# บทที่ 2
# เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ส้มเป็นพืชที่มีความสำคัญชนิดหนึ่งของโลก และมีบทบาทอย่างมากต่อชีวิตประจำวันของมนุษย์มีการนำส้มมาใช้เป็นอาหารประจำวันทั้งในรูปการบริโภคผลสด และแปรรูปเป็นน้ำผลไม้ ทำให้ส้มเป็นผลไม้ที่นิยมอย่างแพร่หลายทั้งในและต่างประเทศ และจะยิ่งมีความต้องการในการบริโภคมากโดยเฉพาะในช่วงปีใหม่และตรุษจีน ส้มในประเทศไทยมีหลายชนิดและนิยมปลูกกันหลายพื้นที่โดยเฉพาะส้มเขียวหวานจะมีการปลูกกระจายอยู่ทั่วประเทศ จากสถิติพื้นที่ปลูกส้มเขียวหวานปี 2538 พบว่ามีพื้นที่ปลูก 264,039 ไร่ หรือประมาณ 4 เปอร์เซ็นต์ของพื้นที่ปลูกไม้ผลทั้งหมดของประเทศ ในปี 2541 มีการส่งออกประมาณ 1,468 ตัน มูลค่าประมาณ 26.5 ล้านบาท ขณะที่มีพื้นที่ปลูกส้มโอ 204,353 ไร่ หรือประมาณ 2 เปอร์เซ็นต์ ของพื้นที่ปลูกไม้ผลทั้งหมดในประเทศคิดเป็นส้มที่ให้ผลิตผลแล้ว 125,420 ตัน ซึ่งส่วนใหญ่ใช้บริโภคภายในประเทศ (กรมวิชาการเกษตร, 2542) นอกจากนั้นมะนาวซึ่งจัดเป็นพืชตระกูลส้มอีกกลุ่มหนึ่งมีพื้นเพาะปลูก 183,432 ไร่ ให้ผลผลิตรวมทั้งหมดภายในประเทศปี 2532 จำนวน 64,040 ตัน ซึ่งใช้บริโภคภายในประเทศเป็นส่วนใหญ่ ดังนั้นพืชตระกูลส้มจึงมีความสำคัญทำให้มีการปลูกกันอย่างแพร่หลายทุกภูมิภาคของโลก ซึ่งสามารถแบ่งกลุ่มพืชตระกูลส้มได้ดังนี้ (เปรมปรี, 2538)

**1. กลุ่มส้มเกลี้ยงและส้มตรา (orange group) แยกได้เป็น**

1.1 ส้มที่มีรสหวาน (sweet orange : *Citrus sinensis*) เช่น ส้ม Shamouti ส้ม Valencia ส้ม Navel

1.2 ส้มที่มีรสเปรี้ยวหรือรสออกขม (sour or bitter orange : *Citrus aurantium*) ส้มพันธุ์นี้ไม่นิยมนำมาใช้เป็นผลไม้สด

**2. กลุ่มส้มจีน, ส้มเขียวหวาน (mandarins group : *Citrus reticulata Blanco)* เช่น**

ส้ม Satsuma ส้ม King ส้ม Common ได้แก่ ส้มจีน ส้มเขียวหวานในประเทศไทย ส้ม Dancy ส้มฟรีมองต์

**3. กลุ่มส้มโอและเกรฟฟรุ้ท (pomelo and grapefruit group) แบ่งได้เป็น**

3.1 ส้มโอ (pomelo : *Citrus grandis* (L))

3.2 เกรฟฟรุ้ท (grapefruit : *Citrus paradisi*)

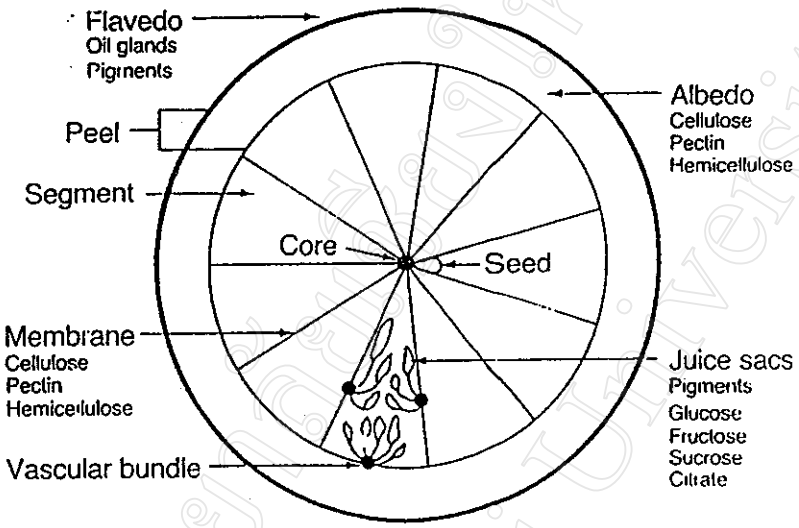
**4. กลุ่มมะนาว (common acid members)**

ได้แก่ พวก citron มะนาวฝรั่ง (lemon) และมะนาว (lime)

ส้มฟรีมองต์จัดอยู่ในกลุ่มส้มเขียวหวาน (*Citrus reticulata Blanco* cv. Fremont) อยู่ในตระกูล Rutaceae จัดเป็นไม้ผลเขตกึ่งร้อน (subtropical fruit) มีถิ่นกำเนิดดั้งเดิมอยู่ในประเทศจีน ปลูกกันมานานในประเทศจีนและญี่ปุ่น ต่อมาได้มีการกระจายไปยังสหรัฐอเมริกาและยุโรป จนปัจจุบันเป็นผลไม้ชนิดหนึ่งที่ปลูกกันทั่วไปทั้งในเขตร้อนและเขตกึ่งร้อน ในประเทศไทยส้มฟรีมองต์ได้ถูกนำมาปลูกทางภาคเหนือของประเทศ ได้แก่ จังหวัดเชียงใหม่ แพร่ น่าน จากนั้นจึงได้แพร่หลายไปยังแหล่งอื่น ภายหลังชาวสวนแถบรังสิต จังหวัดปทุมธานีหลายรายมีความสนใจนำมาปลูกทดแทนส้มเขียวหวานที่เคยปลูกมาก่อนหน้านั้นซึ่งผลผลิตที่ได้นั้นใกล้เคียงกับส้มเขียวหวาน แต่ราคาส้มฟรีมองต์ที่ขายได้มีราคาสูงกว่าส้มเขียวหวานค่อนข้างมาก (เปรมปรี, 2538)

**ลักษณะทางพฤกษศาสตร์โดยทั่วไปของส้มฟรีมองต์**

ส้มฟรีมองต์มีลำต้นสูงประมาณ 2-8 เมตร ทรงพุ่มมีลักษณะแน่นทึบ จัดเป็นไม้พุ่มขนาดเล็ก ลำต้นไม่มีหนาม ใบรูปไข่ค่อนข้างยาว ปลายและฐานใบมีลักษณะมน ส่วนปลายสุดของใบมีรอยเว้าเข้า ผิวท้องใบมีสีเขียวอมเหลือง ผิวหลังใบเป็นมันสีเขียวเข้ม ผลมีรูปร่างกลมแบน ผิวเปลือกสีเขียว สีเขียวอมเหลืองหรือสีส้มอมเหลืองจนถึงสีแดงอมส้ม ผิวเปลือกเรียบมีต่อมน้ำมันอยู่ภายในมีกลิ่นหอม เปลือกด้านในมีสีเหลืองอ่อน เนื้อมีน้ำมาก ผิวเนื้อสีส้ม รสหวานอมเปรี้ยวเล็กน้อย ลักษณะทั่วไปของผลส้มเป็นผลทรงกลมแป้นเล็กน้อย คือ ส่วนกว้างของผลมากกว่าส่วนสูง เช่น ส้มขนาดโตผลจะสูงประมาณ 6.5 เซนติเมตร กว้างประมาณ 7.5 เซนติเมตร ฐานผลกลมมนด้านล่างเรียบเป็นแอ่งตื้นๆ บางสายพันธุ์อาจมีจุกขนาดเล็ก ผิวเรียบ มีต่อมน้ำมันอยู่ตามผิวเปลือกค่อนข้างถี่ ผิวเปลือกสีเขียว เมื่อผลแก่จัดจะมีสีเหลืองอมเขียว แต่ถ้าปลูกในพื้นที่ที่มีอากาศเย็นสีจะออกส้มอมเหลืองจนถึงแดงอมส้ม เนื้อผลสีส้ม รสหวานอมเปรี้ยวเล็กน้อย กลีบแยกออกจากกันได้ง่ายโดยทั่วไปมีประมาณ 11 กลีบต่อผล ผนังกลีบบาง ถุงเนื้อผลส้ม (juice sac) มีขนาดสั้น ฉ่ำน้ำ (วัฒนา, 2528) จัดเป็นผลแบบ hesperidium ประกอบด้วยส่วนประกอบ 3 ส่วน (Baldwin, 1993) คือ ชั้น flavedo เป็นส่วนของ ชั้นนอก (exocarp) ประกอบด้วยเม็ดสีพวก chloroplast หรือ chromoplast และมีต่อมน้ำมัน (oil gland) ฝังตัวอยู่ ประกอบด้วยสารพวก terpenes เป็นส่วนประกอบหลัก ซึ่งชั้น flavedo มี cutin และ wax เคลือบอยู่ ชั้น albedo เป็นส่วนของชั้นกลาง (mesocarp) ไม่มีสี ประกอบด้วยเซลล์พวก parenchyma สานกันเป็นร่างแห ชั้น juice vesicle เป็นส่วนของ endocarp ซึ่งเป็นส่วนของผลที่นำมารับประทาน ประกอบด้วย juice sac cell ที่มี vacuole ขนาดใหญ่ที่ภายในประกอบด้วยกรดและสารประกอบอื่นๆ (รูปที่ 1)




รูปที่ 1 ภาพตัดขวางแสดงส่วนประกอบของผลส้ม (Bain, 1958)

ผลส้มมีการเจริญแบบ sigmoid curve ซึ่งสามารถแบ่งได้เป็น 3 ระยะ (Bain, 1958) ระยะที่ 1 เป็นระยะของการแบ่งเซลล์ (cell division) ทำให้มีขนาดและน้ำหนักของผลเพิ่มขึ้น ใช้เวลาประมาณ 1-1.5 เดือนหลังจากดอกบาน ทั้งนี้ขึ้นกับสภาพภูมิประเทศ ภูมิอากาศ และพันธุ์ เมื่อเข้าสู่ระยะที่ 2 มีการขยายขนาดของเซลล์ทั้งในส่วนเนื้อและเปลือกผล สีเปลือกเริ่มเปลี่ยนจากสีเขียวเป็นสีเหลือง และระยะที่ 3 เป็นระยะการแก่ผล เริ่มมีการเปลี่ยนแปลงสารประกอบภายในผล คือ เปอร์เซ็นต์ของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้ (total soluble solid) จะเพิ่มขึ้น ขณะที่กรดที่ไตเตรตได้ (titrate acid) ลดลง ผลที่แก่สามารถเก็บเกี่ยวได้เมื่อผลมีอายุได้ 9-10 เดือน หรือสังเกตได้จากผิวของผลส้มจะเริ่มเปลี่ยนจากสีเขียวเป็นสีเหลืองหรือสีส้ม (สุรชัย, 2535)

**ลักษณะอาการฟ่ามของส้ม**

อาการฟ่ามของพืชตระกูลส้มเป็นอาการผิดปกติทางสรีรวิทยา (citrus physiology disorder) ที่สังเกตได้ยากจากภายนอก เช่น ลักษณะฟ่ามแห้ง และฟ่ามไตหรืออาการข้าวสาร ซึ่งเป็นอาการผิดปกติที่พบบ่อยในส้มที่ปลูกบริเวณภาคเหนือของไทยโดยพบมากในส้มฟรีมองต์ (Snowdon, 1990) อาการฟ่ามไต ในบางครั้งอาจเรียกอีกชื่อว่า อาการข้าวสาร เป็นลักษณะที่ถุงของเนื้อผลมีสีขาวขุ่นและแห้งไม่มีน้ำ ในผลที่แสดงอาการมากอาจมีอาการฟ่ามเกือบทั้งผล ผนังเซลล์ของถุงส้มที่เกิดอาการจะหนากว่าปกติและส่วนประกอบของเซลล์ก็แตกต่างกันไป ปริมาณสารเพคตินเพิ่มขึ้นและอยู่ในรูปของเจล ปริมาณน้ำตาล กรด และคาร์โรทีนอยด์ลดลง มีแร่ธาตุบางชนิดเพิ่มปริมาณสูงขึ้นโดยเฉพาะ Ca และ Mg รวี (2540) รายงานว่าอาการฟ่ามของผลส้มมีความสัมพันธ์กับชนิด อายุของต้นส้ม รวมทั้งขนาดและอายุของผลส้ม โดยพบอาการฟ่ามมากในส้มเขียวหวานกลุ่ม mandarin และลูกผสม madarin และ valencia orange นอกจากนี้ยังพบมากในส้มโอ โดยต้นส้มที่มีอายุน้อยผลส้มจะมีโอกาสเกิดอาการฟ่ามมากกว่าต้นส้มที่มีอายุมาก ผลส้มที่มีขนาดใหญ่มากจะมีโอกาสเกิดอาการฟ่ามได้เร็วและมากกว่าผลที่มีขนาดเล็กกว่า ต้นส้มที่มีการติดผลต่ำจะมีโอกาสเกิดอาการฟ่ามมาก ผลส้มที่มีอายุครบกำหนดเก็บเกี่ยวแล้วหากปล่อยไว้ต่อไปอีกระยะหนึ่งจะมีโอกาสเกิดอาการฟ่ามมากกว่าผลส้มที่เก็บเกี่ยวเมื่อครบกำหนด ผลส้มที่เก็บเกี่ยวในรุ่นท้ายมีโอกาศเกิดอาการฟ่ามได้มาก ต้นส้มที่มีการใช้ปุ๋ยไนโตรเจนในปริมาณที่สูงโดยเฉพาะในระยะที่ผลใกล้แก่จะมีโอกาสเกิดอาการฟ่ามได้สูง และการใช้ปุ๋ยที่มีโพแทสเซียมสูงกับต้นส้มที่ใช้วิธีเลี้ยงน้ำให้อยู่บนต้นจะเป็นการกระตุ้นให้ยิ่งเกิดอาการฟ่ามได้เร็วยิ่งขึ้น นอกจากอาการฟ่ามแล้ว อาการผิดปกติทางสรีรวิทยาที่มักพบได้ในผลส้ม ได้แก่ อาการผลแตก (fruit cracking), อาการผิวลายจากลม (wind scar) อาการแดดเผา และอาการผลหลวมหรือพอง อาการดังกล่าวคือลักษณะที่ส่วนเปลือกแยกตัวออกจากส่วนเนื้อเกิดเป็นช่องว่างระหว่างเปลือกกับเนื้อผลส้ม เมื่อแกะเปลือกออกส่วนเนื้อสามารถแยกออกจากส่วนเปลือกได้ง่าย ลักษณะอาการนี้จะพบเฉพาะในผลส้มที่แก่เกินไป

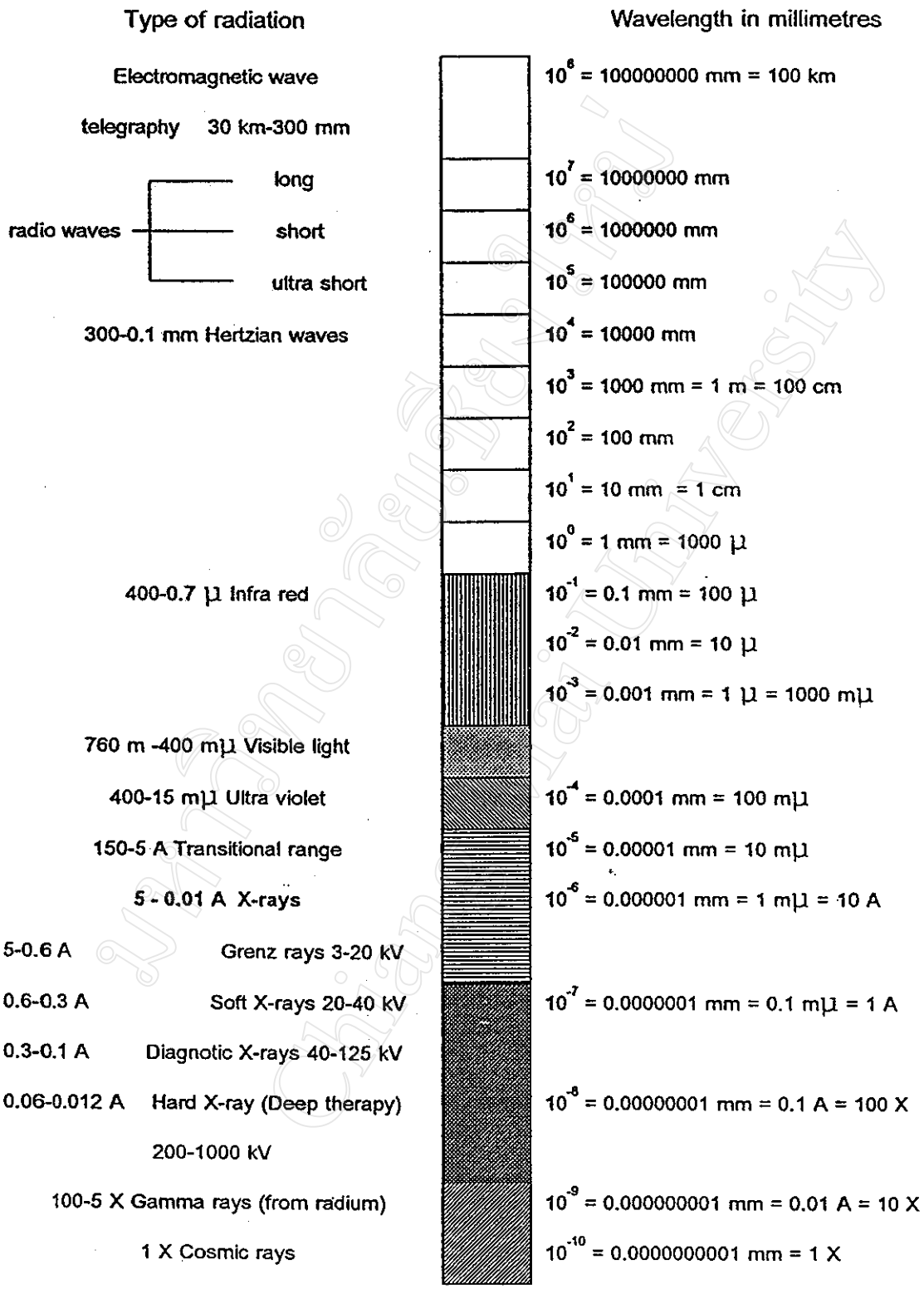
**การตรวจสอบคุณภาพของผลส้ม**

โดยทั่วไปคุณภาพของผลิตผลมีความสัมพันธ์กับคุณสมบัติทางกายภาพของผลิตผลนั้นๆ ได้แก่ ขนาด, รูปร่าง, สี, กลิ่น, รสชาติและความหนาแน่น วิธีที่ใช้ตรวจสอบคุณภาพผลิตผลเกษตรโดยทั่วไป คือการสุ่มตัวอย่างเพื่อนำมาตรวจสอบ ซึ่งวิธีการนี้เป็นวิธีการที่ต้องทำลายผลิตผลที่ตรวจสอบนั้นซึ่งเป็นการสูญเสียทางเศรษฐกิจเป็นอย่างมาก แต่คุณภาพของผลิตผลหลายอย่างสัมพันธ์กับคุณสมบัติทางกายภาพ จึงทำให้มีการคิดค้นและพัฒนาเทคนิคการตรวจสอบคุณภาพโดยไม่ทำลายผล (nondestructive) ขึ้น ซึ่งเป็นเทคนิคที่มีประโยชน์สามารถนำมาใช้กับผลิตผล

เกษตรบางชนิดได้โดยไม่ทำให้เกิดความเสียหายกับผลิตผลที่ตรวจสอบรวมทั้งเป็นวิธีที่มีความแม่นยำและเป็นวิธีแบบวัตถุพิสัย (objective method) การพัฒนาวิธีการหรือเทคนิคการตรวจสอบคุณภาพภายในโดยไม่ทำลายผลิตผลนี้ ตั้งอยู่บนพื้นฐานของคุณสมบัติทางกายภาพของผลิตผล (Chen, 1996) การตรวจสอบคุณภาพแบบไม่ทำลายมีหลายเทคนิค เช่น vibration characteristics, X-ray and gamma ray transmission, optical reflectance and transmission, electrical properties และ nuclear magnetic resonance เป็นต้น การตรวจสอบคุณภาพผลผลิตแบบไม่ทำลายผล ได้เข้ามามีบทบาทต่อการตรวจสอบคุณภาพผลิตผลภายหลังการเก็บเกี่ยวเป็นอย่างมาก เนื่องจากสามารถใช้ตรวจสอบคุณภาพภายในผลรวมทั้งอาการผิดปกติภายในผลซึ่งไม่สามารถตรวจสอบด้วยตาเปล่าจากภายนอกได้ เทคนิคเอกซเรย์เป็นอีกเทคนิคหนึ่งที่นำมาใช้งานเพื่อวัตถุประสงค์ดังกล่าวโดยมีหลักการดังนี้

**หลักการของเทคนิคเอกซเรย์**

เอกซเรย์ ถูกค้นพบโดยนักฟิสิกส์ชาวเยอรมันชื่อ วิลเฮม คอนราด เรินท์เก้น (Wilhelm Conrad Roentgen) ในปี ค.ศ. 1895 ภายในห้องปฏิบัติการของมหาวิทยาลัยวู๊ซบรุค (Wurzburg) ประเทศเยอรมัน เอกซเรย์ คือ รังสีหรือแสงคลื่นสั้นชนิดหนึ่งที่ไม่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า มีลักษณะเป็นการสั่นสะเทือนของคลื่นและอนุภาคของแม่เหล็กไฟฟ้า เอกซเรย์มีช่วงคลื่นสั้น (ชูศักดิ์, 2524) เอกซเรย์อยู่ระหว่างรังสีแกมมากับรังสีอุลตร้าไวโอเลต (รูปที่ 2) คุณสมบัติของเอกซเรย์นั้นคล้ายคลึงกับแสงสว่างธรรมดาเป็นส่วนใหญ่แต่มีคุณสมบัติพิเศษ คือมีอำนาจทะลุทะลวง (penetrating power) ผ่านวัตถุได้มากบ้างน้อยบ้างขึ้นอยู่กับความแน่นทึบ และน้ำหนักอะตอมของวัตถุที่มันผ่าน เอกซเรย์เกิดขึ้นโดยอนุภาคของอิเล็กตรอนที่มีความเร็วสูงวิ่งไปชนเป้าทำให้อิเล็กตรอนหยุดวิ่งในทันทีทันใด ผลที่เกิดขึ้นคือเกิดการชนหรือกระทบกันระหว่างอิเล็กตรอนกับเป้าอย่างแรงอิเล็กตรอนดังกล่าวจะไปชนอิเล็กตรอนที่อยู่ในวงโคจรอื่นของอะตอมของเป้านั้นให้หลุดกระเด็นออกนอกวงโคจร และจะมีอิเล็กตรอนจากวงโคจรอื่น ๆ ที่อยู่ถัดไปวิ่งเข้ามาแทน แต่เนื่องจากพลังงานของอิเล็กตรอนในแต่ละวงโคจรไม่เท่ากัน ดังนั้นจึงมีการคายพลังงานส่วนเกินออกมาในรูปของรังสีเอกซเรย์และความร้อน โดยส่วนใหญ่เป็นความร้อนประมาณ 99.8 เปอร์เซนต์ของพลังงานที่ใช้เริ่มต้น (ชัชวาล, 2528)




รูปที่ 2 รังสีชนิดต่างๆในช่วงคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความยาวคลื่นเป็นมิลลิเมตร
(ดัดแปลงมาจากชูศักดิ์, 2524)

**ลักษณะและคุณสมบัติของเอกซเรย์**

เอกซเรย์เป็นรังสีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ามีช่วงคลื่นสั้นมาก คืออยู่ในช่วงตั้งแต่ 5-0.01 อังสตรอม (°A)โดย $1°A = 10^{-7}$เซนติเมตรหรืออยู่ในช่วงระหว่างรังสีแกมมากับรังสีอุลตร้าไวโอเล็ต มีคุณสมบัติเหมือนแสง โดยเดินทางเป็นเส้นตรง ถ้าเดินทางในสูญญากาศแล้วจะเดินทางด้วยความเร็วเท่ากับแสงคือ 186,000 ไมล์ต่อวินาที หรือ $3\times10^{10}$ เซนติเมตรต่อวินาที นอกจากนั้นแล้วยังมีการสะท้อนกลับ หักเห และเบี่ยงแบนได้เช่นเดียวกับแสง ไม่หักเหในสนามแม่เหล็กไฟฟ้าทำให้เกิดการปล่อยประจุไฟฟ้า (ionization) เมื่อผ่านเข้าไปในอากาศหรือก๊าซทำให้เกิดการเรืองแสง (fluorescence และ phosphorescence) ในสารพิเศษบางอย่าง เอกซเรย์ถูกดูดกลืนโดยสสาร (matter) ทุกชนิดมากบ้างน้อยบ้างขึ้นอยู่กับความหนาแน่น และน้ำหนักของอะตอมของสสารนั้น ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมี เช่น เมื่อเอกซเรย์ไปถูกฟิล์มถ่ายรูปทำให้ฟิล์มดำจึงนำผลนี้มาใช้บันทึกภาพรังสีลงบนแผ่นฟิล์มเอกซเรย์ เนื่องจากเอกซเรย์มีอำนาจทะลุทะลวงสูง สามารถทะลุผ่านเนื้อหนังของมนุษย์และสัตว์ได้ แต่ไม่สามารถทะลุผ่านแผ่นตะกั่วหรือคอนกรีตหนา ๆ ได้ (ชูศักดิ์, 2524)

การเกิดภาพเอกซเรย์เนื่องจากเอกซเรย์มีคุณสมบัติประการหนึ่ง คือสามารถทะลุทะลวงเข้าไปในวัตถุได้แต่ไม่เสมอไปทั้งนี้เพราะเอกซเรย์สามารถทะลุทะลวงไปได้นั้นต้องขึ้นอยู่กับช่วงคลื่นและอำนาจทะลุทะลวงของมัน เอกซเรย์ที่มีช่วงคลื่นยาว เรียกว่า Soft X-ray เพราะมีอำนาจการทะลุทะลวงต่ำ ถูกดูดกลืนโดยวัตถุนั้น ส่วนเอกซเรย์ที่มีช่วงคลื่นสั้น เรียกว่า Hard X-ray ทั้งนี้เพราะมีอำนาจการทะลุทะลวงสูงสามารถผ่านทะลุวัตถุออกมาได้ เนื่องจากลำแสงเอกซเรย์ที่ออกมาจากหลอดเอกซเรย์ประกอบด้วย Soft และ Hard X-ray ที่มีช่วงคลื่นต่าง ๆ เมื่อเอกซเรย์ผ่านวัตถุจึงมีบางส่วนถูกดูดกลืนและบางส่วนทะลุออกมายังฟิล์ม ทำให้เกิดรูปภาพหรือเงา (X-ray image) ซึ่งการดูดกลืนของรังสีเอกซเรย์โดยวัตถุใดๆนั้นขึ้นกับองค์ประกอบสำคัญ 3 ประการคือ ความยาวช่วงคลื่นของเอกซเรย์ ส่วนประกอบของวัตถุที่เอกซเรย์ผ่านและความหนาหรือความแน่นทึบของวัตถุ (ชัชวาล, 2528)

เอกซเรย์สามารถแยกได้เป็น 4 ระดับ ตามความยาวช่วงคลื่นได้แก่ Grenz rays อยู่ในความยาวช่วงคลื่น 5-0.6 °A ระดับพลังงานที่ใช้อยู่ในช่วง 3-20 kV Soft X-rays อยู่ในความยาวช่วงคลื่น 0.6-0.3 °A ระดับพลังงานที่ใช้อยู่ในช่วง 20-40 kV ต่อมาในความยาวช่วงคลื่น 0.3-0.1 °A เรียกว่า Diagnostic X-rays ระดับพลังงานอยู่ในช่วง 40-125 kV และ Deep therapy มีความยาวช่วงคลื่น 0.06-0.012 °A ระดับพลังงานอยู่ในช่วง 200-1000 kV (ชูศักดิ์, 2524)

เครื่องเอกซเรย์พลังงานต่ำเป็นเครื่องมือเพื่อใช้ในห้องทดลองสำหรับตรวจสอบโครงสร้างภายในของพืชและสัตว์ ใช้ศึกษาทางด้าน Genetic engineering และใช้ในการตรวจสอบหีบห่อพัสดุทางไปรษณีย์เพื่อดูภายในโดยไม่ต้องแกะห่อพัสดุนั้น ระดับพลังงานที่ใช้ของเครื่องอยู่ในช่วง 0-25 kV ซึ่งจัดเป็น Soft X-ray มีอุปกรณ์ที่ใช้รับภาพ (sensor) คือฟิล์มเอกซเรย์ โดยเมื่อรังสีเอกซ์ทำปฏิกริยากับ Silver bromide crystal (เกลือเงิน) บนฟิล์มจะเกิดภาพที่เรียกว่า latent image ซึ่งไม่สามารถมองเห็นได้ จนกว่าจะไปผ่านการล้างฟิล์มจึงจะเห็นเป็นภาพ สำหรับเอกซเรย์แบบ Linescan X-ray จะมีหลักการสร้างภาพเช่นเดียวกับเอกซเรย์พลังงานต่ำแต่มีอุปกรณ์ที่ใช้รับภาพคือ image intensifier โดยการแปลงภาพที่ได้จากการเอกซเรย์เปลี่ยนเป็นภาพในทันทีบนจอคอมพิวเตอร์โดยไม่ต้องผ่านลงฟิล์มเอกซเรย์

ภาพเอกซเรย์มีคุณลักษณะเฉพาะแยกเป็น 2 ประการ คือ radiographic density และ radiographic contrast โดย radiographic density คือ ความดำของภาพ เป็นผลเนื่องจากการที่เกลือเงินที่เป็นส่วนผสมสำคัญที่ทำให้เกิดภาพ และอยู่บนฟิล์มทำปฏิกริยากับแสงเอกซเรย์ ภายหลังจากนำไปล้างด้วยวิธีการทางเคมีแล้ว เกลือเงินดังกล่าวเปลี่ยนสภาพเป็นโลหะสีดำเกาะอยู่ทั้งสองด้านของฟิล์มส่วนเกลือเงินที่ไม่ถูกเอกซเรย์จะหลุดออกไปหมดเมื่อถูกน้ำยาคงสภาพ (fixer) ความดำของภาพนี้เอง เรียกว่า radiographic density บริเวณใดของฟิล์มได้รับเอกซเรย์มากภาพของบริเวณนั้นจะดำมากและบริเวณใดได้รับเอกซเรย์น้อยจะจาง สำหรับองค์ประกอบที่มีผลต่อความดำของภาพ ได้แก่

- Kilovoltage (kV) คือ ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ใช้สำหรับป้อนให้เครื่องเอกซเรย์ หรืออำนาจการทะลุทะลวงของเอกซเรย์ การใช้เอกซเรย์ที่มี kilovoltage สูง มีผลทำให้ภาพมีความดำมากกว่าเมื่อใช้ kilovoltage ต่ำ

- Milliamperage (mA) คือค่าของกระแสไฟฟ้าที่ผ่านหลอดเอกซเรย์ที่ใช้ ถ้าใช้ mA มาก ฟิล์มจะมีความดำมาก และหากใช้ mA ต่ำภาพก็จะจาง

- Exposure time คือ เวลาที่ใช้ถ่ายเอกซเรย์ ถ้าใช้เวลาในการถ่ายนานภาพจะดำหรือมี density มากกว่าการใช้เวลาสั้นๆ

- ระยะจากจุดโฟกัสของหลอดเอกซเรย์ถึงฟิล์ม (focus to film distance; F. F. D.) ความเข้มของเอกซเรย์จะลดลงตามกฎกำลังสองผกผัน (inverse square law) กล่าวคือ ถ้ายิ่งห่างออกไป ความเข้มของแสงจะลดลงเป็นอัตราส่วนผกผันกับระยะทางจากจุด focus ของหลอดเอกซเรย์ถึงฟิล์มยกกำลังสอง (intensity = $1/FFD^2$) เป็นผลให้ฟิล์มจางหรือมีความดำลดลง

- ความหนาของส่วนที่ตรวจ (thickness of the part) ถ้าส่วนที่ตรวจนั้นหนามาก หรือประกอบไปด้วยสารที่มีความแน่นทึบมากเอกซเรย์จะผ่านได้น้อยภาพที่ได้จะค่อนข้างขาว เรียกได้

ว่ามี density น้อย แต่ถ้าเป็นส่วนที่มีความหนาไม่มาก หรือมีความหนาแน่นต่ำ เช่น บริเวณที่มีฟองอากาศอยู่มาก เอกซเรย์จะผ่านไปถูกฟิล์มหรือหัววัดได้มาก ภาพที่ได้จะดำมากหรือมี density มาก

ส่วน radiographic contrast เป็นความแตกต่างของความดำของภาพที่เกิดจากการใช้เอกซเรย์ผ่านส่วนประกอบของเนื้อเยื่อชนิดต่างๆ ซึ่งมีความทึบหรือโครงสร้างต่างกัน เอกซเรย์ถูกดูดกลืนมากบ้างน้อยบ้าง ทำให้เกิดภาพของส่วนบริเวณต่างๆของภาพที่มีความดำแตกต่างกัน ความดำที่แตกต่างกันนี้ทำให้มองเห็นเป็นภาพ และเห็นรายละเอียดของภาพได้ (ชัชวาล, 2528)

ปัจจุบันเครื่องฉายรังสีเอกซเรย์มีอยู่หลายชนิดแต่ที่นำมาประยุกต์ใช้ในการเกษตร คือ

**1. X-ray radiography** เป็นเครื่องเอกซเรย์ซึ่งถูกนำมาใช้ตรวจสอบคุณภาพผลิตผลเกษตร สำหรับเครื่อง Low energy X-ray จัดอยู่ในเอกซเรย์กลุ่มนี้เช่นกันมีหลักการ คือการยิงรังสีเอกซเรย์ผ่านวัสดุที่ต้องการทราบรายละเอียดโดยมีฉากรับเป็นฟิล์มเมื่อผ่านการล้างน้ำยาก็จะเกิดรูปภาพได้ เอกซเรย์ชนิดนี้สามารถนำไปใช้ตรวจอาการเนื้อหยาบหรือมีลักษณะคล้ายฟองน้ำ (spongy tissue) ที่เกิดขึ้นในมะม่วง Alphonso ซึ่งเป็นอาการผิดปกติซึ่งเกิดขึ้นภายในผล อาการนี้จะทำให้เนื้อผลมีสีเหลืองซีด เนื้อนุ่ม และมีโพรงอากาศ เมื่อตรวจสอบด้วยเครื่องเอกซเรย์พลังงานต่ำ และดูภาพจากฟิล์ม บริเวณที่เกิดอาการ spongy tissue จะเกิดริ้วรอยสีเทาดำเนื่องจากเนื้อเยื่อชั้น mesocarp ถูกทำลายและเกิดช่องอากาศเกิดขึ้น ซึ่งช่องของอากาศนี้จะมีสัมพันธ์กับภาพที่ปรากฏและเมื่อเทียบกับผลปกติภาพที่เกิดขึ้นจะมีสีเทาสว่าง (Thomas *et al.*, 1993) นอกจากนั้นยังใช้เอกซเรย์ชนิดนี้ตรวจการเข้าทำลายของแมลงในผลิตผลซึ่งไม่แสดงความเสียหายให้เห็นจากภายนอกอาทิเช่นการนำเอกซเรย์พลังงานต่ำตรวจสอบการเข้าทำลายของด้วงในเมล็ดมะม่วงพันธุ์ Neelum และ Alphonso ตรวจสอบเมล็ดมะม่วงที่ถูกด้วงเข้าทำลายโดยปรากฏภาพบริเวณสีดำกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับเนื้อเยื่อที่ไม่ถูกทำลาย เนื่องจากเนื้อเยื่อจะแยกตัวออก ส่วนผลปกติเป็นสีเทาสว่างสม่ำเสมอ (Thomas *et al.*, 1995) ตรวจสอบด้วงที่เข้าทำลายภายในหัวมันเทศ (Thai *et al.*, 1997a) X-ray radiography สามารถตรวจแยกมันฝรั่งออกจากก้อนหินก้อนดิน (Palmer *et al.*, 1973) ตรวจแยกผลแอปเปิ้ลช้ำออกจากแอปเปิ้ลปกติ (Diener *et al.*, 1970) ตรวจสอบผักกาดก่อนการเก็บเกี่ยว (Schatzki *et al.*, 1997) และสามารถคัดแยกหัวผักกาดอ่อนออกจากหัวที่แก่ได้ (Lenker and Adrian, 1971) นอกจากนี้ Brecht *et al.*, 1991 ยังใช้เทคนิคนี้ตรวจสอบความแก่ของมะเขือเทศ

**2. X-ray computed tomography (X-ray CT)** มีหลักในการสร้างภาพคือ การยิงเอกซเรย์ลำแคบออกไปจากหลอดเอกซเรย์ (X-ray source) ผ่านวัตถุที่ต้องการตรวจวัดแล้วใช้หัววัดเอกซเรย์ (detector) ตั้งไว้ฝั่งตรงข้ามเพื่ออ่านค่าความเข้มของเอกซเรย์ เคลื่อนหลอดเอกซเรย์ลำแคบตัดผ่านไปในระนาบของผลิตผลเกษตรที่ต้องการตรวจสอบ การเคลื่อนที่ตัดในแนวเส้นตรงแบบนี้ 1 ครั้ง

ได้ข้อมูลความเข้มของเอกซเรย์ 1 โพรไฟล์ เมื่อการเคลื่อนที่ตัดในแนวเส้นตรงครั้งแรกจบลงการเคลื่อนที่ตัดจะเริ่มขึ้นอีก แต่คราวนี้เอกซเรย์ลำแคบจะบิดเบือนไปจากเดิม 1 องศาแล้วเคลื่อนที่ตัดแบบเดิม การเคลื่อนที่ตัดจะกระทำจนครบ 180 องศา หลังจากนั้นข้อมูลความเข้มเอกซเรย์จำนวนทั้งหมด 180 โพรไฟล์ ถูกนำไปใช้คำนวณสร้างภาพต่อไป โดยใช้เทคนิค Image Processing ประกอบกันเป็นภาพรวมสามารถเห็นรายละเอียดข้างใน เอกซเรย์ชนิดนี้ถูกนำมาตรวจสอบอาการผิดปกติที่เกิดขึ้นภายในผลิตผลเกษตรหลายชนิด Peiris *et al.* (1998) ได้ใช้เทคนิค X-ray CT ประเมินความฟ่ามแบบไม่ทำลายผลเปรียบเทียบกับการประเมินความฟ่ามของผลส้ม Sonengo *et al.* (1995) ได้ตรวจสอบอาการ woolly breakdown ของผล nectarine (*Prunus persica*) โดยใช้ X-ray CT รุ่น GE ; 80 kV 40 mA 25 sec slice หนา 10 mm พบว่าตำแหน่งที่มีอาการ woolly breakdown ภายในผลสอดคล้องกับภาพเอกซเรย์ซึ่งจะมีบริเวณเป็นสีดำ ทั้งนี้เนื่องจากบริเวณที่เป็นนั้นเนื้อเยื่อจะเกิดความเสียหายทำให้มีโพรงอากาศแทรกอยู่จึงไม่สามารถดูดกลืนเอกซเรย์ได้ Suzuki *et al.* (1994) ใช้เครื่องเอกซเรย์ Toshiba-60A type, 120 kV 180 mA slice หนา 10 mm เพื่อตรวจแยกมะละกอที่เกิดความเสียหายจากกระบวนการอบไอน้ำด้วยอุณหภูมิสูงเพื่อทำลายไข่แมลงวันทองออกจากมะละกอปกติ โดยการหาค่าเลข CT จากภาพ CT ของผลมะละกอ พบว่าค่าเลข CT ของผลที่เนื้อเยื่อภายในเสียหายเนื่องจากการอบไอน้ำด้วยอุณหภูมิสูงจะแตกต่างจากเนื้อปกติ โดยบริเวณเนื้อของผลปกติมีค่าต่ำเฉลี่ยที่ –90 ± 5 และสม่ำเสมอ ในขณะที่เนื้อภายในของผลที่เสียหายมีค่าของเลข CT สูงโดยเฉลี่ยที่ +61 ± 4 นอกจากนั้น X-ray CT ที่ระดับพลังงาน 120 kV 80-100 mA 2.8 sec ถูกนำมาใช้ตรวจสอบอาการผิดปกติภายในของส้มพันธุ์ผิวทอง ฟรีมองต์ และเมอคอร์ด เช่น การเกิดเนื้อฟ่ามไต ฟ่ามแห้ง หลวม (loose peel) และแดดเผา (Yantarasri and Sornsrivichai, 1996) และใช้ตรวจสอบลักษณะเนื้อแก้วภายในของผลมังคุดและตรวจสอบความอ่อน-แก่รวมถึงอาการหนอนเจาะไส้ในผลทุเรียน (Yantarasri *et al.*, 1996) นอกจากนั้น X-ray CT ยังใช้ในการตรวจแยกอาการฟ่ามแห้งในผลส้มพันธุ์ Dancy (Peiris *et al.*, 1998) และใช้ตรวจแยกความแก่ของมะเขือเทศในระยะ mature green (Thai *et al.*, 1997b) Yantarasri *et al.* (1997) ได้ใช้ X-ray CT ที่ระดับพลังงาน 120 kV 80-100 mA 2.8 sec slice หนา 10 mm ตรวจสอบความอ่อน-แก่และอาการ water core ในผลมะม่วงพันธุ์น้ำดอกไม้ พบว่าภาพจากการเอกซเรย์เปรียบเทียบกับผลมะม่วงหลังผ่ามีความสัมพันธ์กับอาการผิดปกติ โดยเมื่อพิจารณาจากฟิล์มบริเวณที่เกิดอาการ water core จะมีสีขาวสว่างรอบๆเมล็ดเนื่องจากมีปริมาณน้ำสูงจึงดูดกลืนเอกซ์เรย์ได้มาก Brecht *et al.* (1991) ใช้ X-ray CT ตรวจแยกมะเขือเทศที่ระยะความแก่ต่างกัน Sornsrivichai and Yantarasri (1999) ได้ใช้ X-ray CT คัดแยกคุณภาพสับปะรดพันธุ์ปัตตาเวียโดยจะแยกผลสุก และผลเนื้อใส (translucency) และใช้ตรวจแยกอาการช้ำจากการกระแทก กัลย์ (2541) พบว่าเทคนิค

X-ray CT สามารถตรวจสอบ ความอ่อน-แก่ของผลทุเรียนโดยดูจากค่า CT number นอกจากนั้น รังสินันท์ (2541) ได้ใช้เทคนิคเดียวกันนี้มาคัดแยกผลมังคุดเนื้อแก้วโดยไม่ทำลายผลโดยอาการเนื้อแก้วกับยางไหลมีความสัมพันธ์กับ CT number เช่นเดียวกัน

**3. Digital X-ray** เป็น X-ray Fluoroscopy ชนิดหนึ่งที่ใช้ในทางการแพทย์แต่มี image intensifier ซึ่งสามารถเปลี่ยนเป็นภาพได้ทันที โดยหลักการของเอกซเรย์ชนิดนี้ คือ การยิงรังสีออกไปผ่านวัสดุที่ต้องการทราบรายละเอียด โดยมีฉากรับเป็นฟิล์มหรือมีตัวรับให้ภาพปรากฏบนจอภาพ (ธงชัยและคณะ, 2542)

**4. Linescan X-ray** เทคนิคนี้เป็นแบบที่ใช้กับสนามบินเพื่อตรวจกระเป๋า อาวุธ และสิ่งต้องห้าม ในการเดินทางระหว่างประเทศ เช่น อาหารและผลไม้สด เทคนิคนี้จะคล้ายกับเทคนิคแรกแต่ใช้ sensor รับภาพจากการยิงรังสีผ่านวัตถุแล้วใช้เทคนิค Image Processing สร้างภาพได้อย่างรวดเร็วโดยลักษณะภาพภายในเหมือนกับเทคนิค X-ray radiography (ธงชัยและคณะ, 2542) ห้องวิจัยของ USDA ได้พัฒนาเครื่องเอกซเรย์ชนิดนี้โดยเฉพาะกับผลไม้พบว่าให้รายละเอียดของภาพสูงจนสามารถเห็นการทำลายของแมลงภายในผลมะม่วงได้ (Reyes *et al.*, 1997) และตรวจสอบอาการ water core ในผลแอปเปิ้ล (Muhammad and Tollner, 1997) ในทางการค้าการใช้เอกซเรย์ตรวจสอบคุณภาพของผลิตผลเกษตรถูกนำมาใช้กับผลิตผลหลายชนิด ในเขตอเมริกาเหนือมีปัญหาการเกิด hollow heart ในหัวมันฝรั่งระหว่าง 5-25 เปอร์เซ็นต์ ทำให้เกิดปัญหาต่อเนื่องถึงการทำมันฝรั่งทอด จึงนำเอกซเรย์มาใช้ตรวจแยกหัวมันฝรั่งที่เกิด hollow heart และเศษหินที่ปนมา บริษัท Sunkist Growers พัฒนาเอกซเรย์ขึ้นเพื่อใช้ตรวจแยกผลส้มที่เกิดความเสียหายเนื่องจากความเย็น (freeze damage) ได้ด้วยความเร็ว 600 ผล/นาที/ช่อง นอกจากนี้เอกซเรย์ถูกนำมาใช้ตรวจแยก pit ในผลเชอรี่ด้วยความเร็วถึง 40 ผล/วินาที/ช่อง และมีความผิดพลาดเพียง 1 ใน 28350 ผล (Tollner *et al.*, 1993)

จากการที่ทราบว่าวัตถุที่มีความหนาแน่นต่างกันและมีส่วนประกอบที่ต่างกันสามารถดูดกลืนรังสีได้แตกต่างกัน (ชัชวาล, 2528) ดังเช่น การดูดกลืนเอกซเรย์ของของแข็งในแอปเปิ้ลจะค่อนข้างต่ำกว่าน้ำ (Tollner *et al.*, 1992) การดูดกลืนเอกซเรย์ของน้ำมากกว่าไม้และมากกว่าอากาศตามลำดับ (Tollner *et al.*, 1991) ความหนาแน่นของน้ำสูงกว่าอากาศอยู่มาก กล่าวคือ น้ำมีความหนาแน่นเท่ากับ 1 แต่อากาศมีความหนาแน่นเท่ากับ 0.001293 (ชูศักดิ์, 2524)

ประเด็นที่สำคัญมากของการนำเทคนิคเอกซเรย์มาใช้ตรวจสอบผลิตผลเกษตร ได้แก่ความปลอดภัยต่อผู้บริโภค ถึงแม้ว่าประเด็นความปลอดภัยของการใช้เอกซเรย์กับผลิตผลเกษตรยังเป็นคำถามที่ต้องการคำตอบเนื่องจากยังไม่มีผู้ใดได้ศึกษาถึงเรื่องนี้โดยตรง แต่ปกติการเอกซเรย์คนเพื่อตรวจสอบคนไข้ซึ่งเป็นที่ยอมรับในแง่ความปลอดภัยจึงไม่น่าเป็นปัญหาในการใช้ตรวจสอบ

คุณภาพภายในซึ่งจะทำครั้งเดียวต่อผล นอกจากนั้น Toliner (1993) ได้ให้เหตุผลถึงความปลอดภัยของการใช้เอกซเรย์กับผลิตผลไว้ว่าปริมาณรังสีที่ผลิตผลได้รับระหว่างการตรวจสอบไม่มากไปกว่าปริมาณรังสีที่ผลิตผลได้รับตลอดการเจริญเติบโต นอกจากนั้นองค์การ WHO (World Health Organization) ได้ระบุถึงอันตรายจากรังสีว่าจะมีอันตรายเมื่อได้รับไม่น้อยกว่า 10,000 Gyแต่รังสีที่ผลิตผลได้รับนั้นมีต่ำกว่า 1,000Gy และการดูดกลืนรังสีที่ให้กับผลิตผลค่อนข้างต่ำเนื่องจากพลังงานที่ให้อยู่ในระดับต่ำ(ประมาณ40-120kV) ซึ่งเครื่องเอกซเรย์ที่นำมาใช้กับผลิตผลเกษตรนำมาจากเครื่องมือทางการแพทย์ที่ใช้กับมนุษย์เป็นส่วนใหญ่ ดังนั้นความปลอดภัยของเครื่องจึงมีอยู่สูง

ดังนั้นกรณีการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางกายภาพของผลส้ม การเกิดอาการฟ่ามของผลส้มเกิดจากการเปลี่ยนแปลงสภาวะของน้ำและอากาศในผลเป็นสาเหตุหลักโดยที่ปริมาณน้ำในเนื้อผลส้มจะลดลงตามระดับอาการฟ่ามที่มากขึ้นและมีการเพิ่มขึ้นของอากาศในเนื้อตามระดับความฟ่ามที่เพิ่มขึ้น เมื่อใช้เทคนิคเอกซเรย์ตรวจสอบ เนื่องจากอากาศมีความหนาแน่นต่ำดังนั้นจึงไม่สามารถดูดกลืนรังสีเอกซ์ได้จะทำให้ภาพจากฟิล์มปรากฏเป็นสีดำและในส่วนที่มีปริมาณน้ำมากจะมีความหนาแน่นสูงจะมีการดูดกลืนรังสีเอกซ์ได้มากจะทำให้ภาพบริเวณเป็นสีขาวซึ่งจะทำให้เห็นความแตกต่างเนื่องจากความดำของภาพที่แตกต่างกันทำให้เกิดความคมชัดของภาพขึ้นมา ดังนั้นถ้าใช้วิธีการสังเกตความแตกต่างที่เกิดกับภาพที่ปรากฏด้วยตาร่วมกับการประเมินโดยฟิล์มเอกซเรย์ น่าจะสามารถช่วยประเมินภาพเปรียบเทียบระหว่างผลส้มปกติและผลส้มที่มีระดับความฟ่ามแตกต่างกันได้