การตรวจจับสิ่งแปลกปลอมในข้าวโดยใช้การประมวลผลภาพสองมิติผสมกับภาพถ่ายความร้อน

DETECTION OF FOREIGN BODIES IN RICE USING FUSION OF 2D IMAGE AND THERMAL IMAGE PROCESSING

อภิชญา เงินสด
APICHAYA NGOENSOD

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมการวัดคุม
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ. 2560
KMITL-2017-EN-M-060-094

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การตรวจจับสิ่งแปลกปลอมในข้าวโดยใช้การประมวลผลภาพสองมิติผสมกับภาพถ่ายความร้อน

DETECTION OF FOREIGN BODIES IN RICE USING FUSION OF 2D IMAGE AND THERMAL IMAGE PROCESSING

T148267

อภิชญา เงินสด

APICHAYA NGOENSOD

สาขหมู่.....
เลขทะเบียน 148267
วัน.เดือน.ปี 18 ต.ค. 2560

b.....
l.....

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมการวัดคุม

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2560

KMITL-2017-EN-M-060-094

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

DETECTION OF FOREIGN BODIES IN RICE USING FUSION OF 2D IMAGE AND THERMAL IMAGE PROCESSING

APICHAYA NGOENSOD

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT

OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF

MASTER OF ENGINEERING IN INSTRUMENTATIONS ENGINEERING

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2017

KMITL-2017-EN-M-060-094

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

COPYRIGHT 2017

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การตรวจจับสิ่งแปลกปลอมในข้าวโดยใช้การประมวลผลภาพสองมิติผสมกับภาพถ่ายความร้อน

Thesis Title Detection of Foreign Bodies in Rice using Fusion of 2D Image and Thermal Image Processing

นักศึกษา นางสาวอภิชญา เงินสด

รหัสประจำตัว 59601293

ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา วิศวกรรมการวัดคุม

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รศ.ดร.ทวีพล ซื่อสัตย์

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ (ร่วม) รศ.ดร.นวภัทรา หนูนาค

หมายเลขวิทยานิพนธ์ KMITL-2017-EN-M-060-094

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
ดร.ยุทธพงศ์	ทัพผดุง	
รศ.ดร.วิทยา	ทิพย์สุวรรณพร	
รศ.วิริยะ	กองรัตน์	
รศ.ดร.นวภัทรา	หนูนาค	
รศ.ดร.ทวีพล	ซื่อสัตย์	

วัน / เดือน/ ปี ที่สอบ วันศุกร์ที่ 30 มิถุนายน พ.ศ. 2560 เวลา 15.00-17.00 น.
สถานที่สอบ ณ อาคาร A ชั้น 5 ห้องประชุม 3

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์ ดร. คมสัน มาลีสี)
คณบดี คณะวิศวกรรมศาสตร์
วันที่ 30 มิถุนายน พ.ศ. 2560

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การตรวจจับสิ่งแปลกปลอมในข้าวโดยใช้การประมวลผลภาพสองมิติผสมกับภาพถ่ายความร้อน
นักศึกษา	นางสาว อภิชญา เงินสด
รหัสประจำตัว	59601293
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมการวัดคุม
พ.ศ.	2560
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ. ดร.ทวีพล ซื่อสัตย์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ (ร่วม)	รศ. ดร.นวภัทรา หนูนาค

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอการตรวจจับสิ่งแปลกปลอมที่ปะปนในข้าวด้วยการประมวลผลภาพสองมิติผสมผสานกับการประมวลผลภาพถ่ายความร้อน โดยชนิดของสิ่งแปลกปลอมที่ปะปนในข้าวได้แก่ หิน เศษไม้ และพลาสติก ในการนำภาพถ่ายความร้อนมาประมวลผลภาพประกอบด้วย 2 เทคนิคคือ การประมวลผลภาพแบบสองมิติโดยใช้หลักการวัดความแตกต่างของพื้นที่และความยาวของเส้นทแยงมุมของวัตถุ และการประมวลผลภาพถ่ายความร้อนซึ่งใช้หลักการแอคทีฟเทอร์โมกราฟฟี จากผลการทดลองพบว่าการประมวลผลภาพสองมิติเพียงขั้นตอนเดียวให้ประสิทธิภาพในการตรวจจับพลาสติกที่ต่ำ มีค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดเท่ากับ 53.15% ขณะเดียวกันการประมวลผลภาพถ่ายความร้อนให้ประสิทธิภาพในการตรวจจับหินที่ต่ำ มีค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดเท่ากับ 93.17% และผลการทดลองจากการประยุกต์การประมวลผลภาพสองมิติร่วมผสมผสานกับการประมวลผลภาพถ่ายความร้อนโดยการทดลองแบบออฟไลน์ พบเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดจากการตรวจจับหิน เศษไม้ และพลาสติกมีค่าดีขึ้น คือ 13.81% 1.85% และ 9.39% ตามลำดับ และเมื่อนำไปทดสอบการทำงานของระบบตรวจจับแบบเวลาจริงพบว่า ระบบสามารถตรวจสอบได้ถูกต้องใกล้เคียงการตรวจจับแบบออฟไลน์ โดยเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดจากการตรวจจับหิน เศษไม้ และพลาสติกมีค่าดังนี้ 14.87% 6.06% และ 15.19% ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis Title	Detection of Foreign Bodies in Rice using Fusion of 2D Image and Thermal Image Processing
Student	Mrs. Apichaya Ngoensod
Student ID.	59601293
Degree	Master of Engineering
Program	Instrumentations Engineering
Year	2017
Thesis Advisor	Assoc. Prof. Dr.Taweepol Suesut
Thesis Co – Advisor	Assoc. Prof. Dr. Navapattra Nunak

ABSTRACT

The thesis proposes the detection of foreign bodies in rice by using the fusion of Two-dimension and thermal image processing which including stones, wood sticks, and plastics. The thermal image processing is applied in two techniques; the two-dimensional image processing based on the principle of measuring the difference in area and diagonal of the object; the thermal image processing based on the principle of active thermography. According to the result using only the two-dimensional image processing, provides low efficiency for detecting plastics which the error is 53.15%. Simultaneously, the thermal image processing provides low efficiency for detecting stones which the error is 93.17%. The fusion of 2D image and thermal image processing can improved the foreign bodies detection effectively. The detection error of stones, wood sticks, and plastics are 13.81% 1.85% and 9.39%, respectively. Besides, when applying this technique to real-time implementation, the experiment results are 14.87% 6.06% and 15.19%, respectively which is not significantly different with the off-line image processing.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร.ทวีพล ซื่อสัตย์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้คำแนะนำที่ดีเสมอมา และขอขอบพระคุณ รศ.ดร.นวภัทรา หนูนาค อาจารย์ที่ปรึกษาร่วมวิทยานิพนธ์ ที่ช่วยทำให้วิทยานิพนธ์สำเร็จลุล่วงด้วยดี และที่ขาดไม่ได้คือคณาจารย์ประจำหลักสูตรวิศวกรรมการวัดคุมทุกท่าน ที่ให้ความรู้และสนับสนุนการทำวิจัยในครั้งนี้

ขอกราบขอบพระคุณพ่อ คุณแม่ พี่น้องและเพื่อน ๆ ที่คอยให้กำลังใจ และขอบคุณพี่ ๆ ในห้องปฏิบัติการ เช่น คุณเมธินี สงไทย และทุก ๆ คนที่เกี่ยวข้องสำหรับให้การความสนับสนุนช่วยเหลือในด้านต่าง ๆ

สุดท้ายนี้คุณค่าและคุณประโยชน์อันที่ได้จากการทำวิทยานิพนธ์ครั้งนี้ ผู้เขียนขอมอบแด่ผู้มีพระคุณทุกๆ ท่าน และขอให้ทุกๆ ท่านจงมีแต่ความสุขความเจริญตลอดไป

อภิชญา เงินสด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย..... I

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ..... II

กิตติกรรมประกาศ..... III

สารบัญ..... IV

สารบัญตาราง..... VII

สารบัญรูปภาพ..... VIII

บทที่ 1 บทนำ..... 1

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา..... 1

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการวิจัย..... 2

1.3 ขอบเขตการวิจัย..... 3

1.4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย..... 3

1.5 ประโยชน์ที่ได้รับ..... 3

1.6 รายละเอียดวิทยานิพนธ์..... 4

บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง..... 5

2.1 เทคนิคแอคทีฟเทอร์โมกราฟฟี..... 5

2.1.1 การกระตุ้นด้วยความร้อนแบบพัลซ์..... 6

2.2 สมบัติเชิงความร้อน..... 7

2.3 กล้องถ่ายภาพความร้อน..... 9

2.4 การประมวลผลภาพ..... 10

2.4.1 ประเภทของภาพ..... 11

2.4.1.1 ภาพสองมิติ..... 11

2.4.1.2 ภาพถ่ายความร้อน..... 12

2.4.2 ขั้นตอนการประมวลผลภาพ..... 13

2.5 ทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง..... 17

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

บทที่ 3 วิธีการดำเนินงาน..... 20

3.1 ตัวอย่างและสิ่งแปลกปลอมที่ใช้ในการทดลอง..... 20

3.2 การออกแบบชุดทดลอง..... 21

3.2.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง..... 21

3.2.2 การออกแบบการทดลอง..... 23

3.3 การทดลองเบื้องต้น..... 24

3.3.1 การหาคุณสมบัติทางกายภาพของของวัตถุ..... 24

3.3.2 การหาเวลาที่เหมาะสมในการกระตุ้นความร้อน..... 26

3.3.3 การหาเวลาที่เหมาะสมในการตรวจจับภาพถ่ายความร้อน..... 28

3.4 วิธีการประมวลผลภาพ..... 29

3.3.1 การทดสอบอัลกอลิธึมการประมวลผลภาพเบื้องต้น..... 29

3.3.2 การประมวลผลภาพ 2 มิติ..... 31

3.3.3 การประมวลผลภาพความร้อน..... 34

3.3.4 การประมวลผลภาพ 2 มิติผสมกับภาพความร้อน..... 36

3.5 วิธีการทดลอง..... 39

3.3.1 การตรวจจับสิ่งแปลกปลอมที่ปะปนในข้าวโดยการประมวลผลภาพ... 39

3.3.2 การทดสอบประสิทธิภาพการทำงานของระบบตรวจจับ..... 39

บทที่ 4 ผลการทดลองและการวิจารณ์ผล..... 41

4.1 การตรวจจับสิ่งแปลกปลอมที่ปะปนในข้าว..... 41

4.2.1 การตรวจจับสิ่งแปลกปลอมด้วยการประมวลผลภาพ 2 มิติ..... 41

4.2.2 การตรวจจับสิ่งแปลกปลอมด้วยการประมวลผลภาพถ่ายความร้อน... 43

4.2.3 การทดสอบประสิทธิภาพการทำงานของระบบตรวจจับแบบออนไลน์ ด้วยการประมวลผลภาพ 2 มิติร่วมกับภาพความร้อน..... 45

4.2 การทดสอบการทำงานของระบบตรวจจับแบบออนไลน์..... 47

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ..... 50

5.1 สรุปผลการวิจัย..... 50

5.2 ข้อเสนอแนะ..... 51

เอกสารอ้างอิง..... 52

ภาคผนวก..... 56

ภาคผนวก ก การใช้งานโปรแกรม Thermacam ในการวิเคราะห์ภาพถ่ายความร้อน..... 57

ภาคผนวก ข การใช้งานโปรแกรมหาค่าพารามิเตอร์ของวัสดุ..... 67

ภาคผนวก ค การใช้งานโปรแกรมประมวลผลภาพ 2 มิติ..... 73

ภาคผนวก ง การใช้งานโปรแกรมประมวลผลภาพถ่ายความร้อน..... 78

ภาคผนวก จ การใช้งานโปรแกรมประมวลผลภาพ 2 มิติผสมภาพถ่ายความร้อน..... 83

ภาคผนวก ฉ ผลการทดลองการตรวจจับสิ่งแปลกปลอม..... 88

ภาคผนวก ช ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการทำวิทยานิพนธ์และได้รับการตีพิมพ์..... 91

ประวัติผู้เขียน..... 96

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	ตัวอย่างค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อน	8
2.2	ตัวอย่างค่าความจุความร้อนจำเพาะ	9
3.1	คุณลักษณะทางเทคนิคของกล้องถ่ายภาพความร้อน	22
3.2	แสดงค่าคุณสมบัติทางกายภาพของของวัตถุ	25
4.1	จำนวนสิ่งแปลกปลอมเฉลี่ยที่ตรวจจับได้จากการประมวลผลภาพ 2 มิติ	41
4.2	จำนวนสิ่งแปลกปลอมเฉลี่ยที่ตรวจจับได้จากการประมวลผลภาพความร้อน	43
4.3	จำนวนสิ่งแปลกปลอมเฉลี่ยที่ตรวจจับได้จากการประมวลผลภาพสองมิติรวมกับภาพความร้อน	46
4.4	จำนวนสิ่งแปลกปลอมเฉลี่ยที่ตรวจจับได้จากการทดสอบประสิทธิภาพการทำงานของระบบตรวจจับ	48

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพ

รูปที่		หน้า
2.1	ตัวอย่างแหล่งพลังงานความร้อน	6
2.2	การกระตุ้นความร้อนแบบพัลซ์	7
2.3	หลักการทำงานของกล้องถ่ายภาพความร้อน	10
2.4	ตัวอย่างประเภทของภาพภาพสองมิติ	12
2.5	ภาพถ่ายความร้อนรูปแบบต่างๆ	12
2.6	การได้มาของภาพ	13
2.7	การขยายข้อมูลแบบ Histogram Equalization	14
2.8	ตัวอย่างการขยายภาพ	15
2.9	ตัวอย่างการย่อภาพ	16
2.10	ตัวอย่างการโอเพนนิ่ง	16
2.11	ตัวอย่างการโคลสซิ่ง	17
3.1	ข้าวกล้อง	20
3.2	สิ่งแปลกปลอม	20
3.3	แผ่นอะลูมิเนียม	22
3.4	หลอดไฟฮาโลเจน 50 - 60 Hz	22
3.5	กล้องถ่ายภาพความร้อน FLIR รุ่น A315	23
3.6	คอมพิวเตอร์ประมวลผล (Computer System)	23
3.7	ชุดทดลอง	24
3.8	ตัวอย่างและสิ่งแปลกปลอม	25
3.9	ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้ในการกระตุ้นความร้อน (วินาที) กับอุณหภูมิหลังวัตถุคายความร้อน 2 วินาที (องศาเซียลเซียส)	27
3.10	ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้ในการกระตุ้นความร้อน (วินาที) กับอุณหภูมิหลังวัตถุคายความร้อน 2 วินาที (องศาเซียลเซียส)	28
3.11	การทดสอบอัลกอลิธึมการประมวลผลภาพเบื้องต้น	30
3.12	การหาความยาวเส้นทแยงมุม	31
3.13	อัลกอลิธึมการตรวจจับสิ่งแปลกปลอมที่ปะปนโดยใช้การประมวลผลภาพ 2 มิติ	32

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

หน้า

รูปที่

3.14 ตัวอย่างการตรวจจับวัตถุที่มีขนาดไม่เท่ากับข้าว..... 33
3.15 ตัวอย่างการตรวจจับวัตถุที่มีขนาดเท่ากับข้าว แต่ความยาวเส้นทแยงมุมไม่เท่ากับข้าว..... 33
3.16 ตัวอย่างการตรวจจับวัตถุที่มีขนาดเท่ากับข้าว แต่ความยาวเส้นทแยงมุมเท่ากับข้าว... 34
3.17 อัลกอลิธึมการตรวจจับสิ่งแปลกปลอมที่ปะปนโดยใช้การประมวลผลภาพความร้อน 35
3.18 ตัวอย่างการตรวจจับวัตถุคุณสมบัติทางความร้อนแตกต่างกับเมล็ดข้าว..... 35
3.19 ตัวอย่างการตรวจจับวัตถุคุณสมบัติทางความร้อนใกล้เคียงกับเมล็ดข้าว..... 36
3.20 อัลกอลิธึมการตรวจจับสิ่งแปลกปลอมที่ปะปนโดยใช้การประมวลผลภาพ 2 มิติผสมกับภาพถ่ายความร้อน..... 37
3.21 ชุดทดลองการทดสอบประสิทธิภาพการทำงานของระบบตรวจจับ..... 40
4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนสิ่งแปลกปลอมที่ใส่ในการทดลองกับเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดในการตรวจจับสิ่งแปลกปลอมจากการประมวลผลภาพ 2 มิติ..... 42
4.2 ตัวอย่างการตรวจจับสิ่งแปลกปลอมด้วยภาพ 2 มิติ..... 43
4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนสิ่งแปลกปลอมที่ใส่ในการทดลองกับเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดในการตรวจจับสิ่งแปลกปลอมจากการประมวลผลภาพความร้อน..... 44
4.4 ตัวอย่างการตรวจจับสิ่งแปลกปลอมด้วยภาพ 2 มิติความร้อน..... 45
4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนสิ่งแปลกปลอมที่ใส่ในการทดลองกับเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดในการตรวจจับสิ่งแปลกปลอมจากการประมวลผลภาพ 2 มิติผสมกับภาพความร้อน..... 46
4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนสิ่งแปลกปลอมที่ใส่ในการทดลองกับเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดในการตรวจจับสิ่งแปลกปลอมจากการประมวลผลภาพ 2 มิติผสมกับภาพความร้อนจากการทดสอบการทำงานของระบบตรวจจับ..... 48

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ข้าวเป็นธัญหารหลักที่มีความสำคัญต่อชาวโลก รวมถึงประเทศไทยซึ่งเป็นหนึ่งในประเทศที่ส่งออกข้าวมากเป็นอันดับต้น ๆ โดยในช่วงเดือนมกราคมถึงเดือนมิถุนายนปี 2559 ที่ผ่านมาประเทศไทยสามารถส่งออกข้าวได้ถึง 4,990,000 ตัน [1] ดังนั้นข้าวจึงสร้างรายได้ให้แก่ประเทศไทยเป็นจำนวนมากและยังเป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญ ข้าวมีหลายประเภท ได้แก่ ข้าวกล้อง ข้าวขาว ข้าวเปลือก ฯลฯ ในอุตสาหกรรมการผลิตข้าวผู้ผลิตต้องการผลิตข้าวที่มีความสะอาดและปราศจากสิ่งแปลกปลอมปะปน โดยสิ่งแปลกปลอมสามารถปะปนได้จากหลายขั้นตอน [2] เช่น ขั้นตอนการเก็บเกี่ยว ขั้นตอนการขนส่ง หรือ ขั้นตอนการเก็บรักษา เป็นต้น [3] ซึ่งสิ่งแปลกปลอมจะแทรกเข้ามาระหว่างกระบวนการต่างๆทำให้ผลิตภัณฑ์มีคุณภาพต่ำลง โดยปกติสิ่งแปลกปลอมที่พบในข้าว เช่น แกลบ หิน เศษดิน วัชพืช พลาสติก และเศษไม้ [4] ดังนั้นจึงต้องมีการเพิ่มขั้นตอนการตรวจสอบในกระบวนการผลิตเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่บริสุทธิ์ วิธีดั้งเดิมในการคัดแยกสิ่งแปลกปลอมออกจากผลิตภัณฑ์ได้แก่ การใช้แรงงานมนุษย์ หรืออุปกรณ์ช่วยในการคัดแยก แต่ผลจากวิธีการนี้ได้ประสิทธิภาพไม่ดีตามที่ควร เนื่องจากแรงงานมนุษย์ เกิดความล้า และการสัมผัสทำให้เกิดความเสียหายต่อวัตถุดิบ

ในการแก้ปัญหาดังกล่าวมีการนำเทคนิคการประมวลผลภาพมาประยุกต์ใช้ในด้านอุตสาหกรรม โดยเข้ามาแทนที่การใช้แรงงานมนุษย์ในการตรวจสอบผลิตภัณฑ์เพื่อลดการทำงานที่ผิดพลาด การประมวลผลภาพเป็นสิ่งจำเป็นในการตรวจสอบคุณภาพของผลิตภัณฑ์โดยเฉพาะผลิตภัณฑ์ที่มีการผลิตปริมาณมากในแต่ละวัน เนื่องจากการผลิตดังกล่าวต้องการให้กระบวนการดำเนินไปอย่างอัตโนมัติ ทำให้ประหยัดเวลาในการตรวจสอบและค่าใช้จ่ายในการจ้างแรงงานมนุษย์ ดังนั้นเทคโนโลยีการประมวลผลภาพจึงสามารถแก้ปัญหาต่างในระบบตรวจสอบของโรงงานอุตสาหกรรมได้ เช่น ระบบตรวจสอบคุณภาพของวัตถุ ระบบคัดแยกเกรดของผลไม้อัติโนมัติ เป็นต้น ระบบเหล่านี้เป็นระบบตรวจสอบเพื่อคัดสินค้าที่มีคุณภาพมาตราฐาน ดังนั้นในโรงงานอุตสาหกรรมนิยมใช้การประมวลผลภาพในการตรวจสอบคุณภาพของสินค้า [5]

อุตสาหกรรมการผลิตข้าวมีวิธีการตรวจสอบสิ่งแปลกปลอมที่ปะปนมาในวัตถุดิบโดยการใช้เครื่องคัดแยกสี (Color Sorter) ซึ่งเป็นเครื่องจักรที่นำมาใช้คัดแยกสิ่งแปลกปลอมหรือสิ่งเจือปนอื่น ๆ ที่มีสีแตกต่างจากผลิตภัณฑ์จากการประมวลผลภาพ 2 มิติที่มาจากกล้อง CCD ทำให้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพกับผลิตภัณฑ์ที่มีข้อบกพร่องหรือสิ่งแปลกปลอมสามารถแยกออกจากกันอย่างสิ้นเชิงด้วยเครื่องจักรที่มีความเร็วสูง [6] พบว่าเครื่องคัดแยกสีสามารถลดจำนวนสิ่งแปลกปลอมได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แต่ประสิทธิภาพการทำงานนั้นไม่สามารถคัดแยกได้อย่างสมบูรณ์ เนื่องจากมีข้อจำกัดหลาย ๆ อย่าง เช่น การประมวลผลภาพ 2 มิติจากกล้อง CCD ของเครื่องคัดแยกสีไม่สามารถแยกความแตกต่างของวัสดุต่างชนิดกันที่มีรูปร่างเหมือนกัน ขนาดเท่ากันและสีเหมือนกันได้

ในช่วงที่ผ่านมาได้มีการประยุกต์ใช้กล้องถ่ายภาพความร้อนอินฟราเรดกับการประมวลผลภาพสำหรับตรวจจับสิ่งแปลกปลอม ซึ่งวิธีดังกล่าว เป็นวิธีการตรวจจับแบบไม่ทำลาย ไม่สัมผัสกับวัตถุ และไม่ก่อให้เกิดความเสียหายต่อผลิตภัณฑ์ทั้งด้านคุณภาพและกายภาพ ซึ่งเป็นวิธีที่มีความเหมาะสมในการประเมินคุณภาพของผลไม้ ผัก เมล็ดธัญพืช แป้ง เมล็ดกาแฟ ฯลฯ [7] เทคนิคนี้สามารถใช้ตรวจจับสิ่งแปลกปลอมหรือสารปนเปื้อนในผลิตภัณฑ์ โดยสิ่งแปลกปลอมจะถูกกำจัดออกจากสายการผลิต ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพและความปลอดภัยสูงสำหรับผู้บริโภค ปัจจุบันมีการใช้ภาพถ่ายความร้อนสำหรับการตรวจจับสิ่งแปลกปลอม เช่น การตรวจจับสิ่งแปลกลอมที่ปะปนในอาหาร [8] และการตรวจจับสิ่งแปลกลอมที่ปะปนในแผ่นบิสกิต [9]

ในการทดสอบด้วยกล้องถ่ายภาพความร้อนอินฟราเรด ประกอบด้วยการทดสอบ 2 แบบคือ การทดสอบด้วยกล้องถ่ายภาพความร้อนอินฟราเรดแบบแอคทีฟ (Active thermography) และแบบพาสซีฟ (Passive Thermography) สำหรับการทดสอบแบบพาสซีฟ (Passive Thermography) เป็นการใช้กล้องถ่ายภาพความร้อนตรวจจับวัตถุที่ต้องการทดสอบโดยไม่ต้องมีการกระตุ้นความร้อน แต่ในการทดสอบแบบแอคทีฟ (Active Thermography) นั้นวัตถุภายใต้การทดสอบจะถูกกระตุ้นด้วยความร้อนที่เหมาะสมจากแหล่งความร้อนภายนอกทำให้ภาพถ่ายความร้อนสามารถแสดงความแตกต่างของความร้อนได้ชัดเจน และภาพถ่ายความร้อนจะถูกเก็บรวบรวมในช่วงเวลาที่กำหนดเพื่อที่จะนำมาการวิเคราะห์ โดยการประมวลผลภาพสามารถระบุสิ่งแปลกปลอมได้ แม้แต่สารปนเปื้อนภายใน โดยในการทดสอบเลือกทดสอบแบบแบบแอคทีฟ (Active Thermography) เนื่องจากต้องการการกระตุ้นความร้อนเผื่อให้ภาพถ่ายความร้อนแสดงความแตกต่างระหว่างข้าวกับสิ่งแปลกปลอม [7]

งานวิจัยนี้จึงเป็นการประยุกต์ใช้การประมวลผลภาพถ่ายความร้อนผสมกับภาพ 2 มิติ โดยใช้ความแตกต่างคุณสมบัติทางความร้อนของชิ้นทดสอบและความแตกต่างของขนาด รูปร่างของชิ้นทดสอบ เพื่อการตรวจสอบสิ่งแปลกปลอมที่ปะปนในข้าวด้วยเทคนิคแอคทีฟเทอร์โมกราฟฟี ซึ่งสิ่งแปลกปลอมที่นำมาตรวจสอบ ได้แก่ หิน พลาสติก และเศษไม้

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

1.2.1 เพื่อศึกษาการตรวจจับสิ่งแปลกปลอมที่ปะปนในข้าวด้วยภาพถ่ายความร้อน

1.2.2 เพื่อพัฒนาโปรแกรมสำหรับประมวลผลภาพ 2 มิติผสมกับภาพถ่ายความร้อน สำหรับตรวจจับสิ่งแปลกปลอมที่ปะปนในข้าว โดยใช้โปรแกรม LabVIEW 2014

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1.3.1 วัสดุที่ใช้ทดลอง

1.3.1.1 ข้าว ได้แก่ ข้าวกล้อง ข้าวขาว

1.3.1.2 สิ่งแปลกปลอม ได้แก่ หิน พลาสติก เศษไม้ และข้าวที่เมล็ดหัก

1.3.2 เทคนิคที่ใช้ในการทดสอบ คือ แอคทีฟเทอร์โมกราฟฟี

1.3.3 กล้องถ่ายภาพความร้อนที่ใช้ในการทดสอบ ยี่ห้อ FLIR รุ่น A315

1.3.4 โปรแกรมที่ใช้ในการประมวลผลภาพ คือ LabVIEW 2014

1.4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

1.4.1 ศึกษาเทคนิคแอคทีฟเทอร์โมกราฟฟี สมบัติเชิงความร้อน หลักการใช้กล้องถ่ายภาพความร้อนสำหรับประยุกต์ในการตรวจจับสิ่งแปลกปลอม การวิเคราะห์ภาพถ่ายความร้อน เทคนิคการประมวลผลภาพ และการใช้โปรแกรม LabVIEW

1.4.2 ทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการตรวจสอบวัสดุและตรวจจับข้อบกพร่องโดยใช้ภาพถ่ายความร้อน

1.4.3 ออกแบบการทดลองการตรวจจับสิ่งแปลกปลอมด้วยภาพถ่ายความร้อน

1.4.4 เขียนโปรแกรมประมวลผลภาพ 2 มิติผสมกับภาพถ่ายความร้อนสำหรับตรวจสอบสิ่งแปลกปลอมที่ปะปนในข้าว

1.4.5 ดำเนินการทดลองตามวิธีการศึกษา

1.4.6 วิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง

1.5 ประโยชน์ที่ได้รับ

1.5.1 ทราบวิธีการตรวจจับสิ่งแปลกปลอมที่ปะปนในข้าวด้วยภาพถ่ายความร้อน

1.5.2 ได้โปรแกรมสำหรับประมวลผลภาพ 2 มิติผสมกับภาพถ่ายความร้อน สำหรับตรวจจับสิ่งแปลกปลอมที่ปะปนในข้าว โดยใช้โปรแกรม LabVIEW 2014

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.6 รายละเอียดของวิทยานิพนธ์

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้แบ่งเนื้อหาออกเป็น 5 บท คือ โดยเนื้อหาแต่ละส่วนมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

บทที่ 1 กล่าวถึงความเป็นมาของงานวิจัย ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ ขอบเขตของการวิจัย ขั้นตอนการดำเนินการงานวิจัย ประโยชน์ที่ได้รับ และรายละเอียดของวิทยานิพนธ์

บทที่ 2 กล่าวถึงหลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ เทคนิคแอคทีฟเทอร์โมกราฟฟี สมบัติเชิงความร้อน กล้องถ่ายภาพความร้อน การประมวลผลภาพ และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการตรวจจับโดยใช้ภาพถ่ายความร้อน

บทที่ 3 กล่าวถึงตัวอย่างและสิ่งแปลกปลอม การออกแบบชุดทดลอง การหาเวลาที่เหมาะสมสำหรับการกระตุ้นความร้อน การหาเวลาที่เหมาะสมสำหรับตรวจจับสิ่งแปลกปลอม การทดสอบการทำงานของโปรแกรม และการหาประสิทธิภาพในการทำงานของระบบ

บทที่ 4 กล่าวถึงผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลองของการประมวลผลภาพ 2 มิติ การประมวลผลภาพถ่ายความร้อน การประมวลผลภาพ 2 มิติผสมกับภาพถ่ายความร้อนในการตรวจจับสิ่งแปลกปลอมที่ปะปนในข้าว และแสดงประสิทธิภาพในการทำงานของระบบ

บทที่ 5 กล่าวถึงบทสรุปผลการวิจัย ข้อเสนอแนะ และแนวทางการนำไปประยุกต์ใช้งานในด้านต่าง ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

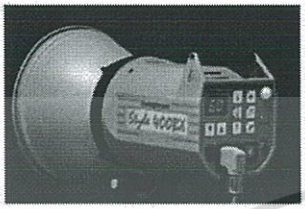
2.1 เทคนิคแอคทีฟเทอร์โมกราฟฟี

เทคนิคแอคทีฟเทอร์โมกราฟฟี (Active Thermography) เป็นเทคนิคที่นิยมในการวัดและการประเมินผลแบบไม่ทำลายวัตถุ (Non Destructive Testing) ซึ่งเป็นการทดสอบที่ไม่มีการสัมผัสกับวัตถุโดยตรงโดยใช้กล้องถ่ายภาพความร้อนอินฟราเรด ในการทดสอบจำเป็นต้องมีแหลงพลังงานความร้อน (Heat source) ภายนอกมากระตุ้นวัตถุที่ทำทดสอบเพื่อให้เกิดความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิบริเวณที่ผิดปกติและอุณหภูมิบริเวณปกติของวัตถุที่ทดสอบ [10] แหล่งพลังงานความร้อนภายนอก (รูปที่ 2.1) นั้นมีหลากหลายชนิด เช่น แสงเลเซอร์ อัลตร้าโซนิคทรานดิวเซอร์ ขดลวดแม่เหล็กไฟฟ้า และหลอดไฟฮาโลเจน เป็นต้น [11] ซึ่งปกติใช้ทดสอบกับวัตถุที่อุณหภูมิอยู่ในช่วง 20-50 องศาเซลเซียส และใช้เวลากระตุ้นเพียงเล็กน้อย การทดสอบแบ่งออกเป็นหลายวิธี ได้แก่ Pulsed Thermography เป็นวิธีการให้พลังงานความร้อนจากการกระตุ้นเพียงระยะเวลาสั้นๆ โดยขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุ Lock-In Thermography เป็นวิธีการให้พลังงานความร้อนเป็นคาบเวลา เช่น สัญญาณไซน์โดยวัดผลตอบสนองในรูปแบบของเฟสและแมกนิจูดจากภาพถ่ายความร้อน และThermo-inductive เป็นวิธีการเหนี่ยวนำความร้อนซึ่งวัตถุถูกทำโดยใช้กระแสไหลวน [12] โดยในการทดสอบควรเลือกวิธีในการให้ความร้อนที่มีความเหมาะสมกับลักษณะงานเพื่อให้ผลลัพธ์ของการทดสอบไม่มีความผิดพลาด สำหรับการทดสอบนี้เลือกใช้วิธี Pulsed Thermography ในการตรวจสอบหาวัตถุที่มีความผิดปกติที่ปะปนในข้าว เนื่องจาก วิธี Pulsed Thermography เป็นการให้ความร้อนในระยะเวลาสั้น เพิ่มอุณหภูมิเพียงเล็กน้อย ความร้อนจึงไม่ส่งผลต่อลักษณะทางกายภาพหรือคุณภาพของข้าว วิธีนี้จึงเป็นวิธีที่เหมาะสมที่สุด

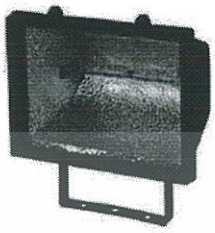
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(ก)

(ข)



(ค)



(ง)

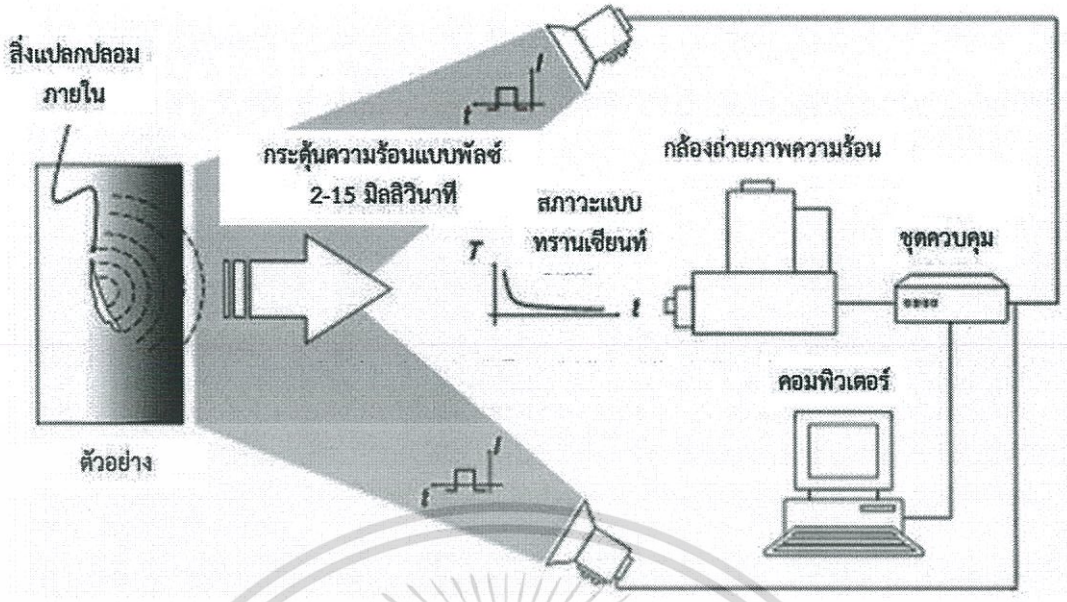
รูปที่ 2.1 ตัวอย่างแหล่งพลังงานความร้อน [14] (ก) อุปกรณ์เป่าลมร้อน (Heat gun) (ข) ผ้าห่มไฟฟ้า (Thermal blanket) (ค) หลอดไฟแฟลช (Flash lamp) (ง) หลอดไฟฮาโลเจน (Halogen lamp)

2.1.1 การกระตุ้นด้วยความร้อนแบบพัลซ์

การกระตุ้นด้วยความร้อนแบบพัลซ์ (Pulsed Thermography) เป็นวิธีการกระตุ้นความร้อนที่นิยมใช้มากที่สุดในเทคนิคแอคทีฟเทอร์โมกราฟฟี เนื่องจากเป็นวิธีที่มีความรวดเร็วเนื่องจากกระตุ้นด้วยความร้อนเป็นเวลาสั้น ๆ ซึ่งระยะเวลาการกระตุ้นขึ้นอยู่กับชนิดวัตถุ วัตถุที่มีการนำความร้อนสูง เช่น ชิ้นส่วนของโลหะ จะถูกกระตุ้นด้วยความร้อนไม่นาน ต่างจากวัตถุที่มีการนำความร้อนต่ำ เช่น พลาสติก ที่จำเป็นต้องกระตุ้นด้วยความร้อนเป็นระยะเวลานานกว่า [13] โดยการกระตุ้นด้วยความร้อนแบบพัลซ์ ช่วยป้องกันไม่ให้เกิดความเสียหายกับวัตถุที่ทำการทดสอบ [14]

สำหรับแหล่งความร้อนที่ใช้ จำเป็นต้องมีความสม่ำเสมอในการกระตุ้นวัตถุทดสอบ ความร้อนจะส่งผ่านวัตถุไปยังบริเวณที่มีข้อบกพร่อง สิ่งเจือปน หรือบริเวณที่มีความเสียหาย และจากการวิเคราะห์การตอบสนองทางความร้อนของวัตถุทดสอบ ผลทางความร้อนสามารถแสดงบริเวณ รูปร่าง ขนาดที่มีความผิดปกติได้ เนื่องจากหลังจากกระตุ้นความร้อนวัตถุจะมีการคายความร้อนโดยอัตราการลดอุณหภูมิของบริเวณที่ปกติกับบริเวณที่มีความบกพร่องจะมีความแตกต่างกัน [15] ซึ่งเกิดจากความแตกต่างระหว่างสมบัติทางความร้อนของวัตถุทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.2 การกระตุ้นความร้อนแบบพัลซ์ [15]

2.2 สมบัติเชิงความร้อน

การวิเคราะห์หาความแตกต่างหรือความผิดปกติของอุณภูมิจากเทคนิคแอคทีฟเทอร์โมกราฟฟี สามารถวิเคราะห์จากสมบัติเชิงความร้อนของวัตถุ เนื่องจากวัตถุต่างชนิดกันย่อมมีคุณสมบัติเชิงความร้อนแตกต่างกัน โดยส่งผลให้เมื่อกระตุ้นความร้อนให้กับวัตถุด้วยปริมาณความร้อนเท่ากัน เวลาเท่ากัน และใช้กล้องถ่ายภาพความร้อนถ่ายภาพขณะที่วัตถุคายความร้อน ภาพถ่ายความร้อนนี้จะแสดงความแตกต่างของวัตถุที่ต่างชนิดกันในรูปแบบของสีและอุณหภูมิ ซึ่งคุณสมบัติเชิงความร้อนที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้ คือ สัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อน และค่าความจุความร้อนจำเพาะ

2.2.1 สัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อน

สัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนของวัตถุ (Emissivity, ε) คือ ค่าที่แสดงถึงความสามารถในการแผ่รังสีความร้อนของวัตถุ มีค่าตั้งแต่ 0 ถึง 1 โดย สามารถหาได้จากอัตราส่วนของการแผ่รังสีความร้อนจากวัตถุจริงใดๆกับการแผ่รังสีความร้อนจากวัตถุดำ (Black body) ณ อุณหภูมิและความยาวคลื่นเดียวกัน ค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนขึ้นอยู่กับชนิดของวัตถุ ลักษณะพื้นผิวของวัตถุ (ความเรียบ ความขรุขระ) รูปร่าง และอุณหภูมิที่ผิวของวัตถุ [18] ค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนเขียนแทนด้วยสัญลักษณ์ ε หาได้จากสมการที่ 2.1 และตัวอย่างสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนแสดงดังตารางที่ 2.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\varepsilon = \frac{E(T)}{E_b(T)} \quad (2.1)$$

เมื่อ ε คือ สัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนของวัตถุ

$E(T)$ คือ พลังงานความร้อนที่แผ่จากวัตถุจริงใด ๆ (W/m^2)

$E_b(T)$ คือ พลังงานความร้อนที่แผ่จากวัตถุดำที่อุณหภูมิเดียวกัน (W/m^2)

ตารางที่ 2.1 ตัวอย่างค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อน [3]

ชนิด	สัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อน
ข้าว [16]	0.98
แผ่นอะลูมิเนียม	0.28
เศษไม้	0.82-0.92
หิน	0.88-0.95
พลาสติก	0.84-0.86

2.2.2 ความจุความร้อนจำเพาะ (Specific Heat capacity, C_p)

ความจุความร้อนจำเพาะ หมายถึง ปริมาณความร้อนที่ทำให้สารที่กำลังพิจารณามวลหนึ่งกิโลกรัมมีอุณหภูมิเปลี่ยนไปหนึ่งองศาเคลวิน ค่าความจุความร้อนจำเพาะนั้นเป็นปริมาณสเกลาร์ มีหน่วยเป็น kJ/kg.K หรือ cal/g.°C [21] สามารถหาได้จากสมการที่ 2.2

$$C_p = \frac{Q}{m(T_2 - T_1)} \quad (2.2)$$

เมื่อ C_p คือ ความจุความร้อนจำเพาะ มีหน่วยเป็น J/kg.K

Q คือ ปริมาณความร้อน มีหน่วยเป็น จูล J

m คือ มวลของวัตถุ มีหน่วยเป็น กิโลกรัม (kg)

T คือ อุณหภูมิ มีหน่วยเป็น เคลวิน K

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.2 ตัวอย่างค่าความจุความร้อนจำเพาะ [3]

ชนิด	ความจุความร้อนจำเพาะ (kJ/kg*K)
ข้าว [16]	1.270-4.830
แผ่นอะลูมิเนียม	0.388
เศษไม้	1.260-2.900
หิน	0.460-0.900
พลาสติก	0.881-2.548

2.3 กล้องถ่ายภาพความร้อน

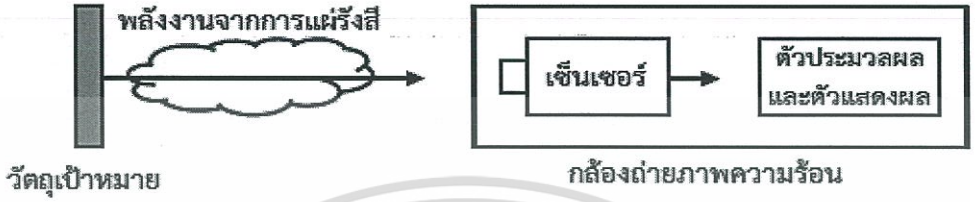
กล้องถ่ายภาพความร้อน เป็นเครื่องมือวัดอุณหภูมิพื้นผิวของวัตถุซึ่งเป็นการทดสอบแบบไม่สัมผัสและไม่ทำลายวัตถุ วัดอุณหภูมิในรูปแบบพื้นที่ [17] ซึ่งมีการใช้งานที่ง่ายและสามารถวัดอุณหภูมิได้อย่างถูกต้องแม่นยำ [25] โดยอาศัยหลักการการแผ่รังสีอินฟราเรด (infrared radiation) ออกจากวัตถุ ซึ่งมีการทำงานดังนี้ เมื่อรังสีอินฟราเรด (infrared) แผ่ออกจากวัตถุเป้าหมายไปยังกล้องถ่ายภาพความร้อนโดยผ่านเลนส์ของกล้องถ่ายภาพความร้อน ตัวตรวจจับรังสีอินฟราเรดจะทำหน้าที่รับรังสีอินฟราเรดและแปลงรังสีอินฟราเรดให้อยู่ในรูปของสัญญาณทางไฟฟ้า โดยรังสีอินฟาเรดที่ตัวตรวจจับรับไปนั้นประกอบด้วย รังสีที่วัตถุเป้าหมายแผ่ออกมารวมกับรังสีที่แผ่จากวัตถุอื่นหรือจากสิ่งแวดล้อมสะท้อนออกจากผิวของวัตถุเป้าหมาย เมื่ออยู่ในรูปของสัญญาณทางไฟฟ้าวงจรอิเล็กทรอนิกส์จะทำหน้าที่แปลงข้อมูลและนำไปแสดงที่ตัวแสดงผลในรูปแบบของตัวเลข สี หรือกราฟ หรือทั้ง 3 รูปแบบ

กล้องถ่ายภาพความร้อนประกอบด้วยเซนเซอร์ชนิดอินฟราเรดหลายตัว ซึ่งแต่ละตัวมีการแสดงผลออกมาในรูปแบบของสีที่มีความแตกต่างกันตามอุณหภูมิของจุดนั้น ๆ ผลของแต่ละจุดที่ได้จากเซนเซอร์แต่ละตัว สามารถนำมารวมกันประกอบขึ้นเป็นภาพ เรียกว่า ภาพถ่ายความร้อน (Thermal image) [11] มีการแสดงผลในรูปแบบของสี สีโทนสว่างแสดงผลของบริเวณที่มีอุณหภูมิสูง และสีโทนมืดแสดงผลของบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำ โดยปัจจัยที่ส่งผลต่อความถูกต้องของการวัด ได้แก่ ชนิดของวัตถุเป้าหมาย ลักษณะพื้นผิวของวัตถุเป้าหมาย ระยะห่างของเครื่องมือวัดและวัตถุเป้าหมาย และการเลือกกล้องถ่ายภาพความร้อนที่เหมาะสม

ในการเลือกกล้องถ่ายภาพความร้อนควรเลือกให้เหมาะสมกับงาน สภาวะหรือสถานที่ที่ใช้งาน เพื่อทำให้การถ่ายภาพความร้อนมีความถูกต้อง แม่นยำ [19] ซึ่งปัจจัยหลักที่ใช้ในการเลือกกล้องถ่ายภาพความร้อน ได้แก่ Thermal Sensitivity คือ ค่าอุณหภูมิที่ต่ำที่สุดที่กล้องถ่ายภาพความร้อนความสามารถแยกแยะความแตกต่างได้ Field of View (FOV) คือ มุมกว้างของภาพที่สามารถถ่ายได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยขึ้นอยู่กับขนาดของภาพถ่ายความร้อนและเลนส์ที่ใช้ ค่า FOV ที่มากขึ้นแสดงถึงความสามารถในการถ่ายวัตถุที่ใหญ่กว่าได้ขณะที่ระยะห่างเท่าเดิม และ Instantaneous Field of View (IFOV) คือ ความละเอียดของภาพถ่ายความร้อน ถ้า IFOV มีค่าสูงเกินไป หมายถึง อุณหภูมิที่แสดงในรูปถ่ายอุณหภูมิเป็นค่าเฉลี่ยของพื้นที่ที่ใหญ่ขึ้น แสดงว่าภาพถ่ายความร้อนจะมีลักษณะไม่ละเอียด [20]



รูปที่ 2.3 หลักการทำงานของกล้องถ่ายภาพความร้อน

2.4 การประมวลผลภาพ

การประมวลผลภาพ (Image Processing) หมายถึง การนำภาพมาประมวลผลหรือคิดคำนวณเพื่อให้ได้ข้อมูลที่เราต้องการทั้งในเชิงคุณภาพและปริมาณโดยใช้คอมพิวเตอร์ ซึ่งอินพุตที่รับเข้ามาคือ ภาพ และเอาต์พุตที่ได้ออกไป คือ ภาพหรือข้อมูลภายในภาพ มีขั้นตอนสำหรับการประมวลผลภาพที่สำคัญมีดังนี้ การทำให้ภาพมีความคมชัด การกำจัดสัญญาณรบกวนในภาพ การแบ่งส่วนที่เราสนใจของวัตถุออกจากภาพ เพื่อนำภาพวัตถุที่ได้ไปวิเคราะห์หาข้อมูลเชิงปริมาณ เช่น ขนาด รูปร่าง และทิศทางการเคลื่อนของวัตถุในภาพ [21] เราสามารถนำข้อมูลเชิงปริมาณเหล่านี้ไปวิเคราะห์และสร้างเป็นระบบในการตรวจสอบ โดยมีการประยุกต์ใช้ในงานด้านต่าง ๆ เช่น ระบบตรวจสอบคุณภาพของผลิตภัณฑ์ในกระบวนการผลิตของโรงงานอุตสาหกรรม ระบบคัดแยกเกรดหรือคุณภาพของพืชผลทางการเกษตร ระบบดูแลและตรวจสอบสภาพการจราจรบนท้องถนนโดยการนับจำนวนรถบนท้องถนนในภาพถ่ายด้วยกล้องวงจรปิดในแต่ละช่วงเวลา เป็นต้น ซึ่งระบบดังกล่าวจำเป็นต้องมีการประมวลผลภาพ หากให้มนุษย์วิเคราะห์เองมักต้องใช้เวลานานและเสียค่าใช้จ่ายแรงงานสูง อีกทั้งการวิเคราะห์ภาพเป็นจำนวนมากทำให้ผู้วิเคราะห์ภาพเกิดอาการล้า ส่งผลให้เกิดความผิดพลาดขึ้นได้ [22] ดังนั้นคอมพิวเตอร์จึงมีบทบาทสำคัญในการทำหน้าที่ดังกล่าวแทนมนุษย์ และคอมพิวเตอร์ยังมีความสามารถในการคำนวณและประมวลผลข้อมูลจำนวนมหาศาลได้ในเวลาอันสั้น คอมพิวเตอร์จึงมีประโยชน์อย่างมากในการเพิ่มประสิทธิภาพการประมวลผลภาพและวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากภาพ [23]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.1 ประเภทของภาพ

การเลือกประเภทของภาพ (Image Types) สำหรับการประมวลผลภาพนั้นมีความสำคัญ หากเลือกประเภทของภาพที่เหมาะสมกับภาพสำหรับการวิเคราะห์จะส่งผลให้การประมวลผลภาพได้ผลดียิ่งขึ้น

2.4.1.1 ภาพสองมิติ

โดยทั่วไปประเภทของภาพ 2 มิติ ตามคุณสมบัติของสีแบ่งออกได้เป็น 4 ประเภท ได้แก่ ภาพขาวดำ (Binary Image) ภาพระดับสีเทา (Gray Scale Image) ภาพสี (Color Image) และภาพแบบดัชนี (Index Image)

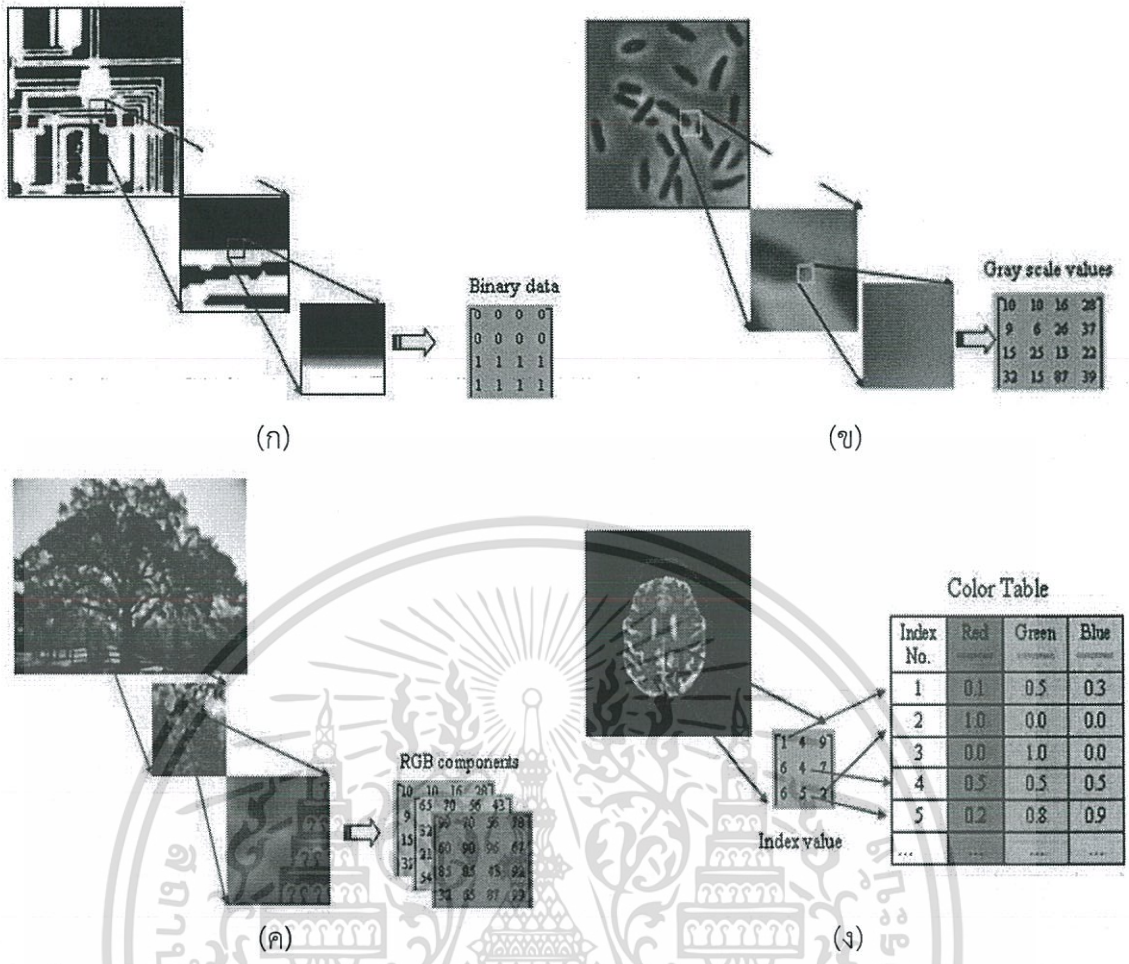
ภาพขาวดำ (Binary Image) คือ แต่ละพิกเซลจะแสดงด้วยค่าแบบไบนารี่ (Binary) ซึ่งมี 1 บิต ประกอบด้วยค่า 1 และ 0 โดยที่ 1 หมายถึงจุดภาพสีขาว และ 0 หมายจุดภาพสีดำ โดยภาพขาวดำเหมาะสมกับภาพที่เกี่ยวกับตัวอักษร (Text) ภาพลายนิ้วมือ

ภาพระดับสีเทา (Gray Scale Image) คือ แตละพิกเซลจะมีค่าความเข้มของแสงในระดับที่แตกต่างกัน ตั้งแต่สีขาวไปยังสีดำ ซึ่งสามารถกำหนดระดับความเข้มของแสงได้โดยใช้ค่าระดับเทา ภาพจะมีความละเอียด (Resolution) เท่ากับ 8 บิต และภาพจะมีค่าระดับความเข้มแสงของสีดำเท่ากับ 0 ส่วนค่าระดับความเข้มของสีขาวจะมีค่าเท่ากับ 255

ภาพสี (Color Image) คือ แต่ละพิกเซลของภาพสีจะเก็บค่าระดับความเข้มแสง 3 แม่สีหลักซ้อนกัน คือ สีแดง (Red) สีเขียว (Green) และสีน้ำเงิน (Blue) ซึ่งในแต่ละพิกเซลนั้น ๆ จะแสดงผลของค่าสีแต่ละพิกเซลตามระดับความเข้มในแต่ละแถบแสงนั้น

ภาพแบบดัชนี (Index Image) คือ ในแต่ละพิกเซลของภาพจะเก็บค่าดัชนี (Inden Nember) ซึ่งเป็นตัวเลขจำนวนเต็ม และจะถูกนำค่าดัชนีดังกล่าวไปเทียบกับ ตารางสี (Color Table) เป็นตารางแสดงค่าแสงสี แดง เขียว และน้ำเงิน โดยค่าดัชนีนี้จะเป็นตัวชี้ให้เห็นว่าภาพในตำแหน่งพิกเซลนั้นๆ มีค่าอัตราส่วนของแม่สีแสง 3 สี ในอัตราส่วนละเท่าไร

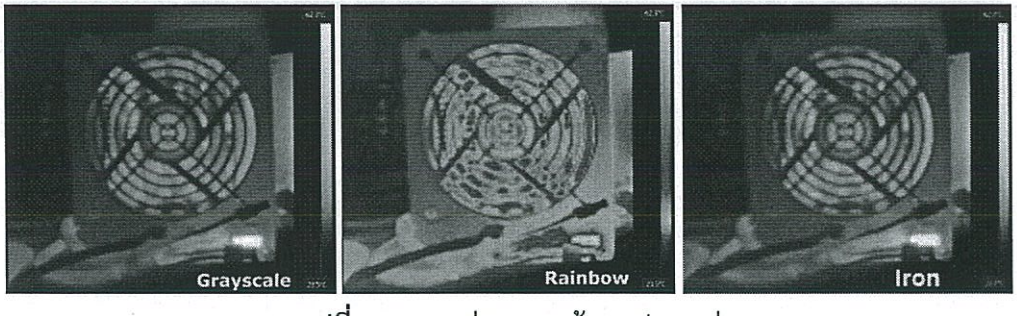
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.4 ตัวอย่างประเภทของภาพภาพสองมิติ [23] (ก) ภาพขาวดำ (ข) ภาพระดับสีเทา (ค) ภาพสี (ง) ภาพแบบดัชนี

2.4.1.2 ภาพถ่ายความร้อน

โดยทั่วไปภาพถ่ายความร้อนมีรูปแบบสีให้เลือกในการแสดงผลให้เหมาะกับการใช้งาน แบ่งออกได้เป็น 3 รูปแบบ ได้แก่ ภาพถ่ายความร้อนสีเทา (gray Palette) ภาพถ่ายความร้อนสีรุ้ง (rainbow Palette) และภาพถ่ายความร้อนสีเหล็ก (Iron Palette)



รูปที่ 2.5 ภาพถ่ายความร้อนรูปแบบต่างๆ [24]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.2 ขั้นตอนการประมวลผลภาพ

เป็นขั้นตอนในการปรับปรุงภาพให้ชัดขึ้นเพื่อให้สามารถตีความหมายของภาพได้ง่าย โดยเป็นจัดการข้อมูลให้กับภาพให้มีความเหมาะสม ในการเก็บและส่งภาพเป็นการช่วยวิเคราะห์ภาพแบบอัตโนมัติและเป็นการสร้างการมองเห็นให้กับคอมพิวเตอร์ โดยมีขั้นตอน ต่าง ๆ ดังนี้

2.4.2.1 Image Acquisition

คือ ขั้นตอนการได้มาของภาพ เป็นการนำภาพที่ต้องการประมวลผลเข้าสู่คอมพิวเตอร์ ซึ่งอาจจะมีการประมวลผลเบื้องต้น (pre-processing) เช่น ปรับขนาดของภาพ การลดสัญญาณรบกวน ซึ่งถือว่าเป็นจุดเริ่มต้นในการพัฒนาระบบการประมวลผลภาพ [36]

รูปที่ 2.6 การได้มาของภาพ [37]

2.4.2.2 Threshold Image

คือ ขั้นตอนการแยกส่วนของภาพโดยการเปรียบเทียบพิกเซลของภาพเริ่มต้นกับค่าเทรชโฮล ใช้ในกรณีที่ข้อมูลภาพมีลักษณะที่ต่างกันระหว่างวัตถุ (Object) และพื้นหลัง (Background) [38] โดยค่าของพิกเซลในภาพที่มีค่ามากกว่าหรือเท่ากับค่าเทรชโฮลจะถูกเปลี่ยนเป็น 0 (จุดดำ) และพิกเซลในภาพที่มีน้อยกว่าค่าเทรชโฮลจะถูกเปลี่ยนเป็น 1 (จุดขาว) ซึ่งแสดงดังสมการที่ 2.3 การใช้เทคนิคเทรชโฮลนั้นเพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่เหมาะสมและคมชัด ซึ่งสิ่งที่สาคัญที่สุดคือ การเลือกค่าเทรชโฮล เพราะถ้าเลือกค่าเทรชโฮลที่ไม่เหมาะสม ภาพที่ได้อาจจะสว่างน้อยเกินไป หรือสว่างมากเกินไป หรือภาพที่ได้มีสิ่งรบกวน (Noise) เกิดขึ้น ทำให้ภาพที่ได้ไม่สวยงามเท่าที่ควร

$$g(x,y)=\begin{cases} 0 \Rightarrow f(x,y) \geq T \\ 1 \Rightarrow f(x,y) < T \end{cases} \qquad (2.3)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ g(x,y) คือ ภาพไบนารี่ที่ได้ของตำแหน่ง X, Y หลังจากทำการเทรสโฮล

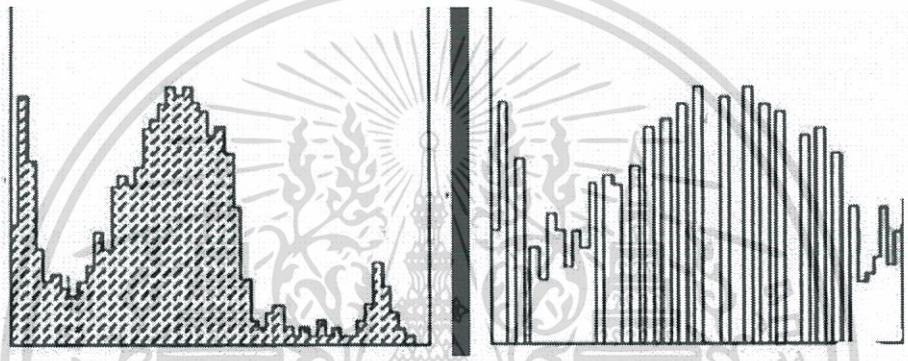
f(x,y) คือ ภาพระดับเทาของตำแหน่ง X, Y

T คือ ค่าเทรสโฮล

X คือ พิกัดตำแหน่งของแถว

Y คือ พิกัดตำแหน่งของคอลัมน์

2.4.2.3 Histogram Equalize คือ ขั้นตอนการแบ่งกราฟให้เท่ากัน โดยยึดค่าระดับสีเทาของข้อมูลภาพ ซึ่งขึ้นอยู่กับการแจกแจงความถี่หรือจำนวนจุดภาพของค่าระดับสีเทาในแต่ละแบนด์ สำหรับช่วงที่ค่าระดับสีเทามีจำนวนจุดภาพมาก จะถูกเน้นภาพมากกว่าช่วงที่ค่าระดับสีเทามีจำนวนจุดภาพน้อย [25]



(ก) (ข)

รูปที่ 2.7 การขยายข้อมูลแบบ Histogram Equalization [40]
(ก) กราฟแท่งของเซทข้อมูลเริ่มต้น (ข) กราฟแท่งของข้อมูลที่ขยายแล้ว

2.4.2.4 Image Filtering คือ ขั้นตอนการกรองภาพ เนื่องจากภาพที่รับเข้ามานั้นอาจมีสัญญาณรบกวน หรือสัญญาณไม่พึงประสงค์ การกรองข้อมูลสามารถทำให้รายละเอียดที่ไม่ชัดเจนมีความชัดเจนขึ้น หรือทำให้คุณลักษณะที่สำคัญมีความเด่นชัดขึ้น ภาพที่ได้จากการกรองข้อมูลภาพจะมีคุณสมบัติแตกต่างจากภาพเริ่มต้น ซึ่งวัตถุประสงค์หลักของการกรองข้อมูลภาพคือการเน้น (enhance) หรือลดทอน (attenuate) คุณสมบัติบางประการของภาพ เพื่อให้ได้ภาพที่มีคุณสมบัติตามต้องการ โดยการกรองภาพที่เลือกใช้เลือกใช้แบบการกรองข้อมูลภาพโดยใช้ค่าเฉลี่ยแบบคณิตศาสตร์ เนื่องจากวิธีนี้เป็นการลดทอนสัญญาณรบกวน ภาพที่ได้จะมีสัญญาณรบกวนลดลง [41]

การกรองข้อมูลภาพโดยใช้ค่าเฉลี่ยแบบคณิตศาสตร์ (mean filtering) โดยวิธีการนี้จะใช้ค่าเฉลี่ยแบบคณิตศาสตร์ของจุดทั้งหมด ซึ่งสามารถคำนวณหาภาพใหม่ดังสมการที่ 2.4

$$\hat{I}(x,y) = \frac{1}{K}\sum_{j=1}^{K} I_j(x,y) \qquad (2.4)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ $\hat{I}(x,y)$ คือ ความเข้มแสงของจุด ณ ตำแหน่ง (x,y) ในภาพผลลัพธ์

$I_j(x,y)$ คือ ความเข้มแสงของจุด ณ ตำแหน่ง (x,y) ในภาพที่ j

2.4.2.5 Morphological processing คือ ขั้นตอนการประมวลผลโดยการเปลี่ยนแปลงลักษณะรูปร่างและโครงร่างของภาพ ซึ่งจะเกี่ยวข้องกับการแยกส่วนประกอบของภาพเพื่อใช้ในการแสดงรูปร่าง ได้แก่ การย่อภาพ (Erosion) การขยายภาพ (Dilation) และการหาโครงสร้างหลักของวัตถุ (Skeleton)

การขยาย (Dilation) ขั้นตอนการขยายนั้นสามารถใช้กับภาพไบนารีและภาพสีเทา ซึ่งอัลกอลิทึมนี้มีวัตถุประสงค์ในการลดขนาดของพื้นหลังลง และค่อยๆเพิ่มขอบเขตของวัตถุ สามารถแสดงเป็นสมการได้ดังสมการที่ 2.5 [26]

$$A \oplus B = \{(x,\ y)+(u,\ v) : (x,\ y) \in A, (u,\ v) \in B\} \tag{2.5}$$

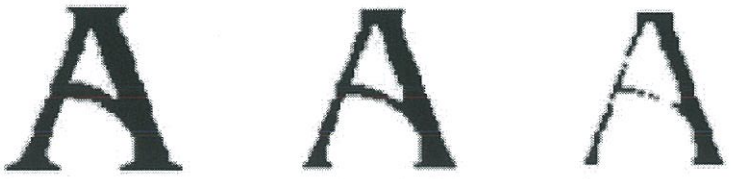
(ก) (ข) (ค)

รูปที่ 2.8 ตัวอย่างการขยายภาพ [27] (ก) ภาพต้นแบบก่อนขยายขนาด (ข) ภาพหลังขยายขนาดโดยโครงสร้างสี่เหลี่ยม 3x3 (ค) ภาพหลังการขยายขนาดโดยโครงสร้างสี่เหลี่ยม 5x5

การย่อขนาด (Erosion) ขั้นตอนการย่อขนาดนั้นสามารถทำได้โดยการลดขนาดวัตถุและขยายพื้นหลัง ซึ่งเป็นการลบชั้นนอกของพิกเซลของวัตถุออก สามารถแสดงเป็นสมการได้ดังสมการที่ 2.6 [26]

$$A \theta B = \{w : B_w \in A\} \tag{2.6}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) (ข) (ค)

รูปที่ 2.9 ตัวอย่างการย่อภาพ [27] (ก) ภาพต้นแบบก่อนย่อขนาด (ข) ภาพหลังย่อขนาดโดยโครงสร้างสี่เหลี่ยม 3x3 (ค) ภาพหลังย่อขนาดโดยโครงสร้างสี่เหลี่ยม 5x5

การโอเพนนิ่ง (Opening) เป็นการรวมกันของขั้นตอนการย่อขนาด (Erosion) และขั้นตอนการขยาย (Dilation) โดยดำเนินการตามลำดับ ซึ่งสามารถกำหนดเป็นสมการได้ดังนี้ดังสมการที่ 2.7

$$A \circ B = (A \theta B) \oplus B \tag{2.7}$$

(ก) (ข)

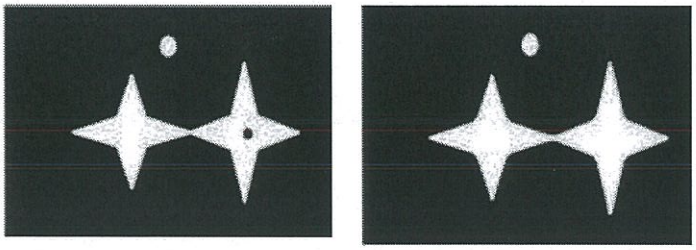
รูปที่ 2.10 ตัวอย่างการโอเพนนิ่ง (ก) ภาพต้นแบบก่อนทำการโอเพนนิ่ง (ข) ภาพหลังทำการโอเพนนิ่ง

การโคลสซิ่ง (Closing) เป็นการรวมกันของขั้นตอนการขยาย (Dilation) และขั้นตอนการย่อขนาด (Erosion) โดยดำเนินการตามลำดับ ซึ่งสามารถกำหนดเป็นสมการได้ดังสมการที่ 2.8

$$A \bullet B = (A \oplus B) \theta B \tag{2.8}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง



(ก) (ข)

รูปที่ 2.11 ตัวอย่างการโคลสซิ่ง (ก) ภาพต้นแบบก่อนทำการโคลสซิ่ง (ข) ภาพหลังทำการโคลสซิ่ง

2.5 ทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Ludwig et al. (2004) [28] ทำการทดลองตรวจสอบความชื้นของไม้และปูนโดยใช้กล้องถ่ายภาพความร้อน ซึ่งภาพถ่ายความร้อนที่ได้สามารถระบุตำแหน่งของพื้นที่ที่มีค่าความชื้น (ปริมาณน้ำ) ที่แตกต่างกัน โดยบางบริเวณไม่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า การใช้กล้องถ่ายภาพความร้อนในการตรวจสอบเป็นวิธีที่รวดเร็ว ไม่ทำลายไม้และปูน เมื่อทราบค่าร้อยละของความชื้นจากการตรวจสอบทำให้สามารถป้องกันการเกิดเชื้อราได้ ปัจจุบันในการตรวจสอบความชื้นในไม้ใช้เทคนิคนี้ที่สุดสำหรับการตรวจสอบ

Ginesu et al. (2004) [8] ทำการทดลองตรวจสอบสิ่งแปลกปลอมในอาหารโดยใช้ภาพถ่ายทางความร้อน ซึ่งเป็นวิธีการตรวจสอบสิ่งแปลกปลอมแบบใหม่ที่วิธีแบบดั้งเดิมไม่สามารถตรวจพบโดยใช้หลักการความแตกต่างของค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อน และความจุความร้อนของวัตถุโดยให้ความร้อนเป็นพัลส์ในการกระตุ้นวัตถุเพื่อให้สิ่งแปลกปลอมสามารถแสดงออกได้อย่างชัดเจน สิ่งแปลกปลอมที่นำมาทดสอบ ได้แก่ เศษไม้ เศษกระดาษ และเศษเหล็ก โดยใช้ภาพสีเทาในการประมวลผลภาพ ใช้วิธีทางสถิติ และใช้ลักษณะสัณฐานในการวิเคราะห์ ผลการทดลองพบว่าการตรวจจับสิ่งแปลกปลอมในอาหารด้วยภาพถ่ายทางความร้อนเป็นวิธีการที่เหมาะสมสำหรับแก้ปัญหาในการตรวจจับแบบดั้งเดิม

Manyong et al. (2008) [29] ทำการทดลองหาปริมาณข้อบกพร่องภายใต้ของชิ้นงานโดยใช้เทคนิค Lock-In Thermography การทดลองมีการกำหนดข้อบกพร่องที่มีรูปร่าง ขนาด และความลึกแตกต่างกัน โดยใช้การวิเคราะห์พิกเซลของภาพที่ได้จากกล้องถ่ายภาพความร้อนอินฟราเรด จากการทดลองผลการทดลองพบว่าการการระบุตำแหน่งของข้อผิดพลาดมีค่าความถูกต้องแม่นยำสูงมากกว่า 90% โดยประสิทธิภาพในการตรวจสอบขึ้นอยู่กับความละเอียดของกล้องถ่ายภาพความร้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

148267

ที่ใช้ หรือระยะของข้อบกพร่องกับพื้นที่ที่ตรวจสอบ การตรวจสอบโดยใช้เทคนิคนี้มีประสิทธิภาพสูง โดยใช้การประมวลผลภาพ

Piotr et al. (2009) [30] ทำการทดลองตรวจสอบรอยช้ำที่เกิดใหม่บนผลแอปเปิ้ลโดยใช้เทคนิค pulsed-phase thermography ซึ่งพันธุ์แอปเปิ้ลที่ใช้ในการทดสอบคือ Jonagold Champion และ Gloster โดยแบ่งความลึกของรอยช้ำออกเป็น 2 ระดับ คือ 200 มิลลิเมตร และ 400 มิลลิเมตร เวลาในการทดสอบรอยช้ำทดสอบเมื่อหลังจากเกิดรอยช้ำ 2 ชั่วโมง และ 14 ชั่วโมง ทดลองโดยเปรียบเทียบการตรวจสอบโดยใช้ภาพถ่ายธรรมดากับภาพถ่ายทางความร้อน พบว่าภาพถ่ายทางความร้อนให้ผลการทดสอบที่ดีกว่า ซึ่งการตรวจสอบรอยช้ำที่เกิดใหม่บนผิวแอปเปิ้ลอาศัยหลักความแตกต่างของคุณสมบัติทางความร้อนระหว่างพื้นผิวแอปเปิ้ลปกติและพื้นผิวแอปเปิ้ลที่มีรอยช้ำ เนื่องจากรอยช้ำดังกล่าวมีความลึกทำให้บริเวณนั้นแสดงความแตกต่างทางความร้อนที่กล้องได้รับกับบริเวณพื้นผิวแอปเปิ้ลปกติ

Bukowska-Belniak et al. (2009) [31] ทำการทดลองตรวจจับสิ่งแปลกปลอมในผลิตภัณฑ์อาหารโดยใช้ภาพความถี่ต่ำในการประมวลผลของภาพถ่ายทางความร้อน ผลิตภัณฑ์ที่เลือกมาทดลองคือ แท่งช็อคโกแลต และสิ่งแปลกปลอมได้แก่ หิน เศษแก้ว เศษพลาสติก ในการทดลองเปรียบเทียบระหว่างแท่งช็อคโกแลตที่ไม่มีสิ่งแปลกปลอม และแท่งช็อคโกแลตที่มีสิ่งแปลกปลอม ตรวจสอบโดยการนำภาพถ่ายทางความร้อนไปประมวลผลภาพด้วยโปรแกรม MATLAB 2007 มีการใช้ฟังก์ชันกรองภาพ ฟังก์ชันเทรสโฮล ผลการทดลองสามารถระบุตำแหน่งของสิ่งแปลกปลอมที่พบภายในผลิตภัณฑ์ได้

Lahiri et al. (2013) [10] ทำการทดลองวัดช่องว่างวงแหวนโดยใช้เทคนิค active infrared thermography ในการหาปริมาณช่องว่างอากาศในทรงกระบอก มีการจำลองโดยใช้ถังอลูมิเนียมกลวงและแท่งเหล็กสแตนเลสไว้ตรงกลางถัง กระตุ้นความร้อนจากภายนอกโดยใช้เครื่องเป่าลมร้อนและวัดอุณหภูมิของชิ้นงานโดยใช้กล้องอินฟราเรดในระหว่างการระบายความร้อน จากการวิเคราะห์ภาพถ่ายความร้อนอินฟราเรดพบความสัมพันธ์ระหว่างการทดลองคือมีการผกผันของเวลาระบายความร้อนกับขนาดวงแหวนช่องว่างอากาศ การผลการทดลองพบว่าสามารถวัดได้อย่างถูกต้อง โดยเทคนิคนี้สามารถพัฒนาประยุกต์ใช้กับการตรวจสอบช่องว่างของเชื้อเพลิงที่เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์

Senni et al. (2014) [9] ทำการทดลองการตรวจจับสิ่งแปลกปลอมแบบอัตโนมัติในแผ่นบิสกิตด้วยเทคนิคอินฟราเรดเทอร์โมกราฟฟีและการประมวลผลภาพ เป็นการตรวจสอบแบบไม่ทำลายสำหรับตรวจสอบสารปนเปื้อนและสิ่งแปลกปลอมที่อยู่ในแผ่นบิสกิต โดยสิ่งแปลกปลอมได้แก่ ก้อนหิน เศษแก้ว เศษพลาสติก ไม้ กระดาษ เส้นใยผ้า ที่มีขนาดเล็ก ในขั้นตอนการตรวจจับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มีการใช้อัลกอริธึมการประมวลผลภาพที่ถูกพัฒนามาเพื่อใช้งานกับภาพถ่ายความร้อนที่มาจากกล้องอินฟราเรด การประมวลผลจะมุ่งเน้นการวิเคราะห์โดยเปรียบเทียบการแผ่รังสีความร้อนของสิ่งแปลกปลอมและแผ่นบิสกิต โดยเบื้องต้นทำการตรวจสอบแบบออฟไลน์ และใช้การวิเคราะห์ทางสถิติเพื่อหาผลลัพธ์ และนำมาประยุกต์ทำการตรวจสอบแบบออนไลน์

Siti et al. (2015) [32] ทำการทดลองตรวจสอบคุณภาพของข้าวเปลือก โดยตรวจสอบความชื้น ความไม่สมบูรณ์ของเมล็ด และสิ่งแปลกปลอมปะปนมาโดยใช้เทคโนโลยีภาพถ่ายทางความร้อน การทดลองกลุ่มตัวอย่างจะถูกให้ความร้อนด้วยโคมไฟ และคายความร้อน โดยวีดีโอความร้อนจะถูกบันทึกช่วงคายความร้อนและนำไปวิเคราะห์ โดยวิเคราะห์ค่าเฉลี่ยของพิกเซลในภาพถ่ายความร้อน ผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่าภาพถ่ายความร้อนสามารถใช้ตรวจสอบคุณภาพของข้าวเปลือกได้ ข้าวเปลือกที่มีความชื้นต่ำค่าเฉลี่ยพิกเซลของภาพถ่ายความร้อนจะสูง ในขณะเดียวกันค่าพิกเซลต่ำแสดงถึงบริเวณเมล็ดข้าวเปลือกที่ยังไม่สมบูรณ์และบริเวณแกลบ ดังนั้นภาพถ่ายความร้อนมีความสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญกับความชื้นของข้าวเปลือก และยังใช้ในการคาดการณ์สำหรับข้าวที่มีการครบกำหนด รวมทั้งมีความสามารถในการแยกแกลบออกจากข้าวเปลือกจากได้อย่างถูกต้อง 100 เปอร์เซ็นต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

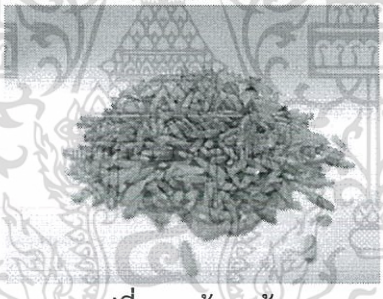
บทที่ 3

วิธีดำเนินงาน

ในบทนี้กล่าวถึงขั้นตอนการศึกษาเกี่ยวกับการออกแบบชุดทดลองการตรวจจับสิ่งแปลกปลอมที่ปะปนในข้าว การหาเวลาที่เหมาะสมในการกระตุ้นความร้อน การหาเวลาที่เหมาะสมในการตรวจจับภาพถ่ายความร้อน วิธีการประมวลผลภาพ 2 มิติ วิธีการประมวลผลภาพถ่ายความร้อน วิธีการตรวจจับสิ่งแปลกปลอมที่ปะปนในข้าว รวมทั้งการทดสอบประสิทธิภาพการทำงานของระบบตรวจจับ

3.1 ตัวอย่างและสิ่งแปลกปลอมที่ใช้ในการทดลอง

ข้าวที่ใช้ในการทดลอง คือ ข้าวกล้องหอมมะลิ 105 และสิ่งแปลกปลอมที่กำหนดขึ้นมา ได้แก่ หินที่มีขนาดเล็กที่มีความยาวประมาณ 0.2-0.85 เซนติเมตร เศษไม้ที่มีความยาวประมาณ 0.85 เซนติเมตร ซึ่งใกล้เคียงกับขนาดของเมล็ดข้าว และพลาสติกที่มีความยาวประมาณ 0.85 เซนติเมตร และมีลักษณะเหมือนเมล็ดข้าว



รูปที่ 3.1 ข้าวกล้อง

(ก) (ข) (ค)

รูปที่ 3.2 สิ่งแปลกปลอม (ก) หิน (ข) เศษไม้ (ค) พลาสติก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 การออกแบบชุดการทดลอง

3.2.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง ได้แก่ แผ่นอะลูมิเนียม หลอดไฟฮาโลเจน กล้องถ่ายภาพความร้อน และคอมพิวเตอร์ โดยมีรายละเอียดดังนี้

สำหรับแผ่นอะลูมิเนียม (รูปที่ 3.3) มีขนาด 10 x 10 เซนติเมตร ใช้เป็นถาดทดลอง การเลือกใช้แผ่นอะลูมิเนียมเนื่องจากแผ่นอะลูมิเนียมมีคุณสมบัติทางความร้อนแตกต่างกับตัวอย่างและสิ่งแปลกปลอมที่ใช้ในการทดลอง ดังนั้นเมื่อให้ความร้อนในการทดลองการสดงผลของแผ่นอะลูมิเนียมในภาพถ่ายความร้อนมีจะมีความแตกต่างจากตัวอย่างและสิ่งแปลกปลอมมากจึงไม่ส่งผลต่อการทดลอง

หลอดไฟฮาโลเจน (รูปที่ 3.4) 150 วัตต์ 50-60 เฮิร์ต 220-240 โวลต์ ใช้เป็นแหล่งความร้อนภายนอกสำหรับกระตุ้นพลังงานความร้อนในเทคนิคแอคทีฟเทอร์โมกราฟฟี หลอดไฟฮาโลเจนเป็นอุปกรณ์ที่ให้พลังงานความร้อนสูง เมื่อกระแสไฟฟ้าไหลผ่านขดลวดทังแตนที่ภายในมีสารจำพวกฮาโลเจนทำให้เกิดความร้อนสูงจึงเปล่งแสงออกมา การเลือกใช้หลอดไฟฮาโลเจนเนื่องจากหลอดไฟฮาโลเจนเป็นอุปกรณ์ที่ได้รับความนิยมว่ามีประสิทธิภาพในการทำงานสูงในการให้พลังงานความร้อนทางแสง โดยไม่มีการสัมผัสกับวัตถุมีจึงเป็นการให้พลังงานความร้อนแบบไม่ทำลาย อีกทั้งเป็นอุปกรณ์ที่มีการกระตุ้นพลังงานความร้อนอย่างรวดเร็วและสามารถให้ความร้อนอย่างต่อเนื่องซึ่งเหมาะกับการทดสอบแบบพัลล์แอคทีฟเทอร์โมกราฟฟี

กล้องถ่ายภาพความร้อน FLIR รุ่น A315 (รูปที่ 3.3) ใช้เป็นอุปกรณ์ในการตรวจสอบโดยจะจับพลังงานรังสีอินฟราเรด (IR) ที่ถ่ายทอดออกมาจากวัตถุและสร้างภาพแถบสี ซึ่งวัตถุที่อุณหภูมิมากกว่าจะแสดงสีสว่างและวัตถุที่อุณหภูมิน้อยกว่าจะแสดงสีมืดกว่า โดยคุณลักษณะทางเทคนิคของกล้องถ่ายภาพความร้อนแสดงดังตารางที่ 3.1

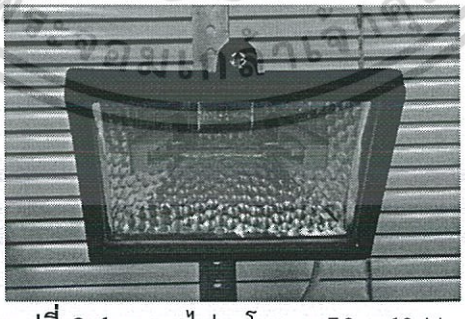
คอมพิวเตอร์ ยี่ห้อ ASUS รุ่น A43S CPU Intel core i5 (รูปที่ 3.6) สำหรับการวิเคราะห์ประมวลผลภาพ 2 และประมวลผลภาพถ่ายความร้อนผ่านโปรแกรม Thermacam และโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นด้วย LabVIEW 2014

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.1 คุณลักษณะทางเทคนิคของกล้องถ่ายภาพความร้อน [50]

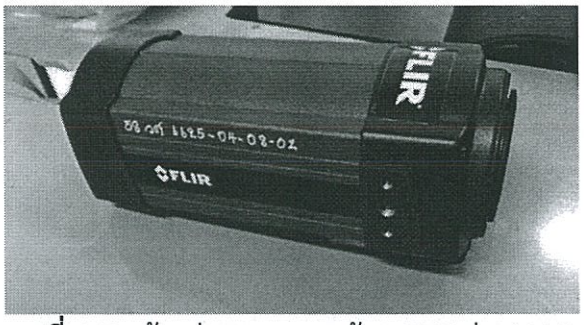
หัวข้อ	รายละเอียด
ช่วงการวัด	–20 ถึง +120 องศาเซลเซียส และ 0 ถึง +350 องศาเซลเซียส
ความแม่นยำ	±2 องศาเซลเซียส or ±2% ของค่าที่อ่านได้
ความละเอียด	320 × 240 พิกเซล
ช่วงสเปกตรัม	7.5–13 ไมโครเมตร
ความไวทางความร้อน	<0.05 องศาเซลเซียส @ + 30 องศาเซลเซียส
ค่าขอบเขตการมองเห็น	25 องศา × 18.8 องศา / 0.4 เมตร (1.31ฟุต)
ความละเอียดของภาพ	1.36 มิลลิเรเดียน
เซ็นเซอร์	เซ็นเซอร์ความร้อนที่ไม่มีการระบายความร้อน
การเชื่อมต่อกล้อง	กิกะบิตอีเธอร์เน็ต

รูปที่ 3.3 แผ่นอะลูมิเนียม

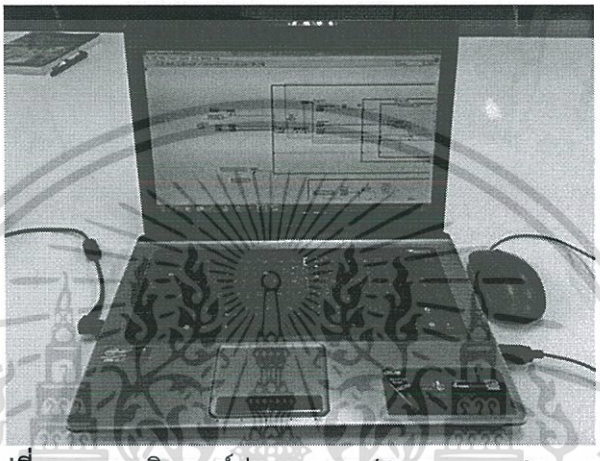


รูปที่ 3.4 หลอดไฟฮาโลเจน 50 - 60 Hz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.5 กล้องถ่ายภาพความร้อน FLIR รุ่น A315

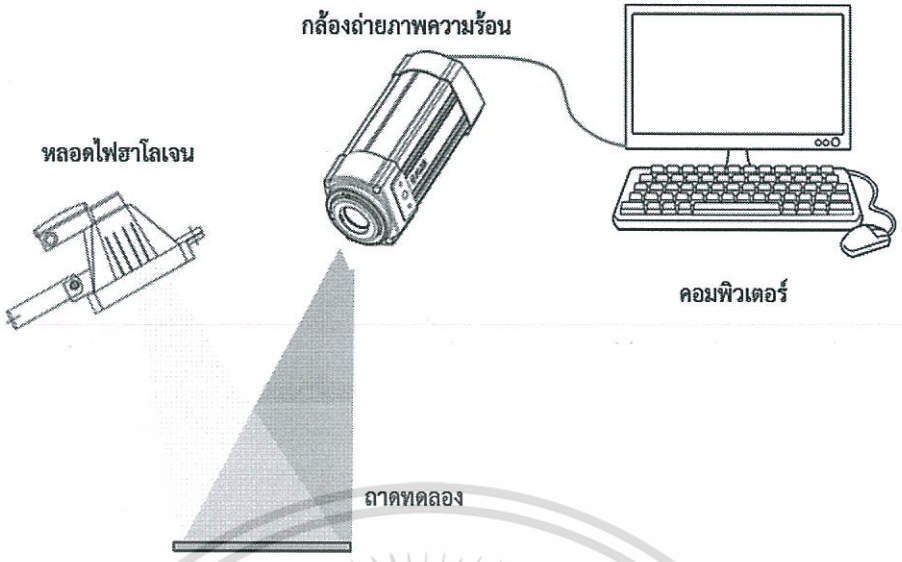


รูปที่ 3.6 คอมพิวเตอร์ประมวลผล (Computer System)

3.2.2 การออกแบบการทดลอง

การออกแบบการทดลองในงานวิจัย สำหรับการทดสอบให้นำวัตถุที่ต้องการทดสอบใส่ลงบนแผ่นอะลูมิเนียมแบบไม่ติดกัน เนื่องจากในกระบวนการตรวจสอบจริงข้าวจะถูกปล่อยตามรางซึ่งในการถ่ายภาพเพื่อนำมาประมวลผลภาพนั้นเมล็ดข้าวจะไม่ติดกัน จากนั้นตั้งหลอดไฟฮาโลเจนที่ด้านซ้ายของแผ่นอลูมิเนียม โดยติดตั้งที่ความสูง 10 เซนติเมตรห่างจากวัสดุที่ต้องการทดสอบ เป็นระยะที่ใกล้ที่สุดเมื่อทำการเปิดไฟพลังงานความร้อนที่กระตุ้นนั้นจะครอบคลุมวัตถุที่ทำการทดสอบทั้งหมด ซึ่งถ้าใช้ระยะทางที่ไกลกว่านี้จะได้รับพลังงานความร้อนน้อยลงทำให้ต้องใช้เวลาในการกระตุ้นความร้อนที่มากขึ้น และตั้งกล้องถ่ายความร้อนด้านตรงข้ามของหลอดไฟฮาโลเจนที่ความสูง 30 เซนติเมตร ห่างจากวัสดุที่ต้องการทดสอบ เพื่อให้พื้นที่ที่ถ่ายภาพความร้อนครอบคลุมวัตถุทั้งหมดที่ทำการทดสอบ ในการปรับมุมกล้องนั้นกล้องปรับกล้องที่มุม 40 องศา เนื่องจากเป็นมุมที่ดีที่สุดในการถ่ายภาพ ซึ่งเป็นมุมที่ทำให้ไม่มีการสะท้อนจากกล้องไปที่แผ่นอะลูมิเนียมและไม่มีสัญญาณรบกวนเกิดขึ้นในภาพ เชื่อมต่อกล้องถ่ายความร้อนกับคอมพิวเตอร์โดยสายอีเทอร์เน็ต คอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการประมวลผลภาพควรติดตั้งบริเวณใกล้เคียงกับที่ทำการทดสอบเพื่อง่ายต่อการตรวจสอบเมื่อมีการตรวจจับสิ่งแปลกปลอม การออกแบบการทดลองแสดงดังรูปที่ 3.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



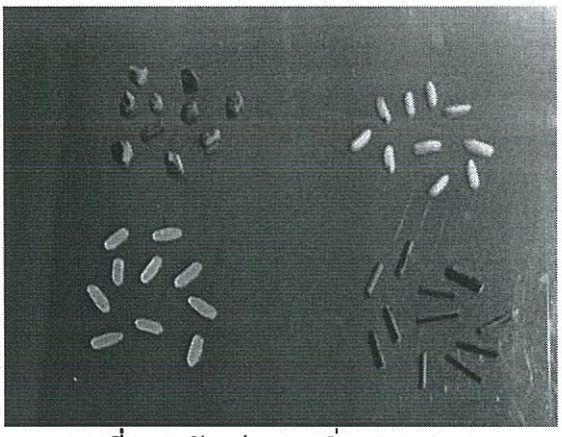
รูปที่ 3.7 ชุดทดลอง

3.3 การทดลองเบื้องต้น

3.3.1 การหาคุณสมบัติทางกายภาพของของวัตถุ

การหาคุณสมบัติทางกายภาพของของวัตถุเพื่อนำไปใช้ในการประมวลผลภาพ 2 มิติ สำหรับการตรวจจับสิ่งแปลกปลอม ในงานวิจัยมีการกำหนดพารามิเตอร์ที่แสดงคุณสมบัติทางกายภาพของวัตถุ ได้แก่ พื้นที่ของวัตถุ (จำนวนพิกเซล) และความยาวเส้นทแยงมุมของวัตถุ (L) เพื่อนำค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวมาสร้างเงื่อนไขในการตรวจจับสิ่งแปลกปลอมให้กับโปรแกรมประมวลผลภาพ 2 มิติในการหาพื้นที่ของวัตถุ และเส้นทแยงมุมของวัตถุเพื่อแสดงความแตกต่างระหว่างข้าวกับสิ่งแปลกปลอมโดยใช้โปรแกรม Labview 2014 สำหรับวิธีในการหาค่าพารามิเตอร์เริ่มจากการวางข้าวและสิ่งแปลกปลอมทั้งหมด อย่างละ 5 ชิ้น ลงบนถาดทดลอง ดังรูปที่ 3.8 จากนั้นใช้กล้องถ่ายภาพความร้อนจับภาพผ่านโปรแกรม Thermacam โดยเลือกชนิดภาพเป็นภาพสีเทา (gray scale) จากนั้นปรับค่า level และ span ให้ได้ภาพที่ชัดเจนที่สุด ซึ่งการปรับค่า level และ span เป็นการกำหนดค่าช่วงอุณหภูมิต่ำที่สุดกับอุณหภูมิสูงที่สุด โดยเป็นการเลือกช่วงของสีให้มีความเหมาะสมเพื่อให้ภาพสามารถแสดงจุดสนใจที่ต้องการตรวจสอบ จากนั้นบันทึกภาพ และนำภาพดังกล่าวเข้าสู่โปรแกรม Labview 2014 ที่เขียนขึ้นเพื่อวัดค่าพื้นที่ของวัตถุและความยาวเส้นทแยงมุมของวัตถุ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.8 ตัวอย่างและสิ่งแปลกปลอม

ตารางที่ 3.2 แสดงค่าคุณสมบัติทางกายภาพของของวัตถุ

ลำดับ	ชนิดของวัตถุ	พื้นที่ (พิกเซล)	เส้นทแยงมุม (หน่วย)
1	ข้าว	283 - 446	33.2415 – 40.4969
2	หิน	268 - 578	29.6816 - 41.4005
3	เศษไม้	318 - 722	41.9762 - 54.4059
4	พลาสติก	402 - 598	37.1618 - 47.5079

จากการหาคุณสมบัติทางกายภาพของของวัตถุเพื่อใช้ในการตรวจจับสิ่งแปลกปลอมที่มีพื้นที่และเส้นทแยงมุมต่างจากพื้นที่และเส้นทแยงมุมของข้าวโดยการประมวลผลภาพ 2 มิติ จากผลการตรวจสอบสิ่งแปลกปลอมแต่ละชนิดพบว่า หินจำนวนหนึ่งที่มีค่าพื้นที่และความยาวเส้นทแยงมุมทั้งน้อยกว่าและมากกว่าค่าพื้นที่และความยาวเส้นทแยงมุมของข้าว ในการตรวจสอบเศษไม้นั้นค่าพื้นที่บางส่วนมีค่าอยู่ในช่วงเดียวกับค่าพื้นที่และความยาวเส้นทแยงมุมของข้าวและบางส่วนมีค่ามากกว่าค่าพื้นที่และความยาวเส้นทแยงมุมของข้าว แต่สำหรับช่วงค่าความยาวของเส้นทแยงมุมของเศษไม้พบว่ามีค่ามากกว่าช่วงความยาวของเส้นทแยงมุมข้าว และสำหรับพลาสติกมีค่าพื้นที่และความยาวเส้นทแยงมุมบางส่วนอยู่ในช่วงเดียวกับค่าพื้นที่และความยาวเส้นทแยงมุมของข้าวและค่าพื้นที่และความยาวเส้นทแยงมุมบางส่วนมากกว่าค่าพื้นที่และความยาวเส้นทแยงมุมของข้าว ดังนั้นในการเขียนโปรแกรมเราสามารถตรวจจับสิ่งแปลกปลอมได้โดยตรวจจับวัตถุที่มีค่าพื้นที่และความยาวเส้นทแยงมุมที่ไม่อยู่ในช่วงของค่าพื้นที่และความยาวเส้นทแยงมุมข้าว และแสดงว่าเป็นสิ่งแปลกปลอม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.2 การหาเวลาที่เหมาะสมในการกระตุ้นความร้อน

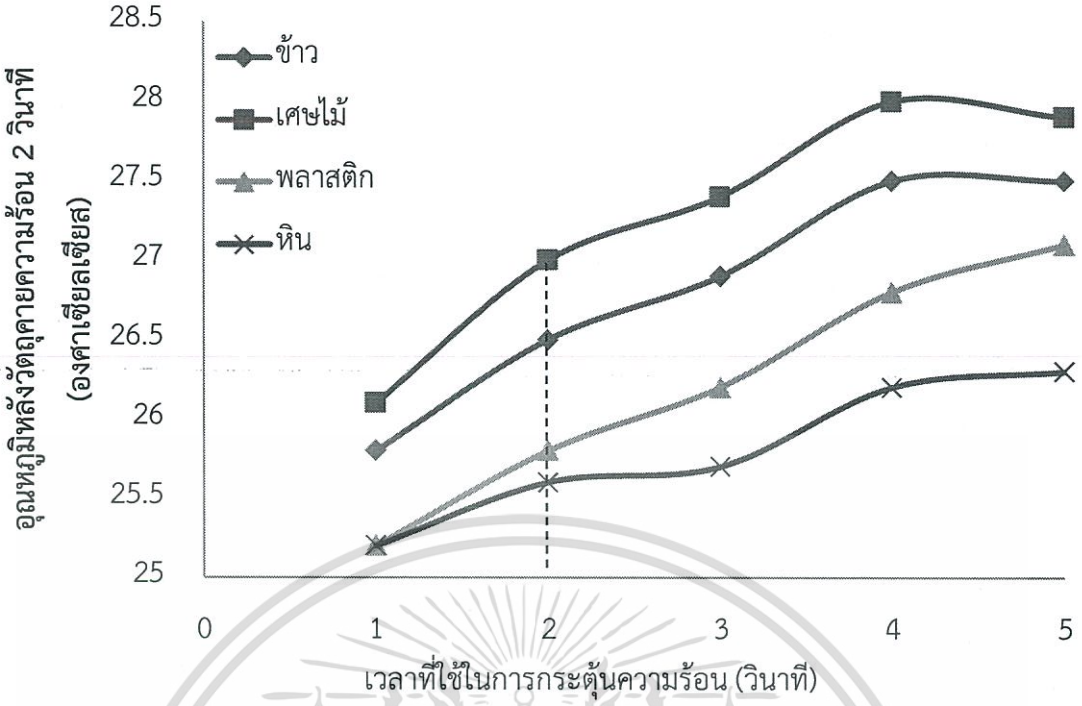
สำหรับการกระตุ้นความร้อนทำสอบเพื่อหาเวลาที่เหมาะสมซึ่งจะเป็นเวลาที่น้อยที่สุด เนื่องจากกระบวนการทำงานแบบเรียลไทม์ต้องการใช้เวลาน้อยที่สุดที่ภาพถ่ายความร้อนสามารถแสดงความแตกต่างระหว่างข้าวและสิ่งแปลกปลอม ในการกระตุ้นความร้อนถ้าการกระตุ้นด้วยพลังงานความร้อนที่น้อยเกินไปภาพถ่ายความร้อนจะไม่สามารถแสดงความแตกต่างระหว่างสิ่งแปลกปลอมกับข้าวได้เนื่องจากพลังงานความร้อนที่น้อยเกินไปจะไม่สามารถส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิภาพถ่ายความร้อนจึงไม่สามารถระบุสิ่งแปลกปลอมได้ แต่ถ้ากระตุ้นด้วยพลังงานความร้อนกับวัตถุมากไปวัตถุนั้นจะใช้เวลาในการคายความร้อนที่นานขึ้นและยังเป็นการเพิ่มเวลาในกระบวนการทดลองซึ่งระบบในการทดลองนี้จะพัฒนาไปเป็นการทดสอบแบบเรียลไทม์ซึ่งต้องการเวลาในกระบวนการทดลองน้อยที่สุด โดยเมื่อให้เวลาการกระตุ้นเพิ่มขึ้นพลังงานความร้อนที่ได้จากการกระตุ้นก็จะเพิ่มขึ้น ส่งผลให้วัสดุทดสอบได้รับพลังงานความร้อนมากขึ้นเช่นกัน ซึ่งพลังงานความร้อนที่วัสดุทดสอบได้รับแปรผันตรงกับความแตกต่างของอุณภูมิ ดังสมการที่ 3.1 เมื่อความแตกต่างของอุณภูมิมากขึ้นภาพถ่ายความร้อนก็จะแสดงความชัดเจนของเฉดสีมากขึ้น ดังนั้นการให้เวลาในการกระตุ้นความร้อนที่เหมาะสมกับวัสดุทดสอบจึงเป็นสิ่งสำคัญ การหาเวลาที่เหมาะสมในการกระตุ้นความร้อนหาจากการทดลองโดยให้เวลาที่แตกต่างกันในการกระตุ้นความร้อนให้กับวัสดุ ซึ่งกำหนดเวลาในการทดสอบกระตุ้นความร้อนให้แก่ข้าวและสิ่งแปลกปลอม คือ 1, 2, 3, 4 และ 5 วินาทีตามลำดับ เนื่องจากถ้ากระตุ้นความร้อนด้วยเวลาที่มากเกินไปจะส่งผลให้การตรวจสอบในระบบเรียลไทม์มีความล่าช้า

$$Q = mc\Delta t \tag{3.1}$$

เมื่อ Q คือ ปริมาณความร้อน มีหน่วยเป็น จูล
m คือ มวล มีหน่วยเป็น กรัม
c คือ ความจุความร้อนจำเพาะ มีหน่วยเป็น จูล/กรัม.เคลวิน
Δt คือ อุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลง มีหน่วยเป็น องศาเซลเซียส

สำหรับวิธีในการหาเวลาที่เหมาะสมในการกระตุ้นความร้อนเริ่มจากการวางข้าวและสิ่งแปลกปลอมทั้งหมด อย่างละ 5 ชิ้น ลงบทถาดทดลอง ดังรูปที่ 3.8 จากนั้นกระตุ้นความร้อนด้วยหลอดไฟฮาโลเจน เมื่อกระตุ้นความร้อนแล้วใช้กล้องถ่ายภาพความร้อนจับภาพผ่านโปรแกรม Thermacam ณ เวลาที่ตัวอย่างมีการคายความร้อน 2 วินาที จากนั้นบันทึกค่าอุณภูมิของข้าวและสิ่งแปลกปลอมแต่ละขนิด โดยทำการทดสอบ 3 ครั้ง และวิเคราะห์ผลหาเวลาที่เหมาะสมในการกระตุ้นความร้อนสำหรับงานวิจัย โดยกระตุ้นความร้อน 1, 2, 3, 4 และ 5 วินาทีตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.9 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้ในการกระตุ้นความร้อน (วินาที) กับอุณหภูมิหลังวัตถุคายความร้อน 2 วินาที (องศาเซลเซียส)

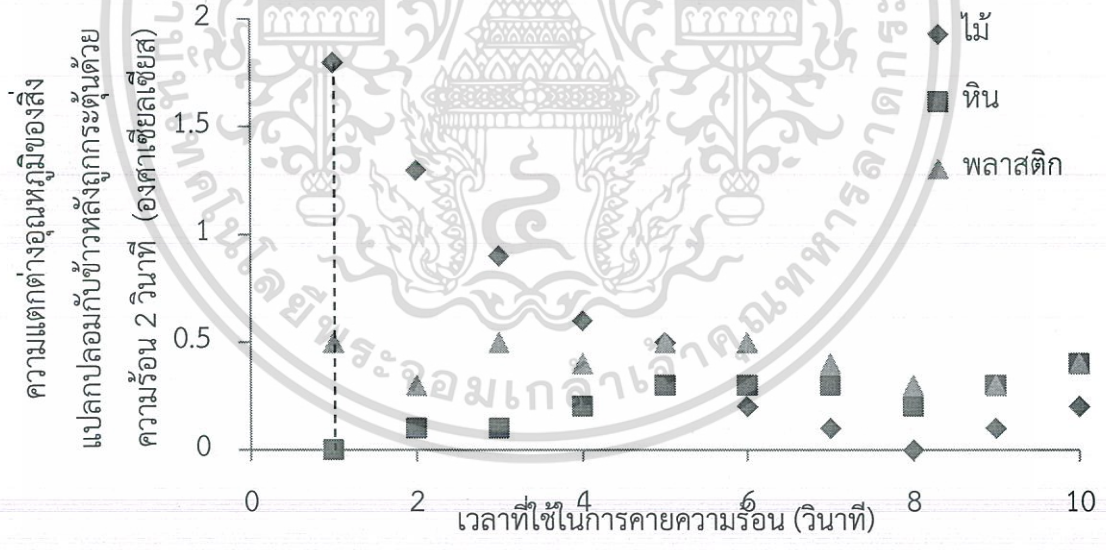
จากผลการวิเคราะห์กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้ในการกระตุ้นความร้อน (วินาที) กับอุณหภูมิหลังวัตถุคายความร้อน 2 วินาที กราฟสามารถแสดงความแตกต่างของอุณภูมิของวัตถุเมื่อได้รับเวลาในการกระตุ้นความร้อนที่แตกต่างกัน และวัตถุต่างชนิดกันจะมีอุณหูมิแตกต่างกัน พบว่าเมื่อเวลาในการกระตุ้นความร้อนมากขึ้นอุณหภูมิของวัตถุแต่ละชนิดก็สูงขึ้น สำหรับวิเคราะห์เวลาที่เหมาะสมในการกระตุ้นความร้อน การกระตุ้นความร้อนด้วยเวลา 1 วินาทีพบเป็นการกระตุ้นพลังงานความร้อนที่น้อยเกินไปโดยอุณหภูมิของข้าวยังใกล้เคียงกับอุณหภูมิของเศษไม้ทำให้ภาพถ่ายความร้อนไม่สามารถแสดงความแตกต่างระหว่างเศษไม้กับข้าวได้จึงไม่เหมาะสม เมื่อเพิ่มเวลาในการกระตุ้นให้มาขึ้นและพบว่าในการกระตุ้นความร้อนตั้งแต่ 2 - 5 วินาทีเป็นเวลาในการกระตุ้นที่สามารถแสดงความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างข้าวและสิ่งแปลกปลอมได้ ซึ่งภาพถ่ายความร้อนสามารถแสดงความแตกต่างของสีระหว่างข้าวและสิ่งแปลกปลอมได้ ดังนั้นจึงเลือกการกระตุ้นความร้อนที่เวลา 2 วินาที เนื่องจากในกระกวนการต้องการเวลาที่น้อยที่สุดในการกระตุ้นความร้อนที่ทำให้ข้าวและสิ่งแปลกปลอมมีอุณหภูมิแตกต่างกัน ซึ่งข้าวมีอุณหภูมิ 26.5 องศาเซลเซียส และสิ่งแปลกปลอม ได้แก่ หิน เศษไม้ พลาสติก มีอุณหภูมิ 25.6, 26, 25.8 องศาเซลเซียสตามลำดับ ดังนั้นจึงเลือกเวลาที่เหมาะสมในการกระตุ้นความร้อนคือ 2 วินาที ซึ่งเพียงพอต่อการทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.3 การหาเวลาที่เหมาะสมในการตรวจจับภาพถ่ายความร้อน

การหาเวลาที่เหมาะสมในการตรวจจับภาพถ่ายความร้อน เป็นการหาเวลาที่สำหรับการเลือกภาพความร้อนที่ถูกถ่ายหลังจากวัตถุถูกกระตุ้นความร้อนจากแหล่งความร้อนภายนอกเพื่อนำมาวิเคราะห์ เนื่องด้วยการความร้อนในปริมาณที่เท่ากันกับวัตถุต่างชนิดกันที่มีคุณสมบัติทางความร้อนแตกต่างกันวัตถุจะมีการคายความร้อนที่แตกต่างกัน ทำให้ค่าอุณหภูมิของวัตถุมีความแตกต่างกัน ส่งผลต่อภาพถ่ายความร้อนมีการแสดงเฉดสีที่แตกต่างกัน ในการหาเวลาที่เหมาะสมนั้นควรเลือกเวลาที่ทำให้อุณหภูมิของวัสดุแต่ละชนิดมีความแตกต่างกับอุณหภูมิของข้าวมากที่สุด เพื่อที่จะให้เฉดสีของภาพถ่ายความร้อนแสดงความแตกต่างกันอย่างชัดเจน และภาพที่ชัดเจนส่งผลต่อความถูกต้องในการประมวลผลภาพ

สำหรับการหาเวลาที่เหมาะสมในการตรวจจับภาพถ่ายความร้อนเริ่มจากการวางข้าวและสิ่งแปลกปลอมทั้งหมด อย่างละ 5 ชิ้น ลงบทถาดทดลอง ดังรูปที่ 3.8 จากนั้นกระตุ้นความร้อนด้วยหลอดไฟฮาโลเจนให้กับตัวอย่างและสิ่งแปลกปลอม 2 วินาที เมื่อกระตุ้นความร้อนแล้วใช้กล้องถ่ายภาพความร้อนจับภาพผ่านโปรแกรม Thermacam ตั้งแต่การคายความร้อนวินาทีที่ 1 ถึงวินาทีที่ 10 โดยทำการทดสอบ 3 ครั้ง และวิเคราะห์ผลหาเวลาที่เหมาะสมในการตรวจจับภาพถ่ายความร้อนสำหรับงานวิจัย



รูปที่ 3.10 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้ในการคายความร้อน (วินาที) กับความแตกต่างอุณหภูมิของสิ่งแปลกปลอมกับข้าวหลังถูกกระตุ้นด้วยความร้อน 2 วินาที (องศาเซียลเซียส)

จากผลการวิเคราะห์กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้ในการคายความร้อน (วินาที) กับความแตกต่างอุณหภูมิของสิ่งแปลกปลอมกับข้าวหลังถูกกระตุ้นด้วยความร้อน 2 วินาที (องศาเซียลเซียส) พบว่าเมื่อเวลาในการคายความร้อนมากขึ้นความแตกต่างอุณหภูมิของสิ่งแปลกปลอมกับข้าว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของวัตถุแต่ละชนิดมีการแสดงผลแตกต่างกัน โดยเศษไม้เมื่อเวลาการคายความร้อนมากขึ้นความแตกต่างอุณหภูมิของเศษไม้กับข้าวจะลดลงจาก 2 องศาเซลเซียสจนถึง 0 องศาเซลเซียส สำหรับพลาสติกเมื่อเวลาการคายความร้อนมากขึ้นความแตกต่างอุณหภูมิของพลาสติกกับข้าวจะค่อนข้างคงที่ ประมาณ 0.5 องศาเซลเซียส แต่ในหินนั้นเมื่อเวลาการคายความร้อนมากขึ้นความแตกต่างอุณหภูมิของหินกับข้าวเริ่มต้นคือ 0 องศาเซลเซียสและมีความแตกต่างสูงสุดเพียง 0.4 องศาเซลเซียส ซึ่งการวัดค่าอุณหภูมิของหินอาจมีการคลาดเคลื่อนเนื่องจากพื้นผิวของหินค่อนข้างขรุขระ ทำให้ภาพถ่ายความร้อนไม่สามารถแสดงความแตกต่างของเฉดสีระหว่างหินกับข้าวได้ ดังนั้นการตรวจจับหินจะสามารถตรวจจับด้วยการประมวลผลภาพ 2 มิติ การพิจารณาการหาเวลาที่เหมาะสมในการตรวจจับภาพถ่ายความร้อนจึงเลือกพิจารณาที่เศษไม้และพลาสติกเท่านั้น จากการวิเคราะห์เวลาที่เหมาะสมที่สุดในการตรวจจับภาพถ่ายความร้อนคือวินาทีที่ 1 เนื่องจากในเวลาดังกล่าวอุณหภูมิของเศษไม้และพลาสติกมีความแตกต่างกับข้าวมากที่สุดเมื่อเทียบกับการคายความร้อนวินาทีอื่นๆ ทำให้สามารถแสดงความแตกต่างของเฉดสีได้ชัดเจน ซึ่งจากคุณสมบัติของกล้องถ่ายภาพความร้อนนี้มีความสามารถในการแยกแยะอยู่ที่ 0.05 องศาเซลเซียสที่อุณหภูมิ + 30 องศาเซลเซียสซึ่งเพียงพอต่อการแสดงความแตกต่างของเฉดสีดังนั้นจึงเลือกที่วินาทีที่ 1

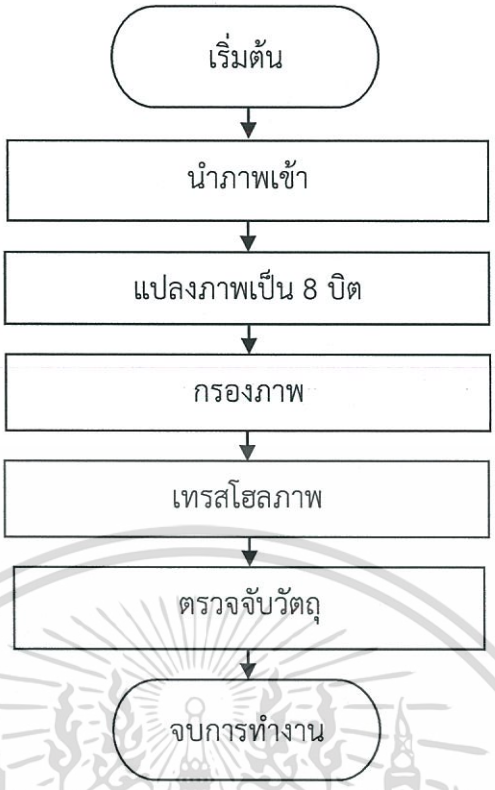
3.4 วิธีการประมวลผลภาพ

3.4.1 การทดสอบอัลกอลิธึมการประมวลผลภาพเบื้องต้นจากภาพความร้อน

ในการทดสอบอัลกอลิธึมการประมวลผลภาพเบื้องต้นสำหรับการตรวจจับสิ่งแปลกปลอมที่ปะปนในเมล็ดกาแฟคั่วด้วยเทคนิคแอคทีฟเทอร์โมกราฟฟี เลือกใช้เมล็ดกาแฟคั่วเนื่องจากมีขนาดใหญ่ทำให้ง่ายต่อการทดสอบความเป็นไปได้ของการทำงานอัลกอลิธึม การทดสอบใช้ทฤษฎีความแตกต่างของค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อน ซึ่งรังสีความร้อนที่แผ่ออกจากผิวของเมล็ดกาแฟคั่วและสิ่งแปลกปลอมมีความแตกต่างกันทำให้ภาพถ่ายความร้อนแสดงระดับสีที่แตกต่างกัน

การสร้างอัลกอลิธึมเบื้องต้นเป็นการสร้างอัลกอลิธึมเพื่อตรวจสอบระบบการตรวจจับสิ่งแปลกปลอมที่ปะปนในเมล็ดกาแฟคั่วด้วยเทคนิคแอคทีฟเทอร์โมกราฟฟี โดยระบบมีการคัดแยกสีที่แตกต่างกันเพื่อระบุสิ่งแปลกปลอมที่ปะปนในเมล็ดกาแฟคั่ว การทดลองใช้โปรแกรม Vision Builder AI 2013 (National Instruments) ในการสร้างระบบการประมวลผลภาพ มีการกำหนดรูปแบบอัลกอลิธึมดังนี้ (แสดงดังรูปที่ 3.11) ใช้อัลกอลิธึม Acquisition ในการนำรูปภาพเข้าโปรแกรม อัลกอลิธึม Extract RGB ในการแปลงรูปภาพให้เป็น 8 bits อัลกอลิธึม Filter ใช้สำหรับลดภาพที่มีความถี่สูง อัลกอลิธึม Threshold image ในการลดภาพให้เหลือสองสี คือ สีขาวและสีดำ และอัลกอลิธึม Detect object ใช้สำหรับนับจำนวนสิ่งแปลกปลอม ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.11 การทดสอบอัลกอลิธึมการประมวลผลภาพเบื้องต้น

โดยการทดลองและผลการทดลองของระบบตรวจจับนี้ พบว่าระบบสามารถตรวจสอบสิ่งแปลกปลอมที่ปะปนในเมล็ดกาแฟได้ซึ่งผลการทดลองสีของภาพถ่ายความร้อนแสดงความแตกต่างอย่างชัดเจนระหว่างเมล็ดกาแฟคั่วและสิ่งแปลกปลอม อย่างไรก็ตามยังพบปัญหาเล็กน้อยคือมีเมล็ดกาแฟคั่วจำนวนหนึ่งไม่สามารถตรวจจับได้จากระบบเนื่องจากการประมวลผลภาพถ่ายความร้อนไม่สามารถตรวจจับสิ่งแปลกปลอมได้หมด โดยระบบนี้สามารถประยุกต์กับระบบอัตโนมัติแบบเวลาจริงและหลักการของระบบนี้สามารถใช้ตรวจจับสิ่งแปลกปลอมที่ประปนในผลิตภัณฑ์อื่น ๆ

ปัญหาของอัลกิลิธึมการประมวลผลภาพเบื้องต้นจากภาพถ่ายความร้อนอีกปัญหาที่พบ คือ อัลกอลิธึมไม่สามารถแยกความแตกต่างของสิ่งแปลกปลอมที่มีคุณสมบัติความร้อนและขนาดใกล้เคียงกับเมล็ดกาแฟคั่วได้ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเพิ่มอัลกอลิธึมในการตรวจจับขนาดและรูปร่างจากภาพถ่ายความร้อนที่ไม่ได้รับการกระตุ้นความร้อนเพื่อตรวจจับลักษณะทางกายภาพของวัตถุที่ไม่เหมือนกับวัตถุที่ต้องการทดสอบ เป็นการเพิ่มประสิทธิภาพในการทำงานของระบบตรวจจับสิ่งแปลกปลอมให้ดีขึ้น จึงทำให้ระบบมีการประมวลผล 2 แบบ คือประมวลผลภาพ 2 มิติและประมวลผลภาพถ่ายความร้อน ในการตรวจสอบสิ่งแปลกปลอมที่ปะปนในเมล็ดกาแฟการแสดงสีในภาพถ่ายความร้อนมีความแตกต่างอย่างชัดเจนระหว่างเมล็ดกาแฟคั่วและสิ่งแปลกปลอมเนื่องจากเมล็ดกาแฟคั่วและสิ่งแปลกปลอมมีความแตกต่างของคุณสมบัติทางความร้อนอย่างชัดเจน เป็นผลทำให้ผู้วิจัยเกิดแนวคิดที่จะประยุกต์ระบบตรวจจับกับผลิตภัณฑ์อื่นที่มีความแตกต่างของงคุณสมบัติทางความร้อนใกล้เคียงกัน

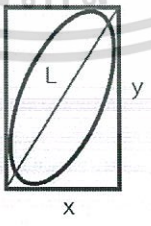
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มากขึ้น โดยผู้วิจัยเลือกตรวจสอบกับผลิตภัณฑ์ข้าว เนื่องจากข้าวมีคุณสมบัติทางความร้อนใกล้เคียงกับสิ่งแปลกปลอม จึงเลือกข้าวเพื่อนำมาทดสอบกับกับระบบที่ได้รับการพัฒนาอัลกอลิธึมการประมวลผลภาพ

3.4.2 การประมวลผลภาพ 2 มิติ

การเขียนโปรแกรมประมวลผลภาพ 2 มิติตรวจจับสิ่งแปลกปลอมใช้ความแตกต่างของค่าพารามิเตอร์พื้นที่ของวัตถุ (จำนวนพิกเซล) และความยาวเส้นทแยงมุมของวัตถุ (L) ในการกำหนดเงื่อนไขของโปรแกรม โดยค่าพารามิเตอร์ที่กำหนดนี้สามารถแสดงความแตกต่างของข้าวกับสิ่งแปลกปลอมได้ ซึ่งเทคนิคประมวลผลภาพสำหรับการเขียนโปรแกรมมีอัลกอลิธึมให้เลือกใช้มากมาย โดยการเขียนโปรแกรมประมวลผลภาพ 2 มิติตรวจจับสิ่งแปลกปลอมในข้าวเริ่มจากนำภาพเข้าสู่โปรแกรมโดยใช้อัลกอลิธึม Simulate Acquisition จากนั้นทำการดึงภาพเฉพาะวัสดุที่สนใจออกจากพื้นพลังของภาพโดยให้อัลกอลิธึมเทรสโฮล การเทรสโฮลจะทำให้ภาพเหลือเพียงสองสีคือ สีที่แสดงพื้นหลัง และสีที่แสดงวัสดุที่สนใจ จากนั้นใช้อัลกอลิธึม Vision Assistance ในการประมวลผลภาพไบนารี่เพื่อลดสัญญาณรบกวนภายในภาพก่อนการตรวจจับสิ่งแปลกปลอม โดยใช้อัลกอลิธึม Morphology ในการเติมโครงสร้างที่ไม่สมบูรณ์ของขอบวัสดุและตัดสัญญาณรบกวนภายในภาพออก เมื่อภาพมีการตัดสัญญาณรบกวนออกแล้วจะเปลงภาพให้เป็นภาพขาวดำเพื่อง่ายต่อการตรวจจับโดยใช้อัลกอลิธึม Equalize เมื่อการปรับภาพเสร็จทำการตรวจจับวัตถุโดยใช้อัลกอลิธึม Detect Object อัลกอลิธึมจะทำการตรวจจับวัตถุและแสดงค่าพารามิเตอร์ของวัตถุ เช่น พิกัดศูนย์กลางของวัตถุ พื้นที่ของวัตถุ พิกัดของบล็อกในแนวแกน x และแกน y ที่คลอบคลุมวัตถุ นำค่าพิกัดของบล็อกในแนวแกน x และแกน y ที่คลอบคลุมวัตถุที่ได้ไปหาความยาวเส้นทแยงมุมของวัตถุ แสดวดั่วรูปที่ 3.12

$$L = \sqrt{x^2 + y^2} \tag{3.1}$$

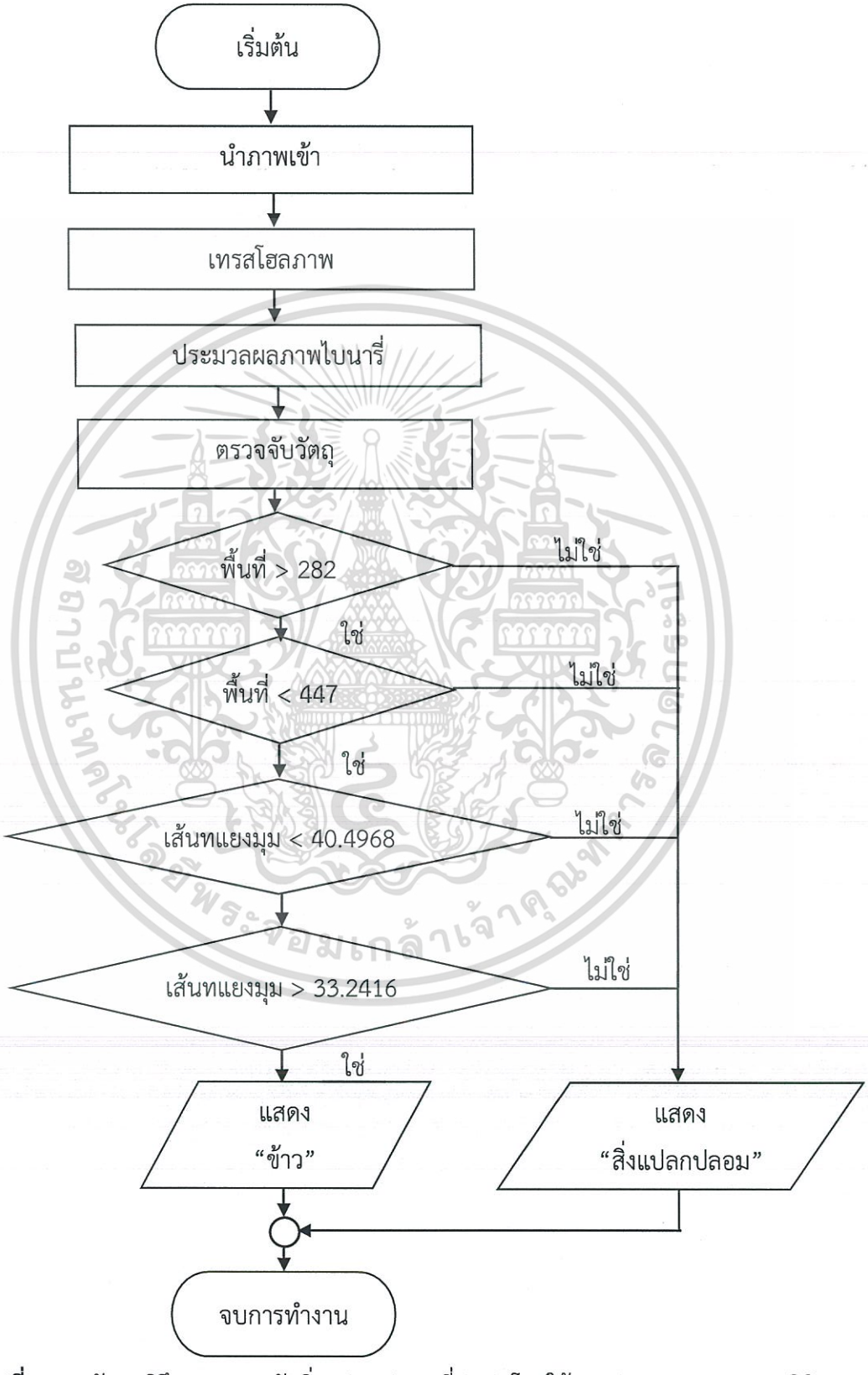


รูปที่ 3.12 การหาความยาวเส้นทแยงมุม

เมื่อได้ค่าพารามิเตอร์พื้นที่ของวัตถุ (พิกเซล) และความยาวเส้นทแยงมุมของวัตถุ (L) นำค่าดังกล่าวเข้าเงื่อนไขตรวจสอบโดยตรวจสอบพื้นที่ ซึ่งข้าวมีพื้นที่ 283 – 447 พิกเซลถ้าพื้นที่ของวัตถุมากกว่าหรือน้อยกว่าพื้นที่ของข้าว แสดงว่าวัตถุนั้นเป็นสิ่งแปลกปลอม และข้าวมีเส้นทแยงมุม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของวัตถุยาว 33.2416 – 40.4968 หน่วยถ้าเส้นทแยงมุมของวัตถุยาวของวัตถุมากกว่าหรือน้อยกว่าเส้นทแยงมุมของวัตถุยาวของข้าว แสดงว่าวัตถุนั้นเป็นสิ่งแปลกปลอม โดยอัลกอลิธึมแสดงดังรูปที่ 3.13

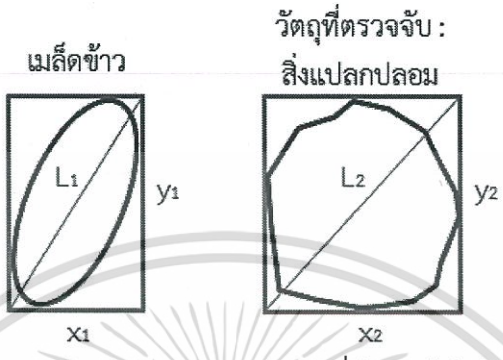


รูปที่ 3.13 อัลกอลิธึมการตรวจจับสิ่งแปลกปลอมที่ปะปนโดยใช้การประมวลผลภาพ 2 มิติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

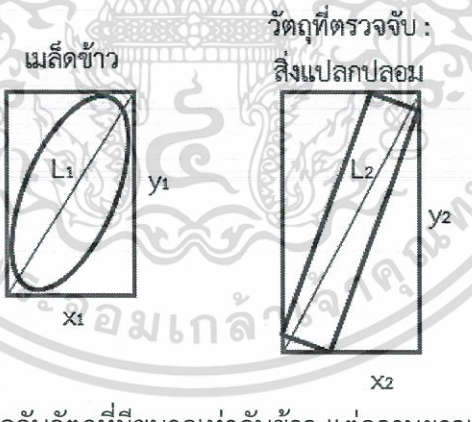
สำหรับการตรวจจับสิ่งแปลกปลอมด้วยการประมวลผลภาพ 2 มิติ ระบบสามารถแบ่งการตรวจจับได้เป็น 3 กรณี ดังนี้

กรณีที่ 1 : วัตถุที่มีขนาดไม่อยู่ในช่วง 283 – 447 พิกเซล ซึ่งเป็นวัตถุที่มีขนาดเล็กกว่าหรือใหญ่กว่าเมล็ดข้าว แสดงว่าเป็นสิ่งแปลกปลอม แสดงดังรูปที่ 3.14



รูปที่ 3.14 ตัวอย่างการตรวจจับวัตถุที่มีขนาดไม่เท่ากับข้าว

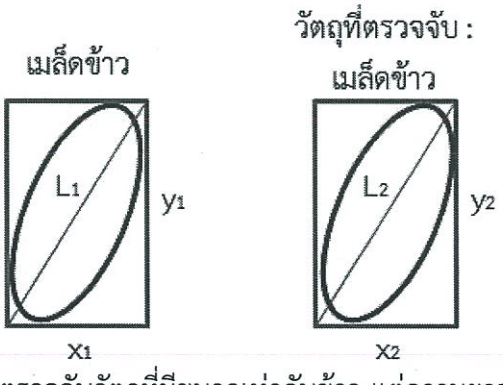
กรณีที่ 2 : วัตถุที่มีขนาดอยู่ในช่วง 283 – 447 พิกเซล ซึ่งเป็นวัตถุที่มีขนาดใกล้เคียงกับเมล็ดข้าว แต่เส้นทแยงมุมที่ความยาวไม่อยู่ในช่วง 33.2416 – 40.4968 หน่วย ซึ่งเป็นวัตถุที่มีความยาวเส้นทแยงมุมสั้นกว่าหรือยาวกว่าเมล็ดข้าว แสดงว่าเป็นสิ่งแปลกปลอม แสดงดังรูปที่ 3.15



รูปที่ 3.15 ตัวอย่างการตรวจจับวัตถุที่มีขนาดเท่ากับข้าว แต่ความยาวเส้นทแยงมุมไม่เท่ากับข้าว

กรณีที่ 3 : วัตถุที่มีขนาดอยู่ในช่วง 283 – 447 พิกเซล ซึ่งเป็นวัตถุที่มีขนาดใกล้เคียงกับเมล็ดข้าว แต่เส้นทแยงมุมที่ความยาวอยู่ในช่วง 33.2416 – 40.4968 หน่วย ซึ่งเป็นวัตถุที่มีความยาวเส้นทแยงมุมใกล้คียงกับเมล็ดข้าว แสดงว่าเป็นเมล็ดข้าว แสดงดังรูปที่ 3.16

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

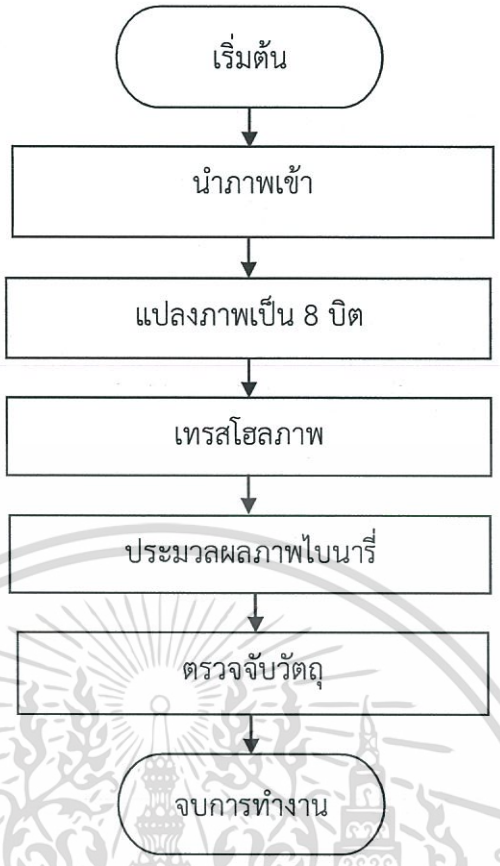


รูปที่ 3.16 ตัวอย่างการตรวจจับวัตถุที่มีขนาดเท่ากับข้าว แต่ความยาวเส้นทแยงมุมเท่ากับข้าว

3.4.3 การประมวลผลภาพถ่ายความร้อน

การเขียนโปรแกรมตรวจจับสิ่งแปลกปลอมจากภาพถ่ายความร้อนนั้นใช้ความแตกต่างของคุณสมบัติทางความร้อนของวัตถุต่างชนิดกัน เมื่อวัตถุที่มีคุณสมบัติทางความร้อนแตกต่างกันได้รับพลังงานความร้อนเท่ากันวัตถุแต่ละชนิดจะมีการแผ่รังสีความร้อนออกจากวัตถุแตกต่างกัน ทำให้กล้องถ่ายภาพความร้อนที่รับพลังงานความร้อนที่แตกต่างกันนี้สามารถแสดงเป็นภาพถ่ายความร้อนที่มีเฉดสีแตกต่างกัน ในการเขียนโปรแกรมประมวลผลภาพถ่ายความร้อนตรวจจับสิ่งแปลกปลอมในข้าวเริ่มจากนำภาพถ่ายความร้อนรูปแบบระดับสีเทาเข้าสู่โปรแกรมโดยใช้อัลกอลิธึม Simulate Acquisition ซึ่งเป็นภาพ 256 บิต ปรับภาพให้เป็นภาพ 8 บิตซึ่งเป็นภาพไบนารี่ โดยใช้อัลกอลิธึม ExtractSingleColorPlane จากนั้นเมื่อได้ภาพที่สามารถแสดงความแตกต่างของสีระหว่างข้าวกับสิ่งแปลกปลอมใช้อัลกอลิธึม Threshold คือการกำหนดช่วงสีของวัตถุเผื่อแบ่งภาพออกเป็นสองสี โดยการกำหนดค่า กำหนดค่าให้ค่าระดับสูงสูงกว่าค่าสีของแผ่นอะลูมิเนียมและข้าว เมื่อข้าวและแผ่นอะลูมิเนียมรวมกันเป็นพื้นหลังของภาพโปรแกรมจะแสดงผลเฉพาะวัตถุที่เป็นสิ่งแปลกปลอม หลังจากนั้นพบว่าภาพที่ได้ยังคงมีสัญญาณรบกวน เช่น ขอบไม่ชัด ภาพบางส่วนเป็นจุดๆ เพื่อทำการปรับภาพให้มีความคมชัด และง่ายต่อการประมวลผลภาพเลือกใช้อัลกอลิธึม Vision Assistance ในการประมวลผลภาพไบนารี่ โดยปรับปรุงภาพเพิ่มขอบให้ชัดและลบจุดที่ไม่ต้องการออก เมื่อภาพดังกล่าวพร้อมที่จะเข้าสู่กระบวนการตรวจจับ ใช้อัลกอลิธึม Detect Object ในการตรวจจับและนับจำนวนสิ่งแปลกปลอมที่พบในการทดลอง โดยอัลกอลิธึมแสดงดังรูปที่ 3.17

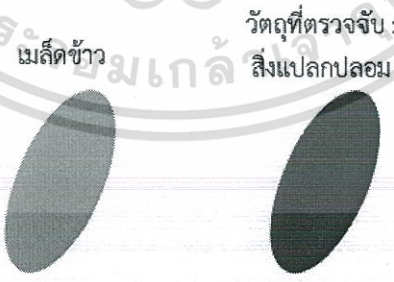
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.17 อัลกอลิธึมการตรวจจับสิ่งแปลกปลอมที่ปะปนโดยใช้การประมวลผลภาพถ่ายความร้อน

สำหรับการตรวจจับสิ่งแปลกปลอมด้วยการประมวลผลภาพถ่ายความร้อน ระบบสามารถแบ่งการตรวจจับได้เป็น 2 กรณี ดังนี้

กรณีที่ 1 : วัตถุที่มีคุณสมบัติทางความร้อนแตกต่างกับเมล็ดข้าว แสดงดังรูปที่ 3.18



รูปที่ 3.18 ตัวอย่างการตรวจจับวัตถุคุณสมบัติทางความร้อนแตกต่างกับเมล็ดข้าว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กรณีที่ 2 : วัตถุที่มีคุณสมบัติทางความร้อนใกล้เคียงกับเมล็ดข้าว แสดงดังรูปที่ 3.19

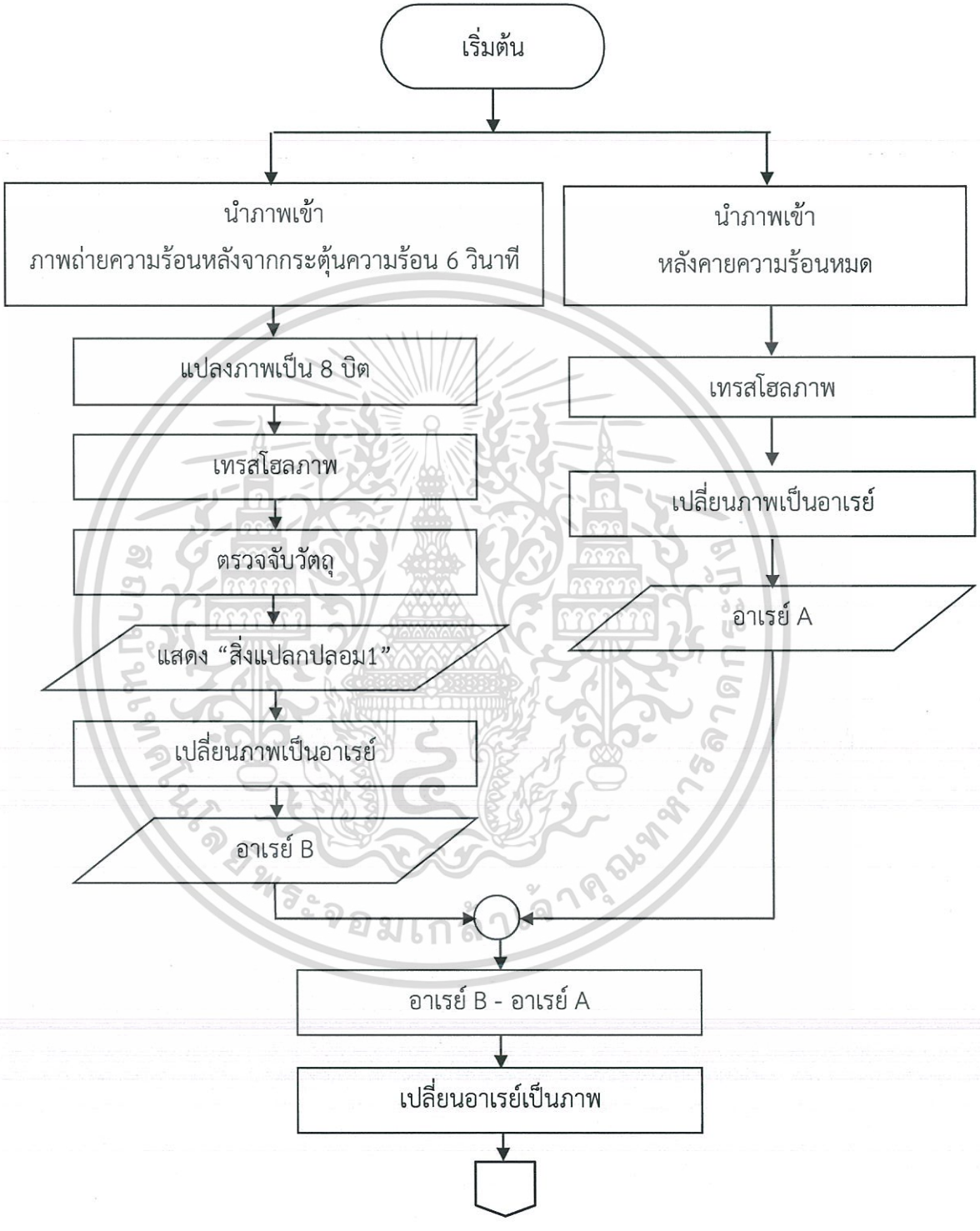
รูปที่ 3.19 ตัวอย่างการตรวจจับวัตถุคุณสมบัติทางความร้อนใกล้เคียงกับเมล็ดข้าว

3.4.3 การประมวลผลภาพถ่าย 2 มิติผสมกับภาพถ่ายความร้อน

การเขียนโปรแกรมประมวลผลภาพ 2 มิติผสมกับภาพถ่ายความร้อน เริ่มต้นโดยโปรแกรมจะประมวลผลภาพถ่ายความร้อนก่อนโดยการนำภาพถ่ายความร้อนเข้าสู่โปรแกรมด้วยอัลกอลิธึม Simulate Acquisition จากนั้นแปลงภาพให้ภาพเป็น 8 บิตด้วยอัลกอลิธึม ExtractSingle ColorPlane เมื่อแปลงภาพแล้วทำการดึงจุดสนใจโดยการแสดงเฉพาะจุดที่เป็นสิ่งแปลกปลอมซึ่งเป็นจุดที่มีค่าความร้อนสูงกว่าบริเวณปกติด้วยอัลกอลิธึม Threshold และนับจำนวนสิ่งแปลกปลอมที่แยกด้วยคุณสมบัติทางความร้อนโดยอัลกอลิธึม Detect Object จากนั้นทำการแปลงภาพไบนารีให้เป็นค่าในอาเรย์ด้วยอัลกอลิธึม Image to Array จะได้ Array B ต่อไปจะเป็นการประมวลผลภาพ 2 มิติเริ่มจากรับภาพหลังจากวัตถุคายความร้อนออกหมดด้วยอัลกอลิธึม Simulate Acquisition จากนั้นนำภาพที่ได้รับเข้ามาแยกส่วนของพื้นหลังออกสนใจเฉพาะวัตถุโดยใช้อัลกอลิธึม Threshold เมื่อเทรสโฮลแล้วภาพจะออกมาเป็นภาพไบนารี่ แปลงภาพให้เป็นค่าในอาเรย์ด้วยอัลกอลิธึม Image to Array กำหนดให้เป็น Array A จากนั้นนำค่าจาก Array B (ค่าอาร์ของภาพที่สิ่งแปลกปลอมที่ถูกแยกด้วยความร้อน) ลบ Array A (ค่าอาเรย์ของภาพที่มีข้าวและสิ่งแปลกปลอมผสมอยู่) จะได้ค่าอาเรย์ใหม่ออกมาซึ่งเป็นค่าอาเรย์ของภาพที่มีข้าวและสิ่งแปลกปลอมที่ไม่สามารถแยกด้วยคุณสมบัติทางความร้อน นำค่าอาเรย์นี้แปลงกลับไปเป็นรูปภาพเพื่อนำรูปภาพเข้าสู่การตรวจสอบสิ่งแปลกปลอมด้วยคุณสมบัติขนาดและเส้นทแยงมุมโดยใช้อัลกอลิธึม Array to Image จากนั้นลบสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นภายในภาพและปรับปรุงโครงสร้างที่มีความปกติเช่น ขอบไม่ชัด ด้วยอัลกอลิธึม Vision Assistance ซึ่งเป็นการประมวลผลภาพไบนารี่ เมื่อได้ภาพที่พร้อมแล้วทำการตรวจจับด้วยอัลกอลิธึม ทำการตรวจจับวัตถุโดยใช้อัลกอลิธึม Detect Object อัลกอลิธึมจะทำการตรวจจับวัตถุและแสดงค่าพารามิเตอร์ของวัตถุ จากนั้นหาพื้นที่ของวัตถุ และเส้นทแยงมุมของวัตถุ นำค่าดังกล่าวเข้าเงื่อนไขตรวจสอบโดยตรวจสอบพื้นที่ ซึ่งข้าวมีพื้นที่ 282 – 447 พิกเซลถ้าพื้นที่ของวัตถุมากกว่าหรือน้อยกว่าพื้นที่ของข้าว แสดงว่าวัตถุนั้นเป็นสิ่งแปลกปลอม และข้าวมีเส้นทแยงมุมของวัตถุยาว 33.2416 – 40.4968 ถ้าเส้นทแยงมุมของวัตถุยาวของวัตถุมากกว่าหรือน้อยกว่าเส้นทแยงมุมของวัตถุยาวของข้าว แสดงว่าวัตถุนั้นเป็นสิ่งแปลกปลอม นำจำนวนสิ่งแปลกปลอมจากการ

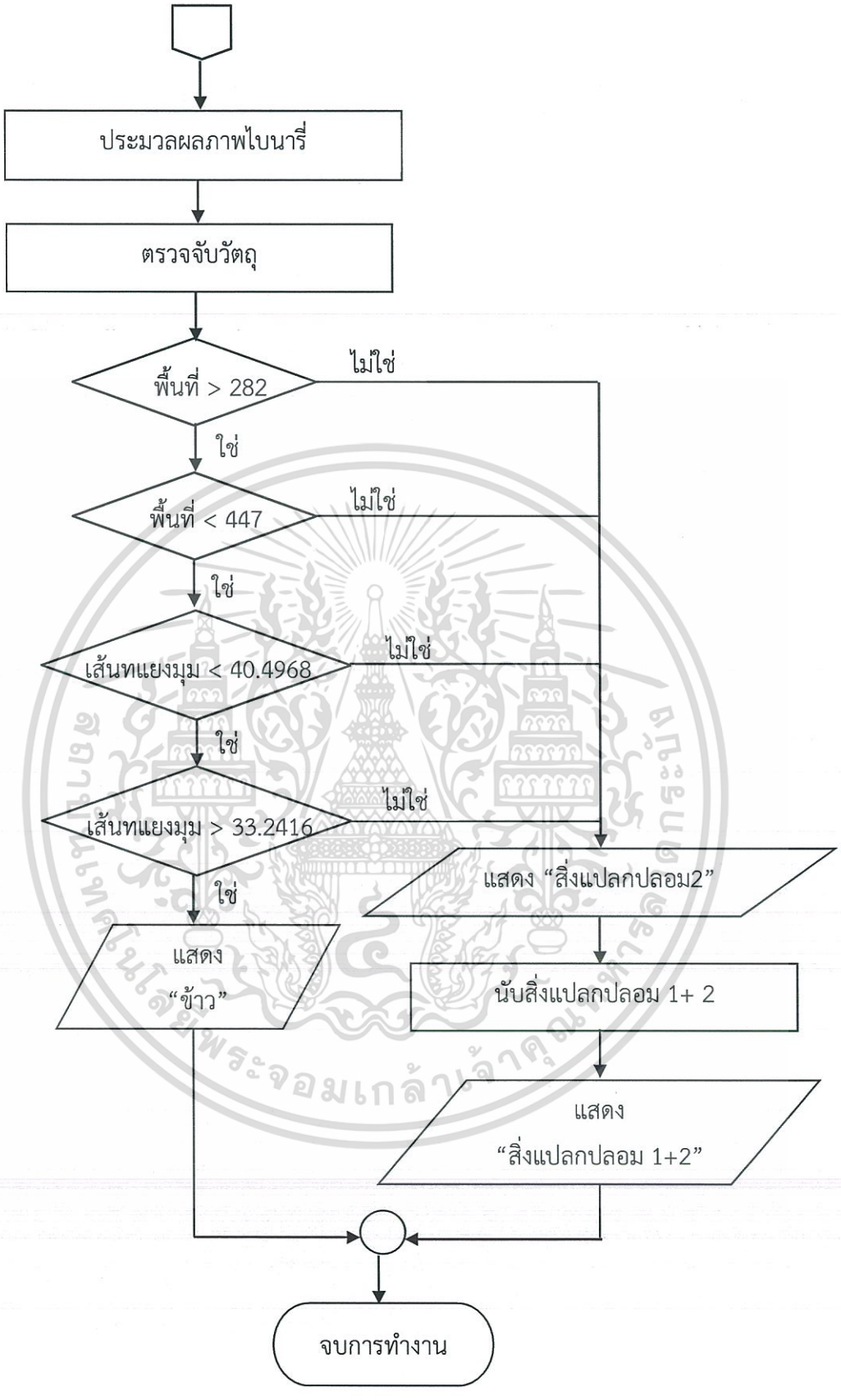
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประมวลผลภาพความร้อนบวกกับจำนวนสิ่งแปลกปลอมจากการประมวลผลภาพ 2 มิติ จะได้จำนวนสิ่งแปลกปลอมทั้งหมดจากการตรวจจับสิ่งแปลกปลอมที่ปะปนในข้าว โดยอัลกอลิธึมแสดงดังรูปที่ 3.20



รูปที่ 3.20 อัลกอลิธึมการตรวจจับสิ่งแปลกปลอมที่ปะปนโดยใช้การประมวลผลภาพ 2 มิติผสมกับภาพถ่ายความร้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.20 อัลกอลิธึมการตรวจจับสิ่งแปลกปลอมที่ปะปนโดยใช้การประมวลผลภาพ 2 มิติผสมกับภาพถ่ายความร้อน **(ต่อ)**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5 วิธีการทดลอง

3.5.1 การตรวจจับสิ่งแปลกปลอมที่ปะปนในข้าวโดยการประมวลผลภาพ

ในการทดลองตรวจจับสิ่งแปลกปลอมที่ปะปนในข้าว ทดลองโดยใส่ข้าวและสิ่งแปลกปลอมลงบนแผ่นอะลูมิเนียมซึ่งแบบไม่ติดกัน เนื่องจากในกระบวนการตรวจสอบจริงข้าวจะถูกปล่อยตามราง ซึ่งในการถ่ายภาพเพื่อนำมาประมวลผลภาพนั้นเมล็ดข้าวจะไม่ติดกัน กำหนดให้ใส่ข้าวและสิ่งแปลกปลอมบนแผ่นอะลูมิเนียมจำนวนรวมกันทั้งหมด 100 ชิ้น และในการทดลองกำหนดให้ทดสอบกับสิ่งแปลกปลอมจำนวน 5, 10, 15, 20, 25 และ 30 ชิ้นตามลำดับ หลังจากวางชิ้นทดสอบลงบนแผ่นอะลูมิเนียมแล้วใช้กล้องถ่ายภาพความร้อนถ่ายภาพความร้อนเป็นไฟล์วีดีโอโดยใช้โปรแกรม Thermacam ในการสั่งถ่ายภาพ จากนั้นกระตุ้นความร้อนให้กับวัสดุที่ทำการทดสอบด้วยหลอดไฟฮาโลเจน เป็นเวลา 2 วินาทีดับไฟ และรอให้วัสดุที่ทำการทดสอบคายความร้อนที่วินาทีที่ 1 จากนั้นนำวิดีโอความร้อนที่ได้ไปวิเคราะเพื่อทำการตรวจจับสิ่งแปลกปลอมที่ปะปนในข้าวโดยวิเคราะห์เริ่มจากเปลี่ยนภาพให้เป็นภาพระดับสีเทา ปรับค่า level และ span แบบอัตโนมัติ เพื่อให้ภาพแสดงสีที่ชัดเจนทำให้มีความภาพชัดและง่ายต่อการนำไปประมวลผล สำหรับการประมวลผลแบ่งออกเป็น 3 ส่วนคือ การประมวลผลภาพ 2 มิติ การประมวลผลภาพถ่ายความร้อน และการประมวลผลภาพ 2 มิติผสมภาพถ่ายความร้อน สำหรับการประมวลผลภาพ 2 มิติเลือกภาพในช่วงก่อนการกระตุ้นความร้อนไปการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมการประมวลผลภาพ 2 มิติที่ออกแบบไว้ สำหรับการประมวลผลภาพถ่ายความร้อนเลือกภาพหลังจากการคายความร้อน 1 วินาทีไปการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมการประมวลผลภาพถ่ายความร้อนที่ออกแบบไว้ และการประมวลผลภาพ 2 มิติผสมภาพถ่ายความร้อนใช้ภาพจากการประมวลผลภาพ 2 มิติ และการประมวลผลภาพความร้อนขั้นต้น ทำการทดลองอย่างละ 3 ครั้งและบันทึกผลการทดลอง

3.5.2 การทดสอบประสิทธิภาพการทำงานของระบบตรวจจับ

สำหรับการออกแบบการทดสอบประสิทธิภาพการทำงานของระบบตรวจจับสิ่งแปลกปลอมทีjปะปนในข้าวนั้น ทดลองโดยใส่ข้าวและสิ่งแปลกปลอมลงบนแผ่นอะลูมิเนียมซึ่งวางแบบไม่ติดกัน กำหนดให้ใส่ข้าวและสิ่งแปลกปลอมลงบนแผ่นอะลูมิเนียมจำนวนรวมกันทั้งหมด 100 ชิ้น และในการทดลองกำหนดให้ทดสอบกับสิ่งแปลกปลอมจำนวน 5, 10, 15, 20, 25 และ 30 ชิ้นตามลำดับ เช่นเดียวกับหัวข้อ 3.5.1 หลังจากนั้นเปิดโปรแกรม LabVIEW 2014 ที่ออกแบบเป็นโปรแกรมสำหรับการตรวจจับสิ่งแปลกปลอมด้วยการประมวลผลภาพถ่าย 2 มิติผสมกับภาพถ่ายความร้อน ทดสอบโดยวางถาดทดลองลงบนสายพาน เปิดสายพาน เปิดหลอดไฟฮาโลเจนกระตุ้นความร้อนให้กับวัตถุ 4 วินาที จากนั้นถาดทดลองจะเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งที่กล้องถ่ายภาพความร้อนโดยใช้เวลา 5 วินาที และกล้องถ่ายภาพความร้อนทำการถ่ายภาพความร้อนและนำภาพเข้าสู่โปรแกรมแบบเรียลไทม์ซึ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เป็นภาพหลังจากวัสดุที่ทำการทดสอบถูกกระตุ้นความร้อน 5 วินาที และนำเข้าอีกภาพเป็นภาพเมื่อวัสดุที่ทำการทดสอบมีการคายความร้อนออกหมด โดยโปรแกรมตรวจจับสิ่งแปลกปลอมที่ปะปนในข้าวจะประมวลผลภาพถ่าย 2 มิติผสมกับภาพถ่ายความร้อนจะแสดงผลจำนวนสิ่งแปลกปลอมทั้งหมดที่ตรวจพบ ทำการทดลองอย่างละ 3 ครั้งและบันทึกผลการทดลอง ชุดทดลองการทดสอบประสิทธิภาพการทำงานของระบบตรวจจับแสดงดังรูปที่ 3.21

รูปที่ 3.21 ชุดทดลองการทดสอบประสิทธิภาพการทำงานของระบบตรวจจับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4
ผลการทดลองและการวิจารณ์ผล

เนื้อหาในบทนี้กล่าวถึงผลการตรวจจับสิ่งแปลกปลอมที่ปะปนในข้าวโดยการประมวลผลภาพแบบออฟไลน์ ซึ่งประกอบด้วยการประมวลผลภาพ 2 มิติ สำหรับแยกสิ่งแปลกปลอมที่มีพื้นที่และความยาวเส้นทแยงมุมที่แตกต่างกับข้าว การประมวลผลภาพความร้อนสำหรับแยกสิ่งแปลกปลอมที่มีคุณสมบัติทางความร้อนแตกต่างกับข้าว รวมทั้งการประยุกต์ใช้การประมวลผลภาพ 2 มิติร่วมกับภาพความร้อนเพื่อเพิ่มความถูกต้องของการตรวจจับสิ่งแปลกปลอมด้วยโปรแกรมที่ทำการพัฒนาขึ้น และผลการทดสอบประสิทธิภาพการทำงานของระบบตรวจจับแบบออนไลน์ด้วยการประมวลผลภาพ 2 มิติผสมกับภาพความร้อน

4.1 การตรวจจับสิ่งแปลกปลอมที่ปะปนในข้าว

4.1.1 การตรวจจับสิ่งแปลกปลอมด้วยการประมวลผลภาพ 2 มิติ

สำหรับการตรวจจับสิ่งแปลกปลอมในข้าวด้วยการประมวลผลภาพ 2 มิติ ใช้การตรวจสอบพื้นที่วัตถุและความยาวเส้นทแยงมุมของกรอบวัตถุในคัดแยกสิ่งแปลกปลอม จากการนำข้าวที่มีสิ่งแปลกปลอมปะปนใส่ลงบนแผ่นอะลูมิเนียม โดยในการประมวลภาพ 2 มิติใช้กล้องถ่ายภาพความร้อนในการถ่ายภาพ เพื่อให้ง่ายต่อการประยุกต์ใช้ร่วมกับการประมวลผลภาพความร้อนที่ใช้กล้องถ่ายภาพความร้อน โดยผลการประมวลผลภาพ 2 มิติแสดงดังตารางที่ 4.1 และรูปที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 จำนวนสิ่งแปลกปลอมเฉลี่ยที่ตรวจจับได้จากการประมวลผลภาพ 2 มิติ

ชนิดของสิ่ง	ค่าเฉลี่ยจำนวนของสิ่งแปลกปลอมที่ปะปนในข้าว (ชิ้น)					
แปลกปลอม	5	10	15	20	25	30
หิน	4±1	9±1	13±1	17±1	22±0	24±1
เศษไม้	3±1	9±1	13±1	20±1	25±1	28±2
พลาสติก	3±1	6±1	12±2	8±2	10±1	12±1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

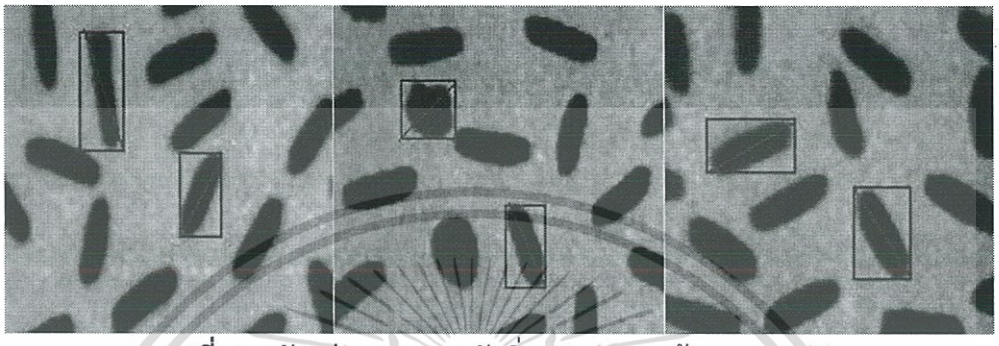
รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนสิ่งแปลกปลอมที่ใส่ในการทดลองกับเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดในการตรวจจับสิ่งแปลกปลอม

จากตารางที่ 4.1 แสดงจำนวนสิ่งแปลกปลอมเฉลี่ยที่ตรวจจับได้จากการประมวลผลภาพ 2 มิติ พบว่าการประมวลผลภาพ 2 มิติสามารถตรวจจับเศษไม้ หิน และพลาสติกได้ตามลำดับ ซึ่งสำหรับการตรวจจับพลาสติกที่ได้มีความแตกต่างจากจำนวนพลาสติกจริงค่อนข้างมาก เนื่องจากการประมวลผลภาพ 2 มิติ เป็นการประมวลผลของพื้นที่และความยาวเส้นทแยงมุมของวัตถุที่แตกต่างจากข้าว ซึ่งพลาสติกที่นำมาทดสอบมีรูปร่างและความยาวใกล้เคียงกับข้าวมากซึ่งมีความยาว 0.85 เซนติเมตร จึงทำให้มีขนาดและเส้นทแยงมุมใกล้เคียงกับข้าวการประมวลผลภาพจึงตรวจจับพลาสติกได้ไม่ดีเท่าที่ควร เศษไม้ที่นำมาทดสอบมีความยาว 0.85 เซนติเมตรซึ่งใกล้เคียงกับข้าว แต่สำหรับเศษไม้มีความกว้างหรือความหนามากกว่าข้าวจึงทำให้มีขนาดและความยาวเส้นทแยงมุมมากกว่าข้าวการประมวลผลภาพจึงสามารถตรวจจับเศษไม้ได้ และหินที่นำมาทดสอบมีรูปร่างและขนาดแตกต่างจากข้าว ซึ่งมีขนาดประมาณ 0.20 - 0.85 เซนติเมตร จึงทำให้มีพื้นที่ขนาดและความยาวเส้นทแยงมุมไม่เท่ากับข้าวการประมวลผลภาพจึงสามารถตรวจจับหินได้ แสดงดังรูปที่ 4.2

จากรูปที่ 4.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนสิ่งแปลกปลอมที่ใส่ในการทดลองกับเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดในการตรวจจับสิ่งแปลกปลอมจากการประมวลผลภาพ 2 มิติ สำหรับการคำนวณเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดนั้นคำนวณจากความผิดผลาดในการตรวจจับสิ่งแปลกปลอมจากโปรแกรมเทียบกับจำนวนสิ่งแปลกปลอมจริงที่ใส่ไปในการทดลอง โดยในการเปอร์เซ็นความผิดของการตรวจจับสิ่งแปลกปลอมแต่ละชนิดพบว่าในการตรวจจับหิน เปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดในการตรวจจับหินมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 14.87% ในการตรวจจับเศษไม้ เปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดในการตรวจจับเศษไม้มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 10.32% และในการตรวจจับพลาสติก เปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดใน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การตรวจจับมีค่าเฉลี่ยสูงถึง 53.15% ความผิดพลาดในการตรวจจับนี้เกิดจากวัสดุทดสอบมีพื้นที่ที่ใกล้เคียงกับข้าวและความยาวเส้นทแยงมุมใกล้เคียงกับข้าว เช่น พลาสติกที่กำหนดทั้งขนาดและรูปร่างเท่ากับข้าวดังนั้นการประมวลผลภาพ 2 มิติจึงยังไม่มีประสิทธิภาพพอสำหรับการตรวจจับสิ่งแปลกปลอมที่รูปร่างและขนาดใกล้เคียงกัน เนื่องจากเกิดความผิดพลาดในการตรวจจับพลาสติกสูง จึงต้องมีการเพิ่มขั้นตอนในการประมวลผลเพื่อให้การตรวจจับมีประสิทธิภาพมากขึ้น



รูปที่ 4.2 ตัวอย่างการตรวจจับสิ่งแปลกปลอมด้วยภาพ 2 มิติ

4.1.2 การตรวจจับสิ่งแปลกปลอมด้วยการประมวลผลภาพถ่ายความร้อน

สำหรับการตรวจจับสิ่งแปลกปลอมในข้าวด้วยการประมวลผลภาพความร้อน ใช้การตรวจสอบความเข้มสีที่แตกต่างกันของวัตถุจากภาพถ่ายความร้อนหลังจากกระตุ้นความร้อนด้วยหลอดไฟฮาโลเจน 150 วัตต์ 1 วินาที โดยผลการประมวลผลภาพความร้อนแสดงดังตารางที่ 4.2 และรูปที่ 4.3

ตารางที่ 4.2 จำนวนสิ่งแปลกปลอมเฉลี่ยที่ตรวจจับได้จากการประมวลผลภาพความร้อน

ชนิดของสิ่งแปลกปลอม	ค่าเฉลี่ยจำนวนของสิ่งแปลกปลอมที่ปะปนในข้าว (ชิ้น)					
	5	10	15	20	25	30
หิน	0±1	1±1	1±1	1±1	1±1	1±1
เศษไม้	5±0	9±1	14±1	19±1	24±1	29±1
พลาสติก	5±1	8±1	12±1	16±2	21±2	27±1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนสิ่งแปลกปลอมที่ใส่ในการทดลองกับจำนวนสิ่งแปลกปลอมที่ตรวจจับผิดพลาดจากการประมวลผลภาพความร้อน

จากตารางที่ 4.2 แสดงจำนวนสิ่งแปลกปลอมเฉลี่ยที่ตรวจจับได้จากการประมวลผลภาพความร้อน พบว่าการประมวลผลภาพความร้อนสามารถตรวจจับเศษไม้ พลาสติก และหินได้ตามลำดับ ซึ่งสำหรับการตรวจจับหินที่ได้มีความแตกต่างจากจำนวนหินจริงค่อนข้างมาก เนื่องจากการประมวลผลภาพความร้อนเป็นการประมวลผลสีของวัตถุในภาพถ่ายความร้อนที่มีสีแตกต่างจากข้าว โดยสีที่แตกต่างกันเกิดต่างวัตถุที่ต่างชนิดกันมีความแตกของคุณสมบัติเชิงความร้อน จึงทำให้กล้องถ่ายภาพความร้อนรับพลังงานความร้อนที่แผ่ออกจากวัตถุแตกต่างกัน หินที่นำมาทดสอบมีค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อน 0.88-0.95 ซึ่งใกล้เคียงกับค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนของข้าวที่มีค่า 0.98 อีกทั้งพื้นผิวของหินมีความขรุขระทำให้เมื่อมีการวัดอุณหภูมิอุณหภูมิของหินจะมากขึ้นเล็กน้อยกว่าความเป็นจริงอุณหภูมิที่แสดงในภาพถ่ายความร้อนจึงมีความใกล้เคียงกับข้าว ดังนั้นทำให้การประมวลผลภาพสามารถตรวจจับหินได้ไม่ดี สำหรับเศษไม้ที่นำมาทดสอบมีค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อน 0.82-0.92 ซึ่งแตกต่างกับข้าวที่มีค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อน 0.98 จึงทำให้การประมวลผลภาพสามารถตรวจจับเศษไม้ได้ พลาสติกที่นำมาทดสอบมีค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อน 0.84-0.86 ซึ่งแตกต่างกับค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนของข้าว จึงทำให้การประมวลผลภาพสามารถตรวจจับพลาสติกได้ แสดงดังรูปที่ 4.4

จากรูปที่ 4.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนสิ่งแปลกปลอมที่ใส่ในการทดลองกับเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดในการตรวจจับสิ่งแปลกปลอมจากการประมวลผลภาพความร้อน โดยในการเปอร์เซ็นความผิดของการตรวจจับสิ่งแปลกปลอมแต่ละชนิดพบว่าในการตรวจจับหิน เปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดในการตรวจจับหินมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 93.17% ในการตรวจจับเศษไม้ เปอร์เซ็นต์ความ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผิดพลาดในการตรวจจับเศษไม้มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 3.96% และในการตรวจจับพลาสติก เปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดในการตรวจจับมีค่าเฉลี่ยสูงถึง 15.91% ความผิดพลาดในการตรวจจับนี้เกิดจากสิ่งแปลกปลอมมีคุณสมบัติทางความร้อนใกล้เคียงกับข้าว หรือวัตถุที่มีพื้นผิวขรุขระ เช่น หิน การวัดอุณหภูมินั้นอาจทำให้อุณภูมิแสดงความค่าคลาดเคลื่อนจากความเป็นจริง ดังนั้นการประมวลผลภาพความร้อนเพียงอย่างเดียวจึงยังไม่มีประสิทธิภาพพอสำหรับการตรวจจับสิ่งแปลกปลอมที่มีคุณสมบัติทางความร้อนใกล้เคียงกับข้าว เนื่องจากเกิดความผิดพลาดในการตรวจจับหินสูง จึงต้องมีการประยุกต์รวมกันระหว่างการประมวลผลภาพ 2 มิติกับการประมวลผลภาพถ่ายความร้อน เพื่อแก้ไขปัญหาที่ผิดพลาดในการตรวจจับสิ่งแปลกปลอม

รูปที่ 4.4 ตัวอย่างการตรวจจับสิ่งแปลกปลอมด้วยภาพถ่ายความร้อน

4.1.3 การทดสอบประสิทธิภาพการทำงานของระบบตรวจจับแบบออฟไลน์ด้วยการประมวลผลภาพ 2 มิติร่วมกับภาพความร้อน

สำหรับการตรวจจับสิ่งแปลกปลอมในข้าวด้วยการประมวลผลภาพ 2 มิติร่วมกับภาพถ่ายความร้อน โดยใช้การตรวจสอบพื้นที่ และความยาวเส้นทแยงมุมจากการประมวลผลภาพ 2 มิติซึ่งระบบไม่สามารถแยกสิ่งแปลกปลอมที่มีพื้นที่และความยาวเส้นทแยงมุมใกล้เคียงกับข้าวได้ เช่น พลาสติก ดังนั้นระบบการประมวลผลภาพ 2 มิติสามารถแยกได้แต่สิ่งแปลกปลอมที่เป็นหินกับเศษไม้ และการประมวลผลภาพความร้อนใช้การตรวจสอบความเข้มสีที่แตกต่างกันของวัตถุจากวัตถุที่มีคุณสมบัติทางความร้อนต่างกันซึ่งระบบไม่สามารถแยกสิ่งแปลกปลอมที่มีคุณสมบัติทางความร้อนใกล้เคียงกับข้าวได้ เช่น หิน ดังนั้นระบบการประมวลผลภาพ ความร้อนสามารถแยกได้แต่สิ่งแปลกปลอมที่เป็นเศษไม้กับพลาสติก สำหรับการวิเคราะห์นั้นใช้ตรวจสอบจากตำแหน่งของสิ่งแปลกปลอมที่พบจากการประมวลผลภาพ 2 มิติผสมกับภาพถ่ายความร้อน โดยผลการทดลองแสดงดังที่ตาราง 4.3 และรูปภาพ 4.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.3 จำนวนสิ่งแปลกปลอมเฉลี่ยที่ตรวจจับได้จากการประมวลผลภาพสองมิติรวมกับภาพความร้อน

ชนิดของสิ่งแปลกปลอม	ค่าเฉลี่ยจำนวนของสิ่งแปลกปลอมที่ปะปนในข้าว (ชิ้น)					
	5	10	15	20	25	30
หิน	4±1	9±1	13±1	17±1	22±1	24±1
เศษไม้	5±0	10±1	14±1	19±1	25±1	29±1
พลาสติก	5±1	9±1	14±1	18±2	23±1	28±1

รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนสิ่งแปลกปลอมที่ใส่ในการทดลองกับจำนวนที่นับผิดพลาดในการตรวจจับสิ่งแปลกปลอม (ชิ้น) จากประมวลผลภาพ 2 มิติผสมกับความร้อน

จากตารางที่ 4.5 แสดงแสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนสิ่งแปลกปลอมที่ใส่ในการทดลองกับเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดในการตรวจจับสิ่งแปลกปลอมจากการประมวลผลภาพ 2 มิติร่วมกับความร้อนสามารถตรวจจับทุกสิ่งแปลกปลอมได้ดี พบว่าการประมวลผลภาพความร้อนสามารถตรวจจับเศษไม้ พลาสติก และหินได้ตามลำดับ การประมวลผลภาพสามารถตรวจจับทุกสิ่งแปลกปลอมได้ดีเนื่องจากมีทั้งการประมวลผลของพื้นที่และความยาวเส้นทแยงมุมของวัตถุที่แตกต่างจากข้าว และการประมวลผลสีของวัตถุในภาพถ่ายความร้อนที่มีสีแตกต่างจากข้าว โดยสีที่แตกต่างกันเกิดต่างวัตถุที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ต่างชนิดกันมีความแตกของคุณสมบัตเชิงความร้อน จึงทำให้กล้องถ่ายภาพความร้อนรับพลังงานความร้อนที่แผ่ออกจากวัตถุแตกต่างกัน เศษไม้ที่นำมาทดสอบสามารถตรวจจับสิ่งแปลกปลอมได้จากทั้งจากการประมวลผลภาพ 2 มิติและจากการประมวลผลภาพถ่ายความร้อน เพราะเศษไม้มีทั้งขนาดและคุณสมบัติเชิงความร้อนแตกต่างจากข้าว พลาสติกที่นำมาทดสอบสามารถตรวจจับสิ่งแปลกปลอมได้จากการประมวลผลภาพความร้อน เพราะพลาสติกมีคุณสมบัติทางความร้อนแตกต่างจากข้าว และหินที่นำมาทดสอบนำมาทดสอบสามารถตรวจจับสิ่งแปลกปลอมได้จากการประมวลผลภาพ 2 มิติ เพราะหินรูปร่างแตกต่างจากข้าว ทำให้มีขนาดและเส้นทแยงมุมต่างจากข้าว

จากการทดลองพบว่าการประยุกต์ร่วมกันของตรวจจับด้วยการประมวลผลภาพ 2 มิติกับภาพความร้อนแบบออฟไลน์ทำให้ระบบตรวจจับสิ่งแปลกปลอมสามารถตรวจจับสิ่งแปลกปลอมได้ทั้งสามชนิด ได้แก่ หิน เศษไม้ พลาสติกได้ดี โดยเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดในการตรวจจับหินเฉลี่ยเท่ากับ 13.81% เปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดในการตรวจจับเศษไม้เฉลี่ยเท่ากับ 1.85% เปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดในการตรวจจับพลาสติกเฉลี่ยเท่ากับ 9.39% ซึ่งมีความผิดพลาดในการตรวบจับน้อยกว่าการตรวจจับด้วยการประมวลผลภาพ 2 มิติอย่างเดียว หรือการตรวจจับด้วยการประมวลผลภาพความร้อนอย่างเดียว เนื่องจากมีความความผิดพลาดน้อยมากในการตรวจจับเมื่อพบสิ่งแปลกปลอมที่มีพื้นที่และความยาวเส้นทแยงมุม หรือคุณสมบัติทางความร้อนใกล้เคียงกับข้าว

4.2 การทดสอบการทำงานของระบบตรวจจับแบบออนไลน์

สำหรับการตรวจจับสิ่งแปลกปลอมในข้าวด้วยการประมวลผลภาพ 2 มิติผสมกับภาพถ่ายความร้อนแบบออนไลน์ การทดสอบประสิทธิภาพการทำงานของระบบนั้นเป็นการใช้โปรแกรมที่มีการประยุกต์ทั้งการประมวลผลภาพ 2 มิติและการประมวลผลภาพถ่ายความร้อนผสมกัน โดยโปรแกรมจะประมวลผลภาพโดยตรวจจับสิ่งแปลกปลอมที่ปะปนในข้าวด้วยประมวลผลภาพภาพถ่ายความร้อนและจากนั้นจะประมวลภาพที่ติดสิ่งแปลกปลอมจากการประมวลผลภาพความร้อนออกไปประมวลผลภาพ 2 มิติต่อ ซึ่งมาจากการทดสอบในหัวข้อ 4.1.3 ผลจากการทดลองพบว่าเมื่อใช้ทั้งการประมวลผลภาพ 2 มิติกับการประมวลผลภาพถ่ายความร้อนทำทำให้ระบบมีประสิทธิภาพดีขึ้น ซึ่งสามารถตรวจจับได้ทั้งสิ่งแปลกปลอมที่มีขนาด เส้นผ่านศูนย์กลาง หรือคุณสมบัติทางความร้อนใกล้เคียงกับข้าว แสดงดังที่ตาราง 4.4 และรูปภาพ 4.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.4 จำนวนสิ่งแปลกปลอมเฉลี่ยที่ตรวจจับได้จากการทดสอบประสิทธิภาพการทำงานของระบบตรวจจับ

ชนิดของสิ่งแปลกปลอม	ค่าเฉลี่ยจำนวนของสิ่งแปลกปลอมที่ปะปนในข้าว (ชิ้น)					
	5	10	15	20	25	30
หิน	4±1	9±1	13±1	17±1	22±0	24±1
เศษไม้	5±1	9±1	13±1	19±0	25±1	29±1
พลาสติก	4±1	8±1	12±1	17±2	22±2	28±1

รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนสิ่งแปลกปลอมที่ใส่ในการทดลองกับจำนวนที่นับผิดพลาดในการตรวจจับสิ่งแปลกปลอม (ชิ้น) จากประมวลผลภาพ 2 มิติผสมกับความร้อนจากการทดสอบการทำงานของระบบตรวจจับ

จากตารางที่ 4.4 แสดงจำนวนสิ่งแปลกปลอมเฉลี่ยที่ตรวจจับได้จากการประมวลผลภาพ 2 มิติผสมกับความร้อน พบว่าการประมวลผลภาพ 2 มิติผสมกับความมร้อนสามารถตรวจจับทุกสิ่งแปลกปลอมแบบเรียลไทม์ได้ดี เนื่องจากมีทั้งการประมวลผลของขนาดและเส้นผ่านศูนย์กลางของวัตถุที่แตกต่างจากข้าว และการประมวลผลสีของวัตถุในภาพถ่ายความร้อนที่มีสีแตกต่างจากข้าว โดยสีที่แตกต่างกันเกิดต่างวัตถุที่ต่างชนิดกันมีความแตกของคุณสมบัติเชิงความร้อน จึงทำให้กล้อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถ่ายภาพความร้อนรับพลังงานความร้อนที่แผ่ออกจากวัตถุแตกต่างกัน โดยเทคนิคที่ใช้ในการประมวลผลนั้นคล้ายกับผลการทดลองจากตารางที่ 4.3

จากการทดลองการทดสอบการทำงานของระบบการประมวลผลภาพ 2 มิติผสมกับภาพความร้อนแบบเรียลไทม์ดังรูปที่ 4.6 พบว่าระบบสามารถตรวจจับสิ่งแปลกปลอมได้ทั้งสามชนิด ได้แก่ หิน เศษไม้ พลาสติกได้ดี โดยเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดในการตรวจจับหินเฉลี่ยเท่ากับ 14.87% เปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดในการตรวจจับเศษไม้เฉลี่ยเท่ากับ 6.06% เปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดในการตรวจจับพลาสติกเฉลี่ยเท่ากับ 15.19% ซึ่งมีความผิดพลาดในการตรวบจับมีค่ามากกว่าการประยุกต์ร่วมกันของตรวจจับด้วยการประมวลผลภาพ 2 มิติกับภาพความร้อนแบบออฟไลน์เล็กน้อย เนื่องจากการตรวจสอบแบบออฟไลน์มีการปรับค่า level และ span เพื่อให้ได้ภาพที่ดีที่สุดนำมาประมวลผลภาพ แต่การทดสอบแบบเรียลไทม์นั้นในการทดสอบ ระบบทำการปรับภาพแบบอัติโนมัติ อีกทั้งภาพยังมีการเคลื่อนไหวทำให้การตรวจจับมีความผิดพลาดขึ้นเล็กน้อย

โดยการทำการทดลองแบบออฟไลน์พบว่าการประมวลภาพ 2 มิติสามารถแยกสิ่งแปลกปลอมได้ ยกเว้นสิ่งแปลกปลอมที่มีขนาดและเส้นทแยงมุมใกล้เคียงกับข้าวทำให้ระบบยังไม่สมบูรณ์ เช่น พลาสติก การประมวลภาพความร้อนสามารถแยกสิ่งแปลกปลอมได้ ยกเว้นสิ่งแปลกปลอมที่มีคุณสมบัติเชิงความร้อนใกล้เคียงกับข้าว เช่น หิน ทำให้ระบบยังไม่สมบูรณ์ จึงมีการทดสอบโดยรวมการประมวลผลภาพทั้งสองแบบเข้าด้วยกับพบว่าระบบมีความสมบูรณ์โดยสามารถตรวจจับสิ่งแปลกปลอมที่มีขนาดและเส้นทแยงมุมใกล้เคียงกับข้าว และสิ่งแปลกปลอมที่มีคุณสมบัติเชิงความร้อนใกล้เคียงกับข้าว จึงมีการนำการประมวลผลภาพทั้งภาพ 2 มิติและภาพความร้อนมาเขียนโปรแกรมผสมกันและทำการทดสอบการทำงานของโปรแกรมแบบออนไลน์พบว่าการตรวจจับด้วยการประมวลผลภาพ 2 มิติผสมกับภาพความร้อนสามารถตรวจจับสิ่งแปลกปลอมได้ถูกต้องแม่นยำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5
สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

ในการวิจัยการศึกษาการตรวจจับสิ่งแปลกปลอมที่ปะปนในข้าวด้วยภาพถ่ายความร้อน โดยการประมวลผลภาพใช้ภาพความร้อนมาประมวลผล ซึ่งเทคนิคที่ใช้ในการประมวลผลแบ่งออกเป็น 2 เทคนิคคือ การประมวลผลภาพแบบ 2 มิติ เป็นการระบุสิ่งแปลกปลอมด้วยการประมวลผลพื้นที่และความยาวเส้นทแยงมุมของวัตถุที่แตกต่างจากข้าว และการประมวลผลภาพความร้อน เป็นการระบุสิ่งแปลกปลอมโดยใช้การประมวลผลของสีที่แตกต่างจากภาพถ่ายความร้อนหลังจากที่วัตถุถูกกระตุ้นความร้อน เนื่องจากวัตถุต่างชนิดกัน จะมีคุณสมบัติเชิงความร้อนแตกต่างกัน เมื่อถูกกระตุ้นด้วยความร้อนปริมาณรังสีความร้อนที่แผ่ไปยังกล้องถ่ายความร้อนของวัตถุต่างชนิดกันจะมีค่าแตกต่างกัน จึงทำให้เห็นสีของภาพถ่ายความร้อนหลังการกระตุ้นความร้อนต่างกัน

จากการพัฒนาโปรแกรมการประมวลผลภาพ 2 มิติ ผลการทดลองโปรแกรมพบว่าระบบสามารถแยกหินและเศษไม้ออกจากข้าวได้ แต่มีประสิทธิภาพในการแยกพลาสติกออกจากข้าวต่ำ เนื่องจากพลาสติกมีพื้นที่และความยาวเส้นทแยงมุมใกล้เคียงกับข้าว และในการพัฒนาโปรแกรมการประมวลผลภาพถ่ายความร้อน ผลการทดลองโปรแกรมพบว่าระบบสามารถแยกเศษไม้และพลาสติกออกจากข้าวได้ แต่มีประสิทธิภาพในการแยกหินออกจากข้าวต่ำเนื่องจากหินมีคุณสมบัติทางความร้อนใกล้เคียงกับข้าว ดังนั้นพบว่าโปรแกรมประมวลผลภาพ 2 มิติไม่สามารถแยกสิ่งแปลกปลอมที่มีพื้นที่และความยาวเส้นทแยงมุมใกล้เคียงกับข้าวได้ และโปรแกรมการประมวลผลภาพความร้อนไม่สามารถแยกสิ่งแปลกปลอมที่มีคุณสมบัติทางความร้อน เช่น สัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อน ค่าความจุความร้อนจำเพาะใกล้เคียงกับข้าว จึงมีการพัฒนาโปรแกรมการประมวลผลภาพ 2 มิติประยุกต์กับโปรแกรมประมวลผลภาพความร้อนสำหรับการตรวจจับสิ่งแปลกปลอมที่ปะปนในข้าว เพื่อให้ระบบมีความสามารถตรวจจับได้ทั้งสิ่งแปลกปลอมที่มีพื้นที่และความยาวเส้นทแยงมุมใกล้เคียงกับข้าว และมีคุณสมบัติเชิงความร้อนเหมือนกับข้าว

จากการทดสอบการทำงานของระบบตรวจจับสิ่งแปลกปลอมที่ปะปนในข้าวพบว่าการประมวลผลภาพ 2 มิติผสมกับการประมวลผลภาพความร้อนสามารถตรวจจับสิ่งแปลกปลอมได้แม่นยำ ในการตรวจจับหินพบเปอร์เซ็นความผิดพลาด 14.87% ในการตรวจจับเศษไม้พบเปอร์เซ็นความผิดพลาดเพียง 6.06% และการตรวจจับพลาสติกพบเปอร์เซ็นความผิดพลาด 15.19%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2 ข้อเสนอแนะในการวิจัย

จากงานวิจัยการตรวจจับสิ่งแปลกปลอมที่ปะปนในข้าวด้วยการประมวลผลภาพ 2 มิติผสมกับภาพถ่ายความร้อน มีจุดบกพร่องคือภาพถ่ายความร้อนที่นำมาตรวจจับสิ่งแปลกปลอมมีการสะท้อนจากกล้องไปที่แผ่นอลูมิเนียมบางช่วงของการทดลอง ซึ่งควรพัฒนาการควบคุมการสะท้อนแสงของชุดทดลองให้ดีกว่านี้ เช่น การปรับมุมกล้อง หรือการเปลี่ยนแผ่นอลูมิเนียมเป็นวัสดุอื่นที่ไม่มีการสะท้อน เมื่อไม่มีการสะท้องเกิดขึ้นจะทำให้การตรวจจับสิ่งแปลกปลอมมีประสิทธิภาพมากขึ้น นอกจากนี้ชุดทดลองควรเพิ่มระบบในการคัดแยกสิ่งแปลกปลอมที่ตรวจจับได้ออกจากการกระบวนการ เช่น การใช้ลมเป่าซึ่งเป็นวิธีการคัดแยกของเครื่องคัดแยกสี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

[1] สมาคมผู้ส่งออกข้าวไทย. 2559. การส่งออกข้าว. [Online]. Available: https://www.thairiceexporters.or.th/default_th.htm

[2] มูลนิธิข้าวไทย ในพระราชอุปถัมภ์. 2554. ประวัติและความเป็นมาของมูลนิธิข้าวไทยฯ. [Online]. Available: http://www.thairice.org/html/foundation/foundth01.html

[3] วราวิช พรพระ ทวีพล ซื่อสัตย์ และนวภัทรา หนูนาค. 2556. "การตรวจจับสิ่งแปลกปลอมในเมล็ดพืชด้วยเทคนิคแอคทีฟเทอร์โมกราฟฟี". **ประชุมวิชาการสมาคมวิศวกรรมศาสตร์แห่งประเทศไทย.** 6 : 672-679

[4] พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์ และนิธิยา รัตนาปนนท์. 2557. การสีข้าว / Rice milling. [Online]. Available: http://www.foodnetworksolution.com/wiki/word/การสีข้าว-rice-milling

[5] นัศพ์ชาณัณ ชินปัญช์ธนะ สำราญ ไผ่นวล และริญญรัตน์ โชติสุริยสินสุข. 2559. "การศึกษางานวิจัยการประมวลผลภาพดิจิทัลและการประยุกต์ใช้งานในแอพพลิเคชัน". **การประชุมวิชาการระดับชาติ มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบูรณ์** 3 : 546-555

[6] จักรสีเลิศ. 2552. เครื่องคัดแยกสี/Ricemilling.[Online]. Available:http://www.jaksrilerd.com/

[7] Bagavathiappan, S. Lahiri, B.B. Saravanan, T. Philip, J. Jayakumar T. 2013. "Infrared thermography for condition monitoring". **Infrared Physics & Technology.** 60 : 35-55

[8] Ginesu, G. Daniele, D. Giusto, Volker Märgner, Peter Meinlschmidt. 2004. "Detection of Foreign Bodies in Food by Thermal Image Processingactors". **IEEE transactions on industrial.** 51 : 480-490

[9] Senni, L. Ricci, M. Palazzi, A. Burrascano, P. Pennisi, P. Ghirelli F. 1998. "On- line automatic detection of foreign bodies in biscuits by infrared thermography and image processing". **Journal of Food Engineering.** 128 : 146-156

[10] Maldague, X. 2001. Introduction to NDT by Active Infrared Thermography. **Wiley Authenticity Guarantee.** E2 (1) : 160-164 ISBN: 978-0-471-18190-3

[11] Usamentiaga, R. Venegas, P. Guerediaga, J. Vega, L. Molleda, J. 2014. "Infrared

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

Thermography for Temperature Measurement and Non-Destructive Testing". **Flow Measurement and Instrumentation.** 19 : 342-349

[12] Usamentiaga, R. Venegas, P. Guerediaga, J. Vega, L. Molleda, J. 2014. "A dimensional analysis of two phase flow throught a horizontally installed Venturi flow meter". **Sensors 2014.** 14 : 12305-12348

[13] Ibarra-Castanedo, C. et al 2008. "Active infrared thermography with applications". **IEEE Canadian Review.** 1 : 1-25

[14] Benzerrouk, S. 2011. Active and Pasive Thermography for the detection of detect in green-state detection of defects in grean-state powdermetallic compacts

[15] Wysocka-Fotek, O. Maj, M. Oliferuk, W. 2015. "Use of pulsed IR Thermography for detedmination of size and depth of subsurface defect taking into account the shape of its cross-section area". **Archives of Metallurgy and Materials.** 60 : 615-620

[16] Mohapatra, D. Bal, S. 2003. "Determination of Specific Heat and Gelatinization Temperature of Rice using Differential Scanning Calorimetry". **ASAE Annual International Meeting Sponsored by ASAE.** P.1-9

[17] นวภัทรา หนูนาค. 2555. thermal image camera / กล้องถ่ายภาพความร้อน. [Online]. Available: http:// http://www.foodnetworksolution.com/wiki/word/7259/thermal-image-camera-กล้องถ่ายภาพความร้อน

[18] Al-doski, J. Mansor, S. 2016. "THERMAL IMAGING FOR PESTS DETECTING". **International Journal of Agriculture, Forestry and Plantation.** 2 : 10-30

[19] เทอร์โมสแกน, 2012. กล้องอินฟราเรด[Online]. Available: http://www.thermoscan.co.th/ir%20thermographer.html

[20] พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์ และนวภัทรา หนูนาค. 2555. Instantaneous field of view (ifov) / ความละเอียดของภาพถ่ายความร้อน. [Online]. Available:http://www.foodnetworksolution.com/wiki/word/4312/instantaneous-field-of-view-ifov-รายละเอียดของภาพถ่ายความร้อน

[21] นัศพ์ชาณัณ ชินปัญช์ธนะ. 2555. "การรู้จำท่าทางมนุษย์จากภาพส่วนบุคคลผ่านการวิเคราะห์การใช้พลังงานร่างกาย".

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

[22] อรรถพล พลานนท์ และ อวยไชย อินทรสมบัติ. 2016 "การประยุกต์ใช้การประมวลผลภาพสาหรับแขนกลไขน็อตในงานด้านอุตสาหกรรมล้อรถยนต์ในจังหวัดนครปฐม". **การประชุมวิชาการ งานวิจัยและพัฒนาเชิงประยุกต์ 7**: 474-478

[23] ดุสิตา ล่องเซ่ง. 2552. Plate detection in traffic control designed for video surveillance system

[24] Thermal Image Blog. 2555. Thermal Camera Imaging Brought to Your Daily Life, See Things Like Never Before. [Online]. Available: http://thermalimaging-blog.com/

[25] Histogram Equalization. [Online].Available : https://www.math.uci.edu/icamp/courses/math77c/demos/hist_eq.pdf

[26] Arora, S. Pandey, R. 2016. "Applications of Morphological Operators using Image Morphological Algorithms" ***SSRG*** **International Journal of Electronics and Communication Engineering (SSRG-IJECE).** 8 : 107-110

[27] Goyal, M. 2011. "Morphological Image Processing". **International Journal of Computer Sci ence & Technology.** 2 : 161-165

[28] Wang, B. Jin, X. Huang, R. Chen, S. 2014. "Measurement of Moisture in Wood for Application in the Restoration of Old Buildings". **Flow Measurement and Instrumentation.** 38 : 131-138

[29] Moron, C. Garcia-Fuentevilla, L. Garcia, A. Moron, A. 2016. "Measurement of Moisture in Wood for Application in the Restoration of Old Buildings". **Sensors16.** 697 : 1-9

[30] Baranowski, P. Mazurek, W. Witkowska-Walczak, B. Sławiński, C. 2009. "Detection of early apple bruises using pulsed-phase thermography". **Postharvest Biology and Technology.** 53 : 91-100

[31] Bukowska-Belniak, B. Leśniak, A. Stasz, A. Kiełkowski, P. and Michalski, R. 2010. "Detection of foreign bodies in comestible product using sequence of low contrast thermographic images".**10th International Conference on Quantitative InfraRed Thermography.** 1 : 1-5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

[32] Farid, M. Khairunniza-Bejo, S. Vesali, F. and Jyuking, Y. 2014. "A new mathematical drying model for paddy rice via thermal imaging". **Journal of Food, Agriculture & Environment.** 2 : 666-668

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก

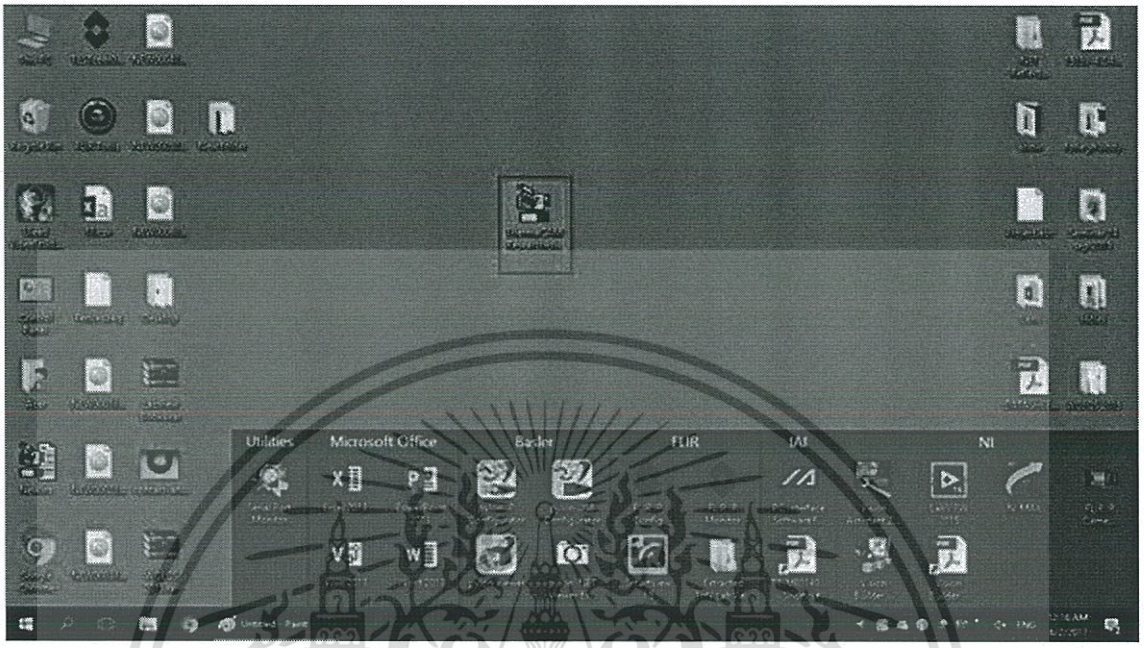
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก
การใช้งานโปรแกรม Thermacam ในการวิเคราะห์ภาพถ่ายความร้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. การใช้โปรแกรม Thermacam

1.1 ดับเบิ้ลคลิกที่โปรแกรม Thermacam เพื่อเปิดการใช้งาน



รูปที่ 1 การใช้โปรแกรม Thermacam (1)

1.2 หน้าต่างการใช้งานโปรแกรม Thermacam

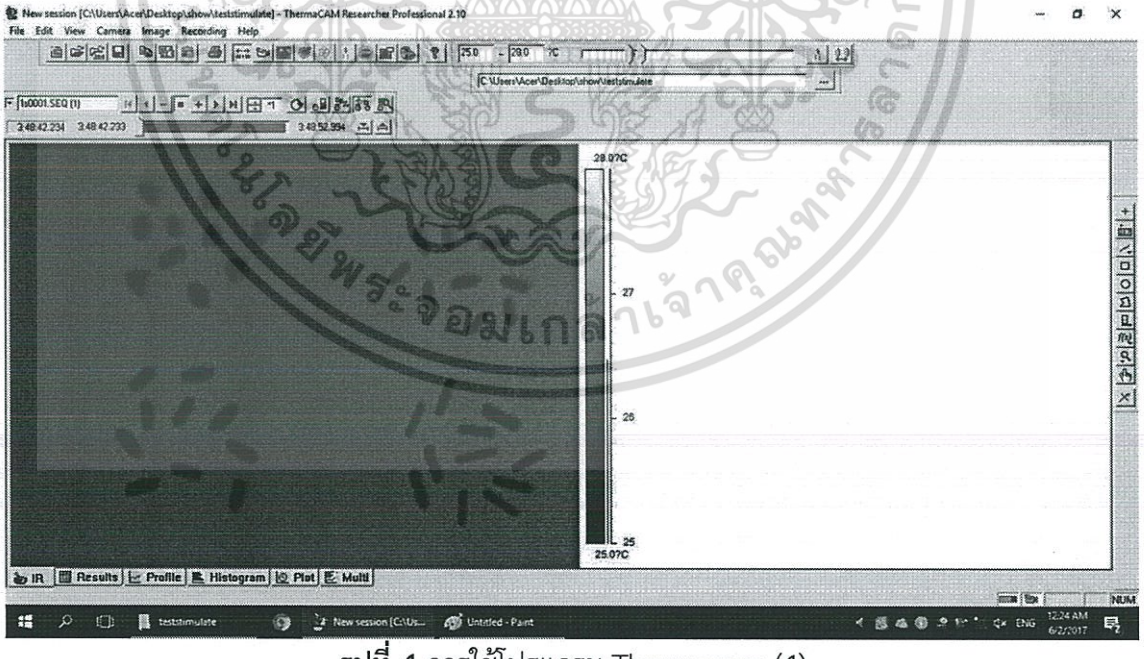
รูปที่ 2 การใช้โปรแกรม Thermacam (2)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.3 การนำภเข้า: คลิกที่รูปกล้องวีดีโอ เพื่อเชื่อมต่อกล้องถ่ายภาพความร้อน

รูปที่ 3 การใช้โปรแกรม Thermacam (3)

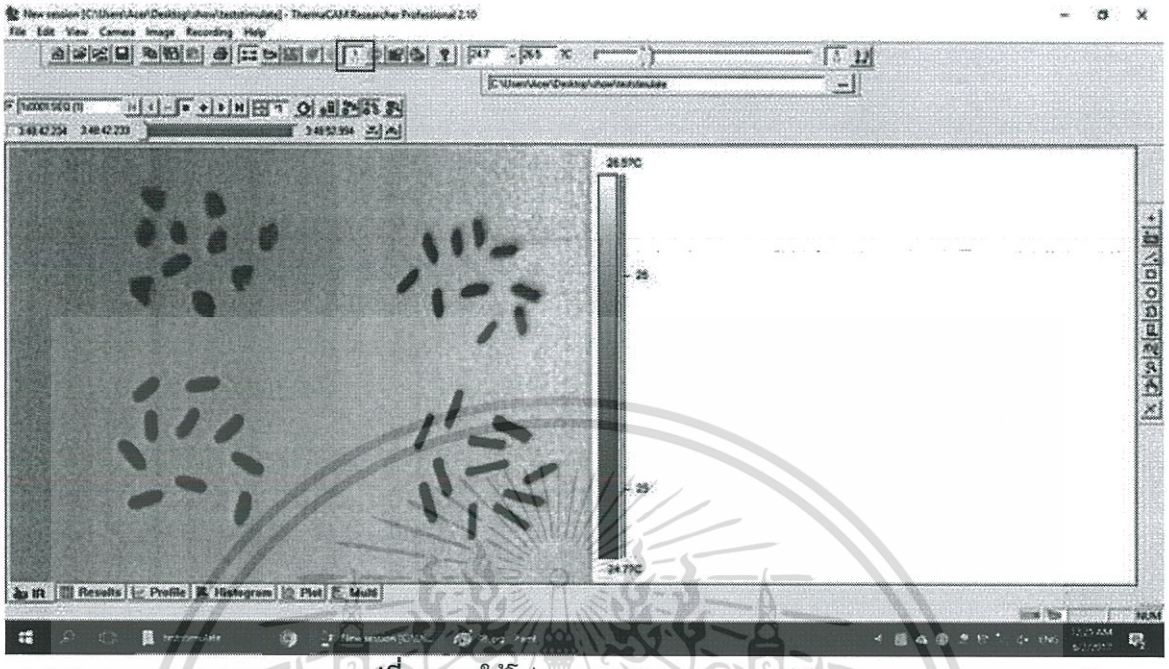
1.4 ภาพจากกล้องถ่ายภาพความร้อนปรากฏ



รูปที่ 4 การใช้โปรแกรม Thermacam (4)

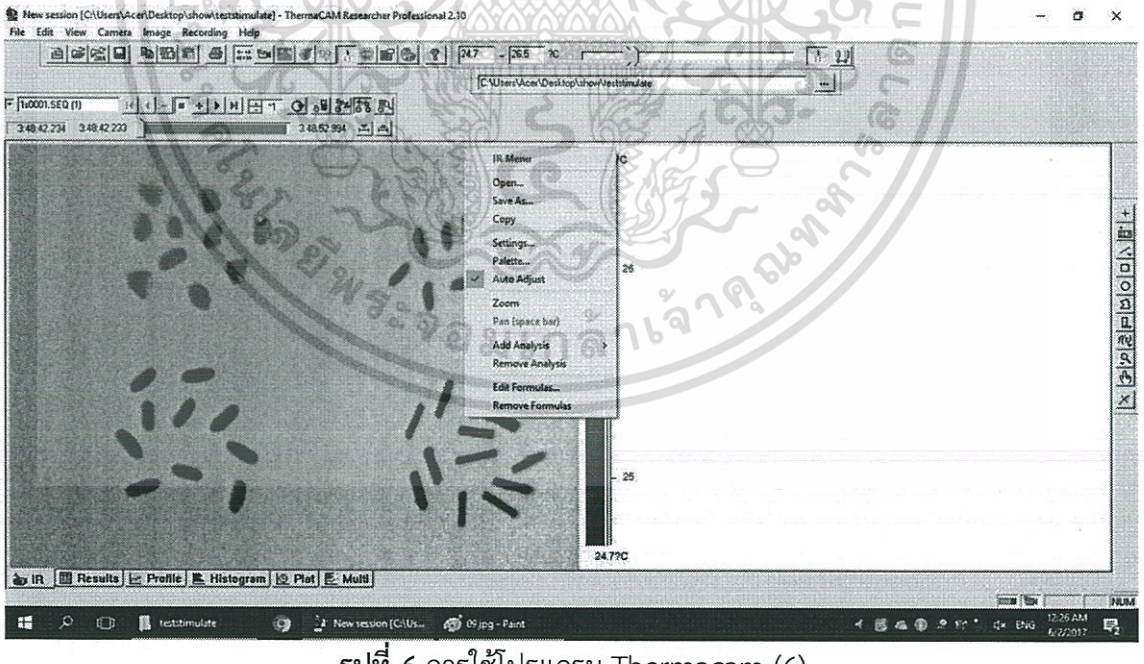
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.5 การปรับ auto span and level: คลิกที่รูปเทียน



รูปที่ 5 การใช้โปรแกรม Thermacam (5)

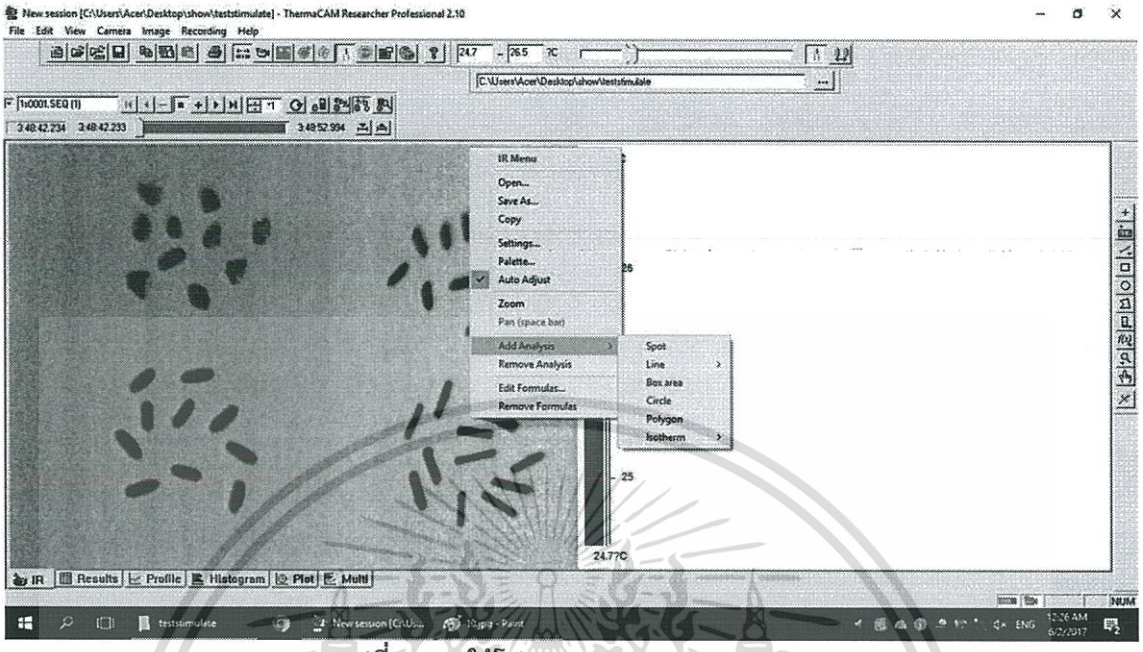
1.6 การวัดอุณหภูมิ: คลิกขวาที่จุดที่ต้องการวิเคราะห์อุณหภูมิในภาพถ่ายความร้อน



รูปที่ 6 การใช้โปรแกรม Thermacam (6)

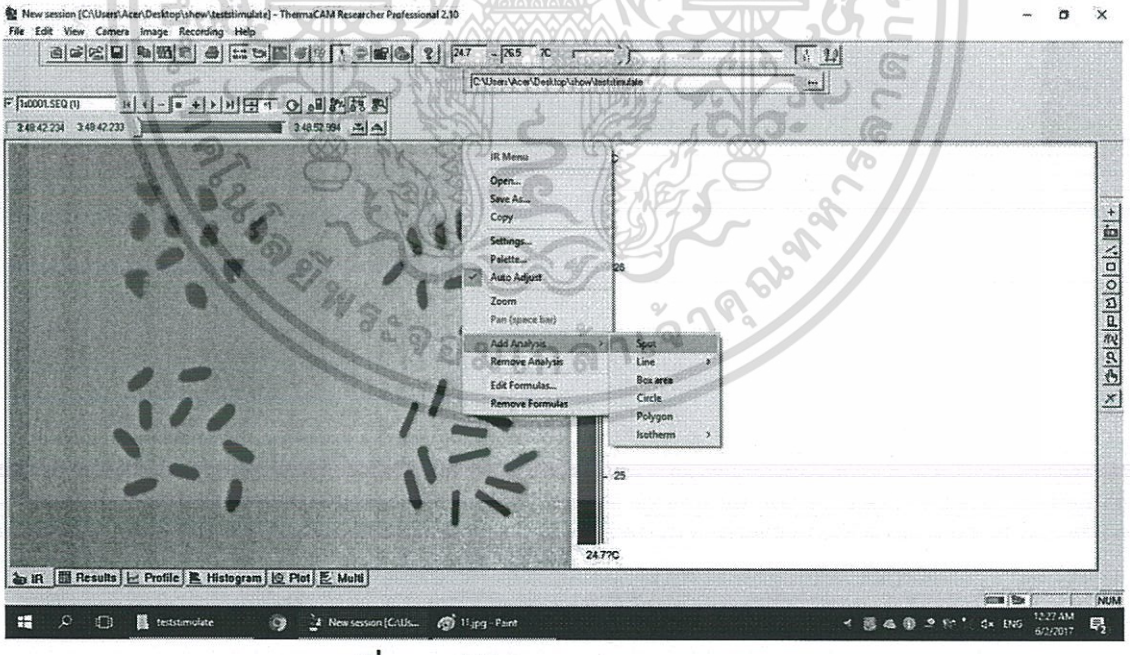
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.7 คลิกที่ Add Analysis



รูปที่ 7 การใช้โปรแกรม Thermacam (7)

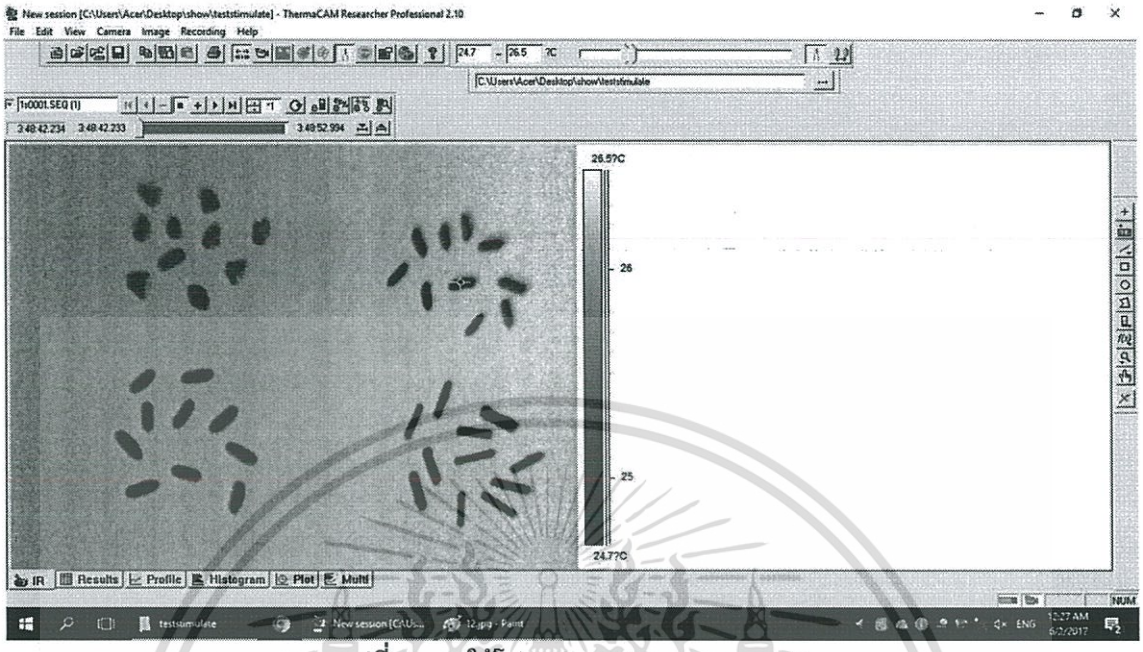
1.8 คลิกที่ Spot



รูปที่ 8 การใช้โปรแกรม Thermacam (8)

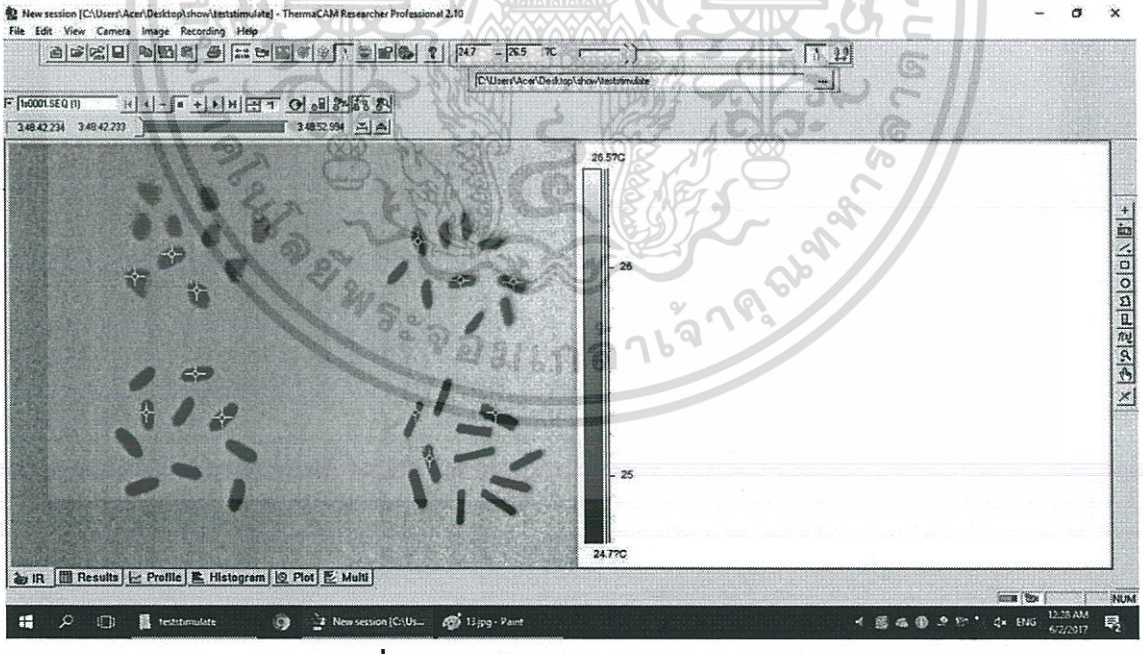
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.9 สัญลักษณ์ Cursor จะแสดงจุดที่ทำการวัดอุณหภูมิ



รูปที่ 9 การใช้โปรแกรม Thermacam (9)

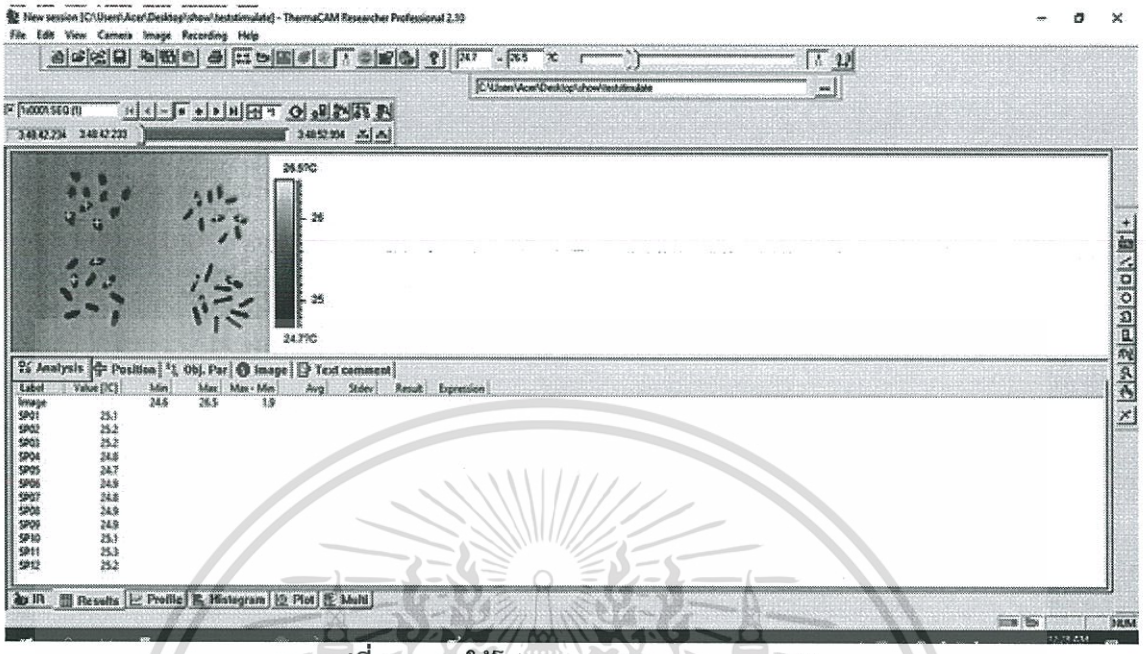
1.10 เลือกหลาย ๆ จุดในการวิเคราะห์ เพื่อนำมาหาอุณหภูมิเฉลี่ย



รูปที่ 10 การใช้โปรแกรม Thermacam (10)

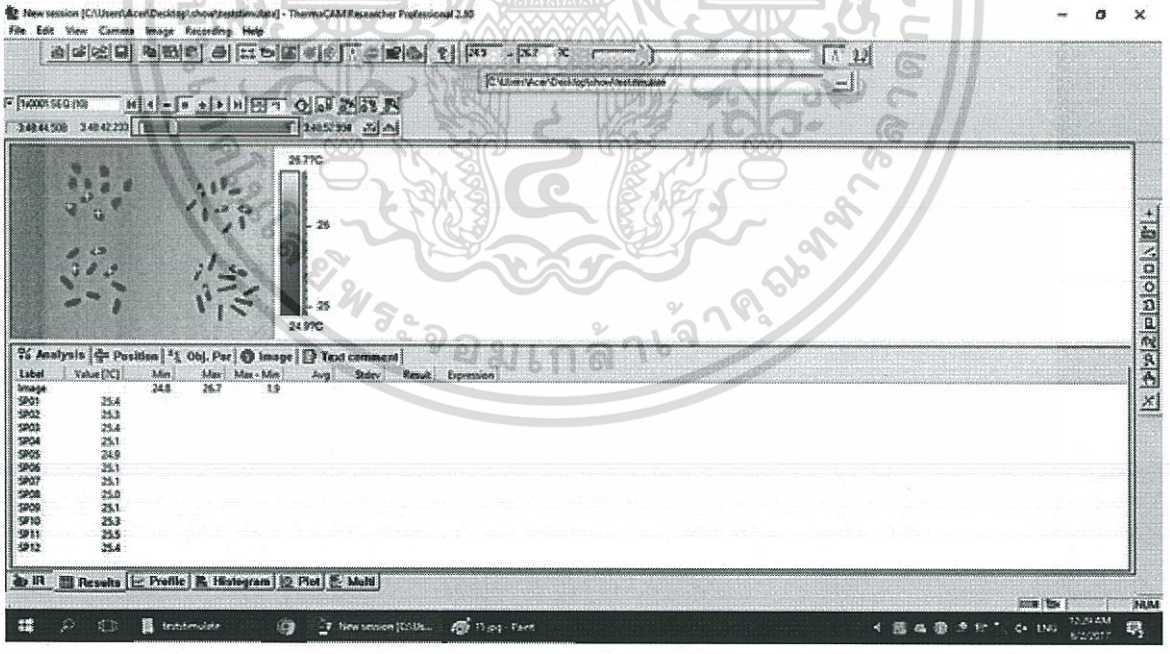
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.11 คลิกที่ Analysis เพื่อดูค่าอุณหภูมิ



รูปที่ 11 การใช้โปรแกรม Thermacam (11)

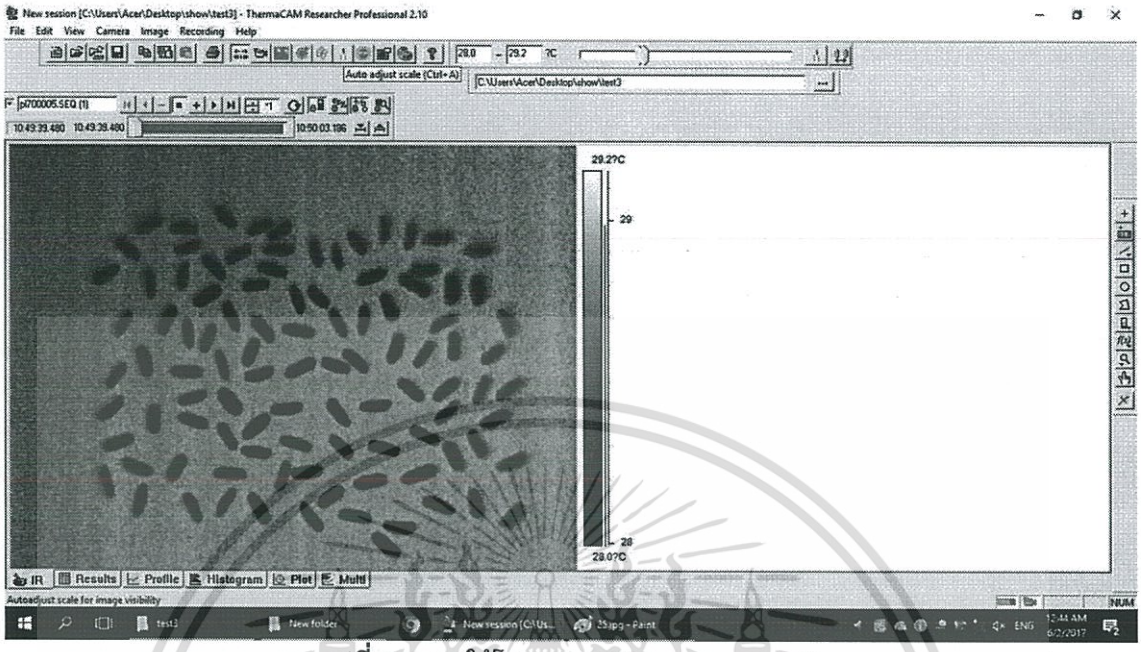
1.12 เมื่อเวลาเปลี่ยนค่าของอุณหภูมิที่วัดก็มีการเปลี่ยนแปลง



รูปที่ 12 การใช้โปรแกรม Thermacam (12)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.13 การเปลี่ยนรูปแบบสีของภาพถ่ายความร้อน



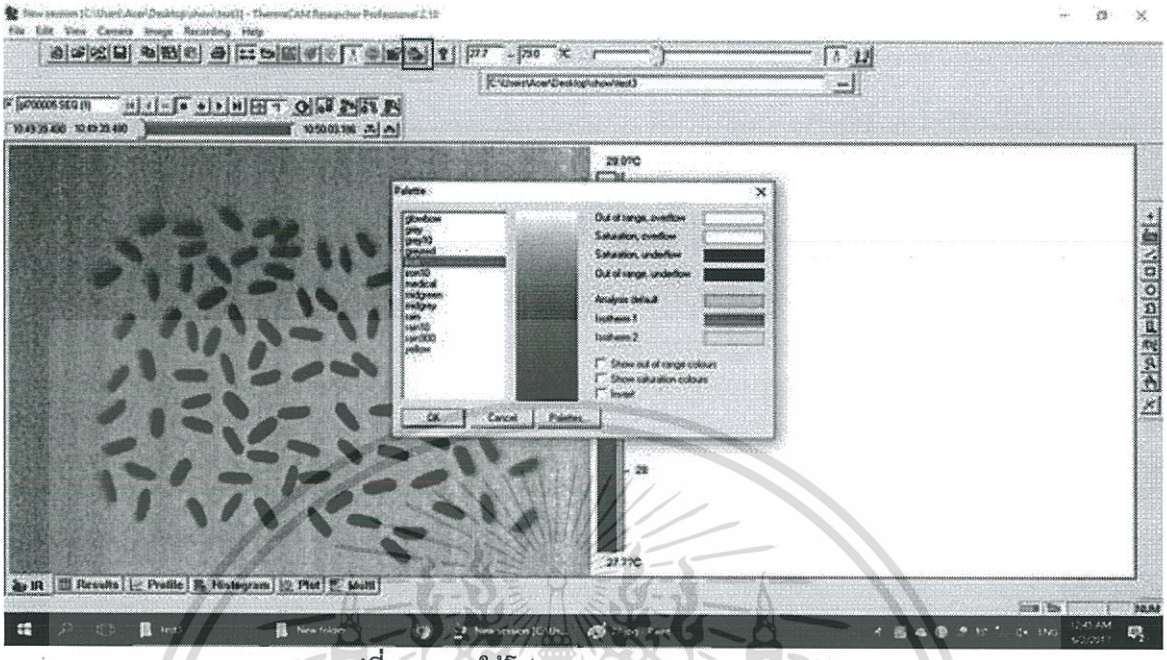
รูปที่ 13 การใช้โปรแกรม Thermacam (13)

1.14 คลิกที่รูปเทียน เพื่อปรับ level และ span

รูปที่ 14 การใช้โปรแกรม Thermacam (14)

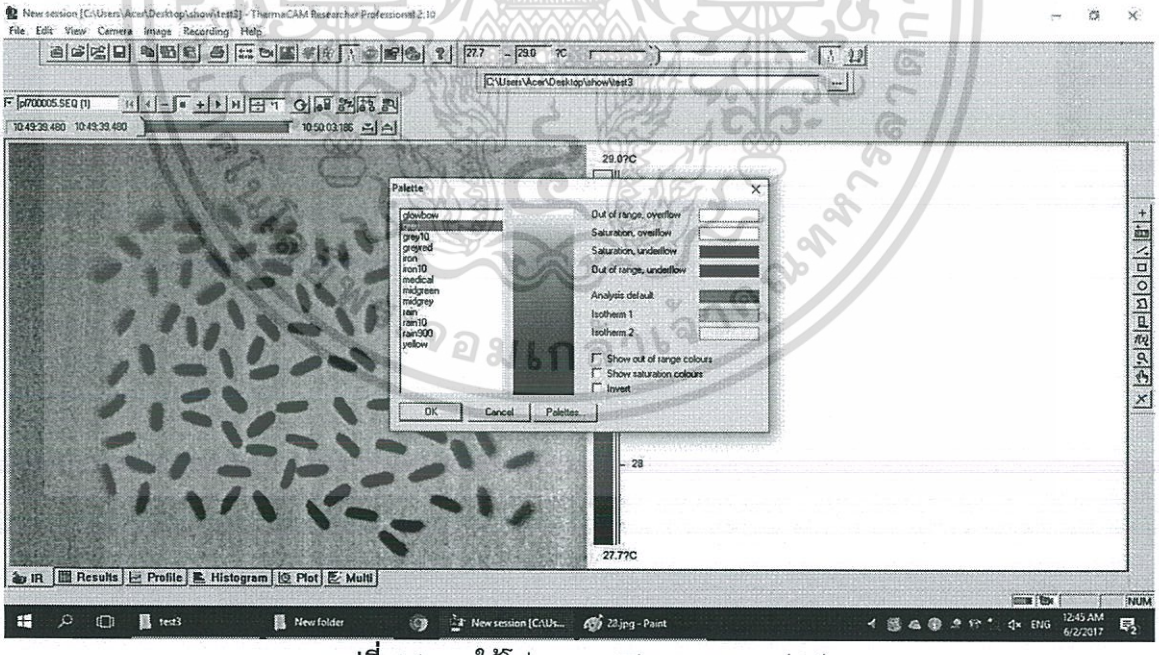
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.15 คลิกที่จานสี เพื่อเลือกรูปแบบสีของภาพ



รูปที่ 15 การใช้โปรแกรม Thermacam (15)

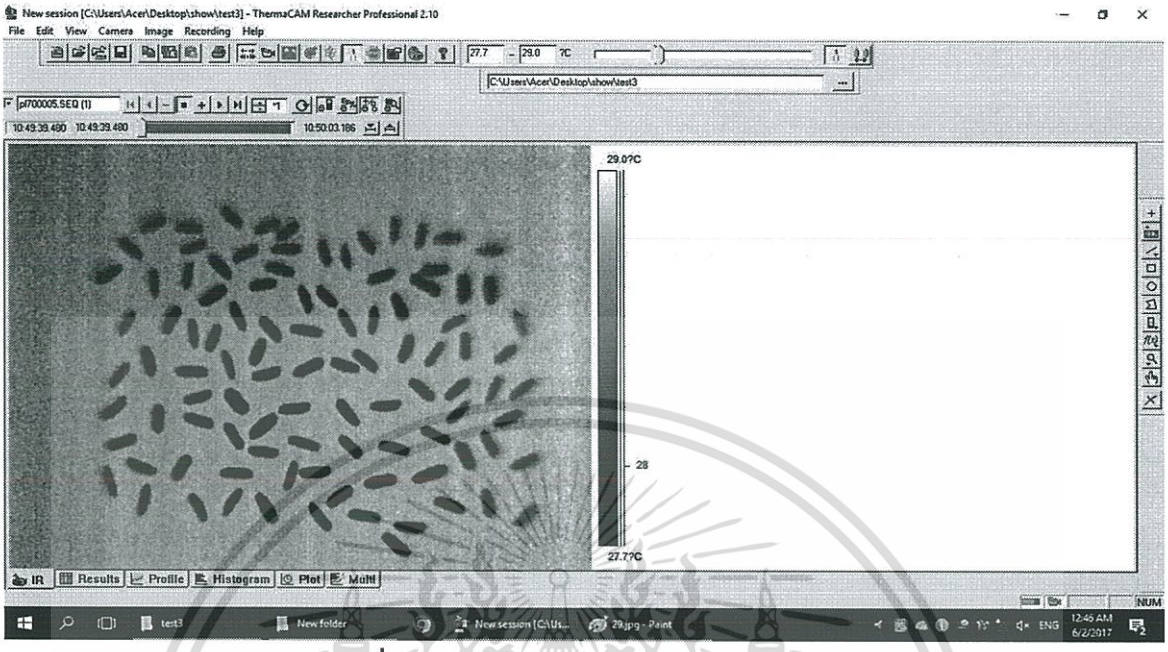
1.16 คลิกที่ Gray เพื่อเปลี่ยนรูปแบบเป็นภาพสีเทา



รูปที่ 16 การใช้โปรแกรม Thermacam (16)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.17 ภาพถ่ายความร้อนรูปแบบสีเทา



รูปที่ 17 การใช้โปรแกรม Thermacam (17)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

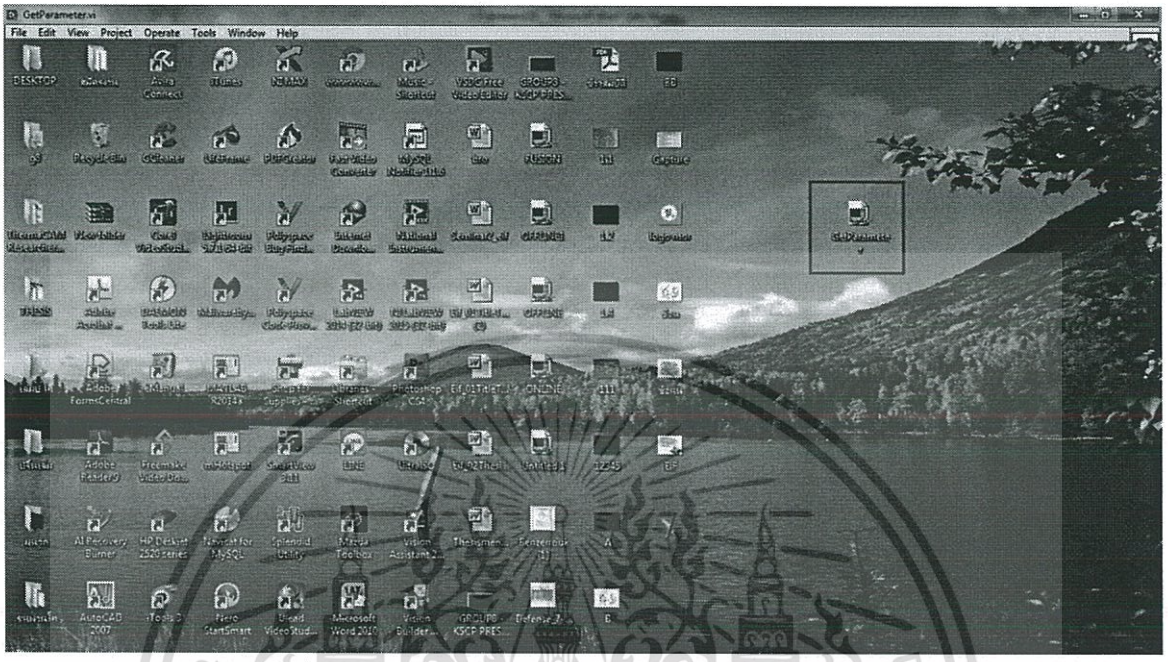
ภาคผนวก ข

การใช้งานโปรแกรมหาค่าพารามิเตอร์ของวัสดุ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

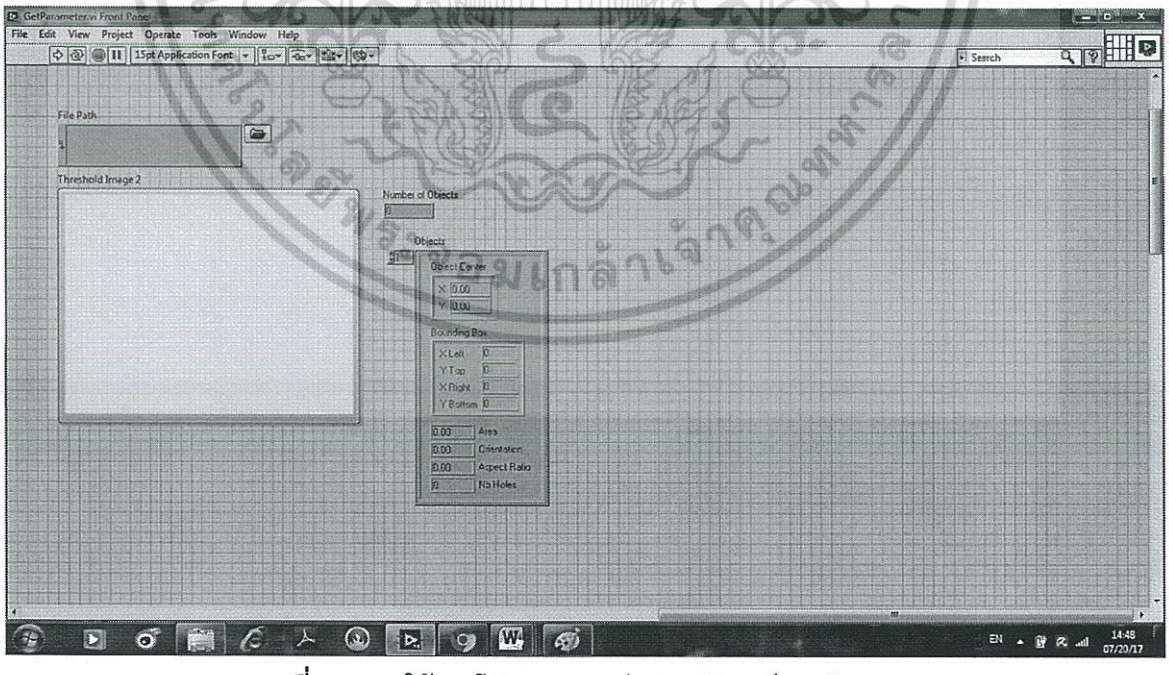
2. การใช้โปรแกรมการใช้งานโปรแกรมหาค่าพารามิเตอร์ของวัสดุ

2.1 ดับเบิ้ลคลิกที่โปรแกรม GetParameter เพื่อเปิดการใช้งานโปรแกรม



รูปที่ 18 การใช้งานโปรแกรมหาค่าพารามิเตอร์ของวัสดุ (1)

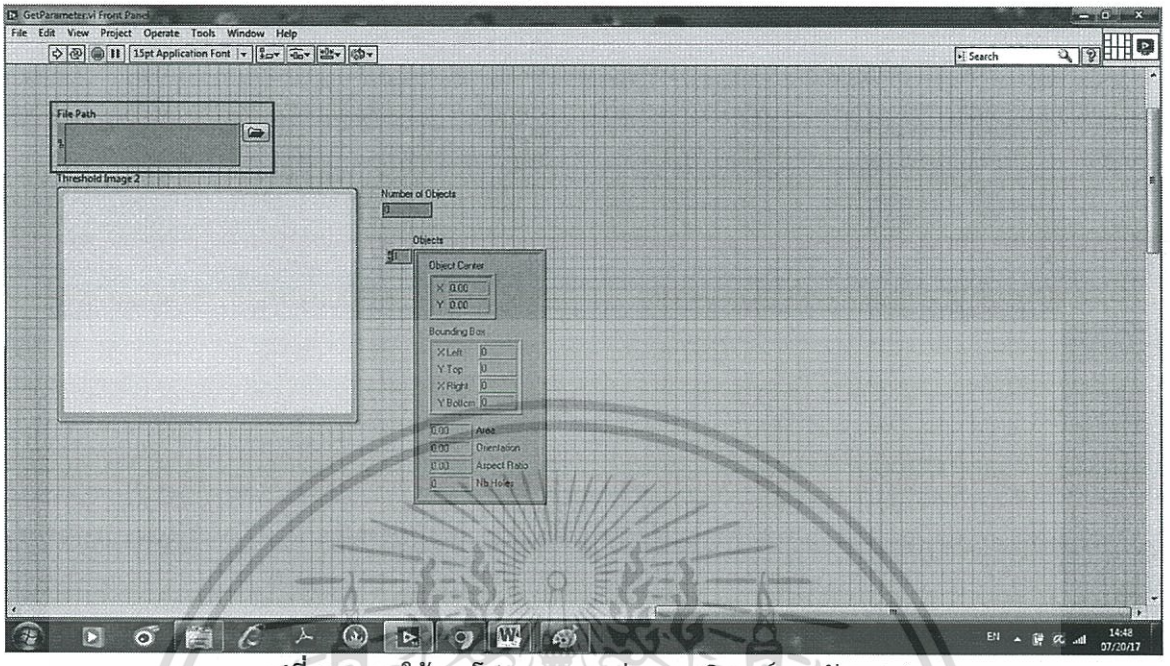
2.2 หน้าต่างการใช้งานโปรแกรม GetParameter



รูปที่ 19 การใช้งานโปรแกรมหาค่าพารามิเตอร์ของวัสดุ (2)

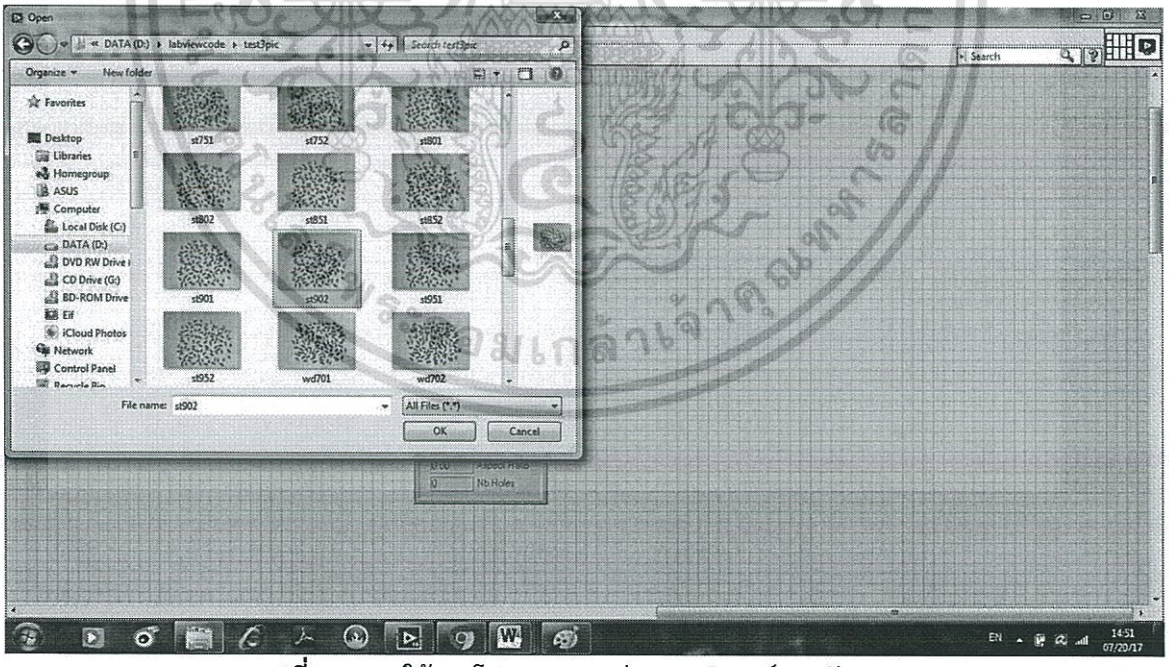
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 คลิกที่แฟ้มสีเหลือง เพื่อเลือกไฟล์ที่ต้องการหาค่าพารามิเตอร์ของวัสดุ



รูปที่ 20 การใช้งานโปรแกรมหาค่าพารามิเตอร์ของวัสดุ (3)

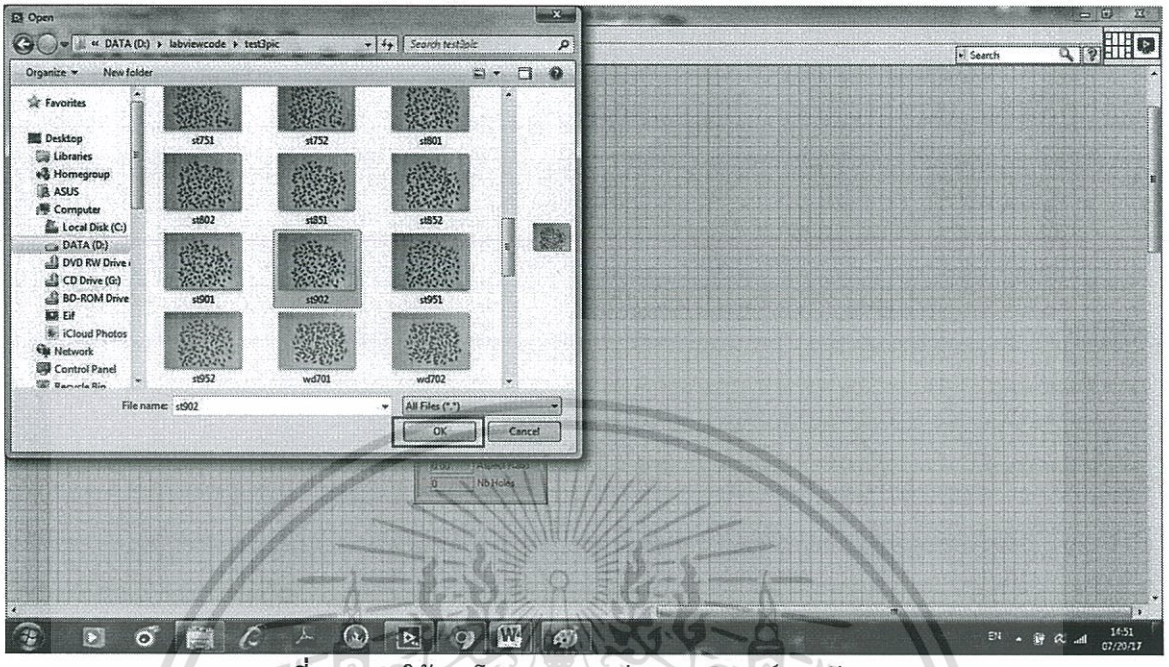
2.4 คลิกไฟล์ที่ต้องการ



รูปที่ 21 การใช้งานโปรแกรมหาค่าพารามิเตอร์ของวัสดุ (4)

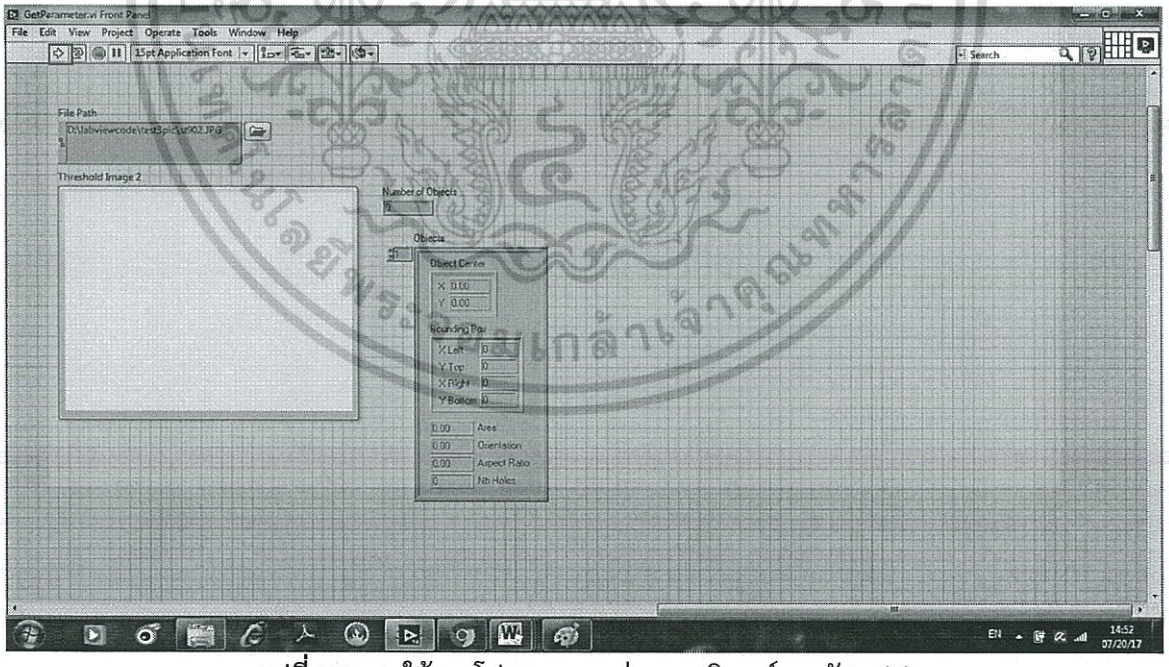
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5 กด OK



รูปที่ 22 การใช้งานโปรแกรมหาค่าพารามิเตอร์ของวัสดุ (5)

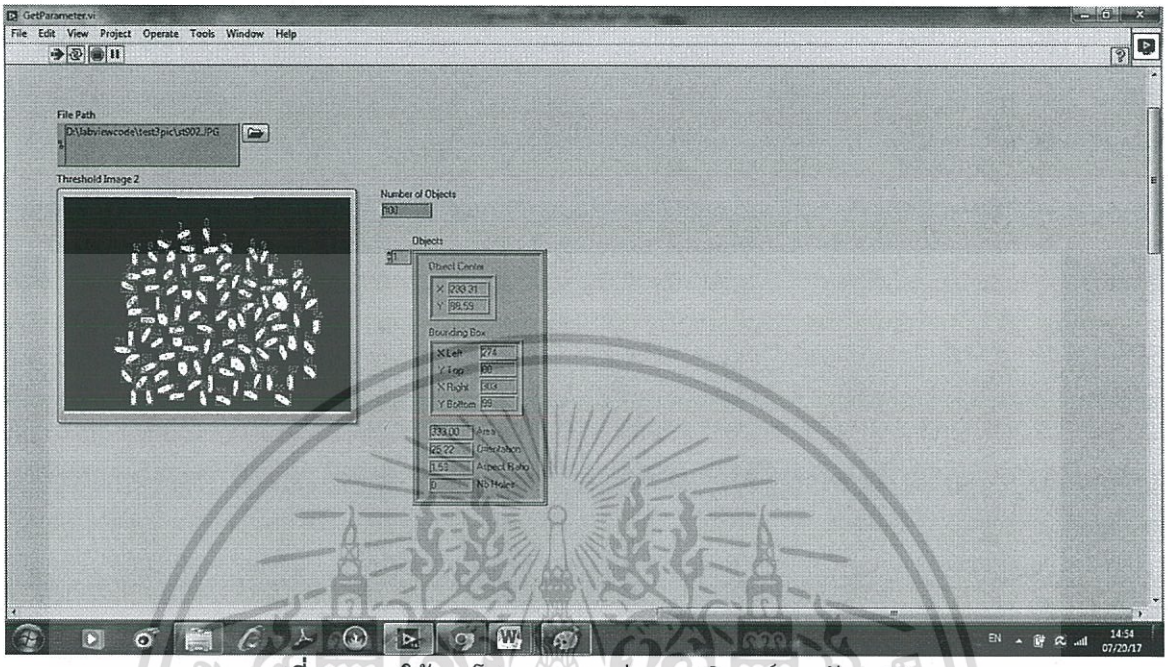
2.6 กด run โปรแกรม



รูปที่ 23 การใช้งานโปรแกรมหาค่าพารามิเตอร์ของวัสดุ (6)

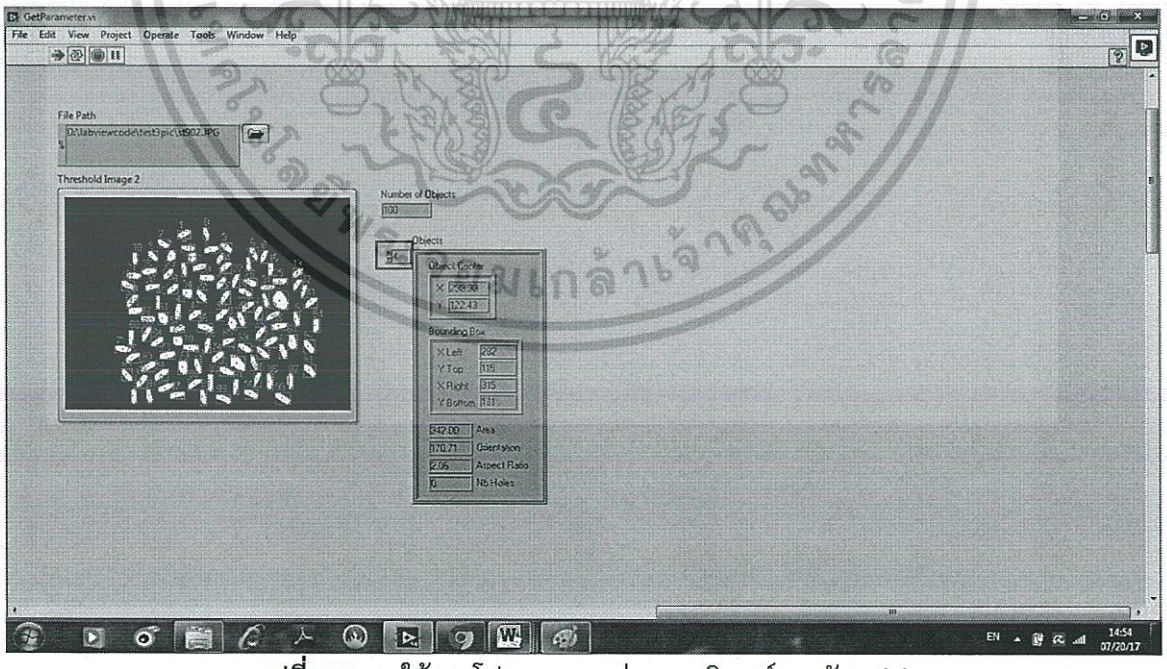
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.7 โปรแกรมจะแสดงผลลัพธ์ของวัสดุแต่ละชิ้น ได้แก่ พิกัดแกน x และ y, ค่าแกน x และ y ของพิกัดบล็อกสี่เหลี่ยม, ค่าพื้นที่, ค่าสัดส่วนกว้าง:ยาว เป็นต้น ค่าที่นำไปใช้คือค่าพื้นที่



รูปที่ 24 การใช้งานโปรแกรมหาค่าพารามิเตอร์ของวัสดุ (7)

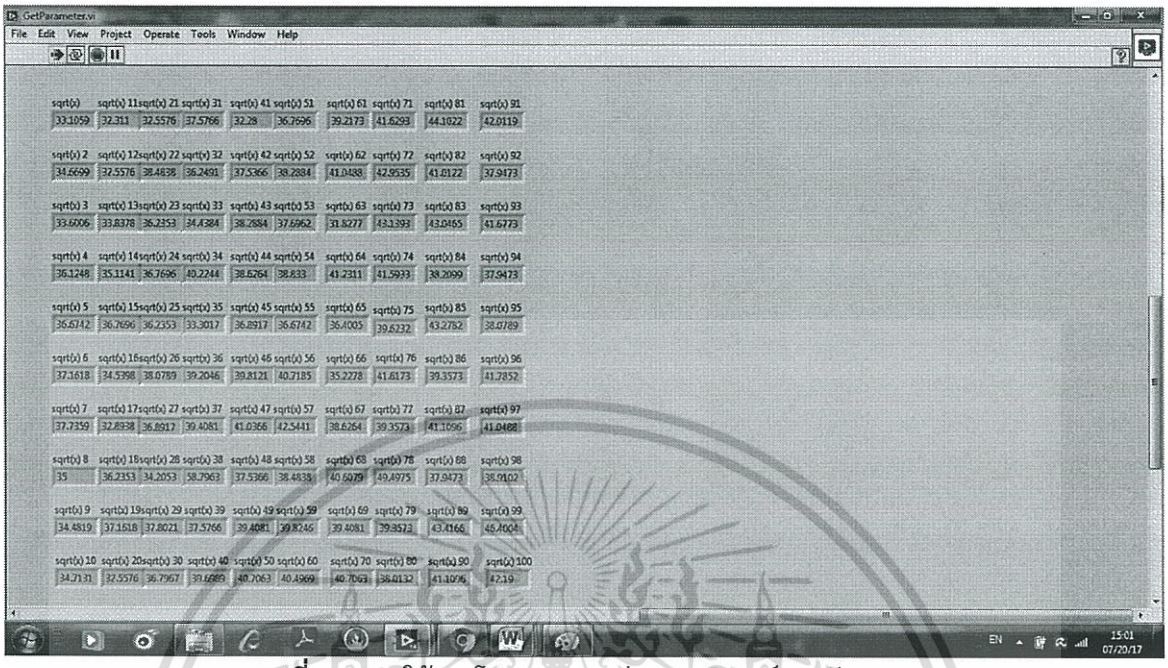
2.8 สามารถกดขึ้นหรือลง เพื่อดูค่าพารามิเตอร์ของวัสดุชิ้นอื่นๆได้



รูปที่ 25 การใช้งานโปรแกรมหาค่าพารามิเตอร์ของวัสดุ (8)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.8 แสดงค่าความยาวเส้นทแยงมุมของวัสดุแต่ละชิ้น



รูปที่ 26 การใช้งานโปรแกรมหาค่าพารามิเตอร์ของวัสดุ (1)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค

การใช้งานโปรแกรมประมวลผลภาพ 2 มิติ

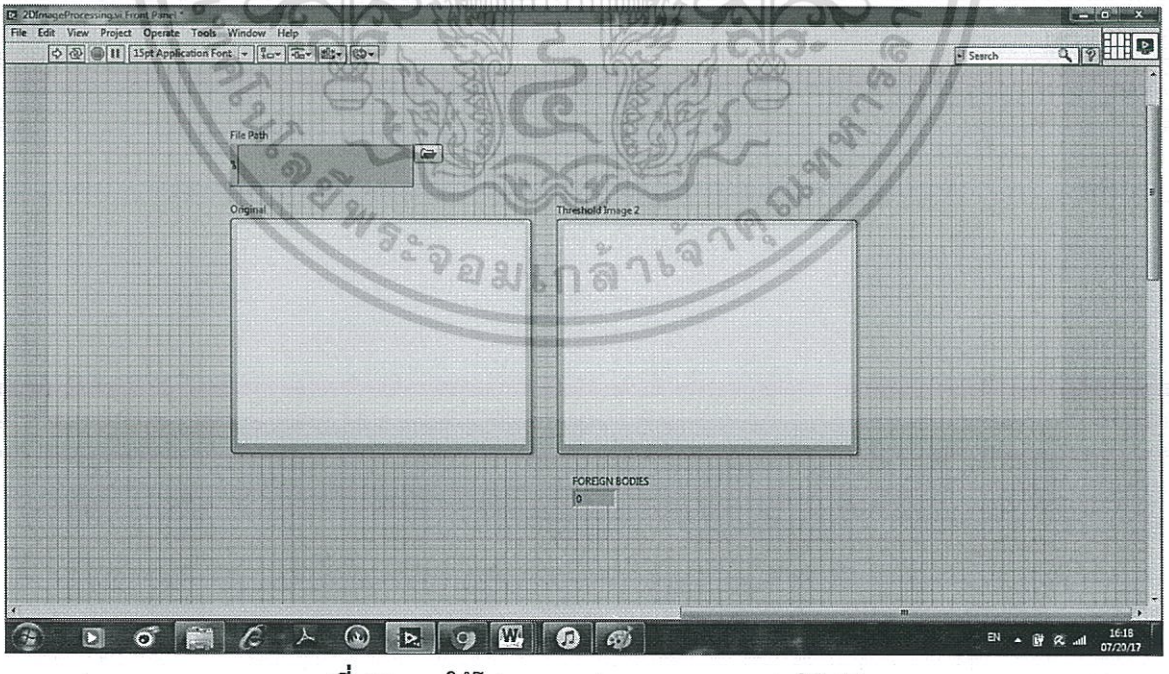
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. การใช้โปรแกรมประมวลผลภาพ 2 มิติ

3.1 ดับเบิ้ลคลิกที่โปรแกรม 2DImageProcessing เพื่อเปิดการใช้งาน

รูปที่ 27 การใช้โปรแกรมประมวลผลภาพ 2 มิติ (1)

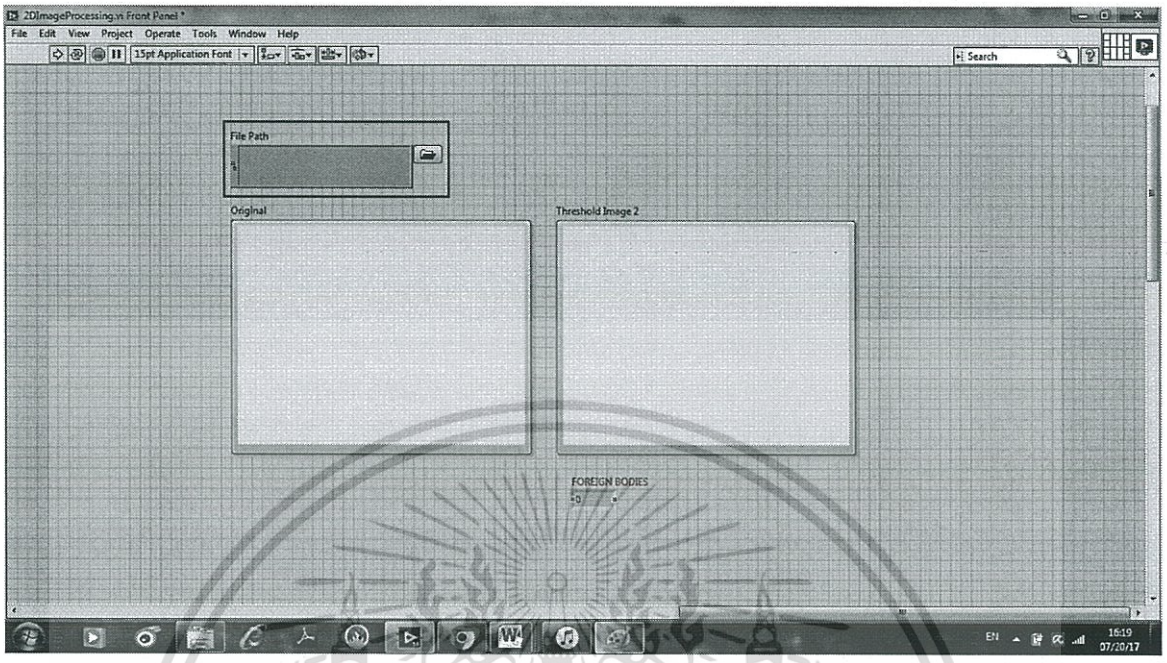
3.2 หน้าโปรแกรมการใช้งาน 2DImageProcessing



รูปที่ 28 การใช้โปรแกรมประมวลผลภาพ 2 มิติ (2)

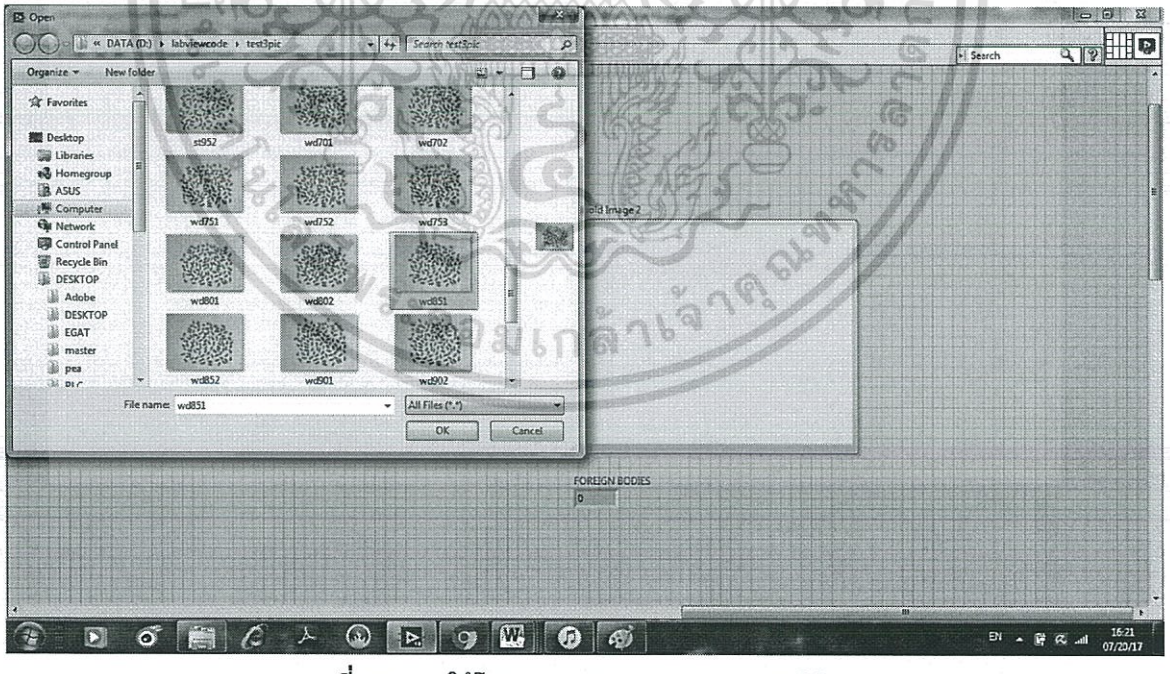
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 คลิกสัญลักษณ์โฟลเดอร์สีเหลือง เพื่อเปิดไฟล์ภาพความร้อนที่ต้องการตรวจจับสิ่งแปลกปลอม



รูปที่ 29 การใช้โปรแกรมประมวลผลภาพ 2 มิติ (3)

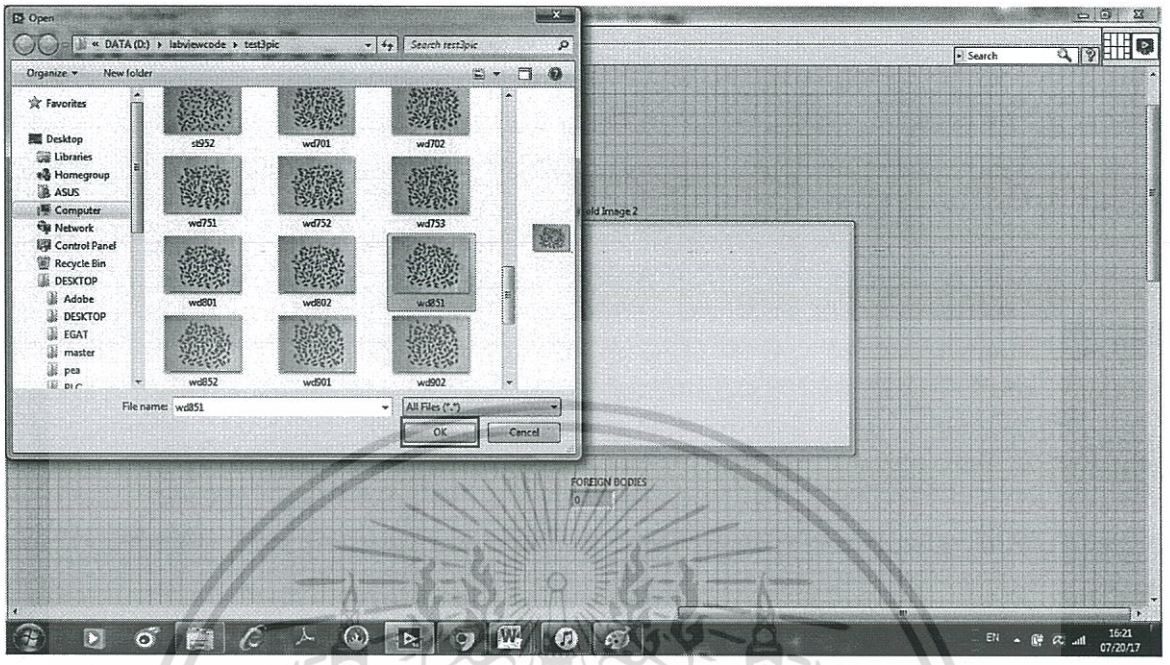
3.4 เลือกไฟล์ภาพความร้อนที่ต้องการตรวจจับสิ่งแปลกปลอม



รูปที่ 30 การใช้โปรแกรมประมวลผลภาพ 2 มิติ (4)

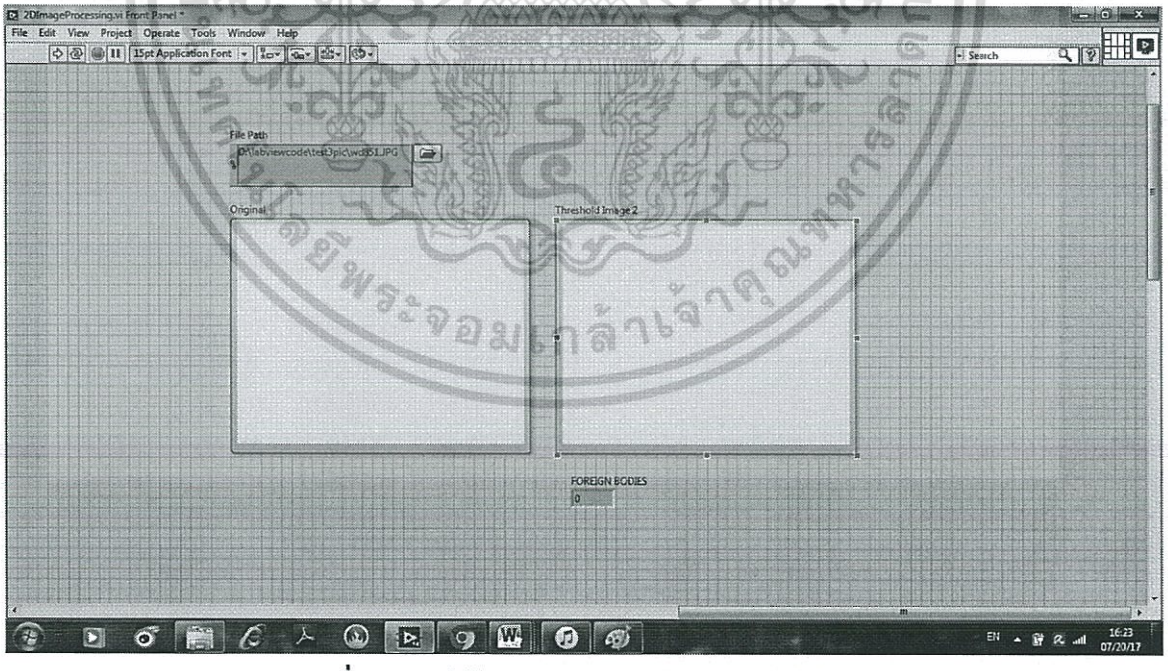
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5 กด OK



รูปที่ 31 การใช้โปรแกรมประมวลผลภาพ 2 มิติ (5)

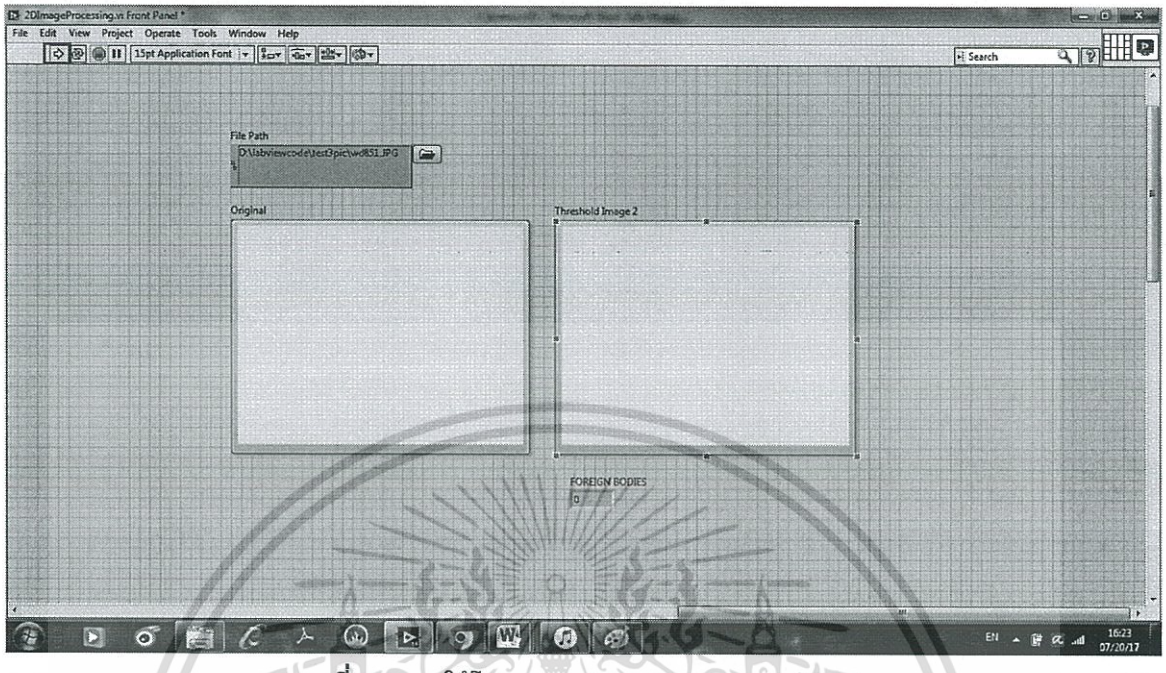
3.6 ไฟล์ที่เลือกจะแสดงที่หน้าโปรแกรม



รูปที่ 32 การใช้โปรแกรมประมวลผลภาพ 2 มิติ (6)

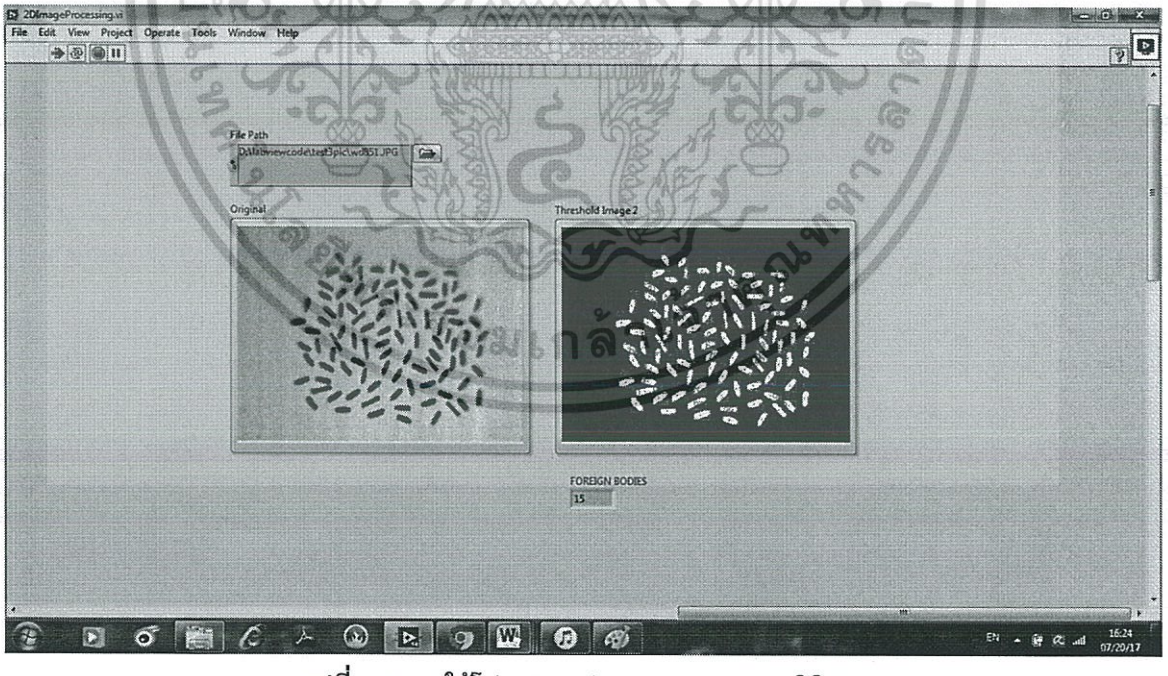
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.7 กด RUN โปรแกรม



รูปที่ 33 การใช้โปรแกรมประมวลผลภาพ 2 มิติ (7)

3.8 โปรแกรมแสดงจำนวนสิ่งแปลกปลอมที่ตรวจจับได้ด้วยการประมวลผลภาพ 2 มิติ



รูปที่ 34 การใช้โปรแกรมประมวลผลภาพ 2 มิติ (8)

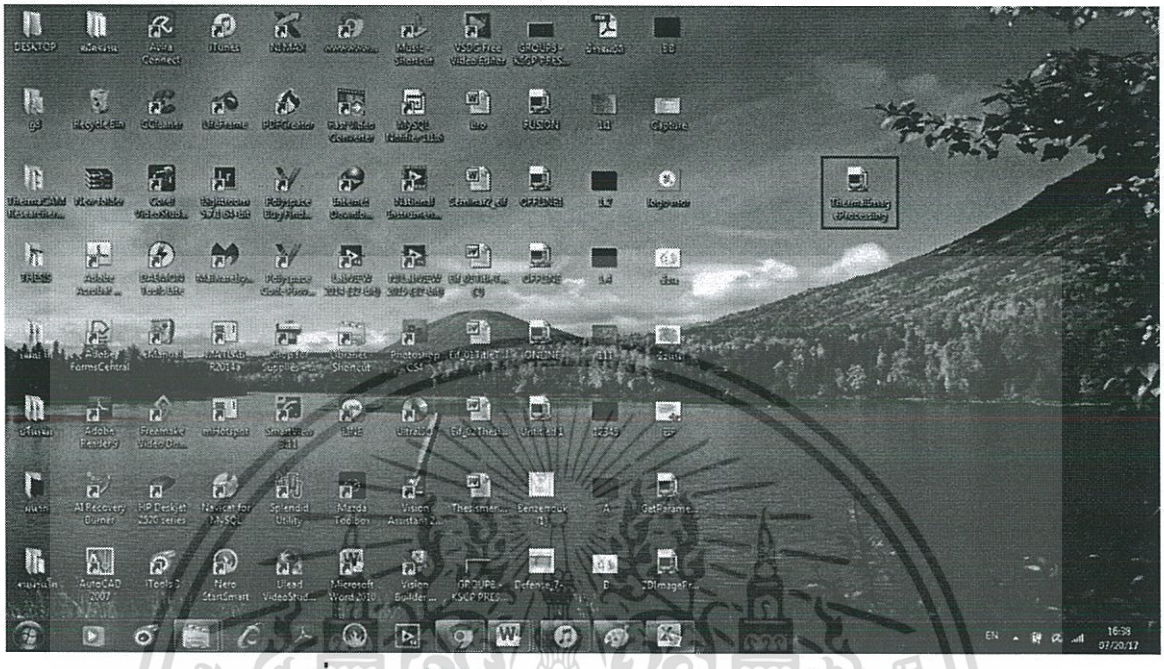
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ง
การใช้งานโปรแกรมประมวลผลภาพความร้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

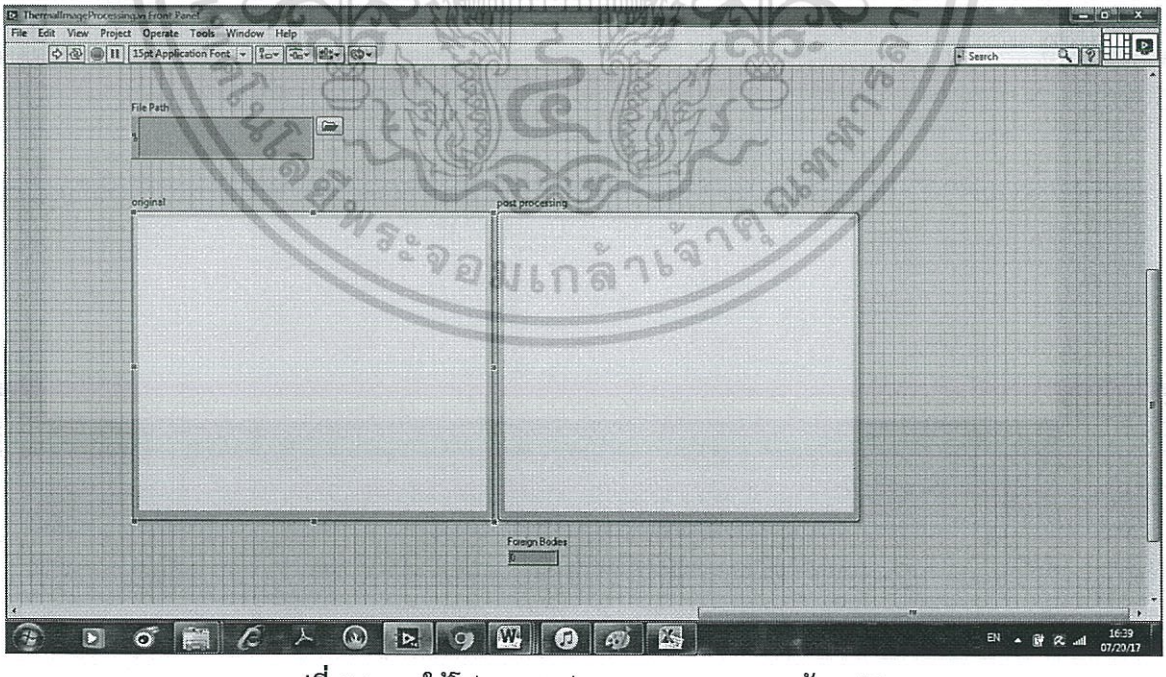
4. การใช้โปรแกรมประมวลผลภาพความร้อน

4.1 ดับเบิ้ลคลิกที่โปรแกรม ThermalImageProcessing เพื่อเปิดการใช้งาน



รูปที่ 35 การใช้โปรแกรมประมวลผลภาพความร้อน (1)

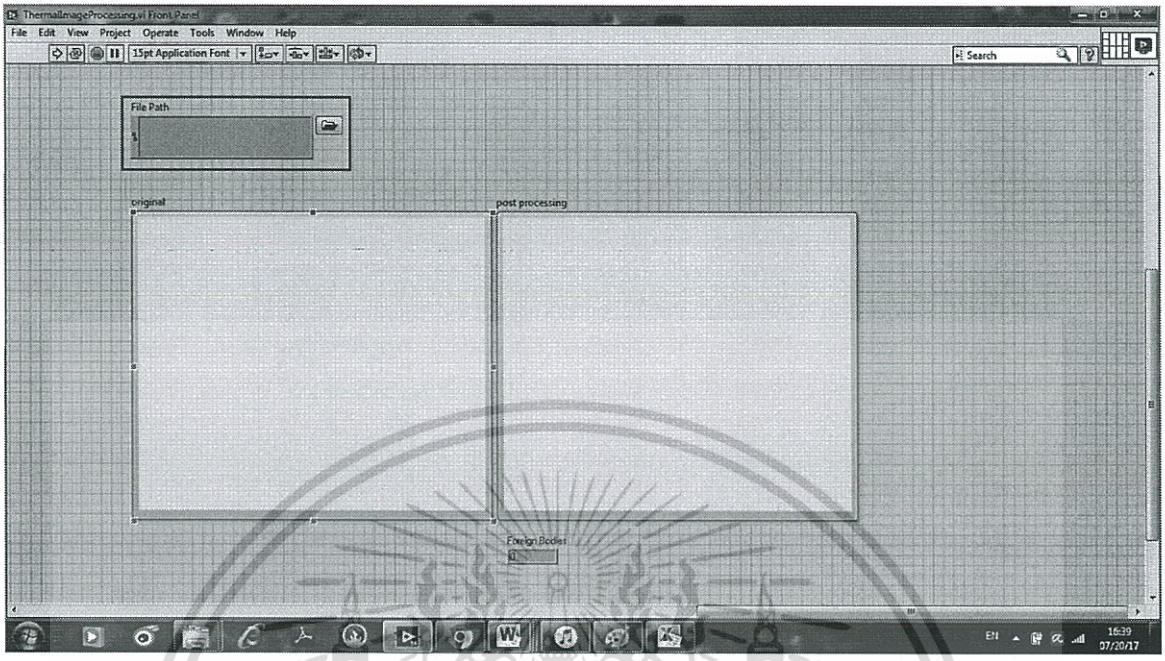
4.2 หน้าโปรแกรมการใช้งาน ThermalImageProcessing



รูปที่ 36 การใช้โปรแกรมประมวลผลภาพความร้อน (2)

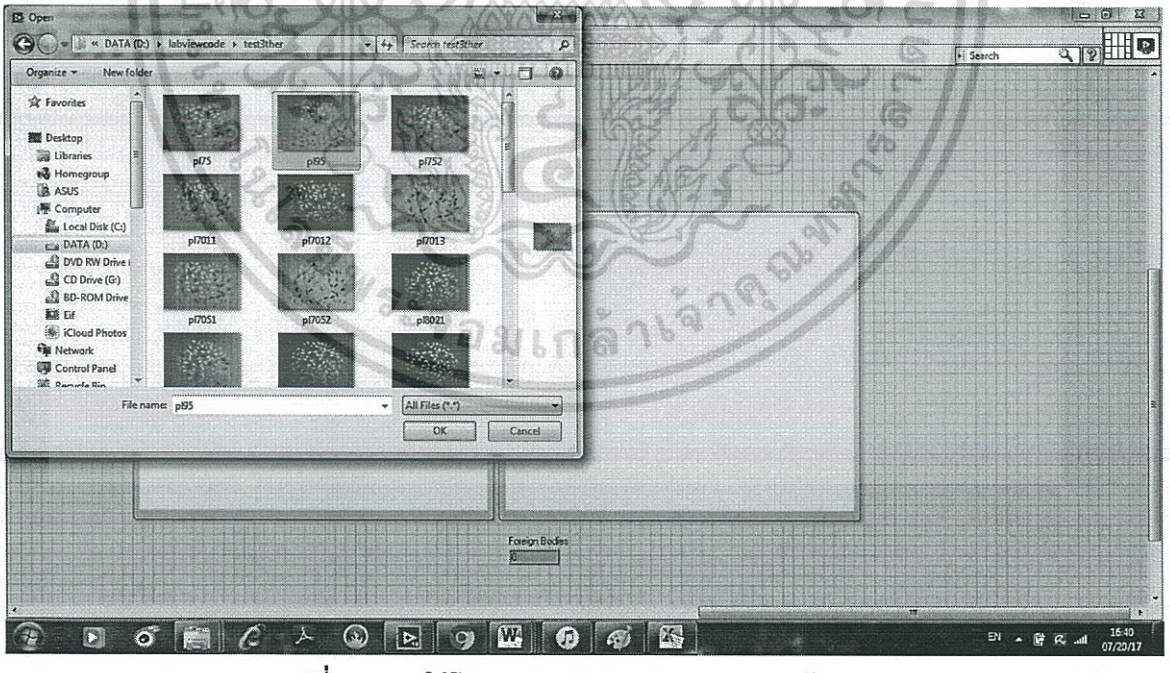
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 คลิกสัญลักษณ์โฟลเดอร์สีเหลือง เพื่อเปิดไฟล์ภาพความร้อนที่ต้องการตรวจจับสิ่งแปลกปลอม



รูปที่ 37 การใช้โปรแกรมประมวลผลความร้อน (3)

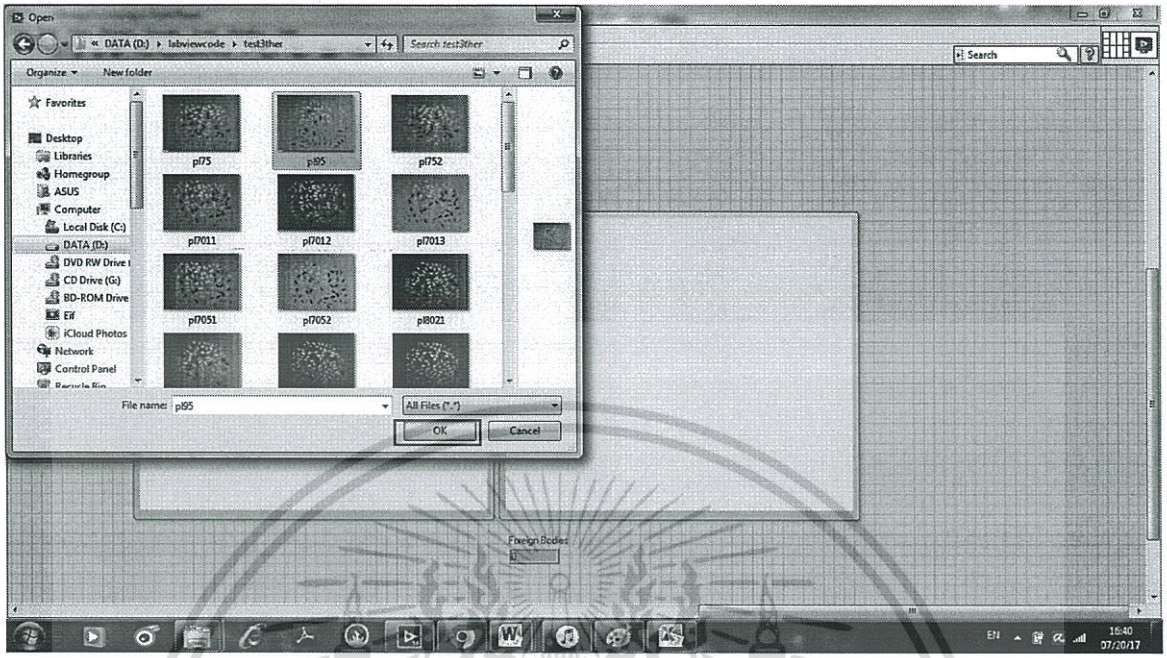
4.4 เลือกไฟล์ภาพความร้อนที่ต้องการตรวจจับสิ่งแปลกปลอม



รูปที่ 38 การใช้โปรแกรมประมวลผลภาพความร้อน (4)

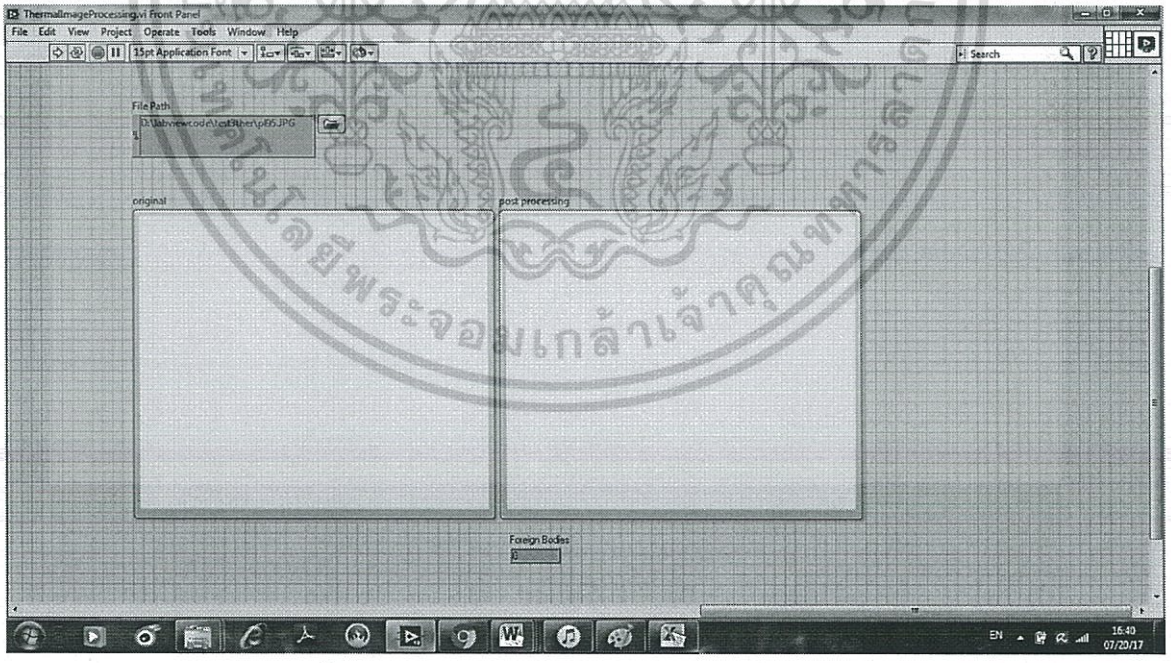
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.5 กด OK



รูปที่ 39 การใช้โปรแกรมประมวลผลภาพความร้อน (5)

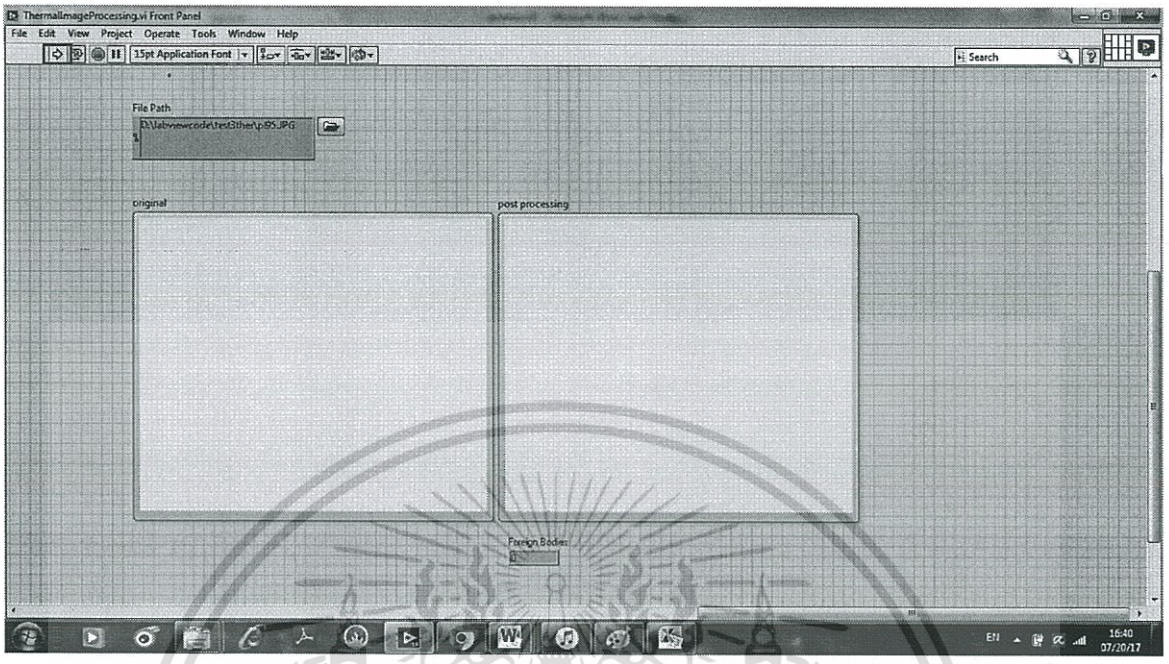
4.6 ไฟล์ที่เลือกจะแสดงที่หน้าโปรแกรม



รูปที่ 40 การใช้โปรแกรมประมวลผลภาพความร้อน (6)

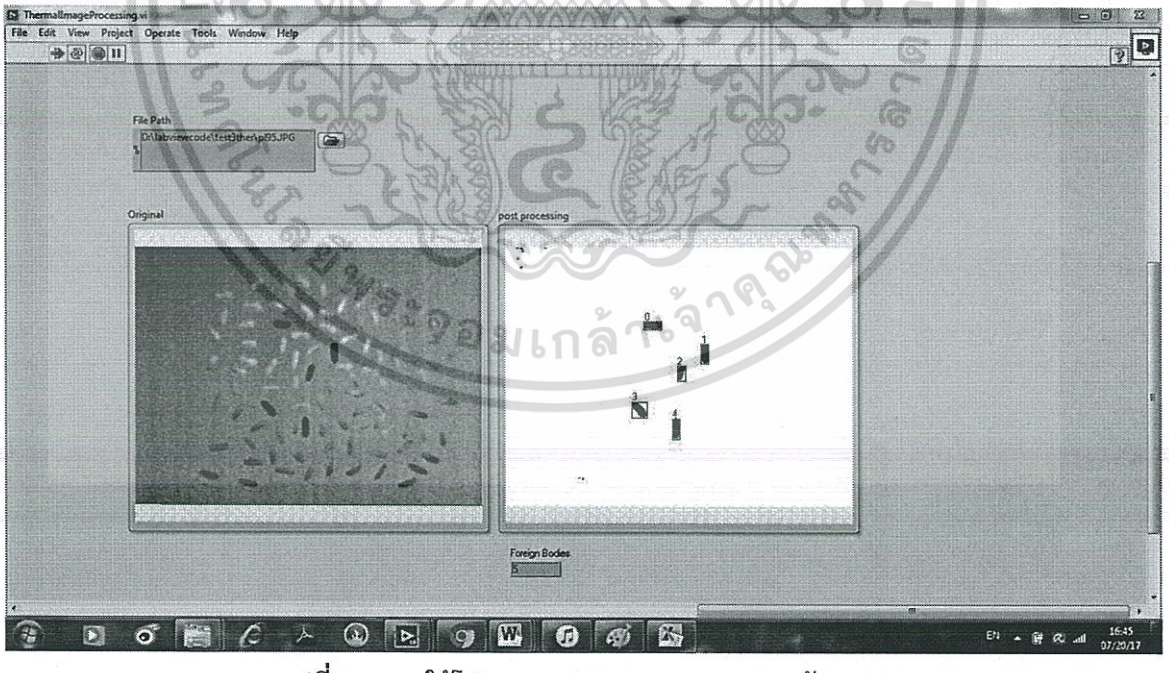
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.7 กด RUN โปรแกรม



รูปที่ 41 การใช้โปรแกรมประมวลผลภาพความร้อน (7)

4.8 โปรแกรมแสดงจำนวนสิ่งแปลกปลอมที่ตรวจจับได้ด้วยการประมวลผลภาพความร้อน



รูปที่ 42 การใช้โปรแกรมประมวลผลภาพความร้อน (8)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

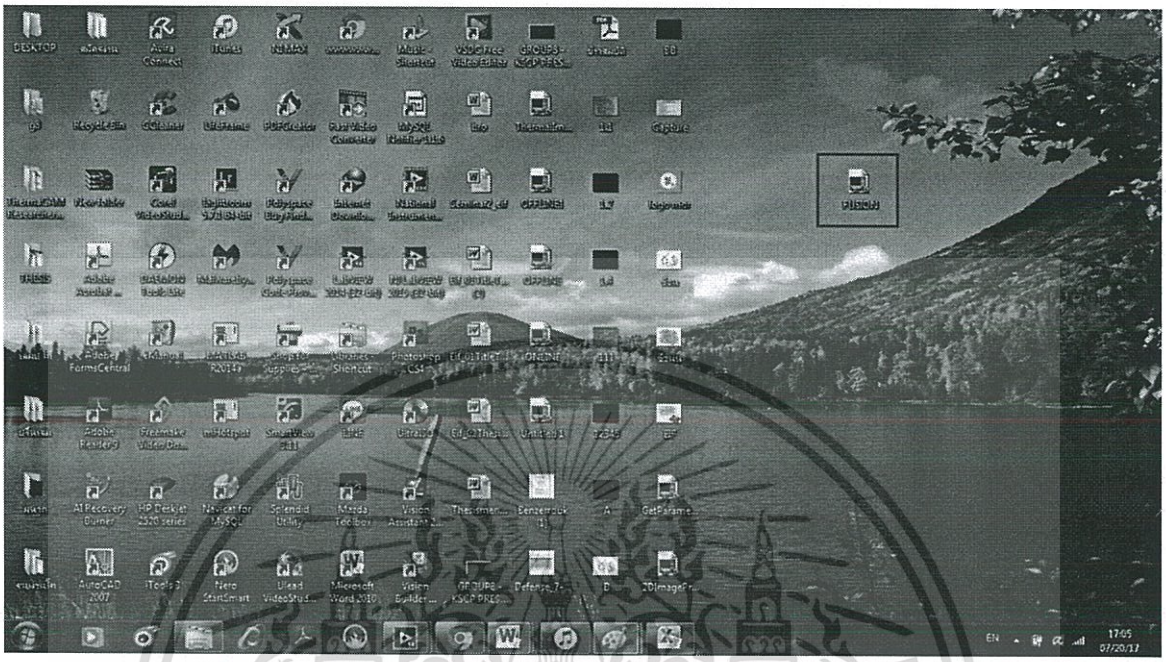
ภาคผนวก จ

การใช้งานโปรแกรมประมวลผลภาพ 2 มิติผสมกับภาพความร้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

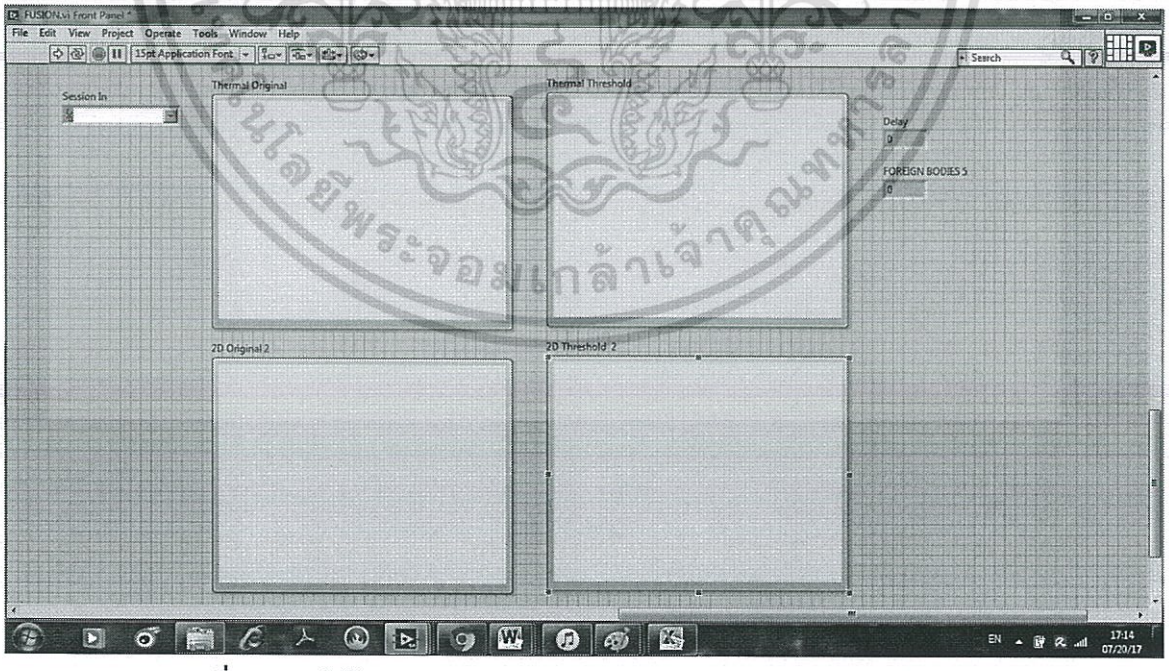
5. การใช้โปรแกรมประมวลผลภาพสองมิติผสมกับภาพความร้อน

5.1 ดับเบิ้ลคลิกที่โปรแกรม FUSION เพื่อเปิดการใช้งาน



รูปที่ 43 การใช้โปรแกรมประมวลผลภาพ 2 มิติผสมกับภาพความร้อน (1)

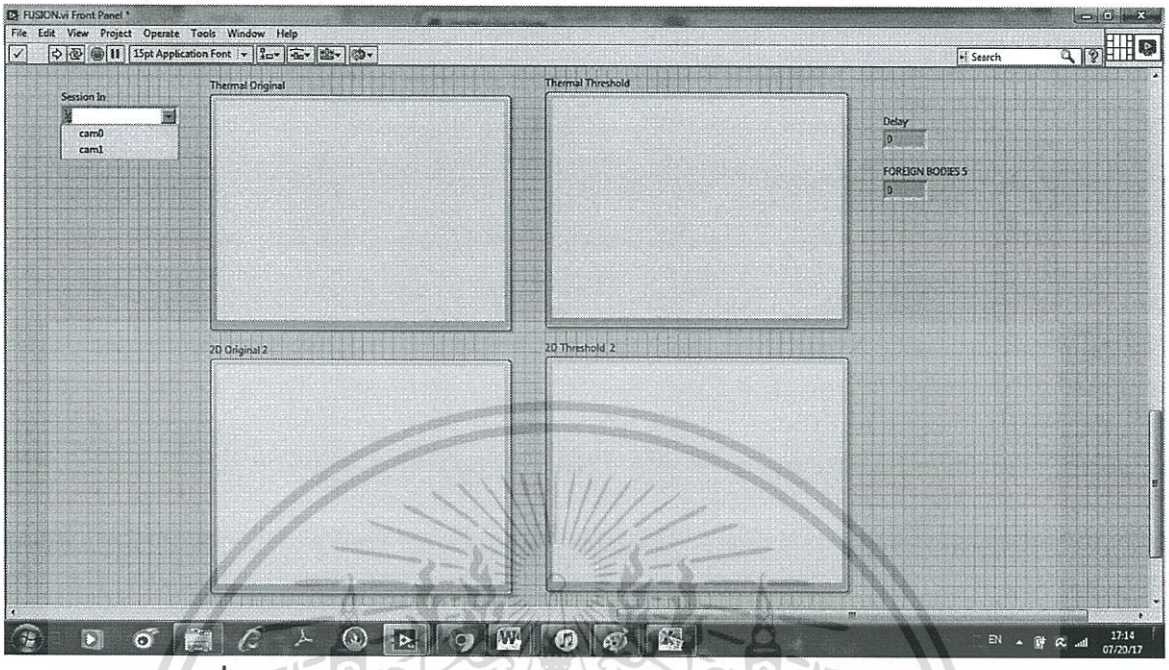
5.2 หน้าโปรแกรมการใช้งาน FUSION



รูปที่ 44 การใช้โปรแกรมประมวลผลภาพ 2 มิติผสมกับภาพความร้อน (2)

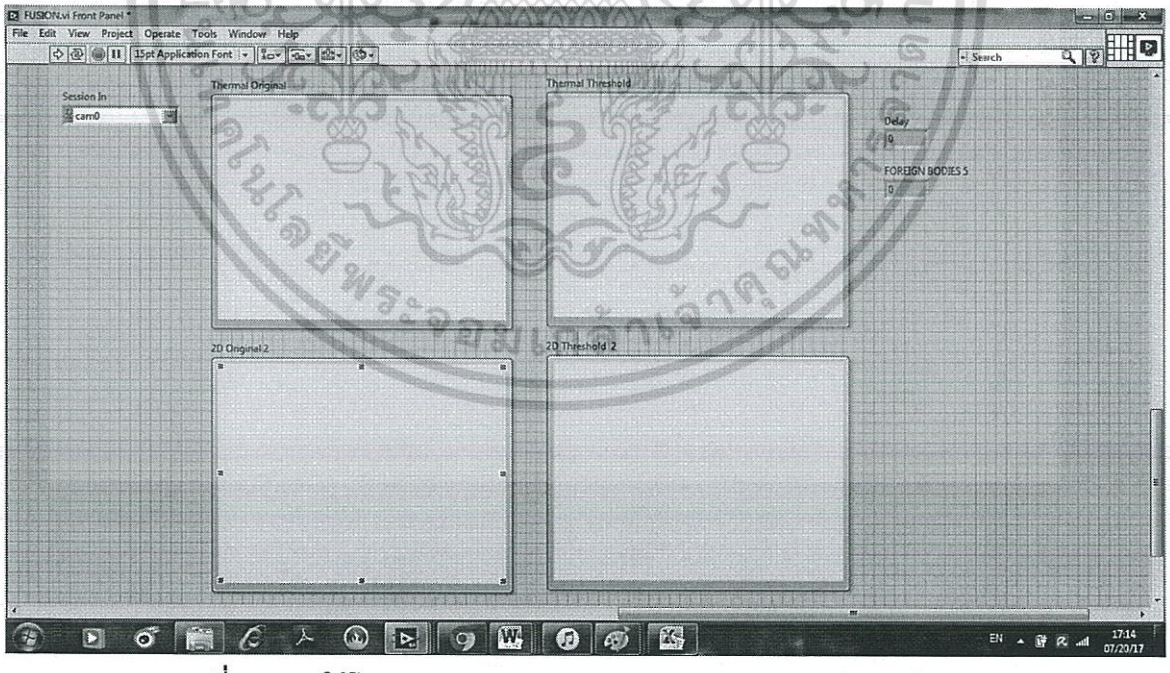
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.3 คลิก Session In เพื่อเลือก PORT ที่ใช้เชื่อมต่อกับกล้องถ่ายภาพความร้อน



รูปที่ 45 การใช้โปรแกรมประมวลผลภาพ 2 มิติผสมกับภาพความร้อน (3)

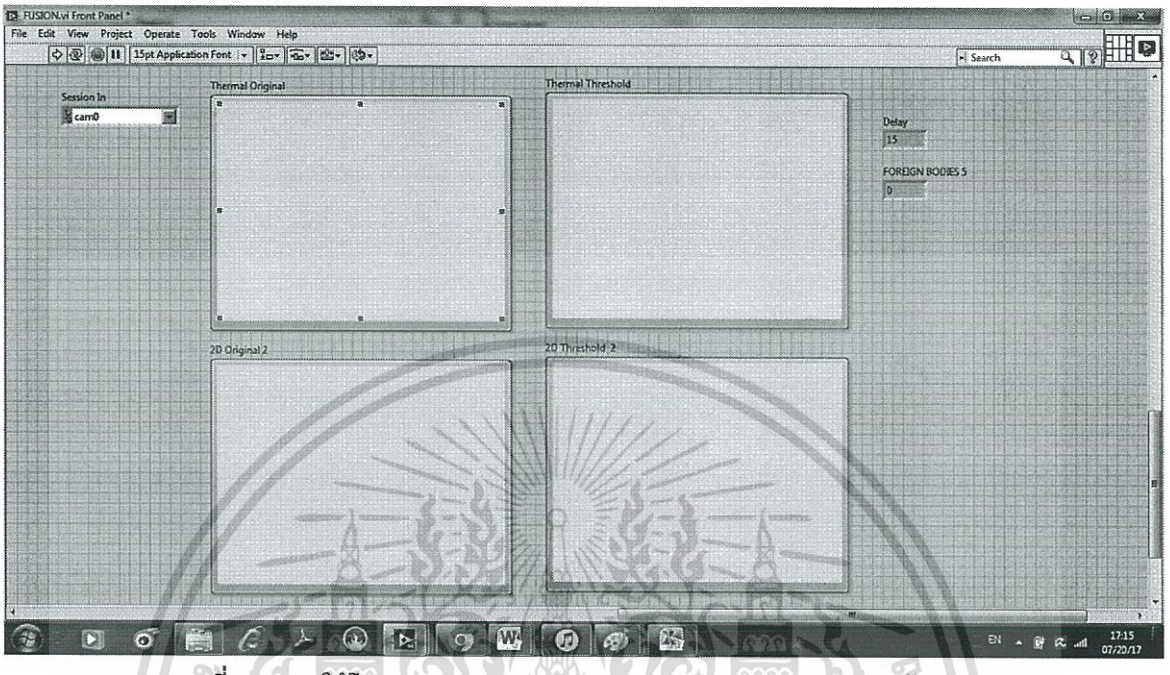
5.4 หน้าจอจะแสดง port ที่เลือกในการเชื่อมต่อ



รูปที่ 46 การใช้โปรแกรมประมวลผลภาพ 2 มิติผสมกับภาพความร้อน (4)

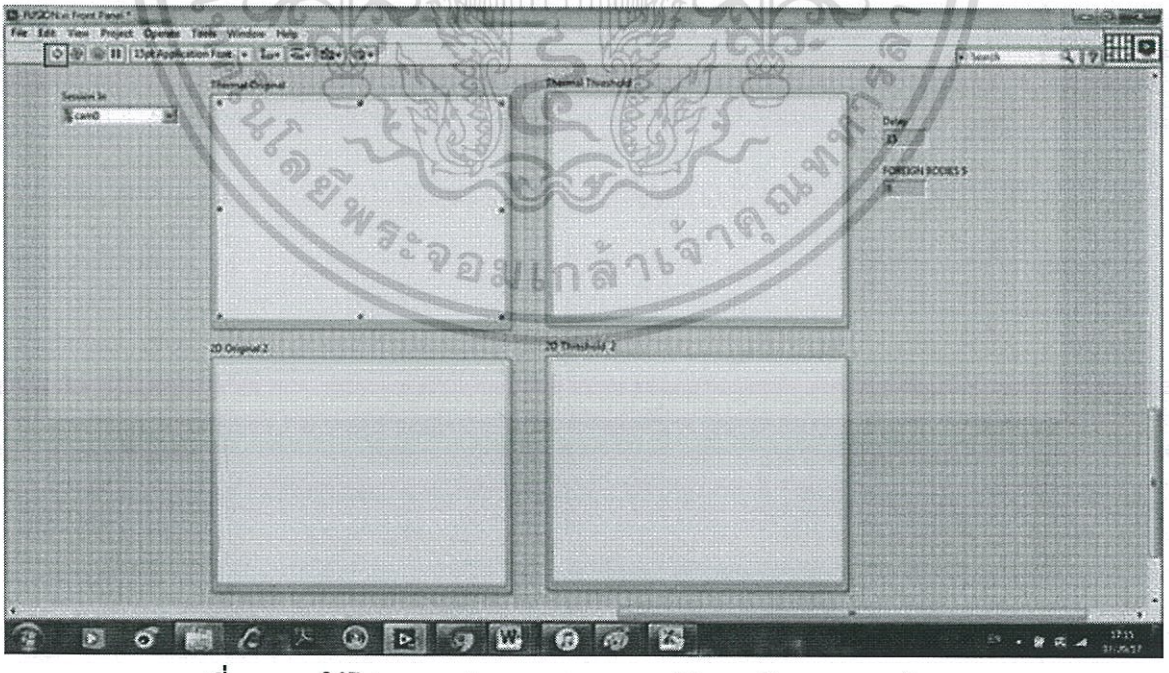
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.5 กดป้อนค่า Delay เป็นเวลาที่วัตถุใช้ในการคายความร้อหลังจากกระตุ้นความร้อนเพื่อนำไปประมวลผลภาพ 2 มิติ



รูปที่ 47 การใช้โปรแกรมประมวลผลภาพ 2 มิติผสมกับภาพความร้อน (5)

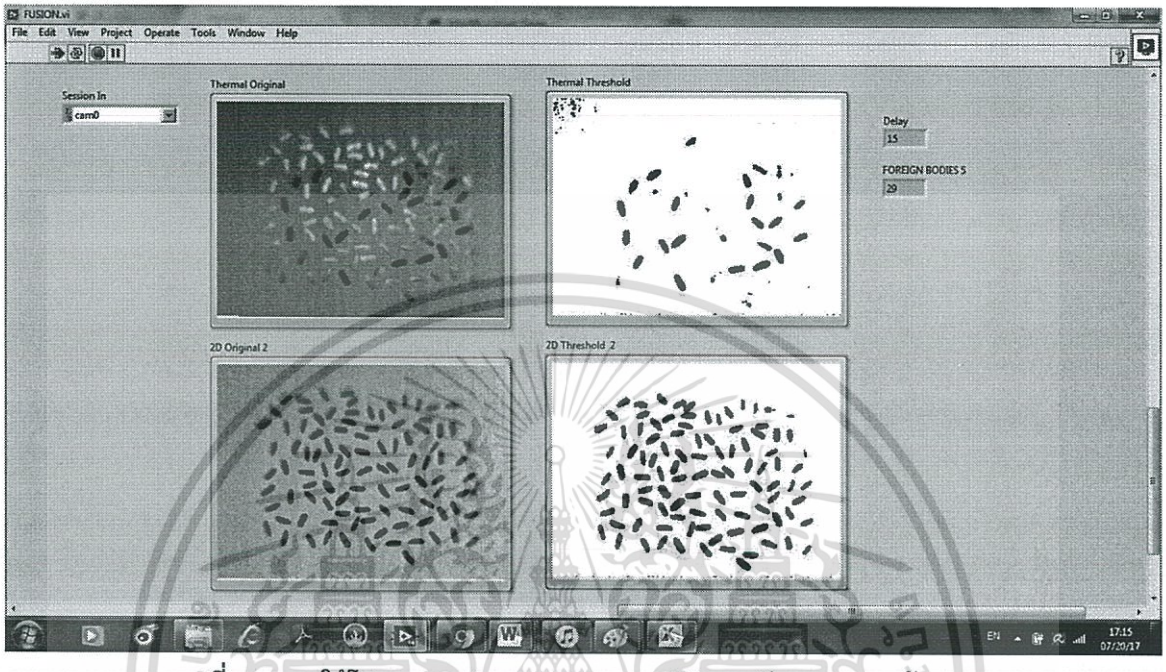
5.6 กด RUN โปรแกรม



รูปที่ 48 การใช้โปรแกรมประมวลผลภาพ 2 มิติผสมกับภาพความร้อน (6)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.7 โปรแกรมแสดงจำนวนสิ่งแปลกปลอมที่ตรวจจับได้ด้วยการประมวลผลภาพ 2 มิติผสมกับภาพถ่ายความร้อน



รูปที่ 49 การใช้โปรแกรมประมวลผลภาพ 2 มิติผสมกับภาพความร้อน (7)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ฉ

ผลการทดลองการตรวจจับสิ่งแปลกปลอม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 1 การตรวจจับสิ่งแปลกปลอมในข้าวด้วยการประมวลผลภาพ 2 มิติ

ชนิดสิ่งแปลกปลอม	จำนวนสิ่งแปลกปลอมที่ใส่ไปในการทดลอง																	
	5 ชิ้น			10 ชิ้น			15 ชิ้น			20 ชิ้น			25 ชิ้น			30 ชิ้น		
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3
หิน	5	4	4	8	9	9	13	13	12	18	16	17	22	22	22	23	24	25
เศษไม้	4	4	3	10	10	8	12	12	13	19	20	20	25	25	24	26	28	29
พลาสติก	3	2	3	7	5	6	9	8	5	6	9	9	11	9	10	11	12	12

ตารางที่ 2 การตรวจจับสิ่งแปลกปลอมในข้าวด้วยการประมวลผลภาพความร้อน

ชนิดสิ่งแปลกปลอม	จำนวนสิ่งแปลกปลอมที่ใส่ไปในการทดลอง																	
	5 ชิ้น			10 ชิ้น			15 ชิ้น			20 ชิ้น			25 ชิ้น			30 ชิ้น		
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3
หิน	0	1	0	1	1	2	2	1	1	1	1	1	1	1	0	1	2	1
เศษไม้	5	5	5	9	8	10	14	15	14	19	19	20	24	24	25	28	30	29
พลาสติก	5	4	5	7	8	8	13	12	11	18	15	16	23	20	20	26	27	27

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเชียงใหม่
ไม่อนุญาตให้ทำซ้ำ ดัดแปลง หรือเผยแพร่ต้นฉบับทั้งหมดหรือบางส่วนในรูปแบบใดๆ ก่อนได้รับอนุญาตเป็นลายลักษณ์อักษรจากเจ้าของลิขสิทธิ์
ข้อมูลนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ตารางที่ 3 การตรวจจับสิ่งแปลกปลอมในข้าวด้วยการประยุกต์การประมวลผลภาพ 2 มิติร่วมกับภาพความร้อน

ชนิดสิ่งแปลกปลอม	จำนวนสิ่งแปลกปลอมที่ใส่ไปในการทดลอง																	
	5 ชิ้น			10 ชิ้น			15 ชิ้น			20 ชิ้น			25 ชิ้น			30 ชิ้น		
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3
หิน	5	4	4	8	9	9	14	13	12	18	16	18	22	23	22	24	24	25
เศษไม้	5	5	5	10	10	10	14	15	14	19	20	19	25	25	25	28	30	29
พลาสติก	5	4	5	9	8	9	14	14	13	19	18	16	23	24	22	27	28	28

ตารางที่ 4 การทดสอบระบบการตรวจจับสิ่งแปลกปลอมในข้าวด้วยการประมวลผลภาพ 2 มิติผสมกับภาพความร้อน

ชนิดสิ่งแปลกปลอม	จำนวนสิ่งแปลกปลอมที่ใส่ไปในการทดลอง																	
	5 ชิ้น			10 ชิ้น			15 ชิ้น			20 ชิ้น			25 ชิ้น			30 ชิ้น		
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3
หิน	5	4	4	8	9	9	13	13	12	18	16	17	22	22	22	23	24	25
เศษไม้	5	5	4	10	9	8	13	14	13	19	19	19	25	25	24	29	30	29
พลาสติก	4	4	5	7	8	8	13	12	11	19	17	16	23	20	22	28	28	27

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งไม่อนุญาตให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของลิขสิทธิ์ทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ช

ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการทำวิทยานิพนธ์และได้รับการตีพิมพ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Detection of Foreign Bodies in Roasted Coffee by using Active Thermography

A. Ngoensod, N. Nunak, and T. Suesut

Abstract—**This paper presents the detection of foreign bodies in roasted coffee by using active thermography with real-time thermal image processing. Foreign bodies, including stone, wood, etc., are found in roasted coffee beans contaminated during drying process and transportation. The principle of radiation from objects with different emissivity and heat capacity is applied. The heat radiation from the roasted coffee and the foreign body are different; therefore, the thermal image can be used to identify the foreign objects. The active thermography system consists of a thermal image camera and computer image processing, heat source and conveyor system controlled by programmable logic controller. The testing and experimental results of the proposed system show that the foreign bodies in roasted coffee beans can be found in all batches, however, the number counting of foreign objects are inaccurate.**

Index Terms—**thermal image processing, Active Thermography, emissivity**

I. Introduction

In northern Thailand, the hill-tribe farmers grow Arabica coffee, while Robusta coffee is grown in South of Thailand [1]. Thailand is the third grown coffee in Southeast Asia [2]. Normally, the coffee production starts from growing coffee, harvesting the cherries, processing of cherries, drying the beans, milling process and finally roasting process. The quality of the coffee is not only depending on the odor and taste, but also the quality of production is very important. Consumers always have high expectations about food purity [3]. Generally, roasted coffee beans contain a small percentage of foreign bodies such as stone and wood. Therefore, it is important to find the way to get coffee 100% pure [4]. In coffee industrial production, many of coffee producers need a pure coffee without any foreign bodies matter because foreign bodies will reduce the quality of coffee. The traditional detection of foreign bodies in coffee by using a person or sorting apparatus, it is not as good as it should be.

The color sorters are the machines replacing hand sorting that consists of the functions of the human hand, brain and eye by separating the color. The color sorter can reduce the amount of foreign bodies, but it cannot be done effectively for 100% [5]. There are many possible reasons for the limitation, for example, the difference material with the same physical size and same color.

The destoner or specific gravity separator is widely used in coffee industry based on the principles of different specific gravity. This machine can be used to produce roasted coffee for the finest quality and it is suitable for the large coffee industry [4].

To overcome this problem, in recent years, many new applications of infrared thermography have been developed [3][6][7]. Infrared thermography is a nondestructive evaluation method with an increasing span of applications. This technique is able to detect contaminants or inhomogeneities. Many industries use thermal image to detect foreign bodies.

Infrared nondestructive testing is particularly suitable to evaluate the quality of fruit, vegetables, seeds, flour, etc. This method includes passive and active infrared nondestructive testing. In active infrared nondestructive testing, the sample under test is stimulated by appropriate thermal activation and thermal images are collected in a determined interval time in order to reconstruct the time–temperature curves of the sample. By analyzing the behavior of the curves for any image pixel, inhomogeneities, flaws and foreign objects can be individuated even in the case of internal defects [7].

In this work, the problem has been solved by using active thermography to find foreign bodies in roasted coffee products. The principle of active thermography was applied to the foreign body detection system for roasted coffee beans.

II. Principle

A. Emissivity

Emissivity is the coefficient of thermal radiation which ranges from 0 to 1, can be defined as a ratio of the thermal radiation from the surface of any object to the thermal radiation from a black body at the same temperature. The maximum thermal radiation that surfaces can radiate (Ideal surface or black body) is $\varepsilon = 1$.

Emissivity of a surface, denoted ε, is defined as

$$\varepsilon = \frac{E(T)}{E_b(T)} \quad (1)$$

Manuscript received December 22, 2016; revised January 9, 2017. This work was supported in part by Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, 10520

A. Ngoensod is with department of Instrumentation and Control Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, Thailand 10520

N. Nunak is with department of Food Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, Thailand 10520 (e-mail: Navaphattra@gmail.com).

T. Suesut is with department of Instrumentation and Control Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, Thailand 10520 (corresponding author e-mail: taweepol.su@kmitl.ac.th).

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ISBN: 978-988-14047-3-2
ISSN: 2078-0958 (Print); ISSN: 2078-0966 (Online)

where

$E(T)$ is the thermal radiation energy of any object (equation 2);

$E_b(T)$ is The thermal radiation energy of a black body at the same temperature as that surface (equation 3 and 4);

$$E(T) = \varepsilon \sigma T^4 \tag{2}$$

$$E_b(T) = \int_0^{\lambda} \frac{C_1}{\left[\lambda^5 \exp\left(\frac{C_2}{\lambda T}\right) - 1\right]} d \tag{3}$$

$$E_b(T) = \sigma T^4 \tag{4}$$

where σ is the constant of Stefan–Boltzmann is equal to 5.67 x 10^{-8} W / m^2 • K^4.

Emissivity depends on the type of object, the surface of the object and the surface temperature of the object.

B. *Active thermography*

Active thermography is a method that enabled nondestructive testing assessment of properties of materials. This method needs external heat source to stimulate the thermal energy to the sample. The difference of thermal radiation between the sample and the defects can be classified by the thermal image. There are 3 methods for active thermography: pulse methods, lock-in methods and pulse phase methods.

Meinlschmidt [13] was developed thermographic detection of defects in wood-based materials. When wood sample under detection was heated with heat source, the temperature of the surface will increase suddenly. The speed of heat at surface diffused into the sample based on the thermal properties such as emissivity, density and heat capacity. The defects in the sample made an obstacle for the heat spreading process. Thereby, the surface temperature over the defect would drop slower than the temperature in other areas and the surface over the defect expressed the hot spots for a long time.

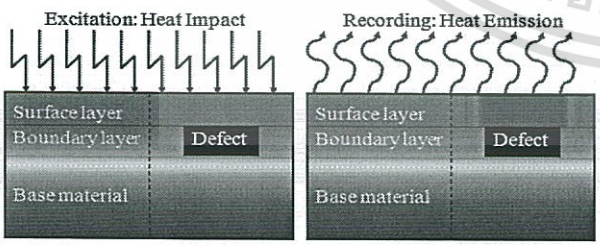


Fig. 1. Principle of active thermography (adapted from P. Meinlschmidt)

III. Experimental Setup

The experiment setup consisted of infrared thermography camera FLIR series A315 (see Table I), Halogen light bulb 50-60 Hz 100W, Conveyor 15x160 cm^2 7.27 cm/sec, Programmable Logic Controller Omron C200HX, photo sensors, and computer for thermal image processing as shown in Fig. 2.

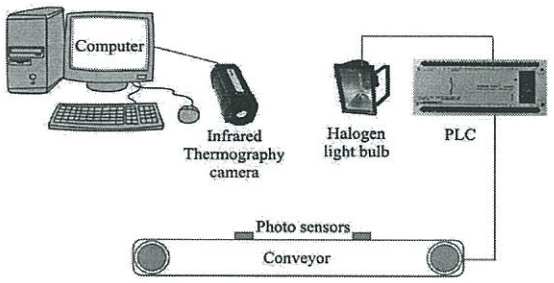


Fig. 2. The detection system for foreign bodies in roasted coffee by using Active thermography.

TABLE I
TECHNICAL CHARACTERISTIC OF IR CAMERA [15]

Measuring range	–20 to +120°C (-4 to 248°F) 0 to +350°C (32 to 662°F)
Accuracy	±2°C or ±2% of reading
Resolution	320 × 240 pixels
Spectral range	7.5–13 µm
Thermal resolution	320 × 240 pixels
Image frequency	60Hz
Field of view	25° × 18.8° / 0.4 m (1.31 ft.)
IFOV	1.36 mrad
Sensor	Uncooled microbolometer
Camera Interface	Gigabit Ethernet

A. *Foreign bodies detection procedure*

The detection procedure started from preparing the sample by mixing the roasted coffee and foreign bodies (i.e. stones, wood), and placed the sample on the tray. The conveyor system controlled by PLC was turned on. Then the sample tray placed on the conveyor belt. When the sample tray was passed to the first photo sensor, the belt would be stopped in order to heat for 50 seconds by stimulating light source. Afterward, the conveyor belt would move the tray to the second photo sensor which was the position for acquiring thermal image by infrared thermography. This step spent time for 4 seconds, including cooling time of sample and thermal image processing. The thermal images were analyzed to detect foreign bodies in roasted coffee using Vision Builder Software AI 2013 (National Instruments) by using functions stimulate acquisition, extract RGB, filter image, threshold image and detect objects, respectively according to the flowchart as shown in Fig. 3. The analysis was divided into 2 parts. There was detecting of foreign bodies and counting the number of foreign bodies. Stimulate acquisition is used for exporting images into the program, extract RGB is used for converting images to 8 bits, filter the image is used for suppressing the high frequencies, threshold image is segmented color into 2 colors (black and white), and detect object is used for counting the number of foreign bodies.

B. *Estimation of cooling time for detecting foreign bodies*

This process for estimating a suitable cooling time after the roasted coffee beans was heated. The estimation was started by preparing the sample. After that the samples were heated for 50 seconds in order to increase the temperature of the samples around 40°C by stimulating light source. Then the samples were cooled down for 24 seconds in the ambient temperature and infrared thermography camera will be used to record thermal image into video files. Finally, the roasted coffee beans and stones were analyzed the temperature by

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ISBN: 978-988-14047-3-2
ISSN: 2078-0958 (Print); ISSN: 2078-0966 (Online)

using FLIR IR Camera Player software. The experiment was repeated for five times.

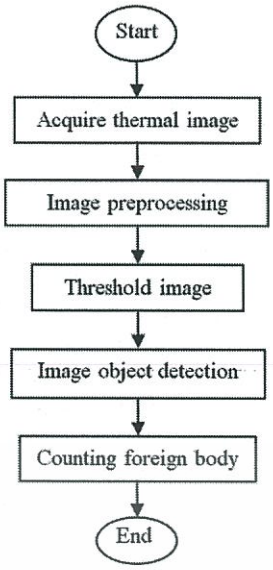


Fig. 3. Image processing for detecting foreign bodies

C. *Emissivity measurement*

From the previous work [14], we applied this method for measuring the emissivity of roasted coffee bean and stone. In this emissivity measurement, the sample tray and the black tape were placed on an aluminum plate which was heated by water in a hot water bath for 85°C. The emissivity value shown on the thermal camera was adjusted the temperature to the temperature on the thermal camera was equal to the temperature at the thermocouple.

IV. Results and Discussion

The experiment results were divided into 3 parts: foreign bodies detection procedure, estimation of cooling time for detecting foreign bodies and emissivity measurement, respectively.

The foreign body detection procedure included detecting of the foreign object and counting the number of foreign bodies. Thermal images have clearly shown the difference between roasted coffee beans and foreign bodies, even though the eyes could not distinguish at some parts. FLIR IR Camera Player software was acquired thermal images and analyzed the temperature. The optimal setting temperature for the level and the span of this experiment was 27°C - 47°C.

For the detection of foreign bodies, the experiment was done randomly for 200 times with the sample containing the foreign body and the roasted coffee. The testing result found that the proposed system could correctly detect the foreign bodies for 100%. The detection result from Vision Builder AI shows pass for pure roasted coffee and shows fail for detecting the foreign bodies as shown in Fig. 4.

However, counting the number of foreign bodies was found some errors. The samples in this experiment were added 1, 2, 3, 4, and 5 pieces of the foreign bodies, respectively and the experiment was done 10 times repeatedly. The result found error 2 times of the total 50 times. The examples of counting the number of foreign bodies have shown in Fig. 6.

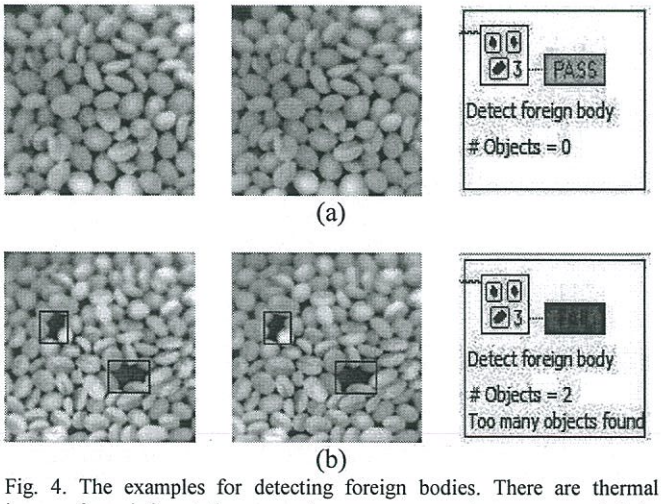


Fig. 4. The examples for detecting foreign bodies. There are thermal images from infrared thermography camera, gray images converted by FLIR IR Camera Player software and the result from the program. (a) The detection of stones in roasted coffee, there is no any foreign body, the program cannot detect foreign bodies. (b) The detection of stones in roasted coffee, the program can detect foreign bodies.

Fig. 5. Examples of roasted coffee beans and stones are mixed together. (a) 5 pieces of stones in roasted coffee, (b) 3 pieces of stones in roasted coffee and (c) 5 pieces of stones in roasted coffee

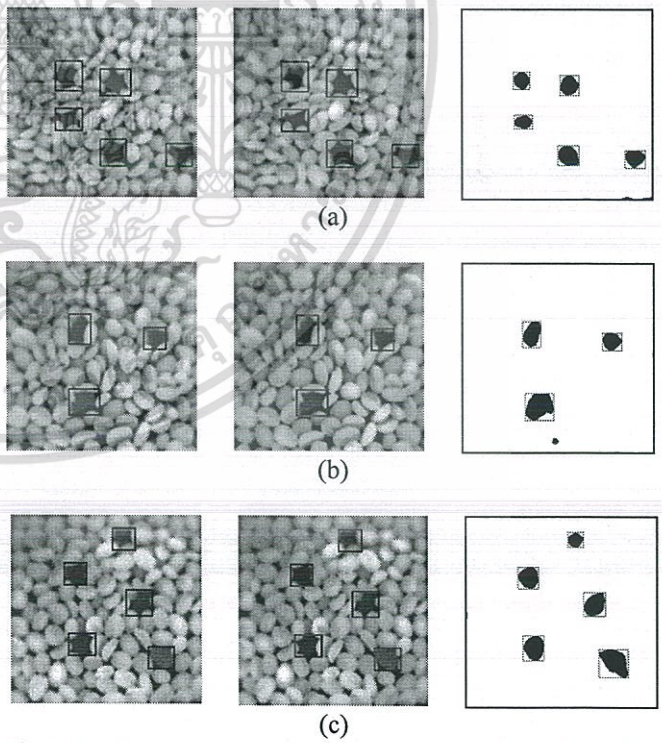


Fig. 6. The examples of counting the number of foreign bodies from Fig. 5. There are thermal images from infrared thermography camera, gray image converted from FLIR IR Camera Player software and the result from the program. (a) The detection of stone in roasted coffee, the program can count 5 from 5 pieces of foreign bodies. (b) The detection of stone in roasted coffee, the program can count 3 from 3 pieces of foreign bodies. (c) The detection of stone in roasted coffee, the program can count 5 from 5 pieces of foreign bodies.

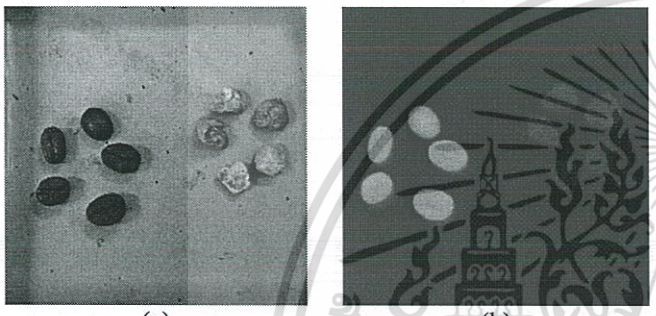
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ISBN: 978-988-14047-3-2
ISSN: 2078-0958 (Print); ISSN: 2078-0966 (Online)

The problem may be caused by the segmentation of the thermal image. The image processing algorithm cannot classify the difference between the roasted foreign bodies and sample tray, therefore, the function of counting object is mistaken the operation.

Fig. 7 shows gray images recorded from the infrared thermography. The intensity level relating to the temperature, low temperature was dark gray and high temperature was bright gray.

The estimation result of cooling time for detecting foreign bodies has shown in Fig. 8. In x-axis represents the time (seconds) and the y-axis represents the temperature (°C). After stimulating with same heating time, the temperature of the stones was constant, but the temperature of the roasted coffee beans was gradually declined because both materials had different emissivity. The suitable time for detection was the first second which the tray was moved to the position of the infrared camera due to the temperature between roasted coffee beans and stones was the most difference.



(a) (b)

Fig. 7. The image and gray image of sample tray is placed with 5 pieces of roasted coffee beans and 5 pieces of stones.

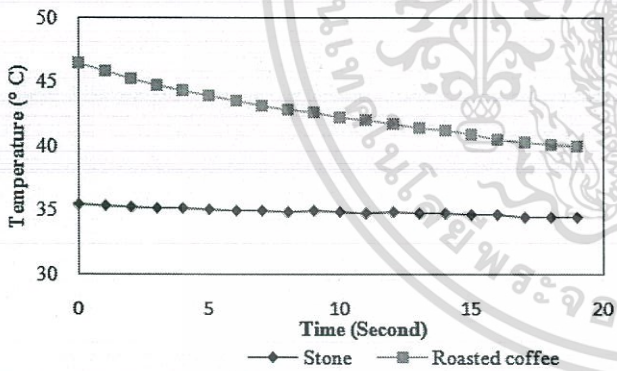


Fig. 8. Temperature curves of the sample in cooling times after the coffee beans and stones are heated about 4 seconds. In x-axis represents the time (seconds) and the y-axis represents the temperature (° C).

Table I shows emissivity of roasted coffee and stone from the experiment. The results of the emissivity were the difference between roasted coffee bean and stone. After the samples were stimulated, the surface temperature of the samples was different because of the thermal properties.

TABLE I
EMISSIVITY OF THE MATERIAL

Material	Emissivity
Roasted coffee	0.75–0.78
Stone	0.80–0.85

V. CONCLUSION

In this work, the detection of foreign bodies in roasted coffee was done by the principle of radiation from objects with different material properties such as emissivity and heat capacity. Consequently, the heat radiation from the sample surface and a foreign object surface is different. Therefore, the thermal image can be identified the contaminated objects from the roasted coffee beans by using active thermography. The testing and results of the system show that it can detect foreign bodies in roasted coffee beans accurately. However, it still has some problems caused by the thermal image processing. The result of experiment presents a clear comparison between roasted coffee and foreign bodies. This system can be improved to an automatic real-time system and this principle can apply to detect foreign bodies in other products as well.

REFERENCES

[1] A. Pongsak, "Coffee Production Status and Potential of Organic Arabica Coffee in Thailand", in *Assumption University : AU Journal of Technology*, June 7, 2015.

[2] S. Chintongprasert, A. Saekoe, "Potentiality to export coffee in Thailand to Asean", *journal of marketing and management of Rajamangala University of Technology Thanyaburi*, 2015.

[3] G.Ginesu, D.D. Giusto, V.Margner and P. Meinlshmidi, "Dection of Foreign Bodies in Food by Thermal Image Processing". *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 51, pp. 480-490, 2004.

[4] D. Giesen. (2013, March 17). Coffee destoner [Online]. Avalable: http://www.giesencoffeeroasters.eu/roaster-equipment/coffee-destoner

[5] J. M. Low, W. S. Maughan, S. C. Bee and M. J. Honeywood, "Sorting by colour in the food industry", *Woodhead Publishing Limited and CRC Press LLC*, London, 2011.

[6] L. Senni, M. Ricci, A. Palazzi, P. Burrascano, P. Pennisi and F. Ghirelli, "On-line automatic detection of foreign bodies in biscuits by infrared thermography and image processing, *Journal of Food Engineering 2014*, vol. 128, pp. 146–156, Dec. 2013.

[7] S. Bagavathiappan, B.B. Lahiri, T. Saravanan, John Philip and T. Jayakumar, "Infrared thermography for condition monitoring – A review", *Infrared Physics & Technology*, vol. 60, pp. 35–55, September 2013.

[8] J. Trefil, "The Nature of Science: An A-Z Guide to the Laws and Principles Governing Our Universe". *Houghton Mifflin Harcourt.*, 2003, pp. 377.

[9] M. Quinn, "Thermal Radiative Transfer and Properties (Book style)", *John Wiley & Sons.*, 1992, pp.56.

[10] Chelladurai, V., Jayas, D. S. and White, N. D. G. 2010. "Thermal imaging for detecting fungal infection in stored wheat". *Journal of Stored Products*, vol. 46, pp. 174-179, 2010.

[11] S. Benzerrouk, "Active and Passive Thermography for the detection of defects in green-state poedermetallic compacts", Degree of Doctor of Philosophy, Worcester Polytechnic Institute, August 2011.

[12] F.P. Incropera, D.P. DeWitt, T.L. Bergman, and A.S. Lavine, Fundamentals of Heat and Mass Transfer, 6th ed., John Wiley & Sons, 2007, pp. 746–747.

[13] P. Meinlschmidt, "Thermographic detection of defects in wood and wood-based materials", *14th international Symposium of nondestructive testing of wood*, Hannover, Germany, May 2nd -4th, 2005.

[14] K. Rakrueangdet, N. Nunak,T. Suesut, and E. Sritham, "Emissivity Measurements of Reflective Materials using Infrared Thermography", *the International MultiConference of Engineers and Computer Scientists 2016*, vol. 1 , March 16 - 18, 2016.

[15] FLIR A315 [Online]. Avalable: http://www.flir.co.uk/automation/display/?id=41955

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ISBN: 978-988-14047-3-2
ISSN: 2078-0958 (Print); ISSN: 2078-0966 (Online)

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล นางสาว อภิชญา เงินสด
ที่อยู่ บ้านเลขที่ 2/152 ถนน มณฑา อำเภอตาคลี จังหวัดนครสวรรค์ 60140

ประวัติการศึกษา

2558 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมการวัดคุม
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ประสบการณ์การทำงานและความเชี่ยวชาญ

- งานวิจัยเรื่อง การตรวจจับสิ่งแปลกปลอมในข้าวด้วยเทคนิคแอคทีฟเทอร์โมกราฟฟี
- งานวิจัยเรื่อง การตรวจจับสิ่งแปลกปลอมในเมล็ดกาแฟดิบด้วยเทคนิคแอคทีฟเทอร์โมกราฟฟี
- งานวิจัยเรื่อง การตรวจจับสิ่งแปลกปลอมในข้าวโดยใช้การประมวลผลภาพถ่ายความร้อนผสมกับภาพสองมิติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้