

รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

การตรวจจับวัตถุแปลกปลอมในอาหารด้วยการประมวลผลภาพถ่ายความร้อน
Foreign Bodies Detection in Food using Thermography

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นงภัทรา หนูนาค
รองศาสตราจารย์ ดร.ทวีพล ชี้อัตย์

ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจากเงินงบประมาณเงินรายได้ ประจำปีงบประมาณ 2556
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง



รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

การตรวจจับวัตถุแปลกปลอมในอาหารด้วยการประมวลผลภาพถ่ายความร้อน
Foreign Bodies Detection in Food using Thermography

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นวกัศรา หนูนาค
รองศาสตราจารย์ ดร.ทวีพล ชี้อัสตย์

ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจากเงินงบประมาณเงินรายได้ ประจำปีงบประมาณ 2556
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ชื่อโครงการ การตรวจจับวัตถุแปลกปลอมในอาหารด้วยการประมวลผลภาพถ่ายทางความร้อน
แหล่งเงิน งบประมาณเงินรายได้ คณะวิศวกรรมศาสตร์
ประจำปีงบประมาณ 2556 จำนวนเงินที่ได้รับการสนับสนุน 80,000 บาท
ระยะเวลาทำการวิจัย 1 ปี ตั้งแต่ 1 ตุลาคม 2555 ถึง 30 กันยายน 2556
หัวหน้าโครงการวิจัย ผศ.ดร.นวกัทรာ หนูนาค
สาขาวิชาวิศวกรรมอาหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ผู้ร่วมโครงการวิจัย รศ.ดร.ทวีพล ชื้อสัตย์
สาขาวิชาวิศวกรรมการวัดและควบคุม คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

บทคัดย่อ

โครงการวิจัยนี้นำเสนอวิธีการตรวจสอบสิ่งแปลกปลอมที่ปนมากับอาหารโดยใช้เทคนิคภาพถ่ายทางความร้อน ซึ่งในงานวิจัยนี้ตรวจสอบสิ่งแปลกปลอมที่ปนมากับเมล็ดพืช โดยเลือกเมล็ดพืช 3 ชนิด ได้แก่ ถั่วลิสง ถั่วเหลือง ถั่วแดง และสิ่งแปลกปลอม 4 ชนิด ได้แก่ เศษหิน เศษไม้ ลูกเหล็ก เศษพลาสติก มาใช้เป็นตัวช่วยในการทดลอง โปรแกรม MATLAB ที่พัฒนาขึ้นสามารถตรวจสอบสิ่งแปลกปลอมได้ เหมาะสำหรับสิ่งแปลกปลอมและเมล็ดพืชที่มีความจุความร้อนจำเพาะแตกต่าง โดยความแตกต่างของสีไม่มีผลต่อความสามารถในการตรวจสอบ

คำสำคัญ : สิ่งแปลกปลอม เมล็ดพืช ภาพถ่ายทางความร้อน

Research Title: Foreign Bodies Detection in Food using Thermography

Researcher: 1) Navaphattra Nunak

Department of Food Engineering, Faculty of Engineering
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

2) Taweepol Suesut

Department of Instrumentation and Control Engineering,
Faculty of Engineering
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

ABSTRACT

This research proposes the method for detecting the foreign bodies in grains using Thermal Image (TI). Three types of grains (peanuts, soybeans and kidney beans) and four types of foreign bodies (stones, wood scraps, iron balls, and plastic scraps) were chosen to test in the experiment. The foreign bodies in grains could be detected by the developed program from MATLAB software. It can be concluded that the image processing technique with TI is suitable for foreign bodies that have a difference of heat specific values. The color contrast between foreign bodies and grains did not effect to the capability of this technique.

Keywords: Foreign bodies, Grains, Thermal image

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ นายคณิน จันท์หลี นายวรนนท์ ฉัตรวิริยะเลิศ และนางสาวอัญชลี ภูทอง นักศึกษา สาขาวิชาวิศวกรรมอาหาร สำหรับการให้ความร่วมมือเป็นอย่างดีในการวิจัย และ “การวิจัยครั้งนี้ ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง จากแหล่งทุนงบประมาณเงินรายได้ คณะวิศวกรรมศาสตร์ ประจำปีงบประมาณ พ.ศ.2556 สำหรับการจัดสรร ทุนอุดหนุนการวิจัย”

นวกัทรรา หนูนาค
ทวีพล ชี้อสัตย์

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	VI
สารบัญรูปภาพ	VII
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย	2
1.4 วิธีดำเนินการวิจัย	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	3
2.1 เมล็ดพืช	3
2.2 การตรวจสอบและคัดแยกสิ่งแปลกปลอม	4
2.2.1 การตรวจสอบและคัดแยกสิ่งแปลกปลอมโดยใช้แรงงานคน	4
2.2.2 การตรวจสอบและคัดแยกสิ่งแปลกปลอมด้วยการใช้วิธีทางกล	4
2.2.3 การตรวจสอบและคัดแยกสิ่งแปลกปลอมด้วยการประมวลผลภาพ	5
2.2.4 การตรวจสอบและคัดแยกสิ่งแปลกปลอมด้วยการประมวลผลภาพ ถ่ายความร้อน	6
2.3 ภาพถ่ายความร้อน	7
2.3.1 การแผ่รังสีความร้อน	7
2.3.2 กล้องถ่ายภาพความร้อน	9
2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	9
บทที่ 3 วิธีการทดลอง	11
3.1 การเตรียมวัสดุ	11
3.1.1 วัสดุทดลอง	11
3.1.2 การหาความจุความร้อนจำเพาะ	11
3.1.3 การหาความชื้น	13
3.2 ชุดอุปกรณ์สำหรับการถ่ายภาพความร้อน	13
3.3 การหาเวลาสำหรับการให้ความร้อนเมล็ดพืชและสิ่งแปลกปลอม	14
3.4 การถ่ายภาพความร้อนเพื่อตรวจสอบสิ่งแปลกปลอม	15
3.5 การคำนวณพลังงานของรังสีอินฟราเรดที่กล้องถ่ายภาพร้อน	15
3.5 การพัฒนาและทดสอบโปรแกรมเพื่อตรวจสอบสิ่งแปลกปลอมด้วยภาพถ่าย ความร้อน	15

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 ผลการวิจัย	18
4.1 ความชื้นและความจุความร้อนจำเพาะ	18
4.2 โปรแกรมสำหรับตรวจสอบสิ่งแปลกปลอมด้วยภาพถ่ายและภาพถ่ายความร้อน	18
4.3 เวลาให้ความร้อนสำหรับตรวจสอบสิ่งแปลกปลอมด้วยภาพถ่ายความร้อน	20
4.4 พลังงานที่กล้องถ่ายภาพความร้อนได้รับจากเมล็ดพืชและสิ่งแปลกปลอม	28
4.5 ผลการตรวจสอบสิ่งแปลกปลอมด้วยโปรแกรม	28
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	44
5.1 สรุปผลการวิจัย	44
5.2 ข้อเสนอแนะ	44
บรรณานุกรม	45
ข้อมูลประวัติผู้วิจัย	48

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ตัวอย่างสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนของสิ่งแปลกปลอมและเมล็ดพืช	7
2.2 ตัวอย่างความจุความร้อนจำเพาะของสิ่งแปลกปลอมและเมล็ดพืช	7
3.1 ข้อมูลพื้นฐานของวัสดุที่นำมาใช้ในการทดลอง	12
3.2 ส่วนประกอบของชุดอุปกรณ์สำหรับการถ่ายภาพความร้อน	14
4.1 ความจุความร้อนจำเพาะของเมล็ดพืชและสิ่งแปลกปลอม	18
4.2 สูตรสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อน ความจุความร้อนจำเพาะ มวลวัตถุ พื้นที่ และพลังงานที่แผ่ออกเมื่อได้รับความร้อน 6 วินาที	30
4.3 ผลการเปรียบเทียบพื้นที่เฉลี่ย 3 ครั้ง ที่ได้จากการวัดและพื้นที่ที่ได้จากโปรแกรมตรวจสอบสิ่งแปลกปลอมด้วยภาพถ่ายความร้อน	31
4.5 ความสามารถในการตรวจสอบสิ่งแปลกปลอมด้วยภาพถ่ายและภาพถ่ายความร้อน	32

สารบัญรูปรูปภาพ

รูปที่	หน้า
2.1 เมล็ดธัญชาติ	3
2.2 การคัดแยกสิ่งแปลกปลอมโดยใช้แรงงานคน	4
2.3 (ก) เครื่องคัดแยกถั่วเหลือง (ข) ถั่วเหลืองและสิ่งแปลกปลอมในถังเก็บเมล็ด	5
2.4 (ก) หลักการทำงานของเครื่องคัดแยกสี (ข) เมล็ดพืชที่ยังไม่ถูกแยก และเมล็ดพืชถูกแยกแล้ว	6
2.5 สเปคตรัมการแผ่รังสีในย่านต่างๆ	8
2.6 การแผ่รังสีจากพื้นผิวแปรผันตามทิศทาง	8
2.7 รังสีอินฟราเรดทั้งหมดที่แผ่ออกจากพื้นผิววัตถุจริง	8
2.8 ระบบการวัดอุณหภูมิโดยอาศัยการแผ่รังสีอินฟราเรดของวัตถุ	10
3.1 เมล็ดเมล็ดพืชและสิ่งแปลกปลอม	11
3.2 ขั้นตอนการหาความจุความร้อนจำเพาะ	13
3.3 ชุดอุปกรณ์สำหรับการถ่ายภาพความร้อน	14
3.4 การเรียงเมล็ดพืชและสิ่งแปลกปลอมในภาชนะ	15
3.5 ขั้นตอนการประมวลผลภาพสำหรับตรวจสอบสิ่งแปลกปลอมด้วยภาพถ่าย และภาพถ่ายความร้อน	16
3.6 การปรับภาพเป็นสีเทาด้วยการแยกโทนสี	17
4.1 โปรแกรมสำหรับตรวจสอบสิ่งแปลกปลอมด้วยภาพถ่ายความร้อน	19
4.2 การประมวลผลภาพสำหรับตรวจสอบสิ่งแปลกปลอมด้วยภาพถ่ายความร้อน	20
4.3 ค่า Absolute difference of average gray level กับ เวลาให้ความร้อน	23
4.4 ภาพถ่ายและภาพถ่ายความร้อนถั่วลิสงจำนวน (ก) 20 เมล็ด (ข) 30 เมล็ด (ค) 40 เมล็ด (ง) 50 เมล็ด และ (จ) 60 เมล็ด โดยมีเศษหินจำนวน 20 ชิ้น	32
4.5 ภาพถ่ายและภาพถ่ายความร้อนถั่วลิสงจำนวน (ก) 20 เมล็ด (ข) 30 เมล็ด (ค) 40 เมล็ด (ง) 50 เมล็ด และ (จ) 60 เมล็ด โดยมีเศษพลาสติกจำนวน 20 ชิ้น	33
4.6 ภาพถ่ายและภาพถ่ายความร้อนถั่วเหลืองจำนวน (ก) 20 เมล็ด (ข) 30 เมล็ด (ค) 40 เมล็ด (ง) 50 เมล็ด และ (จ) 60 เมล็ด (ฉ) 70 เมล็ด (ช) 80 เมล็ด โดยมีเศษหินจำนวน 20 ชิ้น	33
4.7 ภาพถ่ายและภาพถ่ายความร้อนถั่วเหลืองจำนวน (ก) 20 เมล็ด (ข) 30 เมล็ด (ค) 40 เมล็ด (ง) 50 เมล็ด และ (จ) 60 เมล็ด (ฉ) 70 เมล็ด (ช) 80 เมล็ด โดยมีเศษพลาสติกจำนวน 20 ชิ้น	34
4.8 ภาพถ่ายและภาพถ่ายความร้อนถั่วแดงจำนวน (ก) 20 เมล็ด (ข) 30 เมล็ด (ค) 40 เมล็ด และ (ง) 50 เมล็ด โดยมีเศษพลาสติกจำนวน 20 ชิ้น	34
4.9 ภาพถ่ายและภาพถ่ายความร้อนถั่วแดงจำนวน (ก) 20 เมล็ด (ข) 30 เมล็ด (ค) 40 เมล็ด และ (ง) 50 เมล็ด โดยมีเศษไม้ 20 ชิ้น	35

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.23 ภาพถ่ายและภาพถ่ายความร้อนถั่วเหลืองที่วิเคราะห์ด้วยโปรแกรมจำนวน (ก) 20 เมล็ด (ข) 30 เมล็ด (ค) 40 เมล็ด (ง) 50 เมล็ด (จ) 60 เมล็ด (ฉ) 70 เมล็ด และ (ฉ) 80 เมล็ด โดยมีลูกเหล็ก 20 ชิ้น	41
4.24 ภาพถ่ายและภาพถ่ายความร้อนถั่วลิสงที่วิเคราะห์ด้วยโปรแกรมจำนวน (ก) 20 เมล็ด (ข) 30 เมล็ด (ค) 40 เมล็ด (ง) 50 เมล็ด และ (จ) 60 เมล็ด โดยมีเศษไม้ 20 ชิ้น	41
4.25 ภาพถ่ายและภาพถ่ายความร้อนถั่วแดงที่วิเคราะห์ด้วยโปรแกรมจำนวน (ก) 20 เมล็ด (ข) 30 เมล็ด (ค) 40 เมล็ด และ (ง) 50 เมล็ด โดยมีเศษหิน 20 ชิ้น	42
4.26 ภาพถ่ายและภาพถ่ายความร้อนถั่วแดงที่วิเคราะห์ด้วยโปรแกรมจำนวน (ก) 20 เมล็ด (ข) 30 เมล็ด (ค) 40 เมล็ด และ (ง) 50 เมล็ด โดยมีเศษหิน 20 ชิ้น	42
4.27 ภาพถ่ายและภาพถ่ายความร้อนถั่วเหลืองที่วิเคราะห์ด้วยโปรแกรมจำนวน (ก) 20 เมล็ด (ข) 30 เมล็ด (ค) 40 เมล็ด (ง) 50 เมล็ด (จ) 60 เมล็ด (ฉ) 70 เมล็ด และ (ฉ) 80 เมล็ด โดยมีเศษไม้ 20 ชิ้น	42
4.28 ภาพความร้อนการกระจายตัวของตัวอย่าง (ก) ปริมาณเมล็ดพืช 20 เมล็ด และ (ข) ปริมาณเมล็ดพืช 80 เมล็ด	43
4.29 ภาพความร้อนของลูกเหล็กและถั่วแดง	43

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

เมล็ดพืชเป็นสินค้าเศรษฐกิจที่สำคัญของประเทศ โดยในปี พ.ศ. 2555 มีมูลค่าการส่งออกกว่า 100 ล้านบาท คิดเป็นร้อยละ 20 ของผลิตผลทางการเกษตรทั้งหมด (กรมศุลกากร, 2555) สำหรับขั้นตอนการเก็บเกี่ยวเมล็ดพืช อาจมีสิ่งแปลกปลอม เช่น เศษหิน เศษไม้ ปนมากับเมล็ดพืชในระหว่างกระบวนการตากเพื่อลดความชื้นและกระบวนการนวด (กรมส่งเสริมการเกษตร, มปป.) ซึ่งถ้าสิ่งแปลกปลอมเหล่านี้มีขนาดใกล้เคียงกับเมล็ดพืชจะไม่สามารถคัดแยกโดยใช้ตะแกรงร่อนตามปกติได้ เช่น การคัดแยกหินกับถั่วเหลืองเพื่อส่งขายในกระบวนการผลิตน้ำมัน หากถั่วเหลืองมีสิ่งแปลกปลอมเกินกว่า 5 เปอร์เซ็นต์ จะไม่สามารถนำไปขายได้ ทำให้ต้องขายเป็นถั่วเหลืองเกรดต่ำราคาถูกลง (กรมการค้าภายใน, 2546) สำหรับเมล็ดพืชที่ส่งขายในรูปแบบการบรรจุในบรรจุภัณฑ์ เมล็ดพืชอาจต้องผ่านขั้นตอนการคัดแยกขนาดและคุณภาพ รวมถึงขั้นตอนการอบเพื่อลดความชื้น ซึ่งในระหว่างกระบวนการดังกล่าวอาจมีสิ่งแปลกปลอม เช่น เศษโลหะจากเครื่องจักรที่ใช้ในกระบวนการและเศษพลาสติกที่มากับถุงบรรจุภัณฑ์ ปนมากับเมล็ดพืช ทำให้เมล็ดพืชที่ส่งออกสูญเสียคุณภาพที่ควรเป็น และปัจจุบันผู้บริโภคมีความใส่ใจต่อสุขภาพมากขึ้น ประกอบกับผู้ประกอบการต้องการเพิ่มคุณภาพและศักยภาพการส่งออก ทำให้ผู้ประกอบการหันมาใส่ใจกับขั้นตอนการตรวจสอบและการคัดแยกสิ่งแปลกปลอมที่ปนมากับเมล็ดพืชมากยิ่งขึ้น เพื่อให้ได้เมล็ดพืชที่มีคุณภาพดีปราศจากสิ่งแปลกปลอม

วิธีการตรวจสอบและคัดแยกเมล็ดพืชกับสิ่งแปลกปลอมทำได้หลายวิธี ได้แก่ การใช้แรงงานคน การใช้วิธีทางกล การใช้วิธีเชิงแสง เป็นต้น โดยการใช้แรงงานคนเป็นวิธีที่สามารถตรวจสอบและคัดแยกสิ่งแปลกปลอมในขั้นตอนเดียวกัน เหมาะสำหรับเมล็ดพืชที่มีขนาดใหญ่ เช่น การแยกเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์และเมล็ดอัลมอลด์ (ธริชตรี และ เรืองชัย, 2531; Ledbetter, 2007) แต่วิธีนี้ต้องคำนึงถึงอายุของคนคัดแยก สภาพแวดล้อมในพื้นที่ปฏิบัติงาน และระยะเวลาในการทำงานอย่างต่อเนื่อง (วินิต และคณะ, 2545) สำหรับการใช่วิธีทางกลโดยส่วนใหญ่อาศัยแรงงานคนสำหรับการคัดเลือกอุปกรณ์ที่เหมาะสมสำหรับการคัดแยก เช่น ชนิดของตะแกรงร่อน ขนาดของตะแกรงร่อน เป็นต้น การคัดแยกด้วยวิธีทางกลเป็นวิธีที่เหมาะสมสำหรับเมล็ดพืชที่มีคุณสมบัติทางกายภาพต่างกัน (ธวัชชัย และชัยยันต์, 2549; ชัยยันต์, 2555) สำหรับวิธีทางกลมีหลายวิธี เช่น การใช้ลมเป่าสิ่งแปลกปลอมที่มีน้ำหนักเบาออก การใช้ตะแกรงร่อน และการใช้สมบัติความถ่วงจำเพาะ ซึ่งวิธีเหล่านี้มีข้อจำกัดคือ หากเมล็ดพืชและสิ่งแปลกปลอมมีลักษณะทางกายภาพที่ใกล้เคียงกันจะทำให้ไม่สามารถแยกสิ่งแปลกปลอมออกจากเมล็ดพืชได้ เช่น การแยกดินและหินที่มีขนาดใกล้เคียงกับถั่วเหลือง (ณัฐภูมิ และทวีชัย, 2551; ฌโนมขวัญ และคณะ, 2546)

สำหรับการตรวจสอบและคัดแยกสิ่งแปลกปลอมด้วยวิธีการประมวลผลภาพ (Image processing) ซึ่งเป็นวิธีที่นิยมใช้เนื่องจากสามารถทำงานได้อย่างรวดเร็วและแม่นยำ (Mollazade et al., 2012) ปัจจุบันนำไปประยุกต์ใช้กับเครื่องคัดแยกสี (Color sorter) โดยเครื่องคัดแยกประเภทนี้ทำงานโดยใช้หลักการประมวลผลภาพสี (Color image) ซึ่งได้จากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในย่านที่ตามนุษย์มองเห็น (Visible region) แล้วส่งผลที่ได้ไปควบคุมการทำงานของเครื่องอัตโนมัติให้ยิงลมใส่สิ่งแปลกปลอมที่โปรแกรมประมวลผลได้ อย่างไรก็ตามวิธีนี้มีข้อจำกัดในการตรวจสอบ คือ หากเมล็ด

พืชและสิ่งแปลกปลอมมีสีที่ใกล้เคียงกันจะทำให้ประสิทธิภาพในการคัดแยกลดลง (Bayram and Oner, 2006) เช่น การคัดแยกข้าวเจ้ากับข้าวเหนียว จึงได้มีนักวิจัยบางกลุ่มเสนอการนำภาพถ่ายทางความร้อน (Thermal Image) ซึ่งได้จากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในย่านอินฟราเรด (Infrared region) มาใช้สำหรับการตรวจสอบสิ่งแปลกปลอม เพื่อลดข้อจำกัดการทำงานของเครื่องคัดแยกสีดังกล่าว ซึ่งภาพถ่ายทางความร้อนตรวจสอบโดยอาศัยความแตกต่างของสมบัติทางความร้อนของเมล็ดพืชและสิ่งแปลกปลอม เช่น หิน กระจาดแข็ง เศษโลหะ และเศษไม้ กับเมล็ดพืช เช่น เมล็ดอัลมอนด์ ลูกเกด และถั่ว (Ginesu et al., 2004) แต่ประสิทธิภาพการคัดแยกด้วยวิธีนี้จะลดลงหากเมล็ดพืชและสิ่งแปลกปลอมมีสมบัติทางความร้อนที่ใกล้เคียงกัน สำหรับการตรวจสอบด้วยวิธีการนี้ยังดำเนินการในระดับงานวิจัยและยังไม่มีการพัฒนาโปรแกรมเฉพาะสำหรับงานดังกล่าว

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงนำเสนอวิธีการตรวจสอบสิ่งแปลกปลอมที่ปนมากับเมล็ดพืชด้วยการพัฒนาโปรแกรมประมวลผลภาพถ่ายทางความร้อนซึ่งได้จากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในย่านอินฟราเรด

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

เพื่อพัฒนาโปรแกรมประมวลผลภาพถ่ายความร้อนสำหรับตรวจสอบสิ่งแปลกปลอมที่ปนมากับเมล็ดพืช

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

พัฒนาโปรแกรม MATLAB สำหรับตรวจสอบสิ่งแปลกปลอมที่ปนมากับเมล็ดพืชด้วยภาพถ่ายความร้อน โดยภาพถ่ายความร้อนอาศัยความแตกต่างของสมบัติทางความร้อนในการตรวจสอบ สำหรับเมล็ดพืชและสิ่งแปลกปลอมที่ใช้ ได้แก่ ถั่วลิสง ถั่วแดง ถั่วเหลือง เศษหิน เศษไม้ ลูกเหล็ก และเศษพลาสติก ตามลำดับ

1.4 วิธีดำเนินการวิจัย

- 1) สืบค้นและรวบรวมข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับสมบัติทางความร้อนของเมล็ดพืชและสิ่งแปลกปลอม
- 2) ออกแบบและสร้างชุดอุปกรณ์ทดลองสำหรับการตรวจสอบสิ่งแปลกปลอม
- 3) พัฒนาโปรแกรมประมวลผลผลจากภาพถ่ายความร้อนสำหรับตรวจสอบสิ่งแปลกปลอม
- 4) ทำการทดลอง วิเคราะห์ และสรุปผลการวิจัย

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ได้โปรแกรมและวิธีการตรวจสอบสิ่งแปลกปลอมด้วยภาพถ่ายความร้อน

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 เมล็ดพืช

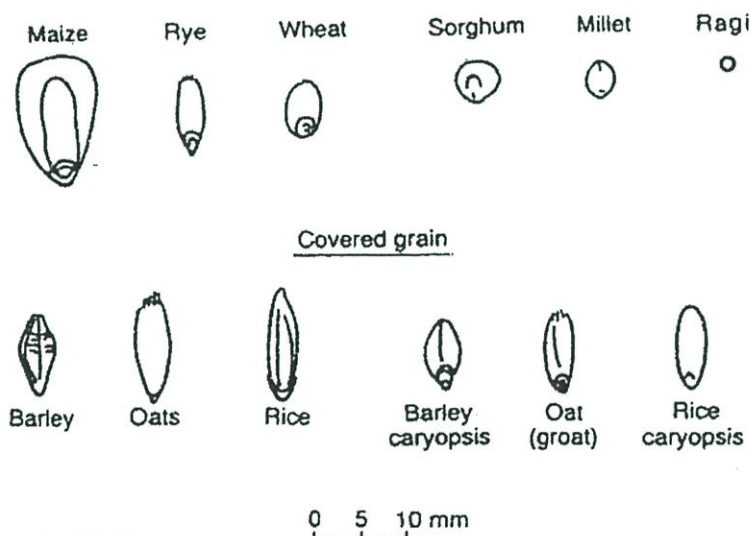
เมล็ดพืช (Grain) โดยทั่วไป หมายถึง เมล็ดพืชที่ใช้ประโยชน์ในการบริโภค หรือเป็นวัตถุดิบ ในการอุตสาหกรรมไม่ได้ใช้ทำพันธุ์ แบ่งออกเป็น 4 กลุ่มได้แก่

1. จำพวกธัญชาติ หมายถึงเมล็ดของธัญพืช (Cereal) แบ่งเป็น 2 ประเภท คือ ชนิดที่ไม่มีเปลือกแข็งหุ้มเมล็ด (Naked caryopsis) เช่น ข้าวสาลี (Wheat) ข้าวโพด (Maize) ข้าวไรย์ (Rye) และชนิดที่มีเปลือกแข็งหุ้มเมล็ด (Covered caryopsis) เช่นข้าวเจ้า (Rice) ข้าวบาร์เลย์ (Barley) และข้าวโอต (Oat) แสดงดังรูปที่ 2.1

2. จำพวกเมล็ดถั่ว (Legumes หรือ Beans) เช่น ถั่วลิสง ถั่วเหลือง ถั่วแดง และถั่วเขียว

3. จำพวกเมล็ดเปลือกแข็ง (Nuts) เช่น เม็ดมะม่วงหิมพานต์ เกาลัด และอัลมอนด์

4. จำพวกเมล็ดเปลือกนิ่ม (Seeds) เช่น เมล็ดแตงโต เมล็ดฟักทอง และเมล็ดทานตะวัน



รูปที่ 2.1 เมล็ดธัญชาติ

ที่มา: Kent and Evers, 1994

สำหรับเมล็ดพืชที่สำคัญในประเทศไทย ได้แก่ ข้าว ถั่วเหลือง ถั่วเขียว ถั่วแดง และถั่วลิสง โดยในปี พ.ศ. 2550 มีปริมาณการส่งออกประมาณ 44.92 ล้านตันต่อปี คิดเป็นมูลค่า 250,000 - 300,000 ล้านบาท เมล็ดพืชที่มีความสำคัญรองลงมาได้แก่ ข้าวโพด มีมูลค่าส่งออก ประมาณ 180,000 - 200,000 ล้านบาทต่อปี (สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร, 2555) การปฏิบัติหลังการเก็บเกี่ยวเมล็ดพืชหลังจากการลดความชื้นและนวดแล้ว จำเป็นต้องมีตรวจสอบและคัดแยกสิ่งแปลกปลอมที่มักปนมาในขั้นตอนดังกล่าว เช่น เศษฟาง เศษดิน หิน กรวด ทราย เป็นต้น เพื่อให้ได้เมล็ดพืชที่มีความสะอาด ดังนั้นการตรวจสอบและคัดแยกจึงเป็นสิ่งจำเป็น และมีความสำคัญเป็นอันดับแรก ๆ เนื่องจากในระบบการซื้อขายพิจารณาราคาของเมล็ดพืช จากปัจจัยสองประการคือ ความชื้น และปริมาณสิ่งแปลกปลอม ถ้าเมล็ดพืชมีปริมาณสิ่งแปลกปลอมและความชื้นสูงเกินกว่าที่

กำหนด ส่งผลให้ระยะเวลาในการเก็บรักษาและราคาของเมล็ดพืชต่ำลง โดยความชื้นปลอดภัยในการเก็บรักษาเมล็ดพืช คือ 15% (สุนีย์, 2555) นอกจากนี้เมล็ดพืชที่ส่งขายในรูปแบบบรรจุภัณฑ์ ต้องผ่านขั้นตอนการคัดแยกขนาดและคุณภาพ ซึ่งในระหว่างกระบวนการดังกล่าวอาจมีสิ่งแปลกปลอม เช่น เศษโลหะจากเครื่องจักรที่ใช้ในกระบวนการ และเศษพลาสติกที่มากับถุงบรรจุภัณฑ์ ปนมากับเมล็ดพืชทำให้เมล็ดพืชที่ส่งออกสูญเสียคุณภาพที่ควรเป็น

2.2 การตรวจสอบและคัดแยกสิ่งแปลกปลอม

ขั้นตอนการตรวจสอบและคัดแยกสิ่งแปลกปลอมที่ปนมากับเมล็ดพืชเป็นขั้นตอนหนึ่งที่สำคัญต่อการแบ่งเกรดคุณภาพของผลิตผล โดยเฉพาะอย่างยิ่งการแบ่งเกรดผลิตผลทางการเกษตรเพื่อการส่งออก วิธีการตรวจสอบและคัดแยกสิ่งแปลกปลอมออกจากเมล็ดพืชมีหลายวิธี ได้แก่ การใช้แรงงานคน การใช้วิธีทางกล การใช้วิธีการประมวลผลภาพ เป็นต้น

2.2.1 การตรวจสอบและคัดแยกสิ่งแปลกปลอมโดยใช้แรงงานคน

การตรวจสอบและคัดแยกสิ่งแปลกปลอมด้วยการใช้แรงงานคนแสดงดังรูปที่ 2.2 เป็นวิธีการตรวจสอบแบบดั้งเดิมและเป็นขั้นตอนแรกสำหรับการคัดแยก โดยส่วนใหญ่เป็นการตรวจสอบและคัดแยกในขั้นตอนเดียว เหมาะสำหรับเมล็ดพืชที่มีขนาดใหญ่ เช่น การแยกเปลือกเม็ดมะม่วงหิมพานต์และเมล็ดอัลมอลด์ (ธริชตรี และเรื่องชัย, 2531; Ledbetter, 2007) อย่างไรก็ตามวิธีนี้มีปัจจัยหลายอย่างที่ทำให้ประสิทธิภาพในการคัดแยกสิ่งแปลกปลอมลดลง ได้แก่ เพศ อายุ ระยะเวลาในการทำงาน สภาพแวดล้อมในการทำงาน และความเหนื่อยล้าของคนที่คัดแยกจากการทำงาน (Ginesu et al., 2003)

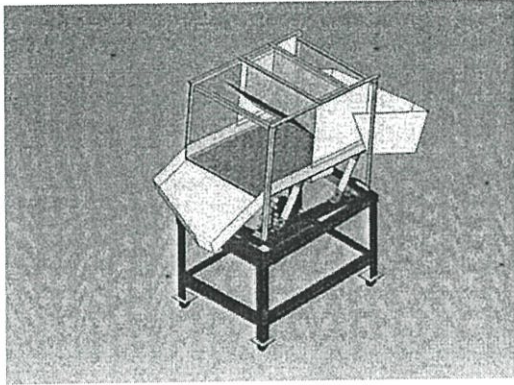


รูปที่ 2.2 การคัดแยกสิ่งแปลกปลอมโดยใช้แรงงานคน
ที่มา: ธริชตรี และเรื่องชัย, 2531

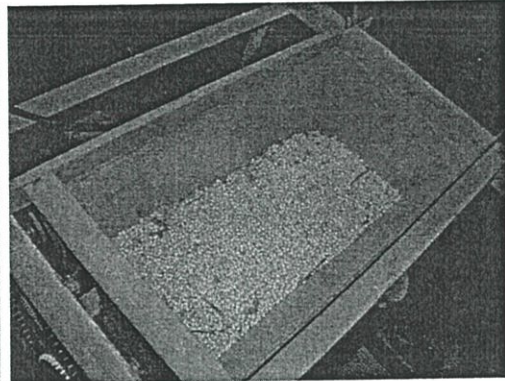
2.2.2 การตรวจสอบและคัดแยกสิ่งแปลกปลอมด้วยวิธีการใช้ทางกล

การตรวจสอบและคัดแยกด้วยวิธีทางกลมีหลายวิธี ได้แก่ การคัดแยกโดยใช้ลม เป่าสิ่งแปลกปลอมที่มีน้ำหนักเบาออกจากเมล็ดพืช เช่น เศษขากพืช เศษไม้ เมล็ดลีบหรือเมล็ดแตก ซึ่งวิธีนี้เป็นวิธีที่ง่ายในการคัดแยกสิ่งแปลกปลอม มีต้นทุนต่ำ อย่างไรก็ตามวิธีนี้ไม่เหมาะกับการคัดแยกเมล็ดพืชและสิ่งแปลกปลอมที่มีน้ำหนักเท่ากัน การคัดแยกโดยใช้ตะแกรงร่อน โดยต้องเลือกขนาดของตะแกรงร่อนให้มีขนาดใกล้เคียงกับเมล็ดพืชที่ต้องการคัดแยกสิ่งแปลกปลอมออก จากนั้น

เขย่าตะแกรงโดยที่เมล็ดพืชจะค้างอยู่บนตะแกรงและสิ่งแปลกปลอมจะรูดผ่านรูตะแกรงออกไป (บัณฑิต, 2549) สำหรับการคัดแยกด้วยวิธีนี้ได้มีการออกแบบเครื่องให้เหมาะสมกับชนิดของเมล็ด เช่น เครื่องคัดแยกถั่วลิสง เครื่องคัดแยกเมล็ดถั่วเหลืองโดยอาศัยความถ่วงจำเพาะ รูปที่ 2.3 (ก) ซึ่งสิ่งแปลกปลอมได้แก่ กรวด หิน ดิน ทราย เปลือก กิ่ง ก้าน และเมล็ดพืชอื่น ๆ รูปที่ 2.3 (ข)



(ก)



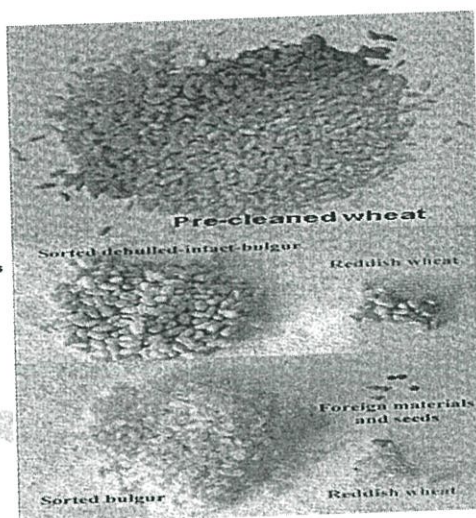
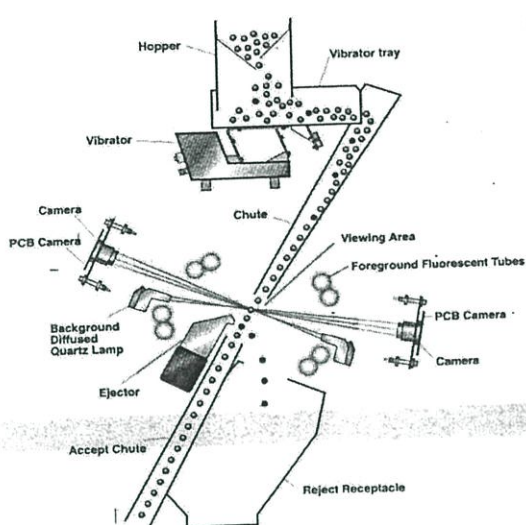
(ข)

รูปที่ 2.3 (ก) เครื่องคัดแยกถั่วเหลือง (ข) ถั่วเหลืองและสิ่งแปลกปลอมในถังเก็บเมล็ด
ที่มา: ถนอมขวัญ และคณะ, 2546

สำหรับกระบวนการคัดแยกด้วยวิธีเชิงกลนั้นส่วนใหญ่ นั้น อาจไม่สามารถแยกเมล็ดพืชและสิ่งแปลกปลอมที่มีสมบัติทางกายภาพใกล้เคียงกันได้ เช่น มีขนาดเท่ากัน มีน้ำหนักเท่ากัน หรือมีปริมาตรเท่ากัน ได้ ถึงแม้ว่าวิธีนี้จะมีการลงทุนต่ำ และประหยัดพลังงานมาก แต่ยังไม่สามารถคัดแยกสิ่งแปลกปลอมได้ทั้งหมด

2.2.3 การตรวจสอบและคัดแยกสิ่งแปลกปลอมด้วยการประมวลผลภาพสี

การตรวจสอบและคัดแยกสิ่งแปลกปลอมด้วยการประมวลผลภาพสี (Color Image) อาศัยคุณสมบัติของสีแต่ละสีที่แตกต่างกันของแต่ละวัตถุ นำมาใช้ทดแทนการคัดแยกด้วยสายตาของคนที่มีข้อจำกัดในการแบ่งแยกสีที่มีความหลากหลาย (จันทร์เพ็ญ, 2551) หลักการทำงานของเครื่องคัดแยกสี คือ เมื่อผลิตผลผ่านเข้าไปเข้าไปในพื้นที่ตรวจสอบแสง (Photo detector) และทำการตรวจสอบด้วยระบบกล้อง CCD (Charge Coupled Device) ทำหน้าที่เป็นเซ็นเซอร์ที่ทำงานโดยการตรวจสอบแต่ละพิกเซล และทำหน้าที่รับแสงและเปลี่ยนค่าแสงเป็นสัญญาณอนาล็อกส่งเข้าสู่วงจรเปลี่ยนค่าอนาล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัลอีกที จากนั้นโปรแกรมจะตรวจสอบด้วยการประมวลผลภาพเพื่อตัดสินใจว่าจะยอมรับหรือปฏิเสธสีของวัสดุที่ตรวจสอบ ถ้าโปรแกรมตรวจพบสีที่ปฏิเสธจะส่งสัญญาณไปที่ตัวควบคุมเครื่องอัตโนมัติ และยิงวัสดุออกแสดงดังรูปที่ 2.4 (ก) และ 2.4 (ข) ซึ่งวิธีนี้จะช่วยเพิ่มคุณภาพก่อนจัดเก็บเมล็ดพืช แต่มีการสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้า และมีความร้อนสะสมของเมล็ดพืชระหว่างกระบวนการ (Bayram and Oner, 2006) นอกจากนี้เครื่องคัดแยกสียังสามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้กับผลผลิตทางการเกษตรอื่นๆ เช่น พริก กระเทียม เมล็ดกาแฟ เป็นต้น อย่างไรก็ตามกระบวนการตรวจสอบและคัดแยกด้วยความแตกต่างของสีนี้สามารถคัดแยกสิ่งแปลกปลอมได้รวดเร็ว แต่อาจไม่สามารถแยกสิ่งแปลกปลอมที่มีสีใกล้เคียงกันได้



รูปที่ 2.4 (ก) หลักการทำงานของเครื่องคัดแยกสี (ข) เมล็ดพืชที่ยังไม่ถูกแยกและเมล็ดพืชถูกแยกแล้ว
ที่มา: Bayram and Oner, 2006

2.2.4 การตรวจสอบและคัดแยกสิ่งแปลกปลอมด้วยการประมวลผลภาพถ่ายความร้อน
การตรวจสอบสิ่งแปลกปลอมด้วยการประมวลผลภาพถ่ายความร้อน ซึ่งเป็นภาพที่
ได้จากซึ่งได้จากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในย่านอินฟราเรด (Infrared region) ปัจจุบันดำเนินงานอยู่ใน
ระดับงานวิจัย เป็นการวัดเชิงคุณภาพที่พิจารณาความแตกต่างของภาพซึ่งเป็นผลมาจากความ
แตกต่างของสมบัติทางความร้อนของเมล็ดพืชและสิ่งแปลกปลอมที่ต้องกำรตรวจสอบ ได้แก่
สัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนของวัตถุ (Emissivity, ϵ) และความจุความร้อนจำเพาะ รายละเอียดมี
ดังนี้

1) สัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนของวัตถุ (Emissivity, ϵ) คือ ค่าที่แสดงถึง
ความสามารถในการแผ่รังสีความร้อนของวัตถุ โดยมีค่าเท่ากับอัตราส่วนของรังสีที่แผ่ออกจากวัตถุกับ
รังสีที่แผ่ออกจากวัตถุดำ ณ อุณหภูมิเดียวกัน ซึ่งสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนของวัตถุจริงใด ๆ มี
ค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1 แต่วัตถุดำ (Black body) มีสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนเท่ากับ 1 เสมอ
เนื่องจากวัตถุดำเป็นวัตถุทางอุดมคติสำหรับการแผ่รังสีความร้อน มีความสามารถในการแผ่รังสีความ
ร้อนได้สูงที่สุด และมีความสามารถในการดูดซึมรังสีที่มาจากทุกทิศทางในทุความยาวคลื่นและ
ทุกทิศทาง ซึ่งสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนขึ้นอยู่กับชนิดของวัตถุ ลักษณะพื้นผิวของของวัตถุ
และอุณหภูมิที่ผิวของวัตถุ (นวกัทร และ ทวีพล, 2555) สำหรับการหาพลังงานการแผ่รังสีอินฟราเรด
ของวัตถุใด ๆ หรือวัตถุจริงจำเป็นต้องทราบสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนของวัตถุเพื่อป้อนให้กับ
กล้องถ่ายภาพความร้อน หากป้อนสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนได้ถูกต้องจะส่งผลให้อุณหภูมิที่ได้
จากกล้องถ่ายภาพความร้อนถูกต้องตามไปด้วย ซึ่งตัวอย่างสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนของวัสดุ
ชนิดต่างๆ แสดงดังตารางที่ 2.1 โดยสามารถคำนวณพลังงานการแผ่รังสีอินฟราเรดได้จาก
ความสัมพันธ์ดังสมการที่ 2.1

$$E(T) = \epsilon \sigma T^4 \quad (2.1)$$

ตารางที่ 2.1 ตัวอย่างสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนของสิ่งแปลกปลอมและเมล็ดพืช

ชนิด	สัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อน	ที่มา
เศษไม้อัด	0.82-0.92	Touloukian and Ho, 1972
หิน	0.88-0.95	Mallory, 1969 Gubareff et al., 1960 Kreith and Kreider, 1978
ลูกเหล็ก	0.21-0.28	Amidon, 1999
ฟิวเจอร์บอร์ด	0.84-0.86	Boudenne et al., 2005
ถั่วลิสง	0.92-0.96	Jeng Liang Lin et al., 1998
ถั่วเหลือง	0.93-0.95	Ramstad and Geddes, 1942
ถั่วแดง	0.93-0.96	Kazarian and Hall, 1965

2) ความจุความร้อนจำเพาะ (Specific Heat, Cp) คือ ค่าที่แสดงถึงคุณสมบัติในการรับความร้อนของวัตถุ โดยทั่วไปความจุความร้อนจำเพาะคือ ปริมาณความร้อนที่ทำให้วัตถุมวล 1 หน่วย มีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นหรือลดลงจากเดิม 1 องศา มีหน่วยเป็น ปริมาณความร้อนต่อหน่วยมวลต่อหน่วยอุณหภูมิ เช่น แคลอรีต่อกรัมต่อองศาเซลเซียส กิโลแคลอรีต่อกิโลกรัมต่อองศาเซลเซียส หรือ จูลต่อกิโลกรัมต่อเคลวิน ตัวอย่างความจุความร้อนจำเพาะของวัสดุแสดงดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ตัวอย่างความจุความร้อนจำเพาะของสิ่งแปลกปลอมและเมล็ดพืช

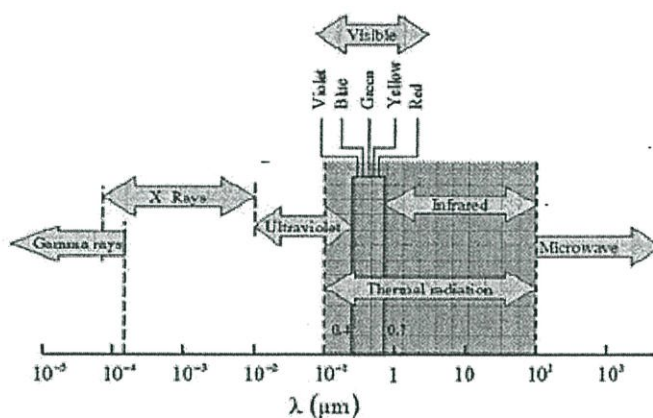
ชนิด	ความจุความร้อนจำเพาะ (kJ/kg·K)	ที่มา
ไม้	1.260-2.900	Tan, 2010
หิน	0.460-0.900	Lalit et al., 2010
ลูกเหล็ก	0.477-1.449	ASM International, 2002
ฟิวเจอร์บอร์ด	0.881-2.584	Boudenne et al., 2005
ถั่วลิสง	1.926-2.912	ASHRAE, 1989 Alam and Shove, 1973
ถั่วเหลือง	1.583-2.353	Ramstad and Geddes, 1942 Kazarian and Hall, 1965
ถั่วแดง	3.660-3.326	Legrand et al., 2006

2.3 ภาพถ่ายความร้อน

2.3.1 การแผ่รังสีความร้อน

วัตถุทุกชนิดที่มีอุณหภูมิสูงกว่าค่าศูนย์องศาสัมบูรณ์ (Absolute Zero หรือ -273.15°C หรือ 0 K) จะมีการแผ่รังสีความร้อนออกมา สำหรับกลไกของการแผ่รังสีความร้อนเกิดจากการสั่น (Oscillations) และการเคลื่อนที่ (Transition) ของอิเล็กตรอนซึ่งประกอบกันเป็นสสาร วัตถุที่มีอุณหภูมิสูงอิเล็กตรอนจะสั่นหรือเคลื่อนที่มาก ส่งผลให้พลังงานภายในวัตถุมีค่าสูง กล่าวได้ว่าพลังงานความร้อนที่แผ่ออกจากวัตถุมีความสัมพันธ์แปรผันตรงกับอุณหภูมิ และรังสีความร้อนที่แผ่

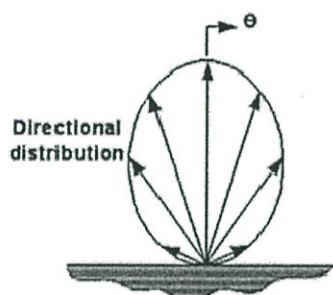
ออกจากวัตถุอยู่ในช่วงความยาวคลื่นประมาณ 0.1 ไมโครเมตร ถึง 100 ไมโครเมตร (ประวิทย์, 2553) แสดงดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 สเปกตรัมการแผ่รังสีในย่านต่างๆ

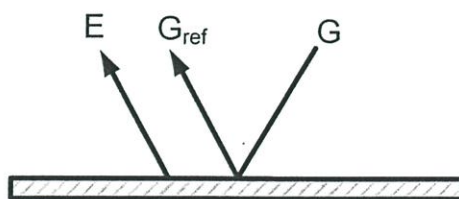
ที่มา: Gruner, 2003

โดยความเข้มของการแผ่รังสีความร้อนออกจากวัตถุใด ๆ มีค่าสูงสุดที่มุม θ เท่ากับ 0 องศา แสดงดังรูปที่ 2.6 (มนตรี, 2548; นวภัทรา และทวีพล, 2555) รังสีความร้อนทั้งหมดที่แผ่ออกจากพื้นผิววัตถุจริง (Radiosity, J) ประกอบด้วยรังสีที่เกิดจากวัตถุเอง (Emission, E) และรังสีจากสิ่งแวดล้อมโดยรอบหรือจากวัตถุอื่นมากระทบและสะท้อนออกจากวัตถุ ($G_{\lambda,ref}$) แสดงในรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.6 การแผ่รังสีจากพื้นผิวแปรผันตามทิศทาง

ที่มา: นวภัทรา และทวีพล, 2555



รูปที่ 2.7 รังสีอินฟราเรดทั้งหมดที่แผ่ออกจากพื้นผิววัตถุจริง

ที่มา: นวภัทรา และทวีพล, 2555

โดยภาพถ่ายความร้อนเป็นภาพที่ได้จากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในย่านอินฟราเรด (Infrared region) อยู่ในช่วงความยาวคลื่น 1-100 ไมโครเมตร โดยแบ่งย่านรังสีอินฟราเรดออกเป็น 5 ช่วงตามช่วงของความยาวคลื่นดังนี้ ช่วง NIR (Near-IR: 0.75-2.5 μm) ช่วงคลื่นสั้น (1.4-3 μm) ช่วงกลาง (3-8 μm) ช่วงคลื่นยาว (8-15 μm) และช่วงไกล (Extreme: 15-100 μm) โดยรังสีอินฟราเรดในช่วงคลื่นสั้นถึงช่วงคลื่นยาว นิยมใช้วัดอุณหภูมิ หรือตรวจสอบการแผ่รังสีของวัตถุ (นวภัทรา และ ทวีพล, 2555)

2.3.2 กล้องถ่ายภาพความร้อน

กล้องถ่ายภาพความร้อนหรือ Thermal image camera (TI - camera) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับวัดอุณหภูมิที่ผิวของวัตถุโดยไม่มีการสัมผัสและทำลายวัตถุ อาศัยการวัดรังสีอินฟราเรดที่แผ่ออกจากวัตถุ และปรับค่ารังสีอินฟราเรดที่วัดได้เป็นอุณหภูมิอาศัยกฎของ Planck และกฎของ Stefan-Boltzmann (นวภัทรา และ ทวีพล, 2555) ส่วนประกอบหลักของกล้อง TI ได้แก่ เลนส์ (Lenses) ตัวตรวจจับ (Detector) และส่วนแสดงผล (Display) โดยมีหลักการทำงานดังนี้ จะแสดงผลออกมาให้รูปแบบของเฉดสีและตัวเลข และประกอบด้วยเซนเซอร์ชนิดอินฟราเรดหลายตัว แต่ละตัวแสดงผลออกมาในรูปแบบของสีแตกต่างกันตามอุณหภูมิของจุดนั้น ๆ โดยทั่วไปสีแดงจะแสดงผลที่มีอุณหภูมิสูงและสีน้ำเงินแสดงผลของบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำ หรือโทนสีสว่างแสดงผลของบริเวณที่มีอุณหภูมิสูง และโทนสีมืดแสดงผลของบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำ ผลของแต่ละจุดที่ได้จากเซนเซอร์แต่ละตัว เมื่อนำมารวมกันจะประกอบขึ้นเป็นภาพ เรียกว่า ภาพถ่ายทางความร้อน (Thermal Image) (นวภัทรา และ ทวีพล, 2555) รูปแบบการวัดอุณหภูมิด้วยกล้องถ่ายภาพความร้อนแบ่งออกเป็น 2 รูปแบบคือ การวัดเชิงปริมาณ (Quantitative) ซึ่งหมายถึงการวัดอุณหภูมิของจุดที่สนใจ และการวัดเชิงคุณภาพ (Qualitative) ซึ่งหมายถึงการพิจารณาความแตกต่างของภาพ ซึ่งการวัดเชิงคุณภาพสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานในลักษณะต่างๆ (ยุทธพงศ์ และคณะ, 2556)

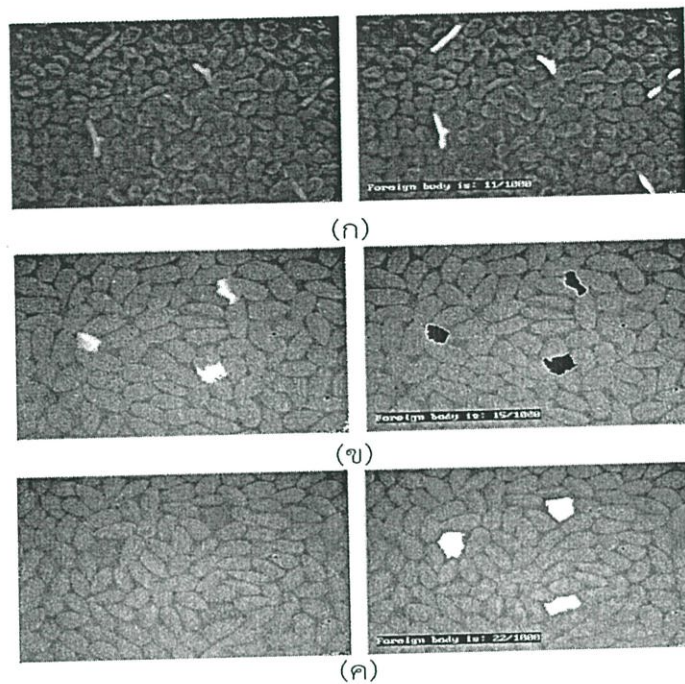
2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Ginesu et al. (2003) ใช้ภาพถ่ายความร้อนตรวจสอบสิ่งแปลกปลอมเช่น หิน กระดาษแข็ง โลหะชิ้นเล็ก ๆ และเปลือกไม้ ที่ปะปนมากับเมล็ดอัลมอลด์ ลูกเกด และถั่วลิสง โดยอาศัยความแตกต่างของพลังงานที่กล้องได้รับระหว่างสิ่งแปลกปลอมกับเมล็ดพืช เนื่องจากสมบัติทางความร้อนของวัสดุมีค่าแตกต่างกัน สามารถตรวจสอบสิ่งแปลกปลอมออกจากเมล็ดพืชได้ เช่น เศษไม้กับลูกเกด รูปที่ 2.8 (ก) เศษกระดาษแข็งกับเมล็ดอัลมอลด์ รูปที่ 2.8 (ข) และเศษหินกับเมล็ดอัลมอลด์ รูปที่ 2.8 (ค)

Chelladurai et al. (2010) ประยุกต์ใช้ภาพถ่ายทางความร้อนในการตรวจสอบเชื้อราหลังการเก็บเกี่ยวโดยอาศัยความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างข้าวสาลีที่มีคุณภาพดีกับข้าวสาลีที่เกิดการติดเชื้อภาพถ่ายทางความร้อนสามารถใช้ในการตรวจสอบเชื้อราได้หลายชนิดและระบุเชื้อได้ชัดเจนมากยิ่งขึ้น เช่น *Aspergillus glaucus* และ *Penicillium spp.*

Chandra et al. (2010) ประยุกต์ใช้ภาพถ่ายทางความร้อนในการตรวจสอบแมลงที่ทำให้เมล็ดข้าวสาลีเกิดความเสียหายโดยอาศัยคลื่นสั้น เปรียบเทียบความแตกต่างของช่วงความยาวคลื่นและคุณสมบัติความแตกต่างของสี สามารถใช้ตรวจสอบแมลงได้แก่ ตัวงวงข้าว มอดข้าวเปลือก ตัวงท้องแบน มอดแป้ง นอกจากแมลงศัตรูข้าวที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น ยังพบแมลงอื่นๆ อีกหลายชนิด

Emekei et al. (2004) ประยุกต์ใช้ภาพถ่ายทางความร้อนในการตรวจสอบแมลงในระยะการฟักตัว โดยอาศัยความแตกต่างของการกระจายอุณหภูมิที่ผิวของเมล็ดพืชที่มีแมลงอยู่กับอัตราการหายใจของแมลงในแต่ละช่วงระยะเวลาการเจริญเติบโต



รูปที่ 2.8 ภาพถ่ายความร้อนของเมล็ดพืชและสิ่งแปลกปลอม (ก) เศษไม้กับลูกเกด (ข) เศษกระดาษ และ (ค) เศษหินกับเมล็ดอัลมอนด์
ที่มา: Meinschmidt et al. 2003

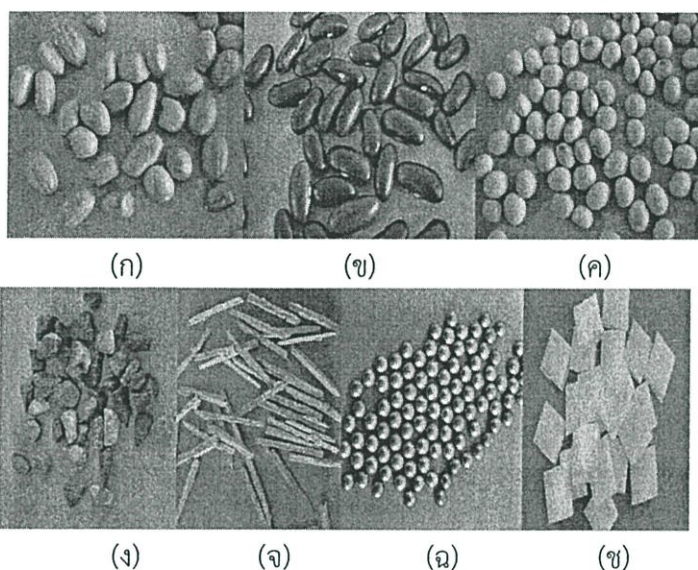
บทที่ 3

วิธีการทดลอง

3.1 การเตรียมวัสดุ

3.1.1 วัสดุทดลอง

ตัวอย่างเมล็ดพืชที่ใช้สำหรับทดลองได้แก่ ถั่วลิสง ถั่วแดง และถั่วเหลือง และวัสดุที่ใช้เป็นตัวอย่างในการตรวจสอบ ได้แก่ เศษหิน (แกรนิต) เศษไม้ ลูกเหล็ก และเศษพลาสติก (พีวีเจอร์บอร์ด) ดังรูป 3.1 โดยจะชั่งน้ำหนัก วัดขนาด และหาพื้นที่หน้าตัดของเมล็ดพืชและสิ่งแปลกปลอมจำนวนชนิดละ 20 ชิ้น และแสดงผลการวัดที่ได้โดยเฉลี่ยในตารางที่ 3.1



รูปที่ 3.1 เมล็ดเมล็ดพืช ได้แก่ (ก) ถั่วลิสง (ข) ถั่วแดง และ (ค) ถั่วเหลือง และ สิ่งแปลกปลอม ได้แก่ (ก) เศษหิน (แกรนิต) (ข) เศษไม้ (ค) ลูกเหล็ก และ (ง) เศษพลาสติก (พีวีเจอร์บอร์ด)

3.1.2 การหาความจุความร้อนจำเพาะ

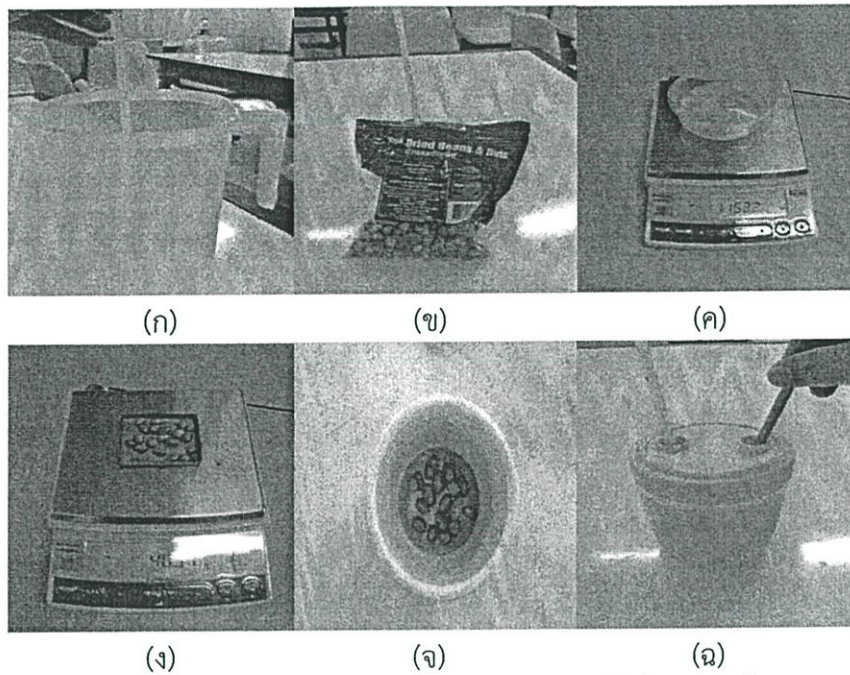
หาความจุความร้อนจำเพาะ (รูปที่ 3.2) โดยผสมน้ำกับน้ำแข็งในภาชนะ ทิ้งไว้จนอุณหภูมิคงที่ ประมาณ 2 นาที แล้ววัดอุณหภูมิ (T_{water}) จากนั้นวัดอุณหภูมิเริ่มต้นของเมล็ดพืช (T_{sample}) และชั่งน้ำหนัก ($\text{mass}_{\text{sample}}$) นำเมล็ดพืชใส่ลงในแคลอรีมิเตอร์ และนำน้ำที่ผสมกับน้ำแข็งไว้แล้วมาชั่งน้ำหนัก ($\text{mass}_{\text{water}}$) จากนั้นใส่ลงในแคลอรีมิเตอร์ นำเทอร์โมมิเตอร์วัดอุณหภูมิ และใช้ไม้กวนน้ำจนอุณหภูมิคงที่ (T_{mixture}) ประมาณ 2 นาที พร้อมทั้งวัดอุณหภูมิ และคำนวณความจุความร้อนจำเพาะ (Aviara and Haque, 2000; Ezekie, 1986, 1987) จากสมการที่ 3.1 โดยความจุความร้อนของน้ำ ($C_{p_{\text{water}}}$) มีค่าเท่ากับ $4.18 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$ ทำการทดลองทั้งหมด 3 ซ้ำ ซึ่งขั้นตอนการหาความจุความร้อนจำเพาะของสิ่งแปลกปลอมมีขั้นตอนการทำแบบเดียวกัน ดังแสดงไว้ข้างต้น

$$C_{p_{\text{sample}}} = \frac{(\text{mass}_{\text{water}})(C_{p_{\text{water}}})(T_{\text{mixture}} - T_{\text{water}})}{(\text{mass}_{\text{sample}})(T_{\text{sample}} - T_{\text{mixture}})} \quad (3.1)$$

ตารางที่ 3.1 ข้อมูลพื้นฐานของวัสดุที่นำมาใช้ในการทดลอง

วัสดุตัวอย่าง	น้ำหนักเฉลี่ย (กรัม/เมล็ด)	ขนาด (กว้างxยาวxสูง (เซนติเมตร))	พื้นที่เฉลี่ย (ตารางเซนติเมตร)	แหล่งที่มา
ถั่วลิสง	0.76 ± 0.02	$0.95 \times 1.43 \times 0.78$	1.06 ± 0.34	ถั่วลิสงตราท็อปส์ ซูเปอร์มาร์เก็ต
ถั่วแดง	0.60 ± 0.02	$0.84 \times 1.73 \times 0.68$	1.14 ± 0.56	ถั่วแดงตราท็อปส์ ซูเปอร์มาร์เก็ต
ถั่วเหลือง	0.18 ± 0.02	$0.60 \times 0.74 \times 0.63$	0.34 ± 0.07	ถั่วเหลืองตราท็อปส์ ซูเปอร์มาร์เก็ต
เศษหิน (แกรนิต)	0.36 ± 0.02	$0.80 \times 1.03 \times 0.46$	0.82 ± 0.31	หินแกรนิตตามท้องถนน หน้าวิศวกรรมโยธา
เศษไม้ (อัด)	0.12 ± 0.03	$0.22 \times 2.38 \times 0.20$	0.52 ± 0.09	ห้องปฏิบัติการภาควิศวกรรมอาหาร
ลูกเหล็ก	0.44 ± 0.01	0.50 (ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง)	0.20	ลูกกลมเหล็กมาตรฐานของศึกษาภัณฑ์
เศษพลาสติก (พีวีเออร์บอร์ด)	0.05 ± 0.02	$1.04 \times 1.04 \times 0.30$	1.08 ± 0.00	เศษพลาสติกจากซูเปอร์มาร์เก็ต

หมายเหตุ ข้อมูลน้ำหนักและพื้นที่เฉลี่ยของเมล็ดพืชและสิ่งแปลกปลอมจำนวนชนิดละ 20 ชิ้น



รูปที่ 3.2 ขั้นตอนการหาความจุความร้อนจำเพาะ (ก) วัดอุณหภูมิน้ำที่ผสมกับน้ำแข็ง (ข) วัดอุณหภูมิของเมล็ดพืช (ค) ชั่งน้ำหนักน้ำที่ผสมกับน้ำแข็ง (ง) ชั่งน้ำหนักเมล็ดพืช (จ) นำเมล็ดพืชและน้ำที่ผสมกับน้ำแข็งไว้ ใส่ในแคลอรีมิเตอร์ (ฉ) กวนให้อุณหภูมิน้ำและเมล็ดพืชคงที่พร้อมทั้งวัดอุณหภูมิ

3.1.3 การหาความชื้น

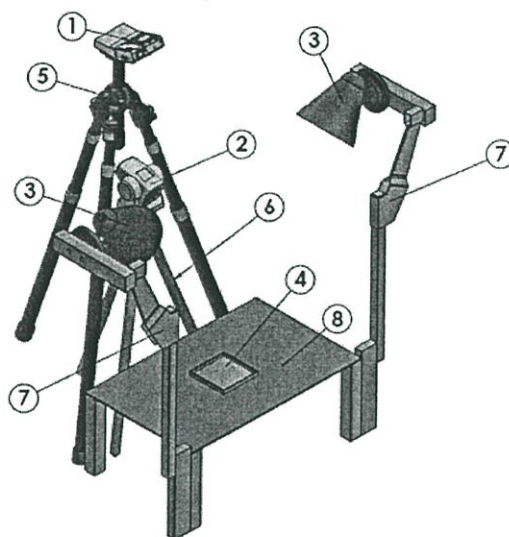
นำถั่วลิสงบดใส่ภาชนะ จำนวน 5 กรัม ชั่งน้ำหนักเริ่มต้น ($mass_{start}$) ก่อนอบด้วยเครื่องชั่งน้ำหนักไฟฟ้าที่มีความละเอียดอยู่ที่ 0.0001 กรัม (ยี่ห้อ Yamato รุ่น HB-120 ประเทศญี่ปุ่น) และนำเข้าตู้อบลมร้อน (ยี่ห้อ Memmert รุ่น UFB 400 ประเทศเยอรมัน) อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง จากนั้นใส่ตู้ดูดความชื้น (Dessicator) (ยี่ห้อ Notthman รุ่น 50) และนำมาชั่งน้ำหนักสุดท้าย ($mass_{final}$) เพื่อคำนวณหาความชื้นฐานเปียก ($\%moisture_{wb}$) จากสมการที่ 3.2 ทำการทดลองทั้งหมด 3 ซ้ำ โดยการหาความชื้นของถั่วเหลืองและถั่วแดงจะมีขั้นตอนการหาเช่นเดียวกับถั่วลิสง

$$\%moisture_{wb} = \frac{mass_{start} - mass_{final}}{mass_{start}} \times 100\% \quad (3.2)$$

3.2 ชุดอุปกรณ์สำหรับการถ่ายภาพความร้อน

ชุดอุปกรณ์สำหรับการถ่ายภาพความร้อนแสดงในรูปที่ 3.3 ประกอบด้วย หลอดไฟฮาโลเจน-ทังสแตน 100 วัตต์ จำนวน 2 หลอดซึ่งติดตั้งอยู่ด้านข้างและสูงจากพื้น 78.5 เซนติเมตร ติดตั้งกล้องถ่ายภาพความร้อนยี่ห้อ Fluke รุ่น Ti32 ติดตั้งอยู่เหนือภาชนะที่ใส่ตัวอย่าง 30 เซนติเมตร เพื่อให้กล้องถ่ายภาพความร้อนได้รับความเข้มของการแผ่รังสีมากที่สุด และติดตั้งกล้องดิจิทัลยี่ห้อ Canon รุ่น IXUS 950 IS อยู่เหนือกล้องถ่ายภาพความร้อน เพื่อทำการบันทึกวิดีโอผ่านกล้องถ่ายภาพความร้อนโดยจะติดตั้งสูงจากกล้องถ่ายภาพความร้อน 31 เซนติเมตร สำหรับรายละเอียดของแต่ละอุปกรณ์แสดงในตารางที่ 3.2 โดยที่ชุดอุปกรณ์นี้ ใช้ถ่ายภาพความร้อนเพื่อหาเวลาสำหรับการ

ให้ความร้อนเมล็ดพืชและสิ่งแปลกปลอม ใช้ถ่ายภาพเพื่อตรวจสอบสิ่งแปลกปลอม และใช้ถ่ายภาพเพื่อคำนวณหาพลังงานความร้อนที่กล้องถ่ายภาพได้รับจากการแผ่รังสีความร้อน



รูปที่ 3.3 ชุดอุปกรณ์สำหรับการถ่ายภาพความร้อน

ตารางที่ 3.2 ส่วนประกอบของชุดอุปกรณ์สำหรับการถ่ายภาพความร้อน

หมายเลข	ส่วนประกอบของชุดอุปกรณ์สำหรับการถ่ายภาพความร้อน
1	กล้องดิจิทัล Canon Power Shot SD850 IS (IXUS 950 IS) ความละเอียด 8 ล้านพิกเซล ขนาดรูรับแสง F2.8-F5 ความเร็วชัตเตอร์ 15 วินาที-1/1600 วินาที
2	กล้องถ่ายภาพความร้อน Fluke Ti32 ความละเอียด 76,800 พิกเซล ช่วงอุณหภูมิที่วัดได้ -20 องศาเซลเซียส ถึง 600 องศาเซลเซียส ความยาวคลื่นที่วัดได้ 7.5 ไมโครเมตร ถึง 14 ไมโครเมตร ระยะโฟกัสต่ำสุด 7.5 เซนติเมตร
3	หลอดฮาโลเจน-ทังสเทน 100 วัตต์ 2 หลอด
4	ถาดอลูมิเนียมขนาด 10 x 10 เซนติเมตร
5	ขาตั้งกล้องดิจิทัล
6	ขาตั้งกล้องถ่ายภาพความร้อน
7	ขาตั้งหลอดไฟปรับ สามารถปรับระดับความสูงได้
8	ฐานแบบจำลองการถ่ายภาพความร้อน

3.3 การหาเวลาสำหรับการให้ความร้อนเมล็ดพืชและสิ่งแปลกปลอม

การหาเวลาสำหรับการให้ความร้อนเมล็ดพืชและสิ่งแปลกปลอมเป็นขั้นตอนแรกก่อนการถ่ายภาพความร้อนเพื่อตรวจสอบสิ่งแปลกปลอม เพื่อให้ได้ภาพถ่ายความร้อนที่ได้สามารถตรวจสอบสิ่งแปลกปลอมได้รวมทั้งใช้พลังงานและเวลาในการตรวจสอบน้อยที่สุด ทำได้โดยเตรียมเมล็ดพืชและสิ่งแปลกปลอม ได้แก่ ถั่วลิสง ถั่วเหลือง ถั่วแดง เศษหิน (แกรนิต) เศษไม้ (ไม้อัด) ลูกเหล็ก และเศษพลาสติก (พีวีเจอบอร์ด) ตัวอย่างละ 5 ชิ้น เรียงลงในถาดอลูมิเนียมโดยไม่ให้มีตัวอย่างใดตัวอย่างหนึ่งติดกัน ดังรูปที่ 3.4 และให้ความร้อนเป็นเวลา 1 วินาที จากนั้นปล่อยให้คายความร้อน 10 วินาที

พร้อมทั้งบันทึกภาพในรูปแบบของไฟล์วิดีโอตลอดระยะเวลาคายความร้อน โดยเริ่มตั้งแต่ วินาทีที่ 0 จนถึงวินาทีที่ 10 ซึ่งทดลองทั้งหมด 3 ซ้ำ จากนั้นนำไฟล์วิดีโอ ที่ได้มาตัดภาพที่เวลา 1 วินาทีจนถึง 10 วินาทีในช่วงการคายความร้อน แล้วนำภาพที่ได้หาค่า Absolute difference of average gray level เพื่อหาเวลาในการให้ความร้อน และคายความร้อนที่น้อยที่สุดที่สามารถตรวจสอบสิ่งแปลกปลอมกับเมล็ดพืช ทำซ้ำตามวิธีที่กล่าวไว้ข้างต้นโดยเพิ่มเวลาการให้ความร้อนเป็น 2 วินาที ซึ่งเพิ่มจนถึง 10 วินาที



รูปที่ 3.4 การเรียงเมล็ดพืชและสิ่งแปลกปลอมในภาชนะ

3.4 การถ่ายภาพความร้อนเพื่อตรวจสอบสิ่งแปลกปลอม

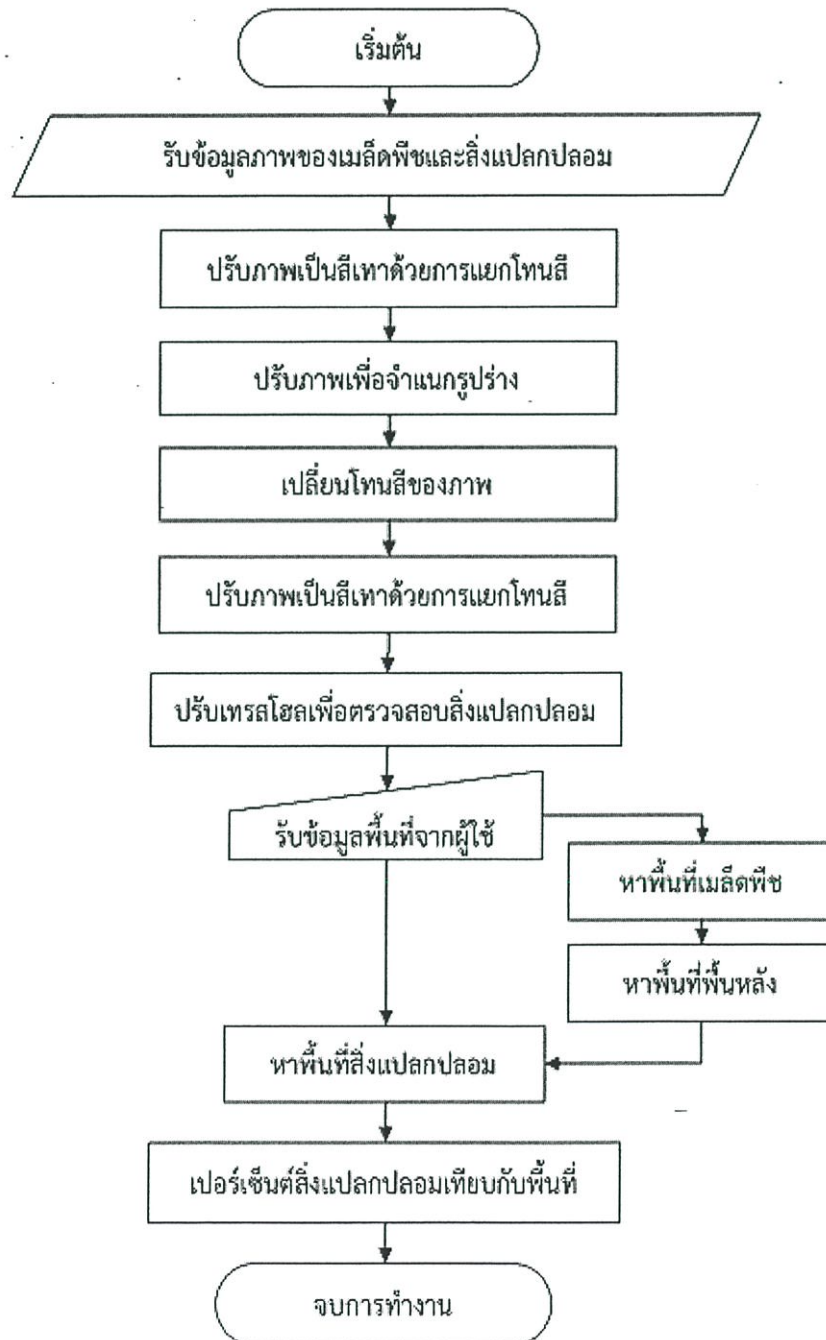
เตรียมเมล็ดพืชและสิ่งแปลกปลอมใส่ภาชนะโดยใช้ชนิดและการจัดเรียงเมล็ดพืชและสิ่งแปลกปลอมเช่นเดียวกับภาพถ่าย และทำการทดลอง 3 ซ้ำ ที่อุณหภูมิ 32 องศาเซลเซียส จากนั้นนำภาชนะวางบนฐานวางภาชนะ พร้อมทั้งให้ความร้อนเป็นระยะเวลาตามที่วิเคราะห์ได้จากหัวข้อ 3.3 ทิ้งให้ตัวอย่างคายความร้อนเป็นเวลา 10 วินาที พร้อมทั้งใช้กล้องถ่ายภาพความร้อนแสดงภาพ และใช้กล้องดิจิทัลบันทึกภาพในรูปแบบของไฟล์วิดีโอบริเวณหน้าจอกของกล้องถ่ายภาพความร้อน ตลอดระยะเวลาการคายความร้อนตั้งแต่ วินาทีที่ 0 จนถึงวินาทีที่ 10 จากนั้นนำไฟล์วิดีโอที่ได้มาตัดภาพที่เวลาการคายความร้อนตามที่วิเคราะห์ได้ และนำภาพที่ได้ไปประมวลผลด้วยโปรแกรมที่พัฒนาขึ้น

3.5 การพัฒนาและทดสอบโปรแกรมเพื่อตรวจสอบสิ่งแปลกปลอมด้วยภาพถ่ายความร้อน

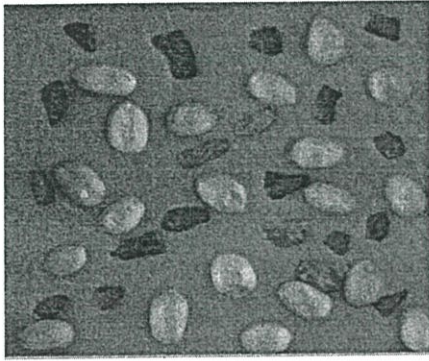
พัฒนาและทดสอบโปรแกรม MATLAB (Version 7.10.0.499, The MathWorks, Inc., US) สำหรับตรวจสอบสิ่งแปลกปลอมด้วยภาพถ่ายความร้อน ซึ่งการทดสอบโปรแกรมทำได้โดยนำค่าพื้นที่เฉลี่ยของสิ่งแปลกปลอมที่ได้จากการวัดเทียบกับพื้นที่ที่ได้จากโปรแกรม โดยทดสอบโปรแกรมกับภาพถ่ายความร้อนของถั่วลิสงจำนวน 20 เมล็ดและเศษหินจำนวน 20 ชิ้น และเพิ่มจำนวนถั่วลิสงครั้งละ 10 เมล็ด จนถึงภาพที่ถั่วลิสงมีจำนวน 60 เมล็ด สำหรับการทดสอบภาพถั่วแดงกับหินและภาพถั่วเหลืองกับหินจะมีขั้นตอนการทดสอบเช่นเดียวกับ ถั่วลิสง แต่จำนวนเมล็ดที่เพิ่ม เพิ่มถึง 50 เมล็ด และ 80 เมล็ดตามลำดับ โดยที่เศษไม้ ลูกเหล็ก และเศษพลาสติก มีขั้นตอนการทดสอบภาพเช่นเดียวกับ เศษหิน สำหรับขั้นตอนการประมวลผลภาพเพื่อตรวจสอบสิ่งแปลกปลอมด้วยภาพถ่ายความร้อนแสดงในรูปที่ 3.5

ขั้นตอนการประมวลผลภาพสำหรับตรวจสอบสิ่งแปลกปลอมด้วยภาพถ่ายความร้อน มีดังนี้ รับข้อมูลภาพของเมล็ดพืชและสิ่งแปลกปลอม จากนั้นปรับภาพเป็นสีเทาด้วยการแยกโทนสีโดย

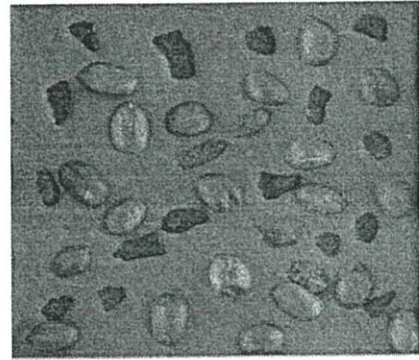
ใช้เทคนิคการแยกโทนสีแดง สีเขียว และสีน้ำเงิน ซึ่งการปรับภาพเป็นขาวดำด้วยการแยกโทนสีนั้นจะทำให้ได้ภาพขาวดำที่มีสีแตกต่างกันคนละโทนสี ดังรูปที่ 3.6 เทคนิคนี้ทำให้สามารถตรวจสอบสิ่งแปลกปลอมได้รวดเร็ว จากนั้นปรับภาพโดยอาศัยการจำแนกรูปร่าง ต่อมาเปลี่ยนโทนสีของภาพเพื่อให้ได้โทนสีของสิ่งแปลกปลอมชัดเจนขึ้น และปรับภาพเป็นสีเทาด้วยการแยกโทนสีอีกครั้ง จากนั้นปรับเทรสโวลเพื่อตรวจสอบสิ่งแปลกปลอม หลังจากขั้นตอนนี้โปรแกรมจำเป็นต้องป้อนขนาดของพื้นที่ที่ต้องการตรวจสอบ เพื่อใช้คำนวณหาพื้นที่ของสิ่งแปลกปลอม และร้อยละของสิ่งแปลกปลอม



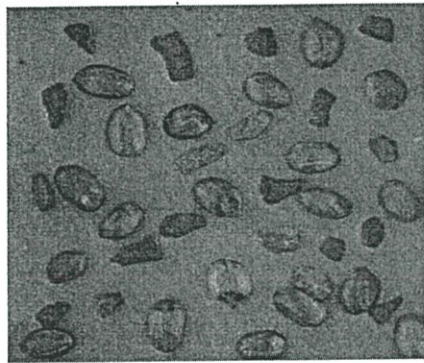
รูปที่ 3.5 ขั้นตอนการประมวลผลภาพสำหรับตรวจสอบสิ่งแปลกปลอมด้วยภาพถ่ายความร้อน



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 3.6 การปรับภาพเป็นสีเทาด้วยการแยกโทนสี (ก) แยกโทนสีแดง (ข) แยกโทนสีเขียว (ค) แยกโทนสีน้ำเงิน

บทที่ 4 ผลการวิจัย

ความถูกต้องของผลลัพธ์ที่ได้จากโปรแกรมตรวจสอบสิ่งแปลกปลอมที่ปนมากับเมล็ดพืช ด้วยวิธีประมวลผลภาพขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย ได้แก่ ความชื้นของเมล็ดพืชและสิ่งแปลกปลอม และชนิดของภาพที่นำมาประมวลผล โดยภาพทางความร้อนต้องคำนึงถึงความจุความร้อนจำเพาะของวัสดุ เวลาในการให้ความร้อน และพลังงานที่กล้องถ่ายภาพความร้อนได้รับ โดยในการคำนวณเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดของโปรแกรมตรวจสอบสิ่งแปลกปลอมที่พัฒนาขึ้นนี้ ตรวจสอบโดยการหาค่าพื้นที่ของสิ่งแปลกปลอมแล้วนำมาเปรียบเทียบกับพื้นที่เฉลี่ยที่ได้จากการวัด รายละเอียดผลการทดลองทั้งหมดแสดงดังต่อไปนี้

4.1 ความชื้นและความจุความร้อนจำเพาะ

ความชื้นของเมล็ดพืช ได้แก่ ถั่วลิสง ถั่วแดง ถั่วเหลือง มีค่าเท่ากับ 6.50 ± 1.96 12.27 ± 2.13 และ 12.13 ± 1.59 (%wb) ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับความชื้นของเมล็ดพืชในช่วงความชื้นปลอดภัยของมาตรฐานการจัดเก็บเมล็ดพืช (สุนีย์, 2555) และจากการทดลองหาความจุความร้อนจำเพาะของสิ่งแปลกปลอมและเมล็ดพืช พบว่ามีค่าสอดคล้องกับงานวิจัยดังแสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ความจุความร้อนจำเพาะของเมล็ดพืชและสิ่งแปลกปลอม

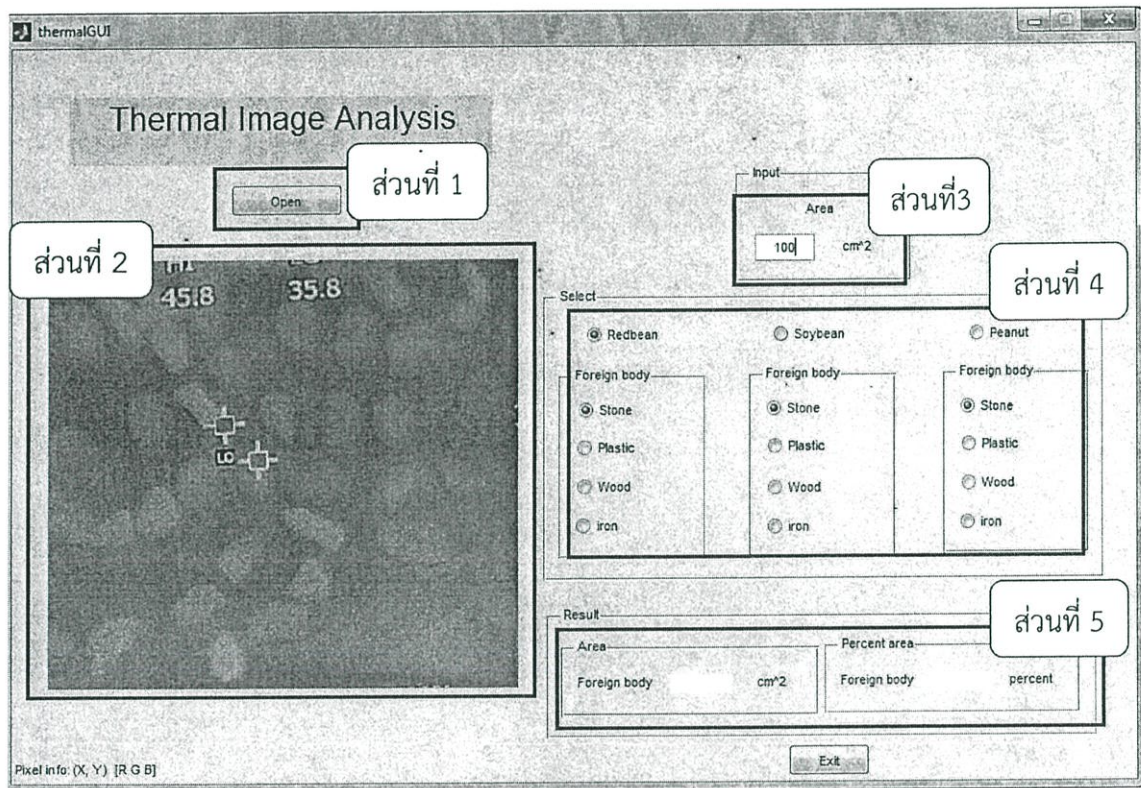
ชนิดเมล็ดพืช	ความจุความร้อนจำเพาะ (kJ/kg·K)	ความจุความร้อนจำเพาะ (kJ/kg·K) อ้างอิง	ที่มา
ถั่วลิสง	2.52 ± 0.40	1.93-2.91	ASHRAE, 1989
ถั่วแดง	2.62 ± 0.41	1.58-2.35	Alam and Shove, 1973 Ramstad and Geddes, 1942 Kazarian and Hall, 1965
ถั่วเหลือง	2.58 ± 0.13	3.66-3.33	Fillaudeau et al., 2006
ลูกเหล็ก	0.83 ± 0.11	1.26-2.90	Tan, 2010
เศษไม้ (ไม้อัด)	2.53 ± 0.16	0.46-0.90	Lalit et al., 2010
เศษหิน (แกรนิต)	1.40 ± 0.29	0.48-1.45	ASM International, 2002
พลาสติก (พีวีเจอร์บอร์ด)	1.91 ± 0.40	0.88-2.58	Boudenne et al., 2005

หมายเหตุ ความจุความร้อนจำเพาะเฉลี่ยจากเมล็ดพืช และสิ่งแปลกปลอม 20 ชื้น

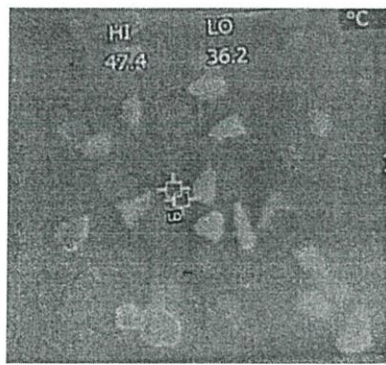
4.2 โปรแกรมสำหรับตรวจสอบสิ่งแปลกปลอมด้วยภาพถ่ายความร้อน

หน้าตาโปรแกรมสำหรับตรวจสอบสิ่งแปลกปลอมด้วยภาพถ่ายความร้อนประกอบด้วย 5 ส่วน ดังนี้ ส่วนที่ 1 การเลือกรูปภาพ ส่วนที่ 2 การแสดงผลภาพ ส่วนที่ 3 การกำหนดพื้นที่ ส่วนที่ 4 การเลือกชนิดเมล็ดพืชและสิ่งแปลกปลอมที่ต้องการตรวจสอบ และส่วนที่ 5 การแสดงค่าพื้นที่และเปอร์เซ็นต์สิ่งแปลกปลอม แสดงดังรูปที่ 4.1

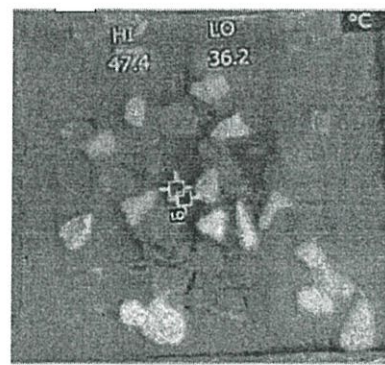
สำหรับขั้นตอนการประมวลผลภาพถ่ายความร้อนแสดงไว้ในรูปที่ 4.3 ประกอบด้วยขั้นตอน ดังนี้ การเก็บข้อมูลภาพวัตถุทดลอง การปรับภาพเป็นสีเทาด้วยการแยกโทนสี จากนั้นปรับภาพโดยอาศัยการตรวจสอบรูปร่างแต่ในขั้นตอนนี้อยู่ในส่วนของประมวลผลภาพถ่ายเท่านั้น การเปลี่ยนโทนสีภาพให้ชัดเจนขึ้นแล้วปรับภาพเป็นสีเทาด้วยการแยกโทนสีอีกครั้ง รวมทั้งปรับเทรสโไฮลเพื่อตรวจสอบสิ่งแปลกปลอม และการประมวลผลภาพพร้อมทั้งแสดงค่าพื้นที่สิ่งแปลกปลอม สุดท้ายนำค่าจากโปรแกรมมาเปรียบเทียบกับพื้นที่จริงจากการวัดขนาด



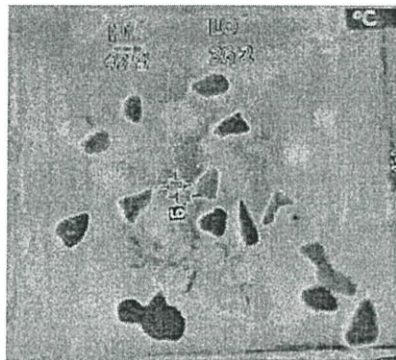
รูปที่ 4.1 โปรแกรมสำหรับตรวจสอบสิ่งแปลกปลอมด้วยภาพถ่ายความร้อน



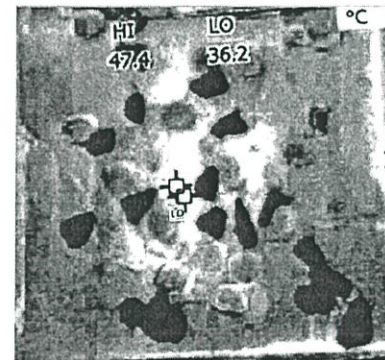
(ก)



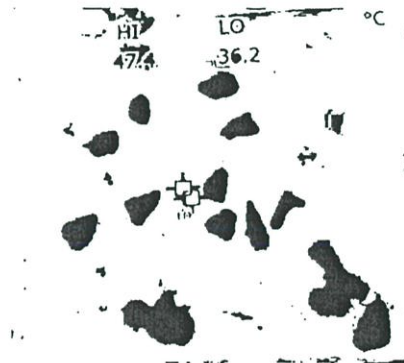
(ข)



(ค)



(ง)



(จ)

รูปที่ 4.2 การประมวลผลภาพสำหรับตรวจสอบสิ่งแปลกปลอมด้วยภาพถ่ายความร้อน (ก) เก็บข้อมูลภาพความร้อนวัสดุทดลอง (ข) ปรับภาพสีเทาด้วยการแยกโทนสี (ค) เปลี่ยนโทนสีภาพให้ชัดเจนขึ้น (ง) ปรับภาพเป็นสีเทาด้วยการแยกโทนสี และ (จ) ปรับเทรสโฮลเพื่อตรวจสอบสิ่งแปลกปลอม หาพื้นที่สิ่งแปลกปลอม และหาเปอร์เซ็นต์สิ่งแปลกปลอม เปรียบเทียบกับพื้นที่เฉลี่ยจริง

4.3 เวลาให้ความร้อนสำหรับตรวจสอบสิ่งแปลกปลอมด้วยภาพถ่ายความร้อน

การตรวจสอบสิ่งแปลกปลอมด้วยภาพถ่ายความร้อนเป็นการวัดเชิงคุณภาพ โดยพิจารณาความแตกต่างระหว่างภาพความร้อนของเมล็ดพืชและสิ่งแปลกปลอมภายใต้เงื่อนไขการกำหนดระยะเวลาให้ความร้อนและระยะเวลาในการคายความร้อนที่เหมาะสม โดยพิจารณาจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Absolute difference of average gray level กับเวลา แสดงดังรูปที่ 4.3 และเลือกระยะเวลาการให้ความร้อนที่น้อยที่สุดที่โปรแกรมสามารถตรวจสอบสิ่งแปลกปลอมได้

จากการทดลอง พบว่า สามารถจัดกลุ่มการเพิ่มขึ้นและลดลงของค่า Absolute difference of average gray level ได้ 4 กลุ่ม คือ กลุ่มเมล็ดพืชกับเศษไม้ กลุ่มเมล็ดพืชกับเศษพลาสติก กลุ่มเมล็ดพืชกับเศษหิน (แกรนิต) และกลุ่มเมล็ดพืชกับลูกเหล็ก รายละเอียดมีดังนี้

กลุ่มที่ 1 กลุ่มเมล็ดพืชทุกชนิดกับเศษไม้ มีแนวโน้มไปในทางเดียวกัน คือ

- ให้ความร้อนเป็นเวลา 2 วินาที ค่า average gray level มีความแตกต่างกันชัดเจนที่สุดในช่วงเวลาคายความร้อนวินาทีที่ 1 -
- ให้ความร้อนเป็นเวลา 4 วินาที ในช่วงแรกของการคายความร้อน ค่า average gray level มีความแตกต่างลดลงจนถึงวินาทีที่ 1 และเพิ่มขึ้นจนถึงวินาทีที่ 6 ซึ่งมีแตกต่างชัดเจนที่สุด
- ให้ความร้อนเป็นเวลา 6 วินาที ค่า average gray level มีความแตกต่างชัดเจนที่สุดวินาทีที่ 10 ซึ่งมีลักษณะแนวโน้มกราฟใกล้เคียงกับการให้ความร้อน 4 วินาที
- ให้ความร้อนเป็นเวลา 8 วินาที ในช่วงแรกของการคายความร้อน ค่า average gray level มีความแตกต่างลดลงจนถึงวินาทีที่ 1 และเพิ่มขึ้นจนถึงวินาทีที่ 3 ซึ่งมีแตกต่างชัดเจนที่สุด จากนั้นค่อย ๆ ลดลง
- ให้ความร้อนเป็นเวลา 10 วินาที ในช่วงแรกของการคายความร้อน ค่า average gray level ค่อย ๆ ลดลงจนถึงวินาทีที่ 7 และเพิ่มขึ้นจนถึงวินาทีที่ 10 ซึ่งมีความแตกต่างชัดเจนที่สุด จากนั้นความแตกต่างจะค่อย ๆ ลดลง

โดยความแตกต่างของเมล็ดพืชและเศษไม้ที่เกิดขึ้นเกิดจากความแตกต่างของสมบัติทางกายภาพและสมบัติความร้อนของวัสดุ ซึ่งเศษไม้มีมวลและความจุความร้อนจำเพาะน้อยกว่าเมล็ดพืช ทำให้เศษไม้เปลี่ยนแปลงอุณหภูมิได้เร็วกว่าเมล็ดพืช

กลุ่มที่ 2 กลุ่มเมล็ดพืชทุกชนิดกับเศษพลาสติกมีแนวโน้มไปในทางเดียวกัน คือ

- ให้ความร้อนเป็นเวลา 2 วินาที ค่า average gray level ความแตกต่างกันชัดเจนที่สุดในช่วงเวลาคายความร้อนวินาทีที่ 0
- ให้ความร้อนเป็นเวลา 4 วินาที ค่า average gray level มีแนวโน้มของค่า average gray level คล้ายกับการให้ความร้อนเมล็ดพืชกับเศษไม้ในช่วงการคายความร้อนที่วินาทีที่ 4
- ให้ความร้อน 6 วินาที ช่วงแรกความแตกต่างของค่า average gray level ค่อย ๆ ลดลงจนถึงช่วงการคายความร้อนที่วินาทีที่ 2 และเพิ่มขึ้นจนถึงช่วงการคายความร้อนที่วินาทีที่ 10 ซึ่งมีความแตกต่างชัดเจนที่สุด
- ให้ความร้อน 8 วินาที ช่วงแรกมีความแตกต่างของค่า average gray level มากและเพิ่มขึ้นจนถึงช่วงการคายความร้อนที่วินาทีที่ 1 จากนั้นค่อย ๆ ลดลงจน ค่า average gray level ไม่มีความแตกต่างกัน
- ให้ความร้อน 10 วินาที มีแนวโน้ม ค่า average gray level ใกล้เคียงกับช่วงการให้ความร้อน 6 วินาที

โดยค่าความแตกต่างของเมล็ดพืชและเศษพลาสติกที่เกิดขึ้นเกิดจาก ความแตกต่างของสมบัติทางกายภาพและสมบัติความร้อน ซึ่งมีลักษณะการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิลำดับกับเศษไม้

กลุ่มที่ 3 กลุ่มเมล็ดพืชทุกชนิดกับเศษหิน มีแนวโน้มไปในทางเดียวกัน คือ

- ให้ความร้อนเป็นเวลา 2 วินาที ค่า average gray level ความแตกต่างกันชัดเจนที่สุดในช่วงเวลาคายความร้อนวินาทีที่ 0

- ให้ความร้อนเป็นเวลา 4 วินาที ช่วงแรกของการคายความร้อนมีความแตกต่างของค่า average gray level น้อย และค่อย ๆ เพิ่มขึ้นจนถึงวินาทีที่ 5 ซึ่งแตกต่างชัดเจนที่สุด
- ให้ความร้อนเป็นเวลา 6 วินาที ช่วงแรกของการคายความร้อนมีความแตกต่างของค่า average gray level มาก และค่อย ๆ ลดลงจนถึงช่วงคายความร้อนที่วินาทีที่ 3 จากนั้น ความแตกต่าง ของค่า average gray level ค่อย ๆ เพิ่มขึ้นจนถึงช่วงคายความร้อนที่วินาที ที่ 10
- ให้ความร้อนเป็นเวลา 8 วินาที ช่วงแรกของการคายความร้อนจะมีความแตกต่างของค่า average gray level มาก และค่อย ๆ เพิ่มขึ้นจนถึงช่วงคายความร้อนที่วินาทีที่ 1 ซึ่งเป็น ความแตกต่างกันชัดเจนที่สุด และจะค่อย ๆ ลดลงจนไม่มีความแตกต่างกัน
- ให้ความร้อน 10 วินาที มีแนวโน้ม ค่า average gray level ใกล้เคียงกับการให้ความร้อน 6 วินาที

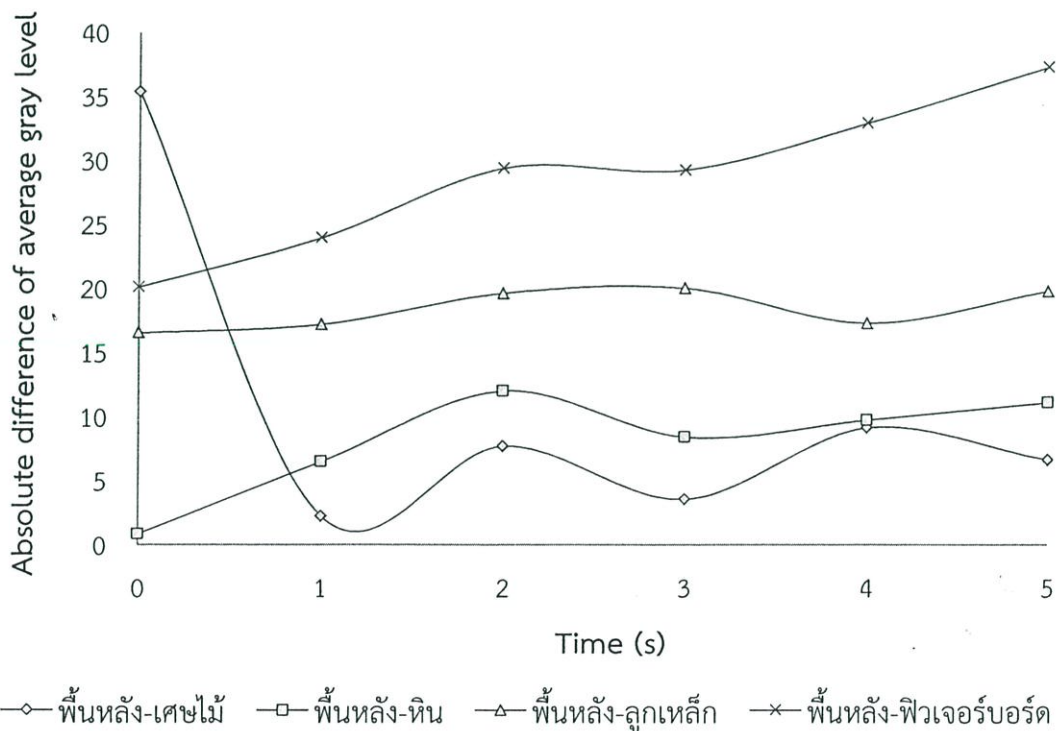
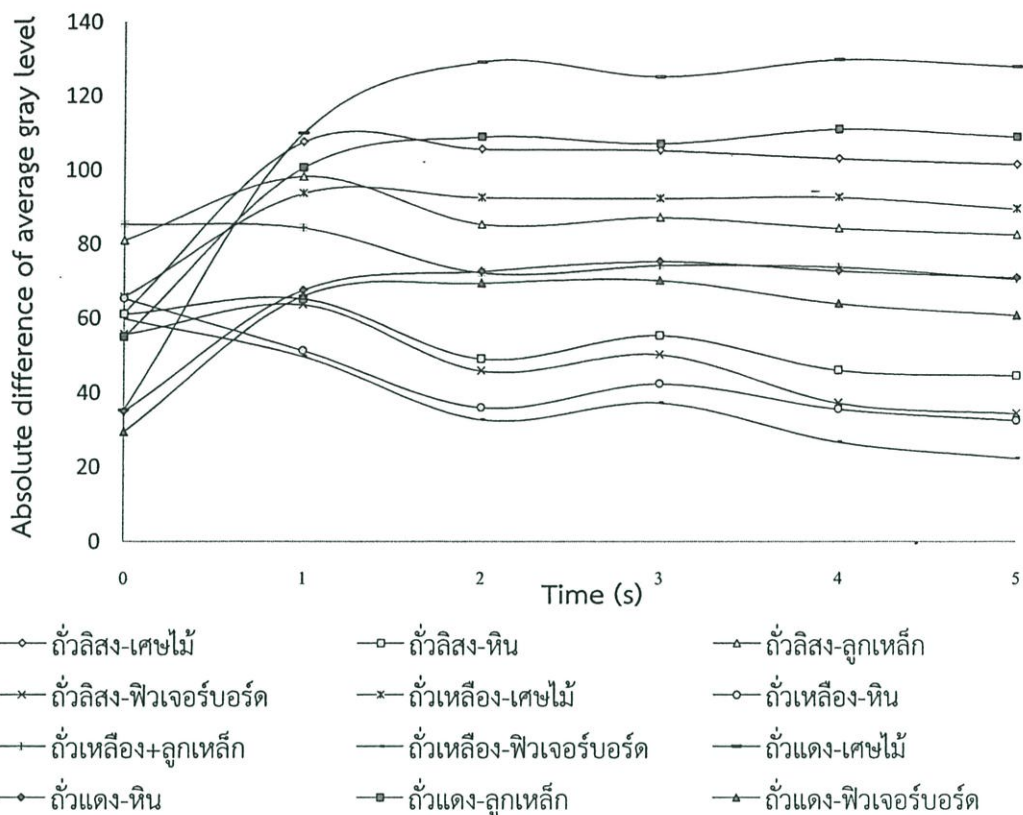
โดยค่าความแตกต่างของเมล็ดพืชและเศษหินที่เกิดขึ้นเกิดจาก ความแตกต่างของสมบัติทางกายภาพและสมบัติความร้อน ซึ่งเศษหินมีมวลและความจุความร้อนจำเพาะน้อยกว่าเมล็ดพืช ทำให้เศษหินเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิได้เร็วกว่าเมล็ดพืช

กลุ่มที่ 4 กลุ่มเมล็ดพืชทุกชนิดกับลูกเหล็ก มีแนวโน้มไปในทางเดียวกัน คือ

- ให้ความร้อน 2 วินาที มีความแตกต่างของ ค่า average gray level ชัดเจนที่สุดในช่วงการคายความร้อนที่วินาทีที่ 2
- ให้ความร้อน 4 วินาที ช่วงแรกของการคายความร้อนจะมีความแตกต่างของ ค่า average gray level น้อย และค่อย ๆ เพิ่มขึ้นจนถึงช่วงคายความร้อนที่วินาทีที่ 5 จากนั้นความแตกต่างจะค่อย ๆ ลดลงจนไม่มีความแตกต่างกัน
- ให้ความร้อน 6 วินาที ช่วงแรกของการคายความร้อนมีความแตกต่าง ของ ค่า average gray level มาก และค่อย ๆ ลดลง จนถึงช่วงคายความร้อนที่วินาทีที่ 3 จากนั้นความแตกต่างค่อย ๆ เพิ่มขึ้นจนถึงช่วงคายความร้อนที่วินาทีที่ 6
- ให้ความร้อน 8 วินาที ช่วงแรกของการคายความร้อนมีความแตกต่างของ ค่า average gray level มาก และเพิ่มขึ้นเล็กน้อยจนถึงช่วงคายความร้อนที่วินาทีที่ 2 จากนั้นจะค่อย ๆ ลดลงจนไม่มีความแตกต่างกัน
- ให้ความร้อน 10 วินาที ช่วงแรกของการคายความร้อนมีความแตกต่างของค่า average gray level มาก และลดลงจนถึงช่วงคายความร้อนที่วินาทีที่ 3 จากนั้นความแตกต่างเพิ่มขึ้นจนถึงช่วงคายความร้อนที่วินาทีที่ 9 และค่อย ๆ ลดลงจนไม่มีความแตกต่างกัน

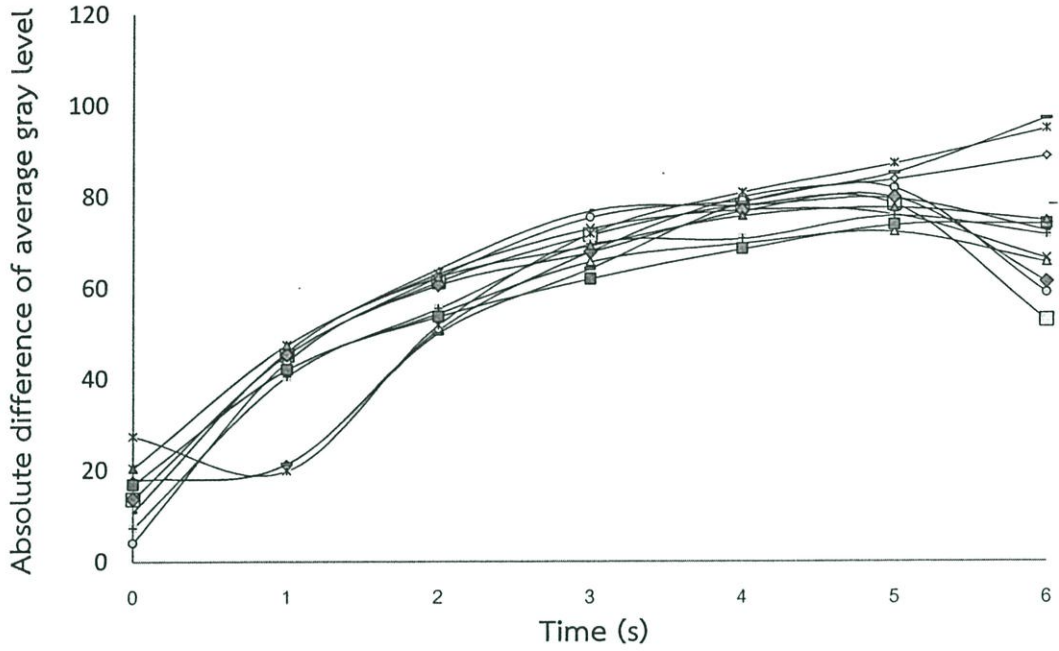
โดยค่าความแตกต่างของเมล็ดพืชและลูกเหล็กเกิดจากสมบัติทางกายภาพและสมบัติทางความร้อนของลูกเหล็กและเมล็ดพืชที่ต่างกัน ลูกเหล็กเป็นวัสดุที่มีสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนต่ำ และมีขนาดเล็ก ทำให้ลูกเหล็กสะท้อนอุณหภูมิของเมล็ดพืช และอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม ส่งผลทำให้ลูกเหล็กกับเมล็ดพืชมีความแตกต่างน้อยกว่าสิ่งแปลกปลอมชนิดอื่น

เนื่องจากการพัฒนาโปรแกรมเบื้องต้น พบว่าสามารถตรวจสอบสิ่งแปลกปลอมได้เมื่อค่า Absolute difference of average gray level ระหว่างสิ่งแปลกปลอม พื้นหลังและเมล็ดพืช มีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ 20 จากรูปที่ 4.3 จะเห็นได้ว่า การให้ความร้อนที่เวลา 6 วินาที เป็นต้นไป ที่สามารถตรวจสอบสิ่งแปลกปลอมทั้งหมดได้ แต่เลือกเวลาในการให้ความร้อนที่ 6 วินาที เพราะประหยัดเวลาในการทำงาน และประหยัดพลังงานที่ใช้ให้ความร้อน

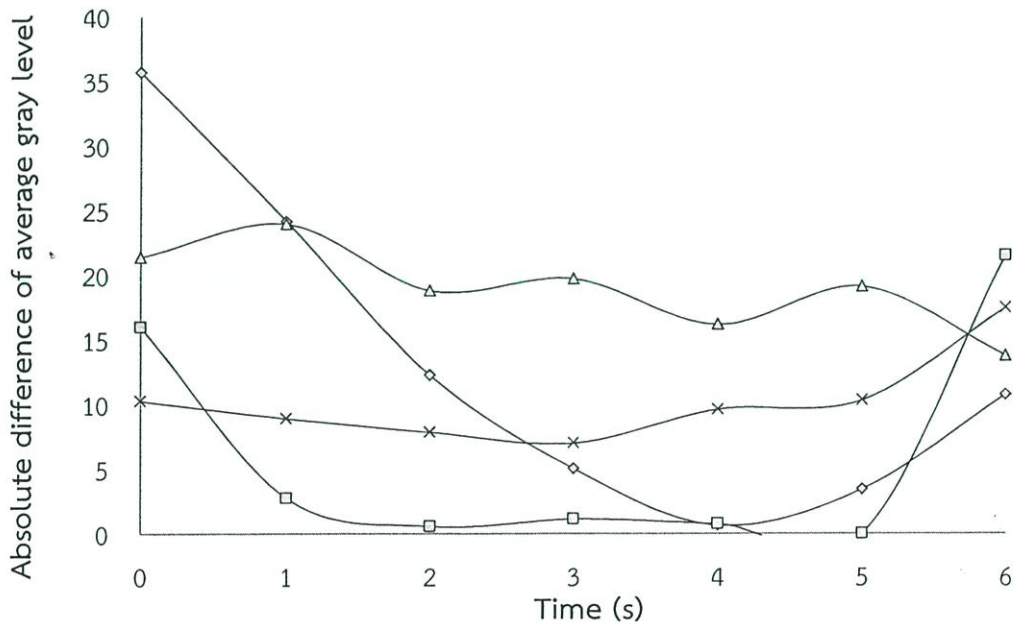


(ก)

รูปที่ 4.3 ค่า Absolute difference of average gray level กับ เวลาให้ความร้อน (ก) 2 วินาที (ข) 4 วินาที (ค) 6 วินาที (ง) 8 วินาที (จ) 10 วินาที



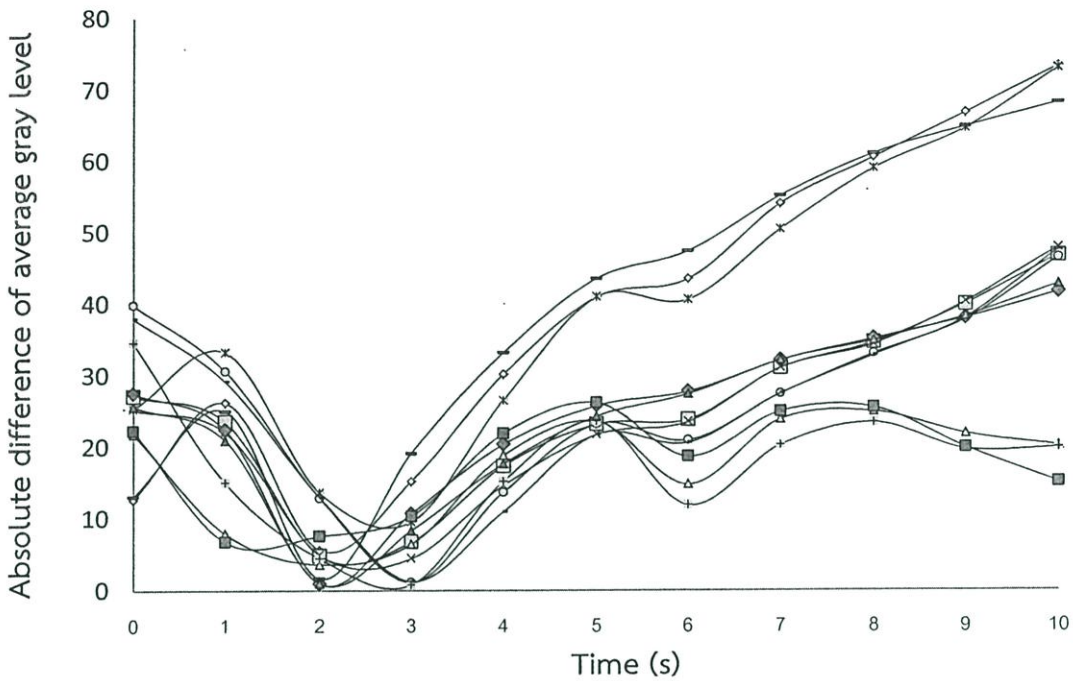
- ◇ ถั่วลิสง-เศษไม้
- ถั่วลิสง-หิน
- △ ถั่วลิสง-ลูกเหล็ก
- × ลิสง-ฟิวเจอร์บอร์ด
- * ถั่วเหลือง-เศษไม้
- ถั่วเหลือง-หิน
- + ถั่วเหลือง+ลูกเหล็ก
- ถั่วเหลือง-ฟิวเจอร์บอร์ด
- ถั่วแดง-เศษไม้
- ◆ ถั่วแดง-หิน
- ถั่วแดง-ลูกเหล็ก
- ▲ ถั่วแดง-ฟิวเจอร์บอร์ด



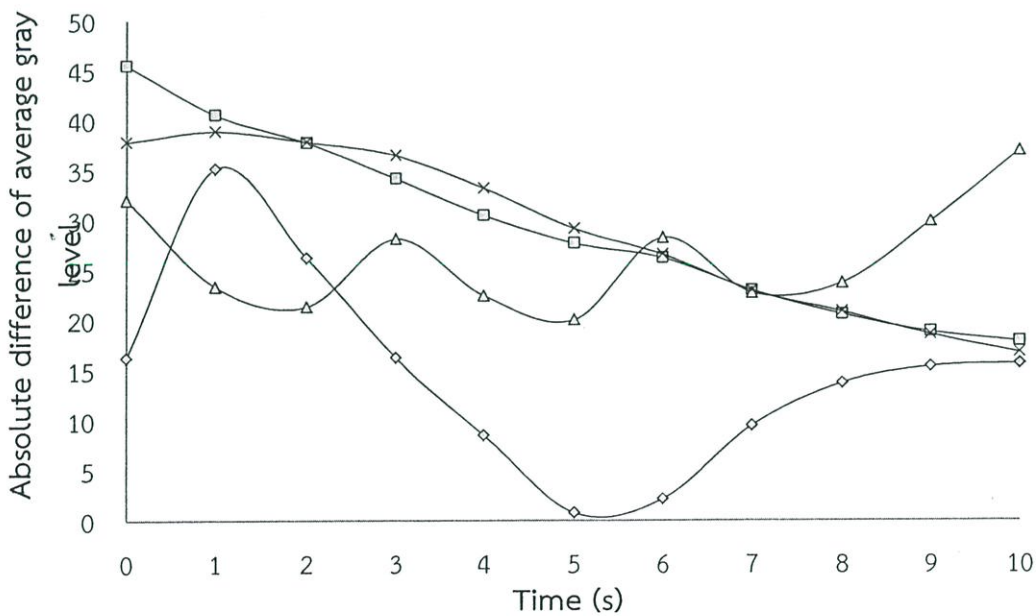
- ◇ พื้นหลัง-เศษไม้
- พื้นหลัง-หิน
- △ พื้นหลัง-ลูกเหล็ก
- × พื้นหลัง-ฟิวเจอร์บอร์ด

(ข)

รูปที่ 4.3 (ต่อ) ค่า Absolute difference of average gray level กับ เวลาให้ความร้อน
(ก) 2 วินาที (ข) 4 วินาที (ค) 6 วินาที (ง) 8 วินาที (จ) 10 วินาที



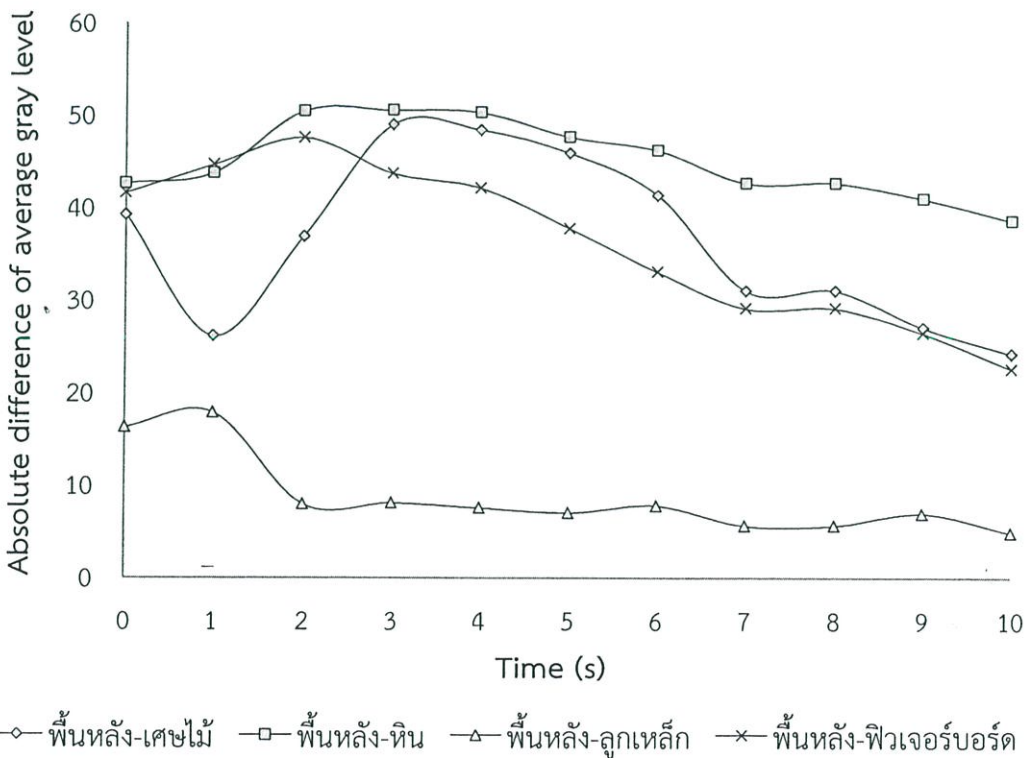
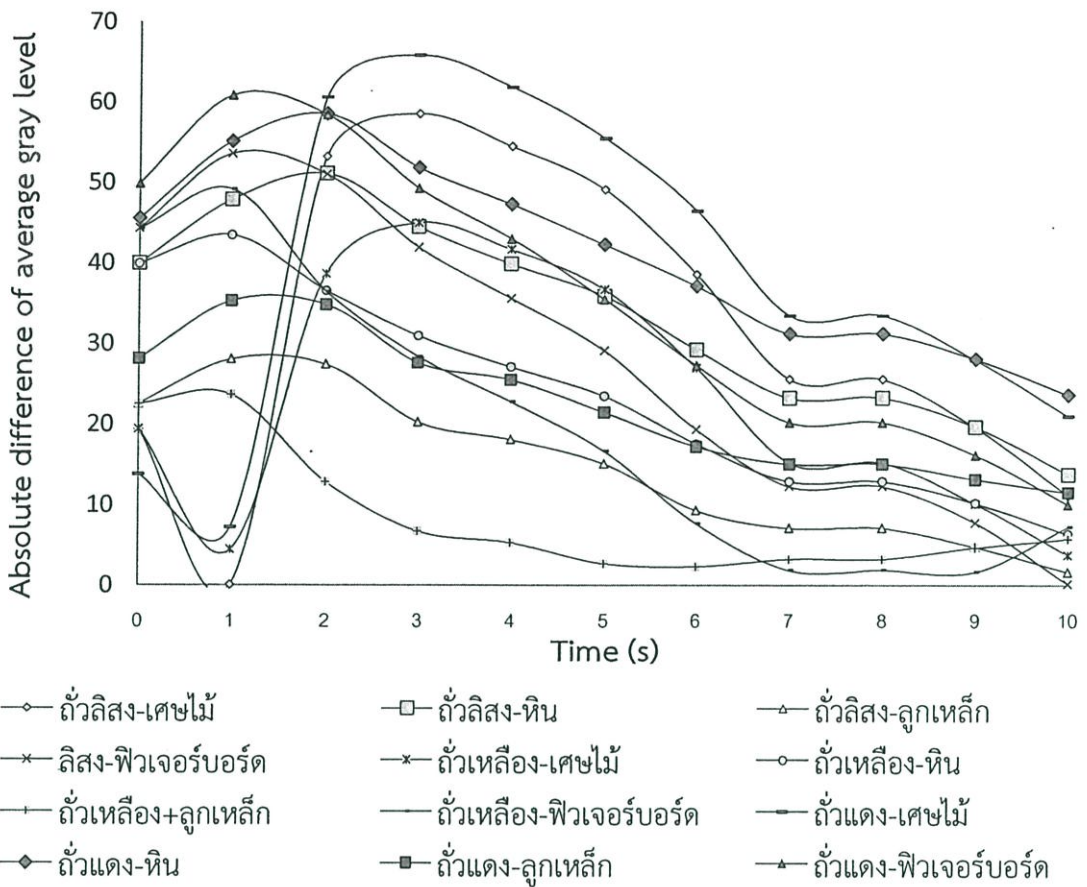
- ◇— ตัวลิสง-เศษไม้
- ตัวลิสง-หิน
- △— ตัวลิสง-ลูกเหล็ก
- ×— ลิสง-ฟิวเจอร์บอร์ด
- *— ตัวเหลือง-เศษไม้
- ตัวเหลือง-หิน
- +— ตัวเหลือง+ลูกเหล็ก
- ตัวเหลือง-ฟิวเจอร์บอร์ด
- ตัวแดง-เศษไม้
- ◇— ตัวแดง-หิน
- ตัวแดง-ลูกเหล็ก
- △— ตัวแดง-ฟิวเจอร์บอร์ด



- ◇— พื้นหลัง-เศษไม้
- พื้นหลัง-หิน
- △— พื้นหลัง-ลูกเหล็ก
- ×— พื้นหลัง-ฟิวเจอร์บอร์ด

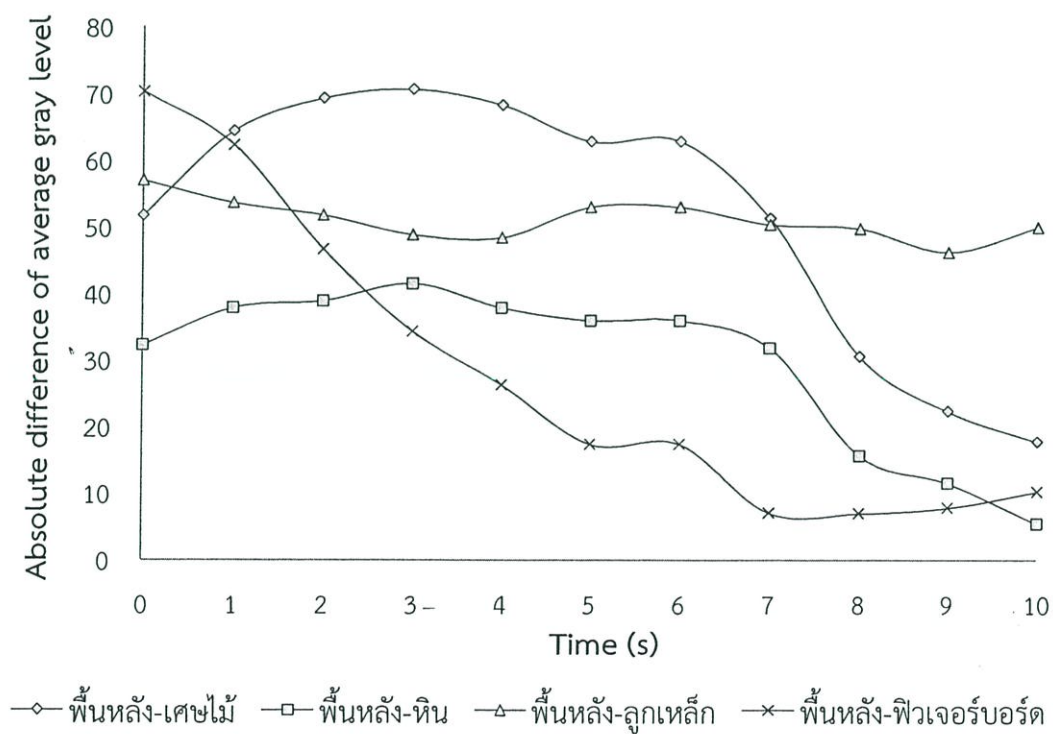
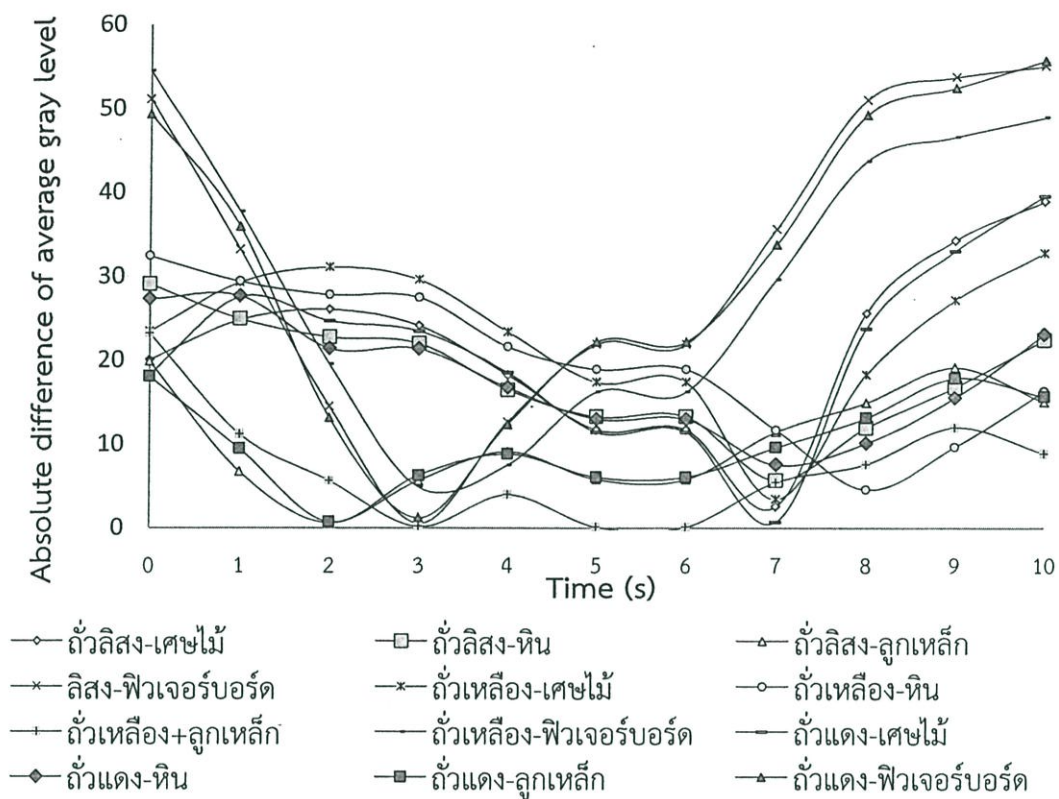
(ค)

รูปที่ 4.3 (ต่อ) ค่า Absolute difference of average gray level กับ เวลาให้ความร้อน
 (ก) 2 วินาที (ข) 4 วินาที (ค) 6 วินาที (ง) 8 วินาที (จ) 10 วินาที



(ง)

รูปที่ 4.3 (ต่อ) ค่า Absolute difference of average gray level กับ เวลาให้ความร้อน
 (ก) 2 วินาที (ข) 4 วินาที (ค) 6 วินาที (ง) 8 วินาที (จ) 10 วินาที



(จ)

รูปที่ 4.3 (ต่อ) ค่า Absolute difference of average gray level กับ เวลาให้ความร้อน

(ก) 2 วินาที (ข) 4 วินาที (ค) 6 วินาที (ง) 8 วินาที (จ) 10 วินาที

4.4 พลังงานที่กล้องถ่ายภาพร้อนได้รับจากเมล็ดพืชและสิ่งแปลกปลอม

จากการให้ความร้อนเมล็ดพืชและสิ่งแปลกปลอมเป็นเวลา 6 วินาที ซึ่งเป็นเวลาในการให้ความร้อนที่น้อยที่สุดที่สามารถนำไปตรวจสอบด้วยโปรแกรมได้ พบว่า ความร้อนที่เมล็ดพืชและสิ่งแปลกปลอมรับไว้มีค่าไม่เท่ากัน เนื่องจากวัสดุแต่ละชนิดมีความจุความร้อนจำเพาะและมวลที่แตกต่างกัน เป็นผลให้เมล็ดพืชและสิ่งแปลกปลอมมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิไม่เท่ากัน และยังส่งผลมาถึงพลังงานที่กล้องถ่ายภาพความร้อนได้รับ โดยวัสดุที่เก็บความร้อนไว้ได้มากจะแผ่รังสีความร้อนออกมามาก กล้องถ่ายภาพความร้อนจึงมองเห็นวัตถุนั้นมีอุณหภูมิสูง นอกจากนี้ยังมีตัวแปรอื่นที่เกี่ยวข้องกับพลังงานที่วัตถุแผ่ออกมา นั่นคือ สัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อน และพื้นที่ของวัสดุ วัตถุที่มีค่าความจุความร้อนจำเพาะสูง ค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนสูง และมีพื้นที่ขนาดใหญ่ จะได้อำนาจพลังงานความร้อนแผ่ออกมาที่กล้องถ่ายภาพความร้อนมากที่สุด ค่าพลังงานที่แผ่ออกมาจากวัสดุแต่ละชนิดแสดงสรุปในตารางที่ 4.2

4.5 ผลการตรวจสอบสิ่งแปลกปลอมด้วยโปรแกรม

รูปที่ 4.4-4.11 แสดงภาพถ่ายและภาพถ่ายความร้อนของถั่วลิสกกับเศษหิน ถั่วลิสกกับเศษพลาสติก (พีวีเจอร์บอร์ด) ถั่วเหลืองกับเศษหิน ถั่วเหลืองกับเศษพลาสติก (พีวีเจอร์บอร์ด) ถั่วแดงกับเศษพลาสติก (พีวีเจอร์บอร์ด) ถั่วแดงกับเศษไม้ ถั่วลิสกกับลูกเหล็ก และถั่วเหลืองกับลูกเหล็ก ตามลำดับ ที่จำนวนวัสดุต่าง ๆ และรูปที่ 4.17-4.24 แสดงภาพที่ได้จากการประมวลผลด้วยโปรแกรมที่พัฒนาขึ้น จะเห็นได้ว่าจำนวนเมล็ดพืชที่มากขึ้นมีผลทำให้ความผิดพลาดในการตรวจสอบพื้นที่มากขึ้นตาม แต่ยังสามารถตรวจสอบสิ่งแปลกปลอมที่ปนมากับเมล็ดพืชได้ แต่มีความแม่นยำน้อยลง

รูปที่ 4.12-4.15 (ภาพลำดับเลขที่) แสดงภาพถ่ายและภาพถ่ายความร้อนของถั่วลิสกกับเศษไม้ ถั่วแดงกับลูกเหล็ก ถั่วแดงกับเศษหิน และถั่วเหลืองกับเศษไม้ ตามลำดับ ที่จำนวนวัสดุต่าง ๆ และรูปที่ 4.24-4.27 (ภาพลำดับเลขที่) แสดงภาพที่ได้จากการประมวลผลด้วยโปรแกรมที่พัฒนาขึ้น ซึ่งการตรวจสอบภาพถ่ายด้วยโปรแกรมจะไม่สามารถตรวจสอบ เศษไม้ เศษหิน และลูกเหล็ก ได้โดยตรง จำเป็นต้องตรวจสอบเมล็ดพืช และพื้นหลังก่อน จากนั้นจึงนำพื้นที่ของเมล็ดพืชและพื้นที่ของพื้นหลังมาลบกับพื้นที่ของภาชนะ สำหรับภาพถ่ายความร้อนสามารถตรวจสอบได้ตามปกติ

ผลการคำนวณค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดแสดงดังตารางที่ 4.3 โดยค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดของพื้นที่ในการตรวจสอบสิ่งแปลกปลอมด้วยภาพถ่ายความร้อนมีค่าเพิ่มขึ้นตามจำนวนของเมล็ดพืช ซึ่งค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดของพื้นที่ ของภาพถ่ายเกิดจากเงาจากการให้แสงไฟส่งผลให้โทนสีของภาพต่างไปจากความจริง การเบียดกันของสิ่งแปลกปลอมกับเมล็ดพืชเมื่อจำนวนเมล็ดพืชเพิ่มขึ้นทำให้สิ่งแปลกปลอมบางชิ้นถูกบดบัง และข้อจำกัดของโปรแกรมเมื่อเมล็ดพืชและสิ่งแปลกปลอมที่ใช้ตรวจสอบมีโทนสีที่ใกล้เคียงกันจะทำให้มีความผิดพลาดมากขึ้น และความผิดพลาดที่เกิดขึ้นในกรณีของภาพถ่ายความร้อนเกิดจากแผ่รังสีความร้อนไปมาระหว่างเมล็ดพืชและสิ่งแปลกปลอมที่อยู่ใกล้กัน ส่งผลทำให้สีที่เกิดขึ้นจากการคายความร้อนมีโทนสีที่ใกล้เคียงกัน แสดงดังรูปที่ 4.28

ตารางที่ 4.4 แสดงการเปรียบเทียบความสามารถในการตรวจสอบสิ่งแปลกปลอมโดยใช้ภาพถ่ายและภาพถ่ายความร้อนที่จำนวนเมล็ดพืชและสิ่งแปลกปลอมเดียวกัน พบว่าสามารถจัดกลุ่มตัวอย่าง ได้ 4 กลุ่มดังนี้

- กลุ่มที่มีสีแตกต่างกัน เหมาะกับการตรวจสอบสิ่งแปลกปลอมด้วยภาพถ่าย เช่น ถั่วลิสงกับพลาสติก ถั่วแดงกับพลาสติก ถั่วเหลืองกับพลาสติก ถั่วเหลืองกับหิน ถั่วแดงกับไม้
- กลุ่มที่มีสีเหมือนกันแต่รูปร่างต่างกัน เหมาะกับการตรวจสอบสิ่งแปลกปลอมด้วยภาพถ่าย เช่น ถั่วลิสงกับไม้ และถั่วเหลืองกับไม้
- กลุ่มที่มีความจุนความร้อนแตกต่างกัน เหมาะกับการตรวจสอบสิ่งแปลกปลอมด้วยภาพถ่าย ความร้อน เช่น ถั่วลิสงกับเศษหิน และถั่วแดงกับเศษหิน ซึ่งความแตกต่างที่เกิดในภาพถ่าย ความร้อนเป็นผลมาจากการรับพลังงานของถั่วแดง ถั่วลิสง กับเศษหิน และพลังงานรังสีอินฟราเรดที่กล้องได้รับแสดงดังตารางที่ 4.2 อย่างไรก็ตามความสามารถในการตรวจสอบสิ่งแปลกปลอมด้วยภาพถ่ายจะลดลงเมื่อเมล็ดพืชและสิ่งแปลกปลอมมีระยะห่างน้อยแสดงดังรูปที่ 4.28 และ
- กลุ่มที่พื้นผิวของสิ่งแปลกปลอมมีความมันวาว และมีสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนที่ต่ำ ในกลุ่มนี้จะไม่เหมาะกับการตรวจสอบด้วยภาพถ่ายความร้อนเพราะกล้องถ่ายภาพความร้อนรับรังสีความร้อนที่เกิดจากการสะท้อนแทน จากเมล็ดพืช จึงทำให้ไม่เกิดความแตกต่างระหว่างสิ่งแปลกปลอมและเมล็ดพืชแสดงดังรูปที่ 4.29 จึงต้องตรวจสอบด้วยภาพถ่าย เช่น เมล็ดพืชกับลูกเหล็ก อย่างไรก็ตามหากสีของสิ่งแปลกปลอมที่มีพื้นผิวมันวาวใกล้เคียงกับเมล็ดพืชจะไม่สามารถตรวจสอบได้เช่นกัน

ตารางที่ 4.2 สรุปสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อน ความจุความร้อนจำเพาะ มาลาวัตฤ พื้นที่ และพลังงานที่แผ่ออกเมื่อได้รับความร้อน 6 วินาที

ชนิดวัสดุ	ความจุความร้อนจำเพาะ (kJ/kg·K)	น้ำหนักเฉลี่ย (กรัม/เมล็ด)	สัมประสิทธิ์การแผ่ รังสีความร้อน	พื้นที่ (cm ²)	พลังงานความร้อนที่ วัตถุได้รับ (Watts)	พลังงานที่กักเก็บ ได้รับ (Watts)
ถั่วลิสง	2.52 ± 0.40	0.76 ± 0.02	0.92-0.96	1.07 ± 0.34	0.30 ± 0.05	0.05 ± 0.00
ถั่วแดง	2.62 ± 0.41	0.60 ± 0.02	0.93-0.96	1.14 ± 0.56	0.22 ± 0.02	0.06 ± 0.00
ถั่วเหลือง	2.58 ± 0.13	0.18 ± 0.02	0.93-0.95	0.35 ± 0.07	0.07 ± 0.01	0.02 ± 0.00
เศษหิน (แกรนิต)	1.40 ± 0.29	0.36 ± 0.02	0.88-0.95	0.82 ± 0.32	0.12 ± 0.02	0.04 ± 0.00
เศษไม้ (อัด)	2.53 ± 0.16	0.12 ± 0.03	0.82-0.92	0.51 ± 0.09	0.09 ± 0.00	0.02 ± 0.00
ลูกเหล็ก	0.83 ± 0.11	0.44 ± 0.01	0.21-0.28	0.20 ± 0.00	0.08 ± 0.03	0.01 ± 0.00
พลาสติก (พีวีเออร์บอร์ด)	1.91 ± 0.40	0.05 ± 0.02	0.84-0.86	1.08 ± 0.00	0.05 ± 0.00	0.05 ± 0.00

หมายเหตุ ค่าพลังงานความร้อนเฉลี่ย 3 ครั้ง

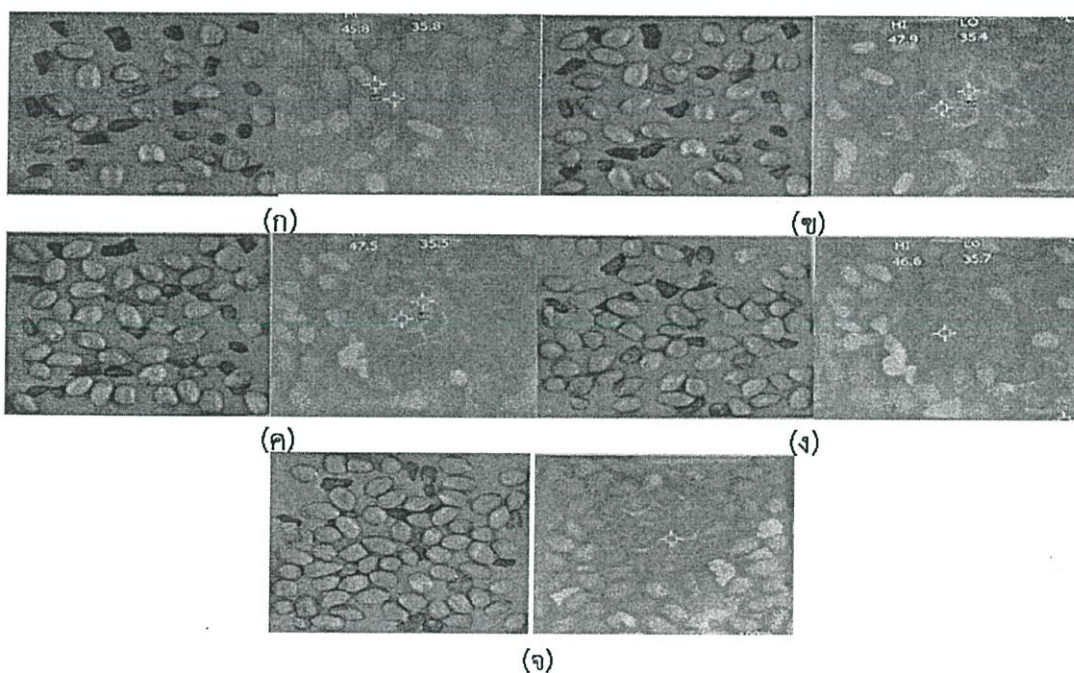
ตารางที่ 4.3 ผลการเปรียบเทียบพื้นที่เฉลี่ย 3 ครั้ง ที่ได้จากการวัดและพื้นที่ที่ได้จากโปรแกรมตรวจสอบสิ่งแวดล้อมด้วยภาพถ่ายความร้อน

ชนิด	จำนวน (เมตร)	เศษหิน 20 ซิน		เศษพลาสติก 20 ซิน		เศษไม้ 20 ซิน	
		Prog.	% Err.	Prog.	% Err.	Prog.	% Err.
ถั่วลิสง	20	11.76 ± 0.07	1.99 ± 0.02	21.18 ± 0.02	2.10 ± 0.00	10.58 ± 0.02	11.90 ± 0.04
	30	9.80 ± 0.03	18.34 ± 0.08	18.31 ± 0.07	15.35 ± 0.11	9.04 ± 0.08	12.44 ± 0.13
	40	9.72 ± 0.10	19.03 ± 0.03	17.39 ± 0.15	19.62 ± 0.04	13.07 ± 0.04	26.60 ± 0.07
	50	16.03 ± 0.12	33.62 ± 0.07	26.03 ± 0.07	20.35 ± 0.06	13.90 ± 0.02	34.65 ± 0.18
	60	16.27 ± 0.08	57.64 ± 0.15	34.20 ± 0.09	58.12 ± 0.08	14.19 ± 0.14	37.51 ± 0.04
	20	11.51 ± 0.08	1.48 ± 0.03	21.61 ± 0.04	4.03 ± 0.00	11.47 ± 0.07	11.13 ± 0.00
ถั่วแดง	30	14.07 ± 0.12	17.31 ± 0.05	23.39 ± 0.02	8.10 ± 0.02	12.65 ± 0.12	22.56 ± 0.02
	40	14.94 ± 0.11	24.49 ± 0.07	17.07 ± 0.13	21.11 ± 0.04	12.78 ± 0.11	23.85 ± 0.04
	50	8.99 ± 0.09	25.10 ± 0.11	39.67 ± 0.12	83.52 ± 0.18	13.08 ± 0.04	26.73 ± 0.07
	20	12.57 ± 0.07	11.04 ± 0.15	21.50 ± 0.08	0.62 ± 0.00	11.27 ± 0.07	9.23 ± 0.11
	30	13.10 ± 0.12	9.15 ± 0.11	20.57 ± 0.04	4.91 ± 0.02	12.08 ± 0.04	17.09 ± 0.06
	40	10.53 ± 0.11	12.26 ± 0.08	23.41 ± 0.05	8.24 ± 0.07	13.50 ± 0.02	30.84 ± 0.12
ถั่วเหลือง	50	9.91 ± 0.18	17.40 ± 0.22	24.61 ± 0.07	13.75 ± 0.05	6.76 ± 0.11	34.54 ± 0.13
	60	9.83 ± 0.14	18.08 ± 0.33	25.00 ± 0.12	15.55 ± 0.02	14.01 ± 0.15	35.72 ± 0.07
	70	15.21 ± 0.11	26.74 ± 0.18	28.72 ± 0.11	32.78 ± 0.08	14.39 ± 0.04	39.43 ± 0.04
	80	17.25 ± 0.25	43.72 ± 0.12	33.39 ± 0.18	54.34 ± 0.33	4.78 ± 0.49	53.65 ± 0.15

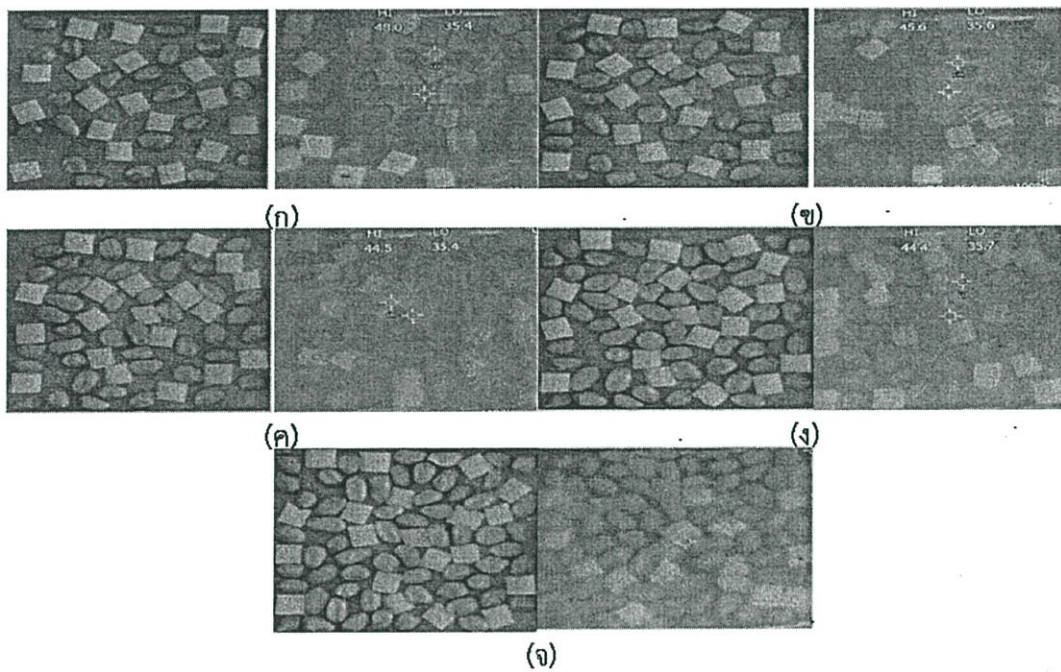
หมายเหตุ พื้นที่จริงของสิ่งแวดล้อมไม่ได้แก่ เศษหิน เศษพลาสติก เศษไม้ และลูกเหล็ก มีค่า 12.00 10.32 3.93 และ 21.63 ตารางเซนติเมตร ตามลำดับ

ตารางที่ 4.4 ความสามารถในการตรวจสอบสิ่งแปลกปลอมด้วยภาพถ่ายความร้อน

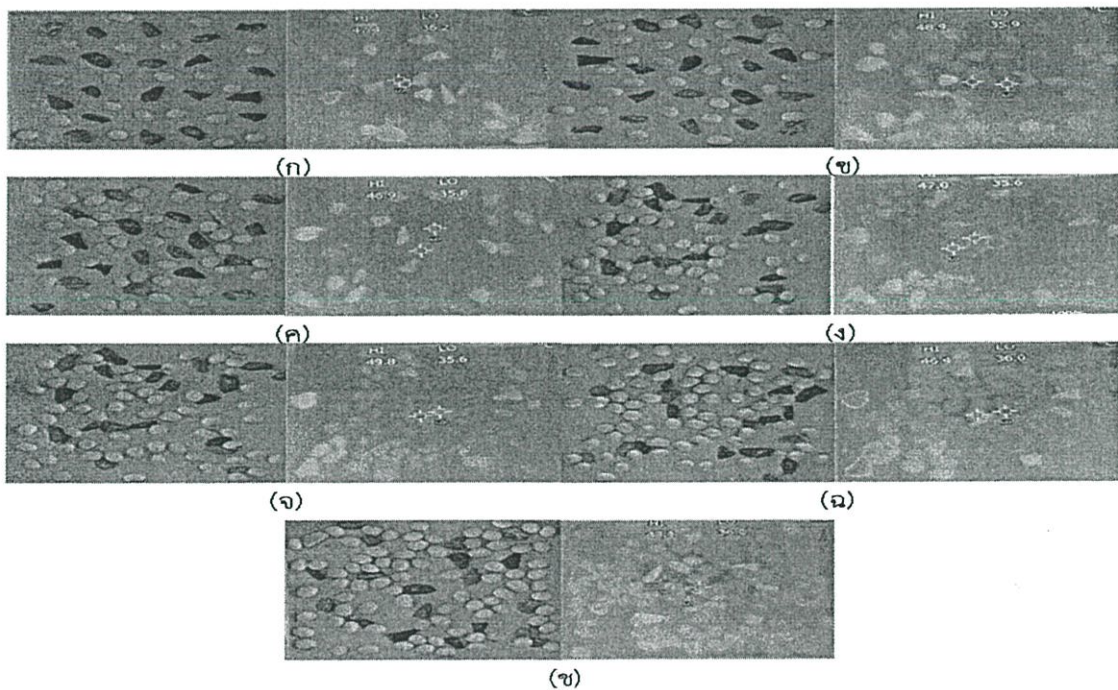
เมล็ดพืช	สิ่งแปลกปลอม	ค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาด (% Error)
ถั่วลิสง	เศษพลาสติก	1.95 ± 0.00
	เศษหิน	1.99 ± 0.02
	เศษไม้	11.90 ± 0.04
	ลูกเหล็ก	
ถั่วแดง	เศษพลาสติก	4.03 ± 0.00
	เศษหิน	1.48 ± 0.02
	เศษไม้	11.13 ± 0.00
	ลูกเหล็ก	
ถั่วเหลือง	เศษพลาสติก	0.62 ± 0.00
	เศษหิน	11.04 ± 0.15
	เศษไม้	9.23 ± 0.11
	ลูกเหล็ก	-



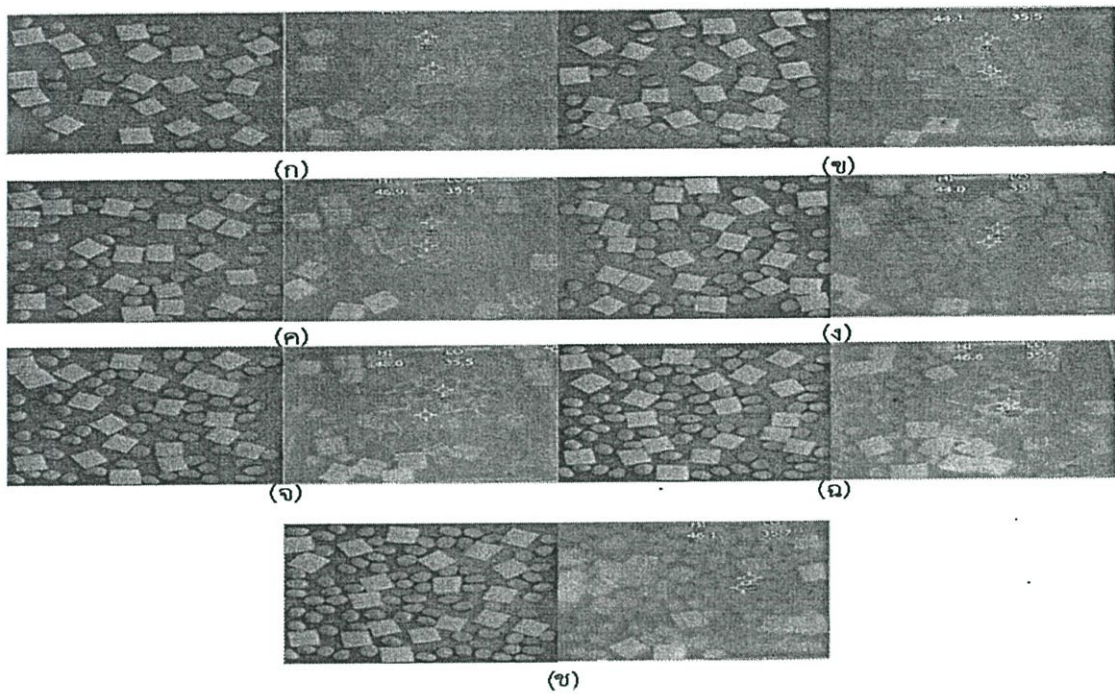
รูปที่ 4.4 ภาพถ่ายและภาพถ่ายความร้อนถั่วลิสงจำนวน (ก) 20 เมล็ด (ข) 30 เมล็ด (ค) 40 เมล็ด (ง) 50 เมล็ด และ (จ) 60 เมล็ด โดยมีเศษหินจำนวน 20 ชิ้น



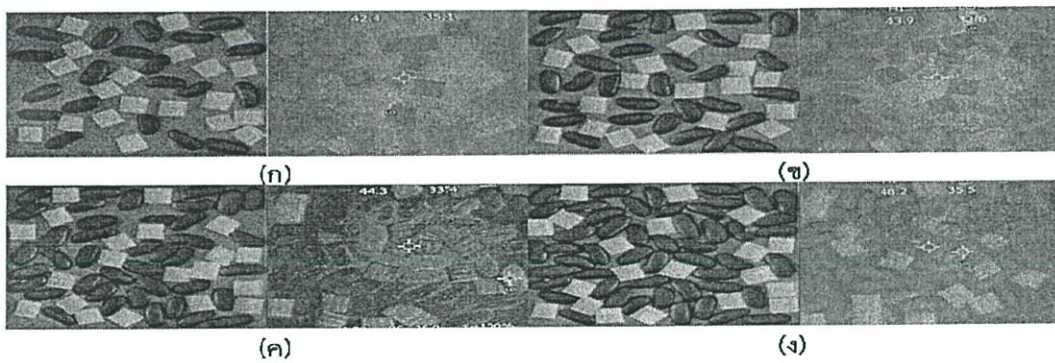
รูปที่ 4.5 ภาพถ่ายและภาพถ่ายความร้อนด้วยลิสงจำนวน (ก) 20 เมล็ด (ข) 30 เมล็ด (ค) 40 เมล็ด (ง) 50 เมล็ด และ (จ) 60 เมล็ด โดยมีเศษพลาสติกจำนวน 20 ชิ้น



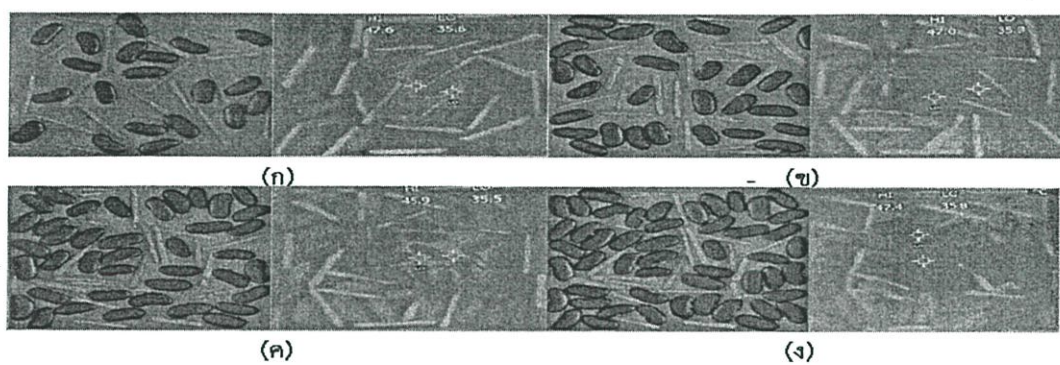
รูปที่ 4.6 ภาพถ่ายและภาพถ่ายความร้อนด้วยเหล็กจำนวน (ก) 20 เมล็ด (ข) 30 เมล็ด (ค) 40 เมล็ด (ง) 50 เมล็ด และ (จ) 60 เมล็ด (ฉ) 70 เมล็ด (ช) 80 เมล็ด โดยมีเศษหินจำนวน 20 ชิ้น



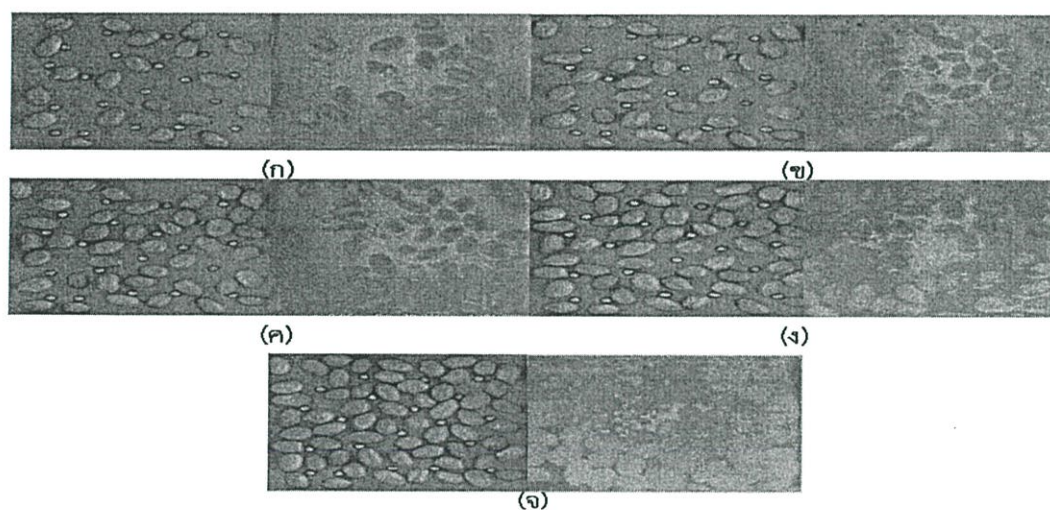
รูปที่ 4.7 ภาพถ่ายและภาพถ่ายความร้อนแก้วเหลืองจำนวน (ก) 20 เมล็ด (ข) 30 เมล็ด (ค) 40 เมล็ด (ง) 50 เมล็ด และ (จ) 60 เมล็ด (ฉ) 70 เมล็ด (ช) 80 เมล็ด โดยมีเศษพลาสติกจำนวน 20 ชิ้น



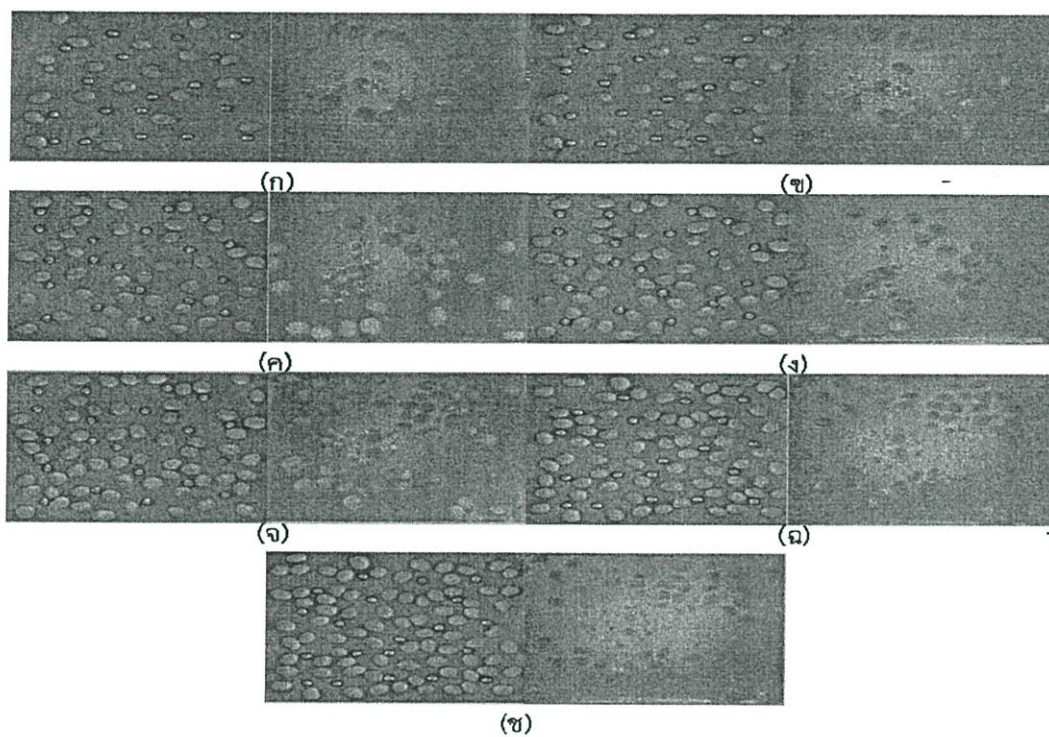
รูปที่ 4.8 ภาพถ่ายและภาพถ่ายความร้อนแก้วแดงจำนวน (ก) 20 เมล็ด (ข) 30 เมล็ด (ค) 40 เมล็ด และ (ง) 50 เมล็ด โดยมีเศษพลาสติกจำนวน 20 ชิ้น



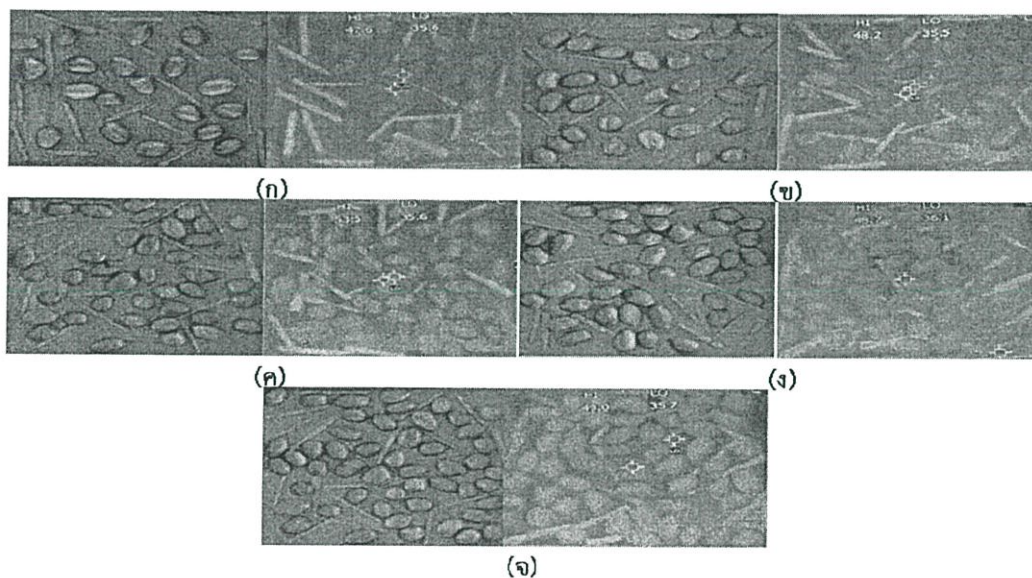
รูปที่ 4.9 ภาพถ่ายและภาพถ่ายความร้อนถั่วแดงจำนวน (ก) 20 เมล็ด (ข) 30 เมล็ด (ค) 40 เมล็ด และ (ง) 50 เมล็ด โดยมีเศษไม้ 20 ชิ้น



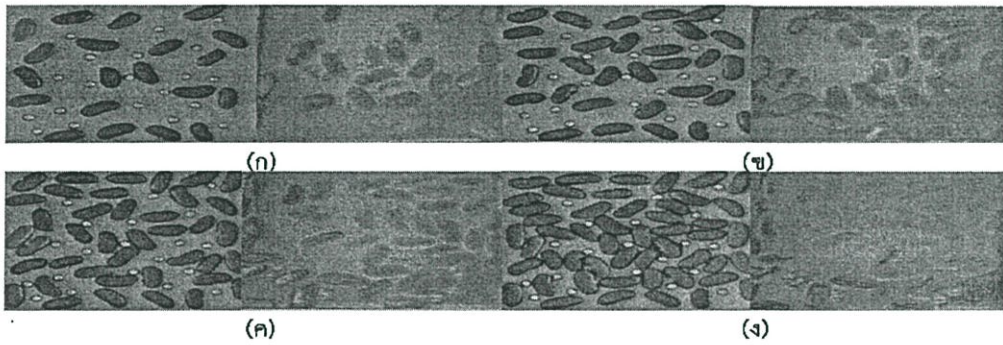
รูปที่ 4.10 ภาพถ่ายและภาพถ่ายความร้อนถั่วลิสงจำนวน (ก) 20 เมล็ด (ข) 30 เมล็ด (ค) 40 เมล็ด (ง) 50 เมล็ด และ (จ) 60 เมล็ด โดยมีลูกเหล็ก 20 ชิ้น



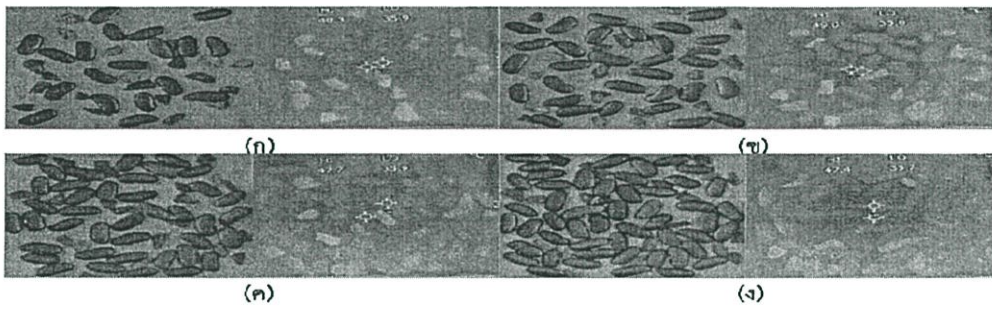
รูปที่ 4.11 ภาพถ่ายและภาพถ่ายความร้อนถั่วเหลืองจำนวน (ก) 20 เมล็ด (ข) 30 เมล็ด (ค) 40 เมล็ด (ง) 50 เมล็ด (จ) 60 เมล็ด (ฉ) 70 เมล็ด และ (ฉ) 80 เมล็ด โดยมีลูกเหล็ก 20 ชิ้น



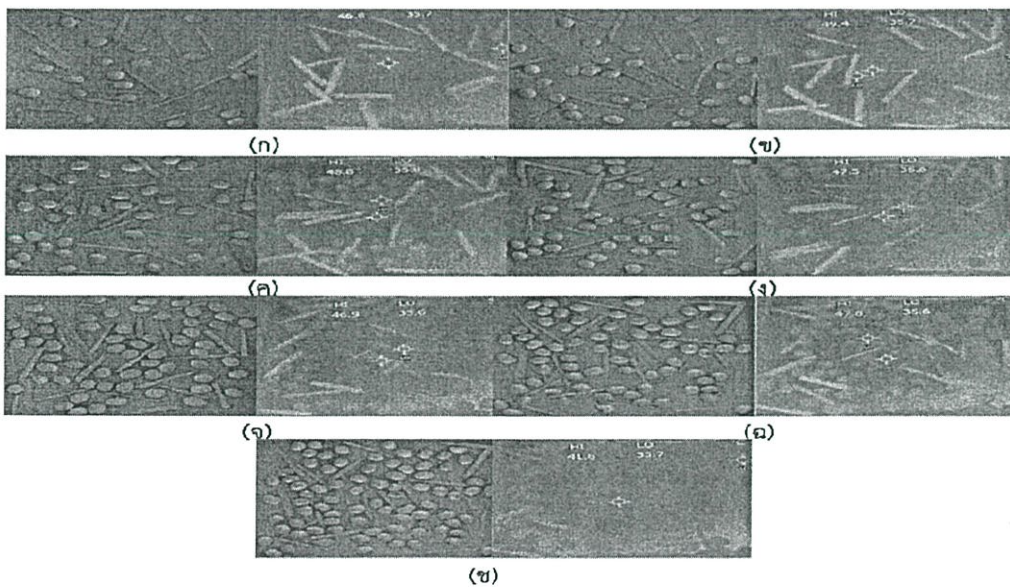
รูปที่ 4.12 ภาพถ่ายและภาพถ่ายความร้อนถั่วลิสงจำนวน (ก) 20 เมล็ด (ข) 30 เมล็ด (ค) 40 เมล็ด (ง) 50 เมล็ด และ (จ) 60 เมล็ด โดยมีเศษไม้ 20 ชิ้น



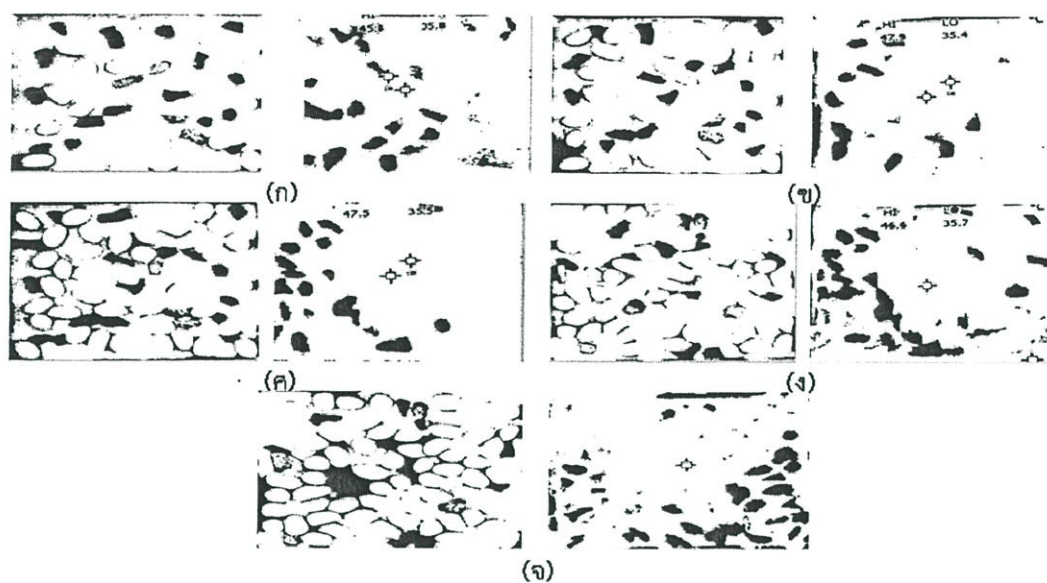
รูปที่ 4.13 ภาพถ่ายและภาพถ่ายความร้อนถั่วแดงจำนวน (ก) 20 เมล็ด (ข) 30 เมล็ด (ค) 40 เมล็ด และ (ง) 50 เมล็ด โดยมีเศษหิน 20 ชิ้น



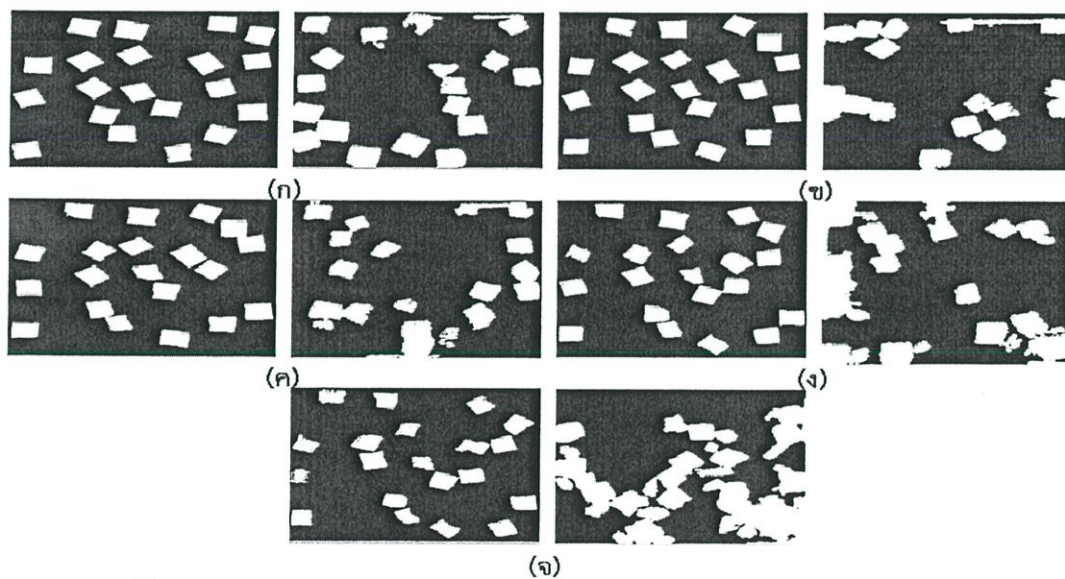
รูปที่ 4.14 ภาพถ่ายและภาพถ่ายความร้อนถั่วแดงจำนวน (ก) 20 เมล็ด (ข) 30 เมล็ด (ค) 40 เมล็ด และ (ง) 50 เมล็ด โดยมีเศษหิน 20 ชิ้น



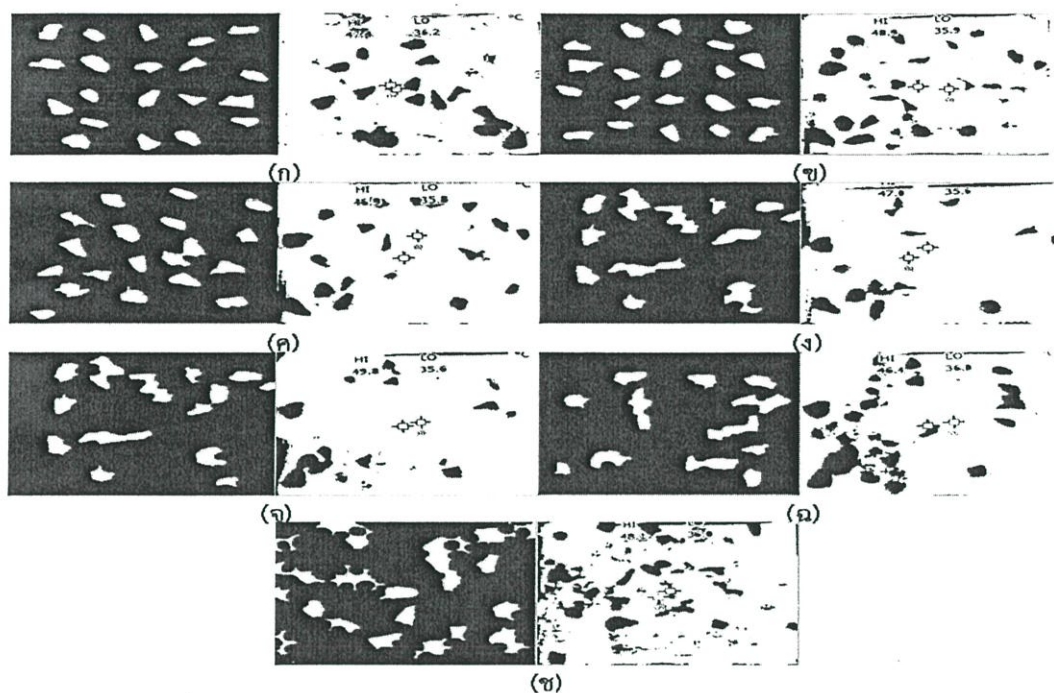
รูปที่ 4.15 ภาพถ่ายและภาพถ่ายความร้อนถั่วเหลืองจำนวน (ก) 20 เมล็ด (ข) 30 เมล็ด (ค) 40 เมล็ด (ง) 50 เมล็ด (จ) 60 เมล็ด (ฉ) 70 เมล็ด และ (ฉ) 80 เมล็ด โดยมีเศษไม้ 20 ชิ้น



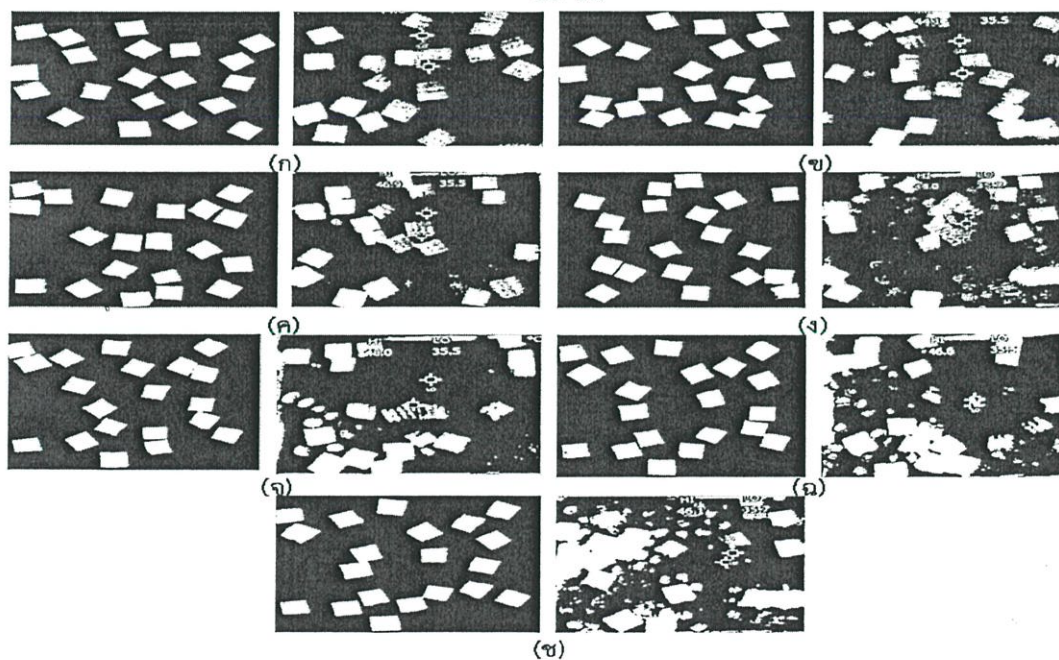
รูปที่ 4.16 ภาพถ่ายและภาพถ่ายความร้อนถั่วลิสงที่วิเคราะห์ด้วยโปรแกรมจำนวน (ก) 20 เมล็ด (ข) 30 เมล็ด (ค) 40 เมล็ด (ง) 50 เมล็ด และ (จ) 60 เมล็ด โดยมีเศษหินจำนวน 20 ชิ้น



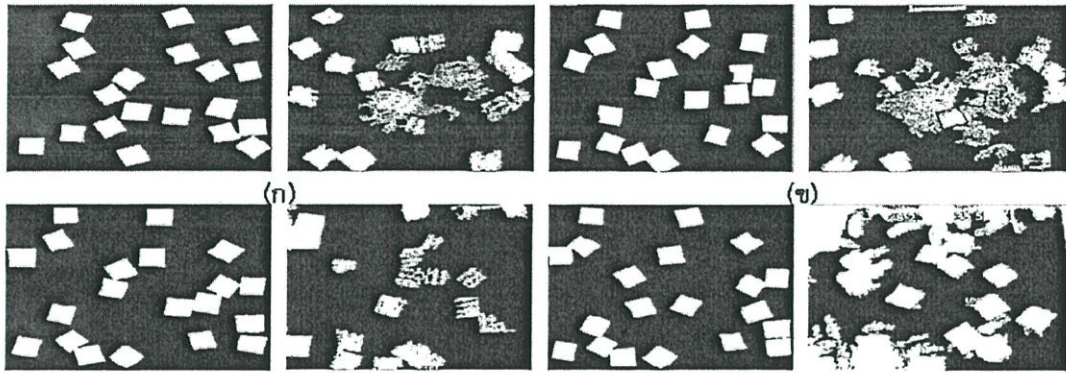
รูปที่ 4.17 ภาพถ่ายและภาพถ่ายความร้อนถั่วลิสงที่วิเคราะห์ด้วยโปรแกรมจำนวน (ก) 20 เมล็ด (ข) 30 เมล็ด (ค) 40 เมล็ด (ง) 50 เมล็ด และ (จ) 60 เมล็ด โดยมีเศษพลาสติกจำนวน 20 ชิ้น



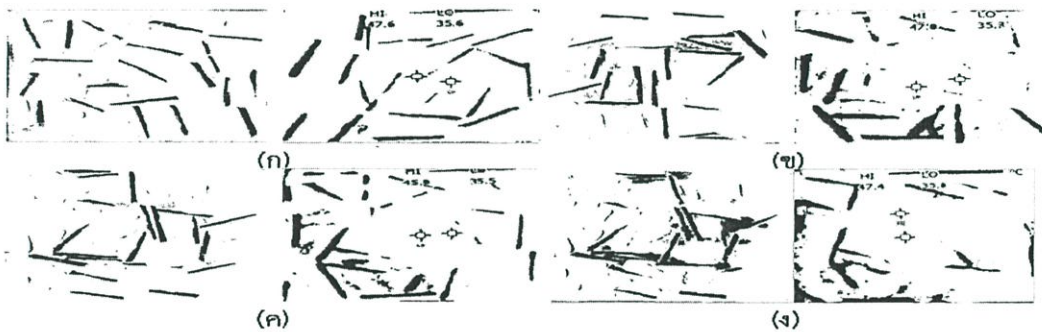
รูปที่ 4.18 ภาพถ่ายและภาพถ่ายความร้อนถั่วเหลืองที่วิเคราะห์ด้วยโปรแกรมจำนวน (ก) 20 เมล็ด (ข) 30 เมล็ด (ค) 40 เมล็ด (ง) 50 เมล็ด และ (จ) 60 เมล็ด (ฉ) 70 เมล็ด (ช) 80 เมล็ด โดยมีเศษหินจำนวน 20 ชิ้น



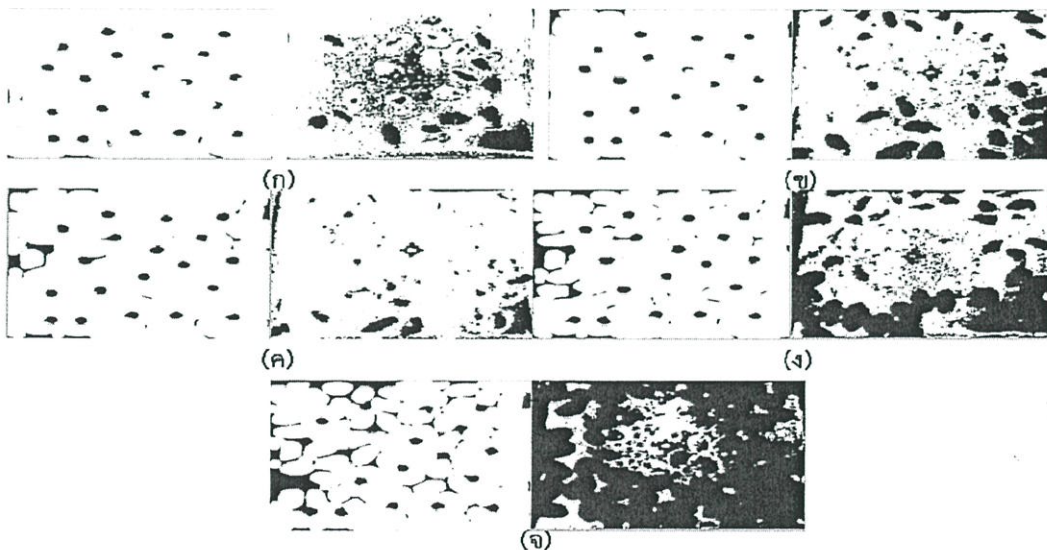
รูปที่ 4.19 ภาพถ่ายและภาพถ่ายความร้อนถั่วเหลืองที่วิเคราะห์ด้วยโปรแกรมจำนวน (ก) 20 เมล็ด (ข) 30 เมล็ด (ค) 40 เมล็ด (ง) 50 เมล็ด และ (จ) 60 เมล็ด (ฉ) 70 เมล็ด (ช) 80 เมล็ด มีเศษพลาสติกจำนวน 20 ชิ้น



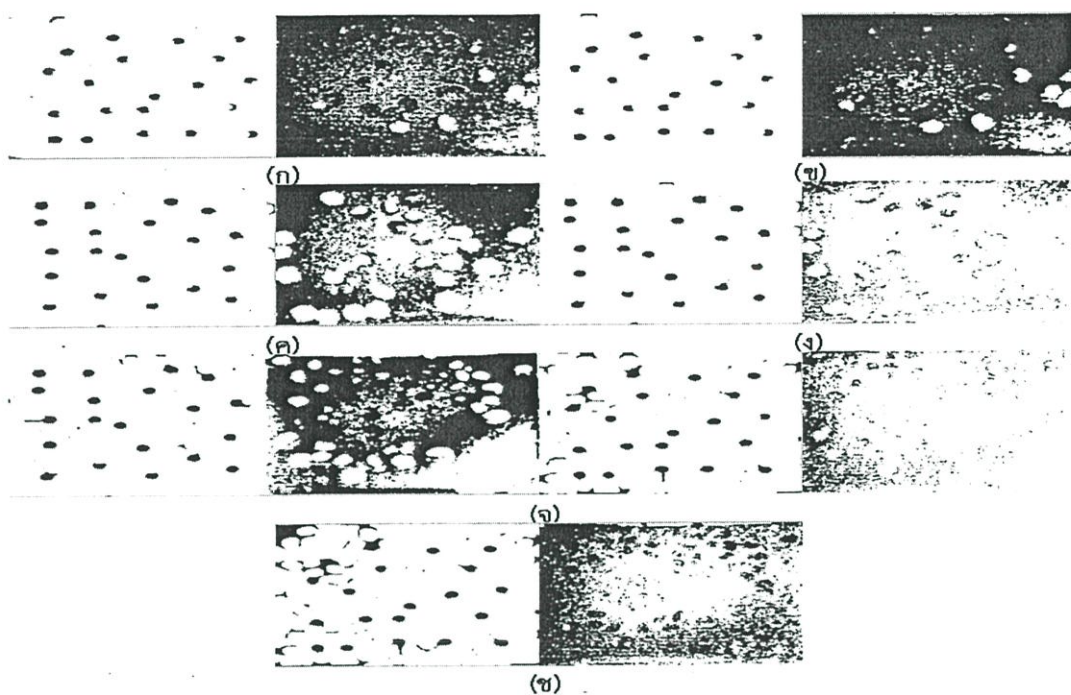
รูปที่ 4.20 ภาพถ่ายและภาพถ่ายความร้อนถั่วแดงที่วิเคราะห์ด้วยโปรแกรมจำนวน (ก) 20 เมล็ด (ข) 30 เมล็ด (ค) 40 เมล็ด และ (ง) 50 เมล็ด มีเศษพลาสติกจำนวน 20 ชิ้น



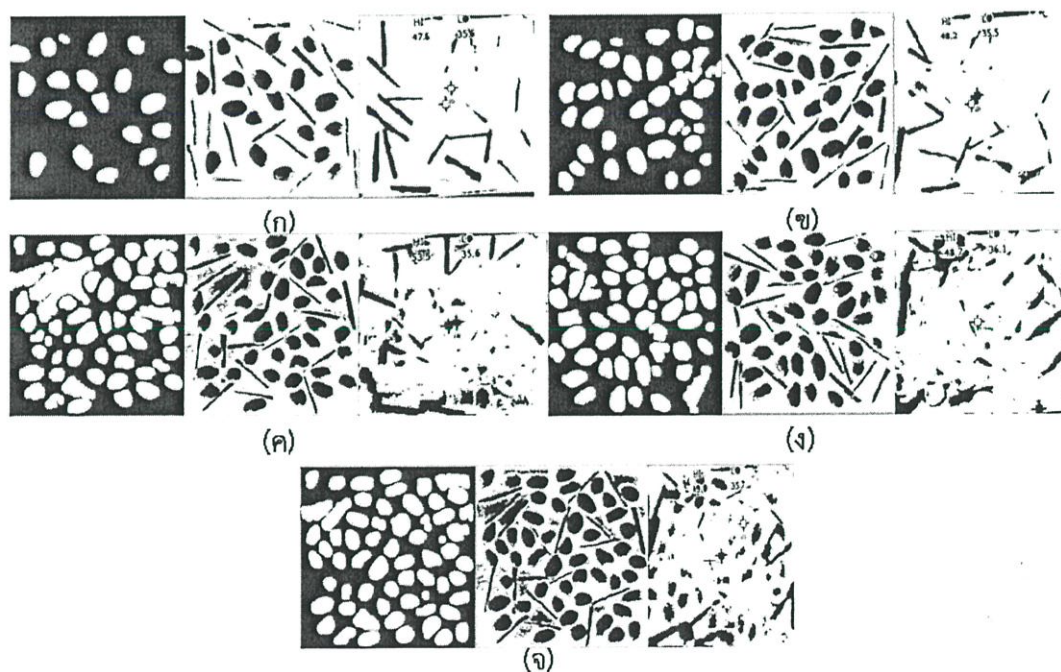
รูปที่ 4.21 ภาพถ่ายและภาพถ่ายความร้อนถั่วแดงที่วิเคราะห์ด้วยโปรแกรมจำนวน (ก) 20 เมล็ด (ข) 30 เมล็ด (ค) 40 เมล็ด และ (ง) 50 เมล็ด มีเศษไม้ 20 ชิ้น



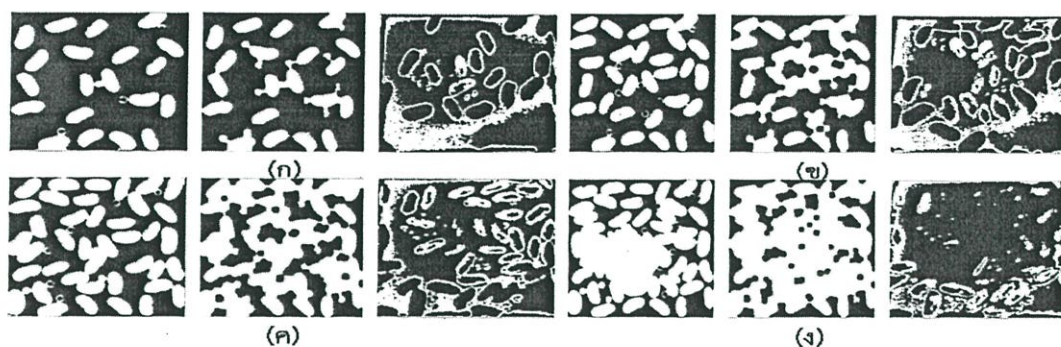
รูปที่ 4.22 ภาพถ่ายและภาพถ่ายความร้อนถั่วลิสงที่วิเคราะห์ด้วยโปรแกรมจำนวน (ก) 20 เมล็ด (ข) 30 เมล็ด (ค) 40 เมล็ด (ง) 50 เมล็ด และ (จ) 60 เมล็ด มีลูกเหล็ก 20 ชิ้น



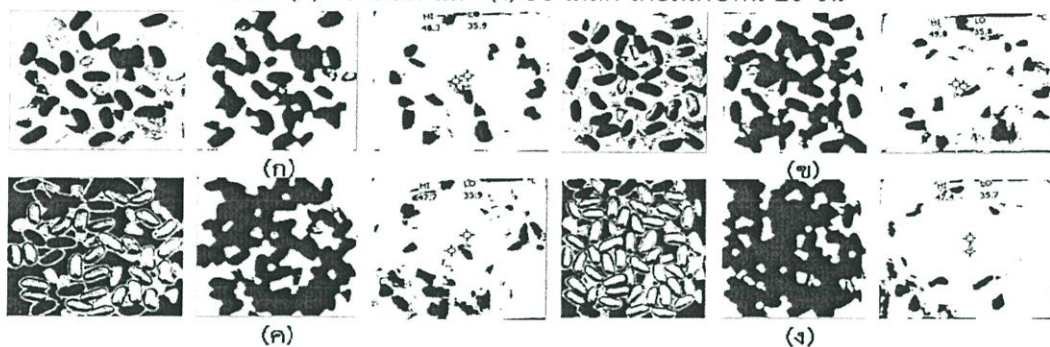
รูปที่ 4.23 ภาพถ่ายและภาพถ่ายความร้อนแก้วเหลืองที่วิเคราะห์ด้วยโปรแกรมจำนวน (ก) 20 เมล็ด (ข) 30 เมล็ด (ค) 40 เมล็ด (ง) 50 เมล็ด (จ) 60 เมล็ด (ฉ) 70 เมล็ด และ (ฉ) 80 เมล็ด มีลูกเหล็ก 20 ชิ้น



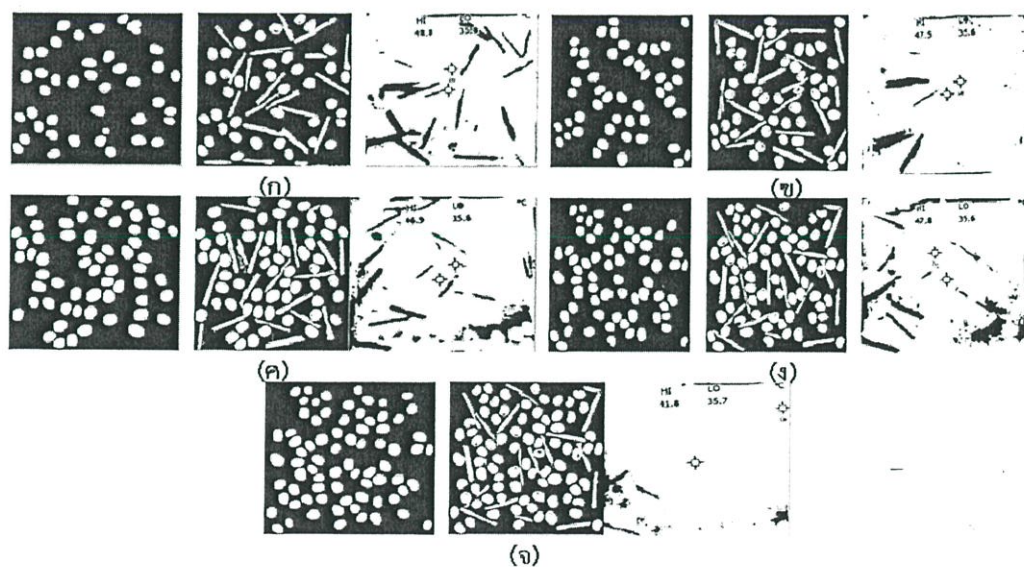
รูปที่ 4.24 ภาพถ่ายและภาพถ่ายความร้อนแก้วสีงที่วิเคราะห์ด้วยโปรแกรมจำนวน (ก) 20 เมล็ด (ข) 30 เมล็ด (ค) 40 เมล็ด (ง) 50 เมล็ด และ (จ) 60 เมล็ด โดยมีเศษไม้ 20 ชิ้น



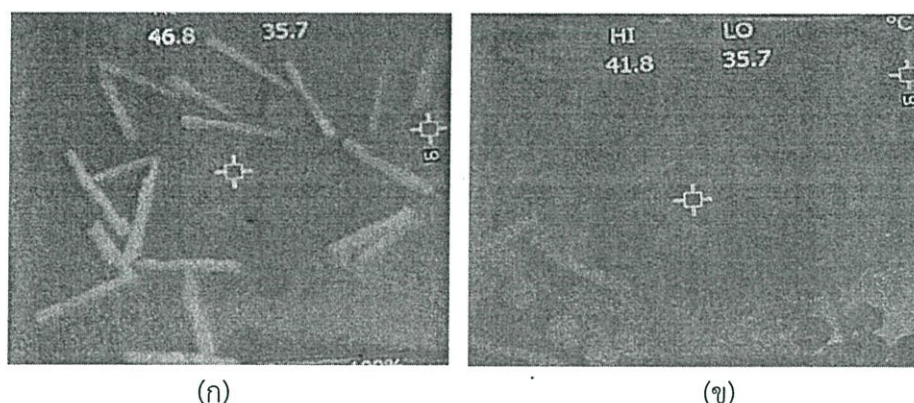
รูปที่ 4.25 ภาพถ่ายและภาพถ่ายความร้อนถั่วแดงที่วิเคราะห์ด้วยโปรแกรมจำนวน (ก) 20 เมล็ด (ข) 30 เมล็ด (ค) 40 เมล็ด และ (ง) 50 เมล็ด โดยมีเศษหิน 20 ชิ้น



รูปที่ 4.26 ภาพถ่ายและภาพถ่ายความร้อนถั่วแดงที่วิเคราะห์ด้วยโปรแกรมจำนวน (ก) 20 เมล็ด (ข) 30 เมล็ด (ค) 40 เมล็ด และ (ง) 50 เมล็ด โดยมีเศษหิน 20 ชิ้น



รูปที่ 4.27 ภาพถ่ายและภาพถ่ายความร้อนถั่วเหลืองที่วิเคราะห์ด้วยโปรแกรมจำนวน (ก) 20 เมล็ด (ข) 30 เมล็ด (ค) 40 เมล็ด (ง) 50 เมล็ด (จ) 60 เมล็ด (ฉ) 70 เมล็ด และ (ฉ) 80 เมล็ด โดยมีเศษไม้ 20 ชิ้น



(ก)

(ข)

รูปที่ 4.28 ภาพความร้อนการกระจายตัวของตัวอย่าง (ก) ปริมาณเมล็ดพืช 20 เมล็ด และ (ข) ปริมาณเมล็ดพืช 80 เมล็ด



รูปที่ 4.29 ภาพความร้อนของลูกเหล็กและถั่วแดง

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

ผลการตรวจสอบสิ่งแปลกปลอมด้วยวิธีการประมวลผลภาพถ่ายทางความร้อนซึ่งได้จากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในย่านอินฟราเรด สามารถจัดกลุ่มการตรวจสอบได้ 4 กลุ่ม ดังนี้ กลุ่มที่มีสีแตกต่างกันเหมาะกับการตรวจสอบสิ่งแปลกปลอมด้วยภาพถ่าย กลุ่มที่มีสีต่างกันแต่รูปร่างใกล้เคียงกัน เหมาะกับการตรวจสอบสิ่งแปลกปลอมด้วยภาพถ่าย กลุ่มที่มีความจุกความร้อนแตกต่างกัน เหมาะกับการตรวจสอบสิ่งแปลกปลอมด้วยภาพถ่ายความร้อน ซึ่งความแตกต่างของสิ่งแปลกปลอมและเมล็ดพืชในภาพถ่ายความร้อนเกิดจาก การรับพลังงานความร้อนและการแผ่รังสีความร้อนไม่เท่ากัน และกลุ่มที่พื้นผิวของสิ่งแปลกปลอมมีความมันวาว ไม่เหมาะกับการตรวจสอบด้วยภาพถ่ายความร้อน เนื่องจากวัสดุที่มีพื้นผิวมันวาวมีสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนต่ำ ดังนั้นรังสีความร้อนของวัสดุดังกล่าวที่กล้องถ่ายภาพความร้อนได้รับเป็นรังสีความร้อนที่สะท้อนมาจากเมล็ดพืช ทำให้โทนสีที่ได้มีโทนสีใกล้เคียงกันจึงต้องตรวจสอบด้วยภาพถ่าย

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. การถ่ายภาพความร้อนควรติดตั้งไฟทั้ง 4 ด้าน เช่นกัน เพื่อให้ความร้อนกระจายสู่ตัวอย่างอย่างสม่ำเสมอ
2. กล้องถ่ายภาพความร้อนที่ใช้ควรเป็นกล้องถ่ายภาพความร้อนที่สามารถถ่ายวิดีโอได้และความละเอียดสูงเพื่อให้ได้ภาพถ่ายความร้อนที่คมชัดก่อนนำไปประมวลผลภาพ ซึ่งความคมชัดของภาพจะช่วยลดค่าความผิดพลาดที่ตรวจสอบได้
3. ควรถ่ายภาพความร้อนในสภาวะปิดเพื่อลดผลกระทบจากสภาพแวดล้อมภายนอก
4. หากต้องการพัฒนาระบบการตรวจสอบสิ่งแปลกปลอมด้วยภาพถ่ายทางความร้อนควรออกแบบให้วัสดุไหลเข้าระบบตรวจสอบในแนวตั้งไหลลงมาเป็นสาย เพียง 1 ชั้นเท่านั้น เพื่อความถูกต้องแม่นยำ

บรรณานุกรม

- จันทร์เพ็ญ โทมัส. (2551). การประมวลผลภาพแบบดิจิทัล (Digital Image Processing). วิธีการทดลองทางฟิสิกส์. คณะวิทยาศาสตร์. มหาวิทยาลัยขอนแก่น
- ใจทิพย์ วานิชชัง, พชณี บุญธกานนท์, กรรณิกา กระแสโทและประทุมพร เสาวพันธ์. (2545). ศึกษากรรมวิธีในการเพิ่มคุณภาพข้าว. รายงานการวิจัยสถาบันเทคโนโลยีราชมงคล สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล. ชลบุรี. น. 153-156.
- ชัยยันต์ จันทร์ศิริ. เครื่องคัดขนาดถั่วลิสงเมล็ดโตแบบตะแกรงทรงกระบอกหมุน. ศูนย์นวัตกรรมเทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยว. มหาวิทยาลัยเชียงใหม่: (ม.ป.ท.).
- ณัฐวดี เนียมสอนและทวีชัย นิมาแสง. (2551). เครื่องทำความสะอาดเมล็ดถั่วเหลืองโดยใช้ความถี่จำเพาะ. ศูนย์นวัตกรรมเทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยว. มหาวิทยาลัยเชียงใหม่: (ม.ป.ท.).
- ธวัชชัย ทิววรรณวงศ์และชัยยันต์ จันทร์ศิริ. (2549). เครื่องคัดขนาดถั่วลิสงเมล็ดโตแบบตะแกรงทรงกระบอกหมุน. ศูนย์นวัตกรรมเทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยว. มหาวิทยาลัยเชียงใหม่: (ม.ป.ท.).
- ธริษตรี จุลกัทัพพะและเรืองชัย พันธุ์บุตร. (2531). เครื่องคัดขนาดเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ประเภทใช้แรงคน. รายงานของนักศึกษา ภาควิชาวิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยขอนแก่น. (ม.ป.ท.).
- นวกัทธา หนูนา และทวีพล ชื้อสัตย์. (2555). การวัดและเครื่องมือวัด (Measurement and Instrumentation). กรุงเทพฯ : มิน เซอร์วิส ซัพพลาย
- บัณฑิต จริโมภาส. (2549). เครื่องจักรกลคัดแยกหลังการเก็บเกี่ยว บรรจุภัณฑ์ และเรือนบรรจุผลไม้. กรุงเทพฯ: สมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย
- ประวิทย์ วัฒนากร. 2553. กล้องถ่ายภาพความร้อนบอกที่ซ่อนอุณหภูมิ.ค้นเมื่อ 28 กุมภาพันธ์ 2556. จาก <http://www.vcharkarn.com/varticle/39579>
- ปฐมากรณ์ หิรัญลาภ, ปริญญา เมฆโมกและพงศ์พันธ์ สมบัติพานิช. (2551). “การควบคุมการทำงานของโปรแกรม MS Microsoft PowerPoint ด้วยการใช้สัญญาณมือ.” ปริญญานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ กรุงเทพฯ: สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- พงษ์เทพ เกิดดอนแฝก, พงษ์สวัสดิ์ คชภูมิ, จักรพงษ์ กลิ่นสะอาดและศิริวัฒน์ โพธิเวชกุล. (2545). การศึกษาการใช้แรงของสนามแม่เหล็กในการคัดแยกเมล็ดพืช. พิมพ์ครั้งที่ 6. น. 330-334.
- มนตรี พิรุณเกษตร. (2548). การถ่ายเทความร้อน ฉบับเตรียมสอบและเสริมประสบการณ์. พิมพ์ครั้งที่ 4. กรุงเทพฯ: วิทย์พัฒนา
- ยุทธพงศ์ ทัพผดุง, อีระวัฒน์ หนูนา, ทวีพล ชื้อสัตย์และนวกัทธา หนูนา. (2555). การใช้เทคโนโลยีภาพถ่ายความร้อนอินฟราเรดอย่างมืออาชีพ. วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์. น. 30.
- วินิต ชินสุวรรณ, นิพนธ์ ป้องจันทร์, สมชาย ขวนอุดมและวราจิต พยอม. (2545). การประเมินความสูญเสียจากการเก็บเกี่ยวเมล็ดพืช. พิมพ์ครั้งที่ 6. น. 242-247.

- สุนีย์ โฆษิตประเสริฐ. (2550). หลักการพื้นฐานในการจัดเก็บ. ค้นเมื่อ 30 มิถุนายน 2555. จาก [http://kpp-rsc.ricethailand.go.th/image/rice/Manage_storage/1storage-1.pdf\(07/04/2007\)](http://kpp-rsc.ricethailand.go.th/image/rice/Manage_storage/1storage-1.pdf(07/04/2007)).
- สำนักวิจัยเศรษฐกิจการเกษตร สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร. (2555). ข้อมูลด้านการผลิตและการตลาดสินค้าเกษตรที่สำคัญ. พิมพ์ครั้งที่ 7. กรุงเทพฯ: กระทรวงเกษตรและสหกรณ์.
- สมชัย เทพศิลป์วิสุทธิ. (2552). เครื่องคัดแยกเมล็ดข้าวกล้องออกจากข้าวเปลือก. นิตยสารเทคโนโลยีเครื่องกล. น. 77-80.
- Alam, A. and Shove, C. G. (1973). Hygroscopicity and thermal properties of soybean. Transactions of the ASAE, (4), p. 707-709.
- Amidon, G. L., Lee, P.I. and Topp, E.M. (2000). Transport Processes in Pharmaceutical Systems. New York: Marcel Dekker, p. 671.
- ASHRAE. (1989). Thermal Properties of Foods. In A: ASHRAE Handbook of Fundamentals, American Society of Heating, Refrigeration, and Air Conditioning Engineers, Atlanta, Georgia: (N.P.)
- Bayram, M. and Oner, M. D. (2006). Determination of applicability and effects of colour sorting system in bulgur production line. Journal of Food Engineering, (74), p. 232-239.
- Boudenne, A., Ibos, L., Fois, M., Majeste, J. and Gehin, C. E. (2005). Electrical and thermal behavior of polypropylene filled with copper particles. Composites: Part A, (36), p. 1545-1554.
- Chakraverty, A. and Singh, R. P. (2001). Postharvest Technology. USA: Science Publishers
- Chandra, B. S., Paliwal, J., Jayas, D. S. and White, N. D. G. (2010). Identification of insect-damaged wheat kernels using short-wave near-infrared hyperspectral and digital colour imaging. Computers and Electronics in Agriculture, (73), p. 118-125.
- Chelladurai, V., Jayas, D. S. and White, N. D. G. (2010). Thermal imaging for detecting fungal infection in stored wheat. Journal of Stored Products, (46), p. 174-179.
- Emekci, M., Navarro, S., Donahaye, E., Rindner, M. and Azrieli A. (2002). Respiration of *Rhizopertha dominica* (F.) at reduced oxygen concentrations. Journal of Stored Products, (40), p. 27-38.
- Ginesu, G., Giusto, D. D., and Märgner, V. (2004). Detection of Foreign Bodies in Food by Thermal Image Processing. IEEE Transactions on Industrial Electronics, (51), p. 480-490.
- Gubareff, G. G., Janssen, J. E. and Torborg, R. H. (1960). Thermal Radiation Properties Survey. Minneapolis-Honeywell Regulation Company, Minneapolis, MN: (N.P.)

- Hobson, D. M., Carter R. M. and Yan, Y. (2007). **Characterisation and Identification of Rice Grains through Digital Image Analysis**. Instrumentation and Measurement, Technology Conference - IMTC 2007: Warsaw, Poland. p. 1-5
- Jeng, L. L., Chuen, S. L. and Chung, T. S. (1998). **Measurement and analysis of ignition behavior for peanut shell during combustion**. Agricultural Machinery Engineering, China: National Chung-Hsing University, 7(3), p. 63-73.
- Kazarian, E. A. and Hall, C. W. (1965). **Thermal properties of grains**. Transactions of the ASAE, 48(8), p. 33-37.
- Kreith, F. and Kreider, J. F. (1978). **Principle of solar Energy**. New York: Hemisphere Publishing
- Ledbetter C. A. (2007). **Shell cracking strength in almond (*Prunus dulcis* [Mill.] D.A. Webb.) and its implication in uses as a value-added product**. Bioresource Technology, (99), p. 5567-5573.
- Legrand, A. (2007). **Physical, mechanical, thermal and electrical properties of cooked red bean (*Phaseolus vulgaris* L.) for continuous ohmic heating process**. Journal of Food Engineering, (81), p. 447-458.
- Mallory, J. F. (1969). **Thermal Insulation**. New York: Van Nostrand Reinhold
- Manickavasagan, A., Jayas, D. S. and White, N. D. G. (2007). **Wheat class identification using monochrome images**. Journal of Cereal Science, (47), p. 518-527.
- Mollazade, K., Omid, M., and Arefi, A., (2012). **Comparing data mining classifiers for grading raisins based on visual features**. Computers and Electronics in Agriculture, (84), p. 124-131.
- Paliwal, J., Mebatsion, H.K. and Jayas, D.S. (2012). **Cereal Grain and Dockage Identification using Machine Vision**. Computers and Electronics in Agriculture, (90), p. 99-105.
- Ramstad, P. E. and Geddes, W. F. (1942). **The respiration and storage behavior of soybeans**. Univ. Minn. Tech. Bul. p. 156.
- Tan, P. V. (2010). **Specific Heat Capacities**. Retrieved September 30, 2012, from http://www.polytee.com.vn/wysiwyg/file_up/Specific%20Heat%20Capacities%20-%20Solids.PDF.
- Touloukian, Y. S. and Ho, C. Y. (1972). **Thermophysical Properties of Matter**. 8(1), **Thermal Radiative Properties of Nonmetallic Solids**. New York; Plenum Press

ข้อมูลประวัติผู้วิจัย

ประวัติส่วนตัว

ชื่อ-สกุล. ผศ.ดร.นวกัทธา หนูนา

เพศ ชาย หญิง วันเดือนปีเกิด 07 กันยายน 2519 อายุ 37 ปีสถานภาพ โสด สมรส

ตำแหน่งปัจจุบัน ผู้ช่วยศาสตราจารย์

ประวัติการศึกษา

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

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

ตำรา

- นวกัทธา หนูนา และ ทวีพล ซื่อสัตย์. 2555. การวัดและเครื่องมือวัด ประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร. คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 316 หน้า
- ยุทธพงศ์ ทัพผดุง, ธีระวัฒน์ หนูนา, ทวีพล ซื่อสัตย์ และ นวกัทธา หนูนา. 2555. การใช้เทคโนโลยีกล้องถ่ายภาพความร้อนอย่างมืออาชีพ, วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์, 120 หน้า

ผลงานวิชาการ

International Journals

- Nunak N. and Schleining G. (2011). Instrumental Textural Changes in Raw White Shrimp during Iced Storage. Journal of Aquatic Food Product Technology, 20, 4, 350-360
- Pimpen Pornchaloempong Panmanas Sirisomboon and Navapattra Nunak. 2011. Mass-Volume-Area properties of frozen Skipjack tuna. International Journal of Food Properties Available online: 12 Feb 2011
- N.Nunak and T.Suesut. (2010). Measuring geometric mean diameter of fruits and vegetables using light sectioning method. Songklanakarin Journal Science Technology
- Nunak N. and Schleining G. (2006). A rapid blade cutting method for the evaluation of osmotic dehydration of apples and potatoes. Journal of Texture Studies, 37, 1, 80-92
- Jarimopas B., Nunak T., and Nunak N. (2005). Electronic device for measuring volume of selected fruit and vegetables. Postharvest Biology and Technology, 35, 25-31

National Journals

- นวภัทรา หนูนา และ อมรรัตน์ मुखประเสริฐ, “จลนศาสตร์การถ่ายเทมวลในระหว่างกระบวนการออสโมติกโซโปวหวาน”, วิศวกรรมสาร มช., ปีที่ 38, ฉบับที่ 1, มกราคม-มีนาคม 2554
- นวภัทรา หนูนา, “ปัจจัยและกระบวนการเบื้องต้นที่มีผลต่ออัตราการถ่ายเทมวลของชิ้นอาหารในระหว่างกระบวนการออสโมติก”, วารสารวิจัยและพัฒนา มจร., ปีที่ 32, ฉบับที่ 1, มกราคม-มีนาคม 2552

Selected Proceedings

- Navaphattra Nunak and Kiattisak Roonprasang, “Use of Electrical Conductivity to Monitor Gel Forming of Soft-Tofu, Hanoi, Vietnam, 3rd-4th March, 2011
- Navaphattra Nunak and Taweeapol Suesut, “Design of an Instrument for Concentration Control of Sugar Solution during Osmotic Process”, International Conference on Precision Instrumentation and Measurement, Kiryu, Japan, 17th – 20th March, 2010
- Navaphattra Nunak, Teerawat Nunak and Taweeapol Suesut, “Identification of Thermal Distribution in Liquid during Ohmic Heating Process by Infrared Thermography”, International Conference on Precision Instrumentation and Measurement, Kiryu, Japan, 17th – 20th March, 2010
- Navaphattra Nunak and Taweeapol Suesut, “Evaluation of White Shrimp Freshness during Iced Storage by Computer Vision”, International Conference on Precision Instrumentation and Measurement, Kiryu, Japan, 17th – 20th March, 2010
- Navaphattra Nunak and Taweeapol Suesut, “Fish Species Sorting and Size Estimation using Laser Light Sectioning”, International Conference on Precision Instrumentation and Measurement, Kiryu, Japan, 17th – 20th March, 2010
- Navaphattra Nunak and Taweeapol Suesut, “Electrical Conductivity of Bonito Tuna during Ohmic Thawing”, International Conference on Innovations in Agricultural, Food and Renewable Energy Productions for Mankind, Nakhon Ratchasima, Thailand, 1st – 3rd April, 2009
- Navaphattra Nunak, Taweeapol Suesut, and Sarayut Inthuset, “Fish Size Measurement by Computer Vision using Laser Light Sectioning”, International Conference on Innovations in Agricultural, Food and Renewable Energy Productions for Mankind, Nakhon Ratchasima, Thailand, 1st – 3rd April, 2009
- N.NUNAK and G.SCHLEINING, “Evaluation of the water transfer in osmotically dehydrated fruit and vegetables using TA-XT2”, International Conference on Agricultural, Food and Biological Engineering & Post Harvest/ Production Technology, 21 – 24 January 2007, pp.
- Schleining, G. and Nunak, N. A rapid texture measurement method to determine the mass transfer in osmotically dehydrated plant products. In: Pedro Fito and Fidel Toldra: Intrafood 2005: Innovations in Traditional foods, 25-28 October, Valencia; Conference Proceedings, Vol 1, 261- 264; Elsevier, London; ISBN 84-9705-880-1.

ประวัติส่วนตัว

ชื่อ-สกุล รศ.ดร.ทวีพล ชื่อสัตย์.....

เพศ ชาย หญิง วันเดือนปีเกิด 18 เมษายน 2515 อายุ 41 ปีสถานภาพ โสด สมรส

ตำแหน่งปัจจุบัน ผู้ช่วยศาสตราจารย์

ประวัติการศึกษา

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

สาขาที่ชำนาญพิเศษ

- การออกแบบเครื่องจักรและระบบโรงงานอัตโนมัติ
- การวัดคุมทางอุตสาหกรรม
- การวัดและทดสอบ
- ระบบตรวจสอบด้วยมาชีนวิชั่น ประยุกต์ใช้งานในอุตสาหกรรมการผลิต อุตสาหกรรมอาหาร

ประสบการณ์ภาคอุตสาหกรรม

- ที่ปรึกษาในการออกแบบ สร้างเครื่องตรวจสอบคุณภาพของตัวเก็บประจุกำลังในโรงงานพานาโซนิคมัสซึชิตะประเทศไทย จำกัด
- ที่ปรึกษาในการออกแบบ ติดตั้งระบบควบคุมอัตโนมัติในโรงงานเครื่องระยองพานอล
- ที่ปรึกษาในการออกแบบติดตั้งระบบแสดงผลแจ้งการทำงานในโรงงานฮอนด้าด้านเมนูแพคเจอริงประเทศไทย

ผลงานทางวิชาการ

ตำรา

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

ผลงานที่ได้รับการตีพิมพ์ (International Publications)

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

ผลงานวิชาการ International Proceeding

Selected Presentations

- Navaphattra Nunak and Taweepol Suesut, “Design of an Instrument for Concentration Control of Sugar Solution during Osmotic Process”, International Conference on Precision Instrumentation and Measurement, Kiryu, Japan, 17th – 20th March, 2010
- Navaphattra Nunak, Teerawat Nunak and Taweepol Suesut, “Identification of Thermal Distribution in Liquid during Ohmic Heating Process by Infrared Thermography”, International Conference on Precision Instrumentation and Measurement, Kiryu, Japan, 17th – 20th March, 2010
- Navaphattra Nunak and Taweepol Suesut, “Evaluation of White Shrimp Freshness during Iced Storage by Computer Vision”, International Conference on Precision Instrumentation and Measurement, Kiryu, Japan, 17th – 20th March, 2010
- Navaphattra Nunak and Taweepol Suesut, “Fish Species Sorting and Size Estimation using Laser Light Sectioning”, International Conference on Precision Instrumentation and Measurement, Kiryu, Japan, 17th – 20th March, 2010
- Navaphattra Nunak and Taweepol Suesut, “Electrical Conductivity of Bonito Tuna during Ohmic Thawing”, International Conference on Innovations in Agricultural, Food and Renewable Energy Productions for Mankind, Nakhon Ratchasima, Thailand, 1st – 3rd April, 2009
- Nunak N. and Taweepol S. (2007). Measuring Geometric Mean Diameter of Fruit and Vegetable using Computer Vision. “PSU-UNS International Conference on Engineering and Environment-ICEE-2007”, 10-11. May 2007, Phuket.
- Taweepol Suesut and Banchar Mongkhoin, “Demand Forecasting Approach Inventory Control for CIMS” , 2004 8th International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision, Kunming,China, 6-9 December 2004
- T.Suesut, P.Inban, P.Nilas, P.Rerngerun and S.Gulphanich, “Interpretation Petri Net model to IEC 1131-3:LD For Programmable Logic Controller”, 2004 IEEE Conference on Robotics, Automation and Mechatronics, Singapore, 1-3 December, 2004
- T.Suesut, V.Tipsuwanporn, P.Nilas, P. Rerngereun and A.Numsonran, “Multi-level Contract Net Protocol based on Holonic Control system Implement to Industrial Network”, 2004 IEEE Conference on Robotics, Automation and Mechatronics, Singapore, 1-3 December, 2004
- Taweepol Suesut, Sathit Intajag and Prapas Roeruen, “Design of Automatic Warehouse and Inventory control under HMS concept”, ICCAS 2004 International Conference on Control, Automation and Systems, Bangkok, Thailand 25-27 August, 2004 –
- Phonphithak, P.Pannil, T.Suesut, R. Masuchun and P. Julsereewong, “Self-Tuning PID Controller Based on PLC”, ICCAS 2004 International Conference on Control, Automation and Systems, Bangkok, Thailand 25-27 August, 2004
- T.Suesut, P.Inban, A.Numsomran and V.Tipsuwanporn, “Redundant System based PLC Network for High Priority Process”, ICCAS 2003 International Conference on Control, Automation and Systems, Gyeongju, Korea 22-25 October, 2003

- T.Suesut, C. Hankarjonsook, N.Tammarugwattana and K.Tirasesth, "Internet Based for Computer Integration Manufacturing System", ICCAS 2003 International Conference on Control, Automation and Systems, Gyeongju, Korea 22-25 October, 2003
- V.Tipsuwanporn, J.Anotaiadikoon, S.Gulpanich, V.Kongratana and T.Suesut, "Automation Cleaning Reverse Osmosis System based on Computer Analysis", PSE Asia 2002 International Symposium on Design, Operation and Control of Chemical Process, Taipei, Taiwan 4-6 December, 2002
- T. Suesut, V.Tipsuwanporn, S.Gulpanich, J.Rodcumtui and P. Sukprasert, "A Design of Automatic Warehouse for Internet Based System", 2002 IEEE International Conference on Industrial Technology, Bangkok, Thailand 11-14 December, 2002
- V.Tipsuwanporn, A.Sangrayub, T. Suesut, A. Numsomran and S.Gulpanich, "Development of PLC Fiber-optic Network for Redundant System", 2002 IEEE International Conference on Industrial Technology, Bangkok, Thailand 11-14 December, 2002
- Taweepol Suesut, Viriya Kongratana, Vittaya Tipsuwanporn and Suphan Kulphanich, "A Technique to Expand the I/O of the PLC Using Remote I/O module", The 14 th Korea Automatic Control Conference, pp E-61 -64, Korea OCT 1999
- T.Suesut, P.Rerngruen, V.Tipsuwanporn, S.Kulphanich and S.Chuenarom, "Design of the PLC network Using Remote I/O module Application for A multi grup of machine", The 3rd Asian Control Conference pp2818-2821, Shanghai, China, July 2000

ทุนวิจัยที่เคยได้รับ

หัวหน้าโครงการวิจัย

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

ผู้ร่วมโครงการวิจัย

- การออกแบบและพัฒนาเครื่องขจัดน้ำออกจากไซโปวหลังกระบวนการล้าง (ปีพ.ศ.2552)
- การศึกษาหาวิธีแก้ปัญหาสภาพหัวเหลืองของกุ้งแดงหลังละลาย (ปีพ.ศ.2552)
- การพัฒนาระบบการแปรรูปขิงผงแบบอัตโนมัติในระหว่างกระบวนการระเหยน้ำ (ปีพ.ศ.2552)

งานวิจัยที่กำลังทำ

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