

การพาสเจอร์ส่น้ำมะกึ่งเข้มข้นด้วยการให้ความร้อนแบบโอห์มมิก



ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร  
มหาวิทยาลัยแม่โจ้  
พ.ศ. 2561

การพาสเจอร์ไร้น้ำมะเขีงเข้มข้นด้วยการให้ความร้อนแบบโอห์มมิก



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของความสมบูรณ์ของการศึกษาตามหลักสูตร

ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยแม่โจ้

พ.ศ. 2561

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยแม่โจ้

การพาสเจอไรส์น้ำมะเข็ญเข้มข้นด้วยการให้ความร้อนแบบโอท้อมิค

ปีหมา ไทยอู่

วิทยานิพนธ์นี้ได้รับการพิจารณาอนุมัติให้เป็นส่วนหนึ่งของความสมบูรณ์ของการศึกษา  
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร

พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษา

อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ฤทธิชัย อัครราชันย์)

วันที่.....เดือน.....พ.ศ. ....

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

(อาจารย์ ดร.กนกวรรณ ตาลดี)

วันที่.....เดือน.....พ.ศ. ....

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

(อาจารย์ ดร.ธีระพล แสนพันธุ์)

วันที่.....เดือน.....พ.ศ. ....

ประธานอาจารย์ผู้รับผิดชอบหลักสูตร

(รองศาสตราจารย์ ดร.วิจิตรา แดงปรก)

วันที่.....เดือน.....พ.ศ. ....

บัณฑิตวิทยาลัยรับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์ ดร.เกรียงศักดิ์ เม่งอำพัน)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่.....เดือน.....พ.ศ. ....

ชื่อเรื่อง	การพาสเจอไรส์น้ำมะเข็ญเข้มข้นด้วยการให้ความร้อนแบบโอท้อมมิก
ชื่อผู้เขียน	นางสาวปัทมา ไทอยู่
ชื่อปริญญา	วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร
อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ฤทธิชัย อัครราชันย์

### บทคัดย่อ

โครงการวิจัยนี้ มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการพาสเจอไรส์น้ำมะเข็ญเข้มข้นด้วยวิธีโอท้อมมิกเปรียบเทียบกับพาสเจอไรส์ด้วยวิธีดั้งเดิม การพาสเจอไรส์ด้วยวิธีโอท้อมมิกของน้ำมะเข็ญเข้มข้นโดยใช้อุปกรณ์การเหนี่ยวนำการเกิดความร้อนแบบโอท้อมมิกขนาดห้องปฏิบัติการที่มีค่าความเข้มสนามไฟฟ้าในช่วง 10-20 V/cm การดำเนินการวิจัยในส่วนแรก ศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิ ความเข้มของสนามไฟฟ้าต่อค่าการนำไฟฟ้าของน้ำมะเข็ญเข้มข้น ค่าการนำไฟฟ้าของน้ำมะเข็ญเข้มข้นมากขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น (25 ถึง 95°C) ผลการศึกษาพบว่า ค่าการนำไฟฟ้าของน้ำมะเข็ญเข้มข้นมีค่าเท่ากับ 0.1878-0.3677 (S/m)

ขั้นตอนที่ 2 ศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการสลายตัวของปริมาณแอนโธไซยานินในน้ำมะเข็ญเข้มข้นในระหว่างการพาสเจอไรส์ด้วยวิธีโอท้อมมิกและวิธีดั้งเดิม ที่อุณหภูมิ 3 ระดับ (75, 85 และ 95°C) และการดำเนินการขั้นตอนสุดท้าย ศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิและระยะเวลาในการเก็บรักษาน้ำมะเข็ญเข้มข้นที่อุณหภูมิ 5 และ 15°C ต่อการเปลี่ยนแปลงทางเคมีกายภาพ และ จุลินทรีย์ของน้ำมะเข็ญเข้มข้น ที่ผ่านการพาสเจอไรส์ทั้งสองวิธี และทดสอบน้ำมะเข็ญพร้อมดื่มที่เตรียมจากน้ำมะเข็ญเข้มข้นที่ผ่านการพาสเจอไรส์ทั้งสองวิธี ทางด้านประสาทสัมผัส ผลการศึกษา พบว่า ในระหว่างการให้ความร้อนแบบโอท้อมมิกมีอัตราการเกิดความร้อนเท่ากับ 0.0774, 0.1712 และ 0.2784 °C/sec ตามลำดับ เมื่อเพิ่มค่าความเข้มสนามไฟฟ้าจาก 10 เป็น 15 V/cm อัตราการเกิดความร้อนจะเพิ่มขึ้นร้อยละ 54.79 ปัจจัยด้านอุณหภูมิและความเข้มสนามไฟฟ้าที่เหมาะสมต่อค่าการนำไฟฟ้าของน้ำมะเข็ญเข้มข้นคือ ที่อุณหภูมิ 75 °C ความเข้มสนามไฟฟ้า 15 V/cm รูปแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสมในการทำนายการเสื่อมสลายของปริมาณแอนโธไซยานินในน้ำมะเข็ญเข้มข้น คือรูปแบบจลนพลศาสตร์ลำดับหนึ่ง การพาสเจอไรส์ด้วยวิธีโอท้อมมิก สามารถลดการเสื่อมสลายของปริมาณสารแอนโธไซยานิน ปริมาณสารประกอบฟีนอลิครวม และ กิจกรรมการต้านอนุมูลอิสระในน้ำมะเข็ญเข้มข้น ได้ดีกว่าการพาสเจอไรส์ด้วยวิธีดั้งเดิม สมบัติทางเคมี กายภาพลดลงที่อุณหภูมิในการเก็บรักษาเพิ่มขึ้น แต่และจุลินทรีย์ทั้งหมดที่ก่อให้เกิดโรคเพิ่ม การเก็บรักษาน้ำมะเข็ญเข้มข้นที่อุณหภูมิ 5 °C มีการสูญเสียสมบัติทางเคมีกายภาพที่น้อย



กว่าการเก็บรักษาที่ 15 °C และพบปริมาณจุลินทรีย์น้อยกว่าที่อุณหภูมิ 15 °C แต่ทั้งสองวิธีพบจุลินทรีย์ทั้งหมดที่ก่อให้เกิดโรคเท่ากับ  $2.0 \times 10^2$  CFU/ml ผลการทดสอบคุณภาพทางด้านประสาทสัมผัสของน้ำมะเข็ญพร้อมดื่ม พบว่า มีกลิ่นที่ไม่แตกต่างกัน อย่างไรก็ตามน้ำมะเข็ญที่เตรียมจากการพาสเจอร์ไรส์ด้วยวิธีโอท้อมมิคได้รับการยอมรับในด้านลักษณะปรากฏ สี รสชาติและการยอมรับรวมมากกว่าการพาสเจอร์ไรส์แบบดั้งเดิม

คำสำคัญ : น้ำมะเข็ญเข้มข้น การพาสเจอร์ไรส์ การให้ความร้อนด้วยวิธีโอท้อมมิค การให้ความร้อนด้วยวิธีดั้งเดิม จลนพลศาสตร์การสลายตัว



<b>Title</b>	PASTEURIZATION OF CONCENTRATED MAKIANG ( <i>Cleistocalyx nervosum</i> ) JUICE USING OHMIC HEATING
<b>Author</b>	Miss Patthama Thaiou
<b>Degree</b>	Master of Science in Food Science and Technology
<b>Advisory Committee Chairperson</b>	Assistant Professor Dr. Rittichai Assavarachan

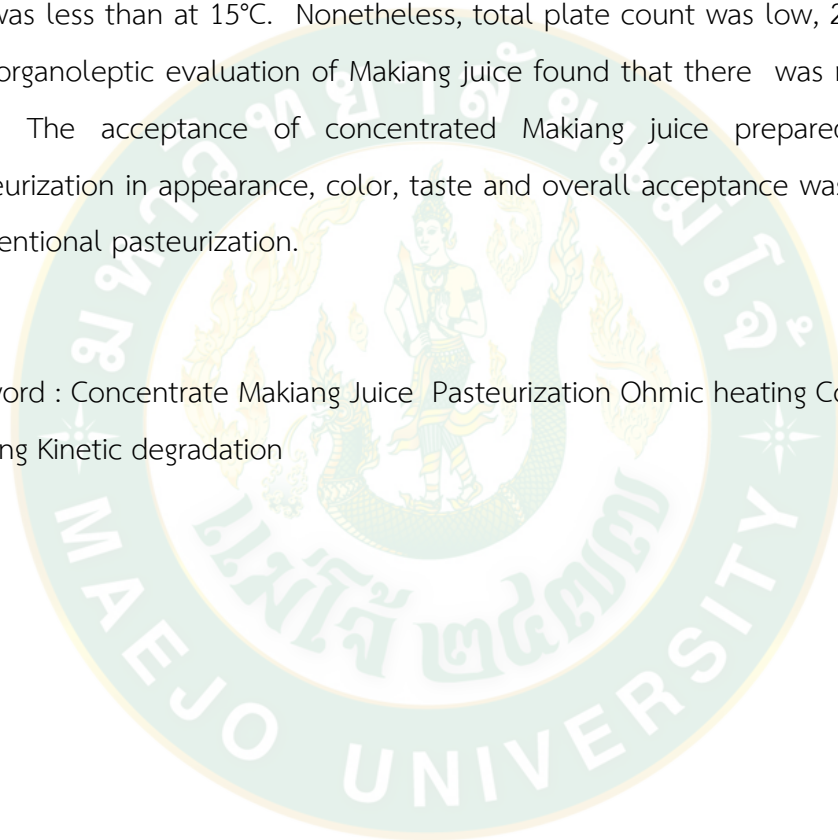
### ABSTRACT

This research aimed to study the efficiency of pasteurization of concentrated Makiang (*Cleistocalyx nervosum*) juice by ohmic heating, compared to conventional methods. In this study, concentrated Makiang juice was heated on a laboratory scale static ohmic heater by applying voltage gradients in the range of 10-20 V/cm. The first steps was to study the heating rate and the effect of temperature and electric voltage gradient on conductivity of concentrated Makiang juice during ohmic heating. The electrical conductivity of sample increased with rise in temperature (25 to 95°C). The range of electrical conductivity during ohmic heating was 0.1878-0.3677 (S/m).

The second step was to study the mathematic model of anthocyanin degradation in concentrated Makiang juice during ohmic and time of conventional heating at temperatures of 75, 85 and 95°C respectively. The effect of storage temperature and storage time on concentrated Makiang juice at the temperature of 5 and 15°C on the physical-chemical properties and microbiological quality of making juice pasteurized by both methods was evaluated in the last step. The sensory quality of making juice pasteurized by both methods was also studied in the last step. The results revealed that the heating rates of ohmic heating at 10, 15 and 20 V/cm were 0.0774, 0.1712 and 0.2784 °C/sec, respectively. When increasing the electric field intensity from 10 to 15 V/cm the heating rate increased 54.79%. The suitable temperature and electric field for pasteurization Makiang juice were 75°C and 15 V/cm

respectively. The suitable mathematic model for predicting anthocyanin degradation in concentrated Makiang juice was the first order of kinetic model equation. The anthocyanin, total phenolic compound and antioxidant activity in concentrated Makiang juice with ohmic pasteurization decreased less than with conventional pasteurization. The decrease in concentrated Makiang juice quality – chemical, physical and microbiological quality, was greater at higher storage temperature. The loss of chemical, physical and microbiological quality of concentrate Makiang juice stored at 5°C was less than at 15°C. Nonetheless, total plate count was low,  $2.0 \times 10^2$  CFU/ml. The organoleptic evaluation of Makiang juice found that there was no difference in odor. The acceptance of concentrated Makiang juice prepared from ohmic pasteurization in appearance, color, taste and overall acceptance was more than via conventional pasteurization.

Keyword : Concentrate Makiang Juice Pasteurization Ohmic heating Conventional heating Kinetic degradation



## กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ฤทธิชัย อัครราชันย์ ซึ่งได้กรุณาเป็นอาจารย์ที่ปรึกษา ขอบคุณอาจารย์ ดร.กนกวรรณ ตาลดี และอาจารย์ ดร.ธีระพล แสนพันธ์ ที่ได้กรุณาเป็นที่ปรึกษาร่วม ที่ให้คำแนะนำ ที่มีประโยชน์ ทำให้ผู้วิจัยได้คิดและมีมุมมองใหม่ๆ จนทำให้งานวิจัยนี้บรรลุตามจุดประสงค์ที่ได้ตั้งไว้ ขอขอบคุณหัวหน้าอาจารย์ ดร.รัตนพล พนมวัน ณ อยุธยา ที่ให้คำปรึกษาและช่วยเหลือในด้านต่างๆ คอยรับฟังปัญหา และเป็นแรงผลักดันให้ได้มาเรียนต่อในครั้งนี้ ขอกราบขอบพระคุณคณาจารย์ทุกท่านทั้งในอดีตและปัจจุบันที่ให้ความรู้ ซึ่งสามารถนำมาใช้เป็นองค์ประกอบในการคิดและทำงานวิจัยขึ้นนี้ได้เป็นอย่างดี ขอขอบคุณคำสอนดีๆ จากทุกท่านและทุกแหล่งความรู้ที่ช่วยผลักดันให้งานวิจัยนี้สำเร็จเช่นกัน

ขอขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. รัตนา ม่วงรัตน์ ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ที่กรุณาให้คำแนะนำและตรวจสอบแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้สมบูรณ์

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการสาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร มหาวิทยาลัยแม่โจ้ซึ่งกรุณาให้ความช่วยเหลือในการยืมอุปกรณ์ ให้ข้อมูลเรื่องต่างๆ โดยเฉพาะในการทำงานห้องปฏิบัติการเคมี และห้องปฏิบัติการจุลชีววิทยา ขอขอบคุณ พี่ๆ น้องๆ ที่งานวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร สถาบันวิจัยเทคโนโลยีเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา จังหวัดลำปาง ทุกท่าน ซึ่งกรุณาให้ความช่วยเหลือและคำแนะนำในการทำการทดลอง ยืมอุปกรณ์ ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ธุรการทุกท่านที่อำนวยความสะดวกในทุกๆ เรื่อง ขอขอบคุณเพื่อนร่วมห้องที่เป็นเพื่อนช่วยทำแล็บทั้งตอนเรียนและตอนทำงานวิจัย ขอขอบคุณครอบครัว ที่คอยให้กำลังใจโดยเสมอมา ความสำเร็จทั้งหลายของงานวิจัยครั้งนี้ เป็นผลมาจากบุคคลทุกท่านที่ได้กล่าวมาข้างต้นรวมถึงท่านที่ไม่ได้ระบุไว้ ประโยชน์อันใดที่งานวิจัยนี้มี ย่อมเป็นผลจากการกระทำของท่านทั้งหลายเหล่านี้ด้วย ผู้วิจัยใคร่ขอขอบพระคุณอย่างสูงไว้ ณ ที่นี้

ปีทนา ไทยอยู่

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ช
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ.....	ฎ
สารบัญตารางผนวก.....	ท
สารบัญภาพผนวก.....	ฒ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
ความสำคัญ และที่มาของปัญหา.....	1
วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	3
บทที่ 2 ตรวจสอบเอกสาร.....	5
มะเกี๋ยง ( <i>Cleistocalyx nervosum</i> var. <i>paniala</i> ).....	5
คุณค่าทางโภชนาการของผลมะเกี๋ยง.....	6
การทบทวนวรรณกรรม/สารสนเทศ/ สิทธิบัตรที่เกี่ยวข้อง.....	21
งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	25
บทที่ 3 อุปกรณ์และวิธีการทดลอง.....	30
อุปกรณ์และสารเคมี.....	30
วิธีการทดลอง.....	32
บทที่ 4 ผลการวิจัยและวิจารณ์.....	42
อัตราการเกิดความร้อนในระหว่าง การให้ความร้อนด้วยวิธีโอห์มมิก.....	42

ปัจจัยของอุณหภูมิ และความเข้มข้นไฟฟ้าต่อสมบัติการนำไฟฟ้า ของน้ำมะกึยงเข้มข้น .....	48
แบบจำลองจลนพลศาสตร์การสลายตัว ของปริมาณแอนโธไซยานิน .....	53
ผลของเวลาในการเก็บรักษาน้ำมะกึยงเข้มข้นด้วยความเย็น .....	67
ผลทางด้านจุลินทรีย์ .....	83
ผลการทดสอบทางประสาทสัมผัส .....	85
บทที่ 5 บทสรุปและข้อเสนอแนะ .....	87
สรุปผลการวิจัย .....	87
ข้อเสนอแนะ .....	88
บรรณานุกรม .....	89
ภาคผนวก .....	95
ภาคผนวก ก การพัฒนาอุปกรณ์และการทดสอบอุปกรณ์ไอทมมิค ที่ใช้ในการทำการวิจัย .....	96
ภาคผนวก ข มาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน THAI COMMUNITY PRODUCT STANDARD มผช. 484/2547 .....	119
ภาคผนวก ค แบบทดสอบทางประสาทสัมผัส .....	116
ภาคผนวก ง บทความทางวิชาการที่นำเสนอและได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ .....	118
ประวัติผู้วิจัย .....	137



## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมีผลมะเกี๋ยง (% โดยน้ำหนักสด และ % น้ำหนักแห้ง).....	6
ตารางที่ 2 ปริมาณแร่ธาตุและโลหะหนักในผลมะเกี๋ยง .....	7
ตารางที่ 3 ค่าเฉลี่ยของวิตามินในผลมะเกี๋ยง.....	7
ตารางที่ 4 ปริมาณกรดอะมิโนที่จำเป็นต่อร่างกายในผลมะเกี๋ยง (mg /100 g).....	8
ตารางที่ 5 ปริมาณกรดอะมิโนที่ไม่จำเป็นต่อร่างกายในผลมะเกี๋ยง .....	8
ตารางที่ 6 ข้อมูลทางวิศวกรรมและการผลิตแสดงการเปรียบเทียบข้อได้เปรียบและข้อเสียของวิธีการให้ความร้อนแบบดั้งเดิม การให้ความร้อนด้วยวิธีโอห์มมิก .....	13
ตารางที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำไฟฟ้าและอุณหภูมิของน้ำมะเกี๋ยงเข้มข้นในระหว่างการพาสเจอร์ไรส์แบบโอห์มมิก ที่ระดับความเข้มข้นของสนามไฟฟ้า (10, 15 และ 20 V/cm).....	50
ตารางที่ 8 แบบจำลองจลนพลศาสตร์ปฏิกิริยาของการสลายของปริมาณแอนโทไซยานินในน้ำมะเกี๋ยงเข้มข้น.....	55
ตารางที่ 9 ค่าสีปรากฏในระบบ CIE- $L^*$ , $a^*$ , $b^*$ ของน้ำมะเกี๋ยงเข้มข้นที่อุณหภูมิ 25-95 °C ใน .....	59
ตารางที่ 10 ค่าของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด (TSS : °Brix), ความเป็นกรด-ด่าง (pH) และปริมาณกรดทั้งหมด (TA : % citric acid) ของน้ำมะเกี๋ยงเข้มข้นที่อุณหภูมิ 25 ถึง 95 °C ในระหว่างการพาสเจอร์ไรส์แบบโอห์มมิก และแบบดั้งเดิม .....	61
ตารางที่ 11 ผลกระทบของอุณหภูมิต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณสารแอนโทไซยานิน สารฟีนอลิก และกิจกรรมการต้านอนุมูลอิสระ ในระหว่างการให้ความร้อนแบบโอห์มมิกและแบบดั้งเดิม .....	65
ตารางที่ 12 ค่าปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายได้ Total Soluble Solid (TSS) °Brix ในตัวอย่างน้ำมะเกี๋ยงเข้มข้นที่เก็บรักษาด้วยความเย็น 5 และ 15 °C.....	67
ตารางที่ 13 ค่าความเป็นกรด - ด่าง (pH) ในตัวอย่างน้ำมะเกี๋ยงเข้มข้นที่เก็บรักษาด้วยความเย็น 5 และ 15 °C .....	68
ตารางที่ 14 ค่าปริมาณกรดทั้งหมด เทียบกับกรดซิตริก Total Acid (TA : % citric acid) ในตัวอย่างน้ำมะเกี๋ยงเข้มข้นที่เก็บรักษาด้วยความเย็น 5 และ 15 °C .....	69



ตารางที่ 15 ค่าสีปรากฏในระบบ CIE-  $L^*$  ในตัวอย่างน้ำมะเขິงเข้มข้นที่เก็บรักษาด้วยความเย็น 5 และ 15 °C..... 70

ตารางที่ 16 ค่าสีปรากฏในระบบ CIE -  $a^*$  ในตัวอย่างน้ำมะเขິงเข้มข้นที่เก็บรักษาด้วยความเย็น 5 และ 15 °C..... 71

ตารางที่ 17 ค่าสีปรากฏในระบบ CIE -  $b^*$  ในตัวอย่างน้ำมะเขິงเข้มข้นที่เก็บรักษาด้วยความเย็น 5 และ 15 °C..... 72

ตารางที่ 18 ผลกระทบของอุณหภูมิและเวลาต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณสารแอนโทไซยานิน สารฟีนอลิก และกิจกรรมการต้านอนุมูลอิสระ ของน้ำมะเขິง สกัดที่เก็บรักษา อุณหภูมิ 5 °C..... 80

ตารางที่ 19 ผลกระทบของอุณหภูมิและเวลาต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณสารแอนโทไซยานิน สารฟีนอลิก และกิจกรรมการต้านอนุมูลอิสระ ของน้ำมะเขິงสกัด ที่เก็บรักษา อุณหภูมิ 15 °C..... 81

ตารางที่ 19 ปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ทั่วไป TPC (Total plate count) CFU/ml ..... 84

ตารางที่ 20 ปริมาณยีสต์และรา Yeast and Mold CFU/ml..... 85



## สารบัญภาพ

	หน้า
ภาพที่ 1 ผลมะเคียง.....	6
ภาพที่ 2 รูปแบบของอันดับการเกิดปฏิกิริยาการเปลี่ยนแปลงคุณภาพ ของจลนพลศาสตร์การ อบแห้ง.....	20
ภาพที่ 3 วงจรสมมูลการให้ความร้อนแบบโอห์มมิก.....	22
ภาพที่ 4 ขั้นตอนการเตรียมน้ำมะเคียงเข้มข้น.....	30
ภาพที่ 5 ขั้นตอนการเพาะเชื้อด้วยเทคนิค pour plate.....	39
ภาพที่ 6 แผนผังแสดงการดำเนินโครงการวิจัย.....	41
ภาพที่ 7 ภาพถ่ายการกระจายอุณหภูมิของน้ำมะเคียงเข้มข้นในขณะให้ความร้อน แบบโอห์มมิกที่ อุณหภูมิเฉลี่ยเท่ากับ 68.1°F (20.06 °C).....	43
ภาพที่ 8 ภาพถ่ายการกระจายอุณหภูมิของน้ำมะเคียงเข้มข้นในขณะให้ความร้อน แบบโอห์มมิกที่ อุณหภูมิเฉลี่ยเท่ากับ 102.9 °F (39.39 °C).....	43
ภาพที่ 9 ภาพถ่ายการกระจายอุณหภูมิของน้ำมะเคียงเข้มข้นในขณะให้ความร้อน แบบโอห์มมิกที่ อุณหภูมิเฉลี่ยเท่ากับ 156.2°F (69.0 °C).....	44
ภาพที่ 10 ภาพถ่ายการกระจายอุณหภูมิของน้ำมะเคียงเข้มข้นในขณะให้ความร้อน แบบโอห์มมิก ที่อุณหภูมิเฉลี่ยเท่ากับ 181.0°F (82.78 °C).....	44
ภาพที่ 11 อัตราการเพิ่มอุณหภูมิในน้ำมะเคียงเข้มข้นในระหว่างการพาสเจอร์ไรส์ แบบโอห์มมิกที่ ระดับความเข้มสนามไฟฟ้า 10, 15 และ 20 V/cm ตามลำดับ.....	47
ภาพที่ 12 ค่าการนำไฟฟ้าและอุณหภูมิของน้ำมะเคียงเข้มข้นในระหว่าง การพาสเจอร์ไรส์แบบโอห์ม มิกระดับความเข้มสนามไฟฟ้าที่ (ก) 10 V/cm (ข) 15 V/cm (ค) 20 V/cm.....	49
ภาพที่ 13 ผลกระทบของความเข้มสนามไฟฟ้าต่อการเปลี่ยนแปลงค่าการนำไฟฟ้าและ อุณหภูมิของน้ำ มะเคียงเข้มข้นในระหว่างการพาสเจอร์ไรส์แบบโอห์มมิก.....	52
ภาพที่ 14 ผลกระทบของความร้อนต่อการสลายแอนโทไซยานิน ในน้ำมะเคียงเข้มข้น.....	54

ภาพที่ 15 จลนพลศาสตร์ปฏิกิริยาอันดับศูนย์ของการสลายของ ปริมาณแอนโธไซยานินในน้ำ  
มะเขິงเข้มชั้น..... 56

ภาพที่ 16 จลนพลศาสตร์ปฏิกิริยาอันดับหนึ่งของการสลายของ ปริมาณแอนโธไซยานินในน้ำ  
มะเขິงเข้มชั้น..... 57

ภาพที่ 17 กราฟแสดงค่าเปลี่ยนแปลงค่าสีปรากฏในระบบ CIE - L\*,a\*,b\* ที่อุณหภูมิเพิ่มขึ้น ..... 60

ภาพที่ 18 ปริมาณสารประกอบฟีนอลิก (Total phenolic) ของน้ำมะเขິงเข้มชั้น ในระหว่างการ  
พาสเจอไรส์แบบโอห์มมิกและ แบบดั้งเดิม ที่อุณหภูมิ 25 ถึง 95 °C ..... 62

ภาพที่ 19 กิจกรรมการต้านอนุมูลอิสระ antioxidant (ABTS) ของน้ำมะเขິงเข้มชั้น ในระหว่าง  
การพาสเจอไรส์แบบโอห์มมิก และ แบบดั้งเดิมที่อุณหภูมิ 25 ถึง 95 °C ..... 63

ภาพที่ 20 กิจกรรมการต้านอนุมูลอิสระ antioxidant (DPPH) ของน้ำมะเขິงเข้มชั้น ในระหว่าง  
การพาสเจอไรส์แบบโอห์มมิกและ แบบดั้งเดิมที่อุณหภูมิ 25 ถึง 95 °C ..... 63

ภาพที่ 21 ปริมาณ anthocyanin ของน้ำมะเขິงเข้มชั้น ในระหว่างการพาสเจอไรส์แบบโอห์มมิก  
และ แบบดั้งเดิมที่อุณหภูมิ 25 ถึง 95 °C ..... 64

ภาพที่ 22 กราฟแสดงค่าเปลี่ยนแปลงสีปรากฏในระบบ CIE -L\*, a\*, b\* ในน้ำมะเขິงเข้มชั้น ที่  
ความเย็น 5 และ 15 °C ..... 74

ภาพที่ 23 การเปลี่ยนแปลงปริมาณสารประกอบฟีนอลิก Total Phenolic ในน้ำมะเขິงเข้มชั้น ที่  
อุณหภูมิการเก็บรักษา 5 และ 15 °C..... 76

ภาพที่ 24 การเปลี่ยนแปลงกิจกรรมต้านอนุมูลอิสระ (ABTS) ในน้ำมะเขິงเข้มชั้น ที่อุณหภูมิการ  
เก็บรักษา 5 และ 15 °C ..... 77

ภาพที่ 25 การเปลี่ยนแปลงกิจกรรมต้านอนุมูลอิสระ (DPPH) ในน้ำมะเขິงเข้มชั้น ที่อุณหภูมิการ  
เก็บรักษา 5 และ 15 °C ..... 78

ภาพที่ 26 การเปลี่ยนแปลงสารแอนโธไซยานิน (Anthocyanin) ในน้ำมะเขິงเข้มชั้น ที่อุณหภูมิ  
การเก็บรักษา 5 และ 15 °C ..... 79

ภาพที่ 27 ผลการทดสอบทางประสาทสัมผัสความชอบของน้ำมะเขິงพร้อมดื่ม ที่ได้จากน้ำมะเขິง  
เข้มที่ผ่านการพาสเจอไรส์ ด้วยวิธีแบบโอห์มมิก และแบบดั้งเดิม ..... 86

## สารบัญตารางผนวก

	หน้า
ตารางผนวกที่ 1 ค่าการนำไฟฟ้าของสารละลายน้ำเกลือ 0.1 M.....	111
ตารางผนวกที่ 2 ค่าร้อยละการเบี่ยงเบนค่าการนำไฟฟ้าของสารละลายน้ำเกลือ 0.1 M ที่ระดับ ความเข้มข้นไฟฟ้า 5 V/cm .....	111
ตารางผนวกที่ 3 ค่าร้อยละการเบี่ยงเบนค่าการนำไฟฟ้าของสารละลายน้ำเกลือ 0.1 M ที่ระดับ ความเข้มข้นไฟฟ้า 10 V/cm .....	112
ตารางผนวกที่ 4 ค่าร้อยละการเบี่ยงเบนค่าการนำไฟฟ้าของสารละลายน้ำเกลือ 0.1 M ที่ระดับ ความเข้มข้นไฟฟ้า 15 V/cm .....	113



## สารบัญภาพผนวก

	หน้า
ภาพผนวกที่ 1 เซลล์โพลิเมอร์ที่ใช้ในการศึกษา.....	98
ภาพผนวกที่ 2 เซลล์โพลิเมอร์ (ด้านบน).....	98
ภาพผนวกที่ 3 ด้านหน้าของเซลล์โพลิเมอร์.....	99
ภาพผนวกที่ 4 ด้านข้างของเซลล์โพลิเมอร์.....	99
ภาพผนวกที่ 5 แผนผังของตู้ควบคุมวงจรไฟฟ้า.....	100
ภาพผนวกที่ 6 การป้อนค่าเมื่อเริ่มโปรแกรม.....	102
ภาพผนวกที่ 7 การอธิบายหน้าที่ของหน้าปัทม์.....	103
ภาพผนวกที่ 8 อธิบายหน้าที่ของแต่ละส่วนในหน้าปัทม์.....	104
ภาพผนวกที่ 9 อธิบายหน้าที่ของแต่ละส่วนในการแสดงผล.....	105
ภาพผนวกที่ 10 อธิบายการทำงานของในส่วนของการบันทึกข้อมูล.....	106
ภาพผนวกที่ 11 Block Diagram วงจรหลักการทำงานของ ระบบการให้ความร้อนแบบโพลิเมอร์.....	107
ภาพผนวกที่ 12 ชั่งน้ำหนักโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) จำนวน 5.85 g.....	109
ภาพผนวกที่ 13 เตรียมน้ำบริสุทธิ์ปริมาตร 1000 mL เพื่อละลาย.....	109
ภาพผนวกที่ 14 เทโซเดียมคลอไรด์ 5.85 (g) ลงในน้ำบริสุทธิ์เพื่อละลายเกลือ จากนั้นคนจนเกลือละลายหมด.....	110
ภาพผนวกที่ 15 เมื่อละลายเกลือจนหมดแล้วดูสารละลายเกลือ ลงในเซลล์โพลิเมอร์ที่ได้เตรียมเอาไว้เพื่อทำการทดลองต่อไป.....	110

# บทที่ 1

## บทนำ

### ความสำคัญ และที่มาของปัญหา

น้ำผลไม้สดเป็นเครื่องดื่มที่มีประโยชน์อุดมด้วยวิตามินและแร่ธาตุและเป็นที่ยอมรับของผู้บริโภคที่ใส่ใจต่อสุขภาพ ในปัจจุบันพบว่ามือน้ำผลไม้คั้นสดพร้อมดื่มบรรจุในขวดพลาสติกและขวดแก้ววางจำหน่ายตามตู้แช่เย็นหรือแช่ในถังน้ำแข็งในร้านค้าทั่วไป ซึ่งสามารถหาซื้อได้ง่าย แต่น้ำผลไม้คั้นสดเหล่านี้จะมีอายุการเก็บรักษาที่สั้นเนื่องจากไม่ได้ผ่านกระบวนการฆ่าเชื้อใดๆ การพาสเจอร์ไรส์ด้วยความร้อนเป็นอีกวิธีหนึ่งที่จะช่วยยืดอายุในการเก็บรักษา แต่ความร้อนที่ใช้มีผลไปทำลายกลิ่นรสของน้ำผลไม้ทำให้กลิ่นรสของน้ำผลไม้เปลี่ยนไปไม่เหมือนน้ำผลไม้สด

วิธีการพาสเจอร์ไรส์น้ำผลไม้ที่นิยมทำกันอย่างมากในปัจจุบัน คือ การให้ความร้อนโดยอาศัยหลักการถ่ายเทความร้อนจากตัวกลางผ่านผิวด้านนอกของอาหารหรือภาชนะบรรจุเข้าไปยังจุดที่ความร้อนถึงช้าที่สุดของอาหาร โดยอุณหภูมิที่จุดดังกล่าวเป็นอุณหภูมิที่ใช้ในการกำหนดเวลาในการให้ความร้อน แต่กว่าที่จุดดังกล่าวจะมีอุณหภูมิถึงระดับที่ใช้ในการฆ่าเชื้อ คุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่ได้ก็ลดลงไปมากโดยเฉพาะสารที่ให้กลิ่นรสหรือสารอาหารที่มีความไวต่อความร้อนสูง ซึ่งเป็นปัญหาหลักในการผลิตน้ำผลไม้เพื่อให้มีความปลอดภัยต่อผู้บริโภคและมีอายุการเก็บรักษาที่ยาวนาน

น้ำผลไม้ส่วนใหญ่จัดอยู่ในประเภทอาหารที่มีความเป็นกรด คือ มี pH ต่ำกว่า 4.6 ซึ่งสามารถใช้ปริมาณความร้อนไม่มากนักในการทำลายจุลินทรีย์ก่อโรค และมักเป็นการให้ความร้อนที่อุณหภูมิสูงระยะเวลาสั้น (High-temperature short-time pasteurization) แต่ช่วงเวลาตั้งแต่เริ่มให้ความร้อนจนถึงอุณหภูมิในการฆ่าเชื้อ (Come-up time) ด้วยวิธีนี้ก็ยังส่งผลต่อการสูญเสียกลิ่นรสในน้ำผลไม้ ปัจจุบันได้มีการใช้ระบบพาสเจอร์ไรส์ด้วยเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบต่างๆ เช่น เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนชนิดแผ่นและกรอบ (Plate and frame heat exchanger, PHE) ซึ่งมีประสิทธิภาพสูงในการฆ่าเชื้อ โดยมีการถ่ายเทความร้อนจากตัวกลางไปยังอาหารได้อย่างรวดเร็วและช่วยลดการสูญเสียคุณค่าทางโภชนาการและกลิ่นรสของอาหารได้มาก แต่ระบบการฆ่าเชื้อแบบนี้มีข้อเสีย คือ มีต้นทุนการผลิตที่สูง อีกทั้งยังมีการใช้งานที่ซับซ้อน ถอดเครื่องมือออกมาทำความสะอาดได้ยาก จึงไม่เหมาะที่จะนำมาใช้ในการฆ่าเชื่อน้ำผลไม้ที่มีเนื้อปนอยู่พอสมควร (Kakac and Liu, 1998) นอกจากนี้ยังได้มีการศึกษาการพาสเจอร์ไรส์น้ำผลไม้ด้วยวิธีอื่นๆ เช่น การพาสเจอร์ไรส์โดยการใช้สนามไฟฟ้าแรงสูงแบบเป็นจังหวะ (Pulse electric field) ร่วมกับการให้ความร้อน เพื่อลด



เวลาในการพาสเจอร์ไรส์ลง ซึ่งทำให้น้ำผลไม้ที่ได้มีรสชาติที่ใกล้เคียงกับน้ำผลไม้สดมากกว่าการพาสเจอร์ไรส์ด้วยวิธีทั่วไป (Buckow *et al.*, 2013)

Leizerson and Shimoni (2005) ได้ทำการศึกษาคุณภาพของน้ำส้มที่ผ่านกระบวนการให้ความร้อนที่อุณหภูมิสูงด้วยวิธีโอทอมมิกแบบต่อเนื่อง พบว่า การฆ่าเชื้อด้วยวิธีโอทอมมิกสามารถรักษาคุณภาพด้านกลิ่นรสของน้ำผลไม้ได้เป็นอย่างดี ซึ่งให้ผลที่ดีกว่าการพาสเจอร์ไรส์ด้วยวิธีทั่วไปและการใช้เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบแผ่นและกรอบ สามารถยับยั้งเอนไซม์ได้ถึง 98 %

การให้ความร้อนแก่อาหารนับเป็นส่วนที่สำคัญที่สุดในอุตสาหกรรมการแปรรูปอาหาร โดยหลักการทั่วไปเป็นการให้ความร้อนแก่อาหารเพื่อทำลายจุลินทรีย์ที่เป็นสาเหตุของการเน่าเสียและสร้างสารพิษอาหาร รวมทั้งพยาธิต่างๆ เพื่อยืดอายุการเก็บรักษาอาหาร (Shelf life) ให้สามารถเก็บได้นานขึ้น และยังเป็นตัวกำหนดคุณภาพของอาหารอีกด้วย การให้ความร้อนจะสามารถทำได้ตั้งแต่การใช้ความร้อนในระดับต่ำ (ต่ำกว่า 100 °C) เช่น การลวก (Blanching) เพื่อยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ และมักใช้ร่วมกับการถนอมอาหารวิธีอื่นๆ รวมด้วยเช่น การใช้ความเย็นเก็บรักษาผลิตภัณฑ์พาสเจอร์ไรส์ (Pasteurization) เพื่อยับยั้งเอนไซม์และทำลายจุลินทรีย์ที่ทนทานต่อความร้อนต่ำจนถึงการใช้ความร้อนที่อุณหภูมิสูง (สูงกว่า 100 °C) เช่น การสเตอริไลซ์ (Sterilization) หรือกระบวนการฆ่าเชื้อที่อุณหภูมิสูง (Ultra High Temperature process) (ฤทธิชัย, 2561) การให้พาสเจอร์ไรส์ในการแปรรูปในอุตสาหกรรมอาหารมีหลายรูปแบบซึ่งแต่ละแบบมีกลไกการให้ความร้อนที่แตกต่างกันออกไป เช่น การพาสเจอร์ไรส์โดยอาศัยการถ่ายเทความร้อนจากผิวนอกเข้าสู่ใจกลางของผลิตภัณฑ์ ทำให้ผิวนอกของผลิตภัณฑ์ได้รับปริมาณความร้อนที่สูงเกินกว่าที่ต้องการ คุณค่าทางอาหารก็อาจสูญเสียได้เนื่องจากปัญหาดังกล่าว และส่งผลกระทบต่ออุตสาหกรรมการแปรรูปอาหาร แม้ว่าปัจจุบันจะมีเทคโนโลยีการให้ความร้อนสมัยใหม่ ซึ่งแต่ละวิธีก็มีกลไกการให้ความร้อน ข้อได้เปรียบ และเสียเปรียบ ตลอดจนความเหมาะสมในการใช้งานที่แตกต่างกัน โดยวิธีการให้ความร้อนแบบโอทอมมิกเป็นหนึ่งในนวัตกรรมการให้ความร้อนที่มีประสิทธิภาพการสูง และเหมาะสมอย่างมากกับการให้ความร้อนในน้ำผลไม้ต่อมาได้มีการพยายามหาวิธีการให้ความร้อนที่มีประสิทธิภาพดีเพื่อช่วยลดข้อจำกัดในด้านการถ่ายเทความร้อน การสิ้นเปลืองพลังงาน เพื่อนำมาพัฒนาใช้ในงานอุตสาหกรรมแปรรูปอาหารและการแปรรูปผลผลิตทางการเกษตร จึงได้มีการศึกษาและพัฒนาแนวคิดการใช้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าซึ่งเป็นแหล่งพลังงานในการสร้างความร้อนประสิทธิภาพสูง สามารถเหนี่ยวนำให้เกิดความร้อนจากภายในตัวอาหารเอง ไม่มีผลกระทบด้านการถ่ายเทความร้อนรวมถึงมีอัตราการสร้างความร้อนที่รวดเร็ว ทำให้อาหารแปรรูปมีลักษณะทางกายภาพที่ดี (สี เนื้อสัมผัส กลิ่น รสชาติ) และสามารถรักษาวิตามิน เกลือแร่ และสารอาหารที่สำคัญไว้ได้ เพื่อเป็นแนวทางในการประยุกต์ใช้แทนการให้ความร้อนด้วยอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่มีข้อจำกัดในกระบวนการแปรรูปด้วยความร้อนแบบดั้งเดิม การพัฒนาระบบการให้ความร้อนให้มีอัตราการเพิ่มอุณหภูมิอย่าง



รวดเร็วและมีการกระจายอุณหภูมิอย่างทั่วถึง (Improvement of temperature uniformity in rapid thermal processing systems) ด้วยเทคโนโลยีการให้ความร้อนด้วยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าซึ่งเป็นหนึ่งในนวัตกรรมการแปรรูปสมัยใหม่ ในการพัฒนารูปแบบการให้ความร้อนให้สามารถการเหนี่ยวนำความร้อนในอาหาร และมีประสิทธิภาพการกระจายความร้อนสูง ปัจจุบันเทคโนโลยีการทำความร้อนสมัยใหม่ด้วยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในการแปรรูปอาหารและผลผลิตทางการเกษตร ซึ่งประกอบด้วย การให้ความร้อนแบบโอห์มมิก (Ohmic heating, OH) การให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ และคลื่นวิทยุ (Microwave, MW and Radio frequency heating, RF) เนื่องจากมีประสิทธิภาพสูงในการสร้างความร้อน และไม่มีผลกระทบจากปัญหาของการถ่ายเทความร้อนดังนั้นจึงได้มีการวิจัยและพัฒนาการสร้างความร้อนด้วยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าขึ้นมาใช้ทดแทนการแปรรูปด้วยความร้อนแบบดั้งเดิมเพื่อใช้เป็นแนวทางปรับปรุงประสิทธิภาพการแปรรูปอาหาร (ฤทธิชัย, 2554)

การเลือกใช้เทคโนโลยีโอห์มมิกเนื่องจากการให้ความร้อนแบบโอห์มมิกเป็นหนึ่งใน นวัตกรรม การให้ความร้อนในเทคโนโลยีการแปรรูปอาหารด้วยวิธีการปล่อยกระแสไฟฟ้าเข้าสู่อาหาร อัตราการ เกิดความร้อนขึ้นอยู่กับปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านอาหารซึ่งจะแปรผันตรงกับคุณสมบัติค่าการนำ ไฟฟ้าของอาหารชนิดนั้นๆ จุดเด่นที่สำคัญของวิธีการให้ความร้อนแบบโอห์มมิกสามารถเกิดความร้อน ได้ภายในตัวของมันเอง มีอัตราการเกิดความร้อนอย่างรวดเร็วภายในตัวอาหารเอง และเป็น เทคโนโลยีการสร้างความร้อนที่มีประสิทธิภาพสูงและมีอัตราการเกิดความร้อนที่สูงกว่าการให้ความ ร้อนแบบอื่นๆ โดยมีอัตราการเกิดความร้อนประมาณ 0.005 – 1.2 °C/sec มีอัตราการเปลี่ยน พลังงานไฟฟ้าได้ถึง 95% (Meredith, 1997)

#### วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. ศึกษาผลกระทบของความเข้มข้นไฟฟ้าและอุณหภูมิ ต่อการเปลี่ยนแปลงของน้ำ มะเกลือเข้มข้น ในระหว่างการให้ความร้อนด้วยโอห์มมิกและหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการ ทำนายค่าการนำไฟฟ้า ช่วงอุณหภูมิ 75, 85 และ 95 °C ตามลำดับ
2. ศึกษาจลนพลศาสตร์การเปลี่ยนแปลงปริมาณแอนโธไซยานินของน้ำมะเกลือเข้มข้นด้วย การพาสเจอร์ไรซ์ด้วยวิธีโอห์มมิกที่ความเข้มข้นไฟฟ้า 10, 15 และ 20 V/cm อุณหภูมิ 75, 85 และ 95 °C ตามลำดับ
3. ศึกษาสมบัติทางเคมี กายภาพ ของน้ำมะเกลือเข้มข้นที่พาสเจอร์ไรซ์ด้วยวิธีโอห์มมิกที่ ความเข้มข้นไฟฟ้า 15 V/cm เปรียบเทียบกับวิธีดั้งเดิม ที่อุณหภูมิ 25 ถึง 95 °C
4. ศึกษาการเปลี่ยนแปลงทางเคมี กายภาพ และ จุลินทรีย์ ของน้ำมะเกลือเข้มข้นที่พาสเจอร์ไรซ์ ด้วยวิธีโอห์มมิก เปรียบเทียบกับวิธีดั้งเดิมที่อุณหภูมิการเก็บ 5 และ 15 °C

5. ทดสอบคุณภาพการยอมรับทางด้านประสาทสัมผัสของน้ำมะเกี๋ยงพร้อมดื่ม ที่เตรียมจากน้ำมะเกี๋ยงเข้มข้นด้วยการพาสเจอร์ไรซ์วิธีโอท่อมิกและวิธีดั้งเดิม

### ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. การพาสเจอร์ไร้น้ำมะเกี๋ยงที่มีคุณภาพด้วยการใช้โอท่อมิก
2. เป็นทางเลือกให้กับโรงงานอุตสาหกรรมการแปรรูปในอุตสาหกรรมการแปรรูปน้ำผลไม้ที่มสีแดงด้วยการพาสเจอร์ไรส์ด้วยวิธีโอท่อมิก
3. ใช้เป็นแนวทางในการพัฒนากระบวนการพาสเจอร์ไรส์ด้วยวิธีโอท่อมิกในการแปรรูปน้ำผลไม้ในอนาคต
4. ได้องค์ความรู้เกี่ยวกับการพาสเจอร์ไรส์ เพื่อลดการสูญเสียสารสำคัญในน้ำมะเกี๋ยงเข้มข้นระหว่างการพาสเจอร์ไรส์ด้วยวิธีโอท่อมิก

### ขอบเขตงานวิจัย

1. ทดสอบค่าการนำไฟฟ้าของน้ำมะเกี๋ยง ที่ระดับความเข้มข้นของสนามไฟฟ้า 10, 15 และ 20 V/cm ที่อุณหภูมิ 25 ถึง 95 °C
2. ทดสอบการเปลี่ยนแปลงคุณภาพทางกายภาพ เคมี ของน้ำมะเกี๋ยงเข้มข้นหลังจากได้รับความร้อนด้วยวิธีการ 2 วิธีคือ แบบโอท่อมิกและแบบดั้งเดิม ที่อุณหภูมิ 25 ถึง 95 °C
3. ศึกษาการเปลี่ยนแปลงคุณภาพทางกายภาพ เคมี ระหว่างเก็บรักษาน้ำมะเกี๋ยงเข้มข้นบรรจุขวดพลาสติกชนิดทนร้อนเป็นเวลา 35 วัน ที่อุณหภูมิ 5 และ 15 °C

## บทที่ 2

### ตรวจเอกสาร

#### มะเกี๋ยง (*Cleistocalyx nervosum* var. *paniala*)

มะเกี๋ยง เป็นพืชในอันดับ Myrtales จัดอยู่ในวงศ์ Myrtaceae มีชื่อวิทยาศาสตร์ว่า *Cleistocalyx nervosum* var. *paniala* ชื่อวิทยาศาสตร์เดิมของมะเกี๋ยงคือ *Eugenia paniala* Roxb. ซึ่งเป็นชื่อที่ใช้กันมาตั้งแต่ พ.ศ. 2375 จากการศึกษาทบทวนพรรณไม้ในสกุล *Eugenia* และ *Cleistocalyx* ใน พ.ศ. 2536 โดย ดร.ประนอม จันทรโนทัย ได้เสนอให้จัดพืช *Eugenia paniala* Roxb. มารวมอยู่ในตระกูล *Cleistocalyx* และกำหนดชื่อวิทยาศาสตร์ของมะเกี๋ยงเป็น *Cleistocalyx operculatus* เช่นเดียวกับต้นหว้าขาว (หว้าน้ำหรือหว้าส้ม) โดยได้จำแนกออกเป็นสองชนิดพันธุ์ คือ *Cleistocalyx operculatus* var. *operculatus* (หว้าขาว) และ *Cleistocalyx operculatus* var. *paniala* (มะเกี๋ยง) ต่อมาใน พ.ศ. 2539 ได้มีการศึกษาทบทวนพืชในวงศ์ Myrtaceae ใหม่อีกครั้งหนึ่งและได้เสนอให้เปลี่ยนชื่อวิทยาศาสตร์ของหว้าขาวและมะเกี๋ยงเป็น *Cleistocalyx nervosum* โดยจำแนกออกเป็นสองชนิดพันธุ์ คือ *Cleistocalyx nervosum* var. *nervosum* (หว้าขาว) และ *Cleistocalyx nervosum* var. *paniala* (มะเกี๋ยง) ความแตกต่างระหว่างพืชสองชนิดพันธุ์นี้อยู่ที่การจัดเรียงหรือจำนวนของดอกในช่อดอกย่อย ขนาดของฐานดอกรูปถ้วย (Hypantium) รวมทั้งขนาดและรูปร่างของผล โดยที่มะเกี๋ยงมักมีดอกจำนวน 3 ดอก ติดอยู่รวมกันเป็นกลุ่มช่อดอกย่อย มีฐานดอกรูปถ้วยขนาดใหญ่กว่า 4 mm ผลรูปไข่ขอบขนาน (oval-oblong) และมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางผลมากกว่า 1.5 cm ส่วนหว้าขาวมักมีจำนวนดอกในแต่ละช่อดอกย่อยมากกว่า 4 ดอก ฐานดอกรูปถ้วยมีขนาดเล็กกว่า 4 mm ผลรูปกลม (globose) และเส้นผ่าศูนย์กลางผลน้อยกว่า 1.5 cm

คุณค่าทางโภชนาการของผลมะเกี๋ยงเป็นสิ่งที่น่าสนใจที่ควรทำการศึกษา เนื่องจากเป็นพืชวงศ์เดียวกับหว้า มีรายงานว่าผลหว้ามีฤทธิ์ในทางยาหลายๆ ด้าน จากการศึกษาในเบื้องต้น พบว่า มีสารในกลุ่ม ฟลาโวนอยด์ (flavonoids) ซึ่งจัดเป็นสารประกอบฟีนอลิก เช่น resveratrol จากการศึกษาทางการแพทย์ได้ใช้สารนี้ในการเป็นยาป้องกันโรคหลอดเลือดหัวใจอุดตัน เนื่องจากสารนี้ช่วยในการกระตุ้นการเพิ่มระดับของ HDL (High Density Lipoprotein) ในกระแสเลือด ซึ่ง HDL นี้จะทำหน้าที่ทำลายไขมันที่เกาะตามผนังหลอดเลือด ช่วยป้องกันไม่ให้เกิดโรคหลอดเลือดหัวใจอุดตัน ในส่วนเปลือกของมะเกี๋ยงพบสารในกลุ่มโพลีฟีนอล (polyphenols) และแทนนิน (tannins) ซึ่งเป็นสารกลุ่มเดียวกันกับที่พบในเปลือกและเมล็ดองุ่น สารนี้ทำหน้าที่จับกับสารกระตุ้นการเกิดมะเร็งที่เป็นอนุมูลอิสระทำให้ป้องกันการเกิดโรคมะเร็งได้



ภาพที่ 1 ผลมะเกี๋ยง

ที่มา: เว็บไซต์เพื่อพืชเกษตรไทย (ม.ป.ป.)

ผลมะเกี๋ยงนิยมนำมาบริโภคทั้งในรูปผลสด และผลิตภัณฑ์แปรรูป ซึ่งจากการวิเคราะห์คุณค่าทางโภชนาการของผลมะเกี๋ยง โดยกลุ่มงานวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร สถาบันวิจัยเทคโนโลยีเกษตร มทร.ล้านนา (ชื่อเดิม สถาบันวิจัยและฝึกอบรมการเกษตรลำปาง) โดยใช้ตัวอย่างผลมะเกี๋ยงสด จำนวน 37 ตัวอย่าง ที่ออกผลในช่วงเดือนกรกฎาคม ถึงสิงหาคม มาทำการวิเคราะห์องค์ประกอบหลัก แร่ธาตุ วิตามิน และกรดอะมิโน ได้ผลดังตารางที่ 1

### คุณค่าทางโภชนาการของผลมะเกี๋ยง

ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมีผลมะเกี๋ยง (% โดยน้ำหนักสด และ % น้ำหนักแห้ง)

องค์ประกอบ	น้ำหนักสด (%)	น้ำหนักแห้ง (%)
ความชื้น	86.72±3.29	-
โปรตีน	0.89±0.22	6.64±1.29
ปริมาณไขมัน	0.31±0.10	2.41±0.73
ปริมาณเถ้า	0.61±0.19	4.57±0.72
ปริมาณกาก	3.52±1.20	26.32±4.01
คาร์โบไฮเดรต	7.95±2.05	59.91±4.84
ค่าพลังงานทั้งหมด (Kcal)	38.19±8.95	279.58±37.66
น้ำตาลอินเวิร์ต	1.94±1.34	13.92±6.81

ที่มา: สถาบันวิจัยและฝึกอบรมการเกษตรลำปาง (2544)

ตารางที่ 2 ปริมาณแร่ธาตุและโลหะหนักในผลมะเกี๋ยง

ปริมาณแร่ธาตุและโลหะหนัก	น้ำหนักสด mg/100 g	น้ำหนักแห้ง mg/100 g
แคลเซียม	56.19±28.26	408.60±153.5
แมกนีเซียม	11.80±4.87	87.32±23.66
เหล็ก	0.47±0.32	3.50±1.93
สังกะสี	0.28±0.16	2.38±1.84
ตะกั่ว	0.24±0.20	2.38±1.84
ปรอท	0	0

ที่มา: สถาบันวิจัยและฝึกอบรมการเกษตรลำปาง (2544)

ตารางที่ 3 ค่าเฉลี่ยของวิตามินในผลมะเกี๋ยง

ปริมาณวิตามิน	น้ำหนักสด	น้ำหนักแห้ง
วิตามินเอ (เบต้า - แคโรทีน) (IU/100 g)	625.36±526.43	4574.73±3708.25
วิตามินบี 1 (µg/100g)	95.89±48.41	717.30±280.16
วิตามินบี 2 (µg/100g)	47.66±24.39	357.44±154.81
วิตามินอี (µg/100g)	0.9±0.0	5.85±1.28
วิตามินซี	ไม่พบ	ไม่พบ

ที่มา: สถาบันวิจัยและฝึกอบรมการเกษตรลำปาง (2544)



ตารางที่ 4 ปริมาณกรดอะมิโนที่จำเป็นต่อร่างกายในผลมะเกี๋ยง (mg /100 g)

ปริมาณกรดอะมิโนที่จำเป็นต่อร่างกาย	น้ำหนักสด	น้ำหนักแห้ง
ไอโซ - ลูซีน	26.32±7.76	198.86±31.93
ลูซีน	55.10±15.98	416.95±67.71
ไลซีน	46.76±13.35	354.74±60.42
เมธไธโอนีน	8.93±2.51	67.99±12.69
ซีสตีน	14.29±5.25	109.37±18.12
ฟินิลอะลานีน	67.1±131.42	494.44±155.31
ไทโรซีน	14.66±4.49	108.13±27.80
ทรีโอนีน	31.51±9.16	275.50±105.48
ทรีปโตเฟน	9.01±2.27	70.12±17.05
วาเลีน	35.37±10.13	267.17±40.19
ฮีสตีดิน	16.65±5.14	125.51±21.18

ที่มา: สถาบันวิจัยและฝึกอบรมการเกษตรลำปาง (2544)

ตารางที่ 5 ปริมาณกรดอะมิโนที่ไม่จำเป็นต่อร่างกายในผลมะเกี๋ยง

ปริมาณกรดอะมิโนที่ไม่จำเป็นต่อร่างกาย	น้ำหนักสด	น้ำหนักแห้ง
กรดแอสปาร์ติก	65.46±19.35	495.72±85.62
ซีรีน	39.08±11.3	296.10±46.79
กรดกลูตามิก	87.62±25.13	665.95±130.20
โพรลีน	31.95±10.37	243.64±52.46
ไกลซีน	36.62±10.61	277.21±45.06
อะลานีน	43.55±12.58	328.62±51.04
ไทโรซีน	14.65±4.48	108.13±27.80
อาร์จินีน	31.18±11.57	239.15±52.85

ที่มา: สถาบันวิจัยและฝึกอบรมการเกษตรลำปาง (2544)

จากการวิเคราะห์คุณภาพไวน์มะเกี๋ยงที่ผลิตโดยสถาบันวิจัยและฝึกอบรมการเกษตรลำปาง พบว่า ในไวน์มะเกี๋ยงมีสารประกอบฟีนอลิกในรูปกรดแกลลิก (gallic acid) เท่ากับ 22.30 mg/L คาเทชิน (catechin) เท่ากับ 84.91 mg/L

ฤทธิชัย (2560) ได้อธิบายว่าวิธีการให้ความร้อนของอุตสาหกรรมอาหารในประเทศไทยโดยส่วนมากจะใช้แหล่งพลังงานความร้อน ผ่านตัวกลางทางความร้อน เช่น ไอน้ำ หรือน้ำร้อน ก่อนจะเข้าสู่อาหาร มีข้อจำกัดของการถ่ายความร้อน เช่น ผลการนำความร้อนและการพาความร้อน ทำให้อัตราการเกิดความร้อนต่ำและใช้เวลานาน ซึ่งส่งผลกระทบต่อ การสูญเสียคุณภาพและคุณลักษณะของอาหาร ดังนั้นจึงได้มีการศึกษาและพัฒนาการให้ความร้อนด้วยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าขึ้น ซึ่งเป็นวิธีการให้ความร้อนจากภายในอาหารเอง ทำให้อัตราการเพิ่มความร้อนเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วและใช้เวลาสั้น จึงช่วยรักษาคุณลักษณะของอาหารให้ดียิ่งขึ้น หลักการโดยรวมของวิธีนี้เกิดจากการเหนี่ยวนำและเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อน นอกจากนี้การพัฒนานวัตกรรมการแปรรูปโดยไม่ใช้ความร้อน (Non-thermal process) เช่น การแปรรูปด้วยเทคนิคพัลส์สนามไฟฟ้า (Electrical pulsed field technique, PEF) และการแปรรูปด้วยความดันสูง (High hydrostatic pressure of food processing, HPP) เพื่อทำลายจุลินทรีย์ที่เป็นสาเหตุของการเสื่อมเสียของอาหารเริ่มมีการประยุกต์ใช้เพื่อการแปรรูปอาหารแปรรูปในระดับอุตสาหกรรมมากขึ้น ผลการศึกษาความพึงพอใจของผู้บริโภคต่อผลิตภัณฑ์น้ำผลไม้แปรรูป พบว่าผู้บริโภคมีคาดหวังในคุณภาพในผลิตภัณฑ์มากขึ้นโดย 40 % ของผู้บริโภคเลือกผลิตภัณฑ์อาหารแปรรูปโดยพิจารณาจากสีเป็นอันดับแรก (Assawarachan and Noomhorm, 2008) และในปัจจุบันผู้บริโภคน้ำผลไม้แปรรูปมีความต้องการกลิ่น และรสชาติ รวมถึงสารอาหารที่มีประโยชน์ทางโภชนาการจากผลไม้สดมากกว่าการใช้สารปรุงแต่งกลิ่นรสสังเคราะห์ ด้านความสดเทียบเท่าผลไม้สด (Fresh-like characteristics) สามารถรักษาคุณภาพของอาหาร กลิ่นและรสจากธรรมชาติได้อย่างดี (higher preference for natural products) และไม่ใส่สารปรุงแต่งรสกลิ่นสังเคราะห์ (Free of chemicals and/or additives) ถึงแม้ว่าจะมีราคาขายที่สูงกว่าผลิตภัณฑ์แปรรูปจากกระบวนการผลิตแบบดั้งเดิมแต่ผลิตภัณฑ์แปรรูปด้วยเทคโนโลยีสมัยใหม่ก็ได้รับการยอมรับจากผู้บริโภคอย่างมาก บทความวิชาการนี้มีวัตถุประสงค์ในการนำเสนอเทคโนโลยีการแปรรูปอาหารสมัยใหม่ของเทคโนโลยีการปรับปรุงประสิทธิภาพเชิงความร้อนด้วยเทคโนโลยี Improvement of thermal processing (ฤทธิชัย, 2561)

## 1. การแปรรูปอาหารแบบดั้งเดิม

กระบวนการให้ความร้อนในอุตสาหกรรมแปรรูปอาหารในปัจจุบันนิยมให้ความร้อนผ่านอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน (Heat exchanger) ในลักษณะต่างๆ โดยใช้ตัวกลางทางในการแลกเปลี่ยนความร้อน เป็นไอน้ำหรือน้ำร้อน ซึ่งวิธีการให้ความร้อนแบบนี้มีข้อจำกัดในกระบวนการ



ผลิตมากมาย อาทิเช่น ผลกระทบในระหว่างการถ่ายเทความร้อน การเกิดตะกอนในอุปกรณ์ แลกเปลี่ยนความร้อนซึ่งเป็นฉนวนความร้อน ส่งผลให้ ประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อนต่ำ และมีอัตราสิ้นเปลืองพลังงานสูง มีอัตราการเกิดความร้อนต่ำ และใช้เวลานาน ส่งผลต่อต้นทุนด้านพลังงาน เนื่องจากต้นทุนพลังงานจะแปรผันตรงกับราคามันในตลาดโลกซึ่งมีแนวโน้มสูงขึ้นทุกวัน (อรรถพล และ ฤทธิชัย, 2550) นอกจากนี้ผลกระทบที่สำคัญจากการที่อาหารรับความร้อนเป็นเวลานานทำให้สูญเสียคุณภาพและคุณลักษณะของอาหารด้านต่างๆ ส่งผลกระทบต่อการสูญเสีย กลิ่น รส และสี จากการเกิดปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลโดยเอนไซม์โพลีฟีนอลออกซิเดสเป็นสาเหตุหลักที่ทำให้สีของน้ำผลไม้เกิดการเปลี่ยนแปลง ออกซิเจนจะเป็นตัวเร่งการเกิดสีน้ำตาล เพราะฉะนั้นโดยทั่วไป จะต้องกำจัดอากาศในน้ำผลไม้ก่อนจะเข้าสู่กระบวนการพาสเจอร์ไรส์ การสูญเสียกลิ่น และรสจากการพาสเจอร์ไรส์ (Pasteurization) และการสเตอริไลซ์ (Sterilization) น้ำผลไม้ทำให้คุณภาพของผลิตภัณฑ์ลดลงเนื่องจากการได้รับความร้อนเป็นเวลานาน หรือการได้รับความร้อนที่อุณหภูมิสูงเกินไป สาเหตุดังกล่าวส่งผลต่อการสูญเสียวิตามินและสารอาหารที่มีคุณค่าทางโภชนาการ การพาสเจอร์ไรส์ (Pasteurization) เพื่อยับยั้งเอนไซม์และทำลายจุลินทรีย์ที่ทนทานต่อความร้อนต่ำ โดยแบ่งสภาวะการศึกษาออกเป็น 2 สภาวะ ได้แก่การพาสเจอร์ไรส์ด้วยวิธีใช้ความร้อนต่ำ-เวลานาน (LTLT: Low Temperature - Long Time) อุณหภูมิไม่ต่ำกว่า 63 °C และคงอยู่ที่อุณหภูมินี้ไม่น้อยกว่า 30 min แล้วทำให้เย็นลงทันทีที่อุณหภูมิ 5 °C หรือต่ำกว่า และวิธีใช้ความร้อนสูง-เวลาสั้น (HTST : High Temperature - Short Time) วิธีนี้ใช้ความร้อนที่อุณหภูมิสูงกว่าวิธีแรก แต่ใช้เวลาน้อยกว่าคือ อุณหภูมิ 71.1 °C คงไว้เป็นเวลา 15 sec (ฤทธิชัย, 2560)

ปัจจุบันอุตสาหกรรมแปรรูปอาหารในประเทศไทยใช้กระบวนการฆ่าเชื้อที่อุณหภูมิสูง (UHT) ซึ่งแบ่งออกเป็นสองสภาวะ ได้แก่ กระบวนการฆ่าเชื้อที่อุณหภูมิสูงแบบ Direct UHT เป็นกระบวนการที่อาหารจะได้รับความร้อนโดยตรงด้วย Steam injection โดยหัวฉีดไอน้ำ (steam injection head) ฉีดไอน้ำที่มีความดันสูง ให้สัมผัสกับอาหารโดยตรงแล้วคงอุณหภูมิในท่อคงอุณหภูมิ (holding tube) ก่อนที่จะทำให้ตัวอย่างเย็นอย่างรวดเร็วไอน้ำจะกลั่นตัวเป็นน้ำทำให้อาหารเหลวเจือจางลงนำไปแยกน้ำออกเพื่อให้ได้มาตรฐานตามที่ต้องการ ใช้อุณหภูมิประมาณ 145-150 °C เป็นเวลา 1-2 sec และกระบวนการฆ่าเชื้อที่อุณหภูมิสูงแบบ Indirect heating ที่ใช้อุณหภูมิประมาณ 130-135 °C เป็นเวลา 2-4 sec ผ่านเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบต่างๆ ส่งผลให้เวลาในการเพิ่มอุณหภูมิเพื่อเพิ่มอุณหภูมิของอาหารประมาณ 40-60 sec ส่งผลให้เกิดสูญเสียคุณภาพของอาหาร อย่างไรก็ตาม กระบวนการฆ่าเชื้อที่อุณหภูมิสูงแบบ Indirect heating method มีความเหมาะสมในการผลิตในระดับอุตสาหกรรมมากกว่าระบบ Direct UHT ที่มีข้อจำกัดด้านวิศวกรรมและกระบวนการผลิต เนื่องจากการสัมผัสกับไอน้ำโดยตรงจะส่งผลต่อการสูญเสียคุณภาพของอาหารอย่างรุนแรง และมี

โอกาสปนเปื้อนเชื้อจุลินทรีย์ในกรณีที่ไอน้ำที่ใช้ในการผลิตไม่ได้มาตรฐาน มีโอกาสเกิดการ Break down จนต้องหยุดการผลิตเนื่องจากการอุดตันที่หัวฉีดไอน้ำทำให้เกิดการสูญเสียทางเศรษฐกิจอย่างมหาศาล อย่างไรก็ตาม กระบวนการฆ่าเชื้อที่อุณหภูมิสูงแบบ Indirect heating ก็มีข้อจำกัดที่สำหรับในเรื่องของการเกิดคราบสิ่งสกปรก หรือการเกิดตะกรันในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน ซึ่งส่งผลต่อประสิทธิภาพเชิงความร้อนของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน และมีต้นทุนในการบำรุงรักษาอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน และอุปกรณ์สร้างแหล่งความร้อนประมาณ 35-50 % ของต้นทุนการบำรุงรักษาเครื่องจักรหรืออุปกรณ์ในการแปรรูปทั้งหมด ดังนั้นเพื่อให้เกิดความเข้าใจของข้อจำกัดของการแปรรูปแบบดั้งเดิม ตารางที่ 6 จึงได้เปรียบเทียบข้อมูลทางเทคนิคของการพาสเจอร์ไรซ์ (Pasteurization) และกระบวนการฆ่าเชื้อที่อุณหภูมิสูง (UHT) รวมถึงข้อเสียเปรียบด้านวิศวกรรมและการผลิตต่างๆ (ฤทธิชัย, 2560)

## 2. ประเภทของเทคโนโลยีสมัยใหม่ในการแปรรูปอาหาร

การแปรรูปอาหารสมัยใหม่สามารถจำแนกออกเป็น 2 รูปแบบ ได้แก่การปรับปรุงประสิทธิภาพเชิงความร้อนด้วยนวัตกรรมด้านวิศวกรรมการทำความร้อนสมัยใหม่ด้วยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในการแปรรูปอาหารซึ่งประกอบด้วยการให้ความร้อนแบบโอห์มมิก (OH) การเกิดความร้อนแบบไดอิเล็กตริก

### 2.1 การเกิดความร้อนแบบโอห์มมิก

การเกิดความร้อนแบบโอห์มมิก (ohmic heating) เป็นเทคโนโลยีการสร้างความร้อน ที่มีประสิทธิภาพสูง มีอัตราการเกิดความร้อนที่สูงมากกว่าวิธีการให้ความร้อนแบบอื่นๆ โดยอัตราการเกิดความร้อนประมาณ 0.005 -1.2 °C/sec และมีประสิทธิภาพในการเปลี่ยนแปลงพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานความร้อนได้มากกว่า 95 % (Meredith, 1997) ซึ่งในขณะที่การสร้างความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟจะมีประสิทธิภาพในการเปลี่ยนแปลงพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานความร้อนได้เพียงร้อยละ 45-48 (วิล, 2547) รวมทั้งการเกิดความร้อนแบบโอห์มมิกมีกลไกการเกิดความร้อนจากภายในตัวอาหาร จึงไม่มีผลกระทบในด้านการถ่ายเทความร้อนจากแหล่งพลังงาน ปัจจุบันการเกิดความร้อนแบบโอห์มมิกถูกนำไปใช้ในการแปรรูปแบบอาหารปลอดเชื้อ (aseptic processing) สำหรับอาหารเหลวเนื้อเดียว (Assawarachan, 2010) ตลอดจนการนำไปใช้ในการเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการแปรรูปในลักษณะต่างๆ เช่น นำไปใช้ในการละลายอาหารทะเลแช่เยือกแข็งซึ่งสามารถช่วยลดพื้นที่และปริมาณน้ำที่ใช้ในกระบวนการละลายแบบดั้งเดิม (อุมาพร และคณะ, 2554) การลวกเพื่อยับยั้งเอนไซม์ การนำการเกิดความร้อนแบบโอห์มมิกสามารถนำไปใช้เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพเชิงความร้อนของการพาสเจอร์ไรซ์ และการสเตอริไลซ์ (ฤทธิชัย, 2555) การเกิดความร้อนแบบโอห์มมิกเมื่อปล่อยกระแสไฟฟ้าไหลผ่านในตัวอย่างอาหารที่มีสมบัติการนำไฟฟ้าซึ่งผลของการไหลผ่านของกระแสไฟฟ้า

ในอาหารจะเกิดเป็นพลังงานความร้อนขึ้นภายในเนื้ออาหารนั้น เนื่องจากในขณะที่กระแสไฟฟ้าไหลผ่านจะเกิดการเคลื่อนที่ของไอออนและเสียดสีกันระหว่างชั้นโมเลกุลในอาหารเกิดเป็นพลังงานความร้อน (ฤทธิชัย, 2554)

## 2.2 การให้ความร้อนแบบไดอิเล็กตริก

การเกิดความร้อนแบบไดอิเล็กตริก (Dielectric heating) เป็นเทคโนโลยีการสร้างความร้อนของวัสดุที่มีสมบัติไดอิเล็กตริก (Dielectric properties) และถูกเหนี่ยวนำด้วยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ระดับความถี่ต่างๆ อาหารและวัสดุชีวภาพมีน้ำเป็นองค์ประกอบหลักซึ่งจัดเป็นวัสดุที่มีน้ำ มีสมบัติไดอิเล็กตริกสูง (ฤทธิชัย, 2554) หลักการการเกิดความร้อนแบบไดอิเล็กตริก คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจะเหนี่ยวนำให้เกิดการสั่นของโมเลกุลน้ำและเกิดการหมุนและเสียดสีกันในระหว่างโมเลกุลทำให้เกิดความร้อนที่ผลิตขึ้นภายใน (Internal Heat Generation) จึงไม่มีผลของการถ่ายเทความร้อน ปัจจุบันการเกิดความร้อนแบบไดอิเล็กตริกแบ่งออกเป็น 2 คลื่นความถี่ ได้แก่การทำความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ ซึ่งเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ระดับความถี่ ที่ 915 และ 2,450 MHz และการเกิดความร้อนด้วยคลื่นวิทยุที่ระดับความถี่ ที่ 3 ระดับ 13.56, 27.12 และ 40.68 MHz อย่างไรก็ตามการทำความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟของวัสดุไดอิเล็กตริกมีข้อจำกัดในเรื่องของความสามารถของการทะลุทะลวงของพลังงาน (Energy Penetration) หรือค่าความลึกในการทะลุทะลวง (Penetration Depth) หรือความลึกเชิงกำลัง (Power Penetration Depth) ซึ่งมีความสำคัญมากที่สุดสำหรับการวิเคราะห์เชิงลึกของกระบวนการทำความร้อนด้วยไมโครเวฟ ด้วยเหตุที่การทำความร้อนด้วยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นการทำความร้อนเชิงปริมาตร (Volumetric Heating) ค่าความลึกในการทะลุทะลวงของพลังงานคลื่นไมโครเวฟมีประสิทธิภาพของระบบต่ำ เนื่องจากมีค่า Penetration Depth ในช่วง 12.2 – 32.8 cm เท่านั้น อย่างไรก็ตามการเกิดความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟมีข้อได้เปรียบเชิงวิศวกรรม ในด้านการเหนี่ยวนำความร้อนจากภายใน และสามารถใช้เหนี่ยวนำความร้อนกับวัสดุอาหารได้หลายสถานะ ปัจจุบันคลื่นไมโครเวฟประสบความสำเร็จในการพัฒนากระบวนการอบแห้ง และถูกต่อยอดเพื่อใช้ในการแปรรูปในระดับอุตสาหกรรม เช่น อุตสาหกรรมการแปรรูปผักและผลไม้อบแห้ง รวมทั้งการนำคลื่นไมโครเวฟร่วมกับระบบสุญญากาศในการแปรรูปผักและผลไม้อบกรอบ (ฤทธิชัย, 2554) และการทำระเหยระบบสุญญากาศด้วยคลื่นไมโครเวฟ (Assawarachan and Noomhorm, 2012)

ในขณะที่การเกิดความร้อนด้วยคลื่นวิทยุมีความลึกในการทะลุทะลวงที่มากกว่าคลื่นไมโครเวฟ และเป็นที่ยอมรับในการนำมาประยุกต์ใช้ในการแปรรูปด้วยความร้อนในการพาสเจอร์ไรซ์ รายงานวิจัยของ Geveke and Gurtler (2009) ศึกษาการนำคลื่นวิทยุใช้การพาสเจอร์ไรซ์น้ำส้มสายชูจากแอปเปิ้ล (Apple cider) ในกระบวนการพาสเจอร์ไรส์ที่อุณหภูมิ 60 °C สามารถลดจำนวนจุลินทรีย์ *Escherichai coli* ได้มากถึง 4.8 CFU/g เมื่อเทียบกับระบบการพาสเจอร์ไรส์แบบดั้งเดิม และการแปรรูปด้วยความร้อนสำหรับการพาสเจอร์ไรส์ผลิตภัณฑ์อาหารแปรรูปซึ่งบรรจุในบรรจุภัณฑ์

นอกจากนี้การพัฒนาคลื่นวิทยุประสบความสำเร็จในการการทำลายมอดและไข่มอดในข้าวเปลือกเพื่อลดการใช้สารเคมีโบรไมด์ และสามารถพัฒนาเป็นเครื่องต้นแบบที่ใช้ในระดับอุตสาหกรรม

**ตารางที่ 6** ข้อมูลทางวิศวกรรมและการผลิตแสดงการเปรียบเทียบข้อได้เปรียบและข้อเสียของวิธีการให้ความร้อนแบบดั้งเดิม การให้ความร้อนด้วยวิธีโอห์มิก

วิธีการให้ความร้อน	ข้อได้เปรียบ	ข้อเสียเปรียบ
1. การให้ความร้อนแบบดั้งเดิม	เทคโนโลยีแบบดั้งเดิมที่มีกลไกการทำงานที่ไม่ซับซ้อน	ข้อจำกัดในเรื่องของการถ่ายเทความร้อนและปัญหาการบดขยี้การสูญเสียคุณภาพอาหารเนื่องจากได้รับความร้อนสูงเป็นเวลานาน เนื่องจากข้อจำกัดด้านการถ่ายเทความร้อนผ่านเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน
2. การให้ความร้อนแบบโอห์มิก	สามารถเกิดความร้อนได้อย่างรวดเร็ว มีอัตราการเกิดความร้อนอย่างสม่ำเสมอ และมีประสิทธิภาพในการเปลี่ยนแปลงพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานความร้อนสูง มากกว่า 95 % และไม่มีผลกระทบจากการถ่ายเทความร้อนเนื่องจากการเหนี่ยวนำความร้อนจากภายใน	สามารถประยุกต์กับสารละลายเนื้อเดียวที่เป็นของเหลวและที่มีค่าการนำไฟฟ้าสูงเท่านั้น ดังนั้นการประยุกต์ใช้งานจึงอยู่ในกรอบของการแปรรูปด้วยความร้อนแบบต่างๆ เช่น การลวก การพาสเจอร์ไรซ์ และกระบวนการฆ่าเชื้อที่อุณหภูมิสูง (UHT) เท่านั้น

ที่มา: ฤทธิชัย (2559)

### 3. ระบบการบรรจุน้ำผลไม้

องค์ประกอบหนึ่งที่ส่งผลให้น้ำผลไม้ได้รับการยอมรับอย่างกว้างขวางไปทั่วทั้งโลกได้แก่วิวัฒนาการของระบบบรรจุภัณฑ์ซึ่งได้พัฒนาบทบาทของบรรจุภัณฑ์ให้อื้ออำนวยความสะดวกได้มากขึ้นกว่าเดิมไม่ว่าจะเป็นการยืดอายุอาหารหรือรูปทรงที่แปลกใหม่ เป็นต้น

#### 3.1 ปัจจัยสำคัญที่จะต้องพิจารณาในการเลือกระบบบรรจุภัณฑ์ ประกอบด้วย

##### 3.1.1 กระบวนการผลิต

##### 3.1.2 ระบบการจัดจำหน่ายและอายุขัยที่ต้องการของน้ำผลไม้ รวมทั้งกฎข้อบังคับ

##### 3.1.3 ส่วนผสมของน้ำผลไม้และระดับคุณภาพที่ต้องการ



3.1.4 สถานะการป้องกันและรักษาคุณภาพของน้ำผลไม้ในระหว่างการขนส่ง การเก็บ  
คงคลังและสถานะ ณ จุดขาย

3.1.5 การวางตำแหน่งสินค้าในตลาดขายปลีก

3.1.6 ปริมาณบรรจุ ขนาดการบรรจุที่แตกต่างกัน พร้อมทั้งรายละเอียดการพิมพ์

3.1.7 ระบบบรรจุที่ต้องการ เช่น เป็นแบบอัตโนมัติหมด หรือความจำเป็นในการขยาย  
กำลังการผลิตในอนาคตหรือ การใช้งานร่วมกับเครื่องจักรที่มีอยู่

3.1.8 ภาพพจน์ของสินค้า และความรู้สึกของผู้บริโภคที่มีต่อสินค้าและบรรจุภัณฑ์  
การบรรจุ

การบรรจุร้อน (Hot Filling) เป็นวิธียืดอายุของของเหลวภายในบรรจุภัณฑ์ การบรรจุร้อนจะ  
ผ่านการฆ่าเชื้อหรือพาสเจอร์ไรส์ด้วยอุณหภูมิที่ 92-95 °C และ บรรจุที่อุณหภูมิ 82 °C หลังจากนั้น  
จะถูกนำมาทำให้เย็นด้วยการเคลื่อนผ่านลวดเย็น และ ถูกทำให้แห้งด้วยการเป่าลม เสร็จแล้วจึง  
นำมาติดฉลากเพื่อทำการขนส่งต่อไป นั้นหมายความว่าวัสดุที่ผ่านการบรรจุร้อนนั้นต้องทนต่อสภาพ  
ความร้อนได้ดีเช่นกัน วิธีบรรจุร้อนนั้นเหมาะสำหรับการบรรจุเครื่องดื่มประเภทน้ำผลไม้ที่มีกรดสูงๆ  
ข้อดี ของการบรรจุร้อนคือ สามารถยืดอายุการเก็บรักษาของเหลวได้นาน ช่วยหลีกเลี่ยงการใช้สารกัน  
บูดในเครื่องดื่ม สามารถใช้กับของเหลวได้หลายประเภท ข้อเสีย คือ เปลืองพื้นที่ในกระบวนการผลิต

การบรรจุเย็น (Cool Filling) คือการการแช่เย็นของเหลวที่อุณหภูมิเย็นจัดประมาณ 0-5 °C  
ซึ่งการบรรจุเย็นนั้นจะสามารถเก็บรักษารสชาติของของเหลวได้ดีทำให้รสชาติแทบจะไม่แตกต่างไป  
จากรสชาติดั้งเดิมเลยแม้ว่าของเหลวนั้นจะมีการแต่งกลิ่นหรือเติมสารปรุงแต่ง ข้อดี ของการบรรจุเย็น  
แบบนี้คือ ได้สินค้าที่มีคุณภาพดี ข้อเสีย คือ ในกระบวนการกระจายสินค้าในระบบแช่เย็นมีค่าใช้จ่าย  
ค่อนข้างสูง

การบรรจุเย็นแบบปลอดเชื้อ (Cool Aseptic) เป็นการบรรจุเครื่องดื่มที่ผ่านความร้อนสูง  
อุณหภูมิที่ 137 °C ในระยะเวลา 4 sec เป็นการให้ความร้อนฆ่าเชื้อทั้งตัวผลิตภัณฑ์และบรรจุ  
ภัณฑ์เพื่อฆ่าจุลินทรีย์จากนั้นลดปริมาณให้เย็นลงสุด วิธีนี้เป็นวิธีที่นิยมมากที่สุดในการอุตสาหกรรม  
เครื่องดื่มที่เกี่ยวกับน้ำผลไม้ เนื่องจากวิธีบรรจุแบบนี้ช่วยรักษาวิตามินในน้ำผลไม้ได้ดีตั้งนั้นรสชาติ  
ของน้ำผลไม้ที่ได้จึงมีคุณภาพดีกว่าและมีอายุการเก็บรักษานานกว่าการบรรจุเย็นแบบธรรมดาอีกด้วย

#### 4. การตรวจวิเคราะห์คุณภาพและการตรวจวิเคราะห์สารต้านอนุมูลอิสระในน้ำผลไม้

##### 4.1 สารต้านอนุมูลอิสระและความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ

ในปัจจุบันผู้บริโภคได้ให้ความสำคัญกับเรื่องสุขภาพ อาหาร และความสวยงามมากขึ้น โดย  
ผลิตภัณฑ์ที่มีส่วนประกอบของสารสกัดจากธรรมชาติและสมุนไพรที่มีสารต้านอนุมูลอิสระ จึงเป็นสาร  
ที่มีผู้บริโภคให้ความสนใจ เนื่องจากสารที่มีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระสามารถช่วยชะลอการเสื่อมสภาพ

ของเซลล์ในร่างกาย รวมทั้งสามารถป้องกันกลิ่นหืนของอาหาร ซึ่งเป็นการเสื่อมเสียของอาหาร (food spoilage) เนื่องจากปฏิกิริยาทางเคมี หรือการเกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาลในผักและผลไม้ เป็นต้น ในที่นี้จะกล่าวถึงสารต้านอนุมูลอิสระในกลุ่มของสารประกอบฟีนอลิกซึ่งเป็นสารต้านออกซิเดชันที่สำคัญชนิดหนึ่งที่พบในผลไม้ ซึ่งอาจใช้เป็นกำหนดมาตรฐานในการพัฒนาการทำน้ำผลไม้จากผลไม้พื้นบ้านต่อไป

#### 4.2 สารประกอบฟีนอลิก

สารประกอบฟีนอลิก (phenolic compound) หรือสารประกอบฟีนอล เป็นสารต้านอนุมูลอิสระชนิดหนึ่งที่อยู่ในกลุ่ม polyphenol ซึ่งเป็นสารประกอบฟีนอลิก ได้แก่ flavonoids, flavones, Gallic acid, ellagic acid, lignin, tannin, anthocyanin, carotenoids และอนุพันธ์ของ cinnamic acid (Cowan, 1999; Helmja et al., 2007) เป็นสารที่ให้สีส้มแก่พืช สารประกอบฟีนอลิกมีมากกว่า 8000 ชนิด จัดเป็นสารต้านอนุมูลอิสระที่ได้จากภายนอก พบได้มากในธรรมชาติและอาหารหรือเครื่องดื่มน้ำที่ผลิตจากพืชหลายชนิด เช่น ผัก ผลไม้ เครื่องเทศ สมุนไพร เมล็ดธัญพืชต่างๆ (Chen et al., 1996; Kinsella et al., 1993; Shahidi et al., 1992; ปรียานุช, 2551; วาริน, 2546; ศรีจันทร์, 2546; โอภา และคณะ, 2549)

สารประกอบฟีนอลิกนอกจากจะมีคุณสมบัติเป็นสารต้านอนุมูลอิสระแล้วยังมีคุณสมบัติอื่นๆ เช่น ฤทธิ์ต้านแบคทีเรีย ต้านไวรัส ต้านการอักเสบ ช่วยขยายหลอดเลือด ต้านโรคมะเร็ง ทำลายเชื้อโรคที่เข้าสู่ร่างกาย รวมถึงเป็นสารกระตุ้นให้สร้างภูมิคุ้มกัน ต้านมะเร็ง และช่วยในการถนอมอาหาร ป้องกันการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของไขมัน โดยใช้เป็นสารกันหืนในอาหาร (lipid oxidation) การวิเคราะห์หาสารประกอบฟีนอลิกส่วนใหญ่นิยมหาออกมาในรูปของกรดแกลลิก (Gallic acid)

การตรวจวิเคราะห์ความสามารถรวมในการต้านอนุมูลอิสระมีด้วยกันหลายวิธี การตรวจวิเคราะห์ด้วยวิธี Trolox Equivalent Antioxidant Capacity Assay (TEAC) ซึ่งการวิเคราะห์ด้วยวิธีนี้ โดยทั่วไปจะมีการสร้างอนุมูลอิสระที่ทราบความเข้มข้นที่แน่นอน และวิเคราะห์ความสามารถในการยับยั้ง หรือขจัดอนุมูลอิสระของสารตัวอย่าง โดยวิธีวัดปริมาณอนุมูลอิสระที่ลดลงหรือที่เหลือ วิธี Scavenging activity of ABTS radical เป็นวิธีการวัดทางอ้อมโดยใช้สาร 2,2'-azino-bis(3-ethylbenzothiazoline-6-sulfonic acid) (ABTS) ทำให้เกิดอนุมูล  $ABTS^+$  เป็นการวัดความสามารถในการขจัดอนุมูล  $ABTS^+$  ที่มีสีเขียวปนน้ำเงิน ข้อดีของวิธีนี้คือสะดวก รวดเร็ว และง่ายต่อการวิเคราะห์ สามารถวิเคราะห์ปริมาณสารต้านอนุมูลอิสระที่เหลือจากการทำปฏิกิริยาโดยวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ลดลง ทำการวิเคราะห์ได้ทั้งในน้ำและตัวละลายอินทรีย์ (เสาวนีย์ และคณะ, 2554; โอภา และคณะ, 2549) และวิธี DPPH (2,2-diphenyl-1-picrylhydrazyl) radical อนุมูล DPPH เป็นอนุมูลไนโตรเจนที่คงตัว มีสีม่วง อยู่ในรูปอนุมูลอยู่แล้ว โดยไม่ต้องทำปฏิกิริยาเพื่อให้เกิดอนุมูล

การวิเคราะห์เป็นการวัดความสามารถของสารทดสอบในการกำจัดอนุมูลอิสระโดยวิธีให้ไฮโดรเจนอะตอม การวัดทำโดยใช้เครื่องวัดค่าการดูดกลืนแสง (spectrophotometer) วัดการลดลงของสี เมื่อเติมสารต้านออกซิเดชันลงไป โดยวัดการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 517 nm DPPH radical ใช้ในการทดสอบความสามารถในการทำลายอนุมูลอิสระของสารตัวอย่าง (scavenging activity) สารละลายของ DPPH มีสีม่วงในเอทานอล และเมื่อได้รับ H จะเปลี่ยนเป็นสารละลายสีเหลือง (Blois, 1958)

### 4.3 แอนโธไซยานิน (Anthocyanins)

แอนโธไซยานินเป็นรงควัตถุที่พบในพืชทั้งในดอกและในผล ละลายน้ำได้ดี เป็นรงควัตถุที่พบอยู่ใน cell sap ของพืช อยู่ในรูปไกลโคไซด์ ให้สีแดง น้ำเงิน และม่วง ในผัก ผลไม้ และดอกไม้ชนิดต่างๆ ปัจจุบันนี้แอนโธไซยานินจัดเป็นรงควัตถุที่ได้รับความสนใจ เนื่องจากเป็นสารต้านอนุมูลอิสระ (Antioxidant) และจากการที่เป็นสารต้านอนุมูลอิสระทำให้แอนโธไซยานินมีบทบาทต่อการป้องกันการเกิดโรคเรื้อรังต่างๆ เช่น โรคเกี่ยวกับหลอดเลือดหัวใจ (Cardiovascular disease) โรคมะเร็ง โรคเบาหวาน เป็นต้น

โครงสร้างของแอนโธไซยานิน ประกอบด้วย สารประกอบ 2 หรือ 3 ชนิด ได้แก่

ชนิดที่ 1 คือแอนโธไซยานิดิน หรือ อะไกลโคโคน (Aglycone) โครงสร้างพื้นฐานของแอนโธไซยานิดินนั้น ประกอบด้วย คาร์บอน 6 อะตอม คาร์บอน 3 อะตอม คาร์บอน 6 อะตอม (C-6-C-3-C-6) เชื่อมต่อกัน แอนโธไซยานินที่พบมากในปัจจุบันมีอยู่ 6 ชนิด คือ เพลาโกนินิดิน (Pelargonidin) ไชยานิดิน (Cyanidin) เดลฟินิดิน (Delphinidin) พีโอนิดิน (Peonidin) เพทูนิดิน (Petunidin) และมอลวิดิดิน (Malvidin) ซึ่งจะแตกต่างกันที่ตำแหน่ง 3' และ 5' ว่ามีหมู่ไฮดรอกซิล (Hydroxyl) หรือ เมธอกซิล (Methoxyl)

ชนิดที่ 2 น้ำตาล ซึ่งน้ำตาลจะเกิดพันธะกับคาร์บอน ตำแหน่งที่ 3 หรือตำแหน่งที่ 3 และ 5 โดยน้ำตาลที่เกิดพันธะได้ เช่น น้ำตาลกลูโคส (Glucose) น้ำตาลกาแลกโตส (Galactose) น้ำตาลรูทีโนส (Rutinose) น้ำตาลแรมโนส (Rhamnose) เป็นต้น

ชนิดที่ 3 คือกรด ซึ่งส่วนนี้อาจจะมีหรือไม่มีก็ได้ ถ้าแอนโธไซยานินมีกรดเป็นองค์ประกอบจะเรียกว่า นอนอะซีเลตเตด แอนโธไซยานิน (Non acelated anthocyanin) แต่ถ้าไม่มีกรดเป็นองค์ประกอบจะเรียกว่า อะซีเลตเตด แอนโธไซยานิน (Acelated anthocyanin) โดยกรดจะเกิดการเอสเทอร์ฟิเคชัน (Esterification) กับน้ำตาลที่จับกับคาร์บอน ตำแหน่งที่ 3 หรือตำแหน่งที่ 5 กรดที่เกิดพันธะเอสเทอร์กับน้ำตาล เช่น กรดคูมาริก (Coumaric acid) กรดเฟอร์ูลิก (Ferulic acid) กรดคาร์แฟอิก (Caffeic acid) เป็นต้น การเกิดเอซิลเลชัน (Acylation) ในโครงสร้างของแอนโธไซยานิน จะทำให้แอนโธไซยานินมีความคงตัวมากขึ้น



ในอดีตตรงควัตถุสามารถถูกแยกออกมาได้เฉพาะชนิดที่มีปริมาณมากๆ เท่านั้นไม่สามารถแยกตรงควัตถุชนิดที่มีปริมาณน้อย หรือมีหลายชนิดผสมรวมกันเป็นสารประกอบเชิงซ้อนผสมได้ จนกระทั่งต่อมาได้มีการพัฒนาเทคนิคและวิธีการสกัดแยกสารด้วย paper chromatography จึงสามารถแยกตรงควัตถุทุกชนิดที่มีปริมาณน้อยๆ ได้

เนื่องจากโมเลกุลของแอนโธไซยานินเป็นไกลโคไซด์ ซึ่งประกอบด้วยส่วนที่เป็นน้ำตาล และส่วนที่เป็นอะไกลโคน (aglycone) เรียกว่า แอนโธไซยานิดิน (anthocyanidin) ซึ่งแยกออกจากกันได้โดยการไฮโดรไลซิสด้วยกรด ในเนื้อเยื่อพืชจะไม่พบอะไกลโคนที่อยู่ในรูปอิสระ จะพบเฉพาะที่อยู่ในรูปไกลโคไซด์ คือ รวมกับน้ำตาลเป็นเอสเทอร์เท่านั้น

น้ำตาลที่เป็นองค์ประกอบในโมเลกุลของแอนโธไซยานิน จะมี 1,2 หรือ 3 โมเลกุลได้ และเป็นได้ทั้งโมโน- ได- และไตรแซ็กคาไรด์ โมเลกุลของน้ำตาลส่วนใหญ่จะเกาะกับหมู่ไฮดรอกซิลในโมเลกุลของแอนโธไซยานิดิน โดยเกิดปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันที่ตำแหน่ง 3 ถ้าเป็นไดไกลโคไซด์จะเกาะที่ตำแหน่ง 3 และ 5 หรือ 3 และ 7 ของหมู่ไฮดรอกซิล

สีของแอนโธไซยานินถูกควบคุมด้วยปัจจัยที่สำคัญ 2 อย่างคือ

1. โครงสร้าง หากในโครงสร้างวงแหวนพินิลมีจำนวนหมู่ไฮดรอกซิล หรือหมู่เมทอกซิล (-OCH<sub>3</sub>) เพิ่มขึ้น จะมีผลต่อสีแอนโธไซยานิน เช่น การเพิ่มหมู่ไฮดรอกซิลให้มากขึ้นจะทำให้มีสีเข้มขึ้น และ สีจะเปลี่ยนเป็นสีน้ำเงินมากขึ้นด้วย และการเพิ่มหมู่ไฮดรอกซิลแทนที่หมู่ไฮดรอกซิลที่ตำแหน่ง 3' และ 5' จะทำให้มีสีแดงเพิ่มขึ้น

2. พีเอช พีเอชของสารละลายที่แอนโธไซยานินละลายอยู่ มีผลต่ออัตราการสลายตัวของแอนโธไซยานิน ทำให้สีเปลี่ยนไปได้ ตัวอย่างเช่น ไซยานินซีเป็นสีแดงของเชอริ และ แคนเบอร์รี่ จะเปลี่ยนจากสีแดงเป็นสีน้ำเงิน เมื่อพีเอชเปลี่ยนจาก 3 เป็น 11 และโครงสร้างของโมเลกุลจะมีการเปลี่ยนแปลง

การเปลี่ยนแปลงพีเอชอาจเกิดขึ้นเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงทางสรีระของผักและผลไม้ เช่น ระหว่างการสุกของผลไม้จะมีการเปลี่ยนแปลงพีเอช มีผลทำให้สีของผลไม้เปลี่ยนแปลงไปได้ โดยเฉพาะผลไม้จำพวกเบอร์รี่ การเปลี่ยนสีเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงพีเอชยังขึ้นอยู่กับเกลือของแอนโธไซยานินด้วยว่าเป็นโพแทสเซียมไอออน โซเดียมไอออน แคลเซียมไอออน หรือ แอมโมเนียมไอออน

รงควัตถุแอนโธไซยานินที่อยู่ในผักและผลไม้ จะถูกทำลายได้ง่ายในกระบวนการแปรรูปอาหาร ตัวอย่างเช่น การใช้อุณหภูมิสูง ความเข้มข้นของน้ำตาลสูง พีเอช กรดอะซิติก กรดแอสคอร์บิก และภาวะที่มีออกซิเจน จะมีผลเร่งอัตราเร็วของการสลายตัวของแอนโธไซยานินให้เกิดเร็วขึ้น เนื่องจากเกิดปฏิกิริยาคนเดนเซชัน (condensation) ของแอนโธไซยานินกับสารประกอบเหล่านี้

ตัวอย่างเช่น แยมสตรอเบอร์ที่มีสีแดง เมื่อเก็บไว้ที่อุณหภูมิห้องนาน 2 ปี จะเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาลแดง เนื่องจากมีสารโพลบาเฟน (phlobaphen) เกิดขึ้นระหว่างการเก็บรักษา

แอนโธไซยานินยังสามารถรวมตัวกับโลหะที่เป็นสีม่วงหรือสีเทา ซึ่งมักเกิดขึ้นเมื่อบรรจุอาหารลงในกระป๋องที่มีดีบุก นอกจากนั้นสีของแอนโธไซยานินจะถูกฟอกสีให้จางลงได้เมื่อมีซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเนื่องจากมีแอนโธไซยานินคาร์โบเนียมไอออน (anthocyanin carbonium ion, R<sup>+</sup>) เกิดขึ้น และไปทำปฏิกิริยากับไบซัลไฟต์ทำให้เกิดเป็น chromen-2 (หรือ 4) -sulfonic acid ซึ่งไม่มีสี แต่มีโครงสร้างและสมบัติคล้าย anthocyanin carbinol base

เนื่องจากปัจจุบันสำนักงานคณะกรรมการอาหารและยาประเทศสหรัฐอเมริกาได้ยกเลิกการใช้สีอาหารสังเคราะห์หลายชนิด ทำให้มีการนำเอาแอนโธไซยานินซึ่งเป็นสีธรรมชาติมาใช้ประโยชน์เป็นสีอาหารมากขึ้น ดังนั้นการศึกษาสมบัติทางเคมีของแอนโธไซยานิน เพื่อให้เข้าใจกลไกของการเสื่อมคุณภาพของแอนโธไซยานินจึงมีความจำเป็นยิ่ง

แอนโธไซยานินสลายตัวได้อย่างช้าๆ และเป็นไปอย่างต่อเนื่องในระหว่างการเก็บรักษาผักและผลไม้ที่แปรสุบด้วยความร้อน ซึ่งกลไกบางอย่างยังไม่เข้าใจได้อย่างสมบูรณ์ แต่ปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อการสลายตัวของแอนโธไซยานิน คือ พีเอช ออกซิเจน กรดแอสคอร์บิก และ โลหะไอออน (นิริยา, 2545)

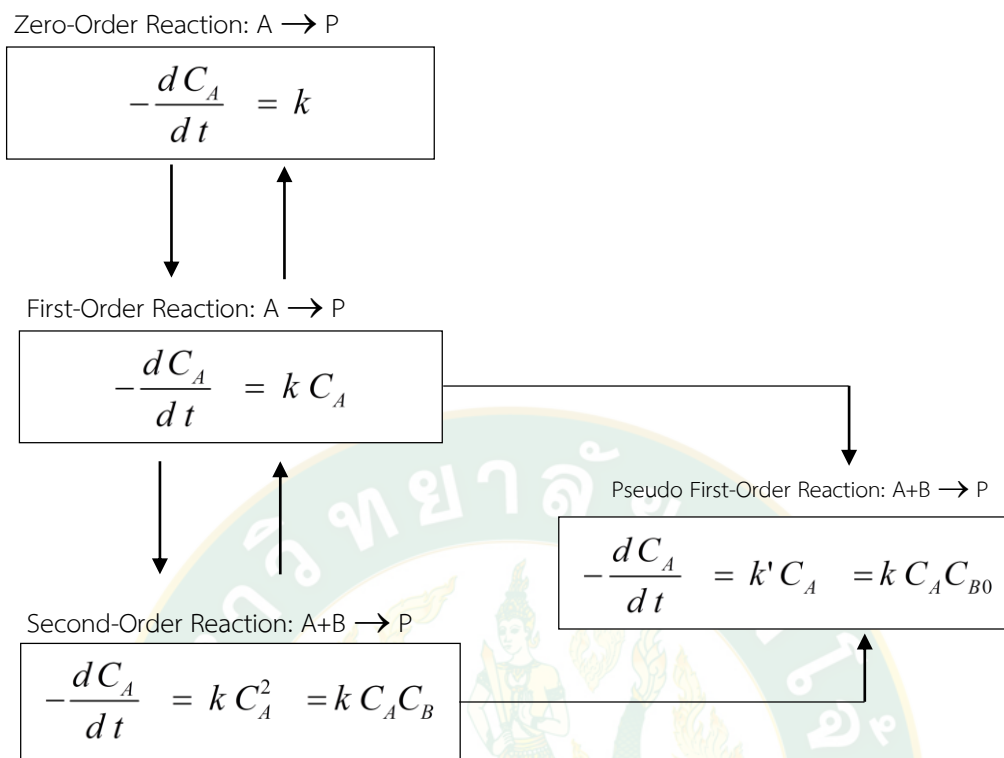
## 5. จลนพลศาสตร์การเปลี่ยนแปลงคุณภาพในระหว่างการให้ความร้อน

ฤทธิชัย (2556) อธิบายแนวทางการพัฒนาสมการทางคณิตศาสตร์สำหรับจลนพลศาสตร์การอบแห้งอาหารและวัตถุชีวภาพสำหรับการทำนายจลนพลศาสตร์การเปลี่ยนแปลงคุณภาพของผลิตภัณฑ์ระหว่างการให้ความร้อนในรูปแบบของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (mathematical modeling) เป็นวิธีการที่ประหยัดได้ทั้งเวลาและค่าใช้จ่ายในการทดลอง สามารถวิเคราะห์หาข้อมูลจำนวนมากอย่างละเอียดซึ่งอาจจะเป็นข้อมูลที่วัดได้ยากหรือวัดไม่ได้เลยในห้องปฏิบัติการ การจำลองการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของผลิตภัณฑ์ สามารถอธิบายการเปลี่ยนแปลงคุณภาพด้านประสาทสัมผัส คุณภาพสี อัตราการคงอยู่ของสารออกฤทธิ์ที่สำคัญหรือสารต้านอนุมูลอิสระชนิดต่างๆ และปริมาณน้ำมันหอมระเหยแบบต่างๆ ในระหว่างสภาวะและวิธีการให้ความร้อนแบบต่างๆ เป็นอย่างดี ปัจจุบันการจำลองจลนพลศาสตร์การเปลี่ยนแปลงคุณภาพของผลิตภัณฑ์ สามารถทำได้ด้วยแบบจำลองเอมพิริคัล (empirical model) ด้วยวิธีการปรับเส้นโค้ง (curve fitting) ให้ผลการจำลองข้อมูลสอดคล้องกับผลการทดลอง โดยแบบจำลองเอมพิริคัลสามารถจำแนกได้เป็นแบบจำลองเชิงเส้น (linear model) แบบจำลองไม่เป็นเชิงเส้น (non-linear model) และแบบจำลองพหุนาม (polynomial model) อย่างไรก็ตาม การเปลี่ยนแปลงคุณภาพผลิตภัณฑ์อาหารและวัตถุชีวภาพในระหว่างการให้ความร้อนนั้น ไม่ได้เป็นปฏิกิริยาปฐมภูมิ (primary reaction) เพียงอย่างเดียว แต่เป็นปฏิกิริยาทุติยภูมิ

(secondary reaction) หลายปฏิกิริยาเกิดขึ้นร่วมกัน ซึ่งเป็นปฏิกิริยาทางเคมีที่ซับซ้อนอย่างมาก ส่งผลให้แบบจำลองเอมพิริคัลไม่เหมาะในการทำนายการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของอาหารและวัสดุชีวภาพในระหว่างการให้ความร้อน ดังนั้นงานวิจัยที่เกี่ยวข้องส่วนใหญ่จึงจะนิยมศึกษาการเปลี่ยนแปลงคุณภาพผลิตภัณฑ์ด้วยแบบจำลองจลนพลศาสตร์ (kinetic model) ซึ่งเป็นแบบจำลองที่มีความเหมาะสมในการทำนายการเปลี่ยนแปลงคุณภาพผลิตภัณฑ์ในลักษณะต่างๆ ได้อย่างเหมาะสมและมีการศึกษากันอย่างแพร่หลาย

แบบจำลองจลนพลศาสตร์ เป็นที่รู้จักกันอย่างดีในการจำลองลำดับของการเกิดปฏิกิริยาทางเคมี หรือชีวเคมี และมีความเหมาะสมอย่างมากในการนำมาใช้สำหรับการจำลองการเปลี่ยนแปลงคุณภาพผลิตภัณฑ์ในระหว่างการให้ความร้อนซึ่งเป็นการเปลี่ยนแปลงทางปฏิกิริยาทางเคมีที่ซับซ้อน ดังนั้นจึงมีรายงานวิจัยจำนวนมากที่ใช้แบบจำลองจลนพลศาสตร์ทำนายอัตราการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของผลิตภัณฑ์ในระหว่างการให้ความร้อนด้วยสภาวะและวิธีต่างๆ ได้เป็นอย่างดี เช่น แบบจำลองจลนพลศาสตร์การเปลี่ยนแปลงสีในผลิตภัณฑ์อาหารในระหว่างการให้ความร้อน สามารถทำนายอัตราการเปลี่ยนแปลงสีของผลิตภัณฑ์ และอัตราการเกิดปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลที่ไม่เกี่ยวข้องกับเอนไซม์ (non-enzymatic browning reaction)

Villota and Hawkes (2007) ได้นำเสนอรูปแบบของจลนพลศาสตร์ของการศึกษาผลกระทบของสภาวะการอบแห้งต่อการเปลี่ยนแปลงคุณภาพผลิตภัณฑ์ ที่เกิดจากปฏิกิริยาเคมี ออกเป็น 4 อันดับปฏิกิริยา ได้แก่ ปฏิกิริยาอันดับศูนย์ (zero order reaction) ปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง (first order reaction) ปฏิกิริยาอันดับสอง (second order reaction) และปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม (pseudo first order reaction) ตามที่แสดงในภาพที่ 2



ภาพที่ 2 รูปแบบของอันดับการเกิดปฏิกิริยาการเปลี่ยนแปลงคุณภาพ  
ของজনপলসাস্ত্রকারণোপাং

(เมื่อ  $C_A$  คือความเข้มข้นของสารอาหาร A ที่เวลาใดๆ  $C_B$  คือความเข้มข้นของตัวทำปฏิกิริยา  
ที่เวลาใดๆ และ  $C_{B0}$  คือความเข้มข้นเริ่มต้นของตัวทำปฏิกิริยา B ในขณะที่  $k$  และ  $k'$   
เป็นค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยา ส่วน P คือผลผลิตของปฏิกิริยา)

ที่มา: ฤทธิชัย (2556)

การศึกษาที่เกี่ยวข้องกับอัตราการเกิดปฏิกิริยาที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงคุณภาพสี  
สารอาหาร (วิตามิน และสารต้านอนุมูลอิสระ) รวมถึงสารออกฤทธิ์สำคัญในระหว่างการให้ความร้อน  
อาหารและวัสดุชีวภาพถูกแสดงความสัมพันธ์ในรูปแบบของอันดับการเกิดปฏิกิริยาการเปลี่ยนแปลง  
คุณภาพของজনপলসাস্ত্রকারণোপাং

การจำลองการเปลี่ยนแปลงสีในระหว่างการอบแห้งจากการสลายตัวของสารสี (pigment)  
ตามธรรมชาติที่มีอยู่ในอาหารและวัสดุชีวภาพ รวมทั้งการเกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาลที่อาศัยเอนไซม์  
(enzymatic browning reaction) และไม่อาศัยเอนไซม์ (non-enzymatic browning reaction) ก็  
มีรูปแบบความสัมพันธ์เป็นอันดับการเกิดปฏิกิริยาของการเปลี่ยนแปลงทางজনপলসাস্ত্র โดย

งานวิจัยของ Dadali *et al.* (2007) และ Demirhan and Özbek (2009) ซึ่งพบว่าการเปลี่ยนแปลงคุณภาพสี (CIE-Hunter color system) และค่าความสด (chroma) ของใบโหระพา และผักขมในระหว่างการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ มีรูปแบบเป็นปฏิกิริยาอันดับศูนย์ และปฏิกิริยาอันดับหนึ่งควบคู่กัน สอดคล้องกับผลงานวิจัยของปองพล และฤทธิชัย ซึ่งศึกษาผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงสีของใบกะเพราของการลดความชื้นของใบกะเพราจากความชื้นเริ่มต้น  $5.19 \pm 0.13$  ฐานแห้ง การให้ความร้อนจนเหลือความชื้น  $0.06 \pm 0.01$  น้ำหนักแห้ง ในระหว่างการอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟที่ระดับพลังงาน 164-752 W จากผลการศึกษาพบว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการทำนายการเปลี่ยนแปลงสีของใบกะเพราของพารามิเตอร์สีของค่า  $a^*$ -value และ  $b^*$ -value เป็นไปตามจลนพลศาสตร์การเปลี่ยนแปลงสีของปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง แต่พารามิเตอร์สีของค่า  $L^*$ -value และค่า  $\Delta E$  เป็นไปตามจลนพลศาสตร์การเปลี่ยนแปลงสีของปฏิกิริยาอันดับศูนย์ ผลงานวิจัยของ (Assawarachan and Noomhorm, 2008) พบว่าการเปลี่ยนแปลงค่าความสว่างกับค่า  $b^*$ -value ในการลดความชื้นของน้ำสับประดขุ่นหนืดด้วยคลื่นไมโครเวฟระบบสุญญากาศก็อยู่ในรูปแบบปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเช่นกัน และ ค่า  $L^*$ -value เป็นไปตามปฏิกิริยาอันดับศูนย์เช่นกัน

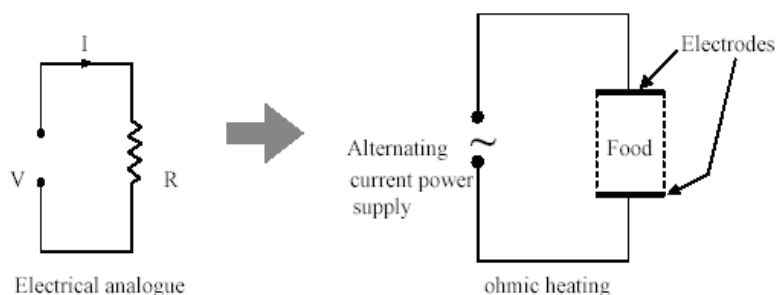
#### การทบทวนวรรณกรรม/สารสนเทศ/ สิทธิบัตรที่เกี่ยวข้อง

##### 1. หลักการพื้นฐานของการเกิดความร้อนแบบโอห์มมิก (Ohmic Heating)

การเกิดความร้อนแบบโอห์มมิก (Ohmic Heating) เป็นเทคโนโลยีการสร้างความร้อนที่มีประสิทธิภาพสูง มีอัตราการเกิดความร้อนที่สูงกว่าวิธีการให้ความร้อนแบบอื่นๆ โดยมีอัตราการเกิดความร้อนประมาณ 0.005 -1.2 องศาเซลเซียสต่อวินาที และมีประสิทธิภาพในการเปลี่ยนแปลงพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานความร้อนร้อยละ 95 (Roberts *et al.* 1998) ซึ่งในขณะที่การสร้างความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟจะมีประสิทธิภาพในการเปลี่ยนแปลงพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานความร้อนได้เพียงร้อยละ 45-48 เท่านั้น รวมทั้งการเกิดความร้อนแบบโอห์มมิกมีกลไกการเกิดความร้อนจากภายในตัวอาหารจึงไม่มีผลกระทบในด้านการถ่ายเทความร้อนจากแหล่งพลังงาน (ฤทธิชัย, 2555) ปัจจุบันการเกิดความร้อนแบบโอห์มมิกถูกนำไปใช้ในการแปรรูปแบบอาหารปลอดเชื้อ (Aseptic Processing) สำหรับอาหารเหลวเนื้อเดียว การให้ความร้อนแบบโอห์มมิก (Ohmic Heating) เป็นวิธีการสร้างความร้อนจากภายในตัวอาหาร ซึ่งเป็นผลจากการปล่อยกระแสไฟฟ้าไหลผ่านเข้าสู่อาหาร และเกิดการต้านทานการไหลของกระแสไฟฟ้าในอาหารจนเกิดเป็นความร้อนที่อัตราความร้อนสูง โดยชนิดของอาหารที่เหมาะสมกับการเกิดความร้อนแบบโอห์มมิกนั้นควรเป็นอาหารที่มีค่าการนำไฟฟ้าที่สูง และค่าการนำไฟฟ้าของอาหารมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิของระบบมีแนวโน้มที่สูงขึ้นเป็นผล



จากปริมาณการไหลผ่านของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านในอาหารได้มากขึ้น (Assawarachan, 2010) ดังภาพที่ 3



ภาพที่ 3 วงจรสมมูลการให้ความร้อนแบบโอห์มมิก

ที่มา: Assawarachan (2010)

การให้ความร้อนแบบโอห์มมิก เป็นเทคโนโลยีการให้ความร้อนที่มีประสิทธิภาพสูงมีการกระจายความร้อนอย่างทั่วถึงทุกจุด ซึ่งสามารถช่วยลดการสูญเสียคุณค่าทางโภชนาการและทางประสาทสัมผัสของอาหารจากรายงานการวิจัยของ (Mitchell and Alwis, 1989) พบว่าการเกิดความร้อนด้วยวิธีโอห์มมิกมีอัตราการเพิ่มของอุณหภูมิที่รวดเร็วหรือมีอัตราการเพิ่มของอุณหภูมิมากกว่า  $0.005-1.2\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{sec}$  และมีความสามารถในการประหยัดพลังงานได้ดีโดยมีประสิทธิภาพการเปลี่ยนจากพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานความร้อนมากถึง 95% (Meredith, 1997) การให้ความร้อนโดยวิธีโอห์มมิกจึงสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในกระบวนการแปรรูปอาหารได้มากมาย เช่น การแปรรูปแบบปลอดเชื้อ (Aseptic processing) การละลายอาหารแช่เยือกแข็ง การลวกเพื่อยับยั้งเอนไซม์ การฆ่าเชื้อแบบพาสเจอร์ไรส์และสเตอริไลซ์ กระบวนการลวก (ฤทธิชัย, 2561)

การให้ความร้อนแบบโอห์มมิกเป็นวิธีการให้ความร้อนโดยการเหนี่ยวนำความร้อนจากภายในตัวอาหารอันเป็นผลจากการต้านทานการไหลผ่านของกระแสไฟฟ้าของอาหาร ซึ่งอัตราการเกิดความร้อนจะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติการต้านทานการไหล หรือคุณสมบัติการนำไฟฟ้าของอาหาร การเกิดความร้อนแบบโอห์มมิกจะเริ่มจากการปล่อยกระแสไฟฟ้ากระแสสลับเข้าสู่อาหาร ผ่านขั้วอิเล็กโทรดที่เป็นโลหะเมื่อกระแสไฟฟ้าไหลเข้าสู่อาหาร อาหารจะเกิดการต้านทานการไหลของกระแสไฟฟ้า ส่งผลให้เกิดการเหนี่ยวนำความร้อนจากภายในตัวอาหารเอง โดยอัตราการเกิดความร้อนจะขึ้นอยู่กับปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านสู่อาหาร กระบวนการให้ความร้อนในกระบวนการ โอห์มมิกมีดังนี้ ค่าการนำ



ไฟฟ้าของอาหารเป็นตัวแปรที่สำคัญในกระบวนการ ซึ่งค่าการนำไฟฟ้าของอาหารเป็นตัวกำหนด ปริมาณความร้อนที่เกิดขึ้น (อรรถพล และ ฤทธิชัย, 2551)

## 2. ประสิทธิภาพการเกิดความร้อน ของวิธีการให้ความร้อนแบบโอห์มมิก

จากการศึกษาถึงผลของไฟฟ้าที่มีต่อผลิตภัณฑ์นั้นที่ผ่านมายังไม่สามารถสรุปได้ชัดเจนว่า กระแสไฟฟ้าที่จ่ายเข้าไปมีผลกระทบต่อจุลินทรีย์และองค์ประกอบต่างๆ เช่น เอนไซม์และกรด แอสคอร์บิกในอาหาร นักวิจัยส่วนใหญ่จึงได้สรุปว่าการทำลายจุลินทรีย์และการสูญเสียสารอาหาร ต่างๆ ในกระบวนการให้ความร้อนแบบโอห์มมิกนั้น เป็นผลมาจากความร้อนที่เกิดขึ้นจากการเปลี่ยน พลังงานไฟฟ้าเป็นความร้อน ดังนั้นไม่ว่าอาหารจะถูกให้ความร้อนโดยวิธีโอห์มมิก ในด้าน ประสิทธิภาพเชิงพลังงานนั้น ถึงแม้ว่าพลังงานไฟฟ้าเกือบทั้งหมดที่จ่ายเข้าไปในอาหารจะเปลี่ยนรูป เป็นพลังงานความร้อน แต่เนื่องจากพลังงานไฟฟ้ามีราคาต่อกิโลจูลสูงกว่าพลังงานความร้อนที่ได้จาก การเผาไหม้เชื้อเพลิง ดังนั้นการให้ความร้อนแบบโอห์มมิกอาจจะไม่สามารถช่วยประหยัดต้นทุนด้าน พลังงานได้เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการให้ความร้อนแบบดั้งเดิม หากเปรียบเทียบระหว่างการให้ความ ร้อนแบบโอห์มมิกกับการให้ความร้อนแบบไมโครเวฟ ซึ่งใช้พลังงานไฟฟ้าเช่นเดียวกัน พบว่า การให้ ความร้อนแบบโอห์มมิกมีประสิทธิภาพสูงกว่า เนื่องจากพลังงานไฟฟ้าเกือบทั้งหมดที่จ่ายเข้าไปใน ระบบเปลี่ยนรูปเป็นพลังงานความร้อนภายในอาหาร และสามารถทำให้อาหารร้อนอย่างทั่วถึง ไม่ว่า ระยะจะลึกลงไปจากผิวมากเท่าใดก็ตาม ในขณะที่การให้ความร้อนแบบไมโครเวฟเป็นการ เปลี่ยนแปลงพลังงานไฟฟ้าให้อยู่ในรูปคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าก่อน แล้วอาหารที่ได้รับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า จะแปลงพลังงานดังกล่าวเป็น พลังงานความร้อนอีกทีหนึ่ง ซึ่งพลังงานความร้อนจะเกิดขึ้นในอาหาร เฉพาะบริเวณที่รับคลื่นได้ และจะเกิดความร้อนบริเวณที่ผิวมากกว่าส่วนที่อยู่ลึกลงไปจากผิวของ อาหาร (ฤทธิชัย, 2561)

## 3. ปัจจัยที่มีผลต่ออัตราการเพิ่มอุณหภูมิในกระบวนการให้ความร้อนแบบโอห์มมิก

### 3.1 ค่าการนำไฟฟ้าของอาหาร (Electrical conductivity)

อัตราการเพิ่มอุณหภูมิในอาหารขึ้นอยู่กับปริมาณไฟฟ้ากระแสสลับที่ได้รับ ซึ่งค่าการนำไฟฟ้า ของอาหารจะเป็นตัวบ่งชี้ว่ากระแสไฟฟ้าวิ่งผ่านอาหารได้มากหรือน้อยกล่าวคือถ้าค่าการนำไฟฟ้าของ อาหารสูงกระแสไฟฟ้าวิ่งผ่านได้มากเช่นกันส่งผลให้อัตราการเพิ่มอุณหภูมิในอาหารเกิดขึ้นได้อย่าง รวดเร็ว ในทางกลับกัน ถ้าค่าการนำไฟฟ้าของอาหารต่ำกว่ากระแสไฟฟ้าวิ่งผ่านอาหารได้น้อยอัตรา การเพิ่มอุณหภูมิในอาหารจะเกิดขึ้นอย่างช้าๆ

### 3.2 ความเข้มสนามไฟฟ้า (Field strength)

Alwis *et al.* (1989) ศึกษาผลของความเข้มสนามไฟฟ้าต่ออัตราการเพิ่มอุณหภูมิในอาหาร พบว่าเมื่อให้ความเข้มสนามไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้นมีผลทำให้อัตราการเพิ่มอุณหภูมิสูงขึ้นเช่นกัน สาเหตุอาจเป็นเพราะว่าการเพิ่มความเข้มของสนามไฟฟ้าเปรียบเสมือนการเพิ่มพลังงานให้กับระบบทำให้อาหารสามารถสร้างความร้อนได้อย่างรวดเร็ว

### 3.3 ขนาดและรูปร่างของชิ้นอาหาร (Particle size and shape)

ขนาดและรูปร่างชิ้นอาหารมีผลต่อการกระจายของสนามไฟฟ้าในกระบวนการให้ความร้อนแบบโอห์มมิกซึ่งมีผลต่ออัตราการเพิ่มอุณหภูมิในชิ้นอาหารและอาหารเหลวที่อยู่รอบๆ ศึกษาผลของรูปร่างอาหารต่ออัตราการเพิ่มอุณหภูมิในชิ้นอาหารและอาหารเหลวที่อยู่รอบๆ โดยทดลองในระบบสถิต (Static system) ชิ้นอาหารใช้มันฝรั่ง 1 ชิ้น โดยเปลี่ยนแปลงรูปร่างคือ เปลี่ยนแปลงอัตราส่วนระหว่างความยาวของชิ้นอาหาร (L) ที่ขนานกับทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้าต่อพื้นที่หน้าตัดขวาง (A) ของชิ้นอาหาร โดยปริมาตรของชิ้นอาหารคงที่ ผลของการทดสอบพบว่าชิ้นอาหารที่มีค่าคงที่ของโอห์มมิกเซลล์ (L/A) สูง อัตราการเพิ่มอุณหภูมิในชิ้นอาหารต่ออาหารเหลวที่อยู่รอบๆ จะต่ำกว่าชิ้นอาหารที่มีค่าคงที่ของโอห์มมิกเซลล์ (L/A) ต่ำกว่า

Pataro *et al.* (2011) ศึกษาผลกระทบของขนาดชิ้นอาหารที่แขวนลอยในอาหารเหลวต่ออัตราการเพิ่มอุณหภูมิเฉลี่ยของอาหาร พบว่าเมื่อขนาดของชิ้นอาหารใหญ่ขึ้นทำให้อัตราการเพิ่มอุณหภูมิลดลง เนื่องจากอาหารเหลวที่มีชิ้นอาหารเล็กแขวนลอยอยู่อาจช่วยให้การกระจายของสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ ทำให้ปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านอาหารมีมากกว่าอาหารเหลวที่มีชิ้นอาหารขนาดใหญ่แขวนลอยอยู่ ซึ่งลักษณะการกระจายของสนามไฟฟ้าผิดปกติไป นอกจากนี้ปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการเกิดความร้อน ของวิธีการให้ความร้อนแบบโอห์มมิกที่ตั้งของอาหารผสม ได้แก่ ทิศทางการจัดเรียงของชิ้นอาหาร (Particle orientation) และ ปริมาณชิ้นอาหาร (Particle concentration)

### 3.4 คุณสมบัติค่าการนำไฟฟ้าของอาหาร (Electrical Conductivity)

อัตราการเกิดความร้อนด้วยวิธีโอห์มมิก จะขึ้นอยู่กับปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านในตัวอาหาร ซึ่งปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านจะแปรผันตรงกับคุณสมบัติค่าการนำไฟฟ้าของอาหาร ดังนั้นอาหารที่มีคุณสมบัติการนำไฟฟ้าที่สูง เช่นอาหารที่มีความเป็นกรดสูง (Acid food) และอาหารที่มีส่วนประกอบของเกลือคลอไรด์ จึงสามารถเกิดความร้อนด้วยวิธีโอห์มมิกได้อย่างดี แต่ในขณะอาหารที่มีคุณสมบัติการนำไฟฟ้าที่ต่ำ เช่น นม เนื้อสัตว์ประเภทต่างๆ ชูริมิแช่เยือกแข็ง จะมีการเกิดความร้อนด้วยวิธีโอห์มมิกได้ไม่ดี

### 3.5 การประยุกต์วิธีการให้ความร้อนแบบโอห์มมิกในระดับอุตสาหกรรม

การเกิดความร้อนด้วยวิธีโอห์มมิกมีกลไกการทำงานโดยการปล่อยกระแสไฟฟ้าผ่านเข้าสู่อาหาร และเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อนประสิทธิภาพสูง มีอัตราการเกิดความร้อนจากภายในตัวอาหารเอง จึงไม่มีผลกระทบเนื่องจากการถ่ายเทความร้อนผ่านตัวกลาง ดังนั้นเกิดความร้อนด้วยวิธีโอห์มมิก จึงถูกประยุกต์และพัฒนาในกระบวนการให้ความร้อนในการแปรรูปอาหารได้หลายรูปแบบ คุณสมบัติการนำไฟฟ้า (Electrical Conductivity) ของอาหารเป็นปัจจัยหลักที่สำคัญในการบ่งบอกความเหมาะสมของชนิดอาหารต่อการเกิดความร้อนด้วยวิธีโอห์มมิก จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อนำเสนอหลักการพื้นฐานการเกิดความร้อนด้วยวิธีโอห์มมิก และการประยุกต์ในการแปรรูปอาหารด้านต่างๆ อาทิเช่น อาทิเช่น การลวก (Blanching) การพาสเจอร์ไรซ์ (Pasteurization) การสเตอริไลซ์ (Sterilization) การแปรรูปอาหารแบบปลอดเชื้อ (Aseptic Processing) และการละลายอาหารแช่เยือกแข็ง เพื่อเป็นแนวการพัฒนาเทคโนโลยีการเกิดความร้อนด้วยวิธีโอห์มมิกเพื่อประยุกต์ใช้ในระดับอุตสาหกรรมต่อไป (อรรถพล และ ฤทธิชัย, 2551)

#### งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

รายงานการวิจัยหลายฉบับต่างให้คำสนับสนุนถึงข้อดีในการเกิดความร้อนแบบโอห์มมิกว่าสามารถช่วยลดการสูญเสียคุณค่าทางโภชนาการและทางประสาทสัมผัสของอาหาร เนื่องจากมีอัตราการเกิดความร้อนที่รวดเร็ว และทั่วถึงกันทุกจุดมีระบบควบคุมการทำงานที่ง่ายและประหยัดพลังงาน ส่งผลให้มีต้นทุนการผลิตที่ต่ำ แต่การให้ความร้อนแบบโอห์มมิกก็ไม่สามารถนำมาใช้ในอุตสาหกรรมได้ทุกประเภทอันเนื่องมาจากข้อจำกัดต่างๆ ดังที่กล่าวมาข้างต้น แต่มีความเหมาะสมอย่างยิ่งสำหรับกระบวนการให้ความร้อนสำหรับอาหารที่มีคุณสมบัติการนำความร้อนที่ดี ปัจจุบันมีหลายประเทศในทวีปยุโรป และอเมริกาได้นำการให้ความร้อนด้วยวิธีโอห์มมิกมาใช้ในการให้ความร้อนในกระบวนการพาสเจอร์ไรซ์ และการให้ความร้อนเพื่อเตรียมวัตถุดิบต่างๆ เช่นกระบวนการลวกเพื่อลดปฏิกิริยาของเอนไซม์

คุณสมบัติการนำไฟฟ้าของอาหารเป็นปัจจัยที่ใช้ในการควบคุมการเกิดความร้อนแบบโอห์มมิก และเป็นปัจจัยที่สำคัญที่สุด โดยอาหารแต่ละชนิดจะมีคุณสมบัติการนำไฟฟ้าที่แตกต่างกัน ซึ่งเป็นเหตุผลที่ว่า การเกิดความร้อนแบบโอห์มมิกจะสามารถเกิดได้เฉพาะอาหารที่มีความเป็นกรดสูง เช่น น้ำผลไม้ และอาหารที่มีเกลือคลอไรด์เป็นส่วนผสม เช่นอาหารทะเล เนื่องจากอาหารกลุ่มดังกล่าวมีคุณสมบัติการนำไฟฟ้าที่สูง จึงมีประสิทธิภาพสูงในการเกิดความร้อนแบบโอห์มมิก ปัจจุบันการวัดค่าการนำไฟฟ้าของอาหารสามารถวัดได้ ดังนี้ การวัดค่าการนำไฟฟ้าของอาหารด้วยอุปกรณ์สำเร็จรูป (Electrical conductivity probe) และวัดค่าการนำไฟฟ้าระหว่างการเกิดความร้อนแบบโอห์มมิก

สำหรับการวัดค่าการนำไฟฟ้าในอุตสาหกรรมอาหารจะนิยมใช้วิธีการวัดค่าการนำไฟฟ้าของอาหารในระหว่างการเกิดความร้อนแบบโอห์มมิกเนื่องจากค่าการนำไฟฟ้าของอาหารจะมีค่าที่แปรผัน อีกทั้งยังขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ

Palaniappan and Sastry (1991) ทดลองเพื่อศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิที่มีต่อค่าการนำไฟฟ้าของอาหารหลายชนิดเมื่อให้ความร้อนโดยวิธีโอห์มมิก ที่แรงดันไฟฟ้า 60 V ความถี่ 60 Hz และสร้างสมการความสัมพันธ์สำหรับหาค่าการนำไฟฟ้าของอาหาร เช่น มันฝรั่ง แครอท แยม เนื้อไก่ และเนื้อวัว จากผลการศึกษาพบว่า ค่าการนำไฟฟ้าของอาหารอาจเป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิคือ ค่าการนำไฟฟ้าของอาหารอาจจะแปรผันตรงกับการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ

Palaniappan and Sastry (1991) ยังได้ทดลองเพื่อศึกษาผลของปริมาณของแข็งที่มีต่อค่าการนำไฟฟ้า ของน้ำมะเขือเทศและน้ำส้ม โดยใช้การทดลองแบบโอห์มมิกเช่นเดียวกับการทดลองข้างต้นแต่ใช้แรงเคลื่อนไฟฟ้า 140 V พบว่านอกจากค่าการนำไฟฟ้าของน้ำผลไม้มีความสัมพันธ์เชิงเส้นกับอุณหภูมิแล้ว ปริมาณของแข็งก็มีผลต่อค่าการนำไฟฟ้าของน้ำผลไม้อีกด้วยและได้สร้างสมการสหพันธ์ขึ้นเพื่อหาค่าการนำไฟฟ้าของน้ำผลไม้ที่มีอุณหภูมิของปริมาณของแข็งต่างๆ และมีความพารามิเตอร์ต่างๆ

Castro *et al.* (2004) ศึกษาถึงอิทธิพลของสนามไฟฟ้าและค่าการนำไฟฟ้าของน้ำสตรอเบอร์รี่ของการให้ความร้อนแบบโอห์มมิก พบว่าค่าการนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มอุณหภูมิ โดยมีความสัมพันธ์ลักษณะเส้นตรง และค่าการนำไฟฟ้าพบว่าขึ้นอยู่กับชนิดผลิตภัณฑ์จากผลสตรอเบอร์รี่ โดย เนื้อสตรอเบอร์รี่จะมีค่าเพิ่มขึ้นของค่าการนำไฟฟ้าพบในเนื้อและชิ้นของสตรอเบอร์รี่ แต่ไม่พบความสัมพันธ์ดังกล่าวในแยมสตรอเบอร์รี่ หรือท็อปปิง และน้ำปรุงรสของสตรอเบอร์รี่-แอปเปิ้ล การใช้ความร้อนแบบโอห์มมิกมีผลทำให้เนื้อและชิ้นของสตรอเบอร์รี่มีค่าการนำไฟฟ้าของเนื้อสตรอเบอร์รี่ที่ทดสอบลดลง แต่การใช้ลมร้อนหรือการให้ความร้อนแบบโอห์มมิกมีผลให้มีค่าการนำไฟฟ้าของเนื้อสตรอเบอร์รี่ต่างกัน การสลายตัวของกรดแอสคอบิกจัดเป็น ปฏิกริยาจลนพลศาสตร์อันดับที่ 1 สำหรับการให้ความร้อนปกติและแบบโอห์มมิก และมีค่าทางจลนพลศาสตร์อยู่ในช่วงระดับเดียวกับรายงานในระบบการผลิตอาหารอื่น จากการทดลองพบว่าสนามแม่เหล็กไฟฟ้าไม่มีผลต่อการสลายตัวของกรดแอสคอบิก

Icier and Ilcali (2005) ศึกษาการให้ความร้อนแบบโอห์มมิกของ ผลแอปเปิ้ลคอก และผลท้อ ในช่วงความเข้มสนามไฟฟ้า 20-70 V/cm พบว่าอุณหภูมิมีการเปลี่ยนแปลงในลักษณะของเส้นตรงสัมพันธ์กับค่าการนำไฟฟ้า ค่าสัมประสิทธิ์การต้านทานของระบบความร้อนแบบโอห์มมิกค่าอยู่ในช่วง 0.49-1.00 S/cm สมการการนำความร้อนแบบไม่เสถียรสำหรับกรณีที่มีค่าความต้านทานภายนอกน้อย สามารถแก้ไขโดยใช้ค่าการนำความร้อนแบบโอห์มมิก สมการการทำนายที่ได้จากการใช้ค่าสมการนำไฟฟ้าพบว่ามีความแม่นยำ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 %



Icier *et al.* (2006) นำวิธีการให้ความร้อนด้วยวิธีโอห์มมิก ความเข้มสนามไฟฟ้า 50 V/cm ใช้ยับยั้งเอนไซม์เพอร์ออกซิเดส (Peroxidase Inactivation) ในน้ำพีชเข้มข้น ที่อุณหภูมิ 100 °C โดยใช้เวลาเพียง 54 sec เมื่อเปรียบเทียบการให้ความร้อนเพื่อการยับยั้งเอนไซม์ด้วยการแช่ในอ่างน้ำร้อนที่อุณหภูมิ 100 °C ซึ่งใช้เวลาประมาณ 3-5 min เพื่อให้ น้ำพีชมีอุณหภูมิถึง 100 °C และต้องใช้เวลาคงอุณหภูมิในอ่างน้ำร้อนอีก 300 sec ดังนั้นการให้ความร้อนด้วยวิธีโอห์มมิก จึงช่วยลดเวลาและพลังงานในกระบวนการลวกเพื่อใช้ยับยั้งเอนไซม์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ สอดคล้องงานของรายงานวิจัยของ Jakób *et al.* ซึ่งระบุว่า การให้ความร้อนด้วยวิธีโอห์มมิก มีประสิทธิภาพในการให้ความร้อนเพื่อยับยั้งเอนไซม์ในนม และน้ำผักและผลไม้ได้ดีกว่าการให้ความร้อนโดยการแช่ในน้ำร้อนหรือการพ่น ละอองไอน้ำ

Sarang *et al.* (2008) ศึกษากระบวนการให้ความร้อนแบบโอห์มมิก ซึ่งผลการศึกษาพบว่า อัตราการเกิดความร้อนจะขึ้นอยู่กับค่าการนำไฟฟ้าของอาหารจึงเป็นที่มาของโครงการวิจัยนี้ ซึ่งศึกษาการนำไฟฟ้า 6 ชนิด ที่แตกต่างกัน ได้แก่ แอปเปิ้ลแดง แอปเปิ้ลพันธุ์สีทอง ลูกพีช ลูกแพร์ สับปะรด และสตอเบอร์รี่ รวมทั้งเนื้อสัตว์ตัดแต่งรูปทรงที่แตกต่างกัน 3 ชนิด ได้แก่ เนื้อไก่ เนื้อหมูและเนื้อวัว โดยทดสอบวิธีให้ความร้อนโดยวิธีการโอห์มมิกที่อุณหภูมิห้องจนตัวอย่างมีความ ร้อนสูงถึงช่วงอุณหภูมิสเตอร์ไรไลเซชัน (ไม่ต่ำกว่า 100 °C) จากผลการวิจัยนี้พบว่าค่าการนำไฟฟ้าของผลไม้ทั้ง 6 ชนิด จะมีค่ามากขึ้นเมื่อมีอุณหภูมิสูง โดยค่าการนำไฟฟ้าของสตอเบอร์รี่จะมีค่ามากที่สุดและค่าการนำไฟฟ้าของ แอปเปิ้ลพันธุ์สีทองจะมีค่าการนำไฟฟ้าต่ำสุด โดยมีลักษณะความสัมพันธ์เป็นสมการเส้นตรง ในขณะที่การนำไฟฟ้าของเนื้อสัตว์ไม่สามารถหาความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ที่ ชัดเจนได้ โดยพบว่าค่าการนำไฟฟ้าของเนื้อสัตว์ทั้ง 3 ชนิด จะขึ้นอยู่กับปริมาณไขมัน (fat content) จากการตรวจสอบค่าการนำไฟฟ้าของเนื้อแสดงว่าส่วนเนื้อแดงมีค่าการนำไฟฟ้ามากกว่าส่วนที่เป็นไขมัน

Alina *et al.* (2010) ได้ศึกษาการให้ความร้อนแบบโอห์มมิกของ นมและน้ำผลไม้รวมถึงน้ำผัก ที่อุณหภูมิต่างๆ เพื่อใช้ยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ alkaline phosphatase, pectin methyl esterase และ peroxidase รวมทั้งศึกษากลไกการหยุดการทำงานของเอนไซม์ และความสอดคล้องของสมการจลศาสตร์ จะถูกแก้ไขให้เหมาะสมกับอาหารแต่ละชนิด ผลการศึกษาพบว่า การให้ความร้อนแบบโอห์มมิก มีการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของอาหารเพียงเล็กน้อย เนื่องจากการทำงานของเอนไซม์ลดลง

Assiry *et al.* (2010) ศึกษาการใช้ความร้อนแบบโอห์มมิกในผลิตภัณฑ์เครื่องดื่มจากน้ำทะเล ทดแทนการใช้ไอน้ำร้อน โดยศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิ สนามแม่เหล็กไฟฟ้า และความเข้มข้นของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำ ต่อค่าการนำไฟฟ้าระหว่างการให้ความร้อนแบบโอห์มมิกกับน้ำทะเล ความร้อนที่ถูกปลดปล่อยในน้ำทะเลได้จากกระแสไฟฟ้าสลับที่ 60 Hz ช่วงความเข้มสนามไฟฟ้าเท่ากับ 6.35-11.04 V/cm ในการทดสอบทำการเตรียมน้ำทะเลที่ความเข้มข้นของเกลือในช่วง 38.9-

106.1 ppt (part per thousand : ส่วนในพันส่วน) เครื่องมือวัดค่าการนำไฟฟ้า และค่าพารามิเตอร์ทางคุณภาพที่ตรวจสอบมีค่าการนำไฟฟ้า สี ค่าพีเอช ความร้อนจำเพาะและความหนาแน่นของน้ำทะเล ทำการตรวจสอบที่อุณหภูมิห้องก่อนและหลังการได้รับความร้อนแบบโอห์มมิก ช่วงการนำไฟฟ้าระหว่างการให้ความร้อนแบบโอห์มมิกเท่ากับ 55-399.6 mS/m การให้ความร้อนแบบโอห์มมิกสามารถใช้ในกระบวนการให้ความร้อนกับน้ำทะเลภายใต้ข้อจำกัดที่เหมือนกัน

Assawarachan (2010) ศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิต่อการเปลี่ยนแปลงค่าการนำไฟฟ้าในน้ำจืดที่ความเข้มข้นที่แตกต่างกัน 3 ระดับ พบว่าค่าการนำไฟฟ้าของน้ำจืดจะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิและความเข้มข้นเพิ่มขึ้น ดังนั้นในอาหารชนิดเดียวกัน เมื่อมีความเข้มข้น หรือมีปริมาณของแข็งในอาหารมากขึ้นจะมีค่าการนำไฟฟ้าได้มากขึ้น เนื่องจากกระแสไฟฟ้าจะสามารถไหลผ่านในตัวกลางของแข็งได้ดีกว่าของเหลว ดังนั้นเมื่ออาหารมีความเข้มข้นมากขึ้นจะทำให้กระแสไฟฟ้ามีพื้นที่ในการไหลผ่านในอาหารได้มากขึ้นส่งผลให้มีคุณสมบัติค่าการนำไฟฟ้ามากขึ้น

Zell *et al.* (2011) ศึกษาออกแบบเซลล์ต่อความสม่ำเสมอของการให้ความร้อนแบบโอห์มมิกกับชิ้นอาหาร เพื่อลดการสูญเสียความร้อนออกจากพื้นผิวเซลล์ โดยการใช้ฉนวนหรือการให้ความร้อนผ่านสายพานความร้อนหรือช่อง แต่วิธีการดังกล่าวนี้ไม่เหมาะสมกับเซลล์ที่อยู่ในห้องลมร้อนที่มีอุณหภูมิ 80 °C และ เป็นการลดขนาดของเซลล์ วัสดุที่ทำจาก electrode ดังกล่าว มีความหนาอย่างน้อย 1 mm และนำผลการวิจัยไปพัฒนากระบวนการพาสเจอร์ไรซ์ โดยวิธีการให้ความร้อนแบบโอห์มมิกร่วมกับการพาความร้อนของอาหาร ภายใต้สภาวะสิ่งแวดล้อมที่เหมาะสมพบว่าภายในผลิตภัณฑ์มีความแตกต่างของอุณหภูมิ 12.1 °C หลังจากผ่านไป 150 sec ซึ่งหมายความว่าสามารถลดอุณหภูมิ 8.6 °C หลังจาก 3 min

Pataro *et al.* (2011) ศึกษาอายุการเก็บรักษาของแอปเปิ้ลคอกเทลในน้ำเชื่อมที่ระดับความหวาน 15 °Brix จากกระบวนการให้ความร้อนแบบโอห์มมิกต่อคุณภาพ ของแอปเปิ้ลคอกเทลที่ผ่านการลวกเพื่อยับยั้งเอนไซม์ รูปทรงลูกบาศก์ ขนาด 1.2 cm และส่วนผสมของของเหลว ของแข็งถูกพาสเจอร์ไรส์ที่อุณหภูมิ 90 °C นาน 113 sec ด้วยวิธีการให้ความร้อนแบบโอห์มมิก ที่ระดับพลังงาน 30 กิโลวัตต์ มีการใช้กระแสไฟฟ้าสลับที่ 25 KHz ตัวอย่างที่ถูกบรรจุอย่างปลอดภัยแล้วถูกเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 25 °C และทำการตรวจสอบเป็นช่วงๆ นาน 1 ปี พบว่าผลิตภัณฑ์ที่เก็บรักษา ตลอดช่วง 52 สัปดาห์ มีปริมาณของเชื้อจุลินทรีย์เกิดขึ้น ปริมาณของกรดแอสคอร์บิก ลดลงเล็กน้อย เนื่องจากการให้ความร้อน อย่างไรก็ตามพบว่าผลิตภัณฑ์ยังคงมีคุณภาพดีช่วงการเก็บรักษา ลักษณะคุณภาพทางด้านความสดของแอปเปิ้ลคอกเทลในน้ำเชื่อมไม่มีผลทางด้านลบเนื่องจากอิทธิพลของกระบวนการให้ความร้อนแบบโอห์มมิก และยังคงมีคุณภาพตลอดช่วงการเก็บรักษา



Patras *et al.* (2010) ศึกษาผลของการให้ความร้อนต่อความคงตัวของแอนโธไซยานิน และ จลนพลศาสตร์ต่อการย่อยสลายของสาร แอนโธไซยานินเป็นสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพที่มีอยู่ใน ผลิตภัณฑ์จากผักและผลไม้ การย่อยสลายของปริมาณแอนโธไซยานินส่วนใหญ่เกิดจากการแตกตัวของพันธะโควาเลนต์ หรือปฏิกิริยาการออกซิเดชันเนื่องจากการให้ความร้อนและการย่อยสลายนี้ขึ้นอยู่กับระดับของความร้อนและความเข้มข้นของปริมาณแอนโธไซยานินเริ่มต้นก่อนการให้ความร้อน แบบจำลองจลนพลศาสตร์มักนำไปใช้เพื่อวัตถุประสงค์ในการประเมินความปลอดภัยของอาหาร ได้อย่างรวดเร็วและมีประโยชน์ ซึ่งความรู้ทางด้านจลนพลศาสตร์เรื่องการสลายตัว รวมถึงลำดับการเกิดปฏิกิริยา อัตราคงที่และพลังงานกระตุ้นเป็นปัจจัยสำคัญในการทำนายการสูญเสียคุณภาพอาหาร ระหว่างการเก็บรักษา รวมถึงกระบวนการให้ความร้อน

Shao-qian *et al.* (2011) จลนพลศาสตร์การสลายตัวของปริมาณแอนโธไซยานินในน้ำส้มผสมเกล็ดส้ม ศึกษาการสลายตัวของปริมาณแอนโธไซยานินที่ผ่านความร้อน ที่ 70 – 90 องศาเซลเซียสในน้ำส้มผสมเกล็ดส้ม พบว่า การลดลงของค่าสีและปริมาณแอนโธไซยานินเป็นปฏิกิริยาลำดับหนึ่ง ค่าสีและปริมาณแอนโธไซยานินจะลดลงเมื่อให้ความร้อนเพิ่มขึ้นและใช้เวลามากขึ้น

อรุษา (2554) การสกัดและวิธีการวิเคราะห์แอนโธไซยานิน แอนโธไซยานินเป็นสารให้สีที่พบในธรรมชาติแบ่งได้เป็น 2 ประเภทใหญ่ๆ คือ นอนอะซิลเลตเทตแอนโธไซยานิน (Non acylated anthocyanin) และอะซิลเลตเทต แอนโธไซยานิน (Acylated anthocyanin) โครงสร้างของแอนโธไซยานิน ประกอบด้วย แอนโธไซยานินดิน น้ำตาล และ/หรือ กรด ตัวทำละลายที่ใช้ในการสกัดแอนโธไซยานิน ได้แก่ น้ำ เอทานอล เมทานอล และอะซิโตน วิธีการสกัดด้วยตัวดูดซับของแข็ง (Solid Phase Extraction) เป็นวิธีที่นิยมใช้ในการทำให้แอนโธไซยานินบริสุทธิ์ การวิเคราะห์ปริมาณแอนโธไซยานินสามารถแบ่งเป็น 2 แบบ คือ การวิเคราะห์ปริมาณแอนโธไซยานินทั้งหมด เช่น วิธีพีเอช-ดิฟเฟอเรนเชียล (pH-Differential) ด้วยสเปกโตรมิเตอร์ และการวิเคราะห์ชนิดและปริมาณของแอนโธไซยานิน โดยใช้เครื่อง โครมาโทกราฟีของเหลวสมรรถนะสูง (High Performance Liquid Chromatography) การย่อยด้วยกรด และการย่อยด้วยด่างหรือการใช้แมสสเปกโตรมิเตอร์เป็นเทคนิคที่ใช้ร่วมกับเครื่อง HPLC เพื่อการวิเคราะห์ แอนโธไซยานินที่ไม่ทราบชนิด

### บทที่ 3

## อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

### อุปกรณ์และสารเคมี

1. มะเกี๋ยงที่ใช้ศึกษา นำมาจากต้นที่คัดเลือกสายพันธุ์แล้ว ที่ สถาบันวิจัยเทคโนโลยีเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา จังหวัดลำปาง จำนวน 200 kg  
การเตรียมน้ำมะเกี๋ยงเข้มข้น



ภาพที่ 4 ขั้นตอนการเตรียมน้ำมะเกี๋ยงเข้มข้น

2. สถานที่ทำการศึกษาดทดลอง ณ มหาวิทยาลัยแม่โจ้ อำเภอสันทราย จังหวัดเชียงใหม่  
สถานที่ทำการวิเคราะห์ทางกายภาพ เคมี ณ สถาบันวิจัยเทคโนโลยีเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา จังหวัดลำปาง
3. อุปกรณ์และเครื่องมือ
  - 3.1 เครื่องให้ความร้อนแบบ โอิทมิกฮีตติ้ง แบบแลบสเกล Ohmic heating
  - 3.2 Hotplate stirrer รุ่น 002278 ยี่ห้อ Fisher scientific ผลิตในประเทศสหราชอาณาจักร
  - 3.3 เครื่องวัดอุณหภูมิแบบพกพา (LD Didactic GmbH model : 524-0673) ผลิตในประเทศจีน

3.4 เครื่องวัดค่าสี Spectrophotometer (Hunter Lab model : Mini Scan XE PLUS) ผลิตในประเทศ สหรัฐอเมริกา

3.5 เครื่องชั่งดิจิตอล 2 ตำแหน่ง (Sartorius model : CP 3202S) ผลิตในประเทศ สหรัฐอเมริกา

3.6 เครื่องวัดค่าของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด (Hand Refractometer) ผลิตในประเทศ ญี่ปุ่น

3.7 เครื่องหมุนเหวี่ยง (Centrifuge) รุ่น HARRIER 15/80 Bench Top Refrigerated Centrifuge ยี่ห้อ Sanyo ผลิตในประเทศญี่ปุ่น

3.8 UV spectrophotometer รุ่น UV-160A บริษัทผู้ผลิต SHIMADZU ผลิตในประเทศ ญี่ปุ่น

3.9 ตู้แช่เยือกแข็ง (Sanyo model:SF-C997 (GYN) ผลิตในประเทศญี่ปุ่น

3.10 ตู้เย็น (Haier model: HR-921) ผลิตในประเทศญี่ปุ่น

3.11 ถ้วยอะลูมิเนียมพร้อมฝาปิด

3.12 โถดูดความชื้น Desiccator ผลิตในประเทศญี่ปุ่น

3.13 บีกเกอร์ (Pyrex No.1000) ผลิตในประเทศอเมริกา

3.14 ภาชนะรามิค (Cuizimate) ผลิตในประเทศไทย

3.15 หม้อ ทัพพี

3.16 เต้าแก๊ส

3.17 ขวดเก็บตัวอย่างชนิดทนร้อน

3.18 ถังฟอยล์อะลูมิเนียม

3.19 กล้อง Thermal Imager รุ่น TiS 45 ยี่ห้อ Fluke ผลิตในประเทศ สหรัฐอเมริกา

#### 4. สารเคมี

4.1 สารละลาย Folin-Ciocalteu Folin and Ciocalteu Phenol Reagent (2.0 Normal) (LOBAL Chemie ประเทศ อินเดีย)

4.2 สารละลายโซเดียมคาร์บอเนต (sodium carbonate :  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) (AR grade : merck ประเทศเยอรมัน)

4.3 สารละลายมาตรฐานกรดแกลลิก (Gallic acid) (AR grade : merck ประเทศเยอรมัน)

4.4 สารละลายแมกนีเซียมคาร์บอเนต (Magnesium Carbonate :  $\text{MgCO}_3$ ) (AR grade : merck ประเทศเยอรมัน)

- 4.5 สารละลายเอทานอล (Ethanol 95%) Ethyl alcohol;  $C_2H_5OH$  (Merck Finechem ประเทศออสเตรเลีย)
- 4.6 สารละลายกรดไฮโดรคลอริก Hydrochloric acid; HCl (J.T. Baker ประเทศสหรัฐอเมริกา)
- 4.7 2,2'-Azino-bis (3-ethylbenzothiazoline-6-sulfonic-acid) diammonium salt; ABTS (Sigma-Aldrich ประเทศเยอรมัน)
- 4.8 2,2-Diphenyl-1-picryl-hydrazyl; DPPH (Sigma-Aldrich ประเทศเยอรมัน)
- 4.9 1 M Tris-HCl buffer (pH = 7.9)
- 4.10 สารละลายมาตรฐานโทลอกซ์ (Trolox) ( $\pm$ )-6-Hydroxy-2,5,7,8-tetramethyl-chroman-2-carboxylic acid; Trolox(Sigma-Aldrich ประเทศเยอรมัน)
- 4.11 โซเดียมไฮดรอกไซด์ NaOH (AR grade : merck ประเทศเยอรมัน)

### วิธีการทดลอง

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาคุณภาพทางกายภาพ ทางเคมี ของน้ำมะเข็ญเข้มข้น ที่ศึกษาวิธีการพาสเจอร์ไรส์แบบดั้งเดิมกับการพาสเจอร์ไรส์แบบโอท้อมิค เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในกระบวนการพาสเจอร์ไรส์รวมทั้งการศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสมในการทำนายอัตราส่วนการเปลี่ยนแปลงปริมาณแอนโทไซยานินต่อการให้ความร้อนที่ระดับและเวลาต่างๆ เมื่อได้วิธีการให้ความร้อนและระยะเวลาการให้ความร้อนที่เหมาะสม ดูจากปริมาณการสลายของแอนโทไซยานินต่อการเปลี่ยนแปลงคุณภาพด้าน สี สารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด ความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ (DPPH และ ABTS) แอนโทไซยานิน ต่อ อุณหภูมิ 25 – 95°C จากนั้น นำมาศึกษาระยะเวลาในการเก็บรักษา น้ำมะเข็ญเข้มข้นบรรจุขวด PET เป็นเวลา 35 วัน เก็บตัวอย่างทุกๆ 5 วัน ที่อุณหภูมิ 5 และ 15°C ต่อคุณภาพ สี สารประกอบฟีนอลิก ความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ (DPPH และ ABTS) แอนโทไซยานิน และ ปริมาณจุลินทรีย์ จากนั้นนำไปทำน้ำมะเข็ญพร้อมดื่ม จากน้ำมะเข็ญเข้มข้นที่ผ่านการพาสเจอร์ไรส์ทั้ง 2 วิธี เพื่อทดสอบทางประสาทสัมผัส

#### 1. การเตรียมตัวอย่าง

ตัวอย่างมะเข็ญที่นำมาศึกษา เป็นมะเข็ญที่ได้จากต้นที่ สถาบันวิจัยเทคโนโลยีเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา จังหวัดลำปาง ที่เก็บในฤดู โดยการกางสแลนใต้ต้น คัดแยกลูกที่เน่าเสียและลูกแดงออกใช้เฉพาะลูกดำเท่านั้น จากนั้นนำไปล้างน้ำให้สะอาดนำไปแช่แข็งที่อุณหภูมิ -18 °C จนกว่าจะมีการใช้งานมะเข็ญแช่แข็ง จำนวน 1 กิโลกรัมต้มสกัดต่อน้ำ อัตราส่วน 1:1 กับน้ำสะอาด ต้มเดือดเป็นเวลา 2 min เพื่อสกัดสารและนำไปทำการเหวี่ยงสลัด ด้วยเครื่อง

เหยียงสลับที่ความเร็ว 500 rpm/min เหยียงนาน 5 min กรองตัวอย่างผ่านผ้าขาวบางเก็บตัวอย่างใส่ในขวดพลาสติกขนาด 1 Lit นำเก็บแช่แข็งที่อุณหภูมิ  $-18^{\circ}\text{C}$  จนกว่าจะมีทดลองและการวิเคราะห์

## 2. การทดลองการหาค่าการนำไฟฟ้าของน้ำมะเข็ญเข้มข้นในการให้ความร้อน

การให้ความร้อนแบบโอห์มมิก เป็นวิธีการสร้างความร้อนจากภายในตัวอาหารซึ่งเป็นผลจากการปล่อยกระแสไฟฟ้าไหลผ่านเข้าสู่อาหาร และเกิดความต้านทานการไหลของกระแสไฟฟ้าในอาหารจนเกิดเป็นความร้อน ภายในเนื้ออาหาร เนื่องจากในขณะที่กระแสไฟฟ้าไหลผ่านจะเกิดการเคลื่อนที่ของโมเลกุลในอาหารเกิดเป็นพลังงานความร้อน หรืออาจกล่าวได้ว่า พลังงานความร้อนที่เกิดขึ้นเป็นผลเนื่องจากการต้านทานการไหลของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่าน

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการทำนายค่าการนำไฟฟ้า

น้ำมะเข็ญเข้มข้นจากข้อ 1 นำมาศึกษาการให้ความร้อน ด้วยระบบเซลล์โอห์มมิกแบบสถิตย์ขนาดห้องปฏิบัติการ โดยใช้ความเข้มข้นของสนามไฟฟ้า 3 ระดับ (10, 15 และ 20 V/cm) ในช่วงอุณหภูมิ 25 - 75, 85 และ 95  $^{\circ}\text{C}$  เปรียบเทียบกับการให้ความร้อนแบบดั้งเดิม ในช่วงอุณหภูมิ 25 - 75, 85 และ 95  $^{\circ}\text{C}$  เท่ากัน โดยเปรียบเทียบปริมาณ ค่าสี แอนโธไซยานิน สารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด ความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ (วิธี Scavenging activity of ABTS radical และวิธี DPPH radical scavenging)

จากนั้นเลือกวิธีที่ดีที่สุดในการให้ความร้อนมะเข็ญเข้มข้น เพื่อศึกษาอุณหภูมิในการพาสเจอร์ไรส์ 25-95  $^{\circ}\text{C}$

## 3. การวิเคราะห์ทางกายภาพ เคมี

### 3.1 การวิเคราะห์ทางกายภาพ

#### การวิเคราะห์สี

นำน้ำมะเข็ญสกัดมาวัดค่าสีโดยใช้เครื่อง เครื่องวัดค่าสี Spectrophotometer (Hunter Lab model : Mini Scan XE PLUS) เพื่อวัดค่าความสว่าง/ความมืด lightness/darkness :  $L^*$ -value) ค่าความเป็นสีแดง/เขียว (redness/greenness :  $a^*$ -value) ค่าความเป็นสีเหลือง/น้ำเงิน (yellowness/blueness :  $b^*$ -value) ของน้ำมะเข็ญเข้มข้น

### 3.2 การวิเคราะห์ทางเคมี

#### 3.2.1 การวัดปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด (Total soluble solid : TSS)

##### อุปกรณ์

1. Hand refractometer ยี่ห้อ ATAGO 0-33  $^{\circ}\text{Brix}$  ประเทศญี่ปุ่น (Japan)
2. หลอดหยด
3. ขวดน้ำกลั่น
4. กระดาษซับ, กระดาษทิชชู



### วิธีการ

1. ทำความสะอาด Hand refractometer ด้วยกระดาษทิชชู
2. ปรับค่า TSS ด้วยน้ำกลั่น โดยปรับค่าให้เท่ากับศูนย์
3. ใช้กระดาษทิชชู เช็ดฝาครอบและปริซึมให้สะอาดและแห้ง
4. นำตัวอย่างมาหยดบนปริซึม 2-3 หยด ปิดฝาครอบ Hand refractometer ลง แล้วอ่านค่า TSS หน่วยวัดเป็นองศาบริกซ์ ( $^{\circ}\text{Brix}$ )

5. เมื่ออ่านค่า TSS ได้แล้ว ใช้น้ำกลั่นฉีดล้างบริเวณปริซึมและฝาครอบให้สะอาด แล้วซับด้วยทิชชูให้แห้งก่อนนำไปเก็บหรือก่อนนำไปวัดตัวอย่างอื่นๆ ต่อไป ค่าที่ได้เป็นค่าของปริมาณของที่ละลายได้หรือร้อยละของน้ำตาลขึ้นอยู่กับชนิดของตัวอย่าง ควรระมัดระวังผิวหน้าของปริซึมล้างด้วยน้ำกลั่นหรือแอลกอฮอล์ เช็ดให้สะอาดและปิดแผ่นทับปริซึมทุกครั้งที่ใช้แล้วเพื่อป้องกันฝุ่นละอองและสิ่งสกปรก เพราะจะทำให้ค่าที่อ่านได้จาก Hand refractometer ผิดพลาดได้

### 3.2.2 การหาปริมาณกรดทั้งหมด (AOAC, 2000)

#### อุปกรณ์

1. อุปกรณ์ไทเทรต ได้แก่ ปิเปต ขวดรูปชมพู่ ปีกเกอร์ บิวเรต ขาดังบิวเรต ลูกยาง

#### คู่มือสาร

2. ปีกเกอร์ขนาด 100, 250 mL

#### สารเคมี

1. สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (sodium hydroxide; NaOH, AR grade; Merck) เข้มข้น 0.1 นอร์มอล (0.1 N NaOH)
2. สารละลายฟีนอล์ฟทาเลอิน (phenolphthalein, AR grade; Fisher Chemicals) เข้มข้นร้อยละ 1 ในเอทิลแอลกอฮอล์ (Absolute ethyl alcohol, AR grade; Merck)

### วิธีการ

1. นำตัวอย่างที่ทราบน้ำหนัก หรือปริมาณที่แน่นอนประมาณ 1 g หรือ ปริมาตร 1 mL ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 100-250 mL เติมน้ำกลั่น 5-10 mL เพื่อให้ตัวอย่างมีสีเหลืองจางลง (ในกรณีที่ตัวอย่างมีความขุ่นมากอาจเติมน้ำมากกว่านี้)
2. หยดสารละลายฟีนอล์ฟทาเลอิน เพื่อเป็นอินดิเคเตอร์ประมาณ 2-3 หยด
3. ค่อยๆ หยดสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เข้มข้น 0.1 N ลงในขวดรูปชมพู่ที่มีตัวอย่าง (การไทเทรต) จนสารละลายตัวอย่างเปลี่ยนเป็นสีชมพูหรือสีม่วง (จุดยุติ ซึ่งตัวอย่างจะมี pH อยู่ในช่วง 8.3-10.3) แล้วจดปริมาตรของ โซเดียมไฮดรอกไซด์ เข้มข้น 0.1 N ที่ใช้ไป เพื่อนำไปคำนวณหาปริมาณกรดทั้งหมด

$$\text{ปริมาณกรด (\% citric acid)} = \frac{(\text{mL ของ NaOH}) (\text{N ของ NaOH}) \times 70 \times 100}{\text{ปริมาตรของตัวอย่าง} \times 1000}$$

### 3.2.3 การวัดค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH)

#### อุปกรณ์

1. เครื่องวัดค่า pH (pH-meter, SANXIN; รุ่น MP-512)
2. ปีกเกอร์ขนาด 100 และ 250 มิลลิลิตร
3. สารละลายโพแทสเซียมคลอไรด์ (potassium chloride) เข้มข้น 3 โมลาร์
4. น้ำกลั่น
5. กระดาษซับ, กระดาษทิชชู

#### วิธีการ

1. อุณหภูมิเครื่องวัดค่า pH ก่อนใช้ประมาณ 15-20 min ในระหว่างนี้เอาหัววัดออกจากครอบ สีดำที่บรรจุสารละลายโพแทสเซียมคลอไรด์ 3 M แล้วแช่หัววัดในน้ำกลั่นประมาณ 15-20 min

2. ทำการ Calibrate เครื่องวัดด้วยสารละลายบัฟเฟอร์ ที่มีค่า pH อยู่ในช่วงที่คาดว่าใกล้เคียงกับตัวอย่างที่จะวัด เช่น สารละลายบัฟเฟอร์ pH 7.0 และ pH 4.0 ตามลำดับ โดยรินสารละลายบัฟเฟอร์ที่ต้องการ Calibrate ลงในปีกเกอร์ แล้วจุ่มหัววัด pH (pH probe) ลงไป และทำตามขั้นตอนที่ได้แนะนำสำหรับเครื่องวัด pH แต่ละยี่ห้อ รุ่น ขณะที่ Calibrate ควรแกว่งหัววัด pH เบาลๆ

3. ล้างหัววัดด้วยน้ำกลั่น ซับน้ำกลั่นที่ติดปลายหัววัดด้วยกระดาษทิชชู แล้วจึงนำหัววัดไปแช่ในสารละลายหรือตัวอย่างที่ต้องการวัดค่า pH แช่หัววัดไว้จนกระทั่งค่า pH ที่หน้าจอนิ่ง จึงเอาหัววัดออกจากตัวอย่าง

4. ล้างปลายหัววัดด้วยน้ำกลั่นจนสะอาด ซับปลายหัววัดด้วยกระดาษซับ แล้วจึงวัดค่า pH ในสารละลายหรือตัวอย่างต่อไป และเมื่อเลิกใช้เครื่องวัด pH แล้ว ให้เก็บหัววัด pH ที่ล้างด้วยน้ำกลั่นแล้ว เก็บไว้ในสารละลายโพแทสเซียมคลอไรด์ที่อยู่ในหลอดสีดำเท่านั้น

### 3.2.4 วิเคราะห์ปริมาณแอนโธไซยานิน

เตรียมตัวอย่างน้ำมะเข็ญเข้มข้นนำไปหมุนเหวี่ยงที่ 3000 Xg อุณหภูมิ 15 °C นาน 5 min จากนั้นดูดส่วนใสมาผสมกับน้ำกลั่น อัตราส่วน 1:9 กับน้ำกลั่น ปิเปตสารละลาย 0.2 ml เจือจางสารละลายตัวอย่างด้วยสารละลาย pH 1.0 buffer ในอัตราส่วน 1:10 เจือจางสารละลายตัวอย่างด้วยสารละลาย pH 4.5 buffer ในอัตราส่วน 1:10 เก็บสารละลายตัวอย่างทั้งสองไว้ในที่มืดนาน 2 hr

วัดค่า absorbance ด้วยเครื่อง spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 515 และ 700 nm โดยใช้ น้ำกลั่นเป็น blank

คำนวณปริมาณแอนโธไซยานินทั้งหมดจากสูตร

$$\text{ปริมาณแอนโธไซยานิน} = \frac{(A_1 - A_2) \times \text{MW} \times \text{DF} \times 1,000}{e \cdot l}$$

สารแอนโธไซยานินในผลมะเกี๋ยงเป็นชนิด cyanidin 3-glucoside

$$e = 26900$$

$$\text{MW} = 449 \text{ g/mol}$$

$$l = \text{Pathlength} = 1.0$$

$$\text{DF} = \text{Dilution factor}$$

$A_1$  = ค่าการดูดกลืนแสงของตัวอย่าง ที่ 510 nm - 700 nm ใน pH 1.0 buffer

$A_2$  = ค่าการดูดกลืนแสงของตัวอย่าง ที่ 510 nm - 700 nm ใน pH 4.5 buffer

### 3.2.5 การวิเคราะห์ค่าสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด

เตรียมตัวอย่างน้ำผลไม้ 10 ml นำไปปั่นเหวี่ยงเพื่อแยกตะกอนที่ความเร็วรอบ 2,500 rpm เป็นเวลา 5 min จากนั้นนำส่วนใส มาทดสอบโดยวิธี Folin - Ciocalteu ดัดแปลงตามวิธีของ Sachindra *et al.* โดยดูดตัวอย่างที่ผ่านการปั่นเหวี่ยง ปริมาตร 0.1 – 1 ml ใส่ในหลอดทดลอง เติมน้ำกลั่นปราศจากประจุปริมาณ 9 ml เขย่าให้เข้ากัน เติม Folin – Ciocalteu ความเข้มข้น 10 % จำนวน 1 ml และเติมสารละลายโซเดียมคาร์โบเนต ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) ความเข้มข้น 7.5 % จำนวน 0.8 ml ผสมให้เข้ากัน เป็นเวลา 1 hr ที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นอ่านค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 765 nm คำนวณปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดโดยเทียบกับสารละลายกรด แกลลิก (Gallic acid) รายงานผลปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด (mg GAE/100 ml)

### 3.2.6 การวิเคราะห์ความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ

#### 3.2.6.1 วิธี Scavenging activity of ABTS radical

นำตัวอย่างน้ำผลไม้ 1 ml เติมน้ำกลั่น 20 mL ผสมให้เป็นเนื้อเดียวกัน จากนั้นนำไปปั่นเหวี่ยงที่ความเร็วรอบ 2500 rpm เป็นเวลา 10 min ดูดส่วนใสของตัวอย่างมาใช้ในการทดสอบความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ วิธีเอบีทีเอส (ABTS radical cation decolorization assay) ดัดแปลงจากวิธีของ Arnao *et al.* (2001) เป็นการทดสอบด้วย  $\text{ABTS}^{\bullet+}$ , 2, 2'-azino-bis

(3ethylbenzothiazoline-6-sulfonic acid) radical สาร สังกะสีที่มีสีเขียวปนน้ำเงินสามารถ ดูดกลืนแสงที่ ความยาวคลื่น 700 nm การเตรียมสารละลายเอบีทีเอส (ABTS reagent) โดยการ ชั่งสารเอบีทีเอส 0.0036 g ละลายในน้ำกลั่น 1 mL ผสมสารโพแทสเซียมเปอร์ ซัลเฟต 0.00067 g แล้วตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องในที่มืด ให้เกิดปฏิกิริยาเป็นเวลา 12-16 ชั่วโมง ทำการทดสอบ สาร ตัวอย่างโดยผสมสารละลายตัวอย่าง 50  $\mu$ L กับ สารละลายเอบีทีเอสปริมาตร 100  $\mu$ L ใน 96 well plate ตั้งทิ้งไว้เป็นเวลา 15 นาทีเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ 734 nm เทียบกับความ เข้มข้นของสารต้านอนุมูลอิสระมาตรฐาน โทรลอคซ์ Trolox (Trolox Equivalent Antioxidant Capacity) เป็น สารมาตรฐาน รายงานผลความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ ABTS (mg TEAC/100 ml)จากนั้นนำค่าการดูดกลืนแสงที่ได้มาคำนวณหาเปอร์เซ็นต์การยับยั้งจากสมการฤทธิ์ การต้านออกซิเดชันเทียบกับกราฟมาตรฐาน

$$\% \text{ inhibition} = [(A_{734 \text{ control}} - A_{734 \text{ test sample}}) / (A_{734 \text{ control}} - A_{734 \text{ blank}})] \times 100$$

3.2.6.2 วิธี 2,2-diphenyl-1-picrylhydrazyl (DPPH) radical scavenging activity

ด้วยวิธี DPPH radical scavenging ดัดแปลงมาจาก Hou *et al.* (2001) ดังนี้ ทำการเจือจางน้ำผลไม้ด้วย เอทานอล แล้วนำทดสอบการวัดค่าการดูดกลืนแสง ที่ 517 nm อยู่ใน ช่วง 1.40 $\pm$ 0.05 นำตัวอย่างน้ำผลไม้ไปปั่นเหวี่ยงที่ความเร็วรอบ 2500 rpm เป็นเวลา 10 min แล้วดูดสารละลายน้ำผลไม้ ความเข้มข้น 0.1 mg/mL ปริมาตร ปริมาตร 0.6 mL ลงในหลอดทดลอง เติมน้ำ 1M Tris-HCl buffer (pH=7.9) ปริมาตร 0.2 mL และเติม 5 mM DPPH ในเอทานอล ปริมาตร 1.2 mL ผสมให้เข้ากันทิ้งไว้ในที่มืด 20 min วัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 517 nm นำค่าที่ได้ไปคำนวณหา %inhibition ตามสมการ จากนั้นนำไปวิเคราะห์ความสามารถในการ ต้านอนุมูลอิสระของน้ำผลไม้โดยเทียบกับกราฟมาตรฐานของ Trolox รายงานผลเป็นค่าการต้าน อนุมูลอิสระ DPPH (mg TEAC/100 g)

$$\% \text{ inhibition} = [(A_{517 \text{ control}} - A_{517 \text{ test sample}}) / (A_{517 \text{ control}} - A_{517 \text{ blank}})] \times 100$$

#### 4. ปัจจัยของอุณหภูมิต่อชนิดของการพาสเจอร์ไรส์

ทำการศึกษาผลของอุณหภูมิ 25-95°C ต่อชนิดของการพาสเจอร์ไรส์ คือวิธีโอท้อมิคเปรียบเทียบกับวิธี ดั้งเดิม โดยศึกษาทางกายภาพ เคมี ตามข้อ 3.1 และ 3.2 (3.2.1-3.2.6)

5. ปัจจัยของอุณหภูมิในการเก็บรักษาต่ออายุการเก็บรักษาและจลนพลศาสตร์การเปลี่ยนแปลงคุณภาพ

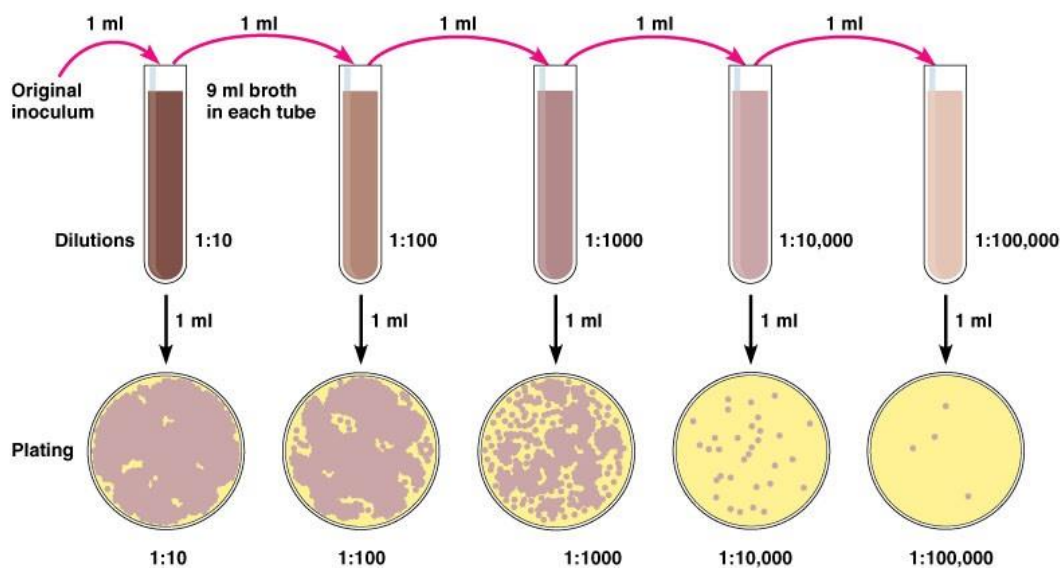
5.1 ผลการศึกษาการเปรียบเทียบระหว่างการให้ความร้อนแบบดั้งเดิม และวิธีการให้ความร้อนแบบโอห์มมิก

5.2 ผลกระทบของอุณหภูมิ 5 และ 15°C เป็นเวลา 35 วัน โดยเก็บตัวอย่างทุกๆ 5 วัน โดยศึกษาทางกายภาพ เคมี ตามข้อ 3.1 และ 3.2 (3.2.1-3.2.6)

5.3 การวิเคราะห์ผลทางด้านจุลชีววิทยา ปริมาณ total plate count และปริมาณ yeast and mold

การวิเคราะห์ปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมด การทดสอบ Total Plate Count หรือ Aerobic Plate Count เป็นการตรวจสอบเชื้อจุลินทรีย์ทั่วไป ที่เป็นเชื้อแบคทีเรียทุกชนิดที่ปนเปื้อนอยู่ในตัวอย่าง ซึ่งเจริญได้ทั้งบนผิวหน้าอาหาร ในอาหาร และได้อาหารเลี้ยงเชื้อที่ใช้ทดสอบ สามารถตรวจได้โดยการนับจำนวนโคโลนีของเชื้อที่เจริญในอาหารที่ใช้ทดสอบ ซึ่งจำนวนเชื้อแบคทีเรียทั่วไปนั้นใช้เป็นตัวชี้วัดอายุการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์ ถ้ามีจำนวนเชื้อจุลินทรีย์สูง ผลิตภัณฑ์ก็จะมีอายุการเก็บต่ำลง ถ้าจำนวนเชื้อจุลินทรีย์ต่ำผลิตภัณฑ์ก็จะมีอายุการเก็บรักษาสูงขึ้น ในการหาจำนวนจุลินทรีย์ในอาหารนั้น ไม่ได้กำหนดวิธีการมาตรฐานที่เฉพาะเอาไว้ โดยในงานทดลองนี้เลือกใช้วิธีการตามมาตรฐาน AOAC Official Method of Analysis 18<sup>th</sup> ed. (AOAC, 2010) ซึ่งใช้ตัวอย่าง 1 cm<sup>3</sup> มาทำการเจือจางตัวอย่างให้เหมาะสมด้วยวิธี Serial dilution ด้วยสารละลาย peptone water แล้วแบ่งตัวอย่างแต่ละความเจือจางใส่จานเพาะเชื้อ จานละ 1 mL จากนั้นเทอาหารเลี้ยงเชื้อ Plate Count Agar (PCA) ทับลงไป แล้วทำการหมუნวน (Pour plate) จานเพาะเชื้อ (รูปที่ 5) จนตัวอย่างกับอาหารผสมเข้ากันดี ทิ้งให้อาหารแข็งตัว แล้วนำไปบ่มที่อุณหภูมิ 35±1 °C เป็นเวลา 48±2 hr จากนั้นนำจานเพาะเชื้อ มานับจำนวนเชื้อจุลินทรีย์ที่เจริญ





ภาพที่ 5 ขั้นตอนการเพาะเชื้อด้วยเทคนิค pour plate

ที่มา: จุลชีววิทยา (2556)

การวิเคราะห์ Yeast and Mold เป็นการตรวจสอบเชื้อยีสต์และเชื้อราทั่วไป ที่ปนเปื้อนอยู่ในตัวอย่าง ซึ่งเจริญได้ทั้งบนผิวหน้าอาหาร ในอาหาร และใต้อาหารเลี้ยงเชื้อที่ใช้ทดสอบ สามารถตรวจได้โดยการนับจำนวนโคโลนีของเชื้อที่เจริญในอาหารที่ใช้ทดสอบ ซึ่งจำนวนเชื้อยีสต์และรา นั้นใช้เป็นตัวชี้วัดอายุการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์ ถ้ามีจำนวนเชื้อจุลินทรีย์สูง ผลิตภัณฑ์ก็จะมีอายุการเก็บต่ำลง ถ้าจำนวนเชื้อจุลินทรีย์ต่ำผลิตภัณฑ์ก็จะมีอายุการเก็บรักษาสูงขึ้น ในการหาจำนวนจุลินทรีย์ในอาหารนั้น ไม่ได้กำหนดวิธีการมาตรฐานที่เฉพาะเอาไว้ โดยในงานทดลองนี้เลือกใช้วิธีการตามมาตรฐาน AOAC Official Method of Analysis 18<sup>th</sup> ed. (AOAC, 2010) ซึ่งใช้ตัวอย่าง 1 cm<sup>3</sup> มาทำการเจือจางตัวอย่างให้เหมาะสมด้วยวิธี Serial dilution ด้วยสารละลาย peptone water แล้วแบ่งตัวอย่างแต่ละความเจือจางใส่จานเพาะเชื้อ จานละ 1 mL จากนั้นเทอาหารเลี้ยงเชื้อ potato Dextrose Agar (PCA) ทับลงไป แล้วทำการหมวน (Pour plate) จานเพาะเชื้อ จนตัวอย่างกับอาหารผสมเข้ากันดี ทิ้งให้อาหารแข็งตัว แล้วนำไปบ่มที่อุณหภูมิ 25±1 °C เป็นเวลา 72±2 hr จากนั้นนำจานเพาะเชื้อ มา นับจำนวนเชื้อจุลินทรีย์ที่เจริญ

#### 6. การทดสอบทางประสาทสัมผัส แบบ โดยใช้วิธี 9-Point Hedonic scale

เป็นการทดสอบที่ใช้วัดความรู้สึกของผู้บริโภคแต่ละคนที่มีต่อตัวอย่างที่กำลังทดสอบออกมาเป็นคะแนน Hedonic หมายถึง มีความพอใจในการกระทำ เป็นวิธีการทดสอบการยอมรับในตัวอย่าง โดยตัวอย่างจะถูกนำเสนอพร้อมกัน 1 - 4 ตัวอย่าง ผู้ทดสอบจะต้องบันทึกระดับของความชอบ

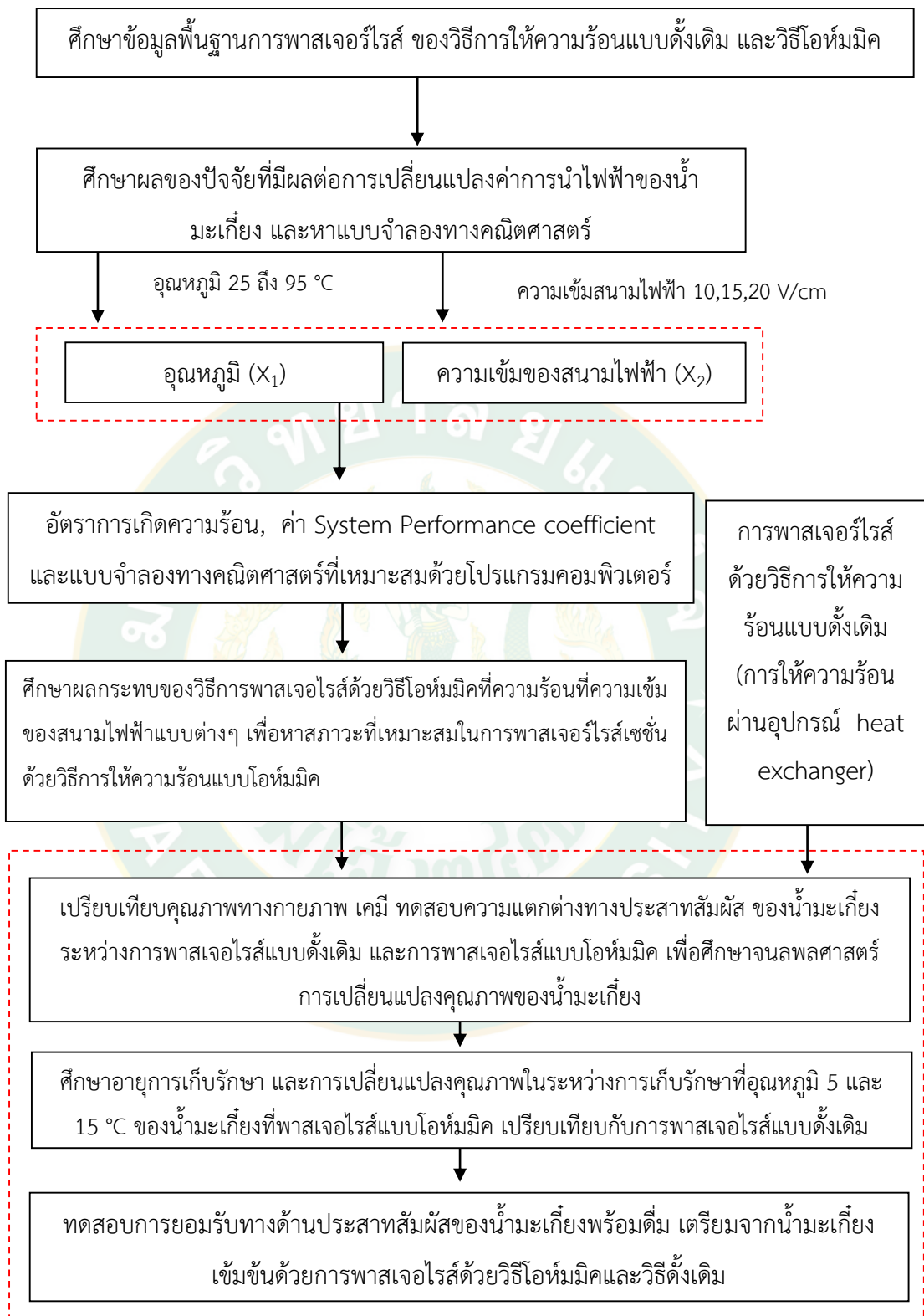
หรือไม่ชอบตัวอย่างนั้นๆ แบบทดสอบจะต้องอธิบายค่าของคะแนนที่กำหนด การทดสอบจะได้ผลที่น่าเชื่อถือถ้าหากผู้ทดสอบทำการตัดสินใจทันที โดยไม่ให้มีเวลาในการตัดสินใจมากนัก

วัดคุณภาพทางประสาทสัมผัส โดยการให้คะแนนความชอบ (9-Points Hedonic Scale) 1 – 9 คะแนน จาก 1 (ไม่ชอบมากที่สุด) ถึง 9 (ชอบมากที่สุด) ด้านลักษณะปรากฏ สี กลิ่น รสชาติ และความชอบรวม โดยให้ผู้ทดสอบ จำนวน 30 คน

#### 7. การออกแบบการทดลองและการวิเคราะห์ข้อมูล

การทดลองทั้งหมดทำการทดลองตัวอย่างละ 3 ซ้ำ และหาค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานจากนั้นนำผลการทดลองมาวิเคราะห์ทางสถิติ ด้วยการวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว (One – way ANOVA) และเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยด้วยวิธี Duncan’s New Multiple Range Test (DMRT) ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 %





ภาพที่ 6 แผนผังแสดงการดำเนินโครงการวิจัย

## บทที่ 4

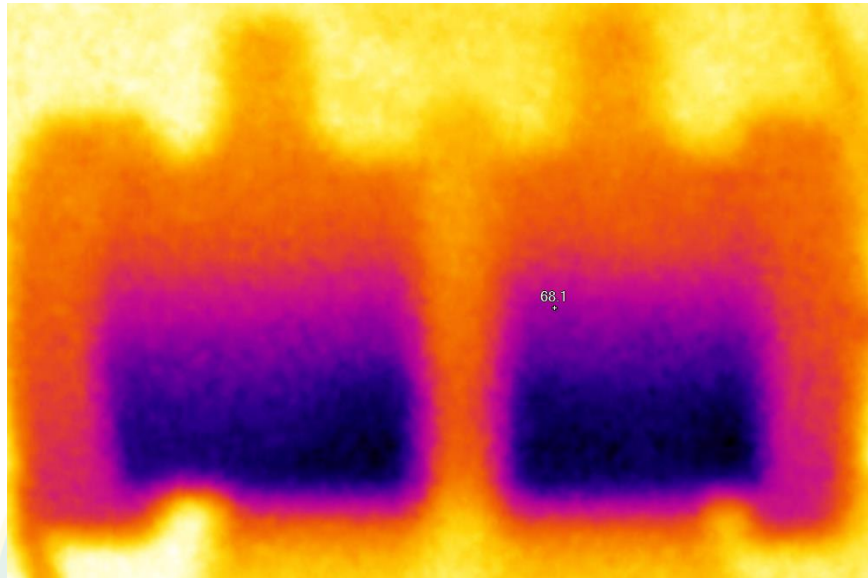
### ผลการวิจัยและวิจารณ์

#### อัตราการเกิดความร้อนในระหว่าง การให้ความร้อนด้วยวิธีโอห์มมิก

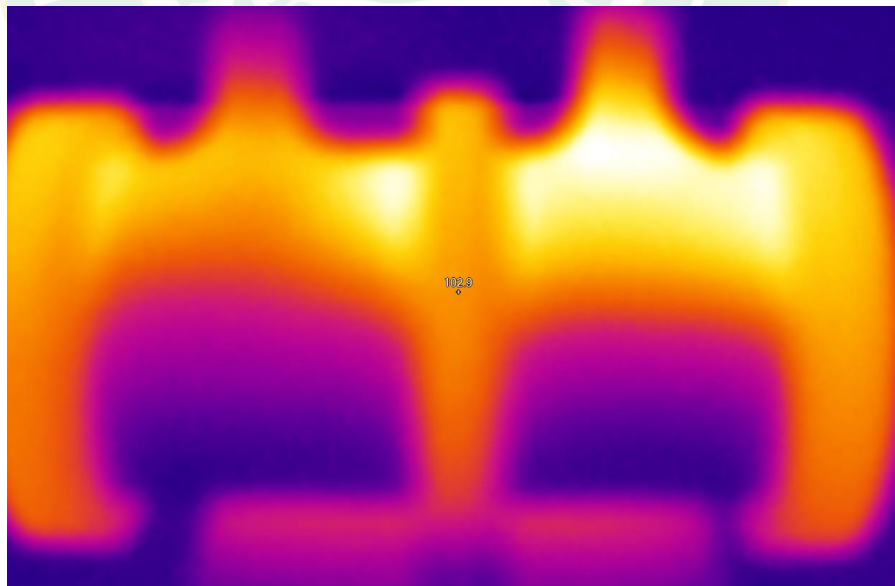
ในการศึกษานี้ทดสอบการให้ความร้อนในน้ำมะเข็ญเข็มชันด้วยวิธีการพาสเจอไรส์แบบโอห์มมิกที่อุณหภูมิ 25 ถึง 95 °C ที่ระดับความเข้มสนามไฟฟ้า 10, 15 และ 20 V/cm ตามลำดับ พบว่าวิธีการพาสเจอไรส์แบบโอห์มมิกมีความสามารถในการกระจายความร้อนสม่ำเสมอ เนื่องจากกลไกการเหนี่ยวนำความร้อนในน้ำมะเข็ญเข็มชันด้วยวิธีโอห์มมิกเป็นการสร้างความร้อนจากภายในตัวอาหารซึ่งเป็นผลจากการปล่อยกระแสไฟฟ้าไหลผ่านเข้าสู่ น้ำมะเข็ญเข็มชัน และการต้านทานการไหลของกระแสไฟฟ้าในน้ำมะเข็ญเข็มชันจนเกิดเป็นความร้อนที่อัตราความร้อนสูง โดยน้ำมะเข็ญเข็มชันมีความเหมาะสมกับการเกิดความร้อนแบบโอห์มมิก เนื่องจากเป็นน้ำผลไม้ที่มีค่าการนำไฟฟ้าสูง และค่าการนำไฟฟ้าของน้ำมะเข็ญเข็มชันมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิของระบบมีแนวโน้มสูงขึ้นเป็นผลจากปริมาณการไหลผ่านของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านอาหารได้มากขึ้นซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Sarang *et al.* (2008)

ภาพที่ 7 - 10 แสดงการกระจายอุณหภูมิของน้ำมะเข็ญเข็มชัน ณ ตำแหน่งแกนกลางของโอห์มมิกเซลล์โดยใช้สายไฟเบอร์ออปติกวัดอุณหภูมิ น้ำมะเข็ญเข็มชันโดยตรงในระหว่างการให้ความร้อนของโอห์มมิก และวิเคราะห์การกระจายความร้อนด้วยกล้อง Thermal Imager รุ่น TiS 45 ยี่ห้อ Fluke (ผลิตในประเทศ สหรัฐอเมริกา) โดยการกำหนดการวัดอุณหภูมิของน้ำมะเข็ญสกัด 4 ตำแหน่งบริเวณแกนกลางของเซลล์โอห์มมิก โดยมีระยะห่างในการวัดอุณหภูมิแต่ละจุดเท่ากับ 2.5 cm พบว่าในช่วงอุณหภูมิค่าการกระจายอุณหภูมิของน้ำมะเข็ญเข็มชันยังมีการกระจายอุณหภูมิได้ไม่ทั่วถึง โดยพิจารณาจากภาพกราฟฟิกของการกระจายอุณหภูมิ มีลักษณะขอบเขตที่แบ่งระดับของอุณหภูมิอย่างชัดเจน และการกระจายอุณหภูมิในน้ำมะเข็ญเข็มชันจะมีการกระจายที่เพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น เนื่องจากกระแสไฟฟ้าสามารถไหลผ่านเข้าสู่ น้ำมะเข็ญเข็มชันได้มากขึ้น จากผลของการอ่อนตัวของเซลล์ สอดคล้องกับแนวโน้มการเพิ่มค่าการนำไฟฟ้า ตามรายงานวิจัยในหัวข้อที่ปัจจัยของอุณหภูมิและความเข้มสนามไฟฟ้าต่อสมบัติการนำไฟฟ้าของน้ำมะเข็ญเข็มชัน ในตอนต่อไป (ปัจจัยของอุณหภูมิ และความเข้มสนามไฟฟ้าต่อสมบัติการนำไฟฟ้าของน้ำมะเข็ญเข็มชัน) โดยอุณหภูมิเฉลี่ยของน้ำมะเข็ญเข็มชันมีค่าเท่ากับ  $68.10 \pm 2.44$ ,  $102.90 \pm 1.18$ ,  $156.20 \pm 2.47$  และ  $181.00 \pm 2.92$  °F ตามลำดับ จากผลการศึกษาสามารถวิเคราะห์ได้ว่าการกระจายอุณหภูมิของน้ำมะเข็ญเข็มชันใน

ระหว่างการพาสเจอร์ไรส์ด้วยวิธีโอท้อมิคมีการกระจายอุณหภูมิอย่างสม่ำเสมอ และมีการกระจายอุณหภูมิได้ดียิ่งขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น

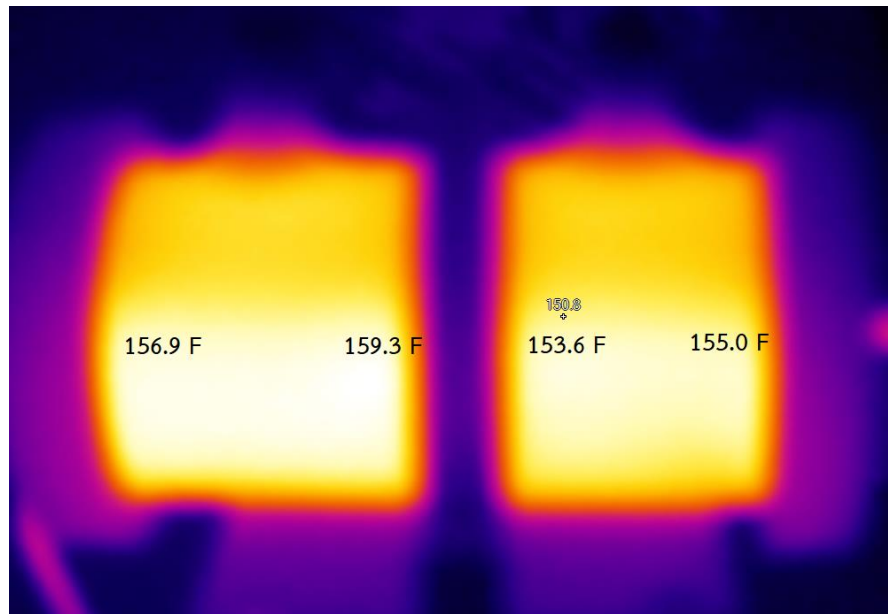


ภาพที่ 7 ภาพถ่ายการกระจายอุณหภูมิของน้ำมะเขี๋ยงเข้มข้นในขณะที่ให้ความร้อนแบบโอท้อมิคที่อุณหภูมิเฉลี่ยเท่ากับ 68.1°F (20.06 °C)

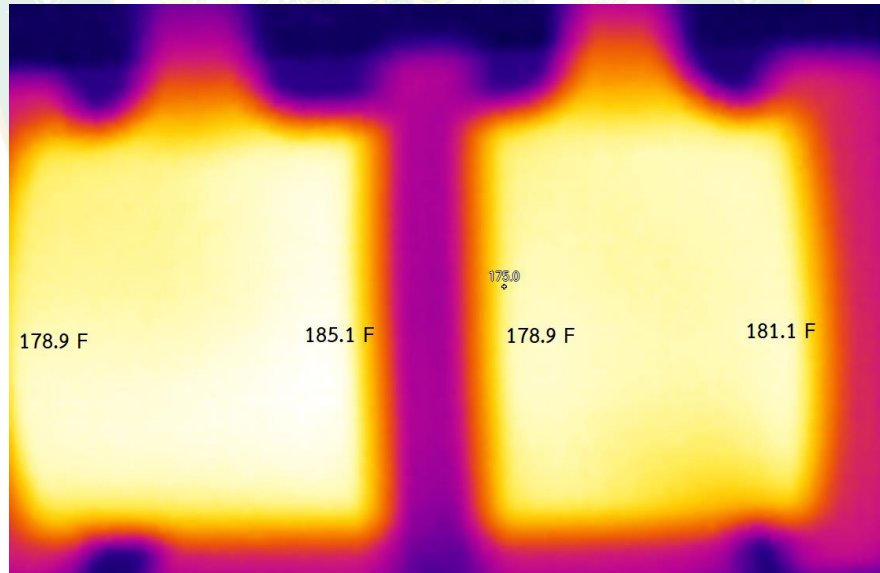


ภาพที่ 8 ภาพถ่ายการกระจายอุณหภูมิของน้ำมะเขี๋ยงเข้มข้นในขณะที่ให้ความร้อนแบบโอท้อมิคที่อุณหภูมิเฉลี่ยเท่ากับ 102.9 °F (39.39 °C)





ภาพที่ 9 ภาพถ่ายการกระจายอุณหภูมิของน้ำมะเข็ญเข้มข้นในขณะที่ให้ความร้อนแบบโอห์มมิกที่อุณหภูมิเฉลี่ยเท่ากับ 156.2°F (69.0 °C)



ภาพที่ 10 ภาพถ่ายการกระจายอุณหภูมิของน้ำมะเข็ญเข้มข้นในขณะที่ให้ความร้อนแบบโอห์มมิกที่อุณหภูมิเฉลี่ยเท่ากับ 181.0°F (82.78 °C)

Icier and Ilcali (2005) และ Assawarachan (2010) ได้อธิบายกลไกการเหนี่ยวนำให้เกิดความร้อน และผลการเปลี่ยนแปลงพลังงานไฟฟ้า เป็นนำพลังงานความร้อนในระหว่างการเกิดความร้อนแบบโอห์มมิก โดยแบ่งกลุ่มพลังงานออกเป็น 3 รูปแบบ ได้แก่ พลังงานไฟฟ้าที่ระบบป้อนให้กับระบบการเหนี่ยวนำความร้อน ซึ่งมีค่าเท่ากับผลคูณของค่าความเข้มสนามไฟฟ้ากับค่าการนำไฟฟ้าเฉลี่ยของน้ำมะกึ่งเข้มข้น ( $E_{\text{electrical}}$ ) พลังงานความร้อนที่เกิดขึ้นในระหว่างการต้านทานการไหลของกระแสไฟฟ้าในระหว่างและเหนี่ยวนำเกิดเป็นความร้อนความร้อน ( $E_{\text{ohmic heating}}$ ) และความร้อนที่สูญเสียไปกับสิ่งแวดล้อม ( $E_{\text{loss}}$ ) การวิเคราะห์กลไกการเปลี่ยนแปลงพลังงานในระบบสามารถคำนวณได้ตามกฎข้อที่ 1 ของเทอร์โมไดนามิก นี้ได้โดยการวัดการเปลี่ยนแปลงพลังงานภายในของระบบเทียบกับความแตกต่างระหว่างสภาวะเริ่มต้นกับสภาวะสุดท้ายของระบบ ตามที่แสดงในสมการที่ (4.1)

$$E_{\text{electrical}} = E_{\text{ohmic heating}} + E_{\text{loss}} \quad (4.1)$$

เมื่อ  $E_{\text{ohmic heating}}$  มีค่าเท่ากับ Sensible heat และ  $E_{\text{loss}}$  มีค่าเท่ากับพลังงานความร้อนที่สูญเสียให้กับสิ่งแวดล้อม การวิเคราะห์สมดุลพลังงานของระบบการให้ความร้อนของน้ำมะกึ่ง ให้ค่า  $E_{\text{loss}}$  มีค่าน้อยมาก และไม่นำมาวิเคราะห์สมดุลพลังงานของระบบ (ฤทธิชัย, 2561)

การวิเคราะห์สมดุลพลังงานของระบบนั้นถูกเขียนในรูปของสมการเชิงอนุพันธ์ รูปแบบแยกตัวแปร ตามที่แสดงในสมการที่ (4.2) และสามารถจัดรูปแบบสมการได้ตามสมการที่ (4.3-4.4) โดยผลการวิเคราะห์ค่าสมรรถนะการเกิดความร้อนด้วยวิธีโอห์มมิก สามารถหาได้ตามความสัมพันธ์ในสมการ

$$SPC_s \left( \frac{\Delta V^2 \sigma}{K_c} \right) = \overset{\circ}{m} C_p \frac{dT}{dt} \quad (4.2)$$

$$SPC_s \left( \frac{\Delta V^2 \sigma}{K_c} \right) \int_{t=0}^{t=t} dt = \overset{\circ}{m} C_p \int_{T=T_i}^{T=T_f} dT \quad (4.3)$$

$$SPC_s \left( \frac{\Delta V^2 \sigma}{K_c} \right) t = \overset{\circ}{m} C_p (T_f - T_i) \quad (4.4)$$

เมื่อ  $SPC_s$  คือค่าสมรรถนะการเกิดความร้อนด้วยวิธีโอห์มมิก,  $C_p$  คือค่าความจุความร้อนเฉลี่ยที่อุณหภูมิ 25-95 °C ของน้ำมะกึ่งเข้มข้นเท่ากับ 2.73 kJ/kg °C,  $K_c$  คือค่าคงที่ของเซลล์โอห์มมิก (มีค่าเท่ากับ 73.97 m<sup>2</sup>)  $T_f$  และ  $T_i$  คืออุณหภูมิสุดท้าย และอุณหภูมิเริ่มต้นของน้ำมะกึ่งเข้มข้น

สมการที่ (4.4) แสดงสมการวิเคราะห์ที่มีค่าค่าสมรรถนะการเกิดความร้อนด้วยวิธีโอห์มมิก เท่ากับอัตราส่วนของพลังงานไฟฟ้าที่เหนี่ยวนำให้เกิดความร้อนแบบโอห์มมิกเทียบกับพลังงานความ

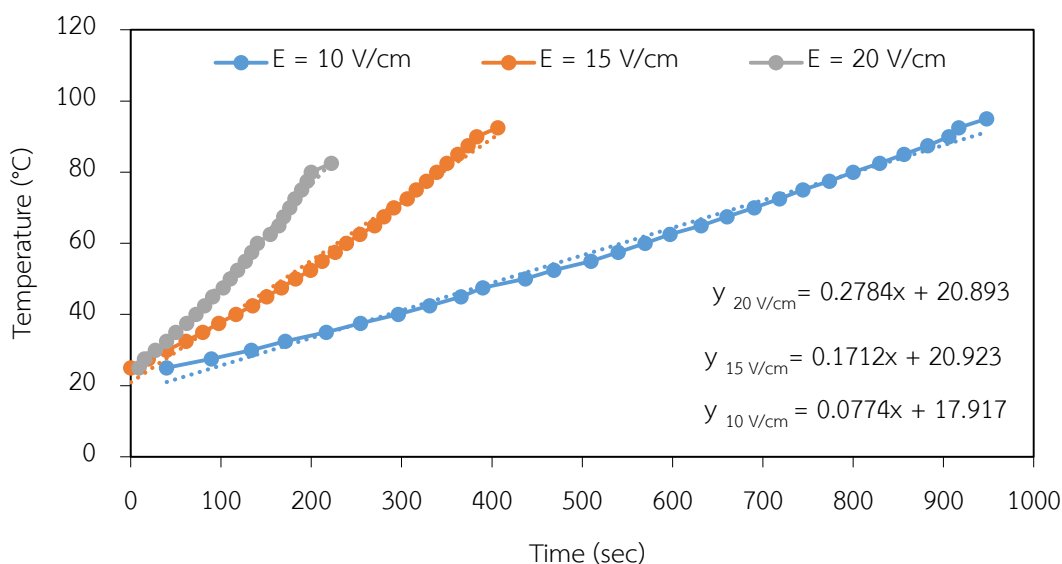
ร้อนที่เกิดขึ้นในน้ำมะเข็ญเข้มข้น เพื่อใช้เปรียบเทียบประสิทธิภาพเชิงความร้อนของระบบการให้ความร้อนแบบโอห์มมิก เป็นไปตามกฎการอนุรักษ์พลังงานของเทอร์โมไดนามิก โดยพลังงานไฟฟ้าที่ทำให้เกิดความเหนียวนำความร้อนในน้ำมะเข็ญเข้มข้นด้วยวิธีโอห์มมิกมีค่าเท่ากับพลังงานความร้อนที่ส่งผลให้อุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นและพลังงานความร้อนที่สูญเสียให้สิ่งแวดล้อม

ภาพที่ 11 อธิบายการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของน้ำมะเข็ญเข้มข้นที่เวลาใดใด ที่ช่วงอุณหภูมิ 25 ถึง 95 °C พบว่า มีอัตราการเกิดความร้อนเท่ากับ 0.0774, 0.1712 และ 0.2784 °C/sec ที่ระดับความเข้มสนามไฟฟ้า 10, 15 และ 20 V/cm ตามลำดับ (รายละเอียดตามที่แสดงในภาพที่ 10) ดังนั้นเมื่อพิจารณาอัตราการเกิดความร้อนของน้ำมะเข็ญเข้มข้นที่ความเข้มสนามไฟฟ้าที่ 10 และ 15 V/cm พบว่า เมื่อเพิ่มค่าความเข้มสนามไฟฟ้าจาก 10 เป็น 15 V/cm อัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิจะเพิ่มขึ้น 54.79 % ในขณะที่ เพิ่มค่าความเข้มสนามไฟฟ้าจาก 15 เป็น 20 V/cm อัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิจะเพิ่มขึ้นเป็น 38.51% ดังนั้นเมื่อวิเคราะห์สมดุลพลังงานที่เกิดขึ้นในระบบ พบว่าการเพิ่มความเข้มสนามไฟฟ้าเทียบเท่าการเพิ่มพลังงานในระบบดังนั้นความเข้มสนามไฟฟ้าที่ 15 V/cm จึงมีความเหมาะสมมากที่สุด ในขณะที่ความเข้มของสนามไฟฟ้า ที่ 20 V/cm มีอัตราการเกิดความร้อนเพิ่มขึ้นเพียง 62.61 % เนื่องจากความเข้มสนามไฟฟ้างกล่าวให้พลังงานไฟฟ้าให้ระบบมากกว่าความสามารถในการเหนียวนำให้เกิดความร้อนในน้ำมะเข็ญเข้มข้น

โดยค่าสมรรถนะการเกิดความร้อนด้วยวิธีโอห์มมิกบ่งบอกถึงค่าประสิทธิภาพการถ่ายเทพลังงานและสมรรถนะเชิงความร้อนในระหว่างการเกิดความร้อนแบบโอห์มมิก มีรูปแบบความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรตามสมการที่ (4.4) จากผลการศึกษาพบว่าค่าสมรรถนะการเกิดความร้อนด้วยวิธีโอห์มมิก (SPCs) มีค่าเท่ากับ  $70.24 \pm 2.91$ ,  $79.27 \pm 1.41$  และ  $74.69 \pm 1.71$  ที่ระดับความเข้มสนามไฟฟ้าที่ 10, 15 และ 20 V/cm ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากการให้ความร้อนน้ำมะเข็ญเข้มข้นที่ระดับความเข้มสนามไฟฟ้าที่ 10 V/cm มีค่า SPCs น้อยที่สุด เนื่องจากการเกิดความสูญเสียความร้อนกับสิ่งแวดล้อมเป็นเวลานาน ในขณะที่ค่า SPCs ของการเกิดความร้อนในน้ำมะเข็ญเข้มข้นที่ระดับความเข้มสนามไฟฟ้าที่ 20 V/cm นั้นเกิดการเหนียวนำความร้อนที่สูงจากการไหลผ่านของกระแสไฟฟ้าที่สูงกว่าสมบัติการนำไฟฟ้าของน้ำผลไม้ส่งผลให้โครงสร้างเซลล์และเนื้อเยื่อภายในเกิดการเสียหายอย่างสมบูรณ์ และสูญเสียความร้อนให้สิ่งแวดล้อมร้อนในอัตราสูง ดังนั้นค่า ค่า SPCs จึงมีค่าที่ต่ำกว่าการเกิดความร้อนที่ความเข้มของสนามไฟฟ้า ที่ระดับ 15 V/cm

ดังนั้นในการหาสภาวะที่เหมาะสมในการให้ความร้อนน้ำมะเข็ญเข้มข้นด้วยวิธีการพาสเจอร์ไรส์แบบโอห์มมิกนั้น จากข้อมูลในโครงการวิจัยนี้พบว่า ระดับความเข้มสนามไฟฟ้าที่ 15 V/cm ที่ช่วงอุณหภูมิ 25-85 °C มีความเหมาะสมมากที่สุด เนื่องจากการพาสเจอร์ไรส์ด้วยวิธีโอห์มมิกที่อุณหภูมิที่สูงเกินกว่า 85 °C จะเกิดฟองอากาศ เนื่องจากการเดือดอย่างยิ่งยวดจนน้ำมะเข็ญเข้มข้นพุ่งออกจากเซลล์โอห์มมิก เสี่ยงต่อการเกิดอันตรายในระหว่างการศึกษา นอกจากนี้การใช้ความเข้ม

สนามไฟฟ้าที่สูงเกินไปจะลดค่า SPCs เนื่องจากพลังงานความร้อนสูญเสียกับสิ่งแวดล้อมมากขึ้น และทำให้โครงสร้างเซลล์และเนื้อเยื่อภายในเกิดการเสียหายอย่างสมบูรณ์



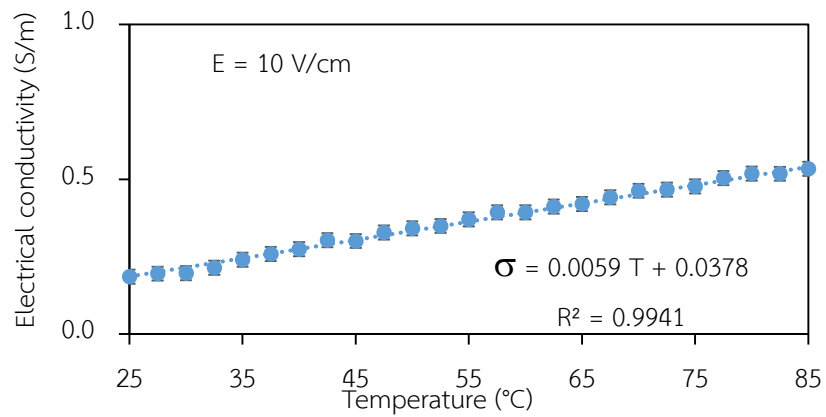
**ภาพที่ 11** อัตราการเพิ่มอุณหภูมิในน้ำมะเขีงเข้มข้นในระหว่างการพาสเจอร์ไรส์แบบโอห์มมิคที่ระดับความเข้มสนามไฟฟ้า 10, 15 และ 20 V/cm ตามลำดับ

จากภาพที่ 11 แสดงความสัมพันธ์ของปัจจัยของความเข้มสนามไฟฟ้ามากขึ้นมีผลต่ออัตราการเกิดความร้อนอย่างมีนัยสำคัญ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % ตัวอย่างน้ำมะเขีงเข้มข้นในระหว่างการพาสเจอร์ไรส์แบบโอห์มมิคกระแสไฟฟ้าที่สูงขึ้นทำให้เกิดความร้อนได้เร็วขึ้น เมื่อใส่ระดับแรงดันไฟฟ้าที่สูงขึ้น เส้นแนวโน้มของอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นจาก 25 ถึง 95°C, 25 ถึง 90°C และ 25 ถึง 80 °C ที่ความเข้มสนามไฟฟ้า 10, 15 และ 20 V/cm ตามลำดับ จะเห็นได้ว่า ที่ความเข้มสนามไฟฟ้า 10 V/cm ใช้เวลาในการเปลี่ยนความร้อนสูงที่สุด และรองลงมาคือที่ความเข้มสนามไฟฟ้า 15 V/cm และที่ความเข้มสนามไฟฟ้า 20 V/cm ใช้เวลาน้อยที่สุด แต่ที่ความเข้ม 15 และ 20 V/cm ไม่สามารถให้ความร้อนได้ถึง 95 °C เนื่องจากมีฟองอากาศเกิดขึ้น ทำให้ต้องหยุดการทดลอง ทั้งนี้ฟองอากาศที่เกิดขึ้นเนื่องมาจากการที่น้ำผลไม้ไม่มีความเป็นกรดสูงเกิดไฮโดรเจนอิเล็กโทรไลต์ที่มีศักยภาพสร้างฟองอากาศ Zhao *et al.* (2005) จากการทดลองพบว่า อุณหภูมิที่สูงขึ้นทำให้ความเข้มข้นของแข็งเพิ่มขึ้น เนื่องจากการระเหยของน้ำ ทำให้การเคลื่อนที่ของไอออนิก เคลื่อนที่เพิ่มขึ้น จึงเป็นสาเหตุทำให้ค่าการนำไฟฟ้ามีแนวโน้มลดลง และอีกสาเหตุหนึ่ง ที่ฟองอากาศที่เกิดขึ้นเป็นผลมาจากเมื่อมีอุณหภูมิสูงขึ้นน้ำผลไม้เกิดการเดือด ทำให้น้ำผลไม้มีความหนาแน่นสูงขึ้น และยังทำให้เกิดปฏิกิริยาการออกซิเดชันลดลง จนทำให้เกิดอากาศอย่างรวดเร็ว (Dadali *et al.*, 2007)

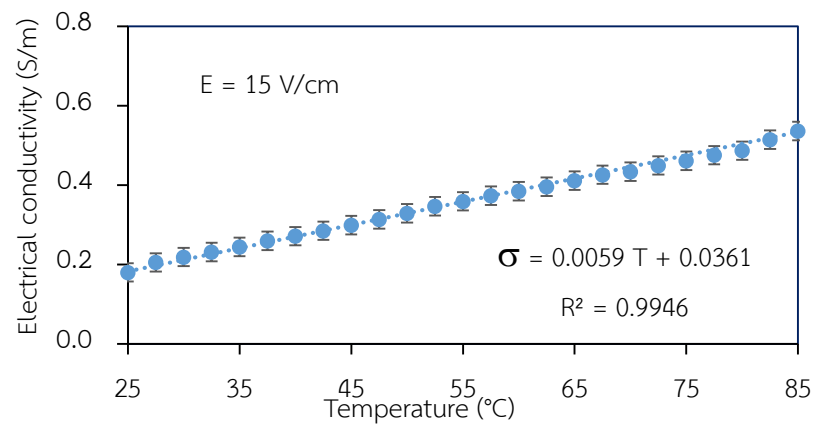
## ปัจจัยของอุณหภูมิ และความเข้มสนามไฟฟ้าต่อสมบัติการนำไฟฟ้า ของน้ำมะเขี๋ยงเข้มข้น

จากผลการศึกษาพบว่าค่าการนำไฟฟ้าของน้ำมะเขี๋ยงเข้มข้นในช่วงอุณหภูมิ 25 ถึง 95 °C มีค่าเท่ากับ 0.1878-0.6058 S/m ที่ระดับความเข้มสนามไฟฟ้า 10 และ 15 V/cm โดยเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นส่งผลให้ปริมาณการไหลของกระแสไฟฟ้าไหลผ่านในน้ำมะเขี๋ยงเข้มข้นได้มากขึ้นส่งผลให้ค่าการนำไฟฟ้ามีค่ามากขึ้น ทั้งนี้สามารถอธิบายปรากฏการณ์ดังกล่าวได้ว่า เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจะทำให้โครงสร้างเซลล์เปลี่ยนแปลงโดยผนังเนื้อเยื่อที่มีโปรโตพลาสซึมเป็นส่วนประกอบของโครงสร้างเกิดการเสถียรภาพ (Protopectin Breakdown) และอ่อนตัวลงจากการถูกทำลายด้วยความร้อน ทำให้น้ำในเนื้อเยื่อเซลล์ไหลผ่านออกมาโดยน้ำภายใต้เนื้อเยื่อเซลล์จะประกอบด้วยสารอาหาร เกลือแร่และไอออนจำนวนมาก ส่งผลทำให้มีการเคลื่อนที่ของไอออนมากขึ้นจึงช่วยกระตุ้นการไหลผ่านของกระแสไฟฟ้าได้มากขึ้น Icier and Ilicali (2005) และ Assawarachan (2010) ในขณะที่การเกิดความร้อนแบบโอห์มมิกที่ความเข้มสนามไฟฟ้าที่ 20 V/cm สามารถวัดค่าการนำไฟฟ้ามีค่าเท่ากับ 0.2925-0.8393 S/m ซึ่งมีค่ามากกว่าการวัดค่าการนำไฟฟ้าที่ความเข้มสนามไฟฟ้า 10 และ 15 V/cm ทั้งนี้เกิดจากการที่น้ำมะเขี๋ยงเข้มข้นถูกเหนี่ยวนำให้เกิดความร้อนด้วยการให้ความร้อนแบบโอห์มมิกที่อัตราการเพิ่มอุณหภูมิที่สูงมากกว่าจนทำให้โครงสร้างเซลล์และเนื้อเยื่อภายในเกิดการเสถียรภาพอย่างสมบูรณ์ส่งผลให้การนำกระแสไฟฟ้าได้มากขึ้น และส่งผลให้สมบัติการนำไฟฟ้าเกิดการเปลี่ยนแปลงในลักษณะแนวโน้มเพิ่มขึ้น (Achir *et al.*, 2016) จากปรากฏการณ์ดังกล่าวจึงทำให้อาหารมีคุณสมบัติการนำไฟฟ้าที่มากขึ้น โดยอัตราการเพิ่มของค่าการนำไฟฟ้าจะมีความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงกับอุณหภูมิ ค่าการนำไฟฟ้าเป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและค่าการนำไฟฟ้าส่วนใหญ่มีความสัมพันธ์แบบเชิงเส้น ดังนั้นการหาสมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำไฟฟ้าและอุณหภูมิที่ช่วงเวลาต่างๆ พบว่ามีรูปแบบสมการเป็นสมการเส้นตรง (ภาพที่ 12)

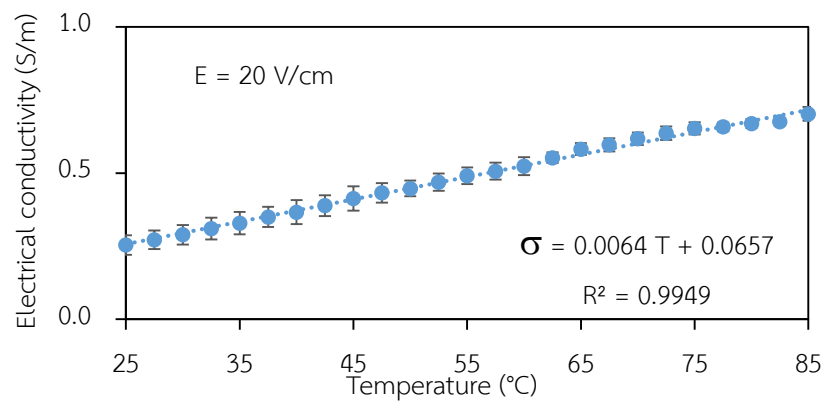




(ก)



(ข)



(ค)

ภาพที่ 12 ค่าการนำไฟฟ้าและอุณหภูมิของน้ำมะเขีงเข้มข้นในระหว่าง  
การพาสเจอร์ไรส์แบบโอห์มมิครระดับความเข้มข้นไฟฟ้าที่

(ก) 10 V/cm (ข) 15 V/cm (ค) 20 V/cm

สมการพื้นฐานความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำไฟฟ้าและอุณหภูมิของน้ำมะเข็ญเข้มข้นในระหว่างการพาสเจอไรส์แบบโอห์มมิก ในช่วงอุณหภูมิ 25 ถึง 95 °C มีความสัมพันธ์ดังนี้ ที่ระดับความเข้มข้นไฟฟ้าที่ 10, 15 และ 20 V/cm (ตารางที่ 7) พบว่าความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับค่าการนำไฟฟ้านั้นมีความสัมพันธ์เชิงเส้นตรง มีสัมประสิทธิ์การตัดสินใจสูงสุด ( $R^2$ ) เท่ากับ 0.9941-0.9949

**ตารางที่ 7** ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำไฟฟ้าและอุณหภูมิของน้ำมะเข็ญเข้มข้นในระหว่างการพาสเจอไรส์แบบโอห์มมิก ที่ระดับความเข้มข้นของสนามไฟฟ้า (10, 15 และ 20 V/cm)

ความเข้มข้นไฟฟ้า (V/cm)	แบบจำลองทางคณิตศาสตร์	( $R^2$ )	$\chi^2$	RMSE
10	$\sigma = 0.0059 T + 0.0378$	0.9941	$8.14 \times 10^{-5}$	0.0088
15	$\sigma = 0.0059 T + 0.0361$	0.9946	$9.16 \times 10^{-5}$	0.094
20	$\sigma = 0.0064 T + 0.0657$	0.9949	$6.67 \times 10^{-3}$	0.0803

หมายเหตุ  $R^2$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจสูงสุด,  $\chi^2$  คือ ความแตกต่างค่าเฉลี่ย (ไคสแควร์), RMSE คือ Root Mean Square error

ผลการวิเคราะห์ค่าสมรรถนะการเกิดความร้อนด้วยวิธีโอห์มมิก สามารถหาได้ตามความสัมพันธ์ในสมการ SPC<sub>s</sub> มีค่าเท่ากับอัตราส่วนของพลังงานไฟฟ้าที่เหนี่ยวนำให้เกิดความร้อนแบบโอห์มมิกเทียบกับพลังงานความร้อนที่เกิดขึ้นในน้ำมะเข็ญเข้มข้น สอดคล้องกับกฎการอนุรักษ์พลังงานของเทอร์โมไดนามิก โดยพลังงานไฟฟ้าที่ทำให้เกิดความเหนี่ยวนำความร้อนในน้ำมะเข็ญเข้มข้นด้วยวิธีโอห์มมิกมีค่าเท่ากับพลังงานความร้อนที่ส่งผลให้อุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นและพลังงานความร้อนที่สูญเสียให้สิ่งแวดล้อม โดยค่าสมรรถนะการเกิดความร้อนด้วยวิธีโอห์มมิกบ่งบอกถึงค่าประสิทธิภาพการถ่ายเทพลังงานและสมรรถนะเชิงความร้อนในระหว่างการเกิดความร้อนแบบโอห์มมิก จากผลการศึกษาพบว่าอัตราการเพิ่มของอุณหภูมิในระหว่างการเกิดความร้อนในน้ำมะเข็ญเข้มข้นด้วยวิธีการเกิดความร้อนแบบโอห์มมิกมีค่าเท่ากับ  $0.0851 \pm 0.0031$ ,  $0.1642 \pm 0.0174$  และ  $0.0393 \pm 0.0149$  °C/sec ที่ระดับความเข้มข้นไฟฟ้าที่ 10, 15 และ 20 V/cm ตามลำดับ ซึ่งพบว่าเมื่อเพิ่มระดับความเข้มข้นไฟฟ้าที่ละ 5 V/cm ส่งผลให้อัตราการเพิ่มอุณหภูมิเท่ากับ 92.26 และ 138.14 % ของการเพิ่มของระดับสนามไฟฟ้าที่ 10 เพิ่มเป็น 15 V/cm และเพิ่มของระดับสนามไฟฟ้าที่ 15

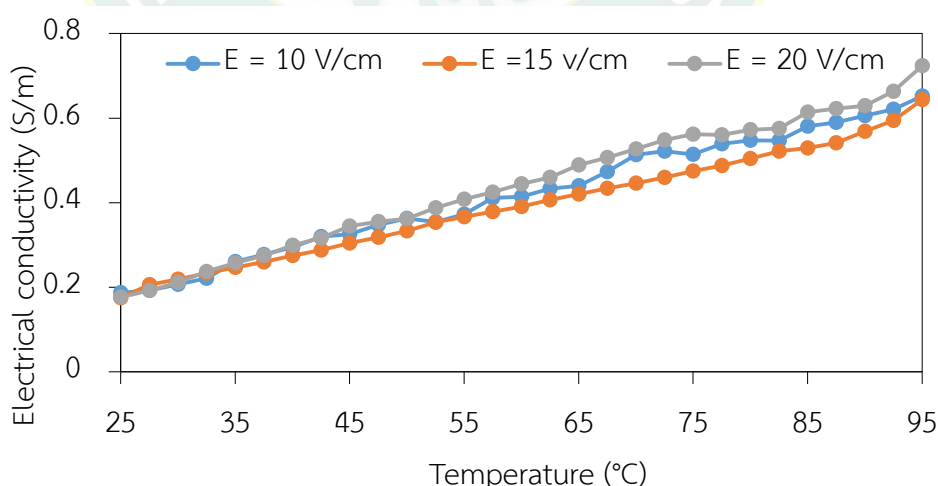
เพิ่มเป็น 20 V/cm ตามลำดับ ในขณะที่ค่าสมรรถนะการเกิดความร้อนด้วยวิธีโอห์มมิก (SPCs) มีค่าเท่ากับ  $70.24 \pm 2.91$ ,  $79.27 \pm 1.41$  และ  $74.69 \pm 1.71$  ที่ระดับความเข้มสนามไฟฟ้าที่ 10, 15 และ 20 V/cm ตามลำดับ ทั้งนี้การพาสเจอไรส์น้ำมะเข็ญเข้มข้นที่ระดับความเข้มสนามไฟฟ้าที่ 10 V/cm มีค่า SPCs น้อยที่สุด เนื่องจากการเกิดความสูญเสียความร้อนกับสิ่งแวดล้อมเป็นเวลานาน ในขณะที่ค่า SPCs ของการเกิดความร้อนในน้ำมะเข็ญที่ระดับความเข้มสนามไฟฟ้าที่ 20 V/cm นั้นเกิดการเหนี่ยวนำความร้อนที่สูงจากการไหลผ่านของกระแสไฟฟ้าที่สูงกว่าสมบัติการนำไฟฟ้าของน้ำมะเข็ญเข้มข้น ส่งผลให้โครงสร้างเซลล์และเนื้อเยื่อภายในเกิดการเสียดสภาพอย่างสมบูรณ์ และสูญเสียความร้อนให้สิ่งแวดล้อมในอัตราสูง ดังนั้นค่า ค่า SPCs จึงมีค่าที่ต่ำกว่าการเกิดความร้อนที่ความเข้มของสนามไฟฟ้า ที่ระดับ 15 V/cm

ดังนั้น ในการหาสถานะที่เหมาะสมในการให้ความร้อนน้ำมะเข็ญเข้มข้นด้วยวิธีการพาสเจอไรส์แบบโอห์มมิกนั้น จากข้อมูลในโครงการวิจัยนี้พบว่า ระดับความเข้มสนามไฟฟ้าที่ 15 V/cm ที่ช่วงอุณหภูมิ 25 ถึง 85 °C เนื่องจากการให้ความร้อนด้วยวิธีโอห์มมิกที่อุณหภูมิที่สูง 85 °C จะเกิดฟองอากาศ เนื่องจากการเดือดอย่างยวบยวดจนน้ำมะเข็ญเข้มข้นพุ่งออกจากเซลล์โอห์มมิก เสี่ยงต่อการเกิดอันตรายในระหว่างการศึกษา นอกจากนี้การใช้ความเข้มสนามไฟฟ้าที่สูงเกินไปจะลดค่า SPCs เนื่องจากพลังงานความร้อนสูญเสียกับสิ่งแวดล้อมมากขึ้น และทำโครงสร้างเซลล์และเนื้อเยื่อภายในเกิดการเสียดสภาพอย่างสมบูรณ์

ผลการวิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการทำนาย ค่าการนำไฟฟ้าของน้ำมะเข็ญเข้มข้นซึ่งเป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิ พบว่ามีรูปแบบเป็นสมการเส้นตรง มีความสัมพันธ์ตามตารางที่ 7 รูปแบบสมการเส้นตรงที่แสดงค่าในการทำนายค่าการนำไฟฟ้าอยู่ในรูปแบบของ  $Y=mx+c$  เมื่อ  $m$  คือค่า ความชันของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและค่าการนำไฟฟ้า ดังนั้นค่าความชันเป็นดัชนีบ่งบอกอัตราการเปลี่ยนแปลงของค่าการนำไฟฟ้าต่ออุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลง โดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการทำนายค่าการนำไฟฟ้าภายใต้ความเข้มสนามไฟฟ้า 10 และ 15 V/cm พบว่ามีอัตราการเปลี่ยนแปลงค่าการนำไฟฟ้าเท่ากับ 0.0059 S/m ต่อ องศาเซลเซียสในขณะที่แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ภายใต้ความเข้มสนามไฟฟ้า 20 V/cm มีอัตราการเปลี่ยนแปลงค่าการนำไฟฟ้าเท่ากับ 0.0064 S/m ต่อ องศาเซลเซียส ซึ่งมีค่าสูงกว่าอัตราการเปลี่ยนแปลงค่าการนำไฟฟ้าที่ ความเข้มสนามไฟฟ้า 10 และ 15 V/cm เท่ากับ 8.47 % เนื่องจาก การพาสเจอไรส์ด้วยวิธีโอห์มมิกนั้นเป็นการสร้างความร้อนจากภายในตัวน้ำผลไม้ น้ำผลไม้จะต้านการไหลของกระแสไฟฟ้า ทำให้เกิดความร้อนขึ้น และเมื่อน้ำมะเข็ญเข้มข้นมีความร้อนมากขึ้น จะสามารถนำไฟฟ้าได้ดี ผลจากการไหลของกระแสไฟฟ้า หากกระแสไฟฟ้าไหลผ่านอาหารได้มากทำให้เกิดความร้อนได้สูง การนำไฟฟ้าก็จะดียิ่งขึ้น ดังนั้น ที่ความเข้มสนามไฟฟ้า 20 V/cm ด้านการไหลของกระแสไฟฟ้าได้สูงกว่า เกิดความร้อนได้มากกว่าจึงมีค่าการนำไฟฟ้าได้สูงกว่า 10 และ 15 V/cm การปล่อยกระแสไฟฟ้าไหลผ่านใน

ตัวอย่างน้ำมะเขี้ยวเข้มข้น ซึ่งเป็นน้ำผลไม้ที่มีลักษณะเป็นของเหลวและเป็นเนื้อเดียวมีสมบัติการนำไฟฟ้า เมื่อมีการไหลผ่านของกระแสไฟฟ้า จะเกิดการเคลื่อนที่ของไอออนที่เสียดสีกันระหว่างชั้นโมเลกุลทำให้เกิดความร้อน และค่าการนำไฟฟ้ามีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเป็นผลจากการไหลผ่านของกระแสไฟฟ้าได้มากขึ้น และที่ความเข้มข้นสนามไฟฟ้า 20 V/cm มีอัตราการเปลี่ยนแปลงค่าการนำไฟฟ้าได้มากกว่า ที่ ความเข้มข้นสนามไฟฟ้า 10 และ 15 V/cm เพราะอัตราการเกิดความร้อนจะขึ้นกับปริมาณ กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านอาหาร ซึ่งปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านจะแปรผันตรงกับคุณสมบัติค่าการนำไฟฟ้าของอาหาร น้ำมะเขี้ยวมีปริมาณกรดอยู่สูง ทำให้มีค่าการนำไฟฟ้าที่สูง ทำให้สามารถแตกตัวสูงจึงนำไฟฟ้าได้ดี

การวิเคราะห์ความแม่นยำของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ใช้หลักการทางสถิติด้วยการวิเคราะห์ค่า  $R^2$  เป็นพารามิเตอร์ในการบ่งบอกความแม่นยำในการทำนายของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการทำนายการเปลี่ยนแปลงค่าการนำไฟฟ้าที่อุณหภูมิใดใดในการบ่งบอกความแม่นยำในการทำนายของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการทำนายการเปลี่ยนแปลงค่าการนำไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 25 ถึง 95 °C ตามลำดับ ผลการศึกษาพบว่า มีค่า  $R^2$  อยู่ในช่วง 0.9941 – 0.9949 ซึ่งมีค่ามากกว่า 0.85 สอดคล้องกับงานวิจัยหลายฉบับ ในขณะที่พารามิเตอร์ทางสถิติที่บ่งบอกความผิดพลาดของการทำนายแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ถูกวิเคราะห์ด้วยค่า  $\chi^2$  และ RMSE มีค่าเท่ากับ  $8.14 \times 10^{-5}$  -  $6.67 \times 10^{-3}$  และ 0.0088 - 0.0940 ตามลำดับ ดังนั้นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การทำนายแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ มีความน่าเชื่อถือได้ อย่างไรก็ตามข้อจำกัดของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ดังกล่าวมานั้นมีความเหมาะสมในการทำนายการเปลี่ยนแปลงค่าการนำไฟฟ้าที่ ความเข้มข้นสนามไฟฟ้า 10, 15, 20 V/cm และ ช่วงอุณหภูมิที่ 25 ถึง 95 °C เท่านั้น



ภาพที่ 13 ผลกระทบของความเข้มข้นไฟฟ้าต่อการเปลี่ยนแปลงค่าการนำไฟฟ้าและอุณหภูมิของน้ำมะเขี้ยวเข้มข้นในระหว่างการพาสเจอร์ไรส์แบบโอห์มมิค

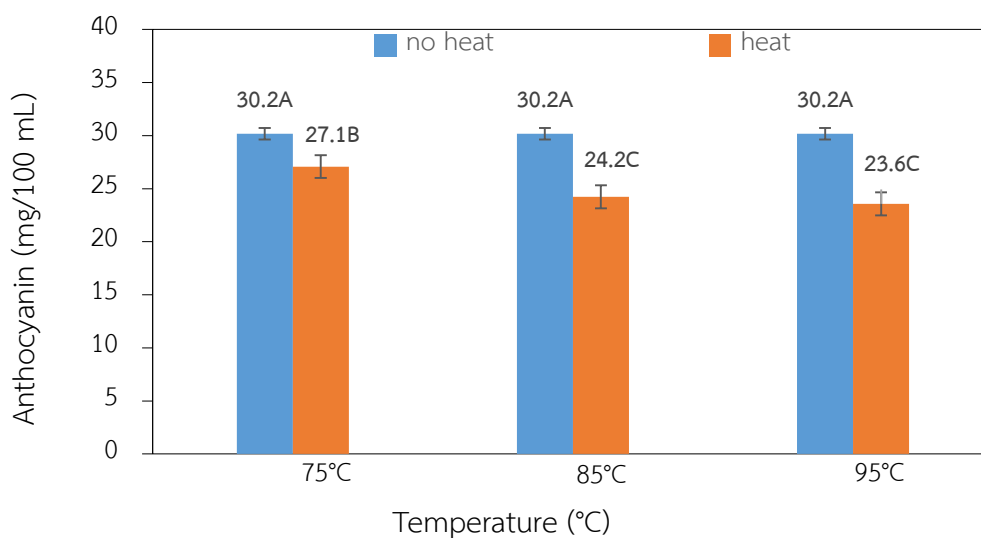
จากภาพที่ 13 แสดงผลกระทบของความเข้มข้นไฟฟ้าต่อการเปลี่ยนแปลงค่านำไฟฟ้าและอุณหภูมิของน้ำมะเข็ญเข้มข้นในระหว่างการพาสเจอร์ไรส์แบบโอทึมมิก พบว่าที่ความเข้มข้นไฟฟ้ามากขึ้นมีผลต่ออัตราการเกิดความร้อนอย่างมาก ในตัวอย่างน้ำมะเข็ญในระหว่างการพาสเจอร์ไรส์แบบโอทึมมิกกระแสไฟฟ้าที่สูงขึ้นทำให้เกิดความร้อนได้เร็วขึ้น เมื่อไล่ระดับความเข้มข้นไฟฟ้าที่สูงขึ้น ที่ 10, 15 และ 20 V/cm ตามลำดับ เส้นแนวโน้มของอุณหภูมิ (การให้ความร้อน) ที่เพิ่มขึ้นจาก 25 ถึง 95 °C, 25 ถึง 90 °C และ 25 ถึง 80 °C ตามลำดับ จะเห็นได้ว่า ที่ความเข้มข้นไฟฟ้า 10 V/cm ใช้เวลาในการเปลี่ยนความร้อนสูงสุด และรองลงมาคือที่ความเข้มข้นไฟฟ้า 15 V/cm และใช้เวลาสั้นที่สุดจะเป็นที่ความเข้มข้นไฟฟ้า 20 V/cm แต่ที่ความเข้มข้น 15 และ 20 V/cm จะไม่สามารถให้ความร้อนได้ถึง 95 °C เนื่องจากมีฟองอากาศเกิดขึ้น ทำให้ต้องหยุดการทดลอง ทั้งนี้ ฟองอากาศที่เกิดขึ้นเนื่องมาจากการนำผลไม้ไม่มีความเป็นกรดสูงเกิดไฮโดรเจนไอเล็กโตรไลต์ที่มีศักยภาพสร้างฟองอากาศ (Zhao *et al.*, 1999) จากการทดลองพบว่า อุณหภูมิที่สูงขึ้นทำให้ความเข้มข้นของของแข็งเพิ่มขึ้น เนื่องจากการระเหยของน้ำ ทำให้การเคลื่อนที่ของไอออนิก เคลื่อนที่เพิ่มขึ้น จึงเป็นสาเหตุทำให้ค่าการนำไฟฟ้ามีแนวโน้มลดลง และอีกสาเหตุหนึ่ง ที่ฟองอากาศที่เกิดขึ้นเป็นผลมาจากเมื่อมีอุณหภูมิสูงขึ้นน้ำผลไม้เกิดการเดือด ทำให้น้ำผลไม้มีความหนาแน่นสูงขึ้น และยังทำให้เกิดปฏิกิริยาการออกซิเดชันลดลง จนทำให้เกิดอากาศอย่างรวดเร็ว (Castroa *et al.*, 2004; Darvishi *et al.* (2013)

### แบบจำลองจลนพลศาสตร์การสลายตัว ของปริมาณแอนโธไซยานิน

ผลการตรวจวิเคราะห์ปริมาณแอนโธไซยานินของน้ำมะเข็ญเข้มข้นมีปริมาณ เท่ากับ  $30.18 \pm 0.574$  mg/ 100 ml และผลการตรวจวิเคราะห์ปริมาณแอนโธไซยานินที่ผ่านความร้อนเป็นเวลา 10 นาที ที่อุณหภูมิ 75, 85 และ 95 °C มีค่าเท่ากับ  $27.08 \pm 0.19$ ,  $24.23 \pm 4.26$  และ  $23.56 \pm 0.39$  mg 100 ml ตามลำดับ โดยมีร้อยละการสลายตัวของปริมาณแอนโธไซยานินเท่ากับ 10.26, 19.69 และ 21.91 % ตามลำดับ และผลการวิเคราะห์ทางสถิติด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ พบว่าปริมาณแอนโธไซยานินของน้ำมะเข็ญสดมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญกับผลการวิเคราะห์ผลกระทบของอุณหภูมิพบว่า การให้ความร้อนกับน้ำมะเข็ญที่อุณหภูมิ 75 °C มีความแตกต่างกับการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 85 และ 95 °C โดยการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 85 และ 95 °C ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ภาพที่ 14 แสดงการเปรียบเทียบปริมาณแอนโธไซยานินของน้ำมะเข็ญเข้มข้น และในน้ำมะเข็ญที่ผ่านการให้ความร้อนที่ 75, 85 และ 95 °C ตามลำดับ เมื่อน้ำมะเข็ญเข้มข้นได้รับความร้อนมากจนมีพลังงานความร้อนไปทำลายโครงสร้าง



โมเลกุลของแอนโธไซยานิน Deglycosylation จนทำให้โครงสร้างของโมเลกุลแอนโธไซยานินเสียสภาพ (Cleavage) และสลายตัวเป็น Protocatechuic acid, Phloroglucinaldehyde และ 4-hydroxybenzoic acid ดังนั้นเมื่ออุณหภูมิที่น้ำมะเขี๋ยงเข้มข้นได้รับสูงขึ้น และส่งผลต่อการเร่งการเกิดกลไก Deglycosylation ส่งผลต่อการสลายตัวของปริมาณแอนโธไซยานินดังกล่าวข้างต้น (Patras *et al.*, 2010)



ภาพที่ 14 ผลกระทบของความร้อนต่อการสลายแอนโธไซยานิน  
ในน้ำมะเขี๋ยงเข้มข้น

### 1. ผลกระทบของเวลาต่อการสลายปริมาณแอนโธไซยานินในระหว่างการพาสเจอร์ไรส์ของน้ำมะเขี๋ยงเข้มข้น

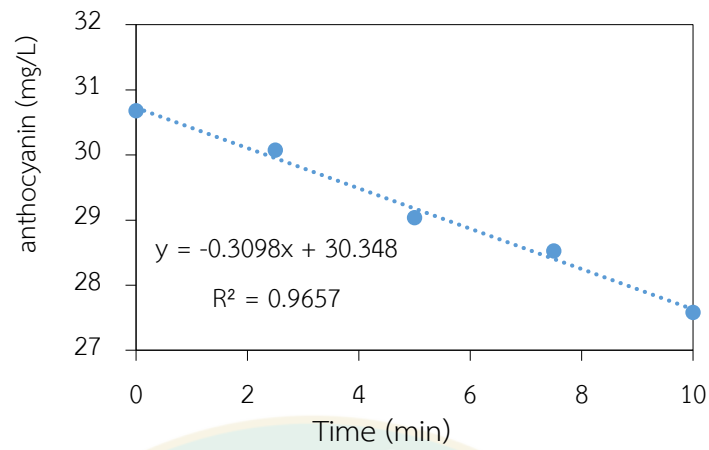
ผลกระทบของอุณหภูมิต่อการสลายตัวของปริมาณแอนโธไซยานินในน้ำมะเขี๋ยงเข้มข้นที่ผ่านความร้อน พบว่าอุณหภูมิเป็นปัจจัยที่สำคัญต่อการสลายตัวของปริมาณแอนโธไซยานินในน้ำมะเขี๋ยงเข้มข้น ดังนั้นจึงทำการศึกษาอัตราการสลายตัวของปริมาณแอนโธไซยานินในน้ำมะเขี๋ยงเข้มข้นในระหว่างการพาสเจอร์ไรส์ ด้วยวิธีดั้งเดิมกับน้ำมะเขี๋ยงเข้มข้นที่อุณหภูมิ 75, 85 และ 95 °C ที่เวลา 0 ถึง 5 จากนั้นนำข้อมูลมาวิเคราะห์ในรูปแบบสมการเชิงเส้น ระหว่างปริมาณแอนโธไซยานิน ที่เวลาใดๆ ในระหว่างการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ ที่ 75, 85 และ 95 °C ตามลำดับ ตามที่แสดงใน ภาพ 15 และ 16 การวิเคราะห์รูปแบบสมการเชิงเส้นเพื่อวิเคราะห์แนวโน้มของการสลายตัวของปริมาณแอนโธไซยานินในน้ำมะเขี๋ยงเข้มข้น เพื่อหารูปแบบที่เหมาะสมของสมการ แสดงในรูปแบบจำลองจลนพลศาสตร์อันดับศูนย์ และแบบจำลองจลนพลศาสตร์อันดับหนึ่ง พบว่าการหาสมการเชิงเส้นการสลายตัวของปริมาณแอนโธไซยานินโดยใช้ดัชนีของค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจสูงสุด ( $R^2$ ) ซึ่งใช้เป็นตัวบ่งบอกความแม่นยำในการทำนายของแบบจำลองจลนพลศาสตร์ และวิเคราะห์ค่าผลบวกกำลังสอง

การถดถอย (SSR) ซึ่งเป็นค่าพารามิเตอร์ทางสถิติสำหรับบ่งบอกความผิดพลาดในการทำนายของแบบจำลองผลศาสตร์ โดยเปรียบเทียบกับปริมาณแอนไฮโดรเจนในน้ำมะกึ่งเข้มข้นของการทดลองซ้ำใหม่ (New experiment) เพื่อวิเคราะห์ และหาแบบจำลองผลศาสตร์ที่เหมาะสม โดยแบบจำลองผลศาสตร์ที่เหมาะสมในการทำนายการสลายปริมาณแอนไฮโดรเจนในน้ำมะกึ่งเข้มข้นในการศึกษานี้ ควรมีค่า  $R^2$  ที่สูง และมีค่า SSR ที่น้อย รูปแบบสมการแบบจำลองผลศาสตร์ และผลการวิเคราะห์ทางสถิติ ตามที่แสดงในตารางที่ 9 ผลการศึกษาพบว่าแบบจำลองผลศาสตร์ปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง มีค่า  $R^2$  อยู่ในช่วง 0.9085-0.9753 และค่า SSR ซึ่งเป็นค่าพารามิเตอร์ทางสถิติที่บ่งบอกความผิดพลาดของแบบจำลองซึ่งอยู่ระหว่าง 0.0199- 0.0406 ซึ่งน้อยกว่าการผลการวิเคราะห์ทางสถิติของแบบจำลองผลศาสตร์อันดับศูนย์ ดังนั้นแบบจำลองผลศาสตร์อันดับหนึ่งมีความเหมาะสมในการทำนายการเปลี่ยนแปลงของการสลายตัวของปริมาณแอนไฮโดรเจนในน้ำมะกึ่งเข้มข้นสอดคล้องกับรายงานวิจัยของ (Shao-qian *et al.*, 2011) ซึ่งพบว่า การสลายตัวของปริมาณแอนไฮโดรเจนในน้ำส้มเหมาะสมกับแบบจำลองผลศาสตร์อันดับหนึ่ง เช่นเดียวกับรายงานผลการวิจัยของ Martynenko and Chen (2016) พบว่าการสลายตัวของปริมาณแอนไฮโดรเจนในน้ำลูเบอร์รี่มีรูปแบบแบบจำลองผลศาสตร์อันดับหนึ่ง รวมถึงรายงานวิจัยของ (Assawarachan and Noomhorm, 2008) พบว่าแบบจำลองผลศาสตร์อันดับหนึ่งมีความเหมาะสมมากกว่าแบบจำลองผลศาสตร์อันดับศูนย์ในการทำนายการเปลี่ยนแปลงสี (CIE-  $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$ ) ของน้ำสับปะรดในระหว่างให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ

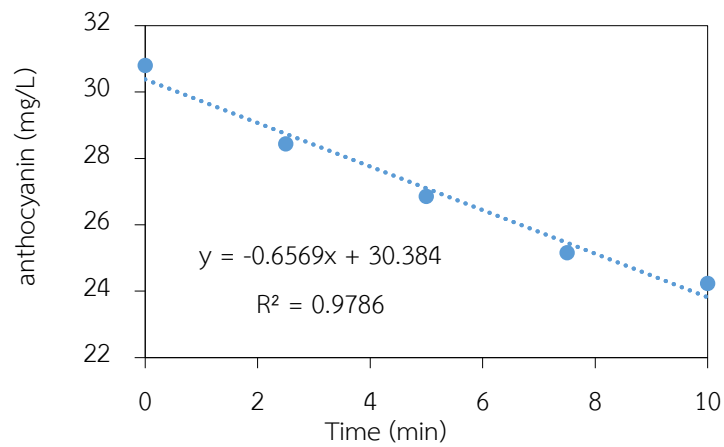
**ตารางที่ 8** แบบจำลองผลศาสตร์ปฏิกิริยาของการสลายของปริมาณแอนไฮโดรเจนในน้ำมะกึ่งเข้มข้น

ลำดับปฏิกิริยา	อุณหภูมิ °C	แบบจำลองทางคณิตศาสตร์	$R^2$	Sum of square regression (SSR)
ปฏิกิริยาอันดับศูนย์	75	$C_t = -0.3098 (\text{time}) + 30.348$	0.9657	0.0287
	85	$C_t = -0.6569 (\text{time}) + 30.348$	0.8740	0.0534
	95	$C_t = -0.6612 (\text{time}) + 30.348$	0.9107	0.0361
ปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง	75	$\ln (C_t/C_0) = -0.3098 (\text{time})$	0.9753	0.0199
	85	$\ln (C_t/C_0) = -0.6569 (\text{time})$	0.9085	0.0406
	95	$\ln (C_t/C_0) = -0.6612 (\text{time})$	0.9106	0.0361

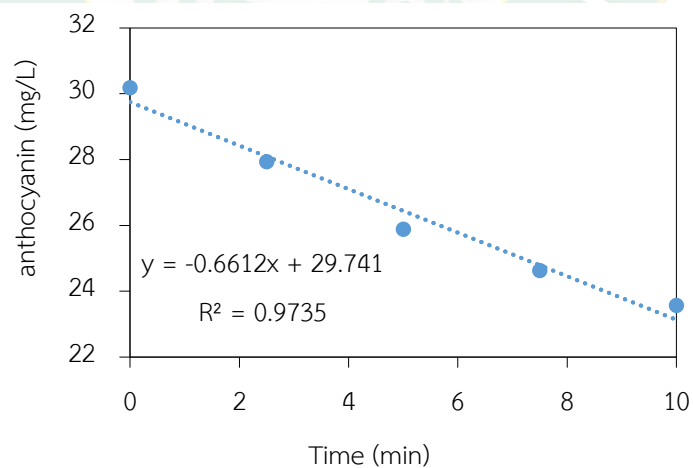
หมายเหตุ  $R^2$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจสูงสุด, SSR คือ ค่าผลบวกกำลังสองการถดถอย (Sum of square regression)



(ก)



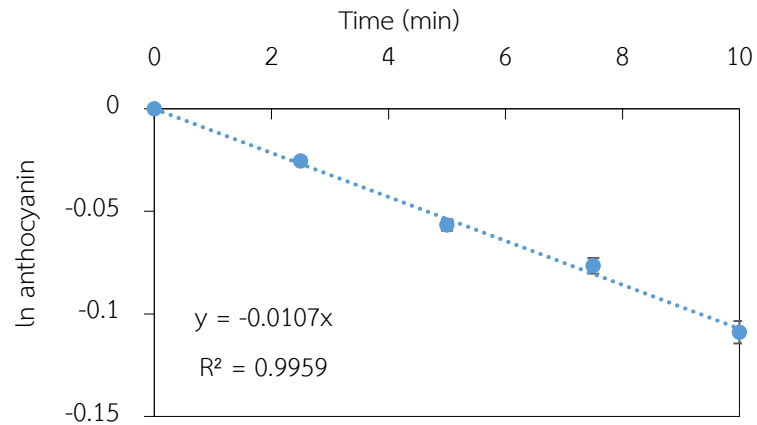
(ข)



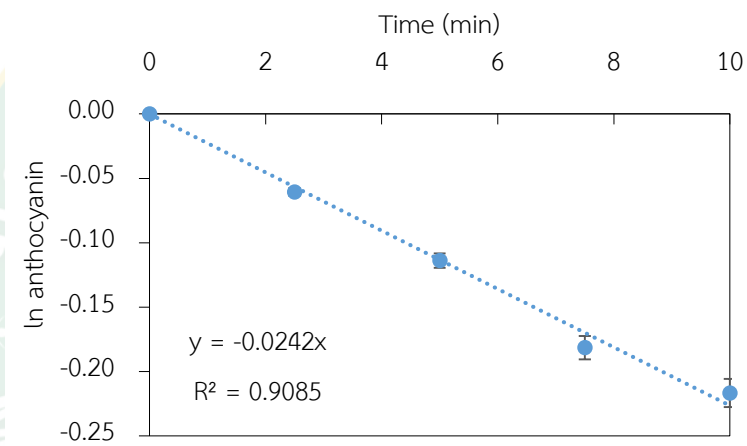
(ค)

ภาพที่ 15 จลนพลศาสตร์ปฏิกิริยาอันดับศูนย์ของการสลายของปริมาณแอนโทไซยานินในน้ำมะเขี๋ยงเข้มข้น

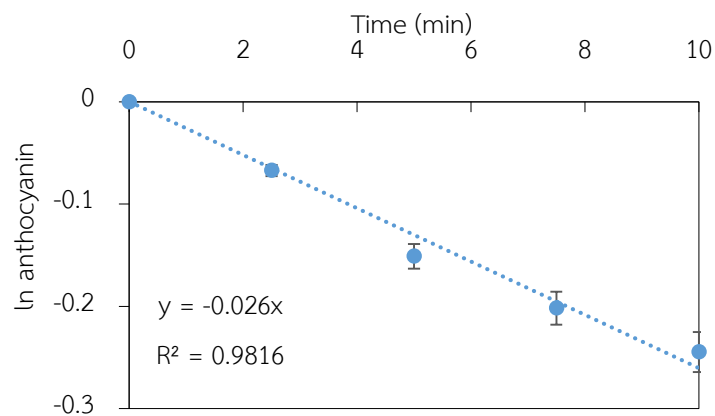
(ก) อุณหภูมิ 75 °C (ข) อุณหภูมิ 85 °C (ค) อุณหภูมิ 95 °C



(ก)



(ข)



(ค)

**ภาพที่ 16** จลนพลศาสตร์ปฏิกิริยาอันดับหนึ่งของการสลายของปริมาณแอนโทไซยานินในน้ำมะเขິงเข้มข้น

(ก) อุณหภูมิ 75 °C (ข) อุณหภูมิ 85 °C (ค) อุณหภูมิ 95 °C

## 2. ผลกระทบของอุณหภูมิต่อการเปลี่ยนสมบัติทางเคมี กายภาพ

2.1 ผลกระทบของอุณหภูมิต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติกายภาพในระหว่างการพาสเจอร์ไรส์แบบโอท้อมมิก และแบบดั้งเดิม

สมบัติทางกายภาพ

ค่าสีในระบบ CIE -  $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$  ของน้ำมะเกี๋ยงเข้มข้นที่อุณหภูมิ 25 ถึง 95 °C ในระหว่างการพาสเจอร์ไรส์แบบโอท้อมมิก และแบบดั้งเดิม แสดงในตารางที่ 9 เมื่อพิจารณาค่าความสว่างของสี ( $L^*$ -value) พบว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นค่าความสว่างลดลง ทั้งวิธีการพาสเจอร์ไรส์แบบโอท้อมมิก และแบบดั้งเดิม เนื่องจากความร้อนจะเป็นตัวกระตุ้นให้เกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาล โดยในน้ำมะเกี๋ยงเข้มข้นมีน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยว และน้ำตาลโมเลกุลคู่เป็นส่วนประกอบในปริมาณมาก ดังนั้นเมื่อน้ำมะเกี๋ยงเข้มข้นได้รับความร้อนส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลเกิดขึ้น ส่งผลให้ค่าความสว่างลดลงอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% โดยอุณหภูมิเป็นปัจจัยหลักที่สำคัญในการเปลี่ยนแปลงค่าความสว่าง และมีการจัดกลุ่มทางสถิติตามรายละเอียดในตารางที่ 9

จากผลการศึกษา Shao-qian *et al.* (2011) พบว่าค่าสีแดง ( $a^*$ -value) ลดลงที่สัมพันธ์กับปริมาณแอนโธไซยานินที่ลดลงซึ่งแสดงว่าน้ำส้ม (blood orange juice) มีสีคล้ำลง และ ยังพบว่า ที่ปริมาณแอนโธไซยานินที่ลดลง 50% เมื่อได้รับความร้อน 70 °C นอกจากนี้ Garcia-Viguera and Bridle (1999) ได้กล่าวว่า แอนโธไซยานินจะไม่คงที่ระหว่างกระบวนการแปรรูปและการเก็บรักษา ซึ่งจะลดลงทันทีและสร้างสีใส หรือ สีที่ไม่ต้องการ ที่เป็นสารประกอบสีน้ำตาล จากเหตุผลดังกล่าวจึงทำให้สอดคล้องกับการทดลองในครั้งนี้ที่พบว่าค่าความสว่าง ( $L^*$ -value) ซึ่งหมายถึงความสว่างของสีลดลง

ค่า  $L^*$ -value มีแนวโน้มลดลง ขณะที่ค่า  $a^*$ -value ลดลงแสดงให้เห็นว่า น้ำมะเกี๋ยงเข้มข้นที่ผ่านการพาสเจอร์ไรส์มีสีคล้ำขึ้น และมีแนวโน้มเป็นสีแดงเนื่องจากมีค่าความเป็นสีแดงลดลง สอดคล้องกับดัชนีการเกิดสีน้ำตาล เมื่ออุณหภูมิในการพาสเจอร์ไรส์เพิ่มขึ้น มีค่าสีแดงลดลงด้วย  $L^*$ -value,  $a^*$ -value และ  $b^*$ -value มีค่าลดลงตามลำดับเมื่อเทียบกับน้ำมะเกี๋ยงเข้มข้นที่ไม่ได้ผ่านความร้อนโดยมีค่าการลดลงของค่าสี คิดเป็น 0 - 9 %, 0 - 3% และ 0 - 2% และเมื่อเปรียบเทียบถึงวิธีการพาสเจอร์ไรส์ระหว่างการพาสเจอร์ไรส์แบบโอท้อมมิก และแบบดั้งเดิม จะเห็นได้ว่าการพาสเจอร์ไรส์ด้วยวิธีโอท้อมมิกมีการลดลงของค่าความสว่างน้อยกว่าการพาสเจอร์ไรส์แบบดั้งเดิม เนื่องจากมีช่วงระยะเวลาการพาสเจอร์ไรส์ที่สั้นกว่าการพาสเจอร์ไรส์แบบดั้งเดิมและเริ่มเปลี่ยนแปลงตั้งแต่การพาสเจอร์ไรส์ที่ 25 °C และ ไม่แตกต่างกันที่ 35 °C และ 75 °C ส่วนค่า  $a^*$ -value และ  $b^*$ -value ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ความเชื่อมั่น 95% ค่า  $a^*$ -value มีความแตกต่างกันทั้งหมดทุกอุณหภูมิ ทั้งการพาสเจอร์ไรส์ทั้งสองแบบ ส่วนการเปรียบเทียบการพาสเจอร์ไรส์เปรียบเทียบกันแต่ละอุณหภูมิพบว่าพาสเจอร์ไรส์แบบดั้งเดิมมีค่า  $a^*$ -value มีมากกว่าการพาสเจอร์ไรส์แบบโอท้อมมิก



อาจเนื่องมาจากค่า  $L^*$ -value ลดลงมากกว่ามีสีคล้ำมากกว่า จึงทำให้ค่า  $a^*$ -value มีค่าสูงกว่า Leizeron and Shimoni (2005) ผลของความร้อนและอุณหภูมิที่สูงขึ้นจะทำลาย Effects of Electrical Heating on Pectin Esterase Activity PE ในน้ำส้มทำให้มีความขุ่นและผลจากมีความขุ่นเพิ่มขึ้นทำให้มีสีแดงเพิ่มขึ้นด้วย ส่วนค่าความเป็นสีเหลือง การเปรียบเทียบวิธีพาสเจอไรส์ทั้งสองแบบมีความแตกต่างกันในวิธีการพาสเจอไรส์ในแต่ละวิธี และในการเปรียบเทียบการพาสเจอไรส์ที่แต่ละอุณหภูมิพบว่า มีความแตกต่างกันที่อุณหภูมิ 95 °C ในการพาสเจอไรส์แบบดั้งเดิมมีค่าสูงกว่าการพาสเจอไรส์ด้วยวิธีโอห์มมิก แต่ไม่มีความแตกต่างกันในอุณหภูมิ 25 ถึง 85 °C ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

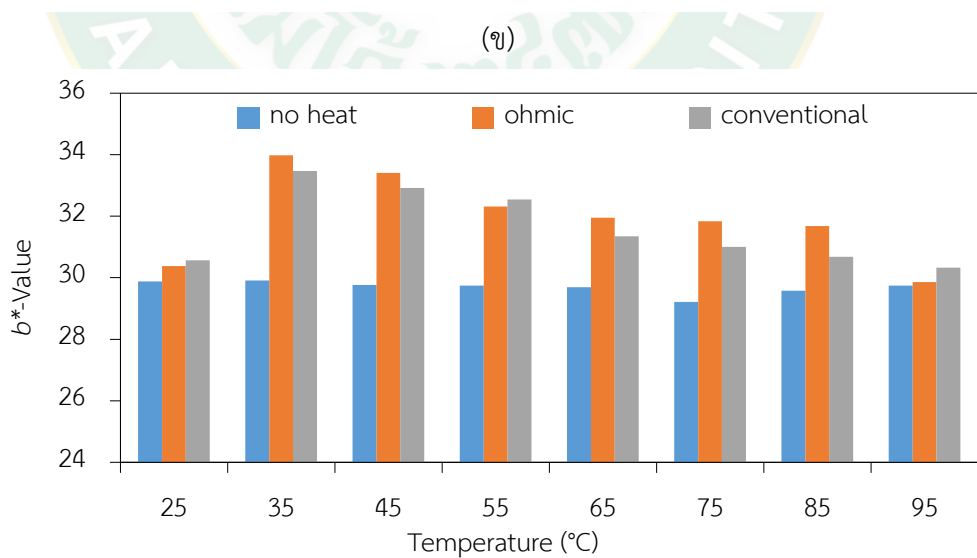
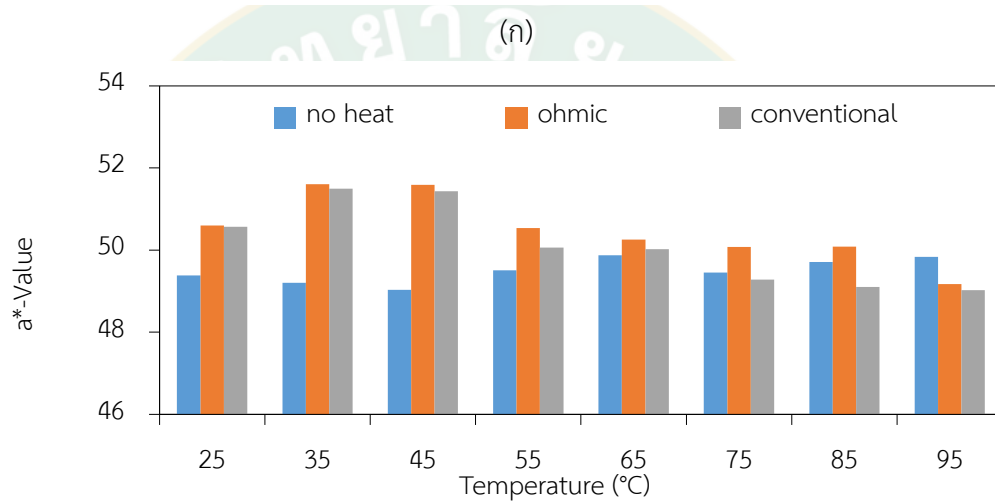
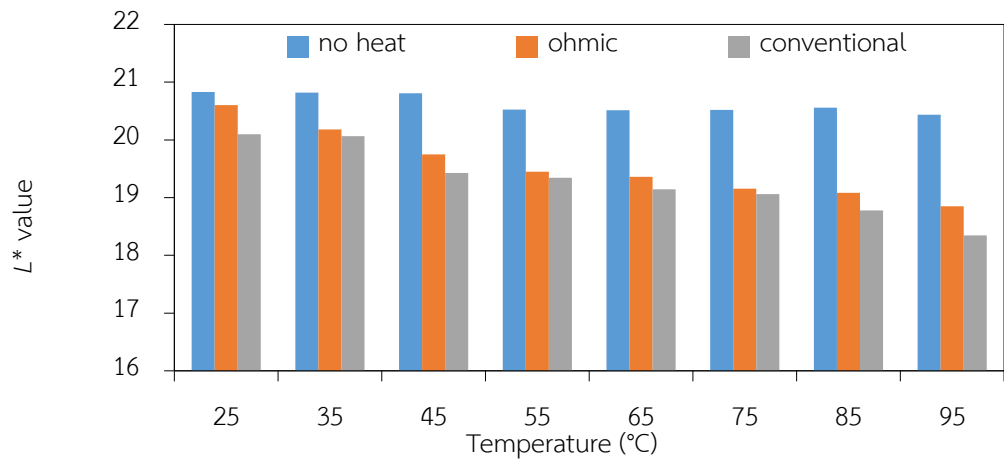
**ตารางที่ 9** ค่าสีปรากฏในระบบ CIE- $L^*, a^*, b^*$  ของน้ำมะเขือข้มชั้นที่อุณหภูมิ 25-95 °C ในระหว่างการพาสเจอไรส์แบบโอห์มมิก และแบบดั้งเดิม

อุณหภูมิ °C	CIE - $L^*a^*b^*$					
	Ohmic			Conventional		
	$L^*$	$a^*$	$b^*$	$L^*$	$a^*$	$b^*$
25	20.60±0.042 <sup>aA</sup>	50.57±0.247 <sup>bNS</sup>	30.38±0.046 <sup>cNS</sup>	20.10±0.044 <sup>a,B</sup>	50.59±0.524 <sup>cNS</sup>	30.57±0.524 <sup>cNS</sup>
35	20.18±0.045 <sup>bNS</sup>	51.49±0.090 <sup>aNS</sup>	33.97±0.399 <sup>aNS</sup>	20.06±0.157 <sup>aNS</sup>	51.59±0.240 <sup>aNS</sup>	33.47±0.385 <sup>aNS</sup>
45	19.75±0.021 <sup>cA</sup>	51.43±0.066 <sup>aNS</sup>	33.40±0.050 <sup>aNS</sup>	19.43±0.021 <sup>b,B</sup>	51.60±0.200 <sup>aNS</sup>	32.91±0.449 <sup>abNS</sup>
55	19.45±0.030 <sup>dA</sup>	50.06±0.080 <sup>cB</sup>	32.31±0.050 <sup>bNS</sup>	19.34±0.012 <sup>b,B</sup>	50.53±0.114 <sup>bA</sup>	32.54±0.273 <sup>bNS</sup>
65	19.36±0.044 <sup>dA</sup>	50.02±0.047 <sup>cB</sup>	31.94±0.093 <sup>bNS</sup>	19.14±0.055 <sup>cB</sup>	50.25±0.044 <sup>bA</sup>	31.34±1.011 <sup>cNS</sup>
75	19.15±0.161 <sup>eNS</sup>	49.28±0.389 <sup>d,B</sup>	31.83±1.363 <sup>bNS</sup>	19.06±0.038 <sup>cNS</sup>	50.07±0.206 <sup>bA</sup>	31.01±0.354 <sup>cdNS</sup>
85	19.08±0.025 <sup>eA</sup>	49.10±0.101 <sup>d,B</sup>	31.68±0.955 <sup>bNS</sup>	18.78±0.072 <sup>d,B</sup>	50.08±0.098 <sup>bA</sup>	30.68±0.295 <sup>cdNS</sup>
95	18.85±0.108 <sup>fA</sup>	49.02±0.633 <sup>dNS</sup>	29.86±0.080 <sup>cB</sup>	18.35±0.032 <sup>e,B</sup>	49.17±0.217 <sup>cNS</sup>	30.33±0.156 <sup>dA</sup>

หมายเหตุ <sup>a,b,c...</sup> ตัวอักษรกำกับที่แตกต่างกันในคอลัมน์เดียวกันแสดงความแตกต่างกันของข้อมูลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

<sup>A และ B</sup> ตัวอักษรกำกับที่แตกต่างกันในแถวเดียวกันของค่าเดียวกันแสดงความแตกต่างกันของข้อมูลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

<sup>ns</sup> ไม่มีความแตกต่างในคอลัมน์และแถวเดียวกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%



(ค)

ภาพที่ 17 กราฟแสดงค่าเปลี่ยนแปลงค่าสีปรากฏในระบบ CIE - L\*,a\*,b\* ที่อุณหภูมิเพิ่มขึ้น

(ก) L\*-value (ข) a\*-value (ค) b\*-value

**ตารางที่ 10** ค่าของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด (TSS : °Brix), ความเป็นกรด-ด่าง (pH) และปริมาณกรดทั้งหมด (TA : % citric acid) ของน้ำมะเกี๋ยงเข้มข้นที่อุณหภูมิ 25 ถึง 95 °C ในระหว่างการพาสเจอร์ไรส์แบบโอห์มมิก และแบบดั้งเดิม

อุณหภูมิ °C	TSS (° Brix)		pH		TA (% citric acid)	
	Ohmic	Conventional	Ohmic	Conventional	Ohmic	Conventional
25	2.4±0.20 <sup>ns,NS</sup>	2.4±0.12 <sup>ns,NS</sup>	2.927±0.012 <sup>b,NS</sup>	2.923±0.006 <sup>ns,NS</sup>	0.945±0.001 <sup>ns,NS</sup>	0.945±0.001 <sup>ns,NS</sup>
35	2.4±0.12	2.4±0.12	2.943±0.006 <sup>a,NS</sup>	2.923±0.010	0.945±0.003	0.945±0.001
45	2.6±0.12	2.4±0.20	2.933±0.006 <sup>ab,NS</sup>	2.920±0.006	0.945±0.003	0.922±0.039
55	2.6±0.12	2.6±0.12	2.923±0.006 <sup>bc,NS</sup>	2.910±0.006	0.945±0.001	0.945±0.001
65	2.8±0.12	2.8±0.12	2.923±0.006 <sup>bc,NS</sup>	2.917±0.006	0.945±0.001	0.967±0.039
75	3.0±0.20	3.0±0.12	2.923±0.006 <sup>bc,NS</sup>	2.917±0.006	0.942±0.003	0.922±0.039
85	3.0±0.35	3.0±0.12	2.917±0.006 <sup>c,NS</sup>	2.917±0.006	0.967±0.003	0.990±0.039
95	3.0±0.12	3.0±0.12	2.917±0.012 <sup>c,NS</sup>	2.917±0.006	0.967±0.003	0.967±0.039

หมายเหตุ a,b,c...ตัวอักษรกำกับที่แตกต่างกันในคอลัมน์เดียวกันแสดงความแตกต่างกันของข้อมูลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

A และ B ตัวอักษรกำกับที่แตกต่างกันในแถวเดียวกันของค่าเดียวกันแสดงความแตกต่างกันของข้อมูลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

<sup>ns</sup> ไม่มีความแตกต่างในคอลัมน์และแถวเดียวกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

จากตารางที่ 10 จะเห็นได้ว่าค่าปริมาณของแข็งที่ละลายได้เฉลี่ย 2.4 – 3.0 °Brix ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ความเชื่อมั่น 95% ที่วิธีการพาสเจอร์ไรส์ และ อุณหภูมิในการพาสเจอร์ไรส์ 25 ถึง 95 °C ที่แตกต่างกัน

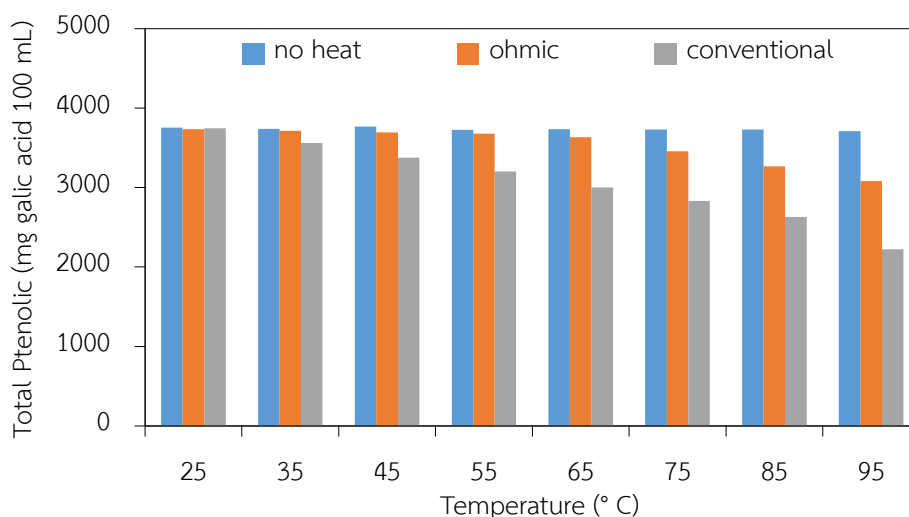
ค่าความเป็นกรด - ด่าง มีการเปลี่ยนแปลงในระหว่างการพาสเจอร์ไรส์ด้วยวิธีโอห์มมิกเฉลี่ยอยู่ในช่วง 2.91-2.94 ส่วนการพาสเจอร์ไรส์ด้วยวิธีดั้งเดิมไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ความเชื่อมั่น 95% ส่วนการเปรียบเทียบผลของวิธีการพาสเจอร์ไรส์ทั้งสองแบบในแต่ละอุณหภูมิไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ สอดคล้องกับงานวิจัยของ Darvishi *et al.* (2012) การเปลี่ยนแปลงความเป็นกรด-ด่างของน้ำทับทิมเพียงเล็กน้อยอาจเป็นผลมาจากการใช้แรงดันไฟฟ้ามีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นกรด-ด่างทำให้เกิดปฏิกิริยาขึ้นหลายปฏิกิริยาเช่น การกักตรอนจากขั้วไฟฟ้าและละลายอิเล็กโทรไลต์อาจเกิดขึ้นเมื่อใช้ไฟฟ้าสูง ที่อาจเกิดขึ้นในระหว่างการพาสเจอร์ไรส์ด้วยวิธีโอห์มมิก การเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นกรด - ด่าง อยู่ระหว่าง 2.86 – 2.93 การเปลี่ยนแปลงนี้

เกิดขึ้นเนื่องจากการสูญเสียประสิทธิภาพของการเป็นบัฟเฟอร์น้อยกว่าการพาสเจอร์ไรส์แบบดั้งเดิมคือ ใช้ระยะเวลาในการพาสเจอร์ไรส์นานกว่าแบบโอห์มมิก และจากการสืบค้นพบว่า การเพิ่มขึ้นของค่าความเป็นกรด-ด่าง อาจมาจากสาเหตุที่ว่า กรด คือ สารประกอบที่มีไฮโดรเจนประกอบอยู่ เมื่อละลายน้ำจะแตกตัวให้ ไฮโดรเจนไอออน ( $H^+$ ) แต่ ไฮโดรเจนไอออนไม่ได้อยู่เป็นไอออนเดี่ยว แต่จะรวมตัวกับ น้ำ ( $H_2O$ ) ได้เป็น ไฮโดรเนียมไอออน ( $H_3O^+$ ) (อนเนก, 2552)

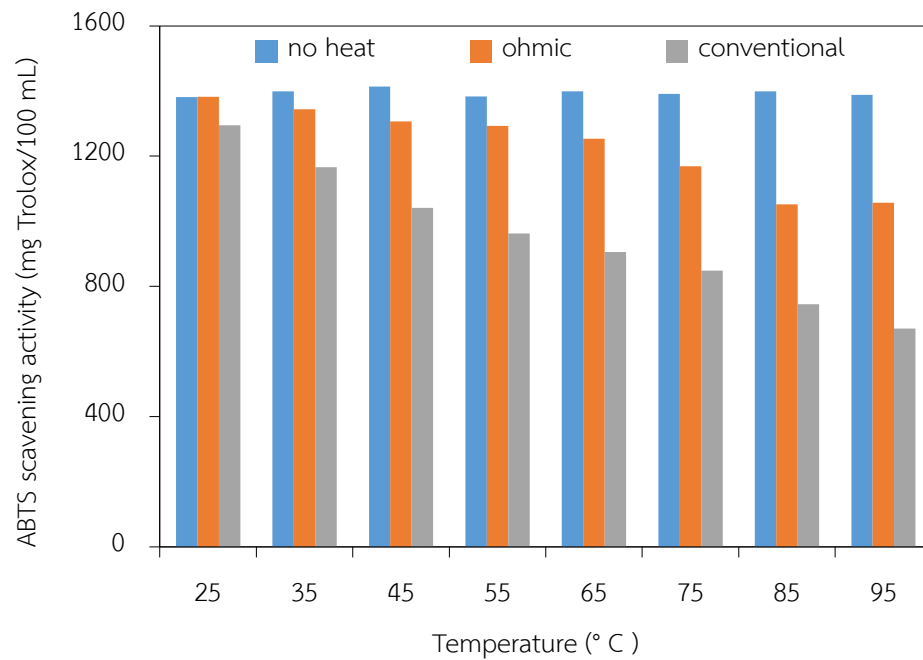
ปริมาณกรดทั้งหมดเทียบกับกรดซิตริกมีค่าเฉลี่ยอยู่ในช่วง 0.94 – 0.96 โดยที่วิธีการพาสเจอร์ไรส์เซชันด้วยวิธีโอห์มมิกและการพาสเจอร์ไรส์เซชันด้วยวิธีดั้งเดิม และการเปรียบเทียบผลของอุณหภูมิในแต่ละอุณหภูมิไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ความเชื่อมั่น 95%

2.2 ผลกระทบของอุณหภูมิต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณสารแอนโทไซยานิน สารประกอบฟีนอลิก และกิจกรรมการต้านอนุมูลอิสระ ในระหว่างการพาสเจอร์ไรส์แบบโอห์มมิกและแบบดั้งเดิม

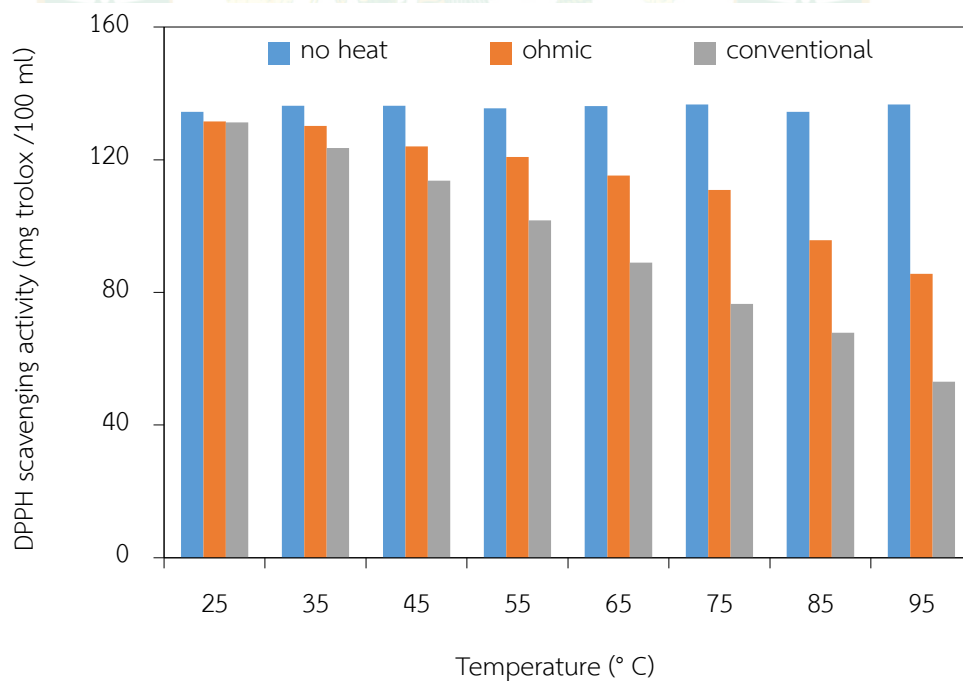
จากผลการศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติกายภาพในระหว่างการพาสเจอร์ไรส์แบบโอห์มมิก และแบบดั้งเดิม พบว่าค่าสีปรากฏในระบบ CIE -  $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$  มีค่าเปลี่ยนแปลงต่ออุณหภูมิ แต่ค่า TSS ( $^{\circ}$  brix) pH และ TA ไม่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ดังนั้นในการศึกษาในหัวข้อนี้จึงศึกษาผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ และวิธีการให้ความร้อนต่อการเปลี่ยนแปลงของปริมาณสารประกอบฟีนอลิก กิจกรรมต้านอนุมูลอิสระ และปริมาณแอนโทไซยานินตามที่แสดงรายละเอียดในภาพที่ 18-21 ตามลำดับ



ภาพที่ 18 ปริมาณสารประกอบฟีนอลิก (Total phenolic) ของน้ำมะเกี๋ยงเข้มข้น ในระหว่างการพาสเจอร์ไรส์แบบโอห์มมิกและแบบดั้งเดิม ที่อุณหภูมิ 25 ถึง 95  $^{\circ}$  C

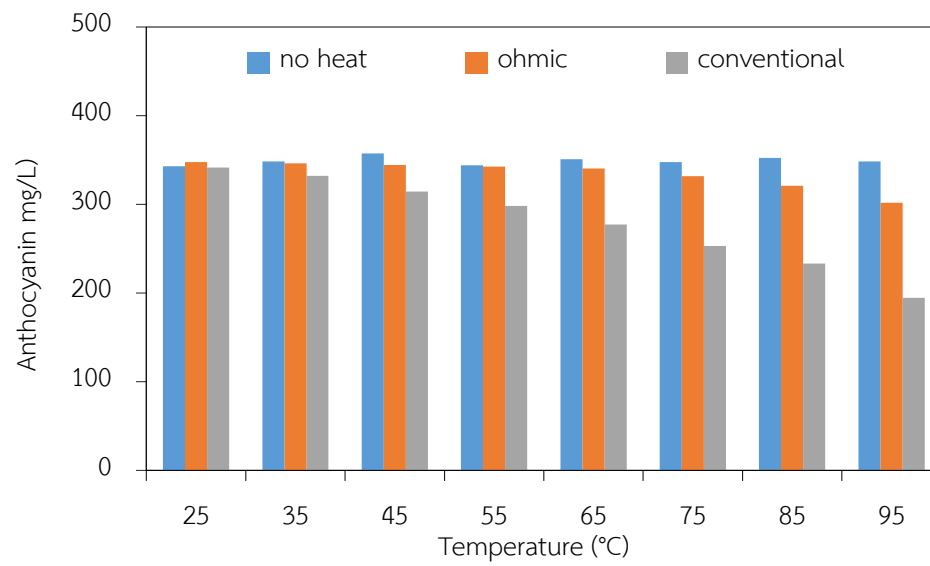


ภาพที่ 19 กิจกรรมการต้านอนุมูลอิสระ antioxidant (ABTS) ของน้ำมะเกี๋ยงเข้มข้น  
ในระหว่างการพาสเจอร์ไรส์แบบโอห์มมิก และ  
แบบดั้งเดิมที่อุณหภูมิ 25 ถึง 95 °C



ภาพที่ 20 กิจกรรมการต้านอนุมูลอิสระ antioxidant (DPPH) ของน้ำมะเกี๋ยงเข้มข้น  
ในระหว่างการพาสเจอร์ไรส์แบบโอห์มมิกและ  
แบบดั้งเดิมที่อุณหภูมิ 25 ถึง 95 °C





ภาพที่ 21 ปริมาณ anthocyanin ของน้ำมะเขีงเข้มชั้น  
ในระหว่างการพาสเจอร์ไรส์แบบโอห์มมิกและ  
แบบดั้งเดิมที่อุณหภูมิ 25 ถึง 95 °C



**ตารางที่ 11** ผลกระทบของอุณหภูมิต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณสารแอนโทไซยานิน สารฟีนอลิก และกิจกรรมการต้านอนุมูลอิสระ ในระหว่างการทำให้ความร้อนแบบไอเท็มิกและแบบดั้งเดิม

อุณหภูมิ	Total Phenolic (mg/100 ml)		Antioxidant (ABTS) mg/100 ml		Antioxidant (DPPH) mg/100 ml		Anthocyanin mg/L	
	Ohmic	Conventional	Ohmic	Conventional	Ohmic	Conventional	Ohmic	Conventional
25	3733.4±13.90 <sup>ns</sup>	3747.042±1.23 <sup>ns</sup>	1381.969±12.40 <sup>ns</sup>	1295.014±43.85 <sup>ns</sup>	131.513±0.58 <sup>ns</sup>	131.197±0.42 <sup>ns</sup>	347.88±7.15 <sup>ns</sup>	314.470±3.58 <sup>ns</sup>
35	3714.639±13.83 <sup>ab,A</sup>	3559.690±1.17 <sup>b,B</sup>	1343.930±6.28 <sup>ab,A</sup>	1165.841±13.69 <sup>b,B</sup>	130.166±0.91 <sup>a,A</sup>	123.585±1.11 <sup>b,B</sup>	346.133±7.11 <sup>a,A</sup>	332.147±6.82 <sup>a,B</sup>
45	3695.878±13.76 <sup>b,A</sup>	3377.209±1.11 <sup>c,B</sup>	1306.666±31.24 <sup>b,A</sup>	1041.467±7.70 <sup>c,B</sup>	124.026±0.70 <sup>b,A</sup>	113.741±0.87 <sup>c,B</sup>	344.385±7.08 <sup>ab,A</sup>	314.666±6.47 <sup>b,B</sup>
55	3677.118±13.69 <sup>bc,A</sup>	3203.721±1.05 <sup>d,B</sup>	1292.31218.73 <sup>bc,A</sup>	959.988±6.16 <sup>d,B</sup>	120.821±1.20 <sup>c,A</sup>	101.708±1.00 <sup>d,B</sup>	342.636±7.04 <sup>ab,A</sup>	298.233±6.13 <sup>c,B</sup>
65	3632.092±13.52 <sup>c,A</sup>	3001.381±0.98 <sup>e,B</sup>	1253.492±15.71 <sup>c,A</sup>	905.405±3.28 <sup>e,B</sup>	115.262±0.69 <sup>d,A</sup>	88.969±0.93 <sup>e,B</sup>	340.539±8.16 <sup>ab,A</sup>	277.326±5.70 <sup>d,B</sup>
75	3456.866±12.87 <sup>d,A</sup>	2831.26±0.93 <sup>f,B</sup>	1169.337±53.80 <sup>d,NS</sup>	848.145±6.08 <sup>f,NS</sup>	110.925±1.62 <sup>e,A</sup>	76.506±0.81 <sup>f,B</sup>	311.798±6.82 <sup>b,A</sup>	253.023±5.35 <sup>e,B</sup>
85	3268.507±12.17 <sup>e,A</sup>	2631.922±0.86 <sup>g,B</sup>	1056.610±3.69 <sup>e,A</sup>	745.145±2.54 <sup>g,B</sup>	95.7703±1.16 <sup>f,A</sup>	67.879±1.36 <sup>g,B</sup>	320.959±6.60 <sup>bc,A</sup>	233.393±4.94 <sup>f,B</sup>
95	3080.899±11.47 <sup>f,A</sup>	2221.996±0.73 <sup>h,B</sup>	1052.101±37.67 <sup>e,A</sup>	670.002±10.69 <sup>h,B</sup>	85.643±1.17 <sup>g,A</sup>	53.086±0.28 <sup>h,B</sup>	301.73±6.20 <sup>c,A</sup>	194.607±4.12 <sup>g,B</sup>

หมายเหตุ <sup>a,b,c...</sup>ตัวอักษรกำกับที่แตกต่างกันในคอลัมน์เดียวกันแสดงความแตกต่างกันของข้อมูลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

<sup>A และ B</sup> ตัวอักษรกำกับที่แตกต่างกันแถวเดียวกันแสดงความแตกต่างกันของข้อมูลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น

95%

<sup>ns</sup> ไม่มีความแตกต่างในคอลัมน์และแถวเดียวกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

จากตารางที่ 11 การลดลงของปริมาณสารประกอบฟีนอลิก Total Phenolic เมื่อใช้วิธีการพาสเจอร์ไรส์ที่ต่างกันมีการลดลงอยู่ในช่วง 0 - 17.48 % ในวิธีการพาสเจอร์ไรส์ด้วยวิธีโอห์มมิก และลดลงอยู่ในช่วง 0 - 40.70 % ในวิธีการพาสเจอร์ไรส์ด้วยวิธีดั้งเดิม และด้วยวิธีการพาสเจอร์ไรส์ทั้งสองแบบนำมาเปรียบเทียบในแต่ละอุณหภูมิพบว่า การพาสเจอร์ไรส์ด้วยวิธีโอห์มมิกในทุกอุณหภูมิมีการลดลงของปริมาณสารประกอบฟีนอลิก Total Phenolic แต่มีการลดลงในปริมาณที่น้อยกว่าการพาสเจอร์ไรส์ด้วยวิธีดั้งเดิมในทุกๆ อุณหภูมิ

การลดลงของกิจกรรมการต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธี ABTS เมื่อใช้วิธีการพาสเจอร์ไรส์ที่ต่างกันมีการลดลงอยู่ในช่วง 0 - 24.59 % ในวิธีการพาสเจอร์ไรส์ด้วยวิธีโอห์มมิก และลดลงอยู่ในช่วง 0 - 48.26 % ในวิธีการพาสเจอร์ไรส์ด้วยวิธีดั้งเดิม และด้วยวิธีการพาสเจอร์ไรส์ทั้งสองแบบนำมาเปรียบเทียบในแต่ละอุณหภูมิพบว่า การพาสเจอร์ไรส์ด้วยวิธีโอห์มมิกในทุกอุณหภูมิมีการลดลงของกิจกรรมการต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธี ABTS มีการลดลงในปริมาณที่น้อยกว่าการพาสเจอร์ไรส์ด้วยวิธีดั้งเดิมในทุกๆ อุณหภูมิ งานวิจัยของ Mercali *et al.* (2014) พบว่า การลดลงของปริมาณแอนโทไซยานินมีการลดลงไม่ต่างกันระหว่างวิธีของการพาสเจอร์ไรส์ ซึ่งขัดแย้งกับงานวิจัยนี้ที่พบว่า การให้ความร้อนแบบดั้งเดิมมีการลดลงของปริมาณแอนโทไซยานินมากกว่าการให้ความร้อนแบบโอห์มมิก แต่พบว่าการใช้สมการจลนพลศาสตร์การเปลี่ยนแปลงปริมาณแอนโทไซยานินในการใช้ความร้อนด้วยวิธีโอห์มมิกมีสมการลำดับ 1 เหมาะสม เนื่องจากมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ ที่สอดคล้องกันคือ มากกว่า 95%

การลดลงของกิจกรรมการต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธี DPPH เมื่อใช้วิธีการพาสเจอร์ไรส์เซชันที่ต่างกันมีการลดลงอยู่ในช่วง 0 - 34.87 % ในวิธีการพาสเจอร์ไรส์ด้วยวิธีโอห์มมิก และลดลงอยู่ในช่วง 0 - 59.56 % ในวิธีการพาสเจอร์ไรส์ด้วยวิธีดั้งเดิม และด้วยวิธีการพาสเจอร์ไรส์ทั้งสองแบบนำมาเปรียบเทียบในแต่ละอุณหภูมิพบว่า การพาสเจอร์ไรส์ด้วยวิธีโอห์มมิกในทุกอุณหภูมิมีการลดลงของกิจกรรมการต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธี DPPH มีการลดลงในปริมาณที่น้อยกว่าการพาสเจอร์ไรส์ด้วยวิธีดั้งเดิมในทุกๆ อุณหภูมิ

การลดลงของปริมาณแอนโทไซยานินรวม เมื่อใช้วิธีการพาสเจอร์ไรส์ที่ต่างกันมีการลดลงอยู่ในช่วง 0 - 13.26 % ในวิธีการพาสเจอร์ไรส์ด้วยวิธีโอห์มมิก และลดลงอยู่ในช่วง 0 - 43.00 % ในวิธีการพาสเจอร์ไรส์ด้วยวิธีดั้งเดิม และนำวิธีการพาสเจอร์ไรส์ทั้งสองแบบนำมาเปรียบเทียบในแต่ละอุณหภูมิพบว่า การพาสเจอร์ไรส์ด้วยวิธีโอห์มมิกในทุกอุณหภูมิมีการลดลงของปริมาณแอนโทไซยานินรวม Anthocyanin มีการลดลงในปริมาณที่น้อยกว่าการพาสเจอร์ไรส์ด้วยวิธีดั้งเดิมในทุกๆ อุณหภูมิ สอดคล้องกับงานวิจัยของ CAO (Shao-qian *et al.*, 2011) การเพิ่มอุณหภูมิและเวลา ความร้อนที่เพิ่มขึ้นทำให้ปริมาณแอนโทไซยานินจะลดลง 50% ที่อุณหภูมิ 70°C จะเห็นได้ว่าอุณหภูมิและความร้อนที่เกิดขึ้นมีผลกับการสลายตัวของปริมาณแอนโทไซยานินในน้ำส้ม (Blood Orange Juice) และ

(Mercali *et al.*, 2014) จลนพลศาสตร์การให้ความร้อน มีผลต่อการเสื่อมสลายของปริมาณแอนโทไซยานินในระหว่างการให้ความร้อนด้วยวิธีโอห์มมิกมีการเสื่อมสลายน้อยกว่าการให้ความร้อนด้วยวิธีดั้งเดิม

### ผลของเวลาในการเก็บรักษาน้ำมะเกี๋ยงเข้มข้นด้วยความเย็น

การดำเนินวิจัยเพื่อศึกษาผลของเวลาในการเก็บรักษาน้ำมะเกี๋ยงเข้มข้นด้วยวิธีการให้ความร้อนแบบโอห์มมิกและแบบดั้งเดิม และนำมาเก็บด้วยความเย็นที่อุณหภูมิ 5 และ 15 °C ต่อการเปลี่ยนแปลงทางด้านกายภาพ อาทิ ค่าสีปรากฏในระบบ CIE  $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$ , TSS (° brix), pH และ TA การเปลี่ยนแปลงด้านเคมี คือปริมาณสารประกอบฟีนอลิก สารต้านอนุมูลอิสระ และสารแอนโทไซยานิน โดยเก็บตัวอย่างมาวิเคราะห์ทุกทุก 5 วัน

**ตารางที่ 12** ค่าปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายได้ Total Soluble Solid (TSS) °Brix ในตัวอย่างน้ำมะเกี๋ยงเข้มข้นที่เก็บรักษาด้วยความเย็น 5 และ 15 °C

Day	Total Soluble Solid (TSS) °Brix			
	Temperature 5 °C		Temperature 15 °C	
	Ohmic	Conventional	Ohmic	Conventional
0	2.933±0.115 <sup>ns,NS</sup>	2.933±0.115 <sup>ns,NS</sup>	2.867±0.115 <sup>ns,NS</sup>	2.933±0.115 <sup>ns,NS</sup>
5	2.933±0.115	2.867±0.115	2.933±0.115	2.867±0.115
10	2.867±0.115	2.933±0.115	2.867±0.115	2.933±0.115
15	2.933±0.115	2.933±0.115	2.867±0.115	2.867±0.115
20	2.933±0.115	2.867±0.115	2.867±0.115	2.933±0.115
25	2.933±0.115	2.933±0.115	2.933±0.115	2.933±0.115
30	2.867±0.115	2.933±0.115	2.933±0.115	2.933±0.115
35	2.933±0.115	2.933±0.115	2.933±0.115	2.867±0.115

หมายเหตุ <sup>ns</sup> ไม่มีความแตกต่างในคอลัมน์และแถวเดียวกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

จากตารางที่ 12 เปรียบเทียบปริมาณค่าของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด ที่การพาสเจอไรส์ด้วยวิธีโอห์มมิกเปรียบเทียบกับพาสเจอไรส์ด้วยวิธีดั้งเดิม ที่การเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 5 และ 15 °C ทำการเก็บตัวอย่างเพื่อทำการศึกษามันทุก 5 วัน พบว่าไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ความเชื่อมั่น 95% ทั้งวิธีการพาสเจอไรส์ อุณหภูมิ และระยะเวลาในการเก็บรักษา ทั้ง 35 วัน

**ตารางที่ 13** ค่าความเป็นกรด - ด่าง (pH) ในตัวอย่างน้ำมะกึ่งเข้มข้นที่เก็บรักษาด้วยความเย็น 5 และ 15 °C

Day	ความเป็นกรด - ด่าง (pH)			
	Temperature 5 °C		Temperature 15 °C	
	Ohmic	Conventional	Ohmic	Conventional
0	2.883±0.015 <sup>cd,NS</sup>	2.887±0.015 <sup>bc,NS</sup>	2.863±0.006 <sup>d,NS</sup>	2.890±0.017 <sup>c,NS</sup>
5	2.870±0.010 <sup>d,NS</sup>	2.867±0.023 <sup>c,NS</sup>	2.873±0.012 <sup>d,NS</sup>	2.857±0.006 <sup>d,NS</sup>
10	2.893±0.012 <sup>cd,NS</sup>	2.907±0.012 <sup>b,NS</sup>	2.933±0.012 <sup>b,NS</sup>	2.893±0.012 <sup>c,NS</sup>
15	2.883±0.12 <sup>cd,NS</sup>	2.897±0.006 <sup>b,NS</sup>	2.903±0.006 <sup>c,B</sup>	2.927±0.012 <sup>b,A</sup>
20	2.900±0.020 <sup>bc,NS</sup>	2.893±0.012 <sup>b,NS</sup>	2.907±0.021 <sup>c,NS</sup>	2.893±0.012 <sup>c,NS</sup>
25	2.917±0.006 <sup>b,A</sup>	2.900±0.010 <sup>b,B</sup>	2.973±0.021 <sup>a,A</sup>	2.897±0.006 <sup>c,B</sup>
30	2.987±0.006 <sup>a,NS</sup>	2.983±0.006 <sup>a,NS</sup>	2.983±0.006 <sup>a,NS</sup>	2.980±0.001 <sup>a,NS</sup>
35	2.987±0.006 <sup>a,NS</sup>	2.983±0.006 <sup>a,NS</sup>	2.983±0.006 <sup>a,NS</sup>	2.980±0.001 <sup>a,NS</sup>

หมายเหตุ <sup>a,b,c...</sup> ตัวอักษรกำกับที่แตกต่างกันในคอลัมน์เดียวกันแสดงถึงความแตกต่างกันของข้อมูลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

<sup>A และ B</sup> ตัวอักษรกำกับที่แตกต่างกันในแถวเดียวกันของค่าเดียวกันแสดงถึงความแตกต่างกันของข้อมูลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

<sup>ns</sup> ไม่มีความแตกต่างในคอลัมน์และแถวเดียวกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

จากตารางที่ 13 เปรียบเทียบปริมาณค่าความเป็นกรด - ด่าง ที่การพาสเจอไรส์ด้วยวิธีโอห์มมิกเปรียบเทียบกับพาสเจอไรส์ด้วยวิธีดั้งเดิม ที่การเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 5 และ 15 °C ทำการเก็บตัวอย่างเพื่อทำการศึกษามันทุก 5 วัน พบว่ามีปริมาณเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ทั้งในการพาสเจอไรส์เซชันด้วยวิธีโอห์มมิกและการพาสเจอไรส์เซชันด้วยวิธีดั้งเดิม แต่ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ



ที่ความเชื่อมั่น 95% ทั้งอุณหภูมิ และระยะเวลาในการเก็บรักษา ยกเว้นวันที่ 25 ของการเก็บรักษา การพาสเจอร์ไรส์เซชันด้วยวิธีโอห์มมิคลดน้อยกว่าวิธีการพาสเจอร์ไรส์เซชันด้วยวิธีดั้งเดิม (Darvishi *et al.*, 2013) การให้ความร้อนด้วยวิธีโอห์มมิคมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นกรด-ด่างเล็กน้อย ขึ้นอยู่กับกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการพาสเจอร์ไรส์ด้วยวิธีโอห์มมิค

**ตารางที่ 14** ค่าปริมาณกรดทั้งหมด เทียบกับกรดซิตริก Total Acid (TA : % citric acid) ในตัวอย่างน้ำมะเขິงเข้มข้นที่เก็บรักษาด้วยความเย็น 5 และ 15 °C

Day	Total Acid (TA : % citric acid)			
	Temperature 5 °C		Temperature 15 °C	
	Ohmic	Conventional	Ohmic	Conventional
0	0.990±0.039 <sup>ns,NS</sup>	0.990±0.039 <sup>ns,NS</sup>	0.990±0.039 <sup>ns,NS</sup>	0.990±0.039 <sup>ns,NS</sup>
5	0.967±0.039	0.990±0.039	0.990±0.039	0.945±0.001
10	0.990±0.039	0.990±0.039	0.967±0.039	0.990±0.039
15	0.945±0.001	0.967±0.039	0.990±0.039	0.945±0.001
20	0.967±0.039	0.990±0.039	0.990±0.039	0.990±0.039
25	0.967±0.039	0.990±0.039	0.967±0.039	0.990±0.039
30	0.967±0.039	0.967±0.039	0.967±0.039	0.945±0.001
35	0.945±0.001	0.967±0.039	0.945±0.001	0.945±0.001

หมายเหตุ <sup>a,b,c...</sup>ตัวอักษรกำกับที่แตกต่างกันในคอลัมน์เดียวกันแสดงถึงความแตกต่างกันของข้อมูลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

<sup>A และ B</sup> ตัวอักษรกำกับที่แตกต่างกันในแถวเดียวกันของค่าเดียวกันแสดงถึงความแตกต่างกันของข้อมูลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

<sup>ns</sup> ไม่มีความแตกต่างในคอลัมน์และแถวเดียวกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

จากตารางที่ 14 เปรียบเทียบค่าปริมาณกรดทั้งหมด Total Solid (TA) % Citric Acid พบว่าที่การพาสเจอไรส์เซชันด้วยวิธีโอห์มิกเปรียบเทียบกับที่การพาสเจอไรส์ด้วยวิธีดั้งเดิม ที่การเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 5 และ 15 °C ทำการเก็บตัวอย่างเพื่อทำการศึกษารวมทุก 5 วัน พบว่าไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ความเชื่อมั่น 95% ทั้งวิธีการพาสเจอไรส์ อุณหภูมิ และระยะเวลาในการเก็บรักษา ทั้ง 35 วัน

**ตารางที่ 15** ค่าสีปรากฏในระบบ CIE-  $L^*$  ในตัวอย่างน้ำมะเข็ญเข้มข้นที่เก็บรักษาด้วยความเย็น 5 และ 15 °C

Day	$L^*$ -Value			
	Temperature 5 °C		Temperature 15 °C	
	Ohmic	Conventional	Ohmic	Conventional
0	18.937±0.029 <sup>a,NS</sup>	18.870±0.050 <sup>a,NS</sup>	18.083±0.055 <sup>a,B</sup>	18.647±0.025 <sup>a,A</sup>
5	18.020±0.060 <sup>b,A</sup>	18.127±0.021 <sup>b,B</sup>	18.017±0.035 <sup>a,B</sup>	18.457±0.061 <sup>ab,A</sup>
10	17.913±0.025 <sup>c,NS</sup>	17.910±0.061 <sup>bc,NS</sup>	17.947±0.065 <sup>a,B</sup>	18.273±0.146 <sup>bc,A</sup>
15	17.780±0.036 <sup>d,NS</sup>	17.777±0.110 <sup>c,NS</sup>	17.860±0.020 <sup>ab,B</sup>	18.067±0.064 <sup>cd,A</sup>
20	17.623±0.015 <sup>e,A</sup>	17.317±0.049 <sup>d,B</sup>	17.660±0.017 <sup>bc,B</sup>	17.917±0.064 <sup>d,A</sup>
25	17.160±0.050 <sup>f,NS</sup>	17.020±0.382 <sup>de,NS</sup>	17.423±0.272 <sup>cd,NS</sup>	17.587±0.143 <sup>e,NS</sup>
30	17.077±0.059 <sup>f,NS</sup>	16.950±0.312 <sup>e,NS</sup>	17.200±0.303 <sup>d,NS</sup>	17.073±0.430 <sup>f,NS</sup>
35	16.976±0.107 <sup>g,NS</sup>	16.913±0.049 <sup>e,NS</sup>	16.743±0.006 <sup>e,NS</sup>	16.873±0.095 <sup>f,NS</sup>

หมายเหตุ <sup>a,b,c...</sup> ตัวอักษรกำกับที่แตกต่างกันในคอลัมน์เดียวกันแสดงถึงความแตกต่างกันของข้อมูลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

<sup>A และ B</sup> ตัวอักษรกำกับที่แตกต่างกันในแถวเดียวกันของค่าเดียวกันแสดงถึงความแตกต่างกันของข้อมูลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

<sup>ns</sup> ไม่มีความแตกต่างในคอลัมน์และแถวเดียวกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

ตารางที่ 16 ค่าสีปรากฏในระบบ CIE -  $a^*$  ในตัวอย่างน้ำมันมะกึ่งยั้งเข้มข้นที่เก็บรักษาด้วยความเย็น 5 และ 15 °C

Day	$a^*$ -Value			
	Temperature 5 °C		Temperature 15 °C	
	Ohmic	Conventional	Ohmic	Conventional
0	49.727±0.159 <sup>a,NS</sup>	49.850±0.172 <sup>a,NS</sup>	44.803±0.015 <sup>a,NS</sup>	43.413±0.577 <sup>a,NS</sup>
5	49.610±0.172 <sup>a,A</sup>	46.943±0.062 <sup>b,B</sup>	44.053±0.015 <sup>b,A</sup>	43.277±0.061 <sup>a,B</sup>
10	48.720±0.327 <sup>b,A</sup>	46.587±0.010 <sup>c,B</sup>	43.600±0.017 <sup>c,A</sup>	43.027±0.047 <sup>a,B</sup>
15	47.817±0.200 <sup>c,A</sup>	46.313±0.154 <sup>c,B</sup>	43.243±0.085 <sup>d,A</sup>	42.437±0.040 <sup>b,B</sup>
20	47.267±0.020 <sup>d,A</sup>	45.930±0.068 <sup>d,B</sup>	43.147±0.047 <sup>d,A</sup>	42.047±0.188 <sup>bc,B</sup>
25	47.040±0.260 <sup>e,A</sup>	45.343±0.059 <sup>e,B</sup>	43.000±0.114 <sup>d,A</sup>	41.910±0.130 <sup>c,B</sup>
30	46.773±0.076 <sup>f,A</sup>	45.037±0.060 <sup>ef,B</sup>	43.133±0.116 <sup>e,A</sup>	41.150±0.095 <sup>d,B</sup>
35	46.513±0.047 <sup>g,A</sup>	44.893±0.021 <sup>f,B</sup>	42.877±0.023 <sup>f,A</sup>	40.853±0.227 <sup>d,B</sup>

หมายเหตุ a,b,c...ตัวอักษรกำกับที่แตกต่างกันในคอลัมน์เดียวกันแสดงความแตกต่างกันของข้อมูลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%  
 A และ B ตัวอักษรกำกับที่แตกต่างกันในแถวเดียวกันของค่าเดียวกันแสดงความแตกต่างกันของข้อมูลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%  
 ns ไม่มีความแตกต่างในคอลัมน์และแถวเดียวกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

ตารางที่ 17 ค่าสีปรากฏในระบบ CIE -  $b^*$  ในตัวอย่างน้ำมันมะกึ่งเข้มข้นที่เก็บรักษาด้วยความเย็น 5 และ 15 °C

Day	$b^*$ -Value			
	Temperature 5 °C		Temperature 15 °C	
	Ohmic	Conventional	Ohmic	Conventional
0	31.700±0.393 <sup>a,NS</sup>	31.443±0.178 <sup>a,NS</sup>	29.567±0.528 <sup>a,NS</sup>	28.627±0.325 <sup>a,NS</sup>
5	31.103±0.394 <sup>b,A</sup>	30.427±0.076 <sup>b,B</sup>	29.300±0.015 <sup>a,A</sup>	28.037±0.390 <sup>b,B</sup>
10	30.667±0.114 <sup>c,A</sup>	30.043±0.006 <sup>bc,B</sup>	29.167±0.015 <sup>a,A</sup>	27.943±0.015 <sup>b,B</sup>
15	30.513±0.093 <sup>c,A</sup>	29.583±0.168 <sup>cd,B</sup>	28.683±0.045 <sup>b,A</sup>	27.267±0.025 <sup>c,B</sup>
20	29.710±0.092 <sup>d,A</sup>	29.310±0.104 <sup>de,B</sup>	28.480±0.049 <sup>bc,A</sup>	26.957±0.373 <sup>cd,B</sup>
25	29.430±0.494 <sup>e,NS</sup>	29.320±0.090 <sup>de,NS</sup>	28.267±0.113 <sup>bcd,A</sup>	26.810±0.265 <sup>cd,B</sup>
30	29.227±0.065 <sup>ef,A</sup>	28.877±0.146 <sup>ef,B</sup>	28.070±0.514 <sup>cd,A</sup>	26.603±0.061 <sup>d,B</sup>
35	29.010±0.114 <sup>f,A</sup>	28.637±0.176 <sup>f,B</sup>	27.950±0.030 <sup>d,A</sup>	25.760±0.066 <sup>e,B</sup>

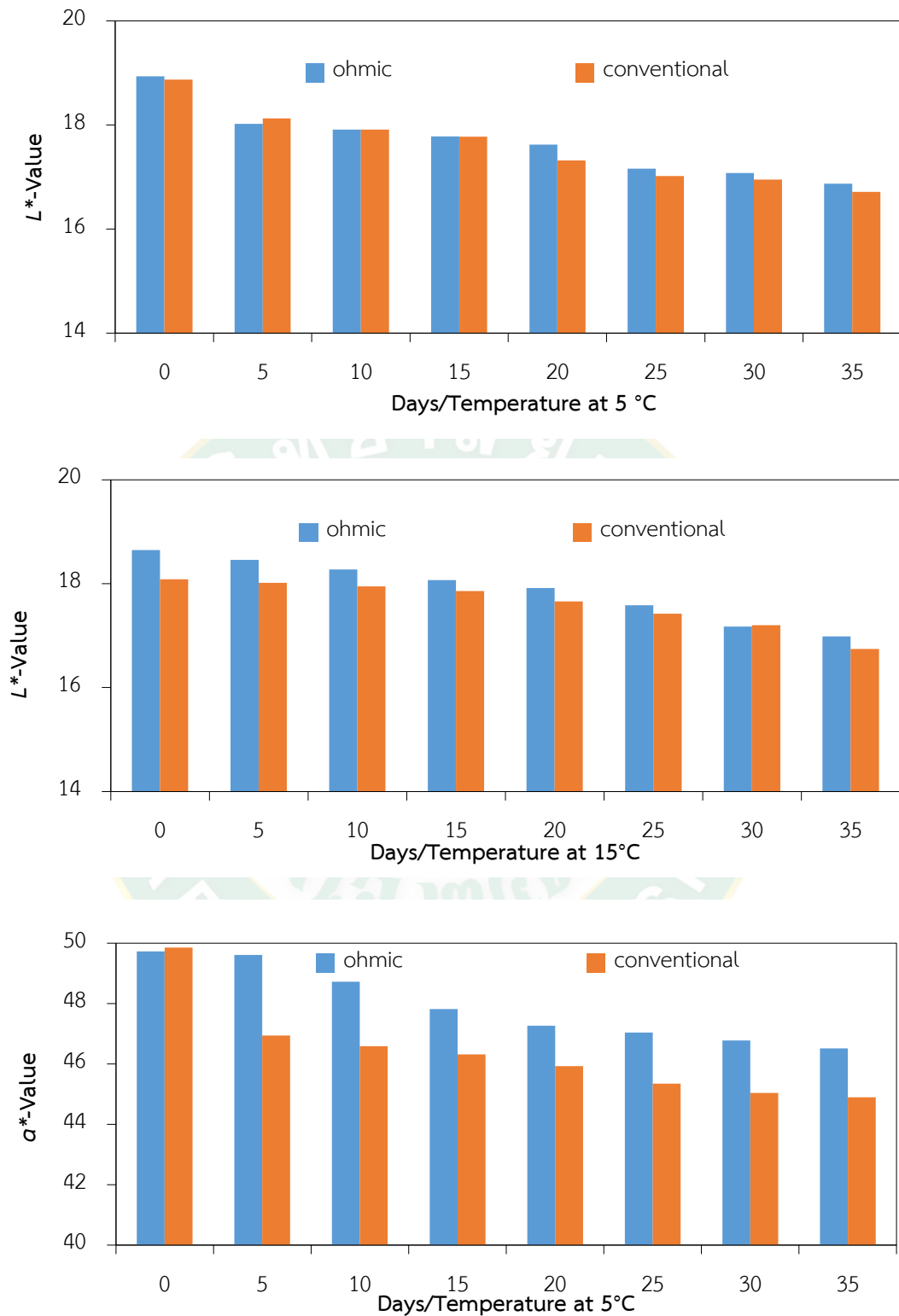
หมายเหตุ <sup>a,b,c...</sup>ตัวอักษรกำกับที่แตกต่างกันในคอลัมน์เดียวกันแสดงความแตกต่างกันของข้อมูลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%  
<sup>A และ B</sup> ตัวอักษรกำกับที่แตกต่างกันในแถวเดียวกันของค่าเดียวกันแสดงความแตกต่างกันของข้อมูลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%  
<sup>ns</sup> ไม่มีความแตกต่างในคอลัมน์และแถวเดียวกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

จากตารางที่ 15 – 17 เปรียบเทียบค่าสีปรากฏในระบบ CIE -  $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$  ที่การพาสเจอไรส์ด้วยวิธีโอห์มมิกเปรียบเทียบกับพาสเจอไรส์ด้วยวิธีดั้งเดิม พบว่าที่ค่าความสดสว่าง ( $L^*$ -Value) มีค่าลดลงอย่างมีนัยสำคัญที่ความเชื่อมั่น 95% ที่การพาสเจอไรส์ด้วยวิธีโอห์มมิก โดยที่ค่าความสว่างมีค่าลดลงเรื่อยๆ ในการเก็บรักษาตั้งแต่วันที่ 5 คิดเป็น 0-10.89 % และ 0-8.92% ในการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 5 °C และ 15 °C ตั้งแต่วันที่เก็บรักษาวันที่ 0 ถึงวันที่ 35 และที่การพาสเจอไรส์แบบดั้งเดิมมีการลดลงของค่าความสว่าง ( $L^*$ -Value) ตั้งแต่วันที่ 5 ของการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 5 °C และ 15 °C คิดเป็น 0-11.43 % และ 0-7.41 % ตั้งแต่วันที่เก็บรักษาวันที่ 0 ถึงวันที่ 35 การเปรียบเทียบที่วิธีการพาสเจอไรส์ในแต่ละวัน พบว่าที่การพาสเจอไรส์แบบโอห์มมิกที่อุณหภูมิ 5 °C มีการลดลงน้อยที่สุด

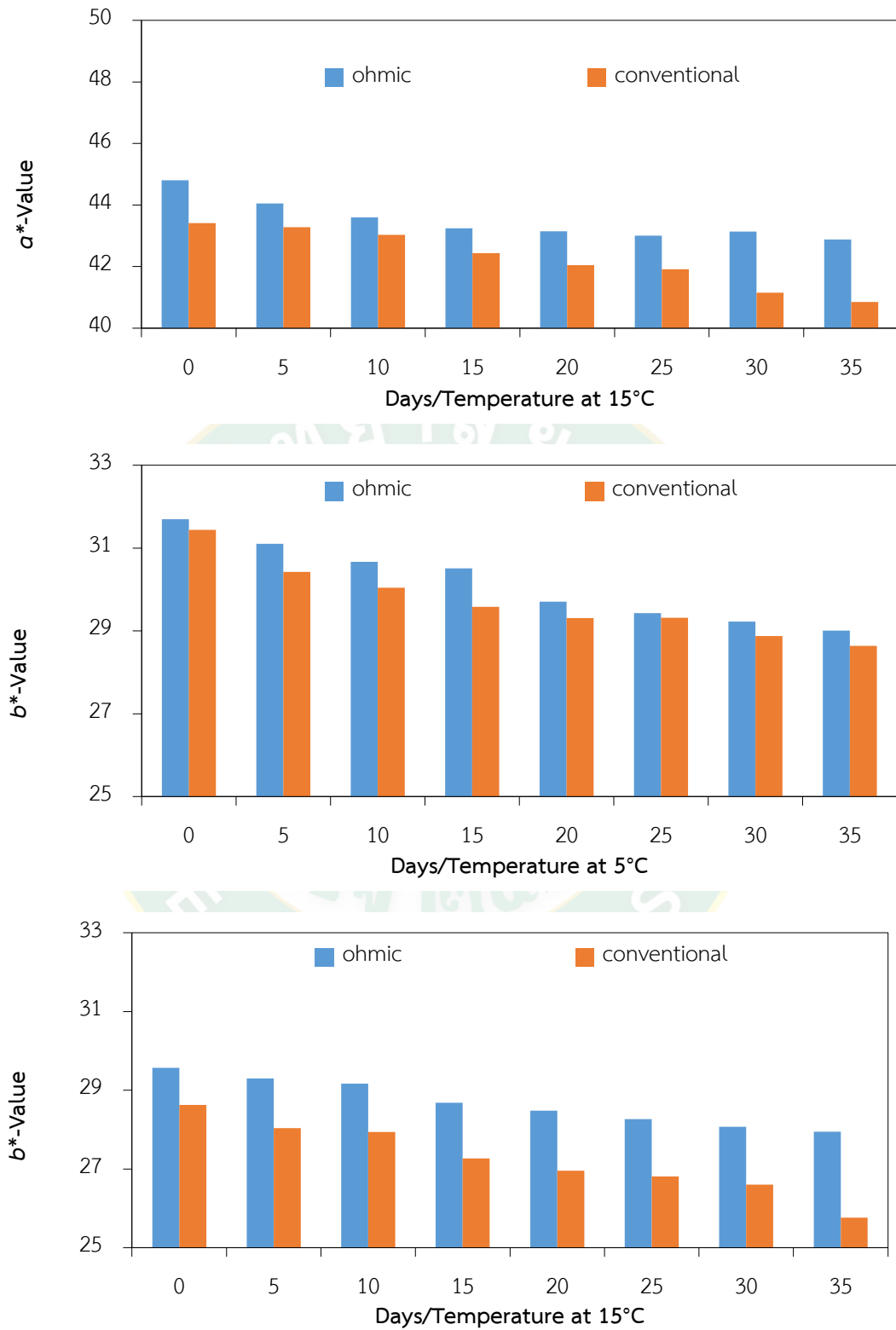
ค่า  $a^*$ -Value ที่การพาสเจอร์ไรส์ด้วยวิธีโอท่อมมิกเปรียบเทียบกับ การพาสเจอร์ไรส์ด้วยวิธีดั้งเดิม พบว่าที่ค่า  $a^*$ -Value มีค่าลดลงอย่างมีนัยสำคัญที่ความเชื่อมั่น 95% ที่การพาสเจอร์ไรส์ด้วยวิธีโอท่อมมิกและการพาสเจอร์ไรส์วิธีดั้งเดิม วิธีการพาสเจอร์ไรส์ด้วยวิธีแบบโอท่อมมิกมีค่าลดลงเรื่อยๆ ในระหว่างการเก็บรักษาตั้งแต่วันที่ 5 คิดเป็น 0 - 6.46 % และ 0 - 4.30% ในการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 5 °C และ 15 °C ตั้งแต่วันที่เก็บรักษาวันที่ 0 ถึงวันที่ 35 และที่การพาสเจอร์ไรส์แบบดั้งเดิม มีการลดลงของค่า  $a^*$ -Value ตั้งแต่วันที่ 5 ของการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 5 °C และ 15 °C คิดเป็น 0 - 9.94 % และ 0-5.89 % ตั้งแต่วันที่เก็บรักษาวันที่ 0 ถึงวันที่ 35 การเปรียบเทียบที่วิธีการพาสเจอร์ไรส์ในแต่ละวัน พบว่าที่การพาสเจอร์ไรส์แบบโอท่อมมิกที่อุณหภูมิ 5 °C มีการลดลงน้อยที่สุด

ค่า  $b^*$ -Value ที่การพาสเจอร์ไรส์ด้วยวิธีโอท่อมมิกเปรียบเทียบกับ การพาสเจอร์ไรส์ด้วยวิธีดั้งเดิม พบว่าที่ค่า  $b^*$ -Value มีค่าลดลงอย่างมีนัยสำคัญที่ความเชื่อมั่น 95% ที่การพาสเจอร์ไรส์ด้วยวิธีแบบโอท่อมมิกมีค่า  $b^*$ -Value ลดลงเรื่อยๆ ในการเก็บรักษาตั้งแต่วันที่ 5 คิดเป็น 0 - 8.48 % และ 0 - 5.47 % ในการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 5 °C และ 15 °C ตั้งแต่วันที่เก็บรักษาวันที่ 0 ถึงวันที่ 35 และที่การพาสเจอร์ไรส์แบบดั้งเดิม มีการลดลงของค่า  $b^*$ -Value ตั้งแต่วันที่ 5 ของการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 5 °C และ 15 °C คิดเป็น 0 - 8.93 % และ 0 - 10.02 % ตั้งแต่วันที่เก็บรักษาวันที่ 0 ถึงวันที่ 35 การเปรียบเทียบที่วิธีการพาสเจอร์ไรส์ในแต่ละวัน พบว่าที่การพาสเจอร์ไรส์แบบโอท่อมมิกที่อุณหภูมิ 5 °C มีการลดลงน้อยที่สุด

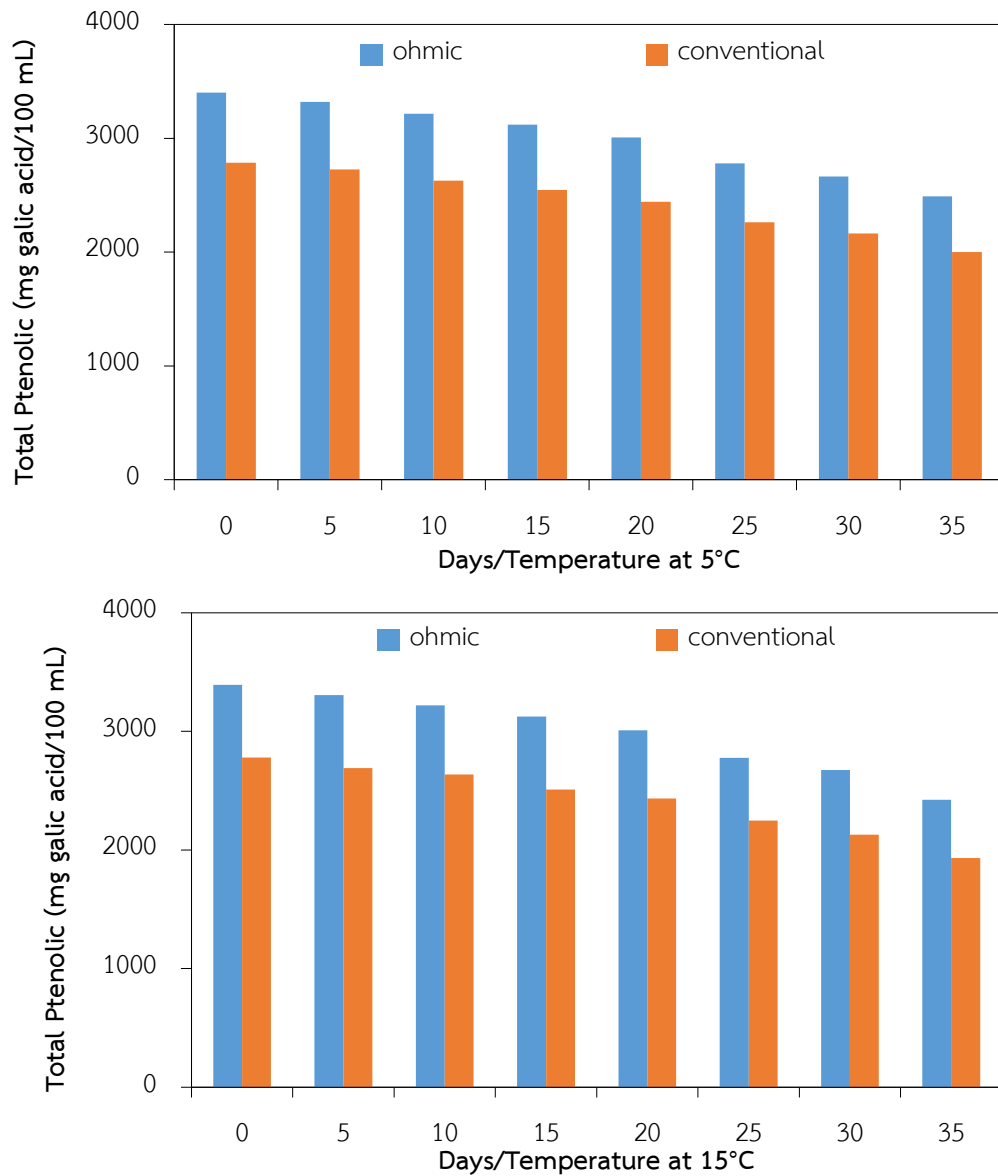




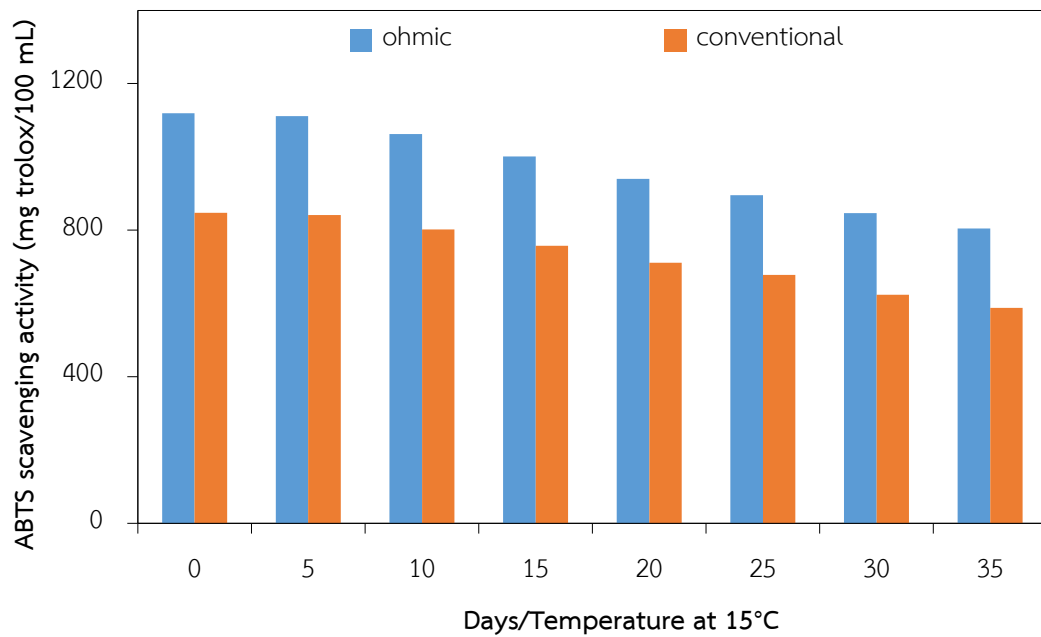
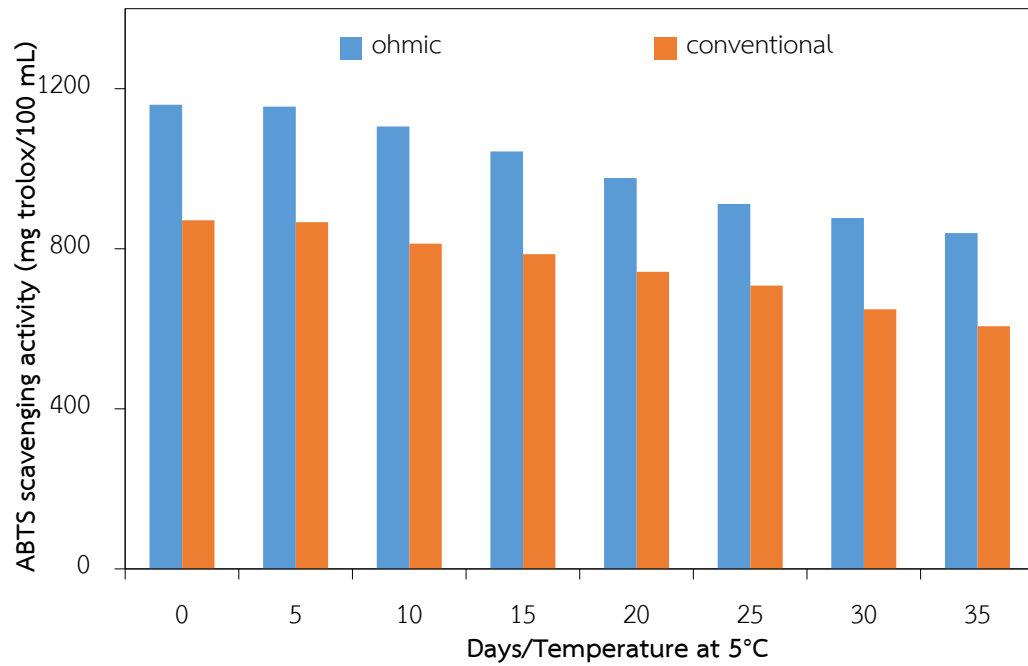
ภาพที่ 22 กราฟแสดงค่าเปลี่ยนแปลงสีปรากฏในระบบ CIE -L\*, a\*, b\*  
 ในน้ำมะเขือเทศแช่แข็ง ที่ความเย็น 5 และ 15 °C



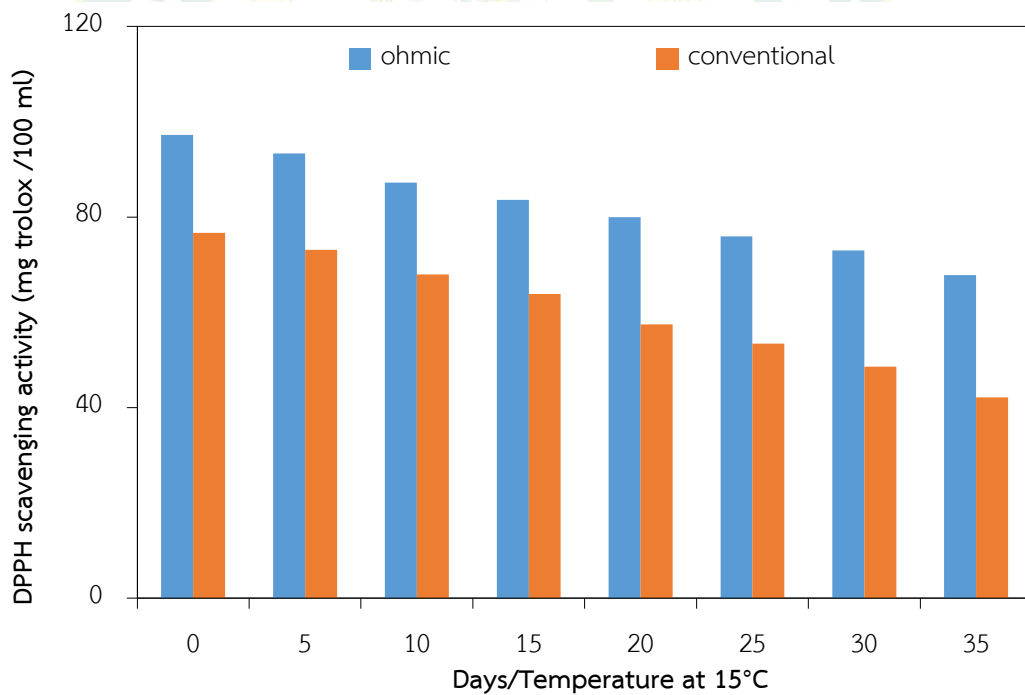
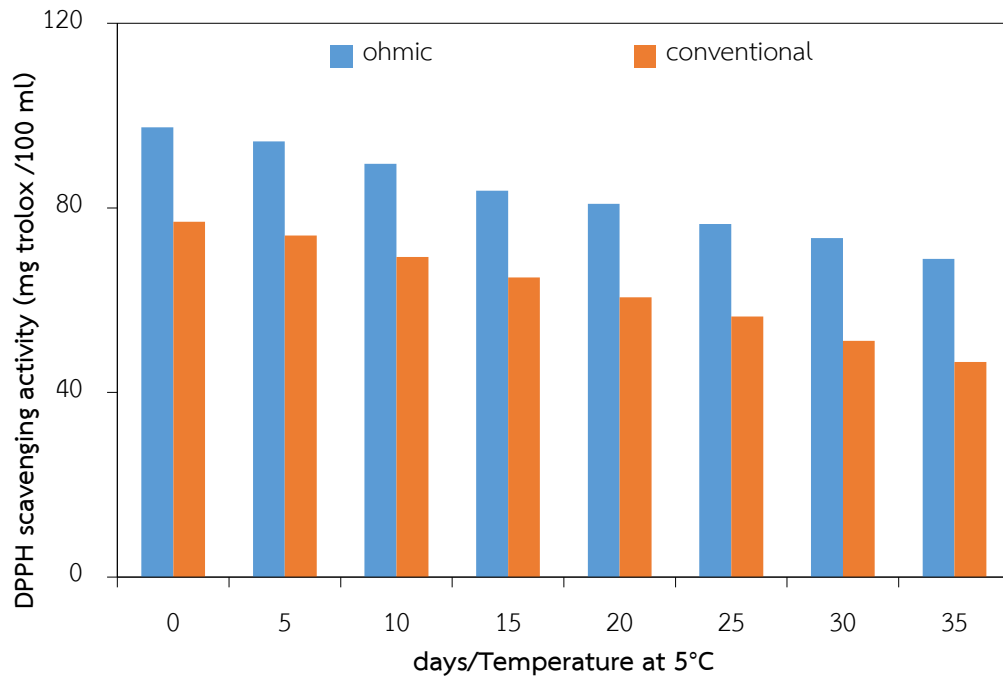
ภาพที่ 22 (ต่อ)



ภาพที่ 23 การเปลี่ยนแปลงปริมาณสารประกอบฟีนอลิก Total Phenolic  
 ในน้ำมะเขือขี้เหล็ก ที่อุณหภูมิการเก็บรักษา 5 และ 15 °C

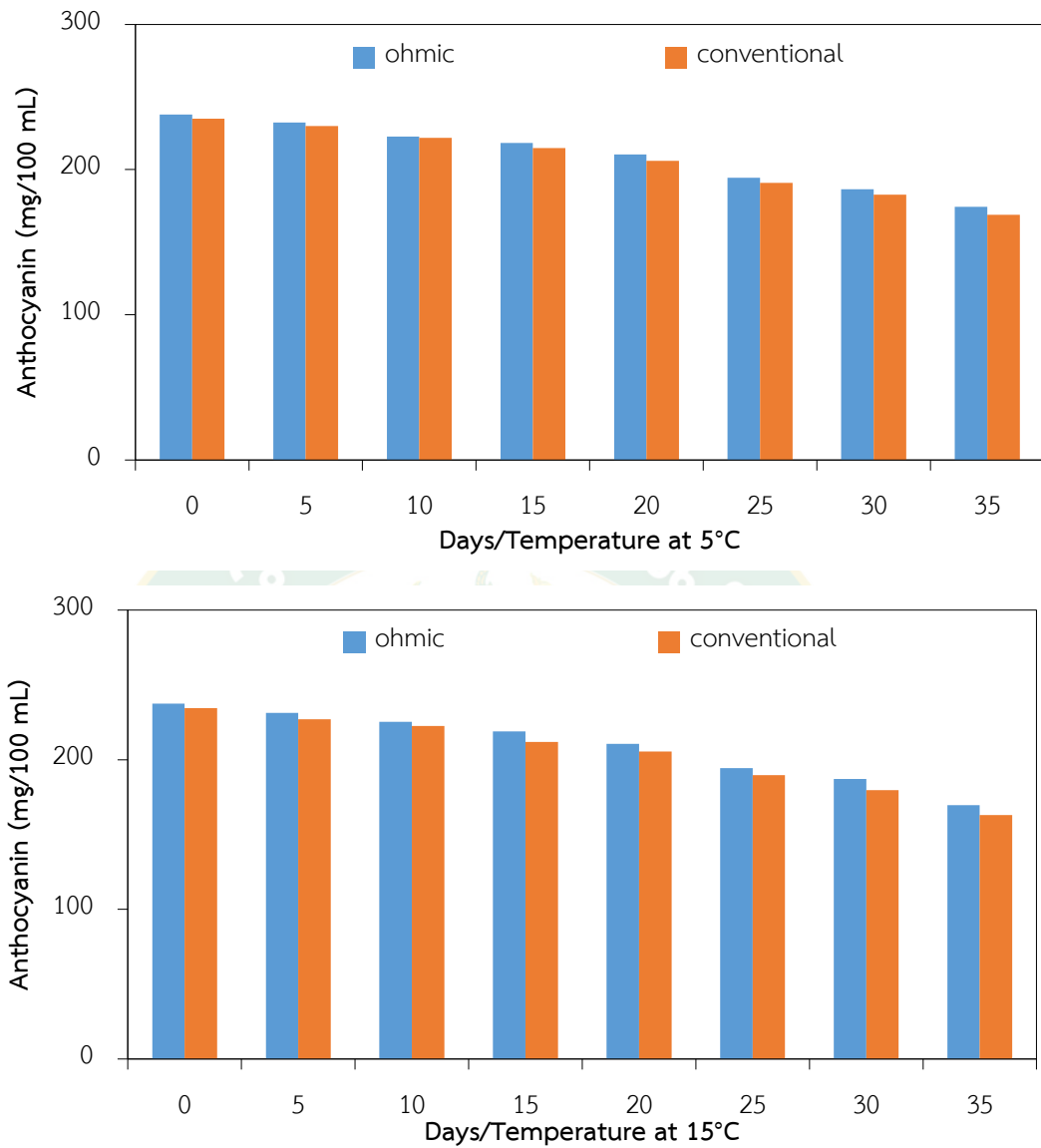


ภาพที่ 24 การเปลี่ยนแปลงกิจกรรมต้านอนุมูลอิสระ (ABTS) ในน้ำมะเขິงเข้มข้น ที่อุณหภูมิการเก็บรักษา 5 และ 15 °C



ภาพที่ 25 การเปลี่ยนแปลงกิจกรรมต้านอนุมูลอิสระ (DPPH) ในน้ำมะเขິงเข้มชั้น ที่อุณหภูมิการเก็บรักษา 5 และ 15 °C





ภาพที่ 26 การเปลี่ยนแปลงสารแอนโทไซยานิน (Anthocyanin) ในน้ำมะเขือขี้เหล็กแช่แข็ง ที่อุณหภูมิการเก็บรักษา 5 และ 15 °C

**ตารางที่ 18** ผลกระทบของอุณหภูมิและเวลาต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณสารแอนโทไซยานิน สารฟีนอลิก และกิจกรรมการต้านอนุมูลอิสระ ของน้ำมะเข็ญ  
 สถิติที่การเก็บรักษา อุณหภูมิ 5 °C

Day	Total Phenolic (mg/100 ml)		Antioxidant (ABTS) mg/100 ml		Antioxidant (DPPH) mg/100ml		Anthocyanin mg/L	
	Ohmic	Conventional	Ohmic	Conventional	Ohmic	Conventional	Ohmic	Conventional
0	3400.761±12.662 <sup>aA</sup>	2785.314±0.913 <sup>aB</sup>	1160.139±8.026 <sup>aA</sup>	871.481±4.978 <sup>aB</sup>	97.435±0.797 <sup>aA</sup>	76.994±0.861 <sup>aB</sup>	238.017±12.662 <sup>aA</sup>	235.068±0.913 <sup>aB</sup>
5	3320.285±12.363 <sup>bA</sup>	2725.064±0.893 <sup>bB</sup>	1155.163±3.929 <sup>aA</sup>	865.988±3.158 <sup>aB</sup>	94.412±1.641 <sup>bA</sup>	74.025±0.507 <sup>bB</sup>	232.384±12.363 <sup>bA</sup>	229.983±0.893 <sup>aB</sup>
10	3216.510±11.976 <sup>cA</sup>	2628.745±0.861 <sup>cB</sup>	1105.083±3.765 <sup>bA</sup>	812.939±29.770 <sup>bB</sup>	89.520±0.785 <sup>cA</sup>	69.324±0.815 <sup>cB</sup>	222.702±11.976 <sup>cA</sup>	221.855±0.861 <sup>bB</sup>
15	3120.651±11.619 <sup>dA</sup>	2544.571±0.834 <sup>dB</sup>	1042.652±4.225 <sup>cA</sup>	786.490±30.133 <sup>bB</sup>	83.714±0.543 <sup>dA</sup>	64.894±0.555 <sup>dB</sup>	218.412±11.619 <sup>dA</sup>	214.751±0.834 <sup>cB</sup>
20	3008.130±11.201 <sup>eA</sup>	2441.089±0.800 <sup>eB</sup>	976.344±5.881 <sup>dA</sup>	742.574±6.231 <sup>cB</sup>	80.861±0.577 <sup>eA</sup>	60.645±0.703 <sup>eB</sup>	210.537±11.201 <sup>eA</sup>	206.017±0.800 <sup>dB</sup>
25	2778.318±10.345 <sup>fA</sup>	2261.360±0.714 <sup>fB</sup>	912.042±9.019 <sup>eA</sup>	707.599±4.780 <sup>dB</sup>	76.531±0.588 <sup>fA</sup>	56.486±0.613 <sup>fB</sup>	194.453±10.345 <sup>fA</sup>	190.849±0.741 <sup>eB</sup>
30	2663.342±9.917 <sup>gA</sup>	2164.361±0.709 <sup>gB</sup>	877.005±6.101 <sup>fA</sup>	648.793±4.393 <sup>eB</sup>	73.481±0.748 <sup>gA</sup>	51.152±0.593 <sup>gB</sup>	186.405±9.917 <sup>gA</sup>	182.663±0.709 <sup>fB</sup>
35	2490.223±9.272 <sup>hA</sup>	1999.921±0.655 <sup>hB</sup>	839.123±8.212 <sup>gA</sup>	606.610±6.459 <sup>fB</sup>	68.955±0.584 <sup>hA</sup>	46.611±0.640 <sup>hB</sup>	174.289±9.272 <sup>hA</sup>	168.785±0.655 <sup>gB</sup>

หมายเหตุ <sup>a,b,c,...</sup> ตัวอักษรกำกับที่แตกต่างกันในคอลัมน์เดียวกันแสดงความแตกต่างกันของข้อมูลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

<sup>A</sup> และ <sup>B</sup> ตัวอักษรกำกับที่แตกต่างกันในแถวเดียวกันแสดงความแตกต่างกันของข้อมูลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

<sup>ns</sup> ไม่มีความแตกต่างในคอลัมน์และแถวเดียวกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

**ตารางที่ 19** ผลกระทบของอุณหภูมิและเวลาต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณสารแอนโทไซยานิน สารฟีนอลิก และกิจกรรมการต้านอนุมูลอิสระ ของน้ำมะเขือเทศ ที่การเก็บรักษา อุณหภูมิ 15 °C

Day	Total Phenolic (mg/100 ml)		Antioxidant (ABTS) mg/100 ml		Antioxidant (DPPH) mg/100 ml		Anthocyanin mg/L	
	Ohmic	Conventional	Ohmic	Conventional	Ohmic	Conventional	Ohmic	Conventional
0	3392.672±12.62 <sup>aA</sup>	2778.689±0.910 <sup>3bB</sup>	1119.270±6.631 <sup>aA</sup>	846.884±3.207 <sup>3bB</sup>	97.226±0.534 <sup>aA</sup>	76.647±0.610 <sup>aB</sup>	237.451±2.156 <sup>aNSNS</sup>	234.509±3.337 <sup>aNS</sup>
5	3305.248±12.307 <sup>bA</sup>	2690.098±0.881 <sup>bB</sup>	1111.238±5.068 <sup>aA</sup>	841.425±2.917 <sup>aB</sup>	93.338±0.605 <sup>bA</sup>	73.121±0.509 <sup>bB</sup>	231.332±2.100 <sup>bNS</sup>	227.032±3.230 <sup>bNS</sup>
10	3219.898±11.989 <sup>cA</sup>	2637.182±0.864 <sup>cB</sup>	1061.996±9.586 <sup>bA</sup>	802.116±30.066 <sup>bB</sup>	87.195±0.812 <sup>cA</sup>	67.954±0.650 <sup>cB</sup>	225.358±2.046 <sup>cNS</sup>	222.567±3.167 <sup>bNS</sup>
15	3126.113±11.640 <sup>dA</sup>	2509.407±0.822 <sup>dB</sup>	989.893±8.099 <sup>cA</sup>	757.397±3.159 <sup>cB</sup>	83.569±0.819 <sup>dA</sup>	63.827±0.784 <sup>dB</sup>	218.794±1.986 <sup>dNS</sup>	211.783±3.013 <sup>cNS</sup>
20	3007.612±11.199 <sup>eA</sup>	2435.001±0.798 <sup>eB</sup>	940.341±6.059 <sup>dA</sup>	710.552±3.554 <sup>dB</sup>	79.943±0.598 <sup>eA</sup>	57.455±0.685 <sup>eB</sup>	210.501±1.911 <sup>eNS</sup>	205.503±2.924 <sup>dNS</sup>
25	2777.212±10.341 <sup>fA</sup>	2246.298±0.736 <sup>fB</sup>	894.980±9.730 <sup>eA</sup>	677.985±3.387 <sup>eB</sup>	75.927±0.566 <sup>fA</sup>	53.429±0.616 <sup>fB</sup>	194.375±1.765 <sup>fNS</sup>	189.578±2.698 <sup>eNS</sup>
30	2674.785±9.959 <sup>gA</sup>	2128.432±0.697 <sup>gB</sup>	846.058±4.737 <sup>fA</sup>	623.664±3.795 <sup>fB</sup>	72.994±0.591 <sup>gA</sup>	48.590±1.030 <sup>gB</sup>	187.206±1.700 <sup>gA</sup>	179.630±2.556 <sup>fB</sup>
35	2423.678±9.024 <sup>hA</sup>	1931.263±0.633 <sup>hB</sup>	804.110±16.230 <sup>gA</sup>	587.901±7.662 <sup>gB</sup>	67.790±0.844 <sup>hA</sup>	42.147±0.792 <sup>hB</sup>	169.632±1.540 <sup>hA</sup>	162.990±2.319 <sup>gB</sup>

หมายเหตุ <sup>a,b,c...</sup>:ตัวอักษรกำกับที่แตกต่างกันในคอลัมน์เดียวกันแสดงความแตกต่างกันของข้อมูลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

<sup>A</sup> และ <sup>B</sup> ตัวอักษรกำกับที่แตกต่างกันในแถวเดียวกันแสดงความแตกต่างกันของค่าเดียวกันของข้อมูลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

<sup>ns</sup> ไม่มีมีความแตกต่างในคอลัมน์และแถวเดียวกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

จากตารางที่ 18 และ 19 ผลกระทบของอุณหภูมิและเวลาต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณสารแอนโทไซยานิน สารประกอบฟีนอลิก และกิจกรรมการต้านอนุมูลอิสระ ของน้ำมะเข็ญเข้มชั้นที่การเก็บรักษา ที่อุณหภูมิ 5 °C และ 15 °C การสลายตัวของปริมาณฟีนอลิกของน้ำมะเข็ญเข้มชั้นในระหว่างการให้ความร้อนแบบโอห์มมิก และความร้อนแบบดั้งเดิมที่เวลาการเก็บรักษาจำนวน 0-35 วัน พบว่าที่การพาสเจอไรส์เซชันด้วยวิธีโอห์มมิกเปรียบเทียบกับพาสเจอไรส์ด้วยวิธีดั้งเดิม พบว่าที่ค่าปริมาณสารประกอบฟีนอลิกรวมมีค่าลดลงอย่างมีนัยสำคัญที่ความเชื่อมั่น 95% ที่การพาสเจอไรส์ด้วยวิธีโอห์มมิกและการพาสเจอไรส์ด้วยวิธีดั้งเดิม โดยที่มีปริมาณลดลงเรื่อยๆ ในการเก็บรักษาตั้งแต่วันที่ 5 คิดเป็น 0-26.76 % และ 0-28.56 % ในการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 5 °C และ 15 °C ตั้งแต่วันที่เก็บรักษาวันที่ 0 ถึงวันที่ 35 และที่การพาสเจอไรส์เซชันแบบดั้งเดิม มีการลดลงของค่าสารประกอบฟีนอลิก ตั้งแต่วันที่ 5 ของการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 5 °C และ 15 °C คิดเป็น 0-28.19 และ 0-30.50 % ตั้งแต่วันที่เก็บรักษาวันที่ 0 ถึงวันที่ 35 การเปรียบเทียบที่วิธีการพาสเจอไรส์เซชันในแต่ละวัน พบว่าที่การพาสเจอไรส์เซชันแบบโอห์มมิกที่อุณหภูมิ 5 °C มีการลดลงน้อยที่สุด

การสลายตัวของกิจกรรมการต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธี ABTS ของน้ำมะเข็ญเข้มชั้นในระหว่างการพาสเจอไรส์แบบโอห์มมิก และแบบดั้งเดิมที่เวลาการเก็บรักษาจำนวน 0-35 วัน พบว่าที่การพาสเจอไรส์ด้วยวิธีโอห์มมิกเปรียบเทียบกับพาสเจอไรส์ด้วยวิธีดั้งเดิม พบว่ากิจกรรมการต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธี ABTS มีค่าลดลงอย่างมีนัยสำคัญที่ความเชื่อมั่น 95% ที่การพาสเจอไรส์เซชันด้วยวิธีโอห์มมิก มีการสลายตัวของกิจกรรมการต้านอนุมูลอิสระลดลงเรื่อยๆ ในการเก็บรักษาตั้งแต่วันที่ 5 คิดเป็น 0-27.67 % และ 0-28.16 % ในการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 5 °C และ 15 °C ตั้งแต่วันที่เก็บรักษาวันที่ 0 ถึงวันที่ 35 และที่การพาสเจอไรส์เซชันแบบดั้งเดิม มีการลดลงของปริมาณสารต้านอนุมูลอิสระ ตั้งแต่วันที่ 5 ของการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 5 °C และ 15 °C คิดเป็น 0-30.39 และ 0-30.58 % ตั้งแต่วันที่เก็บรักษาวันที่ 0 ถึงวันที่ 35 การเปรียบเทียบที่วิธีการพาสเจอไรส์เซชันในแต่ละวัน พบว่าที่การพาสเจอไรส์เซชันแบบโอห์มมิกที่อุณหภูมิ 5 °C มีการลดลงน้อยที่สุด

การสลายตัวของกิจกรรมการต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธี DPPH ของน้ำมะเข็ญเข้มชั้นในระหว่างการพาสเจอไรส์แบบโอห์มมิก และแบบดั้งเดิมที่เวลาการเก็บรักษาจำนวน 0-35 วัน พบว่าที่การพาสเจอไรส์ด้วยวิธีโอห์มมิกเปรียบเทียบกับพาสเจอไรส์ด้วยวิธีดั้งเดิม พบว่ากิจกรรมการต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธี DPPH มีค่าลดลงอย่างมีนัยสำคัญที่ความเชื่อมั่น 95% ที่การพาสเจอไรส์เซชันด้วยวิธีโอห์มมิก โดยที่ลดลงเรื่อยๆ ในการเก็บรักษาตั้งแต่วันที่ 5 คิดเป็น 0-29.23 % และ 0-30.28 % ในการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 5 °C และ 15 °C ตั้งแต่วันที่เก็บรักษาวันที่ 0 ถึงวันที่ 35 และที่การพาสเจอไรส์แบบดั้งเดิม มีการลดลงของกิจกรรมการต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธี DPPH ของน้ำมะเข็ญเข้มสกัด ตั้งแต่วันที่ 5 ของการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 5 °C และ 15 °C คิดเป็น 0-39.46 และ 0-45.01 % ตั้งแต่วันที่

วันที่เก็บรักษาวันที่ 0 ถึงวันที่ 35 การเปรียบเทียบที่วิธีการพาสเจอร์ไรส์เซชันในแต่ละวัน พบว่าที่การพาสเจอร์ไรส์เซชันแบบโอท้อมมิกที่อุณหภูมิ 5 °C มีการลดลงน้อยที่สุด

การลดลงของปริมาณแอนโธไซยานิน ของน้ำมะเข็ญเข้มข้นในระหว่างการพาสเจอร์ไรส์แบบโอท้อมมิก และแบบดั้งเดิมที่เวลาการเก็บรักษาจำนวน 0-35 วัน พบว่าที่การพาสเจอร์ไรส์ด้วยวิธีโอท้อมมิกเปรียบเทียบกับวิธีการพาสเจอร์ไรส์ด้วยวิธีดั้งเดิม พบว่ามีปริมาณการลดลงของปริมาณแอนโธไซยานิน มีค่าลดลงอย่างมีนัยสำคัญที่ความเชื่อมั่น 95% ที่การพาสเจอร์ไรส์ด้วยวิธีโอท้อมมิกมีปริมาณแอนโธไซยานินลดลงเรื่อยๆ ในการเก็บรักษาตั้งแต่วันที่ 5 คิดเป็น 0-26.77 % และ 0-28.56 % ในการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 5 °C และ 15 °C ตั้งแต่วันที่เก็บรักษาวันที่ 0 ถึงวันที่ 35 และที่การพาสเจอร์ไรส์เซชันแบบดั้งเดิม มีการลดลงของปริมาณแอนโธไซยานิน ตั้งแต่วันที่ 5 ของการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 5 °C และ 15 °C คิดเป็น 0-28.20 และ 0-30.50 % ตั้งแต่วันที่เก็บรักษาวันที่ 0 ถึงวันที่ 35 การเปรียบเทียบที่วิธีการพาสเจอร์ไรส์ในแต่ละวัน พบว่าที่การพาสเจอร์ไรส์แบบโอท้อมมิกที่อุณหภูมิ 5 °C มีการลดลงน้อยที่สุดยกเว้นวันที่เก็บรักษาวันที่ 30 และวันที่ 35

### ผลทางด้านจุลินทรีย์

จากผลการศึกษาอายุการเก็บรักษา ด้านจุลินทรีย์ ทำการตรวจเชื้อทั่วไป Standard Plate Count (SPC) และ Yeast & Mold ที่อุณหภูมิกการเก็บรักษา 5 และ 15°C ในระหว่างการให้ความร้อนแบบโอท้อมมิก และความร้อนแบบดั้งเดิมที่เวลา 0-35 วัน การทดสอบ Total Plate Count หรือ Aerobic Plate Count เป็นการตรวจสอบเชื้อจุลินทรีย์ทั่วไป ที่เป็นเชื้อแบคทีเรียทุกชนิดที่ปนเปื้อนอยู่ในตัวอย่าง ซึ่งเจริญได้ทั้งบนผิวหน้าอาหาร ในอาหาร และได้อาหารเลี้ยงเชื้อที่ใช้ทดสอบ สามารถตรวจได้โดยการนับจำนวนโคโลนีของเชื้อที่เจริญในอาหารที่ใช้ทดสอบ ซึ่งจำนวนเชื้อแบคทีเรียทั้งหมดนั้นใช้เป็นตัวชี้วัดอายุการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์ ถ้ามีจำนวนเชื้อจุลินทรีย์สูง ผลิตภัณฑ์ก็จะมีอายุการเก็บต่ำลง ถ้าจำนวนเชื้อจุลินทรีย์ต่ำผลิตภัณฑ์ก็จะมีอายุการเก็บรักษาสูงขึ้น จากการทดลองพบว่าปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ทั่วไป TPC (Total plate count) ที่การให้ความร้อนแบบดั้งเดิมที่อายุการเก็บรักษา 25 วัน อุณหภูมิ 15 °C เริ่มมีเชื้อเจริญขึ้น



ตารางที่ 20 ปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ทั่วไป TPC (Total plate count) CFU/ml

Day	Temperature 5 °C		Temperature 15 °C	
	Ohmic	Conventional	Ohmic	Conventional
0	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ
5	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ
10	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ
15	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ
20	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ
25	ไม่พบ	ไม่พบ	$1.0 \times 10^1$	$2.0 \times 10^1$
30	$1.5 \times 10^1$	$2.0 \times 10^1$	$1.0 \times 10^1$	$2.5 \times 10^1$
35	$1.0 \times 10^1$	$1.5 \times 10^2$	$1.5 \times 10^2$	$1.5 \times 10^2$

ส่วนผลการตรวจวัดปริมาณเชื้อยีสต์และรา ในน้ำมะกึ่งเข้มข้น พบว่า ที่อายุการเก็บ วันที่ 30 มีเชื้อยีสต์และรา เจริญ และปริมาณเชื้อยีสต์และรา ที่อายุการเก็บ 35 วันที่อุณหภูมิ 15°C พบปริมาณเชื้อยีสต์และราสูงที่สุด คือ 200 CFU ต่อมิลลิลิตร และการตรวจวัดปริมาณยีสต์และรานี้ ใช้บ่งบอกการเสื่อมเสียเมื่อเทียบกับมาตรฐาน น้ำผลไม้รวมเข้มข้น มผช.484/2557 ระบุว่า ยีสต์และราต้องน้อยกว่า 100 CFU/ 1 mL

คือถ้าเปรียบเทียบชนิดของการพาสเจอร์ส พบว่า ที่การพาสเจอร์สด้วยวิธีดั้งเดิม สามารถเก็บรักษาได้ 25 วันหากเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 5 และ 15 °C แต่ถ้าพาสเจอร์สด้วยวิธีโอท้อมิคจะสามารถเก็บรักษาได้ 35 วันที่อุณหภูมิ 5 °C และสามารถเก็บรักษาได้ 30 วัน ที่อุณหภูมิ 15 °C

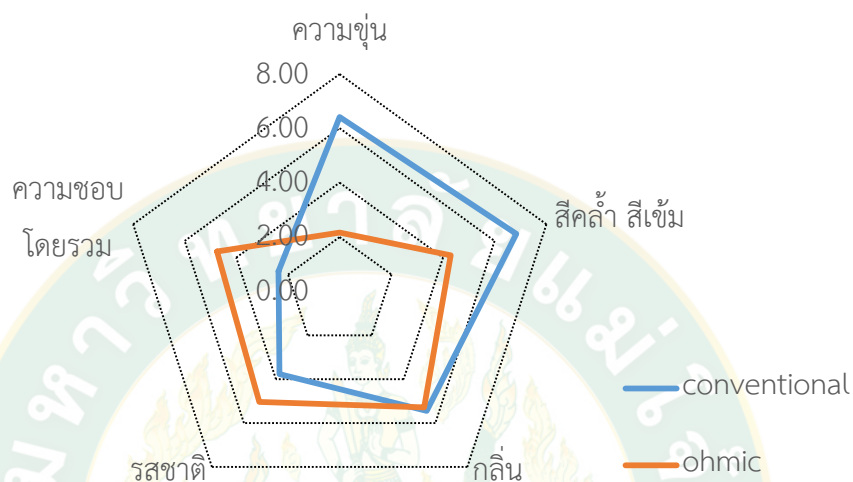
ตารางที่ 21 ปริมาณยีสต์และรา Yeast and Mold CFU/ml

Day	Temperature 5 °C		Temperature 15 °C	
	Ohmic	Conventional	Ohmic	Conventional
0	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ
5	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ
10	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ
15	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ
20	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ
25	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ
30	$1.0 \times 10^1$	$2.0 \times 10^1$	$1.5 \times 10^1$	$3.0 \times 10^1$
35	$1.0 \times 10^1$	$1.0 \times 10^2$	$1.5 \times 10^2$	$2.0 \times 10^2$

#### ผลการทดสอบทางประสาทสัมผัส

จากการทดสอบหาการยอมรับของน้ำมะเกี๋ยงสกัด ที่ปรับรสชาติเป็นน้ำมะเกี๋ยงพร้อมดื่ม ต่อการยอมรับของผู้บริโภคที่มีต่อน้ำมะเกี๋ยง จากการทดสอบการยอมรับทางประสาทสัมผัสที่มีต่อผลิตภัณฑ์น้ำมะเกี๋ยงพร้อมดื่ม ที่ใช้การพาสเจอร์ไรส์ด้วยวิธีแบบดั้งเดิมเปรียบเทียบกับทำให้ความร้อนแบบโอห์มมิก โดยใช้ผู้ทดสอบจำนวน 20 คน ในด้านลักษณะปรากฏ (ความขุ่น-ใส) สี (เข้มดำ – ใสแดง) กลิ่นมะเกี๋ยง รสชาติ (ความกลมกล่อม) และการยอมรับรวม ดังแผนภาพที่ 31 แสดงผลการทดสอบทางประสาทสัมผัสของน้ำมะเกี๋ยงพร้อมดื่ม พบว่าน้ำมะเกี๋ยงพร้อมดื่ม ที่การพาสเจอร์ไรส์ด้วยวิธีโอห์มมิกแตกต่างกันทั้งทางด้าน ลักษณะปรากฏ สี รสชาติ และการยอมรับโดยรวม ผู้ทดสอบชิมให้คะแนนความชอบ และการยอมรับในด้านลักษณะปรากฏที่ต่างกันในทางสถิติที่ความเชื่อมั่น 95% ผู้ทดสอบชิมให้คะแนนความชอบ ด้านลักษณะปรากฏ สี กลิ่น รสชาติความกลมกล่อมและความชอบโดยรวม ของน้ำมะเกี๋ยงพร้อมดื่ม ที่การพาสเจอร์ไรส์ด้วยวิธีโอห์มมิก มีความใสไม่ขุ่นไม่มีตะกอน โดยให้คะแนนความชอบ ด้านลักษณะปรากฏสูงสุดคือ 2.16 คิดเป็นร้อยละ 78.4 ด้านสีพบว่า น้ำมะเกี๋ยงพร้อมดื่ม ที่การพาสเจอร์ไรส์ด้วยวิธีโอห์มมิกผู้ทดสอบชิมให้คะแนนความชอบทางด้านสี ที่ความสดสว่างของสี มากกว่าการให้ความร้อนแบบดั้งเดิม คือให้ความชอบด้านสี (ความสดสว่าง) ที่ 4.30 คิดเป็นร้อยละ 57.0 ทางด้านกลิ่น ผู้ทดสอบชิมให้คะแนนการพาสเจอร์ไรส์ทั้งสองแบบไม่แตกต่างกัน โดยให้คะแนนด้านกลิ่น ที่ 5.45 และ 5.28 คิดเป็นร้อยละ 54.5 และ 52.8 การพาสเจอร์ไรส์แบบดั้งเดิมและ การพาสเจอร์ไรส์แบบโอห์มมิกตามลำดับ มีความความชอบด้าน

รสชาติและความชอบรวมต่างกันในทางสถิติที่ความเชื่อมั่น 95 % ผู้ทดสอบชิมคะแนนความชอบด้านรสชาติและความชอบรวม สูงสุดของน้ำมะเขี๋ยงพร้อมดื่ม ที่การพาสเจอไรส์ด้วยวิธีโอห์มมิกโดยให้คะแนนความชอบด้านรสชาติและความชอบรวมสุดคือ 5.04 และ 4.75 คิดเป็นร้อยละ 50.4 และ 47.5 ตามลำดับ



ภาพที่ 27 ผลการทดสอบทางประสาทสัมผัสความชอบของน้ำมะเขี๋ยงพร้อมดื่มที่ได้จากน้ำมะเขี๋ยงเข้มข้นที่ผ่านการพาสเจอไรส์ด้วยวิธีแบบโอห์มมิก และแบบดั้งเดิม

## บทที่ 5

### บทสรุปและข้อเสนอแนะ

#### สรุปผลการวิจัย

1. ที่ความเข้มสนามไฟฟ้า ที่ 15 V/cm มีสมรรถนะการเกิดความร้อนด้วยวิธีโอห์มมิก (SPCs) เหมาะสมที่สุดคิดเป็น 79.27 %
2. ที่ความเข้มสนามไฟฟ้า 15 V/cm มีประสิทธิภาพดีที่สุดในการเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานความร้อน มีอัตราการเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานความร้อนคิดเป็น 0.0059 S/m ต่อองศาเซลเซียส
3. แบบจำลองจลนพลศาสตร์อันดับหนึ่งมีความเหมาะสมในการทำนายการเปลี่ยนแปลงการสลายตัวของปริมาณแอนโทไซยานินในน้ำมะเขี๋ยงเข้มข้น
4. การพาสเจอร์ไรส์ด้วยวิธีโอห์มมิกมีค่าการลดลงของคุณสมบัติทางเคมี กายภาพ น้อยกว่าการพาสเจอร์ไรส์ด้วยวิธีดั้งเดิม
5. การเก็บรักษาน้ำมะเขี๋ยงเข้มข้นทั้ง 2 วิธี ที่อุณหภูมิ 5 และ 15 °C เป็นระยะเวลาที่นานขึ้น มีการสูญเสียสมบัติทางเคมีและกายภาพมากขึ้น แต่การเก็บที่อุณหภูมิ 5 °C มีการสูญเสียน้อยกว่าที่ 15 °C
6. ผู้ทดสอบชิมให้คะแนนคุณภาพทางด้าน ลักษณะปรากฏ สี รสชาติ (ความกลมกล่อม) และการยอมรับรวม ของน้ำมะเขี๋ยงพร้อมดื่มที่ได้จากน้ำมะเขี๋ยงเข้มข้นที่พาสเจอร์ไรส์ด้วยวิธีโอห์มมิกมากกว่าแบบดั้งเดิม

### ข้อเสนอแนะ

1. ควรมีการศึกษาวิจัยต่อยอดเพื่อสร้างกระบวนการพาสเจอไรส์ด้วยวิธีโอท้อมมิกที่มีการบรรจุแบบปลอดเชื้อ เพื่อลดขั้นตอนในการพาสเจอไรส์ซ้ำทั้งภาชนะบรรจุ
2. ควรมีศึกษาเพิ่มเติมถึงกลไกการเปลี่ยนแปลงทางชีวเคมี และ กิจกรรมของเอ็นไซม์ PPO รวมถึงการเกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาลที่เกิดจากเอ็นไซม์และไม่ใช่เอ็นไซม์ในน้ำมะเขี๋ยง
3. ควรมีการศึกษารงควัตถุอื่นๆ ในน้ำมะเขี๋ยง เช่น ฟลาโวนอยด์ รวมถึง การวิเคราะห์ชนิดของ แอนโทไซยานิน เช่น เดฟฟินิน ด้วยเครื่องมือวิเคราะห์ชั้นสูง
4. ควรเปรียบเทียบต้นทุนการผลิต การพาสเจอไรส์ด้วยวิธีโอท้อมมิก เปรียบเทียบกับการพาสเจอไรส์วิธีดั้งเดิม เพื่อใช้เป็นพื้นฐานในการสร้างแผนทางธุรกิจในอนาคต
5. ควรมีการศึกษาทางด้านประสาทสัมผัส มากกว่า 1 วิธี เช่น การทดสอบความแตกต่างจากตัวอย่างควบคุม (difference from control test)
6. ควรมีการศึกษาผลของการกักกรองของผิวโลหะของขั้วอิเล็กทรอนิกส์ ที่ใช้ในการพาสเจอไรส์ด้วยวิธีโอท้อมมิก
7. ควรมีการศึกษาถึงตารางคุณค่าทางโภชนาการ หากมีการผลิตเพื่อจำหน่าย



## บรรณานุกรม

- จุลชีวะวิทยา. 2556. **เกริ่นจุลชีวะวิทยา**. [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา <http://anonmicrobiology.blogspot.com/2013/07>. (9 มีนาคม 2561).
- นิธิยา รัตนาปนนท์. 2545. **เคมีอาหาร**. กรุงเทพฯ: โอเดียนสโตร์.
- ปริญานุช อินทร์รอด. 2551. **ฤทธิ์ต้านออกซิเดชันและปริมาณสารประกอบฟีนอลรวมของส่วนสกัดจากต้นเร่วหอมและว่านสาวหลง**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. มหาวิทยาลัยบูรพา.
- ฤทธิชัย อัครราชันย์. 2554. การอบแห้งผลผลิตทางการเกษตรด้วยคลื่นไมโครเวฟ. **วิศวกรรมสารเกษมบัณฑิต**, 1(2), 31-42.
- \_\_\_\_\_. 2555. การให้ความร้อนแบบโอห์มมิกในการแปรรูปอาหาร. **วารสารเทคโนโลยีการอาหาร มหาวิทยาลัยสยาม**, 7(1), 11-22.
- ฤทธิชัย อัครราชันย์. 2559. **เอกสารคำสอน ทอ 596 หัวข้อเฉพาะด้านเทคโนโลยีทางอาหาร: เทคโนโลยีการแปรรูปอาหารสมัยใหม่**. เชียงใหม่: คณะวิศวกรรมและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้.
- \_\_\_\_\_. 2560. การแปรรูปอาหารด้วยเทคโนโลยีสมัยใหม่. **Rajabhat Journal of Sciences, Humanities & Social Sciences**, 23(2), 41-48.
- \_\_\_\_\_. 2561. **หนังสือเทคโนโลยีการแปรรูปอาหารสมัยใหม่: การให้ความร้อนแบบโอห์มมิกในการแปรรูปอาหาร สำนักบริหารและพัฒนาวิชาการ**. เชียงใหม่: คณะวิศวกรรมและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้.
- วาริน แสงกิตติโกมล. 2546. การเปรียบเทียบปริมาณสารโพลีฟีนอลิกส์และปริมาณรวมการต้านอนุมูลอิสระในผักและสมุนไพร. **วารสารสหเวชศาสตร์**, 3(1), 91-99.
- วีไล รังสาดทอง. 2547. **เทคโนโลยีการแปรรูปอาหาร**. พิมพ์ครั้งที่ 4. กรุงเทพฯ: เท็กซ์ แอนด์ เจอร์นัล พลับลีเคชั่น.
- เว็บเพื่อพืชเกษตรไทย. ม.ป.ป. **มะเกี๋ยง สรรพคุณ และประโยชน์มะเกี๋ยง**. [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา <http://puechkaset.com/%E0%B8%A1%E0%B8%B0%E0%B9%80%E0%B8%81%E0%B8%B5%E0%B9%8B%E0%B8%A2%E0%B8%87/>. (9 มีนาคม 2561)
- ศรีจันทร์ พรจิราศิลป์. 2546. **ความก้าวหน้าทางเภสัชวิทยา**. กรุงเทพฯ: นิวไทยการพิมพ์.
- สถาบันวิจัยและฝึกอบรมการเกษตรลำปาง. 2544. **มะเกี๋ยง พืชในโครงการอนุรักษ์พันธุกรรมพืช**. ลำปาง: ศิลปการพิมพ์.

- สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม. 2557. **มาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน น้ำมะเขี๋ยง มพช.๔๘๔/๒๕๕๗**. [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา [http://tcps.tisi.go.th/pub/tcps0484\\_57\(%E0%B8%99%E0%B9%89%E0%B8%B3%E0%B8%A1%E0%B8%B0%E0%B9%80%E0%B8%81%E0%B8%B5%E0%B9%8B%E0%B8%A2%E0%B8%87\).pdf](http://tcps.tisi.go.th/pub/tcps0484_57(%E0%B8%99%E0%B9%89%E0%B8%B3%E0%B8%A1%E0%B8%B0%E0%B9%80%E0%B8%81%E0%B8%B5%E0%B9%8B%E0%B8%A2%E0%B8%87).pdf) (10 ตุลาคม 2561).
- สิริรัตน์ กำใจ และ อิศราพงศ์ แซ่อ้อ. 2554. **การพัฒนาอุปกรณ์การวัดค่านำไฟฟ้าของน้ำผลไม้โดยวิธีการให้ความร้อนแบบโอห์มมิก**. เชียงใหม่: วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมอาหาร มหาวิทยาลัยแม่โจ้.
- เสาวนีย์ เหล่าสิงห์, ศิริธร อ่างแก้ว และ มะลิวรรณ อมตธงไชย. 2554. เทคนิคตรวจวัดความสามารถต้านอนุมูลอิสระโดยรวมแบบใหม่ด้วยเทคนิคแอมเพอร์โรเมทรีในระบบที่มีการไหลที่ชั่วไฟฟ้ากลาสซีคาร์บอน ที่ดัดแปรด้วยคาร์บอนนาโนทิวบ์. **วารสารวิทยาศาสตร์ ม. อุบลฯ**, 1, 10-20.
- อเนก ขุนโสภาน. 2552. **กรต และ เบส**. [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา <http://www.vcharkarn.com/blog/58796> (12 กันยายน 2560).
- อรรถพล นุ่มหอม และ ฤทธิชัย อัครราชันย์. 2550. คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า พลังงานความร้อนรูปแบบใหม่. **Food Focus Thailand Magazine**, 2(16), 28-33.
- \_\_\_\_\_. 2551. กระบวนการให้ความร้อนแบบโอห์มมิก. **Food Focus Thailand Magazine**, 3(27), 48-53.
- อรุษา เขาวนลิขิต. 2554. การสกัดและวิธีการวิเคราะห์แอนโทไซยานิน. **วารสารมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒน์ (สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี)**, 3(6), 26-35.
- อุมาพร อุประ, สุนทร สืบคำ และ ฤทธิชัย อัครราชันย์. 2554. วิธีการละลายแบบรวดเร็วด้วยเทคโนโลยีสมัยใหม่. **วารสารสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย**, 17(1), 52-58.
- โอภา วชิระคุปต์, ปรีชา บุญจุง, จันทนาบุญะรัตน์ และ มาลีรัตน์ อัดดีสินทอง. 2549. **สารต้านอนุมูลอิสระ**. กรุงเทพฯ: พี.เอส.ปรีนท์.
- Achir, N., Dhuique-Mayer, Hadjal, C., Madani, T., J.P, P., K. & Dornier, M. 2016. Pasteurization of citrus juices with ohmic heating to preserve the carotenoid profile. **Innovative Food Science and Emerging Technologies**, 33, 397-404.
- Alina, J., Jolanta, B., Halina, W., Viera, I., Július, A. & Milan, P. 2010. Inactivation kinetics of food enzymes during ohmic heating. **Food Chemistry**, 123(2), 369-376.

- Alwis, A. A. P. D., Halden, K. & Fryer, P. J. 1989. Shape and Conductivity Effects in The Ohmic Heating of Food. **Chemical Engineering Research and Design**, 67(1), 159-168.
- AOAC. 2000. **Method of Analysis of the Association of Official Agricultural Chemists**. Washington, DC., USA.: AOAC International.
- \_\_\_\_\_. 2010. **Official Methods of Analysis of AOAC International**. 18. Washington, DC., USA.: AOAC International.
- Arnao, M. B., Cano, A. & Acosta, M. 2001. The hydrophilic and lipophilic contribution to total antioxidant activity. **Food Chemistry**, 73(2), 239-244.
- Assawarachan, R. 2010. Estimation model for electrical conductivity of red grape juice. **International Journal of Agricultural and Biological Engineering**, 3(2), 52-57.
- Assawarachan, R., Nookung, M., Ze-O, I. & Ga-Jai, S. 2013. Development of Electrical conductivity measuring device for fruit juice using ohmic heating. In **Food Innovation Asia Conference, Empower SMEs through Science and Technology**. 13-14 June 2013. BITEC Convention Center, Bangkok, Thailand.
- Assawarachan, R. & Noomhorm, A. 2008. Application electromagnetic radiation technologies in food processing. In **The 2<sup>nd</sup> R&DID\* International Conference -2008; University of the Thai Chamber of Commerce, Bangkok, Thailand**. Theme: Global Competitiveness Through, Research and Development, Innovation, Design.
- \_\_\_\_\_. 2012. Influence of temperature and TSS on performance of evaporation and rheological properties of pineapple concentration by microwave vacuum. **Journal of Food Process Engineering**, 35(3).
- Assiry, A. M., Gaily, M. H., Alsamee, M. & Sarifudin, A. 2010. Electrical conductivity of seawater during ohmic heating. **Desalination**, 260(1), 9-17.
- Blois, M. 1958. Antioxidant determinations by the use of a stable free radical. **Nature**, 181(1199–1200).
- Buckow, R., Ng, S. & Toep, S. 2013. Pulsed Electric Field Processing of Orange Juice : A Review on Microbial, Enzymatic, Nutritional, and Sensory Quality and Stability **Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety**, 12(445-467).

- Castro, I., Teixeira, J. A., Salengke, S., Sastry, S. K. & Vicente, A. A. 2004. Ohmic heating of strawberry products: electrical conductivity measurements and ascorbic acid degradation kinetics. **Innovative Food Science & Emerging Technologies**, 5(1), 27-36.
- Chen, R. H., Waters, J. C., Salmon, E. D. & Murray, A. W. 1996. Association of spindle assembly checkpoint component X MAD2 with unattached kinetochores. **Science**, 274(5285), 242-246.
- Cowan, M. 1999. Plant products as antimicrobial agents. **Clin Microbiol Rev**, 12(4), 564-582.
- Dadali, G., Demirhan, E. & Özbek, B. 2007. Effect of drying conditions on rehydration kinetics of microwave dried spinach. **Food and Bioproducts Processing**, 86(235-241).
- Darvishi, H., Khostaghaza, M. H. & Najafi, G. 2013. Ohmic heating of pomegranate juice: Electrical conductivity and pH change. **Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences**, 12(101-108).
- Demirhan, E. & Özbek, B. 2009. Microwave-drying characteristics of Basil. **Journal of Food Processing and Preservation**, 3(34), 476 - 494.
- Garcia-Viguera, C. & Bridle, P. 1999. Influence of structure on colour stability of anthocyanins and flavylum salts with ascorbic acid. **Food Chemistry**, 64(1), 21-26.
- Geveke, D. & Gurtler, J. B. 2009. Inactivation of *Lactobacillus plantarum* in Apple Cider, Using Radio Frequency Electric Fields. **Journal of food protection**, 72(3), 656-661.
- Helmja, K., Vaher, M., Gorbatšova, J. & Kaljurand, M. 2007. Characterization of Bioactive Compounds Contained in Vegetables of the Solanaceae Family by Capillary Electrophoresis. **Proceedings of the Estonian Academy of Sciences**, 56(172-186).
- Hou, W., Lee, M., Chen, H., Liang, W., Han, C., Liu, W. & Lin, Y. 2001. Antioxidant activities of dioscorin, the storage protein of yam (*Dioscorea batatas* Decne) tuber. **Agric Food Chem**, 49(10), 4956-4960.

- Icier, F., Hasan, Y. & Taner, B. 2006. Peroxidase inactivation and colour changes during ohmic blanching of pea puree. **Journal of Food Engineering**, 74(3), 424-429.
- Icier, F. & Ilicali, C. 2005. Temperature dependent electrical conductivities of fruit purees during ohmic heating. **Food Research International**, 38(10), 1135-1142.
- Kakac, S. & Liu, H. 1998. heat exchangers selection,rating,and thermal design. pp. 159-186. In **Heat Exchangers selection,rating,and thermal design**. 2<sup>nd</sup> ed. boca raton London New York: CRC press.
- Kinsella, J. E., Frankel, E., German, B. & Kanner, J. 1993. Possible mechanisms for the protective role of antioxidants in wine and plant foods. **Food Technol**, 47, 85-89.
- Leizerson, S. & Shimoni, E. 2005. Effect of Ultrahigh-Temperature Continuous Ohmic Heating Treatment on Fresh Orange Juice. **Food Chemistry**, 53(9), 3519–3524.
- Martynenko, A. & Chen, Y. 2016. Degradation kinetics of total anthocyanins and formation of polymeric color in blueberry hydrothermodynamic (HTD) processing. **Journal of Food Engineering**, 171(44-51).
- Mercali, G. D., Gurak, P. D., Schmitz, F. & Marczak, L. D. F. 2014. Evaluation of non-thermal effects of electricity on anthocyanin degradation during ohmic heating of jaborcaba (*Myrciaria cauliflora*) juice. **Food Chemistry**, 171, 200-205.
- Meredith, R. 1997. **Engineer s' Handbook of Industrial Microwave Heating**. London, English: The Institution of Electrical Engineers.
- Mitchell, F. R. G. & Alwis, A. A. P. D. 1989. Electrical Conductivity Meter for Food Sample. **Journal of Physics E: Scientific Instruments**, 22(8), 554-556.
- Palaniappan, S. & Sastry, S. K. 1991. Electrical conductivity of selected Solid Food. **Journal of Food Process Engineering**, 14(3), 247-260.
- Pataro, G., Ferrari, G. & Donsi, G. 2011. Aseptic processing of apricots in syrup by means of a continuous pilot scale ohmic unit. **LWT - Food Science and Technology**, 44(6), 1546-1554.
- Patras, A., Brunton, N. P., O'Donnell, C. & Tiwari, B. K. 2010. Effect of thermal processing on anthocyanin stability in foods; mechanisms and kinetics of degradation. **Trends in Food Science & Technology**, 21(1), 3-11.



- Sarang, S., Sastry, S. K. & Knipe, L. 2008. Electrical conductivity of fruits and meats during ohmic heating. **Journal of Food Engineering**, 87(3), 351-356.
- Shahidi, F., Anitha, P. K. & P.D.Wanasundara. 1992. Phenolic antioxidants. **Critical Reviews in Food Science and Nutrition**, 32(1), 67-103.
- Shao-qian, C., Liang, L. & Si-yi, P. 2011. Thermal Degradation Kinetics of Anthocyanins and Visual Color of Blood Orange Juice. **Agricultural Sciences in China**, 10(12), 1992-1997.
- Villota, R. & Hawkes, J. G. 2007. Reaction kinetics in food system. **Handbook of Food Engineering**, 263-264.
- Zell, M., Lyng, J. G., Morgan, D. J. & Cronin, D. A. 2011. Minimising heat losses during batch ohmic heating of solid food. **Food and Bioproducts Processing**, 89(2), 128-134.
- Zhao, J., Davis, L. & Verpoorte, R. 2005. Elicitor signal transduction leading to production of plant secondary metabolites. **Biotechnology Advances**, 23(4), 283-333.
- Zhao, Y., Kolbe, E. & Flugstad, B. 1999. A Method to Characterize Electrode Corrosion During Ohmic Heating. **Food Process Eng**, 22(81-89).





ภาคผนวก



ภาคผนวก ก

การพัฒนาอุปกรณ์และการทดสอบอุปกรณ์ไอเอ็มมิด  
ที่ใช้ในการทำการวิจัย

## ก.1 การพัฒนาอุปกรณ์การวัดค่าการนำไฟฟ้า (สิริรัตน์ และ อิศราพงศ์, 2554)

การออกแบบชุดอุปกรณ์การวัดค่าการนำไฟฟ้ามีส่วนประกอบที่สำคัญ 3 ส่วน ดังนี้

### ก. 1.1 การพัฒนาเซลล์วัดค่าการนำไฟฟ้า (Cell ohmic)

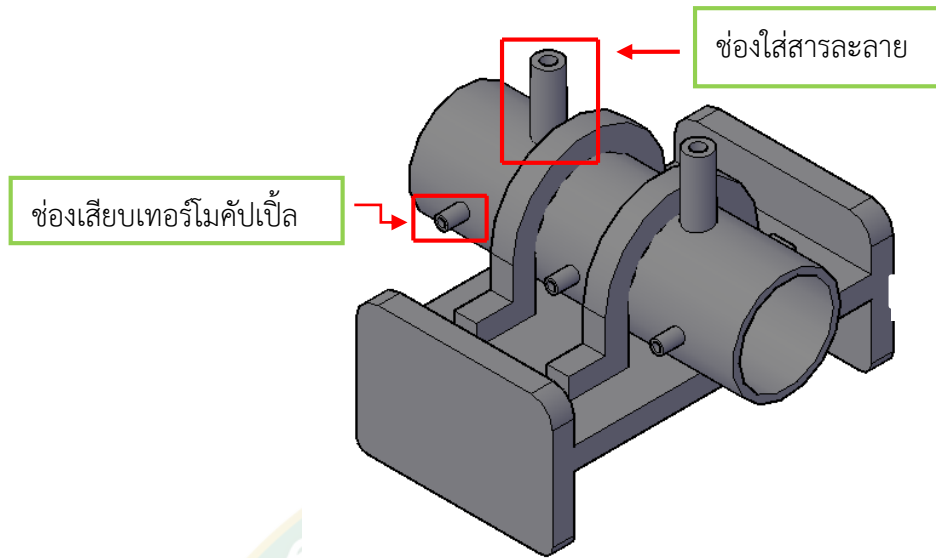
การออกแบบเซลล์โอห์มมิกและการเลือกใช้วัสดุที่เหมาะสมกับงานที่ใช้เป็นสิ่งจำเป็นและสำคัญอย่างยิ่งสำหรับอุตสาหกรรมอาหาร โดยมีหลักการต่างๆ ไปดังนี้

- สามารถถอดออกและรักษาความสะอาดได้ง่าย
- พื้นผิวที่สัมผัสกับอาหารจะต้องเรียบไม่เป็นหลุมเป็นบ่อหรือขรุขระ
- พื้นผิวที่สัมผัสกับอาหารสามารถทำความสะอาดและทั่วถึง

วัสดุที่ใช้ในการสร้างขั้วอิเล็กโทรดจะเป็นโลหะที่มีความสามารถนำไฟฟ้าได้ดี เช่น เหล็ก ปลอดภัยดี เหล็กธรรมดา เหล็กหล่อ เหล็กอาบสังกะสี ดีบุก ทองเหลือง ทองแดง อลูมิเนียม เป็นต้น ในขณะที่วัสดุที่นิยมใช้ในการสร้างโอห์มมิกเซลล์เป็นวัสดุทางวิศวกรรมที่เป็นฉนวนไฟฟ้าและมีความสามารถทนความร้อนได้สูง การคำนวณความยาวของอุปกรณ์เซลล์โอห์มมิกโดยอาศัยความสัมพันธ์ดังนี้

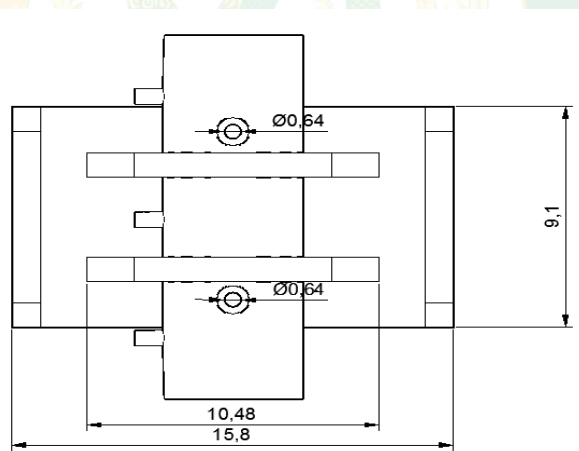
ค่าความเข้มของสนามไฟฟ้าสูงสุด	25	V
ค่าแรงดันไฟฟ้าของแหล่งจ่ายไฟ (Power supply)	250	V
ระยะห่างระหว่างขั้ว	16	cm

ดังนั้นในการออกแบบเซลล์โอห์มมิกจึงออกแบบให้มีระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรดประมาณ 10 cm เพื่อให้สารละลายหรือตัวอย่างอาหารไหลผ่านเข้าเซลล์อย่างเต็มที่ จึงออกแบบให้ระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรดประมาณ 10 cm โดยขั้วอิเล็กโทรดทำจากแผ่นไร้สนิม เบอร์ 316 และโอห์มมิกเซลล์ทำจากท่ออะคริลิกใส ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในประมาณ 4.4 cm และระหว่างท่อเจาะรูขนาด 2.5 mm จำนวน 3 ตำแหน่ง เพื่อวัดการกระจายอุณหภูมิ โดยเทอร์โมคัปเปิ้ลชนิดเค (K-type) และเปลี่ยนสัญญาณอนาล็อกเป็นดิจิตอลเพื่อนำไปประมวลผลโดยเครื่องคอมพิวเตอร์ ซึ่งเซลล์โอห์มมิกที่ออกแบบจะแสดงดังภาพผนวกที่ 1



ภาพผนวกที่ 1 เซลล์โหม้มิคที่ใช้ในการศึกษา

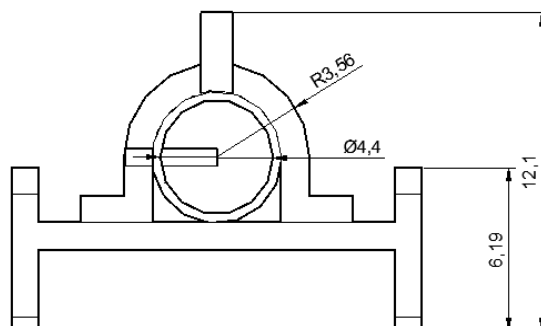
ที่มา: สิริรัตน์ และ อิศราพงศ์ (2554)



ภาพผนวกที่ 2 เซลล์โหม้มิค (ด้านบน)

ที่มา: สิริรัตน์ และ อิศราพงศ์ (2554)

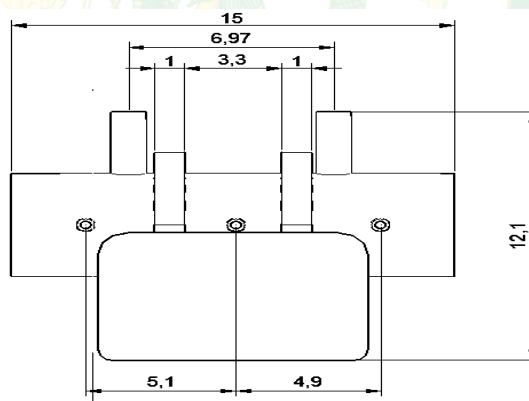
จากภาพภาคผนวกที่ 2 ด้านบนของเซลล์จะถูกออกแบบให้ให้มีช่องเติมสารละลาย 2 ช่อง และยังเป็นช่องระบายแรงดัน มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.64 mm และมีความยาวฐานเซลล์โหม้มิค 15.8 mm และความยาวของตัวยึดทรงกระบอกของเซลล์มีความยาว 10.48 mm



ภาพผนวกที่ 3 ด้านหน้าของเซลล์โหม้มิค

ที่มา: สิริรัตน์ และ อิศราพงศ์ (2554)

จากภาพภาคผนวกที่ 3 ด้านข้างของเซลล์ จะมีทรงกระบอกของเซลล์มีรัศมีเท่ากับ 3.56 mm มีความสูงของฐานเซลล์เท่ากับ 6.19 mm และความสูงระหว่างฐานเซลล์จนถึงช่องเติมสารละลาย 12.1 mm



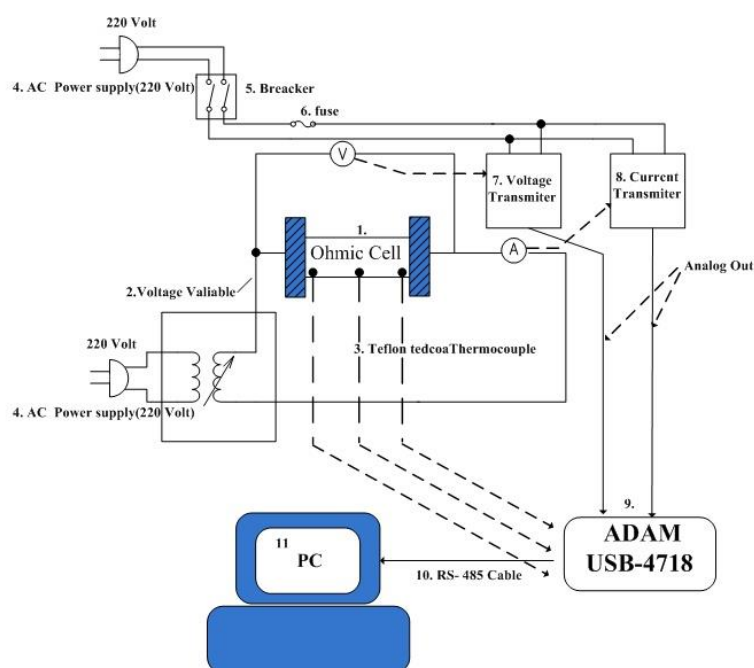
ภาพผนวกที่ 4 ด้านข้างของเซลล์โหม้มิค

ที่มา: สิริรัตน์ และ อิศราพงศ์ (2554)

จากภาพภาคผนวกที่ 4 ด้านข้างของเซลล์ จะมีช่องเสียบเทอร์โมคัปเปิ้ลชนิดเค อยู่ 3 ช่อง และระยะห่างระหว่างช่องทั้งสามคือ 5.1 และ 4.9 cm ตามลำดับจากซ้ายไปขวา

## ก. 2 การออกอุปกรณ์ควบคุม (Control) วงจรไฟฟ้า

ตัวควบคุมวงจรไฟฟ้าถูกออกแบบให้มีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยม มีฝาปิด ภายในจะประกอบไปด้วย ส่วนประกอบต่างๆ ของชุดอุปกรณ์ไฟฟ้า เช่น เบรกเกอร์ ฟิวส์ อุปกรณ์แปลงสัญญาณแรงดันไฟฟ้า อุปกรณ์แปลงสัญญาณกระแสไฟฟ้า และอุปกรณ์รับสัญญาณไฟฟ้าสามารถรับกำลังไฟฟ้าแบบปรับแรงดันไฟฟ้า ซึ่งสามารถปรับได้ 0-250 V เพื่อส่งกำลังไฟฟ้าไปใช้ในการทดลองโดยมีแผนผังวงจรดังภาพภาคผนวกที่ 5



ภาพผนวกที่ 5 แผนผังของตัวควบคุมวงจรไฟฟ้า

- (1. เซลล์ให้ความร้อนแบบโอห์มมิก 2. หม้อแปลงไฟฟ้าแบบปรับแรงดันได้ 3. เซนเซอร์วัดอุณหภูมิ 4. แหล่งกำเนิดไฟฟ้าแรงดัน 220 โวลต์ 5. เบรกเกอร์ 6. ฟิวส์ 7. อุปกรณ์แปลงสัญญาณแรงดันไฟฟ้า 8. อุปกรณ์แปลงสัญญาณกระแสไฟฟ้า 9. อุปกรณ์รับสัญญาณไฟฟ้า 10. สายสัญญาณเชื่อมต่อกับระบบคอมพิวเตอร์ 11. คอมพิวเตอร์)

ที่มา: ฤทธิชัย (2554)



### ก.3 การพัฒนาซอฟต์แวร์ในการประมวลผลด้วยโปรแกรมแลปวิว (สิริรัตน์ และ อิศราพงศ์, 2554)

#### 3.3.1 การออกแบบผังงานการทำงานของโปรแกรม (Program flowchart)

ผังงานหรือแผนภาพที่ใช้แสดงลำดับขั้นตอนในการทำงานของโปรแกรม ซึ่งจะใช้สัญลักษณ์สื่อสารความหมายแทนที่แต่ละขั้นตอนในการทำงานของโปรแกรม ซึ่งจะใช้ภาพสัญลักษณ์สื่อความหมายแทนแต่ละขั้นตอนของการทำงาน และใช้ลูกศรสื่อถึงลำดับขั้นตอน การออกแบบผังงานการทำงานของโปรแกรมจะช่วยให้ง่ายต่อการออกแบบในโปรแกรมโดยกำหนดโครงสร้างการทำงานของโปรแกรมเป็นโครงสร้างแบบลำดับ (Sequence structure) โดยจะเริ่มต้นด้วยการอ่านค่าที่จะนำไปคำนวณหาค่าการนำไฟฟ้าของน้ำผลไม้ จะมีกระแสไฟฟ้า (V) แล้วนำมาแปลงสัญญาณเป็นแอมแปร์ (A) จากนั้นนำค่าอุณหภูมิจากการวัดเทอร์โมคัปเปิ้ลชนิดเค นำค่าที่ได้นำมาแปลงผลทางคอมพิวเตอร์

#### 3.3.2 ขั้นตอนการใช้โปรแกรมกระบวนการให้ความร้อนแบบโอห์มมิก

ในการเรียกใช้งานโปรแกรมกระบวนการให้ความร้อนแบบโอห์มมิก โดยใช้ชุดคำสั่งจากโปรแกรมแลปวิว ต้องมีการตรวจสอบการเชื่อมต่ออุปกรณ์ต่างๆ เช่นการเชื่อมต่อหม้อแปลงไฟฟ้าแบบปรับแรงดันไฟฟ้าได้ (Voltage variable) เข้ากับตู้ควบคุมและสายส่งสัญญาณอุณหภูมิว่าตู้ควบคุมในสภาพที่แน่นไม่หลุดง่าย เมื่อตรวจสอบอุปกรณ์ต่างๆ ครบแล้วก็เริ่มใช้งานโปรแกรมได้ดังต่อไปนี้

3.3.2.1 เมื่อทำเปิดโปรแกรมแลปวิวที่ได้ออกแบบกระบวนการให้ความร้อนแบบโอห์มมิกแล้วต้องมีการปรับสัญญาณ (Calibrate) เพื่อเป็นจุดเชื่อมต่อรับสัญญาณอนาล็อกอินพุทในแต่ละจุดให้มีความสอดคล้องกับอุปกรณ์ Hardware ดังนี้

จากสมการ  $Y = mX + C$  ให้  $M$  คอลัมน์ 1 และ  $C$  เป็นคอลัมน์ที่ 2 จากนั้นให้ป้อนค่าลงไปทีละแถวที่ 1 และแถวที่ 2 ดังภาพ

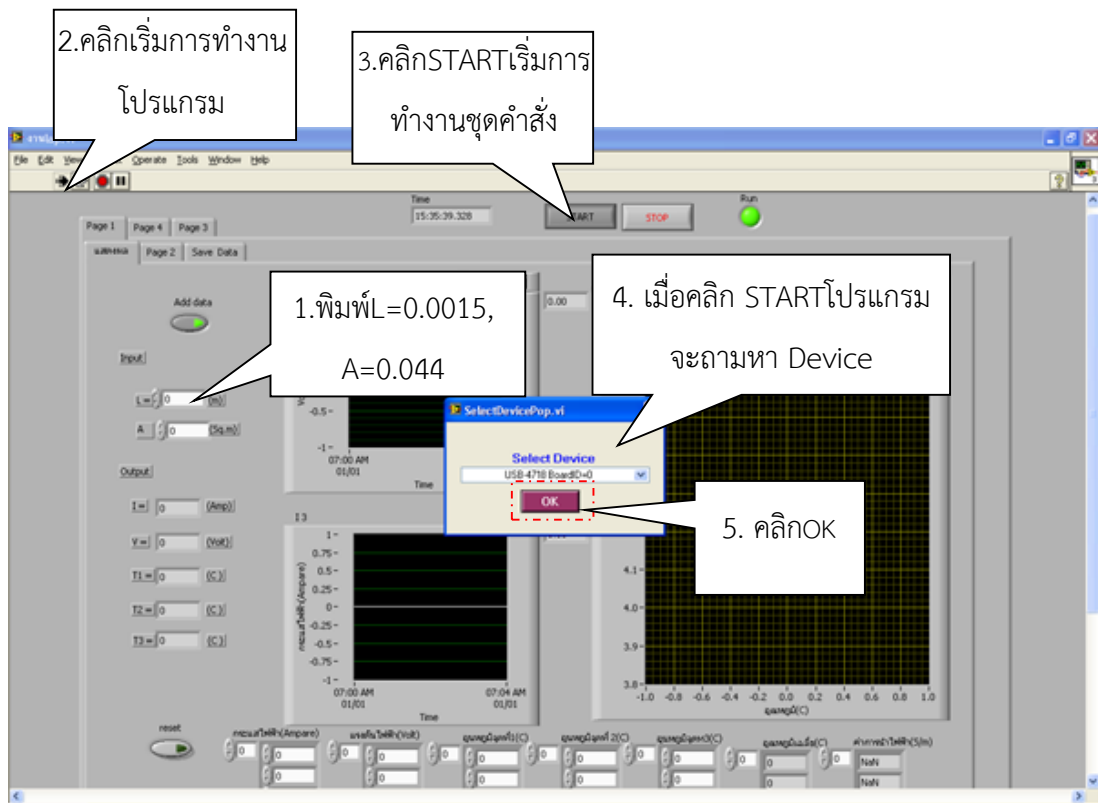
0.625	- 2.5
15.625	- 62.5

ตรงตำแหน่ง Input type แถวที่ 1 และ 2 ให้ตั้งค่าเป็น 4-20 mA แถวที่ 3-5 ตั้งค่าเป็น K

ภาพผนวกที่ 6 การป้อนค่าเมื่อเริ่มโปรแกรม

ที่มา: ฤทธิชัย (2554) และ Assawarachan *et al.* (2013)

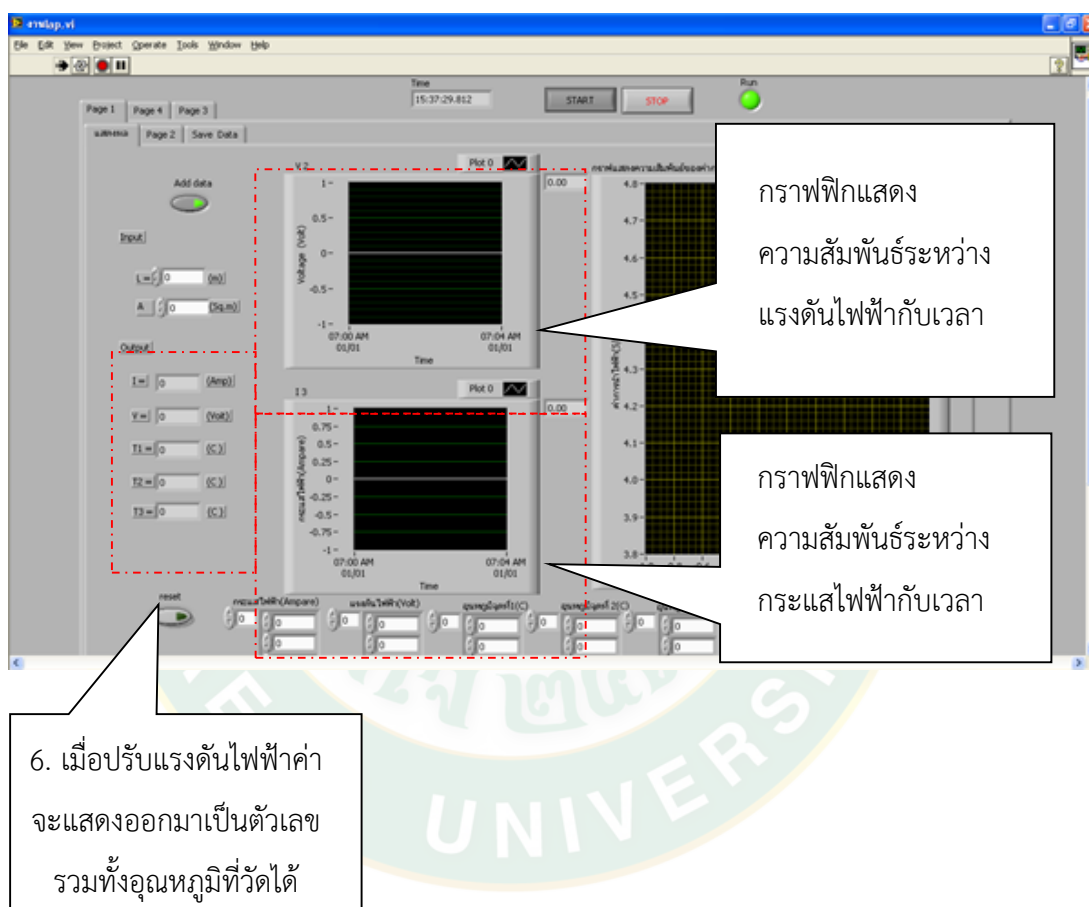
3.3.2.2 จากนั้นก็พิมพ์ค่าคงที่  $L$  กับ  $A$  ( $L$  คือความยาวระหว่างขั้วอิเล็กทรอนิกส์,  $A$  คือพื้นที่หน้าตัดของทรงกระบอกเซลล์โอห์มมิก) จากนั้นทำการกดเริ่มการทำงานของโปรแกรม (Run) ที่เครื่องหมายลูกศร → เพื่อเริ่มการทำงานของโปรแกรมจากนั้นให้กดปุ่ม START เพื่อเริ่มการทำงานของชุดคำสั่งกระบวนการให้ความร้อนแบบโอห์มมิกเมื่อเริ่มการทำงานของโปรแกรมจะถามหา Driver ของ USB4718 กรณีเมื่อเครื่องคอมพิวเตอร์หา Device ของ USB4718 ไม่เจอให้ทำการตรวจสอบสายสัญญาณ RS-485 ที่เชื่อมต่อระหว่าง USB4718 กับคอมพิวเตอร์ว่าเชื่อมต่อแน่นหรือเปล่าเมื่อหา Driver ของ USB4718 เจอจากนั้นกด OK เพื่อเริ่มการทำงาน



ภาพผนวกที่ 7 การอธิบายหน้าที่ของหน้าปัทม์

ที่มา: ฤทธิชัย (2554) และ Assawarachan *et al.* (2013)

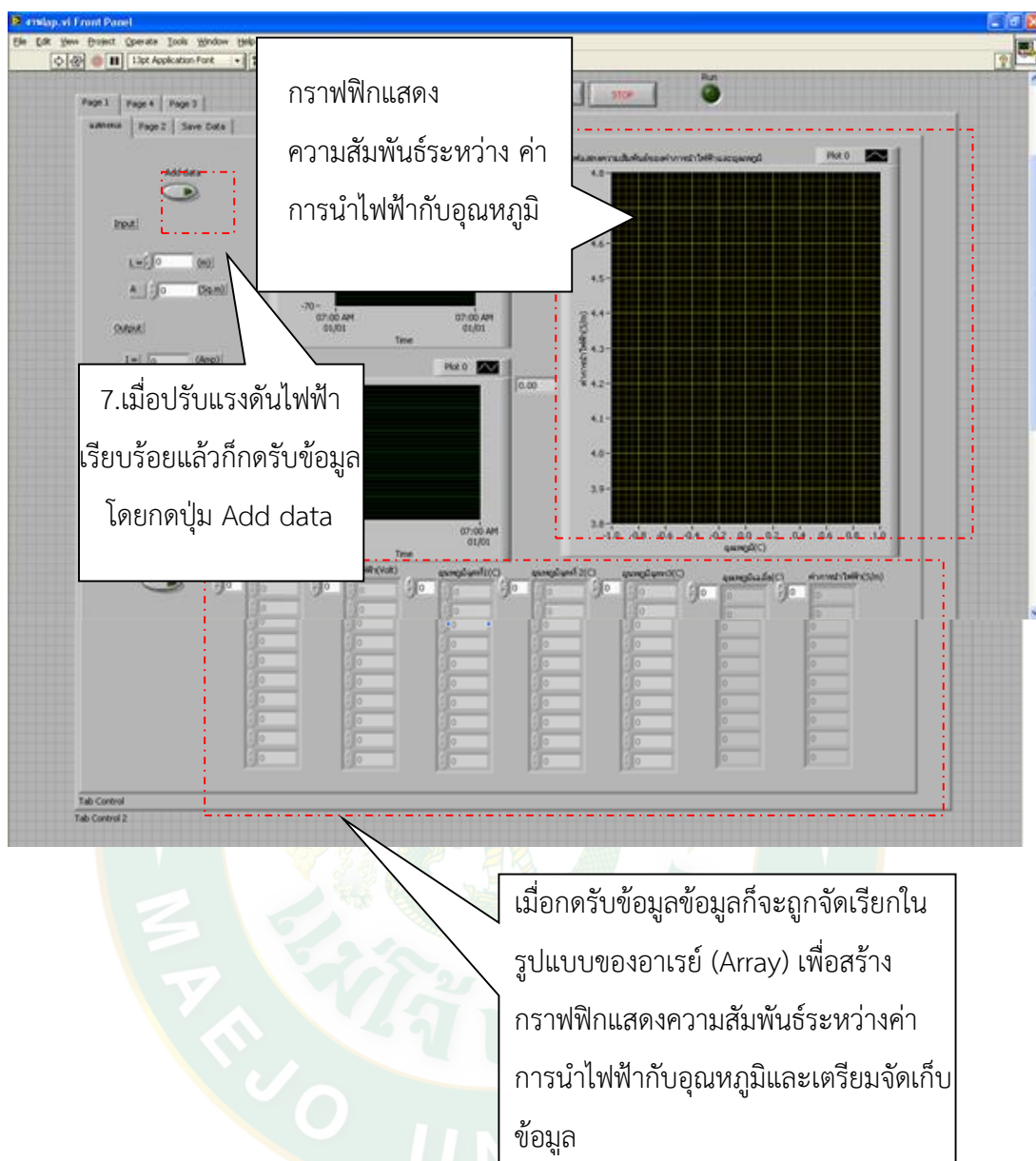
3.3.2.3 จากนั้นก็ทำการควบคุมชุดคำสั่งกระบวนการให้ความร้อนแบบโอทิมมิกโดยทำการควบคุมหรือปรับหม้อแปลงไฟฟ้าแบบปรับแรงดันไฟฟ้าได้ ตามแรงดันไฟฟ้าที่กำหนดคือ ที่แรงดันไฟฟ้า 75, 150 และ 225 V ซึ่งจะสังเกตเห็นได้ว่าเมื่อเราปรับแรงดันไฟฟ้าค่าก็จะแสดงค่าเป็นตัวเลข และแบบกราฟฟิกแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง แรงดันไฟฟ้ากับเวลา และกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับเวลา



ภาพผนวกที่ 8 อธิบายหน้าที่ของแต่ละส่วนในหน้าปัทม์

ที่มา: ฤทธิชัย (2554) และ Asswarachan *et al.* (2013)

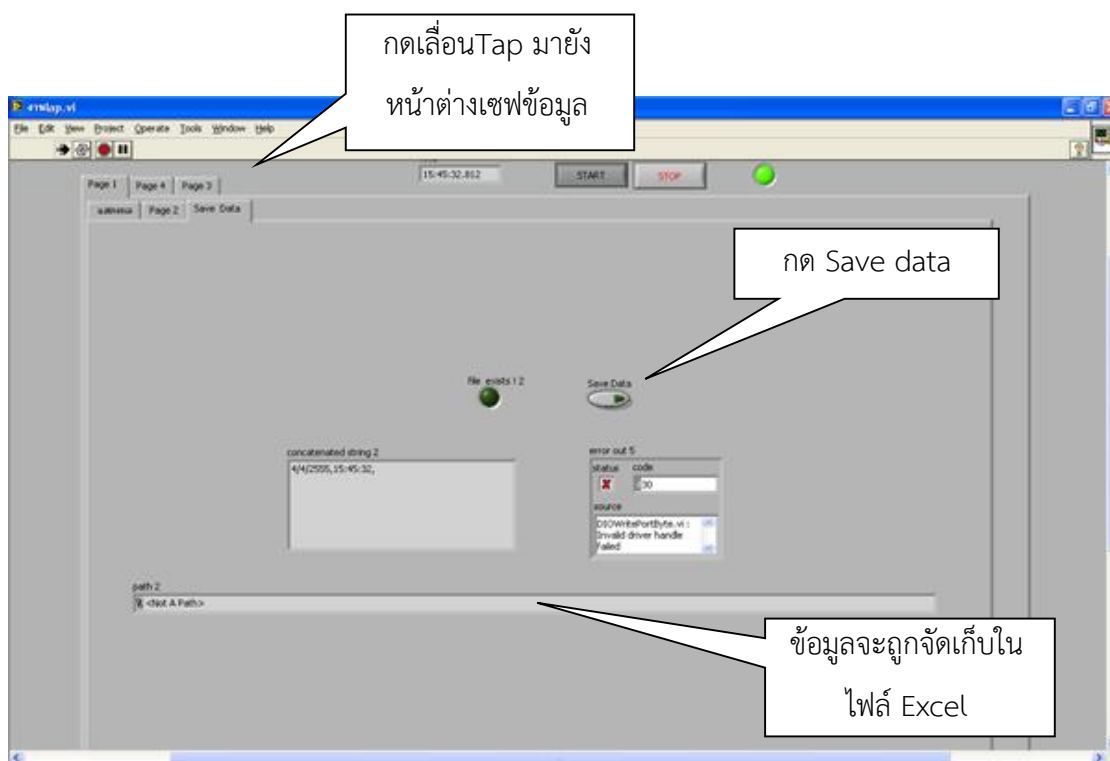
3.3.2.4 เมื่อสังเกตเห็นได้ว่าข้อมูลทุกอย่างครบทุกช่องก็กดรับข้อมูลมาเก็บไว้ในรูปแบบของอาร์เรย์ (Array) เพื่อเข้าสู่โหมดคำนวณค่าการนำไฟฟ้าและอุณหภูมิเฉลี่ยเพื่อจะนำค่าทั้ง 2 มาสร้างกราฟฟิกแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำไฟฟ้ากับอุณหภูมิ



ภาพผนวกที่ 9 อธิบายหน้าที่ของแต่ละส่วนในการแสดงผล

ที่มา: ฤทธิชัย (2554) และ Assawarachan *et al.* (2013)

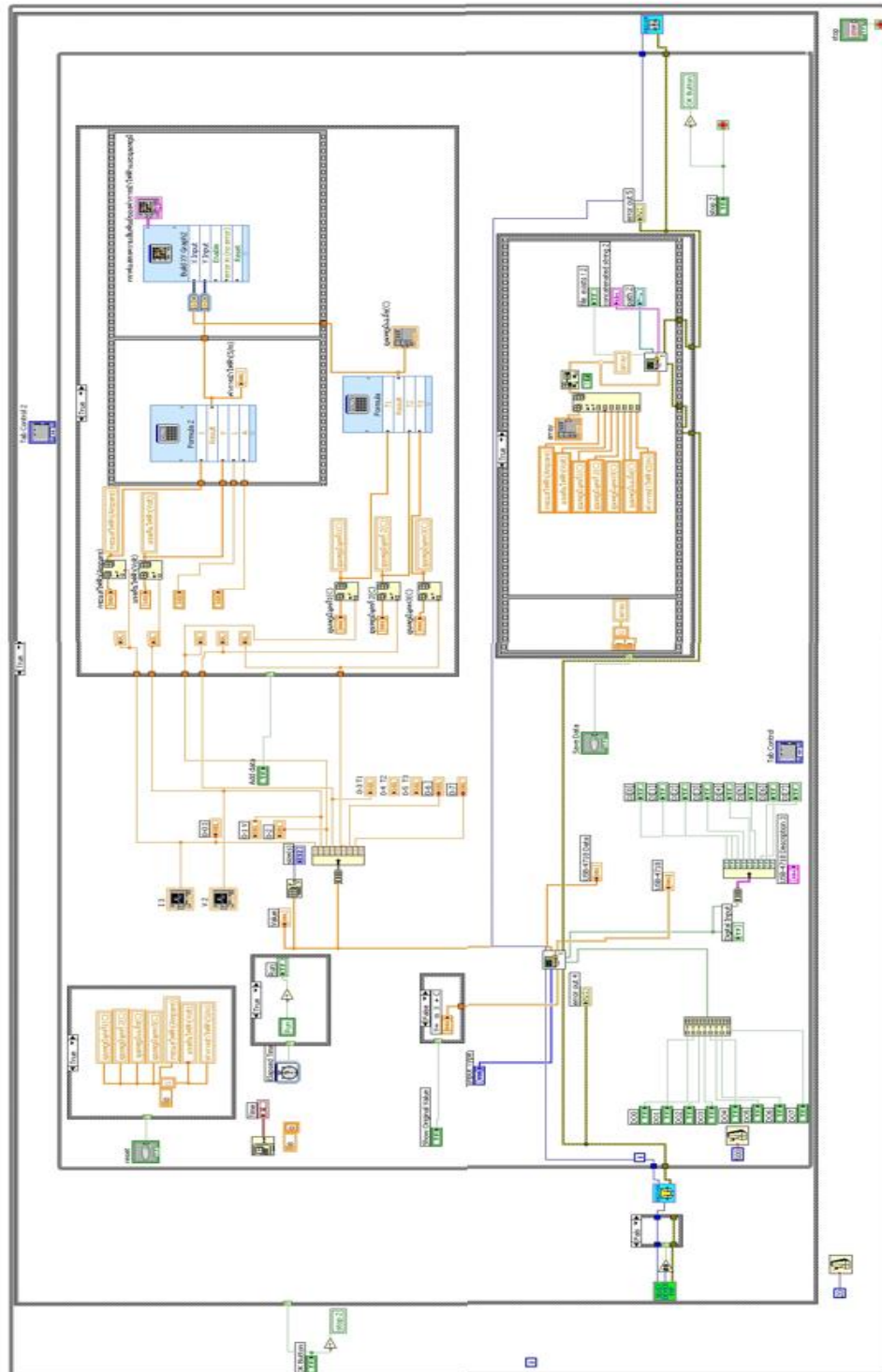
3.3.2.5 หลังจากเก็บข้อมูลจนถึงอุณหภูมิที่ต้องการจากนั้นก็ถึงขั้นตอนการจัดเก็บข้อมูลโดยการเลือกหน้าไปยังส่วนของการเซฟข้อมูลโดยเลื่อน Tap ไปยังหน้าต่างเซฟข้อมูลแล้วกด Save data เมื่อกด Save ข้อมูลจะถูกจัดเก็บไปยังไฟล์ Excel



ภาพผนวกที่ 10 อธิบายการทำงานของในส่วนของการบันทึกข้อมูล

ที่มา: ฤทธิชัย (2554) และ Assawarachan *et al.* (2013)





ภาพผนวกที่ 11 Block Diagram วงจรหลักการทำงานของระบบการให้ความร้อนแบบไอทมมิก

ที่มา: กุทธิชัย (2554) และ Assawarachan *et al.* (2013)

#### ก.4 ทดสอบความแม่นยำของอุปกรณ์วัดค่าการนำไฟฟ้าด้วยสารละลายน้ำเกลือ (NaCl) เข้มข้น 0.1 M

การเปรียบเทียบผลของความเข้มข้นไฟฟ้าที่มีต่อเวลาในการให้ความร้อนของสารละลายน้ำเกลือ 0.1 M แสดงดังตารางภาคผนวกที่ 1 และภาพภาคผนวกที่ 11-14 เมื่อพิจารณาผลของความเข้มข้นไฟฟ้าที่มีต่อเวลาในการให้ความร้อนพบว่า เมื่อให้ความเข้มข้นไฟฟ้าสูงขึ้น เวลาที่ใช้ในการทำให้อุณหภูมิของสารละลายเกลือจากอุณหภูมิห้องจนถึงอุณหภูมิ 80 °C จากผลการศึกษาค่าการนำไฟฟ้าของสารละลายน้ำเกลือโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) ความเข้มข้น 0.1 M ที่อุณหภูมิ 25-80 °C จากสมการการเตรียมน้ำเกลือเข้มข้น 0.1 M ได้ค่าการนำไฟฟ้าอยู่ในช่วง  $1.02 \pm 0.0305$  ถึง  $2.51 \pm 0.0125$  S/m จากผลการทดลองดังกล่าวจะเห็นได้ว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นไฟฟ้าจะส่งผลให้อุณหภูมิเพิ่มขึ้น และยังส่งผลให้ค่าการนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้นด้วยดังภาพภาคผนวกที่ 11 - 14 ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นไฟฟ้าเปรียบเสมือนการเพิ่มพลังงานให้กับระบบทำให้สามารถสร้างความร้อนได้อย่างรวดเร็วนั่นเอง (สิริรัตน์ และ อิศราพงศ์, 2554)

#### การเตรียมน้ำเกลือเข้มข้น 0.1 M

##### หาน้ำหนักเกลือบริสุทธิ์เข้มข้นโซเดียมคลอไรด์ (NaCl)

$$\begin{array}{l} \text{NaCl} \\ = 22.9897 + 35.453 \\ = 58.5 \end{array} \quad \longrightarrow \quad \begin{array}{l} \text{Mol} = \frac{\text{จำนวนสาร (g)}}{\text{มวลโมเลกุล}} \\ \downarrow \\ 0.1 = \frac{\text{จำนวนสาร (g)}}{58.5} \\ \downarrow \end{array}$$

$$\text{จำนวนสาร (g)} = 0.1 \times 58.5 = 5.85 \text{ (g)}$$

สำหรับความเข้มข้น 0.1 M



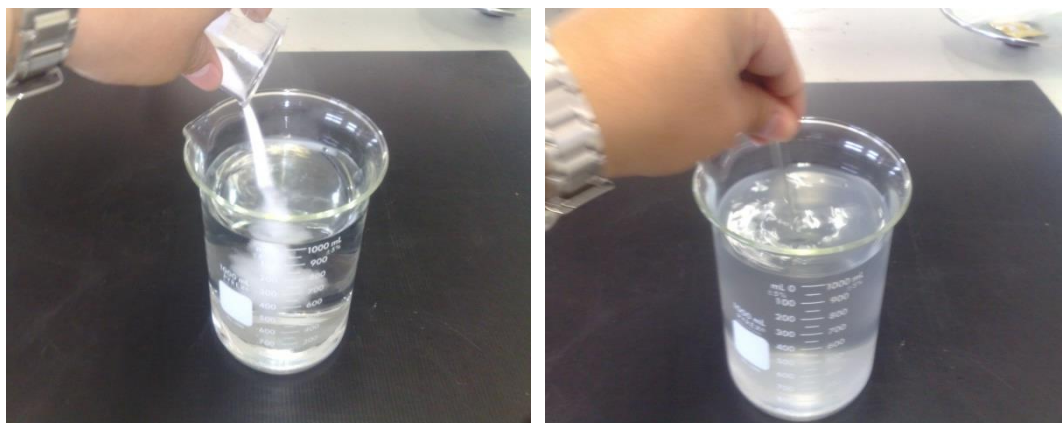
ภาพผนวกที่ 12 ชั่งน้ำหนักโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) จำนวน 5.85 g

ที่มา: สิริรัตน์ และ อิศราพงศ์ (2554)



ภาพผนวกที่ 13 เตรียมน้ำบริสุทธิ์ปริมาตร 1000 mL เพื่อละลาย  
โซเดียมคลอไรด์ 5.85 g

ที่มา: สิริรัตน์ และ อิศราพงศ์ (2554)



ภาพผนวกที่ 14 เทโซเดียมคลอไรด์ 5.85 (g) ลงในน้ำบริสุทธิ์เพื่อละลายเกลือ  
จากนั้นคนจนเกลือละลายหมด

ที่มา: สิริรัตน์ และ อิศราพงศ์ (2554)



ภาพผนวกที่ 15 เมื่อละลายเกลือจนหมดแล้วดูดสารละลายเกลือ  
ลงในเซลล์โหม้มิคที่ได้เตรียมเอาไว้เพื่อทำการทดลองต่อไป

ที่มา: สิริรัตน์ และ อิศราพงศ์ (2554)

ตารางผนวกที่ 1 ค่าการนำไฟฟ้าของสารละลายน้ำเกลือ 0.1 M

อุณหภูมิ (°C)	ระดับความเข้มของสนามไฟฟ้า (S/m)			ค่าการนำไฟฟ้าของ สารละลายมาตรฐาน อ้างอิง
	5 V/cm	10 V/cm	15 V/cm	
40	1.40±0.0168	1.43±0.0055	1.44±0.0071	1.458
50	1.69±0.0158	1.69±0.0086	1.68±0.0178	1.713
60	1.94±0.0059	1.95±0.0127	1.95±0.0153	1.977
70	2.23±0.0026	2.19±0.0523	2.26±0.0307	2.242
80	2.52±0.0214	2.50±0.0041	2.52±0.0241	2.523

ที่มา: สิริรัตน์ และ อิศราพงศ์ (2554)

ตารางผนวกที่ 2 ค่าร้อยละการเบี่ยงเบนค่าการนำไฟฟ้าของสารละลายน้ำเกลือ 0.1 M ที่ระดับความเข้มสนามไฟฟ้า 5 V/cm

อุณหภูมิ (°C)	5 V/cm	ค่าการนำไฟฟ้าของสารละลาย มาตรฐานอ้างอิง (S/m)	การเบี่ยงเบน (%)
40	1.40±0.0168	1.458	4.101
50	1.69±0.0158	1.713	1.626
60	1.94±0.0059	1.977	2.616
70	2.23±0.0026	2.242	0.849
80	2.52±0.0214	2.523	0.212
		เฉลี่ย	1.881

ที่มา: สิริรัตน์ และ อิศราพงศ์ (2554)



นำข้อมูลการเปรียบเทียบค่าการนำไฟฟ้าจากตารางภาคผนวกที่ 2 มาหาเปอร์เซ็นต์ความเบี่ยงเบนช่วงอุณหภูมิ 40 ถึง 80 °C ที่ระดับความเข้มของสนามไฟฟ้า 5 V/cm เทียบกับค่าการนำไฟฟ้าของสารละลายมาตรฐานอ้างอิง พบว่าจะมีเปอร์เซ็นต์เบี่ยงเบนอยู่ในช่วง 0.212 ถึง 4.101 % เมื่อเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ความเบี่ยงเบนพบว่ามีค่า 1.881 %

**ตารางผนวกที่ 3** ค่าร้อยละการเบี่ยงเบนค่าการนำไฟฟ้าของสารละลายน้ำเกลือ 0.1 M ที่ระดับความเข้มสนามไฟฟ้า 10 V/cm

อุณหภูมิ (°C)	10 V/cm	ค่าการนำไฟฟ้าของสารละลาย มาตรฐานอ้างอิง (S/m)	การเบี่ยงเบน (%)
40	143±0.0055	1.458	1.980
50	1.69±0.0086	1.713	1.626
60	1.95±0.0127	1.977	1.909
70	2.19±0.0523	2.242	3.677
80	2.5±0.0041	2.523	1.626
		เฉลี่ย	2.164

ที่มา: สิริรัตน์ และ อิสราพงศ์ (2554)

นำข้อมูลการเปรียบเทียบค่าการนำไฟฟ้าจากตารางภาคผนวกที่ 3 มาหาเปอร์เซ็นต์ความเบี่ยงเบนช่วงอุณหภูมิ 40-80 °C ที่ระดับความเข้มของสนามไฟฟ้า 10 V/cm เทียบกับค่าการนำไฟฟ้าของสารละลายมาตรฐานอ้างอิงพบว่าจะมีเปอร์เซ็นต์เบี่ยงเบนอยู่ในช่วง 1.626 ถึง 3.677 % เมื่อเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ความเบี่ยงเบนพบว่ามีค่า 2.164 %



**ตารางผนวกที่ 4** ค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงค่าการนำไฟฟ้าของสารละลายน้ำเกลือ 0.1 M ที่ระดับความเข้มข้นไฟฟ้า 15 V/cm

อุณหภูมิ (°C)	15 V/cm	ค่าการนำไฟฟ้าของสารละลาย มาตรฐานอ้างอิง (S/m)	การเปลี่ยนแปลง (%)
40	1.44±0.0071	1.458	1.273
50	1.68±0.0178	1.713	2.333
60	1.95±0.0153	1.977	1.909
70	2.26±0.0307	2.242	1.273
80	2.52±0.0241	2.523	0.212
		เฉลี่ย	1.400

ที่มา: สิริรัตน์ และ อิศราพงศ์ (2554)

นำข้อมูลการเปรียบเทียบค่าการนำไฟฟ้าจากตารางผนวกที่ 4 มาหาเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงช่วงอุณหภูมิ 40-80 °C ที่ระดับความเข้มข้นของสนามไฟฟ้า 15 V/cm เทียบกับค่าการนำไฟฟ้าของสารละลายมาตรฐานอ้างอิงพบว่าจะมีเปอร์เซ็นต์เปลี่ยนแปลงอยู่ในช่วง 0.212 ถึง 2.333 % เมื่อเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงพบว่ามีค่า 1.4 %



ภาคผนวก ข

มาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน

THAI COMMUNITY PRODUCT STANDARD

มผช.484/2547

# มาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน

## น้ำมะเกี๋ยง

### 1. ขอบข่าย

1.1 มาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชนนี้ครอบคลุมเฉพาะน้ำมะเกี๋ยงพร้อมดื่ม บรรจุในภาชนะบรรจุ

### 2. บทนิยาม

ความหมายของคำที่ใช้ในมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชนนี้ มีดังต่อไปนี้

2.1 น้ำมะเกี๋ยง หมายถึง เครื่องดื่มที่ได้จากการนำผลไม้ที่สุกและอยู่ในสภาพดีมาล้างให้สะอาด สกัดเอาแต่น้ำ อาจเจือน้ำ อาจปรุงแต่งรสด้วยน้ำตาลหรือน้ำผึ้ง อย่างไรก็ตามหนึ่งหรือผสมกัน และอาจเติมสารเพิ่มความเป็นกรด นำไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิและระยะเวลาที่เหมาะสม

### 3. คุณลักษณะที่ต้องการ

#### 3.1 ลักษณะทั่วไป

ต้องเป็นของเหลว อาจตกตะกอนเมื่อวางทิ้งไว้ อาจมีขึ้นเนือมะเกี๋ยงปนอยู่ได้บ้างเล็กน้อย

#### 3.2 สี กลิ่น และกลิ่นรส

ต้องมีสี กลิ่น และกลิ่นรสที่ดีตามธรรมชาติของส่วนประกอบที่ใช้ ไม่มีกลิ่นแอลกอฮอล์ ปราศจากกลิ่นรสอื่นที่ไม่พึงประสงค์

เมื่อตรวจสอบโดยวิธีให้คะแนนตามข้อ 8.1 แล้วต้องได้คะแนนเฉลี่ยของแต่ละลักษณะจากผู้ตรวจสอบทุกคนไม่น้อยกว่า 3 คะแนน และไม่มีลักษณะใดได้ 1 คะแนน จากผู้ตรวจสอบคนใดคนหนึ่ง

#### 3.3 สิ่งแปลกปลอม

ต้องไม่พบสิ่งแปลกปลอมที่ไม่ใช่ส่วนประกอบที่ใช้ เช่น เส้นผม ดิน ทราย กรวด ชิ้นส่วนหรือสิ่งปฏิกูลจากสัตว์

#### 3.4 วัตถุเจือปนอาหาร (ถ้ามี)

3.4.1 หากมีการใช้วัตถุกันเสีย ให้ใช้ได้ตามชนิดและปริมาณที่กฎหมายกำหนด

3.4.2 หากมีการใช้สารเพิ่มความเป็นกรด ให้ใช้ได้ตามชนิดและปริมาณที่กฎหมายกำหนด

#### 3.5 ความเป็นกรด-ด่าง ต้องไม่เกิน 4.3

#### 3.6 จุลินทรีย์

3.6.1 สตาฟีโลค็อกคัส ออเรียส ต้องไม่พบในตัวอย่าง 1 มิลลิลิตร

3.6.2 เอสเชอริเชีย โคลิ โดยวิธีเอ็มพีเอ็น ต้องน้อยกว่า 2.2 ต่อตัวอย่าง 100 mL

3.6.3 ยีสต์และรา ต้องน้อยกว่า 100 CFU 1 mL

#### 4. สุขลักษณะ

4.1 สุขลักษณะในการทำน้ำมะเกี๋ยง ให้เป็นไปตามคำแนะนำตามภาคผนวก ก.

#### 5. การบรรจุ

5.1 ให้บรรจุน้ำมะเกี๋ยงในภาชนะบรรจุที่สะอาด ปิดได้สนิท และสามารถป้องกันการปนเปื้อนจากสิ่งสกปรกภายนอกได้

5.2 ปริมาตรสุทธิของน้ำมะเกี๋ยงในแต่ละภาชนะบรรจุ ต้องไม่น้อยกว่าที่ระบุไว้ที่ฉลาก

#### 6. เครื่องหมายและฉลาก

6.1 ที่ภาชนะบรรจุน้ำมะเกี๋ยงทุกหน่วย อย่างน้อยต้องมีเลข อักษร หรือเครื่องหมายแจ้งรายละเอียดต่อไปนี้อย่างชัดเจนและ ชัดเจน

- (1) ชื่อผลิตภัณฑ์
  - (2) ส่วนประกอบที่สำคัญ
  - (3) ชนิดและปริมาณวัตถุเจือปนอาหาร (ถ้ามี)
  - (4) ปริมาตรสุทธิ
  - (5) วัน เดือน ปีที่ทำ และวัน เดือน ปีที่หมดอายุ หรือข้อความว่า “ควรบริโภคก่อน (วัน เดือน ปี)”
  - (6) ข้อแนะนำในการเก็บรักษา เช่น ควรเก็บรักษาที่อุณหภูมิไม่เกิน 4 °C
  - (7) ชื่อผู้ทำ หรือสถานที่ทำ พร้อมสถานที่ตั้ง หรือเครื่องหมายการค้าที่จดทะเบียน
- ในกรณีใช้ภาษาต่างประเทศ ต้องมีความหมายตรงกับภาษาไทยที่กำหนดไว้ข้างต้น

#### 7. การชักตัวอย่างและเกณฑ์ตัดสิน

7.1 รุ่น ในที่นี้ หมายถึง น้ำมะเกี๋ยงที่มีส่วนประกอบเดียวกัน ทำในระยะเวลาเดียวกัน

7.2 การชักตัวอย่างและการยอมรับ ให้เป็นไปตามแผนการชักตัวอย่างที่กำหนดต่อไปนี้

7.2.1 การชักตัวอย่างและการยอมรับ สำหรับทดสอบสิ่งแปลกปลอม การบรรจุ และเครื่องหมาย และฉลากให้ชักตัวอย่างโดยวิธีสุ่มจากรุ่นเดียวกัน จำนวน 3 หน่วยภาชนะบรรจุ เมื่อตรวจสอบแล้วทุกตัวอย่างต้องเป็นไปตามข้อ 3.3 ข้อ 5. และ ข้อ 6. จึงจะถือว่าน้ำมะเกี๋ยงรุ่นนั้นเป็นไปตามเกณฑ์ที่กำหนด

7.2.2 การชักตัวอย่างและการยอมรับ สำหรับการทดสอบลักษณะทั่วไปและสี กลิ่น และกลิ่นรส ให้ใช้ตัวอย่างที่ผ่านการทดสอบตามข้อ 7.2.1 แล้ว จำนวน 3 หน่วยภาชนะบรรจุ เมื่อ

ตรวจสอบแล้วตัวอย่างต้องเป็นไปตามข้อ 3.1 และข้อ 3.2 จึงจะถือว่าน้ำมะเกี๋ยงรุ้นนั้นเป็นไปตามเกณฑ์ที่กำหนด

7.2.3 การซีกตัวอย่างและการยอมรับ สำหรับการทดสอบวัตถุเจือปนอาหารและความเป็นกรด-ต่างให้ซีกตัวอย่างโดยวิธีสุ่มจากรุ้นเดียวกัน จำนวน 3 หน่วยภาชนะบรรจุ นำมาทำเป็นตัวอย่างรวมโดยมีปริมาตรรวมไม่น้อยกว่า 300 mL กรณีตัวอย่างไม่พอให้ซีกตัวอย่างเพิ่มโดยวิธีสุ่มจากรุ้นเดียวกันให้ได้ตัวอย่างที่มีปริมาตรรวมตามที่กำหนด เมื่อตรวจสอบแล้วตัวอย่างต้องเป็นไปตามข้อ 3.4 และข้อ 3.5 จึงจะถือว่าน้ำมะเกี๋ยงรุ้นนั้นเป็นไปตามเกณฑ์ที่กำหนด

7.2.4 การซีกตัวอย่างและการยอมรับ สำหรับการทดสอบจุลินทรีย์ ให้ซีกตัวอย่างโดยวิธีสุ่มจากรุ้นเดียวกันจำนวน 3 หน่วยภาชนะบรรจุ โดยมีปริมาตรรวมไม่น้อยกว่า 500 mL กรณีตัวอย่างไม่พอให้ซีกตัวอย่างเพิ่มโดยวิธีสุ่มจากรุ้นเดียวกันให้ได้ตัวอย่างที่มีปริมาตรรวมตามที่กำหนด เมื่อตรวจสอบแล้วตัวอย่างต้องเป็นไปตามข้อ 3.6 จึงจะถือว่าน้ำมะเกี๋ยงรุ้นนั้นเป็นไปตามเกณฑ์ที่กำหนด

7.2.5 เกณฑ์ตัดสินตัวอย่างน้ำมะเกี๋ยงต้องเป็นไปตามข้อ 7.2.1 ข้อ 7.2.2 ข้อ 7.2.3 และข้อ

7.2.4 ทุกข้อ จึงจะถือว่าน้ำมะเกี๋ยงรุ้นนั้นเป็นไปตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชนนี้

## 8. การทดสอบ

8.1 การทดสอบลักษณะทั่วไปและสี กลิ่น และกลิ่นรส

8.1.1 ให้แต่งตั้งคณะผู้ตรวจสอบ ประกอบด้วยผู้ที่มีความชำนาญในการตรวจสอบน้ำมะเกี๋ยงอย่างน้อย 5 คน แต่ละคนจะแยกกันตรวจและให้คะแนนโดยอิสระ

8.1.2 เทตัวอย่างน้ำมะเกี๋ยงลงในแก้วใสโดยมีกระดาษสีขาวเป็นฉากหลัง ตรวจสอบโดยการตรวจพินิจและชิม

8.1.3 หลักเกณฑ์การให้คะแนน ให้เป็นไปตามตารางที่ 1

### ตารางที่ 1 หลักเกณฑ์การให้คะแนน

(ข้อ 8.1.3)

ลักษณะที่ตรวจสอบ	เกณฑ์ที่กำหนด	ระดับการตัดสิน (คะแนน)			
		ดีมาก	ดี	พอใช้	ต้องปรับปรุง
ลักษณะทั่วไป	ต้องเป็นของเหลว อาจตกตะกอน เมื่อวางทิ้งไว้ อาจมีขึ้นเนื้อเมะเกียง ปนอยู่ได้บ้างเล็กน้อย	4	3	2	1
สี กลิ่น และกลิ่นรส	ต้องมีสี กลิ่น และกลิ่นรสที่ติดตาม ธรรมชาติของส่วนประกอบที่ใช้ ไม่ มีกลิ่นแอลกอฮอล์ปราศจากกลิ่นรส อื่นที่ไม่พึงประสงค์	4	3	2	1

8.2 การทดสอบสิ่งแปลกปลอม ภาชนะบรรจุ และเครื่องหมายและฉลาก  
ให้ตรวจพินิจ

8.3 การทดสอบวัตถุเจือปนอาหารและความเป็นกรด-ด่าง  
ให้ใช้วิธีทดสอบตาม AOAC หรือวิธีทดสอบอื่นที่เป็นที่ยอมรับ

8.4 การทดสอบจุลินทรีย์

ให้ใช้วิธีทดสอบตาม AOAC หรือ BAM หรือวิธีทดสอบอื่นที่เป็นที่ยอมรับ

8.5 การทดสอบปริมาตรสุทธิ

ให้ใช้เครื่องวัดปริมาตรที่เหมาะสม



## ภาคผนวก ก.

### สัญลักษณ์

(ข้อ 4.1)

#### ก.1 สถานที่ตั้งและอาคารที่ทำ

ก.1.1 สถานที่ตั้งอาคารและที่ใกล้เคียง อยู่ในที่ที่จะไม่ทำให้ผลิตภัณฑ์ที่เกิดการปนเปื้อนได้ง่าย โดย

ก.1.1.1 สถานที่ตั้งตัวอาคารและบริเวณโดยรอบ สะอาด ไม่มีน้ำขังแฉะและสกปรก

ก.1.1.2 อยู่ห่างจากบริเวณหรือสถานที่ที่มีฝุ่น เขม่า ควัน มากผิดปกติ

ก.1.1.3 ไม่อยู่ใกล้เคียงกับสถานที่น่ารังเกียจ เช่น บริเวณเพาะเลี้ยงสัตว์ แหล่งเก็บหรือกำจัด ขยะ

ก.1.2 อาคารที่ทำมีขนาดเหมาะสม มีการออกแบบก่อสร้างในลักษณะที่ง่ายแก่การบำรุงรักษา การทำความสะอาด และสะดวกในการปฏิบัติงาน โดย

ก.1.2.1 พื้น ฝาผนัง และเพดานของอาคารที่ทำ ก่อสร้างด้วยวัสดุที่คงทน เรียบ ทำความ สะอาดและซ่อมแซมให้อยู่ในสภาพที่ดีตลอดเวลา

ก.1.2.2 แยกบริเวณที่ทำออกเป็นสัดส่วน ไม่อยู่ใกล้ห้องสุขา ไม่มีสิ่งของที่ไม่ใช้แล้วหรือไม่ เกี่ยวข้องกับการทำอยู่ในบริเวณที่ทำ

ก.1.2.3 พื้นที่ปฏิบัติงานไม่แออัด มีแสงสว่างเพียงพอ และมีการระบายอากาศที่เหมาะสม

#### ก.2 เครื่องมือ เครื่องจักร และอุปกรณ์ที่ใช้ทำ

ก.2.1 ภาชนะหรืออุปกรณ์ในการทำที่สัมผัสกับผลิตภัณฑ์ ทำจากวัสดุผิวเรียบ ไม่เป็นสนิม ล้างทำ ความสะอาดได้ง่าย

ก.2.2 เครื่องมือ เครื่องจักร และอุปกรณ์ที่ใช้ สะอาด เหมาะสมกับการใช้งาน ไม่ก่อให้เกิดการ ปนเปื้อนติดตั้งได้ง่าย มีปริมาณเพียงพอ รวมทั้งสามารถทำความสะอาดได้ง่ายและทั่วถึง

#### ก.3 การควบคุมกระบวนการทำ

ก.3.1 วัตถุดิบและส่วนผสมในการทำ สะอาด มีคุณภาพ มีการล้างหรือทำความสะอาดก่อน นำไปใช้

ก.3.2 การทำ การเก็บรักษา การขนย้าย และการขนส่ง ให้มีการป้องกันการปนเปื้อนและการ เสื่อมเสียของผลิตภัณฑ์

#### ก.4 การสุขาภิบาล การบำรุงรักษา และการทำความสะอาด

ก.4.1 น้ำที่ใช้ล้างทำความสะอาดเครื่องมือ เครื่องจักร อุปกรณ์ และมือของผู้ทำ เป็นน้ำสะอาด และมีปริมาณเพียงพอ

ก.4.2 มีวิธีการป้องกันและกำจัดสัตว์นำเชื้อ แมลงและฝุ่นผง ไม่ให้เข้าในบริเวณที่ทำตามความเหมาะสม

ก.4.3 มีการกำจัดขยะ สิ่งสกปรก และน้ำทิ้ง อย่างเหมาะสม เพื่อไม่ก่อให้เกิดการปนเปื้อนกลับลงสู่ผลิตภัณฑ์

ก.4.4 สารเคมีที่ใช้ล้างทำความสะอาด และใช้กำจัดสัตว์นำเชื้อและแมลง และใช้ในปริมาณที่เหมาะสมและเก็บแยกจากบริเวณที่ทำ เพื่อไม่ให้ปนเปื้อนลงสู่ผลิตภัณฑ์ได้

ก.5 บุคลากรและสุขลักษณะของผู้ทำ

ผู้ทำทุกคน ต้องรักษาความสะอาดส่วนบุคคลให้ดี เช่น สวมเสื้อผ้าที่สะอาด มีผ้าคลุมเพื่อป้องกันไม่ให้เส้นผมหล่นลงในผลิตภัณฑ์ ไม่ไว้เล็บยาว ล้างมือให้สะอาดทุกครั้งก่อนปฏิบัติงาน หลังการใช้ห้องสุขาและเมื่อมือสกปรก (สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม, 2557)





ภาคผนวก ค

แบบทดสอบทางประสาทสัมผัส

แบบประเมินผลการทดสอบทางประสาทสัมผัส ทางด้านความชอบ  
โดยวิธี 9 Points hedonic scale

ชื่อผลิตภัณฑ์.....

ชุดที่ \_\_\_\_\_

วันที่.....

คำแนะนำ กรุณาทดสอบตัวอย่าง ที่เสนอให้ตามลำดับของตัวเลขรหัสในตาราง จากซ้ายไปขวาแล้ว ให้คะแนน (1-9) คือมีมากให้คะแนนมาก โดยที่กำหนดให้

สเกลความชอบ 1-9

- 1 = มีน้อยมากที่สุด      2 = มีน้อยมาก      3 = มีปานกลาง  
4 = มีเล็กน้อย      5 = เฉยๆ      6 = มีมากเล็กน้อย  
7 = มีมากปานกลาง      8 = มีมาก      9 = มีมากที่สุด

คุณลักษณะ	รหัส _____	รหัส _____
ลักษณะปรากฏ (ความขุ่น)		
สี (แดงคล้ำ)		
กลิ่น		
รสชาติ (ความกลมกล่อม)		
ความชอบโดยรวม		

ขอเสนอแนะ

.....

.....

.....

.....

.....

ขอบคุณที่ให้ความร่วมมือ



ภาคผนวก ง

บทความทางวิชาการที่นำเสนอและได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่



### ค่าการนำไฟฟ้าของน้ำมะเข็ญในระหว่างการให้ความร้อนแบบโอห์มมิก

Electrical conductivity of Makiang (*Cleistocalyx nervosum*) juice during ohmic heating.

ปัทมา ไทยอุ<sup>1</sup> และ ฤทธิชัย อัครวราชันย์<sup>1\*</sup>

Patthama Thaiou<sup>1</sup> and Rittichai Assawarachan<sup>1\*</sup>

#### บทคัดย่อ

โครงการวิจัยนี้ ดำเนินการศึกษาค่าการให้ความร้อนแก่น้ำมะเข็ญสกัดสดด้วยระบบเซลล์โอห์มมิกแบบสถิตย์ ขนาดห้องปฏิบัติการ โดยใช้ความเข้มข้นของสนามไฟฟ้า 3 ระดับ (10, 15 และ 20 โวลต์ต่อเซ็นติเมตร) ในช่วงอุณหภูมิ 25 ถึง 95 องศาเซลเซียส จากผลการศึกษา พบว่า ในช่วงอุณหภูมิ 30 ถึง 95 องศาเซลเซียส ความเข้มข้นของสนามไฟฟ้าไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติการนำไฟฟ้าอย่างมีนัยสำคัญ (ระดับความเชื่อมั่น ร้อยละ 95) ค่าการนำไฟฟ้าของน้ำมะเข็ญที่ได้จากการทดลองมีค่าอยู่ระหว่าง 0.1878–0.3677 ซีเมนต์ต่อเมตร เมื่ออุณหภูมิของน้ำมะเข็ญเพิ่มสูงขึ้นส่งผลให้ค่าการนำไฟฟ้ามีค่ามากขึ้นในรูปแบบสมการเชิงเส้น แบบจำลองทางคณิตศาสตร์บ่งชี้ให้เห็นความสัมพันธ์ของค่าการนำไฟฟ้าและอุณหภูมิ ผลการทำนายค่าการนำไฟฟ้าของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ พบว่ามีความแม่นยำในการทำนาย และมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจสูงสุด ( $R^2$ ) เท่ากับ 0.9975 ผลการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะการเกิดความร้อนด้วยวิธีโอห์มมิกเท่ากับ  $70.24 \pm 2.91$ ,  $79.27 \pm 1.41$ ,  $74.69 \pm 1.71$  เปอร์เซ็นต์ ที่ระดับความเข้มข้นสนามไฟฟ้าที่ 10, 15 และ 20 โวลต์ต่อเซ็นติเมตร ตามลำดับ

**คำสำคัญ:** น้ำมะเข็ญ, สมบัติการนำไฟฟ้า, การให้ความร้อนแบบโอห์มมิก

<sup>1</sup> สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร คณะวิศวกรรมและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้ จังหวัด เชียงใหม่ 50290

<sup>1</sup> Food Science and Technology, Faculty of engineering and Agro-Industry, Maejo University, Chiang Mai Province 50290

\*Corresponding author: e-mail: rittichai.assawarachan@gmail.com





## Abstract

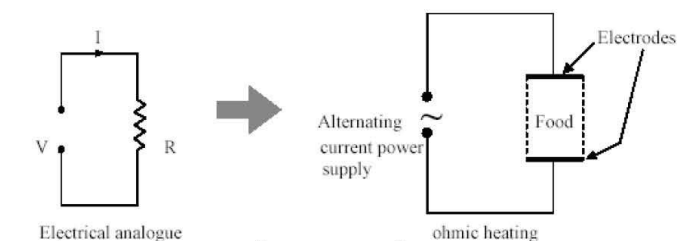
This study was conducted by heating of fresh Makiang (*Cleistocalyx nervosum*) juice using static ohmic heater at laboratory scale. It was applied by voltage gradients at the range of 10, 15 and 20 V/cm with the temperature range of 25–95 °C. The results showed that at the temperature range of 30–95 °C the voltage gradient did not significantly affect on its electrical conductivity property ( $P < 0.05$ ). The electrical conductivity of Makiang juice in this study was in the range of 0.1878–0.3677 S/m. The electrical conductivity was increased when Makiang juice temperature increased as linear regression equation. Mathematical model indicated that there was relationship between electrical conductivity and temperature. The prediction of electrical conductivity by this mathematical model found that it was high accuracy with  $R^2$  value of 0.9975. Analysis of heating coefficient by ohmic at the voltage gradient of 10, 15 and 20 V/cm were  $70.24 \pm 2.91$ ,  $79.27 \pm 1.41$ ,  $74.69 \pm 1.71\%$  at 10, 15 and 20 V/cm, respectively.

**Keywords:** makiang juice, electrical conductivity, ohmic heating

## บทนำ

มะเกี๋ยง เป็นพืชในอันดับ Myrtales จัดอยู่ในวงศ์ Myrtaceae มีชื่อวิทยาศาสตร์ว่า *Cleistocalyx nervosum* var. *poniala* ผลมะเกี๋ยงนิยมนำมาบริโภคทั้งในรูปผลสดมีคุณค่าทางโภชนาการ และชีวเคมีเป็นจำนวนมาก ผลการวิเคราะห์คุณค่าทางโภชนาการพบว่า ผลมะเกี๋ยงสดมีปริมาณ วิตามินเอ (เบต้า – แคโรทีน) วิตามินบี 2 วิตามินบี 1 วิตามินอี มากถึง  $625.36 \pm 526.43$ ,  $95.89 \pm 48.41$ ,  $47.66 \pm 24.39$  และ  $0.9 \pm 0.0$  ไมโครกรัม ต่อ 100 กรัม (สถาบันวิจัยฯ, 2544) รวมทั้งยังประกอบด้วย ปริมาณกรดอะมิโนที่จำเป็นต่อร่างกาย และปริมาณกรดอะมิโนที่ไม่จำเป็นต่อร่างกายจำนวนมาก จากคุณค่าทางโภชนาการของมะเกี๋ยงที่กล่าวมาข้างต้น ผลการศึกษาและพัฒนาผลิตภัณฑ์อาหารจากมะเกี๋ยง พบว่า มะเกี๋ยงสามารถทำผลิตภัณฑ์อาหารได้หลายชนิด และเป็นที่ยอมรับของผู้บริโภค เช่น น้ำมะเกี๋ยงพร้อมดื่ม ไวน์มะเกี๋ยง เยลลี่มะเกี๋ยง มะเกี๋ยงหยี โยเกิร์ตมะเกี๋ยง มะเกี๋ยงดอง และสีผสมอาหารจากผลมะเกี๋ยง โดยผลิตภัณฑ์ขอแปรรูปจากมะเกี๋ยงได้แก่การผลิตน้ำมะเกี๋ยงพร้อมดื่ม และผลิตน้ำมะเกี๋ยงเข้มข้น

การเกิดความร้อนแบบโอห์มมิต (Ohmic Heating) เป็นเทคโนโลยีการสร้างความร้อนที่มีประสิทธิภาพสูง มีอัตราการเกิดความร้อนที่สูงมากกว่าวิธีการให้ความร้อนแบบอื่น ๆ โดยมีอัตราการเกิดความร้อนประมาณ 0.005 – 1.2 องศาเซลเซียสต่อวินาที และมีประสิทธิภาพในการเปลี่ยนแปลงพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานความร้อนร้อยละ 95 (Roberts et al, 1998) ซึ่งในขณะที่การสร้างความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟจะมีประสิทธิภาพในการเปลี่ยนแปลงพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานความร้อนได้เพียงร้อยละ 45–48 เท่านั้น รวมทั้งการเกิดความร้อนแบบโอห์มมิตมีกลไกการเกิดความร้อนจากภายในตัวอาหารจึงไม่มีผลกระทบในด้านการถ่ายเทความร้อนจากแหล่งพลังงาน (ฤทธิชัย 2555) ปัจจุบันการเกิดความร้อนแบบโอห์มมิตถูกนำไปใช้ในการแปรรูปแบบอาหารปลอดเชื้อ (Aseptic Processing) สำหรับอาหารเหลวเนื้อเดียว การให้ความร้อนแบบโอห์มมิต (Ohmic Heating) เป็นวิธีการสร้างความร้อนจากภายในตัวอาหาร ซึ่งเป็นผลจากการปล่อยกระแสไฟฟ้าไหลผ่านเข้าสู่อาหาร และเกิดการต้านทานการไหลของกระแสไฟฟ้าในอาหารจนเกิดเป็นความร้อนที่อัตราความร้อนสูง โดยชนิดของอาหารที่เหมาะสมกับการเกิดความร้อนแบบโอห์มมิตนั้นควรเป็นอาหารที่มีค่าการนำไฟฟ้าที่สูงและค่าการนำไฟฟ้าของอาหารมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิของระบบมีแนวโน้มที่สูงขึ้นเป็นผลจากปริมาณการไหลผ่านของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านในอาหารได้มากขึ้น (Assawarachan, 2010)



ภาพที่ 1 วงจรสมมูลของการให้ความร้อนแบบโอห์มมิก (Ohmic heating circuit)

ตั้งมั่นวัตถุประสงค์ของการศึกษาโครงการวิจัยนี้ได้ศึกษาปัจจัยของอุณหภูมิ (30 ถึง 85 องศาเซลเซียส) และระดับความเข้มข้นของสนามไฟฟ้า (10, 15 และ 20 โวลต์ต่อเซนติเมตร) ของน้ำมะกึ่งในระหว่างการเกิดความร้อนแบบโอห์มมิก เพื่อศึกษาหารูปแบบของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและค่าการนำไฟฟ้า และค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะการเกิดความร้อนด้วยวิธีโอห์มมิก เพื่อเป็นข้อมูลพื้นฐานในการออกแบบระบบพาสเจอร์ไรน์ด้วยวิธีการใช้ความร้อนแบบโอห์มมิกในระดับอุตสาหกรรม

### วัสดุอุปกรณ์และวิธีการศึกษา

นำผลมะกึ่งสดล้างทำความสะอาดจากนั้นนำไปสกัดวิธีความร้อน ที่อัตราส่วนผลมะกึ่งสด จำนวน 1 กิโลกรัมต่อ น้ำสะอาด 1 กิโลกรัมนำไปสกัดที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 2 นาที กรองด้วยผ้าขาวบางด้วยเครื่องเหวี่ยงสลัด (ความเร็วรอบในการเหวี่ยง 500 รอบต่อนาที) เพื่อแยกน้ำมะกึ่งสกัดกับกากเนื้อน้ำมะกึ่งสกัดบรรจุในภาชนะขนาด 1 ลิตร จากนั้นนำน้ำมะกึ่งสกัดไปตรวจวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ทางเคมี-กายภาพเบื้องต้น พบว่า มีค่าของแข็งทั้งหมดที่ละลาย (Total soluble solid, TSS) เท่ากับ 4 องศาบริกซ์ (°Brix), ค่าพีเอช (pH) เท่ากับ 2.7 และปริมาณกรดทั้งหมด (Titratable acidity, TA) เท่ากับ 1.19 % น้ำหนักต่อปริมาตรของกรดซิตริก (%w/w citric acid equivalent) จากนั้นนำไปให้ความร้อนด้วยวิธีโอห์มมิกที่ระดับความเข้มข้นของสนามไฟฟ้า 3 ระดับ ที่ 10, 15 และ 20 โวลต์ต่อเซนติเมตร ที่อุณหภูมิ 25 ถึง 95 องศาเซลเซียส ตามลำดับ

### การหาค่าการนำไฟฟ้าของอาหารในระหว่างการเกิดความร้อนแบบโอห์มมิก

นำน้ำมะกึ่งสดบรรจุในโอห์มมิกเซลล์จากนั้นติดตั้งชุดอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ในการบันทึกสัญญาณทางไฟฟ้า อาทิ ปริมาณกระแสไฟฟ้า, ความต่างศักย์ไฟฟ้า และอุณหภูมิในระหว่างการเกิดความร้อนแบบโอห์มมิก โดยมีส่วนประกอบภายในชุดอุปกรณ์ แบ่งออกเป็นเซ็นเซอร์วัดสัญญาณไฟฟ้า (ปริมาณกระแสไฟฟ้า, ความต่างศักย์ไฟฟ้า) และอุณหภูมิ โดยอุปกรณ์แปลงสัญญาณทางไฟฟ้าซึ่งรับข้อมูลมาจากเซ็นเซอร์เป็นสัญญาณไฟฟ้ามาตรฐานในรูปแบบข้อมูลอนาล็อกหรือข้อมูลดิจิทัล และเครื่องบันทึกสัญญาณทางไฟฟ้าและอุณหภูมิ (ภาพ 2)

นำค่าที่วัดพารามิเตอร์ที่วัดได้ในการศึกษา มาหาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านในตัวอย่างอาหารและความเข้มข้นของกระแสไฟฟ้าตามกฎของโอห์ม โดยใช้สมการพื้นฐานในการคำนวณค่าการนำไฟฟ้าของน้ำมะกึ่งสกัดในระหว่างการให้ความร้อนด้วยวิธีโอห์มมิก ซึ่งมีรูปแบบความสัมพันธ์ตามสมการที่ (1)

$$\sigma = \frac{I L}{V A} \quad (1)$$

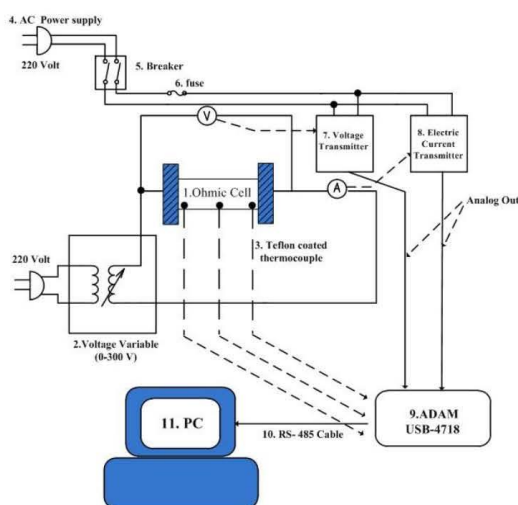
เมื่อ  $\sigma$  คือ ค่าการนำไฟฟ้าของอาหารเหลว (ซีเมนต่อเมตร);  $I$  คือ ปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่าน (แอมแปร์),  $V$  คือ ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า (โวลต์),  $L$  คือ ระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรด (เมตร) และ  $A$  คือ พื้นที่หน้าตัดของขั้วอิเล็กโทรด (ตารางเมตร)



นำค่าการนำไฟฟ้าของน้ำมะเกลือมาวัดหาความสัมพันธ์ที่อุณหภูมิต่างๆ โดยอัตราการเพิ่มของค่าการนำไฟฟ้าจะมีความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงกับอุณหภูมิซึ่งมีรูปแบบความสัมพันธ์ตามสมการที่ (2)

$$\sigma = B_1 T + C_1 \quad (2)$$

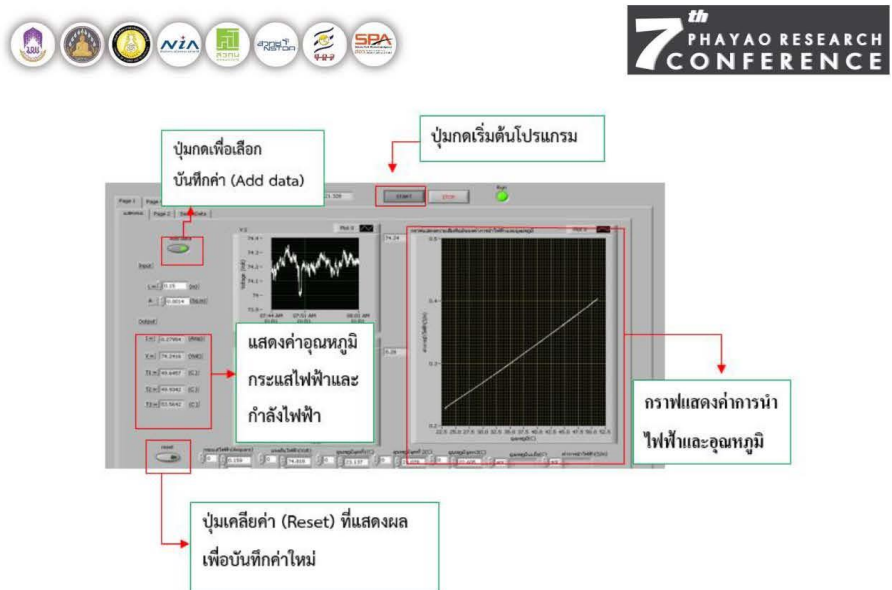
เมื่อ  $\sigma$  คือ ค่าการนำไฟฟ้าของน้ำมะเกลือสกัด (ซีเมนต่อเมตร),  $T$  คือ อุณหภูมิของอาหารเหลวในระหว่างการเกิดความร้อนแบบไอห่มืด (องศาเซลเซียส) และ  $B_1, C_1$  คือ ค่าคงที่ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการทำนายค่าการนำไฟฟ้า



ภาพที่ 2 แผนผังการทำงานของอุปกรณ์วัดค่าการนำไฟฟ้าของอาหารระหว่างการให้ความร้อนแบบไอห่มืด

- (1. โอห์มมิคเซลล์ ; 2. อุปกรณ์ปรับแรงดันไฟฟ้า; 3. สายเซ็นเซอร์สำหรับวัดอุณหภูมิ; 4 แหล่งพลังงาน;  
 5. เบรกเกอร์; 6. ฟิวส์ ; 7. อุปกรณ์ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าเป็นสัญญาณมาตรฐาน; 8. อุปกรณ์ค่ากระแสไฟฟ้าเป็นสัญญาณมาตรฐาน; 9. อุปกรณ์บันทึกสัญญาณมาตรฐาน; 10. สายเชื่อมต่อ RS-485; 11.คอมพิวเตอร์ประมวลผล)

ที่มา: ฤทธิชัย (2554) และ Assawarachan *et al.*, (2013)



ภาพที่ 3 หน้าจอควบคุมการทำงานของโปรแกรมวัดค่าการนำไฟฟ้าในระหว่างการให้ความร้อนแบบโอห์มมิก  
ที่มา: ฤทธิชัย (2554) และ Assawarachan *et al.*, (2013)

ดังนั้นระบบการให้ความร้อนแบบโอห์มมิกจะมีประสิทธิภาพการถ่ายเทพลังงานถูกเขียนอยู่ในพารามิเตอร์ของค่าสมรรถนะการเกิดความร้อนด้วยวิธีโอห์มมิก (Ohmic heating system performance coefficients ; SPCs) และระบบที่มีประสิทธิภาพการเปลี่ยนแปลงพลังงานสูงสุด ควรมีค่า SPCs เท่ากับ 1 หรือหมายถึงค่าพลังงานไฟฟ้าที่ป้อนเข้าสู่ระบบมีค่าเท่ากับพลังงานความร้อนที่น้ำมะเข็ญได้รับซึ่งมีรูปแบบความสัมพันธ์ตามสมการที่ (3)

$$SPC_s \left( \frac{\Delta V^2 \sigma}{K_c} \right) dt = \dot{m} C_p (T_f - T_i) \tag{3}$$

เมื่อ SPC<sub>s</sub> คือค่าสมรรถนะการเกิดความร้อนด้วยวิธีโอห์มมิก, C<sub>p</sub> คือค่าความร้อนเฉพาะของน้ำมะเข็ญสกัดเท่ากับ 2.73 กิโลจูลต่อกิโลกรัม องศาเซลเซียส (kJ/kg °K), K<sub>c</sub> คือค่าคงที่ของเซลล์โอห์มมิก (มีค่าเท่ากับ 73.97 ต่อตารางเมตร) T<sub>f</sub> และ T<sub>i</sub> คืออุณหภูมิสุดท้าย และอุณหภูมิเริ่มต้นของน้ำมะเข็ญ

**การวิเคราะห์ผลทางสถิติ**

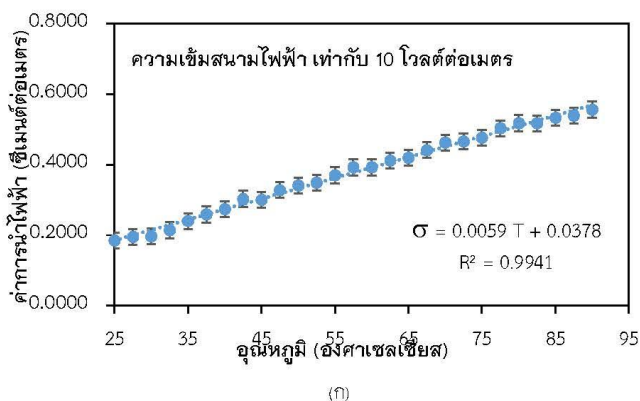
การวิเคราะห์ทางสถิติหาความแตกต่างด้วยวิธีวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียว (one-way ANOVA procedure) โดยเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยด้วยวิธี Duncan's New Multiple Range Test ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 และการวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ของสมการแสดงความสัมพันธ์ของอุณหภูมิและค่าการนำไฟฟ้าของน้ำมะเข็ญสกัดในระหว่างการให้ความร้อนด้วยวิธีโอห์มมิกโดยใช้เทคนิคการวิเคราะห์แบบสมการถดถอยแบบไม่เชิงเส้น (Nonlinear regression) ด้วยโปรแกรม SPSS V.19



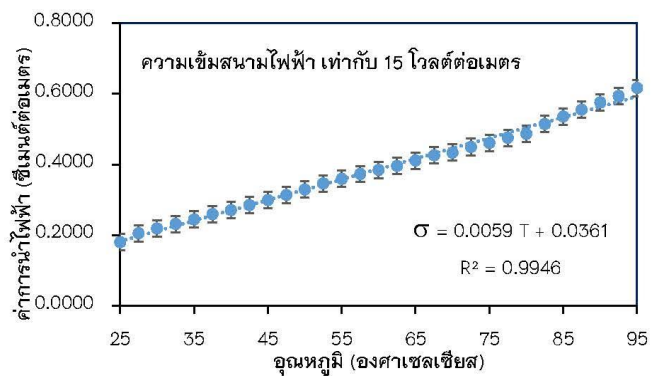
## ผลการศึกษา

### ค่าการนำไฟฟ้าของน้ำมะเขี๋ยง

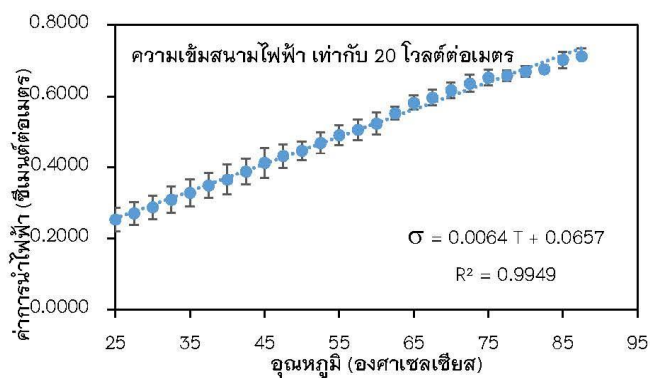
จากผลการศึกษาพบว่าค่าการนำไฟฟ้าของน้ำมะเขี๋ยงที่ช่วงอุณหภูมิ 25 ถึง 95 องศาเซลเซียสมีค่าเท่ากับ 0.1878–0.6058 ซีเมนต์ต่อเมตรที่ระดับความเข้มข้นน้ำมะเขี๋ยง 10 และ 15 วัตต์ต่อเซนติเมตร โดยเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นส่งผลให้ปริมาณการไหลของกระแสไฟฟ้าไหลผ่านในน้ำมะเขี๋ยงได้มากขึ้นส่งผลให้ค่าการนำไฟฟ้ามีค่ามากขึ้น ทั้งนี้สามารถอธิบายปรากฏการณ์ดังกล่าวได้ว่า เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจะทำให้โครงสร้างเซลล์เปลี่ยนแปลงโดยผนังเนื้อเยื่อที่มีโปรโตพลาสตินเป็นส่วนประกอบของโครงสร้างเกิดการเสียสภาพ (Protopectin Breakdown) และอ่อนตัวลงจากการถูกทำลายด้วยความร้อน ทำให้น้ำในเนื้อเยื่อเซลล์ไหลผ่านออกมาโดยน้ำภายในเนื้อเยื่อเซลล์จะประกอบด้วยสารอาหาร เกลือแร่และไอออนจำนวนมาก ส่งผลทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของไอออนมากขึ้นซึ่งช่วยกระตุ้นการไหลผ่านของกระแสไฟฟ้าได้มากขึ้น (Icier and Ilcali 2005 และ Assawarochan, 2010) ในขณะที่การเกิดความร้อนแบบโอห์มมิกที่ความเข้มข้นไฟฟ้าที่ 20 วัตต์ต่อเซนติเมตร สามารถวัดค่าการนำไฟฟ้าที่มีค่าเท่ากับ 0.2925–0.8393 ซีเมนต์ต่อเมตร ซึ่งมีค่ามากกว่าการวัดค่าการนำไฟฟ้าที่ความเข้มข้นน้ำมะเขี๋ยง 10 และ 15 วัตต์ต่อเซนติเมตร ทั้งนี้เกิดจากการที่น้ำมะเขี๋ยงถูกเหนี่ยวนำให้เกิดความร้อนด้วยการให้ความร้อนแบบโอห์มมิกที่อัตราเพิ่มอุณหภูมิที่สูงมากกว่าจนทำให้โครงสร้างเซลล์และเนื้อเยื่อภายในเกิดการเสียสภาพอย่างสมบูรณ์ส่งผลให้การนำกระแสไฟฟ้าได้มากขึ้น และส่งผลให้สมบัติการนำไฟฟ้าเกิดการเปลี่ยนแปลงในลักษณะแนวโน้มเพิ่มขึ้น (Achir et al., 2016) จากปรากฏการณ์ดังกล่าวจึงทำให้อาหารมีคุณสมบัติการนำไฟฟ้าที่มากขึ้น โดยอัตราการเพิ่มของค่าการนำไฟฟ้าจะมีความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงกับอุณหภูมิ ค่าการนำไฟฟ้าเป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและค่าการนำไฟฟ้าส่วนใหญ่มีความสัมพันธ์แบบเชิงเส้น ดังนั้นหาสมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำไฟฟ้าและอุณหภูมิในช่วงเวลาต่างๆ พบว่ามีรูปแบบสมการเป็นสมการเส้น (ภาพที่ 4)







(ข)



(ค)

ภาพที่ 4 ค่าการนำไฟฟ้าและอุณหภูมิของน้ำมะเขือในระหว่างการให้ความร้อนแบบไอห่มมิด ที่ระดับความเข้มสนามไฟฟ้าที่ 10, 15 และ 20 โวลต์ต่อเซนติเมตร

สมการพื้นฐานความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำไฟฟ้าและอุณหภูมิของน้ำมะเขือในระหว่างการให้ความร้อนแบบไอห่มมิด ในช่วงอุณหภูมิ 25–95 °C มีความสัมพันธ์ดังนี้ ที่ระดับความเข้มสนามไฟฟ้าที่ 10, 15 และ 20 โวลต์ต่อเซนติเมตร (ตารางที่ 1) พบว่าความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับค่าการนำไฟฟ้านั้นมีความสัมพันธ์เชิงเส้นตรง มีสัมประสิทธิ์การตัดสินใจสูงสุด ( $R^2$ ) เท่ากับ 0.9946–0.9947





ตารางที่ 1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำไฟฟ้าและอุณหภูมิของน้ำมะเข็ญในระหว่างการให้ความร้อนแบบไอห่มมิตที่ระดับความเข้มข้นของสนามไฟฟ้า (10, 15 และ 20 โวลต์ต่อเซนติเมตร)

ความเข้มข้นสนามไฟฟ้า (โวลต์ต่อเซนติเมตร)	แบบจำลองทางคณิตศาสตร์	สัมประสิทธิ์การ ตัดสินใจสูงสุด ( $R^2$ )	สมรรถนะการเกิด ความร้อน (SPCs)
10	$\sigma = 0.0059 T + 0.0378$ (ซีเมนส์ต่อเมตร)	0.9947	$70.24 \pm 2.91\%$
15	$\sigma = 0.0059 T + 0.0361$ (ซีเมนส์ต่อเมตร)	0.9946	$79.27 \pm 1.41\%$
20	$\sigma = 0.0064 T + 0.0657$ (ซีเมนส์ต่อเมตร)	0.9949	$74.69 \pm 1.71\%$

หมายเหตุ: สปส.ไอห่มมิต คือ ค่าสมรรถนะการเกิดความร้อนด้วยวิธีไอห่มมิต (SPCs)

ผลการวิเคราะห์ค่าสมรรถนะการเกิดความร้อนด้วยวิธีไอห่มมิต สามารถหาได้ตามความสัมพันธ์ในสมการที่ (3) มีค่าเท่ากับอัตราส่วนของพลังงานไฟฟ้าที่เหนี่ยวนำให้เกิดความร้อนแบบไอห่มมิตเทียบกับพลังงานความร้อนที่เกิดขึ้นในน้ำมะเข็ญ สอดคล้องกับกฎการอนุรักษ์พลังงานของเทอร์โมไดนามิก โดยพลังงานไฟฟ้าที่ทำให้เกิดความเหนี่ยวนำความร้อนในน้ำมะเข็ญด้วยวิธีไอห่มมิตมีค่าเท่ากับพลังงานความร้อนที่ส่งผลให้อุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นและพลังงานความร้อนที่สูญเสียให้สิ่งแวดล้อม โดยค่าสมรรถนะการเกิดความร้อนด้วยวิธีไอห่มมิตบ่งบอกถึงค่าประสิทธิภาพการถ่ายเทพลังงานและสมรรถนะเชิงความร้อนในระหว่างการเกิดความร้อนแบบไอห่มมิต จากผลการศึกษาพบว่าอัตราการเพิ่มของอุณหภูมิในระหว่างการเกิดความร้อนในน้ำมะเข็ญด้วยวิธีการเกิดความร้อนแบบไอห่มมิตมีค่าเท่ากับ  $0.0851 \pm 0.0031$ ,  $0.1642 \pm 0.0174$  และ  $0.0393 \pm 0.0149$  องศาเซลเซียสต่อวินาที ที่ระดับความเข้มข้นสนามไฟฟ้าที่ 10, 15 และ 20 โวลต์ต่อเซนติเมตร ตามลำดับ ซึ่งพบว่าเมื่อเพิ่มระดับความเข้มข้นสนามไฟฟ้าที่ละ 5 โวลต์ต่อเซนติเมตร ส่งผลให้อัตราการเพิ่มอุณหภูมิเท่ากับ 92.26 และ 138.14 เปอร์เซ็นต์ของการเพิ่มของระดับสนามไฟฟ้าที่ 10 เพิ่มเป็น 15 โวลต์ต่อเซนติเมตร และเพิ่มของระดับสนามไฟฟ้าที่ 15 เพิ่มเป็น 20 โวลต์ต่อเซนติเมตร ตามลำดับ ในขณะที่ค่าสมรรถนะการเกิดความร้อนด้วยวิธีไอห่มมิต (SPCs) มีค่าเท่ากับ  $70.24 \pm 2.91$ ,  $79.27 \pm 1.41$  และ  $74.69 \pm 1.71$  ที่ระดับความเข้มข้นสนามไฟฟ้าที่ 10, 15 และ 20 โวลต์ต่อเซนติเมตร ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากการให้ความร้อนน้ำมะเข็ญที่ระดับความเข้มข้นสนามไฟฟ้าที่ 10 โวลต์ต่อเซนติเมตร มีค่า SPCs น้อยที่สุด เนื่องจากการเกิดความสูญเสียความร้อนกับสิ่งแวดล้อมเป็นเวลานาน ในขณะที่ค่า SPCs ของการเกิดความร้อนในน้ำมะเข็ญที่ระดับความเข้มข้นสนามไฟฟ้าที่ 20 โวลต์ต่อเซนติเมตร นั้นเกิดการเหนี่ยวนำความร้อนที่สูงจากการไหลผ่านของกระแสไฟฟ้าที่สูงกว่าสมบัติการนำไฟฟ้าของน้ำผลไม้ส่งผลให้โครงสร้างเซลล์และเนื้อเยื่อภายในเกิดการเสียหายอย่างสมบูรณ์ และสูญเสียความร้อนให้สิ่งแวดล้อมในอัตราสูง ดังนั้นค่า SPCs จึงมีค่าที่ต่ำกว่าการเกิดความร้อนที่ความเข้มข้นของสนามไฟฟ้า ที่ระดับ 15 โวลต์ต่อเซนติเมตร

ดังนั้นในการหาสภาวะที่เหมาะสมในการให้ความร้อนน้ำมะเข็ญด้วยวิธีการให้ความร้อนแบบไอห่มมิตนั้น จากข้อมูลในโครงการวิจัยนี้พบว่า ระดับความเข้มข้นสนามไฟฟ้าที่ 15 โวลต์ต่อเซนติเมตร ที่ช่วงอุณหภูมิ 25–85 องศาเซลเซียส เนื่องจากการให้ความร้อนด้วยวิธีไอห่มมิตที่อุณหภูมิที่สูง 85 องศาเซลเซียสจะเกิดฟองอากาศ เนื่องจากการเดือดอย่างยั้งยวดจนน้ำมะเข็ญพุ่งออกจากเซลล์ไอห่มมิต เสี่ยงต่อการเกิดอันตรายในระหว่างการศึกษานอกจากนี้การใช้ความเข้มข้นสนามไฟฟ้าที่สูงเกินไปจะลดค่า SPCs เนื่องจากพลังงานความร้อนสูญเสียกับสิ่งแวดล้อมมากขึ้น และทำโครงสร้างเซลล์และเนื้อเยื่อภายในเกิดการเสียหายอย่างสมบูรณ์



### วิจารณ์และสรุปผล

ค่าการนำไฟฟ้าของน้ำมะเข็ญสดในระหว่างการให้ความร้อนแบบโอห์มมิก ผลการศึกษาพบความวิจัยนี้มีค่าการนำไฟฟ้าเท่ากับ 0.1878–0.6058 ซีเมนต์ต่อเมตรที่ระดับความเข้มข้นไฟฟ้า 10 และ 15 โวลต์ต่อเซนติเมตร และค่าเท่ากับ 0.2925–0.8393 ซีเมนต์ต่อเมตร ระดับความเข้มข้นไฟฟ้า 20 โวลต์ต่อเซนติเมตร โดยค่าการนำไฟฟ้าเป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิมีความสัมพันธ์ในรูปแบบสมการเชิงเส้น อัตราการเพิ่มของอุณหภูมิในระหว่างการเกิดความร้อนในน้ำมะเข็ญด้วยวิธีการเกิดความร้อนแบบโอห์มมิกมีค่าเท่ากับ  $0.0851 \pm 0.0031$ ,  $0.1642 \pm 0.0174$ ,  $0.0393 \pm 0.0149$  องศาเซลเซียสต่อวินาที และค่าสมรรถนะการเกิดความร้อนด้วยวิธีโอห์มมิก (SPCs) มีค่าเท่ากับ  $70.24 \pm 2.91$ ,  $79.27 \pm 1.41$ ,  $74.69 \pm 1.71$  เปอร์เซ็นต์ ที่ระดับความเข้มข้นไฟฟ้าที่ 10, 15 และ 20 โวลต์ต่อเซนติเมตร ตามลำดับ สภาวะที่เหมาะสมในการให้ความร้อนน้ำมะเข็ญด้วยวิธีการให้ความร้อนแบบโอห์มมิกนั้น จากข้อมูลในโครงการวิจัยนี้พบว่า ระดับความเข้มข้นไฟฟ้าที่ 15 โวลต์ต่อเซนติเมตร เนื่องจากมีค่าเท่ากับร้อยละ 92.26 และค่า SPCs ที่สูงที่สุด

### เอกสารอ้างอิง

- ฤทธิชัย อัครราชันย์, อูมาพร อุประ และอรรรตพล นุ่มหอม. (2554). *คุณสมบัติการนำไฟฟ้าของน้ำอู้งุ่นแดงระหว่างกระบวนการให้ความร้อนแบบโอห์มมิก*. การประชุมวิชาการสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทยครั้งที่ 12 ประจำปี 2554. วันที่ 1 เมษายน 2554 ณ โรงแรมชมจันทร์ พัทยาอีสต์ทาว์ จังหวัดชลบุรี
- ฤทธิชัย อัครราชันย์. (2554). การให้ความร้อนแบบโอห์มมิกในการแปรรูปอาหาร. *วารสารเทคโนโลยีการอาหาร มหาวิทยาลัยสยาม*. ปีที่ 7 ฉบับที่ 1 หน้า 11–22.
- สถาบันวิจัยและฝึกอบรมการเกษตรลำปาง. (2544). *มะเข็ญ พืชในโครงการอนุรักษ์พันธุกรรมพืช*. ลำปาง: ศิลปการพิมพ์.
- Achir, N., Dhuique-Mayer, C. Hadjal, T., Madani, K., Pain, J.P and Manuel Dornier (2016). *Pasteurization of citrus juices with ohmic heating to preserve the carotenoid profile*. *Innovative Food Science and Emerging Technologies* 33 : 397–404.
- Assawarachan, R. (2010). Estimation Model for Electrical Conductivity of Red Grape Juice. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*. 3(2): 52–57.
- Assawarachan, R., Nookung, M., Ze-O, I and Ga-Jai, S. (2013). *Development of Electrical conductivity measuring device for fruit juice using ohmic heating*. In Food Innovation Asia Conference, Empower SMEs through Science and Technology. 13–14 June 2013. BITEC Convention Center, Bangkok, Thailand.
- Icier, F and Illicali, C (2005). *Temperature dependent electrical conductivities of fruit purees during ohmic heating*. *Food Research International* 38: 1135–1142.
- Roberts, J.S., Murat, O. B., Rudy, Z. and Diego, L. (1998). Design and testing of prototype ohmic thawing unit. *Computers and Electronics in Agriculture*. 19(2): 211–222.



## จลนพลศาสตร์การสลายแอนโทไซยานินในน้ำมะกึ่งด้วยการให้ความร้อน

### Thermal degradation Kinetics on Anthocyanin stability of Makiang (*Cleistocalyx nervosum*) Juice

ปัทมา ไทยอู<sup>1</sup> และฤทธิชัย อัสวาราชันย์<sup>2\*</sup>

Patthama Thaiou<sup>1</sup> and Rittichai Assawarachan<sup>2\*</sup>

#### บทคัดย่อ

โครงการวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ในการศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิต่อการสลายตัวของปริมาณแอนโทไซยานินในน้ำมะกึ่งด้วยการแปรรูปด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 75, 85 และ 95 องศาเซลเซียส ตามลำดับ น้ำมะกึ่งที่ผ่านการให้ความร้อนที่อุณหภูมิต่าง ๆ นำมาวิเคราะห์หาปริมาณแอนโทไซยานินผลการศึกษาพบว่าปริมาณแอนโทไซยานินของน้ำมะกึ่งสกัดมีค่าเท่ากับ  $30.18 \pm 0.574$  มิลลิกรัมต่อ 100 กรัม และเมื่อนำมาผ่านความร้อนเพื่อการแปรรูปที่ 75, 85 และ 95 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที พบว่ามีปริมาณแอนโทไซยานินได้เท่ากับ  $27.08 \pm 0.19$ ,  $24.23 \pm 4.26$  และ  $23.56 \pm 0.39$  มิลลิกรัมต่อ 100 กรัม ตามลำดับ เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นส่งผลกระทบต่อสลายปริมาณแอนโทไซยานิน และมีแนวโน้มลดลงอย่างนัยสำคัญ (ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95) ผลการสลายตัวของ ปริมาณแอนโทไซยานินที่เวลาใด ๆ ในระหว่างการให้ความร้อนที่เวลาใด ๆ พบว่าแบบจำลองของจลนพลศาสตร์ปฏิกิริยาอันดับหนึ่งมีความเหมาะสม

**คำสำคัญ:** น้ำมะกึ่ง, แอนโทไซยานิน, การให้ความร้อน, ผลกระทบของอุณหภูมิ, แบบจำลองจลนพลศาสตร์

#### Abstract

This research was aimed to study the factors affecting on heating process making (*Cleistocalyx nervosum*) juice against decomposition of anthocyanin content were studied at selected temperatures 75, 85 and 95 °C, respectively. Results indicated that the thermal degradation of anthocyanin were  $30.18 \pm 0.574$  mg/ 100 g were makiang juice heat processing at temperatures of 75, 85 and 95 °C. The processing time was 10 mins found anthocyanin content of the extracted of processed makiang juice which were  $27.08 \pm 0.19$ ,  $24.23 \pm 4.26$ , and  $23.56 \pm 0.39$  mg / 100g. The high temperature rises affect breakdown of anthocyanin and downward trend significantly ( $p < 0.05$ ). Thermal degradation kinetics of anthocyanin for during heating results first -order reaction kinetics are suitable for simulation model.

**Keywords:** Makiang Juice, Anthocyanin content, Thermal processing, Effect of temperature, Kinetics equation

<sup>1</sup> สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร คณะวิศวกรรมและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้ จังหวัดเชียงใหม่

<sup>2</sup> Food Science and Technology, Faculty of engineering and Agro-Industry, Maejo University, Chiang Mai Province 50290

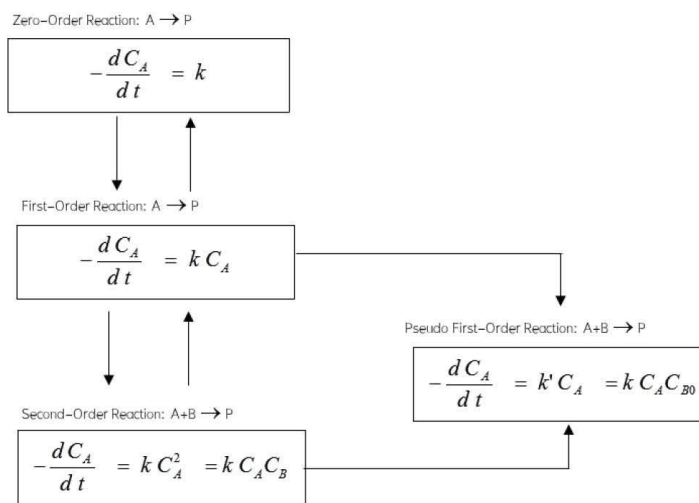
\*Corresponding author: e-mail: rittichai.assawarachan@gmail.com



### บทนำ

มะเคียง เป็นพืชในอันดับ Myrtales จัดอยู่ในวงศ์ Myrtaceae มีชื่อวิทยาศาสตร์ว่า *Cleistocalyx nervosum* var. *paniala* ผลมะเคียงนิยมนำมาบริโภคทั้งในรูปผลสดมีคุณค่าทางโภชนาการ และชีวเคมีเป็นจำนวนมาก ผลการวิเคราะห์คุณค่าทางโภชนาการพบว่า ผลมะเคียงสดมีปริมาณ วิตามินเอ (เบต้า - แคโรทีน) วิตามินบี 2 วิตามินบี 1 วิตามินอี มากถึง 625.36±526.43, 95.89±48.41, 47.66±24.39 และ 0.9±0.0 ไมโครกรัม ต่อ 100 กรัม (กรมวิทยาศาสตร์บริการ, 2539) รวมทั้งยังประกอบด้วย ปริมาณกรดอะมิโนที่จำเป็นต่อร่างกาย และปริมาณกรดอะมิโนที่ไม่จำเป็นต่อร่างกายจำนวนมาก จากคุณค่าทางโภชนาการของมะเคียงที่กล่าวมาข้างต้น ผลการศึกษาและพัฒนาผลิตภัณฑ์อาหารจากมะเคียง พบว่ามะเคียงสามารถทำผลิตภัณฑ์อาหารได้หลายชนิด และเป็นที่ยอมรับของผู้บริโภค เช่น น้ำมะเคียงพร้อมดื่ม ไวน์มะเคียง เยลลี่มะเคียง มะเคียงหยี โยเกิร์ตมะเคียง มะเคียงดอง และสีสผสมอาหารจากผลมะเคียง โดยผลิตภัณฑ์แปรรูปจากมะเคียงได้แก่การผลิตน้ำมะเคียงพร้อมดื่ม และผลิตน้ำมะเคียงเข้มข้น

ฤทธิชัย อัครราชันย์ (2013) ได้อธิบายหลักการของแบบจำลองจลนพลศาสตร์ ซึ่งนิยมใช้ในการจำลองลำดับของการเกิดปฏิกิริยาทางเคมี หรือชีวเคมี และมีความเหมาะสมอย่างมากในการนำมาใช้สำหรับการจำลองการเปลี่ยนแปลงคุณภาพผลิตภัณฑ์ในระหว่างการกระบวนการแปรรูปซึ่งเป็นการเปลี่ยนแปลงทางปฏิกิริยาทางเคมีที่ซับซ้อน ดังนั้นจึงมีรายงานวิจัยจำนวนมากที่ใช้แบบจำลองจลนพลศาสตร์ทำนายอัตราการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของผลิตภัณฑ์ในระหว่างการอบแห้งด้วยสภาวะและวิธีต่าง ๆ ได้เป็นอย่างดี (ภาพ 1)



ภาพที่ 1 รูปแบบของอันดับการเกิดปฏิกิริยาการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของจลนพลศาสตร์

(เมื่อ  $C_A$  คือความเข้มข้นของสารอาหาร A ที่เวลาใด ๆ  $C_B$  คือความเข้มข้นของตัวทำปฏิกิริยา ที่เวลาใด ๆ และ  $C_{B0}$  คือความเข้มข้นเริ่มต้นของตัวทำปฏิกิริยา B ในขณะ  $k$  และ  $k'$  เป็นค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยา ส่วน  $P$  คือผลผลิตของปฏิกิริยา)

ที่มา: ฤทธิชัย (2555)





แอนโทไซยานิน เป็นหนึ่งสารสำคัญของรงควัตถุหรือสารสี (pigment) ที่ให้สีแดง ม่วง และน้ำเงิน ใช้เป็นสารให้สี (coloring agent) ธรรมชาติในอาหาร สารสกัดแอนโทไซยานิน มีสมบัติเป็นโภชนเภสัช (nutraceutical) เป็นสารต้านอนุมูลอิสระ (antioxidant) ช่วยชะลอความเสื่อมของเซลล์ แอนโทไซยานินเป็นสารชีวเคมีที่สำคัญ และมีมากในผลิตภัณฑ์น้ำมะเข็ญ อย่างไรก็ตาม แม้ว่าผลมะเข็ญสดมีคุณค่าทางโภชนาการ และชีวเคมีเป็นจำนวนมาก การแปรรูปผลิตภัณฑ์น้ำมะเข็ญพร้อมดื่ม และผลิตภัณฑ์น้ำมะเข็ญเข้มข้นด้วยความร้อนนั้น เป็นสาเหตุที่สำคัญในการสูญเสียคุณค่าทางโภชนาการ และชีวเคมี ในระหว่างกระบวนการผลิต ดังนั้นงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ในการศึกษาปัจจัยของอุณหภูมิที่มีผลต่อการสลายตัวของปริมาณแอนโทไซยานิน และหาแบบจำลองจลนพลศาสตร์แสดงการเปลี่ยนแปลงปริมาณแอนโทไซยานินในผลิตภัณฑ์น้ำมะเข็ญพร้อมดื่มในระหว่างการให้ความร้อน

### วัสดุอุปกรณ์และวิธีการศึกษา

#### การเตรียมน้ำมะเข็ญสกัดสำหรับการศึกษากลกระทบของอุณหภูมิและเวลา

นำผลมะเข็ญสดล้างทำความสะอาดจากนั้นนำไปสกัดด้วยน้ำร้อน ที่อัตราส่วนผลมะเข็ญสด จำนวน 1 กิโลกรัมต่อ น้ำสะอาด 1 กิโลกรัม นำไปสกัดที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 2 นาที กรองด้วยผ้าขาวบางด้วยเครื่องเหวี่ยงสไลด์ (ความเร็วรอบในการเหวี่ยง 500 รอบต่อนาที) เพื่อแยกน้ำมะเข็ญสกัดกับกากเนื้อ นำน้ำมะเข็ญสกัดบรรจุในภาชนะขนาด 1 ลิตร เพื่อรอการทดลองในขั้นตอนต่อไป จากนั้นนำไปศึกษาผลของอุณหภูมิและเวลาในการให้ความร้อนที่ระดับที่ 75, 85 และ 95 องศาเซลเซียส และเวลา 0, 5 และ 10 นาที ตามลำดับ (จำนวน 3 ซ้ำ) นำน้ำมะเข็ญที่ได้จากการผ่านความร้อนและเวลาต่าง ๆ มาตรวจวัดปริมาณแอนโทไซยานิน

#### การหาปริมาณแอนโทไซยานิน

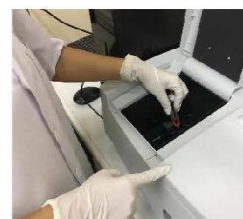
นำน้ำมะเข็ญสกัดที่ผ่านความร้อน (75, 85 และ 95 องศาเซลเซียส) วิเคราะห์หาปริมาณแอนโทไซยานิน (cyanidin-3-glucoside equivalence) ด้วยเทคนิคการวิเคราะห์ความแตกต่างของค่าพีเอช (pH Differential method) โดยเตรียมบัฟเฟอร์ พีเอช 1.0 (pH 1.0 buffer) ด้วย 0.025 โมลของโพแทสเซียมคลอไรด์ (M KCl) และบัฟเฟอร์ที่มีค่าพีเอชเท่ากับ 4.5 (pH 4.5 buffer) ด้วย 0.4 โมล โซเดียมอะซิเตต ( $\text{CH}_3\text{COONa}$ ) และเตรียม สารสกัด (Solution extract) 1000 ไมโครลิตร และปรับปริมาตรด้วยบัฟเฟอร์ให้ได้ 10 มิลลิลิตร (mL) หรือมีอัตราส่วนของ Solution extract : buffer ที่อัตราส่วน 1:10 จากนั้นนำสารละลายที่เตรียมไว้ไปเขย่า และวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 515 นาโนเมตร ( $A_{515}$ ) และ 700 นาโนเมตร ( $A_{700}$ ) ด้วยเครื่องวัดค่าการดูดกลืนแสง spectrophotometer รุ่น T180 UVMS (ผลิตโดยประเทศอังกฤษ) นำค่าการดูดกลืนแสงที่ได้ไปคำนวณหาปริมาณแอนโทไซยานินในรูปของไซยานิดิน 3 กลูโคไซด์ (cyanidin-3-glucoside)



(ก)



(ข)



(ค)

ภาพที่ 2 ภาพถ่ายขั้นตอนการวิเคราะห์ปริมาณแอนโทไซยานินในน้ำมะเข็ญ (ก) ตัวอย่างน้ำมะเข็ญ (ข) การเตรียมตัวอย่างน้ำมะเข็ญบรรจุใน (ค) การเตรียมวัดค่าการดูดกลืนแสง



$$\Delta A = (A_{515} - A_{700})_{pH=1.0} - (A_{515} - A_{700})_{pH=4.5} \quad (1)$$

$$TA = \frac{\Delta A \times MW \times DF \times 100}{\epsilon l} \quad (2)$$

เมื่อ TA คือปริมาณแอนโธไซยานินทั้งหมด, A คือ ค่าการดูดกลืนแสงจากสมการที่ (1), MW คือ น้ำหนักโมลโมเลกุลของไซยานิดิน 3 กลูโคไซด์เท่ากับ 449.2 กรัมต่อโมล (g mol),  $\epsilon$  เท่ากับ 26900 M cm, DF คือ สัมประสิทธิ์การเจือจาง (dilution factor) มีค่าเท่ากับ (1) และค่า โมลาร์แอบซอร์บิตีวี่ตี (E) ใช้ค่าของไซยานิดิน-3-กลูโคไซด์ในสารละลายบัฟเฟอร์ ที่มีค่าพีเอช (pH) เท่ากับ 1.0 มีเท่ากับ 26,900 M<sup>-1</sup> cm<sup>-1</sup> วิธีการวิเคราะห์ปริมาณแอนโธไซยานินด้วยวิธีของ Fultki and Francis (1968) เป็นวิธีที่ใช้ในการวิเคราะห์ปริมาณแอนโธไซยานินตามรายงานวิจัยนี้ สอดคล้องกับวิธีการวิเคราะห์ปริมาณแอนโธไซยานินรายงานวิจัยของ Shao-qian et al., (2011), Alex et al., (2016) และวาริพัลย์ และคณะ (2552)

#### แบบจำลองจลนศาสตร์การเปลี่ยนแปลงปริมาณแอนโธไซยานิน

การหาอันดับการเปลี่ยนแปลงปริมาณแอนโธไซยานินในน้ำมะเขีงงักจะเป็นฟังก์ชันของเวลาในการให้ความร้อน สมการสำหรับการประยุกต์ใช้ในจลนพลศาสตร์การเปลี่ยนแปลงปริมาณแอนโธไซยานินของการศึกษานี้สามารถเขียนในรูปแบบของแบบจำลองจลนพลศาสตร์อันดับศูนย์ ดังแสดงในสมการที่ (3) และ (4) ตามลำดับ

$$C = C_0 \pm kt \quad (3)$$

$$C = C_0 \exp(\pm kt) \quad (4)$$

เมื่อ  $C_0$  คือ ปริมาณแอนโธไซยานินที่เวลาเริ่มต้น และ  $C$  คือ ปริมาณแอนโธไซยานินที่เวลาใด ๆ ในระหว่างการอบนการให้ความร้อนที่อุณหภูมิต่าง ๆ

การวิเคราะห์หาความเหมาะสมของอันดับของปฏิกิริยา ด้วยการใชค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจสูงสุด ( $R^2$ ) และค่าผลบวกกำลังสองการถดถอย (SSR) ซึ่งเป็นดัชนีความผิดพลาดของการทำนายแบบจำลอง ดังสมการที่ (5)

$$SSR = \sum_{i=1}^N (C_{exp,i} - C_{pre,i})^2 \quad (5)$$

เมื่อค่า  $C_{exp,i}$  และ  $C_{pre,i}$  เป็น ปริมาณแอนโธไซยานินของการทดลองซ้ำ (new experiential) และปริมาณแอนโธไซยานินการทำนายของแบบจำลอง

#### การวิเคราะห์ผลทางสถิติ

การวิเคราะห์ทางสถิติหาความแตกต่างด้วยวิธีวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียว (one-way ANOVA procedure) โดยเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยด้วยวิธี Duncan's New Multiple Range Test ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 และการวิเคราะห์หาค่าคงที่ต่าง ๆ ของแบบจำลองจลนพลศาสตร์การเปลี่ยนแปลงปริมาณแอนโธไซยานินในระหว่างการให้ความร้อน ที่เวลาใด ๆ ใช้เทคนิคการวิเคราะห์แบบสมการถดถอยแบบไม่เชิงเส้น (Nonlinear regression) ด้วยโปรแกรม SPSS V.19

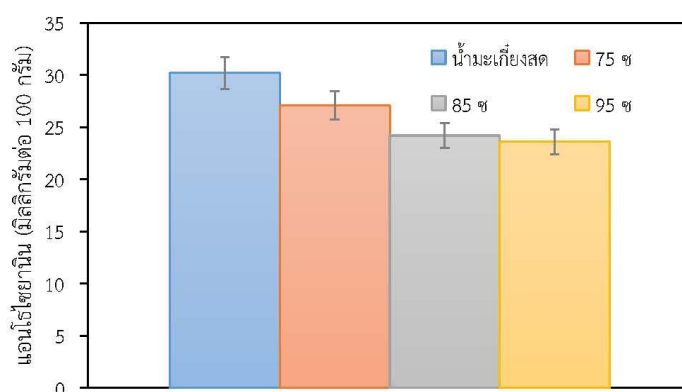




## ผลการศึกษา

### ผลกระทบของอุณหภูมิต่อการสลายปริมาณแอนโธไซยานิน

ผลการตรวจวิเคราะห์ปริมาณแอนโธไซยานินของน้ำมะเข็ญสกัดมีปริมาณ เท่ากับ  $30.18 \pm 0.574$  มิลลิกรัม ต่อ 100 กรัม และผลการตรวจวิเคราะห์ปริมาณแอนโธไซยานินที่ผ่านความร้อนเป็นเวลา 10 นาที ที่อุณหภูมิ 75, 85 และ 95 องศาเซลเซียส มีค่าเท่ากับ  $27.08 \pm 0.19$ ,  $24.23 \pm 4.26$  และ  $23.56 \pm 0.39$  มิลลิกรัมต่อ 100 กรัม ตามลำดับ โดยมีร้อยละการสลายตัวของปริมาณแอนโธไซยานินเท่ากับ 10.26, 19.69 และ 21.91 เปอร์เซ็นต์ และผลการวิเคราะห์ทางสถิติด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ พบว่าปริมาณแอนโธไซยานินของน้ำมะเข็ญสดมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ การวิเคราะห์ผลกระทบของอุณหภูมิพบว่าการให้ความร้อนกับน้ำมะเข็ญที่อุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียสมีความแตกต่างกับการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 85 และ 95 องศาเซลเซียส โดยการให้ความร้อนแบบที่อุณหภูมิ 85 และ 95 องศาเซลเซียส ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ (ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95) ภาพ 3 แสดงการเปรียบเทียบปริมาณปริมาณแอนโธไซยานินของน้ำมะเข็ญสกัด และในน้ำมะเข็ญที่ผ่านการให้ความร้อนที่ 75, 85 และ 95 องศาเซลเซียส ตามลำดับ เมื่อน้ำมะเข็ญได้รับความร้อนมากจนมีพลังงานความร้อนไปทำลายโครงสร้างโมเลกุลของแอนโธไซยานิน เรียกกลไกการเกิดปฏิกิริยานี้ว่า Deglycosylation จนทำให้โครงสร้างของโมเลกุลแอนโธไซยานินเสียสภาพ (Cleavage) และสลายตัวเป็น Protocatechuic acid, Phloroglucinaldehyde และ 4-hydroxybenzoic acid ดังนั้นเมื่ออุณหภูมิที่น้ำมะเข็ญได้รับสูงขึ้น ส่งผลต่อการเร่งการเกิดกลไก Deglycosylation ส่งผลต่อการสลายตัวของปริมาณแอนโธไซยานิน (Patras *et al.*, 2010).



ผลกระทบของความร้อนต่อการสลายแอนโธไซยานินในน้ำมะเข็ญ

ภาพที่ 3 ผลกระทบของอุณหภูมิต่อการสลายตัวของปริมาณแอนโธไซยานินในน้ำมะเข็ญที่ผ่านความร้อนที่อุณหภูมิ 75, 85 และ 95 องศาเซลเซียส

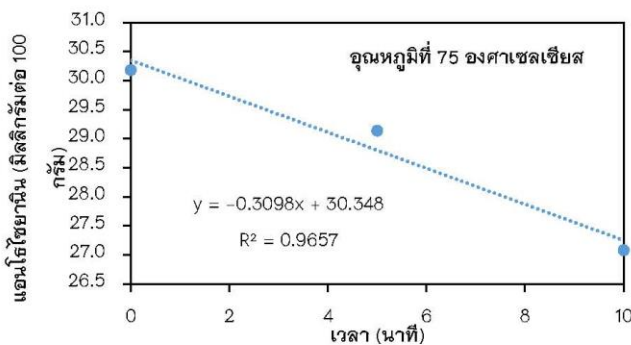


### ผลกระทบของเวลาต่อการสลายปริมาณแอนโรโซยานินในระหว่างการให้ความร้อนของน้ำมะกึ่ง

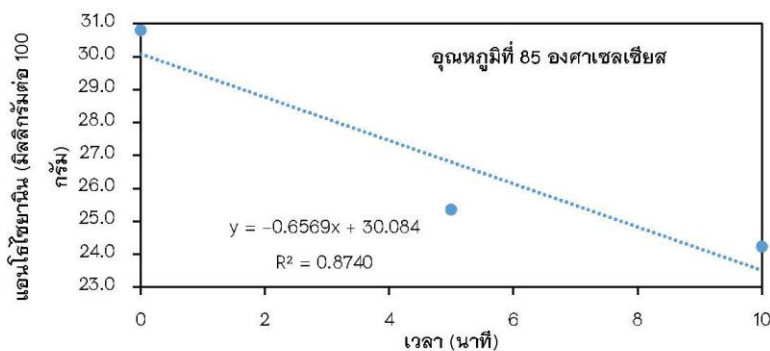
ผลกระทบของอุณหภูมิต่อการสลายตัวของปริมาณแอนโรโซยานินในน้ำมะกึ่งสกัดที่ผ่านความร้อน พบว่าอุณหภูมิเป็นปัจจัยที่สำคัญต่อการสลายตัวของปริมาณแอนโรโซยานินในน้ำมะกึ่งสกัด ดังนั้นเพื่อศึกษาอัตราการสลายตัวของปริมาณแอนโรโซยานินในน้ำมะกึ่งสกัดในระหว่างการให้ความร้อน ด้วยวิธีการให้ความร้อนกับน้ำมะกึ่งสกัดที่อุณหภูมิ 75, 85 และ 95 องศาเซลเซียส ที่เวลา 0, 5 และ 10 นาที จากนั้นนำข้อมูลมาวิเคราะห์ในรูปแบบสมการเชิงเส้น ระหว่างปริมาณแอนโรโซยานิน ที่เวลาใดๆ ในระหว่างการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ ที่ 75, 85 และ 95 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ตามที่แสดงใน ภาพ 4 และ 5 การวิเคราะห์รูปแบบสมการเชิงเส้นเพื่อวิเคราะห์แนวโน้มของการสลายตัวของปริมาณแอนโรโซยานินในน้ำมะกึ่งสกัด เพื่อหารูปแบบที่เหมาะสมของสมการ แสดงในรูปแบบจำลองจลนพลศาสตร์อันดับศูนย์ และแบบจำลองจลนพลศาสตร์อันดับหนึ่ง พบว่าการหาสมการเชิงเส้นการสลายตัวของปริมาณแอนโรโซยานินโดยใช้ดัชนีของค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจสูงสุด ( $R^2$ ) ซึ่งใช้เป็นตัวบ่งบอกความแม่นยำในการทำนายของแบบจำลองจลนพลศาสตร์ และวิเคราะห์ค่าผลบวกกำลังสองการถดถอย (SSR) ซึ่งเป็นค่าพารามิเตอร์ทางสถิติสำหรับบ่งบอกความผิดพลาดในการทำนายของแบบจำลองจลนพลศาสตร์ โดยเปรียบเทียบกับปริมาณแอนโรโซยานินในน้ำมะกึ่งสกัดของการทดลองซ้ำใหม่ (New experiment) เพื่อเปรียบเทียบ และหาแบบจำลองจลนพลศาสตร์ที่เหมาะสม โดยแบบจำลองจลนพลศาสตร์ที่เหมาะสมในการทำนายการสลายปริมาณแอนโรโซยานินในน้ำมะกึ่งสกัดในการศึกษานี้ ควรมีค่า  $R^2$  ที่สูง และมีค่า SSR ที่น้อย รูปแบบสมการแบบจำลองจลนพลศาสตร์ และผลการวิเคราะห์ทางสถิติ ตามที่แสดงในตาราง 1 ผลการศึกษาพบว่าแบบจำลองจลนพลศาสตร์ปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง มีค่า  $R^2$  อยู่ในช่วง 0.9106-0.9753 และค่า SSR ซึ่งเป็นค่าพารามิเตอร์ทางสถิติที่บ่งบอกความผิดพลาดของแบบจำลองซึ่งอยู่ระหว่าง 0.0199- 0.0406 ซึ่งน้อยการผลการวิเคราะห์ทางสถิติของแบบจำลองจลนพลศาสตร์อันดับศูนย์ ดังนั้นแบบจำลองจลนพลศาสตร์อันดับหนึ่งมีความเหมาะสมในการทำนายการเปลี่ยนแปลงของการสลายตัวของปริมาณแอนโรโซยานินในน้ำมะกึ่งสกัดสอดคล้องกับรายงานวิจัยของ Shao-qian *et al.*, (2011) ซึ่งพบว่า การสลายตัวของปริมาณแอนโรโซยานินในน้ำส้มเหมาะสมกับแบบจำลองจลนพลศาสตร์อันดับหนึ่ง เช่นเดียวกับรายงานผลการวิจัยของ Alex *et al.*, (2016) พบว่าการสลายตัวของปริมาณแอนโรโซยานินในน้ำบลูเบอร์รี่มีรูปแบบแบบจำลองจลนพลศาสตร์อันดับหนึ่ง รวมถึงรายงานวิจัยของ Assawarachan and Noomhorm (2008) พบว่าแบบจำลองจลนพลศาสตร์อันดับหนึ่งมีความเหมาะสมมากกว่าแบบจำลองจลนพลศาสตร์อันดับศูนย์ในการทำนายการเปลี่ยนแปลงสี (visual color) ของน้ำส้มปรีดในระหว่างการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ

ตารางที่ 1 แบบจำลองจลนพลศาสตร์ปฏิกิริยาของการสลายของปริมาณแอนโรโซยานินในน้ำมะกึ่ง

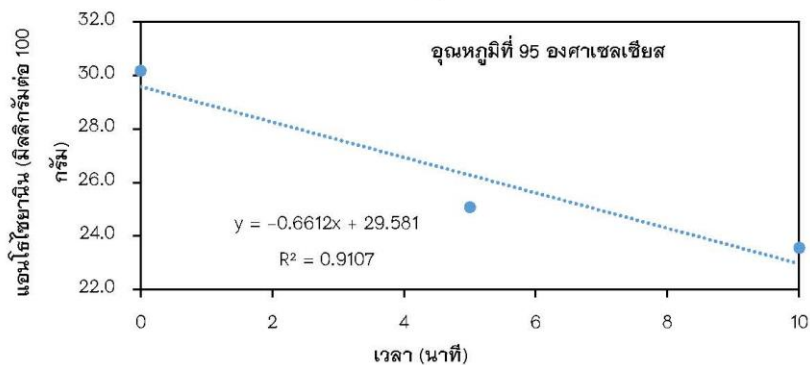
อันดับของปฏิกิริยา	อุณหภูมิ	รูปแบบแบบจำลองจลนพลศาสตร์	สัมประสิทธิ์การตัดสินใจสูงสุด ( $R^2$ )	ค่าผลบวกกำลังสองการถดถอย (SSR)
ปฏิกิริยาอันดับศูนย์	75	$C_t = -0.3098 \text{ (time)} + 30.348$	0.9657	0.0287
	85	$C_t = -0.6569 \text{ (time)} + 30.348$	0.8740	0.0534
	95	$C_t = -0.6612 \text{ (time)} + 30.348$	0.9107	0.0361
ปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง	75	$\ln (C_t/C_0) = -0.3098 \text{ (time)}$	0.9753	0.0199
	85	$\ln (C_t/C_0) = -0.6569 \text{ (time)}$	0.9085	0.0406
	95	$\ln (C_t/C_0) = -0.6612 \text{ (time)}$	0.9106	0.0361



(ก)

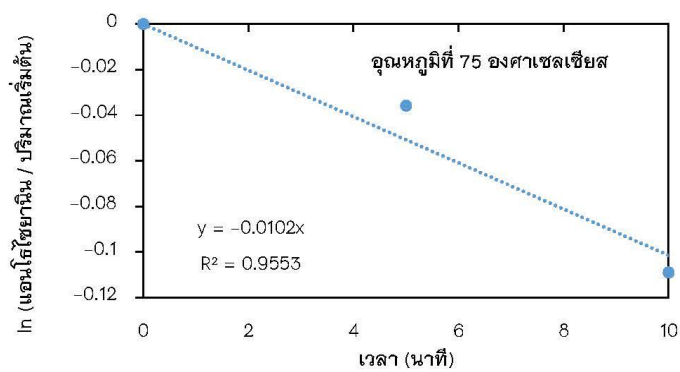


(ข)

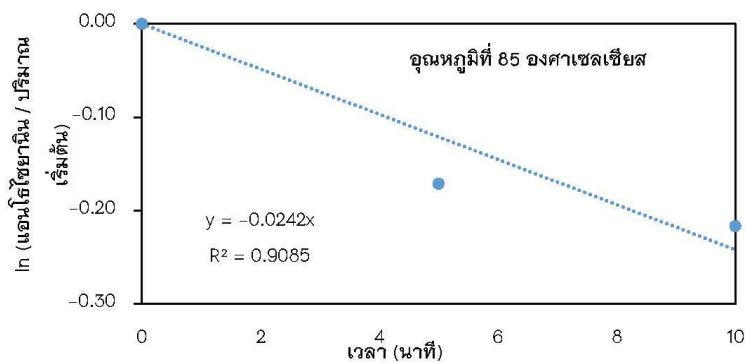


(ค)

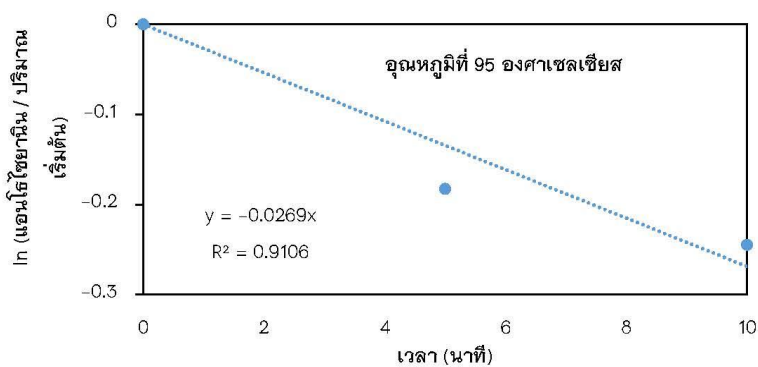
ภาพที่ 4 จลนพลศาสตร์ปฏิกิริยาค้นดับศูนย์ของการสลายของปริมาณแอมโมเนียไนโตรเจนในน้ำมะเขือเทศ  
(ก) จุดหนุมที่ 75 องศาเซลเซียส (ข) จุดหนุมที่ 85 องศาเซลเซียส (ค) จุดหนุมที่ 95 องศาเซลเซียส



(ก)



(ข)



(ค)

ภาพที่ 5 จลนพลศาสตร์ปฏิกิริยาระดับหนึ่งของการสลายของปริมาณแอมโมไโซยานินในน้ำมะเขีง  
 (ก) จุดหมุ่ที่ 75 องศาเซลเซียส (ข) จุดหมุ่ที่ 85 องศาเซลเซียส (ค) จุดหมุ่ที่ 95 องศาเซลเซียส



### วิจารณ์และสรุปผล

ผลของอุณหภูมิ (75, 85, 95 องศาเซลเซียส) มีผลกระทบต่ออย่างมีนัยสำคัญ (ระดับความเชื่อมั่น ร้อยละ 95) ของการสลายตัวของแอนโทไซยานินของน้ำมะเกี๋ยงสกัด น้ำมะเกี๋ยงสดนั้นมีปริมาณแอนโทไซยานินเท่ากับ  $30.18 \pm 0.574$  มิลลิกรัมต่อ 100 กรัม เมื่อนำไปผ่านความร้อนเป็นเวลา 10 นาที พบว่ามีร้อยละของสลายตัวของปริมาณแอนโทไซยานินเท่ากับ 10.26, 19.69 และ 21.91 ที่อุณหภูมิ 75, 85, 95 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ในขณะที่การศึกษาผลของอุณหภูมิ และเวลาในสลายตัวของปริมาณแอนโทไซยานินในน้ำมะเกี๋ยงสามารถอธิบายได้ในรูปของจลนพลศาสตร์ปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง ซึ่งมีความเหมาะสมมากกว่าจลนพลศาสตร์ปฏิกิริยาอันดับศูนย์ เนื่องจาก ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจสูงสุด ( $R^2$ ) ที่สูงกว่า และค่าผลบวกกำลังสองการถดถอย (SSR) ที่น้อยกว่าแบบจำลองของจลนพลศาสตร์ปฏิกิริยาอันดับหนึ่งโดยการเพิ่มอุณหภูมิและความเข้มข้นของน้ำมะเกี๋ยง มีแนวโน้มให้อัตราการสลายตัวของปฏิกิริยา (k) เพิ่มขึ้น

### เอกสารอ้างอิง

- กรมวิทยาศาสตร์บริการ. (2560, กุมภาพันธ์). มะเกี๋ยง พืชในโครงการอนุรักษ์พันธุกรรมพืช สมเด็จพระราชดำริโดย สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล สถาบันวิจัยและฝึกอบรมการเกษตรลำปาง. สืบค้นจาก <http://www.rspg.org/makiang/mg12.htm>
- ปองพล สุริยะกันทร และฤทธิชัย อัครราชันย์. (2555). แบบจำลองการอบแห้งใบกระเพราด้วยคลื่นไมโครเวฟ. *วารสารสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย* ปีที่ 18 ฉบับที่ 1 หน้า 8-14.
- วรวิทย์ อาธิกุล, กชรัตน์ วงศ์รัตน์ และ สิทธิพรธนา กิตติวรพัฒน์ (2552). ความคงตัวของแอนโทไซยานินและความสามารถในการทำลายอนุมูลอิสระในน้ำบลูเบอร์รี่และบลูเบอร์รี่เข้มข้น. เอกสารประกอบการประชุมทางวิชาการมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 47. 17-20 มีนาคม 2552. หน้า 499-506.
- ฤทธิชัย อัครราชันย์ (2556). จลนพลศาสตร์การอบแห้งอาหารและวัสดุชีวภาพ. *วารสารวิชาการ Rajabhat Journal of Sciences, Humanities & Social Sciences*. 14 (2):13-22.
- Alex Martynenko, A. and Yougui Chen, Y. (2016). Degradation kinetics of total anthocyanins and formation of polymeric color in blueberry hydrothermodynamic (HTD) processing. *Journal of Food Engineering* 171:44-51.
- Assawarachan, R and Noomhorm, A. (2008). Effect of Operating Condition on the Kinetic of Color Change of Concentrated Pineapple Juice by Microwave Vacuum Evaporation. *International Journal of Food, Agriculture & Environment* 6(3&4): 47-53.
- Fultki, T and Francis, F.J. (1968). Extraction and Determination of Total Anthocyanin in Cranberries. *Journal of Food sciences*; 33(1) : 72-77.
- Patras, A., Brunton, N. P., O'Donnell, C and Tiwari, B.K. (2010). Effect of thermal processing on anthocyanin stability in foods; mechanisms and kinetics of degradation. *Trends in Food Science & Technology*; 21: 3-11
- Shao-qian, C., Liang, L. and Si-yi, P. (2011). Thermal Degradation Kinetics of Anthocyanins and Visual Color of Blood Orange Juice. *Agricultural Sciences in China*; 10(12): 1992-1997.

## ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ-สกุล	นางสาวปัทมา ไทยอู่
เกิดเมื่อ	25 พฤศจิกายน 2519
ประวัติการศึกษา	พ.ศ. 2542 วิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา จังหวัดลำปาง
ประวัติการทำงาน	พ.ศ. 2544-ปัจจุบัน สถาบันวิจัยเทคโนโลยีเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี ราชมงคลล้านนาจังหวัดลำปาง

