

การประเมินการเปลี่ยนแปลงสมบัติบางประการของเมล็ดกาแฟ  
ระหว่างการคั่วด้วยเทคนิควิเคราะห์ภาพ

Evaluation of Selected Property Changes of Coffee Beans  
during Roasting Using Image Analysis Technique



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมอาหาร

คณะวิศวกรรมศาสตร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้เฉพาะเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้  
ปีการศึกษา 2563

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

การประเมินการเปลี่ยนแปลงสมบัติบางประการของเมล็ดกาแฟ  
ระหว่างการคั่วด้วยเทคนิควิเคราะห์ภาพ

Evaluation of Selected Property Changes of Coffee Beans  
during Roasting Using Image Analysis Technique



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมอาหาร

คณะวิศวกรรมศาสตร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับเอาไว้ใช้ภายในเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้  
ปีการศึกษา 2563

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

Evaluation of Selected Property Changes of Coffee Beans  
during Roasting Using Image Analysis Technique



THIS THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE OF  
BACHELOR OF ENGINEERING IN FOOD ENGINEERING

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ SCHOOL OF ENGINEERING อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อี KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG ที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational and academic use only. Not allowed for commercial use.  
ACADEMIC YEAR 2020

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ปริญญานิพนธ์ปีการศึกษา 2563

ภาควิชาวิศวกรรมอาหาร

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การประเมินการเปลี่ยนแปลงสมบัติบางประการของเมล็ดกาแฟระหว่าง  
การคั่วด้วยเทคนิควิเคราะห์ภาพ

Evaluation of Selected Property Changes of Coffee Beans  
during Roasting Using Image Analysis Technique

ผู้จัดทำ

- |                     |                 |              |          |
|---------------------|-----------------|--------------|----------|
| 1. นางสาวจุฬาลักษณ์ | มุลผดุง         | รหัสประจำตัว | 60010160 |
| 2. นางสาวชนิดาภา    | รัตนโรจน์ตระกูล | รหัสประจำตัว | 60010196 |
| 3. นายธัญวรัตน์     | รอยวิรัตน์      | รหัสประจำตัว | 60010460 |



อาจารย์ที่ปรึกษา

(ผศ. ดร.มธรรดา จิโนรส)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

หัวข้อปริญญานิพนธ์	การประเมินการเปลี่ยนแปลงสมบัติบางประการของเมล็ดกาแฟระหว่าง การคั่วด้วยเทคนิควิเคราะห์ภาพ	
ชื่อนักศึกษา	จุฬาลักษณ์	มุลผดุง
	ชนิดาภา	รัตนโรจน์ตระกูล
	ธัญวรัตน์	รอยวิรัตน์
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ. ดร.มจรูดา	จิโนรส
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต	
สาขาวิชา	วิศวกรรมอาหาร	
ปีการศึกษา	2563	

### บทคัดย่อ

โครงการนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของการคั่วเมล็ดกาแฟด้วยเครื่องคั่วกาแฟแบบฟลูอิดซ์เบดโดยการใช้ไอน้ำร้อนยวดยิ่งและอากาศร้อนต่อสมบัติต่าง ๆ ของเมล็ดกาแฟ และพัฒนาวิธีประเมินการเปลี่ยนแปลงของสีและลักษณะปรากฏของเมล็ดกาแฟระหว่างการคั่วโดยใช้เทคนิควิเคราะห์ภาพ โดยทำการคั่วเมล็ดกาแฟที่อุณหภูมิ 210 °C เพื่อศึกษาสมบัติบางประการของเมล็ดกาแฟคั่ว ได้แก่ ความชื้น แอคติวิตีของน้ำ สี ความหนาแน่นรวม และความเป็นกรด-ด่าง และพัฒนาระบบประเมินลักษณะปรากฏของเมล็ดกาแฟด้วยเทคนิควิเคราะห์ภาพ เพื่อประเมินการเปลี่ยนแปลงของสมบัติต่าง ๆ ได้แก่ สี ขนาด รูปร่าง และแปลงค่าสีเป็นระบบต่าง ๆ โดยเฉพาะค่า Agron number ซึ่งเป็นสเกลค่าสีบ่งชี้ระดับการคั่วของกาแฟ รวมทั้งพารามิเตอร์ที่วิเคราะห์ได้จากภาพต่าง ๆ ได้แก่ ความยาวแกนหลัก ความยาวแกนรอง พื้นที่ภาพฉาย Equivalent Diameter และ Feret Diameter พารามิเตอร์บ่งบอกรูปร่าง ได้แก่ Formfactor Roundness Axial Ratio Extent และ Fractal Diameter พบว่าการใช้ไอน้ำร้อนยวดยิ่งจะใช้เวลาในการคั่วเมล็ดกาแฟเพื่อให้ได้ระดับการคั่วที่ต้องการได้เร็วกว่าการใช้อากาศร้อนทำให้สมบัติต่าง ๆ ได้แก่ ความสว่าง pH และความหนาแน่นรวมของเมล็ดกาแฟลดลงระหว่างการคั่วในขณะที่เมล็ดกาแฟเกิดการฟองตัวซึ่งส่งผลต่อความเปรี้ยวของเมล็ดกาแฟ

**คำสำคัญ :** กาแฟโรบัสตา, เครื่องคั่วแบบฟลูอิดซ์เบด, ไอน้ำร้อนยวดยิ่ง, การวิเคราะห์ภาพ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

<b>Project Title</b>	Evaluation of Selected Property Changes of Coffee Beans during Roasting Using Image Analysis Technique	
<b>Students</b>	Miss Julaluk	Moonpadoong
	Miss Chanidapa	Rattanarottakul
	Mr. Thunvarat	Roywirat
<b>Project Advisor</b>	Asst. Prof. Dr. Maturada	Jinorose
<b>Degree</b>	Bachelor of Engineering	
<b>Program</b>	Food Engineering	
<b>Academic Year</b>	2020	

## Abstract

This project aims to study the effect of superheated steam and hot air on the properties of coffee beans in roasting process with fluidized bed roaster and developed an evaluation color and appearance of coffee beans during roasting by using image analysis technique, coffee beans were roasted at 210 °C to study some properties of roasted coffee beans such as moisture content, water activity, color, bulk density and acidity developed evaluation an appearance of coffee beans by using image analysis technique for evaluate the properties such as color, size, shape and color conversion in various systems, especially the Agtron number is a color scale indicating the degree of roasting of coffee including parameters that analyzed from image analysis such as Major axis, Minor axis Projected Area, Equivalent Diameter and Feret Diameter the parameters that indicate the shape such as Formfactor, Roundness, Axial Ratio, Extent and Fractal Diameter.

It was found that using superheated steam, it would take time to roast the coffee beans to achieve the desired roasting level faster than using hot air for various properties such as lightness, pH and overall bulk density of coffee beans during roasting was associated fragility of coffee beans

**Keywords** : Robusta coffee beans, Fluidized bed roaster, Superheated steam, Image Analysis

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ด้วยความกรุณาและความอนุเคราะห์จาก ผศ. ดร.มธุรดา จิโนรส อาจารย์ที่ปรึกษาปริญญาานิพนธ์ ที่ให้คำชี้แนะในการดำเนินโครงการ ตลอดจนช่วยแก้ไขในสิ่งบกพร่องและให้การสนับสนุนตลอดระยะเวลาในการทำโครงการ ทางคณะผู้ทดลองขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างยิ่ง

ขอขอบคุณอาจารย์สั๊กมณ เทพหัสติน ณ อยุธยา และอาจารย์ณัฐมล จินดาพรรณ ที่ให้คำชี้แนะและช่วยเหลือในการดำเนินงานวิจัย

ขอขอบคุณนางสาวปิ่นปิ่นท์ เสถียรกิจอำไพ ที่ให้คำปรึกษาและคอยช่วยเหลือในเรื่องต่าง ๆ ตลอดการทำวิจัยในครั้งนี้

ขอขอบคุณคณาจารย์และเจ้าหน้าที่ ประจำภาควิชาวิศวกรรมอาหาร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังทุกท่าน ที่ให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์ รวมทั้งความห่วงใยและความช่วยเหลือในด้านต่าง ๆ

สุดท้ายนี้ผู้วิจัยขอขอบพระคุณบิดามารดา และครอบครัวที่ให้การสนับสนุนในการศึกษาของข้าพเจ้าจนสำเร็จการศึกษา



จุฬาลักษณ์  
ชนิดาภา  
ธัญวรรณ์

มุลผดุง  
รัตนโรจน์ตระกูล  
รอยวิรัตน์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	VII
สารบัญรูป	VIII
รายการสัญลักษณ์	IX
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์	2
1.3 ขอบเขตของโครงการ	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 กาแฟ	4
2.1.1 ประวัติความเป็นมา	4
2.2 กระบวนการแปรรูปเมล็ดกาแฟในอุตสาหกรรม	4
2.2.1 กระบวนการแปรรูปแบบแห้ง	4
2.2.2 กระบวนการแปรรูปแบบเปียก	6
2.2.3 การคั่วกาแฟ	6
2.2.4 เครื่องคั่วกาแฟ	8
2.3 ปฏิกิริยาเคมีที่เกิดระหว่างกระบวนการคั่ว	11
2.3.1 ปฏิกิริยาเมลลาร์ด	11
2.3.2 คาราเมลไลเซชัน	11
2.3.3 ปฏิกิริยาไพโรไลซิส	12
2.4 มาตรฐานเมล็ดกาแฟ	12
2.4.1 เมล็ดกาแฟโรบัสตา	12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับวารุใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.4.2 เมล็ดกาแฟโรบัสตาคั่ว	13
2.5 ระบบสี	14
2.5.1 ระบบเพื่อใช้กับอุปกรณ์แสดงผล	14
2.5.2 ระบบเพื่ออธิบายการรับรู้สีของมนุษย์	14
2.5.3 ระบบเพื่อใช้กับอุปกรณ์	14
2.6 การแปลงระบบสี	15
2.7 ขนาด	17
2.7.1 ขนาด	17
2.8 รูปร่าง	17
2.8.1 แฟกเตอร์รูปร่าง	17
2.9 เครื่องกราดภาพ	18
2.9.1 Charge Coupled Device (CCD)	18
2.9.2 Contact Image Sensor (CIS)	18
2.9.3 การเปรียบเทียบระหว่างเครื่องกราด ระบบ CCD และ ระบบ CIS	19
2.10 การวิเคราะห์ภาพ	19
2.10.1 การประมวลผลภาพ	19
2.10.2 การวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากภาพ	20
บทที่ 3 ระเบียบวิจัย	21
3.1 วัตถุประสงค์	21
3.2 อุปกรณ์	21
3.3 การศึกษาการคั่วด้วยเครื่องคั่วแบบฟลูอิดไชน์เบด	21
3.4 วิธีการตรวจสอบสมบัติเมล็ดกาแฟคั่ว	22
3.4.1 การวัดความชื้น	22
3.4.2 การวัดวอเตอร์แอกติวิตี	22
3.4.3 การวัดสี	22
3.4.4 การวัดความหนาแน่นรวม	22

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับอาจารย์และบุคลากรเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.4.5 การวัดความเป็นกรด-ด่าง	23
3.5 การพัฒนาเครื่องประเมินคุณภาพเมล็ดกาแฟ	23
3.5.1 การรับภาพ	23
3.5.2 วิธีการพัฒนาเครื่องวัดสีกาแฟ	23
3.5.3 วิธีการพัฒนาเครื่องวัดขนาดและรูปร่างของ เมล็ดกาแฟ	24
3.6 การวิเคราะห์ทางสถิติ	24
บทที่ 4 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ข้อมูล	26
4.1 ผลการทดลอง	26
4.1.1 ศึกษาการคั่วกาแฟด้วยเครื่องคั่วแบบ ฟลูอิดซ์เบดโดยใช้ไอน้ำร้อนยวดยิ่งและ อากาศร้อน	26
4.1.2 การเปลี่ยนแปลงสมบัติของเมล็ดกาแฟ ระหว่างการคั่ว	26
4.2 ผลการพัฒนาเครื่องวัดสี ขนาดและรูปร่างของ เมล็ดกาแฟ	34
4.2.1 ไดอะแกรมหลักการทำงานของเครื่องวัดสี ขนาดและรูปร่างของเมล็ดกาแฟ	34
4.2.2 รายละเอียดเมนูโปรแกรมวัดสี ขนาดและ รูปร่างของเมล็ดกาแฟ	37
4.2.3 รายละเอียดของคำสั่ง Color	38
4.2.5 รายละเอียดของคำสั่ง Size	39
4.3 ผลการทดสอบประสิทธิภาพโปรแกรมวิเคราะห์ ภาพที่พัฒนา	41
4.3.1 การทดสอบประสิทธิภาพวัดสี	41
4.3.2 การทดสอบประสิทธิภาพการวัดขนาดและรูปร่าง	41
เอกสารนี้เป็นบทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ เอกสารอ้างอิงทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำ ไปใช้	43
	45

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
ภาคผนวก	47
ภาคผนวก ก. ผลการทดลอง	48
ภาคผนวก ข. มาตรฐานที่เกี่ยวข้อง	52
ภาคผนวก ค. ชุดคำสั่งที่พัฒนาขึ้น	55



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	ข้อดี และข้อเสียของการผลิตเมล็ดกาแฟสสารด้วยกระบวนการแบบแห้ง และแบบเปียก	7
2.2	ระดับการคั่วเมล็ดกาแฟ	9
2.3	ข้อบกพร่องและเกณฑ์การยอมรับของเมล็ดกาแฟโรบัสตา	13
2.4	ลักษณะทางเคมี	13
2.5	แพคเตอร์รูปร่าง	17
4.1	ค่าสีของเมล็ดกาแฟระหว่างการคั่วด้วยเครื่องคั่วแบบฟลูอิดซ์เบดที่ อุณหภูมิ 210 °C	30
4.2	การตั้งค่าในการสแกนภาพ	34
4.3	ผลการทดสอบในการบอกระดับการคั่วกาแฟที่อุณหภูมิ 210 °C	41
ก.1	ค่าความชื้นของเมล็ดกาแฟระหว่างการคั่วด้วยเครื่องคั่วแบบฟลูอิดซ์เบด ที่อุณหภูมิ 210 °C	49
ก.2	ค่าวอเตอร์แอกติวิตีของเมล็ดกาแฟระหว่างการคั่วด้วยเครื่องคั่วแบบ ฟลูอิดซ์เบดที่อุณหภูมิ 210 °C	49
ก.3	ค่าความหนาแน่นรวมของเมล็ดกาแฟระหว่างการคั่วด้วยเครื่องคั่วแบบ ฟลูอิดซ์เบดที่อุณหภูมิ 210 °C	50
ก.4	ค่าความเป็นกรด-ด่างของเมล็ดกาแฟระหว่างการคั่วด้วยเครื่องคั่วแบบ ฟลูอิดซ์เบดที่อุณหภูมิ 210 °C	50
ข.1	การจัดขนาดของเมล็ดกาแฟโรบัสตา	53
ข.2	ค่า Agtron number เทียบกับระดับการคั่วกาแฟ	53

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## สารบัญรูปภาพ

รูปที่		หน้า
2.1	กระบวนการผลิตเมล็ดกาแฟสโรโดยกระบวนการแปรรูปแบบแห้ง และแบบเปียก	5
2.2	เครื่องคั่วแบบถังหมุน	9
2.3	การลอยตัวอย่างเป็นอิสระของเมล็ดกาแฟมีพฤติกรรมคล้ายของไหล	10
2.4	เครื่องคั่วแบบฟลูอิดไคซ์เบดโดยใช้น้ำร้อนยวดยิ่ง	10
2.5	หลักการการทำงานของเครื่องกราดภาพของระบบ CCD	18
2.6	หลักการการทำงานของเครื่องกราดภาพของระบบ CIS	18
3.1	ตัวอย่างการจัดเรียงเมล็ดกาแฟ	23
3.2	ชุดอุปกรณ์ทดลอง	25
4.1	การเปลี่ยนแปลงของค่าความชื้นของเมล็ดกาแฟระหว่างการคั่วที่อุณหภูมิ 210 °C	27
4.2	การเปลี่ยนแปลงของค่าวอเตอร์แอกติวิตีของเมล็ดกาแฟระหว่างการคั่วที่อุณหภูมิ 210 °C	28
4.3	การเปลี่ยนแปลงของค่าความสว่างของเมล็ดกาแฟระหว่างการคั่วที่อุณหภูมิ 210 °C	29
4.4	การเปลี่ยนแปลงของค่าความหนาแน่นรวมของเมล็ดกาแฟระหว่างการคั่วที่อุณหภูมิ 210 °C	31
4.5	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นรวมกับค่าความชื้นของเมล็ดกาแฟระหว่างการคั่วที่อุณหภูมิ 210 °C	32
4.6	การเปลี่ยนแปลงของค่าความเป็นกรด-ด่างของเมล็ดกาแฟระหว่างการคั่วที่อุณหภูมิ 210 °C	33
4.7	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเป็นกรด-ด่างกับค่าวอเตอร์แอกติวิตีของเมล็ดกาแฟระหว่างการคั่วที่อุณหภูมิ 210 °C	33
4.8	ไดอะแกรมหลักการการทำงานของเครื่องวัดสี	35
4.9	ไดอะแกรมหลักการการทำงานของเครื่องวัดขนาดและรูปร่าง	36
4.10	หน้าต่าง 'First_Page'	37
4.11	หน้าต่าง 'Select_and_Segmentation_Page'	37
4.12	หน้าต่าง 'Color_Analyze_Page'	38
4.13	หน้าต่าง 'Figure 1'	39
4.14	ตัวอย่างไฟล์ข้อมูลสีในรูปแบบ Excel	39

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

	หน้า	
4.15	หน้าต่าง 'Size_Analyze_Page'	40
4.16	ตัวอย่างไฟล์ข้อมูลของขนาดรูปแบบ Excel	40
4.17	ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนพารามิเตอร์บอกขนาดกับอัตราส่วน ความชื้นของเมล็ดกาแฟระหว่างการคั่วที่อุณหภูมิ 210 °C	42
4.18	ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนพารามิเตอร์บอกรูปร่างกับอัตราส่วน ความชื้นของเมล็ดกาแฟระหว่างการคั่วที่อุณหภูมิ 210 °C	42



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## รายการสัญลักษณ์

$m_i$	มวลตัวอย่างก่อนอบ (g)
$m_d$	มวลตัวอย่างหลังอบ (g)
$a_w$	ค่าวอเตอร์แอกติวิตี
$\rho_b$	ค่าความหนาแน่นรวม
$L^*$	ค่าความสว่าง
$a^*$	ค่าสีแดงหรือสีเขียว
$b^*$	ค่าสีเหลืองหรือสีน้ำเงิน
$C^*$	ค่าสีเหลือง
$h^*$	ค่าสีเทา
$X$	ค่าสีแดง
$Y$	ค่าสีเขียว
$Z$	ค่าสีน้ำเงิน
pH	ค่าความเป็นกรดต่าง
$m_s$	มวลรวมของเมล็ด (g)
$v_b$	ปริมาตรของภาชนะบรรจุ (mL)
$P_0$	พารามิเตอร์ก่อนกระบวนการ
$P$	พารามิเตอร์หลังกระบวนการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

กาแฟเป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญ และสร้างรายได้ให้แก่ประเทศผู้ผลิตเป็นอย่างมาก ประเทศไทยในปี 2562 มีผลผลิตเมล็ดกาแฟถึง 29,307 ตัน (กระทรวงเกษตรและสหกรณ์, 2563) อย่างไรก็ตามหากพิจารณาในเชิงคุณภาพพบว่าเกษตรกรผู้ปลูกกาแฟ รวมทั้งผู้ประกอบการธุรกิจกาแฟในประเทศไทย ต่างมีความรู้และพัฒนาตนเองอย่างต่อเนื่อง ทำให้สามารถผลิตเมล็ดกาแฟคุณภาพหรือกาแฟพิเศษ (specialty coffee) ซึ่งเป็นกาแฟที่ผ่านการทดสอบรสชาติกาแฟ โดยผู้ทดสอบคุณภาพที่ผ่านการอบรมหรือ Q grader และได้คะแนนตั้งแต่ 80 คะแนนขึ้นไป จากคะแนนเต็ม 100 คะแนน ด้วยเหตุนี้ประกอบกับผู้บริโภคในปัจจุบันนิยมดื่มกาแฟพิเศษเพิ่มมากขึ้น จึงทำให้ราคาเมล็ดกาแฟพิเศษในตลาดโลกมีแนวโน้มที่สูงขึ้น (วริทธิ์นันท์ และคณะ, 2563) จากยุทธศาสตร์กาแฟฉบับล่าสุด (ระหว่างปี พ.ศ. 2560 – 2564) มีเป้าหมายต้องการให้ประเทศไทยเป็นหนึ่งในกลุ่มผู้นำในด้านการผลิตและการค้ากาแฟพิเศษของภูมิภาคอาเซียน ซึ่งไม่เพียงแต่เป็นการส่งเสริมการวิจัยและพัฒนาสายพันธุ์กาแฟและวิธีการเพาะปลูกที่ช่วยเพิ่มผลผลิต แต่ยังครอบคลุมถึงการวิจัยและพัฒนานวัตกรรมที่จะช่วยเพิ่มมูลค่าเมล็ดกาแฟไทยอีกด้วย

กาแฟที่เป็นที่นิยมบริโภคของคนส่วนใหญ่มีอยู่ 2 สายพันธุ์ ได้แก่ กาแฟอะราบิกา (*Coffea arabica* L.) และกาแฟโรบัสตา (*Coffea canephora* P.) โดยกาแฟโรบัสตามีรสชาติที่ขม แต่มีความหวานและมีรสเปรี้ยวอ่อน อีกทั้งมีกลิ่นที่ไม่พึงประสงค์ เช่น กลิ่นเหมือนดินและกลิ่นคั่ว/ไหม้ (Kalschne et al., 2018) จึงนิยมใช้เมล็ดกาแฟโรบัสตาเพื่อการผลิตกาแฟสำเร็จรูปหรือใช้ผสมกับเมล็ดกาแฟอะราบิกาในการผลิตเมล็ดกาแฟคั่วผสม (Chindapan et al., 2019) เพื่อยกระดับกาแฟโรบัสตาให้สามารถเทียบเท่ากับกาแฟอะราบิกาได้ การคั่ว (Roasting) นับเป็นกระบวนการที่สำคัญ โดยเฉพาะในการเปลี่ยนเมล็ดกาแฟสาร (Green bean) ให้กลายเป็นกาแฟคั่วที่ประกอบไปด้วยกลิ่นและรสชาติ (สั๊กมน เทพหัสดิน, 2555) ในระหว่างการคั่วเมล็ดกาแฟจะเกิดการเปลี่ยนแปลงขององค์ประกอบทางเคมีทำให้ได้รสชาติของกาแฟที่กลมกลืน โดยทั่วไปการคั่วเมล็ดกาแฟสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ระดับคือ การคั่วอ่อน (Light roast) การคั่วกลาง (Medium roast) และการคั่วเข้ม (Heavy roast) (Clarke, 1985) ปัจจุบันนิยมใช้เครื่องคั่วแบบถังหมุน (Drum roaster) ในการคั่วกาแฟ อย่างไรก็ตาม การคั่วด้วยวิธีนี้ ซึ่งใช้อากาศร้อนที่มีปริมาณออกซิเจนสูงเป็นตัวกลางในการคั่ว มักทำให้เมล็ดกาแฟโรบัสตามีกลิ่นรสที่ไม่พึงประสงค์ อันเนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Maki and Haruyama, 1997) ดังนั้นจึงจำเป็นต้องหาวิธีการอื่นมาช่วยปรับปรุงเพื่อเพิ่มคุณภาพของเมล็ดกาแฟโรบัสตา ซึ่งวิธีการหนึ่งที่มีความเป็นไปได้คือการคั่วโดยใช้ไอน้ำร้อนยวดยิ่ง (Superheated-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับครูอาจารย์เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้คิดแม่ลงในเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

Steam) มาแทนการใช้ไอน้ำร้อน ซึ่งนิยมใช้อยู่โดยทั่วไปในอุตสาหกรรมมากกว่าร้อยละ 80 (สักรกมน เทพหัสดิน, 2555) นอกจากนี้การใช้ไอน้ำร้อนยังมีข้อเสียอีกหลายประการ เช่น เซลล์อาหารเกิดการหดตัว (Shrinkage) เกิดจากการสูญเสียไอน้ำโดยความร้อน หรือเหนียวน่าทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมีอื่น ๆ ได้ และสูญเสียคุณค่าทางอาหารอีกด้วย (จุไรวัลย์, 2549) จากเหตุที่กล่าวมานั้นจึงนำมาสู่การพัฒนากระบวนการต่าง ๆ เพื่อขจัดข้อเสียที่เกิดขึ้นและปรับปรุงคุณภาพของเมล็ดกาแฟโรบัสตาโดยการใช้ไอน้ำร้อนยวดยิ่งซึ่งเป็นไอน้ำอิ่มตัวที่ถูกเพิ่มอุณหภูมิขึ้น เป็นตัวกลางในการคั่วแทนไอน้ำร้อน ปัจจุบันถูกนำมาประยุกต์ใช้ในการคั่วผลิตผลทางการเกษตรหลากหลายชนิด เช่น โกโก้ ถั่วลิสง เป็นต้น (Idrus and Yang, 2012; Zzaman and Yang, 2013)

จากงานวิจัยของ Chindapan และคณะ (2019) ซึ่งได้ศึกษาผลของการใช้ไอน้ำร้อนยวดยิ่งในการคั่วเมล็ดกาแฟโรบัสตาในระดับห้องทดลองพบว่าการใช้ไอน้ำร้อนยวดยิ่งทำให้เมล็ดกาแฟโรบัสตามีปริมาณน้ำตาลเพิ่มขึ้นขณะที่ปริมาณกรดแอซติก (Acetic acid) ซึ่งให้กลิ่นรสที่ไม่พึงประสงค์มีแนวโน้มลดลง นอกจากนี้จากการประเมินทางประสาทสัมผัสโดยใช้วิธีการของ Specialty Coffee Association of America (SCAA) พบว่ากาแฟโรบัสตาที่คั่วจากเมล็ดที่คั่วโดยใช้ไอน้ำร้อนยวดยิ่งมีคะแนนรวมทั้งหมดสูงกว่ากาแฟโรบัสตาที่คั่วจากเมล็ดที่คั่วโดยใช้ไอน้ำร้อน ซึ่งจะเห็นได้ว่าการใช้ไอน้ำร้อนยวดยิ่งมีศักยภาพสูงในการปรับปรุงคุณภาพของเมล็ดกาแฟโรบัสตาในระดับห้องทดลอง

นอกจากนี้คุณภาพของเมล็ดกาแฟถูกกำหนดโดยปัจจัยหลายประการ ได้แก่ สี เนื้อสัมผัสและขนาด โดยวิธีการมาตรฐานทั่วไปในการตรวจสอบคุณภาพของเมล็ดกาแฟ คือ การตรวจสอบทางกายภาพ และตรวจสอบด้วยตาเปล่า ซึ่งวิธีการข้างต้นใช้เวลาและมีความแม่นยำต่ำ นอกจากนี้ยังจำเป็นต้องใช้ความสามารถของแต่ละบุคคล รวมถึงความชำนาญในการแยกแยะความแตกต่างของตัวอย่างอีกด้วย (Faridah et al., 2012) อย่างไรก็ตามมีงานวิจัยที่ศึกษาเกี่ยวกับเทคนิคการวิเคราะห์เชิงภาพถ่ายที่เหมาะสมกับการตรวจสอบคุณภาพของกาแฟน้อย ซึ่งจากงานวิจัย Arboleda และคณะ (2018) ได้ศึกษาเทคนิคการประมวลผลภาพอัตโนมัติสำหรับตรวจสอบคุณสมบัติสี RGB ของเมล็ดกาแฟโดยใช้โปรแกรม MATLAB ซึ่ง MATLAB เป็นหนึ่งในโปรแกรมที่ง่ายและมีประสิทธิภาพมากที่สุดที่สามารถประมวลผลภาพได้ และใช้ในการประมวลผลภาพที่กำหนด โดยโปรแกรม MATLAB มีอัลกอริธึมและแอปพลิเคชันสำหรับการประมวลผลภาพและการแบ่งส่วนงานที่หลากหลาย โดยสามารถจำแนกได้ร้อยละ 100 ดังนั้นจึงนำมาสู่โครงการงานในครั้งนี้ ซึ่งจัดทำขึ้นโดยมีวัตถุประสงค์ และขอบเขตงานดังนี้

## 1.2 วัตถุประสงค์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานี้เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงสมบัติของเมล็ดกาแฟระหว่างคั่วด้วยเครื่องคั่วกาแฟแบบฟลูอิดซ์-ไม่ว่ากรณีใดก็ตาม ล้วนเห็นชัดให้ต้องแปลงเป็นภาษาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เบดโดยการใช้ไอน้ำร้อนยวดยิ่งและไอน้ำร้อนเป็นตัวกลาง และพัฒนากระบวนการเพื่อประเมินการเปลี่ยนแปลงสีและลักษณะปรากฏของเมล็ดกาแฟระหว่างคั่วด้วยเทคนิควิเคราะห์ภาพ

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

### 1.3 ขอบเขตการศึกษา

1.3.1 ศึกษาสมบัติบางประการของเมล็ดกาแฟคั่วพันธุ์โรบัสตา (*Coffea canephora* Pierre) ที่คั่วด้วยเครื่องคั่วแบบฟลูอิดเบดโดยใช้ไอน้ำร้อนยวดยิ่งเทียบกับการใช้อากาศร้อน และทำการศึกษากการเปลี่ยนแปลงของสมบัติต่าง ๆ ระหว่างได้แก่ ความชื้น แอคติวิตีของน้ำ สี ขนาด รูปร่าง ความหนาแน่นรวม และความเป็นกรด-ด่าง

1.3.2 ศึกษาการใช้เทคนิควิเคราะห์ภาพด้วยโปรแกรมประเมินคุณภาพที่สร้างจาก MATLAB ในการประเมินสีของเมล็ดกาแฟระหว่างคั่วในระบบสีต่าง ๆ ได้แก่ RGB, XYZ, CIELAB, CIELCh และ Astron number

1.3.3 ศึกษาการเปลี่ยนแปลงของลักษณะปรากฏ ได้แก่ ประเมินขนาดของเมล็ดกาแฟระหว่างการคั่วด้วยเทคนิควิเคราะห์ภาพด้วยระเบียบวิธี (Algorithm) ที่พัฒนาขึ้นด้วยโปรแกรม MATLAB® and Image Processing Toolbox Release 2021a (The MathWorks, Inc., Natick, Massachusetts, United States) ได้แก่ ความยาวแกนหลัก (Major axis), ความยาวแกนรอง (Minor axis), พื้นที่ภาพฉาย (Projected Area), Equivalent Diameter และ Feret Diameter และประเมินรูปร่างของเมล็ดกาแฟด้วยแฟกเตอร์รูปร่าง (Shape factor) ต่าง ๆ ได้แก่ Formfactor, Roundness, Axial Ratio, Extent และ Fractal Dimension

### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

จากการศึกษาในครั้งนี้คาดว่าจะได้รู้ถึงผลของการคั่วกาแฟด้วยเครื่องคั่วแบบฟลูอิดเบดโดยใช้ไอน้ำร้อนยวดยิ่งต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติต่าง ๆ วิธีประเมินสมบัติของเมล็ดกาแฟด้วยเทคนิควิเคราะห์ภาพที่พัฒนาขึ้น ช่วยให้การประเมินแม่นยำ รวดเร็ว และเป็นแบบวัตถุวิสัย (Objective) เพื่อนำข้อมูลที่ได้ไปใช้ในการปรับปรุงกระบวนการในอุตสาหกรรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## บทที่ 2

# ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

## 2.1 กาแฟ

### 2.1.1 ประวัติความเป็นมา

ต้นกำเนิดมีรายงานการค้นพบครั้งแรกในเอธิโอเปีย (Ethiopia) เมื่อ 1,000 ปีก่อน เป็นเรื่องเล่าที่ได้รับความนิยมอย่างหนึ่งกล่าวไว้ว่าการค้นพบกาแฟโดยบังเอิญของมนุษย์เกิดขึ้นเมื่อแพะเอธิโอเปียมีอาการคึกคะนองผิดปกติ เมื่อคนเลี้ยงแพะได้ลองชิมเมล็ดกาแฟและรู้สึกตื่นตัวจึงได้นำต้นกาแฟกลับสู่ชุมชนของเขา หลังจากนั้นชาวอาราเบีย (Arabian) จึงได้รู้จักต้นกาแฟมากขึ้น (Kington, 2015) จึงทำให้กาแฟแพร่หลายมากขึ้นจากชาวอาราเบียเข้าสู่ชนชาวอิตาลี ดัทช์ เยอรมัน ฝรั่งเศสและกระบวนการผลิตกาแฟได้พัฒนาขึ้นเรื่อย ๆ ในเวลาต่อมา (สมศักดิ์, 2545)

ตามบันทึกของนายเจรีนี ชาวอิตาลี เมื่อปี พ.ศ. 2454 กล่าวว่าประเทศไทยปลูกกาแฟพันธุ์อาราบิก้าตั้งแต่ปี พ.ศ. 2393 ส่วนพันธุ์โรบัสตานั้น มีชาวอิสลามผู้หนึ่งชื่อนายตีหมน เป็นผู้นำมาปลูกคนแรกเมื่อปี พ.ศ. 2447 แล้วแพร่หลายไปตามจังหวัดต่าง ๆ ของประเทศไทยในปัจจุบัน (สมศักดิ์, 2545)

กาแฟสร้างรายได้ให้แก่ประเทศผู้ผลิตเป็นอย่างมาก ประเทศผู้ผลิตและส่งออกเมล็ดกาแฟดิบ 5 อันดับแรกของโลก ได้แก่ บราซิล เวียดนาม โคลัมเบีย อินโดนีเซีย และเอธิโอเปีย โดยมีผลผลิตรวมกันทั้งสิ้นประมาณ 9 ล้านตัน ในส่วนของประเทศไทยยากต่อการแข่งขัน เนื่องจากประเทศไทยผลิตเมล็ดกาแฟได้เพียง 29,000 ตันต่อปี หรือคิดเป็นร้อยละ 0.3 ของปริมาณผลผลิต (สถาบันอาหาร, 2560)

## 2.2 กระบวนการแปรรูปเมล็ดกาแฟในอุตสาหกรรม

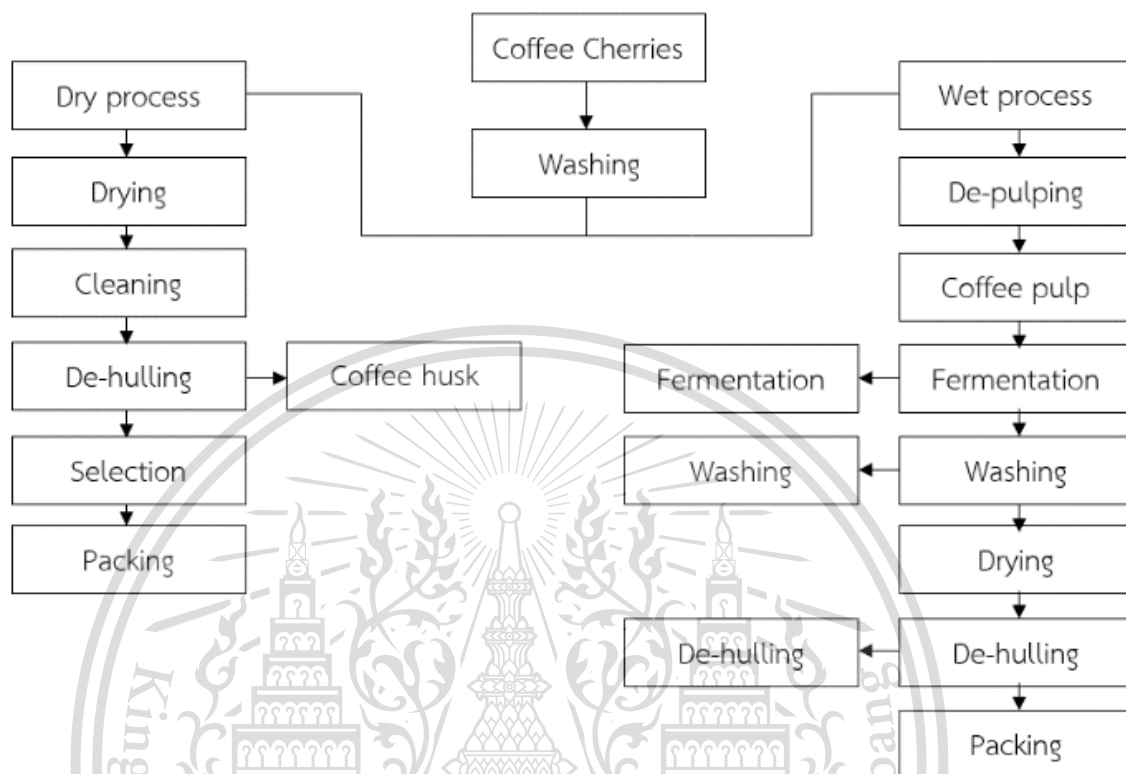
กรรมวิธีผลิตที่ดีจะส่งผลถึงคุณภาพของเมล็ดกาแฟที่ผลิตได้ การผลิตเมล็ดกาแฟสามารถทำได้ 2 วิธี คือ การแปรรูปแบบแห้ง และแบบเปียก ซึ่งขั้นตอนต่าง ๆ แสดงดังรูปที่ 2.1

### 2.2.1 กระบวนการแปรรูปแบบแห้ง (Dry Process)

เป็นกระบวนการแปรรูปที่มีมานานทำได้โดยง่าย ไม่ซับซ้อน และนิยมใช้กับกาแฟโรบัสตาแต่ในประเทศบราซิลจะใช้กับกาแฟอาราบิก้าด้วยเนื่องจากผลผลิตกาแฟในประเทศบราซิลมีปริมาณมาก จึงใช้ผลกาแฟสุก ผลกาแฟดิบ ผลที่สุกจนแห้งคาต้นมาผ่านกระบวนการแปรรูปแบบแห้ง ส่งผลให้กาแฟที่ได้มีคุณภาพไม่ดี ราคาที่ขายในท้องตลาดจึงมีราคาต่ำ (Varnam และ Sutherland, 1994)

นอกจากนี้ความชื้นของเมล็ดกาแฟยังแตกต่างกันมากจากร้อยละ 30 ถึงร้อยละ 65 เมื่อความชื้น

ต่างกันคุณภาพของกาแฟจะแตกต่างกัน ผลกาแฟสุกเต็มที่จจะร่วงลงดิน ทำให้เกิดการปนเปื้อนของ จุลินทรีย์ และเมื่อฝนตกทำให้ผลกาแฟเปียกอาจจะมีการเจริญของเชื้อราได้ (Clarke, 1985)



รูปที่ 2.1 กระบวนการผลิตเมล็ดกาแฟสารโดยกระบวนการแปรรูปแบบแห้ง และแบบเปียก (Pandey et al., 2000)

ผลกาแฟสุกจะมีเมือก (mucilage) และจะค่อย ๆ สลายจากนั้นจะถูกดูดซึมเข้าสู่ภายในเมล็ด ทำให้เกิดกลิ่นรสที่ดีขึ้น แต่ยากที่จะควบคุมจุลินทรีย์ปนเปื้อนได้ ความชื้นแปรของดินฟ้าอากาศทำให้ กาแฟเสื่อมเสียคุณภาพ ถ้าหากมีการควบคุมความชื้นให้ได้เช่นเดียวกับกระบวนการแปรรูปแบบเปียก จะได้เมล็ดกาแฟที่มีคุณภาพดีขึ้น (Varnam และ Sutherland, 1994)

การตากแห้งเป็นการลดความชื้นของเมล็ดกาแฟให้เหลือประมาณร้อยละ 12 ถ้าหากความชื้น ประมาณร้อยละ 15 เชื้อรา แบคทีเรีย สามารถเจริญ และทำลายคุณภาพเมล็ดกาแฟได้ถ้าหาก ความชื้นประมาณร้อยละ 20 จะเกิดการงอกของเมล็ดกาแฟก็จะมีการใช้สารอาหารในเมล็ด ถ้าหาก ความชื้นประมาณร้อยละ 8 เมล็ดกาแฟจะหดตัวลงมากคุณภาพก็จะด้อยลง ดังนั้นจึงต้องพยายาม ควบคุมความชื้นให้ได้ประมาณร้อยละ 12 ซึ่งกระบวนการแปรรูปแบบแห้งมีข้อดีตรงที่ขั้นตอนในการ แปรรูปนั้นไม่ยุ่งยาก และใช้เวลารวดเร็วกว่ากระบวนการแปรรูปแบบเปียก แต่อย่างไรก็ตามคุณภาพของ กาแฟที่ผ่านกระบวนการแปรรูปแบบแห้งจะได้กาแฟสารที่มีคุณภาพต่ำกว่าการผ่านกระบวนการแปรรูป แบบเปียกเนื่องจากเมล็ดกาแฟจะมีความไวต่อการดูดกลืนได้ดีจึงดูดกลืนอับจากเปลือกในระหว่าง

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

การตากแห้งเพราะใช้เวลาในการทำแห้งนานกว่ากระบวนการแปรรูปแบบเปียก (Sivetz และ Foote, 1963)

### 2.2.2 กระบวนการแปรรูปแบบเปียก (Wet Process)

การเก็บผลกาแฟจะเก็บเฉพาะผลกาแฟที่สุกเท่านั้น ถ้ามีผลดิบ หรือผลที่สุกเกินไปติดมาจะทำให้คุณภาพด้อยลงเนื่องจากการสุกของผลกาแฟจะไม่เท่ากัน ดังนั้นการเก็บเมล็ดกาแฟต้องใช้ต้นทุนที่สูง การเก็บผลกาแฟแบบนี้จะได้กาแฟที่สะอาดซึ่งต่างจากแบบแห้ง ผลกาแฟที่เก็บมาจะมีความชื้นประมาณร้อยละ 60 - 75 การเก็บมักเก็บในตอนเช้าถึงบ่าย และต้องนำมาแปรรูปภายในวันที่เก็บหรือปล่อยทิ้งไว้ไม่เกิน 12 - 24 ชั่วโมง จึงเป็นกระบวนการที่ทำให้ได้เมล็ดกาแฟที่มีคุณภาพสูง (Vamam และ Sutherland, 1994) การปอกเปลือกผลกาแฟที่เก็บมาแล้วควรปอกในวันนั้น ถ้าไม่ทันไม่ควรเก็บเกิน 1 คืน เพราะจะเกิดการหมัก ทำให้เมล็ดกาแฟเสื่อมคุณภาพ การปอกเปลือกจะให้ผลดีถ้าใช้เครื่องปอกเปลือก หลังจากปอกเปลือกแล้วจะเห็นว่ายังมีอีกชั้นที่หุ้มเมล็ดไว้มีลักษณะเป็นเมือกมีความหนาราว 0.8 มิลลิเมตร ซึ่งประกอบด้วยน้ำ และเอนไซม์ต่าง ๆ ร้อยละ 80 ของเอนไซม์และอีกร้อยละ 20 เป็น insoluble mucilage ซึ่งใน insoluble mucilage ร้อยละ 80 เป็นน้ำตาลและอีกร้อยละ 20 เป็นสารประเภท pectin และ pectin acid ส่วนของเมือกเป็นส่วนที่เกิดขึ้นเมื่อเมล็ดคั่ว ๆ สุกไม่สามารถนำมาล้างน้ำออกได้ เพราะจะติดอยู่กับเมล็ดกาแฟ ถ้าหากปล่อยให้สุกคาตันจะมีเอนไซม์มาย่อยพอลิเมอร์เหล่านี้ให้น้ำตาลกลูโคสและฟรุกโตส ซึ่งจุลินทรีย์สามารถใช้ได้ ถ้าทิ้งไว้จะทำให้คุณภาพของกาแฟลดลง (Sivetz และ Foote, 1963) จากนั้นจะผ่านขั้นตอนที่มีความสำคัญคือ ขั้นตอนในการหมักเพื่อนำเมือกที่ติดเมล็ดกาแฟออกซึ่งขั้นตอนดังกล่าวเป็นขั้นตอนที่สำคัญทำให้เกิดกลิ่นรสเฉพาะ (specific flavour) ในกาแฟเนื่องจากการเจริญของเชื้อจุลินทรีย์ทำให้น้ำหมักกาแฟมีสภาพเป็นกรด และเชื้อจุลินทรีย์ยังสร้างเอนไซม์เพกทินเนส ซึ่งช่วยในการกำจัดเมือกสายพันธุ์ของแบคทีเรียที่สร้างกรดคือ Enterococcus ซึ่งเป็นกลุ่มของแบคทีเรียที่มีความสามารถในการสร้างกรดแลคติก ทำให้น้ำหมักมีค่าความเป็นกรด-ด่างลดลงจาก 6.8 เหลือ 4.3 จากค่าความเป็นกรดที่ลดลงส่งผลให้เกิดการยับยั้งการทำงานของเอนไซม์เพกทินเนส แต่ก็มีผลดีในแง่ของการป้องกันการเจริญของจุลินทรีย์ที่ทำให้เกิดการเสื่อมเสีย แต่การหมักเมล็ดกาแฟเป็นเวลานานมีผลทำให้เกิดกลิ่นรสที่ไม่ดีในกาแฟ ซึ่งโดยทั่วไปจะทำการหมัก 24 - 36 ชั่วโมง (Vamam และ Sutherland, 1994)

ดังนั้นเมล็ดกาแฟที่ผ่านการแปรรูปแบบเปียกจะมีกลิ่นหอม และเป็นที่ยอมรับมากกว่าเมล็ดกาแฟที่ผ่านการแปรรูปแบบแห้ง (Sivetz และ Foote, 1963) กระบวนการแปรรูปทั้ง 2 วิธีมีข้อดีข้อเสียต่างกันดังแสดงในตารางที่ 2.1

### 2.2.3 การคั่วกาแฟ

การคั่วกาแฟเป็นกระบวนการที่สำคัญในการพัฒนากลิ่นรสและสีของเมล็ดกาแฟ ซึ่งกระบวนการนี้มีอิทธิพลอย่างมากต่อคุณภาพสุดท้ายของกาแฟ (Hernandez et al., 2008; Mussatto et al., 2011) การคั่วเป็นกระบวนการที่ซับซ้อนอย่างมากเนื่องจากเกี่ยวข้องกับปฏิกิริยา

ทางเคมีและการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพซึ่งขึ้นอยู่กับรูปแบบเวลาและอุณหภูมิที่ใช้ในระหว่างกระบวนการคั่ว (Wang, 2012) โดยการถ่ายเทความร้อนและมวลเกิดขึ้นพร้อมกันภายในเมล็ดกาแฟ (Shan et al., 2016)

**ตารางที่ 2.1** ข้อดี และข้อเสียของการผลิตเมล็ดกาแฟสารถ้วยกระบวนการแบบแห้ง และแบบเปียก

วิธีการผลิต	ข้อดี	ข้อเสีย
แบบแห้ง	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. เป็นวิธีที่ง่าย และต้นทุนต่ำ</li> <li>2. ผลกาแฟไม่จำเป็นต้องสุกสม่ำเสมอ</li> <li>3. ไม่ต้องใช้ความรู้ความชำนาญมาก</li> <li>4. เหมาะสมกับพื้นที่ที่มีน้ำจำกัด</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. เมล็ดกาแฟดิบที่ได้มีคุณภาพต่ำกว่าวิธีเปียก</li> <li>2. ใช้เวลาในการตากนาน</li> </ol>
แบบเปียก	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. ใช้เวลาและพื้นที่ในการตากน้อยกว่าวิธีแห้ง</li> <li>2. มีเมล็ดแตกหักน้อยกว่าในขั้นตอนการคั่ว</li> <li>3. เมล็ดกาแฟมีคุณภาพดีกว่าวิธีแห้ง</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. ต้นทุนสูง ต้องใช้ความรู้ไม่สามารถทำได้กับผลกาแฟดิบ</li> <li>2. ต้องใช้น้ำปริมาณมาก</li> </ol>

ที่มา: พงษ์ศักดิ์ อังกสิทธิ์ และบัณฑิต วาฤทธิ์ (2542)

ขั้นตอนการคั่วกาแฟนั้น มีระยะที่สำคัญอยู่หลายระยะเรียกว่า โพรไฟล์การคั่วเพื่อที่จะระบุอุณหภูมิและระยะเวลาการคั่วได้อย่างแม่นยำและทำซ้ำใหม่ได้ โดยระยะการคั่วจะแบ่งออกเป็น 5 ระยะดังนี้

#### ระยะที่ 1 ทำให้แห้ง (Drying)

โดยทั่วไปกาแฟสารถจะมีความชื้นอยู่ประมาณร้อยละ 7-11 ซึ่งกระจายอยู่ทั่ว ๆ โครงสร้างเมล็ดกาแฟจะไม่เปลี่ยนเป็นสีน้ำตาลหากยังมีความชื้นอยู่ เมื่อนำเมล็ดกาแฟไปคั่ว กาแฟจะใช้เวลาสักพักเพื่อถ่ายเทความร้อนเข้าไปก่อนที่น้ำในเมล็ดจะระเหยออกมา ดังนั้นขั้นตอนนี้ถ้าต้องการทำให้กาแฟแห้งจะต้องใช้พลังงานและระยะเวลาที่ค่อนข้างมาก เพราะช่วงเวลาที่แรก ๆ จะยังไม่ค่อยเห็นการเปลี่ยนแปลงใด ๆ (Hoffmann, 2018)

#### ระยะที่ 2 เปลี่ยนเป็นสีเหลือง (Yellowing)

หลังจากความชื้นได้ระเหยออกจากเมล็ดแล้ว กาแฟก็เริ่มเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาล ในขั้นตอนนี้เมล็ดกาแฟยังมีความหนาแน่นสูงและมีกลิ่นคล้ายขนมปัง จากนั้นไม่นานเมล็ดกาแฟจะเริ่มพองและ กากกาแฟ (Chaff) หลุดออก โดยกากกาแฟจะถูกพัดออกไปจากเครื่องคั่วโดยอากาศที่หมุนเวียนผ่านเครื่องเพื่อป้องกันไฟไหม้ โดยสองขั้นตอนแรกนี้สำคัญมาก เพราะหากเมล็ดกาแฟไม่แห้งดีนักก็จะคั่วออกมาได้ไม่สม่ำเสมอและกาแฟจะมีรสชาติที่ไม่น่าประทับใจ มีรสชาติขมจากด้านนอก รสชาติเปรี้ยว

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

และหมิ่นเขียวมาจากด้านใน ซึ่งแม้จะปรับการคั่วให้ช้าลงก็ไม่สามารถแก้ไขได้ เพราะระดับการคั่วที่แตกต่างกัน (Hoffmann, 2018)

### ระยะที่ 3 เสียงแตกครั้งแรก (First crack)

เมื่อเกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาล (Browning reaction) มีการสะสมของแก๊สและไอน้ำก่อตัวขึ้นจนมีแรงดันในเมล็ดกาแฟ เมล็ดกาแฟจะแตกออกทำให้เกิดเสียงและขนาดของเมล็ดก็ขยายเพิ่มขึ้นเกือบเท่าตัว จุดนี้เป็นต้นไปรสชาติของกาแฟจะเริ่มก่อตัว ส่วนอุณหภูมิในการคั่วจะมีอิทธิพลอย่างมากสำหรับการคั่ว ถ้าหากใช้ความร้อนไม่เพียงพอจะทำให้รสชาติกาแฟแย่งได้ (Hoffmann, 2018)

### ระยะที่ 4 การพัฒนารสชาติ

หลังจากระยะที่ 3 ผิวของเมล็ดบางส่วนจะมีความเรียบมากขึ้น โดยระยะนี้เป็นตัวกำหนดสีและระดับการคั่ว โดยระดับการคั่วบ่งบอกคุณสมบัติของความเป็นกรดและความขม เนื่องจากความเป็นกรดของเมล็ดกาแฟสลายอย่างรวดเร็วในขณะที่ความขมเพิ่มขึ้นหากมีการคั่วต่อ (Hoffman, 2018)

### ระยะที่ 5 เสียงแตกครั้งที่สอง (Second crack)

ในระยะนี้เมล็ดกาแฟจะเกิดการแตกเป็นครั้งที่สอง แต่มีเสียงเบาและสั้นกว่าครั้งแรก น้ำมันในกาแฟจะถูกขับออกมาที่ผิวกาแฟและความเป็นกรดส่วนใหญ่ถูกสลายทำให้เกิดรสชาติใหม่ ซึ่งระยะนี้ไม่ได้ขึ้นอยู่กับชนิดของเมล็ดกาแฟที่ใช้แต่เป็นผลมาจากการไหม้ของเมล็ดกาแฟ โดยมีศัพท์เฉพาะทางที่เรียกว่า "French Roast" หรือ "Italian Rose" ซึ่งทั้งสองคำนี้หมายถึงการคั่วกาแฟแบบเข้มมากเกินไปทำให้เนื้อกาแฟมีความขมสูงและสูญเสียรสชาติของกาแฟ (Hoffmann, 2018)

### ระดับการคั่ว

ระดับการคั่วของกาแฟพิจารณาจากระดับหรือสีของกาแฟและการพัฒนารสชาติของกาแฟ โดยจะแบ่งระดับการคั่วหลัก ๆ ได้ดังแสดงในตารางที่ 2.2

#### 2.2.4 เครื่องคั่วกาแฟ

##### เครื่องคั่วกาแฟแบบถังหมุน (Drum roaster)

เครื่องคั่วกาแฟแบบนี้ ได้ถูกประดิษฐ์ขึ้น เมื่อช่วงต้นศตวรรษที่ 20 โดยเป็นเครื่องคั่วที่นิยมใช้กัน เพราะสามารถคั่วได้ด้วยความเร็วที่น้อย ดังแสดงในรูปที่ 2.2 โดยลักษณะของตัวเครื่องจะมีถังเหล็กที่หมุนบนไฟ เพื่อเคลื่อนเมล็ดกาแฟด้านในให้คั่วได้ในระดับที่สม่ำเสมอ ความพิเศษของเครื่องคั่วชนิดนี้คือสามารถควบคุมระดับแก๊สเพื่อควบคุมความร้อนของเครื่องและยังสามารถควบคุมอากาศที่หมุนเวียนผ่านตัวถังเครื่องได้ อีกทั้งยังช่วยควบคุมความเร็วในการถ่ายเทความร้อนให้ถึงเมล็ดกาแฟ ไม่ว่าจะเป็นเครื่องคั่วแบบถังหมุนมีให้เลือกหลากหลายขนาด ซึ่งขนาดใหญ่ที่สุดสามารถคั่วกาแฟได้ครั้งละ 500 กิโลกรัม (Hoffmann, 2018)

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## ตารางที่ 2.2 ระดับการคั่วเมล็ดกาแฟ

ระดับการคั่ว	คุณลักษณะ
แบบอ่อน	มีสีน้ำตาลอ่อนคล้ายอบเชย ความชื้นหนืด (body) น้อย ความเป็นกรดต่ำ และกลิ่นรสยังเกิดขึ้นไม่สมบูรณ์
แบบอ่อน - กลาง	มีสีน้ำตาลอ่อนปานกลาง ความเป็นกรดและความชื้นหนืดเพิ่มขึ้น เล็กน้อย
แบบกลาง	มีสีน้ำตาลปานกลาง มีสีน้ำตาล ความเป็นกรด และความชื้นหนืดเพิ่มขึ้น
แบบกลาง - เข้ม	มีสีน้ำตาลเข้ม เริ่มมีหยดน้ำมันเคลือบผิวเมล็ด ความเป็นกรดเริ่มลดลง และความชื้นหนืดเพิ่มขึ้น เหมาะสำหรับการทำกาแฟเอสเปรสโซ
แบบเข้ม	มีสีน้ำตาลเข้มหรือสีดำ มีหยดน้ำมันหรือน้ำมันเคลือบผิวเมล็ดทั้งเมล็ด กลิ่นกาแฟเริ่มหาย ความชื้นหนืดเพิ่มขึ้น
แบบเข้มมาก	กาแฟมีสีเข้มมากจนเป็นสีดำ มีน้ำมันเคลือบผิวทั้งหมด กลิ่นกาแฟและความชื้นหนืดค่อนข้างน้อย

ที่มา: Coffee Research Institute (2001)



รูปที่ 2.2 เครื่องคั่วแบบถังหมุน (Diaz, 2018)

### เครื่องคั่วกาแฟแบบ Tangential (Tandential roaster)

เครื่องคั่วชนิดนี้จะทำงานคล้ายกับเครื่องคั่วแบบถังหมุนแต่มีอุปกรณ์คล้ายปลั้วด้านในตัวถังคั่วเพื่อใช้กลับและผสมกาแฟให้เข้ากันระหว่างการคั่วซึ่งจะทำให้สามารถคั่วกาแฟในปริมาณมากได้อย่างมีประสิทธิภาพและเครื่องนี้ไม่ได้มีความจุมากไปกว่าเครื่องคั่วแบบถังหมุน แต่มันสามารถคั่วได้เร็วกว่า (Hoffmann, 2018)

เอกสารนี้เป็นเอกสาร **เครื่องคั่วแบบ Centrifugal (Centrifugal roaster)** ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น ลิขสิทธิ์สงวนไว้ให้ดัดแปลงเนื้อหาและตั้งอ้างอิงถึงชื่อของเอกสารฉบับนี้ที่อาจนำไปใช้

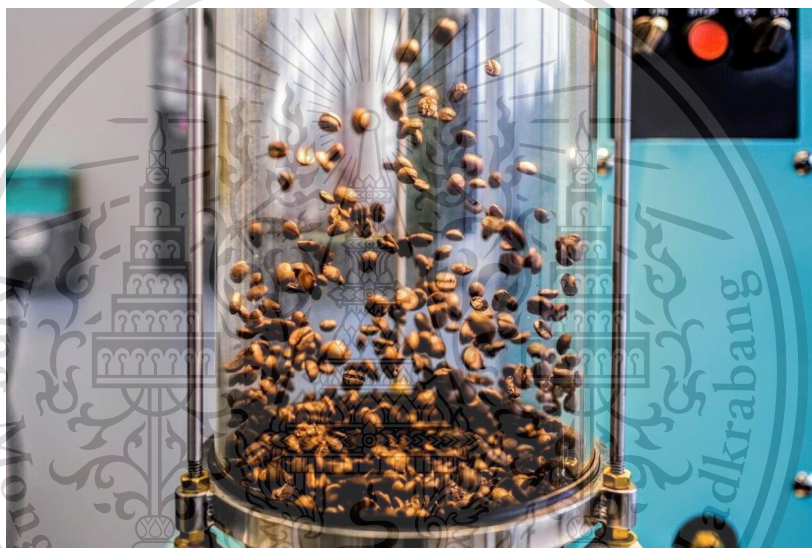
เครื่องคั่วชนิดนี้มีความสามารถในการคั่วกาแฟปริมาณมากได้อย่างรวดเร็ว โดยกาแฟจะถูกใส่ลง  
ไปในถังรูปกรวยคว่ำซึ่งจะคอยหมุนและทำให้เมล็ดกาแฟโตขึ้นมาตามขอบในขณะที่ยก คั่ว จากนั้นเมล็ด

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

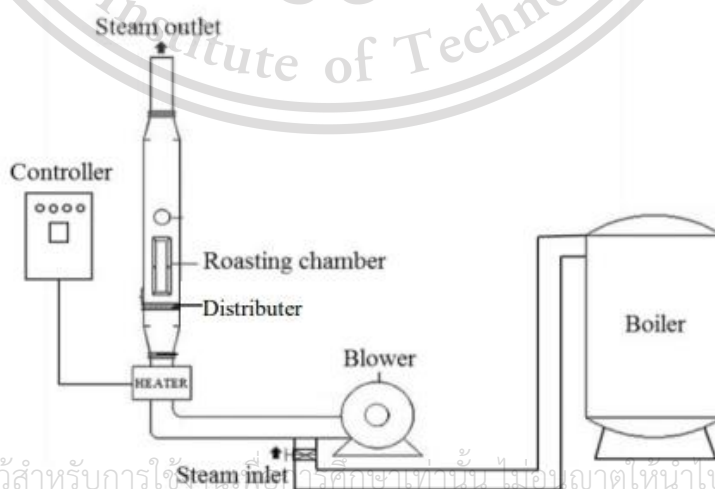
กาแฟจะตกลงไปกลางกรวยและเริ่มไต่ขึ้นมาตามขอบอีกครั้ง การคั่วแบบนี้ใช้เวลาน้อยสามารถคั่วกาแฟเสร็จได้ภายในระยะเวลา 90 วินาทีและยังช่วยลดการสูญเสียน้ำหนัก ช่วยเพิ่มปริมาณกาแฟที่สามารถสกัดได้ (Hoffmann, 2018)

### เครื่องคั่วแบบฟลูอิดไชเบต (Fluidized bed roaster)

เครื่องคั่วกาแฟแบบนี้ได้ถูกประดิษฐ์ขึ้นโดย Michael Sivetz ในช่วงปลายปีคริสต์ศักราช 1970 โดยเครื่องคั่วนี้มีหลักการพื้นฐานคือการทำให้อากาศลอยตัวอยู่ในห้องคั่วมีพฤติกรรมคล้ายของไหล (Fluidization) ดังแสดงในรูปที่ 2.3 โดยการเป่าอากาศร้อนผ่านเข้าไปในตัวห้องคั่ว ระยะเวลาในการคั่วสำหรับเครื่องนี้จะสั้นกว่าเครื่องคั่วแบบถังหมุน ซึ่งจะทำให้เมล็ดกาแฟที่ได้ขยายมากกว่า (Hoffmann, 2018) โดยแผนผังของเครื่องดังแสดงในรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.3 การลอยตัวอย่างเป็นอิสระของเมล็ดกาแฟมีพฤติกรรมคล้ายของไหล (Nocerini, 2017)



รูปที่ 2.4 เครื่องคั่วแบบฟลูอิดไชเบตโดยใช้น้ำร้อนยวดยิ่ง (Yodkaew et al., 2017)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้การศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น ผู้ใช้ต้องรับผิดชอบต่อการใช้งานนี้ รวมถึงเนื้อหาจากเอกสารหรือวีดิโอที่นำมาใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## 2.3 ปฏิกริยาเคมีที่เกิดระหว่างกระบวนการคั่ว

เมื่อนำเมล็ดกาแฟเข้าไปคั่วจะเกิดปฏิกริยาเคมีหลากหลายแบบ การคั่วจะทำให้สารประกอบบางอย่างเปลี่ยนแปลงสภาพและสร้างสารประกอบขึ้นมาใหม่ ปฏิกริยาหลักที่จะเกิดขึ้นมีดังนี้

### 2.3.1 ปฏิกริยาเมลลาร์ด (Maillard reaction)

เป็นปฏิกริยาที่สำคัญสำหรับการเปลี่ยนสีและกลิ่นของเมล็ดกาแฟ ที่อุณหภูมิ 150 - 200 °C กลุ่มคาร์บอนิลจากน้ำตาลและกลุ่มอะมิโนในโปรตีนจะทำปฏิกริยากับสารประกอบของกลี้นและรสชาติของเมล็ดกาแฟ (Coffee Research Institute, 2001) น้ำตาลรีดิทซ์จะทำปฏิกริยากับหมู่อะมิโนในโมเลกุลของแอมโมเนีย กรดอะมิโน และโปรตีนได้เป็นไกลโคซิลเอมีน (N-substituted glycosylamine) และจะเกิดปฏิกริยาต่อเนื่องจนได้สารสีน้ำตาล ขั้นตอนของปฏิกริยาเมลลาร์ดมีดังนี้

1. น้ำตาลรีดิทซ์ทั้งคีโตสและแอลโดส จะรวมตัวกับหมู่อะมิโนได้เป็นไกลโคซิลเอมีน
2. เกิดปฏิกริยาไฮเดรชันได้เป็นอิมิน (imine) และมีการเรียงตัวใหม่ซึ่งมีชื่อเรียกว่า Amadori rearrangement ได้เป็นแอลโดสเอมีน (aldoseamine) หรือคีโตสเอมีน (ketoseamine) เรียกว่า Amadori product
3. เกิดปฏิกริยา enolization ของ Amadori product ได้เป็นไดคีโตสเอมีนหรือไดอะมิโนซูการ์
4. เกิดปฏิกริยาดีไฮเดรชันต่อได้เป็นอนุพันธ์ของฟูแรน (furan)
5. อนุพันธ์ฟูแรนวงแหวนจะเกิดพอลิเมอไรซ์อย่างรวดเร็วได้เป็นสารสีน้ำตาลที่มีไนโตรเจน เป็นองค์ประกอบอยู่ด้วยและไม่ละลายน้ำ สารสีน้ำตาลนี้เรียกว่าเมลานอยดิน (Melanoidin)

ข้อเสียของปฏิกริยาเมลลาร์ดคือทำให้กรดอะมิโนไลซีน ซึ่งเป็นกรดอะมิโนจำเป็นทั้งที่อยู่ในรูปอิสระและที่เป็นองค์ประกอบในโมเลกุลของโปรตีนลดน้อยลง ดังนั้นปฏิกริยาเมลลาร์ดทำให้คุณค่าทางโภชนาการของอาหารลดลงด้วย (นิธิยา, 2553)

### 2.3.2 คาราเมลไลเซชัน (Caramelization)

เกิดช่วงอุณหภูมิ 170 - 200 °C โดยน้ำตาลในเมล็ดกาแฟจะเริ่มเกิดเป็นคาราเมลหรือเป็นสีน้ำตาลไหม้และปล่อยสารประกอบอะโรมาติกและกรดออกมา ในระหว่างการคั่วน้ำตาลซูโครสส่วนใหญ่มักจะถูกเปลี่ยนเป็นสารประกอบคาราเมล (Coffee Research Institute, 2001) ซึ่งน้ำจะถูกกำจัดออกไปจากโมเลกุลของน้ำตาลซูโครสโดยปฏิกริยาดีไฮเดรชัน สารประกอบที่เกิดขึ้นใหม่จะมีพันธะคู่และเป็นวงแหวน มีความข้นหนืด มีรสขมและมีสีเข้มขึ้น เมื่อน้ำตาลได้รับความร้อนจะสูญเสียน้ำประมาณ 5.5% โดยไม่เกิดการสลายตัวและได้สารประกอบใหม่ คือ ไอโซแซ็กโครแซน (isosaccharose) เมื่อสารนี้ได้รับความร้อนมากขึ้นจะสูญเสียน้ำเพิ่มมากขึ้นเป็น 9% ซึ่งการสูญเสีย น้ำออกจากโมเลกุลของน้ำตาลอีก 2 โมเลกุล และเกิดการรวมตัวกันของน้ำตาล 2 โมเลกุลเป็นดีไฮโดรซูการ์ (dehydro-sugar) สารใหม่ที่เกิดขึ้นเรียกว่า คาราเมลแลน (caramelan) สารนี้จะละลายได้ในน้ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่สามารถนำเนื้อหาไปใช้  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น หากมีข้อสงสัยหรือต้องการข้อมูลเพิ่มเติม กรุณาติดต่อฝ่ายวิชาการ

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

และไดอะไลซิสได้ เมื่อได้รับความร้อนนานขึ้นอีกจะสูญเสียน้ำเป็น 13.6% และได้สารใหม่เรียกว่า คาราเมลเลน (นิธิยา, 2553)

ซึ่งสารสีที่เกิดจากปฏิกิริยาคาราเมลเซชันของน้ำตาลเพียงอย่างเดียว จะประกอบด้วยคาร์บอน ไฮโดรเจน และออกซิเจน เรียกว่า คาราเมล (caramel) เมื่อน้ำตาลอยู่ในรูปสารละลายในน้ำ การเกิดปฏิกิริยาคาราเมลเซชันจะขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของน้ำตาล pH และอุณหภูมิ เมื่อสารละลายมีความเข้มข้นสูงหรือสารละลายมีค่าพีเอชต่ำจะเริ่มมีการเปลี่ยนแปลงโดยเกิดเป็นสารประกอบประเภทน้ำตาลแอนไฮไดรด์ (sugar an hydrides) นอกจากนี้ยังมีสารประกอบอื่น ๆ อีก เช่น โคจิบิโอส (Kojibiose) โซโฟโรส (sophorose) และนิจีโรส (nigerose) อาจเกิดขึ้นด้วย (นิธิยา, 2553)

### 2.3.3 ปฏิกิริยาไพโรไลซิส (Pyrolysis reaction)

เกิดที่อุณหภูมิประมาณ 220 °C ความร้อนทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีภายในเมล็ดกาแฟ และทำให้เกิดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (carbon dioxide) ออกมา กระบวนการนี้เรียกว่า ไพโรไลซิส เมล็ดกาแฟจะเปลี่ยนสีเป็นสีน้ำตาลปานกลาง และทำให้เมล็ดกาแฟสูญเสียน้ำหนักไป 13% (Coffee Research Institute, 2001)

## 2.4 มาตรฐานเมล็ดกาแฟ

### 2.4.1 เมล็ดกาแฟโรบัสตา (มาตรฐานสินค้าเกษตร, 2561)

#### คุณลักษณะที่ต้องการ

1. ไม่มีกลิ่นผิดปกติ (off odour bean) เช่น กลิ่นเหม็นเปรี้ยว กลิ่นหมักบูด กลิ่นราหรือกลิ่นแปลกปลอม เช่น กลิ่นปุ๋ย กลิ่นสารเคมี กลิ่นดิน
2. มีสีตรงตามกระบวนการผลิตของเมล็ดกาแฟโรบัสตา ตามหัวข้อ 2.2.1 และ 2.2.2
3. มีความชื้นไม่เกินร้อยละ 12.5 ของน้ำหนักแห้ง
4. ไม่พบร่องรอยการทำลายเมล็ดกาแฟจากด้วงเมล็ดกาแฟ (coffee bean weevil)

#### ข้อบกพร่องและเกณฑ์การยอมรับ

เมล็ดกาแฟโรบัสตามีข้อบกพร่องได้ไม่เกินเกณฑ์การยอมรับที่กำหนดในตารางที่ 2.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

### ตารางที่ 2.3 ข้อบกพร่องและเกณฑ์การยอมรับของเมล็ดกาแฟโรบัสตา

ข้อบกพร่อง	เกณฑ์การยอมรับ (% โดยมวล)
เมล็ดดำ	2
เมล็ดขึ้นรา	0.5
ขึ้นเมล็ดแตก	2
เมล็ดถูกแมลงทำลาย	4
ผลกาแฟแห้ง	0.5
สิ่งแปลกปลอม	0.5
เมล็ดไม่สมบูรณ์	ไม่กำหนดเกณฑ์สูงสุด

ที่มา: มาตรฐานสินค้าเกษตร (2561)

#### 2.4.2 เมล็ดกาแฟโรบัสตาคั่ว (มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมกาแฟคั่ว, 2527)

##### คุณลักษณะที่ต้องการ

1. ลักษณะทั่วไปต้องปราศจากสิ่งที่ไม่ใช่เมล็ดกาแฟ การตรวจสอบให้ทำโดยการตรวจพินิจ
2. สีต้องมีสีตามธรรมชาติ ไม่มีการแต่งเติมด้วยสีสังเคราะห์ใด ๆ การวิเคราะห์ให้ปฏิบัติตามวิธีที่กำหนด
3. กลิ่นรสต้องมีกลิ่นรสตามธรรมชาติของกาแฟคั่ว ไม่มีการปรุงแต่งกลิ่นรสด้วยวัตถุอื่นใด เมื่อตรวจสอบโดยวิธีให้คะแนนแล้วต้องได้คะแนนเฉลี่ยไม่น้อยกว่า 6 คะแนน
4. เมล็ดหักกาแฟคั่วชนิดเมล็ดยอมให้มีเมล็ดหักได้ไม่เกินร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก
5. คุณลักษณะทางเคมี ให้เป็นไปตามตารางที่ 2.4

#### ตารางที่ 2.4 ลักษณะทางเคมีของเมล็ดกาแฟโรบัสตาคั่ว

รายการที่	คุณลักษณะ	เกณฑ์ที่กำหนด
1	ความชื้นร้อยละ	5
2	น้ำตาลคำนวณเป็นน้ำตาลอินเวิร์ดไม่เกินร้อยละ	1.5
3	เถ้าทั้งหมดร้อยละของน้ำหนักแห้ง	3 – 6
4	สารที่ละลายน้ำร้อยละของน้ำหนักแห้ง	25 – 32
5	คาเฟอีนไม่น้อยกว่าร้อยละของน้ำหนัก	1
6	สารที่สกัดได้ด้วยปิโตรเลียมอีเทอร์ร้อยละของน้ำหนักแห้ง	8 - 20

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้เฉพาะในเพื่อการวิจัยเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้เพื่อการค้า  
 ที่มา: มาตรฐานสินค้าเกษตร (2561)

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## 2.5 ระบบสี (Color space)

คำว่า สี ตามพจนานุกรมฉบับราชบัณฑิตยสถาน หมายถึง ลักษณะของแสง ที่ปรากฏแก่ สายตา เราให้เห็นเป็น สีขาว ดำ แดง เขียว หรือการสะท้อนของแสงมาสู่ตามนุษย์ในบรรดาลักษณะปรากฏต่าง ๆ สีเป็นสมบัติที่สามารถบ่งชี้คุณภาพของผลิตภัณฑ์ในเชิงกายภาพ เคมีและประสาทสัมผัส (สั๊กมน เทพหัสดิน, 2555) การรับรู้สีด้วยตาของมนุษย์สามารถอธิบายได้ด้วยพารามิเตอร์ 3 ตัว ซึ่งเรียกว่าค่า tristimulus โดยทั่วไปจะแบ่งระบบสีออกตามวัตถุประสงค์การใช้งานเป็นกลุ่มใหญ่ได้ 3 ประเภท ได้แก่ เพื่อใช้กับอุปกรณ์แสดงผล เพื่ออธิบายการรับรู้สีของมนุษย์ และเพื่อใช้กับอุปกรณ์บางชนิดเพื่อช่วยในการเลือกสีของมนุษย์ (Zheng, 2008)

### 2.5.1 ระบบเพื่อใช้กับอุปกรณ์แสดงผล

ระบบเพื่อใช้กับอุปกรณ์แสดงผลถูกนำมาใช้สำหรับกระบวนการของอุปกรณ์การแสดงผลต่าง ๆ เนื่องจากเป็นระบบที่มีความแตกต่างของสีน้อยจึงเป็นที่นิยมใช้ในการประเมินการเปลี่ยนสีของผลิตภัณฑ์อาหารระหว่างการแปรรูปโดยระบบที่นิยมใช้มากที่สุดในการแสดงผล ได้แก่ ระบบ RGB ซึ่งเป็นระบบที่ถูกนำไปใช้ในกล้องถ่ายภาพและการแสดงผลผ่านจอแสดงผล อีกสองระบบที่นิยมนำมาใช้คือระบบ YIQ และระบบ CMYK แต่ไม่นิยมการใช้สำหรับการวัดสีในอุตสาหกรรมอาหาร (Zheng, 2008)

### 2.5.2 ระบบเพื่ออธิบายการรับรู้สีของมนุษย์

ระบบนี้จะสอดคล้องกับแนวความคิดเรื่อง tint shade และ tone ซึ่งกำหนดโดยศิลปิน และอยู่บนพื้นฐานตามลักษณะธรรมชาติของสี โดยทั่วไประบบประเภทนี้มักใช้ค่าสีเท่ากับค่าความอิ่มตัวของสี Hue-Saturation (HS) เป็นหลัก สีแท้ (Hue;  $h^*$ ) คือ ลักษณะของการรับรู้สี เพื่อตัดสินใจว่าเป็นสีอะไร (ASTM: E-284, 2013) อาทิ สีแดง สีเหลือง สีเขียว และ สีน้ำเงิน หรือการผสมกันของสี (Zheng, 2008) ความอิ่มตัวของสี (Saturation หรือ Chroma;  $C^*$ ) คือ การมองที่ช่วยในการตัดสินใจจากสัดส่วนของสีบริสุทธิ์ (ASTM: E-284, 2013) ระบบสี HS ไม่ไวต่อการเปลี่ยนแปลงของสีที่แตกต่างกันไม่มากจึงไม่เหมาะที่จะใช้ในการประเมินการเปลี่ยนสีของผลิตภัณฑ์ระหว่างกระบวนการ (Zheng, 2008)

### 2.5.3 ระบบเพื่อใช้กับอุปกรณ์

ระบบจะใช้ในอุปกรณ์ตรวจวัดสี โดยระบบสีสำหรับอุปกรณ์วัดหลายระบบมีการกำหนดค่ามาตรฐานจาก Commission International d'Eclairage (CIE) เช่น ระบบ CIEXYZ แต่ในระบบนี้ไม่มีตัวแทนของการไล่โทนสีในวัตถุจึงมีการพัฒนาระบบ CIE 1976 ( $L^*a^*b^*$ ) หรือที่เรียกว่า CIELAB และ CIE 1976 ( $L^*u^*v^*$ ) หรือที่เรียกว่า CIELUV ซึ่งใช้การแปลงค่าแบบไม่เป็นเชิงเส้นของระบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำไปเผยแพร่บนเว็บไซต์หรือสื่ออื่นโดยไม่ได้รับอนุญาต  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีเหตุดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

CIEXYZ และเป็นระบบที่มีการนำไปใช้ในอุปกรณ์การวัดสีต่าง ๆ ในการวัดสีของอาหารระบบ CIELAB เป็นระบบที่นิยมนำมาใช้งาน (Wu and Sun, 2013)

## 2.6 การแปลงระบบสี

จากข้อมูลข้างต้นคณะผู้วิจัยได้เลือกใช้แหล่งกำเนิดแสง  $D_{65}$  และ  $10^\circ$  standard observer ซึ่งสามารถแปลงค่าสีเป็นระบบสีต่าง ๆ ได้แก่ XYZ, CIELAB, CIELCh และแปลงค่าสีโดยใช้สมการทดสอบเบื้องต้นในการแปลงเป็นค่าระบบ Astron number ได้โดยใช้สมการต่าง ๆ ดังนี้ R, G และ B จะมีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1

การแปลงค่าจากระบบ RGB เป็น CIEXYZ (Sun, 2008)

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.4124564 & 0.3575761 & 0.1804375 \\ 0.2126729 & 0.7151522 & 0.0721750 \\ 0.0193339 & 0.1191920 & 0.9503041 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

การแปลงค่าจากระบบ CIEXYZ เป็น Hunter L, a, b (Jha, 2010)

$$L = 100 \sqrt{\frac{Y}{Y_n}} \quad (2.2)$$

$$a = K_a \left( \frac{X/X_n - Y/Y_n}{\sqrt{Y/Y_n}} \right) \quad (2.3)$$

$$b = K_b \left( \frac{Y/Y_n - Z/Z_n}{\sqrt{Y/Y_n}} \right) \quad (2.4)$$

โดย  $Y_n=100$ ,  $X_n=94.83$ ,  $Z_n=107.38$ ,  $K_a=172.10$  และ  $K_b=66.70$

การแปลงค่าจากระบบ CIEXYZ เป็น CIELAB (ASTM D2244, 2015)

$$L^* = 116 \times \sqrt[3]{Y/Y_n} - 16 \quad \text{เมื่อ } Y/Y_n > 0.008856 \quad (2.5)$$

$$L^* = 903.3 \times \left( \frac{Y}{Y_n} \right) \quad \text{เมื่อ } Y/Y_n \leq 0.008856 \quad (2.6)$$

$$a^* = 500 \times \left[ f\left(\frac{X}{X_n}\right) - f\left(\frac{Y}{Y_n}\right) \right] \quad (2.7)$$

$$b^* = 200 \times \left[ f\left(\frac{Y}{Y_n}\right) - f\left(\frac{Z}{Z_n}\right) \right] \quad (2.8)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้นำไปดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

$$f\left(\frac{Y}{Y_n}\right) = \begin{cases} \sqrt[3]{Y/Y_n} & ; Y/Y_n > 0.008856 \\ 7.87(Y/Y_n) + \frac{16}{116} & ; Y/Y_n \leq 0.008856 \end{cases}$$

$$f\left(\frac{Z}{Z_n}\right) = \begin{cases} \sqrt[3]{Z/Z_n} & ; Z/Z_n > 0.008856 \\ 7.87(Z/Z_n) + \frac{16}{116} & ; Z/Z_n \leq 0.008856 \end{cases}$$

$$Y_n = 100, X_n = 94.83 \text{ และ } Z_n = 107.38$$

การแปลง CIELAB เป็น CIELCh (ASTM D2244, 2015)

$$C^* = \sqrt{(a^*)^2 + (b^*)^2} \quad (2.9)$$

$$h^* = \tan^{-1}(b^*/a^*) \quad (2.10)$$

ความแตกต่างของสี (ASTM D2244, 2015)

$$\Delta E^* = \sqrt{\Delta L^{*2} + \Delta a^{*2} + \Delta b^{*2}} \quad (2.11)$$

$$\Delta H^* = \sqrt{\Delta E^{*2} - \Delta L^{*2} + \Delta C^{*2}} \quad (2.12)$$

$$\Delta L^* = L^*_{\text{ตัวอย่าง}} - L^*_{\text{มาตรฐาน}} \quad (2.13)$$

$$\Delta C^* = C^*_{\text{ตัวอย่าง}} - C^*_{\text{มาตรฐาน}} \quad (2.14)$$

$$\Delta a^* = a^*_{\text{ตัวอย่าง}} - a^*_{\text{มาตรฐาน}} \quad (2.15)$$

$$\Delta b^* = b^*_{\text{ตัวอย่าง}} - b^*_{\text{มาตรฐาน}} \quad (2.16)$$

การแปลง CIELAB เป็น Agron number (Leme et al., 2015)

$$\text{Agron} = \text{avg}(7.602 + (L^* \times a^* \times b^* \times 1.237)) \quad (2.17)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## 2.7 ขนาด (Size)

### 2.7.1 ขนาด

ขนาดเป็นลักษณะในการกำหนดสมบัติทางกายภาพในการวิเคราะห์ขนาดมีความจำเป็นสำหรับการปรับแต่งกระบวนการ สมบัติ และคุณภาพของผลิตภัณฑ์ หลักการวิเคราะห์ขนาดคือ การวัดขนาดอนุภาคและวัดเส้นผ่านศูนย์กลางผลลัพธ์ที่ได้จะแสดงให้เห็นถึงการกระจายตัวของอนุภาค ซึ่งส่งผลต่อความสม่ำเสมอของอนุภาคซึ่งมีผลสอดคล้องกับสมบัติทางกายภาพอื่น ๆ (Neal and Russ, 2012) ขนาดสามารถบอกได้ในพารามิเตอร์ต่าง ๆ ได้แก่ ความยาวแกนหลัก (Major axis) ความยาวแกนรอง (Minor axis) พื้นที่ภาพฉาย (Projected Area), Equivalent Diameter และ Feret Diameter

## 2.8 รูปร่าง (Shape)

### 2.8.1 แฟกเตอร์รูปร่าง (Shape Factor)

ในการวัดรูปร่างเนื่องจากไม่สามารถวัดออกมาเป็นรูปทรงได้จึงต้องใช้การคำนวณจากค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องเพื่อบ่งบอกถึงความเป็นรูปร่าง โดยสามารถวัดด้วยเทคนิคต่าง ๆ ได้หลายวิธีเช่น

1. เทคนิควัดจากภาพฉาย (plane of projection) การเปลี่ยนภาพ 3 มิติ ให้เป็น 2 มิติ โดยการวิเคราะห์จากภาพฉายหรือที่ถ่ายออกมาจากวัตถุอยู่ในรูปของภาพ 2 มิติ เพื่อทำการวัดค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้อง
2. เทคนิคการวัดจากภาพ 3 มิติ (Stereo vision) เป็นเทคนิคที่ใช้กล้องส่องจากมุมมองที่แตกต่างกันในการรับภาพและพิจารณาความสอดคล้องกันจากข้อมูล 3 มิติ มาถอดข้อมูลออกเป็นค่าพารามิเตอร์ เทคนิคนี้เก็บข้อมูลได้อย่างรวดเร็ว

### ตารางที่ 2.5 แฟกเตอร์รูปร่าง

Parameter	Calculation	Parameter	Calculation
Formfactor	$\frac{4\pi \cdot Area}{Perimeter^2}$	Extent	$\frac{Area}{Bounding \ Box \ Area}$
Roundness	$\frac{4 \cdot Area}{\pi \cdot MaxDiameter^2}$	Fractal Dimension	$\lim_{\epsilon \rightarrow 0} \frac{\log N(\epsilon)}{\log \frac{1}{\epsilon}}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการ Major เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัด Minor นี้ออก และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

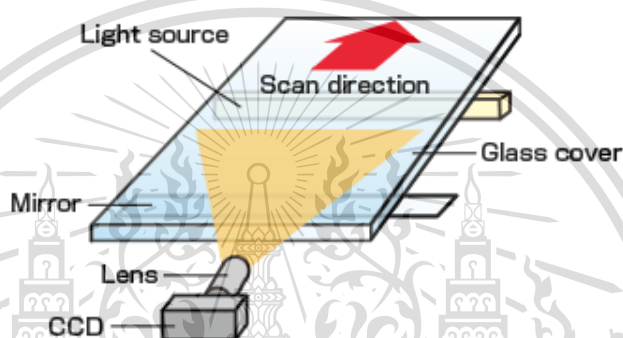
This material is intended for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## 2.9 เครื่องกราดภาพ (Scanner)

### 2.9.1 Charge Coupled Device (CCD)

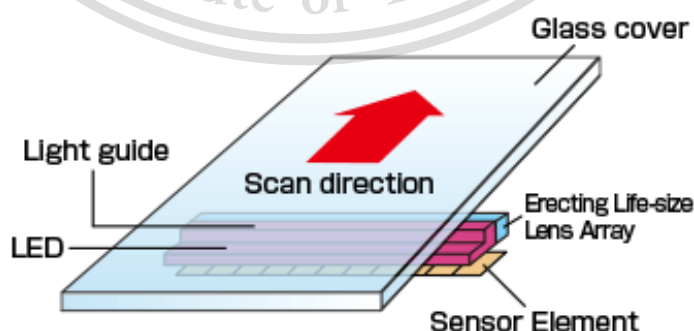
เทคโนโลยี CCD หรือ Charged-coupled device ใช้หัวอ่านที่ไวต่อการรับแสงและสามารถแปลงเป็นสัญญาณไฟฟ้า เครื่องกราดภาพส่วนใหญ่ใช้เซนเซอร์แบบ CCD จึงทำให้สามารถสแกนวัตถุที่มีความลึกหรือวัตถุ 3 มิติได้ หลักการทำงานคือการส่องแสงไปที่วัตถุที่เมื่อแสงสะท้อนกับวัตถุและสะท้อนกลับมาจะถูกส่งผ่านไป CCD เพื่อตรวจวัดความเข้มข้นของแสงที่สะท้อนกลับออกมาจากวัตถุ และแปลงความเข้มของแสงให้เป็นข้อมูลทางดิจิทัล เพื่อส่งผ่านไปยังคอมพิวเตอร์เพื่อประมวลภาพหรือสีอื่น ๆ ออกมา (RBS, 2020)



รูปที่ 2.5 หลักการทำงานของเครื่องกราดภาพของระบบ CCD (WHEC, 2021)

### 2.9.2 Contact Image Sensor (CIS)

เทคโนโลยี CIS หรือ Contact image sensor เป็นเซนเซอร์แบบสัมผัสภาพมีการทำงานที่ตัวรับแสง รับแสงที่สะท้อนกลับจากภาพมายังตัวเซนเซอร์โดยตรงไม่ผ่านกระจกเลนส์ ลำแสงสีขาวที่ใช้ในการสแกนจะมี 3 หลอดสีคือ สีแดง น้ำเงิน และ เขียว ระบบนี้จะมีข้อจำกัดเรื่องของการโฟกัสได้ไม่สามารถโฟกัสได้เกิน 0.2 มม. จึงไม่สามารถสแกนวัตถุที่มีความลึกหรือวัตถุ 3 มิติได้



รูปที่ 2.6 หลักการทำงานของเครื่องกราดภาพระบบ CIS (WHEC, 2021)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้เชิงพาณิชย์  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

### 2.9.3 การเปรียบเทียบระหว่างเครื่องกราดภาพระบบ CCD และ ระบบ CIS

เครื่องกราดภาพระบบทั้ง 2 ระบบนี้มีข้อดีที่แตกต่างกันโดยทั่วไป ระบบ CIS มีการบิดเบี้ยวของภาพน้อย แสงมีความสม่ำเสมอ มีขนาดกระทัดรัดและกินไฟน้อยกว่า แต่สีที่ได้ค่อนข้างเปลี่ยนไปสีจริงของวัตถุเล็กน้อย ในขณะที่ระบบ CCD มีช่วงสีกว้าง ความละเอียดภาพสูงให้ความคมชัดมากกว่า ความเร็วการกราดและอัตราส่วนการรับกวนสัญญาณสูงกว่า ให้ความเที่ยงตรงของสีดี แต่มีราคาสูงกว่าระบบ CIS (Epson, 2021)

## 2.10 การวิเคราะห์ภาพ (Image analysis)

ในปัจจุบันการประยุกต์ใช้เทคนิควิเคราะห์ภาพในการวิเคราะห์ลักษณะปรากฏของอาหารได้รับความนิยมเพิ่มขึ้น เนื่องจากสามารถตรวจวัดประเมินสี ความแตกต่างของสี และคำนวณค่าแฟกเตอร์รูปร่างและตัวบอกรูปร่างชนิดต่าง ๆ ได้สะดวกและรวดเร็วจากภาพถ่ายชิ้นวัสดุ อีกทั้งเป็นการตรวจสอบแบบไม่ทำลาย ซึ่งถือได้ว่าเป็นจุดเด่นที่สำคัญของการประยุกต์ใช้เทคนิควิเคราะห์ภาพ (สั๊กมน เทพหัสดิน, 2555)

### 2.10.1 การประมวลผลภาพ (Image processing)

การรับภาพ (Image acquisition) โดยมีองค์ประกอบพื้นฐาน 4 ประการ ได้แก่ แหล่งกำเนิดแสง กล้องถ่ายภาพ (Camera) ส่วนอุปกรณ์ (Hardware) และส่วนชุดคำสั่ง (Software) ซึ่งใช้ในการรับและการวิเคราะห์ข้อมูลตามลำดับ การเลือกองค์ประกอบพื้นฐานให้เหมาะสมมีความสำคัญเป็นอย่างมาก โดยในส่วนของแหล่งกำเนิดแสงมักใช้ตามมาตรฐาน CIE ซึ่งแหล่งกำเนิดแสงที่นิยมใช้มากที่สุดคือแหล่งกำเนิดแสง  $D_{65}$  ซึ่งให้แสงเที่ยงวัน (Average daylight) หรือเลือกตามสภาพแสงสถานที่จำหน่าย การเลือกแหล่งกำเนิดแสงที่ไม่เหมาะสมอาจทำให้เกิดความผิดพลาดในการรับรู้สีของวัตถุ ดังนั้นควรมีการสอบเทียบสีและความสว่างของแหล่งกำเนิดแสงทุกครั้งก่อนทำการวัดเพื่อลดความผิดพลาดที่อาจเกิดขึ้น การจัดวางตำแหน่งของกล้องถ่ายภาพก็มีความสำคัญโดยมักจัดให้กล้องถ่ายภาพและแหล่งกำเนิดแสงทำมุมกัน 45 องศา เพื่อให้สามารถดักแสงที่สะท้อนจากวัตถุได้ดีที่สุด นอกจากนี้อาจจัดแหล่งกำเนิดแสงเป็นวงกลมล้อมรอบวัตถุเพื่อให้เกิดการกระจายแสงที่สม่ำเสมอ ปัจจัยสำคัญอีกประการ คือ การเลือกสีของพื้นหลัง โดยทั่วไปควรเลือกพื้นหลังที่มีสีตัดกับสีของวัตถุอย่างชัดเจนเพื่อความสะดวกในการวิเคราะห์ และการถ่ายภาพควรทำในสภาพแวดล้อมปิด เพื่อหลีกเลี่ยงผลของแสงแวดล้อมและการสะท้อนแสงจากแหล่งต่าง ๆ ที่ไม่ต้องการ เมื่อได้รูปถ่ายแล้วจึงทำการแยกภาพ (Image Segmentation) (สั๊กมน เทพหัสดิน, 2555)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานในเชิงการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ผู้ใดเห็นว่าเป็นประโยชน์ในการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามเผยแพร่ต่อบุคคลอื่น และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้  
ระดับสีเทา ต่อมากำหนดค่าขีดเริ่มเปลี่ยน (Threshold) เพื่อแยกพื้นหลังออกจากวัตถุโดยใช้เทคนิค  
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

การหาขอบ (Edge detection) โดยขั้นตอนนี้จะแปลงภาพสเกลสีเทา (Gray Scale) ให้ไปเป็นภาพลักษณะฐานสอง (Binary Image) ซึ่งมีเพียงสีดำ (พื้นหลัง) และสีขาว (วัตถุ) เท่านั้น แยกวัตถุอื่นที่ไม่ต้องการออกจากวัตถุ (พื้นที่) ที่ต้องการ หลังจากกำหนดตำแหน่งพื้นที่ของวัตถุแล้ว จึงทำการวิเคราะห์ข้อมูลที่ตำแหน่งเดียวกันกับภาพสีต้นฉบับ (สั๊กมน เทพหัสดิน, 2555)

### 2.10.2 การวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากภาพ (Data analysis)

เมื่อได้ตำแหน่งของตัวอย่างที่ต้องการวิเคราะห์แล้วจึงทำการวิเคราะห์สมบัติต่าง ๆ เช่น การวิเคราะห์สี โดยเมื่อได้ตำแหน่งพื้นที่ของวัตถุที่ต้องการแล้วจะทำให้ได้ค่าสี RGB ซึ่งสามารถแปลงไปเป็นค่าในระบบสีอื่น ๆ ได้ด้วยสมการทางคณิตศาสตร์ การวิเคราะห์รูปร่างโดยการใช้ค่าแฟกเตอร์รูปร่าง (Shape factor) เส้นผ่านศูนย์กลางแกนหลักแกนรอง และเส้นรอบรูป ในการวิเคราะห์เพื่อบอกรูปร่างของวัตถุที่ตรวจวัด การวิเคราะห์ขนาดทำได้โดยการนับจำนวนพิกเซลของตำแหน่งวัตถุที่ต้องการ แล้วจึงหาค่าเฉลี่ยเพื่อให้ได้ขนาดของวัตถุ (สั๊กมน เทพหัสดิน, 2555)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## บทที่ 3

### ระเบียบวิธีวิจัย

#### 3.1 วัตถุดิบ

เมล็ดกาแฟสารพันธุ์โรบัสตา (*Coffea canephora* Pierre) ซึ่งจัดซื้อจากสหกรณ์ผู้ปลูกกาแฟจังหวัดชุมพร มีความชื้นฐานแห้งร้อยละ 13.5 โดยบรรจุใส่ถุงสุญญากาศจัดเก็บที่อุณหภูมิห้อง ( $27 \pm 2$  °C) จนกว่าจะทำการทดลอง

#### 3.2 อุปกรณ์

1. เครื่องคั่วแบบฟลูอิดไชน์เบด (Fluidized bed roaster) ด้วยอากาศร้อนและไอน้ำร้อนยวดยิ่ง
2. เครื่องคอมพิวเตอร์ (Aspire E5-473G-52B0, Acer, China)
3. เครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง (HB-120, Yamato, Japan)
4. เครื่องอบแห้งแบบลมร้อน (UM 400, Hot air oven Memmert, GmbH + Co.KG)
5. เครื่องวัดวอเตอร์แอกติวิตี (3TE, AquaLab, USA)
6. เครื่องวัดสีประเภท Colorimetric Spectrophotometer (ColorFlexEZ, Hunterlab, USA)
7. เครื่องวัดความเป็นกรด-ด่าง (C830P, pH meter, CONSORT, Belgium)
8. เครื่องบดกาแฟ (GVX2, KRUPS, USA)
9. ตะแกรงร่อนขนาด 40 mesh (Laboratory test sieve, ENDECOTTS LTD., UK)
10. กระจกบอขวด ขนาด 500 mL
11. กระดาษกรองขนาด 11  $\mu\text{m}$  (No. 1; Whatman®, Darmstadt, GmbH + Co.KG)
12. เวอร์เนียร์คาร์ลิปเปอร์แบบดิจิตอลชนิดนิยม 2 ตำแหน่ง (Mitutoyo, 500-196-20, Japan)
13. เครื่องกราดภาพ (Scanner) ระบบ CCD (Epson, Perfection V30, Indonesia)
14. โปรแกรม Microsoft Excel 365 (Microsoft, USA)
15. โปรแกรม MATLAB® and Image Processing Toolbox Release 2021a (The MathWorks, Inc., Natick, Massachusetts, United States)

#### 3.3 การศึกษาการคั่วเมล็ดกาแฟด้วยเครื่องแบบฟลูอิดไชน์เบด

เอกสารนี้เป็นเอกสารนำเมล็ดกาแฟ 500 g มาคั่วที่อุณหภูมิ 210 °C ตามกระบวนการของ Chindapan และคณะ (2019) สุ่มตัวอย่างเมล็ดกาแฟทุก ๆ 5 นาที ครั้งละ 150 g เพื่อวัดการเปลี่ยนแปลงของสมบัติต่าง ๆ

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ชั่งน้ำหนักด้วยเครื่องชั่งน้ำหนัก 4 ตำแหน่ง (HB-120, Yamato, Japan) และบรรจุใส่ถุงอลูมิเนียมแบบสุญญากาศ จัดเก็บที่อุณหภูมิห้อง ( $27 \pm 2$  °C) จนกว่าจะทำการทดลอง

### 3.4 วิธีการตรวจสอบสมบัติเมล็ดกาแฟคั่ว

#### 3.4.1 การวัดความชื้น (Moisture Content)

นำเมล็ดกาแฟตัวอย่างชั่งน้ำหนักด้วยเครื่องชั่งน้ำหนักทศนิยม 4 ตำแหน่ง (HB-120, Yamato, Japan) จากนั้นอบด้วยเครื่องอบแห้งลมร้อน (UM 400, Hot air oven Memmert, GmbH + Co.KG) ที่อุณหภูมิ 105 °C จนกระทั่งน้ำหนักคงที่นำมาชั่งน้ำหนักวิเคราะห์หาความชื้นฐานแห้งด้วยสมการ (3.1) ตามวิธีมาตรฐาน AOAC 968.11 (AOAC, 2000)

$$\text{Moisture Content (gน้ำ/เพองแห้ง)} = \frac{m_i - m_d}{m_d} \times 100\% \quad (3.1)$$

โดย  $m_i$  คือ มวลตัวอย่างก่อนอบ (g)

$m_d$  คือ มวลตัวอย่างหลังอบ (g)

#### 3.4.2 การวัดวอเตอร์แอกติวิตี (Water Activity : $a_w$ )

นำตัวอย่างวัดด้วยเครื่องวัดค่า  $a_w$  (3TE, AquaLab, USA) ที่อุณหภูมิ 25 °C โดยทำการวัดตัวอย่างซ้ำ 3 ตัวอย่าง (AOAC, 2000)

#### 3.4.3 การวัดสี (Color)

วัดค่าสีด้วยเครื่องวัดสีประเภท Colorimetric Spectrophotometer (ColorFlexEZ, Hunterlab, USA) โดยใช้แหล่งกำเนิดแสง  $D_{65}$  ที่มุม  $10^\circ$  วัดค่าสีในระบบ XYZ CIELAB และ CIELCh ทำการวัดตัวอย่างซ้ำ 3 ครั้ง

#### 3.4.4 การวัดความหนาแน่นรวม (Bulk density)

วัดความหนาแน่นรวม (Bulk density) โดยการนำเมล็ดกาแฟใส่ลงไปในภาชนะที่ทราบปริมาตรจนเต็มตามวิธีมาตรฐาน ASTM D1895-17 (ASTM, 2017) ชั่งน้ำหนักตัวอย่างด้วยเครื่องชั่งน้ำหนักทศนิยม 4 ตำแหน่ง (HB-120, Yamato, Japan) นำค่าน้ำหนักที่ได้ไปคำนวณหาค่า bulk density ( $\rho_b$ ) โดยสมการที่ (2) (Fennema, 1996)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และสิ่งอื่นใดของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำใบใช้

$$\text{Bulk density } (\rho_b) = \frac{m_s}{V_c} \quad (3.2)$$

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

โดย  $m_s$  คือ มวลรวมของเมล็ด (g)

$V_c$  คือ ปริมาตรของภาชนะบรรจุ (mL)

### 3.4.5 การวัดความเป็นกรด-ด่าง (pH)

วัดค่า pH ด้วยวิธีมาตรฐานของ AOAC 970.21 (AOAC, 2000) โดยทำการบดเมล็ดกาแฟร่อนผ่านตะแกรงขนาด 40 mesh (Laboratory test sieve, ENDECOTTS LTD., UK) จากนั้นนำตัวอย่าง 2 g ผสมกับน้ำกลั่น 100 mL ในขวดรูปชมพู่ ต้มในน้ำเดือดที่ 100 °C เป็นเวลา 10 นาที จากนั้นกรองด้วยกระดาษกรองขนาดของรูกรอง 11  $\mu\text{m}$  (No. 1; Whatman®, Darmstadt, GmbH + Co.KG) แล้วนำของเหลวที่ได้วัดค่า pH โดยใช้เครื่อง pH meter (C830P, CONSORT, Belgium)

## 3.5 การพัฒนาเครื่องวัดสีและลักษณะปรากฏเมล็ดกาแฟ

### 3.5.1 การรับภาพ (Image Acquisition)

นำเมล็ดกาแฟพันธุ์โรบัสตา (*Coffea canephora* Pierre) จำนวน 10 เมล็ด นำมาเก็บภาพด้วยเครื่องกราดภาพ (Scanner) ระบบ CCD (Couple Charge Device) (V370, Epson Inc., China) โดยวางเมล็ดกาแฟในแผ่นรองลักษณะคว่ำให้ด้านเรียบลงกับหน้าสแกน ดังรูปที่ 3.1 ตั้งค่าความละเอียดภาพ 600 dpi (Pawar and Bodkhe, 2015) และบันทึกภาพด้วยนามสกุล JPG (.jpg)



รูปที่ 3.1 ตัวอย่างการจัดเรียงเมล็ดกาแฟ

### 3.5.2 วิธีการพัฒนาเครื่องวัดสีกาแฟ

นำแผ่นสีมาตรฐาน Pantone จำนวน 100 แผ่น มาวัดสีด้วยเครื่อง Spectrophotometer และถ่ายภาพด้วยเครื่องกราดภาพ จากนั้นนำภาพที่ได้มาปรับปรุงคุณภาพ (Image Pre-Processing) ด้วยชุดคำสั่งโปรแกรม MATLAB and Image Processing Toolbox™ (2020a, The MathWorks, Inc., USA) เพื่อให้มีความแม่นยำในการตรวจวิเคราะห์มากขึ้น เช่น การกำจัดสัญญาณรบกวน ด้วยคำสั่ง `imsubtract` จากนั้นทำการแยกวัตถุออกจากพื้นหลัง (Image Segmentation) ด้วยวิธีแบบ Otsu's Thresholding Method (Otsu, 1979) จะได้ตำแหน่งของเมล็ดกาแฟที่ต้องการ โดยสีที่ได้เป็นระบบ RGB ซึ่งสามารถแปลงค่าสีที่ได้จากการวิเคราะห์ภาพเป็นระบบ XYZ, CIELAB และ CIELCh ได้ด้วยสมการทางคณิตศาสตร์ในหัวข้อ 2.6 จากนั้นนำผลที่ได้มาสร้างสมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าสีจาก

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

เครื่องกราฟและเครื่องวัดสีประเภท Colorimetric Spectrophotometer (ColorFlexEZ, Hunterlab, USA) ในค่าสีระบบ RGB, XYZ, CIELAB และ CIELCh วิเคราะห์สมการถดถอย (Regression analysis) ด้วยโปรแกรม SPSS® (IBM® SPSS® Statistics version 26.0, IBM Corporation, Armonk, New York, United States) พบว่าสมการที่ได้มีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of Determination,  $R^2$ ) ที่สูงและมีค่ารากของค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (Root Mean Square Error, RSME) ที่ต่ำ จากนั้นทดสอบความแม่นยำของสมการโดยใช้แผ่นสีมาตรฐาน Spyder Checkr 24 (SCK200, Advanced Photo Systems Limited, USA) ผลที่ได้มาประเมินความแม่นยำของสมการ

สร้างสมการแปลงค่าสีเป็นค่าสีสากลระบบ Agrtron number ซึ่งเป็นค่าสเกลสีซึ่งระดับการคั่วของกาแฟจากอ่อนจนถึงเข้มของ SCAA (Specialty Coffee Association of America) โดยนำภาพเมล็ดกาแฟที่ระดับการคั่วต่าง ๆ วิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสีระบบต่าง ๆ กับค่า Agrtron number สร้างสมการแปลงค่าสีที่มีความแม่นยำสูง จากนั้นทดสอบผลโดยการสอบเทียบโดยผู้เชี่ยวชาญที่ผ่านการอบรมรับรองจากสมาคมกาแฟพิเศษ (Specialty Coffee Association; SCA)

### 3.5.3 วิธีการพัฒนาเครื่องวัดขนาดและรูปร่างของเมล็ดกาแฟ

หลังจากทำการแยกวัตถุออกจากพื้นหลัง โดยวิธี Edge Detection ในการตรวจจับขนาดและรูปร่างของวัตถุ โดยคำนวณหาค่าแฟกเตอร์รูปร่าง (Shape Factor) ได้แก่ Formfactor, Roundness, Axial Ratio, Extent และ Fractal Dimension จากสมการในตารางที่ 2.5 ในการวิเคราะห์รูปร่างของเมล็ด จากนั้นทำการสอบเทียบเฉพาะพื้นที่ด้วยวิธีการนำกระดาษกราฟกำหนดขนาด  $1 \text{ mm}^2$  ถ่ายภาพด้วยเครื่องกราฟได้ภาพในหน่วยพิกเซล (pixel) เพื่อแปลงให้อยู่ในหน่วยพื้นฐานของพื้นที่ โดยจะวิเคราะห์จาก Area of Interest (AOI) ในการหาพารามิเตอร์ขนาด ได้แก่ ความยาวแกนหลัก (Major axis), ความยาวแกนรอง (Minor axis), พื้นที่ภาพฉาย (Projected Area), Equivalent Diameter และ Feret Diameter

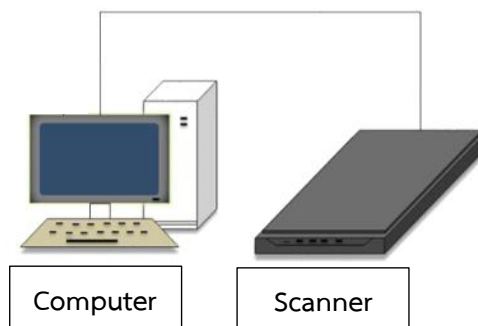
### 3.6 การวิเคราะห์ทางสถิติ

ทำการวัดซ้ำอย่างน้อย 3 ครั้ง นำผลที่ได้จากการวัดค่าสมบัติต่าง ๆ ของเมล็ดกาแฟระหว่างการคั่วที่เวลาต่าง ๆ มาวิเคราะห์ทางสถิติโดยวิธี t-Test: Two-Sample Assuming Equal Variances ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% โดยใช้โปรแกรม Microsoft Excel 365 (Microsoft, USA)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 3.2 ชุดอุปกรณ์ทดลอง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## บทที่ 4

# ผลการทดลองและการวิเคราะห์ข้อมูล

### 4.1 ผลการทดลอง

#### 4.1.1 ศึกษาการคั่วกาแฟด้วยเครื่องคั่วแบบฟลูอิดไชน์เบตโดยใช้ไอน้ำร้อนยวดยิ่งและอากาศร้อน

จากการศึกษาการคั่วโดยใช้เครื่องคั่วแบบฟลูอิดไชน์เบตโดยใช้ไอน้ำร้อนยวดยิ่งและอากาศร้อนที่อุณหภูมิ 210 °C นำมาวัดความชื้น วอเตอร์แอกติวิตี สี ความหนาแน่นรวม ความเป็นกรด-ด่าง ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างค่าความชื้นและความสว่างกับเวลาในการคั่วมีการเปลี่ยนแปลงจากเริ่มต้นเมล็ดกาแฟสดมีค่าความชื้นฐานแห้ง (dry basis) เฉลี่ย 13.50% และมีค่าความสว่างเฉลี่ย 41.24 จากนั้นค่าความชื้นและค่าความสว่างลดลงอย่างรวดเร็วตามระยะเวลาคั่ว เมื่อเวลาในการคั่วเพิ่มขึ้นอัตราการลดลงของค่าความชื้นและค่าความสว่างจะลดลงและค่อนข้างคงที่ โดยระยะเวลาคั่วจะขึ้นอยู่กับค่าความสว่างของเมล็ดกาแฟคั่วที่ต้องการโดยอ้างอิงจากงานวิจัยของ Chindapan et al., 2019 ซึ่งความสว่างอาจบ่งชี้ถึงระดับการคั่วได้

#### 4.1.2 การเปลี่ยนแปลงสมบัติของเมล็ดกาแฟระหว่างการคั่ว

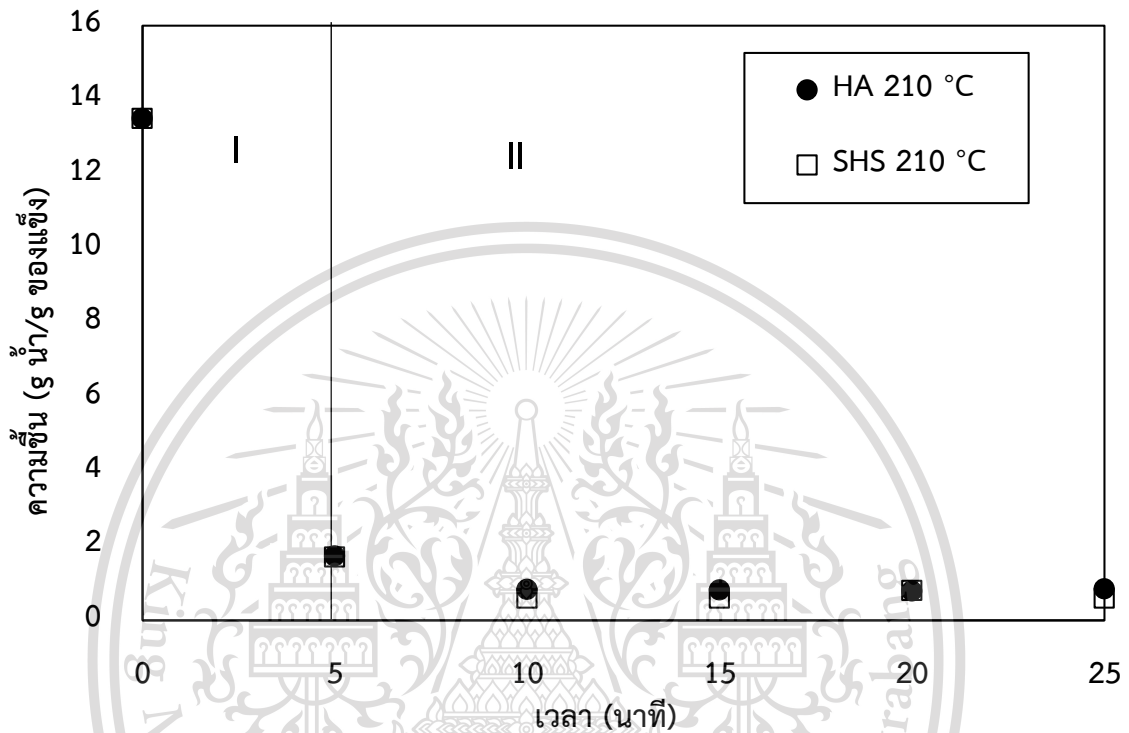
##### ผลของการวิเคราะห์ค่าความชื้น

จากการทดลองพบว่าความชื้นของเมล็ดกาแฟที่คั่วลดลงตามเวลาในระหว่างการคั่วอย่างรวดเร็วในช่วงแรก จากนั้นความชื้นจะลดลงอย่างช้า ๆ และคงที่ ดังรูปที่ 4.1 เนื่องจากน้ำภายในเมล็ดเคลื่อนที่ไปที่ผิวของกาแฟและถูกระเหยด้วยตัวกลางจึงมีค่าสูง หลังจากนั้นปริมาณน้ำของเมล็ดกาแฟเริ่มน้อยลงทำให้การเคลื่อนที่ของน้ำข้างลงจนกระทั่งเมล็ดกาแฟไหม้ในที่สุด ซึ่งการใช้ไอน้ำร้อนยวดยิ่งอุณหภูมิถึงกลางของเมล็ดมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นเร็ว เนื่องมาจากการใช้ไอน้ำร้อนยวดยิ่งมีอัตราการถ่ายเทความร้อนเร็วกว่าการใช้อากาศร้อน (Baggentoss et al., 2008) ส่งผลให้มีความชื้นที่ต่ำ บ่งบอกได้ถึงการใช้ไอน้ำร้อนยวดยิ่งทำให้เมล็ดกาแฟถึงระดับการคั่วได้เร็วกว่าการใช้อากาศร้อน

##### ผลของการวิเคราะห์ค่าวอเตอร์แอกติวิตี

จากการทดลองพบว่าค่าวอเตอร์แอกติวิตีของเมล็ดกาแฟที่คั่วมีค่าลดลงอย่างมากในช่วงแรก เพราะความดันไอของน้ำในเมล็ดกาแฟเริ่มต้นยังมีปริมาณมาก เมื่อผ่านการคั่วความดันไอน้ำน้อยลง จึงทำให้ค่า  $a_w$  ลดน้อยลง หลังจากช่วงเวลาที่ 15 เมล็ดกาแฟคั่วมีค่าวอเตอร์แอกติวิตีคงที่ อาจเนื่องมาจากการสลายตัวและสร้างโครงสร้างใหม่ขององค์ประกอบบางตัวในเมล็ดกาแฟ ส่งผลต่อความดันไอของน้ำในเมล็ดเท่าเดิม (Gloss et al., 2014; Liu and Kitts, 2011) และมีค่าลดลง

ในช่วงสุดท้ายอาจเป็นเพราะปริมาณน้ำถูกสลายตัวด้วยความร้อน เนื่องจากเมล็ดกาแฟถูกคั่วจนกระทั่งไหม้ในที่สุด โดยการใช้ไอน้ำร้อนยวดยิ่งทำให้ค่าวอเตอร์แอกติวิตีลดลงเร็วกว่าการใช้อากาศร้อนเนื่องจากมีอัตราการถ่ายเทความร้อนที่สูงกว่าส่งผลให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาต่าง ๆ และการระเหยน้ำเพิ่มสูงขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.2

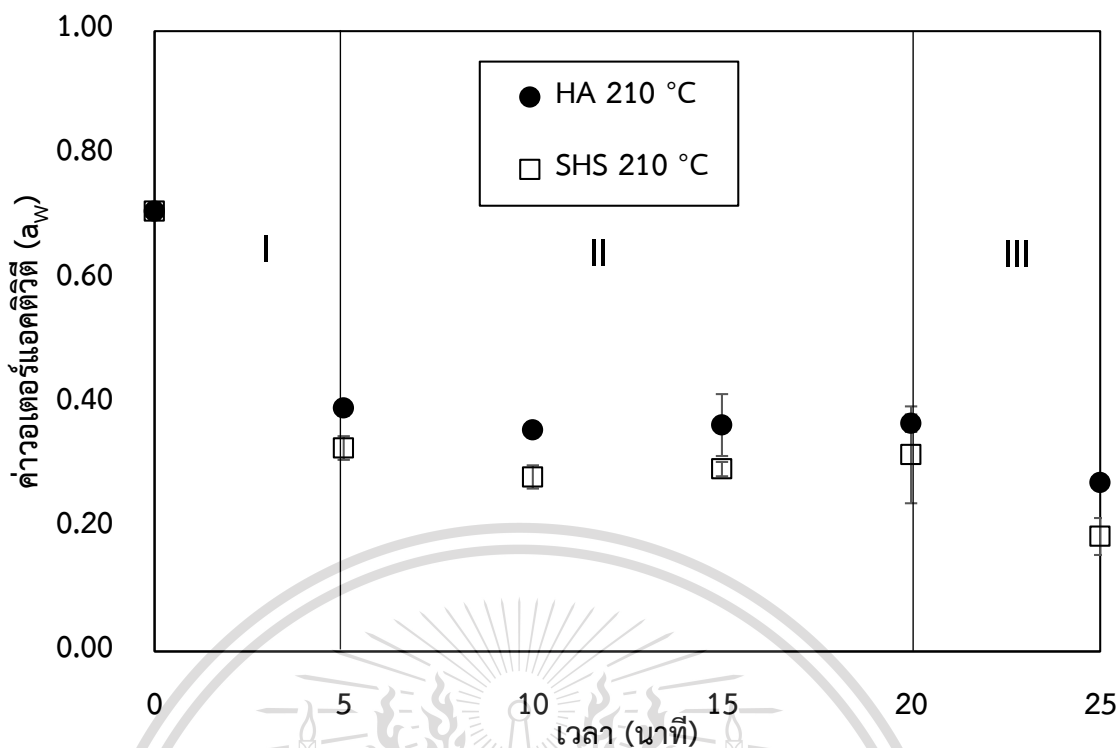


รูปที่ 4.1 การเปลี่ยนแปลงของค่าความชื้นของเมล็ดกาแฟระหว่างการคั่วที่อุณหภูมิ 210 °C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 4.2 การเปลี่ยนแปลงของค่าวอเตอร์แอกติวิตีของเมล็ดกาแฟระหว่างการคั่วที่อุณหภูมิ 210 °C

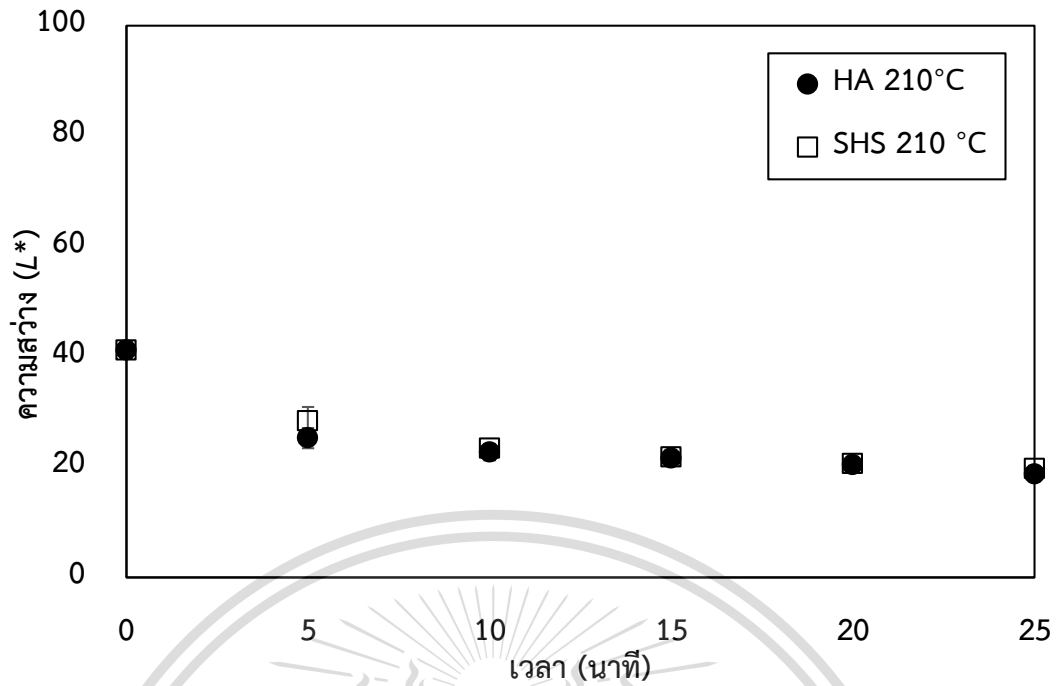
#### ผลของการวิเคราะห์ค่าสี

จากการทดลองพบว่าค่าสีมีการเปลี่ยนแปลงตามระยะเวลาในการคั่ว โดยเริ่มต้นเมล็ดกาแฟสารมีสีอมเขียว เมื่อทำการคั่วที่อุณหภูมิ 210 °C และเวลาคั่วเพิ่มขึ้นเกิดการเปลี่ยนแปลงสีในระหว่างการคั่ว ดังตารางที่ 4.1 พบว่าค่าความสว่าง ( $L^*$ ) มีค่าลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงแรก หลังจากนั้นค่า  $L^*$  ลดช้าลงอาจเป็นผลจากเวลาการคั่วที่นานทำให้เมล็ดกาแฟเกิดการคั่วไหม้ในที่สุด ดังรูปที่ 4.3 เมื่อเปรียบเทียบการใช้อากาศร้อนกับไอน้ำร้อนยวดยิ่ง พบว่าค่า  $L^*$  ไม่ต่างกันมากนักแต่เมื่อดูค่าสีแท้ (Hue;  $h^*$ ) การใช้ไอน้ำร้อนยวดยิ่งมีค่าสีแท้เป็นสีแดงต่ำกว่า ดังตารางที่ 4.2 เนื่องจากอัตราการถ่ายเทความร้อนที่สูงกว่าส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลที่เร็วกว่า โดยการเปลี่ยนแปลงของสีอาจเกิดจากปฏิกิริยาเมลลาร์ด (Saloko et al., 2019) ทั้งนี้เนื่องจากปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อปฏิกิริยาเมลลาร์ด ได้แก่ ค่าความชื้น และ  $a_w$  โดยทั่วไปพบว่าอัตราการเกิดสีน้ำตาลสูงสุดในอาหารส่วนใหญ่ที่ค่า  $a_w$  เท่ากับ 0.60 - 0.65 (สีกมน เทพหัสดิน, 2555) ซึ่งเมล็ดกาแฟสารมีค่า  $a_w$  เท่ากับ 0.71 อาจส่งผลให้เกิดอัตราของปฏิกิริยาเมลลาร์ดที่เกิดสูงขึ้น โดยการใช้ไอน้ำร้อนยวดยิ่งมีความแตกต่างของสีแท้จากการใช้อากาศร้อนอย่างมีนัยสำคัญในช่วง 15 - 25 นาที ( $p < 0.05$ )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 4.3 การเปลี่ยนแปลงของค่าความสว่างของเมล็ดกาแฟระหว่างการคั่วที่อุณหภูมิ 210 °C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ตารางที่ 4.1 ค่าสีของเมล็ดกาแฟระหว่างการคั่วด้วยเครื่องคั่วแบบฟลูอิดซ์เบดที่อุณหภูมิ 210 °C (สถิติภายใน 1 แบช ดูความสม่ำเสมอ)

เวลาในการคั่ว (นาที)	L*			a*			b*		
	HA	SHS	P-value	HA	SHS	P-value	HA	SHS	P-value
เมล็ดกาแฟสด	41.24 ± 1.43	-	-	4.95 ± 0.32	-	-	17.91 ± 1.01	-	-
5	25.25 ± 1.29	28.42 ± 2.48	0.12	6.49 ± 0.66	6.87 ± 0.37	0.23	12.1 ± 0.89	12.88 ± 2.47	0.62
10	22.70 ± 1.83	23.45 ± 0.14	0.32	5.66 ± 0.62	5.79 ± 0.32	0.67	9.21 ± 1.59	8.26 ± 0.66	0.26
15	21.64 ± 1.48	21.86 ± 0.40	0.45	5.07 ± 0.74	4.93 ± 0.25	0.68	7.62 ± 1.43	6.40 ± 0.04	0.11
20	20.45 ± 1.05	20.67 ± 1.02	0.74	4.07 ± 0.46	4.25 ± 0.65	0.66	5.33 ± 0.85	4.59 ± 0.53	0.09
25	18.69 ± 0.97	19.76 ± 0.48	0.07	2.93 ± 0.42	4.09 ± 0.63	0.04*	3.56 ± 0.73	4.36 ± 0.69	0.13

เครื่องหมาย \* หมายถึงมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ( $p \leq 0.05$ )

ตารางที่ 4.1 (ต่อ) ค่าสีของเมล็ดกาแฟระหว่างการคั่วด้วยเครื่องคั่วแบบฟลูอิดซ์เบดที่อุณหภูมิ 210 °C (สถิติภายใน 1 แบช ดูความสม่ำเสมอ)

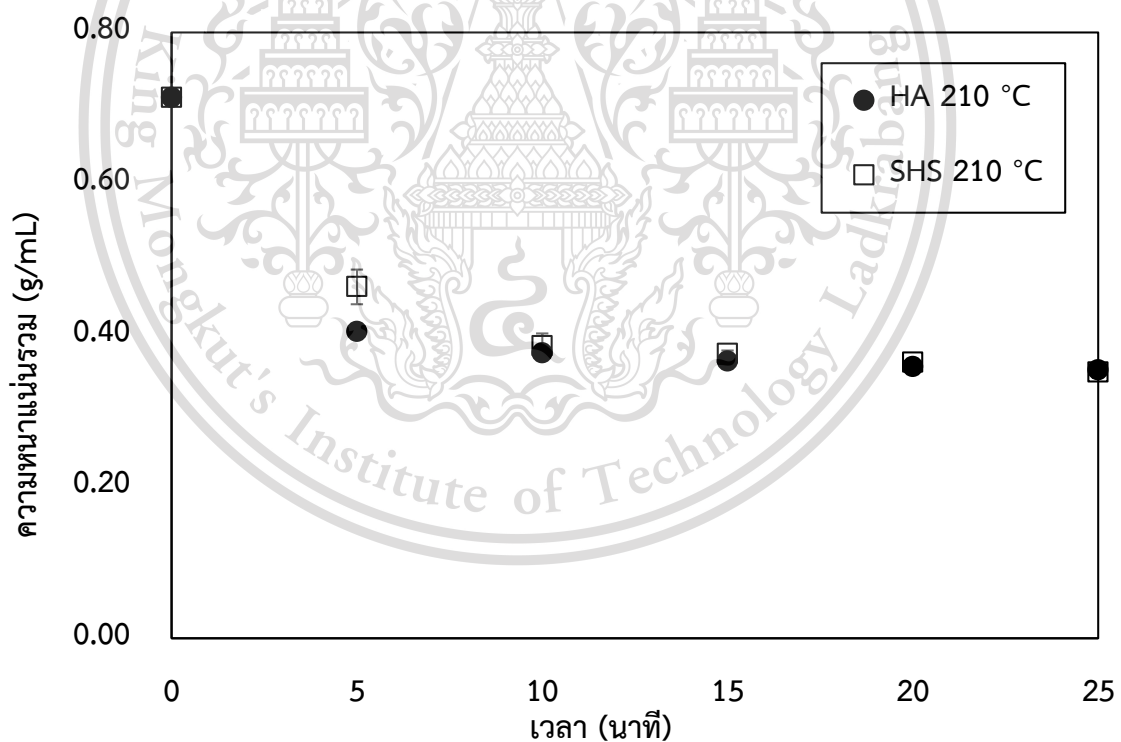
เวลาในการคั่ว (นาที)	C*			h*		
	HA	SHS	P-value	HA	SHS	P-value
เมล็ดกาแฟสด	18.58 ± 0.96	-	-	74.52 ± 1.41	-	-
5	13.74 ± 1.02	14.61 ± 2.34	0.56	61.81 ± 1.75	61.55 ± 3.51	0.90
10	10.82 ± 1.64	10.09 ± 0.69	0.39	58.24 ± 2.72	54.94 ± 1.25	0.05*
15	9.16 ± 1.58	8.08 ± 0.12	0.18	56.19 ± 2.11	52.41 ± 1.55	0.03*
20	6.71 ± 0.92	6.27 ± 0.78	0.39	52.39 ± 2.38	47.30 ± 3.08	0.05*
25	4.62 ± 0.80	5.98 ± 0.92	0.07	50.19 ± 3.19	46.77 ± 1.44	0.02*

เครื่องหมาย \* หมายถึงมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ( $p \leq 0.05$ )

### ผลของการวิเคราะห์ค่าความหนาแน่นรวม

จากผลการทดลองพบว่าความหนาแน่นของเมล็ดกาแฟคั่วที่ใช้อากาศร้อนและไอน้ำร้อนยวดยิ่งจะมีค่าลดลงตามระยะเวลาในการคั่ว เนื่องจากเกิดปฏิกิริยาไพโรไลซิสเกิดการสลายตัวขององค์ประกอบทางเคมีในเมล็ดกาแฟ (Herawati et al., 2019) โดยแบ่งช่วงการเปลี่ยนแปลงเป็นสองช่วง ช่วงแรกเกิดจากการสูญเสียความชื้นที่ปริมาณความชื้นลดลงจาก 14 % ถึง 2 % ช่วงที่สองเกิดขึ้นที่ปริมาณความชื้นลดลงจาก 2 % ถึง 0.59 % และเริ่มคงที่ ดังแสดงในรูปที่ 4.4

เมล็ดกาแฟที่ได้จากการอบแห้งโดยใช้ไอน้ำร้อนยวดยิ่งจะมีความพรุนมาก เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงสถานะของน้ำจากของเหลวกลายเป็นไอ ทำให้โครงสร้างภายในเมล็ดกาแฟถูกดันให้ขยายตัวออกเกิดการพองตัวจึงมีค่าความพรุนสูงขึ้น (สั๊กมน เทพหัสดิน, 2555) การใช้ไอน้ำร้อนยวดยิ่งทำให้ความหนาแน่นรวมลดลงเร็วกว่าการใช้อากาศร้อน จากผลการทดลองพบว่าในช่วงต้นของการคั่ว น้ำในเมล็ดกาแฟจะระเหย ทำให้ความชื้นลดลงมากถึงหลายเปอร์เซ็นต์ (Gloess et al., 2014) การระเหยของน้ำทำให้เกิดแรงดันภายในสูงและทำให้เกิดการขยายตัวของเมล็ดกาแฟ (Fadai et al., 2017) บ่งชี้ได้ถึงค่าความหนาแน่นรวมที่ลดลง ดังแสดงในรูปที่ 4.5

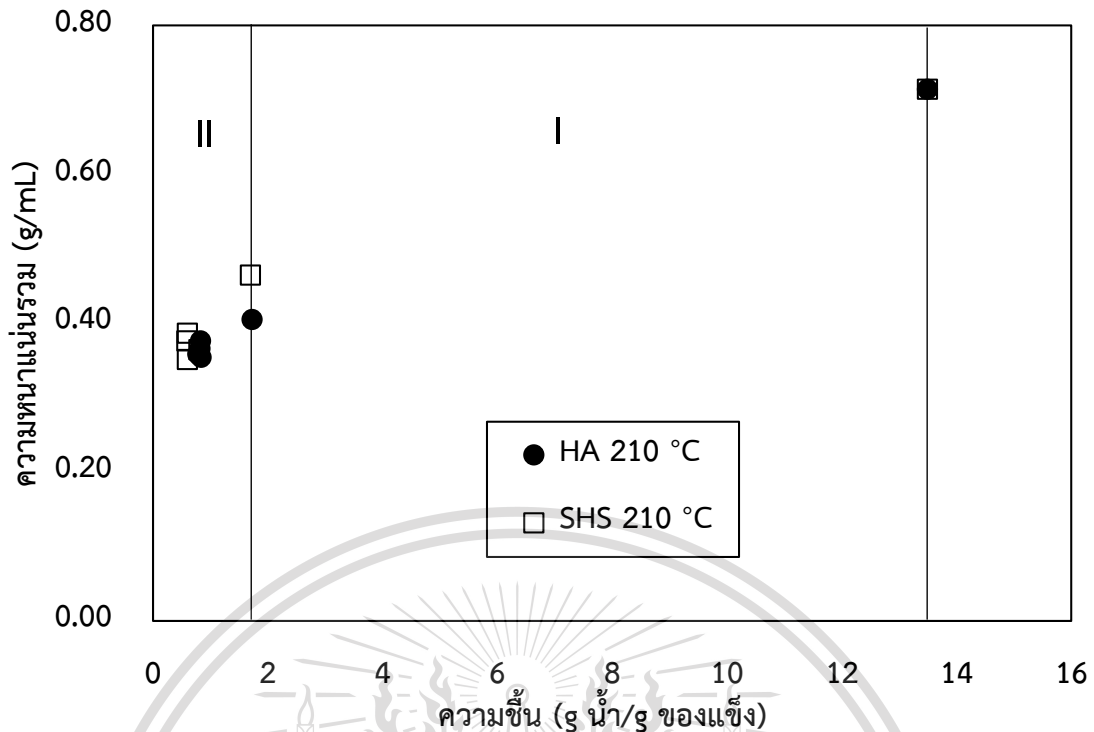


รูปที่ 4.4 การเปลี่ยนแปลงของค่าความหนาแน่นรวมของเมล็ดกาแฟระหว่างการคั่วที่อุณหภูมิ 210 °C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นรวมกับค่าความชื้นของเมล็ดกาแฟระหว่างการคั่วที่อุณหภูมิ 210 °C

#### ผลของการวิเคราะห์ค่าความเป็นกรด-ด่าง

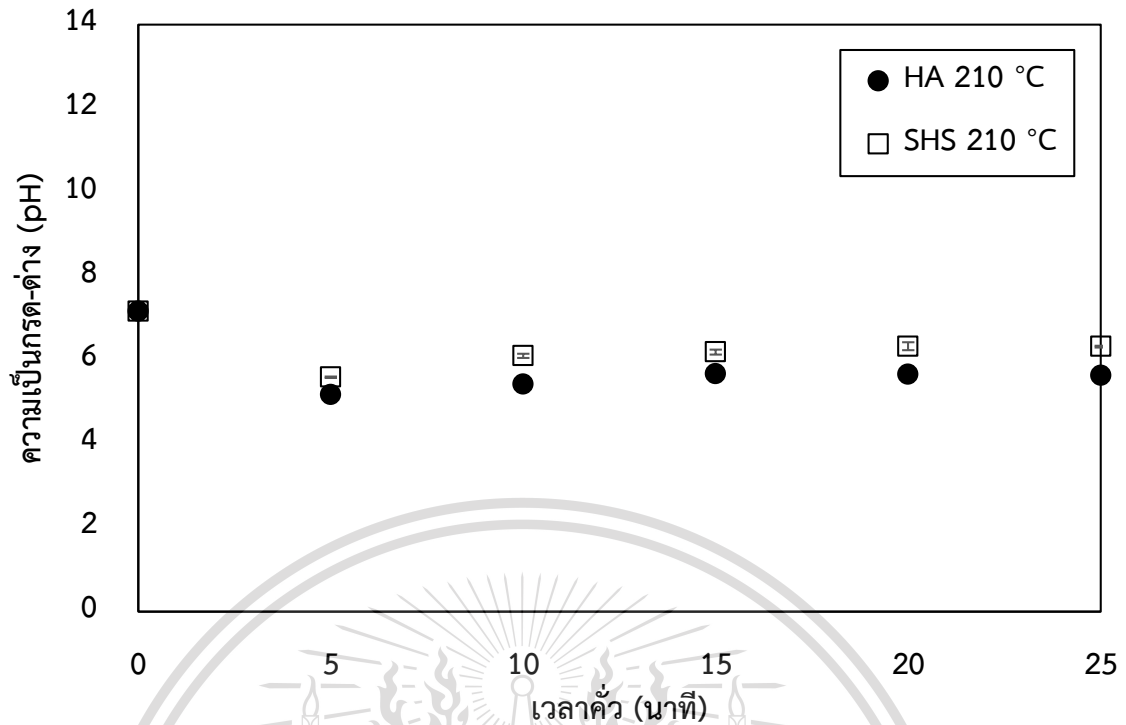
จากผลการทดลองพบว่าค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ของการใช้อากาศร้อนและไอน้ำร้อนยวดยิ่งลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงแรกเนื่องจากการสลายตัวด้วยความร้อน (Thermal degradation) เปลี่ยนน้ำตาลซูโครสเป็นกรด (Wei and Tanokura, 2015) โดยเฉพาะกรดฟอร์มิกและกรดแอสिटิกที่ส่งผลให้ค่า pH ลดลงบ่งชี้ว่ามีความเป็นกรดเพิ่มขึ้น เมื่อถึงจุดหนึ่งที่เวลาประมาณ 5 นาทีค่า pH จะเพิ่มขึ้นเนื่องจากความร้อนทำให้กรดสลายตัว เมื่อเปรียบเทียบระหว่างการคั่วโดยใช้อากาศร้อนกับการใช้ไอน้ำร้อนยวดยิ่งพบว่าค่า pH ของการใช้อากาศร้อนจะต่ำกว่า ดังแสดงในรูปที่ 4.7 บ่งบอกถึงความเป็นกรดเพิ่มมากขึ้นซึ่งอาจส่งผลต่อกลิ่นรสของกาแฟคั่ว

จากความสัมพันธ์ของ pH กับความชื้นพบว่าการคั่วโดยใช้อากาศร้อนมีค่า pH ต่ำกว่าการใช้ไอน้ำร้อนยวดยิ่ง อาจเนื่องมาจากการคั่วโดยใช้ไอน้ำร้อนยวดยิ่งส่งผลให้อัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิเมล็ดสูงขึ้นซึ่งอุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการคั่วส่งผลต่อค่าความเป็นกรด-ด่างในเมล็ดกาแฟพันธุ์โรบัสตาที่คั่วด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งจะมีค่าพีเอชต่ำ (Chindapan et., 2019) ความร้อนสะสมในกระบวนการคั่วเมล็ดกาแฟทำให้ความชื้นระเหยส่งผลให้น้ำหนักกาแฟลดลงอย่างรวดเร็วซูโครสถูกเปลี่ยนทำให้เกิดการเกาะออกของเปลือกเกิดเป็นรอยแตกกรดคลอโรจีนิก (อมร, 2002)

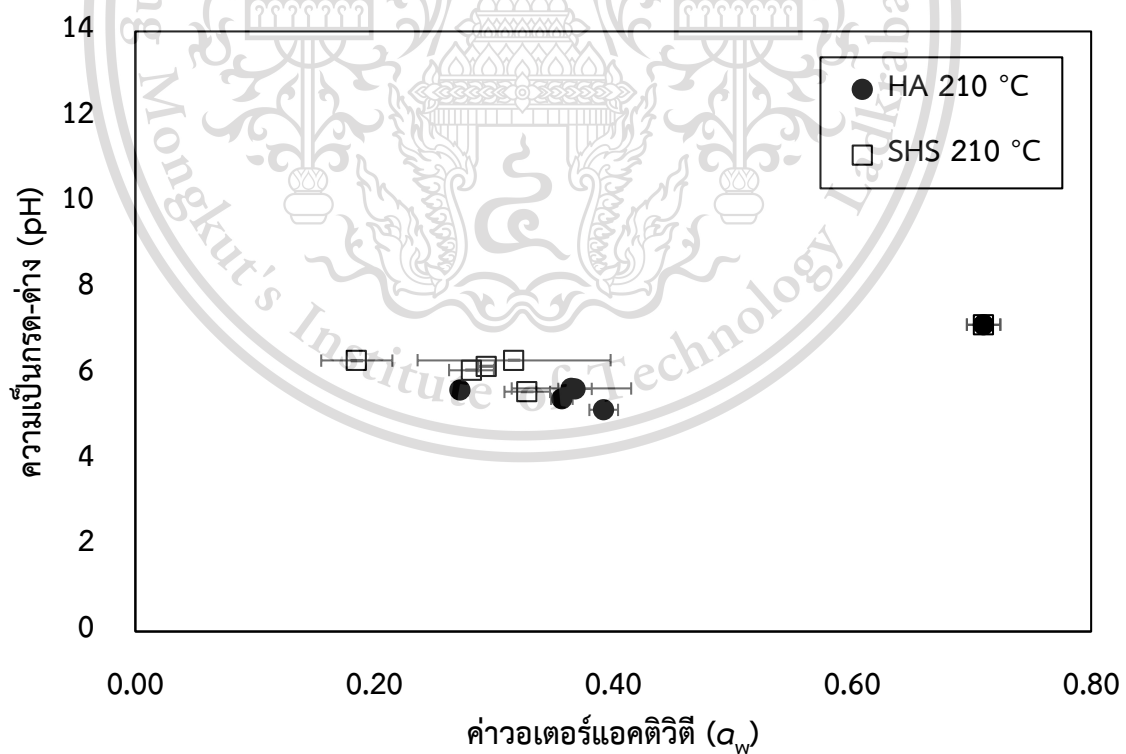
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมอนุญาตให้นำไปเผยแพร่ขึ้นด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 4.6 การเปลี่ยนแปลงของค่าความเป็นกรด-ด่างของเมล็ดกาแฟระหว่างการคั่วที่อุณหภูมิ 210 °C



รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเป็นกรด-ด่างกับค่าวอเตอร์แอกติวิตีของเมล็ดกาแฟระหว่างการคั่วที่อุณหภูมิ 210 °C

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## 4.2 ผลการพัฒนาเครื่องวัดสี ขนาดและรูปร่างของเมล็ดกาแฟ

เมื่อได้ภาพจาก Microsoft Scan โดยใช้โปรแกรม Window Fax and Scan ทำการตั้งค่าในการสแกนภาพ ดังตารางที่ 4.2

ภาพที่ทำการสแกนได้จะอยู่ที่ Libraries>>Documents>>Scanned Documents ในกรณีของ Window 7 และ Window 10

ตารางที่ 4.2 การตั้งค่าในการสแกนภาพ

	วัดสี	วัดขนาด
Source:	Flatbed	Flatbed
Color format:	Color	Color
File type:	JPG (JPG File)	JPG (JPG File)
Resolution (DPI):	600	600
Brightness:	0	0
Contrast:	0	0
Preview or scan images as separate file:	off	off

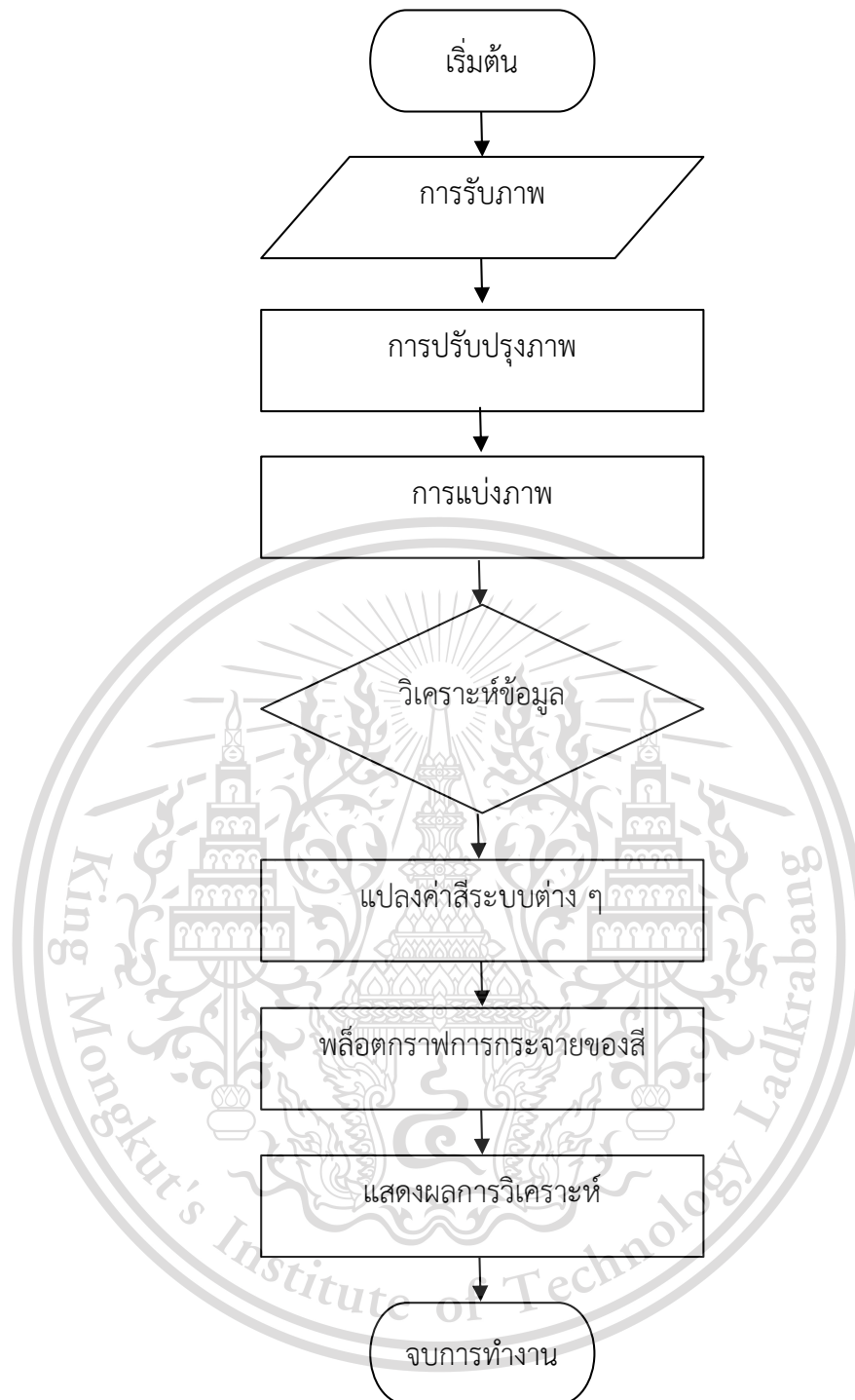
### 4.2.1 ไตอะแกรมหลักการทำงานของเครื่องวัดสี ขนาดและรูปร่างของเมล็ดกาแฟ

โปรแกรมเริ่มต้นโดยการรับภาพ (Image acquisition) รับภาพที่ได้จากเครื่องกราดภาพ (Scanner) ทำการตั้งค่าในการสแกนภาพตามตารางที่ 4.1 หลังจากนั้นคือการปรับปรุงภาพ (Image preprocessing) โดยทำการ Crop Image เพื่อให้ได้สิ่งที่ต้องการจะทำการวิเคราะห์และง่ายต่อ Image preprocessing ขั้นตอนต่อไปคือขั้นตอนการ Image segmentation เป็นการกำหนดตำแหน่งพื้นที่ของวัตถุที่ต้องการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการหาขอบเมื่อได้ภาพที่ผ่านขั้นตอนนี้แล้วก็ทำการวิเคราะห์ค่าสีระบบต่าง ๆ แสดงผลออกมาโดยใช้หน้าต่าง Graphical User Interface (GUI)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

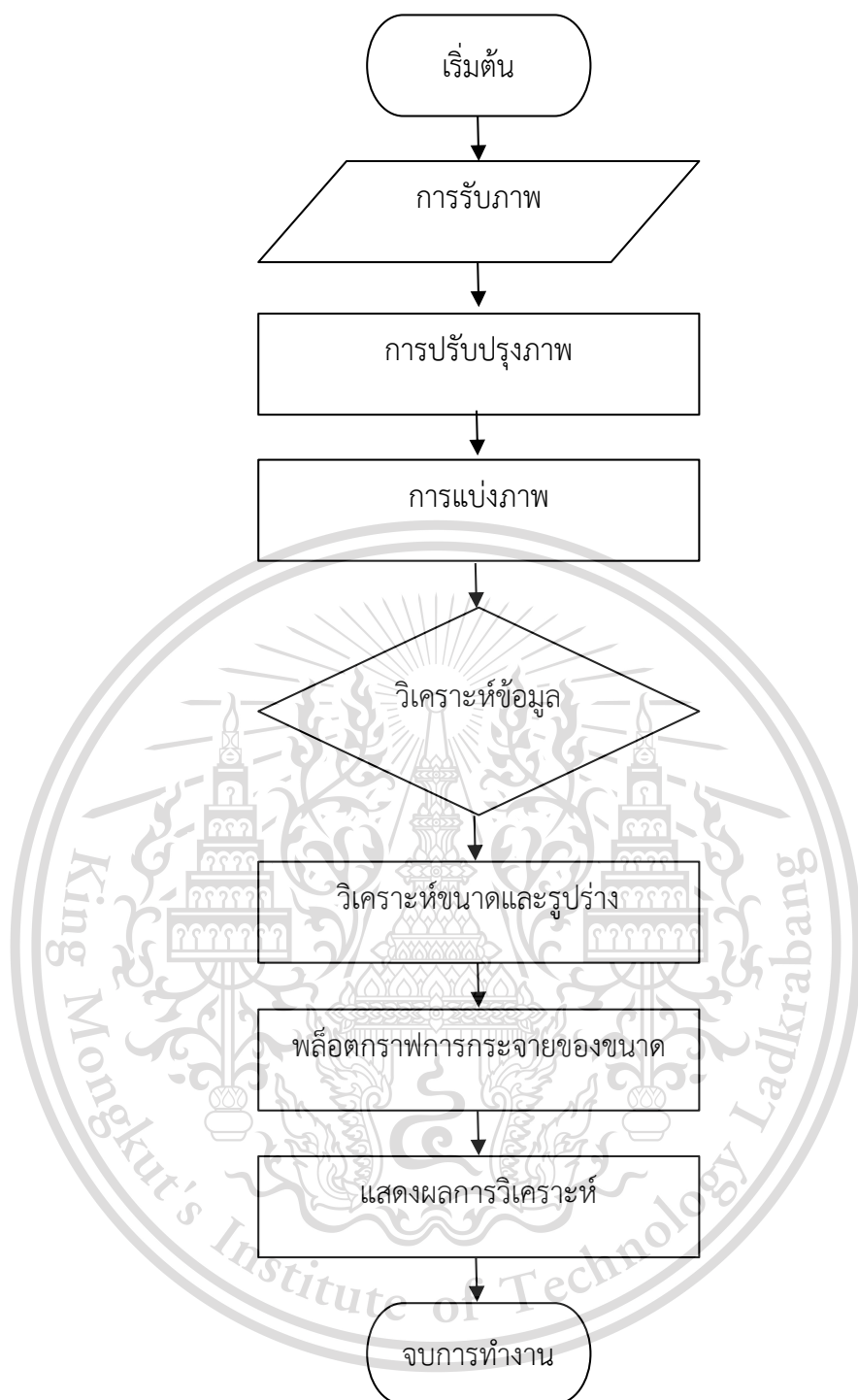


รูปที่ 4.8 ไตอะแกรมหลักการทำงานของเครื่องวัดสี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 4.9 ไตอะแกรมหลักการทำงานของเครื่องวัดขนาดและรูปร่าง

โปรแกรมเริ่มต้นโดยการรับภาพ(Image acquisition) ที่ได้จากเครื่องกราดภาพ (Scanner) โดยตั้งค่าในการสแกนภาพตามตารางที่ 4.2 หลังจากนั้นคือการปรับปรุงภาพ (Image preprocessing) โดยทำการ Crop Image เพื่อให้ได้สิ่งที่เราต้องการจะทำการวิเคราะห์และง่ายต่อกระบวนการ ขั้นตอนต่อไปคือขั้นตอนการ Image segmentation เป็นการกำหนดตำแหน่งพื้นที่ของวัตถุที่ต้องการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการหาขอบเมื่อได้ภาพที่ผ่านขั้นตอนนี้แล้วจะทำการหาค่าขนาด

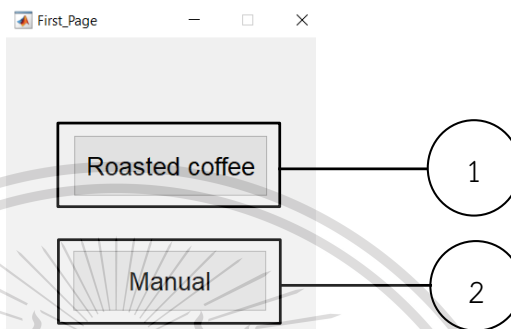
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

โดยการคำนวณค่าแฟกเตอร์รูปร่าง (Shape Factor) และตัวบอกรูปร่างต่าง ๆ แสดงผลออกมาโดยใช้หน้าต่าง Graphical User Interface (GUI)

#### 4.2.2 รายละเอียดเมนูโปรแกรมวัดสี ขนาดและรูปร่างของเมล็ดกาแฟ

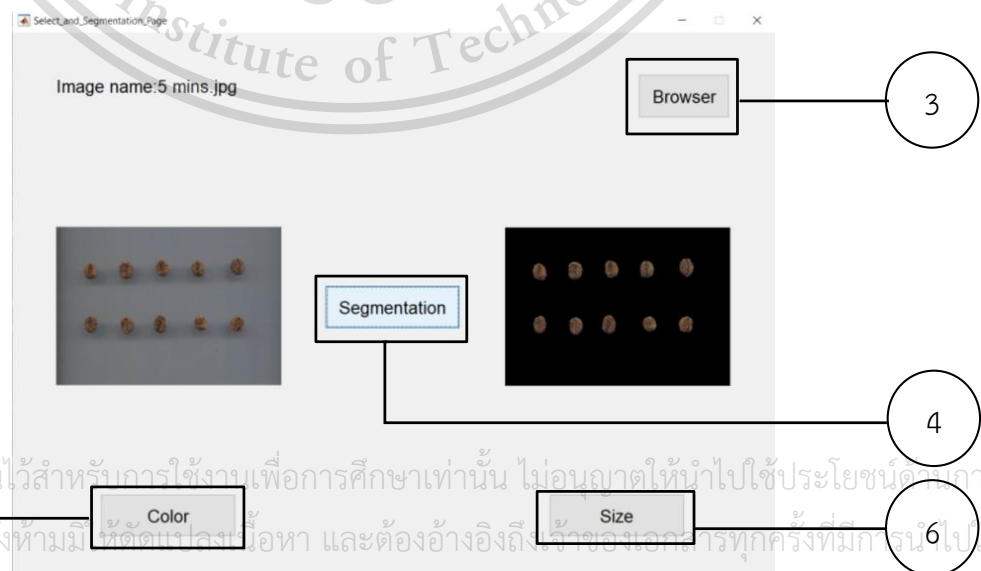
โปรแกรมที่พัฒนาจาก MATLAB® ร่วมกับ Image Processing Toolbox Release 2010 (The MathWorks, Inc., Natick, Massachusetts, United States) จะมีหน้าต่าง 'First\_Page' ปรากฏขึ้นมาดังแสดงรูปที่ 4.10



รูปที่ 4.10 หน้าต่าง 'First\_Page'

หมายเลข 1 คือ 'Roasted coffee' เป็นคำสั่งในการวิเคราะห์ค่าสี ขนาดและรูปร่างของเมล็ดกาแฟ

หมายเลข 2 คือ 'Manual' เป็นคำสั่งสำหรับเปิดคู่มือการใช้งานในโปรแกรม เมื่อ กด คำสั่ง 'Roasted coffee' ใน 'First\_Page' (รูปที่ 4.10) หน้าต่าง 'Select\_and\_Segmentation\_Page' จะปรากฏขึ้นมาดังแสดงในรูปที่ 4.11



รูปที่ 4.11 หน้าต่าง 'Select\_and\_Segmentation\_Page'

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

หมายเลข 3 คือ 'Browser' เป็นคำสั่งสำหรับเปิดรูปภาพที่ต้องการทำการวิเคราะห์ที่ได้จากการสแกนเมื่อได้ภาพแล้วจะแสดงชื่อภาพทางด้านบนซ้ายมือ

หมายเลข 4 คือ 'Segmentation' เป็นคำสั่งในการระบุตำแหน่งภาพที่จะทำการวิเคราะห์

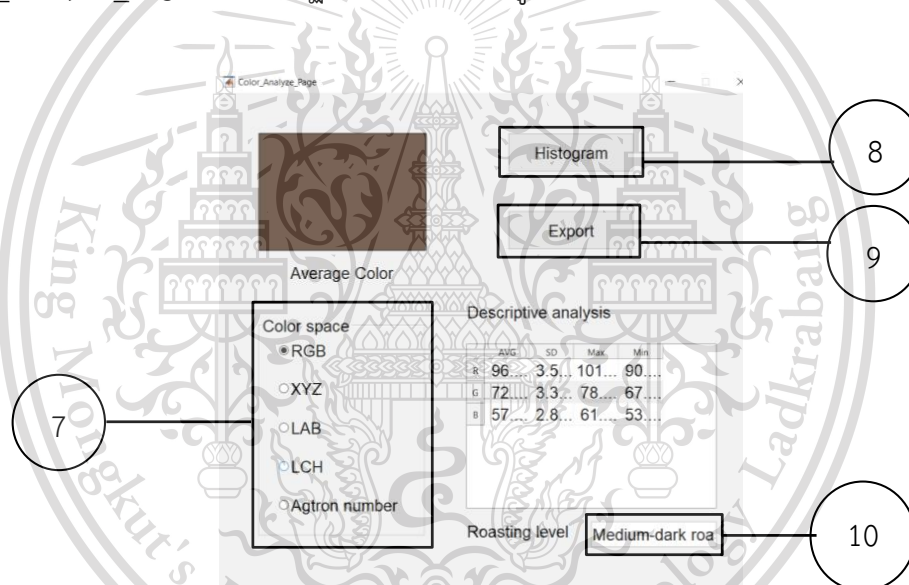
หมายเลข 5 คือ คำสั่ง 'Color' สำหรับทำการวิเคราะห์หาค่าระบบสีต่าง ๆ

หมายเลข 6 คือ คำสั่ง 'Size' สำหรับทำการวิเคราะห์หาขนาดและรูปร่าง

หมายเหตุ ปุ่ม 'Segmentation' อาจจะมีการใช้เวลาในการดำเนินการขึ้นอยู่กับประสิทธิภาพของคอมพิวเตอร์ที่ใช้

#### 4.2.3 รายละเอียดของคำสั่ง Color

กดคำสั่ง 'Color' ใน 'Select\_and\_Segmentation\_Page' (รูปที่ 4.11) แล้วหน้าต่าง 'Color\_Analyze\_Page' จะปรากฏขึ้นมาดังแสดงในรูปที่ 4.12



รูปที่ 4.12 หน้าต่าง 'Color\_Analyze\_Page'

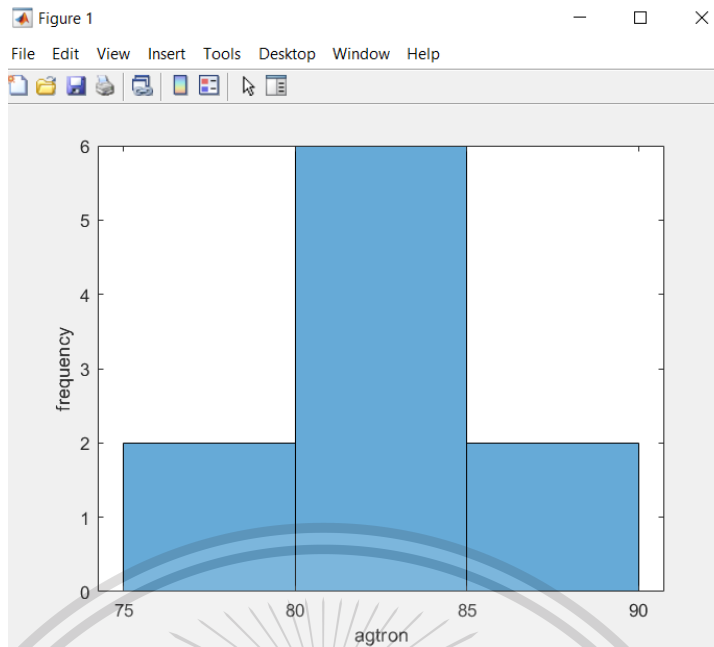
หมายเลข 7 คือ Color space สามารถเลือกระบบค่าสีได้หลายระบบ ได้แก่ RGB, XYZ, CIELAB, CIELCh และ Agtron number

หมายเลข 8 คือ 'Histogram' เมื่อฮิสโทแกรมปรากฏขึ้นมา ผู้ใช้สามารถเลือกดูข้อมูลระหว่างฮิสโทแกรมกับการกระจายของสี กดคำสั่ง 'Histogram' แล้วหน้าต่าง 'Figure 1' จะปรากฏขึ้นมาดังแสดงในรูปที่ 4.13

หมายเลข 9 คือ 'Export' กดคำสั่ง 'Export' (รูปที่ 4.12) นำข้อมูลออกจากโปรแกรมเพื่อทำเอกสารนี้เป็น การวิเคราะห์ค่าต่าง ๆ ดังแสดงในรูปที่ 4.14 ศึกษาคำนี้ ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น หมายเลข 10 คือ 'Roasting level' บอกระดับการคั่วถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 4.13 หน้าต่าง 'Figure 1'

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
1	R of RGB	G of RGB	B of RGB	X of XYZ	Y of XYZ	Z of XYZ	L* of CIELAB	a* of CIELAB	B* of CIELAB	L* of CIELCh	C* of CIELCh	h of CIELCh	Agtron
2	99.0638486	72.3449587	54.0886694	8.16055526	7.60338644	4.53801379	33.1428505	8.75616855	15.3866998	33.1428505	17.7037007	60.3569273	75.5655663
3	93.6044178	68.3707638	53.7986169	7.32663676	6.80294918	4.39176823	31.3540431	8.68143917	13.0555908	31.3540431	15.6785151	56.3777027	80.1511839
4	95.179971	71.3411098	56.2975061	7.73438378	7.28141127	4.77693503	32.4391496	7.88072306	12.9772436	32.4391496	15.1827088	58.7308416	81.0165961
5	97.6036133	73.5946761	58.878635	8.20266015	7.73324128	5.1809549	33.4210357	7.93580706	12.7350703	33.4210357	15.0053007	58.0710713	85.6991516
6	90.1273054	67.7429453	54.8425106	6.96647555	6.55797188	4.49280612	30.7786667	7.61593952	11.5415524	30.7786667	13.8278692	56.5803245	81.0788965
7	98.5148862	73.3488815	56.2647659	8.21886647	7.72506895	4.83283312	33.4036205	8.15629495	14.3660514	33.4036205	16.5199449	60.4143488	78.8588946
8	97.7932952	76.3420413	60.6714695	8.45649929	8.13514039	5.49253575	34.2627608	6.56381343	12.7616632	34.2627608	14.3507385	62.7815013	82.9791024
9	101.342616	78.5534691	61.889107	9.03586935	8.66133004	5.7364174	35.3238844	6.97541818	13.5132342	35.3238844	15.2073653	62.6975965	84.6805032
10	100.269603	75.2563939	57.8480269	8.57905557	8.0961647	5.0927707	34.1823622	7.98350365	14.4612446	34.1823622	16.5185933	61.0985796	80.3646169
11	93.4818789	72.4050664	59.659676	7.71360357	7.36269846	5.24192308	32.6187356	6.91242631	11.0686184	32.6187356	13.049749	58.014946	86.7407011

รูปที่ 4.14 ตัวอย่างไฟล์ข้อมูลสีในรูปแบบ Excel

โดยข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์ค่าสีมีหลายระบบด้วยกันประกอบไปด้วย RGB, XYZ, CIELAB, CIELCh และค่า Agtron number

#### 4.2.4 รายละเอียดของคำสั่ง Size

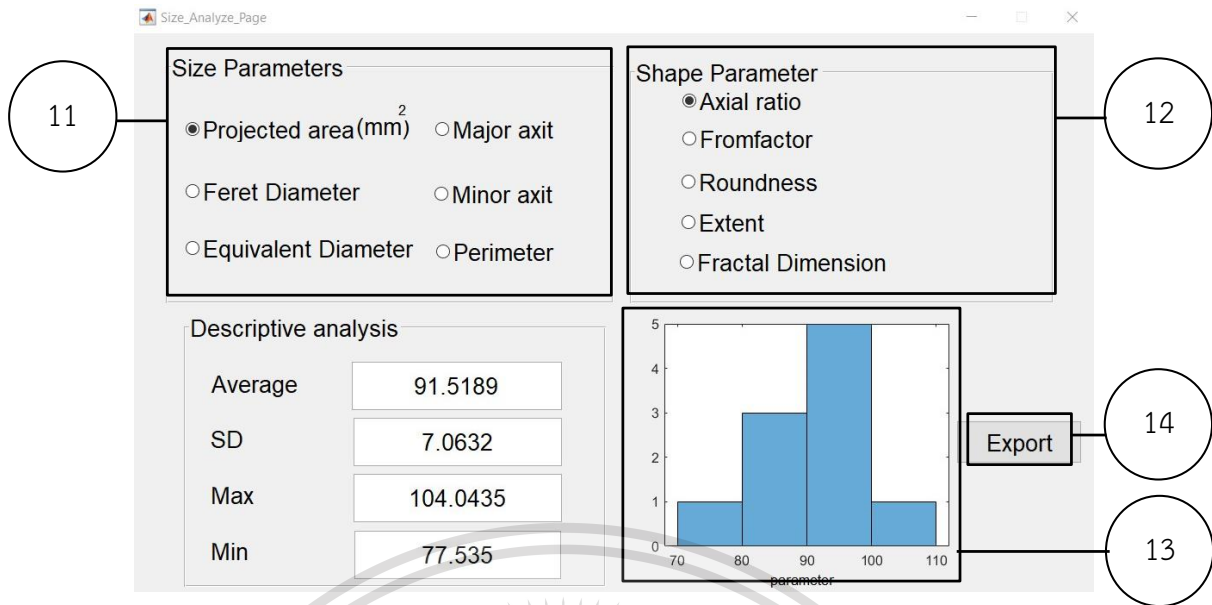
เมื่อกดคำสั่ง 'Size' (หมายเลข 6) ใน 'Select\_and\_Segmentation\_Page' (รูปที่ 4.11)

หน้าต่าง 'Size\_Analyze\_Page' จะปรากฏขึ้นมาดังแสดงในรูปที่ 4.15

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 4.15 หน้าต่าง 'Size\_Analyze\_Page'

หมายเลข 11 คือ 'Size Parameter' เป็นการเลือกวิเคราะห์ตัวแปรในการบอกขนาด  
 หมายเลข 12 คือ 'Shape Parameter' เป็นการเลือกวิเคราะห์รูปร่างในการบอกขนาด  
 หมายเลข 13 คือ Histogram เพื่อดูการกระจายตัวของขนาด  
 หมายเลข 14 คือ คำสั่ง 'Export' เป็นการนำข้อมูลออกเป็นไฟล์ Excel ดังแสดงในรูปที่ 4.16  
 โดยแสดงค่าที่วิเคราะห์ได้จากโปรแกรม ความยาวแกนหลัก (Major axis) ความยาวแกนรอง (Minor axis) พื้นที่ภาพฉาย (Projected Area), Equivalent Diameter และ Feret Diameter พารามิเตอร์บ่งบอกรูปร่างได้แก่ Formfactor, Roundness, Axial Ratio, Extent และ Fractal Dimension

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
1	Area	Perimeter	MajorAxis	MinorAxis	EqD	FeretD	Formfactor	Roundness	AxialRatio	Extent	Fractal
2	89.9640832	35.9370435	12.0874996	9.51741569	10.7026085	12.3478261	0.875375389	0.751273844	0.787376711	0.760725703	1.04173398
3	87.0075614	34.1912174	12.3011324	9.01560524	10.5252776	12.2608696	0.935271568	0.736927173	0.732908563	0.785577744	1.034222664
4	104.043478	37.574087	12.8261036	10.3585005	11.5096599	12.7391304	0.926078612	0.81629176	0.807610855	0.814547876	1.051779706
5	91.1077505	35.7270435	12.3201769	9.44488412	10.770422	12.4347826	0.896955776	0.750220709	0.7666192	0.765198063	1.041424986
6	97.7372401	37.5126087	13.1027867	9.53754533	11.1553987	13.3478261	0.872801334	0.698472177	0.727902054	0.774669623	1.052779191
7	90.5066163	36.226087	12.2377425	9.46660813	10.7348313	12.3913043	0.866657185	0.750509854	0.773558368	0.766293214	1.045227296
8	92.7334594	35.6870435	12.0574001	9.83687435	10.8660898	12.2173913	0.91500862	0.791023912	0.8158371	0.809424809	1.044037544
9	77.5349716	31.9203478	10.7021939	9.23302455	9.93582367	10.826087	0.956251801	0.842295982	0.862722603	0.772836901	1.186345227
10	88.3194707	34.6594783	11.3460362	9.95259322	10.6043313	11.4347826	0.923894283	0.860024357	0.877186807	0.807539408	0.989980113
11	96.2344045	37.1768696	12.5449271	9.79919439	11.0693021	12.826087	0.87497288	0.744821359	0.781128043	0.745697169	1.046099874
12											
13											
14											

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์อื่น การค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิรูปที่ 4.16 ตัวอย่างไฟล์ข้อมูลของขนาดรูปแบบ Excel

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

### 4.3 ผลการทดสอบประสิทธิภาพโปรแกรมวิเคราะห์ภาพที่พัฒนา

#### 4.3.1 การทดสอบประสิทธิภาพการวัดสี

ในการทดลองนี้จะศึกษาผลของความสัมพันธ์ระหว่างค่าสีที่ได้จากเครื่องวัดสี Colorimetric spectrophotometer กับค่าสีที่ได้จากโปรแกรมวิเคราะห์ภาพที่พัฒนา

จากการทดสอบโปรแกรมในการวิเคราะห์ระดับค่าสีโดยทำการทดสอบวิเคราะห์ภาพกาแฟคั่วจำนวน 6 ตัวอย่างได้แก่ เมล็ดกาแฟสาร เมล็ดกาแฟคั่วที่อุณหภูมิ 210 °C ที่เวลา 5, 10, 15, 20 และ 25 นาที ผลปรากฏว่าโปรแกรมสามารถบอกระดับการคั่วได้ตามเกณฑ์ที่พิจารณาระดับการคั่วประยุกต์จาก Lin, C. H. (2016) ดังแสดงในตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ผลการทดสอบในการบอกระดับการคั่วกาแฟที่อุณหภูมิ 210 °C

เวลา	ค่าเฉลี่ย Agron number	ระดับการคั่ว
เมล็ดกาแฟสาร	60	Medium roast
5	48	Medium-dark roast
10	41	Dark roast
15	39	Dark roast
20	37	Dark roast
25	37	Dark roast

#### 4.3.2 การทดสอบประสิทธิภาพการวัดขนาดและรูปร่าง

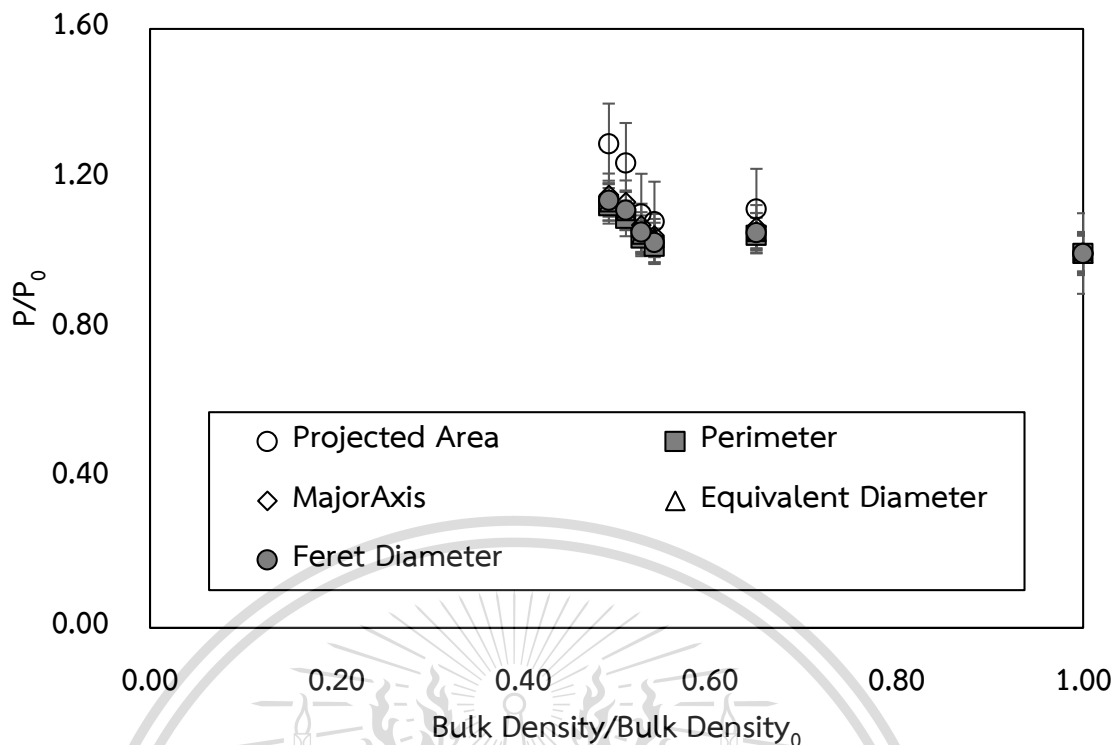
จากการทดลองใช้โปรแกรมในการวัดขนาดและรูปร่างโดยค่าสเกลที่ใช้แปลงหน่วยจากพิกเซลเป็นมิลลิเมตร ได้ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่บ่งบอกขนาดได้แก่ ความยาวแกนหลัก (Major axis) ความยาวแกนรอง (Minor axis) พื้นที่ภาพฉาย (Projected Area), Equivalent Diameter และ Feret Diameter พารามิเตอร์บ่งบอกรูปร่างได้แก่ Formfactor, Roundness, Axial Ratio, Extent และ Fractal Dimension ซึ่งผลการทดลองโดยใช้โปรแกรมวิเคราะห์ทำให้เห็นการเปลี่ยนแปลงในพารามิเตอร์บอกขนาด และรูปร่างต่าง ๆ โดยเฉพาะเรื่องของพื้นที่ของเมล็ดกาแฟเมื่อเทียบกับค่าความหนาแน่นรวม ดังรูปที่ 4.17 บ่งชี้ว่าเมื่อคั่วในเวลาที่มากขึ้น พื้นที่มีค่ามากขึ้น ความหนาแน่นรวมลดลง หมายความว่าเมล็ดกาแฟมีความพองมากขึ้นในอัตราส่วนที่เท่ากันในทุกแกน จึงทำให้พารามิเตอร์ของรูปร่างไม่ค่อยเปลี่ยนแปลงนัก ดังรูปที่ 4.18 นอกจากนี้ยังพบว่าค่าอัตราส่วนพารามิเตอร์บอกขนาดมีความสัมพันธ์กับค่าอัตราส่วนความชื้นของเมล็ดกาแฟจึงสามารถนำมาทำนายค่าความชื้นที่ลดลงได้ (อ่านเพิ่มเติมที่ภาคผนวก ก รูปที่ ก.1)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการศึกษาวิจัยเท่านั้น ไม่สามารถนำเนื้อหาไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

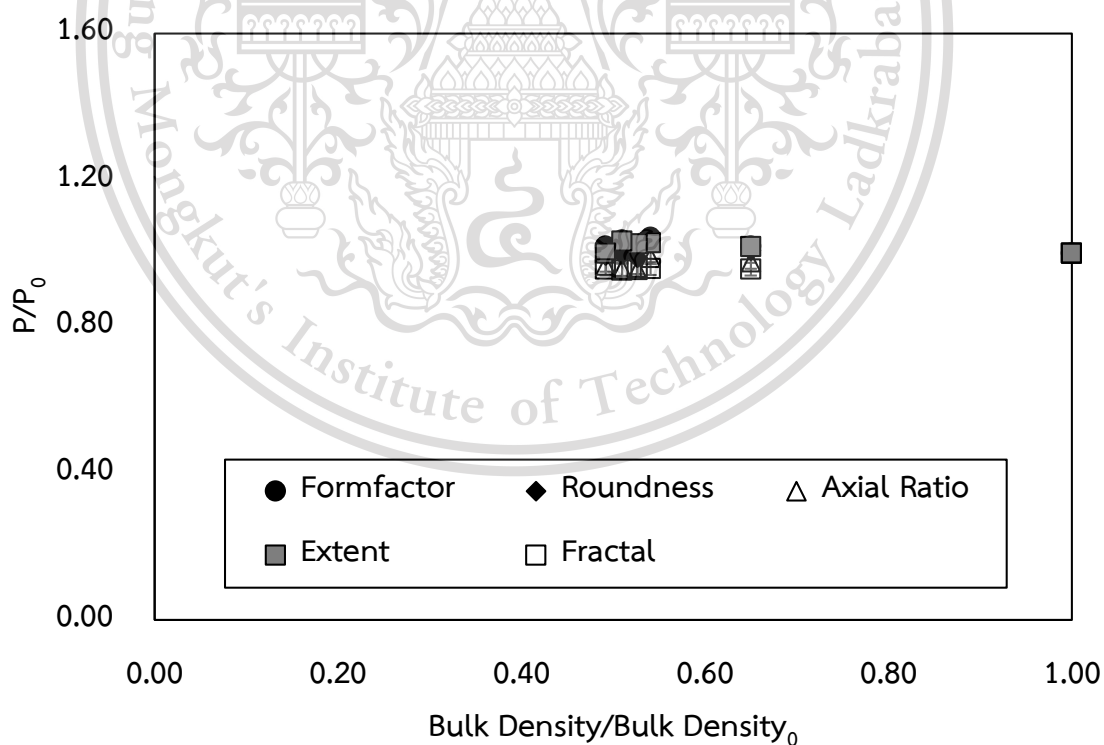
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนพารามิเตอร์บอกขนาดกับอัตราส่วนค่าความหนาแน่นรวมของเมล็ดกาแฟระหว่างการคั่วที่อุณหภูมิ 210 °C



รูปที่ 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนพารามิเตอร์บอกรูปร่างกับอัตราส่วนค่าความหนาแน่นรวม เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าของเมล็ดกาแฟระหว่างการคั่วที่อุณหภูมิ 210 °C  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

ปัจจุบันอุตสาหกรรมกาแฟในประเทศไทยมีการแข่งขันสูง โดยการคั่วเป็นกระบวนการหนึ่งที่สำคัญในกระบวนการแปรรูปกาแฟ เนื่องจากเป็นช่วงที่พัฒนากลิ่น และรสชาติของเมล็ดกาแฟ โดยปกติแล้วจะใช้เครื่องคั่วแบบถ้งหมุนที่ใช้อากาศร้อนในการคั่วซึ่งมีอากาศส่งผลทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันและใช้เวลาคั่วที่นานส่งผลทำให้เมล็ดกาแฟเกิดกลิ่นและรสชาติที่ไม่พึงประสงค์จึงได้มีการนำเอาเครื่องคั่วกาแฟแบบฟลูอิดเบดโดยใช้ไอน้ำร้อนยวดยิ่งมาทดแทนเพื่อแก้ปัญหาดังกล่าว ปริมาณนี้พบว่าเป็นการศึกษาผลของการใช้เครื่องคั่วกาแฟแบบฟลูอิดเบดโดยใช้ไอน้ำร้อนยวดยิ่งในการผลิตเมล็ดกาแฟคุณภาพสูงโดยศึกษาการเปลี่ยนแปลงสมบัติของเมล็ดกาแฟระหว่างการคั่วโดยใช้อากาศร้อนเทียบกับการคั่วโดยใช้ไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่มีผลต่อสมบัติบางประการได้แก่ ความชื้น วอเตอร์แอกติวิตี สี ความหนาแน่นรวม และความเป็นกรด-ด่าง นอกจากนี้ยังได้ทำการพัฒนาระบบที่ประเมินสมบัติของเมล็ดกาแฟด้วยเทคนิควิเคราะห์ภาพ และวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพ อันได้แก่ สี ขนาด และค่าแฟกเตอร์รูปร่างของเมล็ดกาแฟคั่วโดยใช้เครื่องกราดภาพ (Scanner) ในการรับภาพ จากนั้นนำภาพที่ได้มาปรับปรุงและทำการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นใน MATHWORKS MATLAB® ทำการวิเคราะห์สมบัติต่าง ๆ ได้แก่ สี ขนาดและรูปร่าง และมีการแปลงค่าสีเป็นระบบต่าง ๆ โดยเฉพาะค่า Agtron number ซึ่งเป็นสเกลค่าสีบ่งชี้ระดับการคั่วของกาแฟ โดยสมาคม SCAA (Specialty Coffee Association of America) และทำการเทียบระบบกับวิธีมาตรฐาน ได้แก่ เครื่อง Colorimetric Spectrophotometer และเวอร์เนียร์คาลิเปอร์ร่วมกับคำนวณค่าแฟกเตอร์รูปร่าง (Shape factor) จากสมการเพื่อเปรียบเทียบค่าที่ได้กับระบบที่พัฒนาขึ้น

จากการศึกษาการคั่วด้วยเครื่องคั่วแบบฟลูอิดเบดโดยใช้ไอน้ำร้อนยวดยิ่งและอากาศร้อนที่อุณหภูมิการคั่ว 210 °C พบว่าสมบัติต่าง ๆ ของเมล็ดกาแฟ ได้แก่ ค่าความชื้น ค่าวอเตอร์แอกติวิตี ค่าสี ค่าความเป็นกรด-ด่าง และค่าความหนาแน่นรวม เกิดการเปลี่ยนแปลงในระหว่างการคั่วโดยการใช้ไอน้ำร้อนยวดยิ่งสามารถคั่วเมล็ดกาแฟให้ถึงระดับการคั่วที่ต้องการได้เร็วกว่าการใช้อากาศร้อนทำให้ลดการสูญเสียองค์ประกอบทางเคมีที่สำคัญในเมล็ดกาแฟได้ ค่าความเป็นกรด-ด่างของเมล็ดกาแฟคั่วโดยใช้อากาศร้อนมีค่าต่ำกว่าการใช้ไอน้ำร้อนยวดยิ่งซึ่งอาจเกิดจากปฏิกิริยาออกซิเดชันของลิพิดทำให้เกิดการฟอร์มตัวของกรดอินทรีย์ซึ่งส่งผลต่อรสชาติของกาแฟคั่ว

ดังนั้นการใช้ไอน้ำร้อนยวดยิ่งจะใช้เวลาในการคั่วเมล็ดกาแฟเพื่อให้ได้ระดับการคั่วที่ต้องการได้

เร็วกว่าการใช้อากาศร้อนและช่วยยับยั้งการเกิดปฏิกิริยาเคมีที่ส่งผลต่อกลิ่นรสและคุณภาพของกาแฟคั่ว จากการตรวจวัดความหนาแน่นรวมของเมล็ดกาแฟพบว่าความหนาแน่นโดยรวมมีค่าลดลงทว่าเมื่อมองด้วยตาเปล่าเมล็ดกาแฟมีการเปลี่ยนแปลงของขนาดจากเดิมจึงต้องทำการตรวจสอบลักษณะทางกายภาพของเมล็ดกาแฟอย่างละเอียดด้วยเทคนิควิเคราะห์ภาพเพื่อให้สามารถวิเคราะห์ลักษณะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามนำเนื้อหาไปดัดแปลงเป็นสื่อ และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.  
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

การเปลี่ยนแปลงของเมล็ดกาแฟคั่วและประเมินคุณภาพได้แม่นยำขึ้น จากการวิเคราะห์พบว่าสามารถสังเกตความแตกต่างของเมล็ดกาแฟที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาคั่วได้ชัดเจนมากขึ้นและสามารถระบุระดับการคั่วของเมล็ดกาแฟด้วยค่า Agron number ได้อีกด้วย

นอกจากนี้โปรแกรมที่พัฒนาขึ้นยังสามารถวัดขนาดและรูปร่างได้อย่างละเอียดและหลากหลาย ทำให้เห็นการเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์บอกขนาด โดยเฉพาะพื้นที่ของเมล็ดกาแฟเมื่อเทียบกับค่าความหนาแน่นรวมเห็นได้ชัดว่ากาแฟมีความพองมากขึ้นในอัตราส่วนที่เท่ากันทุกแกน

### ข้อเสนอแนะแนวทางการศึกษาเพิ่มเติม

ในโครงการนี้ได้ทำการศึกษาผลของการคั่วด้วยเครื่องคั่วแบบฟลูอิดไชต์เบตโดยใช้ไอน้ำร้อนยวดยิ่งและอากาศร้อนต่อสมบัติทางกายภาพของเมล็ดกาแฟเป็นหลัก แต่ในการคั่วกาแฟนั้นยังมีการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางเคมีอีกหลายปัจจัยที่ส่งผลต่อคุณภาพของเมล็ดกาแฟ จึงควรศึกษาการเปลี่ยนแปลงของสมบัติเหล่านี้เพิ่มเติม เพื่อต่อยอดในการพัฒนากระบวนการคั่วเพื่อให้ได้เมล็ดกาแฟที่มีคุณภาพสูง ส่วนระบบประเมินสมบัติด้วยภาพที่พัฒนาขึ้นแม้ว่าจะมีประสิทธิภาพและความแม่นยำเป็นที่น่าพอใจ ทว่ายังสามารถต่อยอดให้สามารถใช้ในการควบคุมระบบและการผลิตได้ต่อไปในอนาคต



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## เอกสารอ้างอิง

- กระทรวงเกษตรและสหกรณ์. 2563. ยุทธศาสตร์กาแฟปี 2560 –2564. [Online]. เข้าถึงได้จาก:  
[www.doa.go.th/hort/wpcontent/uploads/](http://www.doa.go.th/hort/wpcontent/uploads/).
- กระทรวงอุตสาหกรรม. 2558. **มาตรฐานผลิตภัณฑ์ Thai community product standard มผช.268/2558**. กรุงเทพฯ: กระทรวงอุตสาหกรรม.
- จุไรวัลย์ รัตนะพิสิฐ. 2549. หนังสือการถ่ายโอนมวลและหลักการปฏิบัติเฉพาะหน่วยพื้นฐาน. มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- ทศพร แก้ววิจิตร, อธิวิรัช บุญยโสภณ, ทวีชัย ทับทิม และอรรรคพล พลอยพันแสง. 2562. “การคัดแยกสีและขนาดเมล็ดคั่วด้วยการประมวลผลภาพดิจิทัล.” ใน การประชุมวิชาการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ครั้งที่ 4 และการประชุมระดับนานาชาติ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ : มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์.
- นิธิยา รัตนานนท์. 2558. **เคมีอาหาร**. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์โอเดียนสโตร์
- พศณี สุวรรณวิศลกิจ. 2546. “ความเหมาะสมของมาตรฐานกาแฟอราบิก้าของไทย.” รายงานวิจัย ศูนย์วิจัยและฝึกอบรมที่สูง คณะเกษตรศาสตร์, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- วรสิทธิ์นันท์ ชุมประเสริฐ, นุชนารถ คูประเสริฐ, อาทร เจียมเดงงาม และอภิชญา ศรีรัตน์. 2563. **กาแฟคุณภาพ...ทางออกของเกษตรกรไทย**. [Online]. เข้าถึงได้จาก :  
<https://www.moneyandbanking.co.th/article/cooffe-bean-economic>.
- ศูนย์อัจฉริยะเพื่ออุตสาหกรรมอาหาร สถาบันอาหาร. 2559. “อุตสาหกรรมกาแฟ.” [Online]. เข้าถึงได้จาก: <http://fic.nfi.or.th/foodsectordatabank/>.
- สักกมน เทพหัสดิน. 2555. การอบแห้งอาหารและวัสดุชีวภาพ **Drying of foods and biomaterials**. กรุงเทพฯ: ท้อป.
- สำนักงานมาตรฐานสินค้าเกษตรและอาหารแห่งชาติ. (2561). **มาตรฐานสินค้าเกษตร มกษ. 5700 - 2561**. กรุงเทพฯ: สำนักงานมาตรฐานสินค้าเกษตรและอาหารแห่งชาติ.
- สมศักดิ์ วรรณศิริ. 2545. **การปลูกกาแฟ**. นนทบุรี: สำนักพิมพ์ฐานเกษตรกรรม.
- อมร ทวีชื่นสกุล. 2545. “การพัฒนาเครื่องคั่วเมล็ดกาแฟสด.” รายงานวิจัย คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- AOAC. 968.11. 2000. **Official Methods of Analysis**. 17<sup>th</sup> ed. Association of Official Analytical Chemists. Washington, DC.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

Arboleda, E. R., Fajardo, A. C. and Medina, R. P. 2018. “An Image Processing Technique for Coffee Black Beans Identification.” In **IEEE International Conference on Innovative Research and Development (ICIRD)**. Bangkok. Thailand.

ASTM. D1895-17. 2017. “Standard Test Methods for Apparent Density, Bulk Factor, and Pourability of Plastic Materials.” **ASTM International**. West Conshohocken. PA. DOI: 10.1520/D1895-17. www.astm.org.

ASTM. E284 - 13b. 2013. “Standard Terminology of Appearance” **ASTM International**. West Conshohocken. PA. DOI: 10.1520/D1895-17. www.astm.org.

Baggenstoss, J., Poisson, L., Kaegi, R., Perren, R. and Escher, F. 2008. “Roasting and Aroma Formation: Effect of Initial Moisture Content and Steam Treatment.” **Journal of Agricultural and Food Chemistry**. 56(14): 5847–5851.

Chindapan, N., Soydok, S. and Devahastin, S. 2019. Roasting Kinetics and Chemical Composition Changes of Robusta Coffee Beans During Hot Air and Superheated Steam Roasting. **Journal of Food Science**. 2(84): 292-293.

Clarke, R. J. and Macrae, R., editors. 1985. **Coffee, Vol: 1 : Chemistry**. London: Elsevier. Coffee Research Institute. 2001. **Coffee Roast Colors and Characteristics**. [Online]. Available: <http://www.coffeeresearch.org/coffee/roast.htm>.

Epson. 2021. **CCD technology**. [Online]. Available: <https://www.epson.eu/viewcon/corporatesite/>.

Fadai, N.T., Melrose, J., Please, C.P., Schulman, A., Van Gorder, R.A. 2017. “A heat and mass transfer study of coffee bean roasting.” **International journal communication heat mass transfer**. 104: 787–99.

Faridah, G. O. F. Parikesit, and Ferdiansjah, 2012. “Coffee Bean Grade Determination Based on Image Parameter,” **TELKOMNIKA (Telecommunication Comput. Electron. Control**. 3(9): 53.

Fennema, O. R. 1996. **Food Chemistry**. 5<sup>th</sup> ed. New York: Marcel Dekker.

García, M., Candelo-Becerra, J. E. and Hoyos, F. E. 2019. “Quality and defect inspection of green coffee beans using a computer vision system.” **Applied Sciences**. 9(19): 4195.

Gloess, A. N., Vietri, A., Wieland, F., Smrke, S., Schönbacher, B., López, J. A. S., Petrozzi, S., Bongers, S., Kozirowski, T. and Yeretziyan, C. 2014. “Evidence of different flavour formation dynamics by roasting coffee from different origins: On-line

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับงานวิจัยที่ไม่ใช่เพื่อการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆก็ตาม ห้ามทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาตจากผู้จัดทำ

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

- analysis with PTR-ToF-MS.” **International Journal of Mass Spectrometry**. 365: 324-337.
- Gökmen, V. and Şenyuva, H. Z. 2006. “ Study of color and acrylamide formation in coffee, wheat flour and potato chips during heating.” **Food Chemistry**. 99(2): 238-243.
- Herawati, D., Giriwono, P. E., Dewi, F. N. A., Kashiwagi, T. and Andarwulan, N., 2019. “ Critical roasting level determines bioactive content and antioxidant activity of Robusta coffee beans.” **Food science and biotechnology**. 28(1): 7-14.
- Hernandez, J. A., Heyd, B., and Trystram, G. 2008. "Prediction of brightness and surface area kinetics during coffee roasting." **Journal of Food Engineering**. 89(2): 156-163.
- Hoffman, J. 2014. **The World Atlas of Coffee**. London: Hachette.
- Idrus, N. F. M. and Yang, T. A. 2012. “ Comparison between Roasting by Superheated Steam and by Convection on Changes in Colour, Texture and Microstructure of Peanut (*Arachis hypogaea*).” **Food Science and Technology Research**. 18(4) : 515-524.
- Kalschne, D. L., Biasuz, T., De Conti, A. J., Viegas, M. C., Corso, M. P. and Benassi, M. T. 2018. “ Sensory Characterization and Acceptance of Coffee Brews of *C. arabica* and *C. canephora* Blended with Steamed Defective Coffee.” **Food Research International**. Vol.124 : 234-238.
- Ky, C. L., Louarn, J., Dussert, S., Guyot, B., Hamon, S. and Noiro, M. 2001. “ Caffeine, trigonelline, chlorogenic acids and sucrose diversity in wild *Coffea arabica* L. and *C. Canephora* P. accessions.” **Food Chemistry**. 75(2) : 223-230.
- Leme, D. S., Oliveira, E. M. D., Barbosa, B. H. G., Pereira, R. G. F. A. and Borém, F.M., 2015. “ Plataforma digital para mensuração de grãos de café especiais: escala agron obtida através de fotografias.”
- Lin, C. H., Lin, W. T., Jou, Y. T., Wu, W. T. and Yan, Z. H., 2016. “ A study of process optimization for roasting Taiwanese coffees by applying Six Sigma.” pp. 1-8. In **Proceedings on 2016 International Conference on Fuzzy Theory and Its Applications (iFuzzy)**. IEEE.

Liu, Y. and Kitts, D. D. 2011. “Confirmation that the Maillard reaction is the principle contributor to the antioxidant capacity of coffee brews.” **Food Res. Int.** 44: 2418–2424.

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

- Maki, Y. and Haruyama, T. 1997. "Process for Roasting Coffee Beans with Steam." United States Patent no. 5681607, 28 Oct 1997.
- Massini, R., Nicoli, M. C., Cassara A. and Lerici, C. R. 1990. "Study on physical and physico-chemical changes of coffee beans during roasting." **Italian Journal of Food Science**. 3: 123–32.
- Mazzafera, P. 1999. "Chemical composition of defective coffee beans." **Food chemistry**. 64(4): 547-554.
- Mussatto, S. I., Machado, E. M., Martins, S., and Teixeira, J. A. 2011. "Production, composition, and application of coffee and its industrial residues." **Food and Bioprocess Technology**. 4(5): 661-672.
- Neal, F. B. and Russ, J. C. 2012. **Measuring shape**. CRC Press.
- Oestreich-Janzen, S. 2013. "Chemistry of coffee." **Reference Module in Chemistry, Molecular Sciences and Chemical**. pp. 1-24.
- Otsu, N. 1979. "A threshold selection method from gray-level histograms". **IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics**. 1979(1): 62–66.
- Pawar, A. and Bodkhe, S. 2015, "December. A novel technique for the scanned color image descreening." pp. 1-4. In **Proceedings on 2015 Annual IEEE India Conference (INDICON)** IEEE.
- Pinto, C., Furukawa, J., Fukai, H. and Tamura, S. 2017. "Classification of Green coffee bean images basec on defect types using convolutional neural network (CNN)." pp. 1-5. In **Proceedings on 2017 International Conference on Advanced Informatics, Concepts, Theory, and Applications (ICAICTA)**. IEEE.
- Razmjoo, N., Mousavi, B.S. and Soleymani, F. 2012. "A real-time mathematical computer method for potato inspection using machine vision" **Computers & Mathematics with Applications**. 63(1): 268-279.
- RBS. 2020. **เทคโนโลยีการสแกนภาพแบบ CCD คืออะไร ใช้งานอย่างไร**. [Online]. เข้าถึงได้จาก: <https://rbs.co.th/scan-technology-ccd/>.
- Saloko, S., Sulastri, Y., Murad and Rinjani, M. A. 2019. "The Effects of Temperature and Roasting Time on The Quality of Ground Robusta Coffee (*Coffea robusta*) using Gene Café Roaster." In **Proceedings on the 2<sup>nd</sup> International Conference on Bioscience, Biotechnology, and Biometrics 2019**. 1(2199): 060001. AIP Publishing LLC.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับงานวิจัยเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ทำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งนี้ ห้ามนำไปตีพิมพ์หรือดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

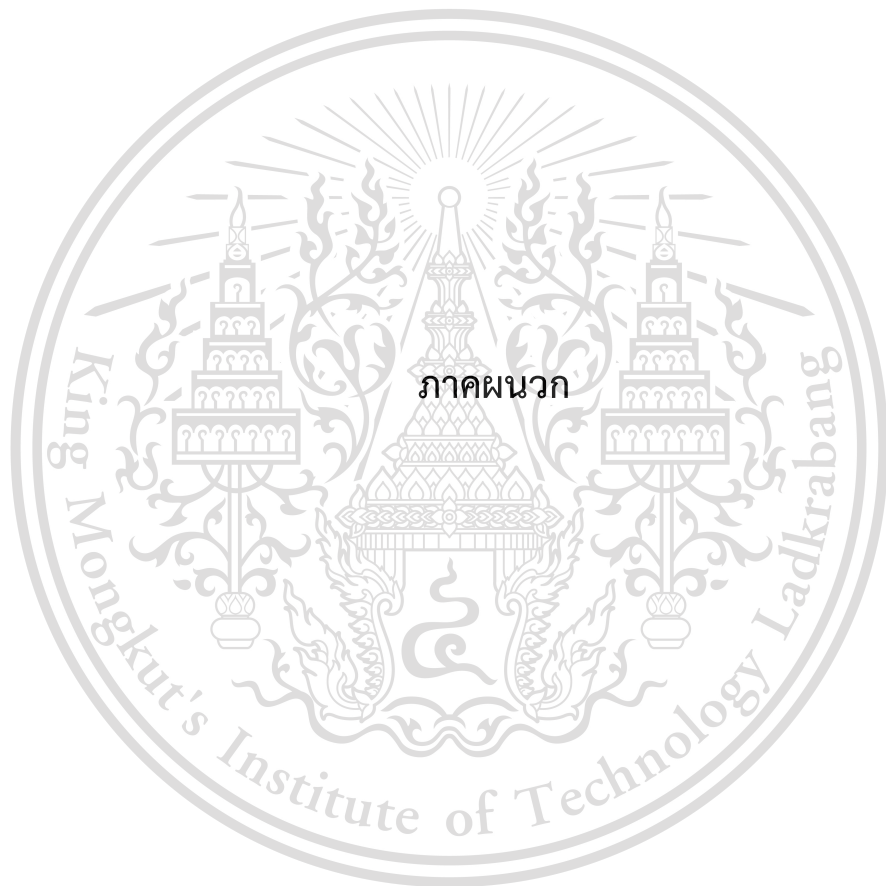
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

- Schwartzberg, H. 2013. "Batch coffee roasting; roasting energy use; reducing that use." pp. 173-195. In Yanniotis, S., Taoukis, P., Stoforos, N. and Karathanos, V. **Advances in Food Process Engineering Research and Applications**. Boston: Springer.
- Shahidi, F. and Zhong, Y. 2010. "Lipid oxidation and improving the oxidative stability." **Chemical Society Reviews**. 39(11): 4067-4079.
- Shan, O. E., Zzaman, W. and Yang, T. A. 2016. "Impact of Different Temperature-Time Profiles during Superheated Steam Roasting on Some Physical Changes of Robusta Coffee." **Journal of Tropical Agricultural Science**. 39(3) : 311-320.
- Sivetz, M. and Foote, H.E. 1963. Coffee Processing Technology. Vol 1: **Fruit-Green, Roast, and soluble Coffee**. London.
- Specialty Coffee Association of America. 2009. **SCAA Protocols | Cupping Specialty Coffee**. [Online]. Available: <https://www.scaa.org/PDF/20V.21NOV2009A.pdf>.
- Varnam, H.A. and Sutherland, P.J. 1994. **Beverage Technology Chemistry and Microbiology**. New York: Chapman&Hall.
- Wang, N. 2012. "Physicochemical changes of coffee beans during roasting." Ph.D. Food Science Thesis of University of Guelph.
- Wei, F. and Tanokura, M. 2015. "Chemical Changes in the Components of Coffee Beans during Roasting." In 83-91. **Coffee in Health and Disease Prevention**. Academic Press.
- Wu, D. and Sun, D. W. 2013. "Advanced applications of hyperspectral imaging technology for food quality and safety analysis and assessment: A review—Part I: Fundamentals." **Innovative Food Science & Emerging Technologies**. 19: 1-14.
- Zheng, Y., 2008. **Technological empowerment**. Stanford University Press. Stanford.
- Zzaman, W. and Yang, T. A. 2013. "Moisture, Color and Texture Changes in Cocoa Seeds during Superheated Steam Roasting." **Journal of Applied Sciences Research**. 9(1) : 1-7.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## ภาคผนวก ก

### ผลการทดลอง

ตารางที่ ก.1 ค่าความชื้นของเมล็ดกาแฟระหว่างการคั่วด้วยเครื่องคั่วแบบฟลูอิดไรซ์เบดที่อุณหภูมิ 210 °C

เวลาในการคั่ว (นาที)	ความชื้น (ร้อยละฐานแห้ง)	
	HA	SHS
เมล็ดกาแฟดิบ	13.50	
5	1.73	1.70
10	0.83	0.60
15	0.82	0.59
20	0.78	0.80
25	0.84	0.60

ตารางที่ ก.2 ค่าวอเตอร์แอกติวิตีของเมล็ดกาแฟระหว่างการคั่วด้วยเครื่องคั่วแบบฟลูอิดไรซ์เบดที่อุณหภูมิ 210 °C (สถิติภายใน 1 แบบ ดูความสม่ำเสมอ)

เวลาในการคั่ว (นาที)	ค่าวอเตอร์แอกติวิตี ( $a_w$ )		
	HA	SHS	P-value
เมล็ดกาแฟดิบ	0.710 ± 0.014		-
5	0.392 ± 0.012	0.328 ± 0.019	0.008
10	0.357 ± 0.009	0.281 ± 0.019	0.003*
15	0.365 ± 0.050	0.294 ± 0.012	0.075
20	0.368 ± 0.014	0.317 ± 0.078	0.489
25	0.272 ± 0.006	0.185 ± 0.030	0.008

เครื่องหมาย \* หมายถึงมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ( $p \leq 0.05$ )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ตารางที่ ก.3 ค่าความหนาแน่นรวมของเมล็ดกาแฟระหว่างการคั่วด้วยเครื่องคั่วแบบฟลูอิดซ์เบดที่ อุณหภูมิ 210 °C (สถิติภายใน 1 แบซ ดูความสม่ำเสมอ)

เวลาในการคั่ว (นาท)	ความหนาแน่นรวม (g/mL)		
	HA	SHS	P-value
เมล็ดกาแฟดิบ	0.714 ± 0.007		-
5	0.405 ± 0.005	0.464 ± 0.023	0.012*
10	0.376 ± 0.004	0.386 ± 0.017	0.358
15	0.365 ± 0.005	0.376 ± 0.004	0.053*
20	0.358 ± 0.005	0.364 ± 0.002	0.097
25	0.354 ± 0.002	0.351 ± 0.007	0.512

เครื่องหมาย \* หมายถึงมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ( $p \leq 0.05$ )

ตารางที่ ก.4 ค่าความเป็นกรด-ด่างของเมล็ดกาแฟระหว่างการคั่วด้วยเครื่องคั่วแบบฟลูอิดซ์เบดที่ อุณหภูมิ 210 °C (สถิติภายใน 1 แบซ ดูความสม่ำเสมอ)

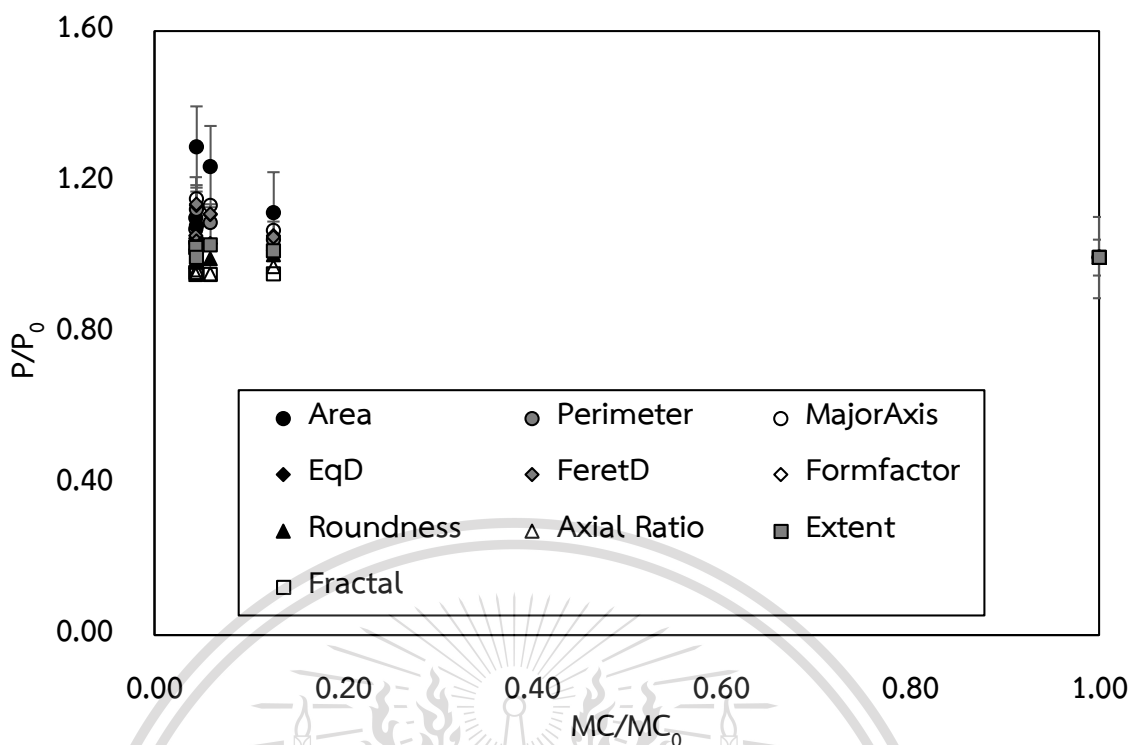
เวลาในการคั่ว (นาท)	ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH)		
	HA	SHS	P-value
เมล็ดกาแฟดิบ	7.16 ± 0.006		-
5	5.17 ± 0.017	5.59 ± 0.006	2.45e-06*
10	5.43 ± 0.050	6.10 ± 0.012	2.42e-05*
15	5.67 ± 0.059	6.19 ± 0.012	1.22e-04*
20	5.66 ± 0.095	6.33 ± 0.012	2.75e-04*
25	5.63 ± 0.021	6.32 ± 0.015	1.93e-03*

เครื่องหมาย \* หมายถึงมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ( $p \leq 0.05$ )

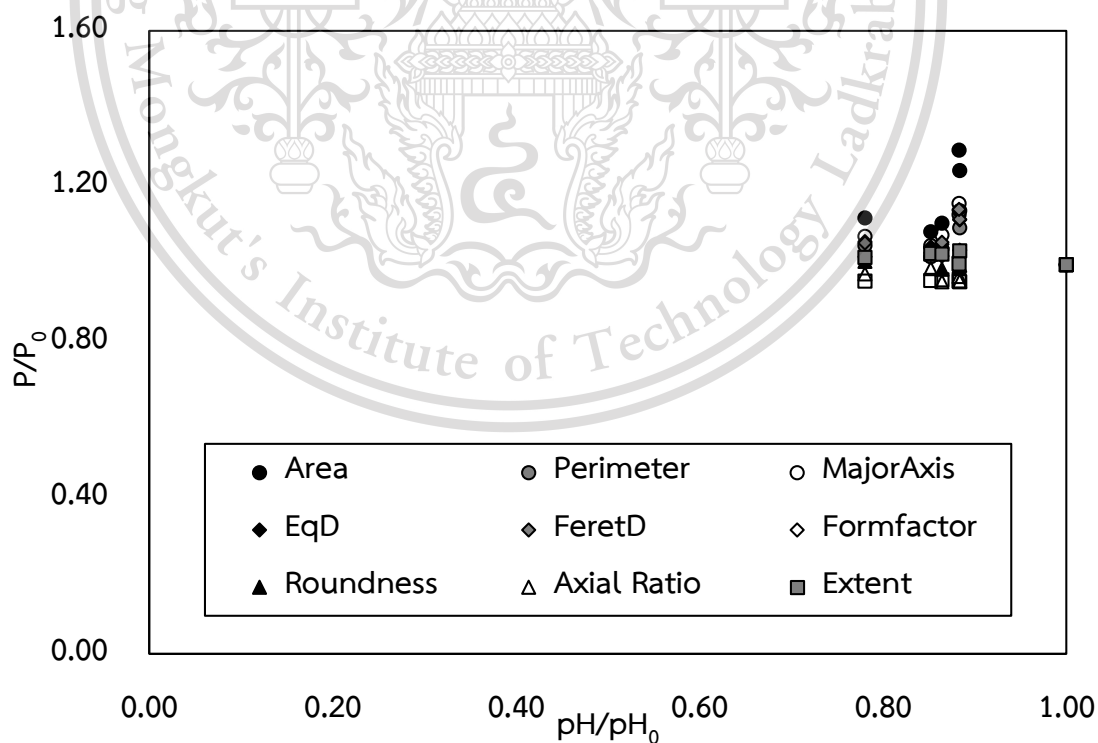
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ ก.1 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนพารามิเตอร์บอกขนาดกับรูปร่างกับอัตราส่วนความขึ้นของ เมล็ดกาแฟระหว่างการคั่วที่อุณหภูมิ 210 °C



รูปที่ ก.2 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนพารามิเตอร์บอกขนาดกับรูปร่างกับอัตราส่วนความเป็นกรด-ด่างของเมล็ดกาแฟระหว่างการคั่วที่อุณหภูมิ 210 °C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามเผยแพร่ไปยังสื่ออื่น และต้องขออนุญาตจากเจ้าของเอกสารทุกครั้งหากมีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## ภาคผนวก ข

### มาตรฐานที่เกี่ยวข้อง

ตารางที่ ข.1 การจัดขนาดของเมล็ดกาแฟโรบัสตา

รหัสขนาด	ขนาดของเมล็ดกาแฟ (mm)	ขนาดตะแกรงร่อน (sieve No.)
1	$\geq 7.14$	18
2	$6.75 < 7.14$	17
3	$6.35 < 6.75$	16
4	$5.95 < 6.35$	15
5	$5.56 < 5.95$	14
6	$4.76 < 5.56$	12
7	$< 4.76$	-

ที่มา: (มกษ. 5700-2561)

ตารางที่ ข.2 ค่า Agron number เทียบกับระดับการคั่วกาแฟ

Agron number	Deegree of roast
95-85	Very light roast
85-75	Light roast
75-65	Light-medium roast
65-55	medium roast
55-45	medium-dark roast
45-35	dark roast
35-30	italian roast
30-25	French roast

ที่มา: Lin, C, H.(2016)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## ColorTrack Coffee Color Selector

COFFEE LABORATORY



รูปที่ ข.1 ค่าสีที่ใช้ในการแปลงค่า Agtron number เบื้องต้น

ที่มา: (Coffee Laboratory, 2020)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## ภาคผนวก ค

### ชุดคำสั่งที่พัฒนาขึ้น

รหัสคำสั่งหน้าแรก First\_Page

```
function varargout = First_Page(varargin)
gui_Singleton = 1;
gui_State = struct('gui_Name',    mfilename, ...
                  'gui_Singleton', gui_Singleton, ...
                  'gui_OpeningFcn', @First_Page_OpeningFcn, ...
                  'gui_OutputFcn', @First_Page_OutputFcn, ...
                  'gui_LayoutFcn', [], ...
                  'gui_Callback', []);
if nargin && ischar(varargin{1})
    gui_State.gui_Callback = str2func(varargin{1});
end
if nargout
    [varargout{1:nargout}] = gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
else
    gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
end
function First_Page_OpeningFcn(hObject, eventdata, handles, varargin)

handles.output = hObject;          % Choose default command line output for
First_Page
guidata(hObject, handles);        % Update handles structure
function varargout = First_Page_OutputFcn(hObject, eventdata, handles)
varargout{1} = handles.output
```

```
function pushbutton1_Callback(hObject, eventdata, handles)
```

```
function pushbutton2_Callback(hObject, eventdata, handles)
```

```
run('Select and Segmentation Page.m')
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเท่านั้น เมื่อคุณเปิดให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น ยกเว้นห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

```
function pushbutton3_Callback(hObject, eventdata, handles)
```

**รหัสคำสั่ง Color analysis**

```
function varargout = Color_Analyze_Page(varargin)
```

```
gui_Singleton = 1;
```

```
gui_State = struct('gui_Name',    mfilename, ...
```

```
    'gui_Singleton',  gui_Singleton, ...
```

```
    'gui_OpeningFcn', @Color_Analyze_Page_OpeningFcn, ...
```

```
    'gui_OutputFcn',  @Color_Analyze_Page_OutputFcn, ...
```

```
    'gui_LayoutFcn',  [], ...
```

```
    'gui_Callback',   []);
```

```
if nargin && ischar(varargin{1})
```

```
    gui_State.gui_Callback = str2func(varargin{1});
```

```
end
```

```
if nargin
```

```
    [varargout{1:nargout}] = gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
```

```
else
```

```
    gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
```

```
end
```

```
function Color_Analyze_Page_OpeningFcn(hObject, eventdata, handles, varargin)
```

```
handles.output = hObject;
```

```
set(handles.radiobutton1, 'Value', 1);
```

```
global Image
```

```
handles.I = Image.Color;
```

```
handles.BW = Image.BW;
```

```
I = handles.I;
```

```
BW = handles.BW;
```

```
BW = bwlabel(BW);
```

```
handles.R = Individual_Color_Average(I(:, :, 1), BW, max(max(BW)));
```

```
handles.G = Individual_Color_Average(I(:, :, 2), BW, max(max(BW)));
```

```
handles.B = Individual_Color_Average(I(:, :, 3), BW, max(max(BW)));
```

This report is for educational use only. It is not to be used for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ควรนำไปสู่ส่วนราชการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆก็ตาม กรุณาแจ้งชื่อหน่วยงานที่นำเอกสารนี้ไปใช้ทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

axes(handles.axes1);rectangle('FaceColor',[mean(handles.R),mean(handles.G),mean(handles.B)]);axis('off');
Data =
round([mean(handles.R*255),std(handles.R*255),max(handles.R*255),min(handles.R*255);...
mean(handles.G*255),std(handles.G*255),max(handles.G*255),min(handles.G*255);...
mean(handles.B*255),std(handles.B*255),max(handles.B*255),min(handles.B*255)],2);
set(handles.uitable1,'ColumnName',{'AVG','SD','Max','Min'],'Data',Data,'RowName',{'R','G','B'});
Lab = xyz2lab(rgb2xyz([handles.R,handles.G,handles.B]));
Agtron = mean(7.602 + (Lab(:,1)*1.237));
if Agtron > 85
    set(handles.edit5,'String','Very light roast');
elseif Agtron > 75 && Agtron <= 85
    set(handles.edit5,'String','Light roast');
elseif Agtron > 65 && Agtron <= 75
    set(handles.edit5,'String','Light-medium roast');
elseif Agtron > 55 && Agtron <= 65
    set(handles.edit5,'String','Medium roast');
elseif Agtron > 45 && Agtron <= 55
    set(handles.edit5,'String','Medium-dark roast');
elseif Agtron > 35 && Agtron <= 45
    set(handles.edit5,'String','Dark roast');
elseif Agtron > 30 && Agtron <= 35
    set(handles.edit5,'String','Italian roast');
else
    set(handles.edit5,'String','French roast');
end
guidata(hObject, handles);

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ในการเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ไปใช้ประโยชน์ทางการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆก็ตาม หากมีข้อสงสัยหรือต้องการข้อมูลเพิ่มเติม กรุณาติดต่อฝ่ายวิชาการ โทร. 0-2929-1000

This repository is not to be used for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

```

Lab = xyz2lab(rgb2xyz([handles.R,handles.G,handles.B]));
Agtron = 0.734318 + (Lab(:,1)*3.388345) + (Lab(:,2)*3.970327) - (Lab(:,3)*4.694510);
figure; histogram(Agtron);
function pushbutton2_Callback(hObject, eventdata, handles)
XYZ = rgb2xyz([handles.R,handles.G,handles.B]);
Lab = xyz2lab(XYZ);
C = sqrt(Lab(:,2).^2+Lab(:,3).^2);
h = atan2d(Lab(:,3),Lab(:,2));
h(h<=0) = h(h<=0)+360;
Agtron = 0.734318 + (Lab(:,1)*3.388345) + (Lab(:,2)*3.970327) - (Lab(:,3)*4.694510);
[file,path] = uiputfile(strcat(datestr(datetime('now'),'yyyy mm dd HHMM'),'
Color','.xlsx'),'Save as');
Table = table(handles.R*255,handles.G*255,handles.B*255,...
    XYZ(:,1)*100,XYZ(:,2)*100,XYZ(:,3)*100,Lab(:,1),Lab(:,2),Lab(:,3),...
    Lab(:,1),C,h,Agtron);
Table.Properties.VariableNames = {'R of RGB','G of RGB','B of RGB',...
    'X of XYZ','Y of XYZ','Z of XYZ','L* of CIELAB','a* of CIELAB',...
    'b* of CIELAB','L* of CIELCh','C* of CIELCh','h of CIELCh','Agtron'};
writetable(Table,strcat(path,file));
function radiobutton1_Callback(hObject, eventdata, handles)
V1 = handles.R*255;
V2 = handles.G*255;
V3 = handles.B*255;
Data = round([mean(V1),std(V1),max(V1),min(V1);...
    mean(V2),std(V2),max(V2),min(V2);...
    mean(V3),std(V3),max(V3),min(V3)],2);
set(handles.uitable1,'ColumnName',{'AVG','SD','Max','Min'],'Data',Data,'RowName',{'R','G','
B'});
function radiobutton2_Callback(hObject, eventdata, handles)
XYZ = rgb2xyz([handles.R,handles.G,handles.B]);
V1 = XYZ(:,1)*100;
V2 = XYZ(:,2)*100;
V3 = XYZ(:,3)*100;

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ภายใต้อะไรก็ตาม หากมีให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is intended for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

```

Data = round([mean(V1),std(V1),max(V1),min(V1);...
    mean(V2),std(V2),max(V2),min(V2);...
    mean(V3),std(V3),max(V3),min(V3)],2);
set(handles.uitable1,'ColumnName',{'AVG','SD','Max','Min'],'Data',Data,'RowName',{'X','Y','Z'});
function radiobutton3_Callback(hObject, eventdata, handles)
Lab = xyz2lab(rgb2xyz([handles.R,handles.G,handles.B]));
V1 = Lab(:,1);
V2 = Lab(:,2);
V3 = Lab(:,3);
Data = round([mean(V1),std(V1),max(V1),min(V1);...
    mean(V2),std(V2),max(V2),min(V2);...
    mean(V3),std(V3),max(V3),min(V3)],2);
set(handles.uitable1,'ColumnName',{'AVG','SD','Max','Min'],'Data',Data,'RowName',{'L*','a*','b*'});
function radiobutton4_Callback(hObject, eventdata, handles)
Lab = xyz2lab(rgb2xyz([handles.R,handles.G,handles.B]));
V1 = Lab(:,1);
V2 = sqrt(Lab(:,2).^2+Lab(:,3).^2);
V3 = atan2d(Lab(:,3),Lab(:,2));
V3(V3<=0) = V3(V3<=0)+360;
Data = round([mean(V1),std(V1),max(V1),min(V1);...
    mean(V2),std(V2),max(V2),min(V2);...
    mean(V3),std(V3),max(V3),min(V3)],2);
set(handles.uitable1,'ColumnName',{'AVG','SD','Max','Min'],'Data',Data,'RowName',{'L*','C*','h'});
function radiobutton5_Callback(hObject, eventdata, handles)
Lab = xyz2lab(rgb2xyz([handles.R,handles.G,handles.B]));
Agtron = 7.602 + (Lab(:,1)*1.237);
Data = round([mean(Agtron),std(Agtron),max(Agtron),min(Agtron)],2);
set(handles.uitable1,'ColumnName',{'AVG','SD','Max','Min'],'Data',Data,'RowName',{'Agtron'});

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้วยการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ; ทั้งนี้ห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## รหัสคำสั่งสีเฉลี่ย Individual\_Color\_Average

```
function [Avg] = Individual_Color_Average(I,BW,n)
for i = 1:n
    [r,c] = find(bwlabel(BW)==i);
    for j = 1:length(r)
        data(j,:) = I(r(j),c(j));
    end
    Avg(i,:) = mean(data);
end
end
```

## รหัสคำสั่งคาลิเบตสี Calibrate

```
function [I_C] = Calibrate(I)

I = (double(I))/255; %Change unit8 to double and [0-255] to [0-1]
IXYZ = rgb2xyz(I); %Change from RGB [0-1] colorspace to
CIEXYZ % [0-1] colorspace
IXYZ(:,1) = IXYZ(:,1)*1.018552; %Calibrate the color
IXYZ(:,2) = IXYZ(:,2)*1.021104;
IXYZ(:,3) = IXYZ(:,3)*1.020240;
IRGB = xyz2rgb(IXYZ);
IHSV = rgb2hsv(IRGB);
IHSV(:,2) = IHSV(:,2)*1.334153;
I_C = hsv2rgb(IHSV);

end
```

## รหัสคำสั่ง Size

```
function varargout = Size_Analyze_Page(varargin)
gui_Singleton = 1;
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์การใช้งานเพื่อการศึกษานั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้  
'gui\_OpeningFcn', @Size\_Analyze\_Page\_OpeningFcn, ...

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

```

        'gui_OutputFcn', @Size_Analyze_Page_OutputFcn, ...
        'gui_LayoutFcn', [], ...
        'gui_Callback', []);
if nargin && ischar(varargin{1})
    gui_State.gui_Callback = str2func(varargin{1});
end
if nargin
    [varargout{1:nargout}] = gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
else
    gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
end
function Size_Analyze_Page_OpeningFcn(hObject, eventdata, handles, varargin)
handles.output = hObject; % Choose default command line output for
Size_Analyze_Page
set(handles.radiobutton1,'Value',1); % Update handles structure
global Image
handles.BW = Image.BW;
handles.Data =
table2array(struct2table(regionprops(handles.BW,'Area','MajorAxisLength','MinorAxisLen
gth','Perimeter','BoundingBox')));
handles.Data(:,9) = FindFeretD(handles.BW);
handles.Data(:,10) = FindFD(handles.BW);
Data_temp = handles.Data(:,1)/529;
set(handles.edit1,'String',num2str(mean(Data_temp)));
set(handles.edit2,'String',num2str(std(Data_temp)));
set(handles.edit3,'String',num2str(max(Data_temp)));
set(handles.edit4,'String',num2str(min(Data_temp)));
axes(handles.axes1);histogram(Data_temp);
guidata(hObject, handles);
function varargout = Size_Analyze_Page_OutputFcn(hObject, eventdata, handles)
varargout{1} = handles.output;
function pushbutton2_Callback(hObject, eventdata, handles)

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดก็ตาม กรุณาแจ้งที่ [info@kmutt.ac.th](mailto:info@kmutt.ac.th) หรือ โทร. 02-2524000-1000 หากเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

```

[file,path] = uiputfile(strcat(datestr(datetime('now'),'yyyy mm dd HHMM'),'
Size','.xlsx'),'Save as');
Area = handles.Data(:,1)/529;
Perimeter = handles.Data(:,8)/23;
MajorAxis = handles.Data(:,6)/23;
MinorAxis = handles.Data(:,7)/23;
EqD = sqrt(4*Area/pi);
FeretD = handles.Data(:,9)/23;
Formfactor = (4*pi*Area)./(Perimeter.^2);
Roundness = (4*Area)./(pi*FeretD.^2);
AxialRatio = MinorAxis./MajorAxis;
Extent = handles.Data(:,1)./(handles.Data(:,4).*handles.Data(:,5));
Fractal = handles.Data(:,10);

Table =
table(Area,Perimeter,MajorAxis,MinorAxis,EqD,FeretD,Formfactor,Roundness,AxialRatio,
Extent,Fractal);
writetable(Table,strcat(path,file));
function radiobutton1_Callback(hObject, eventdata, handles)
Data_temp = handles.Data(:,1)/529;
set(handles.edit1,'String',num2str(mean(Data_temp)));
set(handles.edit2,'String',num2str(std(Data_temp)));
set(handles.edit3,'String',num2str(max(Data_temp)));
set(handles.edit4,'String',num2str(min(Data_temp)));
axes(handles.axes1);histogram(Data_temp);
function radiobutton2_Callback(hObject, eventdata, handles)
Data_temp = handles.Data(:,3)./handles.Data(:,2);
set(handles.edit1,'String',num2str(mean(Data_temp)));
set(handles.edit2,'String',num2str(std(Data_temp)));
set(handles.edit3,'String',num2str(max(Data_temp)));
set(handles.edit4,'String',num2str(min(Data_temp)));
axes(handles.axes1);histogram(Data_temp);

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆก็ตาม กรุณาแจ้งเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## รหัสคำสั่งเลือก Segmentation

```
function varargout = Select_and_Segmentation_Page(varargin)
gui_Singleton = 1;
gui_State = struct('gui_Name',    mfilename, ...
                  'gui_Singleton', gui_Singleton, ...
                  'gui_OpeningFcn', @Select_and_Segmentation_Page_OpeningFcn, ...
                  'gui_OutputFcn', @Select_and_Segmentation_Page_OutputFcn, ...
                  'gui_LayoutFcn', [] , ...
                  'gui_Callback', []);
```

```
if nargin && ischar(varargin{1})
```

```
    gui_State.gui_Callback = str2func(varargin{1});
```

```
end
```

```
if nargin
```

```
    [varargout{1:nargout}] = gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
```

```
else
```

```
    gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
```

```
end
```

```
function Select_and_Segmentation_Page_OpeningFcn(hObject, eventdata, handles,
varargin)
```

```
handles.output = hObject;
```

```
clear global
```

```
set(handles.pushbutton2,'Enable','Off');
```

```
set(handles.pushbutton3,'Enable','Off');
```

```
set(handles.pushbutton4,'Enable','Off');
```

```
axes(handles.axes3); rectangle('FaceColor',[1,1,1]);axis('off');
```

```
axes(handles.axes4); rectangle('FaceColor',[1,1,1]);axis('off');
```

```
guidata(hObject, handles);
```

```
.
```

```
function varargout = Select_and_Segmentation_Page_OutputFcn(hObject, eventdata,
handles)
```

```
varargout{1} = handles.output;
```

```
function pushbutton1_Callback(hObject, eventdata, handles)
```

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามเผยแพร่เอกสารนี้ออกไป และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

clear Imname ImPath %Select an image
file
    [Imname,ImPath] = uigetfile('*.*jpg;*.jpeg','Select the image');
    handles.Imname = Imname;
    handles.ImPath = ImPath;
    set(handles.text2,'String',strcat('Image name: ',Imname)); %Show image name
    I = imread(strcat(ImPath,Imname)); %Image
segmentation
    I = ColorCalibrate(I);
    handles.I = I;
    axes(handles.axes3); imshow(handles.I); %Show selected image and its
segmentation
    set(handles.pushbutton2,'Enable','On'); %Go to analyzing section
guidata(hObject, handles);
function pushbutton2_Callback(hObject, eventdata, handles)
    I = handles.I;
    [Result_Color,Result_BW] = Segmentation(I);
    handles.I_BW = Result_BW;
    axes(handles.axes4); imshow(Result_Color);
    set(handles.pushbutton3,'Enable','On'); %Go to analyzing section
    set(handles.pushbutton4,'Enable','On');
guidata(hObject, handles);
function pushbutton3_Callback(hObject, eventdata, handles)
global Image
Image.Color = handles.I;
Image.BW = handles.I_BW;
run('Color_Analyze_Page.m')
function pushbutton4_Callback(hObject, eventdata, handles)
global Image
Image.BW = handles.I_BW;
run('Size_Analyze_Page.m')

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This is **รหัสคำสั่ง Segmentation** educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

```

function [Result_Color,Result_BW] = Segmentation(I) % Detailed explanation goes
here
BW = imsegment(I);
I_BW(:, :, 1) = immultiply(I(:, :, 1), BW);
I_BW(:, :, 2) = immultiply(I(:, :, 2), BW);
I_BW(:, :, 3) = immultiply(I(:, :, 3), BW);
Data = regionprops(BW, 'BoundingBox');
[xlim, ylim] = size(BW);
for i = 1:length(Data)
    x = Data(i).BoundingBox(1,1);
    y = Data(i).BoundingBox(1,2);
    xl = Data(i).BoundingBox(1,3);
    yl = Data(i).BoundingBox(1,4);
    if x-150.5 > 0
        x = x-150.5;
    else
        x = 1;
    end
    if y-150.5 > 0
        y = y-150.5;
    else
        y = 1;
    end
    if xl+250 > xlim
        xl = xlim;
    else
        xl = xl+250;
    end
    if yl+250 > ylim
        yl = ylim;
    else
        yl = yl+250;
    end
end

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น  $yl = yl + 250$ ; มิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

```

C = imcrop(I,[x,y,xl,yl]);
C_BW = imsegment(C);
I_BW(y:y+yl,x:x+xl,1) = immultiply(I(y:y+yl,x:x+xl,1),C_BW);
I_BW(y:y+yl,x:x+xl,2) = immultiply(I(y:y+yl,x:x+xl,2),C_BW);
I_BW(y:y+yl,x:x+xl,3) = immultiply(I(y:y+yl,x:x+xl,3),C_BW);
BW(y:y+yl,x:x+xl) = immultiply(BW(y:y+yl,x:x+xl),C_BW);
end
Result_Color = I_BW;
Result_BW = BW;
end
function [Result] = imsegment(I)
R = I(:, :, 1);
G = I(:, :, 2);
B = I(:, :, 3);
BW_R = imbinarize(R,'adaptive','ForegroundPolarity','dark','Sensitivity',0.4);
BW_G = imbinarize(G,'adaptive','ForegroundPolarity','dark','Sensitivity',0.4);
BW_B = imbinarize(B,'adaptive','ForegroundPolarity','dark','Sensitivity',0.4);
BW_R = imcomplement(BW_R);
BW_G = imcomplement(BW_G);
BW_B = imcomplement(BW_B);
se = strel('disk',10);
BW_R = imclose(BW_R,se);
BW_G = imclose(BW_G,se);
BW_B = imclose(BW_B,se);
BW_R = imfill(BW_R,'holes');
BW_G = imfill(BW_G,'holes');
BW_B = imfill(BW_B,'holes');
E_R = edge(R);
E_G = edge(G);
E_B = edge(B);

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับอาจารย์ที่ภาควิชาศึกษาคำนวณ ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น ขอสงวนสิทธิ์ในชื่อของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is for personal use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

```

E_RGB = logical(imadd(E_RG,E_B));
BW = logical(imadd(BW_RGB,E_RGB));
BW = imfill(BW,'holes');
BW = imclose(BW,se);
BW = imfill(BW,'holes');
BW = bwareaopen(BW,1000);
BW = imopen(BW,se);
Result = bwareaopen(BW,10000);

```

End

**รหัสคำสั่ง FindFD(BW)**

```

function [FD] = FindFD(BW)
Data = regionprops(BW,'BoundingBox');
for i = 1:length(Data)
    x = Data(i).BoundingBox(1,1);
    y = Data(i).BoundingBox(1,2);
    xl = Data(i).BoundingBox(1,3);
    yl = Data(i).BoundingBox(1,4);
    C = imcrop(BW,[x,y,xl,yl]);
    E = bwperim(C);
    [count,box] = boxcount(E);
    FD(i,1) = mean(-gradient(log(count))./gradient(log(box)));
end
end

function [n,r] = boxcount(c,varargin)
error(nargchk(1,2,nargin)); % control input argument
if ndims(c)==3 % check for true color image (m-by-n-by-3
array)

    if size(c,3)==3 && size(c,1)>=8 && size(c,2)>=8

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

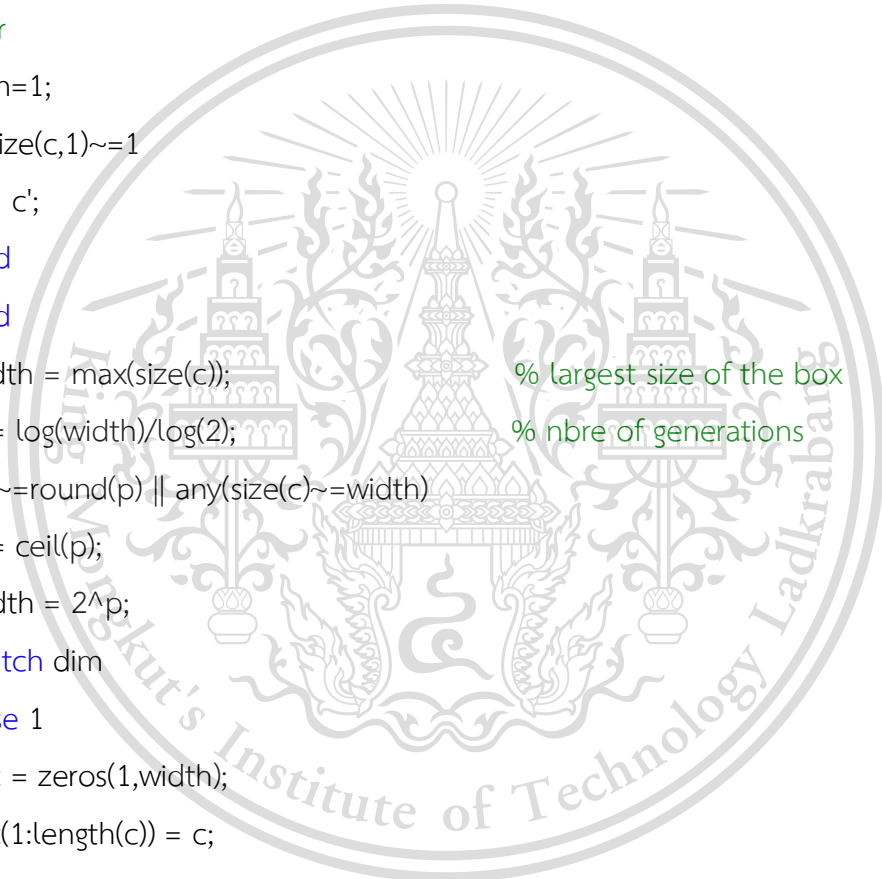
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

```

warning off
c = logical(squeeze(c));
warning on
dim = ndims(c); % dim is 2 for a vector or a matrix, 3 for a
cube
if dim>3
    error('Maximum dimension is 3.');
```



```

end
if length(c)==numel(c) % transpose the vector to a 1-by-n
vector
    dim=1;
    if size(c,1)~=1
        c = c';
    end
    end
    width = max(size(c)); % largest size of the box
    p = log(width)/log(2); % nbre of generations
    if p~=round(p) || any(size(c)~=width)
        p = ceil(p);
        width = 2^p;
        switch dim
        case 1
            mz = zeros(1,width);
            mz(1:length(c)) = c;
            c = mz;
        case 2
            mz = zeros(width, width);
            mz(1:size(c,1), 1:size(c,2)) = c;
            c = mz;
        case 3
            mz = zeros(width, width, width);
            mz(1:size(c,1), 1:size(c,2), 1:size(c,3)) = c;
            c = mz;
        end
    end
end

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ภายในเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆก็ตาม หากมีข้อสงสัยประการใดๆ กรุณาติดต่ออำนวยการเรียนการสอนและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

```

end
end
n=zeros(1,p+1); % pre-allocate the number of box of
size r
switch dim
case 1 %----- 1D boxcount -----
%
n(p+1) = sum(c);
for g=(p-1):-1:0
siz = 2^(p-g);
siz2 = round(siz/2);
for i=1:siz:(width-siz+1)
c(i) = ( c(i) || c(i+siz2));
end
n(g+1) = sum(c(1:siz:(width-siz+1)));
end
case 2 %----- 2D boxcount -----
--%
n(p+1) = sum(c(:));
for g=(p-1):-1:0
siz = 2^(p-g);
siz2 = round(siz/2);
for i=1:siz:(width-siz+1)
for j=1:siz:(width-siz+1)
c(i,j) = ( c(i,j) || c(i+siz2,j) || c(i,j+siz2) || c(i+siz2,j+siz2) );
end
end
n(g+1) = sum(sum(c(1:siz:(width-siz+1),1:siz:(width-siz+1))));
end
case 3 %----- 3D boxcount -----

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น (n(p+1) = sum(c(:));) แต่สามารถนำเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

```

siz = 2^(p-g);
siz2 = round(siz/2);
for i=1:siz:(width-siz+1),
for j=1:siz:(width-siz+1),
for k=1:siz:(width-siz+1),
c(i,j,k)=( c(i,j,k) || c(i+siz2,j,k) || c(i,j+siz2,k) ...
|| c(i+siz2,j+siz2,k) || c(i,j,k+siz2) || c(i+siz2,j,k+siz2) ...
|| c(i,j+siz2,k+siz2) || c(i+siz2,j+siz2,k+siz2));
end
end
end

n(g+1) = sum(sum(sum(c(1:siz:(width-siz+1),1:siz:(width-siz+1),1:siz:(width-
siz+1)))));
end
end
n = n(end:-1:1);
r = 2.^(0:p); % box size (1, 2, 4, 8...)
if any(strncmpi(varargin,'slope',1))
s=-gradient(log(n))./gradient(log(r));
semilogx(r, s, 's-');
ylim([0 dim]);
xlabel('r, box size'); ylabel('- d ln n / d ln r, local dimension');
title([num2str(dim) 'D box-count']);
elseif nargin==0 || any(strncmpi(varargin,'plot',1))
loglog(r,n,'s-');
xlabel('r, box size'); ylabel('n(r), number of boxes');
title([num2str(dim) 'D box-count']);
end
end
if nargin==0
clear r n

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 end  
 end  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

### รหัสคำสั่ง FeretD

```

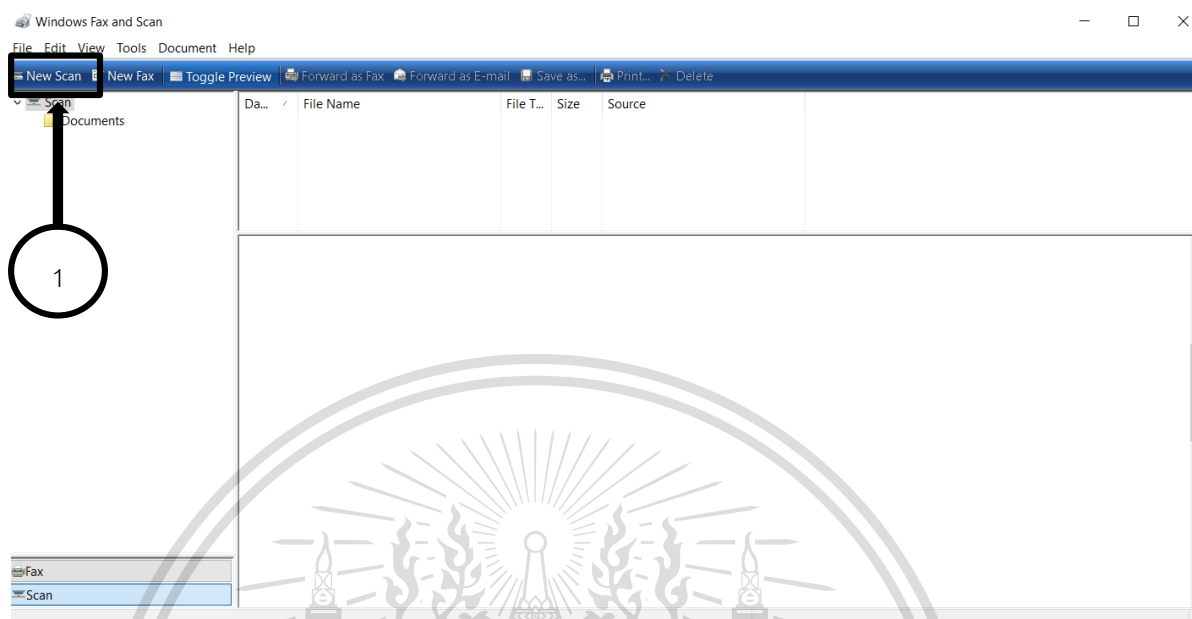
function [FeretD] = FindFeretD(BW)
Data = regionprops(BW,'BoundingBox');
for i = 1:length(Data)
    x = Data(i).BoundingBox(1,1);
    y = Data(i).BoundingBox(1,2);
    xl = Data(i).BoundingBox(1,3);
    yl = Data(i).BoundingBox(1,4);
    C = imcrop(BW,[x,y,xl,yl]);
    FeretD(i,1) = FerretDiameter(C);
end
end
function [Feret] = FerretDiameter(I)
count = 1;
for i = -180:180
    BW = imrotate(I,i);
    temp1 = regionprops(BW,'Area');
    temp1 = cell2mat(struct2cell(temp1));
    BW = bwareaopen(BW,max(temp1));
    Data = regionprops(BW,'BoundingBox');
    L1 = Data.BoundingBox(3);
    L2 = Data.BoundingBox(4);
    temp(count) = max(L1,L2);
    count = count+1;
end
Feret = max(temp);
end

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ ค.1 โปรแกรม Window Fax and Scan

กดคำสั่ง 'New Scan' หมายเลข 1 ที่อยู่ด้านบนซ้ายมือด้านล่าง Menu bar เมื่อกดแล้วจะมีหน้าต่างเพื่อป้อนค่าทำการตั้งค่าตามตารางที่ปรากฏดังตารางที่ 4.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.