

การพัฒนากระบวนการแปรรูปมะม่วงตัดแต่งพันธุ์น้ำดอกไม้โดยใช้พลาสติกมาเย็น



ธีรชัย ประมาพิจิตรวัฒน์

ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมอาหาร

มหาวิทยาลัยแม่โจ้

พ.ศ. 2565

การพัฒนากระบวนการแปรรูปมะม่วงตัดแต่งพันธุ์น้ำดอกไม้โดยใช้พลาสติกมาเย็บ



ธีรชัย ประมาพิจิตรวัฒน์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของความสมบูรณ์ของการศึกษาตามหลักสูตร

ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมอาหาร

สำนักบริหารและพัฒนาระบบราชการ มหาวิทยาลัยแม่โจ้

พ.ศ. 2565

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยแม่โจ้

การพัฒนากระบวนการแปรรูปมะม่วงตัดแต่งพันธุ์น้ำดอกไม้โดยใช้พลาสติก

ธีรชัย ปรมาพิจิตรวัฒน์

วิทยานิพนธ์นี้ได้รับการพิจารณาอนุมัติให้เป็นส่วนหนึ่งของความสมบูรณ์ของการศึกษา  
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมอาหาร

พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษา

อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก .....

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.หยาดฝน ทนงการกิจ)

วันที่.....เดือน.....พ.ศ. ....

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม .....

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กาญจนา นาคประสม)

วันที่.....เดือน.....พ.ศ. ....

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม .....

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชนวัฒน์ นิตศน์วิจิตร)

วันที่.....เดือน.....พ.ศ. ....

ประธานอาจารย์ผู้รับผิดชอบหลักสูตร .....

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.หยาดฝน ทนงการกิจ)

วันที่.....เดือน.....พ.ศ. ....

สำนักบริหารและพัฒนาวิชาการรับรองแล้ว .....

(รองศาสตราจารย์ ดร.ณัฐนิน โอภาสพัฒนกิจ)

รองอธิการบดี

วันที่.....เดือน.....พ.ศ. ....

ชื่อเรื่อง	การพัฒนากระบวนการแปรรูปมะม่วงตัดแต่งพันธุ์น้ำดอกไม้โดยใช้ พลาสติก
ชื่อผู้เขียน	นายธีรชัย ปรมาศิทธิวัฒน์
ชื่อปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอาหาร
อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.หยาดฝน ทนงการกิจ

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อออกแบบเครื่องพลาสติกและศึกษาผลของเวลาในการใช้พลาสติกต่อกิจกรรมของเอนไซม์โพลีฟีนอลออกซิเดส นอกจากนี้ได้ทำการศึกษาผลของกระบวนการต่างๆ ซึ่งได้แก่ วิธีการลวกน้ำร้อน การแช่กรดแอสคอร์บิกและการใช้พลาสติกต่อกิจกรรมของเอนไซม์โพลีฟีนอลออกซิเดส สมบัติทางกายภาพและสมบัติทางเคมีของมะม่วงดอกไม้ตัดแต่ง โดยผลการศึกษาพบว่าเครื่องพลาสติกมีส่วนประกอบหลักทั้งหมด 5 ส่วนได้แก่ ถังก๊าซ หม้อแปลงปรับแรงดันไฟฟ้า หม้อแปลงไฟฟ้านีออนขนาด 12.5 กิโลวัตต์ ส่วนหัวพลาสติกที่มีทองแดง ซึ่งทำหน้าที่เป็นแอโนดและอะลูมิเนียมเป็นแคโทด และส่วนประกอบอื่น ๆ โดยใช้ก๊าซอาร์กอนที่อัตราการไหล 25 ลิตร/นาที่ ในส่วนของการศึกษาเวลาในการใช้พลาสติกสำหรับยับยั้งกิจกรรมเอนไซม์โพลีฟีนอลออกซิเดสในมะม่วงน้ำดอกไม้ตัดแต่งนั้นพบว่า การใช้พลาสติก 4 นาที่เป็นเวลาที่เหมาะสมที่สุด โดยสามารถลดกิจกรรมเอนไซม์โพลีฟีนอลออกซิเดสให้เหลือร้อยละ  $14.93 \pm 1.41$  และสามารถยืดอายุการเก็บรักษาจาก 8 ชม. เป็น 48 ชม. โดยพิจารณาจากค่าสี ค่าดัชนีความเข้มข้นน้ำตาล และลักษณะปรากฏ นอกจากนี้ผลการเปรียบเทียบของกระบวนการต่างๆ ยังพบว่ากระบวนการพลาสติกสามารถลดกิจกรรมเอนไซม์โพลีฟีนอลออกซิเดสได้มากกว่า รวมทั้งรักษาสสมบัติทางด้านกายภาพซึ่งได้แก่สี และความแน่นเนื้อ และสมบัติทางเคมีซึ่งได้แก่ ปริมาณโปรตีน วิตามินซีและสารประกอบฟีนอลิกได้ดีกว่า เมื่อเทียบกับการลวกด้วยน้ำร้อนและการแช่ในกรดแอสคอร์บิก และยังเป็นกระบวนการที่ใช้พลังงานจำเพาะสูงกว่ากระบวนการลวก ดังนั้นการใช้พลาสติกจึงเป็นกระบวนการที่สามารถพัฒนาขึ้นไปในระดับอุตสาหกรรมสำหรับผลิตผลไม้ตัดแต่งพร้อมบริโภคได้

คำสำคัญ : พลาสติก ,การลวก ,การแช่ในกรดแอสคอร์บิก ,เอนไซม์ ,สมบัติทางกายภาพ , สมบัติทางเคมี

<b>Title</b>	DEVELOPMENT OF FRESH-CUT MANGO PROCESSING USING COLD PLASMA
<b>Author</b>	Mr. Teerachai Poramapijitwat
<b>Degree</b>	Master of Engineering in Food Engineering
<b>Advisory Committee Chairperson</b>	Assistant Professor Dr. Yardfon Tanongkankit

## ABSTRACT

This research aimed to design a cold plasma device and study the effect of exposure time of cold plasma treatment on polyphenoloxidase activity. Moreover, the effect of different treatments which were blanching, soaking in ascorbic acid solution and cold plasma treatment on polyphenol oxidase activity, physical and chemical properties of fresh-cut mango. The results of the study revealed that the cold plasma has 5 main components, namely gas tank, voltage regulator, 12.5 kV neon transformer, plasma jet head with copper acting as the anode and aluminum as the cathode. and other components by using argon gas at a flow rate of 25 l/min. For the result of optimum time of cold plasma treatment to inhibit polyphenol oxidase activity, it was found that exposure time of 4 min was the most suitable condition by reducing polyphenoloxidase activity to  $14.93 \pm 1.41$  and extending shelf life from 8 hrs to 48 hr based on the color value, browning intensity index and appearance. Furthermore, cold plasma treatment could reduce more polyphenol oxidase activity and maintain physical properties including color and firmness and chemical properties including protein, vitamin C and phenolic content than blanching and soaking in ascorbic solution. The cold plasma treatment also consumed higher specific energy than the blanching. Thus, this process could be developed to industry scale for fresh-cut fruits production.

Keywords : Cold plasma, Blanching, Soaking in ascorbic acid, Physical properties, Chemical properties

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นผลงานที่ผู้วิจัยได้ทุ่มเทความตั้งใจ สติปัญญา กำลังกายและกำลังใจ จนกระทั่งสำเร็จลุล่วงไปด้วยดีโดยได้รับความอนุเคราะห์คำแนะนำและความช่วยเหลือจากบุคคลหลายฝ่าย โดยเฉพาะอย่างยิ่งขอขอบคุณท่านผู้ช่วยศาสตราจารย์ดร.หยาดฝน ทนงการกิจ ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ซึ่งได้สละเวลาอันมีค่า ให้ความรู้คำแนะนำ และคำปรึกษา จนงานวิจัยสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีตลอดจนตรวจสอบและแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้ถูกต้องและสมบูรณ์และขอขอบคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ดร. ชนวัฒน์ นิตศน์วิจิตร และผู้ช่วยศาสตราจารย์ดร.กาญจนา นาคประสม อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่อบรมสั่งสอน ให้ความรู้คำแนะนำ แนวทางในการทำงานวิจัยและตรวจสอบ ความบกพร่องในการเขียนวิทยานิพนธ์จึงขอขอบคุณไว้ ณ ที่นี้เป็นอย่างสูง ขอขอบคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ดร. ปริญ คงกระพันธ์และวิทยาลัยทดแทนพลังงาน มหาวิทยาลัยแม่โจ้ที่ให้ความอนุเคราะห์ใช้สถานที่เครื่องมือต่างๆ และอำนวยความสะดวกในการทำงานตลอดระยะเวลาที่เข้าทำการทดลอง และให้คำปรึกษา แนะนำ จนงานวิจัยสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ธีรชัย ปรมาศิทธิวัฒน์

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ง
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญภาพ.....	ฉ
สารบัญตารางผนวก.....	ช
สารบัญภาพผนวก.....	ฅ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
ที่มาและความสำคัญ.....	1
วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
ขอบเขตงานวิจัย.....	3
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องและการตรวจสอบเอกสาร.....	4
มะม่วงน้ำดอกไม้.....	4
1. ข้อมูลทั่วไป.....	4
2. ถิ่นกำเนิด.....	5
3. ลักษณะทางพฤกษศาสตร์.....	5
4. การใช้ประโยชน์.....	6
5. มะม่วงตัดแต่ง.....	6
6. การเกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาล.....	8

6.1 การเกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาลเนื่องจากเอนไซม์ .....	9
6.1.1 สารประกอบฟีนอล (phenolic compounds).....	9
6.1.2 เอนไซม์โพลีฟีนอลออกซิเดส (polyphenoloxidase; PPO) .....	9
6.2 ปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลที่ไม่เกี่ยวข้องกับเอนไซม์.....	10
6.2.1 Maillard reaction.....	10
6.2.1.1 Initial stage.....	11
6.2.1.2 Interned stage .....	11
6.2.1.3 Final stage.....	11
7. กระบวนการยับยั้งเกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาล .....	12
7.1 การลวก.....	13
7.2 Reducing agent.....	14
8. พลาสมาเย็น.....	14
9. สี (Color).....	17
9.1. การวิเคราะห์สีระบบ CIE L* a* b* (CIE LAB).....	18
10. ลักษณะเนื้อสัมผัส (Texture) .....	19
10.1การประเมินลักษณะเนื้อสัมผัส.....	19
10.1.1 ใช้ประเมินแรงต้านทานของผลิตภัณฑ์ต่อแรงทางกลที่มากระทำ เช่น กระบวนการในระหว่างการเก็บเกี่ยว.....	19
10.1.2 ใช้วิเคราะห์คุณสมบัติของการไหลของผลิตภัณฑ์อาหารในระหว่างการแปรรูป และการเก็บรักษา .....	19
10.1.3 ใช้เป็นตัวแทนในการกำหนดพฤติกรรมในการเคี้ยวอาหารของผู้บริโภค .....	19
10.2 การประเมินลักษณะเนื้อสัมผัสโดยการใช้เครื่องมือ.....	19
10.2.1 วิธีการวัดค่าพื้นฐานทางวัสดุศาสตร์ (Fundamental measurement).....	20
10.2.2 วิธีการวัดค่าแบบประยุกต์ (Empirical measurement) .....	20



10.2.3 วิธีการเลียนแบบการเคี้ยวของมนุษย์ (Imitative measurement).....	20
11. สารต้านอนุมูลอิสระ.....	21
11.1 สารประกอบฟีนอลิก (phenolic compounds).....	23
11.2 วิตามินซี (vitamin C) .....	24
12. ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (Specific electrical consumption, SEC) .....	25
13. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	26
บทที่ 3 วัสดุ อุปกรณ์ สารเคมี และวิธีการดำเนินงานวิจัย.....	29
วัตถุประสงค์ .....	29
อุปกรณ์และเครื่องมือ .....	29
สารเคมี.....	30
แผนการดำเนินงานวิจัยโดยรวม.....	31
1.ออกแบบเครื่องพลาสมาเย็น .....	33
2.ศึกษาเวลาที่เหมาะสมในการใช้พลาสมาเย็นเพื่อยับยั้งกิจกรรมเอนไซม์โพลีฟีนอลออกซิเดส ...	33
3. การศึกษาเวลาที่เหมาะสมในการใช้พลาสมาเย็น .....	33
4. การศึกษาการเปรียบเทียบผลของกระบวนการ .....	33
4.1 กระบวนการพลาสมาเย็น.....	33
4.2 การลวก .....	33
4.3 การแช่กรดแอสคอร์บิก .....	34
5. การวิเคราะห์กิจกรรมเอนไซม์โพลีฟีนอลออกซิเดส.....	34
6. การวิเคราะห์คุณภาพสี.....	34
7. การวิเคราะห์ดัชนีความเข้มข้นน้ำตาล.....	35
8. การวิเคราะห์ความแน่นเนื้อ.....	35
9. การวิเคราะห์ปริมาณโปรตีน.....	35
10. การวิเคราะห์ปริมาณวิตามินซี.....	36

11. การวิเคราะห์ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด .....	36
12.การวัดพลังงานสิ้นเปลือง.....	36
การวิเคราะห์ทางสถิติ.....	37
สถานที่ดำเนินการวิจัย.....	37
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ .....	38
1.ออกแบบเครื่องพลาสมาเย็น.....	38
2. การศึกษาเวลาที่เหมาะสมในการใช้พลาสมาเย็นเพื่อยับยั้งกิจกรรมเอนไซม์โพลีฟีนอลออกซิเดส .....	41
3. การศึกษาและเปรียบเทียบผลของกระบวนการพลาสมาเย็น การลวก และการแช่แอสคอร์บิก .....	47
3.1 ค่ากิจกรรมของเอนไซม์โพลีฟีนอลออกซิเดส .....	47
3.2 ค่าสี .....	48
3.3 การวิเคราะห์ความแน่นเนื้อ .....	54
3.4.วิเคราะห์ปริมาณโปรตีน.....	55
3.5.วิเคราะห์ปริมาณวิตามินซี .....	56
3.6.วิเคราะห์ปริมาณฟีนอลิก.....	57
4. ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ .....	60
แนวคิดการขยายกำลังการผลิตของเครื่องพลาสมาเย็นแบบเจ็ท.....	62
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง.....	70
บรรณานุกรม.....	71
ภาคผนวก.....	77
ภาคผนวก ก ภาพการดำเนินงาน .....	78
ภาคผนวก ข กราฟมาตรฐานกรดแอสคอร์บิก .....	81
ภาคผนวก ค กราฟมาตรฐานโบวินซีรัมอัลบูมิน (BSA) .....	84

ภาคผนวก ง การวิเคราะห์ผลทางสถิติ.....	88
ภาคผนวก จ บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่.....	91
ประวัติผู้วิจัย.....	104



## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1 กิจกรรมเอนไซม์โพลีฟีนอลออกซิเดสและร้อยละกิจกรรมเอนไซม์โพลีฟีนอลออกซิเดสที่หลงเหลือหลังจากผ่านกระบวนการพลาสมาเย็นที่เวลาต่างๆ .....	42
ตารางที่ 2 ค่าดัชนีความเข้มข้นน้ำตาลในมะม่วงน้ำดอกไม้ก่อนและหลังจากสัมผัสพลาสมาเย็นในแต่ละเวลา .....	43
ตารางที่ 3 ลักษณะปรากฏของมะม่วงสดและตัวอย่างที่ผ่านพลาสมาที่เวลาต่างๆ ในระหว่างการเก็บรักษา .....	46
ตารางที่ 4 กิจกรรมเอนไซม์โพลีฟีนอลออกซิเดสและร้อยละกิจกรรมเอนไซม์โพลีฟีนอลออกซิเดสที่หลงเหลือหลังจากผ่านกระบวนการต่างๆ .....	48
ตารางที่ 5 ค่าดัชนีความเข้มข้นน้ำตาลของตัวอย่างหลังจากผ่านแต่ละกระบวนการในระหว่างการเก็บรักษา .....	52
ตารางที่ 6 ลักษณะปรากฏของมะม่วงสดและมะม่วงหลังจากผ่านแต่ละกระบวนการในระหว่างการเก็บรักษา .....	53
ตารางที่ 7 สมบัติทางกายภาพและทางเคมีในมะม่วงน้ำดอกไม้ตัดแต่งหลังจากผ่านกระบวนการต่างๆ ที่เวลา 48 ชั่วโมงของการเก็บรักษา .....	60
ตารางที่ 8 ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะที่ใช้ในกระบวนการ .....	61
ตารางที่ 9 ส่วนประกอบและราคาของเครื่องพลาสมาเย็นระดับอุตสาหกรรม .....	62

## สารบัญภาพ

	หน้า
ภาพที่ 1 ลักษณะทั่วไปของมะม่วงน้ำดอกไม้.....	4
ภาพที่ 2 ลักษณะลำต้นมะม่วงน้ำดอกไม้.....	5
ภาพที่ 3 กระบวนการตัดแต่งมะม่วง.....	8
ภาพที่ 4 วิธีดิสซาร์จเนื้อผิวของเหลวของอนุพลพลาสติก.....	16
ภาพที่ 5 แผนผังของพลาสติก.....	17
ภาพที่ 6 ระบบสี CIELAB.....	18
ภาพที่ 7 ตัวอย่างของกลุ่มฟลาโวนอยด์.....	24
ภาพที่ 8 แผนภูมิการดำเนินการทดลองวิจัยโดยรวม.....	32
ภาพที่ 9 (ก) แก๊สอาร์กอน (ข) หม้อแปลงปรับแรงดันไฟฟ้า และ (ค) หม้อแปลงไฟนีออน 12.5 kV.....	38
ภาพที่ 10 พลาสติก.....	39
ภาพที่ 11 (ก) ตัวตู้ภายนอก (ข) มุมขอบภายในตู้ และ (ค) ฐานรองตัวอย่าง.....	40
ภาพที่ 12 (ก) อุปกรณ์และการติดตั้ง และ (ข) ลักษณะพลาสติก.....	40
ภาพที่ 13 การเปลี่ยนแปลงของค่าสี (ก) $L^*$ (ข) $a^*$ และ (ค) $b^*$ ของตัวอย่างก่อนและหลังสัมผัสพลาสติก.....	44
ภาพที่ 14 การเปลี่ยนแปลงของค่าสี (ก) $L^*$ (ข) $a^*$ (ค) $b^*$ และ ( $\Delta E$ ) ของตัวอย่างที่ผ่านกระบวนการต่างๆ.....	51
ภาพที่ 15 ความแน่นเนื้อของมะม่วงสดและมะม่วงหลังจากผ่านแต่ละกระบวนการในระหว่างการเก็บรักษา.....	55
ภาพที่ 16 ปริมาณโปรตีนของมะม่วงสดและมะม่วงหลังจากผ่านแต่ละกระบวนการในระหว่างการเก็บรักษา.....	56
ภาพที่ 17 ปริมาณวิตามินซีของมะม่วงตัดแต่งหลังจากผ่านกระบวนการต่างๆระหว่างเก็บรักษา.....	57
ภาพที่ 18 ปริมาณฟีนอลิกของมะม่วงตัดแต่งหลังจากผ่านกระบวนการต่างๆ ระหว่างเก็บรักษา.....	59

ภาพที่ 19 เพาเวอร์สวิตช์พายด์ขนาดแรงดันไฟฟ้า 20 kV .....	63
ภาพที่ 20 อิเล็กโทรดแอโนด (ก) ภาพมุมมองด้านหน้าและขนาดของแอโนด (ข) ภาพไอโซเมตริกและขนาดของแอโนด (ค) ภาพมุมมองด้านข้างและขนาดของแอโนด .....	63
ภาพที่ 21 อิเล็กโทรดแคโทด (ก) ภาพมุมมองด้านหน้าและขนาดของแคโทด (ข) ภาพไอโซเมตริกและขนาดของแคโทด (ค) ภาพมุมมองด้านข้างและขนาดของแคโทด .....	64
ภาพที่ 22 ลักษณะการต่ออิเล็กโทรดทั้ง 2 ขั้ว (ก) ขนาดและลักษณะการประกอบด้านหน้าของอิเล็กโทรดทั้ง 2 ขั้วจากด้านของแคโทด (ข) ขนาดและลักษณะการประกอบด้านหน้าของอิเล็กโทรดทั้ง 2 ขั้วจากด้านของแอโนด (ค) ภาพมุมมองไอโซเมตริกของอิเล็กโทรดเมื่อประกอบทั้ง 2 ขั้ว (ง) ระยะห่าง 0.01 เมตร ระหว่างอิเล็กโทรดทั้ง 2 ขั้ว (จ) ขนาดและลักษณะการประกอบด้านข้างของอิเล็กโทรดทั้ง 2 ขั้ว.....	65
ภาพที่ 23 สถานีก๊าซอาร์กอน.....	66
ภาพที่ 24 ซุปเปอร์ลีน (ก) ลักษณะและขนาดด้านยาวของซุปเปอร์ลีน (ข) ลักษณะภายในและขนาดของซุปเปอร์ลีน .....	67
ภาพที่ 25 การจัดวางส่วนประกอบเครื่องพลาสติกเย็นและการลำเลียงบนสายพานลำเลียง PU (ก) มุมมองข้างหน้าของเครื่องพลาสติกเย็น (ข) มุมมองด้านบนของเครื่องพลาสติกเย็น (ค) มุมมองไอโซเมตริกของเครื่องพลาสติกเย็น (ง) มุมมองไอโซเมตริกของเครื่องพลาสติกเย็น (จ) มุมมองไอโซเมตริกของเครื่องพลาสติกเย็นบนสายพาน .....	68

## สารบัญตารางผนวก

	หน้า
ตารางผนวกที่ 1 การเตรียมสารละลายมาตรฐานกรดแอสคอร์บิก.....	82
ตารางผนวกที่ 2 การเตรียมสารละลายมาตรฐานโบวินซีรัมอัลบูมิน (BSA).....	85
ตารางผนวกที่ 3 การเตรียมสารละลายมาตรฐานโบวินซีรัมอัลบูมิน (BSA).....	85



## สารบัญภาพผนวก

	หน้า
ภาพผนวกที่ 1 กระบวนการแช่ในกรดแอสคอร์บิก .....	79
ภาพผนวกที่ 2 กระบวนการลวกด้วยน้ำร้อน .....	79
ภาพผนวกที่ 4 การเก็บรักษาตัวอย่างในกล่องพลาสติก (PE).....	80
ภาพผนวกที่ 5 กราฟช่วงความเป็นเส้นตรงของกรดแอสคอร์บิกเข้มข้น 5-50 $\mu$ M ตัวทำละลาย $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ ร้อยละ 0.04 เมื่อวัดด้วยเครื่องอัลตราไวโอเลตสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ .....	82
ภาพผนวกที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสงสูงสุด ที่ความยาวคลื่น 595 นาโนเมตร และความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานโบวินซีรัมอัลบูมิน .....	86
ภาพผนวกที่ 7 การเลือกวิธีการวิเคราะห์ความแปรปรวน จากนั้นเลือกตัวแปรที่จะใช้ทำการวิเคราะห์ .....	89
ภาพผนวกที่ 8 วิธีการเลือกเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยระหว่างชุดการทดลองโดยวิธี Duncan's New Multiple Range Test (DMRT) .....	90
ภาพผนวกที่ 9 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของกิจกรรมเอนไซม์ลีพินอลออกซิเดสในมะม่วงตัดแต่งหลังผ่านกระบวนการต่างๆ.....	90



# บทที่ 1

## บทนำ

### ที่มาและความสำคัญ

มะม่วงน้ำดอกไม้สีทอง เป็นมะม่วงสายพันธุ์ยอดนิยมที่ใช้บริโภคภายในประเทศและเพื่อการส่งออก จนเป็นที่รู้จักดีของผู้ซื้อในต่างประเทศและสามารถทำรายได้เข้าสู่ประเทศได้ เพิ่มมากขึ้น นอกจากการบริโภคสดแล้ว ยังมีการนำมะม่วงมาแปรรูปเช่น มะม่วงตัดแต่ง มะม่วงอบแห้ง น้ำมะม่วง เป็นต้น เพื่อเพิ่มมูลค่า เพิ่มช่องทางการตลาด และเป็นการยืดอายุการเก็บรักษา แต่อย่างไรก็ตาม ปัญหาสำคัญในกระบวนการแปรรูปผักและผลไม้คือ สีและลักษณะเนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์ที่เปลี่ยนไป เนื่องจากกิจกรรมของเอนไซม์โพลีฟีนอลออกซิเดสที่เกิดจากบาดแผลและการตัดแต่ง โดยเอนไซม์โพลีฟีนอลออกซิเดสจะเปลี่ยนโมเลกุลของฟีนอลซึ่งมีอยู่ในผักและผลไม้ตามธรรมชาติไปเป็นสารประกอบควิโนนและรวมตัวกันเป็นโมเลกุลใหญ่ขึ้นและมีสีน้ำตาล ดังนั้นในอุตสาหกรรมอาหารจึงได้มีการพัฒนาเทคโนโลยีในการผลิตขึ้นมาเพื่อป้องกันปัญหาการเปลี่ยนแปลงของสีและยังคงลักษณะเนื้อสัมผัสและรสชาติของผักและผลไม้ไว้ได้ (สมฤดี และ ธิดารัตน์, 2553)

วิธีการป้องกันการเปลี่ยนแปลงของสีและลักษณะเนื้อสัมผัสของผักและผลไม้ ในระหว่างกระบวนการผลิตที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรม ได้แก่ การลวกโดยให้อาหารสัมผัสกับน้ำร้อน ใช้น้ำร้อนหรือแหล่งความร้อนอื่น การลวกจึงเป็นหนึ่งในวิธีการการยับยั้งหรือทำลายกิจกรรมของเอนไซม์ในผักและผลไม้บางชนิด และส่งผลต่อการเกิดอัตราการสูญเสียน้ำได้เร็วขึ้น (Fellows, 2000) และยังคงผลให้เกิดการสูญเสียวิตามินที่ไวต่อความร้อนและสูญเสียสารอาหารที่ละลายได้ในน้ำ (Kondo, 2012) นอกจากนี้การใช้สารเคมียังเป็นอีกหนึ่งวิธีการชะลอหรือยับยั้งการเกิดสีน้ำตาลได้ โดยเฉพาะการใช้สารละลายกรด เช่น กรดแอสคอร์บิก ซึ่งสามารถป้องกันการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์ เนื่องจากค่าความเป็นกรดต่างในผลิตภัณฑ์ลดลง และช่วยยับยั้งการเกิดสีน้ำตาลได้ โดยกรดแอสคอร์บิกจะไปรีดิวซ์ สารประกอบควิโนน ไม่ให้เกิดการรวมตัวเป็นโมเลกุลใหญ่ (Walker, 1977) แต่มีข้อเสียคืออาจส่งผลต่อรสชาติและกลิ่นแปลกปลอม (พนิดาและมยุรี, 2558) ดังนั้นการศึกษาเทคโนโลยีใหม่ที่นำมาใช้ในการยับยั้งการเกิดการเปลี่ยนแปลงสีโดยที่ยังคงลักษณะเนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์ไว้ได้จึงนับเป็นความท้าทายสำหรับอุตสาหกรรมอาหาร

ในปัจจุบันได้มีการศึกษาการใช้เทคโนโลยีพลาสมาเย็นเพื่อยับยั้งการทำงานของเอนไซม์โพลีออกซิเดสซึ่งเป็นสาเหตุหลักที่ก่อให้เกิดการเปลี่ยนสีในผักและผลไม้ โดยที่พลาสมาเย็นเป็นการใช้วิธีสนามไฟฟ้าดิสชาร์จตัวกลางซึ่งอาจเป็นก๊าซหรือไอของเหลว จนเกิดเป็นอนุภาคหรืออนุมูลอิสระ จากนั้นอนุมูลพลาสมาจะสามารถแพร่ซึมผ่านตัวกลางไปทำปฏิกิริยาเคมี เช่น ปฏิกิริยาออกซิเดชันและรีดักชัน โดยมีงานวิจัยของ (Dobrynin et al., 2009) รายงานว่า กิจกรรมของเอนไซม์ในเนื้อฝรั่งลดลงถึงร้อยละ 70 เมื่อใช้พลาสมา 2 kV เป็นเวลา 5 นาที เนื่องจากการใช้พลาสมาสามารถทำลายพันธะของโปรตีนได้จึงส่งผลให้กิจกรรมของเอนไซม์โพลีฟีนอลออกซิเดสลดลง นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยของ (Surowsky et al., 2013) รายงานว่ากิจกรรมเอนไซม์โพลีฟีนอลออกซิเดสในระบบจำลองอาหาร (เจลแลนกัม) ลดลงร้อยละ 90 หลังจากสัมผัสพลาสมาเย็น 3 นาที แม้ว่าจะมีการศึกษาการใช้พลาสมาในการยับยั้งการทำงานของเอนไซม์เปอร์ออกซิเดสในผักและผลไม้บางชนิดแล้ว แต่ยังไม่พบข้อมูลการใช้พลาสมาเย็นในพืชหลายชนิดที่เป็นพืชเศรษฐกิจของประเทศไทยเช่น มะม่วง รวมทั้งยังไม่มีการศึกษาถึงผลการใช้พลาสมาต่อปริมาณวิตามิน สารต้านอนุมูลอิสระ สี ลักษณะเนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์ และพลังงานสิ้นเปลืองจำเพาะ (SEC) ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงจะทำศึกษาผลของการประยุกต์ใช้พลาสมาเย็นต่อกิจกรรมของเอนไซม์เปอร์ออกซิเดส สมบัติทางเคมีเช่น ปริมาณและฤทธิ์สารต้านอนุมูลอิสระและสมบัติทางกายภาพเช่น ลักษณะเนื้อสัมผัสและสีของมะม่วง นอกจากนี้จะทำการเปรียบเทียบผลจากการใช้น้ำร้อนลวก การแช่กรดแอสคอร์บิกและการใช้พลาสมาเย็นต่อกิจกรรมของเอนไซม์โพลีฟีนอลออกซิเดสและพลังงานสิ้นเปลืองจำเพาะ (SEC)

### วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. ศึกษาการออกแบบเครื่องพลาสมา
2. ศึกษาผลของเวลาในการใช้พลาสมาเย็นต่อกิจกรรมของเอนไซม์โพลีฟีนอลออกซิเดส
3. ศึกษาผลของวิธีการลวกน้ำร้อน การแช่กรดแอสคอร์บิกและการใช้พลาสมาเย็นต่อกิจกรรมของเอนไซม์โพลีฟีนอลออกซิเดส สมบัติทางเคมีและสมบัติทางกายภาพของมะม่วงดอกไม้ตัดแต่ง

### ขอบเขตงานวิจัย

1. มะม่วงสุก พันธุ์น้ำดอกไม้ มีค่าของแข็งที่ละลายน้ำได้ 20-22 องศาบริกซ์ ขนาด 1.5x1.5x1.5 เซนติเมตร
2. วิธีการทำลายเอนไซม์ ได้แก่ การลวกด้วยน้ำร้อน การแช่กรดแอสคอร์บิก และพลาสมาเย็น
3. การเปลี่ยนแปลง สมบัติทางเคมี ได้แก่ การเกิดปฏิกิริยายาสีน้ำตาล ปริมาณวิตามินซี ปริมาณโปรตีนและปริมาณสารประกอบฟีนอลิก และสมบัติทางกายภาพ ได้แก่ สีและลักษณะเนื้อสัมผัส ของมะม่วงน้ำดอกไม้ และพลังงานสิ้นเปลืองจำเพาะ (SEC)

### ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทราบถึงวิธีการออกแบบพลาสมาเย็น
2. ทราบวิธีทำลายเอนไซม์ที่เหมาะสมที่สุดกับมะม่วงน้ำดอกไม้สุกตัดแต่ง
3. ทราบถึงเวลาที่เหมาะสมในการทรีตเมนต์มะม่วงน้ำดอกไม้สุกตัดแต่งโดยพลาสมาเย็น

## บทที่ 2

### ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องและการตรวจสอบเอกสาร

#### มะม่วงน้ำดอกไม้

##### 1. ข้อมูลทั่วไป

มะม่วงน้ำดอกไม้ (*Mangifera indica* Linn.) จัดอยู่ในวงศ์ Anacardiaceae ชื่อสามัญ Mango (Nam Dok Mai) เป็นมะม่วงที่นิยมรับประทานสุก ที่สามารถทำให้ออกดอกติดผลนอกฤดูได้ดี ทรงพุ่มค่อนข้างเล็กใบค่อนข้างใหญ่ ขอบใบเป็นคลื่น การเรียงตัวของใบเป็นระเบียบ ทนต่อโรคแมลงได้ดีปานกลาง มีผลขนาดปานกลาง ทรงผลรูปไข่ค่อนข้างยาว ขั้วผลอูมรี ปลายผลแหลม ผิวเรียบ เปลือกค่อนข้างบางประมาณ 0.11 เซนติเมตร บอบช้ำง่าย ผลดิบสีเขียวนวล รสเปรี้ยวจัด ผลแก่มีสีเขียวอ่อน มีนวลชัดเจนเห็นท่อน้ำบริเวณผิว เนื้อสีขาวยังมีรสเปรี้ยวเมื่อสุกผิวสีเหลืองอมเขียว เนื้อหนาและละเอียด ฉ่ำน้ำ ไม่มีเสี้ยน กลิ่นหอม เมล็ดบาง อายุเก็บเกี่ยวประมาณ 115-120 วันหลังดอกบาน มีถิ่นดั้งเดิมอยู่สมุทรปราการ เป็นพันธุ์รับประทานสุกเป็นที่ต้องการของตลาดผู้บริโภคทั้งภายในและต่างประเทศ (สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ, 2553)



ภาพที่ 1 ลักษณะทั่วไปของมะม่วงน้ำดอกไม้

ที่มา : สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (2553)

## 2. ถิ่นกำเนิด

มะม่วงน้ำดอกไม้ เป็นมะม่วงท้องถิ่นในไทย ปัจจุบันพบปลูกในทุกภาค และมีการปลูกเพื่อการค้ามากในภาคกลาง ภาคเหนือ ภาคอีสาน ภาคตะวันออก และภาคตะวันตก

## 3. ลักษณะทางพฤกษศาสตร์

3.1 ลำต้นมะม่วงน้ำดอกไม้ เป็นไม้ยืนต้นไม่ผลัดใบขนาดกลาง มีอายุประมาณ 15-20 ปี ลำต้นสูงประมาณ 10-15 เมตร ลำต้นแตกกิ่งน้อย แลดูเป็นทรงพุ่มโปร่ง เปลือกลำต้นสีดำอมเทา



ภาพที่ 2 ลักษณะลำต้นมะม่วงน้ำดอกไม้

ที่มา : สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (2010)

3.2 ใบมะม่วงน้ำดอกไม้ ออกเป็นใบเดี่ยว เรียงสลับกันบนกิ่งแขนง ใบมีรูปหอก โคนใบสอบ แแหลม ปลายใบแหลม ขอบใบโค้งเป็นลูกคลื่น แผ่นใบมีขนาดใหญ่ สีเขียวเข้ม และเป็นมัน

3.3 ดอกมะม่วงน้ำดอกไม้ ออกดอกเป็นช่อแขนงที่ปลายกิ่ง บนช่อแขนงมีดอกย่อยจำนวนมาก แต่ละดอกย่อยมีกลีบเลี้ยง 5 กลีบ และกลีบดอก 5 กลีบ ทั้งนี้ ดอกมะม่วงน้ำดอกไม้ทั้งดอก กระทบ และดอกสมบูรณ์เพศ ที่มีเกสรตัวผู้ และเกสรตัวเมียในดอกเดียวกัน

3.4 ผลและเมล็ดของผลมะม่วงน้ำดอกไม้ มีลักษณะอ้วนจนถึงเกือบกลม ผลด้านข้างผลมีขนาดใหญ่ และเล็กกลึงที่ท้ายผล ขนาดผลกว้างประมาณ 6.5-7.5 เซนติเมตร ยาวประมาณ 12-15 เซนติเมตร มีน้ำหนักต่อผลประมาณ 250-400 กรัม หรือมากกว่า ผลอ่อนมีสีเขียวนวล ผลสุกมีสีเหลืองครีมหรือเหลืองทอง เปลือกค่อนข้างบาง จึงง่ายย่ำ ส่วนเนื้อผลมีสีเหลืองอมครีม เนื้อละเอียด มีรสหวาน และมีกลิ่นหอม ส่วนเมล็ดมีขนาดเล็ก และแบนลึบ ไม่มีเส้นใย

#### 4. การใช้ประโยชน์

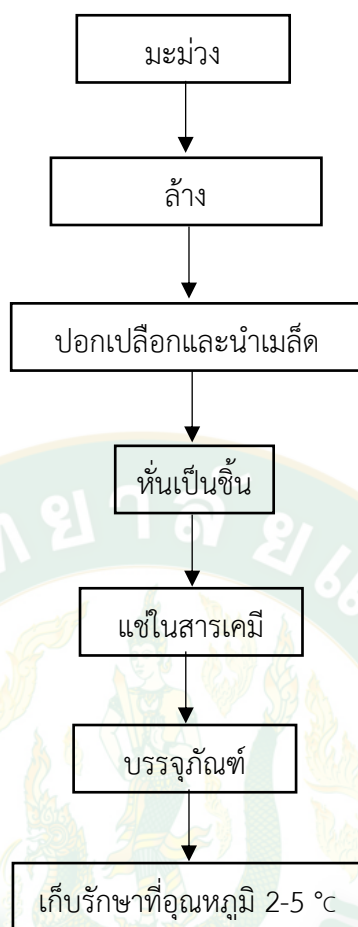
มะม่วงน้ำดอกไม้ ผลสุกมีสีเหลืองนวลหรือเหลืองทอง เนื้อผลมีสีครีม มีรสหวาน และมีกลิ่นหอม นิยมรับประทานเป็นผลไม้สุก นอกจากนั้น ผลดิบยังใช้รับประทานเป็นผลไม้เปรี้ยว นิยมใช้ทำขนมหวาน โดยเฉพาะข้าวเหนียวมะม่วง มะม่วงน้ำดอกไม้ดิบ แปรรูปเป็นมะม่วงดอง เนื่องจากมีรสเปรี้ยวสูง ส่วนผลสุกแปรรูปเป็นมะม่วงกวนหรือ มะม่วงในน้ำเชื่อม และแยมมะม่วง เป็นต้น ก้านยอดอ่อน และยอดอ่อนมีรสเปรี้ยว ใช้รับประทานเป็นผักคู่กับอาหารอื่น อาทิ ลาบ ซุปหน่อไม้ เป็นต้น เปลือกลำต้นใช้ต้มย้อมผ้า ให้ผ้าสีน้ำตาล เนื้อไม้จากต้นขนาดใหญ่ แปรรูปเป็นไม้สำหรับก่อสร้างบ้าน อาทิ ไม้ปูพื้น ไม้ฝ้า หรือแปรรูปเป็นเฟอร์นิเจอร์หรือเครื่องใช้ต่างๆ (สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ, 2553)

#### 5. มะม่วงตัดแต่ง

ผลไม้สดตัดแต่งหรือผลไม้ที่ผ่านการแปรรูปขั้นต่ำ (minimally processed fruit หรือ fresh-cut fruit) หมายถึง ผลไม้สดที่ผ่านกระบวนการล้าง ปอกเปลือก ฝานชิ้น นำเมล็ดออก ตัดแต่ง หั่นเป็นชิ้นเล็กๆ บรรจุใส่บรรจุภัณฑ์ เก็บรักษาที่อุณหภูมิต่ำ และเก็บรักษาพร้อมบริโภค The International Fresh-cut Produce Association หรือ IFPA ให้นิยามผักและผลไม้สดตัดแต่ง คือ

ผักและผลไม้ที่ผ่านการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพไปจากผักและผลไม้เดิม แต่ยังคงความสดอยู่ (IFPA, 1999) เป็นผลไม้ที่มีรสชาติที่เป็นเอกลักษณ์และเป็นอาหารสุขภาพที่ได้รับความนิยมเพิ่มสูงขึ้นในตลาดโลก นอกจากผลมะม่วงแล้ว ปัจจุบันผลิตภัณฑ์ที่ตอบสนองต่อกลุ่มผู้บริโภคที่ต้องการความสะดวกสบาย เช่น เนื้อมะม่วงสดตัดแต่งซึ่งเป็นอีกผลิตภัณฑ์หนึ่งที่มีความต้องการเพิ่มมากขึ้นเช่นกัน โดยเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีศักยภาพและเติบโตอย่างต่อเนื่องในตลาดมะม่วงโลก (James JB, 2010) การเตรียมเนื้อมะม่วงสดเพื่อการบริโภคนั้นต้องใช้หลายขั้นตอนเพื่อให้ได้เนื้อมะม่วงสดที่มีคุณภาพและความปลอดภัยสำหรับบริโภค โดยต้องอาศัยการคัดสรรวัตถุดิบ การเตรียมอุปกรณ์ที่เหมาะสม และกระบวนการผลิตหลายขั้นตอน และเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์เนื้อมะม่วงสดตัดแต่งที่มีคุณภาพสูงที่สุดนั้น ต้องมีการดูแลจัดการผลมะม่วงก่อนการตัดแต่งรวมถึงกระบวนการผลิตและเก็บรักษาภายใต้สภาวะที่เหมาะสม (ดังแสดงในภาพที่ 3) โดยเฉพาะอย่างยิ่งอุณหภูมิซึ่งเป็นปัจจัยที่สำคัญที่สุดที่ส่งผลอย่างมากต่อคุณภาพและอายุการเก็บรักษาของเนื้อมะม่วงสดตัดแต่งกระบวนการตัดแต่งเนื้อมะม่วงสดนั้นมีขั้นตอนดังนี้





ภาพที่ 3 กระบวนการตัดแต่งมะม่วง

ที่มา : (Garcia)

## 6. การเกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาล

การเกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาลในอาหารจะพบได้บ่อยในกระบวนการผลิตหรือการเก็บรักษาอาหารจำพวกเนื้อสัตว์ ผัก และผลไม้ต่างๆ โดยเฉพาะผักสดที่เกิดการแตกหักหรือชำ และอาหารที่ผ่านการให้ความร้อน เช่น ผักและผลไม้อบแห้ง เป็นต้น การเกิดสีน้ำตาลในอาหารมักจะส่งผลให้รูปลักษณะของอาหารเกิดการเปลี่ยนแปลงไป เช่น สี กลิ่น รส และคุณค่าทางโภชนาการ โดยการเกิดสีน้ำตาลในอาหารสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 สาเหตุ คือ เกิดจากเอนไซม์ (enzymatic browning reaction) และเกิดจากสารอื่นที่ไม่ใช่เอนไซม์ (non-enzymatic browning reaction)



### 6.1 การเกิดปฏิกิริยาน้ำตาลเนื่องจากเอนไซม์

ปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลในผักและผลไม้อาจเกิดขึ้นได้เมื่อมีการทำให้ซ้ำ หรือการหั่นผักและผลไม้บางชนิด เช่น มะเขือ หัวปลี และแอปเปิล เป็นต้น โดยจะเกิดสีน้ำตาลขึ้นบริเวณรอยหั่น หรือเกิดขึ้นระหว่างการแปรรูป ปฏิกิริยาชนิดนี้เกิดจากการทำงานของเอนไซม์ในผักและผลไม้ โดยเอนไซม์ที่เป็นสาเหตุหลักของการเกิดปฏิกิริยานี้คือ โพลีฟีนอลออกซิเดสซึ่งจัดเป็นเอนไซม์ในกลุ่มของออกซิโดรีดักเทส (oxidoeductases) (เกียรติศักดิ์, 2551)

ปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการเกิดสีน้ำตาลเนื่องจากเอนไซม์

ปัจจัยสำคัญที่มีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาน้ำตาลเนื่องจากเอนไซม์ในผักและผลไม้ คือ ความเข้มข้นของเอนไซม์และสารประกอบฟีนอลที่เป็นสารตั้งต้น ค่า pH ปริมาณออกซิเจน และ อุณหภูมิ เป็นต้น (สินธนา, 2547)

#### 6.1.1 สารประกอบฟีนอล (phenolic compounds)

สารประกอบที่ฟีนอลเป็นองค์ประกอบสำคัญและอาจมีหมู่เคมีอื่นเข้ามาเกาะที่ตำแหน่งต่างๆ สารในกลุ่มนี้ได้แก่ cinnamic acid, chorogenic acid, catechol, anthocyanin และ tannin เป็นต้น นอกจากนี้ กรดอะมิโนไทโรซีน และฟีนอลอะลานิน ก็จัดเป็นสารประกอบฟีนอลเช่นเดียวกัน (จรัสแท้, 2546) สารประกอบฟีนอลจะพบได้บริเวณแวคิวโอล (vacuole) ซึ่งรวมตัวกันเป็นโมเลกุลใหญ่ในรูปที่ละลายน้ำ (tannins) หรือรวมกันอย่างสมบูรณ์ในรูปที่ไม่ละลายน้ำ (lignins) (Macheix, 1990)

ระดับของการเกิดสีน้ำตาลในผักและผลไม้จะขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารประกอบฟีนอล โดยจากการศึกษาของ (Heller, 1994) และ (Radi, 1997) พบว่า ปริมาณสาร chorogenic acid ในผล apricot และผลแอปเปิลพันธุ์ต่างๆ จะลดลงอย่างรวดเร็วสอดคล้องกับการเกิดสีน้ำตาลที่เพิ่มมากขึ้น แสดงให้เห็นว่า chorogenic acid เป็นสารตั้งต้นของปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลซึ่งจะถูกใช้ไปอย่างรวดเร็ว

#### 6.1.2 เอนไซม์โพลีฟีนอลออกซิเดส (polyphenoloxidase; PPO)

เอนไซม์โพลีฟีนอลออกซิเดสเป็นเอนไซม์ที่เป็น copper metalloprotein มีชื่อตามระบบคือ dihydroxyphenylalanine: oxygen oxidoreductase (Mayer, 1979) และมีชื่อสามัญทั่วไปหลายชื่อตามสารตั้งต้นของปฏิกิริยานั้นๆ เช่น cresolase, catecholase, phenolase และ tyrosinase เป็นต้น (Mathew, 1971)

เอนไซม์โพลีฟีนอลออกซิเดสสามารถพบได้ในพืชแทบทุกชนิด มีมากสุดในเห็ด มันฝรั่ง ท้อ แอปเปิล กล้วย ใบชา กาแฟ และหัวปลี เป็นต้น ในสภาพปกติเอนไซม์โพลีฟีนอลออกซิเดสจะถูกเก็บอยู่ในโครงสร้างของไทลาคอยด์ (thylakoid) ซึ่งเป็นส่วนประกอบของคลอโรพลาสต์ แต่เมื่อน้ำเยื่อของพืชได้รับความเสียหายหรือถูกทำลาย เช่น จากการปอกเปลือก หรือการหั่น จะทำให้เซลล์พืชแตกออก ส่วนของโมโนฟีนอล ซึ่งเป็นสารตั้งต้นที่อยู่ในแควิวโอลจึงทำปฏิกิริยากับเอนไซม์โพลีฟีนอลออกซิเดสและก๊าซออกซิเจนในอากาศทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮดรอกซิเลชัน ได้เป็น ไดฟีนอล ซึ่งสารนี้จะถูกออกซิไดซ์ต่อไปเป็นโอควิโนน และจะทำปฏิกิริยาแบบไม่มีเอนไซม์มาเกี่ยวข้องกับสารประกอบต่างๆ รวมทั้งสารประกอบฟีนอลและกรดอะมิโน ทำให้เกิดเป็นสารสีต่างๆ ซึ่งจะค่อนข้างดำ กล่าวคือ อาจเป็นสีน้ำตาลดำ สีเทาดำ หรือสีม่วงดำก็ได้ (สินธนา, 2547)

ปัจจัยที่มีผลต่อการทำงานของเอนไซม์ มีดังนี้

- 1) อุณหภูมิ เอนไซม์จะทำงานได้ดีจะต้องอยู่ในอุณหภูมิที่เหมาะสม
- 2) pH เป็นปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อการทำงานของเอนไซม์ที่ทำหน้าที่เร่งปฏิกิริยา หาก pH ไม่เหมาะสมจะทำให้เอนไซม์ทำหน้าที่ไม่เต็มที่
- 3) ความเข้มข้นของเอนไซม์ หากเพิ่มความเข้มข้นจะช่วยเร่งปฏิกิริยาให้เกิดเร็วขึ้น แต่ถ้ามากเกินไปอัตราการเกิดปฏิกิริยาจะมีค่าคงที่
- 4) ปริมาณสารตั้งต้น มีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาของเอนไซม์ เมื่อเพิ่มสับสเตรต อัตราการเกิดปฏิกิริยาจะเพิ่มขึ้น แต่เมื่อยิ่งเพิ่มปริมาณของสับสเตรตมากเกินไป อัตราการเกิดปฏิกิริยาจะไม่เกิดเร็วขึ้น เมื่อระดับหนึ่งอัตราการเกิดปฏิกิริยาจะคงที่เนื่องจากไม่ได้เพิ่มปริมาณของเอนไซม์

## 6.2 ปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลที่ไม่เกี่ยวข้องกับเอนไซม์

การที่จะควบคุมปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลให้เป็นไปตามต้องการได้นั้น จำเป็นต้องเข้าใจถึงกลไกต่างๆ ของปฏิกิริยา ซึ่งกลไกที่เกี่ยวข้องกับการเกิดสีน้ำตาลในอาหารที่ไม่เกี่ยวข้องกับเอนไซม์นั้นที่สำคัญมี 3 กลไกด้วยกัน คือ Maillard reaction, caramelization และ ascorbic acid oxidation

### 6.2.1 Maillard reaction

ค้นพบครั้งแรกในปี 1912 โดยนักเคมีชาวฝรั่งเศส ชื่อ Louis Maillard โดยพบว่าเมื่อให้ความร้อนกับสารละลายผสมระหว่าง glucose และ lysine จะทำให้เกิดการพัฒนาเป็นสารสีน้ำตาล และสารพวกเมลานอยดิน (melanoidines) ต่อมาจึงมีการเรียกปฏิกิริยาในลักษณะนี้ว่า ปฏิกิริยา

เมลลาร์ด (Maillard reaction) ซึ่งจะหมายถึงปฏิกิริยาทั้งหมดที่เกี่ยวข้องกับหมู่เอมิโน (amino group) ได้แก่ กรดอะมิโน เปปไทด์ โปรตีน และสารประกอบเอมีน และหมู่คาร์บอนิล (carbonyl group) ได้แก่ น้ำตาล อัลดีไฮด์ และคีโตน (Lee, 1983) กระบวนการเอนไซม์เกิดปฏิกิริยาเมลลาร์ด แบ่งออกเป็น 3 ช่วง ประกอบด้วย

#### 6.2.1.1 Initial stage

Reducing sugar ถูก condense ที่ตำแหน่ง carbonyl กับ amino group ของโปรตีนทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนเป็น N-substituted glycosylamine ภายใต้สภาวะกรด เกิด isomerization เป็น ketone เรียกกระบวนการ Amadori arrangement ได้ผลผลิตเป็น 1-amino-1-deoxy-2-ketose derivative ซึ่งสารที่เกิดขึ้นในช่วงนี้ยังเป็นสารไม่มีสี

#### 6.2.1.2 Intermed stage

ปฏิกิริยาในช่วงนี้เกี่ยวข้องกับการเคลื่อนที่อิเล็กตรอนของ amino group จากการเปลี่ยนแปลงของสื่อน้ำตาลครึ่งส่วน ประกอบด้วยกระบวนการ dehydration, cyclization, fragmentation หรือ amine condensation สามารถแบ่งได้เป็น 3 รูปแบบหลัก คือ

ก) สภาวะกรด กระบวนการ dehydration และ cyclization ทำให้ hexose เปลี่ยนเป็น hydroxyfurfural หรือ pentose เป็น furfural ซึ่งยังคงเป็นสารไม่มีสี แต่กระบวนการ oxidation ที่เกิดต่อไป ทำให้เกิด unsaturated decarboxyl compounds ได้ผลผลิตเป็นสารสีเหลือง

ข) สภาวะด่าง 2-keto glycosyl form เปลี่ยนเป็น 1,2-enol glycosyl form เกิดกระบวนการ dehydration และ oxidation เปลี่ยนเป็น 2,3-enol form ได้ผลผลิตเป็น reductones และ dehydroreduction ซึ่ง dehydroreduction นี้จะไปรวมกับ amino acid ได้ผลผลิตเป็น CO<sub>2</sub> aldehydes และ amino-keto derivatives เรียกปฏิกิริยานี้ว่า Strecker dehydration

ค) สภาวะอุณหภูมิสูง กระบวนการ fragmentation ทำให้เปลี่ยน Amadori product ได้เป็น carbon aldehyde 3-4, alcohols, หรือ ketones ซึ่งมีสีและกลิ่นเป็นเอกลักษณ์ของ Maillard browning โดยเฉพาะ

#### 6.2.1.3 Final stage

ปฏิกิริยาในช่วงนี้เกี่ยวข้องกับการปฏิกิริยา polymerization ของผลผลิตในช่วงที่ 2 และทำปฏิกิริยา copolymerization กับ amino compound สุดท้ายจะได้เป็นผลผลิตที่มีสีเป็น melanoidins หรือ brown nitrogenous polymers

## 7. กระบวนการยับยั้งเกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาล

โดยปกติผักผลไม้มักเกิดสีคล้ำหรือสีน้ำตาลอย่างรวดเร็ว เมื่อเนื้อเยื่อถูกทำลายในระหว่างการเตรียมวัตถุดิบ เช่น ระหว่างการแปรรูป หรือระหว่างการเก็บเพื่อรอจำหน่ายซึ่งเป็นลักษณะที่ไม่พึงประสงค์ในผลิตภัณฑ์ นอกจากนี้ เมื่ออาหารเกิดสีน้ำตาล อายุการเก็บรักษาจะสั้นลง สูญเสียคุณค่าทางโภชนาการ และมูลค่าทางการตลาดลดลง ฉะนั้น การเกิดสีน้ำตาลเนื่องจากเอนไซม์จึงจัดว่าเป็นปัญหาสำคัญในการแปรรูปผักและผลไม้หลายชนิด หากสามารถพัฒนาการใช้ประโยชน์จากผลพลอยได้เหล่านี้ให้เป็นผลิตภัณฑ์ทางเลือก จะช่วยเพิ่มมูลค่า หรือลดต้นทุนได้อีกทางหนึ่ง นักวิจัยจึงได้มีการศึกษาการใช้สารสกัดจากธรรมชาติในการลดการเกิดสีน้ำตาลในปีที่ผ่านมาซึ่งสามารถลดการเกิดสีน้ำตาลได้ โดยสอดคล้องกับงานวิจัยของ (Lozano-De-Gonzalez et al., 1993) กล่าวว่า เมื่อปอกผลไม้ทิ้งไว้จะเกิดสีน้ำตาล ซึ่งเป็นลักษณะที่ไม่น่าพึงพอใจ มีรายงานว่าสารจากธรรมชาติหลายชนิดสามารถยับยั้งการเกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาลในผักและผลไม้ได้ โดยพบว่าเมื่อนำแอปเปิลสดตัดแต่งจุ่มในน้ำสับปะรดพบว่าน้ำสับปะรดมีประสิทธิภาพในการยับยั้งการเกิดสีน้ำตาลในแอปเปิลสดตัดแต่งได้เป็นอย่างดี นอกจากนี้มีการทดลองแช่ผักสลัดลงในสารละลายที่ประกอบด้วยกรดแอสคอร์บิก แชนแทนกัม พบว่าจะช่วยป้องกันการเกิดสีน้ำตาลในผักได้ดีขึ้น (Wyss, 1990) และมีการทดลองใช้ EDTA ร่วมกับโซเดียมแอสซิดไฟโรฟอสเฟต พบว่าสามารถป้องกันการเกิดสีน้ำตาลในมันฝรั่งปอกเปลือกได้ (Feinberg, 1987) และเมื่อนำมาใช้ร่วมกับกรดซิตริกซึ่งเป็นสารเพิ่มความเป็นกรดในอาหาร พบว่าสามารถช่วยในการยับยั้งปฏิกิริยาของเอนไซม์โพลีฟีนอลได้ ซึ่งสอดคล้องกับการใช้กรดซิตริกในเห็ด พบว่าจะช่วยป้องกันการเปลี่ยนสีในเห็ดได้ (McCord and Kilara, 1983) ปฏิกิริยาสีน้ำตาลในผักและผลไม้ จะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วหลังจากที่ถูกทำลายด้วยการปอกเปลือกหรือในกระบวนการตัดแต่ง เนื่องจากการทำลายเนื้อเยื่อของพืชจะทำให้เอนไซม์และสับสเตรทรวมตัวกันอย่างรวดเร็ว ทำให้เกิดปัญหาที่เกี่ยวกับการกำหนดอายุการเก็บของผักและผลไม้ที่ผ่านกระบวนการขึ้นต่างๆ (Sapers and Miller, 1992) โดยมีสาเหตุมาจากปฏิกิริยาที่มีเอนไซม์ซึ่งการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของสารประกอบฟีนอลซึ่งเป็นสับสเตรทกับเอนไซม์จะเกี่ยวข้องกับปฏิกิริยาสีน้ำตาล นอกจากนี้เอนไซม์โพลีฟีนอลออกซิเดส ยังเป็นเอนไซม์ที่สำคัญในการเกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาลของผักและผลไม้ชนิดอื่น เช่น ฝือก (Lourenco et al., 1992) และหน่อไม้ (Huang et al., 2002) ผักและผลไม้สดบางชนิด เช่น มันฝรั่ง แอปเปิล กล้วย จะเกิดสีคล้ำหรือสีน้ำตาลอย่างรวดเร็ว เมื่อเนื้อเยื่อถูกทำลายในระหว่างการเตรียมวัตถุดิบ เช่น ระหว่างการแปรรูป หรือระหว่างการเก็บเพื่อรอจำหน่าย ซึ่งเป็นลักษณะที่ไม่พึงประสงค์ในผลิตภัณฑ์ นอกจากนี้ เมื่ออาหารเกิดสีน้ำตาล อายุการเก็บรักษาจะสั้นลงสูญเสีย

คุณค่าทางโภชนาการ และมูลค่าทางการตลาดลดลง ฉะนั้น การเกิดสีน้ำตาลเนื่องจากเอนไซม์จึงจัดว่าเป็นปัญหาสำคัญในการแปรรูปผักและผลไม้หลายชนิด การเกิดสีน้ำตาลเนื่องจากเอนไซม์ (enzymatic browning) เป็นปฏิกิริยาที่จะเกิดขึ้นกับเนื้อเยื่อพืชเมื่อเซลล์ถูกทำลายทางกลทำให้ monophenol ที่อยู่ในเซลล์พืชสัมผัสกับออกซิเจน และมีเอนไซม์กลุ่ม โพลีฟีนอลออกซิเดส (PPO) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา hydroxylation ได้เป็น o-diphenol สารนี้จะถูก oxidize ต่อเป็นโอควิโนน ซึ่งโอควิโนน ที่เกิดขึ้นจะรวมตัวกันและเกิดปฏิกิริยากับสารประกอบฟีนอลิกอื่นๆหรือกับกรดอะมิโน ได้เป็นสารประกอบเชิงซ้อนสีน้ำตาล (นิตติยา, 2557) ซึ่งในงานวิจัยนี้จะศึกษากระบวนการยับยั้งเกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาลต่างๆ ดังนี้

### 7.1 การลวก

การลวกเป็นที่นิยมใช้เตรียมวัตถุดิบก่อนการแปรรูป การลวกเป็นการให้อาหารสัมผัสกับน้ำร้อน ใช้น้ำร้อน หรือไมโครเวฟ อุณหภูมิที่ใช้ลวกอยู่ระหว่าง 70-105 องศาเซลเซียส ใช้ระยะเวลาสั้นๆ ที่เหมาะสมกับอาหารแต่ละชนิด วัตถุประสงค์หลักของการลวกเพื่อยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ที่เป็นสาเหตุของการเสื่อมเสียก่อนการแปรรูป หรือเพื่อป้องกันการทำงานของเอนไซม์ระหว่างการเก็บรักษา และช่วยลดปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ที่ปนเปื้อนในวัตถุดิบ โดยปัจจัยที่มีผลต่อเวลาในการลวก ได้แก่ ชนิดของวัตถุดิบ ขนาดของชิ้นอาหาร อุณหภูมิของการลวก และวิธีการให้ความร้อน (นิตติยา, 2557) ทำการลวกที่อุณหภูมิ และเวลาในระดับที่ต่างกัน ส่งผลต่อค่ากิจกรรมของ เอนไซม์โพลีฟีนอลออกซิเดส พบว่าอุณหภูมิในการลวก ที่สูงขึ้นจะสามารถลดค่ากิจกรรมของเอนไซม์โพลีฟีนอลออกซิเดสได้มากขึ้นโดยที่อุณหภูมิ 80 และ 90 องศาเซลเซียส จะสามารถลดค่ากิจกรรมของเอนไซม์ได้ดีกว่าที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เนื่องจากการให้ความร้อนที่อุณหภูมิที่อยู่ระหว่าง 70-90 องศาเซลเซียส สามารถที่จะทำลายกิจกรรมของเอนไซม์โพลีฟีนอลออกซิเดสได้ เช่น การลวกถั่วเขียวที่อุณหภูมิ 82 องศาเซลเซียส ด้วยเวลามากกว่า 3.5 นาที สามารถยับยั้งเอนไซม์โพลีฟีนอลออกซิเดสได้ (Marshall, 2000) ซึ่งสอดคล้องกับการทดลองของ (Sun et al., 2010) ที่ได้ศึกษาในแห้ว (chufa) และพบว่าเมื่อให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส ที่เวลา 0 และ 4 นาที จะมีค่าของเอนไซม์โพลีฟีนอลออกซิเดสไม่ต่างกัน แต่เมื่อได้รับความร้อนที่อุณหภูมิเป็น 80 และ 90 องศาเซลเซียส สามารถลดได้ถึงร้อยละ 79.4 และ 61.8 ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่ากิจกรรมของเอนไซม์โพลีฟีนอลออกซิเดสจะถูกทำลายเมื่อความร้อนที่ใช้มีอุณหภูมิสูงกว่า 70 องศาเซลเซียส ดังนั้นการเลือกอุณหภูมิ และเวลาที่เหมาะสมจะสามารถลดกิจกรรมการทำงานของเอนไซม์โพลีฟีนอลออกซิเดสได้ การลวกในน้ำเดือดและการลวกโดยใช้ไอน้ำทำให้เซลล์เนื้อเยื่อพืชถูกทำลายและเกิดการสูญเสีย

น้ำ การลวกจะทำให้เยื่อหุ้มเซลล์ของมันเทศอ่อนตัวลง เพิ่มความสามารถเลือกผ่านของเยื่อหุ้มเซลล์ให้มากขึ้น เพิ่มโอกาสการแพร่ของน้ำออกจากเซลล์ ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างที่ควบคุมขนาดช่องเปิดของเซลล์ส่งผลให้เกิดการถ่ายโอนมวลสารได้มากขึ้น (วิชมนิ, 2556)

### 7.2 Reducing agent

Reducing agent จะช่วยชะลอการเกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาลโดยการรีดิวซ์สารไอควิโนน ที่เกิดขึ้นให้กลับไปเป็นสารประกอบฟีนอลดั้งเดิม ดังนั้น การยับยั้งปฏิกิริยาโดยใช้สารในกลุ่มนี้จะยับยั้งได้เพียงชั่วคราว เมื่อ reducing agent ถูกใช้จนหมดไป ปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลจะดำเนินต่อไป ตัวอย่างของสารกลุ่มนี้ได้แก่ สารประกอบซัลไฟต์ กรดแอสคอร์บิกและอนุพันธ์ (McEvily et al., 1992; Vamos Vignyazo L., 1980)

เมื่อมีการใช้ reducing agent ชะลอการเกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาลหรือที่เรียกว่า lag phase เกิดขึ้น ช่วงระยะเวลาการชะลอจะขึ้นอยู่กับชนิดและความเข้มข้นของสารที่ใช้ หลังจาก reducing agent หมดไป ปฏิกิริยาก็จะสามารถดำเนินต่อไปได้ แต่โดยทั่วไปอัตราเร็วของปฏิกิริยาจะลดลง (Duangmal, 1999)

การใช้สารเคมีเป็นวิธีการชะลอหรือยับยั้งการเกิดสีน้ำตาลได้ โดยเฉพาะการใช้สารละลายกรด เช่น กรดแอสคอร์บิก สามารถป้องกันการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์ และยับยั้งการเกิดสีน้ำตาลได้ โดยกรดแอสคอร์บิกจะไปรีดิวซ์ไอควิโนน ไม่ให้เกิดการรวมตัวเป็นโมเลกุลใหญ่ (จริงแท้, 2546)

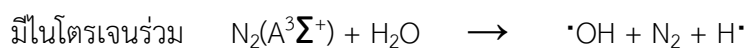
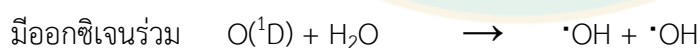
กรดแอสคอร์บิก เป็นตัวกลางที่สำคัญของปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลในผลไม้ที่มีวิตามินซีสูง ซึ่งปฏิกิริยานี้จะเกิดขึ้นได้ดีในสภาวะที่ค่า pH ต่ำกว่า 4 โดยกรดแอสคอร์บิกจะเกิดการสลายตัว (oxidation) เป็นสารจำพวก furfural, dehydroascorbic acid และ 2,3-diketogluconic acids ซึ่งการสลายตัวของกรดแอสคอร์บิกนี้ จะเกิดขึ้นได้ทั้งในสภาวะที่มีอากาศ (aerobic) และไม่มีอากาศ (anaerobic) แต่ในสภาวะที่มีอากาศจะเกิดการสลายตัวได้ดีกว่า (Eskin, 1971)

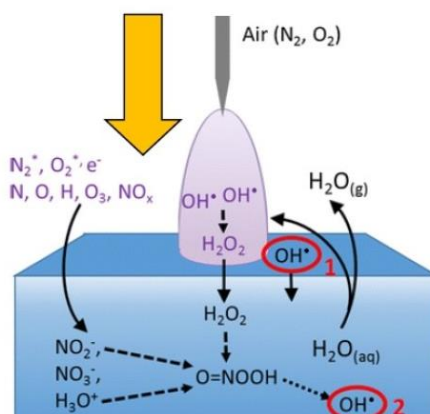
## 8. พลาสมาเย็น

“พลาสมาเย็น” (cold plasma) เป็นคำเฉพาะบ่งบอกฟิสิกส์สถานะหนึ่งของสสารซึ่งประกอบไปด้วยไอออน อิเล็กตรอน หรืออนุมูล สถานะพลาสมาเป็นลำดับต่อจากสถานะของแข็งของเหลว และ ก๊าซ ส่วนคำว่า “เย็น” อธิบายถึงอุณหภูมิพลาสมามีค่าสูงกว่าอุณหภูมิแวดล้อมเพียงเล็กน้อย ตัวอย่างหนึ่งของการเกิดสถานะพลาสมาในธรรมชาติคือ ปรากฏการณ์ฟ้าผ่า พบว่าปรากฏการณ์นี้ให้ประโยชน์ต่อพืช โดยมีผลเชิงบวกต่อชีวโมเลกุลของเซลล์พืช ทั้งนี้สามารถอธิบาย

กลไกได้ว่าฟ้าผ่าเป็นสถานะพลาสมาของอากาศและไอน้ำเกิดอนุมูลออกไซด์ของไนโตรเจน (NOx) แล้วเมื่อรวมเข้ากับไอน้ำหรือความชื้นเป็นกรดไนตริก (HNO<sub>3</sub>) อย่างอ่อน ก่อนจะตกสะสมในดินเป็นรูปไนเตรท ให้พืชสามารถนำไปใช้ในกระบวนการเจริญเติบโตได้ทันที พลาสมาเย็นเป็นการใช้วิธีสนามไฟฟ้าดิสชาร์จตัวกลางซึ่งอาจเป็นก๊าซหรือไอของเหลว จนเกิดเป็นอนุภาค หรืออนุมูลอิสระ จากนั้นอนุมูลพลาสมาจะสามารถแพร่ซึมผ่านตัวกลางไปทำปฏิกิริยาเคมี เช่น การออกซิไดซ์ การรีดิวซ์ เป็นต้น เพราะหนึ่งในกระบวนการเคมีที่ใช้ในการย่อยสลาย (decompose) มักใช้อนุมูลไฮดรอกซิล ( $\bullet\text{OH}$ ) เป็นหลัก และพลาสมาเย็นสามารถสร้างอนุมูลชนิดนี้ทดแทนการใช้สารเคมีแบบดั้งเดิมได้เป็นอย่างดี และเพื่อให้สะดวกในการผลิตและนำไปใช้งาน อนุมูลพลาสมาเย็นมักผลิตได้ 3 วิธีคือ ดิสชาร์จเหนือผิวของเหลว ดิสชาร์จในของเหลว และดิสชาร์จไอของเหลว เช่น สารละลายปุ๋ยไนเตรท หรือของแข็งที่มีของเหลวปรากฏอยู่บนผิว เช่น เมล็ดพืช ผัก ผลไม้ เนื้อสัตว์ตัดแต่ง ความชื้นบนผิวหนัง ฯลฯ (ธีรวรรณ, 2562)

วิธีดิสชาร์จเหนือผิวของเหลว ดังภาพที่ 4 อาจใช้วิธี เจ็ทพลาสมา ดิสชาร์จโคโรนา ไกลดิง อาร์ค และดิสชาร์จข้ามฉนวน (DBD) ในการผลิตอนุมูล อาทิ อะตอมออกซิเจน (O) ไฮดรอกซิล ( $\bullet\text{OH}$ ) โอโซน (O<sub>3</sub>) ไนโตรเจนออกไซด์ (NOx) ก่อนที่อนุมูลพลาสมาเหล่านี้จะแพร่ซึมสู่ผิวด้านบนของเหลว แล้วจึงละลายในเนื้อของเหลว ไฮดรอกซิลซึ่งมีอายุสั้นระดับนาโนวินาที เมื่ออนุมูลนี้แพร่ซึมห่างจากบริเวณที่เป็นสถานะพลาสมา จะรวมกลับเป็นอนุภาคที่มีอายุยาว อาทิ อนุมูลไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ เป็นรูปโมเลกุลเสถียร ทว่าพร้อมที่จะทำการออกซิไดซ์ต่อสารอินทรีย์ได้ ตัวอย่างลำดับกลไกการเกิดอนุมูลอิสระก่อนแพร่ซึมเป็นสารละลายพลาสมา มีดังนี้





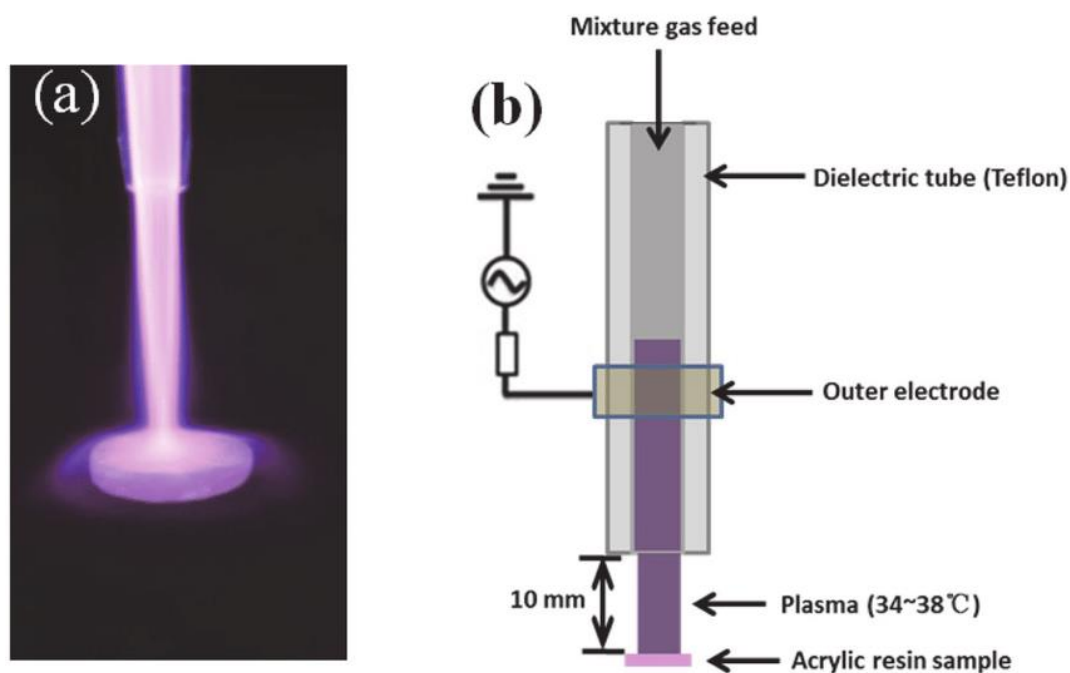
ภาพที่ 4 วิธีดิสชาร์จเหนือผิวของเหลวของอนุมูลพลาสมา

ที่มา : (ธีรวรรณ, 2562)

อนุมูลไฮดรอกซิล ( $\cdot\text{OH}$ ) คือรูปที่เป็นกลาง (neutral form) ของไฮดรอกไซด์ไอออน ( $\text{OH}^-$ ) โดยอนุมูลของไฮดรอกซิลมีความไวในการเกิดปฏิกิริยากับสารประกอบอินทรีย์สูงมาก (oxidation potential) โดยมีฤทธิ์กร่อนรองจากฟลูออรีน ( $\text{F}_2$ ) จึงสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้หลากหลาย เช่น การสลายสารประกอบอินทรีย์ การกำจัดจุลินทรีย์ก่อโรคทั้งของพืชและสัตว์ ประโยชน์ในทางชีววิทยาศาสตร์หลายด้าน เช่น การบำบัดน้ำเสีย การทำให้พื้นผิวไร้จุลินทรีย์ การสลายโมเลกุลสารอินทรีย์ปนเปื้อน ข้อดีของการใช้อนุมูลไฮดรอกซิล คือ หากทำปฏิกิริยากับสารพิษ ผลที่ได้จะเป็นโมเลกุลสารที่ไม่เป็นพิษ เช่น น้ำ คาร์บอนไดออกไซด์ ไฮโดรเจน หรือ ออกซิเจน (ธีรวรรณ, 2562)

หลักการทำงานของพลาสมาเจ็ทจะใช้หม้อแปลงไฟฟ้าจ่ายแรงดันไฟฟ้าเข้าสู่อิเล็กโทรดที่ต่างขั้วกันสองตัวซึ่งอยู่บริเวณรอบหัวเจ็ทเพื่อก่อให้เกิดเป็นสนามไฟฟ้า จากนั้นปล่อยก๊าซอาร์กอนไหลผ่านเข้ามาในหัวเจ็ทโดยตรง ซึ่งผ่านสนามไฟฟ้าระหว่างอิเล็กโทรดสองขั้ว ทำให้ก๊าซเกิดการสูญเสียอิเล็กตรอนและเกิดเป็นพลาสมาเย็น ดังภาพที่ 5





ภาพที่ 5 แผนผังของพลาสมาเจ็ท

ที่มา : (Pan et al., 2015)

## 9. สี (Color)

สีเป็นสมบัติเชิงแสงที่นำมาใช้บรรยายลักษณะภายนอกของวัตถุได้ง่ายที่สุดแบบหนึ่ง ผลลัพธ์ต่างๆ ที่ผลิตออกมาเพื่อการอุปโภค บริโภคต่างใช้สีเป็นเอกลักษณ์เฉพาะตัว หรือเพื่อดึงดูดความสนใจของผู้บริโภค การบรรยายลักษณะของสีหรือการวัดค่าสีจึงมีบทบาทสำคัญในงานควบคุมคุณภาพสินค้าในปัจจุบัน อย่างไรก็ตามมาตรฐานการบรรยายลักษณะของสีอาจแตกต่างกันไปตามประสบการณ์ของผู้บรรยาย หรือตามลักษณะของแสงตกกระทบ ฯลฯ ดังนั้นจึงมีการกำหนดมาตรฐานการวัดค่าสีขึ้นเป็นมาตรฐานสากลเพื่อสะดวกในการอ้างอิงสำหรับการบรรยายลักษณะของสี เครื่องมือที่ใช้วัดสีเรียกว่าเครื่องวัดสีที่สามารถวัดสีของวัตถุออกมาเป็นตัวเลข ซึ่งจะวัดปริมาณการสะท้อนแสงของวัตถุเทียบกับมาตรฐานอ้างอิงที่เป็น reflectance curve วัตถุที่มีสีแตกต่างกันจะมี reflectance curve ต่างกัน วัตถุที่มีสีต่างกันเมื่อสะท้อนแสงของสีนั้น ออกมาก็จะมีความยาวคลื่นต่างกันโดยที่ สีน้ำเงิน มีความยาวคลื่นที่ 430-460 นาโนเมตร สีเขียว มี ความยาวคลื่นที่ 500-580 นาโนเมตร และสีแดง มีความยาวคลื่นที่ 620-780 นาโนเมตร (มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ, 2556)

### 9.1. การวิเคราะห์สีระบบ CIE L\* a\* b\* (CIE LAB)

ระบบ CIE L\*a\*b\* เป็นวิธีการวัดสีที่ใช้ลักษณะของ color space โดยกำหนดให้ L\* เป็นค่าความสว่าง (Lightness) มีค่าอยู่ระหว่าง 0 – 100

แกน a\* ที่เป็น + สีจะเป็นไปในทิศทางสีแดง

แกน a\* ที่เป็น - สีจะเป็นไปในทิศทางสีเขียว

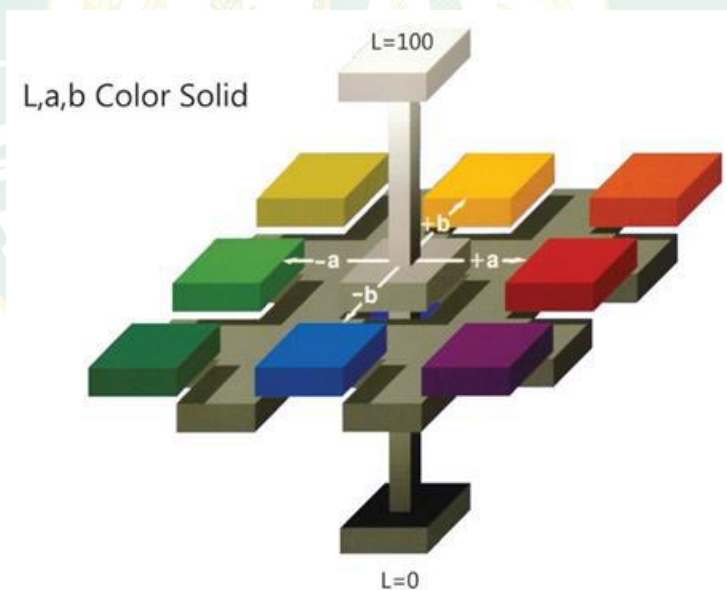
แกน b\* ที่เป็น + สีจะเป็นไปในทิศทางสีเหลือง

แกน b\* ที่เป็น - สีจะเป็นไปในทิศทางสีน้ำเงิน

และในการหาค่าความแตกต่างของสีที่เป็นตัวเลขนั้นเมื่อพิจารณาจากภาพที่ 5 จะพบว่าจุดๆ หนึ่งใน Space นั้น เป็น  $L_1^* a_1^* b_1^*$  และเมื่อสีมีการเปลี่ยนเฉดสีไปจะได้อีกจุดใน Space เป็น  $L_2^* a_2^* b_2^*$  ซึ่ง 2 จุดนี้จะมีระยะห่างกันใน Space เท่าไร ก็จะเป็นตัวบ่งบอกถึงความแตกต่างของสี แสดงดังสมการที่ 1 และภาพที่ 6

$$\Delta E = \sqrt{(L_1^* - L_2^*)^2 + (a_1^* - a_2^*)^2 + (b_1^* - b_2^*)^2} \quad (1)$$

โดยที่  $\Delta E$  คือค่าความแตกต่างของสี



ภาพที่ 6 ระบบสี CIELAB

ที่มา : (HunterLab, 2020)

## 10. ลักษณะเนื้อสัมผัส (Texture)

ลักษณะทางเนื้อสัมผัสในอาหารเป็นผลประกอบกันของคุณสมบัติทางเคมี และกายภาพ ซึ่งรวมถึง ขนาดรูปร่าง จำนวน และการจัดเรียงตัวของโครงสร้างของสารนั้นๆ ซึ่งเป็นผลมาจากโครงสร้างธรรมชาติเริ่มต้นของสาร ดังนั้นลักษณะเนื้อสัมผัสของอาหารจึงมีความจำเป็นและสำคัญอย่างมากต่อการยอมรับของผู้บริโภค และจากคุณสมบัตินี้จะนำไปสู่การคิดค้นวิธีการประเมิน โดยการใช้ประสาทสัมผัสของมนุษย์ นอกจากนี้ยังมีการนำคุณสมบัติทางประสาทสัมผัสมาประยุกต์ หรือดัดแปลงให้อยู่ในรูปของเครื่องมือที่ใช้ในการวัดเนื้อสัมผัสที่มีความสะดวกสบายและรวดเร็วมากยิ่งขึ้น แต่เนื่องจากข้อจำกัดของเครื่องมือที่มีราคาสูงและอาจจะใช้วัดคุณสมบัติทางกายภาพได้บางลักษณะเท่านั้น ทำให้ยากที่จะพิจารณาลักษณะทางกายภาพหลายอย่างรวมกันในระยะเวลาดียวกัน ได้ ด้วยเหตุนี้วิธีการวัดเนื้อสัมผัสแบบทางอ้อมหรือการวัดด้วยประสาทสัมผัสจึงยังเป็นที่นิยมใช้กัน อย่างแพร่หลาย และเนื่องจากในปัจจุบันผลของการวัดทางประสาทสัมผัสมีการพรรณนาความหมาย ออกมาได้เข้าใจมากขึ้น ดังนั้นการนำค่าที่วัดด้วยประสาทสัมผัสมาเชื่อมโยงกับหลักการและค่าที่ได้ จากการวัดด้วยเครื่องมือก็จะสามารถช่วยยืนยันความแม่นยำและชัดเจนของข้อมูลได้มากยิ่งขึ้น (Lawless, 1998)

### 10.1 การประเมินลักษณะเนื้อสัมผัส

เนื้อสัมผัสอาหารใช้เป็นตัวชี้ถึงลักษณะของส่วนประกอบและโครงสร้างภายในอาหาร ซึ่งอธิบายหรือแสดงผลออกมาในรูปแบบของพฤติกรรมกรไหลหรือการสูญเสียรูปร่างของอาหารจากแรงกลจากการบิดเคี้ยว หรือการกดทับของแรงจากเครื่องมือ (Bourne, 1982)

ความสำคัญของเนื้อสัมผัสในอาหารสามารถแบ่งออกเป็น 3 กลุ่ม คือ

10.1.1 ใช้ประเมินแรงต้านทานของผลิตภัณฑ์ต่อแรงทางกลที่มากกระทำ เช่นกระบวนการในระหว่างการเก็บเกี่ยว

10.1.2 ใช้วิเคราะห์คุณสมบัติของการไหลของผลิตภัณฑ์อาหารในระหว่างการแปรรูปและการเก็บรักษา

10.1.3 ใช้เป็นตัวแทนในการกำหนดพฤติกรรมในการเคี้ยวอาหารของผู้บริโภค

### 10.2 การประเมินลักษณะเนื้อสัมผัสโดยการใช้เครื่องมือ

เครื่องมือที่ใช้ประเมินหรือวัดลักษณะเนื้อสัมผัสมีลักษณะเฉพาะซึ่งขึ้นกับวิธีการวัดคุณสมบัติทางกายภาพในสารหรือวัสดุนั้นๆ (Bourne, 1982) แบ่งวิธีการประเมินลักษณะเนื้อสัมผัสโดยการใช้เครื่องมือออกเป็น 3 วิธี ดังนี้

### 10.2.1 วิธีการวัดค่าพื้นฐานทางวัสดุศาสตร์ (Fundamental measurement)

เป็นวิธีการที่พัฒนาโดยนักวิทยาศาสตร์และวิศวกร ซึ่งบ่อยครั้งพบว่าข้อมูลที่ได้ไม่สามารถนำมาใช้ในการประเมินความรู้สึกของมนุษย์ในด้านเนื้อสัมผัสขณะเคี้ยวได้ ข้อดีของวิธีการนี้คือสามารถอธิบายค่าที่วัดได้ในเชิงวัสดุศาสตร์ ส่วนข้อเสียคือค่าที่วัดได้ไม่มีความสัมพันธ์กับค่าทางประสาทสัมผัส เครื่องมือมีราคาแพงและใช้เวลาในการวัดค่านาน วิธีการวัดค่าพื้นฐานทางวัสดุศาสตร์จะเกี่ยวข้องกับค่าแรงที่มากกระทำต่อตัวอย่าง ซึ่งได้แก่ แรงกดและแรงกดอัด (Compression-Extrusion) แรงดึง (Tensile) แรงตัดและแรงเฉือน (Cutting และ shearing) เป็นต้น โดยค่าแรงที่กระทำต่อตัวอย่างได้มาจากแรงที่หัววัดกระทำต่อตัวอย่างในแนวตั้งฉากกับพื้นที่หน้าตัดของตัวอย่างที่ทำการทดสอบ ในขณะที่ในตัวอย่างก็จะเกิดแรงต้านต่อแรงที่มากกระทำ เพื่อพยายามรักษาสมดุลรูปร่างของตัวอย่างให้คงรูปเดิม (ธงชัย, 2544)

### 10.2.2 วิธีการวัดค่าแบบประยุกต์ (Empirical measurement)

เป็นวิธีการวัดค่าเนื้อสัมผัสที่ถูกออกแบบโดยนักประดิษฐ์ เพื่อให้มีความเหมาะสมกับงานที่นำไปใช้ โดยเฉพาะงานควบคุมคุณภาพและแบ่งระดับชั้นคุณภาพผลิตภัณฑ์ในโรงงานอุตสาหกรรม ข้อดีของวิธีการนี้คือ เครื่องมือใช้งานง่าย มีความรวดเร็วในการวัด และค่าที่ได้มีความสัมพันธ์กับการวัดค่าทางประสาทสัมผัส ส่วนข้อเสียคือไม่สามารถอธิบายหลักการของค่าที่วัดได้บนพื้นฐานทางวัสดุศาสตร์ นอกจากนี้ยังเป็นการวัดค่าได้เพียงคุณลักษณะใดคุณลักษณะหนึ่ง อีกทั้งวิธีการวัดค่ายังขึ้นอยู่กับผู้วัดและไม่มีวิธีการวัดที่ได้มาตรฐานแน่นอน โดยทั่วไปจะวัดค่าที่จุดใดจุดหนึ่งจึงไม่สามารถให้ข้อมูลที่ต่อเนื่องได้ ตัวอย่างเครื่องมือวัดค่าแบบประยุกต์ได้แก่ Fruit pressure tester, Bloom gelometer, Penetrometer เป็นต้น

### 10.2.3 วิธีการเลียนแบบการเคี้ยวของมนุษย์ (Imitative measurement)

วิธีการนี้จะออกแบบเครื่องมือให้มีหลักการทำงานคล้ายกับการเคี้ยวของมนุษย์ โดยเป็นเครื่องมือแบบเดียวกันกับวิธีการวัดค่าพื้นฐานทางวัสดุศาสตร์ที่สามารถหาค่าแรงกับระยะทาง หรือความเค้นกับความเครียดได้ ตัวอย่างเครื่องมือที่ใช้วัดค่าด้วยวิธีการนี้ได้แก่ Texture Analysis , Instron, Lloyd เป็นต้น

สมบัติทางเนื้อสัมผัส (texture properties) ของอาหาร ได้แก่

Hardness : ความนุ่ม (softness) ความแน่นเนื้อ (firmness) ความแข็ง (hardness)

Cohesiveness : crumblyness ความกรอบ (crispness) ความเปราะ (brittle)

Adhesiveness: sticky, tacky

ความฉ่ำ, มีน้ำผลไม้ (juiciness)

ความเนียน (mealiness)

ความหยาบ (grittiness)

ความเหนียว (toughness)

ความเป็นเส้นใย (fibrousness)

ดังนั้น ในงานวิจัยนี้จะทำการศึกษาความแน่นเนื้อ (firmness) ซึ่งเป็นสมบัติด้านเนื้อสัมผัส (texture properties) ของอาหาร ความแน่นเนื้อ (firmness) ความแข็ง (hardness) และความนุ่ม (softness) เป็นกลุ่มสมบัติด้านเนื้อสัมผัส ประเภทเดียวกัน อาหารที่วัดความแน่นเนื้อฝัก ผลไม้ เช่น มะม่วง มะละกอ และผลิตภัณฑ์จากเนื้อสัตว์ เช่น ไส้กรอก ชูริมิ

ความแน่นเนื้อ (firmness) เป็นลักษณะเนื้อสัมผัสที่ผู้บริโภคให้ความสำคัญมากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับเนื้อสัมผัสอื่นๆ (Toivonen and Brummell, 2008) การสูญเสียความแน่นเนื้อจึงเป็นหนึ่งในปัจจัยสำคัญที่จำกัดคุณภาพและอายุการเก็บรักษาของผลิตภัณฑ์เนื้อผลไม้สดตัดแต่ง ความแน่นเนื้อในผลไม้ทั้งผลนั้นเกิดจากลักษณะทางกายภาพของเนื้อเยื่อ ขนาดและรูปร่าง การเรียงตัวของเซลล์ความหนาและความแข็งแรงของผนังเซลล์และแรงยึดระหว่างเซลล์ร่วมกับแรงดัน กล่าวคือความแน่นเนื้อของผลไม้นั้นมาจากความแข็งแรงจากผนังเซลล์และแรงดันเต่งที่เกิดขึ้นภายในเยื่อหุ้มเซลล์ (Toivonen and Brummell, 2008) ในผลไม้ทั้งผลนั้นการสูญเสียความแน่นเนื้อในกระบวนการสุกตามธรรมชาติเกิดจากสารประกอบเพกตินถูกย่อยสลายด้วยเอนไซม์ที่เกี่ยวข้องกับการย่อยสลายผนังเซลล์ ได้แก่ เอนไซม์เพกตินเมทิลเอสเทอเรส (pectin methyl esterase; PME) และเอนไซม์พอลิกลาคทูโรเนส (polygalacturonase; PG) การสูญเสียแรงดันของเยื่อหุ้มเซลล์จากการสะสมของตัวถูกละลายต่างๆ บริเวณช่องว่างในผนังเซลล์ (Almeida et al., 2007) และการสูญเสียน้ำในระหว่างการสุก (Saladie et al., 2007) ในผลไม้สดตัดแต่งนอกจากการสูญเสียความแน่นเนื้อเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงที่เกิดจากการสุกตามธรรมชาติแล้ว การกระตุ้นการทำงานของเอนไซม์โดยเอทิลีนจากเนื้อเยื่อที่เกิดบาดแผล และการสูญเสียแรงดันจากกระบวนการตัดแต่งเป็นอีกปัจจัยร่วมที่สำคัญที่ทำให้เกิดการสูญเสีย ความแน่นเนื้อในผลไม้สดตัดแต่งนั้นสูงกว่าในผลไม้ทั้งผล

## 11. สารต้านอนุมูลอิสระ

สารต้านอนุมูลอิสระ (antioxidant) คือสารที่สามารถป้องกันหรือชะลอการเกิดปฏิกิริยา oxidation ด้วยเหตุที่ ROS เกิดขึ้นมาจากกระบวนการต่างๆ ในการดำรงชีวิต ดังนั้น ร่างกายจึงต้องสร้างสารต้านอนุมูลอิสระขึ้นมาเพื่อกำจัดและลดความรุนแรงของ ROS ที่เกิดขึ้นด้วย เช่น co-enzyme Q10 alpha-lipoic acid เป็นต้น โดยปกติแล้วการสร้างสารต้านอนุมูลอิสระในร่างกายนั้น

มีอย่างเพียงพอต่อการเกิดอนุมูลอิสระขึ้นภายในร่างกาย แต่หากมีสภาวะผิดปกติในร่างกาย เช่น ความเครียด การนอนติดต่อกันนานๆ การรับประทานยาที่มีผลลด antioxidant enzyme หรือ สภาวะโรคต่าง ๆ ก็อาจจะทำให้การสร้างอนุมูลอิสระเพิ่มขึ้นจนเสียสมดุลระหว่าง antioxidant และ อนุมูลอิสระเกิดเป็นภาวะ oxidative stress อนุมูลอิสระที่ไม่ได้ถูกกำจัดจะไปทำลายเซลล์และ เนื้อเยื่อทำให้เป็นต้นเหตุของการเกิดโรคต่างๆ ได้ เช่น เป็นต้นเหตุของภาวะหลอดเลือดอุดตัน มะเร็ง Parkinson รวมถึงอาการอักเสบต่างๆ จะเห็นได้ว่าสารต้านอนุมูลอิสระในร่างกายนั้นมีความสำคัญในการป้องกันการเกิดโรคและความเสื่อมของร่างกายเป็นอย่างมาก นอกจากการไปจับกับอนุมูลอิสระ แล้วสารต้านอนุมูลอิสระควรจะต้องมีคุณสมบัติดังต่อไปนี้ร่วมด้วย

1. ป้องกันการเกิดขึ้นของ ROS ได้
2. สามารถจับกับ ROS ที่เกิดขึ้นก่อนที่ ROS นั้นจะไปทำอันตรายเนื้อเยื่อต่างๆ
3. ต้องไม่เพิ่มความแรงของอนุมูลอิสระหรือไม่เปลี่ยน ROS ที่มีความแรงต่ำไปเป็น ROS ที่มีความแรงสูงเช่นไม่เปลี่ยนจาก super oxide ไปเป็น hydroxyl radical เป็นต้น
4. ทำให้เกิดสภาวะที่เหมาะสมต่อการทำงานของ antioxidant enzyme หรือสารต้านอนุมูลอิสระตัวอื่นๆ
5. เพิ่มการแสดงออกของยีนที่ใช้สร้าง antioxidant enzyme และช่วยในการฟื้นฟูความเสียหายของ เซลล์หรือเนื้อเยื่อจากการถูกทำลายด้วยอนุมูลอิสระ

เราสามารถแบ่งสารต้านอนุมูลอิสระภายในร่างกายได้เป็น 4 ประเภทดังนี้

1. Intracellular antioxidants (antioxidant enzyme) ได้แก่ เอนไซม์ต่างๆที่ใช้ในการต้านอนุมูลอิสระเช่น catalase glutathione peroxidase superoxide dismutase
2. Extracellular antioxidants ได้แก่ วิตามินซีสารที่มีกลุ่ม sulfhydryl groups
3. Membrane antioxidants ได้แก่ Carotenoids วิตามินอี
4. สารที่จำเป็นต่อการสังเคราะห์เอนไซม์ที่ใช้ต้านอนุมูลอิสระ ได้แก่ Copper Manganese Selenium Zinc

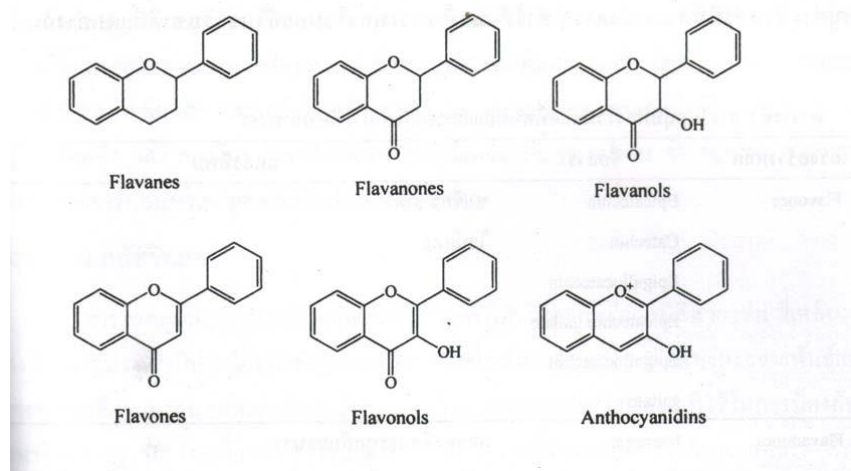
ผลิตภัณฑ์เสริมอาหารที่มีขายในปัจจุบันนี้กว่าร้อยละ 90 จัดเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ ส่วนการนำไปใช้เพื่อหวังผลด้านสุขภาพนั้นขึ้นกับการศึกษาทั้งทางด้าน *in vitro*, *in vivo* และ clinical research โดยทั่วไปแล้วผลิตภัณฑ์เสริมอาหารที่มีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระมักจะมีประโยชน์กับระบบต่างๆ เช่น ระบบหัวใจและหลอดเลือดช่วยในการมองเห็นเสริมสุขภาพความงามของผิวและผม เพื่อป้องกันโรคมะเร็ง และโรคจากความเสื่อมของระบบต่างๆ สารต้านอนุมูลอิสระที่พบได้ในอาหาร และผลิตภัณฑ์ธรรมชาติส่วนใหญ่ เช่น วิตามินอีและวิตามินซีสารในกลุ่ม flavonoids สารกลุ่ม carotenoids และสารกลุ่ม phenolics โดยลักษณะสำคัญของสารที่มีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระเหล่านี้ที่มี

ร่วมกันก็คือ การมี conjugated double bond อยู่ในโครงสร้าง เพราะเมื่อสารเหล่านี้รับหรือสูญเสีย electron ไป free radical ที่เกิดขึ้นจะ delocalized ภายในโครงสร้างได้และทำให้โมเลกุลมีความเสถียรมากกว่าสารที่ไม่มี conjugated double bond ดังนั้น ความรุนแรงของอนุมูลอิสระที่เกิดขึ้นมาใหม่ก็จะลดลง

### 11.1 สารประกอบฟีนอลิก (phenolic compounds)

สารประกอบฟีนอลิก จัดเป็นสารต้านอนุมูลที่ได้รับจากภายนอก และพบได้มากในธรรมชาติ ได้แก่ พืชผัก ผลไม้ ชาเขียว ชาดำ ซีอ็อกโกแลต และไวน์แดง เป็นต้น ในปัจจุบันพบ สารประกอบฟีนอลิกมากกว่า 8,000 ชนิด ในธรรมชาติ ตั้งแต่โมเลกุลอย่างง่าย เช่น กรดฟีนอลิก ฟีนิล โพรพานอยด์ และฟลาโวนอยด์ ไปจนถึงโครงสร้างโพลีเมอร์ที่ซับซ้อน เช่น ลิกนิน เมลานิน และแทนนิน เป็นต้น แม้ว่าปริมาณสารกลุ่มฟีนอลิกในธรรมชาติจะมีปริมาณที่แตกต่างกัน แต่พบว่าปริมาณโดยเฉลี่ยที่คนได้รับต่อวันจะอยู่ในช่วงตั้งแต่ 20 มิลลิกรัม – 1 กรัมซึ่งเป็นปริมาณที่สูงกว่าปริมาณวิตามินอี ที่ได้รับต่อวัน สารโพลีฟีนอลิกเป็นสารที่มีบทบาทสำคัญเนื่องจากมีฤทธิ์ต้านแบคทีเรีย ต้านไวรัส ต้านการอักเสบ ต้านการแพ้ และมีคุณสมบัติในการสลายลิ่มเลือด รวมเป็นสารต้านการก่อมะเร็ง และสามารถลดความดันโลหิตในการสลายลิ่มเลือด เหล่านี้เป็นต้น ซึ่งคุณสมบัติดังกล่าวนี้มีความสัมพันธ์กับ คุณสมบัติ การเป็นสารต้านอนุมูลโครงสร้างทั่วไปของสารประกอบฟีนอลิก ประกอบด้วย โครงสร้างที่เป็นวงอะโรมาติก และมีหมู่แทนที่เป็นหมู่ไฮดรอกซี อย่างน้อย 1 หมู่ ในที่นี้จะกล่าวถึง สารกลุ่มที่สำคัญ ได้แก่ ฟลาโวนอยด์

สารกลุ่มฟลาโวนอยด์ (flavonoids) แบ่งเป็นกลุ่มย่อยได้หลายกลุ่ม ตามความแตกต่าง ของสูตรโครงสร้างโดยเฉพาะที่วงที่มีอะตอมออกซิเจนอยู่ในรูปแบบต่างๆ เช่น อีเทอร์ คีโตน รวมทั้ง การมีหมู่ไฮดรอกซีแทนที่บนวงอะโรมาติกในโมเลกุล ตัวอย่างของสารกลุ่มฟลาโวนอยด์ได้แก่ ฟลาแวน (flavanes), ฟลาวาโนน (flavanols), ฟลาวานอล (flavanols), ฟลาโวนอล (flavonols), ฟลาโวน (flavones) และแอนโทไซยานิดิน (anthocyanidins) เป็นต้น โครงสร้างของกลุ่มฟลาโวนอยด์บางชนิด ดังภาพที่ 7



ภาพที่ 7 ตัวอย่างของกลุ่มฟลาโวนอยด์

ที่มา : (โอภา, 2550)

### 11.2 วิตามินซี (vitamin C)

วิตามินซีถูกค้นพบครั้งแรกเมื่อปี ค.ศ. 1920 โดย Drummond แต่ยังไม่ได้กำหนดชื่อ ในปี ค.ศ. 1928 Szent-Gyorgy นักเคมีชาวฮังการี ได้สกัดสารที่เขาตั้งชื่อให้ว่า Hexuronic acid จากส้ม และกะหล่ำปลี และปี ค.ศ. 1932 Waugh และ King นักเคมีมหาวิทยาลัยพิตส์เบิร์ก ได้สกัดสาร ที่ชื่อว่า antiscorbutic substance จากมะนาวได้ และต่อมาเป็นที่พิสูจน์ว่าเป็นสารชนิดเดียวกับ Hexuronic acid ที่ Szent-Gyorgy สกัดได้ จนในปี ค.ศ. 1933 Szent ได้ตั้งชื่อสารนี้ว่า Covitamic acid และต่อมาเปลี่ยนเป็นชื่อ Ascorbic acid หรือ วิตามินซีขึ้นใช้เป็นครั้งแรกจนถึงทุกวันนี้ (Nagy, 1980)

วิตามินซีเป็นสารอาหารจำเป็นสำหรับสัตว์บางอย่างรวมทั้งมนุษย์ คำว่า วิตามินซี รวมเอาสารประกอบทางเคมีที่ทั่วไปมีโครงสร้างคล้ายกันหลายชนิดที่เรียกว่า vitamer มีฤทธิ์วิตามินซีในร่างกายสัตว์ ซึ่งรวมกรดแอสคอร์บิกและเกลือของมัน เกลือแอสคอร์เบต ดังเช่น โซเดียมแอสคอร์เบต (sodium ascorbate) และแคลเซียมแอสคอร์เบต (calcium ascorbate) มักใช้ในอาหารเสริม ซึ่งสลายเป็นแอสคอร์เบตเมื่อย่อย ทั้งแอสคอร์เบตและกรดแอสคอร์บิกมีอยู่ตามธรรมชาติในร่างกาย เพราะทั้งสองแปลงรูปเป็นกันและกันได้แล้วแต่ความเป็นกรด (pH) ส่วนรูปแบบโมเลกุลที่ออกซิไดซ์ เช่น กรดดีไฮโดรแอสคอร์บิก (DHA) สามารถเปลี่ยนกลับเป็นกรดแอสคอร์บิกด้วยตัวรีดิวซ์ (reducing agent) วิตามินซีเป็นโคแฟกเตอร์ในปฏิกิริยาออกซิเอนไซม์ในสัตว์ และมนุษย์ ซึ่งอำนวยความสะดวกทางชีววิทยาที่จำเป็นหลายอย่างรวมทั้งการสมานแผล การป้องกันเลือดออกจากหลอดเลือดฝอย



และการสังเคราะห์คอลลาเจน ในมนุษย์ การขาดวิตามินซีทำให้การสังเคราะห์คอลลาเจนบกพร่อง ซึ่งทำให้อาการโรคคลักปิดลักเปิดหนักขึ้น บทบาททางเคมีชีวภาพของวิตามินซีอีกอย่างก็คือเป็นสารต้านอนุมูลอิสระ (คือเป็นตัวรีดิวซ์) โดยจ่ายอิเล็กตรอนแก่ปฏิกิริยาเคมีทั้งที่อาศัยเอนไซม์และไม่อาศัยเอนไซม์หลายอย่าง แล้วเปลี่ยนสภาพเป็นแบบออกซิไดซ์ โดยอาจเป็นกรดเซมิดีไฮโดรแอสคอร์บิก (semidehydroascorbic acid) หรือกรดดีไฮโดรแอสคอร์บิก ซึ่งสามารถรีดิวซ์ให้กลับคืนสภาพเดิมด้วยกลไกอาศัยเอนไซม์โดยใช้กลูตาไธโอนและ NADPH เป็นเมแทบอลิต์ ในพืช วิตามินซีเป็นเอนไซม์แอสคอร์เบตเพอร์ออกซิเดส (ascorbate peroxidase) เอนไซม์นี้ใช้แอสคอร์เบตเพื่อสลายไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์ ( $H_2O_2$ ) ที่เป็นพิษให้เป็นน้ำ ( $H_2O$ )

## 12. ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (Specific electrical consumption, SEC)

วิธีการคำนวณค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (SEC) เป็นวิธีพื้นฐานอย่างหนึ่งในการคำนวณการใช้พลังงานต่อหน่วยของผลิตภัณฑ์ในการคำนวณการใช้พลังงานจำเพาะประกอบด้วยจำนวนหน่วยการใช้พลังงานที่เกี่ยวข้องกับการผลิต และปริมาณการผลิตที่ได้โดยค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ เป็นตัวบ่งชี้ประสิทธิภาพการใช้พลังงาน ซึ่งหากค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะมีค่าสูง จะแสดงถึงประสิทธิภาพในการใช้พลังงานต่ำ และหากค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะมีค่าต่ำ จะแสดงถึงประสิทธิภาพในการใช้พลังงานสูง (Palamutcu, 2015) การคำนวณค่า SEC จะเป็นไปตามสมการที่ 2

$$E = \frac{E_t}{C_p \cdot m} \quad (2)$$

เมื่อ E คือ พลังงานจำเพาะใช้ในกระบวนการ (กิโลวัตต์-ชั่วโมงต่อกิโลกรัม)

$E_t$  คือ พลังงานทั้งหมดที่ใช้ในกระบวนการสกัด (กิโลวัตต์-ชั่วโมง)

$C_p$  คือ กิจกรรมเอนไซม์ที่ลดลงในตัวอย่าง (หน่วยต่อชั่วโมง)

m คือ ปริมาณของมะม่วง (กิโลกรัม)

### 13. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

(Surowsky et al., 2013) ได้ศึกษาความสามารถในการยับยั้งเอนไซม์โพลีฟีนอลออกซิเดสในระบบแบบจำลองอาหาร โดยใช้พลาสมาเย็น พบว่า พลาสมาเย็นสามารถลดกิจกรรมของเอนไซม์โพลีฟีนอลออกซิเดสในแบบจำลองอาหารได้ กิจกรรมของเอนไซม์โพลีฟีนอลออกซิเดสลดลงประมาณร้อยละ 90 หลังจากเวลาการรักษา 180 วินาที

(Illera et al., 2019) ได้ศึกษาตัวแปรต่างๆ ของพลาสมาที่ส่งผลต่อกิจกรรมเอนไซม์โพลีฟีนอลออกซิเดสและคุณภาพน้ำแอปเปิล ได้แก่ แรงดันไฟฟ้า และเวลาที่ใช้ พบว่าพลาสมาที่แรงดัน 10.5 kV เหมาะสมที่สุดซึ่งส่งผลกิจกรรมเอนไซม์ลดลงเหลือร้อยละ 16 และ 27.6 ที่เวลา 5 และ 4 นาทีตามลำดับ

(สมฤดี และ ธิดารัตน์, 2553) ได้ศึกษาผลของค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) อุณหภูมิ ชนิด และปริมาณสารป้องกันการเกิดสีน้ำตาลที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมการแปรรูปผักและผลไม้ ได้แก่ กรดซิตริก และกรดแอสคอร์บิก ต่อคุณลักษณะ และค่ากิจกรรมของเอนไซม์โพลีฟีนอลออกซิเดสในเนื้อกล้วยน้ำว้า โดยวิเคราะห์ค่ากิจกรรมของเอนไซม์โพลีฟีนอลออกซิเดสนำ crude enzyme มา 200 ไมโครลิตร มาทำปฏิกิริยากับสารละลาย catechol ความเข้มข้น 20 mM ในสารละลาย phosphate buffer pH 7.0 ความเข้มข้น 0.2 M ปริมาตร 2.80 มิลลิลิตร ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส วัดการเปลี่ยนแปลงของค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 420 นาโนเมตร โดยใช้เครื่องวัดการดูดกลืนแสง คำนวณอัตราเร็วเริ่มต้นจากความชันของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสงกับเวลา ค่ากิจกรรมของเอนไซม์โพลีฟีนอลออกซิเดสโดยให้เอนไซม์ 1 หน่วย (unit) เท่ากับการเปลี่ยนแปลงค่าการดูดกลืนแสง 0.001 หน่วยต่อนาที

(Wannarat et al., 2011) ได้ศึกษาผลของกระบวนการในการลวกที่มีต่อกิจกรรมของเอนไซม์ โพลีฟีนอลออกซิเดสในมังคุด โดยศึกษากระบวนการลวกที่อุณหภูมิ 70, 80 และ 90 องศาเซลเซียส ที่เวลา 1-4 นาที และศึกษาผลของสารออสโมซิสต่อปริมาณการสูญเสียน้ำ และปริมาณของแข็งที่เพิ่มขึ้น โดยมีปัจจัยที่ศึกษา คือ กรดซิตริกที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 0.0, 0.5 และ 1.0 ร่วมกับสารละลายซูโครสร้อยละ 70 อัตราส่วนเนื้อมังคุดต่อสารออสโมซิสที่ใช้ คือ 1 : 2 และ 1 : 4 (w/w) ผลการศึกษาพบว่าอุณหภูมิ และเวลาในการลวกสามารถลดค่ากิจกรรมของเอนไซม์โพลีฟีนอลออกซิเดสได้อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ ) ที่สภาวะอุณหภูมิการลวก 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 นาที

(ชัยรัตน์, 2558) ได้ศึกษาผลของบรรจุภัณฑ์ โดยบรรจุหน่อไม้ฝรั่งในถุงพลาสติกชนิดต่างๆ ได้แก่ Oriented Polypropylene (OPP), Polypropylene (Tappi et al.) และ Polyethylene (PE) ความหนา 40 ไมครอน และไม่บรรจุ คือ ชุดควบคุม นำไปเก็บที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 วัน และย้ายไปเก็บที่ 10 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 9 วัน ทำการวิเคราะห์ ก๊าซภายในภาชนะบรรจุ ร้อยละการสูญเสียน้ำหนัก ปริมาณน้ำตาลทั้งหมด และ ค่าแรงเฉือน พบว่า ตลอดระยะเวลาของการเก็บรักษา การสูญเสียน้ำหนักของหน่อไม้ฝรั่งในถุงชนิด OPP และ PP เพิ่มขึ้นร้อยละ 10 ชนิด PE เพิ่มขึ้นร้อยละ 8 ในวันที่ 8+9 และชุดควบคุมมีการสูญเสียน้ำหนักร้อยละ 8 ในวันที่ 8+3 ความเข้มข้นก๊าซออกซิเจนลดลงจากค่าเริ่มต้นและเข้าสู่สมดุลก๊าซร้อยละ 5 สำหรับถุงชนิด OPP และ PP และร้อยละ 10 สำหรับถุงชนิด PE ความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มขึ้นจากค่าเริ่มต้นและเข้าสู่สมดุลก๊าซร้อยละ 10 สำหรับถุงชนิด OPP และ PP และร้อยละ 5 สำหรับถุงชนิด PE ในวันสุดท้ายของการเก็บรักษา พบว่า หน่อไม้ฝรั่งที่บรรจุในถุงชนิด PE มีค่าความแน่นเนื้อ และ ปริมาณน้ำตาลทั้งหมด มากกว่าชุดการทดลองอื่น อย่างมีนัยสำคัญ

(Sireerat Lisund and Sansanee Srihaphong, 2015) ได้ศึกษาวิธีตรวจวัดหาปริมาณกรดแอสคอร์บิกโดยใช้โซเดียมไธโอซัลเฟตเป็นตัวเพิ่มความเสถียรจากนั้นนำวิธีนี้ไปประยุกต์ใช้หาปริมาณกรดแอสคอร์บิกกับเมล็ดยิววิตามินซีที่ขายตามท้องตลาด และผลมะเฟือง โดยชั่งน้ำหนักผลมะเฟืองสด บันทึกน้ำหนักที่แน่นอน นำมะเฟืองไปปั่นละเอียด ชั่งมะเฟืองที่ปั่นแล้วมา 50 กรัม เติมน้ำ DI ปริมาตร 250 มิลลิลิตร นำไปปั่นเหวี่ยงด้วยเครื่องปั่นเหวี่ยง ดูดเอาเฉพาะสารละลายใสขึ้นบน นำน้ำมะเฟืองที่แยกได้มากรองด้วยกระดาษกรองอีกครั้ง ได้ตัวอย่างน้ำมะเฟือง หาปริมาณกรดแอสคอร์บิกโดยวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นสูงสุด ด้วยเครื่องอัลตราไวโอเลตสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (AOAC, 1980)

(พนิดา และมยุรี, 2558) ได้ศึกษาการเกิดสีน้ำตาลและชะลอการเสื่อมสภาพของสับปะรดตัดแต่งพร้อมบริโภคพันธุ์ห้วยมุ่นโดยการใช้กรดแอสคอร์บิก นำสับปะรดที่ความบริสุทธิ์ระดับ 2-3 (มีสีเหลืองไม่เกิน 1/2 ของผล) ถูกล้าง ปอกเปลือกหั่นชิ้น และแช่ในสารละลายแอสคอร์บิกร้อยละ 0 (น้ำกลั่น, ชุดควบคุม) ร้อยละ 0.5 หรือร้อยละ 1.0 นาน 2 นาที ตามลำดับ พบว่า สารละลายแอสคอร์บิกที่ร้อยละ 0.5 ชะลอการเสื่อมสภาพของสับปะรดตัดแต่งได้ดีที่สุด

(เนตรนภา, 2557) ได้ศึกษาวิเคราะห์หาปริมาณและเปรียบเทียบสารประกอบฟีนอลิก และฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระในเครื่องดื่มน้ำผลไม้ ด้วยวิธีมาตรฐาน จากทั้งหมด 10 ตัวอย่าง นำตัวอย่าง

เครื่องตีน้ำผลไม้มาวิเคราะห์ ถ้าสารละลายชุ่นนำไปปั่นเหวี่ยงและนำส่วนใสมาวิเคราะห์เจือจางด้วยน้ำกลั่นในอัตราส่วนที่ต้องการปริมาตร 0.30 มิลลิลิตร ใส่ลงในขวดสีชาขนาดเล็ก เติมสารละลายร้อยละ 10 (โดยปริมาตรต่อปริมาตร) Folin-Ciocalteu Reagent ปริมาตร 1.50 มิลลิลิตร จากนั้นเติมร้อยละ 7.5  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  (โดยน้ำหนักต่อปริมาตร) ในน้ำกลั่น ปริมาตร 3.00 มิลลิลิตร จากนั้นปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นเป็น 10 มิลลิลิตร เขย่าให้สารละลายผสมกัน และตั้งไว้ในที่มืด เป็นเวลา 30 นาที (ถ้าสารละลายชุ่นนำไปปั่นเหวี่ยงและนำเอาสารละลายใสมาวิเคราะห์) เมื่อเกิดปฏิกิริยาสารละลายจะเปลี่ยนจากสีเหลืองเป็นสีน้ำเงิน แล้วนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 765 นาโนเมตร (A765) ด้วยเครื่องสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ โดยทดลอง 3 ซ้ำ จากนั้นนำไปคำนวณหาปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด จากกราฟมาตรฐานปริมาณกรดแกลลิกในช่วง 50 – 200 ไมโครกรัม

(Supapvanich, 2016) ได้ศึกษาผลของสารละลายน้ำผึ้งต่อการป้องกันการเปลี่ยนสีของสีน้ำตาลของมะม่วงน้ำดอกไม้ สกัดตัวอย่าง 3 กรัม ด้วยเอทานอลร้อยละ 65 (v/v) 30 มิลลิลิตร กรองด้วยกระดาษ Whatman No.1 เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้อง วัดค่าดูดกลืนแสงที่ 420 นาโนเมตร ด้วยเครื่องสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ หน่วยของความเข้มข้นของสีน้ำตาล  $\Delta\text{OD}_{420}/100\text{g FW}$

### บทที่ 3

## วัสดุ อุปกรณ์ สารเคมี และวิธีการดำเนินงานวิจัย

### วัตถุดิบ

มะม่วงสุก พันธุ์น้ำดอกไม้จากตลาดเมืองใหม่ อำเภอเมือง จังหวัดเชียงใหม่

### อุปกรณ์และเครื่องมือ

1. อ่างควบคุมอุณหภูมิ (Water Bath) ยี่ห้อ MEMMERT รุ่น WNB 14 ประเทศเยอรมนี
2. เครื่องปั่น ยี่ห้อ Tefal รุ่น Blendforce ประเทศฝรั่งเศส
3. เครื่องชั่งละเอียด (Analytical Balance) ทศนิยม 2 ตำแหน่ง ยี่ห้อ Sartorius รุ่น BSA3202S-W ประเทศเยอรมนี
4. เครื่องวัดสี (Spectrophotometer) ยี่ห้อ Hunterlab รุ่น MiniScan XE plus ประเทศสหรัฐอเมริกา
5. เครื่องวัดการดูดกลืนแสง (Spectrophotometer) ยี่ห้อ Thermo scientific รุ่น Genesys30 ประเทศจีน
6. เครื่องกวนสาร ยี่ห้อ IKA รุ่น C-MAG HS 7 ประเทศเยอรมนี
7. เครื่องออโต้ปิเปต (Auto pipette) ยี่ห้อ Nichiryo รุ่น 00-NPC-1000 ประเทศญี่ปุ่น
8. กระดาษกรอง เบอร์ 1 ยี่ห้อ Whatman รุ่น 1001 090 ประเทศ เยอรมนี
9. เครื่องวิเคราะห์คุณลักษณะหรือเนื้อสัมผัสอาหาร (Texture analyser) ยี่ห้อ Stable micro systems Ltd รุ่น TA.XT.Plus ประเทศ สหราชอาณาจักร
10. เครื่องหมุนเหวี่ยง ยี่ห้อ Gemmy รุ่น PLC-012E ประเทศไต้หวัน
11. เครื่องผสมสารละลาย ยี่ห้อ UZUSIO รุ่น VTX-3000L ประเทศญี่ปุ่น

12. เครื่องวัดกำลังไฟฟ้า ยี่ห้อ HiDANCE ประเทศจีน

#### สารเคมี

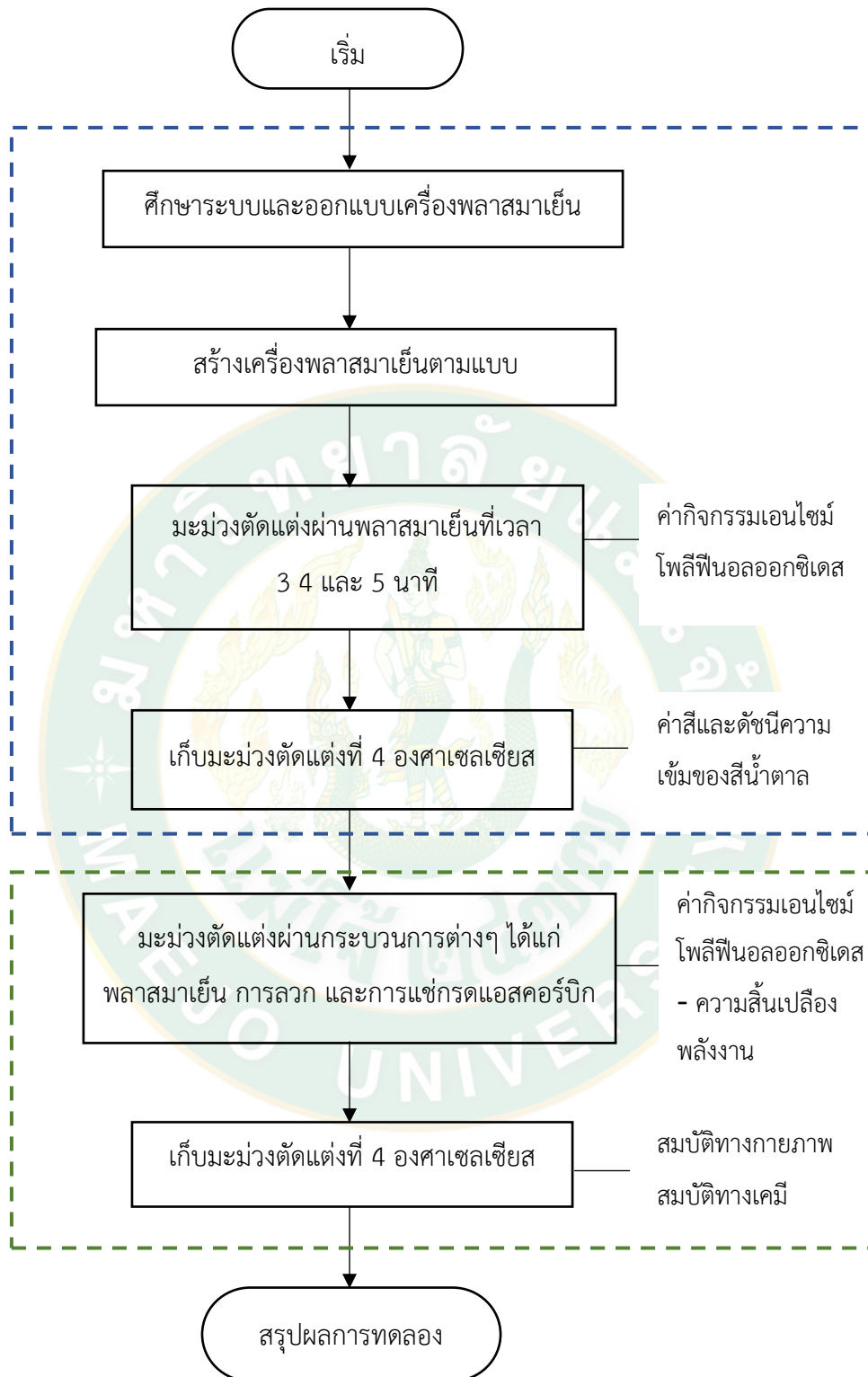
1. Bovine serum albumin บริษัท Himedia ประเทศอินเดีย
2. Bradford reagent บริษัท Himedia ประเทศอินเดีย
3. L-Ascorbic acid บริษัท Fisher ประเทศอังกฤษ
4.  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$  บริษัท Merck ประเทศเยอรมนี
5. Phosphate buffer pH 7.0 บริษัท Sigma ประเทศสหรัฐอเมริกา
6. Saturation ammonium sulphate บริษัท Emparta ประเทศอินเดีย
7. Catechol บริษัท Sigma ประเทศสหรัฐอเมริกา
8. Folin-Ciocalteus reagent บริษัท Merck ประเทศเยอรมนี
9.  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  บริษัท Merck ประเทศเยอรมนี
10. Ethanol บริษัท RCI Labscan ประเทศไทย

### แผนการดำเนินงานวิจัยโดยรวม

การดำเนินงานวิจัยเพื่อศึกษาการพัฒนากระบวนการแปรรูปมะม่วงตัดแต่งพันธุ์น้ำดอกไม้โดยใช้พลาสติกมาเย็นแบ่งออกเป็น 2 ส่วน

1. ในการศึกษาส่วนแรกเป็นการออกแบบระบบและสร้างเครื่องพลาสติกมาเย็น รวมทั้งศึกษาผลของเวลาใช้พลาสติกมาเย็นต่อเอนไซม์โพลีฟีนอลออกซิเดส เพื่อหาเวลาการใช้พลาสติกมาเย็นที่เหมาะสมโดยพิจารณาจากค่ากิจกรรมเอนไซม์โพลีฟีนอลออกซิเดสที่หลงเหลือหลังผ่านกระบวนการพลาสติกมาเย็นน้อยที่สุดและค่าสีที่เปลี่ยนแปลงไปหลังการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส
2. ในการศึกษาส่วนที่ 2 เป็นการศึกษาการเปรียบเทียบผลของกระบวนการได้แก่ พลาสติกมาเย็น การลวก และการแช่กรดแอสคอร์บิก ต่อค่ากิจกรรมเอนไซม์โพลีฟีนอลออกซิเดสที่หลงเหลือ และสมบัติทางกายภาพและสมบัติทางเคมีของมะม่วงตัดแต่งที่เก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส โดยขั้นตอนการดำเนินการวิจัยแสดงดังภาพที่ 8





ภาพที่ 8 แผนภูมิการดำเนินการทดลองวิจัยโดยรวม



### 1. ออกแบบเครื่องพลาสมาเย็น

ทำการศึกษาข้อมูลเกี่ยวกับระบบและอุปกรณ์ของเครื่องพลาสมาเย็น จากนั้นทำการออกแบบเครื่องพลาสมาเย็นโดยใช้โปรแกรม SolidWorks (2020) ในการเขียนแบบและทำการสร้างเครื่อง

### 2. ศึกษาเวลาที่เหมาะสมในการใช้พลาสมาเย็นเพื่อยับยั้งกิจกรรมเอนไซม์โพลีฟีนอลออกซิเดส

นำมะม่วงพันธุ์น้ำดอกไม้สุก จากตลาดเมืองใหม่ อำเภอเมือง จังหวัดเชียงใหม่ ที่มีค่าปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ทั้งหมดให้อยู่ในช่วง 20-22 องศาบริกซ์ (Saritna, 2018) และค่าสีของมะม่วง โดยมีค่า  $L^*$  ในช่วง 56.00-58.00 ค่า  $a^*$  อยู่ในช่วง -0.60-1.00 และค่า  $b^*$  อยู่ในช่วง 51-53 มาล้างด้วยน้ำสะอาด ทำการปอกเปลือกและหั่นขนาด 1.5x1.5x1.5 ซม.

### 3. การศึกษาเวลาที่เหมาะสมในการใช้พลาสมาเย็น

นำตัวอย่างที่เตรียมไว้สัมผัสพลาสมาเย็นที่เวลา 3 4 และ 5 นาที แล้วนำไปวัดกิจกรรมเอนไซม์โพลีฟีนอลออกซิเดส จากนั้นเก็บรักษาตัวอย่างจำนวน 50 กรัม ไว้ในกล่องโพลีเอทิลีน ขนาด 9.5x9.5x8.5 เซนติเมตร ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส และทำการวัดค่าสีและค่าดัชนีความเข้มของน้ำตาลในทุกชั่วโมง

### 4. การศึกษาการเปรียบเทียบผลของกระบวนการ

นำตัวอย่างที่เตรียมไว้มาผ่านกระบวนการ ได้แก่ พลาสมาเย็น การลวก และการแช่กรดแอสคอร์บิก โดยมีรายละเอียดของกระบวนการต่างๆ ดังนี้

#### 4.1 กระบวนการพลาสมาเย็น

นำตัวอย่างสัมผัสพลาสมาเย็นโดยใช้เวลาที่ได้จากผลการศึกษาในข้อที่ 3

#### 4.2 การลวก

นำตัวอย่างลวกในน้ำร้อนโดยใช้เครื่องควบคุมอุณหภูมิ อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 นาที โดยมีอัตราส่วนระหว่างตัวอย่างกับปริมาตรน้ำเท่ากับ 1:5 (วรรณรัตน์และคณะ, 2554) จากนั้นนำตัวอย่างแช่น้ำเย็นอุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 นาทีและทำการสะเด็ดน้ำออกโดยใช้ตะแกรง

#### 4.3 การแช่กรดแอสคอร์บิก

นำตัวอย่างแช่ในสารละลายแอสคอร์บิกที่ความเข้มข้นร้อยละ 0.5 โดยมวลต่อปริมาตร เป็นเวลา 3.5 นาที (พินดาและมยุรี, 2558) โดยมีอัตราส่วนระหว่างตัวอย่างกับปริมาตรน้ำเท่ากับ 1:5

เมื่อตัวอย่างผ่านกระบวนการต่างๆ แล้ว ทำการวัดค่านำไปวัดกิจกรรมเอนไซม์โพลีฟีนอลออกซิเดส จากนั้นนำตัวอย่างจำนวน 50 กรัม เก็บไว้ในกล่องโพลีเอทิลีน ขนาด 9.5×9.5×8.5 เซนติเมตร ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส และทำการวัดสมบัติทางกายภาพได้แก่ ค่าสีและค่าความแน่นเนื้อ และสมบัติทางเคมีได้แก่ ปริมาณโปรตีน สารประกอบโพลีฟีนอล และวิตามินซี ทุกชั่วโมง

#### 5. การวิเคราะห์กิจกรรมเอนไซม์โพลีฟีนอลออกซิเดส

นำตัวอย่าง จำนวน 200 กรัม มาปั่นรวมกับสารละลาย phosphate buffer pH 7.0 ความเข้มข้น 0.2 M ปริมาณ 200 มิลลิลิตร ด้วยเครื่องปั่น (Warning Commercial Laboratory Blender รุ่น BE-12) นาน 25 วินาที นำไปหมุนเหวี่ยง ใน refrigerated centrifuge ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส ที่ความเร็ว 8,000 รอบ/นาที นาน 10 นาที นำส่วนใสมาตกตะกอนโปรตีนด้วยร้อยละ 80 saturation ammonium sulphate ที่อุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียส จากนั้นนำไปหมุนเหวี่ยงใน refrigerated centrifuge ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส ที่ความเร็ว 8,000 รอบ/นาที นาน 10 นาที นำตะกอนที่ได้มาละลายด้วยสารละลาย phosphate buffer pH 7.0 ความเข้มข้น 0.2 M ปริมาตร 4 มิลลิลิตร เก็บ crude enzyme ไว้ที่อุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียส แล้วนำ crude enzyme มา 200 ไมโครลิตร มาทำปฏิกิริยากับสารละลาย catechol ความเข้มข้น 20 mM ในสารละลาย phosphate buffer pH 7.0 ความเข้มข้น 0.2 M ปริมาตร 2.80 มิลลิลิตร ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส วัดการเปลี่ยนแปลงของค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 420 นาโนเมตร โดยใช้เครื่องวัดการดูดกลืนแสง แล้วคำนวณอัตราเร็วเริ่มต้นจากความชันของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสงกับเวลา คำนวณ PPO activity โดยให้เอนไซม์ 1 หน่วย (unit) เท่ากับการเปลี่ยนแปลงค่าการดูดกลืนแสง 0.001 หน่วยต่ออนาที (สมฤดี และธิดารัตน์, 2553) โดยทำการวัดจำนวน 3 ซ้ำ

#### 6. การวิเคราะห์คุณภาพสี

วิเคราะห์คุณภาพด้านสีของตัวอย่างโดยใช้เครื่องวัดสี (ยี่ห้อ Hunterlab รุ่น MiniScan XE plus) การวิเคราะห์สีจะวิเคราะห์ด้วยระบบ CIE โดยการวิเคราะห์วัดสีในเทอมของ ค่าความสว่าง ( $L^*$ ) ค่าสีแดง ( $+a^*$ ) และสีเขียว ( $-a^*$ ) และค่าสีเหลือง ( $+b^*$ ) และสีน้ำเงิน ( $-b^*$ ) และค่าความแตกต่างสีโดยรวม ( $\Delta E$ ) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 1

$$\Delta E = \sqrt{(L^* - L^*_0)^2 + (a^* - a^*_0)^2 + (b^* - b^*_0)^2} \quad (1)$$

เมื่อ  $L^*$ ,  $a^*$  และ  $b^*$  คือ ค่าพารามิเตอร์สีของมะม่วงที่ผ่านกระบวนการ  
 $L^*_0$ ,  $a^*_0$  และ  $b^*_0$  คือ ค่าพารามิเตอร์สีของมะม่วงสด

### 7. การวิเคราะห์ดัชนีความเข้มข้นน้ำตาล

นำตัวอย่าง 3 กรัม ปั่นผสมในเอทานอลความเข้มข้นร้อยละ 65 ปริมาตร 30 มิลลิลิตร แล้วกรองด้วยกระดาษ Whatman No.1 ที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นนำไปวัดค่าดูดกลืนแสงที่ 420 นาโนเมตร และนำค่าการดูดกลืนของแสง (Absorbance) ไปคำนวณดัชนีความเข้มข้นน้ำตาลโดยสมการที่ 3

$$\text{ดัชนีความเข้มข้นน้ำตาล} = \frac{\Delta OD_{420}}{100 \text{ gFW}} \quad (3)$$

เมื่อ  $\Delta OD_{420}$  คือ ช่วงอัตราการเปลี่ยนแปลงของค่าการดูดกลืนของแสงเมื่อเทียบกับมะม่วงสด

### 8. การวิเคราะห์ความแน่นเนื้อ

นำชิ้นตัวอย่างวัดความแน่นเนื้อด้วยเครื่องวิเคราะห์คุณลักษณะเนื้อสัมผัสอาหารที่มีโหลดเซลล์ 20 กิโลกรัมและหัวแบนทรงกระบอกขนาด 50 มม. (P50) วัดความแน่นเนื้อที่ความเครียดร้อยละ 50 และอัตราการบีบอัด 1 มม.ต่อวินาที (Sirijariyawat et al., 2012)

### 9. การวิเคราะห์ปริมาณโปรตีน

วิธีวิเคราะห์ปริมาณโปรตีนด้วยวิธี Bradford assay ตามวิธีที่ดัดแปลงจากวิธีการของ (Ninfa et al., 1998) โดยนำตัวอย่าง 1 กรัม ผสมกับน้ำกลั่น 100 มิลลิลิตร นำไปกวนผสมเป็นเวลา 60 นาที แล้วจึงนำไปปั่นเหวี่ยงแยกตะกอนด้วยเครื่องหมุนเหวี่ยง (ยี่ห้อ Gemmy รุ่น PLC-012E) ที่ 4,000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 20 นาที แล้วนำส่วนใสไปวิเคราะห์ปริมาณโปรตีน จากนั้นเตรียม Reagent blank โดยใช้น้ำกลั่นแทนตัวอย่างหรือสารละลายมาตรฐาน ปิดตัวอย่างที่เจือจางแล้ว หรือสารละลายมาตรฐาน 180 ไมโครลิตร ลงในหลอดทดลอง ที่มี Bradford reagent อยู่ 2,820 ไมโครลิตร ผสมให้เข้ากันตั้งทิ้งไว้ให้ปฏิกิริยาเกิดสมบูรณ์เป็นอย่างน้อย 5 นาที แต่ไม่ควรเกิน 1

ชั่วโมง นำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงโดยใช้เครื่องวัดการดูดกลืนแสง (ยี่ห้อ Thermo scientific รุ่น Genesys30) ที่ความยาวคลื่น 595 นาโนเมตร คำนวณค่าปริมาณของโปรตีนรวมทั้งหมดจากกราฟมาตรฐานระหว่างค่าการดูดกลืนแสงกับความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานโปรตีน (BSA) รายงานผลเป็นมิลลิกรัมต่อกรัม (mg/g) (ณัฐมล จินดาพรรณ, 2556)

#### 10. การวิเคราะห์ปริมาณวิตามินซี

นำตัวอย่างไปปั่นละเอียดแล้วชั่งน้ำหนัก 50 กรัม เติม  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$  ความเข้มข้นร้อยละ 0.04 ปริมาตร 250 มิลลิลิตร จากนั้นนำไปปั่นเหวี่ยงด้วยเครื่องปั่นเหวี่ยง ดูดเอาเฉพาะสารละลายใส่ชั้นบน มากรองด้วยกระดาษกรอง Whatman No.1 จากนั้นนำสารละลายตัวอย่างที่กรองได้ไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 254 นาโนเมตร ด้วยเครื่องวัดการดูดกลืนแสง (ยี่ห้อ Thermo scientific รุ่น Genesys30) และวิเคราะห์ค่าปริมาณวิตามินซีโดยคำนวณจากกราฟมาตรฐาน โดยเตรียมสารละลายกรดแอสคอร์บิกเข้มข้น 5-50  $\mu\text{M}$  ในตัวทำละลาย  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$  ความเข้มข้นร้อยละ 0.04

#### 11. การวิเคราะห์ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด

การตรวจสอบปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด (total phenolics) โดยวิธี Folin-Ciocalteus โดยดัดแปลงวิธีของ (Polikovskiy, 2016) โดยนำตัวอย่าง 1 กรัม ผสมกับน้ำกลั่น 100 มิลลิลิตร แล้วบีบตัวอย่าง 0.1 มิลลิลิตร จากนั้นเติมสารละลายโซเดียมคาร์บอเนตร้อยละ 2 (w/v) 2 มิลลิลิตร ผสมกับสารมาตรฐาน Folin-Ciocalteus reagent 0.1 มิลลิลิตร ใส่หลอดทดลองแต่ละหลอด ผสมให้เข้ากันแล้วตั้งทิ้งไว้ 30 นาที นำสารละลายที่ได้ไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ 750 นาโนเมตร จากนั้นนำไปคำนวณหาปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดเทียบกับกราฟมาตรฐานกรดกลูคิก รายงานผลเป็นมิลลิกรัม<sub>GAE</sub>ต่อกรัมตัวอย่างสด

#### 12. การวัดพลังงานสิ้นเปลือง

การวิเคราะห์ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ เป็นการวิเคราะห์อัตราส่วนระหว่างปริมาณพลังงานที่ใช้ในการกระบวนการ ดัดแปลงตามวิธีการของ (Palamutcu, 2015) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 5 โดยพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในกระบวนการจะวัดจากเครื่องวัดกำลังไฟฟ้า

$$SEC = \frac{E_t}{C_p \cdot m} \quad (2)$$

เมื่อ SEC คือ พลังงานจำเพาะที่ใช้ในกระบวนการ (กิโลวัตต์-ชั่วโมงต่อกิโลกรัม)

$E_t$  คือ พลังงานทั้งหมดที่ใช้ในกระบวนการ (กิโลวัตต์-ชั่วโมง)

$C_p$  คือ กิจกรรมเอนไซม์ที่ลดลงในตัวอย่าง (หน่วยต่อกิโลกรัม)

$m$  คือ น้ำหนักของมะม่วง (กิโลกรัม)

### การวิเคราะห์ทางสถิติ

ผลการทดลองที่ได้จะนำมาวิเคราะห์โดยอาศัยหลักวิชาการทางสถิติของคุณภาพทางกายภาพและทางเคมี โดยใช้การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำเร็จรูป SPSS (Statistical Package for the Social Sciences) และเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยระหว่างชุดการทดลองโดย วิธี Duncan's New Multiple Range Test (DMRT) ซึ่งพิจารณาค่าที่ความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ( $p < 0.05$ )

### สถานที่ดำเนินการวิจัย

ดำเนินการทดสอบที่ห้องปฏิบัติการ (E215) อาคารเรียนรวมสาขาวิศวกรรมอาหาร (สำหรับ นักศึกษาปริญญาโทและปริญญาเอก สาขาวิศวกรรมอาหาร) คณะวิศวกรรมและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้

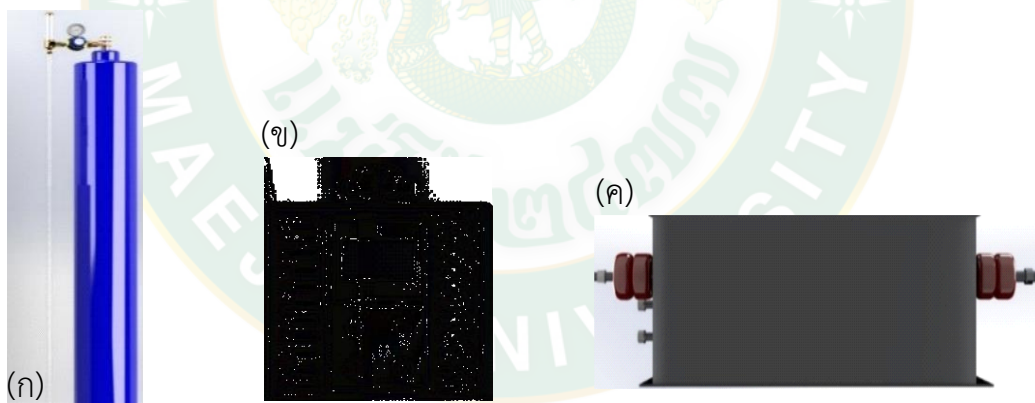
## บทที่ 4

### ผลการทดลองและวิจารณ์

#### 1. ออกแบบเครื่องพลาสมาเย็น

การออกแบบเครื่องพลาสมาเย็นเพื่อใช้สำหรับยับยั้งกิจกรรมของเอนไซม์โพลีฟีนอลออกซิเดส นี้ได้ใช้ก๊าซอาร์กอนเป็นตัวกลางในการทำให้เกิดอิเล็กตรอนอิสระเพื่อเป็นอนุภาคของพลาสมาเย็น เนื่องจากเป็นธาตุที่มีโครงสร้างอะตอมที่มีอิเล็กตรอนวงนอกมากที่สุดคือ 8 ตัวและไม่ติดไฟ โดยเครื่องนี้มีอุปกรณ์หลักทั้งหมด 4 ส่วน ดังนี้

1. ถังก๊าซอาร์กอนขนาด 6 คิว (ภาพที่ 9 ก)
2. หม้อแปลงปรับแรงดันไฟฟ้า ใช้สำหรับปรับแรงดันไฟฟ้าขาเข้าของหม้อแปลงไฟฟ้านีออน (ภาพที่ 9 ข)
3. หม้อแปลงไฟฟ้านีออนขนาด 12.5 กิโลโวลต์ ใช้สำหรับเพิ่มแรงดันไฟฟ้า (ภาพที่ 9 ค)

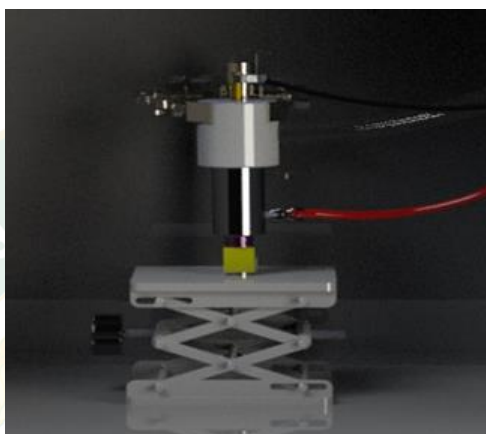


ภาพที่ 9 (ก) แก๊สอาร์กอน (ข) หม้อแปลงปรับแรงดันไฟฟ้า และ (ค) หม้อแปลงไฟฟ้านีออน 12.5 kV

4. ส่วนหัวพลาสมาเจ็ท (ภาพที่ 10) ซึ่งประกอบไปด้วย

- ตัวบอดี้ซึ่งเป็นวัสดุพลาสติกวิศวกรรมมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 ซม. ยาว 4 ซม. ทำหน้าที่เป็นโครงสร้างสำหรับต่ออิเล็กโทรดทั้ง 2 ตัว และสายแก๊ส

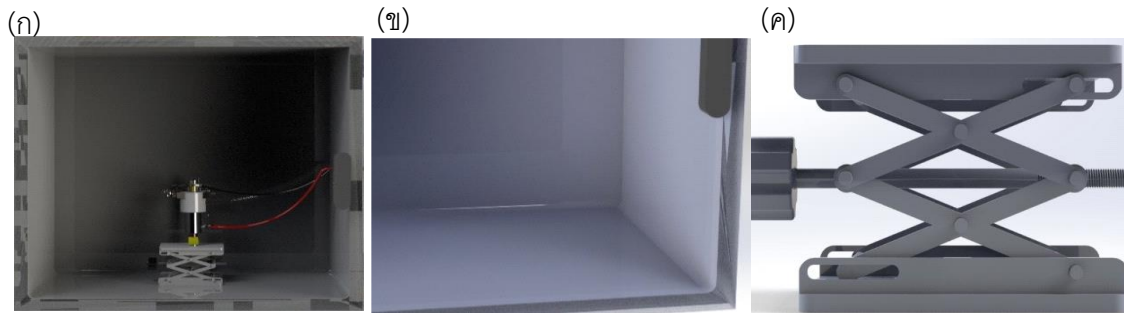
- อิเล็กโทรดทำหน้าที่สร้างสนามไฟฟ้า โดยใช้วัสดุที่สามารถนำไฟฟ้า 2 ตัว ได้แก่ ทองแดงซึ่งทำหน้าที่เป็นแอโนดและอะลูมิเนียมเป็นแคโทด โดยตัวทองแดงมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.6 ซม. ความยาว 10 ซม. และอะลูมิเนียมมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 2.6 ซม. ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 2 ซม. มีความยาว 4 ซม.



ภาพที่ 10 พลาสมาเจ็ท

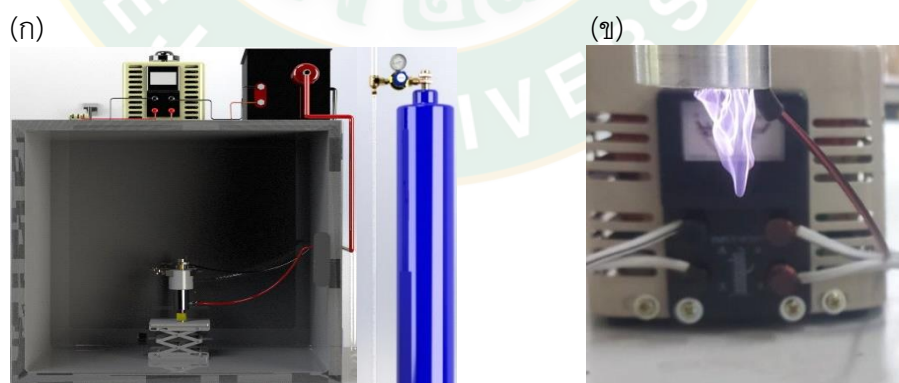
นอกจากนี้เครื่องพลาสมาเขี่ยยังมีส่วนประกอบอื่นซึ่งเป็นส่วนของโครงสร้าง โดยแสดงใน ภาพที่ 3 ดังนี้

1. โครงตั้งเครื่องพลาสมาขนาด 50x50x50 ซม. วัสดุที่ใช้เป็นสแตนเลส sus 304 ซึ่งมีความหนา 2 ซม. (ภาพที่ 11 ก) และมุมภายในตู้ ได้มีการออกแบบให้มีลักษณะโค้งเพื่อให้ง่ายต่อการทำความสะอาด (ภาพที่ 11 ข)
2. ประตูล็อกตู้ของเครื่องพลาสมา ขนาด 50x50x2 ซม.
3. ฐานรองตัวอย่างถูกออกแบบให้สามารถปรับระดับความสูงได้โดยการหมุนวงล้อตรงกลาง โดยมีขนาดของแผ่นที่วางตัวอย่าง 15x15 ซม. และวัสดุที่ใช้เป็นสแตนเลส sus 304 (ภาพที่ 11 ค)



ภาพที่ 11 (ก) ตัวตู้ภายนอก (ข) มุมขอบภายในตู้ และ (ค) ฐานรองตัวอย่าง

การประกอบเครื่องพลาสมาเย็น ถึงก๊าซอาร์กอนจะถูกต่อเข้ากับส่วนบอดี้ของพลาสมาเจ็ทด้วยสายก๊าซและส่วนของหม้อแปลงแรงดันไฟฟ้าขนาด 12.5 กิโลโวลต์ จากหม้อแปลงไฟนีออน (รับไฟฟ้ามาจากหม้อแปลงปรับแรงดันไฟฟ้า) ต่อเข้ากับอิเล็กทรอนิกส์ทรงตองแดงและอะลูมิเนียมอย่างละชิ้นด้วยสายไฟฟ้า (ภาพที่ 12 ก)



ภาพที่ 12 (ก) อุปกรณ์และการติดตั้ง และ (ข) ลักษณะพลาสมาเย็น



การทำงานของเครื่องพลาสมาเริ่มจากการเปิดสวิตช์เพื่อให้กระแสไฟฟ้าจะไหลเข้าสู่หม้อแปลงปรับแรงดันไฟฟ้าเพื่อปรับขนาดแรงดันไฟฟ้าขาออกของหม้อแปลงปรับแรงดันไฟฟ้าให้อยู่ที่ 220 โวลต์ จากนั้นจ่ายไฟฟ้าเข้าสู่หม้อแปลงไฟฟ้านีออน ซึ่งจะเพิ่มแรงดันไฟฟ้าจาก 220 โวลต์ เป็น 12.5 กิโลโวลต์ ต่อสายไฟขาออกจากหม้อแปลงไฟฟ้านีออนไปยังแคโทดและแอโนด เมื่ออิเล็กโทรดทั้งสองตัวที่ได้รับกระแสไฟฟ้า จะทำให้เกิดสนามไฟฟ้าที่ระหว่างระยะห่างของอิเล็กโทรดทั้งสองตัว จากนั้นเปิดวาล์วแก๊สอาร์กอนที่อัตราการไหล 25 ลิตร/นาที่ ให้ไหลผ่านสนามไฟฟ้าที่อยู่ระหว่างอิเล็กโทรดทั้ง 2 ตัว การให้สนามไฟฟ้าปริมาณมากแก่ก๊าซอาร์กอนที่เป็นกลาง เมื่อพลังงานส่งผ่านไปยังอิเล็กตรอนอิสระมากพอ จะทำให้อิเล็กตรอนอิสระชนกับอะตอม และทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกจากอะตอม กระบวนการนี้เรียกว่ากระบวนการแตกตัวเป็นไอออน (ionization) ซึ่งจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว ทำให้จำนวนอิเล็กตรอนที่หลุดออกมาเพิ่มขึ้นอย่างมากซึ่งจะทำให้ก๊าซแตกตัวและกลายเป็นพลาสมาในที่สุด (ภาพที่ 12 ข)

## 2. การศึกษาเวลาที่เหมาะสมในการใช้พลาสมาเย็นเพื่อยับยั้งกิจกรรมของเอนไซม์โพลีฟีนอลออกซิเดส

ผลการศึกษาการใช้พลาสมาเย็นเพื่อยับยั้งกิจกรรมของเอนไซม์โพลีฟีนอลออกซิเดสในมะม่วง ตัดแต่งที่เวลา 3 4 และ 5 นาที ซึ่งแสดงในตารางที่ 1 พบว่า การใช้พลาสมาเย็นโดยมีก๊าซอาร์กอนเป็นตัวกลาง สามารถยับยั้งการทำงานของเอนไซม์โพลีฟีนอลออกซิเดสได้ เนื่องจากอนุภาคพลาสมาเข้าไปทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของเอนไซม์จึงส่งผลให้กิจกรรมของเอนไซม์โพลีฟีนอลออกซิเดสลดลง (Misra et.al., 2016; Surowsky et.al., 2013) โดยกิจกรรมของเอนไซม์นี้จะลดลงได้มากขึ้นเมื่อเวลาที่ใช้พลาสมาเย็นนานขึ้นจนถึงเมื่อเวลาการใช้พลาสมาที่ 4 นาที กิจกรรมของเอนไซม์นั้นมีค่าคงที่ ทั้งนี้อาจมีสาเหตุจากในช่วงแรกของการใช้พลาสมาเย็นนั้นเอนไซม์ที่อยู่บริเวณผิวหน้าของตัวอย่างจะถูกยับยั้งก่อน จากนั้นเมื่อเวลานานมากขึ้นอนุภาคพลาสมาที่สามารถทะลุผ่านเข้าไปในตัวอย่างไม่ยับยั้งกิจกรรมของเอนไซม์ที่อยู่ภายในจนกระทั่งกิจกรรมของเอนไซม์ถูกยับยั้งจนหมดหรือจนกว่าอนุภาคของพลาสมาไม่สามารถทะลุผ่านได้เข้าไปในชิ้นตัวอย่างได้อีก ดังนั้นกิจกรรมของเอนไซม์จึงลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงแรกและค่อยๆ คงที่เมื่อเวลานานขึ้น โดยผลการทดลองนี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Surowsky et.al. (2013) ที่ได้รายงานว่าการใช้พลาสมาเย็นในการยับยั้งกิจกรรมของเอนไซม์โพลีฟีนอลออกซิเดสใน *Agaricus bisporus* นั้นกิจกรรมของเอนไซม์จะลดลงอย่างรวดเร็วในจนเหลือร้อยละ 25 ใน 1 นาทีแรก จากนั้นกิจกรรมของเอนไซม์จะลดลงอย่างช้าๆ

จนถึงเวลา 3 นาที แล้วจากนั้นจะมีค่าคงที่ โดยสามารถลดกิจกรรมของเอนไซม์โพลีฟีนอลออกซิเดสลงเหลือร้อยละ 18

**ตารางที่ 1** กิจกรรมเอนไซม์โพลีฟีนอลออกซิเดสและร้อยละกิจกรรมเอนไซม์โพลีฟีนอลออกซิเดสที่หลงเหลือหลังจากผ่านกระบวนการพลาสมาเย็นที่เวลาต่างๆ

ตัวอย่าง	กิจกรรมเอนไซม์โพลีฟีนอลออกซิเดส (หน่วย/นาที)	ร้อยละกิจกรรมเอนไซม์ที่ยังหลงเหลือ
มะม่วงสด	273.33±46.11 <sup>a</sup>	-
มะม่วงพลาสมา 3 นาที	95.82±2.60 <sup>b</sup>	35.05±9.50 <sup>a</sup>
มะม่วงพลาสมา 4 นาที	40.80±1.12 <sup>c</sup>	14.93±1.41 <sup>b</sup>
มะม่วงพลาสมา 5 นาที	56.29±1.98 <sup>c</sup>	20.59±2.04 <sup>b</sup>

หมายเหตุ อักษรภาษาอังกฤษที่ต่างกันตามแนวตั้ง หมายถึง ค่าเฉลี่ยมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ )

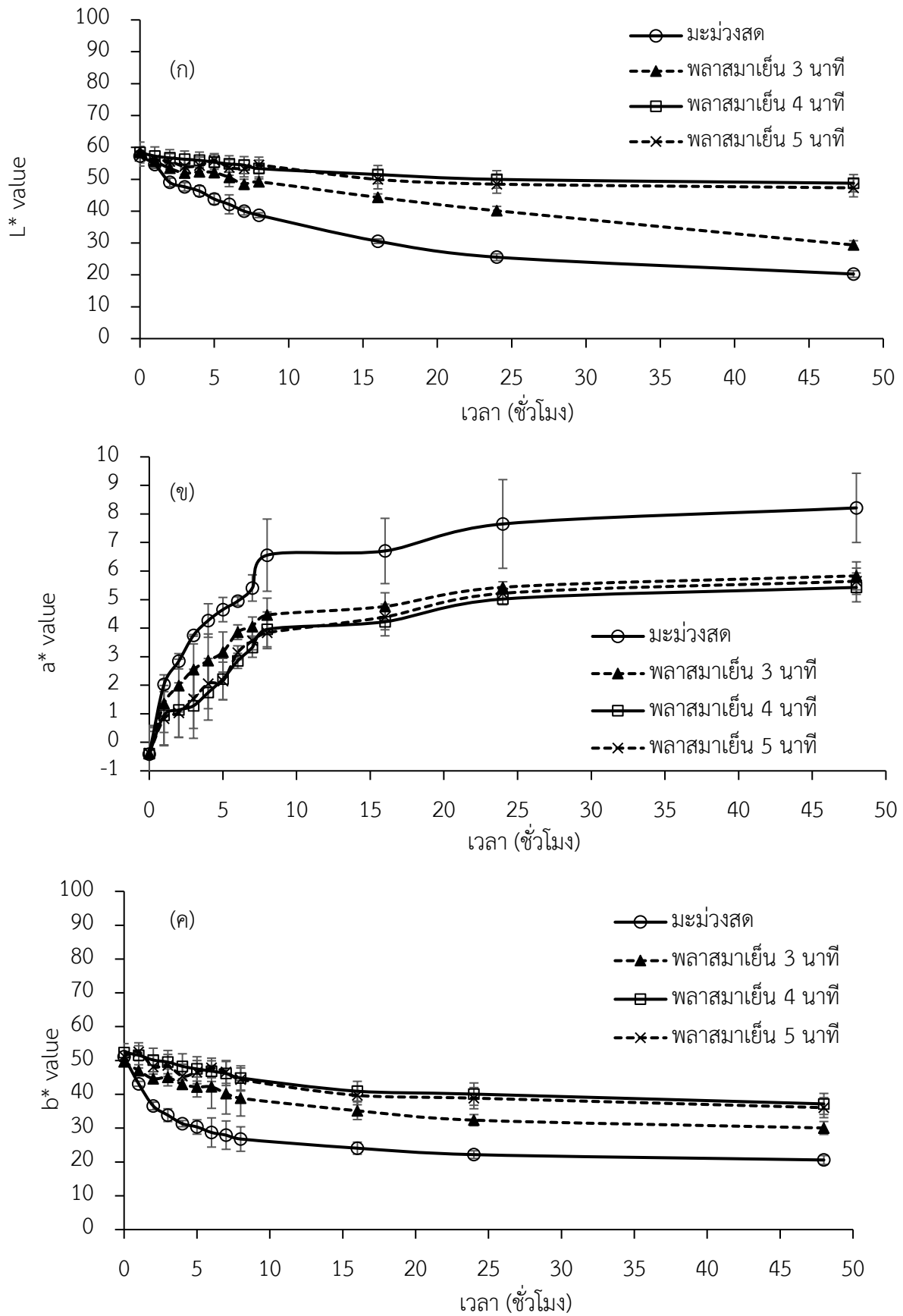
เมื่อเก็บตัวอย่างมะม่วงตัดแต่งที่ไม่ผ่านพลาสมาเย็นและผ่านพลาสมาเย็นที่เวลาต่างๆ ไว้ในกล่องพลาสติกชนิดโพลีเอทิลีน ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส ผลการศึกษาค่าสี ซึ่งแสดงค่าในเทอมของ  $L^*$   $a^*$  และ  $b^*$  ของมะม่วงตัดแต่งซึ่งแสดงในภาพที่ 13 พบว่า ค่า  $L^*$  ซึ่งเป็นค่าความสว่างและค่า  $+b^*$  ซึ่งเป็นค่าความเป็นสีเหลืองของทุกตัวอย่างลดลงเมื่อเวลาการเก็บรักษานานขึ้น โดยตัวอย่างที่ไม่ผ่านพลาสมาเย็นมีการลดลงมากที่สุดและถัดมาเป็นตัวอย่างที่ผ่านพลาสมาเย็นเป็นเวลา 3 นาที ในขณะที่ตัวอย่างที่ผ่านพลาสมาเย็นเป็นเวลา 4 และ 5 นาที มีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ แต่อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาค่า  $a^*$  ซึ่งจะแสดงค่าความเป็นสีแดงเมื่อมีค่าเป็นบวกและเป็นสีเขียวเมื่อมีค่าเป็นลบนั้นพบว่า ค่า  $a^*$  ของทุกตัวอย่างในตอนเริ่มต้นเป็นค่าติดลบจากนั้นเมื่อเวลาการเก็บรักษาเพิ่มมากขึ้น ค่า  $a^*$  จะเพิ่มขึ้นจนมีค่าเป็นบวก ซึ่งแสดงให้เห็นว่าในเวลาเริ่มต้นตัวอย่างมะม่วงมีค่าความเป็นสีเขียวแต่เมื่อเวลาการเก็บรักษานานขึ้นค่าความเป็นสีเขียวลดลงและตัวอย่างแสดงค่าความเป็นสีแดงเพิ่มมากขึ้น โดยตัวอย่างที่ไม่ผ่านพลาสมาเย็นมีความเป็นสีแดงเพิ่มขึ้นมากที่สุดและถัดมาเป็นตัวอย่างที่ผ่านพลาสมาเย็นเป็นเวลา 3 นาที ในขณะที่ตัวอย่างที่ผ่านพลาสมาเย็นเป็นเวลา 4 และ 5 นาที มีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ทั้งนี้มีสาเหตุเนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาลจากกิจกรรมของเอนไซม์โพลีฟีนอลออกซิเดสที่ส่งผลให้ค่าสีของตัวอย่างมีสีน้ำตาล ดังนั้นค่าความสว่างและความเป็นสีเหลืองจึงลดลงและค่าความเป็นสีแดงเพิ่มขึ้น ซึ่งผลการทดลองนี้สอดคล้องกับรายงานผลการศึกษาของ Pankaj et al. (2018) ที่รายงานว่า การใช้พลาสมาเย็นสามารถยับยั้งกิจกรรมของเอนไซม์และลดการเกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาลในแอปเปิลตัดแต่งและเมลอนตัดแต่ง

ตารางที่ 2 ค่าดัชนีความเข้มข้นน้ำตาลในมะม่วงน้ำดอกไม้ก่อนและหลังจากสัมผัสพลาสติกใสในแต่ละเวลา

เวลา (ชั่วโมง)	ดัชนีความเข้มข้นน้ำตาล ( $\Delta OD_{420}/100g$ FW)			
	มะม่วงสด	พลาสติกใส 3 นาที	พลาสติกใส 4 นาที	พลาสติกใส 5 นาที
0	-	-	-	-
1	1.20±0.08 <sup>a</sup>	1.23±0.33 <sup>a</sup>	1.30±0.08 <sup>a</sup>	1.50±0.62 <sup>a</sup>
2	2.03±0.17 <sup>a</sup>	2.50±0.51 <sup>a</sup>	2.40±0.50 <sup>a</sup>	2.50±0.24 <sup>a</sup>
3	2.77±0.21 <sup>a</sup>	3.50±0.08 <sup>a</sup>	3.37±0.49 <sup>a</sup>	3.57±0.40 <sup>a</sup>
4	3.80±0.36 <sup>a</sup>	4.80±0.16 <sup>a</sup>	4.20±0.16 <sup>a</sup>	4.80±0.70 <sup>a</sup>
5	5.10±0.54 <sup>a</sup>	5.73±0.12 <sup>a</sup>	5.33±0.21 <sup>a</sup>	5.60±0.92 <sup>a</sup>
6	6.57±0.45 <sup>a</sup>	6.80±0.57 <sup>a</sup>	6.33±0.17 <sup>a</sup>	6.27±0.61 <sup>a</sup>
7	10.00±0.83 <sup>a</sup>	7.50±0.65 <sup>b</sup>	6.90±0.37 <sup>b</sup>	7.00±0.83 <sup>b</sup>
8	12.70±0.29 <sup>a</sup>	8.70±0.78 <sup>b</sup>	7.77±0.45 <sup>b</sup>	8.10±0.54 <sup>b</sup>
16	17.80±0.92 <sup>a</sup>	10.93±0.90 <sup>ab</sup>	8.53±0.54 <sup>c</sup>	9.60±0.50 <sup>bc</sup>
24	23.23±0.17 <sup>a</sup>	12.53±0.90 <sup>b</sup>	9.47±0.71 <sup>c</sup>	9.63±0.40 <sup>c</sup>
48	34.60±0.57 <sup>a</sup>	17.40±0.96 <sup>b</sup>	11.10±0.65 <sup>c</sup>	12.67±0.46 <sup>c</sup>

หมายเหตุ อักษรภาษาอังกฤษที่ต่างกันตามแนวนอน หมายถึง ค่าเฉลี่ยมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ )

ตารางที่ 2 แสดงค่าดัชนีความเข้มข้นน้ำตาลของตัวอย่างที่เวลาการเก็บรักษาต่างๆ ซึ่งผลการศึกษาพบว่า เมื่อเวลาการเก็บรักษาเพิ่มขึ้นค่าดัชนีความเข้มข้นน้ำตาลก็เพิ่มสูงขึ้น โดยตัวอย่างที่ไม่ผ่านพลาสติกใสการเพิ่มขึ้นของค่าดัชนีความเข้มข้นน้ำตาลมากที่สุด ในขณะที่ตัวอย่างที่ผ่านพลาสติกใสเป็นเวลา 4 และ 5 นาทีมีการเปลี่ยนแปลงดัชนีความเข้มข้นน้ำตาลน้อยที่สุด นอกจากนี้ยังพบว่าค่าดัชนีความเข้มข้นน้ำตาลของตัวอย่างที่ไม่ผ่านพลาสติกใสมีค่าแตกต่างจากตัวอย่างที่ผ่านพลาสติกใสอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อเก็บรักษาไว้เป็นเวลา 8 ชั่วโมง และตัวอย่างที่ผ่านพลาสติกใสเป็นเวลา 3 นาทีมีค่าดัชนีความเข้มข้นน้ำตาลแตกต่างจากตัวอย่างที่ผ่านพลาสติกใสเป็นเวลา 4 และ 5 นาทีอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ เมื่อเก็บรักษาไว้ 24 ชั่วโมง










































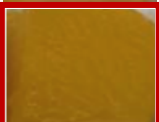
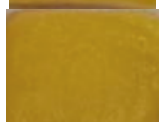



ภาพที่ 13 การเปลี่ยนแปลงของค่าสี (ก)  $L^*$  (ข)  $a^*$  และ (ค)  $b^*$  ของตัวอย่างก่อนและหลังสัมผัส

## พลาสมาเย็น

เมื่อพิจารณาลักษณะปรากฏของมะม่วงตัดแต่งที่ไม่ผ่านและผ่านพลาสมาเย็นเวลาต่างๆ ในระหว่างการเก็บรักษา ซึ่งแสดงไว้ในตารางที่ 3 จะเห็นได้ว่ามะม่วงตัดแต่งที่ไม่ผ่านพลาสมาเย็นปรากฏสีน้ำตาลเมื่อเก็บรักษาไว้ที่เวลา 8 ชั่วโมง ในขณะที่มะม่วงตัดแต่งที่ผ่านพลาสมาเย็นเป็นเวลา 3 นาทีจะปรากฏสีน้ำตาลเมื่อเวลา 24 ชั่วโมง ส่วนมะม่วงตัดแต่งที่ผ่านพลาสมาเย็นเป็นเวลา 4 และ 5 นาที จะปรากฏสีน้ำตาลเมื่อเวลา 48 ชั่วโมง นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบเวลาที่ตัวอย่างปรากฏสีน้ำตาลกับค่าสีที่ได้จากภาพที่ 13 พบว่าตัวอย่างที่ไม่ผ่านพลาสมาเย็นที่เวลา 8 ชั่วโมง มีค่าสี  $L^*$   $a^*$   $b^*$  และดัชนีความเข้มสีน้ำตาล เท่ากับ  $39.27 \pm 0.28$   $6.49 \pm 0.37$   $26.76 \pm 0.30$  และ  $12.70 \pm 0.29$  ตามลำดับ ตัวอย่างผ่านพลาสมาเย็นเป็นเวลา 3 นาที ที่เวลา 24 ชั่วโมง มีค่าสี  $L^*$   $a^*$   $b^*$  และดัชนีความเข้มสีน้ำตาล เท่ากับ  $40.13 \pm 0.93$   $5.69 \pm 0.22$   $36.71 \pm 0.90$  และ  $12.53 \pm 0.90$  ตามลำดับ และตัวอย่างที่ผ่านพลาสมาเย็นเป็นเวลา 4 และ 5 นาทีที่เวลา 48 ชั่วโมงมีค่าสี  $L^*$   $a^*$   $b^*$  และดัชนีความเข้มสีน้ำตาล เท่ากับ  $47.76 \pm 1.36$   $5.43 \pm 0.41$   $38.83 \pm 0.63$  และ  $11.10 \pm 0.65$  และ  $45.79 \pm 1.55$   $5.48 \pm 0.44$   $37.62 \pm 0.92$  และ  $12.67 \pm 0.46$  ตามลำดับ ดังนั้นค่าสี  $L^*$   $a^*$   $b^*$  และดัชนีความเข้มสีน้ำตาล ที่วัดได้นี้สามารถใช้เป็นค่าสีที่บ่งบอกถึงอายุการเก็บรักษาหรือเวลาการเก็บรักษาของมะม่วงตัดแต่งได้ โดยมะม่วงตัดแต่งจะหมดอายุการเก็บเก็บรักษาหากมีค่า  $L^*$  อยู่ในช่วง 40-47 ค่า  $a^*$  อยู่ในช่วง 5.4-5.7 ค่า  $b^*$  อยู่ในช่วง 28-39 และดัชนีความเข้มสีน้ำตาล อยู่ในช่วง 12.53-12.70

ตารางที่ 3 ลักษณะปรากฏของมะม่วงสดและตัวอย่างที่ผ่านพลาสติกเป็นเวลาต่างๆ ในระหว่างการเก็บรักษา

เวลาเก็บรักษา (ชั่วโมง)	การเปลี่ยนแปลงลักษณะปรากฏ			
	มะม่วงสด	พลาสติก 3 นาที	พลาสติก 4 นาที	พลาสติก 5 นาที
0				
1				
2				
3				
4				
5				
6				
7				
8				
16				
24				



### 3. การศึกษาและเปรียบเทียบผลของกระบวนการพลาสมาเย็น การลวก และการแช่กรดแอสคอร์บิก

#### 3.1 ค่ากิจกรรมของเอนไซม์โพลีฟีนอลออกซิเดส

ผลการศึกษาการใช้กระบวนการต่างๆ ได้แก่ การใช้พลาสมาเย็น การลวก การแช่กรดแอสคอร์บิก เพื่อยับยั้งกิจกรรมของเอนไซม์โพลีฟีนอลออกซิเดสในมะม่วงตัดแต่ง ซึ่งแสดงในตารางที่ 4 พบว่า การใช้พลาสมาเย็นสามารถลดกิจกรรมของเอนไซม์โพลีฟีนอลออกซิเดสลงเหลือน้อยที่สุดในขณะที่การลวกและการแช่กรดแอสคอร์บิกสามารถลดกิจกรรมของเอนไซม์โพลีฟีนอลออกซิเดสลงได้ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติทั้งนี้อาจมีสาเหตุเนื่องจากอนุภาคพลาสมาสามารถทะลุเข้าไปในเซลล์ของมะม่วงได้ลึกกว่า จึงส่งผลให้กิจกรรมของเอนไซม์โพลีฟีนอลออกซิเดสลดลงได้มากกว่า การลวกและการแช่กรดแอสคอร์บิก ถึงแม้ว่าการใช้ความร้อนสามารถยับยั้งการทำงานของเอนไซม์โพลีฟีนอลออกซิเดสได้โดยการทำให้โครงสร้างของโปรตีนเปลี่ยนแปลงไป แต่อย่างไรก็ตาม กิจกรรมของเอนไซม์ที่ลดลงนั้นขึ้นอยู่กับเวลาและความสามารถในการถ่ายเทความร้อนเข้าไปภายในวัสดุด้วย โดยวิจัยที่ผ่านมาของ Noreña and Rigon (2018) รายงานว่า การใช้น้ำร้อนลวกผลแบล็คเบอร์รี่ที่อุณหภูมิ 80 และ 90 องศาเซลเซียส สามารถลดกิจกรรมของเอนไซม์โพลีฟีนอลออกซิเดสลงเหลือร้อยละ 75.28 และ 59.18 เมื่อใช้เวลาลวก 6 นาที และ เหลือร้อยละ 72.46 และ 38.46 เมื่อใช้เวลาลวก 10 นาที นอกจากนี้งานวิจัยของ Sun et al. (2010) พบว่าการลวกหัวที่อุณหภูมิ 80 และ 90 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 4 นาที สามารถลดกิจกรรมของเอนไซม์เหลือร้อยละ 79.4 และ 61.8 นอกจากนี้การศึกษาหลายชิ้นยังเสนอว่าการยับยั้งการทำงานของเอนไซม์โดยการรักษาด้วยพลาสมาเย็นนั้นจะผลิต ROS (Reactive Oxygen Species) และ RNS (Reactive Nitrogen Species) ที่เกิดขึ้นจะผลกระทบต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างและการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของเอนไซม์ ( Misra et al., 2016 , Surowsky et al. , 2013 , Takai, 2012).

ในส่วนของการแช่ในกรดแอสคอร์บิกซึ่งสามารถลดกิจกรรมเอนไซม์โพลีฟีนอลออกซิเดสเหลือร้อยละ  $35.38 \pm 7.44$  เนื่องจากกรดแอสคอร์บิกสามารถลดค่าความเป็นกรด-ด่างของตัวอย่างต่ำลงจึงส่งผลต่อกิจกรรมของเอนไซม์โพลีฟีนอลออกซิเดสทำให้ทำงานได้ไม่เต็มที่ เนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาลนั้นมักจะเกิดในช่วงที่มีค่าความเป็นกรดเป็นด่างที่ประมาณ 6-7 (Lee et al., 2003) และอีกสาเหตุคือ กรดแอสคอร์บิก สามารถยับยั้งการทำงานของเอนไซม์โพลีฟีนอลออกซิเดส โดยทำหน้าที่

เป็น chelating agent ซึ่งจะรวมตัวกับไอออนโลหะของเอนไซม์โพลีฟีนอลออกซิเดส คือทองแดงที่บริเวณเร่งและเกิดการรีดิวซ์ cupric ion ( $\text{Cu}^{2+}$ ) ของเอนไซม์ใหม่เปลี่ยนเป็น cuprous ion ( $\text{Cu}^+$ ) ซึ่งเป็นการยับยั้งการทำงานของเอนไซม์โดยตรง (Marshall, 2000) จึงส่งผลให้กิจกรรมเอนไซม์ลดลง ซึ่งวิธีการนี้จะช่วยยับยั้งกิจกรรมเอนไซม์โพลีฟีนอลออกซิเดสโดยเฉพาะบริเวณที่ตัวอย่างสัมผัสกับสารละลายกรดแอสคอร์บิก จึงส่งผลให้ค่ากิจกรรมเอนไซม์โพลีฟีนอลออกซิเดสที่เหลือมีค่าสูงกว่าการใส่พลาสมาเย็น

**ตารางที่ 4** กิจกรรมเอนไซม์โพลีฟีนอลออกซิเดสและร้อยละกิจกรรมเอนไซม์โพลีฟีนอลออกซิเดสที่เหลือหลังจากผ่านกระบวนการต่างๆ

ตัวอย่าง	กิจกรรมเอนไซม์โพลีฟีนอลออกซิเดส (หน่วย/นาที)	ร้อยละกิจกรรมเอนไซม์ที่ยังหลงเหลือ
มะม่วงสด	273.33±46.11 <sup>a</sup>	-
พลาสมาเย็น	40.80±1.12a	14.93±1.41 <sup>a</sup>
ลวก	87.00±13.82 <sup>b</sup>	31.82±2.72 <sup>b</sup>
แช่ในกรดแอสคอร์บิก	94±6.28 <sup>b</sup>	35.38±7.44 <sup>b</sup>

หมายเหตุ อักษรภาษาอังกฤษที่ต่างกันตามแนวตั้ง หมายถึง ค่าเฉลี่ยมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ )

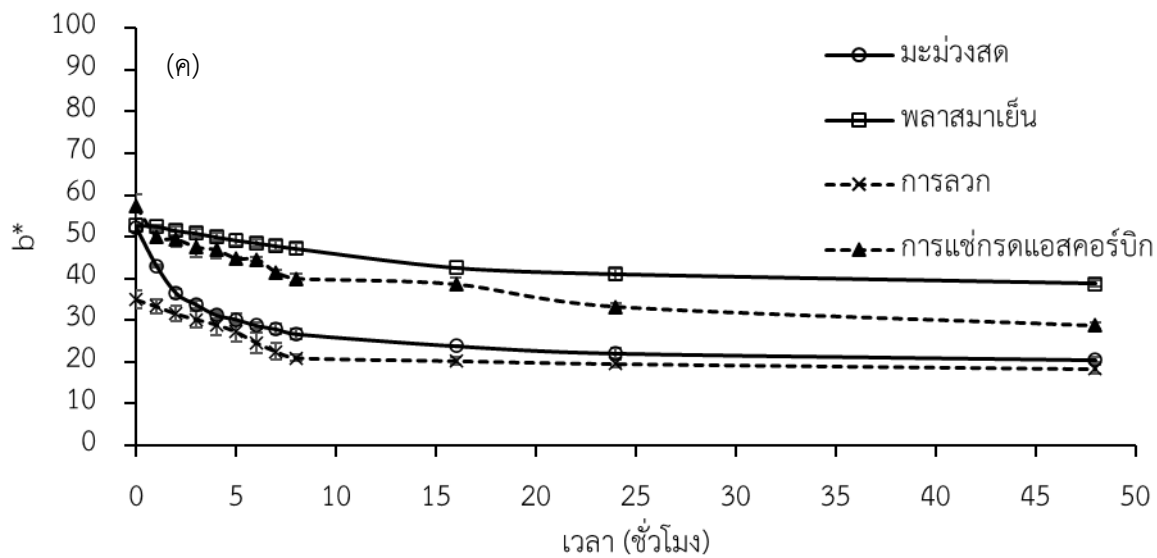
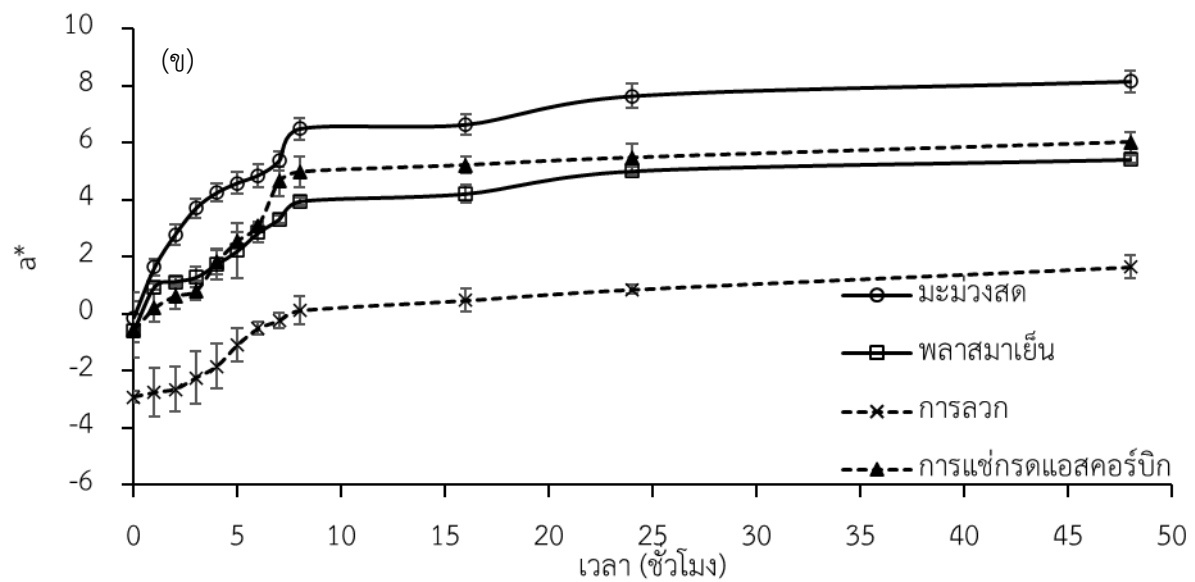
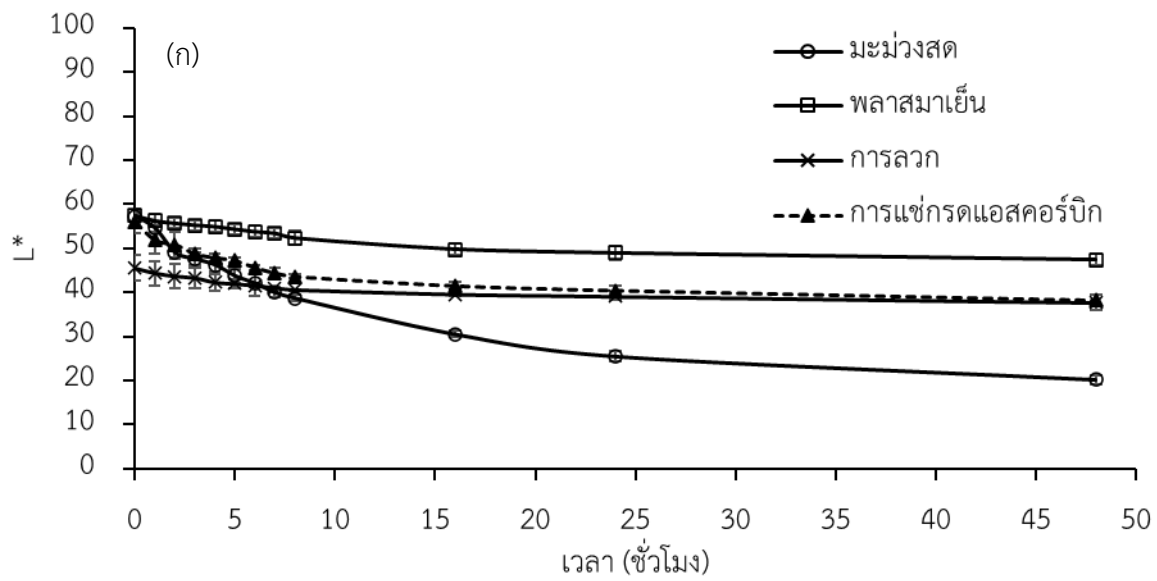
### 3.2 ค่าสี

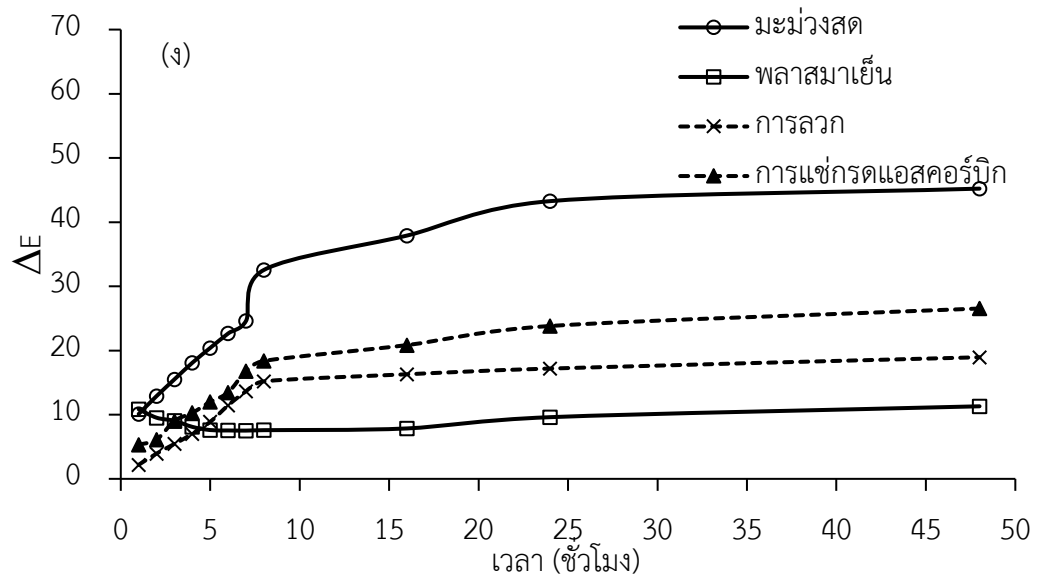
เมื่อพิจารณาค่าสีของตัวอย่างซึ่งแสดงค่าในเทอมของ  $L^*$ ,  $a^*$  และ  $b^*$  โดยแสดงไว้ในภาพที่ 14 จะเห็นได้ว่าในช่วงแรกของการเก็บรักษา ค่า  $L^*$  ซึ่งเป็นค่าความสว่างและ ค่า  $+b^*$  ซึ่งเป็นค่าความเป็นสีเหลืองของทุกตัวอย่างลดลงเมื่อเวลาการเก็บรักษานานขึ้นหลังจากนั้นจะมีค่าคงที่ โดยตัวอย่างมะม่วงสดจะมีการลดลงมากที่สุด และการใช้พลาสมาเย็นส่งผลให้มีค่าลดลงของค่า  $L^*$  และ  $b^*$  น้อยที่สุด ในขณะที่ค่า  $a^*$  ทุกตัวอย่างในตอนเริ่มต้นเป็นค่าติดลบ จากนั้น ค่า  $a^*$  จะเพิ่มขึ้นจนมีค่าเป็นบวกเมื่อเวลาการเก็บรักษาเพิ่มมากขึ้น ซึ่งแสดงให้เห็นว่าในเวลาเริ่มต้นตัวอย่างมะม่วงมีค่าความเป็นสีเขียวแต่เมื่อเวลาการเก็บรักษานานขึ้นค่าความเป็นสีเขียวลดลงและตัวอย่างแสดงค่าความเป็นสีแดงเพิ่มมากขึ้น โดยตัวอย่างมะม่วงสดจะมีการเพิ่มขึ้นมากที่สุด และการลวกนั้นมีการเพิ่มขึ้นของ  $a^*$  น้อยที่สุด



นอกจากนี้ผลการศึกษาจากภาพที่ 14 ซึ่งแสดงค่าการเปลี่ยนแปลงค่าความแตกต่างของสีของตัวอย่างเมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างในวันเริ่มต้นของการเก็บรักษา ( $\Delta E$ ) พบว่า ตัวอย่างที่ผ่านกระบวนการพลาสมาเย็นมีการเปลี่ยนแปลงน้อยที่สุด ตามด้วยการลวก การแช่กรดแอสคอร์บิกและมะม่วงตัดแต่งสดที่มีอัตราการเปลี่ยนแปลงของสีมากที่สุด ซึ่งสอดคล้องกับ (Gu et al., 2021) ที่รายงานว่า ค่าความแตกต่างของสีของกล้วยที่ผ่านกระบวนการพลาสมาและไม่ผ่านกระบวนการพลาสมา ที่เก็บรักษาไว้เป็นเวลา 5 ชั่วโมง นั้นมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ







ภาพที่ 14 การเปลี่ยนแปลงของค่าสี (ง)  $L^*$  (ข)  $a^*$  (ค)  $b^*$  และ ( $\Delta E$ ) ของตัวอย่างที่ผ่านกระบวนการต่างๆ

จากตารางที่ 6 ลักษณะปรากฏสีน้ำตาลจะเกิดขึ้นจนเห็นได้ชัดเมื่อมีค่าดัชนีความเข้มสีน้ำตาลมากกว่า 11 ขึ้นไป โดยจากตารางที่ 5 จะสอดคล้องกับลักษณะปรากฏของกระจกใสในตารางที่ 6 โดยกระจกตัดแต่งสดจะมีค่าความเข้มสีน้ำตาลในชั่วโมงที่ 8 เท่ากับ 12.70, ตัวอย่างที่ผ่านการแช่ในกรดแอสคอร์บิกจะมีค่าความเข้มสีน้ำตาลในชั่วโมงที่ 24 เท่ากับ 11.17, และตัวอย่างที่ผ่านพลาสติกจะมีความเข้มสีน้ำตาลในชั่วโมงที่ 48 เท่ากับ 11.10

ตารางที่ 5 ค่าดัชนีความเข้มข้นน้ำตาลของตัวอย่างหลังจากผ่านแต่ละกระบวนการในระหว่างการเก็บรักษา

เวลาเก็บรักษา (ชั่วโมง)	ดัชนีความเข้มข้นน้ำตาล ( $\Delta OD_{420}/100g$ FW)			
	มะม่วงสด	พลาสมา 4 นาที	ลวก	แช่ในกรด แอสคอร์บิก
0	-	-	-	-
1	1.20±0.08 <sup>a</sup>	1.30±0.08 <sup>a</sup>	4.77±0.49 <sup>b</sup>	0.90±0.42 <sup>a</sup>
2	2.03±0.17 <sup>a</sup>	2.40±0.50 <sup>a</sup>	5.37±0.26 <sup>b</sup>	1.87±0.41 <sup>a</sup>
3	2.77±0.21 <sup>a</sup>	3.37±0.49 <sup>a</sup>	6.17±0.21 <sup>b</sup>	2.73±0.61 <sup>a</sup>
4	3.80±0.36 <sup>a</sup>	4.20±0.16 <sup>a</sup>	6.63±0.29 <sup>b</sup>	3.77±0.48 <sup>a</sup>
5	5.10±0.54 <sup>a</sup>	5.33±0.21 <sup>a</sup>	7.57±0.19 <sup>b</sup>	4.53±0.31 <sup>a</sup>
6	6.57±0.45 <sup>a</sup>	6.33±0.17 <sup>a</sup>	7.83±0.24 <sup>b</sup>	5.30±0.36 <sup>a</sup>
7	10.00±0.83 <sup>a</sup>	6.90±0.37 <sup>b</sup>	8.23±0.24 <sup>b</sup>	6.13±0.37 <sup>b</sup>
8	12.70±0.29 <sup>a</sup>	7.77±0.45 <sup>b</sup>	8.87±0.26 <sup>b</sup>	6.23±0.76 <sup>b</sup>
16	17.80±0.92 <sup>a</sup>	8.53±0.54 <sup>c</sup>	11.37±0.90 <sup>b</sup>	9.37±0.78 <sup>c</sup>
24	23.23±0.17 <sup>a</sup>	9.47±0.71 <sup>d</sup>	12.57±0.68 <sup>b</sup>	11.17±0.61 <sup>c</sup>
48	34.60±0.57 <sup>a</sup>	11.10±0.65 <sup>c</sup>	13.57±0.48 <sup>b</sup>	11.80±0.59 <sup>c</sup>

หมายเหตุ อักษรภาษาอังกฤษที่ต่างกันตามแนวนอน หมายถึง ค่าเฉลี่ยมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ )

ตารางที่ 6 ลักษณะปรากฏของมะม่วงสดและมะม่วงหลังจากผ่านแต่ละกระบวนการในระหว่างการเก็บรักษา

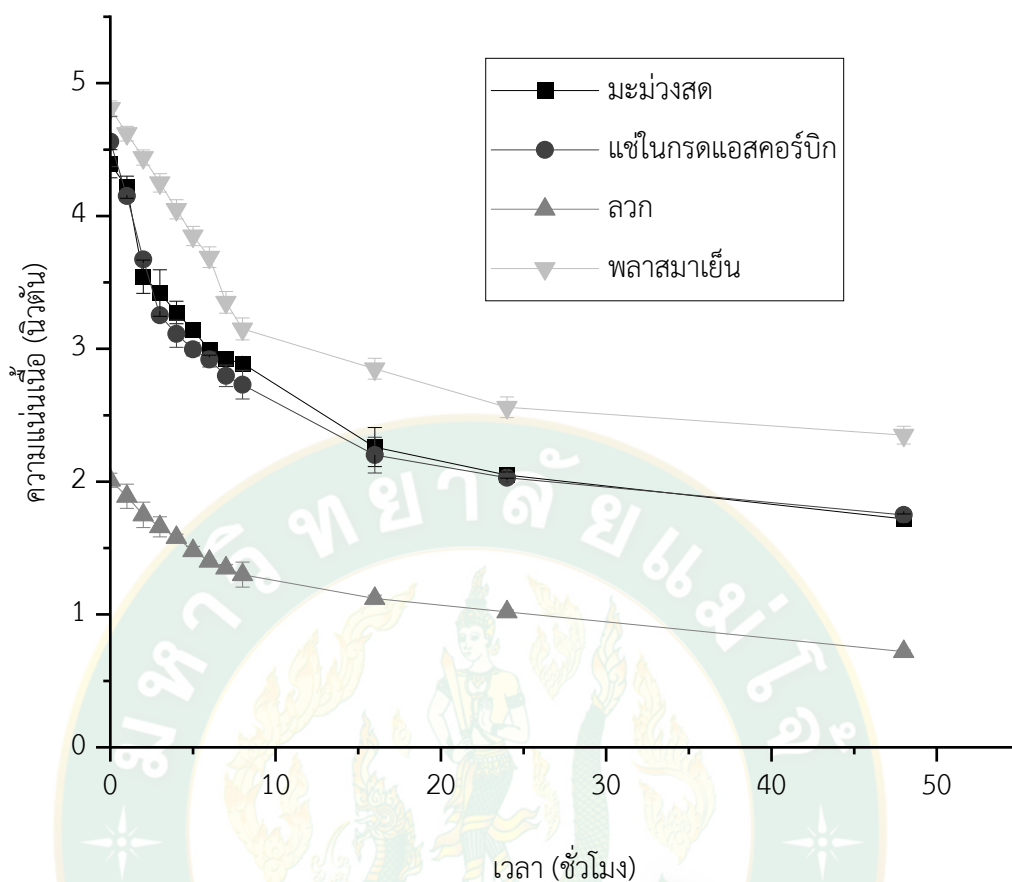
เวลาเก็บรักษา (ชั่วโมง)	การเปลี่ยนแปลงลักษณะปรากฏ			
	มะม่วงสด	พลาสติก 4 นาที	ลวก	แช่ในกรด แอสคอร์บิก
0				
1				
2				
3				
4				
5				
6				
7				
8				
16				
24				

48



### 3.3 การวิเคราะห์ความแน่นเนื้อ

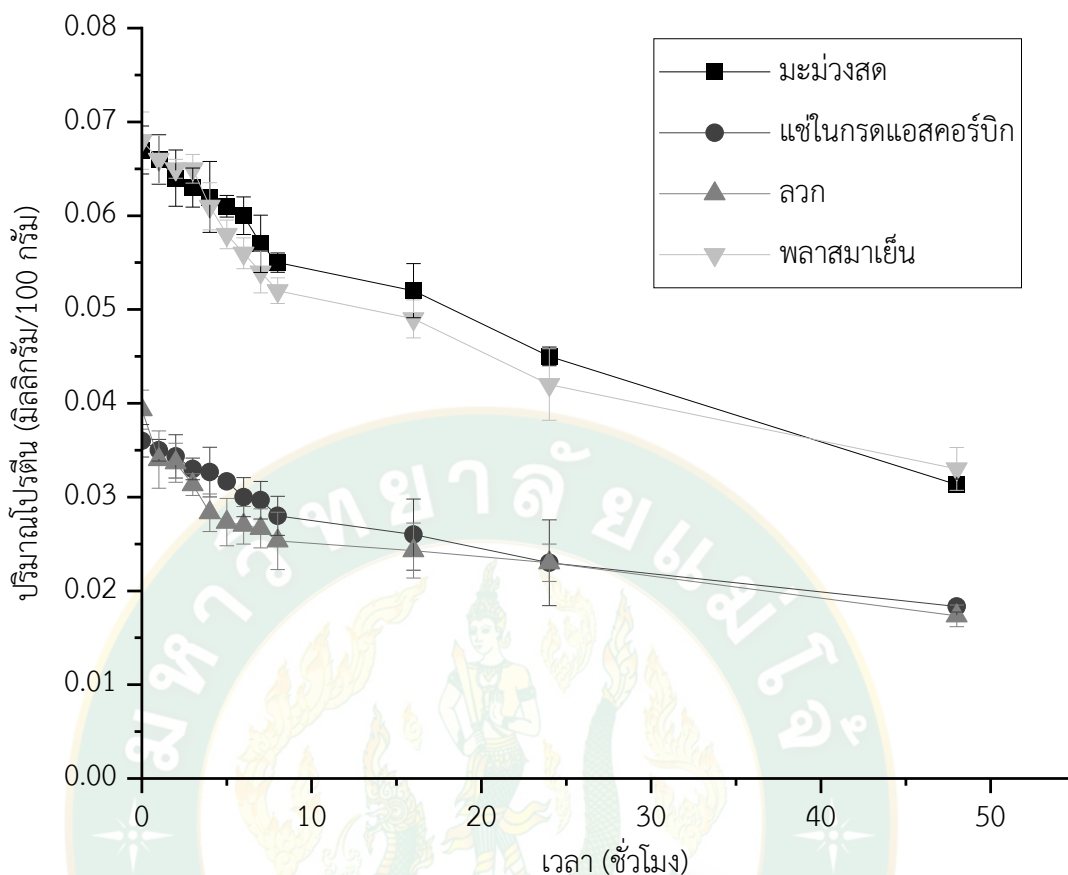
เมื่อพิจารณาความแน่นเนื้อของมะม่วงตัดแต่งที่ไม่ผ่านและผ่านกระบวนการต่างๆ ในระหว่างการเก็บรักษา ซึ่งแสดงไว้ในภาพที่ 15 จะเห็นได้ว่า ค่าความแน่นเนื้อของตัวอย่างหลังกระบวนการในตอนเริ่มต้นของการเก็บรักษานั้น การลวกส่งผลให้ค่าความแน่นเนื้อน้อยที่สุด ซึ่งมีสาเหตุจากการสูญเสียของของแข็งที่ละลายในน้ำได้และสารเพคตินซึ่งเป็นส่วนประกอบของโครงสร้างของเซลล์พืช จากความร้อนและละลายไปกับน้ำที่ใช้ในการลวก ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ (นรินทร์, 2561) พบว่าการลวกด้วยน้ำเดือดในมันเทศจะทำให้จะได้เนื้อสัมผัสที่นิ่มและฉ่ำน้ำ ซึ่งการลวกจะทำให้เยื่อหุ้มเซลล์ของมันเทศอ่อนตัวลงส่งผลให้ความแน่นเนื้อลดลง นอกจากนี้ยังพบว่า มะม่วงตัดแต่งทุกตัวอย่างมีค่าความแน่นเนื้อลดลงเมื่อเวลาการเก็บรักษาที่เพิ่มขึ้น โดยการลดลงของความแน่นเนื้อนี้มีสาเหตุจากเอนไซม์เพคตินเอสเทอเรส (pectinesterase) และ โพลีกาแลคทูโรเนส (polygalacturonase) จะไปจับกับเพคตินที่อยู่ในโครงสร้างของผนังเซลล์ ดังนั้นเมื่อเวลาการเก็บรักษานานขึ้นปริมาณเพคตินที่อยู่ในผนังเซลล์จึงค่อยๆ ลดลงส่งผลให้ความแน่นเนื้อของตัวอย่างลดลง และการศึกษายังพบว่ามะม่วงตัดแต่งที่ผ่านกระบวนการพลาสมาเย็นมีค่าความแน่นเนื้อที่สูงสุด ในช่วงอายุการเก็บรักษา 48 ชั่วโมง ซึ่งมีค่าเท่ากับ  $2.35 \pm 0.06$  นิวตัน ซึ่งอาจมีสาเหตุจากผลของการใช้พลาสมาไม่เพียงแต่ยับยั้งการทำงานของเอนไซม์โพลีฟีนอลออกซิเดส แต่สามารถยับยั้งการทำงานของเอนไซม์เพคตินเอสเทอเรสและโพลีกาแลคทูโรเนสได้อีกด้วย และการใช้พลาสมาเย็นสามารถทำลายเอนไซม์ได้ลึกเข้าไปในตัวอย่างมากกว่าการแช่ลวกและการแช่กรดแอสคอร์บิกที่สามารถยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ได้เฉพาะบริเวณพื้นผิวสัมผัส ซึ่งผลการศึกษาที่สอดคล้องกับงานวิจัยของ (Zhao et al., 2020) ที่รายงานว่า ตัวอย่างผักตอง (Pao cai) ที่ไม่ผ่านกระบวนการพลาสมาเย็นมีการลดลงของค่าความแน่นเนื้ออย่างมีนัยสำคัญ ในขณะที่ตัวอย่างที่ผ่านกระบวนการพลาสมาเย็นมีค่าไม่แตกต่างจากตัวอย่างเริ่มต้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ หลังจากเก็บรักษาตัวอย่างไว้เป็นเวลา 7 วัน ซึ่งแสดงให้เห็นว่าพลาสมาเย็นสามารถช่วยรักษาความแน่นเนื้อของตัวอย่างได้ในระหว่างการเก็บรักษา



ภาพที่ 15 ความชื้นเนื้อของมะม่วงสดและมะม่วงหลังจากผ่านแต่ละกระบวนการในระหว่างการเก็บรักษา

#### 3.4.วิเคราะห์ปริมาณโปรตีน

เมื่อพิจารณาปริมาณโปรตีนของมะม่วงตัดแต่งที่ไม่ผ่านและผ่านกระบวนการต่างๆ ในระหว่างการเก็บรักษา ซึ่งแสดงไว้ในภาพที่ 16 จะเห็นได้ว่ามะม่วงตัดแต่งมีปริมาณโปรตีนลดลงเมื่ออายุการเก็บรักษาที่เพิ่มขึ้น ในขณะที่มะม่วงที่ผ่านการแช่กรดแอสคอร์บิกและการลวกมีปริมาณโปรตีนลดลงมากที่สุดเนื่องจากโปรตีนสามารถละลายน้ำได้ โดยในชั่วโมงเก็บรักษาที่ 48 มีปริมาณโปรตีนเท่ากับ  $0.018 \pm 0.001$  และ  $0.017 \pm 0.001$  มิลลิกรัม/100 กรัม ตามลำดับ นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบค่าความชื้นเนื้อของมะม่วงสด และพลาสมาเย็น ในชั่วโมงอายุการเก็บรักษาที่ 48 ชั่วโมง ซึ่งมีค่าเท่ากับ  $0.031 \pm 0.001$  และ  $0.033 \pm 0.005$  มิลลิกรัม/100 กรัม ตามลำดับ แสดงให้เห็นถึงพลาสมาเย็นไม่มีผลต่อการลดลงของปริมาณโปรตีนในมะม่วงน้ำดอกไม้ตัดแต่งอย่างมีนัยสำคัญ



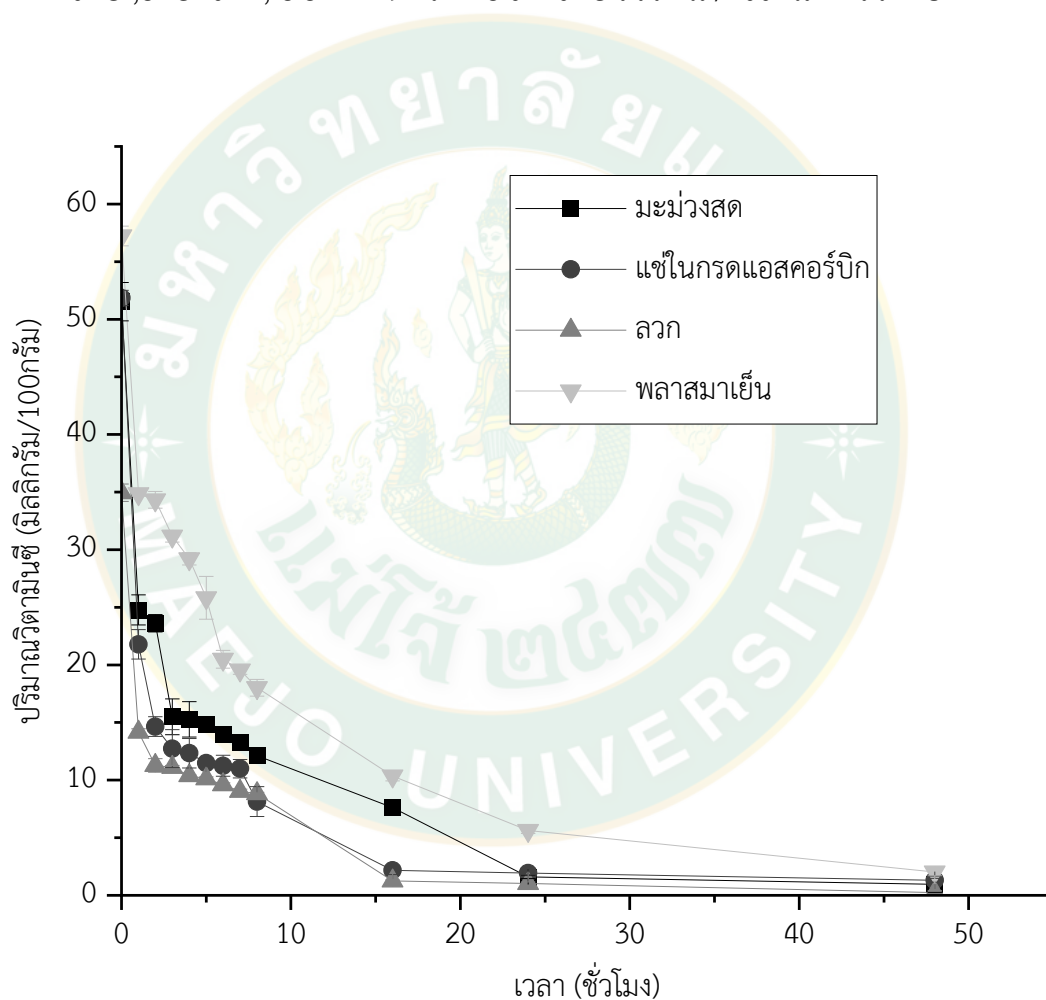
ภาพที่ 16 ปริมาณโปรตีนของมะม่วงสดและมะม่วงหลังจากผ่านแต่ละกระบวนการในระหว่างการเก็บรักษา

### 3.5.วิเคราะห์ปริมาณวิตามินซี

เมื่อพิจารณาปริมาณวิตามินซีของมะม่วงตัดแต่งที่ไม่ผ่านและผ่านกระบวนการต่างๆ ในระหว่างการเก็บรักษา ซึ่งแสดงไว้ใน ภาพที่ 17 จะเห็นได้ว่ามะม่วงตัดแต่งมีปริมาณวิตามินซีลดลงเมื่ออายุการเก็บรักษาที่เพิ่มขึ้น จากการศึกษาพบว่าในชั่วโมงที่ 0 ตัวอย่างที่สัมผัสพลาสมาเย็นมีค่าเพิ่มขึ้นแตกต่างตัวอย่างที่ไม่สัมผัสพลาสมาเย็น มีค่าเท่ากับ  $57.23 \pm 0.85$  มิลลิกรัม/100กรัม สาเหตุที่พลาสมาเย็นส่งผลให้ปริมาณวิตามินซีเพิ่มขึ้นอาจเกี่ยวข้องกับการกระตุ้นเอนไซม์ดีไฮโดรแอสคอร์เบตรีดักเตส (MDHAR – เอนไซม์ของคลาส NADH) โมเลกุลของกรดดีไฮโดรแอสคอร์บิกเป็นรูปแบบออกซิไดซ์ของกรดแอสคอร์บิก และจะถูกแปลงกลับเป็นกรดแอสคอร์บิกตามธรรมชาติโดยกระบวนการดีไฮโดรแอสคอร์เบตรีดักเตสผ่านวัฏจักรแอสคอร์เบต-กลูตาไธโอน (Noctor and Foyer, 1998) สำหรับมะม่วงสดกับมะม่วงแช่กรดแอสคอร์บิกนั้นมีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ เท่ากับ



51.52±1.66 และ 51.84±0.85 มิลลิกรัม/100กรัม ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการนำตัวอย่างแช่ในกรดแอสคอร์บิกนั้นไม่ส่งผลให้ปริมาณวิตามินซีลดลงในทันที ขณะที่มะม่วงที่ลวกด้วยน้ำร้อนนั้นมีค่าลดลงเท่ากับ 34.95±0.75 มิลลิกรัม/100กรัม ตามลำดับ การลวกมีผลทำให้ปริมาณวิตามินซีสูญเสียมากที่สุด เนื่องจากวิตามินซีเป็นวิตามินที่สามารถละลายได้ในน้ำและไวต่อความร้อน (Kondo, 2012) นอกจากนี้เมื่อเก็บรักษาถึงชั่วโมงที่ 8 จะพบว่าปริมาณวิตามินซีในมะม่วงตัดแต่งสด มะม่วงตัดแต่งลวก มะม่วงตัดแต่งแช่ในกรดแอสคอร์บิก มะม่วงตัดแต่งสัมผัสพลาสติกมาเย็น ลดลงอย่างมากซึ่งมีค่าเท่ากับ 12.11±0.15 ,8.13±0.11, 8.82±1.29 และ 18.01±0.73 มิลลิกรัม/100กรัม ตามลำดับ



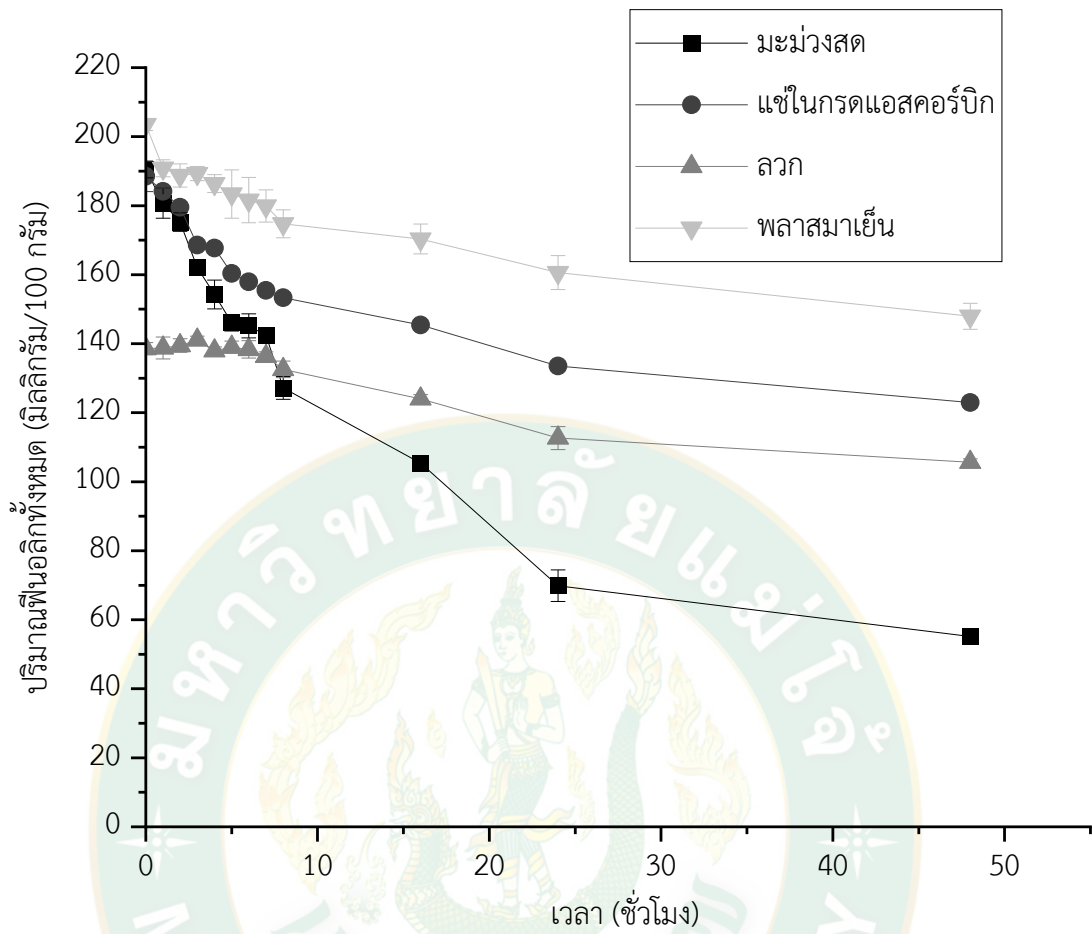
ภาพที่ 17 ปริมาณวิตามินซีของมะม่วงตัดแต่งหลังจากผ่านกระบวนการต่างระหว่างเก็บรักษา

### 3.6.วิเคราะห์ปริมาณฟีนอลิก

เมื่อพิจารณาปริมาณฟีนอลิกของมะม่วงตัดแต่งที่ไม่ผ่านและผ่านกระบวนการต่างๆ ในระหว่างการเก็บรักษา ซึ่งแสดงไว้ใน ภาพที่ 18 จะเห็นได้ว่ามะม่วงตัดแต่งทั้งหมดมีปริมาณฟีนอลิกลด

ลงเมื่ออายุการเก็บรักษาที่เพิ่มขึ้น ในขณะที่มะม่วงตัดแต่งสดมีค่าปริมาณฟีนอลิกลดลงมากที่สุด โดยในช่วงเก็บรักษาที่ 48 มีปริมาณฟีนอลิก เท่ากับ  $55.18 \pm 1.42$  มิลลิกรัม/100 กรัม นอกจากนี้ เมื่อเปรียบเทียบปริมาณฟีนอลิกในมะม่วงลวก แช่กรดแอสคอร์บิกและพลาสติกของเวลาเก็บรักษาที่ 48 ชั่วโมง มีค่าเท่ากับ  $105.61 \pm 1.03$ ,  $122.95 \pm 1.57$ , และ  $147.95 \pm 3.76$  มิลลิกรัม/100กรัม ตามลำดับ แนวโน้มของปริมาณฟีนอลิกเป็นไปตามความสัมพันธ์แบบผกผันกับกิจกรรมของเอนไซม์โพลีฟีนอลออกซิเดส สำหรับการใช้งานในพลาสติกและการแช่กรดแอสคอร์บิก กิจกรรมโพลีฟีนอลออกซิเดสที่ต่ำลงทำให้เกิดปริมาณฟีนอลิกที่สูงขึ้นในมะม่วงตัดแต่ง เนื่องจากโพลีฟีนอลออกซิเดสใช้สารประกอบฟีนอลิกเป็นสารตั้งต้นในการต้านสารออกซิแดนท์ โดยสอดคล้องกับงานวิจัยของ (Farias et al., 2020) รายงานว่าการใช้พลาสติกเพิ่มปริมาณฟีนอลิกทั้งในแอปเปิลทรงลูกบาศก์ และแบบน้ำผลไม้ แนวโน้มของเนื้อหาฟีนอลเป็นไปตามความสัมพันธ์แบบผกผันกับกิจกรรมของเอนไซม์โพลีฟีนอลออกซิเดส

การลวกด้วยน้ำร้อนส่งผลให้ปริมาณฟีนอลิกในมะม่วงตัดแต่งลดลง ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ (Ismail et al., 2004) พบว่าฟีนอลิกในใบคะน้าที่ผ่านการต้มหรือลวกมีปริมาณลดลงเมื่อเทียบกับคะน้าสด อาจเนื่องจากการสูญเสียฟีนอลิกในน้ำ



ภาพที่ 18 ปริมาณฟีนอลิกของมะม่วงตัดแต่งหลังจากผ่านกระบวนการต่างๆ ระหว่างเก็บรักษา

จากการศึกษาและเปรียบเทียบสมบัติทางกายภาพและทางเคมีในมะม่วงน้ำดอกไม้ตัดแต่งที่ผ่านกระบวนการต่างๆ ได้แก่ การสัมผัสพลาสติกมาเย็น การลวก และการแช่กรดแอสคอร์บิก ในชั่วโมงที่ 48 ของการเก็บรักษาซึ่งแสดงดังตารางที่ 7 พบว่ามะม่วงน้ำดอกไม้ตัดแต่งสดที่ผ่านกระบวนการพลาสติกมาเย็นมีสมบัติทางกายภาพและทางเคมีที่ดีที่สุด

**ตารางที่ 7** สมบัติทางกายภาพและทางเคมีในมะม่วงน้ำดอกไม้ตัดแต่งหลังจากผ่านกระบวนการต่างๆ ที่เวลา 48 ชั่วโมงของการเก็บรักษา

สมบัติ	มะม่วงตัดแต่งสด	พลาสติก	การลวก	การแช่กรดแอสคอร์บิก
L*	20.26±1.02 <sup>c</sup>	48.76±2.70 <sup>a</sup>	37.71±0.89 <sup>b</sup>	38.25±1.32 <sup>b</sup>
a*	8.21±1.21 <sup>a</sup>	5.42±0.50 <sup>c</sup>	1.64±0.12 <sup>d</sup>	6.01±0.36 <sup>b</sup>
b*	20.57±1.30 <sup>a</sup>	37.16±3.10 <sup>c</sup>	18.27±0.97 <sup>a</sup>	28.73±0.68 <sup>b</sup>
ΔE	43.26±0.57 <sup>a</sup>	11.30±2.70 <sup>d</sup>	18.94±1.61 <sup>c</sup>	26.54±2.36 <sup>b</sup>
ความแน่นเนื้อ (N)	1.72±0.03 <sup>b</sup>	2.35±0.06 <sup>a</sup>	0.72±0.01 <sup>c</sup>	1.75±0.04 <sup>b</sup>
ดัชนีสีน้ำตาล	34.60±0.57 <sup>a</sup>	11.10±0.65 <sup>c</sup>	13.57±0.48 <sup>c</sup>	11.80±0.59 <sup>c</sup>
โปรตีน (mg/100g)	0.031±0.001 <sup>a</sup>	0.033±0.005 <sup>a</sup>	0.017±0.001 <sup>b</sup>	0.018±0.001 <sup>b</sup>
วิตามินซี (mg/100g)	6.60±0.14 <sup>b</sup>	20.63±3.65 <sup>a</sup>	1.88±0.27 <sup>c</sup>	1.93±0.14 <sup>c</sup>
สารประกอบฟีนอลิก (mg/100g)	55.18±1.42 <sup>a</sup>	147.95±1.69 <sup>d</sup>	105.61±5.33 <sup>b</sup>	122.95±1.57 <sup>c</sup>

หมายเหตุ อักษรภาษาอังกฤษที่ต่างกันตามแนวตั้ง หมายถึง ค่าเฉลี่ยมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ )

#### 4. ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ

ผลการศึกษาผลผลิตต่อเวลาที่ใช้ในการยับยั้งกิจกรรมเอนไซม์โพลีฟีนอลออกซิเดสและความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะที่ใช้ในการลวกด้วยน้ำร้อนและพลาสติก แสดงในตารางที่ 7 พบว่าตัวอย่างที่ผ่านพลาสติกที่แรงดันไฟฟ้า 12.5 กิโลโวลต์ มีปริมาณร้อยละกิจกรรมเอนไซม์โพลีฟีนอลออกซิเดสที่ลดลง 258.40 หน่วย/กิโลกรัม ซึ่งดีกว่าการลวกด้วยน้ำร้อนโดยสามารถทำให้กิจกรรมเอนไซม์ลดลงเหลือ 186.33 หน่วย/กิโลกรัม เนื่องจากอนุภาคพลาสติกเข้าไปทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของเอนไซม์จึงส่งผลให้กิจกรรมของเอนไซม์โพลีฟีนอลออกซิเดสลดลง (Misra et al., 2016); (Surowsky et al., 2013) นอกจากนี้คำนวณความสิ้นเปลืองพลังงานของกระบวนการพลาสติก จากสมการที่ 2 แสดงในตารางที่ 8 พบว่าการยับยั้งเอนไซม์ด้วยพลาสติกที่แรงดันไฟฟ้า 12.5 กิโลโวลต์ มีความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของกระบวนการสูงกว่าการลวกด้วยน้ำร้อน

ตารางที่ 8 ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะที่ใช้ในกระบวนการ

กระบวนการ	พลังงานใช้ใน กระบวนการ (kWh)	กิจกรรมเอนไซม์ที่ ลดลง (หน่วย/กิโลกรัม)	ปริมาณมะม่วง (กิโลกรัม)	พลังงานจำเพาะที่ใช้ (กิโลวัตต์-ชั่วโมง /กิโลกรัม)
ลวก	0.010	186.33	0.2	$1.72 \times 10^{-5} \pm (5.51 \times 10^{-8})^a$
พลาสมาเย็น	0.002	258.40	0.2	$3.86 \times 10^{-5} \pm 0.000^b$

หมายเหตุ อักษรภาษาอังกฤษที่ต่างกันตามแนวตั้ง หมายถึง ค่าเฉลี่ยมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ )



### แนวคิดการขยายกำลังการผลิตของเครื่องพลาสมาเย็นแบบเจ็ท

ในงานวิจัยนี้ใช้เครื่องพลาสมาเย็นในการยับยั้งกิจกรรมเอนไซม์โพลีฟีนอลออกซิเดสด้วยอัตราการไหลก๊าซอาร์กอน 25 ลิตร/นาที่ แรงดันไฟฟ้า 12.5 กิโลโวลต์ ขนาดหัวเจ็ทเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 2 เซนติเมตร เป็นเวลา 4 นาที่ (สำหรับด้านบนและด้านล่างของตัวอย่าง) ซึ่งเหมาะสำหรับการทดสอบระดับห้องปฏิบัติการ แต่มีข้อเสีย กำลังการผลิตต่ำเนื่องจากมีข้อจำกัดของขนาดหัวพลาสมาเย็น ดังนั้นจึงมีแนวคิดการออกแบบเครื่องพลาสมาเย็นแบบเจ็ทให้มีขนาดใหญ่สำหรับการใช้ในอุตสาหกรรม

ส่วนประกอบหลักในการออกแบบเครื่องพลาสมาเย็นระดับอุตสาหกรรมในงานวิจัยนี้ จะแบ่งส่วนประกอบและหน้าที่ แสดงดังตารางที่ 9

**ตารางที่ 9** ส่วนประกอบและราคาของเครื่องพลาสมาเย็นระดับอุตสาหกรรม

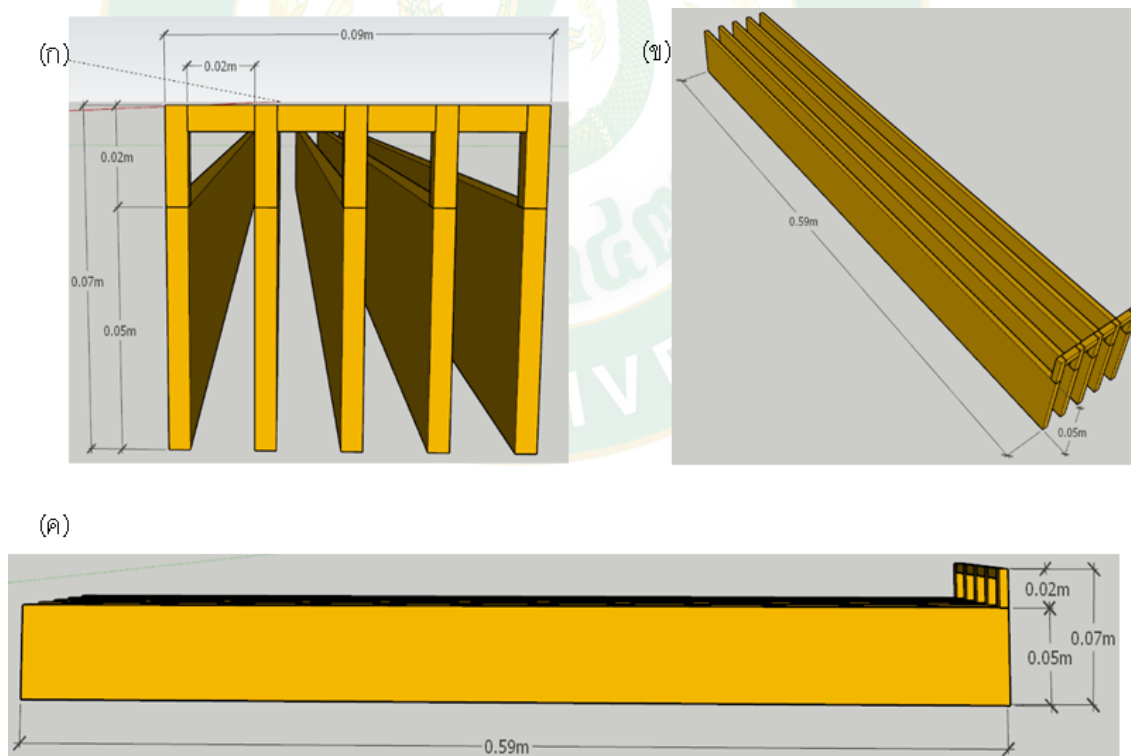
อุปกรณ์	การใช้งาน	ราคา (บาท)
เพาเวอร์ซัพพายด์ 20 kV	จ่ายแรงดันไฟฟ้า 20 kV ให้อิเล็กทรอนิกส์	56,486
สถานีอาร์กอน	จ่ายก๊าซอาร์กอนที่อัตราการไหล 100 ลิตร/นาที่	-
อิเล็กทรอนิกส์ทองแดง (แอนโอด+แคโทด)	สร้างสนามไฟฟ้าโดยใช้ไฟฟ้าแรงดัน 20 kV	16,662
ซูเปอร์คอนดักเตอร์	ยึดอิเล็กทรอนิกส์ 2 ขั้ว	2,790
แผ่นอะคริลิก	ป้องกันอันตรายจากไฟฟ้า	6,465
สายพานลำเลียงพียู	ลำเลียงมะม่วงตัดแต่งผ่านพลาสมาเย็น	-
ราคารวม		82,394

ในการทำงานเครื่องพลาสมาเย็นนั้นจะเริ่มจากเพาเวอร์ซัพพายด์ แสดงดังภาพที่ 19 รับไฟฟ้า 220 V จากนั้นจะแปลงเป็นไฟฟ้าแรงดัน 20 kV และจ่ายไปเครื่องพลาสมาเย็นโดยต่อไปยังอิเล็กทรอนิกส์ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 ขั้วได้แก่ แอนโอดซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวจ่ายกระแสไฟฟ้า แสดงดังภาพที่ 20 แคโทดทำหน้าที่รับกระแสไฟฟ้า แสดงดังภาพที่ 21 เมื่ออิเล็กทรอนิกส์ทั้ง 2 ขั้วได้รับกระแสไฟฟ้าแล้วจะ

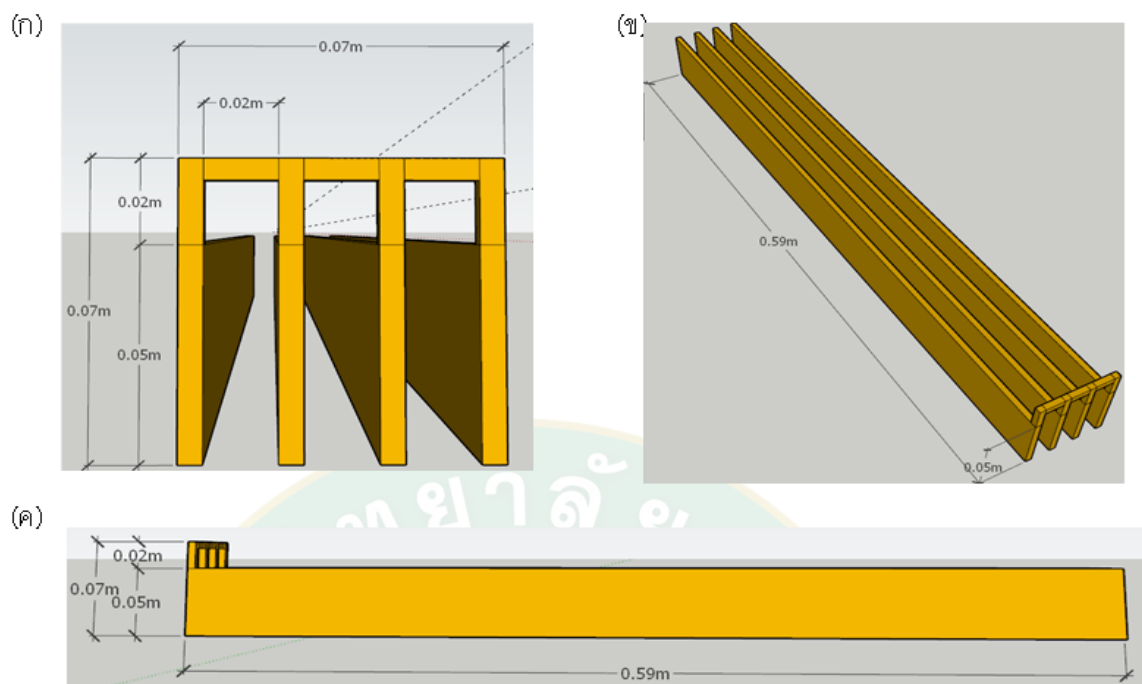
เกิดสนามไฟฟ้าขึ้นตรงบริเวณช่องว่างระหว่างอิเล็กโทรดทั้งสองขั้วที่ระยะห่าง 0.01 เมตร แสดงภาพที่ 22



ภาพที่ 19 เพาเวอร์ซัพพายด์ขนาดแรงดันไฟฟ้า 20 kV

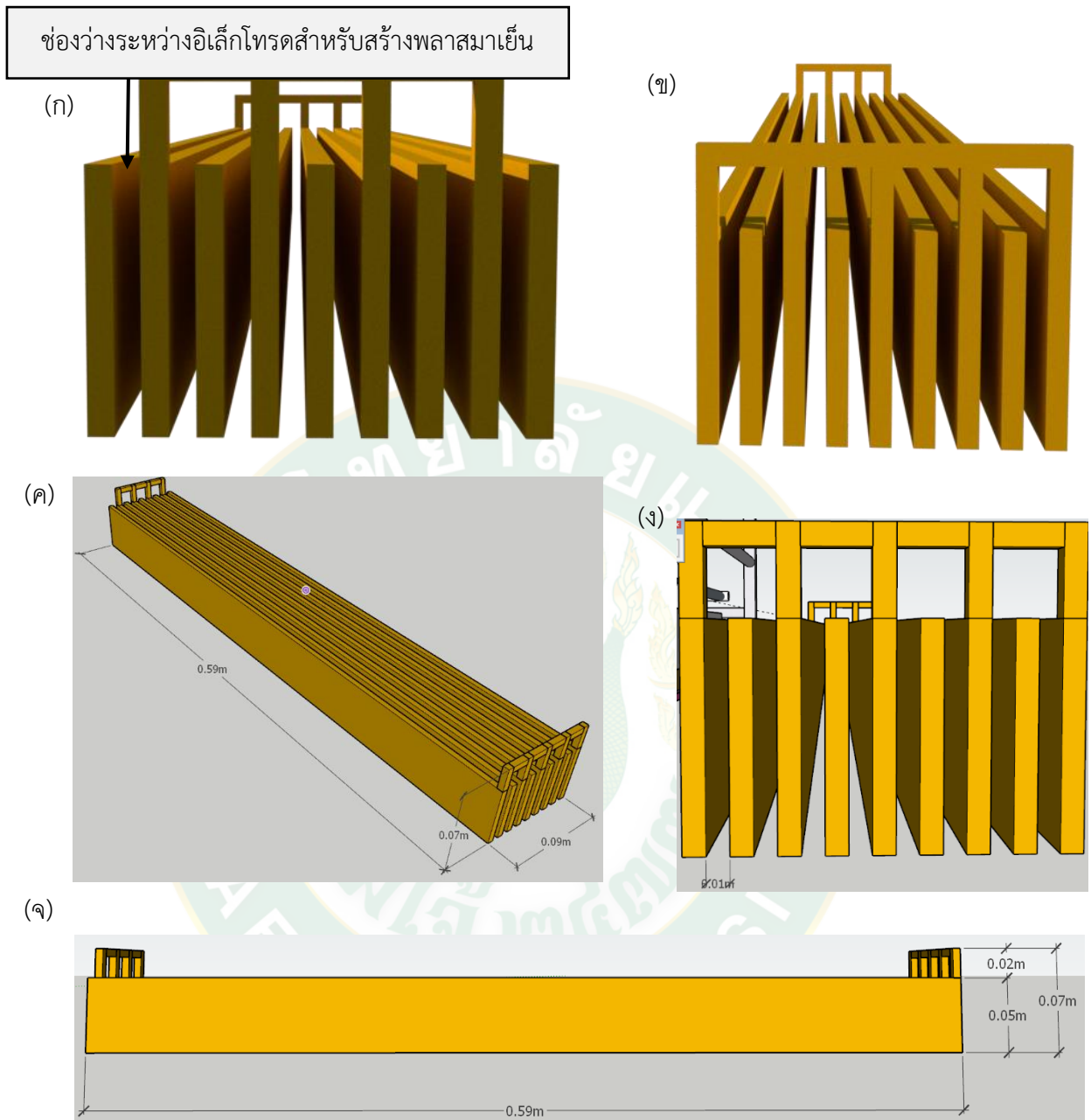


ภาพที่ 20 อิเล็กโทรดแอโนด (ก) ภาพมุมมองด้านหน้าและขนาดของแอโนด (ข) ภาพไอโซเมตริกและขนาดของแอโนด (ค) ภาพมุมมองด้านข้างและขนาดของแอโนด



ภาพที่ 21 อิเล็กโทรดแคโทด (ก) ภาพมุมมองด้านหน้าและขนาดของแคโทด (ข) ภาพไอโซเมตริกและขนาดของแคโทด (ค) ภาพมุมมองด้านข้างและขนาดของแคโทด



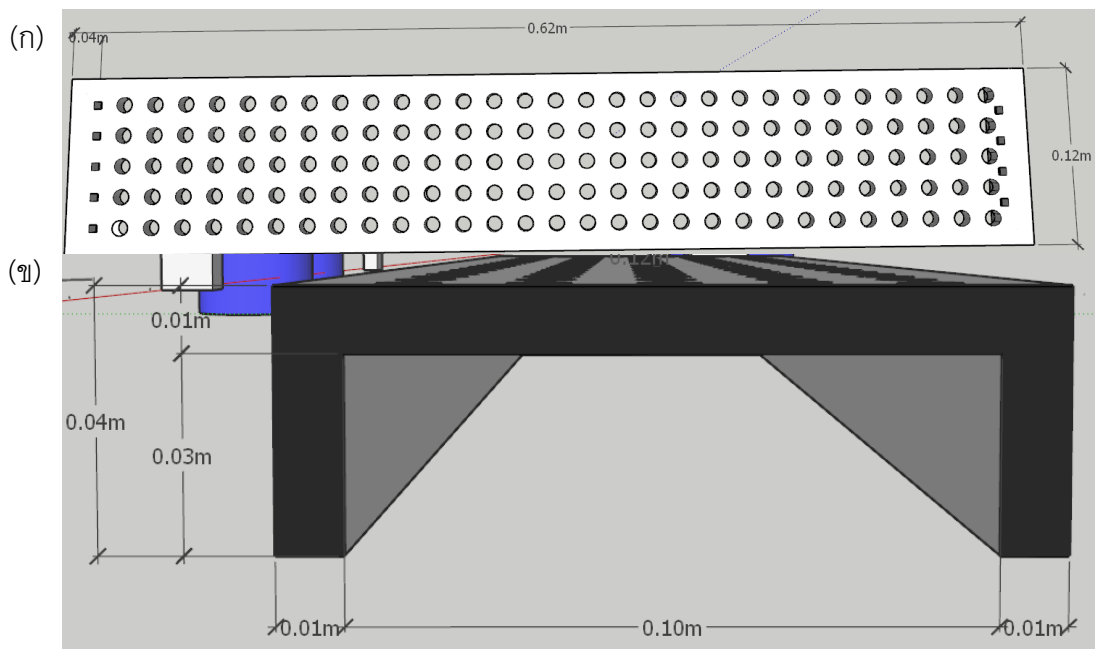


ภาพที่ 22 ลักษณะการต่ออิเล็กโทรดทั้ง 2 ขั้ว (ก) ขนาดและลักษณะการประกอบด้านหน้าของอิเล็กโทรดทั้ง 2 ขั้วจากด้านของแคโทด (ข) ขนาดและลักษณะการประกอบด้านหน้าของอิเล็กโทรดทั้ง 2 ขั้วจากด้านของแอโนด (ค) ภาพมุมมองไอโซเมตริกของอิเล็กโทรดเมื่อประกอบทั้ง 2 ขั้ว (ง) ระยะห่าง 0.01 เมตร ระหว่างอิเล็กโทรดทั้ง 2 ขั้ว (จ) ขนาดและลักษณะการประกอบด้านข้างของอิเล็กโทรดทั้ง 2 ขั้ว



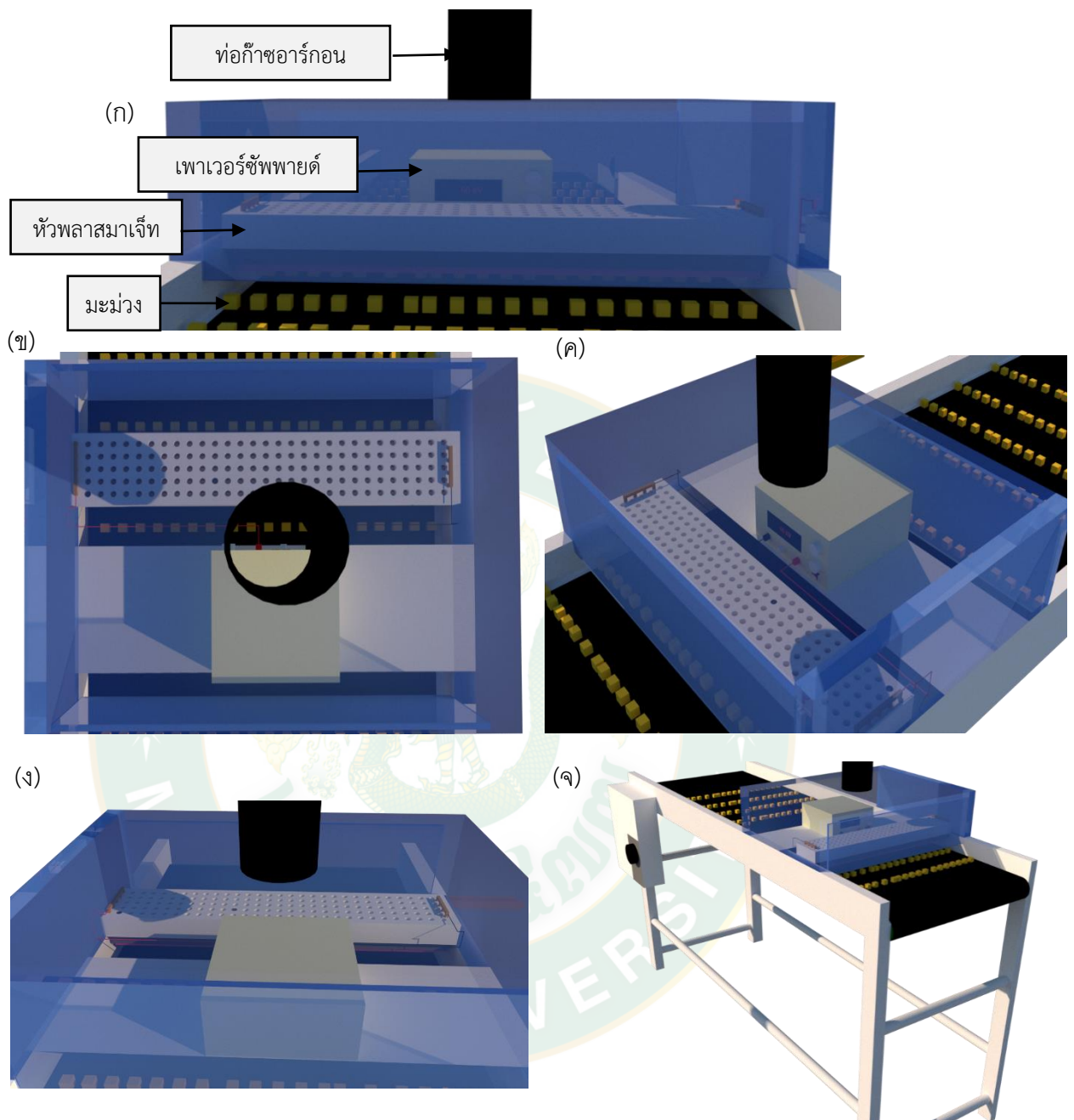
ภาพที่ 23 สถานีก๊าซอาร์กอน

อาร์กอนเป็นก๊าซที่อันตรายเนื่องจากสามารถแทนที่ออกซิเจน ทำให้เกิดภาวะขาดอากาศหายใจเป็นอันตรายถึงชีวิตได้ในที่ที่มีอาร์กอนเข้มข้นสูง ซึ่งกฎกระทรวงกำหนดให้มีคนงานซึ่งมีความรู้เฉพาะเพื่อปฏิบัติหน้าที่เกี่ยวกับการใช้ เก็บ ส่ง และบรรจุก๊าซประจำโรงงาน (ฉบับที่ ๒) พ.ศ. ๒๕๕๕ ระบุว่า ก๊าซอาร์กอนหรือก๊าซอันตรายอื่นตามที่รัฐมนตรีกำหนดโดยประกาศในราชกิจจานุเบกษาที่มีการติดตั้งถังเก็บและจ่ายก๊าซ (storage tank) หรือมีปริมาณการใช้หรือเก็บก๊าซในภาชนะบรรจุก๊าซ (cylinder) จำนวนรวมตั้งแต่ยี่สิบภาชนะบรรจุขึ้นไป หรือมีการใช้หรือเก็บก๊าซจากภาชนะบรรจุชนิดติดตั้งบนรถ (tube trailer) ดังนั้น ก๊าซอาร์กอนที่ใช้ในการออกแบบนั้นจะถูกบรรจุไว้ในสถานีก๊าซอาร์กอนแสดงดังภาพที่ 23 ซึ่งตั้งไว้ที่ภายนอกบริเวณห้องผลิต และจะถูกลำเลียงผ่านท่อมายังพลาสติก ในอัตราการไหลที่ 50 ลิตร/นาที โดยพนักงานจะต้องสวมใส่เครื่องช่วยหายใจแบบมีถังแยก (SCBA) เมื่อต้องเข้าไปปฏิบัติงานในที่มีความเข้มข้นอาร์กอนสูง เพื่อป้องกันภาวะขาดอากาศหายใจได้



ภาพที่ 24 ชุปเปอร์ลีน (ก) ลักษณะและขนาดด้านยาวของชุปเปอร์ลีน (ข) ลักษณะภายในและขนาดของชุปเปอร์ลีน

ชุปเปอร์ลีนจะทำหน้าที่ยึดอิเล็กโทรดทั้งสองขั้วเอาไว้ด้วยกัน และในขณะเดียวกันจะทำหน้าที่ควบคุมการไหลของก๊าซให้ไหลผ่านมายังสนามไฟฟ้าที่ช่องว่างของอิเล็กโทรดทั้งสองขั้ว หลังจากที่ถูกอาร์กอนได้พลังงานจะทำให้ก๊าซแตกตัวจนอิเล็กตรอนอิสระหลุดออกมาจำนวนมาก และกลายเป็นพลาสมาเย็นในที่สุด



ภาพที่ 25 การจัดวางส่วนประกอบเครื่องพลาสมาเย็นและการลำเลียงบนสายพานลำเลียง PU (ก) มุมมองข้างหน้าของเครื่องพลาสมาเย็น (ข) มุมมองด้านบนของเครื่องพลาสมาเย็น (ค) มุมมองไอโซเมตริกของเครื่องพลาสมาเย็น (ง) มุมมองไอโซเมตริกของเครื่องพลาสมาเย็น (จ) มุมมองไอโซเมตริกของเครื่องพลาสมาเย็นบนสายพาน

ในการลำเลียงตัวอย่างมะม่วงขนาด 1.5 เซนติเมตร นั้นจะลำเลียงผ่านบนสายพาน PU ซึ่งมีคุณสมบัติเหมาะกับอุตสาหกรรมอาหาร โดยใช้แบบป้องกันไฟฟ้าสถิตและสามารถทนความร้อน ทนสารเคมี ทนการเสียดสี ในการต่อก๊าซอาร์กอนนั้นจะส่งผ่านจากสถานีอาร์กอนซึ่งติดตั้งอยู่ข้างนอกตัวโรงงานผลิต โดยจะส่งผ่านท่อที่อัตราการไหล 50 ลิตร/นาที ซึ่งจะผ่านเข้ามายังเครื่องพลาสมาเย็นที่ซึ่งมีกรอบตู้อะคริลิกครอบไว้สำหรับป้องกันอันตรายจากไฟฟ้าแรงดันสูง ซึ่งจะแสดงดังภาพที่ 25



## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลอง

1. การออกแบบเครื่องพลาสมาเย็นมีส่วนประกอบหลักทั้งหมด 5 ส่วนได้แก่ ถังก๊าซ หม้อแปลงปรับแรงดันไฟฟ้า หม้อแปลงไฟฟ้านีออนขนาด 12.5 กิโลโวลต์ ส่วนหัวพลาสมาเจ็ทที่มีทองแดง ซึ่งทำหน้าที่เป็นแอโนดและอะลูมิเนียมเป็นแคโทด และส่วนประกอบอื่น ๆ ซึ่งทำหน้าที่เป็นส่วนของโครงสร้างได้แก่ โครงตู้ ประตูดูและฐานรองตัวอย่าง โดยใช้ก๊าซอาร์กอนที่อัตราการไหล 25 ลิตร/นาที่ เป็นก๊าซตัวกลาง

2. การทดสอบการใช้พลาสมาเย็นเพื่อยับยั้งกิจกรรมเอนไซม์โพลีฟีนอลออกซิเดส พบว่า เวลาที่เหมาะสมสำหรับยับยั้งกิจกรรมเอนไซม์โพลีฟีนอลออกซิเดสในมะม่วงน้ำดอกไม้ตัดแต่งคือ 4 นาที โดยสามารถลดกิจกรรมเอนไซม์เหลือร้อยละ  $14.93 \pm 1.41$  เนื่องจากอนุภาคพลาสมาเข้าไปทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของเอนไซม์จึงส่งผลให้กิจกรรมของเอนไซม์โพลีฟีนอลออกซิเดสลดลง และสามารถยืดอายุการเก็บเก็บรักษาจาก 8 ชม. เป็น 48 ชม. โดยพิจารณาจากค่าสี  $L^*$   $a^*$  และ  $b^*$  ซึ่งมะม่วงตัดแต่งจะหมดอายุการเก็บเก็บรักษาหากมีค่า  $L^*$  40-47 ค่า  $a^*$  อยู่ในช่วง 5.4-5.7 และ ค่า  $b^*$  อยู่ในช่วง 28-39

3. กระบวนการพลาสมาเย็นที่เวลา 4 นาที เป็นสภาวะที่เหมาะสมที่สุดเมื่อเทียบกับการลวกด้วยน้ำร้อน และการแช่ในกรดแอสคอร์บิก โดยมีค่ากิจกรรมเอนไซม์เหลือร้อยละ  $14.93 \pm 1.41$  และมีค่าปฏิกิริยาสีน้ำตาล  $11.10 \pm 0.65$  โดยมีช่วงค่าค่าสมบัติกายภาพและทางเคมี ที่เวลาเก็บรักษา 48 ชั่วโมง ดังนี้ ค่าความสว่าง  $L^*$  40 ค่า  $a^*$  อยู่ในช่วง 5.7 และ ค่า  $b^*$  อยู่ในช่วง 28 อัตราการเปลี่ยนแปลงของสี  $\Delta E$  เท่ากับ 11.30 ปริมาณโปรตีน 0.067 mg/100g มีปริมาณวิตามินซี 20.63 mg/100g มีปริมาณฟีนอลิก 147.95 mg/100g และค่าความแน่นเนื้อ 2.35 นิวตัน อย่างไรก็ตามพลาสมาเย็นเป็นกระบวนการที่ใช้พลังงานจำเพาะสูงกว่ากระบวนการลวก

## บรรณานุกรม

- Almeida, J. R. M., Modig, T., Petersson, A., Hähn-Hägerdal, B., Lidén, G. & Gorwa-Grauslund, M. F. 2007. Increased tolerance and conversion of inhibitors in lignocellulosic hydrolysates by *Saccharomyces cerevisiae*. **Journal of Chemical Technology & Biotechnology**, 82(4), 340-349.
- AOAC. 1980. Official Methods of Analysis of the Association of Official Analytical Chemists. 13th Ed), 746.
- Bourne, M. C. 1982. Texture and Viscosity. Concept and measurement.
- Dobrynin, D., Fridman, G., Friedman, G. & Fridman, A. 2009. Physical and biological mechanisms of direct plasma interaction with living tissue. **New Journal of Physics**, 11(11).
- Duangmal, K. a. R. K. O. A. 1999. A comparative study of polyphenoloxidases from taro (*Colocasia esculenta*) and potato (*Solanum tuberosum* var. *Romana*). **Food Chemistry**, 64), 351-359.
- Eskin, N. A. M., H.M. Henderson. and R. J. Townsend. 1971. **Biochemistry of foods**. New York: Academic Press.
- Farias, T. R. B., Rodrigues, S. & Fernandes, F. A. N. 2020. Effect of dielectric barrier discharge plasma excitation frequency on the enzymatic activity, antioxidant capacity and phenolic content of apple cubes and apple juice. **Food Res Int**, 136(109617).
- Feinberg, B., Olson, R. L., and Mullins, W. R. 1987. Prepeeled Potatoes in Potato Processing. 697-726.
- Fellows, P. J. 2000. **Food Processing Technology**. 2th edition. Cambridge, England: Elsevier Science & Technology.
- Garcia, E. a. B., D.M. Fresh-cut fruits. **Processing fruits: science and technology**, 53-72.
- Gu, Y., Shi, W., Liu, R., Xing, Y., Yu, X. & Jiang, H. 2021. Cold plasma enzyme inactivation on dielectric properties and freshness quality in bananas.

**Innovative Food Science & Emerging Technologies**, 69(

- Heller, H. a. G. F. 1994. Biosynthesis of flavonoids. 499-535.
- Huang, D. H., Chang, Y. L., Yang, C. C., Pan, I. C. & King, B. 2002. pipsqueak encodes a factor essential for sequence-specific targeting of a polycomb group protein complex. **Mol Cell Biol**, 22(17), 6261-6271.
- HunterLab. (2020). **HunterLab** (pp. <https://www.hunterlab.com/blog/>).
- IFPA. 1999. Handling guidelines for the fresh-cut produce industry. Alexandria, Virginia: International fresh-cut produce association and the produce marketing association.
- Illera, A. E., Chaple, S., Sanz, M. T., Ng, S., Lu, P., Jones, J., Carey, E. & Bourke, P. 2019. Effect of Cold plasma on Polyphenol oxidase inactivation in cloudy apple juice and on the quality parameters of the juice during storage. **Food Chemistry: X**.
- Ismail, A., Marjan, Z. & Foong, C. 2004. Total antioxidant activity and phenolic content in selected vegetables. **Food Chemistry**, 87(4), 581-586.
- James JB, N. T., Rolle RS. 2010. Processing of fresh-cut tropical fruits and vegetables: A technical guide.
- Kondo, Y., Higashi, C., Iwama, M., Ishihara, K., Handa, S., Mugita, H., Maruyama, N., Koga, H., Ishigami, A., 2012. Bioavailability of vitamin C from mashed potatoes and potato chips after oral administration in healthy Japanese men, *British Journal of Nutrition*. 107(06)), 885–892.
- Kubola, J. & Siriamornpun, S. 2008. Phenolic contents and antioxidant activities of bitter melon (*Momordica charantia* L.) leaf, stem and fruit fraction extracts in vitro. **Food Chem**, 110(4), 881-890.
- Lawless, H. T. a. H., H. 1998. **Sensory Evaluation of Food: Principles and Practices**.
- Lee, F. A. 1983. **Basic Food Chemistry**.
- Lourenco, E. J., Neves, V. A. & Da Silva, M. A. 1992. Polyphenol oxidase from sweet potato: purification and properties. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, 40(12), 2369-2373.
- Lozano-De-Gonzalez, P. G., Barrett, D. M., Wrolstad, R. E. & Durst, R. W. 1993. Enzymatic Browning Inhibited in Fresh and Dried Apple Rings by Pineapple Juice.



- Journal of Food Science**, 58(2), 399-404.
- Macheix, J. J., A. Fleuriet and J. Billot. 1990. Fruit Phenolics. 378(
- Marshall, M. R., J.Kim and C. Wei. 2000. Enzymatic browning in fruits, vegetables and seafoods.
- Mathew, A. G. a. H. A. B. P. 1971. Food browning as a polyphenol reaction. **Advances in Food Reserach**, 19), 75-145.
- Mayer, A. M. a. E. H. 1979. Polyphenol oxidase in plants. **Phytochemistry**, 18), 193-215.
- McCord, J. D. & Kilara, A. 1983. Control of Enzymatic Browning in Processed Mushrooms (*Agaricus bisporus*). **Journal of Food Science**, 48(5), 1479-1484.
- McEvily, A. J., Iyengar, R. & Otwell, W. S. 1992. Inhibition of enzymatic browning in foods and beverages. **Crit Rev Food Sci Nutr**, 32(3), 253-273.
- Misra, N. N., Pankaj, S. K., Segat, A. & Ishikawa, K. 2016. Cold plasma interactions with enzymes in foods and model systems. **Trends in Food Science & Technology**, 55(39-47).
- Nagy, S. 1980. Vitamin C contents of citrus fruit and their products: a review. **J Agric Food Chem**, 28(1), 8-18.
- Noctor, G. & Foyer, C. H. 1998. ASCORBATE AND GLUTATHIONE: Keeping Active Oxygen Under Control. **Annu Rev Plant Physiol Plant Mol Biol**, 49(249-279).
- Palamutcu, S. 2015. **Energy footprints in the textile industry**. In S. S. Muthu (Ed.). Cambridge: Elsevier.
- Pan, H., Wang, G., Pan, J., Ye, G., Sun, K., Zhang, J. & Wang, J. 2015. Cold plasma-induced surface modification of heat-polymerized acrylic resin and prevention of early adherence of *Candida albicans*. **Dent Mater J**, 34(4), 529-536.
- Pankaj, S. K., Wan, Z. & Keener, K. M. 2018. Effects of Cold Plasma on Food Quality: A Review. **Foods**, 7(1).
- Polikovsky, M., Fernand, F., Sack, M., Frey, W., Müller, G. & Golberg, A. 2016. Towards marine biorefineries: Selective proteins extractions from marine macroalgae *Ulva* with pulsed electric fields. **Innovative Food Science Emerging Technologies**, 37), 194-200.
- Radi, M., M. Mahrouz and A.Jaouad. 1997. Phenolic composition, browning

- susceptibility and carotenoid content of several apricot cultivars at maturity. **Hort Science**, 32(6), 1087-1091.
- Saladie, M., Matas, A. J., Isaacson, T., Jenks, M. A., Goodwin, S. M., Niklas, K. J., Xiaolin, R., Labavitch, J. M., Shackel, K. A., Fernie, A. R., Lytovchenko, A., O'Neill, M. A., Watkins, C. B. & Rose, J. K. 2007. A reevaluation of the key factors that influence tomato fruit softening and integrity. **Plant Physiol**, 144(2), 1012-1028.
- Sapers, G. M. & Miller, R. L. 1992. Enzymatic Browning Control in Potato with Ascorbic Acid-2-Phosphates. **Journal of Food Science**, 57(5), 1132-1135.
- Saritna, O. 2018. Study of Morphological Characteristics and Chemical Compositions of Various Mango Cultivars.
- Sireerat Lisnund & Sansanee Srihaphong. 2015. Ultraviolet Spectrophotometric for Determination of Ascorbic Acid in Pharmaceutical Tablets and Carambola Fruit by Sodium Thiosulfate Solution.
- Sirijariyawat, A., Charoenrein, S. & Barrett, D. M. 2012. Texture improvement of fresh and frozen mangoes with pectin methylesterase and calcium infusion. **J Sci Food Agric**, 92(13), 2581-2586.
- Sun, J., You, Y., García-García, E., Long, X. & Wang, J. 2010. Biochemical properties and potential endogenous substrates of polyphenoloxidase from chufa (*Eleocharis tuberosa*) corms. **Food Chemistry**, 118(3), 799-803.
- Supapvanich, S. a. B., P. 2016. Visual appearance maintenance of fresh-cut 'Nam Dok Mai' mango fruit by honey dip. 23(1), 389-394.
- Surowsky, B., Fischer, A., Schlueter, O. & Knorr, D. 2013. Cold plasma effects on enzyme activity in a model food system.
- Tappi, S., Ragni, L., Tylewicz, U., Romani, S., Ramazzina, I. & Rocculi, P. 2019. Browning response of fresh-cut apples of different cultivars to cold gas plasma treatment. **Innovative Food Science & Emerging Technologies**, 53, 56-62.
- Toivonen, P. M. A. & Brummell, D. A. 2008. Biochemical bases of appearance and texture changes in fresh-cut fruit and vegetables. **Postharvest Biology and Technology**, 48(1), 1-14.
- Vamos Vignyazo l., F. J. a. B. S. E. 1980. A study into some properties of peroxidase in vegetables [cauliflower, kohlrabi]. 9

- Walker, J. R. L. 1977. Enzymatic browning in foods: its chemistry and control. **Food Technol**, 12), 19-25.
- Wannarat, L., Anuvat, J. & Nantawan, T. 2011. Effect of blanching on polyphenol oxidase activity enzyme in mangosteen and effect of sucrose syrup incorporated with citric acid in mass transfer during osmosis.
- Wyss, C., MCGuirre, M. and Frost, J. . 1990. Composition for extending shelf life of fruits and vegetables. 4,959, 230.
- Zhao, N., Ge, L., Huang, Y., Wang, Y., Wang, Y., Lai, H., Wang, Y., Zhu, Y. & Zhang, J. 2020. Impact of cold plasma processing on quality parameters of packaged fermented vegetable (radish paocai) in comparison with pasteurization processing: Insight into safety and storage stability of products. **Innovative Food Science & Emerging Technologies**, 60
- พนิดา เมฆทัฬห และ มยุรี กระจายกลาง. 2558. ผลของกรดแอสคอบิกต่อคุณภาพการเก็บรักษา สับปะรดห้วยมุ่นตัดแต่ง.
- ณัฐมล จินดาพรรณ, สุจิตรา ศรีเงินยวง และ ชญานิน แดงพรหม. 2556. อิทธิพลของ pH และอุณหภูมิ ที่มีต่อสมบัติการละลายและการเกิดฟองของโปรตีนถั่วเขียวเข้มข้น. วารสารเทคโนโลยีการอาหาร มหาวิทยาลัยสยาม, 9(1), 52-62.
- เกียรติศักดิ์ ดวงมาลัย. 2551. พอลิฟีนอลออกซิเดส และการเกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาลในผักผลไม้. วารสารวิทยาศาสตร์ (มช.), 36), 97-105.
- สมฤติ ไทพานิชย์ และ ชิดารัตน์ แยมอาษา. 2553. คุณลักษณะของเอนไซม์พอลิฟีนอลออกซิเดสในกล้วยน้ำว้า. วารสารเทคโนโลยีการอาหาร.
- ธงชัย สุวรรณสิขณัน, วิชัย หฤทัยธนาสันต์, เพ็ญขวัญ ชมปรีดา และ พจนีย์ พงศ์พงษ์. 2544. การประยุกต์ใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ทำนายไอโซเทอร์มการดูดซับความชื้นของฟลาวข้าว ชนิดต่างๆ. 515-521.
- ชัยรัตน์ เตชวุฒิพร และ พนิดา บุญฤทธิ์ ธงไชย. 2558. ผลของชนิดบรรจุภัณฑ์พลาสติกต่อการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของหน่อไม้ฝรั่งระหว่างการจำลองอุณหภูมิเก็บรักษาและเก็บรักษา. ว. วิทย.กษ., 46(3)), 653-656.
- ฝ่ายสารสนเทศและการจัดการองค์ความรู้ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ. (2556). สี (Color) (pp. [http://cms2.swu.ac.th/Portals/155/ภาควิชาคหกรรมศาสตร์/เอกสารอ้างอิง/HOM\\_155\\_157.152\\_152.153.pdf](http://cms2.swu.ac.th/Portals/155/ภาควิชาคหกรรมศาสตร์/เอกสารอ้างอิง/HOM_155_157.152_152.153.pdf)).
- นรินทร์ เจริญพันธ์ และน้ำทิพย์ มีมุข. 2561. ผลของวิธีการลวกที่แตกต่างกันต่อคุณภาพมันเทศเนื้อสี

สั้ม. 26(6).

วิชมนี ยืนยงพุทธกาล. 2556. ปัจจัยที่มีผลต่อการดั่งน้ำออกด้วยวิธีออสโมซิสของผักและผลไม้. 18, 226-233.

นิธิยา รัตนาปนนท์. 2557. เคมีอาหาร **Food Chemistry**. กรุงเทพฯ: โอเดียนสโตร์.

เนตรนภา เมยกลาง และ ดร.เฉลิม เรื่องวิริยะชัย. 2557. การหาปริมาณสารประกอบฟีนอลิกและฤทธิ์  
การต้านอนุมูล

สินธนา สีนานุรักษ์. 2547. การแปรรูปผักและผลไม้. ภาควิชาเทคโนโลยีทางอาหาร, 171

จิ่งแท้ ศิริพานิช. 2546. สรีรวิทยาและเทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยวผักและผลไม้.

สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ. (2010). การปลูกมะม่วงน้ำดอกไม้สีทอง.

ธีรวรรณ บุญญวรรณ และ หมุดต่อเล็บ หนิสอ. (2562). พลาสมาเยน (ว่าที่) เทคโนโลยีเพื่อเกษตรสี  
เขียวและอาหารปลอดภัย (pp. <http://www.thaiphysoc.org/article/166/>).

โอภา วัชระคุปต์, ปรีชา บุญจุง, จันทนา บุญยะรัตน์ และมาลีรักษ์ อัดต์สินทอง. 2550. สารต้านอนุมูล  
อิสระ.





ภาคผนวก



ภาคผนวก ก

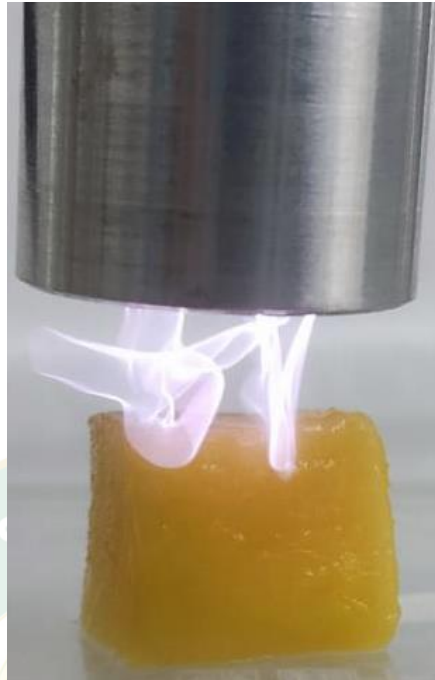
ภาพการดำเนินงาน



ภาพผนวกที่ 1 กระบวนการแช่ในกรดแอสคอร์บิก



ภาพผนวกที่ 2 กระบวนการลวกด้วยน้ำร้อน



ภาพผนวกที่ 3 กระบวนการพลาสมาเย็น



ภาพผนวกที่ 3 การเก็บรักษาตัวอย่างในกล่องพลาสติก (PE)



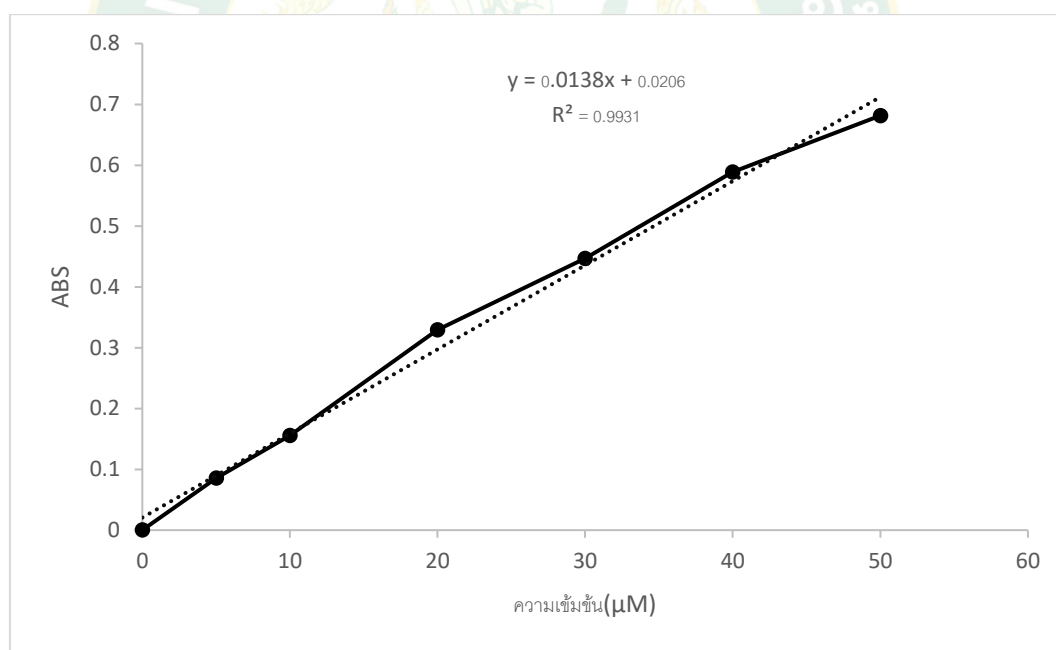


ภาคผนวก ข

กราฟมาตรฐานกรดแอสคอร์บิก

ตารางผนวกที่ 1 การเตรียมสารละลายมาตรฐานกรดแอสคอร์บิก

ความเข้มข้นสารละลาย มาตรฐานกรดแอสคอร์บิก	ปริมาตรสารละลายกรด แอสคอร์บิก mg/ml
0	0.0001
5	0.0855
10	0.1558
20	0.3294
30	0.4465
40	0.5888
50	0.6815



ภาพผนวกที่ 4 กราฟช่วงความเป็นเส้นตรงของกรดแอสคอร์บิกเข้มข้น 5-50 µM ตัวทำละลาย  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$  ร้อยละ 0.04 เมื่อวัดด้วยเครื่องอัลตราไวโอเล็ตสเปกโตรโฟโตมิเตอร์

### การคำนวณปริมาณกรดแอสคอร์บิกของมะม่วง

สมการของกราฟมาตรฐานกรดแอสคอร์บิก คือ

$$y = 0.0138x + 0.02 \quad (4)$$

เมื่อ  $y$  = ค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 265 นาโนเมตร

$x$  = ปริมาณกรดแอสคอร์บิก ( $\mu\text{mol/l}$ )

ตัวอย่างมะม่วงสดตัดแต่ง ค่าการดูดกลืนแสงที่วัดได้ 0.023

$$y = 0.0138x + 0.02$$

$$0.8377 = 0.0138x + 0.02$$

$$x = \frac{(0.8377 - 0.02)}{0.0138}$$

$$x = 0.021 \mu\text{mol/l}$$

$$x = \frac{0.021}{1000} \times 250 \mu\text{mol}$$

$$x = 15.17 \mu\text{mol}$$

ดังนั้น กรดแอสคอร์บิกในมะม่วงมีปริมาณกรดแอสคอร์บิก 15.17  $\mu\text{mol}$

หรือคิดเป็น  $\frac{15.17 \times 176.13}{1000}$  mg/5g เท่ากับ 2.67 mg/5g

มะม่วง 1 กรัม จะมีกรดแอสคอร์บิก เท่ากับ  $\frac{2.67}{5} = 0.51$  mg/g

มะม่วง 100 กรัม จะมีกรดแอสคอร์บิก เท่ากับ  $0.51 \times 100 = 51.52$  mg/100g



ภาคผนวก ค

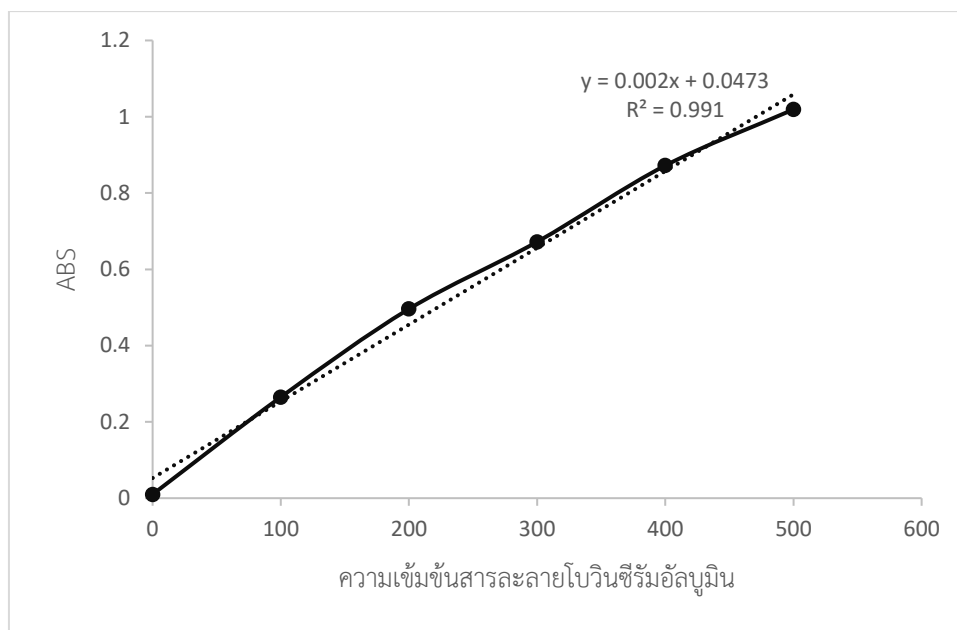
กราฟมาตรฐานโบวินซีรัมอัลบูมิน (BSA)

**ตารางผนวกที่ 2** การเตรียมสารละลายมาตรฐานโบรินซีรัมอัลบูมิน (BSA)

ความเข้มข้นสารละลาย มาตรฐานโบรินซีรัมอัลบูมิน ( $\mu\text{g/ml}$ )	ปริมาตรสารละลายมาตรฐาน โบรินซีรัมอัลบูมิน ความเข้มข้น 10 mg/ml	น้ำกลั่น ( $\mu\text{l}$ )
100	5	495
200	10	490
400	20	480
600	30	470
900	45	455
1,200	60	440
1,500	75	425

**ตารางผนวกที่ 3** การเตรียมสารละลายมาตรฐานโบรินซีรัมอัลบูมิน (BSA)

ความเข้มข้นสารละลายโบรินซีรัมอัลบูมิน ( $\mu\text{g/ml}$ )	Absorbance (ความยาวคลื่น 595 นาโน เมตร)
0	0.004
100	0.265
200	0.496
300	0.672
400	0.872
500	1.019



ภาพผนวกที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสงสูงสุด ที่ความยาวคลื่น 595 นาโนเมตร และ ความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานโบวีนซีรัมอัลบูมิน

การคำนวณปริมาณโปรตีนของสารตัวอย่าง

สมการของกราฟมาตรฐานโบวีนซีรัมอัลบูมิน คือ

$$y = 0.002x + 0.0473 \quad (5)$$

เมื่อ  $y$  = ค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 595 นาโนเมตร

$x$  = ปริมาณโปรตีน ( $\mu\text{g/g}$ )

ตัวอย่างมะม่วงสดตัดแต่ง ค่าการดูดกลืนแสงที่วัดได้ 0.047 โดย Dilution 2 เท่า

$$y = 0.002x + 0.0473$$

$$0.047 = 0.002x + 0.0473$$

$$x = \frac{(0.047 - 0.0473)}{0.002} \times 2$$

$$x = 0.671 \mu\text{g/g}$$

การคำนวณปริมาณโปรตีนของสารตัวอย่าง (มิลลิกรัมต่อกรัมตัวอย่าง)

การคำนวณปริมาณโปรตีนของสารตัวอย่าง (มิลลิกรัมต่อกรัมตัวอย่าง)

ตัวอย่าง 1 กรัม มีโปรตีน 0.671  $\mu\text{g/g}$

ตัวอย่าง 1 กรัม มีโปรตีน 0.00671 mg/g

ตัวอย่าง 100 กรัม มีโปรตีน 0.067 mg/g

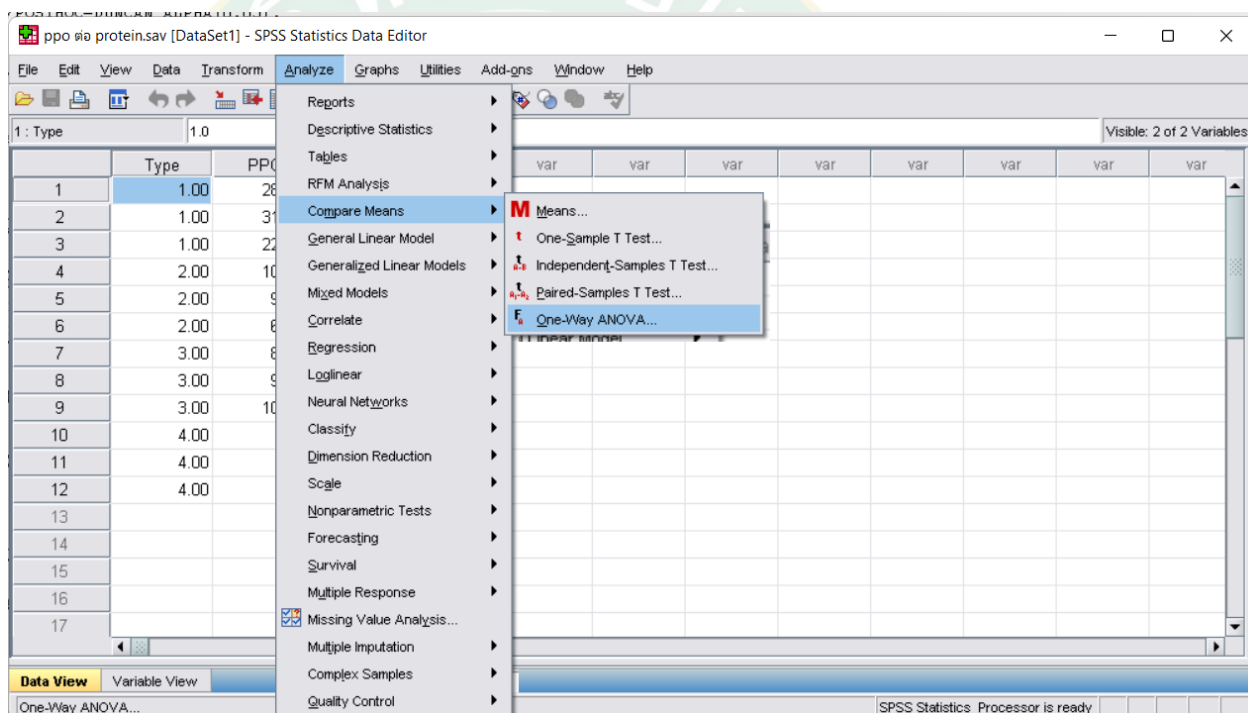






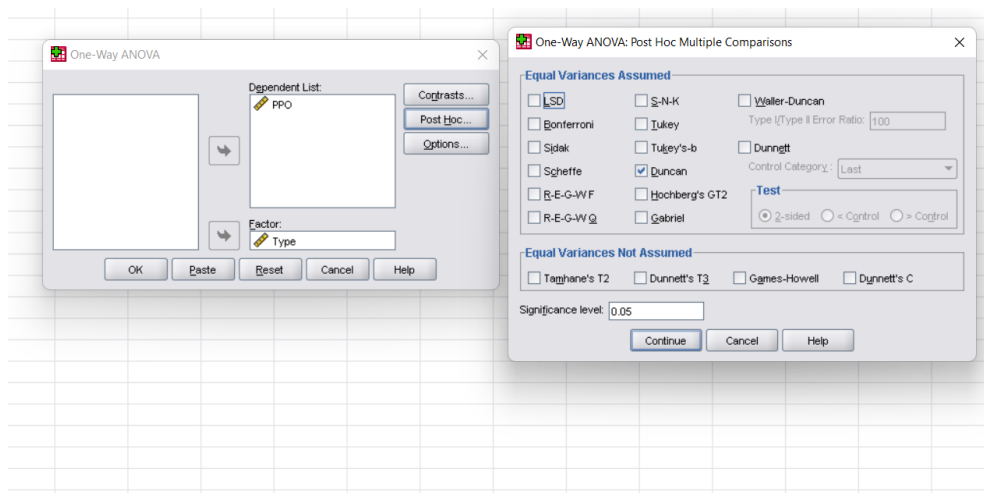
## การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA)

การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ทำการวิเคราะห์ผลด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำเร็จรูป SPSS (Statistical Package for the Social Sciences) และเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยระหว่างชุดการทดลองโดยวิธี Duncan's New Multiple Range Test (DMRT) ซึ่งพิจารณาค่าที่ความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ( $p < 0.05$ ) โดยเริ่มจากการใส่ข้อมูลที่ได้จากการทดลอง จากนั้นเลือกวิธีในการวิเคราะห์ Analyze เลือกไปที่ Compare Means และเลือกรูปแบบ One-Way ANOVA ดังภาพผนวกที่ 7



ภาพผนวกที่ 6 การเลือกวิธีการวิเคราะห์ความแปรปรวน จากนั้นเลือกตัวแปรที่จะใช้ทำการวิเคราะห์

เข้าไปที่ Post Hoc Multiple Comparisons กดเลือกวิธี Duncan's New Multiple Range Test (DMRT) ดังภาพผนวกที่ 8



ภาพผนวกที่ 7 วิธีการเลือกเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยระหว่างชุดการทดลองโดยวิธี Duncan's New Multiple Range Test (DMRT)

```

ONeway PPO DI Type
/MISSING ANALYSIS
/POSTHOC=DUNCAN ALPHA(0.05) .
    
```

➔ **Oneway**

[DataSet1] C:\Users\chin1\Desktop\งาน\แลมพลาสมา\ppo ต่อ protein.sav

**ANOVA**

ANOVA					
PPO					
	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	115788.974	3	38596.325	62.407	.000
Within Groups	4947.708	8	618.464		
Total	120736.682	11			

**Post Hoc Tests**

**Homogeneous Subsets**

**PPO**

Duncan <sup>a</sup>				
Type	N	Subset for alpha = 0.05		
		1	2	3
4.00	3	4.0833		
2.00	3		87.0000	
3.00	3		94.0000	
1.00	3			273.3333
Sig.		1.000	.739	1.000

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

ภาพผนวกที่ 8 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของกิจกรรมเอนไซม์ลิพีนอลออกซิเดสในมะม่วงตัดแต่งหลังผ่านกระบวนการต่างๆ





รายงานการประชุมวิชาการระดับชาติประจำปี 2564  
**“นวัตกรรมเกษตร อาหาร และสุขภาพ”**

*Proceedings of MJU Annual Conference 2021*



การประชุมทางวิชาการระดับชาติ ประจำปี 2564  
 นวัตกรรมเกษตร อาหาร และสุขภาพ



**24-25 ธันวาคม 2564**

ณ อาคารเรียนรวม 80 ปี มหาวิทยาลัยแม่โจ้ จังหวัดเชียงใหม่  
 จัดโดย สำนักวิจัยและส่งเสริมวิชาการการเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้



<b>สารบัญ (ต่อ)</b>	<b>หน้า</b>
<b>ภาคโปสเตอร์</b>	
การใช้ประโยชน์จากมันสำปะหลังหมักยีสต์เป็นแหล่งพลังงานทางเลือกในอาหารไก่พื้นเมือง สุวีรัตน์ ถือแก้ว ทองเลียน บัวจุม และวัชรภรณ์ ทิลา	848
ผลของการเสริมสาหร่ายสไปรูลิน่าในอาหารไก่ไข่ต่อคุณภาพไข่ และคลอเลสเตอรอลในไข่แดงต้มสุก บัวเรียม มณีวรรณ จงกล พรหมยะ จิราพร โรจน์ทินกร และครรชิต ชมภูพันธ์	858
ผลของการเสริมกากมันสำปะหลังหมักทดแทนอาหารชั้นต่อคุณค่าทางโภชนา และความสามารถ ในการย่อยได้ของโคเนื้อ โกเมนทร์ อุ่นล่อ อูติมา นรโกศ ธนิตพันธ์ พงษ์จงมิตร นพรัตน์ ผกาเขต ทิพย์สุดา บุญมาทัน ปรมินทร์ สุครีพ และธวัชชัย ทิมพิไชว์	867
อิทธิพลของผงหมากนวลต่อคุณค่าและการย่อยได้ทางโภชนาของโคเนื้อ ธวัชชัย ทิมพิไชว์ อูติมา นรโกศ ธนิตพันธ์ พงษ์จงมิตร นพรัตน์ ผกาเขต ทิพย์สุดา บุญมาทัน ปรมินทร์ สุครีพ และโกเมนทร์ อุ่นล่อ	875
<b>Session 10</b>	<b>884-964</b>
<b>ภาคบรรยาย</b>	
การหมักน้ำผักด้วย <i>Lactobacillus plantarum</i> อนงค์ อัสนิจินทรา กมลวรรณ มโนวรรณ เบญจวรรณ ป่าพันธ์ พยุงค์ศักดิ์ มะโนชัย และนิอร โฉมศรี	884
ผลของกรดซิตริกและแอสคอร์บิกต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์น้ำพริกหนุ่มพาสเจอร์ไรส์บรรจุขวด รัชฎาภรณ์ ลีนฤณี วิจิตรา แดงปรก กนกวรรณ ดาลดี วชิระ ชุ่มมงคล มธุรส ชัยหาญ และธีระพล เสนพันธ์	897
การออกแบบและทดสอบการใช้พลาสมาเย็นในการยับยั้งเอนไซม์โพลีฟีนอลออกซิเดสในมะม่วงตัดแต่ง ธีรชัย ปรมาศิทธิวัฒน์ หยาดฝน ทนงการกิจ ชนวัฒน์ นิตศน์วิจิตร และกาญจนา นาคประสม	905



การออกแบบและทดสอบการใช้พลาสมาเย็นในการยับยั้งเอนไซม์โพลีฟีนอลออกซิเดส  
ในมะม่วงตัดแต่ง

Design and Test of Cold Plasma Equipment  
for Inhibiting Polyphenol Oxidase Enzyme in Fresh-cut Mango

ธีรชัย พรมาพิจิตรวัฒน์ หยาตผน ทนงการกิจ\* ชนวัฒน์ นิตส์นวิจิตร และกาญจนา นาคประสม  
Teerachai Poramapijitwat, Yardfon Tanongkankit\*, Chanawat Nitatwichit  
and Kanjana Narkprasom

วิศวกรรมอาหาร คณะวิศวกรรมและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้ เชียงใหม่ 50290

Food Engineering, Faculty of Engineering and Agro-industry, Maejo University, Chiang mai, Thailand 50290

\*Corresponding author: yardfon@mju.ac.th

Abstract

In this research design of cold plasma equipment for inhibiting polyphenol oxidase activity (PPO) was conducted. The cold plasma equipment consisted of 5 parts which were gas tank, variable transformer, neon transformer plasma jet head and other structure parts. For experiment of cold plasma treatment, effects of different cold plasma treatment times at 3, 4 and 5 min on PPO activity were performed. Argon gas with flow rate at 25 liter/min was used as medium gas. The results showed that PPO activity decreased when plasma treatment time was longer and remained constant after 4 min. Moreover, color presented in the terms of  $L^*$ ,  $a^*$  and  $b^*$  values and appearance of the samples were observed hourly during storage at 4°C for determination of shelf life. It was observed that  $L^*$  and  $b^*$  values decreased while  $a^*$  value increased when storage time was longer for all samples. Overall results, it could be concluded that cold plasma treatment for 4 min was the best condition to inhibit PPO activity to  $1.49 \pm 0.41\%$  and extended its shelf life from 7 hr. to 48 hr.

**Keywords:** browning reaction, cold plasma, enzyme, fresh-cut mango, shelf life



## บทคัดย่อ

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการออกแบบเครื่องผลิตพลาสมาเย็นเพื่อใช้ยับยั้งกิจกรรมของเอนไซม์โพลีฟีนอลออกซิเดส (PPO) โดยมีส่วนประกอบทั้งหมด 5 ส่วน ได้แก่ ถังก๊าซ หม้อแปลงปรับแรงดันไฟฟ้า หม้อแปลงไฟฟ้านิออน และหัวพลาสมาเจ็ท และส่วนประกอบอื่นซึ่งเป็นส่วนของโครงสร้าง ในส่วนของการดำเนินการทดสอบการใช้พลาสมาเย็นในการยับยั้งกิจกรรมเอนไซม์ PPO ในมะม่วงตัดแต่งที่เวลา 3 4 และ 5 นาที โดยในการทดสอบนี้ใช้ก๊าซอาร์กอนที่อัตราการไหล 25 ลิตร/นาที ซึ่งผลการทดลองพบว่า กิจกรรมของเอนไซม์ PPO จะลดลงเมื่อตัวอย่างใช้เวลาในการสัมผัสกับพลาสมาเย็นนานขึ้นและจะคงที่เมื่อเวลา 4 นาที นอกจากนี้ได้ทำการวัดค่าซึ่งแสดงผลในเทอมของค่า  $L^*$   $a^*$  และ  $b^*$  และลักษณะปรากฏของมะม่วงตัดแต่งที่ไม่ผ่านและผ่านพลาสมาเย็นที่เวลาต่างๆ ที่เก็บไว้ที่อุณหภูมิ 4°C ทุกชั่วโมง เพื่อศึกษาอายุการวางจำหน่าย โดยผลการศึกษพบว่าค่า  $L^*$  และ ค่า  $b^*$  ลดลงในขณะที่ค่า  $a^*$  ของทุกตัวอย่างเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาการเก็บรักษานานขึ้น เมื่อพิจารณาจากผลการทดลองทั้งหมดสรุปได้ว่า การใช้พลาสมาเย็นที่เวลา 4 นาทีเป็นเวลาที่เหมาะสมสำหรับการยับยั้งกิจกรรมเอนไซม์ PPO ลงเหลือเพียงร้อยละ  $1.49 \pm 0.41$  และสามารถยืดอายุการวางจำหน่ายมะม่วงตัดแต่งจาก 7 ชม. เป็น 48 ชม.

**คำสำคัญ:** ปฏิกริยาน้ำตาล มะม่วงตัดแต่ง พลาสมาเย็น อายุการวางจำหน่าย เอนไซม์

## คำนำ

ในอุตสาหกรรมการแปรรูปผักผลไม้สดแต่มีจะประสบปัญหาการเกิดการเปลี่ยนแปลงของสีในผลิตภัณฑ์เป็นสีที่น้ำตาลและคล้ำลงเนื่องจากปฏิกริยาน้ำตาลที่มีเอนไซม์โพลีฟีนอลออกซิเดสเป็นตัวเร่ง ซึ่งส่งผลให้มีอายุการวางจำหน่ายสั้นลงจึงอาจทำให้เกิดเป็นของเสียเหลือทิ้งมากและทำให้ต้นทุนการผลิตสูงขึ้น ดังนั้นในกระบวนการผลิตผลไม้สดจึงต้องมีกระบวนการเพื่อยับยั้งการทำงานของเอนไซม์โพลีฟีนอลออกซิเดส เช่น การลวกน้ำร้อน การปรับให้เป็นกรดด้วยสารละลายกรดอินทรีย์และการแ่สาร reducing agent (Somrudee and Tidarath, 2009) ซึ่งวิธีการเหล่านี้มักส่งผลให้ลักษณะเนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์เปลี่ยนแปลงไปเช่น เนื้อสัมผัสนิ่มลงเนื่องจากความร้อนจากการลวก รสชาติเปลี่ยนแปลงไปเนื่องจากการปรับให้เป็นกรดหรือการสูญเสียสารอาหารที่ละลายน้ำได้หลังจากการแ่สาร ดังนั้นในปัจจุบันนี้ ได้มีการศึกษาการใช้เทคโนโลยีพลาสมาเย็นเพื่อยับยั้งการทำงานของเอนไซม์โพลีฟีนอลออกซิเดสซึ่งเป็นสาเหตุหลักที่ก่อให้เกิดการเปลี่ยนสีในผักและผลไม้สด โดยที่พลาสมาสามารถเกิดขึ้นได้โดยการให้สนามไฟฟ้าแก่ก๊าซที่มีประจุเป็นกลางเช่น ก๊าซอาร์กอนในปริมาณมาก เมื่อพลังงานที่ให้มามากพอที่จะทำให้ไออิเล็กตรอนอิสระชนกับอะตอมของก๊าซจนทำให้ไออิเล็กตรอนหลุดออกจากอะตอมและเกิดการแตกตัวเป็นไอออนอย่างรวดเร็วและกลายเป็นพลาสมาในที่สุด (Misra et al., 2016) จากนั้นอนุภาคพลาสมาจะสามารถแพร่ซึมผ่านผนังเซลล์พืชไปทำให้โครงสร้างของโปรตีนซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักของเอนไซม์เปลี่ยนแปลงหรือเกิดการเสียสภาพ (denaturation) ไป จึงส่งผลให้กิจกรรมของเอนไซม์ลดลงและไม่สามารถเกิดปฏิกริยาน้ำตาลขึ้นในผลิตภัณฑ์ได้ จากงานวิจัยที่ผ่านมาได้มีการรายงานการใช้พลาสมาเย็นในการยับยั้งการทำงานของเอนไซม์โพลีฟีนอลออกซิเดสเช่น Dobrynin et al. (2009) รายงานว่า กิจกรรมของเอนไซม์ในเนื้อฝรั่งลดลง



ถึง 70% เมื่อใช้พลาสมา 2 กิโลวัตต์ เป็นเวลา 5 นาที เนื่องจากการใช้พลาสมาสามารถทำลายพันธะของโปรตีนได้จึงส่งผลให้กิจกรรมของเอนไซม์ลดลง นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยของ Pankaj *et al.* (2013) พบว่า การใช้พลาสมาที่ 30 กิโลวัตต์ เป็นเวลา 5 นาที สามารถยับยั้งกิจกรรมของเอนไซม์โพลีฟีนอลออกซิเดสในมะเขือเทศจนเหลือน้อยกว่า 10% แต่อย่างไรก็ตามในประเทศไทยเทคโนโลยีการใช้พลาสมาเย็นนี้เป็นเทคโนโลยีที่ค่อนข้างใหม่จึงยังมีข้อจำกัดในหลายด้าน เช่น เครื่องมือที่ใช้ผลิตพลาสมาเย็นมีราคาสูงและส่วนใหญ่การใช้เทคโนโลยีนี้ยังอยู่ในขั้นของการทดลองในห้องปฏิบัติการ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์ในการออกแบบและสร้างเครื่องพลาสมาเย็นสำหรับการทำลายเอนไซม์โพลีฟีนอลออกซิเดสในผลิตภัณฑ์มะม่วงตัดแต่งเพื่อยืดอายุการวางจำหน่าย เพื่อเป็นข้อมูลสำหรับการขยายผลในระดับอุตสาหกรรมในอนาคต

## อุปกรณ์และวิธีการ

### การออกแบบเครื่องพลาสมาเย็น

ทำการศึกษาข้อมูลเกี่ยวกับระบบและอุปกรณ์ของเครื่องพลาสมาเย็น จากนั้นทำการออกแบบและเขียนแบบอุปกรณ์เครื่องพลาสมาเย็นด้วยโปรแกรม SolidWorks *et al.* (2020) และสร้างเครื่องตามที่ได้ออกแบบไว้

### การทดสอบเครื่องพลาสมาเย็นในการยับยั้งเอนไซม์โพลีฟีนอลออกซิเดสในมะม่วงตัดแต่ง

นำมะม่วงพันธุ์น้ำดอกไม้สุกจากตลาดเมืองใหม่ อำเภอเมือง จังหวัดเชียงใหม่ ซึ่งควบคุมปริมาณของแข็งที่ละลายในน้ำไว้ที่ 20-22 บริกซ์ Orapin *et al.*, (2018) มาล้าง ปอกเปลือกและหั่นให้มีขนาด 1.5x1.5x1.5 ซม. จากนั้นนำตัวอย่างสัมผัสกับพลาสมาเย็นเป็นเวลา 3 4 และ 5 นาที สำหรับด้านบนและด้านล่างของตัวอย่าง โดยพลาสมาเย็นใช้แรงดันไฟฟ้า 12.5 กิโลวัตต์ หัวเข็มขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 ซม. ระยะห่างระหว่างตัวอย่างกับหัวเข็มอยู่ที่ 10 มม. และอัตราการไหลของก๊าซอาร์กอน 25 ลิตร/นาที และเก็บตัวอย่างไว้ในถุงพลาสติกโพลีเอทิลีน (PE) ที่อุณหภูมิ 4°C เพื่อนำไปวิเคราะห์กิจกรรมเอนไซม์โพลีฟีนอลออกซิเดสและค่าสี

### การวิเคราะห์กิจกรรมเอนไซม์โพลีฟีนอลออกซิเดส

นำมะม่วงที่ผ่านพลาสมาเย็นที่เวลาต่างๆ จำนวน 200 กรัม มาปั่นรวมกับสารละลาย phosphate buffer pH 7.0 ความเข้มข้น 0.2 โมลาร์ ปริมาณ 200 มล. ด้วยเครื่องปั่น (ยี่ห้อ Tefal รุ่น BL307, ฝรั่งเศส) นาน 25 วินาที นำไปหมุนเหวี่ยง ใน refrigerated centrifuge ที่อุณหภูมิ 4°C ความเร็ว 8,000 รอบ/นาที เป็นเวลา 10 นาที แล้วนำส่วนใสมาตกตะกอนโปรตีนด้วย saturation ammonium sulphate ความเข้มข้นร้อยละ 80 ที่อุณหภูมิ 0°C จากนั้นนำไปหมุนเหวี่ยงใน refrigerated centrifuge (ยี่ห้อ SORVALL รุ่น RC 5C Plus, สหรัฐอเมริกา) ที่อุณหภูมิ 4°C ด้วยความเร็ว 8,000 รอบ/นาที นาน 10 นาที และนำตะกอนที่ได้มาละลายด้วยสารละลาย phosphate buffer pH 7.0 ความเข้มข้น 0.2 โมลาร์ ปริมาตร 4 มล. เก็บ crude enzyme ไว้ที่อุณหภูมิ 0°C จากนั้นนำ crude enzyme มาทำปฏิกิริยากับสารละลาย catechol ความเข้มข้น 20 มิลลิโมลาร์ ในสารละลาย phosphate buffer pH 7.0 ความเข้มข้น 0.2 โมลาร์ ปริมาตร 2.80 มล. ที่อุณหภูมิ 25°C วัดการเปลี่ยนแปลงของค่าการดูดกลืนแสง



ที่ความยาวคลื่น 420 นาโนเมตร โดยใช้เครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (ยี่ห้อ Thermo scientific รุ่น Genesys 30, สหรัฐอเมริกา) และคำนวณอัตราเร็วเริ่มต้นจากความชันของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสงกับเวลา คำนวณกิจกรรมเอนไซม์โพลีฟีนอลออกซิเดส โดยให้เอนไซม์ 1 หน่วย (unit) เท่ากับการเปลี่ยนแปลงค่าการดูดกลืนแสง 0.001 หน่วยต่อนาที (Somrudee and Tidarath 2009)

#### การวิเคราะห์ค่าสี

การวิเคราะห์คุณภาพด้านสีของตัวอย่างจะใช้เครื่องวัดสี (ยี่ห้อ Hunterlab รุ่น MiniScan XE plus, สหรัฐอเมริกา) การวิเคราะห์สีจะวิเคราะห์ด้วยระบบ CIE โดยการวิเคราะห์วัดสีในเทอมของค่าความสว่าง ( $L^*$ ) ค่าความเป็นสีเขียว ( $-a^*$ ) -สีแดง ( $+a^*$ ) และค่าความเป็นสีน้ำเงิน ( $-b^*$ ) -สีเหลือง ( $+b^*$ ) โดยทำการวัดจำนวน 3 ซ้ำต่อตัวอย่าง

#### การวิเคราะห์ทางสถิติ

การวางแผนการทดลองและวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติแบบ Completely Randomized Design จากการทดลอง 3 ซ้ำ และเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยโดยใช้วิธี Duncan's New Multiple Range Test ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ( $p < 0.05$ ) โดยใช้โปรแกรม SPSS version 17.0

### ผลการวิจัย

#### การออกแบบอุปกรณ์และเครื่องพลาสมาเย็น

ในการออกแบบเครื่องพลาสมาเย็นเพื่อใช้สำหรับยับยั้งกิจกรรมของเอนไซม์โพลีฟีนอลออกซิเดสนี้ได้ใช้ก๊าซอาร์กอนเป็นตัวกลางในการทำให้เกิดอิเล็กตรอนอิสระเพื่อเป็นอนุภาคของพลาสมาเย็น เนื่องจากเป็นธาตุที่มีโครงสร้างอะตอมที่มีอิเล็กตรอนวงนอกมากที่สุดคือ 8 ตัวและไม่ติดไฟ โดยเครื่องนี้มีอุปกรณ์หลักทั้งหมด 4 ส่วน ดังนี้

1. ถังก๊าซอาร์กอนขนาด 6 คิว (Figure 1A)
2. หม้อแปลงปรับแรงดันไฟฟ้า ใช้สำหรับปรับแรงดันไฟฟ้าขาเข้าของหม้อแปลงไฟฟ้านิออน (Figure 1B)
3. หม้อแปลงไฟฟ้านิออนขนาด 12.5 กิโลโวลต์ ใช้สำหรับเพิ่มแรงดันไฟฟ้า (Figure 1C)



Figure 1 (A) 6 m<sup>3</sup> argon gas tank, (B) Variable transformer and (C) Neon transformer

#### 4. ส่วนหัวพลาสมาเจ็ท (Figure 2) ซึ่งประกอบไปด้วย

- ตัวบอดี้ซึ่งเป็นวัสดุพลาสติกวิศวกรรมมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 ซม. ยาว 4 ซม. ทำหน้าที่เป็นโครงสร้างสำหรับต่ออิเล็กทรอนิกส์ทั้ง 2 ตัว และสายแก๊ส

- อิเล็กโทรดทำหน้าที่สร้างสนามไฟฟ้า โดยใช้วัสดุที่สามารถนำไฟฟ้า 2 ตัว ได้แก่ ทองแดงซึ่งทำหน้าที่เป็นแอโนดและอะลูมิเนียมเป็นแคโทด โดยตัวทองแดงมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.6 ซม. ความยาว 10 ซม. และอะลูมิเนียมมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 2.6 ซม. ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 2 ซม. มีความยาว 10 ซม.



Figure 2 Plasma jet head

นอกจากนี้เครื่องพลาสมาเจ็ทยังมีส่วนประกอบอื่นซึ่งเป็นส่วนของโครงสร้าง โดยแสดงใน Figure 3 ดังนี้

1. โครงตู้เครื่องพลาสมาขนาด 50x50x50 ซม. วัสดุที่ใช้เป็นสแตนเลส sus 304 ซึ่งมีความหนา 2 ซม. (Figure 3A) และมุมภายในตู้ ได้มีการออกแบบให้มีลักษณะโค้งเพื่อให้่ายต่อการทำความสะอาด (Figure 3B)
2. ประตูอะคริลิกตู้ของเครื่องพลาสมา ขนาด 50x50x2 ซม.
3. ฐานรองตัวอย่างถูกออกแบบให้สามารถปรับระดับความสูงได้โดยการหมุนวงล้อตรงกลาง โดยมีขนาดของแผ่นที่วางตัวอย่าง 15x15 ซม. และวัสดุที่ใช้เป็นสแตนเลส sus 304 (Figure 3C)



Figure 3 (A) Door and cold plasma cabinet (B) Round corner and (C) Sample stage

ในการประกอบเครื่องพลาสมาเย็น ถึงก๊าซอาร์กอนจะถูกต่อเข้ากับส่วนบอดี้ของพลาสมาเจ็ทด้วยสายก๊าซและ ส่วนของหม้อแปลงแรงดันไฟฟ้าขนาด 12.5 กิโลโวลต์ จากหม้อแปลงไฟนีออน (รับไฟฟ้ามาจากหม้อแปลงปรับแรงดันไฟฟ้า) ต่อเข้ากับอิเล็กทรอนิกส์ทรานสดูแมงและอะลูมิเนียมอย่างละเอียดด้วยสายไฟฟ้า Figure 4A

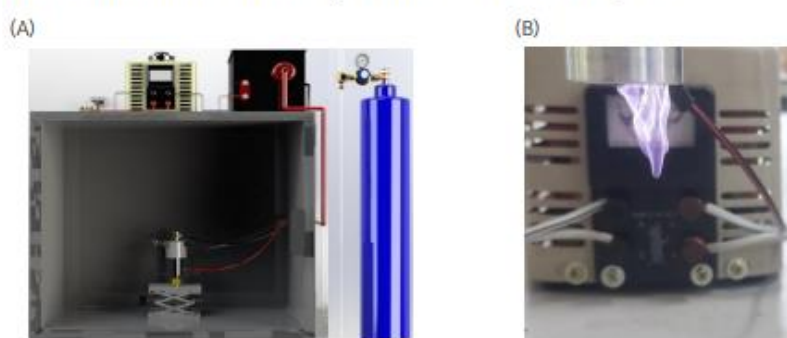


Figure 4 (A) Cold plasma equipment setup and (B) Cold plasma jet

ในการทำงานของเครื่องพลาสมาเริ่มจากการเปิดสวิตช์เพื่อให้กระแสไฟฟ้าจะไหลเข้าสู่หม้อแปลงปรับแรงดันไฟฟ้าเพื่อปรับขนาดแรงดันไฟฟ้าขาออกของหม้อแปลงปรับแรงดันไฟฟ้าให้อยู่ที่ 220 โวลต์ จากนั้นจ่ายไฟฟ้าเข้าสู่หม้อแปลงไฟนีออน ซึ่งจะเพิ่มแรงดันไฟฟ้าจาก 220 โวลต์ เป็น 12.5 กิโลโวลต์ ต่อสายไฟขาออกจากหม้อแปลงไฟนีออนไปยังแคโทดและแอโนด เมื่ออิเล็กโทรดทั้งสองตัวที่ได้รับกระแสไฟฟ้า จะทำให้เกิดสนามไฟฟ้าที่ระหว่างระยะห่างของอิเล็กโทรดทั้งสองตัว จากนั้นเปิดวาล์วแก๊สอาร์กอนที่อัตราการไหล 25 ลิตร/นาที ให้ไหลผ่านสนามไฟฟ้าที่อยู่ระหว่างอิเล็กโทรดทั้ง 2 ตัว การให้สนามไฟฟ้าปริมาณมากแก่ก๊าซอาร์กอนที่เป็นกลาง เมื่อพลังงานส่งผ่านไปยังอิเล็กตรอนอิสระมากพอ จะทำให้อิเล็กตรอนอิสระชนกับอะตอม และทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกจากอะตอม กระบวนการนี้เรียกว่า กระบวนการแตกตัวเป็นไอออน (ionization) ซึ่งจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว ทำให้จำนวนอิเล็กตรอนที่หลุดออกมานี้เพิ่มจำนวนขึ้นอย่างมากซึ่งจะทำให้ก๊าซแตกตัวและกลายเป็นพลาสมาในที่สุด (Figure 4B)

#### การทดสอบการใช้เครื่องพลาสมาเย็นในการยับยั้งกิจกรรมของเอนไซม์โพลีฟีนอลออกซิเดส

ผลการศึกษาการใช้พลาสมาเย็นเพื่อยับยั้งกิจกรรมของเอนไซม์โพลีฟีนอลออกซิเดสในมะม่วงตัดแต่งที่เวลา 3 4 และ 5 นาที ซึ่งแสดงในตารางที่ 1 พบว่า เมื่อเวลาการใช้พลาสมาเย็นนานขึ้นส่งผลให้กิจกรรมของเอนไซม์โพลีฟีนอลออกซิเดสลดลงจนถึงเวลา 4 นาที หลังจากนั้นกิจกรรมของเอนไซม์โพลีฟีนอลออกซิเดสมีค่าคงที่ โดยที่สามารถลดกิจกรรมของเอนไซม์โพลีฟีนอลออกซิเดสในมะม่วงตัดแต่งที่ไม่ผ่านการทรีทเมนต์ด้วยพลาสมาลงจาก  $273.33 \pm 46.11$  หน่วย/นาที ลงเหลือ  $4.08 \pm 1.12$  หน่วย/นาที หรือคิดเป็นร้อยละ  $1.49 \pm 0.41$



**Table 1** Polyphenol oxidase activity and residual polyphenol oxidase activity in mango after different cold plasma treatment times

Sample	PPO activity (unit/min)	PPO residual activity (%)
Untreated	273.33±46.11 <sup>a</sup>	-
3 min treated	9.58±2.60 <sup>b</sup>	3.51±0.95 <sup>a</sup>
4 min treated	4.08±1.12 <sup>c</sup>	1.49±0.41 <sup>b</sup>
5 min treated	5.63±0.98 <sup>c</sup>	2.05±0.59 <sup>b</sup>

Different letters in the same column are significantly different from each other ( $p < 0.05$ ).

นอกจากนี้เมื่อเก็บตัวอย่างมะม่วงตัดแต่งที่ไม่ผ่านพลาสติกและผ่านพลาสติกเป็นเวลาต่างๆ ไว้ในถุงพลาสติกชนิดโพลีเอทิลีน (PE) ที่อุณหภูมิ 4 °C ผลการศึกษาค่าสี ซึ่งแสดงค่าในเทอมของ  $L^*$   $a^*$  และ  $b^*$  ของมะม่วงตัดแต่งโดยแสดงใน Figure 6 พบว่า ค่า  $L^*$  ซึ่งเป็นค่าความสว่างและ ค่า  $+b^*$  ซึ่งเป็นค่าความเป็นสีเหลืองของทุกตัวอย่างลดลงเมื่อเวลาการวางจำหน่ายนานขึ้น โดยตัวอย่างที่ไม่ผ่านพลาสติกมีการลดลงมากที่สุดและถัดมาเป็นตัวอย่างที่ผ่านพลาสติกเป็นเวลา 3 นาที ในขณะที่ตัวอย่างที่ผ่านพลาสติกเป็นเวลา 4 และ 5 นาที มีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ แต่อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาค่า  $a^*$  ซึ่งจะแสดงค่าความเป็นสีแดงเมื่อมีค่าเป็นบวกและเป็นสีเขียวเมื่อมีค่าเป็นลบนั้นพบว่า ค่า  $a^*$  ของทุกตัวอย่างในตอนเริ่มต้นเป็นค่าติดลบจากนั้นเมื่อเวลาการวางจำหน่ายเพิ่มมากขึ้น ค่า  $a^*$  จะเพิ่มขึ้นจนมีค่าเป็นบวก ซึ่งแสดงให้เห็นว่าในเวลาเริ่มต้นตัวอย่างมะม่วงมีค่าความเป็นสีเขียวแต่เมื่อเวลาการวางจำหน่ายนานขึ้นค่าความเป็นสีเขียวลดลงและตัวอย่างแสดงค่าความเป็นสีแดงเพิ่มมากขึ้น โดยตัวอย่างที่ไม่ผ่านพลาสติกมีความเป็นสีแดงเพิ่มขึ้นมากที่สุดและถัดมาเป็นตัวอย่างที่ผ่านพลาสติกเป็นเวลา 3 นาที ในขณะที่ตัวอย่างที่ผ่านพลาสติกเป็นเวลา 4 และ 5 นาที มีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

เมื่อพิจารณาลักษณะปรากฏของมะม่วงตัดแต่งที่ไม่ผ่านและผ่านพลาสติกเป็นเวลาต่างๆ ในระหว่างการวางจำหน่าย ซึ่งแสดงไว้ใน Table 2 จะเห็นได้ว่ามะม่วงตัดแต่งที่ไม่ผ่านพลาสติกปรากฏสีน้ำตาลเมื่ออายุการวางจำหน่ายที่เวลา 7 ชม. ในขณะที่มะม่วงตัดแต่งที่ผ่านพลาสติกเป็นเวลา 3 นาทีจะปรากฏสีน้ำตาลเมื่ออายุการวางจำหน่าย 24 ชม. ส่วนมะม่วงตัดแต่งที่ผ่านพลาสติกเป็นเวลา 4 และ 5 นาทีจะปรากฏสีน้ำตาลเมื่ออายุการวางจำหน่าย 48 ชม. นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบอายุการวางจำหน่ายกับค่าสีที่ได้จาก Figure 7 พบว่าตัวอย่างที่ไม่ผ่านพลาสติกที่อายุการวางจำหน่าย 7 ชม. มีค่าสี  $L^*$   $a^*$  และ  $b^*$  เท่ากับ 40.01±1.22 5.41±0.46 และ 27.92±4.19 ตามลำดับ ตัวอย่างผ่านพลาสติกเป็นเวลา 3 นาทีที่อายุการวางจำหน่าย 24 ชม. มีค่าสี  $L^*$   $a^*$  และ  $b^*$  เท่ากับ 40.13±0.93 5.69±0.22 และ 36.71±0.90 ตามลำดับ และในส่วนของตัวอย่างผ่านพลาสติกเป็นเวลา 4 และ 5 นาทีที่อายุการวางจำหน่าย 48 ชม. มีค่าสี  $L^*$   $a^*$  และ  $b^*$  เท่ากับ 47.43.76±1.36 5.43±0.41 และ 38.83±0.63 และ 45.79±1.55 5.48±0.44 และ 37.62±0.92 ตามลำดับ ดังนั้นค่าสี  $L^*$   $a^*$  และ  $b^*$  ที่วัดได้นี้สามารถใช้เป็นค่าสีที่บ่งบอกถึงอายุการวางจำหน่ายของมะม่วงตัดแต่งได้ โดยมะม่วงตัดแต่งจะหมดอายุการวางจำหน่ายหากมีค่า  $L^*$  อยู่ในช่วง 40-47 ค่า  $a^*$  อยู่ในช่วง 5.4-5.7 และ ค่า  $b^*$  อยู่ในช่วง 28-39

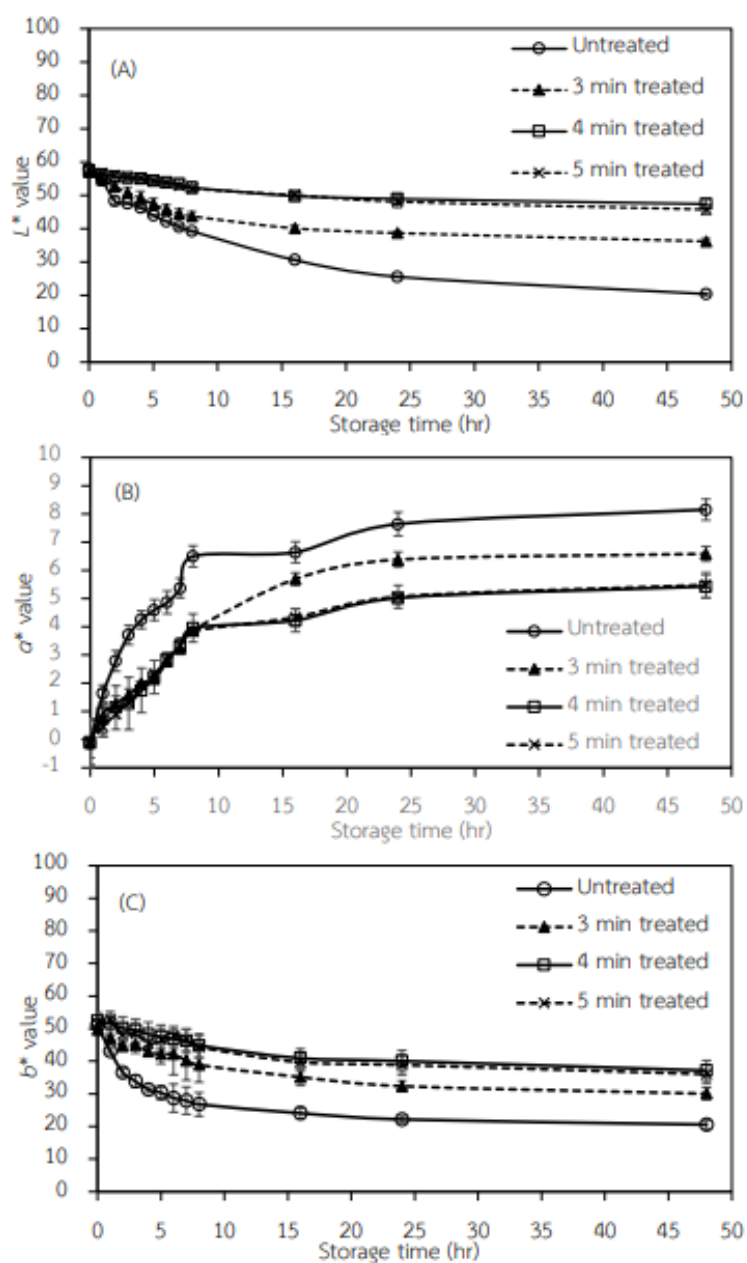


Figure 7 Changes of sample color in the terms of (A)  $L^*$  (B)  $a^*$  and (C)  $b^*$  values undergone different plasma treatment times



**Table 2** Appearance of mangoes treated with different cold plasma treatment times during storage

Sample	Storage (hr)										
	1	2	3	4	5	6	7	8	16	24	48
Untreated											
3 min treated											
4 min treated											
5 min treated											

#### วิจารณ์ผลการวิจัย

เมื่อพิจารณาผลการทดลองใน Table 1 พบว่าการใช้พลาสมาเย็นโดยมีก๊าซอาร์กอนเป็นตัวกลาง สามารถยับยั้งการทำงานของเอนไซม์โพลีฟีนอลออกซิเดสได้ เนื่องจากอนุภาคพลาสมาเข้าไปทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของเอนไซม์จึงส่งผลให้กิจกรรมของเอนไซม์โพลีฟีนอลออกซิเดสลดลง (Misra *et al.*, 2016; Surowsky *et al.*, 2013) โดยกิจกรรมของเอนไซม์นี้จะลดลงได้มากขึ้นเมื่อเวลาที่ใช้พลาสมาเย็นนานขึ้นจนถึงเมื่อเวลาการใช้พลาสมาที่ 4 นาที กิจกรรมของเอนไซม์นั้นมีค่าคงที่ ทั้งนี้อาจมีสาเหตุจากในช่วงแรกของการใช้พลาสมาเย็นนั้นเอนไซม์ที่อยู่บริเวณผิวหน้าของตัวอย่างจะถูกยับยั้งก่อน จากนั้นเมื่อเวลานานมากขึ้นอนุภาคพลาสมาที่สามารถทะลุผ่านเข้าไปในตัวอย่างไม่ยับยั้งกิจกรรมของเอนไซม์ที่อยู่ภายในจนกระทั่งกิจกรรมของเอนไซม์ถูกยับยั้งจนหมดหรือจนกว่าอนุภาคของพลาสมาไม่สามารถทะลุผ่านได้เข้าไปในชิ้นตัวอย่างได้อีก ดังนั้นกิจกรรมของเอนไซม์จึงลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงแรกและค่อยๆ คงที่เมื่อเวลานานขึ้น โดยผลการทดลองนี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Surowsky *et al.* (2013) ที่ได้รายงานว่าการใช้พลาสมาเย็นในการยับยั้งกิจกรรมของเอนไซม์โพลีฟีนอลออกซิเดสใน *Agaricus bisporus* นั้นกิจกรรมของเอนไซม์จะลดลงอย่างรวดเร็วในจนเหลือร้อยละ 25 ใน 1 นาทีแรก จากนั้นกิจกรรมของเอนไซม์จะลดลงอย่างช้าๆ จนถึงเวลา 3 นาที แล้วจากนั้นจะมีค่าคงที่ นอกจากนี้ในส่วนของค่าสีของตัวอย่างในระหว่างการวางจำหน่ายนั้น ค่าความสว่าง ค่าความเป็นสีเหลืองลดลงและค่าความเป็นสีแดงของทุกตัวอย่างเพิ่มสูงขึ้นเมื่อเวลาการวางจำหน่ายนานขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งตัวอย่างที่ไม่ผ่านพลาสมาเย็นมีการเปลี่ยนแปลงของค่าสีมากที่สุด ซึ่งมีสาเหตุเนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาลจากกิจกรรมของเอนไซม์โพลีฟีนอลออกซิเดสที่ส่งผลให้ค่าสีของตัวอย่างมีสีน้ำตาล ดังนั้นค่าความสว่างและความเป็นสีเหลืองจึงลดลงและค่าความเป็นสีแดงเพิ่มขึ้น ซึ่งผลการทดลองนี้สอดคล้องกับรายงานผลการศึกษาของ Pankaj *et al.* (2013) ที่รายงานว่า การใช้พลาสมาเย็นสามารถยับยั้งกิจกรรมของเอนไซม์และลดการเกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาลในแอปเปิลตัดแต่งและเมลอนตัดแต่ง



### สรุปผลการวิจัย

การออกแบบเครื่องพลาสมาเย็นมีส่วนประกอบหลักทั้งหมด 5 ส่วนได้แก่ ถึงก๊าซ หม้อแปลงปรับแรงดันไฟฟ้า หม้อแปลงไฟฟ้าป้อนขนาด 12.5 กิโลวัตต์ ส่วนหัวพลาสมาเจ็ทที่มีทองแดงซึ่งทำหน้าที่เป็นแอโนดและอะลูมิเนียมเป็น แคโทด และส่วนประกอบอื่น ๆ ซึ่งทำหน้าที่เป็นส่วนของโครงสร้างได้แก่ โครงตู้ ประตูดูและฐานรองตัวอย่าง โดยใช้ก๊าซ อาร์กอนที่อัตราการไหล 25 ลิตร/นาที เป็นก๊าซตัวกลาง ในส่วนของการทดสอบการใช้พลาสมาเย็นเพื่อยับยั้งกิจกรรม เอนไซม์โพลีฟีนอล พบว่า เวลาที่เหมาะสมสำหรับยับยั้งกิจกรรมเอนไซม์โพลีฟีนอลออกซิเดสในมะม่วงน้ำดอกไม้ตัดแต่ง คือ 4 นาที โดยสามารถลดกิจกรรมเอนไซม์เหลือร้อยละ  $1.49 \pm 0.41$  และสามารถยืดอายุการวางจำหน่ายจาก 7 ชม. เป็น 48 ชม. โดยพิจารณาจากค่า  $L^*$   $a^*$  และ  $b^*$  ซึ่งมะม่วงตัดแต่งจะหมดอายุการวางจำหน่ายหากมีค่า  $L^*$  40-47 ค่า  $a^*$  อยู่ในช่วง 5.4-5.7 และ ค่า  $b^*$  อยู่ในช่วง 28-39

### กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณคณะวิศวกรรมและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้ ที่สนับสนุนงบประมาณการทำวิจัย

### เอกสารอ้างอิง

- Dobrynin, D., Fridman, G., Friedman, G., and A. Fridman. 2009. Physical and biological mechanisms of direct plasma interaction with living tissue *New Journal of Physics*. 11: 1367-2630.
- Misra, N., Pankaj, S., Segat, A., and K. Ishikawa. 2016. Cold plasma interactions with enzymes in foods and model systems. *Trends in Food Science & Technology*. 55: 39-47.
- Orapin, S., 2018. Study of morphological characteristics and chemical compositions of various mango cultivars *Agricultural Science*. 49(2): 256-268. [in Thai]
- Pankaj, S.K., Misra, N.N., and P.J. Cullen. 2013. Kinetics of tomato peroxidase inactivation by atmospheric pressure cold plasma based on dielectric barrier discharge *Innovative Food Science & Emerging Technologies*. 19: 153-157.
- Somruedee, T., and Y. Tidarath, 2009. Characterization of polyphenol oxidase (PPO) in banana (*Musa sapientum* Linn.) *Food Technology*. 5(1): 54-63. [in Thai]
- Surowsky, B., Fischer, A., Schlueter, O., and D. Knorr. 2013. Cold plasma effects on enzyme activity in a model food system *Innovative Food Science and Emerging Technologies*. 19: 146-152.

## ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ-สกุล	Teerachai Poramapijitwat
เกิดเมื่อ	12 December 1995
ประวัติการศึกษา	Maejo University
ประวัติการทำงาน	-

