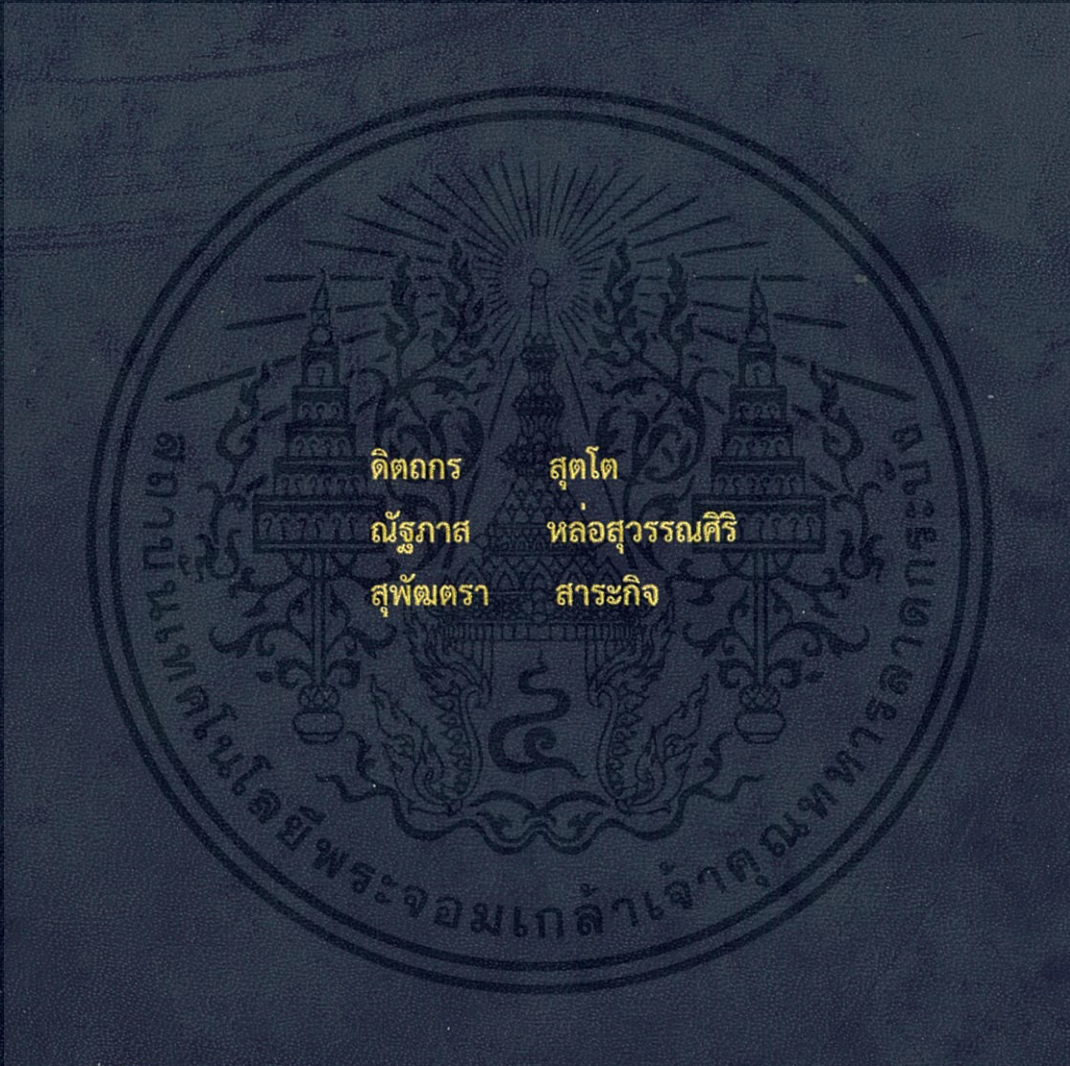


ระบบตรวจสอบสิ่งแปลกปลอมในเมล็ดพืชโดยใช้วิธีการ  
แอคทีฟเทอร์โมกราฟี  
DETECTION OF FOREIGN BODIES IN GRAINS USING  
ACTIVE THERMOGRAPHY



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมการวัดคุม

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2557

ระบบตรวจสอบสิ่งแปลกปลอมในเมล็ดพืชโดยใช้วิธีการ  
แอกทีฟเทอร์โมกราฟี  
DETECTION OF FOREIGN BODIES IN GRAINS USING  
ACTIVE THERMOGRAPHY



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมการวัดคุม  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2557

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

DETECTION OF FOREIGN BODIES IN GRAINS  
USING ACTIVE THERMOGRAPHY



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF  
BACHELOR OF ENGINEERING IN INSTRUMENTATION ENGINEERING  
FACULTY OF ENGINEERING  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG  
ACADEMIC YEAR 2014

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2557  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ใบรับรองปริญญาานิพนธ์

หัวข้อปริญญาานิพนธ์ ระบบตรวจสอบสิ่งแปลกปลอมในเมล็ดพืชโดยใช้วิธีการแอกทีฟเทอร์โมกราฟฟี

DETECTION OF FOREIGN BODIES IN GRAINS USING  
ACTIVE THERMOGRAPHY

นักศึกษาผู้จัดทำ นายดิศถกร สุตโต รหัสนักศึกษา 54010473  
นายณัฐภาส หล่อสุวรรณศิริ รหัสนักศึกษา 54010444  
นางสาวสุพัฒตรา สาระกิจ รหัสนักศึกษา 54011408

ปริญญา วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิชา วิศวกรรมการวัดคุม  
ปีการศึกษา 2557

อาจารย์ผู้ควบคุมปริญญาานิพนธ์

ลายมือชื่อ

รองศาสตราจารย์ ดร.ทวีพล ชื้อสัตย์

หัวข้อปริญญาานิพนธ์ ระบบตรวจสอบสิ่งแปลกปลอมในเมล็ดพืชโดยใช้วิธีการแอกทีฟเทอร์โมกราฟฟี

DETECTION OF FOREIGN BODIES IN GRAINS USING  
ACTIVE THERMOGRAPHY

นักศึกษาผู้จัดทำ	นายดิตถกร	สุตโต	รหัสนักศึกษา	54010473
	นายณัฐภาส	หล่อสุวรรณศิริ	รหัสนักศึกษา	54010444
	นางสาวสุพัฒตรา	สาระกิจ	รหัสนักศึกษา	54011408
อาจารย์ที่ปรึกษา	รศ.ดร.ทวีพล	ชื้อสัตย์		
ปีการศึกษา	2557			

### บทคัดย่อ

โครงการนี้นำเสนอระบบตรวจสอบสิ่งแปลกปลอมในเมล็ดธัญพืชต่าง ๆ ด้วยวิธีการแอกทีฟเทอร์โมกราฟฟี โดยการให้ความร้อนจากแหล่งให้ความร้อนแก่ตัวอย่างจากนั้นใช้กล้องถ่ายภาพความร้อน (Thermal Image Camera) จับภาพทางความร้อน เนื่องจากเมล็ดธัญพืชและสิ่งแปลกปลอมมีค่าความจุความร้อนจำเพาะ (Specific heat capacity) ที่แตกต่างกันดังนั้นรังสีความร้อนที่แผ่ออกมาจากเมล็ดธัญพืชและสิ่งแปลกปลอมจึงมีค่าต่างกันทำให้สามารถตรวจจับสิ่งแปลกปลอมได้ วิธีนี้เหมาะสมกับการตรวจจับสิ่งแปลกปลอมที่มีสีและขนาดเท่ากับเมล็ดพืช ระบบตรวจสอบนี้ประกอบด้วยสายพานลำเลียง, แหล่งกำเนิดความร้อนจากหลอดฮาโลเจน ซึ่งทั้งหมดควบคุมด้วยพีแอลซี (PLC, Programmable Logic Controller), กล้องถ่ายภาพความร้อนอินฟราเรดช่วงความยาวคลื่น 8-14 ไมโครเมตรและคอมพิวเตอร์ประมวลผลภาพโดยใช้โปรแกรม Visual C# ตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบคือ ลูกเต๋อย ถั่วแดง ถั่วดำ ถั่วลิสง และถั่วเหลือง สิ่งแปลกปลอมคือ เศษไม้ เศษหิน และพลาสติก ระบบดังกล่าวสามารถนำไปพัฒนาใช้ในระบบอุตสาหกรรมได้เป็นอย่างดี

Thesis Title	DETECTION OF FOREIGN BODIES IN GRAINS USING ACTIVE THERMOGRAPHY	
Authors	Mr. Dittakorn	Sutto
	Mr. Natthaphat	Lorsuwansiri
	Ms. Supattra	Sarakij
Thesis Advisor	Assoc. Prof. Dr. Taweepol	Suesut
Year	2014	

### ABSTRACT

This project presents the detection of foreign bodies in grains using active thermography. The samples were heated before detecting and taking thermal image by thermal image camera. Because the heat radiation capacity of grains and foreign bodies are different, therefore the foreign body can be identified. This method is suitable for detecting the foreign body such as material same size and color which is difficult to classify by traditional image processing. Our system consists of conveyor, heat source from halogen lamp, programmable logic controller (PLC), thermal image camera with wavelength 8-14  $\mu\text{m}$  and computer for image processing. The Visual C# was developed for thermal image processing. For the case study peanuts, millet, red beans, black eyed peas, and soybeans are the grains and wood, grout and plastic are foreign body. The prototype machine can be improved to use in industrial as well.

## กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาบัตรฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความกรุณาและความอนุเคราะห์ จากอาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร.ทวีพล ชื่อสัตย์ ที่ได้ให้คำแนะนำ คำปรึกษาในการแก้ปัญหาหรือข้อสงสัยต่างๆ แก่ คณะผู้จัดทำเสมอมา รวมถึงให้ความดูแลเอาใจใส่ สอบถามความก้าวหน้าอย่างสม่ำเสมอ ทำให้คณะผู้จัดทำทำงานอย่างเป็นระบบและใช้เวลาอย่างมีประสิทธิภาพ

ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมการวัดคุมที่ได้เอื้อเฟื้อสถานที่ รวมถึงอุปกรณ์และเครื่องมือต่างๆ ในการทำวิจัย จนคณะผู้จัดทำสามารถทำปริญญาบัตรฉบับนี้ได้สำเร็จสิ้น

สุดท้ายนี้คณะผู้จัดทำขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดาที่คอยเป็นกำลังใจที่ดีเสมอมา ตลอดจนเป็นแรงบันดาลใจที่ดีที่สุดที่ทำให้โครงการนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากปริญญาบัตรฉบับนี้ คณะผู้จัดทำขอมอบให้กับบิดา มารดาซึ่งเป็นที่รักและเคารพยิ่ง ตลอดจนครูอาจารย์ที่เคารพทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้และถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดีให้แก่คณะผู้จัดทำเสมอมา



คณะผู้จัดทำ

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญภาพ.....	VIII
<b>บทที่ 1 บทนำ.....</b>	<b>1</b>
1.1 ความเป็นมาและเหตุจูงใจของการวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของปริญญาานิพนธ์.....	1
1.3 ขอบเขตปริญญาานิพนธ์.....	1
1.4 ขั้นตอนการศึกษา.....	1
<b>บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง.....</b>	<b>2</b>
2.1 การแผ่รังสีอินฟราเรด.....	2
2.1.1 ประเภทของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า.....	4
2.1.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่นและอุณหภูมิ.....	5
2.1.3 การแผ่รังสีของวัตถุดำ (Blackbody Radiation).....	8
2.1.4 สัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อน (Emissivity, $\epsilon$ ).....	9
2.2 Active Thermography.....	11
2.2.1 Pulsed Thermography.....	11
2.2.2 Cavity Absorption Thermography.....	12
2.2.3 Lock-In Thermography.....	12
2.2.4 Thermo-inductive Testing.....	13
2.3 ความจุความร้อน.....	15
2.4 แสง.....	16
2.4.1 คุณสมบัติเชิงคลื่นของแสง.....	16
2.4.1.1 การสะท้อนของแสง.....	16
2.4.1.2 การหักเหของแสง.....	17
2.4.1.3 การเลี้ยวเบนของแสง.....	18
2.4.1.4 การแทรกสอดโธมัส ยัง (Thomas Young).....	19
2.4.2 คุณสมบัติเชิงอนุภาคของแสง.....	20
2.5 กล้องถ่ายภาพความร้อน.....	20
2.6 การติดต่อสื่อสารแบบอนุกรมของ RS-232C.....	23
2.6.1 รูปแบบการสื่อสารแบบอนุกรม.....	24

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.6.1.1 การสื่อสารแบบซิงโครนัส (Synchronous).....	24
2.6.1.2 การสื่อสารแบบอะซิงโครนัส (Asynchronous).....	24
2.6.2 ลักษณะการรับส่งข้อมูล.....	25
<b>บทที่ 3 วิธีดำเนินการ.....</b>	<b>26</b>
3.1 กล่าวนำ.....	26
3.2 ส่วนประกอบของชุดสายพานลำเลียง.....	26
3.3 อุปกรณ์.....	27
3.3.1 ชุดสายพานลำเลียง.....	27
3.3.2 กล้องถ่ายภาพความร้อน FLUKE รุ่น TI400.....	28
3.3.3 พีแอลซี (PLC, Programmable Logic Controller).....	28
3.3.4 มอเตอร์.....	29
3.3.5 อินเวอร์เตอร์.....	29
3.3.6 รีเลย์.....	30
3.3.7 ตัวเซนเซอร์แสง.....	31
3.3.8 หลอดไฟ.....	31
3.3.9 วิทยุ.....	31
3.3.10 สิ่งแปลกปลอม.....	32
3.3.11 ถาดสังกะสี.....	32
3.4 Flowchart.....	33
3.4.1 Flowchart (โปรแกรมตรวจสอบสิ่งแปลกปลอม).....	33
3.4.2 Flowchart (สายพานลำเลียง).....	34
3.5 การทำงานของโปรแกรมประมวลผลภาพ.....	35
3.5.1 ส่วนโปรแกรม SmartView3.7.....	35
3.5.2 ส่วนโปรแกรม Microsoft Visual C# 2010.....	35
3.6 การทำงานของพีแอลซี (PLC, Programmable Logic Controller).....	36
3.6.1 ส่วนประกอบของชุดสายพานลำเลียง.....	36
3.6.2 การกำหนดเบอร์รีเลย์และอินพุต/เอาต์พุตของพีแอลซี.....	36
3.7 ขั้นตอนการดำเนินการทดลอง.....	38
<b>บทที่ 4 ผลการทดลอง.....</b>	<b>39</b>
4.1 กล่าวนำ.....	39
4.2 เวลาที่ใช้สำหรับตรวจสอบสิ่งแปลกปลอมด้วยภาพถ่ายความร้อน.....	39
4.3 ผลการทดลอง.....	43

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	52
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	52
5.2 ปัญหาที่พบในการทดลอง.....	52
5.3 ข้อเสนอแนะและแนวทางการพัฒนา.....	52
บรรณานุกรม.....	53
ภาคผนวก.....	54



# สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 แสดงตัวอย่างค่า Emissivity ของพื้นผิววัสดุบางชนิด.....	8
2.2 แสดงค่าความสามารถในการแผ่รังสีความร้อน ( $\epsilon$ ) ของพื้นผิววัสดุบางชนิด.....	10
2.3 ตัวอย่างค่าความจุความร้อนของสิ่งแลกเปลี่ยนและเมล็ดพืช .....	15
3.1 การกำหนดอินพุต/เอาต์พุตของพีแอลซี.....	37
4.1 แสดงผลการทดลอง ถั่วแดง-เศษไม้.....	46
4.2 แสดงผลการทดลอง ถั่วแดง-หิน .....	46
4.3 แสดงผลการทดลอง ถั่วแดง-พลาสติก .....	47
4.4 แสดงผลการทดลอง ถั่วดำ-เศษไม้ .....	47
4.5 แสดงผลการทดลอง ถั่วดำ-หิน .....	47
4.6 แสดงผลการทดลอง ถั่วดำ-พลาสติก.....	48
4.7 แสดงผลการทดลอง ถั่วเหลือง-เศษไม้.....	48
4.8 แสดงผลการทดลอง ถั่วเหลือง-หิน .....	48
4.9 แสดงผลการทดลอง ถั่วเหลือง-พลาสติก.....	49
4.10 แสดงผลการทดลอง ถั่วลิสง-เศษไม้.....	49
4.11 แสดงผลการทดลอง ถั่วลิสง-หิน .....	49
4.12 แสดงผลการทดลอง ถั่วลิสง-พลาสติก.....	50
4.13 แสดงผลการทดลอง ลูกเดือย-เศษไม้.....	50
4.14 แสดงผลการทดลอง ลูกเดือย-หิน.....	50
4.15 แสดงผลการทดลอง ลูกเดือย-พลาสติก.....	51

# สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 สเปกตรัมการแผ่รังสีในย่านต่างๆ ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า .....	3
2.2 การถ่ายเทพลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของวัตถุ.....	3
2.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่นกับอุณหภูมิ .....	6
2.4 แสดงการถ่ายเทพลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของวัตถุในรูปแบบรังสีอินฟราเรด.....	6
2.5 Gustav Robert Georg Kirchhoff.....	7
2.6 แสดงการถ่ายเทพลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของวัตถุในรูปแบบรังสีอินฟราเรด.....	7
2.7 การตรวจสอบรอยตะเข็บจากการเชื่อม .....	11
2.8 Cavity effect.....	12
2.9 Lock-In Thermography.....	13
2.10 หลักการของ Thermo-inductive.....	14
2.11 การให้ความร้อน Thermo-inductive.....	14
2.12 ภาพถ่ายความร้อน Thermo-inductive.....	14
2.13 สเปกตรัมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า.....	16
2.14 การสะท้อนของแสงกับผิวสะท้อนราบ.....	17
2.15 เปรียบเทียบรังสีสะท้อนบนผิวเรียบและผิวขรุขระทำให้เห็นภาพสะท้อนที่แตกต่างกัน .....	17
2.16 แสดงการหักเหของแสงเมื่อผ่านตัวกลางที่ต่างกัน .....	18
2.17 การเลี้ยวเบนของแสง .....	19
2.18 การแทรกสอดของแสง .....	19
2.19 การทดลองปรากฏการณ์แทรกสอดของแสง.....	19
2.20 ปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก.....	20
2.21 ระบบการวัดอุณหภูมิโดยอาศัยการแผ่รังสีอินฟราเรดของวัตถุ .....	21
2.22 การประยุกต์ใช้งานกล้องถ่ายภาพความร้อนในอุตสาหกรรมอาหาร.....	23
2.23 การประยุกต์ใช้งานกล้องถ่ายภาพความร้อนในอุตสาหกรรม.....	23
2.24 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลที่ส่งกับสัญญาณนาฬิกา .....	24
2.25 แสดงส่วนประกอบของข้อมูลแต่ละเฟรม.....	24
3.1 แสดงระบบสายพานลำเลียงการตรวจสอบสิ่งแปลกปลอมแบบอัตโนมัติ.....	26
3.2 ภาพรวมของเครื่องลำเลียงสายพาน .....	27
3.3 สายพานลำเลียง .....	27
3.4 กล้องถ่ายภาพความร้อน ยี่ห้อ FLUKE รุ่น TI400 .....	28
3.5 พีแอลซี (PLC, Programmable Logic Controller) ยี่ห้อ Omron Sysmac C200HX.....	28
3.6 มอเตอร์กระแสสลับ.....	29
3.7 อินเวอร์เตอร์ .....	29
3.8 รีเลย์.....	30
3.9 เซนเซอร์แสง .....	31

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.10 หลอดไฟ.....	31
3.11 ลูกเต๋อย ถั่วเหลือง ถั่วลิสง ถั่วแดงและถั่วดำ .....	31
3.12 ไม้ เศษหินและพลาสติก .....	32
3.13 ถาดสังกะสีใส่เมล็ดพืชและสิ่งแปลกปลอม.....	32
3.14 Flowchart (โปรแกรมตรวจสอบสิ่งแปลกปลอม).....	33
3.15 Flowchart (สายพานลำเลียง) .....	34
3.16 โมเดล HSL Color .....	35
3.17 การกำหนดเบอร์รีเลย์ของพีแอลซี (PLC, Programmable Logic Controller).....	37
3.18 การกำหนดตำแหน่งตาม Backplane .....	37
4.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลา.....	39
4.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลา (ถั่วแดง).....	40
4.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลา (ถั่วลิสง).....	41
4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลา (ถั่วดำ).....	41
4.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลา (ถั่วเหลือง).....	42
4.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลา (ลูกเต๋อย).....	42
4.7 ภาพถ่ายทางความร้อนของเมล็ดพืช .....	43
4.8 ภาพถ่ายทางความร้อนของสิ่งแปลกปลอม .....	44
4.9 ภาพถ่ายทางความร้อนของพลาสติกกับเมล็ดพืช .....	44
4.10 ภาพถ่ายทางความร้อนของไม้กับเมล็ดพืช .....	45
4.11 ภาพถ่ายทางความร้อนของหินกับเมล็ดพืช.....	45

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและเหตุจูงใจของการวิจัย

ในวงการอุตสาหกรรมได้มีการพัฒนาทางด้านเทคโนโลยีการผลิตสินค้าให้มีประสิทธิภาพมากที่สุดภายในระยะเวลาที่น้อยที่สุด โดยใช้ต้นทุนต่ำเพื่อออกไปแข่งขันกับสินค้าในตลาดโลกได้ในราคาที่ต่ำกว่า เนื่องจากเทคโนโลยีการผลิตมีบทบาทสำคัญเป็นอย่างมาก

กระบวนการผลิตนั้น มีขั้นตอนการตรวจสอบผลิตภัณฑ์เพื่อให้สินค้าปราศจากสิ่งแปลกปลอม มีมาตรฐานและมีคุณภาพในสายงานผลิตสินค้าส่งออก โดยนำเทคโนโลยีที่ทันสมัยเข้ามาช่วยในการตรวจสอบผลิตภัณฑ์ว่ามีสิ่งแปลกปลอมปะปนมาหรือไม่ แล้วยังช่วยลดเวลาในการตรวจสอบอีกด้วย ซึ่งปริญญานิพนธ์นี้ได้นำโปรแกรม Visual C# มาประยุกต์ใช้ในการตรวจสอบ โดยการรับภาพมาจากกล้องถ่ายภาพความร้อน แล้วนำภาพมาประมวลผลและหาว่าผลิตภัณฑ์นั้นมีสิ่งแปลกปลอมปะปนมาหรือไม่ เพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมต่อไป

### 1.2 วัตถุประสงค์ของปริญญานิพนธ์

1. เพื่อออกแบบและสร้างเครื่องตรวจสอบสิ่งแปลกปลอมในเมล็ดพืชโดยใช้โปรแกรม Visual C#
2. เพื่อศึกษาประสิทธิภาพในการตรวจสอบสิ่งแปลกปลอมที่ปนมาในเมล็ดพืช

### 1.3 ขอบเขตปริญญานิพนธ์

1. เขียนโปรแกรม Visual C# เพื่อตรวจสอบสิ่งแปลกปลอมได้
2. ออกแบบและสร้างระบบสายพานลำเลียงที่ควบคุมแบบอัตโนมัติโดยพีแอลซี (PLC, Programmable Logic Controller)

### 1.4 ขั้นตอนการศึกษา

1. ศึกษาการทำงานของกล้องถ่ายภาพความร้อน
2. ศึกษาเกี่ยวกับคุณสมบัติทางความร้อน
3. ศึกษาการทำงานของโปรแกรม Visual C#
4. ศึกษาการทำงานของโปรแกรมพีแอลซี (PLC, Programmable Logic Controller) ของ OMRON
5. ทำการทดลองการตรวจสอบสิ่งแปลกปลอม
6. ทำการสรุปผลการทดลอง

## ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง

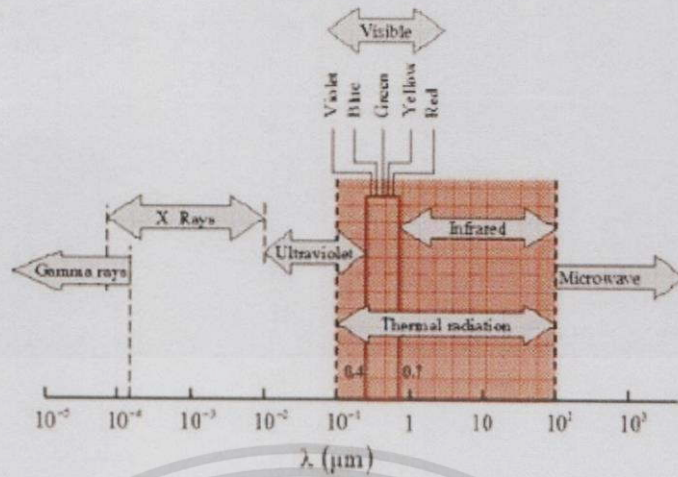
### 2.1 การแผ่รังสีอินฟราเรด

ในปี ค.ศ.1800 นักวิทยาศาสตร์ชาวอังกฤษ Sir. William Herschel เป็นผู้ค้นพบคลื่นรังสีอินฟราเรด (Infrared:IR) หรือคลื่นรังสีความร้อนซึ่งเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดหนึ่งที่แผ่มาจากดวงอาทิตย์ ค้นพบโดยการทดลองวัดอุณหภูมิของแถบสีรุ้งจากปริซึมโดยเลื่อนเทอร์โมมิเตอร์จากแถบสีม่วงไปยังแถบสีแดง พบว่าอุณหภูมิมีค่าเพิ่มขึ้นโดยมีค่าสูงสุดที่แถบสีแดง ขอบเขตดังกล่าวเรียกว่า “อินฟราเรด” (ขอบเขตต่ำกว่าแถบสีแดง) ซึ่งเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความยาวคลื่น 0.75-100  $\mu\text{m}$  มีความถี่ในช่วง 1011-1014 Hz และมีคุณสมบัติไม่เบี่ยงเบนในสนามแม่เหล็กไฟฟ้า โดยเมื่อความถี่สูงขึ้นพลังงานก็มีค่าสูงขึ้นตามไปด้วย และเนื่องจากย่านรังสีอินฟราเรดอยู่ในช่วงคลื่นที่มีความถี่ต่ำกว่าความถี่ของแสงสีแดง มนุษย์จึงไม่สามารถมองเห็นรังสีอินฟราเรดแต่สามารถรู้สึกถึงความร้อนได้ วัตถุทุกชนิดที่มีอุณหภูมิสูงกว่าค่าศูนย์องศาสัมบูรณ์ (Absolute zero หรือ  $-273.15\text{ }^{\circ}\text{C}$  หรือ  $0\text{ K}$ ) มีการแผ่รังสีอินฟราเรดออกมาโดยวัตถุที่ร้อนมีการแผ่รังสีออกมามากกว่าวัตถุที่เย็น (ประวิทย์, 2553)

ย่านรังสีอินฟราเรดแบ่งออกเป็น 4 ช่วงตามช่วงของความยาวคลื่นได้แก่ ช่วงใกล้อินฟราเรด (Near-IR: 0.75-2.5  $\mu\text{m}$ ), ช่วงคลื่นสั้น (1.4-3  $\mu\text{m}$ ), ช่วงกลาง (3-8  $\mu\text{m}$ ), ช่วงคลื่นยาว (8-15 $\mu\text{m}$ ) และช่วงไกล (Extreme: 15-100  $\mu\text{m}$ ) ซึ่งรังสีอินฟราเรดในย่าน Near-IR โดยทั่วไปนำไปประยุกต์ใช้ในการตรวจสอบการวัดค่าการกระจายความร้อน, การสะท้อนหรือการหักเหของรังสี ส่วนรังสีในช่วงคลื่นสั้นถึงช่วงคลื่นยาวนำไปประยุกต์ใช้ในการตรวจสอบการแผ่รังสีของวัตถุ โดยที่ช่วงคลื่นยาวมีความไวในการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิสูงสุดที่ช่วงอุณหภูมิห้อง แต่ในช่วงกลางมีความไวในการตอบสนองที่อุณหภูมิสูงมากเช่น  $400\text{ }^{\circ}\text{C}$  (Gowen, 2010)

การแผ่รังสีอินฟราเรดสัมพันธ์กับพลังงานที่สสารแผ่ออกมา ณ อุณหภูมิหนึ่งๆ โดยกลไกของการแผ่รังสีอินฟราเรดเกี่ยวข้องกับพลังงานเนื่องจากการสั่นสะเทือน (Oscillations) และการเคลื่อนที่ (Transition) ของอิเล็กตรอนซึ่งประกอบกันเป็นสสารวัตถุที่มีอุณหภูมิสูง การสั่นหรือเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนส่งผลให้พลังงานภายในวัตถุมีค่าสูง กล่าวได้ว่าการแผ่รังสีอินฟราเรดเกี่ยวข้องกับสภาพทางความร้อนภายใน การแผ่รังสีเป็นปรากฏการณ์เชิงปริมาตร (Volumetric phenomenon) คือ การแผ่รังสีความร้อนจากสสาร ซึ่งเป็นผลรวมของการแผ่รังสีอินฟราเรดที่จุดใดๆ ของสสารนั้นตลอดทั้งปริมาตร โดยเป็นการเน้นไปที่การแผ่รังสีอินฟราเรดในลักษณะที่เรียกว่าเป็นปรากฏการณ์พื้นผิว (Surface phenomenon)

กล่าวคือในของแข็งและของเหลว รังสีอินฟราเรดส่วนใหญ่ที่แผ่ออกมาโดยโมเลกุลภายในจะถูกโมเลกุลที่อยู่ติดกันดูดซับพลังงานเอาไว้เกือบทั้งหมด จึงเป็นผลให้รังสีอินฟราเรดที่แผ่ออกมาจากของแข็งหรือของเหลวนั้น สามารถคิดได้ว่าเป็นการแผ่รังสีออกมาจากโมเลกุลบริเวณใกล้พื้นผิวหรือปรากฏการณ์พื้นผิว สเปคตรัมของการแผ่รังสีแสดงดังรูป 2.1



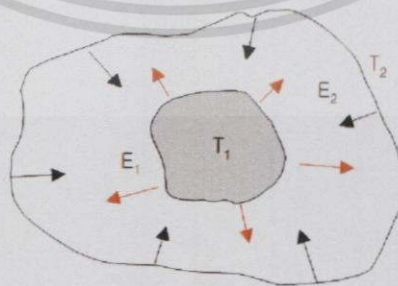
รูปที่ 2.1 สเปกตรัมการแผ่รังสีในย่านต่างๆ ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

การแผ่รังสีอินฟราเรดสัมพันธ์กับคุณสมบัติของคลื่นอันได้แก่ความถี่ (Frequency:  $\nu$ ) และความยาวคลื่น (Wavelength:  $\lambda$ ) แสดงความสัมพันธ์ดังสมการ 2.1

$$\lambda = \frac{c}{\nu} \quad (2.1)$$

โดย  $c$  คือความเร็วของแสงในสุญญากาศสำหรับเดินทางในสุญญากาศ  $c = c_0 = 2.998 \times 10^8$  m/s

รังสีอินฟราเรดหรือรังสีความร้อนที่แผ่ออกมาจากพื้นผิวของวัตถุ ในรูปแบบของพลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (รูปที่ 2.2) ในช่วงความยาวคลื่นหนึ่งซึ่งขนาดของการแผ่รังสีอินฟราเรดเปลี่ยนแปลงไปตามค่าความยาวคลื่น โดยรังสีอินฟราเรดหรือรังสีความร้อนที่แผ่ออกจากวัตถุอื่นมาตกกระทบลงบนพื้นผิววัตถุที่สนใจ บางส่วนถูกดูดซึม (Absorbed) บางส่วนสะท้อน (Reflected) และบางส่วนทะลุผ่านออกไป (Transmitted) จากวัตถุ เรียกค่าคุณสมบัติดังกล่าวของวัตถุว่า ค่าความสามารถในการดูดซึมรังสี (Absorptivity,  $\lambda$ ) ค่าความสามารถในการสะท้อนรังสี (Reflectivity,  $\rho$ ) และค่าความสามารถในการส่งผ่านรังสี (Transmissivity,  $\tau$ ) ตามลำดับ



รูปที่ 2.2 การถ่ายเทพลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของวัตถุ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.1.1 ประเภทของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

แสงที่ตามองเห็น (Visible light) เป็นเพียงส่วนหนึ่งของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ในช่วงที่ประสาทตาของมนุษย์สามารถสัมผัสได้มีความยาวคลื่นอยู่ระหว่าง 400–700 nm หากนำแท่งแก้วปริซึม (Prism) มาหักเหแสงอาทิตย์ เห็นได้ว่าแสงสีขาวถูกหักเหออกเป็นสีม่วง สีคราม สีน้ำเงิน สีเขียว สีเหลือง สีแสดและสีแดง คล้ายกับสีของรุ้งกินน้ำ เรียกว่า “สเปกตรัม” (Spectrum) แสงแต่ละสีมีความยาวคลื่นแตกต่างกัน สีม่วงมีความยาวคลื่นน้อยที่สุด ในขณะที่สีแดงมีความยาวคลื่นมากที่สุด นอกจากแสงที่ตามองเห็นแล้วยังมีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดอื่นๆ ได้แก่รังสีที่มีความยาวคลื่นถัดจากสีแดงออกไปเรียกว่า “รังสีอินฟราเรด” หรือ “รังสี ความร้อน” รังสีชนิดนี้ไม่สามารถมองเห็นแต่รู้สึกถึงความร้อนได้ สัตว์บางชนิดเช่น งู มีประสาทสัมผัสรังสีอินฟราเรด มันสามารถทราบตำแหน่งของเหยื่อได้โดยการสัมผัสรังสีอินฟราเรดที่แผ่ออกมาจากร่างกายของเหยื่อ รังสีที่มีความยาวคลื่นน้อยกว่าแสงสีม่วงเรียกว่า “รังสีอัลตราไวโอเล็ต” แม้ว่ามองไม่เห็นด้วยสายตาแต่เมื่อตากแดดนานๆ ผิวหนังจะไหม้ด้วยรังสีชนิดนี้ นอกจากรังสีอัลตราไวโอเล็ตและรังสีอินฟราเรดแล้ว ยังมีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าประเภทอื่นๆ ซึ่งเรียงลำดับตามความยาวคลื่นได้ดังนี้

**รังสีแกมมา (Gamma ray)** เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความยาวคลื่นน้อยกว่า 0.01 nm โฟตอนของรังสีแกมมามีพลังงานสูงมาก กำเนิดจากแหล่งพลังงานนิวเคลียร์ เช่น ดาวระเบิดหรือระเบิดปรมาณูเป็นอันตรายมากต่อสิ่งมีชีวิต

**รังสีเอ็กซ์ (X-ray)** มีความยาวคลื่น 0.01 – 1 nm มีแหล่งกำเนิดในธรรมชาติมาจากดวงอาทิตย์ มนุษย์ใช้รังสีเอ็กซ์ในทางการแพทย์เพื่อส่องผ่านเซลล์เนื้อเยื่อ แต่ถ้าได้ร่างกายได้รับรังสีนี้มากๆ ก็จะเป็นอันตรายได้

**รังสีอัลตราไวโอเล็ต (Ultraviolet radiation)** มีความยาวคลื่น 1 – 400 nm รังสีอัลตราไวโอเล็ตมีอยู่ในแสงอาทิตย์เป็นประโยชน์ต่อร่างกาย แต่หากได้รับมากเกินไปจะทำให้ผิวไหม้และอาจทำให้เกิดมะเร็งผิวหนังได้

**แสงที่ตามองเห็น (Visible light)** มีความยาวคลื่น 400 – 700 nm พลังงานที่แผ่ออกมาจากดวงอาทิตย์ส่วนมากเป็นรังสีในช่วงนี้ แสงแดดเป็นแหล่งพลังงานที่สำคัญของโลก และยังช่วยในการสังเคราะห์แสงของพืช

**รังสีอินฟราเรด (Infrared radiation)** มีความยาวคลื่น 700 nm – 1 mm โลกและสิ่งมีชีวิตมีการแผ่รังสีอินฟราเรดออกมา โดยก๊าซเรือนกระจก เช่น คาร์บอนไดออกไซด์และไอน้ำในบรรยากาศดูดซับรังสีนี้ไว้ ทำให้โลกมีความอบอุ่นเหมาะกับการดำรงชีวิต

**คลื่นไมโครเวฟ (Microwave)** มีความยาวคลื่น 1 nm – 10 cm ใช้ประโยชน์ในด้านโทรคมนาคมระยะไกล นอกจากนั้นยังนำมาประยุกต์ใช้ในการสร้างพลังงานในเตาอบอาหาร

**คลื่นวิทยุ (Radio wave)** เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความยาวคลื่นมากที่สุด คลื่นวิทยุสามารถเดินทางผ่านชั้นบรรยากาศได้จึงถูกนำมาใช้ประโยชน์ในด้านการสื่อสารโทรคมนาคม

สรุปได้ว่า รังสีอินฟราเรด (infrared) คือ แสงที่มนุษย์ไม่สามารถมองเห็นได้ เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความถี่ต่ำกว่าแสงสีแดง แหล่งกำเนิดของรังสีอินฟราเรด คือ ความร้อน (Heat) มีการแผ่รังสีความร้อนให้กับวัตถุที่มีอุณหภูมิสูงกว่าค่า Absolute Zero หรืออุณหภูมิศูนย์สัมบูรณ์ (-273.15 °C หรือ 0 K) เท่านั้น โดยมีการแผ่รังสีในย่านอินฟราเรดหรือรังสีความร้อนออกจากร่างกายของวัตถุ แม้วัตถุนั้นเป็นไนโตรเจนเหลวที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า -196 °C ยังมีการแผ่รังสีอินฟราเรดออกมาได้ ถึงแม้มีค่าน้อยก็ตาม ซึ่งในความเป็นจริงและในชีวิตประจำวัน มนุษย์สัมผัสและเกี่ยวข้องกับ

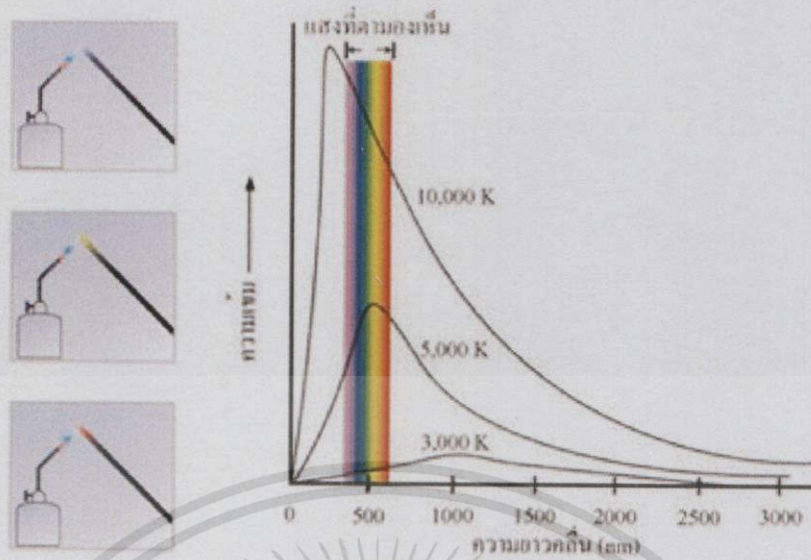
กับรังสีอินฟราเรดอยู่ตลอดเวลา กล่าวคือ ร่างกายรู้สึกร้อนเมื่ออยู่ท่ามกลางแสงอาทิตย์หรือใกล้ไฟ ถึงแม้ว่าสายตาไม่สามารถมองเห็นรังสีอินฟราเรดได้ แต่ผิวก็สามารถรู้สึกสัมผัสถึงความร้อนได้ นั่นแสดงให้เห็นว่า วัตถุที่ร้อนย่อมแผ่พลังงานรังสีความร้อนหรือรังสีอินฟราเรดออกมาได้มากกว่าวัตถุที่เย็น

### 2.1.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่นและอุณหภูมิ

วัตถุทุกชนิดที่มีอุณหภูมิสูงกว่า 0 K (-273°C) มีพลังงานภายในตัว และมีการแผ่รังสีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ความยาวของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าแปรผกผันกับอุณหภูมิ มิใช่เพียงสิ่งที่มีอุณหภูมิสูงดังเช่น ดวงอาทิตย์และไส้หลอดไฟฟ้าที่มีการแผ่รังสี หากแต่สิ่งที่มีอุณหภูมิต่ำดังเช่น ร่างกายมนุษย์และน้ำแข็ง ก็มีการแผ่รังสีเช่นกันเพียงแต่ตาของมนุษย์มองไม่เห็น พิจารณาในรูปที่ 2.3 เป็นการให้พลังงานความร้อนแก่แท่งโลหะ เมื่อแท่งโลหะเริ่มร้อนจะเปล่งแสงสีแดง (สามารถเห็นได้จากขดลวดของเตาไฟฟ้า) เมื่อแท่งโลหะร้อนมากขึ้นจะเปล่งแสงสีเหลืองและในที่สุดจะเปล่งแสงสีขาวอมน้ำเงิน

เมื่อพิจารณาเส้นกราฟเห็นได้ว่า

- 1) เมื่อโลหะมีอุณหภูมิ 3,000 K ความยาวคลื่นสูงสุดที่ยอดกราฟอยู่ที่ 1000 nm ซึ่งตรงกับย่านรังสีอินฟราเรด สายตามนุษย์ไม่สามารถมองเห็นรังสีชนิดนี้ได้ จึงเห็นแท่งโลหะแผ่แสงสีแดง เนื่องจากเป็นความยาวคลื่นที่ต่ำที่สุดที่สามารถมองเห็นได้
- 2) เมื่อแท่งเหล็กมีอุณหภูมิ 5,000 K ความยาวคลื่นสูงสุดที่ยอดกราฟอยู่ที่ 580 nm จึงมองเห็นแท่งโลหะเปล่งแสงสีเหลือง
- 3) เมื่อแท่งเหล็กมีอุณหภูมิ 10,000 K ความยาวคลื่นสูงสุดที่ยอดกราฟอยู่ที่ 290 nm ซึ่งตรงกับย่านรังสีอัลตราไวโอเล็ต ซึ่งสายตามนุษย์ไม่สามารถมองเห็นรังสีชนิดนี้ จึงเห็นแท่งโลหะแผ่แสงสีม่วง เนื่องจากเป็นความยาวคลื่นที่สูงที่สุดที่สามารถมองเห็นได้



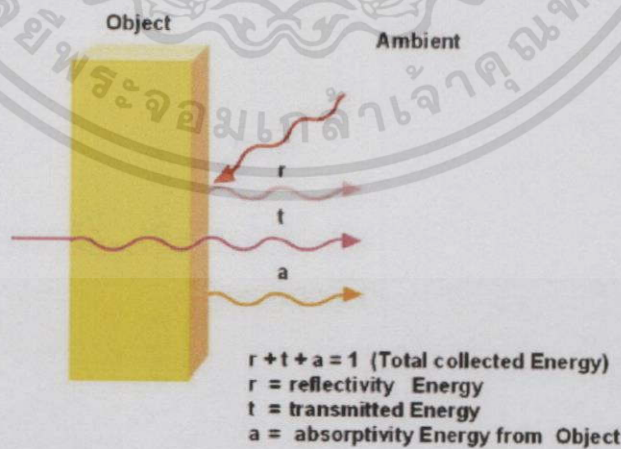
รูปที่ 2.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่นกับอุณหภูมิ

ตัวอย่างนี้แสดงให้เห็นว่า วัตถุร้อนมีพลังงานสูงและแผ่รังสีคลื่นสั้น ส่วนวัตถุเย็นมีพลังงานต่ำและแผ่รังสีคลื่นยาว

สำหรับรังสีอินฟราเรดหรือรังสีความร้อนนั้น ถูกแผ่ออกมาจากพื้นผิวของวัตถุชั้นแรกเท่านั้น ในรูปแบบของพลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า โดยรังสีอินฟราเรดหรือรังสีความร้อนที่ตกกระทบบนพื้นผิววัตถุ บางส่วนถูกดูดกลืน (Absorbed) บางส่วนสะท้อน (Reflected) และบางส่วนทะลุผ่านออกไป (Transmitted) ดังแสดงในรูป 2.4 ซึ่งสัดส่วนเหล่านี้แสดงได้ในรูปของสมการที่ 2.2

$$r + t + a = 1 \tag{2.2}$$

เมื่อกำหนดให้ Absorptivity (a), Reflectivity (r) และ Transmissivity (t)



รูปที่ 2.4 แสดงการถ่ายเทพลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของวัตถุในรูปแบบรังสีอินฟราเรด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อวัตถุอยู่ในสภาพภาวะแวดล้อมที่สมดุล การแผ่พลังงานของรังสีอินฟราเรดของวัตถุมีค่าเท่ากับปริมาณที่ดูดกลืน เป็นผลให้วัตถุที่สามารถดูดกลืนรังสีได้ดีก็สามารถแผ่รังสีได้ดีด้วยสรุปได้ว่า ตัวดูดกลืนรังสีในอุดมคติ (Ideal Absorber) คือ วัตถุที่มีค่า  $a$  (Absorptivity) เป็น 1 และเมื่อกล่าวถึงการแผ่รังสีที่แผ่ออกจากวัตถุโดยต่างจากการดูดกลืนใช้คำว่า  $e$  (Emissivity) แทนการใช้  $a$  (Absorptivity) อย่างไรก็ตามค่าทั้งสองมีความสัมพันธ์กันโดยตรงตามกฎของ Kirchhoff's Law ฉะนั้น  $e=a$

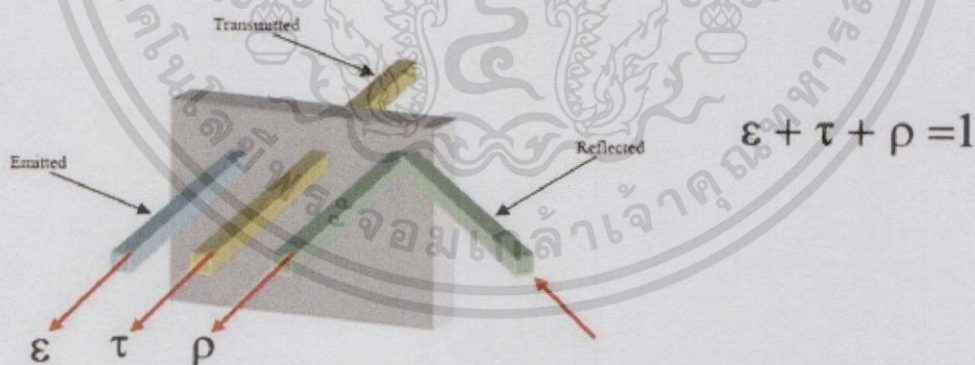


รูปที่ 2.5 Gustav Robert Georg Kirchhoff

จากสมการที่ 2.2 สามารถเขียนใหม่ได้ว่า

$$e + t + r = 1$$

(2.3)



รูปที่ 2.6 แสดงการถ่ายเทพลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของวัตถุในรูปแบบรังสีอินฟราเรด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.1.3 การแผ่รังสีของวัตถุดำ (Blackbody Radiation)

เมื่อกล่าวถึงคุณลักษณะการแผ่รังสีความร้อนบนผิวจริงของวัตถุทั่วไป เป็นต้องเข้าใจแนวความคิดของวัตถุดำเสียก่อน วัตถุดำเป็นผิวทางอุดมคติ ( $a = 1$ ) ซึ่งมีคุณลักษณะดังนี้

- 1) วัตถุดำดูดกลืนรังสีตกกระทบทั้งหมดไว้ไม่มีการสะท้อนกลับโดยไม่คำนึงถึงความยาวคลื่นและทิศทาง
- 2) วัตถุดำแผ่รังสีได้มากกว่าวัตถุอื่นๆ ทุกชนิดที่อุณหภูมิและความยาวคลื่นเดียวกัน
- 3) วัตถุดำแผ่รังสีออกโดยไม่ขึ้นกับทิศทาง นั่นคือ วัตถุดำเป็น diffuse emitter

เนื่องจากวัตถุดำเป็นการแผ่รังสีและตัวดูดกลืนรังสีที่ดีที่สุด (Perfect emitter and absorber) ดังนั้นวัตถุดำจึงเป็นมาตรฐานในการเปรียบเทียบคุณสมบัติการแผ่รังสีของผิววัตถุจริงต่างๆ

สำหรับการคำนวณทางวิศวกรรม ถือว่าคุณสมบัติของผิววัตถุสามารถปล่อยออกเฉลี่ยเท่ากันทุกทิศทางเป็นผลให้ไม่ขึ้นกับทิศทาง ค่า Emissivity ( $e$ ) ขึ้นอยู่กับลักษณะพื้นผิวของวัตถุ การเป็นตัวนำ (Conductor) หรือไม่เป็นตัวนำ (Non-Conductor) โดยทั่วไปค่า Emissivity ของผิวโลหะมีค่าน้อย และถ้าเป็นโลหะผิวมันเงาก็ยังมีค่าน้อยกว่า 0.02 แต่ถ้าทำสีบนแผ่นโลหะนั้นค่าอาจเพิ่มขึ้น และถ้าโลหะมีสนิมก็เพิ่มขึ้นได้เช่นกัน ยกตัวอย่างเช่น  $e = 0.01$  สำหรับเหล็กสแตนเลสมีสนิมเล็กน้อย ถ้ามีสนิมมากจะมีค่าประมาณ 0.5 ส่วนค่าปกติเป็นตัวนำมีค่ามากกว่า 0.6 ขึ้นไป และเพิ่มขึ้นหรือลดลงถ้าอุณหภูมิมีการเปลี่ยนแปลง

ตารางที่ 2.1 แสดงตัวอย่างค่า Emissivity ของพื้นผิววัสดุบางชนิด

Surface	Temperature (°C)	Emissivity
Polished silver	225-625	0.0198-0.0324
Platinum filament	25-1225	0.036-0.192
Polished nickle	23	0.045
Aluminum foil	100	0.087
Concrete	21	0.63
Roofing paper	20	0.91
Plaster	10-88	0.91
Rough red brick	21	0.93
Asbestos paper	38-371	0.93-0.945
Smooth glass	22	0.937
Water	0-100	0.95-0.963
Blackbody		1.00

### 2.1.4 สัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อน (Emissivity, $\epsilon$ )

เป็นค่าที่แสดงถึงความสามารถในการแผ่รังสีความร้อน (thermal radiation) ของวัตถุที่อุณหภูมิใดๆ หรือค่าอัตราส่วนของพลังงานการแผ่รังสีความร้อน (emissive power) ของวัตถุใดๆ กับพลังงานการแผ่รังสีความร้อนของวัตถุดำ ณ อุณหภูมิเดียวกัน ดังแสดงความสัมพันธ์ในสมการที่ 2.4

$$\epsilon(T) = \frac{E(T)}{E_b(T)} \quad (2.4)$$

เมื่อ  $E_b$  คือ ค่าพลังงานการแผ่รังสีความร้อนจากวัตถุดำ (ดังสมการที่ 2.5 และ 2.6)  
 $E$  คือ ค่าพลังงานการแผ่รังสีความร้อนของวัตถุใดๆ (ดังสมการที่ 2.7)

$$E_b(T) = \int_0^\infty \frac{C_1}{\lambda^5 \left[ \exp\left(\frac{C_2}{\lambda T}\right) - 1 \right]} d\lambda \quad (2.5)$$

$$E_b(T) = \sigma T^4 \quad (2.6)$$

$$E(T) = \epsilon \sigma T^4 \quad (2.7)$$

โดยที่  $\sigma$  คือ ค่าคงที่ของสเตฟานโบลท์มานน์ มีค่าเท่ากับ  $5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$

ค่าความสามารถในการแผ่รังสีความร้อน ( $\epsilon$ ) ของวัตถุจริงใดๆ มีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1 โดยวัตถุดำ (blackbody) ซึ่งเป็นวัตถุทางอุดมคติมีความสามารถในการแผ่รังสีความร้อนสูงที่สุดมีค่า  $\epsilon$  เท่ากับ 1

ค่า  $\epsilon$  ขึ้นอยู่กับชนิดของวัตถุ ลักษณะพื้นผิวของวัตถุ และอุณหภูมิที่ผิวของวัตถุ ตัวอย่างค่า  $\epsilon$  ของวัสดุชนิดต่าง ๆ แสดงในตาราง 2.2

ตารางที่ 2.2 แสดงค่าความสามารถในการแผ่รังสีความร้อน ( $\epsilon$ ) ของพื้นผิววัสดุบางชนิด

Material's Surface	Wavelength ( $\lambda$ : $\mu\text{m}$ )	Temperature (K)	Emissivity ( $\epsilon$ )	References
Aluminum; Oxidized		273-373	0.11	Fraden, 2010
Aluminum; Polished		273-373	0.05	Fraden, 2010
Aluminum; Rough		273-373	0.06-0.07	Fraden, 2010
Brass; Oxidized	9.3		0.61	Rao, 2010
Brass; Polished	5.4-9.3		0.10	Rao, 2010
Copper; Oxidized		298	0.78	Fogiel, 1992
Copper; Polished		390	0.023	Fogiel, 1992
Iron; Cast, Oxidized	3.6-9.3		0.63-0.76	Rao, 2010
Iron; Oxidized	9.3		0.96	Rao, 2010
Iron; Polished	3.6-9.3		0.06-0.13	Rao, 2010
Stainless Steel; Types 304		489	0.44	Fogiel, 1992
Stainless Steel; Types 316; Polished			0.28	Amidon, 1999
Bread	10		>0.80	Kress-Rogers and Brimelow, 2005
Chocolate	10		0.85	Kress-Rogers and Brimelow, 2005
Coke	8-13		0.95-1.00	Bentley, 1998
Ice; Rough		300	0.99	Brewster, 1992
Ice; Smooth		300	0.97	Brewster, 1992
Paper		300	0.90-0.98	Brewster, 1992
Vegetation		300	0.92-0.96	Brewster, 1992
Water	9.3		0.96	Rao, 2010

(ที่มา: นวกัทรรา และ ทวีพล, 2555)

ค่า  $\epsilon$  เป็นปัจจัยหนึ่งที่ส่งผลต่อความถูกต้อง (accuracy) ของการวัดอุณหภูมิ (temperature measurement) ด้วยไพโรมิเตอร์ชนิดอาศัยการแผ่รังสีความร้อน (thermal radiation pyrometer) และไพโรมิเตอร์ชนิดอาศัยการแผ่รังสีอินฟราเรด (infrared pyrometer) โดยต้องกำหนดค่าของ  $\epsilon$  ให้เหมาะสมกับชนิดและลักษณะพื้นผิวของวัตถุที่ต้องการวัดอุณหภูมิ เพื่อให้ค่าอุณหภูมิของวัตถุที่วัดได้มีค่าใกล้เคียงกับค่าที่แท้จริง ซึ่งเครื่องมือวัดอุณหภูมิชนิดอาศัยการแผ่รังสีความร้อนเป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แผ่นรังสีที่ดีควรมีฟังก์ชันการใช้งานที่สามารถปรับค่า  $\epsilon$  ให้เหมาะสมกับชนิดและลักษณะพื้นผิวของวัตถุได้

## 2.2 Active Thermography

สำหรับวิธีการประยุกต์ใช้งาน จำเป็นต้องมีแหล่งกระตุ้นความร้อนให้กับวัตถุที่ทำการวัดและทดสอบแหล่งกระตุ้นความร้อน ในที่นี้ได้แก่ แสงเลเซอร์ กระแสหมุนวนหรืออัลตราโซนิกเป็นต้น นิยมใช้มากในการวัดทดสอบแบบไม่ทำลาย (Non-destructive testing) โดยปกติใช้กับการทดสอบวัตถุที่ช่วงอุณหภูมิต่ำประมาณ 20-50 °C ซึ่งใช้แหล่งกระตุ้นความร้อนที่อุณหภูมิเพียงเล็กน้อย การทดสอบแบบนี้มีอยู่ด้วยกันหลายวิธีคือ Pulsed Thermography, Lock-In Thermography และ Thermo-inductive

### 2.2.1 Pulsed Thermography

วิธีนี้ใช้การกระตุ้นด้วยความร้อนเป็นเวลาสั้นๆ ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของพื้นผิววัสดุ เช่น พวกเหล็กมีค่าการนำความร้อนสูงใช้เวลาเพียงไม่กี่มิลลิวินาที ส่วนวัสดุประเภทพลาสติกหรือโลหะใช้เวลาเป็นวินาที ตัวอย่างการใช้งานในการทดสอบตะเข็บรอยเชื่อม (Weld Seam Testing) ซึ่งสามารถออกแบบระบบตรวจสอบให้เป็น in-line quality control ได้ในแบบอัตโนมัติเพื่อใช้ในการหารอยเชื่อมที่ไม่สมบูรณ์ จากตัวอย่างในรูปที่ 2.7 นั้นแสดงให้เห็นว่า รอยเชื่อมที่ดีต้องมีการประติดประต่อกันตลอดแนว ซึ่งในการทดสอบนี้ภาพถ่ายความร้อนที่ได้ถูกนำมาทำการวิเคราะห์โดยใช้การประมวลผลภาพ (Image processing) เข้าร่วมด้วย

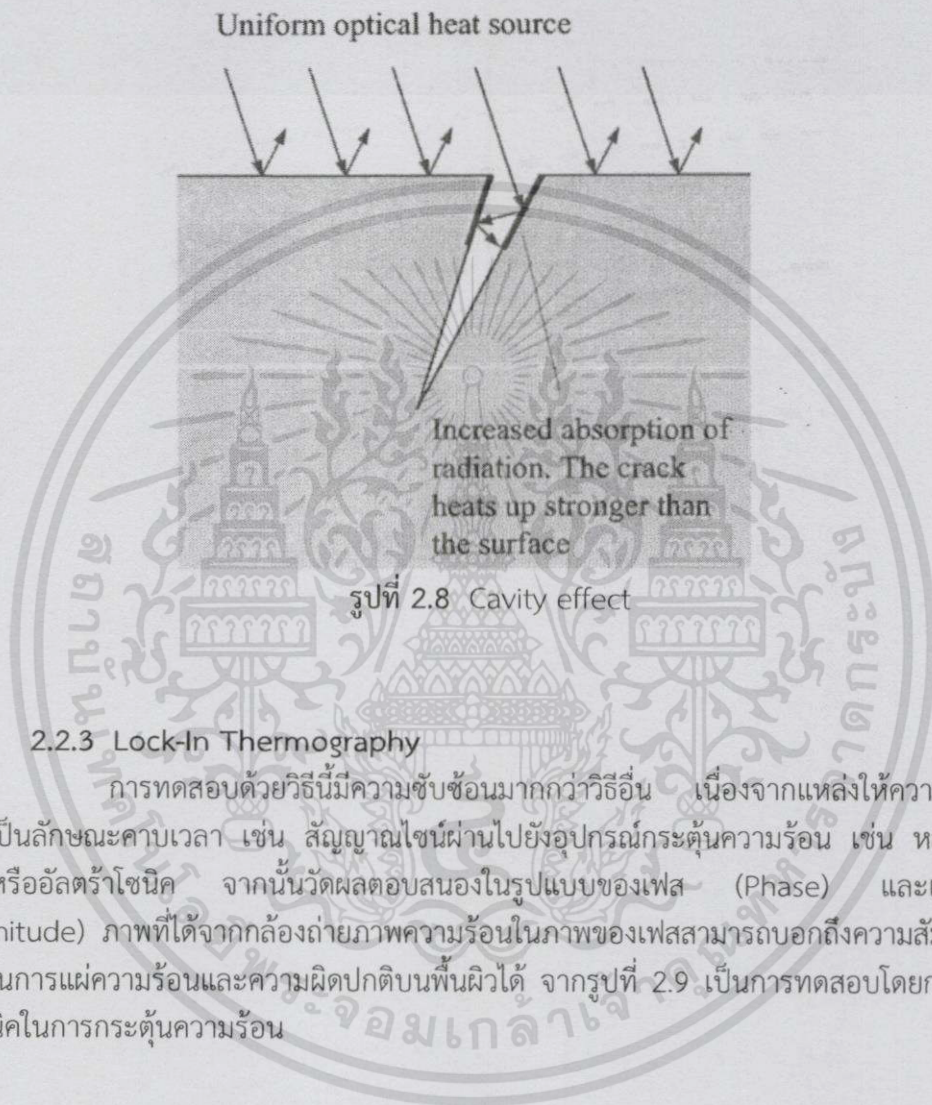


รูปที่ 2.7 การตรวจสอบรอยตะเข็บจากการเชื่อม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.2.2 Cavity Absorption Thermography

วิธีนี้ใช้ได้กับรอยแตกร้าวของโลหะที่เป็นช่องเปิดเนื่องจากว่าค่า Emissivity และค่า Absorption ของช่องว่างที่เกิดขึ้นมีค่ามากกว่าพื้นผิวปกติ ดังนั้นจึงทำให้สามารถตรวจสอบได้ว่ามีรอยแตกร้าวเกิดขึ้น โดยในบริเวณดังกล่าวมีลักษณะที่คล้ายกับว่ามีอุณหภูมิสูงกว่าบริเวณอื่นๆ วิธีนี้สามารถใช้ได้ทั้งแบบ Passive Thermography และ Active Thermography



### 2.2.3 Lock-In Thermography

การทดสอบด้วยวิธีนี้มีความซับซ้อนมากกว่าวิธีอื่น เนื่องจากแหล่งให้ความร้อนต้องป้อนเป็นลักษณะคาบเวลา เช่น สัญญาณไซน์ผ่านไปยังอุปกรณ์กระตุ้นความร้อน เช่น หลอดไฟฮีตเตอร์หรืออัลตราโซนิก จากนั้นวัดผลตอบสนองในรูปแบบของเฟส (Phase) และแอมพลิจูด (Magnitude) ภาพที่ได้จากกล้องถ่ายภาพความร้อนในภาพของเฟสสามารถบอกถึงความสัมพันธ์ของเวลาในการแผ่ความร้อนและความผิดปกติบนพื้นผิวได้ จากรูปที่ 2.9 เป็นการทดสอบโดยการใช้อัลตราโซนิกในการกระตุ้นความร้อน

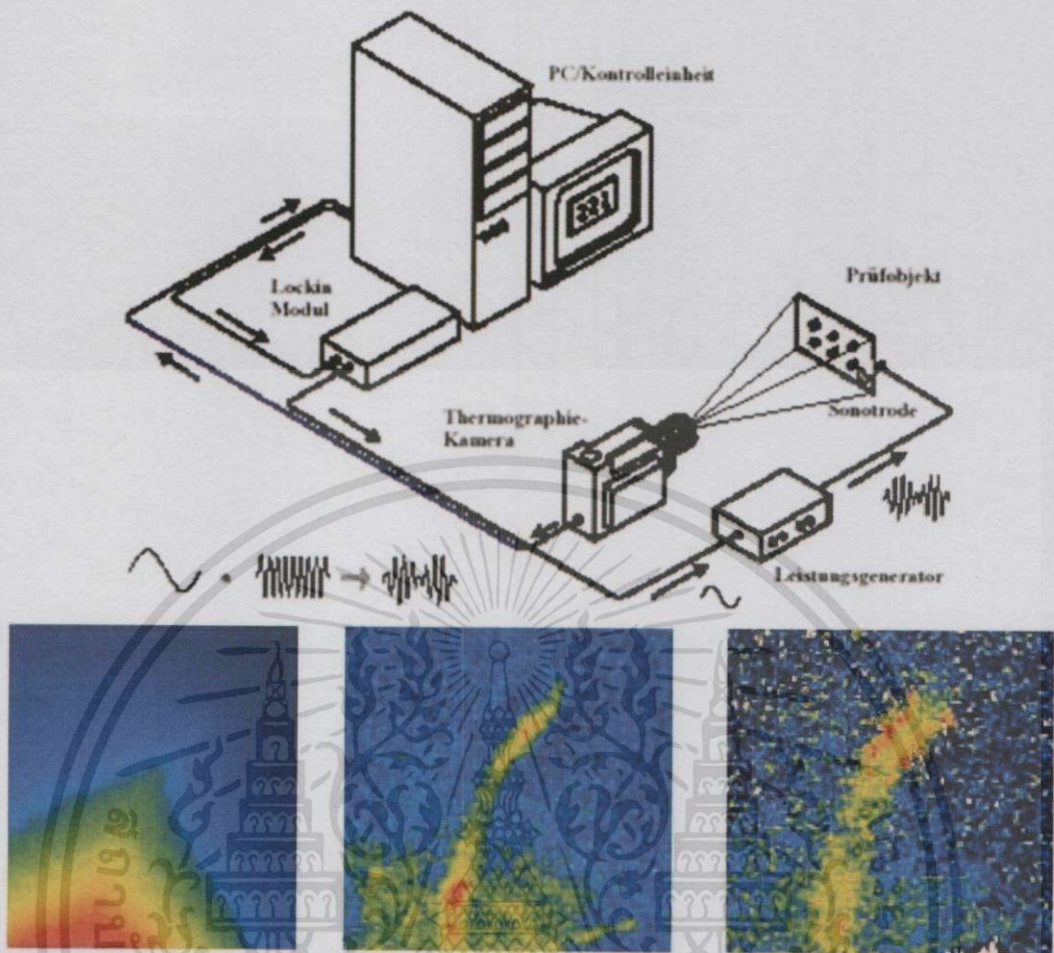
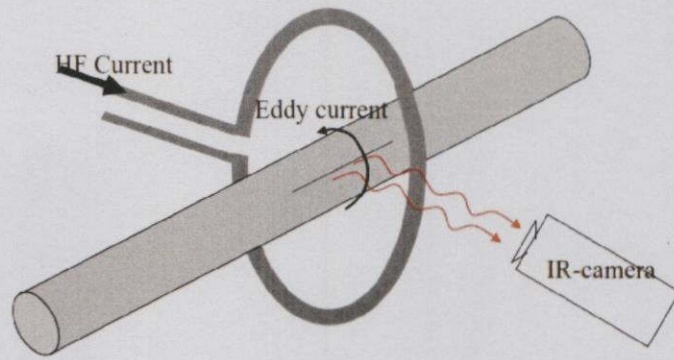


Bild 9: Rißdetektion in Keramikbauteil mit modulierter Ultraschallanregung (40 kHz). Links das Thermographiebild, in der Mitte das Amplitudenbild und rechts das Phasenbild bei jeweils 0,03 Hz.

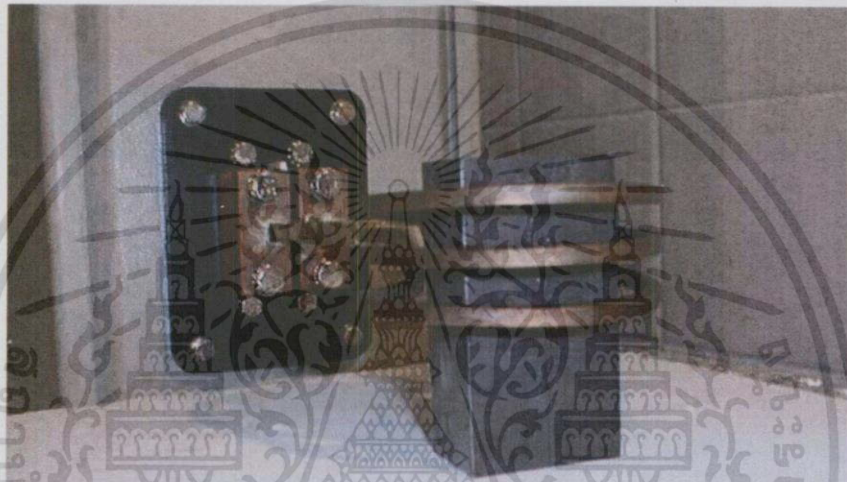
รูปที่ 2.9 Lock-In Thermography

#### 2.2.4 Thermo-inductive Testing

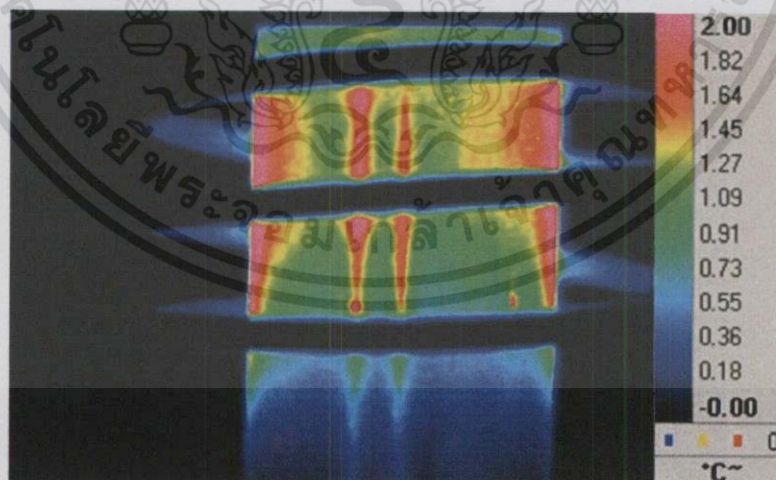
วิธีนี้อาศัยการกระตุ้นความร้อนเพียงเล็กน้อยกับเหล็กโดยใช้ กระแสหมุนวนหรือ Eddy Current โดยปกติแล้วการทดสอบผิวของโลหะใช้หลักการของ Eddy Current ในการตรวจสอบรอยแตกร้าวบนเนื้อโลหะ อย่างไรก็ตาม ไม่สามารถทราบรูปร่างและขนาดของรอยร้าวที่เกิดขึ้นได้ การใช้วิธี Thermo-inductive คือหลักการให้ความร้อนโดยการเหนี่ยวนำและใช้กล้องถ่ายภาพความร้อนตรวจหาลักษณะรอยร้าวบนพื้นผิวโลหะ บริเวณที่มีรอยร้าวจะมีกระแสไหลมากกว่าปกติ จึงทำให้มีอุณหภูมิสูงกว่าบริเวณอื่น การประยุกต์ใช้เทคนิคในการประมวลผลภาพจากกล้องถ่ายภาพความร้อนนั้น ทำให้สามารถนำมาพัฒนาและออกแบบระบบตรวจสอบคุณภาพแบบอัตโนมัติได้



รูปที่ 2.10 หลักการของ Thermo-inductive



รูปที่ 2.11 การให้ความร้อน Thermo-inductive



รูปที่ 2.12 ภาพถ่ายความร้อน Thermo-inductive

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.3 ความจุความร้อน

ความจุความร้อนจำเพาะ (Specific Heat) คือ ปริมาณความร้อนที่พอที่จะทำให้วัตถุมวล 1 หน่วย มีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นหรือลดลงจากเดิม 1 °C มีหน่วยเป็นหน่วยปริมาณความร้อนต่อหน่วยมวลต่อหน่วยอุณหภูมิ เช่นแคลอรีต่อกรัมต่อองศาเซลเซียส กิโลแคลอรีต่อกิโลกรัมต่อองศาเซลเซียส หรือจูลต่อกิโลกรัมต่อเคลวิน สำหรับสมการของการหาความร้อนสำหรับปริมาณความร้อนแฝงมีรูปทั่วไปคือ

$$q = m \int_{T_1}^{T_2} c_p dT \quad (2.8)$$

Aviara and Haque, (2000) ได้หาค่าความชื้นเริ่มต้นของเมล็ดพืชตัวอย่าง ตัวอย่างละ 3 ชุด โดยอบเมล็ดพืชตัวอย่างเป็นเวลา 2.30 ชั่วโมง จากนั้นนำเมล็ดพืชตัวอย่างใส่ในโถดูดความชื้น ประมาณ 2 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำมาคำนวณหาความชื้นจากสมการที่ 2.9

$$\% \text{moisture} = \frac{\text{mass}_{\text{start}} - \text{mass}_{\text{final}}}{\text{mass}_{\text{overall}}} \times 100 \quad (2.9)$$

ต่อมาทำการหาค่าความจุความร้อนโดยขั้นแรกผสมน้ำกับน้ำแข็งในภาชนะ ที่ไว้จนวนอุณหภูมิ คงที่แล้วทำการวัดอุณหภูมิ จากนั้นวัดอุณหภูมิเริ่มต้นของตัวอย่าง นำตัวอย่างที่วัดอุณหภูมิแล้วใส่ลงในแคลอรีมิเตอร์พร้อมทั้งนำน้ำเย็นใส่ลงในแคลอรีมิเตอร์ จากนั้นใส่เทอร์โมมิเตอร์เพื่อวัดอุณหภูมิ พร้อมทั้งใช้ไม้กวนน้ำจนวนอุณหภูมิที่อ่านได้จากเทอร์โมมิเตอร์คงที่ จากนั้นสามารถคำนวณค่าความจุความร้อนของตัวอย่าง ได้จากสมการที่ 2.10

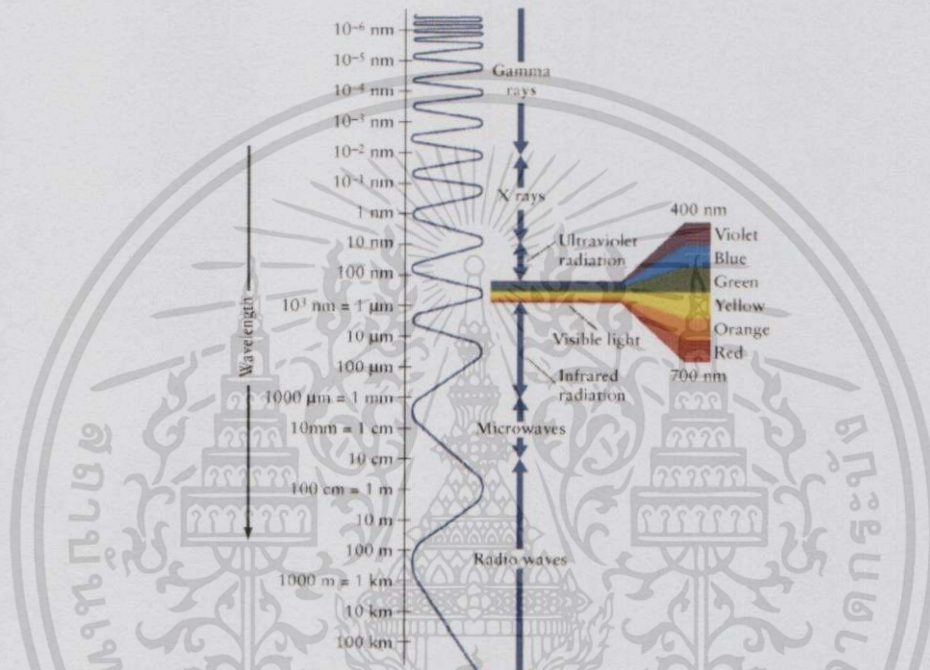
$$C_{p \text{ sample}} = \frac{(\text{mass}_{\text{water}})(c_{p \text{ water}})(T_{\text{mixture}} - T_{\text{water}})}{(\text{mass}_{\text{sample}})(T_{\text{sample}} - T_{\text{mixture}})} \quad (2.10)$$

ตารางที่ 2.3 ตัวอย่างค่าความจุความร้อนของสิ่งแปลกปลอมและเมล็ดพืช

ชนิด	ค่าความจุความร้อน (kJ/kg K)	ที่มา
ไม้	1.26 – 2.9	Tan
หิน	0.46 – 0.9	Tan
ถั่วลิสง	1.926 – 2.912	ASHRAE (1989)
ถั่วแดง	3.660 – 3.326	Fillaudeau et al, (2006)
พลาสติก	1.731 ± 8.5	Bouendene et al, (2005)

## 2.4 แสง

แสงเป็นพลังงานรูปหนึ่ง เคลื่อนที่ได้ โดยการเคลื่อนที่ของพลังงานแสงอยู่ในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งมีช่วงความยาวคลื่นอยู่ระหว่าง 380-760 nm ช่วงความยาวคลื่นของพลังงานแสงดังกล่าวช่วยทำให้เกิดการมองเห็น ส่วนพลังงานรูปอื่น เช่น รังสีอัลตราไวโอเล็ต, รังสีเอกซ์ที่มีความยาวคลื่นสั้นกว่า 380 nm หรือคลื่นวิทยุ, คลื่นโทรทัศน์และพลังงานไฟฟ้าที่มีช่วงความยาวคลื่นยาวกว่า 760 nm พลังงานเหล่านี้มิได้ช่วยให้เกิดการมองเห็น ซึ่งแสงนั้นแสดงได้ทั้งคุณสมบัติของคลื่น และคุณสมบัติของอนุภาค

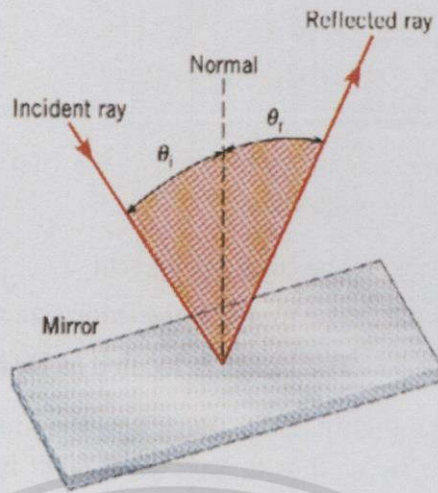


รูปที่ 2.13 สเปกตรัมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

### 2.4.1 คุณสมบัติเชิงคลื่นของแสง

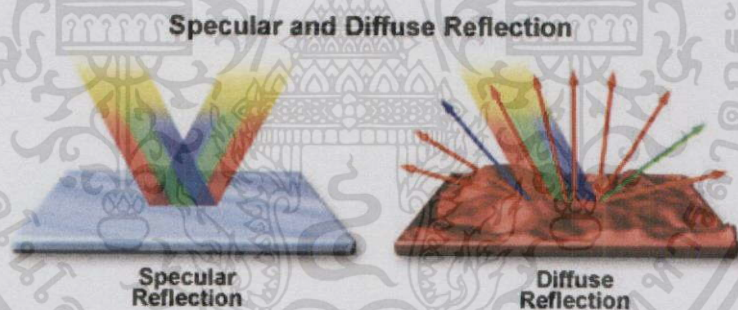
#### 2.4.1.1 การสะท้อนของแสง

การสะท้อนของแสงเป็นสมบัติของแสงเชิงเรขาคณิต ถ้าแสงเดินทางไปกระทบวัตถุที่บดแสงผิวข่มัน แสงจะเปลี่ยนทิศทางไป ณ ตำแหน่งผิวข่มันที่แสงกระทบโดยแสงย้อนกลับในตัวกลางเดิมเรียกการเปลี่ยนแปลงนี้ว่า การสะท้อน (reflection)



รูปที่ 2.14 การสะท้อนของแสงกับผิวสะท้อนราบ

การสะท้อนของแสงกับวัตถุผิวขรุขระหรือวัตถุทั่วไปนั้น วัตถุเหล่านั้นจะดูดกลืนแสงไว้ส่วนหนึ่ง ส่วนที่เหลือจะสะท้อน ถ้าเกิดการสะท้อนกับกระจกเงาแสงจะสะท้อนทั้งหมดโดยไม่ถูกดูดกลืน การที่ตามองเห็นวัตถุต่างๆได้ เนื่องจากมีแสงไปกระทบวัตถุนั้นแล้วแสงสะท้อนเข้าสู่ตา การที่แสงสะท้อนวัตถุเป็นไปตามกฎการสะท้อนของคลื่น คือ มุมตกกระทบเท่ากับมุมสะท้อน โดยรังสีตกกระทบ รังสีสะท้อนและเส้นปกติต้องอยู่บนระนาบเดียวกัน

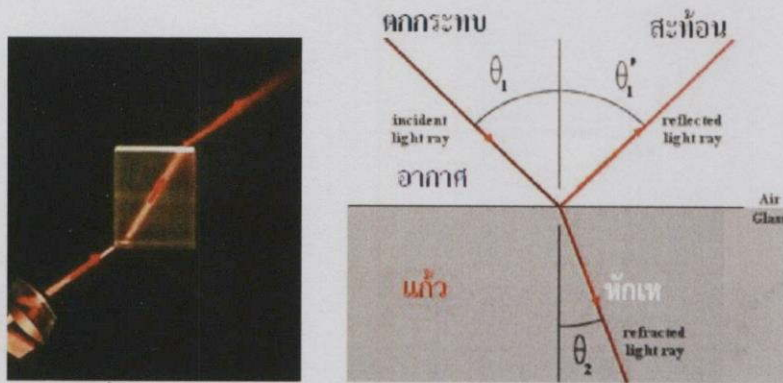


รูปที่ 2.15 เปรียบเทียบรังสีสะท้อนบนผิวเรียบและผิวขรุขระทำให้เห็นภาพสะท้อนที่แตกต่างกัน

ในการสะท้อนของแสงกับผิวของวัตถุ ถ้าผิวของวัตถุเรียบแสงที่สะท้อนออกมาจะเป็นระเบียบ ภาพที่มองเห็นจากการสะท้อนจึงชัดเจน แต่ถ้าผิวสะท้อนขรุขระ รังสีสะท้อนจะไม่เป็นระเบียบ มองเห็นภาพจากการสะท้อนไม่ชัด

#### 2.4.1.2 การหักเหของแสง

การหักเหของแสงเกิดจากการที่แสงเคลื่อนที่ผ่านตัวกลางที่มีความหนาแน่นต่างกัน เป็นผลทำให้อัตราเร็วแสงเปลี่ยนแปลงไป ความยาวคลื่นแสงเปลี่ยนแปลง ทิศทางของแสงเปลี่ยนแปลงไปด้วยโดยความถี่คงที่ ซึ่งในขณะที่แสงเกิดการหักเหจะเกิดการสะท้อนของแสงขึ้นพร้อมๆ กันด้วย ดังรูป 2.16



รูปที่ 2.16 แสดงการหักเหของแสงเมื่อผ่านตัวกลางที่ต่างกัน

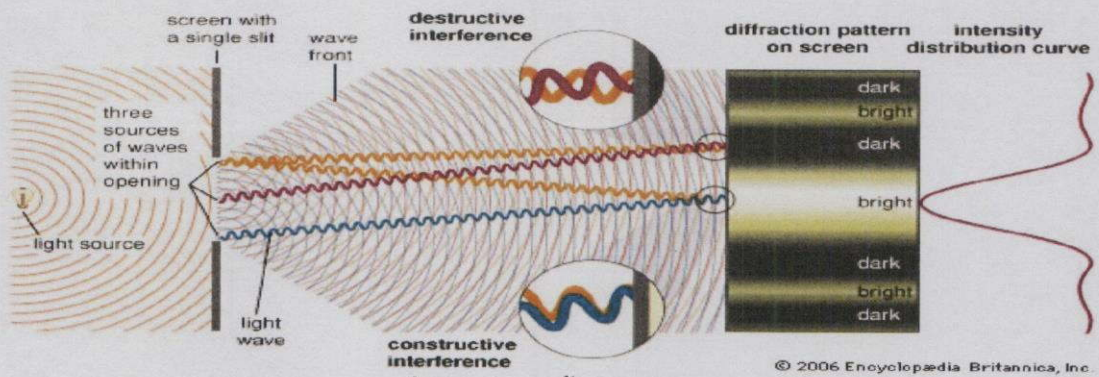
จากรูปที่ 2.16 เมื่อแสงเดินทางผ่านอากาศ (ตัวกลางที่ 1) มีค่าดัชนีหักเห  $n_1$  ไปยังแก้ว (ตัวกลางที่ 2) มีค่าดัชนีหักเห  $n_2$  เห็นได้ว่ารังสีของแสงที่เข้าไปในตัวกลางที่ 2 มีแนวทางการเปลี่ยนไปจากแนวรังสีตกกระทบเดิม แสงจะเกิดการหักเห โดยถ้าให้  $\theta_1$  คือมุมที่รังสีตกกระทบทำกับเส้นปกติ และ  $\theta_2$  คือมุมที่รังสีหักเหทำกับเส้นปกติ เรียกว่ามุมหักเห (angle of refraction) จากกฎของสเนลล์ ได้ความสัมพันธ์ระหว่างมุมตกกระทบ ( $\theta_1$ ) และมุมหักเห ( $\theta_2$ ) และค่าดัชนีหักเหในตัวกลางทั้งสอง  $n_1$  และ  $n_2$  ดังสมการที่ 2.11

$$\frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{n_2}{n_1} \quad (2.11)$$

การหักเหของแสงเกิดขึ้นตรงผิวรอยต่อของตัวกลาง ลักษณะการหักเหของแสง เมื่อแสงเคลื่อนที่จากตัวกลางที่มีความหนาแน่นน้อยเข้าสู่ตัวกลางที่มีความหนาแน่นมากกว่า แสงจะหักเหเข้าหาเส้นปกติ ในทางตรงกันข้ามถ้าแสงเคลื่อนที่จากตัวกลางที่มีความหนาแน่นมากเข้าสู่ตัวกลางที่มีความหนาแน่นน้อยกว่า แสงจะหักเหออกจากเส้นปกติ

#### 2.4.1.3 การเลี้ยวเบนของแสง

การเลี้ยวเบนของแสงเกิดขึ้นได้ เมื่อแสงจากแหล่งกำเนิดแสงอาพันธ์เดินทางผ่านช่องแคบที่มีขนาดเล็กใกล้เคียงกับความยาวคลื่นแสง ทุกๆ จุดบนช่องเดี่ยว (single slit) ทำหน้าที่เป็นแหล่งกำเนิดแสงใหม่ ตามหลักของฮอยเกน แสงจากแหล่งกำเนิดแสงใหม่จะเกิดการซ้อนทับกันบนฉาก ทำให้เห็นเป็นแถบมืดและแถบสว่าง

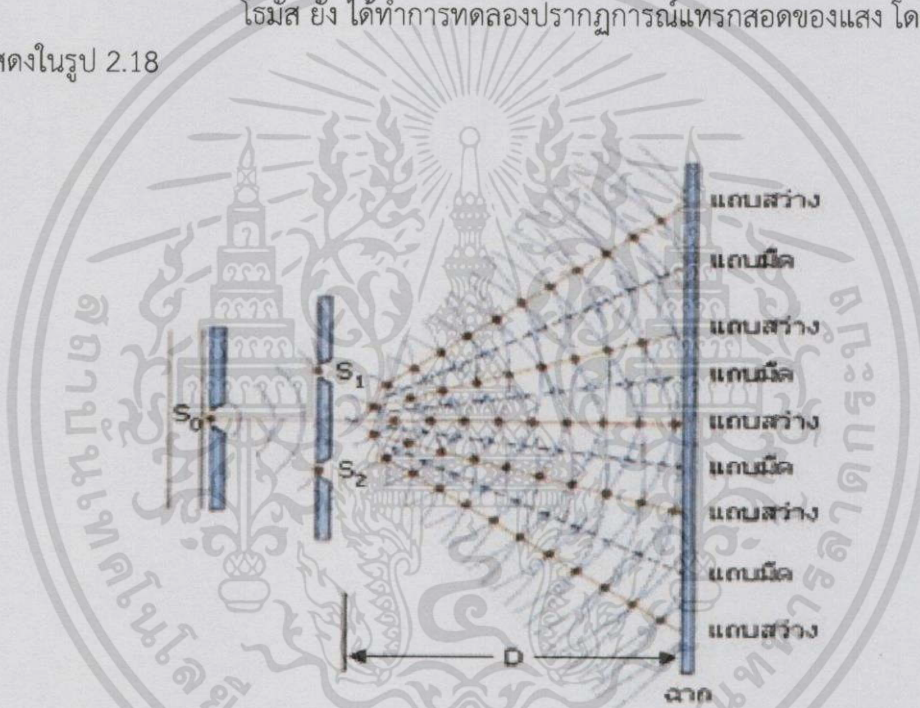


© 2006 Encyclopædia Britannica, Inc.

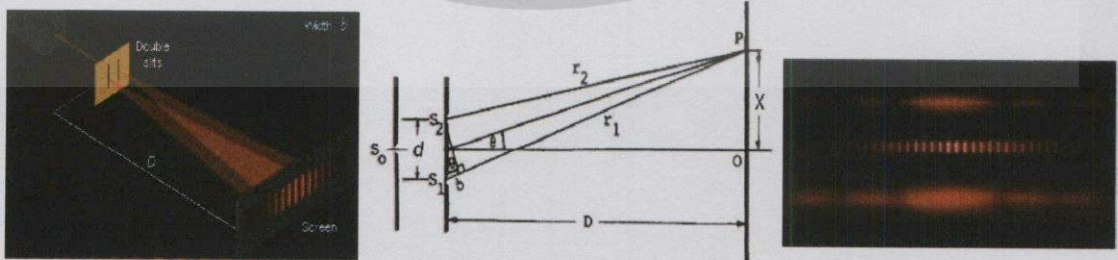
รูปที่ 2.17 การเลี้ยวเบนของแสง

2.4.1.4 การแทรกสอดโรมัส ยัง (Thomas Young)

โรมัส ยัง ได้ทำการทดลองปรากฏการณ์แทรกสอดของแสง โดยใช้อุปกรณ์ดังแสดงในรูป 2.18



รูปที่ 2.18 การแทรกสอดของแสง



รูปที่ 2.19 การทดลองปรากฏการณ์แทรกสอดของแสง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

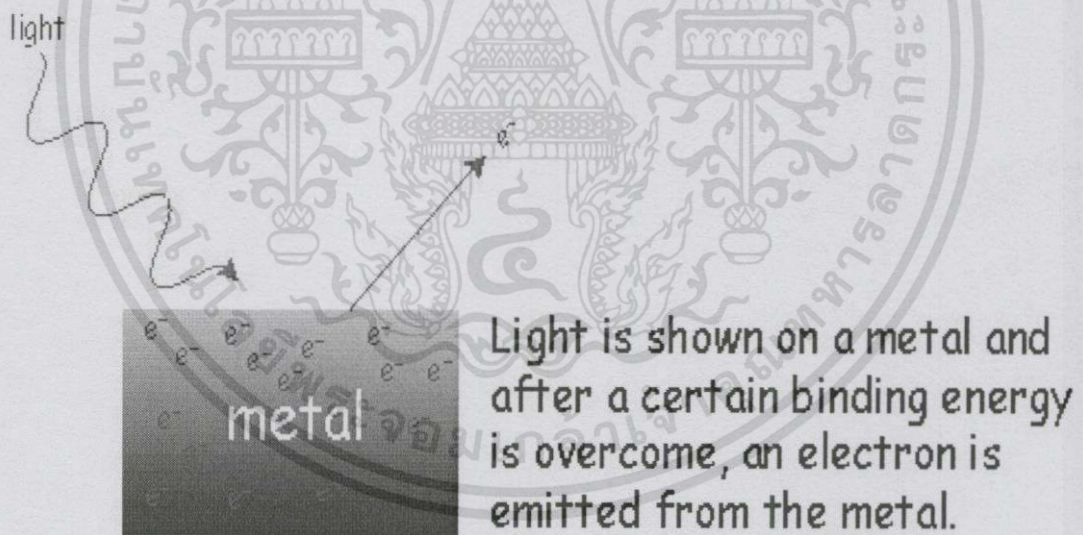
เมื่อให้แสงสีเดียวผ่านช่องแคบ  $S_0$  แล้วเลี้ยวเบนตกลงบนช่องแคบ  $S_1$  และ  $S_2$  ช่องแคบ  $S_1$  และ  $S_2$  ทำหน้าที่เสมือนแหล่งกำเนิดคลื่นอาพันธ์ ในการทดลองใช้แผ่นสลิตคู่ (Double slits) เมื่อคลื่นแสงทั้งสองเดินทางไปพบกันทำให้เกิดการแทรกสอดกัน ในลักษณะเสริมและหักล้างกันบนฉาก ทำให้ปรากฏเป็นแถบมืดและแถบสว่างบนฉาก

จากรูป 2.19 แถบสว่างที่เกิดจากการแทรกสอดของแสงอยู่ใกล้กันมาก ดังนั้น ถ้าวัดมุม  $\theta$  เป็นมุมเล็กมาก ได้ว่า

$$\sin\theta \cong \tan\theta = \frac{X}{D} \quad (2.12)$$

#### 2.4.2 คุณสมบัติเชิงอนุภาคของแสง

ปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริกเป็นปรากฏการณ์ที่แสดงถึงคุณสมบัติเชิงอนุภาคของแสง ซึ่งไอน์สไตน์เป็นบุคคลแรกที่สามารถอธิบายปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริกได้ โดยต้องพิจารณาว่าแสงมีลักษณะเป็นก้อนๆ เรียกว่าโฟตอนวิ่งมาชนผิวของโลหะ แล้วถ่ายทอดโมเมนตัมให้กับอิเล็กตรอน ซึ่งพลังงานของแสงที่วิ่งมาชนขึ้นอยู่กับความถี่ของแสง นั่นคือแสงสีม่วงมีพลังงานมากกว่าแสงสีแดงโดยที่ปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริกสามารถอธิบายได้ดังนี้ เมื่อฉายแสงไปตกกระทบที่ผิวของโลหะแล้วทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกมา โดยพลังงานจลน์ของอิเล็กตรอนที่หลุดออกมาไม่ขึ้นอยู่กับความเข้ม (แอมพลิจูด) ของแสง แต่ขึ้นอยู่กับความถี่ เรียกปรากฏการณ์ดังกล่าวว่า ปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก



รูปที่ 2.20 ปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก

#### 2.5 กล้องถ่ายภาพความร้อน

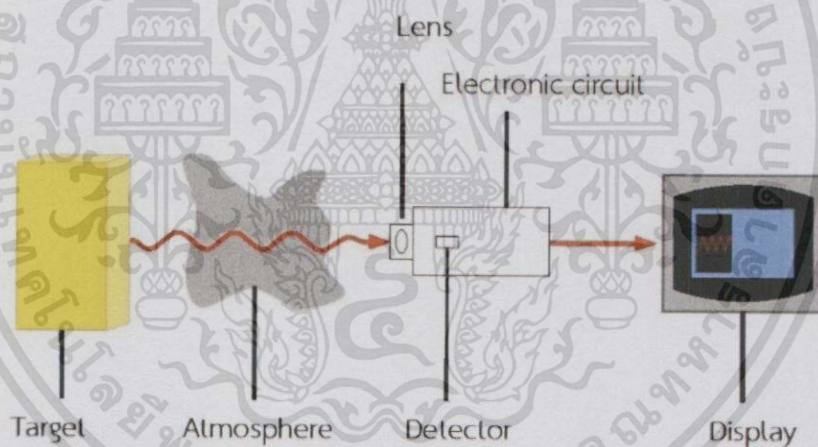
กล้องถ่ายภาพความร้อน (thermal image camera หรือ thermal imager หรือ TI - camera) หรือกล้องถ่ายภาพอินฟราเรด หรือ กล้องอินฟราเรด (infrared thermography) เป็นเครื่องมือวัดอุณหภูมิที่ผิวของวัตถุ ทำงานโดยอาศัยหลักการแผ่รังสีอินฟราเรด (infrared radiation) ออกจากวัตถุ ซึ่งเป็นการวัดแบบไม่สัมผัส ไม่ทำลายวัตถุ และเป็นการวัดอุณหภูมิแบบพื้นที่ ส่วนประกอบที่สำคัญของกล้องถ่ายภาพความร้อน ประกอบด้วย เลนส์ (lens), ตัวตรวจจับรังสี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อินฟราเรด (infrared detector) หรือเซนเซอร์ชนิดอินฟราเรด (Infrared sensor), วงจรอิเล็กทรอนิกส์ (electronic circuit) และส่วนแสดงผล (display)

หลักการการทำงานมีดังนี้ ตัวตรวจจับรังสีอินฟราเรด ทำหน้าที่รับรังสีอินฟราเรด (infrared) ที่แผ่ออกมาจากวัตถุเป้าหมาย (target) ผ่านเลนส์ของเครื่องมือวัด (instrument) แล้วแปลงรังสีอินฟราเรดเหล่านี้ให้อยู่ในรูปของสัญญาณทางไฟฟ้า โดยที่รังสีอินฟราเรดที่ตัวตรวจจับรับไปนั้นประกอบด้วย รังสีที่วัตถุเป้าหมายแผ่ออกมารวมกับรังสีที่แผ่จากวัตถุอื่นหรือจากสิ่งแวดล้อมสะท้อนออกจากผิวของวัตถุเป้าหมาย (ตามทฤษฎีการแผ่รังสีความร้อน: Theory of thermal radiation) จากนั้นวงจรอิเล็กทรอนิกส์จะทำหน้าที่แปลงข้อมูลที่รับมาจากตัวตรวจจับ และนำไปแสดงที่ตัวแสดงผล ซึ่งอาจแสดงผลออกมาในรูปแบบของตัวเลข สี หรือกราฟ หรือทั้ง 3 รูปแบบ

กล้องถ่ายภาพความร้อนประกอบด้วยเซนเซอร์ชนิดอินฟราเรดหลายตัว แต่ละตัวแสดงผลออกมาในรูปแบบของสีที่แตกต่างกันตามอุณหภูมิของจุดนั้นๆ โดยทั่วไป สีแดงแสดงผลของบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงและสีน้ำเงินแสดงผลของบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำ หรือโทนสีสว่างแสดงผลของบริเวณที่มีอุณหภูมิสูง และโทนสีมืดแสดงผลของบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำ ผลของแต่ละจุดที่ได้จากเซนเซอร์แต่ละตัว เมื่อนำมารวมกันประกอบขึ้นเป็นภาพ เรียกว่า “ภาพถ่ายความร้อน” (thermal image) ซึ่งการแปลงรังสีอินฟราเรดที่เซนเซอร์ตรวจจับได้ให้อยู่ในหน่วยของอุณหภูมิ อาศัยกฎของ Planck (Planck's law) และกฎของ Stefan-Boltzmann (Stefan-Boltzmann's law)



รูปที่ 2.21 ระบบการวัดอุณหภูมิโดยอาศัยการแผ่รังสีอินฟราเรดของวัตถุ

(ที่มา: นวภัทรา และ ทวีพล , 2555)

ความถูกต้อง (accuracy) ของอุณหภูมิที่วัดได้จากกล้องถ่ายภาพความร้อนขึ้นอยู่กับ

- 1) ชนิดและลักษณะพื้นผิวของวัตถุเป้าหมายหรือวัตถุที่ต้องการวัดอุณหภูมิ
- 2) ระยะห่างระหว่างเครื่องมือวัดและวัตถุเป้าหมาย โดยค่าความคลาดเคลื่อน (error) อาจเกิดจากการเคลื่อนที่ของรังสีผ่านตัวกลาง เช่น อากาศที่มี ไอน้ำ คาร์บอน ไดออกไซด์ หรือฝุ่นละอองกระจายอยู่ สิ่งต่างๆ เหล่านี้ดูดซับพลังงานบางส่วนจากรังสีก่อนถึงตัวเครื่องมือวัด ทำให้พลังงานที่เซนเซอร์ (sensor) ตรวจจับได้มีค่าลดลง ค่าที่วัดได้จึงคลาดเคลื่อน
- 3) พื้นที่การวัด หรือ ค่าขอบเขตการมองเห็นวัตถุ (field of view, FOV) ของกล้องถ่ายภาพความร้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

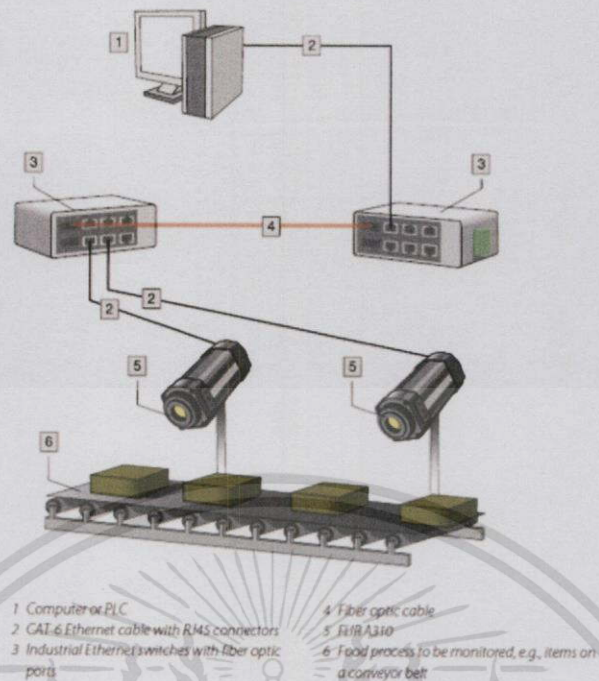
ตัวอย่างการประยุกต์ใช้งานกล้องถ่ายภาพความร้อนในอุตสาหกรรมอาหาร ได้แก่

1. การตรวจสอบสภาพของฉนวนความร้อน เช่น ฉนวนห้องเย็น (cold storage) หรือห้องแช่แข็ง (freezer) ฉนวนหุ้มหม้อฆ่าเชื้อ (retort) และฉนวนหุ้มท่อไอน้ำด้วยกล้องถ่ายภาพความร้อน ซึ่งสามารถใช้ตรวจหาความผิดปกติได้อย่างรวดเร็ว โดยแสดงผลเป็นภาพถ่ายความร้อน ตัวอย่างการแปลผลการตรวจสอบสภาพฉนวนห้องเย็นด้วยกล้องถ่ายภาพความร้อน ได้แก่ การถ่ายภาพความร้อนจากภายนอกห้องเย็นแล้วปรากฏพื้นที่บางบริเวณของผนังมีอุณหภูมิต่ำกว่าผนังส่วนอื่น หรือการถ่ายภาพความร้อนภายในห้องเย็นแล้วปรากฏพื้นที่บางบริเวณมีอุณหภูมิสูง สามารถแปลผลได้ว่าอาจเกิดการเสื่อมสภาพของฉนวนที่บริเวณนั้น

2. การตรวจสอบการทำงานของมอเตอร์ ที่อยู่ในกระบวนการผลิตด้วยกล้องถ่ายภาพความร้อนเป็นการตรวจสอบแบบพื้นที่ โดยความผิดปกติที่เกิดขึ้นอาจแสดงในรูปของเฉดสีแดงปรากฏในภาพถ่ายความร้อน อย่างไรก็ตามการแปลผลที่ได้จากเครื่องมือวัดเพื่อประเมินความผิดปกติดังกล่าวควรอาศัยข้อมูลอื่นเพิ่มเติมเพื่อประกอบการตัดสินใจ

3. การวัดอุณหภูมิของผู้ปฏิบัติงานในสายการผลิตอาหารด้วยกล้องถ่ายภาพความร้อน ซึ่งเป็นการวัดแบบไม่สัมผัส ซึ่งในอุตสาหกรรมอาหารหากผู้ปฏิบัติงานมีอาการเจ็บป่วยโดยไม่แสดงอาการให้สังเกตเห็น สามารถใช้เครื่องมือวัดอุณหภูมิช่วยตรวจสอบได้ เพื่อป้องกันการแพร่กระจายเชื้อโรคจากคนไปสู่อาหาร โดยนิยมใช้เครื่องมือวัดอุณหภูมิชนิดใช้กล้องถ่ายภาพความร้อน หรือเทอร์โมมิเตอร์ชนิดอินฟราเรด (infrared thermometer) เนื่องจากสามารถวัดได้อย่างรวดเร็วโดยที่ผู้ตรวจไม่ต้องสัมผัสกับผู้ป่วย

4. การตรวจสอบคุณภาพของผลิตภัณฑ์ในกระบวนการแปรรูปโดยติดตั้งกล้องถ่ายภาพความร้อนที่บริเวณปลายสายพานลำเลียง (conveyor) เพื่อตรวจสอบอุณหภูมิของชิ้นอาหารหากพบว่ามีอุณหภูมิต่ำกว่าที่กำหนดไว้ ผู้ปฏิบัติงานสามารถนำชิ้นอาหารที่มีปัญหาออกได้ทันที หรือหากพบความผิดปกติอยู่ที่เครื่องจักรที่ใช้แปรรูป ผู้ปฏิบัติงานสามารถหยุดการปฏิบัติงานได้ทันทีเช่นกัน โดยไม่ต้องสูญเสียเวลาและสิ้นเปลืองวัตถุดิบ



รูปที่ 2.22 การประยุกต์ใช้งานกล้องถ่ายภาพความร้อนในอุตสาหกรรมอาหาร  
(ที่มา: <http://www.flir.com/cs/emea/en/view/?id=41781>)



รูปที่ 2.23 การประยุกต์ใช้งานกล้องถ่ายภาพความร้อนในอุตสาหกรรม  
(ที่มา: <http://www.skf.com> และ <http://www.fluke.com/fluke>)

## 2.6 การติดต่อสื่อสารแบบอนุกรมของ RS-232C

ข้อมูลในคอนโทรลเลอร์เป็นข้อมูลที่ความยาวขนาด 1 ไบต์ ( 8 บิต ) โดยมีวิธีการส่งได้ 2 วิธี คือ การส่งแบบขนาน สามารถส่งข้อมูลไปพร้อมกันทั้งหมดจึงทำให้การส่งเป็นไปได้อย่างรวดเร็วแต่ต้องใช้สายเท่ากับจำนวนบิตจึงทำให้มีค่าใช้จ่ายมาก และการส่งแบบอนุกรมเป็นการส่งหรือรับข้อมูลที่ละบิตจนครบ 8 บิต ข้อมูลจะถูกส่งตามจังหวะเวลาที่กำหนดเป็นความกว้างของพัลส์ โดยจังหวะเวลาที่ส่งผู้ส่งกับผู้รับต้องใช้มาตรฐานเดียวกัน

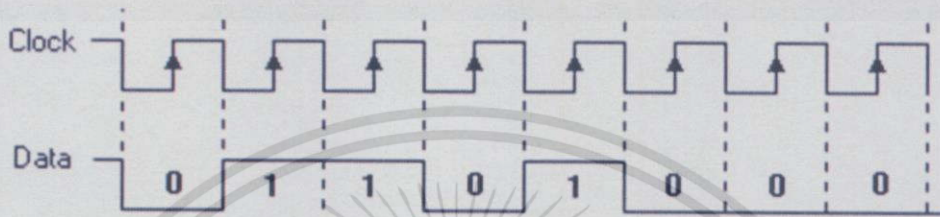
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.6.1 รูปแบบการสื่อสารแบบอนุกรม

การสื่อสารแบบอนุกรมมีด้วยกันอยู่ 2 แบบ คือแบบซิงโครนัส (Synchronous) และแบบอะซิงโครนัส (Asynchronous)

### 2.6.1.1 การสื่อสารแบบซิงโครนัส (Synchronous)

การรับส่งข้อมูลจะมีสัญญาณนาฬิกาเป็นตัวกำหนดจังหวะเวลาในการส่งข้อมูลร่วมอยู่ด้วยอีกเส้นหนึ่ง ใช้คู่กับสัญญาณข้อมูล ตัวอย่างเช่น การส่งสัญญาณจากคีย์บอร์ด

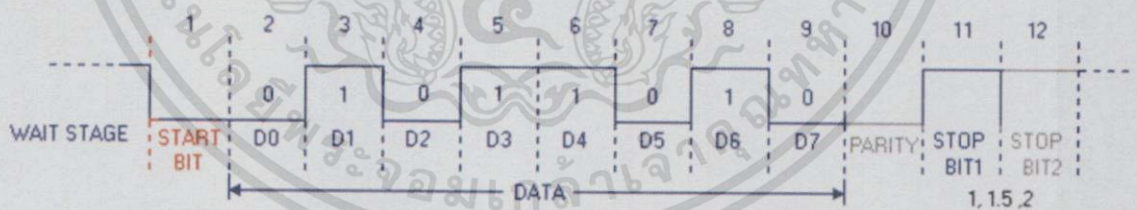


รูปที่ 2.24 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลที่ส่งกับสัญญาณนาฬิกา

### 2.6.1.2 การสื่อสารแบบอะซิงโครนัส (Asynchronous)

การรับส่งข้อมูลโดยที่ไม่จำเป็นต้องมีสัญญาณนาฬิกาการร่วมด้วยแต่จะใช้ตัวส่งและตัวรับที่มีอัตราส่งข้อมูลเท่ากัน รูปแบบข้อมูลแบบอะซิงโครนัส ประกอบด้วย 4 ส่วนคือ

- 1) บิตเริ่มต้น (Start bit) มีขนาด 1 บิต
- 2) บิตข้อมูล (Data) มีขนาด 5, 6, 7 หรือ 8 บิต
- 3) บิตตรวจสอบพาริตี (Parity bit) มีขนาด 1 บิตหรือไม่มี
- 4) บิตหยุด (Stop bit) มีขนาด 1, 1.5, 2 บิต



รูปที่ 2.25 แสดงส่วนประกอบของข้อมูลแต่ละเฟรม

- เมื่อไม่มีการส่งข้อมูล ขา data มีสถานะเป็นลอจิก "1" หรือ สถานะหยุดรอ (Waiting stage)
- เมื่อเริ่มต้นส่งข้อมูล ให้ขา data เป็นลอจิก "0" เป็นจำนวน 1 บิตเรียกว่า บิตเริ่มต้น (Start bit)
- จากนั้นเริ่มต้นส่งข้อมูล โดยส่งบิตต่ำไปก่อน (LSB)
- ตามด้วยพาริตีบิต (มีหรือไม่มีก็ได้ ขึ้นอยู่กับการติดตั้งค่าของทั้งสองฝ่าย)
- สิ้นสุดด้วยลอจิก "1" อย่างน้อย 1 บิต ( มีขนาด 1, 1.5, หรือ 2 บิต) เพื่อแสดงว่าสิ้นสุดข้อมูล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.6.2 ลักษณะการรับส่งข้อมูล

การรับและส่งข้อมูลแบบอนุกรมยังแบ่งออกเป็นลักษณะการใช้งานได้ 3 แบบคือ

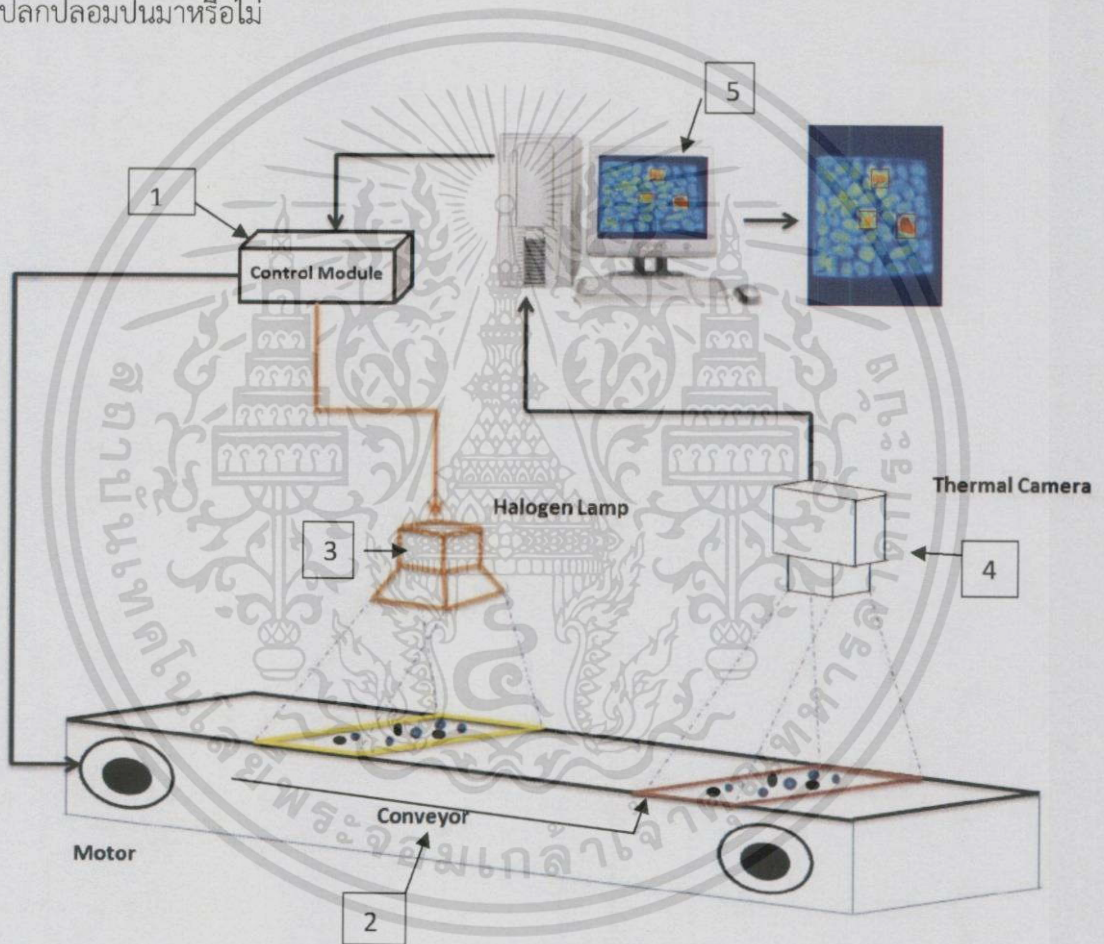
- 1) แบบซิมเพลกซ์ (Simplex) เป็นการส่งหรือรับข้อมูลแบบทิศทางเดียวเท่านั้น
- 2) แบบฮาล์ฟดูเพลกซ์ (Half Duplex) เป็นการส่งและรับข้อมูลแบบสลับกันคือ ด้านหนึ่งเป็นฝ่ายส่ง อีกด้านหนึ่งเป็นฝ่ายรับสลับกัน ไม่สามารถรับ - ส่งในเวลาเดียวกันได้
- 3) แบบฟูลดูเพลกซ์ (Full Duplex) สามารถรับ-ส่งข้อมูลในเวลาเดียวกันได้



## บทที่ 3 วิธีดำเนินการ

### 3.1 กล่าวนำ

ระบบที่ออกแบบใช้สำหรับการตรวจจับสิ่งแปลกปลอมที่ปนมากับเมล็ดพืช เมื่อกลุ่มเมล็ดพืชที่ต้องการตรวจจับวิ่งผ่านมาบนสายพานผ่านส่วนที่ให้ความร้อน ซึ่งควบคุมโดยพีแอลซี (PLC, Programmable Logic Controller) จากนั้นผ่านกล้องถ่ายภาพความร้อน กล้องจะทำการจับภาพและนำภาพนั้นไปประมวลผลด้วยโปรแกรม Visual C# เพื่อตรวจสอบว่ากลุ่มเมล็ดพืชนั้นมีสิ่งแปลกปลอมปนมาหรือไม่



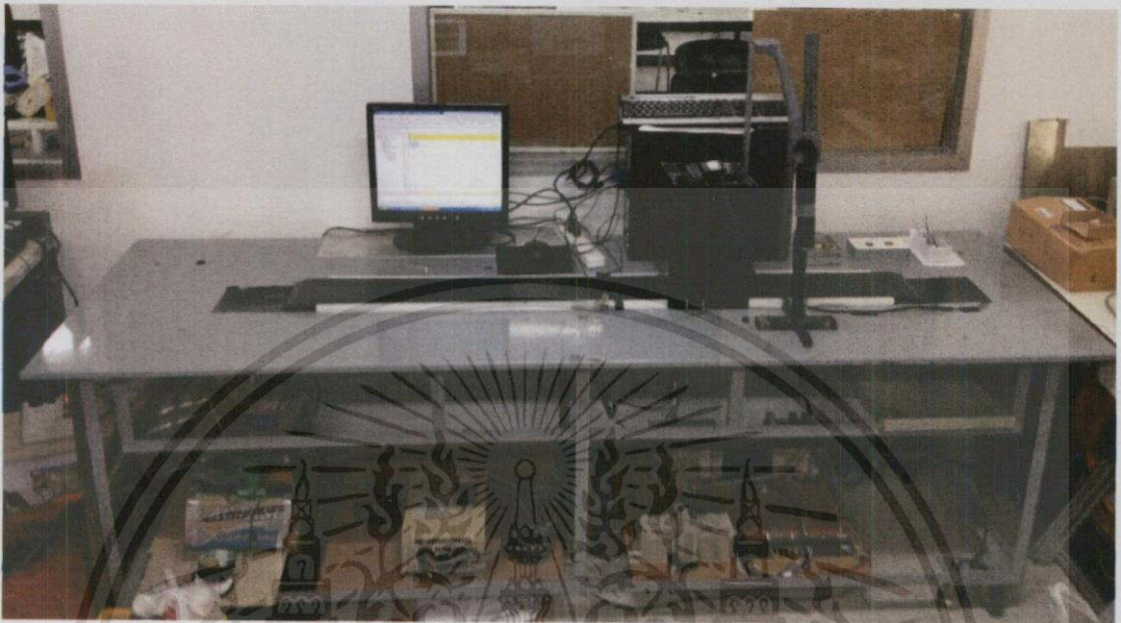
รูปที่ 3.1 แสดงระบบสายพานลำเลียงการตรวจสอบสิ่งแปลกปลอมแบบอัตโนมัติ

### 3.2 ส่วนประกอบของชุดสายพานลำเลียง

- 1) พีแอลซี (PLC, Programmable Logic Controller) ยี่ห้อ Omron Sysmac C200HX
- 2) ชุดสายพานลำเลียง
- 3) มอเตอร์
- 4) อินเวอร์เตอร์
- 5) ตัวเซนเซอร์แสง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 6) แหล่งจ่ายความร้อน
- 7) กล้องถ่ายภาพความร้อน
- 8) คอมพิวเตอร์ที่มีโปรแกรม Visual C# และ CX-Programmer



รูปที่ 3.2 ภาพรวมของเครื่องลำเลียงสายพาน

### 3.3 อุปกรณ์

#### 3.3.1 ชุดสายพานลำเลียง



รูปที่ 3.3 สายพานลำเลียง

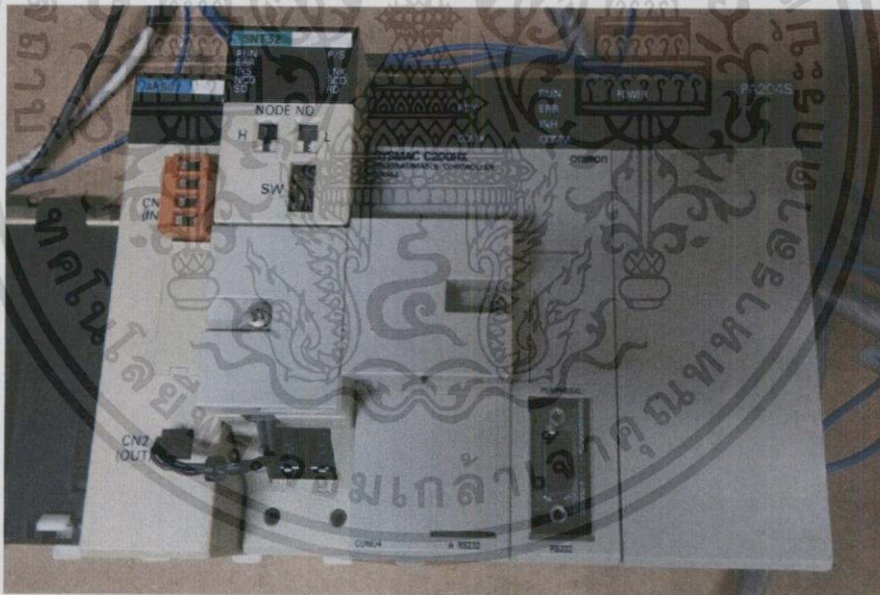
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3.2 กล้องถ่ายภาพความร้อน FLUKE รุ่น TI400



รูปที่ 3.4 กล้องถ่ายภาพความร้อน ยี่ห้อ FLUKE รุ่น TI400

### 3.3.3 พีแอลซี (PLC, Programmable Logic Controller)



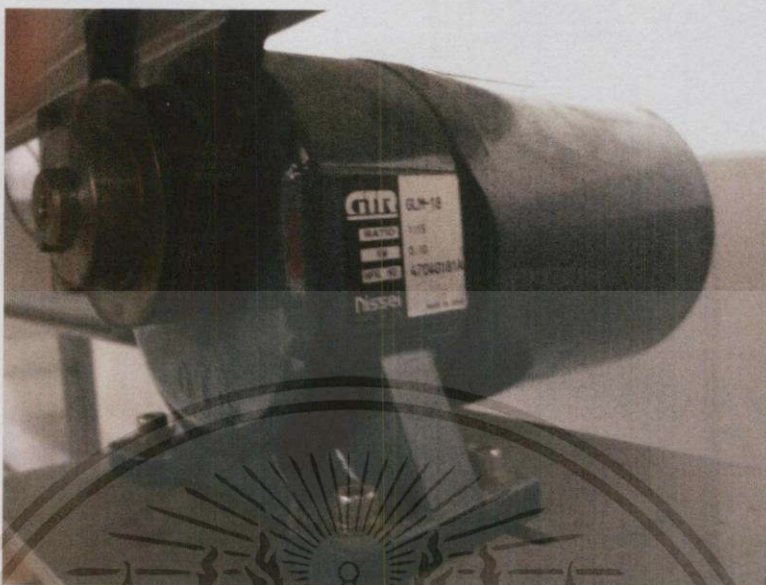
รูปที่ 3.5 พีแอลซี (PLC, Programmable Logic Controller) ยี่ห้อ Omron Sysmac C200HX

พีแอลซี (PLC, Programmable Logic Controller) ที่ใช้ในการทดลองคือ PLC Omron รุ่น C200HX ซึ่งมีสัญญาณขาเข้า (Input) และสัญญาณขาออก (Output) ดังนี้

- 1) สัญญาณขาเข้า ได้แก่ เซนเซอร์แสง, คอมพิวเตอร์
- 2) สัญญาณขาออก ได้แก่ อินเวอร์เตอร์, แหล่งจ่ายความร้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3.4 มอเตอร์



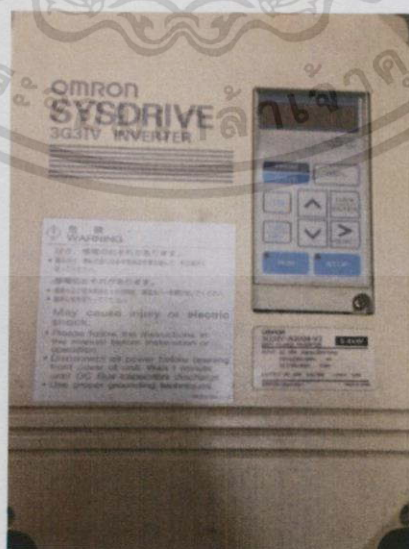
รูปที่ 3.6 มอเตอร์กระแสสลับ

มอเตอร์กระแสสลับมีหน้าที่ในการขับเคลื่อนสายพานลำเลียง โดยมีข้อมูลทางเทคนิค

ดังนี้

- 1) ขนาดแรงดันไฟฟ้า 380 V
- 2) กระแส 0.58 A
- 3) ความถี่ 60 HZ
- 4) จำนวนขั้วมอเตอร์ 4 ขั้ว

### 3.3.5 อินเวอร์เตอร์



รูปที่ 3.7 อินเวอร์เตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อินเวอร์เตอร์ทำหน้าที่แปลงแรงดันไฟฟ้า 1 เฟส (220 V) ไปเป็นแรงดันไฟฟ้า 3 เฟส (380 V) อินเวอร์เตอร์ใช้ในการควบคุมความเร็วของมอเตอร์กระแสสลับโดยการเปลี่ยนแปลงความถี่ คือเมื่อความถี่ของไฟฟ้ากระแสสลับเปลี่ยนแปลง ความเร็วของมอเตอร์จะเปลี่ยนแปลงตามสมการที่ 3.1

$$N = \frac{120f}{p} \quad (3.1)$$

กำหนดให้  $N$  = ความเร็วรอบต่อนาที  
 $f$  = ความถี่ของแหล่งจ่ายไฟฟ้าต่อวินาที  
 $P$  = จำนวนขั้วของมอเตอร์

ความถี่ที่ใช้คือ 7 เฮิร์ตซึ่งสามารถคำนวณหาความเร็วรอบจากสมการ ได้ดังนี้

$$N = \frac{120(7)}{4}$$

$$N = 210 \text{ รอบ / นาที}$$

ข้อมูลทางเทคนิคของอินเวอร์เตอร์ รุ่น 3G3IV-A2004-V2

- |  |                |
|--|----------------|
| 1) Rate unit power (400 VAC Supply)    | 1.4 kVA        |
| 2) Max rated motor (400 VAC Supply)    | 0.4 kW (0.5HP) |
| 3) Rated unit current                  | 1.9 A          |
| 4) Max unit current                    | 3.2 A          |
| 5) INPUT : AC 3PH 200to220V / 50Hz     |                |
| 6) OUTPUT : AC 3PH 0to230V 1.4kVA 3.6A |                |

### 3.3.6 รีเลย์



รูปที่ 3.8 รีเลย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3.7 ตัวเซนเซอร์แสง



รูปที่ 3.9 เซนเซอร์แสง

### 3.3.8 หลอดไฟ



รูปที่ 3.10 หลอดไฟ

### 3.3.9 ธัญพืช



รูปที่ 3.11 ลูกเดือย ถั่วเหลือง ถั่วลิสง ถั่วแดงและถั่วดำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3.10 สิ่งแปลกปลอม



รูปที่ 3.12 ไม้ เศษหินและพลาสติก

### 3.3.11 ถาดสังกะสี

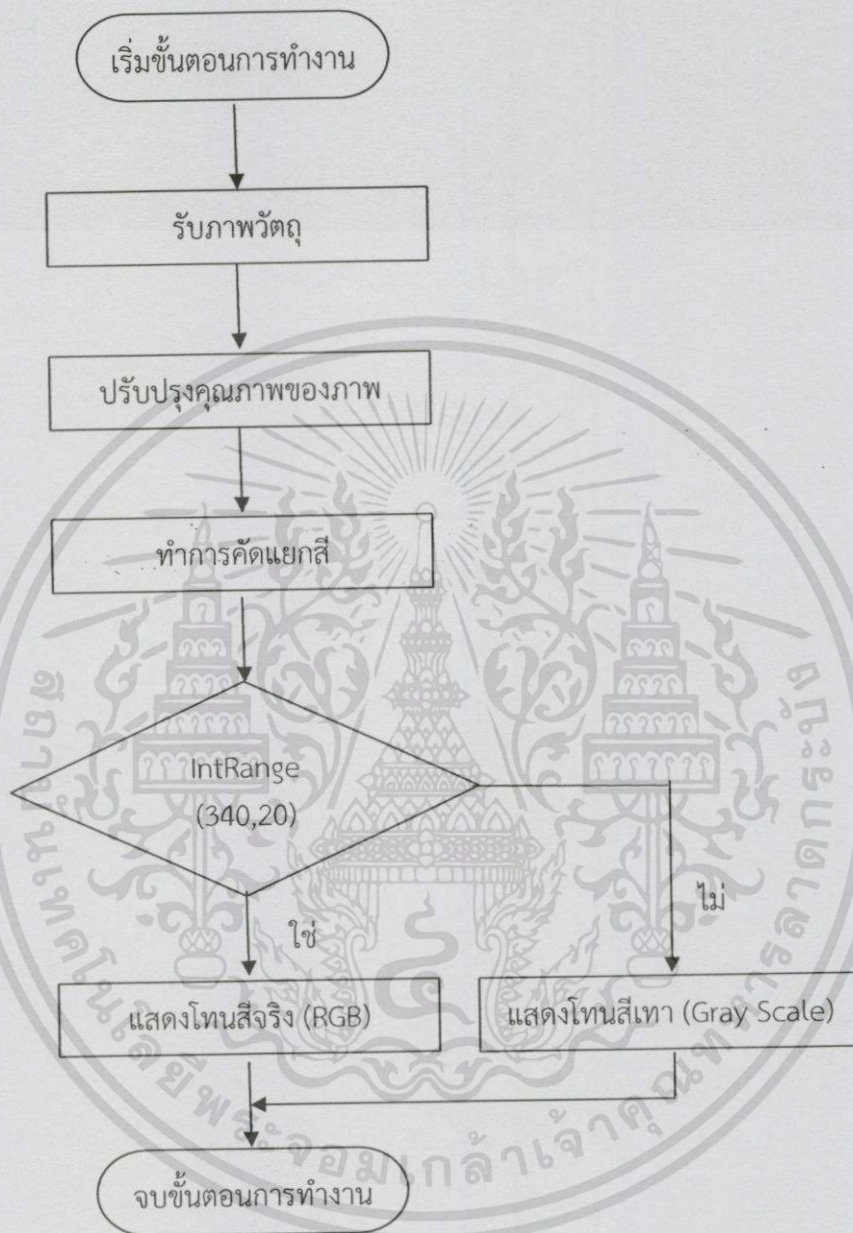


รูปที่ 3.13 ถาดสังกะสีใส่เมล็ดพืชและสิ่งแปลกปลอม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.4 Flowchart

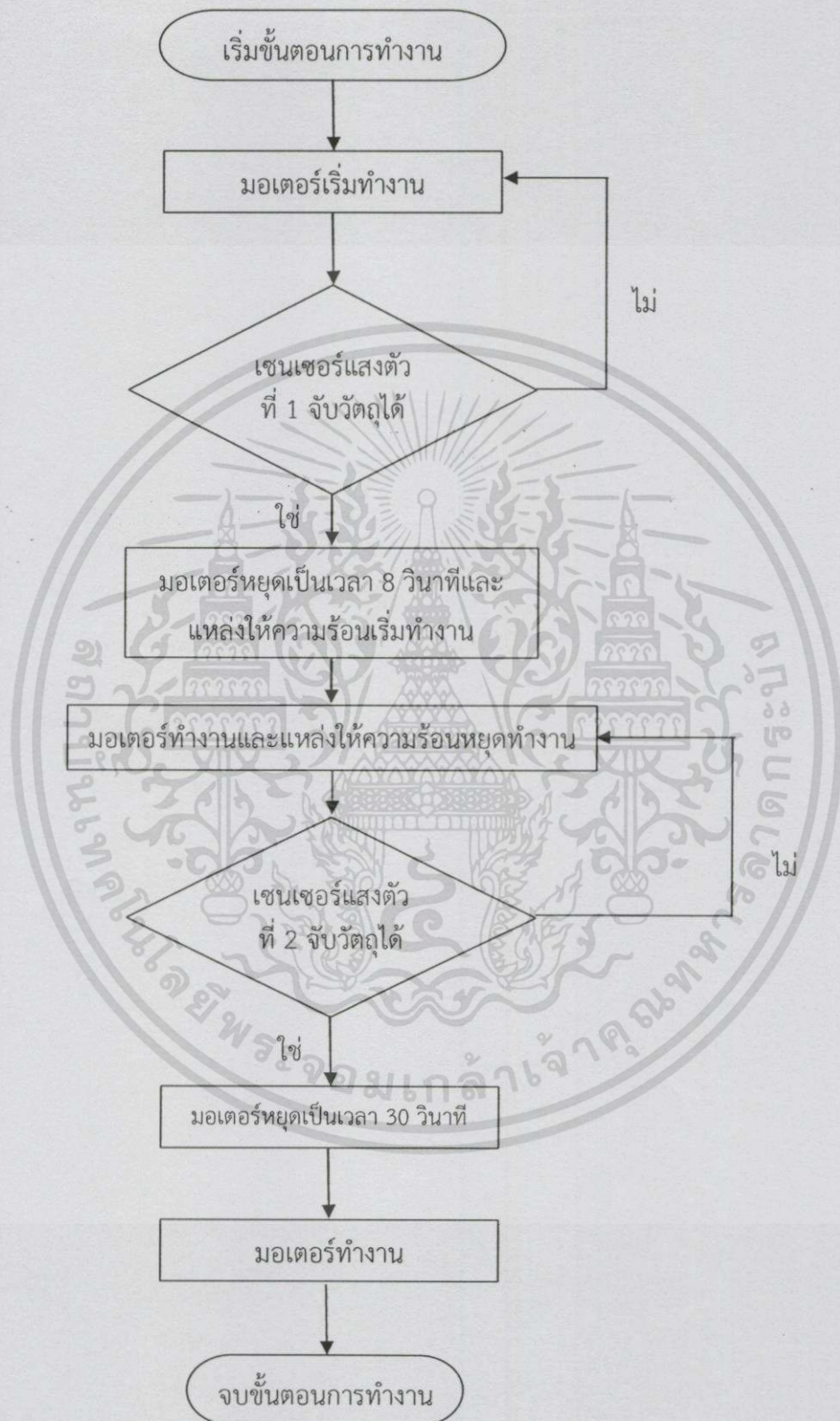
#### 3.4.1 Flowchart (โปรแกรมตรวจสอบสิ่งแปลกปลอม)



รูปที่ 3.14 Flowchart (โปรแกรมตรวจสอบสิ่งแปลกปลอม)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 3.4.2 Flowchart (สายพานลำเลียง)



รูปที่ 3.15 Flowchart (สายพานลำเลียง)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.5 การทำงานของโปรแกรมประมวลผลภาพ

โปรแกรมที่ใช้ในการประมวลผลภาพถ่ายความร้อนคือ Microsoft Visual C# 2010 ซึ่งใช้งานร่วมกับโปรแกรม AForge.NET โดยวัตถุประสงค์หลักของโปรแกรมเป็นการตรวจจับโทนสีของสิ่งแปลกปลอม การทำงานของโปรแกรมนั้น แบ่งเป็น 2 ส่วน คือส่วนที่หนึ่งทำการรับภาพจากกล้องถ่ายภาพความร้อน ปรับปรุงคุณภาพของภาพถ่ายความร้อน (ปรับ Level, Span) ในโปรแกรม SmartView3.7 และส่วนที่สองทำการตรวจจับโทนสีที่ต้องการในโปรแกรม Microsoft Visual C# 2010 ถ้าสีที่อยู่ในช่วงที่กำหนดจะแสดงเป็นโทนสีจริง (RGB) ส่วนสีที่ไม่อยู่ในช่วงที่กำหนดจะแสดงเป็นโทนสีเทา (Gray Scale) และแสดงภาพที่ได้ออกมา โดยมีขั้นตอนการทำงานดังนี้

#### 3.5.1 ส่วนโปรแกรม SmartView3.7

1. รับภาพจากกล้องถ่ายภาพความร้อน
2. ทำการปรับคุณภาพของภาพถ่ายความร้อน (ปรับ Level, Span)
3. บันทึกภาพ (.JPEG)

#### 3.5.2 ส่วนโปรแกรม Microsoft Visual C# 2010

1. รับภาพถ่ายความร้อน (.JPEG)
2. ประมวลผลภาพถ่ายความร้อน
3. แสดงผลภาพที่ได้

จากโปรแกรมประมวลผลภาพ Visual C# จะใช้ HSL Color เป็น Filter ในการกรองสีอุณหภูมิของสิ่งแปลกปลอมในเมล็ดธัญพืช



รูปที่ 3.16 โมเดล HSL Color

Hue : ชนิดของสี เช่น สีแดง, สีน้ำเงินหรือสีเหลือง ช่วงจาก 0 ถึง 360 องศา ตามภาพ  
 Saturation : ความเข้มของสี ช่วงจาก 0 ถึง 100% ตามภาพ  
 Lightness : ความสว่างของสี ช่วงจาก 0 ถึง 100% ตามภาพ

โค้ดโปรแกรมที่ใช้ HSL เป็น Filter

```
// Create filter
HSLFiltering filter = new HSLFiltering();
//Configure the filter
filter.Hue = new IntRange(0, 50);
filter.UpdateLuminance = false;
filter.UpdateHue = false;
//Apply the filter
pictureBox2.Image = filter.Apply((Bitmap)pictureBox1.Image);
```

### 3.6 การทำงานของพีแอลซี (PLC, Programmable Logic Controller)

โครงการนี้ต้องการควบคุมสายพานลำเลียง เพื่อใช้เป็นส่วนหนึ่งในกระบวนการของการตรวจสอบสิ่งแปลกปลอมในเมล็ดพืช โดยโปรแกรมที่ใช้ในการควบคุมสายพานลำเลียงคือ CX-Programmer ผ่านพอร์ทมาตรฐาน RS-232 เพื่อส่งสัญญาณไปควบคุมการทำงานของสายพานลำเลียงให้ทำงานตามที่กำหนดไว้

#### 3.6.1 ส่วนประกอบของชุดสายพานลำเลียง

1. มอเตอร์กระแสสลับ (Motor) ทำหน้าที่ในการขับเคลื่อนสายพานลำเลียง
2. ตัวเซนเซอร์แสง (ss\_1, ss\_2) ทำหน้าที่ในการตรวจจับถาดที่ใส่กลุ่มเมล็ดพืชที่ตรวจสอบ เมื่อสายพานลำเลียงวัตถุผ่านตัวเซนเซอร์ ตัวเซนเซอร์จะส่งสัญญาณแรงดันไฟฟ้าไปยังพีแอลซี (PLC, Programmable Logic Controller) เพื่อให้ส่งสัญญาณไฟฟ้าไปควบคุมมอเตอร์และแหล่งให้ความร้อน ตัวเซนเซอร์ที่ใช้ในโครงการนี้มีทั้งหมด 3 ตัว

#### 3.6.2 การกำหนดเบอร์รีเลย์และอินพุต/เอาต์พุตของพีแอลซี (PLC, Programmable Logic Controller)

การกำหนดพื้นที่รีเลย์ (Relay) เป็นเวอร์ตหรือแขนแนลซึ่งแต่ละแขนแนลประกอบไปด้วยข้อมูล 16 บิต ในแต่ละบิตจะบรรจุข้อมูลในเลขฐานสอง คือ เลข 1 แสดงสถานะ ON และ เลข 0 แสดงสถานะ OFF ดังรูปที่ 3.17 หมายถึง เวอร์ต 003 ประกอบไปด้วย 16 บิต คือ บิตที่ 00 ถึง บิตที่ 15 การอ้างรีเลย์แต่ละบิตด้วยเลข 5 หลัก โดยที่สามหลักแรกเป็นเวอร์ตหรือแขนแนล ส่วนสองหลักหลังเป็นบิต

CH0 = Word 000  
 CH1 = Word 001  
 CH2 = Word 002  
 CH3 = Word 003  
 CHn = Word nnn

บิตที่	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0
ข้อมูล (เลขฐานสอง)	0	0	1	0	0	1	0	0	0	1	0	1	0	0	1	0



รูปที่ 3.17 การกำหนดเบอร์รีเลย์ของพีแอลซี (PLC, Programmable Logic Controller)

จากรูปที่ 3.17 เลือกเวิร์ดหรือแชนแนลที่ 003 และบิตที่ 4 ซึ่งอยู่ในสถานะทำงาน ON = 1 ส่วนการกำหนดอินพุต/เอาต์พุตของพีแอลซี (PLC, Programmable Logic Controller) ชนิดโมดูล จะกำหนดตำแหน่งตาม Backplane ดังรูปที่ 3.18 และตารางที่ 3.1

16 pt Output 0000	16 pt Input 0001	C200 High-speed Counter 0002	16 pt Output 0003	Empty Slot	CPU Unit	Power Supply Unit
-------------------------	------------------------	---------------------------------------	-------------------------	---------------	----------	----------------------

รูปที่ 3.18 การกำหนดตำแหน่งตาม Backplane

ตารางที่ 3.1 การกำหนดอินพุต/เอาต์พุตของพีแอลซี (PLC, Programmable Logic Controller)

Input	Output
1.00 – สวิตช์เริ่มต้น	0.02 – มอเตอร์ 3 เฟส (Motor)
1.01 – สวิตช์หยุด	0.06 – แหล่งให้ความร้อน (Lamp)
1.06 – Photo Sensor 1	
1.02 – Photo Sensor 2	

### 3.7 ขั้นตอนการดำเนินการทดลอง

#### ขั้นตอนที่ 1

เตรียมวัสดุที่ใช้ทำการทดลอง โดยจะใช้เมล็ดพีช ได้แก่ ลูกเต๋อย ถั่วเหลือง ถั่วลิสง ถั่วแดง และถั่วดำ สิ่งแปลกปลอม ได้แก่ ไม้ หินและพลาสติก ลงในถาดทดลอง

#### ขั้นตอนที่ 2

เตรียมกล้องถ่ายภาพความร้อน ทำการปรับ Level, Span และโฟกัสของกล้องถ่ายภาพภาพความร้อนให้พร้อมใช้สำหรับการทดลอง

#### ขั้นตอนที่ 3

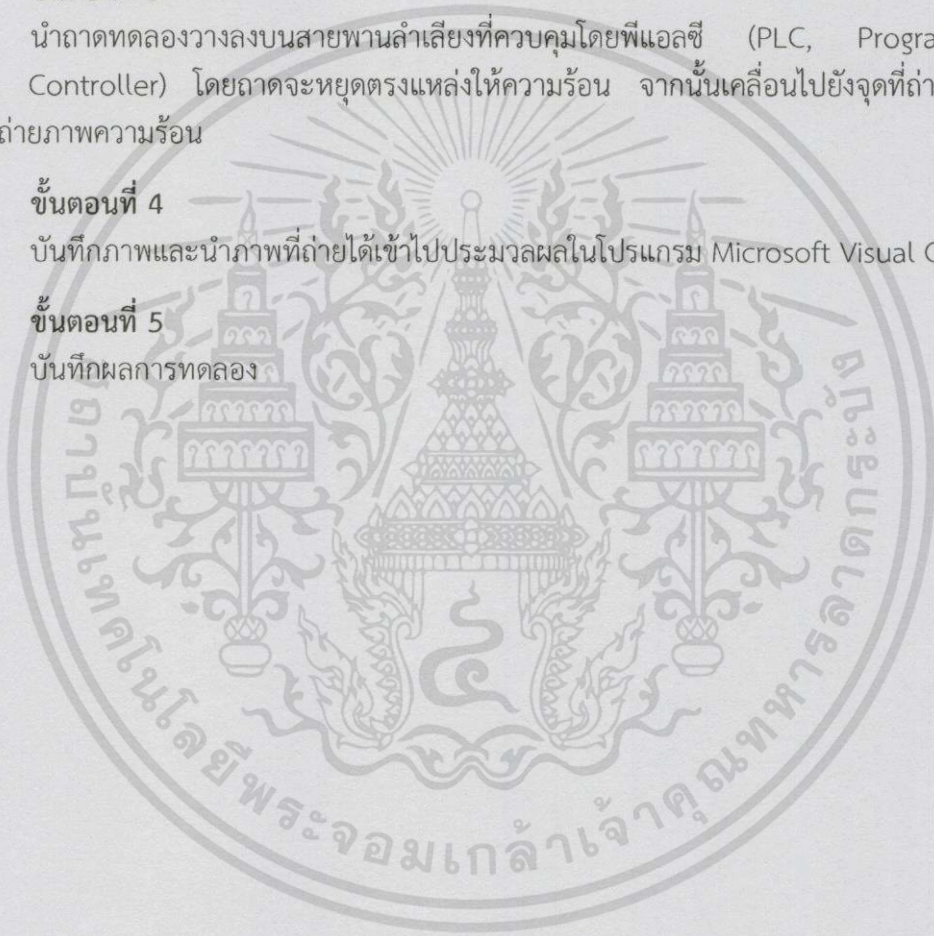
นำถาดทดลองวางลงบนสายพานลำเลียงที่ควบคุมโดยพีแอลซี (PLC, Programmable Logic Controller) โดยถาดจะหยุดตรงแหล่งให้ความร้อน จากนั้นเคลื่อนไปยังจุดที่ถ่ายภาพโดยกล้องถ่ายภาพความร้อน

#### ขั้นตอนที่ 4

บันทึกภาพและนำภาพที่ถ่ายได้เข้าไปประมวลผลในโปรแกรม Microsoft Visual C#

#### ขั้นตอนที่ 5

บันทึกผลการทดลอง



## บทที่ 4

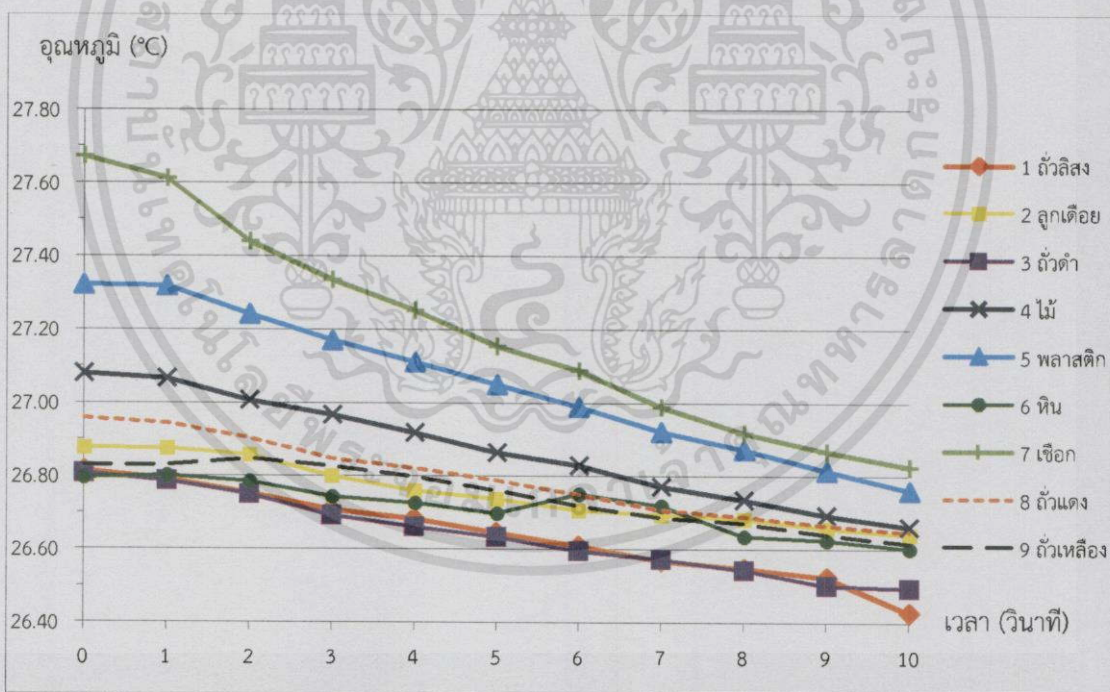
### ผลการทดลอง

#### 4.1 กล่าวนำ

ในการทำการทดลองได้แบ่งการทดลองออกเป็น 3 แบบ ได้แก่ เมล็ดพืชเพียงอย่างเดียว สิ่งแลกเปลี่ยนเพียงอย่างเดียว และเมล็ดพืชกับสิ่งแลกเปลี่ยน

#### 4.2 เวลาที่ใช้สำหรับตรวจสอบสิ่งแลกเปลี่ยนด้วยภาพถ่ายความร้อน

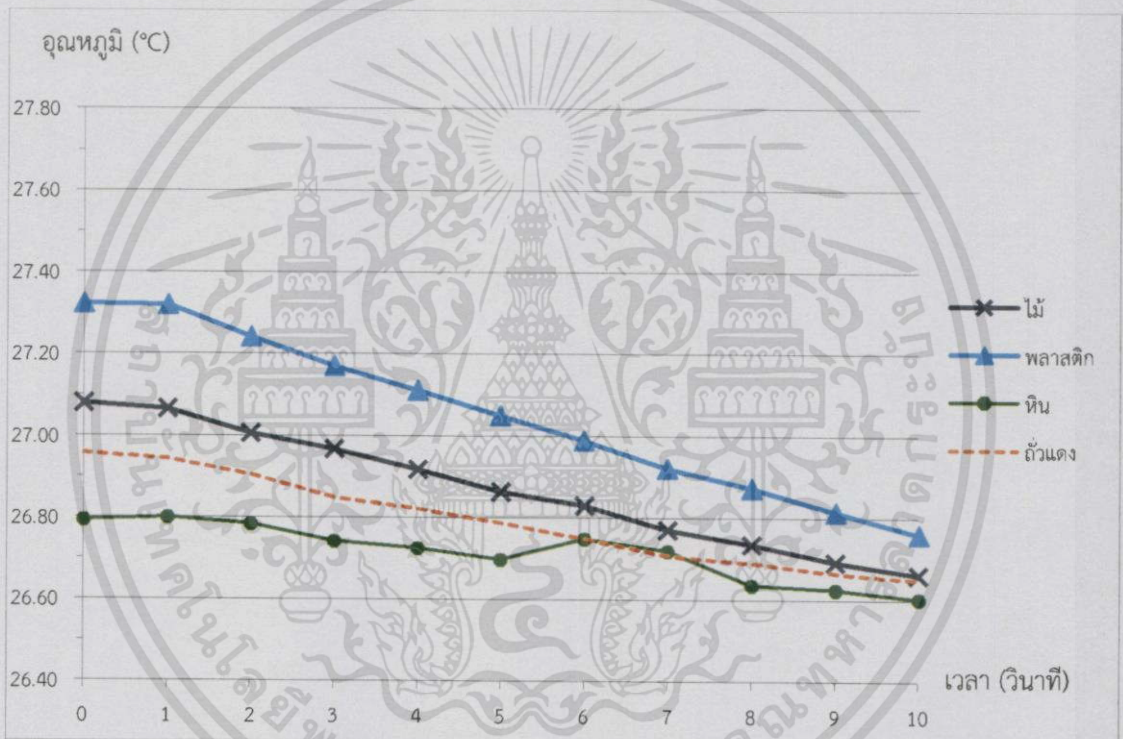
การตรวจสอบสิ่งแลกเปลี่ยนด้วยภาพถ่ายความร้อนเป็นการวัดเชิงคุณภาพ โดยพิจารณาความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิของเมล็ดพืชกับสิ่งแลกเปลี่ยนภายใต้เงื่อนไขการกำหนดระยะเวลาในการให้ความร้อนที่เหมาะสม โดยพิจารณาจากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาดังรูปที่ 4.1 และเลือกระยะเวลาในการให้ความร้อนที่น้อยที่สุดที่สามารถตรวจสอบสิ่งแลกเปลี่ยนได้ โดยเมล็ดพืชกับสิ่งแลกเปลี่ยนที่ใช้ในการทดลองครั้งนี้ ได้แก่ ถั่วแดง ถั่วลิสง ถั่วดำ ถั่วเหลือง ลูกเดือย ไม้พลาสติกและหิน ตามลำดับ



รูปที่ 4.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลา

เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาคลายความร้อนของเมล็ดพืช กับสิ่งแปลกปลอมที่สนใจเพียงอย่างละหนึ่งชนิด โดยให้ความร้อนแก่ตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองเป็นเวลา 8 วินาที แสดงดังรูปที่ 4.2 – 4.6

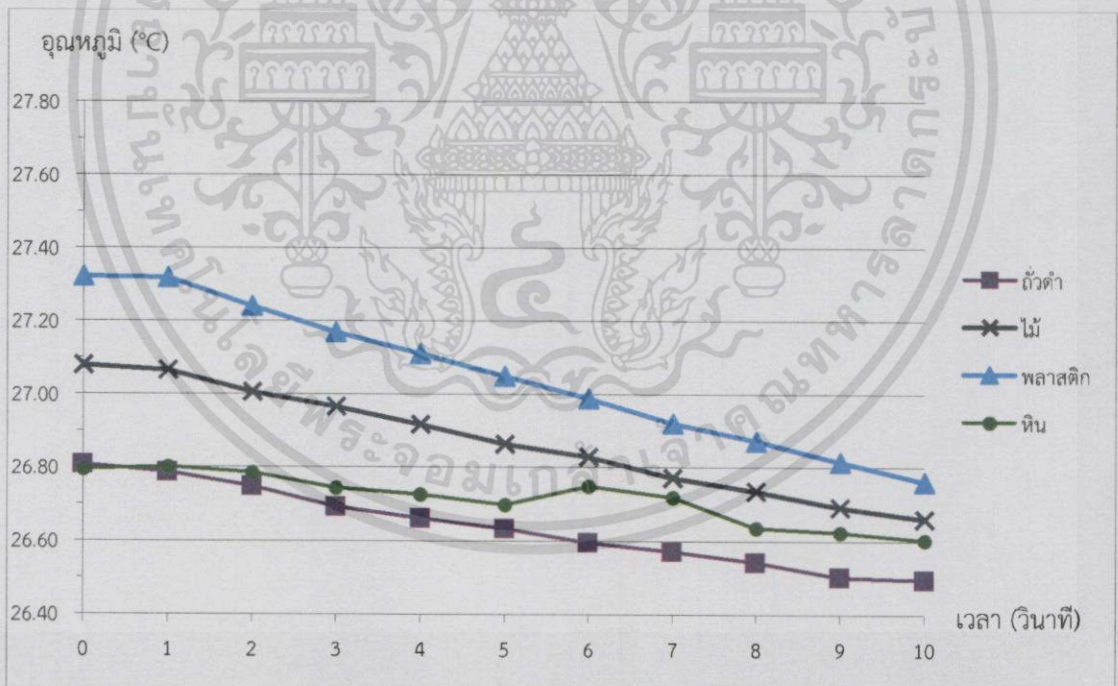
จากรูปที่ 4.2-4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาคลายความร้อนของสิ่งแปลกปลอมกับถั่วแดง, ถั่วลิสง, ถั่วดำ, ถั่วเหลืองและลูกเดือยตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าสามารถตรวจสอบสิ่งแปลกปลอมที่ปะปนมากับถั่วแดงและลูกเดือยได้ตั้งแต่ช่วงเวลาระหว่าง 0-5 วินาที ถั่วลิสงและถั่วดำได้ตั้งแต่ช่วงเวลาระหว่าง 6-10 วินาที และถั่วเหลืองได้ตั้งแต่ช่วงเวลาระหว่าง 2-5 วินาที เนื่องจากมีความแตกต่างของอุณหภูมิในช่วงเวลาดังกล่าวอย่างชัดเจน



รูปที่ 4.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลา (ถั่วแดง)

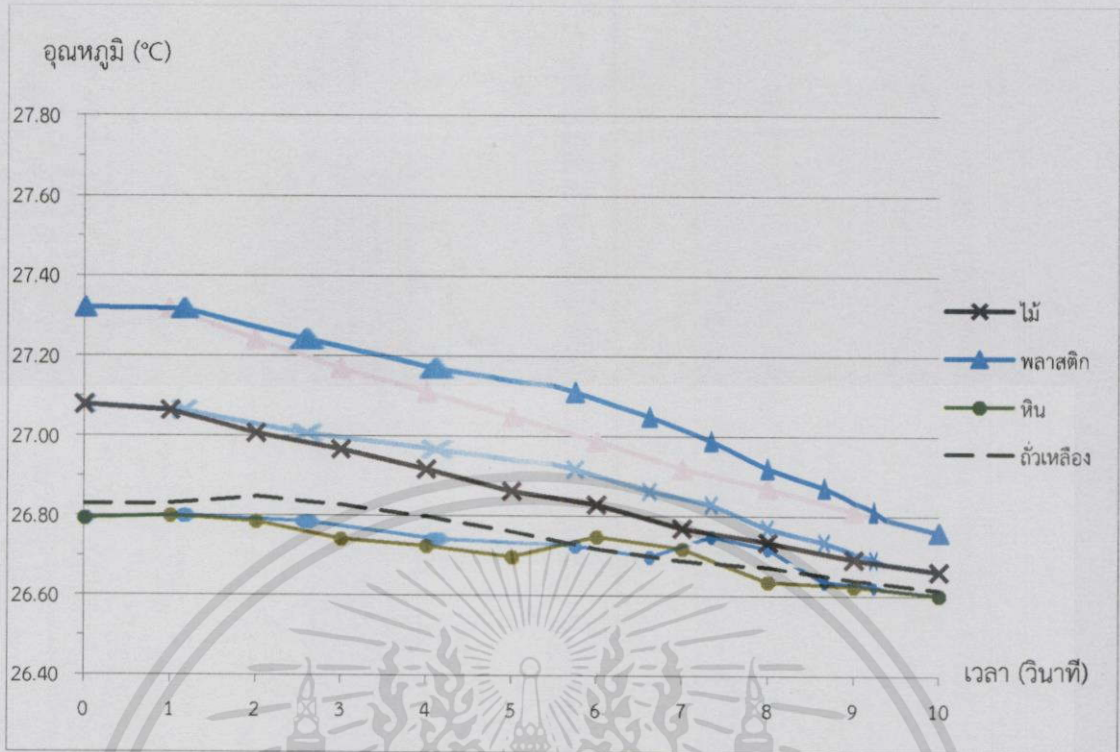


รูปที่ 4.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลา (ถั่วลิสง)

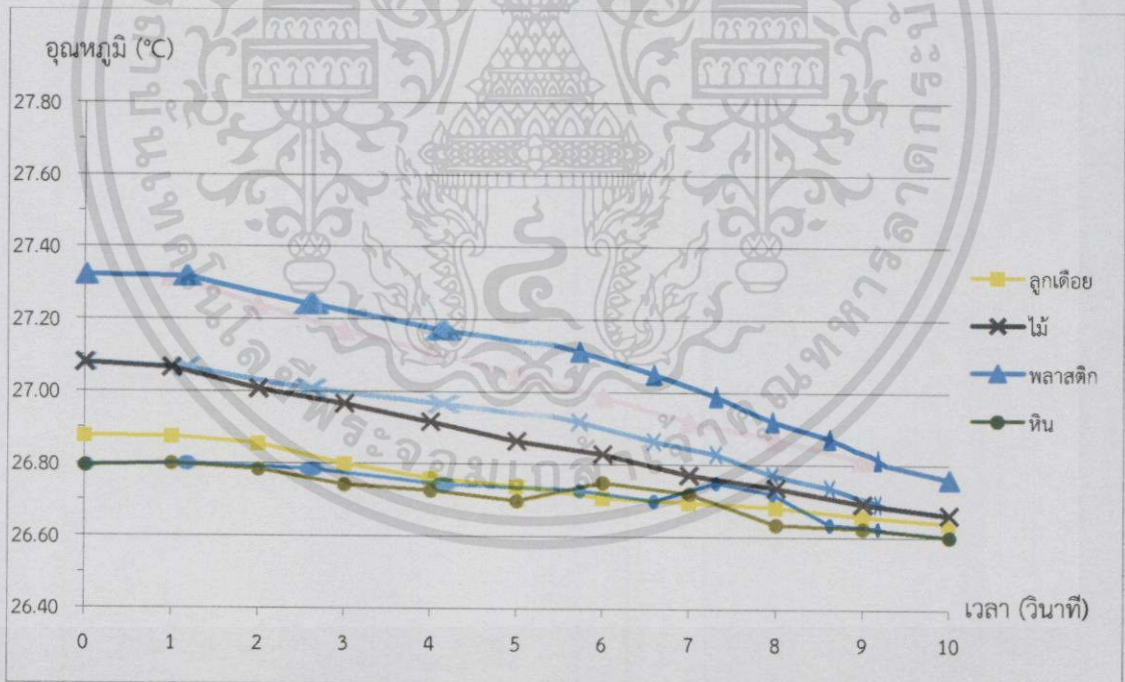


รูปที่ 4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลา (ถั่วดำ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลา (ถั่วเหลือง)

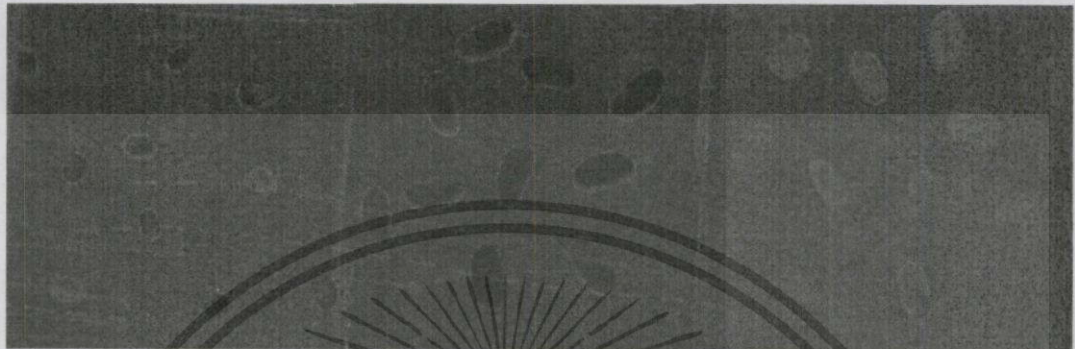


รูปที่ 4.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลา (ลูกเต๋อย)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 4.3 ผลการทดลอง

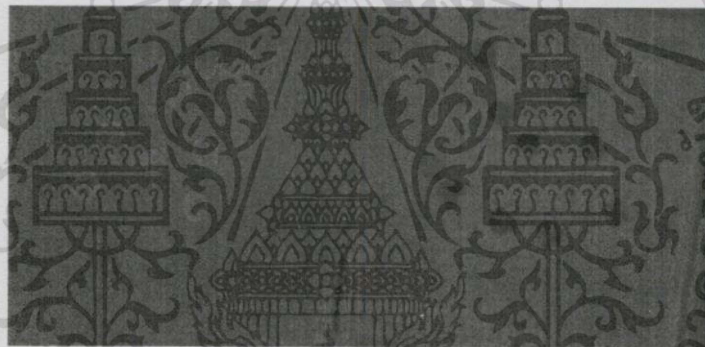
จากการทดลองเพื่อตรวจสอบสิ่งแปลกปลอมที่ปะปนมากับเมล็ดพืชนั้น ได้ทำการทดลองกับเมล็ดพืช 5 ชนิด คือ ถั่วแดง ถั่วลิสง ถั่วดำ ถั่วเหลือง และลูกเดือย กับสิ่งแปลกปลอม 3 ชนิด คือ ไม้พลาสติค และหิน



(ก)

(ข)

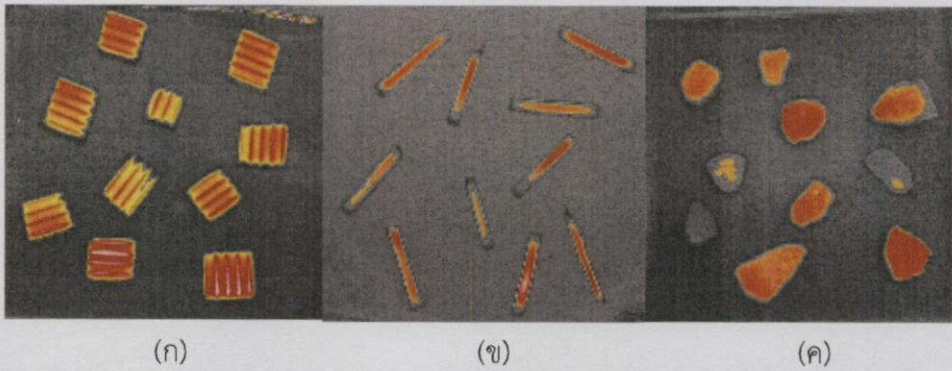
(ค)



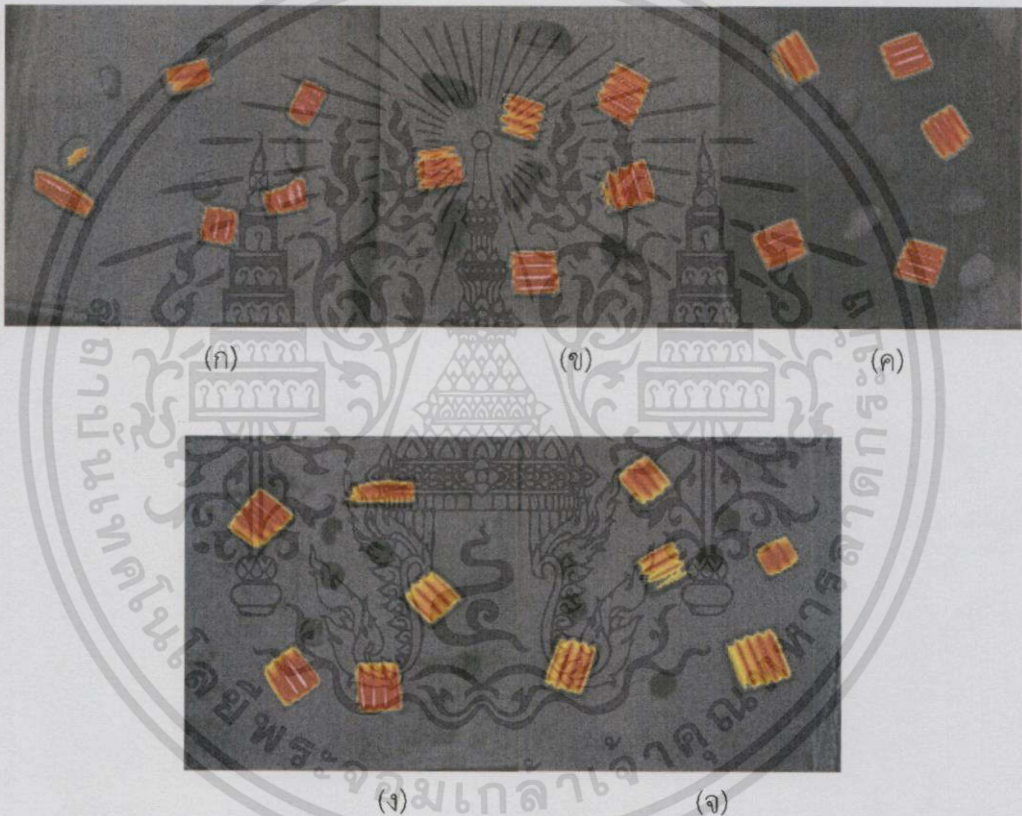
(ง)

(จ)

รูปที่ 4.7 ภาพถ่ายทางความร้อนของเมล็ดพืช ได้แก่ ถั่วดำ (ก), ถั่วแดง (ข), ถั่วลิสง (ค), ถั่วเหลือง (ง), และลูกเดือย (จ) อย่างละ 10 เมล็ดตามลำดับ

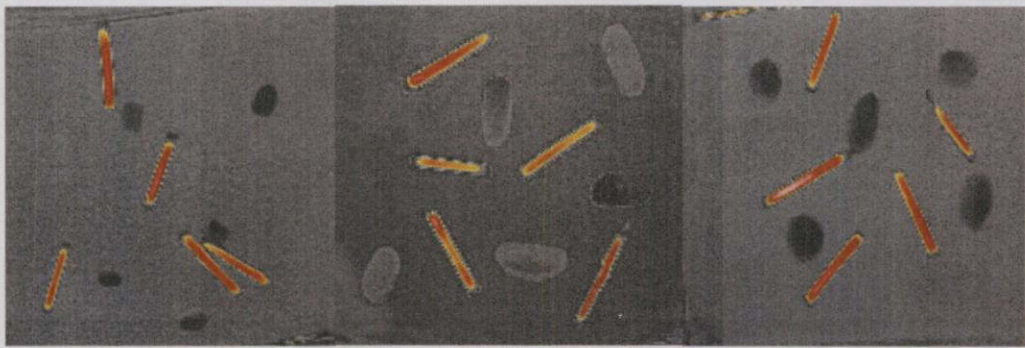


รูปที่ 4.8 ภาพถ่ายทางความร้อนของสิ่งแปลกปลอม ได้แก่ พลาสติก (ก), ไม้ (ข) และหิน (ค) อย่างละ 10 ชิ้นตามลำดับ



รูปที่ 4.9 ภาพถ่ายทางความร้อนของพลาสติก-ถั่วดำ (ก), พลาสติก-ถั่วแดง (ข), พลาสติก-ถั่วลิสง (ค), พลาสติก-ถั่วเหลือง (ง) และพลาสติก-ลูกเดือย (จ) ตามลำดับ

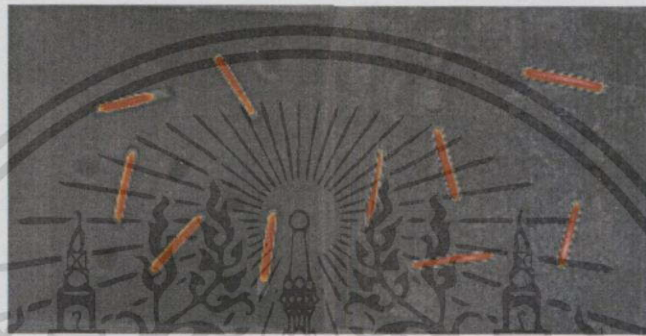
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)

(ข)

(ค)



(ง)

(จ)

รูปที่ 4.10 ภาพถ่ายทางความร้อนของไม้-ถั่วดำ (ก), ไม้-ถั่วแดง (ข), ไม้-ถั่วลิสง (ค), ไม้-ถั่วเหลือง (ง) และไม้-ลูกเดือย (จ) ตามลำดับ



(ก)

(ข)

(ค)

รูปที่ 4.11 ภาพถ่ายทางความร้อนของหิน-ถั่วดำ (ก), หิน-ถั่วแดง (ข) , หิน-ถั่วลิสง (ค) ตามลำดับ



(ง)

(จ)

รูปที่ 4.11 (ต่อ) ภาพถ่ายทางความร้อนของหิน-ถั่วเหลือง (ง) และหิน-ลูกเดือย (จ) ตามลำดับ

ตารางแสดงค่าความผิดพลาดของโปรแกรมประมวลผล

ตารางที่ 4.1 แสดงผลการทดลอง ถั่วแดง-เศษไม้

จำนวนเมล็ดพืช (ถั่วแดง)	จำนวนสิ่งแปลกปลอม (เศษไม้)	จำนวนสิ่งแปลกปลอมที่ โปรแกรมจับได้ (เศษไม้)	ค่าความคลาด เคลื่อนที่เกิดขึ้น
5	5	5	0
6	4	5	1
7	3	3	0
8	2	2	0
9	1	1	0
10	0	0	0

ตารางที่ 4.2 แสดงผลการทดลอง ถั่วแดง-หิน

จำนวนเมล็ดพืช (ถั่วแดง)	จำนวนสิ่งแปลกปลอม (หิน)	จำนวนสิ่งแปลกปลอมที่ โปรแกรมจับได้ (หิน)	ค่าความคลาด เคลื่อนที่เกิดขึ้น
5	5	5	0
6	4	4	0
7	3	5	2
8	2	2	0
9	1	1	0
10	0	0	0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.3 แสดงผลการทดลอง ถั่วแดง-พลาสติก

จำนวนเมล็ดพืช (ถั่วแดง)	จำนวนสิ่งแปลกปลอม (พลาสติก)	จำนวนสิ่งแปลกปลอมที่ โปรแกรมจับได้ (พลาสติก)	ค่าความคลาด เคลื่อนที่เกิดขึ้น
5	5	5	0
6	4	4	0
7	3	3	0
8	2	2	0
9	1	1	0
10	0	0	0

ตารางที่ 4.4 แสดงผลการทดลอง ถั่วดำ-เศษไม้

จำนวนเมล็ดพืช (ถั่วดำ)	จำนวนสิ่งแปลกปลอม (เศษไม้)	จำนวนสิ่งแปลกปลอมที่ โปรแกรมจับได้ (เศษไม้)	ค่าความคลาด เคลื่อนที่เกิดขึ้น
5	5	5	0
6	4	4	0
7	3	4	1
8	2	3	1
9	1	3	2
10	0	0	0

ตารางที่ 4.5 แสดงผลการทดลอง ถั่วดำ-หิน

จำนวนเมล็ดพืช (ถั่วดำ)	จำนวนสิ่งแปลกปลอม (หิน)	จำนวนสิ่งแปลกปลอมที่ โปรแกรมจับได้ (หิน)	ค่าความคลาด เคลื่อนที่เกิดขึ้น
5	5	5	0
6	4	4	0
7	3	3	0
8	2	2	0
9	1	3	2
10	0	0	0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.6 แสดงผลการทดลอง ถั่วดำ-พลาสติก

จำนวนเมล็ดพืช (ถั่วดำ)	จำนวนสิ่งแปลกปลอม (พลาสติก)	จำนวนสิ่งแปลกปลอมที่ โปรแกรมจับได้ (พลาสติก)	ค่าความคลาด เคลื่อนที่เกิดขึ้น
5	5	6	1
6	4	5	1
7	3	3	0
8	2	3	1
9	1	3	2
10	0	0	0

ตารางที่ 4.7 แสดงผลการทดลอง ถั่วเหลือง-เศษไม้

จำนวนเมล็ดพืช (ถั่วเหลือง)	จำนวนสิ่งแปลกปลอม (เศษไม้)	จำนวนสิ่งแปลกปลอมที่ โปรแกรมจับได้ (เศษไม้)	ค่าความคลาด เคลื่อนที่เกิดขึ้น
5	5	5	0
6	4	4	0
7	3	3	0
8	2	2	0
9	1	1	0
10	0	0	0

ตารางที่ 4.8 แสดงผลการทดลอง ถั่วเหลือง-หิน

จำนวนเมล็ดพืช (ถั่วเหลือง)	จำนวนสิ่งแปลกปลอม (หิน)	จำนวนสิ่งแปลกปลอมที่ โปรแกรมจับได้ (หิน)	ค่าความคลาด เคลื่อนที่เกิดขึ้น
5	5	5	0
6	4	5	1
7	3	3	0
8	2	4	2
9	1	1	0
10	0	0	0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.9 แสดงผลการทดลอง ถั่วเหลือง-พลาสติก

จำนวนเมล็ดพืช (ถั่วเหลือง)	จำนวนสิ่งแปลกปลอม (พลาสติก)	จำนวนสิ่งแปลกปลอมที่ โปรแกรมจับได้ ( พลาสติก )	ค่าความคลาด เคลื่อนที่เกิดขึ้น
5	5	5	0
6	4	4	0
7	3	3	0
8	2	2	0
9	1	1	0
10	0	0	0

ตารางที่ 4.10 แสดงผลการทดลอง ถั่วลิสง-เศษไม้

จำนวนเมล็ดพืช (ถั่วลิสง)	จำนวนสิ่งแปลกปลอม (เศษไม้)	จำนวนสิ่งแปลกปลอมที่ โปรแกรมจับได้ (เศษไม้)	ค่าความคลาด เคลื่อนที่เกิดขึ้น
5	5	5	0
6	4	4	0
7	3	3	0
8	2	2	0
9	1	1	0
10	0	0	0

ตารางที่ 4.11 แสดงผลการทดลอง ถั่วลิสง-หิน

จำนวนเมล็ดพืช (ถั่วลิสง)	จำนวนสิ่งแปลกปลอม (หิน)	จำนวนสิ่งแปลกปลอมที่ โปรแกรมจับได้ (หิน)	ค่าความคลาด เคลื่อนที่เกิดขึ้น
5	5	4	1
6	4	3	1
7	3	3	0
8	2	2	0
9	1	2	1
10	0	0	0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.12 แสดงผลการทดลอง ถั่วลิสง-พลาสติก

จำนวนเมล็ดพืช (ถั่วลิสง)	จำนวนสิ่งแปลกปลอม (พลาสติก)	จำนวนสิ่งแปลกปลอมที่ โปรแกรมจับได้ (พลาสติก)	ค่าความคลาด เคลื่อนที่เกิดขึ้น
5	5	5	0
6	4	4	0
7	3	3	0
8	2	3	1
9	1	2	1
10	0	0	0

ตารางที่ 4.13 แสดงผลการทดลอง ลูกเดือย-เศษไม้

จำนวนเมล็ดพืช (ลูกเดือย)	จำนวนสิ่งแปลกปลอม (เศษไม้)	จำนวนสิ่งแปลกปลอมที่ โปรแกรมจับได้ (เศษไม้)	ค่าความคลาด เคลื่อนที่เกิดขึ้น
5	5	5	0
6	4	4	0
7	3	3	0
8	2	2	0
9	1	1	0
10	0	0	0

ตารางที่ 4.14 แสดงผลการทดลอง ลูกเดือย-หิน

จำนวนเมล็ดพืช (ลูกเดือย)	จำนวนสิ่งแปลกปลอม (หิน)	จำนวนสิ่งแปลกปลอมที่ โปรแกรมจับได้ (หิน)	ค่าความคลาด เคลื่อนที่เกิดขึ้น
5	5	4	1
6	4	4	0
7	3	3	0
8	2	3	1
9	1	1	0
10	0	0	0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.15 แสดงผลการทดลอง ลูกเต๋อย-พลาสติก

จำนวนเมล็ดพืช (ลูกเต๋อย)	จำนวนสิ่งแปลกปลอม (พลาสติก)	จำนวนสิ่งแปลกปลอมที่ โปรแกรมจับได้ (พลาสติก)	ค่าความคลาด เคลื่อนที่เกิดขึ้น
5	5	5	0
6	4	4	0
7	3	3	0
8	2	2	0
9	1	1	0
10	0	0	0



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

โครงการนี้นำเสนอการตรวจสอบสิ่งแปลกปลอมที่ปนมากับเมล็ดพืช โดยใช้กล้องถ่ายภาพความร้อนในการตรวจจับ ในขั้นตอนแรกได้ศึกษาตัวเครื่องและอุปกรณ์ต่างๆ รวมถึงการใช้งานซอฟต์แวร์ จากนั้นระบุถึงสิ่งที่ใช้ในการทดลอง ซึ่งก็คือ เมล็ดพืช ได้แก่ ถั่วแดง ถั่วเหลือง ถั่วลิสง ถั่วดำ และลูกเดือย สิ่งแปลกปลอม ได้แก่ ไม้ พลาสติกและหิน ติดตั้งแหล่งให้ความร้อน เขียนโปรแกรมเพื่อควบคุมสายพานลำเลียง และเขียนโปรแกรมเพื่อใช้ในการตรวจสอบสิ่งแปลกปลอม เมื่อทำการประมวลผลแล้วจะทำให้ทราบได้ว่ามีสิ่งแปลกปลอมหรือไม่

#### 5.1 สรุปผลการทดลอง

ในการทดลองนั้นผู้จัดทำได้ทำการทดลอง โดยแบ่งออกเป็น 3 ส่วน คือ ตรวจสอบเฉพาะเมล็ดพืช, ตรวจสอบเฉพาะสิ่งแปลกปลอม และตรวจสอบเมล็ดพืชกับสิ่งแปลกปลอม โดยใช้โปรแกรมตรวจสอบที่ได้เขียนขึ้นมา ผลจากการทดลองที่ได้นั้น การตรวจสอบยังมีความผิดพลาดอยู่บ้าง แต่ก็สามารถตรวจสอบได้ว่ามีสิ่งแปลกปลอมปนมาหรือไม่

#### 5.2 ปัญหาที่พบในการทดลอง

ปัญหาที่พบในโครงการนี้ มีปัจจัยเกี่ยวกับแสงภายนอกมาเข้ามาเกี่ยวข้อง โดยทำให้ค่าของสีเกิดการผิดพลาด อีกปัจจัยหนึ่งคือ ในระหว่างการทดลองเมื่อผู้ทดลองอยู่ใกล้ๆ จะทำให้ค่าได้รับความร้อน เนื่องจากรังสีจากตัวผู้ทดลองแผ่เข้าไปในกล้อง และปัญหาที่สำคัญคือตัวกล้องได้รับแสงสะท้อนจากที่อื่นทำให้ภาพมีความผิดพลาดไปด้วย

#### 5.3 ข้อเสนอแนะและแนวทางการพัฒนา

สำหรับข้อเสนอแนะและแนวทางการพัฒนานั้น สามารถนำไปพัฒนาต่อให้สามารถคัดแยกสิ่งแปลกปลอมออกจากเมล็ดพืช และสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมได้

## บรรณานุกรม

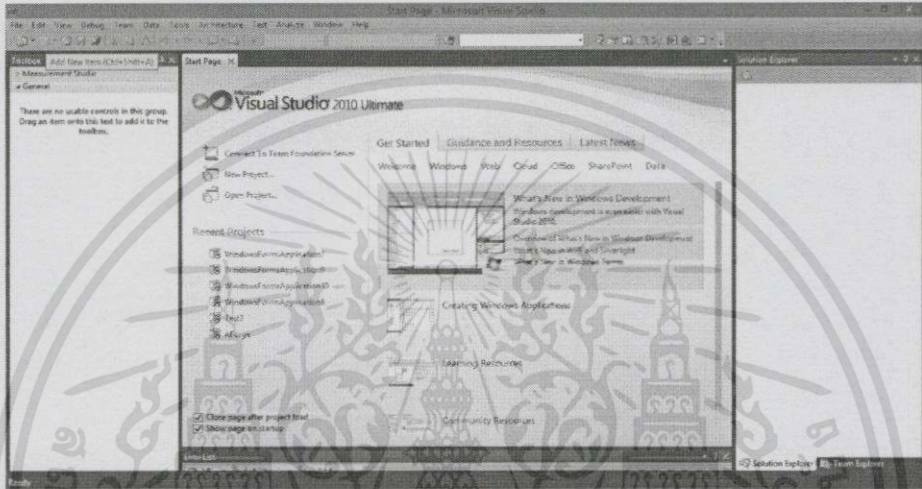
- [1] ณรงค์ ต้นชีวะวงศ์. 2554. ระบบ PLC. พิมพ์ครั้งที่ 21. กรุงเทพฯ : สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น).
- [2] ธนาธร เฉลิมชุตติเดช. 2555. ระบบตรวจสอบสิ่งแปลกปลอมในเมล็ดพืชโดยใช้วิธีการเอกซเรย์เทอร์โมกราฟฟี. ปริญญาานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมการวัดคุม, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [3] นวภัทรา หนูนาท และทวีพล ชื้อสตัย. 2555. การวัดและเครื่องมือวัด ประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร. กรุงเทพฯ : สาขาวิชาวิศวกรรมอาหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [4] นันทนา ดวงศรี. 2555. เครื่องตรวจสอบชิ้นงานด้วยภาพอัตโนมัติโดยใช้วิธีเทียบต้นแบบ. นิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมการวัดคุม, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [5] บัญชา ปะสีละเตสัง. 2552. พัฒนาแอปพลิเคชันด้วย Visual C# 2008. กรุงเทพฯ : ซีเอ็ดยูเคชั่น, บมจ.
- [6] ยุทธพงศ์ ทัพผดุง,ธีระวัฒน์ หนูนาท,ทวีพล ชื้อสตัย และนวภัทรา หนูนาท. 2555. การใช้เทคโนโลยีภาพถ่ายความร้อนอินฟราเรดอย่างมืออาชีพ. กรุงเทพฯ : วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์.
- [7] สุพรรณ กุลพานิชย์. 2533. Programmable controller เทคนิคและการใช้งานเบื้องต้น. เล่มที่ 1. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ : โรงพิมพ์ทิพย์วิสุทธิ์.
- [8] FLIR Systems. 2557. Thermal imaging cameras in the food industry. [Online]. Available : <http://www.flir.co.uk/cs/display/?id=41781>.
- [9] Fluke. 2557. Fluke thermal imagers are on the job because they do the job. [Online]. Available : <http://www.fluke.com/fluke/in/en/Products/Thermal-Cameras.htm>.
- [10] Paul Dvorak. 2556. Is that part hot? Thermal imager tells. [Online]. Available : <http://www.windpowerengineering.com/maintenance/is-that-part-hot-thermal-imager-tells/>.

## ภาคผนวก

### 1. การออกแบบโปรแกรม Visual C#

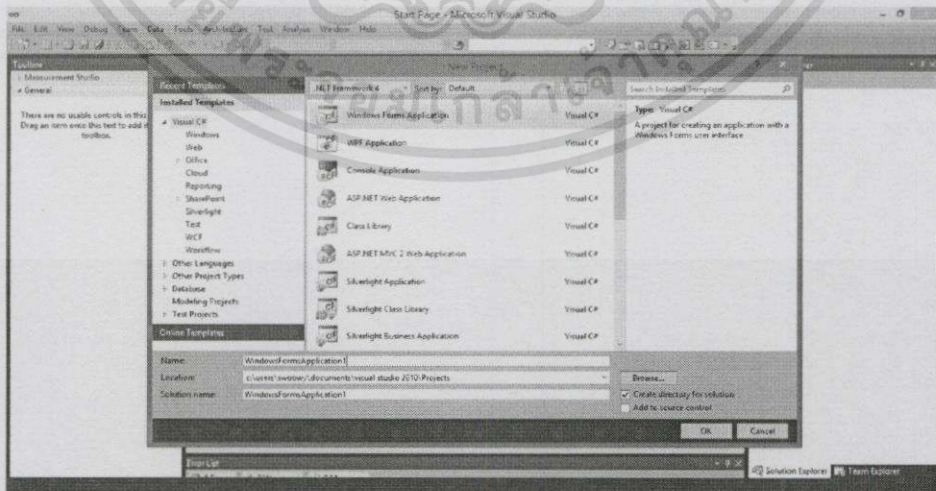
#### 1.1 การใช้งานโปรแกรม Visual C# with AForge.NET

1. เปิด Microsoft Visual Studio (Visual C#) ขึ้นมาพร้อมกับสร้างโปรเจกใหม่ (New Project)



รูปที่ 1 การใช้งานโปรแกรม Visual C# (1)

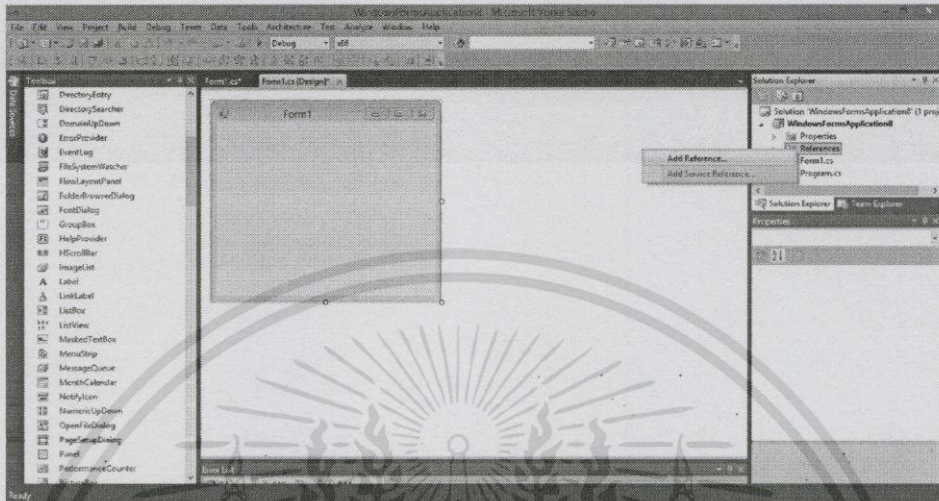
2. เลือกประเภทของโปรเจกเป็น Windows Form Application ของ Visual C# พร้อมตั้งชื่อของโปรเจกและตำแหน่งที่จะบันทึกโปรเจกให้เรียบร้อย จากนั้นกดปุ่ม OK



รูปที่ 2 การใช้งานโปรแกรม Visual C# (2)

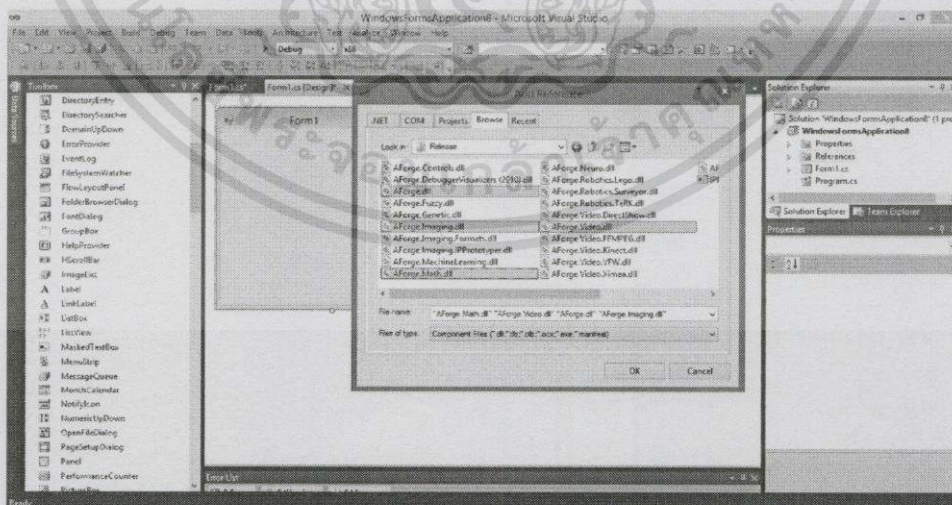
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. หน้าต่างเริ่มต้นของโปรแกรม จากนั้นทำการเพิ่มไลบรารีของ AForge.NET ให้กับโปรเจกก่อน โดยการคลิกเมา์ที่ขวาที่ References ในส่วนของ Solution Explorer แล้วเลือก Add References



รูปที่ 3 การใช้งานโปรแกรม Visual C# (3)

4. ที่หน้าต่าง Add References ให้เลือกแท็บ Browse แล้วทำการเปลี่ยนตำแหน่งการค้นหาที่ช่อง Look in ไปยังโฟลเดอร์ที่ทำการติดตั้ง AForge.NET ไว้ แล้วเข้ายังโฟลเดอร์ Release ให้ทำการเลือกไฟล์ .dll จำนวน 4 ไฟล์คือ “AForge.dll” , “AForge.Imaging.dll” , “AForge.Math.dll” และ AForge.Video.dll” จากนั้นกดปุ่ม OK



รูปที่ 4 การใช้งานโปรแกรม Visual C# (4)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. กลับมาที่ฟอร์มให้เลือกมุมมองโค้ดโดยการกดปุ่ม F7 จากนั้น เพิ่มบรรทัดคำสั่งเพื่อเรียกใช้ namespace ของ AForge.NET ดังนี้

```
using System;
using System.Collections.Generic;
using System.ComponentModel;
using System.Data;
using System.Drawing;
using System.Linq;
using System.Text;
using System.Windows.Forms;

using AForge;
using AForge.Imaging;
using AForge.Imaging.ComplexFilters;
using AForge.Imaging.ColorReduction;
using AForge.Imaging.Filters;
using AForge.Video;
using AForge.Video.DirectShow;
using AForge.Math.Geometry;
```

รูปที่ 5 การใช้งานโปรแกรม Visual C# (5)

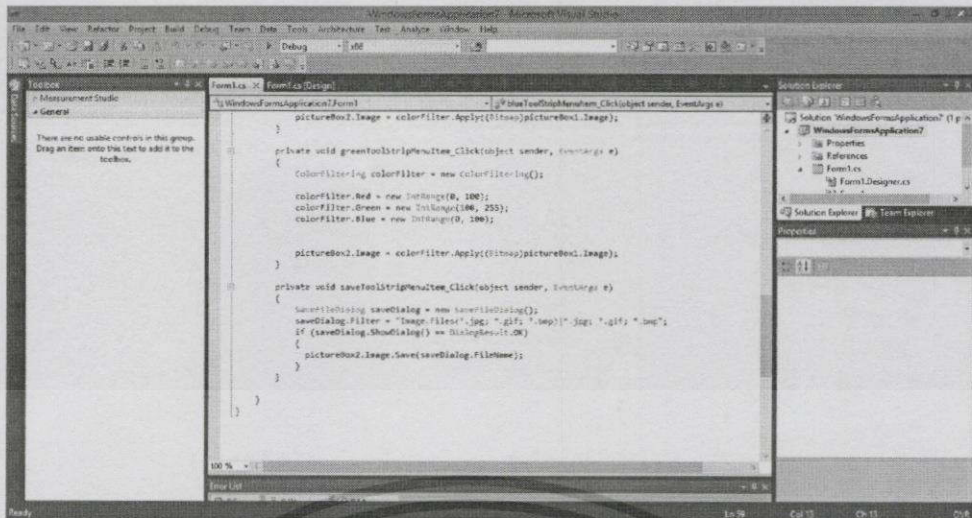
6. ทำการสร้าง ฟอร์มและองค์ประกอบต่างๆดังรูป



รูปที่ 6 การใช้งานโปรแกรม Visual C# (6)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้





## รูปที่ 9 การใช้งานโปรแกรม Visual C# (9)

### 1.2 โปรแกรมที่ใช้ในการประมวลผลภาพถ่ายทางความร้อน

```

using System;
using System.Collections.Generic;
using System.ComponentModel;
using System.Data;
using System.Drawing;
using System.Linq;
using System.Text;
using System.Windows.Forms;

using AForge;
using AForge.Imaging;
using AForge.Imaging.ComplexFilters;
using AForge.Imaging.ColorReduction;
using AForge.Imaging.Filters;
using AForge.Video;
using AForge.Video.DirectShow;
using AForge.Math.Geometry;

```

```

namespace WindowsFormsApplication7
{

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

public partial class Form1 : Form
{
    private Bitmap image;

    public Form1()
    {
        InitializeComponent();
    }

    private void openToolStripMenuItem_Click(object sender,
    EventArgs e)
    {
        OpenFileDialog openFileDialog = new OpenFileDialog();
        openFileDialog.Filter = "Image Files(*.jpg; *.gif; *.bmp)|*.jpg; *.gif;
        *.bmp";
        if (openFileDialog.ShowDialog() == DialogResult.OK)
        {
            image = new Bitmap(openFileDialog.FileName);
            pictureBox1.Image = image;
        }
    }

    private void redToolStripMenuItem_Click(object sender,
    EventArgs e)
    {
        HSLFiltering filter = new HSLFiltering();
        filter.Hue = new IntRange(340, 61);
        filter.UpdateLuminance = false;
        filter.UpdateHue = false;
        pictureBox2.Image = filter.Apply((Bitmap)pictureBox1.Image);
    }
}

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

private void blueToolStripMenuItem_Click(object sender,
EventArgs e)
{
    ColorFiltering colorFilter = new ColorFiltering();

    colorFilter.Red = new IntRange(0, 75);
    colorFilter.Green = new IntRange(0, 75);
    colorFilter.Blue = new IntRange(100, 255);

    pictureBox2.Image=
colorFilter.Apply((Bitmap)pictureBox1.Image);
}

private void greenToolStripMenuItem_Click(object sender,
EventArgs e)
{
    ColorFiltering colorFilter = new ColorFiltering();

    colorFilter.Red = new IntRange(0, 100);
    colorFilter.Green = new IntRange(100, 255);
    colorFilter.Blue = new IntRange(0, 100);

    pictureBox2.Image=
colorFilter.Apply((Bitmap)pictureBox1.Image);
}

private void saveToolStripMenuItem_Click(object sender,
EventArgs e)
{
    SaveFileDialog saveDialog = new SaveFileDialog();

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

saveDialog.Filter = "Image.Files(*.jpg; *.gif; *.bmp)|*.jpg; *.gif;
*.bmp";
if (saveDialog.ShowDialog() == DialogResult.OK)
{
    pictureBox2.Image.Save(saveDialog.FileName);
}
}
}
}

```

### 1.3 การใช้งานโปรแกรม Visual C# เพื่อตรวจสอบสิ่งแปลกปลอม

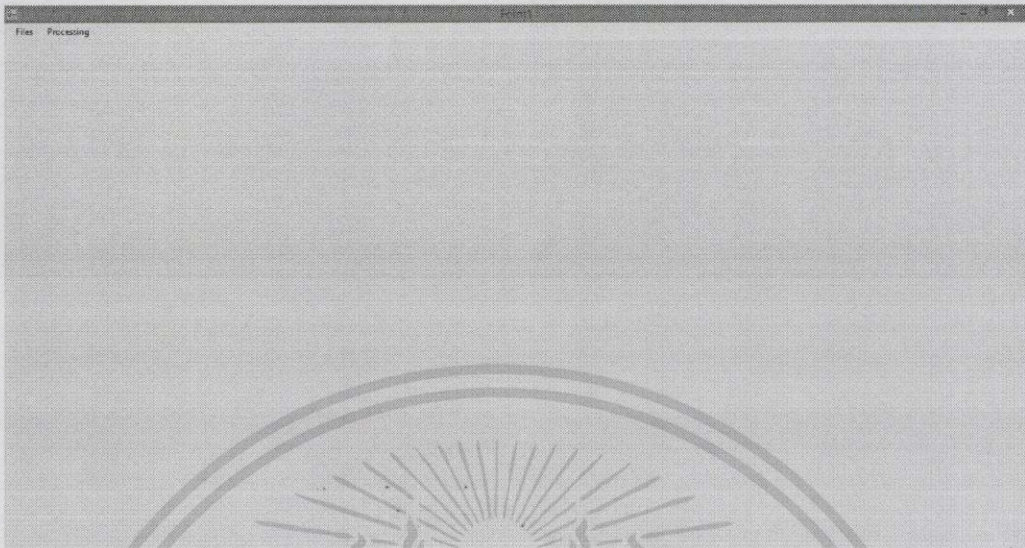
1. ทำการคอมไพล์โปรแกรมโดยกด Debug แล้วเลือก Start Debugging หรือกดปุ่ม F5



รูปที่ 10 การใช้งานโปรแกรมเพื่อตรวจสอบสิ่งแปลกปลอม (1)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2. หน้าต่างของโปรแกรมเมื่อทำการคอมไพล์สำเร็จ



รูปที่ 11 การใช้งานโปรแกรมเพื่อตรวจสอบสิ่งแปลกปลอม (2)

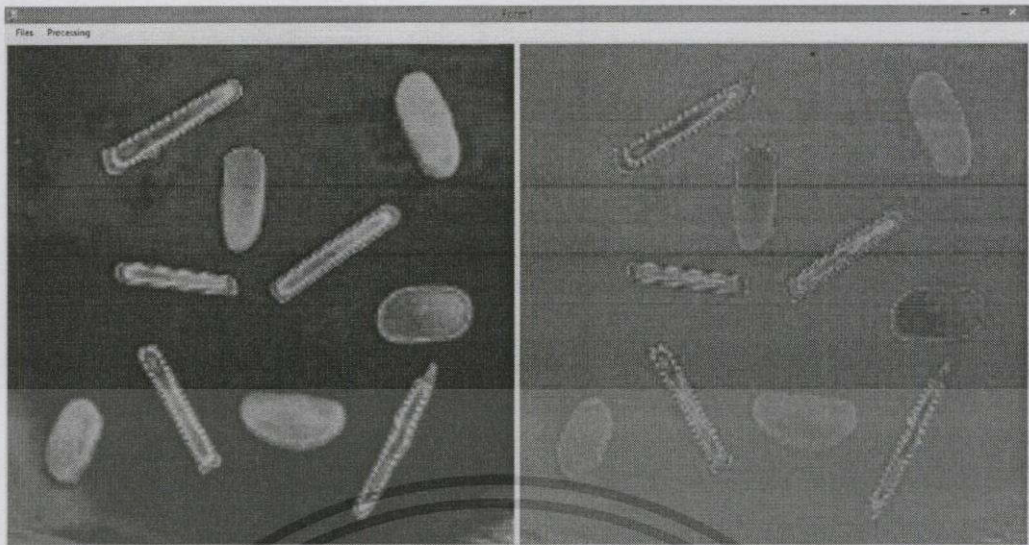
### 3. เลือก Files แล้วเลือก Open เพื่อเรียกดูรูปภาพถ่ายทางความร้อนมาประมวลผล



รูปที่ 12 การใช้งานโปรแกรมเพื่อตรวจสอบสิ่งแปลกปลอม (3)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



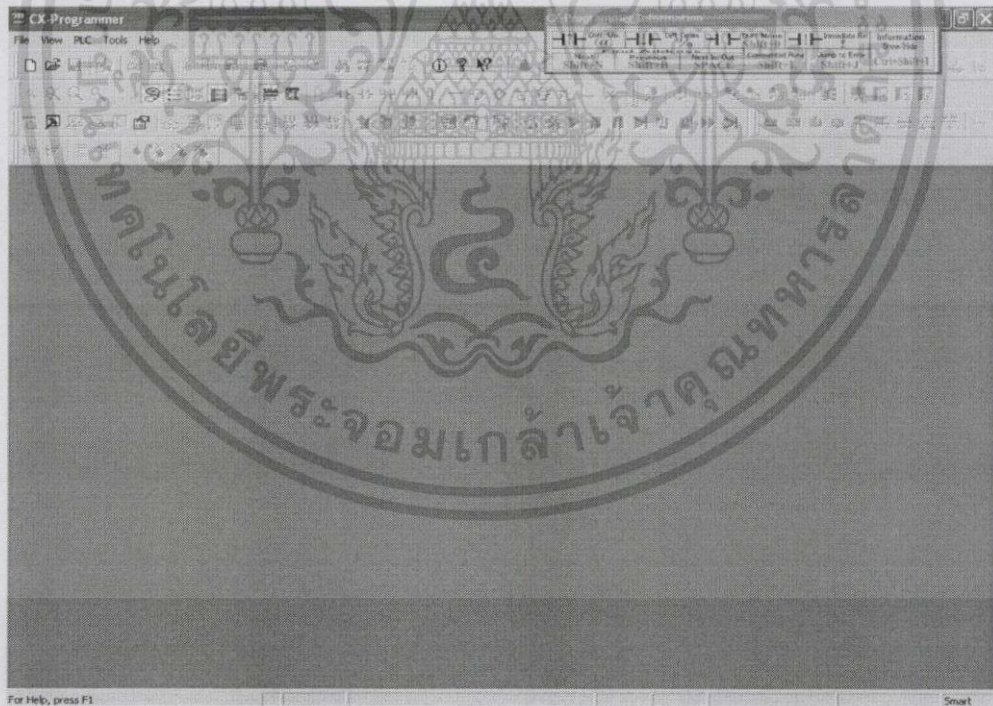


รูปที่ 15 การใช้งานโปรแกรมเพื่อตรวจสอบสิ่งแปลกปลอม (6)

## 2. การออกแบบโปรแกรม CX-Programmer

### 2.1 การใช้งานโปรแกรม CX-Programmer

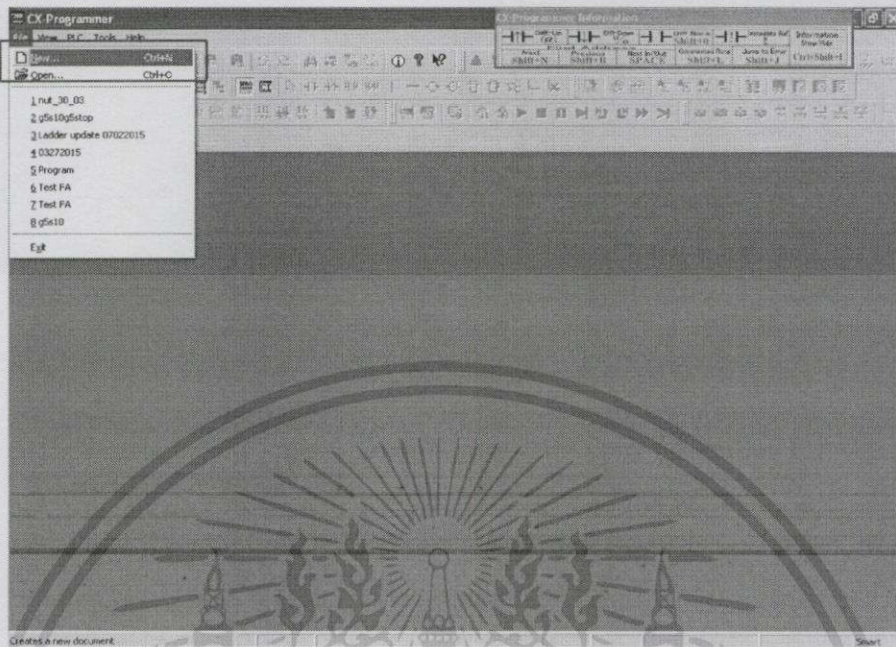
#### 1. เปิดโปรแกรม CX-Programmer



รูปที่ 16 การใช้งานโปรแกรม CX-Programmer (1)

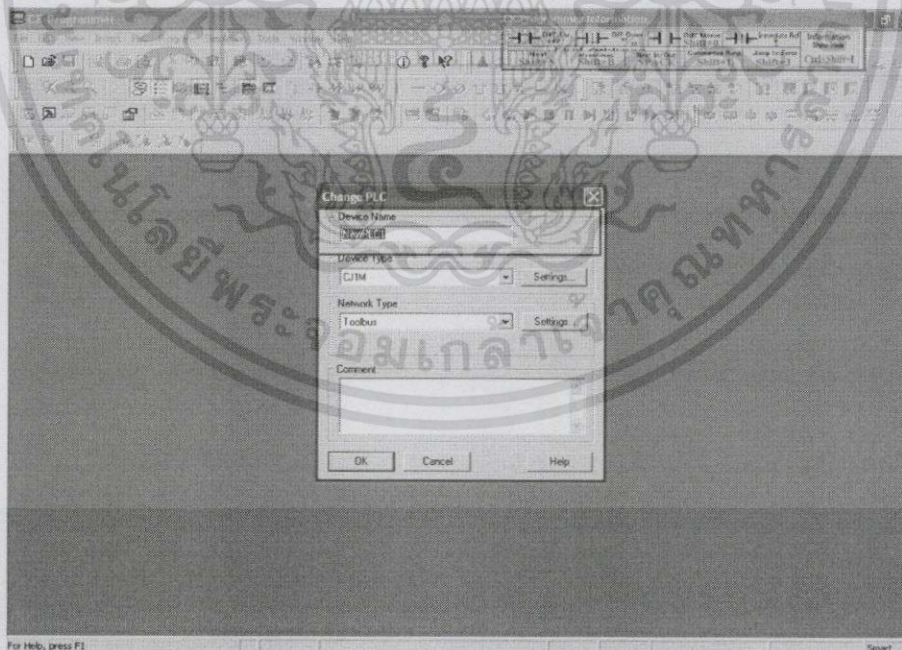
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2. คลิก “File” แล้วเลือก “New” เพื่อเริ่มการเขียนแลตเตอร์



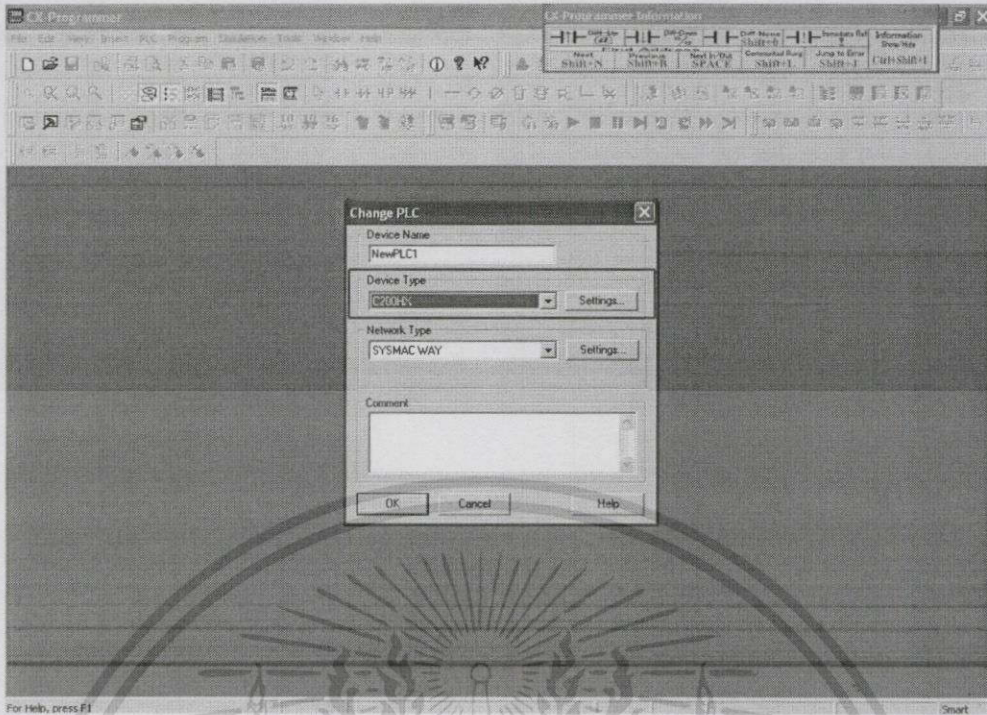
รูปที่ 17 การใช้งานโปรแกรม CX-Programmer (2)

## 3. ตั้งชื่อและรุ่นของพีแอลซี (PLC, Programmable Logic Controller)

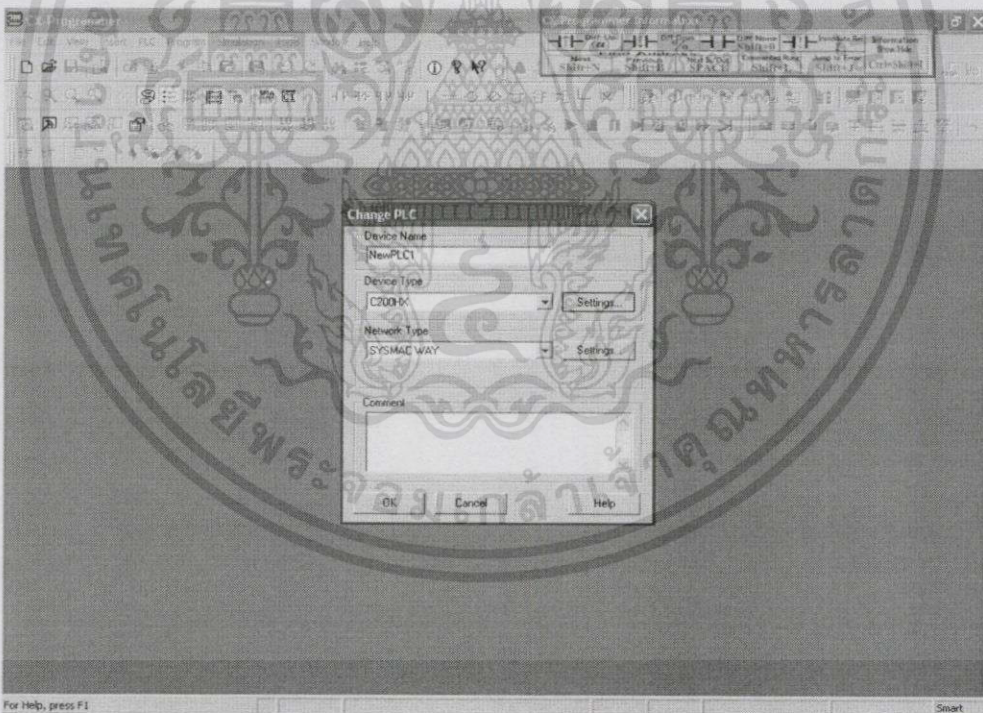


รูปที่ 18 การใช้งานโปรแกรม CX-Programmer (3)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



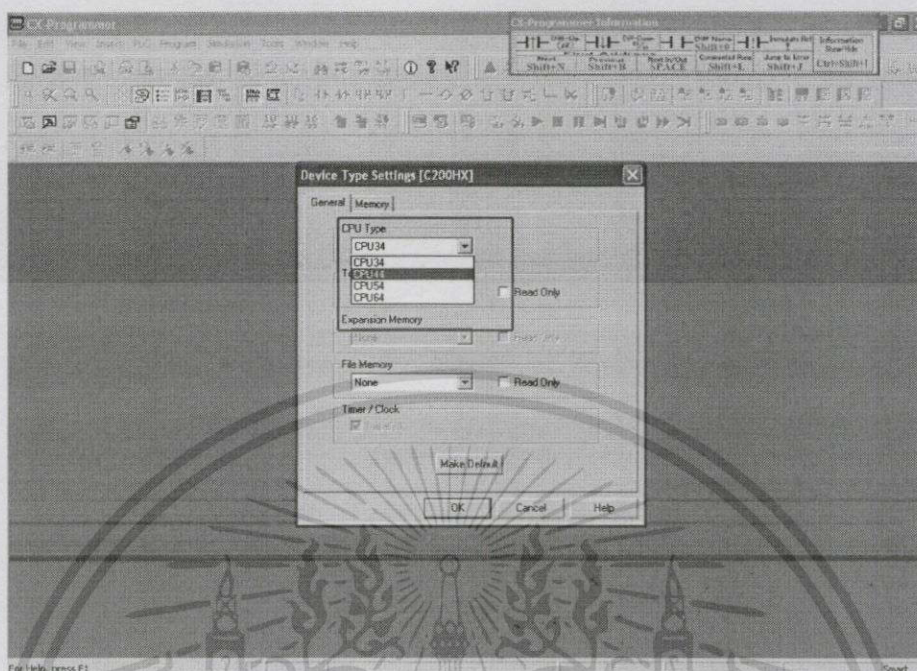
รูปที่ 19 การใช้งานโปรแกรม CX-Programmer (4)



รูปที่ 20 การใช้งานโปรแกรม CX-Programmer (5)

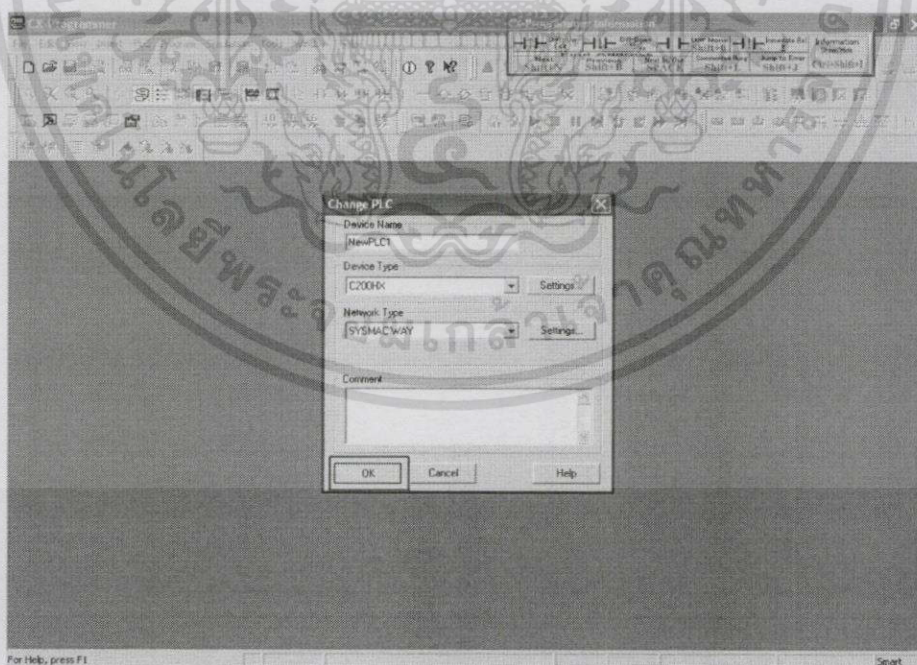
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. ตั้งค่า CPU Type ให้ตรงกับพีแอลซี (PLC, Programmable Logic Controller)



รูปที่ 21 การใช้งานโปรแกรม CX-Programmer (6)

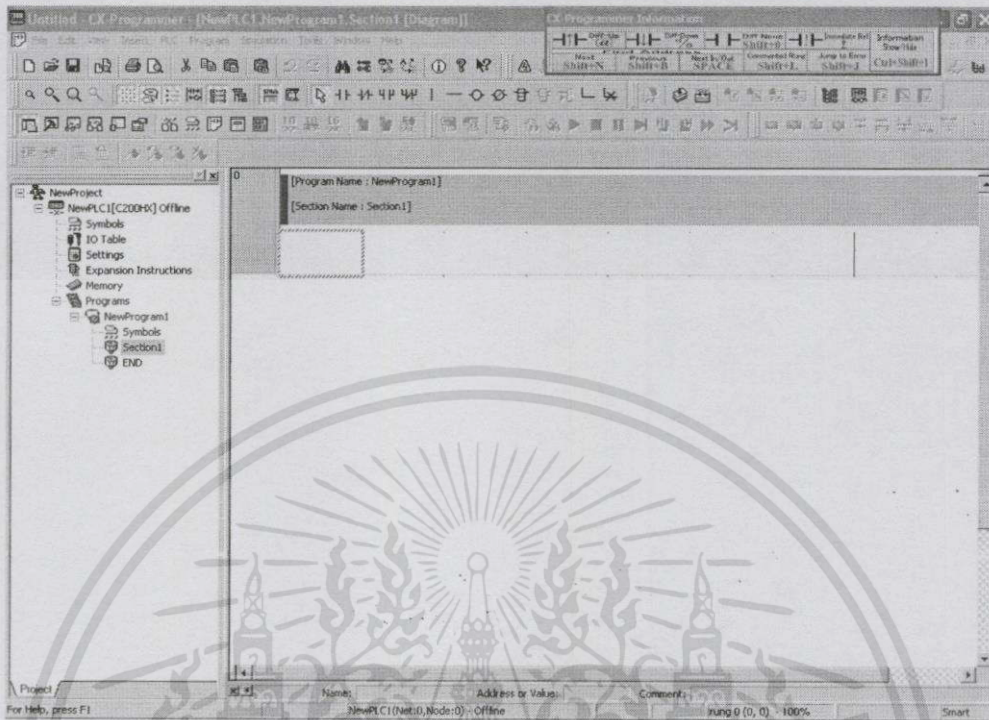
5. คลิก "OK" เพื่อเข้าสู่หน้าต่างในการเขียนแลตเตอร์ไออะแกรม



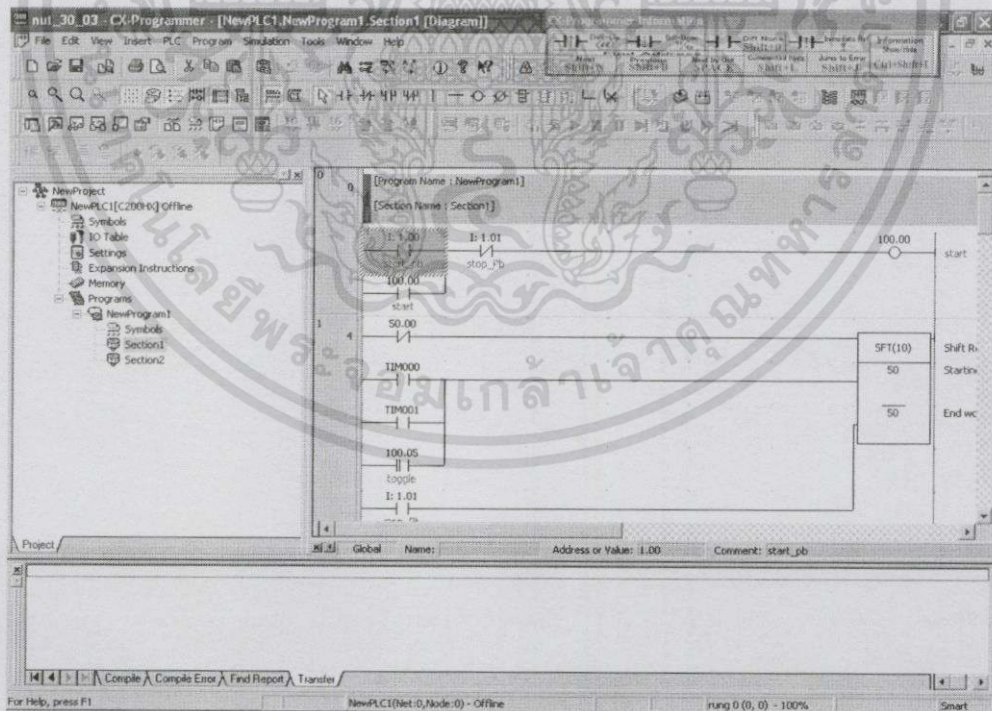
รูปที่ 22 การใช้งานโปรแกรม CX-Programmer (7)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 6. เขียนแลตเตอร์ไดอะแกรม



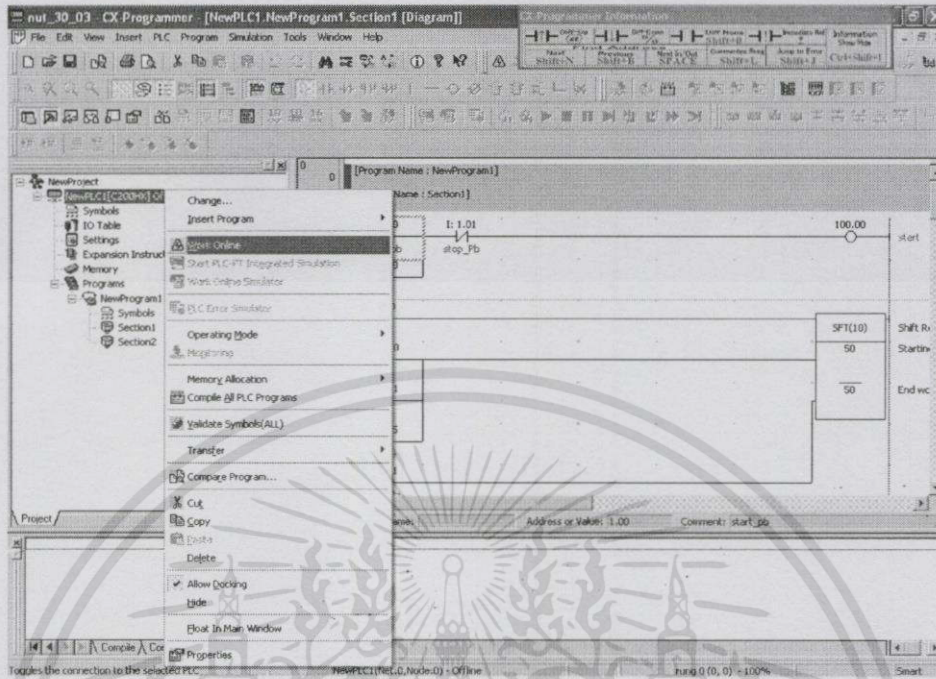
รูปที่ 23 การใช้งานโปรแกรม CX-Programmer (8)



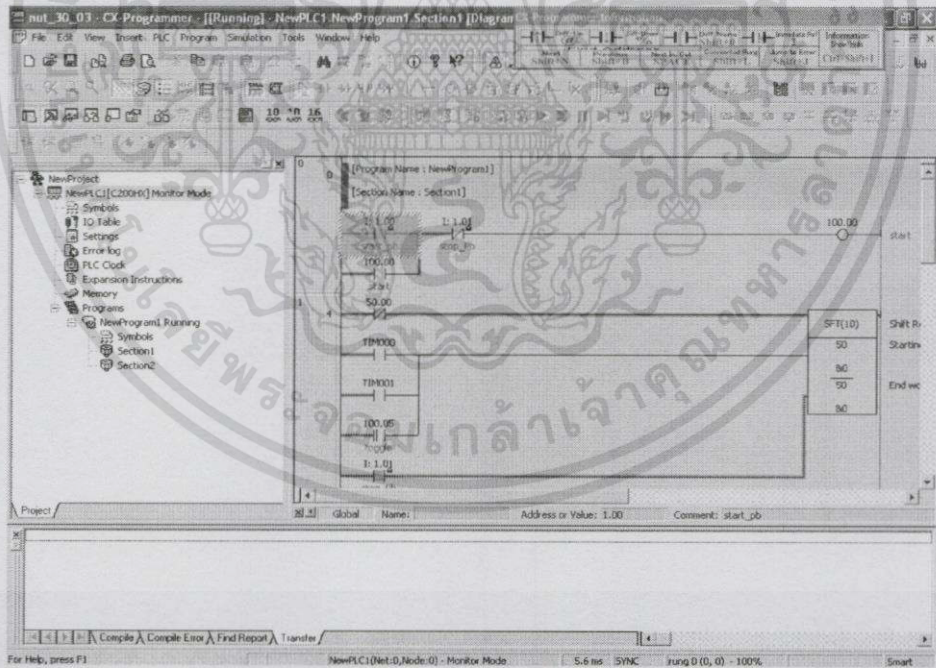
รูปที่ 24 การใช้งานโปรแกรม CX-Programmer (9)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 7. ทำการเชื่อมต่อกับพีแอลซี (PLC, Programmable Logic Controller)



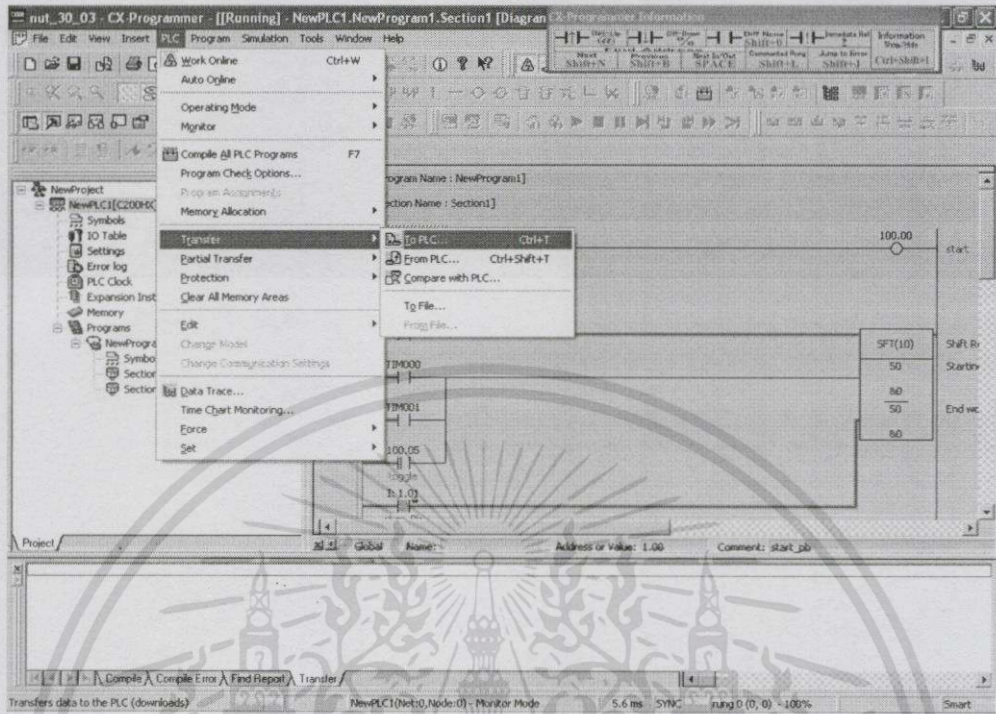
รูปที่ 25 การใช้งานโปรแกรม CX-Programmer (10)



รูปที่ 26 การใช้งานโปรแกรม CX-Programmer (11)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

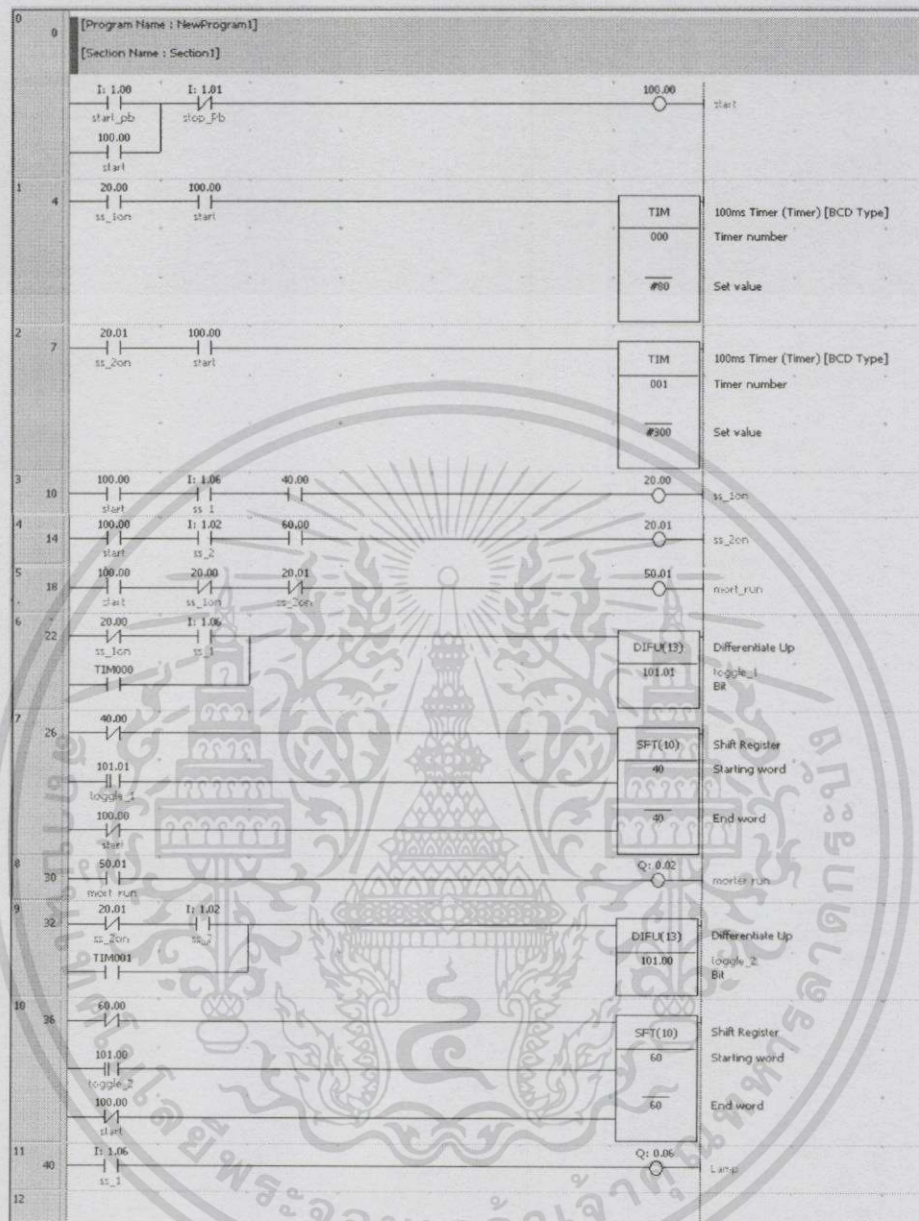
### 8. ดาวโหลดโปรแกรมลงพีแอลซี (PLC, Programmable Logic Controller)



รูปที่ 27 การใช้งานโปรแกรม CX-Programmer (12)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.2 แลตเตอรืโตะแกรมของชุดสายพานลำเลียง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้