

การตรวจสอบอุณหภูมิพื้นผิวเพื่อบ่งชี้สภาพในมอเตอร์เหนี่ยวนำ

SURFACE TEMPERATURE MONITORING FOR INDICATING CONDITION
OF INDUCTION MOTOR



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโท สาขาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมยานยนต์

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2558

KMITL-2015-EN-M-060-168

การตรวจสอบอุณหภูมิที่พื้นผิวเพื่อบ่งชี้สภาพในมอเตอร์เหนี่ยวนำ

SURFACE TEMPERATURE MONITORING FOR INDICATING CONDITION
OF INDUCTION MOTOR



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมการวัดคุม

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2558

KMITL-2015-EN-M-060-168

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

SURFACE TEMPERATURE MONITORING FOR INDICATING CONDITION
OF INDUCTION MOTOR

NAPAT WARARATKUL



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN INSTRUMENTATION ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2015

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ KMITL-2015-EN-M-060-168
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2015

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

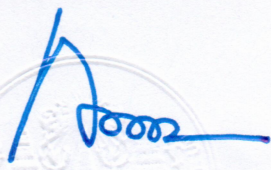
หัวข้อวิทยานิพนธ์ การตรวจสอบอุณหภูมิที่พื้นผิวเพื่อบ่งชี้สภาพในมอเตอร์เหนี่ยวนำ
Thesis Title Surface Temperature Monitoring for Indicating Condition of Induction Motor
นักศึกษา นางสาวณภัทร์ วรารัตน์กุล
รหัสประจำตัว 54611616
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา วิศวกรรมการวัดคุม
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รศ.ดร.ทวีพล ชื้อสัตย์
หมายเลขวิทยานิพนธ์ KMITL-2015-EN-M-060-168

| คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ | | ลายมือชื่อ |
|--------------------------|---------------|--|
| รศ.ดร.วิทยา | ทิพย์สุวรรณพร |  |
| รศ.ดร.นวกัทธา | หนูนา |  |
| ดร.ยุทธพงศ์ | ทัฬหะ |  |
| ดร.เกียรติศักดิ์ | รุ่งพระแสง |  |
| รศ.ดร.ทวีพล | ชื้อสัตย์ |  |

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ วันพุธที่ 15 กรกฎาคม พ.ศ. 2558 เวลา 09.00-11.00 น.
สถานที่สอบ ณ อาคารเฉลิมพระเกียรติใหม่ ห้อง HM-303

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
KING MONKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว


(รองศาสตราจารย์ ดร. คมสัน มาลีสี)

คณบดี คณะวิศวกรรมศาสตร์

วันที่ 15 กรกฎาคม พ.ศ. 2558

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตนี้นำไปเผยแพร่บนสื่อออนไลน์
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

| | |
|-----------------------------|---|
| หัวข้อวิทยานิพนธ์ | การตรวจสอบอุณหภูมิที่พื้นผิวเพื่อบ่งชี้สภาพในมอเตอร์เหนี่ยวนำ |
| นักศึกษา | นางสาวณภัทร์ วรราชต์กุล |
| รหัสประจำตัว | 54611616 |
| ปริญญา | วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต |
| สาขาวิชา | วิศวกรรมการวัดคุม |
| พ.ศ. | 2558 |
| อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ | รศ. ดร.ทวีพล ชี้อสัตย์ |

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอวิธีการตรวจสอบสภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำโดยใช้การวัดอุณหภูมิพื้นผิวของโครงมอเตอร์เหนี่ยวนำและประยุกต์ใช้สมการอุณหภูมิในเครื่องกลไฟฟ้าและการส่งถ่ายความร้อนเพื่อนำไปหาค่าอุณหภูมิภายในของมอเตอร์ ในการทดลองแรงดันไม่สมดุลจะถูกจ่ายให้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำและมีการปรับค่าแตกต่างกันเพื่อทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิภายในมอเตอร์ ในการวัดอุณหภูมิที่พื้นผิวของโครงมอเตอร์จะใช้ อุปกรณ์การวัดอุณหภูมิแบบอินฟราเรด ยี่ห้อ Raytek MI รุ่น RAYMID10LT และกล้องถ่ายภาพความร้อนยี่ห้อ FLIR รุ่น FLIR315 เป็นตัวตรวจวัดและส่งสัญญาณค่าอุณหภูมิไปยังโปรแกรมคำนวณและบันทึกค่าจากการทดลอง โดยโปรแกรมได้ถูกออกแบบโดยใช้ Visual Basic Version 2012 การพิสูจน์แนวคิดอาศัยการวัดอุณหภูมิด้วยดิจิตอลเทอร์โมมิเตอร์เพื่อเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการประเมิน ข้อดีของวิธีการนี้เครื่องจักรไม่ต้องหยุดทำงานหรือถอดออกจากกระบวนการเมื่อต้องการวัดการสูญเสียเพื่อซ่อมบำรุงเบื้องต้น

| | |
|-----------------------|---|
| Thesis Title | SURFACE TEMPERATURE MONITORING FOR INDICATING CONDITION OF INDUCTION MOTOR |
| Student | Miss Napat Wararatkul |
| Student ID. | 54611616 |
| Degree | Master of Engineering |
| Program | Instrumentation Engineering |
| Year | 2015 |
| Thesis Advisor | Assoc. Prof. Dr. Taweepol Suesut |

ABSTRACT

This thesis purposes the induction motor condition monitoring method using the motor frame surface temperature measurement technique and applies electrical machines temperature and heat transfer equation to determine the internal temperature of motor. For the experiment, the voltage unbalance was supplied and varied to the induction motor to simulate the temperature change inside the induction motor. The temperature at the induction motor frame surface was measured by infrared temperature sensor brand Raytek MI, model RAYMID10LT and infrared camera brand FLIR model FLIR315. The software has been developed using the Visual Basic 2012 to calculate and record the data received from the infrared sensor and infrared camera. Concept proving applied temperature measurement using the digital thermometer to compare with result from estimation. The main advantage of this method is the machines are not required to stop or removed from their process to measure their power losses to evaluate for maintenance.

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสำนักนโยบายและแผนพลังงาน(สนพ.) กระทรวงพลังงาน กองทุนส่งเสริมการอนุรักษ์พลังงานแผนเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงาน ที่ให้ทุนอุดหนุนวิจัยปี 2554 เพื่อนำมาใช้เป็นค่าใช้จ่ายในการสร้างระบบกระวัดและค่าวัสดุอุปกรณ์ และค่าใช้สอยในส่วนต่างๆที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้

ขอกราบขอบพระคุณ รศ.ดร. ทวีพล ชื่อสัตย์ อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมการวัดคุม ที่คอยช่วยเหลือแนะนำตลอดจนให้คำปรึกษาในการทำวิทยานิพนธ์นี้จนสำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี ขอกราบขอบพระคุณ ผศ. เชื้อ นกอยู่ อาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมการวัดคุม ที่เอื้อเฟื้ออุปกรณ์และสถานที่ทำการทดลอง และให้คำแนะนำสำหรับการทดลอง ขอขอบพระคุณอาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมการวัดคุมทุกท่านที่ได้ให้ความรู้ในการศึกษา รวมทั้งขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ของภาควิชาวิศวกรรมการวัดคุมและของบัณฑิตคณะวิศวกรรมศาสตร์ทุกท่าน

ขอขอบคุณ คุณรัชชัย เกษมวราพัชร และคุณวัศนัย ใจทน ที่ให้คำปรึกษาทางด้านการออกแบบโปรแกรมและช่วยเหลือตลอดช่วงระยะเวลาการทดลอง จนกระทั่งการทดลองสำเร็จด้วยดี ขอขอบคุณ คุณเมธินี สงไทย คุณวรวิช พรพระ คุณพรพิรุณ มงคลแกลง คุณศิวกร สุขประเสริฐชัย และ ดร.ภาณุพล โขลนกระโทก ที่คอยให้ความช่วยเหลือทั้งทางด้านการเรียนและการทำธุรกรรมต่างๆตลอดระยะเวลาการศึกษา

ขอกราบขอบพระคุณ คุณแม่ คุณตา และญาติพี่น้อง รวมทั้งเพื่อนร่วมชั้นเรียนและเพื่อนร่วมงานทุกคนที่คอยให้กำลังใจ และให้ความช่วยเหลือในส่วนของการเรียนและเรื่องส่วนตัว จนทำให้ผู้เขียนสามารถประสบความสำเร็จจนมาถึงทุกวันนี้ได้

คุณค่าและประโยชน์อันพึงมาจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบแด่ผู้มีพระคุณทุกท่านและประเทศชาติเพื่องานวิจัยทางด้านพลังงานสืบไป

ณภัทร์ วรราชต์กุล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

| | หน้า |
|--|------|
| บทคัดย่อภาษาไทย | I |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ | II |
| กิตติกรรมประกาศ | III |
| สารบัญ | IV |
| สารบัญตาราง | VI |
| สารบัญรูป | VII |
| | |
| บทที่ 1 บทนำ | 1 |
| 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา | 1 |
| 1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการวิจัย | 2 |
| 1.3 ขอบเขตของการวิจัย | 2 |
| 1.4 ขั้นตอนดำเนินงานวิจัย..... | 2 |
| 1.5 ประโยชน์ที่ได้รับ | 3 |
| 1.6 รายละเอียดของวิทยานิพนธ์ | 3 |
| | |
| บทที่ 2 หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง | 4 |
| 2.1 มอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส | 4 |
| 2.2 การวิเคราะห์ความผิดปกติของมอเตอร์..... | 6 |
| 2.3 การวัดอุณหภูมิด้วยเครื่องวัดอุณหภูมิแบบอินฟราเรด..... | 18 |
| 2.4 ทฤษฎีการถ่ายเทความร้อน..... | 22 |
| | |
| บทที่ 3 การออกแบบและการดำเนินงาน | 32 |
| 3.1 การวิเคราะห์ความผิดปกติของมอเตอร์โดยการวิเคราะห์อุณหภูมิ | 32 |
| 3.2 ชุดอุปกรณ์และตัวอย่างที่ใช้ในการทดลอง..... | 34 |
| 3.3 สรุปขั้นตอนการทดลอง..... | 44 |
| | |
| บทที่ 4 การทดลองและการวิเคราะห์การทดลอง | 45 |
| 4.1 การเปรียบเทียบผลกระทบที่มีต่อการทำงานของมอเตอร์ที่ภาวะแรงดันไม่สมดุล | 45 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต่อ IV อ่างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

| | หน้า |
|---|------|
| บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ | 53 |
| 5.1 สรุปผลการวิจัย | 53 |
| 5.2 ข้อเสนอแนะในการวิจัยต่อ | 53 |
| เอกสารอ้างอิง | 54 |
| ภาคผนวก ก ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการทำวิทยานิพนธ์และได้รับการตีพิมพ์ | 56 |
| ประวัติผู้เขียน | 64 |



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

| ตารางที่ | หน้า |
|--|------|
| 2.1 คลาสของฉนวนความร้อนตามมาตรฐาน IEC 85 | 10 |
| 2.2 ค่า Emissivity ของผิววัสดุ..... | 19 |
| 2.3 สัมประสิทธิ์การพาความร้อนของของไหลบางชนิด..... | 24 |
| 4.1 ผลกระทบต่อความเร็วรอบและแรงบิดของมอเตอร์เมื่อแรงดันไม่สมดุล..... | 45 |
| 4.2 กำลังสูญเสียของมอเตอร์ที่วัดได้จากกำลังทางกลที่มอเตอร์จ่ายให้ภาระ..... | 47 |



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

| รูปที่ | หน้า |
|--|------|
| 2.1 โครงมอเตอร์..... | 5 |
| 2.2 แกนเหล็กสเตเตอร์และขดลวดสเตเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส..... | 5 |
| 2.3 ฝาปิดหัวท้ายโครงมอเตอร์..... | 5 |
| 2.4 โรเตอร์กรงกระรอก..... | 6 |
| 2.5 โรเตอร์แบบพันขดลวด..... | 6 |
| 2.6 ตำแหน่งของการวัดอุณหภูมิมอเตอร์..... | 11 |
| 2.7 ลักษณะโครงสร้างของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบทรงกระบอก..... | 12 |
| 2.8 ลักษณะโครงสร้างและขดลวดstatorของมอเตอร์ไฟฟ้า..... | 13 |
| 2.9 แสดงการสูญเสียกำลังในมอเตอร์เหนี่ยวนำ..... | 14 |
| 2.10 แผนภูมิการส่งผ่านกำลังงานไฟฟ้าของมอเตอร์เหนี่ยวนำ..... | 14 |
| 2.11 ระบบการวัดอุณหภูมิโดยอาศัยการแผ่รังสีอินฟราเรดของวัตถุ..... | 20 |
| 2.12 เทอร์โมมิเตอร์ชนิดอินฟราเรด..... | 20 |
| 2.13 รูปแบบการถ่ายเทความร้อนแบบต่างๆ..... | 22 |
| 2.14 การถ่ายโอนความร้อนจากพื้นผิวร้อนไปสู่ของไหลในสิ่งแวดล้อมภายนอก..... | 23 |
| 2.15 การพัฒนาชั้นขอบเขตในการถ่ายเทความร้อนโดยการพาความร้อนแบบบังคับ..... | 24 |
| 2.16 ทรงกระบอกกลวงซึ่งมีการพาความร้อนที่ผิว..... | 27 |
| 2.17 การกระจายอุณหภูมิในทรงกระบอกหลายชั้น..... | 28 |
| 2.18 การใช้ครีระบายความร้อนเพื่อเพิ่มอัตราการระบายความร้อนจากผนัง..... | 29 |
| 2.19 ลักษณะการกระจายความร้อนแบบครี..... | 29 |
| 2.20 การใช้ครีระบายความร้อนเพื่อเพิ่มอัตราการระบายความร้อนจากผนัง..... | 30 |
| 2.21 สเปคตรัมของรังสีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า..... | 31 |
| 3.1 อุปกรณ์การทดลอง..... | 34 |
| 3.2 Induction motor ที่ใช้ในการทดลอง..... | 35 |
| 3.3 แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ..... | 35 |
| 3.4 ตัวต้านทานปรับค่าได้สำหรับสร้างแรงดันไม่สมดุล..... | 36 |
| 3.5 DC Generator สำหรับเป็นโหลดให้กับมอเตอร์..... | 36 |
| 3.6 Power supply สำหรับ DC Generator..... | 36 |
| 3.7 Torque meter และ speed meter..... | 37 |
| 3.8 3 Phase multimeter..... | 37 |
| 3.9 ชุด Infrared Sensor และการติดตั้งอุปกรณ์..... | 38 |
| 3.10 การติดตั้งอุปกรณ์ Infrared Camera..... | 38 |
| 3.11 การติดตั้งอุปกรณ์ Infrared Camera เชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์..... | 38 |
| 3.12 การติดตั้งอุปกรณ์เทอร์โมคัปเปิลแบบสัมผัสภายในมอเตอร์..... | 39 |
| 3.13 การต่อวงจรแรงดันไม่สมดุลวัดอุณหภูมิโดย IR Sensor..... | 39 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และตี VII อ่างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

| รูปที่ | หน้า |
|---|------|
| 3.14 โปรแกรมคำนวณในรูปแบบ HMI ที่ออกแบบ..... | 41 |
| 3.15 การต่อวงจรแรงดันไม่สมดุลวัดอุณหภูมิโดย Infrared camera..... | 41 |
| 3.16 แสดงการต่อวงจรแบบปกติ..... | 42 |
| 3.17 แสดงการต่อวงจรแบบUnbalance Voltage ประมาณ7%..... | 42 |
| 3.17 แสดงการต่อวงจรแบบUnbalance Voltage ประมาณ9%..... | 43 |
| 3.17 แสดงการต่อวงจรแบบUnbalance Voltage ประมาณ13%..... | 43 |
| 4.1 กราฟแสดงอุณหภูมิที่เกิดขึ้นที่มอเตอร์ขณะแรงดันไม่สมดุล 0.79%..... | 47 |
| 4.2 กราฟแสดงอุณหภูมิที่เกิดขึ้นที่มอเตอร์ขณะแรงดันไม่สมดุล 0.89%..... | 48 |
| 4.3 กราฟแสดงอุณหภูมิที่เกิดขึ้นที่มอเตอร์ขณะแรงดันไม่สมดุล 7.26%..... | 49 |
| 4.4 กราฟแสดงอุณหภูมิที่เกิดขึ้นที่มอเตอร์ขณะแรงดันไม่สมดุล 7.67%..... | 49 |
| 4.5 กราฟแสดงอุณหภูมิที่เกิดขึ้นที่มอเตอร์ขณะแรงดันไม่สมดุล 9.37%..... | 50 |
| 4.6 กราฟแสดงอุณหภูมิที่เกิดขึ้นที่มอเตอร์ขณะแรงดันไม่สมดุล 9.67%..... | 50 |
| 4.7 กราฟแสดงอุณหภูมิที่เกิดขึ้นที่มอเตอร์ขณะแรงดันไม่สมดุล 13.46%..... | 51 |
| 4.8 กราฟแสดงอุณหภูมิที่เกิดขึ้นที่มอเตอร์ขณะแรงดันไม่สมดุล 13.57%..... | 51 |
| 4.9 กราฟแสดงอุณหภูมิที่เกิดขึ้นที่เปอร์เซ็นต์แรงดันไม่สมดุลต่างกัน..... | 52 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และ VIII อ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

เนื่องจากในปัจจุบันการใช้พลังงานในโรงงานอุตสาหกรรมมีอัตราการใช้พลังงานไฟฟ้าที่สูงขึ้นและมีการใช้พลังงานไฟฟ้าในด้านต่างๆกันไปโดยที่การใช้พลังงานไฟฟ้าทั้ง 3 เฟส ในด้านต่างๆ ส่งผลให้ในโรงงานอุตสาหกรรมมีความแตกต่างของแรงดันไฟฟ้าระหว่างเฟสทั้ง 3 มีผลทำให้เกิดความไม่สมดุลระหว่างเฟสทั้งกระแสและแรงดันภายในโรงงาน ซึ่งความไม่สมดุลนี้จะส่งผลกระทบต่อระบบไฟฟ้า เช่น เกิดการสูญเสียด้านพลังงานไฟฟ้าในสายที่มีกระแสไฟฟ้าไหลเพิ่มขึ้น สายศูนย์มีกระแสไฟฟ้าไหล[1] ซึ่งในโรงงานอุตสาหกรรมมอเตอร์นับเป็นอุปกรณ์ที่สำคัญสำหรับเครื่องจักรต่างๆ เนื่องจากการทำหน้าที่เป็นตัวต้นกำลัง[2],[3] โดยแปลงพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานกลเพื่อขับโหลดต่างๆ ซึ่งการสูญเสียด้านพลังงานไฟฟ้าในสายที่มีกระแสไฟฟ้าไหลเพิ่มขึ้นส่งผลต่อการใช้กระแสไฟฟ้าในขดลวดโรเตอร์และสเตเตอร์ และผลของการสูญเสียพลังงานไฟฟ้าจากความสัมพันธ์ของกระแสและความต้านทานไฟฟ้า จะทำให้เกิดความร้อนที่ฉนวนและทำให้มีผลต่ออายุการใช้งานของมอเตอร์โดยตรง และการเกิดแรงดันไม่สมดุลก็จะทำให้แรงบิดของมอเตอร์ไฟฟ้าลดลงและความเร็วของโหลดเต็มพิกัดลดลง[1] ซึ่งโดยปกติการประเมินประสิทธิภาพมอเตอร์ทำได้หลายวิธี[4] ในบทความนี้จะขอเน้นถึงการตรวจวิเคราะห์ในขณะที่มอเตอร์ทำงาน โดยไม่ต้องหยุดมอเตอร์เพื่อทำการตรวจสอบวิเคราะห์จากข้อมูลจริง ขณะทำงานจริง เช่น อุณหภูมิขณะทำงาน หรือ กระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นที่โหลดจริงในช่วงนั้นๆ สำหรับนำไปใช้ประโยชน์ในเชิงอุตสาหกรรม เพื่อประเมินสภาพปัจจุบันของมอเตอร์ได้ตรงความเป็นจริงมากที่สุด และเพื่อเป็นประโยชน์ในเชิงวางแผนบำรุงรักษาได้อย่างเหมาะสม

ทั้งนี้การหาอุณหภูมิสเตเตอร์และโรเตอร์จะใช้ทฤษฎี 2 ทฤษฎีที่สำคัญคือ ทฤษฎีการวัดอุณหภูมิด้วยตัวตรวจจับอุณหภูมิ และทฤษฎีการจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับโดยจะเป็นการทดสอบแตกต่างกันภายใต้เงื่อนไขสถานะไม่สมดุล[5],[6] ที่อุณหภูมิสเตเตอร์ซึ่งสามารถประมาณอยู่บนพื้นฐานการวัดค่าความต้านทานสเตเตอร์โดยมีทฤษฎีรองรับคือ การวัดความร้อนโดยตรงกับมอเตอร์โดยติดตั้งตัวตรวจจับอุณหภูมิในส่วนขดลวดสเตเตอร์และโรเตอร์[7],[8] ซึ่งในงานวิจัยเกี่ยวกับการเสื่อมสภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำภายใต้สถานะที่แรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลได้รับการรายงานในงานวิจัยตั้งแต่ปี 1959 [5],[6] วิธีการที่ถูกต้องที่สุดสำหรับแก้ไขภาวะกำลังสูญเสียภายใต้เงื่อนไขแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล คือ การลดภาระมอเตอร์เหนี่ยวนำที่เพิ่มขึ้นให้เป็นปกติ ซึ่งความซับซ้อนของพฤติกรรมความร้อนของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่แรงดันไฟฟ้าอยู่ในสถานะไม่สมดุลทำให้มีการจำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องมีการพัฒนาเรื่องการวัดอุณหภูมิภายในมอเตอร์[9],[10]

งานวิจัยฉบับนี้จะทำการตรวจสอบอุณหภูมิของมอเตอร์เหนี่ยวนำสำหรับการวิเคราะห์กำลังไฟฟ้าสูญเสียเนื่องจากภาวะแรงดันไม่สมดุลโดยใช้ผลของความร้อนที่บริเวณพื้นผิวของมอเตอร์ ซึ่งการสูญเสียในขดลวดของมอเตอร์ถือว่ามีค่ามากที่สุดในรูปของความร้อน[10] โดยใช้ทฤษฎีการนำความร้อนของวัตถุ การพาความร้อน และการแผ่รังสีความร้อน มาใช้ในขั้นตอนการวัดและประมาณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าอุณหภูมิ เพื่อดูผลของกำลังสูญเสียในมอเตอร์ทางความร้อนขณะที่แรงดันไม่สมดุลจากแหล่งจ่าย เพื่อประเมินค่าการใช้งานมอเตอร์และเพื่อการบำรุงรักษาเชิงป้องกัน

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการวิจัย

งานวิจัยนี้นำเสนอการตรวจวัดและติดตามอุณหภูมิของมอเตอร์ที่ใช้ในโรงงานอุตสาหกรรม โดยใช้มอเตอร์เหนี่ยวนำแบบกรงกระรอก กำลังไฟฟ้า 1 กิโลวัตต์ แรงดัน 380 โวลต์แบบสตาร์ ความถี่ 50 เฮิร์ต อนุชนคลาซ B แฟกเตอร์ 0.81 และใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงเป็นโหลดสำหรับมอเตอร์ โดยมีตัวตรวจจับแรงบิดและความเร็วมอเตอร์ติดอยู่ที่โหลด โดย

1. เสนอวิธีการใช้ประสิทธิภาพการนำความร้อนและสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของวัสดุโดยการนำมาประยุกต์ใช้หาความต้านทานสำหรับบริเวณพื้นผิวของเฟรมมอเตอร์โดยเพื่อประมาณค่ากำลังสูญเสียที่เกิดจากการสูญเสียทางความร้อนภายในมอเตอร์โดยใช้ตัวตรวจจับอุณหภูมิแบบอินฟราเรด
2. ศึกษาผลกระทบเนื่องจากแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล คุณภาพของไฟฟ้าและความผิดปกติของมอเตอร์เหนี่ยวนำเมื่อเกิดแรงดันไม่สมดุล
3. ประมาณค่ากำลังสูญเสียในมอเตอร์และค่าอุณหภูมิที่เกิดขึ้นภายในมอเตอร์โดยเปรียบเทียบผลที่ได้จากการคำนวณและผลการทดลองจากการวัดอุณหภูมิภายในที่บริเวณขดลวดสเตเตอร์เพื่อสรุปเป็นงานวิจัยการบ่งชี้สภาวะภายในมอเตอร์จากการวัดค่าอุณหภูมิภายนอก

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1. ออกแบบวิธีการประมาณค่ากำลังสูญเสียในมอเตอร์เหนี่ยวนำและอุณหภูมิที่เกิดขึ้นภายในมอเตอร์โดยใช้หลักการคุณสมบัติการนำความร้อนแบบมิติเดียวตามรัศมีของครีป
2. ออกแบบโปรแกรมสำหรับคำนวณค่าอุณหภูมิและค่ากำลังสูญเสียในมอเตอร์โดยการกระตุ้นแรงดันไม่สมดุลให้กับมอเตอร์จากชุดปฏิบัติการทดลอง
3. หาค่าเบี่ยงเบนจากการทดลองโดยเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิที่ได้จากการวัดกับอุณหภูมิที่ได้จากการคำนวณตามทฤษฎีการส่งถ่ายความร้อน

1.4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

1. ศึกษาทฤษฎีค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนและสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของวัสดุ
2. ศึกษาทฤษฎีผลกระทบต่อมอเตอร์เมื่อแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล
3. ศึกษาทฤษฎีประสิทธิภาพมอเตอร์และกำลังสูญเสีย
4. ศึกษาเครื่องใช้เครื่องมือวัดอุณหภูมิ (ตัวตรวจจับอุณหภูมิแบบอินฟราเรด)
5. ออกแบบวิธีการประมาณค่ากำลังสูญเสียในมอเตอร์เหนี่ยวนำโดยใช้หลักการคุณสมบัติทางความร้อนของวัสดุ
6. ออกแบบโปรแกรมสำหรับคำนวณค่าอุณหภูมิและค่ากำลังสูญเสียในมอเตอร์โดยการกระตุ้นแรงดันไม่สมดุลให้กับมอเตอร์จากชุดปฏิบัติการทดลอง
7. ประมาณค่ากำลังสูญเสียรวมของมอเตอร์โดยการวัดค่ากำลังงานทางกลที่ได้จากภาระของมอเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

8. ประเมินค่าอุณหภูมิที่เกิดขึ้นภายในมอเตอร์ซึ่งคำนวณได้จากโปรแกรมที่ออกแบบเพื่อสรุปผลการบ่งชี้สภาวะภายในมอเตอร์จากการวัดค่าอุณหภูมิภายนอก

1.5 ประโยชน์ที่ได้รับ

สามารถใช้ผลทางทฤษฎีที่ได้จากการทดลองสามารถบ่งชี้สภาวะอุณหภูมิภายในมอเตอร์และกำลังไฟฟ้าที่สูญเสียออกมาในรูปของความร้อนเพื่อการสังเกตการณ์ความผิดปกติที่เกิดขึ้นภายในและการวางแผนบำรุงรักษาเบื้องต้น โดยใช้หลักการถ่ายเทความร้อนของวัสดุและการวัดแบบไม่สัมผัส ซึ่งการใช้ตัววัดอุณหภูมิแบบอินฟราเรดสามารถนำไปประยุกต์ใช้จริงในอุตสาหกรรมได้

1.6 รายละเอียดของวิทยานิพนธ์

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้แบ่งเนื้อหาทั้งหมดออกเป็น 5 บท โดยเนื้อหาแต่ละส่วนมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

บทที่ 1 กล่าวถึงความเป็นมาของงานวิจัย ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ ทฤษฎีและแนวคิดที่ใช้ในงานวิจัย ขอบเขตของการวิจัย และรายละเอียดของวิทยานิพนธ์

บทที่ 2 กล่าวถึงหลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ มอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส กำลังสูญเสียในมอเตอร์ ผลกระทบจากแรงดันไม่สมดุล หลักการของอินฟราเรดเซนเซอร์ และทฤษฎีถ่ายเทความร้อนของวัสดุ

บทที่ 3 กล่าวถึงขั้นตอนการทดลองและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

บทที่ 4 กล่าวถึงการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลองการประมาณค่ากำลังสูญเสียความร้อน

บทที่ 5 เป็นบทสรุปผลการวิจัย ข้อเสนอแนะและแนวทางการนำไปประยุกต์ใช้งานในด้านต่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 มอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส (Three phase induction motor)

มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ เป็นเครื่องกลไฟฟ้าที่เปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าให้เป็นพลังงานกล ในการเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าให้เป็นพลังงานกลนี้ พลังงานไฟฟ้าไม่ได้ถูกนำเข้าสู่ที่โรเตอร์โดยตรง แต่ได้จากการเหนี่ยวนำ (Induction) จึงนิยมเรียกมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับนี้ว่ามอเตอร์เหนี่ยวนำ (Induction Motor)[10]

การทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ใช้หลักการสนามแม่เหล็กหมุนโดยใช้กำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้กับมอเตอร์ ถ้าจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟสให้ขดลวดอาร์เมเจอร์ที่สเตเตอร์จะเกิดสนามแม่เหล็กหมุน เมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กที่สเตเตอร์โดยการหมุนตัดผ่านกับขดลวดตัวนำในโรเตอร์ที่วางอยู่ใกล้กัน จะทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำขึ้นที่ขดลวดตัวนำในโรเตอร์ แต่ถ้าขดลวดตัวนำของโรเตอร์ถูกต่อให้ครบวงจรจะทำให้มีกระแสไฟฟ้าไหลในตัวนำ และเกิดสนามแม่เหล็กขึ้นที่โรเตอร์ ผลรวมของเส้นแรงแม่เหล็กที่สเตเตอร์กับเส้นแรงแม่เหล็กรอบตัวนำที่โรเตอร์ทำให้แรงบิดเกิดขึ้นกับตัวนำซึ่งเป็นผลให้โรเตอร์หมุน

มอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส แบ่งออกได้ 2 แบบ ได้แก่ แบบโรเตอร์กรงกระรอก (Squirrel cage Rotor) และโรเตอร์แบบพันขดลวด (Wound Rotor) มอเตอร์ทั้งสองแบบนี้จะมีส่วนประกอบที่เหมือนกัน คือ ส่วนที่อยู่กับที่ แต่จะแตกต่างกันเฉพาะส่วนที่เคลื่อนที่เท่านั้น[11]

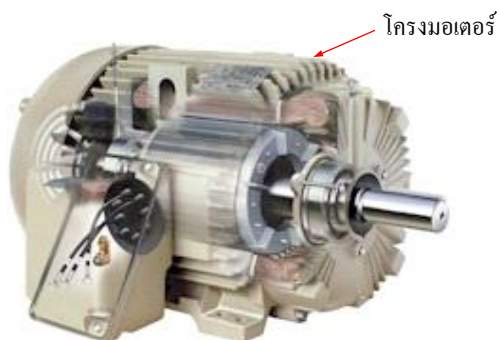
ส่วนที่อยู่กับที่ ประกอบด้วย

- โครงมอเตอร์
- แกนเหล็กสเตเตอร์
- ขดลวดสเตเตอร์
- ฝาปิดหัวท้าย

ส่วนที่เคลื่อนที่ ประกอบด้วย

- แกนเหล็กโรเตอร์และเพลลา
- ขดลวดโรเตอร์

โครงมอเตอร์ (Frame) ทำมาจากอลูมิเนียมหรือทำมาจากเหล็กหล่อเหนียวเป็นรูปทรงกระบอกกลางโดยที่ผิวด้านนอกจะถูกออกแบบให้มีครีบริอบทรงกระบอกเพื่อช่วยในการระบายความร้อน ด้านข้างหรือด้านบนตัวมอเตอร์จะมีกล่องสำหรับต่อสายไฟ (Terminal Box) โครงมอเตอร์ทำหน้าที่จับยึดแกนเหล็กที่พันขดลวดให้แน่นอยู่กับที่และรองรับน้ำหนักทั้งหมดของมอเตอร์ [10]



รูปที่2.1 โครงมอเตอร์

แกนเหล็กสเตเตอร์ (Stator core) และขดลวดสเตเตอร์ (Stator Winding) แกนเหล็กสเตเตอร์ทำมาจากแผ่นเหล็กบางๆอัดซ้อนกันและยึดติดเข้ากับโครงของมอเตอร์ มีลักษณะเป็นรูปทรงกระบอกและด้านในทำเป็นสล็อตไว้สำหรับพันขดลวดสเตเตอร์ซึ่งทำมาจากทองแดง ขดลวดสเตเตอร์จะเป็นขดลวดทองแดงที่เคลือบด้วยฉนวนไฟฟ้าเพื่อไม่ให้เกิดการลัดวงจร ที่สเตเตอร์จะมีขดลวดพันอยู่ 3 ชุด หรือ 3 เฟส ซึ่งแต่ละเฟสจะทำมุม 120 องศา ขดลวดแต่ละเฟสจะต่อกันแบบอนุกรม[10]



รูปที่2.2 แกนเหล็กสเตเตอร์และขดลวดสเตเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส

ฝาปิดหัวท้าย (End Plate) ทำจากวัสดุชนิดเดียวกับโครงมอเตอร์ ฝาปิดนี้จะถูกยึดติดอยู่กับโครงมอเตอร์ด้วยสลักเกลียวซึ่งมีแบริ่งอยู่ตรงกลางสำหรับรองรับเพลลาเพื่อให้โรเตอร์หมุนอยู่ในแนวศูนย์กลางพอดี[10]



รูปที่2.3 ฝาปิดหัวท้ายโครงมอเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โรเตอร์ (Rotor) โรเตอร์สำหรับมอเตอร์เหนี่ยวนำมี 2 ชนิด คือ โรเตอร์กรงกระรอก (Squirrel cage Rotor) (รูปที่ 2.4) ประกอบด้วยแกนเหล็กที่ทำมาจากแผ่นเหล็กบางๆ มีลักษณะกลมอัดซ้อนกันโดยมีเพลาร้อยทะลุเพื่อยึดให้แน่น ที่ผิวของโรเตอร์นี้จะมีสลอตไปตามทางยาวและในสลอตจะมีแท่งตัวนำทองแดงหรืออะลูมิเนียมฝังอยู่โดยรอบ ที่ส่วนปลายของแท่งตัวนำจะเชื่อมติดกับวงแหวนโลหะ และโรเตอร์ชนิดพันขดลวด (Wound Rotor) (รูปที่ 2.5) ตัวนำที่ใช้จะพันด้วยขดลวดทองแดงเคลือบด้วยฉนวนไฟฟ้าจำนวน 3 ชุด หรือ 3 เฟส พันอยู่ในสลอต ซึ่งแต่ละเฟสจะวางทำมุมห่างกัน 120 องศาไฟฟ้า ขดลวดที่พันจะมีจำนวนขั้วแม่เหล็กเท่ากับจำนวนขั้วแม่เหล็กที่สเตเตอร์ ขดลวดทั้ง 3 ชุดจะต่อกันแบบสตาร์ (Star) และปลายอีกด้านหนึ่งต่อเข้ากับสลีปริง (Slip ring) 3 วงที่ติดอยู่บนเพลาด้านหนึ่งซึ่งจะมีแปรงถ่านสัมผัสอยู่ เพื่อต่อไปยังอุปกรณ์ควบคุมภายนอก [10]



2.2 การวิเคราะห์ความผิดปกติของมอเตอร์ [12]

เทคโนโลยีการวิเคราะห์ความผิดปกติของมอเตอร์ (Motor Failure Analysis Technology) ในปัจจุบันที่นำมาใช้ตรวจสอบหรือวิเคราะห์ความเสียหายมอเตอร์แบ่งออกเป็น 2 กลุ่มใหญ่ๆ คือ การตรวจวิเคราะห์ที่ต้องทำขณะที่มอเตอร์หยุดทำงาน (Off-Load Inspection) และการตรวจวิเคราะห์ที่ทำในขณะที่มอเตอร์ทำงาน (On-Load Inspection) ซึ่งการตรวจวิเคราะห์ที่ทำในขณะที่มอเตอร์ทำงานเป็นสิ่งที่ค่อนข้างใหม่สำหรับอุตสาหกรรมประเทศไทย แต่ได้รับความนิยมสูงในประเทศอุตสาหกรรมชั้นนำ เนื่องจากไม่จำเป็นต้องหยุดมอเตอร์เพื่อทำการตรวจสอบและวิเคราะห์ จากข้อมูลจริงขณะทำงานจริง เช่น ความสั่นสะเทือนขณะที่โหลดและอุณหภูมิจริงในขณะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำงานหรือกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นที่โหลดจริงในช่วงนั้นๆ ทำให้สามารถประเมินสภาพปัจจุบันของมอเตอร์ได้ตรงความเป็นจริงมากที่สุด เพื่อเตรียมวางแผนบำรุงรักษาได้อย่างเหมาะสม ซึ่งเทคโนโลยีการวิเคราะห์ความผิดปกติของมอเตอร์ที่นำมาใช้เพื่อตรวจสอบหรือวิเคราะห์ความเสียหายมอเตอร์ที่ทำในขณะที่มอเตอร์ทำงาน ได้แก่

- 1) การวัดและวิเคราะห์ความสั่นสะเทือน การวัดและวิเคราะห์ความสั่นสะเทือนกระแสไฟฟ้าและเส้นแรงแม่เหล็กจะทำโดยอาศัยการแยกความถี่จากสัญญาณที่วัดจากเซ็นเซอร์ เพื่อนำค่ามาหาสาเหตุของความผิดปกติ โดยผลกระทบที่เกิดจากการสั่นสะเทือนที่เห็นได้ชัดเจน คือ การหลวมคอนของชิ้นส่วนต่างๆ เช่น แบริ่ง ขดลวดและการแตกกร้าวของฉนวนที่นำไปสู่การลัดวงจร
- 2) การวัดและวิเคราะห์อุณหภูมิ เป็นการประเมินสภาพความผิดปกติต่างๆ ที่ให้ผลออกมาในรูปของความร้อนเพื่อหลีกเลี่ยงหรือป้องกันการใช้งานในสภาวะอุณหภูมิสูงเกิน (Over heat) ซึ่งอาจนำไปสู่การเสื่อมหรือไหม้ของฉนวนหรือแบริ่งเกิดเสียหายเนื่องจากขาดสารหล่อลื่น โดยผลกระทบจากความร้อน คือ อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น (Temperature rise) ของมอเตอร์อันนำไปสู่การเสื่อมของฉนวนทำให้สารหล่อลื่นมีความหนืดลดลง ส่งผลกระทบทางไฟฟ้า เช่น กระแสและแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล แรงดันตกหรือเกิน การหลวมของจุดต่อ การลัดวงจรภายในขดลวด การแตกกร้าวของตัวนำโรเตอร์ นำไปสู่ความร้อนหรือการสั่นสะเทือน
- 3) การวัดและวิเคราะห์กระแสไฟฟ้าและเส้นแรงแม่เหล็ก เป็นการทดสอบและตรวจสอบมอเตอร์ด้วยการวัดค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของมอเตอร์เพื่อวิเคราะห์สภาพของมอเตอร์ ซึ่งจะต้องทำในขณะที่มอเตอร์หยุดทำงาน เช่น วัดสภาพการเป็นฉนวนไฟฟ้า ไม่สมดุลของค่าความเหนี่ยวนำ ความต้านทานของขดลวดในแต่ละเฟส การทดสอบค่าความต้านทานแม่เหล็กระหว่างโรเตอร์และสเตเตอร์

2.2.1 ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อมอเตอร์

2.2.1.1 โรเตอร์คดเนื่องจากอุณหภูมิ

โรเตอร์คดเนื่องจากอุณหภูมิ (Rotor Thermal Bow) เกิดจากการออกแบบลดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของโรเตอร์และเพิ่มความยาวให้มากขึ้น เพื่อลดต้นทุนและเพิ่มประสิทธิภาพในการทำงานของมอเตอร์ เมื่อโรเตอร์ยาวขึ้นความร้อนที่เกิดขึ้นจากการทำงานซึ่งแปรผันตามโหลดอาจทำให้แกนเหล็กโรเตอร์และสเตเตอร์มีโอกาสคดงอได้

นอกจากการออกแบบแล้ว ด้านการใช้งานสามารถเป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้โรเตอร์เกิดการคดงอเนื่องจากอุณหภูมิได้ เช่น การสตาร์ทมอเตอร์ภายใต้ภาวะโหลดหนักบ่อยครั้ง ซึ่งตัวนำโรเตอร์ที่อยู่ภายใต้ขั้วแม่เหล็กจะมีกระแสไหลผ่านจำนวนมากทำให้เกิดความร้อนสูงกว่าตัวนำตัวอื่น ๆ ซึ่งความร้อนที่ไม่สม่ำเสมอบนโรเตอร์นี้จะทำให้โรเตอร์โก่งหรือเกิดการคดนำไปสู่ภาวะความไม่สมดุลทางกล แต่เมื่อมอเตอร์เย็นตัวปัญหานี้จะหมดไป

2.2.1.2 ช่องอากาศไม่สมมาตร

ช่องอากาศ (Air gap) คือ ช่องว่างระหว่างผิวด้านในสเตเตอร์ถึงผิวโรเตอร์ ซึ่งในการออกแบบมอเตอร์ จะถูกออกแบบให้ช่องอากาศมีความสมมาตรหรือสม่ำเสมอตลอดเส้นรอบวงของโรเตอร์ มอเตอร์เหนี่ยวนำขนาดใหญ่จะมีค่าความไม่สมมาตรอยู่ที่ 5-10%

ปัญหาช่องอากาศไม่สมมาตร (Uneven or eccentric) อาจมีมากขึ้นจากการซ่อม การประกอบ รวมถึงการติดตั้งที่ไม่เหมาะสม เช่น การขันยึดระหว่างแท่นมอเตอร์ และฐานรองที่ไม่ได้ระดับกันทำให้สเตเตอร์บิดตัวเกิดปัญหาช่องอากาศไม่สมมาตรขึ้นได้ เมื่อเกิดภาวะไม่สมมาตร หรือสม่ำเสมอของช่องอากาศผลที่ตามมา คือ กระแสไหลในตัวนำไม่สมดุลและแรงบิดไม่สมดุลบนโรเตอร์ ทำให้เกิดการสั่นสะเทือนซึ่งมีความถี่แปรตามสนามแม่เหล็กหมุน (Rotating magnetic field) ที่ความถี่ 100Hz หรือสองเท่าของความถี่ไฟฟ้า แรงบิดที่เกิดขึ้นจะแปรผกผันกับกำลังสองของระยะห่างระหว่างโรเตอร์และสเตเตอร์ ดังนั้นการไม่สมมาตรของช่องอากาศเพียงเล็กน้อยก็ทำให้เกิดการสั่นสะเทือนที่รุนแรงได้ การวัดความไม่สมมาตรของช่องอากาศอาจใช้วิธีติดตั้งอุปกรณ์วัดระยะช่องอากาศที่ผ่านช่องที่เจาะผ่านตัวเรือนของแบร์ริง โดยผู้ผลิตมอเตอร์บางรายอาจเตรียมช่องดังกล่าวเอาไว้ให้แล้ว แต่ส่วนมากการใช้เครื่องมือวัดเช่น Analyzer จะเป็นวิธีที่สะดวกและให้ความถูกต้องมากกว่าวิธีอื่น

2.2.1.3 สเตเตอร์หลวมคลอน

สเตเตอร์หลวมคลอน (Loose Stator Core/Laminations) เกิดจากการเผาขัดลวดเพื่อรี้อขัดลวดมาพันใหม่ที่ไม่มีการควบคุมอุณหภูมิ อาจทำให้แผ่นโลหะบาง Laminate ที่ประกอบเป็นแกนเหล็กสเตเตอร์เกิดการผิดรูปไปหรืออาจทำให้ฉนวนเคลือบแผ่น Laminate ชำรุดเสียหายหรือการนำเอาขดลวดที่เผาออกจากร่องสล๊อตที่ไม่เหมาะสมอาจทำให้ร่องสล๊อตบิดหรือแยกออกจากกัน และการเผาอาจทำให้โครงเหล็กสเตเตอร์บิดและขยายตัว ทำให้กระแสไหลวน (Eddy current) ที่เกิดขึ้นจากการเหนี่ยวนำบนแผ่น laminate ที่วางชิดกันอาจลัดวงจรหากันจนทำให้เกิดประกายไฟและความร้อนขึ้น ซึ่งการผิดรูปของแกนเหล็กดังกล่าวจะทำให้เกิดปัญหาช่องอากาศไม่สมมาตรตามมา

2.2.1.4 โรเตอร์หลวมคลอน

โรเตอร์หลวมคลอน (Loose Rotor) เกิดจากการที่ค่าของโพลหรือแรงดันไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงอย่างฉับพลันทำให้โรเตอร์มีอุณหภูมิสูงขึ้นและเกิดการขยายตัว (กระแสเพิ่มขึ้นฉับพลัน) บางครั้งโรเตอร์ก็อาจคลอนไปมาบนเพลลาได้ ทำให้เกิดการสั่นสะเทือนที่ความถี่ 50 Hz และเกิดฮาร์โมนิกส์ขึ้น ซึ่งมักเกิดในช่วงที่อุณหภูมิเปลี่ยนแปลง

2.2.1.5 โรเตอร์ไม่สมมาตร

โรเตอร์ไม่สมมาตร (Eccentric Rotor) เกิดจากภาวะความไม่สมดุลทางแม่เหล็ก (Pole pas frequency: FP) ที่ปรากฏเป็น side band โดยอยู่รอบๆ ความถี่ 50 Hz ซึ่งค่าต่างๆ สามารถหาได้ ดังสมการที่ 2.1-2.3 ดังนี้

$$FP = \text{ความถี่เส้นโกล} \times \text{จำนวนขั้วแม่เหล็ก} \quad (2.1)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งค่า FP มีหน่วยเป็นเฮิรตซ์ (Hz)

ค่าความถี่ลื่นไถล (Slip frequency) หาได้จากสมการที่ 2.2 ดังนี้

$$\text{ความถี่ลื่นไถล} = \text{ความเร็วสนามแม่เหล็ก} \times \text{จำนวนขั้วแม่เหล็ก} \quad (2.2)$$

โดยค่าความถี่ลื่นไถลที่ได้มีหน่วยเป็นเฮิรตซ์ (Hz)

ค่าความเร็วสนามแม่เหล็กหมุน (Rotating magnetic field) หาได้จาก

$$\text{ความเร็วสนามแม่เหล็กหมุน} = \frac{120 \times \text{ความถี่}}{\text{จำนวนขั้วแม่เหล็ก}} \quad (2.3)$$

ซึ่งหน่วยของความเร็วสนามแม่เหล็กหมุนมีหน่วยเป็นรอบต่อนาที (rpm)

2.2.1.6 ขดลวดหลวมคลอน

ขดลวดหลวมคลอน (Loose Windings) เกิดในกรณีขดลวดบนสเตเตอร์เกิดหลวมเล็กน้อย จะทำให้เกิดความถี่สะเทือนที่ 100 Hz รุนแรงมากขึ้น ยิ่งทำให้เกิดปัญหาการแตกหลุดของฉนวนของขดลวด ซึ่งนำไปสู่การลัดวงจรของขดลวด ทำให้การลัดวงจรลงกราวด์และสเตเตอร์เสียหายในที่สุด

2.2.1.7 ปัญหาตัวนำโรเตอร์

ปัญหาเสียหายหลักของมอเตอร์ไฟฟ้าขนาดใหญ่ คือ การร้าว (Crack) ซึ่งผลที่ตามมา คือ ความร้อนและการแตกหักของตัวนำโรเตอร์ โดยเฉพาะมอเตอร์ที่ทำการสตาร์ทในขณะที่มีโหลดบ่อยครั้ง การสตาร์ทมอเตอร์แต่ละครั้งจะก่อให้เกิดความเครียดบนตัวนำโรเตอร์เนื่องจากมีกระแสไหลผ่านตัวมันสูงสุดในขณะที่มอเตอร์เริ่มเดินต่ำกว่าความเร็วซิงโครนัส ทำให้กระแสที่ไหลผ่านตัวนำจำนวนมากก่อให้เกิดความร้อนและขยายตัวของตัวนำโรเตอร์ ซึ่งทำให้ความต้านทานไฟฟ้าในแต่ละตัวนำแตกต่างกัน ส่งผลให้เกิดความร้อนไม่เท่ากันและการขยายตัวที่ไม่เท่ากัน นำไปสู่การแตกร้าวของจุดต่อที่เชื่อมกันระหว่างตัวนำและแหวนลัดวงจรด้านหัวและท้ายของโรเตอร์ และในขณะเดียวกันการแตกร้าวของตัวนำก็ยิ่งทำให้ความต้านทานไฟฟ้าของตัวนำเพิ่มขึ้น ทำให้มีกระแสจำนวนมากไหลผ่าน เกิดความร้อนสูงมากขึ้นและเกิดการแตกร้าวมากขึ้น ในขณะที่เดียวกันตัวนำอื่นใกล้เคียงก็ต้องรับภาระกระแสที่สูงขึ้นแทนตัวนำที่แตกที่มีกระแสไหลน้อยลงตามความต้านทานที่มากขึ้น เกิดความร้อนภายในตัวโรเตอร์ส่งผลให้โรเตอร์คด

2.2.2 การวิเคราะห์ความผิดปกติของมอเตอร์โดยการวิเคราะห์อุณหภูมิ[12][13][14]

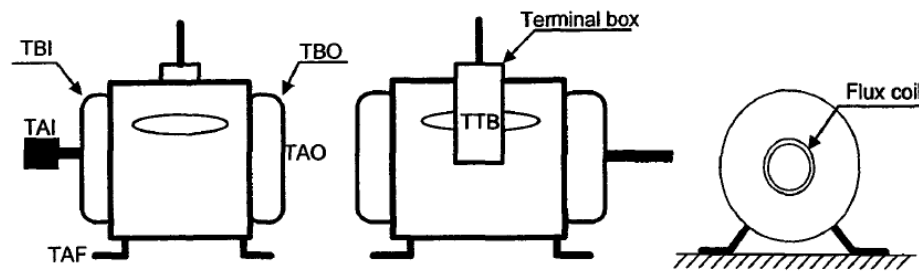
การใช้งานมอเตอร์ที่มีความร้อนสูงเป็นเวลานานทำให้อายุการใช้งานของมอเตอร์ลดลงซึ่งขึ้นอยู่กับอุณหภูมิที่ยอมรับได้ของฉนวนขดลวดและอุณหภูมิของแบร์ริง เนื่องจากค่าอุณหภูมิที่เพิ่มทุก10องศาจะทำให้อายุการใช้งานของฉนวนลดลงครึ่งหนึ่ง[12] และความร้อนสูงยังส่งผลต่อความหนืด(Viscosity) ของสารหล่อลื่นในแบร์ริง อาจทำให้แบร์ริงเสียหายได้เร็วขึ้นจากการขาดสารหล่อลื่น ดังนั้นควรมีการวัดอุณหภูมิเพื่อป้องกันการใช้งานมอเตอร์ขณะเกิดความร้อนสูง ซึ่งตามมาตรฐาน IEC 85 ได้แบ่งฉนวนออกเป็นคลาส ดังตัวอย่างในตารางที่ 2.1 ซึ่งแสดงคลาสของฉนวนความร้อน อุณหภูมิที่ทนได้ของฉนวน(°C) อุณหภูมิห้องสูงสุด(°C) อุณหภูมิเพิ่มสูงสุดที่ยอมรับได้(°K) ค่าเผื่อทางอุณหภูมิ(°C)[10],[12]

ตารางที่2.1 คลาสของฉนวนความร้อนตามมาตรฐาน IEC 85

| คลาส | อุณหภูมิสูงสุดที่ทนได้ของฉนวน (°C) | อุณหภูมิห้องสูงสุด (°C) | อุณหภูมิเพิ่มสูงสุดที่ยอมรับได้ (°K) | ค่าเผื่อทางอุณหภูมิ (°C) |
|---------|------------------------------------|-------------------------|--------------------------------------|--------------------------|
| Class A | 105 | 40 | 60 | 5 |
| Class B | 130 | 40 | 80 | 10 |
| Class E | 120 | 40 | 75 | 5 |
| Class F | 155 | 40 | 105 | 10 |
| Class H | 180 | 40 | 125 | 15 |

หมายเหตุ ตามมาตรฐาน ISO ได้ระบุหน่วยจากการวัดเป็นองศาเซลเซียส และความแตกต่างของอุณหภูมิเป็นเคลวิน ค่าเผื่อทางอุณหภูมิเป็นค่าที่เผื่อไว้ระหว่างอุณหภูมิเฉลี่ยของขดลวดและอุณหภูมิของจุดที่ร้อนที่สุด โดยอุณหภูมิที่ยอมรับได้ = อุณหภูมิสูงสุด - อุณหภูมิห้องสูงสุด - ค่าเผื่อ

การวัดอุณหภูมิแบบเปรียบเทียบแนวโน้ม(Trending)เป็นวิธีที่สะดวกรวดเร็วในการประเมินสภาพความร้อนที่สูงเกิน(Over heat)ในมอเตอร์ สาเหตุหลักของความร้อนสูงเกินเกิดจากการใช้งานเกินพิกัด แบร์ริงยึดติดและการเยื้องศูนย์ (Misalignment) นอกจากนี้ความผิดปกติอื่นๆที่อาจก่อให้เกิดความร้อนสูงเกินได้คือการระบายความร้อนที่จำกัด อุณหภูมิบรรยากาศโดยรอบสูง อัตราการใช้งาน(Duty cycle)ที่มากเกินไปและแหล่งจ่ายไฟผิดปกติ เช่น แรงดันตก เกินหรือไม่สมดุล ซึ่งการวัดอุณหภูมิควรทำในขณะที่มอเตอร์อยู่ในภาวะคงตัว(Steady state) โดยตำแหน่งต่างๆ สำหรับวัดอุณหภูมิมียู่ 7ตำแหน่งคือ 3 จุดบริเวณผิวด้านข้างของมอเตอร์ บริเวณแบร์ริงทั้งสองด้าน บริเวณกล่องต่อสายและบริเวณประกบโพล (Coupling) (รูปที่ 2.6)



รูปที่ 2.6 ตำแหน่งของการวัดอุณหภูมิมอเตอร์

เมื่อ

TSI = Skin Temperature Inboard คือ อุณหภูมิบริเวณผิวด้านใน

TSC = Skin Temperature Center คือ อุณหภูมิบริเวณผิวตรงกลาง

TSO = Skin Temperature Outboard คือ อุณหภูมิบริเวณผิวด้านข้าง

TBI = Inboard Bearing Temperature คือ อุณหภูมิบริเวณผิวด้านข้าง Bearing

TBO = Outboard Bearing Temperature คือ อุณหภูมิบริเวณผิวด้านนอก Bearing

TTB = Skin Temperature of termination box คือ อุณหภูมิบริเวณผิวของกล่องต่อ

สายไฟ

TAF = Ambient Air Temperature taken on the motor foot คือ อุณหภูมิอ้างอิงบน

ฐานรองของมอเตอร์

TAI = Ambient Air Temperature taken inboard of motor คือ อุณหภูมิอ้างอิงด้าน

ในของมอเตอร์

TAO = Ambient Air Temperature taken Outboard of motor คือ อุณหภูมิอ้างอิง

ด้านข้างของมอเตอร์

TCP = Coupling Temperature คือ อุณหภูมิบริเวณประกบโหลต

การวัดอุณหภูมิยังมีปัจจัยต่างๆที่มีผลกับการวิเคราะห์ เช่น โหลต อุณหภูมิห้อง ความร้อนจากรังสีจากดวงอาทิตย์ และตำแหน่งที่วัด อุณหภูมิที่เพิ่มเป็นผลมาจากกำลังสูญเสียต่างๆ เช่น แรงเสียดทาน (Bearing friction) แรงลมต้านการหมุน (Windage) ความสูญเสียในแกนเหล็ก (Core loss) การสูญเสียในขดลวด (Copper loss หรือ I^2R loss) และ Stray load loss ซึ่ง Stray load loss และ Copper loss จะขึ้นอยู่กับโหลต โดยการสูญเสียในขดลวดถือว่ามากที่สุดและอยู่ในรูปของความร้อน ดังนั้นในการวิเคราะห์ปัญหาความร้อนที่แท้จริงและที่ผิวของมอเตอร์แบบแนวโน้มจึงจำเป็นต้องนำสภาวะโหลตมาพิจารณาด้วย โดยที่อุณหภูมิห้องยิ่งสูงทำให้ผิวของมอเตอร์จะมีอุณหภูมิสูงขึ้นตาม และความร้อนจากรังสีดวงอาทิตย์ขณะใช้งานภายใต้แสงแดด สี ความหนาและคุณสมบัติของโลหะก็ส่งผลกับอุณหภูมิผิวที่วัดได้ เพื่อหลีกเลี่ยงหรือลดผลกระทบดังกล่าว การวัดอุณหภูมิผิวควรวัดในตำแหน่งที่ไม่ได้รับแสง และอยู่ต่ำกว่าเส้นผ่านศูนย์กลางในแนวนอน ตำแหน่งวัดเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่ออุณหภูมิผิว โดยทั่วไปตำแหน่งที่มีอุณหภูมิสูงสุดคือตำแหน่งที่มีมวลมากที่สุดและการระบายความร้อนทำได้น้อยสุด ดังนั้นในมอเตอร์แบบเปิด (Open enclosure) ตำแหน่งที่อุณหภูมิสูงที่สุดจะอยู่ที่กลางมอเตอร์ ในขณะที่มอเตอร์แบบปิด (Totally enclose) ตำแหน่งที่อุณหภูมิสูงที่สุดคือตำแหน่งใดก็ตามที่อยู่ระหว่างกึ่งกลางถึงตำแหน่งที่ได้รับลมระบายความร้อนจากพัดลมน้อย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่สุด อุณหภูมิมอเตอร์รอบแวนร์ศมีจะแตกต่างกันออกไปตามลักษณะการระบายความร้อน ซึ่งระยะห่างของสเตเตอร์กับตัวเรือนมอเตอร์จะมีค่าไม่เท่ากันตลอดแวนร์ศมีมอเตอร์ ยิ่งสเตเตอร์อยู่ห่างจากโครงมอเตอร์น้อยเท่าใดค่าที่วัดได้จะคงที่และถูกต้องมากขึ้น ดังนั้นในการวัดอุณหภูมิผิวแบบเปรียบเทียบแวนน์ม ควรทำการวัดในตำแหน่งเดิมหรือใกล้เคียงกับตำแหน่งเดิมทุกครั้ง และควรเลือกวัดในตำแหน่งที่สเตเตอร์อยู่ใกล้กับโครงมอเตอร์มากที่สุด ในการพิจารณาอุณหภูมิเพิ่มของมอเตอร์สำหรับการวิเคราะห์แบบเปรียบเทียบแวนน์ม เพื่อชดเชยอุณหภูมิห้องและสภาวะโหลด ค่าอุณหภูมิเพิ่มหลังชดเชยผลของโหลด (Normalized temperature rise) จะเป็นดังนี้

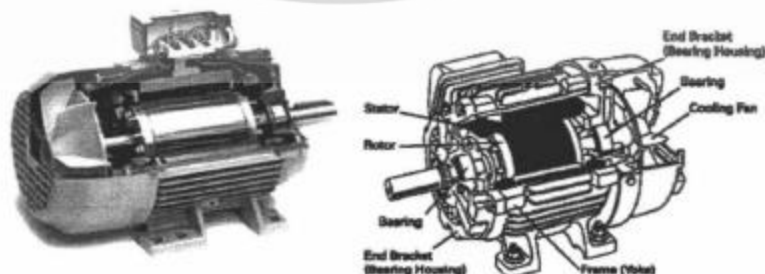
$$T_N = \frac{T_{pt} - T_{amb}}{\% Load} \times 100 \tag{2.4}$$

| | | |
|-------|-----------|--|
| เมื่อ | T_N | คือ Normalized temperature rise |
| | T_{pt} | คือ อุณหภูมิที่วัดได้ |
| | T_{amb} | คือ อุณหภูมิบรรยากาศ |
| | $\% Load$ | คือ ร้อยละของโหลดขณะทำการวัดเทียบกับโหลดสูงสุดของมอเตอร์ |

2.2.3 อุณหภูมิกับการใช้งานมอเตอร์[15]

ปัญหาเกิดจากมอเตอร์ที่มีอุณหภูมิสูงเกินหรือ Over Temperature อาจเกิดมาจากการเลือกขนาดและชนิดมอเตอร์ การติดตั้งไม่ถูกต้อง ความไม่เข้าใจลักษณะของโหลดที่นำไปใช้งานรวมถึงอุณหภูมิของสภาพแวดล้อมในขณะที่ใช้งานสูงเกินมาตรฐาน หลายนๆ ปัญหาที่เกิดกับมอเตอร์ อีกทั้งปัญหาที่เกิดจากมอเตอร์ที่อุณหภูมิสูงเกิน สามารถที่จะหลีกเลี่ยงปัญหาที่จะเกิดขึ้นได้ถ้าเข้าใจในหลักการทำงานของมอเตอร์และเข้าใจถึงสภาพการนำไปใช้งาน

มอเตอร์เหนี่ยวนำกระแสสลับ 3 เฟสแบบกรงกระรอกส่วนใหญ่จะมีการระบายความร้อนโดยพัดลมอยู่สองชุด แยกวงจรลมออกเป็นวงจรลมร้อนภายในและภายนอก ซึ่งวงจรลมภายในจะมีครีบบีบอัดที่ตัวโรเตอร์ทำหน้าที่ตีลมให้มีการหมุนเวียนภายในห้องโรเตอร์ให้ลมกระจายโดยทั่ว เพื่อสามารถนำพาเอาความร้อนจากโรเตอร์เองและขดลวดสเตเตอร์ถ่ายไปยังผิวโครงสร้างของตัวมอเตอร์ โดยวิธีการนำพาระบายความร้อน ส่วนวงจรลมด้านนอกจะมีพัดลมติดด้านท้ายของตัวโรเตอร์ด้านนอกโครงมอเตอร์ ทำหน้าที่ดูดลมเย็นจากทางด้านท้ายผ่านทางครีบบีบอัดด้านนอกเพื่อช่วยนำพาและระบายความร้อนออกจากตัวโครงสร้างมอเตอร์



รูปที่ 2.7 แสดงลักษณะโครงสร้างของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบทรงกระบอก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.7 แสดงมอเตอร์โดยทั่วไปประกอบด้วยโครงเหล็กหรืออะลูมิเนียมด้านนอก ครอบสเตเตอร์ที่ทำจากแผ่นเหล็กบางเรียงอัดซ้อนกัน พร้อมกับขดลวดทองแดงที่หุ้มด้วยฉนวนฝังในร่องสเตเตอร์แล้วทำการชุบหรือเคลือบด้วยฉนวนวานิช

เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของการเคลือบวานิชให้กระจายทั่วถึง ความคงทนแข็งแรงอันเนื่องมาจากการสันสะท้อนและลดโอกาสที่ฝุ่นละอองจะเข้าไปจับระหว่างขดลวด โดยทั่วไปวัสดุของฉนวนที่ใช้ส่วนใหญ่จะสามารถทนอุณหภูมิได้ตามการมาตรฐานฉนวนไฟฟ้า Class F ซึ่งสามารถทนอุณหภูมิได้สูงสุด 155 °C หรือมอเตอร์บางรุ่นอาจจะใช้ฉนวนไฟฟ้าตามมาตรฐาน Class H ซึ่งสามารถทนอุณหภูมิได้สูงสุดถึง 180 °C

รูปที่ 2.8 แสดงลักษณะของขดลวดเมื่อพันเสร็จแล้วกลายเป็นขดลวดสเตเตอร์ รวมทั้งฉนวนขดลวดที่ใช้กันโดยทั่วไป โดยระบบของฉนวนสำหรับขดลวดไฟฟ้าในสเตเตอร์จะประกอบด้วย

- 1) ฉนวนระหว่างเฟสไฟฟ้าหรือระหว่างขดลวด
- 2) ฉนวนระหว่างกราวด์กับเฟสไฟฟ้า
- 3) ฉนวนระหว่างขดลวดภายนอก
- 4) ฉนวนที่ขดลวดขดลวด



รูปที่ 2.8 ลักษณะโครงสร้างและขดลวดของ Stator ของมอเตอร์ไฟฟ้า

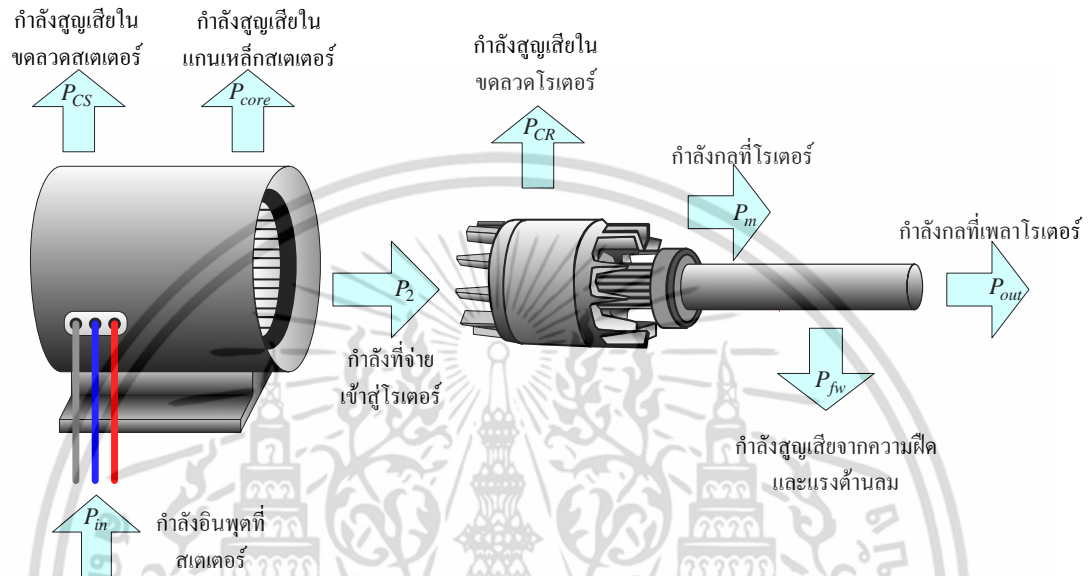
2.2.4 อุณหภูมิกับอายุการใช้งานของมอเตอร์[15]

อายุการใช้งานของมอเตอร์จะยาวนานหรือสั้นลง ปัจจัยที่สำคัญ คือ อายุการใช้งานของฉนวนที่ขดลวด ส่วนอื่นๆ เช่น แบร์ริง ซึ่งเป็นอุปกรณ์ทางกลที่จะพอมองเห็นได้ด้วยตาหรือฟังด้วยเสียงได้นั้น การเปลี่ยนอุปกรณ์เหล่านี้ไม่ยากและมีราคาไม่สูงมากนัก มอเตอร์ส่วนใหญ่เกินกว่า 50% จะเสียหายเนื่องมาจากเกิดการลัดวงจรของขดลวด การลัดวงจรอาจจะเกิดจากปัญหาทางกลที่สามารถมองเห็นได้ง่าย แต่สาเหตุใหญ่ที่อยู่เบื้องหลัง คือ ฉนวนเสื่อมคุณภาพก็เพราะความเป็นฉนวนไม่สามารถทำหน้าที่เป็นฉนวนทนแรงดันไฟฟ้าสูงสุดได้จึงทำให้เกิดแรงดันทะลุฉนวน เกิดการลัดวงจรทางไฟฟ้าหรือลัดวงจรลงดิน ฉนวนเสื่อมคุณภาพมักเกิดจากอุณหภูมิเกินพิกัด เพราะอุณหภูมิที่สูงเกินไปจะทำให้คุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุเปลี่ยนไป ความเป็นฉนวนของขดลวดเสื่อมคุณภาพ ทำให้เกิดการลัดวงจรลงโครงหรือระหว่างขดลวด สาเหตุที่ทำให้อุณหภูมิเกินพิกัด เช่น สภาพแวดล้อมไม่ตรงกับที่ออกแบบ มอเตอร์ขับโหลดเกินทำให้กระแสเกิน การสตาร์ทบ่อยเกินไป มีกระแสเป็นจำนวนมาก ในตอนที่มอเตอร์สตาร์ททำให้ร้อนจัดหรือการเลือกมอเตอร์ไม่เหมาะสมกับสภาพการใช้งาน เป็นต้น

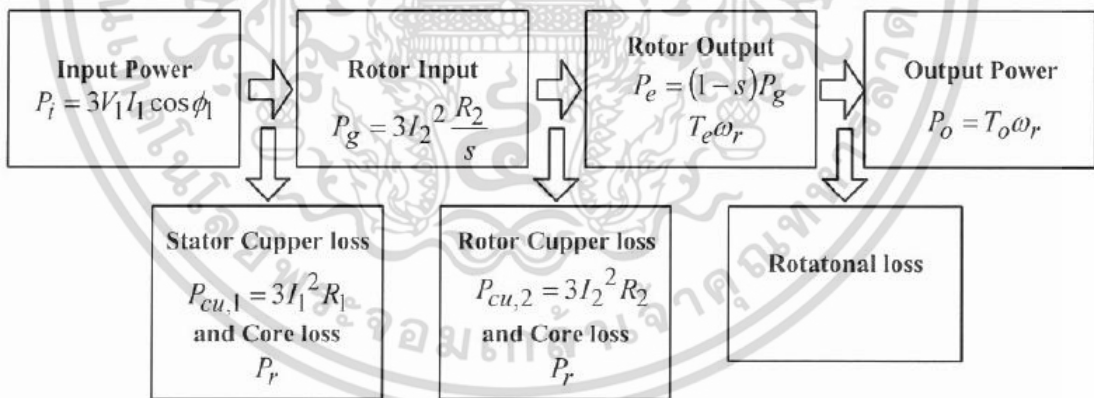
ดังนั้นปัจจัยที่สำคัญก่อให้เกิดผลกระทบกระเทือนต่ออายุการใช้งานของมอเตอร์ คือ ความร้อนเกินพิกัด ซึ่งโดยปกติฉนวนสำหรับมอเตอร์ควรมีอายุการใช้งานประมาณ 20 ปี ถ้ามอเตอร์นั้นทำงานภายใต้สภาวะแวดล้อมตามที่ได้ออกแบบไว้ และหากอุณหภูมิของฉนวนเพิ่มขึ้นทุกๆ 10 องศาเซลเซียส อายุการใช้งานของฉนวนจะสั้นลงโดยประมาณ 50% ยกตัวอย่างเช่น ตามสถิติฉนวน Class

F(155 °C) นำไปใช้งานที่อุณหภูมิเพิ่มขึ้นตาม Class F (105 K) จะมีอายุการใช้งานประมาณ 60,000 ชั่วโมง แต่หากนำไปใช้งานที่อุณหภูมิเพิ่มขึ้นตาม Class B (80 K) จะมีอายุการใช้งานประมาณ 150,000 ชั่วโมง เป็นต้น

2.2.5 การหาประสิทธิภาพมอเตอร์[11],[13]



รูปที่ 2.9 แสดงการสูญเสียกำลังในมอเตอร์เหนี่ยวนำ



รูปที่ 2.10 แผนภูมิการส่งผ่านกำลังงานไฟฟ้าของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

จากแผนภูมิกำลังงานไฟฟ้าที่ป้อนให้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำในรูปแรงดันและกระแสไฟฟ้า อินพุต (input power) เข้าที่ขดลวดอะเมเจอร์ส่วนหนึ่งจะสูญเสียไปเนื่องจากความต้านทานของขดลวดอะเมเจอร์ (stator copper loss) และการสูญเสียแกนเหล็ก (core loss) ในรูปของความร้อน โดยที่กำลังส่วนที่เหลือจะถูกส่งผ่านช่องอากาศให้กับโรเตอร์เรียกว่ากำลังงานในช่องอากาศ (power across air gap) เมื่อถ่ายกำลังงานให้กับโรเตอร์ส่วนหนึ่งจะเกิดการสูญเสียเนื่องจากความต้านทาน (rotor copper loss) ส่วนที่เหลือจะเป็นกำลังงานที่ส่งออกจากโรเตอร์ (electromagnetic power) ซึ่งเป็นกำลังงานทางกล เมื่อเปลี่ยนเป็นกำลังงานทางกลแล้ว จะเกิดการสูญเสีย เนื่องจากแรงเสียด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทานและแรงต้านขณะมอเตอร์เหนี่ยวนำหมุน (friction and windage loss) จากนั้นกำลังงานที่เหลือจะเป็นกำลังงานทางกลไปขับโหลด[13]

การสูญเสียในแกนเหล็ก (core loss) เกิดขึ้นได้ที่ขดลวดสเตเตอร์และโรเตอร์ในขณะที่มอเตอร์เหนี่ยวนำหมุนด้วยความเร็วใกล้ความเร็วซิงโครนัส การเคลื่อนที่สัมพัทธ์ระหว่างผิวของโรเตอร์กับสนามแม่เหล็กหมุนมีค่าน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับส่วนที่เกิดขึ้นในสเตเตอร์ ด้วยเหตุการนี้การสูญเสียในแกนเหล็กทั้งหมดที่เกิดขึ้นจึงรวมไว้ด้วยกันในส่วนของสเตเตอร์เท่านั้น[13]

ในขณะที่มอเตอร์หมุนด้วยความเร็วเพิ่มขึ้นทำให้การสูญเสียเนื่องจากแรงเสียดทานและแรงลมมากขึ้น แต่จะทำให้การสูญเสียในแกนเหล็กลดลง จึงรวมการสูญเสียเหล่านี้ไว้ด้วยกันเรียกว่า rotation loss and core loss และจำพิจารณาให้เป็นค่าคงที่ไม่ขึ้นอยู่ค่าความเร็วรอบที่เปลี่ยนแปลง[13]

กำลังไฟฟ้าที่เกิดจากสนามแม่เหล็กหมุนในช่องอากาศ เรียกว่า กำลังไฟฟ้าช่องอากาศ (air gap power) ซึ่งเป็น input power ที่จ่ายให้โรเตอร์(P_r) เมื่อหักค่าสูญเสียที่กล่าวมาแล้วจะได้กำลังไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในโรเตอร์(P_{Dr}) หรือกำลังไฟฟ้าที่เปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าให้เป็นพลังงานกล และเมื่อโรเตอร์หมุนจะเกิดกำลังสูญเสียเนื่องจากความฝืดและแรงต้านจากลม ซึ่งเรียกว่า กำลังสูญเสียทางกล (P_{mech}) ภายหลังจากหักค่า P_{mech} แล้วจะได้กำลังไฟฟ้าที่จ่ายออกมา(Output power : P_o) เป็นพลังงานกล อยู่ในรูปของแรงบิดที่จ่ายออกมาหรือแรงบิดที่แกนของโรเตอร์ (T_{shaft}) คูณกับความเร็วเชิงมุมของโรเตอร์ (ω_r) ซึ่งเขียนเป็นสมการได้ดังนี้คือ

กำลังไฟฟ้าที่จ่ายออกมา

$$P_o = T_{shaft} \times \omega_r \quad (2.5)$$

กำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้กับมอเตอร์ Power Input

$$P_i = \sqrt{3}V_L I_L \cos \theta \quad (2.6)$$

กำลังสูญเสียของมอเตอร์

$$P_{loss} = P_i - P_o \quad (2.7)$$

ประสิทธิภาพมอเตอร์

$$\mu = \frac{P_o}{P_o + P_{loss}} \times 100 \quad (2.8)$$

เมื่อ

$$P_o = \text{กำลังไฟฟ้าที่จ่ายออกมา(W)}$$

$$P_i = \text{กำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้กับมอเตอร์(W)}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

| | |
|---------------|---------------------------------------|
| P_{loss} | = กำลังสูญเสียมอเตอร์(W) |
| μ | = ประสิทธิภาพมอเตอร์ |
| T_{shaft} | = แรงบิดที่แกนโรเตอร์ N-m |
| ω_r | = ความเร็วเชิงมุมของโรเตอร์ (rev/min) |
| V_L | = ขนาดแรงดันไฟฟ้าของมอเตอร์(V) |
| I_L' | = กระแสไฟฟ้าที่มอเตอร์ได้รับ(A) |
| $\cos \theta$ | = P.F. ล้าหลังของมอเตอร์ |

2.2.6 ผลกระทบและการคำนวณหาค่าแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล[1]

2.1.3.1 ข้อกำหนดที่เกี่ยวข้องกับแรงดันไฟฟ้าและความถี่

ค่ามาตรฐานของพิกัดแรงดันไฟฟ้าและความถี่นั้นสามารถอ้างอิงได้จากข้อกำหนดของ NEMA (National Manufacture Association) ที่กำหนดไว้สำหรับมอเตอร์ชนิดเหนี่ยวนำ (induction Motor) ได้พิจารณาว่าขณะที่มีการใช้งานอยู่ต่อเนื่องค่าแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนให้กับมอเตอร์ไฟฟ้าจะต้องมีค่าไม่เกินข้อกำหนด ดังนี้

1. การเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้าจะต้องไม่เกิน $\pm 10\%$ ของพิกัด ขณะมีการใช้งานตามพิกัดของความถี่ของมอเตอร์
2. การเปลี่ยนแปลงของความถี่จะต้องไม่เกิน $\pm 5\%$ ของพิกัด ขณะมีการใช้งานตามพิกัดของแรงดันไฟฟ้าของมอเตอร์
3. เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงทั้งแรงดันไฟฟ้าและความถี่ ซึ่งผลรวมที่เป็นค่าสมบูรณ์ (Absolute values) ของการเปลี่ยนแปลงทั้ง 2 ค่าจะต้องมีค่าไม่เกิน 10% โดยความถี่อื่นพหุที่ป้อนให้มอเตอร์จะต้องมีค่าไม่เกิน $\pm 5\%$ ของพิกัด

2.2.6.2 ผลกระทบต่อสมรรถนะของมอเตอร์เหนี่ยวนำไฟฟ้า 3 เฟสเมื่อแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล

ระบบไฟฟ้า 3 เฟส ในโรงงานอุตสาหกรรมจะมีอุปกรณ์ไฟฟ้า 1 เฟส เช่น อุปกรณ์ไฟฟ้าสำนักงานเข้ามาเกี่ยวข้องด้วยและก็จะทำให้เกิดการไม่สมดุลระหว่างเฟสทั้งกระแสและแรงดันภายในโรงงาน ซึ่งการไม่สมดุลดังกล่าวก็จะส่งผลกระทบต่อระบบไฟฟ้า เช่น เกิดการสูญเสียด้านพลังงานไฟฟ้าในสายที่มีกระแสไฟฟ้าไหลเพิ่มขึ้น, สายศูนย์มีกระแสไฟฟ้าไหล, การใช้โหลดประเภทที่ใช้ไฟฟ้าเป็นระบบไฟฟ้า 3 เฟส น้อยลงเนื่องจากการเกิดความไม่สมดุลในระบบไฟฟ้าทำให้เฟสใดเฟสหนึ่งจ่ายเต็มพิกัดกว่าเฟสอื่นแล้ว และทำให้สมรรถนะและอายุการใช้งานของมอเตอร์ไฟฟ้ามีประสิทธิภาพและอายุการใช้งานสั้นลง ซึ่งกรณีแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้มอเตอร์เหนี่ยวนำไฟฟ้าแบบ 3 เฟส จะส่งผลกระทบต่อการใช้กระแสไฟฟ้าในขดลวดโรเตอร์และสเตเตอร์ไม่เท่ากัน และทำให้เปอร์เซ็นต์กระแสไฟฟ้าที่ไม่สมดุลที่เกิดขึ้นอาจจะมีค่าสูง 6 ถึง 10 เท่าเมื่อเทียบกับเปอร์เซ็นต์ของแรงดันไฟฟ้าที่ไม่สมดุล และผลของการสูญเสียพลังงานไฟฟ้าจากกระแส จะทำให้เกิดความร้อนของฉนวนขึ้นและทำให้มีผลต่ออายุการใช้งานของมอเตอร์ไฟฟ้าโดยตรง และการเกิดแรงดันไม่สมดุลก็จะทำให้แรงบิดของมอเตอร์ไฟฟาลดลงด้วย ไม่เพียงเท่านั้นความเร็วขณะมีโหลดเต็มพิกัดก็จะมีค่าลดลงด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การคำนวณหาเปอร์เซ็นต์แรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล[1]

การคำนวณหาเปอร์เซ็นต์แรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลนั้นได้ถูกกำหนดโดย NEMA ได้กำหนดว่าค่าเปอร์เซ็นต์แรงดันไฟฟ้าที่เบี่ยงเบนสูงสุดระหว่างเฟสใดเฟสหนึ่งกับค่าแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยทั้ง 3 เฟสต่อค่าเฉลี่ยของแรงดันไฟฟ้าทั้ง 3 เฟส ซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการดังต่อไปนี้

$$\%VUB = \frac{V_{\max dev.}}{V_{avg}} \times 100 \quad (2.9)$$

$$V = \frac{V_{ab} + V_{bc} + V_{ca}}{3} \quad (2.10)$$

เมื่อ

$\%VUB$ = เปอร์เซนต์แรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล

V_{avg} = แรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยระหว่างเฟส (V)

$V_{\max dev.}$ = แรงดันไฟฟ้าเบี่ยงเบนสูงสุดระหว่างเฟสใดเฟสหนึ่งกับ V_{avg}

V_{ab}, V_{bc}, V_{ca} = แรงดันระหว่างเฟส (V)

2.2.6.3 การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิของมอเตอร์ไฟฟ้าเนื่องจากสาเหตุแรงดันไฟฟ้าไม่

สมดุล

เมื่อมอเตอร์ไฟฟ้าทำงานที่เต็มพิกัดโหลด เปอร์เซนต์การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิภายในมอเตอร์ ($\% \Delta T$) จะมีผลจากแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล ซึ่งสามารถประมาณค่าได้เท่ากับสองเท่าของค่าเปอร์เซ็นต์แรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลยกกำลังสอง ซึ่งสามารถแสดงได้ในสมการดังต่อไปนี้

$$\% \Delta T = 2 \times (\% VUB)^2 \quad (2.11)$$

สำหรับการประมาณค่าอุณหภูมิสูงสุดที่ยอมให้เกิดขึ้นได้ของมอเตอร์ไฟฟ้าเนื่องจากสาเหตุแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลสามารถหาได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$T_{rise,unb} = T_{rise,reted} \times \left[1 + \frac{\% \Delta T}{100} \right] \quad (2.12)$$

เมื่อ

$T_{rise,unb}$ = อุณหภูมิที่สูงขึ้นเนื่องจากแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$T_{rise,reted}$ = พิกัดอุณหภูมิสูงสุดของฉนวนที่สามารถยอมรับได้ ดังแสดงในตารางที่ 2.1

$\% \Delta T$ = เปอร์เซ็นต์การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิในมอเตอร์ไฟฟ้า

2.3 การวัดอุณหภูมิด้วยเครื่องวัดอุณหภูมิแบบอินฟราเรด

2.3.1 อินฟราเรดเซนเซอร์[16]

2.3.1.1 หลักการทำงานของอินฟราเรดเซนเซอร์

เหมาะสำหรับใช้วัดอุณหภูมิในจุดต่างๆ โดยที่ไม่จำเป็นต้องสัมผัสกับผิววัตถุที่มีความร้อน ดังนั้นจึงสามารถนำไปใช้กับงานได้หลายประเภท ที่เกี่ยวกับการวัดอุณหภูมิ ซึ่งใช้การวัดรังสีอินฟราเรดที่ถูกปล่อยออกจากวัตถุ โดยการวัดเป็นการวัดอุณหภูมิที่พื้นผิว (Surface) เท่านั้น และการเลือกเครื่องมือวัดชนิดนี้ จะต้องศึกษารายละเอียดหลัก 2 อย่างคือ ค่า Distance to spot ratio และค่า Emissivity (ตารางที่ 2.2) เพื่อให้สามารถอ่านค่าอุณหภูมิได้อย่างถูกต้อง จะใช้สำหรับงานติดตั้ง เพื่อตรวจสอบอุณหภูมิของเครื่องจักรหรืออุณหภูมิของกระบวนการผลิต โดยจะมีการส่งสัญญาณมาตรฐาน เพื่อแสดงผลการวัดอุณหภูมิ และเพื่อใช้ในการควบคุมกระบวนการผลิต ทำให้เกิดความผิดพลาดในกระบวนการผลิตที่เกิดจากอุณหภูมิมีน้อยลง

2.3.1.2 ปัจจัยที่มีผลต่อการทำงานของอินฟราเรดเซนเซอร์

ระบบแสงของอินฟราเรดเซนเซอร์จะเก็บรวบรวมพลังงานอินฟราเรดจากรอบๆ จุดวัดและโฟกัสไปที่ตัวตรวจจับความละเอียดของออปติคอลจะถูกกำหนดโดยอัตราส่วนของระยะทางจากเครื่องมือวัดไปที่วัตถุเปรียบเทียบกับขนาดของจุดที่วัด(D:S Ratio) ยิ่งตัวเลขอัตราส่วนมีมากจะดีกว่าความละเอียดของเครื่องมือวัดและถ้าขนาดของจุดมีขนาดเล็กนั้นจะทำให้สามารถวัดได้จากระยะทางที่ไกลขึ้น นวัตกรรมล่าสุดในเลนส์อินฟราเรดคือการเพิ่มคุณสมบัติ Close Focus ซึ่งจะช่วยให้มีความถูกต้องในการวัดของพื้นที่เป้าหมายขนาดเล็กโดยไม่รวมถึงอุณหภูมิพื้นหลังที่ไม่พึงประสงค์

Field of view

ตรวจสอบให้แน่ใจว่าเป้าหมายมีขนาดใหญ่กว่าขนาดของจุดที่วัด สำหรับเป้าหมายที่มีขนาดเล็กคุณควรอยู่ใกล้กับเป้าหมาย เมื่อความถูกต้องเป็นสิ่งสำคัญต้องแน่ใจว่าเป้าหมายมีขนาดเล็กกว่าสองเท่าหรือใหญ่เท่ากับขนาดของจุด

Environmental Conditions

เงื่อนไขสภาพแวดล้อมในพื้นที่การทำงาน เช่น ไอน้ำ, ฝุ่น, คิวบิก ฯลฯ สามารถป้องกันให้การวัดมีความถูกต้องโดยกีดขวางในส่วนของเลนส์ สัญญาณรบกวน, แม่เหล็กไฟฟ้าหรือการสั่นสะเทือนและเงื่อนไขอื่น ๆ ที่ควรได้รับการพิจารณาก่อนที่จะเริ่มการติดตั้ง โครงสร้างการป้องกัน, เครื่องฟอก, หรือเครื่องทำความเย็นที่อาศัยการระบายความร้อนด้วยน้ำ สามารถป้องกันกันเซนเซอร์และทำให้มั่นใจว่าได้การวัดที่แม่นยำ

Ambient Temperatures (the surrounding temperature)

ถ้าเครื่องวัดอุณหภูมิสัมผัสกับความแตกต่างของอุณหภูมิโดยรอบแบบทันทีทันใดที่ 20°C หรือมากกว่าอนุญาตให้ปรับอุณหภูมิโดยรอบใหม่เป็นเวลาอย่างน้อย 20 นาที Raytek fixed-mounted sensors ที่ระบุการทำงานภายในช่วงของอุณหภูมิห้อง ตัวอย่างเช่น Raytek MIH สามารถทนต่ออุณหภูมิโดยรอบ (โดยไม่มีน้ำหล่อเย็นหรืออากาศ) ได้ถึง 180°C (356 องศาฟาเรนไฮต์) สำหรับอุณหภูมิโดยรอบสูง Raytek แนะนำให้ใช้อุปกรณ์เสริม เช่น Thermo jacket

Emissivity

Emissivity เป็นตัวชี้คุณสมบัติการปล่อยรังสีอินฟราเรดออกมาวัตถุ พลังงานที่ปล่อยออกมานั้นจะบ่งชี้ถึงอุณหภูมิของวัตถุ Emissivity สามารถมีค่าตั้งแต่ 0 (กระจกเงา) ถึง 1.0 (วัตถุดำ)

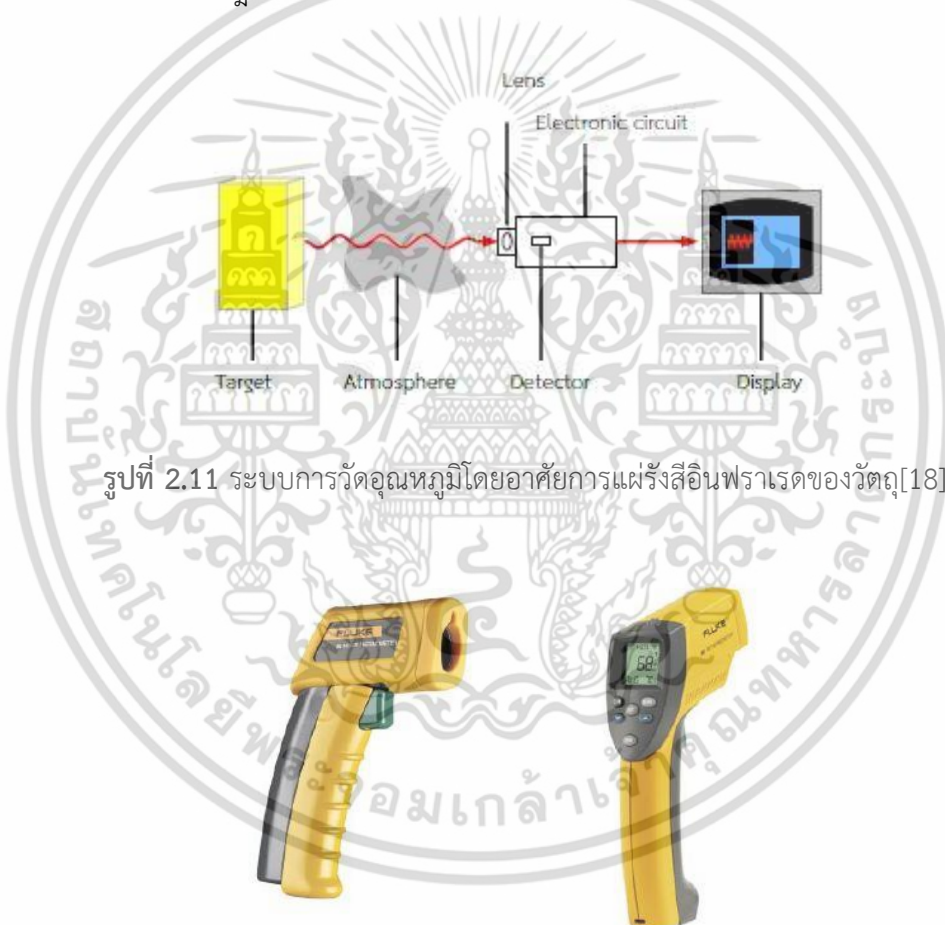
ตารางที่ 2.2 ค่า Emissivity ของผิววัสดุ[17]

| Surface Material | Emissivity Coefficient - ϵ - |
|----------------------------|--|
| Alloy 24ST Polished | 0.09 |
| Alumina, Flame sprayed | 0.8 |
| Aluminum Commercial sheet | 0.09 |
| Aluminum Foil | 0.04 |
| Aluminum Commercial Sheet | 0.09 |
| Aluminum Heavily Oxidized | 0.2 - 0.31 |
| Aluminum Highly Polished | 0.039 - 0.057 |
| Aluminum Anodized | 0.77 |
| Aluminum Rough | 0.07 |
| Aluminum paint | 0.27 - 0.67 |
| Oil paints, all colors | 0.92 - 0.96 |
| Black Body Matt | 1 |
| Mild Steel | 0.20 - 0.32 |
| Steel Oxidized | 0.79 |
| Steel Polished | 0.07 |
| Stainless Steel, weathered | 0.85 |
| Stainless Steel, polished | 0.075 |
| Stainless Steel, type 301 | 0.54 - 0.63 |
| Steel Galvanized Old | 0.88 |
| Steel Galvanized New | 0.23 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.2 เทอร์โมมิเตอร์ชนิดอินฟราเรด (infrared thermometer)[18]

เทอร์โมมิเตอร์ชนิดอินฟราเรด (infrared thermometer) เป็นเครื่องมือวัด (instrument) ใช้สำหรับการวัดอุณหภูมิ (temperature measurement) ที่ผิวของวัตถุแบบไม่สัมผัส ทำงานโดยอาศัยหลักการแผ่รังสีอินฟราเรด (infrared radiation) ออกจากวัตถุ โดยตัวตรวจจรับรังสีอินฟราเรดทำหน้าที่รับรังสีอินฟราเรด (infrared) ที่แผ่ออกจากวัตถุเป้าหมาย (target) ผ่านเลนส์ของเครื่องมือวัด แล้วแปลงรังสีอินฟราเรดเหล่านี้ให้อยู่ในรูปของสัญญาณทางไฟฟ้า รังสีอินฟราเรดที่ตัวตรวจจรับไปนั้นประกอบด้วยรังสีที่วัตถุเป้าหมายแผ่ออกมารวมกับรังสีที่แผ่จากวัตถุอื่นหรือจากสิ่งแวดล้อมสะท้อนออกจากผิวของวัตถุเป้าหมาย จากนั้นแปลงข้อมูลที่รับมาจากตัวตรวจจรับและนำไปแสดงที่ตัวแสดงผล เทอร์โมมิเตอร์ชนิดอินฟราเรดแสดงผลออกมาในรูปของตัวเลข ซึ่งการแปลงรังสีอินฟราเรดที่เซนเซอร์ตรวจจรับได้ให้อยู่ในหน่วยของอุณหภูมิอาศัยกฎของ Planck (Planck's Law) และ กฎของ Stefan-Boltzmann (Stefan-Boltzmann's Law)



รูปที่ 2.11 ระบบการวัดอุณหภูมิโดยอาศัยการแผ่รังสีอินฟราเรดของวัตถุ[18]

รูปที่ 2.12 เทอร์โมมิเตอร์ชนิดอินฟราเรด (ภาพผลิตภัณฑ์ FLUKE)[18]

ค่าความถูกต้อง (accuracy) ของอุณหภูมิที่วัดได้จากเทอร์โมมิเตอร์ชนิดอินฟราเรดขึ้นอยู่กับ

- ชนิดและลักษณะพื้นผิวของวัตถุที่ต้องการวัดอุณหภูมิ โดยวัตถุต่างชนิดกันหรือมีลักษณะพื้นผิวที่แตกต่างกันจะมี ค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสี (emissivity, ϵ) และค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนรังสีของผิววัตถุ (reflection, ρ) ต่างกัน

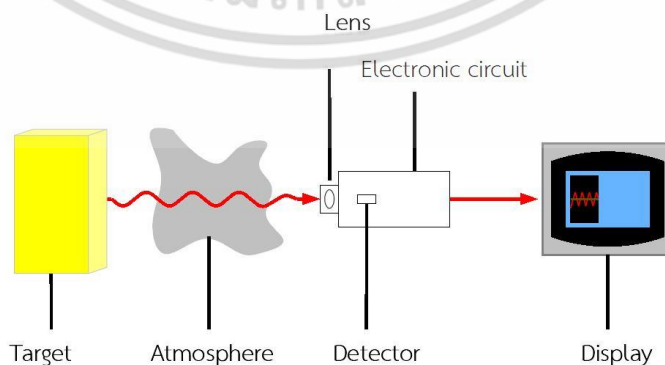
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ระยะห่างระหว่างวัตถุกับเครื่องมือวัด โดยค่าความผิดพลาด (error) ของไพโรมิเตอร์ชนิดอาศัยการเปลี่ยนแปลงการแผ่รังสีของวัตถุ อาจเกิดจากการเคลื่อนที่ของรังสีผ่านตัวกลาง ตัวกลางเหล่านี้ดูดซับพลังงานบางส่วนจากรังสีก่อนถึงตัวเครื่องมือวัด ทำให้พลังงานที่เซนเซอร์ตรวจจับได้มีค่าลดลง ค่าที่วัดได้จึงคลาดเคลื่อน
- พื้นที่การวัดอุณหภูมิด้วยเทอร์โมมิเตอร์ชนิดอินฟราเรด โดยคิดจากค่าอัตราส่วนระหว่างระยะห่างของวัตถุกับเครื่องมือวัด (distance, D) และพื้นที่การวัด (spot size, S) หรือ D:S ซึ่งจะเป็ระยะห่างที่เหมาะสมสำหรับการวัด ในการใช้งานควรเลือกคุณสมบัติให้เหมาะสมกับลักษณะงานตามที่อยู่ปรณกำหนด

2.3.3 กล้องถ่ายภาพความร้อน (thermal image camera)[18]

กล้องถ่ายภาพความร้อน เป็นเครื่องมือวัดอุณหภูมิที่ผิวของวัตถุ ทำงานโดยอาศัยหลักการแผ่รังสีอินฟราเรด (infrared radiation) ออกจากวัตถุ ซึ่งเป็นการวัดแบบไม่สัมผัสและเป็น การวัดอุณหภูมิแบบพื้นที่ ส่วนประกอบสำคัญของกล้องถ่ายภาพความร้อน ประกอบด้วย เลนส์ (lens) ตัวตรวจจับรังสีอินฟราเรด (infrared detector) หรือเซนเซอร์ชนิดอินฟราเรด (Infrared sensor) วงจรอิเล็กทรอนิกส์ (Electronic circuit) และส่วนแสดงผล (display) โดยตัวตรวจจับรังสีอินฟราเรด ทำหน้าที่รับรังสีอินฟราเรด (infrared) ที่แผ่ออกจากวัตถุเป้าหมาย (target) ผ่านเลนส์ของเครื่องมือวัด (instrument) แล้วแปลงรังสีอินฟราเรดเหล่านี้ให้อยู่ในรูปของสัญญาณทางไฟฟ้า รังสีอินฟราเรดที่ตัวตรวจจับรับไปนั้นประกอบด้วยรังสีที่วัตถุเป้าหมายแผ่ออกมารวมกับรังสีที่แผ่จากวัตถุอื่นหรือจากสิ่งแวดล้อมสะท้อนออกจากผิวของวัตถุเป้าหมาย จากนั้นแปลงข้อมูลที่รับมาจากตัวตรวจจับและนำไปแสดงที่ตัวแสดงผล ซึ่งอาจแสดงผลออกมาในรูปแบบของตัวเลข สี หรือกราฟ หรือทั้ง 3 รูปแบบ

กล้องถ่ายภาพความร้อนประกอบด้วยเซนเซอร์ชนิดอินฟราเรดหลายตัว แต่ละตัวแสดงผลออกมาในรูปแบบของสีที่แตกต่างกันตามอุณหภูมิของจุดนั้น ๆ โดยทั่วไป สีแดงแสดงผลของบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงและสีน้ำเงินแสดงผลของบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำ หรือโทนสีสว่างแสดงผลของบริเวณที่มีอุณหภูมิสูง และโทนสีมืดแสดงผลของบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำ ผลของแต่ละจุดที่ได้จากเซนเซอร์แต่ละตัว เมื่อนำมารวมกันจะประกอบขึ้นเป็นภาพ เรียกว่า "ภาพถ่ายความร้อน (thermal image)" ซึ่งการแปลงรังสีอินฟราเรดที่เซนเซอร์ตรวจจับได้ให้อยู่ในหน่วยของอุณหภูมิอาศัยกฎของ Planck (Planck's law) และ กฎของ Stefan-Boltzmann (Stefan-Boltzmann's law)



รูปที่ 2.11 ระบบการวัดอุณหภูมิโดยอาศัยการแผ่รังสีอินฟราเรดของวัตถุ[18]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

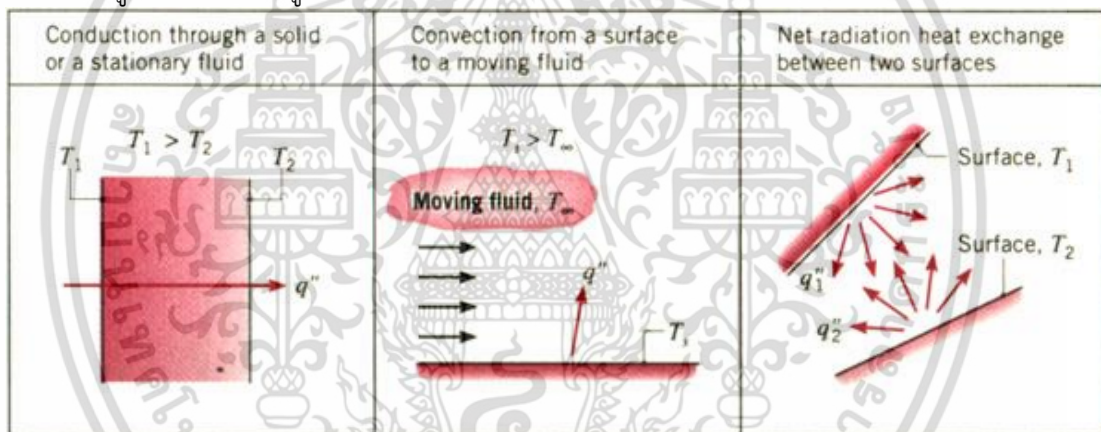
ในการวัดอุณหภูมิด้วยกล้องถ่ายภาพความร้อนคุณสมบัติที่สำคัญเกี่ยวข้องกับการวัดอุณหภูมิ ต่อพื้นที่คือ ค่าของเขตการมองเห็น (Field Of View : FOV) เป็นคุณสมบัติที่แสดงถึงพื้นที่การมองเห็นของกล้องถ่ายภาพความร้อน จะประกอบด้วย Instantaneous Field Of View : IFOV เป็นพื้นที่เล็กที่สุดของ FOV ซึ่งค่า FOV และ IFOV จะเปลี่ยนแปลงตามระยะห่างระหว่างวัตถุกับกล้องถ่ายภาพความร้อนที่มีการเปลี่ยนแปลง

2.4 ทฤษฎีการถ่ายเทความร้อน[19]

การถ่ายเทความร้อน (Heat transfer) แบ่งออกเป็น 3 รูปแบบ ดังนี้

1. การนำความร้อน (Conduction) ตัวกลางต้องอยู่กับที่
2. การพาความร้อน (Convection) ตัวกลางไม่อยู่กับที่ เกี่ยวข้องกับของไหล
3. การแผ่รังสีความร้อน (Radiation) ไม่จำเป็นต้องมีตัวกลาง

โดยทั่วไปกลไกการถ่ายเทความร้อนทั้ง 3 รูปแบบ จะเกิดขึ้นพร้อมกัน กลไกการถ่ายเทความร้อนของแต่ละรูปแบบแสดงดังรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 รูปแบบการถ่ายเทความร้อนแบบต่างๆ

2.4.1 การนำความร้อน (Conduction)

เมื่อวัตถุมีอุณหภูมิที่แตกต่างกันจะเกิดการถ่ายเทความร้อนในทิศทางที่อุณหภูมิลดลง โดยโมเลกุลที่มีอุณหภูมิสูงจะถ่ายเทพลังงานความร้อนให้โมเลกุลที่มีอุณหภูมิต่ำ ส่งผลให้เกิดการถ่ายเทความร้อนในทิศทางที่อุณหภูมิลดลง ลักษณะนี้เรียกว่า การนำความร้อน (heat conduction) หรือการแพร่กระจายความร้อน (heat diffusion) โดยลักษณะการเคลื่อนที่ของโมเลกุลในตัวกลางมีทิศทางที่ไม่แน่นอนแบบ random motion

ซึ่ง Joseph Fourier (1822) ทำการทดลองได้ กฎของฟูเรียร์ (Fourier's law) ซึ่งเป็นสมการอัตรา (rate equation) สำหรับการนำความร้อน ใช้สำหรับการคำนวณหาจำนวนพลังงานความร้อนที่ส่งถ่ายต่อหน่วยเวลา

สำหรับการพิจารณาการกระจายอุณหภูมิภายในผนังราบ (plane wall) สามารถคิดได้ว่าเป็นแบบมิติเดียว (one-dimensional temperature distribution) หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งว่าอุณหภูมิ $T(x)$ แปรผันกับระยะทางตามแกน x ซึ่งเมื่อใช้กฎของฟูเรียร์สามารถเขียนสมการอัตราการนำความร้อนได้เป็น เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พิจารณามิติเดียว (x) ($T_1 > T_2$)

กฎของฟูรีเย (Fourier's law)

$$q_x = -kA \frac{dT}{dx} \quad (2.13)$$

เมื่อ

q_x = อัตราการนำความร้อนในทิศทาง x (Watts หรือ J/s)

A = พื้นที่ที่ตัดฉากกับทิศทาง q_x หรือตั้งฉากกับแกน x

$$\frac{dT}{dx} = \text{Temperature gradient} \quad (2.14)$$

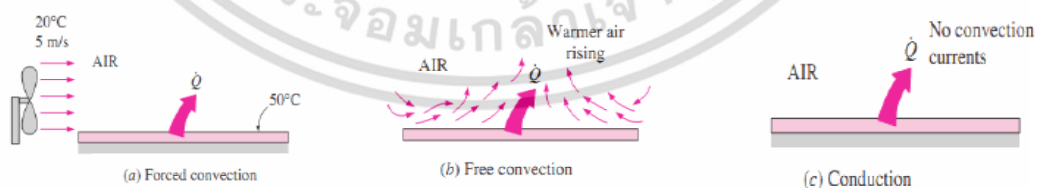
k = ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน (Thermal Conductivity) (W/m·K หรือ W/m·°C)

ค่า k เป็นคุณสมบัติของตัวกลาง แสดงถึงความสามารถของวัสดุในการถ่ายเทพลังงาน โดยค่า k ขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุ

โดยส่วนใหญ่วัสดุที่เป็นตัวนำไฟฟ้าจะมีความสามารถในการนำความร้อนที่ดี เครื่องหมายลบที่แสดงในสมการเป็นเพราะความร้อนจะต้องถ่ายเทในทิศทางที่อุณหภูมิลดลงเสมอหรือเครื่องหมายลบเป็นการทำให้ทิศทางการถ่ายเทความร้อนเป็นไปตามกฎข้อที่สองของเทอร์โมไดนามิกส์

2.4.2 การพาความร้อน (Convection)[20]

พิจารณารูปที่ 2.14 แสดงการถ่ายโอนความร้อนจากพื้นผิวร้อนไปสู่ของไหลในสิ่งแวดล้อมภายนอกโดยการพาความร้อนและการนำความร้อน



รูปที่ 2.14 การถ่ายโอนความร้อนจากพื้นผิวร้อนไปสู่ของไหลในสิ่งแวดล้อมภายนอก

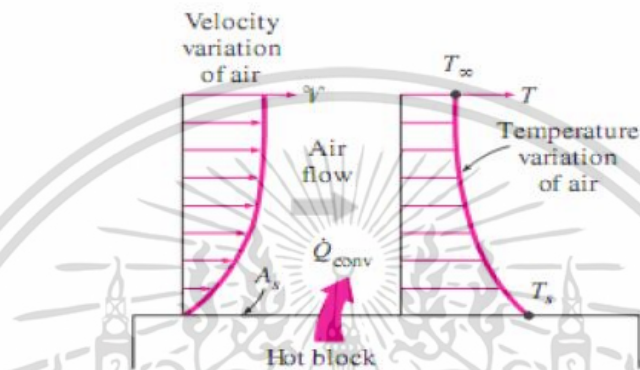
การถ่ายเทความร้อนโดยการพาประกอบด้วยกลไก 2 อย่าง คือ พลังงานเกิดการถ่ายเทเนื่องมาจากการเคลื่อนที่หรือการแพร่แบบสุ่มของโมเลกุล และผลเนื่องมาจากการเคลื่อนที่ของของไหล การถ่ายเทความร้อนลักษณะนี้เกิดขึ้น การถ่ายเทความร้อนโดยการพา แบ่งออกได้เป็น 2 ลักษณะคือ

- การพาความร้อนแบบบังคับ (Force convection) หรือ การพาความร้อนแบบธรรมชาติ (Natural convection) คือ การเคลื่อนที่ของความร้อนระหว่างผิวของแข็งและของไหล โดย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่ของไหลถูกบังคับให้เคลื่อนที่ไปสัมผัสกับผิวของของแข็งโดยกลไกภายนอก เช่น การใช้พัดลม

- การพาความร้อนแบบอิสระ (Free convection) คือการเคลื่อนที่ของความร้อนระหว่างผิวของของแข็งและของไหล โดยที่ไม่มีกลไกใด ๆ ที่ทำให้ของไหลเคลื่อนที่ ของไหลสามารถเคลื่อนที่เองได้ซึ่งเป็นผลมาจากของไหลมีอุณหภูมิต่างกัน แต่ของไหลที่อยู่ใกล้กับผิวของของแข็งก็อาจเคลื่อนที่ได้โดยแรงลอยตัวของของไหลเอง แรงลอยตัวนี้เกิดจากความแตกต่างของความหนาแน่นของของไหล เมื่อเกิดความแตกต่างของอุณหภูมิในชั้นของของไหลขึ้น



รูปที่ 2.15 การพัฒนาชั้นขอบเขตในการถ่ายเทความร้อนโดยการพาความร้อนแบบบังคับ

ตาราง 2.3 ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของของไหลบางชนิด

| ประเภทการพาความร้อนและชนิดของสารไหล | ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนเฉลี่ย (W/m ² K) |
|-------------------------------------|---|
| การพาความร้อนแบบอิสระ, อากาศ | 5 - 25 |
| การพาความร้อนแบบอิสระ, น้ำ | 20 - 100 |
| การพาความร้อนแบบบังคับ, อากาศ | 10 - 200 |
| การพาความร้อนแบบบังคับ, น้ำ | 50 - 10,000 |
| น้ำกำลังเดือด | 3,000 - 100,000 |
| ไอของน้ำที่กำลังกลั่นตัว | 5,000 - 100,000 |

พิจารณาการพาความร้อนที่เกิดขึ้นในของไหลเคลื่อนที่ผ่านพื้นผิวของแข็งที่มีอุณหภูมิต่างกัน ดังรูปที่ 2.15 ที่แสดงการถ่ายเทความร้อนโดยการพาความร้อนระหว่างพื้นผิวร้อนกับของไหลที่เคลื่อนที่ผ่านไปบนแผ่นวัสดุ ซึ่งแสดงให้เห็นการเปลี่ยนแปลงของความเร็วและอุณหภูมิ ซึ่งความเร็วจะลดน้อยลงในทิศทางที่วิ่งเข้าสู่ผิวของวัตถุด้วยผลของแรงจากความเสียดทานที่เนื่องมาจากความหนืดของของไหลและเนื่องจากของไหลชั้นที่อยู่ติดกับผิวนั้นมีความเร็วเป็นศูนย์ ดังนั้นการถ่ายเทความร้อนต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ระหว่างผิวของแผ่นวัสดุกับของไหลชั้นดังกล่าวเป็นการถ่ายเทความร้อนแบบการพาอย่างเดียว ของไหลที่มีความเร็วสูงจะให้ค่าความลาดชันของอุณหภูมิสูงทำให้มีอัตราการพาความร้อนสูงตามไปด้วย ตารางที่ 2.3 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของของไหลบางชนิด

การคำนวณอัตราการเคลื่อนที่ของความร้อนโดยการพามีหลายสิ่งที่เกี่ยวข้องที่มีผลต่อการเคลื่อนที่ของความร้อนแบบการพา เช่น คุณสมบัติต่าง ๆ ของของไหล เช่น ความหนาแน่น ความร้อนจำเพาะ ความหนืด ความเร็วของของไหล ความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิของพื้นผิวของ

ของแข็ง และของไหล เป็นต้น ซึ่งสามารถใช้กฎของนิวตัน (Newton) คำนวณอัตราการเคลื่อนที่ของความร้อนโดยการพาตามสมการ (2.15)

อัตราการพาความร้อน q_{cov} หาได้จาก Newton's law of cooling

$$q_{cov} = hA\Delta T \quad (2.15)$$

โดยที่

A = พื้นที่ผิวส่วนที่สัมผัสของไหล

ΔT = ผลต่างของอุณหภูมิ

h = สัมประสิทธิ์การพาความร้อน (convective heat transfer coefficient)

($W/m^2 \cdot K$ หรือ $W/m^2 \cdot ^\circ C$)

เนื่องจากสภาพการไหลอาจเปลี่ยนแปลงจากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่ง ดังนั้น q และ h อาจมีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามพื้นผิว ดังนั้นอัตราการถ่ายเทความร้อนทั้งหมด (Total heat transfer rate) หาได้จากการอินทิเกรตอัตราการถ่ายเทความร้อนจาก พื้นผิวเล็กๆทั้งหมด

2.4.3 กฎทรงพลังงาน (Conservation of Energy)[19]

เราสามารถแสดงกฎทรงพลังงานได้ว่า

[พลังงานเข้าสู่พื้นผิวควบคุม]-[พลังงานที่ออกจากพื้นผิวควบคุม] = [การเปลี่ยนแปลงพลังงานสะสมในพื้นที่ผิวควบคุม]

$$E_{in} + E_g - E_{out} = \Delta E_{st} \quad (2.16)$$

โดยที่

E_{in} & E_{out} = พลังงานและออกผ่านผิวควบคุม (control volume, CV)

E_g = พลังงานรูปอื่นที่แปลงมาเป็นความร้อนภายในพื้นที่ผิวควบคุม (Energy generation)

ΔE_{st} = การเปลี่ยนแปลงพลังงานสะสมในพื้นที่ผิวควบคุม (Energy storage)

2.4.4 การนำความร้อนแบบมิติเดียวภายใต้สภาวะคงตัว (One-dimensional, steady-state conduction)[19]

การนำความร้อนแบบมิติเดียว (one directional) และภายใต้สภาวะคงตัว (Steady-state) เป็นการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิเกิดขึ้นในทิศทางเดียวและความร้อนจะถ่ายเทในทิศทางนี้เดียวอุณหภูมิในแต่ละจุดในตัวกลางจะไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา คือเมื่อมีความแตกต่างของอุณหภูมิเกิดขึ้นจะทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อนโดยในช่วงแรกอุณหภูมิภายในผนังยังมีการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เปลี่ยนแปลงจะเป็นการถ่ายเทความร้อนในสภาวะไม่คงตัว (unsteady state หรือ transient) จนถึงเวลาหนึ่งที่อุณหภูมิภายในผนังไม่มีการเปลี่ยนแปลงและคงที่คือสภาวะคงตัว (steady state)

วิธีที่ Thermal Resistance

Ohm's law

$$I = \frac{E_1 - E_2}{R_e} \quad (2.17)$$

เมื่อ

- I = กระแสไฟฟ้า
 $E_1 - E_2$ = ความต่างศักย์ทางไฟฟ้า
 R_e = ความต้านทางไฟฟ้า

Fourier's law

แทนด้วยวงจรไฟฟ้าดังนี้

$$q = -kA \frac{(T_{s2} - T_{s1})}{L}$$

$$q = \frac{kA}{L} T_{s1} - T_{s2}$$

$$q = \frac{(T_{s1} - T_{s2})}{L/kA}$$

(2.18)

เมื่อ

- q = อัตราการถ่ายเทความร้อน(W)
 k = ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน(W/mK)
 A = พื้นที่ระบายความร้อน(m²)
 T = อุณหภูมิ(C or K)
 L = ความหนาของพื้นผิว(m)

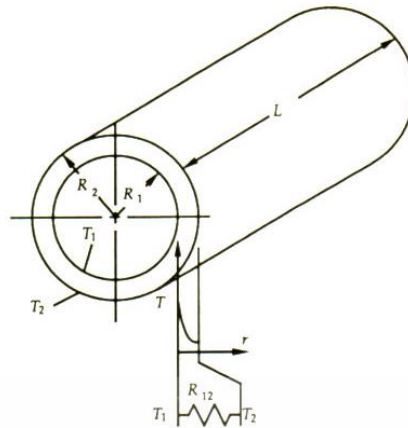
โดยที่ $R = L/kA$

R ; Thermal Resistance

2.4.4.1 การนำความร้อนแบบทรงกระบอก

ตัวอย่างระบบทรงกระบอกที่พบบ่อย ได้แก่ การนำความร้อนผ่านผนังท่อรูปทรงกระบอกกลวง โดยที่ผิวในและนอกของทรงกระบอกสัมผัสกับของไหลที่มีอุณหภูมิต่างกัน(รูปที่ 2.10) โดยถ้าทรงกระบอกมีความยาวมากเมื่อเทียบกับความหนาของผนัง การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิส่วนใหญ่จะเกิดขึ้นในแนวรัศมีและประมาณได้ว่าเป็นการนำความร้อนมิติเดียวตามรัศมี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.16 ทรงกระบอกกึ่งกลางซึ่งมีการพาความร้อนที่ผิว

$$q = \frac{(T_{\infty 1} - T_{\infty 2})}{R_{t, total}} \quad (2.19)$$

$$R_{total} = \frac{1}{h_1 A_i} + \frac{\ln\left[\frac{r_o}{r_i}\right]}{(2\pi k L)} + \frac{1}{h_2 A_o} \quad (2.20)$$

เมื่อ

q = อัตราการถ่ายเทความร้อน (W)

k = ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน (W/mK)

h = ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน ($W/m^2 K$)

A = พื้นที่ระบายความร้อน (m^2)

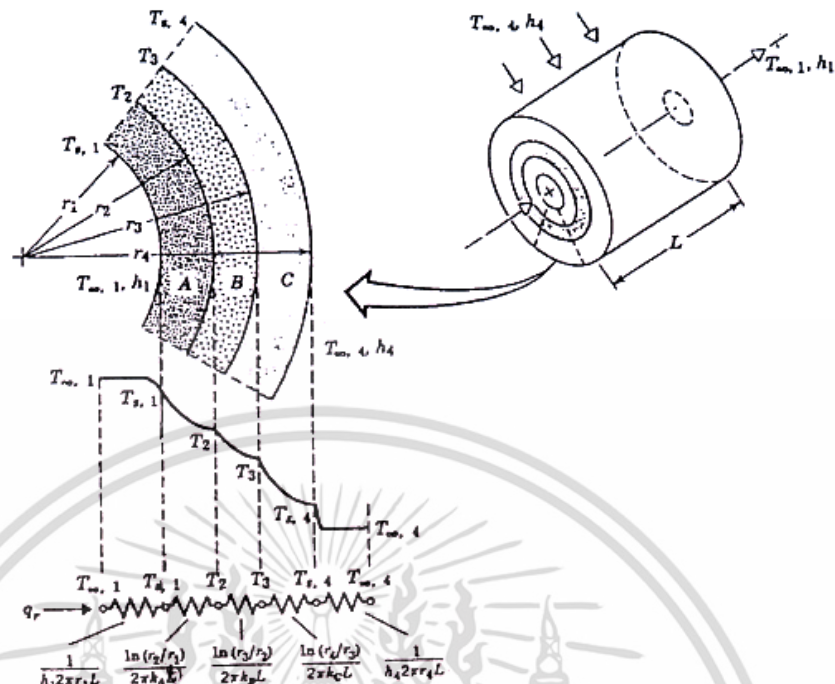
T = อุณหภูมิ (C or K)

L = ความหนาของพื้นผิว (m)

2.4.4.2 กรณีทรงกระบอกหลายชั้น

สำหรับระบบทรงกระบอกหลายชั้นแสดงดังรูปที่ 2.17 ตัวอย่างเช่น การหุ้มฉนวนที่ท่อส่งไอน้ำ หลักการวิเคราะห์อัตราการถ่ายเทความร้อนพิจารณาเช่นเดียวกับกรณีผนังราบหลายชั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.17 การกระจายอุณหภูมิในทรงกระบอกหลายชั้น

ซึ่งถ้าคิดตามรัศมี จะได้ (Critical Radius)

$$q = \frac{(T_{\infty 1} - T_{\infty 2})}{R_{t, total}}$$

$$R_{total} = R_{cond} + R_{conv}$$

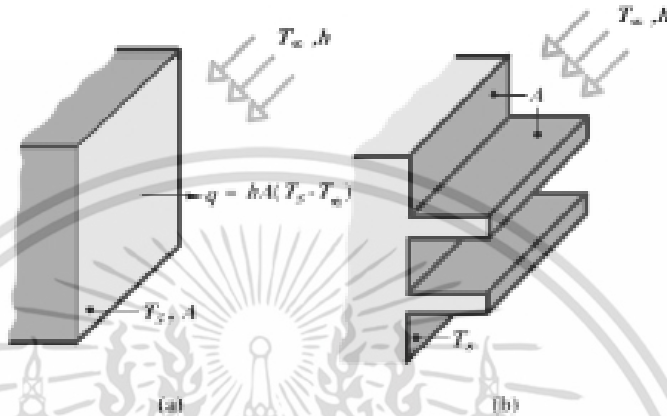
$$R_{cond} = \frac{\ln\left[\frac{r_o}{r_i}\right]}{(2\pi kL)}$$

$$R_{conv} = \frac{1}{h(2\pi r_o L)} \tag{2.21}$$

2.4.5 ครีประบายความร้อน (Fin)[19]

พื้นผิวที่ยื่นไปในของไหล (extended surface) โดยทั่วไปนั้นหมายถึงของแข็งซึ่งมีการถ่ายเทความร้อนภายในผิวและมีการพาความร้อนและ/หรือการแผ่รังสีความร้อน ระหว่างผิวของวัสดุกับสิ่งแวดล้อม พื้นผิวยื่นไปในของไหลนั้นถูกนำไปใช้เพื่อเพิ่มอัตราการถ่ายความร้อนระหว่างของแข็งและของไหล พื้นผิวดังกล่าวนี้เรียกว่า “ครีประบายความร้อน (fin)” พิจารณาผนังในรูปที่ 2.18a ถ้า T_s เป็นค่าคงที่อัตราการถ่ายเทความร้อนจากผนังสามารถเพิ่มขึ้นได้สองวิธีคือ โดยการเพิ่มค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน h ซึ่งทำได้ด้วยการเพิ่มความเร็วของไหล และอีกวิธีคือทำให้อุณหภูมิของของไหล T_{∞} ลดลง อย่างไรก็ตามจะพบว่ามีหลายกรณีแม้ว่าค่า h จะเพิ่มสูงจนไม่อาจเพิ่มไปอีกได้แต่ยังไม่พอเพียงต่อการเพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อนให้ได้ตามความต้องการ หรือไม่ก็อาจทำให้เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าใช้จ่ายสูงมาก ค่าใช้จ่ายดังกล่าวนี้สัมพันธ์กับกำลังงานที่ใช้ในการขับพัดลม หรือเครื่องสูบ เพื่อใช้ในการเพิ่มค่า h โดยการเพิ่มความเร็วของของไหล ส่วนวิธีที่สองคือการลดอุณหภูมิของไหล T_∞ นั้นแทบจะปฏิบัติไม่ได้ อย่างไรก็ตามจากรูปที่ 2.18b สังเกตได้ว่ามีอีกวิธีหนึ่งที่ทำได้ คือการเพิ่มพื้นที่ของพื้นผิวที่มีการพาความร้อน โดยการติดครีบบระบายความร้อนซึ่งยื่นออกมาจากผนังสู่ของไหลที่ล้อมรอบ ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของครีบบมีผลโดยตรงต่อการกระจายอุณหภูมิตลอดตัวครีบ และดังนั้นจึงมีผลต่อการเพิ่มการส่งถ่ายความร้อน



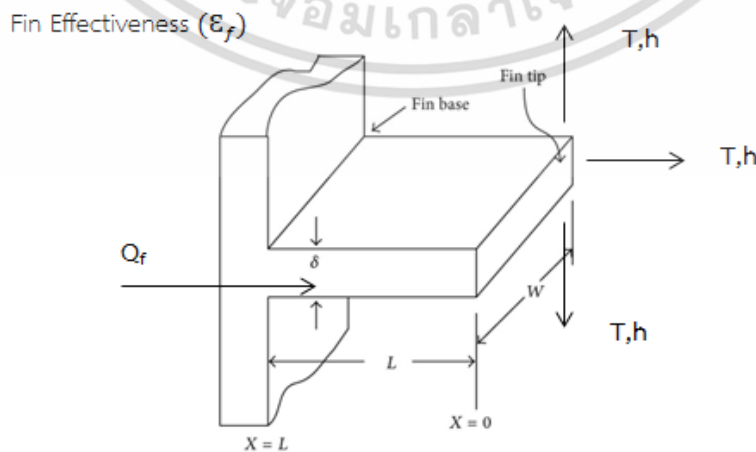
รูปที่ 2.18 การใช้ครีบบระบายความร้อนเพื่อเพิ่มอัตราการระบายความร้อนจากผนัง

ความร้อนที่ระบายจากวัตถุ = ความร้อนที่ของไหลพาออกไป

$$q_{conv} = hA(T_s - T_\infty) \tag{2.22}$$

ซึ่งการติดครีบบระบายความร้อนเป็นการเพิ่ม A แต่ในบางครั้งอาจเป็นการลด q ซึ่งในการใช้งานจะต้องคำนวณให้เหมาะสม

2.4.5.1 การถ่ายเทความร้อนแบบมีครีบ



รูปที่ 2.19 ลักษณะการกระจายความร้อนแบบครีบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับครูซึ่งใช้ในการเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ดูแลเห็นประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เป็นการเปรียบเทียบอัตราการถ่ายเทความร้อนกับเมื่อไม่ติดครีบริบ

$$\varepsilon_f = \frac{q_f}{q_{wo}} \quad (2.23)$$

โดยที่ q_f = อัตราการกระจายความร้อนแบบครีบริบ
 q_{wo} = $hA_{c,b}(T_b - T_\infty)$
 q_{wo} = q (without f_{in})
 T_b = อุณหภูมิที่ฐานครีบริบ
 $A_{c,b}$ = พื้นที่หน้าตัดที่ฐานของครีบริบ

2.4.5.2 การถ่ายเทความร้อนรวม (q_{tot})



รูปที่ 2.20 การใช้ครีบริบระบายความร้อนเพื่อเพิ่มอัตราการระบายความร้อนจากผนัง

$$Q_{tot} = N_f q_f + q_b \quad (2.24)$$

อัตราการส่งถ่ายความร้อนภายในครีบริบหาได้จาก

$$q_f = N \eta_f q_{max} \quad (2.25)$$

โดยที่ N คือจำนวนครีบริบ

$$q_{max} = 2\pi h(r_{2c}^2 - r_1^2)(T_b - T_\infty) \quad (2.26)$$

อัตราการระบายความร้อนจากทรงกระบอกบางส่วนที่ไม่มีครีบริบหาได้จาก

$$q_b = hA_b(T_b - T_\infty)$$

โดยที่

$$A_b = (W - N_f t)(2\pi r_1) \quad (2.27)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่สามารถนำเนื้อหาไปใช้ประโยชน์ด้านการศึกษา
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ

$$q_b = \text{อัตราการถ่ายเทความร้อนจากส่วนที่ไม่ติดครีบ } hA(T_b - T_\infty)$$

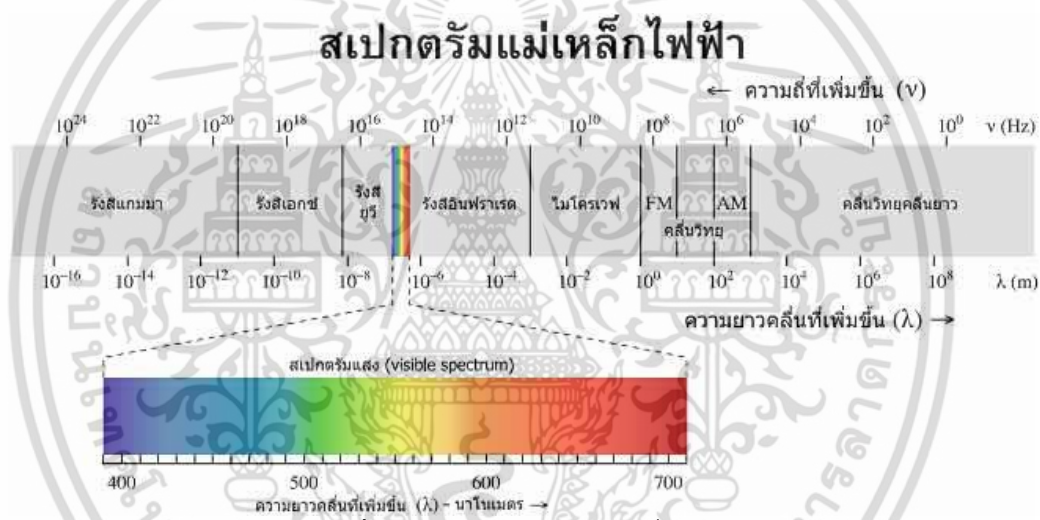
$$A_b = \text{พื้นที่ผิวของฐานส่วนที่ไม่ติดครีบ}$$

$$N_f = \text{จำนวนของครีบ}$$

$$W = \text{ความยาวของครีบ}$$

2.4.6 การแผ่รังสีความร้อน (Radiation) [20]

การแผ่รังสีความร้อน คือ พลังงานความร้อนที่แผ่ออกจากวัตถุ โดยเมื่อวัตถุมี $T_s > 0 \text{ K}$ จะเกิดการสั่นของโมเลกุล และส่งพลังงานออกมาในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic wave) ในย่านของคลื่นความร้อน (Thermal radiation) (รูปที่ 2.21) การแผ่รังสีความร้อนไม่ต้องการตัวกลาง และมีประสิทธิภาพมากที่สุด ในสุญญากาศ



รูปที่ 2.21 สเปกตรัมของรังสีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

อัตราการเปล่งรังสีออกจากวัตถุ สามารถคำนวณได้โดยอาศัยกฎของ Stefan – Boltzman (Stefan-Boltzman's law)

กรณีวัตถุทางอุดมคติ

$$q_b = A_s \sigma T_s^4 \quad (2.28)$$

โดยที่

$$q_b = \text{อัตราการเปล่งรังสีจากวัตถุอุดมคติ (Blackbody)}$$

$$A_s = \text{พื้นที่ผิวของวัตถุ}$$

$$T_s^4 = \text{อุณหภูมิสัมบูรณ์ (K)}$$

$$\sigma = \text{Stefan - Boltzman} = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$$

กรณีวัตถุจริง วัตถุจริงจะเปล่งรังสีได้น้อยกว่าวัตถุทางอุดมคติที่อุณหภูมิเดียวกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการศึกษาไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$q_{emit} = \varepsilon A_s \sigma T_s^4 \quad (2.29)$$

บทที่ 3

การออกแบบและการดำเนินงาน

ในบทนี้จะกล่าวถึงขั้นตอนการศึกษาวัดและการออกแบบชุดการทดลองสำหรับตรวจสอบอุณหภูมิที่พื้นผิวเพื่อป้องกันซีสภาพในมอเตอร์แบบเหนี่ยวนำ ในการออกแบบจะใช้ตัวตรวจวัดอุณหภูมิ 2 ชนิด คือตัวตรวจวัดอุณหภูมิแบบอินฟราเรด(IR Sensor) และเครื่องตรวจวัดอุณหภูมิแบบกล้องถ่ายภาพความร้อน(IR Camera) สำหรับตัวตรวจวัดอุณหภูมิแบบอินฟราเรด(IR Sensor) จะทำการออกแบบโปรแกรม Visual Basic เพื่อใช้สำหรับบันทึกอุณหภูมิที่ตรวจวัดได้และคำนวณค่าอุณหภูมิภายในของมอเตอร์และประมาณค่ากำลังสูญเสียที่ออกมาในรูปแบบของความร้อนโดยค่าอุณหภูมิที่ได้จากตัวตรวจวัดอุณหภูมิจะเป็นผลแบบ real time สำหรับเครื่องตรวจวัดอุณหภูมิแบบกล้องถ่ายภาพความร้อน(IR Camera) จะใช้โปรแกรม Excel ในการคำนวณ ซึ่งข้อมูลอุณหภูมิที่ได้จากกล้องถ่ายภาพความร้อน(IR Camera) จะอยู่ในรูปแบบวิดีโอไฟล์ภาพถ่ายความร้อนและสามารถแปลงเป็นข้อมูลให้อยู่ในโปรแกรม Excel เพื่อนำมาคำนวณ เนื้อหาในบทนี้จะกล่าวถึงอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับการทดลองและการติดตั้ง ซึ่งทำการทดลองโดยการปรับค่าแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลให้กับมอเตอร์เพื่อหาผลกระทบที่เกิดขึ้นภายในขอบเขตการศึกษาโดยอ้างอิงจากทฤษฎีในบทที่ 2 นำมาเป็นข้อมูลประกอบ

3.1 การวิเคราะห์ความผิดปกติของมอเตอร์โดยการวิเคราะห์อุณหภูมิ

ในการทดลองจะทำการสร้างแรงดันไม่สมดุลให้กับมอเตอร์โดยการต่อตัวต้านทานให้กับเฟสใดเฟสหนึ่งของมอเตอร์เพื่อทำให้เกิดแรงดันไม่สมดุล เมื่อเกิดแรงดันไม่สมดุลขึ้นขดลวดภายในมอเตอร์จะมีอุณหภูมิสูงขึ้น เราจะทำการบันทึกค่าอุณหภูมิภายในในมอเตอร์ที่บริเวณขดลวดสเตเตอร์และบันทึกค่าอุณหภูมิภายนอกมอเตอร์ที่โครงด้านข้างของมอเตอร์ซึ่งเป็นส่วนที่ใกล้ขดลวดสเตเตอร์ที่อยู่ภายในมากที่สุด การทดลองจะบันทึกค่าอุณหภูมิทั้งภายในมอเตอร์และภายนอกมอเตอร์ทุกๆ 1 นาที ตั้งแต่ปรับค่ากำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้มอเตอร์เสร็จสิ้น จนกระทั่งอุณหภูมิบริเวณผิวมอเตอร์มีค่าคงที่หรือเข้าสู่ช่วงการถ่ายเทความร้อนในสภาวะที่อุณหภูมิไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา

3.1.1 ผลกระทบต่อมอเตอร์เมื่อแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล

การสร้างแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลให้กับเฟสใดเฟสหนึ่งของมอเตอร์ จะมีผลทำให้เกิดการไม่สมดุลระหว่างเฟสทั้งกระแสและแรงดันทำให้เกิดการสูญเสียด้านพลังงานไฟฟ้าในสายที่มีกระแสไฟฟ้าไหลเพิ่มขึ้น จะทำให้เกิดความร้อนของฉนวนขึ้น แรงบิดของมอเตอร์ลดลงและความเร็วขณะที่มีโหลดเต็มพิกัดมีค่าลดลง โดยการคำนวณเปอร์เซ็นต์แรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลดังสมการที่ 2.6[1] โดยมีการควบคุมการทดลองสำหรับการสร้างแรงดันไม่สมดุลให้กับมอเตอร์ดังนี้

- 1) ใช้มอเตอร์ชุดเดียวตลอดการทดลอง
- 2) ในการทดลองซ้ำที่ค่าเปอร์เซ็นต์แรงดันไม่สมดุลสูงจะไม่คิดในเรื่องความเสี่ยงของฉนวนมอเตอร์จากการทดลองก่อนหน้า
- 3) เริ่มทำการทดลองจากขณะมอเตอร์ไม่ทำงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 4) หลังจากเสร็จสิ้นการทดลอง 1 ครั้ง จะมีการทำให้อุณหภูมิของมอเตอร์ลดลงโดยกำหนดให้จะต้องทิ้งระยะการทดลองอย่างน้อย 3 ชั่วโมงเพื่อไม่ให้มีอุณหภูมิสะสมภายในมอเตอร์

3.1.2 การประมาณค่าอุณหภูมิภายในมอเตอร์ที่ขดลวดสเตเตอร์ เมื่อเกิดแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลในสถานะที่อุณหภูมิไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา

การถ่ายเทความร้อนในสถานะที่อุณหภูมิไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลาที่บริเวณพื้นผิวของมอเตอร์อาศัยหลักการถ่ายเทความร้อนจากบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงไปยังบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำ คือจากภายในมอเตอร์ซึ่งมีความร้อนเกิดขึ้นที่ขดลวด ถ่ายเทอุณหภูมิออกมาทางพื้นผิวของมอเตอร์โดยมีทิศทางเดียวกับอัตราการนำความร้อนต่อพื้นที่โดยขึ้นอยู่กับสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของวัสดุที่ใช้ทำโครงมอเตอร์ซึ่งเป็นไปตามกฎการถ่ายเทความร้อนหรือกฎของฟูเรียร์ดังแสดงในสมการที่ 2.20 การถ่ายเทความร้อนของวัสดุซึ่งเป็นพื้นผิวของโครงมอเตอร์มีการถ่ายเทแบบมิติเดียวทรงกระบอก ดังแสดงในรูปที่ 2.16

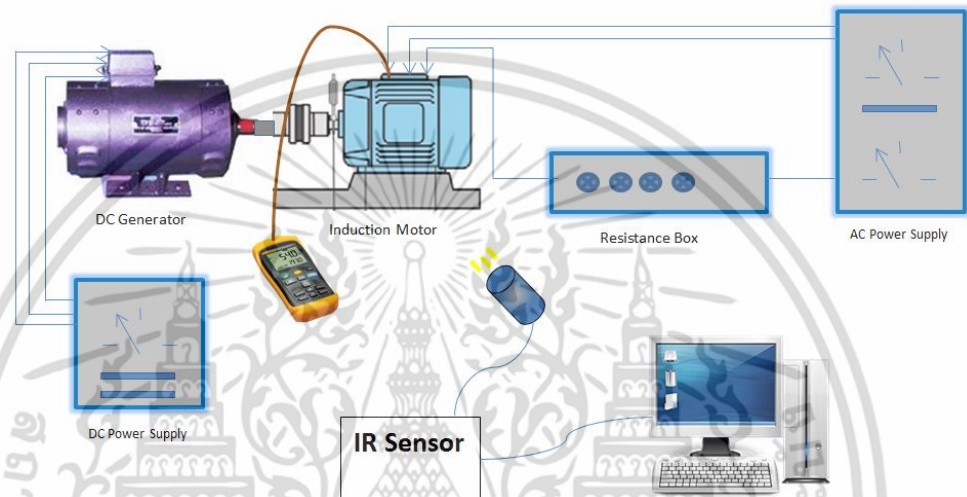
โดยมีสมมติฐานการทดลองสำหรับการตรวจสอบอุณหภูมิมอเตอร์ที่บริเวณพื้นผิวของมอเตอร์ดังนี้

- 1) ประสิทธิภาพการระบายความร้อนของวัสดุที่ใช้ทำโครงมอเตอร์มีค่าเท่ากับ 0.95
- 2) การคำนวณการถ่ายเทความร้อนของวัสดุเป็นการถ่ายเทความร้อนแบบมิติเดียว โดยจะเกิดการถ่ายเทความร้อนจากภายในมอเตอร์สู่ครีปและฐานครีปของโครงมอเตอร์ และใช้ค่าอุณหภูมิสูงสุดที่วัดได้ในการคำนวณดังแสดงในทฤษฎีบทที่ 2 เรื่องการนำความร้อนแบบมิติเดียวภายใต้สภาวะคงตัวกรณีทรงกระบอก
- 3) ค่าคุณสมบัติทางความร้อนของวัสดุมีค่าคงที่ตลอดการทดลอง
- 4) ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนแบบอิสระของอากาศภายในห้องและบริเวณผิวมอเตอร์กำหนดให้เป็น $5 \text{ w/m}^2 \cdot \text{K}$
- 5) ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนแบบบังคับภายในมอเตอร์กำหนดให้เป็น $100 \text{ w/m}^2 \cdot \text{K}$

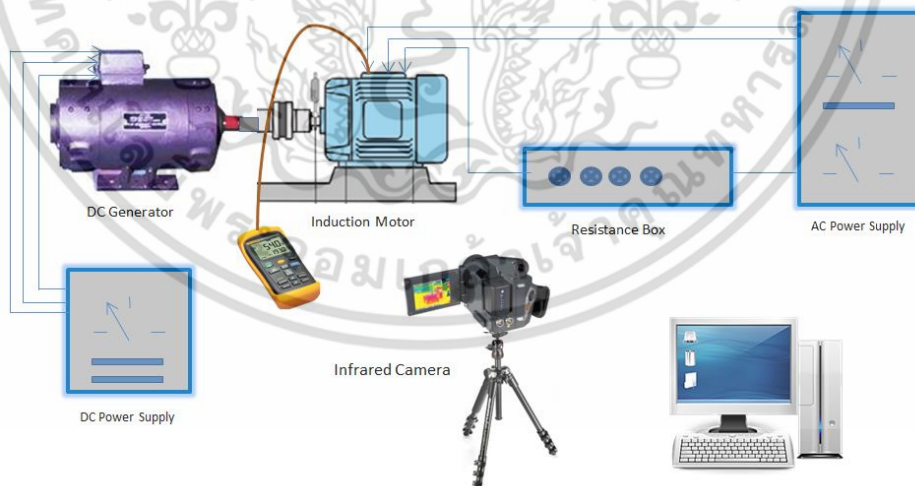
3.2 ชุดอุปกรณ์และตัวอย่างที่ใช้ในการทดลอง (Experiment setup and Sample)

3.2.1 ชุดอุปกรณ์การทดลอง

ชุดการทดลองสำหรับตรวจสอบอุณหภูมิที่พื้นผิวเพื่อบ่งชี้สภาพภายในมอเตอร์แบบเหนี่ยวนำประกอบด้วยชุดการทดลองสองชุดคือ ชุดการทดลองโดยใช้ตัวตรวจวัดอุณหภูมิแบบอินฟราเรด(IR Sensor) และเครื่องมือวัดอุณหภูมิแบบกล้องถ่ายภาพความร้อน(IR Camera) ดังแสดงในรูปที่3.1



(ก) ชุดการทดลองโดยใช้ตัวตรวจวัดอุณหภูมิแบบอินฟราเรด(IR Sensor)



(ข) ชุดการทดลองโดยใช้เครื่องมือวัดอุณหภูมิแบบกล้องถ่ายภาพความร้อน(IR Camera)

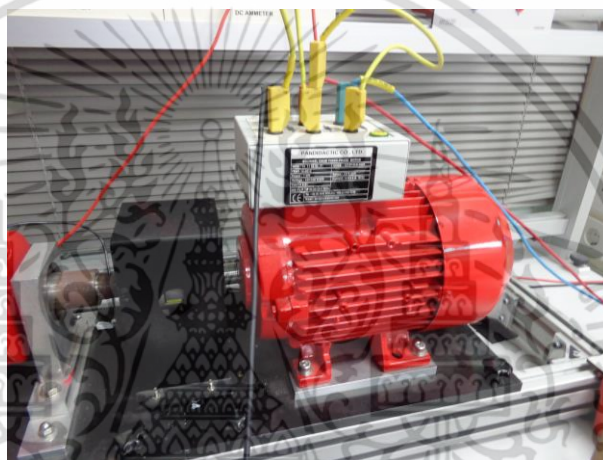
รูปที่ 3.1 ชุดอุปกรณ์ทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.2 อุปกรณ์ในส่วนของการควบคุมที่มอเตอร์

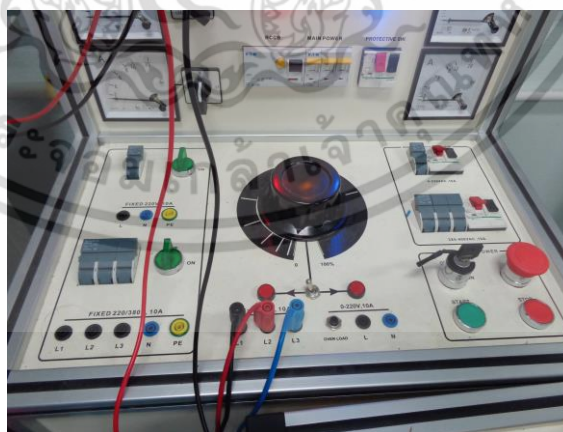
การควบคุมและจ่ายแรงดันไม่สมดุลให้กับมอเตอร์ประกอบด้วยมอเตอร์ชนิดเหนี่ยวนำกระแสสลับขนาด 1 กิโลวัตต์ แรงดัน 220 โวลต์(รูปที่3.2) โดยมอเตอร์เหนี่ยวนำจะได้รับกำลังไฟฟ้ามาจากแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟส(AC power supply) (รูปที่3.3) และมีตัวต้านทานสำหรับใช้เพื่อสร้างแรงดันสมดุลสำหรับไฟฟ้า 1 เฟสก่อนจ่ายกำลังให้กับมอเตอร์(รูปที่3.4) สร้างภาระให้กับมอเตอร์โดยใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง(DC Generator) (รูปที่3.5) โดยใช้กำลังไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสตรง(DC power supply) (รูปที่3.6) และวัดความเร็วรอบของมอเตอร์และแรงบิดได้ที่เครื่องวัดความเร็วรอบและแรงบิด(รูปที่3.7) และวัดค่าทางไฟฟ้าโดยใช้เครื่องวัด3เฟส(3 phase multimeter)

1. ชุดทดลองมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟส 380 V 1 kW



รูปที่ 3.2 Induction motor ที่ใช้ทำการทดลอง

2. แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับขนาด 0 – 400 โวลต์ 2 แอมป์



รูปที่ 3.3 แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ

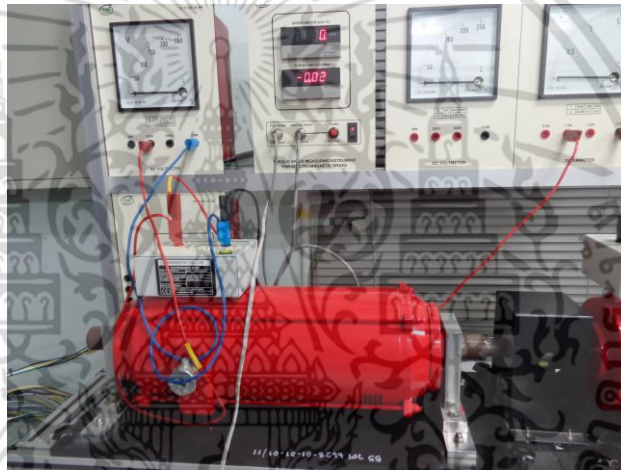
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ชุดความต้านทาน 220/380 V: 3x0 – 400 W Δ/Y in 7 Steps



รูปที่ 3.4 ตัวต้านทานปรับค่าได้สำหรับสร้างแรงดันไม่สมดุล

4. เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง(DC Generator)



รูปที่ 3.5 DC generator สำหรับเป็นโหลดให้กับมอเตอร์

5. แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสตรง(DC Power Supply) 0 – 200 VDC 10 A



รูปที่ 3.6 Power supply สำหรับDC Generator

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6. เครื่องวัดแรงบิด(Torque Meter) และ เครื่องวัดความเร็วรอบ(Speed Meter)



รูปที่ 3.7 Torque meter และ speed meter

7. มิเตอร์วัดค่าทางไฟฟ้า 3 เฟส (3 Phase Multimeter)



รูปที่ 3.8 3 Phase multimeter

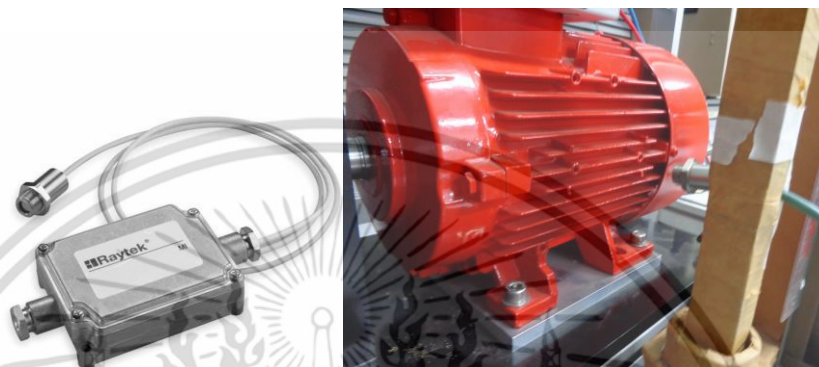
3.2.3 ชุดอุปกรณ์ตรวจวัดอุณหภูมิ

การตรวจวัดอุณหภูมิสำหรับการทดลองนี้มี 2 แบบ คือ การวัดอุณหภูมิภายนอกมอเตอร์ และวัดอุณหภูมิที่ภายในมอเตอร์ โดยการวัดอุณหภูมิที่ภายนอกมอเตอร์จะใช้ตัวตรวจวัดอุณหภูมิแบบอินฟราเรด(IR Sensor)ช่วงการวัดอุณหภูมิ -40°C ถึง 600°C รับรังสีอินฟราเรดในช่วงความยาวคลื่น $8\text{-}14\ \mu\text{m}$ และความถูกต้องของการวัดเท่ากับ $\pm 1^{\circ}\text{C}$ (รูปที่ 3.9) และกล้องถ่ายภาพความร้อน(IR Camera) FLIR รุ่น A315 ซึ่งมีความละเอียด 320×240 พิกเซล รับรังสีอินฟราเรดในช่วงความยาวคลื่น $7.5\text{-}13\ \mu\text{m}$ ช่วงการวัดอุณหภูมิ -20°C ถึง 120°C ความไวต่ออุณหภูมิ (Thermal sensitivity) เท่ากับ $0.05\ \text{K}$ ค่า FOV เท่ากับ $25^{\circ} \times 18.8^{\circ}/0.4\text{m}$ ค่า IFOV เท่ากับ $1.36\ \text{mRad}$ และความถูกต้องของการวัดเท่ากับ $\pm 2^{\circ}\text{C}$ (รูปที่ 3.10) ซึ่งจะทำให้การเชื่อมต่อกับกล้องถ่ายภาพความร้อนกับคอมพิวเตอร์เพื่อบันทึกค่า(รูปที่ 3.11) โดยในการใช้งานควรกำหนดค่าอุณหภูมิพื้นหลัง (Background temperature) และสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีให้ถูกต้องตามคุณสมบัติของวัสดุนั้น ๆ ดังแสดงในตารางที่ 2.2 ทั้งการใช้ตัววัดอุณหภูมิแบบอินฟราเรดและกล้องถ่ายภาพความร้อนจะเป็นการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วัดแบบไม่สัมผัสโดยวัดอุณหภูมิบริเวณพื้นผิวภายนอกด้านข้างของมอเตอร์เนื่องจากเป็นส่วนที่อยู่ติดกับขดลวดสเตเตอร์มากที่สุด การวัดอุณหภูมิภายในมอเตอร์ในการทดลองใช้ดิจิตอลเทอร์โมมิเตอร์แบบสัมผัส FLUKE รุ่น 52 II รับสัญญาณจากเทอร์โมคัปเปิลแบบสัมผัสชนิดเค (K-type) โดยมีระดับความแม่นยำที่ $\pm(0.05\%+0.3^{\circ}\text{C})$ (รูปที่ 3.12) ใช้วัดอุณหภูมิบริเวณด้านในของมอเตอร์บริเวณขดลวดสเตเตอร์และอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม

1. ชุด Infrared Sensor (RAYTEK รุ่น RAYMID10LT)

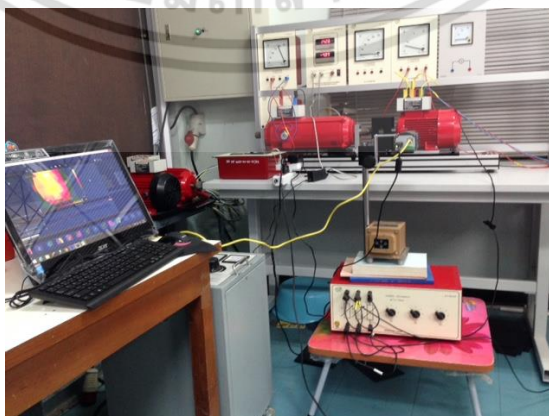


รูปที่ 3.9 ชุด Infrared Sensor และการติดตั้งอุปกรณ์

2. ชุดกล้องถ่ายภาพความร้อน (FLIR A315)



รูปที่ 3.10 การติดตั้งอุปกรณ์ Infrared Camera



รูปที่ 3.11 การติดตั้งอุปกรณ์ Infrared Camera เชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ชุดเทอร์โมมิเตอร์



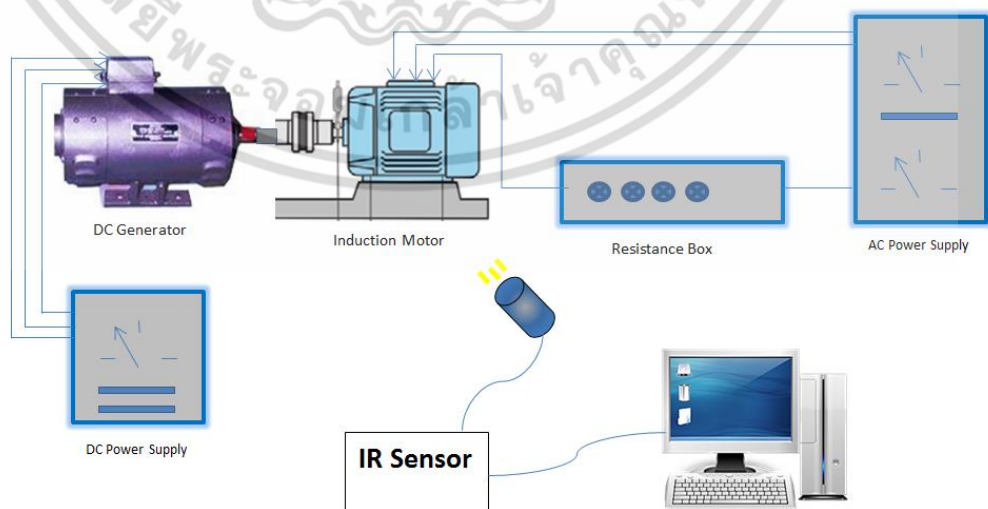
รูปที่ 3.11 เทอร์โมมิเตอร์และเทอร์โมคัปเปิลแบบสัมผัส



รูปที่ 3.12 การติดตั้งอุปกรณ์เทอร์โมคัปเปิลแบบสัมผัสภายในมอเตอร์

3.2.4 การทดลองโดยใช้ IR sensor วัดอุณหภูมิ

3.2.4.1 ชุดอุปกรณ์การทดลองสำหรับการวัดอุณหภูมิโดย IR Sensor



รูปที่ 3.13 การต่อวงจรแรงดันไม่สมดุลวัดอุณหภูมิโดย IR Sensor

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่3.13 จะใช้ตัวต้านทานปรับค่าได้เป็นตัวปรับแรงดันเฟสไดเฟสหนึ่ง เพื่อให้เกิดระบบไฟฟ้าเฟสไม่สมดุล โดยใช้ IR sensor เป็นตัววัดอุณหภูมิแบบไม่สัมผัส โดยจะส่งค่าอุณหภูมิมายังโปรแกรม Visual Basic 2012 ซึ่งโปรแกรมนี้เป็นตัวเก็บข้อมูลที่ได้จากการทดลองและแสดงผลการวิเคราะห์ข้อมูลเริ่มจากการอ่านค่าอุณหภูมิที่คอมพิวเตอร์ที่ได้มาจากการวัดค่าของ IR sensor ที่ครอบคลุมในย่านการทดลองที่ 0-85 C เชื่อมต่อระหว่างคอมพิวเตอร์โปรแกรมและเซนเซอร์โดยใช้ RS232 และให้สัญญาณเอาท์พุทในรูปแบบของสัญญาณอนาล็อก4-20mA และนำอุณหภูมิที่อ่านได้ไปใช้เป็นค่าคงที่ให้กับโปรแกรมเพื่อคำนวณเป็นกำลังไฟฟ้าที่สูญเสียจากมอเตอร์

3.2.4.2 โปรแกรมที่ออกแบบสำหรับคำนวณค่ากำลังสูญเสียของมอเตอร์

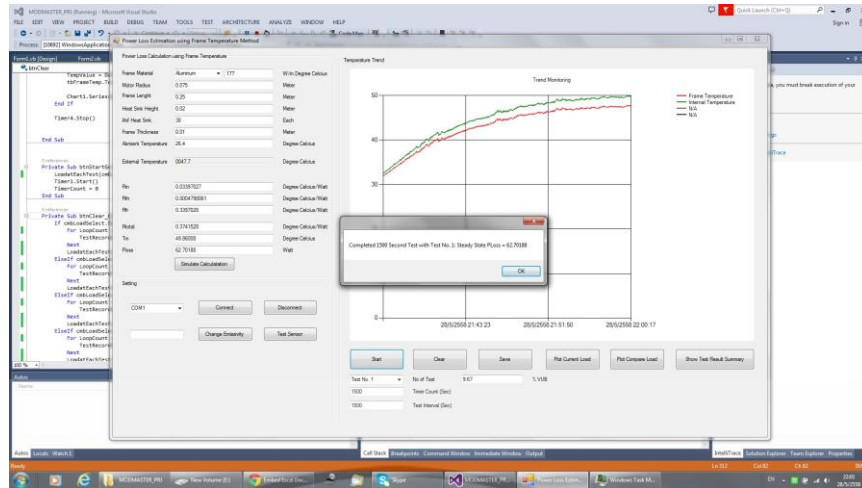
ในโปรแกรมนี้จะทำการเขียนเพื่อกำหนดสูตรของการถ่ายเทความร้อนเพื่อนำไปสู่การคำนวณหาค่ากำลังสูญเสียของมอเตอร์โดยที่มีช่องสำหรับใส่ค่าคงที่สำหรับมอเตอร์นั้นๆ และค่าที่ต้องการเพื่อใช้ในการคำนวณขั้นตอนการใช้โปรแกรม ดังนี้

- ทำการตั้งค่า Emissivity สำหรับ IR Sensor
- ทำการเชื่อมต่อ IR sensor กับโปรแกรมโดยการคอนเนคกับพอร์ตคอมพิวเตอร์
- เซตโปรแกรมให้เข้าสู่โหมดการทดลอง
- ใส่ข้อมูลที่จำเป็นสำหรับการคำนวณ
 - ชนิดของเฟรมมอเตอร์
 - รัศมีมอเตอร์
 - ความยาวของเฟรมมอเตอร์
 - ความสูงของครีบบอเตอร์
 - จำนวนครีบบอเตอร์
 - ความหนาของเฟรมมอเตอร์
 - อุณหภูมิห้องขณะทำการทดลอง

เมื่อเราเริ่มโปรแกรมและ IR Sensor เริ่มวัดอุณหภูมิ โปรแกรมที่ได้ออกแบบไว้จะทำการคำนวณกำลังสูญเสียแบบ real time โดยโปรแกรมนี้ถูกออกแบบให้การทดลอง 1 ครั้ง ใช้เวลา 3000 วินาที โปรแกรมจะทำการหยุดอัตโนมัติพร้อมแสดงค่ากำลังสูญเสียที่เกิดขึ้น

ซึ่งโปรแกรมทำการคำนวณและแสดงออกมา เช่น

- ค่ากำลังสูญเสียที่โครงมอเตอร์
- ค่ากำลังสูญเสียที่ฐานของครีบบอเตอร์
- กำลังสูญเสียของมอเตอร์ ณ เวลาขณะนั้น
- อุณหภูมิภายในมอเตอร์ที่ได้จากการคำนวณ

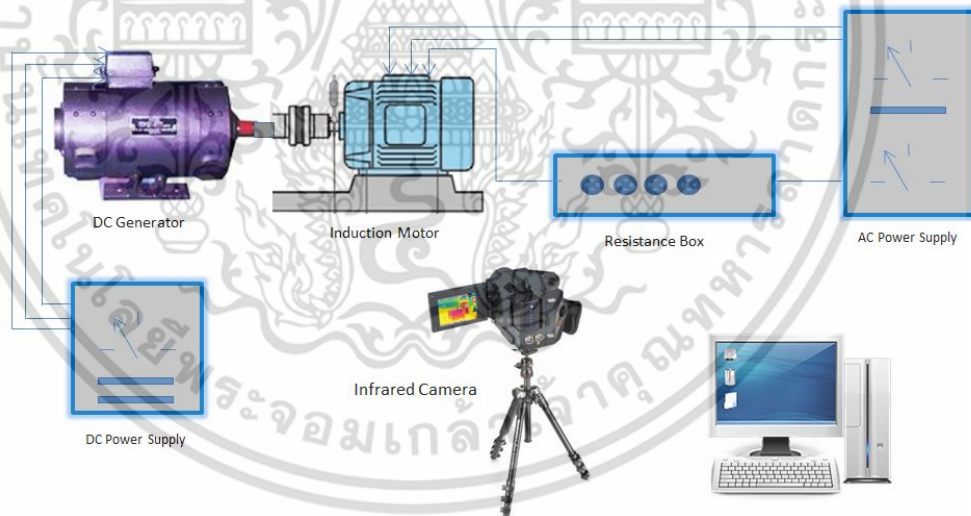


รูปที่ 3.14 โปรแกรมคำนวณในรูปแบบHMI ที่ออกแบบ

3.2.5 การทดลองโดยใช้ Infrared Camera วัดและบันทึกค่าอุณหภูมิ

จากทฤษฎีบทที่ 2 ได้ทำการทดลองต่อวงจรตามรูปที่3.15 เพื่อทำการวัดและเก็บผลการทดลองโดยทำการเก็บผลที่มอเตอร์เหนี่ยวนำ โหลดมอเตอร์ และวัดและเก็บค่าอุณหภูมิที่ได้จาก Infrared camera

3.2.5.1 ชุดอุปกรณ์การทดลองสำหรับการวัดอุณหภูมิโดย Infrared Camera



รูปที่ 3.15 การต่อวงจรแรงดันไม่สมดุลวัดอุณหภูมิโดย Infrared camera

3.2.5.2 โปรแกรมที่ออกแบบสำหรับคำนวณค่ากำลังสูญเสียของมอเตอร์

ในโปรแกรมนี้จะใช้Microsoft Excel เพื่อทำการคำนวณตามสูตรของการถ่ายเทความร้อนเพื่อนำไปสู่การหาค่ากำลังสูญเสียของมอเตอร์โดยที่มีช่องสำหรับใส่ค่าคงที่สำหรับมอเตอร์นั้นๆ และค่าที่ต้องการเพื่อใช้ในการคำนวณ
ขั้นตอนการใช้โปรแกรม ดังนี้

- ทำการบันทึกภาพถ่ายความร้อนจากกล้องถ่ายภาพความร้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- เลือกและบันทึกค่าจากกล้องถ่ายภาพความร้อนให้เป็นข้อมูลของอุณหภูมิแต่ละเวลาลงใน Microsoft excel

- นำข้อมูลอุณหภูมิที่ได้ไปใส่ในโปรแกรมที่สร้างไว้สำหรับคำนวณ

- ใส่ข้อมูลที่ใช้เป็นการคำนวณ

- ชนิดของเฟรมมอเตอร์

- รัศมีมอเตอร์

- ความยาวของเฟรมมอเตอร์

- ความสูงของครีบบอเตอร์

- จำนวนครีบบอเตอร์

- ความหนาของเฟรมมอเตอร์

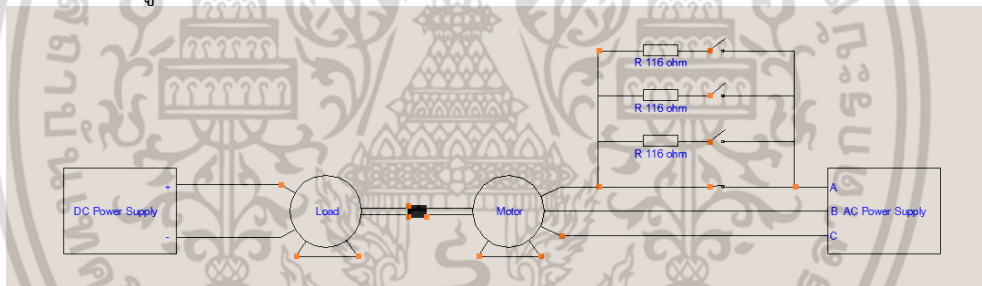
- อุณหภูมิห้องขณะทำการทดลอง

กล้องถ่ายภาพความร้อนจะทำบันทึกภาพความร้อนในลักษณะภายในลักษณะภายใน ซึ่งสามารถเก็บบันทึกได้

3.2.6 ขั้นตอนการทดลองในส่วนของการปรับค่าทางไฟฟ้า

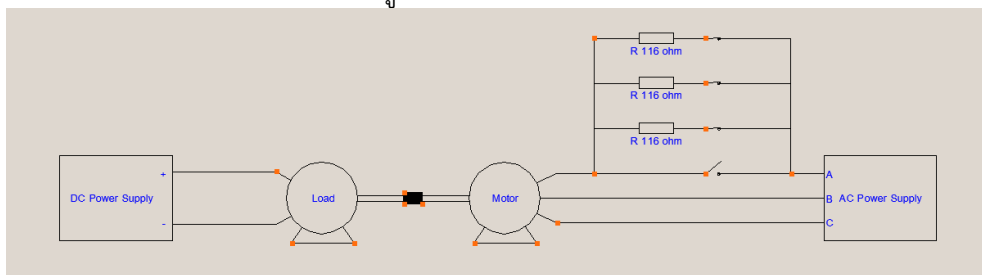
3.2.6.1 ส่วนของการปรับค่ากำลังไฟฟ้าจ่ายให้มอเตอร์

1. ตัวอย่างตามรูป



รูปที่ 3.16 แสดงการต่อวงจรแบบปกติ

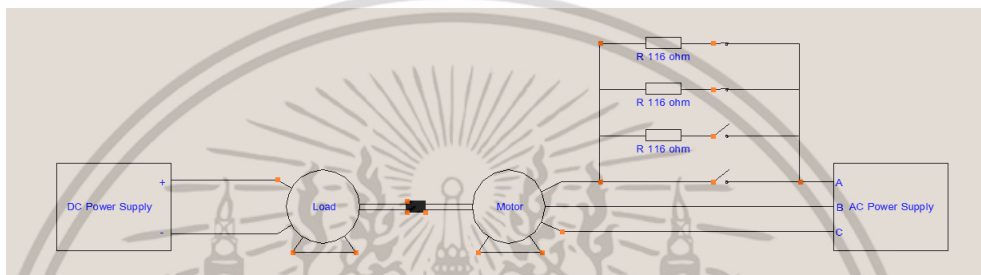
- ติดตั้ง Infrared Sensor และกล้องถ่ายภาพความร้อน เพื่อใช้ในการวัดอุณหภูมิที่โครงของมอเตอร์
- Start Motor จากนั้นทำการปรับแรงดันไฟฟ้าดีซีที่จ่ายให้กับภาระของมอเตอร์ (เป็นการปรับค่าโวลต์) วัดและบันทึกค่าแรงดันไฟฟ้าที่ทำให้ได้ภาระที่ 100% หรือที่ทำให้ได้ Power Input เท่ากับ 1 กิโลวัตต์รวมทั้งวัดค่า ความเร็วรอบและแรงบิด และอุณหภูมิที่โครงของมอเตอร์ด้วย
- Stop Motor ปลอ่ยให้มอเตอร์เย็นลงสู่อุณหภูมิห้อง และปรับแรงดันไฟฟ้าดีซี เป็นศูนย์
- ทำการเปลี่ยนแปลงการต่อวงจรดังรูป



รูปที่ 3.17 แสดงการต่อวงจรแบบ Unbalance Voltage ประมาณ 7

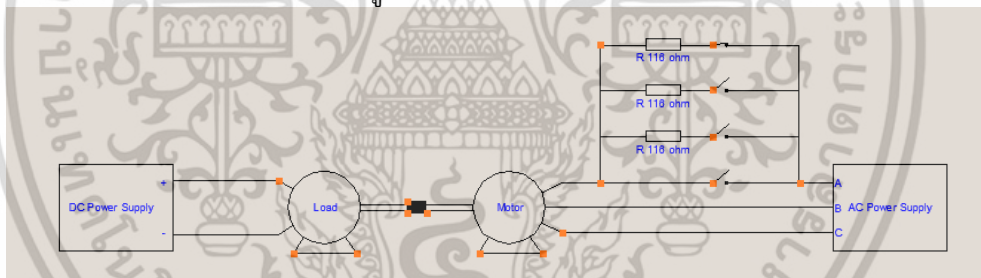
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6. Start Motor และทำการปรับแรงดันไฟฟ้าดีซีให้ได้ภาระที่ 100% ปล่อยให้มอเตอร์ Run จนอุณหภูมิที่โครงของมอเตอร์คงที่ ทำการวัดค่าต่างๆ และบันทึกผลดังนี้
 - แรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของมอเตอร์ทั้งสามเฟส (V_L)
 - Power Input ของมอเตอร์ (P_{in})
 - แรงบิด(N-m)
 - ความเร็วรอบของมอเตอร์ (RPM)
 - อุณหภูมิที่โครงของมอเตอร์
7. Stop Motor ปล่อยให้มอเตอร์เย็นลงสู่อุณหภูมิห้อง และปรับแรงดันไฟฟ้าดีซี เป็นศูนย์
8. ทำการเปลี่ยนแปลงการต่อวงจรดัง แล้วทำการทดลองซ้ำข้อ 6 -7



รูปที่3.18 แสดงการต่อวงจรแบบ Unbalance Voltage ประมาณ 9 %

9. ทำการเปลี่ยนแปลงการต่อวงจรดังรูป แล้วทำการทดลองซ้ำข้อ 6 -7



รูปที่3.19 แสดงการต่อวงจรแบบ Unbalance Voltage 13 %

10. นำผลการทดลองที่ได้ไปคำนวณหาค่าเปอร์เซ็นต์ Unbalance Voltage ค่าอุณหภูมิภายใน และค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสีย

3.2.6.1 ส่วนของ DC Generator(ภาระของมอเตอร์)

1. ทำการจ่ายกำลังไฟให้กับ DC generator โดยใช้ค่ากำลังของมอเตอร์เป็นค่ากำลังสูงสุดที่โหลดได้รับ
2. ค่อยๆปรับแรงดันให้เพิ่มขึ้น(รูปที่ 3.3) และวัดค่ากำลัง(W)
3. อ่านค่าแรงบิดและความเร็วรอบของมอเตอร์(รูปที่ 3.7)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 สรุปขั้นตอนการทดลอง

1. ในการทดลองจะทำการสร้างแรงดันไม่สมดุลให้กับมอเตอร์โดยการต่อตัวต้านทานให้กับเฟสใดเฟสหนึ่งของมอเตอร์เพื่อทำให้เกิดแรงดันไม่สมดุล เมื่อเกิดแรงดันไม่สมดุลขึ้นขดลวดภายในมอเตอร์จะมีอุณหภูมิสูงขึ้น เราจะทำการบันทึกค่าอุณหภูมิภายในมอเตอร์ที่บริเวณขดลวดสเตเตอร์ และบันทึกค่าอุณหภูมิภายนอกมอเตอร์ที่โครงด้านข้างของมอเตอร์ซึ่งเป็นส่วนที่ใกล้ขดลวดสเตเตอร์ที่อยู่ภายในมากที่สุด

2. การทดลองจะบันทึกค่าอุณหภูมิทั้งภายในมอเตอร์และภายนอกมอเตอร์ทุกๆ 1 นาที ตั้งแต่ปรับค่ากำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้มอเตอร์เสร็จสิ้น จนกระทั่งอุณหภูมิบริเวณผิวมอเตอร์มีค่าคงที่หรือเข้าสู่ช่วงการถ่ายเทความร้อนในสถานะที่อุณหภูมิไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา

3. ใช้ตัวตรวจจับอุณหภูมิแบบอินฟราเรดอ่านค่าอุณหภูมิของมอเตอร์และส่งไปให้โปรแกรมหรือ ใช้กล้องถ่ายภาพความร้อนบันทึกภาพและแปลงข้อมูลออกมาเป็นตัวเลขแล้วนำไปคำนวณ

4. ใช้ทฤษฎีการนำความร้อนแบบมิติเดียวภายใต้สถานะคงตัวกรณีทรงกระบอกในการคำนวณ

5. เปรียบเทียบค่าอุณหภูมิที่ได้จากการคำนวณและอุณหภูมิที่ได้จากการวัด และกำลังสูญเสียที่อยู่ในรูปความร้อนของมอเตอร์ บันทึกผล

บทที่ 4

การทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

ในบทนี้กล่าวถึงการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลองการตรวจสอบอุณหภูมิพื้นผิวเพื่อป้องกันสภาพในมอเตอร์เหนี่ยวนำโดยใช้ตัวตรวจวัดอุณหภูมิ 2 ชนิดคือตัวตรวจวัดอุณหภูมิแบบอินฟราเรด(IR Sensor) และกล้องถ่ายภาพความร้อน(IR Camera) ซึ่งจะทำให้การทดลองเพื่อดูผลกระทบต่อมอเตอร์เมื่อแรงดันที่จ่ายให้กับมอเตอร์ไม่สมดุล และเพื่อวิเคราะห์ค่าอุณหภูมิภายในของมอเตอร์จากการคำนวณเทียบกับการวัดจริง ได้ผลการทดลองดังนี้

4.1. การเปรียบเทียบผลกระทบที่มีผลต่อการทำงานของมอเตอร์ที่ภาวะแรงดันไม่สมดุลที่แตกต่างกัน

4.1.1 การพิจารณาที่กำลังทางกลที่ภาระมอเตอร์ได้รับ

ตารางที่ 4.1 ผลกระทบต่อความเร็วรอบและแรงบิดของมอเตอร์เมื่อแรงดันไม่สมดุล

| | | | 0.79%VUB | | 0.89%VUB | |
|--------------------------------------|-----------------------------|-----------------|----------|---------|----------|--------|
| | | | ก่อน | หลัง | ก่อน | หลัง |
| กำลังที่จ่ายให้ มอเตอร์ | กำลังไฟฟ้า (วัตต์) | Pa | 391 | 389 | 394 | 390 |
| | | Pb | 381 | 377 | 383 | 379 |
| | | Pc | 365 | 360 | 364 | 361 |
| | กระแส (แอมแปร์) | Ia | 1.68 | 1.63 | 1.63 | 1.60 |
| | | Ib | 1.76 | 1.74 | 1.70 | 1.69 |
| | | Ic | 1.57 | 1.55 | 1.59 | 1.56 |
| กำลังที่มอเตอร์ จ่ายให้ภาระ(load) | ความเร็วรอบ (รอบต่อนาที) | Speed (RPM) | 144.8 | 144.4 | 144.70 | 144.30 |
| | แรงบิด (นิวตัน-เมตร) | Torque (N-m) | No load | No load | 5.47 | 5.35 |

ก) ผลกระทบต่อมอเตอร์เนื่องจากแรงดันไม่สมดุล 0.79% และ 0.89%

| | | | 7.26%VUB | | 7.67%VUB | |
|--|-----------------------------|-----------------|----------|--------|----------|--------|
| | | | ก่อน | หลัง | ก่อน | หลัง |
| กำลังที่จ่ายให้ มอเตอร์ | กำลังไฟฟ้า (วัตต์) | Pa | 277 | 269 | 273 | 270 |
| | | Pb | 606 | 586 | 609 | 601 |
| | | Pc | 280 | 248 | 290 | 280 |
| | กระแส (แอมแปร์) | Ia | 0.81 | 0.77 | 0.96 | 0.93 |
| | | Ib | 2.58 | 2.52 | 2.63 | 2.59 |
| | | Ic | 2.17 | 2.14 | 2.22 | 2.17 |
| กำลังที่มอเตอร์ จ่ายให้ภาระ (load) | ความเร็วรอบ (รอบต่อนาที) | Speed (RPM) | 144.00 | 143.60 | 143.10 | 143.00 |
| | แรงบิด (นิวตัน-เมตร) | Torque (N-m) | 5.45 | 4.99 | 5.41 | 4.63 |

ข) ผลกระทบต่อมอเตอร์เนื่องจากแรงดันไม่สมดุล 7.26% และ 7.67%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ใดเห็นประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

| | | | 9.37%VUB | | 9.67%VUB | |
|--------------------------------------|-----------------------------|-----------------|----------|--------|----------|--------|
| | | | ก่อน | หลัง | ก่อน | หลัง |
| กำลังที่จ่ายให้ มอเตอร์ | กำลังไฟฟ้า (วัตต์) | Pa | 295 | 293 | 662 | 659 |
| | | Pb | 547 | 544 | 266 | 265 |
| | | Pc | 269 | 267 | 228 | 237 |
| | กระแส (แอมแปร์) | Ia | 1.01 | 0.96 | 2.87 | 2.81 |
| | | Ib | 2.82 | 2.79 | 1.03 | 1.01 |
| | | Ic | 2.34 | 2.30 | 2.37 | 2.33 |
| กำลังที่มอเตอร์ จ่ายให้ภาระ(load) | ความเร็วรอบ (รอบต่อนาที) | Speed (RPM) | 142.50 | 140.80 | 142.30 | 139.80 |
| | แรงบิด (นิวตัน-เมตร) | Torque (N-m) | 4.93 | 4.70 | 4.90 | 4.85 |

ค) ผลกระทบต่อมอเตอร์เนื่องจากแรงดันไม่สมดุล 9.37% และ 9.67%

| | | | 13.46%VUB | | 13.57%VUB | |
|--------------------------------------|-----------------------------|-----------------|-----------|--------|-----------|--------|
| | | | ก่อน | หลัง | ก่อน | หลัง |
| กำลังที่จ่ายให้ มอเตอร์ | กำลังไฟฟ้า (วัตต์) | Pa | 170 | 170 | 283 | 259 |
| | | Pb | 755 | 750 | 728 | 695 |
| | | Pc | 225 | 222 | 164 | 154 |
| | กระแส (แอมแปร์) | Ia | 0.80 | 0.78 | 3.25 | 3.20 |
| | | Ib | 3.61 | 3.58 | 3.69 | 3.67 |
| | | Ic | 3.21 | 3.17 | 0.85 | 0.81 |
| กำลังที่มอเตอร์ จ่ายให้ภาระ(load) | ความเร็วรอบ (รอบต่อนาที) | Speed (RPM) | 141.80 | 141.40 | 141.70 | 141.60 |
| | แรงบิด (นิวตัน-เมตร) | Torque (N-m) | 4.80 | 4.34 | 4.50 | 3.95 |

ง) ผลกระทบต่อมอเตอร์เนื่องจากแรงดันไม่สมดุล 13.46% และ 13.57%

ในการเปรียบเทียบผลการทำงานของมอเตอร์ที่ได้จากการปรับแรงดันไม่สมดุลที่หลายค่าแรงดัน สำหรับทุกการทดลองจะทำการปรับค่ากำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้กับมอเตอร์ประมาณ 1 กิโลวัตต์ และปรับค่าความต้านทานที่เฟสใดเฟสหนึ่งเพื่อสร้างแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล ซึ่งการสร้างแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลจะมีผลทำให้เกิดการไม่สมดุลระหว่างเฟสทั้งกระแสและแรงดันทำให้เกิดการสูญเสียด้านพลังงานไฟฟ้าในสายที่มีกระแสไฟฟ้าไหลเพิ่มขึ้น จะทำให้เกิดความร้อนของฉนวนขึ้น แรงบิดของมอเตอร์ลดลงและความเร็วขณะที่มีโหลดเต็มพิกัดมีค่าลดลง จากตารางที่ 4.1 สามารถแสดงได้ว่าในการทำงานของมอเตอร์ขณะเริ่มต้นจะมีการใช้กำลังไฟฟ้าและกระแสสูงกว่าขณะทำงานแล้วระยะหนึ่งเนื่องมาจากขณะที่สตาร์ทมอเตอร์นั้นจะเกิดการใช้กระแสที่พิกัดทำงานปกติ ซึ่งการวัดค่ากำลังไฟฟ้าและค่าแรงดันจะทำการวัดเมื่อมอเตอร์เข้าสู่สภาวะคงตัว ที่การทดลองเปอร์เซ็นต์แรงดันไม่สมดุลต่างๆ สามารถอธิบายได้ว่าเมื่อกำลังไฟฟ้าที่ให้มอเตอร์มีค่าใกล้เคียงกันและมอเตอร์จ่ายให้ภาระ (Load) เต็มพิกัด ยิ่งเปอร์เซ็นต์ของแรงดันไม่สมดุลสูงมากขึ้น ความเร็วรอบของมอเตอร์มีแนวโน้มลดลง แรงบิดก็

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

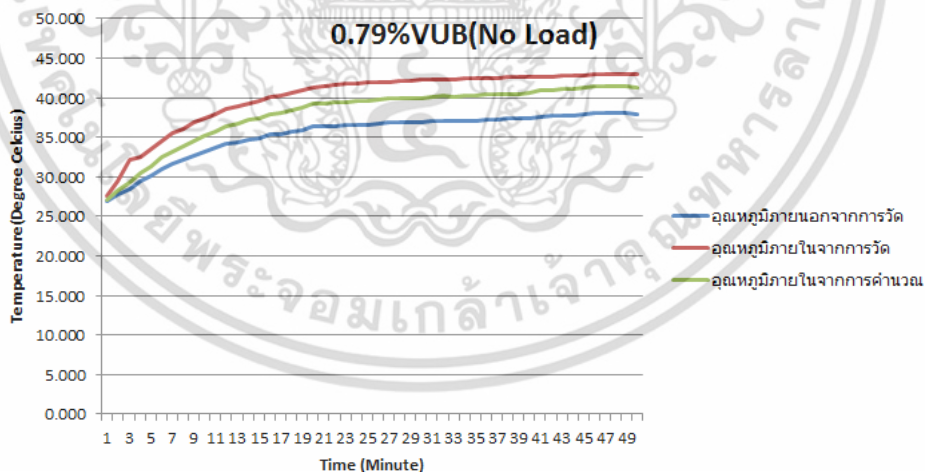
จะลดลงตามเปอร์เซ็นต์แรงดันไม่สมดุลที่เพิ่มขึ้นเช่นกัน เกิดการสูญเสียทางด้านพลังงานไฟฟ้ามากขึ้น สามารถแสดงได้ดังตาราง4.2

ตารางที่4.2 กำลังสูญเสียของมอเตอร์ที่วัดได้จากกำลังทางกลที่มอเตอร์จ่ายให้ภาระ

| %VUB | 0.79% | 0.89% | 7.26% | 7.67% | 9.37% | 9.67% | 13.46% | 13.57% |
|---|-------|---------|---------|--------|--------|--------|---------|--------|
| กำลังที่มอเตอร์ได้รับจากแหล่งจ่าย(วัตต์) | 1126 | 1130 | 1103 | 1152 | 1104 | 1161 | 1142 | 1108 |
| กำลังของมอเตอร์ที่จ่ายให้กับภาระหรือโหลด (วัตต์) | - | 772.005 | 716.564 | 662.09 | 661.76 | 678.03 | 613.676 | 599.32 |
| กำลังสูญเสียรวมของมอเตอร์ทั้งทางกลและทางความร้อน(วัตต์) | - | 357.955 | 386.436 | 489.91 | 442.24 | 482.97 | 528.324 | 508.68 |

จากตารางจะเห็นว่าเมื่อเปอร์เซ็นต์แรงดันไม่สมดุลเพิ่มมากขึ้นจะทำให้เกิดกำลังสูญเสียรวมของมอเตอร์เพิ่มขึ้น สามารถดูได้จากกำลังทางกลของมอเตอร์ที่จ่ายให้กับภาระเทียบกับกำลังที่มอเตอร์ได้รับ ซึ่งกำลังที่สูญหายไปจะไปในรูปของความร้อนและสูญเสียเชิงกล การถ่ายเทความร้อนจากมอเตอร์ขึ้นอยู่กับค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของอากาศบริเวณโดยรอบมอเตอร์ ถ้าค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของอากาศมีค่ามากเราจะสามารถประมาณได้ว่าการถ่ายเทความร้อนจากบริเวณผิวมอเตอร์สู่อากาศได้มาก ซึ่งโดยทั่วไปค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของอากาศจะอยู่ที่ 2-25 W/m³ C

4.1.2 การพิจารณาที่อุณหภูมิที่เกิดขึ้นภายในมอเตอร์จากการวัดและจากการคำนวณ

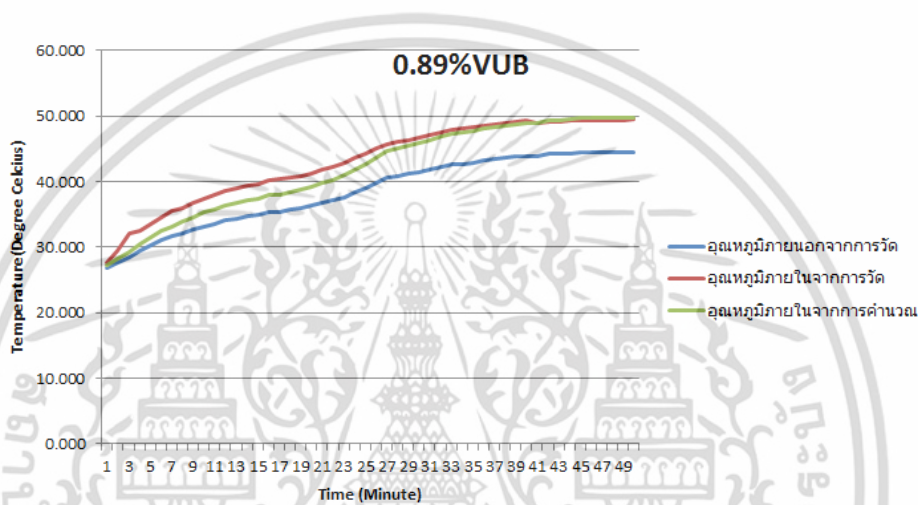


รูปที่4.1 กราฟแสดงอุณหภูมิที่เกิดขึ้นที่มอเตอร์ขณะแรงดันไม่สมดุล 0.79%

จากรูปที่4.1 แสดงกราฟการประมาณค่าอุณหภูมิภายในมอเตอร์ที่แรงดันไม่สมดุล 0.79% โดยที่มอเตอร์ไม่จ่ายกำลังให้ภาระ ใช้กล้องถ่ายภาพความร้อนในการวัดอุณหภูมิ จากกราฟพบว่าหลังจากเริ่มเดินมอเตอร์อุณหภูมิจะเพิ่มขึ้นเล็กน้อยแล้วจึงเข้าสู่สภาวะที่อุณหภูมิคงที่ไม่ขึ้นอยู่กัเวลา อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นเป็นสาเหตุมาจากกระแสไฟฟ้าในขดลวดปริมาณหนึ่ง กรณีที่มอเตอร์ไม่ต้องจ่ายกำลังให้กับภาระจะใช้กระแสที่น้อยกว่ามอเตอร์ที่จ่ายกำลังให้โหลดเต็มพิกัดเนื่องจากจะต้องมีกำลังกลเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนหนึ่งไปใช้เพื่อชนะความผิด กรณีไม่มีภาระความร้อนเกิดขึ้นในขดลวดเล็กน้อยมอเตอร์ใช้กระแส น้อยแต่มอเตอร์ยังต้องการใช้กระแสส่วนหนึ่งไปสร้างสนามแม่เหล็กดังนั้นกระแสขณะมีภาระเต็มพิกัด และไม่มีภาระจึงไม่ต่างกัน แต่ต่างกันที่กำลังไฟฟ้าที่ใช้ไปขับภาระ

- อุณหภูมิภายนอกที่ได้จากการวัดขณะคงที่คือ 38.0 °C
- อุณหภูมิภายในที่ได้จากการคำนวณขณะคงที่คือ 41.39 °C
- อุณหภูมิภายในที่ได้จากการวัดขณะคงที่คือ 42.9 °C
- ค่าเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิภายในที่ได้จากการคำนวณและการวัดคือ 3.51%

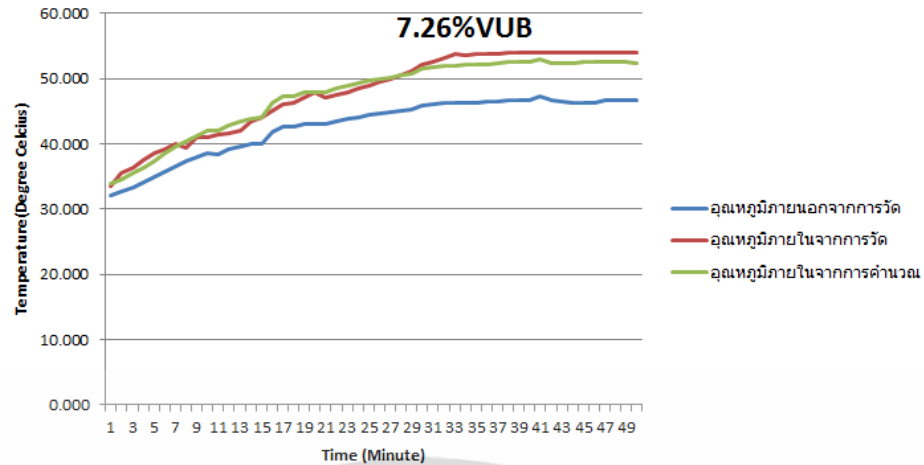


รูปที่ 4.2 กราฟแสดงอุณหภูมิที่เกิดขึ้นที่มอเตอร์ขณะแรงดันไม่สมดุล 0.89%

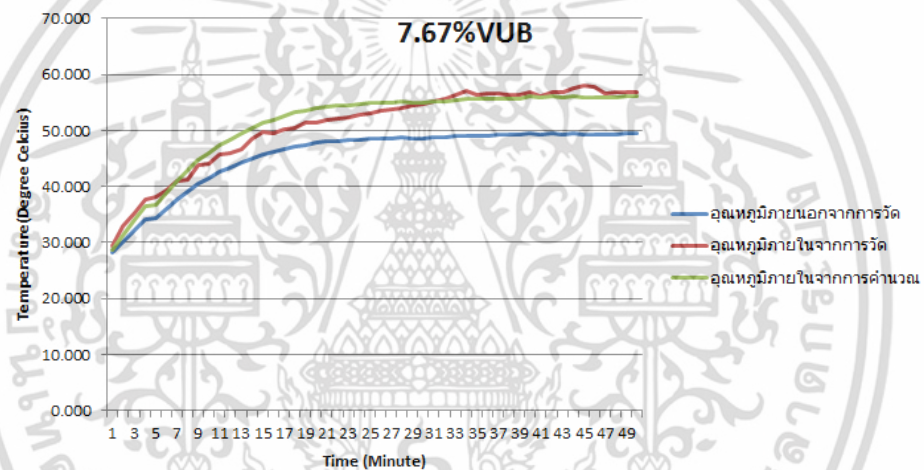
จากรูปที่ 4.2 แสดงกราฟการประมาณค่าอุณหภูมิภายในมอเตอร์ที่แรงดันไม่สมดุล 0.89% โดยที่มอเตอร์จ่ายกำลังให้ภาระเต็มพิกัด ใช้ตัวตรวจวัดอุณหภูมิแบบอินฟราเรดในการวัดอุณหภูมิ จากกราฟพบว่าหลังจากเริ่มเดินมอเตอร์ อุณหภูมิจะค่อยๆเพิ่มขึ้นเนื่องมาจากกระแสไหลในขดลวดปริมาณหนึ่ง จนกระทั่งอุณหภูมิคงที่ที่ค่าหนึ่ง ซึ่งเมื่อเทียบกับรูปที่ 4.1 ที่แรงดันไม่สมดุลใกล้เคียงกันแต่ต่างกันที่มีภาระและไม่มีภาระ จากรูปที่ 4.2 อุณหภูมิภายในมอเตอร์ที่สภาวะคงตัวจะมีค่าสูงกว่า เนื่องมาจากมอเตอร์ต้องการกำลังเพื่อไปขับภาระ

- อุณหภูมิภายนอกที่ได้จากการวัดขณะคงที่คือ 44.51 °C
- อุณหภูมิภายในที่ได้จากการคำนวณขณะคงที่คือ 49.79 °C
- อุณหภูมิภายในที่ได้จากการวัดขณะคงที่คือ 49.41 °C
- ค่าเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิภายในที่ได้จากการคำนวณและการวัดคือ 0.76%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.3 กราฟแสดงอุณหภูมิที่เกิดขึ้นที่มอเตอร์ขณะแรงดันไม่สมดุล 7.26%

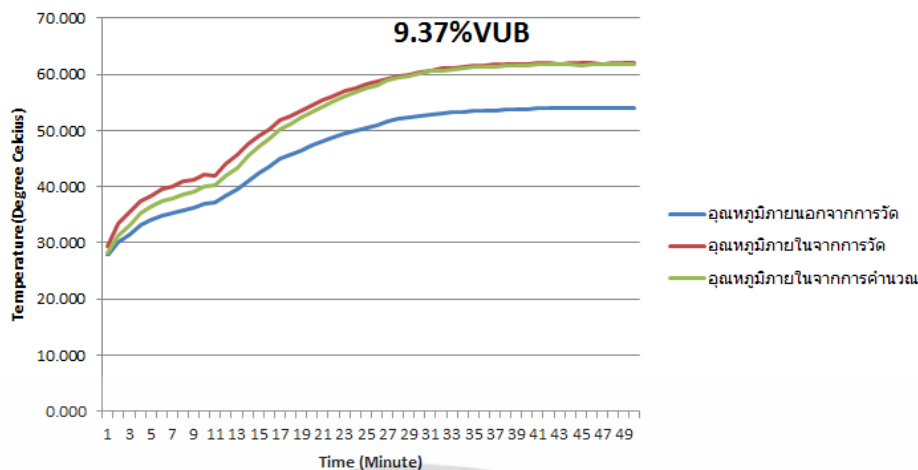


รูปที่ 4.4 กราฟแสดงอุณหภูมิที่เกิดขึ้นที่มอเตอร์ขณะแรงดันไม่สมดุล 7.67%

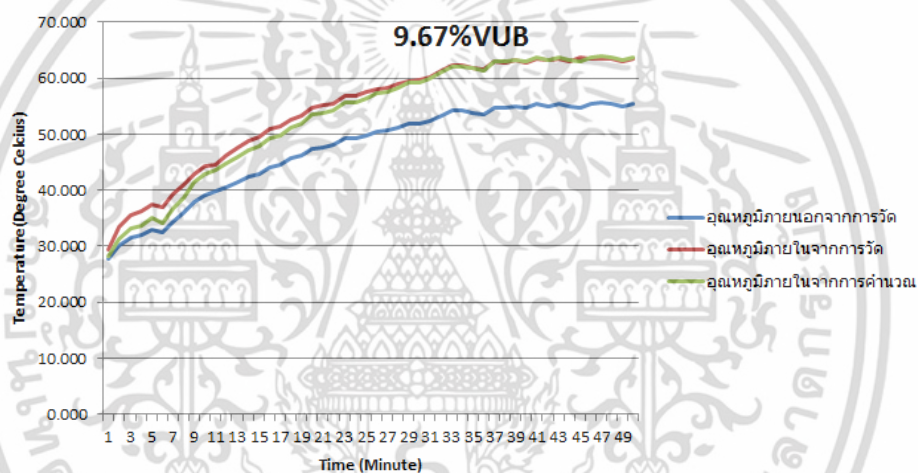
จากรูปที่ 4.3 แสดงกราฟการประมาณค่าอุณหภูมิภายในมอเตอร์ที่แรงดันไม่สมดุล 7.26% และจากรูปที่ 4.4 แสดงกราฟการประมาณค่าอุณหภูมิภายในมอเตอร์ที่แรงดันไม่สมดุล 7.67% ใช้ตัวตรวจวัดอุณหภูมิแบบอินฟราเรด (IR sensor) และกล้องถ่ายภาพความร้อน (IR Camera) ตามลำดับ จากกราฟพบว่าหลังจากเริ่มเดินมอเตอร์อุณหภูมิมอเตอร์จะเพิ่มขึ้นเนื่องมาจากกระแสไหลในสภาวะแรงดันไม่สมดุลกระทั่งอุณหภูมิคงที่ในค่าหนึ่ง จะเห็นได้ว่าเมื่อเปอร์เซ็นต์แรงดันไม่สมดุลเพิ่มขึ้นอุณหภูมิที่ภาวะคงที่ที่ไม่ขึ้นกับเวลามีค่าเพิ่มขึ้นด้วย

- อุณหภูมิภายนอกที่ได้จากการวัดขณะคงที่คือ 46.646 °C และ 49.379°C
- อุณหภูมิภายในที่ได้จากการคำนวณขณะคงที่คือ 52.49 °C และ 55.883 °C
- อุณหภูมิภายในที่ได้จากการวัดขณะคงที่คือ 54.0 °C และ 56.740 °C
- ค่าเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิภายในที่ได้จากการคำนวณและการวัดคือ 2.79% และ 1.51%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.5 กราฟแสดงอุณหภูมิที่เกิดขึ้นที่มอเตอร์ขณะแรงดันไม่สมดุล 9.37%

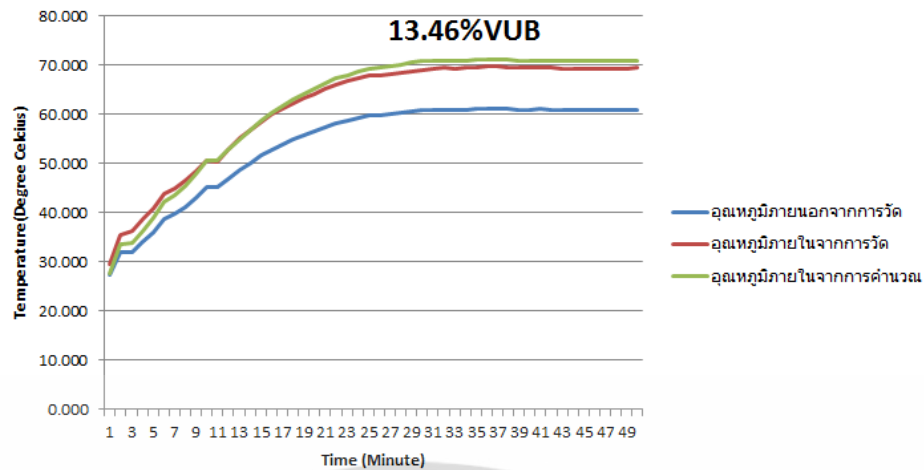


รูปที่ 4.6 กราฟแสดงอุณหภูมิที่เกิดขึ้นที่มอเตอร์ขณะแรงดันไม่สมดุล 9.67%

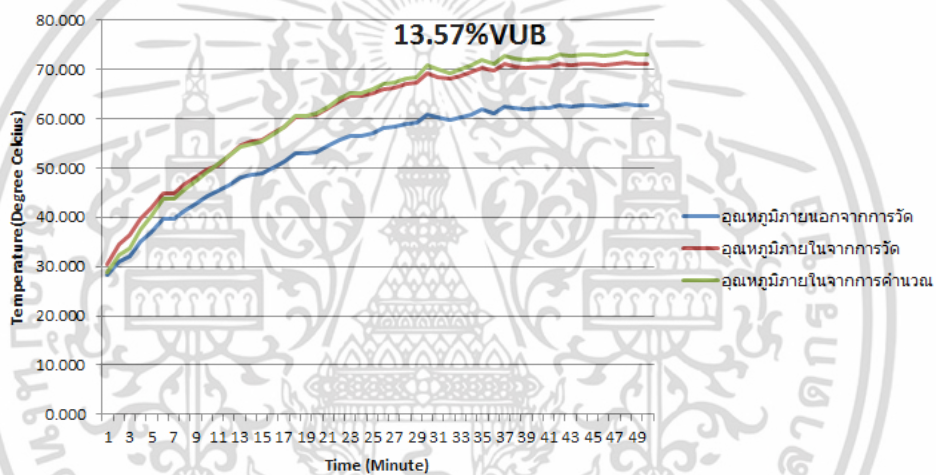
จากรูปที่ 4.5 แสดงกราฟการประมาณค่าอุณหภูมิภายในมอเตอร์ที่แรงดันไม่สมดุล 9.37% และจากรูปที่ 4.6 แสดงกราฟการประมาณค่าอุณหภูมิภายในมอเตอร์ที่แรงดันไม่สมดุล 9.67% ใช้ตัวตรวจวัดอุณหภูมิแบบอินฟราเรด (IR sensor) และกล้องถ่ายภาพความร้อน (IR Camera) ตามลำดับ จากกราฟพบว่าหลังจากเริ่มเดินมอเตอร์อุณหภูมิมอเตอร์จะเพิ่มขึ้นค่อนข้างเร็ว เนื่องจากกระแสไหลในสภาวะแรงดันไม่สมดุลกระทั่งอุณหภูมิคงที่ในค่าหนึ่ง จะเห็นได้ว่าเมื่อเปอร์เซ็นต์แรงดันไม่สมดุลเพิ่มขึ้นอุณหภูมิที่ภาวะคงที่ที่ไม่ขึ้นกับเวลามีค่าเพิ่มขึ้นด้วย

- อุณหภูมิภายนอกที่ได้จากการวัดขณะคงที่คือ 54.0 °C และ 55.343 °C
- อุณหภูมิภายในที่ได้จากการคำนวณขณะคงที่คือ 61.9 °C และ 63.633 °C
- อุณหภูมิภายในที่ได้จากการวัดขณะคงที่คือ 62.0 °C และ 63.343 °C
- ค่าเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิภายในที่ได้จากการคำนวณและการวัดคือ 0.16% และ 0.45%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.7 กราฟแสดงอุณหภูมิที่เกิดขึ้นที่มอเตอร์ขณะแรงดันไม่สมดุล 13.46%



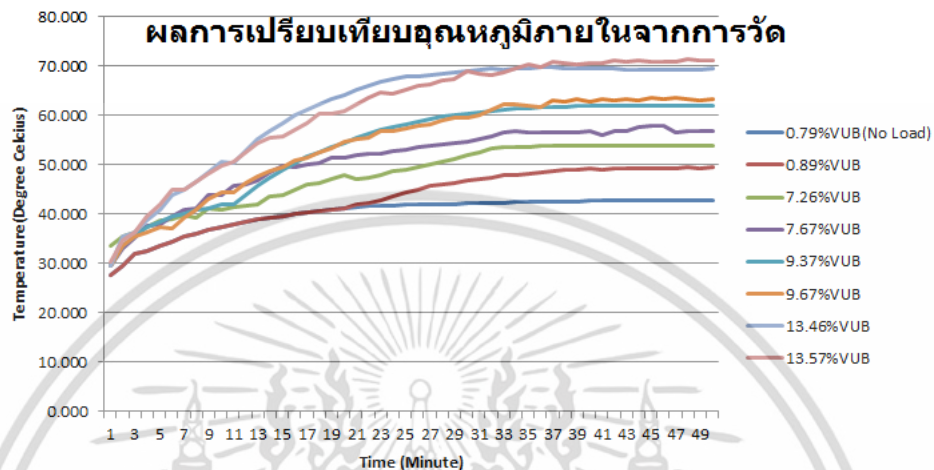
รูปที่ 4.8 กราฟแสดงอุณหภูมิที่เกิดขึ้นที่มอเตอร์ขณะแรงดันไม่สมดุล 13.57%

จากรูปที่ 4.7 แสดงกราฟการประมาณค่าอุณหภูมิภายในมอเตอร์ที่แรงดันไม่สมดุล 13.46% และจากรูปที่ 4.8 แสดงกราฟการประมาณค่าอุณหภูมิภายในมอเตอร์ที่แรงดันไม่สมดุล 13.57% ใช้ตัวตรวจวัดอุณหภูมิแบบอินฟราเรด (IR sensor) และกล้องถ่ายภาพความร้อน (IR Camera) ตามลำดับ จากกราฟพบว่าหลังจากเริ่มเดินมอเตอร์อุณหภูมิมอเตอร์จะเพิ่มขึ้นค่อนข้างเร็วมีความชันเนื่องมาจากกระแสไหลในสภาวะแรงดันไม่สมดุลกระทั่งอุณหภูมิคงที่ในค่าหนึ่ง จะเห็นได้ว่าเมื่อเปอร์เซ็นต์แรงดันไม่สมดุลเพิ่มขึ้นอุณหภูมิที่ภาวะคงที่ที่ไม่ขึ้นกับเวลามีค่าเพิ่มขึ้นด้วย

- อุณหภูมิภายนอกที่ได้จากการวัดขณะคงที่คือ 60.954 °C และ 62.966 °C
- อุณหภูมิภายในที่ได้จากการคำนวณขณะคงที่คือ 70.829 °C และ 73.449 °C
- อุณหภูมิภายในที่ได้จากการวัดขณะคงที่คือ 69.354 °C และ 71.396 °C
- ค่าเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิภายในที่ได้จากการคำนวณและการวัดคือ 2.1% และ 2.8%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.2 ถึง รูปที่ 4.8 การคำนวณหาค่าอุณหภูมิภายในมอเตอร์เมื่อเทียบกับอุณหภูมิภายในที่ได้จากการวัดมีความแตกต่างเล็กน้อย สาเหตุเนื่องมาจากความไม่นิ่งของอุณหภูมิที่ได้จากเครื่องมือวัดเนื่องจากการวัดแบบไม่สัมผัส ค่าการพาความร้อนบริเวณผิวด้านนอกของมอเตอร์ที่สามารถควบคุมได้แค่อุณหภูมิห้องและค่าความต้านทานทางความร้อนของมอเตอร์



รูปที่ 4.9 กราฟแสดงอุณหภูมิจากการวัดที่เกิดขึ้นภายในมอเตอร์ที่เปอร์เซ็นต์แรงดันไม่สมดุลต่างกัน

จากรูปที่ 4.9 สามารถอธิบายได้ว่าจากเส้นกราฟแรก 0.79%VUB กรณีไม่มีภาระหลังจากเริ่มเดินมอเตอร์และจะคงที่ค่าหนึ่งเราสามารถสรุปได้ว่าขณะมอเตอร์ทำงานจริงที่แรงดันที่เข้าใกล้สมดุลจะมีอุณหภูมิเกิดขึ้นภายในมอเตอร์ซึ่งเป็นอุณหภูมิปกติที่จะเกิดในขณะมอเตอร์ทำงาน และจากเส้นกราฟเส้นที่สอง 0.89%VUB แรงดันเข้าใกล้สมดุล แต่มอเตอร์ต้องจ่ายกำลังให้กับภาระเต็มพิกัด จึงมีการใช้กระแสมากขึ้นทำให้มีอุณหภูมิสูงขึ้นและเข้าสู่อุณหภูมิคงที่ ที่เส้นกราฟ 7.26%VUB และ 7.67%VUB จะเห็นได้ว่าเปอร์เซ็นต์แรงดันไม่สมดุลใกล้เคียงกันแต่อุณหภูมิภายในแตกต่างกันและจากตารางที่ 4.2 จะเห็นว่ากำลังสูญเสียรวมของมอเตอร์ที่ 7.67%VUB มีค่าสูงกว่าที่อย่างเห็นได้ชัด อุณหภูมิที่ค่าคงที่จึงสูงกว่าเนื่องจากกำลังสูญเสียรวมมากกว่า ที่เส้นกราฟ 9.37%VUB และ 9.67%VUB เปอร์เซ็นต์แรงดันไม่สมดุลใกล้เคียงกันอุณหภูมิที่คงที่มีค่าใกล้เคียงกันเช่นเดียวกับกับเส้นกราฟ 13.46%VUB และ 13.57%VUB

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

ผลการทดลองสามารถระบุพฤติกรรมของอุณหภูมิความร้อนที่มีสาเหตุมาจากแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับมอเตอร์โดยมีความแตกต่างกันของแรงดันแต่ละเฟส สามารถบ่งชี้ได้ว่าเมื่อแรงดันไฟฟ้าเฟสไม่สมดุลอุณหภูมิจะเพิ่มขึ้นตาม%VUB ไม่สมดุลที่เพิ่มขึ้น การเกิดแรงดันไม่สมดุลจะทำให้แรงบิดของมอเตอร์ไฟฟ้าลดลงและความเร็วรอบขณะที่มอเตอร์มีภาระเต็มพิกัดลดลง อุณหภูมิจะเปลี่ยนแปลงโดยมีแนวโน้มคือ เมื่อเปอร์เซ็นต์ของแรงดันไฟฟ้าเฟสไม่สมดุลเพิ่มมากขึ้น อุณหภูมิของมอเตอร์ที่สถานะคงตัวไม่ขึ้นอยู่กับเวลาจะเพิ่มขึ้น โดยเห็นได้ชัดเจนเมื่อไม่สมดุลมากกว่า10% และกำลังไฟฟ้าที่สูญเสียที่เกิดขึ้นมีปริมาณเพิ่มขึ้นตาม%VUB ฉะนั้นแรงดันเฟสที่จ่ายให้กับมอเตอร์ไฟฟ้าควรมีความสมดุลอยู่เสมอ เพื่อป้องกันไม่ให้อุณหภูมิเกิดความเสียหาย และควรทำการตรวจสอบในระยะเวลาที่เหมาะสม ในการตรวจสอบเพื่อวางแผนบำรุงรักษาเบื้องต้นสามารถใช้วิธีการวัดแบบไม่สัมผัส ในงานวิจัยนี้คือใช้ตัวตรวจวัดอุณหภูมิแบบอินฟราเรด และสามารถใช้ในการคำนวณโดยใช้ทฤษฎีการนำความร้อนแบบหนึ่งมิติภายใต้สถานะคงตัวในรูปแบบของทรงกระบอกแบบมีครีบโดยที่เราทราบพารามิเตอร์ต่างๆของมอเตอร์และอุณหภูมิภายนอก ทำนายอุณหภูมิภายในมอเตอร์ได้

5.2 ข้อเสนอแนะในการวิจัยต่อ

- 1.ในการตรวจวัดอุณหภูมิความร้อนจากสเตเตอร์เพื่อต้องการจะได้ค่าที่แท้จริงควรหาอุปกรณ์ที่สามารถวัดตรงได้จากขดลวดสเตเตอร์
- 2.การปรับกำลังจากแหล่งจ่ายให้มอเตอร์แต่ละครั้งควรปรับให้มีค่าใกล้เคียงกันมากที่สุด เพราะจะมีผลทำให้ได้สัดส่วนการสูญเสียเชิงความร้อนต่อการสูญเสียทั้งหมดของมอเตอร์คลาดเคลื่อน และเพื่อนำผลการทดลองเปรียบเทียบกับผลการทดลองในภาวะที่ใกล้เคียงกันและต่างกันได้
- 3.การทดลองโดยที่มอเตอร์เกิดความร้อนขึ้นภายใน ในการทดลองครั้งต่อไปควรทิ้งระยะให้มอเตอร์มีอุณหภูมิปกติ เพราะถ้ายังมีความร้อนค้างอยู่ในมอเตอร์ ทำให้การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิผิดไปจากความเป็นจริง
- 4.สำหรับอุตสาหกรรมควรเพิ่มระดับการเตือนของสัญญาณเมื่ออุณหภูมิสูงเกินพิกัด โดยผ่านระบบเครือข่ายไร้สายทำให้การตรวจสอบการทำงานของมอเตอร์ได้ตลอดเวลา ลดอันตรายที่อาจเกิดกับพนักงาน และควรตรวจสอบเฟสไฟฟ้าให้สมดุลอยู่เสมอ

เอกสารอ้างอิง

- [1] ยุทธพงศ์ ทัพผดุง, ผลกระทบที่มีต่อสมรรถนะของมอเตอร์เหนี่ยวนำไฟฟ้า 3 เฟส เมื่อแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล, เรียบเรียงจาก *Charles I. Hubert, P.E.,(2003). Operating, Testting, and Preventive Maintenance of electrical Power Apparatus.
- [2] A.E.Fitzgerald, Charles Kingsley, Jr., Stephen D. Umans; **ELECTRIC MACHINERY Fifth Edition**; McGraw-Hill;1992.
- [3] Don Taft, “Vibration Problem Associated with Two Pole”, **Alternating Current Motors**; Plant Superintendent R.A. Reed Electric Co. Los Angeles, California.
- [4] J.S.Hsu, J.D.Kueck,M. Olszewski, D.A. Casada, P.J. Otaduy, and L.M. Tolbert “Comparison of induction motor field efficiency evaluation methods” **IEEE Transactions on Industry Applied.**, vol. 34, issue:1, pp. 117-125,Jan./Feb. 1988.
- [5] H. Farahani, H. R. Arahani, H. R. Hafez, A. R. Jalilean and A. Shoulaei, “Investigation of unbalance supplying voltage on the thermal behavior of squirrel cage induction motor using monitoring system,” in Proceedings of the 42nd International Universities Power Engineering Conference, UPEC 2007, pp. 210-216, Brighton, United Kingdom, September 2007.
- [6] Rasool Sharifi, Mohammad Ebrahimi, “Detection of stator winding faults in induction motors using three phase current monitoring,” Content lists available at Science Direct ISA Transaction 50(2011)14-20.
- [7] R.Beguenane, M.E.H.Benbouzid, “Induction motor themal monitoring by means of rotor resistance identification” **IEEE Tran on EC**, vol. 14, No. 3, September 1999.
- [8] H.Hafezi and A. Jalilian “Design and construction of induction motor thermal monitoring system”, University power engineering conference, 2006. UPEC’06. Proceedings of the 41st International.2006, Page(s):674-678
- [9] Plant Maintenance Technology center, **การวิเคราะห์ความผิดปกติในมอเตอร์**, [www. tgipmt. com/th/motor_faults_analysis](http://www.tgipmt.com/th/motor_faults_analysis)
- [10] วิศวกรรมศาสตร์ ลาดกระบัง, มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับชนิด3เฟส (A.C. three phase motor) [http:// webserv.kmitl.ac.th/51010958/web/subject](http://webserv.kmitl.ac.th/51010958/web/subject)
- [11] ธนพล เกตุสร้อย, **การพิจารณาประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสสำหรับการจัดการพลังงาน**,วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [12] สุวัฒน์ชัย กล้าเกิดผล, การวิเคราะห์ความผิดปกติในมอเตอร์, สถาบันไทย - เยอรมัน
<http://www.tgipmt.com>
- [13] Wikipedia, **Induction Motor** http://en.wikipedia.org/wiki/Induction_motor
- [14] David Kowal, Proactive Maintenance Strategy for Electrical Induced Bearly Damage , Computational System, Inc.
- [15] พิรพงษ์ ลิ้มประสิทธิ์วงศ์, อุณหภูมิกับการใช้งานมอเตอร์, pirapong@tinamics.com
- [16] กิ่งกาญจน์ โตศักดิ์สิทธิ์ และคณะ, การประยุกต์ใช้อินฟราเรดเซนเซอร์เพื่อตรวจจับความผิดปกติของระบบรถไฟช่วงล่าง”, ปรินุญยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรม การวัดคุม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [17] Emissivity Coefficients of some common Materials,
www.engineeringtoolbox.com/emissivity-coefficients-d
- [18] นวภัทรา ทนูนาค และ ทวีพล ชื้อสตัย. 2555. การวัดและเครื่องมือวัด (Measurement and Instrumentation). กรุงเทพฯ : มินิ เซอร์วิส ซัพพลาย
- [19] Frank P.Incropera and david P. Dewitt, Fundamentals of Heat and Mass Transfer, Edition 6th SI version, John Wiley&Son.
- [20] Jutarut Tasara, 2012. การพาความร้อนแบบบังคับ(Forced Convection),
www.ajutarut.files.wordpress.com



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

The 4th KKU International Engineering Conference 2012

KKU-IENC2012

"Driving Together Towards ASEAN Economic Community"

May 10-12, 2012

Kosa Hotel Khon Kaen, Thailand

ORGANIZED BY



TECHNICAL SPONSORED BY



SPONSORED BY



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่าในรูปแบบใดก็ตาม หากมีข้อสงสัยหรือต้องการข้อมูลเพิ่มเติม กรุณาติดต่อฝ่ายประชาสัมพันธ์ โทร. 043-851200

Temperature Monitoring System for Estimating the Power losses in Induction Motor

Napat Wararatkul, Jakkrit Niyompongwirat and Taweepol Suesut
Department of Instrumentation and Control Engineering, Faculty of Engineering,
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang,
Bangkok 10520
E-mail: napat.w@hotmail.com, jakkrit07@hotmail.com, kstaweep@kmitl.ac.th

Abstract— The paper purpose the estimation of power losses in electrical machines using a measurement technique base upon electrical machines temperature and heat transfer equation. To prove this concept, the heat diffusivity of the induction motor can be demonstrated by thermal image. This paper to supply voltage unbalance effected for power loss in induction motor. This system consists of a temperature measurement circuit using IC LM 35DZ Analog Transformer as a temperature sensor and transducer and using Lab View version 7.1 computer program with data acquisition card from National Instrument PCI 6014. The experiment performs by adjusting phase unbalance of 10%, 20% to 50% for temperature changes. In order to allow a direct observation of the temperature distribution in induction motor. The main advantage of this method is that the machines need not to stop or to be removed from their operation process in order to measure their losses when preliminary for maintenance.

Index Terms—Temperature sensor, Unbalance phase analysis, Induction motor maintenance

I. INTRODUCTION

Squirrel cage induction motors are the most important AC machines in industry. Low cost, high reliability, low inertia and high transient torque capacity are among the advantages of these motors. Many resources show that 35%–45% of motor failures are caused by stator insulation breakdown. For small induction machines, thermal overloading is one of the major causes of the stator winding insulation degradation process [1]. Thermal devices and models, which assume fixed thermal characteristics of the motor, are not capable of providing sufficient thermal protection since they have no means of giving a correct temperature estimate when the thermal characteristics change. Because of the high cost and difficulty of installing thermal sensors, thermal protection relies on fuses and thermal/ electronic overload relays, which provided low-cost thermal protection for many years. Therefore, in order to extend the insulation life, it is critical to monitor the stator winding temperature and protect the motor under thermal

overloading conditions such as motor stall, jam, overload, unbalanced operation, and situations where the cooling ability of the motor is accidentally reduced [2]. The stator temperature can also be estimated based on the stator resistance measurement and another accurate method deals with the direct measurement of motor heating using temperature sensors installed in stator windings and rotor parts[3],[4].

In practice, induction machines experience unbalance voltages, depending on the location of the motor and the length of the feeder used. During peak hours, some customers with three phase motors could experience minimum voltages guaranteed by the supply utility. Furthermore, the supply voltage is not always balanced. Therefore, the motor will experience a combination with unbalanced voltages [5],[6],[7].

While operating Voltage unbalance condition, there are losses in electrical machine. The loss will convert to heat. The heat is accumulating in the machine depend on specific heat at constant volume of material used of machine. During the accumulation, the heat will dissipate to machine fin by air ventilation fan of machine. The ventilation air temperature is higher than the surrounding environment the temperature. The difference of these temperatures can be used to calculate the power losses

The purposed of this paper is to analyst the temperature of induction motor to find power loss of motor as the loss of stator winding insulation due to thermal, considering a effect of unbalance voltage to power loss by using sensor in the frame for the first mentioned motor to measure distribution .

II. CHARACTERIZATION OF UNBALANCE

A. Standards Definition of Voltage Unbalance

Studies concerning the derating of induction motors under unbalanced voltage conditions have been reported in the literature since 1959. Gafford et al. [8] the importance of causing unbalanced spatial distribution of losses and heat and presented an equation to estimate the maximum temperature

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

rise. There are some definitions for voltage unbalance factor, general definition of voltage unbalance factor is given by “percent voltage unbalance” (PVU) [8]:

$$PVU = 100 \times \frac{MVD}{V_{Avg}} \quad (1)$$

$$V_{avg} = \frac{V_{ab} + V_{bc} + V_{ca}}{3} \quad (2)$$

MVD is the maximum voltage deviation from the average line voltage magnitude V_{Avg} is the average line voltage magnitude. And The IEC standard [9] adopts the “voltage unbalance factor” (VUF) as defined by the method of symmetrical components

$$VUF = \frac{V_2}{V_1} \quad (3)$$

Berndt and Schmitz presented the results of a series of laboratory tests on three motors and determined theoretically and experimentally the derating factors using the symmetrical components method and considering that the thermal impedance between stator windings was negligible[10]. In 1978 the National Electrical Manufacturers Association(NEMA) [8] presented the MG1 derating graph (Figure. 2).

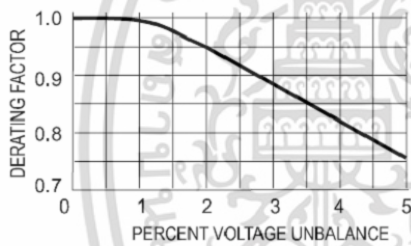


Figure 1. Percent voltage unbalance proportionally derating factor

Due to uneven heating, the deterioration of all coils cannot be assumed equal, hence the hottest coil will determine the theoretical lifespan of the insulation[2],[3]. However it is the most used method in industry to evaluate the motor derating under unbalance voltage condition.

The percent of temperature will be increased voltage unbalance in the motor.

$$\% \Delta T = 2 \times (\% VUB)^2 \quad (4)$$

$$T_{rise,umb} = T_{rise,rated} \times \left[1 + \frac{\% \Delta T}{100} \right] \quad (5)$$

When

$T_{rise,umb}$ = Higher temperatures due to voltage unbalance

$T_{rise,rated}$ = The maximum temperature rating of insulation that can be acceptable

$\% \Delta T$ = Percent increase in motor temperature.

III. EXPERIMENTAL SET UP AND METHODOLOGY

The physical layout consists of two primary systems, and devices as the AC induction motor (see Fig. 3).

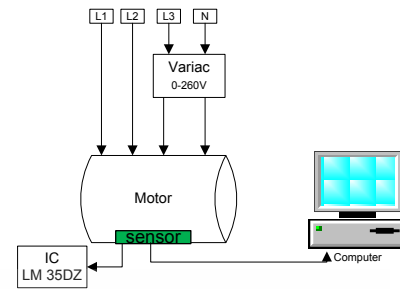


Figure 2. Physical Layout



Figure 3. Experimental setup(SIEMENS IEC 63 class B).

This system consists of a temperature measurement circuit use IC LM 35DZ Analog Transformer as a temperature sensor and transducer and Lab View version 7.1 to keep a data form card of National Instrument PCI 6014. The temperature sensor was tested and calibrated with the standard thermometer. The Experimental results adjusting the unbalance voltage source of 10%, 20%, 30%, 40% and 50% we can describe an effect of unbalance voltage shown in Figure 4.

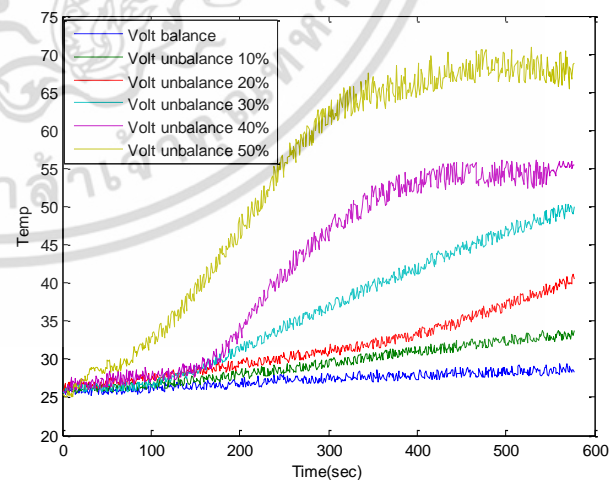


Figure 4. Temperature effect for unbalance voltage.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

According to results shown and investigating unbalance voltage effect on the motor temperature, different test have been done on the motor VUB10% to VUB50% are every unbalance mode. As it may be expected, increasing of stator temperature and transferring the hottest to frame outside of motor that can be measured temperature. For this mode, the stator temperature obtained from measured and estimated method and plotted in Figure 4. To prove this concept, the heat diffusivity of the induction motor can be demonstrated by thermal image as illustrated in Figure 5.

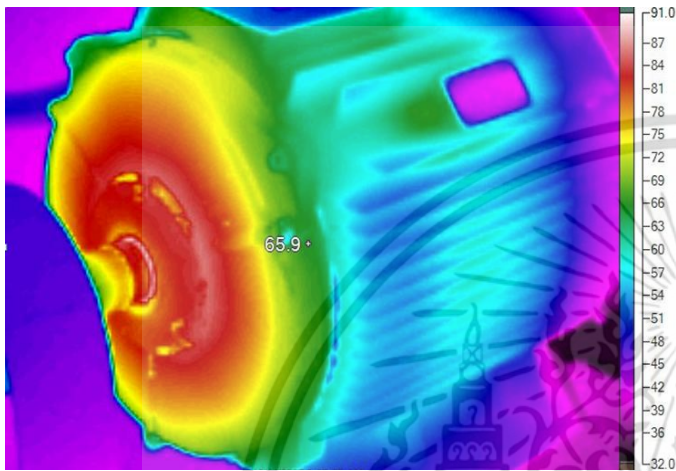


Figure 5. The heat diffusivity of the induction motor

IV. EXPERIMENT AND INVESTIGATED POWER LOSSES

Thermal phenomena are of major importance in the electric machines courses, particularly from the perspective of experimental demonstration and basic explanation of the related causes and effects. In thermal steady-state (or thermal equilibrium), the capacitances (representing the thermal capacity of the different parts) disappear from the lumped-parameter thermal equivalent circuit based model, yielding only current sources (representing the loss production in the different parts) and thermal resistances (representing the thermal resistance between the different parts), which are constant, assuming constant motor speed and ambient temperature. Therefore, in general, after thermal stabilization/equilibrium, the temperature increases linearly with the motor losses. However, the lumped parameters mesh can be very complex, depending on the refinement of the motor thermal model, as explained in [3].

In a motor, the temperature rise, $\Delta\theta$, between two points with different temperatures, caused by the heat produced in the hottest point by Joule effect losses, P_{losses} , dissipated through the equivalent thermal resistance, R_{th} , to the surrounding ambient with temperature, θ_{amb} , and stored in the equivalent thermal capacity, C_{th} , is shown in Figure. 6.[11]

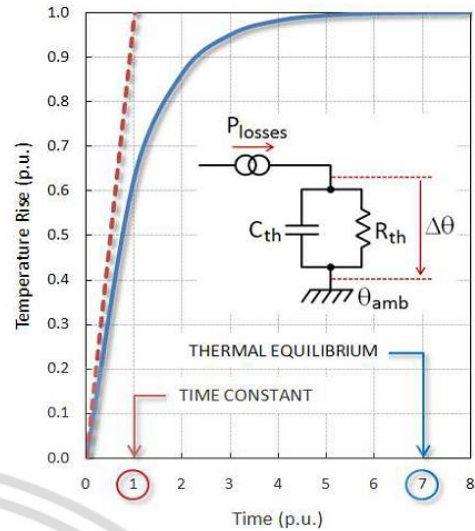


Figure 6. Temperature rise and thermal time constant in a motor.

At the initial instant, all the motor parts are at the ambient temperature. After reaching thermal equilibrium, which occurs 6 to 7 times of thermal constant, τ_{th} , the thermal capacity effect ends, and it can be removed from the equivalent circuit for thermal steady-state analysis purposes, yielding the circuit in Figure.7.[11]

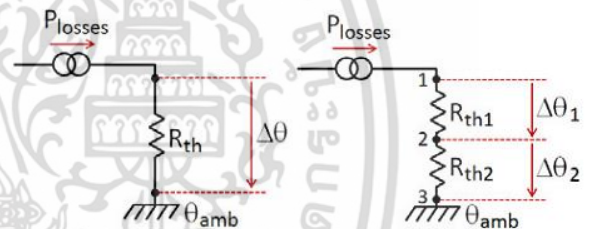


Figure 7. Approximate lumped-parameter thermal equivalent motor circuit.

On that basis, the steady-state temperature rise is simply given by

$$\Delta\theta = R_{th} \cdot P_{losses} \tag{6}$$

In fact, it is obvious the analogy between the thermal quantities and the electric quantities – the temperature rise (in °C or K) is equivalent to the voltage drop (in V), the losses (in W) are equivalent to the current (in A), and the thermal resistance (°C/W or K/W) and thermal capacity (W.s/°C or W.s/K) are equivalent to the ohmic resistance (Ω) and electric capacitance (in F), respectively.

The losses component that does not contribute to internal heat production can be estimated by means of intersecting the curves of the frame-ambient thermal resistance, as a function of that losses component, for different motor loads, as can be seen in Figure.8.[11]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

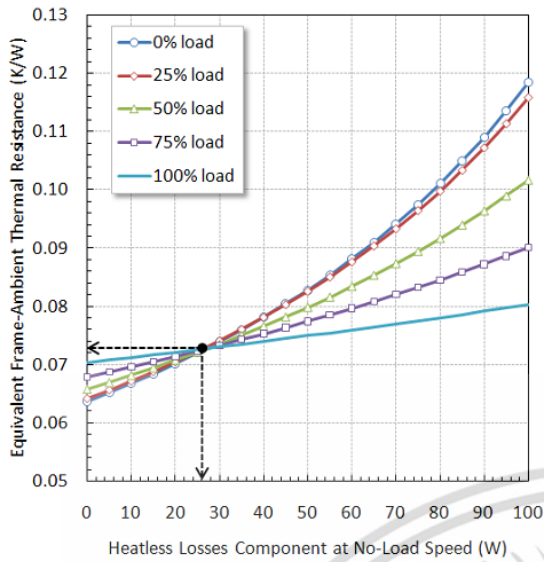


Figure 8. Heatless losses component estimation.

The heatless losses are properly compensated as a function of the speed squared. The estimation of heatless losses is important for the temperature rise calculation as a function of the losses component actually producing heat in the interior of the motor and, therefore, the respective thermal resistance. The theoretical demonstration of the experimental results is summarized in Table II and Table II, in which the estimated R_{frame} is presented for different load points, with a very small variation, validating the proposed methodology. Typically, the steady-state winding temperature rise variation as a function of the motor load is higher than that for the frame, but approximately equal in percentage[11]

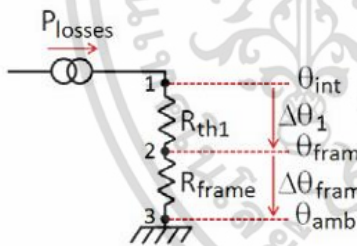


Figure 9. Percent voltage unbalance.

Therefore, in order to explain the observed temperature variation in the frame, two equivalent thermal resistances can be considered, one between an internal virtual loss production point (lumped heat/losses production) and the frame surface, and other between the frame and the ambient, as represented in Figure. 9. It should be noted that the last resistance for calculate P_{losses} , Power loss of motor. In the Figure10 show a components of motor installing sensor on frame outside.

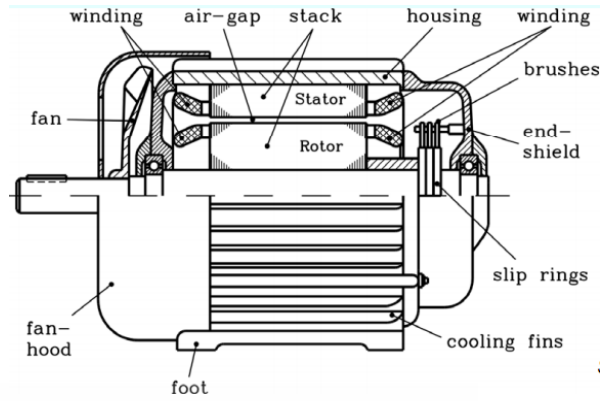


Figure 10. Components of motor .

While operating Voltage unbalance condition, there are losses in electrical machine. The loss will convert to heat. The heat is accumulating in the machine depend on specific heat at constant volume of material used of machine. During the accumulation, the heat will dissipate to machine fin by air ventilation fan of machine. The ventilation air temperature is higher than the surrounding environment the temperature. The difference of these temperatures can be used to calculate the power losses by (6).

A. Elements for calculation of temperature rise conduction of heat[12] and Result.

Heat resistance

$$R_{th} = \frac{l}{\lambda_{th} A} \quad (7)$$

Electrical current density corresponds with heat flow density.

$$q = P_{th}/A [W/m^2] \quad (8)$$

Conduction of heat: Fourier's law

$$\frac{P_{th}}{A} = \lambda_{th} \Delta\theta/l \quad (9)$$

λ values of thermal conductivities are given in Table 1.

| TABLE I. MATERIAL THERMAL CONTIVE TABLE | |
|---|--|
| λ_b | Winding copper thermal conductivity. $5 W.m^{-1}.k^{-1}$ |
| λ_i | Winding insulator thermal conductivity. $0.25 W.m^{-1}.k^{-1}$ |
| λ_{co} | Steel plate crown thermal conductivity. $25 W.m^{-1}.k^{-1}$ |
| λ_{ca} | Crankcase aluminum alloy heat conductivity $180 W.m^{-1}.k^{-1}$ |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

TABLE II. POWER LOSS AT 200 SEC

| Demonstration of the Experimental Results for Different Loads ($\theta = 25^{\circ}\text{C}$) times= 200sec | | | |
|---|---|--------------------------------|-----------------------------|
| %VUB | $\Delta\theta_{\text{frame}}(\text{K})$ | $R_{\text{frame}}(\text{K/W})$ | $P_{\text{loss}}(\text{W})$ |
| 10% | 3.015137 | 0.0793 | 37.82948298 |
| 20% | 4.800415 | 0.0793 | 56.49407314 |
| 30% | 6.265259 | 0.0793 | 76.69802018 |
| 40% | 7.852173 | 0.0793 | 122.686053 |
| 50% | 22.74475 | 0.0793 | 296.055145 |

TABLE III. POWER LOSS AT 500 SEC

| Demonstration of the Experimental Results for Different Loads ($\theta = 25^{\circ}\text{C}$) times= 500sec | | | |
|---|---|--------------------------------|-----------------------------|
| %VUB | $\Delta\theta_{\text{frame}}(\text{K})$ | $R_{\text{frame}}(\text{K/W})$ | $P_{\text{loss}}(\text{W})$ |
| 10% | 6.867799 | 0.0793 | 86.60528373 |
| 20% | 11.71265 | 0.0793 | 147.7005044 |
| 30% | 22.43958 | 0.0793 | 282.970744 |
| 40% | 30.11475 | 0.0793 | 379.7572509 |
| 50% | 42.06238 | 0.0793 | 530.4209332 |

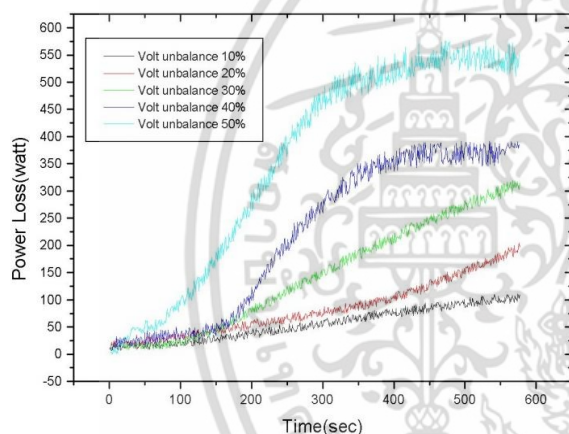


Figure 11. Effect of unbalance voltage to power losses.

Figure. 11 shows the results of five heating tests conducted in order to evaluate the influence of the positive sequence voltage on the derating of the induction motor and its comparison with the NEMA derating curve of VUB.

V. CONCLUSIONS

This paper presents a study and estimating the power loss in Induction Motor, based on monitoring results. The presented results allow to conclude power loss increased by voltage unbalance made a motor high temperatures. Supply conditions, 10% unbalance voltage to 50% voltage. According

to experimental results, increase of motor temperature and power losses of motor depends on the unbalance voltage. In the high percent of unbalancing, the motor temperature increases due to increasing of unbalance voltage and the time.

ACKNOWLEDGEMENT

This work was supported by the Energy policy and planning office, Ministry of Energy, Thailand.

REFERENCES

- [1] A.H. Bonnett, and G.C.Soukup, “Cause and analysis of stator and rotor failures in three-phase squirrel-cage induction motors,” *IEEE Trans Ind. App.*, vol.28, no. 4, pp. 921-937, 1992.
- [2] S.F. Farag, R.G. Bartheld, and W.E. May, “Electronically enhanced low voltage motor protection and control,” *IEEE Trans. Ind. App.*, vol.30, no. 3, pp. 776-784, 1994.
- [3] R.Beguenane, M.E.H.Benbouzid, “Induction motor thermal monitoring by means of rotor resistance identification,” *IEEE Tran on EC*, vol. 14, No. 3, September 1999.
- [4] H. Hafezi, and A. Jalilian “Design and construction of induction motor thermal monitoring system,” *Universities power engineering conference, 2006. UPEC’06. Proceedings of the 41 st International.* 2006, Page(s):674-678
- [5] Rasool Sharifi, Mohammad Ebrahimi, “Detection of stator winding faults in induction motors using three phase current monitoring,” *Contents lists available at Science Direct ISA Transactions* 50(2011)14-20
- [6] A.H. Bonnett, and G.C.Soukup, “Understanding the NEMA motor-generator standards of section MG-1 -1993, Revision 3, THREE-PHASE INDUCTION MOTORS,” *Petroleum and Chemical Industry Conference, 1997. Record of Conference Papers. The Institute of Electrical and Electronics Engineers Incorporated Industry Applications Society 44th Annual, Year: 1997, Page(s): 225 – 238*
- [7] A.H. Bonnett, and G.C.Soukup, “NEMA Motor-Generator Standards for Three-Phase Induction Motor,” *Industry Applications Magazine, IEEE* Volume: 5, Issue: 3, Year: 1999, Page(s): 49 – 63
- [8] B. N. Gafford, W. C. Duesterhoef and C. C. Mosher, “Heating of induction motors on unbalanced voltages,” *AIEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Pt. III-A, Vol. PAS-78, pp. 282-288, June 1959.*
- [9] IEC, *Effects on unbalanced voltages on the performance of three-phase cage induction motors*, Standard IEC 60034-26, Rotating Electrical Machines - Part 26, Publishing by IEC, Geneva, Switzerland, 2006.
- [10] N. Rama Rao and P.A.D. Jyothi Rao, “Rating factors of polyphase induction motors under unbalanced line voltage conditions,” *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-87, No.1, pp. 240-249, January 1968.*
- [11] F. J. T. E. Ferreira, A. de Almeida, and G. Baoming: “Experimental to observe the impact of power quality and voltage-source inverter on the temperature three-phase of Induction Motor Using an infra-Red Camera,” *17th Inter. Conf. on Electric Machines (ICEM’06), Conf. Proc., Crete, Greece, Sept. 2008*
- [12] A.Binder, “Energy converters – CAD and System Dynamic” *INSTITUTE FÜR ELECTRISCHE ENERGIE, Technische Universität Darmstadt, 2008*

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ - นามสกุล นางสาวณภัทร์ วรารัตน์กุล
วัน เดือน ปี เกิด 15 พฤษภาคม 2531
ที่อยู่ 133 หมู่ 8 ตำบลหัวดง อำเภอเมือง จังหวัดพิจิตร 66170

ประวัติการศึกษา

ระดับปริญญาตรี (วศบ.) สาขาวิศวกรรมการวัดคุม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยี
พระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง ในปีการศึกษา 2550 – 2553

ประสบการณ์ทำงาน

2556 – ปัจจุบัน

- วิศวกรเครื่องมือวัด
บริษัท ปตท.สำรวจและผลิตปิโตรเลียมจำกัดมหาชน
ความชำนาญ
- ระบบการวัดและการวิเคราะห์ก๊าซธรรมชาติเพื่อการซื้อขาย
- ระบบป้องกันการเกิดไฟและก๊าซธรรมชาติรั่วไหลบริเวณพื้นที่ผลิต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้