สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

การใช้วิธีการประมวลภาพร่วมกับการใช้เทคนิคเชิงสถิติเพื่อการควบคุมกระบวนการในอุตสาหกรรมอาหาร

The Use of Image Processing and Statistical Techniques for Process Control in Food Industry

ดร. ชุมพล ยวงใย

ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจากเงินรายได้ ประจำปีงบประมาณ 2555

คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

RCH
TA
1637
ช 267ก

เลขหมู่..............
เลขทะเบียน 131183
วัน,เดือน,ปี 22 พ.ค. 2557

.b 12601925
.i

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชื่อโครงการ การใช้วิธีการประมวลภาพร่วมกับการใช้เทคนิคเชิงสถิติเพื่อการควบคุมกระบวนการใน อุตสาหกรรมอาหาร

แหล่งเงิน เงินรายได้

ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2555 จำนวนเงินที่ได้รับการสนับสนุน 72,000 บาท

ระยะเวลาทำการวิจัย 1 ปี ตั้งแต่ 1 ต.ค. 2554 ถึง 30 ก.ย. 2555

ชื่อ-สกุล หัวหน้าโครงการ

ดร. ชุมพล ยวงใย สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

บทคัดย่อ

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้คือ การสร้างระบบการวัดสำหรับการประเมินคุณภาพสีของไส้กรอกโดยใช้วิธีการประมวลผลด้วยภาพและวิธีการควบคุมกระบวนการเชิงสถิติ เนื่องจากสีของไส้กรอกเป็นหนึ่งในคุณลักษณะที่สำคัญทางกายภาพของผลิตภัณฑ์ต่อการตัดสินใจของผู้บริโภคและความพึงพอใจ อย่างไรก็ตามการตรวจคุณภาพสีของไส้กรอกในปัจจุบันตรวจสอบด้วยสายตามนุษย์ทำให้เกิดความเหนื่อยล้าอาจเป็นผลให้ประสิทธิภาพการทำงานลดลง นอกจากนี้ผลการตรวจสอบไม่ได้ทำการบันทึกเพื่อการวิเคราะห์ในอนาคตนอกเหนือจากการบ่งบอกว่าผลิตภัณฑ์ดีหรือเสีย

งานวิจัยนี้เริ่มจากการศึกษาเครื่องมือต้นแบบสำหรับการวัดคุณภาพสีโดยการถ่ายภาพ โดยใช้โปรแกรม MATLAB ในการแปลงรูปภาพที่ได้มาเป็นคุณลักษณะเชิงตัวเลข จากระบบ RGB เป็น L*a*b* และการศึกษาความสามารถในการวัดซ้ำและการวัดเหมือนของเครื่องมือวัด (GR&R) ใช้วิเคราะห์ความแปรปรวนของระบบการวัดจากผลการทดลองพบว่าระบบการวัดมีความสามารถในการแบ่งแยกความแตกต่างของผลิตภัณฑ์ไส้กรอกได้

จากนั้นจึงทำการศึกษาลักษณะของข้อมูลที่ได้จากการถ่ายภาพดังนี้ การตรวจสอบการแจกแจงแบบปกติ การตรวจสอบสหสัมพันธ์ และการตรวจสอบอัตตสหสัมพันธ์ พบว่าข้อมูลไม่เป็นอิสระต่อกันทำให้ไม่สามารถใช้แผนภูมิควบคุมชิวฮาร์ทได้ จึงใช้แผนภูมิควบคุมโฮเทลลิ่งทีสแควร์ โดยได้ทำการทดสอบความผิดปกติแบบ Spike และ Mean shift และแนะนำให้ใช้แผนภูมิควบคุมสำหรับตัวอย่างเชิงเดี่ยวในการวิเคราะห์ค่า L*a*b* ซึ่งแผนภูมิควบคุมสำหรับตัวอย่างเชิงเดี่ยวดังกล่าวทำให้วิศวกรสามารถตรวจสอบสาเหตุของความผิดปกติเพื่อการปรับปรุงกระบวนการในอนาคตต่อไป

คำสำคัญ : การตรวจสอบคุณภาพสี, การประมวลผลภาพ, ระบบ L*a*b*, กระบวนการผลิตไส้กรอก, การควบคุมกระบวนการเชิงสถิติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Research Title: The Use of Image Processing and Statistical Techniques for Process Control in Food Industry

Researcher: Chumpol Yuangyai

Faculty: Engineering **Department:** Industrial Engineering

ABSTRACT

The objective of the study is to construct the measurement instrument for detecting color quality using image processing and statistical process control. The color of sausage plays a physically-critical role to customer decision and satisfaction. However, the current inspection of the product is performed by human. Tiredness and boredom might lessen their performance. In addition, inspection results are not recorded for further analysis; good or bad results are shown.

The instrument acquires the image of sausage then extract the color quality from RGB system to L*a*b* system by MATLAB coding. The gage repeatability and reproducibility study are used to analyze the variation of the instrument system. The result indicates that the instrument is capable of distinguishing sausage product.

Next, the image data collected are investigated their characteristics namely normality, independency, and autocorrelation. It appears that the data are not independent and leads to the violation of Shewhart's chart family assumptions. Then, Hotelling T^2 is used with the test of spike and mean shift abnormality. The individual control chart for all three L*a*b* are also recommended. These three charts assist engineers to investigate the cause of out-of-control signal for further process improvement.

Keywords : Color inspection, Image processing, L*a*b* system, Sausage production, Statistical process control

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยเรื่องการใช้วิธีการประมวลภาพร่วมกับการใช้เทคนิคเชิงสถิติเพื่อการควบคุมกระบวนการในอุตสาหกรรมอาหารการวิจัยครั้งนี้ ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง เป็นอย่างยิ่ง ที่ได้สนับสนุนทุนวิจัยจากแหล่งทุนเงินรายได้ ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2555

นอกจากนี้ผู้วิจัยขอขอบคุณ คุณพิรญาณ์ แก้วสุวรรณ และ คุณปิยาภรณ์ มาตย์วิเศษ ที่ช่วยในการเก็บข้อมูลและวิเคราะห์ผลในการทดสอบเครื่องมือ รวมทั้งช่วยในการจัดพิมพ์งานวิจัยชิ้นนี้ด้วย

ชุมพล ยวงใย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	**I**
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	**II**
กิตติกรรมประกาศ	**III**
สารบัญ	**IV**
สารบัญตาราง	**V**
สารบัญภาพ	**VII**
บทที่ 1 บทนำ	**1**
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	3
1.3 ขอบเขตของการวิจัย	3
1.4 วิธีดำเนินการวิจัย	3
1.5 สมมติฐานงานวิจัย	4
1.6 กรอบแนวความคิดในการวิจัย	5
1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	6
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	**7**
2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	7
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	28
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย	**30**
3.1 การประมวลผลภาพ	31
3.2 การวิเคราะห์ระบบการวัด	32
3.3 การควบคุมกระบวนการเชิงสถิติ	34
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผล	**37**
4.1 ผลการทดลองการวิเคราะห์ระบบการวัด	37
4.2 ผลการทดลองการควบคุมกระบวนการเชิงสถิติ	42
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	**59**
5.1 สรุปผลการวิจัย	59
5.2 ข้อเสนอแนะ	60
บรรณานุกรม	**61**
ภาคผนวก	**65**
ภาคผนวก ก ผลการทดลอง	66
ภาคผนวก ข ส่วนของโปรแกรม MATLAB	87
ภาคผนวก ค แบบของอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	89
ภาคผนวก ง บทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่	90
ประวัตินักวิจัย	**103**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่ หน้า

2.1 แสดงข้อดีและข้อจำกัดของแบบจำลองทั้ง 3 วิธี....11
4.1 รูปแบบการทดลองและผลการทดลองการวิเคราะห์ระบบการวัดก่อนการปรับปรุง....37
4.2 แสดงผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่า a*....38
4.3 แสดงผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่า a* โดยลดรูปตัวแบบ (Reduced model) ของระบบการวัดก่อนการปรับปรุง....39
4.4 ตารางเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของ L* a* และ b*....40
4.5 รูปแบบการทดลองและการวิเคราะห์ระบบการวัดหลังการปรับปรุง....40
4.6 แสดงผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่า a* โดยลดรูปตัวแบบ (Reduced model) ของระบบการวัดหลังการปรับปรุง....41
4.7 ตารางเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของ L* a* และ b* ของระบบการวัดหลังการปรับปรุง....42
4.8 การเปรียบเทียบค่าสัดส่วนระหว่างความแปรปรวนของระบบการวัดและความแปรปรวนของชิ้นงาน....42
4.9 แสดงค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของเพียร์สัน....47
4.10 แสดงลักษณะการใช้แผนภูมิควบคุมกับผลิตภัณฑ์ไส้กรอก....57
ก.1 รูปแบบการทดลองและผลการทดลองการวิเคราะห์ระบบการวัดก่อนการปรับปรุง....66
ก.2 แสดงผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่า L* ของระบบการวัดก่อนการปรับปรุง....69
ก.3 แสดงผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่า L* โดยลดรูปตัวแบบ (Reduced model) ของระบบการวัดก่อนการปรับปรุง....70
ก.4 แสดงผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่า a* ของระบบการวัดก่อนการปรับปรุง....71
ก.5 แสดงผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่า a* โดยลดรูปตัวแบบ (Reduced model) ของระบบการวัดก่อนการปรับปรุง....72
ก.6 แสดงผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่า b* ของระบบการวัดก่อนการปรับปรุง....73
ก.7 แสดงผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่า b* โดยลดรูปตัวแบบ (Reduced model) ของระบบการวัดก่อนการปรับปรุง....74
ก.8 รูปแบบการทดลองและผลการทดลองการวิเคราะห์ระบบการวัดหลังการปรับปรุง....75
ก.9 แสดงผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่า L*....78
ก.10 แสดงผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่า L* โดยลดรูปตัวแบบ (Reduced model) ของระบบการวัดหลังการปรับปรุง....79
ก.11 แสดงผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่า a* ของระบบการวัดหลังการปรับปรุง....80
ก.12 แสดงผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่า a* โดยลดรูปตัวแบบ (Reduced model) ของระบบการวัดหลังการปรับปรุง....81
ก.13 แสดงผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่า b* ของระบบการวัดหลังการปรับปรุง....82
ก.14 แสดงผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่า b* โดยลดรูปตัวแบบ (Reduced model) ของระบบการวัดหลังการปรับปรุง....83

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง(ต่อ)

ตารางที่ **หน้า**

ก.15 ข้อมูลที่ใช้ในการทดสอบ Spike และตัวสถิติโฮเทลลิ่งทีสแควร์ 84
ก.16 ข้อมูลที่ใช้ในการทดสอบ Mean Shift และตัวสถิติโฮเทลลิ่งทีสแควร์ 85
ก.17 ข้อมูลที่ใช้เป็นตัวอย่างการใช้งาน 86

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1.1	แสดงการตรวจสอบคุณภาพของผลิตภัณฑ์ไส้กรอก	2
1.2	แสดงการเปรียบเทียบสีไส้กรอก	2
1.3	แสดงกรอบแนวคิดในการวิจัย	5
2.1	แสดงขั้นตอนการประมวลผลภาพ	8
2.2	แสดงระบบสี RGB	10
2.3	แสดงระบบสี HSI	10
2.4	แสดงระบบสี L*a*b*	11
2.5	แผนภาพแสดงขั้นตอนการผลิตไส้กรอกแบบอิมัลชัน	13
2.6	ปฏิกิริยาเคมีของการเกิดสีในเนื้อสดและผลิตภัณฑ์	14
2.7	แสดงตัวอย่างแผนภูมิควบคุม	20
2.8	การแจกแจงแบบปกติของตัวแปรพหุ 2 ตัวแปร	24
3.1	แสดงแผนผังขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย	30
3.2	แสดงตัวอย่างรูปภาพที่ได้จากการถ่ายภาพ	31
3.3	แสดงการตัดภาพเฉพาะส่วนที่เป็นไส้กรอก	31
3.4	แสดงสีที่ใช้ในการทดลอง	32
3.5	แสดงลักษณะของการได้มาของรูปภาพก่อนการปรับปรุง	32
3.6	แสดงลักษณะของการได้มาของรูปภาพหลังการปรับปรุง	33
3.7	ตัวอย่างที่ใช้แทนลักษณะของไส้กรอกที่ปกติ	34
3.8	ตัวอย่างที่ใช้แทนลักษณะของไส้กรอกที่ผิดปกติ	34
3.9	แสดงอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	35
3.10	แสดงลักษณะของการทดสอบแบบ Spike	36
3.11	แสดงลักษณะของการทดสอบแบบ Mean shift	36
4.1	กราฟแสดงการทดสอบการแจกแจงแบบปกติของค่า L*	43
4.2	กราฟแสดงการทดสอบการแจกแจงแบบปกติของค่า a*	43
4.3	กราฟแสดงการทดสอบการแจกแจงแบบปกติของค่า b*	44
4.4	แสดงลักษณะไส้กรอกที่มีความผิดปกติ	44
4.5	กราฟแสดงการทดสอบการแจกแจงแบบปกติของค่า L*	45
4.6	กราฟแสดงการทดสอบการแจกแจงแบบปกติของค่า a*	45
4.7	กราฟแสดงการทดสอบการแจกแจงแบบปกติของค่า b*	46
4.8	Matrix Plot สำหรับ 29 ตัวอย่าง ของค่า L* a* และ b*	47
4.9	กราฟฟังก์ชันอัตตสหสัมพันธ์และฟังก์ชันอัตตสหสัมพันธ์บางส่วนของค่า L*	48
4.10	กราฟฟังก์ชันอัตตสหสัมพันธ์และฟังก์ชันอัตตสหสัมพันธ์บางส่วนของค่า a*	48
4.11	กราฟฟังก์ชันอัตตสหสัมพันธ์และฟังก์ชันอัตตสหสัมพันธ์บางส่วนของค่า b*	49
4.12	แสดงแผนภูมิควบคุมโฮเทลลิ่งทีสแควร์ที่ใช้ในการทดสอบ Spike	50
4.13	แสดงแผนภูมิควบคุมสำหรับตัวอย่างเดี่ยวที่ใช้ในการทดสอบ Spike ของค่า L*	50

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ(ต่อ)

ภาพที่ **หน้า**

4.14 แสดงแผนภูมิควบคุมสำหรับตัวอย่างเดี่ยวที่ใช้ในการทดสอบ Spike ของค่า a*....................51
4.15 แสดงแผนภูมิควบคุมสำหรับตัวอย่างเดี่ยวที่ใช้ในการทดสอบ Spike ของค่า b*....................51
4.16 แสดงแผนภูมิควบคุมโฮเทลลิ่งทีสแควร์ที่ใช้ในการทดสอบ Mean shift....................52
4.17 แสดงแผนภูมิควบคุมสำหรับตัวอย่างเดี่ยวที่ใช้ในการทดสอบ Mean shift ของค่า L*....................53
4.18 แสดงแผนภูมิควบคุมสำหรับตัวอย่างเดี่ยวที่ใช้ในการทดสอบ Mean shift ของค่า a*....................53
4.19 แสดงแผนภูมิควบคุมสำหรับตัวอย่างเดี่ยวที่ใช้ในการทดสอบ Mean shift ของค่า b*....................54
4.20 แสดงแผนภูมิโฮเทลลิ่งทีสแควร์....................55
4.21 ไส้กรอกที่มีความผิดปกติ....................55
4.22 แสดงแผนภูมิควบคุมสำหรับตัวอย่างเดี่ยวของค่า L*....................56
4.23 แสดงแผนภูมิควบคุมสำหรับตัวอย่างเดี่ยวของค่า a*....................56
4.24 แสดงแผนภูมิควบคุมสำหรับตัวอย่างเดี่ยวของค่า b*....................57
4.25 แสดงแนวทางการควบคุมคุณภาพสีของไส้กรอก....................58
5.1 แสดงกรอบแนวคิดในการควบคุมคุณภาพสีของไส้กรอก....................59
ค.1 แสดงแบบของอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง....................89

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปี พ.ศ. 2546 ประเทศไทยได้ประกาศนโยบายในด้านอาหารและอุตสาหกรรมการเกษตร ในการเป็น “ครัวของโลก” ซึ่งในปัจจุบันประเทศไทยยังดำเนินการตามนโยบายดังกล่าว ประกอบกับประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรมและเป็นประเทศผู้ผลิตและส่งออกรายสำคัญของโลก (สถาบันอาหาร, 2554) ในปี พ.ศ. 2553 สินค้าอาหาร ประเภทอาหารทะเล กุ้งแช่แข็งและแปรรูป ผักผลไม้และไก่แช่แข็งและแปรรูปส่งออกเพิ่มขึ้นจากปี พ.ศ. 2552 ทั้งปริมาณและมูลค่า โดยมีมูลค่า 14,474 ล้านเหรียญสหรัฐ เพิ่มขึ้นร้อยละ 14.4 (กรมส่งเสริมการส่งออก, 2554) จะเห็นได้ว่าอุตสาหกรรมอาหารเป็นอุตสาหกรรมที่มีความสำคัญเป็นอย่างมาก ดังนั้นการปรับปรุงเทคโนโลยีเพื่อให้มีความทันสมัย คุณภาพและความปลอดภัยของผลิตภัณฑ์จึงมีความสำคัญที่ต้องพัฒนาเพื่อให้ได้มาตรฐาน

อุตสาหกรรมการแปรรูปเนื้อสัตว์เพื่อให้สามารถเก็บรักษาได้นานขึ้น สามารถทำได้ 2 วิธีหลักคือ วิธีที่ใช้เทคโนโลยีพื้นบ้านเช่นแหนมหมูยอกุนเชียงเป็นต้นและวิธีที่ใช้เทคโนโลยีจากต่างประเทศ เช่นไส้กรอกแฮมและเบคอนซึ่งประเทศไทยได้พัฒนาการผลิตจนกระทั่งสามารถส่งออกไปยังต่างประเทศได้ ไส้กรอกเป็นที่นิยมในการบริโภคมากกว่าผลิตภัณฑ์อื่นๆ ให้คุณค่าทางโปรตีนสูง ประหยัดเวลา มีความสะดวกในการบริโภค (บริษัทศูนย์วิจัยไทยพาณิชย์จำกัด : ลิขสิทธิ์กรมส่งเสริมอุตสาหกรรม, 2554) และผู้บริโภคหันมานิยมบริโภคไส้กรอกทดแทนลูกชิ้นหมูและลูกชิ้นไก่มากขึ้นเพราะภาพลักษณ์ของไส้กรอกมองว่ามีการผสมแป้งน้อยกว่าลูกชิ้น และมีความแตกต่างด้านรสชาติและรูปแบบสินค้ามากมายในปี พ.ศ. 2551 สถานการณ์ส่งออกสุกรแปรรูปและแช่แข็ง ปี พ.ศ. 2551 ปริมาณส่งออก 9,988.15 เมตริกตัน มูลค่า 1,955.77 ล้านบาท มูลค่าขยายตัวเพิ่มขึ้นร้อยละ 50.19 (ศูนย์อัจฉริยะเพื่ออุตสาหกรรมอาหาร, 2551)

จากสภาวะการส่งออกที่เพิ่มมากขึ้นในปัจจุบันคุณภาพของผลิตภัณฑ์จึงเป็นสิ่งจำเป็นในการผลิต เนื่องจากมีผลต่อการตัดสินใจในการเลือกซื้อของผู้บริโภค ซึ่งคุณลักษณะทางกายภาพเป็นสิ่งแรกที่ทำให้ผู้บริโภคมีความพึงพอใจในผลิตภัณฑ์ก่อนที่จะรับรู้คุณสมบัติทางประสาทสัมผัสอื่นๆ (Chambers and Bower, 1993) คุณภาพที่ผู้บริโภคสามารถรับรู้ได้ ได้แก่ ขนาด รูปร่าง ลักษณะเนื้อสัมผัส และสีซึ่งเป็นหนึ่งในคุณลักษณะหลักที่มีผลกระทบต่อการรับรู้ของผู้บริโภคในด้านคุณภาพ (Francis, 1995)

อุตสาหกรรมการผลิตไส้กรอกมีความเกี่ยวข้องกับสีเนื่องจากเป็นปัจจัยแรกทางกายภาพของผลิตภัณฑ์ที่ก่อให้เกิดการจูงใจของผู้บริโภค และทำให้ผู้บริโภคสามารถรับรู้ถึงคุณภาพของผลิตภัณฑ์ได้ (วราวุฒิ ครูส่ง, 2547) ในกระบวนการผลิตไส้กรอกหลังจากที่ผ่านขั้นตอนการผลิตไส้กรอกการบดเนื้อ การผสม การสับนวด การทำอิมัลชัน การผูกไส้ การทำให้สุกหลังจากนั้นจะทำการบรรจุลงในถุงซึ่งหลังจากผ่านขั้นตอนการบรรจุจะทำการตรวจสอบคุณภาพสีของผลิตภัณฑ์ไส้กรอกดังภาพที่ 1.1 โดยมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชนไส้กรอกหมู มผช. 330/2547 ได้กำหนดคุณลักษณะสีที่ต้องการของไส้กรอกหมูคือ ต้องมีสีที่ดีตามธรรมชาติของส่วนประกอบที่ใช้สม่ำเสมอกันตลอดทั้งชิ้นไม่มีสีผิดปกติ เช่น สีเขียวคล้ำ สีดำ (กระทรวงอุตสาหกรรม, 2547) การควบคุมคุณภาพสีของผลิตภัณฑ์ไส้กรอกที่สำเร็จรูปแล้วก่อนส่งจำหน่ายนั้นจึงมีความสำคัญอย่างมากเนื่องจากจะช่วยจำลองสถานการณ์ของลักษณะการมองเห็นผลิตภัณฑ์ของผู้บริโภคเมื่อมาเลือกซื้อผลิตภัณฑ์ ควบคุมไม่ให้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของเสียส่งไปถึงผู้บริโภค และเป็นหลักประกันให้กับผู้บริโภคมั่นใจในคุณภาพของผลิตภัณฑ์ ซึ่งถ้าไส้กรอกผลิตไม่ตรงกับคุณลักษณะดังกล่าวจะทำให้เกิดความสูญเสียกับผู้ประกอบการได้ด้วยเหตุผลดังกล่าวข้างต้นในกระบวนการผลิตไส้กรอกจึงจำเป็นที่จะต้องตรวจสอบคุณภาพในการผลิตเพื่อตอบสนองความต้องการของลูกค้าและลดความสูญเสียต่างๆที่จะเกิดขึ้น ในปัจจุบันการตรวจสอบคุณภาพของผลิตภัณฑ์ไส้กรอกที่ผ่านการบรรจุดังกล่าวยังคงใช้การตรวจสอบด้วยสายตามนุษย์ดังภาพที่ 1.2 ซึ่งมีปัจจัยหลายอย่างที่ทำให้การประเมินนั้นเกิดความผิดพลาดได้ เนื่องจากการมองของมนุษย์ในแต่ละคนแตกต่างกันขึ้นอยู่กับความชำนาญ ลักษณะของแสง หรือความสามารถในการมองเห็น ซึ่งเป็นการยากที่จะสรุปว่าการควบคุมคุณภาพนั้นมีความแน่นอน ถูกต้อง และมีความน่าเชื่อถือ และนอกจากนี้ผลการตรวจสอบไม่ได้ทำการบันทึกเพื่อการวิเคราะห์ในอนาคตนอกเหนือจากการบ่งบอกว่าผลิตภัณฑ์ดีหรือเสีย ดังนั้นในงานวิจัยครั้งนี้จึงนำวิธีการประมวลภาพ (Image processing) มาประยุกต์ใช้ในการประเมินผลสีของไส้กรอก เพื่อให้การแบ่งแยกสีของไส้กรอกมีประสิทธิผลเพิ่มมากขึ้น งานวิจัยที่ได้ศึกษาเกี่ยวกับวิธีการประมวลภาพในการประเมินคุณภาพของอาหารได้มีการรวบรวมไว้ในปี ค.ศ. 2004 (Du and Sun, 2004 ; Brosnan and Sun, 2004) ซึ่งไม่ปรากฏว่ามีการใช้วิธีการประมวลภาพในการควบคุมสีของผลิตภัณฑ์ไส้กรอก

ภาพที่ 1.1 แสดงการตรวจสอบคุณภาพของผลิตภัณฑ์ไส้กรอก
ที่มา : Mass Producing Hot Dogs in a Factory, Triwood1973, 2008

ภาพที่ 1.2 แสดงการเปรียบเทียบสีไส้กรอก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในปัจจุบันการควบคุมคุณภาพสีของไส้กรอกใช้มนุษย์ในการควบคุมกระบวนการ และยังไม่มีการนำวิธีการควบคุมกระบวนการเชิงสถิติมาประยุกต์ใช้ในขั้นตอนการควบคุมคุณภาพสีของไส้กรอกวิธีการควบคุมกระบวนการเชิงสถิติ (Statistical process control) คือ เทคนิคในการแก้ปัญหาที่มีประสิทธิภาพ นำมาใช้ประโยชน์เพื่อให้กระบวนการมีความเสถียรภาพรวมทั้งการปรับปรุงความสามารถของกระบวนการ โดยการลดความผันแปรที่เกิดขึ้นในกระบวนการ (Montgomery, 2009) ซึ่งในอุตสาหกรรมอาหารการใช้วิธีการควบคุมกระบวนการเชิงสถิติยังไม่แพร่หลายมากนัก วิธีการควบคุมกระบวนการเชิงสถิติมีหลายวิธี วิธีที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมอาหารมากที่สุด คือ แผนภูมิควบคุม (Srikaeo et al., 2005)

ดังนั้นจะเห็นได้ว่าการควบคุมคุณภาพสีของไส้กรอกมีความจำเป็นต่ออุตสาหกรรมการผลิตไส้กรอก เนื่องจากมีผลต่อความพึงพอใจของผู้บริโภคในการเลือกซื้อผลิตภัณฑ์ จากการศึกษาพบว่ามีการใช้วิธีการประมวลผลภาพกับแผนภูมิควบคุมได้รวบรวมไว้ในปี ค.ศ. 2011 ซึ่งใช้ในอุตสาหกรรมการผลิต และอุตสาหกรรมยา (Megahed et al., 2011)แต่ในปัจจุบันยังไม่มีการใช้วิธีการประมวลผลภาพร่วมกับการควบคุมกระบวนการเชิงสถิติในอุตสาหกรรมอาหาร จึงเป็นสิ่งที่ควรได้รับการศึกษา เพื่อให้การควบคุมคุณภาพสีของไส้กรอกมีประสิทธิภาพ ความน่าเชื่อถือ ความสะดวกและถูกต้องในการประเมินคุณภาพเพิ่มมากขึ้น งานวิจัยนี้จะเป็นแนวทางในการควบคุมคุณภาพสีของไส้กรอกในการตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงหรือความผันแปรของกระบวนการผลิต แต่ไม่ได้รวมไปถึงการแบ่งแยกไส้กรอกตามเฉดสี ซึ่งการตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวจะช่วยให้ผู้ประกอบการสามารถทราบถึงความผิดปกติภายในกระบวนการ และทำการตรวจสอบสาเหตุของความผิดปกติเพื่อการปรับปรุงกระบวนการในอนาคต และเป็นแนวทางในการนำไปพัฒนาเพื่อประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาวิธีการประเมินผลคุณภาพสีของผลิตภัณฑ์อาหารโดยใช้วิธีการประมวลผลภาพ (Image processing) ร่วมกับวิธีการเชิงสถิติในการควบคุมคุณภาพสีของไส้กรอกเพื่อการควบคุมกระบวนการ

1.2.2 เพื่อสร้างต้นแบบเครื่องมือสำหรับการตรวจสอบคุณภาพสีของผลิตภัณฑ์อาหาร

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

การศึกษาในงานวิจัยนี้จะศึกษาวิธีการประเมินผลสีของไส้กรอกโดยใช้วิธีการประมวลผลภาพ และใช้เครื่องมือทางสถิติในการควบคุมคุณภาพสีของไส้กรอกในขั้นตอนหลังจากการบรรจุถุงเพื่อตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงหรือความผันแปรของกระบวนการผลิต

1.4 วิธีดำเนินการวิจัย

ขั้นตอนของการศึกษาแสดงแผนภาพกรอบแนวคิดดังภาพที่ 1.3 อธิบายดังนี้

1.4.1 ศึกษาข้อมูลเบื้องต้น เกี่ยวกับปัญหาการวัดคุณภาพของอาหาร รวมทั้งศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้องดังนี้ ความสำคัญของสีของอาหาร วิธีการประมวลผลภาพ คุณลักษณะของไส้กรอก การวิเคราะห์ระบบการวัด และการควบคุมกระบวนการด้วยวิธีการเชิงสถิติ

1.4.2 ศึกษาขั้นตอนและวิธีการที่ใช้ในการประมวลผลภาพและสร้างอุปกรณ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.4.3 แปลงภาพเป็นข้อมูลโดยใช้โปรแกรม MATLAB

1.4.4 การวิเคราะห์ระบบการวัดศึกษาความสามารถในการวัดซ้ำและการวัดเหมือนของเครื่องมือวัด (GR&R) เพื่อสร้างความเชื่อมั่นในการสร้างเครื่องมือวัด

1.4.5 ศึกษาคุณลักษณะของข้อมูลดังนี้ การตรวจสอบการแจกแจงแบบปกติการตรวจสอบ สหสัมพันธ์ และการตรวจสอบอัตตสหสัมพันธ์

1.4.6 ควบคุมกระบวนการด้วยวิธีการเชิงสถิติ โดยเลือกใช้แผนภูมิควบคุมให้เหมาะสม

1.4.7 ประยุกต์ใช้ในการตรวจคุณภาพสีของไส้กรอก

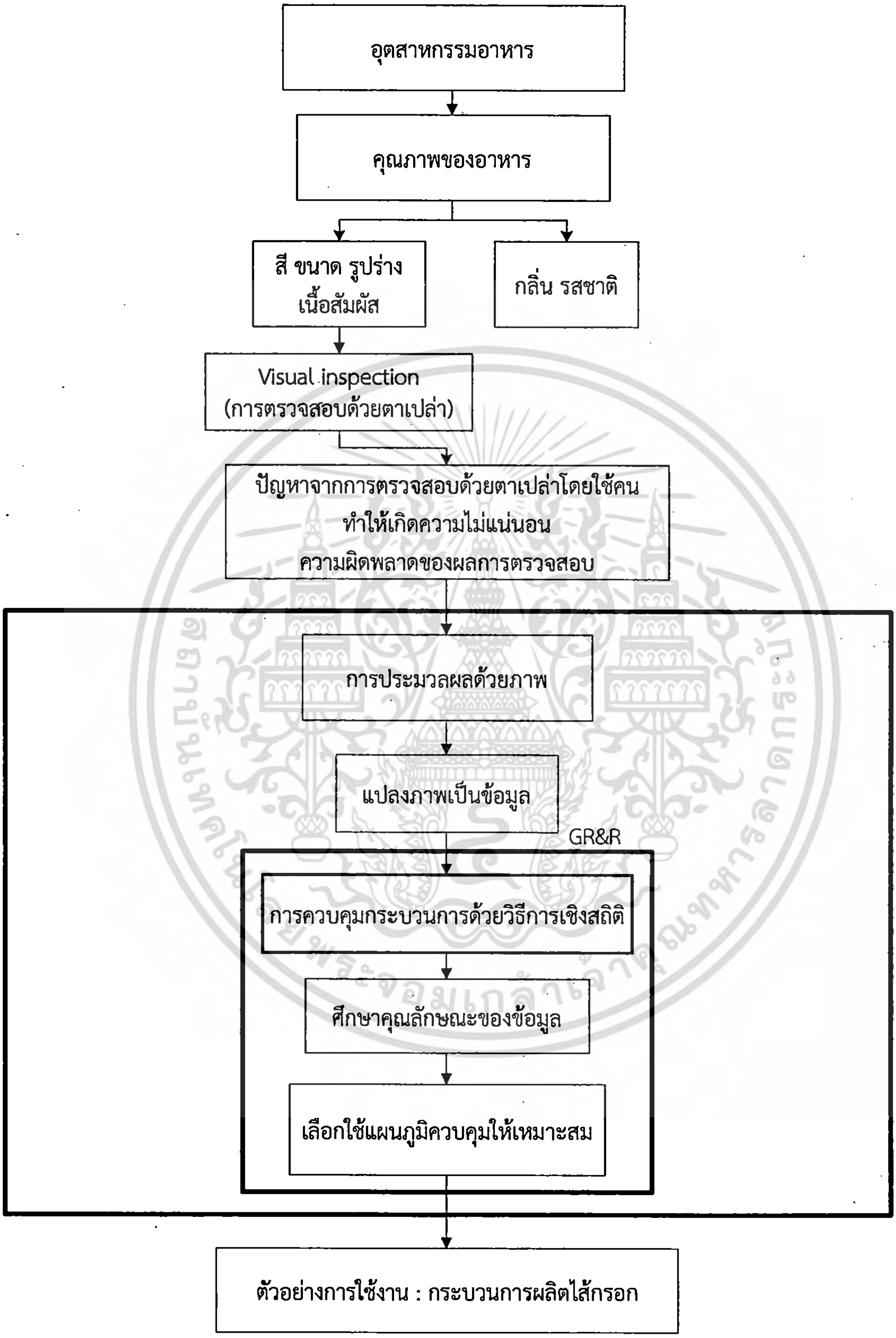
1.5 สมมติฐานงานวิจัย

สามารถใช้วิธีการประเมินผลด้วยภาพในการประเมินผลสีของไส้กรอก และประยุกต์ใช้วิธีการควบคุมกระบวนการเชิงสถิติในการควบคุมคุณภาพสีของไส้กรอกได้

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.6 กรอบแนวความคิดในการวิจัย



ภาพที่ 1.3 แสดงกรอบแนวคิดในการวิจัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ผลงานวิจัยชิ้นนี้จะสามารถได้เครื่องต้นแบบซึ่งสามารถนำไปวัดคุณลักษณะของอาหารร่วมกับการควบคุมกระบวนการเชิงสถิติ เพื่อลดความผิดพลาดที่ใช้การมองของมนุษย์ซึ่งไม่มีมาตรฐานที่แน่ชัดและเป็นเครื่องมือในการปรับปรุงคุณภาพของอาหาร นอกจากนี้ยังสามารถเป็นแนวทางขยายผลการประยุกต์ใช้การถ่ายภาพและประมวลผลภาพและนำไปใช้ในการควบคุมคุณภาพของผลิตภัณฑ์อาหารประเภทอื่นๆได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้กล่าวถึงแนวคิดทฤษฎี และงานวิจัยที่มีผู้ทำมาแล้วเพื่อเป็นแนวทางเข้าสู่กระบวนการวิจัยต่อไป

2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

กล่าวถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับความสำคัญของสีของอาหาร วิธีการประมวลภาพแบบจำลองสี คุณลักษณะของไส้กรอกและลักษณะที่ต้องการ การวิเคราะห์ระบบการวัด และการควบคุมกระบวนการเชิงสถิติแสดงดังต่อไปนี้

2.1.1 ความสำคัญของสีของอาหาร

สีเป็นหนึ่งในคุณลักษณะของผลิตภัณฑ์ที่ผู้บริโภคสามารถประเมินได้ด้วยประสาทสัมผัสซึ่งปรากฏทางกายภาพ (Physical appearance) สีเกิดขึ้นจากแสงตกกระทบผลิตภัณฑ์อาหารแล้วสะท้อนเข้าตาในช่วงความยาวคลื่น 400-800 นาโนเมตร สีจัดเป็นปัจจัยแรกทางกายภาพของผลิตภัณฑ์ที่ก่อให้เกิดการจูงใจของผู้บริโภค และทำให้ผู้บริโภคสามารถรับรู้ถึงคุณภาพของผลิตภัณฑ์ได้ ซึ่งแต่ละผลิตภัณฑ์สีจะเป็นสิ่งบ่งชี้ลักษณะของผลิตภัณฑ์ (วราวุฒิ ครูส่ง, 2546) เช่น มะม่วงสุกจะมีสีเหลืองอมเขียว (Kang et al., 2008) สีของมันฝรั่งทอด (Mendoza et al., 2007) แอปเปิ้ลเขียว (Leeman et al., 1998) สีของเนื้อหมู (O'Sullivan et al., 2003) เป็นต้น

2.1.2 วิธีการประมวลภาพ

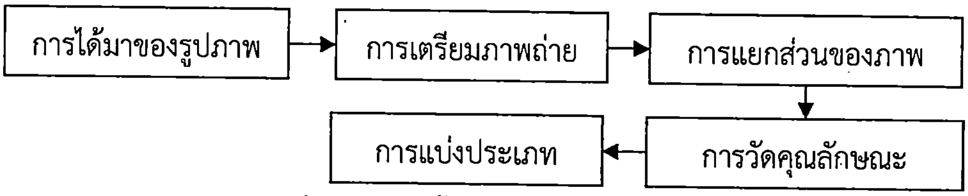
วิธีการประมวลภาพ (Image processing) คือ กระบวนการจัดการทางรูปภาพที่ข้อมูลที่ป้อนเข้าสู่กระบวนการและผลลัพธ์ที่ออกจากกระบวนการต่างก็เป็นรูปภาพเช่นเดียวกัน เป็นกระบวนการดึงคุณสมบัติของภาพออกมาพิจารณาอีกทั้งยังรวมไปถึงวิธีการรวมเอาสิ่งที่สนใจแต่ละอย่างมาพิจารณา ดังนั้นเมื่อนำภาพมาแปลงเข้าสู่คอมพิวเตอร์ภาพนั้นจะกลายเป็นภาพดิจิตอล (Digital image) (ณัฐพล แสงจันทร์ และดาวพระศุกร์ นุ่มเอี่ยม, 2548)

ในอุตสาหกรรมอาหารการประเมินคุณภาพของอาหารยังใช้วิธีการตรวจสอบโดยใช้คน ซึ่งต้องผ่านการคัดเลือกหรือฝึกอบรมจนสามารถแบ่งแยกลักษณะของผลิตภัณฑ์ได้ การใช้วิธีการตรวจสอบดังกล่าวทำให้ต้องใช้แรงงานเป็นจำนวนมาก พนักงานเกิดความล้า ค่าใช้จ่ายสูง และไม่มีความน่าเชื่อถือ เพื่อเพิ่มประสิทธิผลในการตรวจสอบให้มีความถูกต้องและมีความคงที่ จึงได้นำวิธีการประมวลผลภาพมาประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร ซึ่งจะทำให้การประเมินคุณภาพของอาหารมีความถูกต้องและมีความคงที่เพิ่มขึ้น แก้ไขข้อผิดพลาดของการตรวจสอบโดยใช้คน คุณสมบัติที่ใช้ในการตรวจสอบ ได้แก่ ขนาด รูปร่าง สี และเนื้อสัมผัสของอาหาร (Du and Sun, 2004)

2.1.2.1 ขั้นตอนพื้นฐานของการประมวลผลภาพ

ขั้นตอนการประมวลผลภาพโดยทั่วไปประกอบด้วย 5 ขั้นตอนดังภาพที่ 2.1 (Du and Sun, 2004)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2.1 แสดงขั้นตอนการประมวลผลภาพ

1) การได้มาของรูปภาพ (Image acquisition)

การรับสัญญาณจากอุปกรณ์ถ่ายภาพต่างๆซึ่งอยู่ในรูปสัญญาณแอนะลอกแล้วแปลงสัญญาณที่ได้ให้เป็นสัญญาณดิจิตอลเช่น กล้องถ่ายภาพดิจิตอล กล้องวีดีทัศน์ กล้องเว็บแคม เครื่องสแกน หรืออุปกรณ์รับสัญญาณภาพอื่นๆแสงสว่าง เป็นสิ่งจำเป็นในการได้มาของรูปภาพสำหรับการประเมินคุณภาพของอาหาร สภาวะของแสงจะส่งผลกระทบต่อคุณภาพของรูปภาพ ซึ่งภาพถ่ายที่มีคุณภาพสูงจะช่วยลดเวลาและลดความซับซ้อนของขั้นตอนการประมวลผลภาพ

2) การเตรียมภาพถ่าย (Image pre-processing)

เป็นขั้นตอนการปรับปรุงคุณภาพของภาพ เนื่องจากภาพจะมีสัญญาณรบกวนซึ่งทำให้คุณภาพของภาพลดลงซึ่งวัตถุประสงค์ของการเตรียมภาพถ่ายคือการปรับปรุงข้อมูลภาพ โดยลดการบิดเบือนและเพิ่มคุณสมบัติของภาพที่มีความสำคัญต่อการประมวลผลภาพในอนาคตต่อไป ซึ่งวิธีการประมวลผลภาพเบื้องต้นมี 2 ประเภทคือ การประมวลผลพิกเซลเบื้องต้น (Pixel pre-processing) สำหรับการประเมินคุณภาพอาหารจะนิยมใช้การเปลี่ยนแปลงระบบสี เช่น การเปลี่ยนเป็นระบบ HSI หรือระบบ L*a*b* เป็นต้นและการประมวลผลทั่วไปเบื้องต้น (Local pre-processing) เช่น การปรับความชัด การปรับความสว่าง การกำจัดสัญญาณรบกวน เป็นต้น

3) การแยกส่วนของภาพ (Image segmentation)

เป็นการแยกวัตถุที่เราสนใจในภาพออกจากพื้นหลังของภาพ วิธีการที่ใช้ในการประเมินคุณภาพของอาหารแบ่งออกเป็น 4 วิธี ได้แก่ การแยกบริเวณโดยการทำเทรชโฮลด์ (Thresholding-based segmentation) การแยกบริเวณโดยใช้ขอบของวัตถุ (Region based) การแยกบริเวณโดยการทำกราเดียนท์ (Gradient-based segmentation) และการแยกบริเวณโดยการแบ่งประเภท (Classification-based segmentation)

4) การวัดคุณลักษณะ (Object measurement)

หลังจากขั้นตอนการแยกส่วนของภาพเพื่อให้ได้ส่วนของวัตถุที่เราสนใจ จากนั้นจะทำการวัดคุณลักษณะของวัตถุ สำหรับการประเมินคุณภาพของอาหารลักษณะของภาพแบ่งออกเป็น 4 กลุ่มคือ ขนาด รูปร่าง สี และเนื้อสัมผัส

5) การแบ่งประเภท (Classification)

การจำแนกวัตถุโดยการแบ่งประเภทตามเซตของข้อจำกัดในแต่ละประเภท โดยการเปรียบเทียบวัตถุที่วัดได้กับเกณฑ์ที่กำหนดว่าวัตถุที่วัดได้มีความใกล้เคียงกับเกณฑ์ใดมากที่สุด สำหรับวิธีที่นิยมใช้ในการประเมินคุณภาพอาหาร คือ สถิติ (Statistical) ตรรกศาสตร์คลุมเครือ (Fuzzy Logic) และระบบโครงข่ายประสาท (Neural network)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับขั้นตอนการประมวลผลภาพ

จากงานวิจัยของ Papadakis et al. (2000) ได้เสนอเทคนิคในการวัดสีของอาหารประกอบด้วยระบบแสง การใช้กล้องดิจิตอลที่มีความละเอียดสูงในการถ่ายภาพอาหาร และการใช้โปรแกรมโฟโต้ชอปในการรับค่าสี และระบบสีที่นิยมใช้ในงานวิจัยด้านอาหารคือ ระบบ L*a*b* ระบบแสงเป็นสิ่งสำคัญในการใช้แหล่งกำเนิดแสงให้เหมาะสม ซึ่งสีของอาหารส่วนหนึ่งจะขึ้นอยู่กับสเปกตรัมการสะท้อน และแหล่งกำเนิดแสงมาตรฐานกำหนดโดย CIE ที่ใช้กันทั่วไปในงานวิจัยด้านอาหาร คือ A (2856 K) C (6774 K) D_{65} (6500 K) และ D (7500 K) มุมระหว่างกล้องกับแหล่งกำเนิดแสงเป็นมุม 45° ใช้กล้องดิจิตอลบันทึกภาพ โดยความละเอียดของภาพเกี่ยวข้องกับจำนวนพิกเซล ถ้าภาพมีความละเอียดมากจะมีพิกเซลมาก แนะนำให้มีความละเอียดขั้นต่ำ 1,600 x 1,200 พิกเซล

จากงานวิจัยของ Mendoza and Aguilera (2004) ทำการวิเคราะห์ภาพสำหรับการแบ่งประเภทความสุกของกล้วย ในส่วนของการได้มาของรูปภาพ ระบบแสงจะใช้หลอดไฟฟลูออเรสเซนต์ 4 หลอด ยาว 60 cm กับอุณหภูมิสี 6500 °C (เป็นอุณหภูมิสีมาตรฐานที่ใช้กับงานวิจัยด้านอาหาร) และค่าดัชนีความถูกต้องของสีประมาณ 95% (Philips, Natural Daylight, 18W/965) วางเป็นสี่เหลี่ยมเหนือตัวอย่าง 35 เซนติเมตร เป็นมุม 45° กับระนาบของตัวอย่าง ตัวอย่างวางในกล่องไม้ ภายในกล่องทาด้วยสีดำเพื่อหลีกเลี่ยงแสงภายนอกและการสะท้อน การตั้งค่ากล้องใช้ค่ารูรับแสง 3.7 ความเร็วชัตเตอร์ 1/125 ไม่ใช้การซูมและแฟลช เชื่อมต่อกล้องกับคอมพิวเตอร์ เก็บไฟล์ในรูปแบบ JPEG การเตรียมภาพถ่ายโดยลดสัญญาณรบกวนของภาพ และปรับปรุงคุณภาพของภาพ จากนั้นทำการแยกส่วนของภาพ โดยแยกพื้นหลังออกจากภาพกล้วย ทำการวิเคราะห์สีโดยเปลี่ยนจากระบบ RGB เป็น L*a*b* และทำการแบ่งประเภทตามความสุกของกล้วย

จากงานวิจัยของ Pedreschi et al. (2006) ใช้ระบบคอมพิวเตอร์วิชันในการวัดสีของมันฝรั่งการได้มาของรูปภาพใช้ระบบที่พัฒนาโดย Papadakis et al. (2000) ใช้กล้องดิจิตอล Power shot G3 ติดตั้งระยะห่างจากตัวอย่าง 22.5 เซนติเมตร โดยระบบแสงจะใช้หลอดไฟฟลูออเรสเซนต์ 4 หลอด ยาว 60 cm กับอุณหภูมิสี 6500°C (Philips, Natural Daylight, 18W) และค่าดัชนีความถูกต้องของสีประมาณ 95% จัดวางเป็นสี่เหลี่ยมเหนือตัวอย่าง 35 เซนติเมตร เป็นมุม 45° กับระนาบของตัวอย่างมุมระหว่างกล้องและหลอดไฟ 45° วางกล้องและหลอดไฟภายในกล่องไม้ ภายในกล่องทาด้วยสีดำเพื่อหลีกเลี่ยงแสงและการสะท้อนการเตรียมภาพถ่ายโดยลดสัญญาณรบกวนของภาพ ทำการเปลี่ยนภาพสีเป็นความเข้มของสี (Intensity image) การแยกส่วนของภาพใช้ความเข้มของสีในการแบ่งแยกขอบภาพกับพื้นหลัง หลังจากนั้นทำการเปลี่ยนจากแบบจำลองสีระบบ RGB เป็น L*a*b* โดยใช้โปรแกรม MATLAB

จากงานวิจัยดังกล่าว พบว่าวิธีการในการประมวลผลภาพมีความคล้ายคลึงกันในส่วนของวิธีการได้มาของรูปภาพ โดยในงานวิจัยนี้จะใช้วิธีการได้มาของรูปภาพจากงานวิจัยของ Pedreschi et al. (2006)

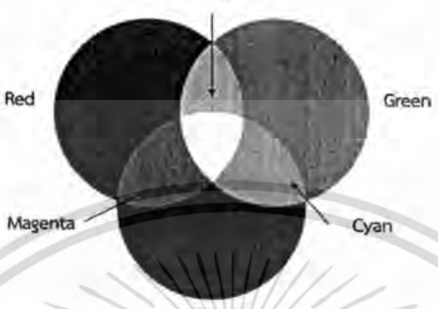
2.1.3 แบบจำลองสี

แบบจำลองสี (Color models) ใช้ในการบ่งชี้และบอกปริมาณสี แบบจำลองสีแต่ละแบบจะมีลักษณะแตกต่างกันไป ซึ่งเหมาะกับการใช้งานที่แตกต่างกัน มีแบบจำลองสีต่างๆดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.3.1 ระบบ RGB (Red/ Green/ Blue)

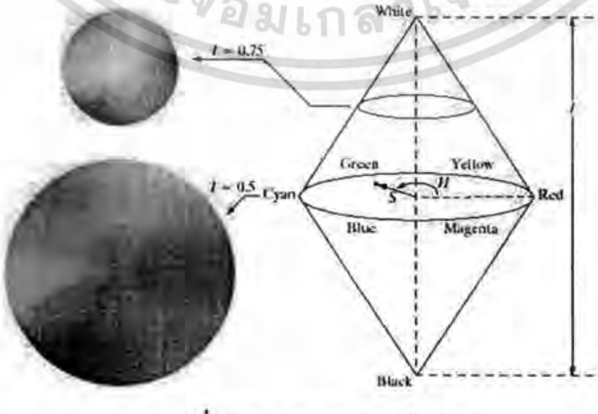
ระบบ RGB เป็นระบบสีของแสง ซึ่งเกิดจากการหักเหของแสงผ่านแท่งแก้วปริซึมเกิดจากความเข้มของสามสีหลัก ได้แก่ แดง เขียว และน้ำเงินซึ่งใช้ในการสร้างสีเขียวน้ำเงิน สีม่วงแดง สีเหลืองและสีขาวแสดงดังภาพที่ 2.2 ระบบนี้จะนำมาใช้สำหรับหน้าจอโทรทัศน์และคอมพิวเตอร์ รวมถึงการเก็บข้อมูลภาพในระบบคอมพิวเตอร์ซึ่งการสร้างพิกเซลสีจะเกิดจากการยิงแสงสีแดง สีเขียว และสีน้ำเงิน (Yam and Papadakis, 2004)



ภาพที่ 2.2 แสดงระบบสี RGB

2.1.3.2 ระบบ HSI (Hue/ Saturation/ Intensity)

ระบบ HSI เป็นเครื่องมือที่มีประสิทธิภาพสำหรับภาพที่สีแตกต่างกันแสดงดังภาพที่ 2.3 โดยปกติภาพสีจะนำมาจากอุปกรณ์ดิจิตอลและบันทึกไว้ในระบบ RGB (แดง เขียวและสีน้ำเงิน) โดยค่า H (Hue) แทนเฉดสี S (Saturation) แทนความบริสุทธิ์ของสี และ I (Intensity) แทนความเข้มของสี สำหรับงานวิจัยที่ใช้ระบบ HSI เช่น มันฝรั่งและแอปเปิ้ลเปลี่ยนจาก RGB เป็น HSI (Tao et al., 1995) วิธีการใช้ระบบสี HSI พิสูจน์แล้วว่ามีประสิทธิภาพสูงสำหรับการประเมินผลสีและการประมวลผลภาพระบบการมองเห็นมีความถูกต้องมากกว่า 90% ในการตรวจสอบของมันฝรั่งและแอปเปิ้ลโดยแทนลักษณะสีด้วยกราฟฮิสโตแกรมการวิเคราะห์ภาพเนื้อ (Li et al., 2001) โดยถ่ายภาพในระบบ RGB และเปลี่ยนเป็นรูปแบบ HSI และการใช้ระบบ HSI ในการแบ่งแยกซอสพิซซ่าออกจากพิซซ่า (Sun and Brosnan, 2003)



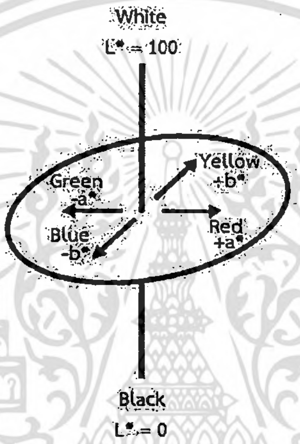
ภาพที่ 2.3 แสดงระบบสี HSI

ที่มา : Digital Image Processing, Gonzalez and Woods, 2002

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.3.3 ระบบ L*a*b*

ระบบ L*a*b* เป็นระบบการวัดสีที่เป็นมาตรฐานสากลพัฒนาขึ้นในปี ค.ศ.1976 โดย Commission International d' Eclairage ระบบ L*a*b* ประกอบด้วย ส่วนประกอบ L* แสดงค่าความสว่างของสีมีค่าอยู่ในช่วง 0 ถึง 100 ส่วนประกอบ a* แสดงองค์ประกอบระหว่างสีเขียวและสีแดงมีค่าอยู่ในช่วง -120 ถึง +120 ส่วนประกอบ b* แสดงองค์ประกอบระหว่างสีน้ำเงินและสีเหลืองมีค่าอยู่ในช่วง -120 ถึง +120 แสดงดังภาพที่ 2.4 ระบบ L*a*b* เป็นระบบที่เป็นอิสระ โดยไม่คำนึงถึงการป้อนข้อมูลและอุปกรณ์รับข้อมูล เช่น กล้องดิจิตอล สแกนเนอร์ จอภาพ และเครื่องพิมพ์ ค่า L*a*b* นิยมใช้ในงานวิจัยด้านอาหาร (Yam and Papadakis, 2004) ตัวอย่างงานวิจัยเช่น การวัดสีของมันฝรั่งทอดโดยแปลงภาพจากระบบ RGB เป็นระบบ L*a*b* (Pedreschi et al., 2006) การประเมินสีของมะม่วง (Kang et al., 2008) เป็นต้น



ภาพที่ 2.4 แสดงระบบสี L*a*b*

ตารางที่ 2.1 แสดงข้อดีและข้อจำกัดของแบบจำลองทั้ง 3 วิธี

ระบบ	ข้อดี	ข้อจำกัด
ระบบ RGB	-ง่ายต่อการใช้งาน (Ford and Roberts, 1998)	- สีของภาพขึ้นกับอุปกรณ์เช่น กล้อง จอภาพ สแกนเนอร์ (Mendoza et al., 2006)
ระบบ HSI	-เหมาะกับภาพที่มีความเข้มของสีแตกต่างกัน (Du and Sun, 2004)	- สีของภาพขึ้นกับอุปกรณ์ (Ford and Roberts, 1998)
ระบบ L*a*b*	- สีของภาพมีความคงที่ไม่ขึ้นกับอุปกรณ์เช่น กล้อง จอภาพ สแกนเนอร์ และเครื่องพิมพ์ (Yam and Papadakis, 2004) - ปรับตัวได้กับหลายสภาวะแสง (Mendoza et al., 2007) - นิยมใช้ในงานวิจัยด้านอาหาร (Yam and Papadakis, 2004)	-ไม่สามารถเข้าใจได้ในทันที คือ ต้องทำการศึกษาการแปลความหมายค่า L* a* และ b* ก่อน (Mendoza et al., 2007)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในขั้นตอนการประมวลผลภาพสีนั้นสามารถเปลี่ยนแปลงภาพสีต้นฉบับที่อยู่ในระบบ RGBเป็นระบบอื่นๆได้ เนื่องจากแบบจำลองสีแต่ละระบบนั้นมีความเหมาะสมกับการใช้งานในแต่ละประเภทที่แตกต่างกันจากการเปรียบเทียบทั้ง 3 วิธีสามารถแสดงข้อดีและข้อจำกัดได้ดังตารางที่ 2.1

สำหรับในงานวิจัยนี้เลือกใช้ระบบ L*a*b* เนื่องจากเป็นระบบที่ไม่ขึ้นกับอุปกรณ์ สามารถแบ่งแยกสีได้มากกว่าระบบ RGB และสามารถบ่งบอกความเข้มและความสว่างของวัตถุได้ ซึ่งจะสามารถอธิบายสีของไส้กรอกที่เป็นตัวอย่างในงานวิจัยนี้ได้ในมุมมองที่ครอบคลุมกว่าระบบ RGB ซึ่งบ่งบอกเฉพาะสีแดง สีเขียว และสีน้ำเงิน จากการศึกษางานวิจัยที่ทำการวิเคราะห์สีของไส้กรอกจะใช้ระบบ L*a*b* (วัชรี คชแก้ว, 2548 ; Kuo and Chu, 2003 ; Zarringhalami et al., 2009)

2.1.4 คุณลักษณะของไส้กรอกและลักษณะที่ต้องการ

คุณลักษณะของไส้กรอกและลักษณะที่ต้องการของไส้กรอกหมูแสดงดังนี้

2.1.4.1 คุณลักษณะของไส้กรอก

ไส้กรอกหมูหมายถึงผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการนำเนื้อหมูไปบดละเอียดนวดหรือสับผสมกับเกลือน้ำแข็งมันหมูหรือน้ำมันพืชเครื่องเทศเช่นพริกไทยกระเทียมและวัตถุเจือปนอาหารอื่นแล้วนำส่วนผสมที่ได้บรรจุลงในไส้หมูหรือไส้ชนิดอื่นที่บริโภคได้ทำให้สุกอาจรมควันหรือไม่ก็ได้ (กระทรวงอุตสาหกรรม, 2547) ไส้กรอกที่ทำการผลิตสามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภทใหญ่คือ

1) ไส้กรอกสด (Fresh sausage)

เป็นไส้กรอกที่ได้จากการนำเนื้อสุกรมาบดผสมกับเครื่องปรุงต่างๆยัดไส้และผูกเป็นปล้องต้องนำมาต้มทอดหรือย่างให้สุกก่อนรับประทานอย่างไรก็ตามไส้กรอกประเภทนี้ไม่เป็นที่นิยมในประเทศมากนักโดยไส้กรอกอีสานแหนมและหมูยออาจจัดให้อยู่ในกลุ่มนี้ได้

2) ไส้กรอกสุกหรือรมควัน (Cooked sausage or Smoked sausage)

มีกรรมวิธีใกล้เคียงกับไส้กรอกสด แต่หลังจากยัดไส้แล้วต้องนำไปรมควันอบ/หรือต้มให้สุกก่อน (กรมส่งเสริมอุตสาหกรรม, 2554)

2.1.4.2 คุณลักษณะที่ต้องการของไส้กรอกหมู

คุณลักษณะที่ต้องการของไส้กรอกหมูได้มีการกำหนดไว้ในมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชนไส้กรอกหมู มผช. 330/2547 ซึ่งประกอบด้วยลักษณะดังต่อไปนี้ (กระทรวงอุตสาหกรรม, 2547)

1) ลักษณะทั่วไป

ในภาชนะบรรจุเดียวกันต้องมีรูปทรงเดียวกันและมีขนาดใกล้เคียงกันมีผิวเรียบไม่ฉีก

2) สี

ต้องมีสีที่ดีตามธรรมชาติของส่วนประกอบที่ใช้สม่ำเสมอกันตลอดทั้งชิ้นไม่มีสีผิดปกติเช่น สีเขียวคล้ำ สีดำ

3) กลิ่นรส

ต้องมีกลิ่นรสที่ดีตามธรรมชาติของส่วนประกอบที่ใช้ปราศจากกลิ่นรสอื่นที่ไม่พึงประสงค์เช่น กลิ่นคาว กลิ่นเหม็นบูดรสเปรี้ยว

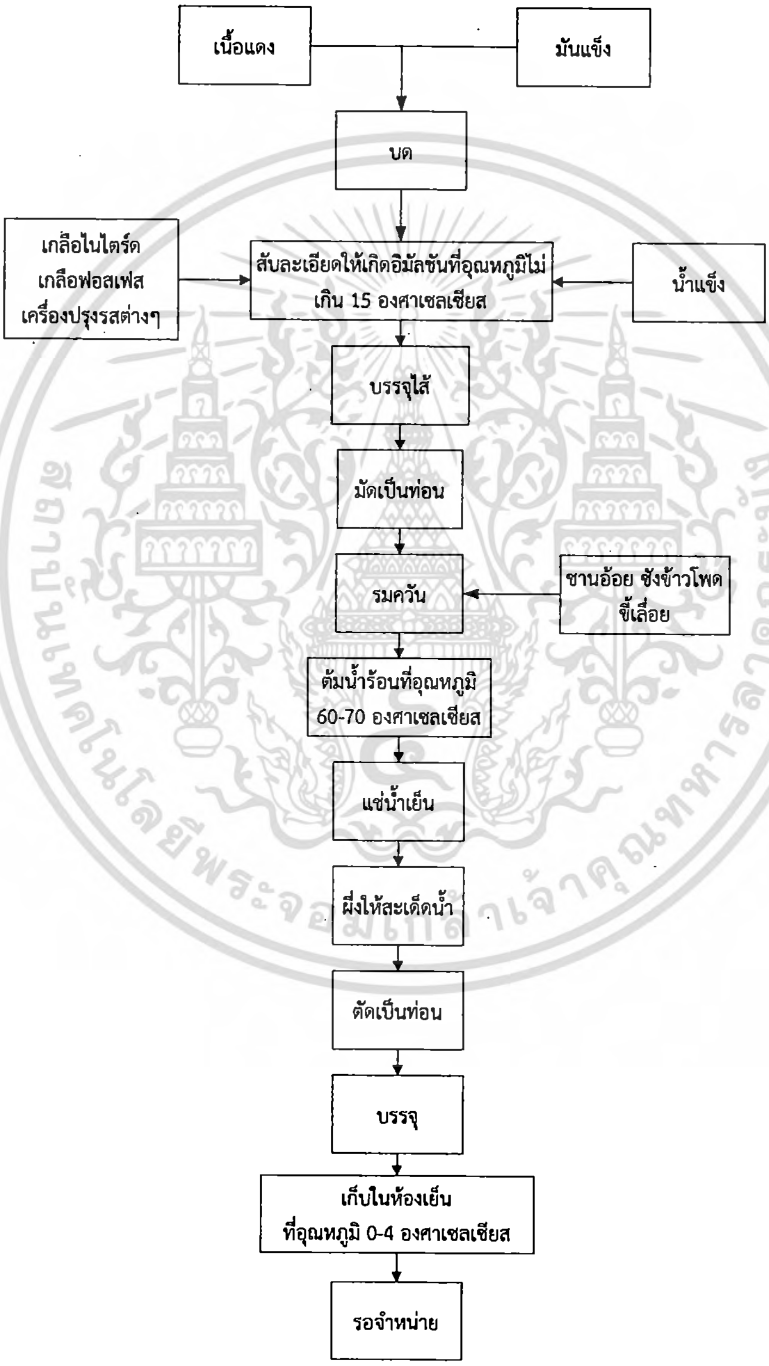
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4) ลักษณะเนื้อ

ต้องเป็นเนื้อเดียวกันไม่มีโพรงอากาศมีความนุ่มยืดหยุ่นคงรูปและไม่มีการแยกตัวของหยดน้ำหรือน้ำมันออกจากเนื้อไส้กรอกหมู

2.1.4.3 ขั้นตอนการผลิตไส้กรอกหมู

การทำไส้กรอกโดยเฉพาะอย่างยิ่งไส้กรอกรมควันและไส้กรอกสุกทั่วไป ส่วนผสมของเนื้อต้องผ่านการสับละเอียดจนอยู่ในสภาพที่เป็นอิมัลชัน (Emulsion) มีขั้นตอนการผลิตไส้กรอกแบบอิมัลชันแสดงได้ดังภาพที่ 2.5 (เยาวลักษณ์ สุรพันธพิศิษฐ์, 2536)



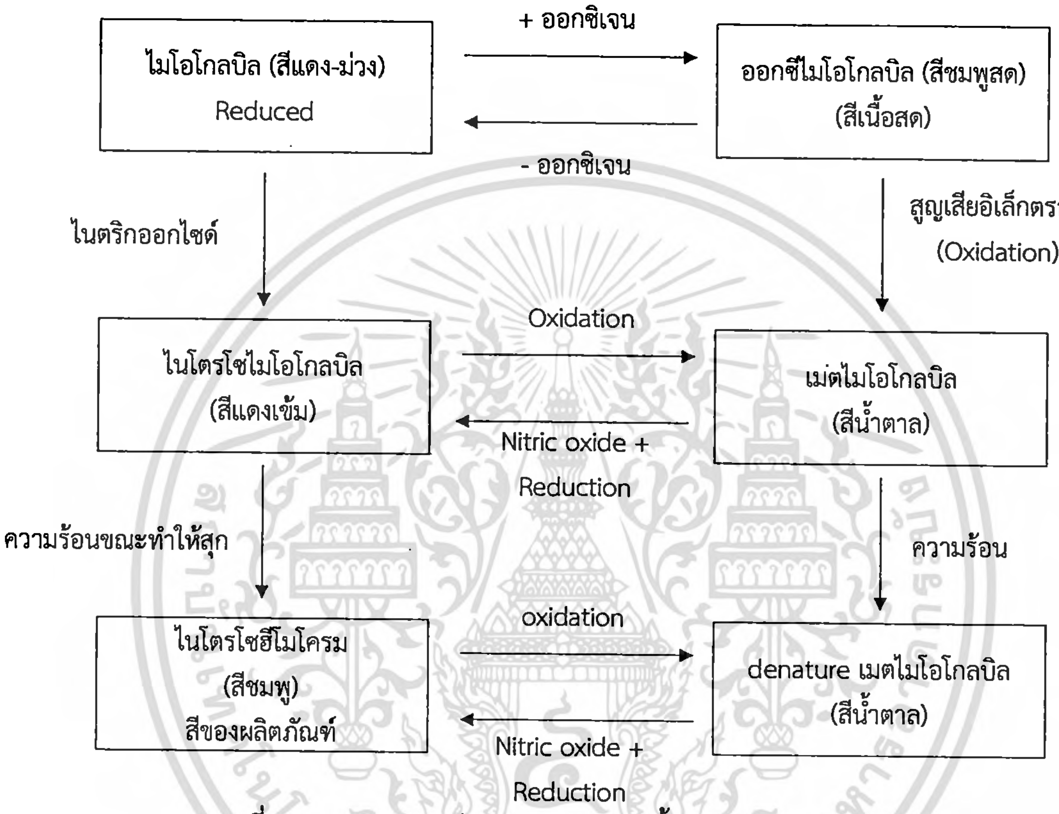
ภาพที่ 2.5 แผนภาพแสดงขั้นตอนการผลิตไส้กรอกแบบอิมัลชัน

ที่มา : เทคโนโลยีเนื้อสัตว์และผลิตภัณฑ์, เยาวลักษณ์ สุรพันธพิศิษฐ์, 2536 : 109

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.4.4 การเกิดสีของผลิตภัณฑ์ไส้กรอก

สารสี (Pigment) ประกอบด้วยโปรตีนหลัก 2 ชนิด คือ ไมโอโกลบิลซึ่งเป็นสารสีในกล้ามเนื้อ และฮีโมโกลบิลซึ่งเป็นสารสีในเม็ดเลือดแดง ตามปกติแล้วสัตว์ที่ถูกฆ่าอย่างได้มาตรฐาน หลังจากตายแล้วพบว่าปริมาณสารสีในกล้ามเนื้อจะประกอบด้วย ไมโอโกลบิลร้อยละ 80-90 และสารอื่นๆที่มีอีกเล็กน้อย คือ ฮีโมโกลบิล ตัวเร่งปฏิกิริยา และไซโตโครม (ชัยณรงค์ คันธพนิต, 2529)



ภาพที่ 2.6 ปฏิกิริยาเคมีของการเกิดสีในเนื้อสดและผลิตภัณฑ์
ที่มา : วิทยาศาสตร์เนื้อสัตว์, ชัยณรงค์ คันธพนิต, 2529 : 203

ปฏิกิริยาทางเคมีของสารสีดังแสดงในภาพที่ 2.6 อธิบายได้ดังที่ชัยณรงค์ คันธพนิตได้กล่าวว่าปฏิกิริยาทางเคมีของสารสี เป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้สีของเนื้อและผลิตภัณฑ์เปลี่ยนแปลง โดยเฉพาะสภาวะทางเคมีของธาตุเหล็กในโมเลกุลของสารสีไมโอโกลบิล หลังจากที่ตัดชิ้นเนื้อจะทำให้เนื้อถูกอากาศ ไมโอโกลบิลในเนื้อจะทำปฏิกิริยากับออกซิเจนในอากาศเป็นสีแดงสดของสารที่เรียกว่า ออกซีไมโอโกลบิล ซึ่งจะเกิดขึ้นภายใน 30-45 นาทีหลังจากเนื้อถูกอากาศ ในปฏิกิริยานี้ไมโอโกลบิลยังคงอยู่และจะไม่ออกซิไดซ์ไปเป็นอย่างอื่นได้ง่ายแม้แต่จะเปลี่ยนเป็นเมตไมโอโกลบิล (Metmyoglobin) แต่ในอีกกรณีหนึ่งที่เมื่อตัดเนื้อแล้วและนำไปเก็บไว้ยังที่อับอากาศ หรือเกือบจะเป็นสุญญากาศในบางกรณีอาจห่อเนื้อแน่นเกินไปจนมีออกซิเจนน้อย อณูธาตุเหล็กของสารสีนั้นจะเกิดการออกซิไดซ์ (Oxidized) ไปเป็นสารที่เรียกว่า เมตไมโอโกลบิล ซึ่งทำให้เนื้อเป็นสีน้ำตาลคล้ำ การเกิดขึ้นของเมตไมโอโกลบิลเป็นปัญหาต่อผู้บริโภคมากเพราะผู้บริโภคมักคิดว่าเป็นเนื้อที่เก็บไว้นานหรือผิดปกติ จึงไม่ซื้อไปรับประทาน ซึ่งสีน้ำตาลนี้อาจเป็นเช่นนั้นตลอดไป ในอีกกรณีหนึ่งถ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทิ้งเนื้อไว้บนโต๊ะผิวเรียบไว้เป็นเวลานานๆ จนทำให้บรรยากาศใต้ชิ้นเนื้อเป็นสุญญากาศ ไมโอโกลบิลจึงถูกรีดิวซ์ได้ อาจแก้ไขโดยการนำเนื้อออกมาให้ถูกอากาศเพื่อจะได้เกิดออกซิเจนเนตไปเป็นออกซีไมโอโกลบิลได้อีกต่อไป

การแปรรูปเนื้อสัตว์ประเภทไส้กรอกได้จากการหมักเกลือซึ่งมีส่วนประกอบหลักอยู่ 2 ชนิด คือ เกลือแกงและไนไตรท์ การหมักด้วยเกลือนั้นเพื่อยืดระยะเวลาการเก็บรักษาไส้กรอกให้นานขึ้นเกลือจะช่วยสกัดโปรตีนออกจากกล้ามเนื้อ ส่วนไนไตรท์จะใช้ได้ทั้งในรูปของเกลือโซเดียมหรือโพแทสเซียมทำหน้าที่สร้างสีชมพูในผลิตภัณฑ์ ซึ่งเรียกว่า ไนโตรโซฮีโซโครม เป็นสารที่มีความคงทนเกิดขึ้นหลังจากกระบวนการให้ความร้อน ดังสมการที่ 2.1

$$Mb + NO \rightarrow NOMb \xrightarrow{heat} \text{Nitrosyl hemochrome} \quad (2.1)$$

ไนตริกออกไซด์ไมโอโกลบิลมีสีแดงสดและเป็นสารสีในเนื้อที่เกิดขึ้นหลังจากผ่านการหมักก่อนที่จะถูกความร้อนเพื่อทำให้สุกเมื่อถูกความร้อนสารนี้จะกลายเป็นสารสีที่คงทนซึ่งมีชื่อเรียกว่า ไนโตรโซฮีโมโครม หรือไนโตรซิลฮีโมโครม คือสารสีชมพูของผลิตภัณฑ์เนื้อสัตว์นั่นเอง

ไนโตรโซฮีโมโครมเป็นสารสีที่คงทนต่อความร้อนการใช้ความร้อนเพื่อทำให้สุกจึงไม่มีผลต่อการสูญเสียสีของไส้กรอก แต่ถ้าไนโตรโซไมโกลบินและไนโตรโซฮีโมโครมถูกแสงสีอาจสูญหายไปจึงทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของสีได้ดังนั้นถ้าวางผลิตภัณฑ์ระหว่างรอจำหน่ายในตู้ที่ใช้แสงไฟค่อนข้างแรงหรือปล่อยให้เนื้อสัมผัสอากาศสีของเนื้อจะจางลงได้ภายในเวลาเพียง 1 ชั่วโมง แต่ถ้าเป็นเนื้อสดสีอาจอยู่ได้นานถึง 3 วัน หรือมากกว่านั้น (ชัยณรงค์ คันธพนิต, 2529)

โซเดียมไนเตรทและโซเดียมไนไตรท์ จัดเป็นวัตถุเจือปนอาหารที่กระทรวงสาธารณสุขอนุญาตให้ผสมในอาหารได้ในปริมาณที่กำหนด ตามประกาศกระทรวงสาธารณสุข ฉบับที่ 281 (พ.ศ.2547) กำหนดปริมาณที่อนุญาตให้ใช้ในอาหาร ดังนี้

- โซเดียมไนเตรท ให้มีได้ไม่เกิน 500 มิลลิกรัมต่อ 1 กิโลกรัม
- โซเดียมไนไตรท์ ให้มีได้ไม่เกิน 125 มิลลิกรัมต่อ 1 กิโลกรัม

กรณีใช้ทั้งโซเดียมไนเตรทและโซเดียมไนไตรท์ ให้มีได้ไม่เกิน 125 มิลลิกรัมต่อ 1 กิโลกรัม

2.1.5 การวิเคราะห์ระบบการวัด

การวิเคราะห์ระบบการวัดใช้ในการวิเคราะห์เครื่องมือวัดคุณภาพสีของอาหาร โดยใช้หลักการความสามารถในการวัดซ้ำและการวัดเหมือนของเครื่องมือวัด (Gage repeatability and reproducibility : GR&R) เพื่อสร้างความเชื่อมั่นในเครื่องมือวัดว่าค่าที่วัดได้จากเครื่องมือวัดมีความสามารถในการแบ่งแยกผลิตภัณฑ์และสามารถนำไปใช้ในการควบคุมกระบวนการเชิงสถิติต่อไป

2.1.5.1 พื้นฐานเกี่ยวกับความสามารถของระบบการวัด

ความสามารถของระบบการวัดมีความสำคัญในแง่ของคุณภาพและการปรับปรุงกระบวนการ โดยปกติกิจกรรมการผลิตมีความสัมพันธ์กับการวัด ซึ่งค่าที่วัดได้จะมีความผันแปรเสมอและความผันแปรที่เกิดขึ้นอาจเกิดมาจากระบบการวัดที่ใช้ ซึ่งระบบการวัดประกอบด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เครื่องมือวัด พนักงานวัด ปัจจัยแวดล้อม ช่วงระยะเวลาที่แตกต่างกัน และปัจจัยอื่นๆ ที่ส่งผลกับสมรรถนะของระบบการวัด เช่น การตั้งค่า หรือการปรับเทียบ (Montgomery, 2009)

ความสามารถของระบบการวัด อาจประกอบด้วยความสามารถในการวัดซ้ำและการวัดเหมือนของเครื่องมือวัด ดังนั้นสามารถอธิบายความหมายของระบบการวัดอย่างง่ายๆ ดังสมการที่ 2.2

$$\sigma^2_{Total} = \sigma^2_P + \sigma^2_{Gauge} \tag{2.2}$$

σ^2_{Total} คือ ความแปรปรวนของข้อมูลทั้งหมด
σ^2_P คือ ความแปรปรวนเนื่องจากชิ้นงาน
σ^2_{Gauge} คือ ความแปรปรวนเนื่องจากเครื่องมือวัด

ความสามารถการวัดซ้ำ (Repeatability) หมายถึง ความผันแปรของค่าวัดรอบค่าที่ควรจะเป็น (Expected value) ของระบบการวัดที่ทำการวัดโดยการใช้พนักงานวัดและอุปกรณ์วัดเดียวกันในการวัดชิ้นงานชิ้นเดียวกันซ้ำๆ โดยทั่วไปในอุตสาหกรรมมักจะหมายถึงความผันแปรของอุปกรณ์ (Equipment variation : EV) เพราะความผันแปรภายในเงื่อนไขเดียวกันของระบบการวัดมักจะมีผลมาจากอุปกรณ์ อย่างไรก็ตามผู้วิเคราะห์ไม่ควรจะสรุปในทันทีเพราะว่าในบางครั้งค่าความผันแปรอาจจะมาจากสาเหตุหลักอื่นๆ ที่ไม่ใช่อุปกรณ์เช่น ทักษะของพนักงานหรือปัจจัยแวดล้อม เป็นต้น

ความสามารถในการวัดเหมือน (Reproducibility) คือ ความผันแปรที่แสดงถึงค่าเฉลี่ยของค่าวัดจากการใช้อุปกรณ์วัดเดียวกันในการวัดชิ้นงานเดียวกันด้วยเงื่อนไขที่แตกต่างกัน ซึ่งในอุตสาหกรรมทั่วไปมักจะหมายถึงความแตกต่างระหว่างพนักงานวัด จึงอาจจะเรียกว่าความผันแปรระหว่างพนักงานวัด (Appraiser variation : AV) อย่างไรก็ตามผู้วิเคราะห์ไม่ควรจะสรุปในทันที เพราะว่าในบางครั้งความผันแปรอาจจะมีสาเหตุหลักจากปัจจัยอื่นที่ไม่ใช่พนักงานวัดก็ได้เช่น ปัจจัยระหว่างกะงาน เป็นต้น (กิติศักดิ์ พลอยพานิชเจริญ, 2553)

2.1.5.2 การวางแผนศึกษาความสามารถในการวัดซ้ำและการวัดเหมือนของเครื่องวัด

การศึกษาความผันแปรของระบบการวัดในรูปความสามารถในการวัดซ้ำและการวัดเหมือนของเครื่องมือวัดนั้นมีความจำเป็นอย่างยิ่งต้องเริ่มต้นจากขั้นตอนการวางแผนการศึกษาโดยมีประเด็นพิจารณาดังนี้ (กิติศักดิ์ พลอยพานิชเจริญ, 2553)

1) วิธีการและเวลาที่จะมีการสอบเทียบเครื่องมือวัด

การสอบเทียบเครื่องมือวัดมีความสำคัญมากต่อการพิจารณาถึงความคลาดเคลื่อนด้านความแม่นในระบบการวัด โดยปกติแล้วจะต้องมีการสอบเทียบก่อนการศึกษาความสามารถในการวัดซ้ำและความสามารถในการวัดเหมือนจะเริ่มต้นขึ้นและไม่ควรมีการสอบเทียบใหม่ถ้าการศึกษายังไม่สิ้นสุดลง เพราะถ้ามีการสอบเทียบใหม่ในระหว่างการศึกษาแล้ว จะทำให้เกิดความผันแปร จึงต้องพยายามลดค่าความผันแปรโดยพยายามให้พนักงานวัดทุกคนมีความเข้าใจในวิธีการสอบเทียบและดำเนินการอย่างสม่ำเสมอ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

2) จำนวนพนักงานที่ใช้ในการศึกษาระบบ GR&R

การกำหนดจำนวนพนักงานวัดที่เหมาะสมมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องพิจารณาก่อนว่าในระบบการผลิตมีพนักงานวัดคือ ผู้ใช้เครื่องมือวัดในการกำหนดค่าตัวเลขกับชิ้นงานเพื่อการตัดสินใจจำนวนเท่าใด ถ้าเครื่องมือวัดดังกล่าวไม่ใช้พนักงานในการดำเนินการวัดเลย (เครื่องมือวัดอัตโนมัติ) หรือมีการใช้พนักงานวัดเพียงคนเดียวแสดงว่าค่าความผันแปรในระบบการวัดไม่ได้มาจากสาเหตุด้านพนักงานวัด และในกรณีที่ระบบการวัดมีพนักงานวัดจำนวนหลายคน ให้ทำการสุ่มพนักงานวัดมาทำการศึกษาอย่างน้อย 2 คนโดยจะต้องเป็นพนักงานที่ผ่านการฝึกอบรมมาอย่างดีแล้ว และปฏิบัติงานเกี่ยวกับงานวัดในอุปกรณ์วัดที่ทำการศึกษาเป็นประจำ

3) จำนวนชิ้นงาน (สิ่งตัวอย่าง)

จำนวนสิ่งตัวอย่างที่ใช้ในการศึกษานั้นโดยปกติจะแนะนำให้ใช้ 10 ตัวอย่างถ้าหากไม่สามารถดำเนินการได้จะต้องพยายามให้ผลคูณของจำนวนของสิ่งตัวอย่างกับจำนวนของพนักงานวัดมีค่ามากกว่า 15 และถ้าไม่สามารถดำเนินการได้ให้เพิ่มจำนวนการทำซ้ำของการวัดในแต่ละสิ่งตัวอย่างและสิ่งตัวอย่างที่จะใช้ในการวัดนี้ต้องเป็นสิ่งตัวอย่างที่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญซึ่งถ้าใช้สิ่งตัวอย่างที่มีความแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญแล้วจะมีความหมายเท่ากับการใช้สิ่งตัวอย่างเดียวด้วยจำนวนวัดซ้ำมากๆและในกรณีที่จะทำให้ระบบการวัดมีคุณภาพด้านความไวเพียงพอต่อการตรวจจับความผันแปรของชิ้นงานในกระบวนการแล้ว จะต้องทำให้ข้อมูลมีความแตกต่างกันไม่ต่ำกว่า 5 ประเภทในกรณีที่มีการตรวจสอบแบบทำลาย จะต้องกำหนดให้ “ลอต(lot)” หมายถึงสิ่งตัวอย่างสำหรับการศึกษา GR&R

4) จำนวนครั้งในการวัดซ้ำสำหรับสิ่งตัวอย่างแต่ละชิ้น

โดยปกติแล้วแนะนำให้ทำการวัดซ้ำที่แต่ละสิ่งตัวอย่างด้วยจำนวนซ้ำเท่าๆกันเรียกการทดลองแบบนี้ว่า Balance design ซึ่งโดยทั่วไปจะกำหนดให้มีการวัดซ้ำสำหรับพนักงานวัดแต่ละคน 2-3 ครั้งต่อชิ้นงานแต่ละชิ้น

5) วิธีลดความผันแปรในสิ่งตัวอย่างของการศึกษา GR&R

ในการศึกษา GR&R บางกรณีนั้นจะไม่สามารถกำจัดความผันแปรภายในสิ่งตัวอย่างออกจากการวัดซ้ำ เช่น ในกรณีการตรวจสอบแบบทำลายที่มีความผันแปรภายในลอตรวมอยู่กับการวัดซ้ำ จึงมีความจำเป็นต้องพยายามเลือกงานในลอตให้มีความใกล้เคียงกันให้มากที่สุด

6) วิธีการประเมินผลความสามารถในการวัดซ้ำและวัดเหมือน

เมื่อการทดลองสิ้นสุดลง ต้องมีการประเมินผลถึงคุณภาพของข้อมูลก่อน เช่น การประเมินผลความสามารถในการแยกความแตกต่างของเครื่องมือวัด ความคงรูป และความต้องกันของระบบการวัด จากนั้นจึงทำการประเมินผลความสามารถในการวัดซ้ำและวัดเหมือนซึ่งมีวิธีการประเมินผล 3 วิธีคือ

1. วิธีอาศัยค่าพิสัย (Range method) เหมาะกับกรณีการทดลองในช่วงสั้นๆ และไม่มีการวัดซ้ำ วิธีการนี้มีข้อดีคือประเมินผลได้ง่าย แต่มีข้อเสียที่สำคัญคือ ไม่สามารถแยกความสามารถในการวัดซ้ำและวัดเหมือนออกจากกันได้

2. วิธีอาศัยค่าเฉลี่ยและพิสัย (Average and range method) เหมาะกับการทดลองซ้ำในแต่ละสิ่งตัวอย่างของพนักงานวัดแต่ละคน ซึ่งวิธีการนี้สามารถแยกการวัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
131183

ซ้ำออกจากการวัดเหมือนได้ แต่ไม่สามารถแยกความผันแปรจากสาเหตุร่วมระหว่างชิ้นงานและพนักงานวัดออกจากค่าการวัดซ้ำได้

3. วิธีอาศัยการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) เหมาะกับการวิเคราะห์ผลการศึกษาที่ได้จากการออกแบบการทดลองเพื่อพิจารณาว่าพนักงานและชิ้นงาน เป็นสาเหตุของความผันแปรอย่างมีนัยสำคัญหรือไม่ และวิธีการนี้จะสามารถแยกความผันแปรจากสาเหตุร่วมระหว่างชิ้นงานและพนักงานวัดออกจากค่าการวัดซ้ำได้วิธีการนี้มีข้อเสียตรงที่มีความยุ่งยากในการทำงานแนะนำให้ใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยในการคำนวณ (กิติศักดิ์ พลอยพานิชเจริญ, 2553)

2.1.5.3 การออกแบบการทดลองการศึกษาความสามารถในการวัดซ้ำและการวัดเหมือนของเครื่องมือวัด

รูปแบบการทดลองทั่วไปที่ใช้สำหรับการออกแบบการทดลองเพื่อศึกษาความสามารถของกระบวนการวัดจะใช้การทดลองแบบ Three factor factorial โดยทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ ซึ่งตัวแปรได้แก่ ชิ้นงาน (Part ; i = 1, 2, ..., a) พนักงานวัด (Operator ; j = 1, 2, ..., b) วิธีการ (Method ; k = 1, 2, ..., c) และระบบการวัด (Measurement ; l = 1, 2, ..., n) (Montgomery, 2009) แสดงดังสมการที่ 2.3

$$y_{ijkl} = \mu + \tau_i + \beta_j + \gamma_k + (\tau\beta)_{ij} + (\tau\gamma)_{ik} + (\beta\gamma)_{jk} + (\tau\beta\gamma)_{ijk} + \epsilon_{ijkl} \quad (2.3)$$

ซึ่ง μ คือ ค่าเฉลี่ยทั้งหมด
τ_i คือ อิทธิพลของชิ้นงาน
β_j คือ อิทธิพลของพนักงานวัด
γ_k คือ อิทธิพลของวิธีการ
$(\tau\beta)_{ij}$ คือ อิทธิพลร่วมระหว่างชิ้นงานและพนักงานวัด
$(\tau\gamma)_{ik}$ คือ อิทธิพลร่วมระหว่างชิ้นงานและวิธีการ
$(\beta\gamma)_{jk}$ คือ อิทธิพลร่วมระหว่างพนักงานวัดและวิธีการ
$(\tau\beta\gamma)_{ijk}$ คือ อิทธิพลร่วมระหว่างชิ้นงาน พนักงานวัดและวิธีการ
ϵ_{ijkl} คือ ความคลาดเคลื่อนสุ่ม

2.1.5.4 การวิเคราะห์ผลการศึกษาความสามารถในการวัดซ้ำและการวัดเหมือนของเครื่องมือวัด

ในการตีความหมายผลการวิเคราะห์จากตารางการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) จะต้องเริ่มจากการวิเคราะห์ความมีนัยสำคัญของอิทธิพลร่วม (Interaction effect) ระหว่างชิ้นงานและพนักงานก่อนซึ่งถ้าพบว่าอิทธิพลร่วมระหว่างชิ้นงานกับพนักงานวัดมีนัยสำคัญ แสดงว่าเมื่อเปลี่ยนชิ้นงานให้พนักงานคนเดิมทำการวัดแล้วผลการวัดจะเปลี่ยนไป ซึ่งจะพบว่าอิทธิพลร่วมมีผลมาก และในกรณีที่อิทธิพลร่วมมีนัยสำคัญจึงจำเป็นต้องตีความหมายจากอิทธิพลหลัก (Main effect) ของพนักงานวัดหรือชิ้นงานอีก เพราะว่าแม้อิทธิพลหลักของพนักงานวัดจะดูเหมือนมีผลอย่างไม่มีนัยสำคัญ แต่แท้ที่จริงแล้วมีอิทธิพลมากเมื่อมีการประเมินค่าความผันแปรด้านความสามารถในการวัดซ้ำและการวัดเหมือนของเครื่องมือวัด (กิติศักดิ์ พลอยพานิชเจริญ, 2553)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.6 การควบคุมกระบวนการเชิงสถิติ

การควบคุมกระบวนการเชิงสถิติ (Statistical process control) คือ เทคนิคในการแก้ปัญหาที่มีประสิทธิภาพ นำมาใช้ประโยชน์เพื่อให้กระบวนการมีความเสถียรภาพรวมทั้งการปรับปรุงความสามารถของกระบวนการ โดยการลดความผันแปรที่เกิดขึ้นในกระบวนการ (Montgomery, 2009)

วิธีการควบคุมกระบวนการเชิงสถิติได้พัฒนาขึ้นในศตวรรษที่ 20 นับว่าเป็นหนึ่งในเทคโนโลยีที่ดีที่สุด โดยในปี 1920s Walter A. Shewhart แห่งบริษัท Bell Telephone Laboratories ได้เสนอวิธีการควบคุมกระบวนการเชิงสถิติในการควบคุมกระบวนการ หลังจากนั้นในปี 1930s ได้มีการนำแผนภูมิควบคุมมาประยุกต์ใช้ (Montgomery, 2009)

วิธีการควบคุมกระบวนการเชิงสถิติถูกนำมาใช้อย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรม โดยในปี 1980 ได้มีงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิธีการควบคุมกระบวนการเชิงสถิติเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ในการควบคุมคุณภาพของกระบวนการ เนื่องจากผลกระทบของการแข่งขันของตลาดโลก (Woodal and Montgomery, 1999) การใช้วิธีการควบคุมกระบวนการเชิงสถิติในอุตสาหกรรมอาหารยังไม่ประสบความสำเร็จมากนัก ซึ่งวิธีการควบคุมกระบวนการเชิงสถิติมีหลายวิธีการแต่ในอุตสาหกรรมอาหารการใช้แผนภูมิควบคุมเป็นที่นิยมมากที่สุด โดยใช้ในการควบคุมกระบวนการ การวิเคราะห์แนวโน้มและใช้ในการเตือนสถานะของกระบวนการ (Srikaeo et al., 2005)

2.1.6.1 แผนภูมิควบคุม (Control chart)

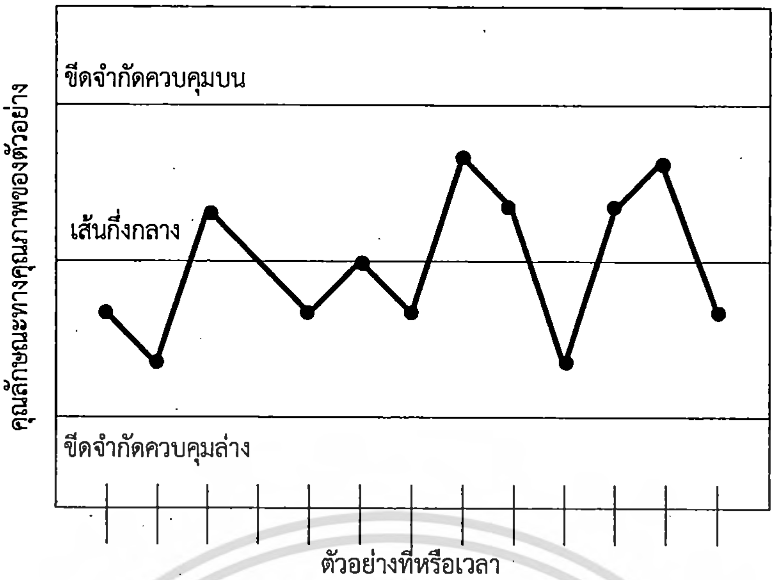
แผนภูมิควบคุมถูกพัฒนาขึ้นเมื่อปี 1920s โดย Walter A. Shewhart ขณะที่ทำงานที่เบลล์เทเลโฟนแล็ป แผนภูมิควบคุมเป็นเครื่องมือคุณภาพอย่างหนึ่งในเจ็ดของเทคนิคการวิเคราะห์คุณภาพที่ใช้ในการเฝ้าติดตามกระบวนการผลิตที่กำลังดำเนินการผลิตอยู่ (On-line process) โดยเงื่อนไขของการใช้แผนภูมิควบคุมของชิวฮาร์ทนั้น จะสร้างบนพื้นฐานข้อมูลที่มีการแจกแจงแบบปกติ (Normal distribution) (Montgomery, 2009) การแจกแจงแบบปกติ เป็นการแจกแจงของตัวแปรสุ่มแบบต่อเนื่องที่พบมากที่สุด ถ้าxเป็นตัวแปรสุ่มปกติที่มีค่าเฉลี่ย μ และ σ^2 จะมีฟังก์ชันความน่าจะเป็นดังสมการที่ 2.4

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2} \quad -\infty < x < \infty \qquad (2.4)$$

ค่าเฉลี่ยของการแจกแจงแบบปกติ คือ μ $(-\infty < \mu < \infty)$ และความแปรปรวน คือ $\sigma^2 > 0$

ตัวอย่างของแผนภูมิควบคุมแสดงดังภาพที่ 2.7 แผนภูมิควบคุมประกอบด้วยขีดจำกัดควบคุมบน (Upper control limit : UCL) ขีดจำกัดควบคุมล่าง (Lower control limit : LCL) และเส้นกึ่งกลาง (Center line : CL) ของสิ่งที่ต้องการควบคุม การควบคุมทำโดยวิธีสุ่มตัวอย่างและวัดผลของสิ่งที่ต้องการควบคุม แล้วเขียนจุดลงในแผนภูมิควบคุมและลากเส้นเชื่อมต่อจุดต่างๆเข้าด้วยกัน (Montgomery, 2009)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2.7 แสดงตัวอย่างแผนภูมิควบคุม

การใช้แผนภูมิควบคุมเพื่อควบคุมกระบวนการมีความสัมพันธ์กับระยะที่ 1 (Phase I) และระยะที่ 2 (Phase II) ซึ่งแต่ละระยะมีจุดประสงค์ที่แตกต่างกัน โดยระยะที่ 1 (Phase I) เป็นการพิจารณากระบวนการว่าอยู่ภายใต้การควบคุมหรือไม่ โดยจะรวบรวมข้อมูล 20 หรือ 25 กลุ่มย่อยภายหลังกระบวนการได้รับการวิเคราะห์และทำให้เป็นมาตรฐานแล้วทำการคำนวณพิกัดควบคุมเริ่มต้น (Trial control limit) เพื่อตรวจสอบว่าข้อมูลที่รวบรวมมาอยู่ภายใต้สภาวะควบคุมหรือไม่ ถ้าอยู่ภายใต้สภาวะควบคุมจะสามารถนำไปควบคุมสำหรับกระบวนการในอนาคตได้ และสามารถใช้พิกัดควบคุมนี้ในการสร้างแผนภูมิควบคุมเพื่อการควบคุมกระบวนการในระยะที่ 2 ต่อไป ดังนั้นอาจจะเรียกแผนภูมิควบคุมในระยะที่ 1 นี้ว่า แผนภูมิควบคุมระยะเริ่มต้น (Trial control limit)ถ้าพบว่ามีข้อมูลส่วนน้อยออกนอกขีดจำกัดการควบคุมแสดงว่ามีความผันแปรจากสาเหตุที่ผิดธรรมชาติเกิดขึ้นกับข้อมูลดังกล่าว ซึ่งจำเป็นต้องวิเคราะห์ค้นหาสาเหตุเพื่อทำการแก้ไขแล้วดำเนินการกำจัดสาเหตุที่ผิดธรรมชาติดังกล่าวออกไป จากนั้นจึงทำการทบทวนพิกัดควบคุมใหม่ แต่หากมีข้อมูลส่วนมากออกนอกการควบคุม แสดงว่ากระบวนการดังกล่าวมีความผันแปรที่ไม่เป็นไปตามสาเหตุโดยธรรมชาติ จึงขาดคุณสมบัติแห่งการคาดการณ์ได้ และไม่สามารถใช้แผนภูมิควบคุมเพื่อควบคุมกระบวนการต่อไปได้

ในระยะที่ 2 (Phase II) จะเกิดขึ้นหลังจากที่กระบวนการอยู่ภายใต้สภาวะที่เสถียรและอยู่ภายใต้การควบคุมแผนภูมิควบคุมประเภทนี้จะใช้ในการควบคุมกระบวนการโดยเปรียบเทียบค่าทางสถิติของตัวอย่างสำหรับแต่ละตัวอย่างตามเวลาที่ต่อเนื่องกันและนำมาคำนวณขีดจำกัดการควบคุมของกระบวนการ และเมื่อพบการออกนอกการควบคุมจะต้องทำการค้นหาสาเหตุที่ผิดธรรมชาติทันทีในระยะที่ 2 ของแผนภูมิควบคุมนี้ จะมีการดำเนินการทบทวนพิกัดควบคุมใหม่ทุกครั้งที่มีการเริ่มทำแผนภูมิควบคุมใหม่ พร้อมมีการทบทวนวิธีการกำหนดกลุ่มย่อย จำนวนสิ่งตัวอย่างและความถี่ของการชักสิ่งตัวอย่างเป็นระยะๆจนกระทั่งเลิกใช้การควบคุมด้วยวิธีการทางสถิติในที่สุด (Montgomery, 2009)

แผนภูมิควบคุมแบ่งตามชนิดของตัวแปรได้เป็น 2 ประเภทหลักๆ คือ แผนภูมิควบคุมตัวแปรเดี่ยวและแผนภูมิควบคุมตัวแปรพหุ ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1) แผนภูมิควบคุมตัวแปรเดี่ยว (Univariate control chart)

แผนภูมิควบคุมตัวแปรเดี่ยวจำแนกได้เป็น 3 ประเภทหลักๆ คือ แผนภูมิควบคุมแปรผัน (Variables control charts) แผนภูมิควบคุมคุณลักษณะ (Attribute control charts) และแผนภูมิควบคุมแบบถ่วงน้ำหนัก (Time-weighted control charts)

1. แผนภูมิควบคุมแปรผัน (Variables control charts)

เป็นวิธีการตรวจสอบผลิตภัณฑ์ด้วยการวัดผลิตภัณฑ์ในเชิงปริมาณ เช่น กรัม เซนติเมตร หรือกิโลกรัม เป็นต้น ซึ่งแผนภูมิชนิดนี้ประกอบด้วย (Montgomery, 2009)

ก. แผนภูมิควบคุมค่าเฉลี่ยและพิสัย ($\bar{x}$ and R control charts)

แผนภูมิชนิดแปรผันที่นิยมใช้มากที่สุดในอุตสาหกรรมคือ แผนภูมิ $\bar{x}$ และแผนภูมิ R แผนภูมิทั้งสองนี้จะใช้ควบคู่กันเพื่อควบคุมค่าเฉลี่ยของกระบวนการและค่าการกระจายของกระบวนการ วัตถุประสงค์และประโยชน์ที่สำคัญของแผนภูมิทั้งสองประกอบด้วย

-แผนภูมิ $\bar{x}$ ใช้ประโยชน์เพื่อควบคุมค่าเฉลี่ยของกระบวนการผลิต เช่นน้ำหนักเฉลี่ยของผงชูรส เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของลวดทองแดง เป็นต้น

-แผนภูมิ R ใช้ประโยชน์เพื่อควบคุมการกระจายของกระบวนการผลิตเช่น น้ำหนักของผงชูรส เส้นผ่านศูนย์กลางของลวดทองแดง เป็นต้น

-แผนภูมิ $\bar{x}$ และ R สามารถใช้ประเมินสมรรถภาพกระบวนการเพื่อวิเคราะห์ถึงความสามารถในการผลิตภายใต้ข้อกำหนดและประเมินจำนวนสินค้าที่ระดับคุณภาพต่ำกว่าที่กำหนด

แผนภูมิควบคุมประกอบด้วยขีดจำกัดควบคุมบน (Upper control limit: UCL) ขีดจำกัดควบคุมล่าง (Lower control limit: LCL) และเส้นกึ่งกลาง (Center line: CL) ขีดจำกัดการควบคุมของแผนภูมิ $\bar{x}$ แสดงดังสมการที่ 2.5 และขีดจำกัดการควบคุมของแผนภูมิ R ดังสมการที่ 2.6

$$\begin{aligned} \text{UCL} &= \bar{\bar{x}} + A_2\bar{R} \\ \text{CL} &= \bar{\bar{x}} \\ \text{LCL} &= \bar{\bar{x}} - A_2\bar{R} \end{aligned} \tag{2.5}$$

$$\begin{aligned} \text{UCL} &= D_4\bar{R} \\ \text{CL} &= \bar{R} \\ \text{LCL} &= D_3\bar{R} \end{aligned} \tag{2.6}$$

เมื่อ $\bar{\bar{x}}$ คือ ค่าเฉลี่ยของค่าเฉลี่ยแต่ละกลุ่มตัวอย่าง

$\bar{R}$ คือ ค่าเฉลี่ยของพิสัยของแต่ละกลุ่มตัวอย่าง

สำหรับค่าของ A_2 D_4 และ D_3 เป็นค่าคงที่ขึ้นอยู่กับจำนวนตัวอย่างในกลุ่มข้อมูล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข. แผนภูมิควบคุมค่าเฉลี่ยและความเบี่ยงเบนมาตรฐาน ($\bar{x}$ and S control charts)

นอกจากแผนภูมิ $\bar{x}$ และ R แผนภูมิควบคุมชนิดแปรผันที่นิยมใช้อีกประเภทหนึ่งคือ แผนภูมิ $\bar{x}$ และ S เมื่อ S เป็นค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของกลุ่มตัวอย่าง เมื่อเปรียบเทียบแผนภูมิ R และแผนภูมิ S พบว่าแผนภูมิ R นั้นการคำนวณจะง่ายกว่า แต่แผนภูมิ S จะมีค่าที่แม่นยำกว่าโดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อจำนวนตัวอย่างในแต่ละกลุ่มตัวอย่างมีค่ามาก โดยทั่วไปเมื่อจำนวนกลุ่มตัวอย่างมากกว่า 10 ตัวอย่าง แผนภูมิควบคุม S จะให้ผลการควบคุมที่แม่นยำกว่าแผนภูมิ R ในปัจจุบันมีเครื่องคิดเลขที่สามารถคำนวณค่า S ได้อย่างรวดเร็ว แผนภูมิ S จึงได้รับความนิยมมากขึ้นซึ่งขีดจำกัดการควบคุมของแผนภูมิ $\bar{x}$ ดังสมการที่ 2.7 และขีดจำกัดการควบคุมของแผนภูมิ S ดังสมการที่ 2.8

$$\begin{aligned} \text{UCL} &= \bar{\bar{x}} + A_3\bar{S} \\ \text{CL} &= \bar{\bar{x}} \\ \text{LCL} &= \bar{\bar{x}} - A_3\bar{S} \end{aligned} \qquad (2.7)$$

$$\begin{aligned} \text{UCL} &= B_4\bar{S} \\ \text{CL} &= \bar{S} \\ \text{LCL} &= B_3S \end{aligned} \qquad (2.8)$$

ค. แผนภูมิควบคุมค่าวัดและพิสัยเคลื่อนที่ (x and MR control charts)

มีหลายกรณีที่กลุ่มตัวอย่างมีจำนวนตัวอย่างเดียว หรือ n = 1 (n คือ จำนวนตัวอย่าง) เช่น การวัดผลที่ได้จากกระบวนการผลิตที่ใช้เครื่องจักรอัตโนมัติ และวัดผลทุกชิ้นที่ผลิตได้ หรืออาจเกิดจากลักษณะการผลิตที่มีอัตราการผลิตซ้ำ ซึ่งกว่าจะรอเพื่อเก็บตัวอย่างจะเสียเวลานานมาก ในกรณีเช่นนี้อาจสร้างแผนภูมิควบคุมสำหรับตัวอย่างเดี่ยว โดยสร้างแผนภูมิ X โดยใช้ค่าพิสัยเฉลี่ย $\bar{R}$ หรือจากผลต่างระหว่างข้อมูลเดี่ยวที่ติดกันดังสมการที่ 2.9

$$MR_i = |x_i - x_{i-1}| \qquad (2.9)$$

โดย x_i คือ ค่าตัวอย่างที่ i

x_{i-1} คือ ค่าตัวอย่างที่ $i-1$

ขีดจำกัดการควบคุมแสดงดังสมการที่ 2.10

$$\begin{aligned} \text{UCL} &= \bar{x} + 3\frac{\overline{MR}}{d_2} \\ \text{CL} &= \bar{x} \\ \text{LCL} &= \bar{x} - 3\frac{\overline{MR}}{d_2} \end{aligned} \qquad (2.10)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. แผนภูมิควบคุมคุณลักษณะ (Attribute control charts)

เป็นวิธีการตรวจสอบผลิตภัณฑ์ด้วยการนับผลิตภัณฑ์เชิงคุณภาพ เช่น ผลิตภัณฑ์ดีหรือผลิตภัณฑ์เสีย ผลิตภัณฑ์ใช้ได้หรือผลิตภัณฑ์ใช้ไม่ได้ เป็นต้น ในทางปฏิบัตินิยมใช้วิธีการตรวจสอบนี้มาก เพราะโรงงานเก็บรวบข้อมูลในลักษณะนี้อยู่แล้ว ดังนั้นโรงงานจึงไม่จำเป็นต้องเสียค่าใช้จ่ายในการตรวจสอบเพื่อสามารถสร้างแผนภูมิควบคุม (Montgomery, 2009) ได้แก่

ก. แผนภูมิที่ใช้วิเคราะห์ของเสีย ประกอบด้วย แผนภูมิควบคุมสัดส่วนของเสีย (p chart) และแผนภูมิควบคุมจำนวนของเสีย (np chart)

ข. แผนภูมิที่ใช้วิเคราะห์ข้อบกพร่อง ประกอบด้วย แผนภูมิควบคุมจำนวนข้อบกพร่องต่อหน่วยการทดสอบ (c chart) และแผนภูมิควบคุมจำนวนข้อบกพร่องเฉลี่ยต่อหน่วย (u chart)

3. แผนภูมิควบคุมแบบถ่วงน้ำหนัก (Time-weighted control charts)

ก. แผนภูมิควบคุมผลรวมสะสม (Cumulative sum control chart) เป็นแผนภูมิควบคุมที่ใช้เพื่อตรวจจับการเปลี่ยนแปลงไปของกระบวนการผลิตโดยนำข้อมูลตลอดช่วงเวลาของการเก็บข้อมูลมาใช้เพื่อประกอบการตัดสินใจด้วย

ข. แผนภูมิควบคุมค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ถ่วงน้ำหนักแบบเอ็กซ์โปเนนเชียล (Exponentially weighted moving average control chart) ใช้เพื่อตรวจจับสภาพการเปลี่ยนแปลงไปของกระบวนการผลิต โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้นเพียงเล็กน้อย (Montgomery, 2009)

2) แผนภูมิควบคุมตัวแปรพหุ (Multivariate control chart)

Montgomery (2009) กล่าวไว้ว่า ในการควบคุมคุณภาพทางสถิติของตัวแปรเดี่ยวโดยทั่วไปจะใช้การแจกแจงแบบปกติ โดยฟังก์ชันความน่าจะเป็นของการแจกแจงแบบปกติแสดงดังสมการที่ 2.11

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2} \quad -\infty < x < \infty \qquad (2.11)$$

โดยค่าเฉลี่ยของการแจกแจงแบบปกติ คือ μ ความแปรปรวนคือ σ^2 องค์ประกอบของการแจกแจงแบบปกติแสดงดังสมการที่ 2.12

$$(x-\mu)(\sigma^2)^{-1}(x-\mu) \qquad (2.12)$$

จากวิธีการดังกล่าวสามารถนำไปใช้ในกรณีของการแจกแจงแบบปกติของตัวแปรพหุ ซึ่งมีตัวแปรทั้งหมด p

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ให้ $x_1, x_2, \dots, x_p$ จัดในรูปของเวคเตอร์ $\mathbf{x}' = [x_1, x_2, \dots, x_p]$ โดยที่ $\boldsymbol{\mu}' = [\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_p]$ คือ เวคเตอร์ของค่าเฉลี่ย x และความแปรปรวนร่วมของตัวแปรสุ่มใน $\mathbf{x}$ ประกอบด้วย $p \times p$ เมตริกความแปรปรวนร่วม (Σ) ซึ่งแสดงดังสมการที่ 2.13

$$(\mathbf{x} - \boldsymbol{\mu})\Sigma^{-1}(\mathbf{x} - \boldsymbol{\mu}) \tag{2.13}$$

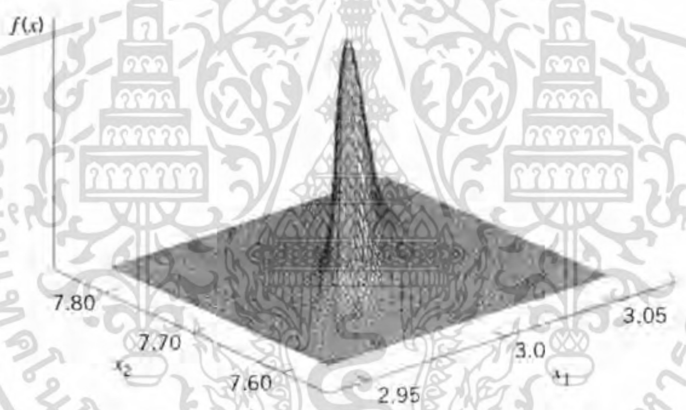
ฟังก์ชันความหนาแน่นน่าจะเป็นแบบปกติของตัวแปรพหุดังสมการที่ 2.14

$$f(\mathbf{x}) = \frac{1}{(2\pi)^{p/2}|\Sigma|^{1/2}} e^{-\frac{1}{2}(\mathbf{x}-\boldsymbol{\mu})'\Sigma^{-1}(\mathbf{x}-\boldsymbol{\mu})} \tag{2.14}$$

ซึ่ง $-\infty < x_j < \infty, j = 1, 2, \dots, p$

p คือ จำนวนตัวแปร

การแจกแจงแบบปกติของตัวแปรพหุสำหรับ 2 ตัวแปร (Bivariate normal) แสดงดังภาพที่ 2.8 แสดงพื้นผิวของฟังก์ชันความหนาแน่น



ภาพที่ 2.8 การแจกแจงแบบปกติของตัวแปรพหุ 2 ตัวแปร

ที่มา : Introduction to statistical quality control, Montgomery, 2009 : 498

เนื่องจากในงานวิจัยนี้ต้องทำการควบคุมหลายตัวแปรพร้อมๆกัน คือ ค่า L* a* และ b* ดังนั้นจึงต้องใช้แผนภูมิควบคุมตัวแปรพหุ ซึ่งมีหลายชนิดดังต่อไปนี้

1. แผนภูมิควบคุมโฮเทลลิ่งทีสแควร์ (Hotelling T^2 control chart)

เป็นแผนภูมิควบคุมหลายลักษณะคุณภาพหลายตัวแปรพร้อมๆกัน โดยมีข้อสันนิษฐานว่าตัวแปรต้องมีความสัมพันธ์กันไม่มากก็น้อยโดยดูที่เมตริกความแปรปรวนร่วม (Covariance matrix) และค่าสังเกตแบบ Multivariate ถูกแสดงในรูปของเวกเตอร์ที่มีมิติ p ตรงกับจำนวนตัวแปร p ที่ทำการวัดในแต่ละค่าสังเกตและข้อมูลที่ได้ต้องเป็นการแจกแจงปกติตัวแปรพหุคูณ (Multivariate normal data) (Fuchs and Kenett, 1998) ในอุตสาหกรรมบางประเภทมีการกำหนดจำนวนตัวอย่างเท่ากับ 1 เช่น อุตสาหกรรมเคมี และอุตสาหกรรมดังกล่าวต้องทำการควบคุมคุณภาพหลายตัวแปรพร้อมๆกัน หรือเรียกอีกอย่างว่าค่าสังเกตเชิงเดี่ยว (Individual observations) (Montgomery, 2009)

เอกสารนี้เก็บรักษาไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กำหนดให้ขนาดตัวอย่าง m แต่ละตัวอย่างมีจำนวนตัวอย่างเท่ากับ 1 และจำนวนคุณลักษณะที่ต้องการควบคุมเท่ากับ p ให้ $\bar{\mathbf{x}}$ คือเวกเตอร์ของค่าเฉลี่ยของตัวอย่าง (Sample mean vector) $\mathbf{S}$ คือ เมตริกความแปรปรวนร่วม (Covariance matrix) ดังนั้นตัวสถิติโฮเทลลิ่งทีสแควร์ (Hotelling T^2) แสดงดังสมการที่ 2.15 และขีดจำกัดการควบคุมสำหรับตัวสถิติเฟส II แสดงดังสมการที่ 2.16

$$T^2 = (\mathbf{x}-\bar{\mathbf{x}})'\mathbf{S}^{-1}(\mathbf{x}-\bar{\mathbf{x}}) \tag{2.15}$$

$$\text{UCL}=\frac{p(m+1)(m-1)}{m^2-mp}F_{\alpha,p,m-p}$$
$$\text{LCL}=0 \tag{2.16}$$

ในกรณีที่ตัวอย่างเริ่มต้นมีจำนวนมาก $m > 100$ ใช้การประมาณค่าขีดจำกัดควบคุมดังสมการที่ 2.17 ถ้าทราบเมตริกความแปรปรวนร่วมจะใช้ขีดจำกัดไคสแควร์ดังสมการที่ 2.18 แต่โดยทั่วไปจะใช้การประมาณค่า

$$\text{UCL}=\frac{p(m-1)}{m-p}F_{\alpha,p,m-p} \tag{2.17}$$
$$\text{UCL}=\chi^2_{\alpha,p} \tag{2.18}$$

Tracy Young and Mason (1992) ใช้การแจกแจงแบบเบต้า (Beta distribution) ในการสร้างขีดจำกัดการควบคุมสำหรับตัวสถิติเฟส I แสดงดังสมการที่ 2.19 ซึ่ง $\beta_{\alpha,p/2,(m-p-1)/2}$ คือ $1-\alpha$ เปอร์เซ็นต์ของการแจกแจงเบต้าที่มีพารามิเตอร์ $p/2$ และ $(m-p-1)/2$ ซึ่งการประมาณขอบเขตการควบคุมของเฟส I โดยใช้การแจกแจง F และการแจกแจงแบบไคสแควร์จะไม่มีความแม่นยำ

$$\text{UCL}=\frac{(m-1)^2}{m}\beta_{\alpha,p/2,(m-p-1)/2}$$
$$\text{LCL}=0 \tag{2.19}$$

สำหรับกรณีค่าสังเกตเชิงเดี่ยวการประมาณค่าเมตริกความแปรปรวนร่วม Σ จากการศึกษาของ Sullivan and Woodal (1995) ได้อภิปรายและวิเคราะห์ปัญหาเปรียบเทียบการประมาณค่าหลายรูปแบบ ซึ่งหนึ่งในวิธีเหล่านั้นคือการประมาณค่าแบบปกติที่ได้จากการรวมกันของทุกค่าสังเกต m อย่างง่าย ซึ่งแสดงดังสมการที่ 2.20

$$\mathbf{S}_1=\frac{1}{m-1}\sum_{i=1}^{m}(\mathbf{x}_i-\bar{\mathbf{x}})(\mathbf{x}_i-\bar{\mathbf{x}})' \tag{2.20}$$

สำหรับวิธีการประมาณค่าเมตริกความแปรปรวนร่วมแบบที่สองเสนอโดย Holmes and Mergen (1993) โดยใช้ความแตกต่างระหว่างค่าสังเกตดังสมการที่ 2.21

$$\mathbf{v}_i=\mathbf{x}_{i+1}-\mathbf{x}_i \quad i=1,2,\ldots,m-1 \tag{2.21}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จัดเรียงเวกเตอร์ในรูปเมตริก V ดังนี้

$$\mathbf{V} = \begin{bmatrix} \mathbf{v}_1' \\ \mathbf{v}_2' \\ \vdots \\ \mathbf{v}_{m-1}' \end{bmatrix}$$

ประมาณค่า $\boldsymbol{\Sigma}$ ดังสมการที่ 2.22

$$\mathbf{S}_2 = \frac{1}{2}\frac{\mathbf{V'V}}{(\mathbf{m}-1)} \quad (2.22)$$

2. แผนภูมิควบคุมตัวแปรพหุ EWMA (Multivariate EWMA control chart)

เป็นแผนภูมิควบคุมที่ใช้ในการตรวจจับข้อมูลที่มีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยและมีความไวในการตรวจจับความผิดปกติ ซึ่ง Lowry et al. (1992) เป็นผู้พัฒนาแผนภูมิควบคุม EWMA กับตัวแปรหลายตัวแปร ซึ่งใช้หลักการของ EWMA แบบเชิงเดี่ยว (Montgomery, 2009) ดังสมการที่ 2.23

$$Z_i = \lambda \mathbf{x}_i + (1-\lambda)Z_{i-1} \quad (2.23)$$

2.1.6.2 การศึกษาลักษณะข้อมูล

การศึกษาลักษณะของข้อมูลเพื่อให้สามารถเลือกใช้แผนภูมิควบคุมได้อย่างเหมาะสม ดังนี้

1) การตรวจสอบการแจกแจงแบบปกติ (Normal distribution)

การตรวจสอบข้อมูลว่ามีการแจกแจงแบบปกติหรือไม่ ทำได้โดยการใช้ Normal probability plot ซึ่งเป็นวิธีการที่ทำได้ง่ายและรวดเร็ว โดยขั้นตอนการทำคือ จัดเรียงข้อมูลจากน้อยไปหามาก โดยค่าสังเกตคือ $x_1, x_2, \dots, x_n$ นำมาจัดเรียงได้ดังนี้ $x_{(1)}, x_{(2)}, \dots, x_{(n)}$ โดย j คือลำดับของค่าสังเกตนำไปคำนวณดังสมการที่ 2.24 จากนั้นนำไปพล็อตกับค่าสังเกตแต่ละลำดับ (Montgomery, 2009)

$$(j-0.5)/n \text{ หรือ } 100(j-0.5)/n \quad (2.24)$$

2) การตรวจสอบสหสัมพันธ์ (Correlation)

การตรวจสอบสหสัมพันธ์ เป็นการวัดระดับความสัมพันธ์ระหว่าง X และ Y ว่ามีความสัมพันธ์กันมากน้อยเพียงใด ตัวสถิติที่ใช้วัดระดับความสัมพันธ์ เรียกว่า สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (ρ) ถ้าค่าของ Y ขึ้นอยู่ค่าของ X เพียงตัวเดียวจะเรียกว่า สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของเพียร์สันเนื่องจากใช้ข้อมูลที่คำนวณจากตัวอย่างแทนข้อมูลจากประชากร จึงประมาณค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของประชากร (ρ) ด้วยค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของตัวอย่าง (r) โดยที่ $-1 \le r \le 1$ ความหมายของค่า r แสดงดังนี้ (Montgomery and Runger, 2011)

1. r เป็นบวก หมายถึง X และ Y มีความสัมพันธ์ในทิศทางเดียวกัน

2. r เป็นลบ หมายถึง X และ Y มีความสัมพันธ์ในทิศทางตรงกันข้าม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. r มีค่าเข้าใกล้ 1 หมายถึง X และ Y มีความสัมพันธ์ในทิศทางเดียวกันและมีความสัมพันธ์กันมาก

4. r มีค่าเข้าใกล้ -1 หมายถึง X และ Y มีความสัมพันธ์ในทิศทางตรงกันข้ามและมีความสัมพันธ์กันมาก

5. r มีค่าเข้าใกล้ 0 หมายถึง X และ Y มีความสัมพันธ์กันน้อย

6. r = 1 หมายถึง X และ Y มีความสัมพันธ์กันอย่างสมบูรณ์ในทิศทางเดียวกัน

3) การตรวจสอบอัตตสหสัมพันธ์ (Autocorrelation)

การตรวจสอบอัตตสหสัมพันธ์มีทั้งที่เกิดจากตัวแปรอิสระที่เป็นค่าความล่าช้า (Lag) ของตัวแปรตาม (Autoregressive) และสหสัมพันธ์ของค่าความคลาดเคลื่อน (Moving average) ดังนั้นจึงต้องทำการวิเคราะห์ทั้งฟังก์ชันอัตตสหสัมพันธ์ (Autocorrelation function : ACF) และฟังก์ชันอัตตสหสัมพันธ์บางส่วน (Partial Autocorrelation function : PACF) เนื่องจาก ACF จะใช้ในการอธิบายสหสัมพันธ์ของค่าความคลาดเคลื่อนแต่ไม่สามารถอธิบายความสัมพันธ์ของตัวแปรอิสระที่เป็นความล่าช้าของตัวแปรตามซึ่งฟังก์ชันอัตตสหสัมพันธ์บางส่วนจะใช้วัดความสัมพันธ์ดังกล่าวได้อธิบายดังนี้

1. ฟังก์ชันอัตตสหสัมพันธ์ (Autocorrelation function : ACF)

อัตตสหสัมพันธ์ของประชากร (ρ_k) คือการวัดความสัมพันธ์ของแต่ละช่วงเวลาของค่าความคลาดเคลื่อนโดยมีช่วงเวลาที่ย้อนหลังไป k หน่วยเวลา ρ_k มีค่าดังสมการที่ 2.25 (Montgomery, 2009)

$$\rho_k = \frac{Cov(x_t, x_{t-k})}{V(x_t)} \quad k = 0, 1, \ldots \tag{2.25}$$

การประมาณค่าอัตตสหสัมพันธ์ของตัวอย่างแทนด้วย r_k แสดงดังสมการที่ 2.26

$$r_k = \frac{\sum_{t=1}^{n-k}(x_t - \bar{x})(x_{t-k} - \bar{x})}{\sum_{t=1}^{n}(x_t - \bar{x})^2} \tag{2.26}$$

2. ฟังก์ชันอัตตสหสัมพันธ์บางส่วน (Partial Autocorrelation function :PACF)

อัตตสหสัมพันธ์บางส่วน คือ อัตตสหสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร x_{t-k} และ x_t ที่อยู่ห่างกัน k ช่วงเวลาที่ขจัดอิทธิพลของตัวแปรที่อยู่ระหว่างตัวแปรทั้งสองได้แก่ $x_{t-k+1}, \ldots, x_{t-1}$ ออกไป แทนด้วย ρ_k และค่าอัตตสหสัมพันธ์บางส่วนของตัวอย่างแสดงดังสมการที่ 2.27 (Castillo, 2002)

$$\hat{\rho}_k, \quad k = 1, 2, \ldots \tag{2.27}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

กล่าวถึงงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิธีการประมวลภาพและการควบคุมกระบวนการเชิงสถิติดังต่อไปนี้

2.2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิธีการประมวลภาพ

ในการวิเคราะห์ภาพสำหรับผลิตภัณฑ์อาหารสีเป็นคุณลักษณะที่มีอิทธิพลและตัวบ่งชี้ที่มีประสิทธิภาพที่ช่วยลดความซับซ้อนของการแยกวัตถุและการตรวจสอบวัตถุจากภาพลักษณะสีของวัตถุที่สามารถแยกได้ด้วยการตรวจสอบพิกเซลภายในขอบเขตของวัตถุซึ่งมีงานวิจัยจำนวนมากที่ประสบความสำเร็จในการวัดสีของผลิตภัณฑ์อาหารดังนี้

จากการศึกษาของ Shearer and Payne (1990) ใช้วิธีการประมวลผลภาพในการวัดสีของผักโดยวัดสีของพริกหวานเพื่อแบ่งแยกประเภทโดยใช้ระบบการวิเคราะห์ภาพสีและใช้ระบบ RGB ค่าความเข้มของพิกเซลถูกแบ่งเป็นแปดระดับสีที่เป็นไปได้ ความสัมพันธ์ของการกระจายความเข้มของพิกเซลในหกออร์โทกอนอลจะถูกคำนวณและใช้สีเป็นตัวแปรเชิงปริมาณผลพบว่ามีความถูกต้องสูงถึง 96% ซึ่งประสบความสำเร็จในการแบ่งเกรดตามสีของพริกหวาน

จากการศึกษาของ Leeman et al. (1998) ได้พัฒนาระบบการมองเห็นสีของเครื่องจักรในการแบ่งแยกความผิดปกติของแอปเปิ้ลเขียว สีของแบบจำลองถูกใช้เป็นมาตรฐานในการเปรียบเทียบกับภาพตัวอย่าง โดยส่วนที่ผิดปกติแต่ละพิกเซลของภาพแอปเปิ้ลจะถูกนำมาเปรียบเทียบกับแบบจำลอง ถ้าพิกเซลตรงกันแสดงว่ามีลักษณะที่สมบูรณ์ดี ถ้าไม่ตรงกันแสดงว่ามีความผิดปกติ จากนั้นทำการแบ่งแยกโดยการคำนวณค่าพารามิเตอร์ทั้งหมดของผลไม้หรือคำนวณเฉพาะส่วน ผลที่ได้เป็นที่น่าพึงพอใจ

จากการศึกษาของ Ahmad et al. (1999) ใช้วิธีการประมวลผลภาพในการแบ่งแยกสีของอาการผิดปกติในเมล็ดถั่วเหลือง ใช้ระบบสี RGB โดยพื้นฐานของแบบจำลองการตัดสินใจหลายตัวแปร ในการแยกแยะระหว่างเมล็ดที่ติดโรคและไม่ติดโรค สำหรับการตรวจสอบและการคัดเกรด แบบจำลองประกอบด้วยลักษณะสี 6 สี ทำการคำนวณค่าเฉลี่ย ค่าต่ำสุดและค่าความแปรปรวนสำหรับค่าพิกเซล RGB เพื่ออธิบายลักษณะอาการของเมล็ด จากการวิเคราะห์สีพบว่าการแสดงผลหนึ่งสีไม่เพียงพอในการอธิบายลักษณะอาการของเมล็ด ความแม่นยำในการแบ่งแยกความผิดปกติและปกติคือ 88%

จากการศึกษาของ Lu et al. (2000) ใช้การประเมินสีของเนื้อหมูสดโดยแบ่งเป็นส่วนของสีพื้น กล้ามเนื้อและไขมัน ใช้ค่าเฉลี่ยและค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของสีแดง สีเขียวและสีน้ำเงินในการแบ่งกลุ่ม โดยแบ่งจากวิธีการทางสถิติโดยใช้เทคนิค Partial least squares และแบบจำลองเครือข่ายใยประสาทและทำนายค่าของสีโดยใช้ภาพ ผลการศึกษาพบว่าระบบการประมวลผลภาพร่วมกับเครือข่ายใยประสาทเป็นเครื่องมือที่มีประสิทธิภาพในการประเมินผลความสดของเนื้อหมูโดยใช้สี

จากการศึกษาของ Pedreschi et al. (2006) ได้นำวิธีการประมวลผลภาพมาประยุกต์ใช้ในการวัดสีของมันฝรั่งทอดโดยใช้อุณหภูมิในการทอดที่แตกต่างกัน โดยทำการแปลงภาพจากระบบ RGB เป็นระบบ L*a*b* เพื่อใช้ในการเปรียบเทียบสีของมันฝรั่งทอด ผลการทดลองพบว่าค่าสีในระบบ L*a*b* จะบันทึกความแตกต่างที่เวลาการทอดต่างกัน อุณหภูมิต่างกันโดยใช้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พารามิเตอร์การเปลี่ยนแปลงสีรวม (ΔE) โดยวิธีการประมวลผลภาพแสดงให้เห็นได้ว่าถ้าทอดที่อุณหภูมิสูงมันฝรั่งจะเป็นสีดำ

2.2.2 วิธีการควบคุมกระบวนการเชิงสถิติ

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการประยุกต์ใช้วิธีการควบคุมกระบวนการเชิงสถิติกับอาหารมีดังนี้

จากการศึกษาของ Hays et al. (1997) ได้ประยุกต์ใช้วิธีการควบคุมกระบวนการเชิงสถิติในการวิเคราะห์อันตรายและจุดวิกฤติที่ต้องการควบคุม โดยใช้แผนภูมิควบคุมแบบ CUSUM และ Individual

จากการศึกษาของ Grigg et al. (1998) ได้ประยุกต์ใช้วิธีการควบคุมกระบวนการเชิงสถิติในบรรจุภัณฑ์ของปลาโดยใช้แผนภูมิควบคุมแบบ $\bar{x} - R$

จากการศึกษาของ Srikaeo and Hourigan (2002) ประยุกต์ใช้วิธีการควบคุมกระบวนการเชิงสถิติในการวิเคราะห์อันตรายและจุดวิกฤติที่ต้องการควบคุมในขั้นตอนการล้างเปลือกไข่โดยใช้แผนภูมิควบคุมแบบ $\bar{x}$ และทำการศึกษาความสามารถของกระบวนการ

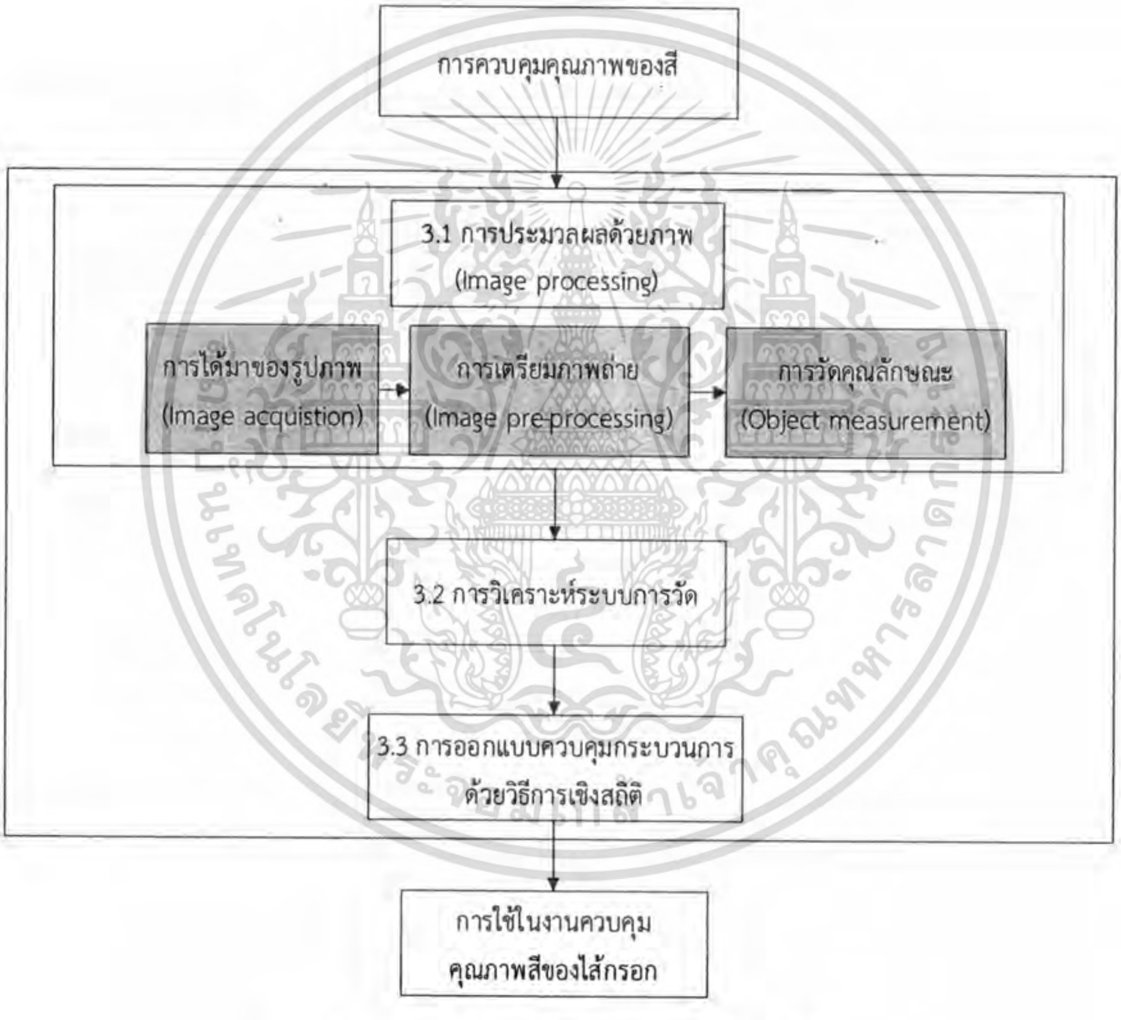
จากการศึกษาของ Srikaeo et al. (2005) ได้ประยุกต์ใช้วิธีการควบคุมกระบวนการเชิงสถิติกับคุณลักษณะของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการทำบิสกิตจากแป้งสาลี ซึ่งเทคนิคที่นำมาใช้ได้แก่ ฮิสโตแกรม การวิเคราะห์ค่าเฉลี่ย แผนภูมิควบคุม และการศึกษาความสามารถของกระบวนการ

จากงานวิจัยเกี่ยวกับวิธีการประมวลผลภาพและวิธีการควบคุมกระบวนการเชิงสถิติไม่พบว่ามีงานวิจัยที่ใช้ทั้งสองวิธีดังกล่าวร่วมกันในผลิตภัณฑ์อาหาร และวิธีการควบควบคุมกระบวนการเชิงสถิติดังกล่าวยังคงเป็นการใช้งานในระดับพื้นฐานและมุ่งเน้นเฉพาะการวัดคุณลักษณะตัวแปรเดียว (Univariate case) หรือไม่ได้ให้ความสำคัญความเป็นอิสระของตัวแปร ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงทำการศึกษาการใช้วิธีการประมวลผลภาพโดยการใช้ภาพสีของไส้กรอกร่วมกับวิธีการควบคุมกระบวนการเชิงสถิติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3
วิธีดำเนินการวิจัย

ในงานวิจัยนี้วัตถุประสงค์คือเพื่อศึกษาวิธีการประเมินผลคุณภาพสีของผลิตภัณฑ์อาหารโดยใช้วิธีการประมวลผลภาพร่วมกับวิธีการเชิงสถิติในการควบคุมคุณภาพสีของไส้กรอกเพื่อการควบคุมกระบวนการ และเพื่อสร้างต้นแบบเครื่องมือสำหรับการตรวจสอบคุณภาพสีของผลิตภัณฑ์อาหาร โดยแบ่งออกเป็นขั้นตอนหลัก 3 ขั้นตอน ได้แก่ การประมวลผลด้วยภาพ การวิเคราะห์ระบบการวัด และการออกแบบควบคุมกระบวนการด้วยวิธีการเชิงสถิติ แสดงแผนผังขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยดังภาพที่ 3.1



ภาพที่ 3.1 แสดงแผนผังขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1 การประมวลผลภาพ

การควบคุมคุณภาพสีของไส้กรอก โดยทั่วไปวิธีการในการวัดสีจะใช้การเปลี่ยนภาพจากระบบ RGB เป็น ระบบ L*a*b* เนื่องจากเป็นระบบที่ไม่ขึ้นกับอุปกรณ์และสามารถบ่งบอกความเข้มและความสว่างของไส้กรอกเพื่อนำไประบุว่าไส้กรอกมีสีคล้ำหรือสีซีด ซึ่งจะทำให้สามารถอธิบายสีของไส้กรอกที่เป็นตัวอย่างในงานวิจัยนี้ในมุมมองที่ครอบคลุมกว่าระบบ RGB ซึ่งบ่งบอกเฉพาะสีแดง สีเขียว และสีน้ำเงิน มีขั้นตอนการประมวลผลภาพดังต่อไปนี้

3.1.1 การได้มาของรูปภาพ

การได้มาของรูปภาพ (Image acquisition) ใช้กล้องดิจิตอลในการถ่ายภาพซึ่งจะได้ภาพออกมาดังภาพที่ 3.2 ซึ่งอุปกรณ์ที่ใช้ในการถ่ายภาพจะกล่าวต่อไปในหัวข้อ 3.2

ภาพที่ 3.2 แสดงตัวอย่างรูปภาพที่ได้จากการถ่ายภาพ

3.1.2 การเตรียมภาพถ่าย

การเตรียมภาพถ่าย (Image pre-processing) ภาพถ่ายดิจิตอลต้องมีการปรับปรุงคุณภาพก่อนที่จะนำไปทำการวิเคราะห์ โดยการนำสิ่งรบกวนภาพออกและเพิ่มความเข้มของภาพ จากนั้นจะทำการตัดรูปภาพเฉพาะส่วนที่เป็นไส้กรอกดังภาพที่ 3.3 และทำการประมวลผลพิกเซลเบื้องต้นโดยการแปลงจากระบบ RGB เป็นระบบ L*a*b* โดยใช้โปรแกรม MATLAB (O'Sullivan et al., 2003 ; Pedreschi et al., 2006)

ภาพที่ 3.3 แสดงการตัดภาพเฉพาะส่วนที่เป็นไส้กรอก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.3 การวัดคุณลักษณะ

การวัดคุณลักษณะ (Object measurement) โดยทำการวัดสีจากภาพถ่ายซึ่งสีที่ได้จากการแปลงจากระบบ RGB เป็นระบบ L*a*b* ในขั้นตอนการประมวลผลภาพเบื้องต้น และทำการคำนวณค่าเฉลี่ยของค่า L* a* และ b* ในทุกพิกเซล

3.2 การวิเคราะห์ระบบการวัด

ใช้หลักการความสามารถในการวัดซ้ำและการวัดเหมือนของเครื่องมือวัดในการวิเคราะห์เครื่องมือวัดคุณภาพสีของอาหาร เพื่อสร้างความเชื่อมั่นในเครื่องมือวัดว่าค่าที่วัดได้จากเครื่องมือวัดมีความสามารถในการแบ่งแยกผลิตภัณฑ์และสามารถนำไปใช้ในการควบคุมกระบวนการเชิงสถิติต่อไป

3.2.1 ตัวอย่างที่ใช้ในการทดลอง

เนื่องจากเป็นช่วงของการสร้างเครื่องมือวัด เพื่อความสะดวกในการทดลอง จึงใช้กระดาษสีที่มีสีแตกต่างกันแทนสีของไส้กรอก จำนวน 10 ตัวอย่าง แสดงดังภาพที่ 3.4

ภาพที่ 3.4 แสดงสีที่ใช้ในการทดลอง

3.2.2 วิธีการประมวลผลภาพ

ทำการทดลองวิธีการประมวลผลภาพก่อนการปรับปรุงและหลังการปรับปรุง ดังนี้

3.2.2.1 วิธีการประมวลผลภาพก่อนการปรับปรุง

การได้มาของรูปภาพใช้แสงสว่างและกล้องดิจิตอล SONY Cyber-shot รุ่น DSC-W50 แสดงดังภาพที่ 3.5

ภาพที่ 3.5 แสดงลักษณะของการได้มาของรูปภาพก่อนการปรับปรุง

3.2.2.2 วิธีการประมวลผลภาพหลังการปรับปรุง

หลังจากทำการปรับปรุงโดยทำการสร้างอุปกรณ์เพื่อควบคุมแสงสว่าง แสดงภาพอุปกรณ์การทดลองดังภาพที่ 3.6

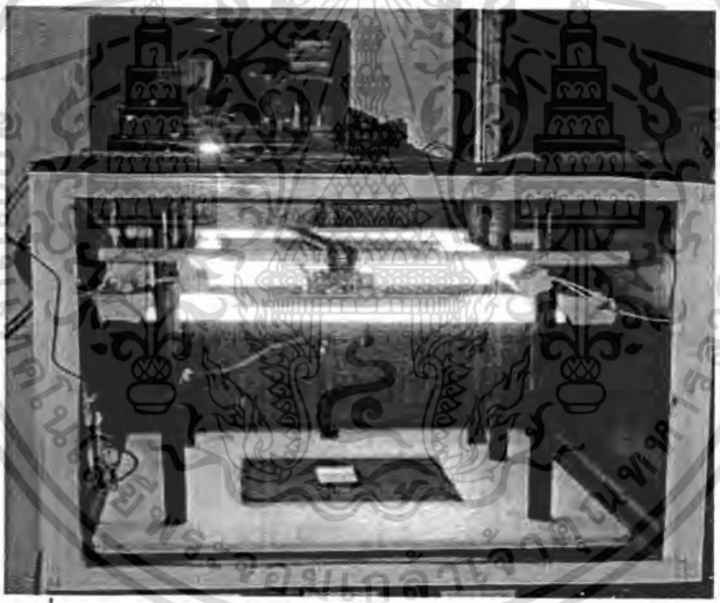
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1) แสงสว่างใช้หลอดไฟฟลูออเรสเซนต์ 4 หลอด (ยี่ห้อ LAMPTAN, Daylight, รุ่น FL18WT8) ความยาว 60 เซนติเมตร อุณหภูมิสี 6500 องศาเซลเซียส และค่า Color Rendering Index (CRI) คือ 80 การจัดวางหลอดไฟวางเป็นสี่เหลี่ยมเหนือตัวอย่างผลิตภัณฑ์ 35 เซนติเมตรเป็นมุม 45 องศา (Pedreschi et al., 2006)

2) กล้องดิจิตอล ใช้กล้องดิจิตอล (Canon EOS 550D) การตั้งค่ากล้องใช้ค่า ISO200 ความเร็วชัตเตอร์ 1/100 ค่ารูรับแสง 5.0 ไม่ใช้แฟลชและการซูม (Kang et al., 2008) ความละเอียด 3456 × 2304 การวางกล้องวางเหนือผลิตภัณฑ์ 22.5 เซนติเมตร โดยมุมระหว่างกล้องและหลอดไฟ 45 องศา

3) กล่องไม้ ขนาดกล่องกว้าง 80 เซนติเมตร ยาว 80 เซนติเมตร และสูง 60 เซนติเมตรโดยอุปกรณ์ทั้งหมดได้แก่ หลอดไฟ กล้องดิจิตอลวางภายในกล่องไม้ทาสีดำ เพื่อป้องกันแสงภายนอกและลดการสะท้อนของแสงภายในกล่อง (Mendoza and Aguilera, 2004 ; Pedreschi et al., 2006) ดังแสดงในภาพที่ 3.6

4) การถ่ายภาพเชื่อมต่อด้วย USB ผ่านคอมพิวเตอร์ โดยใช้โปรแกรม EOS Utility



ภาพที่ 3.6 แสดงลักษณะของการได้มาของรูปภาพหลังการปรับปรุง

3.2.3 ขั้นตอนการดำเนินงานการวิเคราะห์ระบบการวัด

ขั้นตอนการดำเนินงานเพื่อศึกษาความสามารถของระบบการวัดค่าสี โดยออกแบบการทดลองศึกษาความสามารถในการวัดซ้ำและการวัดเหมือนของเครื่องมือวัดประกอบด้วย 3 ปัจจัย คือ พนักงาน ชิ้นงาน และวิธีการวัด โดยใช้ชิ้นงานจำนวน 10 ตัวอย่าง ให้พนักงานจำนวน 2 คน วิธีการวัด 2 วิธี คือการวางแนวตั้งและแนวนอน ทำการวัดโดยแต่ละคนวัดซ้ำคนละ 2 ครั้ง ซึ่งผลการวัดค่าอยู่ในระบบ L*a*b* ประกอบด้วยค่า L* a* และ b* ดังนั้นในการวิจัยครั้งนี้ต้องทำการเก็บข้อมูลทั้งหมด 2 × 10 × 2 × 2 = 80 โดยทำการทดลองแบบสุ่มโดยสมบูรณ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.4 การวิเคราะห์ผลการทดลอง

นำข้อมูลที่ได้จากการทดลองวิเคราะห์ผลโดยใช้โปรแกรม MINITAB 16 โดยใช้ balanced ANOVA จากนั้นนำผลการทดลองที่ได้มาเปรียบเทียบกันเพื่อหาวิธีการที่ดีที่สุดที่นำมาใช้ในการประมวลผลภาพเพื่อให้ค่าที่ได้มีความแม่นยำและมีความถูกต้องมากที่สุด

3.3 การควบคุมกระบวนการเชิงสถิติ

หลังจากทำการวิเคราะห์ระบบการวัด เพื่อสร้างความเชื่อมั่นในเครื่องมือวัดว่าค่าที่วัดได้จากเครื่องมือวัดมีความสามารถในการแบ่งแยกผลิตภัณฑ์และสามารถนำไปใช้ในการควบคุมกระบวนการเชิงสถิติซึ่งขั้นตอนในการควบคุมกระบวนการเชิงสถิติมีดังนี้

3.3.1 ตัวอย่างไส้กรอกที่ใช้ในการทดลอง

ใช้ผลิตภัณฑ์ไส้กรอกจำนวน 2 ชนิด เพื่อใช้แทนลักษณะของไส้กรอกที่ปกติดังภาพที่ 3.7 และไส้กรอกที่ผิดปกติดังภาพที่ 3.8 โดยใช้สีของไส้กรอกที่แตกต่างกันเป็นตัวกำหนด

ภาพที่ 3.7 ตัวอย่างที่ใช้แทนลักษณะของไส้กรอกที่ปกติ

ภาพที่ 3.8 ตัวอย่างที่ใช้แทนลักษณะของไส้กรอกที่ผิดปกติ

3.3.2 ศึกษาคุณลักษณะของข้อมูล

ข้อมูลที่ได้จากการประมวลผลภาพอยู่ในรูปแบบค่าสังเกตเชิงเดี่ยว (Individual observations) จากการศึกษาคุณลักษณะของข้อมูลที่ได้จากการประมวลผลภาพ ค่าที่ได้จะออกมาทั้งหมด 3 ตัวแปร ได้แก่ ค่า L* a* และ b* การศึกษาคุณลักษณะของข้อมูลใช้ตัวอย่างผลิตภัณฑ์ไส้กรอกจำนวน 30 ตัวอย่างดังภาพที่ 3.7 โดยใช้โปรแกรม MINITAB 16 และเนื่องจากแผนภูมิควบคุมชิวฮาร์ท (Shewhart control chart) มีเงื่อนไขเบื้องต้นคือ ข้อมูลต้องมีการแจกแจงแบบปกติและเป็นอิสระกัน ดังนั้นจึงทำการตรวจสอบข้อมูลดังนี้

เอกสารนี้ใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1) การตรวจสอบการแจกแจงแบบปกติ (Normal distribution)
2) การตรวจสอบสหสัมพันธ์ (Correlation)
3) การตรวจสอบอัตตสหสัมพันธ์ (Autocorrelation)

3.3.3 การควบคุมกระบวนการด้วยวิธีการเชิงสถิติ

หลังจากการศึกษาลักษณะของข้อมูล แสดงให้เห็นว่าข้อมูลไม่สามารถสร้างแผนภูมิควบคุมชิวฮาร์ทได้เนื่องจากข้อมูลมีลักษณะไม่เป็นอิสระกัน จึงเสนอแนวทางการควบคุมกระบวนการ คือ การใช้แผนภูมิโฮเทลลิ่งทีสแควร์ในการควบคุมกระบวนการโดยใช้โปรแกรม MATLAB จากนั้นใช้แผนภูมิควบคุมสำหรับตัวอย่างเดี่ยววิเคราะห์ค่า L* a* หรือ b* ที่มีผลกระทบโดยใช้โปรแกรม MINITAB จากการวิเคราะห์ระบบการวัดอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองแสดงดังภาพที่ 3.9

ภาพที่ 3.9 แสดงอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

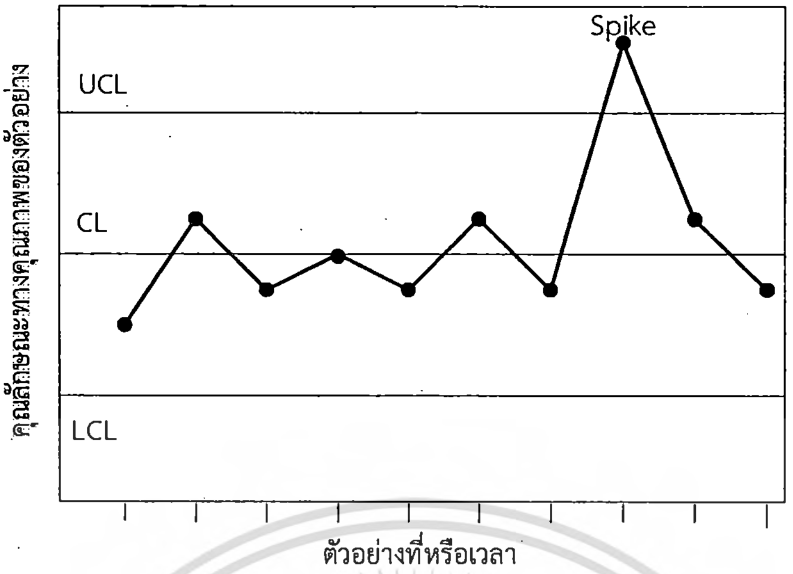
3.3.3.1 การทดสอบแผนภูมิควบคุม

ทดสอบแผนภูมิควบคุมโดยใช้แผนภูมิโฮเทลลิ่งทีสแควร์ในการควบคุมกระบวนการ จากนั้นใช้แผนภูมิควบคุมสำหรับตัวอย่างเดี่ยววิเคราะห์ค่า L* a* หรือ b* ที่มีผลกระทบการทดสอบดังกล่าวเพื่อตรวจสอบความผิดพลาดที่เกิดจากความผิดพลาดแบบที่ 1 (Type I error) คือกรณีที่ตัดสินใจผิดพลาดว่ากระบวนการอยู่ภายนอกการควบคุมแต่ความเป็นจริงแล้วอยู่ภายใต้การควบคุม และความผิดพลาดแบบที่ 2 (Type II error) คือกรณีการตัดสินใจผิดพลาดว่ากระบวนการอยู่ภายใต้การควบคุมแต่ความเป็นจริงแล้วอยู่ภายนอกการควบคุม (Montgomery, 2009) โดยแบ่งออกเป็น 2 กรณี ดังนี้

1) การทดสอบ Spike

จากภาพที่ 3.10 แสดงลักษณะของการทดสอบแบบ Spike ทำการทดลองโดยใช้ผลิตภัณฑ์ไส้กรอกที่มีลักษณะปกติจำนวน 28 ตัวอย่างและผลิตภัณฑ์ไส้กรอกที่ผิดปกติจำนวน 1 ตัวอย่าง จากนั้นทดสอบว่าแผนภูมิควบคุมสามารถตรวจจับสิ่งผิดปกติที่เพิ่มเข้าไปได้หรือไม่

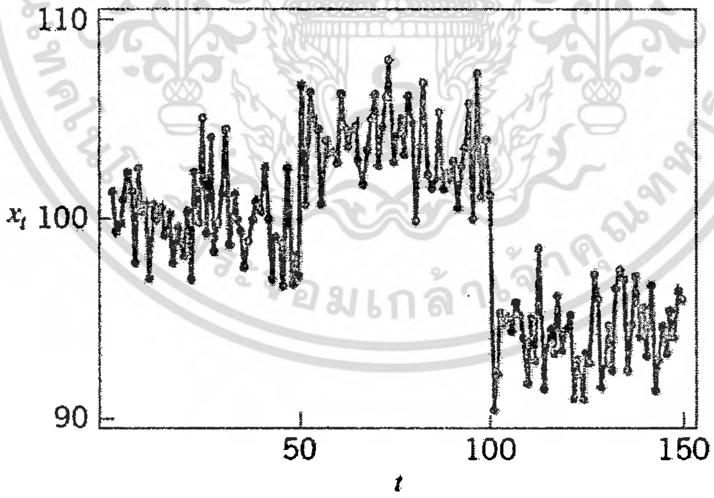
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 3.10 แสดงลักษณะของการทดสอบแบบ Spike

2) การทดสอบ Mean shift

จากภาพที่ 3.11 แสดงลักษณะของการทดสอบแบบ Mean shift ทำการทดลองโดยใช้ผลิตภัณฑ์ไส้กรอกที่มีลักษณะปกติจำนวน 28 ตัวอย่างและไส้กรอกที่มีลักษณะผิดปกติจำนวน 10 ตัวอย่าง จากนั้นทดสอบว่าแผนภูมิควบคุมสามารถตรวจจับสิ่งผิดปกติที่เพิ่มเข้าไปได้หรือไม่



ภาพที่ 3.11 แสดงลักษณะของการทดสอบแบบ Mean shift
ที่มา : Introduction to statistical quality control, Montgomery, 2009 : 458

3.3.3.2 ตัวอย่างการใช้งาน

ทำการทดลองโดยใช้แผนภูมิควบคุมกับตัวอย่างไส้กรอกจริงดังภาพที่ 3.7 จำนวน 29 ตัวอย่าง มาจากลอตและประเภทเดียวกัน เพื่อทดสอบว่าข้อมูลสามารถตรวจจับสิ่งผิดปกติกับข้อมูลที่มาจากกระบวนการผลิตเดียวกันได้หรือไม่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4
ผลการทดลองและวิจารณ์ผล

จากการทดลองตามขั้นตอนในบทที่ 3 ผลการทดลองแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ การวิเคราะห์ระบบการวัดและการควบคุมกระบวนการเชิงสถิติแสดงดังต่อไปนี้

4.1 ผลการทดลองการวิเคราะห์ระบบการวัด

ผลการทดลองของการวิเคราะห์ระบบการวัดก่อนการปรับปรุงและหลังการปรับปรุง ซึ่งการได้มาของรูปภาพของแต่ละวิธีกล่าวไปแล้วในบทที่ 3 หัวข้อ 3.2 โดยระบบการวัดก่อนการปรับปรุงคือ การใช้แสงสว่างภายในห้องปกติไม่ได้ทำการควบคุมแสงและใช้กล้องดิจิตอล SONY Cyber-shot รุ่น DSC-W50 ดังภาพที่ 3.5 และระบบการวัดหลังการปรับปรุงคือ การถ่ายภาพในอุปกรณ์การทดลองที่ได้ทำการควบคุมแสงสว่างและทำการควบคุมค่าต่างๆ ดังภาพที่ 3.6 ซึ่งผลการทดลองที่ได้แสดงดังต่อไปนี้

4.1.1 ผลการทดลองการวิเคราะห์ระบบการวัดก่อนการปรับปรุง

จากผลการทดลองแสดงตัวอย่างดังตารางที่ 4.1 จะเห็นได้ว่าผลการวัดมีค่าอยู่ในระบบ L*a*b* (ผลการทดลองทั้งหมดแสดงไว้ในภาคผนวกตารางที่ ก.1)

ตารางที่ 4.1 รูปแบบการทดลองและผลการทดลองการวิเคราะห์ระบบการวัดก่อนการปรับปรุง

ลำดับการสุ่ม	ลำดับทดลอง	Part	Operator	Method	L*	a*	b*
46	1	2	1	2	43.3962	7.1579	17.122
57	2	5	1	1	49.9104	-0.9346	9.9234
43	3	1	2	1	32.2948	20.8396	15.712
35	4	9	2	1	38.4652	5.7938	4.0851
10	5	3	1	2	40.2515	6.1009	1.8109
21	6	6	1	1	45.7838	4.2728	9.6708
62	7	6	1	2	45.0706	2.6986	7.7185
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
8	78	2	2	2	41.9582	5.9432	15.2823
20	79	5	2	2	48.5942	-0.0798	8.8658
77	80	10	1	1	37.8645	2.7933	6.0871

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 4.2 แสดงตัวอย่างการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ของค่า a* จากโปรแกรม MINITAB 16 ซึ่งผลการทดลองของค่า L* และ b* แสดงในภาคผนวก ก ตารางที่ ก.2 และ ก.6 จากการวิเคราะห์จะเห็นได้ว่าไม่มีอิทธิพลของปัจจัยใดที่มีผลต่อค่าวัดที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 จึงทำการลดรูปตัวแบบ (Reduced model)

ตารางที่ 4.2 แสดงผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่า a*

ANOVA: a* versus Part, Operator, Method

Factor	Type	Levels	Values
Part	random	10	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10
Operator	random	2	1, 2
Method	random	2	1, 2

Analysis of Variance for a*

Source	DF	SS	MS	F	P
Part	9	2895.812	321.757	578.65	0.465 x
Operator	1	12.360	12.360	149.76	0.976 x
Method	1	5.272	5.272	**	
Part*Operator	9	24.859	2.762	1.02	0.486
Part*Method	9	4.432	0.492	0.18	0.991
Operator*Method	1	0.019	0.019	0.01	0.935
Part*Operator*Method	9	24.286	2.698	1.72	0.117
Error	40	62.798	1.579		
Total	79	3029.836			

x Not an exact F-test.

** Denominator of F-test is zero.

S = 1.25297 R-Sq = 97.93% R-Sq(adj) = 95.91%

จากผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่า a* ในตารางที่ 4.2 เมื่อทำการการลดรูปตัวแบบ (Reduced model) จะได้ผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 4.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.3 แสดงผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่า a* โดยลดรูปตัวแบบ (Reduced model) ของระบบการวัดก่อนการปรับปรุง

ANOVA: a* versus Part, Operator, Method

Factor	Type	Levels	Values
Part	random	10	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10
Operator	random	2	1, 2
Method	random	2	1, 2

Analysis of Variance for a*

Source	DF	SS	MS	F	P
Part	9	2895.81	321.76	187.98	0.000
Operator	1	12.36	12.36	7.22	0.009
Method	1	5.27	5.27	3.08	0.084
Error	68	116.39	1.71		
Total	79	3029.84			

S = 1.30830 R-Sq = 96.16% R-Sq(adj) = 95.54%

Source	Variance component	Error term	Expected Mean Square for Each Term (using restricted model)
1 Part	40.0056	4	(4) + 8 (1)
2 Operator	0.2662	4	(4) + 40 (2)
3 Method	0.0890	4	(4) + 40 (3)
4 Error	1.7117		(4)

จากตารางที่ 4.3 การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ของค่า a* จะเห็นได้ว่าอิทธิพลของชิ้นงานวัดและพนักงานวัดมีผลทำให้ค่าวัดเปลี่ยนแปลงไป สำหรับการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ของ L* และ b* แสดงไว้ในตารางที่ ก.3 และ ก.7 ตามลำดับ จากนั้นจึงทำการคำนวณค่าความแปรปรวนของเครื่องมือวัดดังสมการที่ 4.1 แสดงตัวอย่างดังนี้

$$\sigma^2_{\text{gauge}} = \sigma^2 + \sigma^2_\beta + \sigma^2_\gamma \quad (4.1)$$

$$\sigma^2_{\text{gauge}} = 0.2662 + 0.0890 + 1.7117 = 2.0669$$

จากการคำนวณดังกล่าวสามารถเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนดังตารางที่ 4.4 จากตารางจะเห็นได้ว่า ค่าสัดส่วนระหว่างความแปรปรวนของระบบการวัดและความแปรปรวนของชิ้นงานของ L* a* และ b* เท่ากับ 5.77% 5.17% และ 9.27% ตามลำดับซึ่งแสดงว่าความแปรปรวนของเครื่องมือวัดมีค่าน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับความแปรปรวนเนื่องจากชิ้นงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.4 ตารางเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของ L* a* และ b*

ความแปรปรวน	L*	a*	b*
$\sigma^2_{\mathrm{gauge}}$	1.4489	2.0669	2.8083
σ^2_{part}	25.1240	40.0056	30.2985
% $\sigma^2_{\mathrm{gauge}}/\sigma^2_{\mathrm{part}}$	5.77%	5.17%	9.27%

จากผลการทดลองดังตารางที่ 4.4 จะเห็นได้ว่าระบบการวัดอยู่ในเกณฑ์ที่ดี แต่ยังมีอิทธิพลเนื่องจากพนักงานวัดที่ทำให้ค่าในการวัดเปลี่ยนแปลง

4.1.2 ผลการทดลองการวิเคราะห์ระบบการวัดหลังการปรับปรุง

จากผลการทดลองการวิเคราะห์ระบบการวัดก่อนการปรับปรุงยังคงมีอิทธิพลเนื่องจากพนักงานวัดที่ทำให้ค่าวัดเปลี่ยนแปลง จึงทำการปรับปรุงเครื่องมือวัดคุณภาพสีของอาหาร โดยใช้วิธีการที่กล่าวไปแล้วในหัวข้อ 3.2.2.1 ผลที่ได้จากการทดลองแสดงตัวอย่างดังตารางที่ 4.5 สำหรับผลการทดลองทั้งหมดแสดงในภาคผนวกตารางที่ ก.8

ตารางที่ 4.5 รูปแบบการทดลองและการวิเคราะห์ระบบการวัดหลังการปรับปรุง

ลำดับการสุ่ม	ลำดับทดลอง	Part	Operator	Method	L*	a*	b*
11	1	3	2	1	77.7306	12.4887	0.2478
53	2	4	1	1	78.1351	3.8647	0.9086
44	3	1	2	2	68.7043	35.1896	27.0417
64	4	6	2	2	77.6696	3.7449	1.7211
78	5	10	1	2	72.8339	3.4129	1.8522
31	6	8	2	1	80.5439	3.9117	-0.3798
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
24	78	6	2	2	79.9845	3.3609	1.0007
65	79	7	1	1	77.0587	4.3979	0.5542
4	80	1	2	2	68.113	34.978	24.8225

ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน แสดงดังตารางที่ ก.9 ก.11 และ ก.13 และจากผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่า a* เมื่อทำการลดรูปตัวแบบ (Reduced model) จะได้ผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 4.6 สำหรับค่า L* และ b* แสดงในภาคผนวกตารางที่ ก.10 และตารางที่ ก.14 ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.6 แสดงผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่า a* โดยลดรูปตัวแบบ (Reduced model) ของระบบการวัดหลังการปรับปรุง

ANOVA: a* versus Part, Operator, Method

Factor	Type	Levels	Values
Part	random	10	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10
Operator	random	2	1, 2
Method	random	2	1, 2

Analysis of Variance for a*

Source	DF	SS	MS	F	P
Part	9	7458.04	828.67	4741.74	0.000
Operator	1	0.15	0.15	0.84	0.362
Method	1	0.02	0.02	0.11	0.741
Error	68	11.88	0.17		
Total	79	7470.09			

S = 0.418044   R-Sq = 99.84%   R-Sq(adj) = 99.82%

Source	Variance component	Error term	Expected Mean Square for Each Term (using restricted model)
1 Part	103.562	4	(4) + 8 (1)
2 Operator	-0.001	4	(4) + 40 (2)
3 Method	-0.004	4	(4) + 40 (3)
4 Error	0.175		(4)

จากการทดลองผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่า a* จากการลดรูปตัวแบบ (Reduced model) ดังตารางที่ 4.6 เมื่อนำมาคำนวณค่าสัดส่วนระหว่างความแปรปรวนของระบบการวัดและความแปรปรวนของชิ้นงานแสดงผลตัวอย่างการคำนวณของค่า a* ตามสมการที่ 4.2 แสดงดังนี้

$$\sigma^2_{\mathbf{gauge}} = \sigma^2 + \sigma^2_\beta + \sigma^2_\gamma \qquad (4.2)$$

$$\sigma^2_{\mathbf{gauge}} = 0.175 + 0 + 0 = 0.175$$

จากการคำนวณดังกล่าวสามารถสรุปผลการวิเคราะห์ดังตารางที่ 4.7 จากตารางจะเห็นได้ว่า ค่าสัดส่วนระหว่างความแปรปรวนของระบบการวัดและความแปรปรวนของชิ้นงานของ L* a* และ b* เท่ากับ 2.34% 0.17% และ 0.42% ตามลำดับ ซึ่งแสดงว่าความแปรปรวนของเครื่องมือวัดมีค่าน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับความแปรปรวนเนื่องจากชิ้นงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.7 ตารางเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของ L* a* และ b* ของระบบการวัดหลังการปรับปรุง

ความแปรปรวน	L*	a*	b*
σ^2_{gauge}	0.457	0.175	0.3167
σ^2_{part}	19.5062	103.562	74.1617
% $\sigma^2_{\text{gauge}}/\sigma^2_{\text{part}}$	2.34%	0.17%	0.42%

จากการทดลองทั้ง 2 วิธีดังกล่าวข้างต้นนำมาเปรียบค่าสัดส่วนระหว่างความแปรปรวนของระบบการวัดและความแปรปรวนของชิ้นงานได้ดังตารางที่ 4.8

ตารางที่ 4.8 การเปรียบเทียบค่าสัดส่วนระหว่างความแปรปรวนของระบบการวัดและความแปรปรวนของชิ้นงาน

% $\sigma^2_{\text{gauge}}/\sigma^2_{\text{part}}$	ก่อนปรับปรุง	หลังการปรับปรุง
L*	5.77%	2.34%
a*	5.17%	0.17%
b*	9.27%	0.42%

จากตารางที่ 4.8 ทำการเปรียบเทียบผลการทดลองวิธีการได้มาของรูปภาพของระบบการวัดก่อนการปรับปรุงคือ การใช้แสงสว่างภายในห้องปกติไม่ได้ทำการควบคุมแสงและใช้กล้องดิจิตอล SONY Cyber-shot รุ่น DSC-W50 ดังภาพที่ 3.5 และระบบการวัดหลังการปรับปรุงคือการถ่ายภาพในอุปกรณ์การทดลองที่ได้ทำการควบคุมแสงสว่างและทำการควบคุมค่าต่างๆ ดังภาพที่ 3.6 พบว่าค่าสัดส่วนระหว่างความแปรปรวนของระบบการวัดและความแปรปรวนของชิ้นงานของระบบการวัดหลังการปรับปรุงมีค่าน้อยกว่าค่าของระบบการวัดก่อนการปรับปรุงทั้งค่า L* a* และ b* แสดงให้เห็นว่าความแปรปรวนของเครื่องมือวัดมีค่าน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับความแปรปรวนเนื่องจากชิ้นงานดังนั้นระบบการวัดหลังการปรับปรุงจึงเป็นวิธีการที่นำมาใช้ในการควบคุมคุณภาพสีของผลิตภัณฑ์ไส้กรอกและสร้างความเชื่อมั่นในเครื่องมือวัดว่าค่าที่วัดได้จากเครื่องมือวัดมีความสามารถในการแบ่งแยกผลิตภัณฑ์และสามารถนำไปใช้ในการควบคุมกระบวนการเชิงสถิติต่อไป

4.2 ผลการทดลองการควบคุมกระบวนการเชิงสถิติ

หลังจากทำการวิเคราะห์ระบบการวัดเพื่อสร้างความเชื่อมั่นในเครื่องมือวัดว่าค่าที่วัดได้จากเครื่องมือวัดมีความสามารถในการแบ่งแยกผลิตภัณฑ์และสามารถนำไปใช้ในการควบคุมกระบวนการเชิงสถิติจากนั้นจึงทำการทดลองควบคุมคุณภาพสีของไส้กรอกด้วยวิธีการควบคุมกระบวนการเชิงสถิติขั้นตอนในการควบคุมกระบวนการเชิงสถิติมีดังนี้

4.2.1 ศึกษาคุณลักษณะของข้อมูล

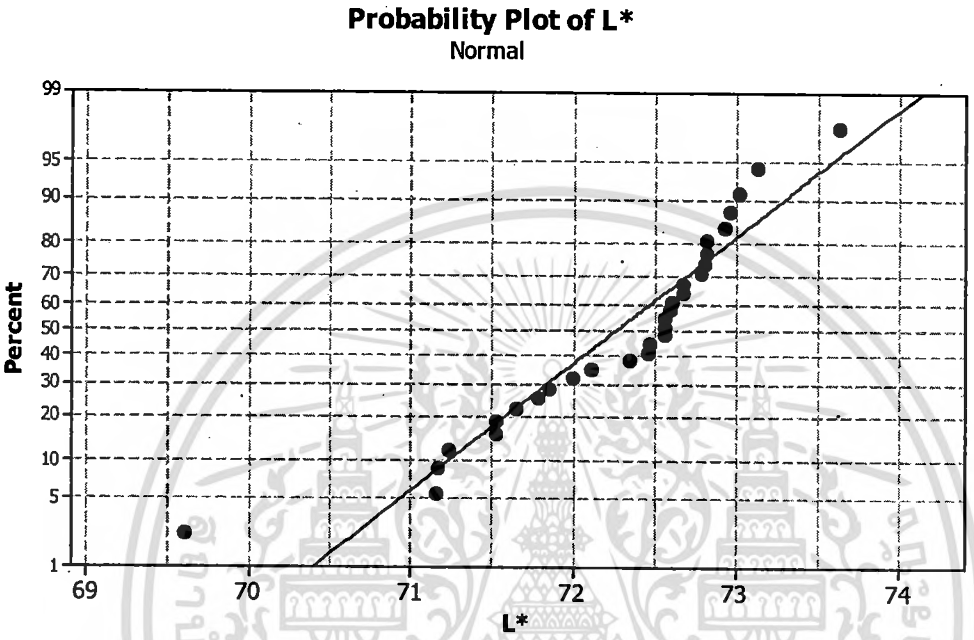
การเก็บข้อมูลที่ได้จากการประมวลผลภาพในรูปแบบค่าสังเกตเชิงเดี่ยว (Individual observations) จากการศึกษาคุณลักษณะของข้อมูลที่ได้จากการประมวลผลภาพ ค่าที่ได้จะออกมาทั้งหมด 3 ตัวแปร ได้แก่ ค่า L* a* และ b* จากนั้นจึงทำการตรวจสอบการแจกแจงแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

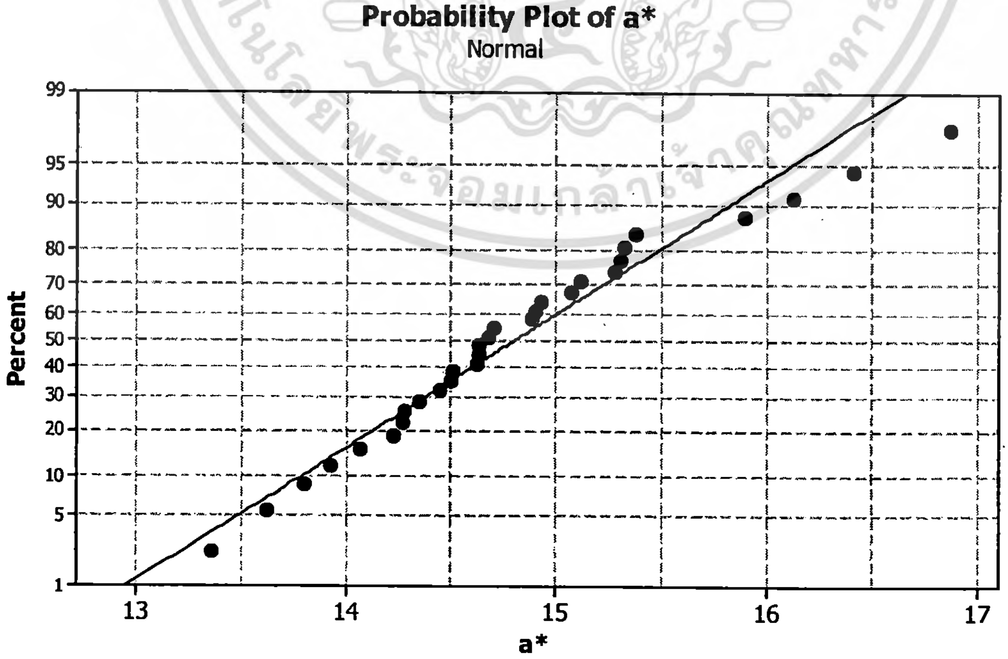
ปกติ (Normal distribution) การตรวจสอบสหสัมพันธ์ (Correlation) และการตรวจสอบอัตตสหสัมพันธ์ (Autocorrelation)

4.2.1.1 การตรวจสอบการแจกแจงแบบปกติ

เป็นเงื่อนไขในการสร้างแผนภูมิควบคุมชิวฮาร์ท ข้อมูลจะต้องมีการแจกแจงแบบปกติ จากการทดลองโดยใช้ผลิตภัณฑ์ไส้กรอกจำนวน 30 ตัวอย่าง นำมาทดสอบการแจกแจงแบบปกติแสดงดังนี้

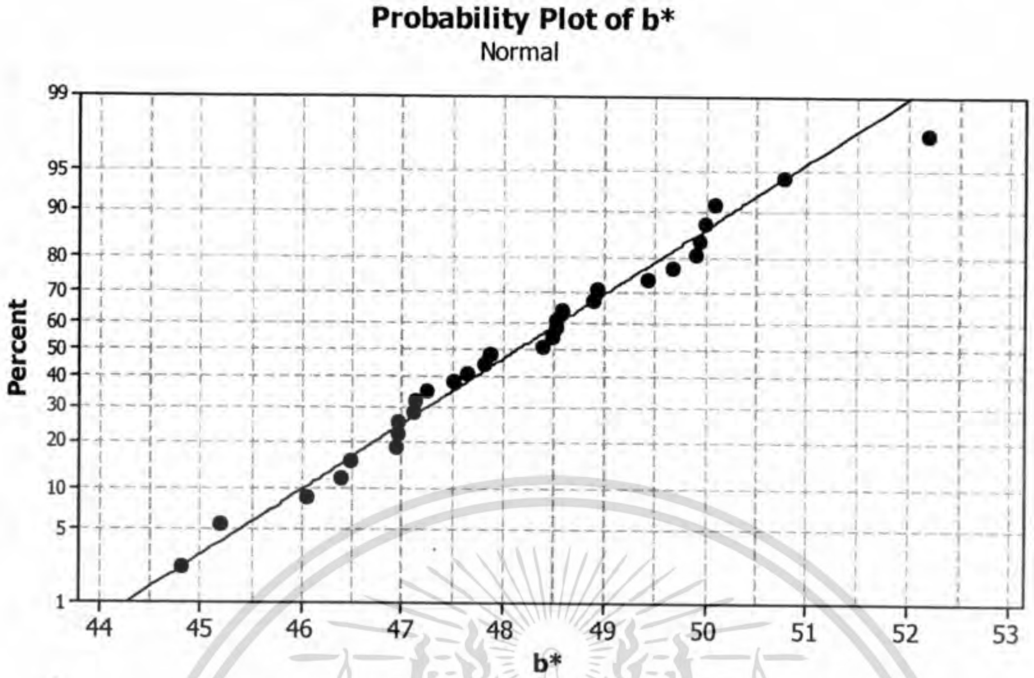


ภาพที่ 4.1 กราฟแสดงการทดสอบการแจกแจงแบบปกติของค่า L*



ภาพที่ 4.2 กราฟแสดงการทดสอบการแจกแจงแบบปกติของค่า a*

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

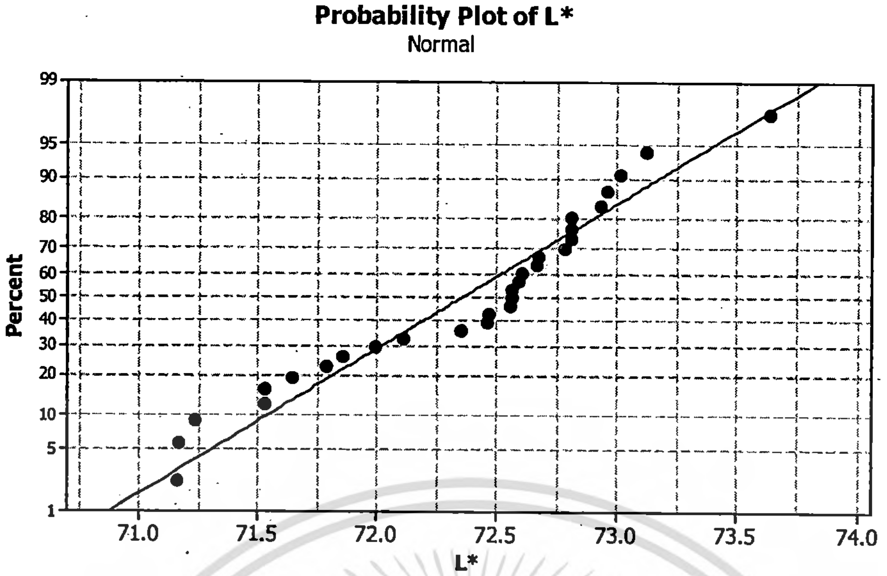


ภาพที่ 4.3 กราฟแสดงการทดสอบการแจกแจงแบบปกติของค่า b*

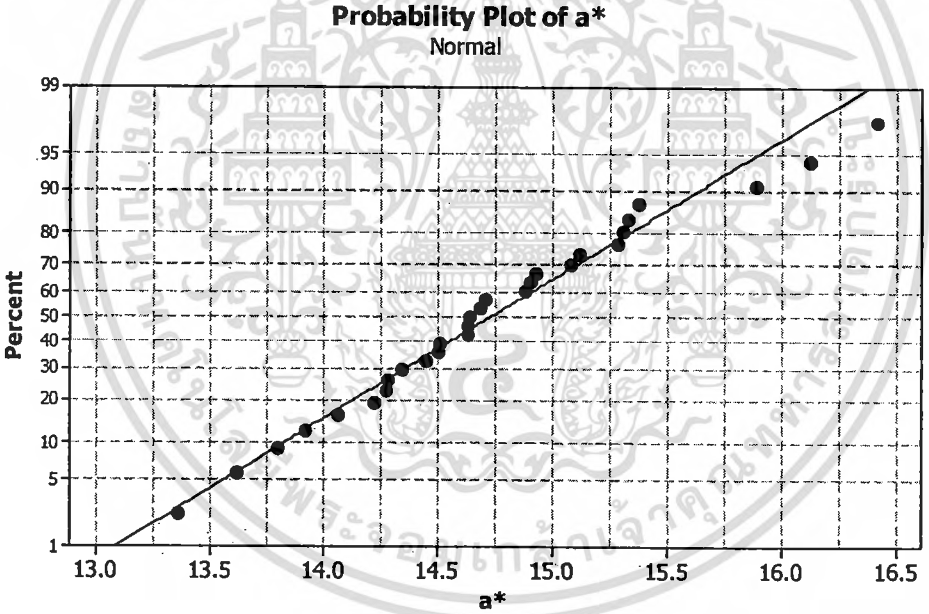
จากกราฟภาพที่ 4.1 4.2 และ 4.3 แสดงการทดสอบการแจกแจงแบบปกติของทั้ง 3 ค่า คือ L* a* และ b* กราฟภาพที่ 4.2 และ 4.3 มีลักษณะเป็นเส้นตรง ไม่พบสิ่งปกติอย่างชัดเจน สามารถนำข้อมูลไปใช้ในการสร้างแผนภูมิควบคุมได้แต่ในภาพที่ 4.1 ค่า L* พบว่ามีค่าที่ผิดปกติ คือ ตัวอย่างที่ 1 เมื่อตรวจสอบกับตัวอย่างที่ใช้ในการทดลอง พบว่าตัวอย่างมีสีของไส้กรอกไม่สม่ำเสมอทั่วทั้งชิ้นแสดงดังภาพที่ 4.4 ดังนั้นจึงทำการตัดค่าที่ผิดปกติออกคือค่าของตัวอย่างที่ 1 และทำการทดสอบการแจกแจงแบบปกติแสดงดังภาพที่ 4.5 4.6 และ 4.7

ภาพที่ 4.4 แสดงลักษณะไส้กรอกที่มีความผิดปกติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

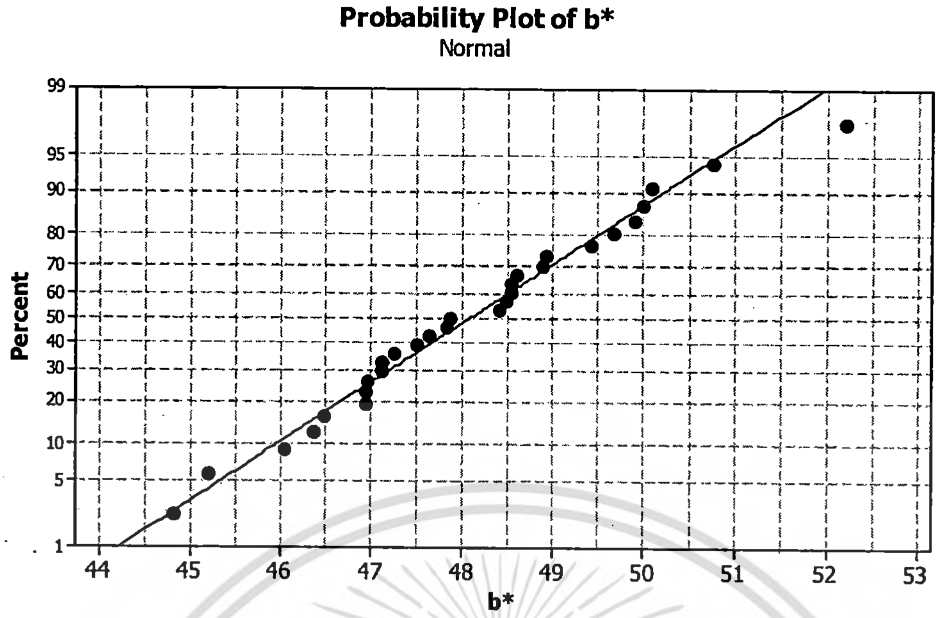


ภาพที่ 4.5 กราฟแสดงการทดสอบการแจกแจงแบบปกติของค่า L*



ภาพที่ 4.6 กราฟแสดงการทดสอบการแจกแจงแบบปกติของค่า a*

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.7 กราฟแสดงการทดสอบการแจกแจงแบบปกติของค่า b*

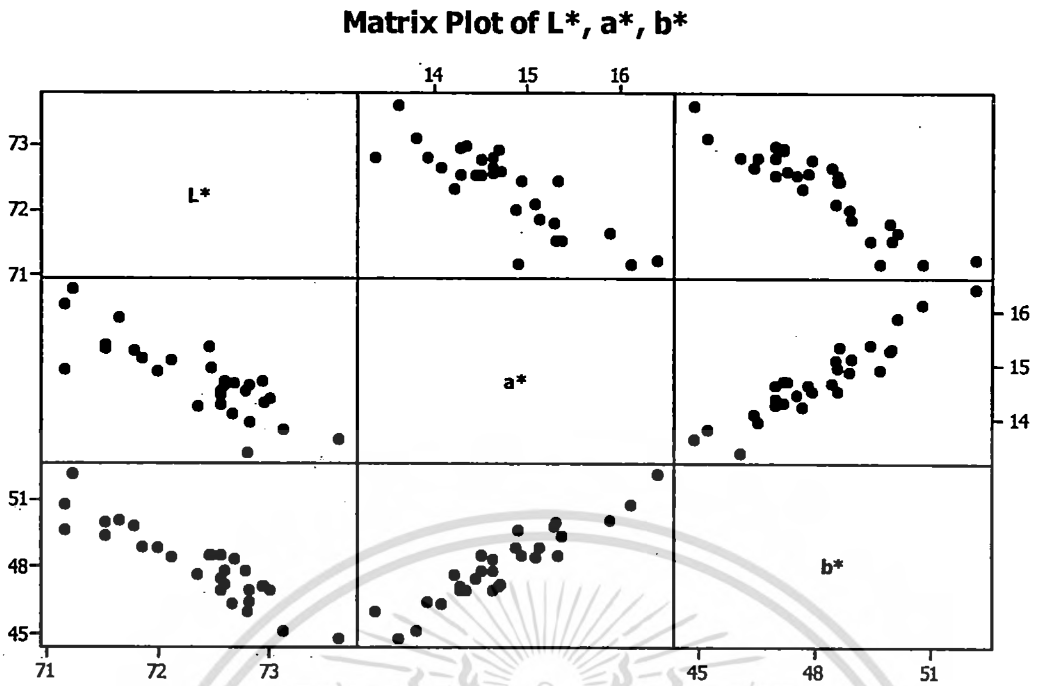
หลังจากการตัดค่าที่ผิดปกติออกและทำการทดสอบการแจกแจงแบบปกติ ดังภาพที่ 4.5 4.6 และ 4.7 จากกราฟค่า L* a* และ b* ไม่พบสิ่งผิดปกติอย่างชัดเจน สามารถสมมติฐานได้ว่าข้อมูลชุดนี้มีการแจกแจงแบบปกติ

4.2.1.2 การตรวจสอบสหสัมพันธ์ (Correlation)

ตรวจสอบสหสัมพันธ์โดยการใช้ Matrix plot และค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของเพียร์สันจากการใช้ Matrix plot ดังภาพที่ 4.8 แสดงให้เห็นว่าค่า L* กับค่า a* และ L* กับค่า b* มีความสัมพันธ์กัน โดยค่า a* กับ b* มีความสัมพันธ์กันทิศทางตรงกันข้ามกับความสัมพันธ์ของ L* กับค่า a* และ L* กับค่า b* และจากค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของเพียร์สันดังตารางที่ 4.9 พบว่าค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของ L* กับ a* มีค่าเท่ากับ -0.827 มีค่าเป็นลบแสดงว่ามีความสัมพันธ์ในทิศทางตรงกันข้ามและมีความสัมพันธ์กันมาก เนื่องจากมีค่าเข้าใกล้ -1 ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของ L* กับ b* มีค่าเท่ากับ -0.912 มีความสัมพันธ์เหมือนกับ L* กับ a* และค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของ a* กับ b* มีค่า 0.932 มีค่าเป็นบวกแสดงว่ามีความสัมพันธ์ในทิศทางเดียวกันและมีความสัมพันธ์กันมาก เนื่องจากมีค่าเข้าใกล้ 1

จากผลการตรวจสอบสหสัมพันธ์สามารถอธิบายได้ว่าข้อมูลชุดนี้มีสหสัมพันธ์กัน จึงไม่สามารถใช้แผนภูมิควบคุมชิวฮาร์ทได้เนื่องจากไม่อยู่ในเงื่อนไขของแผนภูมิควบคุมชิวฮาร์ทในเรื่องความเป็นอิสระ (Independent)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.8 Matrix Plot สำหรับ 29 ตัวอย่าง ของค่า L* a* และ b*

ตารางที่ 4.9 แสดงค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของเพียร์สัน

Correlation Matrix

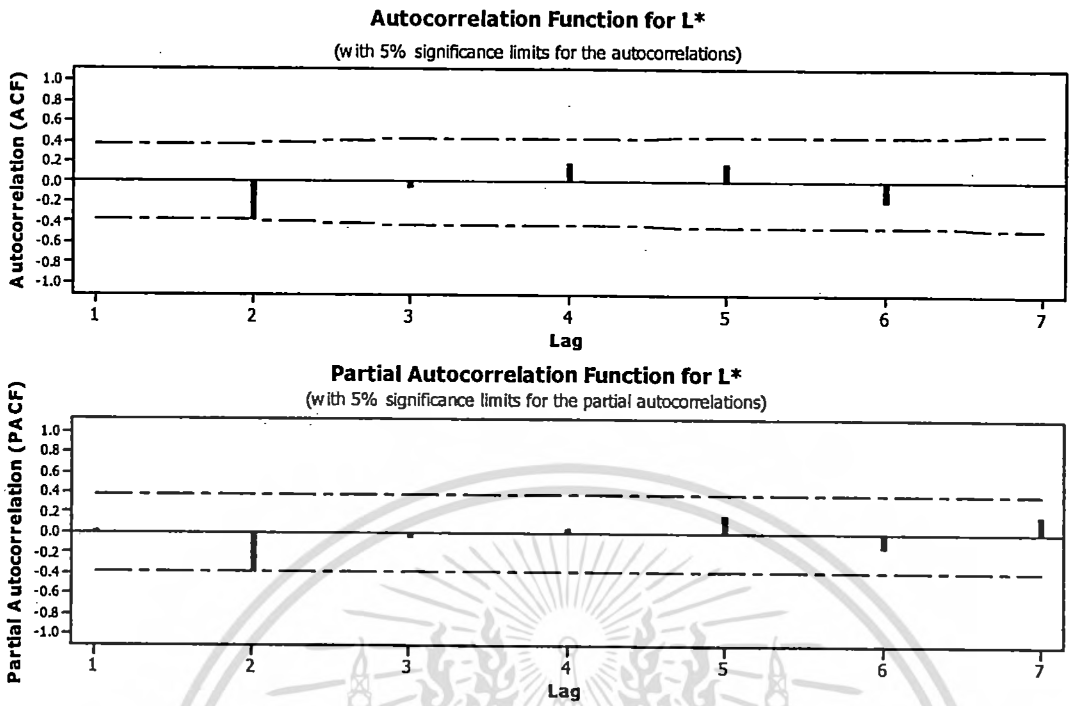
	L*	a*
a*	-0.827	
b*	-0.912	0.932

Cell Contents : Pearson correlation

4.2.1.3 การตรวจสอบอัตตสหสัมพันธ์ (Autocorrelation)

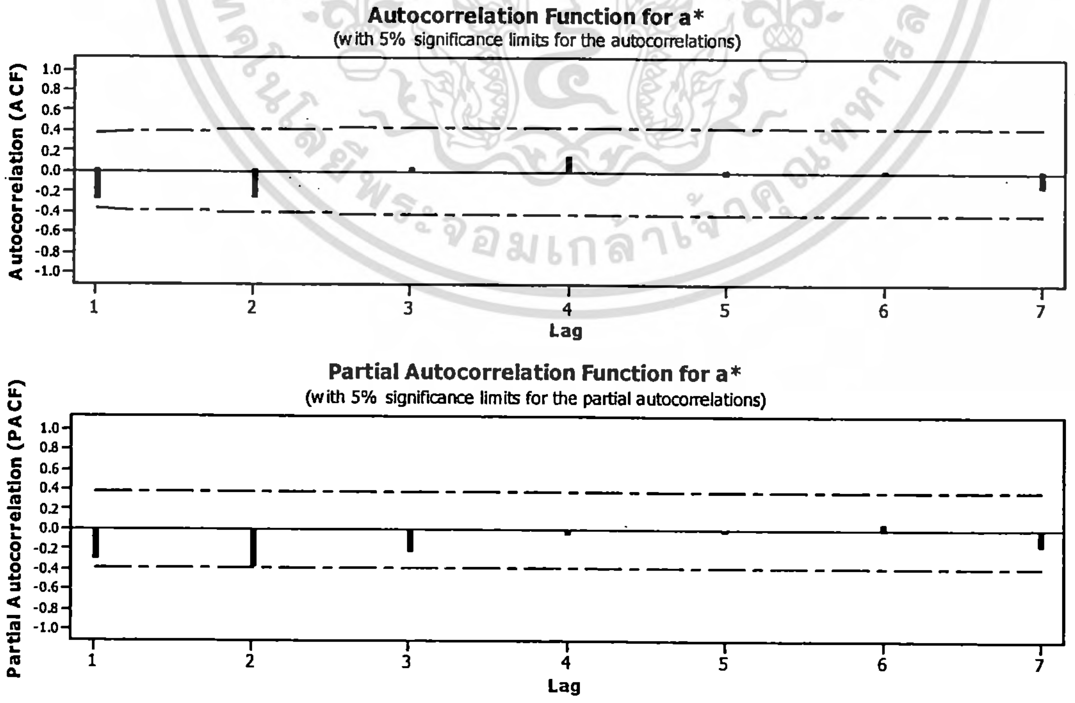
จากการทดลองโดยใช้ผลิตภัณฑ์ไส้กรอกจำนวน 29 ตัวอย่าง นำมาตรวจสอบความความสัมพันธ์ของกระบวนการโดยพิจารณาจากกราฟฟังก์ชันอัตตสหสัมพันธ์ (Autocorrelation function : ACF) และฟังก์ชันอัตตสหสัมพันธ์บางส่วน (Partial Autocorrelation function : PACF) เนื่องจากถ้ากระบวนการมีความสัมพันธ์กันจะไม่สามารถใช้แผนภูมิควบคุมชิวฮาร์ทได้จะต้องใช้แบบจำลอง ARIMA (Autoregressive integrated moving average model) ผลการตรวจสอบแสดงดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.9 กราฟฟังก์ชันอัตตสหสัมพันธ์และฟังก์ชันอัตตสหสัมพันธ์บางส่วนของค่า L*

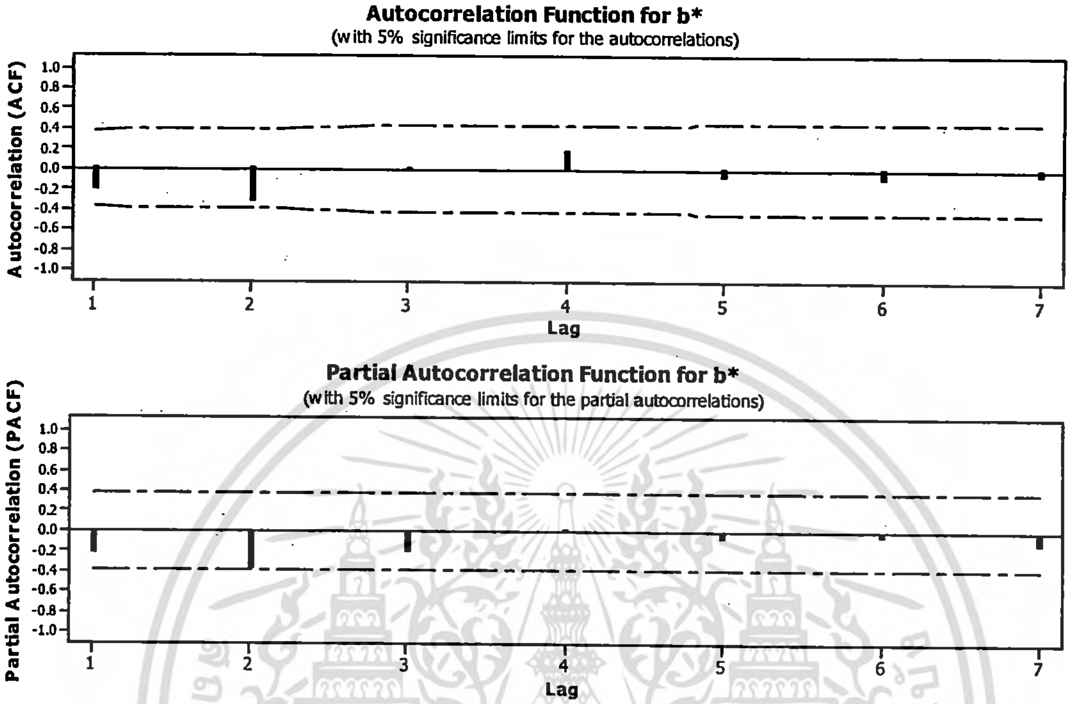
จากภาพที่ 4.9 เมื่อพิจารณากราฟฟังก์ชันอัตตสหสัมพันธ์และฟังก์ชันอัตตสหสัมพันธ์บางส่วนของค่า L* พบว่าค่าตกอยู่ในขอบเขตความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ทุกค่า lag แสดงว่าข้อมูลไม่มีความสัมพันธ์กัน



ภาพที่ 4.10 กราฟฟังก์ชันอัตตสหสัมพันธ์และฟังก์ชันอัตตสหสัมพันธ์บางส่วนของค่า a*

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากภาพที่ 4.10 เมื่อพิจารณากราฟฟังก์ชันอัตตสหสัมพันธ์และฟังก์ชันอัตตสหสัมพันธ์บางส่วนของค่า a* พบว่าค่าตกอยู่ในขอบเขตความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ทุกค่า lag แสดงว่าข้อมูลไม่มีความสัมพันธ์กัน



ภาพที่ 4.11 กราฟฟังก์ชันอัตตสหสัมพันธ์และฟังก์ชันอัตตสหสัมพันธ์บางส่วนของค่า b*

จากภาพที่ 4.11 เมื่อพิจารณากราฟฟังก์ชันอัตตสหสัมพันธ์และฟังก์ชันอัตตสหสัมพันธ์บางส่วนของค่า b* พบว่าค่าตกอยู่ในขอบเขตความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ทุกค่า lag แสดงว่าข้อมูลไม่มีความสัมพันธ์กัน

4.2.2 การควบคุมกระบวนการด้วยวิธีการเชิงสถิติ

หลังจากการศึกษาลักษณะของข้อมูล แสดงให้เห็นว่าข้อมูลไม่สามารถสร้างแผนภูมิควบคุมชิวฮาร์ทได้เนื่องจากข้อมูลมีลักษณะไม่เป็นอิสระกัน จึงเสนอแนวทางการควบคุมกระบวนการโดยใช้แผนภูมิควบคุมโฮเทลลิ่งทีสแควร์ในการตรวจจับ ถ้ามีค่าสังเกตที่ออกนอกการควบคุม จึงใช้แผนภูมิควบคุมสำหรับตัวอย่างเชิงเดี่ยวเพื่อวิเคราะห์ว่าค่า L* a* หรือ b* ที่ออกนอกการควบคุม และนำไปค้นหาปัจจัยที่มีผลกระทบต่อไส้กรอกที่ออกนอกการควบคุม

4.2.2.1 การทดสอบแผนภูมิควบคุม

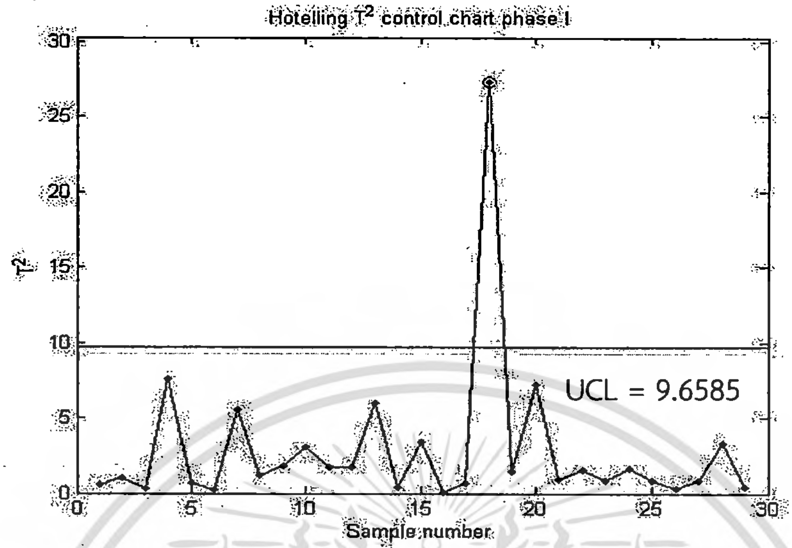
ทดลองใช้แผนภูมิควบคุมโดยใช้แนวทางที่นำเสนอไปดังกล่าวตรวจจับตัวอย่างในกรณีที่มีสิ่งผิดปกติ โดยใช้ผลิตภัณฑ์ไส้กรอกที่มีลักษณะปกติจำนวน 28 ตัวอย่างโดยแบ่งออกเป็น 2 กรณี คือ การทดสอบ Spike และการทดสอบ Mean shift

1) การทดสอบ Spike

ใช้ผลิตภัณฑ์ไส้กรอกที่มีลักษณะปกติจำนวน 28 ตัวอย่างดังภาพที่ 3.7 และผลิตภัณฑ์ไส้กรอกที่ผิดปกติจำนวน 1 ตัวอย่างดังภาพที่ 3.8 รวมทั้งหมด 29 ตัวอย่าง (ข้อมูลที่ใช้

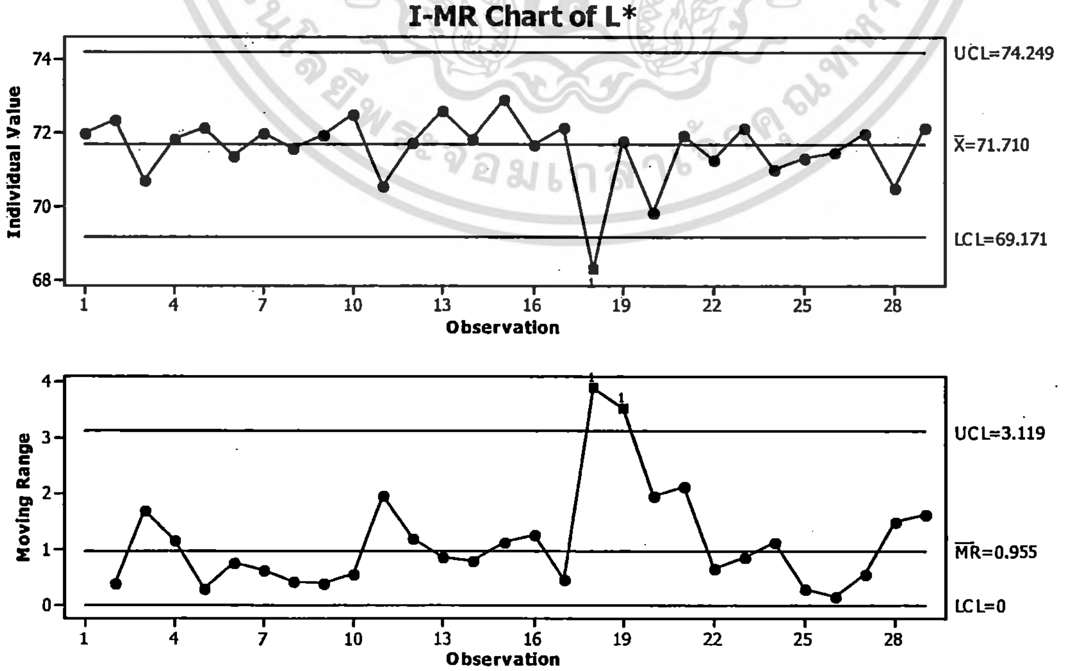
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำแผนภูมิควบคุมแสดงดังภาคผนวกตารางที่ ก.15) ใช้โปรแกรม MATLAB สร้างแผนภูมิควบคุมโฮเทลลิ่งทีสแควร์แสดงดังภาพที่ 4.12 ใช้ค่าระดับนัยสำคัญ = 0.01



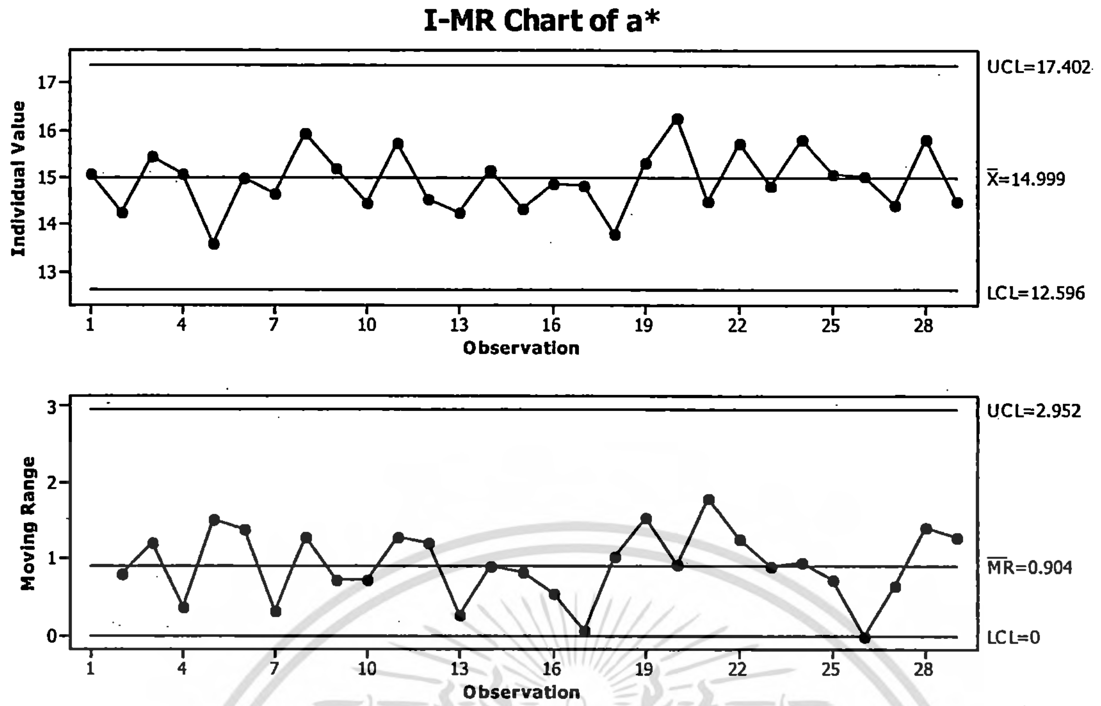
ภาพที่ 4.12 แสดงแผนภูมิควบคุมโฮเทลลิ่งทีสแควร์ที่ใช้ในการทดสอบ Spike

จากภาพที่ 4.12 แผนภูมิควบคุมโฮเทลลิ่งทีสแควร์มีขีดจำกัดควบคุมบน (UCL) เท่ากับ 9.6585 พบว่ามีจุดตกอยู่นอก UCL คือ ตัวอย่างที่ 18 เมื่อทำการวิเคราะห์สาเหตุพบว่าเกิดจากการที่ใส่ตัวอย่างที่ผิดปกติลงไปในการทดสอบ แสดงให้เห็นว่าแผนภูมิควบคุมโฮเทลลิ่งทีสแควร์สามารถใช้ตรวจจับในการทดสอบ Spike ได้ แต่ไม่สามารถบ่งบอกได้ว่าค่า L* a* หรือ b* ที่ออกนอกการควบคุม ดังนั้นจึงต้องใช้แผนภูมิควบคุมตัวอย่างเดี่ยวแสดงดังภาพที่ 4.13 4.14 และ 4.15

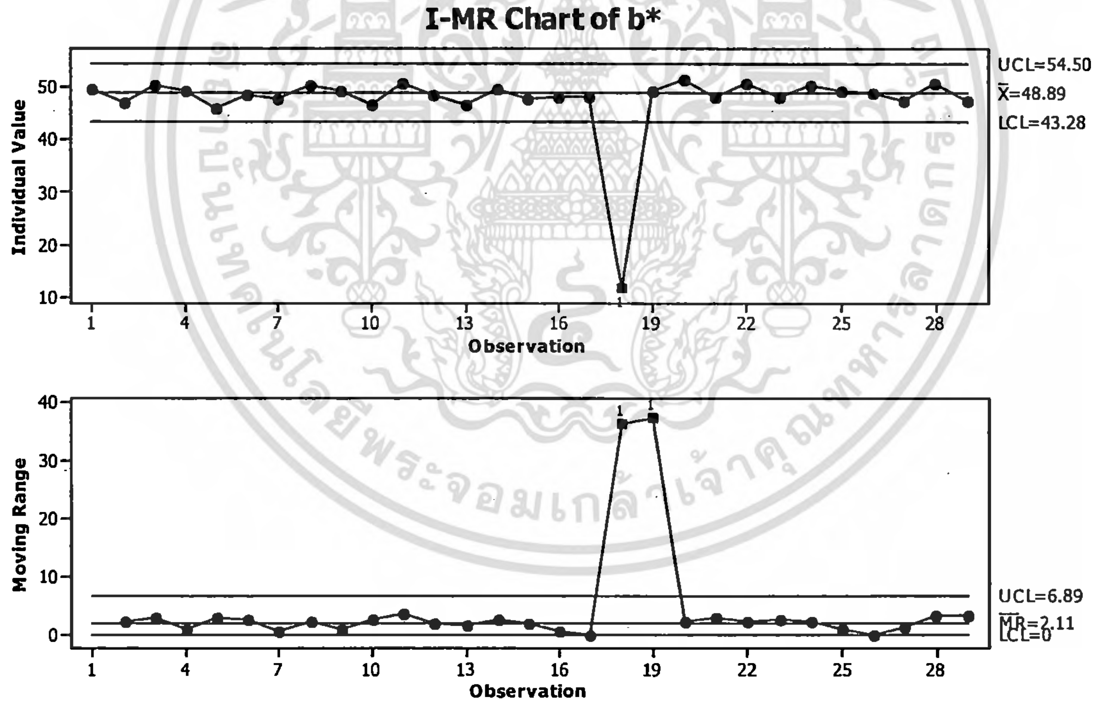


ภาพที่ 4.13 แสดงแผนภูมิควบคุมสำหรับตัวอย่างเดี่ยวที่ใช้ในการทดสอบ Spike ของค่า L*

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.14 แสดงแผนภูมิควบคุมสำหรับตัวอย่างเดี่ยวที่ใช้ในการทดสอบ Spike ของค่า a*



ภาพที่ 4.15 แสดงแผนภูมิควบคุมสำหรับตัวอย่างเดี่ยวที่ใช้ในการทดสอบ Spike ของค่า b*

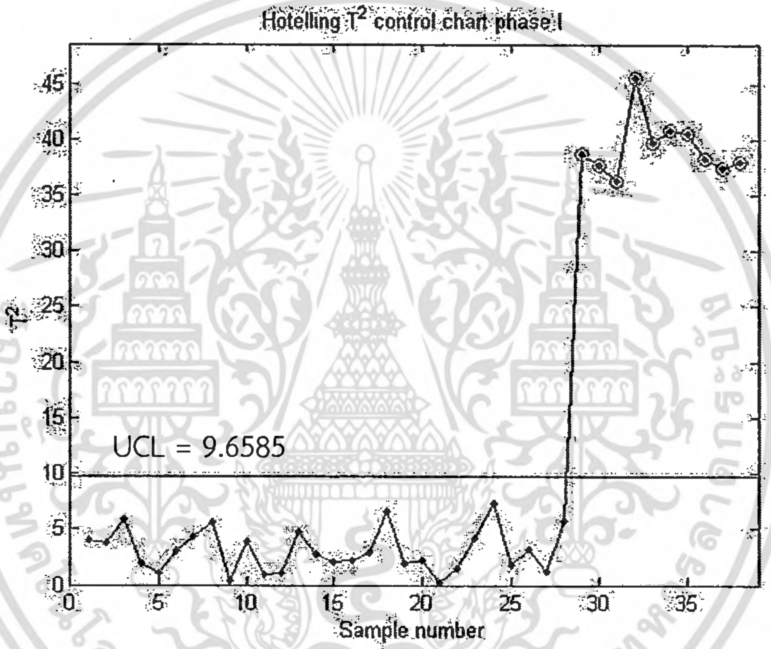
จากนั้นใช้แผนภูมิควบคุมสำหรับตัวอย่างเดี่ยวโดยใช้โปรแกรม MINITAB 16 ในการวิเคราะห์ว่าสาเหตุที่ออกนอกการควบคุมเกิดจากค่า L* a* หรือ b* ดังภาพที่ 4.13 4.14 และ 4.15 จากภาพที่ 4.13 แสดงแผนภูมิควบคุมตัวอย่างเดี่ยวของค่า L* พบว่าตัวอย่างที่ 18 ออกนอกขีดจำกัดการควบคุมล่าง ภาพที่ 4.14 แสดงแผนภูมิควบคุมตัวอย่างเดี่ยวของค่า a* ไม่พบค่าที่ออกนอกการควบคุม และภาพที่ 4.15 แสดงแผนภูมิควบคุมตัวอย่างเดี่ยวของค่า b* พบว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวอย่างที่ 18 ออกนอกขีดจำกัดการควบคุมล่าง จากการใช้แผนภูมิควบคุมตัวอย่างเดี่ยวประกอบกับการใช้แผนภูมิโฮเทลลิ่งทีสแควร์พบว่าสิ่งผิดปกติเกิดที่ตัวอย่างที่ 18 สามารถวิเคราะห์ได้ว่าสิ่งผิดปกติที่เกิดขึ้นเกิดจากค่า L* มีค่าต่ำกว่าขีดจำกัดการควบคุมล่างแสดงให้เห็นว่าตัวอย่างที่ผิดปกตินั้นมีความสว่างน้อยกว่าตัวอย่างที่ปกติ และค่า b* มีค่าต่ำกว่าขีดจำกัดการควบคุมล่างแสดงให้เห็นว่าตัวอย่างที่ผิดปกติมีความเป็นสีเหลืองน้อยกว่าตัวอย่างที่ผิดปกติ

2) การทดสอบ Mean shift

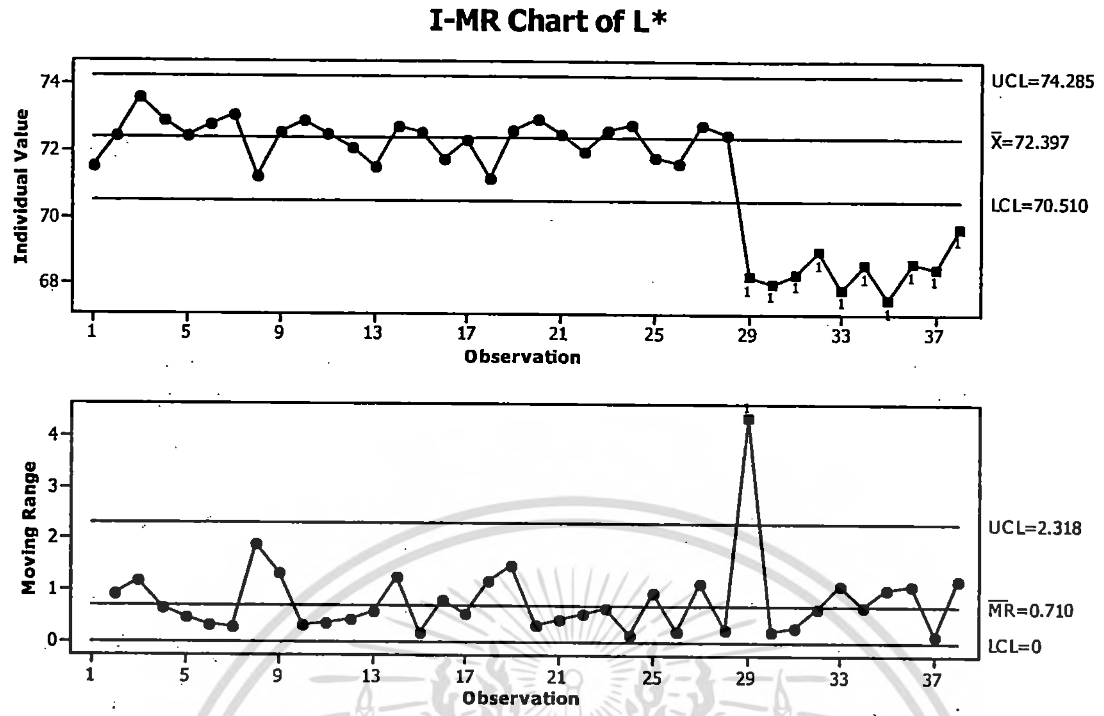
ใช้ผลิตภัณฑ์ไส้กรอกที่มีลักษณะปกติจำนวน 28 ตัวอย่างดังภาพที่ 3.7 และไส้กรอกที่มีลักษณะผิดปกติจำนวน 10 ตัวอย่างดังภาพที่ 3.8 รวมทั้งหมด 38 ตัวอย่าง (ข้อมูลที่ใช้ทำแผนภูมิควบคุมแสดงดังภาคผนวกตารางที่ ก.16) ใช้โปรแกรม MATLAB สร้างแผนภูมิควบคุมโฮเทลลิ่งทีสแควร์แสดงดังภาพที่ 4.16 ใช้ค่าระดับนัยสำคัญ = 0.01



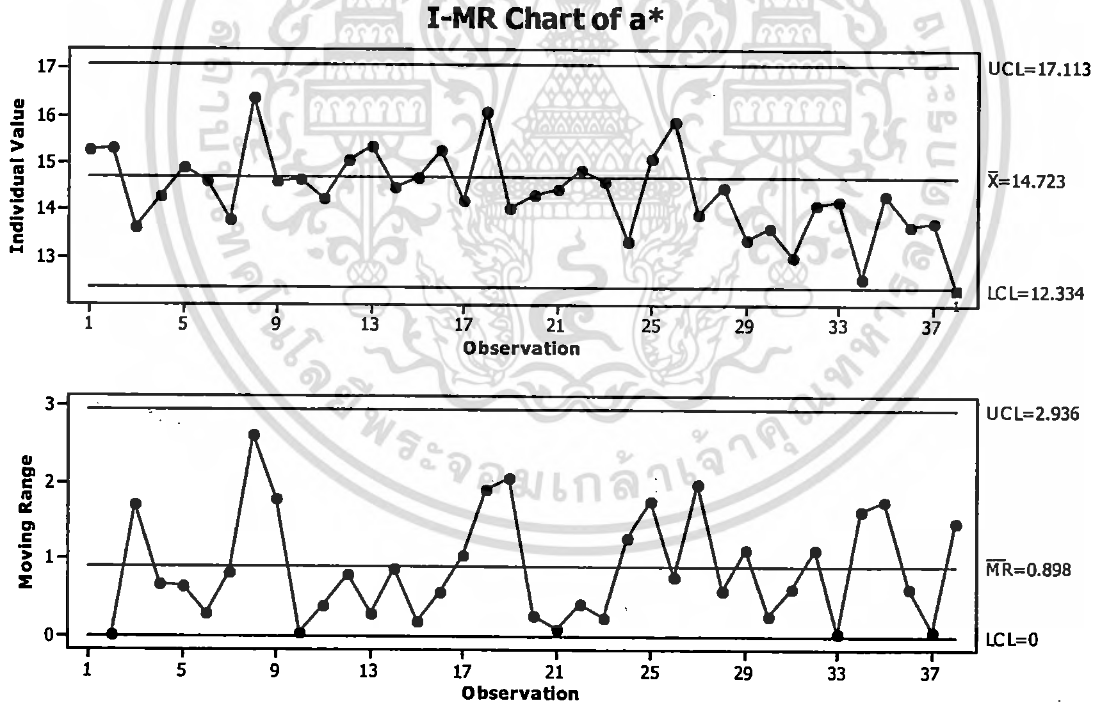
ภาพที่ 4.16 แสดงแผนภูมิควบคุมโฮเทลลิ่งทีสแควร์ที่ใช้ในการทดสอบ Mean shift

จากภาพที่ 4.16 พบว่าแผนภูมิควบคุมโฮเทลลิ่งทีสแควร์มีขีดจำกัดควบคุมบน (UCL) เท่ากับ 9.6585 พบว่ามีจุดตกอยู่นอก UCL คือ ตัวอย่างที่ 29 - 38 เมื่อทำการวิเคราะห์สาเหตุพบว่าเกิดจากการที่ใส่ตัวอย่างที่ผิดปกติลงไปในการทดสอบ แสดงให้เห็นว่าแผนภูมิควบคุมโฮเทลลิ่งทีสแควร์สามารถใช้ตรวจจับในการทดสอบ Mean shift ได้ จากนั้นใช้แผนภูมิควบคุมสำหรับตัวอย่างเดี่ยวในการวิเคราะห์ว่าสาเหตุที่ออกนอกการควบคุมเกิดจากค่า L* a* หรือ b* ดังภาพที่ 4.17 4.18 และ 4.19

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

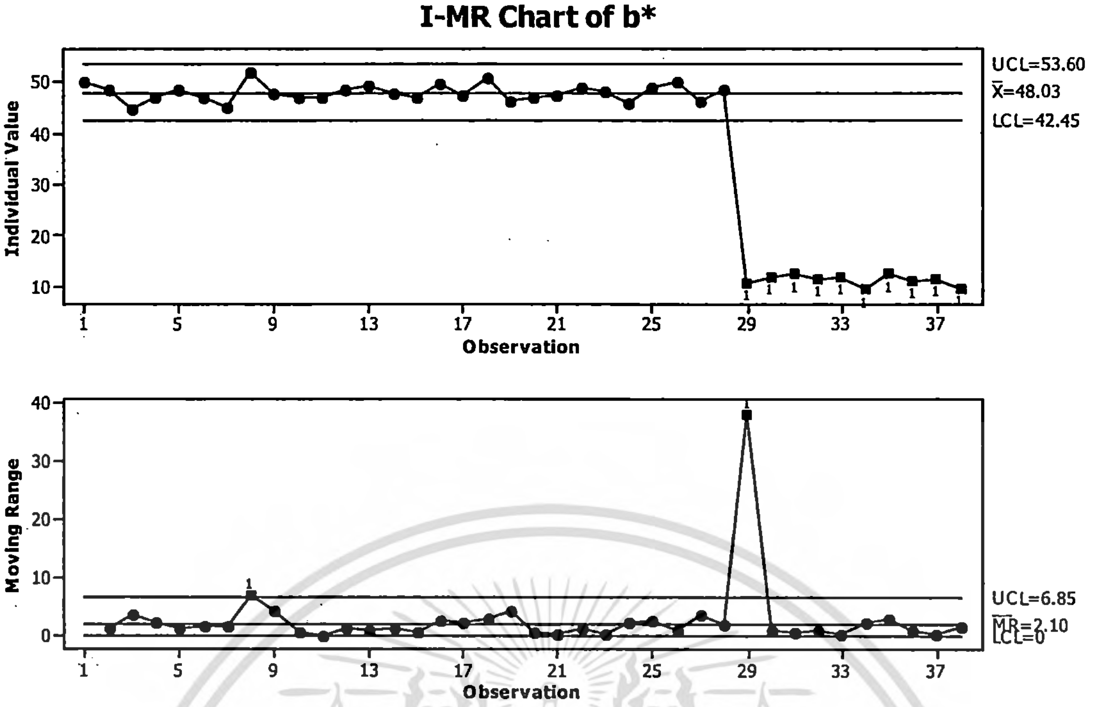


ภาพที่ 4.17 แสดงแผนภูมิควบคุมสำหรับตัวอย่างเดี่ยวที่ใช้ในการทดสอบ Mean shift ของค่า L*



ภาพที่ 4.18 แสดงแผนภูมิควบคุมสำหรับตัวอย่างเดี่ยวที่ใช้ในการทดสอบ Mean shift ของค่า a*

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



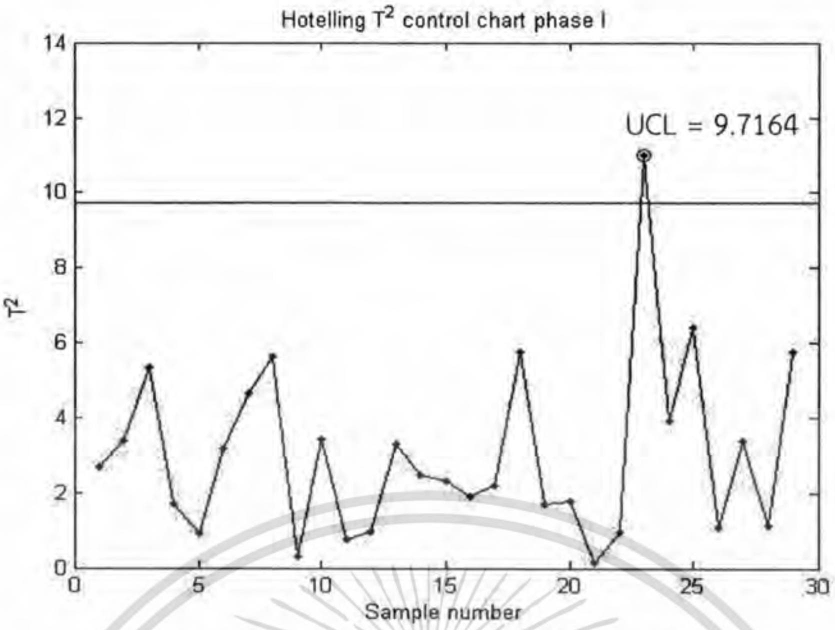
ภาพที่ 4.19 แสดงแผนภูมิควบคุมสำหรับตัวอย่างเดี่ยวที่ใช้ในการทดสอบ Mean shift ของค่า b*

จากภาพที่ 4.17 แสดงแผนภูมิควบคุมตัวอย่างเดี่ยวของค่า L* พบว่าตัวอย่างที่ 29 – 38 ออกนอกขีดจำกัดการควบคุมล่าง จากภาพที่ 4.18 แสดงแผนภูมิควบคุมตัวอย่างเดี่ยวของค่า a* พบว่าตัวอย่างที่ 38 ออกนอกการควบคุมล่าง และภาพที่ 4.19 แสดงแผนภูมิควบคุมตัวอย่างเดี่ยวของค่า b* พบว่าตัวอย่างที่ 29 – 38 ออกนอกขีดจำกัดการควบคุมล่าง จากการใช้แผนภูมิควบคุมตัวอย่างเดี่ยวประกอบกับการใช้แผนภูมิโฮเทลลิ่งทีสแควร์ สามารถวิเคราะห์ได้ว่าสิ่งผิดปกติที่เกิดขึ้นเกิดจากค่า L* มีค่าต่ำกว่าขีดจำกัดการควบคุมล่างแสดงให้เห็นว่าตัวอย่างที่ผิดปกตินั้นมีความสว่างน้อยกว่าตัวอย่างที่ปกติ และค่า b* มีค่าต่ำกว่าขีดจำกัดการควบคุมล่างแสดงให้เห็นว่าตัวอย่างที่ผิดปกติมีความเป็นสีเหลืองน้อยกว่าตัวอย่างที่ผิดปกติ ซึ่งจากการวิเคราะห์ดังกล่าวเมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างที่นำมาใช้เป็นสิ่งผิดปกติซึ่งมีลักษณะเป็นสีแดงพบว่าแผนภูมิควบคุมสามารถบ่งบอกได้ถูกต้อง

4.2.2.2 ตัวอย่างการใช้งาน

หลังจากที่ได้ทำการทดลองใช้แผนภูมิควบคุมในการทดสอบ Spike และ Mean shift พบว่าแผนภูมิควบคุมใช้ในการตรวจจับได้ ในขั้นตอนนี้จึงทำการทดลองโดยใช้แผนภูมิควบคุมกับตัวอย่างไส้กรอกที่ไม่มีสิ่งผิดปกติอย่างชัดเจน โดยใช้ตัวอย่างผลิตภัณฑ์ดังภาพที่ 3.7 จำนวน 29 ตัวอย่าง ที่มาจากลอตเดียวกัน (ข้อมูลที่ใช้ในการทดลองแสดงในภาคผนวกตารางที่ ก.17) เพื่อทดสอบว่าข้อมูลสามารถตรวจจับสิ่งผิดปกติกับข้อมูลที่มาจากกระบวนการผลิตเดียวกันได้หรือไม่ ใช้ค่าระดับนัยสำคัญ = 0.01

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

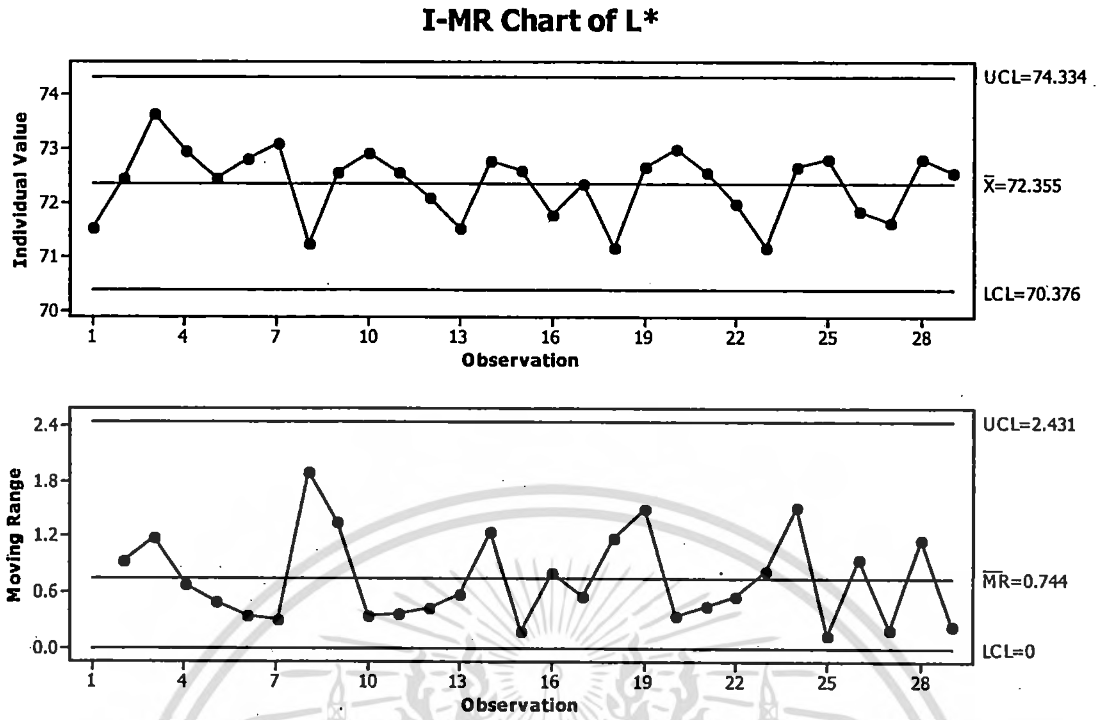


ภาพที่ 4.20 แสดงแผนภูมิโฮเทลลิ่งทีสแควร์

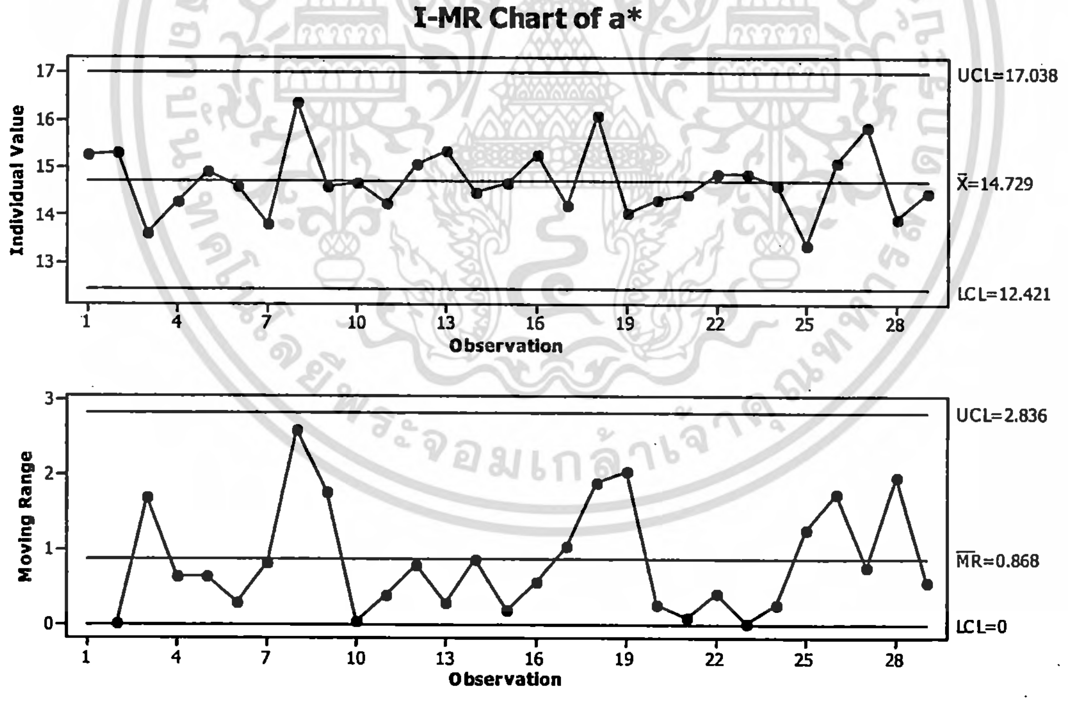
จากภาพที่ 4.20 พบว่าแผนภูมิโฮเทลลิ่งทีสแควร์มีขีดจำกัดควบคุมบน (UCL) เท่ากับ 9.7164 พบว่ามีจุดตกอยู่นอก UCL คือ ตัวอย่างที่ 23 เมื่อทำการวิเคราะห์สาเหตุที่ตัวอย่างที่ 23 ออกนอกการควบคุมพบว่าตัวอย่างไส้กรอกมีสีไม่สม่ำเสมอกันดังภาพที่ 4.21 แสดงให้เห็นว่าแผนภูมิโฮเทลลิ่งทีสแควร์สามารถตรวจจับสิ่งผิดปกติได้ จากนั้นใช้แผนภูมิควบคุมสำหรับตัวอย่างเดี่ยวในการวิเคราะห์ว่าสาเหตุที่ออกนอกการควบคุมเกิดจากค่า L* a* หรือ b* ดังภาพที่ 4.22 4.23 และ 4.24

ภาพที่ 4.21 ไส้กรอกที่มีความผิดปกติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

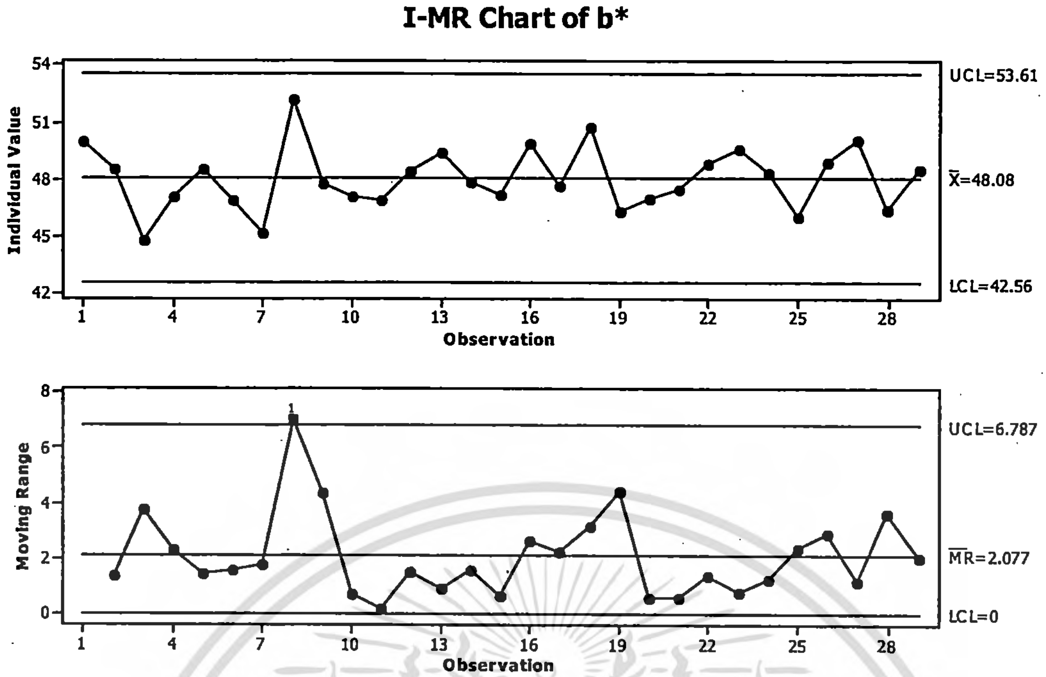


ภาพที่ 4.22 แสดงแผนภูมิควบคุมสำหรับตัวอย่างเดี่ยวของค่า L*



ภาพที่ 4.23 แสดงแผนภูมิควบคุมสำหรับตัวอย่างเดี่ยวของค่า a*

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.24 แสดงแผนภูมิควบคุมสำหรับตัวอย่างเดี่ยวของค่า b*

จากภาพที่ 4.22 4.23 และ 4.24 เมื่อทำการวิเคราะห์พบว่าไม่มีค่าใดที่ออกนอกการควบคุม อาจจะเกิดจากการที่แผนภูมิควบคุมสำหรับตัวอย่างเดี่ยวมีความไวน้อยกว่าแผนภูมิโฮเทลลิ่งทีสแควร์ จึงไม่สามารถตรวจจับสิ่งผิดปกติที่เกิดขึ้นเพียงเล็กน้อยได้

4.2.3 การใช้แผนภูมิควบคุมกับผลิตภัณฑ์ไส้กรอก

จากการใช้ระบบ L*a*b* ในการวัดสีของผลิตภัณฑ์ไส้กรอก เมื่อแผนภูมิควบคุมตรวจจับได้ว่าค่า L* a* หรือ b* ออกนอกการควบคุม สามารถแปลความหมายของค่า L* a* หรือ b* ดังตารางที่ 4.10 เพื่อนำไปใช้ในการปรับปรุงกระบวนการว่ากระบวนการมีความผิดปกติอย่างไรและปัจจัยใดที่ควรปรับปรุง (ชัยณรงค์ คันธพนิต, 2529 ; เยาวลักษณ์ สุรพันธพิศิษฐ์, 2536)

ตารางที่ 4.10 แสดงลักษณะการใช้แผนภูมิควบคุมกับผลิตภัณฑ์ไส้กรอก

ค่า	ปัจจัยที่ควรตรวจสอบในกระบวนการ
L*	- ถ้าค่า L* มากสีของผลิตภัณฑ์ไส้กรอกมีความสว่างมากค่อนไปทางสีขาว ซึ่งอาจแสดงให้เห็นว่าไส้กรอกมีสีซีด - ถ้าค่า L* น้อยสีของผลิตภัณฑ์ไส้กรอกมีความสว่างน้อยค่อนไปทางดำ ซึ่งถ้ามีลักษณะดำมาก ไส้กรอกอาจเกิดความผิดปกติ เกิดการเน่าเสีย เป็นต้น
a*	- ถ้าผลิตภัณฑ์มีสีแดงมาก ให้ลดปริมาณสารไนไตรท์ หรือไนเตรท - ถ้าผลิตภัณฑ์มีสีเขียว อาจเกิดจาก แบคทีเรีย ออกซิเจน สารเคมี หรือแสง
b*	- ถ้าต้องการให้มีสีชมพู ให้เพิ่มปริมาณสารไนไตรท์ หรือไนเตรท อาจเกิดจากแบคทีเรีย ออกซิเจน สารเคมี หรือ แสง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.4 แนวทางการนำไปใช้ประโยชน์

ในกระบวนการผลิตไส้กรอกหลังจากที่ผ่านขั้นตอนการผลิตไส้กรอกการบดเนื้อ การผสม การสับนวด การทำอิมัลชัน การผูกไส้ การทำให้สุก หลังจากนั้นจะทำการบรรจุลงในถุงซึ่งหลังจากผ่านขั้นตอนการบรรจุจะทำการตรวจสอบคุณภาพของผลิตภัณฑ์ไส้กรอกเพื่อจำลองสถานการณ์ของลักษณะการมองเห็นผลิตภัณฑ์ของผู้บริโภคเมื่อมาเลือกซื้อผลิตภัณฑ์ ควบคุมไม่ให้ของเสียส่งไปถึงผู้บริโภค และเป็นหลักประกันให้กับผู้บริโภคมั่นใจในคุณภาพของผลิตภัณฑ์ซึ่งในปัจจุบันขั้นตอนดังกล่าวใช้สายตามนุษย์ในการตรวจสอบ โดยจะใช้แนวทางที่ได้ศึกษาในงานวิจัยครั้งนี้มาแก้ปัญหาดังกล่าวแสดงแนวทางดังภาพที่ 4.25 คือในขั้นตอนแรกจะทำการประมวลผลด้วยภาพ จากนั้นแปลงภาพเป็นข้อมูลให้อยู่ในระบบ L*a*b* และใช้วิธีการควบคุมกระบวนการเชิงสถิติ โดยการใช้แผนภูมิควบคุมโฮเทลลิ่งทีสแควร์ในการตรวจสอบเบื้องต้นว่ากระบวนการมีความผิดปกติหรือไม่ ถ้าพบว่ามีสิ่งผิดปกติเกิดขึ้นในกระบวนการจึงใช้แผนภูมิควบคุมสำหรับตัวอย่างเชิงเดี่ยวในการวิเคราะห์ว่าค่า L* a* หรือ b* ที่ออกนอกการควบคุม จากนั้นเมื่อทราบว่าค่าใดออกนอกการควบคุมจะทำการแปลความหมายของค่าที่ออกนอกการควบคุมว่าควรปรับปรุงสิ่งใดในกระบวนการ ซึ่งวิธีการดังกล่าวจะช่วยตรวจสอบว่าเกิดการเปลี่ยนแปลงในกระบวนการหรือไม่ จากนั้นจึงทำการหาสาเหตุของความผิดปกติของกระบวนการเพื่อการปรับปรุงกระบวนการในอนาคตต่อไป

ภาพที่ 4.25 แสดงแนวทางการควบคุมคุณภาพสีของไส้กรอก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

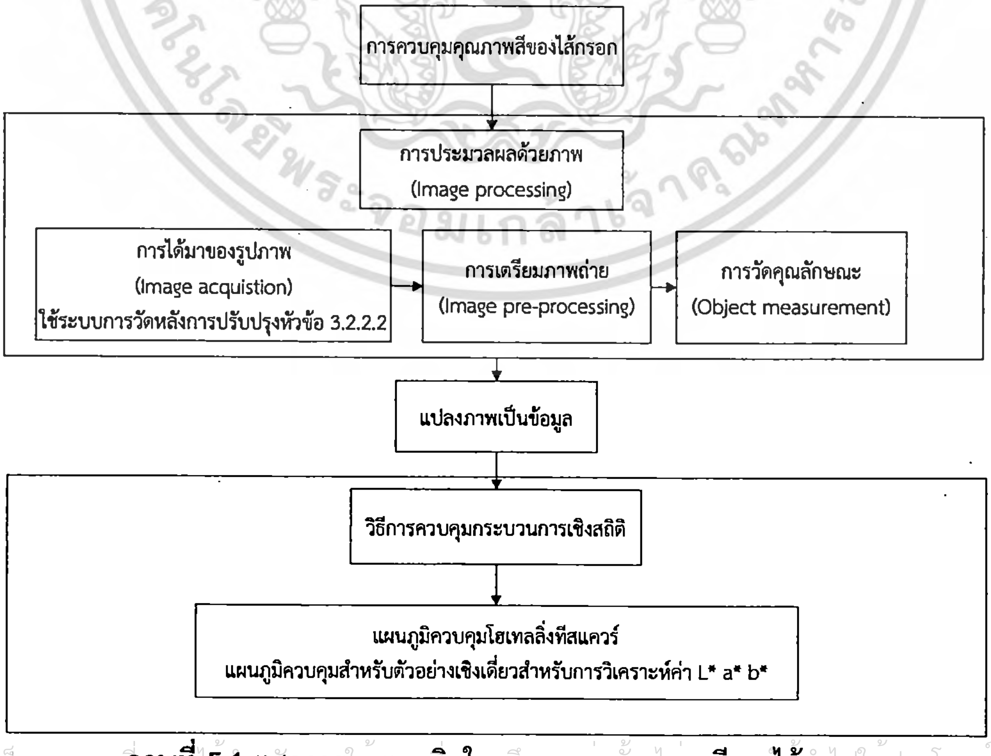
บทที่ 5
สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

ในการศึกษาครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาวิธีการประเมินผลคุณภาพสีของผลิตภัณฑ์อาหารโดยใช้วิธีการประมวลผลภาพ (Image processing) ร่วมกับวิธีการเชิงสถิติในการควบคุมคุณภาพสีของไส้กรอกเพื่อการควบคุมกระบวนการและเพื่อสร้างต้นแบบเครื่องมือสำหรับการตรวจสอบคุณภาพสีของผลิตภัณฑ์อาหาร

5.1.1 ศึกษาวิธีการประเมินผลคุณภาพสีของผลิตภัณฑ์อาหารโดยใช้วิธีการประมวลผลภาพ (Image processing) ร่วมกับวิธีการเชิงสถิติในการควบคุมคุณภาพสีของไส้กรอกเพื่อการควบคุมกระบวนการหลังจากทำการสร้างต้นแบบเครื่องมือ จากนั้นทำการศึกษาคุณลักษณะของข้อมูล พบว่าข้อมูลไม่เป็นไปตามเงื่อนไขของแผนภูมิควบคุมชิวฮาร์ท เนื่องจากค่า L* a* และ b* มีสหสัมพันธ์กันจึงไม่สามารถใช้ในการควบคุมการประเมินผลสีของไส้กรอกได้ จึงเสนอวิธีการใช้แผนภูมิควบคุมโฮเทลลิ่งทีสแควร์ในการตรวจจับ ถ้ามีค่าสังเกตที่ออกนอกการควบคุมจึงใช้แผนภูมิควบคุมสำหรับตัวอย่างเชิงเดี่ยวเพื่อวิเคราะห์ว่าค่า L* a* หรือ b* ที่ออกนอกการควบคุม

จากนั้นใช้วิธีการประมวลผลด้วยภาพและวิธีการควบคุมกระบวนการเชิงสถิติในการควบคุมคุณภาพสีของไส้กรอกร่วมกัน แสดงกรอบแนวคิดดังภาพที่ 5.1 หลังจากเลือกระบบการวัดสีและแนวทางในการใช้แผนภูมิควบคุม จึงทำการทดลองใช้วิธีการประมวลผลด้วยภาพร่วมกับวิธีการควบคุมกระบวนการเชิงสถิติในการทดสอบความผิดปกติแบบ Spike และ Mean shift จากการทดลองใช้แผนภูมิควบคุมโฮเทลลิ่งทีสแควร์ร่วมกับการใช้แผนภูมิควบคุมสำหรับตัวอย่างเชิงเดี่ยวพบว่าสามารถตรวจจับได้



ภาพที่ 5.1 แสดงกรอบแนวคิดในการควบคุมคุณภาพสีของไส้กรอก

เอกสารนี้เป็นเอกสาร… ใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตัวอย่างการใช้งานกับผลิตภัณฑ์ไส้กรอกโดยใช้ตัวอย่างจากลอตและประเภทเดียวกัน พบว่าแผนภูมิควบคุมโฮเทลลิ่งทีสแควร์สามารถตรวจจับสิ่งผิดปกติได้ และเมื่อตรวจสอบกับตัวอย่างจริงพบว่าตัวอย่างไส้กรอกมีลักษณะสีที่ไม่เท่ากัน แต่เมื่อนำไปตรวจสอบโดยใช้แผนภูมิควบคุมสำหรับตัวอย่างเชิงเดี่ยวไม่พบสิ่งผิดปกติ แสดงให้เห็นว่าแผนภูมิควบคุมสำหรับตัวอย่างเชิงเดี่ยวมีความไวน้อยกว่าแผนภูมิควบคุมโฮเทลลิ่งทีสแควร์ ในกรณีที่ตัวอย่างเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยจึงไม่สามารถระบุได้อย่างชัดเจนว่า ค่า L* a* หรือ b* ที่ออกนอกการควบคุม

สำหรับแนวทางในการนำไปใช้ประโยชน์ คือการนำไปใช้ตรวจสอบคุณภาพของผลิตภัณฑ์ไส้กรอกหลังจากผ่านขั้นตอนการบรรจุ เพื่อจำลองสถานการณ์ของลักษณะการมองเห็นผลิตภัณฑ์ของผู้บริโภคเมื่อมาเลือกซื้อผลิตภัณฑ์ ควบคุมไม่ให้ของเสียส่งไปถึงผู้บริโภค และเป็นหลักประกันให้กับผู้บริโภคมั่นใจในคุณภาพของผลิตภัณฑ์ และทำให้เจ้าของกระบวนการสามารถตรวจสอบสาเหตุของความผิดปกติเพื่อการปรับปรุงกระบวนการในอนาคตต่อไปได้

5.1.2 เพื่อสร้างต้นแบบเครื่องมือสำหรับการตรวจสอบคุณภาพสีของผลิตภัณฑ์อาหาร เพื่อสร้างความเชื่อมั่นในการสร้างต้นแบบเครื่องมือจึงทำการศึกษาความสามารถในการวัดซ้ำและการวัดเหมือนของเครื่องมือวัดโดยทำการทดลองเปรียบเทียบระบบการวัดก่อนการปรับปรุงและหลังการปรับปรุงที่มีวิธีการได้มาของรูปภาพที่แตกต่างกัน จากผลการทดลองพบว่าระบบการวัดก่อนการปรับปรุงมีค่าสัดส่วนความแปรปรวนของ L* a* และ b* เท่ากับ 5.77% 5.17% และ 9.27% แสดงให้เห็นว่าระบบการวัดสามารถใช้ได้ แต่พนักงานวัดมีผลต่อค่าที่ได้จากการวัดมีความแตกต่างกันจึงทำการปรับปรุงระบบการวัดโดยการสร้างอุปกรณ์พบว่าสัดส่วนความแปรปรวนของค่า L* a* และ b* มีค่า 2.34% 0.17% และ 0.42% ตามลำดับซึ่งมีค่าน้อยกว่าระบบการวัดก่อนการปรับปรุง ดังนั้นจึงเลือกระบบการวัดหลังการปรับปรุงเนื่องจากเป็นวิธีการที่ดีที่สุด เพื่อสร้างความเชื่อมั่นในเครื่องมือวัดว่าค่าที่วัดได้จากเครื่องมือวัดมีความสามารถในการแบ่งแยกผลิตภัณฑ์

5.2 ข้อเสนอแนะ

ในการศึกษาขั้นต่อไปเสนอแนะดังต่อไปนี้

5.2.1 ทดลองใช้วิธีการควบคุมคุณภาพของตัวแปรพหุในแบบอื่นๆ เช่น Multivariate EWMA chart หรือ Multivariate CUSUM chart เป็นต้น ในกรณีต้องการทดสอบ Small shift

5.2.2 เปลี่ยนตัวอย่างผลิตภัณฑ์ที่นำมาใช้ในการทดลองที่ต้องใช้การควบคุมคุณภาพของสีที่มีความซับซ้อนมากขึ้น

5.2.3 ตรวจสอบลักษณะคุณภาพอื่นๆ เช่น ขนาด รูปร่าง เนื้อสัมผัส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม

กิติศักดิ์ พลอยพานิชเจริญ. 2553. **การวิเคราะห์ระบบการวัด MSA ประมวลผลด้วย Minitab 15.** กรุงเทพฯ : สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี

กระทรวงอุตสาหกรรม. 2547. **มาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชนไส้กรอกหมู มผช.330/2547.** สำนักงานมาตรฐานกระทรวงอุตสาหกรรม.

กรมส่งเสริมการส่งออก. **ข้อมูลการค้าและการส่งออก.** [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก : http://www.depthai.go.th/brขอมลabrการคาและbrการสงออก/สถานการณสงออกรายเดอน/tabid/297/Default.aspx.

กรมส่งเสริมอุตสาหกรรม. 2554. **อุตสาหกรรมแปรรูปเนื้อสัตว์ (ไส้กรอกจากเนื้อสุกร)** [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก : intranet.dip.go.th/doc/download/.../Industrial%20 Sausaqe.pdf.บริษัทศูนย์วิจัยไทยพาณิชย์จำกัด.

ชัยณรงค์ คันธพนิต. 2529. **วิทยาศาสตร์เนื้อสัตว์.** กรุงเทพฯ : วัฒนาพานิช.

ณัฐพล แสงจันทร์ และดาวพระศุกร์ นุ่มเอี่ยม. 2548. "การศึกษาความเป็นไปได้ในการคัดแยกถั่วเหลืองฝักสดโดยใช้กระบวนการประมวลผลภาพ." ปริญญานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเกษตร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

เยาวลักษณ์ สุรพันธพิศิษฐ์. 2536. **เทคโนโลยีเนื้อสัตว์และผลิตภัณฑ์.** กรุงเทพฯ : สหมิตร ออฟเซต.

วัชรี คชแก้ว. 2548. "การตรวจวัดคุณภาพสีและลักษณะเนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์ไส้กรอกแฟรงค์เฟอร์เตอร์ที่จำหน่ายในเขตลาดกระบัง." ปัญหาพิเศษปริญญาครุศาสตร์อุตสาหกรรมบัณฑิต สาขาวิชาอุตสาหกรรมเกษตร, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

วราวุฒิ ครูส่ง. 2546. **การประกันคุณภาพในอุตสาหกรรมอาหาร.** กรุงเทพฯ : ดีสแควร์อินเตอร์เนชันแนล.

ศูนย์อัจฉริยะเพื่ออุตสาหกรรมอาหาร. 2551. **อุตสาหกรรมเนื้อสัตว์และผลิตภัณฑ์.** [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก : http://fic.nfi.or.th/th/thaifood/product52-meat.asp.

สำนักงานคณะกรรมการอาหารและยา. 2547. **ประกาศกระทรวงสาธารณสุข ฉบับที่ 281.** [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก : elib.fda.moph.go.th/.../ประกาศกระทรวงสาธารณสุข/106_No281.doc.

สถาบันอาหาร. 2554. **อุตสาหกรรมอาหารไทย.** [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก : www.industry.go.th/Lists/.../ข้อมูลพื้นฐานอุตสาหกรรม.pdf.

Ahmad, I.S. Reid, J.F. Paulsen, M.R. and Sinclair, J.B. 1999. "Color Classifier for Symptomatic Soybean Seeds Using Image Processing." **Plant Disease.** 83(4) : 320–327.

Brosnan, T. and Sun, D.W. 2004. "Improving Quality Inspection of Food Products by Computer Vision-a Review." **Journal of Food Engineering.** 61(1) : 3-16.

Castillo, E.D. 2002. **Statistical Process Adjustment for Quality Control**. New York : John Wiley and Sons, Inc.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Chambers, I.V.E. and Bowers, J. 1993. "Consumer Perception of Sensory Quality in Muscle Foods : Sensory Characteristics of Meat." **Food Technology.** 47(116) : 118-120.

Du, C. and Sun, D.W. 2004. "Recent Developments in the Applications of Image Processing Techniques for Food Quality Evaluation." **Trends in Food Science & Technology.** 15(5) : 230-249.

Ford, A. and Roberts, A. 1998. **Color Space Conversions.** [online]. Available : http://www.poynton.com/PDFs/coloureq.pdf.

Francis, F.J. 1995. "Quality as Influenced by Color." **Food Quality and Preference.** 6(3) : 149-155.

Fuchs, C. and Kenett, R.S. 1998. "Multivariate Quality Control : theory and application." 1-205. In Schilling, E.G. **Quality and Reliability.** 54. New York : Marcel Dekker, Inc Press.

Gonzalez, R.C. and Woods, R.E. 2002. **Digital Image Processing.** 2th ed. Prentice Hall.

Grigg, N.P. Daly, J. and Stewart, M. 1998. "Case Study: the Use of Statistical Process Control in Fish Product Packaging." **Food Control.** 9(5) : 289-297.

Hayes, G.D. Scallan, A.J. and Wong, J.H.F. 1997. "Applying Statistical Process Control to Monitor and Evaluate the Hazard Analysis Critical Control Point Hygiene Data." **Food Control.** 8(4) : 173–176.

Holmes, D.S. and Mergen, A.E. 1993. "Improving the Performance of the T^2 Control Chart." **Quality Engineering.** 5(4) : 619-625.

Kang, S.P. East, A.R. and Trujillo, F.J. 2008. "Colour Vision System Evaluation of BicolourFruit : A Case Study with 'B74' Mango." **Postharvest Biology and Technology.** 49(1) : 77–85.

Kuo, C.C. and Chu, C.Y. 2003. "Quality Characteristics of Chinese Sausages made from PSE Pork." **Meat Science.** 64 : 441-559.

Leemans, V. Magein, H. and Destain, M.F. 1998. "Defects Segmentation on 'Golden Delicious' Apples by Using Colour Machine Vision." **Computers and Electronics in Agriculture.** 20(2) : 117–130.

Li, J. Tan, J. and Shatadal, P. 2001. "Classification of Tough and Tender Beef by Image Texture Analysis." **Meat Science.** 57(4) : 341–346.

Lowry, C.A. Woodall, W.H. Champ, C.W. and Rigdon, S.E. 1992. "A Multivariate Exponentially Weighted Moving Average Control Chart." **Technometrics.** 34(1) : 46-53.

Lu, J. Tan, J. Shatadal, P. and Gerrard, D.E. 2000. "Evaluation of Pork Color by Using Computer Vision." **Meat Science.** 56(1) : 57–60.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Megahed, F.M. Woodall, W.H. and Camelio, J.A. 2011. "A Review and Perspective on Control Charting with Image Data." **Journal of Quality Technology.** 43(2) : 83-98.

Mendoza, F. and Aguilera, J.M. 2004. "Application of Image Analysis for Classification of Ripening Bananas" **Journal of Food Science.** 69(9) : 471-477.

Mendoza, F. Dejmek, P.A. and Aguilera, J.M. 2006. "Calibrated Color Measurements of Agricultural Foods Using Image Analysis." **Posthavest Biology and Technology.** 41(3) : 285-295.

Mendoza, F. Dejmek, P.A. and Aguilera, J.M. 2007. "Colour and Image Texture Analysis in Classification of Commercial Potato Chips." **Food Research International.** 40(9) : 1146-1154.

Montgomery, D.C. 2009. **Design and Analysis of Experiments (International Student Version).** 7th ed. The United States of America :John Wiley and Sons, INC.

Montgomery, D.C. 2009. **Introduction to statistical quality control.** 6th ed. New York :John Wiley and Sons, Inc.

Montgomery, D.C. and Runger, G.C. 2009. **Applied Statistics and Probability for Engineers.** 5th ed. New York : John Wiley and Sons.

O'Sullivan, M.G. Byrne, D.V. Martens, H. Gidskehaug, L.H. Andersen, H.J. and Martens, M. 2003. "Evaluation of Pork Colour : Prediction of Visual Sensory Quality of Meat from Instrumental and Computer Vision Methods of Colour Analysis." **Meat Science.** 65(2) : 909-918.

Papadakis, S.E. Abdul-Malek, S. Kamdem, R.E. and Yam, K.L. 2000. "A Versatile and Inexpensive Technique for Measuring Color of Foods." **Food Technology.** 5(12) :48–51.

Pedreschi, F. LeÓn, J. Mery, D. and Moyano, P. 2006. "Development of a Computer Vision System to Measure the Color of Potato Chips." **Food Research International.** 39(10) : 1092–1098.

Shearer, S.A., and Payne, F.A. 1990. "Color and Defect Sorting of Bell Peppers Using Machine Vision." **Transactions of the ASAE.** 33(6) : 2045–2050.

Srikaeo, K. and Hourigan, J.A. 2002. "The Use of Statistical Process Control (SPC) to Enhance the Validation of Critical Control Points (CCPs) in Shell Egg Washing." **Food Control.** 13(4–5) : 263–273.

Srikaeo, K. Furst, J. and Ashton, J. 2005. "Characterization of Wheat-Based Biscuit Cooking Process by Statistical Process Control Techniques." **Food control.** 16(4) : 309-317.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Sullivan, J.H. and Woodall, W.H. 1995. "A Comparison of Multivariate Quality Control Charts for Individual Observations." **Journal of Quality Technology.** 28(4) : 398-408.

Sun, D.W. and Brosnan, T. 2003. "Pizza Quality Evaluation Using Computer Vision- Part 1 Pizza Base and Sauce Spread." **Journal of Food Engineering.** 57(1) : 81–89.

Tao, Y. Heinemann, P.H. Vargheses, Z. Morrow, C.T. and Sommer, H.J. 1995. "Machine Vision for Color Inspection of Potatoes and Apples." **Transactions of the ASAE.** 38(5) : 1555–1561.

Tracy, N.D., Young, J.C. and Mason, R.L. 1992. "Multivariate Control Charts for Individual Observations." **Journal of Quality Technology.** 24(2) : 88-95.

Triwood1973. 2008. **Mass Producing Hot Dogs in a Factory.** [Online]. Available : http://www.youtube.com/watch?v=moM1s3cltTc&feature=player_embedded.

Woodall, W.H. and Montgomery, D.C. 1999. "Research Issues and Ideas in Statistical Process Control." **Journal of Quality Technology.** 31(4) : 376–386.

Yam, K.L. and Papadakis, S.E. 2004. "A Simple Digital Imaging Method for Measuring and Analyzing Color of Food Surfaces." **Journal of Food Engineering.** 61(1) : 137–142.

Zarringhalami, S. Sahari, M.A. and Hamidi-Esfehani, Z. 2009. "Partial Replacement of Nitrite by Annatto as a Colour Additive in Sausage." **Meat Science.** 81(1) : 281-284.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก
ผลการทดลอง

1. ผลการทดลองการวิเคราะห์ระบบการวัด

ตารางที่ ก.1 รูปแบบการทดลองและผลการทดลองการวิเคราะห์ระบบการวัดก่อนการปรับปรุง

ลำดับการสุ่ม	ลำดับทดลอง	Part	Operator	Method	L*	a*	b*
46	1	2	1	2	43.3962	7.1579	17.122
57	2	5	1	1	49.9104	-0.9346	9.9234
43	3	1	2	1	32.2948	20.8396	15.712
35	4	9	2	1	38.4652	5.7938	4.0851
10	5	3	1	2	40.2515	6.1009	1.8109
21	6	6	1	1	45.7838	4.2728	9.6708
62	7	6	1	2	45.0706	2.6986	7.7185
53	8	4	1	1	43.7135	1.8187	6.4871
45	9	2	1	1	41.7219	7.6225	19.2566
66	10	7	1	2	42.1134	2.7954	6.8267
31	11	8	2	1	45.6892	0.4536	1.8124
80	12	10	2	2	36.7185	1.6384	5.3717
40	13	10	2	2	36.8799	1.3181	3.7209
41	14	1	1	1	32.0196	19.9458	15.1383
9	15	3	1	1	38.2653	5.77	1.6298
71	16	8	2	1	46.4628	-0.2061	2.2121
14	17	4	1	2	44.528	0.2139	4.5281
33	18	9	1	1	36.5196	7.0377	5.4909
64	19	6	2	2	42.8583	1.1804	8.4799
34	20	9	1	2	37.9665	7.4828	6.0241
1	21	1	1	1	31.0238	21.3731	15.7256
37	22	10	1	1	39.6742	2.0606	8.6384
78	23	10	1	2	38.3574	4.1621	6.189
12	24	3	2	2	39.9612	4.6277	1.4384
3	25	1	2	1	32.2626	19.5076	15.4354
50	26	3	1	2	41.2479	5.5729	1.6682
17	27	5	1	1	52.7633	-1.264	8.7765
38	28	10	1	2	36.5238	3.0154	8.0647
49	29	3	1	1	39.4371	4.7596	1.2969

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.1(ต่อ) รูปแบบการทดลองและผลการทดลองการวิเคราะห์ระบบการวัดก่อนการปรับปรุง

ลำดับการสุ่ม	ลำดับทดลอง	Part	Operator	Method	L*	a*	b*
25	30	7	1	1	41.2279	2.9119	6.1054
61	31	6	1	1	45.0031	0.9262	7.1636
70	32	8	1	2	45.3531	1.4339	2.2656
51	33	3	2	1	41.0932	3.4442	0.2177
56	34	4	2	2	43.9825	5.833	-1.1135
29	35	8	1	1	46.5399	0.7268	3.5442
52	36	3	2	2	39.1893	3.9739	-0.1814
63	37	6	2	1	43.9047	-0.0479	6.6641
76	38	9	2	2	37.4275	4.7217	4.3252
4	39	1	2	2	31.1515	20.6417	15.7696
15	40	4	2	1	45.3586	3.0906	6.4473
59	41	5	2	1	49.3594	-1.5151	8.7892
55	42	4	2	1	43.4416	0.9188	5.3656
11	43	3	2	1	41.3521	2.6301	0.0626
27	44	7	2	1	42.8117	1.0784	6.0711
74	45	9	1	2	39.1538	7.1912	6.5469
2	46	1	1	2	33.1907	22.7927	17.4055
6	47	2	1	2	43.1624	12.0513	20.3883
36	48	9	2	2	40.0949	5.3325	4.4378
67	49	7	2	1	45.0738	0.7578	3.8083
44	50	1	2	2	33.5993	21.7025	16.2554
47	51	2	2	1	42.5357	8.0922	17.222
65	52	7	1	1	43.0033	2.6957	7.75
79	53	10	2	1	38.3136	2.1626	6.4307
60	54	5	2	2	49.0424	-1.4638	9.6196
54	55	4	1	2	43.1354	1.2672	6.8694
5	56	2	1	1	44.057	9.0035	17.5222
18	57	5	1	2	51.0369	-1.1381	9.731
13	58	4	1	1	45.4363	4.1706	8.7453
69	59	8	1	1	47.1138	0.9385	3.2522
16	60	4	2	2	46.7818	4.5538	8.0738
72	61	8	2	2	46.2453	1.0392	2.15
22	62	6	1	2	45.1491	3.536	9.7076
58	63	5	1	2	49.5627	-0.8715	10.0728
7	64	2	2	1	43.3726	11.548	20.3595

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.1(ต่อ) รูปแบบการทดลองและผลการทดลองการวิเคราะห์ระบบการวัดก่อนการปรับปรุง

ลำดับการสุ่ม	ลำดับทดลอง	Part	Operator	Method	L*	a*	b*
30	65	8	1	2	47.2696	3.8981	6.5265
48	66	2	2	2	43.2825	11.6533	20.7551
32	67	8	2	2	45.2135	-0.0895	2.159
42	68	1	1	2	31.7195	21.8232	17.6277
68	69	7	2	2	41.4191	1.6224	5.354
28	70	7	2	2	40.1363	1.8712	5.574
73	71	9	1	1	37.7411	5.6586	3.7475
26	72	7	1	2	40.4769	1.9863	3.8052
39	73	10	2	1	38.6647	0.8871	3.6201
24	74	6	2	2	42.0755	0.8135	7.8376
19	75	5	2	1	49.4802	-1.0529	8.1621
75	76	9	2	1	35.21	7.7077	5.97
23	77	6	2	1	43.0323	1.0894	9.7803
8	78	2	2	2	41.9582	5.9432	15.2823
20	79	5	2	2	48.5942	-0.0798	8.8658
77	80	10	1	1	37.8645	2.7933	6.0871

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.2 แสดงผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่า L* ของระบบการวัดก่อนการปรับปรุง

ANOVA : L* versus Part, Operator, Method

Factor	Type	Levels	Values
Part	random	10	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10
Operator	random	2	1, 2
Method	random	2	1, 2

Analysis of Variance for L*

Source	DF	SS	MS	F	P
Part	9	1407.841	156.427	146.18	0.000 x
Operator	1	0.273	0.273	**	
Method	1	3.558	3.558	4.04	0.101 x
Part*Operator	9	1.923	0.214	0.73	0.676
Part*Method	9	10.336	1.148	3.93	0.027
Operator*Method	1	0.025	0.025	0.08	0.779
Part*Operator*Method	9	2.628	0.292	1.09	0.394
Error	40	10.760	0.269		
Total	79	1437.344			

x Not an exact F-test. ** Denominator of F-test is zero.

S = 0.518657   R-Sq = 99.25%   R-Sq(adj) = 98.52%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.3 แสดงผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่า L* โดยลดรูปตัวแบบ (Reduced model) ของระบบการวัดก่อนการปรับปรุง

ANOVA: L* versus Part, Operator, Method

Factor	Type	Levels	Values
Part	random	10	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10
Operator	random	2	1, 2
Method	random	2	1, 2

Analysis of Variance for a*

Source	DF	SS	MS	F	P
Part	9	1821.77	202.42	141.86	0.000
Operator	1	2.01	2.01	1.41	0.239
Method	1	1.72	1.72	1.20	0.276
Error	68	97.03	1.43		
Total	79	1922.53			

S = 1.19452 R-Sq = 94.95% R-Sq(adj) = 94.14%

Source	Variance component	Error term	Expected Mean Square for Each Term (using restricted model)
1 Part	25.1240	4	(4) + 8 (1)
2 Operator	0.0147	4	(4) + 40 (2)
3 Method	0.0073	4	(4) + 40 (3)
4 Error	1.4269		(4)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.4 แสดงผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่า a* ของระบบการวัดก่อนการปรับปรุง

ANOVA : a* versus Part, Operator, Method

Factor	Type	Levels	Values
Part	random	10	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10
Operator	random	2	1, 2
Method	random	2	1, 2

Analysis of Variance for a*

Source	DF	SS	MS	F	P
Part	9	2895.812	321.757	578.65	0.465 x
Operator	1	12.360	12.360	149.76	0.976 x
Method	1	5.272	5.272	**	
Part*Operator	9	24.859	2.762	1.02	0.486
Part*Method	9	4.432	0.492	0.18	0.991
Operator*Method	1	0.019	0.019	0.01	0.935
Part*Operator*Method	9	24.286	2.698	1.72	0.117
Error	40	62.798	1.579		
Total	79	3029.836			

x Not an exact F-test. **

Denominator of F-test is zero.

S = 1.25297   R-Sq = 97.93%   R-Sq (adj) = 95.91%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.5 แสดงผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่า a* โดยลดรูปตัวแบบ (Reduced model) ของระบบการวัดก่อนการปรับปรุง

ANOVA: a* versus Part, Operator, Method

Factor	Type	Levels	Values
Part	random	10	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10
Operator	random	2	1, 2
Method	random	2	1, 2

Analysis of Variance for a*

Source	DF	SS	MS	F	P
Part	9	2895.81	321.76	187.98	0.000
Operator	1	12.36	12.36	7.22	0.009
Method	1	5.27	5.27	3.08	0.084
Error	68	116.39	1.71		
Total	79	3029.84			

S = 1.30830   R-Sq = 96.16%   R-Sq(adj) = 95.54%

Source	Variance component	Error term	Expected Mean Square for Each Term (using restricted model)
1 Part	40.0056	4	(4) + 8 (1)
2 Operator	0.2662	4	(4) + 40 (2)
3 Method	0.0890	4	(4) + 40 (3)
4 Error	1.7117		(4)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.6 แสดงผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่า b* ของระบบการวัดก่อนการปรับปรุง

ANOVA : b* versus Part, Operator, Method

Factor	Type	Levels	Values
Part	random	10	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10
Operator	random	2	1, 2
Method	random	2	1, 2

Analysis of Variance for b*

Source	DF	SS	MS	F	P
Part	9	2201.714	244.635	114.52	0.000 x
Operator	1	24.695	24.695	17.87	0.078 x
Method	1	0.010	0.010	0.00	0.949 x
Part*Operator	9	9.908	1.101	1.51	0.276
Part*Method	9	15.897	1.766	2.42	0.102
Operator*Method	1	1.012	1.012	1.38	0.269
Part*Operator*Method	9	6.579	0.731	0.24	0.985
Error	40	119.404	2.985		
Total	79	2379.220			

x Not an exact F-test.

S = 1.72775 R-Sq = 94.98% R-Sq(adj) = 90.09%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.7 แสดงผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่า b* โดยลดรูปตัวแบบ (Reduced model) ของระบบการวัดก่อนการปรับปรุง

ANOVA: b* versus Part, Operator, Method

Factor	Type	Levels	Values
Part	random	10	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10
Operator	random	2	1, 2
Method	random	2	1, 2

Analysis of Variance for a*

Source	DF	SS	MS	F	P
Part	9	2201.71	244.63	108.87	0.000
Operator	1	24.69	24.69	10.99	0.001
Method	1	0.01	0.01	0.00	0.947
Error	68	152.80	2.25		
Total	79	2379.22			

S = 1.49902   R-Sq = 93.58%   R-Sq(adj) = 92.54%

Source	Variance component	Error term	Expected Mean Square for Each Term (using restricted model)
1 Part	30.2985	4	(4) + 8 (1)
2 Operator	0.5612	4	(4) + 40 (2)
3 Method	- 0.0559	4	(4) + 40 (3)
4 Error	2.2471		(4)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.8 รูปแบบการทดลองและผลการทดลองการวิเคราะห์ระบบการวัดหลังการปรับปรุง

ลำดับการสุ่ม	ลำดับทดลอง	Part	Operator	Method	L*	a*	b*
11	1	3	2	1	77.7306	12.4887	0.2478
53	2	4	1	1	78.1351	3.8647	0.9086
44	3	1	2	2	68.7043	35.1896	27.0417
64	4	6	2	2	77.6696	3.7449	1.7211
78	5	10	1	2	72.8339	3.4129	1.8522
31	6	8	2	1	80.5439	3.9117	-0.3798
29	7	8	1	1	80.5777	3.9079	-0.3599
30	8	8	1	2	80.4649	3.7723	-0.4286
7	9	2	2	1	77.6572	11.7313	15.5911
63	10	6	2	1	78.0322	3.5003	1.45
37	11	10	1	1	72.1809	3.1532	1.5422
60	12	5	2	2	83.2389	0.3464	1.6658
67	13	7	2	1	77.1277	4.3271	0.6341
66	14	7	1	2	76.9019	4.5797	0.7741
9	15	3	1	1	77.9461	13.8191	0.0967
45	16	2	1	1	77.8279	11.6511	15.7963
51	17	3	2	1	76.7014	12.3216	0.4745
79	18	10	2	1	72.5118	3.3501	1.5442
16	19	4	2	2	77.2489	3.4683	0.3539
25	20	7	1	1	77.0617	4.5765	0.3843
58	21	5	1	2	83.8271	0.2926	1.6015
33	22	9	1	1	71.6838	13.7679	5.7018
28	23	7	2	2	78.8938	4.6144	0.506
13	24	4	1	1	78.2829	3.4114	0.7202
10	25	3	1	2	77.3323	13.1206	0.365
8	26	2	2	2	77.0592	11.0326	16.8855
71	27	8	2	1	80.2895	3.7016	-0.423
76	28	9	2	2	72.3778	14.2337	7.8132
54	30	4	1	2	78.0626	3.4878	0.4012
1	31	1	1	1	68.9309	35.6944	25.4859
17	32	5	1	1	83.0373	0.1742	1.7165
70	33	8	1	2	80.9103	3.7258	-0.5469
5	34	2	1	1	77.6065	11.6062	15.8105
21	35	6	1	1	77.2277	3.7324	1.9822
38	36	10	1	2	73.6246	3.1177	1.4982

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.8(ต่อ) รูปแบบการทดลองและผลการทดลองการวิเคราะห์ระบบการวัดหลังการปรับปรุง

ลำดับการสุ่ม	ลำดับทดลอง	Part	Operator	Method	L*	a*	b*
56	37	4	2	2	77.9674	3.7222	0.6014
18	38	5	1	2	83.9605	0.261	1.1431
48	39	2	2	2	77.2329	11.0247	15.6621
40	40	10	2	2	72.9263	3.1202	1.6532
2	41	1	1	2	68.1203	35.4812	26.5334
32	42	8	2	2	80.6261	4.3723	-0.802
27	43	7	2	1	77.1203	4.3966	0.5948
80	44	10	2	2	73.1904	2.9711	1.1543
39	45	10	2	1	72.3065	3.5553	1.7203
36	46	9	2	2	71.4867	14.0088	7.3159
61	47	6	1	1	77.6226	3.5526	1.75
62	48	6	1	2	80.0487	3.3163	1.1951
35	49	9	2	1	71.8706	13.7408	6.736
43	50	1	2	1	68.0803	34.3315	26.1845
74	51	9	1	2	72.4704	12.9402	5.1633
52	52	3	2	2	76.9952	11.7782	0.3598
68	53	7	2	2	78.7137	4.0485	0.1395
3	54	1	2	1	68.6852	34.101	24.5828
20	55	5	2	2	84.1922	0.2408	1.4484
72	56	8	2	2	80.7079	4.3142	-0.7608
42	57	1	1	2	68.2462	35.68	24.0012
75	58	9	2	1	71.7231	13.7735	6.2848
12	59	3	2	2	77.559	14.4051	-0.1842
41	60	1	1	1	68.2805	34.0758	24.3034
23	61	6	2	1	77.4595	3.531	1.5987
47	62	2	2	1	77.2157	11.33	16.6702
22	63	6	1	2	80.8747	3.6775	0.9666
73	64	9	1	1	72.3977	13.9033	6.6923
15	65	4	2	1	78.0514	3.0909	0.7075
34	66	9	1	2	71.0012	12.9836	4.6842
49	67	3	1	1	76.9605	13.4129	0.2247
57	68	5	1	1	83.2923	0.207	1.5057
50	69	3	1	2	77.3825	13.1318	-0.2281
26	70	7	1	2	78.7785	4.4868	0.8213
6	71	2	1	2	77.2472	11.0692	15.9551

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.8(ต่อ) รูปแบบการทดลองและผลการทดลองการวิเคราะห์ระบบการวัดหลังการปรับปรุง

ลำดับการสุ่ม	ลำดับทดลอง	Part	Operator	Method	L*	a*	b*
46	72	2	1	2	77.2481	11.1245	16.4678
55	73	4	2	1	77.4851	3.4051	0.7162
19	74	5	2	1	82.846	0.2098	1.8663
69	75	8	1	1	80.1617	3.8139	-0.3841
77	76	10	1	1	72.5184	3.35	1.9269
14	77	4	1	2	78.5908	3.672	0.2349
24	78	6	2	2	79.9845	3.3609	1.0007
65	79	7	1	1	77.0587	4.3979	0.5542
4	80	1	2	2	68.113	34.978	24.8225

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.9 แสดงผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่า L*

ANOVA : L* versus Part, Operator, Method

Factor	Type	Levels	Values
Part	random	10	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10
Operator	random	2	1, 2
Method	random	2	1, 2

Analysis of Variance for L*

Source	DF	SS	MS	F	P
Part	9	1407.841	156.427	146.18	0.000 x
Operator	1	0.273	0.273	**	
Method	1	3.558	3.558	4.04	0.101 x
Part*Operator	9	1.923	0.214	0.73	0.676
Part*Method	9	10.336	1.148	3.93	0.027
Operator*Method	1	0.025	0.025	0.08	0.779
Part*Operator*Method	9	2.628	0.292	1.09	0.394
Error	40	10.760	0.269		
Total	79	1437.344			

x Not an exact F-test.

** Denominator of F-test is zero.

S = 0.518657   R-Sq = 99.25%   R-Sq(adj) = 98.52%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.10 แสดงผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่า L* โดยลดรูปตัวแบบ (Reduced model) ของระบบการวัดหลังการปรับปรุง

ANOVA: L* versus Part, Operator, Method

Factor	Type	Levels	Values
Part	random	10	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10
Operator	random	2	1, 2
Method	random	2	1, 2

Analysis of Variance for a*

Source	DF	SS	MS	F	P
Part	9	1407.84	156.43	414.34	0.000
Operator	1	0.27	0.27	0.72	0.398
Method	1	3.56	3.56	9.42	0.003
Error	68	25.67	0.38		
Total	79	1437.34			

S = 0.614434   R-Sq = 98.21%   R-Sq(adj) = 97.93%

Source	Variance component	Error term	Expected Mean Square for Each Term (using restricted model)
1 Part	19.5062	4	(4) + 8 (1)
2 Operator	-0.0026	4	(4) + 40 (2)
3 Method	0.0795	4	(4) + 40 (3)
4 Error	0.3775		(4)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.11 แสดงผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่า a* ของระบบการวัดหลังการปรับปรุง

ANOVA : a* versus Part, Operator, Method

Factor	Type	Levels	Values
Part	random	10	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10
Operator	random	2	1, 2
Method	random	2	1, 2

Analysis of Variance for a*

Source	DF	SS	MS	F	P
Part	9	7458.04	828.67	2498.59	0.000 x
Operator	1	0.15	0.15	0.22	0.702 x
Method	1	0.02	0.02	0.03	0.887 x
Part*Operator	9	2.18	0.24	1.66	0.230
Part*Method	9	2.12	0.24	1.62	0.243
Operator*Method	1	0.56	0.56	3.87	0.081
Part*Operator*Method	9	1.31	0.15	1.02	0.442
Error	40	5.72	0.14		
Total	79	7470.09			

x Not an exact F-test.

S = 0.377995 R-Sq = 99.92% R-Sq(adj) = 99.85%

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.12 แสดงผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่า a* โดยลดรูปตัวแบบ (Reduced model) ของระบบการวัดหลังการปรับปรุง

ANOVA: a* versus Part, Operator, Method

Factor	Type	Levels	Values
Part	random	10	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10
Operator	random	2	1, 2
Method	random	2	1, 2

Analysis of Variance for a*

Source	DF	SS	MS	F	P
Part	9	7458.04	828.67	4741.74	0.000
Operator	1	0.15	0.15	0.84	0.362
Method	1	0.02	0.02	0.11	0.741
Error	68	11.88	0.17		
Total	79	7470.09			

S = 0.418044   R-Sq = 99.84%   R-Sq(adj) = 99.82%

Source	Variance component	Error term	Expected Mean Square for Each Term (using restricted model)
1 Part	103.562	4	(4) + 8 (1)
2 Operator	-0.001	4	(4) + 40 (2)
3 Method	-0.004	4	(4) + 40 (3)
4 Error	0.175		(4)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.13 แสดงผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่า b* ของระบบการวัดหลังการปรับปรุง

ANOVA : b* versus Part, Operator, Method

Factor	Type	Levels	Values
Part	random	10	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10
Operator	random	2	1, 2
Method	random	2	1, 2

Analysis of Variance for b*

Source	DF	SS	MS	F	P
Part	9	5342.36	593.60	1812.49	0.000 x
Operator	1	0.78	0.78	2.14	0.304 x
Method	1	0.18	0.18	10.01	0.973 x
Part*Operator	9	4.56	0.51	1.50	0.279
Part*Method	9	1.44	0.16	0.47	0.862
Operator*Method	1	0.20	0.20	0.58	0.465
Part*Operator*Method	9	3.05	0.34	1.20	0.320
Error	40	11.27	0.28		
Total	79	5363.84			

x Not an exact F-test.

S = 0.530705   R-Sq = 99.79%   R-Sq(adj) = 99.59%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.14 แสดงผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่า b* โดยลดรูปตัวแบบ (Reduced model) ของระบบการวัดหลังการปรับปรุง

ANOVA: b* versus Part, Operator, Method

Factor	Type	Levels	Values
Part	random	10	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10
Operator	random	2	1, 2
Method	random	2	1, 2

Analysis of Variance for a*

Source	DF	SS	MS	F	P
Part	9	5342.36	593.60	1967.54	0.000
Operator	1	0.78	0.78	2.59	0.112
Method	1	0.18	0.18	0.61	0.438
Error	68	20.52	0.30		
Total	79	5363.84			

S = 0.549267 R-Sq = 99.62% R-Sq(adj) = 99.56%

Source	Variance component	Error term	Expected Mean Square for Each Term (using restricted model)
1 Part	74.1617	4	(4) + 8 (1)
2 Operator	0.0120	4	(4) + 40 (2)
3 Method	-0.0030	4	(4) + 40 (3)
4 Error	0.3017		(4)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ผลการทดลองการควบคุมกระบวนการเชิงสถิติ

ตารางที่ ก.15 ข้อมูลที่ใช้ในการทดสอบ Spike และตัวสถิติโฮเทลลิ่งทีสแควร์

ค่าสังเกต	L*	a*	b*	T^2
1	71.9964	15.0826	49.5812	8.3701
2	72.392	14.2672	47.2834	6.932
3	71.8667	15.0961	49.3046	9.3093
4	72.1576	13.5916	46.0803	5.7372
5	71.4025	14.9862	48.7594	5.2391
6	72.0175	14.6615	47.9552	5.7078
7	71.5891	15.9427	50.3682	5.6985
8	71.9702	15.2057	49.451	10.5703
9	72.5214	14.4754	46.8533	4.8946
10	70.5783	15.7567	50.7106	6.9542
11	71.7738	14.5458	48.765	4.7442
12	72.6422	14.2694	46.8758	4.6903
13	72.1243	13.7876	46.9131	6.8265
14	71.8442	15.1798	49.7434	5.5062
15	72.973	14.3407	47.805	4.7459
16	71.6987	14.893	48.3892	6.729
17	72.154	14.8228	48.175	6.6567
18	68.2751	13.7911	11.6618	8.7829
19	71.8015	15.3389	49.1572	4.9277
20	69.8427	16.2844	51.4146	6.1289
21	71.9534	14.4972	48.369	4.7925
22	71.2809	15.7565	50.7994	6.0151
23	72.1531	14.8442	48.051	5.5308
24	71.0228	15.8071	50.4121	9.7635
25	71.3257	15.0678	49.2017	5.5916
26	71.4798	15.0557	48.9929	6.8572
27	72.036	14.3989	47.6043	5.6438
28	70.5301	15.8107	50.9202	5.7438
29	72.1701	14.5153	47.5471	38.6574

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.16 ข้อมูลที่ใช้ในการทดสอบ Mean Shift และตัวสถิติโฮเทลลิ่งทีสแควร์

ค่าสังเกต	L*	a*	b*	T^2
1	71.5254	15.3036	49.9862	8.3701
2	72.4552	15.3222	48.5835	6.932
3	73.6329	13.6102	44.8063	9.3093
4	72.9567	14.2759	47.1215	5.7372
5	72.4611	14.9249	48.5305	5.2391
6	72.8065	14.6293	46.9516	5.7078
7	73.1205	13.7951	45.1898	5.6985
8	71.2322	16.4081	52.193	10.5703
9	72.5841	14.6257	47.8178	4.8946
10	72.9278	14.6801	47.1184	6.9542
11	72.5531	14.2679	46.9424	4.7442
12	72.1099	15.0723	48.4758	4.6903
13	71.5287	15.3745	49.4097	6.8265
14	72.7786	14.4999	47.8712	5.5062
15	72.5973	14.7019	47.2483	4.7459
16	71.7872	15.2776	49.8882	6.729
17	72.3456	14.2194	47.6379	6.6567
18	71.1634	16.1204	50.7682	8.7829
19	72.6619	14.0572	46.3751	4.9277
20	73.0126	14.3431	46.9603	6.1289
21	72.5563	14.4459	47.5079	4.7925
22	71.9941	14.8791	48.8776	6.0151
23	72.6682	14.6322	48.3935	5.5308
24	72.8042	13.3571	46.0468	9.7635
25	71.8543	15.1117	48.9194	5.5916
26	71.6439	15.8892	50.0892	6.8572
27	72.8093	13.9154	46.4737	5.6438
28	72.5575	14.5056	48.5293	5.7438
29	68.2069	13.3666	10.5927	38.6574
30	67.9953	13.6406	11.7167	37.6436
31	68.296	13.0211	12.3548	36.3027
32	68.9487	14.1399	11.4103	45.5575
33	67.8169	14.1907	11.7758	39.6375
34	68.5403	12.5592	9.356	40.8199
35	67.5083	14.3276	12.2668	40.5289

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.16(ต่อ) ข้อมูลที่ใช้ในการทดสอบ Mean Shift และตัวสถิติโฮเทลลิ่งทีสแควร์

ค่าสังเกต	L*	a*	b*	T^2
36	68.6089	13.6902	11.0647	38.2415
37	68.4581	13.7731	11.4442	37.3648
38	69.6688	12.3024	9.5565	37.9119

ตารางที่ ก.17 ข้อมูลที่ใช้เป็นตัวอย่างการใช้งาน

ค่าสังเกต	L*	a*	b*	T^2
1	71.9964	15.0826	49.5812	2.7036
2	72.392	14.2672	47.2834	3.3845
3	71.8667	15.0961	49.3046	5.33
4	72.1576	13.5916	46.0803	1.7091
5	71.4025	14.9862	48.7594	0.9138
6	72.0175	14.6615	47.9552	3.1657
7	71.5891	15.9427	50.3682	4.6562
8	71.9702	15.2057	49.451	5.65
9	72.5214	14.4754	46.8533	0.3259
10	70.5783	15.7567	50.7106	3.4009
11	71.7738	14.5458	48.765	0.767
12	72.6422	14.2694	46.8758	0.9786
13	72.1243	13.7876	46.9131	3.2817
14	71.8442	15.1798	49.7434	2.4725
15	72.973	14.3407	47.805	2.3253
16	71.6987	14.893	48.3892	1.9127
17	72.154	14.8228	48.175	2.1735
18	68.2751	13.7911	11.6618	5.7508
19	71.8015	15.3389	49.1572	1.7052
20	69.8427	16.2844	51.4146	1.7706
21	71.9534	14.4972	48.369	0.1458
22	71.2809	15.7565	50.7994	0.96
23	72.1531	14.8442	48.051	11.0118
24	71.0228	15.8071	50.4121	3.9111
25	71.3257	15.0678	49.2017	6.4228
26	71.4798	15.0557	48.9929	1.0857
27	72.036	14.3989	47.6043	3.3774
28	70.5301	15.8107	50.9202	1.1436
29	72.1701	14.5153	47.5471	5.7625

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข
ส่วนของโปรแกรม MATLAB

1. คำสั่งที่ใช้ในการแปลงสีจากระบบ RGB เป็นระบบ L*a*b

```
clear
clc
f=imread('file_name');
f=im2double(f);
cform = makecform('srgb2lab');
lab_sausage = applycform(f,cform);
l = lab_sausage(:,:,1);
a = lab_sausage(:,:,2);
b = lab_sausage(:,:,3);
l=mean2(l);
a=mean2(a);
b=mean2(b);
x1=[l a b]
```

2. โปรแกรมที่ใช้ในการสร้างแผนภูมิโฮเทลลิ่งทีสแควร์

```
clear
clc
%Inputs
x=input('multivariate data matrix')
alpha=input('significance level')
[m,p]=size(x);
%Holmes and Mergen (1993)
for i=1:m-1;
    j=1:p;
v(i,j)=x(i+1,j)-x(i,j);
end
%Arrange vectors into a matrix V
V=v';
%Sample covariance matrix
S2=(V*V')/(2*(m-1));
sd=inv(S2);
mean=mean(x);
for r=1:m;
```

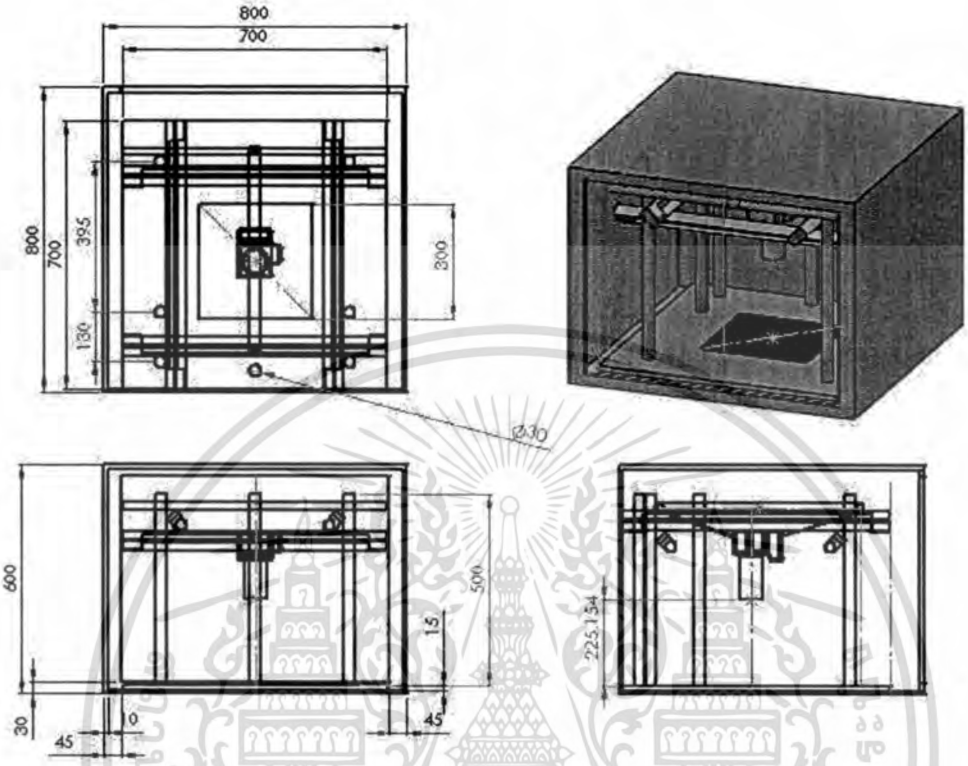
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
    A=x(r,:)-mean;
    t2(r,:)=A*sd*A';
end
    T2=t2

%phase1
%Control limit
V1=p/2;
V2=(m-p-1)/2;
B=betainv(1-alpha,V1,V2);
UCL=(((m-1)^2)/m)*B
LCL=0
%T2 > UCL
Tw=T2(:)<UCL;
point_x=find(Tw==0);
z=point_x;
w=T2(point_x);
out1 = [z w]
%plot
figure(1)
xx=1:1:m;
xxx=0:0.01:m+1;
plot(xx,T2(:),'b.-',xxx,UCL(:),'r-',z,w(:),'ro','LineWidth',1)
title('Hotelling T^2 control chart phase I')
xlabel('Sample number')
ylabel('T^2')
o=[0,m+1,0,max(T2)+3];
axis(o)
hold on
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค
แบบของอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง



ภาพที่ ค.1 แสดงแบบของอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

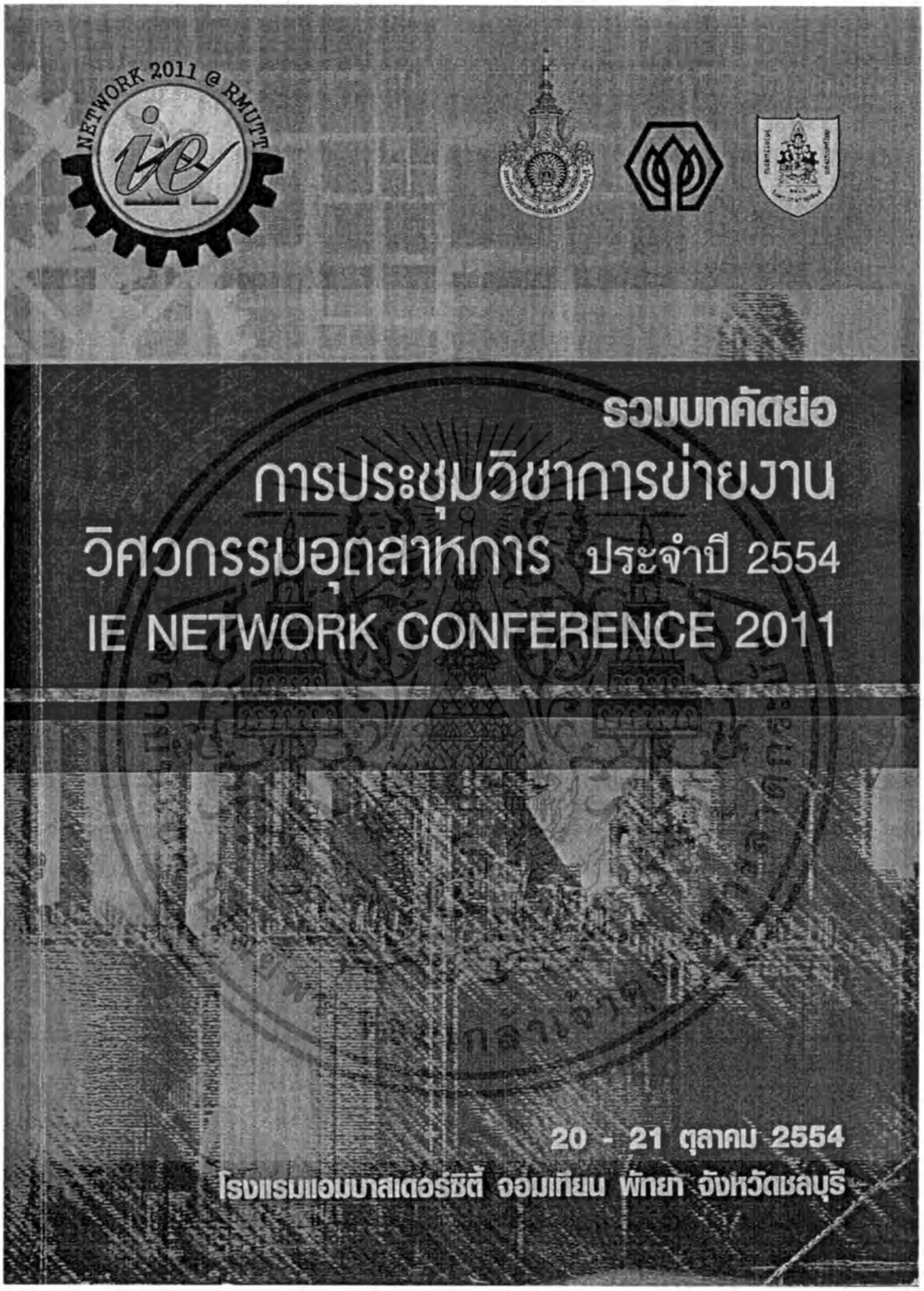
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ง
บทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

1. พิรญาณ์ แก้วสุวรรณ และ ชุมพล ยวงใย. 2554. "การวิเคราะห์ระบบการวัดของเครื่องมือวัดคุณภาพสีของอาหาร." หน้า 548-552. **ใน การประชุมวิชาการข่ายงานวิศวกรรมอุตสาหการประจำปี 2554.**, ชลบุรี, 20 – 21 ตุลาคม 2554.

2. ปิยาภรณ์ มาตย์วิเศษ และ ชุมพล ยวงใย. 2555. "การวิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลต่อค่าสีในระบบการวัดคุณภาพสีโดยใช้ภาพถ่าย." **วิศวสารลาดกระบัง.** 29(3)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การประชุมวิชาการข่ายงานวิศวกรรมอุตสาหการ ประจำปี 2554
20-21 ตุลาคม 2554

การวิเคราะห์ระบบการวัดของเครื่องมือวัดคุณภาพสีของอาหาร
Gauge Repeatability and Reproducibility Analysis for Food Color Vision Detection

พิรญาณ์ แก้วสุวรรณ[1*] ชุมพล ยวงใย[2]
[1,2]สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
แขวงลาดกระบัง เขตลาดกระบัง จังหวัดกรุงเทพมหานคร รหัสไปรษณีย์ 10520
E-mail: piraya.ks@gmail.com*

บทคัดย่อ

ในประเทศไทยอุตสาหกรรมอาหารเป็นอุตสาหกรรมที่มีความสำคัญเป็นอย่างมาก คุณภาพสีของอาหารเป็นส่วนหนึ่งของคุณลักษณะที่สำคัญทางกายภาพของผลิตภัณฑ์ที่ก่อให้เกิดการจูงใจของผู้บริโภค และทำให้ผู้บริโภคสามารถรับรู้ถึงคุณภาพของผลิตภัณฑ์ได้ ในงานวิจัยนี้จึงทำการยกตัวอย่างผลิตภัณฑ์ไส้กรอกเนื่องจากเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีความเกี่ยวข้องกับสี และใช้วิธีการประมวลผลภาพในการวัดคุณภาพของสี ซึ่งใช้ระบบ L*a*b* แต่เนื่องจากในปัจจุบันยังไม่พบว่ามีการวิเคราะห์ของเครื่องมือวัดคุณภาพสีของอาหารที่นำมาใช้ในการประมวลผลภาพ ดังนั้นจึงทำการศึกษาความสามารถในการวัดซ้ำและการวัดเหมือนของเครื่องมือวัด (GR&R) เพื่อสร้างความเชื่อมั่นในการสร้างเครื่องมือวัด ซึ่งจากผลการทดลองพบว่าค่าสัดส่วนความแปรปรวนของ L* a* และ b* เท่ากับ 5.77% 5.17% และ 9.27% ซึ่งระบบการวัดสามารถใช้ได้ แต่พนักงานวัดมีผลต่อค่าที่ได้จากการวัดมีความแตกต่างกัน ดังนั้นจึงทำการปรับปรุงโดยการควบคุมแสงสว่าง พบว่าค่าสัดส่วนความแปรปรวนของค่า L* และ a* ลดลงเหลือ 2.14% และ 2.74% ตามลำดับ แต่ค่า b* มีค่าเพิ่มจากก่อนการปรับปรุงเล็กน้อย คือ 11.24%

คำหลัก การวิเคราะห์ระบบการวัด , เครื่องมือวัดคุณภาพสีของอาหาร , GR&R

1. บทนำ

ในปี 2546 ประเทศไทยได้ประกาศนโยบายในด้านอาหารและอุตสาหกรรมการเกษตรในการเป็น "ครัวของโลก" ประกอบกับประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรมและเป็นประเทศผู้ผลิตและส่งออกรายสำคัญของโลก [1] จะเห็นได้ว่าอุตสาหกรรมอาหารเป็นอุตสาหกรรมที่มีความสำคัญเป็นอย่างมาก ดังนั้นการปรับปรุงเทคโนโลยีเพื่อให้มีความทันสมัย คุณภาพและความปลอดภัยของผลิตภัณฑ์จึงมีความสำคัญที่ต้องพัฒนาเพื่อให้ได้มาตรฐาน

จากสภาวะการส่งออกที่เพิ่มมากขึ้นในปัจจุบันคุณภาพของผลิตภัณฑ์จึงเป็นสิ่งจำเป็นในการผลิต เนื่องจากมีผลต่อการตัดสินใจในการเลือกซื้อของผู้บริโภค ซึ่งคุณลักษณะทางกายภาพเป็นสิ่งแรกที่ทำให้ผู้บริโภคมีความพึงพอใจในผลิตภัณฑ์ก่อนที่จะรับรู้คุณสมบัติทางประสาทสัมผัสอื่นๆ [2] คุณภาพที่ผู้บริโภคสามารถรับรู้ได้ ได้แก่ ขนาด รูปร่าง ลักษณะเนื้อสัมผัส และสีซึ่งเป็นหนึ่งในคุณลักษณะหลักที่มีผลกระทบต่อการรับรู้ของผู้บริโภคในด้านคุณภาพ [3]

อุตสาหกรรมการผลิตไส้กรอกมีความเกี่ยวข้องกับสีเนื่องจากเป็นปัจจัยแรกทางกายภาพของผลิตภัณฑ์ที่ก่อให้เกิดการจูงใจของผู้บริโภค และทำให้ผู้บริโภคสามารถรับรู้ถึงคุณภาพของผลิตภัณฑ์ได้ ซึ่งในกระบวนการผลิตยังคงใช้การตรวจสอบด้วยสายตามนุษย์ซึ่งมีปัจจัยหลายอย่างที่ทำให้การประเมินนั้นเกิดความผิดพลาดได้ เนื่องจากการมองของมนุษย์ในแต่ละคนแตกต่างกันขึ้นอยู่กับความชำนาญ ลักษณะของแสง หรือความสามารถในการมองเห็น ซึ่งเป็นการยากที่จะสรุปว่าการควบคุมคุณภาพนั้นมีความแน่นอน ถูกต้อง และมีความน่าเชื่อถือ ดังนั้นในงานวิจัยครั้งนี้จึงนำวิธีการประมวลภาพ(image processing) มาประยุกต์ใช้ในการประเมินผลสีของไส้กรอก เพื่อให้การแบ่งแยกสีของไส้กรอกมีประสิทธิผลเพิ่มมากขึ้น งานวิจัยที่ได้ศึกษาเกี่ยวกับวิธีการประมวลภาพในการประเมินคุณภาพของอาหาร ซึ่งไม่ปรากฏว่ามีการใช้วิธีการประมวลภาพในการควบคุมสีของผลิตภัณฑ์ไส้กรอก [4], [5] และจากงานวิจัยดังกล่าว ยังไม่พบว่ามีการวิเคราะห์ของเครื่องมือวัดคุณภาพสีของอาหารที่นำมาใช้ในการประมวลผลภาพ ซึ่งในระบบการวัด ค่าวัดที่ได้จะมีความผันแปรเสมอ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการวิเคราะห์ระบบการวัด เพื่อให้เข้าใจถึงความผันแปรของกระบวนการวัด [6]

ดังนั้นจุดประสงค์ของงานวิจัยเพื่อใช้หลักการ ความสามารถในการวัดซ้ำและการวัดเหมือนของเครื่องมือวัด (Gage Repeatability and Reproducibility ; GR&R) ในการวิเคราะห์เครื่องมือวัดคุณภาพสีของอาหาร เพื่อสร้างความเชื่อมั่นในเครื่องมือวัดว่าค่าที่วัดได้จากเครื่องมือวัดมีความสามารถในการแบ่งแยกผลิตภัณฑ์และสามารถนำไปใช้ในการควบคุมกระบวนการเชิงสถิติต่อไป

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 วิธีการประมวลภาพ

วิธีการประมวลภาพ (Image processing) คือ กระบวนการจัดการทางรูปภาพที่ข้อมูลที่ป้อนเข้าสู่กระบวนการและผลลัพธ์ที่ออกจากกระบวนการต่างก็เป็นรูปภาพเช่นเดียวกัน เป็นกระบวนการดึงคุณสมบัติของภาพออกมาพิจารณาอีกทั้งยังรวมไปถึงวิธีการรวมเอาสิ่งที่สนใจแต่ละอย่างมาพิจารณา ดังนั้นเมื่อนำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพมาแปลงเข้าสู่คอมพิวเตอร์ภาพนั้นจะกลายเป็นภาพดิจิตอล (Digital Image) [7]

2.2 แบบจำลองสี (Color models)

แบบจำลองสีใช้ในการบ่งชี้และบอกปริมาณสี ซึ่งในการศึกษาครั้งนี้จะใช้แบบจำลองสี คือ ระบบ L*a*b* เป็นระบบการวัดสีที่เป็นมาตรฐานสากลพัฒนาโดย Commission International d' Eclairage ในปี 1976 ระบบ L*a*b* ประกอบด้วย ส่วนประกอบ L* กำหนดค่าความสว่างของสี ค่าอยู่ในช่วง 0 ถึง 100 ส่วนประกอบ a* แสดงองค์ประกอบระหว่างสีเขียวและสีแดง ค่าช่วง 120 ถึง +120 ส่วนประกอบ b* แสดงองค์ประกอบระหว่างสีน้ำเงินและสีเหลือง ระบบ L*a*b* เป็นระบบที่เป็นอิสระ โดยไม่คำนึงการการป้อนข้อมูลและอุปกรณ์รับข้อมูล เช่น กล้องดิจิตอล สแกนเนอร์ จอภาพ และเครื่องพิมพ์ ค่า L*a*b* นิยมใช้ในงานวิจัยด้านอาหาร [8] ตัวอย่างงานวิจัย เช่น การวัดสีของมันฝรั่งทอดโดยแปลงภาพจากระบบ RGB เป็นระบบ L*a*b* [9]

2.3 การวิเคราะห์ระบบการวัด

2.3.1 พื้นฐานเกี่ยวกับความสามารถของระบบการวัด

ความสามารถของระบบการวัดมีความสำคัญในแง่ของคุณภาพและการปรับปรุงกระบวนการ โดยปกติกิจกรรมการผลิตมีความสัมพันธ์กับการวัด ซึ่งค่าที่วัดได้จะมีความผันแปรเสมอและความผันแปรที่เกิดขึ้นอาจเป็นมาจากระบบการวัดที่ใช้ ซึ่งระบบการวัดประกอบด้วย เครื่องมือวัด พนักงานวัด ปัจจัยแวดล้อม ช่วงระยะเวลาที่แตกต่างกัน และปัจจัยอื่นๆ ที่ส่งผลกับสมรรถนะของระบบการวัด เช่น การตั้งค่า หรือการปรับเทียบ [10]

ความสามารถของระบบการวัด อาจประกอบด้วยความสามารถในการวัดซ้ำและการวัดเหมือนของเครื่องมือวัด ดังนั้นสามารถอธิบายความหมายของระบบการวัดอย่างง่ายๆดังสมการที่ 1

$$\sigma^2_{Total} = \sigma^2_P + \sigma^2_{Gauge} \qquad (1)$$

σ^2_{Total} คือ ความแปรปรวนของข้อมูลทั้งหมด

σ^2_P คือ ความแปรปรวนของชิ้นงาน

σ^2_{Gauge} คือ ความแปรปรวนของเครื่องมือวัด

ความสามารถการวัดซ้ำ(Repeatability) หมายถึง ความผันแปรภายในเงื่อนไขของระบบการวัด ที่มักจะมีสาเหตุมาจากเครื่องมือวัด

ความสามารถในการวัดเหมือน(Reproducibility) คือ ความผันแปรระหว่างเงื่อนไขของระบบการวัด ที่มักจะมีสาเหตุจากความผันแปรระหว่างพนักงานวัด [6]

2.3.2 การวางแผนศึกษาความสามารถในการวัดซ้ำและการวัดเหมือนของเครื่องวัด

กิติศักดิ์ได้กล่าวไว้ว่า [6] การศึกษาความผันแปรของระบบการวัดในรูปความสามารถในการวัดซ้ำและการวัดเหมือนของเครื่องมือวัดนั้น มีความจำเป็นอย่างยิ่งต้องเริ่มต้นจากขั้นตอนการวางแผนการศึกษา โดยมีประเด็นพิจารณาดังนี้ คือ

1) วิธีการและเวลาที่จะมีการสอบเทียบเครื่องมือวัด

โดยปกติแล้วจะต้องมีการสอบเทียบก่อนการศึกษาความสามารถในการวัดซ้ำและความสามารถในการวัดเหมือนจะเริ่มต้นขึ้น

2) จำนวนพนักงานที่ใช้ในการศึกษาระบบ GR&R

ในกรณีที่ระบบการวัดมีพนักงานวัดจำนวนหลายคน ให้ทำการสุ่มพนักงานวัดมาทำการศึกษาอย่างน้อย 2 คน

3) จำนวนชิ้นงาน (สิ่งตัวอย่าง)

จำนวนสิ่งตัวอย่างที่ใช้ในการศึกษานั้น โดยปกติจะแนะนำที่ 10 ตัวอย่าง ซึ่งถ้าหากไม่สามารถดำเนินการได้ จะต้องพยายามให้ผลคูณของจำนวนของสิ่งตัวอย่างกับจำนวนของพนักงานวัดมีค่ามากกว่า 15 และถ้าหากไม่สามารถดำเนินการได้ให้เพิ่มจำนวนการทำซ้ำของการวัดในแต่ละสิ่งตัวอย่าง และสิ่งตัวอย่างที่จะใช้ในการวัดนี้ต้องเป็นสิ่งตัวอย่างที่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ (ถ้าหากใช้สิ่งตัวอย่างที่มีความแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญแล้ว จะมีความหมายเท่ากับการใช้สิ่งตัวอย่างเดียวด้วยจำนวนวัด ซ้ำมากๆ)

4) จำนวนครั้งในการวัดซ้ำสำหรับสิ่งตัวอย่างแต่ละชิ้น

โดยปกติแล้วมักจะแนะนำให้ทำการวัดซ้ำที่แต่ละสิ่งตัวอย่างด้วยจำนวนซ้ำเท่าๆ กัน (เรียกการทดลองแบบนี้ว่า Balance design) ซึ่งโดยทั่วไปจะกำหนดให้มีการวัดซ้ำสำหรับพนักงานวัดแต่ละคน 2-3 ครั้งต่อชิ้นงานแต่ละชิ้น

5) วิธีลดความผันแปรในสิ่งตัวอย่างของการศึกษา GR&R

เลือกชิ้นงานในชุดการผลิตให้มีความใกล้เคียงกันมากที่สุด

2.3.3 การออกแบบการทดลองการศึกษาความสามารถในการวัดซ้ำและการวัดเหมือนของเครื่องมือวัด

รูปแบบการทดลองทั่วไปที่ใช้สำหรับการออกแบบการทดลองเพื่อศึกษาความสามารถของกระบวนการวัดจะใช้การทดลองแบบ three factor factorial โดยทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ ซึ่งตัวแปรได้แก่ ชิ้นงาน (part ; i = 1,2,...,a) พนักงานวัด (operator ; j = 1,2,...,b) และวิธีการ (method ; k = 1,2,...,c) [11] โดยมีสมการดังนี้

$$y_{ijkl} = \mu + \tau_i + \beta_j + \gamma_k + (\tau\beta)_{ij} + (\tau\gamma)_{ik} + (\beta\gamma)_{jk} + (\tau\beta\gamma)_{ijk} + \epsilon_{ijkl} \qquad (2)$$

ซึ่ง τ_i คือ อิทธิพลของชิ้นงาน

β_j คือ อิทธิพลของพนักงานวัด

γ_k คือ อิทธิพลของวิธีการ

l = 1,2,...,n

2.3.4 การวิเคราะห์ผลการศึกษาความสามารถในการวัดซ้ำและการวัดเหมือนของเครื่องมือวัด

ในการตีความหมายผลการวิเคราะห์จากตารางการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) จะต้องเริ่มจากการวิเคราะห์ความมีนัยสำคัญของอิทธิพลร่วม (Interaction effect) ระหว่างชิ้นงานและพนักงานก่อนเสมอ ซึ่งถ้าพบว่าอิทธิพลร่วมระหว่างชิ้นงานกับพนักงานวัดมีนัยสำคัญ แสดงว่าเมื่อเปลี่ยนชิ้นงานให้พนักงานคนเดิมทำการวัดแล้ว ผลการวัดจะเปลี่ยนไป ซึ่งจะพบว่าอิทธิพลร่วมมีผลมาก และในกรณีที่อิทธิพลร่วมมีนัยสำคัญนี้ ก็มีความจำเป็นต้อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตีความหมายจากอิทธิพลหลัก (Main effect) ของพนักงานวัดหรือชิ้นงานอีก เพราะว่าแม้อิทธิพลหลักของพนักงานวัดจะดูเหมือนมีผลอย่างไม่มีนัยสำคัญ แต่แท้ที่จริงแล้วมีอิทธิพลมากเมื่อมีการประเมินค่าความผันแปรด้านความสามารถในการวัดซ้ำและการวัดเหมือนของเครื่องมือวัด [6]

3. อุปกรณ์และวิธีการประมวลผลภาพ

3.1 ตัวอย่างที่ใช้ในการทดลอง

เนื่องจากเป็นช่วงของการสร้างเครื่องมือวัด เพื่อความสะดวกในการทดลอง จึงใช้กระดาษสีที่มีสีแตกต่างกันแทนสีของไส้กรอก จำนวน 10 ตัวอย่าง แสดงดังรูปที่ 1

รูปที่ 1 แสดงสีที่ใช้ในการทดลอง

3.2 วิธีการประมวลผลภาพ

1.การได้มาของรูปภาพ (Image acquisition) ใช้แสงสว่างและกล้องดิจิตอล SONY Cyber-shot รุ่น DSC-W50 แสดงดังรูปที่ 2

รูปที่ 2 แสดงลักษณะของการได้มาของรูปภาพ

2.การเตรียมภาพถ่าย (Image pre-processing)

ภาพถ่ายดิจิตอลต้องมีการปรับปรุงคุณภาพก่อนที่จะนำไปทำการวิเคราะห์ โดยการนำสิ่งรบกวนภาพออกและเพิ่มความเข้มของภาพ

3.การวัดคุณลักษณะ (Object measurement)

ทำการวัดสีจากภาพถ่ายซึ่งสีที่ได้จากภาพถ่ายอยู่ในระบบ RGB จึงต้องแปลงจากระบบ RGB เป็นระบบ L*a*b โดยใช้โปรแกรม MATLAB [12]

4. ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

ขั้นตอนการดำเนินงานเพื่อศึกษาความสามารถของระบบการวัดค่าสี โดยออกแบบการทดลองศึกษาความสามารถในการวัดซ้ำและการวัดเหมือนของเครื่องมือวัด ประกอบด้วย 3 ปัจจัย คือ พนักงาน ชิ้นงาน และวิธีการวัด โดยใช้ชิ้นงานจำนวน 10 ตัวอย่าง ให้พนักงานจำนวน 2 คน วิธีการวัด 2 วิธี แนวตั้งและแนวนอน ทำการวัดโดยแต่ละคนวัดซ้ำคนละ 2 ครั้ง ซึ่งผลการวัดค่าอยู่ในระบบ L*a*b* ประกอบด้วยค่า L* a* และ b* ดังนั้นในการวิจัยครั้งนี้ต้องทำการเก็บข้อมูลทั้งหมด 2 × 10 × 2× 2 = 80 โดยทำการทดลองแบบสุ่มโดยสมบูรณ์ จากนั้นนำข้อมูลวิเคราะห์ผลโดยใช้โปรแกรม MINITAB โดยใช้ balanced ANOVA

5. ผลการดำเนินงาน

จากผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 1 จะเห็นได้ว่าผลการวัดค่าอยู่ในระบบ L*a*b* ประกอบด้วยค่า L* a* และ b* ซึ่งในการวิเคราะห์จะให้ค่า L* a* และ b* เป็นอิสระกัน

ตารางที่ 1 รูปแบบการทดลองและผลการทดลอง

ลำดับการสุ่ม	ลำดับทดลอง	Part	Operator	Method	L*	a*	b*
46	1	2	1	2	43.3962	7.1579	17.122
67	2	5	1	1	49.9104	-0.9346	9.9234
43	3	1	2	1	32.2948	20.8396	15.712
36	4	9	2	1	38.4662	5.7938	4.0861
10	5	3	1	2	40.2616	6.1009	1.8109
21	6	6	1	1	46.7838	4.2728	9.6708
62	7	6	1	2	45.0706	2.6996	7.7185
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
8	78	2	2	2	41.9682	6.9432	15.2823
20	79	5	2	2	48.6942	-0.0796	8.8668
77	80	10	1	1	37.8645	2.7933	6.0871

จากตารางที่ 2 การวิเคราะห์ความแปรปรวน(ANOVA) จะเห็นได้ว่าไม่มีอิทธิพลของปัจจัยใดที่มีผลต่อค่าวัดที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 จึงทำการลดรูปตัวแบบ (Reduced model) ผลที่ได้แสดงดังตารางที่ 3

ตารางที่ 2 แสดงผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่า a*

ANOVA: a* versus Part, Operator, Method

Factor	Type	Levels	Values
Part	random	10	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10
Operator	random	2	1, 2
Method	random	2	1, 2

Analysis of Variance for a*

Source	DF	SS	MS	F	P
Part	9	2895.812	321.757	578.65	0.405 x
Operator	1	12.300	12.300	140.76	0.976 x
Method	1	5.272	5.272	**	
Part*Operator	9	24.859	2.762	1.02	0.486
Part*Method	9	4.432	0.492	0.18	0.991
Operator*Method	1	0.019	0.019	0.01	0.935
Part*Operator*Method	9	24.286	2.698	1.72	0.117
Error	40	62.798	1.570		
Total	79	3029.836			

x Not an exact F-test.

** Denominator of F-test is zero.

S = 1.25207 R-Sq = 97.93% R-Sq(adj) = 95.91%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 3 เมื่อทำการวิเคราะห์ความแปรปรวนของเครื่องมือวัดจากสมการที่ 3 แสดงตัวอย่างดังนี้

$$\sigma^2_{gauge} = \sigma^2 + \sigma^2_\beta + \sigma^2_\gamma \qquad (3)$$

$$\sigma^2_{gauge} = 0.2662 + 0.0890 + 1.7117 = 2.0669$$

จากการคำนวณดังกล่าวสามารถเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนดังตารางที่ 4 จากตารางจะเห็นได้ว่า ค่าสัดส่วนระหว่างความแปรปรวนของระบบการวัดและความแปรปรวนของชิ้นงาน ของ L* a* และ b* เท่ากับ 5.77% 5.17% และ 9.27% ซึ่งแสดงว่าความแปรปรวนของเครื่องมือวัดมีค่าน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับความแปรปรวนเนื่องจากชิ้นงาน

ตารางที่ 3 แสดงผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่า a* โดยลดรูปตัวแบบ (Reduced model)

```
ANOVA: a* versus Part, Operator, Method
Factor    Type     Levels  Values
Part      random   10      1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10
Operator  random   2       1, 2
Method    random   2       1, 2
Analysis of Variance for a*
Source    DF   SS       MS      F       P
Part      9    2895.81  321.76  187.98  0.000
Operator  1    12.36    12.36   7.22    0.009
Method    1    5.27     5.27    3.08    0.084
Error     68   116.39   1.71
Total     79   3029.84
S = 1.30830   R-Sq = 96.16%   R-Sq(adj) = 95.54%
                        Expected Mean Square for Each
                        Term (using Variance  Error  restricted
  Source      component  term  model)
1 Part        40.0056    4 (4) + 8 (1)
2 Operator    0.2662     4 (4) + 40 (2)
3 Method      0.0890     4 (4) + 40 (3)
4 Error       1.7117     (4)
```

ตารางที่ 4 ตารางเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของ L* a* และ b*

ความแปรปรวน	L*	a*	b*
σ^2_{gage}	1.4489	2.0669	2.8083
σ^2_{part}	25.1240	40.0056	30.2985
% $\sigma^2_{gage}/\sigma^2_{part}$	5.77%	5.17%	9.27%

จากตารางที่ 3 การวิเคราะห์ความแปรปรวน(ANOVA) ของค่า a* จะเห็นได้ว่าอิทธิพลของชิ้นงานวัดและพนักงานวัดมีผลทำให้ค่าวัดเปลี่ยนแปลงไป

จากผลการทดลองดังกล่าวข้างต้นจะได้เห็นว่าระบบการวัดอยู่ในเกณฑ์ที่ดี แต่ยังมีอิทธิพลเนื่องจากพนักงานวัดที่ทำให้ค่าในการวัดเปลี่ยนแปลง จึงทำการปรับปรุงเครื่องมือวัดคุณภาพสีของอาหาร โดยทำการควบคุมแสงสว่างโดยใช้หลอดประหยัดไฟ รุ่นจินี่ PHILIPS ขนาด 18W จำนวน 2 หลอด การจัดวางหลอดไฟ วางเหนือตัวอย่างผลิตภัณฑ์ 35 เซนติเมตร เป็นมุม 45 องศา และปิดไฟในห้องทดลอง (ดังรูปที่ 3) ซึ่งผลที่ได้จากการทดลองแสดงดังตารางที่ 5

รูปที่ 3 แสดงภาพหลังการปรับปรุง

ตารางที่ 5 รูปแบบการทดลองและผลการทดลองหลังการปรับปรุง

ลำดับการสุ่ม	ลำดับทดลอง	Part	Operator	Method	L*	a*	b*
40	1	10	2	2	42.9982	8.6256	12.1761
39	2	10	2	1	41.9234	8.8206	11.7624
21	3	6	1	1	48.0045	6.3601	12.4307
48	4	2	2	2	46.3613	14.6579	23.2166
26	5	7	1	2	44.9643	7.518	10.2246
8	6	2	2	2	46.4064	14.3364	24.1653
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
3	78	1	2	1	36.2686	28.0756	21.7609
4	79	1	2	2	36.5066	27.766	20.6571
70	80	8	1	2	49.669	6.3887	7.069

เมื่อนำมาคำนวณค่าสัดส่วนระหว่างความแปรปรวนของระบบการวัดและความแปรปรวนของชิ้นงานจากการลดรูปตัวแบบ (Reduced model) ตัวอย่างการคำนวณของค่า a* ตามสมการที่ 4 แสดงดังนี้

$$\sigma^2_{gauge} = \sigma^2 + \sigma^2_\beta + \sigma^2_\gamma \qquad (4)$$

$$\sigma^2_{gauge} = 1.5301 + 0.0530 + 0.0035 = 1.5866$$

จากการคำนวณดังกล่าวสามารถสรุปผลการวิเคราะห์ดังตารางที่ 6 จากตารางจะเห็นได้ว่า ค่าสัดส่วนระหว่างความแปรปรวนของระบบการวัดและความแปรปรวนของชิ้นงาน ของ L* a* และ b* เท่ากับ 2.14% 2.74% และ 11.24% ซึ่งแสดงว่าความแปรปรวนของเครื่องมือวัดมีค่าน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับความแปรปรวนเนื่องจากชิ้นงาน

ตารางที่ 6 ตารางเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของ L* a* และ b* หลังการปรับปรุง

ความแปรปรวน	L*	a*	b*
σ^2_{gage}	0.4930	1.5866	4.1794
σ^2_{part}	23.0153	57.8451	37.1938
% $\sigma^2_{gage}/\sigma^2_{part}$	2.14%	2.74%	11.24%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการวิเคราะห์ความแปรปรวน(ANOVA) ของค่า L* a* และ b* จะเห็นได้ว่าอิทธิพลของชิ้นงานวัดทำให้ค่าวัดเปลี่ยนแปลงไป แต่ไม่มีอิทธิพลเนื่องจากพนักงานวัด

ตารางที่ 7 การเปรียบเทียบค่าสัดส่วนระหว่างความแปรปรวนของระบบการวัดและความแปรปรวนของชิ้นงาน

% $\sigma^2_{gage}/\sigma^2_{part}$	ก่อนการปรับปรุง	หลังการปรับปรุง
L*	5.77%	2.14%
a*	5.17%	2.74%
b*	9.27%	11.24%

จากตารางที่ 7 เมื่อทำการเปรียบเทียบระหว่างระบบการวัดก่อนการปรับปรุงและหลังการปรับปรุงของค่า L* a* และ b* จะเห็นได้ว่า เมื่อทำการปรับปรุงระบบการวัด พบว่าไม่มีความแตกต่างของการวัดเนื่องจากพนักงาน และค่าสัดส่วนระหว่างความแปรปรวนของระบบการวัดและความแปรปรวนของชิ้นงานของค่า L* และ a* มีค่าลดลงจากค่าก่อนการปรับปรุงเหลือ 2.14% และ 2.74% ตามลำดับ แต่ค่า b* มีค่าเพิ่มจากก่อนการปรับปรุง คือ 11.24% ซึ่งในทางปฏิบัติถือว่าเพิ่มขึ้นจากเดิมไม่มากนัก

จากผลการทดลองดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าระบบการวัดหลังการปรับปรุงอยู่ในเกณฑ์ที่ดี ในการทดลองครั้งนี้ใช้กระดาษสินทนผลิตภัณฑ์ไส้กรอก ซึ่งในขั้นตอนต่อไปจะนำไปประยุกต์ใช้กับผลิตภัณฑ์จริงคาดว่าผลที่ได้จะมีลักษณะคล้ายคลึงกัน

6. สรุป

จากการทดลองศึกษาความสามารถในการวัดซ้ำและการวัดเหมือนของเครื่องมือวัด ประกอบด้วย 3 ปัจจัย คือ พนักงาน ชิ้นงาน และวิธีการวัด การปรับปรุงระบบแสงที่ใช้ในการวัด ทำให้ค่าสัดส่วนระหว่างความแปรปรวนของระบบการวัดและความแปรปรวนของชิ้นงานของค่า L* และ a* มีค่าลดลงจากค่าก่อนการปรับปรุงเหลือ 2.14% และ 2.74% ตามลำดับ แต่ค่า b* มีค่าเพิ่มจากก่อนการปรับปรุงเล็กน้อย คือ 11.24% ซึ่งในอนาคตควรมีการปรับปรุงระบบแสงในการวัด เพื่อให้ค่าสัดส่วนระหว่างความแปรปรวนของระบบการวัดและความแปรปรวนของชิ้นงานลดลงเหลือน้อยที่สุด

เอกสารอ้างอิง

[1] สถาบันอาหาร. อุตสาหกรรมอาหารไทย [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก : URL: www.industry.go.th/Lists/.../ข้อมูลพื้นฐานอุตสาหกรรม.pdf

[2] Chambers, I.V.E. and Bowers, J. 1993. Consumer perception of sensory quality in muscle foods: sensory characteristics of meat influence consumer decisions. Food Technology 47: 116–120.

[3] Francis, F.J. 1995. Quality as influenced by color. Food Quality and Preference 6: 149-155.

[4] Du, C. and Sun, D. 2004. Recent developments in the applications of image processing techniques for food quality evaluation. Trends in Food Science & Technology, 15: 230–249.

[5] Sun, D.W., and Brosnan, T. 2004. Improving quality inspection of food products by computer vision-a review. Journal of Food Engineering, 61 : 3-16.

[6] กิติศักดิ์ พลอยพานิชเจริญ. 2553. การวิเคราะห์ระบบการวัด (MSA) ประมวลผลด้วย Minitab 15. สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี, กรุงเทพฯ, หน้า 141-157.

[7] ณัฐพล แสงจันทร์ และดาวพระศุกร์ นุ่มเอี่ยม. 2548. การศึกษาความเป็นไปได้ในการคัดแยกถั่วเหลืองฝักสดโดยใช้กระบวนการประมวลผลภาพ [ปริญญานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต]. กรุงเทพ : สาขาวิชาวิศวกรรมเกษตร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง

[8] Yam, K.L. and Papadakis, S.E. 2004. A simple digital imaging method for measuring and analyzing color of food surfaces . Journal of Food Engineering, 61: 137–142.

[9] Pedreschi, F., LeÓn, J., Mery, D. and Moyano, P. 2006. Development of a computer visionsystem to measure the color of potato chips. Food Research International, 39: 1092–1098.

[10] Montgomery, D.C. 2009. Statistical Quality Control: A Modern Introduction, John Wiley & Sons, INC., The United States of America.

[11] Montgomery, D.C. 2009. Design and Analysis of Experiments, International Student Version, John Wiley & Sons, INC., The United States of America.

[12] Mendoza, F., Dejmek, P.A and Aguilera, J.M. 2007. Colour and image texture analysis in classification of commercial potato chips. Food Research International, 40: 1146-1154.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การวิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลต่อค่าสีในระบบการวัดคุณภาพสีโดยใช้ภาพถ่าย

Analysis of factors affecting image-based color detection

ปิยาภรณ์ มาตย์วิเศษ ชุมพล ยวงใย

สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

บทคัดย่อ

การประมวลผลภาพได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้ในการตรวจสอบคุณภาพอาหาร โดยระบบนี้มีองค์ประกอบและปัจจัยหลายอย่างที่อาจส่งผลให้เกิดความผันแปรของการวัดสีของภาพถ่ายอาหารที่ต้องการ งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อค่าสีในระบบ L* a* b* ของภาพถ่าย เพื่อเป็นข้อมูลในการลดความผันแปรของระบบและทดสอบความสามารถของเครื่องมือประมวลผลภาพของอาหารที่มีอยู่ อีกทั้งอธิบายความผันแปรที่เกิดขึ้น เพื่อประโยชน์ในการปรับปรุงและควบคุมกระบวนการ โดยในการทดลองมีปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับระบบทั้งหมด 10 ปัจจัย แต่เมื่อพิจารณาโดยใช้ความรู้เบื้องต้นสามารถกรองปัจจัยเพื่อลดความผันแปรของสีของภาพถ่ายในเบื้องต้นได้เหลือ 6 ปัจจัย ได้แก่ ผู้ทำการทดลอง สีพื้นหลังวางชิ้นงาน ตำแหน่งการวางชิ้นงาน จำนวนหลอดไฟ แสงภายนอกและระยะห่างของชิ้นงานกับกล้อง จากนั้นออกแบบการทดลองแบบเศษส่วนเชิงแฟคทอเรียล (fractional factorial design) เพื่อทดสอบความมีนัยสำคัญของปัจจัย พบว่าปัจจัยผู้ทำการทดลองและแสงภายนอก (outside light) ไม่มีผลต่อค่า L* a* และ b* ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ดังนั้นจึงเลือกทั้งสองปัจจัยดังกล่าวไปทำการวิเคราะห์ความสามารถของระบบการวัด (gauge repeatability and reproducibility, GR&R) โดยใช้การออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียลแบบเต็ม (full factorial design) ส่วนปัจจัยอื่นๆ กำหนดให้เป็นค่าคงที่เพื่อลดความผันแปรที่จะเกิดขึ้น จากการทดลองพบว่าค่าสัดส่วนความแปรปรวนของค่า L* a* และ b* ในการทดสอบความสามารถเครื่องมือวัดมีค่าเท่ากับ 0.012% 2.173% และ 0.657% ตามลำดับ ซึ่งสามารถยอมรับได้

คำสำคัญ : การลดความผันแปร, การประมวลผลภาพ, การวิเคราะห์ระบบการวัด, การออกแบบการทดลอง

Abstract

The image processing system has been used to inspect food quality and it consists of several components and factors affecting image-based color detection. The aims of this research is to study these factors affecting color in L* a* b* model to reduce the measurement variability and test the effectiveness of the measurement system. In our experimentation, we consider six factors associated in the system: operator, background, position, number of lamp outside light and distance. Fractional factorial design is used to screen these factors, the experimentation results indicated that operator and outside light are significance at 95 confidence level. Therefore, they are further analyzed using gage repeatability and reproducibility (GR&R), the other four factors defined as a constant to reduce the variability. Results show the variation ratio of the L*, a* and b* is 0.012%, 2.173% and 0.657%, respectively, which are acceptable for further use.

Keywords : variation reduction, image processing, gauge repeatability and reproducibility, design of experiment

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. บทนำ

วิธีการประมวลผลภาพ (image processing) ได้เข้ามามีบทบาทสำคัญในการตรวจสอบคุณภาพอาหารและผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรมากยิ่งขึ้นเนื่องจากสามารถตรวจสอบได้โดยอัตโนมัติทำให้การผลิตมีความรวดเร็ว แม่นยำ และน่าเชื่อถือ [1] เช่น วิเคราะห์คุณภาพของผัก ผลไม้ เนื้อวัว ปลา พิซซ่า ชีส และขนมปัง เป็นต้น [2]

ความแตกต่างกันของผักและผลไม้เป็นอีกปัญหาหนึ่งในซูเปอร์มาร์เก็ตที่พนักงานขายจะต้องสามารถแยกชนิดและคุณภาพของผักผลไม้เหล่านั้นได้ ซึ่งความแตกต่างนี้จะเป็นตัวกำหนดราคาสินค้า เนื่องจากผักและผลไม้บางชนิดผู้บริโภคจะเป็นผู้กำหนดปริมาณเองจึงไม่สามารถบรรจุสำเร็จรูปได้ และชั่งน้ำหนักในขั้นตอนการคิดราคา แต่การชั่งน้ำหนักไม่สามารถบอกถึงชนิดและคุณภาพของสินค้าแต่ละชิ้นได้ ทำให้นำไปสู่ความผิดพลาดในการกำหนดราคา [3] ดังนั้นการประยุกต์ใช้วิธีการประมวลผลภาพในการประเมินสีของผักและผลไม้ช่วยให้การแบ่งแยกประเภทและคุณภาพมีประสิทธิผลเพิ่มมากขึ้น ซึ่งจากการศึกษาพบว่ามีงานวิจัยที่นำวิธีการประมวลผลภาพมาประยุกต์ใช้กับการตรวจสอบคุณภาพผักและผลไม้ [3] แต่ยังไม่พบว่ามีการวิเคราะห์ความสามารถของระบบการวัด ทั้งนี้การวิเคราะห์ความสามารถของระบบการวัดนั้น ถือได้ว่ามีความสำคัญต่อทั้งประสิทธิภาพและความน่าเชื่อถืออีกทั้งยังเป็นประโยชน์ในการปรับปรุงกระบวนการ เนื่องจากในกระบวนการมีความเกี่ยวข้องกับการวัดและแน่นอนว่าค่าที่ได้จากการวัดจะมีความผันแปรเกิดขึ้นเสมอและเนื่องจากในระบบการประมวลผลภาพนั้นมีองค์ประกอบและปัจจัยหลายอย่างที่อาจส่งผลให้สีของภาพถ่ายที่ต้องการวัดเกิดความผันแปร เช่น เครื่องมือวัด พนักงานวัด ปัจจัยแวดล้อม จึงมีความจำเป็นที่ต้องมีการศึกษาปัจจัยเหล่านั้น เพื่อลดความผันแปรที่จะเกิดขึ้นและทำให้เกิดความเชื่อมั่นในความสามารถในการแบ่งแยกผลิตภัณฑ์ของระบบการวัด

งานวิจัยในครั้งนี้จึงได้นำการออกแบบการทดลองเชิงสถิติมาเป็นเครื่องมือในการวิเคราะห์ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อค่าสีในระบบ L* a* b* ของภาพถ่ายที่ได้จากระบบการประมวลผลภาพของอาหารเพื่อลดความผันแปรที่จะเกิดขึ้นในระบบ โดยในที่นี้ความผันแปรจะถูกนำเสนอในรูปแบบของค่าความแปรปรวนที่สามารถวัดได้อีกทั้งทดสอบความสามารถของเครื่องมือ ตลอดจนอธิบายความแปรปรวนที่เกิดขึ้นเพื่อประโยชน์ในการปรับปรุงและควบคุมกระบวนการประมวลผลภาพ

ในบทความนี้ได้แบ่งออกเป็น 5 ส่วน โดยส่วนแรกกล่าวถึงความสำคัญของวิธีการประมวลผลภาพและการวิเคราะห์ความสามารถของระบบการวัด ส่วนที่สองกล่าวถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง ส่วนที่สามกล่าวถึงอุปกรณ์และการออกแบบการทดลองซึ่งมีทั้งหมด 3 ขั้นตอน ในขั้นตอนแรกจะเริ่มจากการกรองปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับระบบ จากนั้นนำปัจจัยที่เหลือมาทดสอบความมีนัยสำคัญโดยคัดเลือกปัจจัยที่ไม่มีผลต่อค่าสี เพื่อลดความแปรปรวนที่จะเกิดขึ้น สุดท้ายนำปัจจัยมาทำการทดสอบความสามารถของระบบการวัด ส่วนที่สี่เป็นผลที่ได้จากการทดลองและส่วนที่ห้าเป็นการสรุปผลที่ได้จากการทดลอง

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 การออกแบบการทดลอง

การออกแบบการทดลองเชิงสถิติ (statistical design of experiment) หมายถึงกระบวนการในการวางแผนการทดลองเพื่อให้ได้มาซึ่งข้อมูลที่เหมาะสมที่สามารถนำไปใช้ในการวิเคราะห์ ซึ่งช่วยให้สามารถหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมกับปัญหาได้ นำไปสู่การหาคำตอบที่ดีที่สุดของปัญหาต่อไป [4]

2.2 วิธีการประมวลผลภาพ

การประมวลผลภาพ (image processing) เป็นการเรียกใช้ขั้นตอนหรือกรรมวิธีใดๆ มากระทำกับภาพ เพื่อปรับปรุงคุณภาพของภาพให้มีคุณสมบัติตามต้องการ เช่น ความคมชัดหรือการประหยัดพื้นที่ในการเก็บข้อมูลหรือใช้สำหรับการประมวลผลภาพ เช่น การจดจำลักษณะได้อย่างแม่นยำหรือการทำให้ได้ค่าการวัดออกมา เป็นต้น

2.3 การวิเคราะห์ความสามารถของระบบการวัด

ความสามารถของระบบการวัดนั้นประกอบไปด้วยความสามารถในการวัดซ้ำ (repeatability) ซึ่งหมายถึงความแปรปรวนของค่าวัดที่เกิดจากการวัดโดยใช้ผู้วัดคน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เดียว อุปกรณ์วัดเดียวกันในการวัดชิ้นงานชิ้นเดียวกันซ้ำๆ และความสามารถในการวัดเหมือน (reproducibility) หมายถึงความแปรปรวนของค่าวัดที่เกิดจากการใช้อุปกรณ์วัดเดียวกันในการวัดชิ้นงานเดียวกันด้วยเงื่อนไขที่แตกต่างกัน โดยสมการที่ 1 สามารถอธิบายความสามารถรวมของระบบการวัดในรูปแบบของค่าความแปรปรวนได้ดังนี้ [5]

$$\sigma^2_{total} = \sigma^2_{part} + \sigma^2_{gauge} \qquad (1)$$

โดย σ^2_{total} คือความแปรปรวนทั้งหมด σ^2_{part} คือความแปรปรวนของชิ้นงาน σ^2_{gauge} คือความแปรปรวนของเครื่องมือวัดซึ่งประกอบไปด้วยความสามารถในการวัดซ้ำ ($\sigma^2_{repeatabilty}$) และความสามารถในการวัดเหมือน ($\sigma^2_{reproducibility}$) ดังแสดงในสมการที่ 2

$$\sigma^2_{gauge} = \sigma^2_{repeatabilty} + \sigma^2_{reproducibility} \qquad (2)$$

รูปแบบการออกแบบการทดลองทั่วไปเพื่อศึกษาความสามารถของระบบการวัด มีตัวแปรได้แก่ ชิ้นงาน (part ; i = 1,2,…,a) ปัจจัยที่ 1 (factor 1 ; j = 1,2,…,b) และปัจจัย 2 (factor 2 ; k = 1,2,…,c) แสดงดังสมการที่ 3

$$y_{ijkl} = \mu + \tau_i + \beta_j + \gamma_k + (\tau\beta)_{ij} + (\tau\gamma)_{ik} + (\beta\gamma)_{jk} + (\tau\beta\gamma)_{ijk} + \varepsilon_{ijkl} \qquad (3)$$

โดย μ คือค่าเฉลี่ย τ_i คืออิทธิพลของชิ้นงาน มีค่าความแปรปรวน = σ^2_τ β_j คืออิทธิพลจากปัจจัยที่ 1 มีค่าความแปรปรวน = σ^2_β γ_k คืออิทธิพลจากปัจจัยที่ 2 มีค่าความแปรปรวน = σ^2_γ $(\tau\beta)_{ij}$ คืออิทธิพลร่วมของชิ้นงานและปัจจัยที่ 1 มีค่าความแปรปรวน = $\sigma^2_{\tau\beta}$ $(\tau\gamma)_{ik}$ คืออิทธิพลร่วมของชิ้นงานและปัจจัยที่ 2 มีค่าความแปรปรวน = $\sigma^2_{\tau\gamma}$ $(\beta\gamma)_{jk}$ คืออิทธิพลร่วมของปัจจัยที่ 1 และ 2 มีค่าความแปรปรวน = $\sigma^2_{\beta\gamma}$ $(\tau\beta\gamma)_{ijk}$ คืออิทธิพลร่วมของชิ้นงาน ปัจจัยที่ 1 และปัจจัยที่ 2 มีค่าความแปรปรวน = $\sigma^2_{\tau\beta\gamma}$ ε_{ijkl} คือค่าความคลาดเคลื่อนของระบบ มีค่าความแปรปรวน = σ^2_ε l คือจำนวนซ้ำของการทดลอง ดังนั้นค่าความแปรปรวนทั้งหมดของระบบ $V(y_{ijkl})$ มีค่า

$$V(y_{ijkl}) = \sigma^2_\tau + \sigma^2_\beta + \sigma^2_\gamma + \sigma^2_{\tau\beta} + \sigma^2_{\tau\gamma} + \sigma^2_{\beta\gamma} + \sigma^2_{\tau\beta\gamma} + \sigma^2_\varepsilon \qquad (4)$$

3. วิธีการ

3.1 อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

1. เครื่องมือการประมวลผลภาพ (รูปที่ 1) กล่องไม้ขนาด 80 × 80 × 60 เซนติเมตร ภายในทาสีดำ [6]

2. แสงสว่างจากหลอดไฟฟลูออเรสเซนต์ ความยาว 60 เซนติเมตร 4 หลอด จัดวางเป็นสี่เหลี่ยมเหนือชิ้นงาน 35 เซนติเมตร เป็นมุม 45 องศา [6]

3. กล้องดิจิตอล Nikon D5100 ตั้งค่ากล้อง ISO200 ความเร็วชัตเตอร์ 1/100 ค่ารูรับแสง 5.0

4. การถ่ายภาพเชื่อมต่อด้วย USB ผ่านคอมพิวเตอร์ โดยใช้โปรแกรม Camera Control Pro 2 และปรับปรุงคุณภาพภาพถ่ายโดยการตัดสิ่งรบกวน วิเคราะห์ค่า L* a* b* ของภาพถ่ายด้วยโปรแกรม MATLAB

5. ตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองจะใช้กระดาษโทนสีเขียวขนาด 10 × 10 เซนติเมตร 10 ชิ้น (รูปที่ 2) เนื่องจากสะดวกในการทดลองและใช้สีเขียวที่ต่างกันเพื่อแทนความแตกต่างกันของสีเขียวของผักและผลไม้

รูปที่ 1 เครื่องมือประมวลผลภาพ

รูปที่ 2 สีของกระดาษสีที่ใช้ในการทดลองจากระดับ 1 ถึง 10

3.2 การออกแบบการทดลอง

1. พิจารณาปัจจัยทั้งหมดที่เกี่ยวข้องกับค่าสีในระบบ L* a* b* ของภาพถ่ายและกรองปัจจัยโดยใช้ความรู้จากประสบการณ์เพื่อลดความผันแปรในระบบเบื้องต้น

2. วัดสีจากภาพถ่ายชิ้นงาน โดยใช้ชิ้นงานคือกระดาษสีเขียวในระดับที่ 5 มาทำการทดสอบ และออกแบบการทดลองแบบเศษส่วนเชิงแฟคทอเรียลจากปัจจัยที่เหลือจากการกรองในขั้นต้น แล้วพิจารณาปัจจัยที่ไม่มีผลต่อค่า L* a* และ b* ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% มาทดลองต่อ เพื่อลดความผันแปรที่จะเกิดขึ้นในระบบ

3. วัดสีจากภาพถ่ายชิ้นงาน ซึ่งในส่วนนี้จะใช้กระดาษสีเขียวทุกระดับมาทดสอบ โดยออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียลแบบเต็มจากปัจจัยที่ไม่มีผลต่อค่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

L* a* b* ที่ได้จากขั้นตอนที่ 2 เพื่อทดสอบความสามารถของระบบการวัด (GR&R) ทั้งนี้ข้อมูลทั้งหมดจะวิเคราะห์ผลโดยใช้โปรแกรม MINITAB

4. ผลการดำเนินงาน

1. ตารางที่ 1 แสดงการพิจารณาปัจจัยทั้งหมดที่เกี่ยวข้องกับค่าสีในระบบ L* a* b* ของภาพถ่ายชิ้นงาน

ตารางที่ 1 การวิเคราะห์ปัจจัยเบื้องต้น

ปัจจัย	การวิเคราะห์เบื้องต้น		
	มีผล	ไม่มีผล	ไม่ทราบแน่ชัด
ขนาดรูรับแสงของกล้องถ่ายภาพ	✓		
ความไวชัตเตอร์กล้องถ่ายภาพ	✓		
การกดชัตเตอร์		✓	
สีพื้นหลังวางชิ้นงาน			✓
ลักษณะพื้นผิวของชิ้นงาน	✓		
ผู้ทำการทดลอง			✓
ตำแหน่งการวางชิ้นงาน			✓
จำนวนหลอดไฟ			✓
แสงภายนอก			✓
ระยะห่างของชิ้นงานกับกล้อง			✓

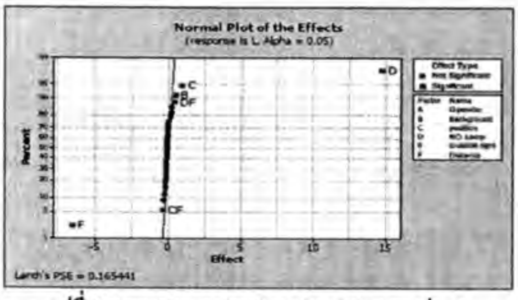
จากตารางที่ 1 พบว่าปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับระบบมีทั้งหมด 10 ปัจจัย โดยสามารถสรุปได้จากประสบการณ์ว่ามีผลและไม่มีผลต่อค่าสีของชิ้นงานมี 4 ปัจจัย ทั้งนี้เพื่อคัดแยกปัจจัยเหล่านี้ออกจากการพิจารณาโดยกำหนดเป็นค่าคงที่เพื่อลดความผันแปรในเบื้องต้น ส่วนปัจจัยที่ยังไม่ทราบแน่ชัดว่ามีผลหรือไม่มีทั้งหมด 6 ปัจจัย

2. กำหนดระดับของปัจจัยทั้ง 6 ปัจจัย ตามตารางที่ 2 และออกแบบการทดลองแบบเศษส่วนเชิงแฟคทอเรียลแบบ 2^{6-1} ได้ทั้งหมด 32 การทดลอง

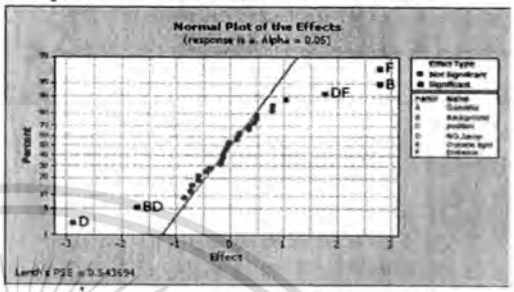
ตารางที่ 2 ระดับของปัจจัยที่ใช้ในการทดลองความมีนัยสำคัญ

ปัจจัย	ระดับ	
	ต่ำ (-1)	สูง (1)
ผู้ทำการทดลอง (A)	คนที่ 1	คนที่ 2
สีพื้นหลังวางชิ้นงาน (B)	ดำ	ขาว
ตำแหน่งการวางชิ้นงาน (C)	เยื้อง	กลาง
จำนวนหลอดไฟ (D)	2 หลอด	4 หลอด
แสงภายนอก (E)	ไม่มี	มี
ระยะห่างของชิ้นงานกับกล้อง (F)	23.5 cm	35.5 cm

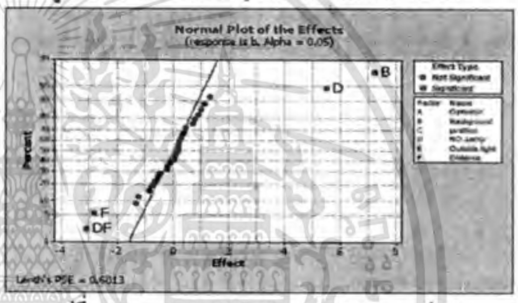
ในขั้นตอนนี้จะพิจาณาเฉพาะปัจจัยที่ไม่มีผลต่อสีของภาพถ่าย จากนั้นนำปัจจัยดังกล่าวไปทำการทดสอบความสามารถของระบบการวัด ส่วนปัจจัยอื่นๆกำหนดให้



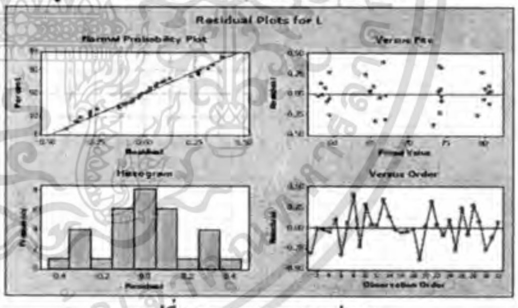
รูปที่ 3 Normal Probability Plot of the Effect ของค่า L*



รูปที่ 4 Normal Probability Plot of the Effect ของค่า a*



รูปที่ 5 Normal Probability Plot of the Effect ของค่า b*



รูปที่ 6 Residual Plot ของค่า L*

เป็นค่าคงที่ เพื่อลดความผันแปรที่จะเกิดขึ้น ทั้งนี้เพื่อพิจารณาว่าปัจจัยที่ไม่ส่งผลต่อสีของภาพถ่ายนั้นจะส่งผลให้ระบบการวัดเกิดความแปรปรวนหรือไม่ ซึ่งจากรูปที่ 3 4 และ 5 พบว่าจาก 6 ปัจจัย อิทธิพลจากผู้ทำการทดลอง (A) และแสงภายนอก (E) ไม่มีผลต่อค่า L* ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ส่วนอิทธิพลที่ไม่มีผลต่อค่า a* และ b* คือ ผู้ทำการทดลอง (A) ตำแหน่งการวางชิ้นงาน (C) และแสงภายนอก (E) และเมื่อพิจารณา Residual Plot ของค่า L* ใน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 6 พบว่าค่าตกค้าง (Residual) มีการเรียงตัวเป็นเส้นตรง การกระจายตัวเป็นแบบปกติ ส่วน Versus Fits และ Versus Order พบว่า ค่าตกค้างมีความแปรปรวนคงที่ ซึ่งในส่วนของค่า a* และ b* ก็ให้ผลเช่นเดียวกันจึงสามารถสรุปได้ว่าค่าตกค้างของข้อมูลไม่ผิดปกติดังนั้นจึงสามารถนำข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์มาใช้ได้

3. ออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียลแบบเต็มจากปัจจัยที่ไม่มีผลต่อค่า L* a* b* โดยในการทดลองนี้เลือกปัจจัยผู้ทำการทดลอง (A) และแสงภายนอก (E) มาทำการวิเคราะห์ต่อ เนื่องจากตำแหน่งการวางชิ้นงาน (C) เป็นปัจจัยที่มีผลต่อค่า L* แต่ไม่มีผลสำหรับค่า a* และ b* แต่การวิเคราะห์ต้องทำการวิเคราะห์ค่า L* a* และb* พร้อมกัน ดังนั้นหากนำปัจจัยตำแหน่งการวางชิ้นงานมาทำการวิเคราะห์ร่วมด้วยอาจทำให้ไม่สามารถวิเคราะห์ความสามารถของระบบในส่วนของค่า L* ได้อย่างแท้จริง โดยได้กำหนดระดับของปัจจัยในการทดลองดังตารางที่ 3 ได้การทดลองทั้งหมด 40 การทดลอง ไม่ทำซ้ำการทดลอง

ตารางที่ 3 ระดับของปัจจัยที่ใช้ในการวิเคราะห์

ปัจจัย	ระดับ
ผู้ทำการทดลอง (operator)	คนที่ 1 , คนที่ 2
แสงภายนอก (outside Light)	มี , ไม่มี
สีของชิ้นงาน (part)	1 ,2 ,3 ,4 ,5 ,6 ,7 ,8 ,9 ,10

จากตารางการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ของค่า L* จะเห็นได้ว่าอิทธิพลหลักจากผู้ทำการทดลองและแสงภายนอกไม่มีผลทำให้ค่าที่วัดได้เปลี่ยนแปลงไปที่ระดับความเชื่อมั่น 95% แต่อิทธิพลร่วมระหว่างชิ้นงานกับผู้ทำการทดลอง ชิ้นงานกับแสงภายนอกและผู้ทำการทดลองกับแสงภายนอกมีผลต่อค่า L* ที่วัดได้ ซึ่งอิทธิพลร่วมระหว่างชิ้นงานกับผู้ทำการทดลองมีนัยสำคัญนั้น อาจเป็นไปได้ว่าเมื่อเปลี่ยนชิ้นงานให้ผู้ทำการทดลองคนเดิมทำการวัดแล้ว ผลการวัดจะเปลี่ยนไป ซึ่งถึงแม้ว่าอิทธิพลหลักของผู้ทำการทดลองจะไม่มีผลอย่างมีนัยสำคัญ แต่แท้ที่จริงแล้วมีอิทธิพลมากเมื่อมีการประเมินค่าความแปรปรวนด้านความสามารถในการวัดซ้ำและการวัดเหมือนของเครื่องมือวัด ในทำนองเดียวกันอิทธิพลร่วมระหว่างชิ้นงานกับแสงภายนอก อาจสามารถแปลความหมายได้ว่าเมื่อเปลี่ยนชิ้นงานในการทำการทดลอง

ตารางที่ 4 แสดงผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่า L*

ANOVA: L versus Part, Operator, Outside light

Factor	Type	Levels	Values
Part	random	10	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10
Operator	random	2	1, 2
Outside light	random	2	1, 2

Analysis of Variance for L*

Source	DF	SS	MS	F	P
Part	9	6998.91	777.66	14268.56	0.000 x
Operator	1	0.02	0.02	0.33	0.620 x
Outside light	1	0.06	0.06	0.83	0.457 x
Part*Operator	9	0.29	0.03	4.92	0.013
Part*Outside light	9	0.26	0.03	4.29	0.021
Operator*Outside light	1	0.05	0.05	7.30	0.024
Error	9	0.06	0.01		
Total	39	6999.65			

x Not an exact F-test.

S = 0.0514812 R-Sq = 100.00% R-Sq (adj) = 100.00%

Source	Variance Component	Error term	Expected Mean Square for Each Term (using unrestricted model)
1 Part	194.401	*	(7) + 2 (5) + 2 (4) + 4 (1)
2 Operator	-0.003	*	(7) + 10 (6) + 2 (4) + 20 (2)
3 Outside light	-0.001	*	(7) + 10 (6) + 2 (5) + 20 (3)
4 Part*Operator	0.013	7	(7) + 2 (4)
5 Part*Outside light	0.011	7	(7) + 2 (5)
6 Operator*Outside light	0.004	7	(7) + 10 (6)
7 Error	0.007		(7)

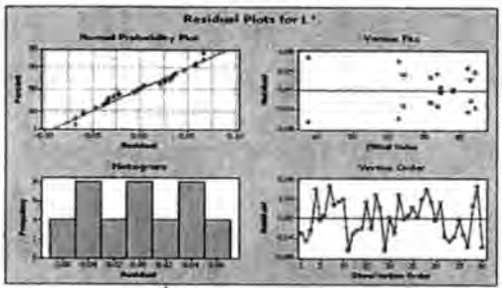
โดยการมีแสงภายนอกเหมือนเดิม ผลการวัดจะเปลี่ยนไป ซึ่งอาจตีความได้ว่าสีของชิ้นงานที่ต่างกันอาจมีการดูดซับหรือสะท้อนแสงที่แตกต่างกันทำให้ค่า L* ที่วัดได้แตกต่างกัน ส่วนอิทธิพลร่วมระหว่างผู้ทำการทดลองกับแสงภายนอกนั้น จากการสังเกตจากการทดลองพบว่าผู้ทำการทดลองแต่ละคนมีรูปร่างที่ต่างกัน เงาของรูปร่างที่มีผลต่อการบังแสงก็ต่างกัน ซึ่งอาจส่งผลให้แสงภายนอกที่ส่องผ่านเข้ามาตกกระทบชิ้นงานไม่เท่ากันในขณะที่เป็นชิ้นงานชิ้นเดียวกัน จึงมีผลทำให้ค่า L* ที่วัดได้ต่างกัน

ส่วนผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่า a* และ b* ได้ผลว่าไม่มีอิทธิพลหลักและอิทธิพลร่วมใดมีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อค่า a* ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% แต่พบว่าอิทธิพลร่วมระหว่างชิ้นงานและแสงภายนอกมีผลต่อค่า b* ของภาพถ่ายอย่างมีนัยสำคัญ

เมื่อพิจารณา Normal Probability Plot พบว่าค่าตกค้างของทั้งค่า L* (รูปที่ 7) และ a* b* มีการเรียงตัวเป็นเส้นตรง การกระจายตัวมีแนวโน้มใกล้เคียงแบบปกติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วน Versus Fits และ Versus Order พบว่าค่าตกค้างมีความแปรปรวนคงที่ดังนั้นจึงไม่ผิดปกติ



รูปที่ 7 Residual Plot ของค่า L*

ตัวอย่างการคำนวณค่าความแปรปรวนทั้งหมดในส่วนของค่า L* จากสมการที่ 4 ได้ดังนี้

$$\sigma^2_{total} = 194.401 + 0 + 0 + 0.013 + 0.011 + 0.004 + 0 + 0.007 = 194.425$$

และจากสมการที่ 1 ทำให้สามารถเปรียบเทียบความแปรปรวนทั้งหมดได้ตามตารางที่ 5

ตารางที่ 5 ตารางเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่า L* a* b*

ความแปรปรวน	L*	a*	b*
σ^2_{total}	194.425	153.023	430.314
σ^2_{gauge}	0.024	3.254	2.809
σ^2_{part}	194.401	149.769	427.505
% $\sigma^2_{gauge}/\sigma^2_{part}$	0.012%	2.173%	0.657%

จากการคำนวณสามารถเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนดังตารางที่ 5 แสดงให้เห็นความแปรปรวนของระบบการวัดมีค่าน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับความแปรปรวนเนื่องจากชิ้นงาน ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับคำแนะนำสำหรับเกณฑ์การยอมรับโดยทั่วไปซึ่ง AIAG [7] ได้ระบุไว้ว่า ถ้าสัดส่วนความแปรปรวนต่ำกว่า 10% โดยทั่วไปแล้วถือว่าสามารถยอมรับได้

7. สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาเพื่อการลดความผันแปรของการวัดคุณภาพสีโดยใช้ภาพถ่าย มีปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับค่าสีในระบบ L*a*b* ของภาพถ่ายทั้งหมด 10 ปัจจัย สามารถกรองปัจจัยเพื่อลดความผันแปรในเบื้องต้นเหลือ 6 ปัจจัย จากนั้นเมื่อวิเคราะห์ความมีนัยสำคัญของทั้ง 6 ปัจจัยพบว่าสามารถนำปัจจัยผู้ทำการทดลองและแสงภายนอกไปทดสอบความสามารถของระบบการวัดได้เนื่องจากเป็นปัจจัยที่ไม่มีผลต่อค่า L* a* b* ซึ่งการทดสอบความสามารถของระบบการวัดพบว่าอิทธิพลหลักไม่มีผลทำให้ค่า L* a* และ b* ที่วัดได้เปลี่ยนแปลงไป แต่มีอิทธิพลร่วมบางกลุ่มที่ทำให้ค่าสีที่วัดได้เปลี่ยนแปลงไปอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งจากการลดความผันแปรที่จะเกิดขึ้นทั้งหมดในระบบ พบว่าความผันแปรของเครื่องมือวัดมีค่าน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับความผันแปรเนื่องจากชิ้นงานซึ่งสามารถยอมรับได้จึงถือได้ว่าระบบการวัดนี้สามารถใช้ได้

8. เอกสารอ้างอิง

[1] D. W. Sun, "Inspecting pizza topping percentage and distribution by a computer vision method," Journal of Food Engineering, vol. 44, pp. 245–249, 2000.

[2] T. Brosnan and D. W. Sun, "Improving quality inspection of food products by computer vision - a review," Journal of Food Engineering, vol. 61, pp. 3-16, 2004.

[3] A. Rocha, D. C. Hauagge, J. Wainer and S. Goldenstein, "Automatic fruit and vegetable classification from images," Computers and Electronics in Agriculture, vol. 70, pp. 96–104, 2010.

[4] D. C. Montgomery, "Design and Analysis of Experiments," International Student Version, John Wiley & Sons, INC., The United States of America, 2009.

[5] กิตติศักดิ์ พลอยพานิชเจริญ, "การวิเคราะห์ระบบการวัด (MSA) ประมวลผลด้วย Minitab 15," สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี, กรุงเทพฯ, หน้า 141-157, 2553.

[6] พิรญาณ์ แก้วสุวรรณและชุมพล ยวงใย, "การวิเคราะห์ระบบการวัดของเครื่องมือวัดคุณภาพสีของอาหาร," การประชุมวิชาการข่ายงานวิศวกรรมอุตสาหการ, หน้า 548-552, 2554.

[7] Automative Industry Action Group (AIAG). "Measurement System Analysis (MSA)," 3rd edition, Michigan, pp. 77, 2002.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัตินักวิจัย

ประวัติส่วนตัว

ชื่อ-สกุล นาย ชุมพล ยวงใย

เพศ ☑ ชาย ☐ หญิง วันเดือนปีเกิด 29 ธันวาคม 2517 อายุ 37 ปี

สถานภาพ ☑ โสด ☐ สมรส

ตำแหน่งปัจจุบัน อาจารย์

ประวัติการศึกษา

ชื่อย่อปริญญา	สาขา	สถาบันที่จบ	ปีที่จบ
วศ.บ.	วิศวกรรมเครื่องกล	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์	2538
M.Eng.	Industrial Engineering	Asian Institute of Technology	2543
Ph.D.	Industrial Engineering and Operations Research	Pennsylvania State University, USA.	2552

ทุนการศึกษาและทุนวิจัยที่เคยได้รับ

ปีพ.ศ.	ทุนการศึกษาและทุนวิจัย	สถาบันที่ให้
2553	Integrating Experimental Design and Reliability for Multiple Stage Manufacturing of Multi-Scale Devices	National Science Foundation, USA

ผลงานวิจัย/งานสร้างสรรค์

ผลงานวิจัย/งานสร้างสรรค์ที่ตีพิมพ์เผยแพร่ (ระดับชาติและนานาชาติ)

[1] **Yuangyai, C.** and Keawsuwan, P. 2011. "A Study of Integrated Model for Process Control and Adjustment under Linear Trend Condition." **Ladkrabang Engineering Journal** 28(2) : 37-42.

[2] **Yuangyai, C.** and Bilsel, R.U. 2010. "Optimal location of dwell points in a loop layout by minimizing the total number of trips around the loop under capacity constraints." **Ladkrabang Engineering Journal** 27(4) : 37-42.

[3] **Yuangyai, C.**, Nembhard, H.B., Hayes, G., Antolino, N., and Adair, J.H. 2009. "Yield Improvement for Lost Mold Rapid Infiltration Forming Process by a Multi-Stage Fractional Factorial Split Plot Design." **International Journal of Nanomanufacturing.** 3(4) : 351-367.

[4] **Yuangyai, C.** and Nembhard, H.B. 2009. "Design of Experiments: A Key to Innovation in Nanotechnology." In Ahmed, W. and Jackson, M. J. (Eds), **Emerging Nanotechnologies for Manufacturing**, William Andrew.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเสนอผลงานวิชาการ

[1] **Yuangyai, C.** and Abrahams, R. 2011. "Statistical process control with autocorrelated data using neural networks." pp. 283-287. In **2011 IEEE International Conference on Quality and Reliability.** 14-17 September 2011. Bangkok, Thailand.

[2] Gyawali, S., Techato, K. and **Yuangyai C.** 2011. "The improvement of water quality monitoring system on U-tapao river basin, Thailand." pp. es103-1 - es103-5. In **TIChE International Conference 2011**. 10 - 11 November 2011. Hatyai, Thailand.

[3] Techato, K., Monprapussorm, S. and **Yuangyai, C.** 2011. "Integrating land use and water quality for environmental based land use planning for U-tapao River Basin, Thailand." In **PSU-USM International Conference on Humanities and Social Sciences 2011**, 3-4 October 2011.

[4] Nembhard, H.B., Sanjay, J., Heany, D., **Yuangyai, C.**, and Hayes, G. 2009. "Optimal Designs for Multistage Fractional Factorial Designs." In **Proceeding of NSF-CMMI conference**, 22-25 June 2009. Honolulu, Hawaii.

[5] Aguirre, M., Hayes, G., **Yuangyai, C.**, Frecker, M., Adair, J., and Antolino, N. 2009. "Fabrication and Strength-Based Design of AMeso Forceps." In **Proceeding of the IDETC/CIE**, 30 August – 2 September 2009. San Diego, CA.

[6] **Yuangyai, C.** and Kachitwittayanukul. 2000. "Integrated Model for Procurement Production and Distribution System: A Case Study for a Disc Drive Company in Thailand." In **AIT Symposium**, Thailand.

[7] เอก มณีคำ และ **ชุมพล ยวงใย**. 2554. "การวิเคราะห์ปัจจัยเพื่อกำหนดเงื่อนไขที่เหมาะสมในการเชื่อมมิกสำหรับขาเบรกรถยนต์โดยการออกแบบการทดลอง กรณีศึกษาในโรงงานอุตสาหกรรมชิ้นส่วนรถยนต์." หน้า 997-1002. ใน **การประชุมวิชาการข่ายงานวิศวกรรมอุตสาหการประจำปี 2554**. 20-21 ตุลาคม 2011, ชลบุรี.

[8] พิรญาณ์ แก้วสุวรรณ และ **ชุมพล ยวงใย.** 2554. "การวิเคราะห์ระบบการวัดของเครื่องมือวัดคุณภาพสีของอาหาร." หน้า 548-552. ใน **การประชุมวิชาการข่ายงานวิศวกรรมอุตสาหการประจำปี 2554**. 20-21 ตุลาคม 2011, ชลบุรี.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้