

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การควบคุมกระบวนการเชิงสถิติโดยใช้ภาพสีสำหรับไส้กรอก

THE COLOR IMAGE-BASED STATISTICAL PROCESS CONTROL
FOR SAUSAGE



T123032



พิรญาณ์ แก้วสุวรรณ
PIRAYA KAEWSUWAN

อพ.
พ 7291

เลขหมู่..... 2505
123032

เลขทะเบียน.....

วัน,เดือน,ปี.. 10 ต.ค. 2555

b. 12479973
i.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ.2555

KMITL-2012-EN-M-217-116

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**THE COLOR IMAGE-BASED STATISTICAL PROCESS CONTROL
FOR SAUSAGE**



**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN INDUSTRIAL ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2012**

KMITL-2012-EN-M-217-116

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2012

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การควบคุมกระบวนการเชิงสถิติโดยใช้ภาพสีสำหรับไส้กรอก
Thesis Title The Color Image-Based Statistical Process Control for Sausage
นักศึกษา นางสาวพิรญาณ์ แก้วสุวรรณ
รหัสประจำตัว 53612412
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา วิศวกรรมอุตสาหการ
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ดร.ชุมพล ยวงโย
หมายเลขวิทยานิพนธ์ KMITL-2012-EN-M-217-116

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
รศ.ดร.ฤดี	มาสุจันท์	
ผศ.ดร.นวกัทธา	หนูนา	
รศ.ดร.โกสินทร์	จำนงไทย	
รศ.ดร.บุญวัฒน์	อัครุ	
ดร.ชุมพล	ยวงโย	

วัน / เดือน/ ปี ที่สอบ วันพฤหัสบดีที่ 31 พฤษภาคม พ.ศ. 2555 เวลา 11.30-13.30 น.
สถานที่สอบ ณ อาคาร A ชั้น 5 ห้องประชุม 3

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
KING MONKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์ ดร.สุชัชวีร์ สุวรรณสวัสดิ์)

คณบดี คณะวิศวกรรมศาสตร์
วันที่ 31 พฤษภาคม พ.ศ. 2555

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การควบคุมกระบวนการเชิงสถิติโดยใช้ภาพสีสำหรับไส้กรอก
นักศึกษา	นางสาวพิรญาณ์ แก้วสุวรรณ
รหัสประจำตัว	53612412
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมอุตสาหการ
พ.ศ.	2555
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	ดร.ชุมพล ยวงโย

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอวิธีการควบคุมกระบวนการเชิงสถิติโดยใช้ภาพสีสำหรับไส้กรอก สีของไส้กรอกเป็นหนึ่งในคุณลักษณะที่สำคัญทางกายภาพของผลิตภัณฑ์ต่อการตัดสินใจของผู้บริโภคและความพึงพอใจ อย่างไรก็ตามการตรวจคุณภาพสีของไส้กรอกในปัจจุบันตรวจสอบด้วยสายตามนุษย์ ทำให้เกิดความเหนื่อยล้าอาจเป็นผลให้ประสิทธิภาพการทำงานลดลง นอกจากนี้ผลการตรวจสอบไม่ได้ทำการบันทึกเพื่อการวิเคราะห์ที่ในอนาคตนอกเหนือจากการบ่งบอกว่าผลิตภัณฑ์ดีหรือเสีย

วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์นี้คือ สร้างระบบการวัดสำหรับการประเมินคุณภาพสีของไส้กรอก โดยใช้วิธีการประมวลผลด้วยภาพและวิธีการควบคุมกระบวนการเชิงสถิติ โดยเริ่มจากการศึกษาเครื่องมือต้นแบบสำหรับการวัดคุณภาพสีโดยการถ่ายภาพ โดยใช้โปรแกรม MATLAB ในการแปลงรูปภาพที่ได้มาเป็นคุณลักษณะเชิงตัวเลขจากระบบ RGB เป็น $L^*a^*b^*$ และการศึกษาความสามารถในการวัดซ้ำและการวัดเหมือนของเครื่องมือวัด (GR&R) ใช้วิเคราะห์ความแปรปรวนของระบบการวัดจากผลการทดลองพบว่าระบบการวัดมีความสามารถในการแบ่งแยกความแตกต่างของผลิตภัณฑ์ไส้กรอกได้

จากนั้นจึงทำการศึกษาลักษณะของข้อมูลที่ได้จากการถ่ายภาพดังนี้ การตรวจสอบการแจกแจงแบบปกติ การตรวจสอบสหสัมพันธ์ และการตรวจสอบอัตโนมัติสหสัมพันธ์ จากการศึกษาพบว่าข้อมูลไม่เป็นอิสระกันและนำไปสู่การละเมิดเงื่อนไขของแผนภูมิควบคุมซีวฮาร์ท ดังนั้นจึงใช้แผนภูมิควบคุมโฮเทลลิงที่สแควร์ทำการทดสอบความผิดปกติแบบ Spike และ Mean shift และแนะนำให้ใช้แผนภูมิควบคุมสำหรับตัวอย่างเชิงเดี่ยวในการวิเคราะห์ค่า $L^*a^*b^*$ ซึ่งแผนภูมิควบคุมสำหรับตัวอย่างเชิงเดี่ยวดังกล่าวทำให้เจ้าของกระบวนการสามารถตรวจสอบสาเหตุของความผิดปกติเพื่อการปรับปรุงกระบวนการในอนาคตต่อไป

Thesis	The Color Image-Based Statistical Process Control for Sausage
Student	Miss Piraya Kaewsuwan
Student ID.	53612412
Degree	Master of Engineering
Program	Industrial Engineering
Year	2012
Thesis Advisor	Dr. Chumpol Yuangyai

ABSTRACT

This thesis proposes the color image-based statistical process control for sausage. 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 objective of the study is to construct the measurement instrument for detecting color quality using image processing and statistical process control. 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 the process owner to investigate the cause of out-of-control signal for further process improvement.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จได้ด้วยความกรุณาจากอาจารย์ที่ปรึกษา ดร.ชุมพล ยวงใย ที่ให้ความช่วยเหลือ ให้คำชี้แนะ และช่วยแก้ปัญหาตลอดจนให้ความรู้แก่ข้าพเจ้า ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง ขอขอบพระคุณอาจารย์สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการทุกท่านที่ให้คำแนะนำ ชี้แนะในการทำวิทยานิพนธ์ และขอขอบพระคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ทุกท่านที่ให้คำแนะนำและข้อเสนอแนะในการทำวิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณบุคลากรประจำสาขาวิชาอุตสาหกรรม และเจ้าหน้าที่บัณฑิตศึกษา คณะวิศวกรรมศาสตร์ และเจ้าหน้าที่บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังที่ให้ความช่วยเหลือในเรื่องต่างๆ

ขอขอบคุณเพื่อน พี่และน้องๆ นักศึกษาปริญญาโทสาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังทุกคน ที่ช่วยให้กำลังใจ ให้ความช่วยเหลือ และคำแนะนำในเรื่องต่างๆ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้ได้รับทุนสนับสนุนการทำวิทยานิพนธ์จากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา และครอบครัวของข้าพเจ้าที่ให้คำแนะนำและข้อคิดเห็น ให้กำลังใจ และให้การสนับสนุนในทุกๆเรื่อง ทำให้ข้าพเจ้าสามารถทำวิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ข้าพเจ้าขอมอบให้กับบิดามารดา ซึ่งเป็นที่รักและเคารพยิ่ง ตลอดจนครูอาจารย์ที่เคารพทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้และถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดีให้แก่ข้าพเจ้า และผู้มีพระคุณทุกท่าน

พิรณานันท์ แก้วสุวรรณ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญรูป.....	IX
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	3
1.3 สมมติฐานของการศึกษา.....	3
1.4 ขอบเขตของการศึกษา.....	3
1.5 ขั้นตอนของการศึกษา.....	4
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	6
2.1 ความสำคัญของสีของอาหาร.....	6
2.2 วิธีการประมวลผลภาพ.....	6
2.2.1 ขั้นตอนพื้นฐานของการประมวลผลภาพ.....	7
2.3 แบบจำลองสี.....	9
2.3.1 ระบบ RGB (Red/ Green/ Blue).....	9
2.3.2 ระบบ HSI (Hue/ Saturation/ Intensity).....	10
2.3.3 ระบบ L*a*b*.....	10
2.4 คุณลักษณะของไส้กรอกและลักษณะที่ต้องการ.....	12
2.4.1 คุณลักษณะของไส้กรอก.....	12
2.4.2 คุณลักษณะที่ต้องการของไส้กรอกหมู.....	12
2.4.3 ขั้นตอนการผลิตไส้กรอกหมู.....	13
2.4.4 การเกิดสีของผลิตภัณฑ์ไส้กรอก.....	14
2.5 การวิเคราะห์ระบบการวัด.....	15
2.5.1 พื้นฐานเกี่ยวกับความสามารถของระบบการวัด.....	15
2.5.2 การวางแผนศึกษาความสามารถในการวัดซ้ำและการวัดเหมือนของเครื่องวัด.....	16
2.5.3 การออกแบบการทดลองการศึกษาความสามารถในการวัดซ้ำและการวัดเหมือนของ เครื่องมือวัด.....	18
2.5.4 การวิเคราะห์ผลการศึกษาความสามารถในการวัดซ้ำและการวัดเหมือนของเครื่องมือ วัด.....	18
2.6 การควบคุมกระบวนการเชิงสถิติ.....	18
2.6.1 แผนภูมิควบคุม (Control chart).....	19

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.6.2 การศึกษาลักษณะข้อมูล	26
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย	28
3.1 การประมวลผลภาพ	29
3.1.1 การได้มาของรูปภาพ	29
3.1.2 การเตรียมภาพถ่าย	29
3.1.3 การวัดคุณลักษณะ	30
3.2 การวิเคราะห์ระบบการวัด	30
3.2.1 ตัวอย่างที่ใช้ในการทดลอง	30
3.2.2 วิธีการประมวลผลภาพ	30
3.2.3 ขั้นตอนการดำเนินงานการวิเคราะห์ระบบการวัด	31
3.2.4 การวิเคราะห์ผลการทดลอง	31
3.3 การควบคุมกระบวนการเชิงสถิติ	32
3.3.1 ตัวอย่างใส่กรอกที่ใช้ในการทดลอง	32
3.3.2 ศึกษาคุณลักษณะของข้อมูล	32
3.3.3 การควบคุมกระบวนการด้วยวิธีการเชิงสถิติ	33
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผล	35
4.1 ผลการทดลองการวิเคราะห์ระบบการวัด	35
4.1.1 ผลการทดลองการวิเคราะห์ระบบการวัดก่อนการปรับปรุง	35
4.1.2 ผลการทดลองการวิเคราะห์ระบบการวัดหลังการปรับปรุง	38
4.2 ผลการทดลองการควบคุมกระบวนการเชิงสถิติ	40
4.2.1 ศึกษาคุณลักษณะของข้อมูล	40
4.2.2 การควบคุมกระบวนการด้วยวิธีการเชิงสถิติ	47
4.2.3 การใช้แผนภูมิควบคุมกับผลิตภัณฑ์ใส่กรอก	56
4.2.4 แนวทางการนำไปใช้ประโยชน์	56
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	58
5.1 สรุปผลการวิจัย	58
5.2 ข้อเสนอแนะ	59
บรรณานุกรม	60
ภาคผนวก	64
ภาคผนวก ก. ผลการทดลอง	65
ภาคผนวก ข. ส่วนของโปรแกรม MATLAB	87

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
ภาคผนวก ค. แบบของอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	89
ภาคผนวก ง. บทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์	90
ประวัติผู้เขียน	97



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 แสดงข้อดีและข้อจำกัดของแบบจำลองทั้ง 3 วิธี	11
4.1 รูปแบบการทดลองและผลการทดลองการวิเคราะห์ระบบการวัดก่อนการปรับปรุง	35
4.2 แสดงผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่า a^*	36
4.3 แสดงผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่า a^* โดยลดรูปตัวแบบ (Reduced model) ของระบบการวัดก่อนการปรับปรุง	37
4.4 ตารางเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของ L^* a^* และ b^*	38
4.5 รูปแบบการทดลองและการวิเคราะห์ระบบการวัดหลังการปรับปรุง	38
4.6 แสดงผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่า a^* โดยลดรูปตัวแบบ (Reduced model) ของระบบการวัดหลังการปรับปรุง	39
4.7 ตารางเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของ L^* a^* และ b^* ของระบบการวัดหลังการปรับปรุง	40
4.8 การเปรียบเทียบค่าสัดส่วนระหว่างความแปรปรวนของระบบการวัดและความแปรปรวนของชิ้นงาน	40
4.9 แสดงค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของเพียร์สัน	45
4.10 แสดงลักษณะการใช้แผนภูมิควบคุมกับผลิตภัณฑ์ไส้กรอง	56
ก.1 รูปแบบการทดลองและผลการทดลองการวิเคราะห์ระบบการวัดก่อนการปรับปรุง	65
ก.2 แสดงผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่า L^* ของระบบการวัดก่อนการปรับปรุง	68
ก.3 แสดงผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่า L^* โดยลดรูปตัวแบบ (Reduced model) ของระบบการวัดก่อนการปรับปรุง	69
ก.4 แสดงผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่า a^* ของระบบการวัดก่อนการปรับปรุง	70
ก.5 แสดงผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่า a^* โดยลดรูปตัวแบบ (Reduced model) ของระบบการวัดก่อนการปรับปรุง	71
ก.6 แสดงผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่า b^* ของระบบการวัดก่อนการปรับปรุง	72
ก.7 แสดงผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่า b^* โดยลดรูปตัวแบบ (Reduced model) ของระบบการวัดก่อนการปรับปรุง	73
ก.8 รูปแบบการทดลองและผลการทดลองการวิเคราะห์ระบบการวัดหลังการปรับปรุง	74
ก.9 แสดงผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่า L^*	77
ก.10 แสดงผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่า L^* โดยลดรูปตัวแบบ (Reduced model) ของระบบการวัดหลังการปรับปรุง	78
ก.11 แสดงผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่า a^* ของระบบการวัดหลังการปรับปรุง	79
ก.12 แสดงผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่า a^* โดยลดรูปตัวแบบ (Reduced model) ของระบบการวัดหลังการปรับปรุง	80
ก.13 แสดงผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่า b^* ของระบบการวัดหลังการปรับปรุง	81
ก.14 แสดงผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่า b^* โดยลดรูปตัวแบบ (Reduced model) ของระบบการวัดหลังการปรับปรุง	82

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และที่ยังอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ก.15 ข้อมูลที่ใช้ในการทดสอบ Spike และตัวสถิติไฮเทลลิงทีสแควร์	83
ก.16 ข้อมูลที่ใช้ในการทดสอบ Mean Shift และตัวสถิติไฮเทลลิงทีสแควร์	84
ก.17 ข้อมูลที่ใช้เป็นตัวอย่างการใช้งาน	86



สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 แสดงการตรวจสอบคุณภาพของผลิตภัณฑ์ไส้กรอก.....	2
1.2 แสดงการเปรียบเทียบสีไส้กรอก.....	2
1.3 แสดงกรอบแนวคิดในการศึกษา.....	5
2.1 แสดงขั้นตอนการประมวลผลภาพ.....	7
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.....	28
3.2 แสดงตัวอย่างรูปภาพที่ได้จากการถ่ายภาพ.....	29
3.3 แสดงการตัดภาพเฉพาะส่วนที่เป็นไส้กรอก.....	29
3.4 แสดงสีที่ใช้ในการทดลอง.....	30
3.5 แสดงลักษณะของการได้มาของรูปภาพก่อนการปรับปรุง.....	30
3.6 แสดงลักษณะของการได้มาของรูปภาพหลังการปรับปรุง.....	31
3.7 ตัวอย่างที่ใช้แทนลักษณะของไส้กรอกที่ปกติ.....	32
3.8 ตัวอย่างที่ใช้แทนลักษณะของไส้กรอกที่ผิดปกติ.....	32
3.9 แสดงอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....	33
3.10 แสดงลักษณะของการทดสอบแบบ Spike.....	34
3.11 แสดงลักษณะของการทดสอบแบบ Mean shift.....	34
4.1 กราฟแสดงการทดสอบการแจกแจงแบบปกติของค่า L^*	41
4.2 กราฟแสดงการทดสอบการแจกแจงแบบปกติของค่า a^*	41
4.3 กราฟแสดงการทดสอบการแจกแจงแบบปกติของค่า b^*	42
4.4 แสดงลักษณะไส้กรอกที่มีความผิดปกติ.....	42
4.5 กราฟแสดงการทดสอบการแจกแจงแบบปกติของค่า L^*	43
4.6 กราฟแสดงการทดสอบการแจกแจงแบบปกติของค่า a^*	43
4.7 กราฟแสดงการทดสอบการแจกแจงแบบปกติของค่า b^*	44
4.8 Matrix Plot สำหรับ 29 ตัวอย่าง ของค่า L^* a^* และ b^*	45
4.9 กราฟฟังก์ชันฮิสโตแกรมและฟังก์ชันฮิสโตแกรมบางส่วนของค่า L^*	46
4.10 กราฟฟังก์ชันฮิสโตแกรมและฟังก์ชันฮิสโตแกรมบางส่วนของค่า a^*	46
4.11 กราฟฟังก์ชันฮิสโตแกรมและฟังก์ชันฮิสโตแกรมบางส่วนของค่า b^*	47
4.12 แสดงแผนภูมิควบคุมไฮเทคโลจิสแควร์ที่ใช้ในการทดสอบ Spike.....	48
4.13 แสดงแผนภูมิควบคุมสำหรับตัวอย่างเดียวที่ใช้ในการทดสอบ Spike ของค่า L^*	49

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ส่วนตัวสำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.14 แสดงแผนภูมิควบคุมสำหรับตัวอย่างเดี่ยวที่ใช้ในการทดสอบ Spike ของค่า a^*	49
4.15 แสดงแผนภูมิควบคุมสำหรับตัวอย่างเดี่ยวที่ใช้ในการทดสอบ Spike ของค่า b^*	50
4.16 แสดงแผนภูมิควบคุมไฮเทลลิ่งทีสแควร์ที่ใช้ในการทดสอบ Mean shift.....	51
4.17 แสดงแผนภูมิควบคุมสำหรับตัวอย่างเดี่ยวที่ใช้ในการทดสอบ Mean shift ของค่า L^*	51
4.18 แสดงแผนภูมิควบคุมสำหรับตัวอย่างเดี่ยวที่ใช้ในการทดสอบ Mean shift ของค่า a^*	52
4.19 แสดงแผนภูมิควบคุมสำหรับตัวอย่างเดี่ยวที่ใช้ในการทดสอบ Mean shift ของค่า b^*	52
4.20 แสดงแผนภูมิไฮเทลลิ่งทีสแควร์.....	53
4.21 ใส่กรอกที่มีความผิดปกติ	54
4.22 แสดงแผนภูมิควบคุมสำหรับตัวอย่างเดี่ยวของค่า L^*	54
4.23 แสดงแผนภูมิควบคุมสำหรับตัวอย่างเดี่ยวของค่า a^*	55
4.24 แสดงแผนภูมิควบคุมสำหรับตัวอย่างเดี่ยวของค่า b^*	55
4.25 แสดงแนวทางการควบคุมคุณภาพสีของใส่กรอก.....	57
5.1 แสดงกรอบแนวคิดในการควบคุมคุณภาพสีของใส่กรอก	59
ค.1 แสดงแบบของอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	89

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปี พ.ศ. 2546 ประเทศไทยได้ประกาศนโยบายในด้านอาหารและอุตสาหกรรมเกษตรในการเป็น “ครัวของโลก” ซึ่งในปัจจุบันประเทศไทยยังดำเนินการตามนโยบายดังกล่าว ประกอบกับประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรมและเป็นประเทศผู้ผลิตและส่งออกรายสำคัญของโลก (สถาบันอาหาร. 2554) ในปี พ.ศ. 2553 สินค้าอาหาร ประเภทอาหารทะเล กุ้งแช่แข็งและแปรรูป ผักผลไม้ และไก่แช่แข็งและแปรรูปส่งออกเพิ่มขึ้นจากปี พ.ศ. 2552 ทั้งปริมาณและมูลค่า โดยมีมูลค่า 14,474 ล้านบาทหรือร้อยละ 14.4 (กรมส่งเสริมการส่งออก. 2554) จะเห็นได้ว่าอุตสาหกรรมอาหารเป็นอุตสาหกรรมที่มีความสำคัญเป็นอย่างมาก ดังนั้นการปรับปรุงเทคโนโลยีเพื่อให้มีความทันสมัย คุณภาพและความปลอดภัยของผลิตภัณฑ์จึงมีความสำคัญที่ต้องพัฒนาเพื่อให้ได้มาตรฐาน

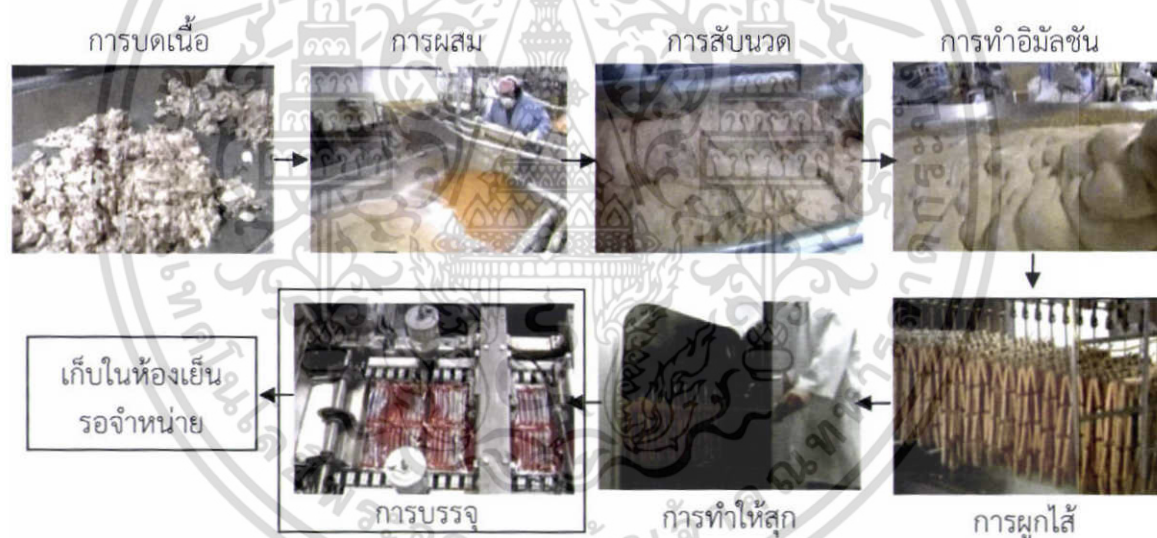
อุตสาหกรรมการแปรรูปเนื้อสัตว์เพื่อให้สามารถเก็บรักษาได้นานขึ้น สามารถทำได้ 2 วิธีหลักคือ วิธีที่ใช้เทคโนโลยีพื้นบ้าน เช่น แหนม หมูยอ กุนเชียง เป็นต้น และวิธีที่ใช้เทคโนโลยีจากต่างประเทศ เช่น ไส้กรอก แฮม และเบคอน ซึ่งประเทศไทยได้พัฒนาการผลิตจนกระทั่งสามารถส่งออกไปยังต่างประเทศได้ ไส้กรอกเป็นที่นิยมในการบริโภคมากกว่าผลิตภัณฑ์อื่นๆ ให้คุณค่าทางโปรตีนสูง ประหยัดเวลา มีความสะดวกในการบริโภค (บริษัทศูนย์วิจัยไทยพาณิชย์จำกัด : ลิขสิทธิ์กรมส่งเสริมอุตสาหกรรม. 2554) และผู้บริโภคหันมานิยมบริโภคไส้กรอกทดแทนลูกชิ้นหมูและลูกชิ้นไก่มากขึ้นเพราะภาพลักษณ์ของไส้กรอกมองว่ามีการผสมแป้งน้อยกว่าลูกชิ้น และมีความแตกต่างด้านรสชาติและรูปแบบสินค้ามากมาย ในปี พ.ศ. 2551 สถานการณ์ส่งออกสุกรแปรรูปและแช่แข็ง ปี พ.ศ. 2551 ปริมาณส่งออก 9,988.15 เมตริกตัน มูลค่า 1,955.77 ล้านบาท ขยายตัวเพิ่มขึ้นร้อยละ 50.19 (ศูนย์วิจัยวิจัยเพื่ออุตสาหกรรมอาหาร. 2551)

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

อุตสาหกรรมการผลิตไส้กรอกมีความเกี่ยวข้องกับสีเนื่องจากเป็นปัจจัยแรกทางกายภาพของผลิตภัณฑ์ที่ก่อให้เกิดการจูงใจของผู้บริโภค และทำให้ผู้บริโภคสามารถรับรู้ถึงคุณภาพของผลิตภัณฑ์ได้ (วารุณี ครุสง. 2547) ในกระบวนการผลิตไส้กรอกหลังจากที่ผ่านขั้นตอนการผลิตไส้กรอก การบดเนื้อ การผสม การสับนวด การทำอิมัลชัน การผูกไส้ การทำให้สุก หลังจากนั้นจะทำการบรรจุลงในถุงซึ่งหลังจากผ่านขั้นตอนการบรรจุจะทำการตรวจสอบคุณภาพสีของผลิตภัณฑ์ไส้กรอกดังรูปที่ 1.1 โดยมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชนไส้กรอกหมู มผช. 330/2547 ได้กำหนดคุณลักษณะสีที่ต้องการของไส้กรอกหมูคือ ต้องมีสีที่ติดตามธรรมชาติของส่วนประกอบที่ใช้สม่ำเสมอทั้งหมดทั้งชิ้นไม่มีสีผิดปกติ เช่น สีเขียวคล้ำ สีดำ (กระทรวงอุตสาหกรรม. 2547) การควบคุมคุณภาพสีของผลิตภัณฑ์ไส้กรอกที่สำเร็จรูปแล้วก่อนส่งจำหน่ายนั้นจึงมีความสำคัญอย่างมาก เนื่องจากจะช่วยจำลองสถานการณ์ของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลักษณะการมองเห็นผลิตภัณฑ์ของผู้บริโภคเมื่อมาเลือกซื้อผลิตภัณฑ์ ควบคุมไม่ให้ของเสียส่งไปถึงผู้บริโภค และเป็นหลักประกันให้กับผู้บริโภคมั่นใจในคุณภาพของผลิตภัณฑ์ ซึ่งถ้าไส้กรอกผลิตไม่ตรงกับคุณลักษณะดังกล่าวจะทำให้เกิดความสูญเสียกับผู้ประกอบการได้ ด้วยเหตุผลดังกล่าวข้างต้นในกระบวนการผลิตไส้กรอกจึงจำเป็นที่จะต้องตรวจสอบคุณภาพในการผลิตเพื่อตอบสนองความต้องการของลูกค้าและลดความสูญเสียต่างๆที่จะเกิดขึ้น ในปัจจุบันการตรวจสอบคุณภาพของผลิตภัณฑ์ไส้กรอกที่ผ่านการบรรจุดังกล่าวยังคงใช้การตรวจสอบด้วยสายตามนุษย์ดังรูปที่ 1.2 ซึ่งมีปัจจัยหลายอย่างที่ทำให้การประเมินนั้นเกิดความผิดพลาดได้ เนื่องจากการมองของมนุษย์ในแต่ละคนแตกต่างกันขึ้นอยู่กับความชำนาญ ลักษณะของแสง หรือความสามารถในการมองเห็น ซึ่งเป็นการยากที่จะสรุปว่าการควบคุมคุณภาพนั้นมีความแน่นอน ถูกต้อง และมีความน่าเชื่อถือ และนอกจากนี้ผลการตรวจสอบไม่ได้ทำการบันทึกเพื่อการวิเคราะห์ในอนาคตนอกเหนือจากการบ่งบอกว่าผลิตภัณฑ์หรือเสีย ดังนั้นในงานวิจัยครั้งนี้จึงนำวิธีการประมวลผลภาพ (Image processing) มาประยุกต์ใช้ในการประเมินผลสีของไส้กรอก เพื่อให้การแบ่งแยกสีของไส้กรอกมีประสิทธิภาพเพิ่มมากขึ้น งานวิจัยที่ได้ศึกษาเกี่ยวกับวิธีการประมวลผลภาพในการประเมินคุณภาพของอาหารได้มีการรวบรวมไว้ในปี ค.ศ. 2004 (Du and Sun, 2004 ; Brosnan and Sun, 2004) ซึ่งไม่ปรากฏว่ามีการใช้วิธีการประมวลผลภาพในการควบคุมสีของผลิตภัณฑ์ไส้กรอก



ตรวจสอบคุณภาพโดยใช้สายตามนุษย์

รูปที่ 1.1 แสดงการตรวจสอบคุณภาพของผลิตภัณฑ์ไส้กรอก

(Triwood1973, 2008)



รูปที่ 1.2 แสดงการเปรียบเทียบสีไส้กรอก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในปัจจุบันการควบคุมคุณภาพสีของไส้กรอกใช้มนุษย์ในการควบคุมกระบวนการ และยังไม่มี การนำวิธีการควบคุมกระบวนการเชิงสถิติมาประยุกต์ใช้ในขั้นตอนการควบคุมคุณภาพสีของไส้กรอก วิธีการควบคุมกระบวนการเชิงสถิติ (Statistical process control) คือ เทคนิคในการแก้ปัญหาที่มี ประสิทธิภาพ นำมาใช้ประโยชน์เพื่อให้กระบวนการมีความเสถียรภาพรวมทั้งการปรับปรุง ความสามารถของกระบวนการ โดยการลดความผันแปรที่เกิดขึ้นในกระบวนการ (Montgomery. 2009) ซึ่งในอุตสาหกรรมอาหารการใช้วิธีการควบคุมกระบวนการเชิงสถิติยังไม่แพร่หลายมากนัก วิธีการควบคุมกระบวนการเชิงสถิติมีหลายวิธี วิธีที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมอาหารมากที่สุด คือ แผนภูมิ ควบคุม (Srikaeo et al. 2005)

ดังนั้นจะเห็นได้ว่าการควบคุมคุณภาพสีของไส้กรอกมีความจำเป็นต่ออุตสาหกรรมการผลิตไส้ กรอก เนื่องจากมีผลต่อความพึงพอใจของผู้บริโภคในการเลือกซื้อผลิตภัณฑ์ จากการศึกษาพบว่ามี การใช้วิธีการประเมินผลผลภาพกับแผนภูมิควบคุมได้รวบรวมไว้ในปี ค.ศ. 2011 ซึ่งใช้ในอุตสาหกรรม การผลิต และอุตสาหกรรมยา (Megahed et al. 2011) แต่ในปัจจุบันยังไม่มีการใช้วิธีการประเมินผล ผลภาพร่วมกับการควบคุมกระบวนการเชิงสถิติในอุตสาหกรรมอาหาร จึงเป็นสิ่งที่ควรได้รับการศึกษา เพื่อให้การควบคุมคุณภาพสีของไส้กรอกมีประสิทธิภาพ ความน่าเชื่อถือ ความสะดวกและถูกต้องใน การประเมินคุณภาพเพิ่มมากขึ้น งานวิจัยนี้จะเป็นแนวทางในการควบคุมคุณภาพสีของไส้กรอกในการ ตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงหรือความผันแปรของกระบวนการผลิต แต่ไม่ได้รวมไปถึงการแบ่งแยกไส้ กรอกตามชนิดสี ซึ่งการตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวจะช่วยให้ผู้ประกอบการสามารถทราบถึง ความผิดปกติภายในกระบวนการ และทำการตรวจสอบสาเหตุของความผิดปกติเพื่อการปรับปรุง กระบวนการในอนาคต และเป็นแนวทางในการนำไปพัฒนาเพื่อประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

- 1.2.1 เพื่อศึกษาวิธีการประเมินผลสีของไส้กรอกโดยใช้วิธีการประเมินผลด้วยภาพ
- 1.2.2 เพื่อศึกษาวิธีการควบคุมคุณภาพสีของไส้กรอกโดยใช้วิธีการควบคุมกระบวนการเชิง สถิติ
- 1.2.3 เพื่อศึกษาการบูรณาการระหว่างวิธีการประเมินผลด้วยภาพและวิธีการควบคุมกระบวนการ เชิงสถิติในการควบคุมคุณภาพสีของไส้กรอก

1.3 สมมติฐานของการศึกษา

สามารถใช้วิธีการประเมินผลด้วยภาพในการประเมินผลสีของไส้กรอก และประยุกต์ใช้วิธีการ ควบคุมกระบวนการเชิงสถิติในการควบคุมคุณภาพสีของไส้กรอกได้

1.4 ขอบเขตของการศึกษา

ครอบคลุมถึงการศึกษาวิธีการประเมินผลสีของไส้กรอกที่ผลิตจากเนื้อสุกรโดยใช้วิธีการ ประเมินผลด้วยภาพ และใช้แผนภูมิควบคุมในการควบคุมคุณภาพสีของไส้กรอกในขั้นตอนหลังจาก การบรรจุถุงเพื่อตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงหรือความผันแปรของกระบวนการผลิต โดยตัวอย่างไส้ กรอกหมูที่ใช้ศึกษานำมาจากตามตลาด

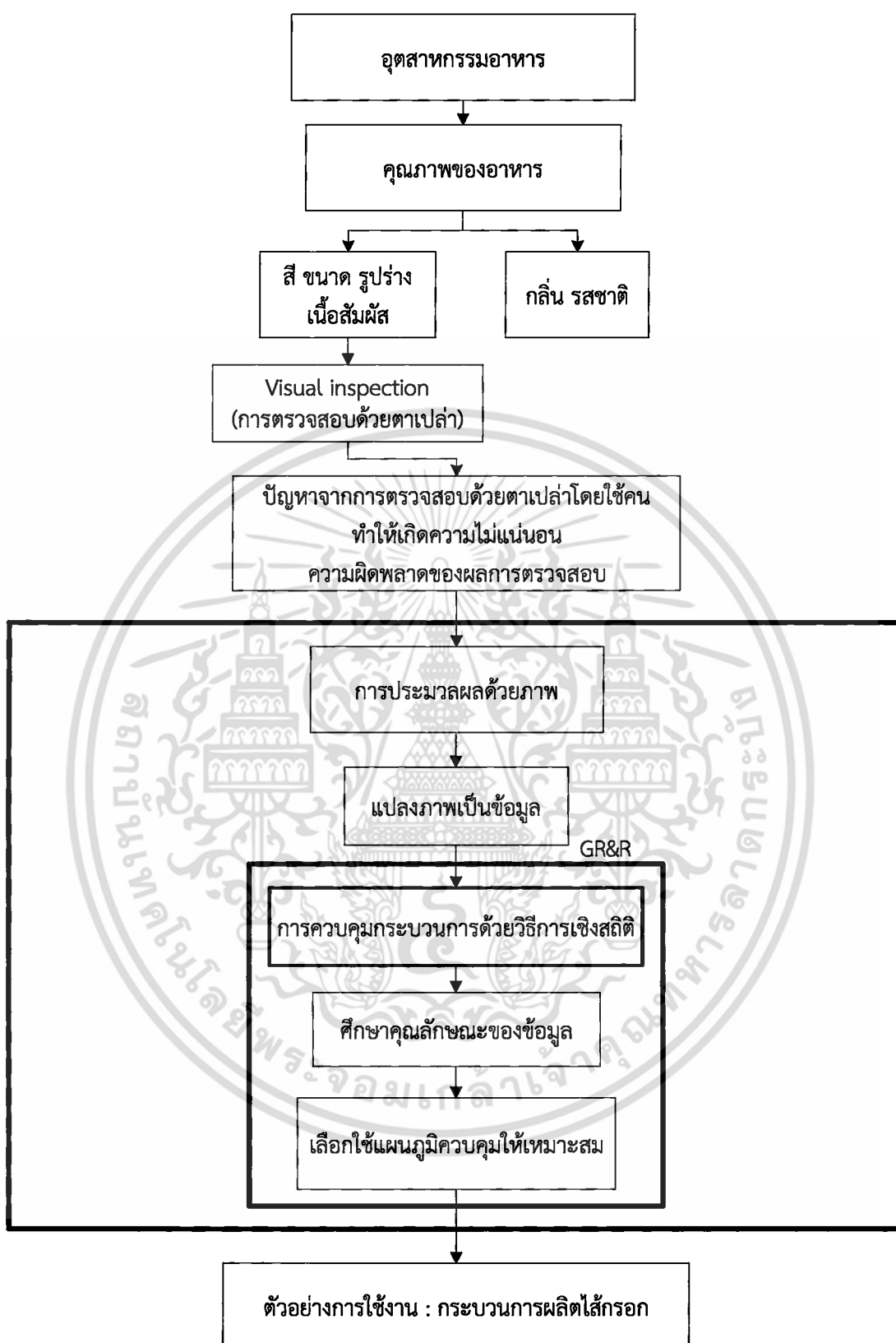
1.5 ขั้นตอนของการศึกษา

ขั้นตอนของการศึกษาแสดงแผนภาพกรอบแนวคิดดังรูปที่ 1.3 อธิบายดังนี้

- 1.5.1 ศึกษาข้อมูลเบื้องต้น เกี่ยวกับปัญหาการวัดคุณภาพของอาหาร รวมทั้งศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้องดังนี้ ความสำคัญของสีของอาหาร วิธีการประมวลผลภาพ คุณลักษณะของไส้กรอก การวิเคราะห์ระบบการวัด และการควบคุมกระบวนการด้วยวิธีการเชิงสถิติ
- 1.5.2 ศึกษาขั้นตอนและวิธีการที่ใช้ในการประมวลผลภาพ และสร้างอุปกรณ์
- 1.5.3 แปลงภาพเป็นข้อมูลโดยใช้โปรแกรม MATLAB
- 1.5.4 การวิเคราะห์ระบบการวัด ศึกษาความสามารถในการวัดซ้ำและการวัดเหมือนของเครื่องมือวัด (GR&R) เพื่อสร้างความเชื่อมั่นในการสร้างเครื่องมือวัด
- 1.5.5 ศึกษาคุณลักษณะของข้อมูล ดังนี้ การตรวจสอบการแจกแจงแบบปกติ การตรวจสอบสหสัมพันธ์ และการตรวจสอบอัตโนมัติสหสัมพันธ์
- 1.5.6 ควบคุมกระบวนการด้วยวิธีการเชิงสถิติ โดยเลือกใช้แผนภูมิควบคุมที่เหมาะสม
- 1.5.7 ประยุกต์ใช้ในการตรวจสอบคุณภาพสีของไส้กรอก



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 1.3 แสดงกรอบแนวคิดในการศึกษา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้กล่าวถึงแนวคิดทฤษฎี และผลงานที่มีผู้ทำมาแล้วเกี่ยวกับความสำคัญของสีของอาหาร วิธีการประมวลผลภาพ แบบจำลองสี คุณลักษณะของไส้กรอกและลักษณะที่ต้องการ การวิเคราะห์ระบบการวัด และการควบคุมกระบวนการเชิงสถิติเพื่อเป็นแนวทางเข้าสู่กระบวนการวิจัย ดังต่อไปนี้

2.1 ความสำคัญของสีของอาหาร

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

2.2 วิธีการประมวลผลภาพ

วิธีการประมวลผลภาพ (Image processing) คือ กระบวนการจัดการทางรูปภาพที่ข้อมูลที่ป้อนเข้าสู่กระบวนการและผลลัพธ์ที่ออกจากกระบวนการต่างก็เป็นรูปภาพเช่นเดียวกัน เป็นกระบวนการดึงคุณสมบัติของภาพออกมาพิจารณาอีกทั้งยังรวมไปถึงวิธีการรวมเอาสิ่งที่สนใจแต่ละอย่างมาพิจารณา ดังนั้นเมื่อนำภาพมาแปลงเข้าสู่คอมพิวเตอร์ภาพนั้นจะกลายเป็นภาพดิจิทัล (Digital image) (ณัฐพล แสงจันทร์ และ ดาวพระศุกร์ นุ่มเอี่ยม. 2548)

ในอุตสาหกรรมอาหารการประเมินคุณภาพของอาหารยังใช้วิธีการตรวจสอบโดยใช้คน ซึ่งต้องผ่านการคัดเลือกหรือฝึกอบรมจนสามารถแบ่งแยกลักษณะของผลิตภัณฑ์ได้ การใช้วิธีการตรวจสอบดังกล่าวทำให้ต้องใช้แรงงานเป็นจำนวนมาก พนักงานเกิดความล่าช้า ค่าใช้จ่ายสูง และไม่น่าเชื่อถือ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการตรวจสอบให้มีความถูกต้องและมีความคงที่ จึงได้นำวิธีการประมวลผลภาพมาประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร ซึ่งจะทำการประเมินคุณภาพของอาหารมีความถูกต้องและมีความคงที่เพิ่มขึ้น แก้ไขข้อผิดพลาดของการตรวจสอบโดยใช้คน คุณสมบัติที่ใช้ในการตรวจสอบ ได้แก่ ขนาด รูปร่าง สี และเนื้อสัมผัสของอาหาร (Du and Sun. 2004)

ในการวิเคราะห์ภาพสำหรับผลิตภัณฑ์อาหาร สีเป็นคุณลักษณะที่มีอิทธิพลและตัวบ่งชี้ที่มีประสิทธิภาพที่ช่วยลดความซับซ้อนของการแยกวัตถุและการตรวจสอบวัตถุจากภาพ ลักษณะสีของวัตถุที่สามารถแยกได้ด้วยการตรวจสอบพิกเซลภายในขอบเขตของวัตถุซึ่งมีงานวิจัยจำนวนมากที่ประสบความสำเร็จในการวัดสีของผลิตภัณฑ์อาหารดังนี้

จากการศึกษาของ Shearer and Payne (1990) ใช้วิธีการประมวลผลภาพในการวัดสีของผัก โดยวัดสีของพริกหวานเพื่อแบ่งแยกประเภทโดยใช้ระบบการวิเคราะห์ภาพสีและใช้ระบบ RGB ค่าความเข้มของพิกเซลถูกแบ่งเป็นแปดระดับสีที่เป็นไปได้ ความสัมพันธ์ของการกระจายความเข้มของ

พิกเซลในทอกรโทคอนอลจะถูกคำนวณและใช้สีเป็นตัวแปรเชิงปริมาณผลพบว่ามีความถูกต้องสูงถึง 96% ซึ่งประสบความสำเร็จในการแบ่งเกรดตามสีของพริกหวาน

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

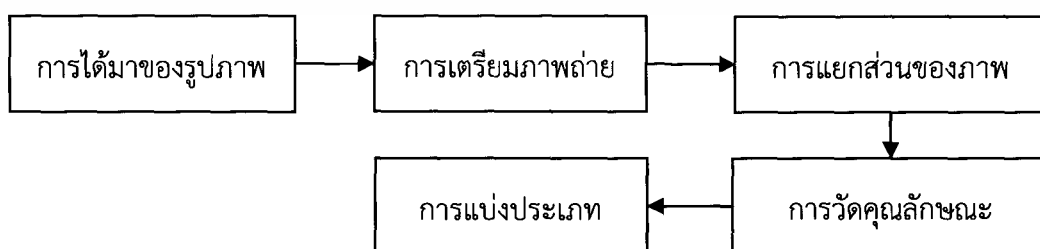
จากการศึกษาของ Ahmad et al. (1999) ใช้วิธีการประมวลผลภาพในการแบ่งแยกสีของอาการผิดปกติในเมล็ดถั่วเหลือง ใช้ระบบสี RGB โดยพื้นฐานของแบบจำลองการตัดสินใจหลายตัวแปร ในการแยกแยะระหว่างเมล็ดที่ติดโรคและไม่ติดโรค สำหรับการตรวจสอบและการคัดเกรดแบบจำลองประกอบด้วยลักษณะสี 6 สี ทำการคำนวณค่าเฉลี่ย ค่าต่ำสุดและค่าความแปรปรวนสำหรับค่าพิกเซล RGB เพื่ออธิบายลักษณะอาการของเมล็ด จากการวิเคราะห์สีพบว่า การแสดงผลหนึ่งสีไม่เพียงพอในการอธิบายลักษณะอาการของเมล็ด ความแม่นยำในการแบ่งแยกความผิดปกติและปกติคือ 88%

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

จากการศึกษาของ Pedreschi et al. (2006) ได้นำวิธีการประมวลผลภาพมาประยุกต์ใช้ในการวัดสีของมันฝรั่งทอดโดยใช้อุณหภูมิในการทอดที่แตกต่างกัน โดยทำการแปลงภาพจากระบบ RGB เป็นระบบ $L^*a^*b^*$ เพื่อใช้ในการเปรียบเทียบสีของมันฝรั่งทอด ผลการทดลองพบว่าค่าสีในระบบ $L^*a^*b^*$ จะบันทึกความแตกต่างที่เวลาการทอดต่างกัน อุณหภูมิต่างกันโดยใช้พารามิเตอร์การเปลี่ยนแปลงสีรวม (ΔE) โดยวิธีการประมวลผลภาพแสดงให้เห็นได้ว่าถ้าทอดที่อุณหภูมิสูงมันฝรั่งจะเป็นสีดำ

2.2.1 ขั้นตอนพื้นฐานของการประมวลผลภาพ

ขั้นตอนการประมวลผลภาพโดยทั่วไปประกอบด้วย 5 ขั้นตอนดังรูปที่ 2.1 (Du and Sun, 2004)



รูปที่ 2.1 แสดงขั้นตอนการประมวลผลภาพ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.1.1 การได้มาของรูปภาพ (Image acquisition)

การรับสัญญาณจากอุปกรณ์ถ่ายภาพต่าง ๆ ซึ่งอยู่ในรูปสัญญาณแอนะล็อก แล้วแปลงสัญญาณที่ได้ให้เป็นสัญญาณดิจิทัล เช่น กล้องถ่ายภาพดิจิทัล กล้องวิดีโอ กล้องเว็บแคม เครื่องสแกน หรืออุปกรณ์รับสัญญาณภาพอื่นๆ

แสงสว่าง เป็นสิ่งจำเป็นในการได้มาของรูปภาพสำหรับการประเมินคุณภาพของอาหาร สภาวะของแสงจะส่งผลกระทบต่อคุณภาพของรูปภาพ ซึ่งภาพถ่ายที่มีคุณภาพสูงจะช่วยลดเวลาและลดความซับซ้อนของขั้นตอนการประมวลผลภาพ

2.2.1.2 การเตรียมภาพถ่าย (Image pre-processing)

เป็นขั้นตอนการปรับปรุงคุณภาพของภาพ เนื่องจากภาพจะมีสัญญาณรบกวน ซึ่งทำให้คุณภาพของภาพลดลง ซึ่งวัตถุประสงค์ของการเตรียมภาพถ่ายคือการปรับปรุงข้อมูลภาพ โดยลดการบิดเบือนและเพิ่มคุณสมบัติของภาพที่มีความสำคัญต่อการประมวลผลภาพในอนาคตต่อไป ซึ่งวิธีการประมวลผลภาพเบื้องต้นมี 2 ประเภทคือ การประมวลผลพิกเซลเบื้องต้น (Pixel pre-processing) สำหรับการประเมินคุณภาพอาหารจะนิยมใช้การเปลี่ยนแปลงระบบสี เช่น การเปลี่ยนเป็นระบบ HSI หรือระบบ $L^*a^*b^*$ เป็นต้น และการประมวลผลทั่วไปเบื้องต้น (Local pre-processing) เช่น การปรับความชัด การปรับความสว่าง การกำจัดสัญญาณรบกวน เป็นต้น

2.2.1.3 การแยกส่วนของภาพ (Image segmentation)

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

2.2.1.4 การวัดคุณลักษณะ (Object measurement)

หลังจากขั้นตอนการแยกส่วนของภาพเพื่อให้ได้ส่วนของวัตถุที่เราสนใจ จากนั้นจะทำการวัดคุณลักษณะของวัตถุ สำหรับการประเมินคุณภาพของอาหารลักษณะของภาพแบ่งออกเป็น 4 กลุ่มคือ ขนาด รูปร่าง สี และเนื้อสัมผัส

2.2.1.5 การแบ่งประเภท (Classification)

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

ตัวอย่างขั้นตอนการประมวลผลภาพที่ใช้ในแต่ละงานวิจัยแสดงดังนี้

จากงานวิจัยของ Papadakis et al. (2000) ได้เสนอเทคนิคในการวัดสีของอาหารประกอบด้วยระบบแสง การใช้กล้องดิจิทัลที่มีความละเอียดสูงในการถ่ายภาพอาหาร และการใช้โปรแกรมโฟโต้ชอปในการรับค่าสี และระบบสีที่นิยมใช้ในงานวิจัยด้านอาหารคือ ระบบ $L^*a^*b^*$ ระบบแสงเป็นสิ่งสำคัญในการใช้แหล่งกำเนิดแสงให้เหมาะสม ซึ่งสีของอาหารส่วนหนึ่งจะขึ้นอยู่กับสเปกตรัมการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สะท้อน และแหล่งกำเนิดแสงมาตรฐานกำหนดโดย CIE ที่ใช้กันทั่วไปในงานวิจัยด้านอาหาร คือ A (2856 K) C (6774 K) D₆₅ (6500 K) และ D (7500 K) มุมระหว่างกล้องกับแหล่งกำเนิดแสงเป็นมุม 45° ใช้กล้องดิจิทัลบันทึกภาพ 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 ภายในกล่องทาดำเพื่อหลีกเลี่ยงแสงภายนอกและการสะท้อน 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) ใช้ระบบคอมพิวเตอร์วิชันในการวัดสีของมันฝรั่ง การได้มาของรูปภาพใช้ระบบที่พัฒนาโดย Papadakis et al. (2000) ใช้กล้องดิจิทัล 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° กับระนาบของตัวอย่าง มุมระหว่างกล้องและหลอดไฟ 45° วางกล้องและหลอดไฟภายในกล่องไม้ ภายในกล่องทาดำเพื่อหลีกเลี่ยงแสงและการสะท้อน การเตรียมภาพถ่ายโดยลดสัญญาณรบกวนของภาพ ทำการเปลี่ยนภาพสีเป็นความเข้มของสี (Intensity image) การแยกส่วนของภาพใช้ความเข้มของสีในการแบ่งแยกขอบภาพกับพื้นหลัง หลังจากนั้นทำการเปลี่ยนจากแบบจำลองสีระบบ RGB เป็น L*a*b* โดยใช้โปรแกรม MATLAB

จากงานวิจัยดังกล่าว พบว่าวิธีการในการประมวลผลภาพมีความคล้ายคลึงกันในส่วนของวิธีการได้มาของรูปภาพ โดยในงานวิจัยนี้จะใช้วิธีการได้มาของรูปภาพจากงานวิจัยของ Pedreschi et al. (2006)

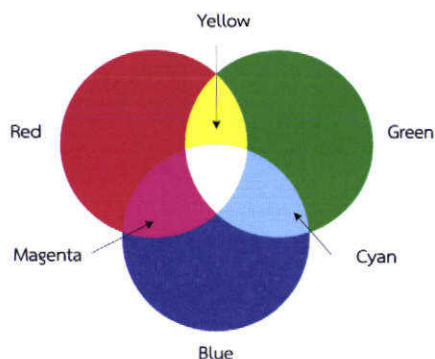
2.3 แบบจำลองสี

แบบจำลองสี (Color models) ใช้ในการบ่งชี้และบอกปริมาณสี แบบจำลองสีแต่ละแบบจะมีลักษณะแตกต่างกันไป ซึ่งเหมาะกับการใช้งานที่แตกต่างกัน มีแบบจำลองสีต่างๆดังนี้

2.3.1 ระบบ RGB (Red/ Green/ Blue)

ระบบ RGB เป็นระบบสีของแสง ซึ่งเกิดจากการหักเหของแสงผ่านแท่งแก้วปริซึม เกิดจากความเข้มของสามสีหลัก ได้แก่ แดง เขียว และน้ำเงินซึ่งใช้ในการสร้างสีเขียว น้ำเงิน สีม่วงแดง สีเหลืองและสีขาวแสดงดังรูปที่ 2.2 ระบบนี้จะนำมาใช้สำหรับหน้าจอโทรทัศน์และคอมพิวเตอร์ รวมถึงการเก็บข้อมูลภาพในระบบคอมพิวเตอร์ ซึ่งการสร้างพิกเซลสีจะเกิดจากการยิงแสงสีแดง สีเขียว และสีน้ำเงิน (Yam and Papadakis. 2004)

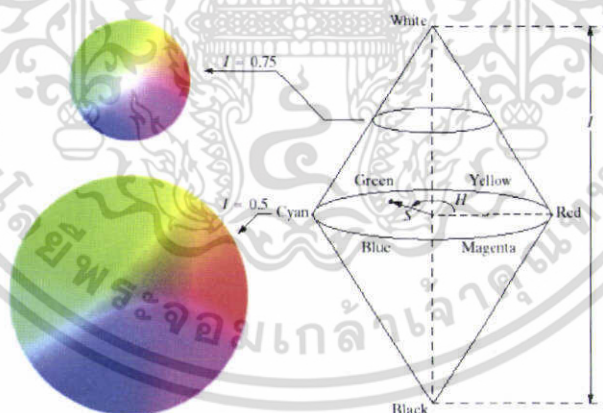
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.2 แสดงระบบสี RGB

2.3.2 ระบบ HSI (Hue/ Saturation/ Intensity)

ระบบ HSI เป็นเครื่องมือที่มีประสิทธิภาพสำหรับภาพที่สีแตกต่างกันแสดงดังรูปที่ 2.3 โดยปกติภาพสีจะนำมาจากอุปกรณ์ดิจิทัลและบันทึกไว้ในระบบ RGB (แดง เขียว และสีน้ำเงิน) โดยค่า H (Hue) แทนเฉดสี S (Saturation) แทนความบริสุทธิ์ของสี และ I (Intensity) แทนความเข้มของสี สำหรับงานวิจัยที่ใช้ระบบ HSI เช่น มันฝรั่งและแอปเปิ้ลเปลี่ยนจาก RGB เป็น HSI (Tao et al. 1995) วิธีการใช้ระบบสี HSI พิสูจน์แล้วว่ามีความมีประสิทธิภาพสูงสำหรับการประเมินผลสีและการประมวลผลภาพ ระบบการมองเห็นมีความถูกต้องมากกว่า 90% ในการตรวจสอบของมันฝรั่งและแอปเปิ้ลโดยแทนลักษณะสีด้วยกราฟฮิสโตแกรม การวิเคราะห์ภาพเนื้อ (Li et al. 2001) โดยถ่ายภาพในระบบ RGB และเปลี่ยนเป็นรูปแบบ HSI และการใช้ระบบ HSI ในการแบ่งแยกซอสพืชม่าออกจากพืชม่า (Sun and Brosnan. 2003)



รูปที่ 2.3 แสดงระบบสี HSI

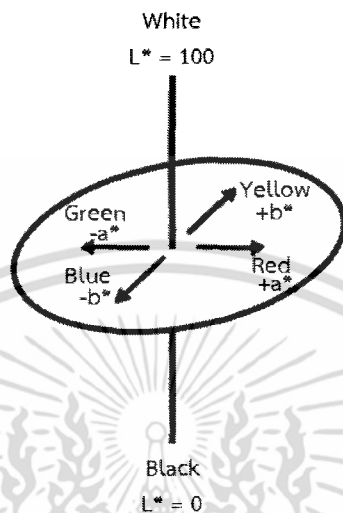
(Gonzalez and Woods. 2002)

2.3.3 ระบบ $L^*a^*b^*$

ระบบ $L^*a^*b^*$ เป็นระบบการวัดสีที่เป็นมาตรฐานสากลพัฒนาขึ้นในปี ค.ศ. 1976 โดย Commission International d' Eclairage ระบบ $L^*a^*b^*$ ประกอบด้วยส่วนประกอบ L^* แสดงค่าความสว่างของสีมีค่าอยู่ในช่วง 0 ถึง 100 ส่วนประกอบ a^* แสดงองค์ประกอบระหว่างสีเขียวและสีแดงมีค่าอยู่ในช่วง -120 ถึง +120 ส่วนประกอบ b^* แสดงองค์ประกอบระหว่างสีน้ำเงินและสีเหลืองมีค่าอยู่ในช่วง -120 ถึง +120 แสดงดังรูปที่ 2.4 ระบบ $L^*a^*b^*$ เป็นระบบที่เป็นอิสระ โดยไม่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำมาใช้เพื่อประโยชน์ทางการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คำนึงถึงการป้อนข้อมูลและอุปกรณ์รับข้อมูล เช่น กล้องดิจิทัล 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



รูปที่ 2.4 แสดงระบบสี $L^*a^*b^*$

ซึ่งจากการเปรียบเทียบทั้ง 3 วิธีสามารถแสดงข้อดีและข้อจำกัดได้ดังตารางที่ 2.1

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 คือต้องทำการศึกษาการแปลความหมายค่า L^* a^* และ b^* ก่อน (Mendoza et al. 2007)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในขั้นตอนการประมวลผลภาพสีนั้นสามารถเปลี่ยนแปลงภาพสีต้นฉบับที่อยู่ในระบบ RGB เป็นระบบอื่นๆได้ เนื่องจากแบบจำลองสีแต่ละระบบนั้นมีความเหมาะสมกับการใช้งานในแต่ละประเภทที่แตกต่างกัน

สำหรับในงานวิจัยนี้เลือกใช้ระบบ $L^*a^*b^*$ เนื่องจากเป็นระบบที่ไม่ขึ้นกับอุปกรณ์ สามารถแบ่งแยกสีได้มากกว่าระบบ RGB และสามารถบ่งบอกความเข้มและความสว่างของวัตถุได้ ซึ่งจะสามารถอธิบายสีของไส้กรอกที่เป็นตัวอย่างในงานวิจัยนี้ได้โดยมองที่ครอบคลุมกว่าระบบ RGB ซึ่งบ่งบอกเฉพาะสีแดง สีเขียว และสีน้ำเงิน จากการศึกษาของงานวิจัยที่ทำการวิเคราะห์สีของไส้กรอกจะใช้ระบบ $L^*a^*b^*$ (วัชร คุชแก้ว. 2548 ; Kuo and Chu. 2003 ; Zarringhalami et al. 2009)

2.4 คุณลักษณะของไส้กรอกและลักษณะที่ต้องการ

คุณลักษณะของไส้กรอกและลักษณะที่ต้องการของไส้กรอกหมูแสดงดังนี้

2.4.1 คุณลักษณะของไส้กรอก

ไส้กรอกหมูหมายถึง ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการนำเนื้อหมูไปบดละเอียด นวดหรือสับผสมกับเกลือน้ำแข็งมันหมูหรือน้ำมันพืช เครื่องเทศ เช่น พริกไทย กระเทียม และวัตถุเจือปนอาหารอื่นแล้วนำส่วนผสมที่ได้บรรจุลงในไส้หมูหรือไส้ชนิดอื่นที่บริโภคได้ ทำให้สุกอาจรมควันหรือไม่ก็ได้ (กระทรวงอุตสาหกรรม. 2547) ไส้กรอกที่ทำการผลิตสามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภทใหญ่คือ

2.4.1.1 ไส้กรอกสด (Fresh sausage)

เป็นไส้กรอกที่ได้จากการนำเนื้อสุกรมาบดผสมกับเครื่องปรุงต่างๆยัดใส่และผูกเป็นปล้องต้องนำมาต้มทอดหรือย่างให้สุกก่อนรับประทาน อย่างไรก็ตามไส้กรอกประเภทนี้ไม่เป็นที่นิยมในประเทศมากนักโดยไส้กรอกอีสานหมนและหมยออาจจัดให้อยู่ในกลุ่มนี้ได้

2.4.1.2 ไส้กรอกสุกหรือรมควัน (Cooked sausage or Smoked sausage)

มีกรรมวิธีใกล้เคียงกับไส้กรอกสด แต่หลังจากยัดใส่แล้วต้องนำไปรมควันอบ/ หรือต้มให้สุกก่อน (กรมส่งเสริมอุตสาหกรรม. 2554)

2.4.2 คุณลักษณะที่ต้องการของไส้กรอกหมู

คุณลักษณะที่ต้องการของไส้กรอกหมูได้มีการกำหนดไว้ในมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชนไส้กรอกหมู มพช. 330/2547 ซึ่งประกอบด้วยลักษณะดังต่อไปนี้ (กระทรวงอุตสาหกรรม. 2547)

2.4.2.1 ลักษณะทั่วไป

ในภาชนะบรรจุเดียวกันต้องมีรูปร่างเดียวกันและมีขนาดใกล้เคียงกันมีผิวเรียบไม่ฉีก

2.4.2.2 สี

ต้องมีสีที่ติดตามธรรมชาติของส่วนประกอบที่ใช้สม่ำเสมอกันตลอดทั้งชิ้นไม่มีสีผิดปกติ เช่น สีเขียวคล้ำ สีดำ

2.4.2.3 กลิ่นรส

ต้องมีกลิ่นรสที่ติดตามธรรมชาติของส่วนประกอบที่ใช้ปราศจากกลิ่นรสอื่นที่ไม่พึงประสงค์ เช่น กลิ่นคาว กลิ่นเหม็นบูดรสเปรี้ยว

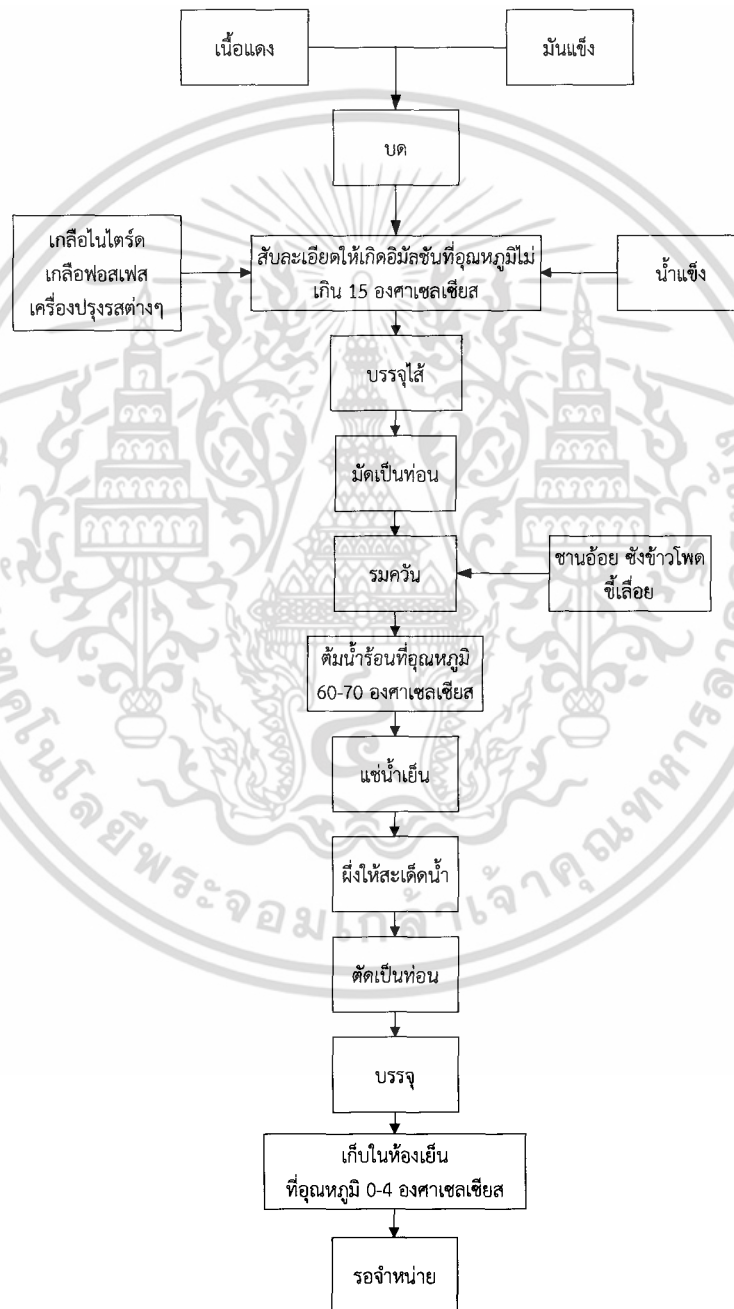
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.2.4 ลักษณะเนื้อ

ต้องเป็นเนื้อเดียวกันไม่มีโพรงอากาศมีความนุ่มยืดหยุ่นคงรูปและไม่มี การแยกตัวของหยดน้ำ หรือน้ำมันออกจากเนื้อไส้กรอกหมู

2.4.3 ขั้นตอนการผลิตไส้กรอกหมู

การทำไส้กรอกโดยเฉพาะอย่างยิ่งไส้กรอกรมควันและไส้กรอกสุกทั่วไป ส่วนผสมของเนื้อต้อง ผ่านการสับละเอียดจนอยู่ในสภาพที่เป็นอิมัลชัน (Emulsion) มีขั้นตอนการผลิตไส้กรอกแบบอิมัลชัน แสดงได้ดังรูปที่ 2.5 (เยาวลักษณ์ สุรพันธ์พิษฐ์. 2536)



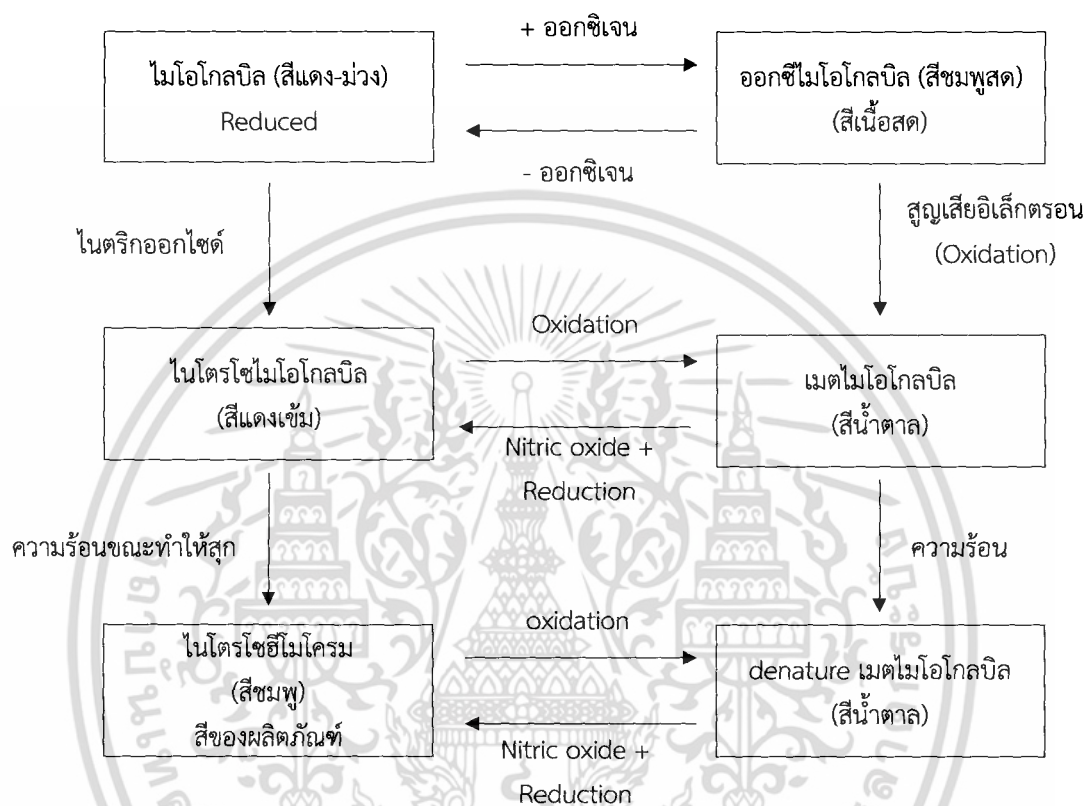
รูปที่ 2.5 แผนภาพแสดงขั้นตอนการผลิตไส้กรอกแบบอิมัลชัน

(เยาวลักษณ์ สุรพันธ์พิษฐ์. 2536)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.4 การเกิดสีของผลิตภัณฑ์ไส้กรอก

สารสี (Pigment) ประกอบด้วยโปรตีนหลัก 2 ชนิด คือ ไมโอโกลบินซึ่งเป็นสารสีในกล้ามเนื้อ และฮีโมโกลบินซึ่งเป็นสารสีในเม็ดเลือดแดง ตามปกติแล้วสัตว์ที่ถูกฆ่าอย่างได้มาตรฐาน หลังจากตายแล้วพบว่าปริมาณสารสีในกล้ามเนื้อจะประกอบด้วย ไมโอโกลบินร้อยละ 80-90 และสารอื่น ๆ ที่มีอีกเล็กน้อย คือ ฮีโมโกลบิน ตัวเร่งปฏิกิริยา และไซโตโครม (ชัยณรงค์ คันธพนิต. 2529)



รูปที่ 2.6 ปฏิกิริยาเคมีของการเกิดสีในเนื้อสดและผลิตภัณฑ์
(ชัยณรงค์ คันธพนิต. 2529)

ปฏิกิริยาทางเคมีของสารสีดังแสดงในรูปที่ 2.6 อธิบายได้ดังที่ชัยณรงค์ คันธพนิต ได้กล่าวว่า ปฏิกิริยาทางเคมีของสารสี เป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้สีของเนื้อและผลิตภัณฑ์เปลี่ยนแปลง โดยเฉพาะสภาวะทางเคมีของธาตุเหล็กในโมเลกุลของสารสีไมโอโกลบิน หลังจากที่ถูกตัดชิ้นเนื้อจะทำให้เนื้อถูกอากาศ ไมโอโกลบินในเนื้อจะทำปฏิกิริยากับออกซิเจนในอากาศเป็นสีแดงสดของสารที่เรียกว่า ออกซีไมโอโกลบิน ซึ่งจะเกิดขึ้นภายใน 30-45 นาทีหลังจากเนื้อถูกอากาศ ในปฏิกิริยานี้ไมโอโกลบินยังคงอยู่และจะไม่ออกซิไดซ์ไปเป็นอย่างอื่นได้ง่ายแม้แต่จะเปลี่ยนเป็นเมตไมโอโกลบิน (Metmyoglobin) แต่ในอีกกรณีหนึ่งเมื่อตัดเนื้อแล้วและนำไปเก็บไว้ยังที่อับอากาศ หรือเกือบจะเป็นสุญญากาศ ในบางกรณีอาจห่อเนื้อแน่นเกินไปจนมีออกซิเจนน้อย ธาตุเหล็กของสารสีนั้นจะเกิดการออกซิไดซ์ (Oxidized) ไปเป็นสารที่เรียกว่า เมตไมโอโกลบิน ซึ่งทำให้เนื้อเป็นสีน้ำตาลคล้ำ การเกิดขึ้นของเมตไมโอโกลบินเป็นปัญหาต่อผู้บริโภคมากเพราะผู้บริโภคมักคิดว่าเป็นเนื้อที่เก็บไว้นานหรือผิดปกติ จึงไม่ซื้อไปรับประทาน ซึ่งสีน้ำตาลนี้อาจเป็นเช่นนั้นตลอดไป ในอีกกรณีหนึ่งถ้าทิ้งเนื้อไว้บนโต๊ะผิวเรียบไว้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เป็นเวลานานๆ จนทำให้บรรยากาศใต้ชั้นเนื้อเป็นสุญญากาศ ไมโอโกลบินจึงถูกรีดิวซ์ได้ อาจแก้ไขโดยการนำเนื้อออกมาให้ถูกอากาศเพื่อจะได้เกิดออกซิเจนเนตไปเป็นออกซีไมโอโกลบินได้อีกต่อไป

การแปรรูปเนื้อสัตว์ประเภทไส้กรอกได้จากการหมักเกลือซึ่งมีส่วนประกอบหลักอยู่ 2 ชนิด คือ เกลือแกงและไนไตรท์ การหมักด้วยเกลือนั้นเพื่อยืดระยะเวลาการเก็บรักษาไส้กรอกให้นานขึ้นเกลือจะช่วยสกัดโปรตีนออกจากกล้ามเนื้อ ส่วนไนไตรท์จะใช้ได้ทั้งในรูปของเกลือโซเดียมหรือโพแทสเซียม ทำหน้าที่สร้างสีชมพูในผลิตภัณฑ์ ซึ่งเรียกว่า ไนโตรโซฮีโมโครม เป็นสารที่มีความคงทนเกิดขึ้นหลังจากกระบวนการให้ความร้อน ดังสมการที่ 2.1



ไนโตรออกไซด์ไมโอโกลบินมีสีแดงสดและเป็นสารสีในเนื้อที่เกิดขึ้นหลังจากผ่านการหมักก่อนที่จะถูกความร้อนเพื่อทำให้สุก เมื่อถูกความร้อนสารนี้จะกลายเป็นสารสีที่คงทนซึ่งมีชื่อเรียกว่า ไนโตรโซฮีโมโครม หรือไนโตรซิลฮีโมโครม คือสารสีชมพูของผลิตภัณฑ์เนื้อสัตว์นั่นเอง

ไนโตรโซฮีโมโครมเป็นสารสีที่คงทนต่อความร้อนการใช้ความร้อนเพื่อทำให้สุกจึงไม่มีผลต่อการสูญเสียสีของไส้กรอก แต่ถ้าไนโตรโซไมโอโกลบินและไนโตรโซฮีโมโครมถูกแสง สีอาจสูญหายไปจึงทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของสีได้ ดังนั้นถ้าวางผลิตภัณฑ์ระหว่างรอจำหน่ายในตู้ที่ใช้แสงไฟค่อนข้างแรงหรือปล่อยให้เนื้อสัมผัสอากาศ สีของเนื้อจะจางลงได้ภายในเวลาเพียง 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

2.5 การวิเคราะห์ระบบการวัด

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

2.5.1 พื้นฐานเกี่ยวกับความสามารถของระบบการวัด

ความสามารถของระบบการวัดมีความสำคัญในแง่ของคุณภาพและการปรับปรุงกระบวนการ โดยปกติกิจกรรมการผลิตมีความสัมพันธ์กับการวัด ซึ่งค่าที่วัดได้จะมีความผันแปรเสมอและความผันแปรที่เกิดขึ้นอาจเกิดมาจากระบบการวัดที่ใช้ ซึ่งระบบการวัดประกอบด้วย เครื่องมือวัด พนักงานวัด ปัจจัยแวดล้อม ช่วงระยะเวลาที่แตกต่างกัน และปัจจัยอื่นๆ ที่ส่งผลกับสมรรถนะของระบบการวัด เช่น การตั้งค่า หรือการปรับเทียบ (Montgomery. 2009)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความสามารถของระบบการวัด อาจประกอบด้วยความสามารถในการวัดซ้ำและการวัดเหมือนของเครื่องมือวัด ดังนั้นสามารถอธิบายความหมายของระบบการวัดอย่างง่าย ๆ ดังสมการที่ 2.2

$$\sigma_{Total}^2 = \sigma_P^2 + \sigma_{Gauge}^2 \quad (2.2)$$

σ_{Total}^2 คือ ความแปรปรวนของข้อมูลทั้งหมด

σ_P^2 คือ ความแปรปรวนเนื่องจากชิ้นงาน

σ_{Gauge}^2 คือ ความแปรปรวนเนื่องจากเครื่องมือวัด

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

ความสามารถในการวัดเหมือน (Reproducibility) คือ ความผันแปรที่แสดงถึงค่าเฉลี่ยของค่าวัดจากการใช้อุปกรณ์วัดเดียวกันในการวัดชิ้นงานเดียวกันด้วยเงื่อนไขที่แตกต่างกัน ซึ่งในอุตสาหกรรมทั่วไปมักจะหมายถึงความแตกต่างระหว่างพนักงานวัด จึงอาจจะเรียกว่าความผันแปรระหว่างพนักงานวัด (Appraiser variation : AV) อย่างไรก็ตามผู้วิเคราะห์ไม่ควรจะสรุปในทันทีเพราะว่าในบางครั้งความผันแปรอาจจะมีสาเหตุหลักจากปัจจัยอื่นที่ไม่ใช่พนักงานวัดก็ได้เช่น ปัจจัยระหว่างกะงาน เป็นต้น (กิตติศักดิ์ พลอยพานิชเจริญ, 2553)

2.5.2 การวางแผนศึกษาความสามารถในการวัดซ้ำและการวัดเหมือนของเครื่องมือวัด

การศึกษาความผันแปรของระบบการวัดในรูปความสามารถในการวัดซ้ำและการวัดเหมือนของเครื่องมือวัดนั้นมีความจำเป็นอย่างยิ่งต้องเริ่มต้นจากขั้นตอนการวางแผนการศึกษา โดยมีประเด็นพิจารณาดังนี้ (กิตติศักดิ์ พลอยพานิชเจริญ, 2553)

2.5.2.1 วิธีการและเวลาที่จะมีการสอบเทียบเครื่องมือวัด

การสอบเทียบเครื่องมือวัดมีความสำคัญมากต่อการพิจารณาถึงความคลาดเคลื่อนด้านความแม่นยำในระบบการวัด โดยปกติแล้วจะต้องมีการสอบเทียบก่อนการศึกษาความสามารถในการวัดซ้ำและความสามารถในการวัดเหมือนจะเริ่มต้นขึ้นและไม่ควรจะมีการสอบเทียบใหม่ถ้าการศึกษายังไม่สิ้นสุดลง เพราะถ้ามีการสอบเทียบใหม่ในระหว่างการศึกษาแล้ว จะทำให้เกิดความผันแปร จึงต้องพยายามลดค่าความผันแปรโดยพยายามให้พนักงานวัดทุกคนมีความเข้าใจในวิธีการสอบเทียบและดำเนินการอย่างสม่ำเสมอ

2.5.2.2 จำนวนพนักงานที่ใช้ในการศึกษาระบบ GR&R

การกำหนดจำนวนพนักงานวัดที่เหมาะสมมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องพิจารณาก่อนว่าในระบบการผลิตมีพนักงานวัดคือ ผู้ใช้เครื่องมือวัดในการกำหนดค่าตัวเลขกับชิ้นงานเพื่อการตัดสินใจจำนวนเท่าใด ถ้าเครื่องมือวัดดังกล่าวไม่ใช่พนักงานในการดำเนินการวัดเลย (เครื่องมือวัดอัตโนมัติ) หรือมีการใช้พนักงานวัดเพียงคนเดียวแสดงว่าค่าความผันแปรในระบบการวัดไม่ได้มาจากสาเหตุด้านเอกสารนี้เป็นเอกสารที่ส่งมอบไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พนักงานวัด และในกรณีที่ระบบการวัดมีพนักงานวัดจำนวนหลายคน ให้ทำการสุ่มพนักงานวัดมาทำการศึกษาน้อย 2 คน โดยจะต้องเป็นพนักงานที่ผ่านการฝึกอบรมมาอย่างดีแล้ว และปฏิบัติงานเกี่ยวกับงานวัดในอุปกรณ์วัดที่ทำการศึกษาก่อนเป็นประจำ

2.5.2.3 จำนวนชิ้นงาน (สิ่งตัวอย่าง)

จำนวนสิ่งตัวอย่างที่ใช้ในการศึกษานั้นโดยปกติจะแนะนำให้ใช้ 10 ตัวอย่างถ้าหากไม่สามารถดำเนินการได้จะต้องพยายามให้ผลคูณของจำนวนของสิ่งตัวอย่างกับจำนวนของพนักงานวัดมีค่ามากกว่า 15 และถ้าไม่สามารถดำเนินการได้ให้เพิ่มจำนวนการทำซ้ำของการวัดในแต่ละสิ่งตัวอย่าง และสิ่งตัวอย่างที่จะใช้ในการวัดนี้ต้องเป็นสิ่งตัวอย่างที่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งถ้าใช้สิ่งตัวอย่างที่มีความแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญแล้วจะมีความหมายเท่ากับการใช้สิ่งตัวอย่างเดียวด้วยจำนวนวัดซ้ำมากๆ และในกรณีที่จะทำให้ระบบการวัดมีคุณภาพด้านความไวเพียงพอต่อการตรวจจับความผันแปรของชิ้นงานในกระบวนการแล้ว จะต้องทำให้ข้อมูลมีความแตกต่างกันไม่ต่ำกว่า 5 ประเภท ในกรณีที่มีการตรวจสอบแบบทำลาย จะต้องกำหนดให้ “ล็อต (lot)” หมายถึงสิ่งตัวอย่างสำหรับการศึกษา GR&R

2.5.2.4 จำนวนครั้งในการวัดซ้ำสำหรับสิ่งตัวอย่างแต่ละชิ้น

โดยปกติแล้วแนะนำให้ทำการวัดซ้ำที่แต่ละสิ่งตัวอย่างด้วยจำนวนซ้ำเท่าๆกันเรียกการทดลองแบบนี้ว่า Balance design ซึ่งโดยทั่วไปจะกำหนดให้มีการวัดซ้ำสำหรับพนักงานวัดแต่ละคน 2-3 ครั้งต่อชิ้นงานแต่ละชิ้น

2.5.2.5 วิธีลดความผันแปรในสิ่งตัวอย่างของการศึกษา GR&R

ในการศึกษา GR&R บางกรณีนั้นจะไม่สามารถกำจัดความผันแปรภายในสิ่งตัวอย่างออกจากการวัดซ้ำ เช่น ในกรณีการตรวจสอบแบบทำลายที่มีความผันแปรภายในล็อตรวมอยู่กับการวัดซ้ำ จึงมีความจำเป็นต้องพยายามเลือกงานในล็อตให้มีความใกล้เคียงกันให้มากที่สุด

2.5.2.6 วิธีการประเมินผลความสามารถในการวัดซ้ำและวัดเหมือน

เมื่อการทดลองสิ้นสุดลง ต้องมีการประเมินผลถึงคุณภาพของข้อมูลก่อน เช่น การประเมินผลความสามารถในการแยกความแตกต่างของเครื่องมือวัด ความคงรูป และความต้องการกันของระบบการวัด จากนั้นจึงทำการประเมินผลความสามารถในการวัดซ้ำและวัดเหมือน ซึ่งมีวิธีการประเมินผล 3 วิธีคือ

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

2. วิธีอาศัยค่าเฉลี่ยและพิสัย (Average and range method) เหมาะกับการทดลองซ้ำในแต่ละสิ่งตัวอย่างของพนักงานวัดแต่ละคน ซึ่งวิธีการนี้สามารถแยกการวัดซ้ำออกจากกรวัดเหมือนได้ แต่ไม่สามารถแยกความผันแปรจากสาเหตุร่วมระหว่างชิ้นงานและพนักงานวัดออกจากค่าการวัดซ้ำได้

3. วิธีอาศัยการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) เหมาะกับการวิเคราะห์ผลการศึกษาที่ได้จากการออกแบบการทดลองเพื่อพิจารณาว่าพนักงานและชิ้นงาน เป็นสาเหตุของความผันแปรอย่างมีนัยสำคัญหรือไม่ และวิธีการนี้จะสามารถแยกความผันแปรจากสาเหตุร่วมระหว่างชิ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปะ 123032 อังอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

งานและพนักงานวัดออกจากค่าการวัดซ้ำได้ วิธีการนี้มีข้อเสียตรงที่มีความยุ่งยากในการทำงานแนะนำให้ใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยในการคำนวณ (กิตติศักดิ์ พลอยพานิชเจริญ. 2553)

2.5.3 การออกแบบการทดลองการศึกษาความสามารถในการวัดซ้ำและการวัดเหมือนของเครื่องมือวัด

รูปแบบการทดลองทั่วไปที่ใช้สำหรับการออกแบบการทดลองเพื่อศึกษาความสามารถของกระบวนการวัดจะใช้การทดลองแบบ Three factor factorial โดยทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ ซึ่งตัวแปรได้แก่ ชิ้นงาน (Part ; $i = 1, 2, \dots, a$) พนักงานวัด (Operator ; $j = 1, 2, \dots, b$) วิธีการ (Method ; $k = 1, 2, \dots, c$) และระบบการวัด (Measurement ; $l = 1, 2, \dots, n$) (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

2.5.4 การวิเคราะห์ผลการศึกษาความสามารถในการวัดซ้ำและการวัดเหมือนของเครื่องมือวัด

ในการตีความหมายผลการวิเคราะห์จากตารางการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) จะต้องเริ่มจากการวิเคราะห์ความมีนัยสำคัญของอิทธิพลร่วม (Interaction effect) ระหว่างชิ้นงานและพนักงานวัดก่อนซึ่งถ้าพบว่ามีอิทธิพลร่วมระหว่างชิ้นงานกับพนักงานวัดมีนัยสำคัญ แสดงว่าเมื่อเปลี่ยนชิ้นงานให้พนักงานคนเดิมทำการวัดแล้วผลการวัดจะเปลี่ยนไป ซึ่งจะพบว่าอิทธิพลร่วมมีผลมาก และในกรณีที่อิทธิพลร่วมมีนัยสำคัญจึงจำเป็นต้องตีความหมายจากอิทธิพลหลัก (Main effect) ของพนักงานวัดหรือชิ้นงานอีก เพราะว่าแม้อิทธิพลหลักของพนักงานวัดจะดูเหมือนมีผลอย่างไรก็ตามมีนัยสำคัญ แต่แท้ที่จริงแล้วมีอิทธิพลมากเมื่อมีการประเมินค่าความผันแปรด้านความสามารถในการวัดซ้ำและการวัดเหมือนของเครื่องมือวัด (กิตติศักดิ์ พลอยพานิชเจริญ. 2553)

2.6 การควบคุมกระบวนการเชิงสถิติ

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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)

ตัวอย่างการประยุกต์ใช้วิธีการควบคุมกระบวนการเชิงสถิติกับอาหาร มีดังนี้

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 ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงทำการศึกษการใช้วิธีการประมวลผลภาพโดยการใช้ภาพสีของไส้กรอกร่วมกับวิธีการควบคุมกระบวนการเชิงสถิติ

2.6.1 แผนภูมิควบคุม (Control chart)

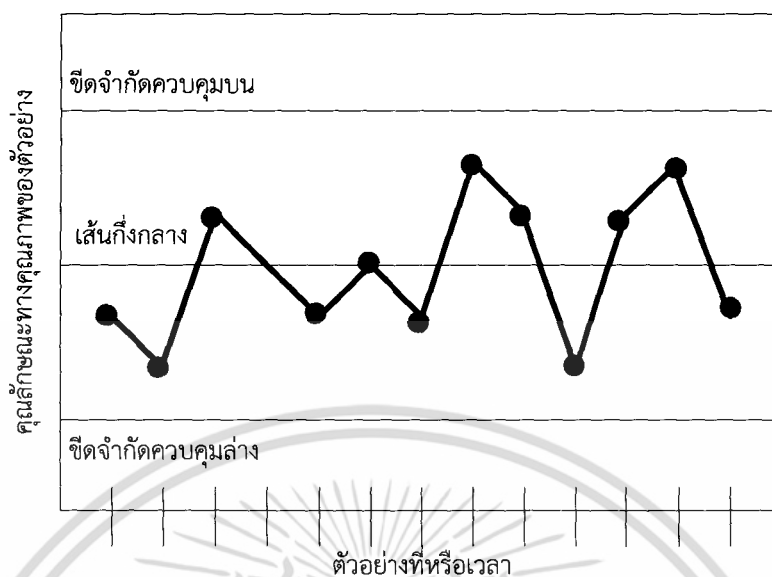
แผนภูมิควบคุมถูกพัฒนาขึ้นเมื่อปี 1920s โดย Walter A. Shewhart ขณะที่ทำงานที่เบลล์ เทเลโฟนแล็บ แผนภูมิควบคุมเป็นเครื่องมือคุณภาพอย่างหนึ่งในเจ็ดของเทคนิคการวิเคราะห์คุณภาพที่ใช้ในการเฝ้าติดตามกระบวนการผลิตที่กำลังดำเนินการผลิตอยู่ (On-line process) โดยเงื่อนไขของการใช้แผนภูมิควบคุมของชีวฮาร์ทนั้น จะสร้างบนพื้นฐานข้อมูลที่มีการแจกแจงแบบปกติ (Normal distribution) (Montgomery. 2009)

การแจกแจงแบบปกติ เป็นการแจกแจงของตัวแปรสุ่มแบบต่อเนื่องที่พบมากที่สุด ถ้า x เป็นตัวแปรสุ่มปกติที่มีค่าเฉลี่ย μ และ σ^2 จะมีฟังก์ชันความน่าจะเป็นดังสมการที่ 2.4

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

ค่าเฉลี่ยของการแจกแจงแบบปกติ คือ μ ($-\infty < \mu < \infty$) และความแปรปรวน คือ $\sigma^2 > 0$
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวอย่างของแผนภูมิควบคุมแสดงดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 แสดงตัวอย่างแผนภูมิควบคุม

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

การใช้แผนภูมิควบคุมเพื่อควบคุมกระบวนการมีความสัมพันธ์กับระยะที่ 1 (Phase I) และระยะที่ 2 (Phase II) ซึ่งแต่ละระยะมีจุดประสงค์ที่แตกต่างกัน โดยระยะที่ 1 (Phase I) เป็นการพิจารณากระบวนการว่าอยู่ภายใต้การควบคุมหรือไม่ โดยจะรวบรวมข้อมูล 20 หรือ 25 กลุ่มย่อยภายหลังจากกระบวนการได้รับการวิเคราะห์และทำให้เป็นมาตรฐาน แล้วทำการคำนวณพิกัดควบคุมเริ่มต้น (Trial control limit) เพื่อตรวจสอบว่าข้อมูลที่รวบรวมมาอยู่ภายใต้สภาวะควบคุมหรือไม่ ถ้าอยู่ภายใต้สภาวะควบคุมจะสามารถนำไปควบคุมสำหรับกระบวนการในอนาคตได้ และสามารถใช้อีกครั้งในการสร้างแผนภูมิควบคุมเพื่อการควบคุมกระบวนการในระยะที่ 2 ต่อไป ดังนั้นอาจจะเรียกแผนภูมิควบคุมในระยะที่ 1 นี้ว่า แผนภูมิควบคุมระยะเริ่มต้น (Trial control limit) ถ้าพบว่ามีข้อมูลส่วนน้อยออกนอกขีดจำกัดการควบคุมแสดงว่ามีความผันแปรจากสาเหตุที่ผิดปกติเกิดขึ้นกับข้อมูลดังกล่าว ซึ่งจำเป็นต้องวิเคราะห์ค้นหาสาเหตุเพื่อทำการแก้ไขแล้วดำเนินการกำจัดสาเหตุที่ผิดปกติดังกล่าวออกไป จากนั้นจึงทำการทบทวนพิกัดควบคุมใหม่ แต่หากมีข้อมูลส่วนมากออกนอกการควบคุม แสดงว่ากระบวนการดังกล่าวมีความผันแปรที่ไม่เป็นไปตามสาเหตุโดยธรรมชาติ จึงขาดคุณสมบัติแห่งการคาดการณ์ได้ และไม่สามารถใช้แผนภูมิควบคุมเพื่อควบคุมกระบวนการต่อไปได้

ในระยะที่ 2 (Phase II) จะเกิดขึ้นหลังจากที่กระบวนการอยู่ภายใต้สภาวะที่เสถียรและอยู่ภายใต้การควบคุม แผนภูมิควบคุมประเภทนี้จะใช้ในการควบคุมกระบวนการโดยเปรียบเทียบค่าทางสถิติของตัวอย่างสำหรับแต่ละตัวอย่างตามเวลาที่ต่อเนื่องกันและนำมาคำนวณขีดจำกัดการควบคุมของกระบวนการ และเมื่อพบการออกนอกการควบคุมจะต้องทำการค้นหาสาเหตุที่ผิดปกติทันที เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในระยะที่ 2 ของแผนภูมิควบคุมนี้ จะมีการดำเนินการทบทวนพิกัดควบคุมใหม่ทุกครั้งที่มีการเริ่มทำแผนภูมิควบคุมใหม่ พร้อมมีการทบทวนวิธีการกำหนดกลุ่มย่อย จำนวนสิ่งตัวอย่าง และความถี่ของการชักสิ่งตัวอย่างเป็นระยะๆจนกระทั่งเลิกใช้การควบคุมด้วยวิธีการทางสถิติในที่สุด (Montgomery. 2009)

แผนภูมิควบคุมแบ่งตามชนิดของตัวแปรได้เป็น 2 ประเภทหลักๆ คือแผนภูมิควบคุมตัวแปรเดียวและแผนภูมิควบคุมตัวแปรพหุ ดังนี้

2.6.1.1 แผนภูมิควบคุมตัวแปรเดียว (Univariate control chart)

แผนภูมิควบคุมตัวแปรเดียวจำแนกได้เป็น 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 หรือ กิโลกรัม เป็นต้น ซึ่งแผนภูมินี้ประกอบด้วย (Montgomery. 2009)

1) แผนภูมิควบคุมค่าเฉลี่ยและพิสัย (\bar{x} and R control charts)

แผนภูมินี้ที่นิยมใช้มากที่สุดในการอุตสาหกรรมคือ แผนภูมิ \bar{x} และ แผนภูมิ R แผนภูมิทั้งสองนี้จะใช้ควบคู่กันเพื่อควบคุมค่าเฉลี่ยของกระบวนการและค่าการกระจายของกระบวนการ วัตถุประสงค์และประโยชน์ที่สำคัญของแผนภูมิทั้งสองประกอบด้วย

- แผนภูมิ \bar{x} ใช้ประโยชน์เพื่อควบคุมค่าเฉลี่ยของกระบวนการผลิต เช่น น้ำหนักเฉลี่ยของผงชูรส เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของลวดทองแดง เป็นต้น
- แผนภูมิ R ใช้ประโยชน์เพื่อควบคุมการกระจายของกระบวนการผลิต เช่น น้ำหนักของผงชูรส เส้นผ่านศูนย์กลางของลวดทองแดง เป็นต้น
- แผนภูมิ \bar{x} และ R สามารถใช้ประเมินสมรรถภาพกระบวนการเพื่อวิเคราะห์ถึงความสามารถในการผลิตภายใต้ข้อกำหนด และประเมินจำนวนสินค้าที่ระดับคุณภาพต่ำกว่าที่กำหนด

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

$$\begin{aligned} UCL &= \bar{\bar{x}} + A_2 \bar{R} \\ CL &= \bar{\bar{x}} \\ LCL &= \bar{\bar{x}} - A_2 \bar{R} \end{aligned} \quad (2.5)$$

$$\begin{aligned} UCL &= D_4 \bar{R} \\ CL &= \bar{R} \\ LCL &= D_3 \bar{R} \end{aligned} \quad (2.6)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ \bar{x} คือ ค่าเฉลี่ยของค่าเฉลี่ยแต่ละกลุ่มตัวอย่าง

\bar{R} คือ ค่าเฉลี่ยของพิสัยของแต่ละกลุ่มตัวอย่าง

สำหรับค่าของ A_2 D_4 และ D_3 เป็นค่าคงที่ขึ้นอยู่กับจำนวนตัวอย่างในกลุ่มข้อมูล

2) 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 และ ขีดจำกัดการควบคุมของแผนภูมิ S ดังสมการที่ 2.8

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

$$\begin{aligned} UCL &= B_4\bar{S} \\ CL &= \bar{S} \\ LCL &= B_3\bar{S} \end{aligned} \quad (2.8)$$

3) แผนภูมิควบคุมค่าวัดและพิสัยเคลื่อนที่ (\bar{x} and MR control charts)

มีหลายกรณีที่กลุ่มตัวอย่างมีจำนวนตัวอย่างเดียว หรือ $n = 1$ (n คือ จำนวนตัวอย่าง) เช่น การวัดผลที่ได้จากกระบวนการผลิตที่ใช้เครื่องจักรอัตโนมัติ และวัดผลทุกชิ้นที่ผลิตได้ หรืออาจเกิดจากลักษณะการผลิตที่มีอัตราการผลิตช้า ซึ่งกว่าจะรอเพื่อเก็บตัวอย่างจะเสียเวลานานมาก ในกรณีเช่นนี้ อาจสร้างแผนภูมิควบคุมสำหรับตัวอย่างเดียว โดยสร้างแผนภูมิ \bar{x} โดยใช้ค่าพิสัยเฉลี่ย \bar{R} หรือจากผลต่างระหว่างข้อมูลเดี่ยวที่ติดกันดังสมการที่ 2.9

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

โดย x_i คือ ค่าตัวอย่างที่ i

x_{i-1} คือ ค่าตัวอย่างที่ $i - 1$

ขีดจำกัดการควบคุมแสดงดังสมการที่ 2.10

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. แผนภูมิควบคุมคุณลักษณะ (Attribute control charts)

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

- 1) แผนภูมิที่ใช้วิเคราะห์ของเสีย ประกอบด้วย แผนภูมิควบคุมสัดส่วนของเสีย (p chart) และแผนภูมิควบคุมจำนวนของเสีย (np chart)
- 2) แผนภูมิที่ใช้วิเคราะห์ข้อบกพร่อง ประกอบด้วย แผนภูมิควบคุมจำนวนข้อบกพร่องต่อหน่วยการทดสอบ (c chart) และแผนภูมิควบคุมจำนวนข้อบกพร่องเฉลี่ยต่อหน่วย (u chart)

3. แผนภูมิควบคุมแบบถ่วงน้ำหนัก (Time-weighted control charts)

- 1) แผนภูมิควบคุมผลรวมสะสม (Cumulative sum control chart) เป็นแผนภูมิควบคุมที่ใช้เพื่อตรวจจับการเปลี่ยนแปลงไปของกระบวนการผลิต โดยนำข้อมูลตลอดช่วงเวลาของการเก็บข้อมูลมาใช้เพื่อประกอบการตัดสินใจด้วย
- 2) แผนภูมิควบคุมค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ถ่วงน้ำหนักแบบเอ็กซ์โปเนนเชียล (Exponentially weighted moving average control chart) ใช้เพื่อตรวจจับสภาพการเปลี่ยนแปลงไปของกระบวนการผลิต โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้นเพียงเล็กน้อย (Montgomery, 2009)

2.6.1.2 แผนภูมิควบคุมตัวแปรพหุ (Multivariate control chart)

Montgomery (2009) กล่าวว่า ในการควบคุมคุณภาพทางสถิติของตัวแปรเดียวโดยทั่วไปจะใช้การแจกแจงแบบปกติ โดยฟังก์ชันความน่าจะเป็นของการแจกแจงแบบปกติแสดงดังสมการที่ 2.11

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

โดยค่าเฉลี่ยของการแจกแจงแบบปกติ คือ μ ความแปรปรวนคือ σ^2 องค์ประกอบของการแจกแจงแบบปกติแสดงดังสมการที่ 2.12

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

จากวิธีการดังกล่าวสามารถนำไปใช้ในกรณีของการแจกแจงแบบปกติของตัวแปรพหุ ซึ่งมีตัวแปรทั้งหมด p

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

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

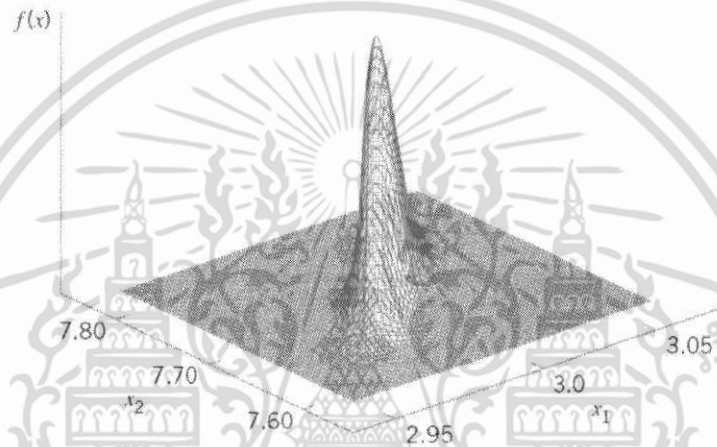
ฟังก์ชันความหนาแน่นน่าจะเป็นแบบปกติของตัวแปรพหุตั้งสมการที่ 2.14

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

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

p คือ จำนวนตัวแปร

การแจกแจงแบบปกติของตัวแปรพหุสำหรับ 2 ตัวแปร (Bivariate normal) แสดงดังรูปที่ 2.8 แสดงพื้นผิวของฟังก์ชันความหนาแน่น



รูปที่ 2.8 การแจกแจงแบบปกติของตัวแปรพหุ 2 ตัวแปร
(Montgomery, 2009)

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

1. แผนภูมิควบคุมโฮเทลลิงทีสแควร์ (Hotelling T^2 control chart)

เป็นแผนภูมิควบคุมหลายลักษณะคุณภาพหลายตัวแปรพร้อมๆกันโดยมีข้อสันนิษฐานว่าตัวแปรต้องมีความสัมพันธ์กันไม่มากนักโดยดูที่เมตริกความแปรปรวนร่วม (Covariance matrix) และค่าสังเกตแบบ Multivariate ถูกแสดงในรูปของเวกเตอร์ที่มีมิติ p ตรงกับจำนวนตัวแปร p ที่ทำการวัดในแต่ละค่าสังเกตและข้อมูลที่ได้อาจต้องเป็นการแจกแจงปกติตัวแปรพหุคูณ (Multivariate normal data) (Fuchs and Kenett, 1998)

ในอุตสาหกรรมบางประเภทมีการกำหนดจำนวนตัวอย่างเท่ากับ 1 เช่น อุตสาหกรรมเคมี และอุตสาหกรรมดังกล่าวต้องทำการควบคุมคุณภาพหลายตัวแปรพร้อมๆกัน หรือเรียกอีกอย่างว่าค่าสังเกตเชิงเดี่ยว (Individual observations) (Montgomery, 2009)

กำหนดให้ขนาดตัวอย่าง m แต่ละตัวอย่างมีจำนวนตัวอย่างเท่ากับ 1 และจำนวนคุณลักษณะที่ต้องการควบคุมเท่ากับ p

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ให้ $\bar{\mathbf{x}}$ คือ เวกเตอร์ของค่าเฉลี่ยของตัวอย่าง (Sample mean vector)

\mathbf{S} คือ เมตริกความแปรปรวนร่วม (Covariance matrix)

ดังนั้นตัวสถิติโฮเทลลิงทีสแควร์ (Hotelling T^2) แสดงดังสมการที่ 2.15

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

ขีดจำกัดการควบคุมสำหรับตัวสถิติเฟส II แสดงดังสมการที่ 2.16

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

ในกรณีที่ตัวอย่างเริ่มต้นมีจำนวนมาก $m > 100$ ใช้การประมาณค่าขีดจำกัดการควบคุมดังสมการที่ 2.17 ถ้าทราบเมตริกความแปรปรวนร่วมจะใช้ขีดจำกัดไคสแควร์ดังสมการที่ 2.18 แต่โดยทั่วไปจะใช้การประมาณค่า

$$\text{UCL} = \frac{p(m-1)}{m-p} F_{\alpha, p, m-p} \quad (2.17)$$

$$\text{UCL} = \chi_{\alpha, p}^2 \quad (2.18)$$

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 และการแจกแจงแบบไคสแควร์จะไม่มีวามแม่นยำ

$$\begin{aligned} \text{UCL} &= \frac{(m-1)^2}{m} \beta_{\alpha, p/2, (m-p-1)/2} \\ \text{LCL} &= 0 \end{aligned} \quad (2.19)$$

สำหรับกรณีค่าสังเกตเชิงเดียวการประมาณค่าเมตริกความแปรปรวนร่วม Σ จากการศึกษาของ Sullivan and Woodall (1995) ได้อภิปรายและวิเคราะห์ปัญหาเปรียบเทียบการประมาณค่าหลายรูปแบบ ซึ่งหนึ่งในวิธีเหล่านั้นคือการประมาณค่าแบบปกติที่ได้จากการรวมกันของทุกค่าสังเกต m อย่างง่าย ซึ่งแสดงดังสมการที่ 2.20

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

สำหรับวิธีการประมาณค่าเมตริกความแปรปรวนร่วมแบบที่สองเสนอโดย Holmes and Mergen (1993) โดยใช้ความแตกต่างระหว่างค่าสังเกตดังสมการที่ 2.21

$$\mathbf{v}_i = \mathbf{x}_{i+1} - \mathbf{x}_i \quad i = 1, 2, \dots, m-1 \quad (2.21)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จัดเรียงเวกเตอร์ในรูปเมตริก V ดังนี้

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

ประมาณค่า Σ ดังสมการที่ 2.22

$$S_2 = \frac{1}{2} \frac{v'v}{(m-1)} \quad (2.22)$$

2. แผนภูมิควบคุมตัวแปรพหุ EWMA (Multivariate EWMA control chart)

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

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

2.6.2 การศึกษาลักษณะข้อมูล

การศึกษาลักษณะของข้อมูลเพื่อให้สามารถเลือกใช้แผนภูมิควบคุมได้อย่างเหมาะสม ดังนี้

2.6.2.1 การตรวจสอบการแจกแจงแบบปกติ (Normal distribution)

การตรวจสอบข้อมูลที่มีการแจกแจงแบบปกติหรือไม่ 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)

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

2.6.2.2 การตรวจสอบสหสัมพันธ์ (Correlation)

การตรวจสอบสหสัมพันธ์ เป็นการวัดระดับความสัมพันธ์ระหว่าง X และ Y ว่ามีความสัมพันธ์กันมากน้อยเพียงใด ตัวสถิติที่ใช้วัดระดับความสัมพันธ์ เรียกว่า สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (ρ) ถ้าค่าของ Y ขึ้นอยู่กับค่าของ X เพียงตัวเดียวจะเรียกว่า สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของเพียร์สัน

เนื่องจากใช้ข้อมูลที่คำนวณจากตัวอย่างแทนข้อมูลจากประชากร จึงประมาณค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของประชากร (ρ) ด้วยค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของตัวอย่าง (r) โดยที่ $-1 \leq r \leq 1$ ความหมายของค่า r แสดงดังนี้ (Montgomery and Runger. 2011)

1. r เป็นบวก หมายถึง X และ Y มีความสัมพันธ์ในทิศทางเดียวกัน
2. r เป็นลบ หมายถึง X และ Y มีความสัมพันธ์ในทิศทางตรงกันข้าม
3. r มีค่าเข้าใกล้ 1 หมายถึง X และ Y มีความสัมพันธ์ในทิศทางเดียวกันและมี
ความสัมพันธ์กันมาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. r มีค่าเข้าใกล้ -1 หมายถึง X และ Y มีความสัมพันธ์ในทิศทางตรงกันข้าม และมีความสัมพันธ์กันมาก
5. r มีค่าเข้าใกล้ 0 หมายถึง X และ Y มีความสัมพันธ์กันน้อย
6. $r = 1$ หมายถึง X และ Y มีความสัมพันธ์กันอย่างสมบูรณ์ในทิศทางเดียวกัน

2.6.2.3 การตรวจสอบอัตตสหสัมพันธ์ (Autocorrelation)

การตรวจสอบอัตตสหสัมพันธ์มีทั้งที่เกิดจากตัวแปรอิสระที่เป็นค่าความล่าช้า (Lag) ของตัวแปรตาม (Autoregressive) และสหสัมพันธ์ของค่าความคลาดเคลื่อน (Moving average)

ดังนั้นจึงต้องทำการวิเคราะห์ทั้งฟังก์ชันอัตตสหสัมพันธ์ (Autocorrelation function : ACF) และฟังก์ชันอัตตสหสัมพันธ์บางส่วน (Partial Autocorrelation function : PACF) เนื่องจาก ACF จะใช้ในการอธิบายสหสัมพันธ์ของค่าความคลาดเคลื่อน แต่ไม่สามารถอธิบายความสัมพันธ์ของตัวแปรอิสระที่เป็นความล่าช้าของตัวแปรตาม ซึ่งฟังก์ชันอัตตสหสัมพันธ์บางส่วนจะใช้วัดความสัมพันธ์ดังกล่าวได้ อธิบายดังนี้

1. ฟังก์ชันอัตตสหสัมพันธ์ (Autocorrelation function : ACF)

อัตตสหสัมพันธ์ของประชากร (ρ_k) คือ การวัดความสัมพันธ์ของแต่ละช่วงเวลาของค่าความคลาดเคลื่อน โดยมีช่วงเวลาที่ย้อนหลังไป k หน่วยเวลา ρ_k มีค่าตั้งสมการที่ 2.25 (Montgomery, 2009)

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

การประมาณค่าอัตตสหสัมพันธ์ของตัวอย่างแทนด้วย r_k แสดงตั้งสมการที่ 2.26

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

2. ฟังก์ชันอัตตสหสัมพันธ์บางส่วน (Partial Autocorrelation function : PACF)

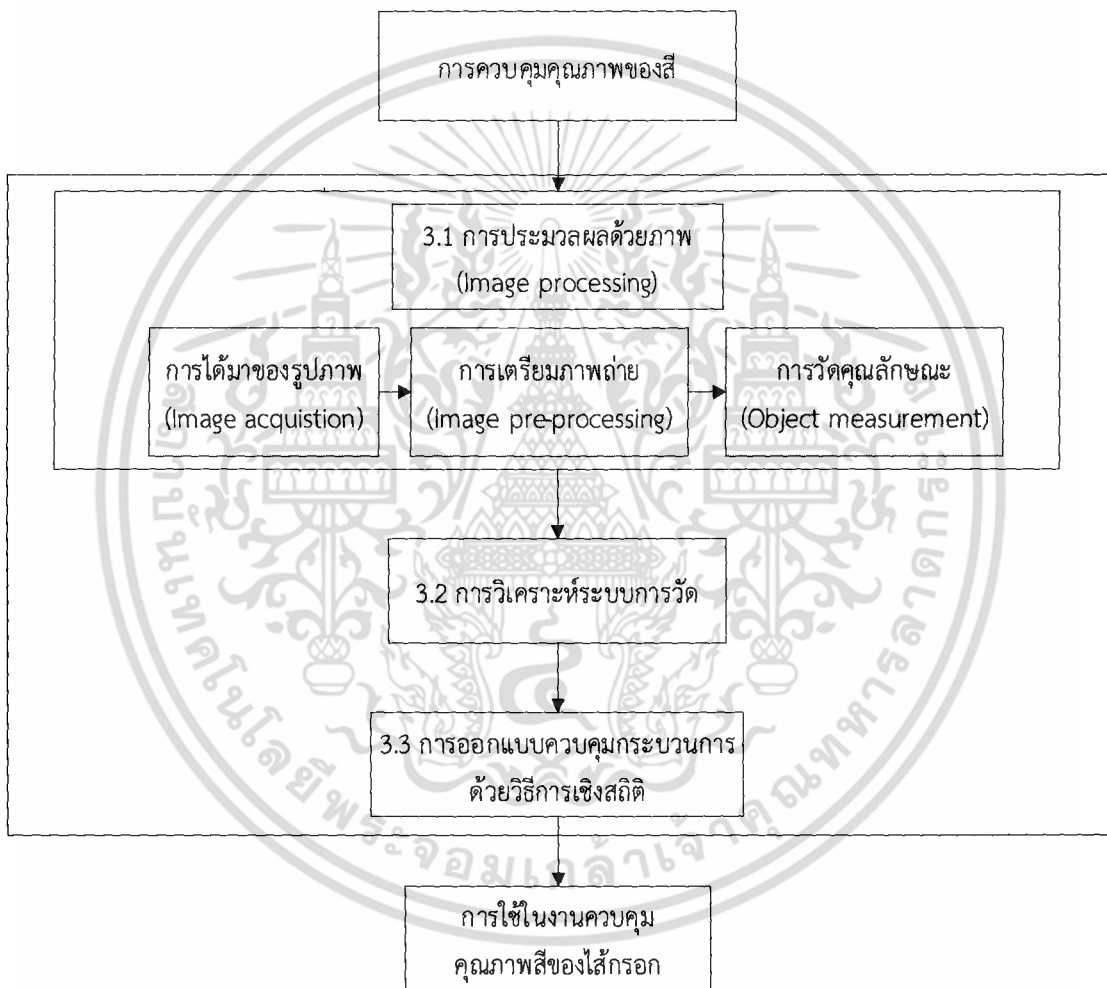
อัตตสหสัมพันธ์บางส่วน คือ อัตตสหสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร x_{t-k} และ x_t ที่อยู่ห่างกัน k ช่วงเวลาที่ขจัดอิทธิพลของตัวแปรที่อยู่ระหว่างตัวแปรทั้งสองได้แก่ $x_{t-k+1}, \dots, x_{t-1}$ ออกไป แทนด้วย ρ_k และค่าอัตตสหสัมพันธ์บางส่วนของตัวอย่างแสดงตั้งสมการที่ 2.27 (Castillo, 2002)

$$\hat{\rho}_k, \quad k = 1, 2, \dots \quad (2.27)$$

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

ในงานวิจัยนี้วัตถุประสงค์คือเพื่อศึกษาวิธีการประเมินผลสีของไส้กรอกโดยใช้วิธีการประมวลผลด้วยภาพวิธีการควบคุมคุณภาพสีของไส้กรอกโดยใช้วิธีการควบคุมกระบวนการเชิงสถิติและบูรณาการทั้งสองวิธีดังกล่าวข้างต้น โดยแบ่งออกเป็นขั้นตอนหลัก 3 ขั้นตอน ได้แก่ การประมวลผลด้วยภาพ การวิเคราะห์ระบบการวัดและการออกแบบควบคุมกระบวนการด้วยวิธีการเชิงสถิติ แสดงแผนผังขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แสดงแผนผังขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

3.1 การประมวลผลภาพ

การควบคุมคุณภาพสีของไส้กรอก โดยทั่วไปวิธีการในการวัดสีจะใช้การเปลี่ยนภาพจากระบบ RGB เป็น ระบบ $L^*a^*b^*$ เนื่องจากเป็นระบบที่ไม่ขึ้นกับอุปกรณ์ และสามารถบ่งบอกความเข้มและความสว่างของไส้กรอกเพื่อนำไประบุว่ามีสีคล้ำหรือสีซีด ซึ่งจะทำให้สามารถอธิบายสีของไส้กรอกที่เป็นตัวอย่างในงานวิจัยนี้ในมุมมองที่ครอบคลุมกว่าระบบ RGB ซึ่งบ่งบอกเฉพาะสีแดง สีเขียว และสีน้ำเงิน มีขั้นตอนการประมวลผลภาพดังต่อไปนี้

3.1.1 การได้มาของรูปภาพ

การได้มาของรูปภาพ (Image acquisition) ใช้กล้องดิจิทัลในการถ่ายภาพ ซึ่งจะได้ภาพออกมาดังรูปที่ 3.2 ซึ่งอุปกรณ์ที่ใช้ในการถ่ายภาพจะกล่าวต่อไปในหัวข้อ 3.2



รูปที่ 3.2 แสดงตัวอย่างรูปภาพที่ได้จากการถ่ายภาพ

3.1.2 การเตรียมภาพถ่าย

การเตรียมภาพถ่าย (Image pre-processing) ภาพถ่ายดิจิทัลต้องมีการปรับปรุงคุณภาพก่อนที่จะนำไปทำการวิเคราะห์ โดยการนำสีรบกวนภาพออกและเพิ่มความเข้มของภาพ จากนั้นจะทำการตัดรูปภาพเฉพาะส่วนที่เป็นไส้กรอกดังรูปที่ 3.3 และทำการประมวลผลพิกเซลเบื้องต้นโดยการแปลงจากระบบ RGB เป็นระบบ $L^*a^*b^*$ โดยใช้โปรแกรม MATLAB (O'Sullivan et al. 2003 : Pedreschi et al. 2006)



รูปที่ 3.3 แสดงการตัดภาพเฉพาะส่วนที่เป็นไส้กรอก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.3 การวัดคุณลักษณะ

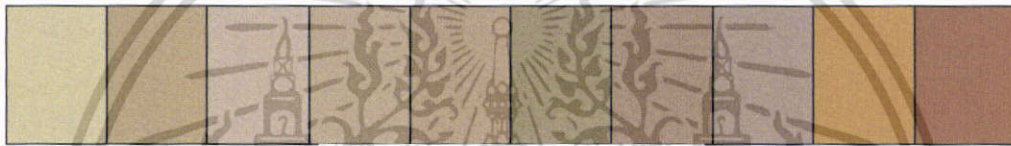
การวัดคุณลักษณะ (Object measurement) โดยทำการวัดสีจากภาพถ่ายซึ่งสีที่ได้จากการแปลงจากระบบ RGB เป็นระบบ $L^*a^*b^*$ ในขั้นตอนการประมวลผลภาพเบื้องต้น และทำการคำนวณค่าเฉลี่ยของค่า L^* , a^* และ b^* ในทุกพิกเซล

3.2 การวิเคราะห์ระบบการวัด

ใช้หลักการความสามารถในการวัดซ้ำและการวัดเหมือนของเครื่องมือวัด ในการวิเคราะห์เครื่องมือวัดคุณภาพสีของอาหาร เพื่อสร้างความเชื่อมั่นในเครื่องมือวัดว่าค่าที่วัดได้จากเครื่องมือวัดมีความสามารถในการแบ่งแยกผลิตภัณฑ์และสามารถนำไปใช้ในการควบคุมกระบวนการเชิงสถิติต่อไป

3.2.1 ตัวอย่างที่ใช้ในการทดลอง

เนื่องจากเป็นช่วงของการสร้างเครื่องมือวัด เพื่อความสะดวกในการทดลอง จึงใช้กระดาษสีที่มีสีแตกต่างกันแทนสีของไส้กรอก จำนวน 10 ตัวอย่าง แสดงดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 แสดงสีที่ใช้ในการทดลอง

3.2.2 วิธีการประมวลผลภาพ

ทำการทดลองวิธีการประมวลผลภาพก่อนการปรับปรุงและหลังการปรับปรุง ดังนี้

3.2.2.1 วิธีการประมวลผลภาพก่อนการปรับปรุง

การได้มาของรูปภาพใช้แสงสว่างและกล้องดิจิทัล SONY Cyber-shot รุ่น DSC-W50 แสดงดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 แสดงลักษณะของการได้มาของรูปภาพก่อนการปรับปรุง

3.2.2.2 วิธีการประมวลผลภาพหลังการปรับปรุง

หลังจากทำการปรับปรุงโดยทำการสร้างอุปกรณ์เพื่อควบคุมแสงสว่างแสดงภาพอุปกรณ์การทดลองดังรูปที่ 3.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น 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. กล้องดิจิทัล ใช้กล้องดิจิทัล (Canon EOS 550D) การตั้งค่ากล้องใช้ค่า ISO200 ความเร็วชัตเตอร์ 1/100 ค่ารับแสง 5.0 ไม่ใช้แฟลชและการซูม (Kang et al. 2008) ความละเอียด 3456 × 2304 การวางกล้องวางเหนือผลิตภัณฑ์ 22.5 เซนติเมตร โดยมุมระหว่างกล้องและหลอดไฟ 45 องศา

3. กล้องไม้ ขนาดกล้องกว้าง 80 เซนติเมตร ยาว 80 เซนติเมตร และสูง 60 เซนติเมตรโดยอุปกรณ์ทั้งหมดได้แก่ หลอดไฟ กล้องดิจิทัลวางภายในกล้องไม้ทาสีดำ เพื่อป้องกันแสงภายนอกและลดการสะท้อนของแสงภายในกล้อง (Mendoza and Aguilera. 2004 ; Pedreschi et al. 2006) ดังแสดงในรูปที่ 3.6

4. การถ่ายภาพเชื่อมต่อด้วย USB ผ่านคอมพิวเตอร์ โดยใช้โปรแกรม EOS Utility



รูปที่ 3.6 แสดงลักษณะของการได้มาของรูปภาพหลังการปรับปรุง

3.2.3 ขั้นตอนการดำเนินงานการวิเคราะห์ระบบการวัด

ขั้นตอนการดำเนินงานเพื่อศึกษาความสามารถของระบบการวัดค่าสี โดยออกแบบการทดลอง ศึกษาความสามารถในการวัดซ้ำและการวัดเหมือนของเครื่องมือวัดประกอบด้วย 3 ปัจจัย คือ พนักงาน ชิงงาน และวิธีการวัด โดยใช้ชิงงานจำนวน 10 ตัวอย่าง ให้พนักงานจำนวน 2 คน วิธีการวัด 2 วิธี คือการวางแนวตั้งและแนวนอน ทำการวัดโดยแต่ละคนวัดซ้ำคนละ 2 ครั้ง ซึ่งผลการวัดค่าอยู่ในระบบ $L^*a^*b^*$ ประกอบด้วยค่า L^* , a^* และ b^* ดังนั้นในการวิจัยครั้งนี้ต้องทำการเก็บข้อมูลทั้งหมด $2 \times 10 \times 2 \times 2 = 80$ โดยทำการทดลองแบบสุ่มโดยสมบูรณ์

3.2.4 การวิเคราะห์ผลการทดลอง

นำข้อมูลที่ได้จากการทดลองวิเคราะห์ผลโดยใช้โปรแกรม MINITAB 16 โดยใช้ balanced ANOVA จากนั้นนำผลการทดลองที่ได้มาเปรียบเทียบกับเพื่อหาวิธีการที่ดีที่สุดที่นำมาใช้ในการประมวลผลภาพเพื่อให้ค่าที่ได้มีความแม่นยำและมีความถูกต้องมากที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 การควบคุมกระบวนการเชิงสถิติ

หลังจากทำการวิเคราะห์หระบบการวัด เพื่อสร้างความเชื่อมั่นในเครื่องมือวัดว่าค่าที่วัดได้จากเครื่องมือวัดมีความสามารถในการแบ่งแยกผลิตภัณฑ์และสามารถนำไปใช้ในการควบคุมกระบวนการเชิงสถิติซึ่งขั้นตอนในการควบคุมกระบวนการเชิงสถิติมีดังนี้

3.3.1 ตัวอย่างไส้กรอกที่ใช้ในการทดลอง

ใช้ผลิตภัณฑ์ไส้กรอกจำนวน 2 ชนิด เพื่อใช้แทนลักษณะของไส้กรอกที่ปกติดังรูปที่ 3.7 และไส้กรอกที่ผิดปกติดังรูปที่ 3.8 โดยใช้สีของไส้กรอกที่แตกต่างกันเป็นตัวกำหนด



รูปที่ 3.7 ตัวอย่างที่ใช้แทนลักษณะของไส้กรอกที่ปกติ



รูปที่ 3.8 ตัวอย่างที่ใช้แทนลักษณะของไส้กรอกที่ผิดปกติ

3.3.2 ศึกษาคุณลักษณะของข้อมูล

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

1. การตรวจสอบการแจกแจงแบบปกติ (Normal distribution)
2. การตรวจสอบสหสัมพันธ์ (Correlation)
3. การตรวจสอบอัตสหสัมพันธ์ (Autocorrelation)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.3 การควบคุมกระบวนการด้วยวิธีการเชิงสถิติ

หลังจากการศึกษาลักษณะของข้อมูล แสดงให้เห็นว่าข้อมูลไม่สามารถสร้างแผนภูมิควบคุมชีวิตฮาร์ทได้เนื่องจากข้อมูลมีลักษณะไม่เป็นอิสระกัน จึงเสนอแนวทางการควบคุมกระบวนการคือ การใช้แผนภูมิโฮเทลลิงที่สแควร์ในการควบคุมกระบวนการโดยใช้โปรแกรม MATLAB จากนั้นใช้แผนภูมิควบคุมสำหรับตัวอย่างเดี่ยววิเคราะห์ค่า L^* a^* หรือ b^* ที่มีผลกระทบ โดยใช้โปรแกรม MINITAB จากการวิเคราะห์ระบบการวัดอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองแสดงดังรูปที่ 3.9



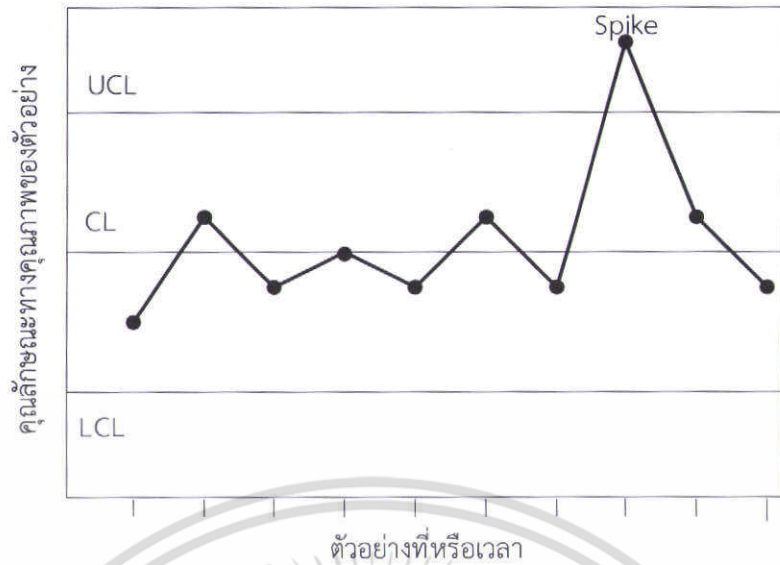
รูปที่ 3.9 แสดงอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

3.3.3.1 การทดสอบแผนภูมิควบคุม

ทดสอบแผนภูมิควบคุมโดยใช้แผนภูมิโฮเทลลิงที่สแควร์ในการควบคุมกระบวนการ จากนั้นใช้แผนภูมิควบคุมสำหรับตัวอย่างเดี่ยววิเคราะห์ค่า L^* a^* หรือ b^* ที่มีผลกระทบ การทดสอบดังกล่าวเพื่อตรวจสอบความผิดพลาดที่เกิดจากความผิดพลาดแบบที่ 1 (Type I error) คือกรณีที่ตัดสินใจผิดพลาดว่ากระบวนการอยู่นอกการควบคุมแต่ความเป็นจริงแล้วอยู่ภายใต้การควบคุม และความผิดพลาดแบบที่ 2 (Type II error) คือกรณีการตัดสินใจผิดพลาดว่ากระบวนการอยู่ภายใต้การควบคุมแต่ความเป็นจริงแล้วอยู่นอกการควบคุม (Montgomery, 2009) โดยแบ่งออกเป็น 2 กรณี ดังนี้

1. การทดสอบ Spike

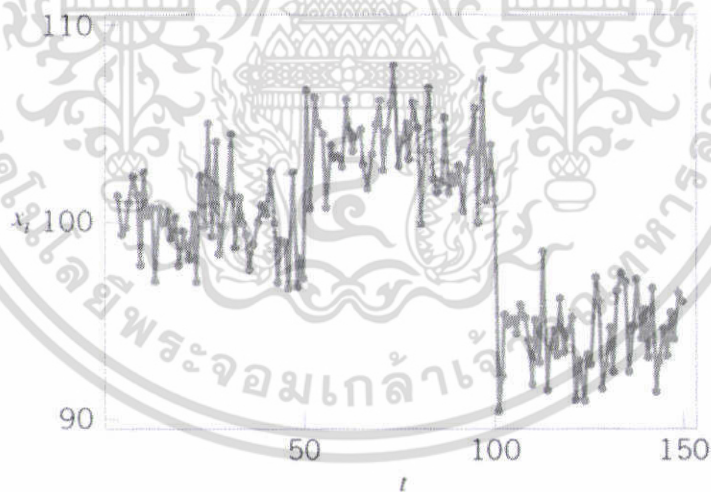
จากรูปที่ 3.10 แสดงลักษณะของการทดสอบแบบ Spike ทำการทดลองโดยใช้ผลิตภัณฑ์ใส่กรอกที่มีลักษณะปกติจำนวน 28 ตัวอย่างและผลิตภัณฑ์ใส่กรอกที่ผิดปกติจำนวน 1 ตัวอย่าง จากนั้นทดสอบว่าแผนภูมิควบคุมสามารถตรวจจับสิ่งผิดปกติที่เพิ่มเข้าไปได้หรือไม่



รูปที่ 3.10 แสดงลักษณะของการทดสอบแบบ Spike

2. การทดสอบ Mean shift

จากรูปที่ 3.11 แสดงลักษณะของการทดสอบแบบ Mean shift ทำการทดลองโดยใช้ผลิตภัณฑ์ไส้กรอกที่มีลักษณะปกติจำนวน 28 ตัวอย่างและไส้กรอกที่มีลักษณะผิดปกติจำนวน 10 ตัวอย่าง จากนั้นทดสอบว่าแผนภูมิควบคุมสามารถตรวจจับสิ่งผิดปกติที่เพิ่มเข้าไปได้หรือไม่



รูปที่ 3.11 แสดงลักษณะของการทดสอบแบบ Mean shift
(Montgomery. 2009)

3.3.3.2 ตัวอย่างการใช้งาน

ทำการทดลองโดยใช้แผนภูมิควบคุมกับตัวอย่างไส้กรอกจริงดังรูปที่ 3.7 จำนวน 29 ตัวอย่าง มาจากล็อตและประเภทเดียวกัน เพื่อทดสอบว่าข้อมูลสามารถตรวจจับสิ่งผิดปกติกับข้อมูลที่มาจากกระบวนการผลิตเดียวกันได้หรือไม่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์ผล

จากการทดลองตามขั้นตอนในบทที่ 3 ผลการทดลองแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ การวิเคราะห์ระบบการวัดและการควบคุมกระบวนการเชิงสถิติ แสดงดังต่อไปนี้

4.1 ผลการทดลองการวิเคราะห์ระบบการวัด

ผลการทดลองของการวิเคราะห์ระบบการวัดก่อนการปรับปรุงและหลังการปรับปรุง ซึ่งการได้มาของรูปภาพของแต่ละวิธีกล่าวไปแล้วในบทที่ 3 หัวข้อ 3.2 โดยระบบการวัดก่อนการปรับปรุงคือ การใช้แสงสว่างภายในห้องปกติไม่ได้ทำการควบคุมแสงและใช้กล้องดิจิทัล SONY Cyber-shot รุ่น DSC-W50 ดังรูปที่ 3.5 และระบบการวัดหลังการปรับปรุงคือ การถ่ายภาพในอุปกรณ์การทดลองที่ได้ทำการควบคุมแสงสว่างและทำการควบคุมค่าต่างๆ ดังรูปที่ 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

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 เมื่อทำการลดรูปตัวแบบ (Reduced model) จะได้ผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 4.3

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%					
Variance			Expected Mean Square for Each Term (using restricted model)		
Source	component	Error term			
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

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

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

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

ตารางที่ 4.4 ตารางเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของ L^* a^* และ b^*

ความแปรปรวน	L^*	a^*	b^*
σ_{gauge}^2	1.4489	2.0669	2.8083
σ_{part}^2	25.1240	40.0056	30.2985
$\% \sigma_{\text{gauge}}^2 / \sigma_{\text{part}}^2$	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

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%					
Variance component			Expected Mean Square for Each Term (using restricted model)		
Source	component	Error term			
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

$$\sigma_{\text{gauge}}^2 = \sigma^2 + \sigma_{\beta}^2 + \sigma_{\gamma}^2 \quad (4.2)$$

$$\sigma_{\text{gauge}}^2 = 0.175 + 0 + 0 = 0.175$$

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.7 ตารางเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของ L^* a^* และ b^* ของระบบการวัดหลังการปรับปรุง

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

จากการทดลองทั้ง 2 วิธีดังกล่าวข้างต้นนำมาเปรียบค่าสัดส่วนระหว่างความแปรปรวนของระบบการวัดและความแปรปรวนของชิ้นงานได้ดังตารางที่ 4.8

ตารางที่ 4.8 การเปรียบเทียบค่าสัดส่วนระหว่างความแปรปรวนของระบบการวัดและความแปรปรวนของชิ้นงาน

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

จากตารางที่ 4.8 ทำการเปรียบเทียบผลการทดลองวิธีการได้มาของรูปภาพของระบบการวัดก่อนการปรับปรุงคือ การใช้แสงสว่างภายในห้องปกติไม่ได้ทำการควบคุมแสงและใช้กล้องดิจิทัล SONY Cyber-shot รุ่น DSC-W50 ดังรูปที่ 3.5 และระบบการวัดหลังการปรับปรุงคือ การถ่ายภาพในอุปกรณ์การทดลองที่ได้ทำการควบคุมแสงสว่างและทำการควบคุมค่าต่างๆ ดังรูปที่ 3.6 พบว่าค่าสัดส่วนระหว่างความแปรปรวนของระบบการวัดและความแปรปรวนของชิ้นงานของระบบการวัดหลังการปรับปรุงมีค่าน้อยกว่าค่าของระบบการวัดก่อนการปรับปรุงทั้งค่า L^* a^* และ b^* แสดงให้เห็นว่าความแปรปรวนของเครื่องมือวัดมีค่าน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับความแปรปรวนเนื่องจากชิ้นงาน ดังนั้นระบบการวัดหลังการปรับปรุงจึงเป็นวิธีการที่นำมาใช้ในการควบคุมคุณภาพสีของผลิตภัณฑ์ไส้กรอกและสร้างความเชื่อมั่นในเครื่องมือวัดว่าค่าที่วัดได้จากเครื่องมือวัดมีความสามารถในการแบ่งแยกผลิตภัณฑ์และสามารถนำไปใช้ในการควบคุมกระบวนการเชิงสถิติต่อไป

4.2 ผลการทดลองการควบคุมกระบวนการเชิงสถิติ

หลังจากทำการวิเคราะห์ระบบการวัดเพื่อสร้างความเชื่อมั่นในเครื่องมือวัดว่าค่าที่วัดได้จากเครื่องมือวัดมีความสามารถในการแบ่งแยกผลิตภัณฑ์และสามารถนำไปใช้ในการควบคุมกระบวนการเชิงสถิติ จากนั้นจึงทำการทดลองควบคุมคุณภาพสีของไส้กรอกด้วยวิธีการควบคุมกระบวนการเชิงสถิติ ขั้นตอนในการควบคุมกระบวนการเชิงสถิติมีดังนี้

4.2.1 ศึกษาคุณลักษณะของข้อมูล

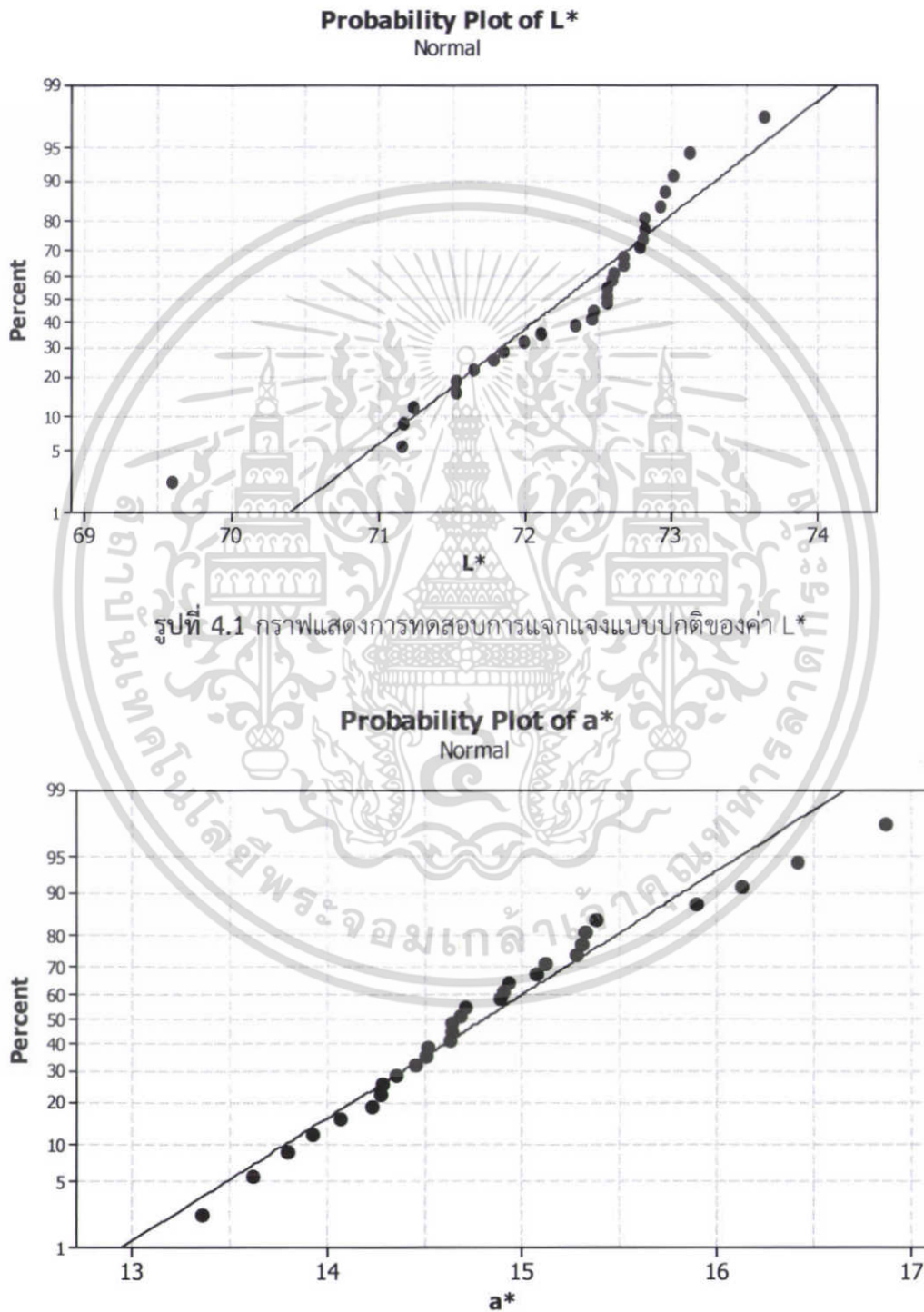
การเก็บข้อมูลที่ได้จากการประมวลผลภาพในรูปแบบค่าสังเกตเชิงเดี่ยว (Individual observations) จากการศึกษาคุณลักษณะของข้อมูลที่ได้จากการประมวลผลภาพ ค่าที่ได้จะออกมาทั้งหมด 3 ตัวแปร ได้แก่ ค่า L^* a^* และ b^* จากนั้นจึงทำการตรวจสอบการแจกแจงแบบปกติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(Normal distribution) การตรวจสอบสหสัมพันธ์ (Correlation) และการตรวจสอบอัตโนมัติสหสัมพันธ์ (Autocorrelation)

4.2.1.1 การตรวจสอบการแจกแจงแบบปกติ

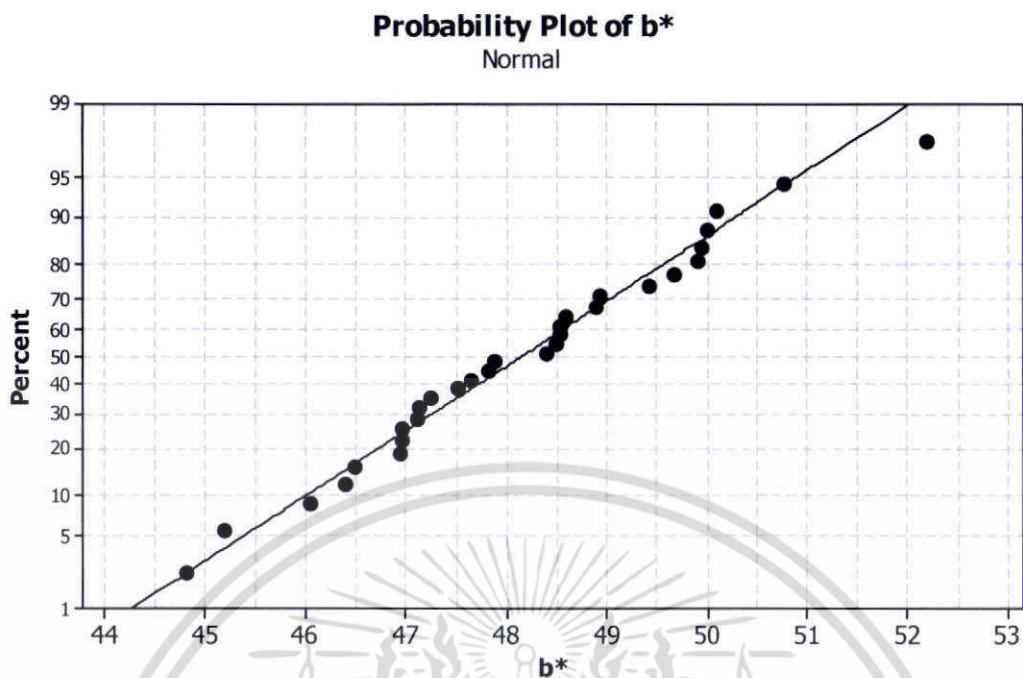
เป็นเงื่อนไขในการสร้างแผนภูมิควบคุมชีวฮาร์ท ข้อมูลจะต้องมีการแจกแจงแบบปกติ จากการทดลองโดยใช้ผลิตภัณฑ์ใส่กรอกจำนวน 30 ตัวอย่าง นำมาทดสอบการแจกแจงแบบปกติแสดงดังนี้



รูปที่ 4.1 กราฟแสดงการทดสอบการแจกแจงแบบปกติของค่า L*

รูปที่ 4.2 กราฟแสดงการทดสอบการแจกแจงแบบปกติของค่า a*

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



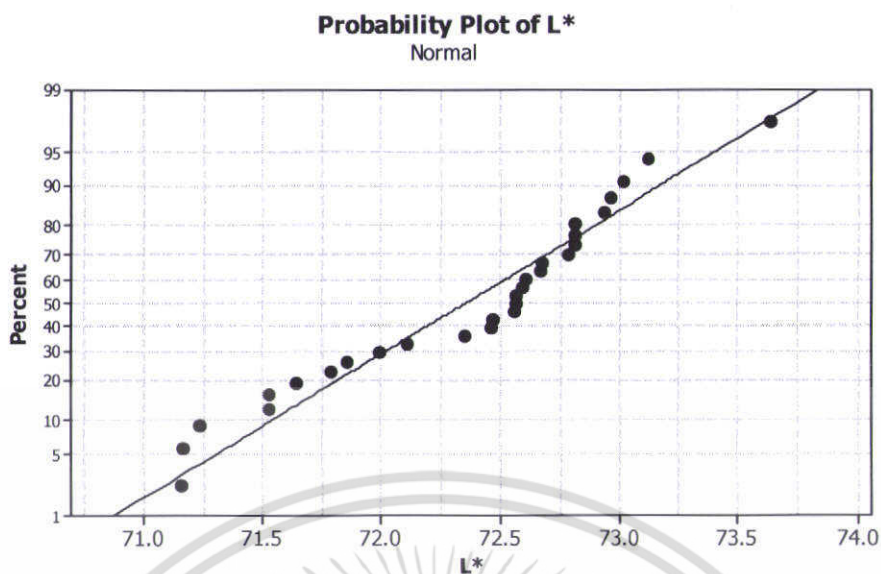
รูปที่ 4.3 กราฟแสดงการทดสอบการแจกแจงแบบปกติของค่า b*

จากกราฟรูปที่ 4.1 4.2 และ 4.3 แสดงการทดสอบการแจกแจงแบบปกติของทั้ง 3 ค่า คือ L^* a^* และ b^* กราฟรูปที่ 4.2 และ 4.3 มีลักษณะเป็นเส้นตรง ไม่พบสิ่งผิดปกติอย่างชัดเจน สามารถนำข้อมูลไปใช้ในการสร้างแผนภูมิควบคุมได้แต่ในรูปที่ 4.1 ค่า L^* พบว่ามีค่าที่ผิดปกติ คือ ตัวอย่างที่ 1 เมื่อตรวจสอบกับตัวอย่างที่ใช้ในการทดลอง พบว่าตัวอย่างมีสีของไส้กรอกไม่สม่ำเสมอทั่วทั้งชิ้นแสดงดังรูปที่ 4.4 ดังนั้นจึงทำการตัดค่าที่ผิดปกติออกคือค่าของตัวอย่างที่ 1 และทำการทดสอบการแจกแจงแบบปกติแสดงดังรูปที่ 4.5 4.6 และ 4.7

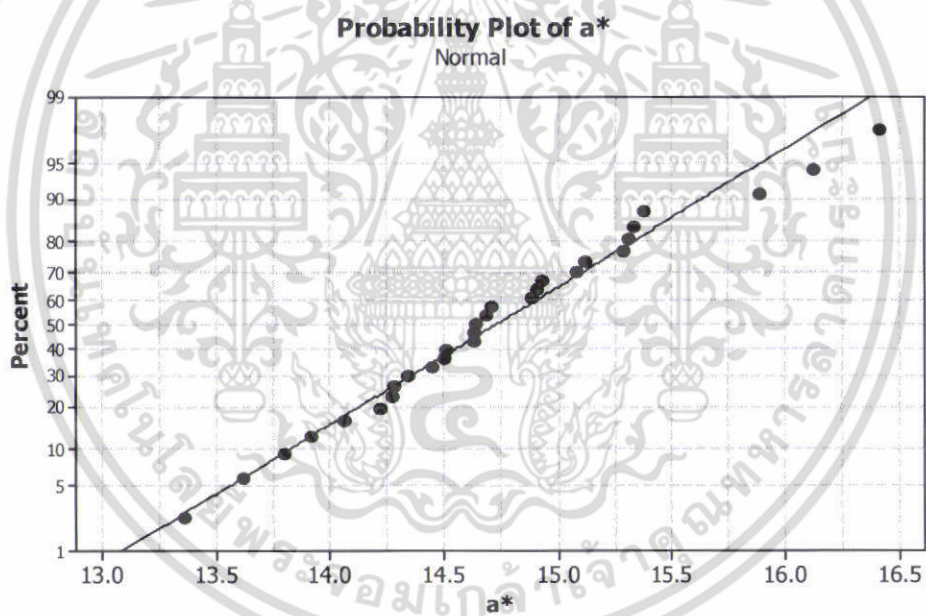


รูปที่ 4.4 แสดงลักษณะไส้กรอกที่มีความผิดปกติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

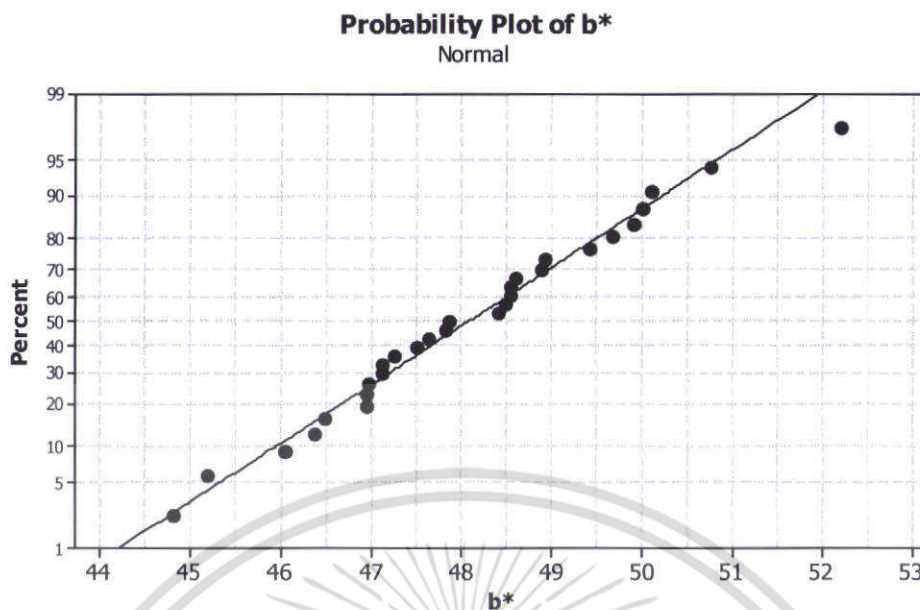


รูปที่ 4.5 กราฟแสดงการทดสอบการแจกแจงแบบปกติของค่า L*



รูปที่ 4.6 กราฟแสดงการทดสอบการแจกแจงแบบปกติของค่า a*

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.7 กราฟแสดงการทดสอบการแจกแจงแบบปกติของค่า b^*

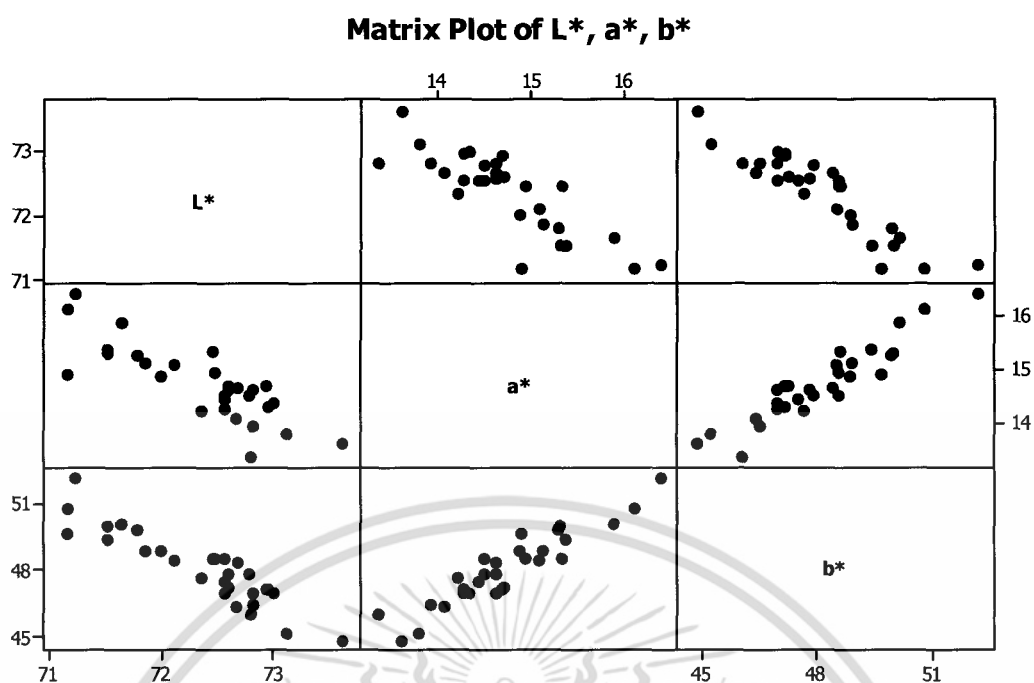
หลังจากการตัดค่าที่ผิดปกติออกและทำการทดสอบการแจกแจงแบบปกติดังรูปที่ 4.5 4.6 และ 4.7 จากกราฟค่า L^* a^* และ b^* ไม่พบสิ่งผิดปกติอย่างชัดเจน สามารถสมมติฐานได้ว่าข้อมูลชุดนี้มีการแจกแจงแบบปกติ

4.2.1.2 การตรวจสอบสหสัมพันธ์ (Correlation)

ตรวจสอบสหสัมพันธ์โดยการใช้ Matrix plot และค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของเพียร์สัน จากการใช้ Matrix plot ดังรูปที่ 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^* 0.932 มีค่าเป็นบวกแสดงว่ามีความสัมพันธ์ในทิศทางเดียวกันและมีความสัมพันธ์กันมาก เนื่องจากมีค่าเข้าใกล้ 1

จากผลการตรวจสอบสหสัมพันธ์สามารถอธิบายได้ว่าข้อมูลชุดนี้มีสหสัมพันธ์กัน จึงไม่สามารถใช้แผนภูมิควบคุมชีวฮาร์ตได้ เนื่องจากไม่อยู่ในเงื่อนไขของแผนภูมิควบคุมชีวฮาร์ตในเรื่องความเป็นอิสระ (Independent)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



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

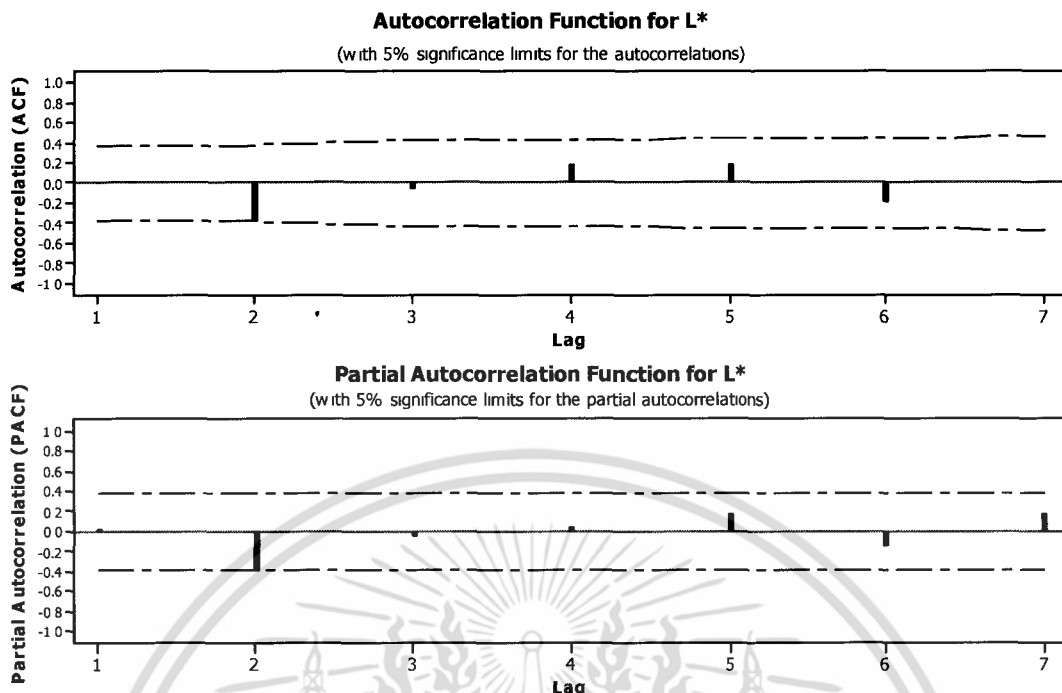
ตารางที่ 4.9 แสดงค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของเพียร์สัน

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

Cell Contents : Pearson correlation

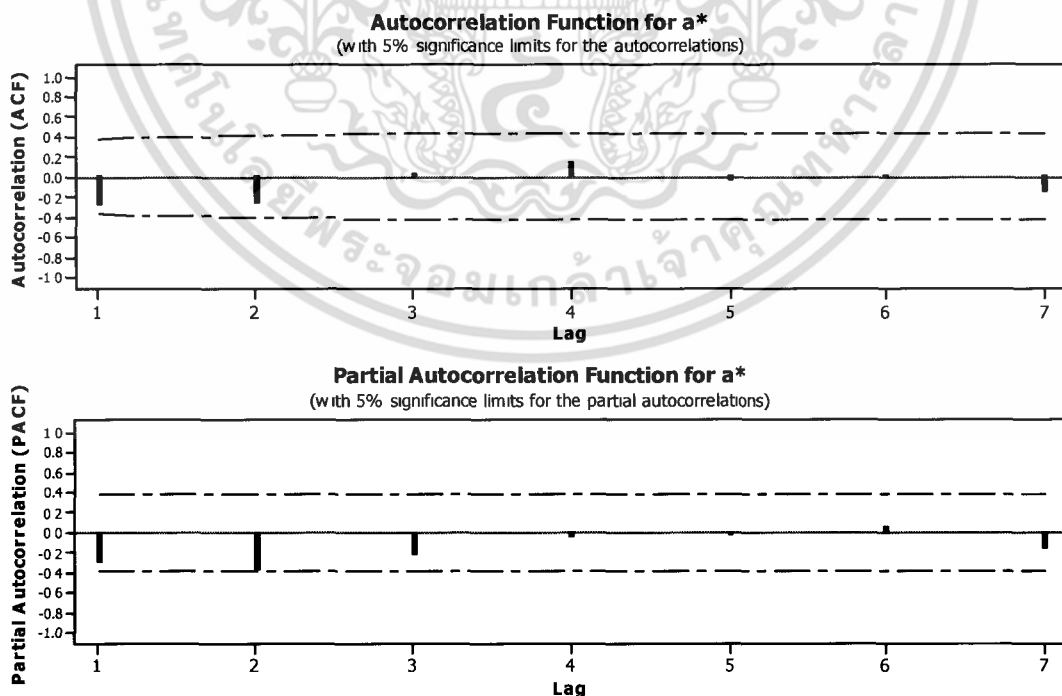
4.2.1.3 การตรวจสอบอัตสหสัมพันธ์ (Autocorrelation)

จากการทดลองโดยใช้ผลิตภัณฑ์ใส่กรอกจำนวน 29 ตัวอย่าง นำมาตรวจสอบความสัมพันธ์ของกระบวนการโดยพิจารณาจากกราฟฟังก์ชันอัตสหสัมพันธ์ (Autocorrelation function : ACF) และฟังก์ชันอัตสหสัมพันธ์บางส่วน (Partial Autocorrelation function : PACF) เนื่องจากถ้ากระบวนการมีความสัมพันธ์กันจะไม่สามารถใช้แผนภูมิควบคุมชีวฮาร์ตได้ จะต้องใช้แบบจำลอง ARIMA (Autoregressive integrated moving average model) ผลการตรวจสอบแสดงดังนี้



รูปที่ 4.9 กราฟฟังก์ชันอัตโนมัติสหสัมพันธ์และฟังก์ชันอัตโนมัติสหสัมพันธ์บางส่วนของค่า L^*

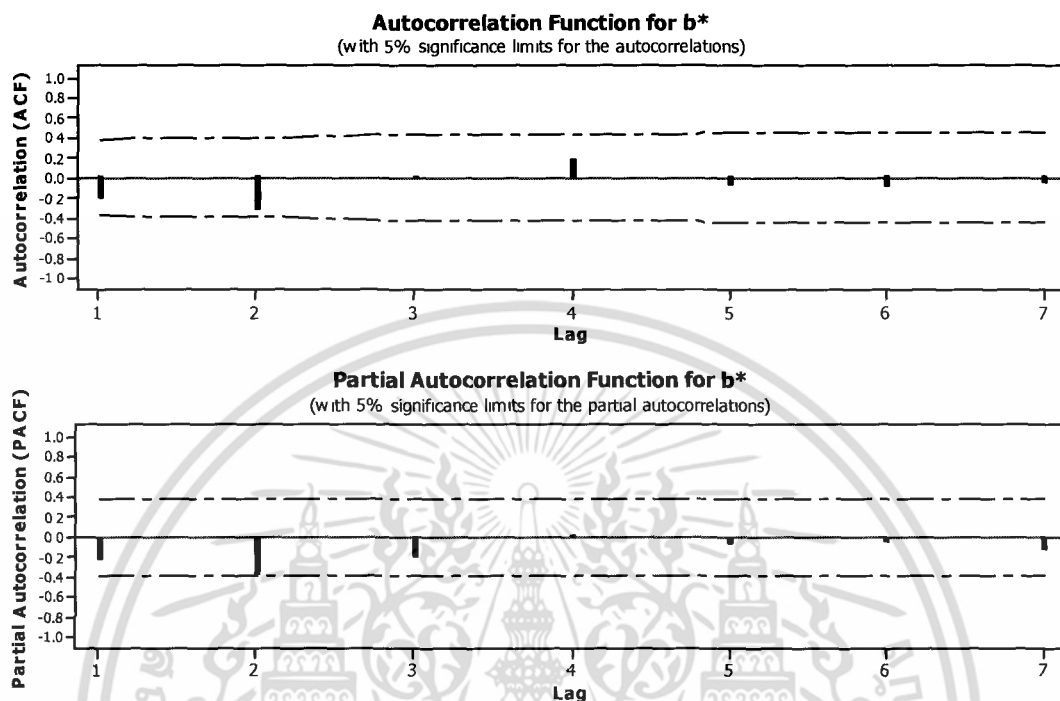
จากรูปที่ 4.9 เมื่อพิจารณากราฟฟังก์ชันอัตโนมัติสหสัมพันธ์และฟังก์ชันอัตโนมัติสหสัมพันธ์บางส่วนของค่า L^* พบว่าค่าตกอยู่ในขอบเขตความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ทุกค่า lag แสดงว่าข้อมูลไม่มีความสัมพันธ์กัน



รูปที่ 4.10 กราฟฟังก์ชันอัตโนมัติสหสัมพันธ์และฟังก์ชันอัตโนมัติสหสัมพันธ์บางส่วนของค่า a^*

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.10 เมื่อพิจารณารูปกราฟฟังก์ชันอัตโนมัติสหสัมพันธ์และฟังก์ชันอัตโนมัติสหสัมพันธ์บางส่วนของค่า a^* พบว่าค่าตกอยู่ในขอบเขตความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ทุกค่า lag แสดงว่าข้อมูลไม่มีความสัมพันธ์กัน



รูปที่ 4.11 กราฟฟังก์ชันอัตโนมัติสหสัมพันธ์และฟังก์ชันอัตโนมัติสหสัมพันธ์บางส่วนของค่า b^*

จากรูปที่ 4.11 เมื่อพิจารณารูปกราฟฟังก์ชันอัตโนมัติสหสัมพันธ์และฟังก์ชันอัตโนมัติสหสัมพันธ์บางส่วนของค่า b^* พบว่าค่าตกอยู่ในขอบเขตความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ทุกค่า lag แสดงว่าข้อมูลไม่มีความสัมพันธ์กัน

4.2.2 การควบคุมกระบวนการด้วยวิธีการเชิงสถิติ

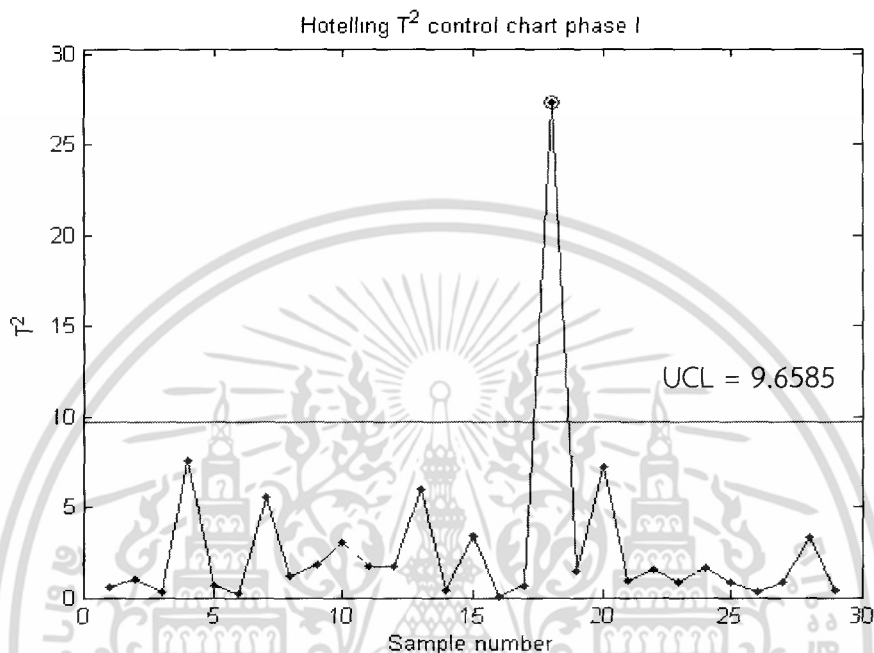
หลังจากการศึกษาลักษณะของข้อมูล แสดงให้เห็นว่าข้อมูลไม่สามารถสร้างแผนภูมิควบคุมชีวิตได้เนื่องจากข้อมูลมีลักษณะไม่เป็นอิสระกัน จึงเสนอแนวทางการควบคุมกระบวนการโดยใช้แผนภูมิควบคุมไฮเทคถึงที่สแควร์ในการตรวจจับ ถ้ามีค่าสังเกตที่ออกนอกการควบคุม จึงใช้แผนภูมิควบคุมสำหรับตัวอย่างเชิงเดียวเพื่อวิเคราะห์หาค่า L^* a^* หรือ b^* ที่ออกนอกการควบคุม และนำไปค้นหาปัจจัยที่มีผลกระทบต่อไส้กรองที่ออกนอกการควบคุม

4.2.2.1 การทดสอบแผนภูมิควบคุม

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

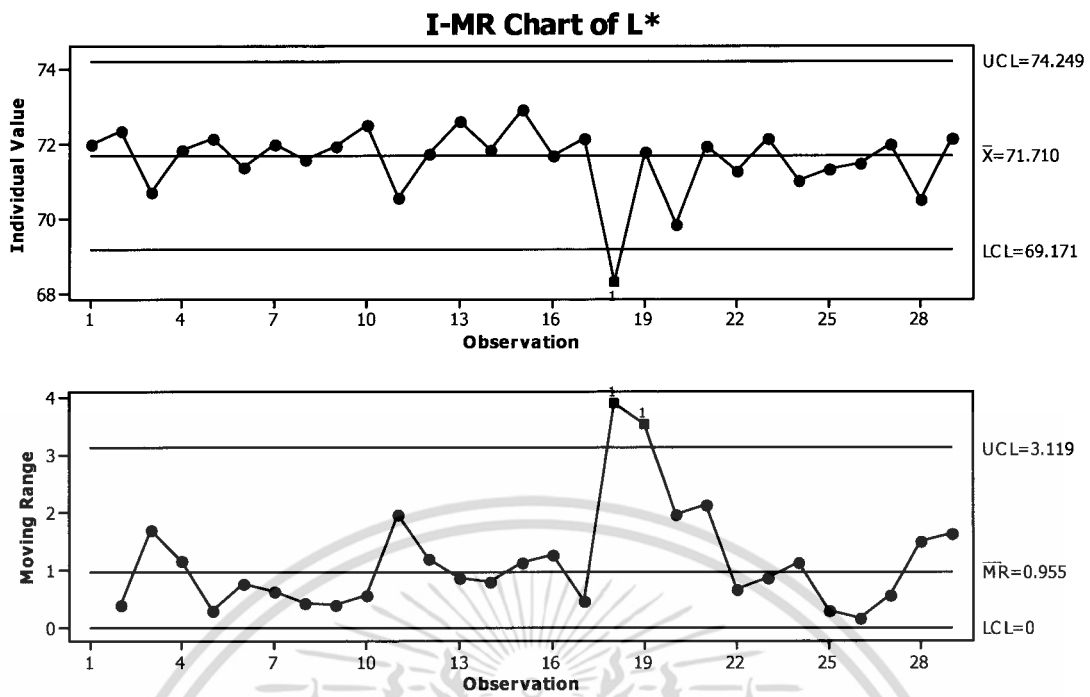
1. การทดสอบ Spike

ใช้ผลิตภัณฑ์ไส้กรอกที่มีลักษณะปกติจำนวน 28 ตัวอย่างดังรูปที่ 3.7 และผลิตภัณฑ์ไส้กรอกที่ผิดปกติจำนวน 1 ตัวอย่างดังรูปที่ 3.8 รวมทั้งหมด 29 ตัวอย่าง (ข้อมูลที่ใช้ทำแผนภูมิควบคุมแสดงดังภาคผนวกตารางที่ ก.15) ใช้โปรแกรม MATLAB สร้างแผนภูมิควบคุมโฮเทลลิงทีสแควร์แสดงดังรูปที่ 4.12 ใช้ค่าระดับนัยสำคัญ = 0.01

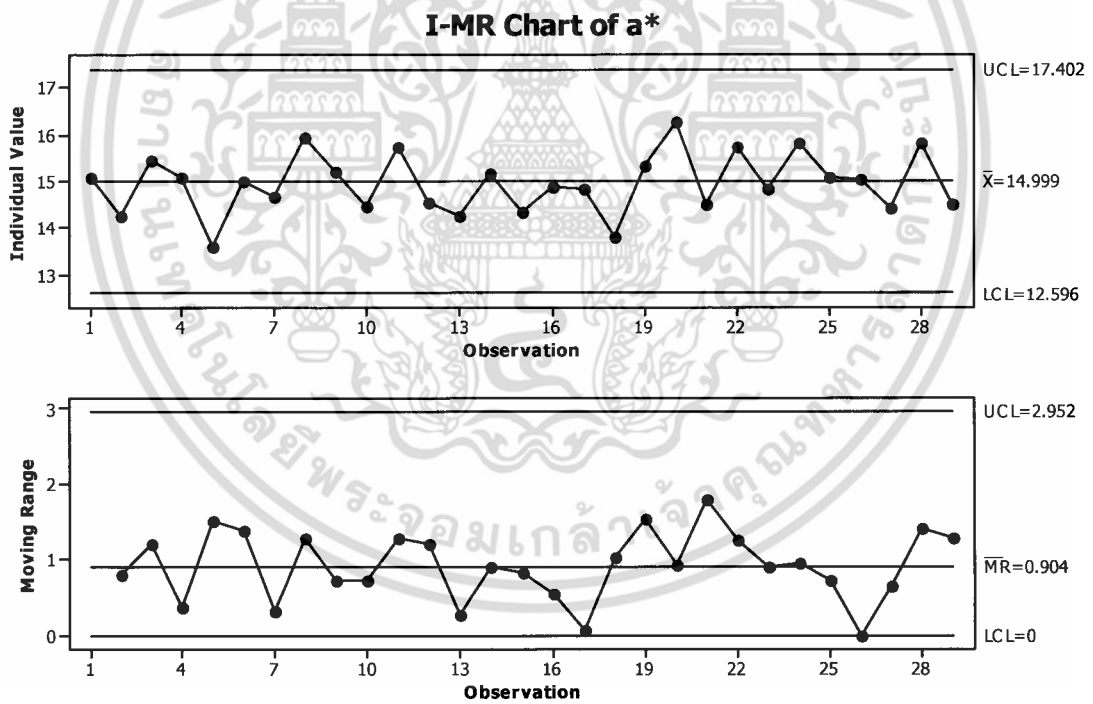


รูปที่ 4.12 แสดงแผนภูมิควบคุมโฮเทลลิงทีสแควร์ที่ใช้ในการทดสอบ Spike

จากรูปที่ 4.12 แผนภูมิควบคุมโฮเทลลิงทีสแควร์มีขีดจำกัดควบคุมบน (UCL) เท่ากับ 9.6585 พบว่ามีจุดตกอยู่นอก UCL คือ ตัวอย่างที่ 18 เมื่อทำการวิเคราะห์สาเหตุพบว่าเกิดจากการที่ใส่ตัวอย่างที่ผิดปกติลงไปใน การทดสอบ แสดงให้เห็นว่าแผนภูมิควบคุมโฮเทลลิงทีสแควร์สามารถใช้ตรวจจับในการทดสอบ Spike ได้ แต่ไม่สามารถบ่งบอกได้ว่าค่า L^* a^* หรือ b^* ที่ออกนอกการควบคุม ดังนั้นจึงต้องใช้แผนภูมิควบคุมตัวอย่างเดี่ยวแสดงดังรูปที่ 4.13 4.14 และ 4.15

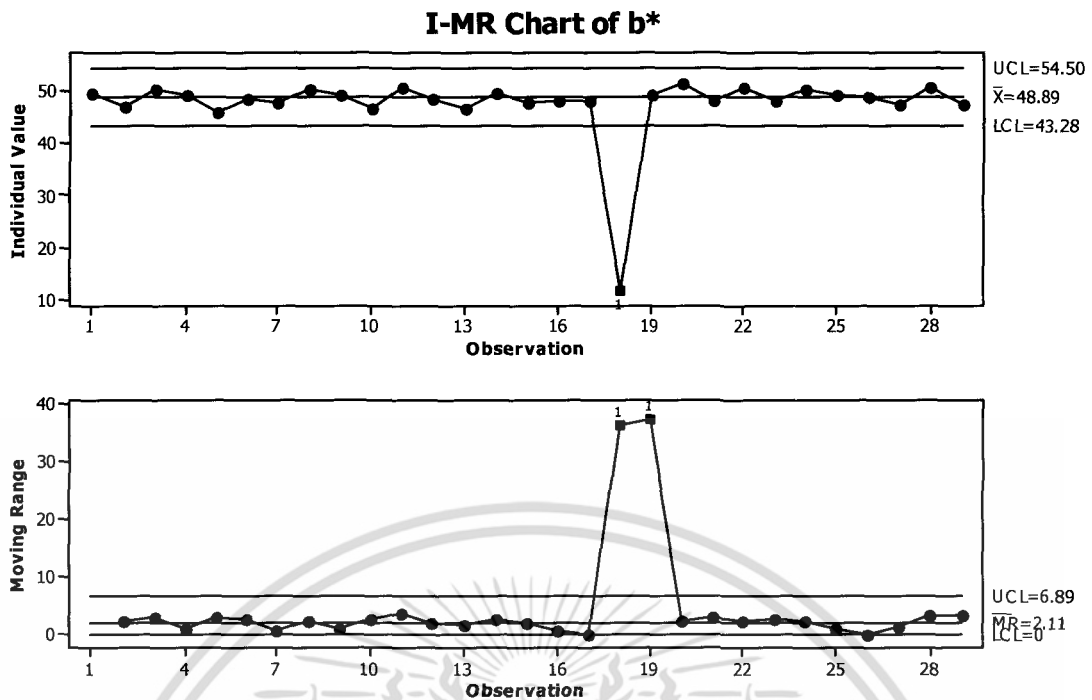


รูปที่ 4.13 แสดงแผนภูมิควบคุมสำหรับตัวอย่างเดียวที่ใช้ในการทดสอบ Spike ของค่า L*



รูปที่ 4.14 แสดงแผนภูมิควบคุมสำหรับตัวอย่างเดียวที่ใช้ในการทดสอบ Spike ของค่า a*

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

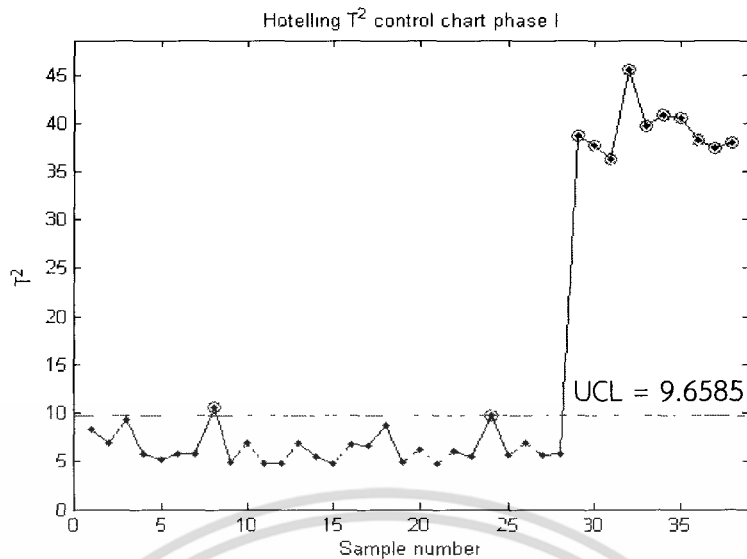


รูปที่ 4.15 แสดงแผนภูมิควบคุมสำหรับตัวอย่างเดียวที่ใช้ในการทดสอบ Spike ของค่า b^*

จากนั้นใช้แผนภูมิควบคุมสำหรับตัวอย่างเดียวโดยใช้โปรแกรม MINITAB 16 ในการวิเคราะห์ว่าสาเหตุที่ออกนอกการควบคุมเกิดจากค่า L^* , a^* หรือ b^* ดังรูปที่ 4.13 4.14 และ 4.15 จากรูปที่ 4.13 แสดงแผนภูมิควบคุมตัวอย่างเดียวของค่า L^* พบว่าตัวอย่างที่ 18 ออกนอกขีดจำกัดการควบคุมล่าง รูปที่ 4.14 แสดงแผนภูมิควบคุมตัวอย่างเดียวของค่า a^* ไม่พบค่าที่ออกนอกการควบคุม และรูปที่ 4.15 แสดงแผนภูมิควบคุมตัวอย่างเดียวของค่า b^* พบว่าตัวอย่างที่ 18 ออกนอกขีดจำกัดการควบคุมล่าง จากการใช้แผนภูมิควบคุมตัวอย่างเดียวประกอบกับการใช้แผนภูมิโฮเทลลิงที่สแควร์พบว่าสิ่งผิดปกติเกิดที่ตัวอย่างที่ 18 สามารถวิเคราะห์ได้ว่าสิ่งผิดปกติที่เกิดขึ้นเกิดจากค่า L^* มีค่าต่ำกว่าขีดจำกัดการควบคุมล่างแสดงให้เห็นว่าตัวอย่างที่ผิดปกติมีความสว่างน้อยกว่าตัวอย่างที่ปกติ และค่า b^* มีค่าต่ำกว่าขีดจำกัดการควบคุมล่างแสดงให้เห็นว่าตัวอย่างที่ผิดปกติมีความเป็นสีเหลืองน้อยกว่าตัวอย่างที่ผิดปกติ

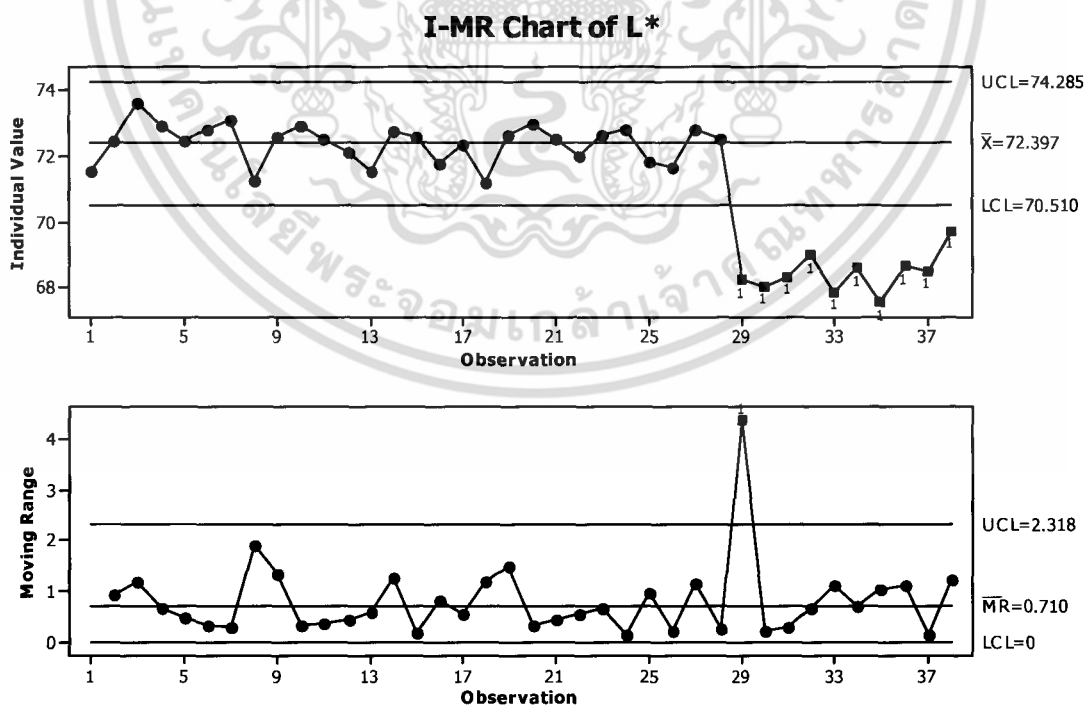
2. การทดสอบ Mean shift

ใช้ผลิตภัณฑ์ไส้กรองที่มีลักษณะปกติจำนวน 28 ตัวอย่างดังรูปที่ 3.7 และไส้กรองที่มีลักษณะผิดปกติจำนวน 10 ตัวอย่างดังรูปที่ 3.8 รวมทั้งหมด 38 ตัวอย่าง (ข้อมูลที่ใช้ทำแผนภูมิควบคุมแสดงดังภาคผนวกตารางที่ ก.16) ใช้โปรแกรม MATLAB สร้างแผนภูมิควบคุมโฮเทลลิงที่สแควร์แสดงดังรูปที่ 4.16 ใช้ค่าระดับนัยสำคัญ $= 0.01$



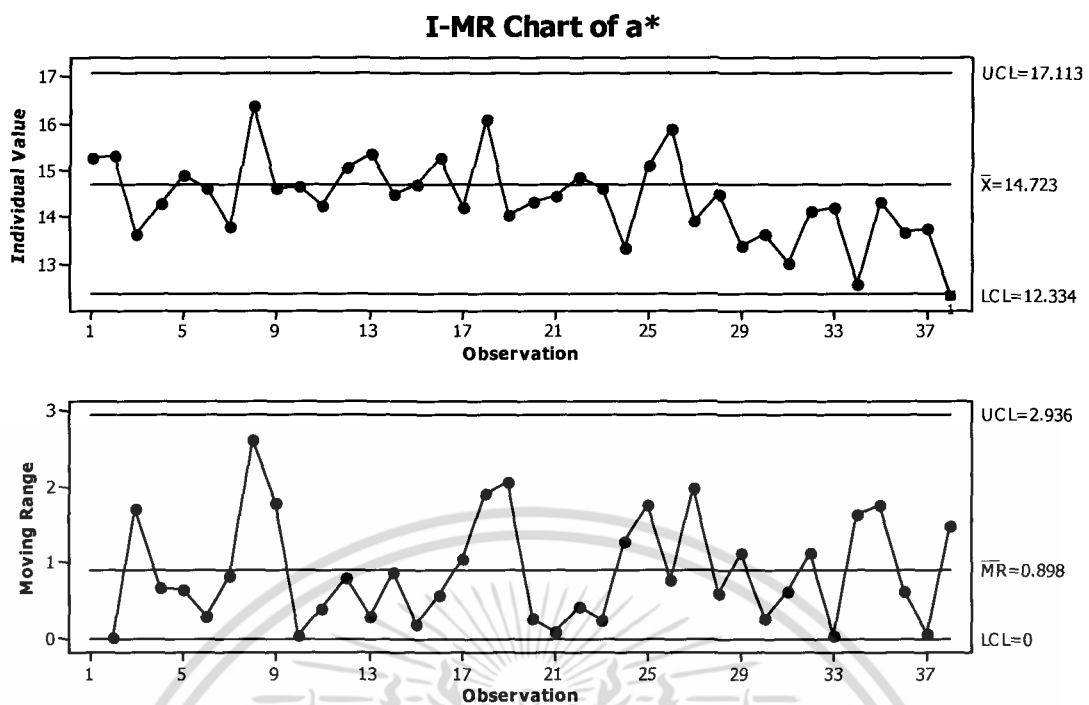
รูปที่ 4.16 แสดงแผนภูมิควบคุมโฮเทลลิงที่สแควร์ที่ใช้ในการทดสอบ Mean shift

จากรูปที่ 4.16 พบว่าแผนภูมิควบคุมโฮเทลลิงที่สแควร์มีขีดจำกัดควบคุมบน (UCL) เท่ากับ 9.6585 พบว่ามีจุดตกอยู่นอก UCL คือ ตัวอย่างที่ 8 24 และ 29 - 38 เมื่อทำการวิเคราะห์สาเหตุที่ตัวอย่าง 8 และ 24 ออกนอกการควบคุม ไม่พบสาเหตุพิเศษ สำหรับตัวอย่างที่ 29 - 38 พบว่าเกิดจากการที่ใส่ตัวอย่างที่ผิดปกติดังไปในการทดสอบ แสดงให้เห็นว่าแผนภูมิควบคุมโฮเทลลิงที่สแควร์สามารถใช้ตรวจจับในการทดสอบ Mean shift ได้ จากนั้นใช้แผนภูมิควบคุมสำหรับตัวอย่างเดียวในการวิเคราะห์ว่าสาเหตุที่ออกนอกการควบคุมเกิดจากค่า L^* a^* หรือ b^* ดังรูปที่ 4.17 4.18 และ 4.19

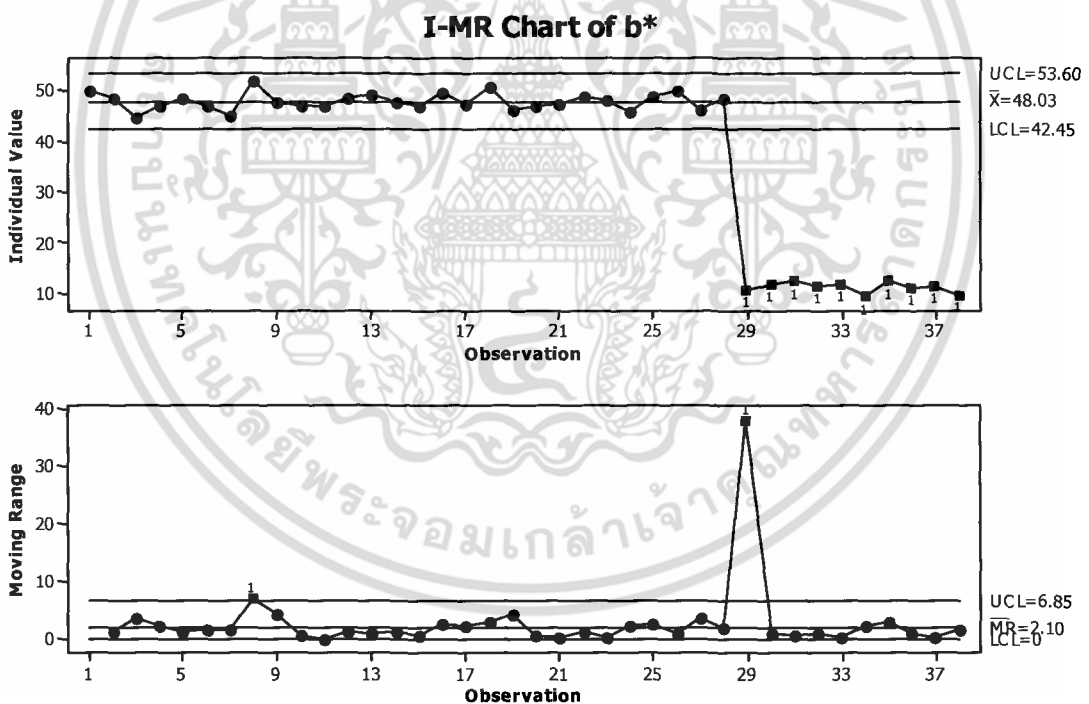


รูปที่ 4.17 แสดงแผนภูมิควบคุมสำหรับตัวอย่างเดียวที่ใช้ในการทดสอบ Mean shift ของค่า L^*

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.18 แสดงแผนภูมิควบคุมสำหรับตัวอย่างเดี่ยวที่ใช้ในการทดสอบ Mean shift ของค่า a*



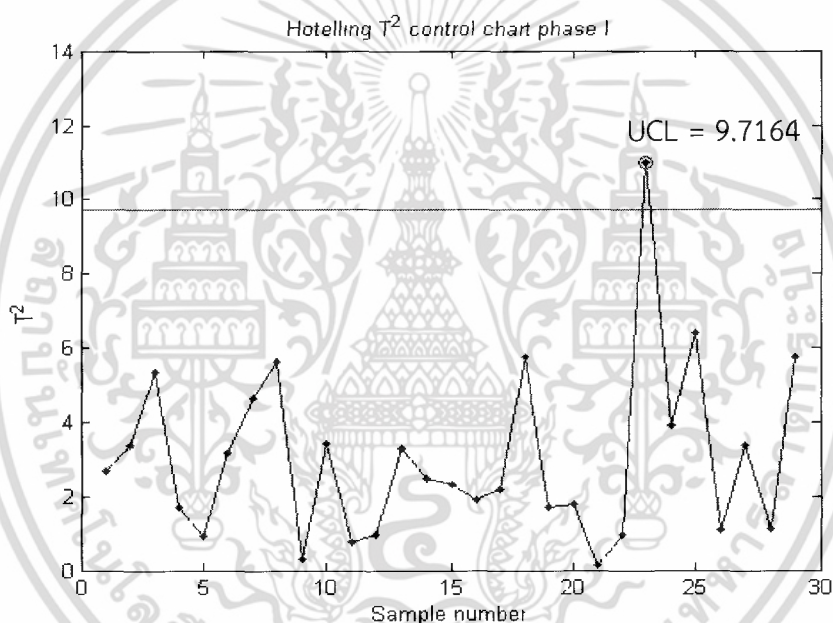
รูปที่ 4.19 แสดงแผนภูมิควบคุมสำหรับตัวอย่างเดี่ยวที่ใช้ในการทดสอบ Mean shift ของค่า b*

จากรูปที่ 4.17 แสดงแผนภูมิควบคุมตัวอย่างเดี่ยวของค่า L* พบว่าตัวอย่างที่ 29 – 38 ออกนอกขีดจำกัดการควบคุมล่าง จากรูปที่ 4.18 แสดงแผนภูมิควบคุมตัวอย่างเดี่ยวของค่า a* พบว่าตัวอย่างที่ 38 ออกนอกการควบคุมล่าง และรูปที่ 4.19 แสดงแผนภูมิควบคุมตัวอย่างเดี่ยวของค่า b* พบว่าตัวอย่างที่ 29 – 38 ออกนอกขีดจำกัดการควบคุมล่าง จากการใช้แผนภูมิควบคุมตัวอย่างเดี่ยว ประกอบกับการใช้แผนภูมิโยเทลลิงทีสแควร์ สามารถวิเคราะห์ได้ว่าสิ่งผิดปกติที่เกิดขึ้นเกิดจากค่า L* เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มีค่าต่ำกว่าขีดจำกัดการควบคุมล่างแสดงให้เห็นว่าตัวอย่างที่ผิดปกตินั้นมีความสว่างน้อยกว่าตัวอย่างที่ปกติ และค่า b^* มีค่าต่ำกว่าขีดจำกัดการควบคุมล่างแสดงให้เห็นว่าตัวอย่างที่ผิดปกติมีความเป็นสีเหลืองน้อยกว่าตัวอย่างที่ผิดปกติ ซึ่งจากการวิเคราะห์ดังกล่าวเมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างที่นำมาใช้เป็นสิ่งผิดปกติซึ่งมีลักษณะเป็นสีแดงพบว่าแผนภูมิควบคุมสามารถบ่งบอกได้ถูกต้อง

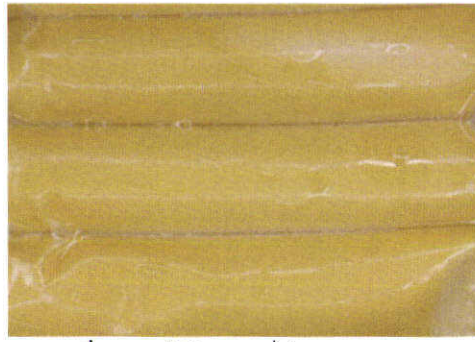
4.2.2.2 ตัวอย่างการใช้งาน

หลังจากที่ได้ทำการทดลองใช้แผนภูมิควบคุมในการทดสอบ Spike และ Mean shift พบว่าแผนภูมิควบคุมใช้ในการตรวจจับได้ ในขั้นตอนนี้จึงทำการทดลองโดยใช้แผนภูมิควบคุมกับตัวอย่างใส่กรอกที่ไม่มีสิ่งผิดปกติอย่างชัดเจน โดยใช้ตัวอย่างผลิตภัณฑ์ดังรูปที่ 3.7 จำนวน 29 ตัวอย่าง ที่มาจากล็อตเดียวกัน (ข้อมูลที่ใช้ในการทดลองแสดงในภาคผนวกตารางที่ ก.17) เพื่อทดสอบว่าข้อมูลสามารถตรวจจับสิ่งผิดปกติกับข้อมูลที่มาจากระบวนการผลิตเดียวกันได้หรือไม่ ใช้ค่าระดับนัยสำคัญ $= 0.01$

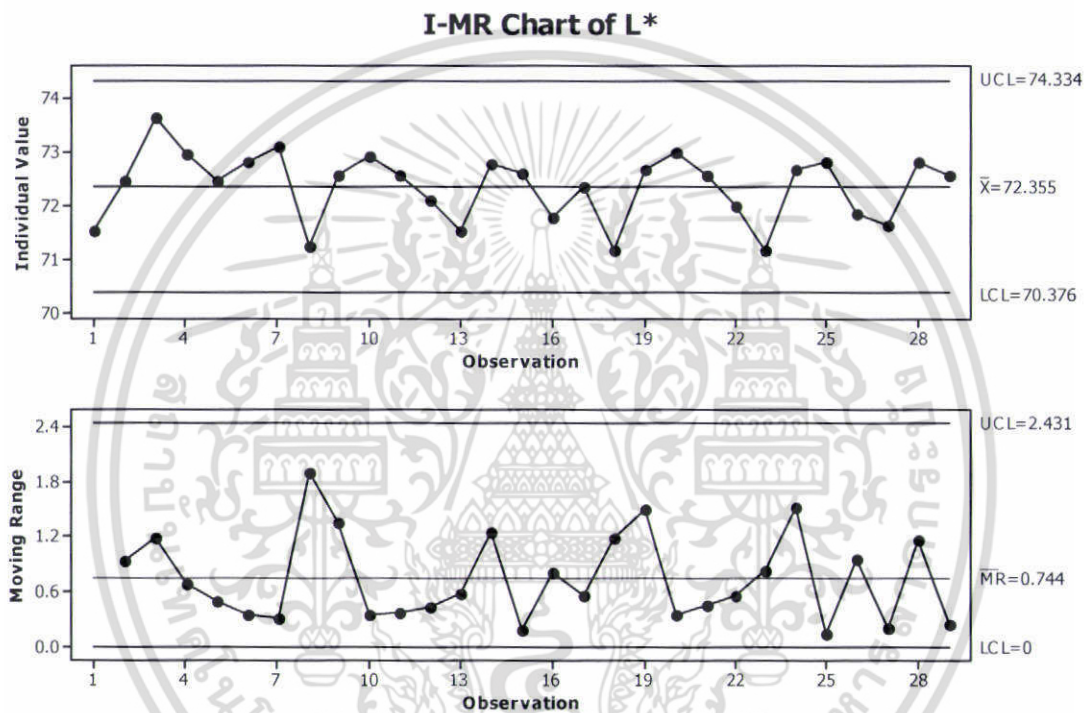


รูปที่ 4.20 แสดงแผนภูมิโฮเทลลิงที่สแควร์

จากรูปที่ 4.20 พบว่าแผนภูมิโฮเทลลิงที่สแควร์มีขีดจำกัดควบคุมบน (UCL) เท่ากับ 9.7164 พบว่ามีจุดตกอยู่นอก UCL คือ ตัวอย่างที่ 23 เมื่อทำการวิเคราะห์สาเหตุที่ตัวอย่างที่ 23 ออกนอกการควบคุมพบว่าตัวอย่างใส่กรอกมีสีไม่สม่ำเสมอดังรูปที่ 4.21 แสดงให้เห็นว่าแผนภูมิโฮเทลลิงที่สแควร์สามารถตรวจจับสิ่งผิดปกติได้ จากนั้นใช้แผนภูมิควบคุมสำหรับตัวอย่างเดียวในการวิเคราะห์ว่าสาเหตุที่ออกนอกการควบคุมเกิดจากค่า L^* a^* หรือ b^* ดังรูปที่ 4.22 4.23 และ 4.24

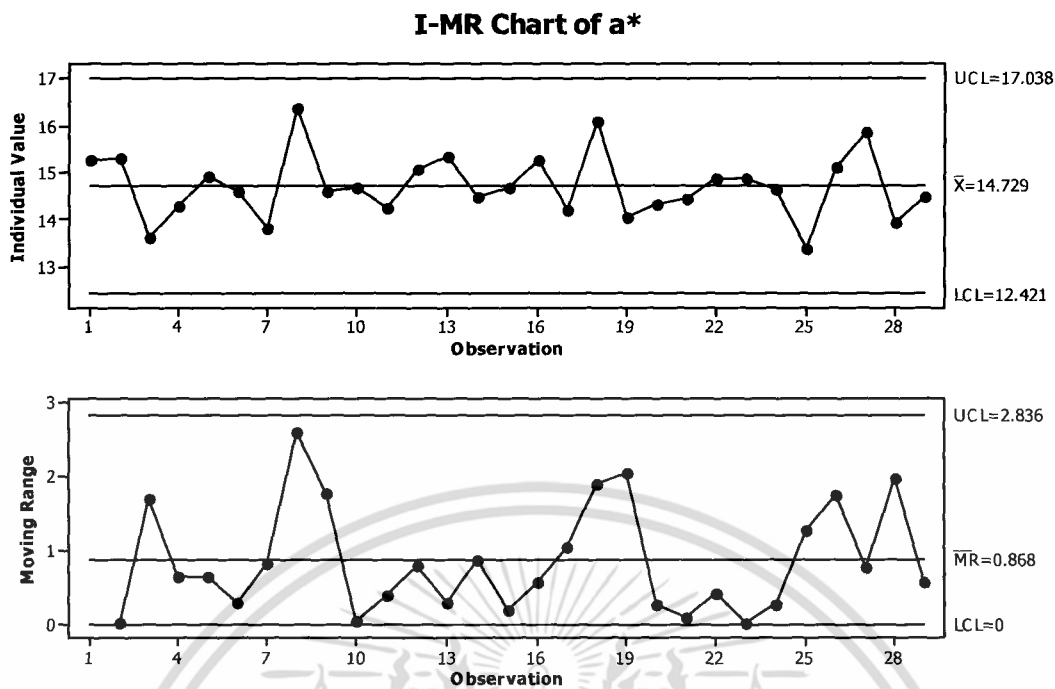


รูปที่ 4.21 ไส้กรอกที่มีความผิดปกติ

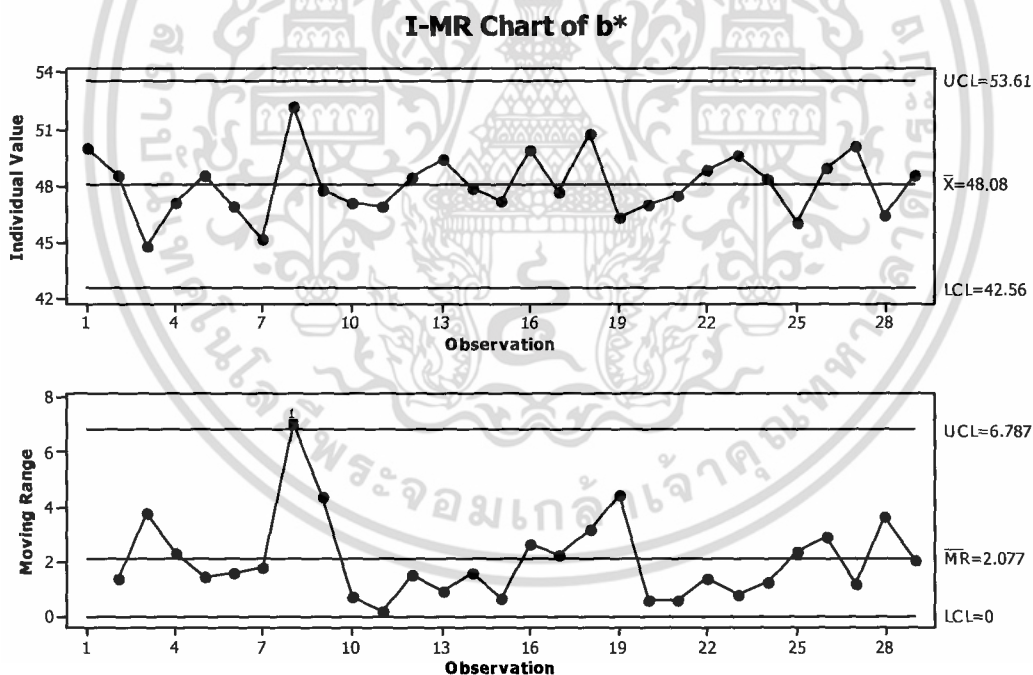


รูปที่ 4.22 แสดงแผนภูมิควบคุมสำหรับตัวอย่างเดี่ยวของค่า L*

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.23 แสดงแผนภูมิควบคุมสำหรับตัวอย่างเดี่ยวของค่า a*



รูปที่ 4.24 แสดงแผนภูมิควบคุมสำหรับตัวอย่างเดี่ยวของค่า b*

จากรูปที่ 4.22 4.23 และ 4.24 เมื่อทำการวิเคราะห์พบว่าไม่มีค่าใดที่ออกนอกการควบคุม อาจเกิดจากการที่แผนภูมิควบคุมสำหรับตัวอย่างเดี่ยวมีความไวน้อยกว่าแผนภูมิโพลีเทคลิงทีสแควร์ จึงไม่สามารถตรวจจับสิ่งผิดปกติที่เกิดขึ้นเพียงเล็กน้อยได้

4.2.3 การใช้แผนภูมิควบคุมกับผลิตภัณฑ์ใส่กรอก

จากการใช้ระบบ $L^*a^*b^*$ ในการวัดสีของผลิตภัณฑ์ใส่กรอก เมื่อแผนภูมิควบคุมตรวจจับได้ว่าค่า L^* a^* หรือ b^* ออกนอกการควบคุม สามารถแปลความหมายของค่า L^* a^* หรือ b^* ดังตารางที่ 4.10 เพื่อนำไปใช้ในการปรับปรุงกระบวนการว่ากระบวนการมีความผิดปกติอย่างไร และปัจจัยใดที่ควรปรับปรุง (ชัยณรงค์ คันธพนิต. 2529 ; เยาวลักษณ์ สุรพันธ์พิศิษฐ์. 2536)

ตารางที่ 4.10 แสดงลักษณะการใช้แผนภูมิควบคุมกับผลิตภัณฑ์ใส่กรอก

ค่า	ปัจจัยที่ควรตรวจสอบในกระบวนการ
L^*	- ถ้าค่า L^* มากสีของผลิตภัณฑ์ใส่กรอกมีความสว่างมากค่อนข้างไปทางสีขาว ซึ่งอาจแสดงให้เห็นว่าใส่กรอกมีสีซีด - ถ้าค่า L^* น้อยสีของผลิตภัณฑ์ใส่กรอกมีความสว่างน้อยค่อนข้างไปทางดำ ซึ่งถ้ามีลักษณะดำมาก ใส่กรอกอาจเกิดความผิดปกติ เกิดการเน่าเสีย เป็นต้น
a^*	- ถ้าผลิตภัณฑ์มีสีแดงมาก ให้ลดปริมาณสารไนโตรท์ หรือไนเตรท - ถ้าผลิตภัณฑ์มีสีเขียว อาจเกิดจาก แแบคทีเรีย ออกซิเจน สารเคมี หรือแสง
b^*	- ถ้าต้องการให้มีสีชมพู ให้เพิ่มปริมาณสารไนโตรท์ หรือไนเตรท อาจเกิดจากแบคทีเรีย ออกซิเจน สารเคมี หรือ แสง

4.2.4 แนวทางการนำไปใช้ประโยชน์

ในกระบวนการผลิตใส่กรอกหลังจากที่ผ่านขั้นตอนการผลิตใส่กรอกการบดเนื้อ การผสม การสับขนาด การทำอิมัลชัน การผูกไส้ การทำให้สุก หลังจากนั้นจะทำการบรรจุลงในถุงซึ่งหลังจากผ่านขั้นตอนการบรรจุจะทำการตรวจสอบคุณภาพของผลิตภัณฑ์ใส่กรอก เพื่อจำลองสถานการณ์ของลักษณะการมองเห็นผลิตภัณฑ์ของผู้บริโภคเมื่อมาเลือกซื้อผลิตภัณฑ์ ควบคุมไม่ให้ของเสียส่งไปถึงผู้บริโภค และเป็นหลักประกันให้กับผู้บริโภคมั่นใจในคุณภาพของผลิตภัณฑ์ ซึ่งในปัจจุบันขั้นตอนดังกล่าวใช้สายตามนุษย์ในการตรวจสอบ โดยจะใช้แนวทางที่ได้ศึกษาในงานวิจัยครั้งนี้มาแก้ปัญหา ดังกล่าวแสดงแนวทางดังรูปที่ 4.25 คือในขั้นตอนแรกจะทำการประมวลผลด้วยภาพ จากนั้นแปลงภาพเป็นข้อมูลให้อยู่ในระบบ $L^*a^*b^*$ และใช้วิธีการควบคุมกระบวนการเชิงสถิติ โดยการใช้แผนภูมิควบคุมไฮเทคที่สแควร์ในการตรวจสอบเบื้องต้นว่ากระบวนการมีความผิดปกติหรือไม่ ถ้าพบว่าไม่มีสิ่งผิดปกติเกิดขึ้นในกระบวนการจึงใช้แผนภูมิควบคุมสำหรับตัวอย่างเชิงเดียวในการวิเคราะห์หาค่า L^* a^* หรือ b^* ที่ออกนอกการควบคุม จากนั้นเมื่อทราบว่าค่าใดออกนอกการควบคุมจะทำการแปลความหมายของค่าที่ออกนอกการควบคุมว่าควรปรับปรุงสิ่งใดในกระบวนการ ซึ่งวิธีการดังกล่าวจะช่วยตรวจสอบว่าเกิดการเปลี่ยนแปลงในกระบวนการหรือไม่ จากนั้นจึงทำการหาสาเหตุของความผิดปกติของกระบวนการเพื่อการปรับปรุงกระบวนการในอนาคตต่อไป



รูปที่ 4.25 แสดงแนวทางการควบคุมคุณภาพสีของไส้กรอก

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

ในการศึกษาครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาวิธีการประเมินผลสี่ของไส้กรอกโดยใช้วิธีการประมวลผลด้วยภาพ วิธีการควบคุมคุณภาพสี่ของไส้กรอกโดยใช้วิธีการควบคุมกระบวนการเชิงสถิติ และบูรณาการทั้งสองวิธีดังกล่าวข้างต้น

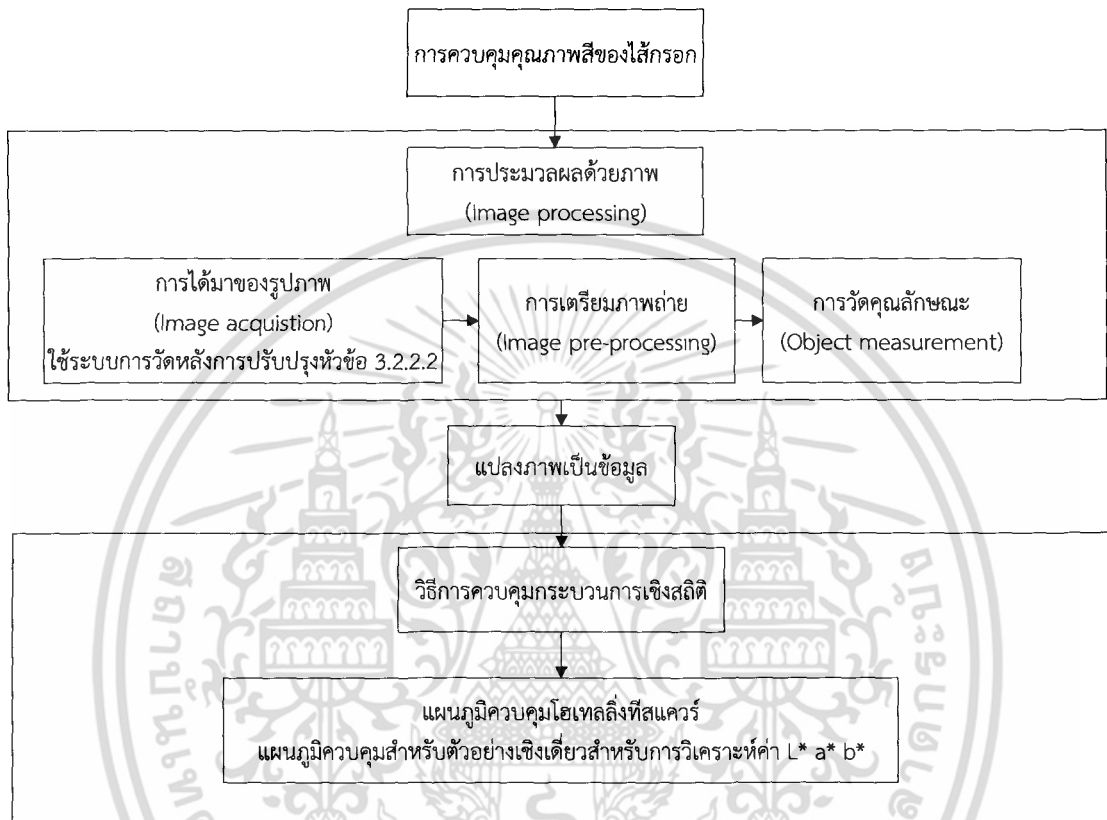
1. ศึกษาวิธีการประเมินผลสี่ของไส้กรอกโดยใช้วิธีการประมวลผลภาพ เพื่อสร้างความเชื่อมั่นในการสร้างเครื่องมือวัดจึงทำการศึกษาความสามารถในการวัดซ้ำและการวัดเหมือนของเครื่องมือวัด โดยทำการทดลองเปรียบเทียบระบบการวัดก่อนการปรับปรุงและหลังการปรับปรุงที่มีวิธีการได้มาของรูปภาพที่แตกต่างกัน จากผลการทดลองพบว่าระบบการวัดก่อนการปรับปรุงมีค่าสัดส่วนความแปรปรวนของ L^* a^* และ b^* เท่ากับ 5.77% 5.17% และ 9.27% แสดงให้เห็นว่าระบบการวัดสามารถใช้ได้ แต่พนักงานวัดมีผลต่อค่าที่ได้จากการวัดมีความแตกต่างกัน จึงทำการปรับปรุงระบบการวัดโดยการสร้างอุปกรณ์พบว่าสัดส่วนความแปรปรวนของค่า L^* a^* และ b^* มีค่า 2.34 % 0.17% และ 0.42% ตามลำดับซึ่งมีค่าน้อยกว่าระบบการวัดก่อนการปรับปรุง ดังนั้นจึงเลือกกระบวนการวัดหลังการปรับปรุงเนื่องจากเป็นวิธีการที่ดีที่สุด เพื่อสร้างความเชื่อมั่นในเครื่องมือวัดว่าค่าที่วัดได้จากเครื่องมือวัดมีความสามารถในการแบ่งแยกผลิตภัณฑ์และสามารถนำไปใช้ในการควบคุมกระบวนการเชิงสถิติต่อไป

2. วิธีการควบคุมคุณภาพสี่ของไส้กรอกโดยใช้วิธีการควบคุมกระบวนการเชิงสถิติ เมื่อทำการศึกษาคูณลักษณะของข้อมูล พบว่าข้อมูลไม่เป็นไปตามเงื่อนไขของแผนภูมิควบคุมชีวฮาร์ท เนื่องจากค่า L^* a^* และ b^* มีสหสัมพันธ์กันจึงไม่สามารถใช้ในการควบคุมการประเมินผลสี่ของไส้กรอกได้ จึงเสนอวิธีการใช้แผนภูมิควบคุมไฮเทลลิ่งทีสแควร์ในการตรวจจับ ถ้ามีค่าสังเกตที่ออกนอกการควบคุมจึงใช้แผนภูมิควบคุมสำหรับตัวอย่างเชิงเดี่ยวเพื่อวิเคราะห์ว่าค่า L^* a^* หรือ b^* ที่ออกนอกการควบคุม

3. การบูรณาการระหว่างการประมวลผลด้วยภาพและวิธีการควบคุมกระบวนการเชิงสถิติในการควบคุมคุณภาพสี่ของไส้กรอก แสดงกรอบแนวคิดดังรูปที่ 5.1 หลังจากเลือกกระบวนการวัดสี่และแนวทางในการใช้แผนภูมิควบคุม จึงทำการทดลองใช้วิธีการประมวลผลด้วยภาพร่วมกับวิธีการควบคุมกระบวนการเชิงสถิติในการทดสอบความผิดปกติแบบ Spike และ Mean shift จากการทำทดลองใช้แผนภูมิควบคุมไฮเทลลิ่งทีสแควร์ร่วมกับการใช้แผนภูมิควบคุมสำหรับตัวอย่างเชิงเดี่ยวพบว่าสามารถตรวจจับได้

จากตัวอย่างการใช้งานกับผลิตภัณฑ์ไส้กรอกโดยใช้ตัวอย่างจากหลอดและประเภทเดียวกันพบว่าแผนภูมิควบคุมไฮเทลลิ่งทีสแควร์สามารถตรวจจับสิ่งผิดปกติได้ และเมื่อตรวจสอบกับตัวอย่างจริงพบว่าตัวอย่างไส้กรอกมีลักษณะสี่ที่ไม่เท่ากัน แต่เมื่อนำไปตรวจสอบโดยใช้แผนภูมิควบคุมสำหรับตัวอย่างเชิงเดี่ยวไม่พบสิ่งผิดปกติ แสดงให้เห็นว่าแผนภูมิควบคุมสำหรับตัวอย่างเชิงเดี่ยวมีความไวน้อยกว่าแผนภูมิควบคุมไฮเทลลิ่งทีสแควร์ ในกรณีที่ตัวอย่างเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยจึงไม่สามารถระบุได้อย่างชัดเจนว่า ค่า L^* a^* หรือ b^* ที่ออกนอกการควบคุม

สำหรับแนวทางในการนำไปใช้ประโยชน์ คือการนำไปใช้ตรวจสอบคุณภาพของผลิตภัณฑ์ใ้กรอกหลังจากผ่านขั้นตอนการบรรจุ เพื่อจำลองสถานการณ์ของลักษณะการมองเห็นผลิตภัณฑ์ของผู้บริโภคเมื่อมาเลือกซื้อผลิตภัณฑ์ ควบคุมไม่ให้ของเสียส่งไปถึงผู้บริโภค และเป็นหลักประกันให้กับผู้บริโภคมั่นใจในคุณภาพของผลิตภัณฑ์ และทำให้เจ้าของกระบวนการสามารถตรวจสอบสาเหตุของความผิดปกติเพื่อการปรับปรุงกระบวนการในอนาคตต่อไปได้



รูปที่ 5.1 แสดงกรอบแนวคิดในการควบคุมคุณภาพสีของไส้กรอก

5.2 ข้อเสนอแนะ

ในการศึกษาขั้นต่อไปเสนอแนะดังต่อไปนี้

1. ทดลองใช้วิธีการควบคุมคุณภาพของตัวแปรพหุในแบบอื่นๆ เช่น Multivariate EWMA chart หรือ Multivariate CUSUM chart เป็นต้น ในกรณีต้องการทดสอบ Small shift
2. เปลี่ยนตัวอย่างผลิตภัณฑ์ที่นำมาใช้ในการทดลองที่ต้องใช้การควบคุมคุณภาพของสีที่มีความซับซ้อนมากขึ้น
3. ตรวจสอบลักษณะคุณภาพอื่นๆ เช่น ขนาด รูปร่าง เนื้อสัมผัส

บรรณานุกรม

กิตติศักดิ์ พลอยพานิชเจริญ. 2553. การวิเคราะห์ระบบการวัด MSA ประมวลผลด้วย Minitab

15. กรุงเทพฯ : สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี

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

สำนักงานมาตรฐานกระทรวงอุตสาหกรรม.

กรมส่งเสริมการค้าและการส่งออก. **ข้อมูลการค้าและการส่งออก.** [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก :

<http://www.depthai.go.th/brขอมลbrการค้าและbrการส่งออก/สถานการณ์ส่งออกรายเดือน/tabid/297/Default.aspx>.

กรมส่งเสริมอุตสาหกรรม. 2554. **อุตสาหกรรมแปรรูปเนื้อสัตว์ (ไส้กรอกจากเนื้อสุกร)**

[ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก : intranet.dip.go.th/doc/download/.../Industrial%20Sausage.pdf. บริษัท ศูนย์วิจัย ไทยพาณิชย์ จำกัด.

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

ณัฐพล แสงจันทร์ และดาวพระศุภร์ นุ่มเอี่ยม. 2548. “การศึกษาความเป็นไปได้ในการคัดแยกแก้วเหลืองฝักสดโดยใช้กระบวนการประมวลผลภาพ.” ปรินญาณิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเกษตร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

เยาวลักษณ์ สุรพันธ์พิศิษฐ์. 2536. **เทคโนโลยีเนื้อสัตว์และผลิตภัณฑ์.** กรุงเทพฯ : สหมิตรออฟเซต.

วัชรী คชแก้ว. 2548. “การตรวจวัดคุณภาพสีและลักษณะเนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์ไส้กรอกแฟรงค์เฟอร์เตอร์ที่จำหน่ายในเขตลาดกระบัง.” ปัญหาพิเศษปริญญาครุศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาอุตสาหกรรมเกษตร, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

วรารุณี ครุสง. 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 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น 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 Bicolour Fruit : 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.

- 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." **Postharvest 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.

- 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., 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.



ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น 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
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา 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
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา 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
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น 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
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น 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 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น 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
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น 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 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น 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
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น 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 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น 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
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา 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
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา 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



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น 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
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น 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)	(4)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น 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%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น 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 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น 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
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.14 แสดงผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่า b^* โดยลดรูปแบบ (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 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ผลการทดลองการควบคุมกระบวนการเชิงสถิติ

ตารางที่ ก.15 ข้อมูลที่ใช้ในการทดสอบ Spike และตัวสถิติไฮเทลลิงทีสแควร์

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
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.16 ข้อมูลที่ใช้ในการทดสอบ Mean Shift และตัวสถิติไฮเทคถึงที่สแควร์

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
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.16 (ต่อ) ข้อมูลที่ใช้ในการทดสอบ Mean Shift และตัวสถิติไฮเทลลิงทีสแควร์

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



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น 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. โปรแกรมที่ใช้ในการสร้างแผนภูมิโฮเทลลิงที่สแควร์

```
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);
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

mean=mean(x);
for r=1:m;
    A=x(r,:)-mean;
    t2(r,:)=A*sd*A';
end
T2=t2

```

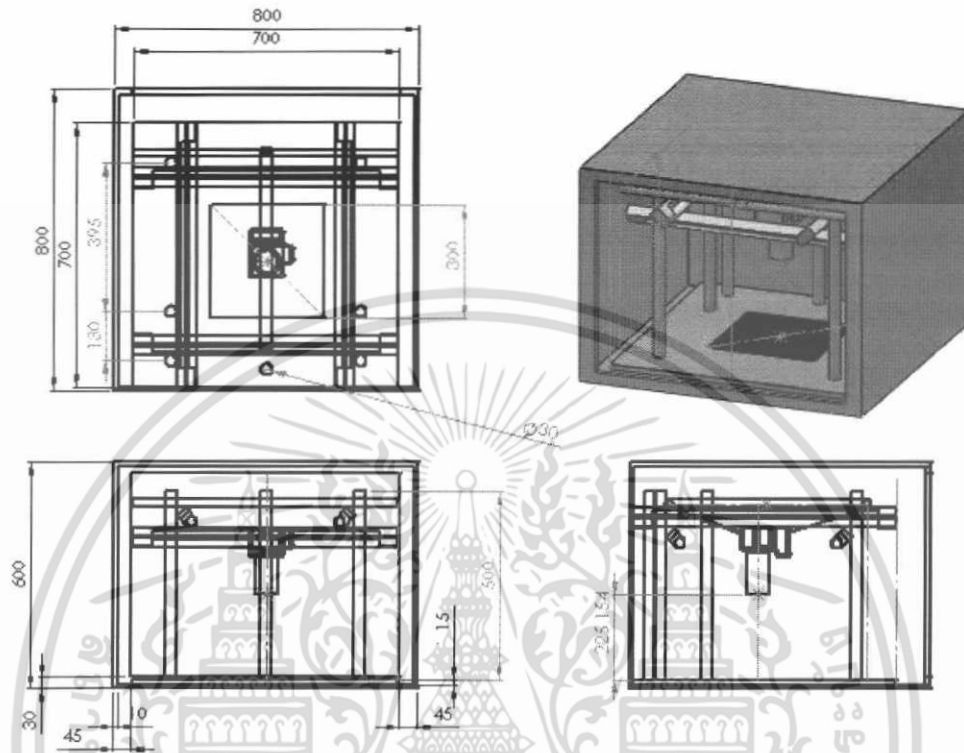
```

%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
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค.
แบบของอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง



รูปที่ ค.1 แสดงแบบของอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ง.
บทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์

1. พิรญาณ์ แก้วสุวรรณ และ ชุมพล ยวงใย. 2554. “การวิเคราะห์ระบบการวัดของเครื่องมือวัดคุณภาพสีของอาหาร.” หน้า 548-552. ใน การประชุมวิชาการช่างงานวิศวกรรมอุตสาหกรรม ประจำปี 2554., ชลบุรี, 20 - 21 ตุลาคม 2554.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รวมบทคัดย่อ
 การประชุมวิชาการ پایان
 วิศวกรรมอุตสาหกรรม ประจำปี 2554
 IE NETWORK CONFERENCE 2011

20 - 21 ตุลาคม 2554
 โรงแรมแอมบาสเตอร์ซีที จอมเทียน พัทยา จังหวัดชลบุรี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



การวิเคราะห์ระบบการวัดของเครื่องมือวัดคุณภาพสีของอาหาร Gauge Repeatability and Reproducibility Analysis for Food Color Vision Detection

พริญาณ์ แก้วสุวรรณ^{1*} ชุมพล ยวงไพบ²

^{1,2} สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
แขวงลาดกระบัง เขตลาดกระบัง จังหวัดกรุงเทพมหานคร รหัสไปรษณีย์ 10520

E-mail: piraya.ks@gmail.com*

บทคัดย่อ

ในประเทศไทยอุตสาหกรรมอาหารเป็นอุตสาหกรรมที่มีความสำคัญเป็นอย่างมาก คุณภาพสีของอาหารเป็นส่วนหนึ่งของคุณลักษณะที่สำคัญทางกายภาพของผลิตภัณฑ์ที่ก่อให้เกิดการงุนงงของผู้บริโภค และทำให้ผู้บริโภคสามารถรับรู้ถึงคุณภาพของผลิตภัณฑ์ได้ในงานวิจัยนี้จึงทำการยกตัวอย่างผลิตภัณฑ์ไส้กรอก เนื่องจากเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีความเกี่ยวข้องกับสี และใช้วิธีการประมวลผลภาพในการวัดคุณภาพของสี ซึ่งใช้ระบบ L*a*b* แต่เนื่องจากในปัจจุบันยังไม่พบว่ามีกรวัดสีของเครื่องมือวัดคุณภาพสีของอาหารที่นำมาใช้ในการประมวลผลภาพ ดังนั้นจึงทำการศึกษาความสามารถในการวัดซ้ำและการวัดเหมือนของเครื่องมือวัด (GR&R) เพื่อสร้างความเชื่อมั่นในการสร้างเครื่องมือวัด ซึ่งจากผลการทดลองพบว่าค่าสัดส่วนความแปรปรวนของ L*, a* และ b* เท่ากับ 5.77% 5.17% และ 9.27% ซึ่งระบบการวัดสามารถใช้ได้ แต่พนักงานวัดมีผลต่อค่าที่ได้จากการวัดมีความแตกต่างกัน ดังนั้นจึงทำการปรับปรุงโดยการควบคุมแสงสว่างพบว่าค่าสัดส่วนความแปรปรวนของค่า 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 ประเทศไทยได้ประกาศนโยบายในด้านอาหารและอุตสาหกรรมเกษตรในการเป็น "ครัวของโลก" ประกอบกับประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรมและเป็นประเทศผู้ผลิตและส่งออกรายสำคัญของโลก [1] จะเห็นได้ว่าอุตสาหกรรมอาหารเป็นอุตสาหกรรมที่มีความสำคัญเป็นอย่างมาก ดังนั้นการปรับปรุงเทคโนโลยีเพื่อให้มีความทันสมัย คุณภาพและความปลอดภัยของผลิตภัณฑ์จึงมีความสำคัญที่ต้องพัฒนาเพื่อให้ได้มาตรฐาน

จากสภาวะการส่งออกที่เพิ่มมากขึ้นในปัจจุบันคุณภาพของผลิตภัณฑ์จึงเป็นสิ่งจำเป็นในการผลิต เนื่องจากมีผลต่อการตัดสินใจในการเลือกซื้อของผู้บริโภค ซึ่งคุณลักษณะทางกายภาพเป็นสิ่งแรกที่ทำให้ผู้บริโภคมีความพึงพอใจในผลิตภัณฑ์ก่อนที่จะรับรู้คุณสมบัติทางประสาทสัมผัสอื่น ๆ [2] คุณภาพที่ผู้บริโภคสามารถรับรู้ได้ ได้แก่ ขนาด รูปร่าง ลักษณะเนื้อสัมผัส และสีซึ่ง

เป็นหนึ่งในคุณลักษณะหลักที่มีผลกระทบต่อการรับรู้ของผู้บริโภคในด้านคุณภาพ [3]

อุตสาหกรรมการผลิตไส้กรอกมีความเกี่ยวข้องกับสีเนื่องจากเป็นปัจจัยแรกทางกายภาพของผลิตภัณฑ์ที่ก่อให้เกิดการงุนงงของผู้บริโภค และทำให้ผู้บริโภคสามารถรับรู้ถึงคุณภาพของผลิตภัณฑ์ได้ ซึ่งในกระบวนการผลิตยังคงใช้การตรวจสอบด้วยสายตามนุษย์ซึ่งมีปัจจัยหลายอย่างที่ทำให้การประเมินนั้นเกิดความผิดพลาดได้ เนื่องจากการมองของมนุษย์ในแต่ละคนแตกต่างกันขึ้นอยู่กับความชำนาญ ลักษณะของแสง หรือความสามารถในการมองเห็น ซึ่งเป็นการยากที่จะสรุปว่าการควบคุมคุณภาพนั้นมีความแน่นอน ถูกต้อง และมีความน่าเชื่อถือ ดังนั้นในงานวิจัยครั้งนี้จึงนำวิธีการประมวลผลภาพ (image processing) มาประยุกต์ใช้ในการประเมินผลสีของไส้กรอก เพื่อให้การแบ่งแยกสีของไส้กรอกมีประสิทธิภาพเพิ่มมากขึ้น งานวิจัยนี้ได้ศึกษาเกี่ยวกับวิธีการประมวลผลภาพในการประเมินคุณภาพของอาหาร ซึ่งไม่พบว่ามีการใช้วิธีการประมวลผลภาพในการควบคุมสีของผลิตภัณฑ์ไส้กรอก [4], [5] และจากงานวิจัยดังกล่าว ยังไม่พบว่ามีกรวัดสีของเครื่องมือวัดคุณภาพสีของอาหารที่นำมาใช้ในการประมวลผลภาพ ซึ่งในระบบการวัด ค่าวัดที่ได้จะมีความผันแปรเสมอ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการวิเคราะห์ระบบการวัด เพื่อให้เข้าใจถึงความผันแปรของกระบวนการวัด [6]

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

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 วิธีการประมวลผลภาพ

วิธีการประมวลผลภาพ (Image processing) คือ กระบวนการจัดการทางรูปภาพที่ข้อมูลทีป้อนเข้าสู่กระบวนการและผลลัพธ์ที่ออกจากกระบวนการต่างก็เป็นรูปภาพเช่นเดียวกัน เป็นกระบวนการดึงคุณสมบัติของภาพออกมาพิจารณาอีกทั้งยังรวมไปถึงวิธีการรวมเอาสิ่งที่สนใจแต่ละอย่างมาพิจารณา ดังนั้นเมื่อนำ



ภาพมาแปลงเข้าสู่คอมพิวเตอร์ภาพหนึ่งจะกลายเป็นภาพดิจิทัล (Digital Image) [7]

2.2 แบบจำลองสี (Color models)

แบบจำลองสีใช้ในการบ่งชี้และบอกปริมาณสี ซึ่งในการศึกษาคำนี้จะใช้แบบจำลองสี คือ ระบบ L*a*b* เป็นระบบการวัดสีที่เป็นมาตรฐานสากลพัฒนาโดย Commission International d'Éclairage 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 โดยไม่คำนึงการขาวป้อนข้อมูลและอุปกรณ์รับข้อมูล เช่น กล้องดิจิทัล สแกนเนอร์ จอภาพ และเครื่องพิมพ์ ค่า L*a*b* นิยมใช้ในงานวิจัยด้านอาหาร [8] ตัวอย่างงานวิจัย เช่น การวัดสีของมีนฝรั่งทอดโดยแปลงภาพจากระบบ RGB เป็นระบบ L*a*b* [9]

2.3 การวิเคราะห์ระบบการวัด

2.3.1 พื้นฐานเกี่ยวกับความสามารถของระบบการวัด

ความสามารถของระบบการวัดมีความสำคัญในแง่ของคุณภาพและการปรับปรุงกระบวนการ โดยปกติกิจกรรมการผลิตมีความสัมพันธ์กับการวัด ซึ่งค่าที่วัดได้จะมีความผันแปรเสมอและความผันแปรที่เกิดขึ้นอาจเป็นผลจากระบบการวัดที่ใช้ ซึ่งระบบการวัดประกอบด้วย เครื่องมือวัด พนักงานวัด ปัจจัยแวดล้อม ช่วงระยะเวลาที่แตกต่างกัน และปัจจัยอื่นๆ ที่ส่งผลกับสมรรถนะของระบบการวัด เช่น การตั้งค่า หรือการเปรียบเทียบ [10]

ความสามารถของระบบการวัด อาจประกอบด้วย ความสามารถในการวัดซ้ำและการวัดเหมือนของเครื่องมือวัด ดังนั้นสามารถอธิบายความหมายของระบบการวัดอย่างง่ายที่สุดสมการที่ 1

$$\sigma_{Total}^2 = \sigma_p^2 + \sigma_{Gauge}^2 \quad (1)$$

σ_{Total}^2 คือ ความแปรปรวนของข้อมูลทั้งหมด

σ_p^2 คือ ความแปรปรวนของชิ้นงาน

σ_{Gauge}^2 คือ ความแปรปรวนของเครื่องมือวัด

ความสามารถการวัดซ้ำ (Repeatability) หมายถึง ความผันแปรภายในเงื่อนไขของระบบการวัด ที่มีจะมีสาเหตุมาจากเครื่องมือวัด

ความสามารถในการวัดเหมือน (Reproducibility) คือ ความผันแปรระหว่างเงื่อนไขของระบบการวัด ที่มีจะมีสาเหตุจากความผันแปรระหว่างพนักงานวัด [6]

2.3.2 การวางแผนศึกษาความสามารถในการวัดซ้ำและการวัดเหมือนของเครื่องมือวัด

กิตติศักดิ์ได้กล่าวไว้ว่า [6] การศึกษาความผันแปรของระบบการวัดในรูปความสามารถในการวัดซ้ำและการวัดเหมือนของเครื่องมือวัดนั้น มีความจำเป็นอย่างยิ่งต้องเริ่มต้นจากขั้นตอนการวางแผนการศึกษา โดยมีประเด็นพิจารณา ดังนี้ คือ

1) วิธีการและเวลาที่จะมีการสอบเทียบเครื่องมือวัด โดยปกติแล้วจะต้องมีการสอบเทียบก่อนการศึกษาความสามารถในการวัดซ้ำและความสามารถในการวัดเหมือนจะเริ่มต้นขึ้น

2) จำนวนพนักงานที่ใช้ในการศึกษาระบบ GR&R ในกรณีที่ระบบการวัดมีพนักงานวัดจำนวนหลายคน ให้ทำการสุ่มพนักงานวัดมาทำการศึกษาอย่างน้อย 2 คน

3) จำนวนชิ้นงาน (สิ่งตัวอย่าง)
จำนวนสิ่งตัวอย่างที่ใช้ในการศึกษานั้น โดยปกติจะแนะนำที่ 10 ตัวอย่าง ซึ่งถ้าหากไม่สามารถดำเนินการได้ จะต้องพยายามให้ผลคูณของจำนวนของสิ่งตัวอย่างกับจำนวนของพนักงานวัดมีค่ามากกว่า 15 และถ้าหากไม่สามารถดำเนินการได้ ให้เพิ่มจำนวนการทำซ้ำของการวัดในแต่ละสิ่งตัวอย่าง และสิ่งตัวอย่างที่จะใช้ในการวัดนี้ต้องเป็นสิ่งตัวอย่างที่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ (ถ้าหากใช้สิ่งตัวอย่างที่มีความแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญแล้ว จะมีความหมายเท่ากับการใช้สิ่งตัวอย่างเดียวด้วยจำนวนวัด ซ้ำหลายๆ)

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

5) วิธีลดความผันแปรในสิ่งตัวอย่างของการศึกษา GR&R เลือกชิ้นงานในชุดการผลิตที่มีความใกล้เคียงกันมากที่สุด

2.3.3 การออกแบบการทดลองการศึกษาความสามารถในการวัดซ้ำและการวัดเหมือนของเครื่องมือวัด

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

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

ซึ่ง τ_i คือ อิทธิพลของชิ้นงาน

β_j คือ อิทธิพลของพนักงานวัด

γ_k คือ อิทธิพลของวิธีการ

$l = 1, 2, \dots, n$

2.3.4 การวิเคราะห์ผลการศึกษาความสามารถในการวัดซ้ำและการวัดเหมือนของเครื่องมือวัด

ในการตีความหมายผลการวิเคราะห์จากตารางการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) จะต้องเริ่มจากการวิเคราะห์ความมีนัยสำคัญของอิทธิพลร่วม (Interaction effect) ระหว่างชิ้นงานและพนักงานก่อนเสมอ ซึ่งถ้าพบว่าอิทธิพลร่วมระหว่างชิ้นงานกับพนักงานวัดมีนัยสำคัญ แสดงว่าเมื่อเปลี่ยนชิ้นงานให้พนักงานคนเดิมทำการวัดแล้ว ผลการวัดจะเปลี่ยนไป ซึ่งพบว่าอิทธิพลร่วมมีผลมาก และในกรณีที่มีอิทธิพลร่วมมีนัยสำคัญนี้ ก็มีความจำเป็นต้อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ตีความหมายจากอิทธิพลหลัก (Main effect) ของพนักงานวัดหรือ ช่างงานอีก เพราะว่าค่าเมืออิทธิพลหลักของพนักงานวัดจะดูเหมือนมี ผลอย่างไม่มีนัยสำคัญ แต่แท้ที่จริงแล้วมีอิทธิพลมากเมื่อมีการ ประเมินค่าความผันแปรด้านความสามารถในการวัดซ้ำและการวัด เหมือนของเครื่องมือวัด [6]

3. อุปกรณ์และวิธีการประมวลผลภาพ

3.1 ตัวอย่างที่ใช้ในการทดลอง

เนื่องจากเป็นช่วงของการสร้างเครื่องมือวัด เพื่อความ สะดวกในการทดลอง จึงใช้กระดาษสีที่มีสีแตกต่างกันแทนสีของสี ้ กรอก จำนวน 10 ตัวอย่าง แสดงดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 แสดงสีที่ใช้ในการทดลอง

3.2 วิธีการประมวลผลภาพ

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



รูปที่ 2 แสดงลักษณะของการได้มาของรูปภาพ

2.การเตรียมภาพถ่าย (Image pre-processing)

ภาพถ่ายดิจิตอลต้องมีการปรับปรุงคุณภาพก่อนที่จะนำไป ทำการวิเคราะห์ โดยการนำสิ่งรบกวนภาพออกและเพิ่มความเข้ม ของภาพ

3.การวัดคุณลักษณะ (Object measurement)

ทำการวัดสีจากภาพถ่ายซึ่งสีที่ได้จากภาพอยู่ในระบบ RGB จึงต้องแปลงจากระบบ RGB เป็นระบบ L*a*b โดยใช้ โปรแกรม MATLAB [12]

4. ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

ขั้นตอนการดำเนินงานเพื่อศึกษาความสามารถของระบบ การวัดค่าสี โดยออกแบบการทดลองศึกษาความสามารถในการวัด ซ้ำและการวัดเหมือนของเครื่องมือวัด ประกอบด้วย 3 ปัจจัย คือ พนักงาน ช่างงาน และวิธีการวัด โดยใช้ช่างงานจำนวน 10 ตัวอย่าง ให้พนักงานจำนวน 2 คน วิธีการวัด 2 วิธี แนวตั้งและแนวนอน ทำ การวัดโดยแต่ละคนวัดซ้ำคนละ 2 ครั้ง ซึ่งผลการวัดค่าอยู่ในระบบ L*a*b* ประกอบด้วยค่า L* a* และ b* ดังนั้นในการวิจัยครั้งนี้ต้อง

ทำการเก็บข้อมูลทั้งหมด $2 \times 10 \times 2 \times 2 = 80$ โดยทำการทดลอง แบบสุ่มโดยสมบูรณ์ จากนั้นนำข้อมูลวิเคราะห์ผลโดยใช้โปรแกรม MINITAB โดยใช้ balanced ANOVA

5. ผลการดำเนินงาน

จากผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 1 จะเห็นได้ว่าผลการ วัดค่าอยู่ในระบบ L*a*b* ประกอบด้วยค่า L* a* และ b* ซึ่งในการ วิเคราะห์จะให้ค่า L* a* และ b* เป็นอิสระกัน

ตารางที่ 1 รูปแบบการทดลองและผลการทดลอง

ลำดับ การสุ่ม	ลำดับ ทดลอง	Part	Operator	Method	L*	a*	b*
45	1	2	1	2	43.3962	7.1579	17.122
57	2	5	1	1	49.9104	-0.9345	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

จากตารางที่ 2 การวิเคราะห์ความแปรปรวน(ANOVA) จะ เห็นได้ว่าไม่มีอิทธิพลของปัจจัยใดที่มีผลต่อค่าวัดที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 จึงทำการลดรูปตัวแบบ (Reduced model) ผลที่ได้แสดงดัง ตารางที่ 3

ตารางที่ 2 แสดงผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่า a*

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	1.570		
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 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



จากตารางที่ 3 เมื่อทำการวิเคราะห์ความแปรปรวนของ เครื่องมือวัดจากสมการที่ 3 แสดงตัวอย่างดังนี้

$$\sigma_{\text{gauge}}^2 = \sigma^2 + \sigma_{\beta}^2 + \sigma_{\gamma}^2 \quad (3)$$

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

จากการคำนวณดังกล่าวสามารถเปรียบเทียบผลการ วิเคราะห์ความแปรปรวนดังตารางที่ 4 จากตารางจะเห็นได้ว่า ค่า สัดส่วนระหว่างความแปรปรวนของระบบการวัดและความ แปรปรวนของชิ้นงาน ของ L* a* และ b* เท่ากับ 5.77% 5.17% และ 9.27% ซึ่งแสดงว่าความแปรปรวนของเครื่องมือวัดมีค่าน้อย เมื่อเปรียบเทียบกับความแปรปรวนเนื่องจากชิ้นงาน

ตารางที่ 3 แสดงผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่า a* โดยลด รูปตัวแบบ (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_{gage}^2	1.4489	2.0669	2.8083
σ_{part}^2	25.1240	40.0056	30.2985
% $\sigma_{\text{gage}}^2 / \sigma_{\text{part}}^2$	5.77%	5.17%	9.27%

จากตารางที่ 3 การวิเคราะห์ความแปรปรวน(ANOVA) ของ ค่า a* จะเห็นได้ว่าอิทธิพลของชิ้นงานวัดและพนักงานวัดมีผลทำให้ ค่าวัดเปลี่ยนแปลงไป

จากผลการทดลองดังกล่าวข้างต้นจะเห็นวาระบบการวัด อยู่ในเกณฑ์ที่ดี แต่ยังมีอิทธิพลเนื่องจากพนักงานวัดที่ทำให้ค่าในการวัดเปลี่ยนแปลง จึงทำการปรับปรุงเครื่องมือวัดคุณภาพสีของอาหาร โดยทำการควบคุมแสงสว่างโดยใช้หลอดประหยัดไฟ รุ่นจีนี่

PHILIPS ขนาด 18W จำนวน 2 หลอด การจัดวางหลอดไฟ วาง เหนือตัวอย่างผลิตภัณฑ์ 35 เซนติเมตร เป็นมุม 45 องศา และเปิด ไฟในห้องทดลอง (ดังรูปที่ 3) ซึ่งผลที่ได้จากการทดลองแสดงดัง ตารางที่ 5



รูปที่ 3 แสดงภาพหลังการปรับปรุง

ตารางที่ 5 รูปแบบการทดลองและผลการทดลองหลังการปรับปรุง

ลำดับ การนับ	ลำดับ ทดลอง	Part	Operator	Method	L*	a*	b*
40	1	10	2	2	42.9982	8.6256	12.1761
39	2	10	2	1	41.9234	8.8205	11.7524
21	3	6	1	1	48.0045	6.3601	12.4307
48	4	2	2	2	45.3613	14.6579	23.2185
26	5	7	1	2	44.9543	7.518	10.2246
8	6	2	2	2	45.4064	14.3354	24.1653
:	:	:	:	:	:	:	:
3	78	1	2	1	36.7886	28.0758	21.7609
4	79	1	2	2	35.5066	27.766	20.6571
70	80	8	1	2	40.669	5.3887	7.069

เมื่อหามาคำนวณค่าสัดส่วนระหว่างความแปรปรวนของ ระบบการวัดและความแปรปรวนของชิ้นงานจากการลดรูปตัวแบบ (Reduced model) ตัวอย่างการคำนวณของค่า a* ตามสมการที่ 4 แสดงดังนี้

$$\sigma_{\text{gauge}}^2 = \sigma^2 + \sigma_{\beta}^2 + \sigma_{\gamma}^2 \quad (4)$$

$$\sigma_{\text{gauge}}^2 = 1.5301 + 0.0530 + 0.0035 = 1.5866$$

จากการคำนวณดังกล่าวสามารถสรุปผลการวิเคราะห์ดัง ตารางที่ 6 จากตารางจะเห็นได้ว่า ค่าสัดส่วนระหว่างความ แปรปรวนของระบบการวัดและความแปรปรวนของชิ้นงาน ของ L* a* และ b* เท่ากับ 2.14% 2.74% และ 11.24% ซึ่งแสดงว่าความ แปรปรวนของเครื่องมือวัดมีค่าน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับความ แปรปรวนเนื่องจากชิ้นงาน

ตารางที่ 6 ตารางเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของ L* a* และ b* หลังการปรับปรุง

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นางสาวพิรญาณ์ แก้วสุวรรณ
วัน เดือน ปีเกิด	12 มิถุนายน 2531 ที่กรุงเทพมหานคร
ที่อยู่	111 ซ.อ่อนนุช 40 ถ.สุขุมวิท 77 แขวงสวนหลวง เขตสวนหลวง กรุงเทพฯ 10250 โทร. 089-478-2299
ประวัติการศึกษา	2552 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอาหาร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ผลงานทางวิชาการ	“การวิเคราะห์ระบบการวัดของเครื่องมือวัดคุณภาพสีของอาหาร” การประชุมวิชาการช่วยงานวิศวกรรมอุตสาหกรรม ประจำปี 2554



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้