซ่อมบำรุงเรดาร์ภายในเรือเปรียบเทียบกับการซ่อมบำรุงแก้ไข

สามารถจำแนกค่าใช้จ่ายในการซ่อมบำรุงเรดาร์ภายในเรือเป็น 3 ส่วนหลักคือ ค่าอะไหล่, ค่าใช้จ่ายในการซ่อมแซมอุปกรณ์ที่ชำรุดและเปลี่ยนอะไหล่ และค่าใช้จ่ายในการตรวจสอบหาอุปกรณ์ที่ชำรุดเสียหาย ตามตารางที่ 14 และสามารถสร้างสมการคำนวณค่าใช้จ่ายรวมในการซ่อมบำรุงเรดาร์ ตามสมการที่ 4

$$M_C = I_C + R_C + S_p \quad (4)$$

กำหนดให้

$M_C$  คือ ค่าใช้จ่ายรวมในการซ่อมบำรุงเรดาร์ (บาท/ปี)

$I_C$  คือ ค่าใช้จ่ายในการตรวจสอบหาอุปกรณ์ที่ชำรุดเสียหาย (บาท/ปี)

$R_C$  คือ ค่าใช้จ่ายในการซ่อมแซมอุปกรณ์ที่ชำรุดและเปลี่ยนอะไหล่ (บาท/ปี)

$S_p$  คือ ค่าอะไหล่ (บาท/ปี)

จากตารางที่ 14 สามารถจำแนกปัจจัยที่มีผลต่อค่าใช้จ่ายในการตรวจสอบหาอุปกรณ์ที่ชำรุดเสียหายเป็น 4 ส่วนคือ เวลาในการตรวจหาอุปกรณ์ที่ชำรุด, จำนวนช่างเรดาร์ที่ใช้ในการตรวจสอบหาอุปกรณ์ที่ชำรุดเสียหาย, ค่าแรงช่างเรดาร์ และค่าใช้จ่ายในการใช้อุปกรณ์พิเศษเพื่อตรวจสอบหาอุปกรณ์ที่ชำรุดเสียหาย สามารถสร้างสมการคำนวณค่าใช้จ่ายในการตรวจสอบหาอุปกรณ์ที่ชำรุดเสียหาย ตามสมการที่ 5

$$I_C = (I_T \times N_T \times T_S) + E_T \quad (5)$$

กำหนดให้

$I_C$  คือ ค่าใช้จ่ายในการตรวจสอบหาอุปกรณ์ที่ชำรุดเสียหาย (บาท)

$I_T$  คือ เวลาในการตรวจหาอุปกรณ์ที่ชำรุด (ชั่วโมง)

$N_T$  คือ จำนวนช่างเรดาร์ที่ใช้ในการตรวจสอบหาอุปกรณ์ที่ชำรุดเสียหาย (คน)

$T_s$  คือ ค่าแรงช่างเรดาร์ (บาทต่อคนต่อชั่วโมง)

$E_T$  คือ ค่าใช้จ่ายในการใช้อุปกรณ์พิเศษเพื่อตรวจสอบหาอุปกรณ์ที่ชำรุดเสียหาย (บาท)

ตารางที่ 14 เปรียบเทียบค่าใช้จ่ายในการซ่อมบำรุงเรดาร์ภายในเรือระหว่างการซ่อมบำรุงแก้ไขกับการใช้เทคนิคการถ่ายภาพรังสีความร้อน

ประเภทของค่าใช้จ่ายในการซ่อมบำรุงเรดาร์	ที่มาของค่าใช้จ่าย	การซ่อมบำรุงแก้ไข	เทคนิคการถ่ายภาพรังสีความร้อน
ค่าใช้จ่ายในการตรวจสอบหาอุปกรณ์ที่ชำรุดเสียหาย ( $I_C$ )	เวลาในการตรวจหาอุปกรณ์ที่ชำรุด ( $I_T$ )	มาก	น้อย
	จำนวนช่างเรดาร์ที่ใช้ในการตรวจสอบหาอุปกรณ์ที่ชำรุดเสียหาย ( $N_T$ )	ไม่แตกต่าง	
	ค่าแรงช่างเรดาร์ต่อคน ( $T_s$ )	ไม่แตกต่าง	
	ค่าใช้จ่ายในการใช้อุปกรณ์พิเศษเพื่อตรวจสอบหาอุปกรณ์ที่ชำรุดเสียหาย ( $E_T$ )	ไม่มี	กล้องถ่ายภาพรังสีความร้อน
ค่าใช้จ่ายในการซ่อมแซมอุปกรณ์ที่ชำรุดและเปลี่ยนอะไหล่ ( $R_C$ )	ค่าใช้จ่ายในการซ่อมแซมอุปกรณ์ที่ชำรุดและเปลี่ยนอะไหล่	ไม่แตกต่าง	
ค่าอะไหล่ ( $S_p$ )	ค่าอะไหล่	ไม่แตกต่าง	

ค่าใช้จ่ายในการซ่อมแซมอุปกรณ์ที่ชำรุดและเปลี่ยนอะไหล่เป็นค่าใช้จ่ายในส่วนที่ไม่สามารถเปลี่ยนแปลงได้โดยใช้เทคนิคการถ่ายภาพรังสีความร้อน เนื่องจากขึ้นอยู่กับ การชำรุดเสียหายซึ่งเกิดขึ้นแบบสุ่มเนื่องจากสภาพการใช้งาน สิ่งแวดล้อม และความชำนาญของช่างในการซ่อมแซมอุปกรณ์ที่ชำรุดและเปลี่ยนอะไหล่

ค่าอะไหล่เป็นค่าใช้จ่ายในส่วนที่ไม่สามารถเปลี่ยนแปลงได้โดยใช้เทคนิคการถ่ายภาพรังสีความร้อน เนื่องจากขึ้นอยู่กับราคาอะไหล่ที่บริษัทผู้ผลิตกำหนดและอัตราแลกเปลี่ยนเงินตราระหว่างประเทศในขณะนั้น

จากการเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายในการซ่อมบำรุงเรดาร์ภายในเรือระหว่างการซ่อมบำรุงแก้ไขกับการใช้เทคนิคการถ่ายภาพรังสีความร้อนพบว่าค่าใช้จ่ายที่ทั้งสองวิธีแตกต่างกันคือ ค่าใช้จ่ายในการตรวจสอบการอุปกรณ์ที่ชำรุดเสียหาย โดยปัจจัยที่มาของค่าใช้จ่ายในการตรวจสอบการอุปกรณ์ที่ชำรุดเสียหายที่ต่างกันคือ เวลาในการตรวจหาอุปกรณ์ที่ชำรุด และค่าใช้จ่ายในการใช้อุปกรณ์พิเศษเพื่อตรวจสอบหาอุปกรณ์ที่ชำรุดเสียหาย โดยเทคนิคการถ่ายภาพรังสีความร้อนใช้เวลาในการตรวจหาอุปกรณ์ที่ชำรุดน้อยกว่าการซ่อมบำรุงแก้ไขแต่มีค่าใช้จ่ายในการใช้อุปกรณ์พิเศษเพื่อตรวจสอบหาอุปกรณ์ที่ชำรุดเสียหาย (กล้องถ่ายภาพรังสีความร้อน) เป็นค่าใช้จ่ายเพิ่มเติมที่มากกว่าค่าใช้จ่ายการซ่อมบำรุงแก้ไข

จากการเก็บข้อมูลการซ่อมบำรุงของเรดาร์จำนวน 8 เครื่อง ระหว่างปี พ.ศ. 2536 – 2550 เป็นระยะเวลา 15 ปี สามารถจำแนกประเภทของการซ่อมบำรุงตามอุปกรณ์ที่ชำรุดเสียหายออกเป็น 2 ประเภทคือ การซ่อมบำรุงการชำรุดที่สามารถใช้เทคนิคการถ่ายภาพรังสีความร้อนตรวจสอบ และการซ่อมบำรุงการชำรุดที่ไม่สามารถใช้เทคนิคการถ่ายภาพรังสีความร้อนตรวจสอบ เมื่อพิจารณาเวลาที่ใช้ในการซ่อมบำรุงสามารถแบ่งออกเป็น เวลาในการตรวจสอบหาการชำรุดที่สามารถใช้เทคนิคการถ่ายภาพรังสีความร้อนเพื่อลดเวลา และเวลาในการซ่อมบำรุงอุปกรณ์ที่ชำรุดและเปลี่ยนอะไหล่ในการชำรุดที่สามารถใช้เทคนิคการถ่ายภาพรังสีความร้อนตรวจสอบ สามารถประมาณเวลาที่ใช้ในการซ่อมบำรุงเรดาร์ตามสมการที่ 6 และ 7 แสดงข้อมูลตามตารางที่ 15

$$M_{\text{Total}} = M_{\text{Tt}} + M_{\text{Tn}} \quad (6)$$

$$M_{\text{Total}} = (I_{\text{Tt}} + R_{\text{Tt}}) + M_{\text{Tn}} \quad (7)$$

กำหนดให้

$M_{\text{Total}}$  คือ เวลารวมในการซ่อมบำรุงทั้งหมด (ชั่วโมง)

$M_{\text{Tt}}$  คือ เวลารวมในการซ่อมบำรุงการชำรุดที่สามารถใช้เทคนิคการถ่ายภาพรังสีความร้อนตรวจสอบ (ชั่วโมง)

$M_{Tn}$  คือ เวลารวมในการซ่อมบำรุงการชำรุดที่ไม่สามารถใช้เทคนิคการถ่ายภาพรังสีความร้อนตรวจสอบ(ชั่วโมง)

$I_{Tn}$  คือ เวลาในการตรวจสอบหาการชำรุดที่สามารถใช้เทคนิคการถ่ายภาพรังสีความร้อนเพื่อลดเวลา (ชั่วโมง)

$R_{Tn}$  คือ เวลาในการซ่อมบำรุงอุปกรณ์ที่ชำรุดและเปลี่ยนอะไหล่ในการชำรุดที่สามารถใช้เทคนิคการถ่ายภาพรังสีความร้อนตรวจสอบ (ชั่วโมง)

ตารางที่ 15 การเปรียบเทียบเวลาในการซ่อมบำรุงเรดาร์แต่ละเครื่องภายในระยะเวลา 15 ปี  
(หน่วย : ชั่วโมง)

เรดาร์	$I_{Tn}$	$R_{Tn}$	$M_{Tn}$ = $I_{Tn} + R_{Tn}$	$M_{Tn}$	$M_{TTotal}$ = $M_{Tn} + M_{Tn}$	$\% I_{Tn} / M_{TTotal}$
1	132	162	294	126	420	31.43
2	102	138	240	114	354	28.81
3	72	288	360	240	600	12.00
4	141	231	372	204	576	24.48
5	110	142	252	198	450	24.44
6	132	144	276	198	474	27.85
7	114	210	324	162	486	23.46
8	117	225	342	234	576	20.31
รวม	920	1,540	2,460	1,476	3,936	23.37

$\% I_{Tn} / M_{TTotal}$  คือ ร้อยละของเวลาในการตรวจสอบหาการชำรุดที่สามารถใช้เทคนิคการถ่ายภาพรังสีความร้อนต่อเวลารวมในการซ่อมบำรุงทั้งหมด

จากการเปรียบเทียบการซ่อมบำรุงเรดาร์โดยวิธีถ่ายภาพรังสีความร้อนกับวิธีที่ปฏิบัติอยู่ในปัจจุบันพบว่า การซ่อมบำรุงเรดาร์ภายในเรือจำนวน 8 เครื่อง ภายในระยะเวลา 15 ปี ใช้เวลาซ่อมบำรุงรวม 3,936 ชั่วโมง โดยใช้เวลารวมในการตรวจหาอุปกรณ์เรดาร์ที่ชำรุดที่สามารถใช้เทคนิคการถ่ายภาพรังสีความร้อนลดเวลาในการตรวจสอบได้เท่ากับ 920 ชั่วโมง ร้อยละของเวลาในการตรวจสอบหาการชำรุดที่สามารถใช้เทคนิคการถ่ายภาพรังสีความร้อนเพื่อลดเวลาต่อเวลารวมใน

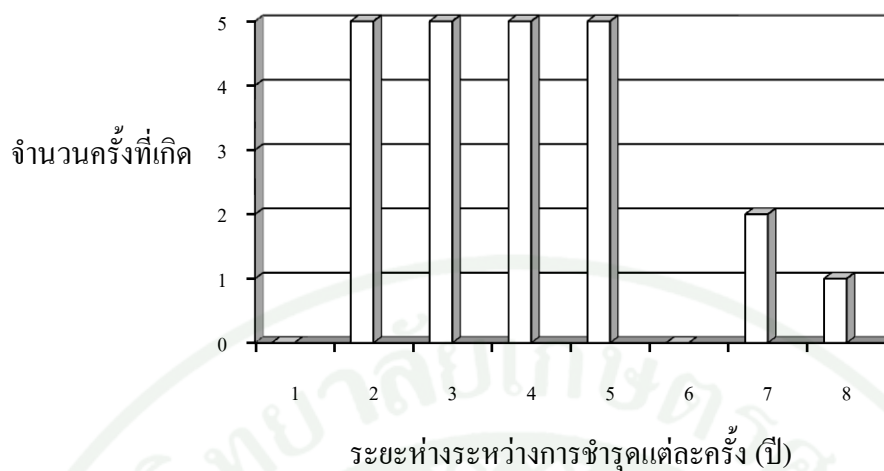
การซ่อมบำรุงคิดเป็น 23.37% จากการเข้าซ่อมบำรุงทั้งหมด 32 ครั้ง เฉลี่ยเวลาที่ใช้ในการตรวจสอบซึ่งสามารถใช้เทคนิคการถ่ายภาพรังสีความร้อนเพื่อลดเวลาในการตรวจสอบได้ 28.75 ชั่วโมงต่อครั้ง โดยหากใช้เทคนิคการถ่ายภาพรังสีความร้อนทดแทนจะลดเวลาเหลือน้อยกว่า 1 ชั่วโมงต่อครั้งของการตรวจสอบ

ตารางที่ 16 จำนวนครั้งที่เรดาร์แต่ละเครื่องชำรุดเสียหายจนต้องเข้าซ่อมบำรุงจากรายงานภายในระยะเวลา 15 ปี ระหว่างปี พ.ศ. 2535 – 2550

เรดาร์ เครื่องที่	ปีที่														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	1	-	-	-	1
2	1	-	1	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	1
3	1	-	1	-	-	1	-	-	-	-	-	-	1	-	1
4	-	1	-	-	1	-	-	-	-	1	-	-	-	1	-
5	-	-	1	-	-	-	-	1	-	-	-	-	1	-	-
6	1	-	-	1	-	-	-	-	1	-	-	-	-	1	-
7	-	1	-	-	1	-	-	-	1	-	-	-	1	-	1
8	-	-	-	1	-	-	1	-	-	-	-	1	-	1	-
รวม	3	2	3	3	2	1	2	1	2	1	1	1	3	3	4

จากการเก็บข้อมูลการชำรุดเสียหายของเรดาร์จำนวน 8 เครื่อง สามารถรวบรวมข้อมูลจำนวนครั้งที่เรดาร์แต่ละเครื่องชำรุดเสียหายจนต้องเข้าซ่อมบำรุงจากรายงาน ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2536 – 2550 เพื่อนำข้อมูลไปวิเคราะห์หาการแจกแจงของการชำรุดเสียหาย และหาค่าเวลาเฉลี่ยระหว่างการชำรุด (Mean Time Between Failure : MTBF) ตามตารางที่ 16

นำข้อมูลจากตารางที่ 16 วิเคราะห์ระยะห่างระหว่างการชำรุดแต่ละครั้งของเรดาร์จำนวน 8 เครื่อง ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2546 - 2550 แล้วนำมาเปรียบเทียบจำนวนครั้งที่เกิดระยะห่างระหว่างการชำรุดที่เท่ากันเพื่อนำไปวิเคราะห์หาเวลาเฉลี่ยระหว่างการชำรุด แสดงตามภาพที่ 10



ภาพที่ 10 เปรียบเทียบจำนวนครั้งที่เกิดของระยะห่างระหว่างการชำรุดแต่ละครั้ง

นำข้อมูลจำนวนครั้งที่เกิดเวลาระหว่างการชำรุดเสียหายแต่ละครั้ง (Time Between Failure) จากภาพที่ 10 ไปวิเคราะห์โดยโปรแกรม Arena ใช้ Input Analyzer ได้รูปแบบการแจกแจงที่เหมาะสมที่สุดคือการแจกแจงแบบเอ็กซ์โปเนนเชียล (Exponential Distribution) กำหนดสมมติฐานการทดสอบรูปการแจกแจงแบบเอ็กซ์โปเนนเชียล ดังนี้

H0: ระยะเวลาระหว่างการชำรุดเสียหายของเรดาร์แต่ละครั้ง ไม่มีรูปแบบการแจกแจงแบบเอ็กซ์โปเนนเชียล

H1: ระยะเวลาระหว่างการชำรุดเสียหายของเรดาร์แต่ละครั้ง มีรูปแบบการแจกแจงแบบเอ็กซ์โปเนนเชียล

โดยกำหนดระดับนัยสำคัญของการทดสอบสมมติฐาน เท่ากับ 0.05 ได้ผลดังนี้

Mean = 2.05

Square Error = 0.019511

Chi Square test

Number of Interval = 3

Degree of freedom = 1

Test Statistic = 2.31

Corresponding p-value = 0.143

ผลการวิเคราะห์การเข้ารับการซ่อมบำรุงของเรดาร์จำนวน 8 เครื่องโดยโปรแกรม ARENA พบว่าความถี่ของการชำรุดเสียหายเป็นการแจกแจงแบบเอ็กซ์โปเนนเชียลโดยมีค่าเฉลี่ยของการชำรุดเสียหายเท่ากับ 2.05 ปีต่อครั้งต่อเครื่อง ที่  $p\text{-value} = 0.143$  ซึ่งมากกว่าระดับนัยสำคัญ  $\alpha = 0.05$  จึงไม่สามารถปฏิเสธสมมติฐานหลัก

กำหนดให้เริ่มการใช้เทคนิคการถ่ายภาพรังสีความร้อนเพื่อซ่อมบำรุงเรดาร์ในปีที่ 15 และพิจารณาการเข้าซ่อมบำรุงในกรณีวิกฤตจากผลการวิเคราะห์การแจกแจงของการชำรุดเสียหายคือเกิดการชำรุดเสียหายจนต้องเข้าซ่อมบำรุง 2.05 ปีต่อครั้งต่อเครื่อง เนื่องจากกำหนดให้กล้องถ่ายภาพรังสีความร้อนมีอายุการใช้งานโดยไม่ต้องซ่อมบำรุง 15 ปี เมื่อนำข้อมูลจากตารางที่ 16 มาพิจารณาหาการซ่อมบำรุงครั้งต่อไปในระยะเวลา 15 ปีข้างหน้า ระหว่างปี พ.ศ. 2550 – 2565 โดยเริ่มนับต่อจากการซ่อมบำรุงครั้งสุดท้าย สามารถคาดว่าจะเป็นชำรุดเสียหายจนต้องเข้าซ่อมบำรุงนับต่อไปอีก 15 ปีจากปีที่ 15 ในปี 15 มีการชำรุดเสียหายของเรดาร์จำนวน 8 เครื่อง รวมทั้งหมด 5 ครั้ง ตามตารางที่ 17

ตารางที่ 17 จำนวนครั้งที่เรดาร์แต่ละเครื่องคาดว่าจะชำรุดเสียหายจนต้องเข้าซ่อมบำรุงนับต่อไปอีก 15 ปีจากปีที่ 15

เรดาร์ เครื่องที่	ปีที่															
	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
1	1	-	1	-	1	-	1	-	1	-	1	-	1	-	1	-
2	1	-	1	-	1	-	1	-	1	-	1	-	1	-	1	-
3	1	-	1	-	1	-	1	-	1	-	1	-	1	-	1	-
4	-	1	-	1	-	1	-	1	-	1	-	1	-	1	-	1
5	1	-	1	-	1	-	1	-	1	-	1	-	1	-	1	-
6	-	1	-	1	-	1	-	1	-	1	-	1	-	1	-	1
7	1	-	1	-	1	-	1	-	1	-	1	-	1	-	1	-
8	-	1	-	1	-	1	-	1	-	1	-	1	-	1	-	1
รวม	5	3	5	3	5	3	5	3	5	3	5	3	5	3	5	3

เมื่อพิจารณาค่าใช้จ่ายในการตรวจหาอุปกรณ์เรดาร์ที่ชำรุดที่สามารถใช้เทคนิคการถ่ายภาพรังสีความร้อนทดแทนได้ของเรดาร์จำนวน 8 เครื่องโดยใช้การตรวจหาแบบเก่า โดยใช้ช่างเรดาร์ 5 คน พิจารณาค่าแรงช่างเรดาร์โดยเลือกกรณีวิกฤตที่ไม่สามารถซ่อมบำรุงได้ทันในเวลาราชการและมีความจำเป็นเร่งด่วนที่จะต้องใช้งานเรดาร์เครื่องดังกล่าวจึงปฏิบัติงานนอกเวลาราชการ ตามระเบียบกระทรวงการคลังว่าด้วยการเบิกจ่ายเงินตอบแทนการปฏิบัติงานนอกเวลาราชการ พ.ศ.2550 กำหนดให้การปฏิบัติงานในวันหยุดราชการมีสิทธิเบิกค่าตอบแทนได้ชั่วโมงละ 60 บาทเฉพาะการปฏิบัติงานนอกเวลาราชการเต็มชั่วโมง (ราชกิจจานุเบกษา, 2550) จากสมการที่ (5) ค่าใช้จ่ายในการตรวจหาอุปกรณ์เรดาร์ที่ชำรุดที่สามารถใช้เทคนิคการถ่ายภาพรังสีความร้อนทดแทนได้ของเรดาร์จำนวน 8 เครื่องภายในระยะเวลา 15 ปีกล่าวคือ ประมาณการเกิดการชำรุดเสียหายของเรดาร์แต่ละเครื่องโดยพิจารณาต่อจากการชำรุดครั้งล่าสุดเป็นเวลา 15 ปีโดยกำหนดให้ต้องเข้าซ่อมบำรุงทุก 2.05 ปี โดยใช้วิธีหามูลค่าปัจจุบันสุทธิ (Net Present Value) ที่ปีที่ 15 ซึ่งกำหนดให้เวลาเฉลี่ยในการตรวจสอบค้นหาอุปกรณ์ที่ชำรุดเสียหายในแต่ละครั้งเท่ากับ 28.75 ชั่วโมงต่อครั้ง ประมาณค่าใช้จ่ายคงที่ตลอดการวิเคราะห์ และวิเคราะห์เป็นรายปีงบประมาณเพื่อให้สอดคล้องกับการใช้งบประมาณแผ่นดิน เมื่อเริ่มใช้เทคนิคการถ่ายภาพรังสีความร้อน กำหนดให้อัตราผลตอบแทนน้อยที่สุดที่น่าสนใจ (Minimum Attractive Rate of Return : MARR) เท่ากับ 7% โดยพิจารณาจากอัตราดอกเบี้ยเงินกู้ประเภท MLR ซึ่งธนาคารพาณิชย์เรียกเก็บจากลูกค้ารายใหญ่ชั้นดี ประเภทเงินกู้แบบมีระยะเวลา การพิจารณา MARR นี้ไม่พิจารณาภาษีเนื่องจากเป็นหน่วยงานราชการจึงไม่ต้องเสียภาษี ในการประมาณค่าใช้จ่ายในการซ่อมบำรุงเรดาร์นี้ไม่ทำการพิจารณาค่าเสียโอกาสจากการชำรุดเสียหายของเรดาร์เนื่องจากเป็นค่าใช้จ่ายที่แตกต่างกันมากในแต่ละกรณีซึ่งไม่สามารถประมาณการค่าใช้จ่ายได้อย่างถูกต้อง การประมาณการค่าใช้จ่ายในการตรวจสอบการชำรุดของเรดาร์ต่อปีตั้งแต่ปีที่ 15 ถึงปีที่ 30 ตามที่แสดงไว้ในตารางที่ 18 โดยคำนวณมูลค่าปัจจุบันสุทธิจากสมการที่ 6

$$NPV(i) = \sum_{t=0}^N \frac{R_t}{(1+i)^t} \quad (6)$$

กำหนดให้

NPV คือ มูลค่าปัจจุบันสุทธิ

t คือ ปีที่คิดกระแสเงินสด

$R_t$  คือ กระแสเงินสดสุทธิในปีที่ t

i คือ อัตราผลตอบแทนต่อปี

N คือ จำนวนปีที่นำมาพิจารณา (เท่ากับ 15 ปี)

ตารางที่ 18 ประมาณการค่าใช้จ่ายในการตรวจสอบการชำรุดของเรดาร์ต่อปีตั้งแต่ปีที่ 15 ถึงปีที่ 30

ปีที่	เวลาที่ใช้ตรวจสอบการชำรุดของเรดาร์ที่ลดลงได้ต่อปี (ชั่วโมง)	ค่าใช้จ่ายในการตรวจสอบการชำรุดของเรดาร์ที่ประหยัดได้ต่อปี (บาท)	ค่ากล้องถ่ายภาพรังสีความร้อน (บาท)
15	143.75	0	130,000
16	86.25	25,800.00	0
17	143.75	43,200.00	0
18	86.25	25,800.00	0
19	143.75	43,200.00	0
20	86.25	25,800.00	0
21	143.75	43,200.00	0
22	86.25	25,800.00	0
23	143.75	43,200.00	0
24	86.25	25,800.00	0
25	143.75	43,200.00	0
26	86.25	25,800.00	0
27	143.75	43,200.00	0
28	86.25	25,800.00	0
29	143.75	43,200.00	0
30	86.25	25,800.00	0

ตัวอย่างเช่น ในปีที่ 16 มีเรดาร์จะต้องเข้าซ่อมบำรุงจำนวน 3 เครื่อง จากเวลาเฉลี่ยที่ใช้ในการตรวจสอบซึ่งสามารถใช้เทคนิคการถ่ายภาพรังสีความร้อนเพื่อลดเวลาในการตรวจสอบได้ 28.75 ชั่วโมงต่อครั้ง คิดเป็นเวลาที่ใช้ในการตรวจสอบหาจุดที่ชำรุดเสียหายรวม 86.25 ชั่วโมง คิดเป็นค่าใช้จ่ายในการตรวจสอบ 25,800.00 บาท มูลค่าเทียบเท่าปัจจุบันจากการลดค่าใช้จ่ายในการซ่อมบำรุงตั้งแต่ปีที่ 15 ถึงปีที่ 30เท่ากับ 308,496.81 บาท เมื่อเปรียบเทียบกับค่าใช้จ่ายในการลงทุน

เพื่อใช้เทคนิคการถ่ายภาพรังสีความร้อนเป็นค่าอุปกรณืคือ กล้องถ่ายภาพรังสีความร้อน  
ราคา 130,000 บาท การใช้เทคนิคการถ่ายภาพรังสีความร้อนเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการซ่อมบำรุง  
เรดาร์ภายในเรือสามารถลดค่าใช้จ่ายในการตรวจสอบอาการชำรุดของเรดาร์ภายในระยะเวลา 15 ปี  
สำหรับเรดาร์จำนวน 8 เครื่องตั้งแต่ปี พ.ศ. 2550 – 2565 คิดเป็นมูลค่าปัจจุบันสุทธิในปี พ.ศ. 2550  
ซึ่งเป็นปีที่พิจารณาเริ่มใช้เทคนิคการถ่ายภาพรังสีความร้อน เท่ากับ 178,496.81 บาท



## สรุปและข้อเสนอแนะ

### สรุป

จากการศึกษาพบว่าเทคนิค การถ่ายภาพรังสีความร้อนสามารถค้นหาอุปกรณ์เรดาร์ ภายในเรือรบที่ชำรุดเสียหายได้ใน 3 ระบบคือ ระบบภาคส่ง, ระบบภาครับ และส่วนแสดงผล ซึ่ง พิจารณาจากอุปกรณ์ที่มีอุณหภูมิสูงกว่าปกติ โดยสร้างแบบจำลองเพื่อพยากรณ์อุณหภูมิสูงสุดของ อุปกรณ์เรดาร์โดยใช้วิธีวิเคราะห์ความถดถอย (Regression Analysis) เพื่อใช้เป็นอุณหภูมิมาตรฐาน ในการเปรียบเทียบกับอุปกรณ์เรดาร์ที่ต้องการตรวจสอบเพื่อค้นหาอุปกรณ์ที่ชำรุดเสียหาย สำหรับการซ่อมบำรุงเชิงตามสภาพ ปัจจัยที่มีผลต่อการอุณหภูมิของอุปกรณ์สูงสุดของอุปกรณ์เรดาร์ ภายในเรือคือ อายุการใช้งานของเรดาร์, ระยะเวลาตั้งแต่เริ่มเดินเครื่องจนถึงการวัดอุณหภูมิ และ อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม สำหรับการซ่อมบำรุงเรดาร์ภายในเรือรบกรณีศึกษา จำนวน 8 เครื่อง พิจารณา ระยะเวลาของโครงการ 15 ปี การใช้เทคนิคการถ่ายภาพรังสีความร้อนเพื่อซ่อมบำรุงเรดาร์เชิงตาม สภาพเมื่อเปรียบเทียบกับ การซ่อมบำรุงแก้ไขสามารถประหยัดค่าใช้จ่ายเป็นมูลค่าปัจจุบันสุทธิ 178,496.81 บาท เทคนิคการถ่ายภาพรังสีความร้อนสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการซ่อมบำรุงเรดาร์ ภายในเรือรบจากเดิมที่ใช้การซ่อมบำรุงแก้ไข โดยช่วยลดเวลาในการค้นหาอุปกรณ์ที่ชำรุด และลด ความเสี่ยงอันตรายจากการสัมผัสอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงของช่างซ่อมบำรุง

### ข้อเสนอแนะ

สำหรับการศึกษาวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่าการใช้เทคนิคการถ่ายภาพรังสีความร้อนสามารถ ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการซ่อมบำรุงเรดาร์ภายในเรือ โดยช่วยลดเวลาและค่าใช้จ่ายในการ ตรวจสอบหาอุปกรณ์ที่ชำรุดเสียหาย การนำแบบจำลองและผลไปใช้งานจริงนั้นจะต้อง ทำการศึกษาเพิ่มเติมดังนี้

1. แบบจำลองที่ได้จากการศึกษานี้สามารถพยากรณ์อุณหภูมิส่วนประกอบของเรดาร์ เฉพาะแบบที่ทำการศึกษานั้น หากนำไปใช้กับเรดาร์แบบอื่นจำเป็นต้องมีการเก็บข้อมูลและ สร้างแบบจำลองใหม่

2. กล้องถ่ายภาพรังสีความร้อนที่ใช้ในการศึกษาเป็นชนิดที่ปรับค่าการแผ่รังสีอัตโนมัติ การใช้กล้องที่ไม่สามารถปรับค่าการแผ่รังสีอัตโนมัติจำเป็นต้องปรับค่าการแผ่รังสีให้เหมาะสมกับวัสดุที่ทำการวัดเพื่อให้ได้ค่าอุณหภูมิที่ถูกต้องแม่นยำ

3. การใช้เทคนิคการถ่ายภาพรังสีความร้อนเพื่อค้นหาอุปกรณ์ที่ชำรุดเสียหายเป็นเพียงการตรวจสอบเบื้องต้นเพื่อลดเวลาในการค้นหา แต่การยืนยันผลจำเป็นต้องใช้การวัดโดยเครื่องมือทางไฟฟ้าเสมอ เพราะอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นนั้นไม่จำเป็นต้องชำรุดเสียหายเสมอไป

4. การศึกษานี้มุ่งเน้นที่การค้นหาอุปกรณ์ที่ชำรุดเสียหายและทำให้อุณหภูมิเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นกว่าปกติ การชำรุดเสียหายที่ทำให้อุณหภูมิลดลงกว่าปกตินั้นไม่อยู่ในขอบเขตการศึกษา ควรจะทำการศึกษาเพิ่มเติมในอนาคต

5. การซ่อมบำรุงเรดาร์ในอนาคต มีแนวทางที่จะใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อค้นหาการชำรุดเสียหาย ซึ่งแสดงผลในรูปแบบ Fault Code เพื่อให้ช่างซ่อมบำรุงนำไปแปลความหมายจากคู่มือที่บริษัทผู้ผลิตจัดทำ ซึ่งสามารถลดเวลาในการค้นหาอุปกรณ์ที่ชำรุดเสียหาย

## เอกสารและสิ่งอ้างอิง

ราชกิจจานุเบกษา. 2550. ฉบับกฤษฎีกาเล่ม 124 ตอนพิเศษ 11 ง, หน้า 3.

คำรณ พิสนเทศยุทธการ, น.ต. เอกสารอ้างอิงประกอบการบรรยาย เรื่อง สงครามอิเล็กทรอนิกส์. กองการฝึก กองเรือยุทธการ, ชลบุรี

Chen, Z., G. Cao and Y. Dun. 1996. Radar equipment integrated maintenance platform, pp.550-553. *In CIE International Conference*. 8-10 October 1996, International Commission on Illumination, Beijing, China.

Connolly, C. 2005. The use of infrared imaging in industry. *Assembly Automation* 25 (3): 191 -195.

Edwards, D. J., G. D. Holt and F. C. Harris. 1998. Predictive maintenance techniques and their relevance to construction plant. *Journal of Quality in Maintenance Engineering* 4 (1): 25-37.

Epperly, R.A., G.E. Heberlein and L.G. Eads. 1997. A tool for reliability and safety: predict and prevent equipment failures with thermography, pp.59-68. *In Petroleum and Chemical Industry Conference 44<sup>th</sup>*. The Institute of Electrical and Electronics Engineers Incorporated Industry Applications Society, Alberta, Canada.

Hoffer, K. O., L. D. Robertson and T. W. Shaw. 1986. Electronic module design evaluation by thermal imaging analysis. *Naval Engineers Journal* 98 (3): 151-156.

International Maritime Organization. 2006. *International Convention for the Safety of Life at Sea*, 1974, as Amended., London, United Kingdom.

- Lindquist, T. M., L. Bertling and R. Eriksson. 2005. Estimation of disconnector contact condition for modeling the effect of maintenance and ageing. *In IEEE PowerTech Conference*. 27-23 June 2005, The Institute of Electrical and Electronics Engineers, St. Petersburg, Russia.
- McMenamin, D. P. 1990. Thermographic analysis of the central office power plant : a tool for maintenance engineer, pp. 487-489. *In Telecommunication Energy Conference 12<sup>th</sup>*. Institute of Electrical and Electronics Engineers, Orlando, USA.
- Murh, M. M., S. Pack, S. Jaufer and H. Lugschitz. 2006. Thermography of aged contacts of high voltage equipment. **Elektrotechnik und Informationstechnik**. 123 (12): 537-543.
- Oyebisi, T.O. 2000. On reliability and maintenance management of electronic equipment in the tropics. **Technovation** 20 (9): 517-522.
- Parida, A. and U. Kumar. 2006. Maintenance performance measurement (MPM) : issues and challenges. **Journal of Quality in Maintenance Engineering** 12 (3): 239-251.
- Raouf, A. and M. Ben-Daya. 1995. Total maintenance management : a systematic approach. **Journal of Quality in Maintenance Engineering** 1 (1): 6-14.
- Trimm, M. 2003. An overview of nondestructive evaluation methods. **Journal of Failure Analysis and Prevention** 3 (3): 17-31.
- Viles, E., D. Puente, M. J. Alvarez and F. Alonso. 2007. Improving the corrective maintenance of an electronic system for trains. **Journal of Quality in Maintenance Engineering** 13 (1): 75-87.
- Yang, J., M. Behnia and G. Morrison. 2002. Infrared thermography for true temperature measurement of the main board in personal computer. **Journal of Thermal Science** 11 (4): 331-336.

Zhou X., L. Xi and J. Lee. 2007. Reliability-centered predictive maintenance scheduling for a continuously monitored system subject to degradation. **Reliability Engineering and System Safety** 92 (4): 530 – 534.





ภาคผนวก

**ตารางผนวกที่ 1** การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ด้วยวิธีวิเคราะห์ความถดถอยเพื่อสร้างแบบจำลองเพื่อพยากรณ์อุณหภูมิสูงสุดของภาคส่งเรดาร์ด้วยโปรแกรมมินิแทบ

Term	Effect	Coef	SE Coef	T	P
Constant		43.3003	0.04374	989.99	0.000
$C_{T1}$	5.6627	2.8313	0.06312	44.86	0.000
$C_{T2}$	4.0893	2.0447	0.05357	38.17	0.000
$C_{T3}$	5.9429	2.9714	0.05357	55.47	0.000
$C_{T1} * C_{T2}$	-0.1970	-0.0985	0.07730	-1.27	0.207
$C_{T1} * C_{T3}$	0.2350	0.1175	0.07730	1.52	0.133
$C_{T2} * C_{T3}$	0.0114	0.0057	0.06561	0.09	0.931
$C_{T1} * C_{T2} * C_{T3}$	-0.1702	-0.0851	0.09468	-0.90	0.372

**ตารางผนวกที่ 2** การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ด้วยวิธีวิเคราะห์ความถดถอยเพื่อสร้างแบบจำลองเพื่อพยากรณ์อุณหภูมิสูงสุดของภาครับเรดาร์ด้วยโปรแกรมมินิแทบ

Term	Effect	Coef	SE Coef	T	P
Constant		40.9633	0.05404	758.02	0.000
$C_{R1}$	5.2892	2.6446	0.07894	33.50	0.000
$C_{R2}$	4.4414	2.2207	0.06618	33.55	0.000
$C_{R3}$	6.8499	3.4249	0.06618	51.75	0.000
$C_{R1} * C_{R2}$	0.2509	0.1254	0.09668	1.30	0.199
$C_{R1} * C_{R3}$	0.1040	0.0520	0.09668	0.54	0.592
$C_{R2} * C_{R3}$	-0.0745	-0.0372	0.08106	-0.46	0.647
$C_{R1} * C_{R2} * C_{R3}$	-0.3989	-0.1995	0.11841	-1.68	0.097

**ตารางผนวกที่ 3** การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ด้วยวิธีวิเคราะห์ความถดถอยเพื่อสร้างแบบจำลองเพื่อพยากรณ์อุณหภูมิสูงสุดของส่วนแสดงผลเรดาร์ด้วยโปรแกรมมินิแทบ

Term	Effect	Coef	SE Coef	T	P
Constant		37.9004	0.05978	634.00	0.000
$C_{D1}$	4.8584	2.4292	0.07012	34.65	0.000
$C_{D2}$	4.4033	2.2017	0.07321	30.07	0.000
$C_{D3}$	6.7947	3.3973	0.07321	46.40	0.000
$C_{D1} * C_{D2}$	0.2638	0.1319	0.08587	1.54	0.129
$C_{D1} * C_{D3}$	0.2042	0.1021	0.08587	1.19	0.239
$C_{D2} * C_{D3}$	0.0317	0.0158	0.08967	0.18	0.860
$C_{R1} * C_{R2} * C_{R3}$	-0.2881	-0.1440	0.10517	-1.37	0.176

## ประวัติการศึกษาและการทำงาน

ชื่อ	เรือเอก ทักษกร ตัณฑวุฑโฒ
เกิดวันที่	4 พฤศจิกายน 2529
สถานที่เกิด	จังหวัดกรุงเทพมหานคร
ประวัติการศึกษา	วศ.บ. (วิศวกรรมไฟฟ้า) โรงเรียนนายเรือ
ตำแหน่งปัจจุบัน	นายทหารควบคุมการบินสกัดกั้น
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	ร.ล. จักรีนฤเบศร กองเรือบรรทุกเฮลิคอปเตอร์ กองเรือยุทธการ กองทัพเรือ
ผลงานดีเด่นและ/หรือรางวัลทางวิชาการ	-
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	-