

การตรวจสอบคุณภาพภายในของผลมังคุดโดยวิธีการไม่ทำลายด้วยวิธี NIR Spectroscopy

Nondestructive Determination of Quality of Mangosteen

Using Near Infrared (NIR) Spectroscopy



โดย

นายพัลลภ ทองเนียม

นางสาวไพลิน ชัยตรี

นางสาวสาวตรี นิลหุ้ย

เลขหน้.....
เลขทะเบียน..... 45674
วัน, เดือน, ปี 13 ก.พ. 2546

.b.....
.i.....

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2544

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์อื่นใด
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปีการศึกษา 2544

การตรวจสอบคุณภาพภายในของผลมังคุด โดยวิธีการไม่ทำลายด้วยวิธี NIR Spectroscopy



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์ปีการศึกษา 2544

ภาควิชา วิศวกรรมเกษตร

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การตรวจสอบคุณภาพภายในของผลมังคุดโดยวิธีการไม่ทำลายด้วยวิธี NIR Spectroscopy

ผู้จัดทำ

1. นายพัลลภ ทองเนียม
2. นางสาวไพลิน ชัยตรี
3. นางสาวสาวิตรี นิลหุ้ย



..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(รองศาสตราจารย์ ดร.ปานมนัส ศิริสมบุญ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การตรวจสอบคุณภาพภายในของผลมังคุดโดยวิธีการไม่ทำลายด้วยวิธี NIR Spectroscopy

นายพัลลภ ทองเนียม

นางสาวไพลิน ชัยศรี

นางสาวสาวิตรี นิลหุ้ย

รศ.ดร. ปานมนัส ศิริสมบุญรณ์ อาจารย์ที่ปรึกษา

ปีการศึกษา 2544

บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ เป็นการวิจัยเกี่ยวกับการตรวจสอบคุณภาพภายในของผลมังคุด โดยไม่ทำลายด้วยวิธี NIR Spectroscopy จากการศึกษาการทดลองพบว่า วิธี NIR Spectroscopy ไม่สามารถแยกผลมังคุดที่มีลักษณะเป็นเนื้อแก้วออกจากเนื้อปกติได้ แต่สามารถตรวจสอบความแน่นเนื้อของผลมังคุดที่แรง 30 N ด้วยค่า Hardness ($r = 0.92$, $SEE = 0.879$, $SEP = 1.016$, $Bias = 3.905E-15$) และค่า Degree of Elasticity ($r = 0.92$, $SEE = 0.077$, $SEP = 0.076$, $Bias = 3.706E-16$) และยังพบว่ามังคุดจะไม่เกิดจุดคลาก (Yield Point) ที่แรงกระทำไม่เกิน 10 N

Nondestructive Determination of Quality of Mangosteen
Using Near Infrared (NIR) Spectroscopy

Panlop Thongnaim

Pailin Chaitree

Savitree Nintuy

Associate Professor Panmanas Sirisomboon Advisor

2001

Abstract

This paper presents a research which was to investigate the quality of mangosteens by nondestructive evaluation using near-infrared (NIR) spectroscopy. It was found that near-infrared (NIR) spectroscopy was not able to separate the defected mangosteens from the good ones, but their texture properties can be detectable with two parameters. The first parameter is the hardness at 30 N forces, the results showed that the multiple correlation coefficient (R) is 0.92, the standard error of estimate (SEE) is 0.879 N/mm, the standard error of prediction (SEP) is 1.016 N/mm and the bias is 3.906×10^{-15} N/mm. The second parameter is the degree of elasticity, the results showed that the values are 0.92, 0.077, 0.076 and 3.706×10^{-16} , respectively. According to the plate compression test, the mangosteens have not reached the bioyield point when the forces were not exceeded 10 N forces.

(ก.1)

สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(ก.1-ก.2)
สารบัญตาราง	(ข.1-ข2)
สารบัญรูปภาพ	(ค.1-ค.2)
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ	3
1.3 ขอบเขตของโครงการ	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 ตรวจสอบเอกสาร	4
2.1 ลักษณะทางกายภาพและชีวภาพของมังคุด	4
2.2 คุณสมบัติทางกายภาพและทางกลของมังคุด	6
2.3 Near Infrared (NIR) Spectroscopy	7
บทที่ 3 การดำเนินการทดลองและผลการทดลองเบื้องต้น	23
3.1 การดำเนินการทดลอง	23
3.1.1 ศึกษาองค์ประกอบทางกายภาพและลักษณะคุณภาพของผลมังคุด	23
3.1.2 ศึกษาความแน่นเนื้อของผลมังคุดด้วย Universal Testing Machine	27
3.1.3 Near Infrared (NIR) Spectroscopy	29
3.2 ผลการทดลองเบื้องต้น	32
บทที่ 4 วิจัยณ์ผลการทดลอง	41
บทที่ 5 การดำเนินการทดลองและผลการทดลองจริง	50
5.1 การดำเนินการทดลอง	50
5.1.1 ศึกษาองค์ประกอบทางกายภาพและลักษณะคุณภาพของผลมังคุด	50
5.1.2 ศึกษาความแน่นเนื้อของผลมังคุดด้วย Universal Testing Machine	51
5.1.3 Near Infrared (NIR) Spectroscopy	52
5.2 ผลการทดลองจริง	54

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(ก.2)

สารบัญ

	หน้า
บทที่ 6 วิจัยผลการทดลอง	79
บทที่ 7 สรุปผลการทดลอง	122
บทที่ 8 สรุปการทำโครงการ	123
ภาคผนวก	
ภาคผนวกที่ 1	
ภาคผนวกที่ 2	
กิตติกรรมประกาศ	
เอกสารอ้างอิง	



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(ข.1)

สารบัญตาราง

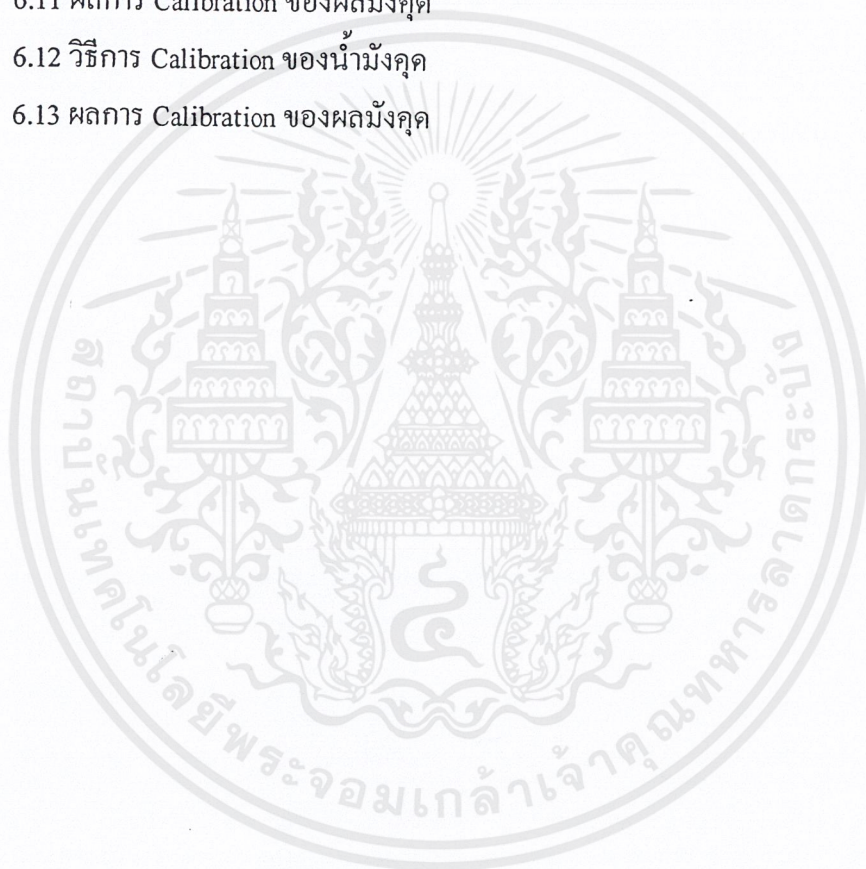
ตารางที่	หน้า
2.1 ช่วงต่างๆของอินฟราเรดสเปกตรัม	8
2.2 รายการสัญลักษณ์ที่ใช้ในPartial Least-squares regression	17
3.1 ขนาด น้ำหนักและลักษณะผิวเปลือกของผลมังคุด	32
3.2 ปริมาตรและความหนาแน่นของมังคุด	33
3.3 ค่า Soluble solidsและลักษณะเนื้อผล	34
3.4 ค่า Texture Properties	37
4.1ระดับการคัดขนาด	41
4.2 ระดับลักษณะผิวเปลือกภายนอกของผลมังคุดจำนวน 18 ผล	42
4.3 พิกัด ค่าเฉลี่ย ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของผลการทดลอง	45
5.1 ขนาด น้ำหนักและลักษณะผิวเปลือกของผลมังคุด	54
5.2 ปริมาตรและความหนาแน่นของมังคุด	58
5.3 ลักษณะเนื้อผลและค่า Soluble solids	62
5.4 ค่า Texture Properties ที่แรง 10N	72
5.5 ค่า Texture Properties ที่แรง 30N	75
6.1 ค่าของผลการทดลองทางกายภาพ	79
6.2 ค่าของผลการทดลองความแน่นเนื้อ	80
6.3 ระดับลักษณะผิวเปลือกภายนอกของผลมังคุด	80
6.4 วิธีการ Calibration Spectrum ของผลมังคุด	96
6.5 ค่าที่ได้จากการ Calibration ของผลมังคุด	102
6.6 ค่าที่ได้จากการ Calibration ของผลมังคุด	103
6.7 Calibration ของน้ำมังคุด	107
6.8 ค่าที่ได้จากการ Calibration ของน้ำมังคุด	114
6.9 ค่าที่ได้จากการ Calibration ของน้ำมังคุด	115
6.10 วิธีการ Calibration ของผลมังคุด	118

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(ข.2)

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
6.11 ผลการ Calibration ของผลมังคุด	119
6.12 วิธีการ Calibration ของน้ำมังคุด	120
6.13 ผลการ Calibration ของผลมังคุด	120



(ค.1)

สารบัญรูปภาพ

รูปที่	หน้า
2.1 การเกิดอันตรกิริยาของสารกับการแผ่รังสีหรือแสง	9
2.2 กระบวนการเกิดการกระตุ้น	9
2.3 แผนภาพองค์ประกอบเครื่อง Near-Infrared Spectroscopy	12
3.1 เส้นผ่าศูนย์กลางของผลมังคุด	24
3.2 การหาปริมาตรและความหนาแน่นของมังคุด	26
3.3 Refractometer	27
3.4 ลักษณะการวางมังคุดบนภาชนะรองรับและตำแหน่งของ plate กด	28
3.5 ลักษณะการวางผลมังคุด	30
3.6 การ scan ผลมังคุด	30
3.7 เครื่อง NIR Spectrometer	31
3.8 กราฟผลการทดลอง Compression Test และ Relaxation Test	36
3.9 Spectrum ที่ scan จากผลมังคุด	39
4.1 เปอร์เซ็นต์ของปริมาณผลแยกตามระดับขนาด	41
4.2 เปอร์เซ็นต์ของปริมาณผลแยกตามระดับผิวเปลือกผลมังคุด	42
4.3 เปอร์เซ็นต์ของปริมาณผลแยกตามระดับปริมาตร	43
4.4 เปอร์เซ็นต์ของปริมาณผลแยกตามระดับความหนาแน่น	43
4.5 เปอร์เซ็นต์ของปริมาณผลแยกตามระดับความถ่วงจำเพาะ	44
4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดและน้ำหนัก	46
4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดและปริมาตร	47
4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นกับลักษณะเนื้อผล	48
4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า %Brix กับลักษณะเนื้อผล	49
5.1 การทดสอบด้วยวิธี Compression Test	52
5.2 กราฟผลการทดลอง Compression Test และ Relaxation Test ที่แรง 10 N	70
5.3 กราฟผลการทดลอง Compression Test และ Relaxation Test ที่แรง 30 N	71
5.4 NIR Original Spectra ของผลมังคุด	77
5.5 NIR Original Spectra ของน้ำมังคุด	78

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพ

รูปที่	หน้า
6.1 ปริมาณผลมั่งคุดที่แยกตามลักษณะผิว	81
6.2 ปริมาณผลมั่งคุดที่แยกตามลักษณะเนื้อ	82
6.3 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดและน้ำหนัก	83
6.4 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดและปริมาตร	84
6.5 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักและปริมาตร	84
6.6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นกับขนาด	85
6.7 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นกับน้ำหนัก	85
6.8 ความสัมพันธ์ระหว่าง Soluble Solids กับปริมาตร	86
6.9 ความสัมพันธ์ระหว่าง Soluble Solids กับความหนาแน่น	86
6.10 ความสัมพันธ์ระหว่าง Hardness กับปริมาตรที่แรงกระทำ 30 N	87
6.11 ความสัมพันธ์ระหว่าง Hardness กับความหนาแน่นที่แรงกระทำ 30 N	87
6.12 ความสัมพันธ์ระหว่าง Hardness กับ Soluble Solids ที่แรงกระทำ 30 N	88
6.13 ความสัมพันธ์ระหว่าง Relaxation กับปริมาตรที่แรงกระทำ 10 N	88
6.14 ความสัมพันธ์ระหว่าง Degree of Elasticity กับปริมาตรที่แรงกระทำ 30 N	89
6.15 ความสัมพันธ์ระหว่าง Degree of Elasticity กับความหนาแน่น ที่แรงกระทำ 30 N	89
6.16 ความสัมพันธ์ระหว่าง Energy absorption กับปริมาตรที่แรงกระทำ 30 N	90
6.17 ความสัมพันธ์ระหว่าง Energy absorption กับความหนาแน่น ที่แรงกระทำ 30 N	90
6.18 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นกับลักษณะเนื้อ	91
6.19 ความสัมพันธ์ระหว่าง Soluble Solids กับลักษณะเนื้อ	92
6.20 ความสัมพันธ์ระหว่าง Hardness กับลักษณะเนื้อที่แรงกระทำ 10 N	93
6.21 ความสัมพันธ์ระหว่าง Hardness กับลักษณะเนื้อที่แรงกระทำ 30 N	93
6.22 สมการ Calibration of Hardness at 30 N	104
6.23 สมการ Calibration of Degree of elasticity at 30 N	105

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

มังคุด (*Garcinia mangostana* L.) อยู่ในวงศ์ Guttiferae ซึ่งมีถิ่นกำเนิดอยู่ในเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ เป็นผลไม้เขตร้อนชนิดหนึ่งที่มีรสชาติดี มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 3.5-7.0 เซนติเมตร เมื่อผลแก่จัดจะมีสีม่วงแดงหรือสีม่วงดำ น้ำหนักประมาณ 30-160 กรัมต่อผล และตลาดมีความต้องการมังคุดที่มีผลขนาดใหญ่ น้ำหนักผลมากกว่า 100 กรัมขึ้นไปต่อผล หรือประมาณ 8-10 ผลต่อ 1 กิโลกรัม ผิวผลเกลี้ยงสะอาด ไม่มีน้ำยางสีเหลืองเปรอะเปื้อนเนื้อผล (เรียกอาการยางตกใน) เนื้อผลอ่อนนุ่มมีสีขาวไม่มีลักษณะเป็นเนื้อแก้ว (เนื้อผลมีลักษณะใสแข็ง) และเนื้อผลไม่ขำเสียหรือเน่า (นิรนาม 2530 อ้างจาก ธนะชัย 2534)

มังคุดเป็นผลไม้ที่จัดว่าได้รับความนิยมในการรับประทานมากที่สุด จนได้รับการยกย่องให้เป็นราชินีแห่งผลไม้และเป็นผลไม้ที่มีการส่งออกสูงสุดชนิดหนึ่ง แต่มูลค่าและปริมาณการส่งออกของมังคุดก็ยังไม่สามารถเพิ่มขึ้นได้ดีเท่าที่ควร ทั้งนี้เนื่องมาจากยังขาดวิธีการคัดคุณภาพของผลมังคุดอย่างมีประสิทธิภาพ ทำให้มังคุดที่ส่งออกไปจำหน่ายยังต่างประเทศมีคุณภาพไม่ดีนัก เช่น มีผลเน่าเสียปะปนอยู่กับผลดี หรือมีผลที่มีลักษณะเป็นเนื้อแก้วปะปนอยู่กับผลที่มีเนื้อปกติ เป็นต้น ดังนั้นการพัฒนาทางด้านการตลาดเพื่อการส่งออกจึงไม่สามารถพัฒนาได้อย่างมีประสิทธิภาพ หรือแม้กระทั่งการพัฒนาทางการตลาดภายในประเทศก็ตาม ผู้บริโภคส่วนใหญ่มักพบว่า ผลไม้ชนิดนี้มีผลเสียปะปนอยู่กับผลดี ทั้งๆ ที่ผู้บริโภคยินดีที่จะซื้อในราคาแพง เพื่อที่จะได้บริโภคมังคุดที่มีคุณภาพดีทุกผล ถึงแม้ว่าจะมีการรณรงค์เกี่ยวกับการผลิตผลมังคุดให้มีคุณภาพดีมานานหลายปีแล้วก็ตาม แต่ผู้บริโภคก็ยังประสบปัญหาเรื่องการซื้อมังคุด ซึ่งมีผลเสียปะปนอยู่กับผลดีจำนวนมากเช่นเดิม ทั้งนี้เพราะผู้ผลิตและผู้จำหน่ายยังขาดวิธีการในการคัดคุณภาพและการรักษาคุณภาพของผลมังคุดที่มีประสิทธิภาพ

การที่ผลมังคุดมีคุณภาพไม่ดีและมีผลเสียปะปนอยู่ในผลดีอาจจะแบ่งสาเหตุได้ 2 ประเด็นใหญ่ๆ คือ การเก็บเกี่ยวผลมังคุดโดยไม่ได้รับการเอาใจใส่เท่าที่ควร และ ผลมังคุดไม่ได้รับการคัดเลือกลักษณะการเก็บเกี่ยวมาแล้วและไม่มีการแบ่งแยกเอาผลเสียออกจากผลดี (สุรพงษ์ 2532 อ้างจาก ธนะชัย 2534) ปัญหาที่สำคัญอีกอย่างหนึ่งคือ การเปลี่ยนแปลงของเนื้อผลจากขาวขุ่นเป็นใส และจากเนื้อที่อ่อนนุ่มกลายเป็นค่อนข้างแข็ง อาการดังกล่าวเรียกว่า อาการเนื้อแก้ว ซึ่งไม่สามารถตรวจสอบได้จากภายนอก ลักษณะของมังคุดเนื้อแก้ว คือ เนื้อของมังคุดจะมีสีใส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เป็นบางส่วนหรือเป็นทั้งผลและเนื้อจะกรอบกว่ามังคุดทั่วไป การเกิดเนื้อแกว้นนั้นมักจะเกิดกับเมล็ดที่ใหญ่ที่สุดในผล ในขณะที่ยวกันเปลือกค้ำนในส่วนที่ติดกับเนื้อผลจะมีอาการจ้ำน้ำด้วย (ธนะชัย 2530 อ้างจาก ธนะชัย 2534) และถ้าเป็นทั้งผลจะทำให้มังคุดเสียคุณภาพ อาจทำให้เปลือกแข็ง และถือว่ามังคุดที่เป็นเนื้อแกว้นนั้นเป็นมังคุดเสีย ต้องคัดออกก่อนจะส่งไปยังตลาดเพื่อจำหน่ายทั้งในและนอกประเทศ ซึ่งสาเหตุของมังคุดเนื้อแกว้นนั้นยังไม่เป็นที่ทราบแน่ชัด ข้อเสนอแนะเรื่องมังคุดเนื้อแกว้นมีหลายประการ เช่น เกิดจากการได้รับความกระทบกระเทือน หรือเกิดจากความสมดุลย์ของธาตุอาหาร แต่ก็ยังไม่มียวิธีโดยอมรับและได้รับการพิสูจน์ (นิวัฒน์ 2532 อ้างจาก ธนะชัย 2534) หรืออาจเกิดจากการที่ผลมังคุดได้รับน้ำในสัดส่วนที่มากเกินไปปกติ (ธนะชัย 2534)

การที่ไม่สามารถคัดแยกคุณภาพของผลมังคุดได้นั้นเป็นอุปสรรคต่อการเก็บรักษาผลมังคุดทั้งในแง่การศึกษาวิจัยและการค้าด้วย เนื่องจากทำให้อัตราการเน่าเสียของผลมังคุดมีความผันแปรไม่แน่นอน ดังรายงานการทดลองรักษาผลมังคุดไว้ในอุณหภูมิต่างๆ กัน (กวิศร์และสุรพงษ์ 2522 อ้างจาก สมศักดิ์ 2538) และการเก็บรักษาผลมังคุดที่เน่าเสียปะปนกับผลดีเท่ากับ เป็นการชักนำให้ผลดีเน่าเสียไปด้วย

ปัจจุบันการศึกษาเรื่องการคัดคุณภาพของผลมังคุดมีน้อยมากซึ่งการศึกษาหาวิธีการคัดแยกคุณภาพของผลมังคุดที่มีประสิทธิภาพนั้นจะเป็นประโยชน์อย่างยิ่งสำหรับการผลิต การเก็บรักษาและการตลาดของมังคุด

ในปัจจุบันการคัดแยกคุณภาพของผลมังคุดนอกจากผ่าผลมังคุดเพื่อตรวจสอบคุณภาพภายในผลแล้วก็ใช้วิธีบีบผลเพื่อตรวจสอบว่าเปลือกแข็งหรือไม่ หรืออาจนำผลมังคุดไปลอยน้ำว่าลอยน้ำได้หรือไม่ ซึ่งวิธีการเหล่านี้เป็นลักษณะภายนอกที่อาจจะบ่งชี้ได้ว่าเนื้อผลภายในรับประทานได้หรือไม่ ส่วนวิธีการอื่นๆก็ยังไม่มียประสิทธิภาพเพียงพอเพราะไม่สามารถแยกผลมังคุดดีกับผลเสียได้ และยังไม่สามารถแยกผลที่เป็นเนื้อแกว้นออกจากผลปกติได้ การที่ไม่สามารถตรวจสอบอาการเนื้อแกว้นได้จากภายนอกนั้นอาจจะเป็นผลเสียต่อการส่งออกมังคุดเพราะการควบคุมคุณภาพเป็นไปได้ยาก

ดังนั้นจะเห็นได้ว่า ถ้าต้องการตรวจสอบคุณภาพภายในของผลมังคุดเพื่อคัดคุณภาพของมังคุดจะต้องทำการผ่าผลมังคุดออก ซึ่งเป็นวิธีการที่ทำลายผลของมังคุด (Destruction) จากเหตุผลดังกล่าวจึงมีผลการนำผลมังคุดมาตรวจสอบโดยวิธี NIR (Near Infrared Spectroscopy) ซึ่งสามารถตรวจสอบคุณภาพภายในของผลมังคุดได้โดยไม่ต้องทำลายผลมังคุด (Nondestruction) ซึ่งจะเป็นประโยชน์อย่างยิ่งกับกระบวนการผลิต และส่งออกผลมังคุดที่จะนำวิธี NIR Spectroscopy มาตรวจสอบผลมังคุด เพื่อคัดคุณภาพของผลมังคุดต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

เพื่อศึกษาลักษณะคุณสมบัติทางกายภาพของผลมังคุดที่มีลักษณะเป็น เนื้อแก้วเปรียบเทียบกับผลที่มีเนื้อปกติ และตรวจสอบคุณภาพภายในของผลมังคุดโดยวิธีการไม่ทำลายด้วยวิธี NIR Spectroscopy

1.3 ขอบเขตของโครงการ

ศึกษาค้นคว้าพร้อมทั้งตรวจสอบคุณภาพภายในของผลมังคุด โดยวิธีการไม่ทำลายด้วยวิธี NIR Spectroscopy โดยพิจารณาลักษณะทางกายภาพและคุณสมบัติต่าง ๆ ดังนี้

1. Texture Properties ได้แก่
 - Hardness (N/mm)
 - Relaxation (%)
 - Degree of Elasticity
 - Energy Absorption (N mm)
2. Soluble Solids (% Brix)
3. ลักษณะคุณภาพเนื้อมังคุด

นำผลที่ได้จากการศึกษาและทดสอบไปวิเคราะห์และสรุปลักษณะภายในของผลมังคุดที่มีความสัมพันธ์กับ NIR Spectrum

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถตรวจสอบคุณภาพภายในของผลมังคุดได้โดยไม่ทำให้ผลมังคุดเกิดการเสียหาย
2. นำหลักการการตรวจสอบไปปรับใช้ในกระบวนการคัดคุณภาพของผลมังคุด เพื่อการบริโภคและการส่งออกให้เป็นที่ยอมรับและได้มาตรฐาน

บทที่ 2

ตรวจเอกสาร

2.1 ลักษณะทางกายภาพและชีวภาพของมังคุด

มังคุด (*Garcinia mangostana* L.) เป็นไม้ผลเขตร้อน อยู่ในวงศ์ Guttiferae (Graf 1986 อ้างจาก วรภัทร 2539) มีถิ่นกำเนิดแถบคาบสมุทรมลายูหรือเอเชียตะวันออกเฉียงใต้แถบประเทศมาเลเซีย พม่า ไทย กัมพูชา เวียดนาม และหมู่เกาะซุนด้า (Oches 1961 อ้างจาก วรภัทร 2539) ประเทศไทยปลูกมังคุดได้ทั้งในภาคกลาง ภาคตะวันออก และภาคใต้ โดยมีแหล่งเพาะปลูกที่สำคัญอยู่ในจังหวัดนนทบุรี ปราจีนบุรี ระยอง จันทบุรี ตรัง สุราษฎร์ธานี ชุมพร และ นครศรีธรรมราช (สุรศักดิ์ 2531 อ้างจาก วรภัทร 2539)

มังคุดจะเจริญเติบโตดีในเขตร้อนชื้นมีฝนตกชุกและมีการกระจายตัวของฝนดี ปริมาณฝนที่พอเหมาะสมควรต่อการเจริญเติบโตคือประมาณ 1,200 มิลลิเมตรต่อปี อุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการเจริญเติบโตอยู่ในช่วง 23-35°C มีความชื้นสัมพัทธ์สูงกว่า 80 เปอร์เซ็นต์ หน้าดินลึก และมีอินทรีย์วัตถุสูง (Watson 1978 อ้างจาก สมศักดิ์ 2538) ผลมังคุดมีลักษณะค่อนข้างกลมเมื่อผลยังเปลือกมีสีเขียวเข้มและมียางสีเหลืองอยู่มาก เนื้อสีขาวขุ่นมีลักษณะเป็น aril ที่เจริญมาจาก integument (Bailey 1953 อ้างจาก สมโภชน์ 2535) เรียงกันอยู่ 7-8 กลีบ เมื่อสุก สีเปลือกผลจะเปลี่ยนจากเขียวเป็นแดง ชมพู หรือม่วง (เกียรติเกษมและคณะ 2530 อ้างจาก สมศักดิ์ 2538) ลักษณะผลเป็นแบบ berry มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 3.5-7.0 เซนติเมตร (กวิศร์และสุรพงษ์ 2522 อ้างจาก สมศักดิ์ 2538, Oshse 1961 อ้างจาก วรภัทร 2539) เปลือกผลหนา 0.8-1.0 เซนติเมตร (กวิศร์และสุรพงษ์ 2522, Chandler 1950 อ้างจาก สมศักดิ์ 2538) มีรสฝาด มียางสีเหลือง (กวิศร์และสุรพงษ์ 2522 อ้างจาก สมศักดิ์ 2538, Oshse 1961 อ้างจาก วรภัทร 2539) มีต่อมน้ำยางอยู่มาก (เกียรติเกษมและคณะ 2530 อ้างจาก สมศักดิ์ 2538)

ผลมังคุดมีการเจริญเติบโตตั้งแต่เริ่มติดผลจนกระทั่งเก็บเกี่ยวได้ใช้เวลา 11-12 สัปดาห์ (กวิศร์และสุรพงษ์ 2522 อ้างจาก สมศักดิ์ 2538) การเจริญเติบโตของมังคุดในช่วง 4 สัปดาห์แรกมีอัตราใกล้เคียงกันระหว่างความกว้างและความสูง และเป็นขึ้นเมื่อผลมีอายุ 7 สัปดาห์ ในขณะที่ส่วนของเนื้อเปลี่ยนจากขาวขุ่นเป็นขาวใส จนกระทั่งสัปดาห์ที่ 10 เมล็ดซึ่งเดิมเป็นสีเขียวจะเปลี่ยนเป็นสีเหลือง เปลือกผลยังคงเป็นสีเขียวตองอ่อน (กวิศร์และสุรพงษ์ 2522 อ้างจาก สมศักดิ์ 2538) ระยะนี้สามารถดึงให้ผลเริ่มหลุดจากกิ่งได้ง่าย (Tongdee และ Suwanagul 1989 อ้าง

จาก สมศักดิ์ 2538) ก่อนที่ผลจะเปลี่ยนเป็นสีม่วงเข้มและร่วงหล่นเองตามธรรมชาติ (Watson 1978 อ้างจาก สมศักดิ์ 2538)

การเก็บเกี่ยวผลม้งคุดส่วนใหญ่ใช้คุณสมบัติของตัวผลไม้เองมาผสมผสานร่วมกัน โดยอาศัยลักษณะที่มองเห็นได้จากภายนอก เช่น ขนาดของผล สีของเปลือก การเกิดนวล เป็นต้น และองค์ประกอบทางเคมีของผล ได้แก่ soluble solids (SS) titratable acidity (TA) และ total sugars (TS) เป็นต้น ดังนั้นการเก็บเกี่ยวของผลม้งคุดที่ชาวสวนนิยมปฏิบัติจะเป็นการสังเกตการพัฒนาสีของผลเป็นหลักโดยสถาบันวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย(2531 อ้างจาก วรภัทร 2539) ได้ลำดับสีของม้งคุดออกเป็น 7 ระดับ ตั้งแต่ 0-6 เพื่อใช้เป็นดัชนีเก็บเกี่ยวดังนี้

ระยะ 0 ผลมีสีเขียวอมเหลืองสม่ำเสมอ หรือมีสีเขียวอมเหลืองเต็มด้วยสีเขียวอ่อน หรือ จุดสีเทา มียางสีเหลืองภายในเปลือกในระดับรุนแรงมาก เนื้อและเปลือกไม่สามารถแยกออกจากกัน ได้

ระยะ 1 ผลมีสีเหลืองอ่อนอมเขียว มีจุดสีชมพูกระจายอยู่บางส่วนของผิวผล ภายนอกในเปลือกยังคงมีอยู่ในระดับรุนแรง เนื้อและเปลือกยังไม่สามารถแยกออกจากกัน ได้

ระยะ 2 ผลมีสีเหลืองอ่อนอมชมพู มีประสีชมพูกระจายไปทั่วทั้งผล ภายนอกได้ เปลือกยังมีอยู่ในระดับปานกลาง การแยกตัวระหว่างเนื้อและเปลือกทำได้ยากถึงปานกลาง

ระยะ 3 ผลมีสีชมพูสม่ำเสมอ ประสีชมพูเริ่มขยายเข้ามารวมกันไม่แบ่งแยกกันอย่างชัดเจนเหมือนในระยะ 2 ภายนอกในเปลือกยังคงมีอยู่น้อยถึงน้อยมาก การแยกตัวระหว่างเนื้อและเปลือก ทำได้ง่ายกว่าระยะ 2

ระยะ 4 ผลมีสีแดงหรือน้ำตาลอมแดง บางครั้งมีแต้มสีม่วง ภายนอกได้เปลือกมีน้อยมากจนถึงไม่มี การแยกตัวระหว่างเนื้อและเปลือกทำได้ง่าย

ระยะ 5 ผลมีสีม่วงแดง ภายนอกไม่มียางเหลืออยู่ เนื้อและเปลือกสามารถแยกออกจากกันได้ง่าย

ระยะ 6 ผลมีสีม่วงเข้มจนถึงดำ ภายนอกไม่มียางเหลืออยู่ เนื้อและเปลือกแยกออกจากกันได้ง่าย

ลักษณะนิสัยในการเจริญเติบโตและออกดอกติดผลจนเก็บเกี่ยวได้ของม้งคุดจะมีความสัมพันธ์กันอย่างมากกับปริมาณน้ำฝนและความชื้นในแต่ละรอบปี โดยจะส่งผลถึงคุณภาพของม้งคุด เช่น ผลมีขนาดเล็ก ยางไหล เป็นโรคเน่าเสีย และอาการเนื้อแก้วของม้งคุด โดยเฉพาะอาการเนื้อแก้ว เมื่อเกิดอาการนี้แล้วเนื้อผลปกติอ่อนนุ่มสีขาว จะเปลี่ยนเป็นใสและแข็งเหมือนวุ้น ไม่สามารถที่จะตรวจสอบอาการเนื้อแก้วได้จากภายนอก และยังไม่ทราบสาเหตุที่แน่นอน (สุรจิตติ 2531 อ้างจาก วรภัทร 2539) ต่อมา ศรียนต์ (2529 อ้างจาก วรภัทร 2539) ได้เสนอแนวความคิดว่าในเนื้อผลปกติมีอากาศแทรกอยู่ในช่องว่างระหว่างเซลล์ ทำให้เห็นเป็นสีขาวเช่นเดียวกับน้ำแข็งที่มีฟองอากาศแทรกอยู่ ซึ่งจะเห็นน้ำแข็งเป็นสีขาวขุ่น ขณะที่เนื้อแก้วนั้นเซลล์ได้รับ

น้ำมากเกินไปทำให้แรงดันภายในเซลล์เพิ่มมากขึ้นจนดันให้เยื่อหุ้มเซลล์ฉีกขาด น้ำเข้าไปแทนที่อากาศในช่องว่างระหว่างเซลล์ทำให้เห็นเนื้อผลใสเหมือนกับน้ำแข็งที่ไม่มีฟองอากาศแทรกอยู่ภายใน นอกจากนั้นการเปลี่ยนแปลงของสารบางอย่างอาจทำให้เกิดการแข็งตัวของเนื้อเยื่อขึ้น เช่น การสะสมสารประกอบพอลิเพกติน (Pectin) ในรูปที่ไม่ละลายน้ำใน middle lamella มากกว่าปกติ

จากการสำรวจและสอบถามเกษตรกรในแหล่งปลูกมังคุดที่สำคัญๆ ถึงสาเหตุของการเกิดเนื้อแก้วในผลมังคุดของศรีสะเกษ (2537 อ้างจาก วรภัทร 2539) พบว่าพบอาการดังกล่าวเมื่อเก็บเกี่ยวผลมังคุดหลังฝนตกและจากการศึกษาข้อมูลอากาศพบว่าปริมาณน้ำฝนที่มากประกอบกับความชื้นสัมพัทธ์ที่สูง และแสงแดดน้อยมีความสัมพันธ์กับการเกิดอาการเนื้อแก้วของมังคุด กล่าวคือถ้าปริมาณน้ำฝนมากมักพบผลที่เป็นเนื้อแก้วและความรุนแรงของอาการเนื้อแก้วมากตามไปด้วย และจากการให้น้ำกับต้นมังคุดประมาณ 75 มม./วัน เปรียบเทียบกับการให้น้ำปกติประมาณ 15-20 มม./วัน พบว่าต้นที่ได้รับน้ำมากมีแนวโน้มเกิดอาการเนื้อแก้วมากกว่าต้นที่ได้รับน้ำน้อยแต่ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ นอกจากนี้ สมชาย (2535 อ้างจาก วรภัทร 2539) ยังรายงานว่าถ้าหากมีปริมาณน้ำฝนมากจะพบว่าผลแตกร้าวกลางผลโดยผิวด้านนอกของเปลือกมังคุดจะแตกเป็นแนวขวางและแนวนอนคู่คล้ายกับผลมังคุดร้าวไปหมดทั้งผลและยังพบอาการเนื้อแก้วและยางไหลในผลมังคุดที่แตกเหล่านั้น

2.2 คุณสมบัติทางกายภาพและทางกลของมังคุด

การตรวจสอบคุณภาพของผลมังคุดและการคัดแยกระดับชั้นจะพิจารณาได้หลายๆ ลักษณะ วิธีการตรวจสอบที่ผ่านมาจะมีการประเมินคุณภาพภายในของผลมังคุดด้วยเทคนิคความถ่วงจำเพาะ เพื่อคัดแยกลักษณะเนื้อผลภายในที่ผิดปกติ (เนื้อแก้วและยางไหล) นอกจากนี้ยังมีการศึกษาองค์ประกอบทางเคมีและปัจจัยของน้ำที่มีผลต่อการเกิดเนื้อแก้วในผลมังคุด (วรภัทร 2539) โดยเปรียบเทียบปัจจัยต่าง ๆ คือ ของแข็งที่ละลายได้ (Soluble solids) ความแน่นเนื้อ (Firmness) ซึ่งวิธีการเหล่านี้ทำให้ทราบถึงคุณภาพของเนื้อภายในผลมังคุด

2.3 Near-Infrared Spectroscopy

การยอมรับในคุณภาพของผักผลไม้ของผู้บริโภค นอกเหนือจากคุณภาพภายนอกที่เห็นแล้ว ปัจจุบันคุณภาพภายในก็เป็นส่วนที่สำคัญที่ต้องนำมาพิจารณาด้วยเช่นกัน รสชาติ และความแน่นเนื้อ การคัดคุณภาพจึงควรพิจารณาถึงความเสียหายที่อาจส่งผลกระทบต่อคุณภาพของผลไม้ ดังนั้น วิธีการทดสอบแบบไม่ทำลาย (non destructive method) จึงนำมาใช้เพื่อจุดประสงค์ดังกล่าว คำอธิบายเรื่อง Near-Infrared Spectroscopy ได้ทำการประมวลความรู้จาก แม้น 2539

Near-Infrared Spectroscopy เป็นเทคนิคอย่างหนึ่งที่นิยมใช้ในการวิเคราะห์ ตรวจสอบ พิสูจน์ และศึกษาเกี่ยวกับโมเลกุลของสาร ซึ่งอาจอยู่ในสถานะของแข็ง หรือของเหลว คือ เป็นข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับการเกิดการสั่น (vibration) ของโมเลกุล Near-Infrared Spectroscopy เป็นเรื่องที่เกี่ยวข้องกับการดูดกลืนรังสี Near-Infrared ของสาร พลังงานบางส่วนถูกถ่ายเทไปยังโมเลกุลทำให้เกิดการสั่นของโมเลกุลแล้วเกิดการกระเจิงออกไป

การศึกษาค้นคว้าเกี่ยวกับ Infrared นี้ได้ดำเนินมาเป็นเวลานานแล้ว ตั้งแต่ปี ค.ศ. 1800 Sir William Herschel ได้ศึกษาเกี่ยวกับ heating effect ในช่วงต่าง ๆ ของสเปกตรัมและพบว่า heating effect มีมากที่สุดแถบของสเปกตรัมที่เลยสีแดง (red end) ไปแล้ว และในช่วงปลายของศตวรรษที่ 19 ได้เริ่มมีการศึกษา Infrared Spectrum แล้ว ในปี ค.ศ. 1910 Coblentz ได้ศึกษาการดูดกลืนแสง Infrared Spectrum ของสารต่าง ๆ และได้สร้างความสัมพันธ์ Infrared Spectrum กับ โครงสร้างของสารขึ้น ซึ่งยังคงใช้อยู่จนกระทั่งปัจจุบันนี้

ในปี ค.ศ. 1939-1945 ได้มีการศึกษาและนำไปใช้ประโยชน์ของ Infrared Spectroscopy อย่างกว้างขวาง โดยเฉพาะอย่างยิ่งในการวิเคราะห์ของผสมพวกไฮโดรคาร์บอนและสารในกลุ่มใกล้เคียงกันได้ดี จึงมีผู้วิจัยด้านนี้มากขึ้น ทั้งเครื่องมืออิเล็กทรอนิกส์และเครื่องวัดที่มีสภาพไวสูง ๆ จนกระทั่งสร้างเครื่องมือทั้งชนิดค่าแสงเดี่ยวและค่าแสงคู่ขึ้นมาใช้ในการศึกษา เพื่อนำไปสู่การวิเคราะห์เชิงคุณภาพและเชิงปริมาณของสารที่สนใจ

Infrared เป็นช่วงหนึ่งของสเปกตรัมของการแผ่รังสีแม่เหล็กไฟฟ้าซึ่งมี wave numbers อยู่ในช่วงประมาณ $12,800$ ถึง 10 cm^{-1} หรือมีช่วงความยาวคลื่นจาก 0.78 ถึง $1,000 \text{ }\mu\text{m}$ เพื่อให้ง่ายและสะดวกขึ้นจะแบ่งช่วงของ Infrared Spectrum ออกเป็น 3 ช่วงคือ

ช่วงใกล้อินฟราเรด (Near-Infrared region) หรือ overtone region (ดูตารางที่ 2.1) เกิดจากการรวมกันของ Infrared ที่อยู่ในช่วงกลาง (นั่นคือเป็น $2\nu, 3\nu$ เป็นต้น เมื่อ ν คือ ความถี่) หรือช่วงที่ต่ำกว่า $2.5 \text{ }\mu\text{m}$ และมักจะพบว่า absorption band ที่ได้ค่อนข้างต่ำ (weak) overtone absorption มีประโยชน์ในการวิเคราะห์สารพวก aromatic

ช่วงกลางอินฟราเรด (Middle-Infrared region) หรือ fundamental region (ดูตารางที่ 2.1)

ยังแบ่งออกได้เป็น
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. group-frequency region เป็นช่วงที่อยู่ระหว่าง $4,000-1,300 \text{ cm}^{-1}$ หรือ $2.5-8 \text{ }\mu\text{m}$
 2. finger print region เป็นช่วงที่อยู่ระหว่าง $1,300-650 \text{ cm}^{-1}$ สเปกตรัมที่ได้ในช่วงนี้ส่วนใหญ่เกิดจากโครงสร้างของโมเลกุลที่สมบูรณ์ ดังนั้นสเปกตรัมที่ได้จึงค่อนข้างยุ่งยาก การวิเคราะห์จึงต้องใช้วิธีเปรียบเทียบกับสเปกตรัมของสารที่ทราบโครงสร้างแล้ว
- ช่วงไกลอินฟราเรด (Far-Infrared region) ช่วงนี้ไม่ค่อยจะได้ใช้ในการวิเคราะห์เนื่องจากสเปกตรัมช่วงนี้มักเกิดจากการสั่นของโครงสร้าง (molecular structure)
- ช่วงที่จะใช้ประโยชน์ในการวิเคราะห์ คือ จาก $4,000$ ถึง 400 cm^{-1} หรือ 2.5 ถึง $25 \text{ }\mu\text{m}$ ดังแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ช่วงต่าง ๆ ของอินฟราเรดสเปกตรัม

ช่วง (Region)	ช่วงความยาวคลื่น (μm)	จำนวนคลื่น (Wave Number) (cm^{-1})	ช่วงความถี่ (V) (Hz)
ช่วงใกล้	0.78-2.5	12,800-4,000	$3.8 \times 10^4 - 1.2 \times 10^{14}$
ช่วงกลาง	2.5-50	4,000-200	$1.2 \times 10^{14} - 6.0 \times 10^{12}$
ช่วงไกล	50-1,000	200-10	$6.0 \times 10^{12} - 3.0 \times 10^{11}$

เมื่อให้ลำแสงที่เคลื่อนที่อย่างต่อเนื่องกัน (continous beam of radiation) ผ่านเข้าไปในวัตถุใสจะพบว่าแสงบางส่วนถูกดูดกลืน บางส่วนเกิดการสะท้อน บางส่วนกระเจิง และบางส่วนผ่านทะลุออกไปดังแสดงในรูปที่ 2.1 ถ้าให้แสงที่ทะลุออกไปนั้นผ่านเข้าเครื่องกระจายแสง (เช่น ปริซึมหรือเกรตติง) จะเห็นว่าสเปกตรัมหายไปส่วนหนึ่ง ส่วนที่หายไปนี้เรียกว่า absorption spectrum พลังงานที่ถูกดูดกลืนไปนั้นจะทำให้โมเลกุลหรืออะตอมเปลี่ยนระดับของพลังงานจากสถานะพื้น (ground state) ไปยังสถานะกระตุ้น (excited state) ดังแสดงในรูปที่ 2.2

ตำแหน่งของ NIR Absorption Bands

ในการบอกตำแหน่ง NIR Spectrum นั้น นิยมบอกเป็นความยาวคลื่นในหน่วยนาโนเมตร (nm), ไมโครเมตร (μm) หรือบางครั้งก็บอกเป็นไมครอน (μ) อีกด้านหนึ่งของสเปกตรัมจะบอกเป็นจำนวนคลื่น (wave number, V^*)

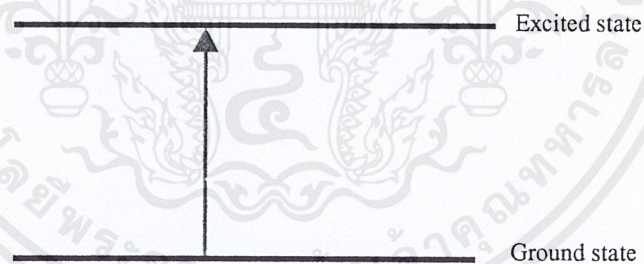
$$\begin{aligned} \nu^* &= 1/\lambda(\text{cm}) && \text{cm}^{-1} \\ &= 10^7/\lambda(\text{nm}) && \text{cm}^{-1} \\ &= 10^4/\lambda(\mu) && \text{cm}^{-1} \end{aligned}$$

แต่ความถี่ (frequency, ν) $\nu = c\nu^*$

c = ความเร็วของแสง



รูปที่ 2.1 การเกิดอันตรกิริยาของสารกับการแผ่รังสีหรือแสง



รูปที่ 2.2 กระบวนการเกิดการกระตุ้น

กระบวนการดูดกลืนแสงเนียร์อินฟราเรด (The Near-Infrared Absorption Process)

โมเลกุลของสารเคมีจะดูดกลืนแสงในช่วง Near-Infrared ได้ นั่นก็จะมีลักษณะเช่นเดียวกับการดูดกลืนแสงในช่วงยูวี-วิสิเบิล เพียงแต่ต่างกันที่ Near-Infrared มีพลังงานน้อยกว่า ดังนั้นโมเลกุลเมื่อดูดกลืนแสง Near-Infrared โมเลกุลจะถูกกระตุ้น (excite) เป็นโมเลกุลที่มีพลังงานสูงกว่าอยู่ที่สภาวะพื้น โดยมีพลังงานเปลี่ยนแปลงอยู่ในราว 2 – 10 kcal/mole ซึ่งเป็นพลังงานพอที่จะทำให้โมเลกุลเกิดการสั่น (vibration) การดูดกลืนแสง Near-Infrared ของโมเลกุลมิใช่ว่าทุกโมเลกุลของสารจะดูดกลืนแสง Near-Infrared ได้หมด แต่จะต้องมีลักษณะเฉพาะ สภาวะก็ต้องเหมาะสม

อีกด้วย คือเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. รั้งสีหรือแสงนั้นจะต้องมีพลังงานพอเหมาะพอดี (quantise)
2. จะต้องเกิดการควบคู่ (coupling) พอดีระหว่างสนามไฟฟ้าจากการแผ่รังสีกับสารนั้นเมื่อการดูดกลืนพลังงานแล้วจะทำให้เกิดโมเมนต์ขั้วคู่ (dipole moment) ของโมเลกุลนั้นเปลี่ยนไป

ดังนั้นเมื่อใช้ Near-Infrared ผ่านเข้าไปในโมเลกุลของสารใดก็ตาม แล้วเกิดปรากฏการณ์ทั้งสองอย่างข้างบนนี้เรียกสารนั้นว่า Near-Infrared active ถ้าไม่มีการเปลี่ยนโมเมนต์ขั้วคู่ แสดงว่าสารนั้นเป็น Near-Infrared inactive ถือว่าไม่มีการดูดกลืนแสง Near-Infrared ถ้ามีการเปลี่ยนแปลงโมเมนต์ขั้วคู่มากจะได้ Near-Infrared absorption peak สูงถ้าเปลี่ยนแปลงน้อยก็จะได้ weak absorption peak เช่น

สารที่มีกลุ่ม C=O ให้ strong near-Infrared absorption peak แต่กลุ่ม - C = N - ให้ weak near-Infrared absorption peak และโมเลกุลที่เป็น symmetric bond เช่น H_2 , Cl_2 , O_2 , N_2 symmetric alkenes (C=C) หรือ symmetric alkeynes (C≡C) เป็นต้นจะไม่ดูดกลืนแสง Near-Infrared

แบบต่าง ๆ ของการสั่นและการงอ (Type of Vibration and Bending)

เมื่อโมเลกุลของสารดูดกลืนแสง Near-Infrared ได้จัดว่าโมเลกุลนั้นเป็น Near-Infrared active พันธะของโมเลกุลนั้นจะเกิดการยืด (stretching) หรือ เกิดการงอ (bending) ซึ่งแบ่งออกได้เป็น

1. การยืด (stretching หรือ valency vibration) เป็นการเปลี่ยนแปลงความยาวระหว่างอะตอมที่เกิดพันธะกัน ซึ่งมีทั้ง symmetric stretching และ asymmetric stretching
2. การงอ (bending) หรือ การผิดรูป (deformation) คือ การเกิดการเปลี่ยนแปลงมุมระหว่าง 2 พันธะ ซึ่งจะมีด้วยกัน 4 แบบ คือ
 - Scissoring
 - Rocking
 - Wagging
 - Twisting

สำหรับโมเลกุลที่มีโครงสร้างง่าย ๆ ประกอบด้วยอะตอม 2-3 อะตอม เมื่อดูดกลืนแสง Near-Infrared สามารถคำนวณหาชนิดและจำนวนของการสั่นได้ แต่ถ้าโมเลกุลมีขนาดใหญ่ โครงสร้างสลับซับซ้อน การคำนวณจะทำได้ยาก ในกรณีที่โมเลกุลประกอบด้วยหลายอะตอม จะคำนวณหาชนิดหรือแบบของการสั่นได้ โดยคิดว่าอะตอมสามารถเคลื่อนไหวได้อย่างอิสระ นั่นคือ แต่ละอะตอมจะมี degree of freedom เป็น 3 (โดยใช้ three co-ordinate มาคำนวณเพื่อหาตำแหน่ง) ดังนั้น

หากโมเลกุลมี n อะตอม จะมี degree of freedom เป็น $3n$ แต่จริงๆแล้ว การเคลื่อนไหวของอะตอมในการคำนวณว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โมเลกุลนั้นถูกบังคับจากการเกิดอันตรกิริยากับอะตอมอื่นที่เกิดขึ้นระกัน จึงถูกจำกัดการเคลื่อนไหวด้วยข้อจำกัดต่อไปนี้

1. ให้ถือว่าโมเลกุลของสารนั้นเป็นอนุภาคเดี่ยว และมีมวลอยู่ที่จุดศูนย์กลาง การเคลื่อนไหวเป็นเส้นตรง โดยที่อะตอมจะอยู่เหมือนเดิม และมี degree of freedom เป็น 3
 2. พลังงานที่ใช้ในการเคลื่อนที่เป็นเส้นตรงไม่ขึ้นกับพลังงานภายในโมเลกุลนั้น
 3. โมเลกุลของสารนั้นอาจจะเกิดการหมุนรอบแกนที่ผ่านศูนย์กลางมวลโดยระยะระหว่างอะตอมต่างๆคงเดิม และอะตอมทุกอะตอมจะมี three degree of rotational freedom แต่ในกรณีที่มีโมเลกุลเป็นเส้นตรง แสดงว่าอะตอมทุกอะตอมเรียงกันเป็นเส้นตรง จึงมีการหมุนได้เพียง 2 ชนิด
 4. การเคลื่อนไหวอื่นๆของโมเลกุลถือว่าเป็นการสั่น อะตอมต่างๆมีการเปลี่ยนตำแหน่งขณะที่ตำแหน่งโดยเฉลี่ยและการจัดตัวของโมเลกุลคงที่
- ดังนั้น โมเลกุลที่ประกอบด้วย n อะตอม จะมีชนิดของการสั่นเป็น $3n-6$ แต่ถ้าโมเลกุลเป็นเส้นตรงจะมีชนิดของการสั่นเป็น $3n-5$ ทั้งนี้รวมถึงการสั่นแบบงอ (bending vibration) ด้วย แต่ในสภาพที่เป็นจริงจะพบว่า ชนิดของการสั่นที่ได้จากการทดลองจะมีมากกว่าหรือน้อยกว่าที่คำนวณเสมอ ทั้งนี้เพราะว่าบางครั้งการสั่นบางชนิดให้สัญญาณน้อยเกินไปเลยวัดไม่ได้ หรือบางครั้งเกิด overtone เช่น

$$\text{first overtone} = 2\nu \quad (\nu=0 \rightarrow \nu=2)$$

$$\text{second overtone} = 3\nu \quad (\nu=0 \rightarrow \nu=3)$$

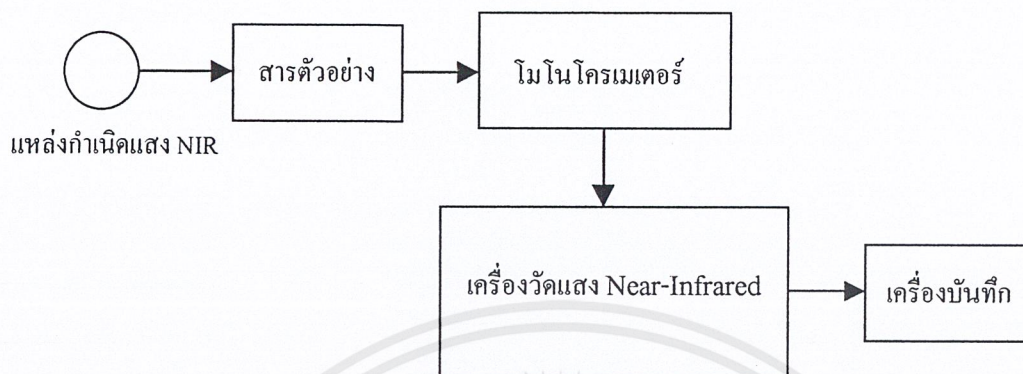
หรือบางทีอาจเกิดการหักล้างกันเป็น difference tone คือ $\nu_1 - \nu_2$

เมื่อ ν คือ ความถี่ (Hz) และ ν คือ ระดับพลังงาน

ส่วนประกอบของเครื่อง Near-Infrared Spectroscopy (NIR Spectroscopy Components)

ส่วนประกอบของเครื่อง Near-Infrared Spectroscopy ลักษณะของการจัด (arrangement) อาจแตกต่างกันบ้างขึ้นอยู่กับเทคนิคที่ใช้ในการออกแบบและความต้องการการใช้งานของผู้ออกแบบแต่ส่วนประกอบหลักที่มีความสำคัญ คือ

1. ต้นกำเนิดแสง Near-Infrared (NIR Source)
2. ช่องที่ใส่สารตัวอย่าง (Sample Compartment)
3. โมโนโครเมเตอร์ (Monochromator)
4. เครื่องวัดแสง Near-Infrared (NIR Detector)
5. เครื่องบันทึกสเปกตรัม (Recorder หรือ Readout Devices)



รูปที่ 2.3 แผนภาพองค์ประกอบของเครื่อง Near-Infrared Spectroscopy (ดัดแปลงจาก แม้น 2539)

1. ต้นกำเนิดแสง Near-Infrared (NIR sources) ที่ใช้กันทั่วไปนั้นเป็นของแข็งที่เฉื่อย ซึ่งสามารถเผาให้ร้อนด้วยไฟฟ้าจนมีอุณหภูมิที่ต้องการได้อย่างต่อเนื่อง ซึ่งจะให้แสงมีความเข้มสูงสุดที่ความถี่ตามที่ต้องการ ปัจจุบันแหล่งกำเนิดแสง NIR ที่ใช้กันอยู่ คือ Quartz Tungsten-Halogen monofilament lamp

2. ช่องที่วางสารตัวอย่างเพื่อวัด (Sample Compartment)

ส่วนที่บรรจุตัวอย่างแล้วนำไปใส่ช่องที่สำหรับวัด ซึ่งส่วนนี้จะมีฝาปิดเพื่อกันแสงจากภายนอกเข้าไป และถูกกันออกจากส่วนที่เป็นระบบอิเล็กทรอนิกส์และระบบแสง

เซลล์ที่ใช้ใส่สารตัวอย่าง (sample cell) ที่เป็นของเหลว บางครั้งเรียกว่าคิวเว็ต (cuvettes) มีด้วยกันหลายแบบ รูปร่างต่าง ๆ กัน ที่ใช้กันโดยทั่วไปมีดังนี้

เซลล์ที่ทำด้วยแก้วธรรมดา

เซลล์ที่ทำด้วยซิลิกา (silica) และ ควอร์ตซ์ (quartz)

การระวังรักษาและการทำความสะอาดเซลล์ เพื่อให้เซลล์อยู่ในสภาพที่ดีและสะอาดทุกครั้ง เมื่อใช้เซลล์แล้วควรจะต้องแช่ไว้ในกรดเจือจาง เช่น กรดไนตริก หรือ กรดโครมิก แล้วจึงล้างด้วยน้ำกลั่นให้สะอาด ไม่ควรใช้แปรงหรือใช้ผ้าทำความสะอาด เมื่อล้างสะอาดแล้วควรใช้กระดาษนุ่ม ๆ ซับน้ำให้แห้ง และควรระวังเศษกระดาษเล็ก ๆ ติดอยู่ด้วย ถ้าเซลล์นั้นสกปรกมาก ควรดัมกับกรดไนตริกเข้มข้นหรือกรดกัดทอง หรือดัมกับสารซึกฟอก 2% หรือสารละลายอิมตัวโซเดียมฟอสเฟต หลังจากนั้นล้างด้วยน้ำกลั่นให้สะอาด ในการทำให้เซลล์แห้งนั้น ทางที่ดีที่สุดควรใช้อากาศอุ่น ๆ เป่าให้แห้ง แล้วเก็บไว้ในกล่องที่มีฟองน้ำ และก่อนใช้ควรจะต้องล้างด้วยน้ำกลั่นหรือตัวทำละลายที่จะใช้เสมอ

3. โมโนโครเมเตอร์ (Monochromator)

ส่วนประกอบนี้ถือว่าเป็นหัวใจของเครื่อง Near-Infrared Spectroscopy เพราะเป็นส่วนที่ใช้ควบคุมแสงโดยจะทำให้แสงที่ออกมาจากต้นกำเนิดแสง ซึ่งเป็นพอลิโครเมติก (คือ เป็นแสงที่ประกอบด้วยแสงที่มีความยาวคลื่นต่างๆ) ให้เป็นแสงโมโนโครเมติก ซึ่งเป็นแถบแสงแคบๆ ความจริงโมโนโครเมเตอร์จะประกอบด้วย

3.1 ช่องที่ปล่อยให้แสงเข้า (entrance slit) เพื่อให้แสงที่เข้ามาแรงพอที่จะผ่านออกไปยังสารตัวอย่าง โดยคิดต่อพื้นที่ที่แสงผ่าน ดังนั้นความกว้างของ entrance slit จึงมีส่วนสำคัญ

3.2 กระจกและเลนส์ (mirror และ lens) เพื่อใช้ทำให้แสงเกิดการสะท้อนไปมาในเครื่อง บางครั้งทำให้แสงเกิดการรวมกัน ทั้งนี้เพื่อช่วยลดขนาดของเครื่อง Near-Infrared Spectroscopy ให้เล็กลง และบางครั้งทำให้แสงกลายเป็นลำแสงขนาน

3.3 ส่วนที่ใช้ทำให้แสงกระจายออกเป็นความยาวคลื่นต่างๆ กันเพื่อให้เหมาะแก่การเลือกใช้หรืออาจเป็นส่วนที่ตัดแสงบางช่วงออกไปให้เหลือเฉพาะช่วงคลื่นแสงที่ต้องการ อุปกรณ์ส่วนนี้อาจจะประกอบด้วย

ก. ฟิลเตอร์ (filters) จัดว่าเป็นโมโนโครเมเตอร์ที่ง่ายที่สุด ซึ่งอาจประกอบด้วยกระจกสีต่าง ๆ ทำเป็นแผ่นกลมเพื่อให้สะดวกแก่การเปลี่ยนด้วยการหมุนแผ่นกลมนั้น หรืออาจใช้วิธีเลื่อนไปมาตามแนวอนกก็ได้ ฟิลเตอร์ชนิดนี้จะให้ความกว้างของแถบคลื่นแสงขนาด 25 nm หรือมากกว่านี้ ฟิลเตอร์ที่ใช้กันมีอีกชนิดหนึ่งเรียกว่า อินเทอร์เฟรนด์ฟิเตอร์ หรือ ไดอิเล็กทริกฟิเตอร์ ซึ่งเป็นฟิเตอร์ที่ฉาบด้วยสารที่มีค่าดัชนีหักเหต่ำ และเป็นพวกไดอิเล็กทริก เช่น แมกนีเซียมฟลูออไรด์ หรือ แคลเซียมฟลูออไรด์ แล้วฉาบด้วยเงินบาง ๆ เพื่อให้แสงผ่านได้บางส่วน และประกบด้วยกระจกเป็นแบบแซนวิชอีกครึ่งหนึ่ง ฟิเตอร์นี้ยอมให้แสงผ่านออกมาที่ความยาวคลื่นต่างๆ กันตามความยาวของแผ่นประมาณ 50% เท่านั้น และความกว้างของแถบคลื่นแสงประมาณ 10 nm เครื่องมือที่ใช้ฟิเตอร์มักจะเป็นคัลเลอร์มิเตอร์ (colorimeter) ซึ่งไม่นิยมใช้ทำ Near-Infrared Spectroscopy

ข. ปริซึม (prism) ในสมัยก่อนนิยมใช้กันมากเกี่ยวกับการศึกษาทางสเปกโทรสโกปีแต่ปัจจุบันเลิกใช้แล้วเพราะมีปัญหาหลายอย่าง

ค. เกรตติง (grating) ในเครื่อง Near-Infrared Spectroscopy สมัยใหม่นี้ล้วนใช้เกรตติงเป็นส่วนกระจายแสงทั้งสิ้น เกรตติงที่มีใช้กันมีอยู่ 2 แบบ คือ

1. ทรานสมิชันเกรตติง (transmission grating) ทำด้วยวัสดุโปร่งใสเพื่อให้แสงผ่านได้ เป็นกระจกแล้วนำมาขีดให้ร่องขนานกัน จำนวนร่องต่อมิลลิเมตรมีมากน้อยได้แตกต่างกัน เกรตติงชนิดนี้ไม่ค่อยนิยมใช้แล้ว

2. รีเฟล็กชันเกรตติง (reflection grating) หรือเกรตติงแบบสะท้อนแสง เป็นเกรต

ติงที่ใช้สะท้อนแสง ดังนั้นผิวหน้าของร่องวัสดุที่ใช้ทำจะต้องเรียบและสะท้อนแสงได้ การค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แต่ที่ใช้กันทั่วไปจะอยู่ในราว 1200 ร่องต่อมิลลิเมตร เนื่องจากการทำร่องซึ่งจะต้องให้เหมือนกันทุกร่องและขนานกันสมัยก่อนทำได้ยาก จึงมีราคาแพง ในปัจจุบันนี้ได้ใช้เทคนิคทางฮอโลกราฟิก แล้วใช้วัสดุเป็นพวกพลาสติกหรือเรซินหล่อจากต้นแบบ (replica) แล้วฉาบด้วยอะลูมิเนียมบางๆ จึงทำได้ง่ายและราคาถูกลง

3.4 ช่องแสงออก (exit slit) เป็นส่วนที่จะปล่อยให้แสงที่ผ่านสารตัวอย่างแล้วผ่านไปยังมาตรวัดแสง ตลอดจนเป็นส่วนที่ช่วยตัดแสงที่รบกวนอีกด้วย โดยทั่วไปช่องแสงเข้าและช่องแสงออกมักจะเปิดเท่ากัน หรือสามารถปรับได้ตามต้องการ

4. เครื่องวัดแสง Near-Infrared (NIR detectors) ในปัจจุบันเครื่องวัดแสง Near-Infrared ที่ใช้กันอยู่แบ่งออกได้เป็น 2 พวก คือ

1. อาศัยหลักการทาง Photoconductive effect ซึ่งเกิดขึ้นเช่นเดียวกับสารกึ่งตัวนำ เป็นแบบ photo detector
2. อาศัยหลักการ Heating effect โดยที่แสง Near-Infrared ถูกดูดกลืนจะเกิดความร้อนขึ้นแล้วทำให้ความต้านของเส้นลวดในเครื่องวัดเกิดการเปลี่ยนแปลง เรียกว่า Thermal Detector ซึ่งใช้เป็นเครื่องวัดที่ครอบคลุมความยาวคลื่นได้กว้างขวาง

โฟตอน ดีเทคเตอร์ (photon detector) ประกอบด้วยแผ่นแก้วที่เป็นฉนวนแล้วฉาบบาง ๆ ด้วยสารกึ่งตัวนำ (semiconductor) เช่น ตะกั่วซัลไฟด์, ตะกั่วเทลลูไรด์, อินเดียมแอนทิโมนไนต์ หรือ เจอร์เมเนียม (Ge) ที่โคปด้วยทองแดงหรือปรอท แผ่นกึ่งตัวนำนี้บรรจุอยู่ในกล่องสุญญากาศเพื่อไม่ให้สารกึ่งตัวนำทำปฏิกิริยากับบรรยากาศ เครื่องวัดนี้เมื่อถูกแสงที่มีพลังงานสูงพอจะทำให้เกิดการลดความต้านทานลง สำหรับตะกั่วซัลไฟด์ไวต่อแสงในช่วง $1-3 \mu\text{m}$ หรือ $10,000$ ถึง $2,000 \text{ cm}^{-1}$ โดยมี response time ประมาณ $10 \mu\text{sec}$ แต่ถ้าใช้สารอื่นและทำให้เย็นด้วยไนโตรเจนเหลวหรือฮีเลียมเหลว จะทำให้เครื่องวัดนี้มีสภาพไวดีขึ้นไปในทางความยาวคลื่นมากขึ้น และมี response time เร็วขนาด 20×10^{-9} วินาที

เทอร์มัลดีเทคเตอร์ (thermal detector) โดยอาศัยสมบัติที่เกิดการเปลี่ยนแปลงความร้อนของสารเมื่อได้รับแสง Near-Infrared ได้ถูกนำมาใช้สำหรับทำดีเทคเตอร์เพื่อวัดแสง Near-Infrared ซึ่งอาจจำแนกออกได้เป็น 4 แบบด้วยกัน คือ

แบบที่ 1 เป็นเทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple) หรือ เทอร์โมไพล์ (Thermopile)

แบบที่ 2 เรียกว่า เทอร์มิสเตอร์ (Thermister) หรือ โบโลมิเตอร์ (Bolometer)

แบบที่ 3 เรียกว่า โกลีย์ (Golay) หรือ นิวมาติกดีเทคเตอร์ (Pneumatic Detector)

แบบที่ 4 เรียกว่า ไพโรอิเล็กทริกดีเทคเตอร์ (Pyroelectric Detector)

5. เครื่องขยาย-แยกสัญญาณและประมวลผล (Signal Processors and Data Read Out) สัญญาณที่ได้จากเครื่องวัดจะนำไปเข้ากระบวนการของระบบอิเล็กทรอนิกส์ เช่น ขยายสัญญาณให้

มากขึ้น หรืออาจเปลี่ยนสัญญาณ D.C. เป็น A.C. หรือ A.C. เป็น D.C. อาจมีการกรองสัญญาณการรบกวนที่ไม่ต้องการใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่ไม่ต้องการออกไป หรือนำสัญญาณที่ได้ไปแยกออก (และเข้ากระบวนการทางคณิตศาสตร์) เข้าเครื่องอินทิเกรชัน หรือเปลี่ยนให้เป็น log scale เป็นต้น

จากนั้นสัญญาณที่ได้ซึ่งเป็นผลของการวิเคราะห์จึงได้เสนอออกมาเป็นหลายรูปแบบ โดยต่อเข้ากับ

5.1 มิเตอร์ มีสเกลอ่านทั้งที่เป็น linear scale และ logarithm scale บอกค่า absorbance และ % transmittance

5.2 ดิจิตัลมิเตอร์(digital meter) โดยเสนอค่าที่วัดได้ออกมาเป็นตัวเลขบอกค่า absorbance หรือ % transmittance หรือ concentration

5.3 เครื่องบันทึก เรคอร์ดเดอร์ หรือ พรินเตอร์ ซึ่งสามารถเขียนสเปกตรัม พิมพ์ข้อมูลที่ต้องการ หรือเขียนกราฟ

5.4 เครื่องไมโครคอมพิวเตอร์ หรือไมโครโปรเซสเซอร์ ซึ่งเป็นเครื่องที่สามารถควบคุมการทำงานต่างๆ ของเครื่อง Near-Infrared Spectroscopy ใช้ในการคำนวณผลการทดลอง เขียนกราฟผลการทดลอง พิมพ์ข้อมูลของผลการทดลองทั้งหมดได้ ตลอดจนชี้สาเหตุของการขัดข้องได้ด้วย ดังนั้น เครื่อง Near-Infrared Spectroscopy ในปัจจุบันนี้จึงนิยมต่อเข้ากับเครื่องคอมพิวเตอร์ เพื่อช่วยในการเก็บแปล คำนวณจากสัญญาณและข้อมูลที่ได้

2.4 Partial least-squares regression (PLSR)

การวิเคราะห์ข้อมูลเชิงปริมาณ (Quantitative Analysis) เพื่อหาค่าและพิจารณาความแตกต่างของตัวแปรต่างๆ ที่ศึกษา เช่น ความเข้มข้น คุณสมบัติทางกายภาพ เป็นต้น ซึ่งวิธีที่ใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูลเชิงปริมาณ ได้แก่

MLR : Multiple Linear Regression

PCR : Principle Component Regression

PLS : Partial Least Square Regression

ประเด็นปัญหาการวิจัยในการวิเคราะห์สหสัมพันธ์และการถดถอย (บุญธรรม 2543) มุ่งต้องการหาคำตอบว่า ตัวแปรที่นำมาหาความสัมพันธ์กันนั้น มีรูปแบบและทิศทางความสัมพันธ์กันอย่างไร มีปริมาณความสัมพันธ์กันมากน้อยเพียงใด และประมาณค่า (estimating) หรือทำนาย (predicting) ตัวแปรตาม (Y) จากตัวแปรอิสระ (X) ได้อย่างไร ซึ่งประเด็นปัญหาการวิจัยมักจะเกี่ยวข้องกับปัจจัยหรือกลุ่มของตัวแปรที่ต้องการหาว่า มีผล มีอิทธิพล สัมพันธ์ หรือเกี่ยวข้องกับตัวแปรที่ต้องการศึกษาอย่างไร

การวิเคราะห์ถดถอยพหุคูณ (Multiple Linear Regression) (บุญธรรม 2543) เป็นวิธีการหา

รูปแบบความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรตาม 1 ตัวกับตัวแปรอิสระหลายตัว ผลการวิเคราะห์จะสร้าง
 เอกสารฉบับนี้เผยแพร่ฟรีโดยไม่คิดค่าใช้จ่ายใดๆ ทั้งสิ้น หากมีข้อผิดพลาดประการใด ขออภัยเป็นอย่างสูง และขอแจ้งให้ทราบล่วงหน้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เป็นสมการ เพื่อบอกว่า ตัวแปรอิสระแต่ละตัวมีความสัมพันธ์กับตัวแปรตามมากน้อยเพียงใด เมื่อให้ตัวแปรอิสระตัวอื่นคงที่ และจะบอกว่า มีความสัมพันธ์ในเชิงบวกหรือเชิงลบ ซึ่งดูได้จากเครื่องหมายหน้าค่าสัมประสิทธิ์ถดถอยบางส่วน ถ้าตัวแปรอิสระตัวใดมีความสัมพันธ์กับตัวแปรตามเชิงบวกจะหมายความว่า เมื่อค่าของตัวแปรอิสระตัวนั้นเพิ่มขึ้น ค่าของตัวแปรตามจะเพิ่มขึ้นด้วย แต่ถ้าเป็นเชิงลบ ผลจะกลับกันคือ เมื่อค่าของตัวแปรอิสระตัวนั้นเพิ่มขึ้น ค่าของตัวแปรตามจะลดลง

การวิเคราะห์การถดถอยบางส่วนโดยวิธีกำลังสองน้อยที่สุด (Partial least-squares regression) (Donald 1992) เป็นเทคนิคในการวิเคราะห์ข้อมูลที่ประกอบด้วยตัวแปรอิสระหลายตัว

จุดประสงค์ของการปรับเทียบสมการหลายตัวแปรก็เพื่อทำนายค่าของตัวแปร y_i ของตัวอย่างที่ $i = 1, 2, \dots, I$ จากเซตของตัวแปรอิสระ x_{ik} ที่ค่าการดูดซับพลังงานที่ความยาวคลื่นต่างๆ $k = 1, 2, \dots, K$ แสดงในรูปแบบของสมการทำนายเชิงเส้น ดังสมการที่ (2.1) รายการสัญลักษณ์ที่ใช้ใน Partial least-squares regression แสดงดังตารางที่ 2.2

$$\hat{y}_i = b_0 + \sum_{k=1}^K x_{ik} b_k \quad (2.1)$$

เมื่อ $y = (y_i, i = 1, 2, \dots, I)^T$ และ $X = (x_{ik}, i = 1, 2, \dots, I; k = 1, 2, \dots, K)^T$ สมการทำนายค่านี้สามารถใช้กำหนดค่า X เพื่อประเมินค่า y เพื่อใช้ในโอกาสต่อไป การอธิบายวิธีการสร้างรูปแบบสมการ และ รูปแบบกระบวนการปรับเทียบ PLSR รวมทั้งการสร้างรูปแบบความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระและตัวแปรตาม ต้องอาศัยการศึกษาทดลองอย่างเป็นขั้นตอน

Bilinear Modeling

PLSR เป็นหนึ่งในหลักการวิเคราะห์การถดถอยแบบ bilinear regression methods ซึ่งเป็นการศึกษาการถดถอยของการประเมินค่าของตัวแปรแฝง (latent variables)

วัตถุประสงค์ของการใช้เทคนิค PLSR ในการวิเคราะห์การปรับเทียบแบบพหุคูณ (multivariate calibration) คือ ความสามารถในการทำนายที่ดี แม่นยำ เข้าใจง่ายชัดเจนการตอบสนองของเครื่องมือ NIR ที่ความยาวคลื่นต่างๆ $X = (x_1, x_2, x_3, \dots, x_k)$ มีความสัมพันธ์กันอย่างมาก

การวิเคราะห์การถดถอยพหุคูณแบบขั้นตอน (stepwise multiple linear regression, SMLR) เป็นการคัดเลือกตัวแปรอิสระ X จากเซตของตัวแปรอิสระ X โดยพิจารณาคัดเลือกตัวแปรอิสระที่มีสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์บางส่วนสูงสุดและมีนัยสำคัญเข้าสมการ วิธีการนี้จะเป็นการลดจำนวนของตัวแปรอิสระ X เพื่อใช้เป็นตัววิเคราะห์การถดถอยสำหรับตัวแปร y ออกจากจำนวนตัวแปร X ที่เหลือ

ตารางที่ 2.2 รายการสัญลักษณ์ที่ใช้ใน Partial least-squares regression (Donald 1992)

Symbol	Explanation
X	Matrix containing NIR spectra $X = (x_{ik}, i = 1, 2, \dots, I; k = 1, 2, \dots, K)$
y	Vector containing concentration ($y_i, i = 1, 2, \dots, I$)
i	Index variable for number of object ($i = 1, 2, \dots, I$)
k	Index variable for number of X variables ($k = 1, 2, \dots, K$)
a	Index variable for number of factor ($a = 1, 2, \dots, A$)
t_a	Score vector for factor a
p_A^T	Loading for factor a
w_A^T	Loading weight for factor a
\bar{x}	Mean of X over all object and for each variable $k = 1, 2, \dots, K$
\bar{y}	Mean of y over all object
b_0	“Intercept”
b_k	Vector containing regressors
E_a	Residual in X matrix after a factors
f_a	Residual in y vector after a factors

การอธิบายสัญลักษณ์ : เมตริกและเวกเตอร์แสดงโดยอักษรตัวพิมพ์หนา เช่น X และ y , อักษรตัวกใช้แสดงให้ทราบว่า มีตัวแปรมากกว่า 1 ตัว, อักษรตัวห้อยใช้แสดงให้ทราบว่า มีตัวแปรเพียง 1 ตัว, ข้อมูลทางสเกลาร์กำหนดโดยตัวอักษรธรรมดา เช่น q_a ข้อมูลเวกเตอร์ทั้งหมดที่เป็น column vectors แสดงในรูปแบบทรานสโพส เช่น x_i^T , สัญลักษณ์ $\hat{}$ แสดงการประเมินค่าทางสถิติของตัวแปรที่เกี่ยวข้อง เช่น \hat{y}_i

ในการประเมินค่าตัวประกอบถดถอย (regression factors) $t_1, t_2, t_3, \dots, t_A$ เพื่อใช้ในการพิจารณาการถดถอยสำหรับตัวแปร y ยังใช้ได้กับการประเมินตัวแปร X อีกด้วย รูปแบบสมการถดถอยที่ใช้ในการประเมินค่าตัวแปรแฝง แสดงดังสมการที่ (2.2), (2.3) และ (2.4)

$$T = w(X) \quad (2.2)$$

$$X = p(T) + E \quad (2.3)$$

$$y = q(T) + f \quad (2.4)$$

เมื่อ $w()$, $p()$, และ $q()$ แทนรูปแบบฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์, E และ f แทนค่าความคลาดเคลื่อนต่างๆ (residuals เช่น คลื่นรบกวน หรือความคลาดเคลื่อนของรูปแบบ) สมการทั้งสามสามารถแสดงความสัมพันธ์ได้ดังสมการที่ (2.5)

$$y = q(w(X)) + f = b(X) + f \quad (2.5)$$

ซึ่งค่าต่างๆจะถูกประเมินทางสถิติ บนพื้นฐานของข้อมูลจากเซตของจำนวนตัวอย่างในการปรับเทียบ i (calibration samples)

รูปแบบการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นแบบ bilinear อธิบายถึงตัวแปรอิสระ $X = (x_1, x_2, x_3, \dots, x_K)$ ในเทอมของตัวประกอบ $T = (t_1, t_2, t_3, \dots, t_A)$ และตัวประกอบเหล่านี้ก็ใช้ในการสร้างรูปแบบสมการสำหรับตัวแปร y แสดงดังสมการที่ (2.6) และ (2.7)

$$X = \bar{1}\bar{x}^T + TP^T + E_A \quad (2.6)$$

$$y = \bar{y} + Tq + f_A \quad (2.7)$$

ตัวแปร $T = t_{ia}, i = 1, 2, \dots, I; a = 1, 2, \dots, A$ เรียกว่า factor scores หมายถึงระดับหรือความสำคัญของตัวประกอบ a ในตัวอย่าง $i = 1, 2, \dots, I$ ตัวแปร $P = (p_{ka}, k = 1, 2, \dots, K; a = 1, 2, \dots, A)$ และ $q = (q_a, a = 1, 2, \dots, A)$ เรียกว่า ตัวแปรถ่วงน้ำหนักสำหรับ X และ y (loading for the factor for X and y) ซึ่งขึ้นอยู่กับตัวประกอบ t_a ตามลำดับ ตัวอย่างเช่น เมื่อ loading factor $q_a = 0$ แสดงให้เห็นว่า factor a ไม่มีความสัมพันธ์ใดๆกับตัวแปร y ในขณะที่ loading factor $p_{ka} = 0$ แสดงให้เห็นว่า ตัวแปร X ไม่มีความสัมพันธ์ใดๆกับ factor a ดังนั้น แต่ละเวกเตอร์ p_{ka} ก็จะมีค่าแตกต่างของสเปกตรัมทั้งค่าบวกและค่าลบในแต่ละความยาวคลื่น $k = 1, 2, \dots, K$ เมตริก E_A และ f_A ในรูปแบบสมการเชิงเส้นแบบ bilinear คือค่าความคลาดเคลื่อนของ X และ y หลังจากตัวประกอบ A ได้ถูก

แยกพิจารณาแสดงดังสมการที่ (2.8) และ (2.9) เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\mathbf{E}_A = \mathbf{X} - \bar{\mathbf{X}}\mathbf{1}^T - \mathbf{t}_1\mathbf{p}_1^T - \dots - \mathbf{t}_A\mathbf{p}_A^T \quad (2.8)$$

$$\mathbf{f}_A = \mathbf{y} - \bar{y}\mathbf{1} - \mathbf{t}_1\mathbf{q}_1 - \dots - \mathbf{t}_A\mathbf{q}_A \quad (2.9)$$

ความหมายของคำว่า bilinear model มีที่มาจากความจริงที่ว่า \mathbf{X} และ \mathbf{y} ต่างก็เป็นฟังก์ชันเชิงเส้นของทั้ง scores \mathbf{T} และ loading \mathbf{P} หรือ \mathbf{q} ผลคูณของ $\mathbf{TP}^T = (\mathbf{t}_1\mathbf{p}_1^T + \mathbf{t}_2\mathbf{p}_2^T + \dots + \mathbf{t}_A\mathbf{p}_A^T)$ แสดงให้เห็นถึงความแตกต่าง ความหลากหลายของ NIR สเปกตรัม เช่น การแปรผันตามส่วนประกอบทางเคมี หรือการแปรผันทางฟิสิกส์

สุดท้ายการวิเคราะห์ถดถอยใช้เพื่อทำนายค่า \mathbf{y} จากตัวแปร \mathbf{X} ในขณะที่ factor scores \mathbf{T} จะอยู่ในรูปฟังก์ชันของ \mathbf{X} : $\mathbf{T} = \mathbf{w}(\mathbf{X})$ ความแตกต่างในการปรับเทียบแบบต่างๆ คือวิธีที่ใช้ในการประเมินค่าฟังก์ชัน \mathbf{T}

PLS1 Regression

ในการประเมินค่าของรูปแบบสมการเชิงเส้นแบบ bilinear model สำหรับตัวแปร \mathbf{y} เพียงหนึ่งเดียว (PLS1) สามารถอธิบายได้หลายรูปแบบ ในปัจจุบันรูปแบบ orthogonalized version ของตัวประกอบ $a = 1, 2, \dots, A$ ได้ถูกประเมินค่าและกำจัดออกไปในเวลาเดียวกัน

สำหรับแต่ละตัวประกอบใหม่ (new factor a) ระดับช่วง PLSR จะถูกประเมินค่าในลักษณะผลรวมเชิงเส้นของความคลาดเคลื่อน \mathbf{X} ภายหลังจากพิจารณาตัวประกอบที่ $a-1$ ดังสมการที่ (2.10)

$$\mathbf{t}_a = \hat{\mathbf{E}}_{a-1} \hat{\mathbf{w}}_a \quad (2.10)$$

ในขณะที่ loading weight spectrum $\hat{\mathbf{W}}_a = (\hat{\mathbf{w}}_{ak}, k = 1, 2, \dots, K)^T$ ใน PLSR คือ เมตริกที่มีความสัมพันธ์ระหว่างค่ากลางของตัวแปร \mathbf{y} กับค่าความหลากหลายของความคลาดเคลื่อนที่เหลือ ภายหลังจากพิจารณาตัวประกอบ $a-1$, $\hat{\mathbf{E}}_{a-1}$ แสดงดังสมการที่ (2.11)

$$\hat{\mathbf{w}}_a = \mathbf{g}_a (\mathbf{y} - \bar{y}\mathbf{1})^T \hat{\mathbf{E}}_{a-1} \quad (2.11)$$

เมื่อ \mathbf{g}_a คือ สัมประสิทธิ์ที่ผลรวมกำลังสองของ $\hat{\mathbf{w}}_a = 1.0$ ความคลาดเคลื่อนหลังจากพิจารณาตัวประกอบ $a-1$, $\hat{\mathbf{E}}_{a-1}$ แสดงดังสมการที่ (2.12)

$$\hat{\mathbf{E}}_{a-1} = \mathbf{X} - \bar{\mathbf{X}}\mathbf{1}^T - \mathbf{t}_1\mathbf{p}_1^T - \dots - \mathbf{t}_{a-1}\mathbf{p}_{a-1}^T \quad (2.12)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่า loadings ที่มีลักษณะเดียวกันสำหรับแต่ละตัวประกอบ \mathbf{P}_a และ q_a ถูกประเมินโดยการถดถอยเชิงเส้นของตัวแปร X และ y ซึ่งมีผลกับ t_a ดังนั้น PLSR จะประกอบไปด้วยผลรวมเชิงเส้นของตัวแปร X , t_a , $a = 1, 2, \dots, A$ ตัวประกอบการประเมิน (estimated factor) t_a ถูกใช้เป็นตัวพิจารณาการถดถอยสำหรับทั้งตัวแปร X และ y ผลรวมของแต่ละ X กับ t_a ถูกนิยามให้มีความสัมพันธ์กับตัวแปร y มากที่สุด

รูปแบบวิธี PLSR มีคุณสมบัติเชิง orthogonality ที่เหมาะสม : เมตริกของ loading weights $\hat{\mathbf{W}}_a = (\hat{\mathbf{w}}_a, a = 1, 2, \dots, A)$ มีความสัมพันธ์ในลักษณะ orthonormal เช่น $\hat{\mathbf{W}}^T \hat{\mathbf{W}} = \mathbf{I}$ (the identity matrix) รูปแบบความสัมพันธ์ในรูปแบบ orthogonalized version ของ PLSR ทำให้เกิดรูปแบบ orthogonal ของ scores ($\mathbf{T}^T \mathbf{T}$ เป็น diagonal) เมื่อพิจารณา loading $\hat{\mathbf{W}}_a$ และ \mathbf{P} loadings $\mathbf{P} = (\mathbf{p}_a, a = 1, 2, \dots, A)$ ไม่มีความสัมพันธ์เชิง orthogonal เหมือนกับ loadings รูปแบบวิธี PLSR มีคุณสมบัติเชิง orthogonality ที่เหมาะสม : เมตริกของ loading weights $\hat{\mathbf{W}}_a$ แต่ทั้ง $\hat{\mathbf{w}}_a$ และ \mathbf{p}_a มีความคล้ายคลึงกันมาก ดังนั้นสามารถที่จะศึกษาเชิง graphically ของตัวแปร loading ตัวใดตัวหนึ่งได้

การปรับเทียบและการทำนาย (Calibration and Prediction) (Donald 1992)

การปรับเทียบตัวแปรหลายตัวแปรที่มีใน PLSR ประกอบไปด้วย การประเมินรูปแบบของตัวแปรต่างๆ ประกอบกับปัจจัยที่ใช้พิจารณาร่วม (A) ปัจจัยแต่ละตัวจะถูกประเมินแต่ละช่วงเวลา $a = 1, 2, \dots, A$ ในรูปของตัวแปร $\mathbf{w}_a, t_a, \mathbf{p}_a, q_a, E_a$ และ f_a ก่อนที่ปัจจัยตัวต่อไปจะถูกประเมิน

รูปแบบของการปรับเทียบสุดท้ายจะประกอบไปด้วยตัวแปรต่างๆ รวมกับข้อมูลทางสถิติซึ่งวางบนพื้นฐานการใช้ เป็นลำดับภายหลังจากการตรวจสอบ outlier แล้ว

รูปแบบของตัวแปรต่างๆ จะมีประโยชน์ในการใช้อธิบายข้อมูลในการเปรียบเทียบ หรือการตรวจสอบ outlier ในตัวอย่างปรับเทียบ (calibration set) เป็นต้น

ดังนั้นในการประเมินค่าแต่ละครั้ง รูปแบบของการปรับเทียบสามารถใช้เพื่อทำนายค่า y_i จากค่า x_i ในตัวอย่างใหม่ $i = 1, 2, \dots, I$ ได้ ซึ่งสามารถทำได้ คือ สำหรับทุกตัวอย่างใหม่ i ซึ่งประกอบด้วยข้อมูล x_i และ scores t_{ia} ถูกกำหนดโดย $t_{ia} = e_{i,a-1}^T \mathbf{w}_a$ เมื่อ $e_{i,a-1}^T$ อธิบายดังสมการที่ (2.13)

$$e_{i,a-1} = \mathbf{x}_i^T - \bar{x} - \sum_{m=1}^{a-1} t_{im} \mathbf{p}^T \quad (2.13)$$

และ y_i ทำนายโดยสมการที่ (2.14)

$$\hat{y}_i = \bar{y} + \sum_{m=1}^{a-1} t_{im} q_m \quad (2.14)$$

หรือสามารถเขียนให้อยู่ในรูปสมการที่ (2.15)

$$\hat{y} = b_0 + \sum_{k=1}^K x_{ik} b_k \quad (2.15)$$

สัมประสิทธิ์การประเมินการถดถอย (estimated regression coefficients) $\mathbf{b} = (b_k, k = 1, 2, \dots, K)$ นิยามโดยสมการที่ (2.16) และ (2.17)

$$\mathbf{b} = \hat{\mathbf{W}} (\mathbf{P}^T \hat{\mathbf{W}})^{-1} \mathbf{q}^T \quad (2.16)$$

$$b_0 = \bar{y}_0 - \mathbf{X}^T \mathbf{b} \quad (2.17)$$

ขั้นตอนการคำนวณ (The PLS1 Algorithm)

ขั้นตอนการคำนวณ (algorithm) มีลักษณะเป็นการคำนวณของ matrix algebra รูปแบบการคำนวณจะเริ่มตั้งแต่ factor counter a มีค่าเท่ากับ 0 ทำการคำนวณตามขั้นตอนจนกว่าจะเสร็จสิ้นซึ่งขั้นตอนการคำนวณนี้จะกล่าวและแสดงตัวอย่างในภาคผนวก

ความแม่นยำของการปรับเทียบ (Judgement of the calibration) (Panmanas 2000)

ความแม่นยำของการปรับเทียบ สามารถพิจารณาได้จากตัวแปรเหล่านี้

1. the coefficient of determination (r^2) เป็นค่าที่วัดในรูปของความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่าง NIR กับ ข้อมูลอ้างอิง มีค่าอยู่ระหว่าง 0-1 ค่าเข้าใกล้ 1 เป็นค่าที่ต้องการ
2. Multiple correlation coefficient (R) ค่าที่วัดในรูปความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่าง NIR กับ ข้อมูลอ้างอิงเชิงเส้นของกลุ่มตัวอย่างปรับเทียบ (calibration set)
3. Standard error of calibration (SEC) วัด calibration fit โดยการพิจารณาค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานของความแตกต่างระหว่างผลที่ได้ของข้อมูลอ้างอิงกับค่าที่ได้จาก NIR สำหรับกลุ่มตัวอย่างปรับเทียบ
4. Standard error of prediction (SEP) ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของความแตกต่างระหว่าง NIR กับ ข้อมูลอ้างอิงสำหรับกลุ่มที่ต้องการทำนาย (prediction set) ค่า SEP เป็นตัววัดประสิทธิภาพของสมการปรับเทียบ (Calibration equation) ที่มีความสัมพันธ์กับกลุ่มที่ต้องการทำนาย (prediction set) ค่า SEP ที่ดีควรมีค่าต่ำ

5. Bias เป็นค่าที่วัดความแตกต่างของค่ากลาง (mean difference) ระหว่าง NIR กับข้อมูลอ้างอิงโดยมีความสัมพันธ์กับกลุ่มที่ต้องการทำนาย
6. Coefficient of regression and intercept เป็นค่าที่ได้จาก computer เพื่อใช้ตรวจสอบสมการที่ได้ว่าสามารถนำไปใช้ได้หรือไม่
7. Q-value for quantitative เป็นค่าที่ได้จาก computer เพื่อใช้ตรวจสอบสมการที่ได้ว่าสามารถนำไปใช้ได้หรือไม่
8. Consistency คือ $(SEE / SEP) * 100$



บทที่ 3

การดำเนินการทดลองและผลการทดลองเบื้องต้น

3.1 การดำเนินการทดลอง

ในการทดลองใช้มังคุด (*Garcinia mangostana* L.) จำนวน 18 ผล (จากตลาดมีนบุรี) ทำความสะอาดโดยการเช็ดด้วยผ้าสะอาดแล้วติดหมายเลขที่ผลมังคุดแต่ละผล พร้อมทั้งสังเกตลักษณะทางกายภาพของผลมังคุดแต่ละผลตามลำดับ การทดลองแบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอน ดังนี้

ตอนที่ 1 ศึกษาองค์ประกอบทางกายภาพและลักษณะคุณภาพของผลมังคุด

การทดลองที่ 1 : การวัดขนาด น้ำหนักของผลมังคุดและพิจารณาลักษณะผิวเปลือกของผลมังคุด

การทดลองที่ 2 : การวัดปริมาตรและความหนาแน่นของมังคุด

การทดลองที่ 3 : การวัดของแข็งที่ละลายได้ (Soluble Solids)

ตอนที่ 2 ศึกษาความแน่นเนื้อของผลมังคุดด้วย Universal Testing Machine

การทดลองที่ 4 : ทดสอบด้วยวิธี Compression Test และ Relaxation Test

ตอนที่ 3 Near - Infrared (NIR) Spectroscopy

การทดลองที่ 5 : วัด NIR Spectrum ของผลมังคุดและน้ำมังคุด

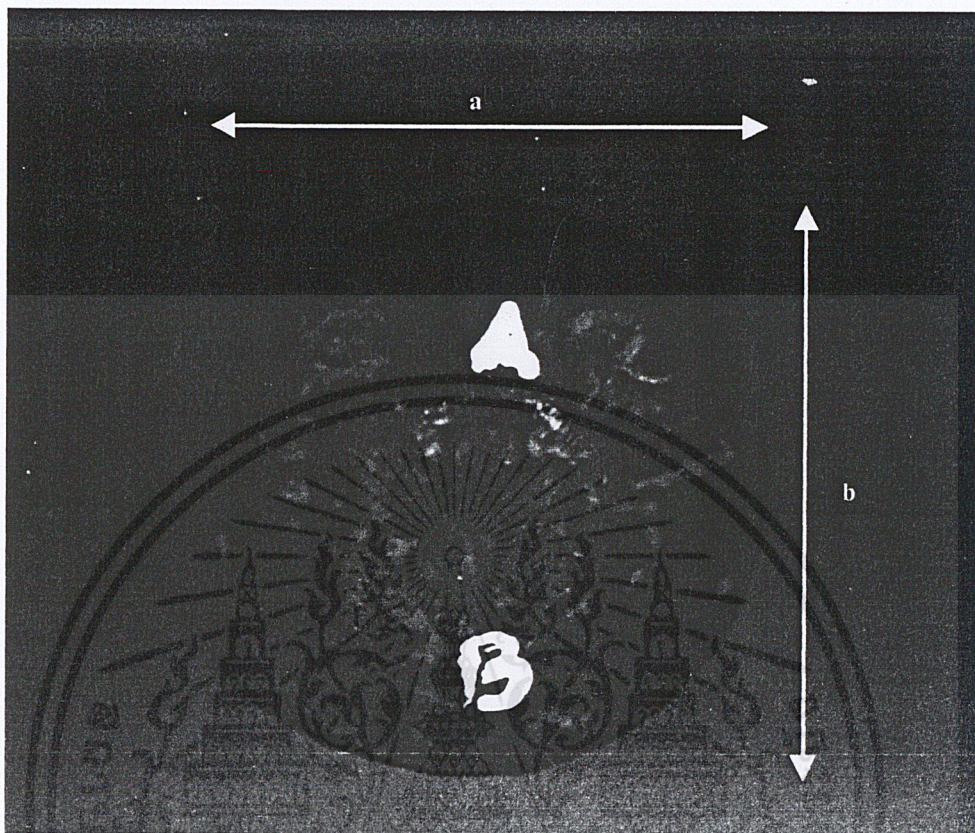
ตอนที่ 1 ศึกษาองค์ประกอบทางกายภาพและลักษณะคุณภาพของผลมังคุด

การทดลองที่ 1 : ขนาด น้ำหนักและพิจารณาลักษณะผิวเปลือกของผลมังคุด
อุปกรณ์

1. เวอร์เนียคาลิเปอร์
2. เครื่องชั่งอิเล็กทรอนิกส์ (Yamato HB3000)

วิธีการ

1. วัดขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางบริเวณแก้มของผลมังคุด (Equatorial diameter) โดยวัดในทิศทางตั้งฉากกัน ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 เส้นผ่าศูนย์กลางกลางของผลมังคุด

เมื่อ a : เส้นผ่าศูนย์กลางตามแนวนอน *

b : เส้นผ่าศูนย์กลางตามแนวตั้ง *

* a และ b มีทิศทางตั้งฉากกัน

ทำการวัดขนาดโดยเวอร์เนียคาลิเปอร์ บันทึกผลในตารางที่ 3.1

2. ชั่งน้ำหนักของผลมังคุดแต่ละผล โดยเครื่องชั่ง แล้วบันทึกผลในตารางที่ 3.1

การทดลองที่ 2 : ปริมาตรและความหนาแน่นของมังคุด

อุปกรณ์

1. บีกเกอร์ ขนาด 1000 ml
2. โทลูอิน
3. ที่กดผลไม้ให้จม
4. เครื่องชั่งไฟฟ้า (Yamato HB 3000)

วิธีการ

การหาปริมาณของมังกุด โดยการชั่งน้ำหนักในโทลูอิน บันทึกผลการทดลองในตารางที่ 3.2

1. ชั่งผลมังกุดในอากาศ (m_1)
2. ชั่งบีกเกอร์ขนาด 1000 ml (m_2)
3. ชั่งบีกเกอร์ขนาด 1000 ml ที่มีโทลูอินบรรจุอยู่ 600 ml (m_3)
4. ชั่งบีกเกอร์ขนาด 1000 ml ที่มีโทลูอินบรรจุอยู่ 600 ml พร้อมทั้งที่กวดผลไม้ให้จมแล้วบันทึกค่าน้ำหนัก (m_4)
5. ชั่งบีกเกอร์ขนาด 1000 ml ที่มีโทลูอินบรรจุอยู่ 600 ml พร้อมทั้งผลมังกุดที่ถูกกวดด้วยที่กวดผลไม้ให้จมอยู่ใน โทลูอิน ณ ตำแหน่งที่ทำเครื่องหมายไว้ แล้วบันทึกค่าน้ำหนัก (m_5)

6. คำนวณน้ำหนักโทลูอินที่ถูกแทนที่ (m_L) จาก

$$m_L = m_5 - m_4 \quad (\text{g})$$

คำนวณปริมาตรของมังกุด (V_m) จาก

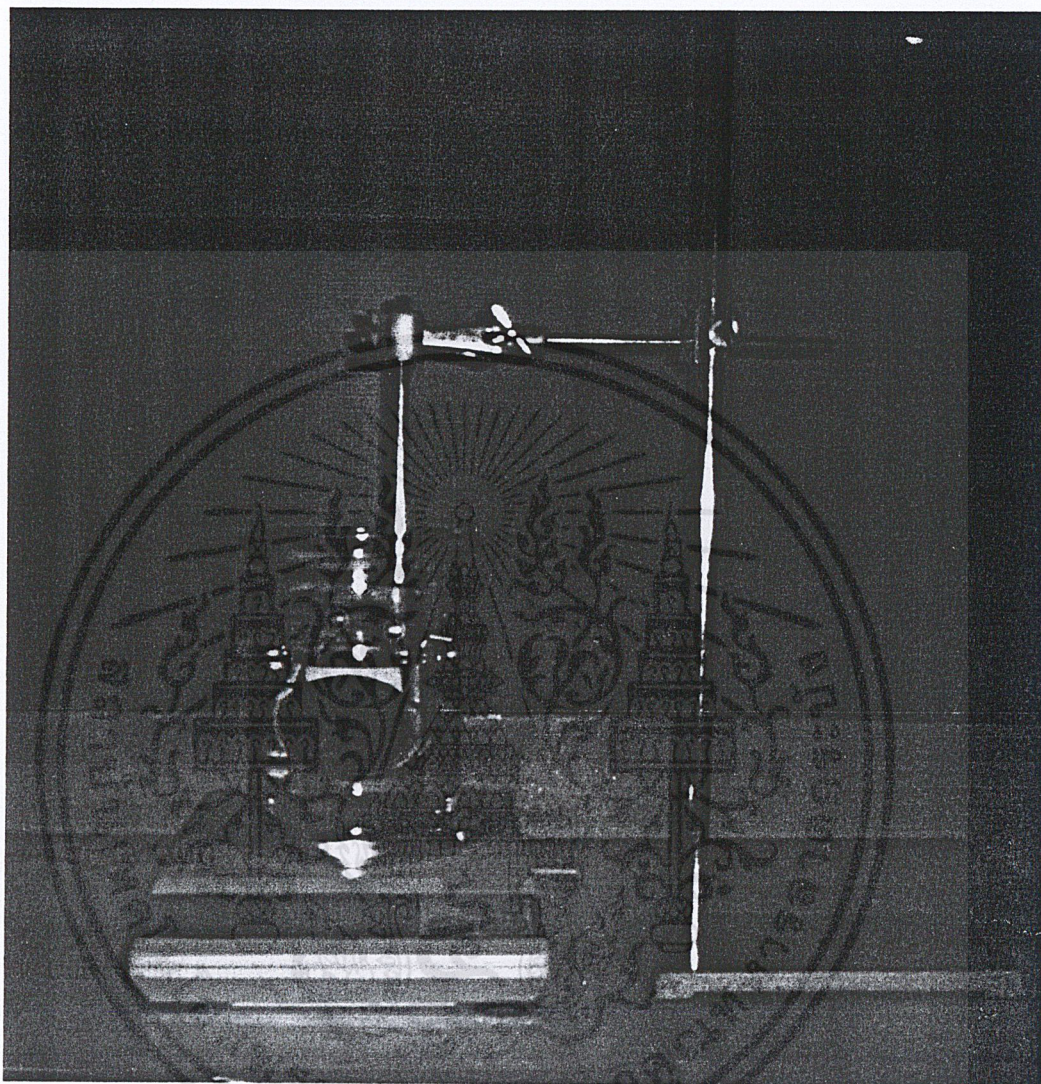
$$V_m = m_L / \rho_L \quad (\text{cm}^3) ; \rho_L = \text{ความหนาแน่นของโทลูอิน} (\text{g/cm}^3)$$

7. คำนวณค่าความหนาแน่นของมังกุด (ρ_M) จาก

$$\rho_M = m_1 / V_m \quad (\text{g/cm}^3)$$

8. คำนวณค่าความถ่วงจำเพาะของมังกุด (SG) จาก

$$SG = \rho_M / \rho_w \quad ; \rho_w = \text{ความหนาแน่นของน้ำ} (1 \text{ g/cm}^3)$$



รูปที่ 3.2 การหาปริมาตรและความหนาแน่นของมั่งคุด

การทดลองที่ 3 : ของแข็งที่ละลายได้ (Soluble Solids)

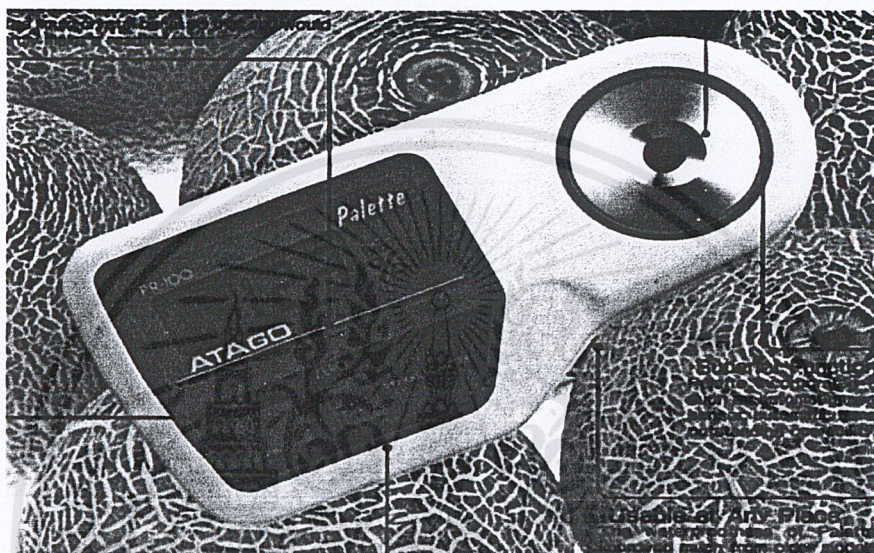
อุปกรณ์

1. Refractometer (ATAGO PR-32)
2. บีกเกอร์ขนาด 50 ml
3. ตะแกรงคั้นน้ำผลไม้
4. น้ำกลั่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของ Kimwipe เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิธีการ บันทึกผลการทดลองในตารางที่ 3.3

1. แบ่งผลมังคุดออกเป็น 2 ส่วน ตามที่กำหนดด้านเอาไว้
2. นำเนื้อมังคุดแต่ละส่วนมาคั้นน้ำด้วยตะแกรงที่เตรียมไว้ พร้อมทั้งสังเกตลักษณะภายในเนื้อผลที่ปรากฏ บันทึกผลที่ได้
3. หยดตัวอย่างน้ำมังคุดที่คั้นลงบน Refractometer บันทึกค่า %Brix



รูปที่ 3.3 Refractometer (ATAGO PR-32)

ตอนที่ 2 ศึกษาความแน่นเนื้อของมังคุดด้วย Universal Testing Machine

การทดลองที่ 4 : ทดสอบด้วยวิธี Compression Test และ Relaxation Test

อุปกรณ์

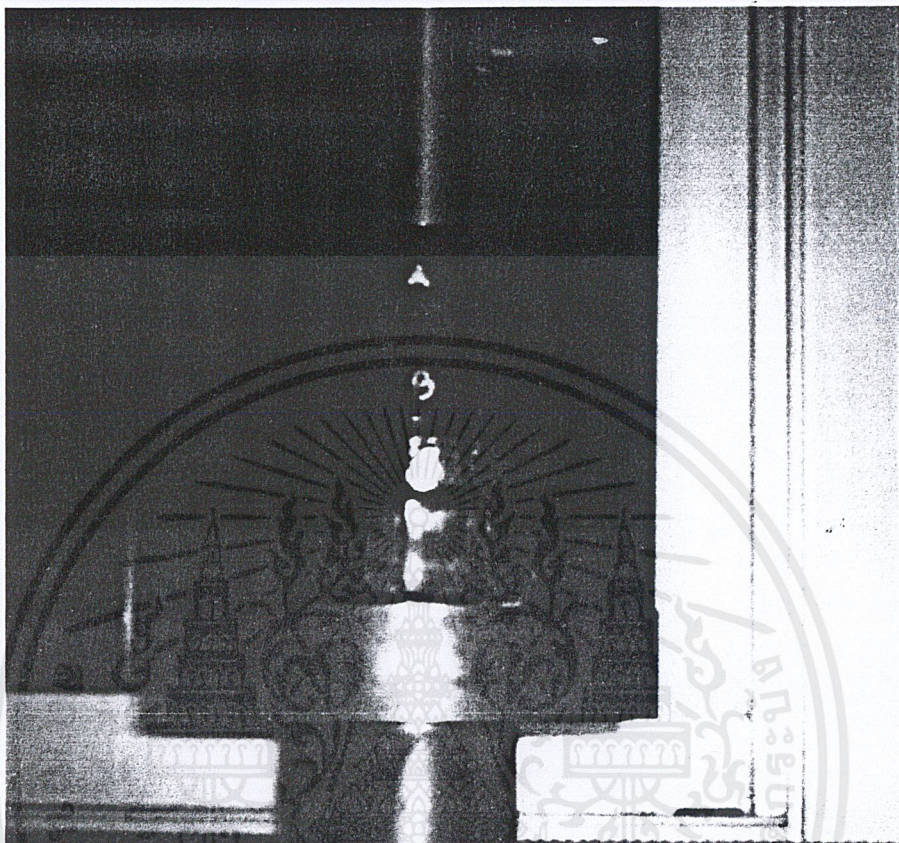
1. Universal Testing Machine (UTM LLOYD รุ่น LR 5K)
2. ติดตั้ง Computer ที่ใช้ Software R Control V 3.23 กับเครื่อง UTM
3. แผ่นเรียบที่ใช้สำหรับกด (Flat plate) ต่อไปจะเรียกว่า Plate กด
4. Load cell ขนาด 100 N
5. ภาชนะรองรับมังคุด

วิธีการ

1. ติดตั้ง Plate กด และ Load cell เข้ากับเครื่อง UTM ให้เรียบร้อย
2. เปิดเครื่อง UTM และเข้าไปยัง Program การทดสอบไว้ใน Software R Control V 3.23 เพื่อควบคุมการทดสอบของเครื่อง UTM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. นำมั่งคุดมาวางบนภาชนะรองรับดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 ลักษณะการวางมั่งคุดบนภาชนะรองรับและตำแหน่งของ Plate กค

4. เริ่มทำการทดสอบ

กระบวนการทดสอบ มี 2 ขั้นตอน คือ

Double Cycle Load

กดมั่งคุดด้วย Plate ที่เคลื่อนที่ลงด้วยความเร็ว 10 mm / min จนได้ Load ที่ Maximum คือ 20 N แล้วควบคุมให้แผ่น Plate เคลื่อนที่ขึ้นจนเหลือ Load ที่ Minimum คือ 0.8 N และทำการกดซ้ำอีกครั้งจนได้ Load ที่ Maximum

Relaxation Test

หลังจากกดซ้ำครั้งที่สองจนได้ค่า Load ที่ Maximum แล้วควบคุมให้ Plate อยู่นิ่งจนกระทั่งเวลาในการทดสอบถึง 2 นาที แล้วจึงหยุดการทดลองและเก็บข้อมูลไว้ในเครื่องคอมพิวเตอร์

5. เลื่อน Plate ให้ห่างจากผิวมั่งคุดและทำการเปลี่ยนด้านทดสอบของมั่งคุดเป็นด้านตรงข้าม

6. ทำซ้ำข้อ 4 – 6
7. เปลี่ยนมังคุดเป็นลูกถัดไปและทำการทดลองซ้ำเหมือนข้อ 3-7
8. ค่าที่ได้จากการทดลองจะเป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดและเวลาในการทดสอบ ซึ่งต้องนำไปวิเคราะห์ผลต่อไป

ตอนที่ 3 Near - Infrared (NIR) Spectroscopy

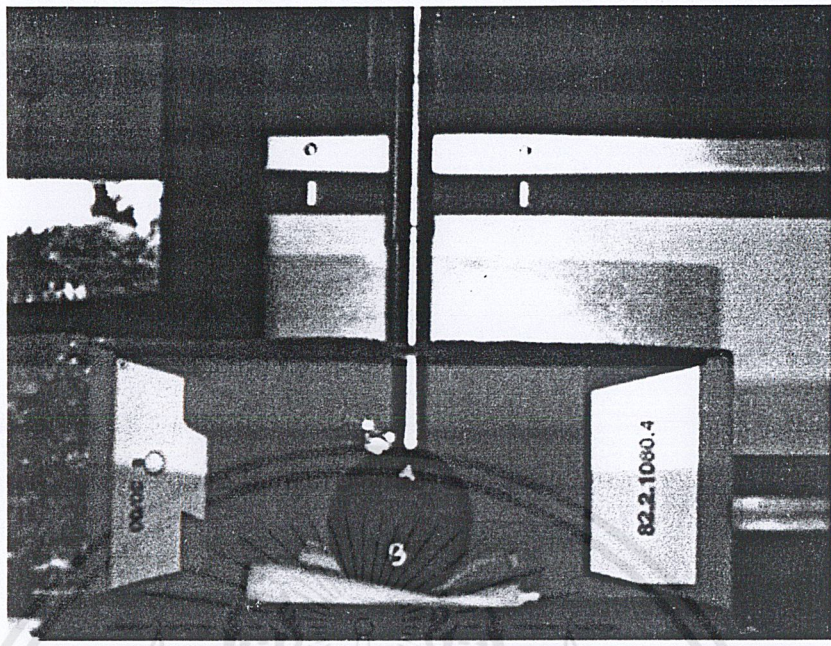
การทดลองที่ 5 : การวัด NIR Spectrum ของมังคุด

อุปกรณ์

1. เครื่อง NIR Spectrometer (BUCHI NIR Flex N-400)
2. กระดาษซับ kimwipes
3. probe
4. ผลมังคุดจำนวน 18 ผล
5. ถังน้ำ
6. ถังน้ำ (cuvette)
7. น้ำผลมังคุด

วิธีการ

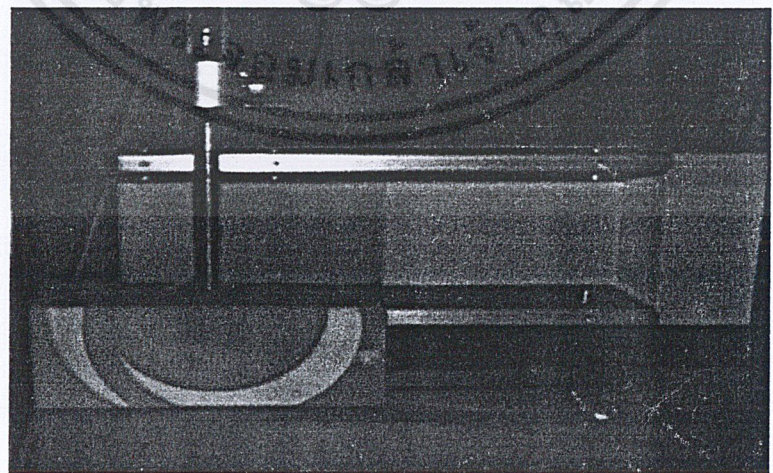
1. ติดตั้ง Computer กับเครื่อง NIR Spectroscopy
2. ติดตั้ง probe ให้อยู่ในถังน้ำเพื่อวัด reference ของความยาวคลื่น
3. เมื่อวัดค่า reference ได้แล้วจึงถอด probe ออก
4. การวัด NIR Spectrum ของผลมังคุด
 - 4.1 นำผลมังคุดด้านที่ทำเครื่องหมายไว้วางแนบกับ probe โดยวางในถังน้ำ ดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 ลักษณะการวางผลมังคุด

4.2 scan ผลมังคุด โดยใช้คำสั่งทาง computer โดย scan 5 ครั้งต่อ 1 ตำแหน่งต่อ
 หนึ่งด้านของผลมังคุด 1 ครั้ง ที่ช่วงความยาวคลื่น $4500 - 10000\text{cm}^{-1}$ หลัง
 จาก scan ด้านที่ 1 (ด้าน A)เสร็จแล้วจึง scan ด้านที่ 2 (ด้าน B) โดยทำการ
 ทดลองซ้ำเหมือนด้านที่ 1

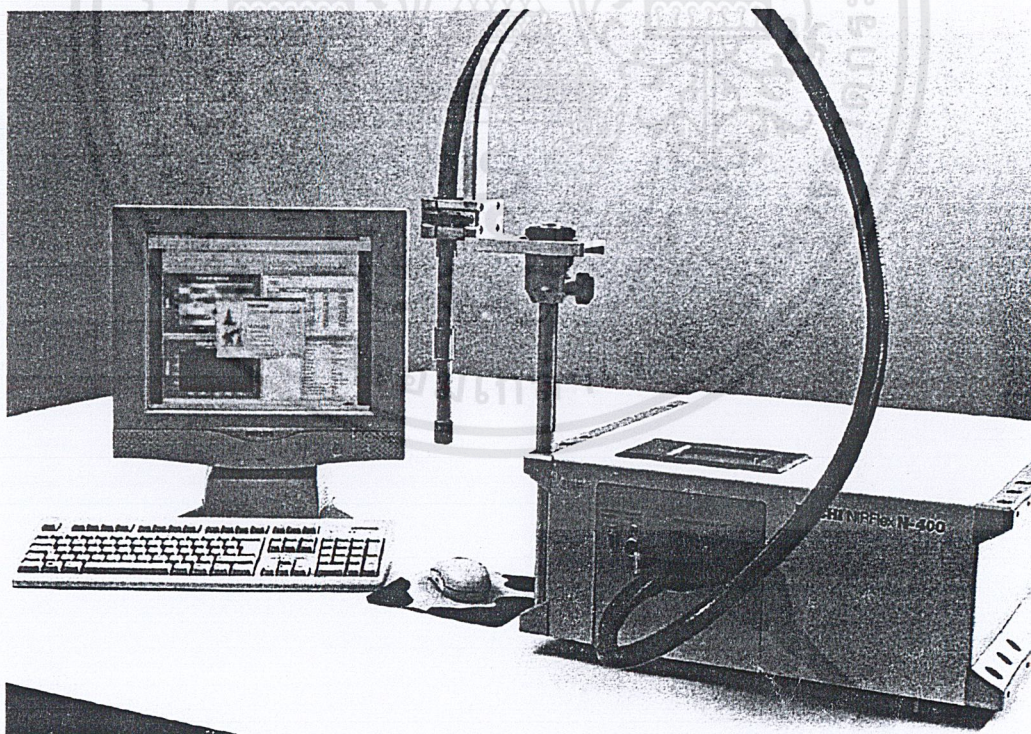
4.3 เก็บข้อมูล Spectrum ที่ได้ใน computer แล้วนำผลมังคุดที่ scan เสร็จออกมา



รูปที่ 3.6 การ scan ผลมังคุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 4.4 ทำความสะอาด probe ที่ใช้ด้วยกระดาษซับให้สะอาด
- 4.5 scan มังคุดตามขั้นตอนการทดลองที่ 4.1–4.4 จนครบทุกผล
- 4.6 นำข้อมูล Spectrum ไปคำนวณหาสมการ Calibration ต่อไป
5. การวัด NIR Spectrum ของน้ำมังคุด
 - 5.1 นำน้ำมังคุดเทลงในขวด จนถึงระดับที่กำหนดไว้
 - 5.2 บรรจุขวดลงในเครื่อง NIR Spectrometer
 - 5.3 scan น้ำผลมังคุด โดยใช้คำสั่งทาง computer โดย scan 5 ครั้ง ต่อหนึ่งตัวอย่าง ที่ช่วงความยาวคลื่น 1000 – 2500 nm ทำซ้ำ 2 ซ้ำ และหลังจาก scan ตัวอย่างด้านที่ 1 เสร็จแล้วจึง scan ตัวอย่างน้ำมังคุดด้านที่ 2 โดยทำการทดลองซ้ำเหมือนด้านที่ 1
 - 5.4 เก็บข้อมูลที่ได้อไว้ใน computer
 - 5.5 ทำความสะอาดคูเวตที่ใช้ด้วยน้ำกลั่น
 - 5.6 scan น้ำมังคุดตามการทดลองที่ 5.1 – 5.5 จนครบทุกตัวอย่าง
 - 5.7 บันทึกผลการทดลองไว้ใน computer เพื่อที่จะนำไป calibrate ต่อไป



รูปที่ 3.7 เครื่อง NIR Spectrometer (BUCHI NIR Flex N-400)

3.2 ผลการทดลอง

ตอนที่ 1 ศึกษาองค์ประกอบทางกายภาพ และลักษณะคุณภาพของผลมังคุด

ผลการทดลองที่ 1 : ขนาด น้ำหนักและพิจารณาลักษณะผิวเปลือกของผลมังคุด

ตารางที่ 3.1 ขนาด น้ำหนักและลักษณะผิวเปลือกของผลมังคุด

NO.	น้ำหนัก (g)	ขนาด (cm)		ลักษณะผิวเปลือกของมังคุด		
		A	B	มีแมลง*	มีรอยขีดข่วน	มียางไหล
1	39.97	4.406	4.390			
2	46.77	4.686	4.394			
3	46.08	4.742	4.690			
4	45.03	4.796	4.624			
5	53.50	4.832	4.754			
6	49.20	4.860	4.832			
7	57.78	4.944	4.786			
8	49.55	4.930	4.912			
9	56.73	5.136	4.794			
10	56.45	4.972	4.802			
11	57.58	5.148	4.862			
12	57.48	5.236	5.030			
13	71.74	5.130	5.124			
14	83.52	5.698	5.394			
15	80.27	5.700	5.432			
16	86.07	5.806	5.454			
17	84.73	5.782	5.464			
18	92.82	5.898	5.608			

หมายเหตุ : เครื่องหมาย | แสดงว่า เล็กน้อย
 || แสดงว่า ปานกลาง
 ||| แสดงว่า มาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษา หมายถึง ลักษณะผิวเปลือกที่มีรอยซึ่งแสดงถึงโดยแมลงทำลายในการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดลองที่ 2 : ปริมาตรและความหนาแน่นของผลมั่งคุด

ตารางที่ 3.2 ปริมาตรและความหนาแน่นของมั่งคุด

NO.	m_1 (g)	m_4 (g)	m_5 (g)	m_L (g)	v_m (cm ³)	ρ_m (g/cm ³)	SG
1	39.97	897.32	933.00	35.68	40.23	0.941	0.945
2	46.77	896.97	935.24	38.27	43.15	1.032	1.036
3	46.08	896.47	937.41	40.94	46.16	0.950	0.955
4	45.03	895.78	937.09	41.31	46.57	0.896	0.900
5	53.50	895.18	941.03	45.85	51.69	0.991	0.995
6	49.20	882.76	928.01	45.23	50.99	0.912	0.916
7	57.78	882.37	931.00	48.63	54.83	1.011	1.015
8	49.55	881.86	931.98	50.12	56.51	0.813	0.816
9	56.73	881.00	930.10	49.10	55.36	0.979	0.983
10	56.45	880.58	931.32	50.74	57.20	0.952	0.956
11	57.58	869.79	923.20	53.41	60.21	0.923	0.927
12	57.48	869.20	924.58	55.38	62.44	0.868	0.871
13	71.74	888.31	949.03	60.72	68.46	1.015	1.019
14	83.52	887.71	956.75	69.04	77.84	1.046	1.050
15	80.27	887.12	952.44	71.32	80.41	0.966	0.969
16	86.07	876.78	948.92	72.14	81.33	1.027	1.031
17	84.73	876.25	948.30	72.05	81.23	1.015	1.019
18	92.82	875.64	953.23	77.59	87.47	1.026	1.030

ผลการทดลองที่ 3 : ของแข็งที่ละลายได้ (Soluble Solids)

จากการวัด Soluble solids และพิจารณาลักษณะเนื้อผลของมังคุด แสดงดังตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 ค่า Soluble solids และลักษณะเนื้อผล

NO	Soluble solids (%Brix)		ลักษณะของเนื้อผล	
	A	B	A	B
1	19.3	19.3	เนื้อขาวนุ่ม	เนื้อขาวนุ่ม
2	17.6	16.9	เนื้อขาวนุ่มและเน่าเสียเล็กน้อย	เนื้อขาวนุ่ม เน่าเสียมีเนื้อแก้วเล็กน้อย
3	19.6	19.3	เนื้อขาวนุ่ม	เนื้อขาวนุ่ม
4	18.4	18.6	เนื้อขาวนุ่ม	เนื้อขาวนุ่มและมียางไหล
5	19.1	16.6	เนื้อขาวนุ่ม เปลือกติดเนื้อเล็กน้อย	เนื้อขาวนุ่ม เปลือกติดเนื้อเกือบทั้งส่วน
6	19.0	19.0	เนื้อขาวนุ่มและซำ	เนื้อขาวนุ่มและซำ
7	19.1	18.5	เนื้อขาวนุ่มและมียางไหลเล็กน้อย	เนื้อขาวนุ่มและมียางไหล
8	22.3	23.0	เนื้อขาวนุ่มและซำ	เนื้อขาวนุ่มและซำ
9	18.5	18.4	เนื้อขาวนุ่มและมียางไหลเล็กน้อย	เนื้อขาวนุ่มและมียางไหล
10	20.2	20.8	เนื้อขาวนุ่ม	เนื้อขาวนุ่ม
11	20.2	19.5	เนื้อขาวนุ่มและมียางไหลเล็กน้อย	เนื้อขาวนุ่ม
12	20.3	19.7	เนื้อขาวนุ่ม	เนื้อขาวนุ่มและเนื้อใส
13	18.2	18.0	เนื้อขาวนุ่มและมียางไหล	เนื้อขาวนุ่มและมียางไหล
14	17.2	17.6	เนื้อแก้ว เน่าเสีย มียางไหลเล็กน้อย	เนื้อแก้ว มียางไหลและเปลือกติดเนื้อ
15	19.4	19.2	เนื้อขาวนุ่มและเนื้อแก้วเล็กน้อย	เนื้อขาวนุ่มและเนื้อแก้วเล็กน้อย
16	16.6	16.0	เนื้อแก้ว มียางไหลและเปลือกติดเนื้อ	เนื้อแก้วเกือบทั้งผล
17	13.0	12.9	เนื้อแก้วทั้งผลและมียางไหลเล็กน้อย	เนื้อแก้วทั้งผล มียางไหล เน่าเล็กน้อย
18	17.3	16.1	เนื้อแก้ว มียางไหลและเปลือกติดเนื้อ	เนื้อแก้วและมียางไหล

จากการดูลักษณะเนื้อผล แบ่งเป็น 7 ลักษณะ ดังนี้

1. เนื้อขาวนุ่ม
2. เปลือกติดเนื้อ

4. เนื้อแก้ว
5. มียางไหลปนอยู่กับเนื้อ
6. เนื้อผลเน่าเสีย
7. เนื้อใส

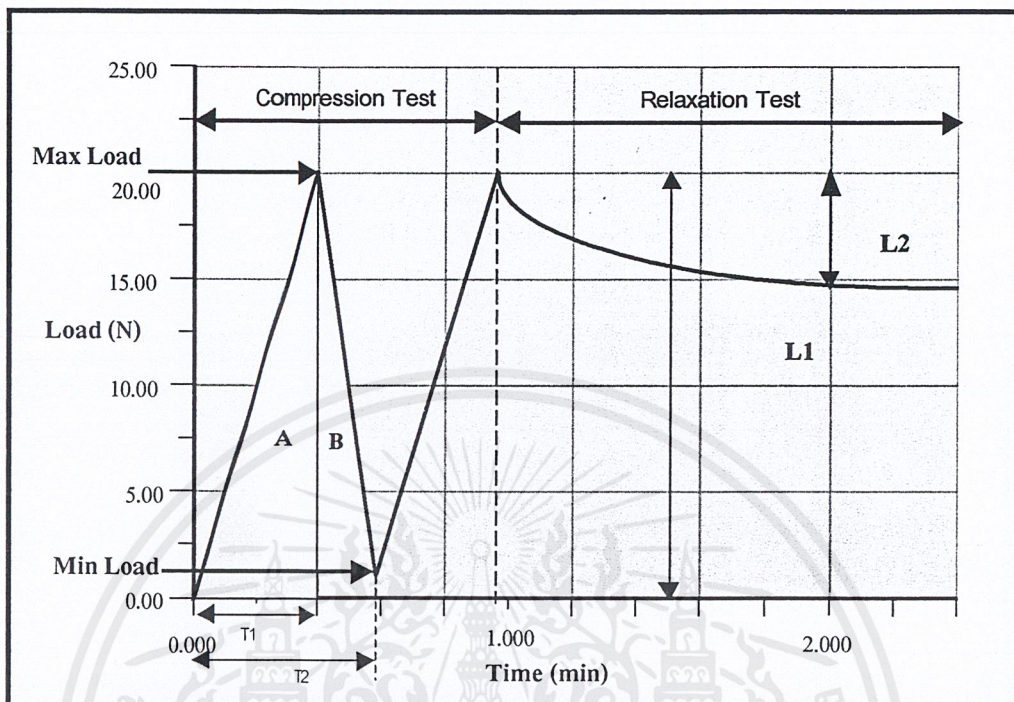
ตอนที่ 2 ศึกษาความแน่นเนื้อด้วย Universal Testing Machine

ผลการทดลองที่ 4 : ทดสอบหาค่า Texture Properties ของมังคุด โดยเครื่อง Universal Testing Machine (UTM)

การทดสอบ โดยวิธี Compression Test และ Relaxation Test ผลจะมีลักษณะเป็นกราฟดังรูปที่ 3.8

ค่าที่ได้จากกราฟ

- T1 = เวลา ที่ Maximum Load (min)
- T2 = เวลา ที่ Minimum Load (min)
- L1 = Maximum Load (N)
- L2 = Load ที่ลดลงขณะ Relaxation ณ ระยะ plate กดคงที่ คือเมื่อ plate อยู่หนึ่งที่ Maximum Load (deformation คงที่) (N)
- D1 = Deformation ที่ Maximum Load (mm)
- D2 = Deformation ที่ Minimum Load (mm)
- A = พื้นที่ใต้กราฟของ Stage ที่ 1 (N- min)
- B = พื้นที่ใต้กราฟของ Stage ที่ 2 (N- min)



รูปที่ 3.8 กราฟผลการทดลอง Compression Test และ Relaxation Test

การคำนวณหาค่า Texture Properties

เมื่อ $D1(\text{mm}) = \text{Deformation ที่เวลา } T1 = T1 (\text{min}) \times 10 (\text{mm/min})$

$D2(\text{mm}) = \text{Deformation ที่เวลา } T2 = T2 (\text{min}) \times 10 (\text{mm/min})$

1. Hardness (N/mm) = $L1 / D1$
2. Relaxation (%) = $L2 / L1$
3. Degree Of Elasticity = $(D1 - D2) / D1$
4. Energy Absorption (N mm) = $(A \times 10 \text{ mm/min}) - (B \times 10 \text{ mm/min})$

ค่า Texture Properties แสดงไว้ในตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 ค่า Texture Properties

NO.		Hardness (N / mm)	Relaxation (%)	Degree of elasticity	Energy absorption (N mm)
1	A	10.46	37.97	0.51	90.00
	B	15.67	37.01	0.74	85.00
2	A	12.34	39.09	0.63	86.79
	B	13.73	37.62	0.54	81.14
3	A	18.04	36.31	0.58	56.83
	B	16.43	36.41	0.64	57.30
4	A	16.39	33.56	0.69	57.15
	B	13.05	37.78	0.65	82.49
5	A	18.05	37.54	0.68	60.40
	B	18.62	32.87	0.65	47.61
6	A	17.16	42.73	0.62	65.29
	B	14.21	35.10	0.60	52.44
7	A	15.21	35.23	0.73	61.66
	B	17.02	37.75	0.63	57.78
8	A	14.25	32.80	0.68	78.16
	B	14.56	37.78	0.58	80.89
9	A	15.10	42.73	0.50	90.17
	B	17.13	43.86	0.59	62.43
10	A	14.50	38.00	0.68	70.36
	B	13.31	37.78	0.66	58.44
11	A	20.43	36.97	0.63	44.64
	B	21.09	37.62	0.65	48.85
12	A	25.04	38.36	0.62	36.01
	B	21.04	39.97	0.56	55.78
13	A	9.68	40.12	0.52	116.32
	B	10.34	41.40	0.51	114.10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่พิมพ์ไว้สำหรับใช้ในการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปลงโฆษณาหรือการค้า

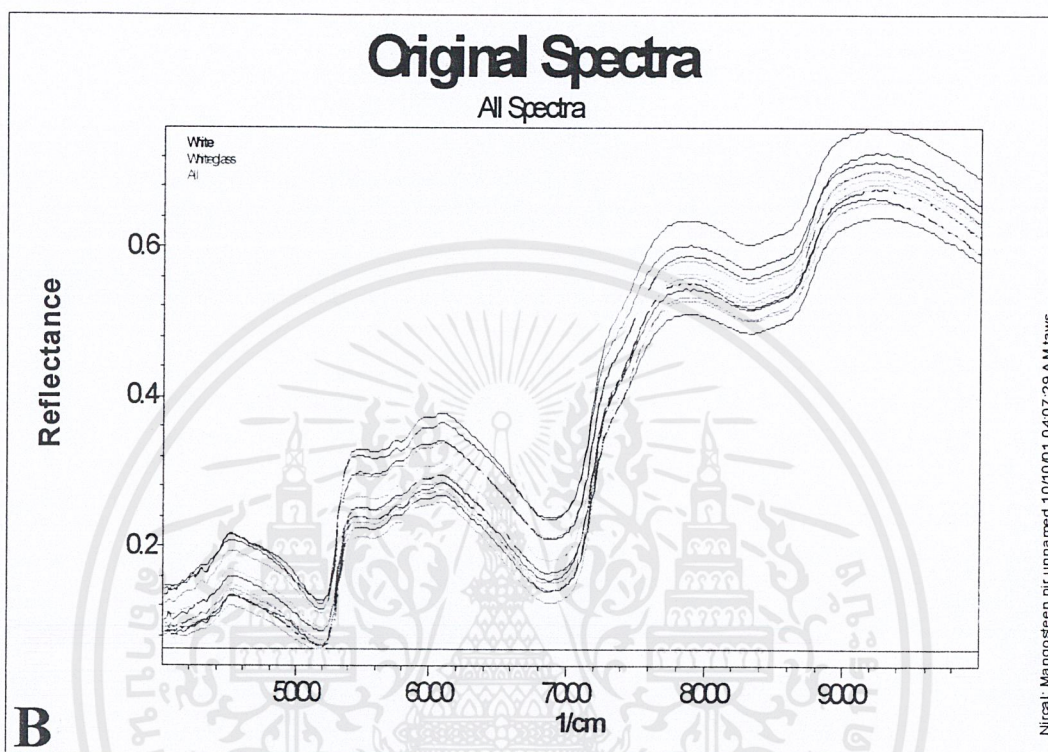
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

NO.		Hardness (N / mm)	Relaxation (%)	Degree of elasticity	Energy absorption (N mm)
14	A	16.47	39.02	0.71	61.23
	B	15.09	38.18	0.68	63.09
15	A	37.39	36.85	0.69	15.43
	B	21.11	37.00	0.68	41.84
16	A	18.68	35.55	0.71	48.24
	B	15.59	37.84	0.74	57.72
17	A	13.92	38.87	0.63	64.00
	B	13.78	37.87	0.67	73.76
18	A	16.84	39.98	0.63	64.47
	B	16.87	37.75	0.70	51.90

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตอนที่ 3 Near - Infrared (NIR) Spectroscopy

ผลการทดลองที่ 5 : วัด NIR Spectrum ของผลมังคุด



รูปที่ 3.9 ตัวอย่าง Spectrums ที่ scan จากผลมังคุด

อธิบาย

- จากกราฟของสเปกตรัมที่แสดงอธิบายได้ดังนี้
 - กราฟสีน้ำเงินแสดงลักษณะของ reflectance ที่ได้ของเนื้อผลขาวปกติ (white)
 - กราฟสีเขียวแสดงลักษณะของ reflectance ที่ได้ของเนื้อแก้ว (white glass)
 - ลักษณะของกราฟดังกล่าวเป็นดังนี้

กราฟสีน้ำเงินที่แสดงลักษณะเนื้อขาวปกติจะเกาะกลุ่มใกล้เคียงกัน สันเหตุได้จากความชื้น ซึ่งกราฟสีเขียวที่แสดงลักษณะเนื้อแก้วก็จะแสดงลักษณะคล้ายกัน
- จากการทดลอง เนื่องจากการใช้ตัวอย่างที่มีจำนวนน้อย ค่าที่ได้อาจจะยังไม่ชัดเจน ในการสังเกตความแตกต่างของเส้นกราฟแต่ละเส้น แต่ละกลุ่ม ถ้าหากใช้จำนวนตัวอย่างที่มากกว่านี้ อาจจะสังเกตความแตกต่างที่เกิดขึ้นได้อย่างชัดเจนขึ้น
- จากข้อมูลเส้นกราฟสเปกตรัมอาจจะยังสังเกตความแตกต่างของเส้นกราฟของแต่ละคุณสมบัติที่ศึกษายังไม่ชัดเจน เนื่องจากผลยังเป็นข้อมูลดิบ การทำ Data

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์โดยโรงเรียนวิทยาศาสตร์จุฬาภรณราชวิทยาลัย มงกุฎ ห้าหมื่นห้าพันปีแห่งปัญญา
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แตกต่างของเส้นกราฟที่ชัดเจนขึ้น ซึ่งอยู่ในขั้นตอนของการศึกษาและวิเคราะห์ข้อมูลต่อไป

4. เมื่อได้เส้นกราฟแต่ละคุณสมบัติของการศึกษาที่มีความแตกต่างกันอย่างชัดเจน เราอาจจะสามารถเลือกช่วงความถี่ที่มีความเหมาะสมไปใช้ในการพิจารณา เพื่อให้ได้ค่าที่ถูกต้องและแม่นยำขึ้นต่อไป



บทที่ 4

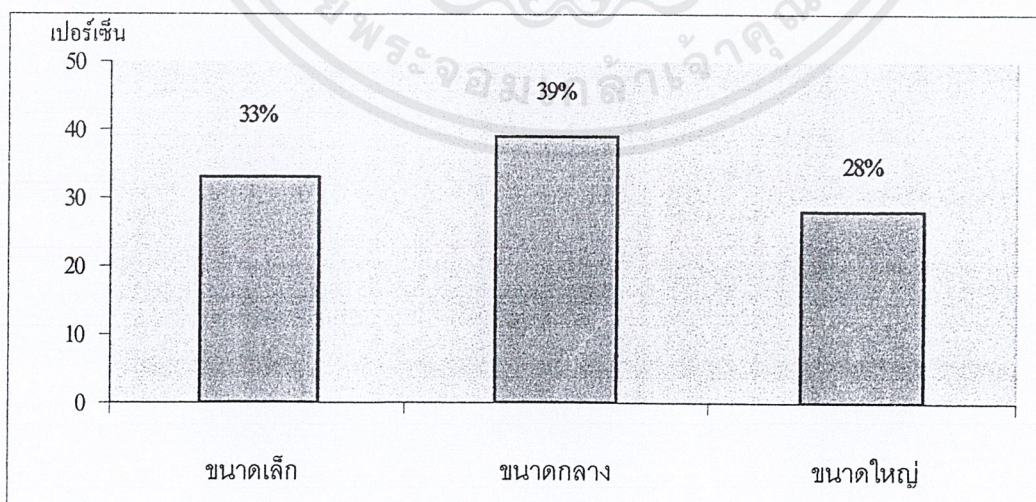
วิจารณ์ผลการทดลอง

จากการทดลองศึกษาองค์ประกอบทางกายภาพและลักษณะคุณภาพของผลมังคุด พบว่าเมื่อพิจารณาลักษณะผิวเปลือกของผลมังคุดแล้วจะไม่สามารถบอกถึงคุณภาพของเนื้อภายในผลได้ แสดงว่าลักษณะผิวเปลือกจะไม่มีความสัมพันธ์กับลักษณะเนื้อภายในผล และสามารถวิเคราะห์ผลได้ดังนี้

1. การคัดระดับน้ำหนักและขนาดของผลมังคุด สามารถแบ่งเป็น 3 ระดับ ดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ระดับการคัดขนาด

ระดับ	น้ำหนัก (g)	เส้นผ่าศูนย์กลางทั้ง 2 ด้าน (cm)	จำนวน (ผล)
ขนาดเล็ก	<50	<4.8	6
ขนาดกลาง	50-75	4.8 – 5.5	7
ขนาดใหญ่	>75	> 5.5	5



รูปที่ 4.1 เปอร์เซ็นต์ของปริมาณผลแยกตามระดับขนาด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. การพิจารณาลักษณะผิวเปลือกแบ่งเป็น 3 ลักษณะ ดังนี้

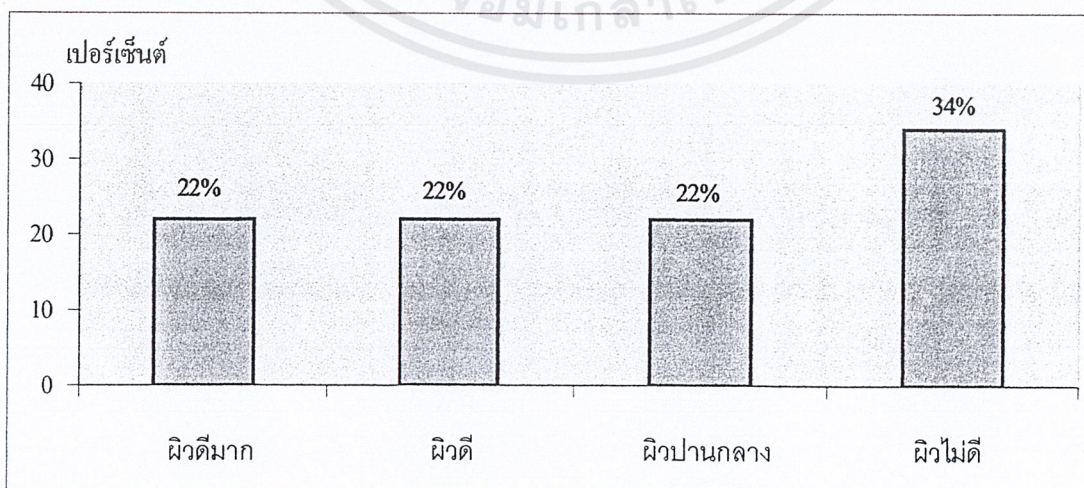
- 1.มีแมลง
- 2.มีรอยขีดข่วน
- 3.มียางไหล

แต่ละลักษณะแบ่งเป็นปริมาณมากน้อยได้ 3 ระดับ คือ

- 1.ปริมาณน้อย
- 2.ปริมาณปานกลาง
- 3.ปริมาณมาก

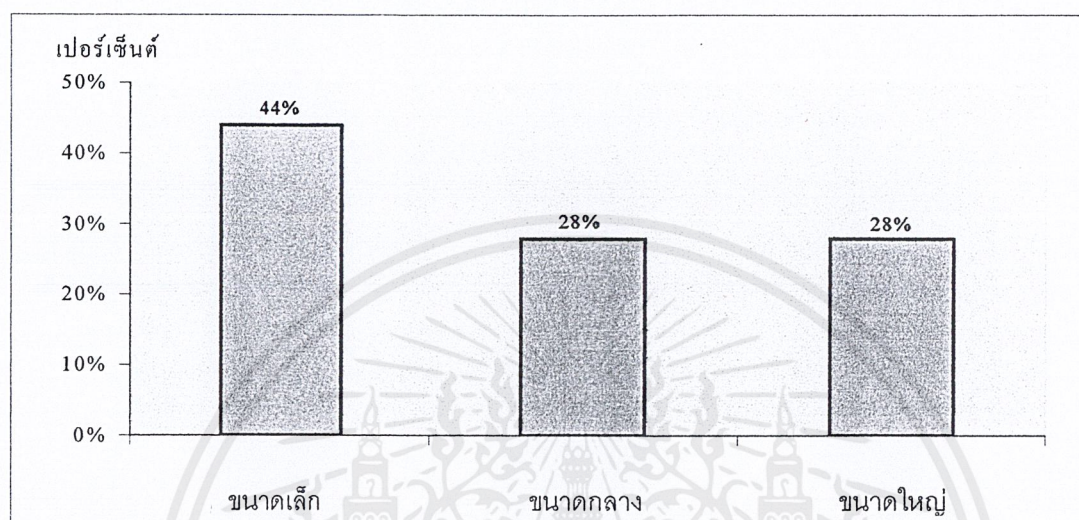
ตารางที่ 4.2 ระดับลักษณะผิวเปลือกภายนอกของมังคุดจำนวน 18 ผล

ระดับ	ลักษณะผิวภายนอก	จำนวนผล
ผิวดีมาก	มีรอยขีดข่วนปริมาณน้อย-ปานกลาง	4
ผิวดี	มีแมลงและรอยขีดข่วนปริมาณน้อย	4
	มีรอยขีดข่วนและยางไหลปริมาณน้อย	2
ผิวปานกลาง	มีแมลง,รอยขีดข่วนและยางไหลปริมาณน้อย	4
ผิวไม่ดี	มีแมลงปริมาณมาก และมีรอยขีดข่วนปริมาณมาก-ปานกลาง	2
	มีแมลงปริมาณมาก และมีรอยขีดข่วนปริมาณมาก-ปานกลาง และมียางไหลปริมาณน้อย	2



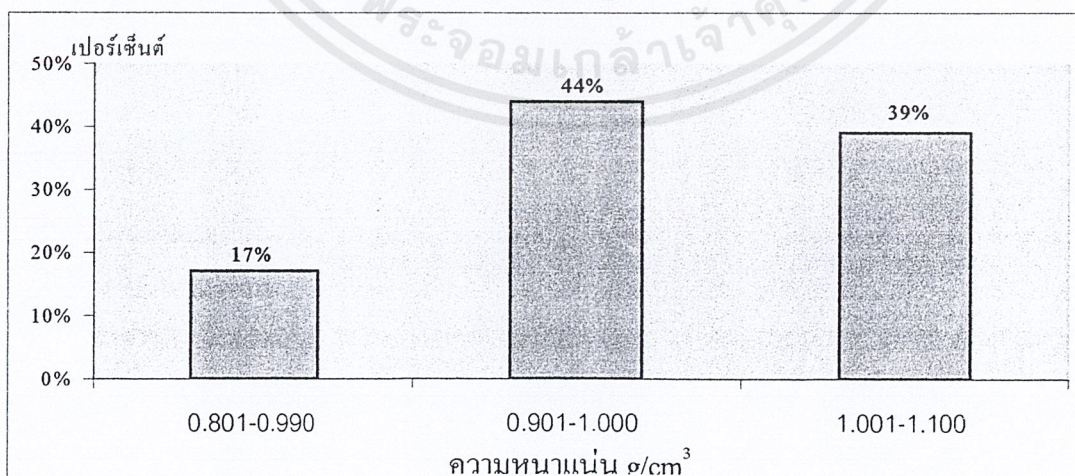
เอกสารนี้เป็นเอกสารรูปที่ 4.2 เปอร์เซ็นต์ปริมาณผลแยกตามระดับผิวเปลือกผลมังคุดไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. การทดลองปริมาตรของผลมังคุดมีค่าอยู่ระหว่าง $40 - 87 \text{ cm}^3$ แบ่งเป็น 3 ระดับ คือ
- ระดับที่ 1 ขนาดเล็ก ปริมาตร $40 - 55 \text{ cm}^3$ จำนวน 8 ผล
 - ระดับที่ 2 ขนาดกลาง ปริมาตร $56 - 70 \text{ cm}^3$ จำนวน 5 ผล
 - ระดับที่ 3 ขนาดใหญ่ ปริมาตร $71 - 85 \text{ cm}^3$ จำนวน 5 ผล



รูปที่ 4.3 เปอร์เซ็นต์ปริมาณผลแยกตามระดับปริมาตร

4. ความหนาแน่นมังคุดมีค่าอยู่ระหว่าง $0.7 - 1.1 \text{ g/cm}^3$ แบ่งได้ 3 ระดับ คือ
- ระดับที่ 1 $0.801 - 0.900 \text{ g/cm}^3$ จำนวน 3 ผล
 - ระดับที่ 2 $0.901 - 1.000 \text{ g/cm}^3$ จำนวน 8 ผล
 - ระดับที่ 3 $1.001 - 1.100 \text{ g/cm}^3$ จำนวน 7 ผล



รูปที่ 4.4 เปอร์เซ็นต์ปริมาณผลแยกตามระดับความหนาแน่น

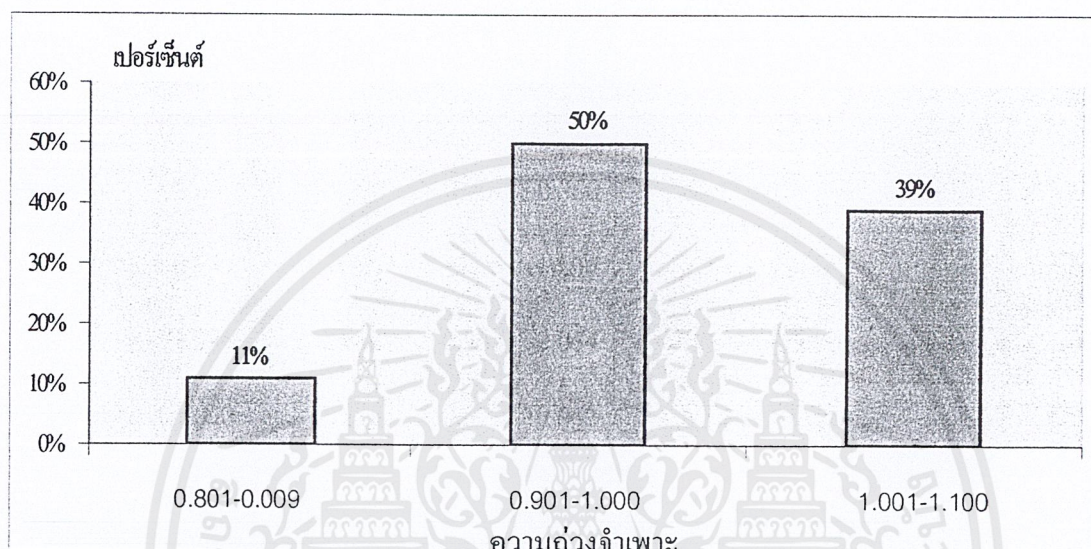
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. ความถ่วงจำเพาะของมัจจุคมีค่าอยู่ระหว่าง 0.81 – 1.10 แบ่งเป็น 3 ระดับ คือ

ระดับที่ 1 0.801 – 0.900 จำนวน 2 ผล

ระดับที่ 2 0.901 – 1.000 จำนวน 9 ผล

ระดับที่ 3 1.001 – 1.100 จำนวน 7 ผล



รูปที่ 4.5 เปอร์เซ็นต์ปริมาณผลแยกตามระดับความถ่วงจำเพาะ

6. ผลจากการวัด Soluble Solids

โดยแบ่ง 1 ผล ออกเป็น 2 ส่วน และทำการวัด % Brix จะพบว่า

1. ในผลเดียวกันทั้ง 2 ส่วน จะมีค่า % Brix ใกล้เคียงกัน

2. % Brix จะมีค่าอยู่ในช่วง 12.9 – 23.0 %

สามารถแบ่งระดับ % Brix ได้ 3 ระดับ ดังนี้

ระดับที่ 1 % Brix มีค่าช่วง 12.9 – 17 % จำนวน 7 ส่วน

ระดับที่ 2 % Brix มีค่าช่วง 17 – 20 % จำนวน 23 ส่วน

ระดับที่ 3 % Brix มีค่าช่วง 20 – 23 % จำนวน 6 ส่วน

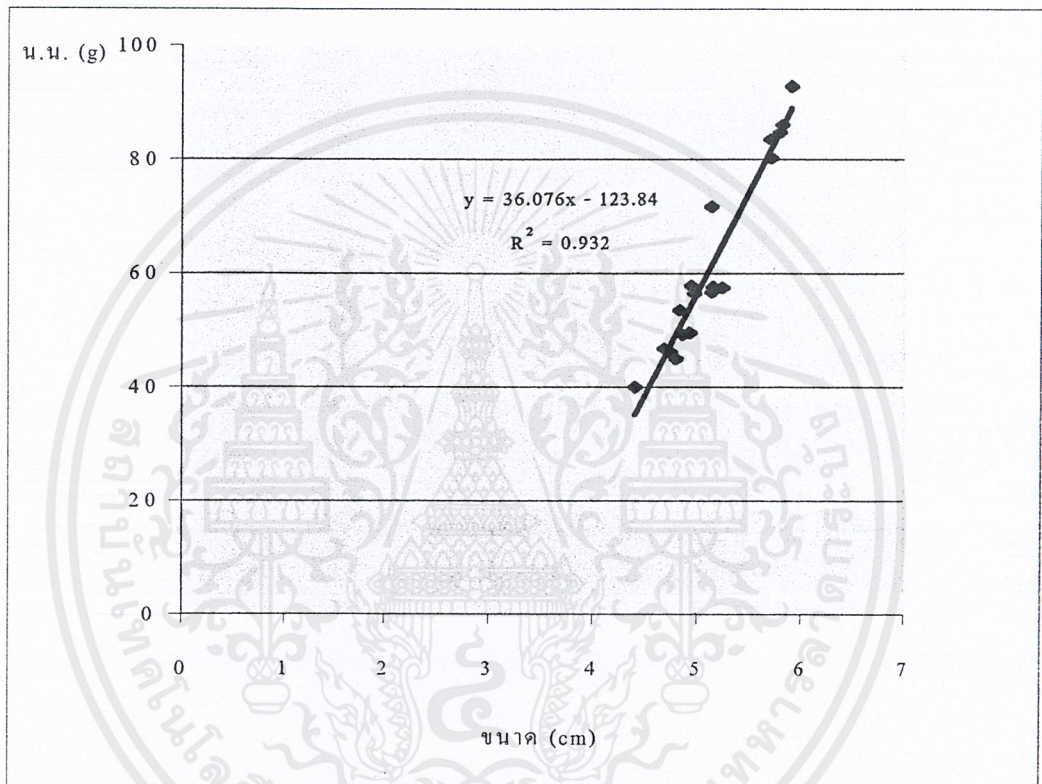
ตารางที่ 4.3 พิกัด ค่าเฉลี่ย ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของผลการทดลอง

การทดสอบ	ข้อมูล (จำนวนตัวอย่าง 18 ผล)	การวิเคราะห์ทางสถิติ			
		Maximum	Minimum	\bar{X}	SD
หาน้ำหนักและ ขนาดของมังคุด	น้ำหนัก (g)	92.82	39.97	61.96	16.17
	เส้นผ่าศูนย์กลาง (cm)				
	ด้าน a	5.898	4.406	5.150	0.430
	ด้าน b	5.608	4.390	4.964	0.360
หาปริมาตรและ ความหนาแน่นของ มังคุด	ปริมาตร (cm ³)	87.47	40.23	61.23	14.36
	ความหนาแน่น (g/cm ³)	1.046	0.813	0.964	0.064
	ความถ่วงจำเพาะ (SG)	1.050	0.816	0.970	0.062
องค์ประกอบเนื้อ ผลภายในด้วย Universal Testing Machine	Hardness (N/mm)	25.04	9.68	16.63	4.74
	Relaxation (%)	43.86	32.80	37.87	2.42
	Degree of elasticity	0.74	0.50	0.64	0.07
	Energy absorption (N mm)	116.32	15.43	65.00	19.84
Soluble solids	% Brix	23	12.9	17.96	3.60

7. การหาความสัมพันธ์ต่างๆ จากการทดลอง

7.1 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดกับน้ำหนักผล

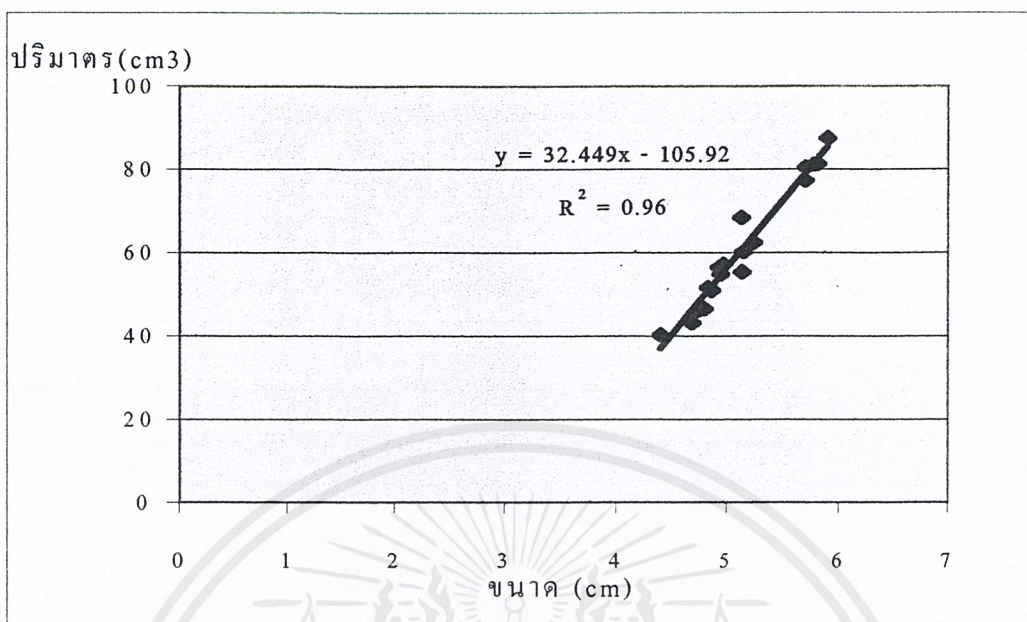
ขนาดจะใช้ค่าความยาวด้าน a เพราะเป็นด้านที่รับแรงได้มากกว่า ด้าน b เนื่องจากมีพื้นที่หน้าตัดน้อยกว่า จากการทดลองที่ศึกษาพบว่า ผลมังคุดที่มีขนาดใหญ่จะมีน้ำหนักมาก และมีน้ำหนักมากกว่าผลมังคุดที่มีขนาดเล็ก แสดงดังรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดและน้ำหนัก

7.2 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดกับปริมาตรผล

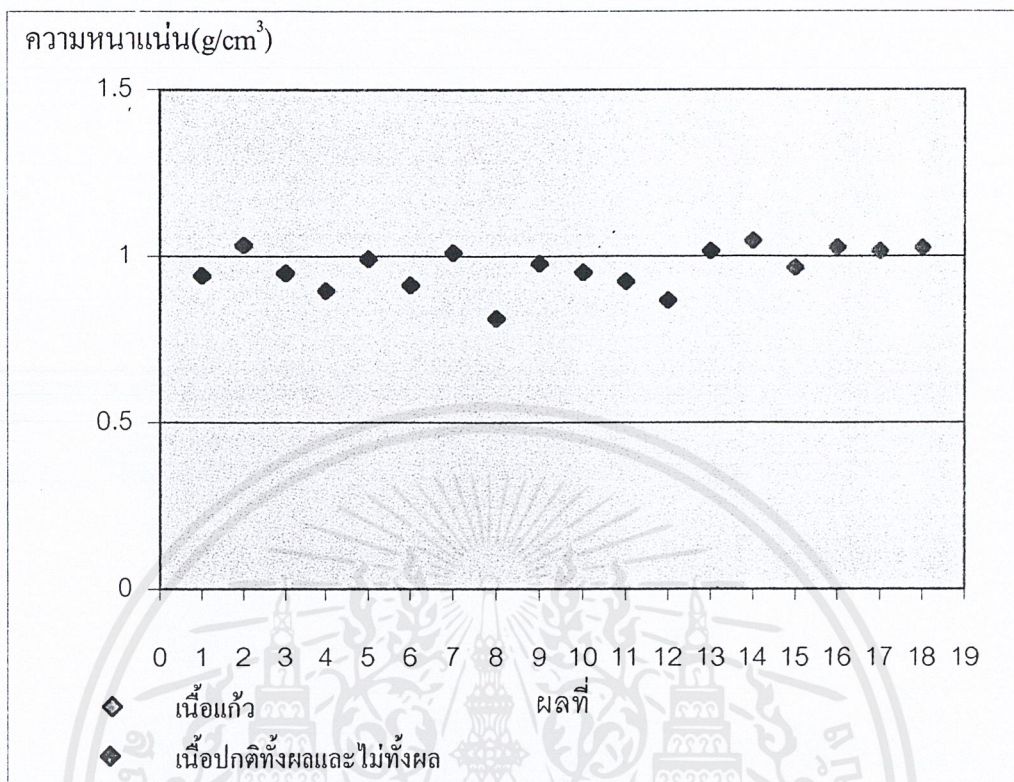
จากการทดลองพบว่า ผลมังคุดที่มีขนาดใหญ่จะมีปริมาตรมากและมีปริมาตรมากกว่าผลมังคุดที่มีขนาดเล็ก แสดงดังรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดกับปริมาตร

7.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกับลักษณะเนื้อผล

ผลมังคุดที่ลักษณะเป็นเนื้อแก้วจะมีความหนาแน่นมากและมีความหนาแน่นมากกว่าผลมังคุดที่มีเนื้อปกติ(เนื้อขาวนุ่ม) ซึ่งสอดคล้องกับรายงานของ ธนะชัย (2534) ที่กล่าวว่าผลมังคุดที่ลักษณะเป็นเนื้อแก้วจะมีความหนาแน่นมากกว่าผลมังคุดที่มีเนื้อปกติ (เนื้อขาวนุ่ม) และมีความหนาแน่นมากกว่าน้ำ



รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นกับลักษณะเนื้อผล

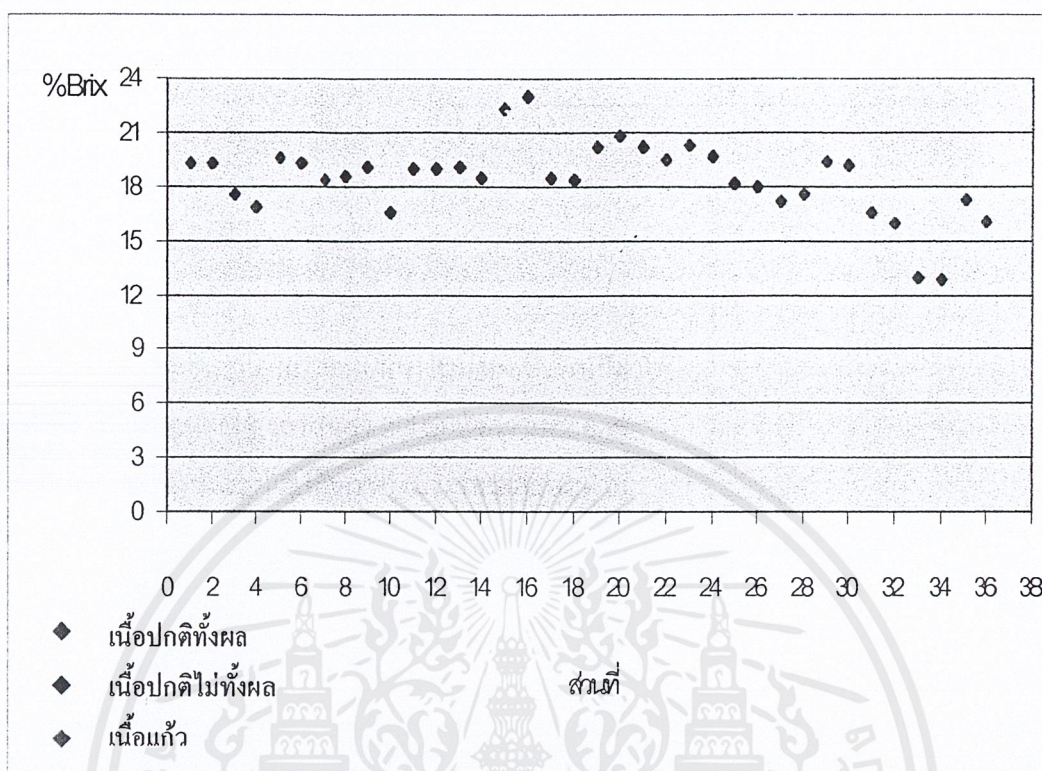
โดยพวกที่มีลักษณะเป็นเนื้อแก้วจะมีความหนาแน่นมากกว่า $1 (\text{g/cm}^3)$

7.4 Soluble solids (%Brix)ของน้ำคั้นกับลักษณะเนื้อผล

จากการแบ่งลักษณะของเนื้อผลพบว่า

- เนื้อปกติ (เนื้อขาวนุ่ม) ทั้งหมด จะมีค่า Soluble solids อยู่ในช่วง 18.4-20.8 %Brix
- เนื้อปกติ (เนื้อขาวนุ่ม) แต่ไม่ทั้งหมด จะมีค่า Soluble solids อยู่ในช่วง 16.6-23.0 %Brix
 - เนื้อขาวนุ่มและเน่า
 - เนื้อขาวนุ่มและขี้
 - เนื้อขาวนุ่มและมียางไหล
 - เนื้อขาวนุ่มและเปลือกติดเนื้อ
- เนื้อแก้ว จะมีค่า Soluble solids อยู่ในช่วง 12.9-19.4 %Brix

โดยแสดงดังรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า %Brix กับลักษณะเนื้อผล

ดังนั้นจะเห็นได้ว่าผลมังคุดที่มีลักษณะเป็นเนื้อแก้วส่วนใหญ่จะมีค่า Soluble solids (%Brix) น้อยกว่าผลที่มีเนื้อปกติ

7.5 ความแน่นเนื้อผลภายใน (Texture Properties)

ในแต่ละผลจะพบว่า ค่าต่าง ๆ ที่ทำการศึกษามีค่าใกล้เคียงกัน จึงไม่สามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าต่าง ๆ ได้ ทั้งนี้อาจเกิดจากใช้ค่าแรงในการกดผลมังคุดน้อยเกินไป เพราะผิวเปลือกของผลมังคุดมีลักษณะแข็ง

7.6 การตรวจสอบด้วย NIR Spectroscopy ยังไม่ได้ทำการทดลอง เนื่องจากเครื่องมือและอุปกรณ์ยังไม่พร้อม เพราะการใช้เครื่อง NIR Spectrometer จำกัดเวลาการใช้

บทที่ 5

การดำเนินการทดลองและผลการทดลอง

5.1 การดำเนินการทดลอง

ในการทดลองใช้มังคุด (*Garcinia Mangostana* L.) จำนวน 103 ผล จากสวนมังคุดที่ จังหวัดพัทลุง (เก็บ ณ วันที่ ตุลาคม 2544) โดยขนส่งมาทางรถยนต์(ใช้เวลาขนส่ง 2 วัน) ทำความสะอาดแล้วติดหมายเลขที่ผลมังคุดแต่ละผล พร้อมทั้งตั้ง-เกตุลักษณะผิวเปลือกของมังคุดแต่ละผลตามลำดับ(ทำการทดลองวันที่ผลมังคุดมาถึง ยังห้องปฏิบัติการเลย) การทดลองแบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอนดังนี้

ตอนที่ 1 ศึกษาองค์ประกอบทางกายภาพและลักษณะคุณภาพของผลมังคุด

การทดลองที่ 1 : การวัดขนาด น้ำหนักของผลมังคุดและพิจารณาลักษณะผิวเปลือกมังคุด

การทดลองที่ 2 : การวัดปริมาตรและความหนาแน่นของมังคุด

การทดลองที่ 3 : การวัดของแข็งที่ละลายได้ (Soluble Solids)

ตอนที่ 2 ศึกษาองค์ประกอบเนื้อผลภายในด้วย Universal Testing Machine

การทดลองที่ 4 : ทดสอบด้วยวิธี Compression Test และ Relaxation Test

ตอนที่ 3 Near - Infrared (NIR) Spectroscopy

การทดลองที่ 5 : การวัด NIR Spectrum ของผลมังคุดและน้ำมังคุด

การทดลองที่ 1 : ขนาด น้ำหนักและลักษณะผิวเปลือกของผลมังคุด

อุปกรณ์และวิธีการทดลองเหมือนการทดลองที่ 1 ในบทที่ 3

การทดลองที่ 2 : ปริมาตรและความหนาแน่นของมังคุด

อุปกรณ์และวิธีการทดลองเหมือนการทดลองที่ 2 ในบทที่ 3 แต่เปลี่ยนจากการใช้โทลูอินเป็นน้ำกลั่น

การทดลองที่ 3 : ของแข็งที่ละลายได้ (Soluble Solids)

อุปกรณ์และวิธีการทดลองเหมือนการทดลองที่ 3 ในบทที่ 3

ตอนที่ 2 ศึกษาความแน่นเนื้อด้วย Universal Testing Machine

การทดลองที่ 4 : ทดสอบด้วยวิธี Compression Test และ Relaxation Test อุปกรณ์

ในการทดลองนี้ใช้อุปกรณ์เช่นเดียวกับการทดลองที่ 4 ในบทที่ 3
ในการทดลองนี้ แบ่งการทดลองเป็น 2 ชุดคือ

1. การทดสอบที่แรง 10 N (ใช้มั่งคุดจำนวน 53 ผล)
2. การทดสอบที่แรง 30 N (ใช้มั่งคุดจำนวน 50 ผล)

วิธีการ

วิธีการทดลองเหมือนการทดลองที่ 4 ในบทที่ 3 โดยกระบวนการทดสอบ มี 2 ขั้นตอน คือ

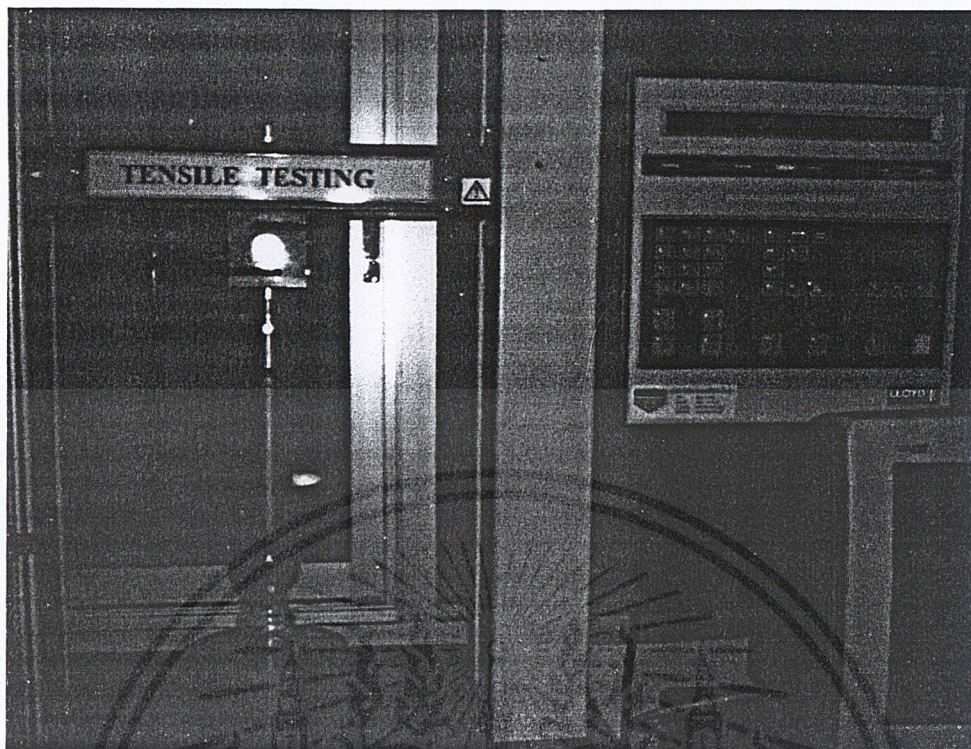
Double Cycle Load

กดมั่งคุดด้วย Plate ที่เคลื่อนที่ลงด้วยความเร็ว 10 mm/min จนได้ Load ที่ Maximum คือ 10 N แล้วควบคุมให้แผ่น Plate เคลื่อนที่ขึ้นจนเหลือ Load ที่ Minimum คือ 0.8 N และทำการกดซ้ำอีกครั้งจนได้ Load ที่ Maximum

และในการทดสอบที่แรง 30 N จะปฏิบัติเหมือนกับการทดสอบที่แรง 10 N ยกเว้นแต่กดมั่งคุดด้วย Plate ที่เคลื่อนที่ลงด้วยความเร็ว 10 mm/min จนได้ Load ที่ Maximum คือ 30 N แล้วควบคุมให้แผ่น Plate เคลื่อนที่ขึ้นจนเหลือ Load ที่ Minimum คือ 1.05 N และทำการกดซ้ำอีกครั้งจนได้ Load ที่ Maximum

Relaxation Test

หลังจากกดซ้ำครั้งที่สองจนได้ค่า Load ที่ Maximum แล้วควบคุมให้ Plate อยู่นิ่งจนกระทั่งเวลาในการทดสอบถึง 2 นาที แล้วจึงหยุดการทดลองและเก็บข้อมูลไว้ในเครื่องคอมพิวเตอร์



รูปที่ 5.1 การทดสอบด้วยวิธี Compression Test

ตอนที่ 3 Near - Infrared (NIR) Spectroscopy

การทดลองที่ 5 : การวัด NIR Spectrum ของมันจูด

5.1 การวัด NIR Spectrum ของมันจูด

อุปกรณ์และวิธีการทดลองเหมือนการทดลองที่ 5 ในบทที่ 3

5.2 การวัด NIR Spectrum ของน้ำมันจูด

1.1 นำน้ำมันจูดเทลงในขวด จนถึงระดับที่กำหนดไว้

1.2 บรรจุขวดลงในเครื่อง NIR Spectrometer

1.3 scan น้ำมันจูดโดยใช้คำสั่งทาง computer โดย scan 5 ครั้ง ต่อหนึ่งตัวอย่าง ที่ช่วงความยาวคลื่น $4000 - 10000 \text{ cm}^{-1}$ ทำซ้ำ 2 ซ้ำ (ในกรณีที่ตัวอย่างไม่พอจะทำ 1 ซ้ำ) และหลังจาก scan ตัวอย่างด้านที่ 1 (ด้าน A) เสร็จแล้วจึง scan ตัวอย่างน้ำมันจูดด้านที่ 2 (ด้าน B) โดยทำการทดลองซ้ำเหมือนด้านที่ 1

1.4 เก็บข้อมูล Spectrum ที่ได้ไว้ใน computer

1.5 ทำความสะอาดคูเวตที่ใช้ด้วยน้ำกลั่นและคว่ำทิ้งไว้บนกระดาษซับเป็นเวลา 2 นาที

1.6 scan น้ำมันจูดตามการทดลองที่ 5.1-5.5 จนครบทุกตัวอย่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.7 หลังจากได้ Spectra ของผลมังคุดและน้ำมังคุดแล้ว จะนำ Spectra เหล่านี้ไปทำ Calibration ต่อไป โดยแบ่งการ Calibration ออกเป็น

1. การวิเคราะห์ข้อมูลเชิงปริมาณ (Quantity) ของผลมังคุด
 2. การวิเคราะห์ข้อมูลเชิงปริมาณ (Quantity) ของน้ำมังคุด
 3. การวิเคราะห์ข้อมูลเชิงคุณภาพ (Quality) ของผลมังคุด
 4. การวิเคราะห์ข้อมูลเชิงคุณภาพ (Quality) ของน้ำมังคุด
- ซึ่งค่า Properties ต่าง ๆ ที่นำมาใช้ในการวิเคราะห์ จะกล่าวในบทที่ 6



5.2 ผลการทดลอง

ตอนที่ 1 องค์ประกอบทางกายภาพ และลักษณะคุณภาพของผลมังคุด

ผลการทดลองที่ 1 : ขนาด น้ำหนักและพิจารณาลักษณะผิวเปลือกของผลมังคุด

ตารางที่ 5.1 ขนาด น้ำหนักและลักษณะผิวเปลือกของผลมังคุด

NO.	น้ำหนัก (g)	ขนาด (cm)		ลักษณะผิวเปลือกของมังคุด		
		a	b	มีแมลง	มีรอยขีดข่วน	มียางไหล
1	45.06	4.422	4.348			
2	87.73	5.558	5.416			
3	49.41	4.622	4.448			
4	55.25	4.724	4.576			
5	52.43	4.598	4.562			
6	46.98	4.426	4.436			
7	44.25	4.336	4.338			
8	51.97	4.488	4.510			
9	51.10	4.558	4.576			
10	56.50	4.728	4.626			
11	69.19	5.016	4.008			
12	63.61	4.916	4.840			
13	50.65	4.560	4.402			
14	53.85	4.584	4.648			
15	56.77	4.794	4.748			
16	68.21	5.128	4.936			
17	63.13	4.800	4.718			
18	75.04	5.204	5.158			
19	63.75	4.966	4.834			
21	54.88	4.700	4.676			
22	71.05	5.286	5.024			

NO.	น้ำหนัก (g)	ขนาด		ลักษณะผิวเปลือกของมังคุด		
		a	b	มีแมลง	มีรอยขีดข่วน	มียางไหล
23	67.94	5.132	5.006			
24	73.80	5.160	5.138			
25	78.25	5.266	5.230			
26	54.69	4.682	4.666			
27	54.20	4.670	4.570			
28	50.65	4.570	4.492			
29	74.37	5.210	5.110			
30	68.84	5.064	4.998			
31	56.46	4.750	4.742			
32	76.01	5.258	5.248			
33	50.64	4.670	4.458			
34	84.40	5.330	5.234			
35	79.30	5.488	5.246			
36	82.43	5.432	5.344			
37	68.26	5.146	5.030			
38	65.13	4.950	5.008			
39	94.10	5.684	5.714			
40	90.56	5.808	5.418			
41	68.56	5.064	5.108			
42	75.22	5.084	5.298			
43	77.81	5.296	5.228			
44	88.85	5.508	5.568			
45	80.86	5.416	5.346			
46	85.02	5.424	5.422			
47	88.40	5.502	5.344			
49	88.47	5.660	5.500			
50	67.63	5.170	5.024			
51	56.52	4.722	4.702			
52	65.65	5.046	4.978			

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

NO.	น้ำหนัก (g)	ขนาด		ลักษณะผิวเปลือกของมังคุด		
		a	b	มีแมลง	มีรอยขีดข่วน	มียางไหล
53	74.25	5.308	5.130			
54	95.97	5.808	5.640			
55	97.44	5.780	5.648			
56	89.17	5.598	5.402			
57	85.49	5.652	5.266			
58	91.37	5.614	5.590			
59	105.00	6.128	5.718			
60	92.36	5.706	5.508			
61	64.22	4.964	4.950			
62	59.66	4.878	4.772			
63	79.83	5.358	5.284			
64	80.95	5.434	5.312			
65	112.9	6.050	5.848			
66	111.6	6.070	5.838			
67	116.7	6.118	5.932			
68	118.4	6.132	6.158			
69	63.85	4.894	4.890			
70	71.64	5.206	5.100			
71	82.52	5.408	5.344			
72	77.29	5.332	5.202			
73	82.82	5.654	5.370			
74	87.15	5.454	5.392			
75	92.13	5.616	5.594			
77	84.91	5.610	5.438			
78	97.80	5.710	5.738			
79	105.90	5.970	5.816			
80	86.42	5.606	5.482			
81	57.91	4.874	4.720			
82	90.25	5.516	5.484			

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

NO.	น้ำหนัก (g)	ขนาด		ลักษณะผิวเปลือกของมังคุด		
		a	b	มีแมลง	มีรอยขีดข่วน	มียางไหล
83	83.50	5.574	5.284			
84	96.36	5.850	5.712			
85	92.78	5.678	5.554			
86	108.10	6.220	5.820			
87	60.10	4.942	4.824			
88	100.50	5.978	5.450			
89	80.03	5.484	5.322			
90	84.46	5.674	5.624			
91	100.10	5.922	5.672			
92	108.60	6.118	5.830			
93	109.40	6.180	5.770			
94	121.70	6.256	6.160			
95	107.70	6.012	5.824			
96	79.12	5.276	5.234			
97	96.11	5.866	5.668			
98	108.70	6.048	5.844			
99	114.70	6.150	6.012			
100	112.70	6.152	5.890			
101	147.00	6.620	6.412			
102	91.82	5.742	5.544			
103	130.80	6.412	6.076			

หมายเหตุ : * มีแมลงหมายถึง ลักษณะผิวเปลือกมีรอยขีดแสดงถึง โคนแมลงทำลาย
 เครื่องหมาย | แสดงว่า เล็กน้อย
 || แสดงว่า ปานกลาง
 ||| แสดงว่า มาก

ผลการทดลองที่ 2 : ปริมาตรและความหนาแน่นของมังกูค

ตารางที่ 5.2 ปริมาตรและความหนาแน่นของมังกูค

NO.	m_1 (g)	m_4 (g)	m_5 (g)	V (cm ³)	ρ_m (g/cm ³)
1	45.06	1184.70	1281.56	43.86	1.027
2	87.73	1184.03	1268.74	84.71	1.036
3	49.41	1182.64	1232.51	49.87	0.991
4	55.25	1182.40	1237.14	54.74	1.009
5	52.43	1181.49	1233.30	51.81	1.012
6	46.98	1181.03	1227.48	46.45	1.011
7	44.25	1180.59	1223.66	43.07	1.027
8	51.97	1179.92	1230.14	50.22	1.035
9	51.10	1179.16	1228.98	49.82	1.026
10	56.50	1178.65	1234.79	56.14	1.006
11	69.19	1178.23	1246.67	68.44	1.011
12	63.61	1177.48	1239.70	62.22	1.022
13	50.65	1176.89	1226.22	49.33	1.027
14	53.85	1176.33	1230.15	53.82	1.001
15	56.77	1175.57	1231.37	55.80	1.017
16	68.21	1175.04	1243.14	68.10	1.002
17	63.13	1174.25	1237.04	62.79	1.005
18	75.04	1173.69	1249.98	46.29	0.984
19	63.75	1173.01	1237.22	64.21	0.993
20	51.03	1171.58	1121.85	50.27	1.015
21	54.88	1181.87	1236.75	54.88	1.000
22	71.05	1181.19	1252.08	70.89	1.002
23	67.94	1180.12	1248.34	68.22	0.996
24	73.80	1179.48	1252.50	73.02	1.011
25	78.25	1178.59	1255.37	76.78	1.019
26	54.69	1176.87	1231.04	54.17	1.010

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

NO.	m_1 (g)	m_4 (g)	m_5 (g)	V (cm ³)	ρ_m (g/cm ³)
27	54.20	1176.39	1230.69	54.30	0.998
28	50.65	1175.87	1225.85	49.98	1.013
29	74.37	1175.13	1249.70	74.57	0.997
30	68.84	1173.94	1243.08	69.14	0.996
31	56.46	1172.31	1228.95	56.64	0.997
32	76.01	1170.02	1247.10	77.08	0.986
33	50.64	1169.47	1219.41	49.94	1.014
34	84.80	1169.05	1252.53	83.48	1.008
35	79.30	1168.16	1247.65	79.49	0.998
36	82.43	1167.33	1248.86	81.53	1.011
37	68.26	1166.54	1233.68	67.14	1.017
38	65.13	1165.90	1231.23	65.33	0.997
39	94.10	1165.06	1259.20	94.14	1.000
40	90.56	1164.04	1258.98	94.94	0.954
41	68.56	1188.07	1255.42	67.35	1.018
42	75.22	1187.52	1262.26	74.74	1.006
43	77.81	1186.42	1263.09	76.67	1.015
44	88.85	1185.57	1273.58	88.01	1.010
45	80.86	1184.82	1268.11	83.29	0.971
46	85.02	1184.24	1269.55	85.31	0.997
47	88.40	1183.53	1270.95	87.42	1.011
48	92.39	1182.86	1274.45	91.59	1.009
49	88.47	1182.02	1270.83	88.81	0.996
50	67.63	1181.06	1248.09	67.03	1.009
51	56.52	1180.66	1237.23	56.57	0.999
52	65.65	1180.11	1242.94	62.83	1.045
53	74.25	1179.23	1253.45	74.22	1.000
54	95.97	1178.45	1274.75	96.30	0.997
55	97.44	1177.49	1275.49	98.00	0.994
56	89.17	1176.60	1265.10	88.50	1.008

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ขออนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

NO.	m_1 (g)	m_4 (g)	m_5 (g)	V (cm ³)	ρ_m (g/cm ³)
57	85.49	1175.89	1260.62	84.73	1.009
58	91.37	1173.33	1267.19	93.86	0.973
59	105.00	1173.09	1244.46	98.04	1.071
60	92.36	1172.18	1265.58	93.40	0.989
61	64.22	1196.56	1260.51	63.95	1.004
62	59.66	1196.19	1256.44	60.25	0.990
63	79.83	1195.50	1274.37	78.87	1.012
64	80.95	1194.58	1274.41	79.83	1.014
65	112.90	1193.66	1301.31	107.65	1.049
66	111.60	1192.32	1300.27	107.95	1.034
67	116.70	1191.67	1302.93	111.26	1.049
68	118.40	1190.47	1303.38	112.91	1.048
69	63.85	1189.20	1254.28	65.08	0.981
70	71.64	1189.01	1260.74	71.73	0.999
71	82.52	1188.17	1269.12	80.95	1.019
72	77.29	1187.18	1264.78	77.60	0.996
73	82.82	1186.30	1268.36	82.06	1.009
74	87.15	1185.56	1269.75	84.19	1.035
75	92.13	1184.76	1276.37	91.61	1.006
76	87.23	1183.94	1269.45	85.51	1.020
77	84.91	1183.30	1271.38	88.08	0.964
78	97.80	1182.43	1278.14	95.71	1.022
79	105.90	1181.55	1285.21	103.66	1.022
80	86.42	1180.61	1267.11	86.50	0.999
81	57.91	1194.91	1252.98	58.07	0.997
82	90.25	1194.30	1282.75	88.45	1.020
83	83.50	1193.20	1275.62	82.42	1.013
84	96.36	1192.13	1286.89	94.76	1.017
85	92.78	1190.93	1281.43	90.50	1.025
86	108.10	1189.59	1295.66	106.07	1.019

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานานาชาติ ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

NO.	m_1 (g)	m_4 (g)	m_5 (g)	V (cm ³)	ρ_m (g/cm ³)
87	60.10	1188.44	1248.21	59.77	1.006
88	100.50	1187.83	1284.79	96.96	1.037
89	80.03	1186.56	1268.64	82.08	0.975
90	84.46	1185.81	1271.27	85.46	0.988
91	100.10	1184.94	1282.95	98.01	1.022
92	108.60	1183.84	1290.70	106.86	1.016
93	109.40	1182.92	1292.67	109.75	0.997
94	121.70	1181.87	1300.76	118.89	1.024
95	107.70	1180.94	1286.87	106.03	1.015
96	79.12	1179.89	1258.46	78.57	1.007
97	9.11	1179.40	1275.43	96.03	1.001
98	108.70	1178.45	1285.30	106.85	1.017
99	114.70	1177.08	1290.30	113.22	1.013
100	112.70	1176.49	1287.29	110.80	1.017
101	147.00	1175.56	1315.02	139.46	1.054
102	91.82	1173.74	1266.56	92.82	0.989
103	130.80	1173.07	1300.99	127.92	1.023

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดลองที่ 3 : ของแข็งที่ละลายได้ (Soluble Solids)

จากการพิจารณาลักษณะเนื้อผลของมังคุดและวัดค่า Soluble Solids แสดงดังตารางที่ 5.3

ตารางที่ 5.3 ลักษณะเนื้อผลและค่า Soluble Solids

NO.	ส่วน	ลักษณะเนื้อ						%Brix
		เนื้อปกติ	ยางไหล	เน่า	เปลือกติด	ซำ	เนื้อแก้ว	
1	A	T						16.6
	B	T						16.5
2	A							18.1
	B							18.6
3	A							17.2
	B	T						17.3
4	A							17.4
	B							16.6
5	A	T						17.0
	B	T						17.1
6	A							17.4
	B							17.6
7	A	T						16.8
	B	T						17.0
8	A							17.8
	B							17.6
9	A							17.6
	B							17.6
10	A	T						17.8
	B	T						17.8
11	A							16.4
	B							17.1
12	A							17.2
	B							17.4

NO.	ส่วน	ลักษณะเนื้อ						%Brix
		เนื้อปกติ	ยางไหล	เนา	เปลือกติด	ซ้ำ	เนื้อแก้ว	
13	A							17.8
	B						T	18.0
14	A							16.4
	B							16.8
15	A							17.4
	B	T						17.3
16	A	T						16.7
	B	T						16.3
17	A							17.6
	B							17.0
18	A							16.6
	B	T						16.6
19	A							17.6
	B							17.2
20	A	T						16.8
	B							16.8
21	A							17.1
	B	T						17.0
22	A							16.8
	B	T						16.9
23	A	T						17.1
	B	T						17.2
24	A	T						16.6
	B							17.0
25	A							17.0
	B							17.6
26	A	T						17.8
	B	T						18.0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

NO.	ส่วน	ลักษณะเนื้อ						%Brix
		เนื้อปกติ	ยางไหล	เน่า	เปลือกติด	ซำ	เนื้อแก้ว	
27	A	T						17.2
	B	T						17.4
28	A	T						15.8
	B	T						15.9
29	A							16.3
	B							16.1
30	A	T						17.7
	B	T						17.6
31	A	T						17.4
	B	T						17.4
32	A	T						16.8
	B							16.4
33	A							17.4
	B			T				-
34	A							17.3
	B							17.1
35	A							17.0
	B							17.0
36	A	T						16.4
	B							16.8
37	A							15.8
	B							15.6
38	A							17.1
	B							17.6
39	A							17.0
	B							17.2
40	A	T						14.4
	B	T						14.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

NO.	ส่วน	ลักษณะเนื้อ						%Brix
		เนื้อปกติ	ยางไหล	เนา	เปลือกติด	ขำ	เนื้อแก้ว	
41	A							17.2
	B							17.1
42	A	T						17.3
	B							17.6
43	A							17.4
	B							17.7
44	A							17.2
	B							17.6
45	A	T						17.4
	B	T						17.2
46	A							16.0
	B							16.4
47	A							16.8
	B	T						17.1
48	A							16.3
	B							16.8
49	A	T						17.1
	B	T						17.2
50	A							18.3
	B	T						18.5
51	A	T						18.0
	B	T						18.1
52	A							15.6
	B							15.5
53	A	T						18.4
	B	T						18.0
54	A	T						16.3
	B							16.0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

NO.	ส่วน	ลักษณะเนื้อ						%Brix
		เนื้อปกติ	ยางไหล	เนา	เปลือกติด	ชำ	เนื้อแก้ว	
55	A	T						18.6
	B	T						17.8
56	A							15.8
	B	T						17.0
57	A						T	16.4
	B							16.0
58	A							16.6
	B	T						16.0
59	A	T						17.8
	B							17.6
60	A							17.0
	B							16.8
61	A	T						17.1
	B	T						16.9
62	A	T						18.0
	B	T						17.4
63	A							16.2
	B							16.4
64	A							17.2
	B							17.6
65	A							16.7
	B							16.9
66	A							16.9
	B							17.7
67	A							16.5
	B							16.6
68	A							16.4
	B							16.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

NO.	ส่วน	ลักษณะเนื้อ						%Brix
		เนื้อปกติ	ยางไหล	เน่า	เปลือกคืด	ซำ	เนื้อแก้ว	
69	A	T						17.2
	B	T						17.0
70	A							17.8
	B	T						17.0
71	A						T	15.4
	B							14.4
72	A	T						16.4
	B	T						16.3
73	A							17.2
	B							16.8
74	A							17.2
	B							17.5
75	A	T						17.8
	B	T						17.4
76	A							16.6
	B							16.1
77	A	T						15.8
	B	T						16.3
78	A							17.6
	B						T	17.3
79	A							16.8
	B							17.2
80	A							16.4
	B							15.8
81	A	T						17.6
	B	T						17.8
82	A							15.2
	B							14.7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

NO.	ส่วน	ลักษณะเนื้อ						%Brix
		เนื้อปกติ	ยางไหล	เน่า	เปลือกติด	ชำ	เนื้อแก้ว	
83	A	T						17.8
	B							17.0
84	A							17.1
	B							16.8
85	A							-
	B							17.0
86	A							16.3
	B							16.4
87	A							17.6
	B							17.4
88	A							16.6
	B						T	16.6
89	A	T						18.6
	B	T						19.0
90	A	T						17.6
	B							17.6
91	A							16.9
	B							16.7
92	A							16.7
	B	T						16.7
93	A							17.3
	B	T						17.2
94	A		T				T	17.0
	B							16.9
95	A							15.4
	B							14.9
96	A							15.8
	B							16.0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

NO.	ส่วน	ลักษณะเนื้อ						%Brix
		เนื้อปกติ	ยางไหล	เนา	เปลือกติด	ซำ	เนื้อแก้ว	
97	A	T						14.5
	B	T						15.0
98	A						T	16.8
	B						T	17.0
99	A							16.2
	B							16.5
100	A							16.1
	B							16.1
101	A	T						16.7
	B	T						16.2
102	A						T	17.4
	B						T	17.6
103	A							15.6
	B							15.4

จากการดูลักษณะเนื้อผล แบ่งเป็น 6 ลักษณะ ดังนี้

1. เนื้อขาวนุ่ม
2. เปลือกติดเนื้อ
3. เนื้อผลซำ
4. เนื้อแก้ว
5. มียางไหลปนอยู่กับเนื้อผล
6. เนื้อผลเนาเสียว

หมายเหตุ : T คือ ลักษณะเนื้อที่เป็นแบบนี้ทั้งส่วน

เครื่องหมาย | คือ ลักษณะเนื้อที่เป็นแบบนี้เล็กน้อย

|| คือ ลักษณะเนื้อที่เป็นแบบนี้ปานกลาง

||| คือ ลักษณะเนื้อที่เป็นแบบนี้มาก

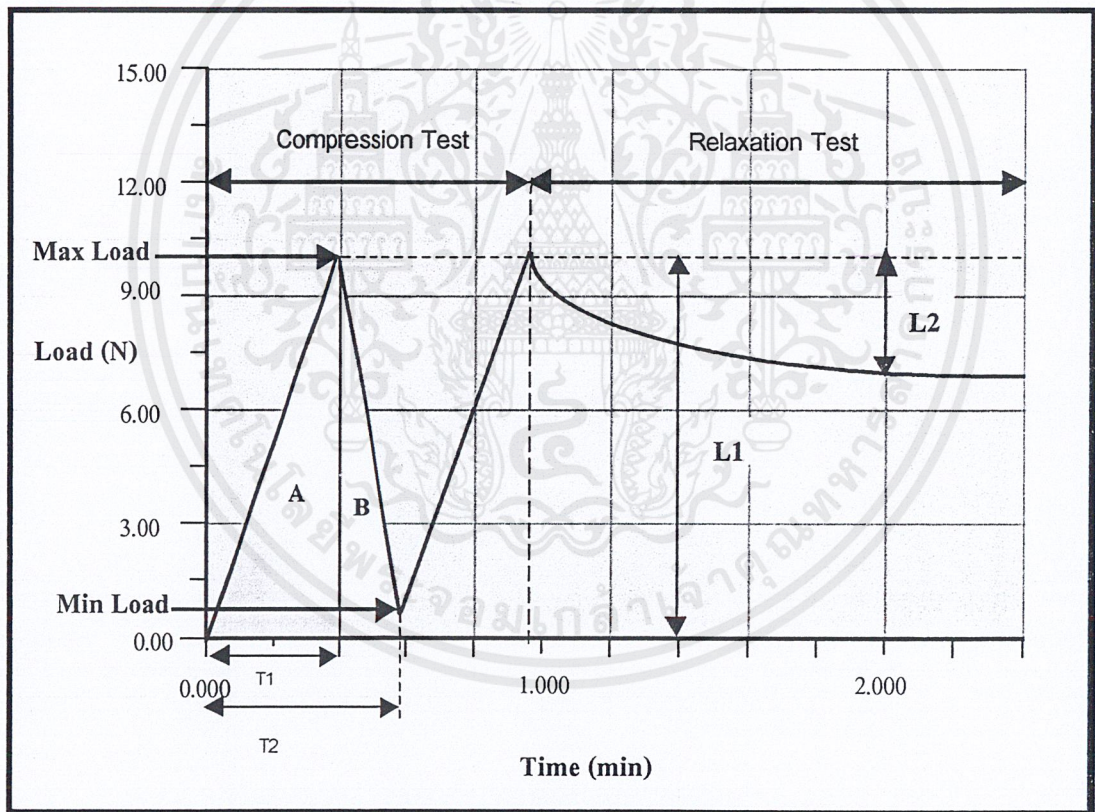
ตอนที่ 2 ความหนาแน่นเนื้อด้วย Universal Testing Machine

ผลการทดลองที่ 4 : Texture Properties ของมันจูด โดยเครื่อง Universal Testing Machine (UTM)

การทดสอบโดยวิธี Compression Test และ Relaxation Test แบ่งการทดสอบเป็นการกดที่ใช้แรง 2 แรง คือ

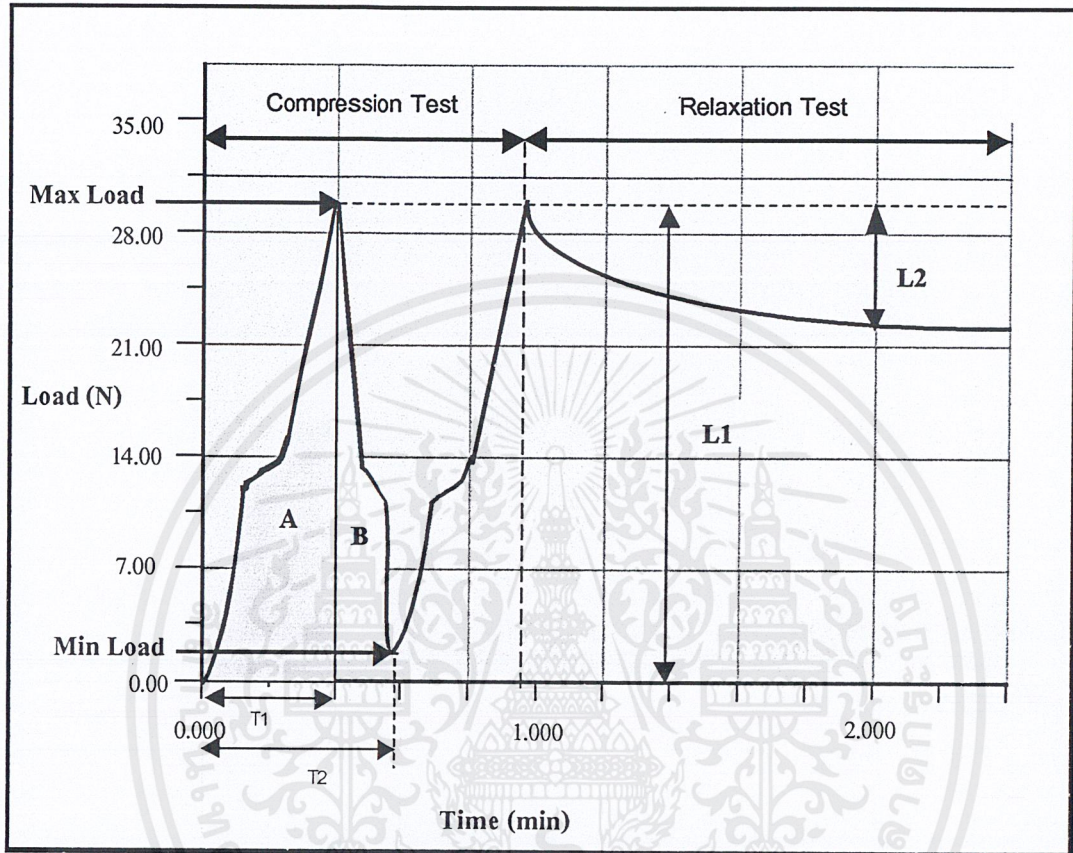
1. ทดสอบที่แรง 10 N
2. ทดสอบที่แรง 30 N

โดยการทดสอบที่แรง 10 N ผลการทดสอบที่ได้จะมีลักษณะเป็นกราฟดังรูปที่ 5.2



รูปที่ 5.2 กราฟผลการทดลอง Compression Test และ Relaxation Test ที่แรง 10 N

โดยการทดสอบที่แรง 30 N ผลการทดสอบที่ได้จะมีลักษณะเป็นกราฟดังรูปที่ 5.3



รูปที่ 5.3 กราฟผลการทดลอง Compression Test และ Relaxation Test ที่แรง 30 N

ค่าที่ได้จากกราฟทั้งสอง มีดังนี้

T1 = เวลาที่ Maximum Load (min)

T2 = เวลาที่ Minimum Load (min)

L1 = Maximum Load (N)

L2 = Load ที่ลดลงขณะ Relaxation ณ ระยะ plate กดคงที่ คือเมื่อ plate อยู่หนึ่งที่

Maximum Load (deformation คงที่) (N)

D1 = Deformation ที่ Maximum Load (mm)

D2 = Deformation ที่ Minimum Load (mm)

A = พื้นที่ใต้กราฟของ Stage ที่ 1 (N- min)

B = พื้นที่ใต้กราฟของ Stage ที่ 2 (N- min)

โดย D1 = T1 × 10 (mm/min)

D2 = T2 × 10 (mm/min)

การคำนวณหาค่า Texture Properties

1. Hardness (N/mm) = L1/D1

2. Relaxation (%) = L2 /L1

3. Degree Of Elasticity = (D1 – D2)/D1

4. Energy Absorption (N mm) = (A×10 mm/min) – (B ×10 mm/min)

ค่า Texture Properties แสดงไว้ในตารางที่ 5.4 และ 5.5

ตารางที่ 5.4 ค่า Texture Properties ที่แรง 10 N

NO	A				B			
	Hardness (N/mm)	Relaxation (%)	Degree Of Elasticity	Energy Absorption (N mm)	Hardness (N/mm)	Relaxation (%)	Degree Of Elasticity	Energy Absorption (N mm)
10	7.265	36.16	0.490	27.13	7.651	33.40	0.503	25.42
11	6.818	30.98	0.340	11.76	9.882	31.57	0.599	17.35
12	4.958	37.42	0.431	36.86	5.600	33.40	0.446	33.23
13	4.584	38.72	0.384	41.54	5.758	36.09	0.389	37.98
14	7.716	34.96	0.707	25.66	6.069	34.83	0.436	28.56
15	4.550	36.22	0.282	27.16	6.460	34.63	0.451	30.48
16	6.173	34.83	0.407	23.98	7.239	33.47	0.418	19.65
17	5.594	36.09	0.434	32.30	6.139	32.14	0.382	20.32
18	11.235	33.66	0.636	17.45	6.718	30.98	0.450	18.64
19	5.970	30.91	0.365	17.45	11.583	32.21	0.637	16.17
20	5.138	36.09	0.389	34.25	7.180	37.49	0.501	36.09
21	6.886	34.76	0.473	25.45	8.547	34.89	0.611	25.08
23	5.853	30.85	0.352	-	7.820	32.14	0.529	21.26
25	4.776	36.03	0.385	35.52	6.374	36.03	0.470	30.16

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

NO	A				B			
	Hardness (N/mm)	Relaxation (%)	Degree Of Elasticity	Energy Absorption (N mm)	Hardness (N/mm)	Relaxation (%)	Degree Of Elasticity	Energy Absorption (N mm)
27	-	-	-	-	8.425	32.21	0.503	18.90
29	7.543	33.47	0.397	13.27	11.772	28.06	0.656	12.26
31	5.248	32.14	0.330	21.07	7.747	34.76	0.513	24.11
33	7.583	34.76	0.530	27.33	6.434	34.76	0.466	29.70
35	9.786	-	0.517	15.13	12.448	30.36	0.681	13.43
37	7.786	34.63	0.464	20.28	10.526	33.6	0.578	37.00
39	9.901	32.00	0.687	19.71	8.497	32.21	0.644	22.1
41	7.206	34.89	0.541	29.62	8.010	36.38	0.562	30.20
43	9.340	34.83	0.604	21.65	9.330	34.63	0.597	20.47
45	11.890	-	0.692	13.30	10.352	-	0.675	18.83
47	12.781	28.06	0.569	13.48	9.307	30.98	0.617	18.37
49	7.481	34.76	0.729	24.19	8.141	33.66	0.59	27.69
51	6.305	37.01	0.545	38.42	7.093	35.19	0.528	33.18
53	9.980	30.35	0.633	17.82	12.470	30.28	0.649	17.17
55	10.851	32.04	0.599	13.74	10.094	33.63	0.622	21.94
57	10.923	33.76	0.564	15.57	10.690	33.89	0.552	27.21
59	14.193	32.17	0.675	13.68	15.405	35.58	0.614	11.86
61	6.471	38.61	0.317	35.45	6.851	38.61	0.517	36.66
63	9.912	33.89	0.632	21.48	8.542	33.83	0.545	20.99
65	8.197	33.63	0.442	14.81	16.338	33.63	0.702	9.72
67	8.337	38.48	0.573	28.90	9.598	36.89	0.558	20.23
69	7.762	32.31	0.564	25.76	9.382	33.43	0.605	-
71	-	-	-	-	8.917	38.61	0.559	19.93
73	9.806	30.62	0.961	18.54	10.453	30.14	0.583	16.27
75	7.935	31.90	0.492	19.79	12.188	36.76	0.563	20.14

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

NO	A				B			
	Hardness (N/mm)	Relaxation (%)	Degree Of Elasticity	Energy Absorption (N mm)	Hardness (N/mm)	Relaxation (%)	Degree Of Elasticity	Energy Absorption (N mm)
77	10.724	28.73	0.619	12.75	11.241	27.28	0.620	14.71
79	10.361	32.17	0.581	16.40	10.265	35.19	0.603	20.58
81	9.617	31.97	0.599	19.62	11.121	33.56	0.607	17.04
83	9.720	30.35	0.572	17.21	10.846	30.42	0.663	16.30
85	8.286	35.06	0.560	23.73	8.006	33.56	0.554	23.09
87	6.526	37.01	0.493	38.05	7.305	36.89	0.527	29.16
89	6.526	37.01	0.531	35.60	7.650	33.70	0.598	29.14
91	11.849	31.97	0.668	13.73	9.282	32.24	0.558	18.63
93	9.931	-	0.687	18.76	-	-		
95	9.662	33.43	0.623	19.64	9.796	33.89	0.593	17.88
97	8.364	35.45	0.586	26.52	7.783	36.95	0.520	24.44
99	9.872	35.26	0.561	25.40	8.088	33.76	0.507	18.20
101	10.211	36.06	0.538	18.41	12.190	33.50	0.656	15.86
103	8.211	35.32	0.592	24.28	8.874	35.58	0.563	21.87

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.5 ค่า Texture Properties ที่แรง 30 N

NO	A				B			
	Hardness (N/mm)	Relaxation (%)	Degree Of Elasticity	Energy Absorption (N mm)	Hardness (N/mm)	Relaxation (%)	Degree Of Elasticity	Energy Absorption (N mm)
1	8.145	40.06	0.509	340.9	8.203	40.06	0.483	343.1
2	12.993	-	0.712	152.7	10.34	36.79	0.631	172.4
3	8.699	37.28	0.531	254.1	8.020	37.36	0.494	262.1
4	8.143	40.06	0.520	265.1	81.97	35.67	0.547	251.3
5	7.897	37.85	0.499	279.5	7.579	41.14	0.452	328.6
6	5.950	38.94	0.377	409.5	6.070	-	0.347	337.8
7	7.597	-	0.403	312.8	7.366	-	0.406	339.0
8	6.968	41.72	0.433	348.1	6.415	40.10	0.372	319.6
9	7.133	38.96	0.440	407.5	7.678	39.00	0.462	343.3
22	9.869	41.26	0.384	209.1	10.433	-	-	-
24	9.712	37.77	0.593	216.2	10.064	36.79	0.631	230.5
26	8.075	-	0.550	336.9	7.159	40.06	0.524	369.4
28	11.332	-	0.613	192.8	9.659	-	0.561	273.5
30	-	-	-	-	8.910	-	0.601	313.7
32	10.724	45.71	0.629	228.07	11.485	-	0.694	185.5
34	11.093	-	0.705	226.4	13.698	-	0.730	125.8
36	9.617	38.04	0.522	213.9	9.725	37.83	0.584	178.5
38	6.410	-	-	-	8.087	47.32	0.539	299.7
40	11.024	35.65	0.658	142.6	13.507	34.69	0.751	133.1
42	8.790	38.88	0.640	317.4	9.117	41.74	0.625	269.0
44	11.505	34.69	0.724	166.3	10.920	-	0.670	201.9
46	9.744	42.27	0.693	227.0	9.804	40.08	0.656	239.2
48	13.307	-	0.644	150.4	11.453	-	0.680	165.6
50	9.564	34.61	0.555	206.4	8.460	37.85	0.588	300.9
52	12.780	40.50	0.534	141.2	16.290	-	0.463	96.59
54	12.271	36.55	0.693	156.7	11.945	34.23	0.673	151.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ในเชิงพาณิชย์

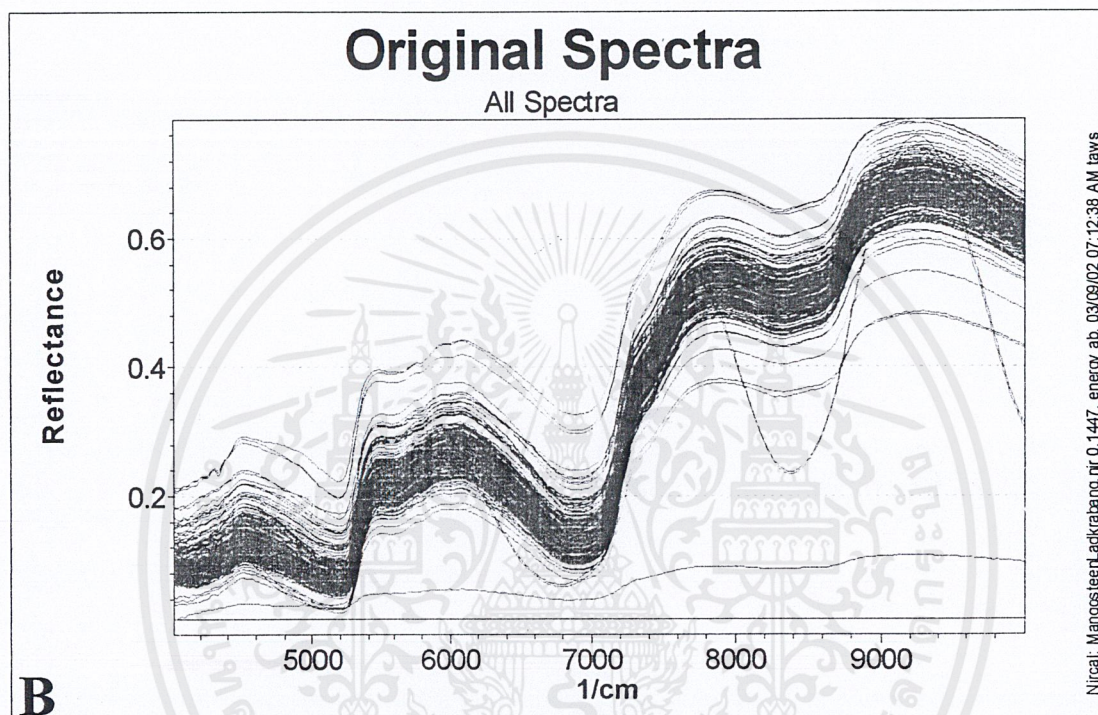
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

NO	A				B			
	Hardness (N/mm)	Relaxation (%)	Degree Of Elasticity	Energy Absorption (N mm)	Hardness (N/mm)	Relaxation (%)	Degree Of Elasticity	Energy Absorption (N mm)
56	10.945	33.94	0.667	177.6	9.471	40.55	0.630	286.0
58	10.948	-	0.673	185.5	8.857	-	0.598	290.4
60	10.125	-	0.639	184.3	12.229	-	0.664	139.9
62	8.867	40.45	0.542	246	9.359	40.52	0.594	264.00
64	10.611	40.49	0.609	208.6	8.725	36.53	0.570	246.1
66	13.027	-	0.735	130.1	11.118	32.91	0.705	144.0
68	9.489	34.29	0.615	204.4	9.323	35.54	0.600	202.2
70	10.047	41.67	0.685	252.7	10.169	37.30	0.623	233.9
72	12.055	-	-	-	10.359	36.44	0.657	224.7
74	9.191	-	0.61	193.1	11.730	-	-	-
76	12.029	-	0.637	144.8	12.094	-	0.701	149.0
78	8.528	37.89	0.595	229.7	8.833	37.87	0.604	247.4
80	-	-	-	-	-	-	-	-
82	16.444	-	0.646	156.2	9.842	-	-	-
84	9.980	-	0.582	191.6	10.027	-	-	-
86	-	-	-	-	-	-	-	-
88	9.947	-	-	-	9.504	31.50	0.590	173.0
90	10.903	-	0.676	167.6	12.132	-	0.698	137.5
92	13.245	-	0.739	120.7	12.981	32.89	0.686	117.4
94	15.000	27.76	0.784	104.4	16.996	-	0.776	70.3
96	8.788	39.09	0.598	253.2	8.815	-	0.579	258.8
98	11.488	33.00	0.714	151.8	11.422	35.46	0.696	155.3
100	13.833	-	0.726	118.5	13.286	32.87	0.662	100.4
102	10.459	39.17	0.65	201.0	10.508	-	-	-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

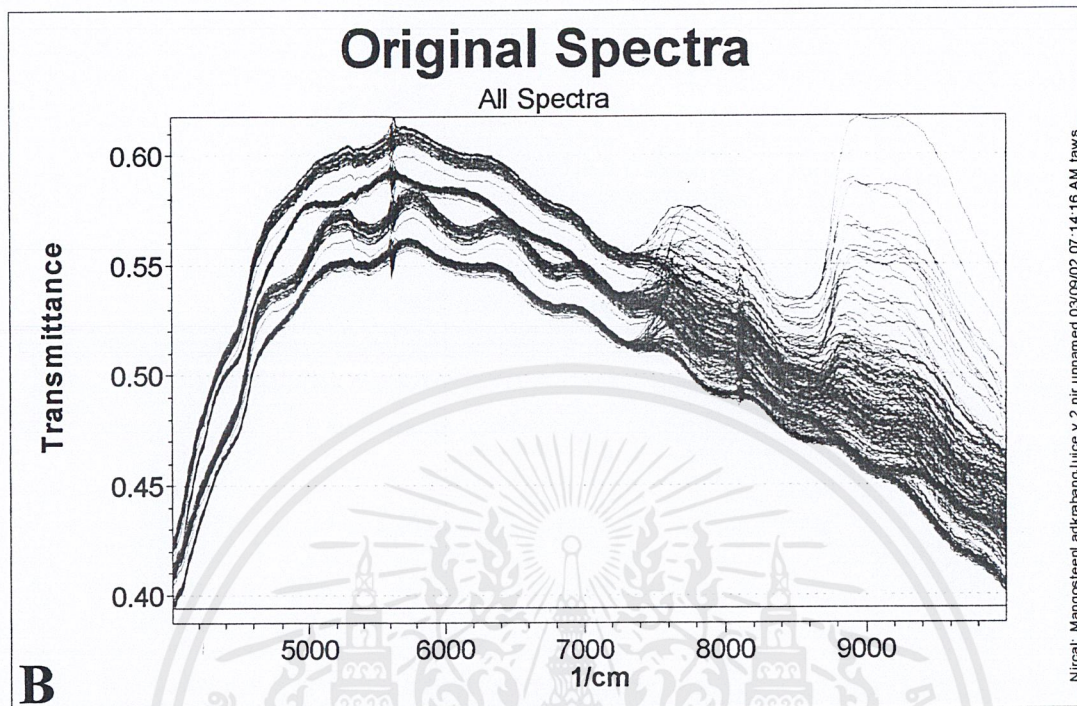
ตอนที่ 3 Near - Infrared (NIR) Spectroscopy

ผลการทดลองที่ 5 : NIR Spectrum ของผลมังคุดและน้ำมังคุดซึ่งแสดงการเปลี่ยนแปลง Reflectance เมื่อ wavelength เปลี่ยนแปลงไปของผลมังคุดและน้ำมังคุด ดังรูปที่ 5.4 และ 5.5 ตามลำดับ



รูปที่ 5.4 NIR Original Spectra ของผลมังคุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.5 NIR Original Spectra ของน้ำมังคุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6

วิจารณ์ผลการทดลองจริง

จากการทดลองศึกษาองค์ประกอบทางกายภาพและลักษณะคุณภาพของผลมังคุดในการทดลองจริง พบว่าเมื่อพิจารณาลักษณะผิวเปลือกของผลมังคุดแล้วได้ว่าลักษณะผิวเปลือกไม่มีความสัมพันธ์กับลักษณะเนื้อภายในผล และสามารถวิจารณ์ผลจากการทดลองจริง ได้ดังนี้

ตอนที่ 1 วิเคราะห์ผลการทดลอง

โดยแบ่งเป็นองค์ประกอบทางกายภาพ, ความแน่นเนื้อ และลักษณะคุณภาพ

1. องค์ประกอบทางกายภาพ

ได้ผลการทดลองดังตารางที่ 6.1

ตารางที่ 6.1 ค่าของผลการทดลองทางกายภาพ

การทดสอบ	ข้อมูล (จำนวนตัวอย่าง 103 ผล)	การวิเคราะห์ทางสถิติ				
		N	Max	Min	\bar{X}	SD
หาน้ำหนักและ ขนาดของมังคุด	- น้ำหนัก (g)	103	146.95	44.25	80.24	21.15
	- เส้นผ่าศูนย์กลาง (cm)					
	ด้าน a	103	6.620	4.336	5.361	0.529
	ด้าน b	103	6.412	4.008	5.226	0.486
หาปริมาตรและ ความหนาแน่น ของมังคุด	- ปริมาตร (cm ³)	103	139.46	43.07	79.12	20.64
	- ความหนาแน่น (g/cm ³)	103	1.071	0.954	1.006	0.019
	- ความถ่วงจำเพาะ (SG)	103	1.071	0.954	1.006	0.019
Soluble solids	- % Brix	204	19.0	14.4	16.9	0.8

2. ความแน่นเนื้อ

ได้ผลการทดลองดังตารางที่ 6.2

ตารางที่ 6.2 ค่าของผลการทดลองความแน่นเนื้อ

การทดสอบ	ข้อมูล (จำนวนตัวอย่าง 103 ผล)		การวิเคราะห์ทางสถิติ				SD	
			N	Max	Min	\bar{X}		
ความแน่นเนื้อผล ค้ำย Universal Testing Machine	-Hardness (N/mm)	10 N	95	16.444	5.950	10.099	2.129	
		30 N	103	16.996	4.550	8.868	2.487	
	-Relaxation (%)	10 N	95	38.72	27.28	33.85	2.50	
		30 N	60	47.32	27.76	37.66	3.41	
	-Degree of elasticity	10 N	102	0.961	0.282	0.552	0.110	
		30 N	89	0.961	0.347	0.602	0.104	
	-Energy absorption (Nmm)	10 N	100	41.54	9.72	27.9	29.33	
		30 N	90	409.5	70.3	208.42	90.63	
		- Bioyield Point		95	15.53	8.62	11.21	0.75

3. องค์ประกอบทางคุณภาพ ประกอบค้ำย

3.1 ลักษณะผิวเปลือกภายนอก

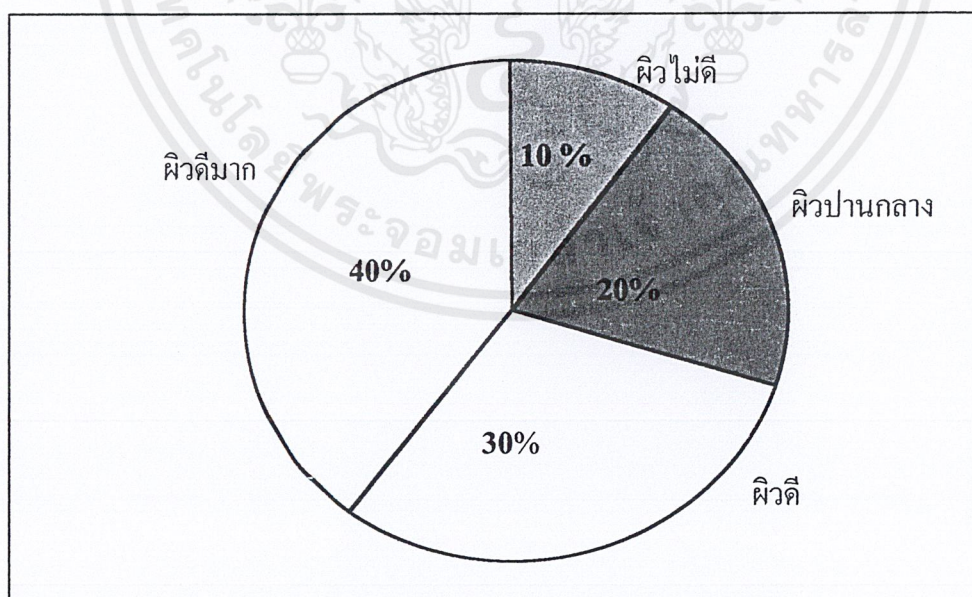
จากการทดลองพิจารณาลักษณะผิวจะแบ่งออกเป็นระดับดังตารางที่ 6.3

ตารางที่ 6.3 ระดับลักษณะ ฌ ผิวเปลือกภายนอกของมังคุด

ระดับ	ลักษณะผิวภายนอก	จำนวน ผล	รวม
1. ผิวดีมาก	ผิวเกลี้ยง	10	27
	มีรอยขีดข่วน(ปริมาณน้อย-ปานกลาง)	17	
2. ผิวดี	มีรอยขีดข่วน(ปริมาณมาก)	34	38

ระดับ	ลักษณะผิวหนังนอก	จำนวน ผล	รวม
	มีแมลง(ปริมาณน้อย)หรือมีรอยขีดข่วนด้วย (ปริมาณน้อย-ปานกลาง)	3	
	มียางไหล(ปริมาณน้อย)หรือมีรอยขีดข่วนด้วย (ปริมาณน้อย-ปานกลาง)	1	
3.ผิวหนังกลาง	มีแมลง(ปริมาณปานกลาง)หรือมีรอยขีดข่วนด้วย (ปริมาณน้อย-ปานกลาง)	19	22
	มีแมลงกับยางไหล(ปริมาณน้อย) หรือรอยขีดข่วนด้วย (ปริมาณน้อย -ปานกลาง)	3	
4. ผิวไม่ดี	มีแมลง(ปริมาณมาก) หรือมีรอยขีดข่วนด้วย (ปริมาณน้อย-ปานกลาง)	9	16
	มีแมลงกับยางไหล(ปริมาณปานกลาง-มาก) หรือมี รอยขีดข่วนเพิ่มมา(ปริมาณน้อย-ปานกลาง)	7	

ปริมาณผลมังคุดที่แยกตามลักษณะผิวดังกล่าวแสดง ดังรูปที่ 6.1



รูปที่ 6.1 ปริมาณผลมังคุดที่แยกตามลักษณะผิว

3.2 ลักษณะเนื้อ

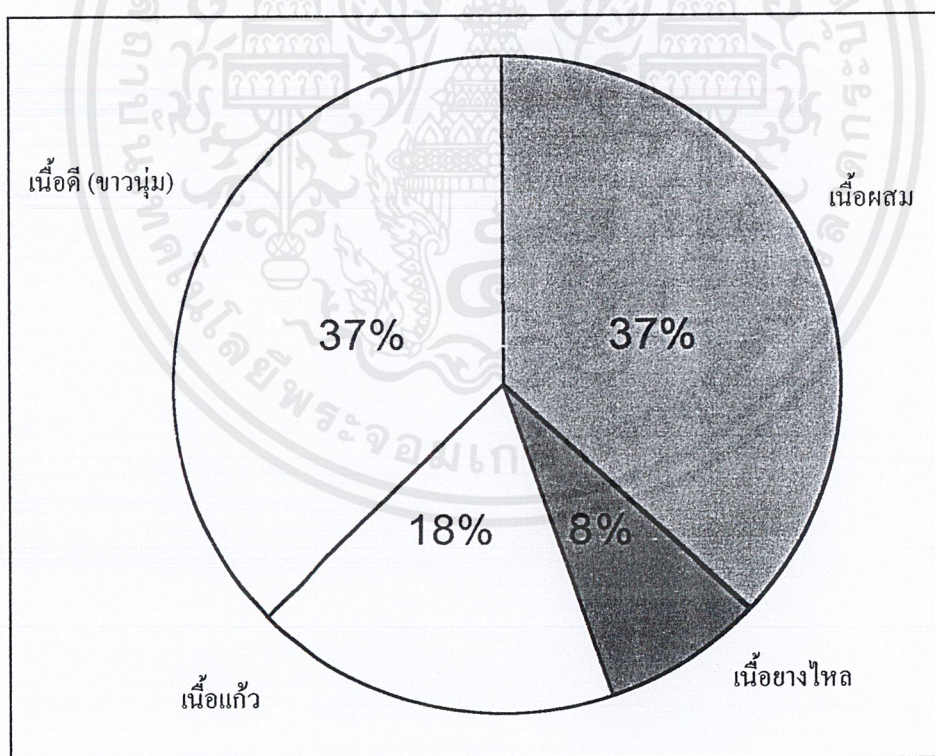
จากการทดลองพิจารณาลักษณะเนื้อจะแบ่งออกเป็นลักษณะดังนี้

1. เนื้อขาวนุ่ม
2. เนื้อเน่าหรือเสีย
3. เนื้อแก้ว
4. เนื้อยางไหล
5. มีเปลือกติดติดเนื้อ

และสามารถแบ่งเพื่อทำการพิจารณาได้เป็น 4 ประเภท ดังนี้

1. ผลที่มีเฉพาะเนื้อดี (ขาวนุ่ม)
2. ผลที่มีเฉพาะเนื้อมียางไหล
3. ผลที่มีเฉพาะเนื้อแก้ว
4. ผลที่มีเนื้อผสม

ปริมาณผลมังคุดที่แยกตามลักษณะเนื้อดังกล่าวแสดง ดังรูปที่ 6.2



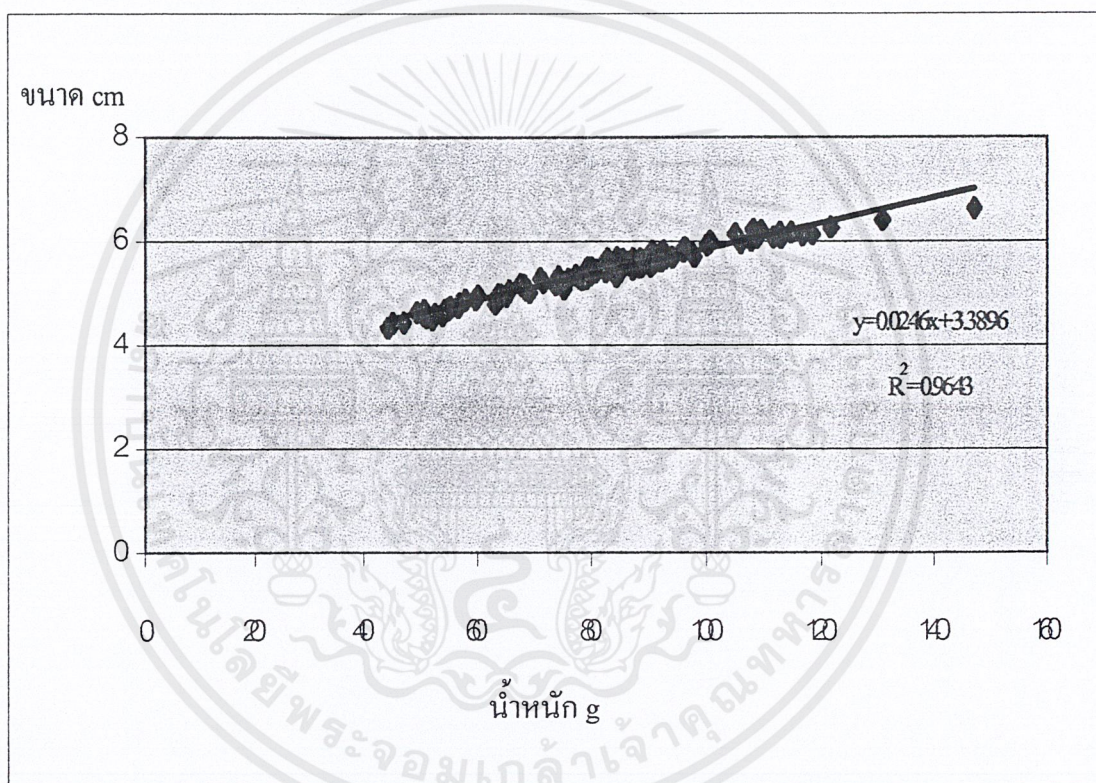
รูปที่ 6.2 ปริมาณผลมังคุดที่แยกตามลักษณะเนื้อ

ตอนที่ 2 การหาความสัมพันธ์ต่าง ๆ จากการทดลอง

1. ความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติทางกายภาพเชิงปริมาณ

1.1 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดกับน้ำหนักผล

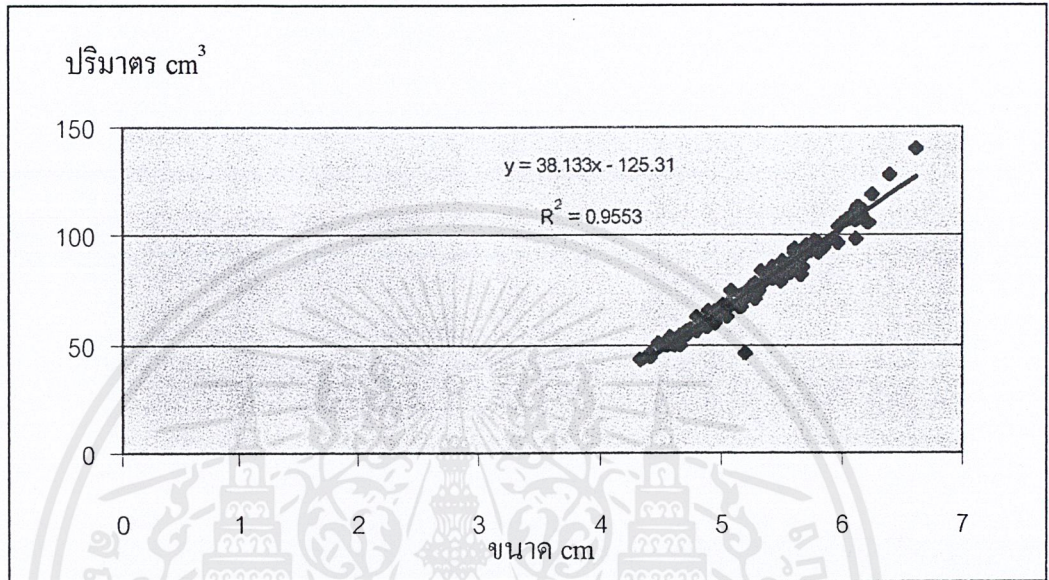
ขนาดจะใช้ค่าความยาวด้าน a เพราะเป็นด้านที่รับแรงได้มากกว่า ด้าน b เนื่องจากมีพื้นที่หน้าตัดน้อยกว่า จากการทดลองจริงที่ศึกษาพบว่า ผลมังคุดที่มีขนาดใหญ่จะมีน้ำหนักมากและมีน้ำหนักมากกว่าผลมังคุดที่มีขนาดเล็ก แสดงดังรูปที่ 6.3



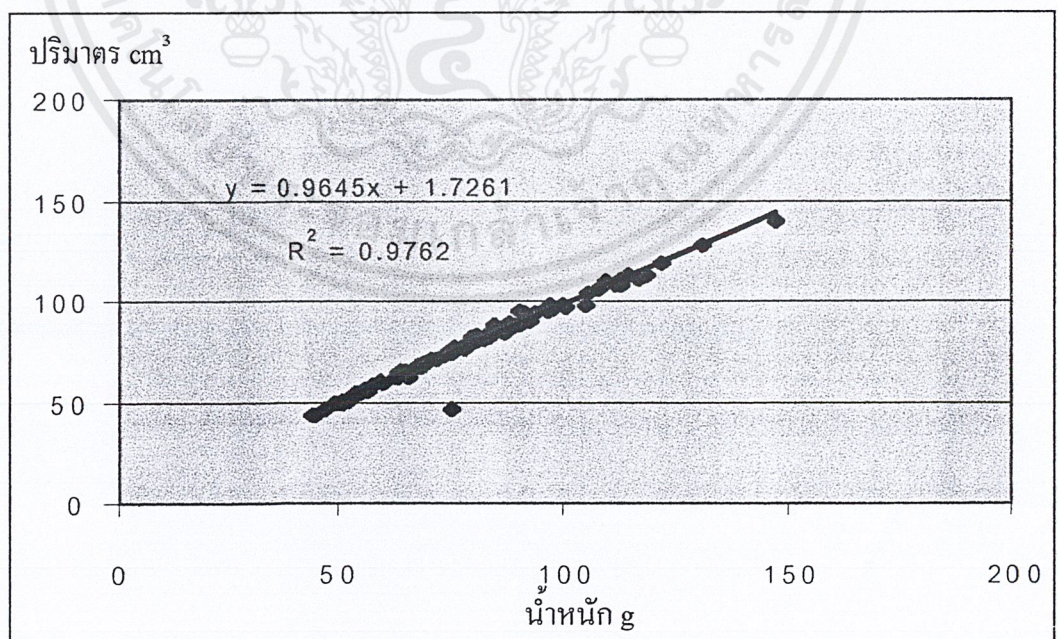
รูปที่ 6.3 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดและน้ำหนัก

1.2 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรกับขนาดผลน้ำหนักร

ปริมาตรและน้ำหนักจะมีความสัมพันธ์กันในลักษณะแปรผันกันดังรูปที่ 6.4 และมีความสัมพันธ์เช่นเดียวกันระหว่างปริมาตรกับน้ำหนักผล ดังรูปที่ 6.5



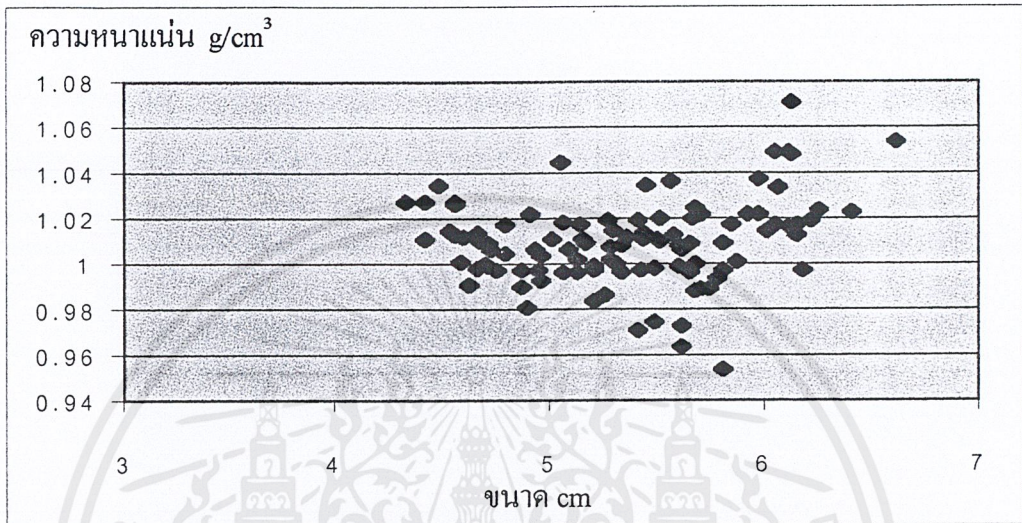
รูปที่ 6.4 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรกับขนาด



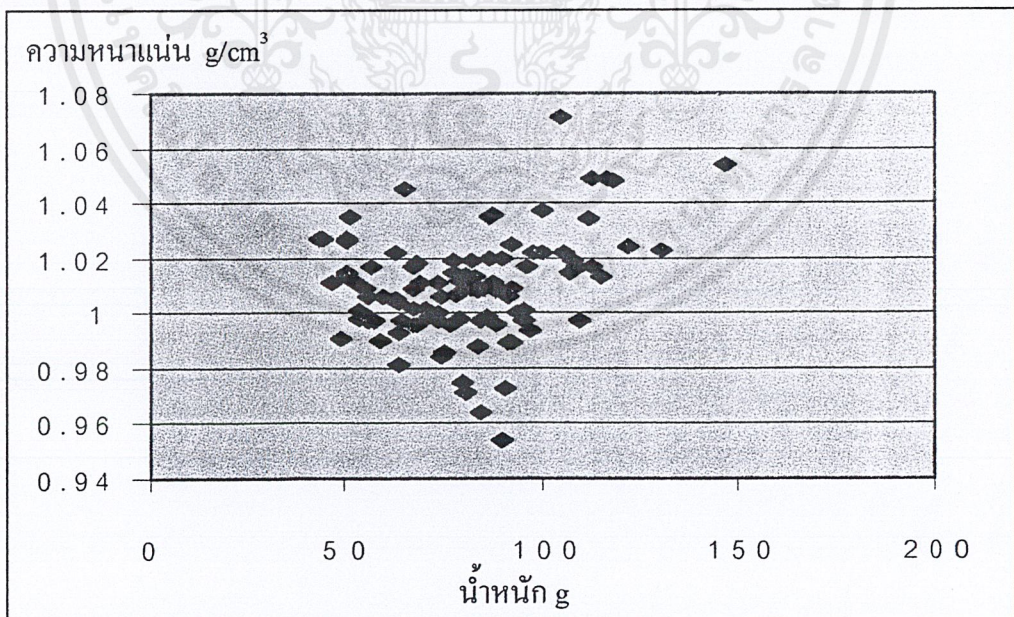
รูปที่ 6.5 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรกับน้ำหนัก

1.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกับขนาดผล

จากการวิเคราะห์ความหนาแน่นกับขนาดของผลสรุปได้ว่าไม่มีความสัมพันธ์กัน ดังรูปที่ 6.6 และความหนาแน่นกับน้ำหนักผลก็จะมีลักษณะความสัมพันธ์เช่นเดียวกันดังรูปที่ 6.7 แต่จะพบความหนาแน่นส่วนใหญ่จะมีค่าเท่ากับ 1 g/cm^3



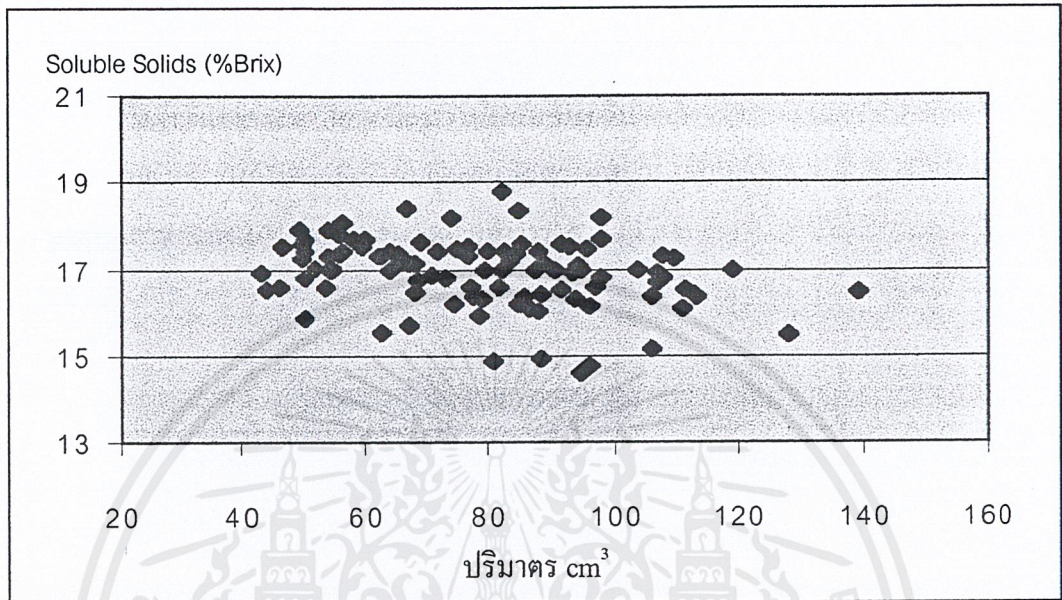
รูปที่ 6.6 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกับขนาด



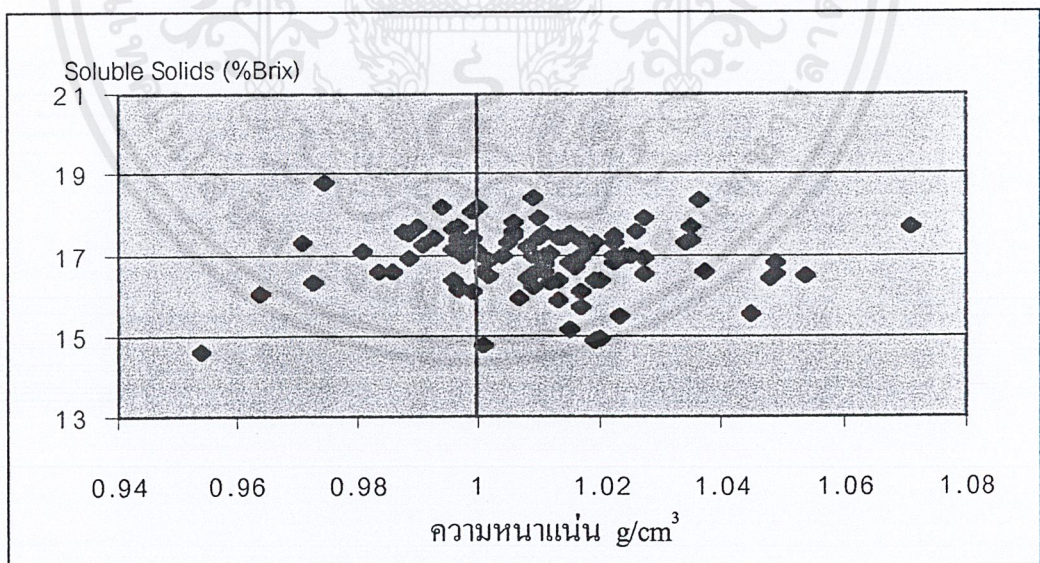
รูปที่ 6.7 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกับน้ำหนัก

1.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Soluble Solids กับปริมาตรและความหนาแน่น

จากการวิเคราะห์ผลค่า Soluble Solids กับ ปริมาตรและความหนาแน่นสรุปได้ว่าไม่มีความสัมพันธ์กัน ดังรูปที่ 6.8และ6.9 ตามลำดับแต่จะพบว่า ค่า Soluble Solids เฉลี่ยประมาณ 17 %Brix



รูปที่ 6.8 ความสัมพันธ์ระหว่าง Soluble Solids กับปริมาตร



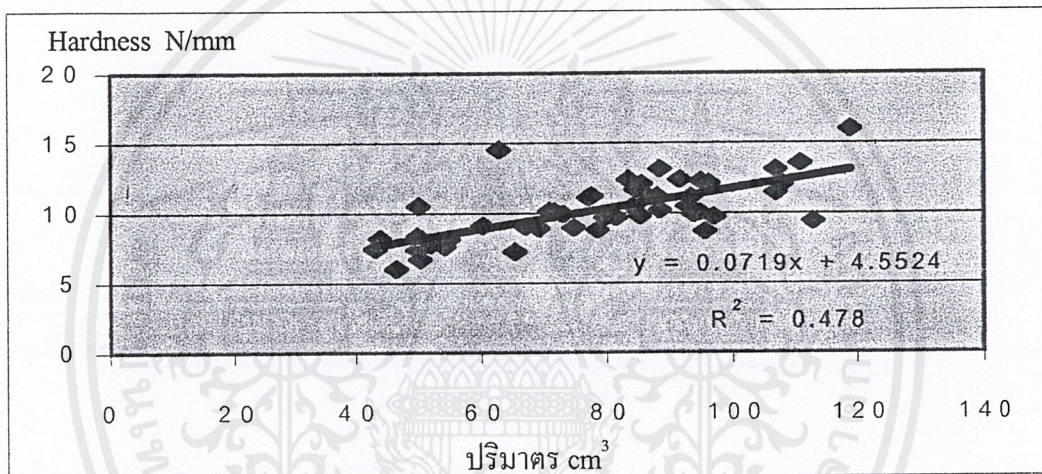
รูปที่ 6.9 ความสัมพันธ์ระหว่าง Soluble Solids กับความหนาแน่น

2. ความสัมพันธ์ของคุณสมบัติความแน่นเนื้อ (Texture Properties) กับคุณสมบัติทางกายภาพ

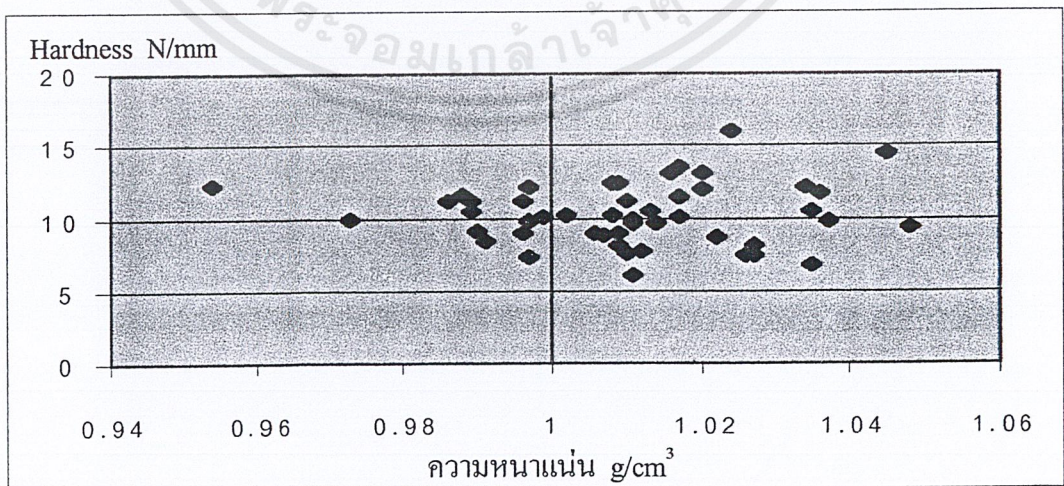
2.1 Hardness

แสดงถึงความแข็งแรงของผลที่สามารถรับแรงได้มากน้อยแค่ไหน สรุปความสัมพันธ์ได้ดังนี้

1. ค่าที่ได้จาก 2 ส่วนในผลเดียวกันจะมีค่าใกล้เคียงกัน
2. ความสัมพันธ์ระหว่างHardnessกับปริมาตรที่แรงกระทำ 30 N มีแนวโน้มสัมพันธ์กันในเชิงแปรผันกันดังรูปที่ 6.10 ส่วนความสัมพันธ์ระหว่างHardnessกับคุณสมบัติทางกายภาพอื่นๆพบว่า ไม่มีความสัมพันธ์กันที่แรงกระทำทั้ง 10 Nและ30 N ดังตัวอย่างรูป 6.11-6.12

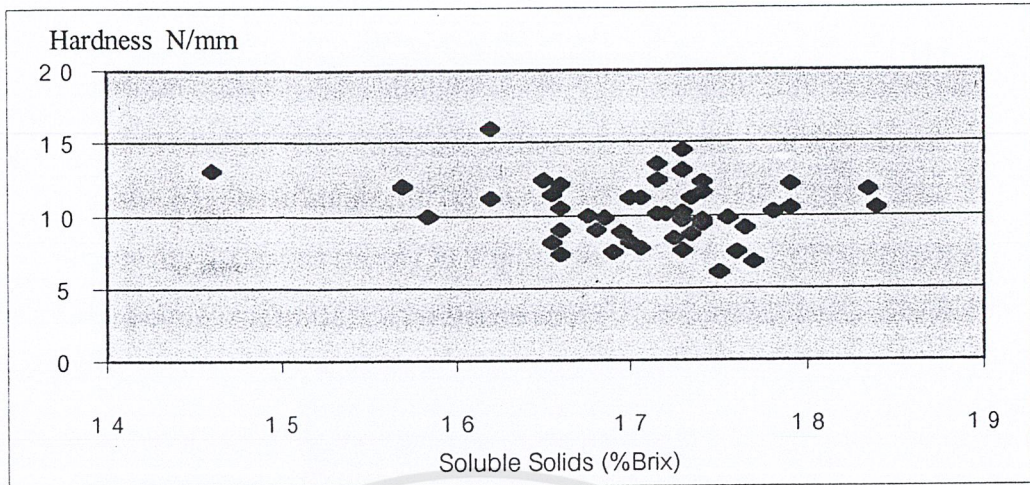


รูปที่ 6.10 ความสัมพันธ์ระหว่าง Hardness กับปริมาตรที่แรงกระทำ 30 N



รูปที่ 6.11 ความสัมพันธ์ระหว่าง Hardness กับความหนาแน่นที่แรงกระทำ 30 N

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

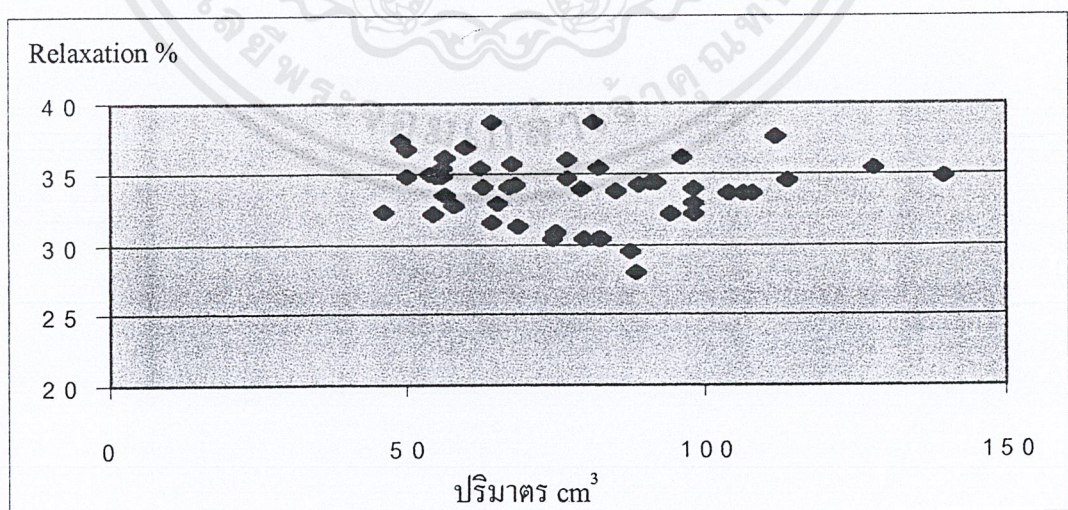


รูปที่ 6.12 ความสัมพันธ์ระหว่าง Hardness กับ Soluble Solids ที่แรงกระทำ 30 N

3.2 Relaxation

คือค่าที่บอกถึงการคลาย Stress หรือการกระจายแรงในผลมันจุด สรุปความสัมพันธ์จากการทดสอบได้ดังนี้

- 2 ค่าที่ได้จาก 2 ส่วนในผลเดียวกันจะมีค่าใกล้เคียงกัน
- 3 จากการวิเคราะห์พบว่า ค่า Relaxation จะมีค่าใกล้เคียงกัน จึงไม่สามารถแยกความสัมพันธ์กับคุณสมบัติทางการภาพใดๆ ได้ทั้งแรงกระทำที่ 10N และ 30 N ดังตัวอย่างรูปที่ 6.13

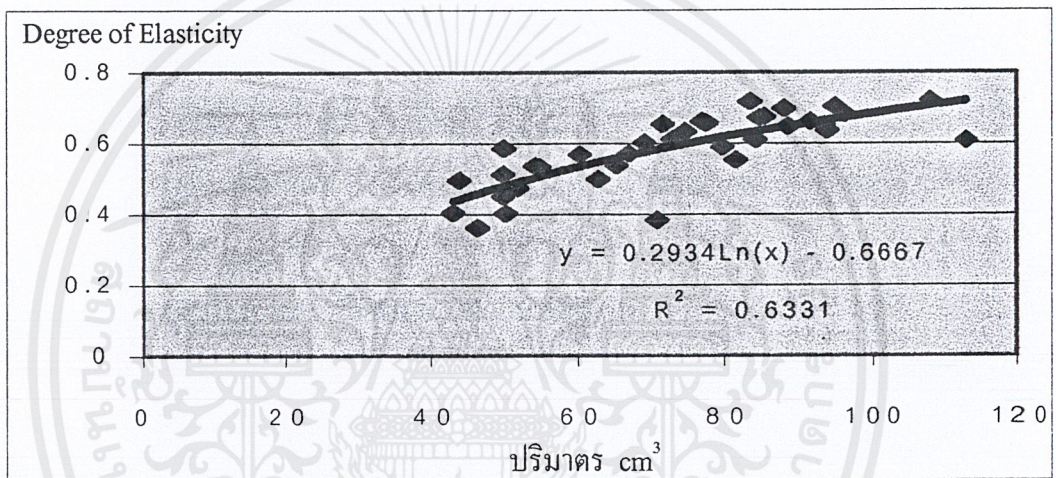


รูปที่ 6.13 ความสัมพันธ์ระหว่าง Relaxation กับปริมาตรที่แรงกระทำ 10 N

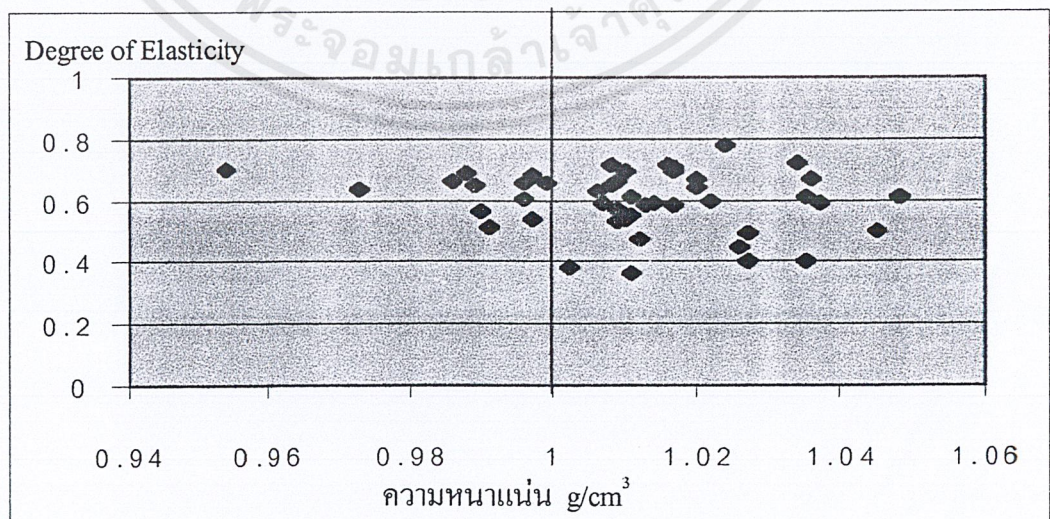
3.3 Degree of Elasticity

คือค่าที่แสดงถึง การคืนรูปของผลมั่งคุด ซึ่งหากมีค่ามากจะสรุปได้ว่าเปลือกจะเสียหาย น้อยที่แรงกดใดๆ สรุปความสัมพันธ์ได้ดังนี้

1. ค่าที่ได้จาก 2 ส่วนในผลเดียวกันบางผลให้ค่าที่ไม่มีความใกล้เคียงกัน
2. ความสัมพันธ์ระหว่าง Degree of Elasticity กับปริมาตรที่แรงกระทำ 30 N มีแนวโน้มสัมพันธ์กัน ในเชิงแปรผันกันดังรูปที่ 6.14 ส่วนความสัมพันธ์ระหว่าง Degree Of Elasticity กับคุณสมบัติทางกายภาพอื่นๆพบว่าไม่มีความสัมพันธ์กันที่แรงกระทำทั้ง 10 N และ 30 N ดังตัวอย่างรูป 6.15



รูปที่ 6.14 ความสัมพันธ์ระหว่าง Degree of Elasticity กับปริมาตรที่แรงกระทำ 30 N

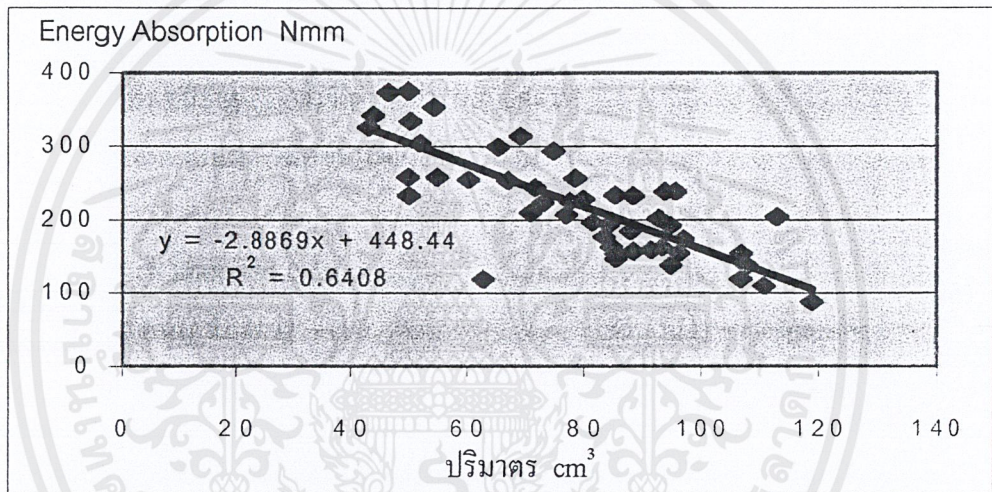


รูปที่ 6.15 ความสัมพันธ์ระหว่าง Degree of Elasticity กับความหนาแน่นที่แรงกระทำ 30 N

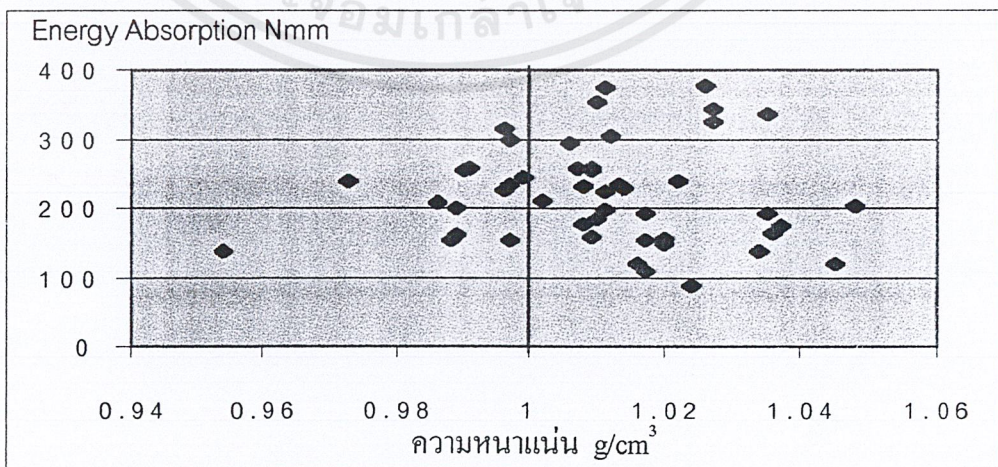
3.4 Energy Absorption

คือค่าพลังงานของมังกุดที่ดูดซับไว้ในช่วงการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง ซึ่งถ้าผลมังกุดดูดซับได้มากแสดงว่า เปลือกของผลทนต่อการเสียหายได้ดี สรุปความสัมพันธ์ได้ดังนี้

1. จากการทดสอบด้วยแรง 30 N จะให้ค่ามากกว่าการทดสอบด้วยแรง 10 N เนื่องจากแรงกดมากกว่าทำให้การให้พลังงานและการดูดซับพลังงานมากกว่า
2. ความสัมพันธ์ระหว่าง Energy Absorption กับปริมาตรที่แรงกระทำ 30 N มีแนวโน้มสัมพันธ์กัน ในเชิงแปรผกผันดังรูปที่ 6.16 ส่วนความสัมพันธ์ระหว่าง Energy Absorption กับคุณสมบัติทางกายภาพอื่นๆพบว่าไม่มีความสัมพันธ์กันที่แรงกระทำทั้ง 10 N และ 30 N ดังตัวอย่างรูป 6.17



รูปที่ 6.16 ความสัมพันธ์ระหว่าง Energy Absorption กับปริมาตรที่แรงกระทำ 30 N



รูปที่ 6.17 ความสัมพันธ์ระหว่าง Energy Absorption กับความหนาแน่นที่แรงกระทำ 30 N

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่บนสื่อออนไลน์

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5 Bioyield Point

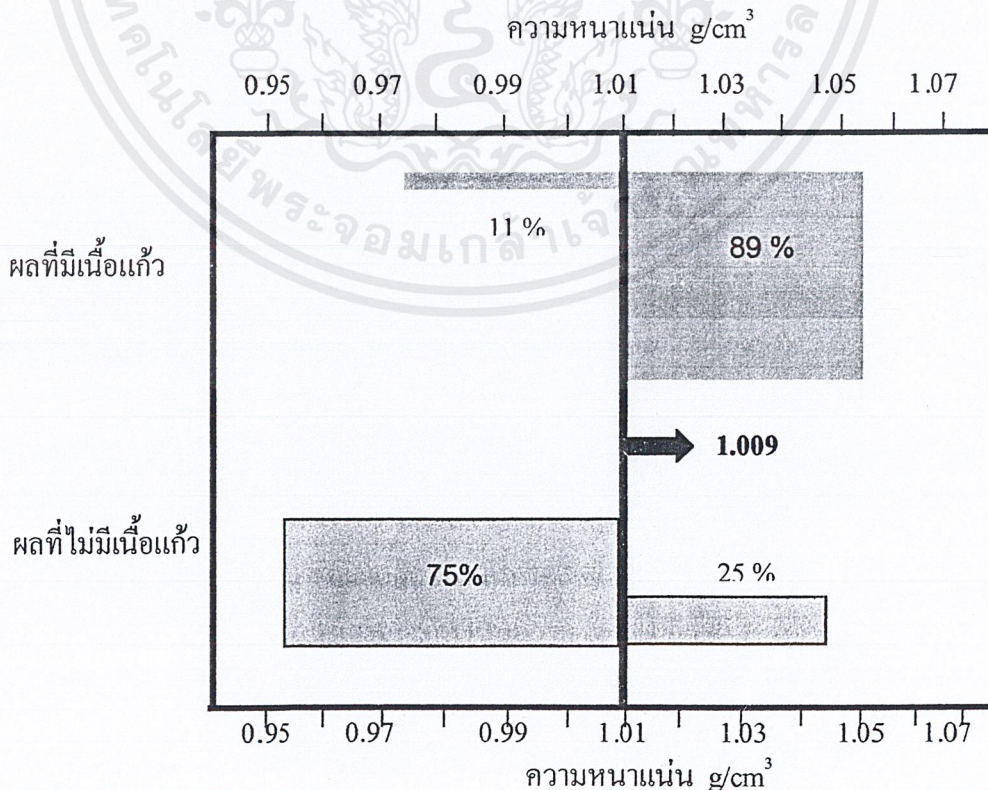
1. จากการทดลองโดยใช้แรง 10 N นั้นไม่ทำให้เกิด Bioyield Point (มีการเสียรูป) ขึ้น
2. เมื่อใช้แรง 30 N ทดสอบจะทำให้เกิด Bioyield Point (มีการเสียรูป) ขึ้นที่แรงมากกว่า 10 N
3. เมื่อวิเคราะห์พบว่า แรงที่ Bioyield Point (มีการเสียรูปของเนื้อเยื่อเปลือกใต้ผิว) ไม่มีความสัมพันธ์กับคุณสมบัติทางกายภาพหรือความแน่นเนื้อใดๆ

3. ความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติเชิงปริมาณกับเชิงคุณภาพ

3.1 ค่าความหนาแน่นกับลักษณะเนื้อ

จากการวิเคราะห์พบว่า มังคุดที่ลักษณะเป็นเนื้อแก้วจะมีความหนาแน่นมากและมากกว่า มังคุดที่มีเนื้อที่ไม่เป็นเนื้อแก้ว ซึ่งสอดคล้องกับรายงานของ ณะชัย (2534) ที่กล่าวว่า ผลมังคุดที่ลักษณะเป็นเนื้อแก้วจะมีความหนาแน่นมากกว่าผลมังคุดที่มีเนื้อปกติ (เนื้อขาวนุ่ม) แต่ไม่สามารถแยกได้อย่างชัดเจน โดยสรุปได้ว่า

- 89 % ของผลเป็นเนื้อแก้ว มีความหนาแน่น มากกว่า 1.009 g/cm^3
 - 75 % ของผลไม่เป็นเนื้อแก้ว มีความหนาแน่น น้อยกว่า 1.009 g/cm^3
- แสดงผลได้ดังรูปที่ 6.18



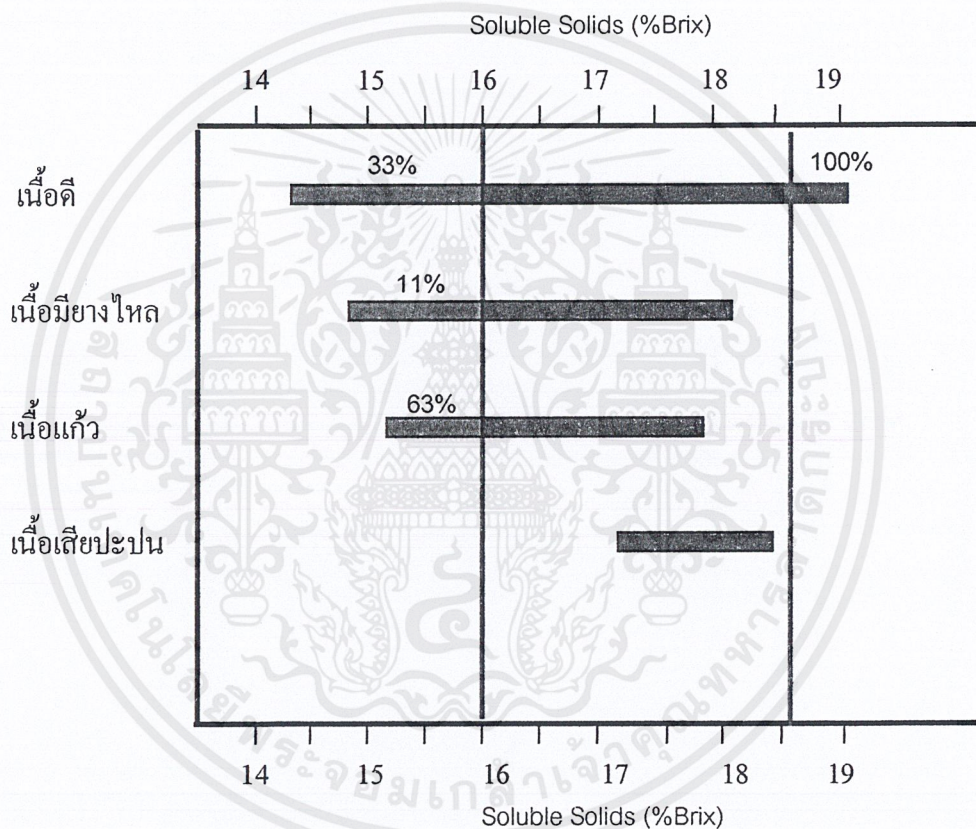
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้าารูปที่ 6.18 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นกับลักษณะเนื้อ ให้นำไปใช้

3.2 Soluble solids (%Brix) ของน้ำคั้นกับลักษณะเนื้อผล

สามารถสรุปแยกเป็นลักษณะเนื้อได้ 4 ลักษณะและมีช่วง %Brix ดังนี้

1. เนื้อดี (ขาวนุ่ม) มี %Brix อยู่ในช่วง 14.4 – 19
2. เนื้อมียางไหล มี %Brix อยู่ในช่วง 14.7 – 18.1
3. เนื้อแก้ว มี %Brix อยู่ในช่วง 15.2 – 17.8
4. เนื้อเสียปนกันมี %Brix อยู่ในช่วง 17.4 – 18.6

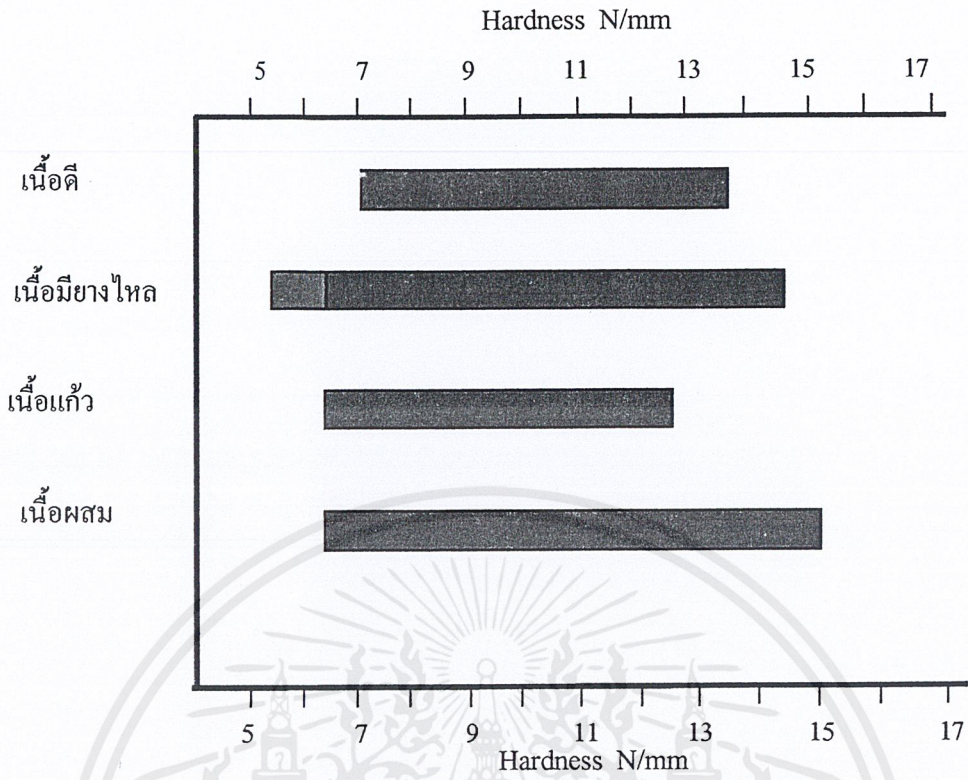
โดยแสดงดังรูปที่ 16.19



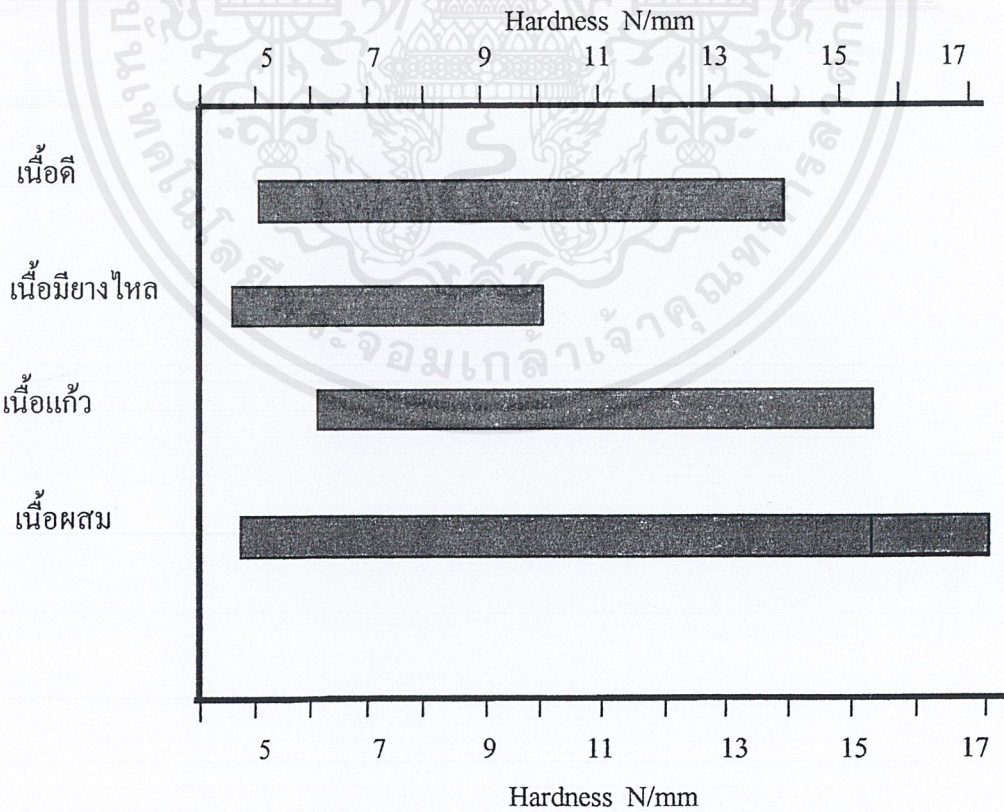
รูปที่ 6.19 ความสัมพันธ์ระหว่าง Soluble Solids กับลักษณะเนื้อ

4. ความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติความแน่นเนื้อกับคุณสมบัติเชิงคุณภาพ

จากการวิเคราะห์พบว่าทุกคุณสมบัติของความแน่นเนื้อไม่สามารถแยกลักษณะเนื้อได้ชัดเจนที่แรงกระทำที่ 10 N และ 30 N แสดงตัวอย่างดังรูปที่ 6.20 และ 6.21 ตามลำดับ เป็นความสัมพันธ์ของ Hardness กับลักษณะเนื้อนั้น จึงสรุปได้ว่าความแน่นเนื้อไม่มีความสัมพันธ์กับลักษณะเนื้อภายใน



รูปที่ 6.20 ความสัมพันธ์ระหว่าง Hardness กับลักษณะเนื้อที่แรงกระทำ 10 N



รูปที่ 6.21 ความสัมพันธ์ระหว่าง Hardness กับลักษณะเนื้อที่แรงกระทำ 30 N

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตอนที่ 3 การวิเคราะห์ข้อมูลเชิงปริมาณ (Quantity) และเชิงคุณภาพ (Quality) ของ NIR Spectroscopy

ขั้นตอนการ Calibration เชิงปริมาณ (Quantity) ของผลมันจุกุด

1. เปิดไฟล์ข้อมูล Spectra ที่ได้จากการ Scan ผลมันจุกุด
2. นำค่า Properties (ค่าที่วัดได้จากวิธีการวัดมาตรฐาน, Reference value) ต่างๆ ใส่ลงตาม Spectra ของผลตามหมายเลขผลที่กำหนดไว้ ซึ่งค่า Properties เหล่านี้ ได้แก่
 1. Density
 2. %Brix
 3. Hardness at 30 N
 4. Relaxation at 30 N
 5. Energy Absorption at 30 N
 6. Degree of Elasticity at 30 N
 7. Hardness at 10 N
 8. Relaxation at 10 N
 9. Energy Absorption at 10 N
 10. Degree of Elasticity at 10 N
3. สร้างสมการ Calibration ของแต่ละ Parameters โดย
 - 3.1 ใช้วิธี PLS ที่ช่วงความยาวคลื่น 4500-10000 1/cm โดยใช้ค่า Reflectance ทุกๆ 12 1/cm (500 จุด) สาเหตุที่เลือกช่วงความยาวคลื่น 4500-10000 1/cm เนื่องจากที่ช่วงความยาวคลื่น 4000-4500 1/cm จะถูกดูดซับโดย Fiber optic
 - 3.2 จัดกลุ่มของ Spectrum ให้เป็น 2 กลุ่ม คือ Calibration set และ Validation set (Prediction set) โดยแบ่ง 5/6 ส่วนเป็น Calibration set และ 1/6 ส่วนเป็น Validation set โดยสุ่มแบบ 5 ข้อมูลเว้น 1 ข้อมูล (5 Skip 1) จนกระทั่งหมดทุกข้อมูล และจัดให้ข้อมูลที่มีค่าสูงสุดและต่ำสุดอยู่ใน Calibration set
 - 3.4 เลือก Properties ที่จะทำการ Calibration
 - 3.5 คำนวณหาสมการ Calibration โดยใช้ Auto Calibration จาก Software NIRCal V4.01
 - 3.6 หลังจากทำการ Calibration แล้วจะได้รายงานมาเป็นค่าต่างๆ ดังนี้
 1. Standard Error of Calibration (SEE)
 2. Standard Error of Prediction (SEP)
 3. Bias
 4. Regression Coefficient (r)
 5. Consistency

6. Q-Value
7. สมการ Calibration $f(x)$
4. เลือก Properties ที่จะทำการ Calibration
5. ทำซ้ำข้อ 3.1-3.6 จนครบทุก Properties
6. บันทึกค่าต่างๆ ลงในตารางที่ 6.4, 6.5 และ 6.6

หมายเหตุ การคำนวณหาสมการ Calibration โดยวิธี PLS ด้วย Auto Calibration จาก Software NIRCal V4.01 ของเครื่อง Computer จะอธิบายไว้ในภาคผนวก



ผลการทำ Auto Calibration Spectrum ของผลมัน้คุดเชิงปริมาณ (Quantity) แสดงดังตารางที่ 6.4

ตารางที่ 6.4 วิธีการ Calibration Spectrum ของผลมัน้คุด

ครั้งที่	Properties	Density
1	Method	PLS
	Data	1. Smooth Average 3 Points
	Pretreatment	2. Normalization by Closure, 4392-4800, 5400-6600, 7800-9996 (total 320/500)
	Sequence	3. First Derivative BCAP
Wavelengths	4392-4800, 5400-6600, 7800-9996 [1/cm] (total 320/500)	
Calibration Set		
2	Method	PLS
	Data	1. First Derivative BCAP
	Pretreatment	
	Sequence	
Wavelengths	4392-4800, 5400-6600, 7800-9996 [1/cm] (total 320/500)	
Calibration Set		
3	Method	PLS
	Data	1. First Derivative BCAP
	Pretreatment	2. Normalization by Closure, 4392-4800, 5400-6600, 7800-9996 (total 320/500)
	Sequence	
Wavelengths	4392-4800, 5400-6600, 7800-9996 [1/cm] (total 320/500)	
Calibration Set		
1	Properties	%Brix
	Method	PLS
	Data	1. First Derivative BCAP
	Pretreatment	2. Normalization by Closure, 4440-9000 (total 381/500)
Sequence		
Wavelengths	4440-9000 [1/cm] (total 381/500)	
Calibration Set		
2	Method	PLS
	Data	1. Smooth Average 3 Points
	Pretreatment	2. Normalization by Closure, 4392-4800, 5400-6600, 7800-9996 (total 320/500)
	Sequence	3. First Derivative BCAP

ครั้งที่	Properties	%Brix
2	Wavelengths Calibration Set	4392-4800, 5400-6600, 7800-9996 [1/cm] (total 320/500)
3	Method	PLS
	Data Pretreatment Sequence	1. First Derivative BCAP 2. Normalization by Closure, 4440-9000 (total 381/500)
	Wavelengths Calibration Set	4440-9000 [1/cm] (total 381/500)
1	Properties	Hardness at 30 N
	Method	PLS
	Data Pretreatment Sequence	1. First Derivative BCAP 2. Normalization by Closure, 4596-9996 (total 451/500)
	Wavelengths Calibration Set	4596-9996 [1/cm] (total 451/500)
2	Method	PLS
	Data Pretreatment Sequence	1. First Derivative Savitzky-Golay 9 Points 2. Normalization to Unit Length, 4596-9996 (total 451/500)
	Wavelengths Calibration Set	4596-9996 [1/cm] (total 451/500)
3	Method	PLS
	Data Pretreatment Sequence	1. First Derivative BCAP 2. Normalization by Closure, 4392-4800, 5400-6600, 7800-9996 (total 320/500)
	Wavelengths Calibration Set	4392-4800, 5400-6600, 7800-9996 [1/cm] (total 320/500)
1	Properties	Relaxation at 30 N
	Method	PLS
	Data Pretreatment Sequence	No pretreatment
	Wavelengths Calibration Set	4500-9996 [1/cm] (total 459/500)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ครั้งที่	Properties	Relaxation at 30 N
2	Method	PLS
	Data Pretreatment Sequence	1. First Derivative BCAP 2. Normalization by Closure, 4440-9000 (total 381/500)
	Wavelengths Calibration Set	4440-9000 [1/cm] (total 381/500)
3	Method	PLS
	Data Pretreatment Sequence	1. First Derivative Savitzky-Golay 9 Points 2. Normalization to Unit Length, 4440-9000 (total 381/500)
	Wavelengths Calibration Set	4440-9000 [1/cm] (total 381/500)
1	Properties	Energy Absorption at 30 N
	Method	PLS
	Data Pretreatment Sequence	1. First Derivative BCAP
	Wavelengths Calibration Set	4596-9996 [1/cm] (total 451/500)
2	Method	PLS
	Data Pretreatment Sequence	1. First Derivative BCAP
	Wavelengths Calibration Set	4440-9000 [1/cm] (total 381/500)
3	Method	PLS
	Data Pretreatment Sequence	1. First Derivative Savitzky-Golay 9 Points 2. Normalization to Unit Length, 4392-4800, 5400-6600, 7800-9996 (total 320/500)
	Wavelengths Calibration Set	4392-4800, 5400-6600, 7800-9996 [1/cm] (total 320/500)

ครั้งที่	Properties	Degree of Elasticity at 30 N
1	Method	PLS
	Data Pretreatment Sequence	1. First Derivative Savitzky-Golay 9 Points 2. Normalization to Unit Length, 4440-9000 (total 381/500)
	Wavelengths Calibration Set	4440-9000 [1/cm] (total 381/500)
2	Method	PLS
	Data Pretreatment Sequence	1. First Derivative Savitzky-Golay 9 Points 2. Normalization to Unit Length, 4440-9000 (total 381/500)
	Wavelengths Calibration Set	4440-9000 [1/cm] (total 381/500)
3	Method	PLS
	Data Pretreatment Sequence	1. First Derivative BCAP 2. Normalization by Closure, 4596-9996 (total 451/500)
	Wavelengths Calibration Set	4596-9996 [1/cm] (total 451/500)
1	Properties	Hardness at 10 N
	Method	PLS
	Data Pretreatment Sequence	1. First Derivative Savitzky-Golay 9 Points 2. Normalization to Unit Length, 4440-9000 (total 381/500)
	Wavelengths Calibration Set	4440-9000 [1/cm] (total 381/500)
2	Method	PLS
	Data Pretreatment Sequence	1. First Derivative BCAP 2. Normalization by Closure, 4596-9996 (total 451/500)
	Wavelengths Calibration Set	4596-9996 [1/cm] (total 451/500)
3	Method	PLS
	Data Pretreatment Sequence	1. First Derivative BCAP 2. Normalization by Closure, 4440-9000 (total 381/500)

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ครั้งที่	Properties	Hardness at 10 N
3	Wavelengths Calibration Set	4440-9000 [1/cm] (total 381/500)
1	Properties	Relaxation at 10 N
	Method	PLS
	Data Pretreatment Sequence	1. First Derivative Savitzky-Golay 9 Points 2. Normalization to Unit Length, 4392-4800, 5400-6600, 7800-9996 (total 320/500)
	Wavelengths Calibration Set	4392-4800, 5400-6600, 7800-9996 [1/cm] (total 320/500)
2	Method	PLS
	Data Pretreatment Sequence	1. First Derivative BCAP
	Wavelengths Calibration Set	4392-4800, 5400-6600, 7800-9996 [1/cm] (total 320/500)
3	Method	PLS
	Data Pretreatment Sequence	1. First Derivative Savitzky-Golay 9 Points 2. Normalization to Unit Length, 4392-4800, 5400-6600, 7800-9996 (total 320/500)
	Wavelengths Calibration Set	4392-4800, 5400-6600, 7800-9996 [1/cm] (total 320/500)
1	Properties	Energy Absorption at 10 N
	Method	PLS
	Data Pretreatment Sequence	1. Normalization by Closure, 4596-9996 (total 451/500) 2. First Derivative BCAP
	Wavelengths Calibration Set	4596-9996 [1/cm] (total 451/500)
2	Method	PLS
	Data Pretreatment Sequence	1. Smooth Average 3 Points 2. Normalization by Closure, 4596-9996 (total 451/500) 3. First Derivative BCAP
	Wavelengths Calibration Set	4596-9996 [1/cm] (total 451/500)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ครั้งที่	Properties	Energy Absorption at 10 N
3	Method	PLS
	Data	1. Normalization by Closure, 4440-9000 (total 381/500)
	Pretreatment Sequence	2. First Derivative BCAP
	Wavelengths Calibration Set	4440-9000 [1/cm] (total 381/500)
1	Properties	Degree of Elasticity at 10 N
	Method	PLS
	Data	1. Smooth Average 3 Points
	Pretreatment Sequence	2. Normalization by Closure, 4440-9000 (total 381/500) 3. First Derivative BCAP
Wavelengths Calibration Set	4440-9000 [1/cm] (total 381/500)	
2	Method	PLS
	Data	1. Smooth Average 3 Points
	Pretreatment Sequence	2. Normalization by Closure, 4596-9996 (total 451/500) 3. First Derivative BCAP
	Wavelengths Calibration Set	4596-9996 [1/cm] (total 451/500)
3	Method	PLS
	Data	1. First Derivative BCAP
	Pretreatment Sequence	2. Normalization by Closure, 4596-9996 (total 451/500)
	Wavelengths Calibration Set	4596-9996 [1/cm] (total 451/500)

หมายเหตุ ความหมายของ Data pretreatment sequence ต่างๆ ในตารางอธิบายไว้ในภาคผนวก

จากการ Calibration ในตารางที่ 6.4 จะได้ค่าทางสถิติ ซึ่งค่าเหล่านี้จะนำมาใช้พิจารณาการยอมรับผลการทดลอง แสดงดังตารางที่ 6.5 และ 6.6

ตารางที่ 6.5 ค่าที่ได้จากการ Calibration ของผลมั่งคุด

Properties	ครั้งที่	Bias	r		SEE	SEP
			C-Set	V-Set		
Density	1	-1.82585e-016	0.458587	0.463254	0.0157176	0.0160003
	2	-1.61852e-016	0.416024	0.509134	0.0158259	0.0158259
	3	-1.83254e-016	0.466954	0.435299	0.0156403	0.0163517
%Brix	1	5.01874e-015	0.629609	0.681876	0.62761	0.621517
	2	4.4084e-015	0.514324	0.534232	0.697891	0.684059
	3	1.02272e-014	0.646751	0.552437	0.624902	0.638305
Hardness at 30 N	1	3.90584e-015	0.922852	0.861122	0.878846	1.01634
	2	-8.20762e-015	0.858252	0.73393	1.17109	1.33909
	3	6.97702e-015	0.767019	0.946903	1.46406	0.891017
Relaxation at 30 N	1	3.27832e-013	0.869846	0.764731	2.35583	2.38107
	2	-4.00625e-015	0.852617	0.754254	2.49533	2.13831
	3	1.82927e-014	0.867796	0.622504	2.373	2.65463
Energy Absorption at 30 N	1	9.59719e-014	0.776956	0.808848	48.3862	50.9652
	2	1.04537e-013	0.73553	0.816217	52.0705	50.998
	3	1.55735e-014	0.878412	0.835234	36.7306	48.7633
Degree of Elasticity at 30 N	1	3.70574e-016	0.917497	0.771557	0.0774489	0.0764504
	2	2.17544e-016	0.861266	0.730988	0.0989485	0.0905935
	3	1.5003e-017	0.680617	0.819059	0.142661	0.0719661
Hardness at 10 N	1	1.60067e-015	0.578039	0.454751	1.93831	1.7077
	2	8.78418e-016	0.599558	0.441233	1.90107	1.73122
	3	5.46571e-016	0.505628	0.43548	2.04934	1.71463
Relaxation at 10 N	1	7.61296e-015	0.539267	0.407296	2.21901	1.56665
	2	5.32907e-015	0.719267	0.216633	1.83062	1.88059
	3	7.95131e-015	0.714341	0.194097	1.84396	1.7947
Energy Absorption at 10 N	1	-1.00441e-014	0.709385	0.588188	5.34149	5.16603
	2	-6.14049e-015	0.68928	0.589489	5.49059	5.15618
	3	-1.71057e-015	0.682539	0.575301	5.53874	5.15981
Degree of Elasticity at 10 N	1	-6.14588e-017	0.496432	0.38182	0.0958684	0.0811552
	2	8.62056e-017	0.345826	0.306669	0.213604	0.093494
	3	-9.14301e-018	0.296291	0.261317	0.217428	0.0790653

ตารางที่ 6.6 ค่าที่ได้จากการ Calibration ของผลมั่งคุด

Properties	ครั้งที่	Consistency	Q
Density	1	98.2333	0.6941
	2	101.63	0.6772
	3	95.6497	0.6717
%Brix	1	100.98	0.5649
	2	102.022	0.4747
	3	97.9002	0.4733
Hardness at 30 N	1	86.4714	0.4030
	2	87.4536	0.2396
	3	164.313	0.2395
Relaxation at 30 N	1	98.94	0.3778
	2	116.696	0.3332
	3	89.391	0.2365
Energy Absorption at 30 N	1	94.9396	0.1635
	2	102.103	0.1556
	3	75.3244	0.1447
Degree of Elasticity at 30 N	1	101.306	0.5305
	2	109.222	0.3394
	3	198.233	0.3289
Hardness at 10 N	1	113.504	0.1107
	2	109.811	0.1083
	3	119.521	0.1073
Relaxation at 10 N	1	141.64	0.2536
	2	97.3427	0.2073
	3	102.745	0.2060
Energy Absorption at 10 N	1	103.396	0.1133
	2	106.486	0.1116
	3	107.344	0.1076

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

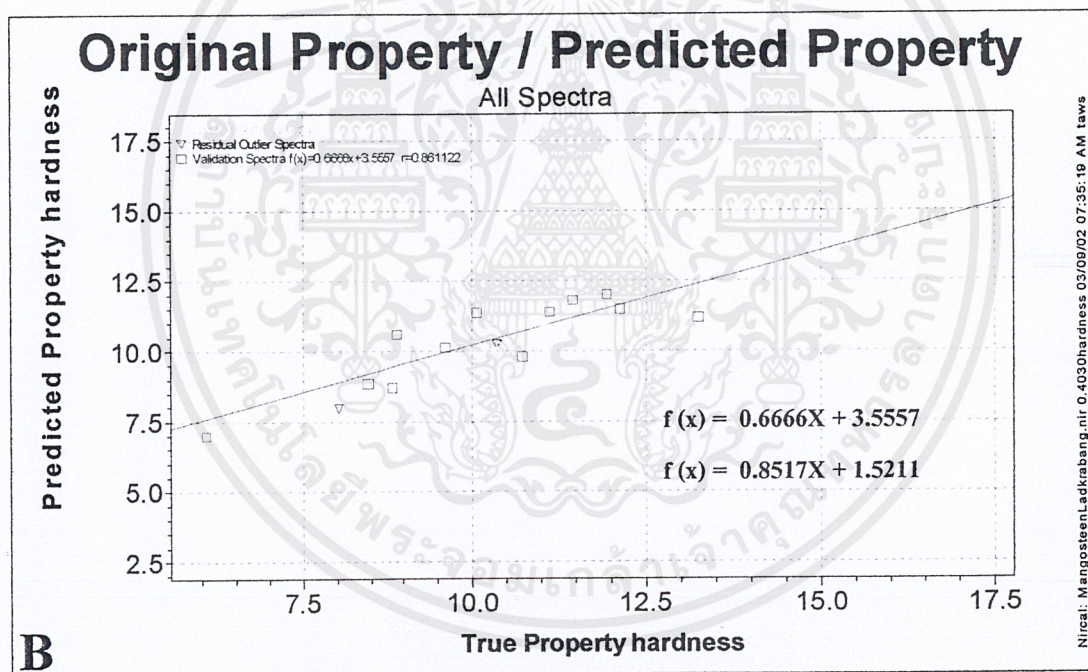
Properties	ครั้งที่	Consistency	Q
Degree of Elasticity at 10 N	1	118.13	0.1653
	2	228.468	0.1602
	3	274.998	0.1579

หมายเหตุ C-Set ย่อมาจาก Calibration Set

V-Set ย่อมาจาก Validation Set

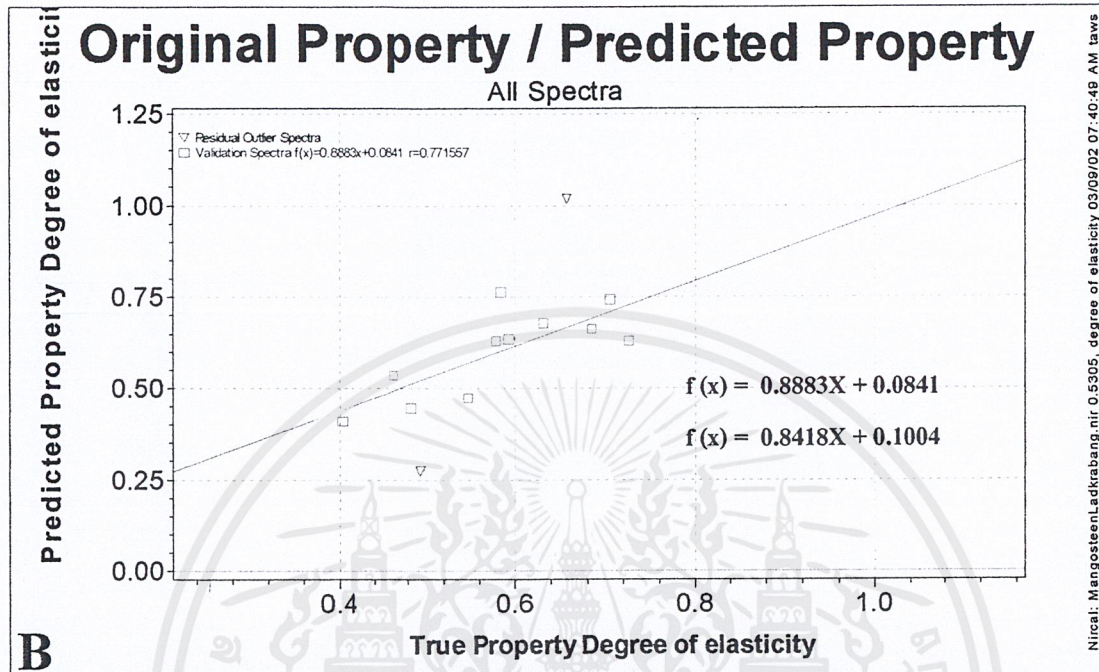
กราฟของสมการจากการ Calibration ของผลมั่งคุด มีดังนี้

1. Hardness at 30 N



รูปที่ 6.22 สมการ Calibration of Hardness at 30 N

6. Degree of Elasticity at 30 N



รูปที่ 6.23 สมการ Calibration of Degree of Elasticity at 30 N

การพิจารณาค่าต่าง ๆ ที่ได้จากรายงาน

หลังจากที่ได้รายงานแสดงค่าต่างๆมาแล้ว จะพิจารณาค่าที่ดีที่สุดจากการทดลองเพื่อคัดเลือกสมการ โดยจะพิจารณาค่าต่าง ๆ ดังนี้

1. ค่า r เราจะพิจารณาทั้ง Calibration Set และ Validation Set และจะต้องมีค่ามากกว่า 0.900000 หรือ 90% ขึ้นไป แต่ค่า r ของ Validation Set อาจมีค่าน้อยกว่า 0.900000 ได้เล็กน้อย จึงจะถือว่าสมการที่ได้นั้นเชื่อถือได้ มีความแม่นยำสูงและสามารถนำไปใช้ใน NIR Spectrometer ได้

2. ค่า Bias ค่านี้อาจพิจารณาที่ Calibration Set ซึ่งควรมีค่าน้อย ๆ และควรมีค่าเข้าใกล้ 0

3. ค่า SEE ควรจะมีค่าน้อย

4. ค่า SEP ควรจะมีค่าน้อยและมีค่าใกล้เคียงกับค่า SEE

5. ค่า Consistency จะต้องอยู่ในช่วง 80-110 จึงจะยอมรับสมการที่ได้

$$\text{Consistency} = 100 * (\text{SEE} / \text{SEP})$$

6. ค่า Q-Value ควรจะมีค่าสูงและเข้าใกล้ 1 มากที่สุด

ในการพิจารณานั้นจะพิจารณาทั้ง 6 ค่า ไปพร้อม ๆ กัน และในการทดลองนี้จะเห็นได้ว่าค่า Q-Value มีค่าต่ำ ทั้งนี้อาจเป็นเพราะว่า ข้อมูลของตัวอย่าง (Data of Sample) มีน้อยเกินไป

จากการวิเคราะห์ข้อมูลเชิงปริมาณ และการพิจารณาค่าทางสถิติของข้อมูลผลมังคุด จะได้สมการที่สามารถนำมาใช้ในการทำนายผลการทดสอบ Properties โดยใช้วิธี NIR Spectroscopy ดังนี้

1. สมการ Calibration ของ Hardness at 30 N

$$\text{สมการ } Y = 0.851656X + 1.52112$$

2. สมการ Calibration ของ Degree of Elasticity at 30 N

$$\text{สมการ } Y = 0.841801X + 0.771557$$

ขั้นตอนการ Calibration เชิงปริมาณ (Quantity) ของน้ำมันงาคูค

1. เปิดไฟล์ข้อมูล Spectra ที่ได้จากการ Scan น้ำมันงาคูค
2. นำค่า Properties เช่นเดียวกับการ Calibration Spectrum ของผลงาคูค (ค่าที่วัดได้จากวิธีการวัดมาตรฐาน, Reference Value) ต่างๆ ใส่ลงตาม Spectra ของผลตามหมายเลขผลที่กำหนดไว้
3. สร้างสมการ Calibration ของแต่ละ Parameters โดย
 - 3.1 ใช้วิธี PLS ที่ช่วงความยาวคลื่น 4000-10000 1/cm โดยใช้ค่า Transmittance ทุกๆ 12 1/cm (500 จุด)
 - 3.2 จัดกลุ่มของ Spectrum ให้เป็น 2 กลุ่ม คือ Calibration set และ Validation set (Prediction Set) ตามวิธีการของการ Calibration Spectrum ของผลงาคูค
 - 3.4 เลือก Properties ที่จะทำการ Calibration
 - 3.5 คำนวณหาสมการ Calibration โดยใช้ Auto Calibration จาก Software NIRCal V4.01
 - 3.6 หลังจากทำการ Calibration แล้วจะได้รายงานมาเป็นค่าต่างๆ ทางสถิติเช่นเดียวกับการ Calibration Spectrum ของผลงาคูค
4. เลือก Properties ที่จะทำการ Calibration
5. ทำซ้ำข้อ 3.1-3.6 จนครบทุก Properties
6. บันทึกค่าต่างๆ ลงในตารางที่ 6.7, 6.8 และ 6.9

ผลการทำ Auto Calibration ของน้ำมันงาคูคเชิงปริมาณ (Quantity) แสดงดังตารางที่ 6.7

ตารางที่ 6.7 Calibration ของน้ำมันงาคูค

ครั้งที่	Properties	Density
1	Method	PLS
	Data	1. MSC full, 4008-9996 (total 500/500), Mean Vector (500)
	Pretreatment	
	Sequence	
2	Method	PLS
	Data	1. First Derivative BCAP
	Pretreatment	
	Sequence	

ครั้งที่	Properties	Density
2	Wavelengths Calibration Set	4392-4800, 5400-6600, 7800-9996 [1/cm] (total 320/500)
3	Method	PLS
	Data Pretreatment Sequence	1. First Derivative BCAP
	Wavelengths Calibration Set	4008-9996 [1/cm] (total 500/500)
1	Properties	%Brix
	Method	PLS
	Data Pretreatment Sequence	1. First Derivative BCAP
	Wavelengths Calibration Set	4392-4800, 5400-6600, 7800-9996 [1/cm] (total 320/500)
2	Method	PLS
	Data Pretreatment Sequence	1. First Derivative BCAP
	Wavelengths Calibration Set	4008-9996 [1/cm] (total 500/500)
3	Method	PLS
	Data Pretreatment Sequence	1. Absorbance Log10(1/x)
	Wavelengths Calibration Set	4392-4800, 5400-6600, 7800-9996 [1/cm] (total 320/500)
1	Properties	Hardness at 30 N
	Method	PLS
	Data Pretreatment Sequence	1. Absorbance Log10(1/x) 2. Normalization by Closure, 4008-9996 (total 500/500)
	Wavelengths Calibration Set	4008-9996 [1/cm] (total 500/500)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ครั้งที่	Properties	Hardness at 30 N
2	Method	PLS
	Data Pretreatment Sequence	1. First Derivative BCAP
	Wavelengths Calibration Set	4008-9996 [1/cm] (total 500/500)
	Method	PLS
	Data Pretreatment Sequence	1. First Derivative BCAP
	Wavelengths Calibration Set	4392-4800, 5400-6600, 7800-9996 [1/cm] (total 320/500)
1	Properties	Relaxation at 30 N
	Method	PLS
	Data Pretreatment Sequence	1. Normalization by Closure, 4008-9996 (total 500/500) 2. Absorbance Log ₁₀ (1/x)
	Wavelengths Calibration Set	4008-9996 [1/cm] (total 500/500)
2	Method	PLS
	Data Pretreatment Sequence	1. Normalization by Closure, 4008-9996 (total 500/500)
	Wavelengths Calibration Set	4008-9996 [1/cm] (total 500/500)
3	Method	PLS
	Data Pretreatment Sequence	1. MSC full, 4392-4800, 5400-6600, 7800-9996 (total 320/500), Mean Vector (500)
	Wavelengths Calibration Set	4392-4800, 5400-6600, 7800-9996 [1/cm] (total 320/500)

ครั้งที่	Properties	Energy Absorption at 30 N
1	Method	PLS
	Data Pretreatment Sequence	1. MSC full, 4008-9996 (total 500/500), Mean Vector (500)
	Wavelengths Calibration Set	4008-9996 [1/cm] (total 500/500)
2	Method	PLS
	Data Pretreatment Sequence	1. Normalization by Closure, 4392-4800, 5400-6600, 7800-9996 (total 320/500), Mean Vector (500)
	Wavelengths Calibration Set	4392-4800, 5400-6600, 7800-9996 [1/cm] (total 320/500)
3	Method	PLS
	Data Pretreatment Sequence	1. MSC full, 4392-4800, 5400-6600, 7800-9996 (total 320/500), Mean Vector (500)
	Wavelengths Calibration Set	4392-4800, 5400-6600, 7800-9996 [1/cm] (total 320/500)
1	Properties	Degree of Elasticity at 30 N
	Method	PLS
	Data Pretreatment Sequence	No Pretreatment
	Wavelengths Calibration Set	4392-4800, 5400-6600, 7800-9996 [1/cm] (total 320/500)
2	Method	PLS
	Data Pretreatment Sequence	1. Absorbance Log ₁₀ (1/x)
	Wavelengths Calibration Set	4392-4800, 5400-6600, 7800-9996 [1/cm] (total 320/500)
3	Method	PLS
	Data Pretreatment Sequence	1. Smooth Savitzky-Golay 9 Points

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ครั้งที่	Properties	Degree of Elasticity at 30 N
3	Wavelengths Calibration Set	4392-4800, 5400-6600, 7800-9996 [1/cm] (total 320/500)
1	Properties	Hardness at 10 N
	Method	PLS
	Data Pretreatment Sequence	1. First Derivative BCAP
	Wavelengths Calibration Set	4008-9996 [1/cm] (total 500/500)
2	Method	PLS
	Data Pretreatment Sequence	1. Normalization by Closure, 4008-9996 (total 500/500)
	Wavelengths Calibration Set	4008-9996 [1/cm] (total 500/500)
3	Method	PLS
	Data Pretreatment Sequence	1. MSC full, 4392-4800, 5400-6600, 7800-9996 (total 320/500), Mean Vector (500)
	Wavelengths Calibration Set	4392-4800, 5400-6600, 7800-9996 [1/cm] (total 320/500)
1	Properties	Relaxation at 10 N
	Method	PLS
	Data Pretreatment Sequence	1. Normalization by Closure, 4008-9996 (total 500/500)
	Wavelengths Calibration Set	4008-9996 [1/cm] (total 500/500)
2	Method	PLS
	Data Pretreatment Sequence	1. First Derivative BCAP
	Wavelengths Calibration Set	4392-4800, 5400-6600, 7800-9996 [1/cm] (total 320/500)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ครั้งที่	Properties	Relaxation at 10 N
3	Method	PLS
	Data Pretreatment Sequence	1. First Derivative BCAP
	Wavelengths Calibration Set	4008-9996 [1/cm] (total 500/500)
1	Properties	Energy Absorption at 10 N
	Method	PLS
	Data Pretreatment Sequence	1. Absorbance Log10(1/x)
	Wavelengths Calibration Set	4392-4800, 5400-6600, 7800-9996 [1/cm] (total 320/500)
2	Method	PLS
	Data Pretreatment Sequence	1. First Derivative BCAP
	Wavelengths Calibration Set	4008-9996 [1/cm] (total 500/500)
3	Method	PLS
	Data Pretreatment Sequence	1. Normalization by Closure, 4008-9996 (total 500/500)
	Wavelengths Calibration Set	4008-9996 [1/cm] (total 500/500)
1	Properties	Degree of Elasticity at 10 N
	Method	PLS
	Data Pretreatment Sequence	1. Normalization by Closure, 4008-9996 (total 500/500) 2. Absorbance Log10(1/x)
	Wavelengths Calibration Set	4008-9996 [1/cm] (total 500/500)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ครั้งที่	Properties	Degree of Elasticity at 10 N
2	Method	PLS
	Data Pretreatment Sequence	1. Smooth Savitzky-Golay 9 Points
	Wavelengths Calibration Set	4392-4800, 5400-6600, 7800-9996 [1/cm] (total 320/500)
3	Method	PLS
	Data Pretreatment Sequence	1. First Derivative BCAP
	Wavelengths Calibration Set	4008-9996 [1/cm] (total 500/500)

หมายเหตุ ความหมายของ Data pretreatment sequence ต่างๆ ในตารางอธิบายไว้ในภาคผนวก

จากการ Calibration ในตารางที่ 6.7 จะ ได้ค่าทางสถิติ ซึ่งค่าเหล่านี้จะนำมาใช้พิจารณาการยอมรับผลการทดลอง แสดงดังตารางที่ 6.8 และ 6.9

ตารางที่ 6.8 ค่าที่ได้จากการ Calibration ของน้ำมันงาคั่ว

Properties	ครั้งที่	Bias	r		SEE	SEP
			C-Set	V-Set		
Density	1	-1.52362e-015	0.482376	0.074374	0.0172586	0.0167178
	2	-1.72411e-016	0.268347	-0.0157225	0.0189798	0.0163896
	3	-1.61309e-016	0.262368	-0.0400208	0.0190122	0.0165117
%Brix	1	4.2897e-015	0.244889	0.00974591	0.776195	0.671569
	2	4.28468e-015	0.249617	-0.0174783	0.775229	0.678539
	3	-2.60651e-015	0.366054	-0.0501391	0.745007	0.707575
Hardness at 30 N	1	-1.4803e-014	0.632276	0.602546	1.58295	1.61436
	2	7.05988e-016	0.514079	0.514176	1.75254	1.72259
	3	7.28762e-016	0.502074	0.499041	1.76701	1.74107
Relaxation at 30 N	1	-1.50809e-014	0.61354	0.317678	4.02249	3.43303
	2	-6.5979e-014	0.531192	0.274941	4.31584	3.05849
	3	1.57334e-014	0.620931	0.207279	3.99296	3.57699
Energy Absorption at 30 N	1	1.30943e-012	0.558605	0.484373	67.7812	63.0455
	2	5.38388e-013	0.508842	0.454006	70.3494	62.9501
	3	-5.82239e-013	0.50885	0.453359	70.349	62.9835
Degree of Elasticity at 30 N	1	-1.63833e-015	0.362855	0.454497	0.190524	0.0846783
	2	1.08022e-016	0.380434	0.379574	0.189085	0.092677
	3	-5.35608e-016	0.362084	0.452438	0.190585	0.0848421
Hardness at 10 N	1	6.35608e-016	0.45320	0.43008	1.63257	1.53644
	2	-5.5324e-014	0.354720	0.354175	1.60539	1.49855
	3	-5.77981e-014	0.302047	0.301208	1.76701	1.74107
Relaxation at 10 N	1	3.25419e-015	0.307581	0.316066	4.00529	3.06754
	2	-5.3649e-014	0.311673	0.297645	3.95250	2.52847
	3	2.34911e-014	0.309355	0.294608	3.98965	2.97868
Energy Absorption at 10 N	1	1.35941e-016	0.519651	0.517153	10.2081	10.9361
	2	3.62954e-016	0.503092	0.498984	11.4664	12.3842
	3	-4.73913e-014	0.501784	0.493238	11.7807	11.6598

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Properties	ครั้งที่	Bias	r		SEE	SEP
			C-Set	V-Set		
Degree of	1	-1.6593e-014	0.276812	0.225209	0.216865	0.09476
Elasticity at	2	-2.32170e-015	0.25890	0.25013	0.225091	0.09642
10 N	3	-2.73084e-015	0.26438	0.27326	0.203124	0.08664

ตารางที่ 6.9 ค่าที่ได้จากการ Calibration ของน้ำมั่งคุด

Properties	ครั้งที่	Consistency	Q
Density	1	103.235	0.4687
	2	115.804	0.4647
	3	115.144	0.4557
%Brix	1	115.579	0.2578
	2	114.250	0.2494
	3	105.290	0.2310
Hardness at 30 N	1	98.0543	0.1928
	2	101.738	0.1649
	3	101.490	0.1600
Relaxation at 30 N	1	117.170	0.1117
	2	141.110	0.1006
	3	111.629	0.0967
Energy Absorption at 30 N	1	107.512	0.0788
	2	111.754	0.0734
	3	111.694	0.0733
Degree of Elasticity at 30 N	1	224.998	0.1750
	2	204.026	0.1748
	3	224.636	0.1747
Hardness at 10 N	1	106.2570	0.1327
	2	107.1296	0.1156
	3	107.1049	0.1074
Relaxation at 10 N	1	0.1103	130.57
	2	0.1098	156.32

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Properties	ครั้งที่	Consistency	Q
Relaxation at 10 N	3	0.1005	133.94
Energy Absorption at 10 N	1	109.136	0.0652
	2	114.2172	0.0603
	3	113.178	0.0595
Degree of Elasticity at 10 N	1	228.860	0.1578
	2	233.447	0.1535
	3	234.450	0.1404



ขั้นตอนการ Calibration เชิงคุณภาพ (Quality) ของผลมังคุด

1. เปิดไฟล์ข้อมูล Spectra ที่ได้จากการ Scan ผลมังคุด
2. นำลักษณะของเนื้อผลมังคุดซึ่งพิจารณาระดับดังนี้
 - เนื้อดีมาก (Good) หมายถึง เนื้อที่มีลักษณะเป็นเนื้อขาวนุ่มไม่มีเนื้อเสี้ยนปน หรือ เนื้อที่มีลักษณะต่อไปนี้ในปริมาณเล็กน้อย
 1. มีลักษณะจ้ำ
 2. มีลักษณะเน่า
 3. มียางไหล
 4. มีเปลือกติดเนื้อ
 - เนื้อปานกลาง (Relative Good) หมายถึง เนื้อที่มีลักษณะต่อไปนี้ในปริมาณปานกลาง
 1. มียางไหล
 2. มีเปลือกติดเนื้อ
 หรือ เนื้อที่มีเนื้อแก้วเล็กน้อยปะปนกับเนื้อเสี้ยนเล็กน้อย หรือ มีเนื้อเสี้ยนปนกันมากกว่า 2 อย่างในปริมาณน้อย-ปานกลาง หรือ เนื้อที่มีลักษณะเป็นเนื้อแก้วเล็กน้อย
 - เนื้อไม่ดี (Bad) หมายถึง เนื้อที่มีลักษณะเป็นเนื้อแก้วปริมาณปานกลาง – มาก หรือ มีเนื้อแก้วปริมาณปานกลาง – มากปะปนกับเนื้อเสี้ยน หรือ มีเนื้อเสี้ยนปะปนกัน มากกว่า 2 อย่างในปริมาณมาก หรือ มีเนื้อแก้วเล็กน้อยปะปนกับเนื้อเสี้ยนปริมาณมาก หรือ มียางไหลมากปะปนอยู่กับเนื้อผล

จากนั้นจึงใส่ลงในแต่ละ Spectrum ตามหมายเลขผลที่กำหนดไว้ เพื่อใช้เป็นค่า Reference ซึ่งการใส่ค่านี้ เราจะใส่เป็น 1 กับ 0 เท่านั้น โดยจะใส่เป็น 1 เมื่อลักษณะของเนื้อผลตรงกับระดับเนื้อผลที่แยกไว้ในข้างต้น และระดับที่เหลือจะใส่เป็น 0 ทั้งหมด ในแต่ละด้านของแต่ละผล

3. สร้างสมการ Calibration ในแต่ละ Properties โดย
 - 3.1 ใช้วิธี Cluster ซึ่งเป็นวิธีหนึ่งในการแยกคุณภาพของตัวอย่างออกเป็นกลุ่มๆ ที่ช่วงความยาวคลื่น 4500-10000 1/cm โดยใช้ค่า Reflectance ทุกๆ 12 1/cm (500 จุด)
 - 3.2 คำนวณหาสมการ Calibration โดยใช้ Auto Calibration จาก Software NIRCal V4.01 ของเครื่อง Computer
 - 3.3 หลังจากทำการ Calibration แล้วจะได้รายงาน ดังนี้
 1. Wavelength calibration set
 2. Data pretreatment sequence
 3. Number cluster (จำนวนกลุ่มในการแยกคุณภาพของตัวอย่าง)
4. เปลี่ยนจากลักษณะของเนื้อผลมังคุดเป็นลักษณะของผิวเปลือกมังคุดซึ่งพิจารณาดังนี้

- ดีมาก (Very Good) หมายถึง ผิวที่มีลักษณะเกลี้ยง หรือ มีรอยขีดข่วนเล็กน้อย-ปานกลาง
- ดี (Good) หมายถึง ผิวที่มีแมลงเล็กน้อย หรือ มีรอยขีดข่วนด้วยในปริมาณเล็กน้อย-ปานกลาง หรือ ผิวที่มียางไหลน้อย หรือ ผิวที่มีรอยขีดข่วนมาก
- ปานกลาง (Medium) หมายถึง ผิวที่มีแมลงปานกลาง หรือ มีรอยขีดข่วนด้วยในปริมาณเล็กน้อย-ปานกลาง หรือ ผิวที่มีแมลงเล็กน้อยและมียางไหลเล็กน้อย หรือ มีรอยขีดข่วนด้วยในปริมาณเล็กน้อย-ปานกลาง
- ไม่ดี (Bad) หมายถึง ผิวที่มีแมลงมาก หรือ มีรอยขีดข่วนด้วยในปริมาณเล็กน้อย-ปานกลาง หรือ ผิวที่มีแมลงปานกลางและมียางไหลปานกลาง-มาก หรือ มีรอยขีดข่วนด้วยในปริมาณเล็กน้อย-ปานกลาง

จากนั้นจึงใส่ลงในแต่ละ Spectrum ตามหมายเลขผลที่กำหนดไว้ เพื่อใช้เป็นค่า Reference ซึ่งการใส่ค่านี้ เราจะใส่เป็น 1 กับ 0 เท่านั้น โดยจะใส่เป็น 1 เมื่อลักษณะของผิวเปลือกผลตรงกับระดับผิวเปลือกที่แยกไว้ในข้างต้น และระดับที่เหลือจะใส่เป็น 0 ทั้งหมด ในแต่ละผล

5. ทำซ้ำข้อ 3

ผลการทำ Auto Calibration ของผลมังคุดเชิงคุณภาพ (Quality) แสดงดังตารางที่ 6.10 และ 6.11

ตารางที่ 6.10 วิธีการ Calibration ของผลมังคุด

Properties	ลักษณะเนื้อผล
Method	Cluster
Wavelengths Calibration Set	4392-4800, 5400-6600, 7800-9996 [1/cm] (total 320/500)
Q-Value	0.0061
Properties	ลักษณะผิวเปลือกของผลมังคุด
Method	Cluster
Wavelengths Calibration Set	4440-9000 [1/cm] (total 381/500)
Q-Value	0.0017

ตารางที่ 6.11 ผลการ Calibration ของผลมังคุด

Property Overview	Number Cluster
Good	51
Relative Good	26
Bad	52
Total	129
Property Overview	Number Cluster
Very Good	37
Good	38
Medium	30
Bad	20
Total	125

จากผลการ Calibration ของผลมังคุดเชิงคุณภาพ จะพบว่าไม่สามารถแยกลักษณะเนื้อผลได้ เนื่องจากจะพิจารณาที่ Number cluster (จำนวนกลุ่มในการแยก) และค่า Q-value ซึ่งในการทดลองนี้ ได้ค่า Q-value น้อยมาก และผลรวมจำนวนกลุ่มมีมากเกินไป ควรจะมีจำนวนกลุ่มเท่ากับจำนวนของ Property overview จากการทดลองนี้ควรมี Number cluster เท่ากับ 3 หรือ Number cluster ของ Good เท่ากับ 1
 Number cluster ของ Relative Good เท่ากับ 1
 Number cluster ของ Bad เท่ากับ 1

ดังนั้นจึงสรุปว่า ผิวเปลือกผลภายนอกไม่สามารถบอกได้ว่าเนื้อผลภายในจะมีคุณภาพดีหรือไม่ หรือกล่าวได้ว่า ผิวเปลือกผลภายนอกไม่มีความสัมพันธ์กับเนื้อผลภายในของมังคุด

ขั้นตอนการ Calibration เชิงคุณภาพ (Quality) ของน้ำมั่งคุด

1. เปิดไฟล์ข้อมูล Spectrum ที่ได้จากการ Scan น้ำมั่งคุด
 2. นำลักษณะของเนื้อผลมั่งคุดซึ่งมีลักษณะตามที่ได้อธิบายมาแล้ว ใส่งลงในแต่ละ Spectrum ตามหมายเลขผลที่กำหนดไว้ เพื่อใช้เป็นค่า Reference ซึ่งการใส่งค่านี้ เราจะใส่งเป็น 1 กับ 0 เท่านั้น โดยจะใส่งเป็น 1 เมื่อลักษณะของเนื้อผลตรงกับระดับเนื้อผลที่แยกไว้ในข้างต้น และระดับที่เหลือจะใส่งเป็น 0 ทั้งหมด ในแต่ละด้านของแต่ละผล
 3. สร้างสมการ Calibration ในแต่ละ Properties โดย
 - 3.1 เลือกช่วงความยาวคลื่นที่เหมาะสม เพื่อที่จะนำมาสร้างสมการ Calibration ในการทำครั้งนี้ ได้เลือกช่วงความยาวคลื่น 4500-10000 1/cm เนื่องจากที่ช่วงความยาวคลื่น 4000-4500 1/cm จะถูกดูดซับ โดยสาร Fiber Optic ดังนั้นจึงเริ่มใช้ช่วงความยาวที่ 4500-10000 1/cm
 - 3.2 ทำการคำนวณหาสมการ Calibration โดยทำ Auto Calibration โดย Software Computer
 - 3.3 หลังจากทำการ Calibration แล้วจะได้รายงานเช่นเดียวกับการ Calibration เชิงคุณภาพของผลมั่งคุด ดังนี้
 4. บันทึกค่าลงในตารางที่ 6.12 และ 6.13
- ผลการทำ Auto Calibration ของผลมั่งคุดเชิงคุณภาพ (Quality) แสดงดังตารางที่ 6.12 และ 6.13

ตารางที่ 6.12 วิธีการ Calibration ของน้ำมั่งคุด

Properties	ลักษณะเนื้อผล
Method	Cluster
Wavelengths Calibration Set	4008-9996 [1/cm] (total 500/500)
Q-Value	0.0013

ตารางที่ 6.13 ผลการ Calibration ของน้ำมั่งคุด

Property Overview	Number Cluster
Good	42
Relative Good	25
Bad	44
Total	111

จากผลการ Calibration ของน้ำมั่งคุดเชิงคุณภาพ จะพบว่าไม่สามารถแยกลักษณะเนื้อผล
ได้ เนื่องจากจะพิจารณาที่ Number cluster (จำนวนกลุ่มในการแยก) และค่า Q-value ซึ่งในการ
ทดลองนี้ ได้ค่า Q-value น้อยมาก และผลรวมจำนวนกลุ่มมีมากเกินไป

ดังนั้นจึงสรุปว่า ไม่สามารถแยกลักษณะของเนื้อผลได้จากการ Scan น้ำมั่งคุด



บทที่ 7

สรุปผลการทดลอง

จากการผลการทดลองและการวิจารณ์การทดลองสามารถสรุปผลได้ดังนี้

1. น้ำหนักและขนาดของผลมังคุดมีความสัมพันธ์กับปริมาตรของผล โดยมีความแปรผันตรงกัน
2. ผิวเปลือกภายนอกของมังคุดไม่มีความสัมพันธ์กับลักษณะเนื้อภายในผล
3. ความหนาแน่นของมังคุดไม่สามารถแยกเนื้อแก้วออกจากเนื้อดีได้อย่างชัดเจน
4. ของแข็งที่ละลายได้ (%Brix) ของผลมังคุดไม่สามารถแยกลักษณะเนื้อให้แตกต่างกันได้อย่างชัดเจน
5. การทดสอบด้วยวิธี Compression Test และ Relaxation Test แรงที่กระทำต่อมังคุดที่ 10 N ไม่ทำให้มังคุดเกิดจุดคดาก (Biyield point)
6. ค่า Hardness, Relaxation Energy, Absorption และค่า Degree of Elasticity ไม่มีความสัมพันธ์กับลักษณะเนื้อผลของมังคุด
7. สามารถตรวจสอบความแน่นเนื้อของผลมังคุดด้วยวิธี NIR spectroscopy ที่แรง 30N ด้วยค่า Hardness และค่า Degree of Elasticity ที่แรง 30 N
8. ผิวเปลือกผลภายนอกไม่สามารถบอกได้ว่าเนื้อผลภายในจะมีคุณภาพดีหรือไม่ หรือ ผิวเปลือกผลภายนอกไม่มีความสัมพันธ์กับเนื้อผลภายในของมังคุด

บทที่ 8

สรุปการทำโครงการงาน

1. ทำให้มีความรู้และความเข้าใจในเรื่องการตรวจสอบคุณภาพ โดยวิธี NIR spectroscopy
2. ทำให้มีความรู้และความเข้าใจในเรื่องการตรวจสอบความแน่นเนื้อด้วย Universal Testing Machine (UTM)
3. สามารถนำผลการทดลองที่ได้เป็นแนวทางในการทำโครงการงานครั้งต่อไป

ข้อเสนอแนะ

1. ในการทำโครงการงานครั้งต่อไป การทดลองที่ไม่ควรทำ คือ การวัดปริมาณของแข็งที่ละลายได้ (soluble solids) ในน้ำมันงาคุดและการวัดความหนาแน่น เนื่องจาก NIR spectra ของทั้งผลงม้งาคุดและน้ำมันงาคุดไม่มีความสัมพันธ์กับสมบัติดังกล่าว และการวัดความแน่นเนื้อควรทำเฉพาะ Single cycle load plate compression test เท่านั้น เนื่องจาก NIR spectra ของทั้งผลงม้งาคุดและน้ำมันงาคุดมีความสัมพันธ์กับค่า Hardness จึงไม่จำเป็นต้องทำ Double cycle load plate compression test และ Relaxation test เนื่องจาก NIR spectra ของทั้งผลงม้งาคุดและน้ำมันงาคุดไม่มีความสัมพันธ์กับ Energy absorption และ Relaxation
2. น้ำมันงาคุดที่คั้นได้ควรกรองให้เหลือแต่ของเหลวไม่มีกาก หรือมีเนื้อมันอยู่ในน้ำเพื่อ NIR Spectra ของน้ำมันงาคุดจะไม่เกิด Noise
3. การทำโครงการงานครั้งต่อไปควรใช้คิวเวต (Cuvette) ที่มี Path-Length ขนาดต่ำกว่า 10 mm หรือใช้ British Cup เพื่อให้ลำแสง NIR ผ่านน้ำมันงาคุดได้ดีขึ้น



ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวกที่ 1

ตัวอย่างการคำนวณในการ Calibration โดย วิธี PLS Regression

ใช้ข้อมูล absorbance (X) ที่ 3 wavelength จาก (Reference) ตัวอย่าง 5 ตัวอย่าง และมีตัวแปรตาม 1 ตัวแปร (y) ดังแสดงในตารางภาคผนวกที่ 1

โดย X คือ Spectrophotometric absorbances

Y คือ ค่าความเข้มข้น

ตารางภาคผนวกที่ 1 แสดงข้อมูลและค่า Average ของ X, y

ตัวอย่าง	X			y
	x1	x2	x3	
1	11.5	10	8	1
2	7	4.5	3	2
3	5.5	2	1	3
4	8	3.5	3	4
5	13.5	8	8	5
ค่าเฉลี่ย	9.1	5.6	4.6	3

ขั้นตอนการคำนวณ

1. หาค่า Average, \bar{x}, \bar{y} ก็จะได้ดังตารางภาคผนวกที่ 1
2. หาค่า $X_0 = X - \bar{X}$, $y_0 = y - \bar{y}$ ได้ดังตารางภาคผนวกที่ 2
3. คำนวณจำนวน Factor ที่เหมาะสม (A max) ดังนั้นจะได้ $a = 1, \dots, A_{max}$

ที่ Factor a = 1

3.1 คำนวณค่า Loading weight w_a จาก $w_a = C X'_{a-1} y_{a-1}$

โดย $C = (y'_{a-1} X_{a-1} X'_{a-1} y_{a-1})^{-0.5}$

จะได้ $C = (y'_0 X_0 X'_0 y_0)^{-0.5}$

โดย

$$y_0'X_0 = \begin{bmatrix} -2 & -1 & 0 & 1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 2.4 & 4.4 & 3.4 \\ -2.1 & -1.1 & -1.6 \\ -3.6 & -3.6 & -3.6 \\ -1.1 & -2.1 & -1.6 \\ 4.4 & 2.4 & 3.4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 5 & -5 & 0 \end{bmatrix}$$

$$X_0'y_0 = \begin{bmatrix} 2.4 & -2.1 & -3.6 & -1.1 & 4.4 \\ 4.4 & -1.1 & -3.6 & -2.1 & 2.4 \\ 3.4 & -1.6 & -3.6 & -1.6 & 3.4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -2 \\ -1 \\ 0 \\ 1 \\ 2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 5 \\ -5 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$C = \begin{bmatrix} 5 & -5 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 5 \\ -5 \\ 0 \end{bmatrix} = 50^{-0.5} = 0.141$$

$$w_a = w_1 = C X_0'y_0$$

$$w_1 = 0.141 \begin{bmatrix} 5 \\ -5 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.71 \\ -0.71 \\ 0 \end{bmatrix}$$

3.2 ดังนั้น $w_1 = \begin{bmatrix} 0.71 & -0.71 & 0 \end{bmatrix}$

3.3 คำนวณ Scores $t_a = X_{s-1} w_a$ จะได้ $t_1 = X_0 w_1$ คำนวณตารางภาคผนวกที่ 2

ตารางภาคผนวกที่ 2 แสดงข้อมูล X_0, y_0 , และ t_1

Obj.no	X_0			y_0	t_1
1	2.4	4.4	3.4	-2	-1.4
2	-2.1	-1.1	-1.6	-1	-0.7
3	-3.6	-3.6	-3.6	0	0.0
4	-1.1	-2.1	-1.6	1	0.7
5	4.4	2.4	3.4	2	1.4

3.4 คำนวณ Spectral loading, p_a โดย

$$p_a = X'_{a-1} t_a / t'_a t_a \text{ จะได้ } p_1 = X'_0 t_1 / t'_1 t_1$$

$$\text{ได้ } p_1 = [0.71 \ -0.71 \ 0] \text{ ซึ่งจะได้ว่า } w_1 = p_1$$

3.5 คำนวณ The Chemical Loading, q_a โดย

$$q_a = y'_{a-1} t_a / t'_a t_a \text{ จะได้ } q_1 = y'_0 t_1 / t'_1 t_1$$

$$\text{จะได้ } q_1 = 1.4$$

w_1, p_1 และ q_1 แสดงค่าดังตารางภาคผนวกที่ 3

3.6 สร้าง X, y residuals โดยใช้ E และ f เป็นตัวแทน

$$E = X_{a-1} - t_a p'_a$$

$$F = y_{a-1} - t_a q_a$$

ที่ Factor $a = 2$

4. แทนที่ X_{a-1} และ y_{a-1} ด้วย E และ f ตามลำดับ

ดังนั้น ได้ $X_1 = E$ และ $y_1 = f$ ดังตารางภาคผนวกที่ 4

ตารางภาคผนวกที่ 3 แสดงข้อมูล w_1 , p_1 และ q_1 , b และ b_0

Factor a = 1				
w_1	0.71	-0.71	0	
p_1 และ q_1	0.71	-0.71	0	1.4
b และ b_0	1.0	-1.0	0	-0.5

ตารางภาคผนวกที่ 2 แสดงข้อมูล X_0, y_0

Obj.no	X_1			Y_1
1	3.4	3.4	3.4	0
2	-1.6	-1.6	-1.6	0
3	-3.6	-3.6	-3.6	0
4	-1.6	-1.6	-1.6	0
5	3.4	3.4	3.4	0

4.1 จำนวนซ้ำจากขั้นตอนที่ 1 เป็นต้นมา จนกระทั่ง $a = A_{max}$

5. จำนวน สมการ Calibration

$$y = 1 b_0 + X b \text{ โดย}$$

$$b = w (p'w)^{-1} q$$

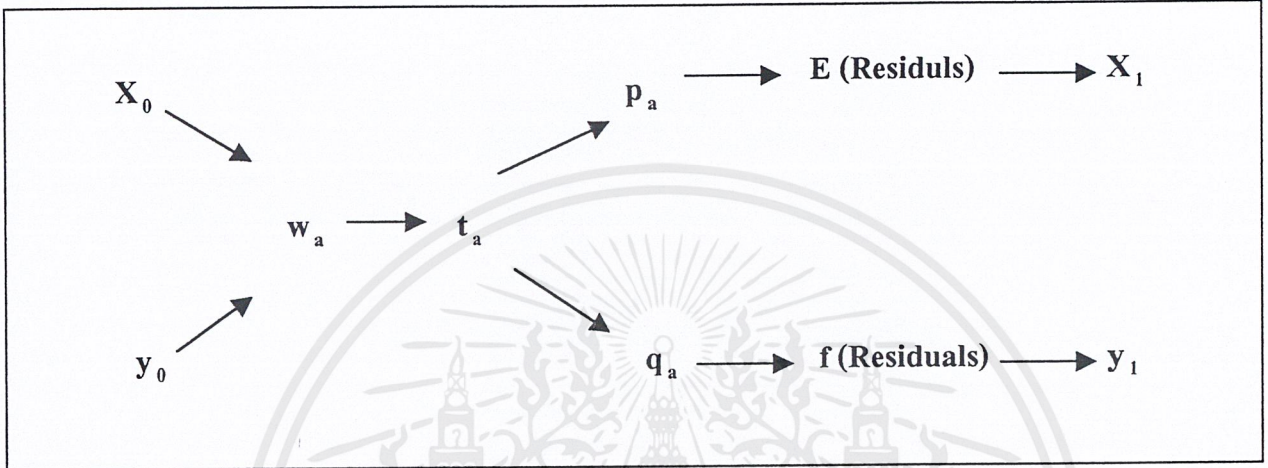
$$b_0 = \bar{y} - \bar{x}' b$$

แสดง Algorithm ดังรูปที่ 1

หมายเหตุ : 1. สมการในบทที่ 2 เทียบได้เป็นสมการในภาคผนวก

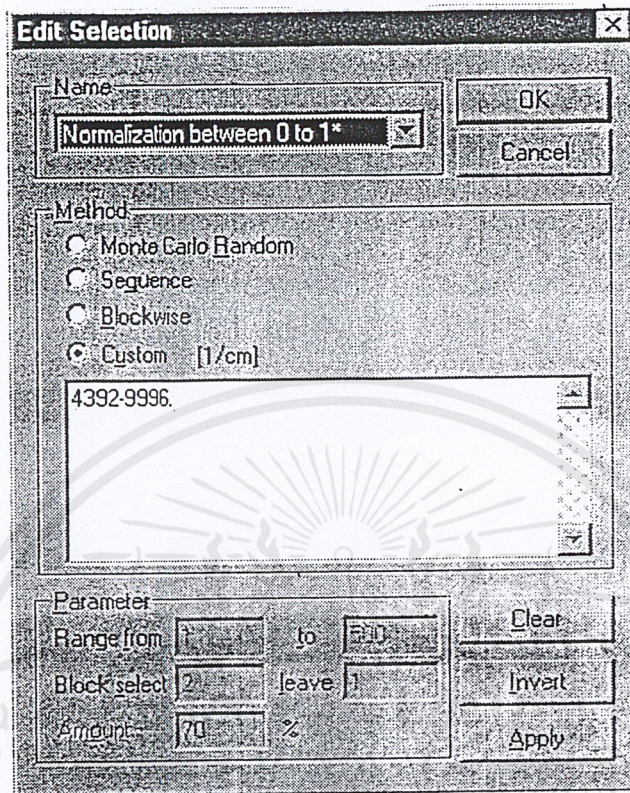
2. $C = g_x$ (ในบทที่2)

3. $' = ^T$ (ในบทที่2) หมายถึง การTranspost



รูปภาคผนวกที่ 1 แสดง Algorithm ของ Caibration

ภาคผนวกที่ 2 การคำนวณ Data pretreatment BUCHI NIRCal สามารถหา Data pretreatment ได้หลายวิธีดัง ได้คัดลอกเอกสารคู่มือประกอบการใช้ Software ดังนี้



Click on **Custom [1/cm]**

Type into the field which wavelength range should be applied for the pretreatment.

Click on the OK button to confirm the changes.

In the following short description the effects of the pretreatments and the implemented formulae are given. The following conventions are used.

Capital letters : Vectors

Small letters : Scalars

T = Transmission or Reflectance

A = Absorbance

S = Spectrum

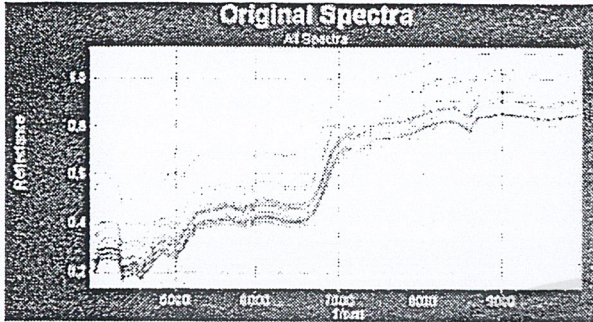
h = DeltaX, Distance of base points on the x-axis

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

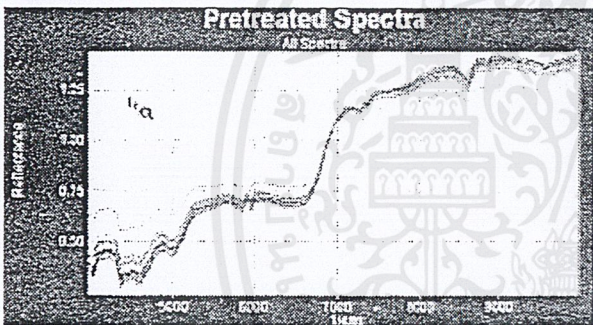
Formula for derivation or explanation แปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

13.1 Normalization

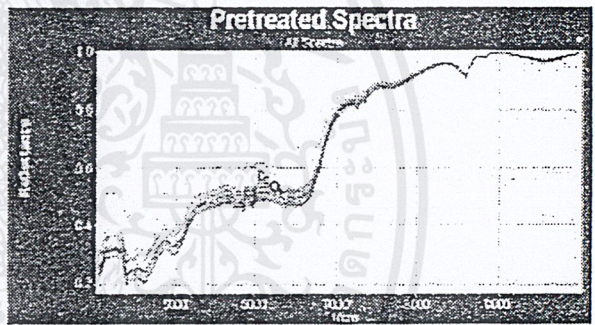
The aim of normalization is to reduce baseline variations.



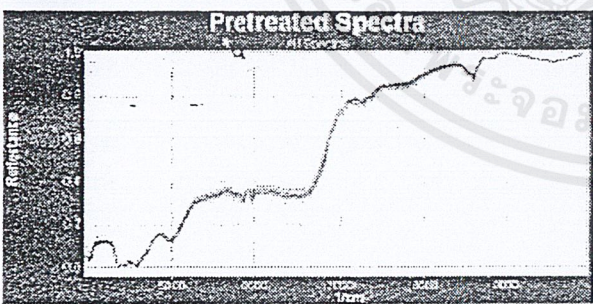
13.1.1 Normalization by Closure



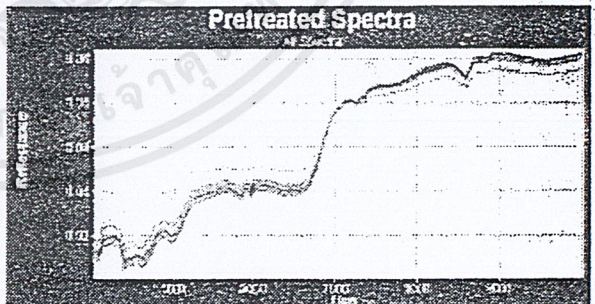
13.1.2 Normalization by Maxima



13.1.3 Normalization between 0 and 1



13.1.4 Normalization to Unit Length



The example shows the effect of the different normalization functions. It is possible to select that normalization function which gives the best results for a given data set.

13.1.5 Formulae

Normalization by Closure (Martens, Naes 1989, p. 337)

(*consideration of wavelength selection)

$$NC = \frac{N \cdot T}{\sum_{i=1}^N T_i}$$

Normalization by Maxima

(*consideration of wavelength selection)

$$N = \frac{T}{\max(T)}$$

Normalization between 0 and 1

(*consideration of wavelength selection)

$$S = \frac{S - \min(S)\bar{I}}{\max(S - \min(S)\bar{I})}$$

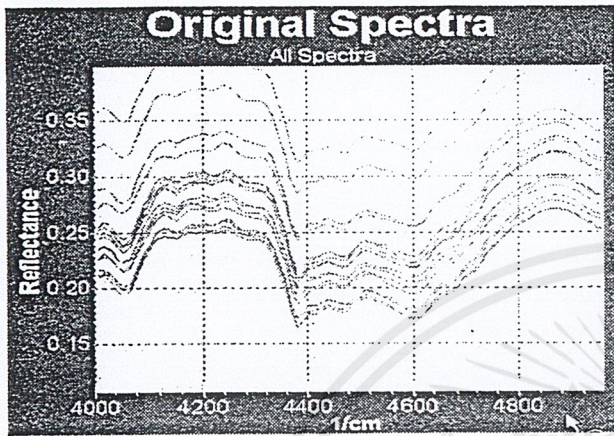
Vector Normalization to Unit Length

(*consideration of wavelength selection)

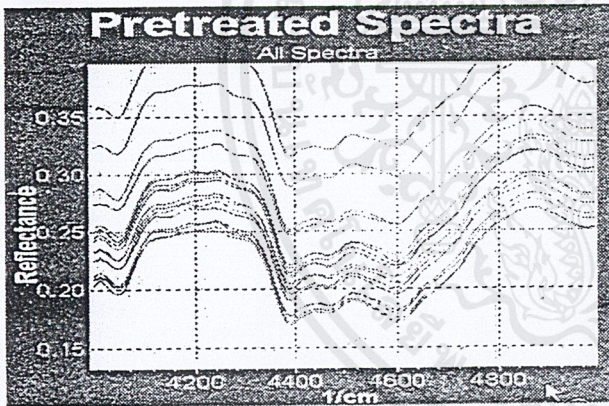
$$VN = \frac{T}{\|T\|} = \frac{T}{\sqrt{T_i^2 + T_{i+1}^2 + \dots + T_n^2}}$$

13.2 Smoothing

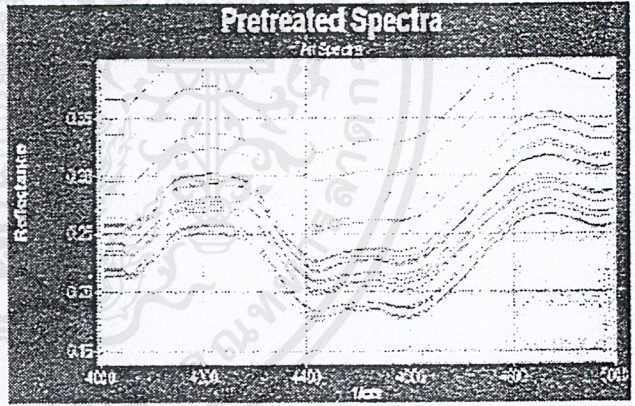
Smoothing is used in order to reduce the noise level in spectra. However when using smoothing the spectral resolution will be affected. The smoothing function should be chosen according to the original data.



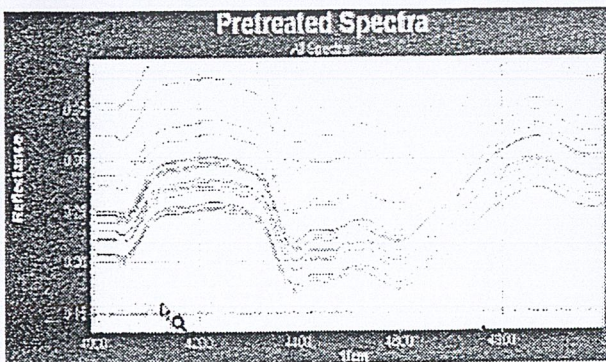
13.2.1 Average 3 Points



13.2.2 Average 9 Points



13.2.3 Savitzky-Golay 9 Points





Please Note

Please chose the smoothing function carefully. No loss of spectral information should appear.

13.2.4 Formulae

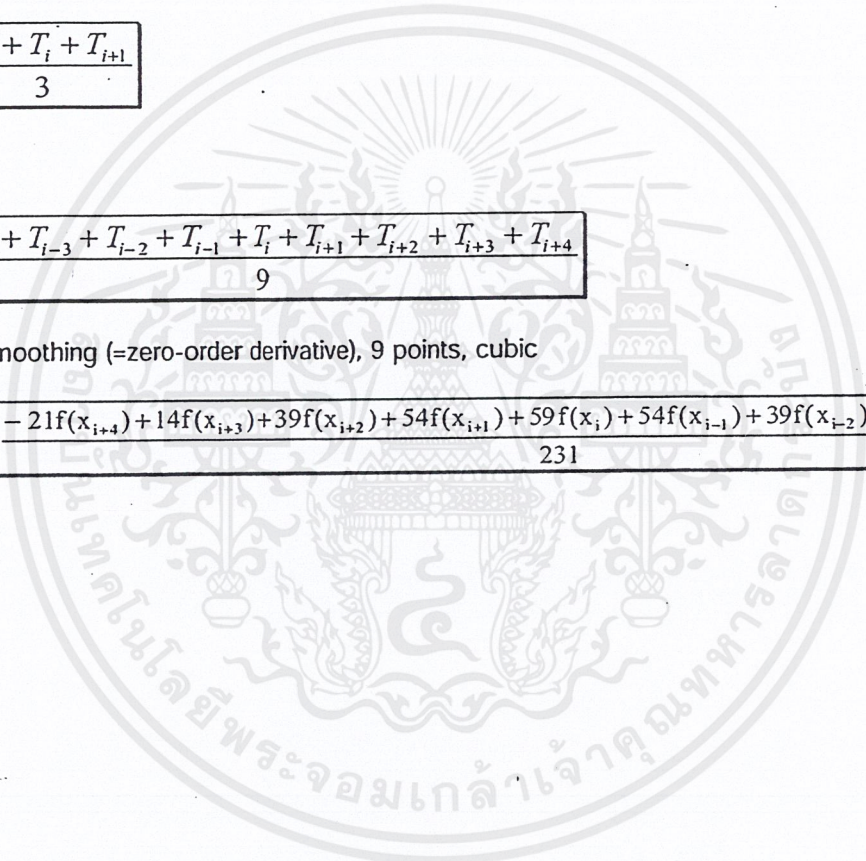
Average 3 and 9 Points

$$gm_i = \frac{T_{i-1} + T_i + T_{i+1}}{3}$$

$$gm_i = \frac{T_{i-4} + T_{i-3} + T_{i-2} + T_{i-1} + T_i + T_{i+1} + T_{i+2} + T_{i+3} + T_{i+4}}{9}$$

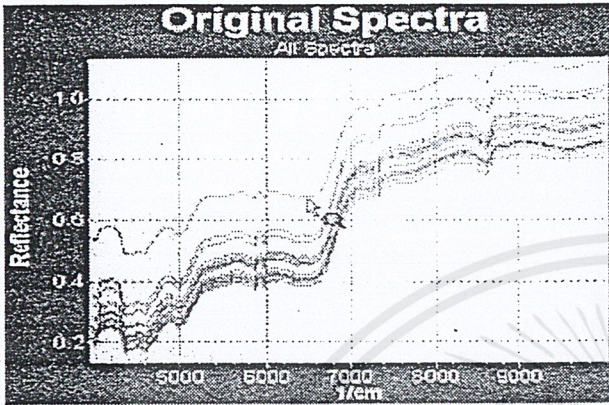
Savitzky-Golay Smoothing (=zero-order derivative), 9 points, cubic

$$f_{smooth}(x_i) = \frac{-21f(x_{i+4}) + 14f(x_{i+3}) + 39f(x_{i+2}) + 54f(x_{i+1}) + 59f(x_i) + 54f(x_{i-1}) + 39f(x_{i-2}) + 14f(x_{i-3}) - 21f(x_{i-4})}{231}$$

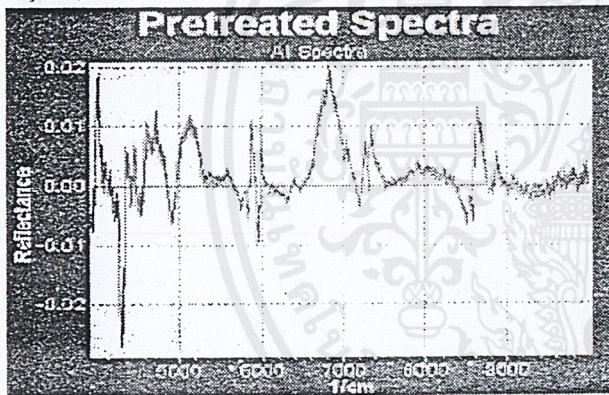


13.3 1st Derivative

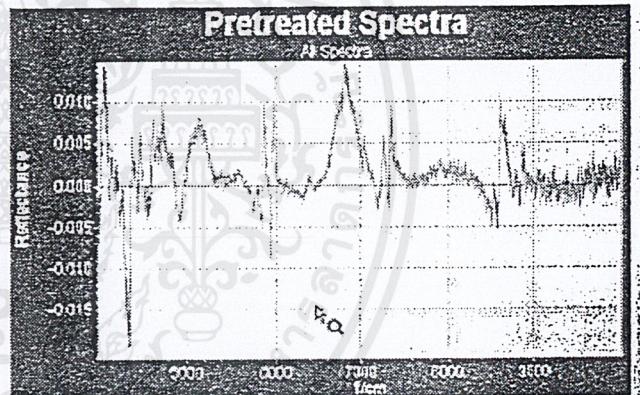
Derivative is used in order to reduce baseline effects. The first derivative will eliminate a linear ordinate offset. The second derivative will eliminate a sloping baseline.



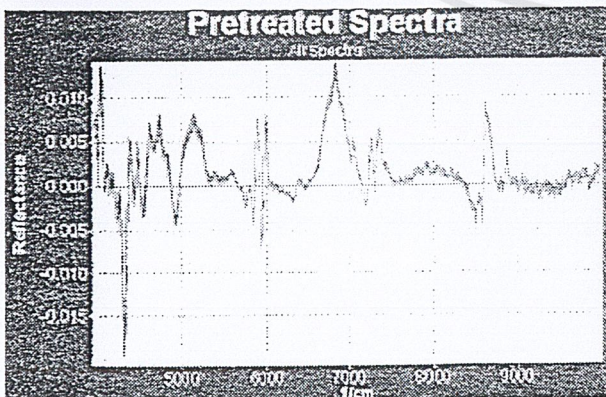
13.3.1 BCAP 4 Point, 1st Derivative



13.3.2 Taylor 3 Point 1st Derivative



13.3.3 Savitzky-Golay 9 Point 1st Derivative



13.3.4 Formulae

BCAP 1st Derivative

$$f'(x_i) = \frac{f(x_{i+2}) + f(x_{i+1}) - f(x_{i-1}) - f(x_{i-2})}{4}$$

Savitzky-Golay 1st Derivative, 9 Points

Savitzky-Golay derivative works with orthogonal polynomials (here cubic)

$$f'(x_i) = \frac{-86f(x_{i+4}) + 142f(x_{i+3}) + 193f(x_{i+2}) + 126f(x_{i+1}) - 126f(x_{i-1}) - 193f(x_{i-2}) - 142f(x_{i-3}) + 86f(x_{i-4})}{1188}$$

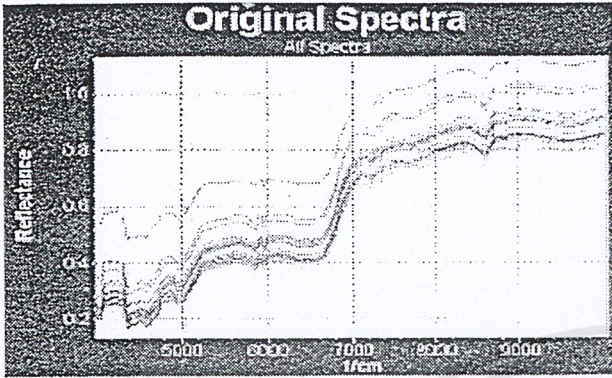
Literature:

Savitzky, Golay Analytical Chemistry Vol. 36, No. 8, July 1964, p.1627-1639, "Smoothing and Differentiation of Data by Simplified Least Squares Procedures"

Taylor-Progression 1st Derivative

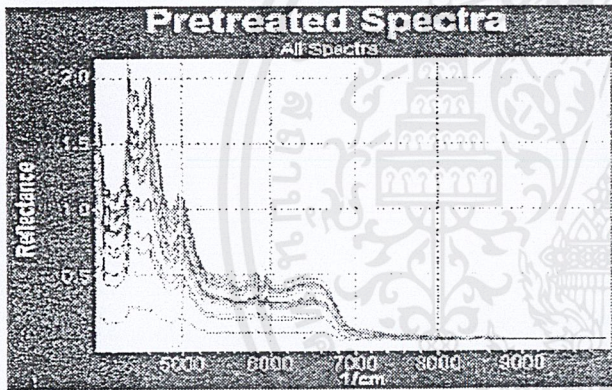
$$f'(x_i) = \frac{f(x_{i+1}) - f(x_{i-1}))}{h^2}; \text{centered}$$

13.7 Ordinate Transformations



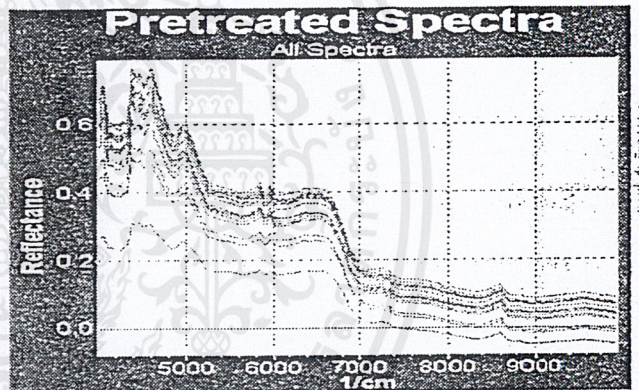
13.7.1 Kubelka-Munk Transformation

KM



13.7.2 Absorbance

log_e



13.7.3 Absorbance Inverse

10^x

This is simply the inverse function of the ordinate transformation into absorbance; i.e. an absorbance spectrum will be transformed into transmission/reflectance.

13.7.4 Formulae

Kubelka-Munk

$$KM = \frac{(1-T)^2}{2T}$$

Absorbance

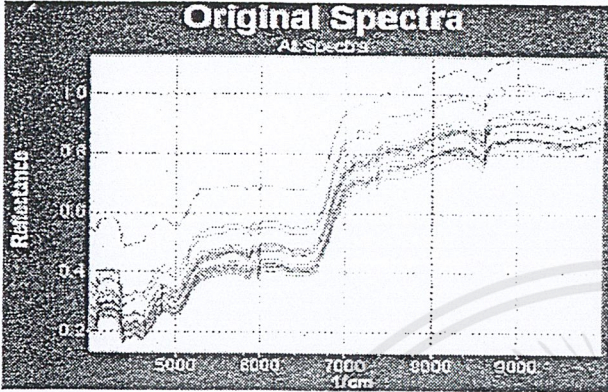
$$A = \log (1 / T)$$

Implemented as:

$$\begin{aligned} A &= -\log_{10}(T) \\ &= -\frac{\log_e(T)}{\log_e(10)} \\ &= -0.434294481902 \log_e(T) \\ T &\in R^+ \end{aligned}$$

13.5 Multiplicative Scatter Correction (MSC)

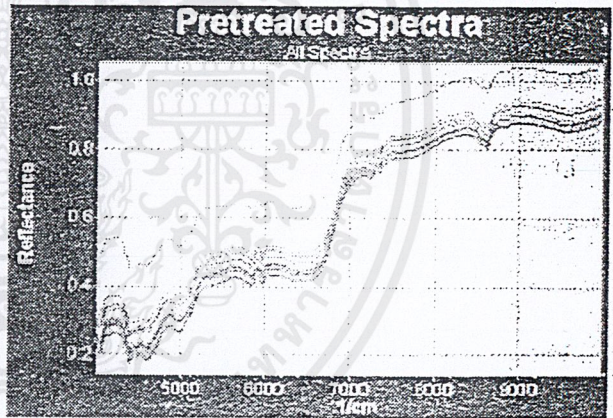
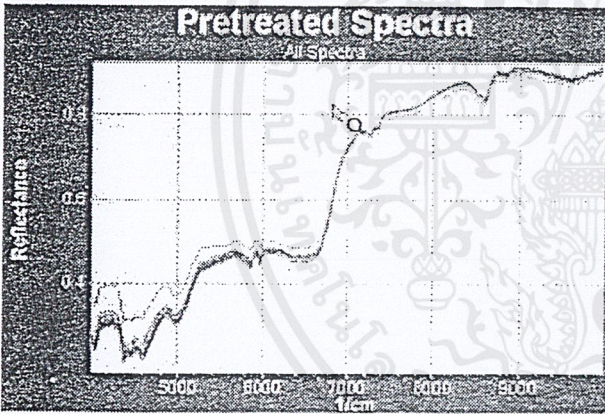
MSC is used in order to reduce or to increase baseline effects caused by scattering.



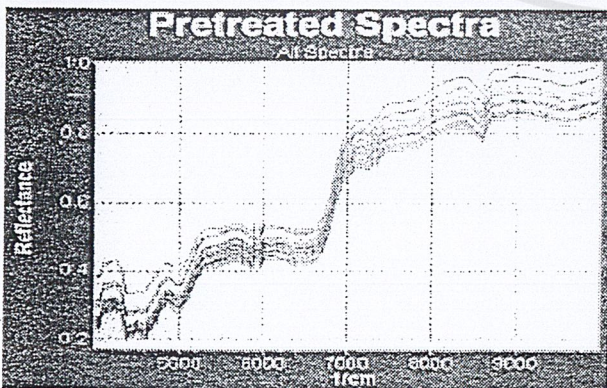
13.5.1 MSC Full



13.5.2 MSC Amplification



13.5.3 MSC Offset



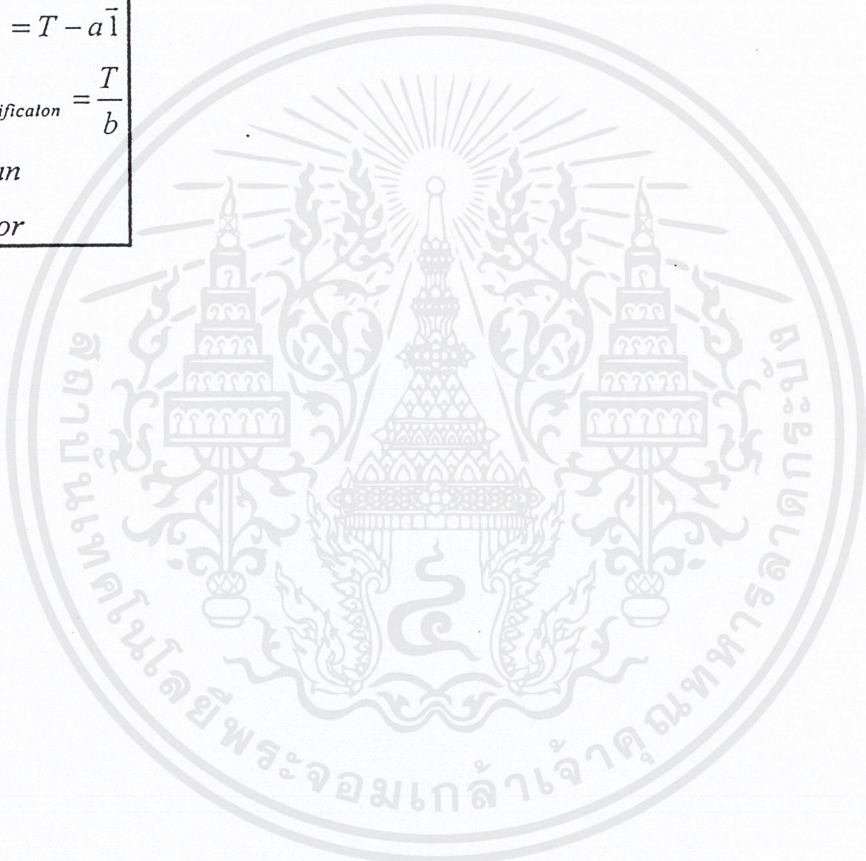
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

13.5.4 Formulae

(*consideration of wavelength selection)

$$T = a\bar{l} + b\bar{T} + \bar{E}$$
$$MSC_{full} = \frac{T - a\bar{l}}{b}$$
$$MSC_{offset} = T - a\bar{l}$$
$$MSC_{amplificaton} = \frac{T}{b}$$

\bar{T} = Mean
 \bar{E} = Error



กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์เรื่อง การตรวจสอบคุณภาพภายในของผลมังคุดโดยวิธีการไม่ทำลายด้วยวิธี NIR Spectrscopy ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี ทางผู้จัดทำขอกราบขอบพระคุณ รศ.ดร.ปานมนัส สิริสมบูรณ์ อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณ คุณตันธิติ รัชชสุภา บริษัท U&V Holding (Thailand) Co, LTD ที่เอื้อเฟื้อเครื่อง NIR Spectroscopy (BÜCHI NIRflex N-400)

คุณสุดใจ สอนสะอาด และเจ้าหน้าที่ ห้องปฏิบัติการพอลิเมอร์ ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

อาจารย์และเจ้าหน้าที่ประจำภาควิชาวิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความช่วยเหลือการทำวิทยานิพนธ์ให้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี

นายพัลลภ ทองเนียม
นางสาวไพฑิณ ชัยตรี
นางสาวสาวิตรี นิลหุ้ย

เอกสารอ้างอิง

1. กวิศร์ วาณิชกุล และ สุรพงษ์ โกสิทธิ์จินดา, “การเจริญเติบโตของผลมังคุด”, วิทยาศาสตร์, 2522.
2. เกียรติเกษม กาญจนพิสุทธ์, มโนธรรม สัจจถาวร, อุดลย์ พงศ์สุวรรณ, พรรณ บุรณะ และ ลิจิต เอียดแก้ว, “มังคุดราชินีแห่งผลไม้”, พิมพ์ที่สหมิตรออฟเซต, กรุงเทพฯ, 2530.
3. ชนะชัย พันธุ์เกษมสุข, “การศึกษาวิธีการคัดคุณภาพของผลมังคุด”, วิทยานิพนธ์ปริญญา มหาบัณฑิต ภาควิชาพืชสวน มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, 2534.
4. บุญธรรม กิจปรีดาวิสุทธ์, “สถิติวิเคราะห์เพื่อการวิจัย”, กรุงเทพฯ, เรือนแก้วการพิมพ์, 2543.
5. แม้น อมรสิทธิ์, อมร เพชรสม, “หลักการและเทคนิคการวิเคราะห์เชิงเครื่องมือ”, กรุงเทพฯ, โรงพิมพ์ชวนพิมพ์, 2539.
6. วรภัทร ถักนทีนวงศ์, “การศึกษาองค์ประกอบทางเคมี ความมีชีวิตของเซลล์และปัจจัยของน้ำที่มีผลต่อการเกิดเนื้อแก้วในผลมังคุด”, วิทยานิพนธ์ปริญญา มหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2539.
7. ศรียนต์ ชัยจำรูญพันธ์, “การศึกษาอาการเนื้อแก้วของมังคุด”, ปัญหาพิเศษปริญญาตรี ภาควิชา พืชสวน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ, 2529.
8. ศรีตั้งวาลย์ ทยวิเศษกุล, “ปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดเนื้อแก้วของมังคุด”, วิทยานิพนธ์ปริญญาโท มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ, 2537.
9. สมชาย เทพเดชา, “มังคุด Trends & Potentials”, โรงพิมพ์เปเปอร์ออฟเซ็ท, กรุงเทพฯ, 2535.
10. สมโภชน์ น้อยจินดา, “ผลของสภาพบรรยากาศตัดแปลงที่มีต่อคุณภาพและอายุการเก็บรักษาของผลมังคุด”, วิทยานิพนธ์ปริญญา มหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2535.
11. สมศักดิ์ อดัญธิ, “การศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพและทางชีวเคมีบางประการของเปลือกผลมังคุดที่แข็งตัวเนื่องจากการตกกระทบ”, วิทยานิพนธ์ปริญญา มหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2538.
12. สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย, “รายงานการเก็บรักษา การใช้ประโยชน์จากก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ในการเก็บรักษาผักผลไม้เพื่อการส่งออก ฉบับที่ 8 การเก็บรักษามังคุด”, รายงานวิจัยเสนอต่อการปีโตรเลียมแห่งประเทศไทย, 2531.
13. สุรกิตติ ศรีกุล, “มังคุด”, ศูนย์วิจัยพืชสวนสุราษฎร์ธานี สถาบันวิจัยพืชสวน กรมวิชาการเกษตร, 2531.

14. Bailey, L.H., "Mangosteen", In The Standard Encyclopedic of Horticulture, The Macmillan Co., New York, 1953.
15. Bellon-Maurel V., Vigneau J.L., "NIR Fast Spectrometer for Fruit Internal Quality Assessment : Reproducibility Study", Montpellier Cedex 1, France, 1995.
16. Chandler, W.H., "Evergreen Ochards", La and Febiger, Philadelphia, 1950.
17. Donald A. Burns, and Emil W. Ciurczak, "Handbook of Near-Infrared Analysis", the United state of America : Marcel Dekker, Inc, 1992.
18. Graf, A.B., "Tropica. East Rutherford", New Jersey, 1986.
19. Oches, J.J., "Tropical and Suptropical Agriculture", The Macmilland Co., New York, 1961.
20. Panmanas Sirisomboon, Munehiro Tanaka, Takayoshi Akinaga and Takayuki Kojima, "Evaluation of the Textural properties of Japanese pear", Jurnal of Texture Studies 31 (2000) 665-677.
21. Somchai Arunrungrusmi and others., "Nondestructive 2D Cross-Section Visualization of a Mangosteen", King Mongkut's University of Technology Thonburi, Thailand, 1999.
22. Sumio Kawano, Takayuki Fujiwara and Mutsuo Iwamoto, "Nondestructive Determination of Sugar Content in Satsuma Mandarin using Near Infrared (NIR) Transmittance", Ministry of Agriculture, Forestry and Fisheries, Japan, 1933.
23. Tongdee, S.C., and A. Suwanagul, "Postharvest mechanical damage in mangosteens", ASEAN Food J, 1989.
24. Watson, B.J., "An Appreciation of Five Exotic Tropical Fruit Tree Species and their Potential in Queensland", Department of Primary Industries, Kamerunga Horticultural Research Station, Australia, 1978.