

การออกแบบระบบวัดความชื้นในแป้งโดยใช้แสงช่วง Near-Infrared

นายอรรถชัย ธีลาฤทธิกุล

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2549

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

DESIGN OF FLOUR MOISTURE MEASURING SYSTEM USING NEAR-INFRARED

Mr. Atthachai Leelaritthikul

**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering Program in Electrical Engineering**

Department of Electrical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University


Academic Year 2006

Copyright of Chulalongkorn University

491750

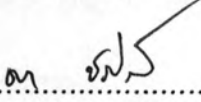
หัวข้อวิทยานิพนธ์ การออกแบบระบบวัดความชื้นในแป้งโดยใช้แสงช่วง Near-infrared
โดย นายอรรถชัย ลีลาฤทธิกุล
สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ที่ปรึกษา ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธรา ชลปราณี

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบัณฑิต


..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.ดิเรก ลาวัญศิริ)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.บวรยง โตประเสริฐพงศ์)


..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธรา ชลปราณี)


..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.สมชัย รัตนธรรมพันธ์)

อรรถชัย ลีลาฤทธิ์กุล : การออกแบบระบบวัดความชื้นในแป้งโดยใช้แสงช่วง Near-infrared (DESIGN OF FLOUR MOISTURE MEASURING SYSTEM USING NEAR-IR) อ. ที่ปรึกษา : ผศ. ดร.ธรา ชลปราชญ์, 131 หน้า.

แป้งเป็นหนึ่งในผลิตภัณฑ์แปรรูปทางเกษตรกรรมหลักที่สำคัญของประเทศไทย และเป็นองค์ประกอบหลักของอาหารส่วนใหญ่ นอกจากอุตสาหกรรมอาหารแล้ว แป้งยังถูกนำมาใช้ในอุตสาหกรรมด้านต่างๆ ดังนั้น การควบคุมคุณภาพแป้งจึงมีความสำคัญ หนึ่งในนั้นคือ ปริมาณความชื้น แป้งเป็นวัสดุคูกกลืนความชื้น ซึ่งมีผลกับคุณลักษณะของเนื้อแป้งและระยะเวลาในการเก็บรักษา เนื่องจากง่ายต่อการเกิดเชื้อรา การหาค่าปริมาณความชื้นตามวิธีมาตรฐานด้วยการอบให้แห้ง เป็นวิธีที่เสียเวลาและมีต้นทุนที่ค่อนข้างสูงในกระบวนการผลิต ดังนั้น วิธีรองในการหาค่าปริมาณความชื้นที่ถูกต้องแม่นยำและรวดเร็วจึงเป็นที่นิยมกว่า

วิทยานิพนธ์นี้มีวัตถุประสงค์ในการศึกษาการหาความชื้นในแป้งด้วยการวัดสเปกตรัมการดูดกลืนแสงที่เกิดขึ้นในช่วง NIR ในการนำข้อมูลการวัดที่ได้มาแปลผลเป็นเปอร์เซ็นต์ความชื้นที่มีอยู่ในแป้ง สเปกตรัมที่เกิดขึ้นในช่วง NIR เป็นสเปกตรัมที่มีความซับซ้อนเนื่องจากการเกิด โอเวอร์ โทนและคอมบิเนชัน การแปลผลข้อมูลจึงต้องใช้หลักการทางคณิตศาสตร์ช่วยในการแปลผลข้อมูล ด้วยการใช้แนวความคิด Chemometric ในการแปลผลข้อมูลสเปกตรัมด้วยแบบจำลองสมการถดถอยหลายตัวแปรและ Partial Least Squares แล้วเปรียบเทียบค่ากำลังสองน้อยที่สุดของค่าความผิดพลาดจากแบบจำลอง เพื่อแสดงให้เห็นถึงความเป็นไปได้ในการแปลผลข้อมูล ตัวอย่าง เช่น R^2 และ SEC ที่ได้จากแบบจำลองกลุ่มสอบเทียบของแป้งข้าวเจ้า และ R^2 และ SEP ที่ได้จากแบบจำลองกลุ่มทำนายของแป้งข้าวเจ้า ด้วยการใช้แบบจำลองสมการถดถอยหลายตัวแปรมีค่าเป็น 0.99206 0.31093 0.98164 และ 0.47667 ตามลำดับ ส่วนค่าที่ได้จากการใช้แบบจำลอง PLS มีค่าเป็น 0.99357 0.28758 0.98440 และ 0.44582 ตามลำดับ เป็นต้น นอกจากนี้ยังเป็นเครื่องต้นแบบในการนำมาพัฒนาให้ใช้ได้ ในอุตสาหกรรมเกษตรในด้านต่างๆต่อไป

ภาควิชา.....วิศวกรรมไฟฟ้า..... ลายมือชื่อนิสิต..... อรรถชัย ลีลาฤทธิ์กุล
 สาขาวิชา.....วิศวกรรมไฟฟ้า..... ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา..... ดร. ชลปราชญ์
 ปีการศึกษา...2549.....

4770535721 : MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING

KEY WORD: NEAR INFRARED / FLOUR / MOISTURE

ATTACHAI LEELARITTHIKUL : DESIGN OF FLOUR
MOISTURE MEASURING SYSTEM USING NEAR-INFRARED.

THESIS ADVISOR : ASST.PROF. THARA CHONPRANEE,
Ph.D., 131 pp.

Flour is one of the important major agricultural products of Thailand and is a major constituent in most foods. In addition to food industry, it is also used in other industries. Therefore flour quality control is important. Factor is moisture content, which effects flour material and flour preservation time. High moisture results in mold. Using the oven drying method, the standard moisture determination process, consumes time and may be quite costly. Thus, secondary methods for moisture determination which are accurate and fast, are preferred.

This thesis proposes the study of flour moisture determination using near-infrared absorption. The NIR spectrum is used for flour moisture interpretation. Because NIR spectrum is complicated due to overtone and combination bands. Spectrum interpretation is based on mathematical concept, i.e. Chemometric. Multiple linear regression and Partial Least Square (PLS) models are used for spectrum description. By comparing the least square errors, it is possible to obtain the moisture content using NIR. For example, R^2 and SEC for rice flour calibration model and R^2 and SEP for rice flour prediction model using multiple linear regression model are 0.99206, 0.31093, 0.98164, and 0.47667, respectively. On the other hand, the values using partial least square model are 0.99357, 0.28758, 0.98440, and 0.44582, respectively. This prototype can be adapted for other agricultural industries.

Department.....Electrical Engineering.....Student's signature *Attachai Leelaritthikul*
Field of study.....Electrical Engineering.....Advisor's signature..... *Tara Chonpranee*
Academic year2006.....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยความกรุณา และความช่วยเหลืออย่างดียิ่งจาก ผศ.ดร. ชาราชลปราณี อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้สละเวลาในการให้คำปรึกษาและข้อคิดเห็นต่างๆ ด้วยความเอาใจใส่ตลอดมา จนวิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงด้วย

ขอกราบขอบพระคุณ รศ.ดร.บรรจง โคประเสริฐพงศ์ ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รศ.ดร.สมชัย รัตนธรรมพันธ์ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ซึ่งได้สละเวลาและให้คำแนะนำต่างๆ ในการสอบวิทยานิพนธ์ของข้าพเจ้าอย่างดียิ่ง

ขอกราบขอบพระคุณ ครูถาวร สุวรรณกิจ ซึ่งได้ให้คำแนะนำต่างๆจนสามารถทำงานวิจัยจนประสบผลสำเร็จ

ขอกราบขอบพระคุณ รศ.ดร.มานะ ศรียุทธศักดิ์ ที่ให้ความช่วยเหลือด้านเครื่องมือและสถานที่ และขอขอบคุณเพื่อนๆ ที่ห้องปฏิบัติการวิจัย BERL ซึ่งให้คำแนะนำต่างๆในการทำงานวิจัยนี้

ขอกราบขอบพระคุณ คุณวรุณี ธนะแพศย์ ที่หน่วยปฏิบัติการเทคโนโลยีการตรวจสอบสินค้าโดยวิธีไม่ทำลาย แห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่ช่วยให้คำแนะนำและแนะนำหนังสือที่มีประโยชน์ต่องานวิจัยนี้

ขอขอบคุณ โด ที่เป็นเพื่อนซึ่งช่วยให้กำลังใจให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปได้

ขอขอบคุณ ท็อป และ ไอ้ต ที่ช่วยเป็นกำลังใจและให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์

ขอขอบคุณ ปุ่น ที่ช่วยแวะมาเยี่ยมเยียนคลายเครียดในขณะที่กำลังทำงานวิจัย

และท้ายที่สุดนี้ ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา และน้องชาย ที่ช่วยเป็นกำลังใจ และให้การสนับสนุนข้าพเจ้าด้วยดีจนจบการศึกษา

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญภาพ.....	ฉ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 บทนำและแนวเหตุผล.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	1
1.3 ขอบเขต.....	2
1.4 ขั้นตอนและวิธีดำเนินงานวิจัย.....	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
บทที่ 2 แป้ง.....	3
2.1 องค์ประกอบหลักภายในเมล็ดแป้ง.....	6
2.1.1 อะมิโลส.....	7
2.1.2 อะมิโลเพกทิน.....	8
2.2 โครงสร้างเมล็ดแป้ง.....	9
2.3 ส่วนประกอบอื่นๆ ภายในเมล็ดแป้ง.....	10
2.3.1 ไขมัน.....	10
2.3.2 ไนโตรเจน.....	11
2.3.3 เถ้า.....	12
2.3.4 ฟอสฟอรัส.....	12
บทที่ 3 การหาค่าความชื้นในแป้ง.....	14
3.1 การหาค่าปริมาณความชื้นทางตรง (Direct Measurement).....	14
3.2 การหาค่าปริมาณความชื้นทางอ้อม (Indirect Measurement).....	15
3.2.1 ความต้านทานไฟฟ้า (Resistance).....	15
3.2.2 ค่าความจุไฟฟ้า (Capacitance).....	15
3.2.3 การวัดด้วยแสงอินฟราเรด.....	15
บทที่ 4 ทฤษฎีพื้นฐานการวัดแสง NIR.....	17

4.1 ประวัติการพัฒนา NIR	17
4.2 หลักการวัดแสงแบบ Near-infrared	18
4.2.1 สเปกโตรสโคปีแบบสั้น	18
4.2.2 แบบจำลองทางกลศาสตร์คลาสสิกของโมเลกุล 2 อะตอม	18
4.2.3 แบบจำลองแอนฮาร์โมนิกของโมเลกุล 2 อะตอม	23
4.2.4 แบบจำลองของโมเลกุลหลายอะตอม	25
4.2.4.1 ระดับชั้นพลังงานของโมเลกุลหลายอะตอม	26
4.2.4.2 Selection Rules	27
4.2.4.3 ผลจากแอนฮาร์โมนิก	27
4.2.4.4 การพิจารณาค่าคงตัวแอนฮาร์โมนิก	29
4.4 น้ำ	30
บทที่ 5 เครื่องมือ	33
5.1 แหล่งกำเนิดแสง	33
5.1.1 Thermal radiation	33
5.1.1.1 หลอดทังสเตนฮาโลเจน	33
5.1.1.2 โกลบาร์และฮีตเตอร์ทวินโครม	34
5.1.2 เลเซอร์สารกึ่งตัวนำและไดโอดเปล่งแสง	34
5.2 ตัวอย่างเครื่องมือวัดที่เกี่ยวข้องในช่วง NIR	34
5.2.1 Filter-based instrument	35
5.2.1.1 Interference Filter	35
5.2.2 LED-based instruments	36
5.2.3 AOTF-based instruments	36
5.2.3 Dispersive optic-based instruments	38
5.2.3.1 เกรตติงแบบเลี้ยวเบน	39
5.2.3.1.1 Echelle Grating	39
5.2.3.1.2 Holographic Grating	40
5.2.3.1.3 Concave Grating	40
5.2.4 Fourier transform-based instruments	40
5.3 ตัวตรวจจับแสงช่วง Near-infrared	41
5.3.1 Photoconductor	41
5.3.2 Photovoltaic Effect	42
5.3.3 Multi-Channel Detectors	42

5.4	วัสดุทางแสงที่ใช้สำหรับช่วง Near-infrared.....	43
5.5	การวัดแสง NIR ในวัสดุการเกษตร	44
5.5.1	การส่งผ่านแบบกระจายแสง (Diffused Transmission).....	44
5.5.2	การสะท้อนแบบกระจายแสง (Diffused Reflection).....	45
5.5.3	Transflectance	45
5.5.4	Interactance	46
5.6	Beer-Lambert Law	46
บทที่ 6	Chemometric.....	49
6.1	การแปลผลข้อมูล.....	50
6.1.1	แบบจำลองกำลังสองน้อยที่สุด.....	50
6.1.1.1	Classical Least Squares (CLS).....	51
6.1.1.2	Inverse Least Squares (ILS).....	51
6.1.1.2.1	สมการถดถอยหลายตัวแปร (MLR).....	51
6.1.1.2.2	สหสัมพันธ์ร่วม (Co-correlation) และการอินเวอร์ส	52
6.1.1.2.3	Partial Least Squares(PLS)	54
6.2	Digital smoothing และ Filtering methods	55
6.2.1	Moving-Window Average Smoothing Method	56
6.2.2	Savitsky-Golay Filter	57
6.2.3	Numerical Differentiation.....	59
6.2.3.1	Simple Difference Method.....	59
6.2.3.2	Moving-Window Polynomial Least-Squares Fitting Method.....	60
บทที่ 7	ระบบการวัดแสง NIR.....	62
7.1	อุปกรณ์ที่ใช้ในการหาค่าความชื้น.....	63
7.2	อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองวัดแสง	63
7.3	วิธีการทดลอง	65
7.4	วิธีการแปลผลข้อมูล	74
บทที่ 8	ผลการทดลอง.....	75
8.1	ส่วนภาครับสัญญาณของวงจร	75
บทที่ 9	สรุปผลการวิจัย.....	107
9.1	สรุปผลการทดลอง	107
9.2	ข้อเสนอแนะ	109
	รายการอ้างอิง	110

ภาคผนวก	111
ภาคผนวก ก	112
ภาคผนวก ข	113
ภาคผนวก ค	122
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	131

สารบัญตาราง

ตารางที่ 2.1 ผลผลิตของแป้งโดยรวมของโลกในปี พ.ศ. 25355

ตารางที่ 2.2 สมบัติที่สำคัญของอะมิโลสและอะมิโลเพกทิน7

ตารางที่ 2.3 องค์ประกอบของแป้งแต่ละชนิด 10

ตารางที่ 2.4 ปริมาณอะมิโลสและปริมาณไขมันในข้าวโพดพันธุ์ต่างๆ 11

ตารางที่ 2.5 ขนาด รูปร่างและลักษณะเม็ดแป้งชนิดต่างๆ 13

ตารางที่ 4.1 ตัวอย่างค่าคงตัวแอนฮาร์โมนิก χ_c 25

ตารางที่ 4.2 ความถี่สำหรับการดูดกลืนที่เกี่ยวข้องกับน้ำ 32

ตารางที่ 5.1 การจำแนกเครื่องมือ NIR โดยมีพื้นฐานอยู่บนเทคโนโลยีการเลือกช่วง
ความยาวคลื่น..... 35

ตารางที่ 8.1 การเปรียบเทียบการคำนวณระหว่างแบบจำลอง MLR และ PLS ของกลุ่ม
สอบเทียบ..... 106

ตารางที่ 8.2 การเปรียบเทียบการคำนวณระหว่างแบบจำลอง MLR และ PLS ของกลุ่มทำนาย 106

สารบัญภาพ

รูปที่ 2.1 โครงสร้างอะมิโลส.....	7
รูปที่ 2.2 โครงสร้างอะมิโลเพกทิน.....	8
รูปที่ 2.3 โครงสร้างเม็ดแป้ง.....	9
รูปที่ 3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการหาความชื้นทางตรง.....	14
รูปที่ 3.2 วงจรสมมูลการวัดความชื้นด้วยค่าความจุไฟฟ้า.....	15
รูปที่ 4.1 แบบจำลองโมเลกุลสองอะตอม.....	19
รูปที่ 4.2 แบบจำลองฮาร์มอนิก (A) และแอนฮาร์มอนิก (B) พลังงานศักย์ของโมเลกุล 2 อะตอม.....	19
รูปที่ 4.3 ระดับชั้นพลังงานการสั่น.....	21
รูปที่ 4.4 ผลของการดูกลืน โฟตอนที่มีต่อพลังงานศักย์และขนาดของการสั่น.....	22
รูปที่ 4.5 ระดับชั้นพลังงานการสั่นและการเปลี่ยนแปลงระดับชั้นพลังงานที่เกี่ยวข้องตาม แบบจำลองแอนฮาร์มอนิก.....	23
รูปที่ 4.6 ตัวอย่างรูปแบบการสั่นของโมเลกุล.....	26
รูปที่ 4.7 ระดับชั้นพลังงานการสั่นของ SO ₂	27
รูปที่ 4.8 ระดับชั้นพลังงานการสั่นของ SO ₂	28
รูปที่ 4.9 รูปแบบพื้นฐานการดูกลืนในช่วง NIR ในแต่ละช่วง.....	29
รูปที่ 4.10 NIR สเปกตรัมของน้ำในช่วง 900-2500 นาโนเมตร.....	31
รูปที่ 4.11 โหมดการสั่นของน้ำ.....	31
รูปที่ 5.1 หลักการทำงานของ interference filter.....	36
รูปที่ 5.2 โมโนโครเมเตอร์ที่ใช้ตัวแยกแสงแบบ Acousto-Optic Tunable.....	37
รูปที่ 5.3 ระบบแสงแบบดิสเพอร์ซีฟซึ่งมีพื้นฐานบนเกรตติงแบบเว้าและตัวรับสัญญาณแบบ อาร์เรย์ในสเปกโตรมิเตอร์สมัยใหม่แบบไม่มีส่วนที่เคลื่อนที่.....	38
รูปที่ 5.4 การทำงานของเกรตติงแบบสะท้อน.....	39
รูปที่ 5.5 หลักการทำงานของ Fourier-transform spectrometer.....	40
รูปที่ 5.6 ค่าดีเทคติวิตีของตัวตรวจจับแสงชนิด Photoconductive และ Photovoltaic.....	41
รูปที่ 5.7 สเปกตรัมการส่งผ่านแสงในช่วง NIR ของวัสดุต่างๆ.....	43
รูปที่ 5.8 ปฏิกริยาที่เกิดขึ้นระหว่างแสงกับวัสดุ.....	44
รูปที่ 5.9 การส่งผ่านแบบกระจายแสง.....	44
รูปที่ 5.10 การสะท้อนแบบกระจายแสง.....	45
รูปที่ 5.11 การวัดแบบ Transflectance.....	45
รูปที่ 5.12 การวัดแบบ Interactance.....	46

รูปที่ 5.13 แสงที่ถูกคูกกลืนผ่านเนื้อวัสดุ.....	46
รูปที่ 6.1 หลักการของ moving-window average filter.....	56
รูปที่ 6.2 หลักการของ Savitsky-Golay Filter.....	57
รูปที่ 7.1 ระบบการวัดแสง NIR	62
รูปที่ 7.2 ตัวตรวจจับแสงที่ใช้ในการทดลอง	63
รูปที่ 7.3 ที่ใส่ตัวอย่าง.....	64
รูปที่ 7.4 ระบบวัดแสงที่ใช้ในการทดลอง	65
รูปที่ 7.5 ส่วนที่ใช้เป็นแหล่งกำเนิดแสง	66
รูปที่ 7.6 ภายในส่วนที่ใช้เป็นแหล่งกำเนิดแสง.....	66
รูปที่ 7.7 มอเตอร์ที่ใช้ในควบคุมการเลือกความยาวคลื่นที่จะวัด	67
รูปที่ 7.8 Entrance Slit ของโมโนโครเมเตอร์	67
รูปที่ 7.9 Exit Slit ของโมโนโครเมเตอร์.....	68
รูปที่ 7.10 ภายในส่วนรับแสงของระบบวัด	68
รูปที่ 7.11 วงจรไฟฟ้าที่ใช้ควบคุมการวัดและเก็บข้อมูล	69
รูปที่ 7.12 ที่ใส่ตัวอย่างประกอบด้วยกระจก 2 บานพร้อมที่ปิดตัวอย่าง	69
รูปที่ 7.13 ที่ใส่ตัวอย่างพร้อมอุปกรณ์ในการใส่ตัวอย่าง	70
รูปที่ 7.14 ซ้อนดวงที่คักแป็งแล้ว	70
รูปที่ 7.15 การใส่แป็งลงที่ใส่ตัวอย่าง	71
รูปที่ 7.16 แป็งที่ถูกใส่ลงในที่ใส่ตัวอย่าง	71
รูปที่ 7.17 ที่ใส่ตัวอย่างสำหรับตั้งค่าความเข้มแสง.....	72
รูปที่ 7.18 ภาพก่อนการตั้งค่าความเข้มแสง	72
รูปที่ 7.19 ก) ตัวอย่างที่ทำการวัดเมื่อใส่ลงที่ทำการวัด	73
ข) ตัวอย่างที่ทำการวัดในขณะที่ทำการวัด	73
รูปที่ 7.20 ก) แบบจำลองสอบเทียบเพื่อหาสมการอ้างอิง.....	74
ข) การทำนายค่าของตัวอย่างจากสมการอ้างอิง.....	74
รูปที่ 8.1 ส่วนการวัดสัญญาณแสงที่เกิดจากการคูกกลืนและแปลงสัญญาณ	75
รูปที่ 8.2 แรงดันไฟฟ้าที่วัดได้เป็นฟังก์ชันของความยาวคลื่น ในอากาศ.....	76
รูปที่ 8.3 แรงดันไฟฟ้าที่วัดได้เป็นฟังก์ชันของความยาวคลื่นในแป้งข้าวโพด	76
รูปที่ 8.4 แรงดันไฟฟ้าที่วัดได้เป็นฟังก์ชันของความยาวคลื่นในแป้งข้าวเหนียว.....	77
รูปที่ 8.5 แรงดันไฟฟ้าที่วัดได้เป็นฟังก์ชันของความยาวคลื่นในแป้งข้าวเจ้า	77
รูปที่ 8.6 แรงดันไฟฟ้าที่วัดได้เป็นฟังก์ชันของความยาวคลื่นในแป้งมันสำปะหลัง.....	78
รูปที่ 8.7 ค่าการคูกกลืนที่วัดได้เป็นฟังก์ชันของความยาวคลื่นในแป้งข้าวโพดที่มีความชื้น	

13.05%	79
รูปที่ 8.8 ค่าการคูณกลืนที่วัดได้เป็นฟังก์ชันของความยาวคลื่นในแป้งข้าวเหนียวที่มีความชื้น	
13.88%	79
รูปที่ 8.9 ค่าการคูณกลืนที่วัดได้เป็นฟังก์ชันของความยาวคลื่นในแป้งข้าวเจ้าที่มีความชื้น	
12.69%	80
รูปที่ 8.10 ค่าการคูณกลืนที่วัดได้เป็นฟังก์ชันของความยาวคลื่นในแป้งมันสำปะหลังที่มีความชื้น	
13.30%	80
รูปที่ 8.11 ค่าการคูณกลืนการวัดแบบส่งผ่านของข้าวกล้องในช่วง 825-1075 นาโนเมตร	81
รูปที่ 8.12 ค่าการคูณกลืนของแป้งข้าวโพดสองตัวอย่างที่มีค่าความชื้นต่างกัน	82
รูปที่ 8.13 ค่าการคูณกลืนของแป้งข้าวเหนียวสองตัวอย่างที่มีค่าความชื้นต่างกัน	82
รูปที่ 8.14 ค่าการคูณกลืนของแป้งข้าวเจ้าสองตัวอย่างที่มีค่าความชื้นต่างกัน.....	83
รูปที่ 8.15 ค่าการคูณกลืนของแป้งมันสำปะหลังสองตัวอย่างที่มีค่าความชื้นต่างกัน	83
รูปที่ 8.16 ขอบบรรจุแก้วสีเขียวที่มีขนาดต่างๆกัน	84
รูปที่ 8.17 อนุพันธ์อันดับ 2 ของค่าการคูณกลืนของแป้งข้าวโพดในกลุ่มสอบเทียบ	85
รูปที่ 8.18 อนุพันธ์อันดับ 2 ของค่าการคูณกลืนของแป้งข้าวเหนียวในกลุ่มสอบเทียบ.....	85
รูปที่ 8.19 อนุพันธ์อันดับ 2 ของค่าการคูณกลืนของแป้งข้าวเจ้าในกลุ่มสอบเทียบ	86
รูปที่ 8.20 อนุพันธ์อันดับ 2 ของค่าการคูณกลืนของแป้งมันสำปะหลังในกลุ่มสอบเทียบ.....	86
รูปที่ 8.21 ค่าการคูณกลืนของน้ำ	87
รูปที่ 8.22 อนุพันธ์อันดับ 2 ของค่าการคูณกลืนของน้ำ.....	87
รูปที่ 8.23 ค่าสัมประสิทธิ์ MLR ของแป้งข้าวโพดที่มีความสัมพันธ์กับค่าความชื้น	88
รูปที่ 8.24 ค่าสัมประสิทธิ์ MLR ของแป้งข้าวเหนียวที่มีความสัมพันธ์กับค่าความชื้น	89
รูปที่ 8.25 ค่าสัมประสิทธิ์ MLR ของแป้งข้าวเจ้าที่มีความสัมพันธ์กับค่าความชื้น	89
รูปที่ 8.26 ค่าสัมประสิทธิ์ MLR ของแป้งมันสำปะหลังที่มีความสัมพันธ์กับค่าความชื้น	90
รูปที่ 8.27 ค่าสัมประสิทธิ์เชิงเส้นที่หามาจาก PLS ของแป้งข้าวโพดที่มีความสัมพันธ์กับค่า	
ความชื้น (NF=6).....	91
รูปที่ 8.28 ค่าสัมประสิทธิ์เชิงเส้นที่หามาจาก PLS ของแป้งข้าวเหนียวที่มีความสัมพันธ์กับค่า	
ความชื้น (NF=6).....	91
รูปที่ 8.29 ค่าสัมประสิทธิ์เชิงเส้นที่หามาจาก PLS ของแป้งข้าวเจ้าที่มีความสัมพันธ์กับค่า	
ความชื้น (NF=6).....	92
รูปที่ 8.30 ค่าสัมประสิทธิ์เชิงเส้นที่หามาจาก PLS ของแป้งมันสำปะหลังที่มีความสัมพันธ์กับค่า	
ความชื้น (NF=6).....	92
รูปที่ 8.31 สเตปครัมของเวกเตอร์ 5 ตัวที่มีความสัมพันธ์กับค่าความชื้นและข้อมูลในกลุ่มสอบ	

เทียบของแป้งข้าวโพด โดยคำนวณมาจาก PLS.....	93
รูปที่ 8.32 สเปกตรัมของเวกเตอร์ 5 ตัวที่มีความสัมพันธ์กับค่าความชื้นและข้อมูลในกลุ่มสอบ เทียบของแป้งข้าวเหนียว โดยคำนวณมาจาก PLS.....	94
รูปที่ 8.33 สเปกตรัมของเวกเตอร์ 5 ตัวที่มีความสัมพันธ์กับค่าความชื้นและข้อมูลในกลุ่มสอบ เทียบของแป้งข้าวเจ้า โดยคำนวณมาจาก PLS.....	94
รูปที่ 8.34 สเปกตรัมของเวกเตอร์ 5 ตัวที่มีความสัมพันธ์กับค่าความชื้นและข้อมูลในกลุ่มสอบ เทียบของแป้งมันสำปะหลัง โดยคำนวณมาจาก PLS.....	95
รูปที่ 8.35 กราฟค่า R-Square ค่า SEC ในกลุ่มสอบเทียบ และค่า SEP ในกลุ่มทำนาย ของแป้งข้าวโพด ที่ได้จากแบบจำลอง MLR	96
รูปที่ 8.36 กราฟค่า R-Square ค่า SEC ในกลุ่มสอบเทียบ และค่า SEP ในกลุ่มทำนาย ของแป้งข้าวเหนียว ที่ได้จากแบบจำลอง MLR	97
รูปที่ 8.37 กราฟค่า R-Square ค่า SEC ในกลุ่มสอบเทียบ และค่า SEP ในกลุ่มทำนาย ของแป้งข้าวเจ้า ที่ได้จากแบบจำลอง MLR	98
รูปที่ 8.38 กราฟค่า R-Square ค่า SEC ในกลุ่มสอบเทียบ และค่า SEP ในกลุ่มทำนาย ของแป้งมันสำปะหลัง ที่ได้จากแบบจำลอง MLR	99
รูปที่ 8.39 กราฟค่า R-Square, ค่า SEC ในกลุ่มสอบเทียบ และค่า SEP ในกลุ่มทำนาย ของแป้งข้าวโพด (NF=8) ที่ได้จากแบบจำลอง PLS	100
รูปที่ 8.40 กราฟค่า R-Square, ค่า SEC ในกลุ่มสอบเทียบ และค่า SEP ในกลุ่มทำนาย ของแป้งข้าวเหนียว (NF=8) ที่ได้จากแบบจำลอง PLS	101
รูปที่ 8.41 กราฟค่า R-Square, ค่า SEC ในกลุ่มสอบเทียบ และค่า SEP ในกลุ่มทำนาย ของแป้งข้าวเจ้า (NF=6) ที่ได้จากแบบจำลอง PLS	102
รูปที่ 8.42 กราฟค่า R-Square, ค่า SEC ในกลุ่มสอบเทียบ และค่า SEP ในกลุ่มทำนาย ของแป้งมันสำปะหลัง (NF=6) ที่ได้จากแบบจำลอง PLS	103
รูปที่ 8.43 กราฟระหว่าง Number of factors กับ Standard error of calibration และ Number of factors กับ Standard error of prediction ของแป้งข้าวโพด.....	104
รูปที่ 8.44 กราฟระหว่าง Number of factors กับ Standard error of calibration และ Number of factors กับ Standard error of prediction ของแป้งข้าวเหนียว	104
รูปที่ 8.45 กราฟระหว่าง Number of factors กับ Standard error of calibration และ Number of factors กับ Standard error of prediction ของแป้งข้าวเจ้า.....	105
รูปที่ 8.46 กราฟระหว่าง Number of factors กับ Standard error of calibration และ Number of factors กับ Standard error of prediction ของแป้งมันสำปะหลัง	105
รูปที่ ข.1 สเปกตรัมของแป้งข้าวโพดในกลุ่มสอบเทียบ	114

รูปที่ ข.2 สเปกตรัมของแป้งข้าวโพดในกลุ่มทำนายน 115

รูปที่ ข.3 สเปกตรัมของแป้งข้าวเหนียวในกลุ่มสอบเทียบ 116

รูปที่ ข.4 สเปกตรัมของแป้งข้าวเหนียวในกลุ่มทำนายน 117

รูปที่ ข.5 สเปกตรัมของแป้งข้าวเจ้าในกลุ่มสอบเทียบ..... 118

รูปที่ ข.6 สเปกตรัมของแป้งข้าวเจ้าในกลุ่มทำนายน 119

รูปที่ ข.7 สเปกตรัมของแป้งมันสำปะหลังในกลุ่มสอบเทียบ 120

รูปที่ ข.8 สเปกตรัมของแป้งมันสำปะหลังในกลุ่มทำนายน 121