



## รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

การใช้กล้องถ่ายภาพความร้อนเพื่อลดพลังงานที่สูญเสียในเครื่องจักรกลไฟฟ้า

**Application of infrared thermography for reducing energy loss  
in electrical machine**

รศ.ดร.ทวีพล ชื้อสัตย์

ผศ.ดร.นวกัฑรา หนูนาค

ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจากเงินงบประมาณเงินรายได้ ประจำปีงบประมาณ 2555

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง



## รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

การใช้กล้องถ่ายภาพความร้อนเพื่อลดพลังงานที่สูญเสียในเครื่องจักรกลไฟฟ้า

Application of infrared thermography for reducing energy loss  
in electrical machine

รศ.ดร.ทวีพล ชื้อสัตย์

ผศ.ดร.นงภัทรา หนูนา

ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจากเงินงบประมาณเงินรายได้ ประจำปีงบประมาณ 2555

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ชื่อโครงการ การใช้กล้องถ่ายภาพความร้อนเพื่อลดพลังงานที่สูญเสียในเครื่องจักรกลไฟฟ้า  
แหล่งเงิน งบประมาณเงินรายได้ คณะวิศวกรรมศาสตร์

ประจำปีงบประมาณ 2555

จำนวนเงินที่ได้รับการสนับสนุน 80,000 บาท

ระยะเวลาทำการวิจัย 1 ปี

ตั้งแต่ 1 ตุลาคม 2554 ถึง 30 กันยายน 2555

หัวหน้าโครงการวิจัย รศ.ดร.ทวีพล ชื้อสัตย์

สาขาวิชาวิศวกรรมการวัดและควบคุม คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ผู้ร่วมโครงการวิจัย ผศ.ดร.นวกัทธา หนูนา

สาขาวิชาวิศวกรรมอาหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

### บทคัดย่อ

ปัจจุบันกล้องถ่ายภาพความร้อนได้รับความนิยมเป็นอย่างมากในกานนำมาประยุกต์ใช้งานด้านการตรวจสอบระบบไฟฟ้า ซึ่งข้อดีของการประยุกต์ใช้เครื่องมือนี้คือไม่จำเป็นต้องดับกระแสไฟฟ้า ซึ่งหมายความว่า การตรวจสอบระบบไฟฟ้าโดยกล้องถ่ายภาพความร้อนสามารถตรวจสอบขณะที่กระบวนการผลิตยังคงดำเนินการอยู่ งานในวิจัยนี้ นำกล้องถ่ายภาพความร้อน การประมวลผลภาพด้วยคอมพิวเตอร์ มาใช้ในการตรวจสอบและวิเคราะห์มอเตอร์เหนี่ยวนำไฟฟ้า 3 เฟส เพื่อทำนายความผิดปกติทางกล และทางไฟฟ้า ในขณะที่เกิดแรงดันไม่สมดุล โดยใช้งานร่วมกับมอเตอร์ที่มีการควบคุมแรงดันในแต่ละเฟส อ่านค่าอุณหภูมิที่สูงขึ้นได้จากภาพถ่ายความร้อน ซึ่งสามารถประเมินหาค่าพลังงานที่สูญเสียในมอเตอร์ได้ ทำให้สามารถวางแผนการบำรุงรักษาได้อย่างมีประสิทธิภาพ ทำให้ลดความสูญเสียในกระบวนการผลิตได้ทำให้ระบบไฟฟ้ามีความเชื่อถือได้ และมีความมั่นคงสูง

คำสำคัญ : กล้องถ่ายภาพความร้อน, มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ, การประมวลผลภาพ

**Research Title:** Application of infrared thermography for reducing energy loss in electrical machine

**Researcher:** Assoc.Prof.Dr.Taweepol Suesut

Department of Instrumentation and Control Engineering

Faculty of Engineering, KMITL

Asst.Prof.Dr.Navaphattra Nunak

Department of Food Engineering

Faculty of Engineering, KMITL

### ABSTRACT

At present, thermal imaging cameras are widely used for the machine condition monitoring applications. The advantages of the application of such tools are not necessary to shut down the electricity during operation. This means that the electrical system inspected by a thermal imaging camera to monitor the production process is still in progress. In this research, the thermal imaging camera and computer image processing were used to monitor and analyze three-phase induction motor in order to predict the mechanical disorders and power supply, while the voltage un-balance. The motor was controlled the voltage supply in each phase, then the temperature was read by the infrared thermal camera which can evaluate the energy loss in the motor. This manner can perform maintenance plan effectively and reduce losses in the manufacturing process as well as getting high reliability and stability.

**Keywords:** Infrared thermography, Induction motor, Image processing

### กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณทุนสนับสนุนการวิจัยจากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง จากแหล่ง  
ทุน งบประมาณเงินรายได้ คณะวิศวกรรมศาสตร์ ประจำปีงบประมาณ พ.ศ.2555 สำหรับการจัดสรร  
ทุนอุดหนุนการวิจัย

ทวีพล ชื้อสัตย์  
นวกัทรานุนาค

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VI
สารบัญภาพ.....	VII
<b>บทที่ 1 บทนำ.....</b>	<b>1</b>
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	3
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
<b>บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....</b>	<b>4</b>
2.1 กล้องถ่ายภาพความร้อน.....	4
2.2 หลักการแผ่รังสีความร้อน.....	5
2.3 การแผ่รังสีของวัตถุดำ.....	7
2.4 การปล่อยคลื่นรังสีอินฟราเรดออกจากพื้นผิววัตถุ.....	7
2.5 การประยุกต์ใช้งานกล้องถ่ายภาพความร้อน.....	8
2.6 มอเตอร์ไฟฟ้า.....	9
2.7 เพอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงแรงดันที่มีต่อสมรรถนะของมอเตอร์.....	18
2.8 โปรแกรมการประมวลผลภาพจากกล้องถ่ายภาพการทดลอง.....	18
<b>บทที่ 3 วิธีการทดลอง.....</b>	<b>29</b>
3.1 การติดตั้งและเชื่อมต่ออุปกรณ์.....	29
3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย.....	29
3.3 การหาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน.....	12
3.4 การวิเคราะห์.....	13

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 ผลการทดลอง.....	31
4.1 ผลการทดลองแบบเฟสสมดุล.....	31
4.2 ผลการทดลองแบบเฟสไม่สมดุล 10%.....	32
4.3 ผลการทดลองแบบเฟสไม่สมดุล 20%.....	33
4.4 ผลการทดลองแบบเฟสไม่สมดุล 30%.....	34
4.5 ผลการทดลองแบบเฟสไม่สมดุล 40%.....	35
4.6 ผลการทดลองแบบเฟสไม่สมดุล 50%.....	36
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย.....	39
บรรณานุกรม.....	40
ประวัตินักวิจัย	

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ค่าอุณหภูมิสูงสุดที่ยอมให้เพิ่มขึ้นสำหรับมอเตอร์เหนี่ยวนำทั้ง 1 เฟส และ 3 เฟส ในหน่วยองศาเซลเซียส โดยอ้างอิงอุณหภูมิต่อข้างที่ 40 องศาเซลเซียส.....	21
4.1 ผลการประเมินพลังงานสูญเสียที่โหลดต่างกันเป็นเวลา 200 วินาที.....	37
4.2 ผลการประเมินพลังงานสูญเสียที่โหลดต่างกันเป็นเวลา 500 วินาที.....	38

## สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2.1 กล้องถ่ายภาพความร้อนแบบ Mechanical Scanning System.....	4
2.2 การวัดค่าอุณหภูมิจากการแผ่รังสี.....	5
2.3 สเปกตรัมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเนื่องจากอุณหภูมิของวัตถุ.....	6
2.4 การถ่ายเทพลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของวัตถุ.....	6
2.5 ภาพถ่ายความร้อนของเบรกเกอร์ที่มีการชำรุด.....	8
2.6 การวัดอุณหภูมิที่ตัวมอเตอร์.....	9
2.7 แผนผังการจำแนกประเภทของมอเตอร์.....	11
2.8 โครงสร้างของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง.....	12
2.9 อาร์เมเจอร์และคอมมิวเตเตอร์.....	12
2.10 แปรงถ่าน.....	12
2.11 ขั้วแม่เหล็กและขดลวดสนามของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง.....	13
2.13 สเตเตอร์และขดลวดสเตเตอร์.....	14
2.14 โรเตอร์แบบกรงกระรอก.....	15
2.15 โรเตอร์แบบขดลวด.....	15
2.16 ฝาครอบหัวท้าย.....	15
2.17 สวิตช์แรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง.....	16
2.18 มอเตอร์เหนี่ยวนำที่มีโรเตอร์แบบกรงกระรอก.....	16
2.19 มอเตอร์เหนี่ยวนำที่มีโรเตอร์แบบขดลวด.....	17
2.20 เปอร์เซนต์การเปลี่ยนแปลงแรงดันที่มีผลต่อสมรรถนะของมอเตอร์.....	18
2.21 กราฟเปอร์เซนต์การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิของมอเตอร์เทียบกับเปอร์เซนต์ของแรงดันไม่สมดุล.....	22
2.22 กราฟสมรรถนะของมอเตอร์ลดลงเนื่องจากผลของแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล.....	22
2.23 แสดงคำสั่งที่ใช้ติดต่อกับกล้อง.....	23
2.24 แสดงคำสั่งที่ใช้วัดค่าสี.....	23
2.25 แสดงคำสั่งที่ใช้ตรวจจับวัตถุแปลกปลอม.....	24
2.26 แสดงคำสั่งที่ใช้คำนวณเปอร์เซนต์ภาพ.....	25
2.27 แสดงคำสั่งที่ใช้เพื่อตั้งค่าสถานะ.....	25

## สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
2.28 แสดงคำสั่งที่ใช้เพื่อแสดงสถานะ .....	26
2.29 แสดงคำสั่งที่ใช้เพื่อ เก็บภาพ เก็บข้อมูล และหน่วงเวลา .....	26
2.30 แสดงคำสั่งทั้งหมดของโปรแกรมตรวจจับสิ่งผิดปกติ .....	27
2.31 หน้าโปรแกรม vision builder AI .....	28
3.1 การทดลองวิเคราะห์หม้อเตอร์ด้วยกล้องถ่ายภาพความร้อน .....	29
3.2 Induction motor SIEMENS IEC 63 class B .....	30
3.3 Slide regulator .....	30
3.4 กล้องถ่ายภาพความร้อน FLUKE รุ่น TI32 .....	30
4.1 การทดลองวิเคราะห์หม้อเตอร์ด้วยกล้องถ่ายภาพความร้อน .....	29
4.2 (a) แรงดันสมดุลไม่สมดุล 10% .....	32
(b) แสดงอุณหภูมิแบบแรงดันสมดุลไม่สมดุล 10% .....	32
4.3 (a) แรงดันสมดุลไม่สมดุล 20% .....	33
(b) แสดงอุณหภูมิแบบแรงดันสมดุลไม่สมดุล 20% .....	33
4.4 (a) แรงดันสมดุลไม่สมดุล 30% .....	34
(b) แสดงอุณหภูมิแบบแรงดันสมดุลไม่สมดุล 10% .....	34
4.5 (a) แรงดันสมดุลไม่สมดุล 40% .....	35
(b) แสดงอุณหภูมิแบบแรงดันสมดุลไม่สมดุล 40% .....	35
4.6 (a) แรงดันสมดุลไม่สมดุล 50% .....	36
(b) แสดงอุณหภูมิแบบแรงดันสมดุลไม่สมดุล 50% .....	36
4.7 แสดงอุณหภูมิรวม .....	37
4.8 แสดงค่าพลังงานที่สูญเสียในขณะที่แรงดันไม่สมดุล .....	38

## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

กล้องถ่ายภาพความร้อน (Infrared Thermography camera) เป็นเครื่องมือที่ใช้เทคโนโลยีขั้นสูงมีประสิทธิภาพในการตรวจจับสิ่งผิดปกติจากพฤติกรรมของการเกิดความร้อนขึ้นของวัตถุในระยะไกล นิยมประยุกต์ใช้ในงานต่างๆ หลายด้านเช่น การบำรุงรักษาระบบไฟฟ้า การบำรุงรักษาเครื่องจักรกล การตรวจสอบอาคาร อุตสาหกรรมอาหาร วิศวกรรมอากาศยาน ด้านเทคนิคการแพทย์ และอื่นๆ

กล้องถ่ายภาพความร้อนได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้ตรวจสอบและบำรุงรักษาระบบไฟฟ้าอย่างแพร่หลาย โดยวัสดุและอุปกรณ์ที่นำมาใช้งานในระบบไฟฟ้าง่าดังกล่าวนี้มีคุณสมบัติในการสะท้อน การดูดกลืน และการส่งผ่านรังสีที่แตกต่างกันไป ตัวอย่างการประยุกต์ใช้กล้องถ่ายภาพความร้อน ได้แก่การใช้เพื่อการตรวจสอบในการซ่อมบำรุงระบบไฟฟ้า กล้องถ่ายภาพความร้อนสามารถวิเคราะห์ปัญหาหรือพบสิ่งผิดปกติได้อย่างมีประสิทธิภาพ แต่ถึงอย่างไรก็ตามในการตรวจสอบระบบไฟฟ้าที่ถูกต้อง เพื่อให้ได้ค่าอุณหภูมิและวิเคราะห์ปัญหาได้อย่างถูกต้องนั้น ผู้ตรวจสอบและวิเคราะห์ผลการตรวจสอบจำเป็นต้องมีประสบการณ์และมีความรู้ ความสามารถ ทั้งภาคทฤษฎีและปฏิบัติ อีกทั้งปัจจัยต่างๆ ที่เข้ามาบรบกวนจนทำให้ผู้ตรวจสอบวิเคราะห์ผิดพลาด

มอเตอร์ไฟฟ้าเป็นเครื่องจักรกลไฟฟ้าชนิดหนึ่งที่ทำหน้าที่ เปลี่ยนพลังงานไฟฟ้ามาเป็นพลังงานกล ในรูปของการหมุนเคลื่อนที่มอเตอร์ไฟฟ้ามีทั้งไฟฟ้ากระแสสลับ และไฟฟ้ากระแสตรง ที่ประกอบด้วยขดลวดสเตเตอร์ และ แกนเหล็ก โรเตอร์ ซึ่งต่างมีขดลวดอาร์มาเจอร์ที่เป็นอิสระต่อกัน และทำงานด้วยการถ่ายทอดกำลังไฟฟ้าโดยใช้การเหนี่ยวนำแม่เหล็กไฟฟ้าจากขดลวดด้านหนึ่งไปยังอีกด้านหนึ่ง มอเตอร์แบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ

1. มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง
2. มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ

มอเตอร์ที่นิยมใช้มากในอุตสาหกรรมคือมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ ซึ่งแบ่งออกเป็น 3 ชนิด คือ

- มอเตอร์เหนี่ยวนำ (Induction Motor)
- มอเตอร์แบบซิงโครนัส (Synchronous Motor)
- มอเตอร์แบบพิเศษ (Universal Motor)

มอเตอร์ที่ได้รับความนิยมใช้งานมากที่สุดคือมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบสามเฟส โดยทั่วไปผู้ที่ทำหน้าที่ด้านการอนุรักษ์พลังงานจะมุ่งเน้นการตรวจสอบประสิทธิภาพของมอเตอร์ ให้ทำงานได้อย่างเหมาะสมซึ่งจะช่วยให้สามารถประหยัดพลังงานไฟฟ้าได้ และช่วยป้องกันความเสียหายในกรณีที่มีมอเตอร์ไม่สามารถใช้งานได้ โดยมีแนวทางในการอนุรักษ์พลังงานในมอเตอร์ไฟฟ้าง่าดังนี้

1. เลือกใช้มอเตอร์ที่มีพิกัดให้เหมาะสมกับโหลดที่ต้องการขับเคลื่อน
2. หลีกเลี่ยงการเดินมอเตอร์ในขณะที่ไม่มีโหลด
3. เลือกใช้มอเตอร์ประสิทธิภาพสูงแทนมอเตอร์ธรรมดา
4. แก้ไขเพาเวอร์แฟกเตอร์โดยการต่อขานานคาปาซิเตอร์ขนาดที่เหมาะสมกับมอเตอร์
5. ทำการอัดจารบีและเปลี่ยนเบร้ง เมื่อมอเตอร์ใช้งานเป็นเวลานาน
6. เมื่อแรงดันไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงไปจากพิกัด จะทำให้ประสิทธิภาพของมอเตอร์เปลี่ยนไปควรตรวจสอบแรงดันไฟฟ้าอย่างสม่ำเสมอ

จากมาตรการในการอนุรักษ์พลังงานจากการใช้มอเตอร์ดังกล่าวพบว่า การแก้ปัญหาทำได้ 2 ทาง คือปัญหาในทางกลเช่นแรงเสียดทานที่เกิดจากการสึกหรอ และปัญหาในทางไฟฟ้า ซึ่งในทางไฟฟ้านี้เองเราพบว่ามอเตอร์สามเฟสมักจะประสบกับปัญหาในระบบไฟฟ้าที่ป้อนเข้ามอเตอร์อยู่ในสภาวะไม่สมดุล (phase unbalance) ปกติแล้วสภาพดังกล่าวมักเกิดจากโหลดในเฟสใดเฟสหนึ่งแตกต่างกันมาก และมักเกิดจากการใช้โหลดเฟสเดียวในโรงงาน ทำให้โหลดของแต่ละเฟสแตกต่างกันไปมาก แต่เนื่องจากระบบไฟฟ้าเฟสเดียวยังมีใช้งานกันอยู่มาก การใช้ไฟฟ้าทั้งสองระบบนี้จึงเป็นปัญหาในการจัดโหลดของแต่ละเฟสให้สมดุลกันเป็นไปได้ยาก เมื่อมอเตอร์ถูกใช้งานขณะที่เกิดภาวะไม่สมดุลของแรงดันไฟฟ้า ส่งผลให้อัตราส่วนของกระแสไม่สมดุลเพิ่มขึ้นมากกว่าอัตราส่วนของแรงดันที่ไม่สมดุล เป็นสาเหตุที่ทำให้กำลังการใช้งานของมอเตอร์ตกลงและอุณหภูมิมอเตอร์จะสูงมากขึ้น อุณหภูมิที่สูงมากขึ้นของมอเตอร์ขณะที่ใช้งานเต็มที่ในกรณีปกติมักสูงไม่เกิน 40 องศาเซลเซียส แต่ถ้าหากแรงดันไฟฟ้าระหว่างเฟสมีสภาพที่ผิดปกติไปจากสมดุลเพียง 3.5 % อุณหภูมิของมอเตอร์จะสูงขึ้นกว่าเดิมถึง 25 % ผลก็คือมอเตอร์จะมีอายุการใช้งานสั้นกว่าเกณฑ์ปกติ เพราะความร้อนจะทำให้ฉนวนของขดลวดเสื่อมสภาพลง (damage of insulation) จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องตรวจสอบระดับแรงดันไฟฟ้าและความถี่เป็นระยะอยู่เสมอ จะเห็นได้ว่าผลกระทบทั้งทางกล และ ทางไฟฟ้าที่มีต่อประสิทธิภาพของมอเตอร์จะแสดงออกมาได้ทางความร้อน นอกจากนี้ยังสามารถใช้เครื่องมือทำนายย้อนกลับเพื่อประเมินคุณภาพของการจ่ายกำลังไฟฟ้าได้อีกด้วย งานวิจัยนี้มุ่งค้นหาวิธีการที่เหมาะสมในการตรวจประเมินประสิทธิภาพของมอเตอร์ เพื่อทำการปรับปรุงให้มีประสิทธิภาพสูงสุด

ปัจจุบันการตรวจสอบระบบไฟฟ้าได้นิยมใช้กล้องถ่ายภาพความร้อนมาประยุกต์ใช้งานเป็นอย่างมาก ซึ่งข้อได้เปรียบการประยุกต์ใช้เครื่องมือดังกล่าวนั้นก็ช่วยทำให้ไม่จำเป็นต้องดับกระแสไฟฟ้า ซึ่งหมายความว่าตรวจสอบระบบไฟฟ้าโดยกล้องถ่ายภาพความร้อนสามารถตรวจสอบขณะที่กระบวนการผลิตยังคงดำเนินการอยู่ อย่างไรก็ตามการตรวจวัดด้วยกล้องถ่ายภาพความร้อนสามารถทำได้เพียงการวัดค่าอุณหภูมิ โดยผู้วิเคราะห์ภาพต้องเป็นผู้ที่มีความชำนาญในการวิเคราะห์ผล ซึ่งงานในวิจัยนี้จะนำกล้องถ่ายภาพความร้อน การประมวลผลภาพด้วยคอมพิวเตอร์ (Computer Image Processing) มาใช้ในการตรวจสอบและวิเคราะห์มอเตอร์เหนี่ยวนำไฟฟ้า 3 เฟส เพื่อทำนายความผิดปกติทางกล และทางไฟฟ้าใน

ขณะที่เกิดแรงดันไม่สมดุล ทำให้สามารถวางแผนการบำรุงรักษาได้อย่างมีประสิทธิภาพ ทำให้ลดความสูญเสียในกระบวนการผลิตได้ทำให้ระบบไฟฟ้ามีความเชื่อถือได้และมีความมั่นคงสูง

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. พัฒนาโปรแกรมประมวลผลภาพสำหรับการวิเคราะห์ค่าอุณหภูมิและการสูญเสียพลังงาน ด้วยการวัดแบบไม่สัมผัสโดยอาศัยกล้องถ่ายภาพความร้อนอินฟราเรด
2. ศึกษาวิธีการช่วยลดความสิ้นเปลืองพลังงานที่สูญเสีย และประสิทธิภาพที่ลดลง และลดความเสียหายกรณีที่เครื่องจักรไม่สามารถทำงานได้

## 1.3 ขอบเขตของการวิจัย

โปรแกรมที่พัฒนาขึ้นเพื่อการใช้งานร่วมกับมอเตอร์ที่มีการควบคุมแรงดันในแต่ละเฟสเพื่อให้ทราบค่าเปอร์เซ็นต์แรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล อ่านค่าอุณหภูมิที่สูงขึ้นได้จากภาพถ่ายความร้อน ซึ่งสามารถประเมินหาค่าพลังงานที่สูญเสียในมอเตอร์ได้

## 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ได้วิธีการวิเคราะห์ผลจากความร้อนเพื่อลดความสูญเสียจากพลังงานไฟฟ้า และความเสียหายที่เกิดขึ้นกับมอเตอร์

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 กล้องถ่ายภาพความร้อน

กล้องถ่ายภาพความร้อนมีอยู่ด้วยกัน 2 แบบ คือ แบบ Mechanical Scanning System และระบบที่อยู่บน Detector array ซึ่งไม่มีตัวสแกน โดยจำนวนของ Detector Array จะสอดคล้องกับความละเอียดของภาพ (Pixel) แต่ทั่วไปแล้วจำนวนตัวตรวจจับจะมีน้อยกว่าขนาดของภาพ

- Mechanical scanning system

ระบบนี้จะประกอบด้วยกระจกที่หมุน 1 ชุดหรือมากกว่า เพื่อทำการสแกนตำแหน่งของภาพตามแนวแนวโดยจะมีตัวตรวจจับเพื่อวัดอุณหภูมิจากการแผ่รังสีเพียงชุดเดียว ดังนั้นตัวตรวจจะต้องมีความไวในการวัดและความเร็วในการตรวจจับสูง ต่อมาได้มีการพัฒนาตัวตรวจจับให้มีขนาดเป็นแบบอาร์เรย์โดยจะสามารถตรวจวัดได้ในเวลาเดียวกัน 1 แถว จึงสามารถทำให้ลดเวลาลงได้ โดยใช้กระจกเคลื่อนที่เพียงตัวเดียว รูปแบบของ Mechanical scanning system แสดงดังในรูป

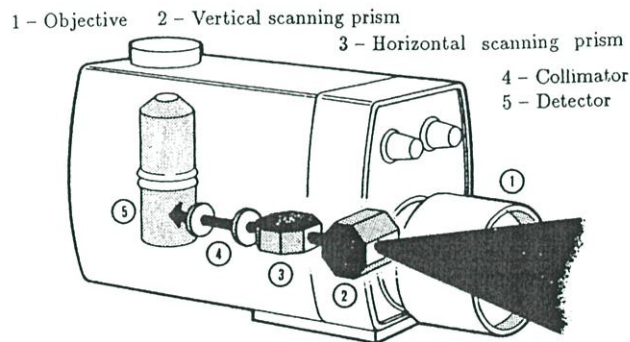
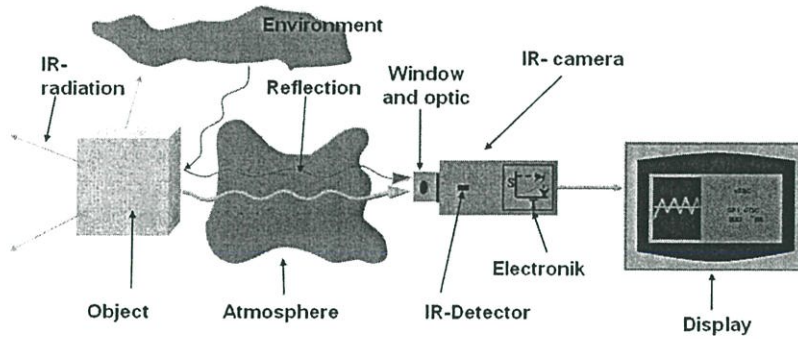


Fig. 14.17 The AGA TVH 780 camera

#### รูปที่ 2.1 กล้องถ่ายภาพความร้อนแบบ Mechanical Scanning System

- FPA (Focal Plane Arrays)

ตัวตรวจจับแบบอาร์เรย์ถูกวางอยู่บนระนาบของกล้องและไม่มีการเคลื่อนที่เชิงกล ระบบตรวจจับแบบนี้ ช่วยทำให้การออกแบบตัวตรวจจับสามารถลดความไวและเวลาในการตรวจจับลงได้ แต่อย่างไรก็ตามขั้นตอนในการสร้างตัวตรวจจับชนิดนี้ก็มี ความซับซ้อนมากขึ้น โดยทั่วไปตัวตรวจจับและตัวรับภาพจะมีขนาด 320x240 และ 640x480 pixels ในการออกแบบตัวตรวจจับแบบ FPA นี้ใช้เทคโนโลยีเดียวกันกับการออกแบบตัวรับภาพ CCD และ CMOS เรียกเทคนิคนี้ว่า ROIC (Read Out Integrated Circuit) ชนิดของสารกึ่งตัวนำที่ใช้จะเป็นพวก Platinum silicides หรือ Microbolometer ซึ่งทำมาจาก Silicon



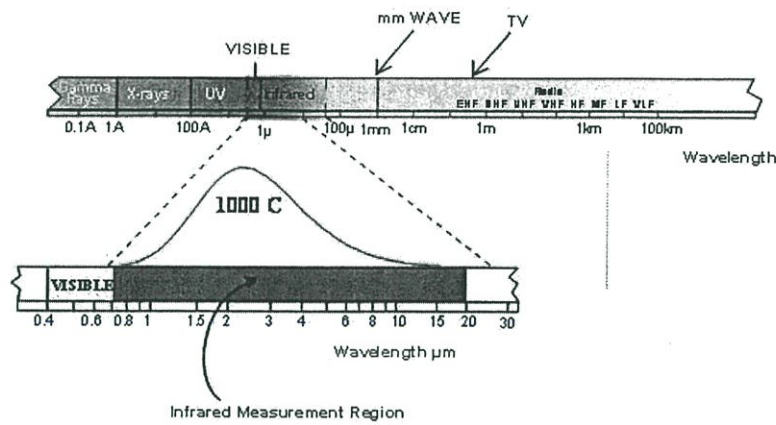
รูปที่ 2.2 การวัดค่าอุณหภูมิจากการแผ่รังสี

## 2.2 หลักการแผ่รังสีความร้อน

วัตถุทุกชนิดที่มีความร้อนมากกว่า 0 องศาเซลเซียส (เคลวิน) หรือตั้งแต่  $-273.15$  องศาเซลเซียส จะมีการแผ่รังสีความร้อนออกมา รังสีนี้มีขนาดความยาวคลื่นอยู่ในช่วงความถี่ของอินฟราเรด หรือเรียกว่ารังสีอินฟราเรด วัตถุใดๆจะมีทั้งคุณสมบัติในการแผ่รังสีและการดูดซับความร้อน (Emission and Absorption) การแผ่รังสีความร้อนของวัตถุจะไม่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของสภาพแวดล้อมแต่จะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของวัตถุนั้น ค่าการแผ่รังสีความร้อนของวัสดุ คือค่าอัตราส่วนของพลังงานที่แผ่ออกจากวัตถุต่อพลังงานที่แผ่ออกจากวัตถุดำ (Black Body) ณ อุณหภูมิเดียวกัน

คลื่นรังสีอินฟราเรดหรือคลื่นรังสีความร้อนนั้น ถูกค้นพบโดยนักวิทยาศาสตร์ชาวอังกฤษ คือ Sir William Herschel ซึ่งได้ค้นพบ รังสีอินฟราเรดสเปกตรัม (Infrared Ray) ในปี ค.ศ.1800 โดยเขาได้ทำการทดลองวัดอุณหภูมิของแถบสีต่างๆที่เปล่งออกมาเป็นสสารจากปริซึมและพบว่าอุณหภูมิความร้อนจะเพิ่มขึ้นตามลำดับและสูงสุดที่แถบสีแดง ในความเป็นจริงนั้นการที่เขาเลื่อนเทอร์โมมิเตอร์จากแถบสีที่ไม่สว่างไปยังแถบสีแดง ซึ่งเป็นแถบสีที่สิ้นสุดของสเปกตรัม และอุณหภูมิสูงขึ้นเป็นลำดับ ซึ่งขอบเขตดังกล่าวนี้เรียกว่า “อินฟราเรด” (ขอบเขตที่ต่ำกว่าแถบสีแดง)

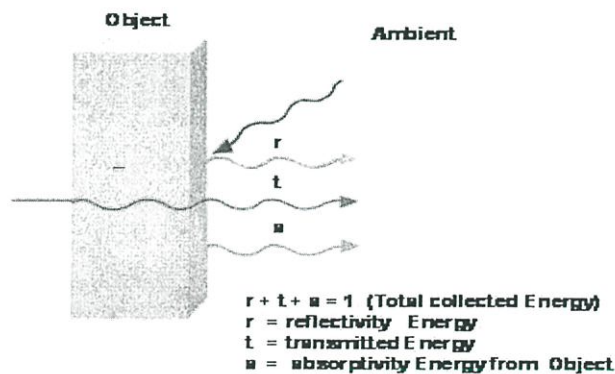
สายตาของมนุษย์นั้นธรรมชาติได้ออกแบบให้สามารถ มองเห็นคลื่นได้ในระดับหนึ่งหรือเรียกว่า "รังสีการมองเห็น" (Visible Light) โดยจะอยู่ในรูปของความสว่าง จากรูปที่ 2.3 จะเห็นได้ว่าเราสามารถ มองเห็นรังสีในย่านแคบๆ เท่านั้น หรือเรียกว่าย่านสเปกตรัมแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งถ้ามองด้านซ้ายของสเปกตรัมแม่เหล็กไฟฟ้าก็จะติดกับย่านรังสีอัลตราไวโอเล็ต ซึ่งมนุษย์ไม่สามารถมองเห็นในย่านนี้และส่วนด้านขวาของสเปกตรัมแม่เหล็กไฟฟ้า ก็จะติดกับย่านรังสีอินฟราเรด ซึ่งเราก็ไม่สามารถมองเห็นเช่นกัน



รูปที่ 2.3 แสดงสเปกตรัมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเนื่องจากอุณหภูมิของวัตถุ

แหล่งกำเนิดของรังสีอินฟราเรด ก็คือ ความร้อนหรือการแผ่รังสีความร้อน ไม่ว่าจะวัตถุใดก็ตามที่มีอุณหภูมิสูงกว่าค่า Absolute Zero (-273.15 องศาเซลเซียส หรือ 0 องศาเคลวิน) จะมีการแผ่รังสีในย่านอินฟราเรดหรือรังสีความร้อนออกมาแม้ใน โตรเจนที่อุณหภูมิต่ำ -196 องศาเซลเซียส ก็ยังมีการแผ่รังสีอินฟราเรดออกมาได้ ถึงแม้จะมีค่าน้อยก็ตาม ซึ่งในความเป็นจริงและในชีวิตประจำวัน เราจะสัมผัสและเกี่ยวข้องกับรังสีอินฟราเรดอยู่ตลอดเวลา เช่น เรารู้สึกร้อนเมื่ออยู่กลางแจ้งหรือใกล้ไฟ ถึงแม้ว่าตามนุษย์จะไม่สามารถมองเห็นรังสีอินฟราเรดได้ แต่ผิวเราก็สามารถรู้สึกจากความร้อนได้ วัตถุที่ร้อนย่อมแผ่พลังงานรังสีออกมามากกว่าวัตถุที่เย็น

สำหรับรังสีอินฟราเรดหรือรังสีความร้อน จะแผ่ออกมาจากพื้นผิวของวัตถุชั้นแรก ในรูปแบบของพลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า โดยรังสีอินฟราเรดหรือรังสีความร้อนที่ตกกระทบบนพื้นผิววัตถุ บางส่วนจะถูกดูดกลืน (Absorbed) บางส่วนจะสะท้อน (Reflected) และบางส่วนจะส่งผ่านหรือทะลุผ่านออกไป (Transmitted) ดังแสดงในรูปที่ 2.4 ซึ่งสัดส่วนเหล่านี้แสดงได้ในรูปของสมการที่ 1 เมื่อ กำหนดให้ Absorbivity (a), Reflectivity (r) และ Transmissivity (t)



รูปที่ 2.4 แสดงการถ่ายเทพลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของวัตถุ

### 2.3 การแผ่รังสีของวัตถุดำ (Blackbody Radiation)

เมื่อก้าวถึงคุณลักษณะการแผ่รังสีของผิวจริงทั่วไป จำเป็นจะต้องเข้าใจแนวความคิดของวัตถุดำก่อน วัตถุดำเป็นผิวทางอุดมคติ ( $e = 1$ ) ซึ่งมีคุณลักษณะดังนี้

1. วัตถุดำจะดูดรังสีกระทบทั้งหมดไว้ไม่มีการสะท้อนกลับ โดยไม่คำนึงถึงความยาวคลื่นและทิศทาง
2. วัตถุดำจะแผ่รังสีได้มากกว่าวัตถุอื่นๆ ทุกชนิดที่อุณหภูมิและความยาวคลื่นเดียวกัน
3. วัตถุดำจะแผ่รังสีออกโดยไม่ขึ้นกับทิศทาง นั่นคือ วัตถุดำเป็น Diffuse emitter

เนื่องจากวัตถุดำเป็นการแผ่รังสี และตัวดูดรังสีที่ดีที่สุด (Perfect emitter and absorber) ดังนั้น วัตถุดำจึงเป็นมาตรฐาน ในการเปรียบเทียบคุณสมบัติการแผ่รังสีของผิววัตถุจริงต่าง ๆ

### 2.4 การปล่อยคลื่นรังสีอินฟราเรดออกจากพื้นผิววัตถุ

จากแนวคิดเกี่ยวกับวัตถุดำ เพื่อเป็นการอธิบายพฤติกรรมของผิวอุดมคติ ต่อจากนี้เราจะพิจารณาผิวของวัตถุจริงบ้าง วัตถุดำเป็นตัวอย่างตัวปล่อยรังสีออกในอุดมคติที่ไม่มีผิววัตถุใดสามารถส่งออกรังสีได้มากกว่าวัตถุดำในอุณหภูมิเดียวกัน เพราะฉะนั้น จึงเลือกวัตถุดำมาเป็นมาตรฐานในการอธิบายของการแผ่หรือการปล่อยรังสีออกจริง คุณสมบัติการปล่อยรังสีออก เรียกว่า Emissivity ( $e$ ) กำหนดเป็นอัตราส่วนของการปล่อยรังสีของวัตถุใด ๆ ต่อรังสีของวัตถุดำที่อุณหภูมิเดียวกัน จะเห็นได้ว่าการปล่อยออก มีค่าสูงสุดได้ไม่เกินหนึ่งหมายความว่าพื้นผิวใด ๆ สามารถแผ่รังสีได้สูงสุดเท่ากับวัตถุดำ นั่นเอง

กฎของ Stefan-Boltzmann

$$\text{Emissivity} = \frac{\text{radiation emitted by the surface}}{\text{radiation emitted by blackbody}}$$

ความสัมพันธ์ของ การสะท้อน การซับ และ การส่งผ่าน (Reflection, Absorption, Transmission)

$$\text{Incident flux} = \text{reflected} + \text{absorbed} + \text{transmitted flux}$$

R: Reflectance (ค่าการสะท้อน)

A: Absorptance (ค่าการดูดซับ)

T: Transmittance (ค่าการส่งผ่าน) -

$$R+A+T = 1$$

ตัวอย่าง เช่น กระจก: absorbed = transmitted = 0, reflected = 1

วัตถุดำ (Blackbody) : reflected = transmitted = 0, absorbed = 1

สำหรับการคำนวณทางวิศวกรรมจะถือว่าคุณสมบัติของผิววัตถุจะสามารถปล่อยออกเฉลี่ยเท่ากันทุกทิศทางเป็นผลให้ไม่ขึ้นกับทิศทางค่า Emissivity ( $e$ ) จะขึ้นอยู่กับลักษณะพื้นผิวของวัตถุ การเป็นตัวนำ (Conductor) หรือไม่เป็นตัวนำ (Non-Conductor) โดยทั่วไปค่า Emissivity ของผิวโลหะจะมีค่าน้อย และ

ถ้าเป็นโลหะผิวมันเงาก็ยิ่งจะมีค่าน้อยกว่า 0.02 แต่ถ้าทาสีบนแผ่นโลหะนั้นค่าอาจเพิ่มขึ้น และถ้าโลหะมีสนิมก็เพิ่มขึ้นได้เช่นกัน ยกตัวอย่างเช่น  $\epsilon = 0.01$  สำหรับเหล็กสแตนเลสมีสนิมเล็กน้อย แต่ถ้ามีสนิมมากจะมีค่าประมาณ 0.5 ส่วนค่าปกติเป็นตัวนำจะมีค่ามากกว่า 0.6 ขึ้นไป และเพิ่มขึ้นหรือลดถ้าอุณหภูมิมีการเปลี่ยนแปลง

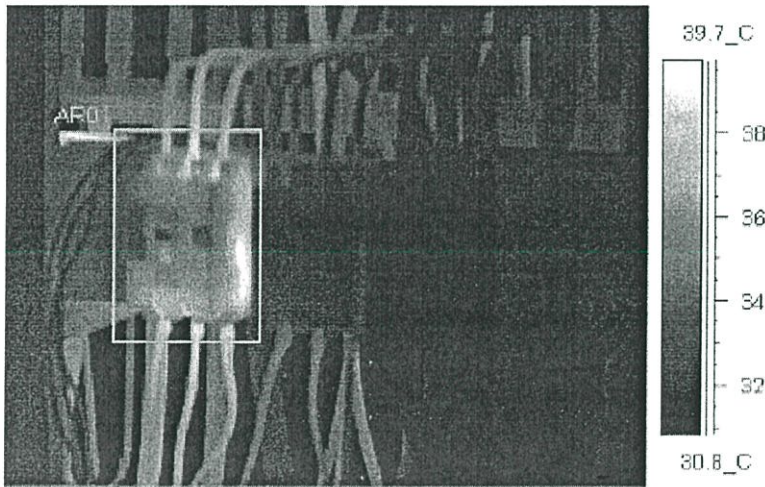
## 2.5 การประยุกต์ใช้งานกล้องถ่ายภาพความร้อน

การตรวจสอบอุปกรณ์ไฟฟ้าแต่ละประเภทอุปกรณ์ ที่ในไฟฟ้าภายในอาคารและโรงงานอุตสาหกรรมนั้นจะประกอบด้วยอุปกรณ์หลายชนิดและมีหน้าที่การทำงานที่แตกต่างกันและมีจุดในการตรวจสอบหรือให้ความสนใจเพื่อการตรวจสอบหาสิ่งผิดปกติที่แตกต่างกันไปซึ่งสามารถสรุปได้เบื้องต้น เช่น

### เซอร์กิตเบรกเกอร์

เซอร์กิตเบรกเกอร์เป็นอุปกรณ์ป้องกันการกระแสวิกเนื่องจากการทำงานเกินพิกัดและการลัดวงจรไฟฟ้า ซึ่งส่วนประกอบต่างๆที่ต้องตรวจสอบด้วยกล้องถ่ายภาพความร้อนนั้นจะประกอบด้วย:

- จุดต่อและขั้วไฟฟ้าต่างๆ
- จุดเข้าหัวสายหรือหางปลาต่างๆ (Cable Lug)
- การเกิดความร้อนภายในตัวเซอร์กิตเบรกเกอร์เนื่องจากหน้าสัมผัสภายในชำรุด



รูปที่ 2.5 ภาพถ่ายความร้อนของเบรกเกอร์ที่มีการชำรุด

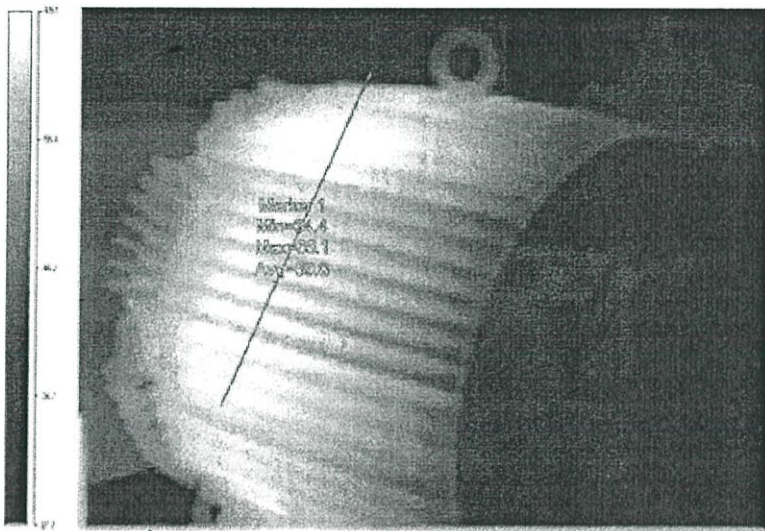
### มอเตอร์

เป็นอุปกรณ์ที่ใช้งานในภาคอุตสาหกรรมเป็นจำนวนมาก และเป็นอุปกรณ์ที่คาบเกี่ยวระหว่างงานด้านวิศวกรรมไฟฟ้าและเครื่องกล ซึ่งการวิเคราะห์สิ่งผิดปกติที่เกิดขึ้นในมอเตอร์ไฟฟ้านั้นจะมีอุปกรณ์หลายประเภทที่นำมาใช้เพื่อตรวจสอบสิ่งผิดปกติ สำหรับกล้องถ่ายภาพความร้อนก็เป็นอุปกรณ์ชนิดหนึ่งที่

สามารถวิเคราะห์ห้สิ่งผิดปกติที่เกิดขึ้นได้ซึ่งส่วนประกอบต่างๆที่จะต้องตรวจสอบด้วยกล้องถ่ายภาพความร้อนนั้นจะประกอบด้วย:

- จุดต่อและขั้วไฟฟ้าต่างๆ
- จุดเข้าหัวสายหรือหางปลาต่างๆ(Cable Lug)
- ชุดแปร่งถ่าน
- เฟลาและคลัทช์ถูกป็น

การตรวจสอบมอเตอร์นั้นจะใช้วิธีการเปรียบเทียบข้อมูลระหว่างมอเตอร์ที่มีขนาดและการทำงานที่สถานะใกล้เคียงกันซึ่งถ้าพบค่าอุณหภูมิของมอเตอร์ที่เกิดปัญหามีค่าอุณหภูมิสูงกว่า มอเตอร์ ที่อยู่ในสภาพปกติเกิด 10-15 องศาเซลเซียส ให้สันนิฐานเบื้องต้นว่ามอเตอร์ดังกล่าวน่าจะเกิดการชำรุด



รูปที่ 2.6 การวัดอุณหภูมิที่ตัวมอเตอร์

## 2.6 มอเตอร์ไฟฟ้า

มอเตอร์ไฟฟ้าเป็นเครื่องจักรกลไฟฟ้าชนิดหนึ่งที่ทำหน้าที่ เปลี่ยนพลังงานไฟฟ้า มาเป็นพลังงานกล ในรูปของการหมุนเคลื่อนที่ มอเตอร์ไฟฟ้ามีทั้งไฟฟ้ากระแสสลับและไฟฟ้ากระแสตรง ที่ประกอบด้วย ขดลวดสเตเตอร์ และ แกนเหล็กโรเตอร์ ซึ่งต่างมีขดลวดอาร์มาเจอร์ที่เป็นอิสระต่อกันและทำงานด้วยการ ถ่ายทอดกำลังไฟฟ้าโดยใช้การเหนี่ยวนำแม่เหล็กไฟฟ้าจากขดลวดด้านหนึ่งไปยังอีกด้านหนึ่ง

มอเตอร์ไฟฟ้า (Motor) สามารถจำแนกชนิดตามการใช้กระแสไฟฟ้าได้ 2 ชนิด คือ

1. มอเตอร์ ไฟฟ้ากระแสตรง (Direct Current Motor; DC Motor)
2. มอเตอร์ ไฟฟ้ากระแสสลับ (Alternating Current Motor; AC Motor)

มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง แบ่งตามลักษณะการต่อขดลวดสนามแม่เหล็กได้ 3 แบบ คือ

1. มอเตอร์แบบขนาน (Shunt Motor)
2. มอเตอร์แบบอนุกรม (Series Motor)
3. มอเตอร์แบบผสม (Compound Motor)

มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ เป็นมอเตอร์ที่นิยมใช้กันมากที่สุดในโรงงานอุตสาหกรรม มีข้อดี คือ มีความเร็วรอบคงที่ และตัวหมุนโรเตอร์ (Rotor) ส่วนมากเป็นชนิดกรงกระรอก (Squirrel Cage) ไม่มี ขดลวดพันอยู่ จึงไม่มีอันตรายจากประกายไฟฟ้าที่แปร่งถ่านและคอมมิวเตเตอร์เหมือนกับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง นำไปใช้งานได้อย่างกว้างขวาง โดยเฉพาะในโรงงานที่มีแก๊สหรือน้ำมันที่ไวไฟ ซึ่งมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไม่สามารถนำไปใช้ได้ มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ สามารถจำแนกชนิดของมอเตอร์ได้ดังนี้

มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับชนิด 1 เฟส แบ่งออกได้ 5 แบบ คือ

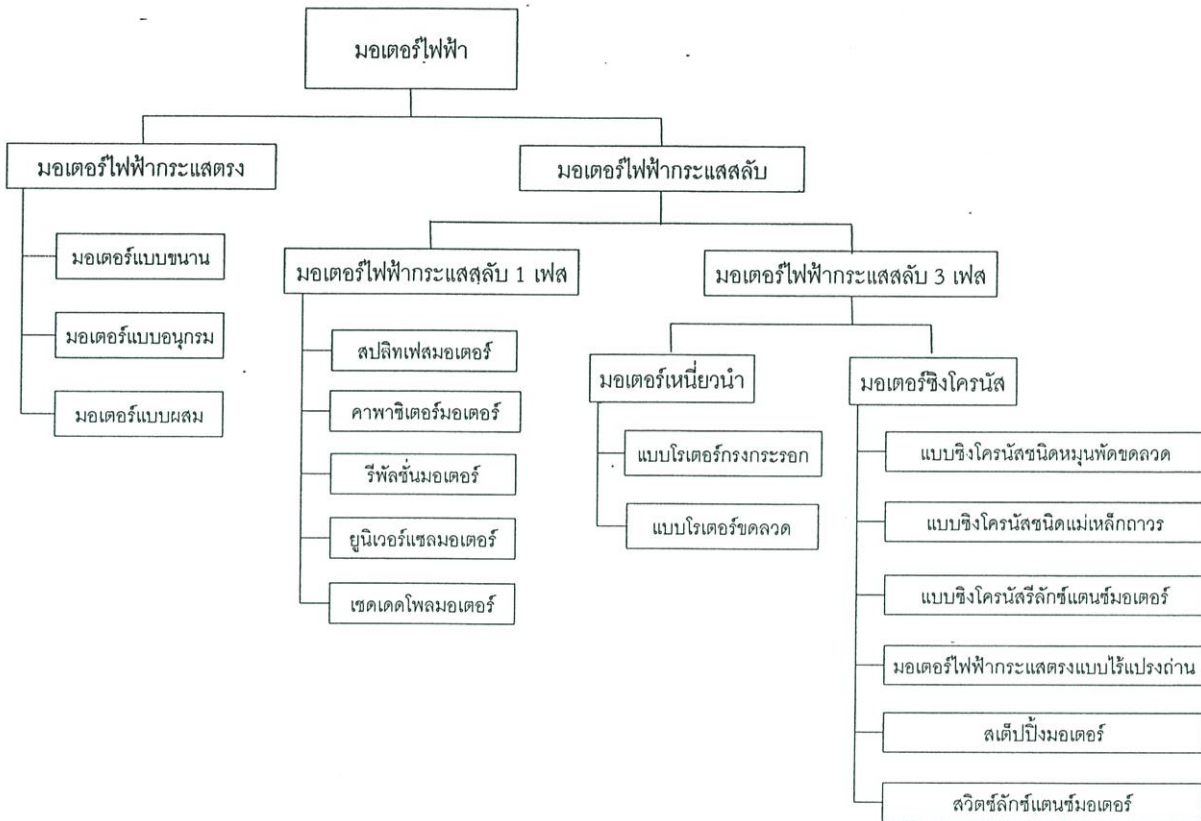
1. สปลิตเฟสมอเตอร์ (Split-phase Motor)
2. คาปาซิเตอร์มอเตอร์ (Capacitor Motor)
3. รีพัลชันมอเตอร์ (Repulsion Motor)
4. ยูนิเวอร์แซลมอเตอร์ (Universal Motor)
5. เซดเดดโพลมอเตอร์ (Shaded-pole Motor)

มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับชนิด 3 เฟส แบ่งออกได้ 2 แบบ คือ

1. มอเตอร์เหนี่ยวนำ สามารถแบ่งตามลักษณะของตัวหมุน (Rotor) 2 ชนิด คือ
  - มอเตอร์เหนี่ยวนำชนิดที่มีโรเตอร์แบบกรงกระรอก
  - มอเตอร์เหนี่ยวนำชนิดที่มีโรเตอร์แบบขดลวด
2. มอเตอร์ซิงโครนัส สามารถแบ่งออกได้ 6 ชนิด คือ
  - มอเตอร์ซิงโครนัสชนิดตัวหมุนพันขดลวด
  - มอเตอร์ซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวร
  - ซิงโครนัสรีลักซ์แดนซ์มอเตอร์
  - มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปร่งถ่าน
  - สเต็ปป์มอเตอร์
  - สวิตซ์รีลักซ์แดนซ์มอเตอร์

มอเตอร์ที่ได้รับความนิยมใช้งานมากที่สุดคือมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบสามเฟส งานวิจัยนี้ได้นำเอาระบบการวัดและติดตามค่าอุณหภูมิมาใช้ในการตรวจสอบและวิเคราะห์มอเตอร์เหนี่ยวนำไฟฟ้า 3 เฟส เพื่อแจ้งเตือนสถานะในขณะที่เกิดแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล ทำให้สามารถวางแผนการบำรุงรักษาได้อย่างมีประสิทธิภาพ ทำให้ลดความสูญเสียในกระบวนการผลิตได้

ประเภทของมอเตอร์ไฟฟ้า ตามที่ได้กล่าวในข้างต้น สามารถเขียนแผนผังการจำแนกชนิดของมอเตอร์ไฟฟ้าได้ดังรูปที่ 2.7



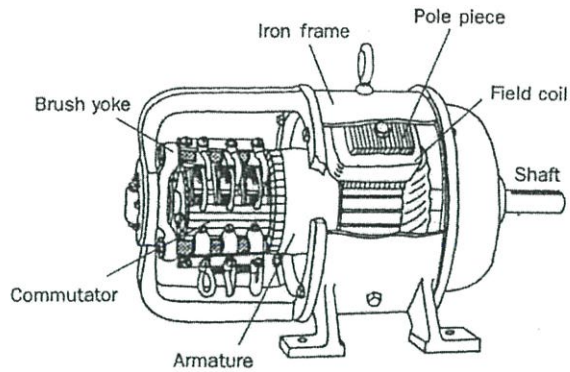
รูปที่ 2.7 แผนผังการจำแนกประเภทของมอเตอร์

### มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง คือ เครื่องกลไฟฟ้าที่ทำงานโดยอาศัยแหล่งกำเนิดภายนอกที่เป็น ไฟฟ้ากระแสตรง

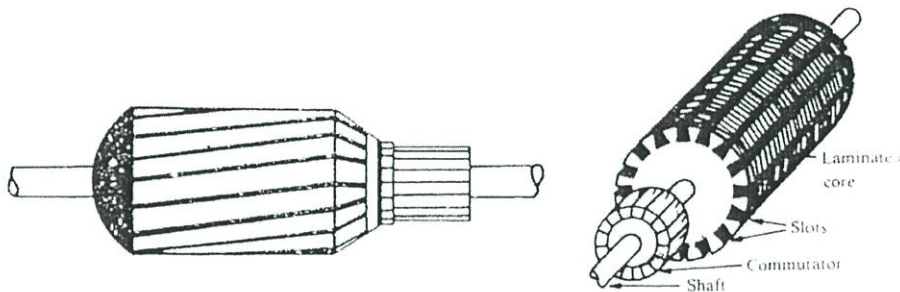
### โครงสร้างของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

เมื่อพิจารณาภาพตัดของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ที่แสดงในรูปที่ 2.8 จะพบว่า โครงสร้างของมอเตอร์ประกอบด้วย เปลือกนอกของมอเตอร์ (Iron Frame) ทำด้วยเหล็กหล่อ ทำหน้าที่หุ้ม ส่วนประกอบต่าง ๆ ของมอเตอร์ จะติดตะขอไว้เพื่อใช้ในการขนย้ายมอเตอร์ ตัวหมุนของมอเตอร์จะ เรียกว่า อาร์เมเจอร์ (Armature) ทำด้วยเหล็กมีแกนกลาง (Shaft) เป็นแกนหมุน รอบ ๆ อาร์เมเจอร์พัน ด้วยขดลวดสนามแม่เหล็ก (Field Coil) และมีขั้วแม่เหล็ก (Pole Piece) ยึดติดกับเปลือกของมอเตอร์ มี แปรงถ่าน (Brushes) เป็นตัวนำไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายภายนอกไปจ่ายให้มอเตอร์เพื่อให้มอเตอร์หมุน



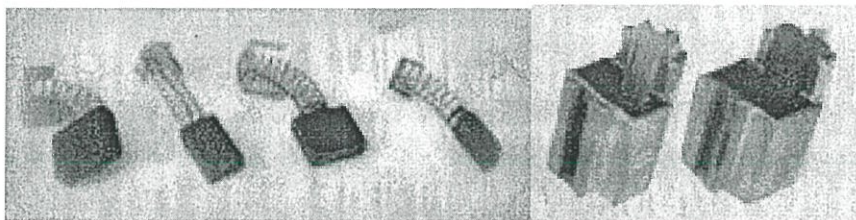
รูปที่ 2.8 โครงสร้างของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

อาร์เมเจอร์ (Armature) คือ ตัวหมุนของมอเตอร์ อาจเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า โรเตอร์ (Rotor) ทำจากแผ่นโลหะบางอัดซ้อนกัน (Laminate Sheet Steel) รอบ ๆ แผ่นทำเป็นร่อง (Slot) ใช้สำหรับใส่ขดลวดสนามแม่เหล็ก และปลายของขดลวดที่พันอยู่บนอาร์เมเจอร์จะนำมาต่อกับคอมมิวเตเตอร์ (Commutator) ซึ่งทำด้วยซีทองแดง (Segment) ที่ติดตั้งอยู่ด้านบนของอาร์เมเจอร์ และปลายด้านหนึ่งของคอมมิวเตเตอร์ ต่อกับขดลวดสนามแม่เหล็กที่พันอยู่บนตัวอาร์เมเจอร์



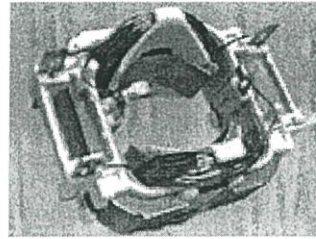
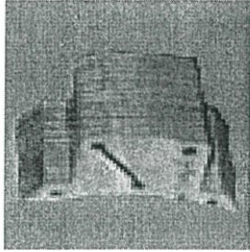
รูปที่ 2.9 อาร์เมเจอร์และคอมมิวเตเตอร์

แปรงถ่าน คือ แท่งคาร์บอนที่กดแนบกับคอมมิวเตเตอร์ เพื่อต่อไฟฟ้าจากวงจรภายนอกเข้าสู่ คอมมิวเตเตอร์ แปรงถ่านจะยึดอยู่ที่กล่องใส่แปรงถ่าน และมีสปริงเป็นตัวกดแปรงถ่านให้สัมผัสกับ คอมมิวเตเตอร์ ลักษณะของแปรงถ่าน แสดงในรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 แปรงถ่าน

ขั้วแม่เหล็กและขดลวดสนาม (Pole Piece and Field Coil) ขั้วแม่เหล็กสำหรับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงมีลักษณะเป็นขั้วแม่เหล็กยื่น (Pole Shoes) ดังรูปที่ 2.11 (ก) และทำจากแผ่นเหล็กบางอัดซ้อน กัน เหมือนกับอาร์เมเจอร์ รอบ ๆ ของขั้วแม่เหล็กจะพันด้วยขดลวดสนาม ขดลวดนี้จะรับไฟตรงเข้ามา เพื่อสร้างสนามแม่เหล็กระหว่างขั้วแม่เหล็กของมอเตอร์ ลักษณะของขดลวดสนามดังรูปที่ 2.11 (ข)



(ก) ขั้วสนามแม่เหล็ก

(ข) ขดลวดสนาม

รูปที่ 2.11 ขั้วแม่เหล็กและขดลวดสนามของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

### ประเภทของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง สามารถแบ่งประเภทของมอเตอร์ ตามลักษณะการต่อขดลวดสนามแม่เหล็กได้ 3 แบบ ดังนี้

- **มอเตอร์แบบขนาน (Shunt Motor)**

มอเตอร์แบบขนาน คือ มอเตอร์ที่ต่อขดลวดสนามแม่เหล็ก ซึ่งนิยมเรียกตามชื่อมอเตอร์ว่า ชั้นท์ฟิลด์ (Shunt Field) ขนานกับอาร์เมเจอร์ของมอเตอร์ มอเตอร์แบบขนานมีคุณสมบัติที่ดี คือ ให้ความเร็วรอบค่อนข้างคงที่ จึงนิยมนำไปใช้ในเครื่องจักรกลที่ต้องหมุนด้วยรอบคงที่ เช่น เครื่องกลึง เครื่องไส เครื่องกัด ฯลฯ

- **มอเตอร์แบบอนุกรม (Series Motor)**

มอเตอร์แบบอนุกรม คือ มอเตอร์ที่ต่อขดลวดสนามแม่เหล็กอนุกรมกับอาร์เมเจอร์ของมอเตอร์ จึงเรียกขดลวดสนามแม่เหล็กของมอเตอร์ชนิดนี้ว่า ซีรีส์ฟิลด์ (Series Field) มีคุณลักษณะที่ดี คือ ให้แรงบิดสูง นิยมใช้เป็นต้นกำลังของรถไฟ รางยกของ เคนไฟฟ้า ความเร็วรอบของมอเตอร์อนุกรมนี้จะลดลงเมื่อโหลดของมอเตอร์เพิ่มขึ้น เมื่อไม่มีโหลดความเร็วจะสูงมาก ดังนั้นเมื่อเริ่มสตาร์ทมอเตอร์แบบ อนุกรม จึงต้องให้มีโหลดต่ออยู่เสมอเพื่อให้เกิดความปลอดภัย

- **มอเตอร์แบบผสม (Compound Motor)**

มอเตอร์แบบผสม จะนำคุณลักษณะที่ดีของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบขนาน และแบบ อนุกรม มารวมกัน เป็นมอเตอร์ที่มีแรงบิดเริ่มหมุนมากกว่ามอเตอร์ขนาน และมีความเร็วรอบคงที่กว่ามอเตอร์

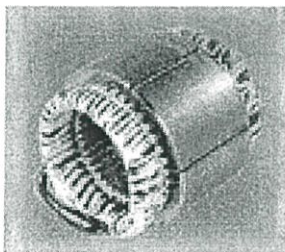
อนุกรม การต่อมอเตอร์แบบผสมมีวิธีการต่อขดลวดขนาน (Shunt field) อยู่ 2 วิธี คือ วิธีที่หนึ่ง การต่อขดลวดชั้นที่ (Shunt field) กับขดลวดอนุกรมและอาร์เมเจอร์ เรียกว่า ลองชันท์ และวิธีที่สองต่อขดลวดชั้นที่ขนานกับอาร์เมเจอร์ เรียกว่า ชอทชันท์ (Short Shunt Compound Motor)

### มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ

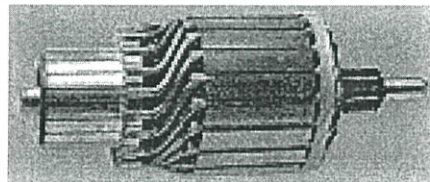
มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ คือ เครื่องกลไฟฟ้าที่ทำงานโดยอาศัยแหล่งกำเนิดภายนอกที่เป็น ไฟฟ้ากระแสสลับ มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับแบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับชนิด 1 เฟส และมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับชนิด 3 เฟส โดยที่โครงสร้างของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับชนิด 1 เฟส และโครงสร้างของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับชนิด 3 เฟส มีลักษณะคล้ายกัน

#### โครงสร้างของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ

ส่วนที่อยู่กับที่ หรือที่เรียกว่า สเตเตอร์ (Stator) ทำด้วยเหล็กวงกลมแผ่นบาง ๆ อัดซ้อนกัน (Laminated Iron Core) ดังรูปที่ 2.13 (ก) มีขดลวดสเตเตอร์ (Stator Coil) ดังรูปที่ 2.13 (ข) พันอยู่ในร่องแกนสเตเตอร์ ทำหน้าที่เป็นตัวรับกระแสไฟฟ้าจากภายนอก และเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าให้เป็นสนามแม่เหล็ก โดยสนามแม่เหล็กจากขดลวดจะถ่ายทอดไปยังแกนเหล็กเพื่อทำให้เกิด สนามแม่เหล็กจำนวนมากพอที่จะทำให้เกิดการเหนี่ยวนำที่ตัวโรเตอร์ (Rotor) ทำให้โรเตอร์หมุน



(ก) สเตเตอร์



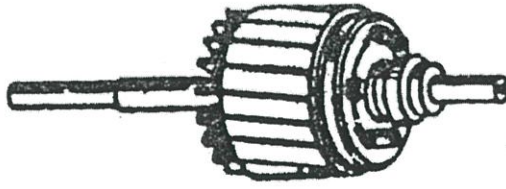
(ข) ขดลวดสเตเตอร์

รูปที่ 2.13 สเตเตอร์และขดลวดสเตเตอร์

ตัวหมุน หรือที่เรียกว่า โรเตอร์ (Rotor) ทำหน้าที่รับสนามแม่เหล็กจากสเตเตอร์ โดยทั่วไป โรเตอร์มี 2 แบบ คือ

#### 1. โรเตอร์แบบกรงกระรอก (Squirrel Cage Rotor)

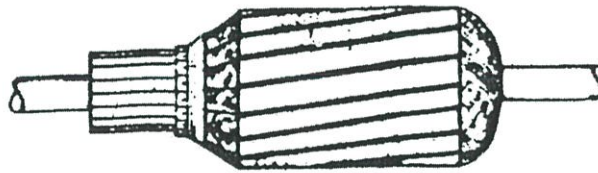
ทำจากแผ่นโลหะบาง ๆ อัดเข้าด้วยกัน โดยมีเพลลาเหล็กอยู่แกนกลาง ผิวของโรเตอร์จะมีร่อง ตามแนวยาว โดยร่องนี้จะมีทองแดงหรืออะลูมิเนียมเส้นโต ๆ ฝังอยู่โดยรอบและหัวท้ายของทองแดงหรืออะลูมิเนียมเส้นนี้ มีวงแหวนปิดรอบ ๆ



รูปที่ 2.14 โรเตอร์แบบกรงกระรอก

## 2. โรเตอร์แบบขดลวด (Wound Rotor)

มีลักษณะเป็นแกนเหล็ก ทาจากแผ่นโลหะบาง ๆ อัดซ้อนกัน และพันขดลวดอาบน้ำยาในร่องแกนโรเตอร์



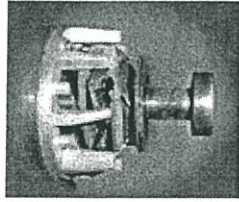
รูปที่ 2.15 โรเตอร์แบบขดลวด

ฝาครอบหัวท้าย (End Plate) ทำหน้าที่ปิดด้านข้างของมอเตอร์ และทำหน้าที่รองรับเพลลาที่ติด กับแกนโรเตอร์



รูปที่ 2.16 ฝาครอบหัวท้าย

สวิทช์แรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง (Centrifugal Switch) เป็นสวิทช์ที่ทำงานโดยอาศัยแรงเหวี่ยงจากแกนหมุนของโรเตอร์ ทำหน้าที่ตัดกระแสไฟเข้าขดลวดสตาร์ท (Starting Winding) หลังจากที่ มอเตอร์หมุนไปแล้ว



รูปที่ 2.17 สวิตช์แรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง

### มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับชนิด 1 เฟส

มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับชนิด 1 เฟส คือ มอเตอร์ที่ใช้กับแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ 1 เฟส 220 โวลต์ 50 เฮิร์ตซ์ หรือขนาดแรงดันที่ต่ำกว่านี้ตามพิกัดของมอเตอร์

### มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับชนิด 3 เฟส

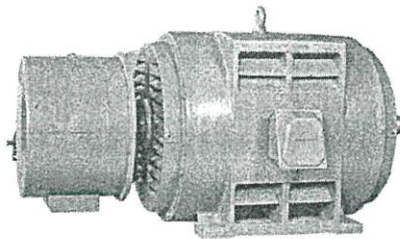
มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับชนิด 3 เฟส แบ่งออกตามโครงสร้าง และหลักการทางานของมอเตอร์ ได้ 2 แบบ ดังนี้

#### มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟส แบบอินดักชัน (3 Phase Induction Motor)

มอเตอร์เหนี่ยวนำ เป็นมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟส ที่มีคุณสมบัติที่ดี คือ มีความเร็วรอบ คงที่ เนื่องจากความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำขึ้นอยู่กับความถี่ (Frequency) ของแหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับ มีราคาถูก โครงสร้างไม่ซับซ้อน สะดวกในการบำรุงรักษา เพราะไม่มีแปรงถ่าน และ คอมมิวเตเตอร์เหมือนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง เมื่อใช้ร่วมกับเครื่องควบคุมความเร็วแบบอินเวอร์เตอร์ (Inverter) สามารถควบคุมความเร็ว (Speed) ได้ตั้งแต่ศูนย์จนถึงความเร็วตามพิกัดของมอเตอร์ นิยมใช้ เป็นต้นกำลังในโรงงานอุตสาหกรรม เพื่อขับเคลื่อนลิฟท์ ขับเคลื่อนสายพานลาเลียง ขับเคลื่อนเครื่องจักร ไฟฟ้า เช่น เครื่องไฮดรอลิก เป็นต้น มอเตอร์เหนี่ยวนำมี 2 แบบ แบ่งตามลักษณะของตัวหมุน คือ

#### 1 มอเตอร์เหนี่ยวนำที่มีโรเตอร์แบบกรงกระรอก (Squirrel Cage Induction Motor)

ตัวโรเตอร์จะมีโครงสร้างแบบกรงกระรอก เหมือนกับโรเตอร์ของสปลิตเฟสมอเตอร์ สำหรับตัวสเตเตอร์เป็นโครงสร้างเหล็กหล่ออยู่ภายนอก และภายในเป็นเหล็กแผ่นบาง ๆ อัดซ้อนกันมีร่อง และมีการพันขดลวดสเตเตอร์เพื่อสร้างสนามแม่เหล็กหมุน จำนวน 3 ขด ตามจำนวนของลำดับเฟสของแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ

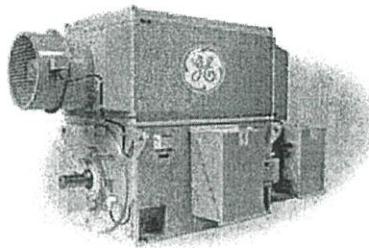


รูปที่ 2.18 มอเตอร์เหนี่ยวนำที่มีโรเตอร์แบบกรงกระรอก

โดยงานวิจัยนี้ใช้มอเตอร์ยี่ห้อ SIEMENS IEC 63 class B ที่ใช้ในเครื่องลับดอกสว่าน (Pointing machine) เป็นกรณีศึกษา

### มอเตอร์เหนี่ยวนำที่มีโรเตอร์แบบขดลวด (Wound Rotor Induction Motor)

ตัวโรเตอร์จะทำจากเหล็กแผ่นบาง ๆ อัดซ้อนกัน เป็นตัวหุ้มค้ำยอาร์เมเจอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้า กระแสตรง มีร่องสำหรับวางขดลวดของตัวโรเตอร์เป็นขดลวด 3 ชุด สำหรับสร้างขั้วแม่เหล็ก 3 เฟส เช่นกัน ปลายเป็นขดลวดทั้ง 3 ชุดต่อกับสลีปริง (Slip Ring) จำนวน 3 อัน สำหรับเป็นทางให้ กระแสไฟฟ้าครบวงจรทั้ง 3 เฟส ส่วนประกอบอื่น ๆ ของมอเตอร์ชนิดนี้เหมือนกับชนิดที่มีโรเตอร์แบบกรงกระรอก



รูปที่ 2.19 มอเตอร์เหนี่ยวนำที่มีโรเตอร์แบบขดลวด

การทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำ เมื่อจ่ายไฟฟ้าสลับ 3 เฟส ให้ที่ขดลวดทั้งสองของตัวสเตเตอร์ จะเกิดสนามแม่เหล็กหมุนรอบ ๆ ตัวสเตเตอร์ ทำให้ตัวหมุนได้รับการเหนี่ยวนำเกิดขั้วแม่เหล็กที่โรเตอร์ และขั้วแม่เหล็กนี้จะพยายามดึงดูดกับสนามแม่เหล็กที่หมุนอยู่รอบ ๆ ทำให้โรเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำหมุนไปได้ ความเร็วของสนามแม่เหล็กหมุนที่ตัวสเตเตอร์นี้จะคงที่ตามความถี่ของไฟฟ้ากระแสสลับ ดังนั้นโรเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำจึงหมุนตามสนามแม่เหล็กหมุนดังกล่าวไปด้วยความเร็วเท่ากับความเร็วของสนามแม่เหล็กหมุน

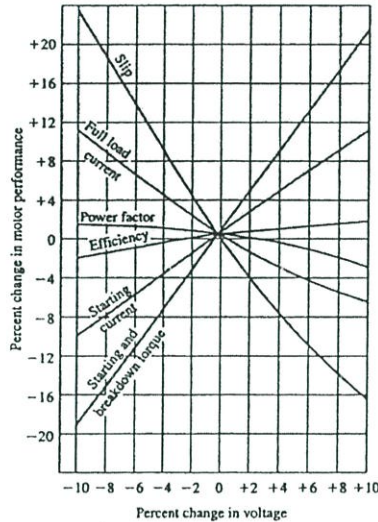
### มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟส แบบซิงโครนัส (3 Phase Synchronous Motor)

มอเตอร์ซิงโครนัส เป็นมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับที่มีขนาดใหญ่ที่สุด มีขนาดพิกัดของ กำลังไฟฟ้า ตั้งแต่ 150 kW (200 hp) จนถึง 15 MW (20,000 hp) มีความเร็วตั้งแต่ 150 ถึง 1,800 RPM โครงสร้างของมอเตอร์ซิงโครนัสที่สำคัญมี 2 ส่วน คือ สเตเตอร์และโรเตอร์ สเตเตอร์ของมอเตอร์ ซิงโครนัสเหมือนกับสเตเตอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟส แบบอินดักชัน มีร่องสำหรับพันขดลวดจำนวน 3 ชุด เฟสละ 1 ชุด เมื่อจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟส ให้กับสเตเตอร์ จะเกิดสนามแม่เหล็กหมุนขึ้นเช่นเดียวกับสนามแม่เหล็กหมุนของมอเตอร์อินดักชัน ส่วนของโรเตอร์ เป็นแบบขั้วแม่เหล็กยื่น (Salient Poles) และมีขดลวดพันรอบ ๆ ขั้วแม่เหล็กยื่นเหล่านั้น ขดลวดสนามแม่เหล็กที่พันรอบขั้วแม่เหล็กยื่นนี้ต่อกับแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงภายนอก เพื่อสร้างขั้วแม่เหล็กยื่นที่ตัวโรเตอร์

## 2.7 การคำนวณและผลกระทบเมื่อแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล

### ผลกระทบที่มีผลต่อมอเตอร์เมื่อแรงดันไฟฟ้าเกิดการเปลี่ยนแปลง

สมรรถนะของมอเตอร์เมื่อแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนให้เกิดการเปลี่ยนแปลง โดยทั่วไปแล้วเมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้าจะมีผลต่อสมรรถนะของมอเตอร์โดยตรงซึ่งสามารถอธิบายได้ในรูปที่ 2.20 ซึ่งได้อธิบายเกี่ยวกับผลต่อ แรงบิดเริ่มเดิน, กระแสเริ่มเดิน และอื่นๆ



รูปที่ 2.20 เปอร์เซนต์การเปลี่ยนแปลงแรงดันที่มีผลต่อสมรรถนะของมอเตอร์

### กรณีมอเตอร์ทำงานที่แรงดันไฟฟ้าต่ำกว่าพิกัด

เมื่อมีการใช้งานมอเตอร์ในสภาวะแรงดันไฟฟ้าต่ำกว่าพิกัดจะมีผลทำให้กระแสไฟฟ้าที่ป้อนให้มอเตอร์เพิ่มขึ้น ซึ่งจะทำให้เกิดความสูญเสียด้านความร้อนเพิ่มขึ้น ( $I^2R$ ) ในขดลวดสเตเตอร์และโรเตอร์ ซึ่งจากผลดังกล่าวจะทำให้อุณหภูมิของขดลวดสูงขึ้นและจะทำให้ความเป็นฉนวนของขดลวดลดลงและมีอายุการใช้งานสั้นลงในที่สุด อย่างไรก็ตามถ้ามอเตอร์มีการใช้งานไม่หนักหรือมีโหลดน้อยการเพิ่มขึ้นของกระแสไฟฟ้าที่มีผลจากการลดลงของแรงดันไฟฟ้าก็จะมีค่าต่ำกว่ากระแสพิกัดของมอเตอร์ ซึ่งจากผลดังกล่าวก็จะไม่ทำให้เกิดความร้อนหรืออุณหภูมิที่ขดลวดมอเตอร์สูงขึ้นแต่อย่าง

### การคำนวณหาค่ากรณีมอเตอร์ทำงานที่แรงดันไฟฟ้าสูงกว่าพิกัด

เมื่อมอเตอร์มีการใช้งานที่แรงดันไฟฟ้าสูงกว่าพิกัด กระแสไฟฟ้าในขดลวดของสเตเตอร์จะมีค่าลดลง และถ้าแรงดันที่ป้อนให้มอเตอร์มีค่าสูงเพียงพอก็อาจจะทำให้สนามแม่เหล็กไฟฟ้าของแกนเหล็กเกิดการอิ่มตัวได้ จากการเกิดเหตุการณ์ดังกล่าวขึ้นก็จะส่งผลให้กระแสไฟฟ้ากระตุ้น (Exciting Current) มีค่าสูงขึ้นเป็นอย่างมาก ก็จะมีผลทำให้เกิดความร้อนสูงในขดลวด ซึ่งโดยทั่วไปแล้วการที่จะเกิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้าอิ่มตัวนั้นอาจจะเกิดขึ้นที่แรงดันไฟฟ้าสูงเกินกว่าพิกัดที่ประมาณ 110 เปอร์เซนต์

เพื่อให้่ายต่อการคำนวณ จึงสมมติให้ค่ากำลังโหลดของเพลา (Shaft-Power Load) มีค่าคงที่และจะไม่นำผลการสูญเสียภายในมอเตอร์มาพิจารณา ดังนั้นกำลังไฟฟ้าอินพุทของมอเตอร์จึงมีค่าเท่ากับกำลังโหลดเอาต์พุทของเพลา ดังแสดงในสมการที่ 1

$$\sqrt{3}V_{line} \times I_{line} \times F_P = HP_{shaft} \times 746 \quad (1)$$

เมื่อค่ากำลังโหลดของเพลา (Shaft-Power Load) มีค่าคงที่ กำลังไฟฟ้าอินพุทที่ป้อนให้มอเตอร์ที่มีค่าสูงกว่าพิกัดจะสามารถประมาณค่าได้เท่ากับค่ากำลังไฟฟ้าอินพุทที่แรงดันไฟฟ้าตามพิกัด โดยจะไม่พิจารณาผลของการเปลี่ยนแปลงของแรงลมและความเสียด ซึ่งจะมีผลเพียงเล็กน้อยต่อความเร็วของมอเตอร์ไฟฟ้า ดังนั้นจึงได้แสดงตามสมการที่ 2

$$\sqrt{3}V_2 \times I_2 \times F_P \approx \sqrt{3}V_{rated} \times I_{rated} F_P \quad (2)$$

เมื่อไม่นำค่าตัวประกอบ (Power Factor) มาประกอบการพิจารณา ดังนั้นจะได้สมการที่ 3

$$I_2 \approx \frac{V_{rated} I_{rated}}{V_2} \quad (3)$$

เมื่อ  $I_2$  = กระแสไฟฟ้าเมื่อแรงดันไฟฟ้าสูงกว่าพิกัด (A)

$I_{rated}$  = กระแสไฟฟ้าพิกัดของมอเตอร์ (A)

$V_{rated}$  = แรงดันไฟฟ้าพิกัดของมอเตอร์ (V)

$V_2$  = แรงดันไฟฟ้าสูงกว่าพิกัดของมอเตอร์ (V)

การคำนวณหาค่าเปอร์เซ็นต์ความร้อนที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากกระแสไฟฟ้าเกินพิกัด

เปอร์เซ็นต์ของความร้อนที่เกิดขึ้นของขดลวดในมอเตอร์เนื่องจากกระแสไฟฟ้าเกินพิกัดนั้น ส่วนใหญ่ก็จะมีสาเหตุมาจากแรงดันไฟฟ้าและความถี่ที่ป้อนให้มอเตอร์ไม่อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานของพิกัดหรืออาจจะเกิดจากการใช้โหลดเกินพิกัดก็ได้ ซึ่งเราสามารถคำนวณหาได้ดังต่อไปนี้

$$\%heating \approx \left[ \frac{I_2}{I_{rated}} \right]^2 \times 100 \quad (4)$$

เมื่อ  $I_2$  = กระแสไฟฟ้าเมื่อแรงดันไฟฟ้าสูงกว่าพิกัด (A)

### ข้อกำหนดที่เกี่ยวข้องกับแรงดันไฟฟ้าและความถี่

ค่ามาตรฐานของพิกัดแรงดันไฟฟ้าและความถี่นั้น ได้อ้างอิงข้อกำหนดของ NEMA (National Electrical Manufacturers Association) สำหรับมอเตอร์ชนิดเหนี่ยวนำ (Induction Motor) นั้น ได้พิจารณาว่า ขณะมีการใช้งานอย่างต่อเนื่องแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนให้กับมอเตอร์ไฟฟ้าจะต้องมีค่าไม่เกินข้อกำหนดดังต่อไปนี้

1. การเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้าจะต้องไม่เกิน  $\pm 10$  เปอร์เซ็นต์ของพิกัด ขณะมีการใช้งานตามพิกัดของความถี่ของมอเตอร์
2. การเปลี่ยนแปลงของถี่จะต้องไม่เกิน  $\pm 5$  เปอร์เซ็นต์ของพิกัด ขณะมีการใช้งานตามพิกัดของแรงดันไฟฟ้าของมอเตอร์
3. เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงทั้งแรงดันไฟฟ้าและความถี่ซึ่งผลรวมเป็นค่าสมบูรณ์ (Absolute values) ของการเปลี่ยนแปลงทั้ง 2 ค่าจะต้องมีค่าไม่เกิน 10% โดยความถี่อินพุตที่ป้อนให้มอเตอร์จะต้องมีค่าไม่เกิน  $\pm 5$  เปอร์เซ็นต์ของพิกัดด้วย

### การคำนวณหาเปอร์เซ็นต์แรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล

การคำนวณหาเปอร์เซ็นต์แรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลนั้นได้ถูกกำหนดโดย NEMA ได้กำหนดว่าค่าเปอร์เซ็นต์แรงดันไฟฟ้าที่เบี่ยงเบนสูงสุดระหว่างเฟสใดเฟสหนึ่งกับค่าแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยทั้ง 3 เฟสต่อค่าเฉลี่ยของแรงดันไฟฟ้าทั้ง 3 เฟส ซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการดังต่อไปนี้

$$\%VUB = \frac{V_{\max \text{ dev}}}{V_{\text{avg}}} \times 100 \quad (5)$$

$$V_{\text{avg}} = \frac{V_{ab} + V_{bc} + V_{ca}}{3} \quad (6)$$

เมื่อ	$\%VUB$	= เปอร์เซ็นต์แรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล
	$V_{\text{avg}}$	= แรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยระหว่างเฟส (V)
	$V_{\max \text{ dev}}$	= แรงดันไฟฟ้าเบี่ยงเบนสูงสุดระหว่างเฟสใดเฟสหนึ่งกับ $V_{\text{avg}}$
	$V_{ab} + V_{bc} + V_{ca}$	= แรงดันระหว่างเฟส (V)

การคำนวณหาการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิของมอเตอร์ไฟฟ้าเมื่อแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล

เมื่อมอเตอร์ไฟฟ้าทำงานที่เต็มพิกัดโหล่นั้น ทำให้เปอร์เซ็นต์การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิภายในมอเตอร์ ( $\% \Delta T$ ) จะมีผลจากแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล ซึ่งสามารถประมาณค่าได้เท่ากับสองเท่าของค่าเปอร์เซ็นต์แรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลยกกำลังสอง ซึ่งสามารถแสดงได้ในสมการดังต่อไปนี้

$$\% \Delta T = 2 \times (\% VUB)^2 \quad (7)$$

สำหรับการประมาณค่าอุณหภูมิสูงสุดที่ยอมให้เกิดขึ้นได้ของมอเตอร์ไฟฟ้าเนื่องจากสาเหตุแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลสามารถหาได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$T_{rise,umb} = T_{rise,rated} \times \left[ 1 + \frac{\% \Delta T}{100} \right] \quad (8)$$

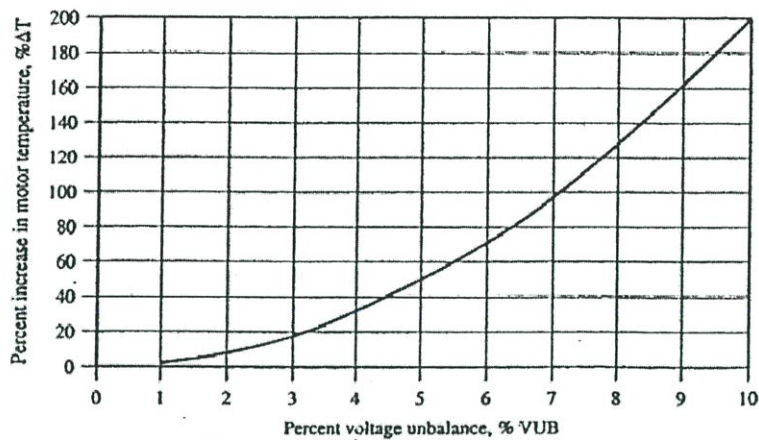
เมื่อ  $T_{rise,umb}$  = อุณหภูมิที่สูงขึ้นเนื่องจากแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล

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

$\% \Delta T$  = เปอร์เซ็นต์การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิในมอเตอร์ไฟฟ้า

ตารางที่ 2.1 ค่าอุณหภูมิสูงสุดที่ยอมให้เพิ่มขึ้นสำหรับมอเตอร์เหนี่ยวนำทั้ง 1 เฟส และ 3 เฟส ในหน่วย องศาเซลเซียส โดยอ้างอิงอุณหภูมิรอบข้างที่ 40 องศาเซลเซียส

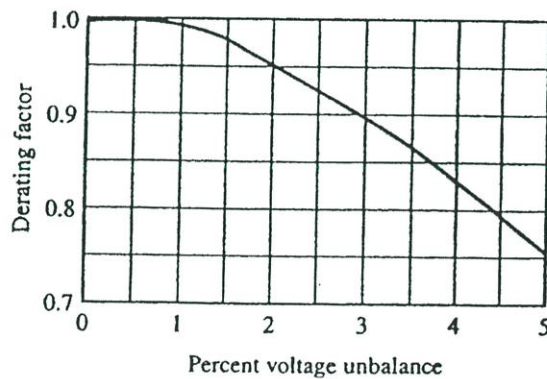
ระดับชั้นของฉนวน(Class of insulation system)	A	B	F	H
อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น(อ้างอิงค่าอุณหภูมิรอบข้างสูงสุดที่ 40 องศาเซลเซียส 1.อุณหภูมิ ของขดลวด โดยวิธีความต้านทาน				
ก)มอเตอร์ที่มีค่า Service Factor=1.0	60	80	105	125
ข)มอเตอร์ที่มีค่า Service Factor=1.15 หรือมากกว่า	70	90	115	-
ค)มอเตอร์ที่มีการปิดสนิทที่มีค่า Service Factor=1.0	65	85	110	135
ง)มอเตอร์ที่มีการปิดชุดขดลวดและอื่นๆสนิทที่มีค่า Service Factor=1.0	65	85	110	-



รูปที่ 2.21 กราฟเปอร์เซ็นต์การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิของมอเตอร์เทียบกับเปอร์เซ็นต์ของแรงดันไม่สมดุล

### สมรรถนะของมอเตอร์ไฟฟ้าลดลงเมื่อแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล

เมื่อมอเตอร์ไฟฟ้ามีการใช้งานหรือจำเป็นที่จะต้องใช้งานในสภาวะแรงดันไฟฟ้าที่ไม่สมดุล นั้นจะมีผลทำให้สมรรถนะของมอเตอร์ไฟฟ้าลดลง (การทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้าทำงานต่ำกว่าแรงม้าพิกัด) กราฟที่แสดงการลดลงของสมรรถนะของมอเตอร์ไฟฟ้าได้แสดงที่รูปที่ 2.22 ซึ่งการเกิดไม่สมดุลของแรงดันไฟฟ้าประมาณ 1 เปอร์เซ็นต์อาจจะไม่มีผลต่อสมรรถนะของมอเตอร์ไฟฟ้าและไม่ทำให้เกิดความเสียหายต่อมอเตอร์ไฟฟ้าแต่อย่างใด แต่อย่างไรก็ตามการใช้งานมอเตอร์ไฟฟ้าที่สภาวะแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลเกินกว่า 5 เปอร์เซ็นต์นั้นไม่ควรกระทำ เนื่องจากจะมีผลทำให้เกิดปัญหาและความเสียหายหลายประการต่อมอเตอร์ไฟฟ้าของท่านได้

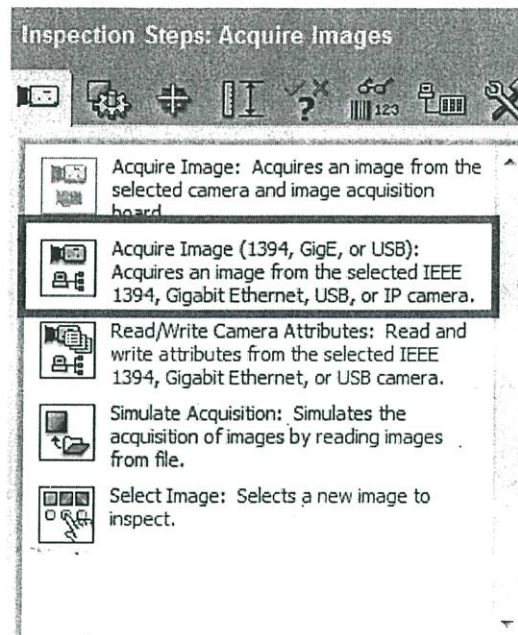


รูปที่ 2.22 กราฟสมรรถนะของมอเตอร์ลดลงเนื่องจากผลของแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล

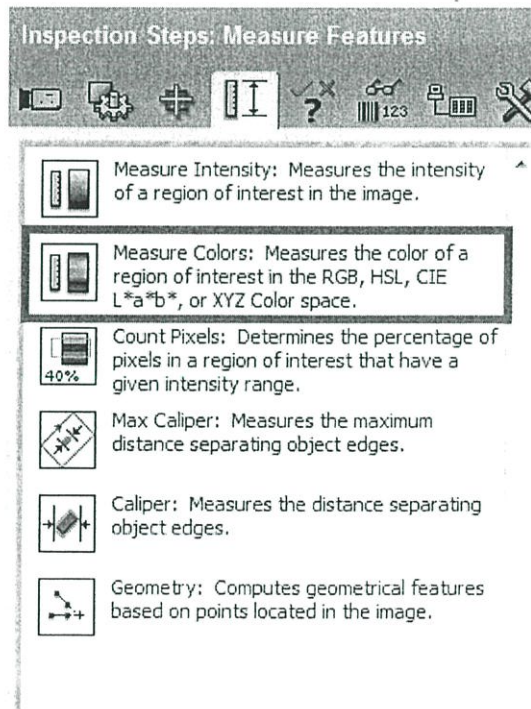
## 2.8 โปรแกรมการประมวลผลภาพจากกล้องถ่ายภาพการทดลอง

### 1) ขั้นตอนการออกแบบโปรแกรม

- สร้างโปรแกรมโดยใช้คำสั่ง Acquire Image (1394, GigE, or USB) Controls เพื่อติดต่อกับกล้อง ดังรูปที่ 2.23 และใช้คำสั่ง Measure Colors เพื่อตรวจวัดค่าสีของภาพ ดังรูปที่ 2.24



รูปที่ 2.23 แสดงคำสั่งที่ใช้ติดต่อกับกล้อง



รูปที่ 2.24 แสดงคำสั่งที่ใช้วัดค่าสี

- ใช้คำสั่ง Detect Objects Controls เพื่อตรวจจับวัตถุแปลกปลอมจากสีที่แตกต่าง โดยที่ทำการปรับค่า Threshold เคตสีให้จับที่โทนสีร้อน ต่อจากนั้นเราจะกำหนดค่า ให้จับขนาดวัตถุที่ไม่ต่ำกว่า 50 ตารางจุด และทำการจำกัดค่าถ้าเจอวัตถุแปลกปลอมที่มากกว่า 1 จะให้หน้าจอแสดงคำว่า fail ดังรูปที่ 2.25

The image shows three panels of the 'Detect Objects Setup' dialog box. The top panel is the 'Threshold' tab, the middle is the 'Settings' tab, and the bottom is the 'Limits' tab.

**Top Panel: Detect Objects Setup - Threshold**

- Color Model: HSL
- Hue: 0 to 30
- Saturation: 75 to 255
- Luminance: 75 to 255
- Number of Objects Found: 0
- Step Status: PASS

**Middle Panel: Detect Objects Setup - Settings**

- Ignore Objects Touching Region of Interest
- Fill Holes within Objects
- Minimum Object Size: 50.00 pix<sup>2</sup>
- Maximum Object Size: 121.00 pix<sup>2</sup>
- Sort by: Area (Pixels)
- Ascending
- Descending
- Number of Objects Found: 0

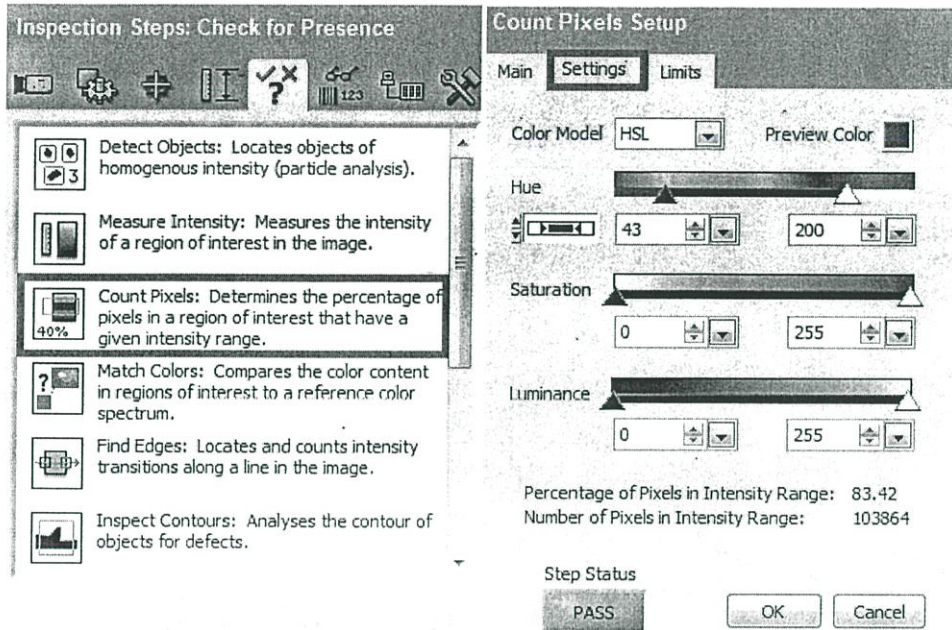
Objects	Area	X	Y

**Bottom Panel: Detect Objects Setup - Limits**

- Pass Inspection if...
  - Minimum Number of Objects: 1
  - Maximum Number of Objects: 1
- Number of Objects Found: 0
- Step Status: PASS

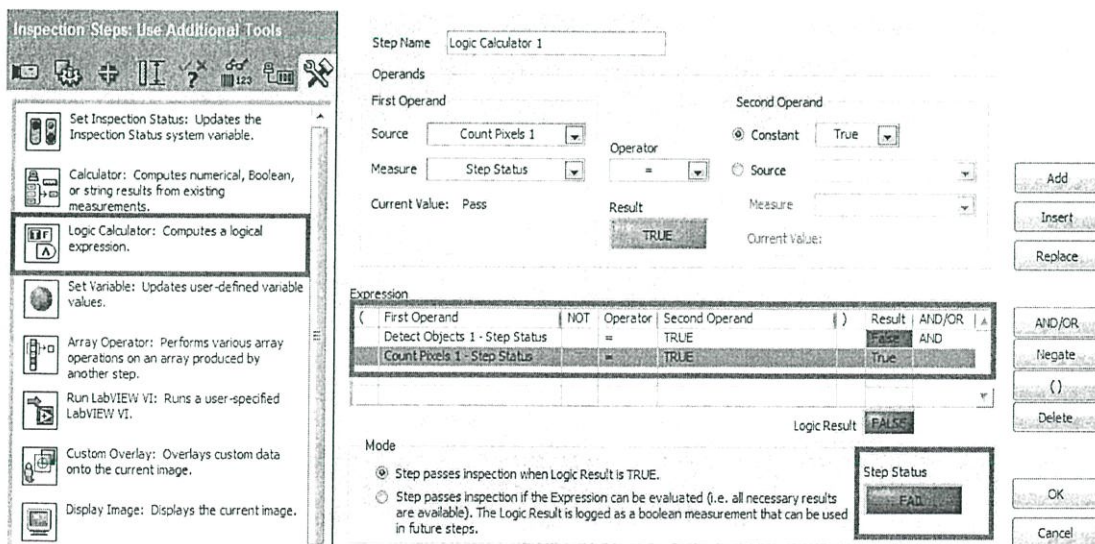
รูปที่ 2.25 แสดงคำสั่งที่ใช้ตรวจจับวัตถุแปลกปลอม

-ใช้คำสั่ง Count Pixels Control เพื่อวัดค่าเปอร์เซ็นต์ภาพ โดยที่ทำการปรับค่า Threshold เผลดสีให้  
 จำนวนเปอร์เซ็นต์สีที่โทนสีเป็น ดังรูปที่ 2.26

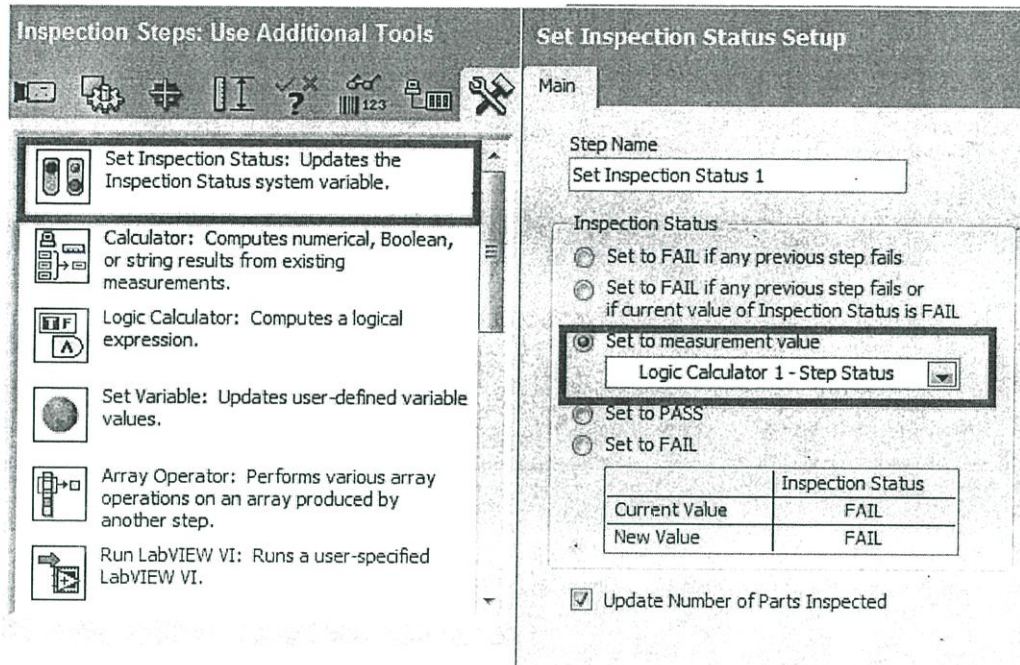


รูปที่ 2.26 แสดงคำสั่งที่ใช้คำนวณเปอร์เซ็นต์ภาพ

-ใช้คำสั่ง Logic Calculator เพื่อตั้งกฎแสดงสถานะ โดยจะตั้งค่าให้นำสถานะของคำสั่ง Detect Objects และ Count Pixels มาทำการ AND กัน เมื่อสถานะของคำสั่งใดขึ้น Fail จะทำให้สถานะของ Logic Calculator ขึ้น Fail ดังรูปที่ 2.26 จากนั้นใช้คำสั่ง Set Inspection Status เพื่อจะให้เห็นสถานะที่หน้าจอ แสดงผล ว่าเป็น pass หรือ fail โดยตั้งค่าให้แสดงสถานะจากคำสั่ง Logic Calculator ดังรูปที่ 2.27

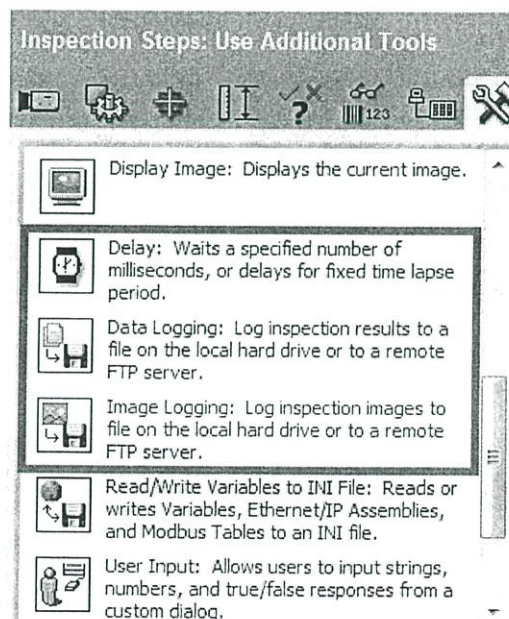


รูปที่ 2.27 แสดงคำสั่งที่ใช้เพื่อตั้งค่าสถานะ



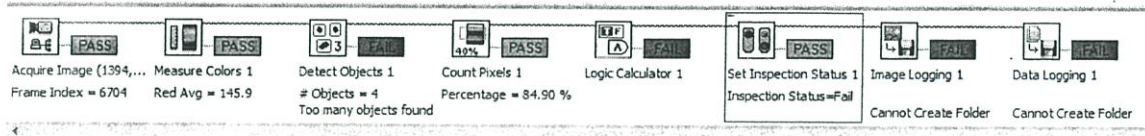
รูปที่ 2.28 แสดงคำสั่งที่ใช้เพื่อแสดงสถานะ

-ใช้คำสั่ง image logging และ data logging เพื่อเก็บภาพและข้อมูลการทดลอง โดยที่ข้อมูลจะทำการบันทึกเป็นรูปแบบไฟล์ .csv ซึ่งสามารถเปิดใน Microsoft Excel ได้ และทำการใช้คำสั่ง delay ให้หน่วงเวลาเก็บภาพและข้อมูลทุกๆ 1 วินาที ดังรูปที่ 2.29



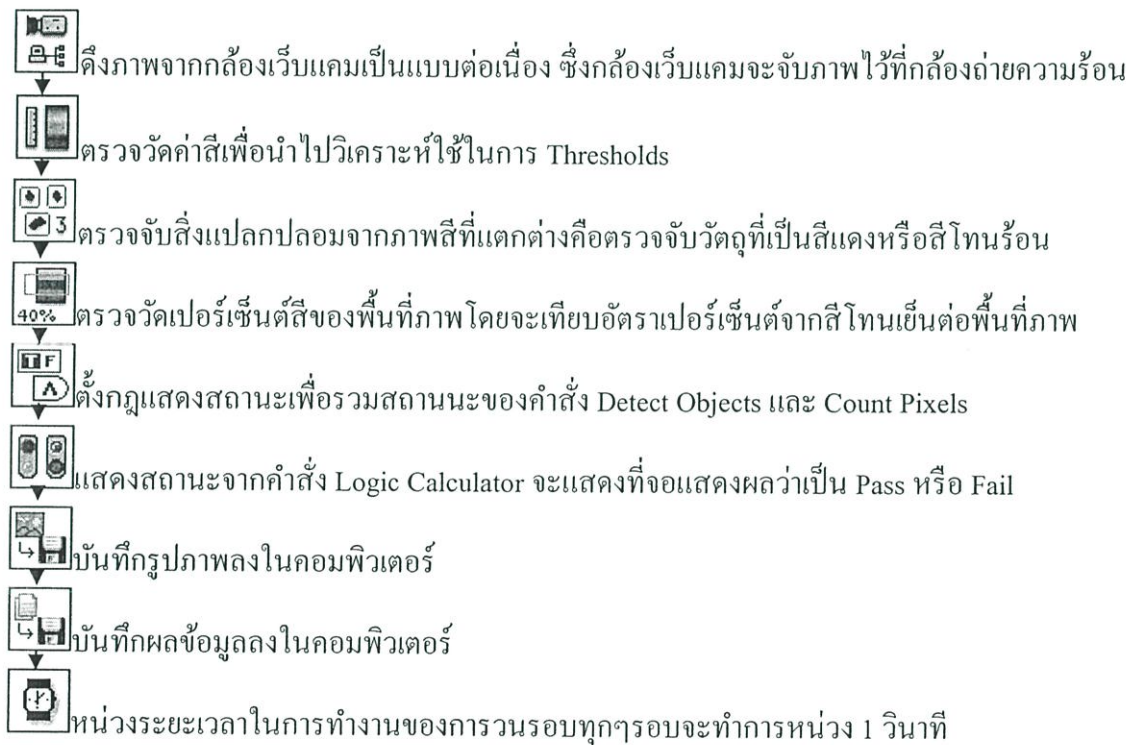
รูปที่ 2.29 แสดงคำสั่งที่ใช้เพื่อ เก็บภาพ เก็บข้อมูล และหน่วงเวลา

-จากการใช้คำสั่งทั้งหมดจะแสดงในรายการขั้นตอนการตรวจสอบ ดังรูปที่ 2.30

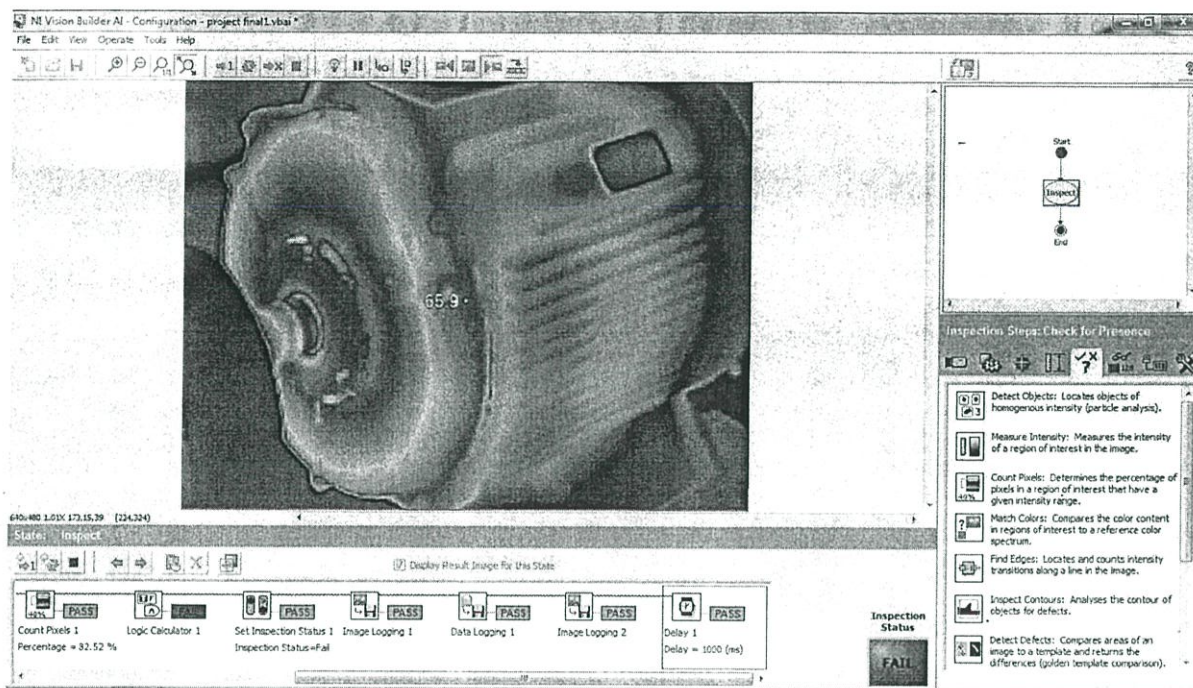


รูปที่ 2.30 แสดงคำสั่งทั้งหมดของโปรแกรมตรวจจับสิ่งผิดปกติ

## 2) ขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมการตรวจสอบสิ่งผิดปกติ



ขั้นตอนที่ 6. เมื่อได้ภาพถ่ายความร้อนก็นำมาทำการแยกแยะ โดยใช้โปรแกรม Vision Builder AI



รูปที่ 2.31 หน้าโปรแกรม vision builder AI

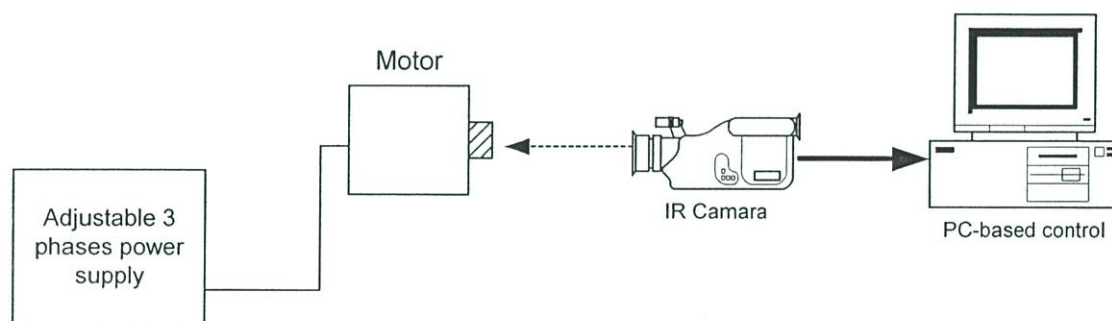
ขั้นตอนที่ 7. ทำการเก็บผลการทดลองไว้ในรูปแบบไฟล์ .csv สามารถนำข้อมูลที่ได้ไปเปิดในโปรแกรม Microsoft Excel

## บทที่ 3

### วิธีการทดลอง

#### 3.1 การติดตั้งและเชื่อมต่ออุปกรณ์

จากทฤษฎีของบทที่สองได้ทำการต่อจรตามรูปที่ 3.1 เพื่อทำการวัดและเก็บผลการทดลองโดยทำการเก็บผลทดลองระหว่างแรงดันและอุณหภูมิของมอเตอร์ดังนี้ ทดสอบโปรแกรมการใช้งานกับมอเตอร์ที่มีการควบคุมแรงดันในแต่ละเฟสเพื่อให้ทราบค่าเปอร์เซ็นต์แรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล อ่านค่าอุณหภูมิที่สูงขึ้น จากนั้นทำการทดสอบในด้านประสิทธิภาพการวิเคราะห์ภาพของโปรแกรม โดยการใช้ภาพจากกล้องถ่ายภาพความร้อนเพื่อให้โปรแกรมวิเคราะห์แสดงค่าเป็นเปอร์เซ็นต์แรงดันไฟฟ้าที่ไม่สมดุล พร้อมประเมินผลที่ได้

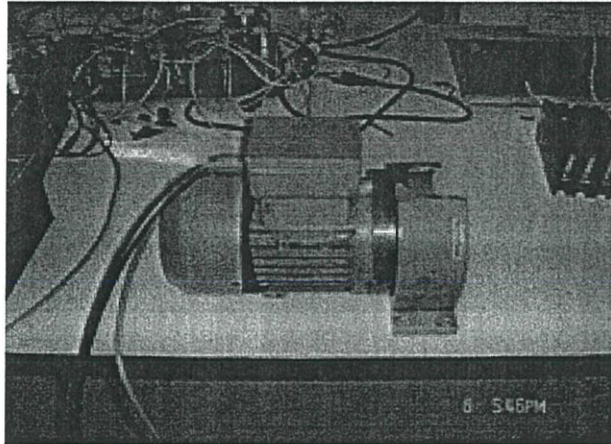


รูปที่ 3.1 การทดลองวิเคราะห์มอเตอร์ด้วยกล้องถ่ายภาพความร้อน

จากขั้นตอนการทดลองในบทที่สามได้ทำการทดลองโดยจะเก็บผลผ่านโปรแกรม LabVIEW โดยได้ทำการทดลองตามรูปที่ 3.1 และได้เริ่มการทดลองแบบเฟสสมดุล จากนั้นจะทำการปรับค่าแรงดันให้เฟสไม่สมดุลโดยการปรับที่ละ 10%, 20%, 30%, 40%, และ 50, จากการ run มอเตอร์ ได้ผลการทดลองดังนี้

#### 3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

1. Induction motor SIEMENS IEC 63 class B
2. Slide regulator
3. Thermal Image Camera Fluke TI32
4. Computer และ โปรแกรม Lab view Vision Builder



รูปที่ 3.2 Induction motor SIEMENS IEC 63 class B



รูปที่ 3.3 Slide regulator



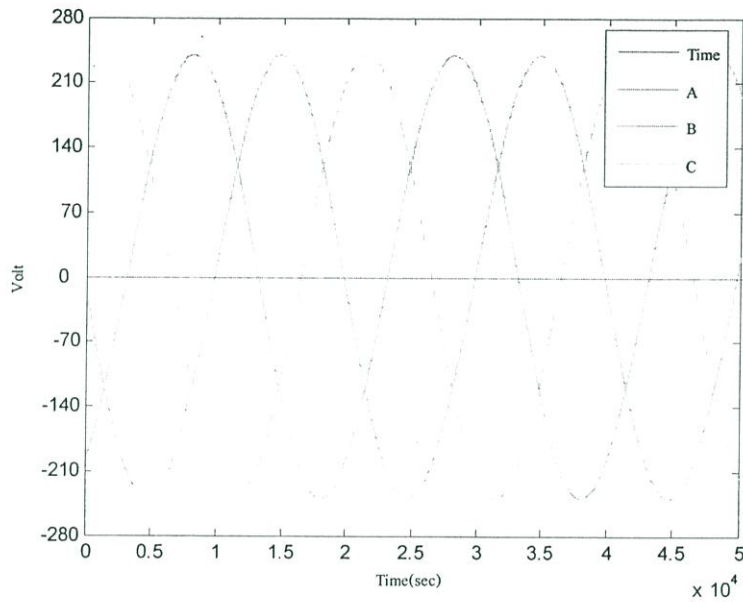
รูปที่ 3.4 กล้องถ่ายภาพความร้อน FLUKE รุ่น TI32

## บทที่ 4

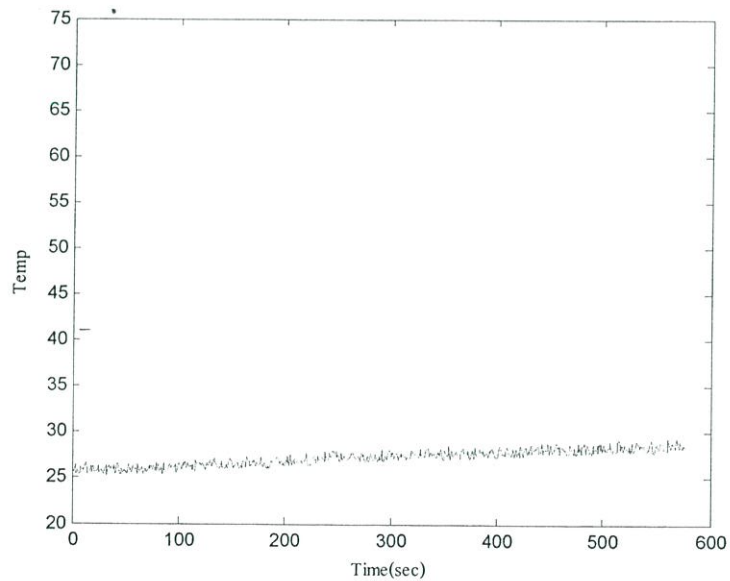
### ผลการทดลอง

#### 4.1 ผลการทดลองแบบเฟสสมดุล

จากการทดลอง ได้ทำการเก็บผลการทดลองแบบเฟสสมดุล และอุณหภูมิที่เปลี่ยนไปจากการ run มอเตอร์ ได้ผลการทดลองดังนี้



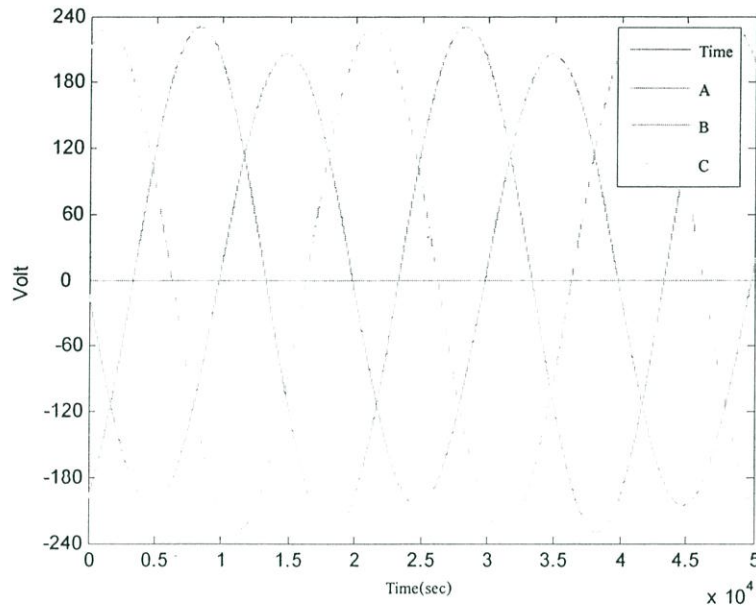
รูปที่ 4.1(a) แรงดันสมดุล



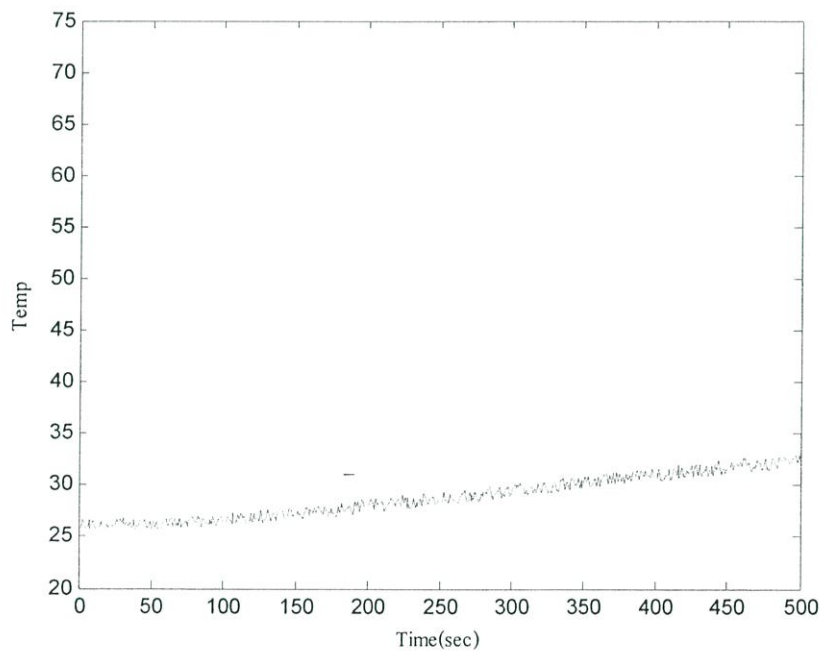
รูปที่ 4.1(b) แสดงอุณหภูมิแบบแรงดันสมดุล

#### 4.2 ผลการทดลองแบบเฟสไม่สมดุล 10%

จากการทดลอง ได้ทำการเก็บผลการทดลองแบบเฟสสมดุล และอุณหภูมิที่เปลี่ยนไปจากการ run มอเตอร์ ได้ผลการทดลองดังนี้



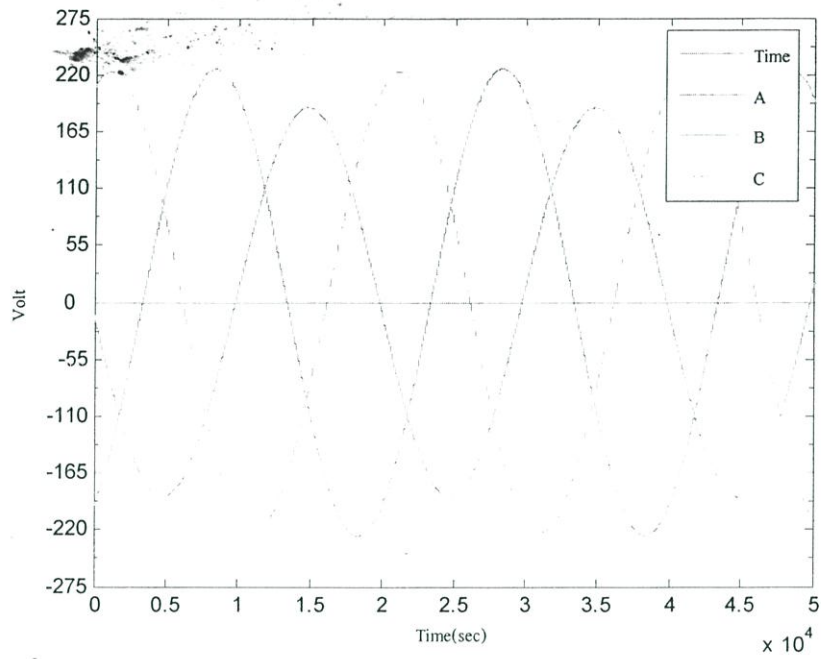
รูปที่ 4.2(a) แรงดันสมดุลไม่สมดุล 10%



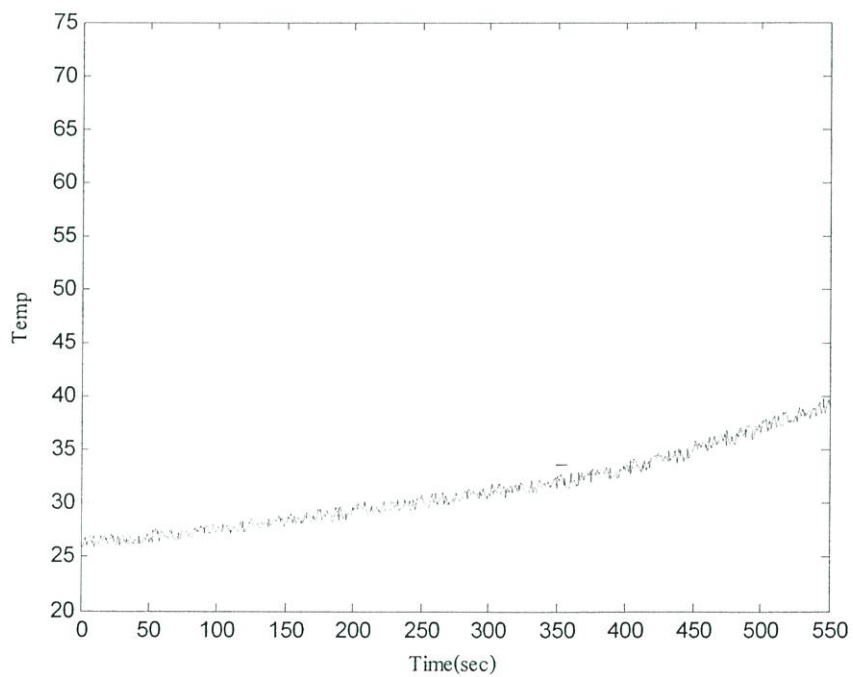
รูปที่ 4.2(b) แสดงอุณหภูมิแบบแรงดันสมดุลไม่สมดุล 10%

### 4.3 ผลการทดลองแบบเฟสไม่สมดุล 20%

จากการทดลอง ได้ทำการเก็บผลการทดลองแบบเฟสสมดุล และอุณหภูมิที่เปลี่ยนไปจากการ run มอเตอร์ ได้ผลการทดลองดังนี้



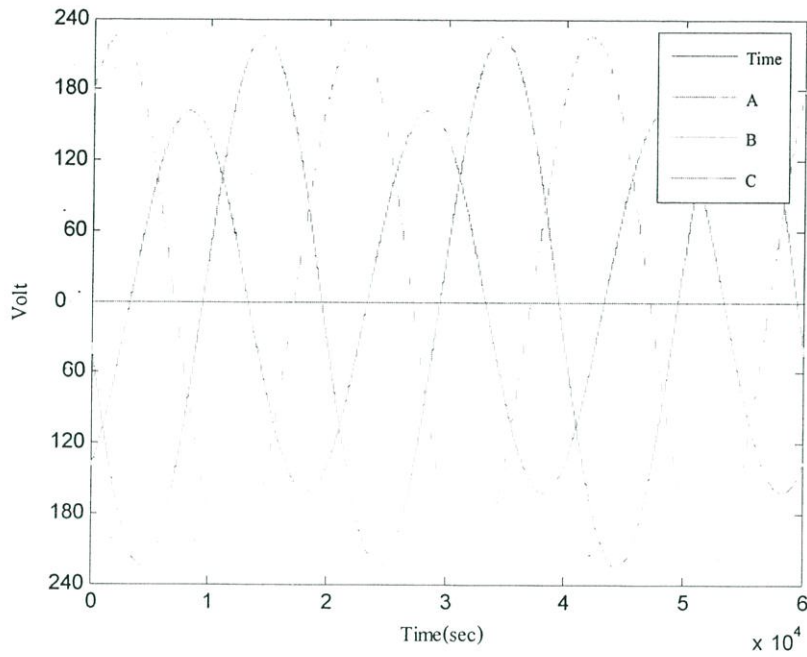
รูปที่ 4.3(a) แรงดันสมดุลไม่สมดุล 20%



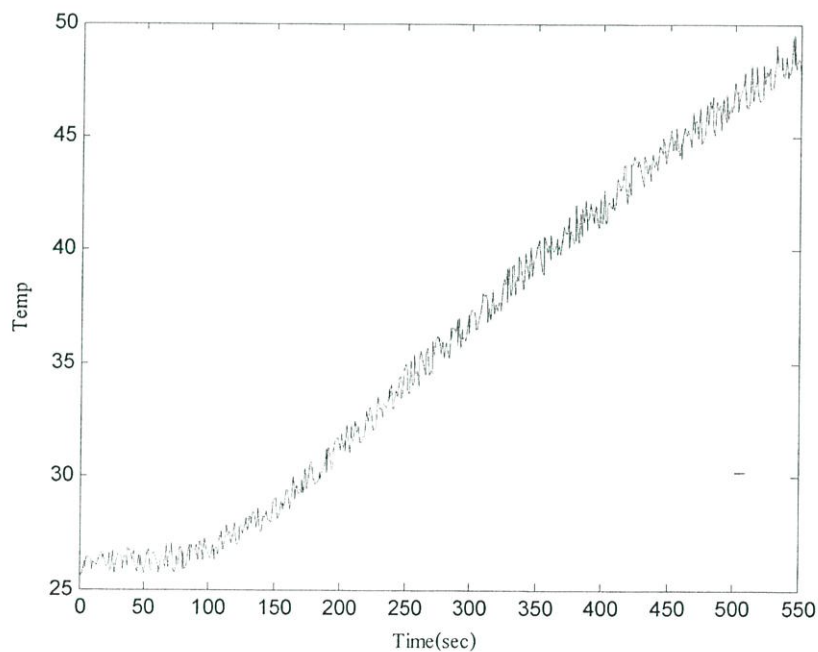
รูปที่ 4.3(b) แสดงอุณหภูมิแบบแรงดันสมดุลไม่สมดุล 20%

#### 4.4 ผลการทดลองแบบเฟสไม่สมดุล 30%

จากการทดลองในรูปที่ 3.1 ได้ทำการเก็บผลการทดลองแบบเฟสสมดุล และอุณหภูมิที่เปลี่ยนไปจากการ run มอเตอร์ ได้ผลการทดลองดังนี้



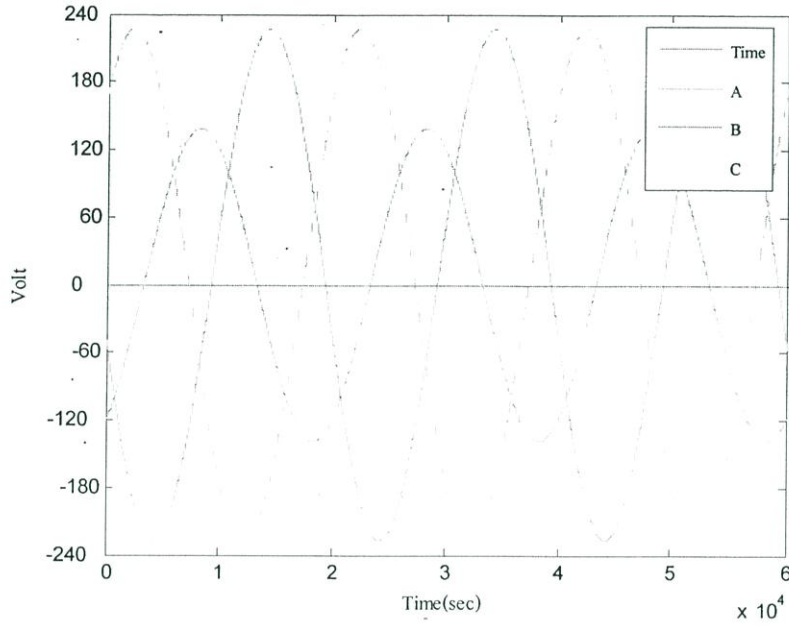
รูปที่ 4.4(a) แรงดันสมดุลไม่สมดุล 30%



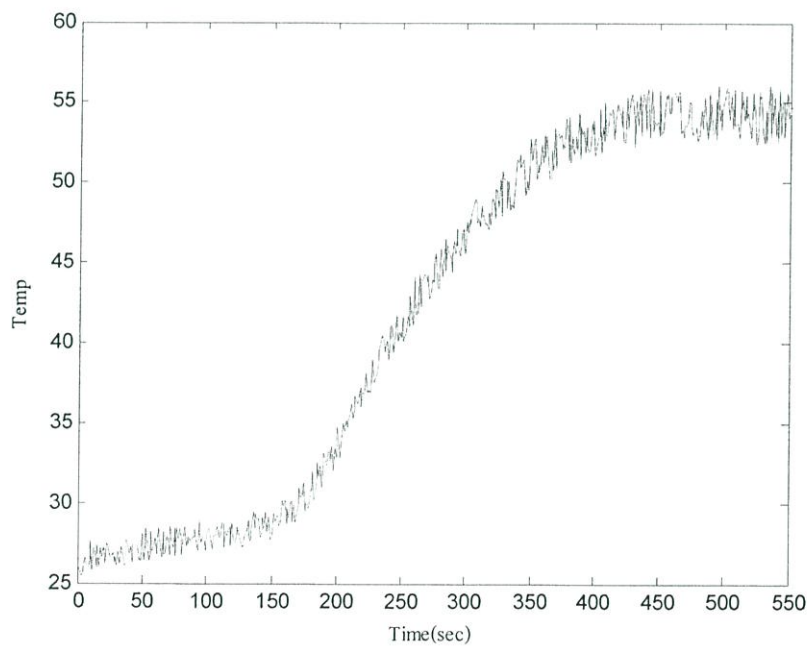
รูปที่ 4.4(b) แสดงอุณหภูมิแบบแรงดันสมดุลไม่สมดุล 30%

#### 4.5 ผลการทดลองแบบเฟสไม่สมดุล 40%

จากการทดลองในรูปที่ 3.1 ได้ทำการเก็บผลการทดลองแบบเฟสสมดุล และอุณหภูมิที่เปลี่ยนไปจากการ run มอเตอร์ ได้ผลการทดลองดังนี้



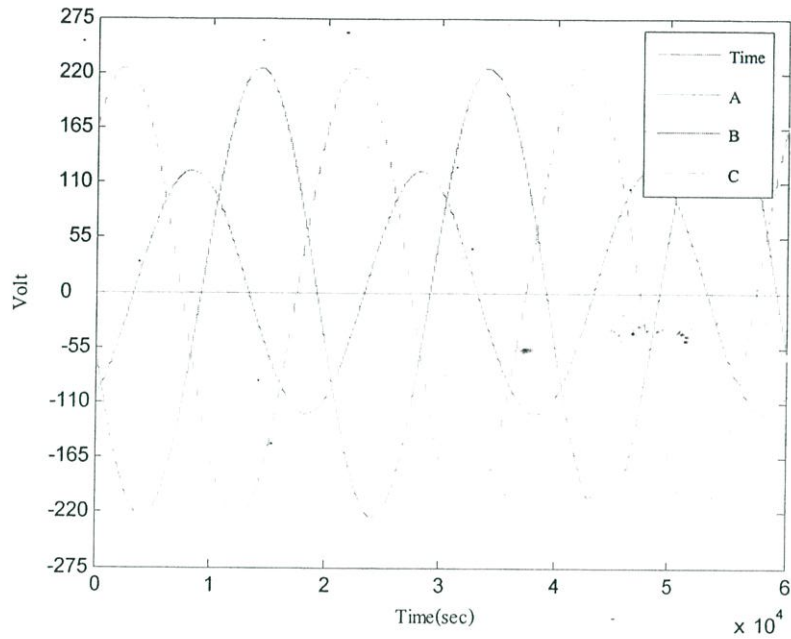
รูปที่ 4.5(a) แรงดันสมดุลไม่สมดุล 40%



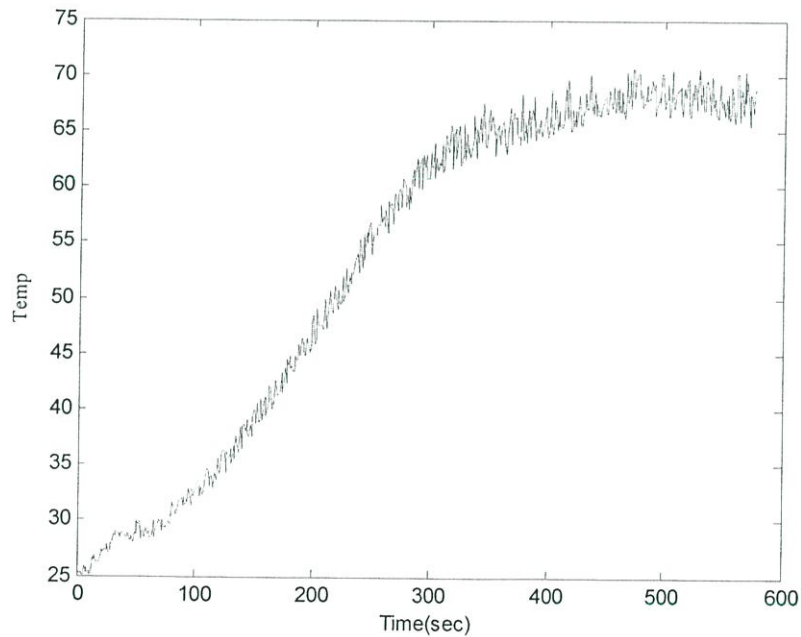
รูปที่ 4.5(b) แสดงอุณหภูมิแบบแรงดันสมดุลไม่สมดุล 40%

#### 4.6 ผลการทดลองแบบเฟสไม่สมดุล 50%

จากการทดลองในรูปที่ 3.1 ได้ทำการเก็บผลการทดลองแบบเฟสสมดุล และอุณหภูมิที่เปลี่ยนไปจากการ run มอเตอร์ ได้ผลการทดลองดังนี้

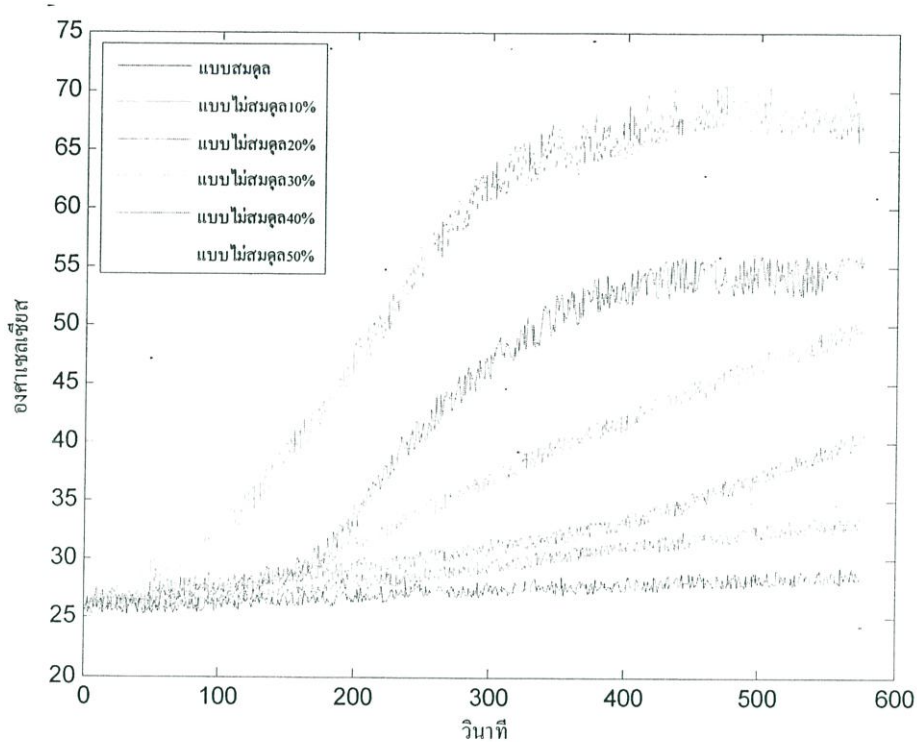


รูปที่ 4.6(a) แรงดันสมดุลไม่สมดุล 50%



รูปที่ 4.6(b) แสดงอุณหภูมิแบบแรงดันสมดุลไม่สมดุล 50%

จากผลการทดลองที่ได้จะเป็นผลการเปรียบเทียบระหว่างแรงดันที่เปลี่ยนแปลงว่ามีผลต่ออุณหภูมิ โดยสังเกตได้ว่าเมื่อแรงดันเฟสไม่สมดุลจะทำให้อุณหภูมิสูงขึ้นดังรูปที่ 4.2 ถึง 4.6 โดยใช้อุณหภูมิห้องเป็นตัวอ้างอิงที่ 25 องศาเซลเซียส



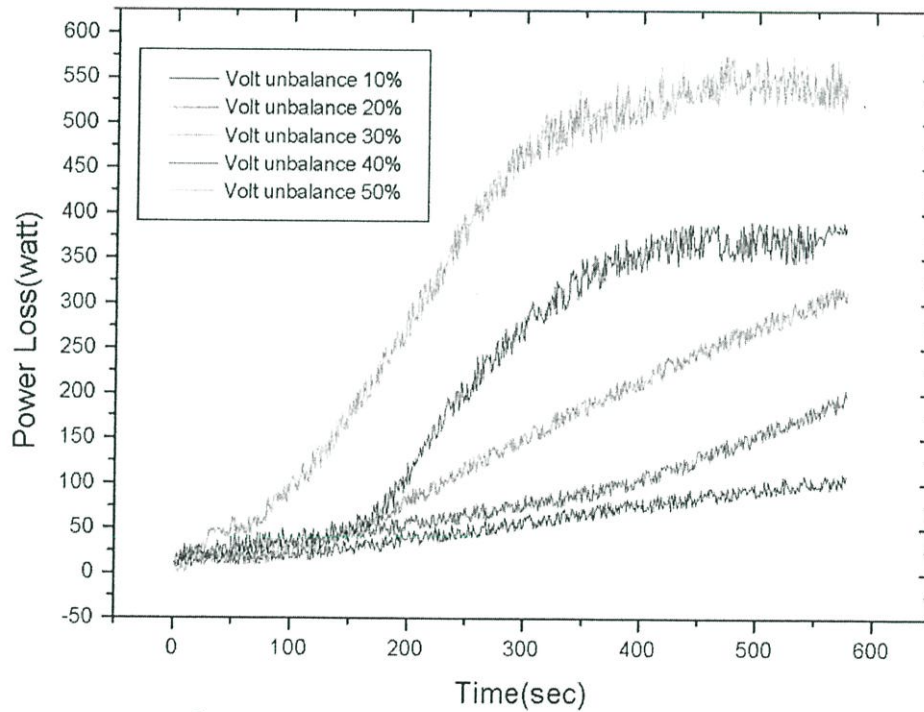
รูปที่ 4.7 แสดงอุณหภูมิรวม

ตารางที่ 4.1 ผลการประเมินพลังงานสูญเสียที่โหลดต่างกันเป็นเวลา 200 วินาที

ผลการประเมินพลังงานสูญเสียที่โหลดต่างกันเป็นเวลา 200วินาที( $\theta = 25^{\circ}\text{C}$ )			
%VUB	$\Delta\theta_{\text{frame}}$ (K)	$R_{\text{frame}}$ (K/W)	$P_{\text{loss}}$ (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

ตารางที่ 4.2 ผลการประเมินพลังงานสูญเสียที่โหลดต่างกันเป็นเวลา 500 วินาที

ผลการประเมินพลังงานสูญเสียที่โหลดต่างกันเป็น เวลา 500 วินาที( $\theta = 25^{\circ}\text{C}$ )			
%VUB	$\Delta\theta_{\text{frame}}$ (K)	$R_{\text{frame}}$ (K/W)	$P_{\text{loss}}$ (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



รูปที่ 4.8 แสดงค่าพลังงานที่สูญเสียในขณะที่แรงดันไม่สมดุล

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัย

จากมาตรการในการอนุรักษ์พลังงานจากการใช้มอเตอร์ดังกล่าวพบว่า การแก้ปัญหาทำได้ 2 ทาง คือปัญหาในทางกลเช่นแรงเสียดทานที่เกิดจากการสึกหรอ และปัญหาในทางไฟฟ้า ซึ่งในทางไฟฟ้านี้เองเราพบว่ามอเตอร์สามเฟสมักจะประสบกับปัญหาในระบบไฟฟ้าที่ป้อนเข้ามอเตอร์อยู่ในสถานะไม่สมดุล (phase unbalance) ปกติแล้วสภาพดังกล่าวมักเกิดจากโหลดในเฟสใดเฟสหนึ่งแตกต่างกันมาก และมักเกิดจากการใช้โหลดเฟสเดียวในโรงงาน ทำให้โหลดของแต่ละเฟสแตกต่างกันไปมาก แต่เนื่องจากระบบไฟฟ้าเฟสเดียวยังมีใช้งานกันอยู่มาก การใช้ไฟฟ้าทั้งสองระบบนี้จึงเป็นปัญหาในการจัด โหลดของแต่ละเฟสให้สมดุลกัน เป็นไปได้ยาก เมื่อมอเตอร์ถูกใช้งานขณะที่เกิดภาวะไม่สมดุลของแรงดันไฟฟ้า ส่งผลให้อัตราส่วนของกระแสไม่สมดุลเพิ่มขึ้นมากกว่าอัตราส่วนของแรงดันที่ไม่สมดุล เป็นสาเหตุที่ทำให้กำลังการใช้งานของมอเตอร์ตกลงและอุณหภูมิมอเตอร์จะสูงมากขึ้น อุณหภูมิที่สูงมากขึ้นของมอเตอร์ขณะที่ใช้งานเต็มที่ในกรณีปกติมักสูงไม่เกิน 40 องศาเซลเซียส แต่ถ้าหากแรงดันไฟฟ้าระหว่างเฟสมีสภาพที่ผิดปกติไปจากสมดุลเพียง 3.5 % อุณหภูมิของมอเตอร์จะสูงขึ้นกว่าเดิมถึง 25 % ผลก็คือมอเตอร์จะมีอายุการใช้งานสั้นกว่าเกณฑ์ปกติ เพราะความร้อนจะทำให้ฉนวนของขดลวดเสื่อมสภาพลง (damage of insulation) จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องตรวจสอบระดับแรงดันไฟฟ้าและความถี่เป็นระยะอยู่เสมอ จะเห็นได้ว่าผลกระทบทั้งทางกล และ ทางไฟฟ้าที่มีต่อประสิทธิภาพของมอเตอร์จะแสดงออกมาได้ทางความร้อน นอกจากนี้ยังสามารถใช้เป็นเครื่องมือทำนายย้อนกลับเพื่อประเมินคุณภาพของการจ่ายกำลังไฟฟ้าได้อีกด้วย งานวิจัยนี้มุ่งค้นหาวิธีการที่เหมาะสมในการตรวจประเมินประสิทธิภาพของมอเตอร์ เพื่อทำการปรับปรุงให้มีประสิทธิภาพสูงสุด

ในงานวิจัยนี้ได้พัฒนาโปรแกรมขึ้นเพื่อการใช้งานร่วมกับมอเตอร์ที่มีการควบคุมแรงดันในแต่ละเฟสเพื่อให้ทราบค่าเปอร์เซ็นต์แรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล อ่านค่าอุณหภูมิที่สูงขึ้นได้จากภาพถ่ายความร้อน ซึ่งสามารถประเมินหาค่าพลังงานที่สูญเสียในมอเตอร์ได้

### บรรณานุกรม

- [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, "Rerating factors of poly phase 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 quantity and voltage-source inverter on the temperature three-phase of Induction Motor Using an infrared 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

## ข้อมูลประวัติผู้วิจัย

### ประวัติส่วนตัว

ชื่อ-สกุล รศ.ดร.ทวีพล ชื่อสัตย์ .....

เพศ ชาย หญิง วันเดือนปีเกิด 18 เมษายน 2515 อายุ 41 ปี

สถานภาพ โสด สมรส

ตำแหน่งปัจจุบัน ผู้ช่วยศาสตราจารย์

### ประวัติการศึกษา

ชื่อย่อปริญญา	สาขา	สถาบันที่จบ	ปีที่จบ
วศ.บ.	วิศวกรรมการวัดคุม	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง	2539
วศ.ม.	วิศวกรรมไฟฟ้า	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง	2541
Dr.Mont	Automation Engineering	University of Leoben, Austria	2551

### สาขาที่ชำนาญพิเศษ

- การออกแบบเครื่องจักรและระบบโรงงานอัตโนมัติ
- การวัดคุมทางอุตสาหกรรม
- การวัดและทดสอบ
- ระบบตรวจสอบด้วยมาชีนวิชั่น ประยุกต์ใช้งานในอุตสาหกรรมการผลิต อุตสาหกรรมอาหาร

### ประสบการณ์ภาคอุตสาหกรรม

- ที่ปรึกษาในการออกแบบ สร้างเครื่องตรวจสอบคุณภาพของตัวเก็บประจุกำลังในโรงงานพานาโซนิคมัสซึชิตะประเทศไทย จำกัด
- ที่ปรึกษาในการออกแบบ ติดตั้งระบบควบคุมอัตโนมัติในโรงงานเคีอระของพานล
- ที่ปรึกษาในการออกแบบติดตั้งระบบแสดงผลแจ้งการทำงานในโรงงานฮอนด้านแมนูแฟคเจอร์ประเทศไทย

## ผลงานทางวิชาการ

### ตำรา

1. ทวีพล ชื้อสตัย 2545, การวิจัยดำเนินงาน คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 178 หน้า
2. นวภัทรา หนูนาค และ ทวีพล ชื้อสตัย, 2555, การวัดและเครื่องมือวัด ประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร. คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 316 หน้า
3. ยุทธพงศ์ ทัพผดุง, ชีระวัฒน์ หนูนาค, ทวีพล ชื้อสตัย และ นวภัทรา หนูนาค 2555, การใช้เทคโนโลยีกล้องถ่ายภาพความร้อนอย่างมืออาชีพ, วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์, 120 หน้า

### ผลงานที่ได้รับการตีพิมพ์ (International Publications)

- N.Nunak and T.Suesut, “Measuring geometric mean diameter of fruit and vegetable using computer vision”, *Songklanakarin Journal Science Technology* 2010, มี impact factor

### ผลงานวิชาการ International Proceeding

#### Selected Presentations

- Navaphattra Nunak and **Taweepol Suesut**, “Design of an Instrument for Concentration Control of Sugar Solution during Osmotic Process”, International Conference on Precision Instrumentation and Measurement, Kiryu, Japan, 17<sup>th</sup> – 20<sup>th</sup> March, 2010
- Navaphattra Nunak, Teerawat Nunak and **Taweepol Suesut**, “Identification of Thermal Distribution in Liquid during Ohmic Heating Process by Infrared Thermography”, International Conference on Precision Instrumentation and Measurement, Kiryu, Japan, 17<sup>th</sup> – 20<sup>th</sup> March, 2010
- Navaphattra Nunak and **Taweepol Suesut**, “Evaluation of White Shrimp Freshness during Iced Storage by Computer Vision”, International Conference on Precision Instrumentation and Measurement, Kiryu, Japan, 17<sup>th</sup> – 20<sup>th</sup> March, 2010
- Navaphattra Nunak and **Taweepol Suesut**, “Fish Species Sorting and Size Estimation using Laser Light Sectioning”, International Conference on Precision Instrumentation and Measurement, Kiryu, Japan, 17<sup>th</sup> – 20<sup>th</sup> March, 2010

- Navaphattra Nunak and **Taweepol Suesut**, “Electrical Conductivity of Bonito Tuna during Ohmic Thawing”, International Conference on Innovations in Agricultural, Food and Renewable Energy Productions for Mankind, Nakhon Ratchasima, Thailand, 1<sup>st</sup> – 3<sup>rd</sup> April, 2009
- Nunak N. and **Taweepol S.** (2007). Measuring Geometric Mean Diameter of Fruit and Vegetable using Computer Vision. “PSU-UNS International Conference on Engineering and Environment-ICEE-2007”, 10-11. May 2007, Phuket.
- **Taweepol Suesut** and Banchar Mongkhoin, “Demand Forecasting Approach Inventory Control for CIMS” , 2004 8th International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision, Kunming,China, 6-9 December 2004
- **T.Suesut**, P.Inban, P.Nilas, P.Rerngerun and S.Gulphanich, “Interpretation Petri Net model to IEC 1131-3:LD For Programmable Logic Controller”, 2004 IEEE Conference on Robotics, Automation and Mechatronics, Singapore, 1-3 December, 2004
- **T.Suesut**, V.Tipsuwanporn, P.Nilas, P. Rerngereun and A.Numsonran, “Multi-level Contract Net Protocol based on Holonic Control system Implement to Industrial Network”, 2004 IEEE Conference on Robotics, Automation and Mechatronics, Singapore, 1-3 December, 2004
- **Taweepol Suesut**, Sathit Intajag and Prapas Roeruen, “Design of Automatic Warehouse and Inventory control under HMS concept”, ICCAS 2004 International Conference on Control, Automation and Systems, Bangkok, Thailand 25-27 August, 2004
- Phonphithak, P.Pannil, **T.Suesut**, R. Masuchun and P. Julsereewong, “Self-Tuning PID Controller Based on PLC”, ICCAS 2004 International Conference on Control, Automation and Systems, Bangkok, Thailand 25-27 August, 2004
- **T.Suesut**, P.Inban, A.Numsomran and V.Tipsuwanporn, “Redundant System based PLC Network for High Priority Process”, ICCAS 2003 International Conference on Control, Automation and Systems, Gyeongju, Korea 22-25 October, 2003
- **T.Suesut**, C. Hankarjōnsook, N.Tammarugwattana and K.Tirasesth, “Internet Based for Computer Integration Manufacturing System”, ICCAS 2003 International Conference on Control, Automation and Systems, Gyeongju, Korea 22-25 October, 2003

- V.Tipsuwanporn, J.Anotaiadikoon, S.Gulpanich, V.Kongratana and **T.Suesut**, “Automation Cleaning Reverse Osmosis System based on Computer Analysis”, PSE Asia 2002 International Symposium on Design, Operation and Control of Chemical Process, Taipei, Taiwan 4-6 December, 2002
- **T. Suesut**, V.Tipsuwanporn, S.Gulpanich, J.Rodcumtui and P. Sukprasert, “A Design of Automatic Warehouse for Internet Based System”, 2002 IEEE International Conference on Industrial Technology, Bangkok, Thailand 11-14 December, 2002
- V.Tipsuwanporn, A.Sangrayub, **T. Suesut**, A. Numsomran and S.Gulpanich, “Development of PLC Fiber optic Network for Redundant System”, 2002 IEEE International Conference on Industrial Technology, Bangkok, Thailand 11-14 December, 2002
- **Taweepol Suesut**, Viriya Kongratana, Vittaya Tipsuwanporn and Suphan Kulphanich, “ A Technique to Expand the I/O of the PLC Using Remote I/O module” , The 14 th Korea Automatic Control Conference, pp E-61 –64, Korea OCT 1999
- **T.Suesut** , P.Rerngruen, V.Tipsuwanporn, S.Kulphanich and S.Chuenarom, “ Design of the PLC network Using Remote I/O module Application for A multi grup of machine”, The 3rd Asian Control Conference pp2818-2821, Shanghai, China, July 2000

### ทุนวิจัยที่เคยได้รับ

#### หัวหน้าโครงการวิจัย

- การออกแบบและพัฒนาอุปกรณ์ตรวจสอบเนื้อสัมผัสและความเค็มของแมงกะพรุนคอง(ปีพ.ศ. 2552)
- การออกแบบและพัฒนาอุปกรณ์วัดการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางไฟฟ้า คุณสมบัติทางกายภาพและคุณสมบัติทางเคมีของน้ำกระเจียบในระหว่างกระบวนการให้ความร้อน (ปีพ.ศ.2552)

#### ผู้ร่วมโครงการวิจัย

- การออกแบบและพัฒนาเครื่องขจัดน้ำออกจากไซโป้วหลังกระบวนการล้าง (ปีพ.ศ.2552)
- การศึกษาหาวิธีแก้ปัญหาสภาพหัวเหลืองของกุ้งแดงหลังละลาย (ปีพ.ศ.2552)
- การพัฒนาระบบการแปรรูปจึงผงบอบอัดโนมัตินระหว่างกระบวนการระเหยน้ำ (ปีพ.ศ.2552)

#### งานวิจัยที่เคยได้รับ

- การออกแบบและพัฒนาอุปกรณ์ตรวจสอบเนื้อสัมผัสและความเค็มของแมงกะพรุนคอง

- แหล่งทุน: โครงการ IRPUS สกว. ฝ่ายอุตสาหกรรม ประจำปี 2552
- การออกแบบและพัฒนาอุปกรณ์วัดการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางไฟฟ้า คุณสมบัติทางกายภาพและคุณสมบัติทางเคมีของน้ำกระเจี๊ยบในระหว่างกระบวนการให้ความร้อน
- แหล่งทุน: โครงการ IRPUS สกว. ฝ่ายอุตสาหกรรม ประจำปี 2552
- การศึกษาหาวิธีแก้ปัญหาสภาพหัวเหลืองของกุ้งแดงหลังละลาย
- แหล่งทุน: โครงการ IRPUS สกว. ฝ่ายอุตสาหกรรม ประจำปี 2552
- การพัฒนาระบบการแปรรูปจึงผงบอบอัดโนมิติในระหว่างกระบวนการระเหยน้ำ
- แหล่งทุน: โครงการ IRPUS สกว. ฝ่ายอุตสาหกรรม ประจำปี 2552
- การผลิตน้ำมันระเหยจากกระบวนการแปรรูปจึงผงบอบในระหว่างกระบวนการระเหยน้ำ
- แหล่งทุน: โครงการ IRPUS สกว. ฝ่ายอุตสาหกรรม ประจำปี 2552

#### งานวิจัยที่กำลังทำ

- ชื่อโครงการ การวัดค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีอินฟราเรดในอุปกรณ์จำหน่ายไฟฟ้าของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค (หัวหน้าโครงการ)
- แหล่งทุน การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค 2553
- ชื่อโครงการ การออกแบบเครื่องมือวัดความเข้มข้นและพัฒนาระบบควบคุมในกระบวนการแปรรูปอาหารด้วยวิธีออสโมติก (หัวหน้าโครงการ)
- แหล่งทุน สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ประจำปีงบประมาณ 2552

## ข้อมูลประวัติผู้วิจัย

## ประวัติส่วนตัว

ชื่อ-สกุล ผศ.ดร.นวกัทธา หนูนาท

เพศ  ชาย  หญิง วันเดือนปีเกิด 07 กันยายน 2519 อายุ 36 ปีสถานภาพ  โสด  สมรส

ตำแหน่งปัจจุบัน ผู้ช่วยศาสตราจารย์

## ประวัติการศึกษา

ชื่อย่อปริญญา	สาขา	สถาบันที่จบ	ปีที่จบ
วศ.บ.	วิศวกรรมเกษตร	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง	2542
M.Eng.	Post-Harvest and Food Process Engineering	Asian Institute of Technology	2545
Dr.Nat.tech	Food Technology	University of Natural Resources and Applied Life Sciences, Vienna, Austria	2549

สาขาวิจัยที่มีความชำนาญพิเศษ Food Properties (Mechanical, Optical, Thermal and Textural Properties), Measurement and Instruments in Food Processing, Hygienic Design of Food Processing Equipment...

## ตำรา

- นวกัทธา หนูนาท และ ทวีพล ชื้อสตัย. 2555. การวัดและเครื่องมือวัด ประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร. คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 316 หน้า

## ผลงานวิชาการ

## International Journals

- Nunak N. and Schleining G. (2011). Instrumental Textural Changes in Raw White Shrimp during Iced Storage. Journal of Aquatic Food Product Technology, 20, 4, 350-360

- Pimpen Pornchaloempong Panmanas Sirisomboon and **Navapattra Nunak**. 2011.  
Mass-Volume-Area properties of frozen Skipjack tuna. International Journal of Food Properties  
Available online: 12 Feb 2011
- **N.Nunak** and T.Suesut. (2010). Measuring geometric mean diameter of fruits and vegetables using light sectioning method. Songklanakarin Journal Science Technology
- **Nunak N.** and Schleining G. (2006). A rapid blade cutting method for the evaluation of osmotic dehydration of apples and potatoes. Journal of Texture Studies, 37, 1, 80-92
- Jarimopas B., Nunak T., and **Nunak N.** (2005). Electronic device for measuring volume of selected fruit and vegetables. Postharvest Biology and Technology, 35, 25-31

#### National Journals

- นวภัทรา หนูภาค และ อมรรัตน์ มุขประเสริฐ, “จลนศาสตร์การถ่ายเทมวลในระหว่างกระบวนการออสโมติกไซโป้วหวาน”, วิศวกรรมสาร มช., ปีที่ 38, ฉบับที่ 1, มกราคม-มีนาคม 2554
- นวภัทรา หนูภาค, “ปัจจัยและกระบวนการเบื้องต้นที่มีผลต่ออัตราการถ่ายเทมวลของชิ้นอาหารในระหว่างกระบวนการออสโมติก”, วารสารวิจัยและพัฒนา มจร., ปีที่ 32, ฉบับที่ 1, มกราคม-มีนาคม 2552

#### Selected Proceedings

- **Navapattra Nunak** and Kiattisak Roonprasang, “Use of Electrical Conductivity to Monitor Gel Forming of Soft-Tofu, Hanoi, Vietnam, 3<sup>rd</sup>-4<sup>th</sup> March, 2011
- **Navapattra Nunak** and Taweepol Suesut, “Design of an Instrument for Concentration Control of Sugar Solution during Osmotic Process”, International Conference on Precision Instrumentation and Measurement, Kiryu, Japan, 17<sup>th</sup> – 20<sup>th</sup> March, 2010
- **Navapattra Nunak**, Teerawat Nunak and Taweepol Suesut, “Identification of Thermal Distribution in Liquid during Ohmic Heating Process by Infrared Thermography”, International Conference on Precision Instrumentation and Measurement, Kiryu, Japan, 17<sup>th</sup> – 20<sup>th</sup> March, 2010

- **Navaphattra Nunak** and Taweepol Suesut, “Evaluation of White Shrimp Freshness during Iced Storage by Computer Vision”, International Conference on Precision Instrumentation and Measurement, Kiryu, Japan, 17<sup>th</sup> – 20<sup>th</sup> March, 2010
- **Navaphattra Nunak** and Taweepol Suesut, “Fish Species Sorting and Size Estimation using Laser Light Sectioning”, International Conference on Precision Instrumentation and Measurement, Kiryu, Japan, 17<sup>th</sup> – 20<sup>th</sup> March, 2010
- **Navaphattra Nunak** and Taweepol Suesut, “Electrical Conductivity of Bonito Tuna during Ohmic Thawing”, International Conference on Innovations in Agricultural, Food and Renewable Energy Productions for Mankind, Nakhon Ratchasima, Thailand, 1<sup>st</sup> – 3<sup>rd</sup> April, 2009
- **Navaphattra Nunak**, Taweepol Suesut, and Sarayut Inthuset, “Fish Size Measurement by Computer Vision using Laser Light Sectioning”, International Conference on Innovations in Agricultural, Food and Renewable Energy Productions for Mankind, Nakhon Ratchasima, Thailand, 1<sup>st</sup> – 3<sup>rd</sup> April, 2009
- **N.NUNAK** and **G.SCHLEINING**, “Evaluation of the water transfer in osmotically dehydrated fruit and vegetables using TA-XT2”, International Conference on Agricultural, Food and Biological Engineering & Post Harvest/ Production Technology, 21 – 24 January 2007, pp.
- **Schleining, G.** and **Nunak, N.** A rapid texture measurement method to determine the mass transfer in osmotically dehydrated plant products. In: Pedro Fito and Fidel Toldra: Intrafood 2005: Innovations in Traditional foods, 25-28 October, Valencia; Conference Proceedings, Vol 1, 261-264; Elsevier, London; ISBN 84-9705-880-1.