บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

มังคุด (*Garcinia mangostana* L.) อยู่ในวงศ์ Guttiferae เป็นผลไม้เขตร้อน และมีถิ่นกำเนิดในแถบคาบสมุทรมลายู แต่ในปัจจุบันมีปลูกอยู่ทั่วไปในประเทศมาเลเซีย อินโดนีเซีย พม่า ศรีลังกา ไทย เวียดนาม กัมพูชา และหมู่เกาะซุนด้า (Ochse et al., 1961) แหล่งที่ปลูกในประเทศไทยมีแหล่งปลูกมังคุดที่มากที่สุดของประเทศไทย คือ ภาคใต้ รองลงมาเป็นภาคตะวันออก และภาคกลาง สำหรับในภาคเหนือมีปลูกบ้างเล็กน้อย จังหวัดที่มีการปลูกมังคุดมากได้แก่ ชุมพร นครศรีธรรมราช นราธิวาส สุราษฎร์ธานี จันทบุรี ระยอง ตราด และปราจีนบุรี เป็นต้น (เกียรติ เกษตร และคณะ, 2530 และ นพรัตน์, 2536)

ลักษณะทางพฤกษศาสตร์

มังคุดมีผลแบบ berry มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของผลประมาณ 3.5-7.0 เซนติเมตร เปลือกหนา 0.8 -1.0 เซนติเมตร เนื้อภายในมีสีขาวขุ่น อ่อนนุ่ม เนื้อแบ่งออกเป็น 4-8 กลีบ แล้วแต่จำนวนไข่อ่อน (Ochse et al., 1961 ; Almeyda and Matin, 1976) เมื่อผลยังดิบเปลือกมีสีเขียวตองอ่อน และมียางสีเหลืองอยู่มาก เมื่อผลเริ่มแก่จะเกิดจุด หรือประสีม่วงแดงเป็นปื้นขึ้นบริเวณเปลือก เรียกว่า "สายเลือด" เมื่อผลสุกเต็มที่จะเป็นสีม่วงแดงจนถึงดำกระจายทั้งผล ระยะเวลาตั้งแต่เริ่มติดผลจนกระทั่งเก็บเกี่ยวใช้เวลาประมาณ 11-12 สัปดาห์ (กวิศร์ และสุรพงษ์, 2522) สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย (2529) ได้ศึกษาดัชนีการเก็บเกี่ยวมังคุด และได้แบ่งระยะความสุกแก่ของผลมังคุดออกเป็นระดับสีไว้ 7 ระดับ โดยมีความแตกต่างกันในแต่ละระดับ คือ

ระดับสีที่ 0 เป็นผลที่มีสีขาวอมเหลืองสม่ำเสมอ หรือมีสีขาวอมเหลืองแต้มด้วยสีเขียวอ่อนหรือจุดสีเทา มียางสีเหลืองภายในเปลือกในระดับรุนแรงมาก เนื้อและเปลือกไม่สามารถแยกออกจากกันได้ ผลที่เก็บเกี่ยวในระยะนี้แม้ว่าจะเปลี่ยนสีไปเป็นระดับ 6 แล้วก็ตาม แต่ผลที่ได้จะมีรสชาติไม่ดี

ระดับสีที่ 1 ผลจะมีสีเหลืองอ่อนอมเขียว มีจุดสีชมพูกระจายอยู่ในบางส่วนของผล ยางในเปลือกยังอยู่ในระดับรุนแรง เนื้อและเปลือกยังไม่สามารถแยกออกจากกันได้ ผลที่เก็บเกี่ยวในระยะนี้ถึงแม้จะเปลี่ยนสีไปเป็นระดับ 6 แล้วก็ตาม แต่ผลที่ได้จะมีรสชาติไม่ดี

ระดับสีที่ 2 ผลมีสีเหลืองอ่อนอมชมพู มีประสีชมพูกระจายไปทั่วผล ยางภายในเปลือกอยู่ในระดับปานกลาง การแยกตัวระหว่างเนื้อกับเปลือกทำได้ยากถึงปานกลาง เป็นระยะอ่อนที่สุดสำหรับการเก็บเกี่ยวให้ได้ผลที่มีคุณภาพดี

ระดับสีที่ 3 ผลมีสีชมพูสม่ำเสมอ ประสีชมพูเริ่มขยายเข้ามารวมกันไม่แบ่งแยกชัดเจนเช่นในระดับสีที่ 2 ยางภายในเปลือกยังคงมีน้อยถึงน้อยมาก การแยกตัวระหว่างเนื้อกับเปลือกปานกลาง

ระดับสีที่ 4 ผลที่มีสีแดงหรือน้ำตาลอมแดงบางครั้งมีแต้มสีม่วง ยางภายในเปลือกมีน้อยมากถึงไม่มีเลย การแยกตัวระหว่างเนื้อกับเปลือกดีมาก เป็นระยะที่เกือบรับประทานได้

ระดับสีที่ 5 ผลมีสีม่วงอมแดง ภายในเปลือกไม่มียางเหลืออยู่ เนื้อและเปลือกสามารถแยกออกจากกันได้ง่าย เป็นระยะที่รับประทานได้

ระดับสีที่ 6 ผลมีสีม่วงหรือม่วงเข้มจนถึงสีดำ ซึ่งบางครั้งพบว่ามีสีม่วงปนอยู่เล็กน้อย ภายในเปลือกไม่มียางเหลืออยู่ เนื้อและเปลือกสามารถแยกออกจากกันได้ง่าย เป็นระยะที่เหมาะแก่การรับประทาน

จากการศึกษาของ กวิศร์ และ สุรพงษ์ (2522) และ ธีรวัฒน์ (2533) พบว่าผลมังคุดแต่ละระดับสีมีอายุแตกต่างกันประมาณ 1 ถึง 2 วัน และอายุที่เหมาะสมสำหรับการเก็บเกี่ยวของมังคุดเพื่อการส่งออก ควรเป็นระยะที่ผลมังคุดเริ่มมีจุดประสีชมพูตลอดทั้งผล หรือระยะสายเลือด ซึ่งเทียบได้กับระดับสีที่ 2-4 ซึ่งระดับสีที่ 2 นี้จะใช้เวลาประมาณ 4-5 วัน หลังการเก็บเกี่ยวในการเปลี่ยนเป็นสีม่วงแดง และสามารถบริโภคได้ จึงทำให้อายุการวางจำหน่ายนานกว่าการเก็บเกี่ยวเมื่อผลมีสีม่วงแดง หรือม่วงเข้ม คือ ในระดับสีที่ 5 หรือ 6 ซึ่งระดับสีนี้เหมาะสำหรับการวางจำหน่ายในตลาดภายในประเทศเท่านั้น (อัมพิกา และคณะ, 2539)

กวิศร์ และ สุรพงษ์ (2522) ได้ศึกษาการเปลี่ยนแปลงหลังการเก็บเกี่ยวของผลมังคุด ในกลุ่มอายุต่างๆ ตั้งแต่เริ่มเปลี่ยนสี 0 - 7 วัน (ระดับสีที่ 1 - 6) เมื่อเก็บไว้ที่อุณหภูมิเฉลี่ย 28.3 C° (อุณหภูมิห้อง) และความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ย 84.33 เปอร์เซ็นต์ พบว่ามังคุดจะมีการเปลี่ยนสีเพิ่มมากขึ้นตามจำนวนวันที่เก็บรักษา โดยกลุ่มที่มีอายุน้อยที่สุดใช้เวลาในการเปลี่ยนสีจนสีสม่ำเสมอทั่วผล และเป็นที่ยอมรับของผู้บริโภคนาน 3 - 4 วัน กลุ่มที่มีอายุรองลงมาจะใช้เวลาในการเปลี่ยน

สีจนสม่ำเสมอภายใน 2 วัน หลังการเก็บเกี่ยว และจะปรากฏการเหี่ยวของเปลือกเมื่อเก็บไว้นานมากกว่า 7 วัน การสูญเสียน้ำหนักของมังคุดมีแนวโน้มสูงขึ้นเรื่อยๆ เมื่อมีระยะเวลาหลังการเก็บเกี่ยวนานขึ้นแต่การสูญเสียน้ำหนักของมังคุดทุกกลุ่มไม่มีความแตกต่างกัน นอกจากนี้เมื่อเก็บรักษาไว้นานมากกว่า 7 วัน จึงจะเกิดรอยแยกระหว่างเนื้อกับเปลือก เป็นร่องตามยาวของพูผลอย่างเห็นได้ชัด แต่เนื้อผลยังคงมีสภาพดีคล้ายผลที่เพิ่งเก็บมาใหม่ๆ

ในปี 2538 ประเทศไทยผลิตมังคุดได้ 129,227 ตัน (ศูนย์สถิติการเกษตร, 2540) แต่คุณภาพของมังคุดที่ผลิตได้ยังไม่อยู่ในเกณฑ์ที่ดีพอ และไม่ตรงกับความต้องการของตลาด คือ ผลมีขนาดเล็ก เปลือกแข็ง มีร่องรอยการเข้าทำลายของแมลงอย่างเด่นชัด มีอาการเนื้อแก้ว และยางไหลในผลเป็นจำนวนมาก แต่มังคุดที่ตลาดต้องการ คือ ผลมีขนาดใหญ่ มีผิวสวยเรียบเป็นมัน ไม่มีร่องรอยการเข้าทำลายของแมลงหรือมีน้อย คุณภาพเนื้อดี ไม่มีอาการเนื้อแก้ว และยางไหลภายในผล (อัมพิกา และคณะ, 2539) แต่ในอนาคตมังคุดผลที่มีขนาดเล็ก (38 มิลลิเมตร หรือ มีน้ำหนัก 30 กรัมขึ้นไป) ยังคงจำหน่ายได้ แต่ต้องเป็นมังคุดคุณภาพดีตามมาตรฐานของ CODEX โดยยอมให้มีผลเสียปะปนอยู่ได้แต่ต้องไม่เกินร้อยละ 5 ของผลมังคุดทั้งหมด สำหรับคุณภาพชั้นพิเศษ และไม่เกินร้อยละ 10 สำหรับคุณภาพชั้น 1 โดยไม่มีผลที่มีเปลือกแข็ง และต้องผ่าผลออกได้ตามปกติ คือ ต้องไม่มียางไหลภายในผล คุณภาพมังคุดของไทยจึงจะเข้าสู่มาตรฐานโลกได้ (สุรพงษ์, 2540) การที่มีมังคุดคุณภาพไม่ดีปะปนอยู่ด้วยนั้นอาจแบ่งสาเหตุออกได้เป็น 2 ประเด็นใหญ่ๆ คือ การเก็บเกี่ยวมังคุดที่ไม่ระมัดระวัง และเกษตรกรไม่ได้ทำการคัดเลือกมังคุดผลเสียออกไปก่อนจำหน่าย (สุรพงษ์, 2532)

การเจริญเติบโต การออกดอก และการติดผล จนกระทั่งเก็บเกี่ยวได้ของผลมังคุดจะมีความสัมพันธ์กันอย่างมากกับปริมาณน้ำฝน และความชื้นสัมพัทธ์ในแต่ละรอบปี โดยจะมีผลถึงคุณภาพของผลมังคุด เช่น ผลมีขนาดเล็ก ยางไหล โรคเน่า อาการเนื้อแก้วของมังคุดโดยเฉพาะอาการเนื้อแก้วเมื่อเกิดอาการนี้แล้ว เนื้อผลปกติซึ่งมีลักษณะอ่อนนุ่ม สีขาวขุ่น จะเปลี่ยนไปเป็นเนื้อแข็งใสและกรอบเหมือนวุ้น (สุรกิตติ, 2531 และวรภัทร, 2539 ก) จากการศึกษาของ ศรียนต์ (2529) พบว่า อาการเนื้อแก้วนี้อาจพบเพียงบางส่วนของผล หรืออาจพบว่าเป็นเนื้อแก้วทั้งผลก็ได้ ลักษณะการเกิดอาการเนื้อแก้วนั้นมักเกิดกับเมล็ดใหญ่ที่สุดของผล ในขณะเดียวกันเปลือกด้านในส่วนที่ติดกับเนื้อผลก็มีอาการฉ่ำน้ำด้วย อาการเนื้อแก้วนี้อาจเกิดร่วมกับอาการเนื้อเหลืองหรือเรียกว่า "อาการยางไหล" ซึ่งพบว่ามียางสีเหลืองหยดเปื้อนเนื้อผล หรือไหลซึมเข้าไปในเนื้อผลมังคุด และถ้าหากมียางไหลในรอยต่อระหว่างเนื้อกับเปลือกผล เปลือกผลในบริเวณนั้นจะแข็ง

และติดกับเนื้อผลทำให้แกะเปลือกออกได้ยาก นอกจากนี้มังคุดที่เก็บเกี่ยวในระยะต่างๆ กันคือ กลุ่มที่มีผลสีเขียว สีชมพู และสีม่วง นั้นพบว่ามีอาการเนื้อแก้วอยู่ทุกระยะเก็บเกี่ยวในอัตราใกล้เคียงกัน เมื่อนำผลมังคุดไปวินิจฉัยเชื้อจุลินทรีย์ชนิดต่างๆ และศึกษาโครงสร้างของเนื้อเยื่อ พบว่าไม่ปรากฏเชื้อจุลินทรีย์แต่อย่างใด เนื้อเยื่อของมังคุดเนื้อแก้ว และเนื้อปกติ ประกอบด้วยเซลล์พาเรนไคมา (parenchyma) และพบว่ามีช่องว่างขนาดใหญ่ (pore) เช่นเดียวกันกับผลการทดลองของ Pankasemsuk *et al.* (1996) ซึ่งพบว่ากลุ่มของเซลล์พาเรนไคมาของมังคุดเนื้อแก้วมีลักษณะกลม และมีความเต่งมากกว่าในเนื้อปกติ และเมื่อทำการบังคับน้ำเข้าไปในผลมังคุด พบว่าผลมังคุดที่ได้รับน้ำเข้าไปมากจะเกิดอาการเนื้อแก้วตามมาและมีความถ่วงจำเพาะเพิ่มขึ้นจาก 0.98 เป็น 1.02 โดยเฉลี่ย นอกจากนี้ยังพบว่าผลมังคุดที่ได้รับน้ำมากยังมีอาการยางไหลในผลร่วมด้วย ต่อมา ศรีสังวาลย์ (2537) ได้รายงานว่าปริมาณน้ำที่ต้นมังคุดได้รับในช่วงระหว่างฤดูกาลเก็บเกี่ยวผลิตผล มีความสัมพันธ์กับอาการเนื้อแก้ว และยางไหลภายในผลมังคุด โดยเฉพาะเมื่อมีฝนตกหนักในช่วงฤดูกาลเก็บเกี่ยวติดต่อกันนานหลายวัน อาการดังกล่าวจะมีความรุนแรงมากยิ่งขึ้น จากการทดลองของ วรภัทร (2539 ข) ยืนยันว่าอาการเนื้อแก้วของมังคุดเกิดจากการเปลี่ยนแปลงสภาวะของน้ำในผลเป็นสาเหตุหลัก และพบว่ามังคุดเนื้อแก้วมีปริมาณน้ำมากกว่าเนื้อปกติ 1.21 เปอร์เซ็นต์ มีปริมาณอากาศน้อยกว่าปกติ 15 เท่า และมีความแน่นเนื้อมากกว่ามังคุดเนื้อปกติมากกว่า 3 เท่า นอกจากนี้ยังพบว่ามีปริมาณเพกตินที่ละลายได้ในน้ำ (water soluble pectin) น้อยกว่าเนื้อปกติ 0.55 มิลลิกรัม/100 กรัมน้ำหนักสด และเมื่อทดลองให้น้ำทางก้านผลด้วยความดันสูงทำให้ผลแตก และเกิดการเปลี่ยนสีไปเป็นสีม่วงเข้มอย่างรวดเร็วภายใน 2 วัน ซึ่งเร็วกว่าการเปลี่ยนสีตามปกติ แต่ไม่ทำให้เกิดอาการเนื้อแก้วในผลแต่อย่างใด

หลักการของความถ่วงจำเพาะและความสัมพันธ์กับคุณภาพผลิตผลเกษตร

ความถ่วงจำเพาะ คือ อัตราส่วนระหว่างความหนาแน่นของผลไม้ต่อความหนาแน่นของน้ำที่อุณหภูมิ และความดันเดียวกัน (ชาญ, 2523) ความถ่วงจำเพาะเป็นคุณสมบัติทางกายภาพ (physical property) อย่างหนึ่งที่มีความสัมพันธ์กับคุณภาพภายในของผลิตผลเกษตร โดยในพืชแต่ละชนิดนั้นมีปัจจัยต่างๆ ที่สัมพันธ์กับค่าความถ่วงจำเพาะ เช่น ปริมาณของสารละลายที่มีอยู่ภายในเซลล์ ปริมาณของแป้ง ปริมาณของแข็ง ความหนาของเซลล์และส่วนประกอบของเซลล์ ขนาดของช่องว่างระหว่างเซลล์ หรือปริมาณของโพรงอากาศที่มีอยู่ภายในส่วนของพืชนั้นๆ เป็นต้น โดยปัจจัยเหล่านี้ที่เปลี่ยนแปลงไป และมีผลในการกำหนดคุณภาพของผักและผลไม้ เช่น

ระดับความสุกแก่ หรือตำหนิที่เกิดขึ้นภายใน (Kelly and Smith, 1944 ; Zaltzman *et al.*, 1987) เช่น หัวมันฝรั่งที่มีค่าความถ่วงจำเพาะสูง พบว่ามีปริมาณแป้งทั้งหมดสูงกว่ามันฝรั่งที่มีค่าความถ่วงจำเพาะต่ำ และในหัวแครอทที่มีค่าความถ่วงจำเพาะสูง พบว่ามีปริมาณของแข็งสูงมากกว่ากลุ่มที่มีค่าความถ่วงจำเพาะต่ำ (Kelly and Smith, 1944) ถั่วฝักสดแช่แข็งที่ละลายน้ำแข็งแล้ว (thaw) มีค่าความถ่วงจำเพาะสูงพบว่าเป็นถั่วที่แก่ ส่วนถั่วค่าความถ่วงจำเพาะต่ำเป็นถั่วที่ยังอ่อนอยู่และมีคุณภาพดีกว่ากลุ่มที่มีค่าความถ่วงจำเพาะสูง (Makower, 1957) มะเขือเทศ (green-tomato) ที่มีค่าความถ่วงจำเพาะเฉลี่ยต่ำเป็นมะเขือเทศยังอ่อนอยู่ ส่วนกลุ่มที่มีค่าความถ่วงจำเพาะสูงเป็นพวกที่สุกแก่ โดยในแต่ละพันธุ์จะมีค่าความถ่วงจำเพาะแตกต่างกันไป การที่มะเขือเทศที่ยังไม่แก่มีค่าความถ่วงจำเพาะต่ำกว่าผลที่สุกแก่เต็มที่ นั้นเนื่องจากในผลที่ยังอ่อนมีโพรงอากาศในเนื้อมากกว่าผลที่สุกแก่ แต่มีปริมาณของแข็งที่ละลายได้ในน้ำทั้งหมดต่ำผลที่สุกแก่ จึงมีค่าความถ่วงจำเพาะต่ำกว่าผลมะเขือเทศที่สุกแก่ (Nettles, 1950) เช่นเดียวกันกับผล highbush blueberries ที่มีค่าความถ่วงจำเพาะต่ำนั้นเป็นกลุ่มที่ยังไม่แก่ ส่วนกลุ่มที่มีความถ่วงจำเพาะสูงมักเป็นผลที่สุกแก่แล้ว (Wolfe *et al.*, 1974) ในหัวแรดิชที่มีค่าความถ่วงจำเพาะต่ำนั้น เมื่อผ่าดูเนื้อภายในพบว่ามีระดับอาการ sponginess มากกว่าร้อยละ 60 ของพื้นที่หัวแรดิชทั้งหมด และพบว่าระดับอาการ sponginess ที่เพิ่มมากขึ้นนั้นมีความสัมพันธ์กับค่าความถ่วงจำเพาะที่ลดลง (r^2 = -0.92) (Marcelis *et al.*, 1995) มะม่วงพันธุ์ Alphonso ที่มีค่าความถ่วงจำเพาะสูงมากกว่า 1 พบว่าเป็นผลมะม่วงที่มีความแก่ตั้งแต่ร้อยละ 80 ขึ้นไป และกลุ่มที่มีค่าความถ่วงจำเพาะต่ำกว่า 1 พบว่าเป็นผลที่ยังไม่แก่ (Roy and Joshi, 1989) โดยผลที่มีค่าความถ่วงจำเพาะมากกว่า 1 เมื่อปล่อยไว้ให้สุก พบว่ามีรสชาติดีเป็นที่ยอมรับของผู้บริโภค แต่มีอาการ Internal breakdown ภายในเนื้อมากกว่ากลุ่มที่มีค่าความถ่วงจำเพาะต่ำกว่า 1 ซึ่งเมื่อปล่อยให้สุกแล้วกลับมีรสชาติไม่ดี (Shantha., 1980) มะม่วงพันธุ์น้ำดอกไม้เมื่อมีอายุมากขึ้นมีค่าความถ่วงจำเพาะสูงขึ้นเรื่อยๆ เพราะมีการสะสมอาหารมากขึ้น เมื่อบริบูรณ์มีความถ่วงจำเพาะตั้งแต่ 1.02-1.04 จึงสามารถใช้วิธีการลอยน้ำเพื่อคัดเลือกผลมะม่วงพันธุ์น้ำดอกไม้ตามอายุได้ ผลที่ลอยน้ำมีค่าความถ่วงจำเพาะน้อยกว่า 1 เมื่อปล่อยไว้ให้สุกมีปริมาณของแข็ง หรือร้อยละของน้ำหนักแห้ง ปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ (น้ำตาล) ต่ำ และมีปริมาณกรดสูง จึงมีรสชาติไม่ดีและไม่เป็นที่ยอมรับของผู้บริโภค ส่วนผลจมน้ำที่มีค่าความถ่วงจำเพาะมากกว่า 1 เมื่อปล่อยไว้ให้สุกมีคุณภาพดีและมีรสชาติดีเป็นที่ยอมรับของผู้บริโภค โดยมีปริมาณน้ำตาล วิตามินซีสูง และมีปริมาณกรดต่ำ (อรรณพ และคณะ, 2529 และจริงแท้, 2538) ผลส้มที่มีค่าความถ่วงจำเพาะต่ำนั้น เป็นผลส้มที่ฟ่ามแบบแห้ง (dry juice sacs) ซึ่งเป็นอาการ freezing injury อย่างหนึ่งและมี

คุณภาพไม่ดีและไม่เป็นที่ยอมรับของผู้บริโภค และกลุ่มที่มีค่าความถ่วงจำเพาะสูงเป็นผลปกติ (Turrel and Slack, 1948) pecan กลุ่มที่มีค่าความถ่วงจำเพาะสูง พบว่าเป็นเมล็ดที่มีเนื้อเต็มเมล็ด และมีคุณภาพดีกว่ากลุ่มที่มีค่าความถ่วงจำเพาะต่ำ ที่พบว่าเป็นเมล็ดที่มีไม่สมบูรณ์และมีเนื้อไม่เต็มเมล็ด (Heaton *et al*., 1982)

การประยุกต์ใช้วิธีความถ่วงจำเพาะในการคัดคุณภาพผลิตผลเกษตร

วิธีความถ่วงจำเพาะเป็นวิธีการที่สามารถนำมาปรับปรุงใช้ในการคัดคุณภาพผลิตผลทางการเกษตรได้ง่ายไม่ยุ่งยาก ไม่ซับซ้อน และมีราคาถูก (Kelly and Smith, 1944) ถ้าหากทราบความหนาแน่น (density) หรือความถ่วงจำเพาะ (specific gravity ; SG) ของผลิตผลนั้นๆ ว่ามีความแตกต่างจากสิ่งแปลกปลอมที่ไม่ต้องการ ก็สามารถนำมาคำนวณค่าความถ่วงจำเพาะเพื่อคัดแยกสิ่งแปลกปลอมที่ไม่ต้องการออกไปได้ วิธีการคัดคุณภาพของผักผลไม้โดยใช้ความถ่วงจำเพาะอาจใช้วิธีธรรมดา เช่น การลอย - จมในน้ำหรือสารละลายตัวกลางที่ทราบความหนาแน่น หรืออาจปรับปรุงวิธีในการคัดแยก เช่น การปล่อยให้ผลไม้ตกลงในน้ำไหล ผลที่มีความถ่วงจำเพาะต่างกันจะลอยแยกห่างกันออกไป หรืออาจใช้การเพิ่มฟองอากาศเพื่อปรับแต่งความถ่วงจำเพาะของสารละลาย หรือสารตัวกลางที่ใช้ในการคัดให้มีความเหมาะสมในการคัดแยกผลิตผลมากยิ่งขึ้น วิธีการต่างๆ เหล่านี้ สามารถนำไปใช้ในการคัดแยกผลิตผลที่มีค่าความถ่วงจำเพาะใกล้เคียงกันให้ออกจากกันได้ชัดเจนมากขึ้น (Mohsenin, 1986 and Chen, 1996)

Zaltzman *et al*. (1987) รายงานว่าในปี 1952 Kunkel *at al*. ได้พัฒนาวิธีการคัดแยกคุณภาพหัวมันฝรั่ง โดยใช้สารละลายเกลือปรับค่าความถ่วงจำเพาะในการคัดแยก ให้ผลการคัดแยกที่แม่นยำมาก แต่ต้องล้างหัวมันฝรั่งก่อนการคัดแยก เพื่อลดปัญหาการเจือจางของสารละลายที่ใช้ในการคัดแยก และต้องรีบล้างหัวมันฝรั่งทันทีหลังการคัดแยก ก่อนนำไปเก็บรักษา แต่การล้างหัวมันฝรั่งบ่อยๆ จะทำให้ผิวมันฝรั่งมีรอยขีดข่วน ทำให้เป็นแผลและปนเปื้อนเชื้อจุลินทรีย์ได้ง่ายและมีอายุการเก็บรักษาสั้นลง แต่ในแอปเปิลนั้นพบว่าผลที่มีอาการ water core จะมีความถ่วงจำเพาะเฉลี่ยสูงกว่าผลปกติ แต่ทั้ง 2 กลุ่มนี้ ยังมีค่าความถ่วงจำเพาะต่ำกว่า 1.00 ในปี 1962 ได้มีการใช้น้ำผสมแอลกอฮอล์ (ethyl, methyl หรือ isopropyl alcohol) ที่มี ค่าความถ่วงจำเพาะประมาณ 0.87 มาใช้คัดแยกในเชิงการค้า พบว่าสามารถคัดผลแยกแอปเปิลผลปกติออกจากผลที่มีอาการ water core ได้ร้อยละ 78 แต่การควบคุมค่าความถ่วงจำเพาะให้คงที่นั้นทำได้ยาก (Porritt *et al*., 1963) เช่นเดียวกับส้มที่มีอาการฟ่ามแบบแห้ง (dry juice sacks) นั้น จะมี

ค่าความถ่วงจำเพาะต่ำกว่าปกติ และส้มทั้ง 2 กลุ่มนี้มีค่าความถ่วงจำเพาะต่ำกว่า 1.00 ซึ่งคัดแยกโดยวิธีการลอยน้ำไม่ได้ จึงต้องใช้ emulsion (ส่วนผสมของน้ำกับน้ำมัน) ที่มีค่าความถ่วงจำเพาะที่เหมาะสมในการคัดแยก แต่ส้มที่มีอาการฟ่ามเพียงเล็กน้อยกับส้มที่มีอาการฟ่ามรุนแรงนั้น จะต้องใช้ค่าความถ่วงจำเพาะที่เหมาะสมในการคัดแยกที่ต่างกัน และถ้าหากมีการคัดขนาดส้มผลเล็กกับผลใหญ่ออกจากกันก่อนการคัดแยก จะช่วยให้ประสิทธิภาพในการคัดแยกสูงขึ้น อย่างไรก็ดีสารตัวกลางที่ใช้ในการคัดแยกซึ่งเป็น emulsion นั้นควบคุมให้ความถ่วงจำเพาะคงที่ได้ยาก ทำให้ต้องมีการควบคุมและตรวจสอบอย่างใกล้ชิดตลอดช่วงของการคัดแยก (Grierson and Hayward, 1959) ต่อมา Miller (1990) ได้ใช้ video -dimensional sizing มาใช้ในการหามิติและขนาดของผลส้มฟลอริด้า (florida citrus) เพื่อหาความหนาแน่นในการคัดแยกส้มฟ่ามแทนการคัดแยกใน emulsion และได้พัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มาใช้ในการคำนวณหาจุดตัดช่วงของค่าความหนาแน่นที่ใช้ในการคัดแยก พบว่าสมการการวัดการกระจายแบบ gaussion ให้ค่าความสัมพันธ์ในการคัดแยกที่แม่นยำสูง Wolf *et al.* (1975) ได้ศึกษาวิธีการคัดแยกผล blueberries ที่ยังอ่อนอยู่ออกจากผลแก่และผลสุก โดยให้สารลดแรงตึงผิวกับผล blueberries เพื่อลดฟองอากาศที่เกิดขึ้นในช่องว่างของผลก่อนทำการคัดแยกโดยใช้ตัวกลางเป็นสารละลายเกลือทำให้ได้ผลในการคัดแยกดีขึ้น แต่ผลสุกที่ผ่านการคัดแยกด้วยวิธีการนี้เกิดการเน่าเสียมากกว่าปกติถึงร้อยละ 15 เมื่อเปรียบเทียบกับผลที่ไม่ได้ผ่านการคัดแยกด้วยวิธีดังกล่าว และเมื่อเติม chlorine ที่มีความเข้มข้น 200 ppm เพิ่มเข้าไปในสารละลายเกลือที่ใช้ในการคัดแยกแล้วนำไปเป่าให้แห้งก่อนส่งขาย พบว่าสามารถลดการเน่าเสียลงได้

Zaltzman *et al.*, (1983) ได้ทดลองคัดแยกหัวมันฝรั่งออกจากดินและหินด้วยวิธี fluidized bed medium โดยใช้ทรายที่เติมฟองอากาศเข้าไปเป็นตัวกลางในการคัดแยก สามารถคัดแยกได้ความแม่นยำสูงถึงร้อยละ 99.5 และเมื่อนำวิธีการนี้มาปรับปรุงและพัฒนาเครื่องคัดแยกหัวมันฝรั่งเพื่อใช้ในอุตสาหกรรม พบว่ามีประสิทธิภาพในการทำงานสูงถึง 5 ตัน/ชั่วโมง ต่อมาได้ทดลองคัดแยก pecan nut ออกจากไข่ของด้วงปีกแข็ง (weevils) ซึ่งมีความหนาแน่นใกล้เคียงกันมาก โดยใช้ magnesium sulphate ที่ปรับด้วยฟองอากาศในการคัดแยก พบว่าให้ผลในการคัดแยกเป็นที่น่าพอใจ Cavalieri *et al.* (1996) ได้คัดแยกผลแอปเปิลที่มีอาการ water core ออกจากผลปกติ โดยการเติมฟองอากาศให้กับน้ำเพื่อลดค่าความถ่วงจำเพาะของน้ำให้มีค่าความถ่วงจำเพาะต่ำกว่า 1.00 เพื่อใช้ในการคัดแยกแอปเปิลผลปกติที่มีค่าความถ่วงจำเพาะต่ำกว่า 0.88 ออกมาจากพวกที่มีอาการผิดปกติ ซึ่งมีค่าความถ่วงจำเพาะสูงกว่า 0.88 พบว่าสามารถคัด

ผลที่มีอาการผิดปกติระดับปานกลางถึงระดับรุนแรงออกไปได้สูงถึงร้อยละ 100 และถ้ามีอาการผิดปกติอยู่ในระดับต่ำกว่าปานกลางจะให้ความแม่นยำในการคัดแยกร้อยละ 80-90

ส่วนในกรณีของมังคุดนั้น Pankasemsuk *et al.* (1996) ได้ทดลองคัดแยกคุณภาพมังคุดโดยวิธีการลอยน้ำ พบว่ามีผลมังคุที่ลอยน้ำร้อยละ 66.5 ของผลมังคุดทั้งหมด โดยสามารถคัดผลปกติมาได้ร้อยละ 87.9 ของผลปกติทั้งหมด และคัดผลที่เป็นเนื้อแก้วออกไปได้ร้อยละ 80.2 ของผลที่เป็นเนื้อแก้วทั้งหมด และมีความแม่นยำในการคัดแยกเป็นร้อยละ 90.7 ซึ่งให้ผลคล้ายกันกับการทดลองของ สณฑรรศน์ และคณะ (2533) ที่พบว่าเมื่อนำผลมังคุดลอยในน้ำมีผลที่ลอยน้ำเป็นร้อยละ 53.7 ของผลมังคุดทั้งหมด โดยสามารถคัดผลมังคุดเนื้อปกติมาได้ร้อยละ 80 และคัดแยกผลที่เป็นเนื้อแก้วออกไปได้ร้อยละ 85.4 และมีความแม่นยำในการคัดแยกเป็นร้อยละ 73.7 แต่ในปีที่มีฝนตกชุก พบว่าวิธีการลอยน้ำนี้มีผลมังคุดที่ลอยน้ำเพียงร้อยละ 11 ของผลมังคุดทั้งหมดเท่านั้น โดยสามารถคัดผลปกติมาได้เพียงร้อยละ 26.2 และพบว่าผลปกติที่จมน้ำลงไปกับผลที่ผิดปกตินั้น เป็นผลมังคุดที่มีน้ำเข้าไปในผลมากและเริ่มมีอาการเนื้อแก้วเล็กน้อยปะปนอยู่ด้วยเป็นจำนวนมาก เมื่อใช้น้ำเกลือที่มีความเข้มข้นร้อยละ 3-6 (ค่าความถ่วงจำเพาะประมาณ 1.02-1.04) ในการคัดแยก พบว่าสามารถคัดแยกมังคุดเนื้อปกติได้เพิ่มมากขึ้นเป็นร้อยละ 59 และ 91.7 ตามลำดับ แต่ความแม่นยำในการคัดแยกกลับลดลงเป็นร้อยละ 64.3, และ 38.1 ตามลำดับ และถ้าหากเก็บผลมังคุดไว้ในห้องเย็นนาน 3-4 สัปดาห์ ก่อนนำมาคัดแยกพบว่าเกิดการสูญเสียน้ำหนักมากขึ้นและมีความแม่นยำในการคัดแยกลดลง

แต่อย่างไรก็ตามการคัดแยกมังคุดเนื้อแก้วด้วยความถ่วงจำเพาะนี้ยังไม่มีการนำมาใช้กันในเชิงการค้า เนื่องจากมีความแม่นยำและประสิทธิภาพไม่แน่นอน ซึ่งอาจจะมีสาเหตุที่น่าจะมีผลกระทบต่อค่าความถ่วงจำเพาะของผลมังคุดที่ต้องศึกษาเพิ่มเติมอีก เช่น ระดับความแก่ เวลาหลังการเก็บเกี่ยวในระยะสั้นๆ ก่อนการคัดแยก ระดับความรุนแรงของอาการเนื้อแก้ว และอาการผิดปกติอื่นๆ

หลักการและทฤษฎีของเทคนิค X-ray

X-ray คือ รังสีหรือแสงคลื่นสั้นชนิดหนึ่งที่ไม่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า มีความยาวคลื่นตั้งแต่ 0.04-1000 อังสตรอม (angstrom) [อังสตรอม คือ หน่วยวัดความของช่วงคลื่น 1 อังสตรอม (A^{o}) เท่ากับ 10^{-7} เซนติเมตร] หรืออยู่ระหว่างรังสี gamma กับ ultraviolet และมีคุณสมบัติส่วนใหญ่คล้ายคลึงกับแสงสว่างธรรมดาโดยทั่วๆ ไป แต่มีคุณสมบัติพิเศษ คือ มีอำนาจ

ทะลุทะลวง (penetrating power) ผ่านวัตถุ (object) ได้มากบ้างน้อยบ้างขึ้นอยู่กับความแน่นทึบและน้ำหนักอะตอมของวัตถุที่รังสีเอ็กซ์ผ่าน (ชัชวาลย์, 2528) แต่ไม่เสมอไปทั้งนี้เพราะการที่เอ็กซเรย์ จะสามารถทะลุทะลวงไปได้นั้นขึ้นอยู่กับช่วงคลื่น (wave length) และอำนาจในการทะลุทะลวงของรังสี รังสีเอ็กซ์ที่มีช่วงคลื่นยาว (soft X-ray) ซึ่งมีอำนาจทะลุทะลวงต่ำมักถูกดูดกลืน (absorbed) โดยวัตถุ ส่วนรังสีคลื่นสั้น (hard X-ray) นั้นมีอำนาจทะลุทะลวงสูงและสามารถผ่านวัตถุออกมาได้ และเนื่องจากลำแสงเอ็กซเรย์ที่ออกมาจากหลอดเอ็กซเรย์นั้นประกอบด้วย soft X-ray และ hard X-ray ที่มีช่วงคลื่นต่างๆ ดังนั้นเมื่อรังสีเอ็กซ์ผ่านวัตถุ จึงมีบางส่วนถูกดูดกลืนไปและมีบางส่วนผ่านทะลุออกมายังฟิล์มที่ใช้เป็นฉากรับ จึงทำให้เกิดรูปภาพหรือเงา (X-ray image) ปรากฏอยู่บนฟิล์มได้ (ชัชวาลย์, 2528 และกฤตยา, 2524)

คุณลักษณะเฉพาะของภาพ X-ray นั้นจะมีความดำ (density) ที่แตกต่างกัน เนื่องจากส่วนประกอบของวัตถุหรือสารที่รังสีผ่าน เช่น กระดูก กล้ามเนื้อ ไขมัน น้ำ ฯลฯ มักมีความแน่นทึบหรือโครงสร้างที่แตกต่างกัน X-ray จึงถูกดูดกลืนไว้มากบ้างน้อยบ้าง มีผลทำให้เกิดภาพมีความดำแตกต่างกันออกไป ความดำนี้เองที่ทำให้มองเห็นเป็นภาพ และเห็นรายละเอียดของภาพได้ว่าส่วนไหนคืออะไร องค์ประกอบที่มีผลต่อความดำของภาพ ได้แก่ (ชัชวาลย์, 2528)

1) Kilovoltage (kV) หมายถึงคุณภาพหรืออำนาจทะลุทะลวงของ X-ray นั่นเอง การใช้ X-ray ที่มี kilovoltage สูง มีผลทำให้ภาพมีความดำมากกว่าเมื่อใช้ Kilovoltage ต่ำ

2) Milliampere (mA) หมายถึงปริมาณหรือจำนวนของ X-ray ที่ใช้ ถ้าใช้ mA มากฟิล์มจะมีความดำมาก และถ้าหากใช้ mA ต่ำภาพก็จะดำน้อยลง

3) เวลาในการถ่าย (exposure time) ถ้าใช้เวลาในการถ่ายนาน ภาพจะดำหรือมี density มากกว่าการใช้เวลาสั้นๆ

4) ระยะจากจุด focus ของหลอด X-ray จนถึงฟิล์ม (focus to film distance ; F.F.D.) ความเข้มของ X-ray จะลดลงตามกฎกำลังสองผกผัน (inverse square law) กล่าวคือ ถ้ายิ่งห่างออกไป ความเข้มของแสงจะลดลงเป็นอัตราส่วนผกผันกับระยะทางจากจุด focus ของหลอด X-ray ถึงฟิล์มยกกำลังสอง (intensity = $1 / FFD^2$) เป็นผลให้ฟิล์มมีความดำลดลง

5) ความหนาของส่วนที่ตรวจ (thickness of part) ถ้าส่วนที่ตรวจนั้นหนามาก หรือประกอบไปด้วยสารที่มีความแน่นทึบมาก หรือค่อนข้างขาว เรียกได้ว่ามี density น้อย แต่ถ้าเป็นส่วนที่มีความหนาไม่มากหรือมีความหนาแน่นต่ำ เช่น บริเวณที่มีฟองอากาศอยู่มาก X-ray จะผ่านไปถูกฟิล์มหรือหัววัดได้มาก ภาพที่ได้จะดำมากหรือมี density มาก

เครื่อง X-ray มีอยู่หลายชนิดและหลายแบบ แต่ที่นิยมใช้ในปัจจุบันมีอยู่ 2 ชนิด คือ

X-ray radiography และ X-ray computed tomography (X-ray CT) โดย X-ray radiography เป็น X-ray ธรรมดาที่มีใช้กันอยู่โดยทั่วๆ ไปในวงการแพทย์ มีหลักทำงาน คือ เมื่อทำการยิงลำแสง X-ray ผ่านวัตถุที่ต้องการตรวจสอบ และมีฟิล์มเป็นฉากรับ ภาพที่ได้จะมีลักษณะซ้อนทับกันทำให้แยกรายละเอียดของภาพได้ไม่ดีนัก ในขณะที่ X-ray CT ซึ่งได้นำเอาคอมพิวเตอร์มาช่วยคำนวณในการสร้างภาพ จะทำให้ได้ภาพที่มีรายละเอียดมากกว่า และเป็นภาพที่ไม่ซ้อนทับกัน (รัศมี, 2528)

หลักการทำงานของ X-ray CT คือ เมื่อยิง X-ray ลำแคบๆ ออกไปจากหลอดกำเนิด X- ray (X-ray source) ผ่านวัตถุที่ต้องการตรวจวัด แล้วใช้หัววัด X-ray (detector) ซึ่งติดตั้งไว้ฝั่งตรงข้าม เพื่ออ่านค่าความเข้มของ X-ray ที่ได้รับ แล้วเคลื่อนหลอด X-ray ลำแคบนี้ตัดผ่านไปในแนวเส้นตรง 1 ครั้ง จะได้ข้อมูลความเข้มของ X-ray 1 profile เมื่อการเคลื่อนที่ตัดในแนวเส้นตรงครั้งแรกจบลงการเคลื่อนที่ตัดจะเริ่มขึ้นอีก แต่คราวนี้ลำแสง X-ray จะบิดไปจากเดิม 1 องศา แล้วเคลื่อนที่ตัดในแบบเดิมในระนาบเดิม การเคลื่อนที่ตัดจะทำจนครบ 180 องศา ข้อมูลจากค่าความเข้มของ X-ray ที่ทะลุผ่านวัตถุชิ้นบางๆ ออกมาในทิศทางต่างๆ จำนวนมากนี้ จะถูกนำไปสร้างภาพ ซึ่งจะได้ภาพที่ไม่ซ้อนทับกัน และให้รายละเอียดของภาพได้ดี (รัศมี, 2528 และมานัส, 2532)

เนื่องจากในเนื้อเยื่อที่มีคุณสมบัติและองค์ประกอบแตกต่างกันนั้น จะมีความสามารถในการดูดกลืน photons จากลำแสง X-ray ที่ผ่านได้ต่างกัน ทำให้สามารถนำค่าที่วัดได้ไปคำนวณและจำแนกเป็นสัมประสิทธิ์การลดลง (attenuation coefficient) ของ X-ray ในระนาบหนึ่ง ตามแนวภาคตัดขวางของวัตถุได้ ค่าสัมประสิทธิการลดลงของ X-ray เมื่อผ่านตัวกลางนี้ ในทางปฏิบัตินิยมแสดงเป็นค่าเลข CT (CT number) ซึ่งเป็นค่าที่กำหนดขึ้นเอง โดยกำหนดให้เลข CT ของสารต่างๆ มีค่าแตกต่างกัน เช่น ให้น้ำมีค่าเป็น 0 ไขมันมีค่าเป็น -100 อากาศมีค่าเป็น -1,000 และให้กระดูกมีค่าเป็น +1,000 (Rao and Gregg, 1975) ดังนั้นภาพ CT จะถูกสร้างขึ้นด้วยเซลล์รูปสี่เหลี่ยมจตุรัสเล็กๆ จำนวนมากมายที่เรียงกันอย่างเป็นระเบียบทั้งแนวตั้งและแนวนอนด้วยค่าเลข CT การแสดงผลจะแสดงเป็นตัวเลข CT หรือเปลี่ยนเลข CT ให้เป็นความขาว - ดำ บนจอภาพ ซึ่งความเข้มของพื้นที่ขาว - ดำ ในภาพ CT นั้นจะมีความสอดคล้องกันกับค่าของเลข CT ด้วย เช่น กระดูกซึ่งมีค่าของเลข CT สูง (+1,000) จะสามารถดูดกลืน photons จาก X-ray ได้มาก จะเห็นภาพในบริเวณนั้นเป็นสีขาว ขณะที่อากาศซึ่งดูดกลืน photons ได้น้อยนั้น

จะมีค่าเลข CT ต่ำด้วย (-1,000) ซึ่งจะปรากฏเป็นบริเวณสีดำบนภาพ (รัศมี, 2528 และ มานัส, 2532)

การประยุกต์ใช้เทคนิค X-ray ในการตรวจสอบคุณภาพผลิตผลเกษตร

เทคนิค X-ray ได้มีการศึกษาวิจัยเพื่อนำมาใช้ในการตรวจสอบคุณภาพผลิตผลการเกษตรโดยไม่ทำลายผลมานานกว่า 30 ปีแล้ว โดยได้นำมาใช้ในการตรวจสอบอาการช้ำ (bruise) ภายในผลแอปเปิล (Diener *et al.*, 1970) ความอ่อน-แก่ของหัวผักกาดหอม (Lenker and Adrian, 1971) อาการ split pit ในผล peaches (Ham *et al.*, 1988) ความอ่อน - แก่ ของผลมะเขือเทศ (Breckt *et al.*, 1991) ปริมาณน้ำในผลแอปเปิล (Tollner *et al.*, 1992) คุณสมบัติทางกายภาพของผลิตผลเกษตร เช่น อาการไส้ล้มในแตงโม เนื้อแตกในแตงแคนตาลูป (cantalope) เมล็ดในผลเลมอน (lemon) (Tollner, 1993) และปัจจุบันได้มีการนำเอาเทคนิค X-ray มาใช้ในการตรวจสอบอาการ freezing damage ในผลส้ม และอาการ hollow heart ในหัวมันฝรั่งในเชิงการค้าแล้ว (Tollner, 1993; Chen, 1996)

Sonengo *et al.* (1995) ได้ตรวจสอบอาการ woolly breakdown ของผล nectarine โดยใช้ X-ray CT พบว่าตำแหน่งที่มีอาการ woolly breakdown ภายในจะสอดคล้องกับภาพ X-ray ในบริเวณที่แสดง low signal density (dark area) ทั้งนี้เนื่องจากบริเวณที่เป็น woolly breakdown นั้น เนื้อเยื่อจะเกิดความเสียหายทำให้มีโพรงอากาศแทรกอยู่ จึงไม่สามารถดูดกลืน X-ray ได้ Suzuki *et al.* (1994) ได้หาค่าเลข CT จากภาพ CT ของผลมะละกอที่เนื้อเยื่อภายในเสียหายเนื่องจากการอบไอน้ำด้วยอุณหภูมิสูง เพื่อทำลายไข่แมลงวันทอง พบว่าค่าเลข CT จะแตกต่างจากเนื้อปกติ โดยค่าเลข CT ในบริเวณเนื้อส่วนนอก เนื้อส่วนกลาง และเนื้อส่วนในของผลปกติมีค่าต่ำ (เฉลี่ย -90 ± 5) และสม่ำเสมอ ในขณะที่เนื้อภายในของผลที่เสียหายจะมีค่าของเลข CT สูง (+61 ±4)

การเกิดเนื้อแก้วของมังคุดเกิดจากการเปลี่ยนแปลงสภาวะของน้ำในผลเป็นสาเหตุหลัก และมีปริมาณของน้ำ ปริมาณอากาศภายในเนื้อผล รวมทั้งมีความแน่นเนื้อเปลี่ยนแปลงไป (วรภัทร, 2539 ข) ดังนั้นอาการเนื้อแก้วจึงน่าจะคัดแยกได้โดยวิธีความถ่วงจำเพาะ และตรวจสอบโดยใช้เทคนิคทาง X-ray โดยไม่ทำลายผลได้