รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

การควบคุมคุณภาพเชิงสถิติสำหรับการวิเคราะห์ภาพเนื้อสัมผัสของอาหาร
Food Texture Image-based Analysis for statistical process control

ผศ.ดร. ชุมพล ยวงใย
นางสาวปิยภรณ์ มาตย์วิเศษ

ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจากเงินรายได้ ประจำปีงบประมาณ 2556
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

การควบคุมคุณภาพเชิงสถิติสำหรับการวิเคราะห์ภาพเนื้อสัมผัสของอาหาร
Food Texture Image-based Analysis for statistical process control

ผศ.ดร. ชุมพล ยวงใย
นางสาวปิยภรณ์ มาตย์วิเศษ

ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจากเงินรายได้ ประจำปีงบประมาณ 2556
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ชื่อโครงการ การควบคุมคุณภาพเชิงสถิติสำหรับการวิเคราะห์ภาพเนื้อสัมผัสของอาหาร
แหล่งเงิน เงินรายได้
ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2556 จำนวนเงินที่ได้รับการสนับสนุน 80,000 บาท
ระยะเวลาทำการวิจัย 1 ปี ตั้งแต่ 1 ต.ค. 2555 ถึง 30 ก.ย. 2556
ชื่อ-สกุล หัวหน้าโครงการ
ผศ.ดร. ชุมพล ยวงใย สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์
ชื่อ-สกุล ผู้ช่วยนักวิจัย
นางสาวปิยภรณ์ มาตย์วิเศษ สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

บทคัดย่อ

คุณลักษณะที่สำคัญต่อการตัดสินใจของผู้บริโภคของการเลือกซื้อนักเกตไก่เกี่ยวข้องกับ ลักษณะปรากฏ สี และความสามารถในการยึดเกาะ อย่างไรก็ตามการตรวจคุณภาพดังกล่าวในปัจจุบันตรวจสอบด้วยสายตามนุษย์ ซึ่งอาจพิจารณาคุณภาพของผลิตภัณฑ์ผิดพลาด ดังนั้นการศึกษาในครั้งนี้จึงมุ่งเน้นไปที่การสร้างเครื่องมือวัดสำหรับการตรวจสอบคุณภาพของนักเกตไก่โดยใช้วิธีการประมวลผลภาพร่วมกับการวิเคราะห์องค์ประกอบสำคัญและการควบคุมกระบวนการทางสถิติ โดยเริ่มจากการศึกษาความสามารถในการวัดซ้ำและวัดเหมือนของเครื่องมือวัด เพื่อให้แน่ใจว่าเครื่องมือวัดสามารถที่จะแยกแยะความแตกต่างได้ ซึ่งจากผลการทดลองพบว่าระบบการวัดมีความสามารถในการแบ่งแยกความแตกต่างของผลิตภัณฑ์นักเกตไก่ และเนื่องจากข้อมูลที่ได้จากการประมวลผลภาพมีคุณลักษณะของนักเกตไก่ที่ถูกวิเคราะห์ทั้งหมด 11 คุณลักษณะ ดังนั้นการวิเคราะห์องค์ประกอบสำคัญ จึงถูกนำมาใช้เพื่อลดคุณลักษณะในการตรวจสอบ ซึ่งสามารถลดคุณลักษณะได้จาก 11 คุณลักษณะให้เหลือเพียง 4 คุณลักษณะ

จากการทดลองและการวิเคราะห์ข้อมูลข้างต้นแสดงให้เห็นว่าการลดคุณลักษณะจะเป็นประโยชน์สำหรับการตรวจสอบความผิดปกติของนักเกตไก่ได้อย่างรวดเร็ว ส่วนแผนภูมิควบคุมสำหรับตัวอย่างเชิงเดี่ยวทำให้เจ้าของกระบวนการตรวจสอบสาเหตุของความผิดปกติเพื่อการปรับปรุงกระบวนการต่อไปในอนาคต

Research Title: Food Texture Image-based Analysis for statistical process control
Researcher: Chumpol Yuangyai and Piyaphorn Mativses
Faculty: Engineering **Department:** Industrial Engineering

ABSTRACT

Customer's decision on buying chicken nugget involve appearance, colors and adhesion characteristic. These characteristics are inspected by human, thus, misclassification might be occurred. Therefore, this study focuses on constructing a measurement instrument for detecting the qualities of chicken nugget using image capturing and analysis. Then gage repeatability and reproducibility (GR&R) study is used to ensure that the instrument is capable of distinguishing nugget differences. After the images capturing and analysis, eleven characteristics of chicken nugget are analyzed. The principal component analysis was applied to reduce the characteristic dimensions from eleven to only four characteristics.

The experiments and data analysis shows that the characteristics reduction is useful for detect abnormality of nuggets. The charts assist the process owner to investigate the cause of out-of-control signal and finally lead to process improvement.

กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยเรื่องการควบคุมคุณภาพเชิงสถิติสำหรับการวิเคราะห์ภาพเนื้อสัมผัสของอาหาร ครั้งนี้ ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง เป็นอย่างยิ่ง ที่ได้สนับสนุนทุนวิจัยจากแหล่งทุนเงินรายได้ ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2556

ชุมพล ยวงใย

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ 1

ABSTRACT 2

กิตติกรรมประกาศ 3

สารบัญ 4

สารบัญตาราง 6

สารบัญรูป 7

บทที่ 1 บทนำ 8

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา 8

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา 10

1.3 ขอบเขตของการศึกษา 10

1.4 ขั้นตอนของการศึกษา 10

บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 12

2.1 ผลิตภัณฑ์อาหารชุบแป้งทอด 12

2.2 นักเกตไก่ 13

2.3 แบบจำลองสี (COLOR MODELS) 17

2.4 วิธีการประมวลภาพ (IMAGE PROCESSING) 19

2.5 การออกแบบการทดลอง 24

2.6 การวิเคราะห์ระบบการวัดของเครื่องมือในการประมวลผลภาพ 27

2.7 การวิเคราะห์องค์ประกอบสำคัญ (PRINCIPAL COMPONENT ANALYSIS) 29

บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย 33

3.1 การสร้างเครื่องมือประมวลผลภาพ 34

3.2 ออกแบบการทดลองเพื่อลดความผันแปรที่เกิดจากเครื่องมือประมวลผลภาพ 35

3.3 การวิเคราะห์ระบบการวัด 36

3.4 การตรวจสอบคุณลักษณะโดยการประมวลผลภาพ 36

3.5 การวิเคราะห์องค์ประกอบสำคัญ 38

3.6 การควบคุมกระบวนการด้วยวิธีการเชิงสถิติ 39

บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผล 41

4.1 ผลการสร้างเครื่องมือประมวลผลภาพ 41

4.2 ผลการออกแบบการทดลองเพื่อพิจารณาปัจจัยที่มีผลต่อค่าสีของภาพถ่าย 42

4.3 ผลการทดลองการวิเคราะห์ระบบการวัด 47

4.4 ผลการตรวจสอบคุณลักษณะโดยการประมวลผลภาพ 51

4.5 ผลการทดลองการวิเคราะห์องค์ประกอบสำคัญ 51

บทที่ 5 57

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ 57

5.1 สรุปผลการวิจัย 57

5.2 ข้อเสนอแนะ 58
บรรณานุกรม 59
ภาคผนวก 64
ภาคผนวก ก. 64
ผลการทดลอง 64
ภาคผนวก ข. 87
ส่วนของโปรแกรม MATLAB 87
ภาคผนวก ค. 90
แบบของเครื่องมือประมวลผลภาพที่ใช้ในการทดลอง 90
ภาคผนวก ง. 91
บทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์ 91
ประวัตินักวิจัย 98

สารบัญตาราง

ตารางที่ หน้า

ตารางที่ 2.1 ตัวอย่างลักษณะสารละลายผสมและอาหารชุบแป้งทอดชนิดต่างๆ 13
ตารางที่ 2.2 ข้อดีและข้อจำกัดของแบบจำลองสีในระบบ RGB L*A*B* HSV และ HSI 18
ตารางที่ 2.3 คำศัพท์พื้นฐานที่ใช้โยดทั่วไปในการประมวลผลภาพ 23
ตารางที่ 4.1 การวิเคราะห์องค์ประกอบสำคัญเบื้องต้น 43
ตารางที่ 4.2 ระดับของปัจจัยที่ใช้ในการทดลองความมีนัยสำคัญ 44
ตารางที่ 4.3 รูปแบบการทดลองและผลการทดสอบความมีนัยสำคัญ 44
ตารางที่ 4.4 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่า L* (ANALYSIS OF VARIANCE FOR L*) 45
ตารางที่ 4.5 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่า A* (ANALYSIS OF VARIANCE FOR A*) 46
ตารางที่ 4.6 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่า B* (ANALYSIS OF VARIANCE FOR B*) 46
ตารางที่ 4.7 ระดับของปัจจัยที่ใช้ในการวิเคราะห์ 48
ตารางที่ 4.8 รูปแบบการทดลองและผลการทดลองการวิเคราะห์ระบบการวัด 48
ตารางที่ 4.9 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่า L* 49
ตารางที่ 4.10 ตารางเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่า L* A* B* 50
ตารางที่ 4.11 ผลการตรวจสอบคุณลักษณะของนักเกตไก่ 80 ชิ้นโดยการประมวลผลภาพ 51
ตารางที่ 4.12 ผลการสร้างเมตริกซ์ความสัมพันธ์ระหว่างคู่ของตัวแปร (CORRELATION MATRIX) ... 52
ตารางที่ 4.13 ผลลัพธ์จากการสกัดองค์ประกอบโดยใช้วิธีการวิเคราะห์องค์ประกอบสำคัญ 52
ตารางที่ 4.14 ผลลัพธ์จากการสกัดองค์ประกอบ 4 องค์ประกอบก่อนการหมุนแกน 53
ตารางที่ 4.15 ผลลัพธ์จากการสกัดองค์ประกอบ 4 ปัจจัยหลังการหมุนแกนแบบ VARIMAX 53
ตารางที่ 4.16 สรุปปัจจัยของแต่ละองค์ประกอบที่วิเคราะห์ได้ 54
ตารางที่ 4.17 FACTOR SCORE COEFFICIENTS 54
ตารางที่ ก.1 รูปแบบการทดลองและผลการทดลองการวิเคราะห์ระบบการวัด 64
ตารางที่ ก.2 รูปแบบการทดลองและผลการทดลองการวิเคราะห์ระบบการวัด 65
ตารางที่ ก.3 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่า A* 66
ตารางที่ ก.4 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่า B* 68
ตารางที่ ก.5 ผลการตรวจสอบคุณลักษณะของนักเกตไก่ 80 ชิ้นโดยการประมวลผลภาพ 81
ตารางที่ ก.6 ผลการตรวจสอบคุณลักษณะของนักเกตไก่ 27 ชิ้นโดยการประมวลผลภาพ 83

สารบัญรูป

รูปที่ หน้า
รูปที่ 1.1 ตัวอย่างคุณภาพด้านสี ความพรุนและความสามารถในการยึดเกาะ 9
ของแป้งชุบทอดนักเกตที่แตกต่างกัน..... 9
รูปที่ 2.1 แมคนักเกต (CHICKEN MC NUGGET)..... 12
รูปที่ 2.2 ขั้นตอนการผลิตนักเกตไก่..... 15
รูปที่ 2.3 L*A*B* MODEL..... 19
รูปที่ 2.5 แสดงขั้นตอนการประมวลผลภาพ..... 21
รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย 33
รูปที่ 3.2 ตัวอย่างเครื่องมือประมวลผลภาพของ ก) เครื่องมือประมวลผลภาพของ PEDRESCHI ET AL. (2006) ข) เครื่องมือประมวลผลภาพของ พิรญาณ์ (2554) 34
รูปที่ 3.3 แบบของเครื่องมือประมวลผลภาพที่ใช้ในงานวิจัย 35
รูปที่ 3.4 กระดาษสีที่ใช้ในขั้นตอนการออกแบบการทดลอง..... 35
รูปที่ 3.5 สีของกระดาษสีที่ใช้ในการทดลองจากระดับ 1 ถึง 10 36
รูปที่ 3.6 การปรับปรุงคุณภาพของภาพถ่าย ก) ภาพถ่ายนักเกตไก่ที่ได้จากการถ่ายภาพ ข) รูปภาพนักเกตไก่ที่ผ่านการตัดพื้นหลัง 37
รูปที่ 3.7 ตัวอย่างรูปภาพที่ทำการการแยกส่วน ก) รูปภาพในระบบ RGB ข) รูปภาพระดับสีเทา ค) รูปภาพขาวดำ ง) พื้นที่ของภาพถ่ายนักเกตโดยการหาขอบภาพ 37
รูปที่ 3.8 ตัวอย่างรูปภาพที่ทำการการแยกส่วนภาพสี ก) รูปภาพนักเกตที่ต้องการแยกส่วนภาพสี ข) รูปภาพส่วนเนื้อนักเกต ค) รูปภาพส่วนแป้งชุบทอดนักเกต ง) รูปภาพส่วนรูพรุนนักเกต..... 37
รูปที่ 3.9 ตัวอย่างที่ใช้แทนลักษณะของนักเกตไก่ที่ปกติ..... 39
รูปที่ 3.10 ตัวอย่างที่ใช้แทนลักษณะของนักเกตไก่ที่ผิดปกติ..... 39
รูปที่ 4.1 ลักษณะเครื่องมือประมวลผลภาพที่ได้จากการปรับปรุง..... 42
รูปที่ 4.2 NORMAL PROBABILITY PLOT OF THE EFFECT ของค่า L*A*B* ในขั้นตอนการออกแบบการทดลอง ก) ค่า L* ข) ค่า A* ค) ค่า B* 45
รูปที่ 4.3 RESIDUAL PLOT ของค่า L*A*B* ในขั้นตอนการออกแบบการทดลอง ก) ค่า L* ข) ค่า A* ค) ค่า B*..... 47
รูปที่ 4.4 RESIDUAL PLOT ของค่า L*A*B* ในขั้นตอนการวิเคราะห์ระบบการวัด 50
รูปที่ 4.5 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบ 56
รูปที่ ก.1 PROBABILITY PLOT ของค่า 1L* 1A* และ 1B* 85
รูปที่ ก.2 PROBABILITY PLOT ของค่า 2L* 2A* และ 2B* 85
รูปที่ ก.3 PROBABILITY PLOT ของค่า 3L* 3A* และ 3B* 86
รูปที่ ก.4 PROBABILITY PLOT ของค่า AREA และ %PORE..... 86
รูปที่ ค.1 แบบของเครื่องมือประมวลผลภาพที่ใช้ในการทดลอง 90

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ประเทศไทยมีนโยบายในด้านอาหารและอุตสาหกรรมการเกษตรในการเป็นครัวของโลก ตั้งแต่ในปี พ.ศ. 2546 เพื่อเป็นการผลักดันนโยบายครัวไทยสู่ครัวโลกให้เป็นรูปธรรมมากยิ่งขึ้น ประเทศไทยจึงได้มีแผนการดำเนินงานโครงการครัวไทยสู่ครัวมาตรฐานของโลก โดยตั้งเป้ายกระดับมาตรฐานโรงงานอุตสาหกรรมด้านอาหารขนาดใหญ่ให้เป็นที่ยอมรับในตลาดส่งออก รวมถึงพัฒนามาตรฐานและเพิ่มขีดความสามารถในการแข่งขันในระดับโลก และในปัจจุบันมีอาหารและสินค้าทางการเกษตรหลายชนิดที่สามารถเป็นสินค้าส่งออกที่มีมูลค่าทางการตลาดเป็นอันดับต้นๆของโลก เช่น ข้าว ไก่แปรรูป กุ้งแช่แข็ง ทูน่ากระป๋อง ผักและผลไม้ เป็นต้น (หนังสือพิมพ์ฐานเศรษฐกิจ. 2554)

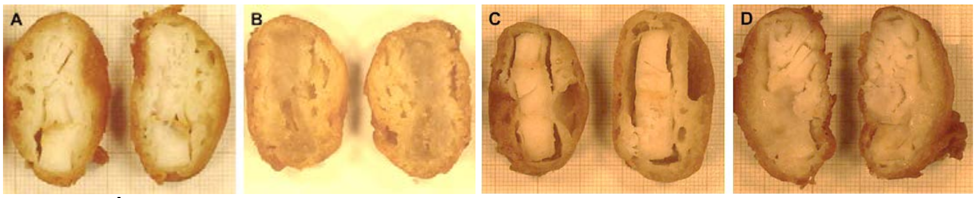
ในส่วนของการส่งออกไก่และผลิตภัณฑ์ไก่แปรรูปของไทยนั้นมีมูลค่ารวม 4.88 5.22 6.03 และ 6.32 พันล้านบาท ในปี 2552 2553 2554 และ 2555 ตามลำดับ ซึ่งมีการปรับตัวสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง โดยไก่แปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ส่งออกหลักในกลุ่มผลิตภัณฑ์ไก่ของไทยคิดเป็นสัดส่วนกว่า 97% ของมูลค่าการส่งออกไก่และผลิตภัณฑ์ทั้งหมด (สถิติการค้าระหว่างประเทศ. 2553; ศูนย์สารสนเทศการเกษตร สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์. 2554; นิตยสาร พิก แอนด์ พอร์ค. 2556)

ผลิตภัณฑ์ไก่แปรรูปที่ประเทศไทยผลิตเพื่อการส่งออกมีหลายชนิด เช่น ไก่ชุบแป้งทอด ขาไก่ย่าง ลูกชิ้นไก่ ไก่เสียบไม้ย่าง อกไก่ทอด และนักเกตไก่ โดยสินค้าเหล่านี้มีมูลค่าส่งออกเพิ่มสูงขึ้นในช่วงที่ผ่านมา นักเกตไก่เป็นผลิตภัณฑ์ไก่แปรรูปประเภทอาหารชุบแป้งทอด ซึ่งถือว่าเป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับสินค้า เนื่องจากทำให้ผลิตภัณฑ์มีลักษณะปรากฏน่าสนใจ มีกลิ่นรสที่ดึงดูดผู้บริโภค ช่วยรักษาหรือป้องกันการสูญเสียความชื้นของผลิตภัณฑ์ในกระบวนการให้ความร้อน สามารผสมเครื่องเทศหรือสมุนไพรบางชนิด และจากลักษณะเด่นของผลิตภัณฑ์อาหารชุบแป้งทอดดังกล่าว ทำให้มีการเติบโตของตลาดเพิ่มมากขึ้น อีกทั้งความนิยมในการบริโภคเพิ่มขึ้นอย่างกว้างขวางทั่วโลก (Oiao et. al. 2007) ผู้ผลิตไก่ได้ให้ความสนใจในการผลิตผลิตภัณฑ์ประเภทชุบแป้งเพิ่มขึ้น ยกตัวอย่างเช่นบริษัท Mc Donald ได้ผลิตแมคนักเกต (chicken Mc nugget) และประสบความสำเร็จเป็นอย่างดี (สุทธวัฒน์. 2537)

นักเกตไก่สามารถเก็บไว้ได้นานโดยการปรับปรุงให้อยู่ในรูปอาหารแช่เยือกแข็งกึ่งสำเร็จรูป โดยการนำเนื้อไก่มาบด อัดเป็นแท่งหรือรูปทรงตามต้องการ ชุบแป้งทอดในระยะเวลาสั้นๆเพื่อให้คงรูปและกึ่งสุก หลังจากนั้นก็นำไปแช่งแข็งและบรรจุกล่องเพื่อขายให้กับผู้บริโภค ซึ้งผู้บริโภคก็จะนำไปทำให้สุกอย่างรวดเร็วก่อนรับประทาน อย่างไรก็ตามผลิตภัณฑ์นักเกตไก่ยังมีปัญหาและต้องการการปรับปรุงคุณภาพด้านเนื้อสัมผัส สี ลักษณะปรากฏ ความพรุนและความสามารถในการยึดหรือการเกาะของตัวแป้งชุบทอดกับเนื้อไก่ ซึ่งเป็นปัญหาที่พบบ่อยมาก (Loewe. 1996)

ทั้งนี้ลักษณะของนักเกตไก่ดังกล่าวมีผลต่อการตัดสินใจของผู้บริโภคและเป็นตัวบ่งชี้คุณภาพของผลิตภัณฑ์ ซึ่งในกระบวนการผลิตใช้วิธีการตรวจสอบด้วยสายตา ทำให้ยากต่อการควบคุมผลิตภัณฑ์และกระบวนการ เพราะการตรวจสอบด้วยวิธีการดังกล่าวมีปัจจัยหลายอย่างที่มีผลต่อการประเมินคุณภาพ เช่น ความสามารถ ความชำนาญและการตัดสินใจของผู้ประเมินแต่ละบุคคล เป็นต้น ซึ่งทำ

ให้ผลที่ได้จากการตรวจสอบคุณภาพของผลิตภัณฑ์ไม่สม่ำเสมอ ยากต่อการควบคุมให้เป็นไปในทิศทางเดียวกัน ทำให้มีผลต่อการยอมรับและความน่าเชื่อถือจากผู้บริโภค อีกทั้งผลการตรวจสอบนั้นมีการบันทึกเป็นแบบของดีและของเสีย ทำให้ลดโอกาสในการวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อการปรับปรุงกระบวนการในอนาคต



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

เพื่อเป็นการลดปัญหาดังกล่าวข้างต้น ดังนั้นจึงได้เสนอการใช้วิธีการประมวลผลภาพ (image processing) ซึ่งในปัจจุบันได้เข้ามามีบทบาทสำคัญในการตรวจสอบคุณภาพอาหารและผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรเนื่องจากสามารถตรวจสอบคุณภาพได้โดยอัตโนมัติทำให้การผลิตมีความรวดเร็ว แม่นยำ มีประสิทธิภาพ เพิ่มความถูกต้องในการตรวจสอบตลอดจน สามารถลดต้นทุนการผลิต (Li & Wang, 1999; Suranjan, Doetkott, Chtioui and Marsh. 1998; Sun. 2000) โดยสามารถใช้ร่วมกับเทคนิคด้วยปัญญาอัจฉริยะ เช่น fuzzy logic และ neural network เป็นต้น เพื่อมาช่วยในการวิเคราะห์ภาพ

ทั้งนี้ในกระบวนการประมวลผลภาพมีความเกี่ยวข้องกับการวัดและแน่นอนว่าค่าที่ได้จากการวัดจะมีความผันแปรเกิดขึ้นเสมอและเนื่องจากในระบบการประมวลผลภาพนั้น มีองค์ประกอบและปัจจัยหลายอย่างที่อาจส่งผลให้สีของภาพถ่ายที่ต้องการวัดเกิดความผันแปร เช่น เครื่องมือวัด พนักงานวัด ปัจจัยแวดล้อม จึงมีความจำเป็นที่ต้องมีการศึกษาปัจจัยเหล่านั้น เพื่อลดความผันแปรที่จะเกิดขึ้น ซึ่งการนำการออกแบบการทดลองมาเป็นเครื่องมือในการพิจารณาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อคุณลักษณะของภาพถ่ายที่ต้องการจะทำให้สามารถลดความผันแปรที่จะเกิดขึ้นในระบบได้ และเมื่อสามารถลดความผันแปรที่จะเกิดขึ้นได้แล้ว การวิเคราะห์ความสามารถของเครื่องมือหรือระบบการวัดโดยการประมวลผลภาพก็ถือได้ว่ามีความสำคัญต่อทั้งประสิทธิภาพและทำให้เกิดความเชื่อมั่นในความสามารถในการแบ่งแยกผลิตภัณฑ์ของระบบการวัดระบบอีกทั้งยังเป็นประโยชน์ในการปรับปรุงกระบวนการ

ในกรณีที่มีการตรวจสอบคุณลักษณะหลายๆ ด้านโดยการประมวลผลภาพจะพบว่ามีตัวแปรเป็นจำนวนมาก ซึ่งส่งผลให้การวิเคราะห์คุณภาพเป็นไปได้ยาก ดังนั้นเทคนิควิเคราะห์องค์ประกอบสำคัญ (principal component analysis) จึงถูกนำมาใช้เพื่อหาความสัมพันธ์ของตัวแปรและลดจำนวนตัวแปรโดยการรวมตัวแปรหลาย ๆ ตัวให้อยู่ในปัจจัยหรือองค์ประกอบเดียวกัน ซึ่งจะทำให้ได้องค์ประกอบหรือตัวแปรใหม่ และสามารถหาค่าข้อมูลได้ จึงสามารถนำไปเป็นตัวแปรสำหรับการวิเคราะห์ทางสถิติต่อไป

เมื่อได้ค่าคุณลักษณะหรือปัจจัยที่ต้องการแล้ว เทคนิคควบคุมกระบวนการเชิงสถิติ (statistical process control) เป็นเทคนิคที่ถูกนำมาใช้ในการแก้ปัญหา โดยมีประโยชน์ในการทำให้กระบวนการ

มีความเสถียรภาพ การปรับปรุงความสามารถของกระบวนการตลอดจนการลดความผันแปรที่เกิดขึ้นในกระบวนการและสามารถนำไปใช้ได้กับกระบวนการที่หลากหลาย (Montgomery. 2009) ซึ่งในปัจจุบันวิธีการควบคุมกระบวนการเชิงสถิติถูกใช้อย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรม แต่ทั้งนี้ยังไม่พบว่ามีการใช้วิธีการประมวลผลภาพร่วมกับการวิเคราะห์องค์ประกอบสำคัญและวิธีการควบคุมเชิงสถิติมาใช้ในการตรวจสอบคุณภาพและควบคุมกระบวนการผลิตนักเกตไก่ ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่จะทำการศึกษา เพื่อให้การควบคุมและตรวจสอบคุณภาพของนักเกตไก่ มีประสิทธิภาพ เสถียรภาพ ความน่าเชื่อถือ ความสะดวกและถูกต้องเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากทั้งหมดนี้มีผลต่อความพึงพอใจและการตัดสินใจซื้อของผู้บริโภค

จากงานวิจัยของพิรญาณ์ (2555) ได้สร้างระบบการวัดสำหรับการประเมินคุณภาพสีของไส้กรอกโดยใช้วิธีการประมวลผลภาพและวิธีการควบคุมกระบวนการเชิงสถิติ โดยได้ใช้แผนภูมิควบคุมโฮเทลลิ่งทีสแควร์เพื่อทำการทดสอบความผิดปกติแบบ Spike และ Mean shift และแนะนำให้ใช้แผนภูมิควบคุมสำหรับตัวอย่างเชิงเดี่ยวในการวิเคราะห์ค่า L*a*b* ในการหาสอบสาเหตุของความผิดปกติ จะเห็นได้ว่างานวิจัยเป็นการตรวจสอบคุณลักษณะสีของผลิตภัณฑ์ไส้กรอกเพียงอย่างเดียว เนื่องจากไส้กรอกเป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการบดผสมส่วนประกอบรวมกันทำให้ผลิตภัณฑ์เป็นเนื้อเดียวและมีสีตามธรรมชาติของส่วนประกอบที่ใช้สม่ำเสมอกันตลอดทั้งชิ้น (กระทรวงอุตสาหกรรม. 2547) ซึ่งถือได้ว่าเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีลักษณะไม่ซับซ้อน ทั้งนี้ยังมีผลิตภัณฑ์อาหารอีกหลายประเภทรวมถึงนักเกตไก่ที่มีลักษณะผลิตภัณฑ์ที่ซับซ้อน คือมีชั้นของเนื้อที่ถูกเคลือบด้วยชั้นของแป้งชุบทอด ทำให้คุณภาพผลิตภัณฑ์แบ่งเป็นหลายประการ

ดังนั้นในงานวิจัยครั้งนี้จึงได้นำวิธีการประมวลผลภาพและการวิเคราะห์องค์ประกอบสำคัญร่วมกับการควบคุมกระบวนการเชิงสถิติมาประยุกต์ใช้ในการประเมินผลคุณลักษณะของนักเกตไก่เพื่อให้การตรวจสอบคุณภาพนักเกตไก่มีประสิทธิผลเพิ่มมากขึ้น

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

1.2.1 เพื่อสร้างเครื่องมือประมวลผลภาพและวิธีการประเมินผลคุณภาพที่มีความเหมาะสมและมีความสามารถในการประเมินผลคุณภาพของนักเกตไก่

1.2.2 เพื่อเสนอวิธีการควบคุมคุณภาพเชิงสถิติของนักเกตไก่

1.3 ขอบเขตของการศึกษา

1.4.1 ครอบคลุมถึงการศึกษาวิธีการประเมินผลคุณภาพของนักเกตไก่ที่ผลิตจากเนื้อไก่โดยใช้วิธีการประมวลผลด้วยภาพ ขั้นตอนการวิเคราะห์องค์ประกอบสำคัญ และใช้แผนภูมิควบคุมในการตรวจสอบและควบคุมคุณภาพของนักเกตไก่

1.4.2 ตัวอย่างนักเกตไก่ที่ใช้ศึกษานำมาจากตามท้องตลาด

1.4 ขั้นตอนของการศึกษา

ขั้นตอนของการศึกษามีดังนี้

1.4.1 ศึกษาข้อมูลเบื้องต้น เกี่ยวกับปัญหาการตรวจสอบคุณภาพของอาหาร รวมทั้งศึกษาทฤษฎีที่ เกี่ยวข้องดังนี้ ผลิตภัณฑ์อาหารชุบแป้งทอด นักเกตไก่ ขั้นตอนการผลิตนักเกตไก่และคุณลักษณะที่ต้องการ วิธีการประมวลภาพ การออกแบบการทดลอง การ

วิเคราะห์ระบบการวัด การวิเคราะห์องค์ประกอบสำคัญและการควบคุมกระบวนการเชิงสถิติ

1.4.2 ศึกษาขั้นตอน วิธีการที่ใช้ในการประมวลผลภาพ และการสร้างอุปกรณ์

1.4.3 ออกแบบการทดลองเพื่อลดความผันแปรของระบบ

1.4.4 วิเคราะห์ระบบการวัดโดยศึกษาความสามารถในการวัดซ้ำและการวัดเหมือนของเครื่องมือวัด (GR&R) เพื่อสร้างความเชื่อมั่นในการสร้างเครื่องมือวัด

1.4.5 ตรวจสอบคุณลักษณะโดยการประมวลผลภาพ โดยแปลงภาพเป็นข้อมูลด้วยโปรแกรม MATLAB

1.4.6 ใช้เทคนิควิเคราะห์องค์ประกอบนำมาช่วยเพื่อลดจำนวนตัวแปร

1.4.7 เลือกใช้แผนภูมิควบคุมสำหรับแต่ละองค์ประกอบที่ได้จากการวิเคราะห์ และศึกษาลักษณะขององค์ประกอบเพื่อประกอบการใช้งานแผนภูมิควบคุม ดังนี้ การตรวจสอบการแจกแจงแบบปกติและการตรวจสอบสหสัมพันธ์

1.4.8 ประยุกต์ใช้ในการตรวจคุณภาพของนักเกตไก่

บทที่ 2
เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้กล่าวถึงแนวคิดทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ ผลิตภัณฑ์อาหารชุบแป้งทอด นักเกตไก่ วิธีการประมวลภาพ การออกแบบการทดลอง การวิเคราะห์ระบบการวัดของเครื่องมือในการประมวลผลภาพ การวิเคราะห์องค์ประกอบสำคัญและการควบคุมกระบวนการเชิงสถิติ เพื่อเป็นแนวทางเข้าสู่กระบวนการวิจัยต่อไป

2.1 ผลิตภัณฑ์อาหารชุบแป้งทอด

ผลิตภัณฑ์อาหารชุบแป้งทอดเป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับอาหาร เช่น กุ้งชุบแป้งทอด ไก่ชุบแป้งทอดและนักเกตไก่ เป็นต้น ซึ่งผลิตภัณฑ์เหล่านี้มักได้รับความนิยมและยอมรับจากผู้บริโภค เนื่องจากผลิตภัณฑ์มีลักษณะปรากฏน่าสนใจ มีกลิ่นรสที่ดึงดูดผู้บริโภค ช่วยรักษาหรือป้องกันการสูญเสียความชื้นของผลิตภัณฑ์ในกระบวนการให้ความร้อน สามารผสมเครื่องเทศหรือสมุนไพรบางชนิด เพิ่มขนาดและน้ำหนักของผลิตภัณฑ์ การเตรียมหรือปรุงสามารถทำได้ง่ายและช่วยเพิ่มความหลากหลายของผลิตภัณฑ์ และจากลักษณะเด่นของผลิตภัณฑ์อาหารชุบแป้งทอด ทำให้มีการเติบโตของตลาดเพิ่มมากขึ้น ผู้ผลิตไก่ได้ให้ความสนใจในการผลิตผลิตภัณฑ์ประเภทชุบแป้งเพิ่มขึ้นโดยบริษัท Mac Donald ได้ผลิตแมคนักเกต (chicken Mc nugget) และประสบความสำเร็จเป็นอย่างดี (สุทธวัฒน์. 2537)

รูปที่ 2.1 แมคนักเกต (chicken Mc nugget)
ที่มา : http://eatthis.menshealth.com/node/106288

2.1.1 แป้งชุบทอดหรือแป้งสำหรับประกอบอาหารทอด

แป้งชุบทอดหรือแป้งสำหรับประกอบอาหารทอด หมายถึง แป้งที่ผสมกับส่วนประกอบอื่น ใช้ชุบอาหารก่อนนำไปทอด เพื่อทำให้กรอบ (สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. 2534) จากคำนิยามจะเห็นได้ว่า องค์ประกอบส่วนใหญ่ของแป้งชุบทอดคือแป้ง ซึ่งประกอบด้วยสตาร์ชและโปรตีนเป็นส่วนใหญ่ ซึ่งคุณสมบัติขององค์ประกอบเหล่านี้ส่งผลถึงคุณลักษณะของผลิตภัณฑ์แป้งชุบทอดในด้านต่างๆ

ตารางที่ 2.1 ตัวอย่างลักษณะสารละลายผสมและอาหารชุบแป้งทอดชนิดต่างๆ

ชนิดแป้งผสม	อัตราส่วนแป้งผสมน้ำ	ลักษณะสารละลายแป้งผสม	ลักษณะอาหารชุบแป้งทอด
1. แป้งสาลีเอนกประสงค์	1:1.5	แป้งเกาะติดอาหารบางส่วน มีความหนืดข้นน้อย	สีแป้งเหลือง พองฟู กรอบเล็กน้อย
	1:1.25	มีความข้นหนืดพอดี แป้งเกาะติดอาหารทั่ว	สีเหลืองเสมอกัน พองฟู กรอบร่วน
2. แป้งสาลีขนมปัง	1:1	หนืดข้นมากเกินไป ชุบอาหารไม่ติด	แป้งไม่ติดอาหาร แยกอยู่คนละส่วน
	1:1.25	แป้งละลายดี หนืดข้นพอเหมาะ เกาะติดอาหาร	สีเหลืองน้ำตาล พองฟูน้อย กรอบ
3. แป้งข้าวเจ้า	1:1	หนืดข้นมากเกินไป ชุบอาหารไม่ติด	แป้งไม่ติดอาหาร
	1:1.25	แป้งหนืดน้อย ชุบอาหารไม่ค่อยติด	สีขาว ไม่พองฟู แป้งกรอบแข็ง
4. แป้งข้าวโพด	1:1	แป้งตกตะกอนเร็ว ชุบอาหารไม่ติด	แป้งแยกกันอยู่คนละส่วนกับอาหาร สีแป้งเป็นสีขาว กรอบแข็ง
5. แป้งมันสำปะหลัง	1:1	น้ำแป้งเหลวชุบอาหารไม่ติด	แป้งแยกกันอยู่คนละส่วนกับอาหาร สีแป้งเป็นสีขาว ไม่พองกรอบ
6. แป้งผสม ก 3:1	1:1.5	มีความข้นหนืดดี ชุบอาหาร	แป้งกรอบร่วน พองฟู แป้งสีเหลืองอมน้ำตาล
7. แป้งผสม ข 3:1	1:1.25	มีความข้นหนืดดี ชุบอาหารติดทั่ว	แป้งกรอบแข็งเล็กน้อย พองฟู มีสีเหลือง

หมายเหตุ แป้งผสม ก = แป้งสาลีเอนกประสงค์ต่อแป้งข้าวเจ้า
แป้งผสม ข = แป้งสาลีขนมปังต่อแป้งข้าวเจ้า

ที่มา : อรอนงค์และคณะ (2526)

2.2 นักเกตไก่

นักเกต เป็นผลิตภัณฑ์ชุบแป้งหรือชุบแป้งและเกล็ดขนมปังป่น (battered and breaded products) ซึ่งมีลักษณะปรากฏเป็นที่น่าสนใจและมีกลิ่นรสเป็นที่ดึงดูดใจของผู้บริโภค โดยมีการผลิตจากการนำเนื้อสัตว์มาตัดเป็นชิ้นคลุกกับส่วนผสมต่างๆ หรือบดผสมกับส่วนผสมต่างๆ เช่นเกลือเครื่องเทศ แล้วนำไปชุบน้ำแป้งชุบทอดซึ่งมีส่วนผสมหลักคือ แป้งและส่วนผสมอื่นๆ ได้แก่ เกลือ

น้ำตาล ผงฟู ไข่ผง และเครื่องเทศ จากนั้นจึงนำไปคลุกกับขนมปังป่น เก็บรักษาโดยการแช่เยือกแข็งก่อนรับประทานนำมาทอดในน้ำมัน จะได้ผลิตภัณฑ์ที่มีสีเหลืองกรอบน่ารับประทาน (อังคณา. 2546)

2.2.1 ขั้นตอนการผลิตนักเกตไก่

2.2.1.1 การบดผสม (grinding) เป็นขั้นตอนที่บดผสมเนื้อไก่ด้วยเครื่องบดผสม มีการเติมเกลือเพื่อเป็นการสกัดโปรตีนส่วนที่ละลายเกลือได้ แล้วเติมเครื่องปรุงรสและเครื่องเทศต่างๆ บดผสมให้เป็นเนื้อเดียวกัน ในขั้นตอนนี้จะต้องควบคุมอุณหภูมิในการผลิตประมาณ 10 องศาเซลเซียสหรือต่ำกว่า

2.2.1.2 การขึ้นรูป (forming) เนื้อไก่ที่ได้จากขั้นตอนการบดผสมจะถูกนำมาขึ้นรูปผ่านแม่พิมพ์ที่มีขนาดและรูปร่างต่างๆ ในทางอุตสาหกรรมนิยมใช้เครื่องจักรในการขึ้นรูป เนื่องจากประหยัดเวลา ขนาดและรูปร่างที่มีความสม่ำเสมอและช่วยลดการปนเปื้อนจากจุลินทรีย์ อย่างไรก็ตามขนาดและรูปร่างของผลิตภัณฑ์ขึ้นอยู่กับความต้องการของผู้บริโภค

2.2.1.3 การคลุกกับแป้งสำหรับคลุก การคลุกผลิตภัณฑ์กับแป้งสำหรับคลุกอาหารมีวัตถุประสงค์เพื่อให้ผิวของวัตถุดิบสามารถยึดเกาะกับน้ำแป้งได้ดีขึ้น อาจมีการเติมเกลือและเครื่องเทศต่างๆในแป้งสำหรับคลุกด้วยก็ได้เพื่อปรุงแต่กลิ่นรส

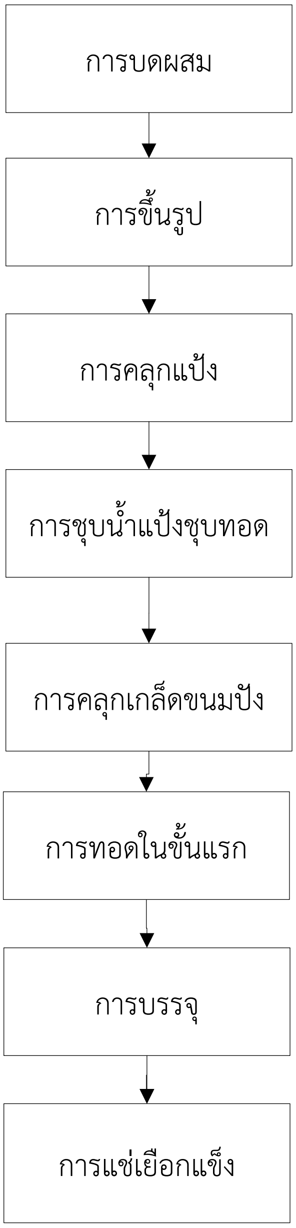
2.2.1.4 การชุบน้ำแป้งชุบทอด (battering) เป็นขั้นตอนเคลือบผลิตภัณฑ์หรือเป็นการที่ช่วยให้ผลิตภัณฑ์ยึดเกาะกับเกล็ดขนมปังได้ดีขึ้น น้ำแป้งชุบทอดที่ใช้ควรมีอุณหภูมิประมาณ 10 องศาเซลเซียสหรือต่ำกว่า และควรคนอย่างสม่ำเสมอเพื่อป้องกันการเกิดการแขวนลอยของน้ำแป้ง

2.2.1.5 การคลุกเกล็ดขนมปัง (breading) เป็นขั้นตอนที่จะมีหรือไม่มีก็ได้แล้วแต่ชนิดของนักเกต การชุบน้ำแป้งชุบทอดและเกล็ดขนมปังจะช่วยปรับปรุงเนื้อสัมผัสและลักษณะปรากฏของผลิตภัณฑ์ให้ดีขึ้น โดยเกล็ดขนมปังช่วยห่อหุ้ม (coat) ผลิตภัณฑ์ขั้นตอนนี้ควรทำอย่างรวดเร็วเพื่อป้องกันการปนเปื้อนและการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์

2.2.1.6 การทอดในขั้นแรก (pre-frying) เป็นขั้นตอนเพื่อให้เกิดการยึดตัวของแป้งกับเนื้อไก่ให้มีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นซึ่งจะทำให้การแปรรูปโดยการแช่เยือกแข็งต่อไปทำได้ง่ายและสะดวกขึ้น นอกจากนี้การทอดทำให้สีของผลิตภัณฑ์น่ารับประทานเพิ่มขึ้นและทำหน้าที่เป็นเกราะป้องกันการสูญเสียความชื้นระหว่างการเก็บรักษาโดยการแช่เยือกแข็ง อุณหภูมิปกติที่ใช้ในการทอดอยู่ในช่วง 182-193 องศาเซลเซียส ถ้าอุณหภูมิต่ำเกินไปแป้งจะไม่สุก แต่ถ้าอุณหภูมิสูงเกินไปอาจทำให้สีคล้ำหรือไหม้ เวลาที่ใช้ประมาณ 30 วินาที การทอดมักจะกระทำโดยการใช้สายพานเป็นตัวพาผลิตภัณฑ์ลงสู่กระทะทอด ผลิตภัณฑ์เหล่านี้ก่อนบริโภคต้องทอดเป็นเวลาประมาณ 4 นาที ทั้งนี้ขึ้นกับขนาดและความหนาของผลิตภัณฑ์ (อังคณา. 2546)

2.2.1.7 การบรรจุ (packaging) เป็นการป้องกันผลิตภัณฑ์ถูกทำลายและสูญเสียความชื้นระหว่างการเก็บรักษาในสภาพแช่เยือกแข็ง

2.2.1.8 การแช่เยือกแข็ง (freezing) แช่เยือกแข็งผลิตภัณฑ์ที่อุณหภูมิต่ำกว่า -18 องศาเซลเซียส เพื่อยืดอายุการเก็บรักษาและลดกิจกรรมของจุลินทรีย์ก่อนส่งถึงมือผู้บริโภค



รูปที่ 2.2 ขั้นตอนการผลิตนักเกตไก่

2.2.2 คุณลักษณะที่ต้องการของนักเกตไก่

นักเกตไก่ เป็นผลิตภัณฑ์อาหารชุบทอดอย่างหนึ่งซึ่งคุณลักษณะของอาหารชุบทอดจะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของแป้งเหลวที่ใช้ชุบทอดและส่วนผสมของเนื้อนักเกตที่ใช้ชุบทอด

2.2.2.1 คุณลักษณะที่ต้องการของส่วนผสมของเนื้อนักเกต

นอกจาก กลิ่น รสชาติและความสดใหม่ของเนื้อนักเกตแล้ว ยังมีคุณลักษณะอื่นๆที่เป็นคุณลักษณะที่ต้องการอีก ซึ่งจากรายงานการวิจัยการพัฒนาแป้งเหลวชุบทอดสำหรับนักเกตไก่แช่เยือกแข็ง (จันทนี. 2546) ได้มีการศึกษาคุณสมบัติของผลิตภัณฑ์นักเกตไก่ทั้งส่วนผสมของเนื้อและส่วนผสมของแป้งเหลว ซึ่งมีค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการตรวจสอบคุณภาพ คือ ปริมาณความชื้น ปริมาณไขมัน น้ำหนัก สี และเนื้อสัมผัส ได้แก่ ความแข็ง (hardness) ความเหนียวหนึบ

(adhesiveness) ค่าการเกาะตัว (cohesiveness) เนื่องจากคุณสมบัติทั้งหมดเหล่านี้มีผลต่อความพึงพอใจของผู้บริโภค

2.2.2.2 คุณลักษณะที่ต้องการของแป้งเหลวชุบทอด

คุณสมบัติของแป้งเหลวชุบทอดที่ใช้ในการชุบทอดผลิตภัณฑ์นักเกตไก่นั้นถือว่ามีความสำคัญต่อความพึงพอใจและการตัดสินใจของผู้บริโภคอย่างมาก เนื่องจากเป็นส่วนประกอบที่เคลือบที่อยู่ภายนอก อีกทั้งลักษณะคุณภาพของแป้งชุบทอดจะเกิดขึ้นหลังการทอด ซึ่งคุณลักษณะที่ต้องการของแป้งชุบทอดมีดังนี้

1) ลักษณะปรากฏ (appearance) สามารถแบ่งลักษณะทางคุณภาพที่กำหนดการยอมรับของผู้บริโภคได้ดังนี้ (Loewe. 1996)

- ความอ่อนนุ่ม (tenderness)
- ความเหนียว (roughness)
- ความข้น (thickness)
- เนื้อสัมผัส (textuer)
- ความใส (translucency)
- ความพรุน (porosity)

ตัวอย่างเช่น การใช้แป้งข้าวเหนียวและแป้งข้าวโพดเป็นแป้งผสมชุบทอด จะให้ลักษณะการเคลือบที่หนาขึ้น แต่เนื้อสัมผัสของแป้งผสมชุบทอดจะเปลี่ยนไป โดยจะมีลักษณะที่เหนียวขึ้นเนื่องจากระดับการเกิดเจลาติไนเซชันที่มากเกินไปของสตาร์ช ในทางตรงกันข้ามการเคลือบที่บางกว่าและมีความข้นหนืดน้อยกว่าจะทำให้มีฟองอากาศเกิดที่ผิวของแป้งผสมชุบทอด อันเนื่องมาจากการระเหยของน้ำทำให้มีผิวของแป้งผสมชุบทอดโปร่งขึ้น ทำให้เนื้อสัมผัสมีความกรอบมากขึ้น

2) สี (color) สีของผลิตภัณฑ์ชุบแป้งทอดมีความเกี่ยวข้องกันอย่างมากกับลักษณะปรากฏ การดูดซับน้ำมันที่ใช้ในการทอดและปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลของน้ำตาลรีดิวซิงกับโปรตีน จะมีผลทำให้สีของผลิตภัณฑ์ชุบทอดเข้มขึ้น เราจะสามารถควบคุมสีได้โดยควบคุมวิธีในการทอดและชนิดของสารตัวกลางที่ใช้ในการทอด

3) ความสามารถในการยึดเกาะ (adhesion) ในระหว่างการเก็บรักษาในห้องเย็นและขนส่งเป็นช่วงเวลาที่สำคัญต่อการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติการยึดเกาะของแป้งชุบทอด เพราะว่าเกิดการเคลื่อนไหวขึ้น บางครั้งทำให้เกล็ดขนมปังหลุดออกหรือชิ้นผลิตภัณฑ์อาหารเกิดการแตกหัก โดยเฉพาะชิ้นที่อยู่ด้านล่างของภาชนะบรรจุ และในการทอดแบบน้ำมันท่วม (deep frying) โดยทั่วไป จะทำให้การยึดติดลดลง เนื่องจากชิ้นอาหารภายในเกิดการหดตัวจากการได้รับความร้อน ดังนั้นจึงควรทำให้ชิ้นอาหารที่จะนำมาชุบทอดนั้นสุกเสียก่อน จะช่วยให้การยึดเกาะดีขึ้น นอกจากนั้นยังมีสารบางอย่างที่ใช้เป็นส่วนผสมในแป้งชุบทอดเพื่อที่จะทำให้การยึดเกาะดีขึ้น ได้แก่ สารพอลิฟอสเฟต โปรตีนจากยีสต์ น้ำมันพืช แป้งออกซิไดซ์และกัมจากพืช

4) ความกรอบ (crispness) ความกรอบเป็นคุณลักษณะที่สำคัญอย่างหนึ่งที่ยากต่อการระบุปริมาณ ถ้าในผลิตภัณฑ์ไม่มีความกรอบจะเกิดลักษณะเหนียว หรือนุ่มแบบแฉะ การเคลือบของแป้งชุบทอดจะต้องแสดงลักษณะโครงสร้างของชั้นแป้งที่สามารถต้านการเคี้ยวในระยะแรกและค่อยๆลดลงทีละน้อยเมื่อผลิตภัณฑ์อยู่ในปาก

5) กลิ่นรส (flavor) ถึงแม้ว่าผลิตภัณฑ์จะมีสี เนื้อสัมผัสและความกรอบที่ดีแต่กลิ่นรสจะมีผลโดยตรงต่อประสาทสัมผัสของมนุษย์และจะกระตุ้นให้เกิดการบริโภคหรือปฏิเสธการบริโภคขึ้น

ได้ นอกจากการเลือกสูตรแป้งชุบทอดที่ใช้สารให้กลิ่นรสดีแล้ว กลิ่นยังขึ้นกับวิธีในการแปรรูป เวลาและอุณหภูมิของการทอด องค์ประกอบและลักษณะของน้ำมันที่ใช้ทอดและชนิดของเกล็ดขนมปังที่ใช้

2.2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับคุณภาพของนักเกตไก่

Albert et. al. (2007) ได้ทำการศึกษาความสามารถในการยึดเกาะของแป้งชุบของนักเกต 3 ชนิด ได้แก่ oxidised starch xanthan gum และ HPMC อีกทั้งถูกทำให้สุกด้วยวิธีที่แตกต่างกัน คือ การทอดแบบน้ำมันท่วม การอบด้วยตู้อบลมร้อนและการอบด้วยตู้อบไมโครเวฟ จากนั้นตรวจสอบคุณภาพนักเกตปลาโดยใช้การประมวลผลภาพ ผลที่ได้ทำให้ทราบว่าคุณภาพของนักเกตปลาที่ได้ขึ้นอยู่กับชนิดของแป้งชุบและวิธีในการปรุงให้สุก

Qiao et. al. (2009) ใช้เทคนิคการประมวลผลภาพร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมเพื่อศึกษาการทำนายสมบัติทางกลของนักเกตไก่ที่ถูกทอด โดยเนื้อสัมผัสของนักเกตไก่เป็นพารามิเตอร์ที่เขาสนใจ ซึ่งความสามารถในการรับแรง พลังงานที่ใช้ในจุดแตกหักและความแข็งของนักเกตไก่ถูกพิจารณา ซึ่งคุณสมบัติเหล่านี้จะเปลี่ยนแปลงไปตามระยะเวลาในการทอด จากผลการศึกษาพบว่าสัมประสิทธิ์ของการทำนายมีค่าสูงถึง 0.84

จันทนี และคณะ (2552) ศึกษาการพัฒนาแป้งเหลวชุบทอดสำหรับนักเกตไก่แช่เยือกแข็งเพื่อให้มีลักษณะของความหนืดที่เหมาะกับการยึดเกาะกับเนื้อ จากผลการศึกษาพบว่าการเพิ่มส่วนผสมในเนื้อไก่บดและใช้แป้งเหลวที่มีส่วนผสมของแป้งสาลีและแป้งข้าวโพดมีผลทำให้คุณภาพของผลิตภัณฑ์นักเกตไก่พร้อมบริโภค (ที่ไม่แช่เยือกแข็ง) ในด้านเนื้อสัมผัสและลักษณะปรากฏดีขึ้น ส่วนเมื่อทำเป็นผลิตภัณฑ์นักเกตไก่แช่เยือกแข็ง พบว่าการเลือกใช้แป้งดัดแปลงในส่วนผสมของเนื้อไก่ร่วมกับการใช้แป้งเหลวที่เติมแป้งข้าว 10% หรือเติมแป้งดัดแปลง 5% จะทำให้ผลิตภัณฑ์นักเกตไก่แช่เยือกแข็งมีคุณภาพที่ดีขึ้น

Akinbode et. al. (2011) กล่าวว่า ความพรุนและขนาดของรูพรุนมีความสำคัญมากสำหรับคุณสมบัติทางจุลภาคของอาหารทอดซึ่งมีความจำเป็นในการเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการและการพัฒนาผลิตภัณฑ์ จึงได้ทำการศึกษาเพื่อการอธิบายลักษณะของรูพรุนและปริมาณการกระจายของไขมันในการทอดนักเกตไก่แบบน้ำมันท่วม โดยใช้กล้องจุลทรรศน์เลเซอร์แบบ confocal โดยตัวอย่างถูกทอดที่อุณหภูมิ 170 180 และ 190 °C ในการวิเคราะห์จะถ่ายภาพแป้งชุบทอดที่ผ่านการทอดและนำภาพมาวิเคราะห์กระจายไขมันและรูพรุน ผลที่ได้คือ อุณหภูมิและเวลาในการทอดมีผลต่อการกระจายของไขมัน ส่วนความพรุนมีค่าอยู่ระหว่าง 4.97% ถึง 32.7% ซึ่งเป็นผลมาจากอุณหภูมิที่ใช้ทอดและขนาดของรูพรุนมีค่าประมาณระหว่าง 1.20 ถึง 550 ไมครอน

จากงานวิจัยดังกล่าวข้างต้นจะเห็นได้ว่าผลิตภัณฑ์นักเกตยังมีปัญหาในเรื่องคุณภาพด้านสี ลักษณะปรากฏ ความสามารถในการยึดเกาะและความพรุนของแป้งชุบทอด ซึ่งจากงานวิจัยได้ใช้เทคนิคต่างๆมาประยุกต์ใช้ในการตรวจสอบคุณภาพเหล่านี้รวมถึงวิธีการประมวลผลภาพและจากผลการวิจัยพบว่าการตรวจสอบคุณภาพนักเกตไก่มีประสิทธิผลเพิ่มมากขึ้น

2.3 แบบจำลองสี (color models)

สีเป็นคุณลักษณะของอาหารอย่างหนึ่งที่มีผลต่อการตัดสินใจของผู้บริโภค เนื่องจากเป็นสิ่งแรกที่ผู้บริโภคจะใช้ในประเมินคุณภาพในเบื้องต้น

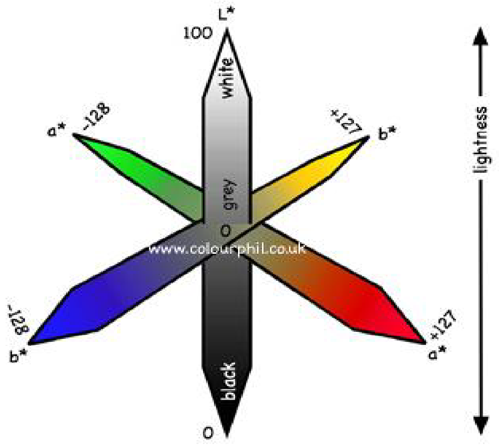
ตารางที่ 2.2 ข้อดีและข้อจำกัดของแบบจำลองสีในระบบ RGB L*a*b* HSV และ HSI (พิรญาณ์. 2554; พิทักษ์พงศ์. 2555)

ระบบสี	ข้อดี	ข้อจำกัด	ตัวอย่างการใช้งาน
RGB	ง่ายต่อการใช้งานเพราะภาพที่ถ่ายออกมาจะอยู่ในระบบ RGB (Ford,and Roberts. 1998)	สีของภาพขึ้นกับอุปกรณ์เช่น กล้อง จอภาพ สแกนเนอร์ (Mendoza. 2006)	Ahmad et al. ใช้วิธีการประมวลผลภาพในการแบ่งแยกสีของอาการผิดปกติในเมล็ดถั่วเหลือง
L*a*b*	- สีของภาพมีความคงที่ไม่ขึ้นกับอุปกรณ์เช่น กล้อง จอภาพ สแกนเนอร์ และเครื่องพิมพ์ (Yam,and Papadakis. 2004) - ปรับตัวได้กับหลายสภาวะแสง (Mendoza et al. 2007) - นิยมใช้ในงานวิจัยด้านอาหาร (Yam and Papadakis. 2004) - เป็นระบบที่แนะนำสำหรับการวัดสีอาหารที่มีผิวโค้ง (Mendoza et. al. 2006)	ไม่สามารถเข้าใจได้ในทันทีศึกษาการแปลความหมายค่า L* a* b* ก่อน (Mendoza. 2006)	- Pedreschi et al (2006) ได้นำวิธีการประมวลผลภาพมาประยุกต์ใช้ในการวัดสีของมันฝรั่งทอด - พิรญาณ์ (2554) ใช้วิธีการประมวลผลภาพในการประเมินคุณภาพไส้กรอก
HSV	HSV ที่มีความละเอียดในการจำแนกสีได้มากกว่า RGB (สมเกียติ ,2550)	ไม่สามารถเข้าใจได้ทันทีต้องศึกษาการแปลความหมายค่า HSV ก่อน	ใช้ในการค้นหาเมฆในรูปถ่ายจากดาวเทียม (ชินวัฒน์ และสุเจตน์. 2547)
HIS	เหมาะกับภาพที่มีความเข้มของสีแตกต่างกัน (Du and Sun. 2004)	- ไม่สามารถเข้าใจได้ทันทีต้องศึกษาการแปลความหมายค่า HSI ก่อน - สีของภาพขึ้นกับอุปกรณ์ (Ford and Roberts. 1998)	Du and Sun (2003) ใช้วีธีการประมวลผลภาพในการแบ่งแยกระดับคุณภาพของซอสพิซซ่า

ซึ่งในงานวิจัยได้เลือกใช้แบบจำลองสีในระบบ L*a*b* มาใช้ในการวิเคราะห์คุณภาพด้านสีของนักเกตไก่ เนื่องจากเป็นระบบสีที่ไม่ขึ้นกับอุปกรณ์ สามารถปรับตัวได้กับหลายสภาวะแสงและเป็นที่นิยมในงานวิจัยด้านอาหาร

ระบบ L*a*b* เป็นระบบการวัดสีที่เป็นมาตรฐานสากล พัฒนาโดย Commission International d’ Eclairage ในปี 1976 ระบบ L*a*b* ประกอบด้วย ส่วนประกอบ L* กำหนดค่าความสว่างของสี ค่าอยู่ในช่วง 0 ถึง 100 ส่วนประกอบ a* แสดงองค์ประกอบระหว่างสีเขียวและแดง มีค่าอยู่ในช่วง –128 ถึง +127 (256 ระดับ) เช่นเดียวกับส่วนประกอบ b* ซึ่งแสดงองค์ประกอบ

ระหว่างสีน้ำเงินและสีเหลือง (Baldevbhai and Anand. 2012) โดยระบบนี้นิยมใช้ในงานวิจัยด้านอาหาร (Yam and Papadakis. 2004) ซึ่งในงานวิจัยนี้จะทำการแปลงภาพจากระบบ RGB เป็นระบบ L*a*b* โดยระบบ RGB เป็นระบบสีของแสง จากความเข้มของสามสีหลัก ได้แก่ แดง เขียว และน้ำเงิน ทั้งนี้เนื่องจากระบบ L*a*b* ให้ช่วงสีที่กว้างกว่าซึ่งรวมสีที่มีอยู่ทั้งหมดของระบบ RGB และ CMYK



รูปที่ 2.3 L*a*b* model
ที่มา : Baldevbhai and Anand (2012)

2.4 วิธีการประมวลภาพ (image processing)

การประมวลผลภาพ (image processing) คือ การให้คอมพิวเตอร์ประมวลผลภาพ เพื่อให้ทราบว่าภาพนั้นคือภาพอะไรหรือมีสิ่งที่สนใจอยู่ในภาพหรือไม่ โดยไม่ต้องใช้สายตาของตนมาช่วยตัดสิน การคิดคำนวณนั้นมีหลายวิธี ซึ่งแต่ละวิธีก็มีประโยชน์แตกต่างกัน ไม่ว่าจะเป็นการนำเอาสีแต่ละจุด (pixel) มาคิด การคิดคำนวณเป็นบริเวณหลายๆจุดรวมๆกัน (area) เช่น การดูพื้นผิว (texture) การดูแบบ (pattern) การวิเคราะห์หารูปร่าง หรือการวิเคราะห์แบบอื่นๆ เพื่อหาค่าที่สามารถระบุได้ว่า ภาพนั้นมีลักษณะอย่างไร ซึ่งจะนำไปสู่การตัดสินใจได้ว่าสิ่งนั้นเป็นสิ่งที่เรากำลังค้นหาหรือสนใจอยู่หรือไม่ (ยุทธพงศ์และคณะ. 2553)

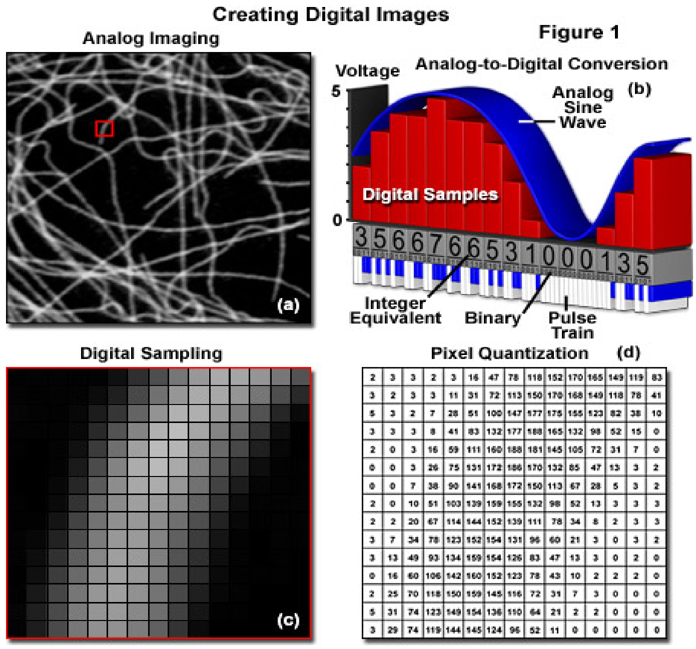
2.4.1 โปรแกรม MATLAB (Matrix Laboratory)

เป็นซอฟต์แวร์ในการคำนวณและการเขียนโปรแกรม ที่มีความสามารถครอบคลุมตั้งแต่การพัฒนาอัลกอริทึม การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และการทำ simulation ของระบบ การสร้างระบบควบคุม และโดยเฉพาะเรื่อง image processing และ wavelet การสร้างเมตริกซ์ นอกจากนี้ MATLAB ยังสามารถทำงานได้ทั้งในลักษณะของการติดต่อโดยตรง คือ การเขียนคำสั่งเข้าไปทีละคำสั่ง เพื่อให้ประมวลผลไปเรื่อยๆ หรือสามารถที่จะรวบรวมชุดคำสั่งเป็นโปรแกรมได้ (ยุทธพงศ์และคณะ. 2553)

2.4.2 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับการประมวลผลภาพดิจิตอล

การประมวลผลภาพดิจิตอลเป็นกระบวนการที่ใช้ในการจัดการข้อมูลซึ่งเกี่ยวข้องกับการแปลงข้อมูลที่เป็นรูปภาพต่างๆ ให้เป็นสัญญาณอนาล็อก (analogue signal) ให้อยู่ในรูปของ

สัญญาณดิจิตอล (digital signal) เพื่อใช้ในการประมวลผลผ่านทางคอมพิวเตอร์ได้ และยังสามารถนำมาใช้ในการลดปัญหาของภาพ เป็นต้น อีกทั้งยังสามารถนำไปใช้ประโยชน์ในทางอื่น เช่น การตกแต่ง การส่งรูปไปตามสายนำสัญญาณจากที่แห่งหนึ่งไปยังอีกที่หนึ่ง การเก็บข้อมูลไว้ในหน่วยความจำเพื่อทำอัลบั้มภาพอิเล็กทรอนิกส์ เพื่อใช้ประโยชน์ในการทำแฟ้มพนักงาน การตรวจสอบคุณภาพชิ้นงาน เป็นต้น ในการแปลงภาพให้เป็นสัญญาณดิจิตอลนั้น ระบบจะนำรูปภาพอนาล็อกที่รับเข้ามา (รูปที่ 2.4a) ไปคำนวณโดยกระบวนการ sampling และ quantization (รูปที่ 2.4b) และส่งข้อมูลออกมาในรูปแบบดิจิตอล (รูปที่ 2.4c) จากนั้นคอมพิวเตอร์จะเก็บข้อมูลภาพลงหน่วยความจำ โดยการจองหน่วยความจำภายในเครื่องในรูปแบบของอาร์เรย์ โดยค่าในแต่ละช่องของอาร์เรย์แสดงถึงคุณสมบัติต่างๆ ของรูปที่พิกเซลนั้นๆ และตำแหน่งของช่องอาร์เรย์ก็เป็นตัวกำหนดตำแหน่งของพิกเซลภายในภาพด้วย (รูปที่ 2.4d) (ยุทธพงศ์และคณะ. 2553)

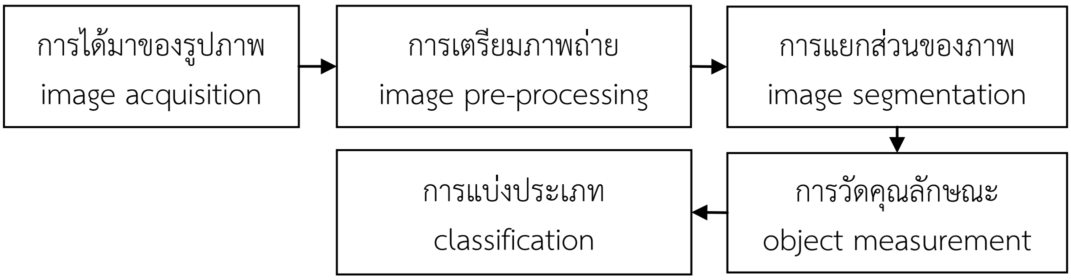


รูปที่ 2.4 การแปลงภาพอนาล็อกให้เป็นภาพดิจิตอล

ที่มา : http://zeiss-campus.magnet.fsu.edu

2.4.3 ขั้นตอนพื้นฐานของการประมวลผลภาพ

ขั้นตอนการประมวลผลภาพโดยทั่วไปประกอบด้วย 5 ขั้นตอนดังรูปที่ 2.5 (Du and Sun. 2004)



รูปที่ 2.5 แสดงขั้นตอนการประมวลผลภาพ

2.4.3.1 การได้มาของรูปภาพ (image acquisition)

การรับสัญญาณจากอุปกรณ์ถ่ายภาพต่าง ๆ ซึ่งอยู่ในรูปสัญญาณอนาล็อก แล้วแปลงสัญญาณที่ได้ให้เป็นสัญญาณดิจิตอล เช่น กล้องถ่ายภาพดิจิตอล กล้องวีดีทัศน์ กล้องเว็บแคม เครื่องสแกน หรืออุปกรณ์รับสัญญาณภาพอื่นๆ เป็นต้น

แสงสว่าง เป็นสิ่งจำเป็นในการได้มาของรูปภาพสำหรับการประเมินคุณภาพของอาหาร สภาวะของแสงจะส่งผลกระทบต่อคุณภาพของรูปภาพ ซึ่งภาพถ่ายที่มีคุณภาพสูงจะช่วยลดเวลาและลดความซับซ้อนของขั้นตอนการประมวลผลภาพ

2.4.3.2 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 และ การประมวลผลทั่วไปเบื้องต้น (local pre-processing) เช่น การปรับความชัด การปรับความสว่าง การกำจัดสัญญาณรบกวน เป็นต้น

2.4.3.3 การแยกส่วนของภาพ (image segmentation)

เป็นการแยกวัตถุที่เราสนใจในภาพออกจากพื้นหลังของภาพ วิธีการที่ใช้ในการประเมินคุณภาพของอาหารแบ่งออกเป็น 4 วิธี ได้แก่ การแยกบริเวณโดยการทำเทรชโฮลด์ (thresholding-based segmentation) การแยกบริเวณโดยใช้ขอบของวัตถุ (region based) การแยกบริเวณโดยการทำกราเดียนท์ (gradient-based segmentation) และการแยกบริเวณโดยการแบ่งประเภท (classification-based segmentation)

2.4.3.4 การวัดคุณลักษณะ (object measurement)

หลังจากการแยกส่วนของภาพ เพื่อให้ได้ส่วนของวัตถุที่เราสนใจ จากนั้นจะทำการวัดคุณลักษณะของวัตถุ สำหรับการประเมินคุณภาพของอาหารลักษณะของภาพแบ่งออกเป็น 4 กลุ่มคือ ขนาด รูปร่าง สี และเนื้อสัมผัส

2.4.3.5 การแบ่งประเภท (classification)

การจำแนกวัตถุโดยการแบ่งประเภทตามเซตของข้อจำกัดในแต่ละประเภท โดยการเปรียบเทียบวัตถุที่วัดได้กับเกณฑ์ที่กำหนดว่าวัตถุที่วัดได้มีความใกล้เคียงกับเกณฑ์ใดมากที่สุด สำหรับวิธีที่นิยมใช้ในการประเมินคุณภาพอาหาร คือ สถิติ (statistical) ตรรกศาสตร์คลุมเครือ (fuzzy Logic) และ ระบบโครงข่ายประสาท (neural network)

2.4.4 วิธีการประมวลผลภาพในการตรวจสอบคุณภาพอาหาร

การตรวจสอบคุณลักษณะที่มีคุณภาพของอาหารในปัจจุบันจะขึ้นอยู่กับการประเมินด้วยสายตาของมนุษย์ แต่อย่างไรก็ตามกระบวนการนี้ต้องใช้ประสาทสัมผัสในการประเมิน ซึ่งอิทธิพลจากปัจจัยทางสรีรวิทยาส่งผลได้ง่ายต่อมนุษย์ผู้ประเมินและผลลัพธ์ที่ได้คือ การประเมินผลที่เป็น

ความเห็นส่วนตัวและความไม่แม่นยำ ดังนั้นการตรวจสอบที่เป็นอัตโนมัติทำให้การผลิตมีความรวดเร็วและมีประสิทธิภาพ เพิ่มความถูกต้องในการตรวจสอบตลอดจนลดต้นทุนการผลิต ซึ่งกว่าทศวรรษที่ผ่านมาความก้าวหน้าในด้านฮาร์ดแวร์และซอฟต์แวร์สำหรับการประมวลภาพดิจิตอลได้นำไปสู่การพัฒนาระบบ computer vision โดยได้นำมาใช้ในการประเมินคุณภาพของอาหารที่หลากหลาย (Locht et. al. 1997) ซึ่งระบบนี้มีความรวดเร็ว ประหยัด แม่นยำ และให้ความถูกต้องมากขึ้น (Li & Wang, 1999; Suranjan, Doetkott, Chtioui & Marsh. 1998; Sun. 2000)

ในการวิเคราะห์ภาพสำหรับผลิตภัณฑ์อาหาร สีเป็นคุณลักษณะที่มีอิทธิพลและตัวบ่งชี้ที่มีประสิทธิภาพที่ช่วยลดความซับซ้อนของการแยกวัตถุและการตรวจสอบวัตถุจากภาพ ลักษณะสีของวัตถุที่สามารถแยกได้ด้วยการตรวจสอบพิกเซลภายในขอบเขตของวัตถุ ซึ่งงานวิจัยจำนวนมากที่ประสบความสำเร็จในการวัดสีของผลิตภัณฑ์อาหาร

2.4.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิธีการประมวลผลภาพ

จากการศึกษาของ Lu et. al. (2000) การแยกสีภาพจากการแบ่งส่วนภาพในการประเมินผล เนื้อหมูสด ได้แก่ ค่าเฉลี่ยและค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของคลื่นสีแดง การแบ่งกลุ่มโดยใช้สีเขียวและสีฟ้า แบ่งจากวิธีการทางสถิติโดยใช้เทคนิค partial least squares และแบบจำลองเครือข่ายใยประสาท และทำนายค่าของสีโดยใช้ภาพ ผลการศึกษาพบว่า ระบบการประมวลผลภาพร่วมกับเครือข่ายใยประสาท เป็นเครื่องมือที่มีประสิทธิภาพในการประเมินผลความสดของเนื้อหมูโดยใช้สี

การตรวจสอบคุณภาพการกระจายของซอสบนพิซซ่าก็เป็นอีกหนึ่งการประยุกต์ใช้วิธีการประมวลภาพ โดย Sun และ Brosnan (2003) ได้ทำการตรวจสอบลักษณะการแพร่กระจายของซอสมะเขือเทศบนหน้าพิซซ่าด้วยการประมวลภาพจากคอมพิวเตอร์ ผลที่ได้คือ การประมวลด้วยภาพมีค่าความผิดพลาด 13% เมื่อเปรียบเทียบกับการตรวจสอบด้วยตาของมนุษย์ และวิธีการนี้มีความเป็นไปได้ที่จะนำมาใช้ 92%

Mendoza et. al. (2006) ได้ทำการสอบเทียบการวัดสีของผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรโดยใช้การวิเคราะห์ภาพ โดยได้วัดค่าสีของภาพถ่ายผักและผลไม้ในระบบสี sRGB HSV และ L*a*b* ซึ่งเงื่อนไขในการวิจัยจะพิจารณาถึงความเหมาะสมกับชิ้นงานที่มีผิวโค้ง จากผลการทดลองพบว่าระบบ L*a*b* เป็นระบบที่แนะนำสำหรับการวัดสีอาหารที่มีผิวโค้ง

จากการศึกษาของ Pedreschi et. al. (2006) ได้นำวิธีการประมวลผลภาพมาประยุกต์ใช้ในการวัดสีของมันฝรั่งทอดโดยใช้อุณหภูมิในการทอดที่แตกต่างกัน โดยทำการแปลงภาพจากระบบ RGB เป็นระบบ L*a*b* เพื่อใช้ในการเปรียบเทียบสีของมันฝรั่งทอด ผลการทดลองพบว่าวิธีการประมวลผลภาพแสดงให้เห็นได้ว่าถ้าทอดที่อุณหภูมิสูงมันฝรั่งจะเป็นสีดำ โดยสามารถพิจารณาได้จากค่าสีในระบบ L*a*b* ซึ่งจะถูกบันทึกที่เวลาการทอดต่างกัน อุณหภูมิต่างกันโดยใช้พารามิเตอร์การเปลี่ยนแปลงสีรวม

Sánchez et. al. (2008) ได้ศึกษาการวิเคราะห์ปริมาณความแตกต่างขององค์ประกอบ (ไขมัน เนื้อเยื่อเกี่ยวพัน และเนื้อไร้มัน) และตรวจสอบคุณภาพผลิตภัณฑ์แฮมในระหว่างกระบวนการหมักเกลือ (salting process) ด้วยวิธีการประมวลภาพด้วยคอมพิวเตอร์ ผลที่ได้คือ วิธีการประมวลภาพสามารถนำมาใช้ในการวิเคราะห์โดยการร่วมกับค่าตัวแปรอื่นๆ เพื่อทำนายลักษณะของแฮมในระหว่างกระบวนการหมักเกลือได้

จากงานวิจัยดังกล่าวข้างต้นจะเห็นได้ว่าวิธีการประมวลผลภาพสามารถตรวจสอบคุณภาพของอาหาร วิเคราะห์ความแตกต่างขององค์ประกอบหรือใช้ในการทำนายคุณภาพของอาหารได้ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงนำวิธีประมวลผลภาพมาประยุกต์ใช้กับการตรวจสอบคุณภาพนักเกตไก่และเป็นแนวทางในการนำไปพัฒนาเพื่อประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร

2.4.6 คำศัพท์พื้นฐานที่ใช้โดยทั่วไปในการประมวลผลภาพ

ในการประมวลผลภาพด้วยระบบคอมพิวเตอร์มีคำศัพท์เฉพาะมากมาย ซึ่งได้ระบุคำศัพท์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ไว้ในตารางที่ 2.1 (ยุทธพงศ์และคณะ. 2553; ปฐมากรณ์และคณะ. 2551; วราศิริและคณะ. 2551)

ตารางที่ 2.3 คำศัพท์พื้นฐานที่ใช้โยดทั่วไปในการประมวลผลภาพ

คำศัพท์	คำอธิบาย
การประมวลผลภาพ (image Processing)	คือการนำรูปภาพเข้าจากนั้นทำการส่งรูปภาพออก เป็นการเรียกใช้ขั้นตอนหรือกรรมวิธีใดๆ มากระทำกับภาพ เพื่อปรับปรุงคุณภาพของภาพให้ได้ภาพใหม่ที่มีคุณสมบัติตามต้องการเช่น ความคมชัด การประหยัดพื้นที่ในการเก็บข้อมูล หรือใช้สำหรับการประมวลผลในระดับสูงเช่น การจดจำรูปร่างลักษณะได้อย่างแม่นยำ
การวิเคราะห์รูปภาพ (image Analysis)	คือการนำรูปภาพเข้าจากนั้นทำการส่งค่าที่วัดได้ออก วิธีนี้จะได้กระบวนการประมวลผลภาพเพื่อทำให้ได้ค่าการวัดออกมาเช่น การวัดขนาดผักและผลไม้ในงานอุตสาหกรรม เป็นต้น
การแปลงภาพสีให้เป็นภาพขาวดำ (thresholding)	เป็นกระบวนการแปลงภาพสีให้มีการแสดงผลได้แค่ 2 ระดับคือ ขาวและดำ โดยจะแปลงข้อมูลภาพให้ภาพเป็นไบนารี่ (binary Image) มีกระบวนการแปลงภาพที่มีความเข้มหลายระดับ เป็นภาพที่มีความเข้มเพียง 2 ระดับหรือ 1 บิตคือ 0 และ 1 โดย 0 แทนจุดภาพที่มีสีขาว และ 1 แทนจุดภาพที่มีสีดำ เทคนิคเทรซโฮลด์คือการเปรียบเทียบค่าพิกเซลกับค่าคงที่ที่เรียกว่าค่าเทรซโฮลด์ (threshold Value) โดยค่าพิกเซลในภาพที่มีค่าน้อยกว่าค่าเทรซโฮลด์จะถูกกำหนดเป็น 1 (จุดดำ) แต่ถ้าค่าของพิกเซลใดๆ ในภาพมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับเทรซโฮลด์จะถูกกำหนดให้เป็น 0 (จุดขาว)
รูปภาพขาวดำ (black-white Image, binary Image)	รูปภาพที่ประกอบไปด้วยสีขาวและสีดำเท่านั้น คอมพิวเตอร์สามารถวิเคราะห์รูปภาพชนิดนี้ได้ง่ายกว่ารูปภาพชนิดอื่นๆ เนื่องจากรูปภาพขาวดำมีค่าข้อมูลเพียง 2 ค่าเท่านั้น โดยจะแทนสีดำด้วยค่า 0 และสีขาวด้วยค่า 1 หรือแทนสีดำด้วยค่า 0 และสีขาวด้วยค่า 255
รูปภาพสี (color image)	รูปภาพสีจะมีอยู่หลายรูปแบบเช่น รูปแบบ RGB ซึ่งเหมาะสำหรับแสดงผลบนจอคอมพิวเตอร์ รูปแบบ CMY เหมาะจะใช้ในงานที่เกี่ยวกับเครื่องพิมพ์เป็นต้น
RGB Image หรือ true color Image	เป็นรูปที่เก็บโดยใช้อาร์เรย์ 3 มิติ ขนาด $m \times n \times 3$ โดยที่ m คือความยาว และ n คือความกว้างของภาพในหน่วยจุดภาพ ส่วนมิติสุดท้ายนั้น ในแต่ละมิติจะเก็บค่าสีแยกกัน คือสีแดง สีเขียว และสีน้ำเงิน

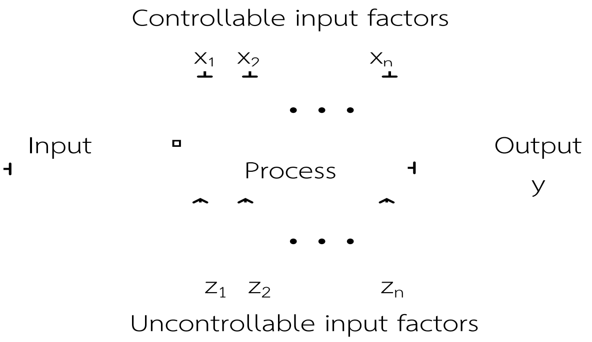
ตารางที่ 2.3 คำศัพท์พื้นฐานที่ใช้โยดทั่วไปในการประมวลผลภาพ (ต่อ)

คำศัพท์	คำอธิบาย
รูปภาพระดับสีเทา (gray-scale image)	รูปที่แต่ละพิกเซลจะเก็บข้อมูลของความเข้มแสงเป็นข้อมูล 8 บิต ทำให้แต่ละพิกเซลสามารถมีความเข้มแสงได้ถึง 256 ระดับ โดยจะแทนสีดำด้วยเลข 0 และแทนสีขาวด้วยเลข 255 ซึ่งค่าระหว่าง 0-255 จะเป็นความเข้มแสงในโทนสีเทา
พิกเซล (pixel)	เป็นส่วนประกอบภาพหรือเรียกได้อีกอย่างหนึ่งว่าจุดภาพ จำนวนของพิกเซลยิ่งมากยิ่งจะทำให้ภาพมีความละเอียดคมชัดมากยิ่งขึ้น ซึ่งแต่ละพิกเซลสามารถแทนด้วยสถานะลอจิก 0 และ 1 ค่าที่กำกับแต่ละพิกเซลจะแสดงถึงค่าเฉลี่ยของความเข้มแสงในภาพที่พิกเซลนั้นแทนอยู่ โดยค่าของพิกเซลนี้มีค่าตั้งแต่ 0 ถึง 1
วีธีการหาขอบภาพ (edge detection method)	คือการตรวจสอบโดยการลากเส้นขอบว่าผ่านหรือใกล้เคียงกับจุดใดโดยการคำนวณจากการเปลี่ยนแปลงของความเข้มในตำแหน่งที่ใกล้เคียงกับจุดดังกล่าว ซึ่งวิธีการหาขอบภาพประกอบด้วยหลายวิธีซึ่งในงานวิจัยนี้ใช้วิธี canny ในการหาขอบภาพเนื่องจากวีธีดังกล่าวมีการใช้ gaussian filter ก่อนการหาขอบจึงสามารควบคุมระดับความละเอียดของขอบภาพที่ต้องการและสามารถลดสัญญาณรบกวนได้ จึงทำให้สามารถลดขั้นตอนการประมวลผลภาพเบื้องต้น (preprocessing)

2.5 การออกแบบการทดลอง

2.5.1 การออกแบบการทดลอง (Design of Experiment : DOE)

เป็นเทคนิคทางสถิติชั้นสูงที่ใช้ในการปรับตั้งค่าสภาวะของกระบวนการให้เหมาะสมหรือให้เป็นไปตามสภาพที่เราต้องการ โดยอาศัยแบบจำลองหรือสมการทางคณิตศาสตร์มาอธิบายความสัมพันธ์ของปัจจัย (factor) ที่มีผลต่อกระบวนการ สามารถศึกษาผลของหลายๆ ปัจจัยพร้อมกันในเวลาเดียวกัน ซึ่งข้อแตกต่างอย่างเห็นได้ชัดระหว่างวิธีการโดยทั่วไปกับเทคนิคของการออกแบบการทดลอง คือ วิธีการโดยทั่วไปมักเป็นแบบการลองผิดลองถูกหรือใช้การทดลองปรับตั้งค่าของกระบวนทีละค่า (One-Factor-At-A-Time) ไปทีละตัวเรื่อยๆ โดยวิธีการแบบลองผิดลองถูกนี้กระบวนการจะเข้าสู่จุดหมายที่เราต้องการได้ช้า และเป็นการสิ้นเปลืองทรัพยากรในการวิเคราะห์และเก็บข้อมูลสูงมากอีกทั้งยังไม่เหมาะสมอย่างยิ่งกับกระบวนการที่มีผลของความสัมพันธ์ร่วม (Interaction Effect) ระหว่างตัวแปรของกระบวนการด้วยกันเอง ซึ่งข้อดีของเทคนิคการออกแบบการทดลอง คือให้ผลของความแม่นยำและความถูกต้องในการวิเคราะห์ข้อมูลได้อย่างสูง โดยสามารถระบุออกมาเป็นค่าตัวเลขทางสถิติที่แสดงถึงค่าระดับความสำคัญของตัวแปรที่ส่งผลต่อกระบวนการ นอกจากนี้ยังมีความรวดเร็วในการดำเนินการตรวจสอบสาเหตุของปัญหา การออกแบบการทดลองจึงเป็นวิธีการเก็บข้อมูลที่มีประสิทธิภาพโดยการเปลี่ยนแปลงหรือปรับค่าของ input (factors) อย่างมีจุดมุ่งหมายที่จะสังเกตการเปลี่ยนแปลงของ output (response) ที่เกิดขึ้น



รูปที่ 2.6 หุ่นจำลองทั่วไปของกระบวนการ
ที่มา : Montgomery, 2007

2.5.2 การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียล (Experiment of Factorial Design)

การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียล หมายถึง การทดลองที่พิจารณาถึงผลที่เกิดจากการรวมกันของระดับของปัจจัยทั้งหมดที่เป็นไปได้ในการทดลองนั้น การออกแบบเชิงแฟกทอเรียลมีประโยชน์หลายประการ ได้แก่ ทำให้สามารถหลีกเลี่ยงปัญหาที่เกิดจากอันตรกิริยาของปัจจัยที่จะก่อให้เกิดข้อสรุปที่ผิดพลาดได้ เนื่องจากเป็นการออกแบบการทดลองที่มีประสิทธิภาพเหนือกว่าการทดลองทีละปัจจัย และทำให้เราสามารถประมาณผลของปัจจัยหนึ่งที่ระดับต่างๆ ของปัจจัยอื่นได้ รวมทั้งทำให้เราสามารถหาข้อสรุปที่สมเหตุผลตลอดเงื่อนไขของการทดลองได้ซึ่งการออกแบบเชิงแฟกทอเรียลมีอยู่ด้วยกันหลายแบบ ได้แก่

1) การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียล 2 ปัจจัย เป็นการออกแบบเชิงแฟกทอเรียลชนิดที่ง่ายที่สุด จะเกี่ยวข้องกับปัจจัย 2 ปัจจัย เช่น ปัจจัย A และปัจจัย B โดยปัจจัย A จะประกอบด้วย a ระดับ ส่วนปัจจัย B จะประกอบด้วย b ระดับ ซึ่งในแต่ละเรพลิเคตของการทดลองจะประกอบด้วยการทดลองร่วมปัจจัยทั้งหมดเท่ากับ a x b การทดลองและโดยปกติจะมีจำนวนเรพลิเคตทั้งหมด n ครั้ง

2) การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2^k (two-level full factorial) เป็นการออกแบบการทดลองในกรณีมีปัจจัย k ปัจจัย ซึ่งแต่ละปัจจัยประกอบด้วย 2 ระดับ ระดับเหล่านี้อาจจะเกิดจากข้อมูลเชิงปริมาณ เช่น อุณหภูมิ ความดัน หรืออาจจะเกิดจากข้อมูลเชิงคุณภาพ เช่น เครื่องจักร คนงานและใน 2 ระดับที่กล่าวนี้จะแทนด้วยระดับสูงและต่ำของปัจจัยหนึ่งๆ ใน 1 เรพลิเคตที่บริบูรณ์สำหรับการออกแบบเช่นนี้ จะประกอบด้วยข้อมูลทั้งสิ้น 2k ข้อมูล การออกแบบการทดลองแบบนี้มีประโยชน์มากต่องานทดลองในช่วงเริ่มแรก เมื่อมีปัจจัยเป็นจำนวนมากที่เราต้องการที่จะตรวจสอบ การออกแบบเช่นนี้จะทำให้เกิดการทดลองจำนวนน้อยที่สุดที่สามารถจะทำได้

3) การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบ 3 ระดับ หรือการออกแบบเชิงแฟกทอเรียล 3^k (three-level full factorial) หมายถึง การออกแบบเชิงแฟกทอเรียลที่แต่ละปัจจัยประกอบด้วย 3 ระดับ ได้แก่ ระดับต่ำ ระดับกลางและระดับสูง ซึ่งสัญลักษณ์ที่ใช้แทนระดับทั้งสามอาจจะใช้ตัวเลข -1, 0 และ 1 ตามลำดับ สังเกตว่าการทดลองแบบนี้จะมีระดับที่สามของปัจจัยเพิ่มเข้ามาในแบบจำลอง ซึ่งทำให้เราสามารถที่จะแสดงความสัมพันธ์ระหว่างผลตอบ และปัจจัยที่สนใจในลักษณะลักษณะที่เป็นสมการแบบควอดราติกได้

4) การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบเต็ม (general full factorial) ในตัวแบบของ General full factorial การทดลองแต่ละครั้งในแต่ละปัจจัยจะมีค่าระดับหลายๆค่า ตัวอย่างเช่น ปัจจัย A มี 2 ระดับ ปัจจัย B มี 3 ระดับ และ ปัจจัย C มี 5 ระดับ การทดลองในทุกรันจะทำครบทุกค่าระดับของทุกปัจจัย ตัวแบบ General full factorial อาจจะนำไปใช้ในการทดลองขนาดเล็กเพื่อทำการคัดเลือกปัจจัย (screening) หรือ เพื่อทำการหาค่าที่ดีที่สุด (optimization)

5) การออกแบบการทดลองแบบเศษส่วนเชิงแฟกทอเรียล (fractional Factorial) ในการทดลองแบบ full factorial ค่าตอบสนองจะถูกวัดค่าในทุกๆ เงื่อนไขการทดลองซึ่งจะเป็นทุกๆค่าระดับของทุกปัจจัย ซึ่งอาจจะต้องมีการทำการทดลองจำนวนมากครั้ง ตัวอย่างเช่น การทดลองของ two-level full factorial ของ 6 ปัจจัย อย่างน้อยต้องมีการทดลองจำนวน 64 รัน หรือ กรณีที่มี 9 ปัจจัย จะมีการทดลองอย่างน้อย 512 รัน เพื่อเป็นการประหยัดเวลาและต้นทุนคุณอาจทำการออกแบบการทดลองให้มีการทำการทดลองเฉพาะบางเงื่อนไข ตัวแบบ factorial ที่มีการทดลองไม่ครบทุกเงื่อนไขนี้เรียกว่า fractional factorial designs โปรแกรม Minitab สามารถสร้างตัวแบบ fractional factorial ได้จนถึงจำนวนปัจจัย 15 ตัวต่อหนึ่งการทดลอง fraction factorial มีความสำคัญอย่างมากในการทดลองเพื่อการคัดเลือกปัจจัย (screening) เพราะว่ามีการลดจำนวนรันลงจนเหลือขนาดการทดลองที่สามารถทำได้จริง รันที่ถูกเลือกมาทำการทดลองเป็นรันที่อยู่ในชุดการทดลองของตัวแบบ full factorial ซึ่งในกรณีที่ไม่ได้ทำการทดลองครบทุกเงื่อนไขของทุกปัจจัยจะทำให้เกิดผลอย่างหนึ่งที่เรียกว่าคอนฟาวด์ (confounded) ซึ่ง คอนฟาวด์ นี้หมายถึง อิทธิพลของปัจจัยที่ไม่สามารถทำการประเมินค่าแยกออกมาได้เดี่ยวๆ และอาจเรียกว่าเป็น aliased โดย Minitab จะแสดงตารางของ alias ที่อยู่ในรูปแบบของการคอนฟาวด์ เพราะว่าเรื่องของคอนฟาวด์ ทำให้อิทธิพล (effects) บางตัวไม่สามารถหาค่าได้ทำให้การเลือกการทำ fractionalfactorial ต้องเลือกส่วนที่จะมาทำให้ถูกต้องเพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่ใช้งานได้ การเลือกส่วนการทดลองที่ดีที่สุด บางครั้งอาจจะต้องใช้ความรู้เฉพาะเกี่ยวกับกระบวนการและผลิตภัณฑ์เพื่อมาตัดสินใจด้วย

2.5.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบการทดลอง

สุรพงศ์ (2547) ได้ศึกษาการปรับปรุงประสิทธิภาพเครื่องสีข้าวกล้องโดยใช้เทคนิคการออกแบบการทดลอง ในการออกแบบการทดลองแบ่งเป็น 3 ขั้นตอนคือ การทดลอลงเพื่อหาช่วงระดับของปัจจัย การทดลองเพื่อหาอิทธิพลของปัจจัยจากแบบจำลองและการทดลองเพื่อยืนยันผลของค่าปัจจัยที่เหมาะสมของเครื่องสีข้าวกล้อง จากผลการทดลองและการวิเคราะห์ข้อมูลเชิงสถิติที่ระดับนัยสำคัญ $\alpha = 0.05$ ทำให้ได้ค่าของปัจจัยที่เหมาะสมต่อการกระเทาะเปลือกสำหรับข้าวแต่ละพันธุ์

ไพโรจน์ (2550) ได้ศึกษาการลดความผันแปรน้ำหนักบรรจุของเครื่องบรรจุแป้งโดยใช้วิธีทางสถิติเพื่อปรับปรุงคุณภาพของการผลิตในกระบวนการผลิตแป้ง โดยอาศัยหลักการบริหารคุณภาพการวิเคราะห์ระบบการวัดและการออกแบบการทดลองมาประยุกต์ใช้ โดยกการศึกษาสภาพปัจจุบันวิเคราะห์สาเหตุ กรองหาสาเหตุที่คาดว่ามีผลกระทบและทดสอบสมมติฐาน ซึ่งจากผลการทดลองพบว่าสาเหตุที่มีผลกระทบต่อความเบี่ยงเบนของน้ำหนัก คือ ระยะห่างระหว่าเกลียวบรรจุ ดังนั้นจึงทำการควบคุม ทำให้ดัชนีความสามารถของกระบวนการเพิ่มขึ้นและสามารถลดความเบี่ยงเบนของน้ำหนักบรรจุได้

Mendoza et. al. (2006) ได้ทำการสอบเทียบการวัดสีของผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรโดยใช้การวิเคราะห์ภาพ ในขั้นตอนการวิเคราะห์ความไวของสีในระบบ L*a*b* ใช้การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2^k จาก 4 ปัจจัย ได้แก่ สีของพื้นหลัง (สีดำและสีขาว) ทิศทางการวางตัวอย่าง (0 °: แนวนอนและ 90 °: แนวตั้ง) ความละเอียดของภาพ (640 × 480 และ 2048 × 1536 พิกเซล) และ ระยะซูม (ความยาวโฟกัส 5.4 และ 11.3 มม.) โดยได้วัดสีกล้วยสุก 6 ลูก (ระดับ 7) ในระบบ L*a*b* เพื่อพิจารณาปัจจัยที่มีความสัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงในเงื่อนไขการจับภาพและรูปแบบของการสะท้อนแสงบนพื้นผิวโค้ง

Jarimopas et. al. (2007) ได้ทำการวิจัยเพื่อพัฒนาจานหมุนของเครื่องคัดขนาดมังคุดสำหรับเกษตรกรผู้ปลูกผลไม้และผู้ประกอบการขนาดเล็ก วิธีการประกอบไปด้วยการออกแบบ การสร้าง การทดสอบ การประเมินผลทางวิศวกรรมและทางเศรษฐกิจ โดยเครื่องต้นแบบมีการออกแบบรูปทรงจานหมุนแบบกรวยและมีช่องว่างคัดขนาดจัดตามเส้นรอบวงของจานหมุน ซึ่งในขั้นตอนการทดสอบโดยการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียล 2 ปัจจัย พบว่าขนาดของช่องว่างคัดขนาดและความเร็วจานหมุนมีผลที่ระดับนัยสำคัญ 5% ต่ออัตราส่วนการปนเปื้อนของจุลินทรีย์ ประสิทธิภาพในการคัดขนาดและความสามรถในการลอดผ่านช่องของมังคุด

จากงานวิจัยดังกล่าวข้างต้นจะเห็นได้ว่าการออกแบบการทดลองสามารถนำมาใช้เพื่อการปรับปรุงประสิทธิภาพของเครื่องมือและหาเงื่อนไขที่เหมาะสมกับการผลิตอีกทั้งยังสามารถลดความผันแปรที่เกิดขึ้นได้ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยที่ต้องการวิเคราะห์องค์ประกอบสำคัญในระบบประมวลผลภาพที่ส่งผลให้คุณลักษณะของภาพถ่ายเพื่อลดความผันแปรที่จะเกิดขึ้น ดังนั้นเทคนิคการออกแบบการทดลองจึงถูกนำมาใช้เพื่อลดความผันแปรที่จะเกิดขึ้นในระบบการประมวลผลภาพ

2.6 การวิเคราะห์ระบบการวัดของเครื่องมือในการประมวลผลภาพ

วิธีการประมวลผลภาพได้ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายในปัจจุบัน เพื่อให้การควบคุมคุณภาพผลิตภัณฑ์มีประสิทธิภาพ น่าเชื่อถือ สะดวกและมีความถูกต้องในการประเมินคุณภาพเพิ่มมากขึ้น ดังนั้นความสามารถของระบบการวัดด้วยวิธีประมวลภาพ จึงถือได้ว่ามีความสำคัญต่อทั้งประสิทธิภาพและความน่าเชื่อถือที่กล่าวข้างต้น อีกทั้งยังเป็นประโยชน์เพื่อใช้ในการปรับปรุงกระบวนการ เนื่องจากในกระบวนการมีความเกี่ยวข้องกับการวัดและแน่นอนว่าค่าที่ได้จากการวัดจะมีความผันแปรเกิดขึ้นเสมอ ทั้งนี้ความผันแปรที่เกิดขึ้นอาจมีสาเหตุมาจากระบบการวัดและจากสิ่งตัวอย่างที่ต้องการวัด (กิติศักดิ์. 2553)

2.6.1 ความสามารถของระบบการวัด

ความสามารถของระบบการวัดนั้นอาจประกอบไปด้วย ความสามารถในการวัดซ้ำ (repeatability) ซึ่งหมายถึง ความผันแปรของค่าวัดที่เกิดจากการวัดโดยการใช้ผู้วัดคนเดียว อุปกรณ์วัดเดียวกันในการวัดชิ้นงานชิ้นเดียวกันซ้ำๆ และความสามารถในการวัดเหมือน (reproducibility) ซึ่งหมายถึง ความแปรปรวนของค่าวัดที่เกิดจากการใช้อุปกรณ์วัดเดียวกันในการวัดชิ้นงานเดียวกันด้วยเงื่อนไขที่แตกต่างกัน โดยสมการที่ 2.1 สามารถอธิบายความสามารถของระบบการวัดในรูปแบบของค่าความแปรปรวนได้ดังนี้

$$\sigma_{total}^2 = \sigma_{part}^2 + \sigma_{gauge}^2 \qquad (2.1)$$

โดย

σ^2_{total} คือ ความแปรปรวนทั้งหมด

σ^2_{parrt} คือ ความแปรปรวนของชิ้นงาน

σ^2_{gauge} คือ ความแปรปรวนของเครื่องมือวัด

ทั้งนี้ σ^2_{gauge} หรือความแปรปรวนของเครื่องมือวัดประกอบไปด้วยความสามารถในการวัดซ้ำ $(\sigma^2_{repeatability})$ และความสามารถในการวัดเหมือน $(\sigma^2_{reproducibility})$ ดังแสดงในสมการที่ 2.2 ซึ่งอาจเป็นความแปรปรวนที่เกิดจากผู้ทำการวัด วิธีในการวัด อุปกรณ์ต่างๆในระบบวัด ช่วงเวลาในการวัด และอื่นๆ รวมไปถึงความแปรปรวนที่เกิดขึ้นโดยธรรมชาติ

$$\sigma^2_{gauge} = \sigma^2_{repeatability} + \sigma^2_{reproducibility} \quad (2.2)$$

รูปแบบการออกแบบการทดลองทั่วไปเพื่อศึกษาความสามารถของระบบการวัด มีตัวแปรได้แก่ ชิ้นงาน (part ; i = 1,2,...,a) ปัจจัยที่ 1 (factor 1 ; j = 1,2,...,b) และปัจจัย 2 (factor 2 ; k = 1,2,...,c) แสดงดังสมการที่ 2.3

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

โดย

μ คือ ค่าเฉลี่ย

τ_i คือ อิทธิพลของชิ้นงาน มีค่าความแปรปรวน เท่ากับ σ^2_τ

β_j คือ อิทธิพลจากปัจจัยที่ 1 มีค่าความแปรปรวน เท่ากับ σ^2_β

γ_k คือ อิทธิพลจากปัจจัยที่ 2 มีค่าความแปรปรวน เท่ากับ σ^2_γ

$(\tau\beta)_{ij}$ คือ อิทธิพลร่วมของชิ้นงานและปัจจัยที่ 1 มีค่าความแปรปรวน เท่ากับ $\sigma^2_{\tau\beta}$

$(\tau\gamma)_{ik}$ คือ อิทธิพลร่วมของชิ้นงานและปัจจัยที่ 2 มีค่าความแปรปรวน เท่ากับ $\sigma^2_{\tau\gamma}$

$(\beta\gamma)_{jk}$ คือ อิทธิพลร่วมของปัจจัยที่ 1 และ 2 มีค่าความแปรปรวน เท่ากับ $\sigma^2_{\beta\gamma}$

$(\tau\beta\gamma)_{ijk}$ คือ อิทธิพลร่วมของชิ้นงาน ปัจจัยที่ 1 และ 2 มีค่าความแปรปรวนเท่ากับ $\sigma^2_{\tau\beta\gamma}$

ϵ_{ijkl} คือ ค่าความคลาดเคลื่อนของระบบ มีค่าความแปรปรวน เท่ากับ σ^2_ϵ

l คือ จำนวนซ้ำของการทดลอง

ดังนั้นค่าความแปรปรวนทั้งหมดของระบบ $V(y_{ijkl})$ มีค่า

$$V(y_{ijkl}) = \sigma^2_\tau + \sigma^2_\beta + \sigma^2_\gamma + \sigma^2_{\tau\beta} + \sigma^2_{\tau\gamma} + \sigma^2_{\beta\gamma} + \sigma^2_{\tau\beta\gamma} + \sigma^2_\epsilon \quad (2.4)$$

2.6.2 วิธีการประเมินผลความสามารถในการวัดซ้ำและวัดเหมือน

เมื่อการทดลองสิ้นสุดลง ต้องมีการประเมินผลถึงคุณภาพของข้อมูลก่อน เช่น การประเมินผลความสามารถในการแยกความแตกต่างของเครื่องมือวัด ความคงรูป และความต้องกันของระบบการวัด จากนั้นจึงทำการประเมินผลความสามารถในการวัดซ้ำและวัดเหมือน ซึ่งมีวิธีการประเมินผล 3 วิธีคือ

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

2) วิธีอาศัยค่าเฉลี่ยและพิสัย (Average and range method) เหมาะกับการทดลองซ้ำในแต่ละสิ่งตัวอย่างของพนักงานวัดแต่ละคน ซึ่งวิธีการนี้สามารถแยกการวัดซ้ำออกจากการวัดเหมือนได้ แต่ไม่สามารถแยกความผันแปรจากสาเหตุร่วมระหว่างชิ้นงานและพนักงานวัดออกจากค่าการวัดซ้ำได้

3) วิธีอาศัยการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) เหมาะกับการวิเคราะห์ผลการศึกษาที่ได้จากการออกแบบการทดลองเพื่อพิจารณาว่าพนักงานและชิ้นงาน เป็นสาเหตุของความผันแปรอย่างมีนัยสำคัญหรือไม่ และวิธีการนี้จะสามารถแยกความผันแปรจากสาเหตุร่วมระหว่างชิ้นงานและพนักงานวัดออกจากค่าการวัดซ้ำได้ วิธีการนี้มีข้อเสียตรงที่มีความยุ่งยากในการทำงานแนะนำให้ใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยในการคำนวณ (กิติศักดิ์ พลอยพานิชเจริญ. 2553)

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

2.7 การวิเคราะห์องค์ประกอบสำคัญ (principal component analysis)

ในกรณีที่มีการตรวจสอบคุณลักษณะอาหารในหลายๆ ด้านพร้อมกันโดยการประมวลผลภาพทำให้มีตัวแปรหลายตัว ซึ่งส่งผลให้การวิเคราะห์คุณภาพเป็นไปได้ยาก ดังนั้นเทคนิควิเคราะห์องค์ประกอบสำคัญ จึงถูกนำมาใช้เพื่อลดจำนวนตัวแปรโดยการรวมตัวแปรหลาย ๆ ตัวให้อยู่ในปัจจัยหรือองค์ประกอบเดียวกัน ซึ่งถือว่าเป็นตัวแปรใหม่ และสามารถหาค่าข้อมูลได้ เรียกว่า factor score จึงสามารถนำไปเป็นตัวแปรสำหรับการวิเคราะห์ทางสถิติต่อไป

2.7.1 ความหมายของการวิเคราะห์องค์ประกอบสำคัญ

การวิเคราะห์องค์ประกอบสำคัญ หรือบางครั้งเรียกว่า การวิเคราะห์องค์ประกอบสำคัญหลักเป็นเทคนิคในการลดตัวแปรหรือรวมกลุ่มตัวแปรที่มีความสัมพันธ์กันไว้ในกลุ่มหรือองค์ประกอบเดียวกัน ตัวแปรที่อยู่ในปัจจัยเดียวกันจะมีความสัมพันธ์กันมากโดยเชื่อว่ามีความซ้ำซ้อนในตัวแปรเหล่านั้น ซึ่งความซ้ำซ้อนที่เกิดขึ้นอาจเนื่องมาจากมีการวัดที่เหมือนกันความ สัมพันธ์นั้นอาจจะเป็นในทิศทางบวก (ไปในทิศทางเดียวกัน) หรือทิศทางลบ (ไปในทางตรงกันข้าม) ก็ได้ ส่วนตัวแปรที่อยู่คนละองค์ประกอบจะไม่มีความสัมพันธ์กันหรือมีความสัมพันธ์กันน้อย สำหรับการพิจารณาผลที่ได้จากการวิเคราะห์จะใช้หลักเหตุผลในการระบุ (หรือกำหนดชื่อ) องค์ประกอบที่ได้ ผลจากการวิเคราะห์องค์ประกอบสำคัญจะปรากฏค่าต่าง ๆ ที่สำคัญ คือ ค่า communality (h^2) เป็นค่าความแปรปรวนที่แต่ละตัวแปรแบ่งให้กับแต่ละองค์ประกอบ เป็นส่วนที่ชี้ถึงว่าแต่ละตัวแปรวัดองค์ประกอบนั้นๆ ร่วมกับตัวแปรอื่นมากน้อยเพียงใด ค่า eigenvalues เป็นผลรวมกำลังสองของสัมประสิทธิ์ของ

องค์ประกอบร่วมในแต่ละองค์ประกอบ ซึ่งต้องมีค่าไม่ต่ำกว่า 1 จึงจะถือว่าเป็นองค์ประกอบที่แท้จริง ส่วน factor loading เป็นค่าน้ำหนักองค์ประกอบของแต่ละตัวแปรในองค์ประกอบนั้น (กัลยา. 2544)

2.7.2 ขั้นตอนการวิเคราะห์ของเทคนิควิเคราะห์องค์ประกอบสำคัญ

ขั้นตอนการวิเคราะห์ของเทคนิควิเคราะห์องค์ประกอบสำคัญมีขั้นตอนต่าง ๆ ที่สำคัญ 4 ขั้นตอนดังนี้คือ

2.6.4.1 การสร้างเมตริกซ์ความสัมพันธ์ระหว่างคู่ของตัวแปรทุกตัว (correlation matrix) การสร้างเมตริกซ์ความสัมพันธ์ระหว่างคู่ของตัวแปรทุกตัวเป็นขั้นตอนแรกของการวิเคราะห์องค์ประกอบสำคัญที่จะดำเนินการหาความสัมพันธ์ในรูปแบบเส้นตรงโดยวิธีของ Pearson correlation

2.6.4.2 การสกัดองค์ประกอบ (initial extraction of the components) วัตถุประสงค์ของการสกัดองค์ประกอบ คือ การหาจำนวนองค์ประกอบที่สามารถใช้ตัวแปรทั้งหมดทุกตัวได้ โดยอาศัยหลักความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างตัวแปรที่ใช้เป็นข้อมูลองค์ประกอบสำคัญ คือการผสมเชิงเส้นตรง (linear combination) ของตัวแปรที่อธิบายการผันแปรของข้อมูลได้มากที่สุด จากนั้นหาการผสมที่สองที่สามารถอธิบายการผันแปรได้มากที่สุดเป็นอันดับที่สอง โดยที่ไม่สัมพันธ์กับการผสมแรก ทำเช่นนี้เรื่อยไปจนได้องค์ประกอบสำคัญที่สามารถอธิบายการผันแปรของทุกตัวแปรได้ครบถ้วน ซึ่งองค์ประกอบสำคัญจะอธิบายการผันแปรได้น้อยลงตามลำดับและทุกองค์ประกอบไม่สัมพันธ์กัน

ผลลัพธ์ที่ได้จากการสกัดองค์ประกอบ จะช่วยในการตัดสินใจเกี่ยวกับจำนวนขององค์ประกอบเพื่อเก็บไว้สำหรับใช้ในการวิเคราะห์ต่อไปในอนาคต กฎที่ดีที่สุดสำหรับการกำหนดจำนวนขององค์ประกอบคือ “eigenvalue > 1 ” ค่า eigenvalue เป็นค่าที่บ่งบอกถึงความสามารถขององค์ประกอบว่าจะอธิบายความแปรปรวนของกลุ่มตัวอย่างได้มากน้อยเพียงไร โดยปกติถ้าองค์ประกอบนั้นอธิบายความแปรปรวนของกลุ่มตัวอย่างได้น้อยกว่า 1 eigenvalue แล้วก็ไม่มีประโยชน์ที่จะนำองค์ประกอบนั้นมาใช้

2.6.4.3 การหมุนแกนองค์ประกอบ (rotation to a final solution)

การหมุนแกนองค์ประกอบหรือบางครั้งเรียกการหมุนแกนปัจจัยเป็นขั้นตอนที่จะดำเนินการแยกตัวแปรให้เห็นเด่นชัดว่าตัวแปรหนึ่ง ๆ ควรจะจัดอยู่ในกลุ่มหรือในองค์ประกอบใด เนื่องจากในการสกัดองค์ประกอบอาจจะได้องค์ประกอบเดียวหรือหลายองค์ประกอบ ซึ่งแต่ละองค์ประกอบจะเกิดการรวมของตัวแปรแบบเชิงเส้นตรงแต่ปัญหาที่เกิดขึ้น คือ ตัวแปรหนึ่ง ๆ อาจจะเป็นสมาชิกในหลายองค์ประกอบซึ่งยากต่อการให้ความหมายและการกำหนดชื่อองค์ประกอบหรืออาจได้ความหมายของแต่ละองค์ประกอบไม่ชัดเจน การหมุนแกนจะเป็นวิธีการที่จะทำให้สมาชิกของแต่ละตัวแปรในองค์ประกอบหนึ่ง ๆ ชัดเจนขึ้น ซึ่งในงานวิจัยได้เลือกใช้การหมุนแกนแบบมุมฉาก (orthogonal) แบบวาริแมกซ์ (varimax) ซึ่งเป็นวิธีการหมุนแกนแบบที่ให้แกนขององค์ประกอบหมุนจากตำแหน่งเดิมในลักษณะตั้งฉากกันตลอดเวลาที่มีการหมุนแกนเรียกว่าเป็นการหมุนแกนแบบที่องค์ประกอบแต่ละองค์ประกอบไม่มีความสัมพันธ์กันเลย

2.6.4.4 การเลือกค่าน้ำหนักและให้ความหมายแก่องค์ประกอบ (interpreting the rotated solution)

การให้ความหมายแก่องค์ประกอบเป็นขั้นตอนที่จะต้องกำหนดชื่อหรือให้ความหมายแก่องค์ประกอบหรือตัวแปรใหม่ที่ได้ โดยพิจารณาว่าในองค์ประกอบนั้นๆ ประกอบด้วยตัวแปรอะไรบ้างที่เป็นสมาชิกอยู่แต่เนื่องจากในองค์ประกอบหนึ่งๆ ประกอบไปด้วยตัวแปรทุกตัวที่เป็นสมาชิก โดยมีน้ำหนักของการเป็นสมาชิกแตกต่างกัน ดังนั้นก่อนจะให้ ความหมายแก่องค์ประกอบใด ๆ ควรจะต้องพิจารณาเลือกตัวแปรที่น่าจะเป็นสมาชิกขององค์ประกอบนั้น ๆ มากที่สุด หลังจากนั้นจึงให้ความหมายแก่องค์ประกอบที่ได้แต่ละองค์ประกอบ (ศิริชัย. 2544)

การวิเคราะห์องค์ประกอบสำคัญมีลักษณะจะช่วยนักวิจัยอย่างมากในเรื่องการประเมินธรรมชาติของความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรและค้นหาความเที่ยงตรงเชิงโครงสร้างของเครื่องมือวัด ยังมีนักวิจัยอื่นๆที่กล่าวยกย่องชื่นชมในการวิเคราะห์องค์ประกอบสำคัญ แต่ก็ยังมีนักวิจัยท่านอื่น ๆ อีกไม่น้อยที่กล่าวถึงในด้านบกพร่อง นอกจากนี้ยังมีปัญหาในเรื่องของการแปลความหมายผลการวิเคราะห์องค์ประกอบสำคัญที่ถูกวัดโดยตัวแปรบางตัว มักก่อความยุ่งยากในการแปลความหมายอยู่เสมอๆ ทั้งนี้มีสาเหตุมาจากผู้วิจัยไม่มีพื้นฐานในการแปลผลลัพธ์ที่ได้อีกทั้งยังมีอีกปัญหาหนึ่งที่เกิดขึ้นบ่อยเกี่ยวกับการวิเคราะห์องค์ประกอบสำคัญ นั่นคือการวิเคราะห์องค์ประกอบสำคัญไม่ให้ผลลัพธ์ที่ใช้ในการแก้ปัญหาใด เกี่ยวกับองค์ประกอบที่ได้ หรือยิ่งกว่านั้นผลลัพธ์ที่ได้ก็ไม่สามารถแปลความหมายได้ ทำให้เกิดความลำบากในการหาเหตุผลมาอธิบายผลลัพธ์ที่ได้ (รสริน. 2556; วิรัช. 2538)

2.7.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์องค์ประกอบสำคัญที่เกี่ยวข้องกับอาหาร

จากงานวิจัยของ Vainionpaa et. al. (2004) ได้เปรียบเทียบความแตกต่างของวิธีการวิเคราะห์ในการตรวจสอบคุณภาพบรรยากาศในถุงบรรจุผลิตภัณฑ์ไก่ย่างสับโดยใช้การวิเคราะห์องค์ประกอบสำคัญ ซึ่งการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของบรรยากาศในถุงบรรจุผลิตภัณฑ์ไก่ย่างสับในระหว่างการเก็บในตู้เย็นถูกตรวจสอบโดยใช้วิธีการ 4 แบบ ที่แตกต่างกัน ได้แก่ ดัชนีบ่งบอกเวลา-อุณหภูมิ (TTIs) การวิเคราะห์จุลินทรีย์ สารสังเคราะห์ที่บ่งบอกถึงคุณภาพและประสาทสัมผัสประเมินผล โดยเมื่อเปรียบเทียบของความไวของคุณภาพโดยใช้การวิเคราะห์องค์ประกอบสำคัญพบว่าวิธีการวิเคราะห์ทางจุลชีววิทยาและ TTIs ให้ผลเดียวกันและบ่งบอกถึงคุณภาพได้มากกว่าทั้งสารสังเคราะห์ที่บ่งบอกถึงคุณภาพและประสาทสัมผัสประเมินผล หรืออาจสรุปได้ว่าองค์ประกอบที่ยิ่งประกอบด้วยหลายสารบ่งบอก (ปัจจัย) ยิ่งจะเป็นดัชนีที่บ่งบอกถึงคุณภาพได้น้อยเท่านั้น

ปิติพร และ ธงชัย (2550) ศึกษาการวิเคราะห์พฤติกรรมด้านความหนืดของแป้งและลักษณะเนื้อสัมผัสของเจลแป้งทั้งสี่ชนิด ได้แก่ แป้งเท้ายายม่อม แป้งท้าว แป้งมันสำปะหลัง และแป้งข้าวเจ้า พบว่าชนิดแป้งที่ต่างกันมีผลทำให้ค่าของพฤติกรรมดังกล่าวแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$) เมื่อใช้เทคนิคการวิเคราะห์องค์ประกอบสำคัญ วิเคราะห์ความสัมพันธ์ของชนิดแป้งที่มีผลต่อค่าพารามิเตอร์ที่วิเคราะห์ได้ พบว่า PC1 หรือ องค์ประกอบของการเกิดเจลมีความสัมพันธ์กับค่าความหนืดเมื่อทิ้งไว้ให้เย็น ในขณะที่ PC2 หรือ องค์ประกอบด้านความหนืดมีความสัมพันธ์กับค่าความหนืดของน้ำแป้งขณะทำให้สุก นอกจากนี้เมื่อใช้เทคนิควิเคราะห์องค์ประกอบวิเคราะห์ลักษณะเนื้อสัมผัสของเจลแป้งพบว่าสามารถแบ่งลักษณะของเจลแป้งออกได้เป็น 3 กลุ่ม คือเจลแป้งที่มีความยืดหยุ่นและเหนียวสูง เจลแป้งที่มีความยืดหยุ่นและเหนียวปานกลางและเจลแป้งที่มีความยืดหยุ่นและเหนียวน้อย

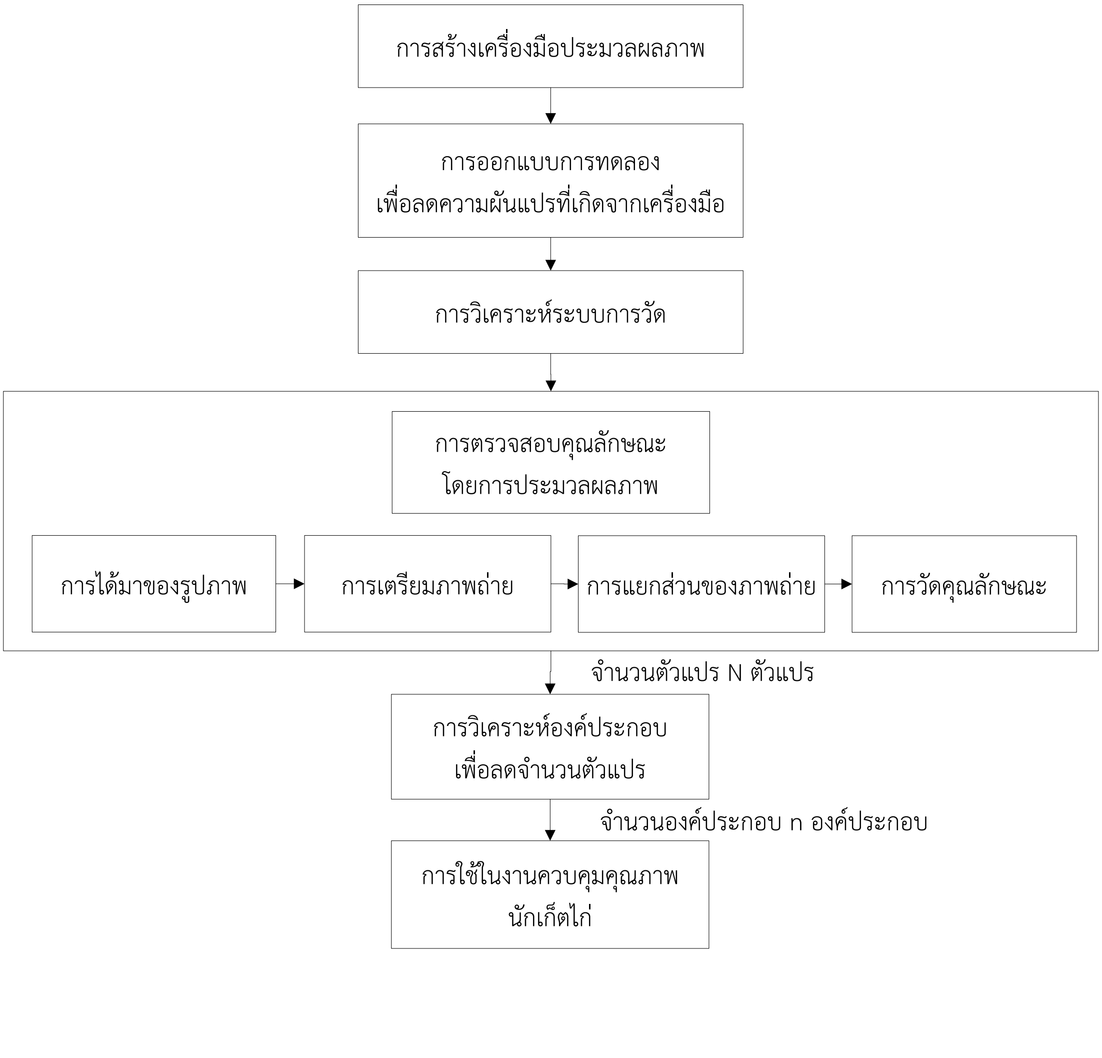
จากการศึกษาของ ปรัชญาและคณะ (2554) ได้ศึกษาการพัฒนาแนวความคิดผลิตภัณฑ์นักเกตไก่เทียมแช่แข็งโดยใช้แผนภาพความต้องการของผู้บริโภคร่วมกับการวิเคราะห์องค์ประกอบสำคัญ พบว่าได้ใช้ค่าคุณภาพทางด้านกายภาพของผลิตภัณฑ์นักเกตไก่แช่แข็งยี่ห้อหนึ่ง เป็นต้นแบบในการพัฒนาเนื่องจากเป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้รับคะแนนความชอบโดยรวมจากผู้บริโภคมากที่สุด นอกจากนี้จากแผนภาพความชอบ ทำให้ทราบว่าคุณภาพเนื้อสัมผัสเป็นปัจจัยหลักที่มีผลต่อความชอบโดยรวมของผู้บริโภคมากที่สุด รองลงมาคือค่าสี โดยเฉพาะอย่างยิ่งค่า adhesiveness เป็นปัจจัยที่ให้ผลเชิงบวกต่อค่าความชอบโดยรวม และค่าเนื้อสัมผัสค่าอื่นเป็นปัจจัยที่ให้ผลเชิงลบต่อค่าความชอบโดยรวม เช่น hardness springiness และ cohesiveness เป็นต้น ดังนั้นการพัฒนาคุณภาพเนื้อสัมผัสในผลิตภัณฑ์นักเกตไก่และนักเกตไก่แช่แข็งจึงมีความสำคัญและมีอิทธิพลต่อความชอบโดยรวมของผู้บริโภคมากที่สุด

จากงานวิจัยของ ชลินทร์และคณะ (2555) ได้นำเสนอการสร้างหัววัดแอลกอฮอล์ด้วยท่อนาโนคาร์บอน และระบบจมูกอิเล็กทรอนิกส์ในการแยกแยะเบียร์สดชนิดต่าง ๆ เพื่อที่จะประยุกต์เป็นระบบจมูกอิเล็กทรอนิกส์ด้วยหัววัดท่อนาโนคาร์บอนต่อไป ในส่วนของหัววัดท่อนาโนคาร์บอน ถูกสร้างด้วยวิธีตกตะกอนไอระเหยทางเคมีแบบความร้อนกับก๊าซไนโตรเจน และแบบขดลวดความร้อนกับก๊าซไฮโดรเจน ผลการทดสอบกับแอลกอฮอล์ ปรากฏว่าแบบที่สร้างด้วยลวดความร้อนกับก๊าซไฮโดรเจนให้ผลตอบสนองที่ดีกว่า สำหรับระบบจมูกอิเล็กทรอนิกส์ ใช้หัววัดในท้องตลาดหลาย ๆ ชนิดรวมกันเป็นอาร์เรย์วิธีการวิเคราะห์ผลใช้วิธีวิเคราะห์องค์ประกอบสำคัญ ผลที่ได้สามารถแยกแยะเบียร์สดสามชนิดที่แตกต่างกันได้ซึ่งมีประโยชน์ต่อผู้ผลิตเบียร์สดเพื่อใช้ตรวจสอบและควบคุมคุณภาพในเบื้องต้น

จากงานวิจัยดังกล่าวข้างต้นจะเห็นได้ว่าเทคนิคการวิเคราะห์องค์ประกอบสำคัญสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการเปรียบเทียบความแตกต่างของคุณลักษณะและหาความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์หรือตัวแปรได้อย่างมีประสิทธิภาพ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้นำการวิเคราะห์องค์ประกอบสำคัญมาใช้ในการหาความสัมพันธ์ของตัวแปรคุณลักษณะของนักเกตไก่ เพื่อรวมตัวแปรเป็นองค์ประกอบใหม่ก่อนการนำองค์ประกอบดังกล่าวไปเป็นตัวแปรสำหรับการวิเคราะห์ต่อไป

บทที่ 3
วิธีดำเนินการวิจัย

ในงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์คือเพื่อศึกษาวิธีการตรวจสอบคุณภาพของนักเกตไก่โดยใช้วิธีการประมวลผลด้วยภาพร่วมกับการวิเคราะห์องค์ประกอบสำคัญ อีกทั้งควบคุมคุณภาพนักเกตไก่โดยใช้วิธีการควบคุมกระบวนการเชิงสถิติและบูรณาการวิธีดังกล่าวข้างต้น โดยแบ่งออกเป็นขั้นตอนหลัก ได้แก่ การสร้างเครื่องมือในการประมวลผลภาพและออกแบบการทดลองศึกษาปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับสีของภาพถ่ายเพื่อลดความผันแปรที่จะเกิดขึ้น จากนั้นวิเคราะห์ระบบการวัดของเครื่องมือประมวลผลภาพที่สร้างขึ้นเพื่อสร้างความมั่นใจ จากนั้นเป็นวิธีการตรวจสอบคุณภาพหรือคุณลักษณะโดยการประมวลผลภาพ ก่อนนำคุณลักษณะที่ได้มาทำการวิเคราะห์องค์ประกอบสำคัญเพื่อลดจำนวนตัวแปรที่จะใช้ในการวิเคราะห์ จากนั้นนำองค์ประกอบหรือตัวแปรใหม่ที่วิเคราะห์ได้ไปออกแบบควบคุมกระบวนการด้วยวิธีการเชิงสถิติเพื่อใช้ในการควบคุมคุณภาพนักเกตไก่ แสดงดังรูปที่ 3.1

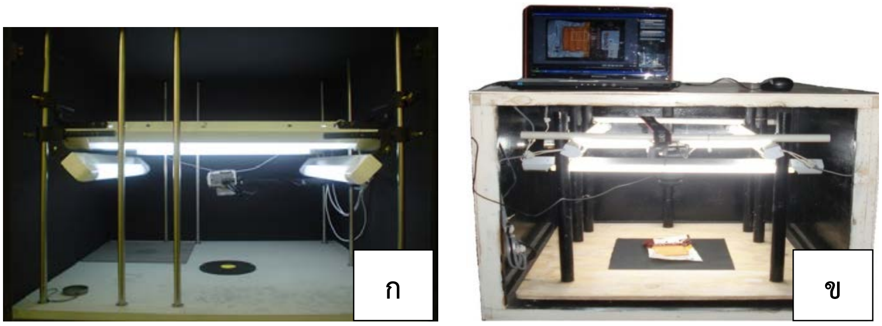


รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

3.1 การสร้างเครื่องมือประมวลผลภาพ

3.1.1 หลักการออกแบบเครื่องมือประมวลผลภาพ

จากงานวิจัยของ Pedreschi et al. (2006) ได้สร้างเครื่องมือในการประมวลผลภาพเพื่อใช้วัดสีของมันฝรั่งทอดกรอบ ต่อมา พิรญาณ์ (2554) ได้ดัดแปลงและสร้างเครื่องมือในการประมวลผลภาพเพื่อใช้วัดสีของไส้กรอก ซึ่งจากผลการวิจัยพบว่าเครื่องมือในการประมวลผลภาพที่ พิรญาณ์ สร้างขึ้นสามารถแบ่งแยกสีของไส้กรอกได้เป็นอย่างดี



รูปที่ 3.2 ตัวอย่างเครื่องมือประมวลผลภาพของ ก) เครื่องมือประมวลผลภาพของ Pedreschi et al. (2006) ข) เครื่องมือประมวลผลภาพของ พิรญาณ์ (2554)

แต่ยังพบว่าเครื่องมือประมวลผลภาพของ พิรญาณ์ นั้นมีความไม่เหมาะสมอยู่บ้าง การวิจัยครั้งนี้จึงได้นำเครื่องมือประมวลผลภาพนั้นมาพิจารณาเพื่อปรับปรุงให้มีความสมบูรณ์และเหมาะสมต่ออุตสาหกรรมอาหารมากยิ่งขึ้น ซึ่งได้มีแนวทางในการออกแบบมาจากคำแนะนำของ European Hygienic Engineering & Design Group : EHEDG (2007) โดยได้พิจารณาตามประเด็นดังต่อไปนี้

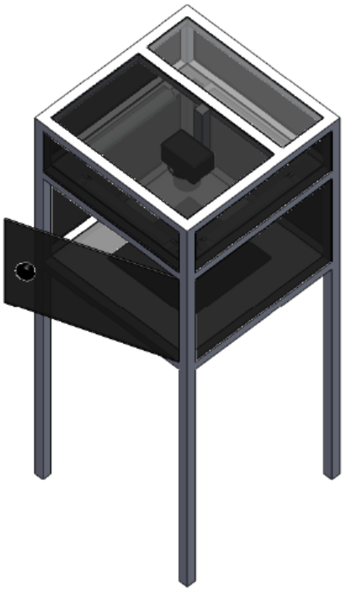
3.1.1.1 วัสดุที่ใช้ไม่เป็นอันตรายและเสี่ยงต่อการปนเปื้อนอาหาร

เมื่อพิจารณาเครื่องมือประมวลผลภาพของ พิรญาณ์ จะพบว่าวัสดุที่ประกอบเป็นกล่องทำมาจากไม้ซึ่งอาจทำให้มีฝุ่น ส่วนวัสดุที่ประกอบเป็นโครงทำมาจากเหล็กซึ่งเกิดสนิมได้ง่าย ซึ่งทั้งหมดนี้อาจทำให้เกิดการปนเปื้อนกับอาหารที่นำมาทดสอบได้

3.1.1.2 วัสดุที่ใช้มีความคงทน แข็งแรง สะดวกต่อการใช้งานและมีรูปลักษณ์สวยงาม

เมื่อพิจารณาเครื่องมือประมวลผลภาพของ พิรญาณ์ จะพบว่าเครื่องมือมีขนาดใหญ่ น้ำหนักค่อนข้างมากเนื่องจากวัสดุที่ประกอบเป็นโครงทำมาจากเหล็กซึ่งทำให้ลำบากสำหรับการเคลื่อนย้าย ไม่มีฝาปิดที่มิดชิด และอุปกรณ์ที่ใช้ในการยึดจับกล้องถ่ายภาพยังไม่มั่นคงและแข็งแรงซึ่งอาจทำให้กล้องเกิดการตกหล่นหรือเคลื่อนที่ส่งผลต่อคุณภาพของภาพถ่ายที่จะนำมาวิเคราะห์ อีกทั้งไม่สามารถรองรับการตรวจสอบคุณภาพอาหารที่มีการเคลื่อนที่ในสายพานได้ในอนาคต

ดังนั้นจึงได้ออกแบบเครื่องมือประมวลผลภาพดังรูปที่ 3.3 โดยพิจารณาวัสดุที่เหมาะสมที่ได้จากงบประมาณที่มีอย่างจำกัดและตามคำแนะนำของ EHEDG (2007)

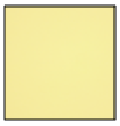


รูปที่ 3.3 แบบของเครื่องมือประมวลผลภาพที่ใช้ในงานวิจัย

3.2 ออกแบบการทดลองเพื่อลดความผันแปรที่เกิดจากเครื่องมือประมวลผลภาพ

ขั้นตอนการออกแบบการทดลองจัดทำขึ้นเพื่อศึกษาปัจจัยในเครื่องมือประมวลผลภาพที่สร้างขึ้น โดยเป็นปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับสีของภาพถ่ายชิ้นงานที่ต้องการประมวลผล เพื่อลดความผันแปรที่อาจจะเกิดขึ้นจากเครื่องมือ

ตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองจะใช้กระดาษเหลืองขนาด 10×10 เซนติเมตร เนื่องจากสะดวกในการทดลองและใช้แทนสีของนักเกต แสดงดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 กระดาษสีที่ใช้ในขั้นตอนการออกแบบการทดลอง

3.2.1 ขั้นตอนการดำเนินงานการออกแบบการทดลอง

3.2.1.1 พิจารณาปัจจัยทั้งหมดในระบบประมวลผลภาพ

พิจารณาปัจจัยทั้งหมดในระบบประมวลผลภาพที่เกี่ยวข้องกับค่าสีของภาพถ่ายพิจารณาปัจจัยทั้งหมดที่เกี่ยวข้องกับค่าสีของภาพถ่ายในระบบ L* a* b* ของภาพถ่ายชิ้นงานและกรองปัจจัยโดยใช้ความรู้จากประสบการณ์เพื่อลดความผันแปรของระบบในเบื้องต้น

3.2.1.2 ออกแบบการทดลองแบบเศษส่วนเชิงแฟคทอเรียล

ถ่ายภาพชิ้นงานโดยใช้เครื่องมือการประมวลด้วยภาพ จากนั้นวัดสีจากภาพถ่ายชิ้นงาน (รูปที่ 3.3) โดยใช้โปรแกรม MATLAB และออกแบบการทดลองแบบเศษส่วนเชิงแฟคทอเรียล (fractional factorial design) จากปัจจัยที่เหลือจากการกรองในขั้นต้น จากนั้นพิจารณาความมีนัยสำคัญของปัจจัยต่อค่าสีของภาพถ่ายในระบบ L* a* b* ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% เพื่อกำหนดให้

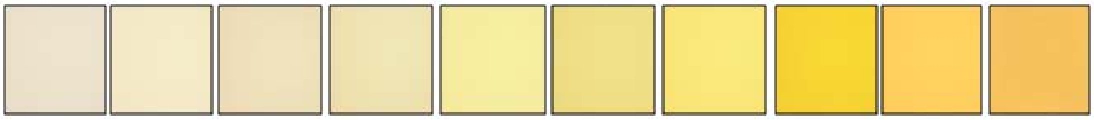
ปัจจัยที่มีผลต่อค่าสีของภาพถ่ายเป็นค่าคงที่ในการใช้เครื่องมือประมวลผลภาพเพื่อลดความผันแปรที่จะเกิดขึ้นในระบบ

3.3 การวิเคราะห์ระบบการวัด

ใช้หลักการความสามารถในการวัดซ้ำและการวัดเหมือนของเครื่องมือวัด (GR&R) ในการวิเคราะห์เครื่องมือวัด เพื่อสร้างความเชื่อมั่นในเครื่องมือวัดว่าค่าที่วัดได้จากเครื่องมือวัดมีความสามารถในการแบ่งแยกผลิตภัณฑ์และสามารถนำไปใช้ในการควบคุมกระบวนการเชิงสถิติต่อไปได้

3.3.1 ตัวอย่างที่ใช้ในการทดลอง

ตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองจะใช้กระดาษโทนสีขาวถึงเหลืองขนาด 10×10 เซนติเมตร 10 ตัวอย่าง เนื่องจากสะดวกในการทดลองและได้สีเหลืองที่ต่างกันเพื่อแทนความแตกต่างกันของสีเนื้อนักเกต แป้งชุบทอดและรูพรุนของนักเกต แสดงดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 สีของกระดาษสีที่ใช้ในการทดลองจากระดับ 1 ถึง 10

3.3.2 ขั้นตอนการดำเนินงานการวิเคราะห์ระบบการวัด

3.3.2.1 พิจารณาปัจจัยในระบบการวัดของเครื่องมือประมวลผลภาพ

พิจารณาปัจจัยในระบบการวัดของเครื่องมือประมวลผลภาพ ซึ่งเป็นปัจจัยที่ไม่มีผลต่อค่าสีของภาพถ่ายในระบบ L* a* b* ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% จากขั้นตอนการออกแบบการทดลองในหัวข้อ 3.1

3.3.2.3 ออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียลแบบเต็ม

วัดสีจากภาพถ่ายชิ้นงาน ซึ่งในส่วนนี้จะใช้กระดาษสี 10 ระดับ ดังรูปที่ 3.5 มาทดสอบ โดยออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียลแบบเต็ม (full factorial design) จากปัจจัยในระบบการวัดของเครื่องมือประมวลผลภาพ มาใช้ในการวิเคราะห์ระบบการวัดของเครื่องมือประมวลผลภาพ เพื่อทดสอบความสามารถของระบบการวัดว่าค่าที่วัดได้จากเครื่องมือมีความสามารถในการแบ่งแยกผลิตภัณฑ์

3.3.2.4 การวิเคราะห์ผลการทดลอง

นำข้อมูลที่ได้จากการทดลองวิเคราะห์ผลโดยใช้โปรแกรม MINITAB 16 โดยใช้ balanced ANOVA จากนั้นพิจารณาค่าความแปรปรวนที่ได้จากตาราง ANOVA

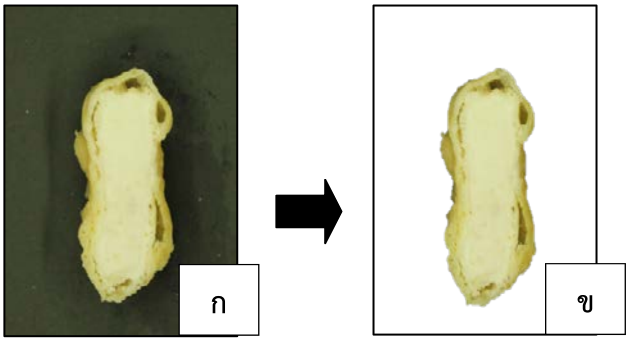
3.4 การตรวจสอบคุณลักษณะโดยการประมวลผลภาพ

3.4.1 การได้มาของรูปภาพ (image acquisition)

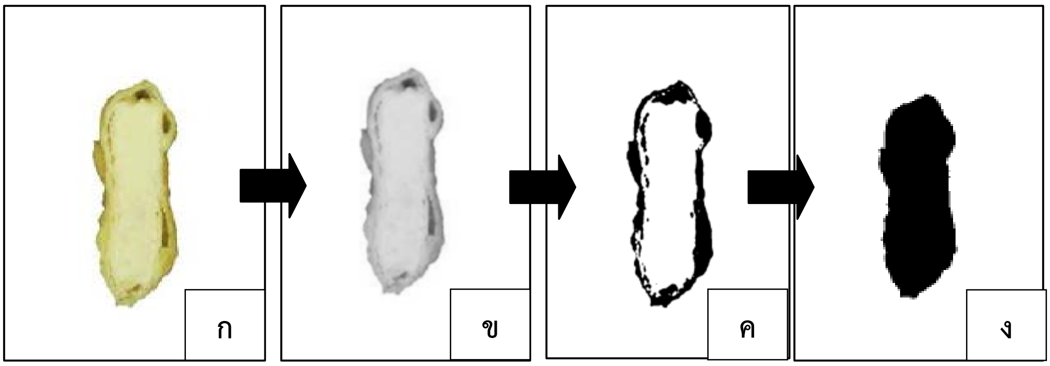
ถ่ายภาพชิ้นงานในเครื่องมือประมวลผลภาพ โดยการถ่ายภาพจะเชื่อมต่อด้วย USB ผ่านคอมพิวเตอร์ โดยใช้โปรแกรม EOS Utility วิเคราะห์ค่าคุณลักษณะของภาพถ่ายด้วยโปรแกรม MATLAB

3.4.2 การเตรียมภาพถ่าย (image pre-preprocessing)

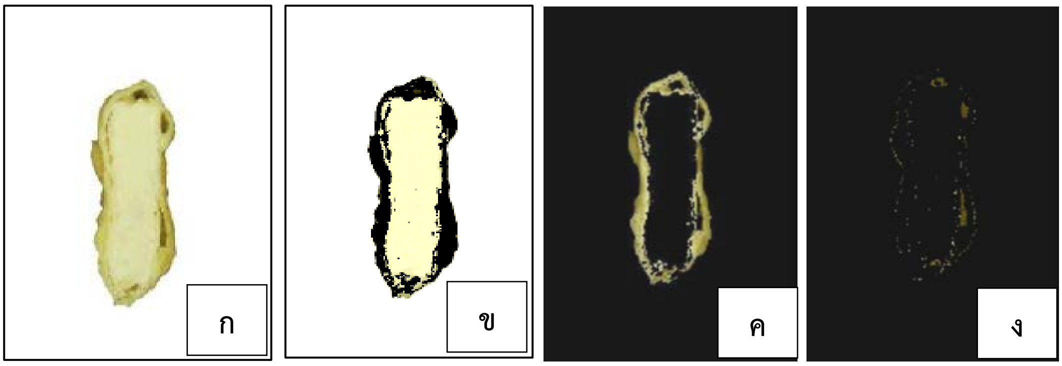
ถ่ายภาพนักเกตที่ผ่าครึ่งตามขวางความสูง 2 เซนติเมตร ปรับปรุงคุณภาพรูปภาพก่อนนำไปวิเคราะห์ โดยตัดพื้นหลังของภาพถ่ายให้เหลือเฉพาะส่วนที่เป็นนักเกตไก่ ดังรูปที่ 3.6 เพื่อเตรียมภาพถ่ายนักเกตที่ต้องการตรวจสอบให้พร้อมสำหรับการวิเคราะห์พื้นที่ ปริมาณรูพรุน ค่าสีของเนื้อไก่ แป้งชุบทอดและรูพรุนในระบบ L*a*b* โดยพิจารณาสีที่แตกต่างกัน โดยใช้โปรแกรม MATLAB ในขั้นตอนต่อไป



รูปที่ 3.6 การปรับปรุงคุณภาพของภาพถ่าย ก) ภาพถ่ายนักเกตไก่ที่ได้จากการถ่ายภาพ ข) รูปภาพนักเกตไก่ที่ผ่านการตัดพื้นหลัง



รูปที่ 3.7 ตัวอย่างรูปภาพที่ทำการการแยกส่วน ก) รูปภาพในระบบ RGB ข) รูปภาพระดับสีเทา ค) รูปภาพขาวดำ ง) พื้นที่ของภาพถ่ายนักเกตโดยการหาขอบภาพ



รูปที่ 3.8 ตัวอย่างรูปภาพที่ทำการการแยกส่วนภาพสี ก) รูปภาพนักเกตที่ต้องการแยกส่วนภาพสี ข) รูปภาพส่วนเนื้อนักเกต ค) รูปภาพส่วนแป้งชุบทอดนักเกต ง) รูปภาพส่วนรูพรุนนักเกต

3.4.3 การแยกส่วนของภาพถ่าย (image segmentation)

3.4.3.1 วัดคุณภาพด้านพื้นที่และปริมาณรูพรุน

ใช้โปรแกรม MATLAB ในการวัดคุณภาพด้านพื้นที่และปริมาณรูพรุนของนักเกตไก่ โดยนำภาพถ่ายที่ปรับปรุงแล้วซึ่งสีของภาพที่ได้จะอยู่ในระบบ RGB จึงต้องแปลงจากระบบ RGB เป็นรูปภาพระดับสีเทา (gray scale image) ก่อนเปลี่ยนเป็นรูปภาพขาวดำ (binary image) เพื่อให้การแยกส่วนของภาพถ่ายชัดเจนยิ่งขึ้นและหาพื้นที่ของภาพถ่ายนักเกตโดยการหาขอบภาพ ดังรูปที่ 3.7

3.4.3.2 วัดคุณภาพด้านสีของเนื้อไก่ สีของแป้งชุบทอด สีของรูพรุนในระบบ L*a*b*

ใช้โปรแกรม MATLAB ในการวัดคุณภาพด้านสีของเนื้อนักเกต สีของแป้งชุบทอด สีของรูพรุนของนักเกตไก่ โดยนำภาพถ่ายที่ปรับปรุงแล้วซึ่งสีของภาพที่ได้จะอยู่ในระบบ RGB จึงต้องแปลงจากระบบ RGB เป็นระบบ L*a*b* จากนั้นแยกส่วนของภาพถ่ายสีโดยการเลือกส่วนที่เป็นเนื้อนักเกต แป้งและรูพรุน เพื่อให้โปรแกรมคำนวณหาพิกเซลที่มีค่าสีใกล้เคียง ซึ่งผลที่ได้คือภาพสีของแต่ละส่วนของนักเกต ดังรูปที่ 3.8 ก่อนนำภาพสีที่แยกส่วนได้มาคำนวณค่า L* a* และ b* เฉลี่ย ซึ่งช่วงค่า L* คือ 0 ถึง 100 a* คือ -127 ถึง 128 และ b* คือ -127 ถึง 128 จะถูกแปลงโดยโปรแกรม MATLAB ให้มีค่าอยู่ในช่วง 0-255 ทั้ง 3 ค่า เพื่อให้สะดวกต่อการวิเคราะห์

3.4.4 การวัดคุณลักษณะ (object measurement)

3.4.4.1 วัดคุณภาพด้านพื้นที่และปริมาณรูพรุน

เมื่อแยกส่วนของภาพถ่ายแล้ว จากนั้นภาพที่ได้จะถูกนำมาวิเคราะห์ พื้นที่และปริมาณรูพรุนของนักเกตโดยพิจารณาสีที่แตกต่างกันบริเวณแป้งชุบทอด ดังรูปที่ 3.7 ซึ่งบริเวณพื้นที่สีดำจะเป็นพื้นที่รวมของขอบแป้ง ช่องว่างของการยึดเกาะ (ความสามารถในการยึดเกาะ) และรูพรุนทั้งหมด ส่วนพื้นที่สีขาวคือเนื้อนักเกตและแป้งชุบทอด จากนั้นนับจำนวนพิกเซลภาพในส่วนที่เป็นพื้นที่สีดำเทียบกับพิกเซลของพื้นที่ภาพถ่ายนักเกตซึ่งได้มาจากการหาขอบภาพ จะได้ค่าร้อยละพื้นที่รูพรุนของนักเกตชิ้นนั้นๆ โดยใช้โปรแกรม MATLAB

3.4.4.2 วัดคุณภาพด้านสีของเนื้อไก่ สีของแป้งชุบทอด สีของรูพรุนในระบบ L*a*b*

เมื่อได้ภาพสีของแต่ละส่วนของนักเกต ดังรูปที่ 3.8 จากนั้นนำภาพที่ได้มาวิเคราะห์ค่าสีในระบบ L*a*b* โดยการคำนวณค่าเฉลี่ยของค่า L* a* และ b* ในทุกพิกเซล โดยใช้โปรแกรม MATLAB

3.5 การวิเคราะห์องค์ประกอบสำคัญ

เมื่อได้คุณลักษณะทั้ง 11 คุณลักษณะ (พื้นที่ ปริมาณรูพรุน ค่า L* a* และ b* ของเนื้อนักเกต แป้งชุบทอดและรูพรุน) จะถูกวิเคราะห์องค์ประกอบสำคัญโดยใช้โปรแกรม Minitab 16 เพื่อลดจำนวนตัวแปรโดยการรวมตัวแปรหลาย ๆ ตัวให้อยู่ในปัจจัยหรือองค์ประกอบเดียวกัน

3.5.1 สร้างเมทริกซ์สหสัมพันธ์ (correlation matrix) เพื่อตรวจสอบความสัมพันธ์ของคุณลักษณะทั้ง 11 ข้อ โดยใช้โปรแกรม MATLAB

3.5.2 สกัดองค์ประกอบ เพื่อหาจำนวนองค์ประกอบที่สามารถใช้ตัวแปรทั้งหมดทุกตัวได้โดยอาศัยหลักความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างตัวแปรที่ใช้เป็นข้อมูลองค์ประกอบสำคัญ

3.5.3 เลือกวิธีการหมุนแกน แยกตัวแปรให้เห็นเด่นชัดว่าตัวแปรหนึ่ง ๆ ควรจะจัดอยู่ในกลุ่มหรือในองค์ประกอบใด

3.5.4เลือกค่าน้ำหนักองค์ประกอบ **(factors score) และตั้งชื่อองค์ประกอบที่วิเคราะห์ได้**

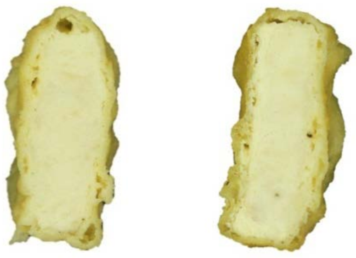
พิจารณาเลือกตัวแปรที่น่าจะเป็นสมาชิกขององค์ประกอบนั้น ๆ มากที่สุด หลังจากนั้นจึงให้ความหมายแก่องค์ประกอบที่ได้แต่ละองค์ประกอบ

3.6 การควบคุมกระบวนการด้วยวิธีการเชิงสถิติ

หลังจากทำการวิเคราะห์ระบบการวัด เพื่อสร้างความเชื่อมั่นในเครื่องมือวัดว่าค่าที่วัดได้จากเครื่องมือวัดมีความสามารถในการแบ่งแยกผลิตภัณฑ์และสามารถนำไปใช้ในการควบคุมกระบวนการเชิงสถิติซึ่งขั้นตอนในการควบคุมกระบวนการเชิงสถิติจะนำปัจจัยที่ได้จากการวิเคราะห์องค์ประกอบสำคัญมาเป็นตัวแปรใหม่สำหรับการทดสอบ ซึ่งขั้นตอนในการควบคุมกระบวนการเชิงสถิติมีดังนี้

3.6.1 ตัวอย่างนักเกตไก่ที่ใช้ในการทดลอง

ใช้ผลิตภัณฑ์นักเกตจำนวน 2 ชนิด เพื่อใช้แทนลักษณะของนักเกตไก่ที่ปกติดังรูปที่ 3.9 และนักเกตไก่ที่ผิดปกติดังรูปที่ 3.10 โดยใช้ความแตกต่างของคุณลักษณะที่ต้องการตรวจสอบคือ คุณภาพสีของแป้งชุบทอด (PC1) คุณภาพด้านความลึกของรูพรุน (PC2) คุณภาพสีของเนื้อนักเกต (PC3) และคุณภาพด้านความพรุน (PC4) ซึ่งเป็นคุณลักษณะที่ได้จากการวิเคราะห์องค์ประกอบสำคัญ เป็นตัวกำหนด



รูปที่ 3.9 ตัวอย่างที่ใช้แทนลักษณะของนักเกตไก่ที่ปกติ

รูปที่ 3.10 ตัวอย่างที่ใช้แทนลักษณะของนักเกตไก่ที่ผิดปกติ

3.6.2 การเลือกใช้แผนภูมิควบคุม

จากการตรวจสอบคุณลักษณะของนักเกตไก่จากการประมวลผลภาพ ค่าที่ได้จะออกมาทั้งหมด 11 ตัวแปร และเมื่อวิเคราะห์องค์ประกอบจะได้ตัวแปรใหม่เพียง 4 ตัวแปร ได้แก่ ค่า PC1 PC2 PC3 และ PC4 ข้อมูลขององค์ประกอบที่ได้จากการประมวลผลภาพอยู่ในรูปแบบค่าสังเกต

เชิงเดี่ยว (individual observations) ดังนั้นจึงเลือกใช้แผนภูมิควบคุมสำหรับตัวอย่างเดี่ยวของชิวฮาร์ท (shewhart control chart)

3.6.2.1 การทดสอบแผนภูมิควบคุม

ทดสอบแผนภูมิควบคุมโดยใช้แผนภูมิแผนภูมิควบคุมสำหรับตัวอย่างเดี่ยวในการควบคุมกระบวนการ การทดสอบดังกล่าวเพื่อตรวจสอบความผิดพลาดที่เกิดจากความผิดพลาดแบบที่ 1 (type I error) คือกรณีที่ตัดสินใจผิดพลาดว่ากระบวนการอยู่ภายนอกการควบคุมแต่ความเป็นจริงแล้วอยู่ภายใต้การควบคุม และความผิดพลาดแบบที่ 2 (type II error) คือกรณีการตัดสินใจผิดพลาดว่ากระบวนการอยู่ภายใต้การควบคุมแต่ความเป็นจริงแล้วอยู่ภายนอกการควบคุม (Montgomery, 2009) โดยแบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอน ดังนี้

1) ขั้นตอนการออกแบบแผนภูมิ (phase I)

ออกแบบแผนภูมิโดยใช้แผนภูมิควบคุมสำหรับตัวอย่างเดี่ยวเพื่อวิเคราะห์ค่า PC1 PC2 PC3 และ PC4 สำหรับตัวอย่างนักเกตไก่ที่มีลักษณะปกติหรือที่ตรวจสอบแล้วว่าเป็นของดี ดังรูปที่ 3.7 จำนวน 80 ตัวอย่าง เพื่อทดสอบแผนภูมิควบคุมว่ามีความผิดพลาดแบบที่ 1 (type I error) หรือไม่ ก่อนการนำพิกัดควบคุมไปใช้ในกระบวนการควบคุมต่อไป

2) ขั้นตอนการควบคุมหรือการใช้แผนภูมิควบคุม (phase II)

ใช้แผนภูมิควบคุมกับตัวอย่างนักเกตไก่ที่มีลักษณะปกติ ดังรูปที่ 3.9 จำนวน 26 ตัวอย่าง มาจากลอตและประเภทเดียวกัน และนักเกตไก่ที่มีลักษณะผิดปกติในดานคุณภาพสีของแป้งชุบทอด (PC1) ดังรูปที่ 3.10 จำนวน 1 ตัวอย่าง เพื่อทดสอบว่าแผนภูมิควบคุมสามารถตรวจจับสิ่งผิดปกติได้หรือไม่หรือมีความผิดพลาดแบบที่ 2 (type II error) หรือไม่ และทำการทดสอบในลักษณะเดียวเดียวกันนี้กับนักเกตไก่ในส่วนของคุณภาพด้านความลึกของรูพรุน (PC2) คุณภาพสีของเนื้อนักเกต (PC3) และคุณภาพด้านความพรุน (PC4)

3.6.3 ศึกษาลักษณะของข้อมูล

ศึกษาลักษณะข้อมูลองค์ประกอบเพื่อเป็นข้อมูลประกอบการใช้งานแผนภูมิควบคุม ดังนั้นจึงทำการตรวจสอบข้อมูลดังนี้

3.6.2.1 การตรวจสอบการแจกแจงแบบปกติ (normal distribution)

3.6.2.2 การตรวจสอบสหสัมพันธ์ (correlation)

บทที่ 4
ผลการทดลองและวิจารณ์ผล

จากการทดลองตามขั้นตอนในบทที่ 3 ผลการทดลองแบ่งออกเป็น 6 ส่วนคือ การสร้างเครื่องมือประมวลผลภาพ การออกแบบการทดลองเพื่อพิจารณาปัจจัยที่มีผลต่อค่าสีของภาพถ่าย การวิเคราะห์ระบบการวัด การตรวจสอบคุณลักษณะโดยการประมวลผลภาพ การวิเคราะห์องค์ประกอบสำคัญและการควบคุมกระบวนการเชิงสถิติ แสดงดังต่อไปนี้

4.1 ผลการสร้างเครื่องมือประมวลผลภาพ

จากการพัฒนาและดัดแปลงเครื่องมือประมวลผลจากงานวิจัยของ Pedreschi et al. (2006) และ พิรญาณ์ (2554) โดยการพิจารณาวัสดุที่จะใช้จากงบประมาณที่มีอย่างจำกัดและตามคำแนะนำของ EHEDG (2007) ตามประเด็นต่อไปนี้

1. วัสดุที่ใช้ไม่เป็นอันตรายและเสี่ยงต่อการปนเปื้อนอาหาร ทั้งนี้วัสดุที่นำมาใช้นั้นไม่ได้สัมผัสกับอาหารโดยตรง ในการพิจารณาจึงมุ่งเน้นไปที่วัสดุที่ไม่ก่อให้เกิดละอองฝุ่น ไม่เป็นพิษหรือมีสารระเหยที่เป็นอันตรายและไม่เกิดสนิมเพื่อลดโอกาสในการปนเปื้อนอาหาร
2. วัสดุที่ใช้มีความคงทน แข็งแรง สะดวกต่อการใช้งานและมีรูปลักษณ์สวยงาม

ทำให้ได้เครื่องมือการประมวลภาพดังรูปที่ 4.1 ซึ่งประกอบไปด้วย

- aluminium profile หรือ aluminium frame เป็นโลหะที่มีน้ำหนักเบาแต่แข็งแรงทนทานต่อการสึกกร่อน ประกอบง่าย ไม่ต้องเชื่อม เปลี่ยนแปลงรูปแบบโครงสร้างโดยง่ายและหลากหลาย ไม่เป็นสนิม ไม่เป็นพิษหรือมีสารระเหยที่เป็นอันตรายที่อาจส่งผลต่อการปนเปื้อนอาหาร โดยได้เป็นประกอบเป็นโครงและขาตั้งสูงจากพื้น 100 เซนติเมตรเพื่อความมั่นคงแข็งแรงและให้สามารถรองรับการตรวจสอบคุณภาพอาหารที่เคลื่อนที่ในสายพานได้ในอนาคต อีกทั้งเพื่อให้สามารถปรับเปลี่ยนรูปทรงของโครงได้ตามความเหมาะสมและในกรณีที่มีการปรับปรุงแก้ไขเครื่องมือในอนาคต
- ยึดจับกล้องถ่ายภาพกับ aluminium profile ทำให้มีความมั่นคงและป้องกันการตกหล่นของกล้องโดยวางเหนือแผ่นอะคริลิกที่เจาะรูให้เฉพาะเลนส์กล้องลอดผ่านได้
- แผ่นอะคริลิกสีดำด้าน ประกอบเป็นกล่องเพื่อใช้ในการถ่ายภาพ โดยแผ่นอะคริลิกเป็นพลาสติกชนิดหนึ่ง มีน้ำหนักเบา ทำความสะอาดได้ง่าย ไม่มีปัญหาเรื่องละอองฝุ่นและสารระเหยที่เป็นอันตรายที่อาจส่งผลต่อการปนเปื้อนอาหาร (บุญรักษ์. 2008) และอะคริลิกสีดำด้านสามารถป้องกันแสงจากภายนอกและลดการสะท้อนของแสงภายในได้ 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
- กล้องดิจิตอล Canon 550D ตั้งค่ากล้อง ISO400 ความเร็วชัตเตอร์ 1/60 ค่ารูรับแสง 5.6 ระยะซูม 35 มิลลิเมตร ไม่ใช้แฟลช ความละเอียด 3456 × 2304 การวางกล้อง วางเหนือชิ้นงาน 35.5 เซนติเมตร โดยมุมระหว่างกล้องและหลอดไฟ 45 องศา

- ถ่ายภาพชิ้นงานในเครื่องมือประมวลผลภาพ โดยการถ่ายภาพจะเชื่อมต่อด้วย USB ผ่านคอมพิวเตอร์ โดยใช้โปรแกรม EOS Utility วิเคราะห์ค่าคุณลักษณะของภาพถ่ายด้วยโปรแกรม MATLAB

รูปที่ 4.1 ลักษณะเครื่องมือประมวลผลภาพที่ได้จากการปรับปรุง

4.2 ผลการออกแบบการทดลองเพื่อพิจารณาปัจจัยที่มีผลต่อค่าสีของภาพถ่าย

หลังจากได้เครื่องมือประมวลผลภาพเพื่อจะนำไปใช้ในการตรวจสอบคุณลักษณะของนักเกตไก่ ซึ่งก่อนการนำไปใช้จะทำการวิเคราะห์องค์ประกอบสำคัญทั้งหมดที่เกี่ยวข้องกับระบบการประมวลผลภาพเพื่อพิจารณาปัจจัยที่ส่งผลให้ค่าสีของภาพถ่ายชิ้นงานเปลี่ยนแปลง ดังนี้

4.2.1พิจารณาปัจจัยทั้งหมดในระบบประมวลผลภาพที่เกี่ยวข้องกับค่าสีของภาพถ่าย

เมื่อพิจารณาปัจจัยทั้งหมดที่เกี่ยวข้องกับค่าสีในระบบ L* a* b* ของภาพถ่ายชิ้นงานและกรองปัจจัยโดยใช้ความรู้จากประสบการณ์เพื่อลดความผันแปรของระบบในเบื้องต้น ดังตารางที่ 4.1 ซึ่งแสดงผลการพิจารณาปัจจัยทั้งหมดที่เกี่ยวข้องกับค่าสีในระบบ L* a* b* ของภาพถ่ายชิ้นงาน

จากตารางที่ 4.1 พบว่าปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับระบบมีทั้งหมด 10 ปัจจัย โดยสามารถสรุปได้จากความรู้เบื้องต้น การทดลองเบื้องต้นและประสบการณ์ได้ว่ามีปัจจัยที่มีผลต่อค่าสีของภาพถ่ายชิ้นงานแน่นอน 3 ปัจจัยคือค่ารูรับแสงของกล้องถ่ายภาพ ความไวชัตเตอร์กล้องถ่ายภาพและลักษณะพื้นผิวของชิ้นงานเนื่องจาก เมื่อกำหนดให้ค่ารูรับแสงมีค่ามาก แสงจะสามารถผ่านเข้ากล้องได้มาก

ทำให้ภาพถ่ายชิ้นงานที่ได้มีความสว่างมากซึ่งตรงเข้ากับเมื่อกำหนดให้ค่ารูรับแสงมีค่าน้อยก็จะส่งผลให้ให้ภาพถ่ายมีความสว่างน้อยตามไปด้วย ค่าความไวชัตเตอร์มีผลต่อค่าสีของภาพถ่าย คือเมื่อกำหนดให้ความไวชัตเตอร์มีค่ามากทำให้แสงสามารถผ่านเข้ากล้องได้น้อยส่งผลให้ภาพถ่ายชิ้นงานมีความสว่างน้อยแต่หากกำหนดให้มีค่าน้อยภาพถ่ายที่ได้ก็จะมีความสว่างมาก (ตะวัน. 2554) ส่วนลักษณะพื้นผิวของชิ้นงานที่นำมาทำการทดสอบจะมีผลต่อค่าสีของภาพถ่ายชิ้นงานเนื่องจาก ชิ้นงานที่มีพื้นผิวต่างกัน เช่น มีความมันวาว สะท้อนแสง ขรุขระหรือเรียบด้านจะมีความสามารถในการสะท้อนแสดงหรือดูดซับแสงได้ต่างกันจึงมีผลทำให้ค่าสีของภาพถ่ายชิ้นงานมีค่าแตกต่างกัน ซึ่งสอดคล้องกับการทดลองของ Mendoza et. al. (2006) ที่ได้ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการวัดสีของผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรพบว่าความโค้งและความเงาของพื้นผิวมีผลต่อค่าสีที่วัดได้อย่างมีนัยสำคัญ นอกจากนี้จากการพิจารณายังพบว่าการกดชัตเตอร์เป็นปัจจัยที่ไม่มีผลต่อค่าสีของภาพถ่ายชิ้นงานเนื่องจากในการวิเคราะห์กำหนดให้การกดชัตเตอร์เพื่อถ่ายภาพจะใช้เมาส์คลิกผ่านโปรแกรม Camera Control Pro 2 ในคอมพิวเตอร์ซึ่งเชื่อมต่อกล้องและคอมพิวเตอร์ด้วย USB จึงไม่มีผลต่อสีของภาพถ่ายชิ้นงานแน่นอน

ตารางที่ 4.1 การวิเคราะห์องค์ประกอบสำคัญเบื้องต้น

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

ทั้งนี้เพื่อเป็นการคัดแยกปัจจัยเหล่านี้ออกจากการพิจารณาจึงได้กำหนดค่าของปัจจัยดังกล่าวรวมถึงค่าอื่นๆของกล้องที่ใช้ถ่ายภาพเป็นค่าคงที่เพื่อลดความผันแปรในเบื้องต้น คือกำหนดให้ใช้กล้องดิจิตอล Canon 550D ตั้งค่ากล้อง ISO400 ความเร็วชัตเตอร์ 1/60 ค่ารูรับแสง 5.6 ระยะซูม 35 มิลลิเมตร ไม่ใช้แฟลช ความละเอียด 3456 × 2304 การวางกล้อง วางเหนือชิ้นงาน 35.5 เซนติเมตร โดยมุมระหว่างกล้องและหลอดไฟ 45 องศา

ส่วนปัจจัยที่ยังไม่ทราบแน่ชัดว่ามีผลต่อต่อสีหรือไม่นั้นมีทั้งหมด 6 ปัจจัย ได้แก่ สีพื้นหลังวางชิ้นงาน ผู้ทำการทดลอง ตำแหน่งการวางชิ้นงาน จำนวนหลอดไฟ แสงภายนอกและระยะห่างของชิ้นงานกับกล้อง ซึ่งปัจจัยทั้ง 6 ปัจจัยนี้จะถูกนำไปวิเคราะห์ความมีนัยสำคัญต่อค่าสีของภาพถ่ายชิ้นงานต่อไป

4.2.2 ออกแบบการทดลองแบบเศษส่วนเชิงแฟคทอเรียลเพื่อพิจารณาความมีนัยสำคัญของปัจจัย

เมื่อกำหนดระดับของปัจจัยทั้ง 6 ปัจจัยที่เหลือจากการกรองในขั้นต้น ดังตารางที่ 4.2 และออกแบบการทดลองแบบเศษส่วนเชิงแฟคทอเรียล (fractional factorial design) แบบ 2^{6-1} ได้ทั้งหมด 32 การทดลอง ดังตารางที่ 4.3

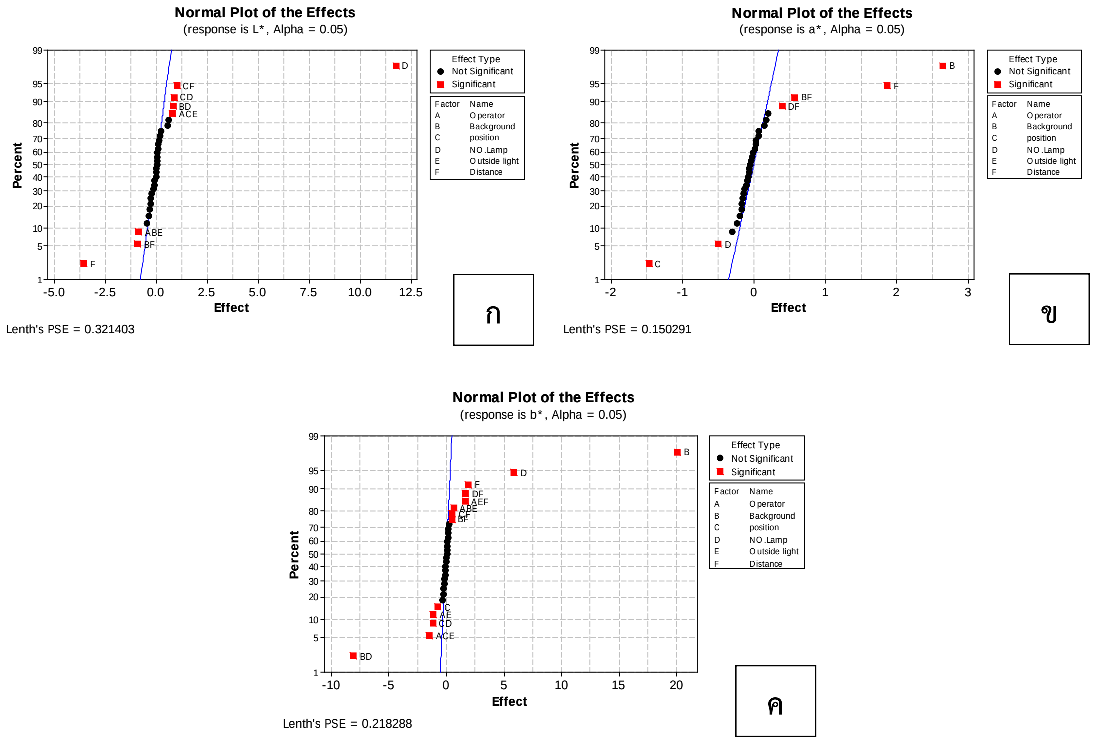
ตารางที่ 4.2 ระดับของปัจจัยที่ใช้ในการทดลองความมีนัยสำคัญ

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

ตารางที่ 4.3 รูปแบบการทดลองและผลการทดสอบความมีนัยสำคัญ

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 4.2ก) และผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่า L* จากทั้งหมด 6 ปัจจัย ดังตารางที่ 4.4 พบว่าอิทธิพลจากจำนวนหลอดไฟ (D) ระยะห่างระหว่าชิ้นงานกับกล้องถ่ายภาพ (F) มีผลต่อค่า L* ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ($P<0.05$)



รูปที่ 4.2 normal probability plot of the effect ของค่า L*a*b* ในขั้นตอนการออกแบบการทดลอง ก) ค่า L* ข) ค่า a* ค) ค่า b*

ตารางที่ 4.4 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 4.2ข) และผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่า a* จากทั้งหมด 6 ปัจจัย ดังตารางที่ 4.5 พบว่าอิทธิพลจากสีพื้นหลัง (B) ตำแหน่งการวางชิ้นงาน (C) จำนวนหลอดไฟ (D) และระยะห่างระหว่างชิ้นงานกับกล้องถ่ายภาพ (F) มีผลต่อค่า a* ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% (P<0.05)

ตารางที่ 4.5 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่า a* (analysis of variance for a*)

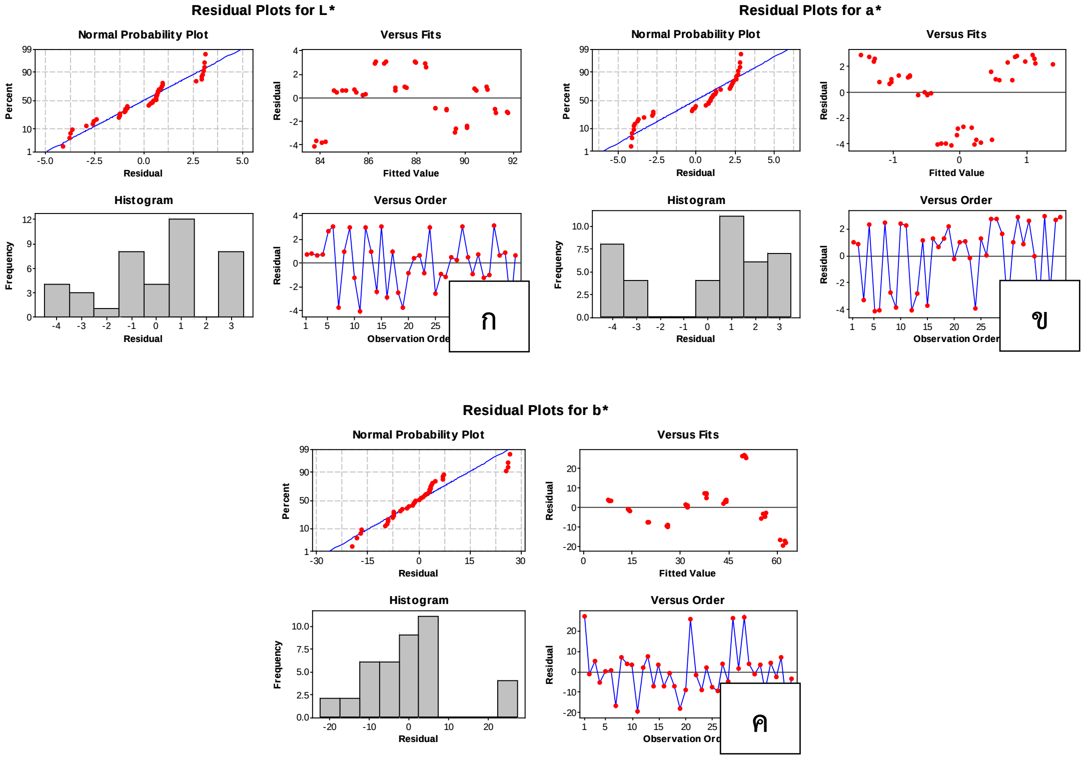
Source	DF	Seq SS	Adj MS	F	P-value
main effects	6	103.584	17.2641	199.34	0.000
operator (A)	1	0.013	0.0129	0.15	0.708
background (B)	1	56.187	56.1866	648.76	0.000
position (C)	1	17.206	17.2057	198.66	0.000
no.Lamp (D)	1	1.934	1.9340	22.33	0.001
outside light (E)	1	0.191	0.1907	2.20	0.169
distance (F)	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 4.6 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 4.2ค) และผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่า b* จากทั้งหมด 6 ปัจจัย ดังตารางที่ 4.6 พบว่าอิทธิพลจากสีพื้นหลัง (B) จำนวนหลอดไฟ (D) และระยะห่างระหว่างชิ้นงานกับกล้องถ่ายภาพ (F) มีผลต่อค่า b* ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ($P<0.05$)

พิจารณา residual plot ของค่า L* ในรูปที่ 4.3ค พบว่าค่าตกค้าง (residual) มีการเรียงตัวเป็นเส้นตรง การกระจายตัวเป็นแบบปกติ ส่วน versus fits และ versus order พบว่า ค่าตกค้างมีความแปรปรวนคงที่ ซึ่งในส่วนของค่า a* และ b* ในรูปที่ 4.3ข และ 4.3ค ตามลำดับ ก็ให้ผลเช่นเดียวกันกับ residual plot ของค่า L* จึงสามารถสรุปได้ว่าค่าตกค้างของข้อมูลไม่ผิดปกติดังนั้นจึงสามารถนำข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์มาใช้ได้



รูปที่ 4.3 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

4.3 ผลการทดลองการวิเคราะห์ระบบการวัด

หลังจากการออกแบบการทดลองและวิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลต่อค่าสีของภาพถ่ายชิ้นงานทำให้สามารถลดความผันแปรที่จะเกิดขึ้นในการประมวลผลภาพแล้ว ส่วนปัจจัยที่ไม่มีผลต่อค่าสีของภาพถ่ายชิ้นงานได้แก่ ผู้ทำการทดลองและแสงภายนอก ซึ่งถือว่าเป็นส่วนหนึ่งของระบบการวัดของการประมวลผลภาพ ดังนั้นขั้นตอนต่อไปจะเป็นการวิเคราะห์ระบบการวัดของเครื่องมือประมวลผลภาพเพื่อทดสอบความสามารถของระบบการวัดของเครื่องมือว่ามีความสามารถในการแบ่งแยกผลิตภัณฑ์ได้หรือไม่

4.3.1 การวิเคราะห์ระบบการวัด

ออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียลแบบเต็ม (full factorial design) จากปัจจัยในระบบการวัดของเครื่องมือประมวลผลภาพ (ผู้ทำการทดลองและแสงภายนอก) และในขั้นตอนนี้จะวัดสีของภาพถ่ายชิ้นงาน 10 ชิ้นที่มีสีแตกต่างกันดังรูป 3.3 และกำหนดระดับของปัจจัยในการทดลองดังตารางที่ 4.7 ได้การทดลองทั้งหมด 40 การทดลอง ไม่ทำซ้ำการทดลองดังตารางที่ 4.8

ตารางที่ 4.7 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 4.8 รูปแบบการทดลองและผลการทดลองการวิเคราะห์ระบบการวัด

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 4.9 จะเห็นได้ว่าอิทธิพลหลักจากผู้ทำการทดลองไม่มีผลทำให้ค่าสีที่วัดได้เปลี่ยนแปลงไปที่ระดับความเชื่อมั่น 95% แต่อิทธิพลจากแสงภายนอกมีผลทำให้ค่าสีที่วัดได้เปลี่ยนแปลงไปที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ซึ่งอาจแปลความหมายได้ว่าแสงภายนอกนั้นความจริงแล้วมีผลทำให้ค่า L* ของภาพถ่ายชิ้นงานเปลี่ยนแปลง แต่ในขั้นตอนการทดสอบความมีนัยสำคัญมีปัจจัยที่นำมาพิจารณาในระบบหลายปัจจัยจึงส่งผลให้แสงภายนอกดูเหมือนว่าจะไม่มีผลเมื่อเทียบกับปัจจัยอื่นๆที่มีผลต่อค่า L* มากกว่า ดังนั้นในการทดลองควรกำหนดแสงภายนอกให้เป็นปัจจัยคงที่ด้วยเพื่อลดความผันแปรที่จะเกิดขึ้นส่วนผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่า a* และ b* ได้ผลว่าไม่มีอิทธิพลหลักและอิทธิพลร่วมใดมีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อค่า a* ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

ตารางที่ 4.9 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

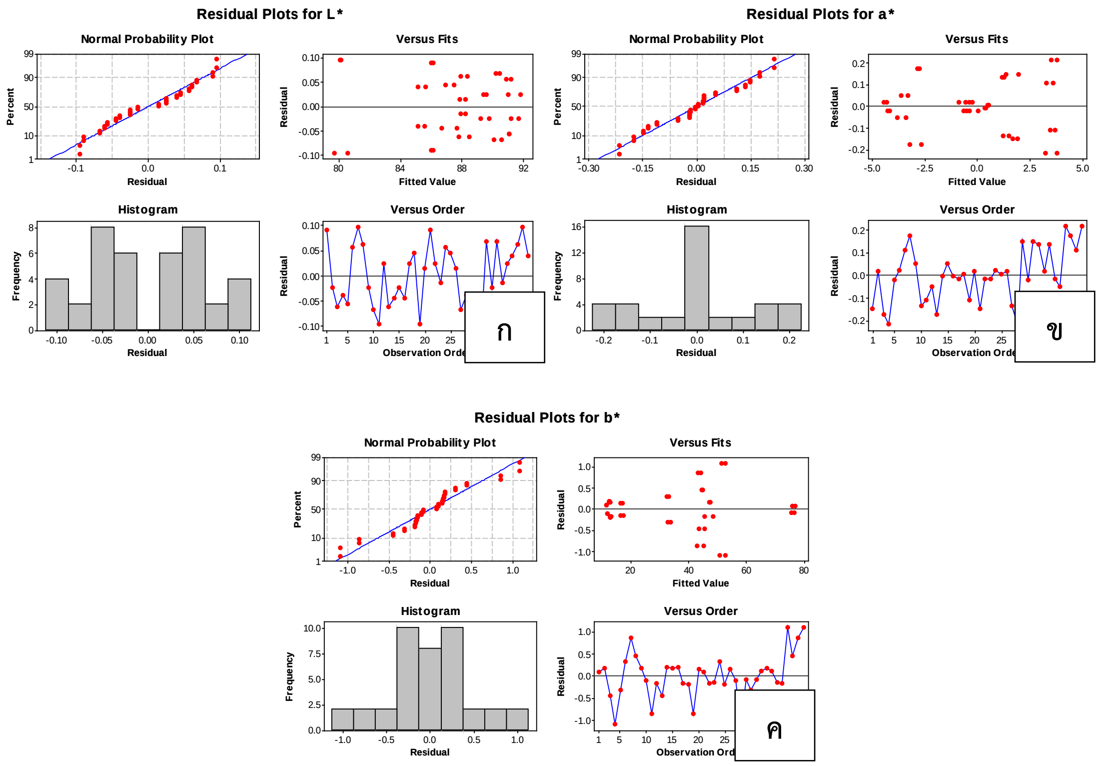
Analysis of Variance for L*

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%

Source	Variance component	Error term	Expected Mean Square for Each 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 4.4 residual plot ของค่า L*a*b* ในขั้นตอนการวิเคราะห์ระบบการวัด ก) ค่า L* ข) ค่า a* ค) ค่า b*

ตัวอย่างการคำนวณค่าความแปรปรวนทั้งหมดในส่วนของค่า L* จากสมการที่ 2.1 ได้ดังนี้ เมื่อพิจารณา normal probability plot พบว่าค่าตกค้างของทั้งค่า L* (รูปที่ 4.4ก) และ a* b* มีการเรียงตัวเป็นเส้นตรง การกระจายตัวมีแนวโน้มใกล้เคียงแบบปกติ ส่วน versus fits และ versus order พบว่าค่าตกค้างมีความแปรปรวนคงที่ดังนั้นจึงไม่ผิดปกติ

$$\sigma^2_{total} = \sigma^2_{part} + \sigma^2_{gauge}$$
$$\sigma^2_{\text{total}} = 11.314 + 0 + 0.091 + 0.011 + 0.013 + 0 + 0.015 = 11.444$$
$$\sigma^2_{\text{gauge}} = 0 + 0.091 + 0 = 0.091$$
$$\sigma^2_{\text{part}} = 11.314$$

และจากสมการที่ 2.1 ทำให้สามารถเปรียบเทียบความแปรปรวนทั้งหมดได้ดังตารางที่ 4.10

ตารางที่ 4.10 ตารางเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่า L* a* b*

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

จากการคำนวณสามารถเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนดังตารางที่ 4.10 แสดงให้เห็นความแปรปรวนของระบบการวัดมีค่าน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับความแปรปรวนเนื่องจากชิ้นงาน ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับคำแนะนำสำหรับเกณฑ์การยอมรับโดยทั่วไปซึ่ง AIAG (Automative Industry Action Group. 2002) ได้ระบุไว้ว่า ถ้าสัดส่วนความแปรปรวนต่ำกว่า 10% โดยทั่วไปแล้วถือว่าสามารถยอมรับได้

4.4 ผลการตรวจสอบคุณลักษณะโดยการประมวลผลภาพ

หลังจากทำการวิเคราะห์ระบบการวัด เพื่อสร้างความเชื่อมั่นในเครื่องมือวัดว่าค่าที่วัดได้จากเครื่องมือวัดมีความสามารถในการแบ่งแยกผลิตภัณฑ์และสามารถนำไปใช้ในการควบคุมกระบวนการได้ จากนั้นจึงทำการตรวจสอบคุณลักษณะของนักเกตไก่ ซึ่งผลจากการประมวลผลภาพทำให้ได้คุณลักษณะของนักเกตไก่ทั้ง 80 ตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบ ทั้งหมด 11 คุณลักษณะ

ตารางที่ 4.11 ผลการตรวจสอบคุณลักษณะของนักเกตไก่ 80 ชิ้นโดยการประมวลผลภาพ

ตัว	สีเนื้อนักเกต			สีแป้งชุบทอด			สีรูพรุน			พื้นที่	%รูพรุน
อย่าง	1L*	1a*	1b*	2L*	2a*	2b*	3L*	3a*	3b*	(area)	(%pore)
1	250.00	122.29	151.89	197.24	121.78	174.42	97.94	130.44	170.06	10048.0	12.67
2	251.27	122.21	152.36	189.07	123.73	175.26	128.05	131.04	179.57	9495.0	11.92
3	252.69	122.06	151.80	188.63	124.04	179.45	96.98	132.35	172.66	10743.0	13.02
4	250.42	122.11	152.63	199.12	123.64	176.55	71.13	129.82	162.67	10126.0	11.40
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
76	252.40	121.99	152.42	173.87	123.78	174.78	115.09	131.18	179.27	12641.0	10.93
77	252.72	121.99	151.99	180.03	124.75	181.19	142.46	131.23	182.92	10192.0	9.96
78	252.81	121.97	152.18	172.11	124.52	175.54	124.96	134.35	181.54	11340.0	6.23
79	252.66	121.89	152.88	182.05	123.87	173.07	104.84	135.05	175.76	12170.0	11.87
80	250.35	122.13	153.59	184.36	125.76	178.62	118.38	132.91	178.47	11408.0	10.07

จากตารางที่ 4.11 จะเห็นได้ว่าจากการประมวลผลภาพสามารถตรวจสอบคุณลักษณะตัวอย่างนักเกตไก่ได้ทั้งหมด 11 คุณลักษณะ ได้แก่ พื้นที่หน้าตัด ปริมาณรูพรุน ค่าสี L* a* และ b* ของเนื้อนักเกต แป้งชุบทอดและรูพรุน

4.5 ผลการทดลองการวิเคราะห์องค์ประกอบสำคัญ

หลังจากการตรวจสอบคุณลักษณะโดยการประมวลผลภาพ จะเห็นได้ว่ามีตัวแปรที่แสดงถึงลักษณะคุณภาพของนักเกตไก่หลายตัวแปร ดังนั้นเทคนิคการวิเคราะห์องค์ประกอบสำคัญจึงถูกนำมาใช้ในการลดจำนวนตัวแปร โดยการรวมตัวแปรหลาย ๆ ตัวให้อยู่ในตัวแปรหรือองค์ประกอบเดียวกัน ซึ่งองค์ประกอบที่ได้ถือเป็นตัวแปรใหม่ที่สามารถหาค่าข้อมูลได้และสามารถนำองค์ประกอบดังกล่าวไปเป็นตัวแปรสำหรับการวิเคราะห์ทางสถิติต่อไปทำการวิเคราะห์ระบบการวัด เพื่อสร้างความเชื่อมั่นในเครื่องมือวัดว่าค่าที่วัดได้จากเครื่องมือวัดมีความสามารถในการแบ่งแยกผลิตภัณฑ์และสามารถนำไปใช้ในการควบคุมกระบวนการจากนั้นจึงทำการทดลองวิเคราะห์องค์ประกอบจากค่าที่ได้จากการประมวลผลภาพเพื่อพิจารณาตัวแปรที่มีความสัมพันธ์กันไว้ในกลุ่มหรือองค์ประกอบเดียวกัน ซึ่งการวิเคราะห์ในขั้นตอนต่อจากนี้ ช่วงค่า L* คือ 0 ถึง 100 a* คือ -127 ถึง 128 และ b* คือ -127

ถึง 128 จะถูกแปลงโดยโปรแกรม MATLAB ให้มีค่าอยู่ในช่วง 0-255 ทั้ง 3 ค่า เพื่อให้สะดวกต่อการวิเคราะห์ผลและการคำนวณ

4.5.1 ผลการสร้างเมตริกซ์ความสัมพันธ์ระหว่างคู่ของตัวแปรทุกตัว

สร้างเมตริกซ์ความสัมพันธ์ระหว่างคู่ของตัวแปรทุกตัว (correlation matrix) เพื่อหาความสัมพันธ์ในรูปแบบเส้นตรงโดยวิธีของ Pearson correlation ของคุณลักษณะนักเกตไก่ทั้ง 11 ข้อ แสดงดังตารางที่ 4.12

ตารางที่ 4.12 ผลการสร้างเมตริกซ์ความสัมพันธ์ระหว่างคู่ของตัวแปร (correlation matrix)

ตัวแปร	1L*	1a*	1b*	2L*	2a*	2b*	3L*	3a*	3b*	area	%pore
1L*	1										
1a*	-0.813	1									
1b*	-0.507	0.040	1								
2L*	-0.85	0.166	-0.207	1							
2a*	0.159	-0.217	0.107	-0.637	1						
2b*	0.080	-0.106	0.074	-0.180	0.694	1					
3L*	0.243	-0.242	-0.134	-0.125	0.058	-0.017	1				
3a*	0.114	-0.023	-0.105	0.233	0.013	0.094	-0.136	1			
3b*	0.277	-0.246	-0.159	-0.040	0.107	0.075	0.868	0.012	1		
Area	0.046	-0.061	0.199	-0.190	0.196	0.001	-0.127	0.137	-0.169	1	
%pore	0.183	-0.057	-0.226	-0.031	0.286	0.183	-0.096	0.055	-0.114	-0.036	1

เมื่อพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ในตารางที่ 4.12 จะพบว่าตัวแปร 1L* และ 1a* 1L* และ 2L* 2L* และ 2a* 2a* และ 2b* 3L* และ 3b* มีความสัมพันธ์กันค่อนข้างมาก โดยมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ -0.813 -0.850 -0.637 0.694 และ 0.868 ตามลำดับ ดังนั้นจึงสามารถวิเคราะห์ผลในเบื้องต้นได้ว่า ตัวแปรแต่ละคู่ที่กล่าวข้างต้นควรอยู่ในองค์ประกอบเดียวกัน

4.5.2 การสกัดองค์ประกอบ

สกัดองค์ประกอบ (extraction factor analysis: factor extraction หรือ initial factors) โดยใช้วิธีการวิเคราะห์องค์ประกอบสำคัญ (principal component analysis, PCA)

วิธีการวิเคราะห์องค์ประกอบสำคัญเป็นการย่อเมตริกซ์สหสัมพันธ์ที่มีความซับซ้อนให้ง่ายต่อการอธิบาย และเป็นวิธีที่ทำให้องค์ประกอบตั้งฉากกัน หรือเป็นอิสระกัน ซึ่งทำให้ค่าน้ำหนักองค์ประกอบ (factor loading) เป็นค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของตัวแปรกับองค์ประกอบ

ตารางที่ 4.13 ผลลัพธ์จากการสกัดองค์ประกอบโดยใช้วิธีการวิเคราะห์องค์ประกอบสำคัญ

	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5	PC6	PC7	PC8	PC9	PC10	PC11
Eigenvalue	2.6483	2.1194	1.6305	1.2405	1.0842	0.8089	0.636	0.5501	0.1351	0.1011	0.0459
Proportion	0.2410	0.1930	0.1480	0.1130	0.0990	0.0740	0.058	0.0500	0.0120	0.0090	0.0040
Cumulative	0.2410	0.4330	0.5820	0.6940	0.7930	0.8670	0.924	0.9740	0.9870	0.9960	1.0000

จากตารางที่ 4.13 จะพบว่ามีองค์ประกอบที่มีค่า eigenvalue มากกว่า 1 อยู่ทั้งหมด 5 องค์ประกอบ โดยองค์ประกอบที่สำคัญที่สุดคือ องค์ประกอบที่ 1 (PC1) เนื่องจากสามารถอธิบายความแปรปรวนของข้อมูลได้มากที่สุดซึ่งสามารถอธิบายได้ถึง 24.10% ส่วนองค์ประกอบที่ 2 3 4

และ 5 (PC2 PC3 PC4 และ PC5) จะสำคัญรองลงมา แต่เมื่อพิจารณาค่า eigenvalue จะพบว่าองค์ประกอบที่ 5 มีค่า eigenvalue เข้าใกล้ 1 และสามารถอธิบายข้อมูลได้เพียง 9.90% จึงจะตัดการพิจารณาในองค์ประกอบที่ 5 ดังนั้นในขั้นตอนการสกัดองค์ประกอบจึงมีองค์ประกอบที่ใช้พิจารณา 4 องค์ประกอบโดยทั้งหมดสามารถอธิบายความแปรปรวนรวมของข้อมูลได้ 69.40%

ตารางที่ 4.14 ผลลัพธ์จากการสกัดองค์ประกอบ 4 องค์ประกอบก่อนการหมุนแกน

ตัวแปร (variable)	น้ำหนักองค์ประกอบ (factor loading)				ค่าความแปรปรวน (communality: h^2)
	PC1	PC2	PC3	PC4	
1L*	0.758	-0.252	-0.457	-0.292	0.932
1a*	-0.716	0.085	0.209	0.469	0.783
1b*	-0.282	0.48	0.507	-0.284	0.648
2L*	-0.41	-0.578	-0.351	0.145	0.646
2a*	0.582	0.732	0.052	0.196	0.916
2b*	0.408	0.564	-0.058	0.421	0.665
3L*	0.603	-0.453	0.537	0.101	0.867
3a*	0.014	-0.026	-0.48	-0.049	0.234
3b*	0.629	-0.457	0.456	0.162	0.838
Area	0.015	0.407	-0.077	-0.624	0.561
%pore	0.223	0.224	-0.51	0.435	0.549
Variance	2.6483	2.1194	1.6305	1.2405	7.6387
% ความแปรปรวนรวม	0.241	0.193	0.148	0.113	0.694

ตารางที่ 4.14 แสดงค่าน้ำหนักองค์ประกอบ ที่ได้จากการสกัดองค์ประกอบ เพื่อจัดว่าตัวแปรใดควรอยู่ในองค์ประกอบใด ซึ่งจะพิจารณาค่าน้ำหนักองค์ประกอบ ถ้าค่าน้ำหนักองค์ประกอบของตัวแปรในองค์ประกอบใดมีค่ามาก (เข้าสู่ +1 หรือ -1) และขององค์ประกอบอื่น ๆ มีค่าต่ำ (เข้าสู่ศูนย์) จะจัดตัวแปรให้อยู่ในองค์ประกอบที่มีค่าน้ำหนักองค์ประกอบสูง ซึ่งเมื่อพิจารณาจะพบว่าค่าน้ำหนักองค์ประกอบ ในองค์ประกอบต่างๆ มีค่าแตกต่างกันไม่ชัดเจน ทำให้ไม่สามารถจัดตัวแปรได้

4.5.3 เลือกวิธีการหมุนแกน (factors rotation)

เนื่องจากค่าน้ำหนักองค์ประกอบ ในองค์ประกอบต่างๆ มีค่าแตกต่างกันไม่ชัดเจน ดังแสดงในตารางที่ 4.14 ทำให้ไม่สามารถจัดตัวแปรได้ จึงต้องทำการหมุนแกนองค์ประกอบเพื่อแยกตัวแปรให้เห็นเด่นชัดว่าตัวแปรอื่นๆ และควรจะจัดอยู่ในกลุ่มหรือในองค์ประกอบใด โดยเลือกการหมุนแบบตั้งฉากกัน (orthogonal) หรือเป็นอิสระกัน แบบ varimax ซึ่งได้ผลลัพธ์ดังตารางที่ 4.15

ตารางที่ 4.15 ผลลัพธ์จากการสกัดองค์ประกอบ 4 ปัจจัยหลังการหมุนแกนแบบ varimax

ตัวแปร	น้ำหนักองค์ประกอบ				ค่าความแปรปรวน
	PC1	PC2	PC3	PC4	
1L*	0.083	0.139	-0.916	0.258	0.932

1a*	-0.105	-0.169	0.858	0.086	0.783
1b*	0.081	-0.088	0.317	-0.73	0.648
2L*	-0.57	-0.153	0.125	0.531	0.646
2a*	0.926	0.044	-0.152	-0.185	0.916
2b*	0.81	0.005	0.023	0.091	0.665
3L*	0.001	0.913	-0.183	0.008	0.867
3a*	-0.023	-0.318	-0.25	0.264	0.234
3b*	0.039	0.887	-0.201	0.1	0.838
Area	0.045	-0.37	-0.344	-0.551	0.561
%pore	0.479	-0.238	-0.089	0.506	0.549
Variance	2.0955	1.996	1.9777	1.5696	7.6387
% ความแปรปรวนรวม	0.19	0.181	0.18	0.143	0.694

ตารางที่ 4.16 สรุปปัจจัยของแต่ละองค์ประกอบที่วิเคราะห์ได้

PC1	PC2	PC3	PC4
2L*	3L*	1L*	1b*
2a*	3a*	1a*	2L*
2b*	3b*	-	Area
-	-	-	% pore

ค่าในตารางที่ 4.15 เป็นค่าน้ำหนักองค์ประกอบ เมื่อมีการหมุนแกนปัจจัยโดยวิธี varimax จะพบว่าค่าน้ำหนักองค์ประกอบเปลี่ยนแปลงไปเมื่อเทียบกับค่าน้ำหนักองค์ประกอบ เมื่อยังไม่มีการหมุนแกนแล้วทำให้ค่าน้ำหนักองค์ประกอบของบางองค์ประกอบมีค่ามากเมื่อเทียบกับขององค์ประกอบอื่นๆ ดังนั้นจากผลการวิเคราะห์ในตารางที่ 4.12 4.15 และ 4.16 ควรจัดให้

องค์ประกอบที่ 1 (PC1) ประกอบด้วยตัวแปร 3 ตัวแปรคือ 2L* 2a* และ 2b*

องค์ประกอบที่ 2 (PC2) ประกอบด้วยตัวแปร 3 ตัวแปรคือ 3L* 3a* และ 3b*

องค์ประกอบที่ 3 (PC3) ประกอบด้วยตัวแปร 2 ตัวแปรคือ 1L* และ 1a*

องค์ประกอบที่ 4 (PC4) ประกอบด้วยตัวแปร 4 ตัวแปรคือ 1b* 2L* area และ % pore

และจากผลลัพธ์ ในตารางที่ 4.15 สรุปได้ว่าองค์ประกอบทั้ง 4 สามารถอธิบายความแปรปรวนรวมของตัวแปรได้ 69.40% องค์ประกอบที่ 1 อธิบายได้ 19% องค์ประกอบที่ 2 ได้ 18.1% องค์ประกอบที่ 3 ได้ 18% และองค์ประกอบที่ 4 ได้ 14.3%

4.5.4 เลือกค่าน้ำหนักองค์ประกอบ (factors score) และตั้งชื่อองค์ประกอบที่วิเคราะห์ได้

จากตัวแปร 11 ตัวสามารถจัดให้เหลือเพียง 4 องค์ประกอบ เท่ากับเป็นการลดตัวแปรจาก 11 ตัว เหลือ 4 ตัวแปร ซึ่งถือเป็นตัวแปรใหม่ ส่วนค่าน้ำหนักองค์ประกอบ (factors score) จะถูกใช้เป็นค่าขององค์ประกอบ

ตารางที่ 4.17 factor score coefficients

ตัวแปร	factor score coefficients			
	PC1	**PC2**	**PC3**	**PC4**
1L*	-0.037	-0.037	-0.468	0.089
1a*	0.051	0.01	0.462	0.132

1b*	0.01	0	0.108	-0.447
2L*	-0.227	-0.075	0.039	0.315
2a*	0.437	0.011	0.006	-0.053
2b*	0.423	0.008	0.115	0.137
3L*	-0.016	0.46	0.005	-0.024
3a*	-0.017	-0.201	-0.156	0.154
3b*	0.01	0.443	0.005	0.04
Area	-0.068	-0.229	-0.286	-0.392
%pore	0.279	-0.14	0.025	0.375

เมื่อนำตัวแปรของแต่ละองค์ประกอบที่วิเคราะห์ได้มาเขียนในรูปสมการ จะได้ดังนี้

PC1= (-0.227)2L* + (0.437)2a* + (0.423)2b* (4.1)

PC2= (0.460)3L* + (-0.201)3a* + (0.443)3b* (4.2)

PC3= (-0.468)1L* + (0.462)1a* (4.3)

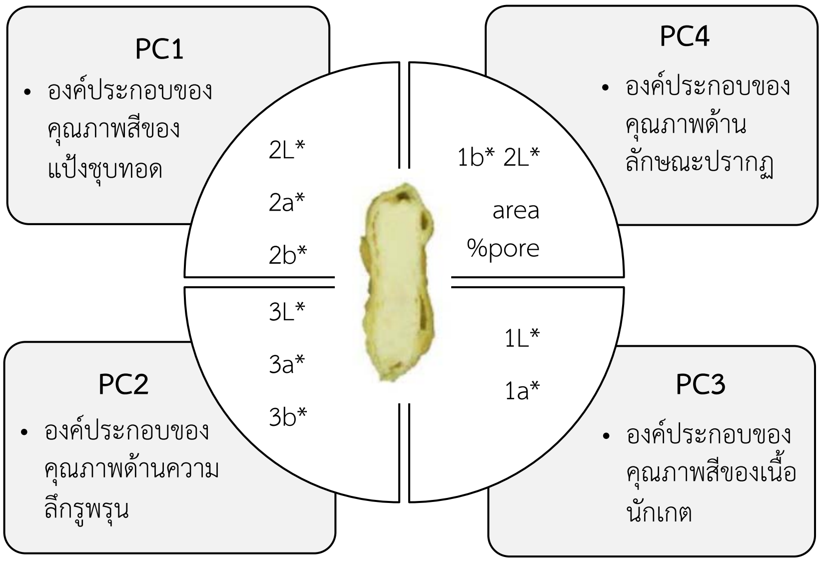
PC4= (-0.447)1b* + (0.315)2L* + (-0.392)area + (0.375)(%pore) (4.4)

พิจารณาองค์ประกอบที่ 1 (PC1) ซึ่งประกอบด้วยตัวแปร 3 ตัวแปรคือ 2L* 2a* และ 2b* พบว่าทั้ง 3 ตัวแปร เป็นตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับค่าความสว่าง (2L*) ค่าสีของแป้งชุบทอดทั้งในส่วนของสีเขียว-แดง (2a*) และสีนำเงิน-เหลือง (2b*) ซึ่ง ชนิดหรือส่วนผสมของแป้งชุบทอดแต่ละชนิดนั้นนอกจากจะมีรสชาติ ความข้นหนืด ความสามารถในการเกาะติดเนื้อไก่ที่แตกต่างกันแล้วยังให้สีหลังการทอดในขั้นต้นที่แตกต่างกัน ดังแสดงในตารางที่ 2.1 หรือระยะเวลาในการทอดก็ส่งผลให้สีของแป้งชุบทอดมีความแตกต่างกันได้เช่นกัน จึงสามารถเรียกองค์ประกอบที่ 1 ได้ว่า “**องค์ประกอบของคุณภาพสีของแป้งชุบทอด**”

องค์ประกอบที่ 2 (PC2) ประกอบด้วยตัวแปร 3 ตัวแปรคือ 3L* 3a* และ 3b* ซึ่งตัวแปรทั้ง 3 ตัวแปร เกี่ยวข้องกับค่าความสว่างของรูพรุน (L*) สีเขียว-แดง (a*) และสีนำเงิน-เหลือง (b*) ซึ่งตัวแปรทั้งหมดของรูพรุน สามารถบอกได้ถึงความลึกตื้นของรู จึงสามารถเรียกองค์ประกอบที่ 2 ได้ว่า “**องค์ประกอบของคุณภาพด้านความลึกของรูพรุน**” ซึ่งอาจแปลความหมายได้ว่าที่ความกว้างของรูพรุนเท่ากันรูพรุนที่ตื้นกว่าจะให้ค่าสีที่อ่อนกว่ารูพรุนที่มีความลึก เนื่องจากแสงส่องไปไม่ถึงส่วนที่อยู่ลึกหรือด้านใน ทำให้ภาพถ่ายที่ได้มีสีที่เข้มกว่า ซึ่งการเกิดความลึกของรูพรุนที่ไม่เท่ากันนี้อาจเป็นสาเหตุมาจากกรณีถ้าแป้งสุกหรือได้รับความร้อนเพิ่มมากขึ้น แป้งจะเกิดการพองตัวมากขึ้น ดังนั้นจึงเกิดรูพรุนมากขึ้นและลึกมากขึ้น หรือชนิดของแป้งชุบทอดที่ต่างกันก็ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์มีความพรุนที่ต่างกัน

องค์ประกอบที่ 3 (PC3) ประกอบด้วยตัวแปร 2 ตัวแปรคือ 1L* และ 1a* โดยตัวแปรทั้งสองเป็นตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับค่าความสว่างและสีเขียว-แดงของเนื้อนักเกต ตามลำดับ ซึ่งเช่นเดียวกับแป้งชุบทอดนั่นคือถ้าหากส่วนผสมของเนื้อนักเกตแตกต่างกันก็จะส่งผลให้คุณลักษณะต่างๆรวมถึงสีแตกต่างกันด้วย จึงสามารถเรียกองค์ประกอบที่ 3 ได้ว่า “**องค์ประกอบของคุณภาพสีของเนื้อนักเกต**” และในส่วนของเนื้อนั้น เมื่อพิจารณาจากผลิตภัณฑ์ด้วยสายตาจะเห็นได้ว่า เนื้อนักเกตที่สุกแล้วจะมีสีขาว ส่วนที่ยังไม่สุกจะมีสีแดงคล้ำ ลักษณะค่อนข้างใส จึงมีองค์ประกอบเฉพาะความสว่างและสีเขียว-แดง ดังนั้นจึงแตกต่างจากองค์ประกอบของคุณภาพสีของแป้งชุบทอดที่มีลักษณะเป็นสีเหลืองจึงมีตัวแปรของสีเหลืองเป็นองค์ประกอบด้วย

องค์ประกอบที่ 4 (PC4) ประกอบด้วยตัวแปร 4 ตัวแปรคือ 1b* 2L* area และ % pore ซึ่งองค์ประกอบนี้มีตัวแปรย่อยที่ค่อนข้างหลากหลาย ทำให้ยากต่อการพิจารณาหาคามสัมพันธ์และการกำหนดชื่อองค์ประกอบ แต่เมื่อพิจารณาตัวแปรย่อยในองค์ประกอบพบว่ามีตัวแปรที่บ่งบอกถึงลักษณะปรากฏ คือ area และ % pore ส่วนตัวแปร 2L* ก็มีความเกี่ยวข้องกับแป้งชุบทอด ซึ่งทั้ง area และ %pore ก็เกี่ยวข้องกับแป้งชุบทอดเช่นเดียวกัน จึงสมมติฐานว่าตัวแปรทั้ง 3 ตัวแปร มีความเกี่ยวข้องกัน ส่วนตัวแปร 1b* ยังไม่สามารถหาความสัมพันธ์ร่วมกับตัวแปรอื่นได้ แต่เมื่อพิจารณาสมการที่ 4.4 จะพบว่าตัวแปร 1b* มีค่าน้ำหนักองค์ประกอบหรือค่าสัมประสิทธิ์น้อยที่สุดในทั้งหมด 4 ตัวแปร จึงเป็นตัวแปรที่มีความสำคัญในการอธิบายความหมายขององค์ประกอบนี้น้อยที่สุด ซึ่งอาจทำให้แสดงลักษณะหรือมีความสัมพันธ์ร่วมกับตัวแปรอื่นๆในองค์ประกอบได้น้อย ดังนั้นจึงพิจารณาองค์ประกอบที่ 4 ได้ว่าเป็น “**องค์ประกอบของคุณภาพด้านลักษณะปรากฏ**”



รูปที่ 4.5 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบ

บทที่ 5
สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเสนอวิธีการประเมินผลคุณภาพของนักเกตไก่โดยใช้การประมวลผลภาพร่วมกับการวิเคราะห์องค์ประกอบสำคัญและเสนอวิธีการควบคุมคุณภาพเชิงสถิติของนักเกตไก่

1. เครื่องมือในการประมวลผลภาพที่ใช้ในการศึกษาได้พัฒนาจากงานวิจัยของ พิรญาณ์ (2554) ซึ่งได้เครื่องมือมีที่มีขนาดเล็กลง น้ำหนักเบาลงสะดวกต่อการเคลื่อนย้าย วัสดุที่ใช้ไม่มีปัญหาเรื่องสนิมและฝุ่นเพื่อลดการปนเปื้อนกับอาหารที่นำมาทดสอบ อีกทั้งมีอุปกรณ์ที่ใช้ในการยึดจับกล้องถ่ายภาพที่มั่นคงและแข็งแรงเพื่อลดการตกหล่นหรือเคลื่อนที่อาจส่งผลต่อคุณภาพของภาพถ่ายที่จะนำมาวิเคราะห์

2. ศึกษาวิธีการประเมินผลสีของนักเกตไก่โดยใช้วิธีการประมวลภาพ และเพื่อลดความผันแปรที่จะเกิดขึ้นต่อคุณลักษณะของภาพถ่ายที่ต้องการจึงพิจารณาปัจจัยทั้งหมดที่เกี่ยวข้องกับระบบ จากนั้นออกแบบการทดลองแบบเศษส่วนเชิงแฟกทอเรียลเพื่อพิจารณาความมีนัยสำคัญของปัจจัย ซึ่งจากการทดลองพบว่าปัจจัยที่มีผลต่อค่าสีในระบบ L*a*b* คือ สีพื้นหลังวางชิ้นงาน ตำแหน่งการวางชิ้นงาน จำนวนหลอดไฟและระยะห่างของชิ้นงานกับกล้อง ซึ่งในการนำเครื่องมือประมวลผลภาพไปใช้จึงต้องกำหนดให้ปัจจัยดังกล่าวเป็นค่าคงที่เพื่อลดความผันแปรและลดความผิดพลาดที่จะเกิดขึ้นในการประมวลผลภาพ

3. เพื่อสร้างความเชื่อมั่นในการสร้างเครื่องมือวัดจึงทำการศึกษาความสามารถในการวัดซ้ำและการวัดเหมือนของเครื่องมือวัด โดยการนำปัจจัยผู้ทำการทดลองและแสงภายนอกซึ่งเป็นปัจจัยที่ไม่มีผลต่อค่าสีภาพถ่ายไปทำการทดลองเพื่อวิเคราะห์ระบบการวัดโดยการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบเต็ม จากผลการทดลองพบว่าระบบการวัดมีค่าสัดส่วนความแปรปรวนของค่า L* a* และ b* เท่ากับ 0.805% 0.179% และ 0.003% ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าความแปรปรวนของระบบการวัดมีค่าน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับความแปรปรวนเนื่องจากชิ้นงาน ทำให้มีเชื่อมั่นในเครื่องมือวัดว่าค่าที่วัดได้จากเครื่องมือวัดมีความสามารถในการแบ่งแยกผลิตภัณฑ์และสามารถนำไปใช้ในการควบคุมกระบวนการเชิงสถิติต่อไป

4. จากการประมวลผลภาพสามารถตรวจสอบคุณลักษณะตัวอย่างนักเกตไก่ได้ทั้งหมด 11 คุณลักษณะ ได้แก่ ค่า L* a* b* ของเนื้อนักเกต (1L* 1a* 1b*) L* a* b* ของแป้งชุบทอด (2L* 2a* 2b*) L* a* b* ของรูพรุน (3L* 3a* 3b*) พื้นที่หน้าตัด (area) และปริมาณรูพรุน (%pore)

5. การวิเคราะห์องค์ประกอบสำคัญของคุณลักษณะของนักเกตไก่ทั้งหมด 11 คุณลักษณะที่ได้จากการประมวลผลภาพ จากผลการวิเคราะห์องค์ประกอบสำคัญโดยการพิจารณาจากเมตริกซ์ความสัมพันธ์ การสกัดองค์ประกอบโดยใช้วิธีการวิเคราะห์องค์ประกอบสำคัญและการหมุนแกนปัจจัยโดยวิธี varimax ทำให้ได้เป็นตัวแปรใหม่ 4 ตัวแปร ซึ่งจะถูกเรียกว่าปัจจัยหรือองค์ประกอบและสามารถอธิบายความแปรปรวนรวมของตัวแปรได้ 69.40% โดยที่ องค์ประกอบที่ 1 (PC1) ประกอบด้วย 2L* 2a* และ 2b* รวมเรียกว่า **“องค์ประกอบของคุณภาพสีของแป้งชุบทอด”** องค์ประกอบที่ 2 (PC2) ประกอบด้วย 3L* 3a* และ 3b* รวมเรียกว่า “**องค์ประกอบของคุณภาพด้านความลึกของรูพรุน**” องค์ประกอบที่ 3 (PC3) ประกอบด้วย 1L* และ 1a* รวมเรียกว่า “**องค์ประกอบของคุณภาพสีของเนื้อนักเกต**” องค์ประกอบที่ 4 (PC4) ประกอบด้วย 1b* 2L* area

และ % pore รวมเรียกว่า “**องค์ประกอบของคุณภาพด้านลักษณะปรากฏ**” และเมื่อนำค่าน้ำหนักองค์ประกอบ (factors score) ของแต่ละตัวแปรมาเขียนในรูปของสมการจะผลได้ดังนี้

PC1= (-0.227)2L* + (0.437)2a* + (0.423)2b*

PC2= (0.460)3L* + (-0.201)3a* + (0.443)3b*

PC3= (-0.468)1L* + (0.462)1a*

PC4= (-0.447)1b* + (0.315)2L* + (-0.392)area + (0.375)(%pore)

ซึ่งทำให้สามารถหาค่าข้อมูลขององค์ประกอบหรือปัจจัยใหม่ที่สร้างขึ้นได้ และสามารถนำปัจจัยดังกล่าวไปเป็นตัวแปรสำหรับการวิเคราะห์ต่อไป

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. เนื่องจากตัวอย่างนักเกตไก่ที่นำมาทดสอบเป็นนักเกตไก่ที่มาจากท้องตลาดทำให้ไม่พบของเสียดังนั้นในการทดลองจึงได้นำนักเกตไก่ที่มียี่ห้อและมีลักษณะแตกต่างกันแทนของดีและของเสีย ทั้งนี้เพื่อเป็นแนวทางในการตรวจสอบ ซึ่งหากมีตัวอย่างของดีและขอเสียที่ได้จากกระบวนการผลิตจริงทำให้ทราบปัญหาของคุณภาพนักเกตไก่ที่แท้จริง ซึ่งอาจจะให้ได้การวิเคราะห์และผลลัพธ์ที่สามารถนำไปใช้จริงได้มากยิ่งขึ้น

2. ในขั้นตอนการทดสอบแผนภูมิควบคุมจะพบว่าแผนภูมิควบคุมของค่า PC2 หรือองค์ประกอบของความลึกของรูพรุน ไม่สามารถตรวจจับความผิดปกติของตัวอย่างได้ ซึ่งอาจเกิดจากการตีความหมายขององค์ประกอบ PC2 ผิดพลาดหรืออาจเป็นสาเหตุมาจากในประมวลผลภาพยังไม่สามารถดึงความแตกต่างของความผิดปกติของคุณภาพด้านนี้ได้ดีเท่าที่ควร ดังนั้นควรมีศึกษาเรื่องการตีความหมายในการวิเคราะห์องค์ประกอบและการปรับปรุงโปรแกรมในการประมวลผลภาพให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้นต่อไปในอนาคต

3. ในขั้นตอนการเก็บตัวอย่างเพื่อทำการทดลอง ควรสุ่มตัวอย่างหลายๆ ชุดตามเวลา จะทำให้สามารถทราบการแจกแจงของค่าเฉลี่ยของกลุ่มตัวอย่างซึ่งสามารถอ้างอิงถึงประชากรได้ และทำให้สามารถเลือกใช้แผนภูมิควบคุมได้ตรงกับลักษณะของข้อมูลส่งผลให้การนำแผนภูมิควบคุมมาใช้งานมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

4. เปลี่ยนตัวอย่างผลิตภัณฑ์ที่นำมาใช้ในการวิเคราะห์ที่ต้องใช้การควบคุมคุณภาพที่มีความซับซ้อนมากขึ้นหรือตรวจสอบลักษณะคุณภาพอื่นๆ เช่น ขนาด รูปร่าง เนื้อสัมผัส

5. การตรวจสอบคุณภาพโดยการประมวลผลภาพสามารถใช้ร่วมกับเทคนิคด้วยปัญญาอัจฉริยะ เช่น fuzzy logic เป็นต้น เพื่อมาช่วยในการวิเคราะห์ภาพและสามารถช่วยในการแบ่งระดับคุณภาพได้มากกว่า 2 ระดับ

บรรณานุกรม

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

กัลยา วานิชย์บัญชา. 2546. **การวิเคราะห์สถิติชั้นสูงด้วย SPSS for Windows.** พิมพ์ครั้งที่ 3. กรุงเทพฯ : ธรรมสาร.

กอง บก. ฐานเศรษฐกิจ. 2554, 10-12 พฤศจิกายน. “ยันครัวไทยสู่โลกถึงจุดหมายชัวร์.” **ฐานเศรษฐกิจ**. หน้า 2.

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

จันทนี อุริยะพงศ์สรรค์ ธนกร โรจนกร และ สุทธิพงศ์ อุริยะพงศ์สรรค์. 2552. **การพัฒนาแป้งเหลวชุบทอดสำหรับนักเกตไก่แช่เยือกแข็ง.** กรุงเทพฯ : สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ.

ชลินทร์ สุทธิเนตร อัสสุชล แสงนวล และ เติมพงษ์ เพ็ชรกูล. 2555. “เซนเซอร์ท่อนาโนคาร์บอนสำหรับจมูกอิเล็กทรอนิกส์เพื่อการตรวจสอบเบียร์สด.” หน้า 236-245. ใน **การประชุมวิชาการนำเสนอผลงานวิจัย ระดับบัณฑิตศึกษา มหาวิทยาลัยขอนแก่น ครั้งที่ 13.** ขอนแก่น : มหาวิทยาลัยขอนแก่น.

ชินวัฒน์ แก้วทอง และสุเจตน์ จันทรังษ์. “ค้นหาเมฆในรูปถ่ายจากดาวเทียม.” **วิศวสารลาดกระบัง**. 21(4) : 1-8.

ตะวัน พันธ์แก้ว. 2554. คู่มือถ่ายภาพด้วยกล้อง DSLR ฉบับสมบูรณ์. กรุงเทพฯ : โปรวิชั่น.

นิตยสาร พิก แอนด์ พอร์ค. 2556. **ธุรกิจไก่ ปี 56 ผู้ประกอบการต้องสามัคคีกัน.** [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก : http://www.thaiahpa.com/know11.php.

ปฐมากรณ์ หิรัญลาภ ปริญญา เมฆโมก และพงศ์พัธน์ สมบัติพานิช. 2551. “การควบคุมการทำงานของโปรแกรม MS Microsoft PowerPoint ด้วยการใช้สัญญาณมือ.” ปริญญานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ บัณฑิตวิทยาลัย. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

ปรัชญา นันทปถวี อนุวัตร แจ้งชัด กมลวรรณ แจ้งชัด และ เทพกัญญา หาญศีลวัต. 2554. “การพัฒนา แนวความคิดผลิตภัณฑ์นักเก็ตไก่เทียมแช่แข็งโดยใช้แผนภาพความต้องการของผู้บริโภคและแผนภาพความชอบ.” หน้า 1-11. ใน **การประชุมเสนอผลงานวิจัยระดับบัณฑิตศึกษาแห่งชาติ ครั้งที่ 22 6-7 ตุลาคม 2554. บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.** กรุงเทพฯ : มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

ปิติพร ฤทธิเรืองเดช และ ธงชัย สุวรรณสิชณน์. 2550. “การวิเคราะห์องค์ประกอบของพฤติกรรมด้านความหนืดและคุณสมบัติด้านเนื้อสัมผัสของเจลในแป้งชนิดต่างๆ.” หน้า 434-443. ใน **การประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 45 : สาขาส่งเสริมการเกษตรและคหกรรมศาสตร์ สาขาอุตสาหกรรมเกษตร วันที่ 30 มกราคม - 2 กุมภาพันธ์ 2550.** กรุงเทพฯ : มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

พิชิต สุขเจริญพงศ์. 2544. **การควบคุมคุณภาพเชิงสถิติวิศวกรรม (Engineering Quality Control).** กรุงเทพฯ : ซีเอ็ดยูเคชัน.

พิรญาณ์ แก้วสุวรรณ. 2555. "การควบคุมกระบวนการเชิงสถิติโดยใช้ภาพสีสำหรับไส้กรอก." วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ บัณฑิตวิทยาลัย. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

พิทักษ์พงศ์ กิ่งภาร. 2556. "การเปรียบเทียบระบบสีสำหรับการตรวจสอบคุณภาพสีไส้กรอก." ปริญญานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

ไพโรจน์ ส่งสุข. 2550. "การลดความผันแปรน้ำหนักบรรจุของเครื่องบรรจุแป้งโดยวิธีทางสถิติ." ปริญญานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมระบบการผลิต ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

ยุทธพงศ์ อุณหทวีทรัพย์ และ ณัฐกานต์ ลิขิตผลจรูญ. 2553. **"ระบบวิเคราะห์ฝ่าเท้าเพื่อการวินิจฉัยโรค**." ชลบุรี : มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตศรีราชา.

รสริน ศรีริกานนท์. 2555. **การวิเคราะห์องค์ประกอบ (Factor Analysis).** [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก : http://www.saruthipong.com/port/document/299-705/299-705-8.pdf.

วราศิริ พวงมาลัย วริศร์ วรเวทย์สกุล และ วัชรพงษ์ คุปตวุฒินันท์. 2551. "การรู้จำภาพใบหน้า." ปริญญานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

วิรัช วรรณรัตน์. 2538. "การวิเคราะห์ตัวประกอบ (Factor analysis)" **วารสารการวัดผลการศึกษา.** 48 : 37-42.

ศุภชัย นาทะพันธ์. 2551. **การควบคุมคุณภาพ**. กรุงเทพฯ : ซีเอ็ดยูเคชัน.

ศูนย์สารสนเทศการเกษตร สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์. 2554. **สถิติการค้าสินค้าเกษตรไทยกับต่างประเทศ ปี 2554.** กรุงเทพฯ : ศูนย์สารสนเทศการเกษตร สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์.

ศิริชัย พงษ์วิชัย. 2544. **การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติด้วยคอมพิวเตอร์.** พิมพ์ครั้งที่ 11. กรุงเทพฯ : จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

สถิติการค้าระหว่างประเทศ (World Trade Atlas). 2553. **สถิติการส่งออกไก่และผลิตภัณฑ์**. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก : http://www.nesp.kku.ac.th/kkusp/images/stories /document/ exportchicken53.doc

สุทธวัฒน์ เบญจกุล. 2537. "อาหารทะเลชุบแป้งและขนมปัง." **วารสารอุตสาหกรรมเกษตร.** 5(2) : 45-52.

สุรพงศ์ บางพาน. 2547. "การปรับปรุงประสิทธิภาพเครื่องสีข้าวกล้องโดยใช้เทคนิคการออกแบบการทดลอง." วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ บัณฑิวิทยาลัย. มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.

สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. 2534. **แป้งผสมสำหรับประกอบอาหารทอด มอก. 1028-2534.** กรุงเทพฯ : สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม.

อรอนงค์ นัยวิกุล จิตธนา แจ่มเมฆ ธารินี หลีละเมียร และศิรินทร์ อิรินทร์. 2526. การศึกษาคุณลักษณพของความกรอบหรอกรอบพองของแป้งชนิดต่างๆ เพื่อใช้ประกอบอาหาร. **วารสารอาหาร.** 15(1) : 41-62.

อังคณา ผ่องภักดี. 2546. “การพัฒนาผลิตภัณฑ์นักเกตแช่เยือกแข็งจากปลาโอลาย.” วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาผลิตภัณฑ์ประมง ภาควิชาผลิตภัณฑ์ประมง บัณฑิตวิทยาลัย. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

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 predusts using three cooking procedures.” **Food Hydrocolloids**. 23 : 1443-1448.

Anonymous. What's In Your Food What’s in a Chicken Mc Nugget. [Online]. Available : http://eatthis.menshealth.com/node/106288.

Automative Industry Action Group (AIAG). 2002. **Measurement System Analysis (MSA).** 3rd edition. Michigan.

Baldevbhai, P. J. and Anand, R. S. 2012. “Color Image Segmentation for Medical Images using L*a*b* Color Space.” **Journal of Electronics and Communication Engineering.** 1(2) : 24-45.

Du, C. and Sun, D.W. 2004. “Recent developments in the applications of image processing techniques for food quality evaluation.” **Trends in Food Science & Technology**. 15(5) : 230-249.

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

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.

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.

Jarimopas, B., S. Toomsaengtong, S. and Inprasit, C. 2007. “Design and testing of a mangosteen fruit sizing machine.” **Journal of Food Engineering**. 79 : 745–751.

Li, Q.Z. and Wang, M.H. 1999. “Development and prospect of real time fruit grading technique based on computer vision.” **Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery**. 30(6) : 1–7.

Locht, P., Thomsen, K. and Mikkelsen, P. 1997. Full colour image analysis as a tool for quality control and process development in the food industry. ASAE Paper No. 973006, ASAE, St. Joseph, Michigan, USA.

Loewe, R. 1996. "Ingredient selection for batter systems." 11-28. in Karel Kulp and Robert Loewe (eds.). **Batter breading in food processing**. 276. Minnesota : AACC.

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.

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

Mendoza, F. Dejmek, P.A. and Aguilera, J.M. 2006. "Calibrated color measurements of agricultural foods using image analysis." **Posthavest Biology and Technology.** 41(3) : 285-295.

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

Montgomery, D.C. and Runger, G.C. 2007. **Applied Statistics and Probability ror Engineers.** 4th. New York : John Wiley and Sons.

Mendoza, F., Dejmekb, P. and Aguilera J. M. 2006. "Calibrated color measurements of agricultural foods using image analysis." **Postharvest Biology and Technology**. 41 : 285–295.

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.

Qiao, J., Wang, N., Ngadi, M.O. and Kazemi, S. 2007. "Predicting mechanical properties of fried chicken nuggets using image processing and neural network techniques." **Journal of Food Engineering**. 79 : 1065–1070.

Sánchez, A.J., Albarracin, W., Grau, R., Ricolfe, C. and Barat, J.M. 2008. "Control of ham salting by using image segmentation." **Food Control.** 19 : 135-142.

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.

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.

Sun, D.W. 2000. "Inspecting pizza topping percentage and distribution by a computer vision method." **Journal of Food Engineering**. 44 : 245–249.

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.

Suranjan, P., Doetkott, C., Chtioui, Y. and Marsh, R. 1998. “Computer vision system for colour evaluation of edible beans.” ASAE Paper No. 983053, ASAE, St. Joseph, Michigan, USA.

Vainionpaa, J., Smolander, M., Alakomi, H-L., Ritvanen, T., Rajamaki, T., Rokka, M. and Ahvenainen, R. 2004. “Comparison of different analytical methods in the monitoring of the quality of modified atmosphere packaged broiler chicken cuts using principal component analysis.” **Journal of Food Engineering**. 65 : 273–280.

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.

ZEISS. **Education in Microscopy and Digital Imaging.** [Online]. Available : http://zeiss-campus.magnet.fsu.edu/articles/livecellimaging/digitalimaging.html.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก.

ผลการทดลอง

ตารางที่ ก.1 รูปแบบการทดลองและผลการทดลองการวิเคราะห์ระบบการวัด

ลำดับการสุ่ม	ลำดับทดลอง	ระดับปัจจัย						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	46.3750
15	3	-1	1	1	1	-1	1	90.6790	-1.7152	43.9415
22	4	1	-1	1	-1	1	1	81.5612	-4.7818	16.6295
13	5	-1	-1	1	1	-1	-1	94.3468	-6.4764	25.5972
19	6	-1	1	-1	-1	1	-1	83.8876	-2.1312	44.7327
27	7	-1	1	-1	1	1	1	90.9236	0.0226	44.3704
24	8	1	1	1	-1	1	-1	82.0711	-3.5076	42.3629
32	9	1	1	1	1	1	1	91.9660	-2.0468	44.1165
23	10	-1	1	1	-1	1	1	78.8411	-1.8172	45.8585
31	11	-1	1	1	1	1	-1	95.0073	-4.1897	40.8952
26	12	1	-1	-1	1	1	1	90.4788	-3.2362	33.4832
14	13	1	-1	1	1	-1	1	91.0707	-4.6476	31.6459
17	14	-1	-1	-1	-1	1	1	81.0743	-3.3509	15.3303
2	15	1	-1	-1	-1	-1	1	79.5797	-3.2380	15.6040
28	16	1	1	-1	1	1	-1	94.3738	-2.8044	41.5596
6	17	1	-1	1	-1	-1	-1	80.3782	-4.8087	19.1716
7	18	-1	1	1	-1	-1	-1	81.6369	-3.1574	42.9016
9	19	-1	-1	-1	1	-1	1	89.9444	-3.0140	33.7784
30	20	1	-1	1	1	1	-1	94.2866	-6.4632	25.9751
12	21	1	1	-1	1	-1	1	90.8747	0.3861	44.3655
18	22	1	-1	-1	-1	1	-1	84.4309	-4.5871	15.7620

20	23	1	1	-1	-1	1	1	78.5445	0.3855	46.1746
4	24	1	1	-1	-1	-1	-1	84.2199	-1.6851	45.5460
10	25	1	-1	-1	1	-1	-1	94.1156	-4.7800	31.1172
1	26	-1	-1	-1	-1	-1	-1	84.4718	-4.6072	15.9244
29	27	-1	-1	1	1	1	1	91.7499	-4.1584	33.5757
25	28	-1	-1	-1	1	1	-1	94.0944	-4.6195	31.4289
5	29	-1	-1	1	-1	-1	1	80.3061	-4.4829	16.4296
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

ตารางที่ ก.2 รูปแบบการทดลองและผลการทดลองการวิเคราะห์ระบบการวัด

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.3 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่า a*

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 a*

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%

Source	Variance component	Error term	Expected Mean Square for Each 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)

ตารางที่ ก.4 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่า b*

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 b*

Source	DF	SS	MS	F	P
part	9	16822.71	1869.19	5741.97	0.109 x
operator	1	1.06	1.06	1.24	0.565 x
outside light	1	0.54	0.54	0.95	0.716 x
part*operator	9	7.49	0.83	0.79	0.636
part*outside light	9	4.94	0.55	0.52	0.828
operator*outside light	1	1.08	1.08	1.02	0.338
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%

Source	Variance component	Error term	Expected Mean Square for Each 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)

ตารางที่ ก.5 ผลการตรวจสอบคุณลักษณะของนักเกตไก่ 80 ชิ้นโดยการประมวลผลภาพ

ตัวอย่าง	สีเนื้อนักเกต			สีแป้งชุบทอด			สีรูพรุน			พื้นที่	%รูพรุน	องค์ประกอบ			
	1L*	2a*	3b*	1L*	2a*	3b*	1L*	2a*	3b*	(area)	(%pore)	PC1	PC2	PC3	PC4
1	250.00	122.29	151.89	197.24	121.78	174.42	97.94	130.44	170.06	10048.0	12.67	82.23	94.17	-60.50	-3940.19
2	251.27	122.21	152.36	189.07	123.73	175.26	128.05	131.04	179.57	9495.0	11.92	85.28	112.11	-61.13	-3726.46
3	252.69	122.06	151.80	188.63	124.04	179.45	96.98	132.35	172.66	10743.0	13.02	87.29	94.50	-61.87	-4215.21
4	250.42	122.11	152.63	199.12	123.64	176.55	71.13	129.82	162.67	10126.0	11.40	83.51	78.69	-60.78	-3970.91
5	251.93	122.05	152.33	194.25	121.85	173.97	63.55	135.24	161.18	9446.6	11.76	82.74	73.45	-61.52	-3705.88
6	251.11	122.17	152.17	191.59	122.81	175.26	101.40	133.98	174.44	9733.50	9.07	84.31	96.99	-61.07	-3819.96
7	251.85	122.08	151.83	187.28	123.46	177.26	89.11	138.23	170.45	9769.30	12.38	86.42	88.72	-61.46	-3834.17
8	252.45	122.01	152.27	187.46	123.39	176.33	80.61	135.52	168.04	9615.00	12.47	85.95	84.28	-61.78	-3773.79
9	250.83	122.23	152.29	172.11	126.11	178.70	104.22	131.96	175.53	9548.60	13.31	91.63	99.18	-60.92	-3752.38
10	251.03	121.98	153.13	178.15	125.75	181.83	94.74	132.50	170.30	8610.80	9.79	91.43	92.39	-61.13	-3384.33
11	252.52	122.07	151.79	182.91	126.26	183.60	110.80	135.29	176.53	10098.00	14.57	91.32	101.98	-61.78	-3963.70
12	252.65	122.00	152.16	177.51	127.85	182.10	122.76	132.04	181.42	10382.00	13.24	92.61	110.30	-61.88	-4077.32
13	251.20	122.15	152.48	171.78	126.36	180.58	64.62	130.92	157.92	11365.00	10.55	92.61	83.37	-61.13	-4465.46
14	252.71	121.94	152.44	166.40	127.78	180.87	125.55	135.23	181.97	11828.00	12.97	94.57	100.18	-61.93	-4647.89
15	251.53	122.10	152.63	180.38	126.33	181.35	8.80	128.60	166.20	9328.50	11.97	90.97	51.83	-61.31	-3664.05
16	252.88	121.97	152.17	180.13	124.67	174.97	110.21	135.93	173.54	12903.00	9.43	87.60	100.25	-62.00	-5065.93
17	249.72	122.15	152.72	188.88	123.25	177.17	86.91	132.14	169.27	11261.00	10.55	85.92	88.41	-60.83	-4419.38
18	252.27	121.92	152.86	189.01	126.13	182.99	103.13	135.72	174.47	9318.60	14.32	89.62	97.45	-61.73	-3656.79
19	252.73	121.96	152.21	164.16	128.07	185.54	76.69	133.23	165.13	9759.60	14.26	97.19	81.65	-61.93	-3837.27
20	252.74	121.99	152.08	173.51	127.22	181.41	98.67	133.83	172.89	12135.00	13.32	92.94	95.08	-61.92	-4765.70
21	252.18	122.08	152.21	144.50	127.48	180.39	94.71	129.32	165.53	12037.00	14.22	99.21	90.90	-61.62	-4736.26
22	252.75	121.92	152.34	189.73	122.92	176.99	132.89	126.74	177.51	9861.90	11.41	90.51	114.29	-61.96	-3870.22
23	252.82	121.93	152.35	189.82	124.18	181.10	125.60	131.53	177.60	10073.00	14.68	87.78	110.01	-61.99	-3951.92
24	252.27	121.96	152.46	169.06	124.60	180.72	129.79	132.45	183.38	7217.90	4.05	92.52	114.32	-61.72	-3842.70
25	251.53	121.92	153.17	192.60	124.38	177.49	117.83	133.41	179.79	9892.90	9.75	85.71	107.03	-61.39	-3882.36
26	252.82	121.95	152.22	167.48	126.15	180.70	122.34	130.63	179.14	8985.90	11.57	93.54	109.38	-61.98	-3533.78
27	252.12	122.05	152.51	154.07	126.78	181.10	94.98	134.04	172.76	12532.00	10.37	97.03	93.28	-61.61	-4928.61

ตารางที่ ก.5 ผลการตรวจสอบคุณลักษณะของนักเกตไก่ 80 ชิ้นโดยการประมวลผลภาพ (ต่อ)

ตัวอย่าง	สีเนื้อนักเกต			สีแป้งชุบทอด			สีรูพรุน			พื้นที่	%รูพรุน	องค์ประกอบ			
	1L*	2a*	3b*	1L*	2a*	3b*	1L*	2a*	3b*	(area)	(%pore)	PC1	PC2	PC3	PC4
28	248.69	122.32	152.98	173.50	125.42	177.79	66.44	130.27	159.52	12058.00	9.30	90.63	75.04	-60.87	-4737.19
29	252.68	121.96	152.46	176.26	126.24	182.37	76.98	135.82	166.91	13618.00	14.24	92.30	82.05	-60.91	-5346.05
30	252.64	121.95	152.57	180.14	124.60	174.60	72.73	135.60	164.76	12108.00	14.78	87.41	79.19	-61.89	-4752.78
31	252.19	122.04	152.83	173.13	127.17	182.46	113.62	132.65	177.46	12556.00	15.12	93.45	104.22	-61.64	-4930.62
32	252.11	121.98	152.27	185.89	123.32	177.70	129.33	129.50	180.44	10594.00	8.81	86.86	113.40	-61.63	-4159.21
33	252.80	121.92	152.54	167.16	126.26	183.20	103.63	129.03	170.86	9641.40	15.08	94.73	97.42	-61.98	-3789.87
34	252.84	121.96	152.44	183.72	125.00	176.36	111.71	131.37	176.48	12295.00	13.08	87.52	103.17	-61.99	-4825.42
35	251.08	122.18	153.05	184.05	123.71	178.13	90.86	138.00	172.14	9768.50	11.34	87.63	90.32	-61.06	-3835.75
36	252.63	121.97	152.22	183.57	126.00	179.80	95.00	129.54	172.21	9381.80	12.91	89.45	93.95	-61.88	-3683.45
37	252.72	121.99	152.04	180.14	124.26	178.31	70.44	131.78	163.86	11928.00	13.01	88.83	78.51	-61.91	-4682.53
38	252.91	121.98	151.92	172.09	125.74	180.01	119.40	130.70	178.07	10907.00	13.05	92.03	107.54	-62.01	-4284.79
39	252.48	122.00	152.42	164.05	125.42	178.42	106.73	133.52	176.27	11800.00	10.38	93.04	100.35	-61.79	-4638.46
40	249.30	122.35	153.25	174.54	125.14	181.22	94.55	131.80	172.52	13530.00	9.54	91.72	93.43	-60.15	-5313.93
41	251.38	122.08	152.98	208.32	123.74	182.01	89.85	136.99	171.39	12582.00	9.99	83.78	89.72	-61.25	-4931.34
42	252.02	122.09	152.42	199.03	123.82	178.37	89.68	138.11	171.11	11293.00	11.86	84.38	89.30	-61.54	-4428.16
43	251.01	122.13	152.86	156.99	126.35	180.87	89.88	133.59	169.41	11214.00	7.23	93.09	89.54	-61.05	-4412.17
44	252.75	121.92	152.62	176.51	125.12	180.24	76.00	136.11	165.33	10108.00	12.69	90.85	80.84	-61.96	-3970.61
45	252.25	122.05	152.35	175.15	125.81	179.80	80.97	134.76	167.62	12215.00	9.04	91.27	84.41	-61.67	-4798.01
46	252.72	121.99	152.31	184.28	124.45	180.56	73.98	132.95	165.70	11587.00	9.85	88.93	80.71	-61.92	-4548.67
47	250.67	122.17	152.27	184.12	123.66	178.43	102.42	134.50	172.65	9699.90	10.97	87.72	96.56	-60.87	-3808.61
48	252.30	121.96	152.95	173.50	125.61	182.82	73.02	131.50	163.92	12584.00	12.00	92.84	79.78	-61.73	-4942.52
49	251.94	122.04	152.32	171.75	126.83	183.17	115.29	132.71	178.04	9938.50	12.82	93.92	105.23	-61.52	-3905.50
50	252.46	121.90	152.94	169.94	126.66	183.67	116.45	132.48	179.26	12855.00	8.63	94.46	106.35	-61.84	-5050.94
51	252.47	121.87	153.46	168.52	125.78	180.91	110.77	132.23	176.74	11977.00	10.47	93.24	102.67	-61.85	-4706.86
52	252.58	121.89	152.88	168.13	124.63	173.11	102.44	128.68	172.54	12011.00	10.59	89.52	97.69	-61.89	-4720.02
53	250.38	122.20	153.84	181.51	123.85	179.46	76.46	133.37	166.32	11786.00	10.90	88.83	82.04	-60.72	-4627.90
54	249.03	122.27	154.49	180.55	123.53	179.19	72.05	133.30	164.25	12022.00	9.23	88.79	79.11	-61.06	-4721.54

ตารางที่ ก.5 ผลการตรวจสอบคุณลักษณะของนักเกตไก่ 80 ชิ้นโดยการประมวลผลภาพ (ต่อ)

ตัวอย่าง	สีเนื้อนักเกต	สีแป้งชุบทอด	สีรูพรุน	พื้นที่	%รูพรุน	องค์ประกอบ

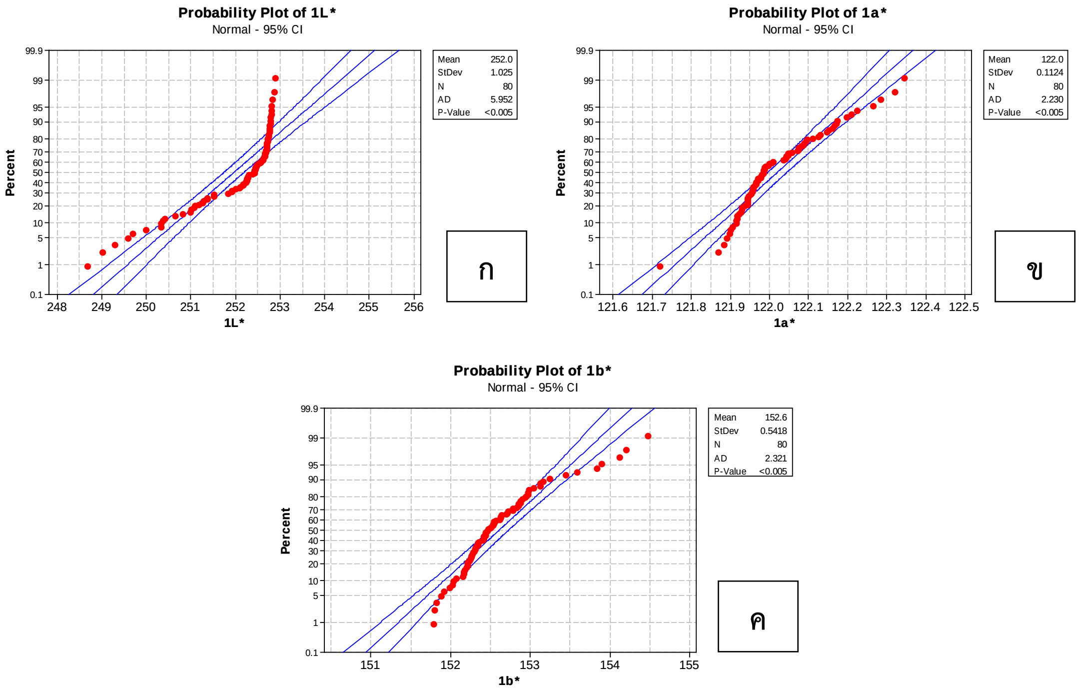
	1L*	2a*	3b*	1L*	2a*	3b*	1L*	2a*	3b*	(area)	(%pore)	PC1	PC2	PC3	PC4
55	252.43	121.93	153.14	150.73	127.09	179.07	110.47	135.13	177.17	10256.00	8.35	97.07	102.14	-60.81	-4038.39
56	251.30	122.09	152.56	169.78	125.37	180.95	95.15	132.26	172.31	10494.00	11.95	92.79	93.52	-61.20	-4124.25
57	252.57	122.01	152.31	175.50	125.66	181.69	85.81	134.03	168.55	10056.00	12.97	91.93	87.20	-61.83	-3950.31
58	252.79	121.94	152.53	178.79	128.22	187.23	99.47	133.74	172.37	12666.00	11.56	94.64	95.24	-61.97	-4972.94
59	252.79	121.99	152.24	166.87	124.81	176.72	99.75	135.81	174.31	11812.00	12.65	91.41	95.81	-61.95	-4641.47
60	252.31	121.97	152.79	172.84	127.61	183.89	88.27	137.35	170.87	12364.00	13.13	94.31	88.69	-61.73	-4856.06
61	252.46	121.90	152.99	175.45	125.66	181.21	114.27	133.33	177.87	10909.00	9.70	91.74	104.56	-61.83	-4286.04
62	249.60	122.09	153.90	146.82	128.48	180.25	101.92	134.64	172.56	12083.00	14.19	99.06	96.26	-60.51	-4754.32
63	251.38	122.16	152.65	176.07	122.67	175.78	106.26	127.49	174.16	10951.00	9.08	88.00	100.41	-61.21	-4302.35
64	250.35	122.04	154.13	145.45	126.85	177.87	104.25	125.48	166.51	11655.00	12.01	97.65	96.50	-60.78	-4587.76
65	252.74	121.97	152.41	159.73	124.06	174.16	119.33	125.74	171.71	11393.00	9.69	91.63	105.69	-61.93	-4480.49
66	252.79	121.95	152.55	169.86	124.71	179.42	85.31	130.20	169.02	12526.00	10.33	91.83	87.95	-61.97	-4921.29
67	252.28	121.72	154.21	175.17	124.44	179.65	96.70	130.45	172.65	11034.00	9.82	90.61	94.74	-61.83	-4335.64
68	252.80	121.95	152.51	179.91	124.90	180.63	105.45	136.09	176.55	11664.00	10.72	90.15	99.36	-61.97	-4580.05
69	252.44	121.95	152.91	167.15	124.45	174.49	91.60	129.63	166.60	8687.00	14.41	90.25	89.89	-61.80	-3416.13
70	252.71	121.93	152.79	156.26	126.31	178.27	97.92	130.94	169.52	12514.00	10.41	95.13	93.82	-61.93	-4920.97
71	252.25	121.97	152.73	174.01	126.11	178.86	91.86	133.64	171.71	13621.00	10.96	91.27	91.46	-61.70	-5349.09
72	252.73	121.96	152.44	187.54	124.32	175.10	79.50	135.50	165.25	12126.00	7.74	85.82	82.54	-61.93	-4759.64
73	252.79	121.95	152.25	170.03	123.41	173.92	85.03	138.48	169.82	12160.00	12.20	88.90	86.51	-61.97	-4777.04
74	252.67	121.91	152.70	193.28	124.16	177.99	77.05	132.20	163.82	13429.00	8.65	85.67	81.44	-61.93	-5268.43
75	252.77	121.98	152.03	168.58	126.17	177.38	111.40	134.15	177.43	12743.00	15.10	91.90	102.88	-61.94	-5005.02
76	252.40	121.99	152.42	173.87	123.78	174.78	115.09	131.18	179.27	12641.0	10.93	88.56	105.99	-61.76	-4964.84
77	252.72	121.99	151.99	180.03	124.75	181.19	142.46	131.23	182.92	10192.0	9.96	90.29	120.19	-61.91	-4003.00
78	252.81	121.97	152.18	172.11	124.52	175.54	124.96	134.35	181.54	11340.0	6.23	89.60	110.90	-61.97	-4456.79
79	252.66	121.89	152.88	182.05	123.87	173.07	104.84	135.05	175.76	12170.0	11.87	86.01	98.94	-61.94	-4777.53
80	250.35	122.13	153.59	184.36	125.76	178.62	118.38	132.91	178.47	11408.0	10.07	88.66	106.80	-60.74	-4478.98

ตารางที่ ก.6 ผลการตรวจสอบคุณลักษณะของนักเกตไก่ 27 ชิ้นโดยการประมวลผลภาพ

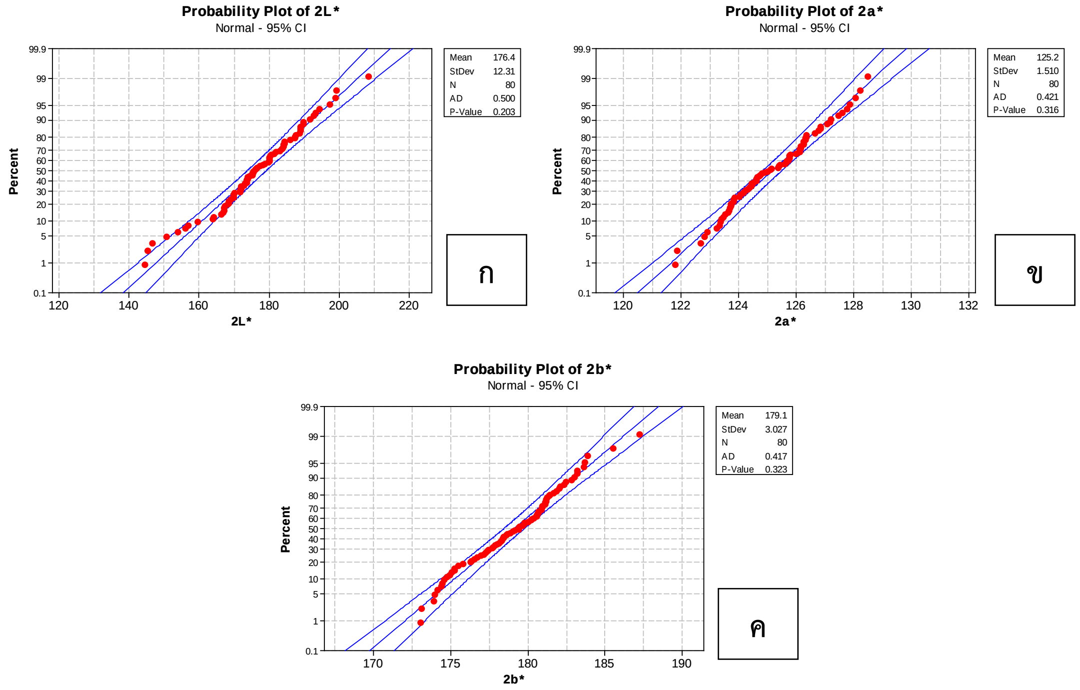
ตัวอย่าง	สีเนื้อนักเกต			สีแป้งชุบทอด			สีรูพรุน			พื้นที่	%รูพรุน	องค์ประกอบ			
	1L*	1a*	1b*	2L*	2a*	2b*	3L*	3a*	3b*	(area)	(%pore)	PC1	PC2	PC3	PC4

1	251.11	121.96	154.21	174.83	124.41	178.22	83.23	129.03	166.27	11721.00	6.59	90.06	86.01	-61.18	-4606.06
2	252.30	121.75	153.96	184.48	121.85	170.71	90.39	132.12	171.10	9892.40	17.78	83.58	90.82	-61.83	-3882.56
3	251.42	121.99	154.08	162.70	127.32	180.32	86.96	135.35	170.48	11322.00	11.69	94.99	88.32	-61.30	-4451.84
4	252.42	121.98	152.59	160.09	123.87	173.96	88.44	131.33	169.00	11424.00	16.04	91.37	89.15	-61.78	-4490.61
5	252.81	121.95	152.68	214.90	121.81	168.72	96.87	135.39	172.65	11821.00	8.35	75.82	93.83	-61.97	-4631.32
6	251.82	121.90	153.55	171.55	125.28	182.64	80.07	132.27	167.44	12210.00	13.31	93.06	84.42	-61.53	-4796.38
7	252.13	121.69	154.39	157.81	125.21	177.72	83.83	131.87	168.70	12451.00	15.68	94.07	86.79	-61.78	-4894.84
8	252.41	121.77	153.75	183.47	124.95	185.13	85.47	127.38	162.14	9198.10	16.92	91.26	85.54	-61.87	-3610.89
9	252.68	121.89	152.89	189.85	124.86	179.62	89.75	131.93	170.58	11731.00	13.91	87.45	90.34	-61.94	-4602.33
10	252.31	121.59	154.88	189.95	123.78	178.76	108.27	129.12	174.92	10716.00	17.31	86.59	101.34	-61.90	-4204.24
11	252.70	121.90	152.98	196.31	121.70	172.19	80.66	132.36	167.78	10735.00	13.54	81.45	84.83	-61.95	-4210.01
12	252.60	121.87	153.19	196.76	123.43	177.75	89.48	132.77	170.08	13331.00	9.81	84.46	89.82	-61.91	-5228.77
13	252.52	121.86	153.46	178.90	123.91	173.25	94.33	132.91	171.40	11731.00	7.90	86.82	92.60	-61.88	-4607.95
14	252.51	121.77	153.64	191.46	124.74	179.84	121.33	130.80	179.07	10253.00	18.93	87.12	108.85	-61.92	-4021.20
15	251.84	121.62	155.07	186.70	122.99	174.95	93.02	134.08	171.98	11892.00	14.43	85.37	92.03	-61.67	-4667.25
16	252.41	121.74	153.81	179.89	124.16	176.45	106.44	131.60	174.53	10005.00	13.84	88.06	99.83	-61.88	-3929.33
17	252.68	121.92	152.84	182.69	125.49	180.77	93.95	126.93	168.49	11957.00	14.44	89.83	92.34	-61.93	-4693.00
18	252.54	121.90	153.25	181.18	127.10	182.77	108.32	134.37	176.01	12006.00	12.35	91.73	100.79	-61.87	-4713.53
19	252.27	121.87	153.63	196.69	122.40	179.70	88.10	127.75	167.44	9955.30	13.25	84.85	89.02	-61.76	-3904.63
20*	222.57	129.64	167.40	177.24	145.47	185.70	98.59	145.59	175.41	8552.40	23.45	101.89	93.79	-44.27	-3363.80
20**	252.62	121.75	153.58	228.02	121.99	176.34	96.78	132.40	171.66	15448.00	14.82	76.14	93.95	-61.98	-6047.31
21	252.44	121.87	153.47	177.29	125.11	177.71	68.53	132.20	162.53	13269.00	16.36	89.60	76.96	-61.84	-5208.69
22	252.16	121.79	153.95	189.41	124.17	177.93	128.98	129.47	178.47	12437.00	15.97	86.53	112.37	-61.74	-4879.04
23	252.54	121.78	153.43	158.88	128.77	181.99	69.07	131.24	163.00	12038.00	15.42	97.19	77.60	-61.93	-4732.26
24	252.59	121.81	153.41	181.46	124.27	175.46	93.48	133.29	171.57	9582.90	17.77	87.34	92.21	-61.94	-3761.95
25	252.45	121.57	154.46	195.35	124.01	177.72	119.54	125.73	170.52	12126.00	16.39	85.02	105.26	-61.98	-4755.35
26	251.65	121.73	154.81	191.89	123.04	178.18	108.38	126.57	168.92	10732.00	12.24	85.58	99.25	-61.53	-4211.46
27	252.54	121.78	153.67	197.91	123.73	177.02	70.59	134.47	164.74	9689.10	22.58	84.02	78.42	-61.93	-3796.97

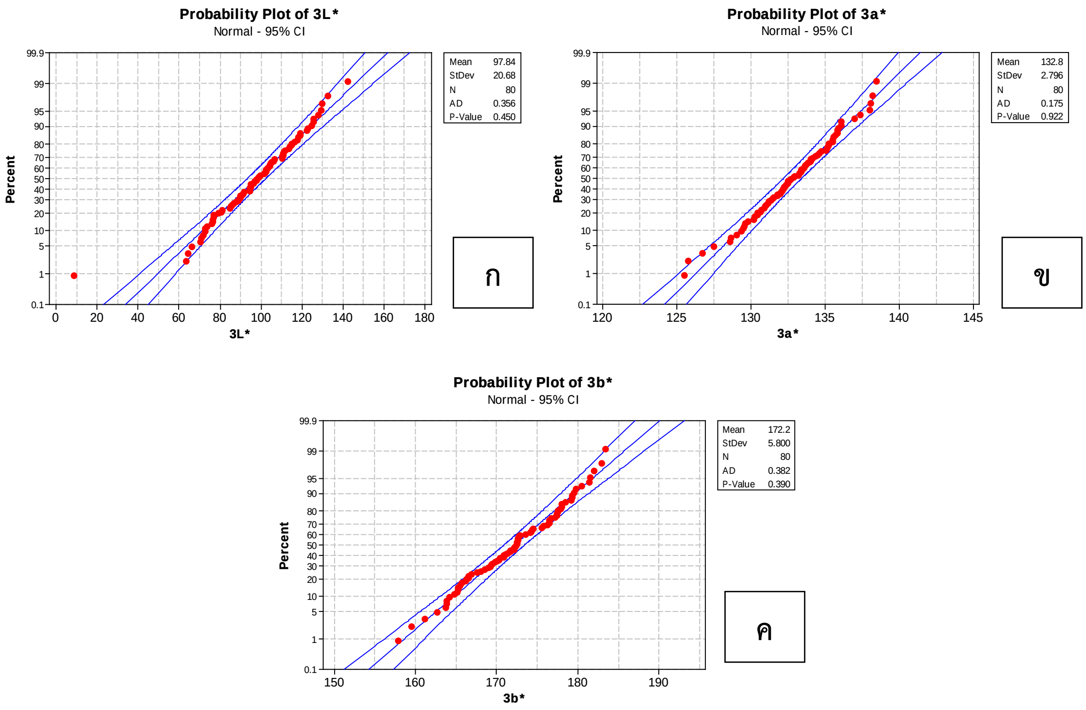
* ค่าของตัวอย่างที่ผิดปกติที่ใช้ในขั้นตอนการควบคุม (phase II) ของค่า PC1 และ PC3 ** ค่าของตัวอย่างที่ผิดปกติที่ใช้ในขั้นตอนการควบคุม (phase II) ของค่า PC2 และ PC4



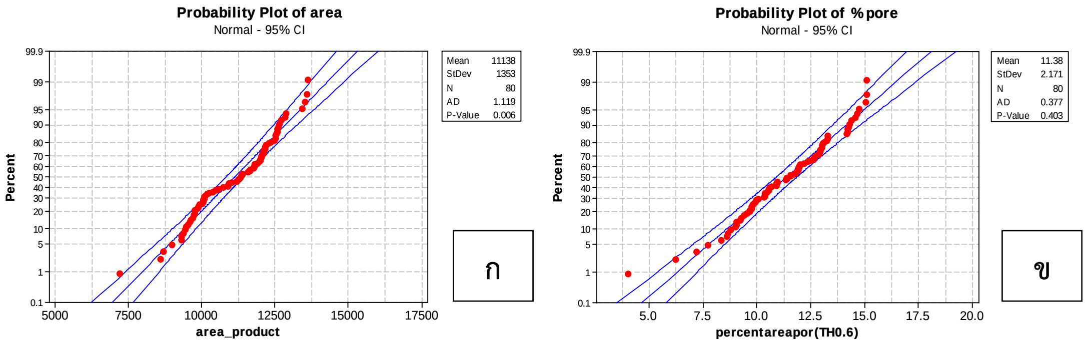
รูปที่ ก.1 probability plot ของค่า 1L* 1a* และ 1b* ก) probability plot ของค่า 1L* ข) probability plot ของค่า 1a* ค) probability plot ของค่า 1b*



รูปที่ ก.2 probability plot ของค่า 2L* 2a* และ 2b* ก) probability plot ของค่า 2L* ข) probability plot ของค่า 2a* ค) probability plot ของค่า 2b*



รูปที่ ก.3 probability plot ของค่า 3L* 3a* และ 3b* ก) probability plot ของค่า 3L* ข) probability plot ของค่า 3a* ค) probability plot ของค่า 3b*



รูปที่ ก.4 probability plot ของค่า area และ %pore ก) probability plot ของค่า area ข) probability plot ของค่า %pore

ภาคผนวก ข.
ส่วนของโปรแกรม MATLAB

1. คำสั่งที่ใช้ในการแปลงสีจากระบบ RGB เป็นระบบ L*a*b ในขั้นตอนการวิเคราะห์ระบบการวัด

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

2. คำสั่งที่ใช้ในการประมวลผลภาพ (คุณภาพสี)

```
clear all;close all;clc;
shadow1 = imread('file_name');
shadow = imresize(shadow1,[480 480]);
srgb2lab = makecform('srgb2lab');
lab2srgb = makecform('lab2srgb');

shadow_lab = applycform(shadow, srgb2lab); % convert to L*a*b*

% the values of luminosity can span a range from 0 to 100; scale them
% to [0 1] range (appropriate for MATLAB(R) intensity images of class double)
% before applying the three contrast enhancement techniques
max_luminosity = 2;
L = shadow_lab(:,:,1)/max_luminosity;

% replace the luminosity layer with the processed data and then convert
% the image back to the RGB colorspace
shadow_imadjust = shadow_lab;
shadow_imadjust(:,:,1) = imadjust(L)*max_luminosity;
shadow_imadjust = applycform(shadow_imadjust, lab2srgb);

shadow_histeq = shadow_lab;
shadow_histeq(:,:,1) = histeq(L)*max_luminosity;
shadow_histeq = applycform(shadow_histeq, lab2srgb);

shadow_adapthisteq = shadow_lab;
shadow_adapthisteq(:,:,1) = adapthisteq(L)*max_luminosity;
shadow_adapthisteq = applycform(shadow_adapthisteq, lab2srgb);
%figure(1),imshow(shadow), title('Original');
%figure(2),imshow(shadow_imadjust), title('Imadjust');
%figure(3),imshow(shadow_histeq), title('Histeq');
figure(4),imshow(shadow_adapthisteq), title('Adapthisteq');
```

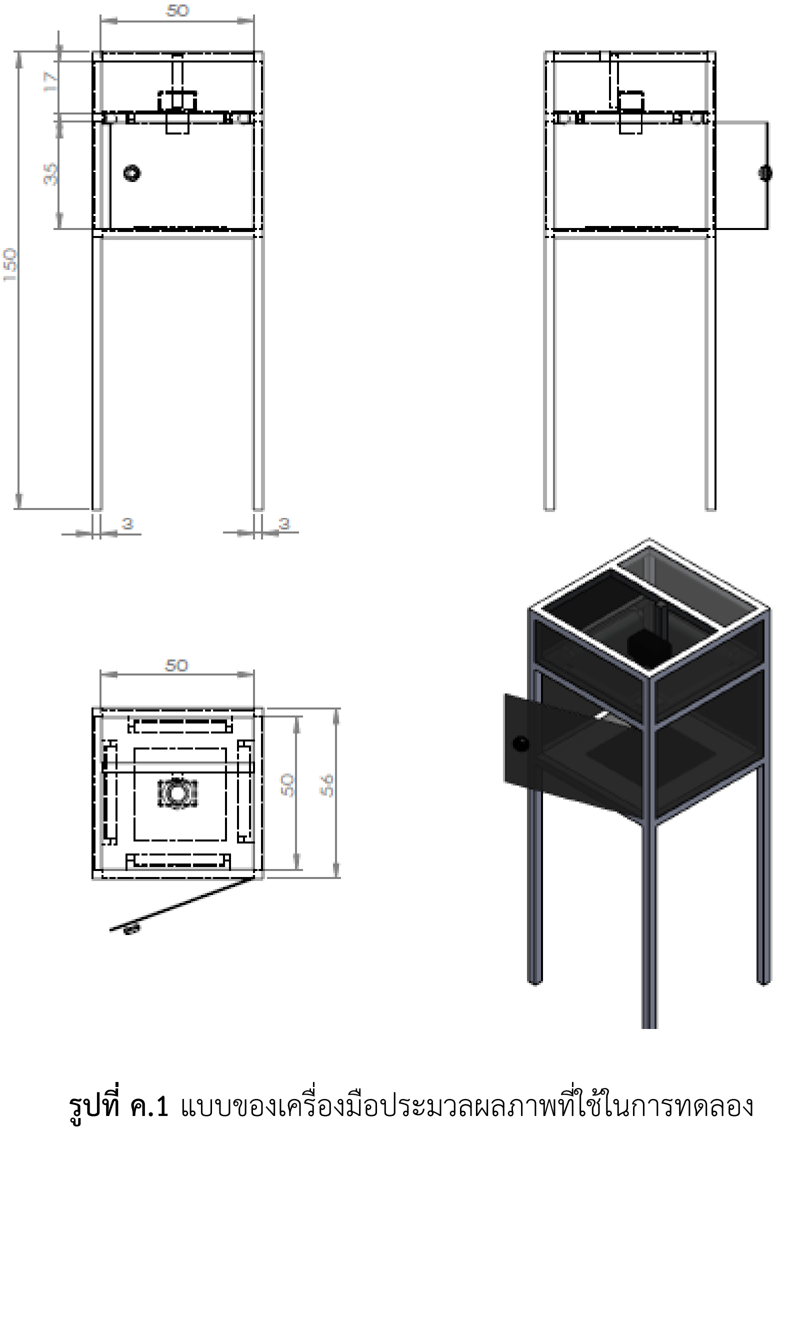
```
resize = shadow_adapthisteq;
% Determine the image resolution.
imageRes = [480 480];
imageWidth = imageRes(1);
imageHeight = imageRes(2);
% Initialize storage for each sample region.
colorNames = {'white','yellow','brown'};
nColors = length(colorNames);
sample_regions = false([imageHeight imageWidth nColors]);
% Select each sample region.
f = figure;
```

```
for count = 1:nColors
    set(f, 'name', ['Select sample region for ' colorNames{count}] );
    sample_regions(:,:,count) = roipoly(resize);
end
close(f);
% Display a sample region.
imshow(sample_regions(:,:,1))
title(['sample region for ' colorNames{1}]);
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

% Convert the resize RGB image into an L*a*b image.
cform = makecform('srgb2lab');
lab_resize = applycform(resize,cform);

% Calculate the mean 'L' 'a' and 'b' value for each area extracted.
% These values serve as your color markers in 'L*a*b' space.
L = lab_resize(:,:,1);
a = lab_resize(:,:,2);
b = lab_resize(:,:,3);
color_markers = repmat(0, [nColors, 3]);
for count = 1:nColors
  color_markers(count,1) = mean2(a(sample_regions(:,:,count)));
  color_markers(count,2) = mean2(b(sample_regions(:,:,count)));
  color_markers(count,3) = mean2(L(sample_regions(:,:,count)));
end

% For example, the average color of the second sample region in 'a*b' space is:
disp('   a*      b*      L*')
disp( sprintf('[%0.3f,%0.3f,%0.3f]', color_markers(1,1), color_markers(1,2), color_markers(1,3)) );
disp( sprintf('[%0.3f,%0.3f,%0.3f]', color_markers(2,1), color_markers(2,2), color_markers(2,3)) );
disp( sprintf('[%0.3f,%0.3f,%0.3f]', color_markers(3,1), color_markers(3,2), color_markers(3,3)) );
x1= [color_markers(1,3) color_markers(1,1) color_markers(1,2)]
x1= [color_markers(2,3) color_markers(2,1) color_markers(2,2)]
x1= [color_markers(3,3) color_markers(3,1) color_markers(3,2)]
% Create an array that contains your color labels:
%      0 = background
%      1 = white
%      2 = yellow
%      3 = brown
color_labels = 0:(nColors-1);

% Initialize matrices to be used in the nearest neighbor classification.
a = double(a);
b = double(b);
distance = repmat(0,[size(a), nColors]);

% Perform classification.
for count = 1:nColors
  distance(:,:,count) = ( (a - color_markers(count,1)).^2 + ...
                        (b - color_markers(count,2)).^2 ).^0.5;
end
[value, label] = min(distance, [], 3);
label = color_labels(label);
clear value distance;
rgb_label = repmat(label, [1 1 3]);
segmented_images = repmat(uint8(0), [size(resize), nColors]);

for count = 1:nColors
  color = resize;
  color(rgb_label ~= color_labels(count)) = 0;
  segmented_images(:,:,:,count) = color;
end
subplot 221,imshow(shadow), title('Original');
subplot 222,imshow(segmented_images(:,:,:,1));
title([colorNames{1} ' objects'] );
subplot 223,imshow(segmented_images(:,:,:,2));
title([colorNames{2} ' objects'] );
subplot 224,imshow(segmented_images(:,:,:,3));
title([colorNames{3} ' objects'] );
```

3. คำสั่งที่ใช้ในการประมวลผลภาพ (พื้นที่และรูพรุน)

```
clear all;close all;clc;
%image
product = imread('file_name');
resize = imresize(product,[512 512]);
brith = resize*1.2
%gray image
gray = rgb2gray(brith);
%th=graythresh(gray);
%black image TH=0.6
black = im2bw(gray,0.6);
%black product TH=0.9
black_product = im2bw(gray,0.9);
%area picture = 512*512=262144
%area product
area_product = 262144-bwarea(black_product)
%calculate %area porous
white_image = bwarea(black)
black_image = 262144-white_image
percentareapore = black_image/area_product*100
%imge show
subplot 221,imshow(black_product), title('product area');
subplot 222,imshow(gray), title('gray');
subplot 223,imshow(black), title('black');
subplot 224,imshow(resize), title('BW2');
```

ภาคผนวก ค.
แบบของเครื่องมือประมวลผลภาพที่ใช้ในการทดลอง



รูปที่ ค.1 แบบของเครื่องมือประมวลผลภาพที่ใช้ในการทดลอง

ภาคผนวก ง.
บทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์

1) Yuangyai, C., Matvises P., Janjarassuk U. , (2013) “Image-based Analysis for Characterization of Chicken Nugget Quality” LSCM conference, Bali, Indonesia.

Image-based Analysis for Characterization of Chicken Nugget Quality

Chumpol Yuangyai[1], Piyaphorn Matvises[2], Udom Janjarassuk[3]
[1,2,3] Faculty of Engineering, Department of Industrial Engineering,
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok 10520, Thailand
Email: chumpol.yuangyai@gmail.com, piyaphorn.mat@hotmail.com, kjudom@yahoo.com

Abstract: Appearance, colors and adhesion characteristic of chicken nugget are important to customer satisfaction and buying decision. These characteristics are generally inspected by human, thus, the inspectors might incorrectly judge. In addition, the results are not quantitatively recorded for further analysis and improvement. Therefore, this study focuses on constructing a measurement instrument for detecting the qualities of chicken nugget, then gage repeatability and reproducibility (GR&R) study is used to ensure that the instrument is capable of distinguishing nugget differences. Since, there are eleven characteristics of chicken nugget are analyzed. The principal component analysis was applied to reduce the number of characteristics from eleven dimensions to only four dimensions. The experiments and data analysis show that the dimension reduction is useful for rapidly detect abnormality of nuggets and finally help practitioners to improve the process.

Keywords: Chicken nugget quality, Gage repeatability and reproducibility Image-based analysis, Principal component analysis

Introduction

Food appearance is one of the most important characteris for customers buying decision. The need of fast and accurate food inspection is crucial. In this paper, a chicken nuggets product is selected as a case study. Chicken nuggest production is the semi-frozen food includes ground chicken meat, pressed into bars or desired shapes, coating and deep fried in a short period in order to be stabilized and semi-cooked, then freezing and packing for sale to consumers. Then, consumers will rapid cooked before eating.

The characteristics of chicken nuggets affect not only the customer's buying decision and satisfaction but also are product indicators for process improvment. However, the current inspections are performed by human. The inspection is considered as tedious, laborious, costly, time-consuming and inconsistent task. Researchers have used image processing in food quality inspection to alleviate these problems (Du and Sun, [1]; Brosnan and Sun, [2]). Therefore, there is a need of automate instructment associated imagement processing for collecting data and the data will be used for further analysis and process improvement.

The objective of the study is to propose statistical techniques: GR&R, Desing of experiement and PCA for the analysis and the detection chicken nugget quality using image processing. We use image processing-based techniques to collect Chicken Nugget 11 eleven characteristics which include chicken meat colors, flour colors, porosity colors, and section areas. Then Gage repeatability and reproducibility is used to ensure that the instrument is capable of distinguish ingnuggest difference using only represented colors characteristics in L*a*b* system.

Due to an automate process, there are several product characteristics or variables can be collected simultenously. It is difficulficult to analyse, then principle component analysis is then used to to determine the relationship between variables and reduce the number ofvariables by combining the variables within the same factors or components and introduced new variables that is useful for further analysis.

The organization of the paper begin with method and related topics involving image processing and analysis, color inspection system, selection area and poposity inspection, and design and analysis of experiment, gage repeatablitya and reproducibility, and principle component analysis. Then Results and discussion will be presented, followed by conclusion at the end.

Methods and Related topics

In this section, we introduce image processing and, design of experimental, gage repeatability and reproducibility, principal component analysis, and a proposed framework as follows:

Image Processing and Analysis

Image analysis has been commonly used in food

quality inspection (Du and Sun, [1]; Brosnan and Sun, [2]) for a wide range of products including meat (Barni, *et al.*, [3]; Borggaard, *et al.*, [4]; Fortin *et al.*, [5]), fruits (Wang and Gu, [6]), and fish (Karplus, *et al.*, [7]). Image processing analysis generally consists of 5 steps: (1) image acquisition; (2) pre-processing; (3) imagesegmentation; (4) object measurementand (5) classification.

For chicken nugget inspection, the image processing is implemented to measure the color of chicken meat and battered flour and flour porosity, section-area.the algorithms for processing of color analysis and section-area and porosity analysis are written in MATLAB.

Color Measurement

We measure the color in the L*a*b* systemwhich is an international standard for color measurements, adopted by the Commission Internationaled' Eclairage (CIE) in 1976. This color model creates a consistent color regardless of devices used to generate the image (e.g., monitor, printer or scanner). L* is the luminance or lightness component, which ranges from 0 to 100, and parameters a* (from green to red) and b* (from blue to yellow) are the two chromatic components, which range from –128 to+127 (256 level) (Baldevbhai and Anand, [8])

Section-area and Porosity Measurement

Measure Section-area and porosity using a threshold-based segmentation method. There is a particularly effective technique for scenes containing solid objects resting upon a contrasting background, which distinguishesthe object from the remaining part of an image with an optimal value. (Du and Sun, [1])

Figure 1 is the inspection equipment. The chamber itself consists of the following three main elements (Image processing is based on Pedreschi *et al.* [10] and Yuangyai *et al.* [11]:

1. Four florescence lamps are attached atsquare 30 cm. above the sample and set at an angle of 45° to nugget location.
2. A Canon EOS 550D is located vertically above the sample. The angle between the camera lens axis and the lighting sources are at 45°, format JPEG resolution 3456 × 2304and connected to the USB port.
3. Illuminators and the CDC inside a mat acrylicbox to prevent the light and reflection from outside sources, size 50 × 50 × 50 cm. and the frame is made of aluminum located above the ground 100 cm.

Figure 1. Image processing equipment for nugget inspection

Design of Experimental to Reduce the Measurement Variability

Design of experiments (DOE) is the process of planning an experiment to obtain the information concerning which factors affect to experiment responses (Montgomery, D.C. and Runger, G.C., [9]). This study uses the fractional factorial design for six factors (2^{6-2})to reduce the measurement variability. We use a simulated color paper with ten chicken nugget-like colors (Figure 2). MINITAB is used for analysis.

Gage Repeatability and Reproducibility Study

Gage repeatability and reproducibility (GR&R) is a statistical technique used to assess the measurement system whether or not it is capable of distinguishing part differences. In this study, we use a color paper with ten chicken nugget-like colors as samples (shown in Figure 1) and the factors that no effect on the measurement system. There are analyzed with full factorial design.The computations were performed using a balanced ANOVA module in MINITAB.

Figure 2. Chicken Nugget color-like papers for experiments

In the statistical model of GR&R, there are a randomly selected parts and b randomly selected operators and each operator measures every part n times. factor 1 (i= 1, 2, …, a), factor 2 (j = 1, 2, …, b) factor 3 (k = 1, 2, …, c) replication (l = 1, 2, …, n). The effect model is described as

$$y_{ijkl} = \mu + \tau_i + \beta_j + \gamma_k + (\tau\beta)_{ij} + (\tau\gamma)_{ik} + (\beta\gamma)_{jk} + (\tau\beta\gamma)_{ijk} + \epsilon_{ijkl} \quad (1)$$

Where τ_i, β_j, γ_k, $(\tau\beta)_{ij}$, $(\tau\gamma)_{ik}$, $(\beta\gamma)_{jk}$, $(\tau\beta\gamma)_{ijk}$ and ϵ_{ijkl} are all independent random variables that

represent the effect of factor 1, factor 2, factor 3, the interaction of factor 1 and factor 2, parts and factor 3, factor 2 and factor 3, factor 1factor 2 and factor 3, and random error, respectively. μ is the overall mean.

Principal Component Analysis

Principal component analysis (PCA) is a variable reduction procedure. It is useful whenthere is large number of data sets on a number of variables and it is believe that some redundancy exits in the data set In this study, redundancy means that some of the variables are correlated with one another, possibly because they are measuring the similar structure. PCA consists off our main steps: study of correlation among the variables, initial extraction of the components, rotation to a final solution and interpreting the rotated solution (Jonhson and Wichern, [12]). New factors obtained from the analysis, are called principle components.

Results and Discussion

We present the result and discussion of DOE, GR&R, Nugget measurement, and PCA as the following.

Design of Experimental to Reduce the Measurement Variability

Once the equipment is completely built,we considered six factors in the measurement system: (A) background color, (B) operator, (C) position (object), (D) number of lamps, (E) outside light, (F) distance (between camera and object). Fractional factorial design (2^{6-2}) was used to screen out these factors. Then images are converted to L, a*, b* values.The experimentation results indicate factors are significance at 5% significance level using ANOVA with MINITAB.

Table1, Table 2 and Table 3 display the analysis of variance for L* a* and b*, respectively. The results indicats that four factor except operator and outside light are significance at 5% significance level. Therefore, we choose background (B) as black, position (C) as central, number of lamp (D)as two and distance (F) is 22.5 cm. Andthe camera setting is set to manual mode ISO400, shutter speed 1/60, aperture 5.6, no zoom and no flash, to reduce the variability.

Table 1. 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			

Table 2.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	17.2067	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			

Table 3.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	3229.61	3229.61	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			

Gage Repeatability and Reproducibility Study (GR&R)

Once the variability of the measurement system is reduced, the different colored papers are taken by two operators with two method (outside light and not). Then images are converted to L, a*, b* values for GR&R using ANOVA with MINITAB 16. Due to the space limitation, an example of L* value analysis is shown in Table 1. Based on the p-values, it is concluded that the effect of parts, operators and outside light, and their interaction effects.

The variance of the gauge is estimated as the summation of the variance component estimate of σ^2, σ_β^2, and σ_γ^2.

$$\sigma_{total}^2 = \sigma_{part}^2 + \sigma_{gauge}^2$$

$$\sigma_{total}^2 = 11.314 + 0 + 0.091 + 0.011 + 0.013 + 0 + 0.015 = 11.444$$

$$\sigma_{gauge}^2 = 0 + 0.091 + 0 = 0.091$$

$$\sigma_{part}^2 = 11.314$$

Table 4 Analysis of Variance for 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
1 part	11.3139
2 operator	-0.0006
3 outside light	0.0911
4 part*operator	0.0111
5 part*outside light	0.0127
6 operator*outside light	-0.0012
7 Error	0.0152

Where σ^2 is the random experimental error, σ_τ^2 is the variance component for parts, σ_β^2 is the variance component for operators and σ_γ^2 is the variance component for outside light.

Table 5. Comparison analysis of variance of the L * a* and b*

Variance	L*	a*	b*
σ^2_{total}	11.444	7.822	468.284
σ^2_{gauge}	0.0911	0.0139	0.012
σ^2_{part}	11.314	7.745	466.216
% $\sigma^2_{gauge}/\sigma^2_{part}$	0.805%	0.179%	0.003%

Table 5 shows the results for L*, a*, and b*. The proportion of the variance of the gauge and the variance component of parts for L* a* b* is 0.805% 0.179% and 0.003%, respectively. These values indicate that the variability of the measurement system is very small compared to the variance of part. Then compared with the generally accepted criteria for the AIAG (Automative Industry Action Group, [13]) have noted that If the variance ratio below 10% is generally considered acceptable. Therefore, the measurement system is capable of distinguishing nugget differences.

Image processing and analysis

To analyze the characteristics of chicken nugget, 80 chicken nuggets are randomly selectedfrom a local market.

Color inspection

Background was removed from the digital image as shown in Figure 3. Then select the area of chicken meat, batter and porosity for example to present the neighbors or similar pixel is shown in Figure 4. Then there were color of chicken meat, batter and analysis in L*a*b* system.

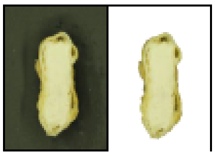


Figure 3.removing image background

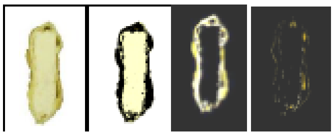


Figure 4.color-based image segmentation

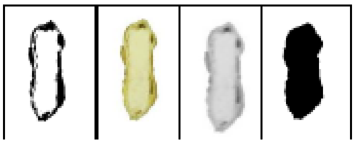


Figure 5.image segmentation with threshold and edge detection technique

Section-Area and Porosity Inspection

Background was removed from the pre-processed grayscale image using a threshold of 0.6 to determine porosity and combined with an edge detection technique based on the Laplacian-of Gauss (LoG) operator (Castleman, [14]) to determine section-area, shown in Figure 5.

Therefore, there are 11 characteristics of chicken nugget are analyzed.

Principal Component Analysis

Since there are 11 characteristics of chicken nugget are analyzed. The principal component analysis is applied to reduce the number of characteristics. This section, colors of chicken meat represent are *1L**, *1a** and *1b**. The colors of batter representare *2L**, *2a** and *2b** and the colors of porosity representare *3L**, *3a** and *3b**. Section-area represent *area*. Porosity represent *pore*.

Correlation matrix in Table 6 is shown correlation between variable and use as directed in the grouping variable.

Table 6.correlation matrix of 11 characteristics

variable	1L*	1a*	1b*	2L*	2a*	2b*	3L*	3a*	3b*	area	pore
1L*	1										
1a*	-0.813	1									
1b*	-0.507	0.040	1								
2L*	-0.85	0.166	-0.207	1							
2a*	0.159	-0.217	0.107	-0.637	1						
2b*	0.080	-0.106	0.074	-0.180	0.694	1					
3L*	0.243	-0.242	-0.134	-0.125	0.058	-0.017	1				
3a*	0.114	-0.023	-0.105	0.233	0.013	0.094	-0.136	1			
3b*	0.277	-0.246	-0.159	-0.040	0.107	0.075	0.868	0.012	1		
Area	0.046	-0.061	0.199	-0.190	0.196	0.001	-0.127	0.137	-0.169	1	
pore	0.183	-0.057	-0.226	-0.031	0.286	0.183	-0.096	0.055	-0.114	-0.036	1

Table 7. Results of principal component analysis

	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5	PC6	PC7	PC8	PC9	PC10	PC11
Eigenvalue	2.6483	2.1194	1.6306	1.2406	1.0842	0.8089	0.636	0.5501	0.1351	0.1011	0.0459
Proportion	0.2410	0.1930	0.1480	0.1130	0.0990	0.0740	0.068	0.0500	0.0120	0.0090	0.0040
Cumulative	0.2410	0.4330	0.5820	0.6940	0.7930	0.8670	0.924	0.9740	0.9870	0.9960	1.0000

Eigenvalue of each principal component (PC) is considered and shown in Table. 7, Eigenvalue of PC1 to PC5 are higher than 1. However, Eigenvalue of PC5 is smaller and closer to 1, Then it is not considered. Therefore, PC1 to PC4 are considered, that can be explain the variance of the 11 variablesfor 69.4%.

The rotation axis is the procedure to separate the variables that a variable should be arranged in other groups or components. It is because the extraction component can be a single component or multiple components.Factor loading of the PC1 to PC4 are shown in Table 7. Thefactor loadingof before-rotation is not obvious that be difficult to integrate the variable. However after-rotation of the variables can be grouped, with selected of factor loadingthathigh value in each component as the following.

PC1 = (-0.227)2L* + (0.437)2a* + (0.423)2b* (2)

PC2 = (0.460)3L*+(-0.201)3a*+(0.443)3b* (3)

PC3 = (-0.468)1L* + (0.462)1a* (4)

PC4 = (-0.447)1b* + (0.315)2L*
+ (-0.392)area + (0.375)pore (5)

and eq. 2 to 5 are the relationship in linear form of variables in each principal component.The coefficient of each Therefore, the principal component analysis was applied to reduce the characteristics of chicken from eleven to only four.

When interpreting the underlying relationships of the variables in each component. They can be introduced the new component of the analysis. The new components are as follows:

- The variables of PC1 are associated the color of the batter, PC1 was named "the component of batter quality."
- The variables of PC2 are associated the color of the porosity, PC2 was named "the component of depth-porosity quality."
- The variables of PC3 are associated the color of the chicken meat, PC3 was named "the component of chicken meatquality", and
- The variables of PC4 consist of a variety of variables, that difficult to determine the relationships. However the variables found that related to the overall appearance of chicken nuggetsare

associated. PC4 was named "the component of appearance quality".

Conclusion

In this study, we proposed a framework for using image processing for characterization of chicken nugget quality. Design of experiment is used to consider the factor associated in the system in order to reduce the measurement variability. Then gage repeatability and reproducibility is used to assess the measurement system variation of the color-based image processing equipment. Since there are 11 characteristics of chicken nugget are analyzed with image processing which include chicken meat color, battered flour color section-area and porosity. The principal component analysis is applied to reduce the characteristics from eleven to only four characteristics are follow PC1 is the component of batterquality, PC2 is the component of depth-porosity quality, PC3 is the component of chicken meat quality and PC4 is the component of appearance quality.

References

1. Du, C.J and Sun, D.W., Recent developments in the applications of image processing techniques for food quality evaluation, *Trends in Food Science & Technology*, 15, 2004, pp. 230–249.
2. Brosnan, T. and Sun, D.W., Improving quality inspection of food products by computer vision-a review. *Journal of Food Engineering*, 61(1), 2004, pp. 3-16.
3. Barni, M., Cappellini, V., andMecocci, A., Colour-based detection of defects on chicken meat, *Image and Vision Computing*, 15, 1997, pp. 549–556.
4. Borggaard, C., Madsen, N.T. and Thodberg, H.H., In-line Image Analysis in the Slaughter Industry, Illustrated by Beef Carcass Classification, *Meat Science*, 43(1), 1996, pp. 151-163.
5. Fortin, A., Tong, A. K. W., Robertson, W. M., Zawadski, S. M., Landry, S. J., Robinson, D. J., Liu, T., andMockford, R. J., A novel approach to grading pork carcasses: computer vision and ultrasound. *Meat Science*, 63, 2003, pp. 451–462.
6. Li, Q. Z., Wang, M. H., 1ndGu, W. K., Computer vision based system for apple surface defect detection,*Computers and Electronics in Agriculture*, 36(2–3), 2002, pp. 215–223.
7. Karplus, I., Alchanatis, V., Zion, B., Guidance of groups of guppies (Poeciliareticulata) to allow sorting by computer vision, *Aquacultural Engineering*, 32(3–4), 2005, pp. 509-520.
8. Baldevbhai, P. J. and Anand, R. S., Color Image Segmentation for Medical Images using L*a*b* Color Space, *Journal of Electronics and Communication Engineering*, 1(2), 2012, pp. 24-45.
9. Montgomery, D.C. and Runger, G.C., *Applied Statistics and Probability for Engineers*, 4th, New York: John Wiley and Sons, 2007.
10. Pedreschi, F., LeÓn, J., Mery, D. and Moyano, P., Development of a computer vision system to measure the color of potato chips, *Food Research International*, 39(10), 2006, pp. 1092–1098.
11. Yuangyai, C., Kaewsuwan, P., and Cheng, C.Y., Color-based Image Analysis for Statistical Sausage Production Control, *Proceedings of the Asia Pacific Industrial Engineering & Management Systems Conference 2012*.
12. Johnson, A. and Wichern D. W., *Applied Multivariate Statistical Analysis*, 6th, Pearson, 2007.
13. Automative Industry Action Group (AIAG), *Measurement System Analysis (MSA)*, 3rd edition, Michigan, 2002.
14. Castleman, K., *Digital image processing*, Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1996, pp. 667.

ประวัตินักวิจัย

ประวัติส่วนตัว

ชื่อ-สกุล นาย ชุมพล ยวงใย

เพศ ☑ ชาย ☐ หญิง วันเดือนปีเกิด 29 ธันวาคม 2517 อายุ 38 ปี

สถานภาพ ☑ โสด ☐ สมรส

ตำแหน่งปัจจุบัน อาจารย์

ประวัติการศึกษา

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

ทุนการศึกษาและทุนวิจัยที่เคยได้รับ

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

ผลงานวิจัย/งานสร้างสรรค์

ผลงานวิจัย/งานสร้างสรรค์ที่ตีพิมพ์เผยแพร่ (ระดับชาติและนานาชาติ)

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

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

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

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

การเสนอผลงานวิชาการ

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

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

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

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

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

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

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

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