

รายงานฉบับสมบูรณ์

การบูรณาการวิธีการประมวลผลภาพพร้อมกับการใช้เทคนิคเชิงสถิติ
เพื่อการควบคุมคุณภาพในอุตสาหกรรมอาหารแปรรูปเนื้อสัตว์

The integration of image processing and statistical techniques
for quality control in meat-processing industry

รหัสโครงการ

SCH-NR-2011-22-1

ผศ.ดร.ชุมพล ยวงใย

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

รายงานฉบับสมบูรณ์

การบูรณาการวิธีการประมวลผลภาพพร้อมกับการใช้เทคนิคเชิงสถิติเพื่อการควบคุมคุณภาพในอุตสาหกรรม
อาหารแปรรูปเนื้อสัตว์

The integration of image processing and statistical techniques for quality control in
meat-processing industry

รายนามคณะผู้วิจัย

1. ผศ.ดร.ชุมพล ยวงใย

หน่วยงาน คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

วันเริ่มต้นโครงการ 1 มีนาคม 2555

วันสิ้นสุดโครงการ 31 มีนาคม 2558

กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจาก
ศูนย์ประสานงานนักเรียนทุนรัฐบาลทางด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
และสำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ

ปี พ.ศ. 2555

บทคัดย่อ

การควบคุมคุณภาพของผลิตภัณฑ์อาหารเนื้อสัตว์แปรรูปเป็นองค์ประกอบสำคัญที่สำคัญอย่างหนึ่งในการตอบสนองต่อนโยบายด้านอาหารแห่งชาติ (ครัวของโลก) เนื่องจากผลิตภัณฑ์เหล่านี้ต้องมีคุณลักษณะที่ได้มาตรฐาน มีความปลอดภัยและเป็นไปตามความต้องการของผู้บริโภคทั้งในและต่างประเทศ ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษการควบคุมคุณภาพของไส้กรอกนั้นมีการตรวจสอบโดยใช้สายตาของมนุษย์ซึ่งมีความผิดพลาดสูง ดังนั้นในงานวิจัยนี้ได้บูรณาการวิธีการประมวลผลภาพเพื่อลดความผิดพลาดดังกล่าว โดยใช้การประมวลผลภาพถ่ายกับวิธีการควบคุมกระบวนการเชิงสถิติอย่างเหมาะสม โดยได้พัฒนาเครื่องต้นแบบสำหรับการตรวจสอบและเสนอกรอบการดำเนินการ โดยเริ่มต้นจากการกำหนดคุณลักษณะด้านสีและเนื้อสัมผัสโดยใช้วิธีการประมวลผลภาพ การประเมินผลระบบการวัด การนำข้อมูลที่ได้กับแผนภูมิควบคุมสำหรับข้อมูลหลายตัวแปร ซึ่งการทดลองใช้ปรากฏว่าสามารถนำไปตรวจสอบสิ่งผิดปกติในกระบวนการได้ อีกทั้งยังนำกรอบความคิดนี้ไปประยุกต์ใช้กับผลิตภัณฑ์นักเก็ตไก่อีกด้วย ความสำเร็จของงานวิจัยชิ้นนี้จะเป็นเครื่องมือที่ใช้ในการค้นหาปัญหาที่เกิดขึ้นและสาเหตุเพื่อการปรับปรุงกระบวนการแปรรูปเนื้อสัตว์ ซึ่งรากฐานที่สำคัญอย่างหนึ่งในการพัฒนาอุตสาหกรรมการแปรรูปเนื้อสัตว์ในประเทศไทยต่อไป

คำสำคัญ การควบคุมคุณภาพอาหาร, การประมวลผลภาพ และ การควบคุมคุณภาพเชิงสถิติ

Abstract

Food quality control is one of the crucial elements to the Thailand's food policy: kitchen of the world. The food characteristics must comply with safety regulations, standards and also consumers' satisfaction. In this study, the meat processing: sausage production are selected. Colors and textures of these products are of important and often evaluated by using a visual inspection which has a low consistency due to human nature. The image processing will eliminate the human mistake and provide quantitative data for further advanced analysis. A statistical process control technique will be properly selected based on the investigation of data characteristics (multivariate and autocorrelation). The objectives of the study are to build a prototype equipment for meat product control develop and also to proposed an approach for the meat processing control by the integration of image processing and statistical process control. The proposed approach include determining the characteristics of sausage color, image processing. The integration helps process owner to identify and remove the cause of troubles in the meat processing. In additions, we extend the approach for the production of Chicken Nugget. We believe that the outcomes of this study will eventually yield a foundation for the development of meat processing industry in Thailand.

Key Words: food control, image processing, statistical process control

สารบัญเรื่อง

	หน้า
1. บทนำ	9
2. วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย	10
3. การทบทวนวรรณกรรม	10
3.1. การตรวจสอบคุณภาพของอาหารกับวิธีการประมวลผลภาพ	10
3.2. แบบจำลองสี	14
3.3. คุณลักษณะที่ต้องการของไส้กรอกหมู	17
3.4. ขั้นตอนการผลิตไส้กรอกหมู	18
4. การออกแบบการวิจัย	27
5. ขอบเขตของการวิจัย	29
6. ระเบียบวิธีการวิจัย	29
6.1. การศึกษาเกี่ยวกับระบบการวัด	29
6.2. ออกแบบการทดลองเพื่อลดความผันแปรที่เกิดจากเครื่องมือประมวลผลภาพ	31
6.3. การวิเคราะห์ความสามารถของระบบการวัด	32
6.4. การประมวลผลภาพ	32
6.5. ศึกษาคุณลักษณะของข้อมูล	34
6.6. การควบคุมกระบวนการ	34
7. ผลการทดลอง	35
7.1. ผลการสร้างเครื่องมือประมวลผลภาพ	35
7.2. ผลการออกแบบการทดลองเพื่อพิจารณาปัจจัยที่มีผลต่อค่าสีของภาพถ่าย	36
7.3. ผลการวิเคราะห์ความสามารถของระบบการวัด	41
7.4. ศึกษาคุณลักษณะของข้อมูล	45
7.5. การควบคุมกระบวนการ	46
8. สรุปผล	50
9. ปัญหาและอุปสรรค	52
10. บรรณานุกรม	53
11. ภาคผนวก	57
ภาคผนวก ก ผลการทดลองการวิเคราะห์ความสามารถของระบบการวัด	57
ภาคผนวก ข ผลการทดลองการควบคุมกระบวนการเชิงสถิติ	60
ภาคผนวก ค แบบของเครื่องมือประมวลผลภาพที่ใช้ในการทดลอง	62
ภาคผนวก ง ส่วนของโปรแกรม MATLAB	63
ประวัติผู้วิจัย	66

สารบัญญภาพ

หน้า

รูปที่ 1.1 ตัวอย่างคุณภาพด้านสี ความพรุนและความสามารถในการยึดเกาะ ของแป้งชูบทอดนึ่งที่แตกต่างกัน.....	9
รูปที่ 1.2 แสดงการเปรียบเทียบสีไส้กรอก.....	10
รูปที่ 3.1 แสดงขั้นตอนการประมวลผลภาพ.....	12
รูปที่ 3.2 แสดงระบบสี RGB	14
รูปที่ 3.3 แสดงระบบสี HSI.....	15
รูปที่ 3.4 แสดงระบบสี $L^*a^*b^*$	15
รูปที่ 3.5 แสดงระบบสี L^*C^*h	16
รูปที่ 3.6 แผนภาพแสดงขั้นตอนการผลิตไส้กรอกแบบอิมัลชัน.....	18
รูปที่ 3.7 ปฏิกริยาเคมีของการเกิดสีในเนื้อสดและผลิตภัณฑ์	19
รูปที่ 4.1 กรอบการวิจัย	28
รูปที่ 6.1 แสดงแผนผังขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย	29
รูปที่ 6.2 ตัวอย่างเครื่องมือประมวลผลภาพของ ก) เครื่องมือประมวลผลภาพของ Pedreschi et al. (2006) ข) เครื่องมือประมวลผลภาพของ พิริญญาณ (2555).....	30
รูปที่ 6.3 แบบของเครื่องมือประมวลผลภาพที่ใช้ในงานวิจัย	31
รูปที่ 6.4 กระดาษสีที่ใช้ในขั้นตอนการออกแบบการทดลอง.....	31
รูปที่ 6.5 สีของกระดาษสีที่ใช้ในการทดลองจากระดับ 1 ถึง 10.....	32
รูปที่ 6.6 เครื่องมือประมวลผลภาพ	33
รูปที่ 6.7 แสดงตัวอย่างรูปภาพที่ได้จากการถ่ายภาพ	33
รูปที่ 6.8 แสดงการตัดภาพเฉพาะส่วนที่เป็นไส้กรอก	34
รูปที่ 6.9 ตัวอย่างที่ใช้แทนลักษณะของไส้กรอกที่ผิดปกติ	35
รูปที่ 7.1 เครื่องมือประมวลผลภาพ	36
รูปที่ 7.2 normal probability plot of the effect ของค่า $L^*a^*b^*$ ในขั้นตอนการออกแบบการทดลอง..	39
รูปที่ 7.3 residual plot ของค่า $L^*a^*b^*$ ในขั้นตอนการออกแบบการทดลอง	41
รูปที่ 7.4 residual plot ของค่า $L^*a^*b^*$ ในขั้นตอนการวิเคราะห์ความสามารถของระบบการวัด	44
รูปที่ 7.5 กราฟแสดงการทดสอบการแจกแจงแบบปกติของค่า $L^*, a^*, b^*, h, C^*, S_L^*, S_a^*, S_b^*, S_h$ และ S_C^*	45
รูปที่ 7.6 Matrix Plot สำหรับ 29 ตัวอย่าง ของค่า $L^*, a^*, b^*, h, C^*, S_L^*, S_a^*, S_b^*, S_h$ และ S_C^*	46
รูปที่ 7.7 แผนภูมิควบคุมไฮเทลลิ่งที่สแควร์ของค่า L^*, a^* และ b^*	47
รูปที่ 7.8 แผนภูมิควบคุมไฮเทลลิ่งที่สแควร์ของค่า $L^*, a^*, b^*, h, C^*, S_L^*, S_a^*, S_b^*, S_h$ และ S_C^*	48
รูปที่ 7.9 ตัวอย่างไส้กรอกที่มีความไม่สม่ำเสมอของสีอย่างไม่ชัดเจน	48
รูปที่ 8.1 แสดงกรอบแนวคิดในการควบคุมคุณภาพสีของไส้กรอก	51
รูปที่ ค.1 แบบของเครื่องมือประมวลผลภาพที่ใช้ในการทดลอง	62

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 3.1 แสดงข้อดีและข้อจำกัดของแบบจำลองทั้ง 3 วิธี	17
ตารางที่ 7.1 การวิเคราะห์องค์ประกอบสำคัญเบื้องต้น	37
ตารางที่ 7.2 ระดับของปัจจัยที่ใช้ในการทดสอบอิทธิพลของปัจจัย	38
ตารางที่ 7.3 รูปแบบการทดลองและผลการทดสอบอิทธิพลของปัจจัย	38
ตารางที่ 7.4 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่า L^* (analysis of variance for L^*)	39
ตารางที่ 7.5 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่า a^* (analysis of variance for a^*)	40
ตารางที่ 7.6 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่า b^* (analysis of variance for b^*)	40
ตารางที่ 7.7 ระดับของปัจจัยที่ใช้ในการวิเคราะห์	42
ตารางที่ 7.8 รูปแบบการทดลองและผลการวิเคราะห์ความสามารถของระบบการวัด	42
ตารางที่ 7.9 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่า L^*	43
ตารางที่ 7.10 เปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่า $L^*a^*b^*$	44
ตารางที่ 7.11 แสดงค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของเพียร์สัน	46
ตารางที่ 7.12 ค่าความแตกต่างส่วนเกินของค่า $L^*, a^*, b^*, h, C^*, S_{L^*}, S_{a^*}, S_{b^*}, S_h$ และ S_{C^*}	49
ตารางที่ 7.13 แสดงค่าความแตกต่างส่วนเกินที่มากที่สุดของตัวอย่างใส่กรอกที่ออกนอกการควบคุม	49
ตารางที่ ก.1 รูปแบบการทดลองและผลการวิเคราะห์ความสามารถของระบบการวัด	57
ตารางที่ ก.2 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่า a^*	58
ตารางที่ ก.3 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่า b^*	59
ตารางที่ ข.1 ข้อมูลที่ใช้ในการทดสอบแผนภูมิควบคุมและตัวสถิติไฮเทลลิงที่สแควร์ของค่า L^*, a^* และ b^*	60
ตารางที่ ข.2 ข้อมูลที่ใช้ในการทดสอบแผนภูมิควบคุมและตัวสถิติไฮเทลลิงที่สแควร์ของค่า $L^*, a^*, b^*, h, C^*, S_{L^*}, S_{a^*}, S_{b^*}, S_h$ และ S_{C^*}	61

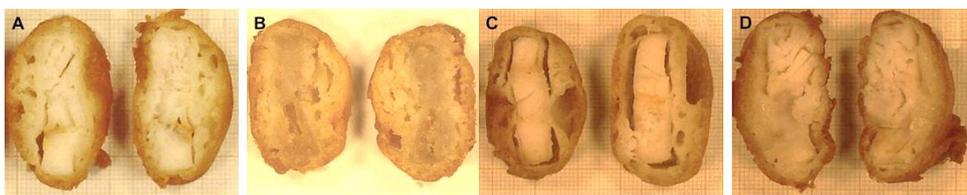
1. บทนำ

ในปี 2546 ประเทศไทยได้ประกาศนโยบายในด้านอาหารและอุตสาหกรรมเกษตรในการเป็น “ครัวของโลก” ซึ่งในปัจจุบันประเทศไทยยังดำเนินการตามนโยบายดังกล่าว ประกอบกับประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรมและเป็นประเทศผู้ผลิตและส่งออกรายสำคัญของโลก (สถาบันอาหาร, 2554) ในปี 2553 สินค้าอาหาร ประเภทอาหารทะเล กุ้งแช่แข็งและแปรรูป ผักผลไม้ และไก่แช่แข็งและแปรรูปส่งออกเพิ่มขึ้น จากปี 2552 ทั้งปริมาณและมูลค่า โดยมีมูลค่า 14,474 ล้านดอลลาร์ เพิ่มขึ้นร้อยละ 14.4 (กรมส่งเสริมการส่งออก, 2554) จะเห็นได้ว่าอุตสาหกรรมอาหารเป็นอุตสาหกรรมที่มีความสำคัญเป็นอย่างมาก ดังนั้นการปรับปรุงเทคโนโลยีเพื่อให้มีความทันสมัย คุณภาพและความปลอดภัยของผลิตภัณฑ์จึงมีความสำคัญที่ต้องพัฒนาเพื่อให้ได้มาตรฐานและความพึงพอใจของผู้บริโภค

อุตสาหกรรมการแปรรูปเนื้อสัตว์เป็นอุตสาหกรรมที่สำคัญเนื่องเป็นการเก็บรักษาเนื้อสัตว์ให้มีคุณภาพได้นานขึ้น สามารถทำได้ 2 วิธีหลัก คือ วิธีที่ใช้เทคโนโลยีพื้นบ้าน เช่น หมน หมวย กุนเชียง เป็นต้น และวิธีที่ใช้เทคโนโลยีจากต่างประเทศ เช่น ไส้กรอก ซึ่งในปัจจุบันประเทศไทยได้พัฒนาการผลิตจนกระทั่งสามารถส่งออกไปยังต่างประเทศได้ รวมทั้งสถานการณ์ส่งออกสุกรแปรรูปและแช่แข็ง ปี 2551 ปริมาณส่งออก 9,988.15 เมตริกตัน มูลค่า 1,955.77 ล้านบาท มูลค่าขยายตัวเพิ่มขึ้นร้อยละ 50.19 (บริษัท ศูนย์วิจัย ไทยพาณิชย์ จำกัด)

จากสภาวะการส่งออกที่เพิ่มมากขึ้นในปัจจุบันคุณภาพของผลิตภัณฑ์จึงเป็นสิ่งจำเป็นในการผลิต เนื่องจากมีผลต่อการตัดสินใจในการเลือกซื้อของผู้บริโภค ซึ่งคุณลักษณะทางกายภาพเป็นสิ่งแรกที่ทำให้ผู้บริโภคมีความพึงพอใจในผลิตภัณฑ์ก่อนที่จะรับรู้คุณสมบัติทางประสาทสัมผัสอื่นๆ (Chambers and Bowers, 1993) คุณรูปที่ผู้บริโภคสามารถรับรู้ได้ ได้แก่ ขนาด รูปร่าง ลักษณะเนื้อสัมผัส และสี (Francis, 1995) ดังนั้นการส่งเสริมด้านการควบคุมคุณภาพผลิตภัณฑ์และการพัฒนาเทคโนโลยีในการผลิต จึงเป็นสิ่งจำเป็นที่จะต้องยกระดับและนำมาเป็นจุดเด่นเพื่อการแข่งขันในตลาดโลก ซึ่งปัจจัยด้านคุณรูปที่จะตอบสนองความต้องการของผู้บริโภคนั้น นอกจากรสชาติแล้ว ลักษณะทางกายภาพยังถือเป็นอีกหนึ่งปัจจัยที่มีผลต่อความพึงพอใจของผู้บริโภคเช่นกัน

ในข้อเสนอโครงการนี้จะทำการศึกษาการควบคุมคุณภาพของการแปรรูปเนื้อ ได้แก่ การผลิตไส้กรอก ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์แปรรูปจากเนื้อสุกรอย่างหนึ่งที่มีความเกี่ยวข้องกับลักษณะปรากฏและสัดส่วนขององค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ และมีคุณลักษณะที่ซับซ้อนน้อยเมื่อเทียบกับผลิตภัณฑ์อื่นๆ โดยผลิตภัณฑ์ไส้กรอกส่วนใหญ่ จะเน้นเรื่องคุณภาพสีเป็นหลัก ในขณะที่มักเกิดไอน้ำนั้นเบคอนจะเน้นทั้งสีและลักษณะเนื้อสัมผัส ดังรูปที่ 1.1



รูปที่ 1.1 ตัวอย่างคุณภาพด้านสี ความพรุนและความสามารถในการยึดเกาะของแป้งชูบทอดนักเก็ตที่แตกต่างกัน ที่มา : Albert et.al. (2009)

ทั้งนี้ลักษณะดังกล่าวมีการตรวจสอบคุณภาพด้วยสายตา ดังรูปที่ 1.2 แสดงการตรวจสอบสีของไส้กรอก ซึ่งวิธีการนี้เป็นอุปสรรคต่อการรวบรวมข้อมูล และส่งผลกระทบต่อตรงต่อการควบคุมกระบวนการ

เพราะการตรวจสอบด้วยวิธีการดังกล่าวมีปัจจัยหลายอย่างที่มีผลต่อการประเมินคุณภาพ เช่น ความสามารถ ความชำนาญและการตัดสินใจของผู้ประเมินแต่ละบุคคล ซึ่งทำให้คุณภาพของผลิตภัณฑ์ไม่มีมาตรฐานที่แน่นอน ยากต่อการควบคุมให้ไปในทางเดียวกัน ทำให้มีผลต่อการยอมรับและความน่าเชื่อถือจากผู้บริโภค ดังนั้นในงานวิจัยครั้งนี้จึงนำวิธีการประมวลผลภาพ (image processing) มาประยุกต์ใช้ในการประเมินคุณภาพสีของไส้กรอกในเรื่องความสม่ำเสมอของสีไส้กรอกภายในแพ็ค



รูปที่ 1.2 แสดงการเปรียบเทียบสีไส้กรอก

2. วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

1. เพื่อพัฒนาวิธีการประเมินผลคุณภาพของผลิตภัณฑ์อาหารโดยเน้นเรื่องการตรวจสอบคุณภาพด้านสี โดยใช้วิธีการประมวลผลภาพ (Image processing) ร่วมกับวิธีการเชิงสถิติที่เหมาะสม โดยเน้นผลิตภัณฑ์ไส้กรอก
2. เพื่อพัฒนาเครื่องต้นแบบสำหรับเป็นเครื่องมือตรวจสอบคุณภาพของผลิตภัณฑ์เนื้อสัตว์แปรรูป

3. การทบทวนวรรณกรรม

3.1. การตรวจสอบคุณภาพของอาหารกับวิธีการประมวลผลภาพ

คุณภาพของสีและลักษณะเนื้อสัมผัสเป็นหนึ่งในคุณลักษณะของผลิตภัณฑ์ที่ผู้บริโภคสามารถประเมินได้ด้วยประสาทสัมผัสซึ่งปรากฏทางกายภาพ (physical appearance) สีเกิดขึ้นจากแสงตกกระทบผลิตภัณฑ์อาหารแล้วสะท้อนเข้าตาในช่วงความยาวคลื่น 400-800 นาโนเมตร สีจัดเป็นปัจจัยแรกทางกายภาพของผลิตภัณฑ์ที่ก่อให้เกิดการจูงใจของผู้บริโภค และทำให้ผู้บริโภคสามารถรับรู้ถึงคุณภาพของผลิตภัณฑ์ได้ ซึ่งแต่ละผลิตภัณฑ์สีจะเป็นสิ่งบ่งชี้ลักษณะของผลิตภัณฑ์ เช่น มะม่วงสุกจะมีสีเหลืองอมเขียว (Kang et al., 2008) สีของมันฝรั่งทอด (Mendoza et al., 2007) แอปเปิ้ลเขียว (Leemans et al., 1998) สีของเนื้อหมู (O'Sullivan et al., 2003) เป็นต้น

วิธีการประมวลผลภาพ (Image processing) คือ กระบวนการจัดการทางรูปทรงที่ข้อมูลที่ป้อนเข้าสู่กระบวนการและผลลัพธ์ที่ออกจากกระบวนการต่างก็เป็นรูปภาพเช่นเดียวกัน เป็นกระบวนการดึงคุณสมบัติ

ของภาพออกมาพิจารณาอีกทั้งยังรวมไปถึงวิธีการรวมเอาสิ่งที่สนใจแต่ละอย่างมาพิจารณา ดังนั้นเมื่อนำภาพมาแปลงเข้าสู่คอมพิวเตอร์ภาพนั้นจะกลายเป็นภาพดิจิทัล (Digital image)

ในอุตสาหกรรมอาหาร การประเมินคุณภาพของอาหารยังใช้วิธีการตรวจสอบโดยใช้คน ซึ่งต้องผ่านการคัดเลือกหรือฝึกอบรมจนสามารถแบ่งแยกลักษณะของผลิตภัณฑ์ได้ การใช้วิธีการตรวจสอบดังกล่าวทำให้ต้องใช้แรงงานเป็นจำนวนมาก พนักงานเกิดความเมื่อยล้า มีค่าใช้จ่ายสูง และความน่าเชื่อถือน้อย ดังนั้นเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการตรวจสอบให้มีความถูกต้อง (accuracy) และมีความคงที่ (consistency) จึงได้นำวิธีการประมวลผลภาพ (Image processing) มาประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร ซึ่งจะทำให้การประเมินคุณภาพของอาหารมีความถูกต้องและมีความคงที่เพิ่มขึ้น แก๊ซข้อผิดพลาดของการตรวจสอบโดยใช้คน คุณสมบัติที่ใช้ในการตรวจสอบ ได้แก่ ขนาด รูปร่าง สี และเนื้อสัมผัสของอาหาร (Du and Sun, 2004)

ในการวิเคราะห์ภาพสำหรับผลิตภัณฑ์อาหาร สีและลักษณะเนื้อสัมผัสเป็นคุณลักษณะที่มีอิทธิพลและตัวบ่งชี้ที่มีประสิทธิภาพที่ช่วยลดความซับซ้อนของการแยกวัตถุและการตรวจสอบวัตถุจากภาพ ลักษณะสีของวัตถุที่สามารถแยกได้ด้วยการตรวจสอบพิกเซลภายในขอบเขตของวัตถุ ซึ่งงานวิจัยจำนวนมากที่ประสบความสำเร็จในการวัดสีของผลิตภัณฑ์อาหาร ได้แก่

จากการศึกษาของ Shearer and Payne (1990) ใช้วิธีการประมวลผลภาพในการวัดสีของผัก โดยวัดสีของพริกหวานเพื่อแบ่งแยกประเภทโดยใช้ระบบการวิเคราะห์ภาพสีและใช้ระบบ RGB ค่าความเข้มของพิกเซลถูกแบ่งเป็นแปดระดับสีที่เป็นไปได้ ความสัมพันธ์ของการกระจายความเข้มของพิกเซลในหกออร์โทกอนอลจะถูกคำนวณและใช้สีเป็นตัวแปรเชิงปริมาณผลพบว่ามีค่าความถูกต้องสูงถึง 96% ซึ่งประสบความสำเร็จในการแบ่งเกรดตามสีของพริกหวาน

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

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

จากการศึกษาของ Lu et al. (2000) ใช้การประเมินสีของเนื้อหมูสดโดยแบ่งเป็นส่วนของสีพื้นกล้ามเนื้อและไขมัน ใช้ค่าเฉลี่ยและค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของสีแดง สีเขียวและสีน้ำเงินในการแบ่งกลุ่มโดยแบ่งจากวิธีการทางสถิติโดยใช้เทคนิค Partial least squares และแบบจำลองเครือข่ายประสาทและทำนายค่าของสีโดยใช้ภาพ ผลการศึกษาพบว่าระบบการประมวลผลภาพร่วมกับเครือข่ายประสาทเป็นเครื่องมือที่มีประสิทธิภาพในการประเมินผลความสดของเนื้อหมูโดยใช้สี

จากการศึกษาของ Pedreschi et al. (2006) ได้นำวิธีการประมวลผลภาพมาประยุกต์ใช้ในการวัดสีของมันฝรั่งทอดโดยใช้ข้อมูลหมุมในการทอดที่แตกต่างกัน โดยทำการแปลงภาพจากระบบ RGB เป็นระบบ $L^*a^*b^*$ เพื่อใช้ในการเปรียบเทียบสีของมันฝรั่งทอด ผลการทดลองพบว่าค่าสีในระบบ $L^*a^*b^*$ จะบันทึกความแตกต่าง

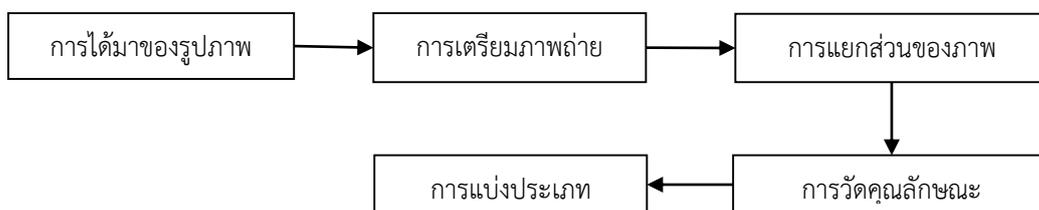
ที่เวลาการทอดต่างกัน อุณหภูมิต่างกันโดยใช้พารามิเตอร์การเปลี่ยนแปลงสีรวม (ΔE) โดยวิธีการประมวลผลภาพแสดงให้เห็นได้ว่าถ้าทอดที่อุณหภูมิสูงมันฝรั่งจะเป็นสีดำ

Wu and Sun (2013) ได้รวบรวมงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการวัดสีโดยใช้ระบบคอมพิวเตอร์วิทัศน์สำหรับการควบคุมคุณภาพของอาหาร

จากงานวิจัยของ Girolami et al. (2014) ใช้ระบบคอมพิวเตอร์วิทัศน์ในการวิเคราะห์ภาพในการประเมินลักษณะปรากฏของไส้กรอก Lucanian dry โดยทำการวัดสีและอัตราส่วนของไขมันที่มองเห็น โดยใช้ค่าคุณลักษณะของสี L^*, a^*, b^* , hue และ chroma

3.1.1. ขั้นตอนพื้นฐานของการประมวลผลภาพ

ขั้นตอนการประมวลผลภาพโดยทั่วไปประกอบด้วย 5 ขั้นตอนดังรูปที่ 3.1 (Du and Sun, 2004)



รูปที่ 3.1 แสดงขั้นตอนการประมวลผลภาพ

3.1.1.1. การได้มาของรูปภาพ (Image acquisition)

การรับสัญญาณจากอุปกรณ์ถ่ายภาพต่าง ๆ ซึ่งอยู่ในรูปสัญญาณแอนะล็อก แล้วแปลงสัญญาณที่ได้ให้เป็นสัญญาณดิจิทัล เช่น กล้องถ่ายภาพดิจิทัล กล้องวีดิทัศน์ กล้องเว็บแคม เครื่องสแกน หรืออุปกรณ์รับสัญญาณภาพอื่นๆ

แสงสว่าง เป็นสิ่งจำเป็นในการได้มาของรูปภาพสำหรับการประเมินคุณภาพของอาหาร สภาวะของแสงจะส่งผลกระทบต่อคุณภาพของรูปภาพ ซึ่งภาพถ่ายที่มีคุณภาพสูงจะช่วยลดเวลาและลดความซับซ้อนของขั้นตอนการประมวลผลภาพ

3.1.1.2. 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

3.1.1.3. การแยกส่วนของภาพ (Image segmentation)

เป็นการแยกวัตถุที่เราสนใจในภาพออกจากพื้นหลังของภาพ วิธีการที่ใช้ในการประเมินคุณภาพของอาหารแบ่งออกเป็น 4 วิธี ได้แก่ การแยกบริเวณโดยการทำให้ขีด (Thresholding-based segmentation) การแยกบริเวณโดยใช้ขอบของวัตถุ (Region based) การแยกบริเวณโดยการทำการถาด (Region based)

(Gradient-based segmentation) และการแยกบริเวณโดยการแบ่งประเภท (Classification-based segmentation)

3.1.1.4. การวัดคุณลักษณะ (Object measurement)

หลังจากขั้นตอนการแยกส่วนของภาพเพื่อให้ได้ส่วนของวัตถุที่เราสนใจ จากนั้นจะทำการวัดคุณลักษณะของวัตถุ สำหรับการประเมินคุณภาพของอาหารลักษณะของภาพแบ่งออกเป็น 4 กลุ่มคือ ขนาด รูปร่าง สี และเนื้อสัมผัส

3.1.1.5. การแบ่งประเภท (Classification)

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

ตัวอย่างขั้นตอนการประมวลผลภาพที่ใช้ในแต่ละงานวิจัยแสดงดังนี้

จากงานวิจัยของ Papadakis et al. (2000) ได้เสนอเทคนิคในการวัดสีของอาหารประกอบด้วยระบบแสง การใช้กล้องดิจิทัลที่มีความละเอียดสูงในการถ่ายภาพอาหาร และการใช้โปรแกรมโฟโต้ชอปในการรับค่าสี และระบบสีที่นิยมใช้ในงานวิจัยด้านอาหารคือ ระบบ $L^*a^*b^*$ ระบบแสงเป็นสิ่งสำคัญในการใช้แหล่งกำเนิดแสงให้เหมาะสม ซึ่งสีของอาหารส่วนหนึ่งจะขึ้นอยู่กับสเปกตรัมการสะท้อน และแหล่งกำเนิดแสงมาตรฐานกำหนดโดย CIE ที่ใช้กันทั่วไปในงานวิจัยด้านอาหาร คือ A (2856 K) C (6774 K) D₆₅ (6500 K) และ D (7500 K) มุมระหว่างกล้องกับแหล่งกำเนิดแสงเป็นมุม 45° ใช้กล้องดิจิทัลบันทึกภาพโดยความละเอียดของภาพเกี่ยวข้องกับจำนวนพิกเซล ถ้าภาพมีความละเอียดมากจะมีพิกเซลมาก แนะนำให้มีความละเอียดขั้นต่ำ 1,600 x 1,200 พิกเซล

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

จากงานวิจัยของ Pedreschi et al. (2006) ใช้ระบบคอมพิวเตอร์วิชั่นในการวัดสีของมันฝรั่งการได้มาของรูปภาพใช้ระบบที่พัฒนาโดย 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 ภายในกล่องทาด้วยสีดำเพื่อหลีกเลี่ยงแสงและการสะท้อน การเตรียม

ภาพถ่ายโดยลดสัญญาณรบกวนของภาพ ทำการเปลี่ยนภาพสีเป็นความเข้มของสี (Intensity image) การแยกส่วนของภาพใช้ความเข้มของสีในการแบ่งแยกขอบภาพกับพื้นหลัง หลังจากนั้นทำการเปลี่ยนจากแบบจำลองสีระบบ RGB เป็น $L^*a^*b^*$ โดยใช้โปรแกรม MATLAB

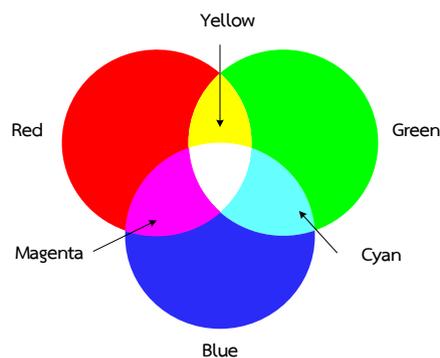
จากงานวิจัยดังกล่าว พบว่าวิธีการในการประมวลผลภาพมีความคล้ายคลึงกันในส่วนของวิธีการได้มาของรูปภาพ โดยในงานวิจัยนี้จะใช้วิธีการได้มาของรูปภาพจากงานวิจัยของ Pedreschi et al. (2006)

3.2. แบบจำลองสี

แบบจำลองสี (Color models) ใช้ในการบ่งชี้และบอกปริมาณสี แบบจำลองสีแต่ละแบบจะมีลักษณะแตกต่างกันไป ซึ่งเหมาะกับการใช้งานที่แตกต่างกัน มีแบบจำลองสีต่างๆดังนี้

3.2.1. ระบบ RGB (Red/ Green/ Blue)

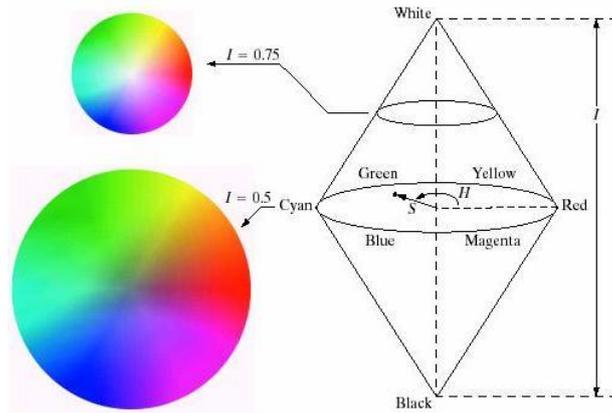
ระบบ RGB เป็นระบบสีของแสง ซึ่งเกิดจากการหักเหของแสงผ่านแท่งแก้วปริซึม เกิดจากความเข้มของสามสีหลัก ได้แก่ แดง เขียว และน้ำเงินซึ่งใช้ในการสร้างสีเขียวน้ำเงิน สีม่วงแดง สีเหลืองและสีขาวยังแสดงดังรูปที่ 2.2 ระบบนี้จะนำมาใช้สำหรับหน้าจอโทรทัศน์และคอมพิวเตอร์ รวมถึงการเก็บข้อมูลภาพในระบบคอมพิวเตอร์ ซึ่งการสร้างพิกเซลสีจะเกิดจากการยิงแสงสีแดง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



รูปที่ 3.2 แสดงระบบสี RGB

3.2.2. ระบบ HSI (Hue/ Saturation/ Intensity)

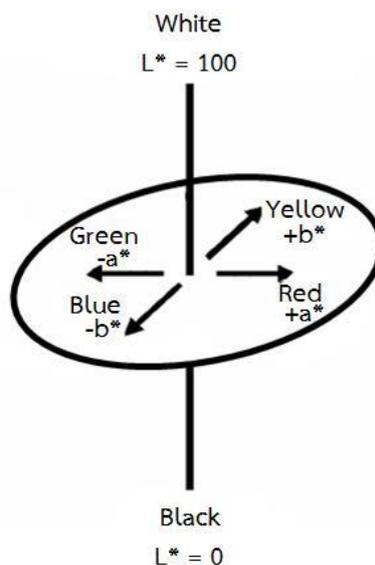
ระบบ HSI เป็นเครื่องมือที่มีประสิทธิภาพสำหรับภาพที่สีแตกต่างกันแสดงดังรูปที่ 2.3 โดยปกติภาพสีจะนำมาจากอุปกรณ์ดิจิทัลและบันทึกไว้ในระบบ RGB (แดง เขียว และสีน้ำเงิน) โดยค่า H (Hue) แทนเฉดสี S (Saturation) แทนความบริสุทธิ์ของสี และ I (Intensity) แทนความเข้มของสี สำหรับงานวิจัยที่ใช้ระบบ HSI เช่น มันฝรั่งและแอปเปิ้ลเปลี่ยนจาก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



รูปที่ 3.3 แสดงระบบสี HSI
(Gonzalez and Woods. 2002)

3.2.3. 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 โดยไม่คำนึงถึงการป้อนข้อมูลและอุปกรณ์รับข้อมูล 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



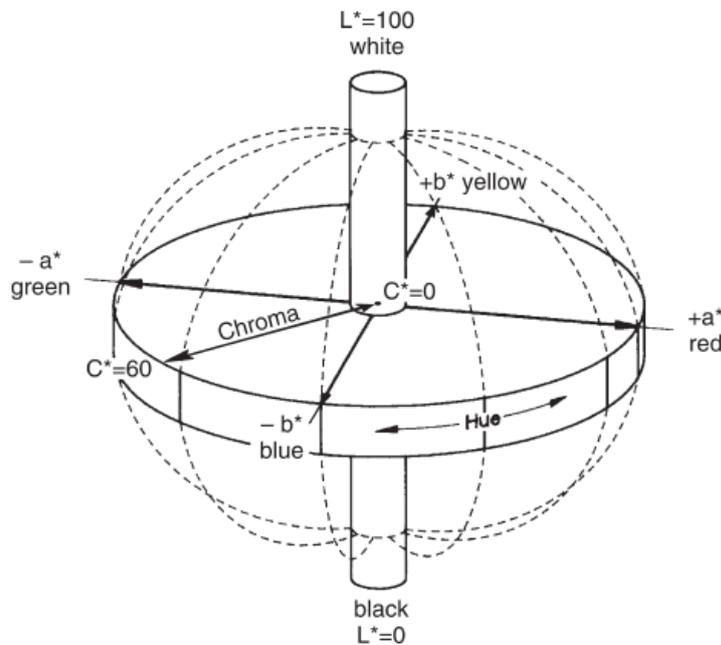
รูปที่ 3.4 แสดงระบบสี $L^*a^*b^*$

3.2.4. ระบบ L^*C^*h

ระบบ L^*C^*h เป็นระบบที่แปลงจากระบบ CIE $L^*a^*b^*$ ซึ่งเป็นการระบุพิกัดฉาก ให้เป็นการระบุพิกัดทรงกระบอก พัฒนาขึ้นในปี 1976 ประกอบด้วยค่า L^* C^* และ h ดังรูปที่ 3.5 โดยค่า L^* จะแสดงค่าค่าความสว่างของสีเช่นเดียวกับระบบ $L^*a^*b^*$ ค่า C^* แสดงค่าโครมา (Chroma) และ h แสดงค่า Hue angle สำหรับค่า C^* เริ่มจาก 0 ซึ่งเป็นค่าที่ศูนย์กลางและเพิ่มมากขึ้นตามระยะที่ห่างจากศูนย์กลางมากขึ้น สำหรับ h เป็นค่ามุมที่ทำกับแกน $+a^*$ โดยค่า 0 เท่ากับ $+a^*$ (สีแดง) ค่า 90 เท่ากับ $+b^*$ (สีเหลือง) ค่า 180 เท่ากับ $-a^*$ (สีเขียว) และค่า 270 เท่ากับ $-b^*$ (สีน้ำเงิน) ซึ่งค่า C^* และ h คำนวณได้จากสมการที่ 3.1 และ 3.2 (Datacolor; Plataniotis and Venetsanopoulos. 2000)

$$\text{chroma } (C^*) = (a^{*2} + b^{*2})^{\frac{1}{2}} \quad (3.1)$$

$$\text{Hue } (h) = \tan^{-1} \left(\frac{b^*}{a^*} \right) \quad (3.2)$$



รูปที่ 3.5 แสดงระบบสี L^*C^*h
(x-rite. 2007)

ซึ่งจากการเปรียบเทียบทั้ง 3 วิธีสามารถแสดงข้อดีและข้อจำกัดได้ดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 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) - ปรับตัวได้กับหลายสถานะแสง (Mendoza et al. 2007) - นิยมใช้ในงานวิจัยด้านอาหาร (Yam and Papadakis. 2004)	- ไม่สามารถเข้าใจได้ในทันที คือต้องทำการศึกษาก่อนแปลความหมายค่า L^*a^* และ b^* ก่อน (Mendoza et al. 2007)

ในขั้นตอนการประมวลผลภาพสีนั้นสามารถเปลี่ยนแปลงภาพสีต้นฉบับที่อยู่ในระบบ RGB เป็นระบบอื่นๆได้ เนื่องจากแบบจำลองสีแต่ละระบบนั้นมีความเหมาะสมกับการใช้งานในแต่ละประเภทที่แตกต่างกัน

สำหรับในงานวิจัยนี้เลือกใช้ระบบ $L^*a^*b^*$ และ L^*C^*h เนื่องจากเป็นระบบที่ไม่ขึ้นกับอุปกรณ์ สามารถแบ่งแยกสีได้มากกว่าระบบ RGB และสามารถบ่งบอกความเข้มและความสว่างของวัตถุได้ ซึ่งจะสามารถอธิบายสีของไส้กรอกที่เป็นตัวอย่างในงานวิจัยนี้ได้ในอนาคตที่ครอบคลุมกว่าระบบ RGB ซึ่งบ่งบอกเฉพาะสีแดง สีเขียว และสีน้ำเงิน จากการศึกษางานวิจัยที่ทำการวิเคราะห์สีของไส้กรอกใช้ระบบ $L^*a^*b^*$ (วัชร คุชแก้ว. 2548 ; Kuo and Chu. 2003 ; Zarringhalami et al. 2009) และ Girolami et al. (2014) ใช้ค่า L^* , a^* , b^* , hue และ chroma ในการวิเคราะห์ภาพลักษณะปรากฏของไส้กรอก Lucanian dry โดยใช้วิเคราะห์สีและปริมาณไขมันที่มองเห็น

3.3. คุณลักษณะที่ต้องการของไส้กรอกหมู

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

3.3.1. ลักษณะทั่วไป

ในภาชนะบรรจุเดียวกันต้องมีรูปร่างเดียวกันและมีขนาดใกล้เคียงกันมีผิวเรียบไม่ฉีก

3.3.2. สี

ต้องมีสีที่ดีตามธรรมชาติของส่วนประกอบที่ใช้สม่ำเสมอทั้งหมดทั้งชิ้นไม่มีสีผิดปกติ เช่น สีเขียวคล้ำ สีดำ

3.3.3. กลิ่นรส

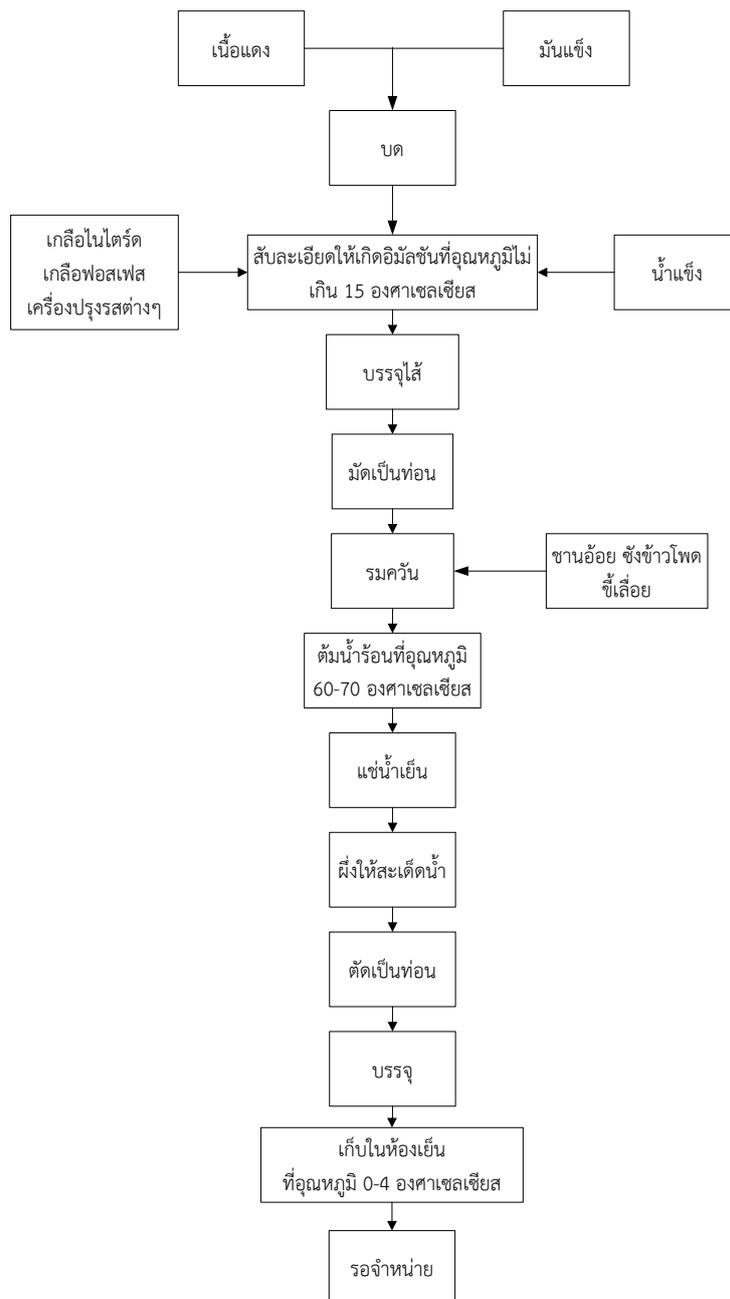
ต้องมีกลิ่นรสที่ดีตามธรรมชาติของส่วนประกอบที่ใช้ปราศจากกลิ่นรสอื่นที่ไม่พึงประสงค์ เช่น กลิ่นคาว กลิ่นเหม็นบูดรสเปรี้ยว

3.3.4. ลักษณะเนื้อ

ต้องเป็นเนื้อเดียวกันไม่มีโพรงอากาศมีความนุ่มยืดหยุ่นคงรูปและไม่มีการแยกตัวของหยดน้ำหรือน้ำมันออกจากเนื้อไส้กรอกหมู

3.4. ขั้นตอนการผลิตไส้กรอกหมู

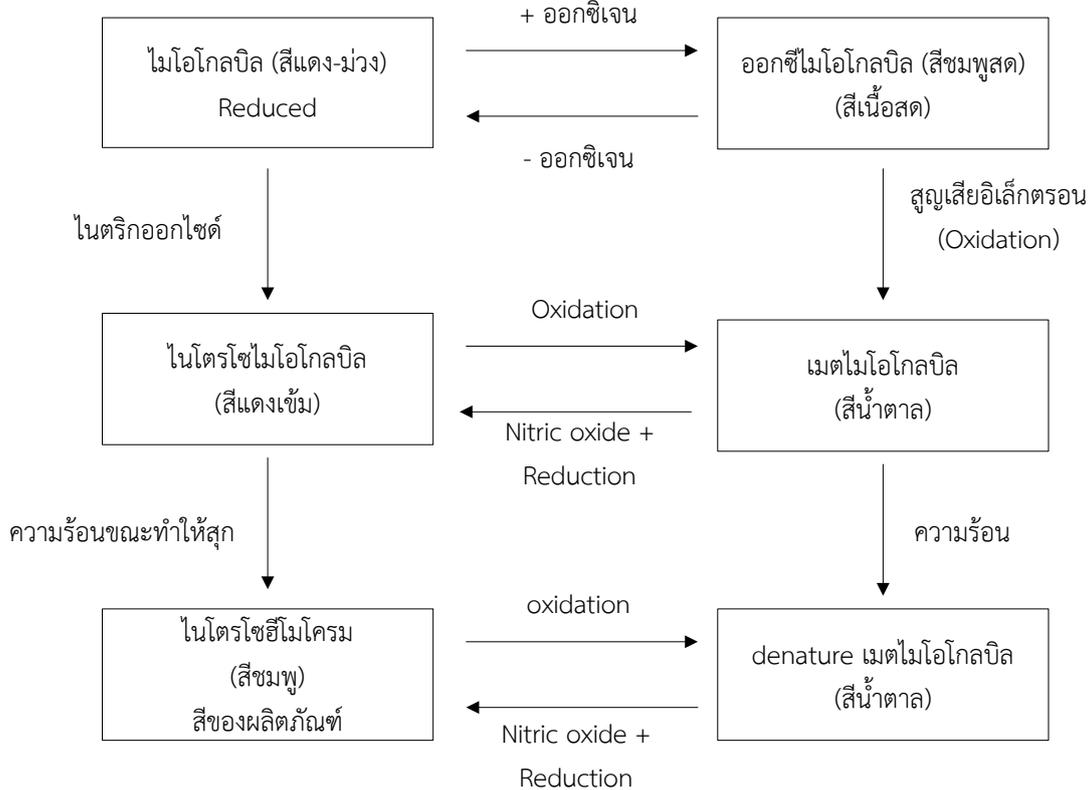
การทำไส้กรอกโดยเฉพาะอย่างยิ่งไส้กรอกรมควันและไส้กรอกสุกทั่วไป ส่วนผสมของเนื้อต้องผ่านการสับละเอียดจนอยู่ในสภาพที่เป็นอิมัลชัน (Emulsion) มีขั้นตอนการผลิตไส้กรอกแบบอิมัลชันแสดงได้ดังรูปที่ 3.6 (เยาวลักษณ์ สุรพันธ์พิศิษฐ์. 2536)



รูปที่ 3.6 แผนภาพแสดงขั้นตอนการผลิตไส้กรอกแบบอิมัลชัน
(เยาวลักษณ์ สุรพันธ์พิศิษฐ์. 2536)

3.4.1. 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 3.7 ปฏิกิริยาเคมีของการเกิดสีในเนื้อสดและผลิตภัณฑ์
(ชัยณรงค์ คันธพนิต. 2529)

ปฏิกิริยาทางเคมีของสารสีดังแสดงในรูปที่ 3.7 อธิบายได้ดังที่ชัยณรงค์ คันธพนิต ได้กล่าวว่าปฏิกิริยาทางเคมีของสารสี เป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้สีของเนื้อและผลิตภัณฑ์เปลี่ยนแปลง โดยเฉพาะสภาวะทางเคมีของธาตุเหล็กในโมเลกุลของสารสีไมโอโกลบิน หลังจากที่ถูกตัดขึ้นเนื้อจะทำให้เนื้อถูกอากาศ ไมโอโกลบินในเนื้อจะทำปฏิกิริยากับออกซิเจนในอากาศเป็นสีแดงสดของสารที่เรียกว่า ออกซีไมโอโกลบิน ซึ่งจะเกิดขึ้นภายใน 30-45 นาทีหลังจากเนื้อถูกอากาศ ในปฏิกิริยานี้ไมโอโกลบิลยังคงอยู่และจะไม่ออกซิไดซ์ไปเป็นอย่างอื่นได้ง่ายแม้แต่จะเปลี่ยนเป็นเมตไมโอโกลบิน (Metmyoglobin) แต่ในอีกกรณีหนึ่งที่เมื่อตัดเนื้อแล้วและนำไปเก็บไว้ยังที่อับอากาศ หรือเกือบจะเป็นสุญญากาศ ในบางกรณีอาจห่อเนื้อแน่นเกินไปจนมีออกซิเจนน้อย อนุภาคเหล็กของสารสีนั้นจะเกิดการออกซิไดซ์ (Oxidized) ไปเป็นสารที่เรียกว่า เมตไมโอโกลบิน ซึ่งทำให้เนื้อเป็นสีน้ำตาลคล้ำ การเกิดขึ้นของเมตไมโอโกลบินเป็นปัญหาต่อผู้บริโภคมากเพราะผู้บริโภคมักคิดว่าเป็นเนื้อที่เก็บไว้นานหรือผิดปกติ จึงไม่ซื้อไปรับประทาน ซึ่งสีน้ำตาลนี้อาจเป็นเช่นนั้นตลอดไป ในอีกกรณีหนึ่งถ้าทิ้งเนื้อไว้บนโต๊ะผิวเรียบไว้เป็นเวลานานๆ จนทำให้บรรยากาศใต้ชั้นเนื้อเป็นสุญญากาศ ไมโอโกลบิลจึงถูกรีดิวซ์ได้ อาจแก้ไขโดยการนำเนื้อออกมาให้ถูกอากาศเพื่อจะได้เกิดออกซิเจนเนตไปเป็นออกซีไมโอโกลบินได้อีกต่อไป

การแปรรูปเนื้อสัตว์ประเภทไส้กรอกได้จากการหมักเกลือซึ่งมีส่วนประกอบหลักอยู่ 2 ชนิด คือ เกลือแกงและไนไตรท์ การหมักด้วยเกลือนั้นเพื่อยืดระยะเวลาการเก็บรักษาไส้กรอกให้นานขึ้นเกลือจะช่วยสกัดโปรตีนออกจากกล้ามเนื้อ ส่วนไนไตรท์จะใช้ได้ทั้งในรูปของเกลือโซเดียมหรือโพแทสเซียมทำหน้าที่สร้างสีชมพูในผลิตภัณฑ์ ซึ่งเรียกว่า ไนโตรโซฮีโมโครม เป็นสารที่มีความคงทนเกิดขึ้นหลังจากกระบวนการให้ความร้อน ดังสมการที่ 3.3



ไนตริกออกไซด์โมโนโกลบิลมีสีแดงสดและเป็นสารสีในเนื้อที่เกิดขึ้นหลังจากผ่านการหมักก่อนที่จะถูกความร้อนเพื่อทำให้สุก เมื่อถูกความร้อนสารนี้จะกลายเป็นสารสีที่คงทนซึ่งมีชื่อเรียกว่า ไนโตรโซฮีโมโครม หรือไนโตรซฮีโมโครม คือสารสีชมพูของผลิตภัณฑ์เนื้อสัตว์นั่นเอง

ไนโตรโซฮีโมโครมเป็นสารสีที่คงทนต่อความร้อนการใช้ความร้อนเพื่อทำให้สุกจึงไม่มีผลต่อการสูญเสียสีของไส้กรอก แต่ถ้าไนโตรโซฮีโมโครมถูกแสง 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

3.5. การวิเคราะห์ระบบการวัด

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

3.5.1. พื้นฐานเกี่ยวกับความสามารถของระบบการวัด

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

ความสามารถของระบบการวัด อาจประกอบด้วยความสามารถในการวัดซ้ำและการวัดเหมือนของเครื่องมือวัด ดังนั้นสามารถอธิบายความหมายของระบบการวัดอย่างง่าย ๆ ดังสมการที่ 3.4

$$\sigma_{Total}^2 = \sigma_P^2 + \sigma_{Gauge}^2 \quad (3.4)$$

σ_{Total}^2 คือ ความแปรปรวนของข้อมูลทั้งหมด
 σ_P^2 คือ ความแปรปรวนเนื่องจากชิ้นงาน
 σ_{Gauge}^2 คือ ความแปรปรวนเนื่องจากเครื่องมือวัด

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

ความสามารถในการวัดเหมือน (Reproducibility) คือ ความผันแปรที่แสดงถึงค่าเฉลี่ยของค่าวัดจากการใช้อุปกรณ์วัดเดียวกันในการวัดชิ้นงานเดียวกันด้วยเงื่อนไขที่แตกต่างกัน ซึ่งในอุตสาหกรรมทั่วไปมักจะหมายถึงความแตกต่างระหว่างพนักงานวัด จึงอาจจะเรียกว่าความผันแปรระหว่างพนักงานวัด (Appraiser variation : AV) อย่างไรก็ตามผู้วิเคราะห์ไม่ควรจะสรุปในทันที เพราะในบางครั้งความผันแปรอาจจะมีสาเหตุหลักจากปัจจัยอื่นที่ไม่ใช่พนักงานวัดก็ได้เช่น ปัจจัยระหว่างกะงาน เป็นต้น (กิตติศักดิ์ พลอยพานิชเจริญ. 2553)

3.5.2. การวางแผนศึกษาความสามารถในการวัดซ้ำและการวัดเหมือนของเครื่องวัด

การศึกษาความผันแปรของระบบการวัดในรูปความสามารถในการวัดซ้ำและการวัดเหมือนของเครื่องมือวัดนั้นมีความจำเป็นอย่างยิ่งต้องเริ่มต้นจากขั้นตอนการวางแผนการศึกษา โดยมีประเด็นพิจารณา ดังนี้ (กิตติศักดิ์ พลอยพานิชเจริญ. 2553)

3.5.2.1. วิธีการและเวลาที่จะมีการสอบเทียบเครื่องมือวัด

การสอบเทียบเครื่องมือวัดมีความสำคัญมากต่อการพิจารณาถึงความคลาดเคลื่อนด้านความแม่นยำในระบบการวัด โดยปกติแล้วจะต้องมีการสอบเทียบก่อนการศึกษาความสามารถในการวัดซ้ำและความสามารถในการวัดเหมือนจะเริ่มต้นขึ้นและไม่ควรมีการสอบเทียบใหม่ถ้าการศึกษายังไม่สิ้นสุดลง เพราะถ้ามีการสอบเทียบใหม่ในระหว่างการศึกษาก็จะทำให้เกิดความผันแปร จึงต้องพยายามลดค่าความผันแปรโดยพยายามให้พนักงานวัดทุกคนมีความเข้าใจในวิธีการสอบเทียบและดำเนินการอย่างสม่ำเสมอ

3.5.2.2. จำนวนพนักงานที่ใช้ในการศึกษาระบบ GR&R

การกำหนดจำนวนพนักงานวัดที่เหมาะสมมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องพิจารณาก่อนว่าในระบบการผลิตมีพนักงานวัดคือ ผู้ใช้เครื่องมือวัดในการกำหนดค่าตัวเลขกับชิ้นงานเพื่อการตัดสินใจจำนวนเท่าใด ถ้าเครื่องมือวัดดังกล่าวไม่ใช่พนักงานในการดำเนินการวัดเลย (เครื่องมือวัดอัตโนมัติ) หรือมีการใช้พนักงานวัดเพียงคนเดียวแสดงว่าค่าความผันแปรในระบบการวัดไม่ได้มาจากสาเหตุด้านพนักงานวัด และในกรณีที่ระบบการวัดมีพนักงานวัดจำนวนหลายคน ให้ทำการสุ่มพนักงานวัดมาทำการศึกษาน้อย 2 คน โดยจะต้องเป็นพนักงานที่ผ่านการฝึกอบรมมาอย่างดีแล้ว และปฏิบัติงานเกี่ยวกับงานวัดในอุปกรณ์วัดที่ทำการศึกษาเป็นประจำ

3.5.2.3. จำนวนชิ้นงาน (สิ่งตัวอย่าง)

จำนวนสิ่งตัวอย่างที่ใช้ในการศึกษานั้นโดยปกติจะแนะนำให้ใช้ 10 ตัวอย่างถ้าหากไม่สามารถดำเนินการได้จะต้องพยายามให้ผลคูณของจำนวนของสิ่งตัวอย่างกับจำนวนของพนักงานวัดมีค่ามากกว่า 15 และถ้าไม่สามารถดำเนินการได้ให้เพิ่มจำนวนการทำซ้ำของการวัดในแต่ละสิ่งตัวอย่างและสิ่งตัวอย่างที่จะใช้ในการวัดนี้ต้องเป็นสิ่งตัวอย่างที่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งถ้าใช้สิ่งตัวอย่างที่มีความแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญแล้วจะมีความหมายเท่ากับการใช้สิ่งตัวอย่างเดี่ยวด้วยจำนวนวัดซ้ำมากๆ และในกรณีที่จะทำให้ระบบการวัดมีคุณภาพด้านความไวเพียงพอต่อการตรวจจับความผันแปรของชิ้นงานในกระบวนการแล้วจะต้องทำให้ข้อมูลมีความแตกต่างกันไม่ต่ำกว่า 5 ประเภท ในกรณีที่มีการตรวจสอบแบบทำลาย จะต้องกำหนดให้ “ล็อต (lot)” หมายถึงสิ่งตัวอย่างสำหรับการศึกษา GR&R

3.5.2.4. จำนวนครั้งในการวัดซ้ำสำหรับสิ่งตัวอย่างแต่ละชิ้น

โดยปกติแล้วแนะนำให้ทำการวัดซ้ำที่แต่ละสิ่งตัวอย่างด้วยจำนวนซ้ำเท่าๆกันเรียกการทดลองแบบนี้ว่า Balance design ซึ่งโดยทั่วไปจะกำหนดให้มีการวัดซ้ำสำหรับพนักงานวัดแต่ละคน 2-3 ครั้งต่อชิ้นงานแต่ละชิ้น

3.5.2.5. วิธีลดความผันแปรในสิ่งตัวอย่างของการศึกษา GR&R

ในการศึกษา GR&R บางกรณีนั้นจะไม่สามารถกำจัดความผันแปรภายในสิ่งตัวอย่างออกจากการวัดซ้ำ เช่น ในกรณีการตรวจสอบแบบทำลายที่มีความผันแปรภายในล็อตรวมอยู่กับการวัดซ้ำ จึงมีความจำเป็นต้องพยายามเลือกงานในล็อตให้มีความใกล้เคียงกันให้มากที่สุด

3.5.2.6. วิธีการประเมินผลความสามารถในการวัดซ้ำและวัดเหมือน

เมื่อการทดลองสิ้นสุดลง ต้องมีการประเมินผลถึงคุณภาพของข้อมูลก่อน เช่น การประเมินผลความสามารถในการแยกความแตกต่างของเครื่องมือวัด ความคงรูป และความต้องการของระบบการวัด จากนั้นจึงทำการประเมินผลความสามารถในการวัดซ้ำและวัดเหมือน ซึ่งมีวิธีการประเมินผล 3 วิธีคือ

1. วิธีอาศัยค่าพิสัย (Range method) เหมาะกับกรณีการทดลองในช่วงสั้นๆ และไม่มี การวัดซ้ำ วิธีการนี้มีข้อดีคือประเมินผลได้ง่าย แต่มีข้อเสียที่สำคัญคือ ไม่สามารถแยกความสามารถในการวัดซ้ำ และวัดเหมือนออกจากกันได้
2. วิธีอาศัยค่าเฉลี่ยและพิสัย (Average and range method) เหมาะกับการทดลองซ้ำใน แต่ละสิ่งตัวอย่างของพนักงานวัดแต่ละคน ซึ่งวิธีการนี้สามารถแยกการวัดซ้ำออกจาก การวัดเหมือนได้ แต่ไม่สามารถแยกความผันแปรจากสาเหตุร่วมระหว่างชิ้นงานและพนักงานวัดออกจากค่าการวัดซ้ำได้
3. วิธีอาศัยการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) เหมาะกับการวิเคราะห์ผลการศึกษาที่ ได้จากการออกแบบการทดลองเพื่อพิจารณาว่าพนักงานและชิ้นงาน เป็นสาเหตุของความผันแปรอย่างมี นัยสำคัญหรือไม่ และวิธีการนี้จะสามารถแยกความผันแปรจากสาเหตุร่วมระหว่าง ชิ้นงานและพนักงานวัดออกจากค่าการวัดซ้ำได้ วิธีการนี้มีข้อเสียตรงที่มีความยุ่งยากในการทำงานแนะนำ ให้ใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยในการคำนวณ (กิตติศักดิ์ พลอยพานิชเจริญ. 2553)

3.5.3. 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 3.5

$$y_{ijkl} = \mu + \tau_i + \beta_j + \gamma_k + (\tau\beta)_{ij} + (\tau\gamma)_{ik} + (\beta\gamma)_{jk} + (\tau\beta\gamma)_{ijk} + \epsilon_{ijkl} \quad (3.5)$$

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

3.5.4. การวิเคราะห์ผลการศึกษาความสามารถในการวัดซ้ำและการวัดเหมือนของเครื่องมือวัด

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

3.6. การควบคุมกระบวนการเชิงสถิติในอุตสาหกรรมอาหาร

วิธีการควบคุมกระบวนการเชิงสถิติได้พัฒนาในปี 1920s Dr.Walter A. Shewhart แห่งบริษัท Bell Telephone Laboratories ได้เสนอวิธีการควบคุมกระบวนการเชิงสถิติในการควบคุมกระบวนการ หลังจากนั้นในปี 1930s ได้มีการนำแผนภูมิควบคุมมาประยุกต์ใช้ วิธีการควบคุมกระบวนการเชิงสถิติถูกนำมาใช้อย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรม โดยในปี 1980 ได้มีงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิธีการควบคุมกระบวนการเชิงสถิติเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ในการควบคุมคุณภาพของกระบวนการ เนื่องจากผลกระทบของการแข่งขันของตลาดโลก (Woodall and Montgomery, 1999) แต่อย่างไรก็ตาม การใช้วิธีการควบคุมกระบวนการเชิงสถิติในอุตสาหกรรมอาหารยังไม่ประสบความสำเร็จมากนัก ซึ่งวิธีการควบคุมกระบวนการเชิงสถิติมีหลายวิธีการ แต่

ในอุตสาหกรรมอาหารการใช้แผนภูมิควบคุมเป็นที่นิยมมากที่สุด โดยใช้ในการควบคุมกระบวนการ การวิเคราะห์แนวโน้มและใช้ในการเตือนสถานะของกระบวนการ (Srikaeo et al., 2005)

ตัวอย่างในการประยุกต์ใช้วิธีการควบคุมกระบวนการเชิงสถิติ เช่น Hays et al. (1997) วิธีการควบคุมกระบวนการเชิงสถิติในการวิเคราะห์อันตรายและจุดวิกฤติที่ต้องการควบคุมโดยใช้แผนภูมิควบคุมแบบ CUSUM Srikaeo and Hourigan (2002) ใช้ในการวิเคราะห์อันตรายและจุดวิกฤติที่ต้องการควบคุมในขั้นตอนการล้างเปลือกไข่ โดยใช้แผนภูมิควบคุมแบบ \bar{x} , Grigg et al. (1998) ได้ประยุกต์ใช้วิธีการควบคุมกระบวนการเชิงสถิติในบรรจุภัณฑ์ของปลาโดยใช้แผนภูมิควบคุมแบบ \bar{x} -R และ Srikaeo et al. (2005) ได้ประยุกต์ใช้วิธีการควบคุมกระบวนการเชิงสถิติกับคุณลักษณะของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการทำปัสกิตจากแป้งสาลี ซึ่งเทคนิคที่นำมาใช้ได้แก่ ฮิสโตแกรม การวิเคราะห์ค่าเฉลี่ย แผนภูมิควบคุม ศึกษาความสามารถของกระบวนการ Lim et al. (2014) ได้รวบรวมการใช้วิธีการควบคุมกระบวนการทางสถิติในอุตสาหกรรมอาหาร ซึ่งวิธีที่ใช้ในงานวิจัยดังกล่าวยังคงเป็นการใช้งานในระดับพื้นฐานและมุ่งเน้นเฉพาะการวัดคุณลักษณะตัวแปรเดียว (univariate case) หรือไม่ได้ให้ความสำคัญความเป็นอิสระของตัวแปร

ซึ่งจากการรวบรวมงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ผู้วิจัยพบว่าส่วนใหญ่ยังไม่มีการนำข้อมูลด้านการประมวผลภาพมาใช้ร่วมกับวิธีการทางสถิติที่เหมาะสม เช่น การพิจารณาข้อมูลเพียงตัวแปรเดียว (univariate) หรือในกรณีที่หลากหลายตัวแปร (multivariate) ต้องมีการพิจารณาถึงความสัมพันธ์ของตัวแปรแต่ละตัว (autocorrelation) และจะพิจารณาเสมือนว่าข้อมูลเพียงตัวแปรเดียวภายใต้เงื่อนไขที่อิสระต่อกัน (independency) การไม่ให้ความสำคัญกับลักษณะข้อมูลอาจส่งผลให้การควบคุมกระบวนการหรือผลิตภัณฑ์ผิดพลาดได้

พิรญาณ์ (2555) นำเสนอการใช้แผนภูมิควบคุมโฮเทลลิงที่สแควร์ของค่า $L^* a^* b^*$ แนะนำให้ใช้แผนภูมิควบคุมสำหรับตัวอย่างเชิงเดียวในการวิเคราะห์ค่า $L^* a^* b^*$ ในการตรวจสอบความผิดปกติของไส้กรอก ซึ่งแผนภูมิควบคุมดังกล่าวนั้นสามารถตรวจจับความผิดปกติระหว่างแพ็คได้ แต่ยังไม่เพียงพอสำหรับการตรวจจับความผิดปกติภายในแพ็ค

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเพิ่มการวิเคราะห์ในด้านความผันแปรของไส้กรอกภายในแพ็ค จึงเพิ่มเติมค่าลักษณะของไส้ที่ใช้ในการวิเคราะห์ทั้งหมด 10 ค่า เนื่องจากในงานวิจัยนี้ต้องทำการควบคุมหลายตัวแปรพร้อมๆ กัน คือ ค่าเฉลี่ยและค่าส่วนเบี่ยงมาตรฐานของค่า $L^* a^* b^* C^*$ และ h ดังนั้นจึงต้องใช้แผนภูมิควบคุมตัวแปรพหุ โดยในงานวิจัยนี้จะเลือกใช้แผนภูมิควบคุมโฮเทลลิงที่สแควร์ (Hotelling T^2 control chart) ซึ่งเป็นแผนภูมิควบคุมหลายลักษณะคุณภาพหลายตัวแปรพร้อมๆ กันโดยมีข้อสันนิษฐานว่าตัวแปรต้องมีความสัมพันธ์กันไม่มากก็น้อยโดยดูที่เมตริกความแปรปรวนร่วม (Covariance matrix) และค่าสังเกตแบบ Multivariate ถูกแสดงในรูปของเวกเตอร์ที่มีมิติ p ตรงกับจำนวนตัวแปร p ที่ทำการวัดในแต่ละค่าสังเกตและข้อมูลที่ได้ต้องเป็นการแจกแจงปกติตัวแปรพหุคูณ (Multivariate normal data) (Fuchs and Kenett, 1998)

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

กำหนดให้ขนาดตัวอย่าง m แต่ละตัวอย่างมีจำนวนตัวอย่างเท่ากับ 1 และจำนวนคุณลักษณะที่ต้องการควบคุมเท่ากับ p

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

\mathbf{S} คือ เมตริกความแปรปรวนร่วม (Covariance matrix)

ดังนั้นตัวสถิติโฮเทลลิงที่สแควร์ (Hotelling T^2) แสดงดังสมการที่ 3.6

$$T^2 = (\mathbf{x} - \bar{\mathbf{x}})' \mathbf{S}^{-1} (\mathbf{x} - \bar{\mathbf{x}}) \quad (3.6)$$

ขีดจำกัดการควบคุมสำหรับตัวสถิติเฟส II แสดงดังสมการที่ 3.7

$$\begin{aligned} \text{UCL} &= \frac{p(m+1)(m-1)}{m^2 - mp} F_{\alpha, p, m-p} \\ \text{LCL} &= 0 \end{aligned} \quad (3.7)$$

ในกรณีที่ตัวอย่างเริ่มต้นมีจำนวนมาก $m > 100$ ใช้การประมาณค่าขีดจำกัดควบคุมดังสมการที่ 3.8 ถ้าทราบเมตริกความแปรปรวนร่วมจะใช้ขีดจำกัดไคสแควร์ดังสมการที่ 3.9 แต่โดยทั่วไปจะใช้การประมาณค่า

$$\text{UCL} = \frac{p(m-1)}{m-p} F_{\alpha, p, m-p} \quad (3.8)$$

$$\text{UCL} = \chi_{\alpha, p}^2 \quad (3.9)$$

Tracy Young and Mason (1992) ใช้การแจกแจงแบบเบต้า (Beta distribution) ในการสร้างขีดจำกัดการควบคุมสำหรับตัวสถิติเฟส I แสดงดังสมการที่ 3.10 ซึ่ง $\beta_{\alpha, p/2, (m-p-1)/2}$ คือ $1 - \alpha$ เปอร์เซ็นต์ของการแจกแจงเบต้าที่มีพารามิเตอร์ $p/2$ และ $(m-p-1)/2$ ซึ่งการประมาณขอบเขตการควบคุมของเฟส I โดยการใช้การแจกแจง F และการแจกแจงแบบไคสแควร์จะไม่มีความแม่นยำ

$$\begin{aligned} \text{UCL} &= \frac{(m-1)^2}{m} \beta_{\alpha, p/2, (m-p-1)/2} \\ \text{LCL} &= 0 \end{aligned} \quad (3.10)$$

สำหรับกรณีค่าสังเกตเชิงเดี่ยวการประมาณค่าเมตริกความแปรปรวนร่วม Σ จากการศึกษาของ Sullivan and Woodall (1995) ได้อธิบายและวิเคราะห์ปัญหาเปรียบเทียบการประมาณค่าหลายรูปแบบซึ่งหนึ่งในวิธีเหล่านั้นคือการประมาณค่าแบบปกติที่ได้จากการรวมกันของทุกค่าสังเกต m อย่างง่าย ซึ่งแสดงดังสมการที่ 3.11

$$\mathbf{S}_1 = \frac{1}{m-1} \sum_{i=1}^m (\mathbf{x}_i - \bar{\mathbf{x}})(\mathbf{x}_i - \bar{\mathbf{x}})' \quad (3.11)$$

สำหรับวิธีการประมาณค่าเมตริกความแปรปรวนร่วมแบบที่สองเสนอโดย Holmes and Mergen (1993) โดยใช้ความแตกต่างระหว่างค่าสังเกตดังสมการที่ 3.12

$$\mathbf{v}_i = \mathbf{x}_{i+1} - \mathbf{x}_i \quad i = 1, 2, \dots, m - 1 \quad (3.12)$$

จัดเรียงเวกเตอร์ในรูปเมตริก \mathbf{V} ดังนี้

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

ประมาณค่า Σ ดังสมการที่ 3.13

$$\mathbf{S}_2 = \frac{1}{2(m-1)} \mathbf{V}'\mathbf{V} \quad (3.13)$$

3.7. การศึกษาลักษณะข้อมูล

การศึกษาลักษณะของข้อมูลเพื่อให้สามารถเลือกใช้แผนภูมิควบคุมได้อย่างเหมาะสม ดังนี้

3.7.1. การตรวจสอบการแจกแจงแบบปกติ (Normal distribution)

การตรวจสอบข้อมูลว่ามีการแจกแจงแบบปกติหรือไม่ ทำได้โดยการใช้ Normal probability plot ซึ่งเป็นวิธีการที่ทำได้ง่ายและรวดเร็ว โดยขั้นตอนการทำคือ จัดเรียงข้อมูลจากน้อยไปหามาก โดยค่าสังเกตคือ x_1, x_2, \dots, x_n นำมาจัดเรียงได้ดังนี้ $x_{(1)}, x_{(2)}, \dots, x_{(n)}$ โดย j คือลำดับของค่าสังเกตนำไปคำนวณดังสมการที่ 3.14 จากนั้นนำไปพล็อตกับค่าสังเกตแต่ละลำดับ (Montgomery. 2009)

$$(j - 0.5)/n \text{ หรือ } 100(j - 0.5)/n \quad (3.14)$$

3.7.2. การตรวจสอบสหสัมพันธ์ (Correlation)

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

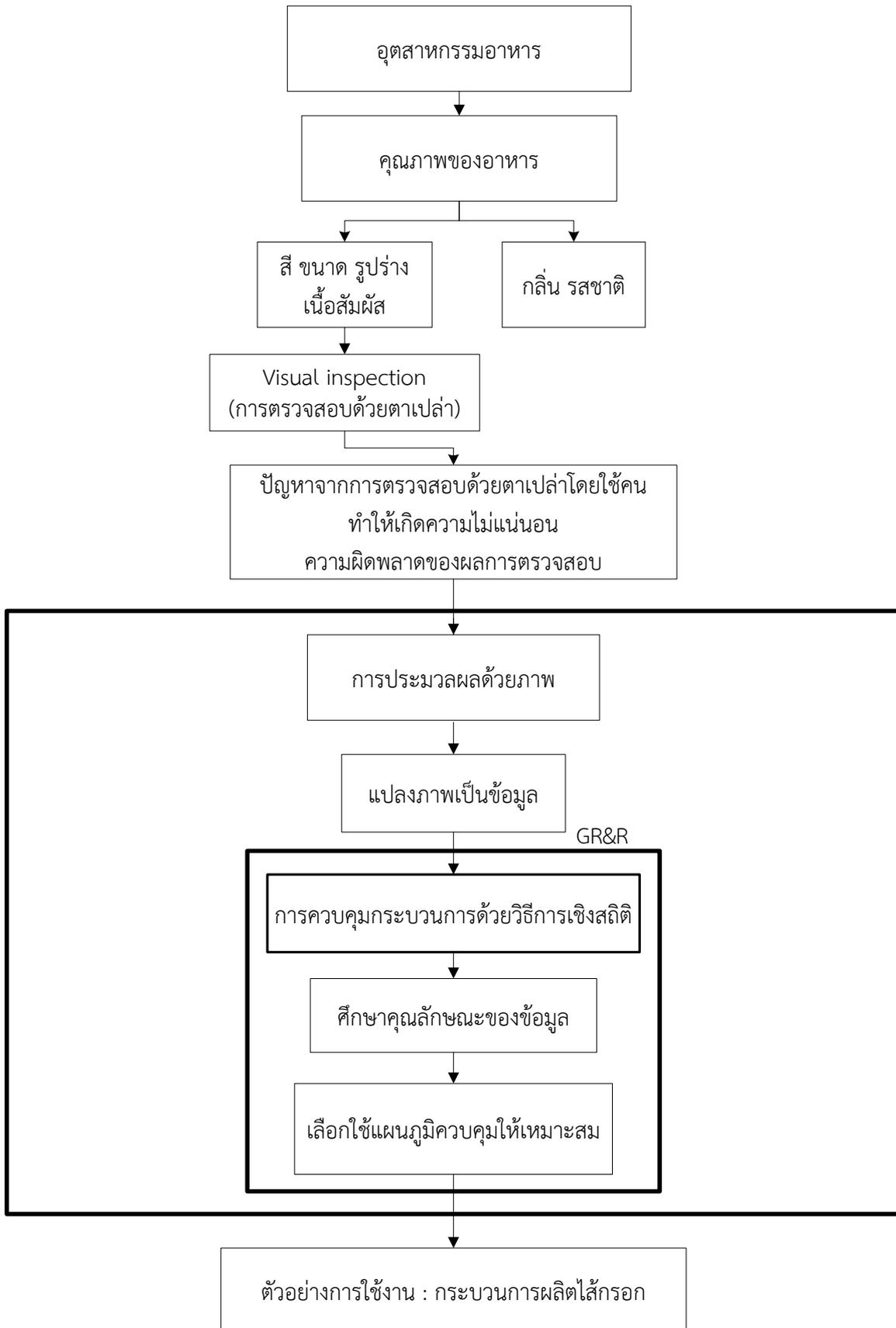
เนื่องจากใช้ข้อมูลที่คำนวณจากตัวอย่างแทนข้อมูลจากประชากร จึงประมาณค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของประชากร (ρ) ด้วยค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของตัวอย่าง (r) โดยที่ $-1 \leq r \leq 1$ ความหมายของค่า r แสดงดังนี้ (Montgomery and Runger. 2011)

1. r เป็นบวก หมายถึง X และ Y มีความสัมพันธ์ในทิศทางเดียวกัน
2. r เป็นลบ หมายถึง X และ Y มีความสัมพันธ์ในทิศทางตรงกันข้าม
3. r มีค่าเข้าใกล้ 1 หมายถึง X และ Y มีความสัมพันธ์ในทิศทางเดียวกันและมีความสัมพันธ์กันมาก
4. r มีค่าเข้าใกล้ -1 หมายถึง X และ Y มีความสัมพันธ์ในทิศทางตรงกันข้ามและมีความสัมพันธ์กันมาก
5. r มีค่าเข้าใกล้ 0 หมายถึง X และ Y มีความสัมพันธ์กันน้อย
6. $r = 1$ หมายถึง X และ Y มีความสัมพันธ์กันอย่างสมบูรณ์ในทิศทางเดียวกัน

4. การออกแบบการวิจัย

กรอบงานวิจัยชิ้นนี้แสดงดังรูปที่ 4.1 ซึ่งเริ่มจากอุตสาหกรรมอาหารโดยพิจารณาจากคุณลักษณะคุณภาพของอาหารซึ่งมีหลายประการเช่น สี ขนาด รูปร่าง เนื้อสัมผัส กลิ่น และรสชาติ แต่ในงานวิจัยนี้จะให้ความสำคัญกับการตรวจสอบด้วยตาเปล่าซึ่งได้แก่ สี ซึ่งปัญหาที่พบของการตรวจสอบคุณลักษณะเหล่านี้ด้วยตาเปล่านั้นมีความผิดพลาดสูง

ดังนั้นจึงได้นำวิธีการประมวลผลภาพเข้ามาประยุกต์ โดยในขั้นตอนนี้จะประกอบด้วยขั้นตอนการได้มาของรูปภาพ การประมวลผลเบื้องต้น การวัดคุณลักษณะ หลังจากนั้นจึงนำรูปที่ได้มาทำให้เป็นข้อมูลเชิงตัวเลขหลังจากนั้นจึงศึกษาพฤติกรรมของข้อมูลในเชิงสถิติ และมีการเลือกใช้เครื่องมือทางสถิติให้เหมาะสม หลังจากนั้นจึงนำไปใช้งานจริงในการผลิตไส้กรอก



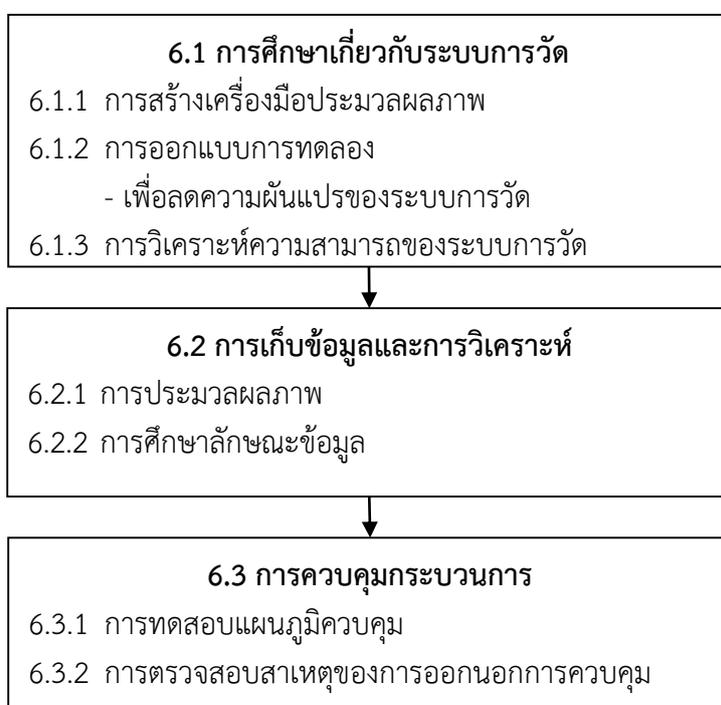
รูปที่ 4.1 กรอบการวิจัย

5. ขอบเขตของการวิจัย

ครอบคลุมถึงการศึกษาวิธีการประเมินผลสีของไส้กรอกโดยใช้วิธีการประเมินผลด้วยภาพและใช้แผนภูมิควบคุมในการควบคุมคุณภาพสีของไส้กรอกในขั้นตอนหลังจากการบรรจุถุงเพื่อตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงหรือความผันแปรของกระบวนการผลิต โดยตัวอย่างไส้กรอกที่ใช้ศึกษานำมาจากตามท้องตลาด

6. ระเบียบวิธีการวิจัย

ในงานวิจัยนี้วัตถุประสงค์คือเพื่อศึกษาวิธีการประเมินผลสีของไส้กรอกโดยใช้วิธีการประเมินผลด้วยภาพวิธีการควบคุมคุณภาพสีของไส้กรอกโดยใช้วิธีการควบคุมกระบวนการเชิงสถิติและบูรณาการทั้งสองวิธีดังกล่าวข้างต้น โดยแบ่งออกเป็นขั้นตอนหลัก 3 ขั้นตอน ได้แก่ การศึกษาเกี่ยวกับระบบการวัด การเก็บข้อมูลและการวิเคราะห์ และการควบคุมกระบวนการ แสดงแผนผังขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยดังรูปที่ 6.1



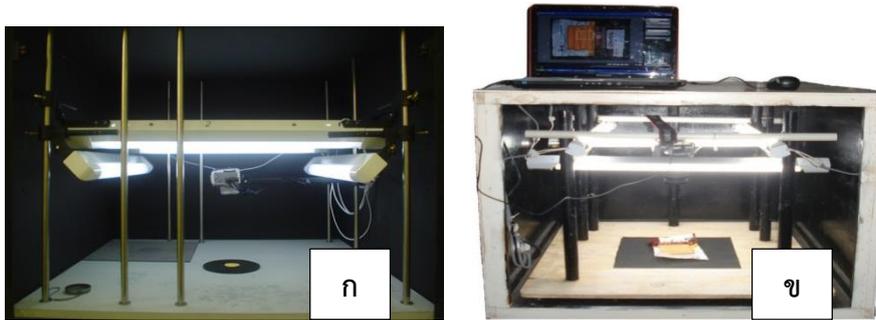
รูปที่ 6.1 แสดงแผนผังขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

6.1. การศึกษาเกี่ยวกับระบบการวัด

6.1.1. การสร้างเครื่องมือประเมินผลภาพ

6.1.1.1. หลักการออกแบบเครื่องมือประเมินผลภาพ

จากงานวิจัยของ Pedreschi et al. (2006) (รูปที่ 6.2ก) ได้สร้างเครื่องมือในการประเมินผลภาพเพื่อใช้วัดสีของมันฝรั่งทอดกรอบ ต่อมา พิรญาณ์ (2555) (รูปที่ 6.2ข) ได้ดัดแปลงและสร้างเครื่องมือในการประเมินผลภาพเพื่อใช้วัดสีของไส้กรอก ซึ่งจากผลการวิจัยพบว่าเครื่องมือในการประเมินผลภาพที่ พิรญาณ์ สร้างขึ้นสามารถแบ่งแยกสีของไส้กรอกได้เป็นอย่างดี



รูปที่ 6.2 ตัวอย่างเครื่องมือประมวลผลภาพของ ก) เครื่องมือประมวลผลภาพของ Pedreschi et al. (2006)
ข) เครื่องมือประมวลผลภาพของ พิริญญาณ์ (2555)

แต่ยังพบว่าเครื่องมือประมวลผลภาพของ พิริญญาณ์ นั้นเป็นเครื่องมือที่ใช้ได้ในห้องปฏิบัติการเท่านั้น การวิจัยครั้งนี้จึงได้นำเครื่องมือประมวลผลภาพนั้นมาพิจารณาเพื่อปรับปรุงให้มีความสมบูรณ์และเหมาะสมต่ออุตสาหกรรมอาหารมากยิ่งขึ้น ซึ่งได้มีแนวทางในการออกแบบมาจากความเหมาะสมกับงบประมาณที่มีอย่างจำกัด และคำแนะนำของ European Hygienic Engineering & Design Group : EHEDG (2004) ในเฉพาะประเด็นการเลือกใช้วัสดุเท่านั้น ดังนั้นจึงสามารถแบ่งหลักการในการปรับปรุงเครื่องมือประมวลผลภาพได้เป็น 2 ข้อ ดังนี้

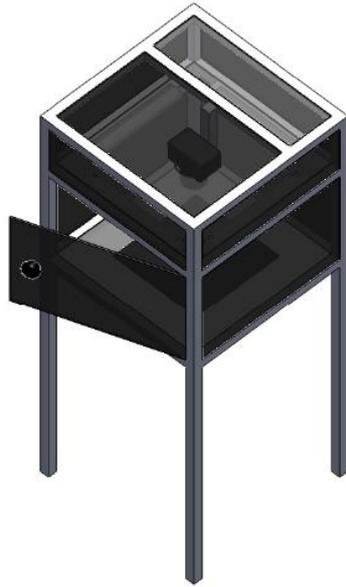
6.1.1.1 วัสดุที่ใช้ไม่เป็นอันตรายและเสี่ยงต่อการปนเปื้อนอาหาร

เมื่อพิจารณาเครื่องมือประมวลผลภาพของ พิริญญาณ์ จะพบว่าวัสดุที่ประกอบเป็นกล่องทำมาจากไม้ซึ่งอาจทำให้มีฝุ่น ส่วนวัสดุที่ประกอบเป็นโครงทำมาจากเหล็กซึ่งเกิดสนิมได้ง่าย ซึ่งทั้งหมดนี้อาจทำให้เกิดการปนเปื้อนกับอาหารที่นำมาทดสอบได้

6.1.1.2 วัสดุที่ใช้มีความคงทน แข็งแรง สะดวกต่อการใช้งานและมีรูปลักษณะสวยงาม

เมื่อพิจารณาเครื่องมือประมวลผลภาพของ พิริญญาณ์ จะพบว่าเครื่องมือมีขนาดใหญ่ น้ำหนักค่อนข้างมากเนื่องจากวัสดุที่ประกอบเป็นโครงทำมาจากเหล็กซึ่งทำให้ลำบากสำหรับการเคลื่อนย้าย ไม่มีฝาปิดที่มิดชิด และอุปกรณ์ที่ใช้ในการยึดจับกล่องถ่ายภาพยังไม่มั่นคงและแข็งแรงซึ่งอาจทำให้กล่องเกิดการตกหล่นหรือเคลื่อนที่ส่งผลต่อคุณภาพของภาพถ่ายที่จะนำมาวิเคราะห์ อีกทั้งไม่สามารถรองรับการตรวจสอบคุณภาพอาหารที่มีการเคลื่อนที่ในสายพานได้ในอนาคต

ดังนั้นจึงได้ออกแบบเครื่องมือประมวลผลภาพดังรูปที่ 6.3



รูปที่ 6.3 แบบของเครื่องมือประมวลผลภาพที่ใช้ในงานวิจัย

6.2. ออกแบบการทดลองเพื่อลดความผันแปรที่เกิดจากเครื่องมือประมวลผลภาพ

ขั้นตอนการออกแบบการทดลองจัดทำขึ้นเพื่อศึกษาปัจจัยในเครื่องมือประมวลผลภาพที่สร้างขึ้น โดยเป็นปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับสีของภาพถ่ายชิ้นงานที่ต้องการประมวลผล เพื่อลดความผันแปรที่อาจเกิดขึ้นจากเครื่องมือ

ตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองจะใช้กระดาษเหลืองขนาด 10×10 เซนติเมตร เนื่องจากสะดวกในการทดลองแสดงดังรูปที่ 6.4



รูปที่ 6.4 กระดาษสีที่ใช้ในขั้นตอนการออกแบบการทดลอง

6.2.1. ขั้นตอนการดำเนินงานการออกแบบการทดลอง

6.2.1.1. พิจารณาปัจจัยทั้งหมดในระบบประมวลผลภาพ

พิจารณาปัจจัยทั้งหมดในระบบประมวลผลภาพที่เกี่ยวข้องกับค่าสีของภาพถ่ายพิจารณาปัจจัยทั้งหมดที่เกี่ยวข้องกับค่าสีของภาพถ่ายในระบบ $L^*a^*b^*$ สำหรับค่า C^* และ h ไม่นำมาพิจารณาเนื่องจากทั้ง 2 ค่ามีความสัมพันธ์กับค่า $L^*a^*b^*$ เนื่องจากค่า C^* และ h ต้องทำการคำนวณจากค่า $L^*a^*b^*$ ของภาพถ่ายชิ้นงาน และกรองปัจจัยโดยใช้ความรู้จากประสบการณ์เพื่อลดความผันแปรของระบบในเบื้องต้น

6.2.1.2. ออกแบบการทดลองแบบเศษส่วนเชิงแฟคทอเรียล

ถ่ายภาพชิ้นงานโดยใช้เครื่องมือการประมวลด้วยภาพ จากนั้นวัดสีจากภาพถ่ายชิ้นงาน (รูปที่ 6.3) โดยใช้โปรแกรม MATLAB และออกแบบการทดลองแบบเศษส่วนเชิงแฟคทอเรียล (fractional factorial

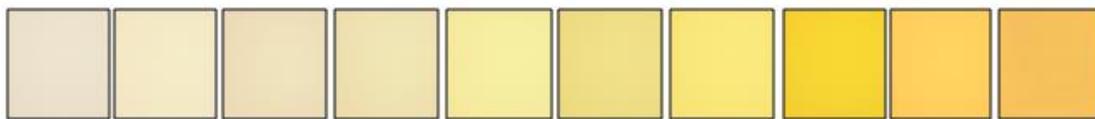
design) จากปัจจัยที่เหลือจากการกรองในขั้นต้น จากนั้นพิจารณาความมีนัยสำคัญของปัจจัยต่อค่าสีของภาพถ่ายในระบบ $L^*a^*b^*$ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% เพื่อกำหนดให้ปัจจัยที่มีผลต่อค่าสีของภาพถ่ายเป็นค่าคงที่ในการใช้เครื่องมือประมวลผลภาพเพื่อลดความผันแปรที่จะเกิดขึ้นในระบบ

6.3. การวิเคราะห์ความสามารถของระบบการวัด

ใช้หลักการความสามารถในการวัดซ้ำและการวัดเหมือนของเครื่องมือวัด (GR&R) ในการวิเคราะห์เครื่องมือวัด เพื่อสร้างความเชื่อมั่นในเครื่องมือวัดว่าค่าที่วัดได้จากเครื่องมือวัดมีความสามารถในการแบ่งแยกผลิตภัณฑ์และสามารถนำไปใช้ในการตรวจสอบคุณลักษณะด้วยวิธีการเชิงสถิติต่อไปได้

6.3.1. ตัวอย่างที่ใช้ในการทดลอง

ตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองจะใช้กระดาษโทนสีขาวยิ่งเหลืองขนาด 10×10 เซนติเมตร 10 ตัวอย่าง เนื่องจากสะดวกในการทดลองและได้สีที่ต่างกันเพื่อแทนความแตกต่างกันของสีไส้กรอก แสดงดังรูปที่ 6.5



รูปที่ 6.5 สีของกระดาษสีที่ใช้ในการทดลองจากระดับ 1 ถึง 10

6.3.2. ขั้นตอนการดำเนินงานการวิเคราะห์ความสามารถของระบบการวัด

6.3.2.1. พิจารณาปัจจัยในระบบการวัดของเครื่องมือประมวลผลภาพ

พิจารณาปัจจัยในระบบการวัดของเครื่องมือประมวลผลภาพ ซึ่งเป็นปัจจัยที่ไม่มีผลต่อค่าสีของภาพถ่ายในระบบ $L^*a^*b^*$ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% จากขั้นตอนการออกแบบการทดลองในหัวข้อ 6.2

6.3.2.2. ออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียลแบบเต็ม

วัดสีจากภาพถ่ายชิ้นงาน ซึ่งในส่วนนี้จะใช้กระดาษสี 10 ระดับ ดังรูปที่ 6.5 มาทดสอบ โดยออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียลแบบเต็ม (full factorial design) จากปัจจัยในระบบการวัดของเครื่องมือประมวลผลภาพ มาใช้ในการวิเคราะห์ความสามารถของระบบการวัดของเครื่องมือประมวลผลภาพ เพื่อทดสอบความสามารถของระบบการวัดว่าค่าที่วัดได้จากเครื่องมือมีความสามารถในการแบ่งแยกผลิตภัณฑ์

6.3.2.3. การวิเคราะห์ผลการทดลอง

นำข้อมูลที่ได้จากการทดลองวิเคราะห์ผลโดยใช้โปรแกรม MINITAB 17 โดยใช้ balanced ANOVA จากนั้นพิจารณาค่าความแปรปรวนที่ได้จากตาราง ANOVA

6.4. การประมวลผลภาพ

การควบคุมคุณภาพสีของไส้กรอก โดยทั่วไปวิธีการในการวัดสีจะใช้การเปลี่ยนภาพจากระบบ RGB เป็นระบบ $L^*a^*b^*$ จากนั้นคำนวณค่า hue และ chroma เนื่องจากสามารถบ่งบอกความเข้มและความสว่างของไส้กรอกเพื่อนำไประบุว่าไส้กรอกมีสีคล้ำหรือสีซีด ซึ่งจะทำให้สามารถอธิบายสีของไส้กรอกที่เป็นตัวอย่างในงานวิจัยนี้ในมุมมองที่ครอบคลุมกว่าระบบ RGB ซึ่งบ่งบอกเฉพาะสีแดง สีเขียว และสีน้ำเงิน มีขั้นตอนการประมวลผลภาพดังต่อไปนี้

6.4.1. การได้มาของรูปภาพ

ถ่ายภาพตัวอย่างไส้กรอก โดยใช้เครื่องมือประมวลผลภาพดังรูปที่ 6.6 โดยการถ่ายภาพจะเชื่อมต่อด้วย USB ผ่านคอมพิวเตอร์ โดยใช้โปรแกรม EOS Utility ลักษณะรูปภาพที่ได้แสดงดังรูปที่ 6.7



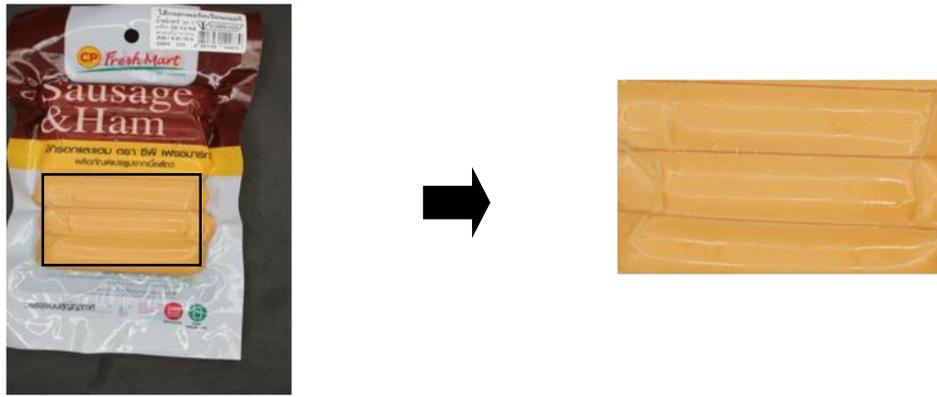
รูปที่ 6.6 เครื่องมือประมวลผลภาพ



รูปที่ 6.7 แสดงตัวอย่างรูปภาพที่ได้จากการถ่ายภาพ

6.4.2. การเตรียมภาพถ่าย

การเตรียมภาพถ่าย (Image pre-processing) ภาพถ่ายดิจิทัลต้องมีการปรับปรุงคุณภาพก่อนที่จะนำไปทำการวิเคราะห์ โดยการนำสิ่งรบกวนภาพออกและเพิ่มความเข้มของภาพ จากนั้นจะทำการตัดรูปภาพเฉพาะส่วนที่เป็นไส้กรอกดังรูปที่ 6.8 และทำการประมวลผลฟิสิกส์เบื้องต้นโดยการแปลงจากระบบ RGB เป็นระบบ $L^*a^*b^*$ โดยใช้โปรแกรม MATLAB (O'Sullivan et al. 2003 : Pedreschi et al. 2006)



รูปที่ 6.8 แสดงการตัดภาพเฉพาะส่วนที่เป็นไส้กรอก

6.4.3. การวัดคุณลักษณะ

การวัดคุณลักษณะ (Object measurement) โดยทำการวัดสีจากภาพถ่ายซึ่งสีที่ได้จากการแปลงจากระบบ RGB เป็นระบบ $L^*a^*b^*$ ในขั้นตอนการประมวลผลภาพเบื้องต้น ทำการคำนวณค่า $hue = \tan^{-1}\left(\frac{b^*}{a^*}\right)$ และ $chroma = (a^{*2} + b^{*2})^{\frac{1}{2}}$ จากนั้นคำนวณค่าเฉลี่ยและค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่า L^*, a^*, b^*, h, C^* ในทุกพิกเซลของรูปภาพที่ตัดภาพเฉพาะส่วนที่เป็นไส้กรอก โดยค่าเฉลี่ยของแต่ละค่าจะแทนด้วย L^*, a^*, b^*, h, C^* สำหรับค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานจะแทนด้วย $S_{L^*}, S_{a^*}, S_{b^*}, S_h$ และ S_{C^*}

6.5. ศึกษาคุณลักษณะของข้อมูล

ข้อมูลที่ได้จากการประมวลผลภาพอยู่ในรูปแบบค่าสังเกตเชิงเดี่ยว (Individual observations) จากการศึกษาคุณลักษณะของข้อมูลที่ได้จากการประมวลผลภาพ ค่าที่ได้จะออกมาทั้งหมด 10 ตัวแปร ได้แก่ ค่า $L^*, a^*, b^*, h, C^*, S_{L^*}, S_{a^*}, S_{b^*}, S_h$ และ S_{C^*} การศึกษาคุณลักษณะของข้อมูลใช้ตัวอย่างผลิตภัณฑ์ไส้กรอกจำนวน 30 ตัวอย่างโดยใช้โปรแกรม MINITAB 17 และเนื่องจากแผนภูมิควบคุมชีวฮาร์ท (Shewhart control chart) มีเงื่อนไขเบื้องต้นคือ ข้อมูลต้องมีการแจกแจงแบบปกติและเป็นอิสระกัน ดังนั้นจึงทำการตรวจสอบข้อมูลดังนี้

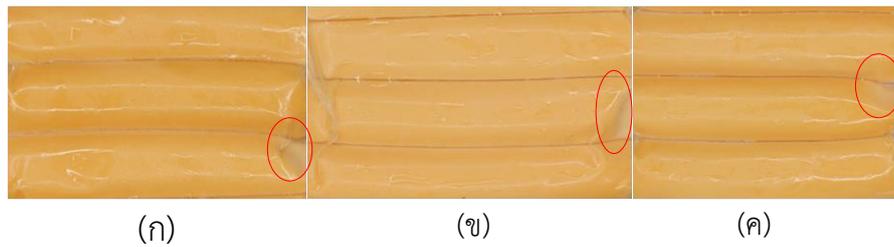
1. การตรวจสอบการแจกแจงแบบปกติ (Normal distribution)
2. การตรวจสอบสหสัมพันธ์ (Correlation)

6.6. การควบคุมกระบวนการ

หลังจากการศึกษาลักษณะของข้อมูล แสดงให้เห็นว่าข้อมูลไม่สามารถสร้างแผนภูมิควบคุมชีวฮาร์ทได้ เนื่องจากข้อมูลมีลักษณะไม่เป็นอิสระกัน จึงเสนอแนวทางการควบคุมกระบวนการโดยใช้แผนภูมิควบคุมไฮเทลลิงทีสแควร์ในการตรวจจับ ถ้ามีค่าสังเกตที่ออกนอกการควบคุม จึงใช้ค่า Contribution ของ $L^*, a^*, b^*, h, C^*, S_{L^*}, S_{a^*}, S_{b^*}, S_h$ และ S_{C^*} เพื่อวิเคราะห์หาค่า $L^*, a^*, b^*, h, C^*, S_{L^*}, S_{a^*}, S_{b^*}, S_h$ และ S_{C^*} ที่ออกนอกการควบคุม และนำไปค้นหาปัจจัยที่มีผลกระทบต่อไส้กรอกที่ออกนอกการควบคุม

6.6.1. การทดสอบแผนภูมิควบคุม

ในงานวิจัยนี้ต้องการสร้างแผนภูมิควบคุมเพื่อตรวจจับความไม่สม่ำเสมอของสีไส้กรอกภายในแพ็ค ซึ่งจำเป็นต้องใช้แผนภูมิที่มีความไวในการตรวจจับสิ่งผิดปกติ จึงทำการทดสอบแผนภูมิควบคุมโพลีเทอริงที่สแควร์ของค่า L^*, a^*, b^* เปรียบเทียบกับแผนภูมิควบคุมโพลีเทอริงที่สแควร์ของค่า $L^*, a^*, b^*, h, C^*, S_{L^*}, S_{a^*}, S_{b^*}, S_h$ และ S_{C^*} เพื่อทดสอบความไวของแผนภูมิควบคุมในการตรวจสอบความเป็นสีเดียวกันของไส้กรอกในแต่ละแพ็ค โดยใช้ตัวอย่างไส้กรอก 27 แพ็คที่ทำการสุ่มมาจากห้องตลาดซึ่งแทนผลิตภัณฑ์ที่อยู่ในการควบคุม กำหนดให้ไส้กรอก 3 แพ็คที่มีสีไม่สม่ำเสมอแทนผลิตภัณฑ์ที่ไม่ตรงตามข้อกำหนด ดังรูปที่ 6.9



รูปที่ 6.9 ตัวอย่างที่ใช้แทนลักษณะของไส้กรอกที่ผิดปกติ

6.6.2. การตรวจสอบสาเหตุของการออกนอกการควบคุม

ขั้นตอนในการควบคุมกระบวนการที่สำคัญคือการระบุสาเหตุของความผิดปกติ ซึ่งในงานวิจัยนี้จะคำนวณหาค่าความแตกต่างส่วนเกิน (Contribution Value) ของค่า $L^*, a^*, b^*, h, C^*, S_{L^*}, S_{a^*}, S_{b^*}, S_h$ และ S_{C^*} ในแต่ละตัวอย่างเพื่อใช้อธิบายสาเหตุของการออกนอกการควบคุมและอธิบายลักษณะของสี โดยหาความแตกต่างระหว่างแต่ละค่าของสีในแต่ละตัวอย่างกับค่าเฉลี่ยของสี (ไส้กรอกที่อยู่ในการควบคุม 27 ตัวอย่าง) ของค่า $L^*, a^*, b^*, h, C^*, S_{L^*}, S_{a^*}, S_{b^*}, S_h$ และ S_{C^*} วิธีการหาค่าดังกล่าวแสดงดังสมการที่ 6.1 จากนั้นหาค่าความแตกต่างส่วนเกิน (Contribution Value) ของค่าลักษณะของสีที่มีค่ามากที่สุดของแต่ละตัวอย่างที่ออกนอกการควบคุม เพื่อนำไปหาสาเหตุที่ไส้กรอกออกนอกการควบคุม

$$\begin{aligned} \Delta L^* &= L_S^* - L_A^*, \Delta a^* = a_S^* - a_A^*, \Delta b^* = b_S^* - b_A^*, \Delta h = h_S - h_A, \Delta C_S^* = C_S^* - C_A^* \\ \Delta S_{L^*} &= S_{L^*,S} - S_{L^*,A}, \Delta S_{a^*} = S_{a^*,S} - S_{a^*,A}, \Delta S_{b^*} = S_{b^*,S} - S_{b^*,A}, \Delta S_h = S_{h,S} - S_{h,A} \\ \text{และ } \Delta S_{C^*} &= S_{C^*,S} - S_{C^*,A} \end{aligned} \quad (6.1)$$

7. ผลการทดลอง

7.1. ผลการสร้างเครื่องมือประมวลผลภาพ

จากการพัฒนาและดัดแปลงเครื่องมือประมวลผลจากงานวิจัยของ Pedreschi et al. (2006) และ พิรญาณ์ (2555) โดยการพิจารณาวัสดุที่จะใช้จากงบประมาณที่มีอย่างจำกัดและตามคำแนะนำของ EHEDG (2004) ทำให้ได้หลักการการพัฒนาเครื่องมือประมวลผลภาพ ดังนี้

1. วัสดุที่ใช้ไม่เป็นอันตรายและเสี่ยงต่อการปนเปื้อนอาหาร ทั้งนี้วัสดุที่นำมาใช้นั้นไม่ได้สัมผัสกับอาหารโดยตรง ในการพิจารณาจึงมุ่งเน้นไปที่วัสดุที่ไม่ก่อให้เกิดละอองฝุ่น ไม่เป็นพิษหรือมีสารระเหยที่เป็นอันตราย และไม่เกิดสนิมเพื่อลดโอกาสในการปนเปื้อนอาหาร

2. วัสดุที่ใช้มีความคงทน แข็งแรง สะดวกต่อการใช้งานและมีรูปลักษณ์สวยงามทำให้ได้เครื่องมือการประมวลผลภาพดังรูปที่ 7.1 ซึ่งประกอบไปด้วย

- aluminium profile หรือ aluminium frame เป็นโลหะที่มีน้ำหนักเบาแต่แข็งแรง ทนทานต่อการสึกกร่อน ประกอบง่าย ไม่ต้องเชื่อม เปลี่ยนแปลงรูปแบบโครงสร้างได้ง่ายและหลากหลาย ไม่เป็นสนิม ไม่เป็นพิษหรือมีสารระเหยที่เป็นอันตรายที่อาจส่งผลกระทบต่อการทำงานของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ โดยได้เป็นประกอบเป็นโครงและขาตั้งสูงจากพื้น 100 เซนติเมตรเพื่อความมั่นคงแข็งแรงและให้สามารถรองรับการตรวจสอบคุณภาพอาหารที่เคลื่อนที่ในสายพานได้ในอนาคต อีกทั้งเพื่อให้สามารถปรับเปลี่ยนรูปทรงของโครงได้ตามความเหมาะสมและในกรณีที่มีการปรับปรุงแก้ไขเครื่องมือในอนาคต

- ยึดจับกล้องถ่ายภาพกับ aluminium profile ทำให้มีความมั่นคงและป้องกันการตกหล่นของกล้องโดยวางเหนือแผ่นอะคริลิกที่เจาะรูให้เฉพาะเลนส์กล้องลอดผ่านได้

- แผ่นอะคริลิกสีดำด้าน ประกอบเป็นกล่องเพื่อใช้ในการถ่ายภาพ โดยแผ่นอะคริลิกเป็นพลาสติกชนิดหนึ่ง มีน้ำหนักเบา ทำความสะอาดได้ง่าย ไม่มีปัญหาเรื่องละอองฝุ่นและสารระเหยที่เป็นอันตรายที่อาจส่งผลกระทบต่อการทำงานของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ด้านสามารถป้องกันแสงจากภายนอกและลดการสะท้อนของแสงภายในได้ โดยประกอบได้เป็นกล่องสี่เหลี่ยมขนาดกล่องกว้าง 50 เซนติเมตร ยาว 50 เซนติเมตร และสูง 50 เซนติเมตร และมีฝาปิด – เปิด มีความมิดชิดและสะดวกต่อการใช้งาน

- แสงสว่าง ได้จากหลอดไฟฟลูออเรสเซนต์ 4 หลอด ความยาว 30 เซนติเมตร ซึ่งเป็นหลอดไฟที่มีขนาดเล็กลงจากเดิมทำให้เครื่องมือมีขนาดเล็กลง โดยจัดวางเป็นสี่เหลี่ยมเหนือชิ้นงาน 35 เซนติเมตร เป็นมุม 45 องศา

- กล้องดิจิทัล Canon 550D ตั้งค่ากล้อง ISO400 ความเร็วชัตเตอร์ 1/60 ค่ารับแสง 5.6 ระยะชัด 35 มิลลิเมตร ไม่ใช้แฟลช ความละเอียด 3456 x 2304 การวางกล้อง วางเหนือชิ้นงาน 35.5 เซนติเมตร โดยมุมระหว่างกล้องและหลอดไฟ 45 องศา

- ถ่ายภาพชิ้นงานในเครื่องมือประมวลผลภาพ โดยการถ่ายภาพจะเชื่อมต่อด้วย USB ผ่านคอมพิวเตอร์ โดยใช้โปรแกรม EOS Utility วิเคราะห์ค่าคุณลักษณะของภาพถ่ายด้วยโปรแกรม MATLAB



รูปที่ 7.1 เครื่องมือประมวลผลภาพ

7.2. ผลการออกแบบการทดลองเพื่อพิจารณาปัจจัยที่มีผลต่อค่าสีของภาพถ่าย

หลังจากได้เครื่องมือประมวลผลภาพเพื่อจะนำไปใช้ในการวิเคราะห์สีของไส้กรอก ซึ่งก่อนการนำไปใช้จะทำการวิเคราะห์หองค์ประกอบสำคัญทั้งหมดที่เกี่ยวข้องกับระบบการประมวลผลภาพเพื่อพิจารณาปัจจัยที่ส่งผลให้ค่าสีของภาพถ่ายชิ้นงานเปลี่ยนแปลง ดังนี้

7.2.1. พิจารณาปัจจัยทั้งหมดในระบบประมวลผลภาพที่เกี่ยวข้องกับค่าสีของภาพถ่าย

เมื่อพิจารณาปัจจัยทั้งหมดที่เกี่ยวข้องกับค่าสีในระบบ $L^*a^*b^*$ ของภาพถ่ายชิ้นงานและกรองปัจจัย โดยใช้ความรู้จากประสบการณ์เพื่อลดความผันแปรของระบบในเบื้องต้น ดังตารางที่ 7.1 ซึ่งแสดงผลการพิจารณาปัจจัยทั้งหมดที่เกี่ยวข้องกับค่าสีในระบบ $L^*a^*b^*$ ของภาพถ่ายชิ้นงาน

จากตารางที่ 7.1 พบว่าปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับระบบมีทั้งหมด 10 ปัจจัย โดยสามารถสรุปได้จากความรู้เบื้องต้น การทดลองเบื้องต้นและประสบการณ์ได้ว่ามีปัจจัยที่มีผลต่อค่าสีของภาพถ่ายชิ้นงานแน่นอน 3 ปัจจัย คือค่ารับแสงของกล้องถ่ายภาพ ความไวชัตเตอร์กล้องถ่ายภาพและลักษณะพื้นผิวของชิ้นงานเนื่องจาก เมื่อกำหนดให้ค่ารับแสงมีค่ามาก แสงจะสามารถผ่านเข้ากล้องได้มาก ทำให้ภาพถ่ายชิ้นงานที่ได้มีความสว่างมาก ซึ่งตรงเข้ากับเมื่อกำหนดให้ค่ารับแสงมีค่าน้อยก็จะส่งผลให้ภาพถ่ายมีความสว่างน้อยตามไปด้วย ค่าความไวชัตเตอร์มีผลต่อค่าสีของภาพถ่าย คือเมื่อกำหนดให้ความไวชัตเตอร์มีค่ามากทำให้แสงสามารถผ่านเข้ากล้องได้น้อยส่งผลให้ภาพถ่ายชิ้นงานมีความสว่างน้อยแต่หากกำหนดให้มีค่าน้อยภาพถ่ายที่ได้ก็จะมีค่าสว่างมาก (ตะวัน. 2554) ส่วนลักษณะพื้นผิวของชิ้นงานที่นำมาทำการทดสอบจะมีผลต่อค่าสีของภาพถ่ายชิ้นงาน เนื่องจาก ชิ้นงานที่มีพื้นผิวต่างกัน เช่น มีความมันวาว สะท้อนแสง ขรุขระหรือเรียบด้านจะมีความสามารถในการสะท้อนแสงหรือดูดซับแสงได้ต่างกันจึงมีผลทำให้ค่าสีของภาพถ่ายชิ้นงานมีค่าแตกต่างกัน ซึ่งสอดคล้องกับการทดลองของ Mendoza et al. (2006) ที่ได้ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการวัดสีของผลิตภัณฑ์ทางการเกษตร พบว่าความโค้งและความเงาของพื้นผิวมีผลต่อค่าสีที่วัดได้อย่างมีนัยสำคัญ นอกจากนี้จากการพิจารณา ยังพบว่าการกดชัตเตอร์เป็นปัจจัยที่ไม่มีผลต่อค่าสีของภาพถ่ายชิ้นงานเนื่องจากในการวิเคราะห์กำหนดให้การกดชัตเตอร์เพื่อถ่ายภาพจะใช้เมาส์คลิกผ่านโปรแกรม Camera Control Pro 2 ในคอมพิวเตอร์ซึ่งเชื่อมต่อกล้องและคอมพิวเตอร์ด้วย USB จึงไม่มีผลต่อสีของภาพถ่ายชิ้นงานแน่นอน

ตารางที่ 7.1 การวิเคราะห์องค์ประกอบสำคัญเบื้องต้น

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

ทั้งนี้เพื่อเป็นการคัดแยกปัจจัยเหล่านี้จากการพิจารณาจึงได้กำหนดค่าของปัจจัยดังกล่าวรวมถึงค่าอื่นๆของกล้องที่ใช้ถ่ายภาพเป็นค่าคงที่เพื่อลดความผันแปรในเบื้องต้น คือ กำหนดให้ใช้กล้องดิจิทัล Canon 550D ตั้งค่ากล้อง ISO400 ความเร็วชัตเตอร์ 1/60 ค่ารับแสง 5.6 ระยะซูม 35 มิลลิเมตร ไม่ใช่

แฟลช ความละเอียด 3456 × 2304 การวางกล้อง วางเหนือชิ้นงาน 35.5 เซนติเมตร โดยมุมระหว่างกล้อง และหลอดไฟ 45 องศา

ส่วนปัจจัยที่ยังไม่ทราบแน่ชัดว่ามีผลต่อต่อสีหรือไม่ นั่นมีทั้งหมด 6 ปัจจัย ได้แก่ สีพื้นหลังวางชิ้นงาน ผู้ทำการทดลอง ตำแหน่งการวางชิ้นงาน จำนวนหลอดไฟ แสงภายนอกและระยะห่างของชิ้นงานกับกล้อง ซึ่งปัจจัยทั้ง 6 ปัจจัยนี้จะถูกนำไปวิเคราะห์ความมีนัยสำคัญต่อค่าสีของภาพถ่ายชิ้นงานต่อไป

7.2.2. ออกแบบการทดลองแบบเศษส่วนเชิงแฟคทอเรียลเพื่อพิจารณาความมีนัยสำคัญของปัจจัย

เมื่อกำหนดระดับของปัจจัยทั้ง 6 ปัจจัยที่เหลือจากการกรองในขั้นต้น ดังตารางที่ 7.2 และออกแบบการทดลองแบบเศษส่วนเชิงแฟคทอเรียล (fractional factorial design) แบบ 2^{6-1} ได้ทั้งหมด 32 การทดลอง ดังตารางที่ 7.3

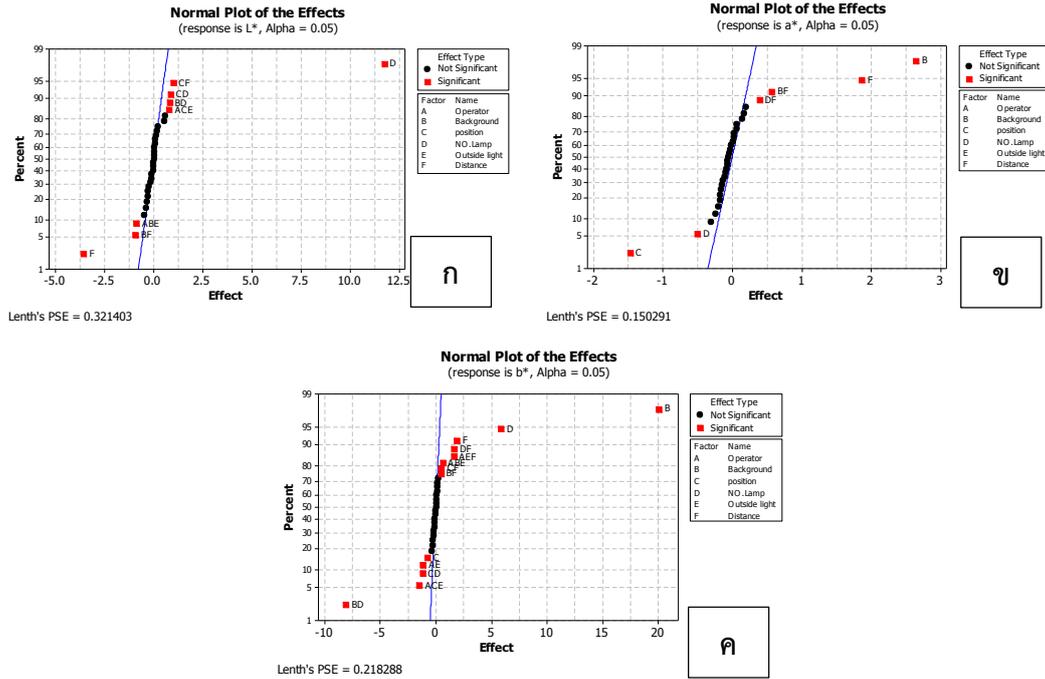
ตารางที่ 7.2 ระดับของปัจจัยที่ใช้ในการทดสอบอิทธิพลของปัจจัย

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

ตารางที่ 7.3 รูปแบบการทดลองและผลการทดสอบอิทธิพลของปัจจัย

ลำดับการสุ่ม	ลำดับทดลอง	ปัจจัย						ผลการทดลอง		
		A	B	C	D	E	F	L^*	a^*	b^*
21	1	-1	-1	1	-1	1	-1	80.8328	-4.9729	19.8416
3	2	-1	1	-1	-1	-1	1	75.9295	0.8427	46.375
15	3	-1	1	1	1	-1	1	90.679	-1.7152	43.9415
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
8	30	1	1	1	-1	-1	1	77.3140	-1.1903	45.9894
16	31	1	1	1	1	-1	-1	95.0440	-4.3397	41.5148
11	32	-1	1	-1	1	-1	-1	94.3446	-2.8746	42.0624

เมื่อพิจารณา normal probability plot of the effect ของค่า L^* (รูปที่ 7.2ก) และผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่า L^* จากทั้งหมด 6 ปัจจัย ดังตารางที่ 7.4 พบว่าอิทธิพลจากจำนวนหลอดไฟ (D) ระยะห่างระหว่างชิ้นงานกับกล้องถ่ายภาพ (F) มีผลต่อค่า L^* ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ($P < 0.05$)



รูปที่ 7.2 normal probability plot of the effect ของค่า $L^* a^* b^*$ ในขั้นตอนการออกแบบการทดลอง
 ก) ค่า L^* ข) ค่า a^* ค) ค่า b^*

ตารางที่ 7.4 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่า L^* (Analysis of variance for L^*)

source	DF	Seq SS	Adj MS	F	P-value
main effects	6	1212.89	202.15	155.45	0.000
operator (A)	1	0.16	0.16	0.12	0.736
background (B)	1	1.56	1.56	1.20	0.299
position (C)	1	0.55	0.55	0.42	0.530
no.Lamp (D)	1	1107.09	1107.09	851.33	0.000
outside light (E)	1	3.04	3.04	2.34	0.157
distance (F)	1	100.48	100.48	77.27	0.000
2-way interactions	15	31.15	2.08	1.60	0.230
total	31	1257.04			

เมื่อพิจารณา normal probability plot of the effect ของค่า a^* (รูปที่ 7.2ข) และผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่า a^* จากทั้งหมด 6 ปัจจัย ดังตารางที่ 7.5 พบว่าอิทธิพลจากสี่พื้นหลัง (B) ตำแหน่งการวางชิ้นงาน (C) จำนวนหลอดไฟ (D) และระยะห่างระหว่างชิ้นงานกับกล้องถ่ายภาพ (F) มีผลต่อค่า a^* ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ($P < 0.05$)

ตารางที่ 7.5 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่า a^* (Analysis of variance for a^*)

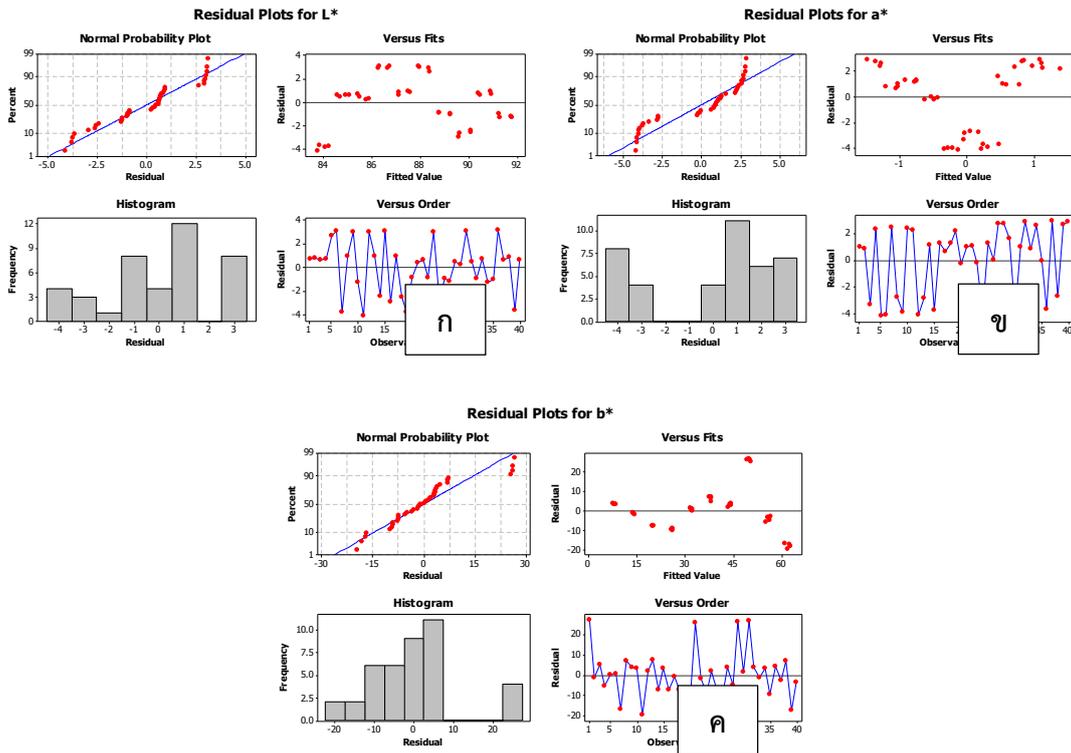
Source	DF	Seq SS	Adj MS	F	P-value
main effects	6	103.584	17.2641	199.34	0.000
operator (A)	1	0.013	0.0129	0.15	0.708
background (B)	1	56.187	56.1866	648.76	0.000
position (C)	1	17.206	17.2057	198.66	0.000
no.Lamp (D)	1	1.934	1.9340	22.33	0.001
outside light (E)	1	0.191	0.1907	2.20	0.169
distance (F)	1	28.054	28.0544	323.93	0.000
2-way interactions	15	6.302	0.42	4.85	0.008
total	31	110.75			

ตารางที่ 7.6 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่า b^* (Analysis of variance for b^*)

Source	DF	Seq SS	Adj MS	F	P-value
main effects	6	3544.91	590.82	139.12	0.000
operator (A)	1	0.13	0.13	0.03	0.866
background (B)	1	3229.51	3229.51	760.45	0.000
position (C)	1	3.90	3.90	0.92	0.361
no.Lamp (D)	1	280.81	280.81	66.12	0.000
outside light (E)	1	0.00	0.00	0.00	0.991
distance (F)	1	30.57	30.57	7.20	0.023
2-way interactions	15	570.96	38.06	8.96	0.001
total	31	4158.34			

เมื่อพิจารณา normal probability plot of the effect ของค่า b^* (รูปที่ 7.2ค) และผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่า b^* จากทั้งหมด 6 ปัจจัย ดังตารางที่ 7.6 พบว่าอิทธิพลจากสีพื้นหลัง (B) จำนวนหลอดไฟ (D) และระยะห่างระหว่างชิ้นงานกับกล้องถ่ายภาพ (F) มีผลต่อค่า b^* ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ($P < 0.05$)

พิจารณา residual plot ของค่า L^* ในรูปที่ 7.3ก พบว่าค่าตกค้าง (residual) มีการเรียงตัวเป็นเส้นตรง การกระจายตัวเป็นแบบปกติ ส่วน versus fits และ versus order พบว่า ค่าตกค้างมีความแปรปรวนคงที่ ซึ่งในส่วนของค่า a^* และ b^* ในรูปที่ 7.3ข และ 7.3ค ตามลำดับ ก็ให้ผลเช่นเดียวกันกับ residual plot ของค่า L^* จึงสามารถสรุปได้ว่าค่าตกค้างของข้อมูลไม่ผิดปกติดังนั้นจึงสามารถนำข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์มาใช้ได้



รูปที่ 7.3 residual plot ของค่า $L^* a^* b^*$ ในขั้นตอนการออกแบบการทดลอง ก) ค่า L^* ข) ค่า a^* ค) ค่า b^*

จากการวิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลทำให้ค่าสีของภาพถ่ายชิ้นงานในระบบ $L^* a^* b^*$ เปลี่ยนแปลงไป มีทั้งหมด 4 ปัจจัยซึ่งในการนำเครื่องมือประมวลผลภาพไปใช้จึงต้องกำหนดให้ปัจจัยดังกล่าวเป็นค่าคงที่เพื่อลดความผันแปรและลดความผิดพลาดที่จะเกิดขึ้นในการประมวลผลภาพ โดยได้กำหนดดังนี้ สีพื้นหลังวางชิ้นงาน (B) = ดำ ตำแหน่งการวางชิ้นงาน (C) = กลาง จำนวนหลอดไฟ (D) = 4 หลอด และระยะห่างของชิ้นงานกับกล้อง (F) = 35.5 cm

ส่วนผู้ทำการทดลอง (A) และแสงภายนอก (E) พบว่าไม่มีผลต่อค่าสีภาพถ่ายชิ้นงาน ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ($P > 0.05$) ดังนั้นในการประมวลผลภาพไม่ว่าจะเปลี่ยนผู้ทำการทดลองหรือในการถ่ายภาพจะเปิดฝาเครื่อง (มีแสงภายนอก) หรือปิดฝาเครื่อง (ไม่มีแสงภายนอก) ก็ไม่ส่งผลให้ค่าสีของภาพถ่ายชิ้นงานในระบบ $L^* a^* b^*$ เปลี่ยนแปลงไป

7.3. ผลการวิเคราะห์ความสามารถของระบบการวัด

ขั้นตอนต่อไปจะเป็นการวิเคราะห์ความสามารถของระบบการวัดของเครื่องมือประมวลผลภาพเพื่อทดสอบความสามารถของระบบการวัดของเครื่องมือว่ามีความสามารถในการแบ่งแยกผลิตภัณฑ์ได้หรือไม่ ผลการทดสอบดังนี้

7.3.1. การวิเคราะห์ความสามารถของระบบการวัด

ออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียลแบบเต็ม (full factorial design) จากปัจจัยในระบบการวัดของเครื่องมือประมวลผลภาพ (ผู้ทำการทดลองและแสงภายนอก) และในขั้นตอนนี้จะวัดสีของภาพถ่ายชิ้นงาน 10 ชิ้นที่มีสีแตกต่างกันดังรูป 6.5 และกำหนดระดับของปัจจัยในการทดลองดังตารางที่ 7.7 ได้การทดลองทั้งหมด 40 การทดลอง ไม่ทำซ้ำการทดลอง รูปแบบการทดลองแสดงดังตารางที่ 7.8

ตารางที่ 7.7 ระดับของปัจจัยที่ใช้ในการวิเคราะห์

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

ตารางที่ 7.8 รูปแบบการทดลองและผลการวิเคราะห์ความสามารถของระบบการวัด

ลำดับการสุ่ม	ลำดับทดลอง	ปัจจัย			ผลการทดลอง		
		part	operator	outside light	L^*	a^*	b^*
30	1	8	1	2	86.1155	1.5589	77.0611
8	2	2	2	2	91.178	-0.3656	12.7657
24	3	6	2	2	87.7307	-3.3916	43.1814
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
22	38	6	1	2	87.9775	-2.6741	45.1633
40	39	10	2	2	80.1826	3.7446	45.2459
34	40	9	1	2	85.2196	3.7304	52.4798

จากตารางการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ของค่า L^* ดังตารางที่ 7.9 จะเห็นได้ว่าอิทธิพลหลักจากผู้ทำการทดลองไม่มีผลทำให้ค่าสีที่วัดได้เปลี่ยนแปลงไปที่ระดับความเชื่อมั่น 95% แต่อิทธิพลจากแสงภายนอกมีผลทำให้ค่าสีที่วัดได้เปลี่ยนแปลงไปที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ซึ่งอาจแปลความหมายได้ว่าแสงภายนอกนั้นความจริงแล้วมีผลทำให้ค่า L^* ของภาพถ่ายชิ้นงานเปลี่ยนแปลงแต่ในขั้นตอนการทดสอบอิทธิพลของปัจจัยมีปัจจัยที่นำมาพิจารณาในระบบหลายปัจจัยจึงส่งผลให้แสงภายนอกดูเหมือนว่าจะไม่มีผลเมื่อเทียบกับปัจจัยอื่นๆที่มีผลต่อค่า L^* มากกว่า ดังนั้นในการทดลองควรกำหนดแสงภายนอกให้เป็นปัจจัยคงที่ด้วยเพื่อลดความผันแปรที่จะเกิดขึ้นส่วนผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่า a^* และ b^* ได้ผลว่าไม่มีอิทธิพลหลักและอิทธิพลร่วมใดมีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อค่า a^* ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

ตารางที่ 7.9 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่า L^*

ANOVA: L versus Part, Operator, Outside light

Factor	Type	Levels	Values
part	random	10	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10
operator	random	2	1, 2
outside light	random	2	1, 2

Analysis of Variance for L^*

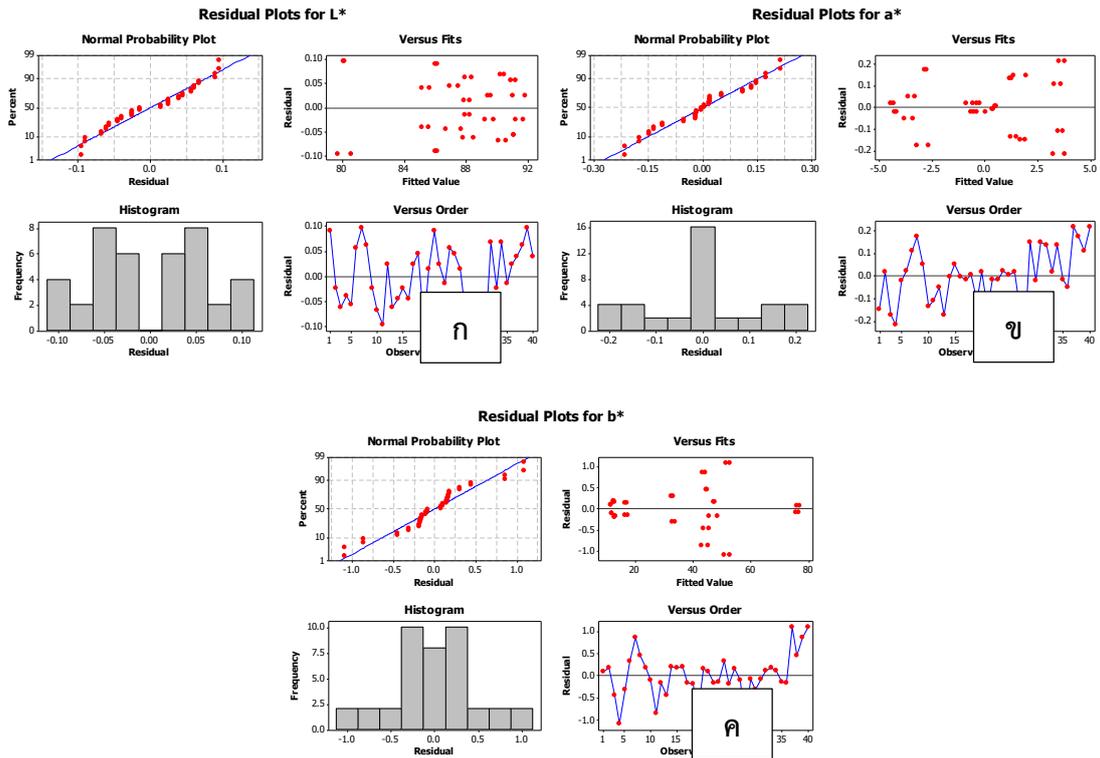
Source	DF	SS	MS	F	P
part	9	407.864	45.318	722.26	0.000 x
operator	1	0.014	0.014	0.56	0.503 x
outside light	1	1.851	1.851	65.35	0.002 x
part*operator	9	0.336	0.037	2.46	0.098
part*outside light	9	0.365	0.041	2.68	0.079
operator*outside light	1	0.003	0.003	0.19	0.671
Error	9	0.136	0.015		
Total	39	410.569			

x Not an exact F-test.

S = 0.123119 R-Sq = 99.97% R-Sq(adj) = 99.86%

Variance Error Expected Mean Square for Each

Source	component	term	Term (using unrestricted model)
1 part	11.3139	*	(7) + 2 (5) + 2 (4) + 4 (1)
2 operator	-0.0006	*	(7) + 10 (6) + 2 (4) + 20 (2)
3 outside light	0.0911	*	(7) + 10 (6) + 2 (5) + 20 (3)
4 part*operator	0.0111	7	(7) + 2 (4)
5 part*outside light	0.0127	7	(7) + 2 (5)
6 operator*outside light	-0.0012	7	(7) + 10 (6)
7 Error	0.0152		(7)



รูปที่ 7.4 residual plot ของค่า $L^* a^* b^*$ ในขั้นตอนการวิเคราะห์ความสามารถของระบบการวัด ก) ค่า L^* ข) ค่า a^* ค) ค่า b^*

ตัวอย่างการคำนวณค่าความแปรปรวนทั้งหมดในส่วนของค่า L^* จากสมการที่ 7.1 ได้ดังนี้ เมื่อพิจารณา normal probability plot พบว่าค่าตกค้างของทั้งค่า $L^* a^*$ และ b^* (รูปที่ 7.4) มีการเรียงตัวเป็นเส้นตรง การกระจายตัวมีแนวโน้มใกล้เคียงแบบปกติ ส่วน versus fits และ versus order พบว่าค่าตกค้างมีความแปรปรวนคงที่ดังนั้นจึงไม่ผิดปกติ

$$\begin{aligned}
 \sigma_{total}^2 &= \sigma_{part}^2 + \sigma_{gauge}^2 \\
 \sigma_{total}^2 &= 11.314 + 0 + 0.091 + 0.011 + 0.013 + 0 + 0.015 = 11.444 \\
 \sigma_{gauge}^2 &= 0 + 0.091 + 0 = 0.091 \\
 \sigma_{part}^2 &= 11.314
 \end{aligned}
 \tag{7.1}$$

ตารางที่ 7.10 เปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่า $L^* a^* b^*$

ความแปรปรวน	L^*	a^*	b^*
σ_{Total}^2	11.444	7.822	468.284
σ_{gauge}^2	0.130	0.077	2.068
σ_{part}^2	11.314	7.745	466.216
$\% \sigma_{gauge}^2 / \sigma_{part}^2$	0.805%	0.179%	0.003%

จากการคำนวณสามารถเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนดังตารางที่ 7.10 แสดงให้เห็นความแปรปรวนของระบบการวัดมีค่าน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับความแปรปรวนเนื่องจากชิ้นงานโดยมีค่า 0.805% 0.179% และ 0.179% ตามลำดับซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับคำแนะนำสำหรับเกณฑ์การยอมรับโดยทั่วไปซึ่ง AIAG

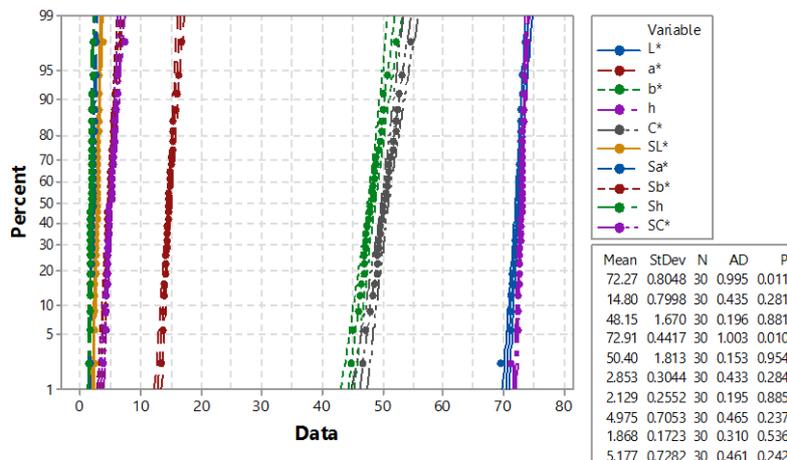
(Automotive Industry Action Group. 2002) ได้ระบุไว้ว่า ถ้าสัดส่วนความแปรปรวนต่ำกว่า 10% โดยทั่วไปแล้วถือว่าสามารถยอมรับได้

7.4. ศึกษาคุณลักษณะของข้อมูล

ข้อมูลที่ได้จากการประมวลผลภาพอยู่ในรูปแบบค่าสังเกตเชิงเดี่ยว (Individual observations) จากการศึกษาคุณลักษณะของข้อมูลที่ได้จากการประมวลผลภาพ ค่าที่ได้จะออกมาทั้งหมด 10 ตัวแปร ได้แก่ ค่า $L^*, a^*, b^*, h, C^*, S_L^*, S_a^*, S_b^*, S_h$ และ S_C^* การศึกษาคุณลักษณะของข้อมูลใช้ตัวอย่างผลิตภัณฑ์ไส้กรอกจำนวน 30 ตัวอย่าง โดยใช้โปรแกรม MINITAB 17 และเนื่องจากแผนภูมิควบคุมชีวฮาร์ท (Shewhart control chart) มีเงื่อนไขเบื้องต้นคือ ข้อมูลต้องมีการแจกแจงแบบปกติและเป็นอิสระกัน ดังนั้นจึงทำการตรวจสอบข้อมูล ได้ผลดังนี้

7.4.1. การตรวจสอบการแจกแจงแบบปกติ (Normal distribution)

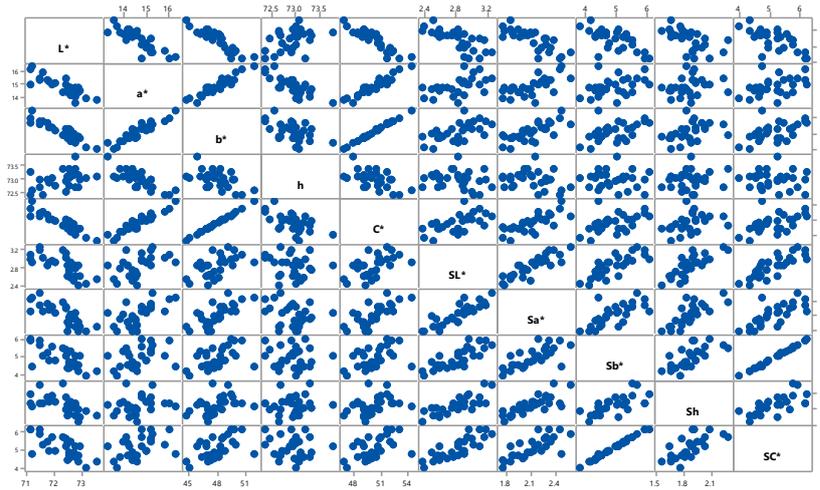
เป็นเงื่อนไขในการสร้างแผนภูมิควบคุมชีวฮาร์ท ข้อมูลจะต้องมีการแจกแจงแบบปกติ จากการทดลองโดยใช้ผลิตภัณฑ์ไส้กรอกจำนวน 30 ตัวอย่าง นำมาทดสอบการแจกแจงแบบปกติดังรูปที่ 7.5 จากกราฟพบว่า มีลักษณะเป็นเส้นตรง ไม่พบสิ่งผิดปกติอย่างชัดเจน สามารถนำข้อมูลไปใช้ในการสร้างแผนภูมิควบคุมได้แต่พบว่า ค่า L^* พบว่ามีค่าที่ผิดปกติดังนั้นจึงทำการตัดค่าที่ผิดปกติออก



รูปที่ 7.5 กราฟแสดงการทดสอบการแจกแจงแบบปกติของค่า $L^*, a^*, b^*, h, C^*, S_L^*, S_a^*, S_b^*, S_h$ และ S_C^*

7.4.2. การตรวจสอบสหสัมพันธ์ (Correlation)

ทำการตรวจสอบสหสัมพันธ์โดยการใช้ Matrix plot และค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของเพียร์สันแสดงดังตารางที่ 7.11 จากการใช้ Matrix plot ดังรูปที่ 7.6 แสดงให้เห็นว่าค่า S_h และ a^*, S_L^* และ h, S_a^* และ h, S_b^* และ h, S_h และ h, S_C^* และ h มีความสัมพันธ์กันน้อย แต่ความสัมพันธ์ระหว่างค่าอื่นๆที่เหลือนั้นมีค่ามาก จากผลการตรวจสอบสหสัมพันธ์สามารถอธิบายได้ว่าข้อมูลชุดนี้มีสหสัมพันธ์กัน จึงไม่สามารถใช้แผนภูมิควบคุมชีวฮาร์ทได้ เนื่องจากไม่อยู่ในเงื่อนไขของแผนภูมิควบคุมชีวฮาร์ทในเรื่องความเป็นอิสระ (Independent)



รูปที่ 7.6 Matrix Plot สำหรับ 29 ตัวอย่าง ของค่า L^* , a^* , b^* , h , C^* , S_L^* , S_{a^*} , S_{b^*} , S_h และ S_{C^*}

ตารางที่ 7.11 แสดงค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของเพียร์สัน

Variable	L^*	a^*	b^*	h	C^*	S_L^*	S_{a^*}	S_{b^*}	S_h
a^*	-0.829								
b^*	-0.914	0.932							
h	0.409	-0.775	-0.493						
C^*	-0.911	0.946	0.999	-0.529					
S_L^*	-0.72	0.504	0.598	-0.177	0.593				
S_{a^*}	-0.785	0.633	0.745	-0.212	0.738	0.866			
S_{b^*}	-0.672	0.382	0.502	-0.079	0.493	0.799	0.704		
S_h	-0.572	0.223	0.393	0.129	0.378	0.798	0.789	0.686	
S_{C^*}	-0.696	0.419	0.538	-0.101	0.529	0.819	0.745	0.998	0.692

7.5. การควบคุมกระบวนการ

หลังจากการศึกษาลักษณะของข้อมูล แสดงให้เห็นว่าข้อมูลไม่สามารถสร้างแผนภูมิควบคุมชีวฮาร์ทได้ เนื่องจากข้อมูลมีลักษณะไม่เป็นอิสระกัน และเนื่องจากต้องการวิเคราะห์ความไม่สม่ำเสมอของสีไส้กรอก ดังนั้นจึงเสนอแนวทางการควบคุมกระบวนการคือ การใช้แผนภูมิไฮเทลลิงทีสแควร์ของค่า L^* , a^* , b^* , h , C^* , S_L^* , S_{a^*} , S_{b^*} , S_h และ S_{C^*} ในการควบคุมกระบวนการโดยใช้โปรแกรม MATLAB

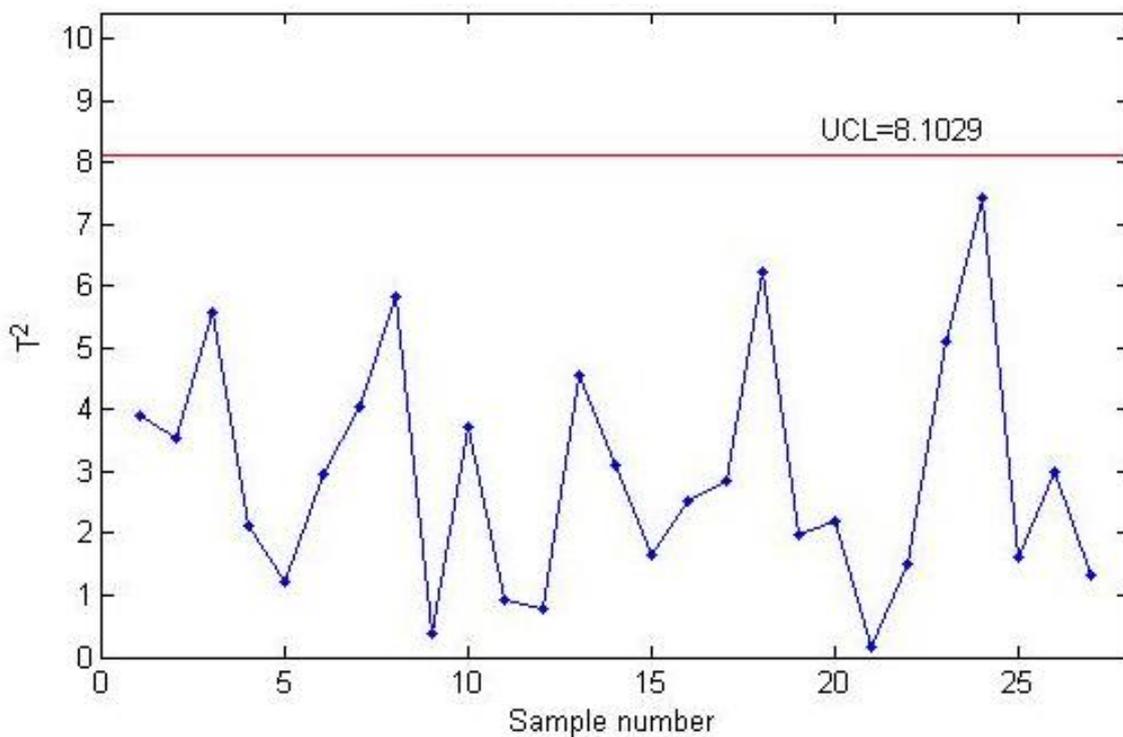
7.5.1. การทดสอบแผนภูมิควบคุม

หลังจากการศึกษาลักษณะของข้อมูล แสดงให้เห็นว่าข้อมูลไม่สามารถสร้างแผนภูมิควบคุมชีวฮาร์ทได้ เนื่องจากข้อมูลมีลักษณะไม่เป็นอิสระกัน และเนื่องจากต้องการวิเคราะห์ความไม่สม่ำเสมอของสีไส้กรอก ดังนั้นจึงเสนอแนวทางการควบคุมกระบวนการคือ การใช้แผนภูมิไฮเทลลิงทีสแควร์ของค่า L^* , a^* , b^* , h , C^* , S_L^* , S_{a^*} , S_{b^*} , S_h และ S_{C^*} ในการควบคุมกระบวนการโดยใช้โปรแกรม MATLAB ทำการทดสอบความไวของแผนภูมิควบคุมดังกล่าวโดยทำการเปรียบเทียบระหว่างแผนภูมิควบคุมไฮเทลลิงทีสแควร์ของค่า L^* , a^* , b^* ดังรูปที่ 7.7 เปรียบเทียบกับแผนภูมิควบคุมไฮเทลลิงทีสแควร์ของค่า L^* , a^* , b^* , h , C^* , S_L^* , S_{a^*} , S_{b^*} , S_h และ S_{C^*} ดังรูปที่ 7.8 โดยใช้ค่าระดับนัยสำคัญเท่ากับ 0.027 เพื่อวิเคราะห์ความเป็นสี

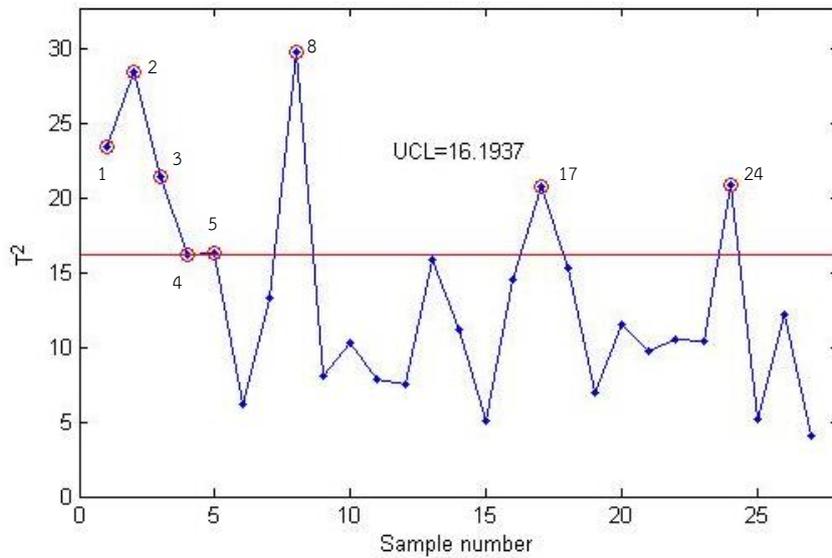
เดียวกันของผิวไส้กรอก โดยใช้ผลิตภัณฑ์ไส้กรอกที่มีลักษณะปกติจำนวน 24 ตัวอย่าง และผลิตภัณฑ์ไส้กรอกที่กำหนดว่าเป็นสิ่งผิดปกติจำนวน 3 ตัวอย่าง คือ ตัวอย่างที่ 1 3 และ 17

จากรูปที่ 7.4 แสดงแผนภูมิควบคุมไฮเทลลิงที่สแควร์ของค่า L^* , a^* และ b^* มีขีดจำกัดควบคุมบน (UCL) เท่ากับ 8.1029 ไม่พบสิ่งผิดปกติที่เกิดขึ้นจากแผนภูมิควบคุมดังกล่าว แต่เมื่อพิจารณาแผนภูมิควบคุมไฮเทลลิงที่สแควร์ของค่า L^* , a^* , b^* , h , C^* , S_{L^*} , S_{a^*} , S_{b^*} , S_h และ S_{C^*} มีขีดจำกัดควบคุมบน (UCL) เท่ากับ 16.1937 พบว่ามีจุดที่ตกอยู่นอก UCL ทั้งหมด 8 จุด คือ ตัวอย่างที่ 1 2 3 4 5 8 17 และ 24 จากแผนภูมิควบคุมดังกล่าวพบว่าสามารถตรวจจับสิ่งผิดปกติที่กำหนดได้คือ ตัวอย่างที่ 1 3 และ 17 ซึ่งตัวอย่างดังกล่าวเห็นความไม่สม่ำเสมอของสีได้อย่างชัดเจนและเป็นสิ่งผิดปกติที่ได้กำหนดไว้ สำหรับตัวอย่างที่ 2 4 5 8 และ 24 เมื่อทำการตรวจสอบตัวอย่างไส้กรอกไม่พบความผิดปกติอย่างชัดเจนดังรูปที่ 7.6

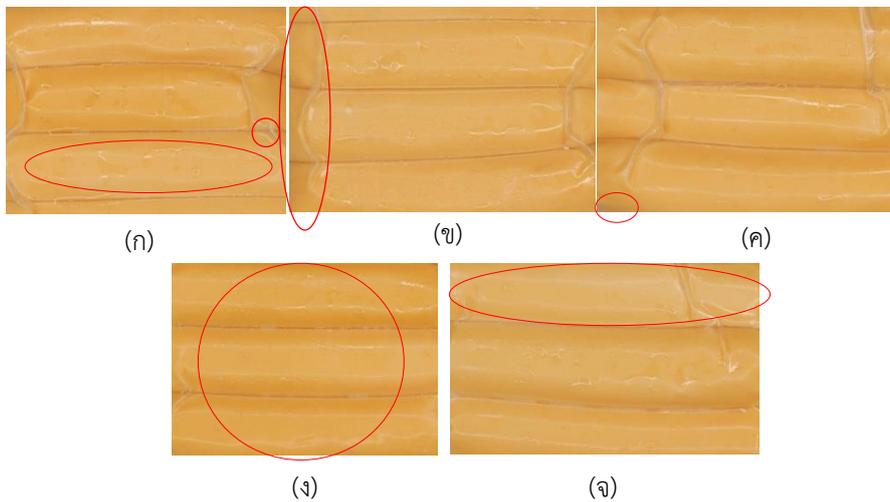
จากการเปรียบเทียบทั้ง 2 แผนภูมิควบคุมจะเห็นได้ว่า แผนภูมิควบคุมไฮเทลลิงที่สแควร์ของค่า L^* , a^* , b^* , h , C^* , S_{L^*} , S_{a^*} , S_{b^*} , S_h และ S_{C^*} มีความไวในการตรวจจับสิ่งผิดปกติที่ลักษณะสีของไส้กรอกที่มีความไม่สม่ำเสมอมากกว่าแผนภูมิควบคุมไฮเทลลิงที่สแควร์ของค่า L^* , a^* , b^*



รูปที่ 7.7 แผนภูมิควบคุมไฮเทลลิงที่สแควร์ของค่า L^* , a^* และ b^*



รูปที่ 7.8 แผนภูมิควบคุมโฮเทลิ่งที่สแควร์ของค่า L^* , a^* , b^* , h , C^* , S_L^* , S_a^* , S_b^* , S_h และ S_C^*



รูปที่ 7.9 ตัวอย่างไส้กรอกที่มีความไม่สม่ำเสมอของสีอย่างไม่ชัดเจน (ก) ตัวอย่างที่ 2 (ข) ตัวอย่างที่ 4 (ค) ตัวอย่างที่ 5 (ง) ตัวอย่างที่ 8 (จ) ตัวอย่างที่ 24

7.5.2. การตรวจสอบสาเหตุของการออกนอกการควบคุม

ขั้นตอนสำคัญในการควบคุมกระบวนการคือการระบุสาเหตุพิเศษของความผิดปกติที่เกิดขึ้น ดังนั้นจึงทำการวิเคราะห์แผนภูมิควบคุมที่ออกนอกการควบคุมโดยใช้ความแตกต่างของแต่ละค่ากับเวกเตอร์ของค่าเฉลี่ย เพื่ออธิบายสาเหตุของความผิดปกติและอธิบายลักษณะของสี โดยหาความแตกต่างระหว่างแต่ละค่าของสีกับค่าเฉลี่ยของสีของค่า L^* , a^* , b^* , h , C^* , S_L^* , S_a^* , S_b^* , S_h และ S_C^* แสดงดังสมการที่ 6.1

จากตารางที่ 7.12 แสดงค่าความแตกต่างส่วนเกินของแต่ละตัวอย่างที่ออกนอกการควบคุม และค่าความแตกต่างส่วนเกินที่มากที่สุดของแต่ละตัวอย่างแสดงดังตารางที่ 7.13 โดยค่าความแตกต่างส่วนเกินที่มากที่สุดจะแสดงถึงสาเหตุที่ไส้กรอกออกนอกการควบคุม จากตารางที่ 7.13 ค่าความแตกต่างส่วนเกินที่มากที่สุดของตัวอย่างที่ 1, 2, 3, 4, 5, 8, 17 และ 24 คือ 2.062, 0.726, -3.392, -0.981, 0.563, 4.499, 0.666 และ -2.271 ตามลำดับ

ค่าความแตกต่างส่วนเกินที่มากที่สุดของตัวอย่างที่ 1 2, 3, 4, 5, 8 และ 24 มาจากค่า chroma (C^*) โดยค่า chroma ของตัวอย่างที่ 1 2 5 และ 8 มีค่ามากกว่า 0 ซึ่งหมายความว่าลักษณะของสีมีความสว่างในทางตรงกันข้ามตัวอย่างที่ 3, 4 และ 24 ค่า chroma มีค่าน้อยกว่า 0 หมายความว่าลักษณะของสีมีลักษณะค่อนข้างคล้ำ (Klein. 2010) สำหรับค่าความแตกต่างส่วนเกินที่มากที่สุดของตัวอย่างที่ 17 คือ -0.488 มาจากค่า S_b^* (ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของ b^*) ซึ่งความแตกต่างดังกล่าวมีค่ามากกว่า 0 หมายความว่ามีความผันแปรมากในส่วนที่เป็นสีเหลือง เมื่อพิจารณารูปที่ จะเห็นได้ว่าสีของผิวไส้กรอกไม่เป็นเนื้อเดียวกันอย่างชัดเจน แต่เมื่อพิจารณารูป พบว่ามีสีของไส้กรอกไม่เป็นเนื้อเดียวกันอย่างไม่ชัดเจน

ตารางที่ 7.12 ค่าความแตกต่างส่วนเกินของค่า L^* , a^* , b^* , h , C^* , S_L^* , S_a^* , S_b^* , S_h และ S_C^*

Sample	ΔL^*	Δa^*	Δb^*	Δh	ΔC^*	ΔS_L^*	ΔS_a^*	ΔS_b^*	ΔS_h	ΔS_C^*
1	-0.869	0.579	1.980	0.009	2.062	0.369	0.208	1.046	0.034	1.073
2	0.061	0.597	0.577	-0.455	0.726	0.187	0.147	0.506	-0.074	0.553
3	1.239	-1.115	-3.200	0.161	-3.392	-0.302	-0.263	-0.717	-0.196	-0.730
4	0.563	-0.449	-0.885	0.190	-0.981	0.021	-0.160	-0.354	-0.084	-0.379
5	0.064	0.183	0.529	-0.022	0.563	0.289	0.178	0.123	0.171	0.144
8	-1.162	1.683	4.186	-0.351	4.499	0.099	0.357	-0.472	-0.028	-0.333
17	-0.048	-0.506	-0.368	0.406	-0.488	0.359	0.278	0.666	0.439	0.653
24	0.405	-1.378	-1.958	0.903	-2.271	0.014	0.049	0.132	0.023	0.159

ตารางที่ 7.13 แสดงค่าความแตกต่างส่วนเกินที่มากที่สุดของตัวอย่างไส้กรอกที่ออกนอกการควบคุม

ตัวอย่าง	ค่าความแตกต่างส่วนเกินที่มากที่สุด	Maximum Contribution (Color Values)	Possible causes in sausage production
1	2.062	C^* (Chroma)	การรมควัน (การวางไส้กรอกซ้อนทับกัน, color setting)
2	0.726	C^* (Chroma)	การรมควัน (color setting)
3	-3.392	C^* (Chroma)	การรมควัน (การวางไส้กรอกซ้อนทับกัน, color setting)
4	-0.981	C^* (Chroma)	การรมควัน (color setting)
5	0.563	C^* (Chroma)	การรมควัน (color setting)
8	4.499	C^* (Chroma)	การรมควัน (color setting)
17	0.666	S_b^* (ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่า b^*)	การผสม (เวลาที่ใช้ในการผสมไม่เพียงพอ)
24	-2.271	C^* (Chroma)	การรมควัน (color setting)

7.5.3. การอธิบายความหมายการตรวจจับของแผนภูมิควบคุมในกระบวนการผลิตไส้กรอก

เมื่อแผนภูมิควบคุมตรวจจับการออกนอกการควบคุม เป็นเรื่องยากสำหรับเจ้าของกระบวนการในการหาสาเหตุของการออกนอกการควบคุม เนื่องจากแผนภูมิควบคุมไฮเทคที่สแควร์นั้นไม่ได้ให้ข้อมูลในเชิงลึก ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงแนะนำการใช้ค่าความแตกต่างส่วนเกินของค่า $L^*, a^*, b^*, h, C^*, S_L^*, S_a^*, S_b^*, S_h$ และ S_C^* และการหาค่าความแตกต่างส่วนเกินที่มากที่สุดของแต่ละตัวอย่าง

จากตารางที่ 7.13 พบว่าค่าความแตกต่างส่วนเกินที่มากที่สุดของแต่ละตัวอย่างมาจากค่า C^* (Chroma) และ S_b^* ซึ่งสามารถอธิบายความหมายได้ดังนี้ เมื่อค่า ΔC^* มีค่ามากกว่า 0 หมายความว่าสีของไส้กรอกมีลักษณะค่อนข้างไปทางสว่าง แต่กรณีค่า ΔC^* มีค่าน้อยกว่า 0 หมายความว่าสีของไส้กรอกมีลักษณะค่อนข้างไปทางมืดหรือมีความเป็นสีน้อย (Klein. 2010) แสดงให้เห็นว่าผิวของไส้กรอกสีไม่เนื้อเดียวกัน ซึ่งอาจเกิดจากขั้นตอนการรมควัน ซึ่งมีผลกับการสร้างสีของไส้กรอก หรือการวางซ้อนทับกันในระหว่างการรมควัน (Essien. 2008)

เมื่อค่า ΔS_b^* มีค่ามากกว่าศูนย์แสดงให้เห็นถึงความผันแปรของสีเหลืองในสีของไส้กรอก ซึ่งอาจจะเกิดจากกระบวนการผสมอาจจะใช้เวลาไม่เพียงพอ จึงทำให้ไส้กรอกเกิดความไม่สม่ำเสมอของสี

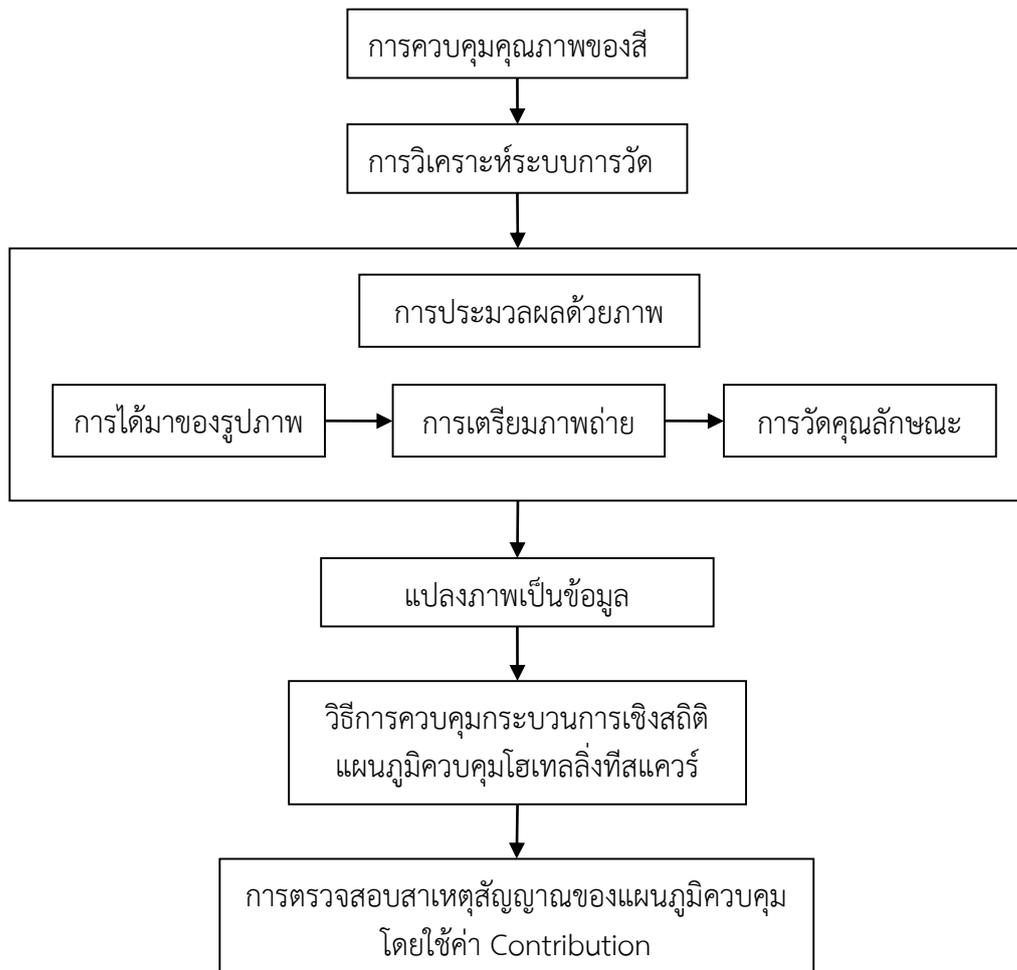
8. สรุปผล

ในการศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาเครื่องต้นแบบสำหรับเป็นเครื่องมือตรวจสอบคุณภาพของผลิตภัณฑ์เนื้อสัตว์แปรรูป และเพื่อพัฒนาวิธีการประเมินผลคุณภาพของผลิตภัณฑ์อาหารโดยเน้นเรื่องการตรวจสอบคุณภาพด้านสี โดยใช้วิธีการประมวลผลภาพ (Image processing) ร่วมกับวิธีการเชิงสถิติที่เหมาะสม

1. เครื่องมือในการประมวลผลภาพที่ใช้ในการศึกษาได้พัฒนาจากงานวิจัยของ พิรญาณ์ (2555) ซึ่งได้เครื่องมือที่มีขนาดเล็กลง น้ำหนักเบาลงสะดวกต่อการเคลื่อนย้าย วัสดุที่ใช้ไม่มีปัญหาเรื่องสนิมและฝุ่นเพื่อลดการปนเปื้อนกับอาหารที่นำมาทดสอบ อีกทั้งมีอุปกรณ์ที่ใช้ในการยึดจับกล้องถ่ายภาพที่มั่นคงและแข็งแรง เพื่อลดการตกหล่นหรือเคลื่อนที่อาจส่งผลกระทบต่อคุณภาพของภาพถ่ายที่จะนำมาวิเคราะห์ และเพื่อสร้างความเชื่อมั่นในการสร้างเครื่องมือวัดจึงทำการศึกษาความสามารถในการวัดซ้ำและการวัดเหมือนของเครื่องมือวัด โดยการนำปัจจัยผู้ทำการทดลองและแสงภายนอกซึ่งเป็นปัจจัยที่ไม่มีผลต่อค่าสีภาพถ่ายไปทำการทดลองเพื่อวิเคราะห์ระบบการวัดโดยการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบเต็ม จากผลการทดลองพบว่าระบบการวัดมีค่าสัดส่วนความแปรปรวนของค่า $L^* a^*$ และ b^* เท่ากับ 0.805% 0.179% และ 0.003% ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าความแปรปรวนของระบบการวัดมีค่าน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับความแปรปรวนเนื่องจากชิ้นงาน ทำให้มีเชื่อมั่นในเครื่องมือวัดว่าค่าที่วัดได้จากเครื่องมือวัดมีความสามารถในการแบ่งแยกผลิตภัณฑ์ และสามารถนำไปใช้ในการตรวจสอบคุณลักษณะด้วยวิธีการเชิงสถิติต่อไป

2. วิธีการควบคุมคุณภาพสีของไส้กรอกโดยใช้วิธีการควบคุมกระบวนการเชิงสถิติ เมื่อทำการศึกษาคูณลักษณะของข้อมูล พบว่าข้อมูลไม่เป็นไปตามเงื่อนไขของแผนภูมิควบคุมชีวฮาร์ท เนื่องจากค่า $L^*, a^*, b^*, h, C^*, S_L^*, S_a^*, S_b^*, S_h$ และ S_C^* มีสหสัมพันธ์กันจึงไม่สามารถใช้ในการควบคุมการประเมินผลสีของไส้กรอกได้ และเนื่องจากความผันแปรของสีนั้น ไม่ได้มีเพียงความผันแปรระหว่างกลุ่มหรือความแตกต่างของสีระหว่างแพ็ค แต่ยังมีมีความผันแปรภายในกลุ่มหรือความแตกต่างของสีภายในแพ็คด้วยเช่นกัน จึงเสนอวิธีการใช้แผนภูมิควบคุมไฮเทคที่สแควร์โดยใช้ค่า $L^*, a^*, b^*, h, C^*, S_L^*, S_a^*, S_b^*, S_h$ และ S_C^* ในการตรวจจับ โดยใช้ทดสอบตัวอย่างผลิตภัณฑ์ไส้กรอกที่มีลักษณะสีที่ไม่เท่ากันมาทำการทดสอบ ถ้ามีค่าสังเกตที่ออกนอกการควบคุมจะใช้ค่าความแตกต่างส่วนเกินที่มากที่สุดของแต่ละค่าในแต่ละตัวอย่าง (Contribution)

ในการหาสาเหตุ แสดงกรอบแนวคิดในการควบคุมคุณภาพสีของไส้กรอกดังรูปที่ 8.1 ซึ่งการนำไปใช้ตรวจสอบคุณภาพของผลิตภัณฑ์ไส้กรอกหลังจากผ่านขั้นตอนการบรรจุในกรณีที่มีสีของผลิตภัณฑ์ที่มีความไม่สม่ำเสมอกัน เพื่อจำลองสถานการณ์ของลักษณะการมองเห็นผลิตภัณฑ์ของผู้บริโภคเมื่อมาเลือกซื้อผลิตภัณฑ์ ควบคุมไม่ให้ของเสียส่งไปถึงผู้บริโภค และเป็นหลักประกันให้กับผู้บริโภคมั่นใจในคุณภาพของผลิตภัณฑ์ และทำให้เจ้าของกระบวนการสามารถตรวจสอบสาเหตุของความผิดปกติเพื่อการปรับปรุงกระบวนการในอนาคตต่อไปได้



รูปที่ 8.1 แสดงกรอบแนวคิดในการควบคุมคุณภาพสีของไส้กรอก

3. นอกจากนี้ยังได้นำแนวคิดไปประยุกต์ใช้กับการผลิตอาหารแปรรูปเนื้อสัตว์ประเภทอื่นๆ ได้แก่ การควบคุมคุณภาพของนักเก็ตไก่ ซึ่งต้องมีการกำหนดวิธีการตรวจสอบ การวิเคราะห์ระบบการวัด การถ่ายภาพ และการควบคุมกระบวนการทางสถิติที่เหมาะสม

ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์

1. **Yuangyai, C.**, Keawsuwan P., and Cheng, C. 2012. Color-based Image Analysis for Statistical Sausage Production Control, Proceeding of the Asia Pacific Industrial Engineering & Management Systems Conference 2012, Phuket.
2. Matwichek, P., and **Yuangyai, C.** 2012. Analysis of factors affecting image-based color detection, Ladkrabang Engineering Journal, 29(3), 31-36.
3. **Yuangyai, C.**, and Matvises, P., and Janjarassuk, U. 2013. Image-based Analysis for Characterization of Chicken Nugget Quality, Jurnal Teknik Industri, 15(2), 125-130.

9. ปัญหาและอุปสรรค

ในขั้นตอนการทดสอบแผนภูมิควบคุมจะพบว่า ในขั้นตอนการวิเคราะห์สาเหตุที่ค่าสั่งเกตออกนอกการควบคุมนั้น ตัวอย่างไส้กรอกที่มีความไม่สม่ำเสมอและไม่สามารถเห็นได้อย่างชัดเจนนั้น ยังต้องมีการวิเคราะห์เพิ่มเติมเนื่องจากการใช้ค่า Contribution อาจจะยังไม่เพียงพอสำหรับการวิเคราะห์ตัวอย่างไส้กรอกที่มีลักษณะดังกล่าว ดังนั้นควรมีศึกษาเรื่องการตีความหมายในการวิเคราะห์สาเหตุที่ค่าสั่งเกตออกนอกการควบคุมเพิ่มขึ้นต่อไปในอนาคต

10. บรรณานุกรม

- กิติศักดิ์ พลอยพานิชเจริญ. 2553. **การวิเคราะห์ระบบการวัด MSA ประมวลผลด้วย Minitab 15.** กรุงเทพฯ : สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี
- กระทรวงอุตสาหกรรม. 2547. **มาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชนไส้กรอกหมู มพข.330/2547.** สำนักงานมาตรฐานกระทรวงอุตสาหกรรม.
- กรมส่งเสริมการส่งออก. **ข้อมูลการค้าและการส่งออก.** [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก : <http://www.depthai.go.th/brขอมลbrการค้าและbrการส่งออก/สถานการณ์ส่งออกรายเดอ น / tabid/297/Default.aspx>.
- ชัยณรงค์ คันทนิต. 2529. **วิทยาศาสตร์เนื้อสัตว์.** กรุงเทพฯ : วัฒนาพานิช.
- ตะวัน พันธุ์แก้ว. 2554. **คู่มือถ่ายภาพด้วยกล้อง DSLR ฉบับสมบูรณ์.** กรุงเทพฯ : โพรวิชั่น.
- บริษัท ศูนย์วิจัยไทยพาณิชย์ จำกัด: ลิขสิทธิ์ กรมส่งเสริมอุตสาหกรรม. **อุตสาหกรรมแปรรูปเนื้อสัตว์ (ไส้กรอกจากเนื้อสุกร)**[ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก: URL: intranet.dip.go.th/doc/download/.../Industrial%20Sausage.pdf
- พิรญาณ์ แก้วสุวรรณ. 2555. “การควบคุมกระบวนการเชิงสถิติโดยใช้ภาพสีสำหรับไส้กรอก.” วิทยานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม บัณฑิตวิทยาลัย. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- เยาวลักษณ์ สุรพันธ์พิศิษฐ์. 2536. **เทคโนโลยีเนื้อสัตว์และผลิตภัณฑ์.** กรุงเทพฯ : สหมิตร ออฟเซต.
- วัชร คุชแก้ว. 2548. “การตรวจวัดคุณภาพสีและลักษณะเนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์ไส้กรอกแฟรงค์เฟิร์ตที่จำหน่ายในเขตลาดกระบัง.” ปัญหาพิเศษปริญญาครุศาสตรอุตสาหกรรมบัณฑิต สาขาวิชาอุตสาหกรรมเกษตร, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- 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.
- Akinbode, A. A., Liu, L. and Ngadi, M. O. 2011. “Microstructural evaluation of deep-fat fried chicken nugget batter coating using confocal laser scanning microscopy.” **Journal of Food Engineering.** 102 : 49-57.
- Albert, A., Perez-Munuera, I., Quiles, A., Salvador, A., Fiszman, S.M. and Hernando, I. 2009. “Adhesion in fried battered nuggets: Performance of different hydrocolloids as preducts using three cooking procedures.” **Food Hydrocolloids.** 23 : 1443-1448.
- Automotive Industry Action Group (AIAG). 2002. **Measurement System Analysis (MSA).** 3rd edition. Michigan.
- 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.
- Datacolor. Color Differences & Tolerances. [online]. Available: <http://knowledgebase.admin/attachments/colordifferencestolerances.pdf>

- 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.
- Effiong Essien. 2003. **Sausage manufacture**. CRC Press
- EHEDG. 2004. Hygienic equipment design criteria Doc. 8 second edition. [Online]. Available :http://www.ehedg.org/uploads/doc08_Hygienic_Equipment_Design_Criteria_Second_Ed.pdf
- 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.
- Girolami, A., Napolitano, F., Faraone, D., Bello, G.D. and Braghieri, A. 2014. "Image analysis with the computer vision system and the consumer test in evaluating the appearance of Lucanian dry sausage." **Meat Science**. 96 : 610–616.
- 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.
- Klein, G. A. 2010. **Industrial Color Physics**. Springer-Verlag, New York.
- 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.
- Lim, S.A.H., Antony, J. and Albliwi, S. 2014. "Statistical Process Control (SPC) in the food industry - A systematic review and future research agenda." **Trends in Food Science & Technology**. 37 : pp.137-151.

- 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.
- 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.
- Plataniotis, K.N. and A.N. Venetsanopoulos. 2000. **Color Image Processing and Applications**. Springer-Verlag, New York.
- 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.
- Wu, D. and Sun, D.W. 2013. “Colour measurements by computer vision for food quality control - A review.” **Trends in Food Science & Technology**. 29 : 5-20.
- 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.
- X-Rite. 2007. **A Guide to Understanding Color Communication**. [Online]. Available : http://www.xrite.com/documents/literature/en/L10-001_Understand_Color_en.pdf
- 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.

11. ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

ผลการทดลองการวิเคราะห์ความสามารถของระบบการวัด

ตารางที่ ก.1 รูปแบบการทดลองและผลการวิเคราะห์ความสามารถของระบบการวัด

ลำดับการสุ่ม	ลำดับทดลอง	ระดับปัจจัย			ผลการทดลอง		
		part	operator	Outside light	L^*	a^*	b^*
30	1	8	1	2	86.1155	1.5589	77.0611
8	2	2	2	2	91.1780	-0.3656	12.7657
24	3	6	2	2	87.7307	-3.3916	43.1814
33	4	9	1	1	85.5812	3.0285	49.6772
19	5	5	2	1	91.0706	-4.2888	32.3485
20	6	5	2	2	90.9807	-4.4191	32.8775
37	7	10	1	1	80.2326	3.3907	44.2221
23	8	6	2	1	88.4700	-2.5809	45.4522
26	9	7	1	2	89.2048	-3.5757	47.5851
2	10	1	1	2	90.0598	1.0946	11.7804
38	11	10	1	2	79.5985	3.3722	42.2139
25	12	7	1	1	89.6180	-3.8686	45.4518
21	13	6	1	1	88.4372	-2.8469	44.9731
9	14	3	1	1	87.6818	0.3648	12.5269
27	15	7	2	1	89.8043	-3.2569	47.5022
12	16	3	2	2	86.6494	0.3874	12.6987
7	17	2	2	1	91.8846	-0.3879	12.8393
11	18	3	2	1	87.5273	0.5113	12.5400
39	19	10	2	1	80.4661	3.6008	44.4562
16	20	4	2	2	87.9229	-0.8568	17.1935
31	21	8	2	1	86.2415	1.7501	76.2953
6	22	2	1	2	91.0959	0.0279	12.6047
14	23	4	1	2	87.9270	-0.6745	17.3230
17	24	5	1	1	91.3089	-4.2686	33.4801
10	25	3	1	2	87.0168	0.5428	12.6080
13	26	4	1	1	88.2612	-0.5256	16.3962
3	27	1	2	1	90.5407	1.3823	11.5873
36	28	9	2	2	85.1275	3.5756	51.5791
29	29	8	1	1	86.0371	2.0974	75.6410
18	30	5	1	2	91.0259	-4.1949	33.4113
32	31	8	2	2	85.9238	1.5241	76.7343
4	32	1	2	2	90.2951	1.3974	11.6006
5	33	2	1	1	91.6695	-0.2044	12.7255
1	34	1	1	1	90.5448	1.3332	11.5199
15	35	4	2	1	88.2321	-0.5025	16.3282
28	36	7	2	2	89.4553	-3.4554	48.3290
35	37	9	2	1	85.6815	4.0193	53.8106
22	38	6	1	2	87.9775	-2.6741	45.1633
40	39	10	2	2	80.1826	3.7446	45.2459
34	40	9	1	2	85.2196	3.7304	52.4798

ตารางที่ ก.2 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่า α^*

ANOVA: α^* versus Part, Operator, Outside light

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

Analysis of Variance for α^*

Source	DF	SS	MS	F	P
part	9	279.1865	31.0207	723.48	0.003 x
operator	1	0.0115	0.0115	0.06	0.850 x
outside light	1	0.0489	0.0489	0.28	0.710 x
part*operator	9	0.6049	0.0672	1.13	0.428
part*outside light	9	0.3153	0.0350	0.59	0.778
operator*outside light	1	0.1979	0.1979	3.33	0.101
Error	9	0.5343	0.0594		
Total	39	280.8993			

x Not an exact F-test.

S = 0.243646 R-Sq = 99.81% R-Sq(adj) = 99.18%

Variance Error Expected Mean Square for Each

Source	component	term	Term (using unrestricted model)
1 part	7.74446	*	(7) + 2 (5) + 2 (4) + 4 (1)
2 operator	-0.00971	*	(7) + 10 (6) + 2 (4) + 20 (2)
3 outside light	-0.00623	*	(7) + 10 (6) + 2 (5) + 20 (3)
4 part*operator	0.00392	7	(7) + 2 (4)
5 part*outside light	-0.01217	7	(7) + 2 (5)
6 operator*outside light	0.01385	7	(7) + 10 (6)
7 Error	0.05936	(7)	(7)

ตารางที่ ก.3 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่า b^*

ANOVA: b^* versus Part, Operator, Outside light

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

Analysis of Variance for b^*

Source	DF	SS	MS
part	9	16822.71	1869.19
operator	1	1.06	1.06
outside light	1	0.54	0.54
part*operator	9	7.49	0.83
part*outside light	9	4.94	0.55
operator*outside light	1	1.08	1.08
Error	9	9.50	1.06
Total	39	16847.33	

x Not an exact F-test.

S = 1.02753 R-Sq = 99.94% R-Sq(adj) = 99.76%

Variance Error Expected Mean Square for Each

Source	component	term	Term (using unrestricted model)
1 part	467.216	*	(7) + 2 (5) + 2 (4) + 4 (1)
2 operator	0.010	*	(7) + 10 (6) + 2 (4) + 20 (2)
3 outside light	-0.001	*	(7) + 10 (6) + 2 (5) + 20 (3)
4 part*operator	-0.112	7	(7) + 2 (4)
5 part*outside light	-0.253	7	(7) + 2 (5)
6 operator*outside light	0.002	7	(7) + 10 (6)
7 Error	1.056		(7)

ภาคผนวก ข

ผลการทดลองการควบคุมกระบวนการเชิงสถิติ

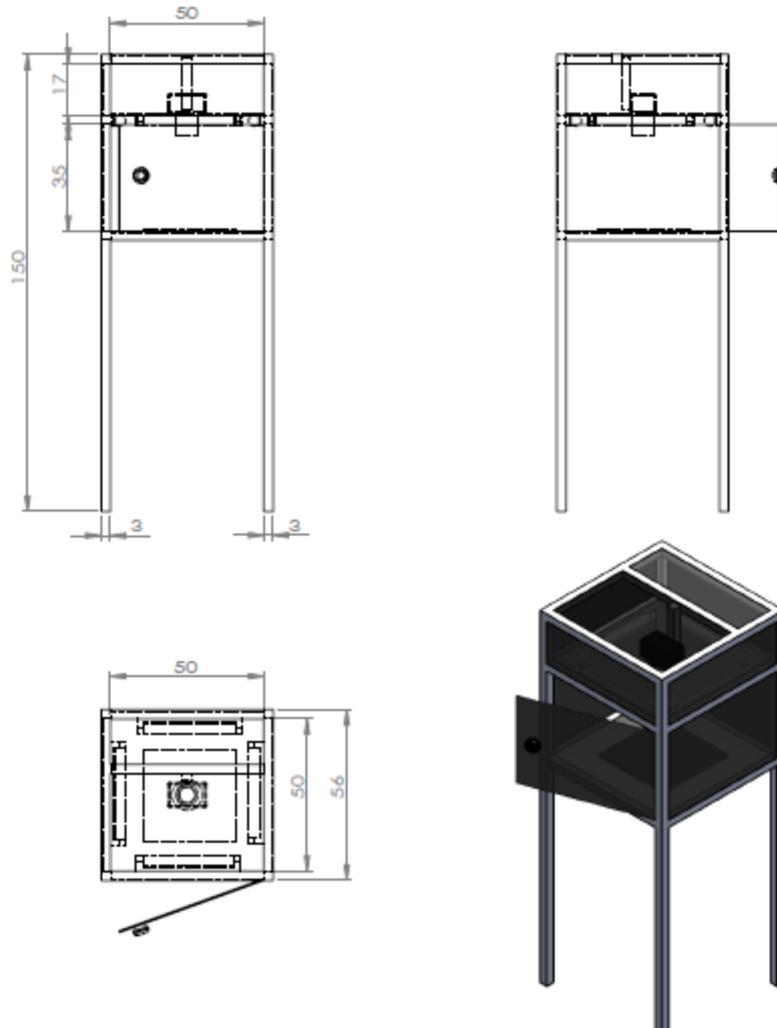
ตารางที่ ข.1 ข้อมูลที่ใช้ในการทดสอบแผนภูมิควบคุมและตัวสถิติไฮเทลลิ่งทีสแควร์ของค่า L^* , a^* และ b^*

ลำดับ	L^*	a^*	b^*	T^2
1	71.5258	15.3067	49.9955	3.8952
2	72.4555	15.3253	48.5931	3.5387
3	73.6333	13.6132	44.8164	5.582
4	72.9571	14.279	47.1313	2.1112
5	72.4582	14.9114	48.545	1.2175
6	72.8068	14.6323	46.9614	2.968
7	73.1963	13.7585	45.1398	4.0627
8	71.2325	16.4113	52.202	5.8212
9	72.5844	14.6288	47.8274	0.3848
10	72.9281	14.6831	47.1282	3.7287
11	72.5534	14.2709	46.9522	0.9291
12	72.1072	15.0567	48.4971	0.79
13	71.5291	15.3775	49.419	4.5501
14	72.7789	14.5029	47.8809	3.1182
15	72.6022	14.6832	47.2757	1.6638
16	71.7854	15.2644	49.8964	2.5281
17	72.346	14.2225	47.6476	2.8653
18	71.1637	16.1235	50.7774	6.2095
19	72.6622	14.0603	46.385	1.9755
20	73.013	14.3462	46.9702	2.2048
21	72.5567	14.449	47.5176	0.1581
22	71.9944	14.8822	48.887	1.4969
23	72.6694	14.6162	48.4077	5.0831
24	72.7995	13.3498	46.0584	7.4178
25	71.8546	15.1148	48.9288	1.6305
26	71.6442	15.8923	50.0985	2.9776
27	72.8071	13.9007	46.4892	1.3082

ตารางที่ ข.2 ข้อมูลที่ใช้ในการทดสอบแผนภูมิควบคุมและตัวสถิติไฮเทลลิ่งทีสแควร์ของค่า L^* , a^* , b^* , h , C^* , S_{L^*} , S_{a^*} , S_{b^*} , S_h และ S_{C^*}

ลำดับ	L^*	a^*	b^*	h	C^*	S_{L^*}	S_{a^*}	S_{b^*}	S_h	S_{C^*}	T^2
1	71.5258	15.3067	49.9955	72.9469	52.3112	3.1838	2.3144	5.9129	1.8879	6.14	23.4939
2	72.4555	15.3253	48.5931	72.4821	50.9757	3.0016	2.2531	5.3735	1.7803	5.6201	28.4705
3	73.6333	13.6132	44.8164	73.0984	46.8577	2.513	1.8439	4.1501	1.658	4.3372	21.3854
4	72.9571	14.279	47.1313	73.1271	49.2689	2.8358	1.946	4.5138	1.7698	4.6889	16.2491
5	72.4582	14.9114	48.545	72.9157	50.8127	3.1039	2.2842	4.9905	2.0249	5.2113	16.3154
6	72.8068	14.6323	46.9614	72.6728	49.2076	2.5817	1.8639	4.4905	1.6494	4.6614	6.188
7	73.1963	13.7585	45.1398	73.0299	47.2115	2.408	1.752	3.8075	1.7552	3.9418	13.2712
8	71.2325	16.4113	52.202	72.5863	54.7481	2.9131	2.463	4.3958	1.8257	4.7342	29.7432
9	72.5844	14.6288	47.8274	72.9958	50.0356	2.6934	1.9918	4.3077	1.6998	4.5196	8.1225
10	72.9281	14.6831	47.1282	72.6803	49.3798	2.3736	1.7627	4.1344	1.5572	4.3014	10.2836
11	72.5534	14.2709	46.9522	73.0481	49.0963	2.8324	1.9645	5.2051	1.8657	5.3548	7.8166
12	72.1072	15.0567	48.4971	72.7325	50.8083	2.8943	2.1394	4.7632	1.923	4.9444	7.4874
13	71.5291	15.3775	49.419	72.6966	51.793	3.2678	2.5901	5.6547	2.2356	5.9053	15.9012
14	72.7789	14.5029	47.8809	73.1425	50.0525	2.4934	2.0897	4.6729	1.8043	4.8857	11.1428
15	72.6022	14.6832	47.2757	72.7171	49.5253	2.6264	1.8885	4.4986	1.7667	4.6519	5.111
16	71.7854	15.2644	49.8964	72.9814	52.2084	2.8439	2.334	5.2336	2.0022	5.4568	14.5797
17	72.346	14.2225	47.6476	73.3432	49.761	3.1737	2.3845	5.5334	2.2925	5.7201	20.7966
18	71.1637	16.1235	50.7774	72.3646	53.303	3.096	2.4504	5.9171	1.9103	6.1736	15.2784
19	72.6622	14.0603	46.385	73.0959	48.4941	2.9098	2.1068	5.3323	1.9369	5.5178	6.9207
20	73.013	14.3462	46.9702	72.9785	49.13	2.6012	1.8455	5.0494	1.6407	5.2114	11.4823
21	72.5567	14.449	47.5176	73.0606	49.6848	2.6019	1.7459	4.3146	1.6472	4.4479	9.7388
22	71.9944	14.8822	48.887	73.0366	51.13	2.9396	2.2812	5.5387	2.0335	5.7467	10.5055
23	72.6694	14.6162	48.4077	73.196	50.5896	2.5621	2.0056	4.4277	1.8149	4.6103	10.3595
24	72.7995	13.3498	46.0584	73.8404	47.9783	2.8282	2.1557	4.9989	1.8766	5.2262	20.8799
25	71.8546	15.1148	48.9288	72.8314	51.2373	2.9185	2.2229	4.7224	1.9201	4.9469	5.166
26	71.6442	15.8923	50.0985	72.3755	52.5846	3.0204	2.1855	5.0674	1.8918	5.2669	12.2073
27	72.8071	13.9007	46.4892	73.3374	48.5475	2.7767	2.0083	4.4141	1.8819	4.5975	4.0267

ภาคผนวก ค
แบบของเครื่องมือประมวลผลภาพที่ใช้ในการทดลอง



รูปที่ ค.1 แบบของเครื่องมือประมวลผลภาพที่ใช้ในการทดลอง

ภาคผนวก ง
ส่วนของโปรแกรม MATLAB

1. คำสั่งที่ใช้ในการแปลงสีจากระบบ RGB เป็นระบบ $L^*a^*b^*$ และคำสั่งในการคำนวณค่า $h, C^*, S_L^*, S_a^*, S_b^*, S_h$ และ S_C^* ในขั้นตอนการประมวลผลภาพ

```
clear
clc
f=imread('31.jpg');
f=im2double(f);
cform = makecform('srgb2lab');
lab_sausage = applycform(f,cform);
l = lab_sausage(:,:,1);
lx = l(:);
a = lab_sausage(:,:,2);
ax = a(:);
b = lab_sausage(:,:,3);
bx = b(:);
ll=mean2(l);
aa=mean2(a);
bb=mean2(b);
lls=std2(l);
aas=std2(a);
bbs=std2(b);
%x=[ll aa bb]
%sx=[lls aas bbs];
%p=[lx ax bx];

%find hue
%cmmap = rgb2hsv(f)
hue=atand(bx./ax);
huem=mean(hue);
hues=std(hue);
Chroma=((ax.^2)+(bx.^2)).^(1/2)
C=mean(Chroma);
CS=std(Chroma);
x=[ll aa bb huem C lls aas bbs hues CS]
```

2. คำสั่งที่ใช้ในขั้นตอนการควบคุมกระบวนการเชิงสถิติ

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

ประวัติผู้วิจัย

1. ชื่อ - นามสกุล (ภาษาไทย) นาย ชุมพล ยวงใย

(ภาษาอังกฤษ) Chumpol Yuangyai

2. สถานที่ทำงาน

สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ถนนฉลองกรุง เขตลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520

โทรศัพท์ 02-737-3000 ต่อ 5135 โทรสาร 02-739-2392

E-mail: chumpol.yuangyai@gmail.com และ kychumpo@kmitl.ac.th

3. ประวัติการศึกษา

ระดับ	สาขา	สถาบัน	ปี พ.ศ.
ปริญญาเอก	วิศวกรรมอุตสาหการและการวิจัย ดำเนินงาน	The Pennsylvania State University, USA	2552
ปริญญาโท	วิศวกรรมอุตสาหการ	Asian Institute of Technology	2543
ปริญญาตรี	วิศวกรรมเครื่องกล	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์	2538

4. ประสบการณ์ทำงาน

ปี	ตำแหน่ง	สถานที่ทำงาน	หน้าที่ความรับผิดชอบ
2555- ปัจจุบัน	ผู้ช่วย ศาสตราจารย์	คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระ จอมเกล้าเจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง	การเรียนการสอน การวิจัยด้านสถิติวิศวกรรม และวิศวกรรมคุณภาพ ในระดับปริญญาตรี และปริญญาโท และการจัดการคุณภาพใน ระดับปริญญาเอก
2553- 2555	อาจารย์	คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระ จอมเกล้าเจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง	การเรียนการสอน การวิจัยด้านสถิติวิศวกรรม และวิศวกรรมคุณภาพ ในระดับปริญญาตรี และปริญญาโท และการจัดการคุณภาพใน ระดับปริญญาเอก
2552-2553	นักวิจัย	The Pennsylvania State University, University Park, PA USA	การวิจัยด้านการออกแบบการทดลองสำหรับ การพัฒนาเครื่องมือแพทย์ในโครงการจาก กองทุนวิจัยแห่งประเทศสหรัฐอเมริกา (US National Science Foundation)
2547-2548	ผู้ช่วยผู้จัดการ ส่วนประกัน คุณภาพ	บริษัท ไทยซีอาร์ที จำกัด (บริษัทในกลุ่มปูนซิเมนต์ ไทย จำกัด (มหาชน), SCG)	การประกันคุณภาพของหลอดภาพโทรทัศน์ การปรับปรุงผลิตภาพของกระบวนการและ ผลิตภัณฑ์
2544-2547	ผู้ช่วยผู้จัดการ ส่วนประกัน คุณภาพ	บริษัท ซีดีที ดิสเพลย์ เทคโนโลยี จำกัด (SCG)	การจัดทำระบบประกันคุณภาพ ISO9000 การประกันคุณภาพของผลิตภัณฑ์ การ

ปี	ตำแหน่ง	สถานที่ทำงาน	หน้าที่ความรับผิดชอบ
			ปรับปรุงผลิตภาพของกระบวนการผลิต หลอดภาพคอมพิวเตอร์
2542-2543	พนักงาน บังคับบัญชา และวิชาชีพ	บริษัท ปูนซิเมนต์ไทย จำกัด (มหาชน)	ได้รับการคัดเลือกจากบริษัทปูนซิเมนต์ไทยให้ ศึกษาในระดับปริญญาโทที่สถาบันเทคโนโลยี แห่งเอเชีย
2538-2542	ผู้จัดการแผนก ผลิต / ผู้จัดการแผนก ประกัน คุณภาพ	บริษัท สยามมากอตโต จำกัด (SCG)	การวางแผนและควบคุมกระบวนการผลิต การจัดทำระบบประกันคุณภาพ ISO9000 การควบคุมคุณภาพ สำหรับกระบวนการผลิต ลูกบดซีเมนต์

5. ประสบการณ์งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

โครงการวิจัย	แหล่งทุน	สถานภาพ
Integrating Experimental Design and Reliability for Multiple Stage Manufacturing of Multi-Scale Devices	National Science Foundation, USA (2010)	ผู้ร่วมวิจัย/ Post doctoral fellow

6. บรรณานุกรมผลงานวิชาการที่เกี่ยวข้อง

1. Matwichek, P., and Yuangyai, C. 2012. Analysis of factors affecting image-based color detection, Ladkrabang Engineering Journal, 29(3), 31-36.
2. Yuangyai, C., and Matvises, P., and Janjarassuk, U. 2013. Image-based Analysis for Characterization of Chicken Nugget Quality, Jurnal Teknik Industri, 15(2), 125-130.
3. Yuangyai, C., Keawsuwan P., and Cheng, C. 2012. Color-based Image Analysis for Statistical Sausage Production Control, Proceeding of the Asia Pacific Industrial Engineering & Management Systems Conference 2012, Phuket.
4. พิรญาณ์ แก้วสุวรรณ และ ชุมพล ยวงใย. 2554. การวิเคราะห์ระบบการวัดของเครื่องมือวัดคุณภาพสีอาหาร, การประชุมวิชาการช่างงานวิศวกรรม ประจำปี 2554 พัทยา ชลบุรี ประเทศไทย