

การประเมินคุณภาพผลส้มโชกุน (*Citrus reticulata* Blanco cv. Shogun) แบบไม่ทำลายด้วยเทคนิคการกระเจิงคอมป์ตันของรังสีแกมมา

กัมปนาท พรรณราย¹ ธวัช ชิตตระการ² และ ไตรภพ ผ่องสุวรรณ³

Abstract

Punnary, K., Chittrakarn, T. and Bhongsuwan, T.

Nondestructive quality assessment of shogun mandarin fruits (*Citrus reticulata* Blanco cv. Shogun) using compton scattering of gamma-ray technique
Songklanakarin J. Sci. Technol., Dec. 2005, 27(Suppl. 3) : 849-859

Compton scattering of gamma radiation was applied for nondestructive testing of the shogun mandarin fruits with good quality defined as no dry sack or dry fibrous structures inside. In principle, the scattering deviated angles to the left and right of a gamma ray that penetrates through a homogeneous fibrous structure meat of any orange fruit should be equal. The source Cs-137, with an initial gamma ray activity of 9.25 mCi, placed in a 7 cm thick lead shielding, was radiated through a 10 mm diameter collimator onto any single fruit to be tested. A NaI(Tl)-detector, oriented perpendicular to both left and right of the incoming beam, was placed 5 cm from the fruit. Results showed that the net count rate of the scattering beam between the left and right counting for good-quality shogun mandarin with proper tissue for consumption was less than 85 counts per minute (average 83 cpm), whereas shogun mandarin with dry sack, which were unfit for consumption, had twice that rate or more (average 175 cpm).

Key words : compton scattering, nondestructive testing, shogun mandarin, gamma ray

Department of Physics, Faculty of Science, Prince of Songkla University, HatYai, Songkhla, 90112 Thailand.

¹นักศึกษาลัทธิสุตร วท.ม. สาขาฟิสิกส์ ²Ph.D.(Nuclear Physics) รองศาสตราจารย์ ³Ph.D.(Applied Geophysics), ผู้ช่วยศาสตราจารย์
ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา 90112

Corresponding e-mail: tawat.c@psu.ac.th

รับต้นฉบับ 16 มีนาคม 2548 รับลงพิมพ์ 10 มิถุนายน 2548

บทคัดย่อ

กัมปนาท พรหมราช รัชช ชิตตระการ และ ไตรภพ ผ่องสุวรรณ

การประเมินคุณภาพผลส้มโชกุน (*Citrus reticulata* Blanco cv. Shogun) แบบไม่ทำลาย
ด้วยเทคนิคการกระเจิงคอมป์ตันของรังสีแกมมา

ว. สงขลานครินทร์ วทท. ๕.ค. 2548 27(ฉบับพิเศษ 3) : 849-859

ทำการตรวจสอบคุณภาพแบบไม่ทำลายด้วยเทคนิคการกระเจิงคอมป์ตันของรังสีแกมมากับผลส้มพันธุ์โชกุน โดยกำหนดให้ผลส้มมีคุณภาพเมื่อไม่มีเนื้อฟาม อาศัยหลักการกระเจิงของรังสีแกมมาทางด้านซ้าย และขวาของผล ส้มที่มีเนื้อเยื่อภายในเป็นปกติ (ความหนาแน่นสม่ำเสมอ) ที่มุมเท่ากันจะมีค่าใกล้เคียงกัน ด้วยการฉายรังสีแกมมา จากแหล่งกำเนิดรังสี Cs-137 ความแรง 9.25 mCi ซึ่งบรรจุอยู่ในชุดตะกั่วกำบังรังสีหนา 7 ซม. ผ่านท่อบีบรังสี ที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของช่องเปิด 10 มม. ไปยังตัวอย่าง และวัดรังสีแกมมาที่กระเจิงจากตัวอย่างในมุม 90 องศา กับเส้นทางการเดินทางของรังสีตกกระทบด้วยหัววัดรังสีแกมมา NaI(Tl) ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 7.5 ซม. ทั้งทางด้านซ้าย และขวา โดยระยะห่างระหว่างปลายของท่อบีบรังสีกับตัวอย่าง และตัวอย่างกับหัววัดเท่ากับ 5 ซม. พบว่าผลส้มที่มี เนื้อเยื่อเป็นปกติ (มีคุณภาพ) จะมีค่าผลต่างของอัตรานับสุทธิเฉลี่ยจากทางด้านซ้าย และขวาน้อยกว่า 83 cpm และ มีค่ามากกว่า 175 cpm ในกรณีที่เป็นเนื้อฟาม (ไม่มีคุณภาพ)

ปัจจุบันได้มีการสร้างเครื่องมือเพื่อใช้ตรวจสอบคุณภาพผลไม้โดยอาศัยพื้นฐานจากการตรวจสอบคุณภาพของมนุษย์ เช่น การสังเกตองค์ประกอบทางเคมี ลักษณะทางกายภาพ และองค์ประกอบต่างๆ ของเนื้อเยื่อ รวมทั้งความบกพร่องหรือความไม่สมบูรณ์ของผลไม้ เป็นต้น ซึ่งวิธีการตรวจสอบคุณภาพผลไม้สามารถแบ่งออกเป็น 2 วิธีหลักๆ คือ การตรวจสอบแบบทำลาย และไม่ทำลาย (Abbott, 1999) โดยการตรวจสอบแบบทำลาย ได้แก่ การหาค่าความแน่นเนื้อ (firmness) ค่าปริมาณน้ำมัน และ น้ำหนักแห้ง (oil and dry matter content) ค่าปริมาณ น้ำผลไม้ และปริมาณเนื้อผลไม้ทั้งหมด (soluble solids and total solids) ค่าความเป็นกรดลดลง (decreasing acidity) และค่าความหวานเพิ่มขึ้น (increasing contents of sugar) เป็นต้น (Harker et al., 1997) ซึ่งวิธีการดังกล่าวจะทำให้ผลไม้ที่ผ่านการตรวจสอบเสียหายจึงไม่สามารถตรวจสอบคุณภาพได้ทุกผล สำหรับการตรวจสอบแบบไม่ทำลาย ได้แก่ การสั่นพ้องแม่เหล็กนิวเคลียร์ (nuclear magnetic resonance; NMR) (Chen et al., 1993; Yantarasi et al., 1997) การใช้แสง (Lancaster et al., 1997) รวมถึงแสงใกล้อินฟราเรด (near infrared; NIR) (Birth, 1976; Upchurch et al., 1994; Williams and Norris, 1987) การถ่ายภาพรังสีเอกซ์ (x-ray radio-

graph) (Kalayanamitra et al., 1998; Mizrach, 1999; Nylund and Lutz, 1950; Tollner et al., 1992) และ การใช้คลื่นความถี่เหนือเสียง (ultrasonic) (Gan et al., 2001; Mizrach, 2000) เป็นต้น ในการตรวจสอบด้วยวิธีนี้จะไม่ทำให้ผลไม้เสียหายจึงสามารถตรวจสอบคุณภาพได้ทุกผล ดังนั้นการบอกถึงคุณภาพด้วยวิธีการตรวจสอบแบบไม่ทำลายจึงมีความเชื่อมั่นที่มากกว่าวิธีการตรวจสอบแบบทำลาย

งานวิจัยชิ้นนี้จะเลือกใช้ส้มพันธุ์โชกุน (*Citrus reticulata* Blanco cv. Shogun) ในการทดลอง เพราะผลไม้นี้ดังกล่าวจัดเป็นผลไม้เศรษฐกิจที่สำคัญของประเทศ ซึ่งลักษณะเนื้อเยื่อที่จัดเป็นปัญหา และทำให้คุณภาพของผลไม้ลดลงคือ เนื้อฟาม โดยฟามที่พบมาก ได้แก่ ฟามแห้ง (dry juice sack) ซึ่งมีลักษณะเป็นถุงเนื้อสีขาวขุ่นแห้ง ไม่มีน้ำ และผนังเซลล์หนากว่าปกติ พบมากบริเวณ ขั้วหรือก้นของผล ในผลที่มีมากอาจพบลามถึงครึ่งผลหรือเกือบเต็มผล นอกจากนั้นยังมีฟามไต่หรือฟามข้าวสาร (granulation) ฟามแดดเผา (sunburn) และส้มโปรง (puffiness) ที่เป็นปัญหาอีกด้วย (ธงชัย และคณะ, 2542)

จากที่กล่าวมาแล้วข้างต้นจะเห็นได้ว่าเนื้อเยื่อผลส้มในบริเวณที่เป็นปกติ และเป็นเนื้อฟามมีความหนาแน่นที่แตกต่างกัน กล่าวคือ ในบริเวณที่เป็นปกติจะมีความหนา

แน่นมากกว่าบริเวณที่เป็นเนื้อฟ้าม จึงอาศัยเทคนิคการกระเจิงคอมป์ตัน (compton scattering) ของรังสีแกมมา ซึ่งมีความสัมพันธ์กับความหนาแน่นของวัตถุที่ใช้เป็นเป้า (Jama and Hussein, 1999) ในการตรวจสอบคุณภาพผลสั้ม โดยลักษณะของอันตรกิริยาชนิดนี้จะอยู่ในรูปของการชนกันระหว่างโฟตอนกับอิเล็กตรอน ซึ่งโฟตอนที่เข้าชนจะถ่ายทอดพลังงานส่วนหนึ่งให้กับอิเล็กตรอนทำให้โฟตอนที่หลุดรอดออกมาอยู่ในทิศทางใหม่ และมีพลังงานลดลง (ธารง, 2540) ดังนั้นถ้ากำหนดให้ค่าพลังงานและโมเมนตัมของการชนเป็นแบบอนุกรมจะสร้างความสัมพันธ์ได้ ดังสมการ (1) (ธวัช, 2541)

$$E = \frac{E_0}{1 + \frac{E_0}{m_0 c^2} (1 - \cos\theta)} \quad (1)$$

วัสดุอุปกรณ์ และวิธีการทดลอง

1. การหาสมการเปรียบเทียบพลังงาน

เปรียบเทียบเครื่องวิเคราะห์สัญญาณแบบหลายช่อง (MCA Canberra รุ่น 35 plus) โดยตั้งค่าเวลาที่ใช้ในการวัดรังสีแกมมาเท่ากับ 300 s จากนั้นจ่ายความต่างศักย์ไฟฟ้า 800 V จากแหล่งจ่ายความต่างศักย์สูง (HVPS Ortec รุ่น 556) ให้กับหัววัดรังสีชนิดเปล่งแสง NaI(Tl) ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 7.5 ซม. (Canberra รุ่น 802-4) เพื่อใช้ตรวจวัดรังสีแกมมาจากแหล่งกำเนิดรังสีแบบเม็ดกระดุมชนิดซีเซียม-137 (Cs-137) ขนาด 5 µCi (Oxford) และโคบอลต์-60 (Co-60) ขนาด 1 µCi (Oxford) (สำหรับการตรวจสอบคุณภาพผลสั้มจะใช้แหล่งกำเนิดรังสีแกมมาชนิดซีเซียม-137 แบบแท่งขนาด 9.25 mCi (Amersham) เพียงอย่างเดียว) แต่เนื่องจากแหล่งกำเนิดรังสีซีเซียม-137 ให้รังสีแกมมาพลังงานขนาด 661.6 keV และโคบอลต์-60 ให้รังสีแกมมา 2 ระดับพลังงาน คือ 1173.2 และ 1332.5 keV เมื่อใช้หัววัดรังสีชนิดเปล่งแสงหัววัดรังสีแกมมาที่ปลดปล่อยออกมาจากแหล่งกำเนิดรังสีทั้ง 2 ชนิด จึงปรากฏยอดพลังงานหลักที่เครื่องวิเคราะห์สัญญาณแบบหลายช่อง 3 ตำแหน่ง ซึ่งตรงกับหมายเลขช่องที่ 116, 203 และ 229 ตามลำดับ จับคู่หมายเลขช่อง

ของยอดพลังงานดังกล่าวกับพลังงานของแหล่งกำเนิดรังสีแกมมาทั้ง 2 ชนิด เพื่อเขียนกราฟ และหาสมการในการเปรียบเทียบพลังงาน

2. การหารูปแบบการจัดวางระบบวัดที่เหมาะสม

จัดวางตัวอย่าง (ผลสั้ม) และหัววัด ดัง Figure 1 โดยกำหนดระยะห่างระหว่างปลายของท่อบีบรังสีกับตัวอย่าง และตัวอย่างกับหัววัดเป็น 5-5, 5-10, 10-5 และ 10-10 ซม. จากนั้นทำการวัดรังสีแกมมาที่กระเจิงจากตัวอย่างในมุม 0, 30, 45, 60 และ 90 องศา กับเส้นทางเดินของรังสีตกกระทบของทุกๆ ระยะห่าง เพื่อหารูปแบบการจัดวางระบบวัดที่เหมาะสม

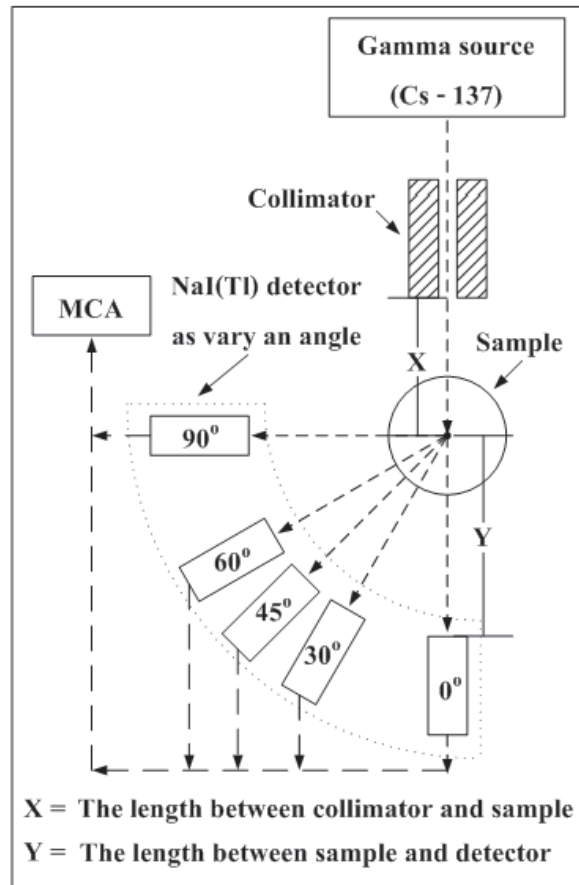


Figure 1. Schematic diagram of the experiment set up.

3. การหาความเป็นไปได้ในการใช้เทคนิคการกระเจิงคอมป์ตันของรังสีแกมมาในการตรวจสอบคุณภาพผลส้ม

สร้างส้มจำลองขึ้นจากโอเอซิซ (วัสดุอุ้มน้ำสีเขียว โดยมากใช้ในงานจัดดอกไม้) ให้มีลักษณะ และขนาดใกล้เคียงกับผลส้มธรรมชาติ จากนั้นแบ่งส้มจำลองออกเป็น 8 ส่วน ด้วยการตัดเป็นชิ้นตามยาวในลักษณะเดียวกับกึ่งหนึ่งของผลส้ม และแบ่งปริมาณความฟ้ามออกเป็น 6 ระดับ คือ 0, 25, 50, 75, 87.5 และ 100% โดยเนื้อปกติของส้มจำลองสามารถกำหนดได้ด้วยการนำส้มจำลองในส่วนที่ต้องการให้เป็นเนื้อปกติแช่น้ำ 15 ถึง 30 นาที ก่อนนำไปทดลอง และเนื่องจากรังสีแกมมาที่กระเจิงจากบริเวณที่มีความหนาแน่นต่างกันจะมีค่าไม่เท่ากัน ดังนั้นผลต่างของรังสีแกมมาที่กระเจิงจากตำแหน่งใดๆ ในมุม 90 องศา กับเส้นทางเดินของรังสีตกกระทบ ทั้งทางด้านซ้ายและขวา จะมีค่าไม่เท่ากันสำหรับรังสีแกมมาที่กระเจิงจากบริเวณที่มีความหนาแน่นเท่ากัน และต่างกัน นั่นคือ ถ้าความหนาแน่นทั้ง 2 ข้างเท่ากันผลต่างของจำนวนนับสุทธิเฉลี่ยของรังสีแกมมาที่กระเจิงออกมาจากบริเวณดังกล่าว

จะมีค่าน้อยกว่าบริเวณที่มีความหนาแน่นต่างกัน จึงจัดวางส้มจำลองด้วยการหันด้านบนเข้าหาท่อบีบรังสี จากนั้นวัดรังสีแกมมาที่กระเจิงจากส้มจำลองในมุม 90 องศา ทั้งทางด้านซ้าย และขวาของตำแหน่งต่างๆ ด้านละ 5 ครั้ง โดยแบ่งตำแหน่งต่างๆ ของส้มจำลองที่มีความฟ้าม 0, 25, 50, 75 และ 100% ออกเป็น 4 ตำแหน่ง ห่างกัน 90 องศา และ 8 ตำแหน่ง ห่างกัน 45 องศา สำหรับส้มจำลองที่มีความฟ้าม 87.5% ดัง Figure 2 บันทึกผลที่ได้จากเครื่องวิเคราะห์สัญญาณแบบหลายช่อง หาค่าเฉลี่ยของจำนวนนับสุทธิของรังสีแกมมาที่กระเจิงจากส้มจำลองในแต่ละชุดข้อมูลที่ตำแหน่งต่างๆ จากนั้นนำจำนวนนับสุทธิเฉลี่ยที่ได้ในทางด้านซ้ายและขวาของตำแหน่งเดียวกันของส้มจำลอง หักกลับกัน เพื่อทราบถึงผลต่างของจำนวนนับสุทธิเฉลี่ยของรังสีแกมมาที่กระเจิงจากส้มจำลองทั้ง 2 ด้าน จากนั้นจัดกลุ่มข้อมูลที่มีความฟ้ามเท่ากันเป็นกลุ่มเดียวกัน และเปรียบเทียบกลุ่มข้อมูลข้างต้นโดยอาศัยการทดสอบหาความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยสองค่าที่ได้จากกลุ่มตัวอย่างสองกลุ่มที่เป็นอิสระจากกันแบบที (t-test) เพื่อทราบถึงความแตกต่างของกลุ่มข้อมูลดังกล่าว

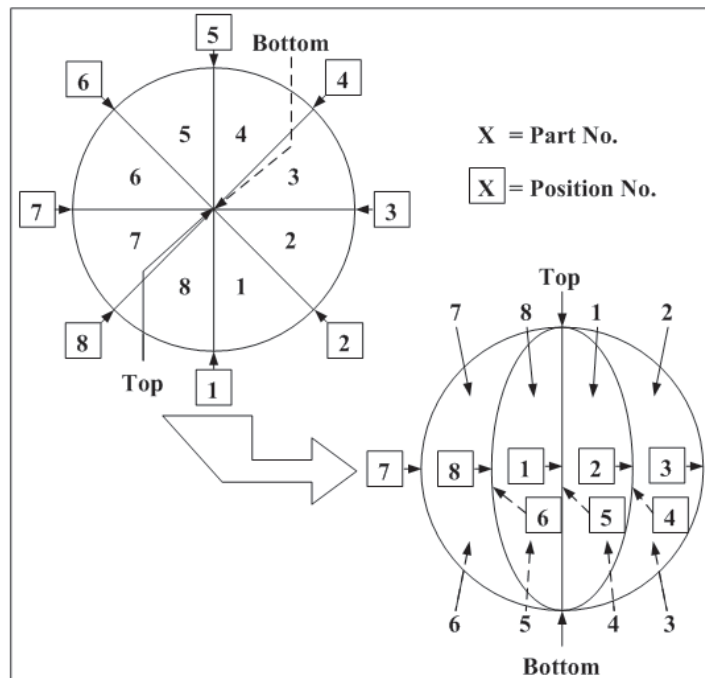


Figure 2. Schematic diagram of the sample phantom of a shogun mandarin fruit.

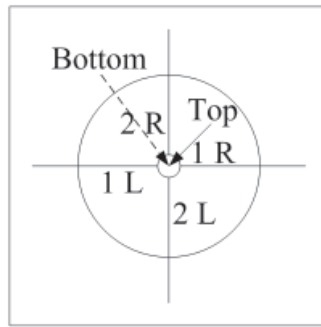


Figure 3. Schematic diagram of the orientation of a shogun mandarin fruit.

4. การตรวจวัดรังสีแกมมาที่กระเจิงจากผลส้มโชกุน
คัดเลือกตัวอย่างผลส้มแบบสุ่มให้มีขนาดของผลเท่าๆ
กันจำนวน 43 ผล โดยแบ่งตำแหน่งตามยาวจากขั้วถึงก้น
ของผลออกเป็น 4 ตำแหน่ง ห่างกัน 90 องศา ดัง Figure
3 และจัดวางผลส้มให้ขั้วหรือก้นหันเข้าหาท่อบีบรังสี จาก
นั้นทำการทดลอง และจัดการกับข้อมูลของผลส้มในรูปแบบ
เดียวกับแบบจำลอง สำหรับการกำหนดลักษณะเนื้อเยื่อของ
ผลส้มให้กับผลต่างของจำนวนนับสุทธีเจเลียของรังสีแกมมา
สามารถทำได้ด้วยการผ่าผลส้มพิสูจน์

ผลการทดลอง

1. ส่วนของระบบวัด

สามารถแสดงได้ดัง Figure 4 ถึง 8

2. ส่วนของแบบจำลอง

ข้อมูลทางสถิติแบบที่ของแบบจำลองแสดงได้ดัง
Table 1 โดยผลต่างของอัตรานับสุทธีเจเลียของรังสีแกมมา

ที่กระเจิงจากแบบจำลองที่มีปริมาณความฟ้ามต่างๆ แสดง
ได้ดังนี้

- 1) ผลต่างของอัตรานับสุทธีเจเลียของปริมาณความ
ฟ้าม 0% เท่ากับ 129+54 cpm
- 2) ผลต่างของอัตรานับสุทธีเจเลียของปริมาณความ
ฟ้าม 25% เท่ากับ 150+88 cpm
- 3) ผลต่างของอัตรานับสุทธีเจเลียของปริมาณความ
ฟ้าม 50% เท่ากับ 126+123 cpm
- 4) ผลต่างของอัตรานับสุทธีเจเลียของปริมาณความ
ฟ้าม 75% เท่ากับ 96+47 cpm
- 5) ผลต่างของอัตรานับสุทธีเจเลียของปริมาณความ
ฟ้าม 87.5% เท่ากับ 83+46 cpm
- 6) ผลต่างของอัตรานับสุทธีเจเลียของปริมาณความ
ฟ้าม 100% เท่ากับ 73+36 cpm

3. ส่วนของผลส้มโชกุน

จากข้อมูลทางสถิติแบบที่ ใน Table 3 ซึ่งแบ่ง
ลักษณะเนื้อเยื่อที่ใช้ในการพิจารณาคุณภาพของผลส้มออก

Table 1. t-test for independent samples of the phantom shogun mandarin.

Group 1 vs. Group 2	t-test for independent samples										
	Note : Variables were treated as independent samples										
	Mean Group 1	Mean Group 2	t-value	df	p	Valid N Group 1	Valid N Group 2	Std. Dev. Group 1	Std. Dev. Group 2	F-ratio Variances	p Variances
0.0% vs. 25.0%	647.3	747.9	-0.4313	18	0.6714	4	16	272.1	440.3	2.6189	0.4649
0.0% vs. 50.0%	647.3	631.2	0.0505	22	0.9602	4	20	272.1	616.0	5.1263	0.2031
0.0% vs. 75.0%	647.3	478.8	1.2691	22	0.2177	4	20	272.1	237.4	1.3134	0.5984
0.0% vs. 87.5%	647.3	415.3	1.5586	10	0.1502	4	8	272.1	229.5	1.4058	0.6378
0.0% vs. 100.0%	647.3	365.5	1.9822	8	0.0828	4	6	272.1	182.1	2.2315	0.4050

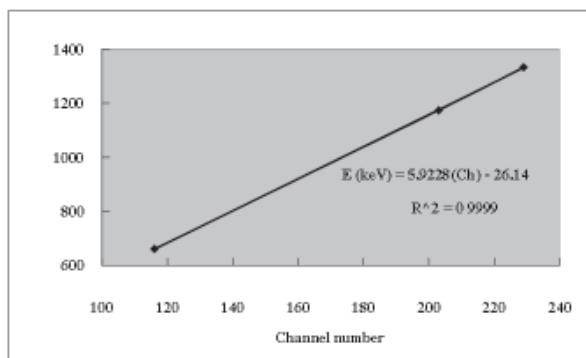


Figure 4. Standard energy calibration between Energy (keV) and Channel number (Ch) of MCA.

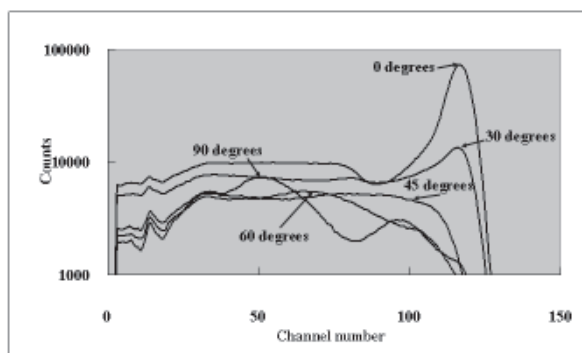


Figure 5. The energy spectrum of gamma scattering in different angles, in which the distance between the collimator and sample and between sample and detector are both 5 cm.

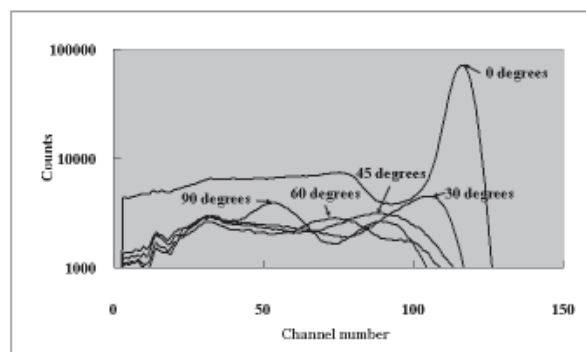


Figure 6. The energy spectrum of gamma scattering in difference angle, in which the distance between the collimator and sample and between sample and detector is 5 and 10 cm., respectively.

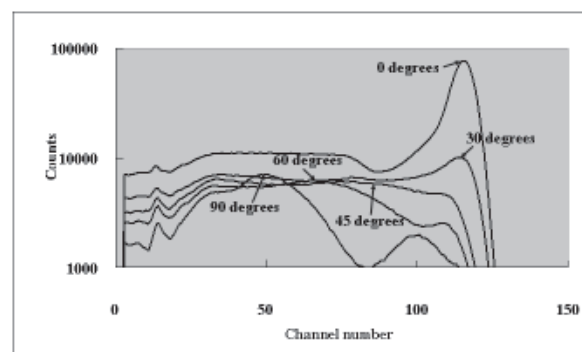


Figure 7. The energy spectrum of gamma scattering in difference angle, in which the distance between the collimator and sample and between sample and detector is 10 and 5 cm., respectively.

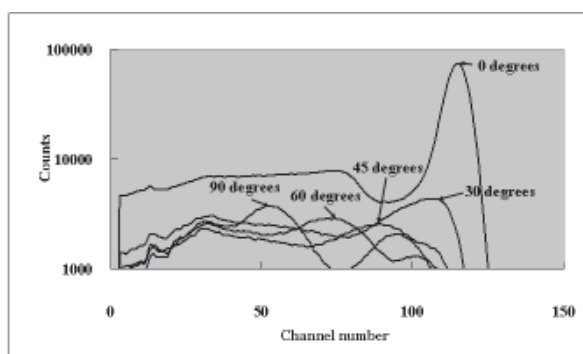


Figure 8. The energy spectrum of gamma scattering in difference angle, in which the distance between the collimator and sample and between sample and detector are both 10 cm.

Table 2. Uncertainty level of the difference of net average count rate between volume of dry sack for modeling.

volume of dry sack	0%	25%	50%	75%	87.5%	100%
0 %		33 %	4 %	78 %	85 %	92 %
25 %	33 %		47 %	97 %	94 %	94 %
50 %	4 %	47 %		69 %	65 %	69 %
75 %	78 %	97 %	69 %		47 %	71 %
87.5 %	85 %	94 %	65 %	47 %		33 %
100 %	92 %	94 %	69 %	71 %	33 %	

Table 3. t-test for independent samples of shogun mandarin.

t-test for independent samples											
Note : Variables were treated as independent samples											
	Mean Group 1	Mean Group 2	t-value	df	p	Valid N Group 1	Valid N Group 2	Std. Dev. Group 1	Std. Dev. Group 2	F-ratio Variances	p Variances
Normal vs. Dry juice sack	475.1	676.0	-2.3276	158	0.0212	132	28	381.1	550.2	2.0843	0.0068

เป็น 2 ประเภท คือ เนื้อปกติ และเนื้อฟาม พบว่าผลต่างของอัตรานับสุทธิเฉลี่ยของเนื้อเยื่อที่เป็นปกติ และฟามีค่าเท่ากับ 95 ± 76 cpm และ 135 ± 110 cpm

วิจารณ์ผล

1. ส่วนของระบบวัด

จาก Figure 4 สามารถหาสมการเปรียบเทียบพลังงานได้เป็น

$$E(\text{keV}) = 5.9228(\text{Ch}) - 26.14 \quad (2)$$

และจาก Figure 5 ถึง 8 ซึ่งแสดงจำนวนนับสุทธิเฉลี่ยของรังสีแกมมาที่กระเจิงจากผลส้มในระยะห่าง และมุมกระเจิงต่าง ๆ พบว่าจำนวนนับสุทธิเฉลี่ยของรังสีแกมมามีค่ามากขึ้นเมื่อระยะห่างระหว่างปลายของท่อบีบรังสีกับ

ตัวอย่าง และตัวอย่างกับหัววัดมีค่าน้อยลง โดยที่มุมกระเจิง 0 องศา ของทุกระยะห่างจะมีค่าจำนวนนับสุทธิเฉลี่ยของยอดพลังงานหลักสูงสุด แต่เนื่องจากเป็นการวัดรังสีแกมมาที่ทะลุผ่านตัวอย่างจึงไม่เหมาะสมที่จะใช้ในการตรวจสอบคุณภาพผลส้ม เพราะธรรมชาติของผลส้มถึงแม้จะเป็นพันธุ์เดียวกันก็มีความหนาแน่นที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับความสด และความสมบูรณ์ของผลนั้นๆ ดังนั้นจึงเป็นการยากที่จะใช้มุมกระเจิงดังกล่าวในการตรวจสอบคุณภาพส่วนที่มุมกระเจิง 30 องศา ก็ไม่เหมาะสม เพราะตำแหน่งของยอดพลังงานหลักที่ปรากฏซ้อนทับกับยอดพลังงานหลักของมุมกระเจิง 0 องศา เปรียบได้กับการวัดรังสีแกมมาที่ทะลุผ่านออกมาจากตัวอย่างเช่นกัน ซึ่งการซ้อนทับกันดังกล่าวเกิดขึ้นจากการที่เส้นผ่านศูนย์กลางของหัววัดมีขนาดค่อนข้างใหญ่ ทำให้หัววัดรับรังสีแกมมาจากมุมกระเจิงอื่นๆ ปนเข้ามา โดยรังสีแกมมาที่อาจปนเข้าสู่หัววัดจะอยู่ในช่วงมุมกระเจิง ± 37 องศา ในกรณีของระยะห่าง

ระหว่างตัวอย่างกับหัววัดเท่ากับ 5 ซม. (เกิดจากการหาค่า \tan^{-1} ของรัศมีของหัววัดซึ่งเท่ากับ 3.75 ซม.หารด้วยระยะห่างระหว่างตัวอย่างกับหัววัด) และ + 21 องศา ในกรณีระยะห่างเท่ากับ 10 ซม. สำหรับที่มุมกระเจิง 45, 60 และ 90 องศา ยอดพลังงานหลักที่ปรากฏค่อนข้างแยกตัวออกจากกันอย่างชัดเจน โดยยอดพลังงานหลักของมุมกระเจิง 90 องศา มีจำนวนนับสุทธิเฉลี่ยที่สูงที่สุดจึงเหมาะสมที่จะใช้ในการตรวจสอบคุณภาพผลส้ม ดังนั้นในการจัดวางอุปกรณ์การทดลองจะใช้ระยะห่างระหว่างปลายของท่อบีบรังสีกับตัวอย่าง และตัวอย่างกับหัววัดรังสีเท่ากับ

5 ซม. โดยเลือกใช้มุมกระเจิงเป็น 90 องศา และเมื่อพิจารณาจากสมการ (1) และ (2) พลังงานของรังสีแกมมาที่กระเจิงในมุมดังกล่าวจะมีค่าเท่ากับ 288.29 keV ซึ่งตรงกับหมายเลขช่องที่ 53 ของเครื่องวิเคราะห์สัญญาณแบบหลายช่อง

2. ส่วนของแบบจำลอง

จากข้อมูลทางสถิติแบบทีของแบบจำลองใน Table 1 สามารถเขียนกราฟแบบบ็อก (box plot) เพื่อเปรียบเทียบผลต่างของอัตรานับสุทธิเฉลี่ยของปริมาณความฟ้าม

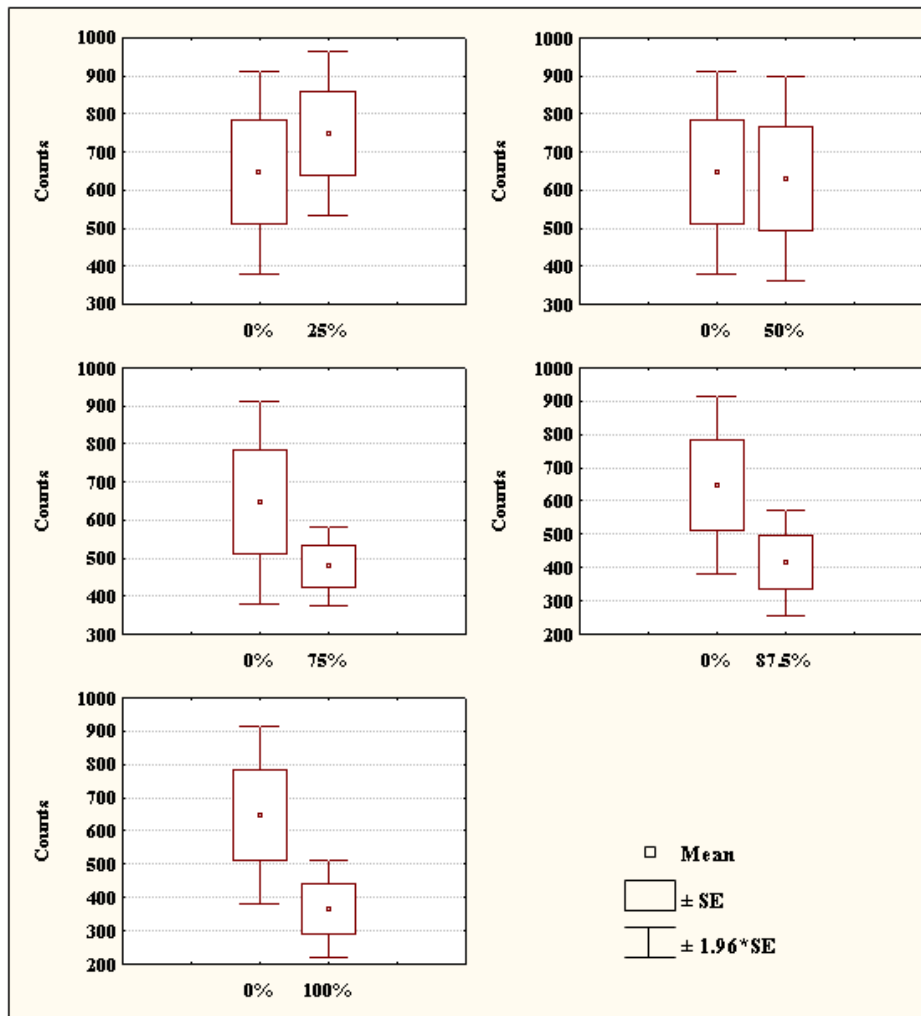


Figure 9. Box plot and the t-test probability of the net count of the scattering beam between the left and right counting for phantom of a shogun mandarin fruit.

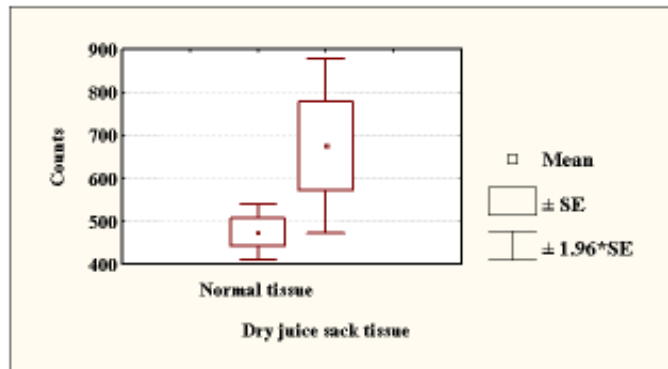


Figure 10. Box plot and the t-test probability of the net count of the scattering beam between the left and right counting of the normal and dry juice sack of the shogun mandarin fruit tissue.

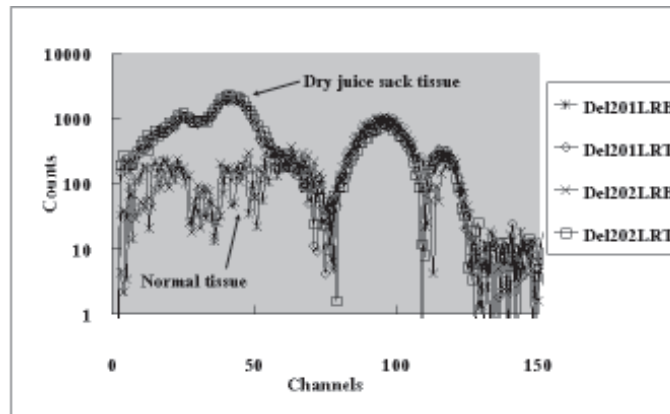


Figure 11. The energy spectrum of the net average difference of count number of normal and dry sack tissue.

0% กับปริมาณความฟ้ามืดอื่น ๆ ได้ดัง Figure 9 โดยระดับความเชื่อมั่นในความแตกต่างกันของผลต่างของอัตรานับสุทธิเฉลี่ยระหว่างแบบจำลองที่มีปริมาณความฟ้ามืดต่าง ๆ แสดงได้ดัง Table 2 ซึ่งจะเห็นว่าประสิทธิภาพของการตรวจสอบคุณภาพมีค่าสูงขึ้นเมื่อปริมาณความฟ้ามืดมีค่ามากขึ้น จึงเป็นไปได้ที่จะใช้เทคนิคการกระเจิงคอมป์ตันของรังสีแกมมาในการตรวจสอบคุณภาพผลส้ม โดยมีข้อสังเกตที่น่าสนใจประการหนึ่งคือ ในกรณีที่ปริมาณความฟ้ามืดมีค่าเท่ากับ 50% ระดับความเชื่อมั่นเมื่อเปรียบเทียบกับเนื้อดีจะมีค่าเพียง 4% ที่เป็นดังนี้อาจเกิดจากรูปแบบของแบบจำลองที่แบ่งครึ่งลูกเป็นเนื้อดี และอีกครึ่งลูกเป็นเนื้อฟ้ามืด

ดังนั้นเมื่อทำการวัดรังสีแกมมาที่กระเจิงจากแบบจำลองที่เนื้อดี หรือเนื้อฟ้ามืดเป็นศูนย์กลางชนิดเดียวกันในการเดินทางของรังสีแกมมาไปยังหัววัด จะได้ผลต่างของจำนวนนับสุทธิเฉลี่ยมีค่าไม่แตกต่างกันมากนัก

3. ส่วนของผลสัมฤทธิ์

พบว่าผลต่างของอัตรานับสุทธิเฉลี่ยของเนื้อปกติ และเนื้อฟ้ามืด มีความแตกต่างกันในระดับความเชื่อมั่น 98% และสามารถเขียนกราฟแบบบล็อกได้ดัง Figure 10 ซึ่งตัวอย่างของกราฟผลต่างของอัตรานับสุทธิเฉลี่ยของเนื้อเนื้อที่เป็นปกติ และฟ้ามืดแสดงได้ดัง Figure 11

สรุป และข้อเสนอแนะ

การตรวจสอบคุณภาพผลส้มแบบไม่ทำลายด้วยเทคนิคการกระเจิงคอมป์ตันของรังสีแกมมาจากระบบที่ใช้ในการทดลองสามารถใช้ได้จริง โดยแบ่งเกณฑ์ของผลต่างของอัตรานับสเปกตรัมเฉลี่ยในการกำหนดลักษณะเนื้อเยื่อได้เป็น 3 กรณี (ใช้ความเชื่อมั่น 95%) ดังนี้

1. ผลต่างของอัตรานับสเปกตรัมเฉลี่ยมีค่าน้อยกว่า 83 cpm จัดได้ว่าเนื้อเยื่อเป็นปกติ
2. ผลต่างของอัตรานับสเปกตรัมเฉลี่ยอยู่ในช่วง 83 ถึง 175 cpm จัดได้ว่าเนื้อเยื่อมีโอกาสเป็นฟาร์ม
3. ผลต่างของอัตรานับสเปกตรัมเฉลี่ยมีค่ามากกว่า 175 cpm จัดได้ว่าเนื้อเยื่อเป็นฟาร์ม

ถึงแม้ว่าเทคนิคการกระเจิงคอมป์ตันของรังสีแกมมาจะสามารถใช้ตรวจสอบคุณภาพของผลส้มได้ แต่เทคนิคดังกล่าวก็ยังมีจุดบกพร่องในส่วนของเวลาในการตรวจสอบ นั่นคือ ในแต่ละผลจะต้องใช้เวลาค่อนข้างมาก (ในงานวิจัยชิ้นนี้ใช้เวลา 100 นาที/ผล) ซึ่งเงื่อนไของเวลาสามารถลดให้น้อยลงได้ด้วยการเพิ่มพลังงาน และความแรงรังสี แต่วิธีการดังกล่าวจะมีผลต่อต้นทุนในการรักษาความปลอดภัยจากรังสี และขนาดของระบบที่ใหญ่ขึ้น (ในงานวิจัยใช้ระบบจ่ายรังสี โดยมีชุดกัมบังรังสีที่ทำจากตะกั่วหนา 7 ซม.) นอกจากนั้นการเพิ่มจำนวนของหัววัดเพื่อใช้วัดรังสีแกมมาที่กระเจิงจากตัวอย่างก็เป็นอีกวิธีหนึ่งที่จะช่วยในการลดเวลาของการตรวจสอบคุณภาพผลได้ สำหรับรูปแบบการจัดวางตัวอย่างก็ถือเป็นจุดบกพร่องอีกจุดหนึ่งเช่นกัน นั่นคือในการตรวจสอบคุณภาพจะต้องจัดวางตัวอย่างให้ขั้วหรือก้นของผลส้มหันเข้าหาท่อบีบรังสี ซึ่งลักษณะการจัดวางดังกล่าวทำได้ยากในเส้นทางการผลิตของโรงงานอุตสาหกรรม แต่ถึงอย่างไรก็ตามการตรวจสอบคุณภาพผลส้มแบบไม่ทำลายด้วยเทคนิคการกระเจิงคอมป์ตันของรังสีแกมมาก็จัดเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่สามารถนำไปพัฒนา และประยุกต์ใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมได้

เอกสารอ้างอิง

- อึ้งชัย ยันตรศรี, จริญญา พันธุ์รักษา, วิลาวัลย์ คำปวน และ ดนัย บุญเกียรติ. 2542. การประยุกต์ใช้เทคนิคทางเอกซเรย์ในการคัดและประกันคุณภาพเพื่อการส่งเสริมอุตสาหกรรมการผลิตส้มของประเทศไทยในอนาคต, ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ. 174-180.
- อึ้งชัย ยันตรศรี. 2540. ตรวจวัดคุณภาพผลส้มด้วยเครื่องเอกซเรย์, เกษการเกษตร. 30-31.
- อวัช ชิตตระการ. 2541. การตรวจและการวัดรังสี. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- Abbott, J.A. 1999. Quality measurement of fruits and vegetables, *Postharv. Biol. Technol.* 15: 207-225.
- Abbott, J.A., Lu, R., Upchurch, B.L. and Strohshine, R.L. 1997. Technologies for nondestructive quality evaluation of fruits and vegetables, *Hortic. Rev.* 20: 1-120.
- Birth, G.S. 1976. How light interacts with foods, *Quality Detection in Foods.* 6-11.
- Chen, P., McCarthy, M.J., Kauten, R., Sarig, Y. and Han, S. 1993. Maturity Evaluation of Avocados by NMR Methods, *J. Agr. Eng. Res.* 55: 177-187.
- Gan, T.H., Hutchins, D.A. and Billson, D.R. 2001. Preliminary studies of a novel air-coupled ultrasonic inspection system for food containers, *J. Food Eng.* 147-155.
- Harker, F.R., Redgwell, R.J., Hallett, I.C., Murry, S.H. and Carter, G. 1997. Texture of fresh fruits, *Hortic. Rev.* 20: 121-224.
- Jama, H.A., and Hussein, E.M.A. 1999. Design aspects of a gamma ray energy spectral Compton-scatter nondestructive testing method, *Appl. Rad. Isotopes.* 50: 331-342.
- Kalayanamitra, K., Sornsrivichai, J. and Yantarasri, T. 1998. Determination of Durian Maturity by X-ray Technique.
- Lancaster, J.E., Lister, C.E., Reay, P.F. and Triggs, C.M. 1997. Influence of pigment composition on skin color in a wide range of fruits and vegetables, *J. Am. Soc. Hortic. Sci.* 122: 594-598.
- Mizrach, A. 1999. Nondestructive ultrasonic determination of avocado softening process, *J. Food Eng.* 40: 139-144.
- อึ้งชัย ยันตรศรี. 2540. ฟิสิกส์แผ่นใหม่: ความรู้พื้นฐานสำหรับนักฟิสิกส์. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

- Mizrach, A. 2000. Determination of avocado and mango fruit properties by ultrasonic technique, *Ultrasonics*. 38: 717-722.
- Mizrach, A., Flitsanov, U., El-Batsri, R. and Degani, C. 1999. Determination of avocado maturity by ultrasonic attenuation measurements, *Sci. Hortic.* 80: 173-180.
- Mizrach, A., Flitsanov, U., Schmilovitch, Z. and Fuchs, Y. 1999. Determination of mango physiological indices by mechanical wave analysis, *Postharvest Biology and Technology*. 16: 179-186.
- Mizrach, U., Flitsanov, R., Batsri E.I., and Degani, C. 1999. Determination of avocado maturity by ultrasonic attenuation measurements, *Sci. Hortic.* 80 : 173-180.
- Nylund, R.E. and Lutz, J.M. 1950. Separation of hollow heart potato tubers by means of size grading, specific gravity, and X-ray examination, *Am. Potato J.* 27: 214-222.
- Tollner, E.W., Hung, Y.C., Upchurch, B.L. and Prussia, S.E. 1992. Relating X-ray absorption to density and water content in apples, *Trans. Am. Soc. Agric. Eng.* 35: 1921-1928.
- Upchurch, B.L., Throop, J.A. and Aneshansley, D.J. 1994. Influence of time, bruise-type, and severity on near-infrared reflectance from apple surfaces for automatic bruise detection, *Trans. Am. Soc. Agric. Eng.* 37: 1571-1575.
- Williams, P. and Norris, K. 1987. *Near-infrared Technology in the Agricultural and Food Industries*, American Association of Cereal Chemists. St paul: MN.
- Yantarasri, T., Sornsrivichai, J. and Chen, P. 1997. Nondestructive X-ray and NMR Imaging for Quality Determination of Mango Fruit, *Proc. 5th Intl. Symp. On Fruit, Nut and Vegetable Production Engineering* Davis, CA.
- Yantarasri, T., Sornsrivichai, J. and Chen, P. 1998. NMR Technique for Nondestructive Quality Evaluation of Durian Fruit, *Proc. of 5th Tri-University Joint Seminar & Symposium*, October 26-29.