

การผลิตถ่านกัมมันต์จากเมล็ดมะม่วงมหาชนกเพื่อชะลอการสุกของมะม่วง

PRODUCTION OF ACTIVATED CARBONS FROM MAHACHANOK'S MANGO SEEDS  
FOR DELAY RIPENING OF MANGOES



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2566

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



การผลิตถ่านกัมมันต์จากเม็ดมะม่วงมหาชนกเพื่อชะลอการสุกของมะม่วง



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2566

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

PRODUCTION OF ACTIVATED CARBONS FROM MAHACHANOK'S MANGO SEEDS  
FOR DELAY RIPENING OF MANGOES



PHORNWIMON KRAIJAN

SIRAPHOB LAONORK

APIWAT RODMEE

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF  
BACHELOR OF ENGINEERING IN CHEMICAL ENGINEERING  
FACULTY OF ENGINEERING  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG  
ACADEMIC YEAR 2023

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อปริญญานิพนธ์	การผลิตถ่านกัมมันต์จากเม็ดมะม่วงมหาชนกเพื่อชะลอการสุกของมะม่วง		
นักศึกษา	นางสาวพรวิมล ไกรจันทร์	รหัสนักศึกษา	63010646
	นายสิรภพ เหล่านอก	รหัสนักศึกษา	63010970
	นายอภิวัฒน์ รอดมี	รหัสนักศึกษา	63011047
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต		
สาขาวิชา	วิศวกรรมเคมี		
ปีการศึกษา	2566		
อาจารย์ที่ปรึกษา	รศ.ดร.พรสวรรค์ อัครแสงรัตน์		
	ผศ.ดร.พงษ์เสริฐ ศรีพรหม		

ปริญญานิพนธ์นี้ได้รับการพิจารณาอนุมัติให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

คณะกรรมการตรวจสอบปริญญานิพนธ์

ประธานกรรมการ

(รศ.ดร.พรสวรรค์ อัครแสงรัตน์)

กรรมการ

(ผศ.ดร.ณัฐนนท์ ไพบูลย์ศิลป์)

กรรมการ

(ผศ.ดร.ภัทรานิษฐ์ วงศ์พร้อมรัตน์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อปริญญานิพนธ์	การผลิตถ่านกัมมันต์จากเม็ดมะม่วงมหาชนกเพื่อชะลอการสุกของมะม่วง		
นักศึกษา	นางสาวพรวิมล ไกรจันทร์	รหัสนักศึกษา	63010646
	นายสิรภพ เหล่านอก	รหัสนักศึกษา	63010970
	นายอภิวัฒน์ รอดมี	รหัสนักศึกษา	63011047
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต		
สาขาวิชา	วิศวกรรมเคมี		
ปีการศึกษา	2566		
อาจารย์ที่ปรึกษา	รศ.ดร.พรสวรรค์ อัครแสงรัตน์		
	ผศ.ดร.พงษ์เสริฐ ศรีพรหม		

## บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาการผลิตถ่านกัมมันต์จากเม็ดมะม่วงมหาชนก เพื่อชะลอการสุกของมะม่วงในการเตรียมถ่านกัมมันต์ ขั้นตอนแรกการคาร์บอนเซชันเพื่อให้ได้ถ่านไบโอชาร์ และขั้นตอนถัดไป การกระตุ้นเพื่อให้เป็นถ่านกัมมันต์ ในงานวิจัยได้ศึกษาผลของอุณหภูมิคาร์บอนเซชันที่มีผลต่อการผลิตถ่านไบโอชาร์ พบว่าอุณหภูมิคาร์บอนเซชันที่ 500 องศาเซลเซียส มีความเหมาะสมมากที่สุด มีร้อยละผลได้ 25.47 และเลขไอโอดีน 361.77 มิลลิกรัมไอโอดีนต่อกรัมตัวดูดซับ นำถ่านไบโอชาร์ที่ผ่านการคาร์บอนเซชันที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส ไปกระตุ้นทางเคมีด้วยโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตเพื่อเพิ่มความจำเพาะต่อแก๊สเอทิลีนบนพื้นผิว เนื่องจากโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตมีความสามารถในการออกซิไดซ์แก๊สเอทิลีน ถ่านกัมมันต์ที่ได้นำไปตรวจสอบลักษณะทางกายภาพ โดยวิเคราะห์ลักษณะทางสัณฐานทางวิทยา พื้นที่ผิวจำเพาะ และหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิว พบว่าถ่านกัมมันต์มีรูพรุนขนาดเล็กกระจายตัวอยู่บนพื้นผิว โดยมีพื้นที่ผิวจำเพาะ 0.65 ตารางเมตรต่อกรัม และมีหมู่ไฮดรอกซิลและแมงกานีสเกิดขึ้นหลังการกระตุ้น และในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาการชะลอการสุกของมะม่วงน้ำดอกไม้ ควบคุมการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ  $27 \pm 2$  องศาเซลเซียส และไม่มีการควบคุมความชื้น โดยชุดการทดลองถูกแบ่งเป็น 4 ทริตเมนต์ ได้แก่ ทริตเมนต์ควบคุมที่ไม่มีถ่านกัมมันต์ ทริตเมนต์ของถ่านกัมมันต์ปริมาณ 10 กรัมต่อมะม่วง 1 กิโลกรัม ทริตเมนต์ของถ่านกัมมันต์ปริมาณ 20 กรัมต่อมะม่วง 1 กิโลกรัม และทริตเมนต์ของถ่านกัมมันต์ทางการค้าปริมาณ 10 กรัมต่อมะม่วง 1 กิโลกรัม พบว่า ทริตเมนต์ของถ่านกัมมันต์ปริมาณ 10 กรัมต่อมะม่วง 1 กิโลกรัมสามารถชะลอการสุกได้ดีที่สุด โดยสามารถชะลอได้ประมาณ 2 วันเมื่อเปรียบเทียบกับทริตเมนต์ควบคุม ในขณะที่ทริตเมนต์ของถ่านกัมมันต์ทางการค้าไม่สามารถชะลอการสุกได้

คำสำคัญ: ถ่านกัมมันต์, การชะลอการสุกของมะม่วง, การดูดซับแก๊สเอทิลีน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

<b>Thesis Title</b>	Production of activated carbons from Mahachanok's mango seeds for delay ripening of mangoes		
<b>Student</b>	Ms. Phornwimon Kraijan	<b>Student ID</b>	63010646
	Mr. Siraphob Laonork	<b>Student ID</b>	63010970
	Mr. Apiwat Rodmee	<b>Student ID</b>	63011047
<b>Degree</b>	Bachelor of Engineering		
<b>Program</b>	Chemical Engineering		
<b>Year</b>	2023		
<b>Thesis Advisor</b>	Assoc. Prof. Dr. Pornsawan Assawasaengrat		
	Asst. Prof. Dr. Pongsert Sriprom		

## ABSTRACT

This research studied the production of activated carbon from Mahachanok's mango seeds to delay the ripening of mangoes. Activated carbon production involves carbonization to obtain biochar and activation to convert it into activated carbon. The research investigated the effect of carbonization temperature on biochar production. The results showed that the optimal carbonization temperature is 500 °C, with a yield percentage of 25.47 and an iodine number of 361.77 mg/g. The biochar obtained at a carbonization temperature of 500 °C was activated with potassium permanganate to create specificity for ethylene gas on its surface because it can oxidize it. The activated carbon was investigated for its morphology, specific surface area, and functional groups. The results showed that the activated carbon had small pores distributed on the surface, with a specific surface area of 0.649 m<sup>2</sup>/g and the presence of hydroxyl and manganyl groups after activation. In addition, the research studied the ripening delay of Nam Dok Mai mango in controlled storage conditions at 27±2 °C and without humidity control. The experimental set was divided into 4 treatments: control treatment without activated carbon, treatment of activated carbon at 10 g per 1 kg of mango, treatment of activated carbon at 20 g per 1 kg of mango, and treatment of commercial activated carbon at 10 g per 1 kg of mango. The results showed that the best treatment for delayed ripening is the treatment of activated carbon at 10 g per 1 kg of mango. Compared to the control treatment, it can delay ripening by about 2 days, while the treatment of commercial activated carbon cannot delay ripening.

**Keywords:** Activated carbon, Ripening delay of mango, Ethylene adsorption

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยการผลิตถ่านกัมมันต์จากเมล็ดมะม่วงมหาชนกสามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับความอนุเคราะห์และความช่วยเหลือจากบุคคลหลายท่าน ทางผู้วิจัยขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.พรสวรรค์ อัครแสงรัตน์ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พงษ์เสรีฐ ศรีพรหม อาจารย์ที่ปรึกษาที่ได้กรุณาให้คำปรึกษา และคำแนะนำในการจัดทำโครงการวิจัย

ขอขอบพระคุณ คุณพิสันต์ ผลโพธิ์ ที่คอยให้คำแนะนำในการใช้เครื่องมือการทดลองต่างๆ ใน ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ได้เป็นอย่างดี และปลอดภัย ขอขอบพระคุณ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่องตรวจ โครงสร้างสัณฐานวิทยา ทำให้งานวิจัยชิ้นนี้มีผลของลักษณะโครงสร้างสัณฐานวิทยา ขอขอบพระคุณ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่องวัดพื้นที่ผิวและ ความเป็นรูพรุนของตัวอย่าง ทำให้งานวิจัยชิ้นนี้มีผลของพื้นที่ผิวจำเพาะของตัวอย่าง ขนาด และ ปริมาตรของรูพรุนบนตัวอย่าง ขอขอบพระคุณ คุณวสันต์ โชคลาภ ที่ท่านได้ให้ความอนุเคราะห์ใน การนำวัตถุตัวอย่างไปตรวจหาหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ ที่โรงงานของท่าน จนทำให้งานวิจัยชิ้นนี้มีผลตรวจหาหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวถ่านกัมมันต์ ขอขอบพระคุณ คณะอุตสาหกรรมอาหาร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่องตรวจ วัดสี และเครื่องวิเคราะห์เนื้อสัมผัส ทำให้งานวิจัยชิ้นนี้มีผลตรวจสีของเปลือกและเนื้อของมะม่วง น้ำดอกไม้ และผลตรวจความแน่นเนื้อของมะม่วงน้ำดอกไม้

สุดท้ายนี้ ทางผู้วิจัยขอโน้มรำลึกถึงพระคุณของบิดา มารดา ผู้ซึ่งมีพระคุณสูงสุดที่ได้ให้การ อุปการะผู้วิจัยมาโดยตลอด รวมทั้งบุคคลรอบข้างทุกคนที่มีความเกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้ ที่ได้ให้ความ ช่วยเหลือและเป็นกำลังใจในการจัดทำงานวิจัยนี้จนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ผู้วิจัยรู้สึกยินดีเป็นอย่าง ยิ่ง จึงขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงมา ณ โอกาสนี้

พรวิมล ไกรจันทร์

สิริภพ เหล่านอก

อภิวัฒน์ รอดมี

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ.....	I
ABSTRACT.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญรูป.....	VIII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 กระบวนการดูดซับ.....	4
2.1.1 ประเภทของการดูดซับ.....	4
2.1.2 กลไกการดูดซับ.....	5
2.1.3 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ.....	6
2.2 ถ่านกัมมันต์.....	6
2.2.1 โครงสร้างของถ่านกัมมันต์.....	7
2.2.2 ประเภทของถ่านกัมมันต์.....	8
2.2.3 คุณสมบัติของถ่านกัมมันต์.....	10
2.2.4 ประโยชน์ของถ่านกัมมันต์.....	10
2.3 กระบวนการในการผลิตถ่านกัมมันต์.....	11

## สารบัญ (ต่อ)

2.3.1 กระบวนการเตรียมวัตถุดิบ (Preparation process) .....	11
2.3.2 กระบวนการคาร์บอนเซชัน (Carbonization process) .....	11
2.3.3 กระบวนการกระตุ้น (Activation process) .....	12
2.4 การสุกของผลไม้.....	13
2.4.1 ประเภทของผลไม้.....	13
2.4.2 การเปลี่ยนแปลงลักษณะต่างๆ ของผลไม้ในระหว่างการสุก.....	14
2.4.3 ปัจจัยที่มีผลต่อการสุกของผลไม้.....	15
2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	16
<b>บทที่ 3 วิธีการดำเนินการ.....</b>	<b>19</b>
3.1 วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....	19
3.1.1 วัตถุดิบ.....	19
3.1.2 สารเคมีที่ใช้.....	19
3.1.3 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง .....	19
3.2 วิธีการทดลอง.....	20
3.2.1 การผลิตถ่านกัมมันต์.....	20
3.2.2 การศึกษาคุณลักษณะของถ่านกัมมันต์.....	21
3.2.3 การศึกษาอิทธิพลของถ่านกัมมันต์ที่มีผลต่อการชะลอการสุกของมะม่วง .....	21
<b>บทที่ 4 ผลการดำเนินงานวิจัย.....</b>	<b>24</b>
4.1 การผลิตถ่านกัมมันต์ .....	24
4.1.1 การวิเคราะห์องค์ประกอบแบบประมาณของเม็ดมะม่วงมหาชนก.....	24
4.1.2 การศึกษาผลของอุณหภูมิคาร์บอนเซชันในการผลิตถ่านไปโอซาร์.....	24
4.2 การตรวจสอบลักษณะทางกายภาพของถ่านกัมมันต์.....	26
4.2.1 การวิเคราะห์ลักษณะทางสัณฐานวิทยา.....	26

## สารบัญ (ต่อ)

4.2.2 การวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะ.....	27
4.2.3 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันที่อยู่บนพื้นผิว.....	27
4.3 การศึกษาอิทธิพลของถ่านกัมมันต์ที่มีผลต่อการชะลอการสุกของผลไม้.....	28
4.3.1 การสูญเสียน้ำหนักของมะม่วงน้ำดอกไม้.....	28
4.3.2 สีเปลือกและสีเนื้อของมะม่วงน้ำดอกไม้.....	29
4.3.3 ความแน่นเนื้อของมะม่วงน้ำดอกไม้.....	33
4.3.4 ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ของเนื้อมะม่วงน้ำดอกไม้.....	34
4.3.5 ร้อยละปริมาณกรดที่ไทเทรตได้ของเนื้อมะม่วงน้ำดอกไม้.....	35
4.3.6 อัตราส่วนปริมาณของแข็งที่ละลายได้ต่อปริมาณกรดที่ไทเทรตได้ของเนื้อมะม่วงน้ำดอกไม้.....	36
<b>บทที่ 5 สรุปผลงานวิจัยและข้อเสนอแนะ.....</b>	<b>38</b>
5.1 สรุปผลงานวิจัย.....	38
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	39
<b>บรรณานุกรม.....</b>	<b>40</b>
<b>บรรณานุกรม (ต่อ).....</b>	<b>41</b>
<b>บรรณานุกรม (ต่อ).....</b>	<b>42</b>
<b>บรรณานุกรม (ต่อ).....</b>	<b>43</b>
<b>ภาคผนวก.....</b>	<b>45</b>
<b>ภาคผนวก ก วิธีการวิเคราะห์หึ่งค์ประกอบแบบประมาณของวัตถุดิบ.....</b>	<b>46</b>
<b>ภาคผนวก ข วิธีการวิเคราะห์เลขไอโอดีนของถ่านไบโอชาร์.....</b>	<b>50</b>
<b>ภาคผนวก ค วิธีการเตรียมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์มาตรฐาน 0.1 นอร์มัล.....</b>	<b>56</b>
<b>ภาคผนวก ง รูปการทดลอง.....</b>	<b>59</b>

# สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 4.1 องค์ประกอบแบบประมาณของเม็ดมะม่วงมหาชนก .....	24
ตารางที่ 4.2 เลขไอโอดีนของถ่านไบโอชาร์ที่อุณหภูมิคาร์บอนเซชันต่าง ๆ.....	26



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 กลไกการดูดซับของถ่านกัมมันต์ .....	5
รูปที่ 2.2 เปรียบเทียบโครงสร้าง (a) ผลึกแกรไฟต์ (b) ผลึกถ่านกัมมันต์.....	8
รูปที่ 2.3 โครงสร้างของถ่านกัมมันต์ .....	8
รูปที่ 2.4 ขนาดของอนุภาคถ่านกัมมันต์ (a) ถ่านกัมมันต์แบบแท่ง (b) ถ่านกัมมันต์แบบเม็ด .....	9
รูปที่ 4.1 ร้อยละผลได้ของถ่านไบโอชาร์ที่อุณหภูมิคาร์บอนในเซชัน 450, 500, 550.....	25
รูปที่ 4.2 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของ (1) วัตถุดิบเม็ดมะม่วงมหาชนก (2) ถ่านไบโอชาร์ (3) ถ่านกัมมันต์ และ (4) ถ่านกัมมันต์ทางการค้า ที่กำลังขยาย a) 1000 เท่า และ b) 2500 เท่า.....	27
รูปที่ 4.3 กราฟ FT-IR ของโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต ถ่านไบโอชาร์ และถ่านกัมมันต์.....	28
รูปที่ 4.4 การเปลี่ยนแปลงร้อยละการสูญเสียน้ำหนักของมะม่วงน้ำดอกไม้ในทรีตเมนต์ต่างๆ.....	29
รูปที่ 4.5 การเปลี่ยนแปลงสีเปลือกของมะม่วงน้ำดอกไม้ในทรีตเมนต์ต่างๆ ตามจำนวนวันเก็บรักษา .....	30
รูปที่ 4.6 การเปลี่ยนแปลงสีเนื้อของมะม่วงน้ำดอกไม้ในทรีตเมนต์ต่างๆ ตามจำนวนวันเก็บรักษา...	31
รูปที่ 4.7 การเปลี่ยนแปลงค่าสี $\Delta E$ ของเปลือกมะม่วงน้ำดอกไม้ในทรีตเมนต์ต่างๆ.....	32
รูปที่ 4.8 การเปลี่ยนแปลงค่าสี $\Delta E$ ของเนื้อมะม่วงน้ำดอกไม้ในทรีตเมนต์ต่างๆ.....	32
รูปที่ 4.9 ลักษณะภายนอกของมะม่วงน้ำดอกไม้ในทรีตเมนต์ต่างๆ ตามจำนวนวันเก็บรักษา.....	32
รูปที่ 4.10 การเปลี่ยนแปลงความแน่นเนื้อของมะม่วงน้ำดอกไม้ในทรีตเมนต์ต่างๆ ตามจำนวนวันเก็บรักษา.....	34
รูปที่ 4.11 การเปลี่ยนแปลงปริมาณของแข็งที่ละลายได้ของเนื้อมะม่วงน้ำดอกไม้ในทรีตเมนต์ต่างๆ ตามจำนวนวันเก็บรักษา .....	35
รูปที่ 4.12 การเปลี่ยนแปลงปริมาณกรดที่ไทเทรตได้ของเนื้อมะม่วงน้ำดอกไม้ในทรีตเมนต์ต่างๆ ....	36
รูปที่ 4.13 การเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วนปริมาณของแข็งที่ละลายได้ต่อปริมาณกรดที่ไทเทรตได้ของเนื้อมะม่วงน้ำดอกไม้ในทรีตเมนต์ต่างๆ ตามจำนวนวันเก็บรักษา .....	37

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ที่มาและความสำคัญของงานวิจัย

มะม่วงมหาชนก (*Mangifera Indica*) มีคุณลักษณะเด่นคือ สีส้มสวยงาม ผลมีขนาดและรูปร่างดี มีเนื้อเยื่อ เม็ดลีบบาง รสชาติหวานอมเปรี้ยวเล็กน้อย เมื่อสุกงอมมีรสชาติดี มีกลิ่นหอมเฉพาะตัว ซึ่งคุณลักษณะดังกล่าวนี้ทำให้มะม่วงมหาชนกเป็นมะม่วงอีกพันธุ์หนึ่งที่มีความนิยมในการบริโภคสูง [1] แต่ปัญหาที่พบในมะม่วงสายพันธุ์นี้คือ ผลผลิตที่ได้มาตรฐานตามความต้องการของตลาดนั้นมีจำนวนน้อย ส่วนที่เหลือจะเป็นผลผลิตที่มีคุณภาพในการบริโภคแต่มีผิวไม่สวยงาม มีจุดดำและร่องรอยการเข้าทำลายของโรคและแมลงขนาดเล็ก สีและขนาดของผลไม่ตรงตามความต้องการของพ่อค้าคนกลาง เพื่อป้องกันมะม่วงส่วนนี้ล้นตลาด จึงมีการนำมาแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ มากมาย อาทิเช่น มะม่วงแช่อิ่ม, แยมมะม่วง, มะม่วงอบแห้ง เป็นต้น [2] แต่ปัญหาที่หลีกเลี่ยงไม่ได้อีกอย่างหนึ่งคือ ยังคงมีวัสดุเศษเหลือจากการแปรรูปเกิดขึ้น โดยเป็นเม็ดมะม่วงกว่า 60 เปอร์เซ็นต์ ส่งผลให้เกิดปริมาณขยะเหลือทิ้งที่เพิ่มขึ้นทุกปี [3] เพื่อให้ขยะเหลือทิ้งเหล่านี้มีปริมาณน้อยที่สุด แนวคิดการลดขยะให้เป็นศูนย์ หรือ zero waste จึงเป็นแนวคิดที่สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการแก้ไขปัญหาดังกล่าวได้ อีกทั้งยังเป็นแนวคิดที่สอดคล้องกับโมเดลเศรษฐกิจ BCG หรือการพัฒนาเศรษฐกิจชีวภาพ เศรษฐกิจหมุนเวียน และเศรษฐกิจสีเขียว ที่ภาครัฐกำลังให้ความสนใจ [4] ซึ่งหนึ่งในวิธีที่เป็นการนำเม็ดมะม่วงที่เป็นของเหลือทิ้งมาใช้ให้เกิดประโยชน์คือ การนำมาผลิตเป็นถ่านกัมมันต์

ถ่านกัมมันต์ เป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการนำวัสดุที่มีปริมาณคาร์บอนสูงมาผ่านกระบวนการคาร์บอนในเซชัน และการกระตุ้น ตามลำดับ โดยถ่านกัมมันต์ที่ผลิตออกมาได้นั้นสามารถนำไปประยุกต์ใช้ทำตัวเก็บประจุ [5] หรือนำไปประยุกต์ใช้เป็นตัวดูดซับเพื่อกำจัดสารประกอบอินทรีย์ที่ปนเปื้อนอยู่ในน้ำหรือในอากาศ [6] เช่น การกำจัดแก๊สเอทิลีนเพื่อช่วยชะลอการสุกของผลไม้ [7] โดยแก๊สเอทิลีนนั้นเป็นแก๊สที่ปลดปล่อยออกมาจากตัวของผลไม้เอง และมีบทบาททำให้ผลไม้เกิดการสุกได้เร็วขึ้น ซึ่งก่อให้เกิดปัญหาในระหว่างการขนส่งผลไม้ เพื่อแก้ไขปัญหา นี้ ทางคณะผู้ศึกษาจึงได้คิดหาวิธีในการผลิตถ่านกัมมันต์เพื่อนำมาดูดซับแก๊สเอทิลีน โดยจากการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับการดูดซับแก๊สเอทิลีนโดยใช้ถ่านกัมมันต์นั้น พบว่าการกระตุ้นให้เกิดหมู่แอมงาเนตขึ้นบนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดซับแก๊สเอทิลีนได้ดีขึ้น [8] เนื่องจากหมู่แอมงาเนตที่เกิดขึ้นจะทำให้หน้าที่เป็นตัวออกซิไดซ์แก๊สเอทิลีน ส่งผลทำให้ถ่านกัมมันต์มีพื้นที่ผิวจำเพาะเพิ่มขึ้นและสามารถทำ

ปฏิกิริยาได้มากยิ่งขึ้น ซึ่งสารเคมีที่ใช้ในการกระตุ้น คือต่างทับทิมหรือโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต ( $\text{KMnO}_4$ ) โดยปัจจุบันได้มีการศึกษาในการนำชีวมวลมาผลิตเป็นถ่านกัมมันต์เพื่อดูดซับแก๊สเอทิลีน เช่น เปลือกพืศตาคิโอ [9], เศษไม้เนื้อแข็งที่เหลือทิ้งจากกระบวนการทำเยื่อกระดาษ [10], ไม้ไผ่ [8] และชานอ้อย [7] เพื่อให้สอดคล้องกับแนวคิดการลดขยะให้เป็นศูนย์ แต่ยังไม่มียานวิจัยใดที่ผลิตถ่านกัมมันต์จากเม็ดมะม่วงมหาชนก ทางคณะผู้ศึกษาจึงมีแนวคิดที่จะนำวัสดุเศษเหลือจากการแปรรูปมะม่วงมหาชนกมาผลิตเป็นถ่านกัมมันต์ โดยองค์ประกอบทางเคมีที่จำเป็นต่อการสังเคราะห์ถ่านกัมมันต์ที่มีอยู่ในเม็ดมะม่วง คือ สารประกอบลิกโนเซลลูโลส [11] ซึ่งจัดเป็นสารประกอบคาร์โบไฮเดรตชนิดหนึ่ง องค์ประกอบหลักของคาร์โบไฮเดรตก็คือ คาร์บอน โดยในเม็ดมะม่วงนั้นมีปริมาณของคาร์โบไฮเดรตอยู่ที่ 72.86–75.92 เปอร์เซ็นต์ [12] ดังนั้นจึงมีความเป็นไปได้ที่เม็ดมะม่วงจะสามารถถูกนำมาสังเคราะห์เป็นถ่านกัมมันต์เพื่อนำมาใช้ในการชะลอกการสุกโดยการดูดซับแก๊สเอทิลีน

ดังนั้นเป้าหมายของงานวิจัยนี้คือ ศึกษาวิธีการผลิตถ่านกัมมันต์จากเม็ดมะม่วงมหาชนกโดยใช้วิธีการกระตุ้นทางเคมีด้วยสารโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต และเพื่อชะลอกการสุกของมะม่วงได้

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อศึกษาการเตรียมถ่านกัมมันต์จากเม็ดมะม่วงมหาชนก
2. เพื่อศึกษาความสามารถในการชะลอกการสุกของมะม่วงโดยใช้ถ่านกัมมันต์

## 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1. ศึกษาผลของอุณหภูมิคาร์บอนในเซชัน ที่อุณหภูมิ 450, 500, 550 และ 600 องศาเซลเซียส ที่มีผลต่อการเตรียมถ่านไบโอชาร์จากเม็ดมะม่วง จากนั้นทำการกระตุ้นพื้นผิวของถ่านไบโอชาร์ด้วยโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต
2. ศึกษาคุณลักษณะทางกายภาพของถ่านไบโอชาร์และถ่านกัมมันต์ ได้แก่ พื้นที่ผิวจำเพาะ, ลักษณะทางสัณฐานวิทยา และหมู่ฟังก์ชันที่อยู่บนพื้นผิว
3. ทดสอบการสุกของมะม่วง โดยประเมินจากการเปลี่ยนแปลงคุณลักษณะทางกายภาพของมะม่วง ได้แก่ น้ำหนักของมะม่วง, สีเปลือกและเนื้อของมะม่วง, ความแน่นเนื้อของมะม่วง, ปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายได้ และปริมาณกรดที่ไทเทรตได้ของเนื้อมะม่วง
4. ทดสอบหาอัตราส่วนของปริมาณถ่านกัมมันต์ต่อน้ำหนักของมะม่วงที่เหมาะสม
5. เปรียบเทียบความสามารถในการชะลอกการสุกของมะม่วงโดยใช้ถ่านกัมมันต์ที่ได้จากการผลิต และถ่านกัมมันต์ทางการค้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถใช้เม็ดมะม่วงมหาชนกซึ่งเป็นวัสดุเศษเหลือจากการแปรรูปมาผลิตเป็นถ่านกัมมันต์ เพื่อเพิ่มมูลค่าและลดปริมาณของวัสดุเศษเหลือจากการแปรรูปได้
2. ถ่านกัมมันต์ที่ผลิตมาได้นั้น สามารถนำไปใช้ได้กับอุตสาหกรรมการขนส่งผลไม้ โดยมีหน้าที่เป็นตัวดูดซับแก๊สเอทิลีน เพื่อยืดอายุของผลไม้ให้มีความสดใหม่ ไม่เสียหาย ไม่ช้ำ ก่อนที่จะนำไปวางขายและถึงมือผู้บริโภค
3. ข้อมูลที่ได้สามารถใช้เป็นแนวทางในการผลิตถ่านกัมมันต์ทั้งในระดับท้องถิ่นและระดับอุตสาหกรรม



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

# ทฤษฎีและงานที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 กระบวนการดูดซับ (Adsorption)

การดูดซับ (Adsorption) เป็นการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารที่อยู่บนพื้นที่ผิวของตัวดูดซับ (adsorbent) โดยเกิดจากโมเลกุลของตัวถูกดูดซับ (adsorbate) ในสถานะแก๊สหรือของเหลวเกาะติดกับตัวดูดซับ ที่มีสถานะของแข็ง กระบวนการดูดซับนี้เป็นวิธีการแยกองค์ประกอบของสารออกจากสารละลายหรือแก๊สวิธีหนึ่ง ซึ่งความสามารถของการดูดซับขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ เช่น ธรรมชาติของตัวถูกดูดซับและตัวดูดซับ ขนาดและพื้นที่ผิวของตัวดูดซับ พลังงานกระตุ้นของตัวดูดซับ และสถานะการดูดซับ เช่น อุณหภูมิ ความเข้มข้น ความดัน และพลังงานศักย์ของอันตรกิริยาระหว่างสารที่ถูกดูดซับกับตัวดูดซับ ดังนั้นเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ความเข้มข้น และความดันเกิดขึ้น จะส่งผลทำให้ความสามารถในการดูดซับเปลี่ยนแปลงอีกด้วย [13]

การดูดซับจะเกิดขึ้นเนื่องจากตัวดูดซับมีแรงดึงดูดที่พื้นผิวมากกว่าค่าพลังงานจลน์ของโมเลกุลของตัวถูกดูดซับ แต่องค์ประกอบของสารแต่ละชนิดในสารละลายหรือแก๊สมีแรงดึงดูดกับตัวดูดซับได้ไม่เท่ากัน และมีความสามารถในการกระจายบนพื้นผิวที่ต่างกัน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับลักษณะโครงสร้าง, คุณสมบัติทางเคมีที่ผิวของตัวดูดซับ และสารที่เป็นตัวถูกดูดซับด้วย [13]

#### 2.1.1 ประเภทของการดูดซับ [14]

การดูดซับ แบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท ตามความแตกต่างของแรงดึงดูดที่เกิดขึ้นในการดูดซับ ดังนี้

##### 2.1.1.1 การดูดซับทางกายภาพ (Physisorption)

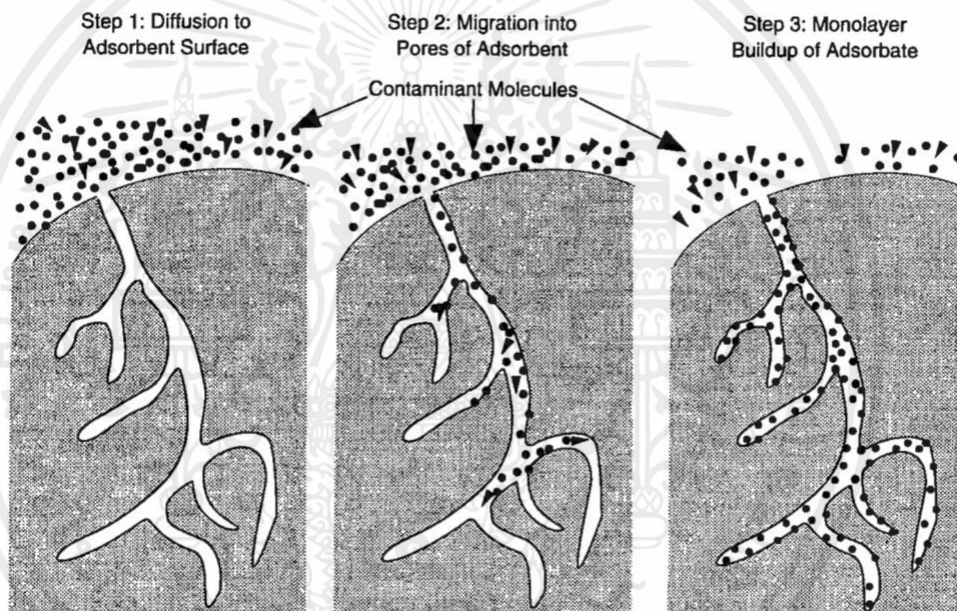
เป็นการดูดซับที่เกิดจากแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของตัวถูกดูดซับและพื้นผิวของตัวดูดซับด้วยแรงแวนเดอร์วาลส์ (Van der Waals) ซึ่งเป็นแรงดึงดูดทางไฟฟ้าอ่อนๆ ลักษณะสำคัญคือ เป็นกระบวนการที่มีค่าความร้อนของการดูดซับต่ำ ทำให้เกิดกระบวนการผันกลับได้ หรือเรียกว่าการคายซับ (Desorption) โดยสามารถทำได้ด้วยการเพิ่มอุณหภูมิหรือลดความดันภายในระบบ ซึ่งจะทำให้ความสามารถในการดูดซับสารบนผิวของตัวดูดซับลดลง แต่เป็นการช่วยฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับ (Regeneration) ให้เกิดได้ง่ายยิ่งขึ้น

### 2.1.1.2 การดูดซับทางเคมี (Chemisorption)

เป็นการดูดซับที่เกิดจากพันธะทางเคมีหรือการใช้อิเล็กตรอนร่วมกันของหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของตัวดูดซับและโมเลกุลตัวถูกดูดซับ ทำให้มีค่าพลังงานกระตุ้น (Activation energy) เข้ามาเกี่ยวข้อง ส่งผลให้ค่าความร้อนของการดูดซับมีค่าที่สูงขึ้น การดูดซับประเภทนี้มักเกิดขึ้นที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิวิกฤตของตัวถูกดูดซับ ลักษณะสำคัญคือ เป็นกระบวนการผันกลับไม่ได้ เนื่องจากเมื่อเกิดการดูดซับแล้ว ตัวถูกดูดซับจะไม่สามารถหลุดออกมาจากพื้นผิวของตัวดูดซับได้

### 2.1.2 กลไกการดูดซับ [14]

กลไกการดูดซับ สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ขั้นตอน ดังนี้



รูปที่ 2.1 กลไกการดูดซับของถ่านกัมมันต์ [14]

1. การแพร่ภายนอก (External diffusion) เป็นขั้นตอนการเคลื่อนที่ของโมเลกุลตัวถูกดูดซับเข้าหาตัวดูดซับ โดยสารที่มีขนาดเล็กกว่า 1 ไมครอน จะเคลื่อนที่ตามธรรมชาติเข้าหาตัวดูดซับ ซึ่งทำให้เกิดการแพร่กระจายและมีโอกาสวิ่งเข้าหาถ่านกัมมันต์ได้มากกว่า เนื่องจากเป็นสารที่มีขนาดเล็ก ในทางกลับกันสารที่มีขนาดใหญ่กว่า 1 ไมครอน จะเกิดการแพร่กระจายในระดับโมเลกุลได้น้อยมาก โดยที่ขนาดและน้ำหนักของตัวถูกดูดซับจะมีบทบาทสำคัญในการสร้างตะกอนและติดค้าง ดังนั้นขนาดและการกระจายขนาดจึงมีความสำคัญอย่างมากต่อการเคลื่อนย้ายของตัวถูกดูดซับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. การแพร่ภายใน (Intraparticle diffusion) เป็นขั้นตอนการเคลื่อนที่ของโมเลกุลตัวถูกดูดซับกระจายเข้าสู่รูพรุนภายในของตัวดูดซับ โดยปกติแล้วตัวดูดซับจะมีฟิล์มของของไหลห่อหุ้มอยู่ เมื่อโมเลกุลของตัวถูกดูดซับเคลื่อนที่ไปยังตัวดูดซับ โมเลกุลของตัวถูกดูดซับจะต้องทำการแทรกตัวผ่านฟิล์มของของไหลให้ได้ จึงจะสามารถเข้าไปในพื้นที่ผิวของตัวดูดซับได้ ส่งผลให้เกิดการดูดซับขึ้น เนื่องจากพื้นที่ส่วนใหญ่ของตัวดูดซับอยู่ภายในโพรงที่เรียกว่า รูพรุน

3. การเกาะติด (Adsorption) เป็นขั้นตอนที่โมเลกุลของตัวถูกดูดซับจะต้องเกาะติดบนผิวภายในของตัวดูดซับได้โดยไม่หลุดออกไป เมื่อเสร็จสิ้นกระบวนการนี้ถือว่าการดูดซับที่ผิวภายในรูพรุนเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์

### 2.1.3 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ

1. ขนาดและพื้นที่ผิวของตัวดูดซับ ซึ่งขนาดของตัวดูดซับมีผลต่ออัตราเร็วในการดูดซับ โดยอัตราเร็วในการดูดซับจะแปรผกผันกับขนาดของตัวดูดซับ แต่พื้นที่ผิวของตัวดูดซับจะมีความสัมพันธ์โดยตรงกับความสามารถในการดูดซับ กล่าวคือ เมื่อพื้นที่ผิวของตัวดูดซับมาก จะส่งผลทำให้ตัวดูดซับมีความสามารถในการดูดซับได้ดียิ่งขึ้น

2. ความปั่นป่วน อัตราเร็วในการดูดซับขึ้นอยู่กับแผนการแพร่หรือรูพรุนของการแพร่ ซึ่งหากในระบบมีความปั่นป่วนต่ำ ฟิล์มของเหลวที่อยู่ล้อมรอบตัวดูดซับจะหนาขึ้น ทำให้โมเลกุลของสารดูดซับเคลื่อนที่เข้าหาตัวดูดซับได้ยาก แต่ในทางกลับกันหากในระบบมีความปั่นป่วนสูง ฟิล์มของเหลวที่อยู่ล้อมรอบตัวดูดซับจะบาง ทำให้โมเลกุลของสารดูดซับเคลื่อนที่เข้าหาตัวดูดซับได้เร็วยิ่งขึ้น ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับรูพรุนของการแพร่อีกด้วย

3. ขนาดของสารที่ถูกดูดซับ สารที่ถูกดูดซับจะต้องมีขนาดเล็กกว่าภายในโพรงของตัวดูดซับเล็กน้อย จึงจะสามารถดูดซับได้ดีที่สุด เนื่องจากจะเกิดแรงดึงดูดระหว่างสารที่ถูกดูดซับและตัวดูดซับมากที่สุด ทำให้ดูดซับได้อย่างมีประสิทธิภาพ

4. อุณหภูมิ อุณหภูมิมีผลต่ออัตราเร็วและความสามารถในการดูดซับ โดยเมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการดูดซับ จะส่งผลให้อัตราเร็วในการดูดซับเพิ่มขึ้นตามไปด้วย แต่ความสามารถในการดูดซับจะลดลง เนื่องจากกระบวนการดูดซับเป็นกระบวนการคายร้อน

5. ระยะเวลาในการดูดซับ ระยะเวลาในการดูดซับมีผลต่อประสิทธิภาพในการดูดซับ โดยเมื่อมีระยะเวลาในการดูดซับมากพอ การดูดซับจะเข้าสู่ภาวะสมดุล ส่งผลทำให้มีความสามารถในการดูดซับดียิ่งขึ้น

## 2.2 ถ่านกัมมันต์ (Activated carbon)

ถ่านกัมมันต์ (Activated carbon หรือ Activated charcoal) เป็นถ่านสังเคราะห์ที่ได้จากการนำวัตถุดิบทางธรรมชาติที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลัก และมีธาตุอื่นๆ ประกอบอยู่บ้าง เช่น

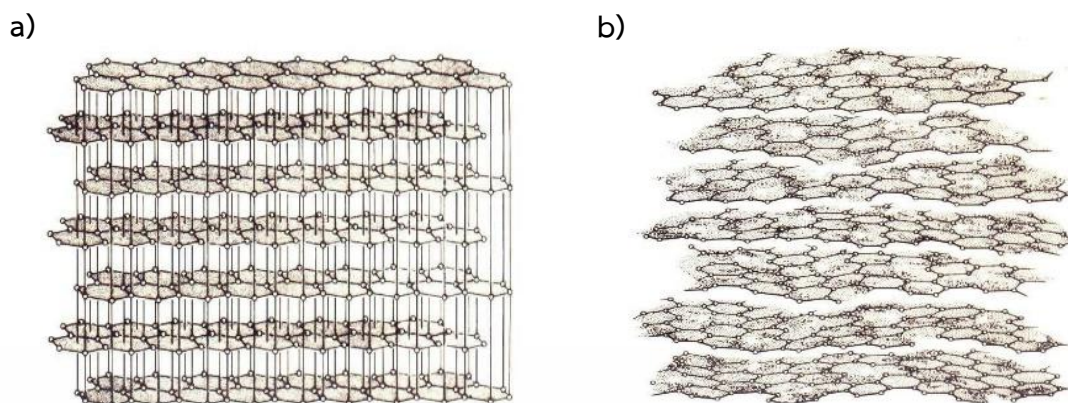
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ออกซิเจน ไฮโดรเจน กำมะถัน และไนโตรเจน เป็นต้น โดยจะผลิตผ่านกระบวนการการกระตุ้นทางเคมีและทางกายภาพจนได้ผลิตภัณฑ์เป็นถ่านกัมมันต์ออกมา เพื่อให้เกิดรูพรุนขนาดเล็กภายในจำนวนมากและมีพื้นที่ผิวจำเพาะที่สูง ส่งผลให้เกิดการเกาะติดของอนุภาคหรือโมเลกุลของสารบนพื้นผิวภายในของถ่าน ถ่านกัมมันต์ที่ได้จึงมีความสามารถในการดูดซับสูง ซึ่งความสามารถในการดูดซับนี้เป็นปัจจัยสำคัญในการกำหนดสมรรถนะของถ่านกัมมันต์ โดยทั่วไปถ่านกัมมันต์มีพื้นที่ผิวจำเพาะอยู่ที่ประมาณ 500–1,500 ตารางเมตรต่อกรัม และมีขนาดรูพรุนอยู่ที่ประมาณ 20–20,000 อังสตรอม ซึ่งคุณสมบัติเหล่านี้ขึ้นกับชนิดของวัตถุดิบ และกระบวนการในการผลิต [15] นอกจากนี้ยังสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดซับให้กับถ่านกัมมันต์ได้ด้วยการใช้สารเคมีเพื่อปรับสภาพพื้นผิวภายในให้กับรูพรุน โดยทำให้บริเวณผิวของรูพรุนมีอิเล็กตรอนอิสระที่พร้อมจะแลกเปลี่ยนประจุและยึดเหนี่ยวอนุภาคหรือโมเลกุลของสารต่างๆ ไว้ได้อย่างมีประสิทธิภาพ [14] วัตถุดิบที่มักจะถูกนำมาผลิตเป็นถ่านกัมมันต์มักเป็นสารอินทรีย์ที่มีปริมาณของคาร์บอนสูง โดยเฉพาะสารประเภทลิกโนเซลลูโลส ปัจจัยที่ส่งผลต่อการเลือกวัตถุดิบที่นำมาผลิตเป็นถ่านกัมมันต์ประกอบด้วย ปริมาณคาร์บอนที่อยู่ในวัตถุดิบที่เลือกมาใช้ในการผลิต, ปริมาณสารอินทรีย์ที่ต่ำ, การมีอยู่ของวัตถุดิบและราคา, การย่อยสลายที่ต่ำ และความง่ายในการเกิดกระบวนการกระตุ้น [16]

### 2.2.1 โครงสร้างของถ่านกัมมันต์

ถ่านกัมมันต์เป็นถ่านที่มีลักษณะโครงสร้างเป็นรูปคาร์บอนอสัณฐาน (Amorphous carbon) ซึ่งมีลักษณะพื้นผิวเป็นรูพรุนขนาดเล็กจำนวนมาก โดยทั่วไปผิวหน้าของถ่านกัมมันต์นั้นไม่มีขีด แต่เนื่องจากมีสารประกอบออกไซด์เกิดขึ้น และมีการจัดเรียงอะตอมอยู่ในลักษณะเฮกซะโกนัล (Hexagonal) ส่งผลทำให้ผิวหน้าของถ่านกัมมันต์มีพื้นที่ผิวสูง และสามารถดูดซับได้ดีกว่าตัวดูดซับชนิดอื่นๆ [14]

จากการศึกษาลักษณะโครงสร้างของถ่านกัมมันต์พบว่า ถ่านกัมมันต์มีโครงสร้างคล้ายกับแกรไฟต์ แต่มีการจัดเรียงตัวเป็นระเบียบน้อยกว่าแกรไฟต์ ประกอบด้วยโครงสร้างที่เป็นผลึกเล็กๆ ที่ไม่สมบูรณ์ เกิดการเบี่ยงเบนในแนวฉากและซ้อนเหลื่อมกันในแนวระนาบ เรียกว่า “โครงสร้างแบบเทอร์โบสแตติก” (Turbostatic structure) การจัดเรียงตัวของผลึกเป็นไปในทิศทางที่ไม่แน่นอน มีการยึดโยงและซ้อนทับกันอย่างไม่เป็นระเบียบ ทำให้มีช่องว่างรูพรุนเกิดขึ้น ซึ่งโครงสร้างของถ่านกัมมันต์จะขึ้นอยู่กับสถานะที่ใช้ในการผลิตถ่านกัมมันต์ ได้แก่ อุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในกระบวนการ [17]



รูปที่ 2.2 เปรียบเทียบโครงสร้าง (a) ผลึกแกรไฟต์ (b) ผลึกถ่านกัมมันต์ [17]



รูปที่ 2.3 โครงสร้างของถ่านกัมมันต์ [18]

ในกระบวนการกระตุ้นถ่านที่ผ่านกระบวนการคาร์บอนไนเซชันมาแล้วนั้น จะทำให้ถ่านมีความพรุนมากขึ้น เนื่องจากมีการสูญเสียสารประกอบคาร์บอนระหว่างช่องว่างของผลึกคาร์บอน ซึ่งรูพรุนที่เกิดขึ้นจะทำให้มีพื้นที่ผิวสัมผัสมาก เพิ่มประสิทธิภาพในการดูดซับให้ดียิ่งขึ้น [17]

## 2.2.2 ประเภทของถ่านกัมมันต์

2.2.2.1 แบ่งตามลักษณะรูพรุน สามารถจำแนกลักษณะรูพรุนของถ่านกัมมันต์ตามขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุนได้ตามข้อกำหนดของ International Union of Pure and Applied Chemistry หรือ IUPAC ดังนี้

1. รูพรุนขนาดเล็ก หรือไมโครพอร์ (Micropores) คือ รูพรุนที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางน้อยกว่า 2 นาโนเมตร รูพรุนประเภทนี้มีความสัมพันธ์กับค่าพื้นที่ผิวจำเพาะของถ่านกัมมันต์จึงมีความสำคัญในการดูดซับ ซึ่งรูพรุนประเภทนี้เหมาะสำหรับการดูดซับแก๊สและไอระเหย
2. รูพรุนขนาดกลาง หรือเมโซพอร์ (Mesopores) คือ รูพรุนที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางตั้งแต่ 2 - 50 นาโนเมตร ซึ่งรูพรุนประเภทนี้เหมาะสำหรับการดูดซับสารที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ เช่น การฟอกสี เป็นต้น

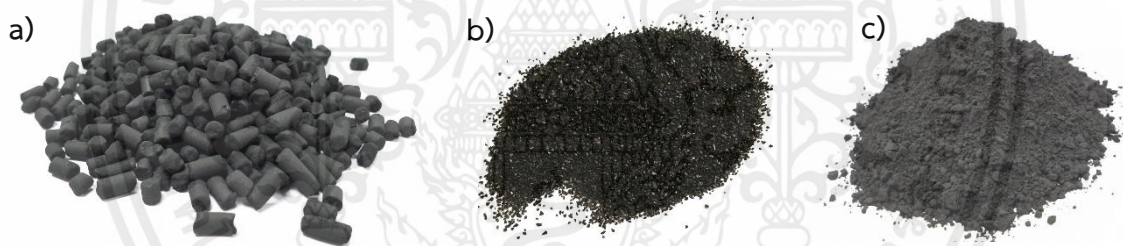
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. รูพรุนขนาดใหญ่ หรือแมโครพอร์ (Macropores) คือ รูพรุนที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมากกว่า 50 นาโนเมตร โดยปกติรูพรุนประเภทนี้ไม่มีความสำคัญในการดูดซับสารต่างๆ แต่เป็นตัวช่วยให้สารที่ถูกดูดซับสามารถเคลื่อนที่ผ่านไปยังรูพรุนขนาดเล็กและขนาดกลางได้ง่ายขึ้น [19]

### 2.2.2.2 แบ่งตามขนาดของอนุภาค

1. ถ่านกัมมันต์แบบผง (Powder Activated Carbon, PAC) มีลักษณะแบบผง ซึ่งเกิดจากการบดถ่านกัมมันต์ที่สามารถผ่านตะแกรงร่อนขนาด 60 เมชได้ไม่ต่ำกว่าร้อยละ 99 โดยน้ำหนัก มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางระหว่าง 0.15 – 0.25 มิลลิเมตร โดยทั่วไปเหมาะสำหรับการใช้งานแบบเติมลงในภาชนะของเหลวโดยตรงมากกว่าบรรจุในท่อ และปล่อยของเหลวไหลผ่านผงถ่าน เนื่องจากสูญเสียผงถ่านได้ง่ายกว่า

2. ถ่านกัมมันต์แบบเกล็ดหรือเม็ด (Granular Activated Carbon, GAC) มีลักษณะเป็นเม็ด ซึ่งเกิดจากการอัดผ่านเครื่องอัดเป็นเส้นกลมๆ แล้วตัดออกเป็นท่อนเท่าๆกัน หรือเป็นเกล็ดที่สามารถผ่านตะแกรงร่อนขนาด 20 เมชได้ไม่ต่ำกว่าร้อยละ 85 และสามารถผ่านตะแกรงร่อนขนาด 40 เมชได้ไม่เกินร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก มีขนาดค่อนข้างใหญ่เมื่อเทียบกับแบบผง มีพื้นที่ผิวภายนอกขนาดเล็กลง โดยทั่วไปเหมาะสำหรับดูดซับแก๊สและไอระเหย เนื่องจากมีอัตราการแพร่กระจายเร็วกว่า



รูปที่ 2.4 ขนาดของอนุภาคถ่านกัมมันต์ (a) ถ่านกัมมันต์แบบแท่ง (b) ถ่านกัมมันต์แบบเม็ด และ (c) ถ่านกัมมันต์แบบผง [34]

3. ถ่านกัมมันต์แบบแท่ง (Extruded) มีลักษณะเป็นแท่ง ซึ่งเกิดจากการขึ้นรูปลักษณะทรงกระบอก ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางตั้งแต่ 0.8 – 45 มิลลิเมตร โดยทั่วไปเหมาะสำหรับการกรองดูดซับแก๊ส เพราะมีความแข็งแรงเชิงกลสูง และมีปริมาณฝุ่นละอองต่ำ

### 2.2.2.3 แบ่งตามความหนาแน่นของถ่านกัมมันต์

1. ความหนาแน่นต่ำ ถ่านกัมมันต์ประเภทนี้มักใช้เพื่อดูดซับในสารละลาย เช่น การฟอกสีของน้ำตาลดิบให้เป็นสีขาวยบริสุทธิ์ หรือการทำน้ำให้บริสุทธิ์ เป็นต้น

2. ความหนาแน่นสูง ถ่านกัมมันต์ประเภทนี้มักใช้ดูดซับสารพิษ หรือไอระเหย

#### 2.2.2.4 แบ่งตามชนิดของสารที่ถูกดูดซับ

1. ถ่านกัมมันต์สำหรับดูดซับแก๊ส (Gas adsorbents) เป็นถ่านที่ใช้ในการดูดซับสารพิษ กลิ่น และไอของสารอินทรีย์ ส่วนมากเป็นถ่านกัมมันต์ที่ได้จากกระบวนการเผาถ่านที่ความดันสูง

2. ถ่านกัมมันต์สำหรับดูดซับสี (Color adsorbents) เป็นถ่านกัมมันต์ที่ใช้เป็นตัวฟอกสี ส่วนมากเป็นถ่านที่ได้จากถ่านไม้ ถ่านชานอ้อย ถ่านจากแกลบ ถ่านตากหินน้ำมัน และถ่านจากกากน้ำตาล เป็นต้น

3. ถ่านกัมมันต์สำหรับดูดซับโลหะ (Metal adsorbents) เป็นถ่านกัมมันต์ที่เป็นตัวแยกพวกโลหะชนิดต่างๆ เช่น ถ่านที่ใช้ในการแยก ทอง เงิน แพลตทินัม และแร่ เป็นต้น

#### 2.2.3 คุณสมบัติของถ่านกัมมันต์

คุณสมบัติของถ่านกัมมันต์ เป็นตัวกำหนดประสิทธิภาพในการนำไปใช้งาน ซึ่งมีคุณสมบัติที่ต่างกันออกไป ขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ของการนำไปใช้งาน สามารถแบ่งได้ดังนี้

1. ความหนาแน่น (Density) เป็นการทดสอบน้ำหนักของถ่านกัมมันต์ต่อหน่วยปริมาตร ซึ่งขึ้นอยู่กับขนาดและความพรุนของถ่านกัมมันต์ ดังนั้นถ่านกัมมันต์ที่มีความหนาแน่นเชิงปริมาตรต่ำ จะมีปริมาณรูพรุนขนาดเล็กจำนวนมาก ทำให้สามารถดูดซับสารได้ในปริมาณมากกว่า

2. พื้นที่ผิวจำเพาะ (Specific surface area) ใช้เป็นค่ามาตรฐานเพื่อแสดงคุณสมบัติของถ่านกัมมันต์ ส่วนใหญ่จะใช้วิธีการ BET ในการตรวจสอบผ่านเครื่องทดสอบพื้นที่ผิวเป็นเครื่องวิเคราะห์ ซึ่งใช้แก๊สไนโตรเจนเป็นแก๊สในการดูดซับ โดยปกติถ่านกัมมันต์มีพื้นที่ผิวจำเพาะตั้งแต่ 500–2,500 ตารางเมตรต่อกรัม

3. ค่าการกระจายตัวของอนุภาค (Particle size distribution) จะเกี่ยวข้องกับขนาดความละเอียดของถ่านกัมมันต์ โดยถ่านกัมมันต์ที่มีขนาดอนุภาคละเอียดมากจะเพิ่มพื้นที่ผิวมากขึ้น ส่งผลทำให้ปริมาณของสารที่ถูกดูดซับสามารถเข้าไปในโครงสร้างถ่านกัมมันต์ได้มากขึ้น

#### 2.2.4 ประโยชน์ของถ่านกัมมันต์

ถ่านกัมมันต์มีความสามารถในการดูดซับ ซึ่งสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้อย่างแพร่หลาย ทั้งในทางอุตสาหกรรม การแพทย์ และยังสามารถนำไปใช้ในชีวิตประจำวันได้อีกด้วย โดยถ่านกัมมันต์แต่ละชนิดจะมีความสามารถในการใช้งานที่ต่างกันออกไป ดังนี้

1. ใช้ในอุตสาหกรรมทำหน้ากากป้องกันแก๊สพิษ ทั้งที่ใช้ในการทหาร และที่ใช้กันทั่วไป ทั้งนี้เพราะถ่านกัมมันต์สามารถดูดซับแก๊สพิษและไอของสารอินทรีย์ได้

2. ใช้กำจัดสิ่งเจือปนออกจากแก๊ส เช่น ไนโตรเจน ฮีเลียม ไฮโดรเจน คาร์บอนไดออกไซด์ เป็นต้น

3. ใช้แยกแก๊สโซลีนออกจากแก๊สธรรมชาติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. ใช้แยกไอระเหยของตัวทำละลายที่ใช้แล้วเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ โดยถ่านกัมมันต์จะดูดซับ

ไอระเหยที่อุณหภูมิห้องและคายออกที่ความดันของไอต่ำ เช่น การสกัดด้วยตัวทำละลาย การหมัก อุตสาหกรรมพลาสติก ผลิตภัณฑ์ยาง เป็นต้น

## 2.3 กระบวนการในการผลิตถ่านกัมมันต์

โดยทั่วไปกระบวนการในการผลิตถ่านกัมมันต์มี 3 ขั้นตอนหลัก คือ กระบวนการเตรียมวัตถุดิบ (Preparation process) กระบวนการเปลี่ยนวัตถุดิบให้เป็นถ่านไบโอชาร์ หรือเรียกว่า กระบวนการคาร์บอนไนเซชัน (Carbonization process) และกระบวนการเพิ่มประสิทธิภาพให้กับถ่านไบโอชาร์ หรือเรียกว่า กระบวนการกระตุ้น (Activation process) ซึ่งกระบวนการกระตุ้นนี้สามารถทำได้ 2 วิธี คือ การกระตุ้นทางกายภาพ (Physical activation) และการกระตุ้นทางเคมี (Chemical activation) ดังนี้

### 2.3.1 กระบวนการเตรียมวัตถุดิบ (Preparation process)

การเตรียมวัตถุดิบเพื่อเข้ากระบวนการผลิตถ่านกัมมันต์ เป็นขั้นตอนสำคัญที่สามารถกำหนดคุณลักษณะผลิตภัณฑ์ให้ตรงตามความต้องการ โดยมีปัจจัยที่ต้องพิจารณา ดังนี้

1. ความชื้นของวัตถุดิบ ควรควบคุมให้มีค่าต่ำที่สุดที่จะเป็นไปได้ก่อนเข้ากระบวนการคาร์บอนไนเซชัน เพื่อเป็นการลดเวลาและลดมลภาวะในรูปของควัน อีกทั้งยังสามารถลดพลังงานในกระบวนการคาร์บอนไนเซชัน การลดความชื้นทำได้โดยการอบด้วยตู้อบโดยตรง หรือการตากแดด ซึ่งเป็นวิธีที่นิยม เนื่องจากสะดวก และเป็นการลดต้นทุนในโรงงานการผลิตถ่านกัมมันต์

2. ขนาดของวัตถุดิบ ในวัตถุดิบบางประเภทมีความจำเป็นที่จะต้องลดขนาดก่อนเข้ากระบวนการคาร์บอนไนเซชัน เพื่อให้ความร้อนกระจายตัวเข้าไปในวัตถุดิบอย่างทั่วถึง เช่น การลดขนาดของถ่านหิน, ชีวมวลที่เป็นลำต้นที่มีขนาดใหญ่ มีลักษณะขนาดไม่สม่ำเสมอ การลดขนาดทำโดยนำวัตถุดิบผ่านเครื่องลดขนาด ซึ่งเครื่องบางประเภทมีตัวคัดขนาดอยู่ด้วย

3. การเก็บวัตถุดิบ วัตถุดิบที่พร้อมจะผ่านกระบวนการคาร์บอนไนเซชันจะถูกนำไปเก็บในที่กักเก็บที่มิดชิดป้องกันความชื้น เนื่องจากฝนตกหรือเก็บในที่ที่มีอากาศถ่ายเทได้สะดวก เพื่อป้องกันการติดไฟของวัตถุดิบในกรณีที่อยู่ในสภาวะอากาศร้อน

### 2.3.2 กระบวนการคาร์บอนไนเซชัน (Carbonization process)

กระบวนการคาร์บอนไนเซชันหรือการแปรสภาพวัตถุดิบให้เป็นถ่าน ซึ่งเป็นกระบวนการแยกสลายตัวด้วยความร้อน (Pyrolysis) โดยเป็นการนำวัตถุดิบทางธรรมชาติที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลักมาให้ความร้อนที่อุณหภูมิสูงในพื้นที่อับอากาศหรือสภาวะที่มีการจำกัดออกซิเจนเพื่อกำจัดธาตุ และองค์ประกอบต่างๆ เช่น ไฮโดรเจน ออกซิเจน ไนโตรเจน และน้ำ รวมถึงสารระเหยที่ไม่ใช่คาร์บอนออกจากโครงสร้างของวัตถุดิบในรูปของน้ำมันทาร์และแก๊ส [14] ส่งผลทำให้ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของแข็งสีดำที่มีการจัดเรียงของโครงสร้างผลึกที่เป็นระเบียบมากขึ้นและมีสัดส่วนคาร์บอนเป็นองค์ประกอบสูงขึ้น เรียกว่า ถ่านไบโอชาร์ ซึ่งถ่านไบโอชาร์ที่ได้จะมีความสามารถในการดูดซับได้เพียงเล็กน้อย เนื่องจากยังคงมีน้ำมันดิน (Tar) บางส่วนอุดช่องว่างภายในรูพรุนสะสมอยู่ ดังนั้นจึงต้องมีการเพิ่มประสิทธิภาพให้กับถ่านไบโอชาร์ด้วยกระบวนการกระตุ้นต่อไป [21]

ขั้นตอนการเกิดคาร์บอนเซชันแบ่งได้เป็น 3 ขั้นตอน ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 ที่ช่วงอุณหภูมิประมาณ 30–200 องศาเซลเซียส จะเกิดการระเหยของน้ำออกจากโครงสร้าง และวัตถุดิบเริ่มเกิดการแยกสลายตัวด้วยความร้อน ซึ่งในขั้นตอนนี้จะทำให้วัตถุดิบแห้ง

ขั้นตอนที่ 2 ที่ช่วงอุณหภูมิประมาณ 200–300 องศาเซลเซียส จะเกิดการแยกสลายตัวด้วยความร้อน ซึ่งในขั้นตอนนี้จะเกิดแก๊สและน้ำมันดินในโครงสร้าง และมีบางส่วนที่ถูกปลดปล่อยออกมา

ขั้นตอนที่ 3 ที่อุณหภูมิสูงกว่า 300 องศาเซลเซียส จะเกิดการเกาะตัวกันของโครงสร้างถ่านคาร์บอน ซึ่งในขั้นตอนนี้จะทำให้เนื้อของวัตถุดิบกลายเป็นสีดำและน้ำหนักของถ่านลดลง [22]

### 2.3.3 กระบวนการกระตุ้น (Activation process)

กระบวนการกระตุ้นเป็นการทำให้ถ่านไบโอชาร์ที่ได้มีความสามารถในการดูดซับสูงขึ้น โดยทั่วไปการกระตุ้นถ่านกัมมันต์สามารถทำได้ 2 วิธี คือ

1. การกระตุ้นทางกายภาพ (Physical activation) เป็นการพัฒนารูพรุนของถ่านไบโอชาร์ให้มีรูพรุนเพิ่มมากขึ้นด้วยวิธีการออกซิไดซ์โดยใช้แก๊ส เช่น แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ไอน้ำ หรืออากาศ เป็นต้น [17] ซึ่งจะใช้อุณหภูมิในการกระตุ้นค่อนข้างสูง ในระหว่างการกระตุ้นจะเกิดปฏิกิริยาการแปรสภาพเป็นแก๊ส (Gasification) ระหว่างแก๊สออกซิไดซ์ คาร์บอน น้ำมันดิน และสารระเหยที่ตกค้างในถ่านไบโอชาร์ ทำให้รูพรุนที่ถูกอุดไว้เปิดออก อีกทั้งยังทำให้มีรูพรุนเกิดขึ้นมาใหม่เพิ่มขึ้นอีกด้วย [14] ข้อดีของการกระตุ้นทางกายภาพคือ เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม เนื่องจากไม่จำเป็นต้องใช้สารเคมีในการกระตุ้น และถ่านกัมมันต์ที่ได้สามารถนำไปใช้ได้โดยไม่ต้องผ่านการบำบัดสารเคมี แต่มีข้อเสียคือ ได้ผลผลิตต่ำ ใช้ระยะเวลานาน และมีค่าใช้จ่ายสูง เนื่องจากในการกระตุ้นแต่ละครั้งจำเป็นต้องใช้พลังงานสูงมากในการกระตุ้น [19]

2. การกระตุ้นทางเคมี (Chemical activation) เป็นการเพิ่มประสิทธิภาพให้กับถ่านไบโอชาร์ด้วยการใช้สารเคมีเป็นตัวกระตุ้น ซึ่งสารเคมีที่ใช้ในการกระตุ้นส่วนใหญ่จะเป็นสารละลายกรด หรือเกลือของโลหะ เช่น กรดฟอสฟอริก กรดซัลฟิวริก ซิงค์คลอไรด์ แคลเซียมคลอไรด์ โซเดียมไฮดรอกไซด์ โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ และโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต เป็นต้น [17] โดยนำถ่านไบโอชาร์ไปแช่ในสารเคมีก่อน เพื่อให้สารเคมีถูกดูดซับเข้าไปแทรกตัวอยู่ในรูพรุนของถ่านไบโอชาร์ หลังจากนั้นนำไปเผากระตุ้นที่อุณหภูมิสูง ทั้งนี้อุณหภูมียังขึ้นอยู่กับวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตถ่านไบโอชาร์อีกด้วย ซึ่งการเผาจะทำให้สารเคมีเกิดการสลายตัวด้วยความร้อนเปลี่ยนเป็นแก๊สระเหย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ออกไปจากโครงสร้างของถ่านกัมมันต์ ส่งผลให้เกิดรูพรุนเพิ่มมากขึ้น นอกจากนี้ยังอาจเกิดกลุ่มโมเลกุลบางกลุ่มบนพื้นผิวภายในรูพรุนอีกด้วย [23] ข้อดีของการกระตุ้นทางเคมีคือ ผลผลิตมีแนวโน้มสูงกว่า ใช้ระยะเวลาไม่นาน และใช้อุณหภูมิที่ต่ำกว่าการกระตุ้นทางกายภาพ ทำให้ประหยัดค่าใช้จ่ายพลังงานมากขึ้น ในภาคอุตสาหกรรมจึงนิยมวิธีการกระตุ้นทางเคมีมากกว่าการกระตุ้นทางกายภาพ แต่มีข้อเสียคือ มีค่าใช้จ่ายสารเคมีเพิ่มเข้ามา อีกทั้งยังต้องมีการบำบัดหรือล้างสารเคมีออกจากถ่านกัมมันต์ก่อนนำไปใช้อีกด้วย [19]

## 2.4 การสุกของผลไม้

การสุกของผลไม้ (Ripening of fruit) เป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นหลังจากผลไม้มีการเจริญเติบโตมาจนถึงระยะสุดท้ายที่มีการแก่เต็มที่แล้ว ซึ่งผลไม้อาจเกิดการเปลี่ยนแปลงลักษณะต่างๆ ทางสรีรวิทยาและทางชีวเคมีจะแตกต่างกันขึ้นอยู่กับชนิดของผลไม้ และจะเกิดขึ้นได้ต้องใช้พลังงานมาก ซึ่งพลังงานนี้จะเกิดจากอัตราการหายใจที่เกิดขึ้นภายในของผลไม้รวมทั้งเกิดการปลดปล่อยแก๊สเอทิลีนอีกด้วย แต่ในการสุกของผลไม้จะมีระยะเวลาจำกัดแค่ในช่วงเวลาหนึ่งเท่านั้น โดยระยะดังกล่าวมักจะเป็นระยะเดียวกันกับผลไม้ที่สามารถรับประทานได้ หากผ่านระยะนี้ไปแล้ว ผลไม้จะพัฒนาการเข้าสู่การเสื่อมสภาพหรือเน่าเสียไปในที่สุด [24]

### 2.4.1 ประเภทของผลไม้

สามารถแบ่งตามลักษณะการหายใจในระหว่างการสุกได้เป็น 2 ประเภท ดังนี้

#### 2.4.1.1 ผลไม้ประเภทบ่มสุก (Climacteric fruit)

ในช่วงผลไม้อายุจะมีอัตราการหายใจค่อนข้างต่ำ แต่เมื่อผลไม้เริ่มมีการสุกจะมีการสร้างแก๊สเอทิลีนเพิ่มขึ้นและมีอัตราการหายใจที่เพิ่มสูงขึ้นจนถึงจุดสูงสุด (Climacteric peak) หลังจากนั้นอัตราการหายใจจะค่อยๆ ลดลง และเมื่อผลไม้เริ่มสุกจะสามารถสังเกตเห็นการเปลี่ยนแปลงทั้งทางกายภาพและทางเคมีในด้านต่างๆ เช่น มีการเปลี่ยนสีของเปลือก มีกลิ่นหอม และมีเนื้อนิ่ม เป็นต้น ตัวอย่างเช่น มะม่วง มะละกอ กล้วย มะเขือเทศ ทูเรียน ละมุด ท้อ ฝรั่งและแอปเปิล เป็นต้น [25]

#### 2.4.1.2 ผลไม้ประเภทบ่มไม่สุก (Non-climacteric fruit)

ในช่วงระหว่างการสุกหรือในระหว่างการสุกช่วงสุดท้ายของผลไม้จะมีการสร้างแก๊สเอทิลีนต่ำ และมีอัตราการหายใจค่อยๆ ลดลงเมื่อผลไม้อายุมากขึ้น และอัตราการหายใจจะไม่เพิ่มขึ้นอีก เมื่อผลไม้เริ่มสุกจะไม่สามารถสังเกตเห็นการเปลี่ยนแปลงได้อย่างชัดเจน มีการเปลี่ยนแปลงภายในผลเกิดขึ้นน้อยมาก รสชาติของผลมักจะคงที่จนกระทั่งหมดอายุ ตัวอย่างเช่น องุ่น เงาะ มังคุด ลำไย ลิ้นจี่ และสตอเบอรี่ [26]

## 2.4.2 การเปลี่ยนแปลงลักษณะต่างๆ ของผลไม้ในระหว่างการสุก

1. การหายใจ เป็นกระบวนการเผาผลาญอาหารของผลไม้ที่สะสมในรูปแบบต่างๆ เช่น แป้งหรือน้ำตาลให้เปลี่ยนเป็นพลังงาน ทั้งนี้ในระหว่างการหายใจของผลไม้ยังมีการปลดปล่อยพลังงานความร้อนออกมา ทำให้ผลไม้มีอุณหภูมิสูงขึ้นและเสื่อมสภาพได้เร็วขึ้น [29] ซึ่งผลไม้ประเภท Climacteric fruit จะมีอัตราการหายใจที่เพิ่มสูงขึ้น เมื่อผลไม้เริ่มสุก และมีอัตราการหายใจสูงที่สุดในช่วง Climacteric peak ซึ่งโดยจะสามารถแบ่งออกได้เป็น 4 ระยะ ได้แก่ ระยะ Pre-climacteric จะเป็นระยะที่มีอัตราการหายใจต่ำ เนื้อของผลไม้จะมีลักษณะแข็ง ถัดไปจะเกิดระยะ Climacteric rise เป็นระยะที่มีอัตราการหายใจเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ผิวของผลไม้ยังมีสีเขียวและเนื้อของผลไม้ยังแข็งอยู่ หลังจากนั้นจะเกิดระยะ Climacteric peak ซึ่งเป็นระยะที่มีอัตราการหายใจของผลไม้เพิ่มขึ้นสูงสุด เนื้อของผลไม้เริ่มนิ่ม ผิวมีการเปลี่ยนสีเล็กน้อยและเริ่มมีกลิ่นหอม และระยะสุดท้าย Post-climacteric เป็นระยะที่มีอัตราการผลิตแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ลดลงอย่างช้าๆ ผลไม้มีผิวสีเหลือง เนื้อผลไม้และกลิ่นหอม [30]

2. การคายน้ำ ในระหว่างการสุกของผลไม้ ผลไม้ประเภท Climacteric จะมีอัตราการหายใจที่เพิ่มขึ้น ซึ่งในกระบวนการหายใจของผลไม้จะมีการปลดปล่อยพลังงานความร้อน ส่งผลทำให้เกิดการระเหยหรือการคายน้ำของผลไม้ตลอดเวลา ถึงแม้ว่าผลไม้จะโครงสร้างที่ปกคลุมผิว เพื่อป้องกันการระเหยของน้ำ แต่ยังมีช่องเปิด จำพวกปากใบและช่องอากาศที่สามารถระเหยน้ำออกมาได้ จึงทำให้ผลไม้มีน้ำหนักและคุณภาพที่ลดลง โดยเฉพาะเนื้อของผลไม้ ทำให้เนื้อของผลไม้เกิดการเหี่ยวและไม่มารับประทาน [29]

3. การสร้างเอทิลีน เอทิลีนเป็นฮอร์โมนของพืชที่มีสถานะเป็นแก๊ส ซึ่งในระหว่างการสุกของผลไม้ จะมีการสร้างเอทิลีน 2 ระบบ ได้แก่ ระบบที่เป็นที่สร้างเอทิลีนในระดับต่ำ พบมากในเนื้อเยื่อของพืชทุกชนิด และระบบที่สร้างเอทิลีนที่ตอบสนองต่อเอทิลีนที่สร้างจากผลไม้ประเภท Climacteric ซึ่งเป็นเอทิลีนที่สามารถกระตุ้นตัวเองได้ [28] แก๊สเอทิลีนมีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนแปลงของผลไม้ค่อนข้างมาก โดยปกติผลไม้จะมีการสร้างเอทิลีนเล็กน้อย แต่เมื่อผลไม้เกิดการกระทบเหวี่ยงหรือเกิดบาดแผลขึ้น จะทำให้มีการสร้างเอทิลีนเพิ่มมากขึ้น ส่งผลทำให้เกิดการกระตุ้นการสุกของผลไม้ให้สุกเร็วยิ่งขึ้น ทั้งนี้ยังส่งผลทำให้เร่งอัตราการหายใจของผลไม้อีกด้วย [29]

4. การเปลี่ยนแปลงทางเคมี โดยจะเกิดการเปลี่ยนแปลงคาร์โบไฮเดรตที่ละลายน้ำไม่ได้ ประเภทแป้งเป็นคาร์โบไฮเดรตที่ละลายน้ำได้ประเภทน้ำตาล ส่งผลทำให้ในระหว่างการสุกของผลไม้มีปริมาณน้ำตาลที่เพิ่มขึ้น และผลไม้ยังมีการเปลี่ยนแปลงปริมาณของกรดอินทรีย์ ซึ่งในขณะที่ผลไม้ยังอ่อนอยู่จะมีปริมาณกรดอินทรีย์ค่อนข้างสูง กรดอินทรีย์จึงเป็นตัวกลางในวัฏจักรเครบส์ (Kreb's cycle) ของกระบวนการหายใจ แต่เมื่อผลไม้เริ่มสุกจะมีปริมาณกรดที่ลดลง เนื่องจากกรดถูกนำไปใช้ในกระบวนการหายใจเช่นเดียวกันกับน้ำตาล

5. การเปลี่ยนแปลงของสี สีของผลไม้มีการเปลี่ยนแปลงหลายตำแหน่ง เช่น สีผิว เปลือก สีของเนื้อผลไม้ หรือแม้แต่สีของเมล็ด ซึ่งในผลไม้ส่วนใหญ่การเปลี่ยนสีจะเริ่มจากการสลายตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของคลอโรฟิลล์ ทำให้สีเขียวหายไป หลังจากนั้นจะเกิดสีเหลือง ส้ม แดง น้ำเงิน หรือสีอื่นๆ เกิดขึ้นในระหว่างที่มีการสุก และเกิดการสุกในระยะสุดท้ายของผลไม้

6. การเปลี่ยนรสชาติ โดยปกติผลไม้ที่สุกจะมีรสชาติหวาน เนื่องจากปริมาณแป้งที่สะสมอยู่ในผลไม้ได้เปลี่ยนไปเป็นน้ำตาล ทำให้ผลไม้มีรสชาติหวานมากขึ้น นอกจากนี้ปริมาณแทนนินจะทำให้ผลไม้มีรสชาติฝาดหรือขมมีปริมาณลดน้อยลงในระหว่างการสุก ทำให้ผลไม้ไม่มีรสชาติฝาดเหลืออยู่ในผลไม้

7. การเปลี่ยนแปลงความแน่นเนื้อ โดยปกติผลไม้ที่สุกจะมีความแข็งลดลง และมีความนิ่มของเนื้อเพิ่มขึ้น ซึ่งเกิดจากการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของผนังเซลล์ ทำให้โครงสร้างเนื้อเยื่อของผลไม้มีการเปลี่ยนแปลง หรือมีความแข็งแรงลดลง นอกจากนี้ความแน่นเนื้อของผลไม้บางชนิดขึ้นอยู่กับปริมาณแป้งที่สะสมอยู่ด้วย เมื่อแป้งย่อยสลายไปเป็นน้ำตาลแล้วจึงทำให้ความแน่นเนื้อลดลง

8. การเปลี่ยนแปลงของสารประกอบที่ระเหยง่าย (volatile compounds) สารประกอบจำพวกนี้จะมีปริมาณน้อยมากในผลไม้ แต่มีความสำคัญมาก เนื่องจากเป็นส่วนประกอบสำคัญที่ทำให้ผลไม้มีกลิ่นเฉพาะในระหว่างที่มีการสุก จะเห็นได้ชัดในทุเรียน มะม่วง และกล้วย เป็นต้น ซึ่งผลไม้บางชนิดไม่สามารถจำแนกความสุกได้ด้วยการมองเห็นจากการดูลักษณะภายนอก แต่หากมีกลิ่นเฉพาะเกิดขึ้น เราจะสามารถจำแนกได้ทันที

### 2.4.3 ปัจจัยที่มีผลต่อการสุกของผลไม้ [27]

การสุกของผลไม้ขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงลักษณะทางสรีรวิทยาของผลไม้ ดังนั้นจึงต้องควบคุมปัจจัยเหล่านี้ เพื่อชะลออายุและการเปลี่ยนแปลงลักษณะต่างๆ ของผลไม้ให้ช้าลงได้

1. แก๊สออกซิเจน การลดปริมาณของแก๊สออกซิเจนในอากาศลง มีผลทำให้การสุกของผลไม้ช้าลง เนื่องจากอัตราการหายใจและกระบวนการเผาผลาญอาหารภายในเซลล์ของผลไม้จะเกิดช้าลง รวมทั้งยังไปชะลออัตราการสลายตัวของคลอโรฟิลล์ให้ช้าลงอีกด้วย

2. แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ การเพิ่มปริมาณของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในบรรยากาศให้สูงขึ้น มีผลทำให้อัตราการหายใจของผลไม้ช้าลง ซึ่งจะไปยังยังการสังเคราะห์และการทำงานของแก๊สเอทิลีนอีกด้วย

3. แก๊สเอทิลีน เป็นฮอร์โมนของพืชชนิดหนึ่ง ซึ่งมีความสำคัญมากต่อทางสรีรวิทยาหลังการเก็บเกี่ยวพืชและผลไม้ โดยแก๊สเอทิลีนเป็นสารที่เกี่ยวข้องในกระบวนการสุกของผลไม้ จึงเรียกแก๊สเอทิลีนว่า แก๊สบ่มสุก และแก๊สเอทิลีนยังช่วยเลือนจุดเริ่มต้นของการสุกหรือเลือน climacteric peak ให้เกิดเร็วยิ่งขึ้น

4. อุณหภูมิ การเก็บรักษาผลไม้ในอุณหภูมิที่เหมาะสมจะช่วยยืดอายุการเก็บของผลไม้ได้ โดยผลไม้จะสุกช้าลงก็ต่อเมื่ออยู่ในสภาวะที่มีอุณหภูมิต่ำ แต่ผลไม้บางชนิดอาจเกิดความเสียหายจากอุณหภูมิต่ำ แต่สูงกว่าจุดเยือกแข็งของผลไม้ เรียกว่า อาการสะท้านหนาว (chilling injury) ซึ่งจะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เป็นอาการผิดปกติที่ทำให้เกิดความเสียหายหลายลักษณะ เช่น เกิดรอยแผล รอยฉ่ำ เปลือกหรือเนื้อของผลไม้เปลี่ยนเป็นสีดำหรือสีน้ำตาล เป็นต้น

ดังนั้นเพื่อยืดอายุการเก็บรักษาและชะลอการสุกของผลไม้ จึงจำเป็นต้องเริ่มการเก็บเกี่ยวผลไม้ในระยะและวิธีการที่เหมาะสมสำหรับชนิดและประเภทของผลไม้ เพื่อให้ได้ผลไม้เริ่มต้นที่มีคุณภาพดีร่วมกับการจัดการหลังเก็บเกี่ยวที่เหมาะสม เพื่อชะลอการเปลี่ยนแปลงต่างๆ โดยการควบคุมปัจจัยที่กล่าวมาข้างต้นที่มีผลต่อการสุกของผลไม้ [31]

## 2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ศักยะ สมบัติไพรวรรณ (2555) [28] ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมการสุกของมะม่วงน้ำดอกไม้ โดยได้ทำการตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพและเคมี ได้แก่ ความถ่วงจำเพาะ ความแน่นเนื้อ ผ่านเปลือก ความแน่นเนื้อ ค่าสีเปลือกและเนื้อ (ประกอบด้วย  $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$ ) ค่าพีเอช ปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้ และปริมาณกรดที่ไทเทรตได้ โดยจะทำการตรวจสอบทุกวัน วันละ 5 ผล พบว่าเมื่อผลมะม่วงมีการสุกเพิ่มขึ้น ค่าความแน่นเนื้อ และปริมาตรกรดที่ไทเทรตได้มีค่าลดลง ส่วนปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้ ค่าพีเอช และความถ่วงจำเพาะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น การเปลี่ยนแปลงค่าสีทั้งเปลือกและเนื้อ พบว่าทั้งค่า  $L^*$ ,  $a^*$  และ  $b^*$  มีค่ามากขึ้นก่อนที่ผลจะเน่าเสีย ยกเว้นค่าสี  $L^*$  ของเนื้อจะมีค่าลดลง จากความสัมพันธ์ระหว่างความแน่นเนื้อ และระยะเวลาในการเก็บรักษาสามารถแบ่งระยะการสุกของมะม่วง ได้เป็น 3 ระยะ ได้แก่ วันที่ 1-3 อยู่ในระยะเริ่มสุก วันที่ 4-7 อยู่ในระยะสุก และวันที่ 8-12 อยู่ในระยะสุกงอม ต่อมาทำการศึกษาและเปรียบเทียบการชะลอการสุกของมะม่วงน้ำดอกไม้ด้วยตัวกำจัดแก๊สเอทิลีนทางการค้าและถ่านกัมมันต์ โดยทำการทดสอบ 6 กลุ่ม ได้แก่ กลุ่มควบคุม กลุ่มบรรจุกล่องพร้อมถ่านกัมมันต์ชนิดผง แกรนูล และเกล็ด กลุ่มบรรจุกล่องพร้อมตัวกำจัดแก๊สเอทิลีนทางการค้า และสุดท้ายคือกลุ่มที่รมด้วย 1-เมทิลไซโคลโพรพีน (1-MCP) เป็นเวลา 6 ชั่วโมง แต่ละกลุ่มบรรจุมะม่วงกล่องละ 3 ผล (ประมาณ 1 กิโลกรัม) ในกล่องกระดาษลูกฟูกที่ไม่ทำการเจาะรู เก็บรักษาที่อุณหภูมิ  $13 \pm 1$  องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์  $95 \pm 2$  เปอร์เซ็นต์ เป็นเวลา 37 วัน ทำการตรวจสอบทุกวัน จากผลการศึกษาพบว่า ลักษณะทางกายภาพและเคมีของผลไม้ สำหรับกลุ่มควบคุมและกลุ่มบรรจุกล่องพร้อมถ่านกัมมันต์แบบต่างๆ ไม่ได้แสดงให้เห็นถึงแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ แต่ในกลุ่มบรรจุกล่องพร้อมตัวกำจัดแก๊สเอทิลีนทางการค้า และ 1-MCP ให้ความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ กล่าวคือกลุ่มของถ่านกัมมันต์ที่ใช้ในการศึกษานี้ไม่สามารถชะลอการสุกของมะม่วงได้ แต่กลุ่มบรรจุกล่องพร้อมตัวกำจัดแก๊สเอทิลีนทางการค้า และ 1-MCP สามารถนำมาใช้ในการชะลอการสุกของมะม่วงน้ำดอกไม้ได้

P. Tepamatr (2566) [7] ได้ทำการศึกษาความสามารถในการดูดซับแก๊สเอทิลีนของถ่านกัมมันต์ทั้ง 4 ชนิด ได้แก่ ถ่านกัมมันต์ทางการค้า, ถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากขานอ้อย, ถ่านกัมมันต์ที่เคลือบด้วยพลาเดียม รวมทั้งกรณีที่ไม่มีถ่านกัมมันต์ จากนั้นทำการศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดแก๊สเอ

ทิลินของพาลาเดียมที่เคลือบบนถ่านกัมมันต์ เพื่อใช้ในการชะลอการสุกและยืดอายุการเก็บรักษาของกล้วย ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ผลิตถ่านกัมมันต์จากขานอ้อย โดยใช้อุณหภูมิคาร์บอนไนเซชันที่ 500 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 2 ชั่วโมง ภายใต้สภาวะที่มีบรรยากาศเป็นแก๊สไนโตรเจน ซึ่งจะได้ถ่านไบโอชาร์ออกมา หลังจากนั้นนำถ่านไบโอชาร์ไปกระตุ้นทางเคมีด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ แล้วนำไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 2 ชั่วโมง ภายใต้สภาวะที่มีบรรยากาศเป็นแก๊สไนโตรเจนเช่นเดียวกัน จากนั้นจะได้ถ่านกัมมันต์เป็นผลิตภัณฑ์ออกมา ต่อมาแบ่งการทดลองออกเป็น 4 กลุ่ม โดยแต่ละกลุ่มจะใส่ถ่านกัมมันต์ต่างกัน ซึ่งใช้ปริมาณของถ่านกัมมันต์ 2 กรัมต่อปริมาณกล้วย 100 กรัม หลังจากนั้นเก็บไว้ในภาชนะแก้วที่ปิดสนิทเป็นระยะเวลา 10 วัน เพื่อศึกษาระยะเวลาในการเก็บรักษาของกล้วย พบว่าถ่านกัมมันต์ที่เคลือบด้วยพาลาเดียมช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดแก๊สเอทิลิน และลดปริมาณการผลิตแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งจะส่งผลทำให้ยืดอายุการเก็บรักษาของกล้วยได้มากขึ้น นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบสีและน้ำหนักของกล้วยตั้งแต่วันแรกจนถึงวันสุดท้ายของการทดลอง จะพบว่าสีของกล้วยที่ใช้ถ่านกัมมันต์ที่เคลือบด้วยพาลาเดียมมีสีเปลือกของกล้วยเป็นสีเขียวอ่อนกว่าเมื่อเทียบกับวันแรก และเมื่อเทียบกับถ่านกัมมันต์ชนิดอื่นๆ จะมีสีเขียวกว่าอย่างเห็นได้ชัด เช่นเดียวกันกับการสูญเสียน้ำหนักและการย่อยแป้งเป็นน้ำตาลของกล้วยก็มีค่าต่ำเช่นเดียวกัน เนื่องจากในระหว่างการสุกของกล้วยเกิดกระบวนการหายใจ ซึ่งจะปลดปล่อยความร้อนออกมาในรูปของการระเหยของน้ำ ดังนั้นถ่านกัมมันต์ที่เคลือบด้วยพาลาเดียมจะสามารถกำจัดแก๊สเอทิลินที่ส่งผลเสียต่อกล้วยและสามารถยืดอายุการเก็บรักษาของกล้วยได้อย่างมีประสิทธิภาพ

S.H. Wang และคณะ (2563) [10] ได้ทำการศึกษาคุณสมบัติต่างๆ ของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากเศษไม้เนื้อแข็งที่มีหมู่ซัลโฟเนตบนพื้นผิว โดยงานวิจัยนี้ได้ผลิตถ่านกัมมันต์ด้วยอุณหภูมิคาร์บอนไนเซชันที่แตกต่างกัน โดยในกระบวนการนี้จะให้ความร้อนแก่วัตถุดิบ 3 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 30 นาที และมีอัตราการให้ความร้อนเป็น 5 องศาเซลเซียสต่อนาที ภายใต้สภาวะที่มีบรรยากาศเป็นแก๊สไนโตรเจน ในช่วงที่ 1 และ 2 ตั้งค่าอุณหภูมิอยู่ที่ 110 และ 300 องศาเซลเซียส ตามลำดับ และในช่วงที่ 3 ซึ่งเป็นขั้นตอนหลักจะทำการแปรค่าอุณหภูมิ ได้แก่ 400, 500, 600, 700, 800, 900 และ 1,000 องศาเซลเซียส โดยจะได้ถ่านกัมมันต์เป็นผลิตภัณฑ์ที่ไม่จำเป็นต้องผ่านกระบวนการกระตุ้นอีก เนื่องจากวัตถุดิบที่นำมาใช้นี้มีสารเคมีที่ทำให้เกิดการกระตุ้นด้วยตัวเอง (self-activation) ต่อมานำถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้มาศึกษาและเปรียบเทียบคุณสมบัติต่างๆ พบว่าอุณหภูมิคาร์บอนไนเซชันส่งผลต่อการเกิดโครงสร้างของรูพรุน ค่าพื้นที่ผิวจำเพาะของถ่านกัมมันต์จะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิคาร์บอนไนเซชันสูงขึ้น และจะลดลงเมื่ออุณหภูมิคาร์บอนไนเซชันสูงกว่า 800 องศาเซลเซียส ลักษณะรูปร่างของรูพรุนในแต่ละอุณหภูมิคาร์บอนไนเซชันมีความแตกต่างกันอย่างชัดเจน ในช่วงอุณหภูมิคาร์บอนไนเซชัน 400-600 องศาเซลเซียส จะมีรูพรุนขนาดใหญ่จำนวนมาก ในช่วงอุณหภูมิคาร์บอนไนเซชัน 700-800 องศาเซลเซียส จะมีรูพรุนขนาดกลางจำนวนมาก โดยรูพรุนมีลักษณะรูปร่างเป็นแบบคอกขวด และในช่วง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อุณหภูมิคาร์บอนเซชัน 900-1,000 องศาเซลเซียส จะมีรูพรุนขนาดกลางจำนวนมากเช่นกัน แต่รูพรุนมีลักษณะรูปร่างเป็นแบบสลิท นอกจากนี้สำหรับการนำถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้มาดูดซับแก๊สเอทิลีนพบว่า ความสามารถในการดูดซับแก๊สเอทิลีนมีแนวโน้มเดียวกันกับค่าพื้นที่ผิวจำเพาะ ซึ่งการดูดซับแก๊สเอทิลีนจะเกิดได้มากขึ้นเมื่อถ่านกัมมันต์มีรูพรุนขนาดเล็กมากขึ้น

Qanytah และคณะ (2565) [8] ได้ทำการศึกษาความสามารถของกระดาษผสมถ่านกัมมันต์ในการดูดซับแก๊สเอทิลีน โดยในงานวิจัยนี้ได้ผลิตถ่านกัมมันต์จากไม้ไผ่ ซึ่งเปรียบเทียบการกระตุ้นทางเคมีด้วยสารเคมีที่แตกต่างกัน 2 ชนิด ได้แก่ โพลแทสเซียมไฮดรอกไซด์และโพลแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต พบว่าถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยโพลแทสเซียมไฮดรอกไซด์มีพื้นที่ผิวจำเพาะสูงกว่าถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยโพลแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต แต่ในด้านการดูดซับแก๊สเอทิลีน พบว่าถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยโพลแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตสามารถดูดซับแก๊สเอทิลีนได้ดีกว่าอย่างเห็นได้ชัด เนื่องจากโพลแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตมีความสามารถในการออกซิไดซ์แก๊สเอทิลีนที่ดีกว่า ต่อมานำถ่านกัมมันต์ที่ถูกกระตุ้นด้วยโพลแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตมาศึกษาจลนศาสตร์การดูดซับ พบว่าการดูดซับแก๊สเอทิลีนนี้สอดคล้องกับแบบจำลองจลนศาสตร์อันดับหนึ่งเทียม ซึ่งสามารถสันนิษฐานได้ว่ากลไกการดูดซับโมเลกุลของเอทิลีนบนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์นี้เป็นการดูดซับที่ถูกควบคุมโดยการแพร่และไม่มีกรแยกออกของโมเลกุลที่ถูกดูดซับออกจากถ่านกัมมันต์

## บทที่ 3

### วิธีการดำเนินการ

งานวิจัยนี้จัดทำขึ้นเพื่อศึกษาการผลิตถ่านกัมมันต์จากเมล็ดมะม่วงมหาชนกในระดับห้องปฏิบัติการ สำหรับการนำไปใช้เป็นตัวดูดซับแก๊สเอทิลีนหรือแก๊สเร่งการสุกที่ปลดปล่อยออกมาจากมะม่วง เพื่อชะลอการสุกของมะม่วงให้ยาวนานยิ่งขึ้น ในบทนี้จะกล่าวถึงวัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง และวิธีการทดลอง โดยวิธีการทดลองในงานวิจัยนี้ได้ถูกแบ่งออกเป็น 3 ส่วน ได้แก่ การผลิตถ่านกัมมันต์ การศึกษาคุณลักษณะของถ่านกัมมันต์ และการศึกษาอิทธิพลของถ่านกัมมันต์ในการชะลอการสุกของมะม่วง

#### 3.1 วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

##### 3.1.1 วัตถุดิบ

1. เม็ดมะม่วงมหาชนก จากคณะอุตสาหกรรมอาหาร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
2. ทรายสำหรับทำให้อับอากาศ
3. มะม่วงน้ำดอกไม้เกรดส่งออกที่มีความบริสุทธิ์ร้อยละ 80 โดยประมาณ จากสวนมะม่วงลุงอำนาจ ตำบลคลองเขื่อน อำเภอคลองเขื่อน จังหวัดฉะเชิงเทรา
4. ถ่านกัมมันต์ทางการค้าแบบเกล็ด ยี่ห้อ Ezytec

##### 3.1.2 สารเคมีที่ใช้

1. น้ำกลั่น
2. น้ำที่ปราศจากไอออน
3. โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต (Analytical Reagent grade, KemAus, Australia)
4. โซเดียมคลอไรด์ (Analytical Reagent grade, Univar, Australia)
5. โซเดียมไฮโปคลอไรท์ (Commercial grade, Chemipan, Thailand)
6. โซเดียมไฮดรอกไซด์ (Analytical Reagent grade, Loba, India)
7. ฟีนอล์ฟทาลีน (Laboratory Reagent grade, KemAus, Australia)

##### 3.1.3 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

1. เครื่องชั่งมาตรฐาน (Tiger, China)
2. ตู้อบความร้อน (Binder, Germany)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. เต้าเผาไฟฟ้า (Yamato Scientific, Japan)
4. โถดูดความชื้น และซิลิกาเจล (Duran, Germany)
5. ภาชนะเผาพร้อมฝาปิด
6. ปีกเกอร์ (Duran, Germany)
7. กระจกบอทวง (Duran, Germany)
8. อ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ (Mettler, Germany)
9. จานเพาะเชื้อ (Petri Q, The Czech Republic)
10. กล่องไปรษณีย์
11. เครื่องปั่นผลไม้ (Sharp, Japan)
12. ตะแกรงลวดตาถี่
13. หลอดหยดพลาสติก (Lab Medic, Malaysia)
14. เครื่องวัดสี (Konica Minolta, Japan)
15. เครื่องวัดดัชนีหักเห (Atago, Japan)
16. เครื่องวิเคราะห์เนื้อสัมผัส (Stable Micro Systems, UK)
17. ชุดเครื่องแก้วสำหรับการไทเทรต (Witeg, Germany)
18. ชุดเครื่องกรองสารเคมี (Pyrex, France)

## 3.2 วิธีการทดลอง

### 3.2.1 การผลิตถ่านกัมมันต์

#### 1. การเตรียมวัตถุดิบ

1.1 นำเม็ดมะม่วงมหาชนกมาชูดเนื้อที่ติดค้างอยู่ออก และล้างด้วยน้ำประปา

1.2 นำเม็ดมะม่วงมหาชนกที่ล้างเสร็จเรียบร้อยแล้วมาทำการอบแห้ง โดยนำเข้า

ตู้อบความร้อนที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง

1.3 นำเม็ดมะม่วงมหาชนกที่แห้งแล้วมาตัดลดขนาดเป็น 1 ใน 6 ของขนาดเดิม

#### 2. การคาร์บอนเซชัน

2.1 นำเม็ดมะม่วงมหาชนกที่ได้จากการขั้นตอนการเตรียมวัตถุดิบ มาชั่งน้ำหนักก่อนเผา จากนั้นใส่ในภาชนะเผาพร้อมกับใส่ทรายลงไปในแต่ละชั้นที่ทำการบรรจุเพื่อทำให้การเผาเป็นแบบอับอากาศ

2.2 นำภาชนะเผาที่บรรจุเม็ดมะม่วงมหาชนกไปเผาในเต้าเผาไฟฟ้า โดยตั้งค่าอัตราการให้ความร้อนเท่ากับ 10 องศาเซลเซียสต่อนาที จนถึงที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส และ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำการคาร์บอนเซชันที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นทิ้งไว้ให้เย็น ผลิตภัณฑ์ที่ได้ในขั้นตอนนี้คือ ถ่านไบโอชาร์

2.3 นำถ่านไบโอชาร์ที่ได้แยกออกจากทราย ชั่งน้ำหนักหลังเผา และเก็บไว้ในโถดูดความชื้น

2.4 ทำการทดลองซ้ำจากขั้นตอนที่ 2.1 ถึง 2.3 โดยเปลี่ยนอุณหภูมิในขั้นตอนที่ 2.2 เป็น 500, 550 และ 600 องศาเซลเซียส ตามลำดับ

2.5 นำถ่านไบโอชาร์ที่ผ่านการคาร์บอนเซชันทั้ง 4 อุณหภูมิ ไปตรวจเลขไอโอดีนมาตรฐาน ASTM D 4607-94 เพื่อเลือกอุณหภูมิที่เหมาะสมในการคาร์บอนเซชันเม็ดมะม่วงมหาชนก

### 3. การกระตุ้นถ่านไบโอชาร์ด้วยโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต

3.1 นำถ่านไบโอชาร์ที่ได้จากขั้นตอนการคาร์บอนเซชันที่อุณหภูมิที่เหมาะสม แช่ในสารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตเข้มข้น 0.3 โมลาร์ ณ อัตราส่วน 100 มิลลิลิตร ต่อถ่านไบโอชาร์ 10 กรัม เป็นระยะเวลา 2 ชั่วโมง

3.2 เมื่อครบเวลาที่กำหนด นำถ่านไบโอชาร์ไปล้างด้วยน้ำที่ปราศจากไอออนจนกระทั่งน้ำที่ใช้ล้างไม่มีสี จากนั้นอบให้แห้งด้วยตู้อบความร้อนที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง เมื่อสิ้นสุดขั้นตอนนี้จะได้ถ่านกัมมันต์เป็นผลิตภัณฑ์

#### 3.2.2 การศึกษาคุณลักษณะของถ่านกัมมันต์

1. การวิเคราะห์ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของถ่านกัมมันต์ โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

2. การวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะของถ่านกัมมันต์ โดยใช้เครื่องวิเคราะห์พื้นที่ผิวและขนาดรูพรุน (BET)

3. การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันที่อยู่บนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ โดยใช้เครื่องฟูเรียร์ทรานฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ (FT-IR)

#### 3.2.3 การศึกษาอิทธิพลของถ่านกัมมันต์ที่มีผลต่อการชะลอกการสุกของมะม่วง

##### 1. การคัดเลือกมะม่วงน้ำดอกไม้

1.1 นำมะม่วงน้ำดอกไม้มาตรวจความบริบูรณ์ซ้ำอีกครั้ง โดยนำมาทดสอบการลอยน้ำและน้ำเกลือ 2% โดยคัดเลือกเฉพาะผลที่จมน้ำแต่ลอยในน้ำเกลือ

1.2 ชั่งน้ำหนักและวัดขนาดของมะม่วงที่ผ่านการตรวจความบริบูรณ์แล้ว เพื่อเลือกกลุ่มตัวอย่างในการทดลองจำนวน 40 ผล ที่มีความใกล้เคียงกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.3 นำผลมะม่วงที่เป็นกลุ่มตัวอย่างแช่ในสารละลายโซเดียมไฮโปคลอไรท์เข้มข้น 200 ส่วนในล้านส่วน เป็นระยะเวลา 5 นาที เพื่อลดปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ก่อโรคในผลไม้ จากนั้นรอให้แห้งหรือเป่าด้วยลมอุณหภูมิปกติ

1.4 นำผลมะม่วงที่ผ่านการแช่ในสารละลายโซเดียมไฮโปคลอไรท์แล้ว แช่ในน้ำอุ่นอุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 5 นาที เพื่อยับยั้งการเกิดและการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ อีกทั้งยังช่วยทำให้อัตราการหายใจต่ำลงอีกด้วย จากนั้นรอให้แห้งหรือเป่าด้วยลมอุณหภูมิปกติ

## 2. การทดสอบการชะลอการสุกของมะม่วง

2.1 นำมะม่วง 1 ผล น้ำหนักอยู่ในช่วง 320 ถึง 380 กรัม บรรจุลงในกล่องไปรษณีย์

2.2 แบ่งการทดลองออกเป็น 4 ทริตเมนต์ ได้แก่ ทริตเมนต์ควบคุมที่ไม่มีถ่านกัมมันต์ ทริตเมนต์ของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตปริมาณ 10 กรัมต่อมะม่วง 1 กิโลกรัม ทริตเมนต์ของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตปริมาณ 20 กรัมต่อมะม่วง 1 กิโลกรัม และทริตเมนต์ของถ่านกัมมันต์ทางการค้าปริมาณ 10 กรัมต่อมะม่วง 1 กิโลกรัม

2.3 การตรวจวัดร้อยละการสูญเสียน้ำหนัก ทำการชั่งน้ำหนักของมะม่วง และบันทึกค่าทุกวัน เพื่อตรวจสอบน้ำหนักของมะม่วงที่เปลี่ยนแปลงไป ผ่านสูตรคำนวณดังสมการที่ (3.1)

$$\text{ร้อยละการสูญเสียน้ำหนัก} = \frac{\text{น้ำหนักเริ่มต้น} - \text{น้ำหนักสุดท้าย}}{\text{น้ำหนักเริ่มต้น}} \times 100 \quad (3.1)$$

2.4 การตรวจวัดสีเปลือกและเนื้อ ทำการวัดสีโดยใช้เครื่องวัดสี เพื่อตรวจสอบสีเปลือกและสีเนื้อของมะม่วงที่เปลี่ยนแปลงไป การวัดสีจะใช้ระบบ CIELAB ค่าที่ได้จะแสดงออกมาเป็นค่าความสว่างของสี ( $L^*$ ) ค่าสีเขียว-สีแดง ( $a^*$ ) และค่าสีน้ำเงิน-สีเหลือง ( $b^*$ ) ซึ่งค่า  $L^*$  เมื่อมีค่าเข้าใกล้ 0 หมายความว่ามะม่วงมีสีคล้ำ และเมื่อมีค่าเข้าใกล้ 100 หมายความว่ามะม่วงมีสีสว่าง ค่า  $a^*$  และ  $b^*$  จะมีช่วงอยู่ที่ -60 ถึง +60 โดยถ้าค่า  $a^*$  มีค่าเป็นลบ หมายความว่ามะม่วงมีสีโน้มไปทางสีเขียว หากมีค่าเป็นบวก หมายความว่ามะม่วงมีสีโน้มไปทางสีแดง ส่วนค่า  $b^*$  มีค่าเป็นลบ หมายความว่ามะม่วงมีสีโน้มไปทางสีน้ำเงิน และหากมีค่าเป็นบวก หมายความว่ามะม่วงมีสีโน้มไปทางสีเหลือง จากนั้นนำค่า  $L^*$ ,  $a^*$  และ  $b^*$  มาคำนวณหาค่า  $\Delta E$  หรือค่าการเปลี่ยนแปลงของสีโดยเทียบกับวันแรกผ่านสูตรคำนวณดังสมการที่ (3.2)

$$\Delta E = \sqrt{(L_n^* - L_1^*)^2 + (a_n^* - a_1^*)^2 + (b_n^* - b_1^*)^2} \quad (3.2)$$

เมื่อ  $L_n^*$ ,  $a_n^*$  และ  $b_n^*$  คือ ค่า  $L^*$ ,  $a^*$  และ  $b^*$  ของวันที่  $n$

$L_1^*$ ,  $a_1^*$  และ  $b_1^*$  คือ ค่า  $L^*$ ,  $a^*$  และ  $b^*$  ของวันที่ 1

2.5 การตรวจวัดความแน่นเนื้อ นำผลมะม่วงที่ถูกปกปกป้องออก ที่ผ่านการตรวจวัดสีจากขั้นตอนก่อนหน้านี้ มาทดสอบความแน่นเนื้อด้วยเครื่องวิเคราะห์เนื้อความสัมผัส โดยใช้โพรบสแตนเลสตีลงไปในชิ้นส่วนของมะม่วงด้วยความลึก 5 มิลลิเมตร ซึ่งจะทำให้ได้ค่าความแน่นเนื้อออกมาในหน่วยกิโลกรัม จากนั้นนำไปคำนวณหาความแน่นเนื้อในหน่วยนิวตันต่อมิลลิเมตร ผ่านสูตรคำนวณดังสมการที่ (3.3)

$$\text{ความแน่นเนื้อ} \left( \frac{\text{นิวตัน}}{\text{มิลลิเมตร}} \right) = \frac{\text{ความแน่นเนื้อ (กิโลกรัม)} \times 9.81 \left( \frac{\text{นิวตัน}}{\text{วินาที}^2} \right)}{\text{ระยะกด (มิลลิเมตร)}} \quad (3.3)$$

2.6 การตรวจวัดปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายได้ นำผลมะม่วงจากขั้นตอนก่อนหน้านี้ มาตัดให้เป็นชิ้นขนาดเล็ก จากนั้นนำมาบดคั้นเพื่อให้ได้น้ำที่อยู่ในเนื้อมะม่วงออกมา นำหลอดหยดพลาสติกมาดูดตัวอย่างน้ำมะม่วง แล้วหยดลงไปในเครื่องวัดดัชนีหักเห เพื่อตรวจหาปริมาณน้ำตาลที่อยู่ในเนื้อมะม่วง อ่านผลและบันทึกค่า

2.7 การตรวจวัดร้อยละปริมาณกรดที่ไทเทรตได้ นำผลมะม่วงส่วนที่เหลือมาตัดแบ่งให้ได้ปริมาณ 25 กรัม แล้วบดผสมพร้อมกับน้ำกลั่นปริมาตร 100 มิลลิลิตร กรองเนื้อส่วนที่ละเอียดออกผ่านตะแกรงลวดตาถี่ จะได้สารละลายน้ำมะม่วง จากนั้นตวงสารละลายน้ำมะม่วง 20 มิลลิลิตร ผสมกับน้ำกลั่น 30 มิลลิลิตร ในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร แล้วหยดฟีนอล์ฟทาลีน 2-3 หยด แล้วทำการไทเทรตด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 0.1 นอร์มัล จนพอดีเป็นสีส้มจาง อ่านและบันทึกปริมาตรสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในหน่วยมิลลิลิตร แล้วนำมาคำนวณหาร้อยละปริมาณกรดที่ไทเทรตได้ ผ่านสูตรคำนวณ ดังสมการที่ (3.4)

$$\text{ร้อยละปริมาณกรดที่ไทเทรตได้} = \frac{\text{ความเข้มข้นของ NaOH} \times \text{ปริมาณ NaOH ที่ใช้} \times \text{แฟกเตอร์การละลาย} \times 0.067}{\text{ปริมาณน้ำคั้นมะม่วง}} \times 100 \quad (3.4)$$

เมื่อ 0.067 คือ ค่าปริมาณน้ำหนักสมมูลของกรดมาลิกที่ปราศจากน้ำ

2.8 ทำซ้ำกับตัวอย่างมะม่วงในทริตเมนต์ถัดไปอีก 3 ทริตเมนต์ ทำทุกวันเป็นระยะเวลา 14 วัน ยกเว้นวันหยุดราชการ

## บทที่ 4

### ผลการดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยนี้ศึกษาการผลิตถ่านกัมมันต์จากเม็ดมะม่วงมหาชนก เพื่อชะลอการสุกของมะม่วง โดยศึกษาอุณหภูมิคาร์บอนไอเซชันในการผลิตถ่านไบโอชาร์ และศึกษาคุณลักษณะของถ่านกัมมันต์ ได้แก่ ลักษณะทางสัณฐานวิทยา พื้นที่ผิวจำเพาะ และหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ ในการชะลอการสุกของมะม่วง วิเคราะห์จากร้อยละน้ำหนักที่สูญเสีย การเปลี่ยนแปลงสีเปลือกและสีเนื้อ ความแน่นเนื้อ ปริมาณของของแข็งที่ละลายได้ ร้อยละปริมาณกรดที่ไทเทรตได้ และอัตราส่วนของปริมาณของแข็งที่ละลายได้ต่อปริมาณกรดที่ไทเทรตได้ของเนื้อมะม่วงน้ำดอกไม้

#### 4.1 การผลิตถ่านกัมมันต์

##### 4.1.1 การวิเคราะห์องค์ประกอบแบบประมาณของเม็ดมะม่วงมหาชนก

จากการวิเคราะห์หาองค์ประกอบแบบประมาณพบว่า เม็ดมะม่วงมหาชนกที่เป็นวัตถุดิบมีร้อยละปริมาณความชื้นเฉลี่ยเท่ากับ 1.18 ร้อยละปริมาณสารระเหยเฉลี่ยเท่ากับ 93.43 ร้อยละปริมาณเถ้าเฉลี่ยเท่ากับ 1.13 และร้อยละปริมาณคาร์บอนคงตัวเฉลี่ยเท่ากับ 4.26 ดังแสดงในตารางที่ 4.1 เม็ดมะม่วงมหาชนกมีองค์ประกอบของเถ้าต่ำ และปริมาณสารระเหยสูงแสดงถึงปริมาณคาร์บอนในเม็ดมะม่วงมหาชนกมีปริมาณมาก เหมาะสมที่จะนำมาใช้เป็นวัตถุดิบผลิตถ่านกัมมันต์

ตารางที่ 4.1 องค์ประกอบแบบประมาณของเม็ดมะม่วงมหาชนก

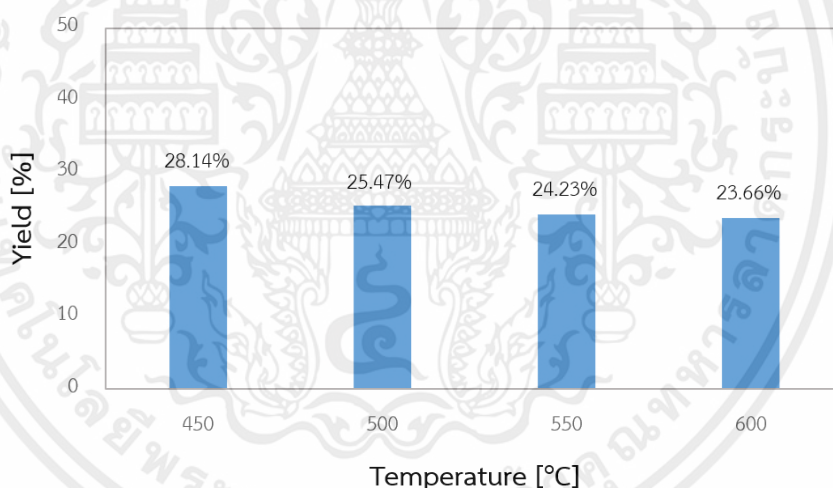
ครั้งที่	ร้อยละปริมาณ ความชื้น	ร้อยละปริมาณ สารระเหย	ร้อยละปริมาณ เถ้า	ร้อยละปริมาณ คาร์บอนคงตัว
1	0.99	94.48	1.20	3.33
2	1.37	92.38	1.06	5.18
เฉลี่ย	1.18	93.43	1.13	4.26

##### 4.1.2 การศึกษาผลของอุณหภูมิคาร์บอนไอเซชันในการผลิตถ่านไบโอชาร์

การคาร์บอนไอเซชัน เป็นการเผาซึ่งเกิดขึ้นในพื้นที่อับอากาศ ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 800 องศาเซลเซียส เพื่อเพิ่มสัดส่วนของคาร์บอนในสารอินทรีย์ โดยผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการนี้คือ ถ่านไบโอชาร์ ซึ่งเกิดจากโครงสร้างวงแหวนอะโรมาติก นอกจากนี้ยังมีกลุ่มโครงสร้างโมเลกุลที่มีขนาดเล็ก ได้แก่ น้ำ แอมโมเนีย น้ำมันห่าน และแก๊สต่างๆ เป็นผลิตภัณฑ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาอุณหภูมิคาร์บอไนเซชันที่ใช้ในการสังเคราะห์ถ่านไบโอชาร์ ได้แก่ 450, 500, 550 และ 600 องศาเซลเซียส ในสภาวะอับอากาศ ซึ่งค่าร้อยละผลได้หลังจากผ่านการคาร์บอไนเซชันที่แต่ละอุณหภูมิ แสดงดังรูปที่ 4.1 พบว่าเมื่ออุณหภูมิคาร์บอไนเซชันเพิ่มสูงขึ้น ส่งผลให้ร้อยละผลได้มีค่าลดลง จากนั้นนำถ่านไบโอชาร์ที่ผ่านการคาร์บอไนเซชันที่อุณหภูมิ 450, 500, 550 และ 600 องศาเซลเซียส มาศึกษาการดูดซับไอโอดีน โดยผลลัพธ์ที่ได้จากการทดลองนี้คือ เลขไอโอดีน ซึ่งแสดงถึงประสิทธิภาพในการดูดซับไอโอดีนของถ่านไบโอชาร์ เลขไอโอดีนของถ่านไบโอชาร์ที่ผ่านการคาร์บอไนเซชันที่แต่ละอุณหภูมิ แสดงดังตารางที่ 4.2 โดยพบว่าอุณหภูมิคาร์บอไนเซชันที่เหมาะสมที่สุด คือ 500 องศาเซลเซียส ที่เลขไอโอดีนเฉลี่ยอยู่ที่ 361.77 มิลลิกรัมไอโอดีนต่อกรัมถ่านไบโอชาร์ และถึงแม้ว่าที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส เลขไอโอดีนเฉลี่ยมีค่ามากกว่า แต่ก็ไม่ได้มีค่ามากกว่าอย่างมีนัยสำคัญ ประกอบกับร้อยละผลได้ของถ่านไบโอชาร์ที่ผ่านการคาร์บอไนเซชันที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียสมีค่าสูงกว่าที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส จึงไม่มีความจำเป็นที่จะต้องใช้พลังงานที่มากกว่าในการสังเคราะห์ถ่านไบโอชาร์



รูปที่ 4.1 ร้อยละผลได้ของถ่านไบโอชาร์ที่อุณหภูมิคาร์บอไนเซชัน 450, 500, 550 และ 600 องศาเซลเซียส

ตารางที่ 4.2 เลขไอโอดีนของถ่านไบโอชาร์ที่อุณหภูมิคาร์บอนเซชันต่าง ๆ

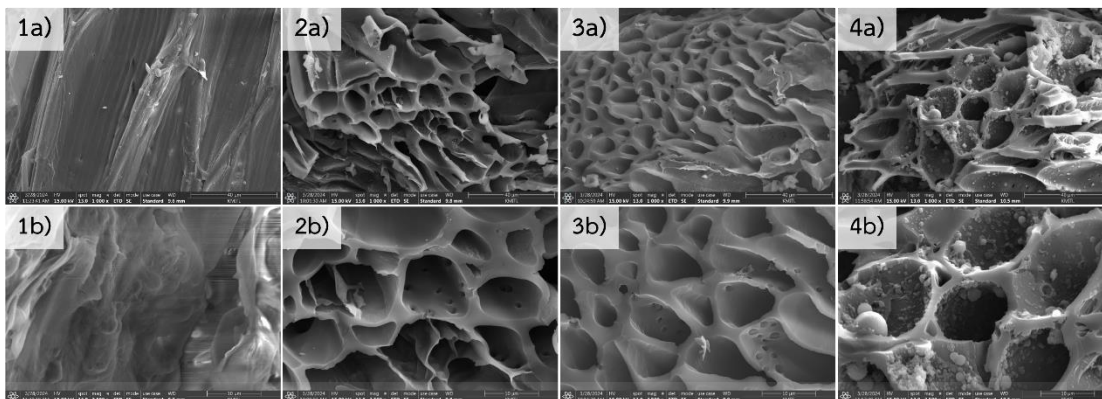
ถ่านไบโอชาร์	เลขไอโอดีน (มิลลิกรัมไอโอดีนต่อกรัมตัวดูดซับ)
อุณหภูมิคาร์บอนเซชัน 450 องศาเซลเซียส	307.82
อุณหภูมิคาร์บอนเซชัน 500 องศาเซลเซียส	361.77
อุณหภูมิคาร์บอนเซชัน 550 องศาเซลเซียส	373.08
อุณหภูมิคาร์บอนเซชัน 600 องศาเซลเซียส	334.64

นำถ่านไบโอชาร์ที่ผ่านการคาร์บอนเซชันที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส มาทำการกระตุ้นด้วยสารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต 0.3 โมลาร์ ที่อัตราส่วน 100 มิลลิกรัม ต่อถ่านไบโอชาร์ 10 กรัม เป็นระยะเวลา 2 ชั่วโมง จะได้ถ่านกัมมันต์เป็นผลิตภัณฑ์

## 4.2 การตรวจสอบลักษณะทางกายภาพของถ่านกัมมันต์

### 4.2.1 การวิเคราะห์ลักษณะทางสัณฐานวิทยา

การวิเคราะห์ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของเม็ดมะม่วงมหาชนก ถ่านไบโอชาร์ ถ่านกัมมันต์ และถ่านกัมมันต์ทางการค้า โดยใช้เทคนิค SEM ดังแสดงในรูปที่ 4.2 ซึ่งรูป 1a), 2a), 3a) และ 4a) แสดงพื้นผิวที่กำลังขยาย 1000 เท่า และรูป 1b), 2b), 3b) และ 4b) แสดงพื้นผิวที่กำลังขยาย 2500 เท่า พบว่าเม็ดมะม่วงมหาชนกไม่มีรูพรุนบนพื้นผิว ถ่านไบโอชาร์ที่ผ่านการคาร์บอนเซชันที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส มีรูพรุนขนาดเล็กกระจายอยู่ทั่วไปบนพื้นผิว ซึ่งการพัฒนารูพรุนบนพื้นผิวนี้อาจเกิดจากการสลายตัวของโครงสร้างกลายเป็นสารระเหยทำให้เกิดเป็นรูพรุน ถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการกระตุ้นมีโครงสร้างรูพรุนคล้ายกับถ่านไบโอชาร์ แต่มีขนาดรูพรุนเล็กกว่า ซึ่งเป็นผลมาจากการเคลือบติดของสารโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตบนพื้นผิว และถ่านกัมมันต์ทางการค้ามีรูพรุนขนาดใหญ่เมื่อเทียบกับรูพรุนของถ่านไบโอชาร์และถ่านกัมมันต์ อีกทั้งยังมีพื้นผิวบริเวณรูพรุนที่ขรุขระมาก



รูปที่ 4.2 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของ (1) วัสดุคิบูเม็ดมะม่วงมหาชนก (2) ถ่านไบโอชาร์ (3) ถ่านกัมมันต์ และ (4) ถ่านกัมมันต์ทางการค้า ที่กำลังขยาย a) 1000 เท่า และ b) 2500 เท่า

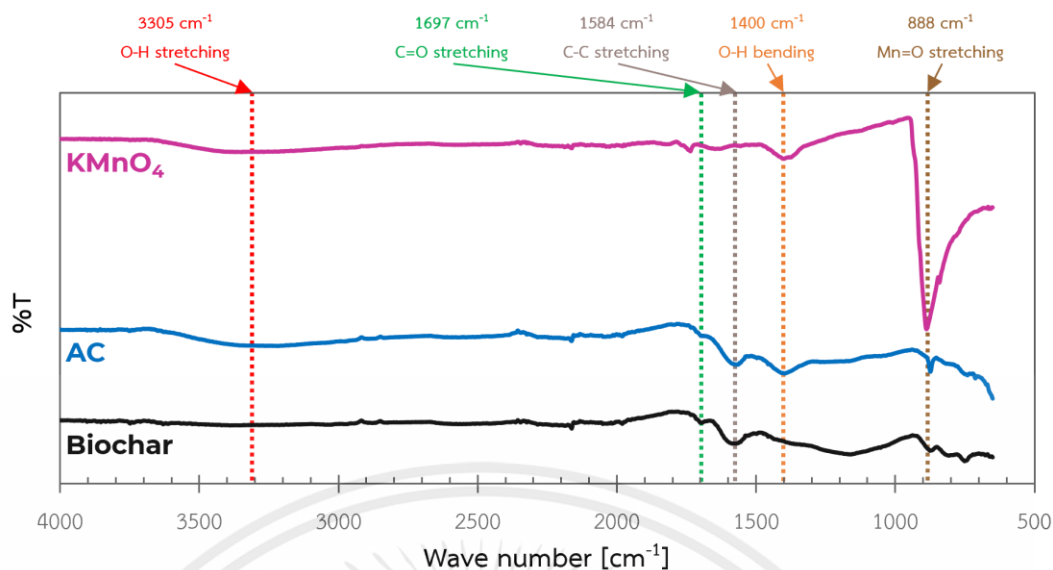
#### 4.2.2 การวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะ

การวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะของถ่านไบโอชาร์ ถ่านกัมมันต์ที่ผลิตขึ้นมา และถ่านกัมมันต์ทางการค้า โดยใช้เทคนิค BET พบว่าถ่านไบโอชาร์มีพื้นที่ผิวจำเพาะ 111.37 ตารางเมตรต่อกรัม ถ่านกัมมันต์ที่ผลิตขึ้นมา มีพื้นที่ผิวจำเพาะ 0.65 ตารางเมตรต่อกรัม และถ่านกัมมันต์ทางการค้า มีพื้นที่ผิวจำเพาะ 0.08 ตารางเมตรต่อกรัม จากการวิเคราะห์ผลการทดลองสามารถอธิบายได้ว่าเมื่อนำถ่านไบโอชาร์มาผ่านการกระตุ้นเป็นถ่านกัมมันต์ ส่งผลให้พื้นที่ผิวจำเพาะลดลง เนื่องจากโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตที่นำมากระตุ้นได้เคลือบติดพื้นผิว และเข้าไปอยู่ในรูพรุน แต่เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับถ่านกัมมันต์ทางการค้า พบว่าถ่านกัมมันต์ที่ผลิตขึ้นมา มีพื้นที่ผิวจำเพาะสูงกว่า

#### 4.2.3 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันที่อยู่บนพื้นผิว

การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันที่อยู่บนพื้นผิวของถ่านไบโอชาร์และถ่านกัมมันต์ โดยใช้เทคนิค FT-IR ในช่วงเลขคลื่น  $4000-600\text{ cm}^{-1}$  ดังแสดงในรูปที่ 4.2 พบว่าถ่านกัมมันต์เกิดพีคที่ตำแหน่ง  $3305\text{ cm}^{-1}$  แสดงถึง O-H Stretching ซึ่งเป็นหมู่ไฮดรอกซิลเช่นเดียวกับที่ปรากฏอยู่บนพื้นผิวของโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตเป็นการบ่งบอกถึงความชื้นอยู่บนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ พีคที่ตำแหน่ง  $1697\text{ cm}^{-1}$  แสดงถึง C=O Stretching ซึ่งเป็นหมู่คีโตน ของลิกนินที่ยังคงมีอยู่ในถ่านไบโอชาร์และถ่านกัมมันต์ เนื่องจากโครงสร้างของลิกนินยังคงย่อยสลายไปไม่หมด และพีคที่ตำแหน่ง  $1584\text{ cm}^{-1}$  แสดงถึง C-C Stretching ซึ่งเป็นโครงสร้างอะโรมาติก การเกิดพีคที่ตำแหน่ง  $1400\text{ cm}^{-1}$  แสดงถึง O-H Bending ของ -Mn-O-H [32] และพีคที่ตำแหน่ง  $888\text{ cm}^{-1}$  ของ Mn=O Stretching คือกลุ่มแมงกานิล ที่เกิดจากการกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



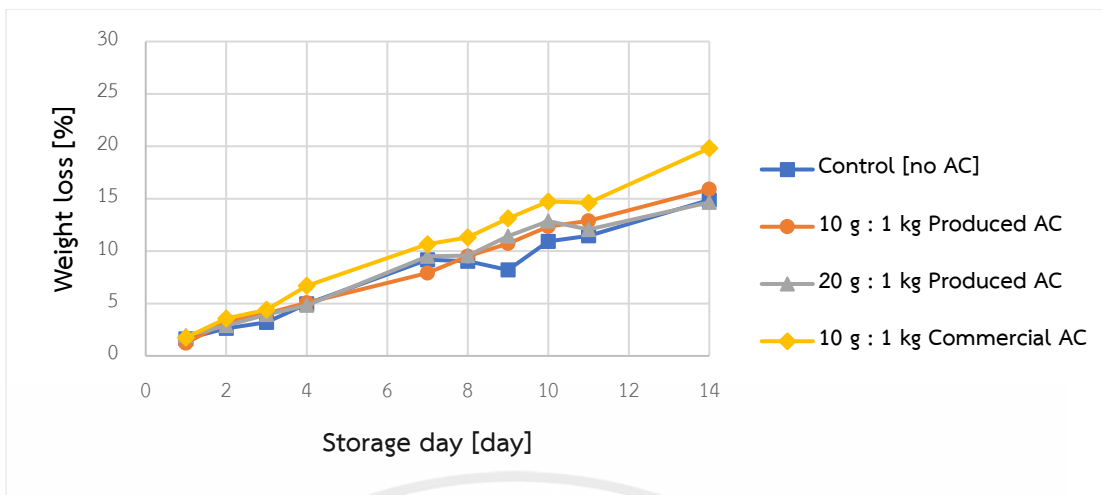
รูปที่ 4.3 กราฟ FT-IR ของโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต ถ่านไบโอชาร์ และถ่านกัมมันต์

### 4.3 การศึกษาอิทธิพลของถ่านกัมมันต์ที่มีผลต่อการชะลอการสุกของผลไม้

#### 4.3.1 การสูญเสียน้ำหนักของมะม่วงน้ำดอกไม้

จากการทดลองพบว่า ในระหว่างการสุกของมะม่วงน้ำดอกไม้ที่เพิ่มขึ้น การสูญเสียน้ำหนักมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามไปด้วย สาเหตุของการสูญเสียน้ำหนักของผลไม้ระหว่างการสุกเกิดจากกระบวนการหายใจและกระบวนการคายน้ำเป็นหลัก ซึ่งในกระบวนการเหล่านี้จะทำให้เกิดการปลดปล่อยน้ำและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ออกมา เป็นผลให้ผลไม้มีน้ำหนักลดลง [7] สำหรับมะม่วงน้ำดอกไม้ซึ่งเป็นผลไม้ประเภท climacteric ในระหว่างการสุกจะมีอัตราการหายใจเพิ่มขึ้นอย่างมาก [33] ทำให้ร้อยละการสูญเสียน้ำหนักสูง

จากรูปที่ 4.3 พบว่า ร้อยละการสูญเสียน้ำหนักในแต่ละวันเก็บรักษาของทรีตเมนต์ควบคุมที่ไม่มีถ่านกัมมันต์, ทรีตเมนต์ของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตปริมาณ 10 กรัมต่อมะม่วง 1 กิโลกรัม และทรีตเมนต์ของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตปริมาณ 20 กรัมต่อมะม่วง 1 กิโลกรัม มีความใกล้เคียงกัน โดยมีการสูญเสียน้ำหนักตลอดการทดลอง 14 วัน ประมาณร้อยละ 15 ในขณะที่ทรีตเมนต์ของถ่านกัมมันต์ทางการค้าปริมาณ 10 กรัมต่อมะม่วง 1 กิโลกรัม มีร้อยละการสูญเสียน้ำหนักในแต่ละวันเก็บรักษาที่สูงกว่าทรีตเมนต์อื่นๆ และมีการสูญเสียน้ำหนักตลอดการทดลอง 14 วัน ประมาณร้อยละ 20 ซึ่งอาจจะเกิดจากถ่านกัมมันต์ทางการค้าสามารถดูดซับความชื้นในระบบที่เก็บรักษา (ความชื้นในกล่อง) ได้ดีกว่าถ่านกัมมันต์ที่ผลิต ส่งผลให้ปริมาณความชื้นในระบบลดต่ำกว่าทรีตเมนต์อื่นๆ อัตราการคายน้ำจึงสูงกว่าทรีตเมนต์อื่นๆ



รูปที่ 4.4 การเปลี่ยนแปลงร้อยละการสูญเสียน้ำหนักของมะม่วงน้ำดอกไม้ในทรีตเมนต์ต่างๆ ตามจำนวนวันเก็บรักษา

#### 4.3.2 สีเปลือกและสีเนื้อของมะม่วงน้ำดอกไม้

สีเปลือกของผลไม้เป็นคุณลักษณะภายนอกที่สามารถสังเกตได้ก่อนลักษณะทางคุณภาพอื่นๆ แต่การใช้สีเปลือกในการกำหนดระดับความสุกของมะม่วงไม่มีค่าจำเพาะที่ใช้เป็นมาตรฐาน เนื่องจากขณะที่ผลมะม่วงเจริญเติบโตอยู่บนต้น ชาวสวนมักห่อผลเพื่อป้องกันแมลงและรักษาสีผลให้มีความสวยงาม อีกทั้งปัจจัยในเรื่องการรับแสงแดดและอุณหภูมิในพื้นที่ที่ปลูกยังส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงสีเปลือกของมะม่วงเช่นกัน ทำให้การกำหนดความสุกจากสีเปลือกเพียงอย่างเดียวไม่เพียงพอ จึงควรพิจารณาลักษณะทางคุณภาพอื่นๆ ควบคู่ไปด้วย [28]

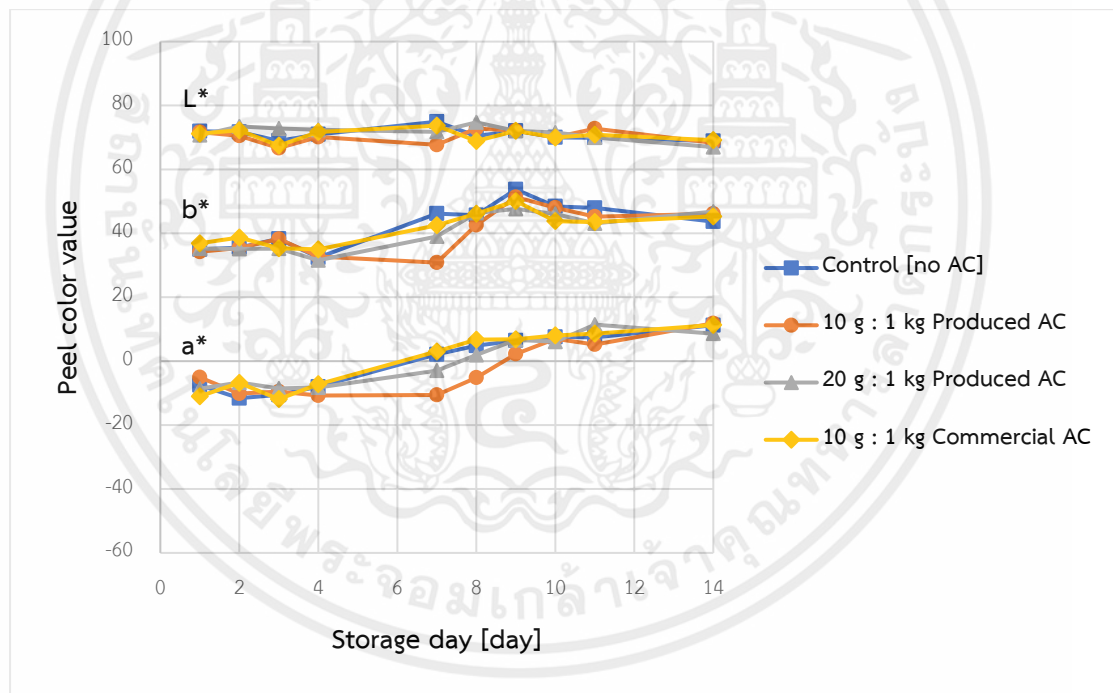
สำหรับมะม่วงน้ำดอกไม้ ในตอนดิบเปลือกจะมีสีเขียวทึบ เนื้อจะมีสีเหลืองซีด เมื่อสุกเปลือกจะเปลี่ยนสีเป็นสีเหลืองเช่นเดียวกันกับเนื้อ ซึ่งเป็นผลมาจากการเสื่อมสลายของคลอโรฟิลล์ ทำให้มีสีเขียวลดลง และการสังเคราะห์แคโรทีนอยด์เพิ่มขึ้น โดยในแคโรทีนอยด์จะมีเม็ดสีที่สำคัญคือ เบตา-แคโรทีน ที่ทำให้มะม่วงมีสีเหลืองเพิ่มขึ้น สำหรับมะม่วงผลที่สุกมากจะมีเบตา-แคโรทีนสูงกว่ามะม่วงผลที่เพิ่งเริ่มสุก ทำให้ผลมีสีเหลืองที่เข้มกว่า [33]

ในการทดลองได้ทำการตรวจวัดสีของมะม่วงน้ำดอกไม้ในระบบ CIE ค่าที่ได้จะแสดงออกมาเป็นค่าความสว่างของสี ( $L^*$ ), ค่าสีแดง ( $a^*$ ) และค่าสีเหลือง ( $b^*$ ) จากการทดลองพบว่าค่าความสว่างของเปลือกค่อนข้างคงตัวตลอดการทดลอง 14 วัน โดยอยู่ที่ประมาณ 70 ในขณะที่ความสว่างของเนื้อมีแนวโน้มลดลงจาก 85 เหลือ 70 โดยประมาณ การที่ค่าความสว่างของเปลือกมีความคงตัวเนื่องมาจากในระหว่างการสุก เปลือกมะม่วงเปลี่ยนสีจากสีเขียวทึบเป็นสีเหลือง ซึ่งไม่ส่งผลต่อค่าความสว่าง แต่ในระหว่างการสุก เนื้อมะม่วงเปลี่ยนสีจากสีเหลืองซีดเป็นสีเหลือง ซึ่งส่งผลให้ค่าความสว่างของสีเนื้อลดลง

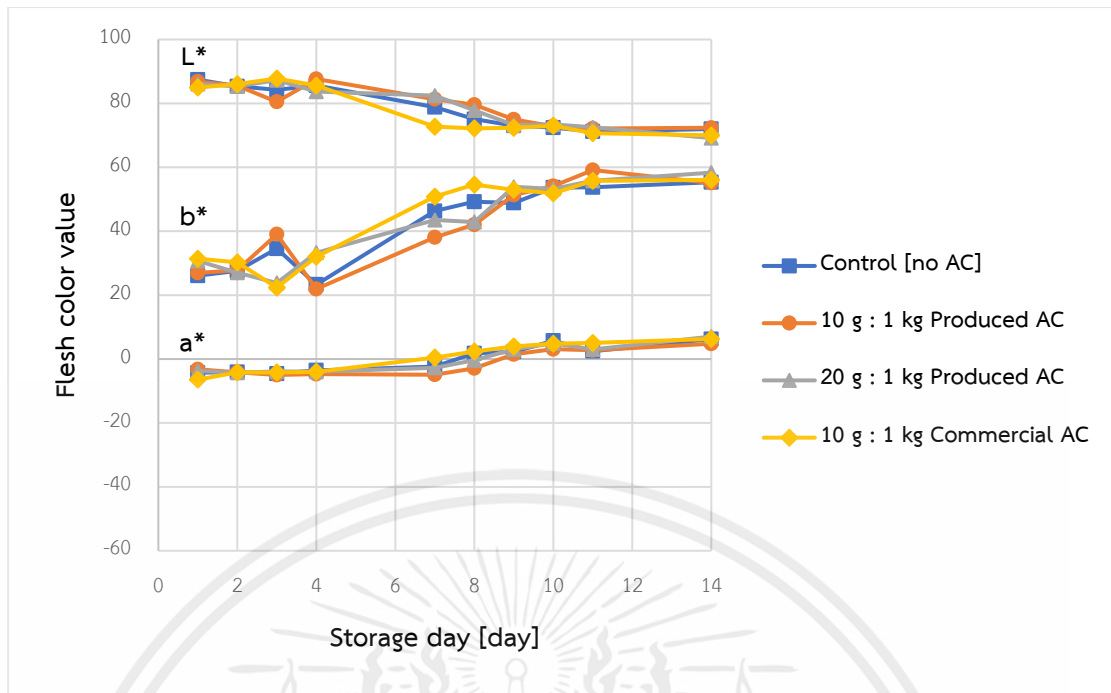
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าสีแดงเป็นค่าแสดงแนวโน้มสีเขียว (ค่าลบ) และสีแดง (ค่าบวก) โดยค่าสีแดงของเปลือกมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจาก -10 เป็น +10 โดยประมาณ และค่าสีแดงของเนื้อไม้มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจาก -5 เป็น +5 โดยประมาณ การที่ค่าสีแดงเพิ่มขึ้นในระหว่างการสุกเป็นเพราะการเสื่อมสลายของคลอโรฟิลล์ และเมื่อค่าสีแดงมีค่ามากกว่า 0 หมายความว่าค่าสีเขียวได้หมดไปแล้ว

ค่าสีเหลืองเป็นค่าแสดงแนวโน้มสีน้ำเงิน (ค่าลบ) และสีเหลือง (ค่าบวก) โดยค่าสีเหลืองของเปลือกมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจาก +35 เป็น +50 โดยประมาณ จากนั้นลดลงเล็กน้อย และค่าสีเหลืองของเนื้อไม้มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจาก +25 เป็น +60 โดยประมาณ การที่ค่าสีเหลืองเพิ่มขึ้นในระหว่างการสุกเป็นเพราะมีการสังเคราะห์เบตา-แคโรทีนเพิ่มขึ้น และการที่ค่าสีเหลืองของเปลือกลดลงเล็กน้อยในช่วงท้ายของการทดลองเป็นเพราะเปลือกมีสีเหลืองที่เข้มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับค่าความสว่างของเปลือกที่ลดลงเล็กน้อยในช่วงท้ายของการทดลองเช่นกัน นอกจากนี้เมื่อพิจารณาวันที่ค่าสีเหลืองสูงสุดของทั้งเปลือกและเนื้อพบว่า การเปลี่ยนแปลงสีเปลือกเกิดขึ้นไวกว่าการเปลี่ยนแปลงสีเนื้อ



รูปที่ 4.5 การเปลี่ยนแปลงสีเปลือกของมะม่วงน้ำดอกไม้ในทรีตเมนต์ต่างๆ ตามจำนวนวันเก็บรักษา

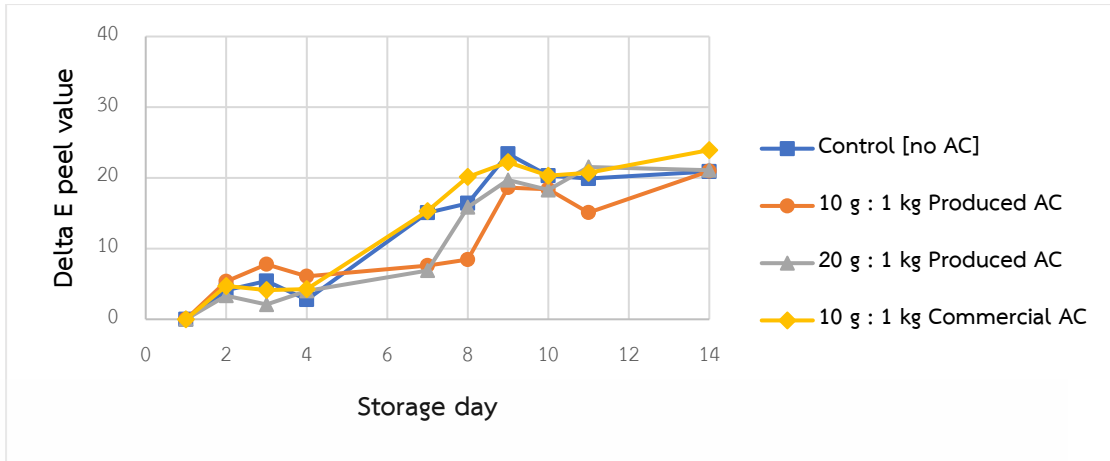


รูปที่ 4.6 การเปลี่ยนแปลงสีเนื้อของมะม่วงน้ำดอกไม้ในทรีตเมนต์ต่างๆ ตามจำนวนวันเก็บรักษา

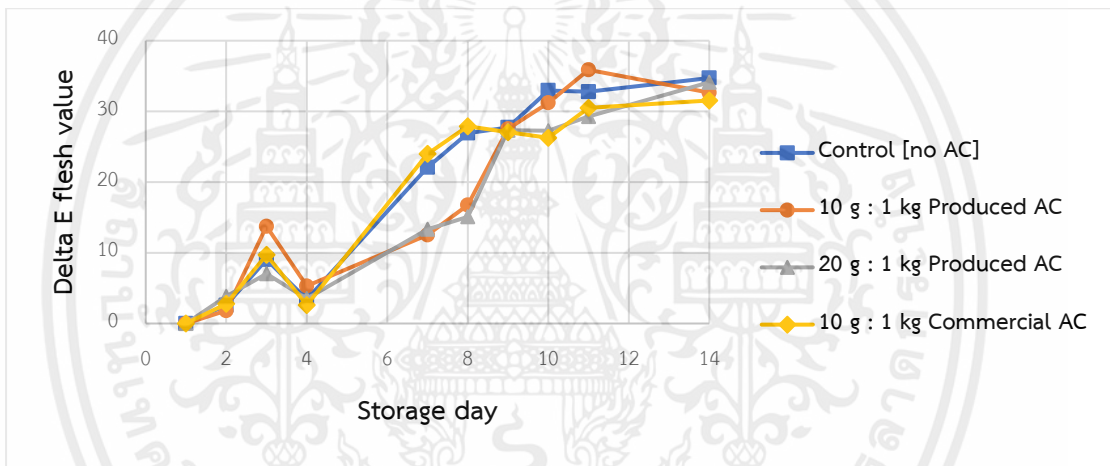
ค่า  $\Delta E$  คือค่าการเปลี่ยนแปลงของค่าสีทั้ง 3 หน่วย ณ วันที่เก็บรักษาเทียบกับวันที่ 1 ซึ่งจะช่วยลดความแปรปรวนจากการพิจารณาค่าสีของหน่วยใดหน่วยหนึ่ง จากรูปที่ 4.6 พบว่าการเปลี่ยนแปลงของสีเปลือกของทรีตเมนต์ควบคุมที่ไม่มีถ่านกัมมันต์มีการเปลี่ยนแปลงอย่างมากในระหว่างวันที่ 4 ถึง 7 ทรีตเมนต์ของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตปริมาณ 10 กรัมต่อมะม่วง 1 กิโลกรัมมีการเปลี่ยนแปลงอย่างมากในระหว่างวันที่ 8 ถึง 9 ทรีตเมนต์ของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตปริมาณ 20 กรัมต่อมะม่วง 1 กิโลกรัมมีการเปลี่ยนแปลงอย่างมากในระหว่างวันที่ 7 ถึง 8 และทรีตเมนต์ของถ่านกัมมันต์ทางการค้าปริมาณ 10 กรัมต่อมะม่วง 1 กิโลกรัมมีการเปลี่ยนแปลงอย่างมากในระหว่างวันที่ 4 ถึง 8 ดังนั้นจะเห็นได้ชัดเจนว่าถ่านกัมมันต์ที่ผลิตสามารถชะลอการเปลี่ยนแปลงของสีเปลือกได้

จากรูปที่ 4.7 พบว่าการเปลี่ยนแปลงของสีเนื้อของทรีตเมนต์ควบคุมที่ไม่มีถ่านกัมมันต์มีการเปลี่ยนแปลงอย่างมากในระหว่างวันที่ 4 ถึง 8 ทรีตเมนต์ของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตปริมาณ 10 กรัมต่อมะม่วง 1 กิโลกรัมมีการเปลี่ยนแปลงอย่างมากในระหว่างวันที่ 8 ถึง 9 ทรีตเมนต์ของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตปริมาณ 20 กรัมต่อมะม่วง 1 กิโลกรัมมีการเปลี่ยนแปลงอย่างมากในระหว่างวันที่ 8 ถึง 9 และทรีตเมนต์ของถ่านกัมมันต์ทางการค้าปริมาณ 10 กรัมต่อมะม่วง 1 กิโลกรัมมีการเปลี่ยนแปลงอย่างมากในระหว่างวันที่ 4 ถึง 7 ดังนั้นจะเห็นได้ชัดเจนว่าถ่านกัมมันต์ที่ผลิตสามารถชะลอการเปลี่ยนแปลงของสีเนื้อได้เช่นเดียวกับสีเปลือก

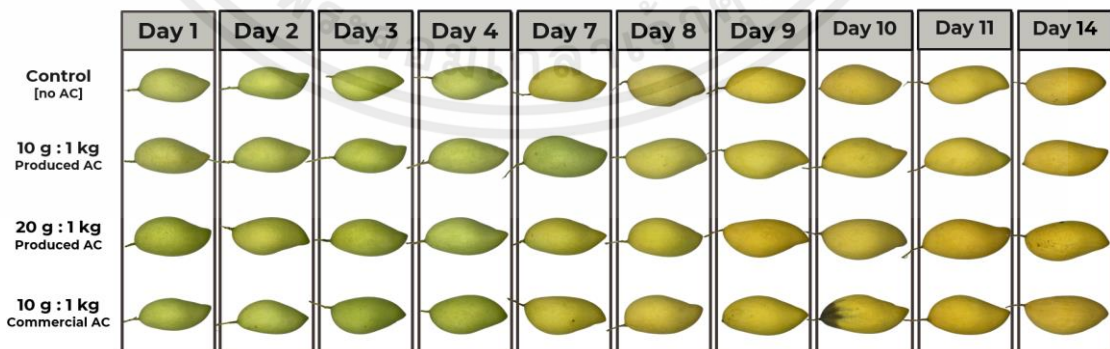
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.7 การเปลี่ยนแปลงค่าสี  $\Delta E$  ของเปลือกมะม่วงน้ำดอกไม้ในทรีตเมนต์ต่างๆ ตามจำนวนวันเก็บรักษา



รูปที่ 4.8 การเปลี่ยนแปลงค่าสี  $\Delta E$  ของเนื้อมะม่วงน้ำดอกไม้ในทรีตเมนต์ต่างๆ ตามจำนวนวันเก็บรักษา



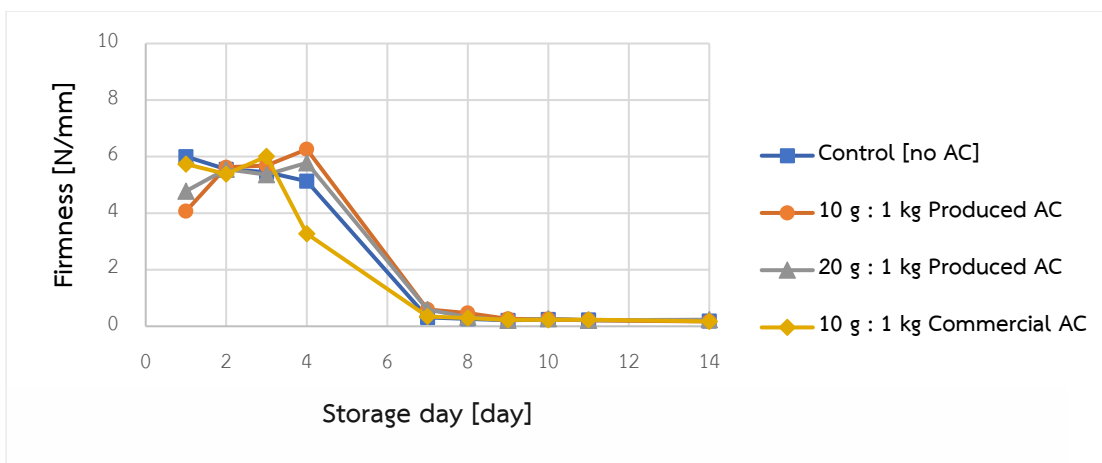
รูปที่ 4.9 ลักษณะภายนอกของมะม่วงน้ำดอกไม้ในทรีตเมนต์ต่างๆ ตามจำนวนวันเก็บรักษา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 4.3.3 ความแน่นเนื้อของมะม่วงน้ำดอกไม้

จากการทดลองพบว่า ในระหว่างการสุกของมะม่วงน้ำดอกไม้ที่เพิ่มขึ้น ความแน่นเนื้อ มีแนวโน้มลดลง โดยในช่วงแรกของการเก็บรักษา (วันที่ 1 ถึง 4) มะม่วงน้ำดอกไม้มีความแน่นเนื้อ ลดลงอย่างช้าๆ หลังจากนั้นความแน่นเนื้อจะลดลงอย่างรวดเร็วในวันที่ 7 แสดงให้เห็นว่าเนื้อมะม่วง มีความอ่อนนุ่มเริ่มสุกแล้ว ซึ่งการลดลงของความแน่นเนื้อนี้จะเกิดจากการเปลี่ยนแปลงขนาดโมเลกุล ของโปรโตเพคติน ซึ่งเป็นสารประกอบเพคตินที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่และไม่ละลายน้ำ โดย โปรโตเพคตินนี้จะทำให้แต่ละเซลล์ยึดเกาะติดกันอย่างแน่นในช่วงที่มะม่วงดิบอยู่ เมื่อมะม่วงสุก โปรโตเพคตินจะเปลี่ยนแปลงขนาดโมเลกุลให้เล็กลง ทำให้สามารถละลายน้ำได้มากขึ้น และทำให้ เซลล์ยึดเกาะกันอย่างหลวมๆ ซึ่งเป็นผลทำให้เนื้อเยื่อของมะม่วงอ่อนตัวลง อีกทั้งในระหว่างการสุก ยังมีเอนไซม์ polygalacturonase, pectinesterase และ cellulase ที่มีบทบาทสำคัญในการย่อย ผนังเซลล์ ทำให้เนื้อเยื่ออ่อนตัวลงเช่นกัน

จากรูปที่ 4.9 พบว่า ความแน่นเนื้อในแต่ละวันเก็บรักษาของทรีตเมนต์ควบคุมที่ไม่มี ถ่านกัมมันต์, ทรีตเมนต์ของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตปริมาณ 10 กรัมต่อมะม่วง 1 กิโลกรัม, ทรีตเมนต์ ของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตปริมาณ 20 กรัมต่อมะม่วง 1 กิโลกรัม และทรีตเมนต์ของถ่านกัมมันต์ ทางการค้าปริมาณ 10 กรัมต่อมะม่วง 1 กิโลกรัม มีความแตกต่างกัน โดยในวันแรกหลังการเก็บเกี่ยว จากกราฟจะสังเกตได้ว่าค่าความแน่นเนื้อของแต่ละทรีตเมนต์มีค่าเริ่มต้นที่ไม่เท่ากัน ซึ่งค่า ความแน่นเนื้อของมะม่วงน้ำดอกไม้ในทรีตเมนต์ของถ่านกัมมันต์ปริมาณ 10 กรัมต่อมะม่วง 1 กิโลกรัม มีค่าต่ำที่สุดเมื่อเทียบกับทรีตเมนต์อื่นๆ สันนิษฐานว่าอาจเกิดจากผลของมะม่วงมีความสุก เริ่มต้นมากกว่าผลอื่นๆ และในวันที่ 3 ค่าความแน่นเนื้อของมะม่วงน้ำดอกไม้ในทรีตเมนต์ ของถ่านกัมมันต์ทางการค้ามีค่าสูงขึ้น และในวันที่ 4 ค่าความแน่นเนื้อของมะม่วงน้ำดอกไม้ใน ทรีตเมนต์ของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตปริมาณ 10 กรัมต่อมะม่วง 1 กิโลกรัม มีค่าสูงที่สุด สันนิษฐานว่าอาจ เกิดจากมะม่วงน้ำดอกไม้ในระยะเริ่มต้นมีความสุกที่ไม่เท่ากัน ซึ่งไม่สามารถควบคุมปัจจัยนี้ได้ จึงส่งผลทำให้ค่าความแน่นเนื้อของมะม่วงน้ำดอกไม้มีค่าไม่เท่ากัน



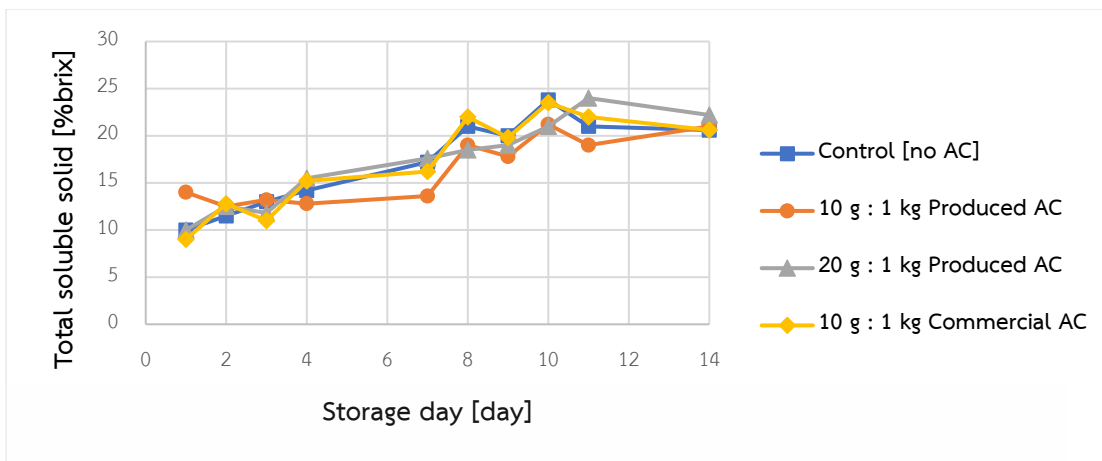
รูปที่ 4.10 การเปลี่ยนแปลงความแน่นเนื้อของมะม่วงน้ำดอกไม้ในทรีตเมนต์ต่างๆ ตามจำนวนวันเก็บรักษา

#### 4.3.4 ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ของเนื้อมะม่วงน้ำดอกไม้

จากการทดลองพบว่า ในระหว่างการสุกของมะม่วงน้ำดอกไม้ที่เพิ่มขึ้น ปริมาณของแข็งที่ละลายได้มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามไปด้วย เนื่องจากเมื่อผลไม้มีความสุกมากขึ้น สารประกอบคาร์โบไฮเดรตที่ละลายน้ำไม่ได้จำพวกแป้งที่สะสมอยู่ในผลขณะอยู่บนต้น จะถูกไฮโดรไลซ์โดยเอนไซม์ amylase แล้วเปลี่ยนไปเป็นสารประกอบคาร์โบไฮเดรตที่ละลายน้ำได้จำพวกน้ำตาลมากขึ้น ส่งผลให้ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ของเนื้อมะม่วงมีค่าเพิ่มขึ้นตามไปด้วย

ค่าปริมาณของแข็งที่ละลายได้ในน้ำของเนื้อมะม่วงน้ำดอกไม้ที่ถูกบด จะสามารถวัดค่าได้โดยการอ่านสเกลผ่านเครื่องวัดดัชนีหักเห ซึ่งจะใช้หลักการการหักเหแสงของน้ำเนื้อมะม่วงน้ำดอกไม้ที่หยดลงไปบนแผ่นปริซึม โดยค่าการหักเหของแสงจะแปรเปลี่ยนไปตามปริมาณน้ำตาลที่อยู่ในของเหลวตัวอย่างที่ใช้วัดค่า และจะแสดงค่าออกมาในรูปของ %brix เมื่อเทียบกับปริมาณของน้ำกลั่นปริสุทธิ์

จากรูปที่ 4.10 พบว่า ค่าปริมาณของแข็งที่ละลายได้ของน้ำเนื้อมะม่วงน้ำดอกไม้ในทรีตเมนต์ของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตปริมาณ 10 กรัมต่อมะม่วง 1 กิโลกรัมในวันที่ 1 ของการเก็บรักษามีค่าเริ่มต้นที่สูงกว่าทรีตเมนต์อื่นๆ จึงมีความสอดคล้องกับผลของความแน่นเนื้อของเนื้อมะม่วงน้ำดอกไม้ในวันแรกของการเก็บรักษาอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งเกิดจากความแปรปรวนของผลมะม่วงและความสุกของผลมะม่วงเริ่มต้นไม่เท่ากันเมื่อเทียบกับทรีตเมนต์อื่นๆ ต่อมาในวันที่ 4, 7, 9 และ 11 ของการเก็บรักษาในทรีตเมนต์ของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตปริมาณ 10 ต่อมะม่วง 1 กิโลกรัมมีค่าต่ำกว่าทรีตเมนต์อื่นๆ อย่างเห็นได้ชัด แต่ในวันที่ 10 กลับมีค่าพุ่งสูงขึ้น ส่งผลทำให้เนื้อของมะม่วงน้ำดอกไม้มีค่าความหวานมากหรือมีความสุกมากกว่าวันอื่นๆ ในการทดลอง แสดงให้เห็นว่า น้ำของเนื้อมะม่วงน้ำดอกไม้มีรสชาติหวานน้อยกว่าหรือมีความสุกน้อยกว่าทรีตเมนต์อื่นๆ

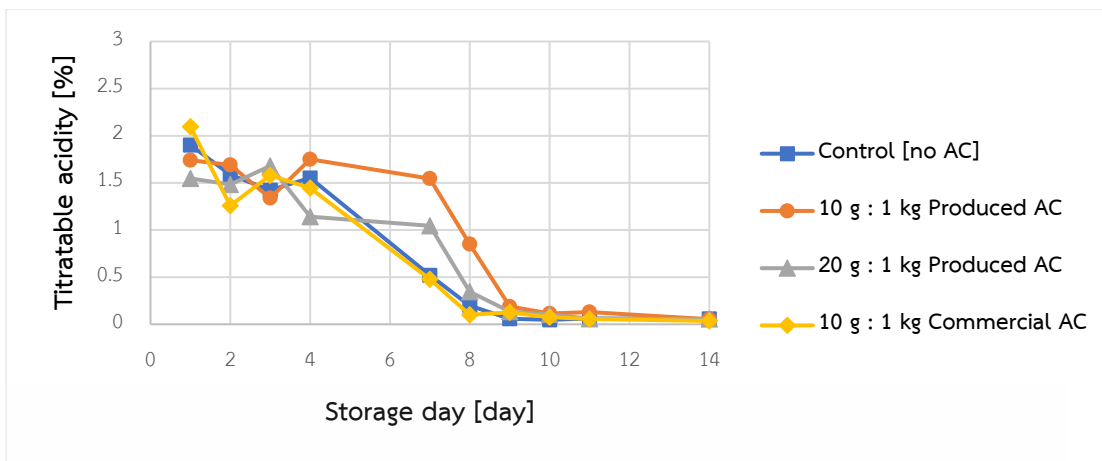


รูปที่ 4.11 การเปลี่ยนแปลงปริมาณของแข็งที่ละลายได้ของเนื้อมะม่วงน้ำดอกไม้ในทรีตเมนต์ต่างๆ ตามจำนวนวันเก็บรักษา

#### 4.3.5 ร้อยละปริมาณกรดที่ไทเทรตได้ของเนื้อมะม่วงน้ำดอกไม้

จากการทดลองพบว่า ในระหว่างการสุกของมะม่วงน้ำดอกไม้ที่เพิ่มขึ้น ร้อยละปริมาณกรดที่ไทเทรตได้มีแนวโน้มลดลง ซึ่งในมะม่วงมีกรดมาลิกเป็นกรดที่แสดงอิทธิพลหรือกรดหลัก โดยในระหว่างการสุกของมะม่วง กรดมาลิกจะถูกนำไปใช้เป็นพลังงานในกระบวนการหายใจระดับเซลล์และการสังเคราะห์น้ำตาล ส่งผลทำให้ปริมาณกรดมาลิกหรือกรดที่ไทเทรตได้มีค่าลดลงและมีการเพิ่มขึ้นของน้ำตาล เมื่อมะม่วงมีความสุกมากขึ้น

จากรูปที่ 4.11 ค่าปริมาณกรดที่ไทเทรตได้ของเนื้อมะม่วงน้ำดอกไม้ในแต่ละทรีตเมนต์มีความแตกต่างกันอย่างชัดเจน แต่มีแนวโน้มลดลงไปในทางเดียวกัน โดยค่าร้อยละปริมาณกรดที่ไทเทรตของเนื้อมะม่วงน้ำดอกไม้ของทรีตเมนต์ของถ่านกัมมันต์ปริมาณ 10 กรัมต่อมะม่วง 1 กิโลกรัม ในวันที่ 4 พบว่ามีค่าความเป็นกรดสูงที่สุด เมื่อเทียบกับทรีตเมนต์อื่นๆ ในขณะเดียวกันค่าปริมาณกรดที่ไทเทรตของเนื้อมะม่วงน้ำดอกไม้ในทรีตเมนต์ของถ่านกัมมันต์ปริมาณ 20 กรัมต่อมะม่วง 1 กิโลกรัมมีค่าความเป็นกรดต่ำที่สุด



รูปที่ 4.12 การเปลี่ยนแปลงปริมาณกรดที่ไทเทรตได้ของเนื้อมะม่วงน้ำดอกไม้ในทรีตเมนต์ต่างๆ ตามจำนวนวันเก็บรักษา

#### 4.3.6 อัตราส่วนปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ต่อปริมาณกรดที่ไทเทรตได้ของเนื้อมะม่วงน้ำดอกไม้

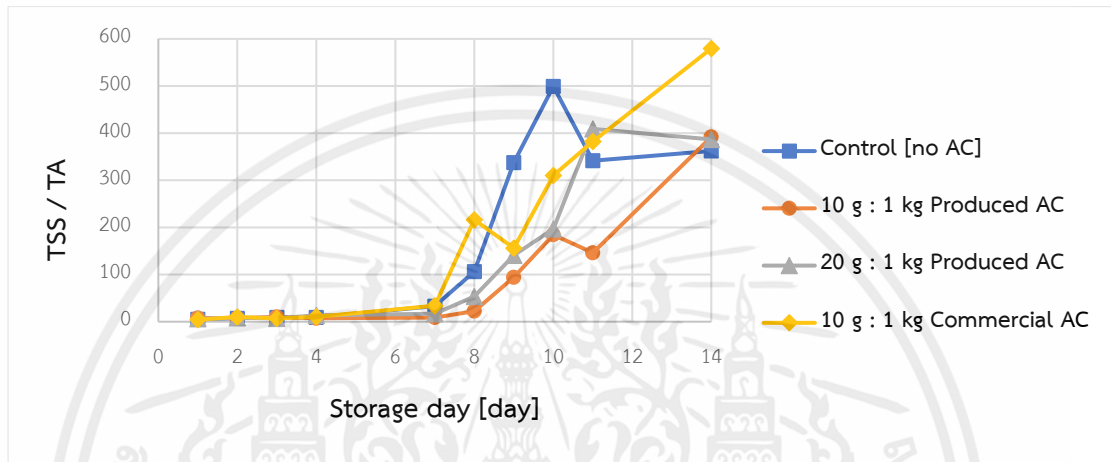
อัตราส่วนนี้บ่งชี้ถึงปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ต่อปริมาณกรดที่ไทเทรตได้ โดยถ้าอัตราส่วนนี้มีค่าที่สูงขึ้น ย่อมหมายความว่ามะม่วงน้ำดอกไม้มีรสชาติหวานขึ้น จึงอาจอนุมานได้ว่ามะม่วงน้ำดอกไม้ผลนั้นได้เกิดการสุกเพิ่มมากขึ้น โดยอัตราส่วนปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ต่อปริมาณกรดที่ไทเทรตได้ของงานวิจัยนี้ทั้ง 14 วัน ได้ถูกนำมาสร้างเป็นกราฟความสัมพันธ์ดังแสดงในรูปที่ 4.11

จากรูปที่ 4.11 พบว่าในช่วงวันที่ 9-10 ของการเก็บรักษา ทรีตเมนต์ควบคุมแสดงค่าอัตราส่วนปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ต่อปริมาณกรดที่ไทเทรตได้สูงกว่าทรีตเมนต์อื่นๆ ซึ่งทำให้สามารถตั้งสมมติฐานได้ว่า ทรีตเมนต์ควบคุมมีความสามารถในการชะลอที่ต่ำที่สุด ทว่าเมื่อถึงวันที่ 11 ของการเก็บรักษา ทรีตเมนต์ควบคุมกลับมีค่าอัตราส่วนนี้ต่ำกว่าทรีตเมนต์ของถ่านกัมมันต์ปริมาณ 20 กรัมต่อมะม่วง 1 กิโลกรัม และทรีตเมนต์ของถ่านกัมมันต์ทางการค้าปริมาณ 10 กรัมต่อมะม่วง 1 กิโลกรัม ซึ่งหมายความว่าตั้งแต่วันที่ 11 ของการเก็บรักษา ทรีตเมนต์ของถ่านกัมมันต์ที่ได้กล่าวไปก่อนหน้านี้ 2 ชนิด ให้ผลในการชะลอการสุกที่ต่ำกว่าทรีตเมนต์ควบคุมเสียอีก อาจกล่าวได้ว่ากลุ่มทรีตเมนต์ของถ่านกัมมันต์ดังกล่าวทั้ง 2 ทรีตเมนต์สามารถชะลอการสุกได้ดีกว่ากลุ่มควบคุมในช่วงก่อน 11 วันของการเก็บรักษา แต่เมื่อเกิดการสุกในระดับหนึ่งทรีตเมนต์ของถ่านกัมมันต์ทั้ง 2 ทรีตเมนต์นี้ กลับทำให้เกิดการสุกมากกว่ากลุ่มควบคุม

ในขณะที่ทรีตเมนต์ของถ่านกัมมันต์ปริมาณ 10 กรัมต่อมะม่วง 1 กิโลกรัม แสดงค่าอัตราส่วนนี้ค่อนข้างต่ำ หากพิจารณาแค่เฉพาะผลลัพธ์ในส่วนนี้ สามารถกล่าวได้ว่าทรีตเมนต์ของถ่านกัมมันต์นี้ สามารถชะลอการสุกได้ตลอดช่วงการเก็บรักษา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อย่างไรก็ตามค่าอัตราส่วนปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้ต่อปริมาณกรดที่ไทเทรตได้ เกิดจากผลหารของสองค่า หากแต่ละค่าเกิดความคลาดเคลื่อนอันเป็นเหตุมาจากความแปรปรวนจากวัตถุดิบ ผลที่ตัวเลขสองจำนวนนำมาคูณหรือหารกัน ย่อมเกิดความคลาดเคลื่อนสะสมขนาดใหญ่ยิ่งขึ้น วิธีแก้ไขปัญหาดังกล่าวคือ ควรใช้พารามิเตอร์นี้เป็นค่าเสริม ยังไม่สามารถใช้เป็นหลักฐานได้ ให้กลับไปพิจารณาค่าปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้ และปริมาณกรดที่ไทเทรตได้ ทีละอย่าง



รูปที่ 4.13 การเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วนปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ต่อปริมาณกรดที่ไทเทรตได้ของเนื้อมะม่วงน้ำดอกไม้ในทรีตเมนต์ต่างๆ ตามจำนวนวันเก็บรักษา

จากการทดสอบการชะลอการสุกของมะม่วงน้ำดอกไม้พบว่า ทรีตเมนต์ของถ่านกัมมันต์ทางการค้าให้ผลไม่แตกต่างจากทรีตเมนต์ควบคุม หรือกล่าวได้ว่าไม่สามารถชะลอการสุกได้ ทรีตเมนต์ของถ่านกัมมันต์ปริมาณ 20 กรัมต่อมะม่วง 1 กิโลกรัมให้ผลแตกต่างจากทรีตเมนต์ควบคุมในบางพารามิเตอร์ ในขณะที่ทรีตเมนต์ของถ่านกัมมันต์ปริมาณ 10 กรัมต่อมะม่วง 1 กิโลกรัมให้ผลแตกต่างจากทรีตเมนต์ควบคุมในทุกพารามิเตอร์ ยกเว้นการสูญเสียเสียน้ำหนักของมะม่วงน้ำดอกไม้ซึ่งขึ้นอยู่กับกระบวนการหายใจและการคายน้ำเป็นหลัก ซึ่งแสดงให้เห็นว่าถ่านกัมมันต์ของทรีตเมนต์นี้สามารถดูดซับแก๊สเอทิลีนและชะลอการสุกได้ โดยสามารถชะลอได้ประมาณ 2 วัน เมื่อเปรียบเทียบกับทรีตเมนต์ควบคุม ซึ่งการที่ถ่านกัมมันต์ปริมาณน้อยกว่าให้ผลการชะลอการสุกได้ดีกว่า อาจเกิดจากการตอบสนองของมะม่วงต่อปริมาณแก๊สเอทิลีนไม่เหมือนกัน เช่น การใช้ตัวดูดซับปริมาณมาก จะทำให้ปริมาณแก๊สเอทิลีนในระบบมีน้อยเกินไป ซึ่งอาจส่งผลให้มะม่วงปลดปล่อยแก๊สเอทิลีนเพิ่มมากขึ้น

## บทที่ 5

### สรุปผลงานวิจัยและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลงานวิจัย

จากการวิเคราะห์องค์ประกอบแบบประมาณของเม็ดมะม่วงมหาชนก พบว่ามีร้อยละปริมาณความชื้น 1.18 ร้อยละปริมาณสารระเหย 93.43 ร้อยละปริมาณเถ้า 1.13 และร้อยละปริมาณคาร์บอนคงตัว 4.26 ซึ่งเหมาะแก่การนำมาผลิตเป็นถ่านกัมมันต์ การเตรียมถ่านกัมมันต์จากเม็ดมะม่วงมหาชนก ในขั้นตอนแรกการคาร์บอนไนเซชันนำเม็ดมะม่วงมหาชนกไปทำการคาร์บอนไนเซชันที่อุณหภูมิ 450, 500, 550 และ 600 องศาเซลเซียส เพื่อให้ได้ถ่านไบโอชาร์ พบว่าการคาร์บอนไนเซชันที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส มีความเหมาะสมมากที่สุด เมื่อพิจารณาถึงคุณภาพควบคู่ไปกับความคุ้มค่าของพลังงาน โดยมีร้อยละผลได้เท่ากับ 25.47 และมีเลขไอโอดีนเท่ากับ 361.77 มิลลิกรัม ไอโอดีนต่อกรัมตัวดูดซับ ในขั้นตอนถัดไปนำถ่านไบโอชาร์ที่ทำการคาร์บอนไนเซชันที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส มากระตุ้นทางเคมีด้วยโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตเพื่อให้ได้ถ่านกัมมันต์ จากการตรวจสอบลักษณะทางกายภาพ พบว่าถ่านกัมมันต์มีรูพรุนขนาดเล็กกระจายตัวอยู่บนพื้นผิว โดยมีพื้นที่ผิวจำเพาะ 0.65 ตารางเมตรต่อกรัม และมีหมู่ไฮดรอกซิลและแมงกานิลเกิดขึ้นหลังการกระตุ้น

ในการศึกษาการชะลอการสุกของมะม่วง แบ่งชุดการทดลองเป็น 4 ทรีตเมนต์ ได้แก่ ทรีตเมนต์ควบคุมที่ไม่มีถ่านกัมมันต์ ทรีตเมนต์ของถ่านกัมมันต์ปริมาณ 10 กรัมต่อมะม่วง 1 กิโลกรัม ทรีตเมนต์ของถ่านกัมมันต์ปริมาณ 20 กรัมต่อมะม่วง 1 กิโลกรัม และทรีตเมนต์ของถ่านกัมมันต์ทางการค้าปริมาณ 10 กรัมต่อมะม่วง 1 กิโลกรัม ทุกทรีตเมนต์ถูกควบคุมอุณหภูมิการเก็บรักษาไว้ที่  $27 \pm 2$  องศาเซลเซียส และไม่มีการควบคุมความชื้น จากการตรวจสอบการสูญเสียน้ำหนัก สีเปลือกและสีเนื้อ ความแน่นเนื้อ ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ ร้อยละปริมาณกรดที่ไทเทรตได้ และอัตราส่วนปริมาณของแข็งที่ละลายได้ต่อปริมาณกรดที่ไทเทรตได้ พบว่าทรีตเมนต์ของถ่านกัมมันต์ทางการค้าไม่สามารถชะลอการสุกได้ ในขณะที่ทรีตเมนต์ของถ่านกัมมันต์ปริมาณ 10 กรัมต่อมะม่วง 1 กิโลกรัมให้ผลการชะลอการสุกได้ดีที่สุด โดยสามารถชะลอได้ประมาณ 2 วัน เมื่อเปรียบเทียบกับทรีตเมนต์ควบคุม ซึ่งการที่ถ่านกัมมันต์ปริมาณ 10 กรัมต่อมะม่วง 1 กิโลกรัมให้ผลการชะลอการสุกได้ดีกว่าปริมาณ 20 กรัมต่อมะม่วง 1 กิโลกรัม อาจเกิดจากการตอบสนองของมะม่วงต่อปริมาณแก๊สเอทิลีน การใช้ตัวดูดซับปริมาณมาก จะทำให้ปริมาณแก๊สเอทิลีนในระบบมีน้อยเกินไป ซึ่งอาจส่งผลให้มะม่วงปลดปล่อยแก๊สเอทิลีนเพิ่มมากขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

จากการทดลองจะต้องมีการพัฒนาเพื่อนำไปใช้งานจึงมีข้อเสนอแนะเพื่อการปรับปรุงและการนำไปใช้ให้เกิดประโยชน์ ดังนี้

1. การศึกษาผลของตัวแปรอื่นๆ ที่ส่งผลต่อสมบัติความพรุนของถ่านกัมมันต์ เช่น ระยะเวลาการคาร์บอนเซชัน, อัตราการเพิ่มอุณหภูมิคาร์บอนเซชัน, ความเข้มข้นของสารเคมีที่นำมาใช้กระตุ้น, ระยะเวลาในการกระตุ้น เป็นต้น อาจช่วยให้ถ่านกัมมันต์มีความสามารถในการดูดซับที่ดีขึ้น และอาจช่วยให้กระบวนการใช้พลังงานหรือสารเคมีน้อยลง

2. การเผาถ่านไปไอซาร์สำหรับผลิตเป็นถ่านกัมมันต์ในปริมาณมาก จำเป็นต้องใช้เตาเผาถ่านขนาดใหญ่ที่สามารถให้ความร้อนได้อย่างทั่วถึงในทุกส่วนของเตาเผา และสามารถควบคุมอุณหภูมิได้ อีกทั้งยังต้องมีการควบคุมสภาวะในการเผาให้เป็นแบบอับอากาศหรือมีอากาศน้อยที่สุด จึงควรมีการศึกษาและออกแบบเตาเผาถ่านในระดับ Large scale เพิ่มเติม

3. การตรวจสอบการปลดปล่อยแก๊สเอทิลีนของผลไม้ ณ บรรยากาศที่ทดลอง และการดูดซับแก๊สเอทิลีนบนถ่านกัมมันต์ที่ผลิต แบบออนไลน์ด้วยเครื่อง GC (Gas Chromatography) จะทำให้ได้ข้อมูลเพื่อเป็นแนวทางในการอธิบายเกี่ยวกับการดูดซับแก๊สเอทิลีน และการสุกของผลไม้ได้ชัดเจนมากยิ่งขึ้น

4. การทดสอบการชะลอการสุกของผลไม้ในสภาวะ Cold chain ควบคู่ไปกับการใช้ถ่านกัมมันต์ที่ผลิต อาจทำให้เห็นผลลัพธ์การชะลอการสุกของผลไม้ได้ชัดเจนยิ่งขึ้น และอาจทำให้ถ่านกัมมันต์ที่ผลิตสามารถดูดซับแก๊สเอทิลีนได้เต็มประสิทธิภาพ

## บรรณานุกรม

- [1] สรวุฒิ ดาแก้ว, ประสพสุข ฤทธิเดช, วสันต์ ปินะเต และ สายใจ เพิ่งที. 2563. โครงการส่งเสริมการแปรรูปมะม่วงพันธุ์มหาชนกเพื่อส่งเสริมเกษตรกรรายย่อยให้ไปสู่รูปแบบการเกษตรแบบยั่งยืนและเตรียมความพร้อมสำหรับการเกษตรในยุค 4.0. [Online]. Available: <http://hsmi2.psu.ac.th/food/project/476>
- [2] Nantasarn, M. Khamkula, K. and Boonsrichana, T. 2021. Development of packaging and marketing channel of Mahachanok mango Processing in commercial market at Na Chueak district, Maha Sarakham province. [Online]. Available: <http://research.rmu.ac.th/rdi-mis/upload/fullreport/1632295373.pdf>
- [3] กรมวิชาการเกษตร. 2565. กรมวิชาการเกษตรเพิ่มมูลค่าเมล็ดมะม่วงวัสดุเหลือใช้จากการแปรรูป สู่โลชั่นผิวขาว ป้องกันการเกิดริ้วรอย. [Online]. Available: <https://www.doa.go.th/th/กรมวิชาการเกษตรเพิ่มมูลค่า/>
- [4] ศูนย์วิจัยสิทธิกรไทย. 2564. จากของเหลือทิ้งทางการเกษตร สู่พลาสติกชีวภาพ. [Online]. Available: <https://www.kasikornresearch.com/th/analysis/k-social-media/Pages/Zero-Waste-FB-10-08-21.aspx>
- [5] Numee, P. Sangtawesin, T. Yilmaz, M. & Kanjana, K. 2023. Activated carbon derived from radiation-processed durian shell for energy storage application, Carbon Resources Conversion. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.crcon.2023.07.001>
- [6] Tonanon. N. 2021. Porous carbon from biomass. [Online]. Available: <http://biomass2carbon.eng.chula.ac.th/porous-carbon-from-biomass/>
- [7] Tepamatr, P. 2023. Efficacy of a palladium-modified activated carbon in improving ethylene removal to delay the ripening of Gros Michel banana, Journal of Agriculture and Food Research. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2023.100561>

## บรรณานุกรม (ต่อ)

- [8] Mayanullah, Q. Syamsu, K. Fahma, F. and Pari, G. 2022. Ethylene Adsorption on Activated Carbon Paper Liner: A Model Kinetic Study. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1024/1/012022>
- [9] Tavakoli Foroushani, F. Tavanai, H. and Ali Hosseini, F. 2016. An investigation on the effect of KMnO<sub>4</sub> on the pore characteristics of pistachio nut shell based activated carbon, *Microporous and Mesoporous Materials*, 230, 39–48. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.micromeso.2016.04.030>
- [10] Wang, S.-H. Hwang, Y.-K. Choi, S.W. Yuan, X. Lee, K.B. and Chang, F.-C. 2020. Developing self-activated liginosulfonate-based porous carbon material for ethylene adsorption, *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.jtice.2020.10.017>
- [11] Ahmad, A. and Azam, T. 2019. Water Purification Technologies, Bottled and Packaged Water, 83–120. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-815272-0.00004-0>
- [12] Mutua, J.K. Imathiu, S. and Owino, W. 2016. Evaluation of the proximate composition, antioxidant potential, and antimicrobial activity of mango seed kernel extracts, *Food Science & Nutrition*, 5(2), 349–357. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1002/fsn3.399>
- [13] Chansuvarn, W. 2014. Adsorption efficiency of lead (II) ion from aqueous solution by using an aerated concrete as adsorbent. Rajamangala University of Technology Phra Nakhon, Bangkok.
- [14] Katesa, J. 2013. “Effect of Carbonization temperature on properties of cars and activated carbon from coconut shell.” Master of Engineering Thesis, Suranaree University of Technology.

## บรรณานุกรม (ต่อ)

- [15] Wanich, S. and Nuasri, C. 2018. Preparation of Activated Carbon from Longan Peel and Seed for Phenol Adsorption. Rajabhat Maha Sarakham University, Maha Sarakham.
- [16] F. Rodríguez-Reinoso. and J. Silvestre-Albero. 2016. Activated Carbon and Adsorption, Reference Module in Materials Science and Materials Engineering. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803581-8.02289-X>
- [17] Benhawan, A. (2018). Preparation and Characterization of Activated Carbon from Velvet Tamarind Shell. Yala Rajabhat. Yala.
- [18] Francisco Rodríguez-Reinoso & M. Molina-Sabio. 1998. Textural and chemical characterization of microporous carbons, *Advances in Colloid and Interface Science*, 76–77: 271–294. [Online]. Available: [https://doi.org/10.1016/S0001-8686\(98\)00049-9](https://doi.org/10.1016/S0001-8686(98)00049-9)
- [19] Jiwalak N. 2002. Preparation and characterization of activated carbon from lignite coal by physical and chemical activation. Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima.
- [20] Chungsiriporn J., Kaewpradit P., and Pongyeela P. 2016. Activated carbon production from rubber wood charcoal from biomass power plants for water filters. Prince of Songkla University, Songkla.
- [21] Thaomola S. 2018. Preparation, Characterization and Application of Activated Carbon from Eastern Thailand Agricultural Wastes as Adsorbents for Heavy Metals from Aqueous Solution. Burapa University, Chanthaburi.
- [22] Prabir Basu. 2018. Chapter 4 – Torrefaction, Biomass Gasification, Pyrolysis and Torrefaction, 93-154. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812992-0.00004-2>

## บรรณานุกรม (ต่อ)

- [23] Somboot, P. 2018. Phosphorus Removal in Surface Water by Activated Cabon from Water Hyacinths. Rajabhat Maha Sarakham University, Maha Sarakham.
- [24] พีรเดช ทองอำไพ. 2557. การสุกของผลไม้. [Online]. Available: <https://www.thaikasetsart.com/การสุกของผลไม้/>
- [25] พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์ และ นิธิยา รัตนูปนนท์. 2553. Climacteric fruit/ผลไม้ที่บ่มให้สุกได้. [Online]. Available: <https://www.foodnetworksolution.com/wiki/word/1105/climacteric-fruit>
- [26] พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์ และ นิธิยา รัตนูปนนท์. 2553. Non-climacteric fruit. [Online]. Available: <https://www.foodnetworksolution.com/wiki/word/1104/non-climacteric-fruit>
- [27] Sanjaya, A. 2562. การสุกของผลไม้. [Online]. Available: <https://slideplayer.in.th/slide/15430174/>
- [28] Sombatpraiwan, S. 2012. A study on ripening delay of Nam Dokmai mango by activated carbon. Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima.
- [29] มูลนิธิโครงการสารานุกรมไทยสำหรับเยาวชน. 2545. การจัดการหลังการเก็บเกี่ยวผักและผลไม้. [Online]. Available: <https://www.saranukromthai.or.th/sub/book/book.php?book=26&chap=6&page=26-6-infodetail01.html>
- [30] จริญญา ศิริพานิช. 2546. สรีรวิทยาและเทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยวผักและผลไม้ (พิมพ์ครั้งที่ 5). กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
- [31] วิวัฒน์ หวังเจริญ. 2552. การยืดอายุการเก็บรักษาผักและผลไม้สด. เชียงใหม่ : คณะวิศวกรรมศาสตร์และอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้.
- [32] Ezhaveni Sathiyamoorthi. 2015. Biological synthesis of manganese dioxide nanoparticles by Kalopanax pictus plant extract, IET Nanobiotechnology.

- [33] Ketsa, S. and Pota, S. 1992. Ripening Quality and Physico-Chemical Changes of “Nam Dok Mai” Mango Fruits Harvested at Different Stages of Maturity. Kasetsart University, Bangkok.
- [34] บริษัท คาร์โบกาญจน์ จำกัด. 2562. ข้อมูลเบื้องต้นของถ่านกัมมันต์. [Online]. Available: <https://www.carbokarn.co.th/%E0%B8%96%E0%B9%88%E0%B8%B2%E0%B8%99%E0%B8%81%E0%B8%B1%E0%B8%A1%E0%B8%A1%E0%B8%B1%E0%B8%99%E0%B8%95%E0%B9%8C/>




เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



## ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ก  
วิธีการวิเคราะห์องค์ประกอบแบบประมาณของวัตฤตติบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ก

### วิธีการวิเคราะห์องค์ประกอบแบบประมาณของวัตถุดิบ

การวิเคราะห์องค์ประกอบแบบประมาณ (Proximate Analysis) ของวัตถุดิบซึ่งเป็นเม็ดมะม่วงมหาชนกที่ผ่านการอบแห้งและลดขนาดแล้ว ตามมาตรฐาน ASTM โดยแต่ละองค์ประกอบรายงานค่าร้อยละโดยน้ำหนักที่ได้เทียบกับน้ำหนักวัตถุดิบที่ไม่มีความชื้นหรือน้ำหนักฐานแห้ง (Dry Basis)

#### เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิเคราะห์

- 1) เครื่องชั่งมาตรฐานที่มีความแม่นยำ  $\pm 0.0001$  กรัม
- 2) ถ้วยครุชชีเบลพร้อมฝาปิด
- 3) เต้าเผาไฟฟ้า
- 4) โถดูดความชื้นและซิลิกาเจล

#### การวิเคราะห์หาร้อยละปริมาณความชื้น (Moisture content)

ทำการวิเคราะห์หาร้อยละปริมาณความชื้นที่มีอยู่ในวัตถุดิบ โดยปฏิบัติตามมาตรฐาน ASTM D3173 – 00 ซึ่งมีรายละเอียดขั้นตอนการวิเคราะห์ ดังนี้

- 1) อบถ้วยครุชชีเบลพร้อมฝาปิดที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นนำถ้วยครุชชีเบลมาวางทิ้งไว้ให้เย็นในโถดูดความชื้น แล้วทำการชั่งน้ำหนักครุชชีเบลพร้อมฝาปิด
- 2) ชั่งน้ำหนักวัตถุดิบประมาณ 1 กรัม ใส่ในถ้วยครุชชีเบลที่เตรียมไว้ในข้อ 1) จากนั้นปิดฝา แล้วชั่งน้ำหนักครุชชีเบลพร้อมฝาปิดที่มีวัตถุดิบบรรจุอยู่
- 3) นำถ้วยครุชชีเบลที่มีวัตถุดิบบรรจุอยู่จากข้อ 2) ไปทำการอบโดยเปิดฝาดูที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เมื่ออบเสร็จเป็นที่เรียบร้อยแล้ว ให้ปิดฝาทันที แล้วนำไปวางทิ้งไว้ให้เย็นในโถดูดความชื้น จากนั้นนำไปชั่งน้ำหนัก แล้วทำการบันทึกผล
- 4) ทำการตรวจสอบซ้ำ 3 ครั้ง นำค่าที่ได้จากการตรวจสอบในแต่ละครั้งมาทำการคำนวณหาร้อยละปริมาณความชื้นผ่านสูตรคำนวณดังสมการ

$$\text{ร้อยละปริมาณความชื้น} = \frac{\text{น้ำหนักวัตถุดิบก่อนอบ} - \text{น้ำหนักวัตถุดิบหลังอบ}}{\text{น้ำหนักวัตถุดิบก่อนอบ}} \times 100$$

#### การวิเคราะห์หาร้อยละปริมาณสารระเหย (Volatile matter content)

ทำการวิเคราะห์หาร้อยละปริมาณสารระเหยที่มีอยู่ในวัตถุดิบ โดยปฏิบัติตามมาตรฐาน ASTM E872 – 82 ซึ่งมีรายละเอียดขั้นตอนการวิเคราะห์ ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 1) นำถ้วยครุชชีเบลพร้อมฝาปิดไปเผาที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที จากนั้นนำถ้วยครุชชีเบลมาวางทิ้งไว้ให้เย็นในโถดูดความชื้น แล้วทำการชั่งน้ำหนักครุชชีเบลพร้อมฝาปิด
- 2) ชั่งน้ำหนักวัตถุที่ผ่านการอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียสแล้ว ประมาณ 1 กรัม ใส่ในถ้วยครุชชีเบลที่เตรียมไว้ในข้อ 1) จากนั้นปิดฝา แล้วชั่งน้ำหนักครุชชีเบลพร้อมฝาปิดที่มีวัตถุบรรจุอยู่
- 3) นำถ้วยครุชชีเบลที่มีวัตถุบรรจุอยู่จากข้อ 2) ไปเผาแบบปิดฝาไว้ที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 7 นาที เมื่อเผาเสร็จเป็นที่เรียบร้อยแล้ว นำไปวางทิ้งไว้ให้เย็นในโถดูดความชื้น จากนั้นนำไปชั่งน้ำหนัก แล้วทำการบันทึกผล
- 4) ทำการตรวจสอบซ้ำ 3 ครั้ง นำค่าที่ได้จากการตรวจสอบในแต่ละครั้งมาทำการคำนวณหาร้อยละปริมาณสารระเหยผ่านสูตรคำนวณดังสมการ

$$\text{ร้อยละปริมาณสารระเหย} = \frac{\text{น้ำหนักวัตถุก่อนเผา} - \text{น้ำหนักวัตถุหลังเผา}}{\text{น้ำหนักวัตถุก่อนเผา}} \times 100$$

#### **การวิเคราะห์หาร้อยละปริมาณเถ้า (Ash content)**

ทำการวิเคราะห์หาร้อยละปริมาณเถ้าที่มีอยู่ในวัตถุ โดยปฏิบัติตามมาตรฐาน ASTM E1755 - 01 ซึ่งมีรายละเอียดขั้นตอนการวิเคราะห์ ดังนี้

- 1) นำถ้วยครุชชีเบลพร้อมฝาปิดไปเผาที่อุณหภูมิ 575 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง จากนั้นนำถ้วยครุชชีเบลมาวางทิ้งไว้ให้เย็นในโถดูดความชื้น แล้วทำการชั่งน้ำหนักครุชชีเบลพร้อมฝาปิด
- 2) ชั่งน้ำหนักวัตถุที่ผ่านการอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียสแล้ว ประมาณ 1 กรัม ใส่ในถ้วยครุชชีเบลที่เตรียมไว้ในข้อ 1) จากนั้นปิดฝา แล้วชั่งน้ำหนักครุชชีเบลพร้อมฝาปิดที่มีวัตถุบรรจุอยู่
- 3) นำถ้วยครุชชีเบลที่มีวัตถุบรรจุอยู่จากข้อ 2) ไปเผาโดยเปิดฝาดอกที่อุณหภูมิ 575 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง เมื่อเผาเสร็จเป็นที่เรียบร้อยแล้ว ให้ปิดฝาทันที แล้วนำไปวางทิ้งไว้ให้เย็นในโถดูดความชื้น จากนั้นนำไปชั่งน้ำหนัก แล้วทำการบันทึกผล
- 4) ทำการเผาซ้ำที่อุณหภูมิ 575 องศาเซลเซียส อีกทุก 1 ชั่วโมง จนกว่าน้ำหนักจะคงที่ โดยมีความแตกต่างจากน้ำหนักที่ชั่งก่อนหน้านี้ไม่เกิน 0.3 มิลลิกรัม และบันทึกผล
- 5) ทำการตรวจสอบซ้ำ 3 ครั้ง นำค่าที่ได้จากการตรวจสอบในแต่ละครั้งมาทำการคำนวณหาร้อยละปริมาณเถ้าผ่านสูตรคำนวณดังสมการ

$$\text{ร้อยละปริมาณเถ้า} = \frac{\text{น้ำหนักวัตถุหลังเผา}}{\text{น้ำหนักวัตถุก่อนเผา}} \times 100$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### การวิเคราะห์หาร้อยละปริมาณคาร์บอนคงตัว (Fixed carbon content)

ทำการวิเคราะห์หาร้อยละปริมาณคาร์บอนคงตัวที่มีอยู่ในวัตถุดิบ โดยคำนวณจากผลต่างผ่านสูตร  
คำนวณดังสมการ

$$\text{ร้อยละปริมาณคาร์บอนคงตัว} = 100 - (\text{ร้อยละปริมาณความชื้น} + \text{ร้อยละปริมาณสารระเหย} + \text{ร้อยละปริมาณเถ้า})$$

#### ตัวอย่างการคำนวณ

การวิเคราะห์หาร้อยละปริมาณความชื้น

น้ำหนักครุชชีเบลพร้อมฝา	=	26.0799	กรัม
น้ำหนักครุชชีเบลพร้อมฝากับวัตถุดิบก่อนอบ	=	27.0893	กรัม
น้ำหนักครุชชีเบลพร้อมฝากับวัตถุดิบหลังอบ	=	27.0793	กรัม
ร้อยละปริมาณความชื้น	=	$\frac{27.0893 - 27.0793}{27.0893 - 26.0799}$	
	=	0.9936	

การวิเคราะห์หาร้อยละปริมาณสารระเหย

น้ำหนักครุชชีเบลพร้อมฝา	=	41.1897	กรัม
น้ำหนักครุชชีเบลพร้อมฝากับวัตถุดิบก่อนเผา	=	42.2112	กรัม
น้ำหนักครุชชีเบลพร้อมฝากับวัตถุดิบหลังเผา	=	41.2461	กรัม
ร้อยละปริมาณสารระเหย	=	$\frac{42.2112 - 41.2461}{42.2112 - 41.1897}$	
	=	94.4804	

การวิเคราะห์หาร้อยละปริมาณเถ้า

น้ำหนักครุชชีเบลพร้อมฝา	=	26.0775	กรัม
น้ำหนักครุชชีเบลพร้อมฝากับวัตถุดิบก่อนเผา	=	27.0838	กรัม
น้ำหนักครุชชีเบลพร้อมฝากับวัตถุดิบหลังเผา	=	26.0896	กรัม
ร้อยละปริมาณเถ้า	=	$\frac{26.0896 - 26.0775}{27.0838 - 26.0775}$	
	=	1.1995	

การวิเคราะห์หาร้อยละปริมาณคาร์บอนคงตัว

$$\begin{aligned} \text{ร้อยละปริมาณคาร์บอนคงตัว} &= 100 - (0.9936 + 94.4804 + 1.1995) \\ &= 3.0014 \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ข

### วิธีการวิเคราะห์เลขไอโอดีนของถ่านไบโอชาร์

การวิเคราะห์เลขไอโอดีน (Iodine Number) ของถ่านกัมมันต์ก่อนการกระตุ้นหรือถ่านไบโอชาร์ ปฏิบัติตามมาตรฐาน ASTM D4607 – 94 ซึ่งมีรายละเอียดการวิเคราะห์ ดังนี้

#### เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิเคราะห์

- 1) เครื่องชั่งมาตรฐานที่มีความแม่นยำ  $\pm 0.0001$  กรัม
- 2) ตู้อบความร้อน
- 3) โถดูดความชื้นและซีกกาเจล
- 4) บิวเรต ขนาด 10 มิลลิลิตร
- 5) ขวดรูปชมพู่พร้อมจุกปิด ขนาด 250 มิลลิลิตร
- 6) ขวดรูปชมพู่ปากกว้าง ขนาด 250 มิลลิลิตร
- 7) ปีกเกอร์
- 8) ขวดสีชา และขวดใสสำหรับบรรจุสาร
- 9) กรวยกรอง ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มิลลิเมตร
- 10) กระดาษกรอง
- 11) ปีเปต ขนาด 5.0, 10.0, 25.0, 50.0 และ 100 มิลลิลิตร
- 12) ขวดปริมาตร ขนาด 1 ลิตร
- 13) กระบอกตวง ขนาด 100 และ 500 มิลลิลิตร
- 14) เพลทให้ความร้อน

#### สารเคมีที่ใช้ในการวิเคราะห์

- 1) น้ำกลั่น
- 2) กรดไฮโดรคลอริก (Analytical Reagent grade)
- 3) โซเดียม ไทโอซัลเฟต (Analytical Reagent grade)
- 4) ไอโอดีน (Analytical Reagent grade)
- 5) โพแทสเซียม ไอโอไดด์ (Analytical Reagent grade)
- 6) โพแทสเซียมไอโอเตต (Analytical Reagent grade)
- 7) แป้งมันสำปะหลัง (Analytical Reagent grade)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### การเตรียมสารละลาย

- 1) สารละลายกรดไฮโดรคลอริก (ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก) - เติมกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 70 มิลลิลิตรลงในน้ำกลั่น 550 มิลลิลิตร แล้วผสมให้เข้ากัน
- 2) โซเดียม ไทโอซัลเฟต (0.100 นอร์มัล) - ละลายโซเดียม ไทโอซัลเฟต 24.820 กรัม ในน้ำกลั่นเดือด ประมาณ  $75 \pm 25$  มิลลิลิตร จากนั้นนำสารผสมเทใส่ลงในขวดปรับปริมาตรขนาด 1 ลิตร แล้วเจือจางด้วยน้ำกลั่นจนถึงระดับที่กำหนดไว้บนขวดปรับปริมาตร เก็บสารละลายนี้ลงในขวดสีชาเป็นระยะเวลาอย่างน้อย 4 วัน ก่อนนำมาทำการทดสอบมาตรฐาน
- 3) สารละลายไอโอดีนมาตรฐาน (0.100±0.001 นอร์มัล) - ผสมไอโอดีน 12.700 กรัม และโพแทสเซียม ไอโอไดด์ 19.100 กรัม ในปิ๊กเกอร์ เติมน้ำกลั่น 2-5 มิลลิลิตร แล้วคนให้เข้ากัน เติมน้ำกลั่นอย่างต่อเนื่องในขณะที่กำลังคนอยู่ครั้งละประมาณ 5 มิลลิลิตร จนกระทั่งปริมาตรรวมเท่ากับ 50-60 มิลลิลิตร จากนั้นทำการคนเป็นครั้งคราวในช่วงระยะเวลา 4 ชั่วโมง เพื่อให้แน่ใจว่าสารละลายเข้ากันทั้งหมด เมื่อครบเวลาที่กำหนด นำสารผสมเทใส่ลงในขวดปรับปริมาตรขนาด 1 ลิตร แล้วเจือจางด้วยน้ำกลั่นจนถึงระดับที่กำหนดไว้บนขวดปรับปริมาตร เก็บสารละลายนี้ลงในขวดสีชา
- 4) สารละลายโพแทสเซียม ไอโอเดต (0.100 นอร์มัล) - ทำการอบแห้งโพแทสเซียม ไอโอเดตมากกว่า 4 กรัม ที่อุณหภูมิ  $110 \pm 5$  องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 2 ชั่วโมง แล้วนำไปวางทิ้งไว้ให้เย็นในโถดูดความชื้น จากนั้นนำไปชั่งน้ำหนัก  $3.5667 \pm 0.1$  มิลลิกรัม แล้วละลายด้วยน้ำกลั่น 100 มิลลิลิตร จากนั้นนำสารละลายนี้เทใส่ลงในขวดปรับปริมาตรขนาด 1 ลิตร แล้วเจือจางด้วยน้ำกลั่นจนถึงระดับที่กำหนดไว้บนขวดปรับปริมาตร เก็บสารละลายนี้ลงในขวดแก้วที่มีฝาปิด
- 5) สารละลายน้ำแป้ง - ผสมแป้ง  $1 \pm 0.5$  กรัม ลงในน้ำเย็น 5-10 มิลลิลิตร เติมน้ำเย็นอีก  $25 \pm 5$  มิลลิลิตรในขณะที่กำลังคน จากนั้นเทสารผสมนี้ลงในน้ำกลั่นเดือด 1 ลิตร แล้วต้มให้เดือดอีก 4-5 นาที สารละลายนี้ควรเตรียมใหม่ทุกครั้งก่อนการทดลองในแต่ละวัน

### การทำสารละลายมาตรฐาน

- 1) การทำสารละลายโซเดียม ไทโอซัลเฟตมาตรฐาน 0.100 นอร์มัล - ปิเปตสารละลายโพแทสเซียม ไอโอเดตที่เตรียม 25.0 มิลลิลิตร ลงในขวดรูปชมพู่ปากกว้าง แล้วเติมโพแทสเซียม ไอโอไดด์  $2.00 \pm 0.01$  กรัม ลงไป ทำการเขย่าเพื่อละลายผลึกโพแทสเซียม ไอโอไดด์ จากนั้นปิเปตกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 5.0 มิลลิลิตร ลงในขวดรูปชมพู่ ไทเทรตไอโอดีนด้วยสารละลายโซเดียม ไทโอซัลเฟต จนกระทั่งสารละลายเปลี่ยนเป็นสีเหลืองอ่อน หยดสารละลายน้ำแป้งซึ่งเป็นอินดิเคเตอร์ เพื่อให้สารละลายในขวดรูปชมพู่เปลี่ยนเป็นสีฟ้า แล้วไทเทรตด้วยสารละลายโซเดียม ไทโอ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซัลเฟตจนกระทั่งสารละลายไม่มีสี ทำการคำนวณค่าความเข้มข้นของสารละลายโซเดียม ไทโอซัลเฟต ในหน่วยนอร์มัล ผ่านสูตรคำนวณดังสมการ

$$\text{ความเข้มข้นโซเดียม ไทโอซัลเฟต} = \frac{\text{ปริมาตรโพแทสเซียม ไอโอเดต} \times \text{ความเข้มข้นโพแทสเซียม ไอโอเดต}}{\text{ปริมาตรโซเดียม ไทโอซัลเฟต}}$$

2) การทำสารละลายไอโอดีนมาตรฐาน 0.100±0.001 นอร์มัล - ปิเปตสารละลายไอโอดีนที่เตรียม 25 มิลลิลิตร ลงในขวดรูปชมพู่ปากกว้าง ไทเทรตด้วยสารละลายโซเดียม ไทโอซัลเฟตมาตรฐานจากข้อ 1) จนกระทั่งสารละลายเปลี่ยนเป็นสีเหลืองอ่อน หยดสารละลายน้ำแบ่งซึ่งเป็นอินดิเคเตอร์ เพื่อให้สารละลายในขวดรูปชมพู่เปลี่ยนเป็นสีฟ้า แล้วไทเทรตต่อด้วยสารละลายโซเดียม ไทโอซัลเฟตมาตรฐานจนกระทั่งสารละลายไม่มีสี ทำการคำนวณค่าความเข้มข้นของสารละลายไอโอดีน ในหน่วยนอร์มัล ผ่านสูตรคำนวณดังสมการ

$$\text{ความเข้มข้นไอโอดีน} = \frac{\text{ปริมาตรโซเดียม ไทโอซัลเฟต} \times \text{ความเข้มข้นโซเดียม ไทโอซัลเฟต}}{\text{ปริมาตรไอโอดีน}}$$

#### ขั้นตอนการวิเคราะห์เลขไอโอดีน

1) บดถ่านไบโอชาร์ให้ละเอียด แล้วนำมาร่อนให้ผ่านตะแกรงขนาดเมช 100 แต่ไม่ผ่านตะแกรงขนาดเมช 325

2) อบแห้งถ่านไบโอชาร์ จากนั้นนำไปวางทิ้งไว้ให้เย็นในโถดูดความชื้น

3) ชั่งน้ำหนักถ่านไบโอชาร์ประมาณ 1 กรัม แล้วเทใส่ลงในขวดรูปชมพู่ที่มีจุกปิด

4) ปิเปตสารละลายกรดไฮโดรคลอริก 10 มิลลิลิตร ลงในขวดรูปชมพู่ที่มีถ่านไบโอชาร์ ปิดจุกแล้วค่อยๆ หมุนขวดรูปชมพู่เบาๆ จนกระทั่งถ่านไบโอชาร์ทั้งหมดสัมผัสกับสารละลายไฮโดรคลอริก จากนั้นคลายจุกปิดออกเพื่อระบายแก๊ส แล้วนำไปวางบนเพลทให้ความร้อนที่อยู่ในตู้ดูดควัน จนกว่าสารละลายเดือด แล้วปล่อยให้เดือดเป็นระยะเวลา 30±2 วินาที เพื่อกำจัดซัลเฟอร์ที่อาจมารบกวนผลการทดลอง นำขวดรูปชมพู่ออกจากเพลทให้ความร้อน แล้วรอจนกว่าขวดรูปชมพู่จะเย็นจนถึงอุณหภูมิห้อง

5) ปิเปตสารละลายไอโอดีนมาตรฐาน 100 มิลลิลิตร ลงในขวดรูปชมพู่ ปิดจุก แล้วเขย่าอย่างแรงเป็นระยะเวลา 30±1 วินาที จากนั้นทำการกรองแบบธรรมดาโดยใช้กระดาษกรอง 1 แผ่น เพื่อแยกถ่านไบโอชาร์ออกจากสารละลาย

6) นำสารละลายส่วนที่กรองได้ประมาณ 20–30 มิลลิลิตร มาล้างภายในปิเปต และปิเปตสารละลายส่วนที่กรองได้ 50 มิลลิลิตร ลงในขวดรูปชมพู่ปากกว้าง ไทเทรตด้วยสารละลายโซเดียม ไทโอซัลเฟตมาตรฐาน จนกระทั่งสารละลายเปลี่ยนเป็นสีเหลืองอ่อน หยดสารละลายน้ำแบ่งซึ่งเป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อินดิเคเตอร์ เพื่อให้สารละลายในขวดรูปชมพู่เปลี่ยนเป็นสีฟ้า แล้วไทเทรตด้วยสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟตมาตรฐานจนกระทั่งสารละลายไม่มีสี บันทึกค่าของปริมาตรสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟตมาตรฐานที่ใช้

### การคำนวณหาค่าเลขไอโอดีน

ในการคำนวณหาค่าเลขไอโอดีน มีความจำเป็นที่จะต้องทราบค่าเหล่านี้ก่อนที่จะคำนวณ

$$\begin{aligned}
 A &= \text{ความเข้มข้นไอโอดีนมาตรฐาน} \times 12693.0 \\
 B &= \text{ความเข้มข้นโซเดียมไทโอซัลเฟตมาตรฐาน} \times 126.93 \\
 \text{แฟคเตอร์การละลาย} &= \frac{\text{ปริมาตรไอโอดีนมาตรฐาน} \times \text{ปริมาตรกรดไฮโดรคลอริก}}{\text{ปริมาตรส่วนที่กรองได้}}
 \end{aligned}$$

เมื่อทราบค่าทั้ง 3 ค่าแล้ว สามารถคำนวณหาค่าเลขไอโอดีนผ่านสูตรคำนวณดังสมการ

$$\text{เลขไอโอดีน} = \frac{A - (\text{แฟคเตอร์การละลาย} \times B \times \text{ปริมาตรโซเดียมไทโอซัลเฟตมาตรฐาน})}{\text{ปริมาณตัวดูดซับที่ใช้}}$$

### ตัวอย่างการคำนวณ

การทำสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟตมาตรฐาน

ปริมาตรโพแทสเซียมไอโอเดต	=	25.00	มิลลิลิตร
ความเข้มข้นโพแทสเซียมไอโอเดต	=	0.100	นอร์มัล
ปริมาตรโซเดียมไทโอซัลเฟต	=	24.81	มิลลิลิตร
ความเข้มข้นโซเดียมไทโอซัลเฟต	=	$\frac{25.00 \times 0.100}{24.81}$	
	=	0.101	นอร์มัล

การทำสารละลายไอโอดีนมาตรฐาน

ปริมาตรโซเดียมไทโอซัลเฟต	=	24.20	มิลลิลิตร
ความเข้มข้นโซเดียมไทโอซัลเฟต	=	0.101	นอร์มัล
ปริมาตรไอโอดีน	=	25.00	มิลลิลิตร
ความเข้มข้นโซเดียมไทโอซัลเฟต	=	$\frac{24.20 \times 0.101}{25.00}$	
	=	0.098	นอร์มัล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การคำนวณหาค่าเลขไอโอดีน

$$\text{ปริมาณโซเดียม ไทโอซัลเฟตมาตรฐาน} = 38.00 \quad \text{มิลลิลิตร}$$

$$\text{ปริมาณถ่านไบโอชาร์} = 1.00 \quad \text{กรัม}$$

$$A = 0.098 \times 12693.00$$

$$= 1238.09$$

$$B = 0.101 \times 126.93$$

$$= 12.79$$


$$\text{แฟคเตอร์การละลาย} = \frac{100 + 10}{50}$$

$$= 2.20$$

$$\text{เลขไอโอดีน} = \frac{1238.09 - (2.20 \times 12.79 \times 38.00)}{1.00}$$

$$= 301.28 \quad \text{มิลลิกรัมไอโอดีนต่อกรัมตัวดูดซับ}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ค  
วิธีการเตรียมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์มาตรฐาน 0.1 นอร์มัล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ค

### วิธีการเตรียมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์มาตรฐาน 0.1 นอร์มัล

โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เป็นเบสที่นิยมนำมาใช้เป็นไทเทรนต์ เพื่อหาปริมาณกรด แต่เนื่องจากโซเดียมไฮดรอกไซด์ดูดความชื้นในอากาศและทำปฏิกิริยากับคาร์บอนไดออกไซด์ในอากาศ จึงมีความจำเป็นที่จะต้องหาความเข้มข้นที่แน่นอนก่อนนำมาใช้ไทเทรต การเตรียมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์มาตรฐาน 0.1 นอร์มัล มีรายละเอียด ดังนี้

#### เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้

- 1) เครื่องชั่งมาตรฐานที่มีความแม่นยำ  $\pm 0.001$  กรัม
- 2) เตาอบ
- 3) ปีกเกอร์
- 4) ซ้อนคนสาร
- 5) กระจกบอทวง ขนาด 100 มิลลิลิตร
- 6) ขวดรูปชมพูปากกว้าง ขนาด 250 มิลลิลิตร
- 7) บิวเรต ขนาด 50 มิลลิลิตร
- 8) ขวดปรับปริมาตร ขนาด 500 มิลลิลิตร
- 9) เพลทให้ความร้อน

#### สารเคมีที่ใช้ในการวิเคราะห์

- 1) น้ำกลั่น
- 2) โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (Analytical Reagent grade)
- 3) โซเดียมไฮดรอกไซด์ (Analytical Reagent grade)
- 4) ฟีนอล์ฟทาลีน (Analytical Reagent grade)

#### การเตรียมสารละลาย

- 1) อบโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ในตู้อบความร้อนที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นนำไปวางทิ้งไว้ให้เย็นในโถดูดความชื้น
- 2) ต้มน้ำกลั่น 1 ลิตร ให้เดือดเป็นระยะเวลา 20 นาที เพื่อไล่แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ จากนั้นนำไปวางทิ้งไว้ให้เย็นจนถึงอุณหภูมิห้อง (ปิดฝาหรือใช้กระดาษฟอยล์ เพื่อป้องกันแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในอากาศ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3) ชั่งน้ำหนักโซเดียมไฮดรอกไซด์ประมาณ 2 กรัม แล้วละลายด้วยน้ำกลั่นจากข้อ 2) จากนั้นนำสารผสมเทใส่ลงในขวดปรับปริมาตรขนาด 500 มิลลิลิตร แล้วเจือจางด้วยน้ำกลั่นจากข้อ 2) จนถึงระดับที่กำหนดไว้บนขวดปรับปริมาตร

7) ชั่งน้ำหนักโพแทสเซียมไฮดรเจนพทาเลต 0.5 กรัม แล้วละลายด้วยน้ำกลั่นต้มที่เย็นจนถึงอุณหภูมิห้องแล้ว 75 มิลลิลิตร หยดฟีนอล์ฟทาลีนซึ่งเป็นอินดิเคเตอร์ประมาณ 2-3 หยด จากนั้นไทเทรตด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์จากข้อ 3) จนกระทั่งสารละลายเปลี่ยนเป็นสีชมพูอ่อน บันทึกค่าของปริมาตรสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้

8) ทำการคำนวณค่าความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ในหน่วยนอร์มัล ผ่านสูตรคำนวณดังสมการ

$$\text{ความเข้มข้นโซเดียมไฮดรอกไซด์} = \frac{\text{น้ำหนักโพแทสเซียมไฮดรเจนพทาเลต}}{0.20422 \times \text{ปริมาตรโซเดียมไฮดรอกไซด์}}$$

#### ตัวอย่างการคำนวณ

ปริมาณโพแทสเซียมไฮดรเจนพทาเลต	=	0.500	กรัม
ปริมาตรโซเดียมไฮดรอกไซด์	=	24.46	มิลลิลิตร
ความเข้มข้นโซเดียมไฮดรอกไซด์	=	$\frac{0.5}{0.20422 \times 24.46}$	
	=	0.100	นอร์มัล



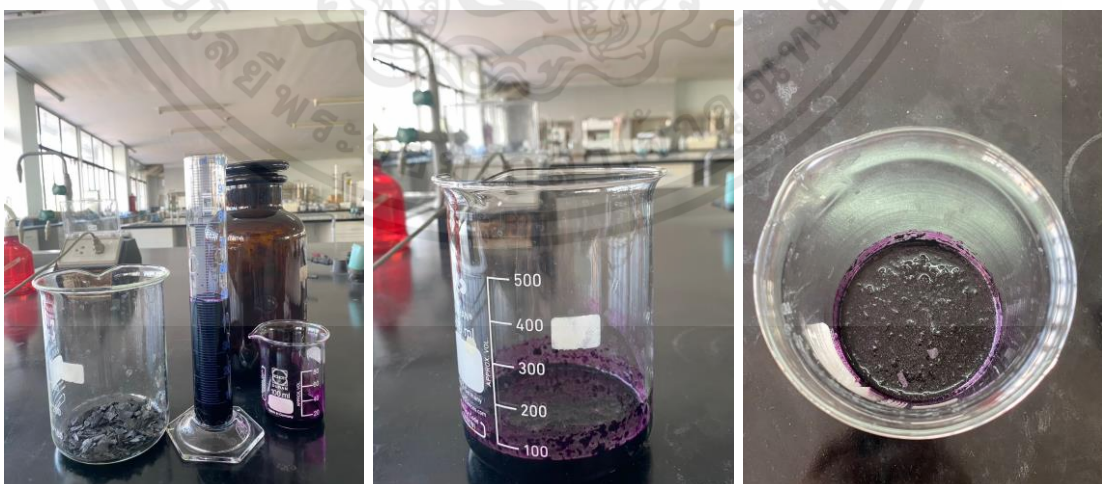
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



การเตรียมวัตถุดิบ



การคาร์บอนไนเซชัน



การกระตุ้นทางเคมีด้วยโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



การบำบัดสารเคมีด้วยการล้างและกรองแบบสุญญากาศ



การตรวจความบริสุทธิ์ของมะม่วงน้ำดอกไม้



อ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ชุดการทดลองแต่ละทรีตเมนต์

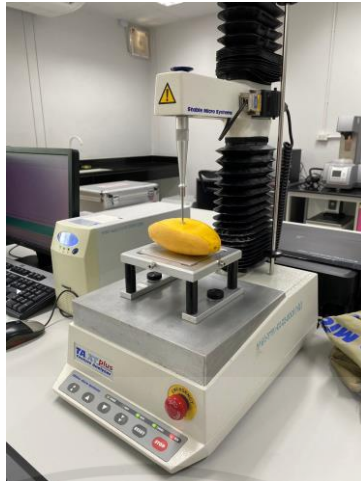


การตรวจน้ำหนักที่สูญเสียของมะม่วงน้ำดอกไม้



การตรวจสอบสีของมะม่วงน้ำดอกไม้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



การตรวจความแน่นเนื้อของมะม่วงน้ำดอกไม้



การตรวจปริมาณของแข็งที่ละลายได้ของเนื้อมะม่วงน้ำดอกไม้



การตรวจปริมาณกรดที่ไทเทรตได้ของเนื้อมะม่วงน้ำดอกไม้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้