

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 เมล็ดพืชและสิ่งแปลกปลอม

เมล็ดพืชโดยทั่วไป หมายถึง เมล็ดพืชที่ใช้ประโยชน์ในการบริโภค หรือเป็นวัตถุดิบในการอุตสาหกรรมไม่ได้ใช้ทำพันธุ์แบ่งออกเป็น 4 กลุ่มได้แก่ กลุ่มเมล็ดธัญพืชเช่นข้าวข้าวโพดกลุ่มเมล็ดถั่วเช่น ถั่วลิสง ถั่วเหลือง ถั่วแดง ถั่วเขียว กลุ่มเมล็ดเปลือกแข็งเช่น เม็ดมะม่วงหิมพานต์ เกาลัด และอัลมอนต์ และกลุ่มเมล็ดเปลือกนิ่มเช่น เมล็ดแดงโต เมล็ดฟักทอง และเมล็ดทานตะวัน สำหรับเมล็ดพืชที่สำคัญในประเทศไทยได้แก่ ข้าว ถั่วเหลือง ถั่วเขียว ถั่วแดง และถั่วลิสง โดยทั่วไปการปฏิบัติหลังการเก็บเกี่ยวเมล็ดพืชหลังจากการลดความชื้นและนวดแล้ว ต้องตรวจสอบและคัดแยกสิ่งแปลกปลอมที่มักปนมาในขั้นตอนดังกล่าวเช่น เศษฟางเศษดินหินกรวดทราย เป็นต้น เพื่อให้ได้เมล็ดพืชที่มีความสะอาดดังนั้น ขั้นตอนการตรวจสอบและคัดแยกจึงเป็นสิ่งจำเป็นและมีความสำคัญเป็นอันดับต้น ๆ เนื่องจากในระบบการซื้อขายพิจารณาราคาของเมล็ดพืชจากปัจจัยสองประการคือความชื้นและปริมาณสิ่งแปลกปลอมถ้าเมล็ดพืชมีปริมาณสิ่งแปลกปลอมและความชื้นสูงเกินกว่าที่กำหนด จะส่งผลให้ระยะเวลาในการเก็บรักษาและราคาของเมล็ดพืชต่ำลง โดยความชื้นปลอดภัยในการเก็บรักษาเมล็ดพืชอยู่ในช่วง 12-15% (สุนีย์, 2555) นอกจากนี้เมล็ดพืชที่ส่งขายในรูปแบบบรรจุภัณฑ์ ต้องผ่านขั้นตอนการคัดแยกขนาดและคุณภาพ ซึ่งในระหว่างกระบวนการดังกล่าวอาจมีสิ่งแปลกปลอม เช่น เศษโลหะจากเครื่องจักรที่ใช้ในกระบวนการ และเศษพลาสติกที่มักปนมาที่บรรจุภัณฑ์ ปนมากับเมล็ดพืชทำให้เมล็ดพืชที่ส่งออกสูญเสียคุณภาพที่ควรเป็น

2.2 การตรวจสอบและคัดแยกสิ่งแปลกปลอม

การตรวจสอบและคัดแยกสิ่งแปลกปลอมที่ปนมากับเมล็ดพืชเป็นขั้นตอนสำคัญต่อการแบ่งเกรดคุณภาพของผลิตผล โดยเฉพาะอย่างยิ่งการแบ่งเกรดเพื่อการส่งออก วิธีการตรวจสอบและคัดแยกสิ่งแปลกปลอมออกจากเมล็ดพืชมีหลายวิธี ได้แก่ การใช้แรงงานคน การใช้วิธีทางกล การใช้วิธีการประมวลผลภาพ เป็นต้น

2.2.1 การตรวจสอบและคัดแยกสิ่งแปลกปลอมโดยใช้แรงงานคน

การตรวจสอบและคัดแยกสิ่งแปลกปลอมด้วยการใช้แรงงานคนแสดงดังภาพที่ 2.1 เป็นวิธีการตรวจสอบแบบดั้งเดิมและเป็นขั้นตอนแรกสำหรับการคัดแยก โดยส่วนใหญ่เป็นการตรวจสอบและคัดแยกในขั้นตอนเดียว เหมาะสำหรับเมล็ดพืชที่มีขนาดใหญ่ เช่น การแยกเปลือกเม็ดมะม่วงหิมพานต์และเมล็ดอัลมอนต์ (ธริชตรี และ เรืองชัย, 2531; Ledbetter, 2007) อย่างไรก็ตาม วิธีนี้มีปัจจัยหลายอย่างที่ทำให้ประสิทธิภาพในการคัดแยกสิ่งแปลกปลอมลดลง ได้แก่ เพศ อายุ ระยะเวลาในการทำงาน สภาพแวดล้อมในการทำงาน และความเหนื่อยล้าของคนที่คัดแยกจากการทำงาน (Ginesu et al., 2003)



ภาพที่ 2.1 การคัดแยกสิ่งแปลกปลอมโดยใช้แรงงานคน
ที่มา: ธีรชตรี และเรืองชัย, 2531

2.2.2 การตรวจสอบและคัดแยกสิ่งแปลกปลอมด้วยวิธีทางกล

การตรวจสอบและคัดแยกด้วยวิธีทางกลมีหลายวิธี ได้แก่

2.2.2.1 การใช้ลมเป่าสิ่งแปลกปลอมที่มีน้ำหนักเบาออกจากเมล็ดพืช เช่น เศษซากพืช เศษไม้ เมล็ดลีบหรือเมล็ดแตก ซึ่งวิธีนี้เป็นวิธีที่ง่ายในการคัดแยกสิ่งแปลกปลอม มีต้นทุนต่ำ อย่างไรก็ตามวิธีนี้ไม่เหมาะกับการคัดแยกเมล็ดพืชและสิ่งแปลกปลอมที่มีน้ำหนักใกล้เคียงกัน

2.2.2.2 การใช้ตะแกรงร่อน โดยต้องเลือกขนาดของตะแกรงร่อนให้มีขนาดใกล้เคียงกับเมล็ดพืชที่ต้องการคัดแยกสิ่งแปลกปลอมออก จากนั้นเขย่าตะแกรงโดยที่เมล็ดพืชจะค้างอยู่บนตะแกรง และสิ่งแปลกปลอมจะรอดผ่านรูตะแกรงออกไปเช่น การคัดแยกถั่วลิสงกับเศษหินและดิน (ธีรชชัยและชัยยันต์, 2549; ชัยยันต์, 2555) การคัดแยกสิ่งแปลกปลอมได้แก่ กรวดหินดินทรายเปลือกกิ่งก้านและเมล็ดพืชอื่น ๆ ออกจากเมล็ดถั่วเหลืองโดยอาศัยความถ่วงจำเพาะ (ภาพที่ 2.2) (ณัฐภูมิและทวีชัย, 2551) และการคัดแยกเศษหินออกจากถั่วเหลืองอาศัยหลักการสันสะเทือน (ถนอมขวัญและคณะ, 2546) และการคัดแยกเปลือกข้าวออกจากเมล็ดข้าวกล้อง (สมชัย, 2548) เป็นต้น

2.2.2.3 การใช้สมบัติทางด้านแม่เหล็ก เป็นการตรวจสอบโดยอาศัยลักษณะทางกายภาพ และสมบัติทางไฟฟ้าของวัตถุ นิยมใช้ตรวจสอบเศษโลหะที่อาจปนมากับอาหาร ซึ่งข้อจำกัดของเครื่องตรวจจับโลหะคือ ถ้าวัตถุที่ใช้ตรวจจับมีสมบัติทางไฟฟ้าและสมบัติทางแม่เหล็กคล้ายคลึงกัน จะทำให้ประสิทธิภาพในการคัดแยกเศษโลหะลดลงส่วนใหญ่จะใช้ตรวจสอบสิ่งแปลกปลอมในกระบวนการสุดท้ายก่อนออกสู่ตลาด (พงษ์เทพและคณะ, 2545)



ภาพที่ 2.2 (ก) เครื่องตัดแยกข้าวเปลือก(ข) ข้าวเปลือกและสิ่งแปลกปลอมในถังเก็บเมล็ด
ที่มา: ถนอมขวัญและคณะ, 2546

สำหรับกระบวนการตัดแยกด้วยวิธีทางกลนั้นใช้งบประมาณการลงทุนต่ำและประหยัดพลังงานมาก แต่ไม่สามารถแยกเมล็ดพืชและสิ่งแปลกปลอมที่มีสมบัติทางกายภาพใกล้เคียงกันได้ เช่น มีขนาดเท่ากัน มีน้ำหนักเท่ากัน หรือมีปริมาตรเท่ากันได้

2.2.2.4 การใช้สมบัติทางด้านแม่เหล็ก เป็นการตรวจสอบโดยอาศัยลักษณะทางกายภาพ และสมบัติทางไฟฟ้าของวัตถุ นิยมใช้ตรวจสอบเศษโลหะที่อาจปนมากับอาหาร ซึ่งข้อจำกัดของเครื่องตรวจจับโลหะคือ ถ้าวัตถุที่ใช้ตรวจจับมีสมบัติทางไฟฟ้าและสมบัติทางแม่เหล็กคล้ายคลึงกัน จะทำให้ประสิทธิภาพในการตัดแยกเศษโลหะลดลงส่วนใหญ่จะใช้ตรวจสอบสิ่งแปลกปลอมในกระบวนการสุดท้ายก่อนออกสู่ตลาด (พงษ์เทพและคณะ, 2545)

2.2.3 การตรวจสอบสิ่งแปลกปลอมด้วยการประมวลผลภาพ

การแสดงผลภาพดิจิทัล (Digital Image) สามารถแสดงเป็นแอเรย์ (Array) หลายมิติหรือเป็น เมทริกซ์ (Matrix) ของตัวเลข กำหนดให้ $f(x, y)$ เป็นผลของการหาค่าของภาพดิจิทัลที่มี M แถวและ N คอลัมน์ จุดพิกัด (x, y) มีจุดกำเนิดคือ $(x, y) = (0, 0)$ และจุดพิกัด ถัดไปในแถวแรกของภาพคือ $(x, y) = (0, 1)$ ซึ่งจุดพิกัด $(0, 1)$ นี้ใช้ระบุถึงจุดภาพที่ 2 ในแถวแรกก็ได้หมายความว่าถึงจุดพิกัดที่ใช้กันทั่วไปภาพดิจิทัลสามารถแบ่งออกเป็น 4 ประเภท ได้แก่ ภาพระดับสีเทา (Gray Image) ภาพสี (Color Image) ภาพขาวดำ (Black and White Image) และภาพดัชนี (Indexed Image) ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

ภาพระดับสีเทา (Intensity Image หรือ Monochrome Image หรือ Gray Image) ค่าในแต่ละจุดภาพของภาพประเภทนี้ คือค่าความเข้มของแสง ณ ตำแหน่งของแต่ละจุดภาพซึ่งจะอยู่ในรูปของระดับสีเทา (Gray Scale) ค่าที่เป็นไปได้ของภาพระดับเทาจะขึ้นอยู่กับจำนวนบิตที่ใช้โดยแสดงผลภาพชนิดนี้ได้ด้วยแอเรย์หลายมิติ

ภาพสี (Color Image) หรือ ภาพอาร์จีบี (RGB Image) ค่าในแต่ละจุดภาพของภาพสีประกอบไปด้วยเวกเตอร์ ซึ่งภาพสีจะแทนภาพด้วยแอเรย์หลายมิติของเวกเตอร์ที่แสดงค่าของสีแดง สีเขียว

และสีน้ำเงิน อย่างละ 8 บิต ดังนั้น ภาพอาร์จีบี 1 จุดภาพจะประกอบไปด้วยจำนวนบิตทั้งหมด 24 บิต ทำให้ภาพ RGB มีจำนวนสีที่เป็นไปได้ทั้งหมด 9 ระบบ CIELAB, CIEXYZ, HSI, NRGB, RGB, SCT, YIQ, YUV และ YcbCr

ภาพขาวดำ (Black and White Image) หรือ ภาพไบนารี (Binary Image) ค่าในแต่ละจุดภาพของภาพขาวดำจะใช้เพียง 1 บิต ซึ่งมีค่าที่เป็นไปได้ คือ 0 (สีดำ) และ 1 (สีขาว) เท่านั้น

ภาพดัชนี (Indexed Image) ค่าในแต่ละจุดภาพของภาพดัชนีประกอบด้วยค่าของหมายเลขดัชนี (Index Number) ซึ่งชี้ไปยังค่าของสีในตารางสี ดังนั้น ถ้าต้องการที่จะทราบค่าสีในแต่ละจุดภาพจะต้องไปดูค่าในตารางสีที่ดัชนีตรงกับค่าในจุดภาพ เช่น จุดภาพ ณ ตำแหน่ง (150, 125) ของภาพมีค่าหมายเลขดัชนีเท่ากับ 5 ซึ่งชี้ไปยังค่าของสีลำดับที่ 5 ในตารางสี ซึ่งมีค่าสีแดง สีเขียว สีน้ำเงินเท่ากับ 0.2902, 0.0 และ 0.627 ตามลำดับ เป็นต้น

การประมวลผลภาพ (Image processing) เป็นกระบวนการใด ๆ ที่กระทำต่อภาพทั้งในเชิงคุณภาพและเชิงปริมาณเพื่อเป้าหมายอย่างใดอย่างหนึ่ง เช่น การปรับภาพให้คมชัดมากยิ่งขึ้น การแก้ไขภาพที่ไม่ชัด การรู้จำภาพ การแก้ไขภาพในเชิงเรขาคณิต และการแยกแยะบริเวณในภาพ เป็นต้น

2.2.4 การตรวจสอบสีและคัดแยกสีโดยการประมวลผลภาพสี

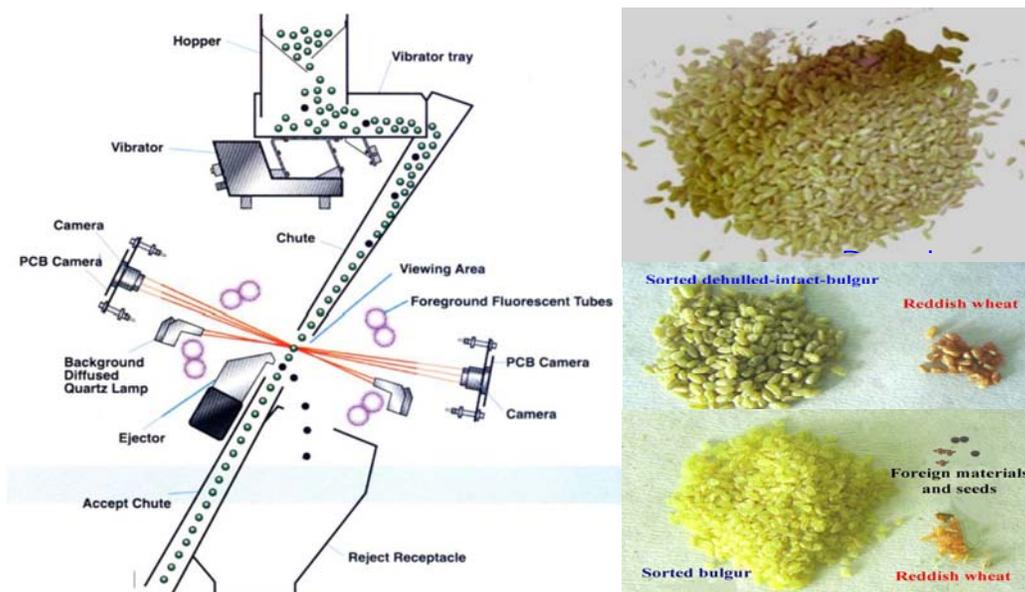
การตรวจสอบและคัดแยกสีโดยการประมวลผลภาพสี อาศัยคุณสมบัติของสีแต่ละสีที่แตกต่างกันของแต่ละวัตถุโดยสีที่เกิดขึ้นนั้นเกิดจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในย่านที่ตามนุษย์มองเห็น ประกอบไปด้วยสีจำนวน 7 สี ได้แก่ สีม่วง สีคราม สีน้ำเงิน สีเขียว สีเหลือง สีแดง ซึ่งสีต่างๆ เหล่านี้จะอยู่ในช่วงความยาวคลื่น 380-760 นาโนเมตร การตรวจสอบด้วยวิธีนี้นำมาใช้ทดแทนการตรวจสอบด้วยสายตาของคนที่มีข้อจำกัดในการแบ่งแยกสีที่มีความหลากหลาย (จันทรพิชญ, 2551) ซึ่งเป็นวิธีที่นำไปใช้ในเครื่องคัดแยกสี (Color Sorter) แสดงดังภาพที่ 2.3 เครื่องนี้ใช้สำหรับตรวจสอบและคัดแยกสีและคัดแยกสีเช่น กรวดหินดินทรายเปลือกกิ้งก่าและเมล็ดพืชอื่นๆ โดยอาศัยการแตกต่างของสีที่ต่างกัน หลักการทำงานของเครื่องคัดแยกสี คือ เมื่อผลิตผลผ่านไปเข้าไปในพื้นที่ตรวจสอบแสง และทำการตรวจสอบด้วยระบบกล้อง CCD (Charge Coupled Device) ทำหน้าที่เป็นเซนเซอร์ที่ทำงานโดยการตรวจสอบแต่ละพิกเซลและทำหน้าที่รับแสงและเปลี่ยนค่าแสงเป็นสัญญาณอนาล็อกส่งเข้าสู่วงจรเปลี่ยนค่าอนาล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัลที่ จากนั้นโปรแกรมจะตรวจสอบด้วยการประมวลผลภาพเพื่อตัดสินใจว่าจะยอมรับหรือปฏิเสธสีของวัสดุที่ตรวจสอบ ถ้าโปรแกรมตรวจพบสีที่ปฏิเสธจะส่งสัญญาณไปที่ตัวควบคุมเครื่องอัดอากาศ และยิงวัสดุออกแสดงดังภาพที่ 2.4 (ก) และ (ข) วิธีนี้จะช่วยเพิ่มคุณภาพเมล็ดพืชก่อนการจัดเก็บ นอกจากนี้เครื่องคัดแยกสียังสามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้กับผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรอื่นๆ เช่น พริก กระเทียม เมล็ดกาแฟ เป็นต้น กระบวนการตรวจสอบและคัดแยกด้วยความแตกต่างของสีนี้สามารถคัดแยกสีและคัดแยกสีได้รวดเร็ว แต่อาจไม่สามารถแยกสีที่มีสีใกล้เคียงกันได้



ภาพที่ 2.3 เครื่องคัดแยกสี (Color sorter)

ที่มา: http://www.beltandbearings.com/product.detail_546344_th_2411767

วันที่สืบค้น 2/10/2555



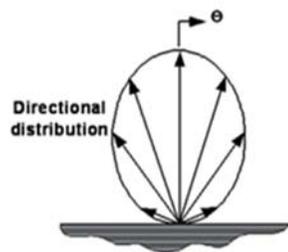
ภาพที่ 2.4 (ก) หลักการทำงานของเครื่องคัดแยกสี (ข) เมล็ดพืชที่ยังไม่แยกและเมล็ดพืชที่แยกแล้ว

ที่มา: Bayram and Oner, 2006

2.2.5 การตรวจสอบสิ่งแปลกปลอมด้วยการประมวลผลภาพถ่ายความร้อน

2.2.5.1 การแผ่รังสีความร้อน

วัตถุทุกชนิดที่มีอุณหภูมิสูงกว่าค่าศูนย์องศาสัมบูรณ์ หรือ -273.15°C หรือ 0 K จะมีการแผ่รังสีความร้อนออกมา สำหรับกลไกของการแผ่รังสีความร้อนเกิดจากการสั่นและการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนซึ่งประกอบกันเป็นสสาร วัตถุที่มีอุณหภูมิสูงอิเล็กตรอนจะสั่นหรือเคลื่อนที่มาก ส่งผลให้พลังงานภายในวัตถุมีค่าสูงกล่าวได้ว่าพลังงานความร้อนที่แผ่ออกจากวัตถุมีความสัมพันธ์แปรผันตรงกับอุณหภูมิ โดยรังสีความร้อนที่แผ่ออกจากวัตถุอยู่ในช่วงความยาวคลื่นประมาณ 0.1 ไมโครเมตร ถึง 100 ไมโครเมตร ซึ่งความเข้มของการแผ่รังสีความร้อนออกจากวัตถุใด ๆ มีค่าสูงสุดที่มุม θ เท่ากับ 0 องศา แสดงดังภาพที่ 2.5 (นวกัฑราและทวีพล, 2555)

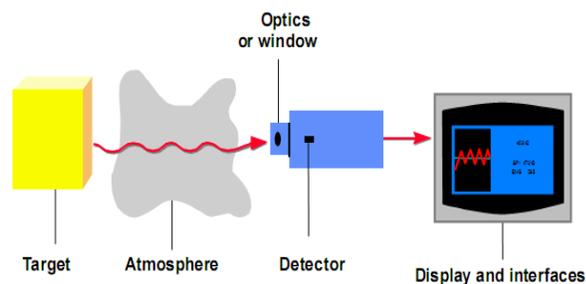


ภาพที่ 2.5 การแผ่รังสีจากพื้นผิวแปรผันตามทิศทาง

ที่มา: นวกัฑรา และทวีพล, 2555

2.2.5.2 กล้องถ่ายภาพความร้อน

กล้องถ่ายภาพความร้อนหรือ Thermal image camera (TI - camera) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับวัดอุณหภูมิที่ผิวของวัตถุโดยไม่มีการสัมผัสและทำลายวัตถุ อาศัยการวัดรังสีอินฟราเรดที่แผ่ออกจากวัตถุและปรับค่ารังสีอินฟราเรดที่วัดได้เป็นอุณหภูมิอาศัยกฎของ Planck และกฎของ Stefan-Boltzmann (นวกัฑรา และ ทวีพล, 2555) ลักษณะการทำงานแสดงดังภาพที่ 2.6

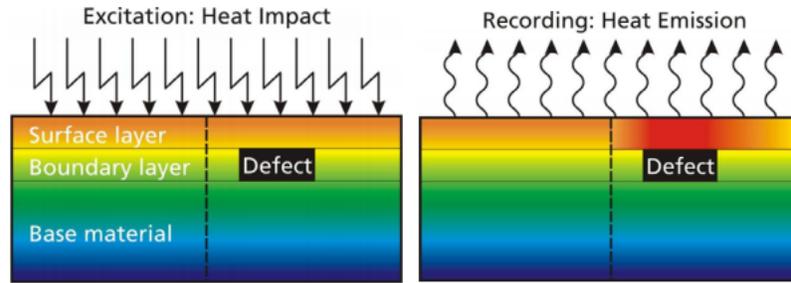


ภาพที่ 2.6 ระบบการวัดอุณหภูมิโดยอาศัยการแผ่รังสีอินฟราเรดของวัตถุ

ที่มา: Gruner, 2003

ส่วนประกอบหลักของกล้อง TI ได้แก่ เลนส์ ตัวตรวจจับ และส่วนแสดงผล ซึ่งแสดงผลออกมาในรูปแบบของเฉดสีและตัวเลข กล้อง TI ประกอบด้วยเซนเซอร์ชนิดอินฟราเรดหลายตัว แต่ละตัวแสดงผลออกมาในรูปแบบของสีที่แตกต่างกันตามอุณหภูมิของจุดนั้น ๆ โดยทั่วไปสีแดงจะแสดงผลที่มีอุณหภูมิสูงและสีน้ำเงินแสดงผลของบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำ หรือโทนสีสว่างแสดงผลของบริเวณที่มีอุณหภูมิสูง และโทนสีมืดแสดงผลของบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำ ผลของแต่ละจุดที่ได้จากเซนเซอร์แต่ละตัวเมื่อนำมารวมกันจะประกอบขึ้นเป็นภาพ เรียกว่า ภาพถ่ายทางความร้อน (Thermal Image) (นวกัทร และ ทวีพล, 2555) รูปแบบการวัดอุณหภูมิด้วยกล้องถ่ายภาพความร้อนแบ่งออกเป็น 2 รูปแบบคือ การวัดเชิงปริมาณ หมายถึงการวัดอุณหภูมิของจุดที่สนใจ และการวัดเชิงคุณภาพ หมายถึงการพิจารณาความแตกต่างของภาพ (ยุทพงษ์ และคณะ, 2556)

การประยุกต์ใช้งานกล้องถ่ายภาพความร้อนเพื่อการวัดและการทดสอบแบ่งออกเป็น 2 เทคนิค คือ Passive thermography และ Active thermography โดยเทคนิค Active thermography ต้องมีแหล่งกระตุ้นความร้อนจากภายนอก มาเป็นแหล่งให้ความร้อนกับวัตถุที่จะทำการตรวจสอบ ซึ่งตัวอย่างที่นิยมใช้เป็นแหล่งกระตุ้นความร้อนสำหรับงานตรวจสอบแบบไม่ทำลาย คือ แสงจากหลอดไฟฮาโลเจน หลอดไฟซีนอน แสงเลเซอร์ กระแสไฟฟ้าหมุนวน หรือ อัลตราโซนิก เป็นต้น ตัวอย่างการประยุกต์ใช้กล้องถ่ายภาพความร้อนด้วยเทคนิค Active thermography ได้แก่ การหาความผิดปกติบนแผ่นไม้อัด ดังแสดงในภาพที่ 7 โดยให้ความร้อนลงบนพื้นผิวของตัวอย่างก่อน จากนั้นใช้กล้องถ่ายภาพความร้อนตรวจสอบความผิดปกติ พบว่าบริเวณที่เป็นโพรงอากาศอยู่ภายใน ความร้อนจะผ่านออกไปได้น้อยจึงทำให้ความร้อนสะสมอยู่นานกว่าบริเวณอื่น ดังนั้นจึงทำให้กล้องสามารถตรวจจับบริเวณที่ผิดปกติได้ วิธีการตรวจสอบแบบ Active thermography มีหลายวิธี เช่น วิธี lock-in infrared thermography และวิธี Pulse thermography การทดสอบด้วยวิธี lock-in infrared thermography มีความซับซ้อนมากกว่าวิธีอื่นเนื่องจาก แหล่งให้ความร้อนจะต้องป้อนเป็นลักษณะคาบเวลาแบบสัญญาณไซน์ ผ่านไปยังอุปกรณ์กระตุ้นความร้อน เช่น หลอดไฟ หรือ อัลตราโซนิก เพื่อให้ความร้อนจากนั้นวัดผลตอบสนองในรูปแบบของเฟสและแอมพลิจูด จากภาพที่ได้จากกล้องถ่ายภาพความร้อน โดยภาพของเฟสสามารถบอกถึงความสัมพันธ์ของเวลาในการกระจายความร้อนและความผิดปกติบนพื้นผิวได้ วิธี Pulse thermography เป็นวิธีการให้ความร้อนจากแหล่งกระตุ้นเพียงแค่วิธีเวลาสั้น ๆ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของพื้นผิววัสดุ ค่าความจุความร้อนจำเพาะของวัสดุ และค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อน



ภาพที่ 2.7 (ก) การให้ความร้อนกับพื้นผิวไม้ (ข) บริเวณที่เป็นโพรงจะสะสมความร้อนได้นานกว่า
ที่มา : Meintschmidt (2005)

ภาพถ่ายทางความร้อนเป็นภาพที่ได้จากการแผ่รังสีของวัตถุ ซึ่งเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในย่านอินฟราเรด (Infrared region) การตรวจสอบสิ่งแปลกปลอมด้วยการประมวลผลภาพถ่ายความร้อน ปัจจุบันเป็นวิธีที่ดำเนินงานอยู่ในระดับงานวิจัยโดยเป็นการวัดเชิงคุณภาพที่พิจารณาความแตกต่างของภาพซึ่งเป็นผลมาจากความแตกต่างของสมบัติทางความร้อนของเมล็ดพืชและสิ่งแปลกปลอมที่ต้องการตรวจสอบ ได้แก่ สัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนของวัตถุ และความจุความร้อนจำเพาะ รายละเอียดมีดังนี้

1) สัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนของวัตถุ คือ ค่าที่แสดงถึงความสามารถในการแผ่รังสีความร้อนของวัตถุ โดยมีค่าเท่ากับอัตราส่วนของรังสีที่แผ่ออกจากวัตถุกับรังสีที่แผ่ออกจากวัตถุ Black body ณ อุณหภูมิเดียวกัน ซึ่งสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนของวัตถุจริงใด ๆ มีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1 แต่วัตถุดำ มีสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนเท่ากับ 1 เสมอ เนื่องจากวัตถุดำเป็นวัตถุทางอุดมคติสำหรับการแผ่รังสีความร้อน มีความสามารถในการแผ่รังสีความร้อนได้สูงที่สุด และมีความสามารถในการดูดซึมรังสีที่มาจากกระทบทั้งหมดในทุกความยาวคลื่นและทุกทิศทาง ซึ่งสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนขึ้นอยู่กับชนิดของวัตถุ ลักษณะพื้นผิวของของวัตถุ และอุณหภูมิที่ผิวของวัตถุ (ท) และทวิพล,2555สำหรับการหาพลังงานการแผ่รังสีอินฟราเรดของวัตถุใด ๆ หรือว ใดดูจริงจำเป็นต้องทราบสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนของวัตถุเพื่อป้อนให้กับกล้องถ่ายภาพความร้อน หากป้อนสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนได้ถูกต้องจะส่งผลให้อุณหภูมิที่ได้จากกล้องถ่ายภาพความร้อนถูกต้องด้วย ตัวอย่างสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนของวัสดุชนิดต่าง ๆ แสดงดังตารางที่ 2.1 สามารถคำนวณพลังงานการแผ่รังสีอินฟราเรดได้จากสมการที่ 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 Creith 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 ค่าที่แสดงถึงคุณสมบัติในการรับคาย/ความร้อนของวัตถุโดยทั่วไปความจุความร้อนจำเพาะคือ ปริมาณความร้อนที่ทำให้วัตถุมวล 1 หน่วย มีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นหรือลดลงจากเดิม 1 องศา มีหน่วยเป็น ปริมาณความร้อนต่อหน่วยมวลต่อหน่วยอุณหภูมิ เช่น แคลอรีต่อกรัมต่อองศาเซลเซียส กิโลแคลอรีต่อกิโลกรัมต่อองศาเซลเซียส หรือจูลต่อกิโลกรัมต่อเคลวิน สำหรับสมการของการหาพลังงานความร้อนที่วัตถุได้รับมีรูปทั่วไปแสดงดังสมการที่ 2.2 และตัวอย่างความจุความร้อนจำเพาะของวัสดุแสดงดังตารางที่ 2.2

$$q = m \int_{T_1}^{T_2} c_p dT \quad (2.2)$$

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 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.3.1 การวัดสมบัติทางความร้อนด้วยกล้องถ่ายภาพความร้อน

Gamaliel et al. (2013) ใช้กล้องถ่ายภาพความร้อนประมาณค่าความหนาแน่นของไม้ โดยวิเคราะห์จากหลักการ IRT และพฤติกรรมทางอุณหพลศาสตร์ของไม้เป็นฟังก์ชันกับความหนาแน่น ซึ่งผลการทดลองพิจารณาการเย็นตัวของไม้หลายๆตัวอย่างเพื่อนำมาสร้างกราฟความสัมพันธ์ และวิเคราะห์ทางสถิติ เพื่อประมาณค่าความหนาแน่นของไม้ ซึ่งพบว่าวิธีดังกล่าวสามารถหาความหนาแน่นของไม้ได้ และยังเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่น่าสนใจในการประมาณค่าของสมบัติทางกายภาพของวัสดุต่างๆ

Chudzik (2012) ใช้กล้องถ่ายภาพความร้อนในการวัดค่าสัมประสิทธิ์การกระจายความร้อนของฉนวน โดยประยุกต์ใช้วิธีการกระตุ้นความร้อนแบบเป็นช่วง และใช้กล้องถ่ายภาพความร้อนวัดอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงบริเวณผิวของตัวอย่างที่ทดสอบ จากนั้นวิเคราะห์ด้วยวิธีแก้ปัญหาแบบย้อนกลับ โดยใช้สมการการกระจายอุณหภูมิแบบ 3 มิติและหาวิธีที่เหมาะสมในการหาค่าสัมประสิทธิ์การกระจายความร้อน พบว่า วิธี Thermo-wave มีการรบกวนของอุณหภูมิบริเวณด้านข้างซึ่งควรคำนวณโดยการแก้ปัญหาแบบย้อนกลับ และควรใช้วิธี Thermovision ในการวัดค่าสัมประสิทธิ์การกระจายความร้อนของฉนวน

Christine and Stéphane (2012) ประยุกต์ใช้กล้องถ่ายภาพความร้อนหาค่าสัมประสิทธิ์การกระจายความร้อนและค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนอย่างง่าย ของวัสดุ 3 ชนิดคือ Polypropylene Pmma และ Glass โดยใช้วิธี lock in thermography ซึ่งในการวัดค่าสัมประสิทธิ์การกระจายความร้อนใช้การประมาณค่าโดยตรงจากวัสดุแต่การวัดค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนต้องมีวัสดุอ้างอิงในการเปรียบเทียบเพื่อใช้ในการประมาณค่าโดยผลการทดลองพบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การกระจายความร้อนและค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนที่ได้จากการทดลอง มีค่าใกล้เคียงกับค่าจริง

Torreset al. (2012) ประยุกต์ใช้กล้องถ่ายภาพความร้อนแบบ active ในการหาค่าสัมประสิทธิ์การกระจายความร้อนของตัวอย่างทรงกลม โดยใช้ทฤษฎีการนำความร้อนของวัสดุ 3 มิติ ในสมการการกระจายความร้อน ซึ่งในการทดลองใช้หลอดไฟฮาโลเจน ให้ความร้อนแก่วัสดุทรงกลม 3 ชนิดคือ Polyurethane foam, Fuji Apple และ Candle แล้วใช้กล้องถ่ายภาพความร้อนตรวจวัดอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลง จากนั้นนำค่าอุณหภูมิที่บันทึกได้มาสร้างแบบจำลอง พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การกระจายความร้อนสอดคล้องกับค่ามาตรฐานที่ได้จากการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อน

Krause et al. (2011) ประยุกต์ใช้กล้องถ่ายภาพความร้อนในการหาค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของวัสดุที่มีความละเอียดโดยในการทดลองใช้เลเซอร์ในการให้ความร้อนแก่วัสดุที่มีการบรรจุ 3 ลักษณะ คือ ฝุ่นที่บรรจุด้วยวิธี RBD ฝุ่นที่ผ่านการกรอง และใช้กล้องถ่ายภาพความร้อนในการตรวจวัดอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลง พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนที่วัดได้มีความสอดคล้องกับงานวิจัยอื่น ๆ และค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนขึ้นกับลักษณะการบรรจุของวัสดุในการทดลอง

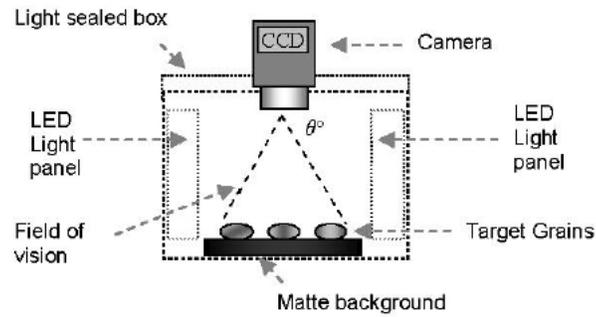
Laskar et al. (2008) ประยุกต์ใช้กล้องถ่ายภาพความร้อนวัดค่าสัมประสิทธิ์การกระจายความร้อนของของแข็ง โดยให้ความร้อนแก่วัสดุบริเวณด้านหน้า และใช้กล้องถ่ายภาพความร้อนในการตรวจจับอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงบริเวณที่ผิวของตัวอย่าง ซึ่งในการทดลองวัดค่าสัมประสิทธิ์การกระจายความร้อนของวัสดุ 3 ชนิดคือ อลูมิเนียม ทองแดง และทองเหลือง พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การกระจายความร้อนที่ได้จากการทดลองมีค่าสอดคล้องกับค่าของงานวิจัยอื่นๆ

Bison et al. (2002) เปรียบเทียบการวัดค่าสัมประสิทธิ์การกระจายความร้อนของแผ่นสแตนเลส 304 จาก 3 วิธี คือ วิธีให้ความร้อนแก่ตัวอย่างด้วยอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริก วิธีให้ความร้อนโดยใช้แสงแฟลชร่วมกับวิธี Deconvolution โดยทั้งสองวิธีใช้กล้องถ่ายภาพความร้อนในการวัดอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงของตัวอย่าง และผลกระทบจากภาพถ่ายทางความร้อน พบว่าวิธีให้ความร้อนโดยใช้แสงแฟลชร่วมกับวิธี Deconvolution มีค่าสัมประสิทธิ์การกระจายความร้อนสอดคล้องกับงานวิจัยอื่นๆ มากที่สุด และเหมาะสำหรับการวัดค่าสัมประสิทธิ์การกระจายความร้อนของวัสดุที่มีค่าสัมประสิทธิ์การกระจายความร้อนต่ำ

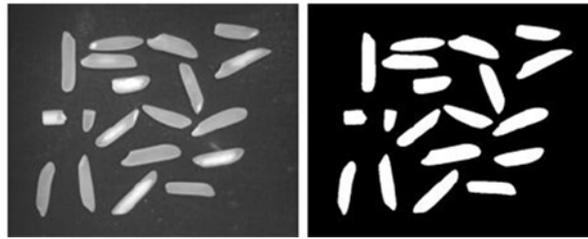
2.3.2 การตรวจสอบเมล็ดพืชด้วยวิธีการประมวลผลภาพถ่าย

Hobson et al. (2007) เสนอวิธีการถ่ายภาพที่ใช้กล้องควบคุมแสงสำหรับการถ่ายภาพเพื่อตรวจสอบสายพันธุ์ของเมล็ดพืช ก่อนนำไปประมวลผลภาพด้วยโปรแกรม ซึ่งการใช้กล้องควบคุมแสงช่วยลดแสงรบกวนจากธรรมชาติ จึงจะทำให้ได้ภาพที่ชัดเจน ง่ายต่อการนำไปประมวลผลภาพ มีหลักการดำเนินการดังภาพที่ 2.8 (ก) โดยมีหลอด LED2 หลอดในการให้แสงสว่างในกล้องควบคุมแสง เมล็ดพืชจะถูกวางบนถาดที่มีสีของพื้นผิวแตกต่างกับเมล็ดพืช และวางอยู่ใต้ตำแหน่งโฟกัสของกล้อง บันทึกภาพจากนั้นนำไปผ่านขั้นตอนในการปรับภาพ จะได้ภาพที่มีความแตกต่างกันอย่างชัดเจนดังภาพที่ 2.8 (ข) แสดงภาพที่ได้ระหว่างเมล็ดพืชตัวอย่างและพื้นหลังมีความแตกต่างอย่างชัดเจน โดยอาศัยสมบัติทางกายภาพ เช่น รูปร่าง ค่าเฉลี่ยของความยาว และค่า Grey Level จากการประมวลผลภาพ พบว่าสามารถตรวจสอบและคัดแยกสายพันธุ์ของเมล็ดพืชได้

Choudhary et al. (2007) วิเคราะห์และประมวลผลภาพโดยใช้ภาพถ่ายเมล็ดพืช ได้แก่ ข้าวฟ่าง ข้าวบาเลย์ ข้าวโอ๊ต และข้าวไรย์ จากนั้นทำการวิเคราะห์ภาพด้วยโปรแกรม MATLAB เพื่อหาปัจจัยที่มีผลต่อการคัดแยกด้วยการประมวลผลภาพ พบว่าปัจจัยที่มีผลได้แก่ ความยาวคลื่นสั้น รูปร่าง สี และผิวสัมผัส อย่างไรก็ตามพบว่าไม่สามารถนำปัจจัยเพียงอย่างเดียวมาวิเคราะห์สำหรับตรวจสอบชนิดของเมล็ดพืชได้ ควรพิจารณารูปร่างและผิวสัมผัสของเมล็ดพืชมาใช้ในการตรวจสอบด้วย เพื่อนำมาใช้ปรับปรุงวิธีการตรวจสอบให้มีคุณภาพดีและเหมาะสม สำหรับใช้ในการตรวจคุณภาพของเมล็ดข้าว ระบุชนิดของสายพันธุ์ข้าว และตรวจสอบสิ่งแปลกปลอมออกจากเมล็ดพืช (Paliwal et al., 2003; Choudhary et al., 2008) นอกจากนี้ยังมีการใช้ลักษณะของพื้นผิวภายนอกของเมล็ดพืชในการคัดแยกสายพันธุ์ที่ต่างชนิดกัน



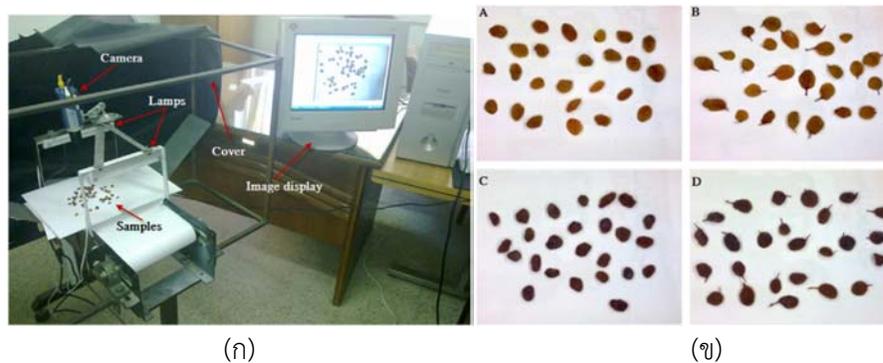
(ก)



(ข)

ภาพที่ 2.8 การถ่ายภาพเมล็ดพืช (ก) กล้องควบคุมแสง (ข) การประมวลผลภาพจากโปรแกรม
ที่มา: Hobson et al. (2007)

Mollazade et al. (2012) ประยุกต์ใช้การประมวลผลภาพในการตรวจสอบลูกเกตกับสิ่งแปลกปลอม (ก้าน) โดยใช้อุปกรณ์ถ่ายภาพ ดังภาพที่ 2.9 (ก) เพื่อเก็บข้อมูลภาพ จากนั้นตรวจสอบกับลูกเกตที่มีสีเขียว ลูกเกตสีเขียวที่มีก้าน ลูกเกตสีดำ และลูกเกตสีดำที่มีก้านภาพที่ 2.9 (ข) โดยอาศัยความแตกต่าง สี ขนาด และรูปร่างของลูกเกต ซึ่งการตรวจสอบพบว่าวิธี ANNs SVMsDTs และ BNs มีความถูกต้องในการตรวจสอบสูงสุด 96.33 95.67 94.67 และ 94.33 %



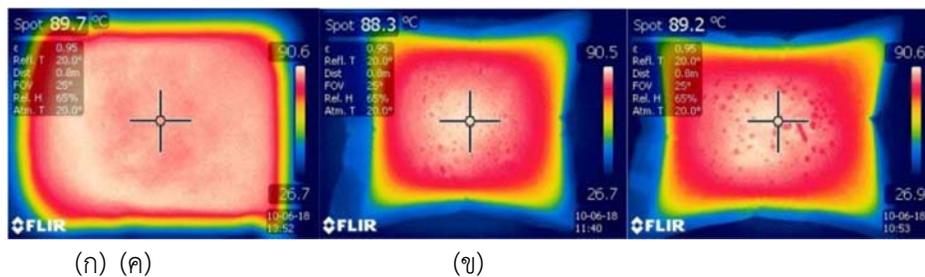
(ก)

(ข)

ภาพที่ 2.9 (ก) ชุดอุปกรณ์สำหรับใช้ถ่ายภาพ (ข) ลูกเกตที่ใช้ในการตรวจสอบ
ที่มา: Mollazade et al. (2012)

2.3.3 การตรวจสอบเมล็ดพืชด้วยวิธีการวิเคราะห์ภาพถ่ายทางความร้อน

ใจทิพย์ และคณะ (2545) ประยุกต์ใช้คลื่นความถี่วิทยุร่วมกับการใช้ภาพถ่ายความร้อนในการจัดการข้าวให้ปราศจากสารพิษ Aflatoxin โดยพบว่าปริมาณการติดเชื้อ *A. flavus* ลดลงเมื่อระยะเวลาและอุณหภูมิในการให้คลื่นความถี่วิทยุเพิ่มขึ้นภาพความร้อนที่ได้จากกล้องอินฟราเรดแสดงการกระจายความร้อนของการบรรจุเมล็ดข้าวแบบสุญญากาศ เปรียบเทียบระหว่างการบรรจุแบบไม่มีพื้นที่ว่างเต็มถุง 100% และการบรรจุแบบมีพื้นที่ว่างโดยมีลักษณะการบรรจุหลวมโดยมีพื้นที่บรรจุประมาณ 85% แสดงดังภาพที่ 2.10 จากการที่เมล็ดข้าวได้รับความร้อนอย่างสม่ำเสมอส่งผลให้เชื้อราที่ติดมาตายในที่สุด



ภาพที่ 2.10 การกระจายความร้อนของการบรรจุแบบสุญญากาศ (ก) แบบไม่มีพื้นที่ว่าง บรรจุเต็มถุง 100% (ข) แบบมีพื้นที่ว่างโดยบรรจุ 85% (ค) หลังจากผ่านคลื่นความถี่วิทยุ
ที่มา: ใจทิพย์ วานิชชังและคณะ, 2545

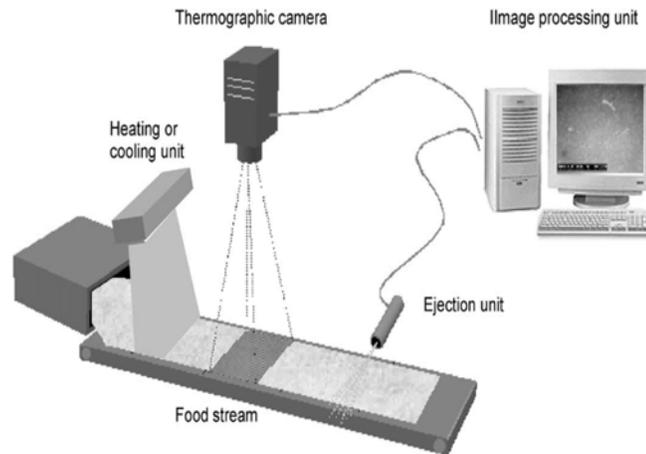
Chelladurai et al. (2010) ประยุกต์ใช้ภาพถ่ายทางความร้อนในการตรวจสอบเชื้อราหลังการเก็บเกี่ยวโดยอาศัยความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างข้าวสาเลที่มีคุณภาพดีกับข้าวสาเลที่เกิดการติดเชื้อภาพถ่ายทางความร้อนสามารถใช้ในการตรวจสอบเชื้อราได้หลายชนิดและระบุเชื้อได้ชัดเจนมากยิ่งขึ้น เช่น *Aspergillus glaucus* และ *Penicillium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

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

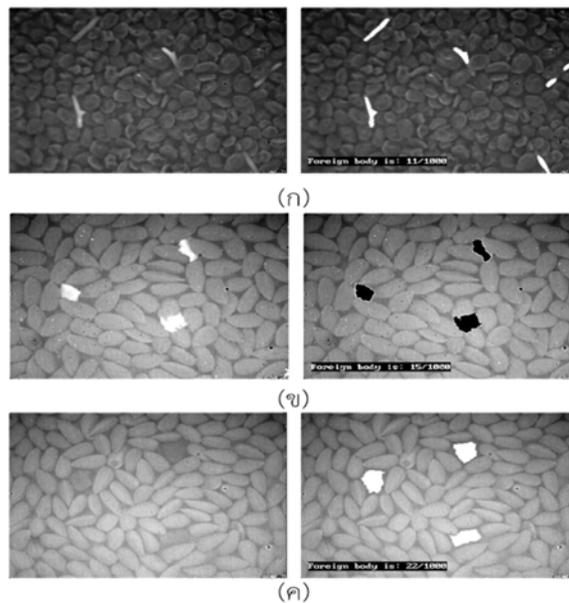
Emekei et al. (2004) ประยุกต์ใช้ภาพถ่ายทางความร้อนในการตรวจสอบแมลงในระยะการฟักตัว โดยอาศัยความแตกต่างของการกระจายอุณหภูมิที่ผิวของเมล็ดพืชที่มีแมลงอยู่กับอัตราการหายใจของแมลงในแต่ละช่วงระยะเวลาการเจริญเติบโต

Ginesu et al. (2004) ได้ศึกษาและทดลองนำภาพถ่ายความร้อน (Thermal image) มาใช้ในการตรวจสอบสิ่งแปลกปลอมที่ปนมากับเมล็ดพืช ซึ่งในการทดลองจะแบ่งกลุ่มของสิ่งแปลกปลอมกับเมล็ดพืชออกเป็น 3 กลุ่ม คือ เมล็ดอัลมอนต์กับหิน เมล็ดอัลมอนต์กับเศษกระดาษ และลูกเกตกับเศษไม้

ซึ่งใช้ชุดอุปกรณ์การทดลองดังภาพที่ 2.11 โดยให้ความร้อนกับสิ่งแปลกปลอมและเมล็ดพืช และทิ้งไว้จนได้ช่วงเวลาที่เหมาะสมและใช้กล้องถ่ายภาพความร้อนถ่ายจะได้ภาพที่เกิดจากกล้องถ่ายภาพความร้อนซึ่งแสดงดังภาพที่ 2.12 จากนั้นนำภาพถ่ายทางความร้อนมาตรวจวิเคราะห์เพื่อตรวจสอบหาสิ่งแปลกปลอมที่ปนมากับเมล็ดพืชได้ด้วยโปรแกรมวิเคราะห์ในขั้นตอนต่อไปซึ่งผลการทดลองจะได้ภาพที่แสดงถึงความแตกต่างระหว่างเมล็ดพืชกับสิ่งแปลกปลอมได้อย่างชัดเจน



ภาพที่ 2.11 ชุดอุปกรณ์ที่ใช้ตรวจสอบสิ่งแปลกปลอมโดยกล้องถ่ายภาพความร้อน
ที่มา: Ginesu et al. (2004)



ภาพที่ 2.12 ภาพถ่ายความร้อนของเมล็ดพืชและสิ่งแปลกปลอม (ก) เศษไม้กับลูกเกด (ข) เศษกระดาษ และ (ค) เศษหินกับเมล็ดอัลมอลล์

ที่มา: Ginesu et al. (2004)

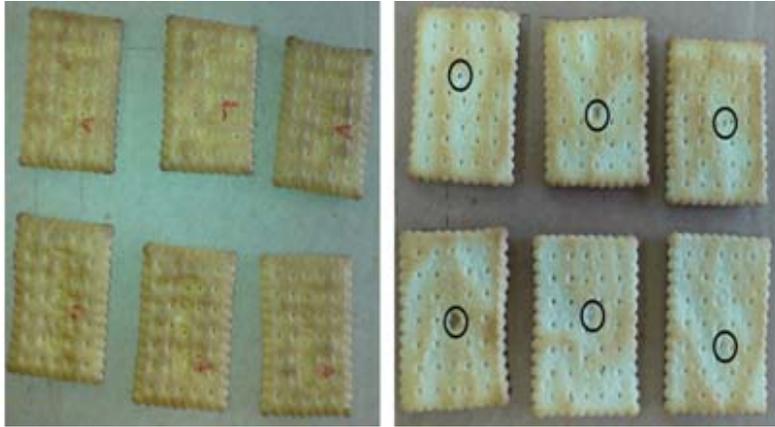
นอกจากนี้กล้องถ่ายภาพความร้อนยังสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการตรวจสอบการรบกวนของแมลงในข้าวสาลี โดย Manickavasagan *et al.* (2008) ได้ทดลองใช้กล้องถ่ายภาพความร้อนในการตรวจจับการรบกวนของตัวด้วงในข้าวสาลี ซึ่งในการทดลองจะเริ่มจากนำข้าวสาลีที่ไม่ถูกรบกวนและข้าวสาลีที่ถูกรบกวนดังภาพที่ 2.13 มาป้อนที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียสและใส่ในตู้เย็นที่อุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 วินาทีจากนั้นนำมาทิ้งไว้ในอุณหภูมิห้องเป็นเวลา 20 วินาทีและใช้กล้องถ่ายภาพความร้อนถ่ายรูปเพื่อนำไปวิเคราะห์หาความแตกต่างของข้าวสาลีที่ถูกตัวด้วงรบกวนและไม่ถูกรบกวน จากการทดลองแสดงให้เห็นถึงความแตกต่างของข้าวสาลีที่ถูกตัวด้วงรบกวนและไม่ถูกรบกวน



ภาพที่ 2.13 ภาพข้าวสาลีที่ถูกตัวด้วงรบกวนและไม่ถูกรบกวน

ที่มา: <http://wheatgrassthai.blogspot.com/2007/03/1-7.html>

Senniet *et al.* (2014) ได้ทดลองนำกล้องอินฟราเรดมาประยุกต์ใช้ในการตรวจสอบสิ่งแปลกปลอมที่ซ่อนอยู่ภายในขนมปังกรอบ ซึ่งในการทดลองเป็นการนำสิ่งแปลกปลอม อันได้แก่ หิน เศษ แก้ว เศษพลาสติก เศษไม้ เศษกระดาษ และเศษผ้าเป็นต้น มาใช้ในการทดลองโดยนำสิ่งแปลกปลอมเหล่านี้ไปใส่ไว้ในแป้งขนมปังหรือแป้งโดว์แล้วจึงนำไปอบเป็นเวลา 6 วินาที ที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส เมื่อทำการอบเสร็จแล้วจะทิ้งไว้ให้อุณหภูมิเย็นตัวลงจากนั้นจึงใช้กล้องอินฟราเรดถ่ายภาพในทุก ๆ 10 วินาที เป็นเวลา 30 นาที เมื่อทำการอบเสร็จแล้วจะทิ้งไว้ให้อุณหภูมิเย็นตัวลงจากนั้นจึงใช้กล้องอินฟราเรดถ่ายภาพเพื่อนำมาตรวจหาสิ่งแปลกปลอมที่ปนเปื้อนอยู่ภายในขนมปังกรอบ ซึ่งภาพที่ได้จากการทดลองแสดงดังภาพที่ 2.14 สามารถนำมาตรวจวิเคราะห์เพื่อตรวจหาสิ่งแปลกปลอมได้ด้วยโปรแกรมวิเคราะห์ในขั้นตอนต่อไปผลการทดลองจะเห็นความแตกต่างระหว่างสิ่งแปลกปลอมกับอาหารได้จากภาพถ่ายความร้อน และงานวิจัยนี้มีการพัฒนาไปสู่ระบบ on-line ในอุตสาหกรรมการผลิตขนมปังกรอบ



ภาพที่ 2.14 ภาพความร้อนที่ใช้ในการตรวจสอบสิ่งแปลกปลอมที่ปนเปื้อนในขนมปังกรอบ
ที่มา: Senni et al., 2014