



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ สมบัติทางวิศวกรรมของเนื้อมะละกอตีป่นและการเพิ่มความเข้มข้น
ของเนื้อมะละกอตีป่นด้วยวิธีการให้ความร้อนแบบต่างๆ

โดย

รองศาสตราจารย์ ดร. อัมพวัน ตันสกุล

ภาควิชาวิศวกรรมอาหาร

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

พฤษภาคม 2554

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ สมบัติทางวิศวกรรมของเนื้อมะละกอตีป่นและการเพิ่มความเข้มข้น
ของเนื้อมะละกอตีป่นด้วยวิธีการให้ความร้อนแบบต่างๆ

รองศาสตราจารย์ ดร. อัมพวัน ตันสกุล

ภาควิชาวิศวกรรมอาหาร

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

สนับสนุนโดยสำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา

และสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย

(ความเห็นในรายงานนี้เป็นของผู้วิจัย สกอ. และ สกว. ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป)

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาผลของปริมาณของแข็งที่ละลายได้และอุณหภูมิ ต่อสมบัติทางกายภาพและความร้อน สมบัติทางรีโอโลยี และสมบัติทางไดอิเล็กทริกของเนื้อมะละกอดีป่น รวมถึงได้ศึกษาจลนพลศาสตร์ของการเปลี่ยนแปลงสีของเนื้อมะละกอดีป่นที่ผ่านการระเหยน้ำด้วยวิธีต่างๆ

ในส่วน of สมบัติทางกายภาพและความร้อนของเนื้อมะละกอดีป่น ได้ทดลองวัดค่าความหนาแน่นด้วย Pycnometer ค่าความร้อนจำเพาะวัดด้วย Differential Scanning Calorimeter (DSC) และค่าการนำความร้อนวัดด้วยอุปกรณ์วัดค่าการนำความร้อนแบบ Line heat source probe และนำค่าความร้อนจำเพาะ ค่าการนำความร้อน และค่าความหนาแน่นที่วัดได้ ไปคำนวณหาการแพร่กระจายความร้อน จากการศึกษาค่าผลของปริมาณของแข็งที่ละลายได้ และอุณหภูมิของเนื้อมะละกอดีป่น ในช่วงความเข้มข้น 10, 15, 20 และ 25°Brix และในช่วงอุณหภูมิ 40, 50, 60, 70, และ 80°C พบว่ามีความหนาแน่นเฉลี่ยในช่วง 1014.61 - 1098.86 kg/m³ และมีความร้อนจำเพาะเฉลี่ยในช่วง 3.652 - 4.092 kJ/kg°C ส่วนค่าการนำความร้อน และค่าการแพร่กระจายความร้อนมีค่าเฉลี่ยในช่วง 0.452 - 0.685 W/m°C และ 1.127×10^{-7} - 1.650×10^{-7} m²/s ตามลำดับ ทั้งนี้ความหนาแน่นจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณของแข็งที่ละลายได้เพิ่มขึ้น แต่จะมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ส่วนค่าความร้อนจำเพาะ ค่าการนำความร้อน และค่าการแพร่กระจายความร้อนจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น และจะมีค่าลดลงเมื่อปริมาณของแข็งที่ละลายได้เพิ่มขึ้น นอกจากนี้แบบจำลองที่เป็นฟังก์ชันของปริมาณของแข็งที่ละลายได้ และอุณหภูมิได้ถูกพัฒนาขึ้นมาจากผลข้อมูลการทดลองของสมบัติดังกล่าว

ในส่วน of จลนพลศาสตร์ของการเปลี่ยนแปลงสีของเนื้อมะละกอดีป่นที่ผ่านการระเหยน้ำด้วยวิธีต่างๆ ได้ศึกษาการเปลี่ยนแปลงของสีระหว่างกระบวนการทำเข้มข้นมะละกอดีป่นด้วยวิธีการให้ความร้อนแบบดั้งเดิม การให้ความร้อนภายใต้ระบบความดันสุญญากาศ และการให้ความร้อนด้วยเครื่องไมโครเวฟ โดยความเข้มข้นเริ่มต้นและความเข้มข้นสุดท้ายของมะละกอดีป่นเป็น 10 และ 25 °Brix ตามลำดับ สภาวะที่ใช้ในการศึกษาในงานวิจัยนี้คือ อุณหภูมิ 70 80 90 °C สำหรับกรณีการให้ความร้อนแบบดั้งเดิมและการให้ความร้อนภายใต้ระบบความดันสุญญากาศ และกำลังของเครื่องไมโครเวฟที่ 200 300 400 วัตต์ สำหรับกรณีการให้ความร้อนด้วยเครื่องไมโครเวฟ เวลาในการระเหยน้ำในการทำเข้มข้นมะละกอดีป่นให้มีความเข้มข้น 25 °Brix คือ 455 340 และ 240 นาที สำหรับการให้ความร้อนแบบดั้งเดิม 38.75 35.25 และ 20.75 นาที สำหรับการให้ความร้อนภายใต้ระบบความดันสุญญากาศ และ 29.75 18.50 และ 15.50 นาที สำหรับการให้ความร้อนด้วยเครื่องไมโครเวฟ นอกจากนี้ยังได้ทำการศึกษาการเปลี่ยนแปลงสีโดยรวม (ΔE) พบว่า จลนพลศาสตร์ของการ

เปลี่ยนแปลงเอนทัลปีรวม (ΔE) เป็นไปตาม ปฏิกิริยาลำดับที่ศูนย์ ในกรณีที่เป็นการให้ความร้อนแบบ
 ตั้งเดิม เป็นไปตามปฏิกิริยาแบบผสม ในกรณีที่เป็นการให้ความร้อนภายใต้ระบบความดันสูญญากาศ
 และเป็นไปตามปฏิกิริยาลำดับที่ศูนย์ ในกรณีที่เป็นการให้ความร้อนด้วยเครื่องไมโครเวฟ

ในส่วนของการสมบัติทางรีโอโลยีของเนื้อมะละกอดีป่น ได้ศึกษาผลของอุณหภูมิและปริมาณ
 ของแข็งที่ละลายได้ต่อพฤติกรรมการไหลของเนื้อมะละกอดีป่น ที่มีปริมาณของแข็งที่ละลายได้
 เท่ากับ 10, 15, 20 และ 25 °Brix ณ อุณหภูมิ 5, 20, 35, 50, 65 และ 80 °C ด้วยเครื่อง rotational
 viscometer พบว่าสมการของHerschel – Bulkley สามารถอธิบายพฤติกรรมทางการไหลของ
 มะละกอดีป่นได้ดี เมื่ออัตราเฉือนเพิ่มขึ้นเนื้อมะละกอดีป่นมีพฤติกรรมการไหลแบบซูโดพลาสติกที่
 มีความข้นคลาก นอกจากนี้พบว่าความหนืดปรากฏเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณของแข็งที่ละลายได้เพิ่มขึ้น
 และอุณหภูมิลดลง

ในส่วนของการสมบัติทางไดอิเล็กทริกของเนื้อมะละกอดีป่น ได้ศึกษาผลของปริมาณของแข็งที่
 ละลายได้ และอุณหภูมิของเนื้อมะละกอดีป่น ในช่วงความเข้มข้น 10, 15, 20 และ 25 °Brix และ
 ในช่วงอุณหภูมิ 40, 50, 60, 70, และ 80°C ด้วยวิธี open-ended coaxial probe พบว่าค่าคงที่ไดอิเล็กทริก
 มีค่าลดลงเมื่อปริมาณของแข็งที่ละลายได้เพิ่มขึ้นและอุณหภูมิเพิ่มขึ้น ณ ความถี่ 915 และ
 2450 MHz ในขณะที่ค่าแฟกเตอร์การสูญเสียไดอิเล็กทริกมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณของแข็งที่ละลายได้
 เพิ่มขึ้นและอุณหภูมิเพิ่มขึ้น ณ ความถี่ 915 MHz แต่ที่ความถี่ 2450 MHz ผลของอุณหภูมิไม่มี
 แนวโน้มที่ชัดเจน

คำสำคัญ : เนื้อมะละกอดีป่น / ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ / อุณหภูมิ / ความหนาแน่น / ความร้อน
 จำเพาะ / การนำความร้อน / การแพร่กระจายความร้อน / สี / วิธีการระเหย / แบบจำลองทาง
 จลนพลศาสตร์/ ความหนืดปรากฏ / ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก / ค่าแฟกเตอร์การสูญเสียไดอิเล็กทริก

ABSTRACT

The effects of soluble solids content and temperature on engineering properties; i.e., thermophysical properties, rheological properties and dielectric properties of papaya puree with different soluble solids contents were experimentally determined at various temperatures. In addition, the study of kinetics of color change of papaya puree undergoing different evaporation methods was carried out.

For thermophysical properties of papaya puree, density and specific heat were measured using pycnometer and differential scanning calorimeter (DSC), respectively while thermal conductivity was measured using line heat source probe. Thermal diffusivity was then calculated from the experimental results of the specific heat, thermal conductivity and density. Thermal properties of papaya puree were experimentally determined at soluble solids contents of 10, 15, 20 and 25 °Brix and at temperatures of 40, 50, 60, 70 and 80°C. The density, specific heat, thermal conductivity and thermal diffusivity of papaya puree were found to be in the ranges of 1014.6 to 1098.9 kg/m³, 3.652 to 4.092 kJ/kg °C, 0.452 to 0.685 W/m °C and 1.127×10^{-7} to 1.650×10^{-7} m²/s, respectively. Density increased with increasing soluble solids content but decreased with increasing temperature. Whereas specific heat, thermal conductivity and thermal diffusivity increased with increasing temperature but decreased with increasing soluble solids content. Moreover, the empirical models for each property as a function of soluble solids content and temperature were obtained.

For color degradation and kinetics, color change of papaya puree during different evaporation processes (i.e., conventional evaporation, rotary vacuum evaporation, and microwave heating processes) was investigated. The initial and final soluble solids contents of papaya puree were approximately 10°Brix and 25°Brix, respectively. The conditions studied in this research were the temperatures of 70, 80, 90°C for the conventional and rotary vacuum evaporation methods and microwave powers of 200W, 300W, and 400W for the microwave heating method. Total color difference (ΔE) was used to evaluate the total color change. The zero-order, first-order and a combined kinetics models were applied to the change in color. Results indicated that variation in ΔE of papaya puree obtained from conventional evaporating and microwave heating followed a

zero-order kinetics model. Whereas variation in ΔE of papaya puree obtained from rotary vacuum evaporating followed a combined kinetics model.

For rheological properties of papaya puree, the rotational rheometer was used to evaluate the flow parameters. Rheological properties of papaya puree were experimentally determined at soluble solids contents of 5, 15, 20 and 25 °Brix and at temperatures of 5, 20, 35, 50, 65 and 80°C. The flow behavior of papaya puree was adequately described by the Herschel-Bulkley model. As shear rate increased, papaya puree exhibited a pseudoplastic behavior with a yield stress. In addition, it was found that the apparent viscosity increased with an increase in soluble solids content and a decrease in temperature.

For dielectric properties of papaya puree, the open-ended coaxial probe method was applied in this research. Dielectric properties of papaya puree were experimentally determined at soluble solids contents of 10, 15, 20 and 25 °Brix and at temperatures of 40, 50, 60, 70 and 80°C. Results showed that dielectric constant decreased with increasing soluble solids content and increasing temperature at 915 and 2450 MHz. Whereas dielectric loss factor increased with increasing soluble solids content at 915 and 2450 MHz. In addition, dielectric loss factor increased with increasing temperature at 915 MHz but at 2450 MHz the influence of temperature on dielectric loss factor did not show the obvious trend.

Keywords: Papaya puree, Soluble solids content, Temperature, Density, Specific heat, Thermal conductivity, Thermal diffusivity, Color, Evaporation method, Kinetic model, Apparent viscosity, Dielectric constant, Dielectric loss factor

บทสรุปผู้บริหาร

ประเทศไทยเป็นประเทศที่อุดมไปด้วยผลไม้หลากหลายชนิด ซึ่งนับว่าเป็นผลิตผลทางการเกษตรที่สำคัญอย่างหนึ่งของประเทศ เช่น สับปะรด กัลล้วย มะม่วง มะละกอ เป็นต้น ซึ่งมีการนำมาแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์หลายชนิด เนื้อผลไม้ดิบเป็นผลิตภัณฑ์จากผลไม้แบบหนึ่งที่เพิ่มมูลค่าให้กับผลไม้และยังสามารถนำไปทำผลิตภัณฑ์อื่นๆ ได้หลากหลาย อาทิเช่น ซอสผลไม้ ผลไม้ผง เนื้อผลไม้เข้มข้น เป็นต้น มะละกอเป็นผลไม้ที่มีคุณค่าทางอาหารสูง เนื่องจากเนื้อมะละกอสุกมีสารต้านอนุมูลอิสระ (antioxidants) สูง สารต้านอนุมูลอิสระในมะละกอได้แก่ เบต้า-แคโรทีน วิตามินเอ และวิตามินซี

โดยทั่วไปผลไม้เน่าเสียได้ง่าย การทำเนื้อผลไม้เข้มข้นเป็นการแยกน้ำออกจากผลิตภัณฑ์จึงช่วยยืดอายุการเก็บของผลิตภัณฑ์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งมะละกอเป็นผลไม้ที่สุกง่ายและเน่าเสียเร็ว อายุการเก็บของมะละกอสุกจึงสั้น การแปรรูปมะละกอสุกโดยการนำเฉพาะส่วนเนื้อมาตีปั่นและทำให้เข้มข้นขึ้นเป็นอีกทางเลือกหนึ่งในการยืดอายุการเก็บของมะละกอสุก และสามารถเพิ่มศักยภาพในการส่งออกมะละกอแปรรูป

วิธีการทำให้เข้มข้นมีความสำคัญต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์สุดท้าย เช่น สี กลิ่น ลักษณะปรากฏ เป็นต้น การผลิตเนื้อผลไม้เข้มข้นน่าจะมีศักยภาพในการผลิตระดับอุตสาหกรรม เนื่องจากสามารถใช้เป็นส่วนประกอบในผลิตภัณฑ์อื่นๆ ได้ เช่น ไอศกรีม เยลลี่ และเครื่องดื่มผลไม้ เป็นต้น เป็นที่ทราบกันดีว่าการทำน้ำหรือเนื้อผลไม้เข้มข้นโดยวิธีการระเหยแบบดั้งเดิม มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของสีและการสูญเสียสารระเหยที่ให้กลิ่น (volatile compounds) ทำให้คุณภาพของผลิตภัณฑ์ด้อยลง โดยเฉพาะอย่างยิ่งสีเป็นลักษณะปรากฏที่ผู้บริโภคให้ความสำคัญอย่างยิ่ง จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะนำวิธีการทำให้เข้มข้นแบบใหม่ที่เร็วกว่าวิธีเดิมมาใช้ การให้ความร้อนโดยใช้คลื่นไมโครเวฟน่าจะเป็นวิธีให้ความร้อนที่ควรทำการศึกษาเปรียบเทียบกับวิธีให้ความร้อนแบบเดิม การให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟนั้น คลื่นพลังงานไมโครเวฟในช่วงความถี่ 915 หรือ 2,450 MHz จะส่งผ่านภาชนะบรรจุไปสู่วัตถุดิบ ไมโครเวฟจะแทรกซึมผ่านวัตถุดิบไปยังบริเวณที่มีโมเลกุลน้ำที่มีขั้วสูง พลังงานไมโครเวฟจะเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อนภายในวัสดุอาหารที่มีความชื้น มีผลทำให้เกิดการคั่งน้ำออกจากวัสดุอาหารอย่างรวดเร็ว

ในการแปรรูปผลไม้ให้มีคุณภาพดี คงคุณค่าทางโภชนาการ จะต้องใช้อุณหภูมิและเวลาที่เหมาะสม ข้อมูลสมบัติทางการไหล สมบัติทางความร้อนและสมบัติทางไดอิเล็กทริกของผลไม้ชนิดนั้นๆจึงมีความสำคัญ สมบัติทางการไหลได้แก่ ความหนืดปรากฏ ค่าสัมประสิทธิ์ความข้นหนืด และดัชนีพฤติกรรมการไหล สมบัติทางความร้อนได้แก่ ค่าการนำความร้อน ค่าความร้อนจำเพาะ และค่าการแพร่กระจายความร้อน สมบัติทางไดอิเล็กทริกได้แก่ ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก และค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริก ทั้งนี้สมบัติดังกล่าวทั้งหมดขึ้นกับหลายปัจจัย ซึ่งปัจจัยที่สำคัญ ได้แก่ องค์ประกอบของอาหาร และอุณหภูมิ เป็นต้น

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาหาสมบัติทางความร้อน สมบัติทางการไหล และสมบัติทางไดอิเล็กทริกของเนื้อมะละกอตีปั่น ในช่วงความเข้มข้น และอุณหภูมิต่างๆกัน และหาความสัมพันธ์ของสมบัติดังกล่าวกับปัจจัยที่เกี่ยวข้อง ทำให้สามารถทำนายสมบัติดังกล่าวของเนื้อมะละกอตีปั่นได้อย่างถูกต้องและรวดเร็ว โดยสามารถนำข้อมูลสมบัติดังกล่าวเหล่านี้ไปใช้ในการพิจารณาปรับปรุงกระบวนการให้ความร้อนหรือทำระเหยเนื้อมะละกอตีปั่นโดยการให้ความร้อนแบบเดิม หรือการให้ความร้อนแบบใหม่ (การให้ความร้อนโดยใช้คลื่นไมโครเวฟ) เพื่อให้ได้สภาวะการแปรรูปที่เหมาะสม และใช้ในการออกแบบและพัฒนาอุปกรณ์การผลิตและกระบวนการผลิตสำหรับเนื้อมะละกอตีปั่น หรือเนื้อผลไม้อื่นๆตีปั่นที่มีลักษณะใกล้เคียง นอกจากนี้ยังได้ศึกษาเปรียบเทียบการทำเนื้อมะละกอตีปั่นเข้มข้นโดยการให้ความร้อนต่างกัน 3 แบบได้แก่ การให้ความร้อนโดยใช้คลื่นไมโครเวฟ การระเหยที่ความดันต่ำกว่าบรรยากาศ และการระเหยที่ความดันบรรยากาศ

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณสำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา (สกอ.) และ สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) ภายใต้งบโครงการทุนเพิ่มขีดความสามารถด้านการวิจัยของอาจารย์รุ่นใหม่กลางในสถาบันอุดมศึกษา ที่ให้ทุนสนับสนุนงานวิจัยนี้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ค
บทสรุปผู้บริหาร	จ
กิตติกรรมประกาศ	ช
สารบัญ	ช
รายการตาราง	ฉ
รายการรูปประกอบ	ฎ

บทที่

1. บทนำ	1
1.1 ที่มาของงานวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 มะละกอ	4
2.1.1 คุณค่าทางโภชนาการ	5
2.1.2 องค์ประกอบทางชีวภาพ	5
2.1.3 เนื้อมะละกอดีป็น	7
2.2 สมบัติทางความร้อนของอาหาร	8
2.3 จลนพลศาสตร์การเปลี่ยนแปลงสีของอาหาร	9
2.4 สมบัติทางรีโอโลยีของอาหาร	10
2.5 สมบัติทางไดอิเล็กทริกของอาหาร	11

3. วิธีการดำเนินงานวิจัย	12
3.1 การศึกษาสมบัติทางกายภาพและความร้อนของเนื้อมะละกอดีป่น	12
3.1.1 การเตรียมตัวอย่างมะละกอดีป่น	12
3.1.2 การวัดค่าของแข็งละลายน้ำได้โดยรวม	12
3.1.3 การวัดค่าความหนาแน่น	12
3.1.4 การวัดค่าความร้อนจำเพาะ	12
3.1.5 การวัดค่าการนำความร้อน	13
3.1.6 การหาค่าการแพร่กระจายความร้อน	15
3.1.7 การออกแบบการทดลอง	15
3.2 การศึกษาจลนพลศาสตร์การเปลี่ยนแปลงสีของเนื้อมะละกอดีป่นที่ผ่านกระบวนการระเหยน้ำแบบต่างๆ	16
3.2.1 การเตรียมตัวอย่างมะละกอดีป่น	16
3.2.2 การวัดค่าของแข็งละลายน้ำได้โดยรวม	17
3.2.3 การวัดสี	17
3.2.4 การออกแบบการทดลอง	17
3.3 การศึกษาสมบัติทางรีโอโลยีของเนื้อมะละกอดีป่น	18
3.3.1 การเตรียมตัวอย่างมะละกอดีป่น	18
3.3.2 การวัดค่าสมบัติการไหล	18
3.4 การศึกษาสมบัติทางไดอิเล็กทริกของเนื้อมะละกอดีป่น	18
3.4.1 การเตรียมตัวอย่างมะละกอดีป่น	18
3.4.2 การวัดค่าสมบัติไดอิเล็กทริก	18
4. ผลการทดลองและวิจารณ์	20
4.1 ผลการศึกษาสมบัติทางกายภาพและความร้อนของเนื้อมะละกอดีป่น	20
4.1.1 ความหนาแน่นของเนื้อมะละกอดีป่น	20
4.1.2 ค่าความร้อนจำเพาะของเนื้อมะละกอดีป่น	21
4.1.3 ค่าการนำความร้อนของเนื้อมะละกอดีป่น	23
4.1.4 ค่าการแพร่กระจายความร้อนของเนื้อมะละกอดีป่น	24
4.2 ผลการศึกษาจลนพลศาสตร์การเปลี่ยนแปลงสีของเนื้อมะละกอดีป่นที่ผ่านกระบวนการระเหยน้ำแบบต่างๆ	26
4.2.1 ผลการศึกษาเปรียบเทียบกระบวนการระเหยน้ำแบบต่างๆของเนื้อมะละกอดี	26

ปั่น	
4.2.2 ผลการเปลี่ยนแปลงสีของเนื้อมะละกอดีป่นเข้มข้นระหว่างกระบวนการ ระเหยน้ำ	29
4.3 ผลการศึกษาสมบัติทางรีโอโลยีของเนื้อมะละกอดีป่น	34
4.3.1 ผลของความเข้มข้นและอุณหภูมิต่อสมบัติการไหลของเนื้อมะละกอดีป่น	34
4.4 ผลการศึกษาสมบัติทางไดอิเล็กทริกของเนื้อมะละกอดีป่น	38
4.4.1 ผลของความเข้มข้นและอุณหภูมิต่อค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของเนื้อมะละกอดีป่น	38
4.4.2 ผลของความเข้มข้นและอุณหภูมิต่อแฟกเตอร์การสูญเสียไดอิเล็กทริกของเนื้อ มะละกอดีป่น	38
5. สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	41
5.1 สมบัติทางกายภาพและความร้อนของเนื้อมะละกอดีป่น	41
5.2 จลนพลศาสตร์การเปลี่ยนแปลงสีของเนื้อมะละกอดีป่นที่ผ่านกระบวนการระเหย น้ำแบบต่างๆ	41
5.3 สมบัติทางรีโอโลยีของเนื้อมะละกอดีป่น	41
5.4 สมบัติทางไดอิเล็กทริกของเนื้อมะละกอดีป่น	42
เอกสารอ้างอิง	43
Output ที่ได้จากโครงการ	49
ภาคผนวก	50
ก Tansakul, A., Kantrong, H, Saengrayup, R. and Sura, P. (in press). Thermophysical Properties of Papaya Puree. International Journal of Food Properties.	
ข Tansakul, A., Kantrong, H, Saengrayup, R. and Sura, P. 2009. Thermophysical Properties of Papaya Puree. Prodeedings of the 4 th International conference on Innovations in Food Processing Technology and Engineering. January 19-20. Asian Institute of Technology. Bangkok.	
ค Korakot, I. and Tansakul, A. 2009. Color Degradation kinetics of Papaya Puree undergoing Different Evaporation Methods. Prodeedings of the 10 th International Agricultural Engineering Conference. December 7-10. Asian Institute of Technology. Bangkok.	

รายการตาราง

ตาราง	หน้า
2.1 องค์ประกอบทางโภชนาการของมะละกอ คิดเป็นส่วนที่รับประทานได้ต่อ 100 กรัม	6
2.2 ร้อยละขององค์ประกอบของแคโรทีนอยด์ในมะละกอเนื้อสีเหลืองและแดง	7
4.1 สมบัติทางกายภาพและเคมีของเนื้อมะละกอตีปั่นเข้มข้น 10ปริกซ์	26
4.2 เวลาในการระเหยน้ำเพื่อเตรียมตัวอย่างเนื้อมะละกอตีปั่นที่ความเข้มข้นต่างๆ	29
4.3 ค่า Hunter $L a b$ และค่าการเปลี่ยนแปลงสีทั้งหมด (ΔE) ที่ 25 ปริกซ์ของเนื้อมะละกอตีปั่นซึ่งใช้การระเหยน้ำแบบต่างๆ	30
4.4 ตัวแปรทางจลนพลศาสตร์ของสมการที่ (4.1) และ (4.2) สำหรับการเปลี่ยนแปลงสีโดยรวมของเนื้อมะละกอตีปั่นเข้มข้นที่ใช้วิธีการระเหยน้ำแบบต่างๆ	33
4.5 Yield stress (τ_y), Flow behavior index (n) and Consistency coefficient (m) ของเนื้อมะละกอตีปั่นเข้มข้น	37

รายการรูปประกอบ

รูป	หน้า	
2.1	รูปร่างและลักษณะของมะละกอ	4
3.1	ชุดเครื่องมือที่ใช้ในการวัดค่าการนำความร้อน	14
3.2	Probe สำหรับวัดค่าการนำความร้อนและภาชนะใส่ตัวอย่าง	14
3.3	Open-ended coaxial probe ต่อเข้ากับ network analyzer	19
4.1	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นของเนื้อมะละกอดิบที่ระดับความเข้มข้น (◆) 10°Brix, (■) 15 °Brix, (▲) 20 °Brix, (●) 25 °Brix กับอุณหภูมิ 40-80°C	21
4.2	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนจำเพาะของเนื้อมะละกอดิบที่ระดับความเข้มข้น (◆) 10°Brix, (■) 15 °Brix, (▲) 20 °Brix, (●) 25 °Brix กับอุณหภูมิ 40-80°C	22
4.3	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำความร้อนของเนื้อมะละกอดิบที่ระดับความเข้มข้น (◆) 10°Brix, (■) 15 °Brix, (▲) 20 °Brix, (●) 25 °Brix กับอุณหภูมิ 40-80°C	23
4.4	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการแพร่กระจายความร้อนของเนื้อมะละกอดิบที่ระดับความเข้มข้น (◆) 10°Brix, (■) 15 °Brix, (▲) 20 °Brix, (●) 25 °Brix กับอุณหภูมิ 40- 80°C	25
4.5	การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นต่อเวลาของกระบวนการระเหยน้ำแบบดั้งเดิมที่อุณหภูมิ 70 80 และ 90°C	27
4.6	การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นต่อเวลาของกระบวนการระเหยน้ำแบบภายใต้ความดันสุญญากาศ ที่อุณหภูมิ 70 80 และ 90°C	27
4.7	การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นต่อเวลาของกระบวนการระเหยน้ำแบบไมโครเวฟที่กำลังไฟฟ้า 200 300 และ 400 วัตต์	28
4.8	ค่าการเปลี่ยนแปลงเอนทัลปีโดยรวมของกระบวนการระเหยน้ำแบบวิธีดั้งเดิมที่ 70 80 และ 90°C	31
4.9	ค่าการเปลี่ยนแปลงเอนทัลปีโดยรวมของกระบวนการระเหยน้ำแบบภายใต้ความดันสุญญากาศที่ 70 80 และ 90°C	32

4.10	ค่าการเปลี่ยนแปลงสีโดยรวมของกระบวนการระเหยน้ำแบบไมโครเวฟที่ 200 300 และ 400W	32
4.11	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นเฉือนและอัตราเฉือนของเนื้อมะละกอดีป็นที่ระดับความเข้มข้น 10 บริกซ์ ที่อุณหภูมิ 5, 20, 35, 50, 65 และ 80 °C	35
4.12	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นเฉือนและอัตราเฉือนของเนื้อมะละกอดีป็นที่ระดับความเข้มข้น 20 บริกซ์ ที่อุณหภูมิ 5, 20, 35, 50, 65 และ 80 °C	35
4.13	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นเฉือนและอัตราเฉือนของเนื้อมะละกอดีป็นที่ระดับความเข้มข้น 20 บริกซ์ ที่อุณหภูมิ 5, 20, 35, 50, 65 และ 80 °C	36
4.14	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นเฉือนและอัตราเฉือนของเนื้อมะละกอดีป็นที่ระดับความเข้มข้น 25 บริกซ์ ที่อุณหภูมิ 5, 20, 35, 50, 65 และ 80 °C	36
4.15	ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของเนื้อมะละกอดีป็น ในช่วงความเข้มข้น 10, 15, 20 และ 25 °Brix และในช่วงอุณหภูมิ 40, 50, 60, 70, และ 80°C ณ ความถี่ 915 MHz	39
4.16	ค่าแฟคเตอร์การสูญเสียไดอิเล็กทริกของเนื้อมะละกอดีป็น ในช่วงความเข้มข้น 10, 15, 20 และ 25 °Brix และในช่วงอุณหภูมิ 40, 50, 60, 70, และ 80°C ณ ความถี่ 915 MHz	39
4.17	ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของเนื้อมะละกอดีป็น ในช่วงความเข้มข้น 10, 15, 20 และ 25 °Brix และในช่วงอุณหภูมิ 40, 50, 60, 70, และ 80°C ณ ความถี่ 2450 MHz	40
4.18	ค่าแฟคเตอร์การสูญเสียไดอิเล็กทริกของเนื้อมะละกอดีป็น ในช่วงความเข้มข้น 10, 15, 20 และ 25 °Brix และในช่วงอุณหภูมิ 40, 50, 60, 70, และ 80°C ณ ความถี่ 2450 MHz	40

1. บทนำ

1.1 ที่มาของงานวิจัย

มะละกอ (*Carica papaya* Linn.) เป็นไม้ผลสำคัญชนิดหนึ่งในแถบประเทศเขตร้อนรวมทั้งประเทศไทย (Ahmed และคณะ, 2002) มะละกอสามารถเจริญเติบโตได้ในสภาพอากาศและดินเกือบทั่วทุกภาคของประเทศโดยเฉพาะในจังหวัดราชบุรี นครปฐม และสมุทรสาคร มะละกอในด้านคุณค่าทางโภชนาการอุดมไปด้วยสารเบต้าแคโรทีน (Provitamin A) และกรดแอสคอบิก (Chan, 1983) นอกจากนั้นมะละกอยังมีแคลเซียม, ฟอสฟอรัส, เหล็ก, วิตามิน, ไรโบฟลาวิน และไนอะซีนด้วย ผลมะละกอสามารถใช้บริโภคได้ทั้งแบบดิบและสุก โดยจะบริโภคเป็นของหวาน ใส่ในสลัด หรือรับประทานร่วมกับซีเรียลอาหารเช้าก็ได้ ในประเทศแถบเอเชียนิยมรับประทานผลมะละกอดิบในรูปของผัก เช่น ส้มตำ มะละกอนำมาแปรรูปได้หลายชนิด เช่น มะละกออบแห้ง, เป็นส่วนผสมของสลัดผลไม้เมืองร้อน (tropical fruit salad) และค็อกเทล (cocktail) หรือทำเป็นเนื้อมะละกอดิบ ซึ่งสามารถนำไปแปรรูปต่อเป็นผลิตภัณฑ์อาหารอื่นๆ ได้อีกหลายอย่าง เช่น เครื่องดื่ม, ไอศกรีม, แยมเยลลี่, น้ำผลไม้ และน้ำผลไม้แบบผสมเนื้อผลไม้ โดยนิยมผลิตเป็นแบบแช่แข็งและบรรจุกระป๋อง (Nakasone และ Paull, 1998) นอกจากนั้น มะละกอยังสามารถนำมาใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมเครื่องสำอางค์และยาได้อีกด้วย ในเดือนมกราคม 2546 กรมศุลกากรรายงานไทยส่งออกมะละกอสด 281.26 ตัน มูลค่า 4.76 ล้านบาท เพิ่มขึ้น 83% จาก 48.8 ตัน ในเดือนมกราคม 2545 และเพิ่มขึ้น 35.9% จาก 180.82 ตันในเดือนธันวาคม 2545 และส่งออกมะละกอกะป๋องในเดือนมกราคม 2546 จำนวน 206.63 ตัน เพิ่มขึ้น 11% จากมกราคม 2545 แต่ลดลง 31% จากเดือนธันวาคม 2545 (Food Market Exchange, 2008)

ความรู้และข้อมูลเกี่ยวกับสมบัติทางกายภาพและความร้อน สมบัติทางการไหล และสมบัติทางไดอิเล็กทริกของผลไม้ชนิดต่างๆจึงมีความสำคัญ สมบัติทางกายภาพและความร้อนได้แก่ ความหนาแน่น ค่าการนำความร้อน ค่าความร้อนจำเพาะ และค่าการแพร่กระจายความร้อน สมบัติทางการไหลได้แก่ ความหนืดปรากฏ ค่าสัมประสิทธิ์ความข้นหนืด และดัชนีพฤติกรรมการไหล สมบัติทางไดอิเล็กทริกได้แก่ ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก และค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริก ทั้งนี้สมบัติดังกล่าวทั้งหมดขึ้นกับหลายปัจจัย ซึ่งปัจจัยที่สำคัญ ได้แก่ องค์ประกอบของอาหาร และอุณหภูมิ เป็นต้น (Rao, et. al, 2005)

จากการสืบค้นข้อมูลเบื้องต้น พบว่ายังไม่มีข้อมูลของสมบัติทางกายภาพและความร้อน สมบัติทางการไหล และสมบัติทางไดอิเล็กทริกของเนื้อมะละกอดีป่นปรากฏในรายงานทางวิชาการมากนัก การศึกษาถึงสมบัติดังกล่าวของเนื้อมะละกอดีป่น และผลของสมบัติเหล่านี้ที่มีต่อกระบวนการผลิตจึงเป็นสิ่งจำเป็น งานวิจัยนี้ได้ศึกษาหาสมบัติทางกายภาพและความร้อน สมบัติทางการไหล และสมบัติทางไดอิเล็กทริกของเนื้อมะละกอดีป่น ในช่วงความเข้มข้น และอุณหภูมิ ต่างๆกัน นอกจากนี้ยังได้ศึกษาการเปลี่ยนแปลงสีระหว่างกระบวนการทำเนื้อมะละกอดีป่นเข้มข้น ด้วยวิธีให้ความร้อนแบบต่างๆ

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1.2.1 ศึกษาผลของความเข้มข้นของเนื้อมะละกอดีป่นและอุณหภูมิต่อสมบัติทางความร้อน ได้แก่ ค่าการนำความร้อน ค่าความร้อนจำเพาะ และค่าการแพร่กระจายความร้อนของเนื้อมะละกอดีป่น
- 1.2.2 เพื่อศึกษาจลนศาสตร์และการเปลี่ยนแปลงสีของเนื้อมะละกอดีป่นเข้มข้นที่ผ่านการให้ความร้อนแบบต่างๆ ได้แก่ การให้ความร้อนโดยใช้คลื่นไมโครเวฟ การระเหยที่ความดันต่ำกว่าบรรยากาศ และการระเหยที่ความดันบรรยากาศ
- 1.2.3 ศึกษาผลของความเข้มข้นของเนื้อมะละกอดีป่นและอุณหภูมิ ต่อสมบัติทางการไหล ได้แก่ ความหนืดปรากฏ ค่าสัมประสิทธิ์ความข้นหนืด และ ดัชนีพฤติกรรมการไหลของเนื้อมะละกอดีป่น
- 1.2.4 ศึกษาผลของความเข้มข้นของเนื้อมะละกอดีป่น อุณหภูมิ และความถี่ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ต่อสมบัติทางไดอิเล็กทริก ได้แก่ ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก และค่าแฟกเตอร์การสูญเสียไดอิเล็กทริกของเนื้อมะละกอดีป่น
- 1.2.5 หาความสัมพันธ์ของสมบัติทางการไหล สมบัติทางความร้อน และสมบัติทางไดอิเล็กทริก กับ ปัจจัยต่างๆดังกล่าวข้างต้น เพื่อใช้ในการทำนายสมบัติเหล่านี้

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1.3.1 หาค่าความหนาแน่น ค่าความร้อนจำเพาะ ค่าการนำความร้อน และค่าการแพร่กระจายความร้อนของเนื้อมะละกอดีป่นที่มีความเข้มข้น 10, 15, 20, 25°Brix ในช่วงอุณหภูมิ 40, 50, 60, 70 และ 80°C
- 1.3.2 หาสมการทำนายความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่น ค่าการนำความร้อน ค่าความร้อนจำเพาะ และค่าการแพร่กระจายความร้อนกับปัจจัยที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ ความเข้มข้นของเนื้อมะละกอดีป่น และ อุณหภูมิ

1.3.3 ทำการศึกษาจลนพลศาสตร์การสูญเสียของสีของมะละกอตีป่นซึ่งใช้การระเหยน้ำแบบต่างๆ นั่นคือ การระเหยน้ำแบบดั้งเดิม ที่ 70 80 และ 90°C การระเหยน้ำแบบภายใต้ความดันสุญญากาศ ที่ 70 80 และ 90°C การระเหยน้ำแบบไมโครเวฟ ที่กำลังไฟฟ้า 200 300 และ 400W ความเข้มข้นที่ทำการศึกษาคือ 10 15 20 และ 25บริกซ์ และทำการวัดค่าสี

1.3.4 หาค่าความหนืดปรากฏ ค่าสัมประสิทธิ์ความข้นหนืด และ ดัชนีพฤติกรรมการไหลที่มีความเข้มข้น 10, 15, 20, 25°Brix ในช่วงอุณหภูมิ 5, 20, 35, 50, 65 และ 80°C

1.3.5 หาค่าคงที่ไดอิเล็กทริก และค่าแฟคเตอร์การสูญเสียไดอิเล็กทริกของเนื้อมะละกอตีป่นที่มีความเข้มข้น 10, 15, 20, 25°Brix ในช่วงอุณหภูมิ 40, 50, 60, 70 และ 80°C

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ข้อมูลสมบัติทางวิศวกรรม ได้แก่ สมบัติทางกายภาพและทางความร้อน สมบัติทางรีโอโลยี และสมบัติทางไดอิเล็กทริกของเนื้อมะละกอตีป่น รวมถึงความรู้ความเข้าใจในการเปลี่ยนแปลงทางจลนพลศาสตร์การสูญเสียของสีของมะละกอตีป่นเข้มข้นสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการออกแบบและปรับปรุงกระบวนการผลิต การพัฒนาคุณภาพของผลิตภัณฑ์เนื้อมะละกอตีป่นเข้มข้น

2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 มะละกอ

มะละกอ (*Carica papaya* L.) เป็น 1 ใน 21 สปีชีส์ของตระกูล *Carica* และเป็นไม้ผลที่มีความสำคัญทางเศรษฐกิจ มะละกามีชื่อสามัญได้แก่ papaya, papaw or pawpaw, papayer (ภาษาฝรั่งเศส) mamao (ภาษาบราซิล) และมีถิ่นกำเนิดในทวีปอเมริกากลางบริเวณเม็กซิโกและคอซตาริกา โดยชาวสเปนได้นำเข้ามาในมะนิลาในช่วงกลางศตวรรษที่ 16 แล้วแพร่กระจายอย่างต่อเนื่องเข้าสู่เอเชียและแปซิฟิกตอนใต้รวมทั้งประเทศไทย (Chan, 1983; Nakasone และ Paull, 1998) มะละกอพันธุ์ที่แพร่หลายทั่วไปในประเทศไทย คือ “แขกดำ”, “โกโก้”, “ปากช่อง 1” มะละกามีรูปร่างคล้ายกับเมล่อน มีทั้งทรงกลม, ทรงรี หรือทรงรียาว ขนาดของผลอยู่ในช่วง 255 กรัม ถึง 6.8 กิโลกรัม เนื้อหนาประมาณ 1.5 - 4 เซนติเมตร ตัวผลจะประกอบมาจากส่วนกลีบ 5 กลีบรวมกันมีช่องว่างตรงกลางบรรจุด้วยเมล็ด (รูปที่ 2.1) ผลของมะละกามีสีเขียวในตอนที่ยังดิบและจะเริ่มมีสีเหลืองเมื่อสุก เนื้อมะละกอจะมีหลายสีตั้งแต่ส้มอ่อน เหลืองจนค่อนข้างแดง รสชาติของมะละกอสุกจะหวานและชุ่มฉ่ำ เนื้อมะละกอเป็นแหล่งของแคโรทีนอยด์ รวมถึงเบต้าแคโรทีน และไลโคปีน มะละกอดิบนำมารับประทานเป็นผักหรือทำสลัด เนื้อมะละกอสุกใช้รับประทานสด และสามารถนำไปทำเป็นขนมหวาน เซอร์เบท แยม ไอศกรีม เครื่องดื่ม และซอส ตามสถิติขององค์การอาหารและการเกษตรแห่งสหประชาชาติ (FAO) มะละกามีผลผลิตทั่วโลกปีละประมาณ 2 ล้านตัน ประเทศในทวีปเอเชียเป็นผู้ผลิตรายใหญ่คือ อินโดนีเซีย ประมาณ 3 แสนตัน และอินเดียประมาณ 2.7 แสนตัน ประเทศไทยผลิตมะละกอโดยประมาณ 2 แสนตันต่อปี (วิชัย โหมสิทธิ์คนและคณะ, 2544)



รูปที่ 2.1 รูปร่างและลักษณะของมะละกอ

2.1.1 คุณค่าทางโภชนาการ

มะละกอกับผลไม้ที่ดีต่อการควบคุมปริมาณสารอาหารและเป็นแหล่งของโปรวิตามินเอและวิตามินซี อีกทั้งไม่มีโคเลสเตอรอลและไขมันอิ่มตัว มะละกามีส่วนประกอบของคาร์โบไฮเดรต แคลเซียม ธาตุเหล็กและเส้นใยซึ่งดีต่อระบบย่อยอาหารและหัวใจ และยังประกอบด้วยวิตามินและเกลือแร่ต่างๆ เช่น ไนอาซิน โฟเลต วิตามินบี แมกนีเซียม ฟอสฟอรัส โพแทสเซียม ไขมันและกรดอะมิโน (Philippine Herbal Medicine Site, 2006) ตารางที่ 2.1 แสดงองค์ประกอบทางโภชนาการของมะละกอ ส่วนที่รับประทานได้ของมะละกอสั้นใหญ่ประกอบไปด้วย น้ำ 87% และคาร์โบไฮเดรต 12% รวมเป็น 99% ของทั้งผล

2.1.2 องค์ประกอบทางชีวภาพ (Chan, 1983)

ก. น้ำตาล

คาร์โบไฮเดรตหลักในมะละกอ คือ น้ำตาลกับสตาร์ชเล็กน้อยหรืออาจไม่มีเลย (Chan และคณะ, 1974) ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ในเนื้อมะละกอดิบมีค่าอยู่ในช่วง 11.5 ถึง 13.5°Brix ซูโครสเป็นส่วนประกอบส่วนใหญ่ของน้ำตาลในเนื้อมะละกอดิบ รองลงมาคือ กลูโคส และฟรุคโตส ตามลำดับ

ข. กรดอินทรีย์

มะละกามีปริมาณกรดต่ำเมื่อเทียบกับผลไม้ชนิดอื่นๆ ข้อมูลจาก United States Department of Agriculture-Agricultural Research, Hawaii Fruit Laboratory แสดงให้เห็นว่า มะละกามีค่า pH 5.0 -5.5 กรดที่พบมากในมะละกอประกอบไปด้วย กรดมาลิก กรดซิตริก และกรดแอลฟา-คีโตกลูตาริก ปริมาณ 0.464 0.525 และ 0.042 meq/100 กรัม น้ำหนักเปียก ตามลำดับ ในมะละกามีปริมาณกรดทั้งหมด 1.54 meq/100 g หรือ 0.099% ในรูปของกรดซิตริก ในเนื้อมะละกอดิบมีกรดแอสคอร์บิก 0.279 meq ต่อ 100 g (49.2 mg/100 g) และมีกรดมาลิก กรดซิตริก และ กรดแอลฟา - คีโตกลูตาริก รวมกันทั้งหมด 1.31 meq ต่อ 100 g คิดเป็น 85% ของกรดทั้งหมด กรดที่ระเหยได้ทั้งหมดในมะละกอเป็น 0.123 meq ต่อ 100 g และคิดเป็น 8% ของกรดทั้งหมด ส่วนที่เหลืออยู่ 7% (0.11 meq ต่อ 100 กรัม) คาดว่าเป็นกาแลกทูโรนิกและกรดที่ไม่ระเหยอื่นๆ ผลเหล่านี้แสดงให้เห็นว่ามะละกามีปริมาณกรดอินทรีย์ค่อนข้างต่ำ และอาจเป็นส่วนที่ทำให้มะละกอมีสชาติหวาน

ค. สารประกอบที่ระเหยได้

มีรายงานถึงสารประกอบที่ระเหยได้หรือกลิ่นของมะละกอไว้หลายราย Flath และ Forrey (1977) ทดสอบสารระเหยในมะละกอดิบและระบุว่ามีการระเหยได้ทั้งหมด 106 สาร สารระเหย Linalool เป็นสารประกอบหลักและมีเบนซิลไอโซไทโอไซยานดอยู่เล็กน้อย และส่วนสารประกอบ

รองที่พบ คือ กรดบิวทีริก กรดเฮกซานอิก และกรดออกซานอิก และสารประกอบเมทิลเอสเทอร์ ส่วนสารประกอบอื่นๆ พบในรูปของสาร phenylacetonitrile และสาร linalool oxide.

ตารางที่ 2.1 องค์ประกอบทางโภชนาการของมะละกอ คิดเป็นส่วนที่รับประทานได้ต่อ 100 กรัม

องค์ประกอบทางโภชนาการ	ส่วนที่รับประทานได้ต่อ 100 กรัม		
	1	2	3
พลังงาน	46 cal	45 cal	-
ความชื้น	86.8 g	87.1 g	90 g
โปรตีน	0.36 g	0.5 g	0.5 g
ไขมัน	0.06 g	0.1 g	0.1 g
คาร์โบไฮเดรต	12.2 g	11.8 g	-
เส้นใย	0.58 g	0.5 g	-
เถ้า	0.57 g	0.5 g	0.5 g
แคลเซียม	30 mg	24 mg	24 mg
เหล็ก	0.2 mg	0.7 mg	0.6 mg
แมกนีเซียม	21 mg	-	-
ฟอสฟอรัส	12 mg	22 mg	22 mg
โพแทสเซียม	183 mg	221 mg	230 mg
โซเดียม	4 mg	-	4 mg
เบต้าแคโรทีน	-	710 mg	950 µg
วิตามินเอ	1093 IU	-	-
วิตามินซี	84 mg	73 mg	70 mg
ไทอะมิน	0.03 mg	0.03 mg	0.04 mg
ไรโบฟลาวิน	0.04 mg	0.05 mg	0.04 mg
ไนอะซิน	0.33 mg	-	0.4 mg

ที่มา : 1. Chan (1983); Nakasone และ Paull (1998)

2. FAO และ US. Dept. of Health, Education และ Welfare (1972)

3. Philippine Herbal Medicine Site (2006)

ง. เม็ดสี

สีของเนื้อมะละกอสุกเกิดจาก สีของแคโรทีนอยด์ Yamamoto (1964) พบสารแคโรทีนอยด์ ทั้งในมะละกอสีเหลืองและสีแดง แต่ในมะละกอสีเหลืองจะไม่พบไลโคปีน องค์ประกอบของแคโรทีนอยด์ในมะละกอทั้ง 2 สี แสดงในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ร้อยละขององค์ประกอบของแคโรทีนอยด์ในมะละกอเนื้อสีเหลืองและแดง

สารประกอบ	มะละกอเนื้อเหลือง	มะละกอเนื้อแดง
เบต้าแคโรทีน	4.8	4.8
ไซแคโรทีน (ζ -Carotene)	24.8	5.9
คริปโตแซนทินโมโนอีพอกไซด์	15.6	4.4
คริปโตแซนทิน	38.9	19.2
ไลโคปีน	0.0	63.5
สารผสมอื่นๆ	15.9	2.2

ในมะละกอเนื้อเหลืองและมะละกอเนื้อแดงพบว่ามีปริมาณแคโรทีนอยด์ทั้งหมดเท่ากับ 3.7mg/100g และ 4.2 mg/100g ตามลำดับ และมะละกอเนื้อแดงมีปริมาณโปรวิตามินเอเป็น 1.5 เท่าของมะละกอเนื้อเหลือง

จ. เอนไซม์

เอนไซม์ที่สำคัญในมะละกอ เช่น papain ที่เป็นโปรติโอไลติกเอนไซม์สำคัญที่ใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร เครื่องสำอางค์ เครื่องหนัง และอุตสาหกรรมยาง, Pectin Esterase (PE) ทำให้เกิดเจลในเนื้อมะละกอตีปั่นแต่ถูกยับยั้งได้ด้วยซูโครส, Invertase, Catalase, Peroxidase, Nitrate Reductase และ Lipoxydase

2.1.3 เนื้อมะละกอตีปั่น (Ahmed และคณะ, 2002; Barrett และคณะ, 2005)

พิวรีหรือผักผลไม้ที่ถูกนำมาตีปั่น บด จนได้ของเหลวเนื้อเรียบเนียนที่มีความคงตัวและข้นหนืด เช่น มะเขือเทศ ฝรั่ง มะม่วง และมะละกอ เนื้อมะละกอตีปั่นเป็นผลิตภัณฑ์เบื้องต้นที่สามารถนำไปทำผลิตภัณฑ์อื่นๆ ได้อีกหลากหลาย เช่น น้ำผลไม้ น้ำผลไม้แบบผสมเนื้อผลไม้ แยม เจลลี่ (Barrett และคณะ, 2005) และยังสามารถนำไปเป็นเครื่องเคียงหรือเพิ่มความข้นหนืดให้ซอสหรือซุพ ในอดีตมีปัญหาในกระบวนการผลิตเนื้อมะละกอตีปั่น คือ การเกิดเจล และกลิ่นที่ไม่ดี Stafford และคณะ (1966) พบว่า การเกิดเจลในเนื้อมะละกอตีปั่นเกิดจากการทำงานของเอนไซม์ pectin esterase แต่

สามารถยับยั้งได้โดยการให้ความร้อน หรือการเติมน้ำตาลเพื่อให้มีปริมาณของแข็งทั้งหมดในเนื้อมะละกอดีป็นประมาณ 26°Brix (Yamamoto และ Inoue, 1963; Chang และคณะ, 1965) หรือการปรับ pH ของเนื้อมะละกอดีป็นให้เท่ากับ 3.4 ก็เป็นการยับยั้งการเกิดเจลได้ (Brekke และคณะ, 1973) การใช้ความร้อนในการยับยั้งเอนไซม์ pectin esterase ยังช่วยยับยั้งเอนไซม์อื่นที่ทำให้เกิดกลิ่นไม่ดีอีกด้วย แต่อย่างไรก็ตาม กลิ่นไม่ดีในเนื้อมะละกอดีป็นเกิดมาจากการปนเปื้อนของเปลือก เมล็ด ไข่ และยางของมะละกอเอง (Brekke และคณะ, 1972) การคัดแยกออกไปอย่างรวดเร็วและตลอดการผลิตจะช่วยป้องกันกลิ่นไม่ดีและรสขมในเนื้อมะละกอดีป็นได้ กระบวนการผลิตเนื้อมะละกอดีป็นเริ่มจากการล้างเปลือกมะละกอให้สะอาดเพื่อกำจัดสิ่งสกปรก และขยำแมลงออก หลังจากนั้นนำมาปอกเปลือก นำเมล็ดออกและหั่นเป็นชิ้นเล็กๆ นำไปตีป็นในเครื่องตีป็นแล้วกรองผ่านตะแกรงเพื่อให้ผลิตภัณฑ์มีความสม่ำเสมอเป็นเนื้อเดียวกัน (Ahmed และคณะ, 2002)

2.2 สมบัติทางความร้อนของอาหาร

สมบัติทางความร้อนของอาหาร มีความสำคัญอย่างมากต่อการทำนายการถ่ายเทความร้อนของอาหาร สมบัติทางความร้อนที่สำคัญ ได้แก่ ความร้อนจำเพาะ (specific heat) การนำความร้อน (thermal conductivity) การแพร่กระจายความร้อน (thermal diffusivity) ในการแปรรูปอาหารด้วยความร้อนนั้น กระบวนการมักถูกควบคุมด้วยสมบัติดังกล่าวประโยชน์ของสมบัติทางความร้อน คือการนำมาใช้ในการทำนายอัตราการถ่ายเทความร้อนในอาหาร ดังนั้นข้อมูลสมบัติทางความร้อนที่ถูกต้องและแม่นยำจึงมีความจำเป็นอย่างมากต่อการติดตามความเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นกับอาหารในระหว่างกระบวนการให้ความร้อน การพัฒนาอุปกรณ์การวัด วิธีการวัด ตลอดจนปรับปรุงความสามารถในการวัดสมบัติทางความร้อนให้ถูกต้องแม่นยำ และสร้างสมการทำนายสมบัติทางความร้อนจากข้อมูลเบื้องต้นอื่นๆ เช่น อุณหภูมิ องค์ประกอบของอาหาร ความหนาแน่น เป็นต้น ช่วยให้เกิดความเข้าใจและสามารถประยุกต์ใช้สมบัติทางความร้อนได้เป็นอย่างดี (Singh and Heldman, 1981; Choi and Okos, 1986; Rahman, 1995; Tansakul et al., 2006; Tansakul et al., 2008)

Rapusas และ Driscoll (1995) ศึกษาการนำความร้อนโดยวิธี Line heat source พบว่าค่าการนำความร้อนของหอมหัวใหญ่สดและแห้งแบบหั่นแว่น มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างเป็นเส้นตรงเมื่อความชื้นเพิ่มขึ้น มีค่าเท่ากับ 0.29 – 0.52 W/m°C ในช่วงความชื้นเปียก 24.0 – 80.6 % พบว่าอุณหภูมิช่วง 30.7 – 33.0 °C และค่าความพรุนช่วง 0.09 – 0.27 ไม่มีผลต่อค่าการนำความร้อน และได้ศึกษาค่าความร้อนจำเพาะของหอมหัวใหญ่แบบหั่นแว่นโดยวิธี Method of mixture พบว่าค่าความร้อนจำเพาะของหอมหัวใหญ่เท่ากับ 1.82 – 3.45 kJ/kg°C ในช่วงความชื้นเปียก 0 – 69.2 % โดยมีความสัมพันธ์กันอย่างเป็นเส้นตรง

Chowdary (1988) ได้ศึกษาสมบัติทางความร้อนของมะม่วงในช่วง 10 -40 °C โดยหาค่าความร้อนจำเพาะของมะม่วงด้วยวิธี Method of Mixture พบว่าค่าความร้อนจำเพาะมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างเป็นเส้นตรงเมื่ออุณหภูมิมีค่าเพิ่มขึ้น และหาการนำความร้อนโดยใช้หลักการของ Line heat source พบว่าการนำความร้อนมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างเป็นเส้นตรงเมื่ออุณหภูมิมีค่าเพิ่มขึ้น

Priyanto (1992) ศึกษาความร้อนจำเพาะของเมลอนที่มีความชื้น 88%wb และความหนาแน่น 943 kg/m³ โดยวิธี Method of Mixture ได้ค่าความร้อนจำเพาะของเมลอนเท่ากับ 2.65 – 4.65 kJ/kg°C ซึ่งพบว่าค่าความร้อนจำเพาะมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างเป็นเส้นตรงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นในช่วงอุณหภูมิ 5 -45 °C

Fasina และคณะ (2003) รายงานสมบัติทางความร้อนของเนื้อมันฝรั่งหวาน (sweetpotato puree) ในช่วงอุณหภูมิ 5-80°C

Kurozawa และคณะ (2005) รายงานค่าการนำความร้อนและค่าการแพร่กระจายความร้อนของมะละกอสุกในช่วงอุณหภูมิ 20-40 °C

Espinoza-Guevara และคณะ (2010) ศึกษาสมบัติทางกายภาพและความร้อนของเนื้อและเปลือกมะละกอในช่วงอุณหภูมิ 20-60 °C

2.3 จลนพลศาสตร์การเปลี่ยนแปลงสีของอาหาร

น้ำผลไม้เข้มข้น อาจเรียกได้ว่าเป็น ผลิตภัณฑ์กึ่งสำเร็จ (Semi-finished) ซึ่งสามารถนำไปใช้เจือจางเพื่อผลิตผลิตภัณฑ์น้ำผลไม้ชนิดอื่นๆ นำไปใช้เป็นส่วนประกอบของเครื่องดื่มชนิดต่างๆ และยังสามารถใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตผลิตภัณฑ์แบบผงได้อีกด้วย (Ramteke และคณะ, 1993)

โดยทั่วไปการเพิ่มความเข้มข้นของน้ำผลไม้ นั้น จะใช้วิธีการระเหย (Evaporation) วิธีการใช้เยื่อเลือกผ่าน(Membrane process) เช่น กระบวนการออสโมซิส(Osmosis)กระบวนการรีเวอร์สออสโมซิส (Reverse Osmosis) กระบวนการอัลตราฟิลเตรชัน (Ultrafiltration) และวิธีการเพิ่มความเข้มข้นด้วยวิธีแช่แข็ง (Freeze concentration) (Ramteke และคณะ, 1993)

วิธีเพิ่มความเข้มข้นโดยการระเหยน้ำ (Evaporation) เป็นวิธีที่นิยมกันมาก เนื่องจากมีต้นทุนที่ต่ำ แต่อย่างไรก็ตาม ความร้อนที่ใช้จะทำให้เกิดการสูญเสียกลิ่นรสได้ ทั้งนี้เนื่องจากองค์ประกอบที่ทำให้กลิ่นรสในน้ำผลไม้โดยส่วนใหญ่จะไวต่อความร้อน ดังนั้นกระบวนการผลิตน้ำผลไม้เข้มข้นที่ต้องการคุณภาพสูงๆ จึงต้องพยายามให้เกิดการระเหยน้ำหรือการแยกน้ำออกไปที่อุณหภูมิต่ำๆ และต้องไม่ให้เกิดการสูญเสียขององค์ประกอบอื่นๆ ในน้ำผลไม้ ซึ่งการระเหยน้ำที่อาศัยความร้อนปกตินั้น สารประกอบให้กลิ่นรสในอาหารจะสูญเสียไปกับไอน้ำเกือบหมด แม้ว่าจะได้มีการพัฒนาเครื่องมือที่สามารถแยกกลิ่นรสออกจากไอน้ำเพื่อนำกลับไปผสมในผลิตภัณฑ์แล้วก็ตาม แต่ก็ไม่สามารถนำองค์ประกอบเหล่านั้นกลับมาได้ทั้งหมด ซึ่งโดยปกติแล้วจะสามารถนำองค์ประกอบกลับมาได้ไม่เกิน

50% คุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่ได้จึงยังต่ำกว่าวัตถุดิบเริ่มต้น (Thijssen, 1975) นอกจากนี้ปฏิกิริยาหลายอย่าง เช่น pigment degradation และปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาล เกิดขึ้นระหว่างการให้ความร้อนและส่งผลถึงสีของอาหารได้ (Barreiro et al., 1997) นอกจากนี้การวัดค่าสีในระบบ $L^*a^*b^*$ เป็นตัวชี้วัดที่ดีในการเปลี่ยนแปลงค่าสีโดยรวมของพืชผัก (Avila and Silva 1999) น้ำบรอกโคลี (Weemaes et al. 1999) และน้ำส้ม (Tiwari et al. 2009)

Maskan (2006) พบว่าอุณหภูมิการเปลี่ยนแปลงสีโดยรวมของน้ำทับทิมเข้มข้น เป็นแบบผสมระหว่างอันดับศูนย์และอันดับหนึ่ง

Nisha และคณะ (2010) พบว่าอุณหภูมิการเปลี่ยนแปลงสีของเนื้อมะเขือเทศดิบในช่วงอุณหภูมิ 50 ถึง 120 °C เป็นแบบอันดับหนึ่ง

2.4 สมบัติทางรีโอโลยีของอาหาร

ในชีวิตประจำวันของมนุษย์เราเกี่ยวข้องกับอาหารเหลวอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ อาหารแต่ละมื้อก็มีน้ำ น้ำมัน นม กะทิ น้ำเชื่อม และอาหารเหลวอื่นๆ รวมอยู่ด้วย ความหนืดของอาหารเหลวจึงเข้ามามีบทบาทต่อมนุษย์เรา เพราะความหนืดของอาหารเหลวสามารถบ่งบอกถึงคุณภาพของอาหารได้ ความหนืดของอาหารมีความสำคัญอย่างยิ่งกับอุตสาหกรรมอาหาร โดยเฉพาะอย่างยิ่งอุตสาหกรรมอาหารที่เกี่ยวข้องกับอาหารในสถานะของเหลว ไม่ว่าจะเป็นอยู่ในขั้นตอนรับวัตถุดิบ การแปรรูป การเก็บรักษาผลิตภัณฑ์สุดท้าย ตัวอย่างอุตสาหกรรมอาหารที่ต้องอาศัยความรู้ความเข้าใจในเรื่องความหนืดมาออกแบบเพื่อการแปรรูปอาหารในระดับอุตสาหกรรมอย่างมีประสิทธิภาพ ได้แก่ อุตสาหกรรมนม อุตสาหกรรมน้ำผักผลไม้ อุตสาหกรรมน้ำมันพืช เป็นต้น ข้อมูลด้านความหนืดของอาหารในแต่ละขั้นตอนการแปรรูปจะเป็นประโยชน์ในการออกแบบกระบวนการแปรรูปอาหาร เช่น การเลือกปั๊ม และออกแบบระบบท่อที่เหมาะสมในโรงงานอุตสาหกรรมอาหาร (Rao et al., 2005)

Rao และคณะ (1984) ศึกษาบทบาทของความเข้มข้นและอุณหภูมิต่อความหนืดของน้ำแอปเปิลและน้ำองุ่น และสร้างสมการคณิตศาสตร์ทำนายความหนืดปรากฏจากความเข้มข้นและอุณหภูมิของน้ำแอปเปิลและน้ำองุ่น

Ahmed และคณะ (2006) ได้ศึกษาพฤติกรรมการไหลของอาหารทารกที่มีมันฝรั่งหวานเป็นองค์ประกอบ โดยทำการศึกษาในช่วงอุณหภูมิ 5-80 °C ผลพบว่า อาหารทารกดังกล่าวมีพฤติกรรมการไหลเป็นแบบ shear-thinning

Dutta และคณะ (2006) ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมการไหลและปฏิกิริยาการสลายตัวของเบต้าแคโรทีนเนื่องจากความร้อนในฟักทองดิบ โดยทำการศึกษาภายใต้อุณหภูมิ 60-100 °C จากการศึกษาพบว่าฟักทองดิบมีพฤติกรรมการไหลเป็นแบบซูโดพลาสติก (Pseudoplastic) สำหรับสมการที่ใช้อธิบายพฤติกรรมการไหลได้แก่ Herschel-Bulkley model

Nindo และคณะ (2007) ได้ทำการศึกษาถึงพฤติกรรมการไหลของบลูเบอร์รี่ตีป่นในระหว่างกระบวนการให้ความร้อน โดยศึกษาภายใต้ปริมาณของของแข็งที่ละลายได้ 10% 15% 20% และ 25% ที่อุณหภูมิ 25 40 50 และ 60 °C จากการศึกษาพบว่า พฤติกรรมการไหลของบลูเบอร์รี่ตีป่นเป็นแบบ shear-thinning และสร้างสมการคณิตศาสตร์แสดงผลของอุณหภูมิและความเข้มข้นที่มีต่อพฤติกรรม การไหลของบลูเบอร์รี่ตีป่น

Maceiras และคณะ (2007) ศึกษาถึงผลของการให้ความร้อนต่อพฤติกรรมการไหลของผลไม้ ตีป่น (ราสพ์เบอร์รี่ สตรอเบอร์รี่ พีช และพ룬) โดยศึกษาในช่วงอุณหภูมิ 20 ถึง 40 °C จากการศึกษา พบว่า พฤติกรรมการไหลของผลไม้ตีป่นดังกล่าวเป็นไปตามโมเดลแบบ Ostwald de Wale และ Herschel-Bulkley

Augusto และคณะ (2010) ศึกษาถึงพฤติกรรมการไหลของน้ำมะเขือเทศที่ผลิตในเชิงการค้า พบว่า น้ำมะเขือเทศเป็นของไหลแบบ thixotropic โดยที่พฤติกรรมการไหลของน้ำมะเขือเทศเป็น แบบ pseudoplastic ที่มีความข้นคลากด้วย

2.5 สมบัติทางไดอิเล็กทริกของอาหาร

ข้อมูลสมบัติทางไดอิเล็กทริก ได้แก่ ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก และค่าแฟกเตอร์การสูญเสียไดอิเล็กทริกของอาหาร ช่วยให้เกิดความรู้ความเข้าใจกระบวนการให้ความร้อนแบบไดอิเล็กทริก (เช่น การให้ความร้อนโดยใช้คลื่นไมโครเวฟ เป็นต้น) ได้ดียิ่งขึ้น งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับสมบัติทางไดอิเล็กทริกของผักและผลไม้ เช่น

Sipahioglu and Barringer (2003) หาค่าคงที่ไดอิเล็กทริก และค่าแฟกเตอร์การสูญเสียไดอิเล็กทริกของผักและผลไม้ในช่วงอุณหภูมิ 5-130 °C ที่ความถี่ 2450 MHz โดยใช้วิธี open-ended coaxial probe พบว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกลดลง แต่เมื่อความชื้นเพิ่มขึ้น ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกเพิ่มขึ้น และที่อุณหภูมิน้อยกว่า 34 °C เมื่อความชื้นเพิ่มขึ้น ค่าแฟกเตอร์การสูญเสียไดอิเล็กทริกลดลง ในขณะที่ที่อุณหภูมิมากกว่า 34 °C เมื่อความชื้นเพิ่มขึ้น ค่าแฟกเตอร์การสูญเสียไดอิเล็กทริกเพิ่มขึ้น

Guan และคณะ (2004) วัดค่าสมบัติทางไดอิเล็กทริกของมันฝรั่งบดในช่วงความถี่ 1-1800 MHz ช่วงอุณหภูมิ 20-120 °C ช่วงความชื้นเปียก 81.6-87.8 % และปริมาณเกลือ 0.8-2.8% โดยใช้วิธี open-ended coaxial probe พบว่าค่าคงที่ไดอิเล็กทริก และค่าแฟกเตอร์การสูญเสียไดอิเล็กทริก ลดลงเมื่อความถี่เพิ่มขึ้น แต่อุณหภูมิและปริมาณเกลือไม่มีผลต่อค่าคงที่ไดอิเล็กทริก ส่วนค่าแฟกเตอร์การสูญเสียไดอิเล็กทริกเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิและปริมาณเกลือเพิ่มขึ้น

3. วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 การศึกษาสมบัติทางกายภาพและความร้อนของเนื้อมะละกอดีป่น

3.1.1 การเตรียมตัวอย่างมะละกอดีป่น

นำมะละกอดิบสุกเต็มที่พันธุ์แขกดำที่ซื้อจากตลาดทุ่งครุ กรุงเทพฯ มาล้างทำความสะอาดและปอกเปลือก ผ่าครึ่งนำเมล็ดออกและหั่นเป็นชิ้นเล็กๆ ใส่มะละกอกที่หั่นเป็นชิ้นเล็กๆ ลงในเครื่องตีป่นที่ภายในมีตะแกรงที่มีขนาดช่องเปิด 1.5 mm. นำเนื้อมะละกอดีป่นที่ได้มาพาสเจอไรซ์ใน Water Bath ที่อุณหภูมิ 80°C เวลา 1 นาที เพื่อยับยั้งการทำงานของเอนไซม์และป้องกันการเสื่อมเสียของเนื้อมะละกอดีป่น จากนั้นนำเนื้อมะละกอดีป่นมาทำให้มีความเข้มข้นตามต้องการด้วยเครื่องระเหยแบบสูญญากาศ จะได้เนื้อมะละกอดีป่นที่มีความเข้มข้น 10, 15, 20 และ 25°Brix

3.1.2 การวัดค่าของแข็งละลายน้ำได้โดยรวม

นำตัวอย่างมาวัดค่าของแข็งละลายน้ำได้โดยรวมด้วยเครื่องรีแฟกโตมิเตอร์ (refractometer) ช่วงความเข้มข้น 0-32 บริกซ์ โดยทำการสอบเทียบก่อนการวัดด้วยน้ำกลั่นทุกครั้ง

3.1.3 การวัดค่าความหนาแน่น

ความหนาแน่นของของเหลวสามารถหาได้โดยใช้ Pycnometer โดยใช้มวลของของเหลวที่บรรจุใน Pycnometer ที่ทราบปริมาตรแน่นอนมาคำนวณหาความหนาแน่นดังแสดงในสมการที่ (3.1) ทั้งนี้ Pycnometer ที่นำมาใช้ต้องได้รับการสอบเทียบด้วยน้ำกลั่นก่อน

$$\text{ความหนาแน่น} = \frac{\text{มวล}}{\text{ปริมาตร}} \quad (3.1)$$

3.1.4 การวัดค่าความร้อนจำเพาะ

หา Baseline โดยการวัดความแตกต่างของพลังงานความร้อนที่เครื่องให้แก่วัสดุตัวอย่างและช่องใส่วัสดุอ้างอิงขณะที่ไม่มีตัวอย่างใดๆ โดยใช้ช่วงอุณหภูมิ 25 ถึง 100°C และ Scanning rate 5 °C/นาที จากนั้นใช้ Sapphire ที่ทราบน้ำหนักและค่าความร้อนจำเพาะเป็นสารอ้างอิงโดยใช้ช่วงอุณหภูมิ และ Scanning rate เช่นเดียวกันกับ Baseline แล้วนำเนื้อมะละกอดีป่นที่มีความเข้มข้น 10,

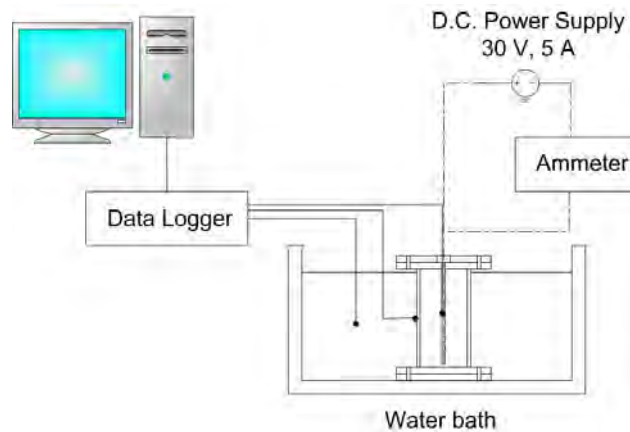
15, 20 และ 25°Brix มาบรรจุใน Liquid pan ปิดผนึกให้สนิทด้วยเครื่องปิดผนึก ซึ่งน้ำหนักและจุดบันทึกไว้ นำ Pan ที่บรรจุด้วยเนื้อมะละกอดีป็นและ Pan เปล่าใส่ลงในช่องใส่วัสดุตัวอย่างและช่องใส่วัสดุอ้างอิงของ Microfurnace โดยใช้ช่วงอุณหภูมิ 25 ถึง 100°C และ Scanning rate 5°C/นาที เช่นเดียวกับ Baseline และ Sapphire รวบรวม Thermogram ของ Baseline, Sapphire และเนื้อมะละกอดีป็น มาแสดงร่วมกันในกราฟเดียวกัน แล้วหาค่าความเบี่ยงเบนของ Sapphire และเนื้อมะละกอดีป็นที่เบี่ยงเบนไปจาก Baseline แล้วคำนวณหาค่าความร้อนจำเพาะจากสมการ (3.2)

$$C_p = \frac{d}{d'} \frac{m'}{m} C'_p \quad (3.2)$$

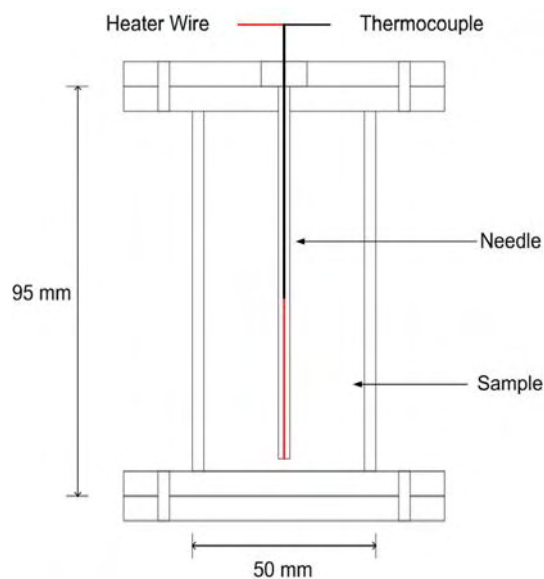
เมื่อ	d	คือ	ระยะเบี่ยงเบนจาก baseline เมื่อมีตัวอย่างอยู่ใน sample holder
	d'	คือ	ระยะเบี่ยงเบนจาก baseline เมื่อมี sapphire อยู่ใน sample holder
	m	คือ	มวลของ Sample (mg.)
	m'	คือ	มวลของ Sapphire (mg.)
	C' _p	คือ	ค่าความร้อนจำเพาะของ Sapphire
	C _p	คือ	ค่าความร้อนจำเพาะของตัวอย่าง

3.1.5 การวัดค่าการนำความร้อน

สำหรับเทคนิคในการวัดค่าการนำความร้อนที่ใช้ในงานวิจัยนี้เรียกว่า “Line heat source probe method” ซึ่ง probe ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ทำจากแท่งเซมิคอนดักเตอร์ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.65 มม. และมีความยาว 75 มม. Probe นี้ประกอบด้วยลวดความร้อน (heater wire) ที่ทำจาก Constantan และ เทอร์โมคัปเปิล (type T) สำหรับภาชนะใส่ตัวอย่างนั้นมีรูปร่างเป็นทรงกระบอกทำจาก Acrylic ซึ่งมีเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 50 มม. และสูง 95 มม. ชุดเครื่องมือวัดค่าการนำความร้อน (รูปที่ 3.1) ประกอบด้วย probe (รูปที่ 3.2), ภาชนะใส่ตัวอย่าง, อ่างควบคุมอุณหภูมิ (water bath) เพื่อควบคุมอุณหภูมิของตัวอย่าง, DC power supply (0-30 โวลต์ และ 0-5 แอมป์) ใช้ในการแปลงไฟฟ้ากระแส สลับให้เป็นไฟฟ้ากระแสตรง และจ่ายกระแสให้กับลวดความร้อน และอ่านค่ากระแสผ่านแอมมิเตอร์ เทอร์โมคัปเปิลที่ใช้ในชุดการวัดนี้มี 3 ตำแหน่งด้วยกันคือ ที่จุดกึ่งกลางของ probe, ที่ภาชนะใส่ตัวอย่าง และ อ่างควบคุมอุณหภูมิ ซึ่งเทอร์โมคัปเปิลทั้ง 3 เส้นนี้จะต่อเข้ากับ data logger และ คอมพิวเตอร์ เพื่อใช้แสดงค่าและบันทึกอุณหภูมิที่เปลี่ยนไปตามเวลาในระหว่างการวัด ก่อนทำการวัดค่าจริงจะต้องทำ calibration โดยใช้ 0.5% agar gel และเปรียบเทียบกับค่าอ้างอิงซึ่งมีค่าเท่ากับ $0.628 \text{ W m}^{-1} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ ที่อุณหภูมิ 30 °C



รูปที่ 3.1 ชุดเครื่องมือที่ใช้ในการวัดค่าการนำความร้อน



รูปที่ 3.2 Probe สำหรับวัดค่าการนำความร้อนและภาชนะใส่ตัวอย่าง

การสอบเทียบ Line Heat Source Probe ทำได้โดยการวัดค่าการนำความร้อนของตัวอย่างที่ทราบค่าการนำความร้อน ได้แก่ น้ำและกลีเซอริน ซึ่งมีค่าการนำความร้อนเท่ากับ 0.628 และ 0.289 W/m°C ที่อุณหภูมิ 30°C ตามลำดับ (Sweat and Haugh, 1974) จากนั้นนำเนื้อมะละกอดีป่นความเข้มข้น 10, 15, 20 และ 25°Brix มาบรรจุเข้าไปในกระบอกตัวอย่าง แล้วเสียบ Probe เข้าไปที่กึ่งกลางของตัวอย่างเนื้อมะละกอดีป่นที่บรรจุอยู่ในกระบอกใส่ตัวอย่าง นำไปวางใน Water bath แล้วต่อกระบอกตัวอย่างและ Probe เข้ากับ DC Power supply, Digital Multimeter, เครื่องบันทึกอุณหภูมิ และ

คอมพิวเตอร์ รวบรวมอุณหภูมิของเนื้อมะละกอที่ป็นและน้ำใน Water bath มีค่าเท่ากันที่อุณหภูมิที่ทำการทดลอง แล้วเปิด DC Power supply เพื่อให้กระแสไฟฟ้าแก่ Probe เป็นเวลา 1 นาที กระแสไฟฟ้าที่จะแสดงบนหน้าจอของ Multimeter จดบันทึกไว้ เครื่องบันทึกอุณหภูมิจะบันทึกอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นทุกๆ 0.5 วินาทีตลอดระยะเวลาการทดลอง คำนวณปริมาณความร้อนที่ให้กับ Probe เขียนกราฟอุณหภูมิที่ได้กับค่า $\ln$ ของเวลา จะได้เป็นกราฟเส้นตรงที่มีค่า R^2 ไม่ควรต่ำกว่า 0.99 นำค่าความชันที่ได้มาจากราฟระหว่างอุณหภูมิและ $\ln(t)$ มาคำนวณหาการนำความร้อนดังแสดงในสมการที่ (3.3)

$$k = \frac{Q \ln(t_2/t_1)}{4\pi(T_2 - T_1)} \quad (3.3)$$

เมื่อ	T	คือ	อุณหภูมิที่วัด ณ จุดใดจุดหนึ่ง (°C)
	k	คือ	ค่าการนำความร้อน (W/m .K)
	t	คือ	เวลาที่วัดอุณหภูมิ ณ จุดใดจุดหนึ่ง
	Q	คือ	กำลังของแหล่งกำเนิดให้ความร้อนต่อหน่วยความยาว (W/m)

3.1.6 การหาค่าการแพร่กระจายความร้อน

ค่าการแพร่กระจายความร้อนได้จากการคำนวณโดยใช้ค่าความหนาแน่น ค่าการนำความร้อน และค่าความร้อนจำเพาะที่ได้จากการทดลองดังความสัมพันธ์ในสมการ (3.4)

$$\alpha = \frac{k}{\rho C_p} \quad (3.4)$$

เมื่อ	α	คือ	ค่าการแพร่กระจายความร้อน $\left(\frac{m^2}{s}\right)$
	k	คือ	ค่าการนำความร้อน $\left(\frac{W}{m .K}\right)$
	ρ	คือ	ความหนาแน่น $\left(\frac{kg}{m^3}\right)$
	C_p	คือ	ความร้อนจำเพาะ $\left(\frac{J}{kg .K}\right)$

3.1.7 การออกแบบการทดลอง

ในการทดลองนี้เป็นการศึกษาผลของความเข้มข้น และอุณหภูมิที่มีต่อสมบัติทางกายภาพและความร้อนของเนื้อมะละกอดีป็นซึ่งได้แก่ ค่าความหนาแน่น ค่าความร้อนจำเพาะ ค่าการนำความร้อน และค่าการแพร่กระจายความร้อน โดยจะมีช่วงของความเข้มข้นและอุณหภูมิที่ทดลองดังนี้

- ความเข้มข้น 4 ระดับ คือ 10 15 20 และ 25°Brix
- อุณหภูมิ 5 ระดับ คือ 40 50 60 70 และ 80 °C

แผนการทดลองค่าสมบัติทางกายภาพและความร้อนทั้งหมดเป็นแบบ Factorial และทำการทดลอง 3 ซ้ำ ผลการทดลองที่ได้จะนำมาวิเคราะห์ผลทางสถิติด้วยโปรแกรม SPSS for windows Version 13.0 ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 และเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของแต่ละตัวอย่างโดยวิธีของ Duncan ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ค่าความหนาแน่น ค่าความร้อนจำเพาะ ค่าการนำความร้อน และค่าการแพร่กระจายความร้อนของเนื้อมะละกอดีป็นที่ทดลองได้นำมาสร้างสมการทำนายความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติทางกายภาพและความร้อนเหล่านี้กับปัจจัยที่เกี่ยวข้องคือ ความเข้มข้น และอุณหภูมิ แล้วเปรียบเทียบสมการทำนายที่ได้จากการทดลองดังกล่าวกับสมการทำนายค่าสมบัติทางกายภาพและความร้อนที่มีผู้เสนอไว้

3.2 การศึกษาจลนพลศาสตร์การเปลี่ยนแปลงสีของเนื้อมะละกอดีป็นที่ผ่านกระบวนการระเหยน้ำแบบต่างๆ

3.2.1 การเตรียมตัวอย่างมะละกอดีป็น

นำมะละกอดิบสุกเต็มที่พันธุ์แขกดำที่ซื้อจากตลาดทุ่งครุ กรุงเทพฯ มาล้างทำความสะอาดเพื่อกำจัดสิ่งแปลกปลอมและยาฆ่าแมลงตกค้างออก นำมะละกอที่ผ่านการทำความสะอาดแล้วมาปอกเปลือก ผ่าครึ่งนำเมล็ดออกและหั่นเป็นชิ้นเล็กๆ ใส่มะละกอที่หั่นเป็นชิ้นเล็กๆ ลงในเครื่องดีป็นและกรองผ่านตะแกรงที่มีขนาดช่องเปิด 1.5 มิลลิเมตร นำเนื้อมะละกอดีป็นที่ได้มาพาสเจอร์ไรซ์ใน Water Bath ที่อุณหภูมิ 80°C เวลา 1 นาที เพื่อยับยั้งการทำงานของเอนไซม์และป้องกันการเสื่อมเสียของเนื้อมะละกอดีป็น จากนั้นนำเนื้อมะละกอดีป็นที่มีความเข้มข้นเริ่มต้นประมาณ 10 บริกซ์ จำนวน 250 กรัม มาทำให้มีความเข้มข้น 15, 20 และ 25 บริกซ์ ด้วยกระบวนการระเหยน้ำแบบต่างๆ 3 วิธีเพื่อให้ได้เนื้อมะละกอดีป็นที่มีความเข้มข้นต่างกันทั้งหมด 4 ระดับคือ 10, 15, 20 และ 25 บริกซ์

ทั้งนี้กระบวนการระเหยน้ำทั้ง 3 วิธี ได้แก่

3.3 การศึกษาสมบัติทางรีโอโลยีของเนื้อมะละกอดีป่น

3.3.1 การเตรียมตัวอย่างมะละกอดีป่น

นำมะละกอสุกเต็มที่พันธุ์แขกดำที่ซื้อจากตลาดทุ่งครุ กรุงเทพฯ มาล้างทำความสะอาดและปอกเปลือก ผ่าครึ่งนำเมล็ดออกและหั่นเป็นชิ้นเล็กๆ ใส่มะละกที่หั่นเป็นชิ้นเล็กๆ ลงในเครื่องตีป่นที่ภายในมีตะแกรงที่มีขนาดช่องเปิด 1.5 mm. นำเนื้อมะละกอดีป่นที่ได้มาพาสเจอไรซ์ใน Water Bath ที่อุณหภูมิ 80°C เวลา 1 นาที เพื่อยับยั้งการทำงานของเอนไซม์และป้องกันการเสื่อมเสียของเนื้อมะละกอดีป่น จากนั้นนำเนื้อมะละกอดีป่นมาทำให้มีความเข้มข้นตามต้องการด้วยเครื่องระเหยแบบสุญญากาศ จะได้เนื้อมะละกอดีป่นที่มีความเข้มข้น 10, 15, 20 และ 25°Brix

3.3.2 การวัดค่าสมบัติทางการไหล

นำตัวอย่างเนื้อมะละกอดีป่นมาหาสมบัติการไหล โดยใช้ rotational concentric cylinder viscometer (Haake viscometer, Model VT500, Germany) กับระบบการวัดชนิด SV 1 และใช้อัตราเฉือนแตกต่างกัน 3 รอบ คือ เพิ่มอัตราเฉือนจาก 0 เป็น 300 s^{-1} ภายใน 1 นาที จากนั้นคงอัตราเฉือนไว้ที่ 300 s^{-1} เป็นเวลา 1 นาที แล้วลดอัตราเฉือนจาก 300 เป็น 0 s^{-1} ภายใน 1 นาที ทั้งนี้รักษาอุณหภูมิของตัวอย่างให้คงที่ที่ 5, 20, 35, 50, 65 และ 80 °C โดยใช้อ่างควบคุมอุณหภูมิ (thermostat bath) ทำการทดลอง 3 ซ้ำ

3.4 การศึกษาสมบัติทางไดอิเล็กทริกของเนื้อมะละกอดีป่น

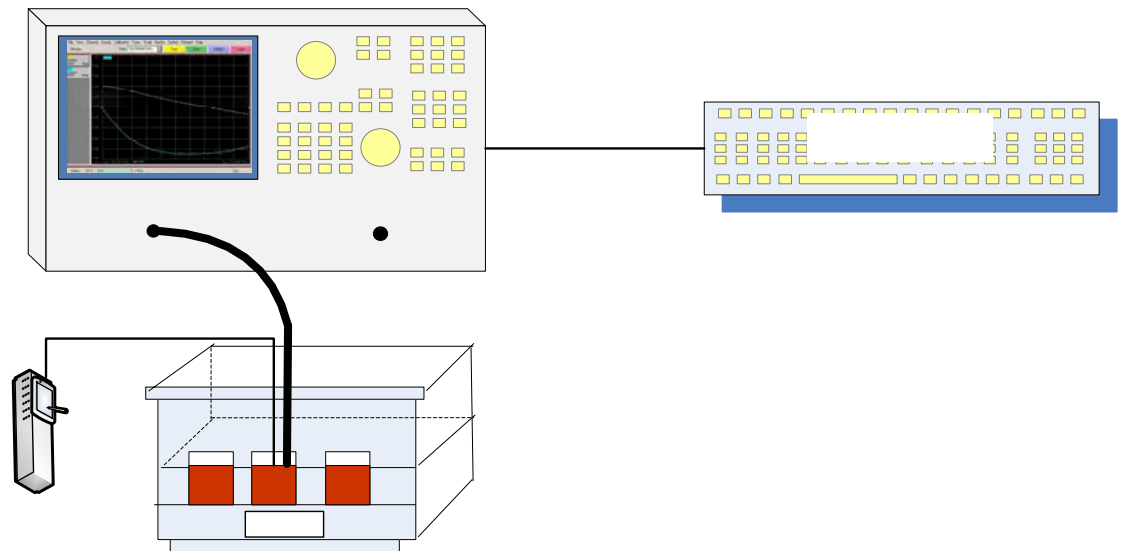
3.4.1 การเตรียมตัวอย่างมะละกอดีป่น

นำมะละกอสุกเต็มที่พันธุ์แขกดำที่ซื้อจากตลาดทุ่งครุ กรุงเทพฯ มาล้างทำความสะอาดและปอกเปลือก ผ่าครึ่งนำเมล็ดออกและหั่นเป็นชิ้นเล็กๆ ใส่มะละกที่หั่นเป็นชิ้นเล็กๆ ลงในเครื่องตีป่นที่ภายในมีตะแกรงที่มีขนาดช่องเปิด 1.5 mm. นำเนื้อมะละกอดีป่นที่ได้มาพาสเจอไรซ์ใน Water Bath ที่อุณหภูมิ 80°C เวลา 1 นาที เพื่อยับยั้งการทำงานของเอนไซม์และป้องกันการเสื่อมเสียของเนื้อมะละกอดีป่น จากนั้นนำเนื้อมะละกอดีป่นมาทำให้มีความเข้มข้นตามต้องการด้วยเครื่องระเหยแบบสุญญากาศ จะได้เนื้อมะละกอดีป่นที่มีความเข้มข้น 10, 15, 20 และ 25°Brix

3.4.2 การวัดค่าสมบัติทางไดอิเล็กทริก

นำตัวอย่างเนื้อมะละกอดีป่นมาหาสมบัติทางไดอิเล็กทริก โดยใช้ network analyzer (Agilent Technologies N5230A, USA) กับ open-ended coaxial probe ทั้งนี้รักษาอุณหภูมิของ

ตัวอย่างให้คงที่ที่ 40, 50, 60, 70 และ 80 °C โดยใช้อ่างควบคุมอุณหภูมิ ทำการทดลอง 3 ซ้ำ (รูปที่ 3.3)



รูปที่ 3.3 Open-ended coaxial probe ต่อเข้ากับ network analyzer

Agilent
13.5GHz

4. ผลการทดลองและวิจารณ์

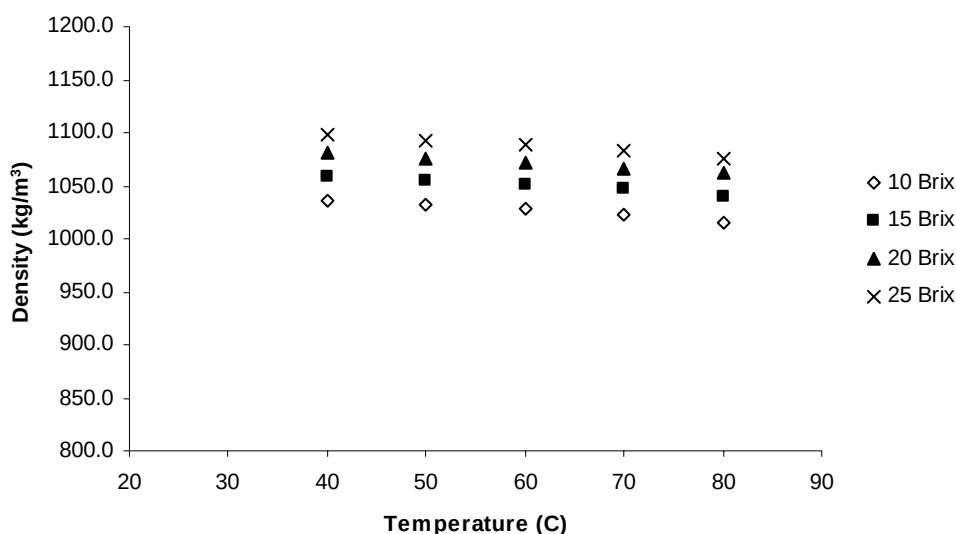
4.1 ผลการศึกษาสมบัติทางกายภาพและความร้อนของเนื้อมะละกอดีป็น

4.1.1 ความหนาแน่นของเนื้อมะละกอดีป็น

จากการทดลองวัดค่าความหนาแน่นของเนื้อมะละกอดีป็นที่ผ่านขนาดช่องเปิดตะแกรง 1.5 mm. และ มีความเข้มข้น 10, 15, 20 และ 25°Brix ในช่วงอุณหภูมิ 40, 50, 60, 70, และ 80°C จำนวน 3 ซ้ำ ด้วย pycnometer พบว่า เนื้อมะละกอดีป็นมีความหนาแน่นเฉลี่ยอยู่ในช่วง 1014.61 – 1098.86 kg/m³ ดังแสดงในรูปที่ 4.1

ความหนาแน่นของเนื้อมะละกอดีป็นจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นที่เพิ่มขึ้นจาก 10-25 °Brix เพราะ เมื่อความเข้มข้นเพิ่มขึ้นน้ำที่เหลืออยู่ในเนื้อมะละกอดีป็นจะมีปริมาณน้อยลง และน้ำก็มีค่าความหนาแน่นต่ำกว่าองค์ประกอบอื่นๆ ในอาหาร (ยกเว้นไขมัน) (AbuDagga และ Kolbe, 1997) จึงทำให้เมื่อเนื้อมะละกอดีป็นมีความเข้มข้นสูงๆ จะมีค่าความหนาแน่นเพิ่มมากขึ้น ซึ่งผลการทดลองนี้มีลักษณะเช่นเดียวกับน้ำผลไม้และเนื้อผลไม้ดีป็นอื่นๆ (Tsen และ King, 2002; Ramos และ Ibarz, 1998) แต่ความหนาแน่นของเนื้อมะละกอดีป็นจะมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก 40-80°C เนื่องจาก เนื้อมะละกอดีป็นเกิดการขยายตัวเมื่อได้รับความร้อน ทำให้บรรจุเนื้อมะละกอดีป็นที่อุณหภูมิสูงๆ เข้าไปใน pycnometer ได้ปริมาณน้อยลงส่งผลให้ค่าความหนาแน่นน้อยลงด้วย

พบว่าเมื่อความเข้มข้นเปลี่ยนไปจาก 10-25°Brix ค่าความหนาแน่นของเนื้อมะละกอดีป็นจะมีการเปลี่ยนแปลงมากกว่าเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนไปจาก 40-80°C แสดงว่า ค่าความหนาแน่นของเนื้อมะละกอดีป็นจะมีการเปลี่ยนแปลงตามความเข้มข้นมากกว่าการเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ



รูปที่ 4.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นของเนื้อมะละกอตีปั่นที่ระดับความเข้มข้น (◆) 10°Brix, (■) 15 °Brix, (▲) 20 °Brix, (●) 25 °Brix กับอุณหภูมิ 40- 80°C

สมการทำนายทางคณิตศาสตร์ที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นของเนื้อมะละกอตีปั่นกับความเข้มข้นและอุณหภูมิ พิจารณาจากสมการที่มีผลสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ทางสถิติ มีค่า R^2 สูง SE ต่ำ สามารถทำนายค่าความหนาแน่นได้ใกล้เคียงกับค่าทดลอง และมีรูปแบบที่ง่ายสะดวกต่อการนำไปใช้ ได้ผลดังนี้

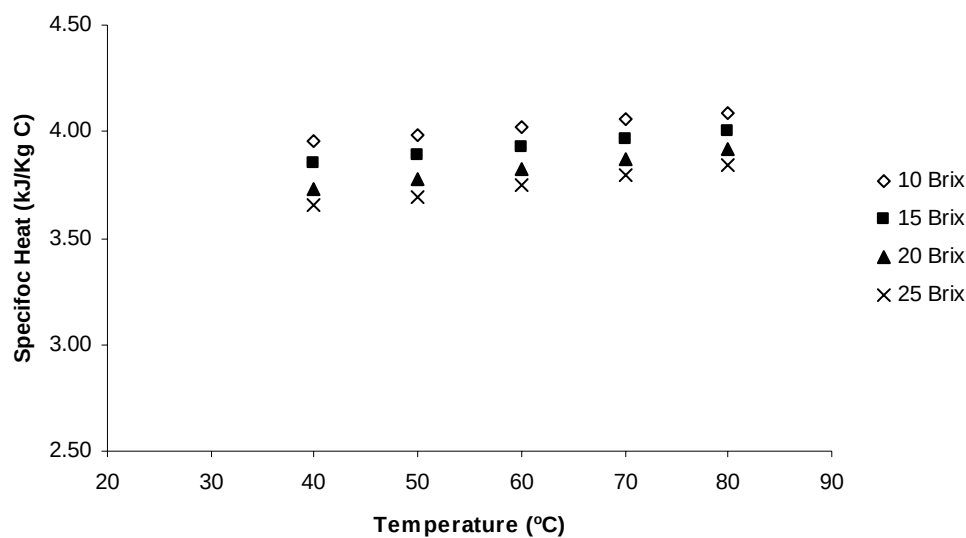
$$\text{ค่าความหนาแน่น : } \rho = 1019 + 4.06B - 0.517T \quad ; (R^2 = 0.992, SE = 2.368)$$

4.1.2 ค่าความร้อนจำเพาะของเนื้อมะละกอตีปั่น

จากการทดลองวัดค่าความร้อนจำเพาะด้วยเครื่อง Differential Scanning Calorimeter (DSC) กับเนื้อมะละกอตีปั่นที่มีความเข้มข้น 10, 15, 20 และ 25°Brix ในช่วงอุณหภูมิ 40, 50, 60, 70 และ 80°C จำนวน 3 ซ้ำ พบว่า ความร้อนจำเพาะของเนื้อมะละกอตีปั่นมีค่าเฉลี่ยอยู่ในช่วง 3.652- 4.092 kJ/kg°C ดังแสดงในรูปที่ 4.2

ความเข้มข้นของเนื้อมะละกอตีปั่น และอุณหภูมิในการทดลองมีผลทำให้ค่าความร้อนจำเพาะของเนื้อมะละกอตีปั่นเปลี่ยนแปลงไป โดยเมื่อความเข้มข้นเพิ่มขึ้นค่าความร้อนจำเพาะของเนื้อมะละกอตีปั่นจะลดลง เป็นผลเนื่องมาจาก ปริมาณน้ำที่มีอยู่ในเนื้อมะละกอตีปั่นซึ่งถือเป็นองค์ประกอบหลักของเนื้อมะละกอตีปั่น และจากองค์ประกอบในอาหารทั้งหมด น้ำมีค่าความร้อนจำเพาะมากที่สุดเมื่อเทียบกับองค์ประกอบอื่นๆ ในอาหาร เช่น โปรตีน, คาร์โบไฮเดรต ไขมัน, เกล็ด (Mohsenin, 1980; Nesvadba และ Eunson, 1984) เมื่อเนื้อมะละกอตีปั่นถูกทำให้มีความเข้มข้นเพิ่ม

มากขึ้นด้วยการระเหยน้ำออกไป ปริมาณน้ำที่เหลืออยู่ในเนื้อมะละกอดีป็นจึงน้อยลง ซึ่งแสดงถึงปริมาณความชื้นของเนื้อมะละกอดีป็น (% น้ำหนักเปียก) ที่ระดับความเข้มข้น 10, 15, 20 และ 25°Brix ส่งผลให้ค่าความร้อนจำเพาะมีค่าน้อยลงตามความเข้มข้นที่เพิ่มขึ้นของเนื้อมะละกอดีป็นด้วย ซึ่งผลการทดลองนี้มีผลเช่นเดียวกับอาหารทั่วไป (Vagenas และคณะ, 1990) ส่วนอุณหภูมิในการทดลองเมื่อเพิ่มขึ้นจาก 40-80°C จะส่งผลให้ค่าความร้อนจำเพาะของเนื้อมะละกอดีป็นเพิ่มขึ้นซึ่งมีลักษณะเดียวกันกับอาหารส่วนใหญ่ (Sweat, 1995; Fasino และคณะ, 2003) เนื่องจาก ค่าความร้อนจำเพาะเป็นค่าพลังงานความร้อนที่ทำให้วัสดุมวล 1 กิโลกรัมมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้น 1°C ดังนั้น เมื่ออุณหภูมิยังสูงขึ้นพลังงานความร้อนที่ให้กับวัสดุจะยิ่งมากขึ้นด้วย (Rahman, 1995)



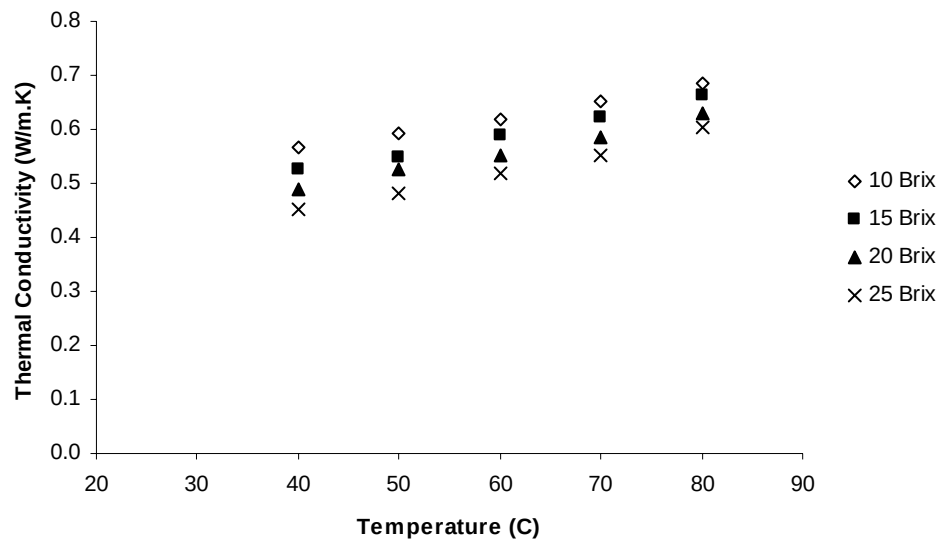
รูปที่ 4.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนจำเพาะของเนื้อมะละกอดีป็นที่ระดับความเข้มข้น (◆) 10°Brix, (■) 15 °Brix, (▲) 20 °Brix, (●) 25 °Brix กับอุณหภูมิ 40- 80°C

สมการทำนายทางคณิตศาสตร์ที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนจำเพาะของเนื้อมะละกอดีป็นกับความเข้มข้นและอุณหภูมิ พิจารณาจากสมการที่มีผลสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ทางสถิติ มีค่า R^2 สูง SE ต่ำ สามารถทำนายค่าความร้อนจำเพาะได้ใกล้เคียงกับค่าทดลอง และมีรูปแบบที่ง่าย สะดวกต่อการนำไปใช้ ได้ผลดังนี้

$$\text{ค่าความร้อนจำเพาะ} : C_p = 3.97 - 0.019B + 0.004T \quad ; (R^2 = 0.997, SE = 0.007)$$

4.1.3 ค่าการนำความร้อนของเนื้อมะละกอตีปั่น

จากการทดลองวัดค่าการนำความร้อนด้วย Line heat source probe กับเนื้อมะละกอตีปั่นความเข้มข้น 10, 15, 20 และ 25°Brix ในช่วงอุณหภูมิ 40, 50, 60, 70 และ 80°C จำนวน 3 ซ้ำ พบว่า การนำความร้อนของเนื้อมะละกอตีปั่นมีค่าเฉลี่ยในช่วง 0.452 ถึง 0.685 W/m°C ดังแสดงในรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำความร้อนของเนื้อมะละกอตีปั่นที่ระดับความเข้มข้น (◆) 10°Brix, (■) 15 °Brix, (▲) 20 °Brix, (●) 25 °Brix กับอุณหภูมิ 40- 80°C

พบว่าการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของเนื้อมะละกอตีปั่นและอุณหภูมิมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าการนำความร้อนของเนื้อมะละกอตีปั่น โดยเมื่อความเข้มข้นของเนื้อมะละกอตีปั่นเพิ่มขึ้นค่าการนำความร้อนของเนื้อมะละกอตีปั่นจะมีค่าลดลง แต่เมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นค่าการนำความร้อนของเนื้อมะละกอตีปั่นจะมีค่าเพิ่มขึ้น ที่ค่าการนำความร้อนของเนื้อมะละกอตีปั่นจะมีค่าลดลงเมื่อความเข้มข้นเพิ่มขึ้น เนื่องจากน้ำซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักของเนื้อมะละกอตีปั่น และองค์ประกอบทางเคมีของอาหารที่มีค่าการนำความร้อนมากที่สุด (AbuDagga และ Kolbe, 1997; Nesvadba และ Euson, 1984) มีความสัมพันธ์ในทางกลับกันกับความเข้มข้นของเนื้อมะละกอตีปั่น คือเมื่อความเข้มข้นเพิ่มขึ้น ปริมาณน้ำจะลดลงจึงส่งผลให้ค่าการนำความร้อนของเนื้อมะละกอตีปั่นมีค่าลดลงด้วย ซึ่งสอดคล้องกับ Sweat (1995) ที่รายงานว่า อาหารโดยทั่วไปมีค่าการนำความร้อนเพิ่มขึ้นตามปริมาณน้ำที่มีอยู่ในอาหารนั้น ส่วนค่าการนำความร้อนของเนื้อมะละกอตีปั่นมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งมีลักษณะเดียว กันกับอาหารที่มีความชื้นสูงทั่วไป (AbuDagga และ Kolbe,

1997) พิจารณาได้จากค่าการนำความร้อนของน้ำบริสุทธิ์ที่มีค่าเพิ่มขึ้นจาก 0.615 - 0.678 W/m°C เมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นจาก 30-90°C เช่นกัน

สมการทำนายทางคณิตศาสตร์ที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำความร้อนของเนื้อมะละกอดีปกับความเข้มข้นและอุณหภูมิ พิจารณาจากสมการที่มีผลสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ทางสถิติ มีค่า R^2 สูง SE ต่ำ สามารถทำนายค่าการนำความร้อนได้ใกล้เคียงกับค่าทดลอง และมีรูปแบบที่ง่าย สะดวกต่อการนำไปใช้ ได้ผลดังนี้

ค่าการนำความร้อน : $k = 0.557 - 6.74 \times 10^{-3}B + 9.2 \times 10^{-4}T + 2.0 \times 10^{-5}T^2$; ($R^2 = 0.994$, SE = 0.005)

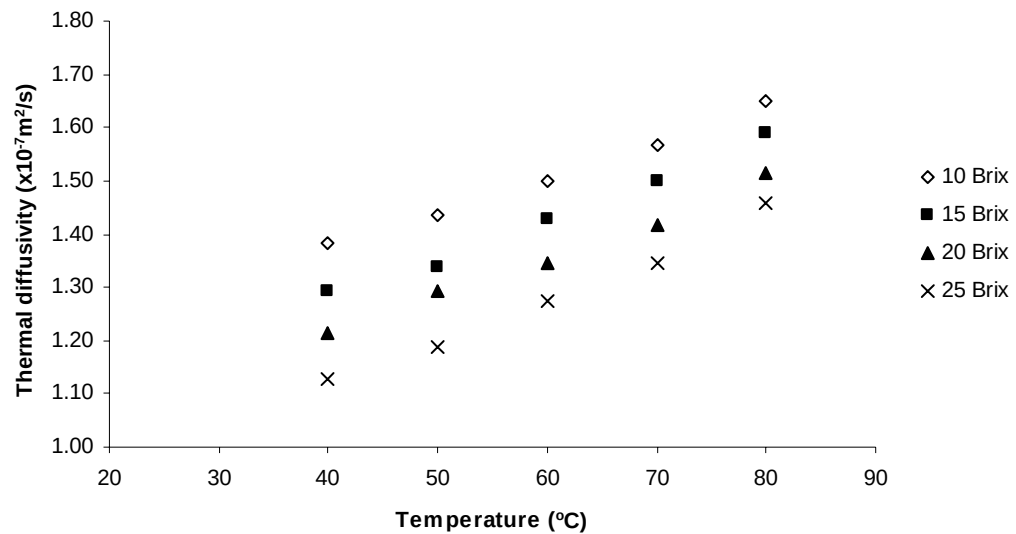
4.1.4 ค่าการแพร่กระจายความร้อนของเนื้อมะละกอดีป

จากผลการทดลองวัดค่าความหนาแน่น ค่าความร้อนจำเพาะ และค่าการนำความร้อนของเนื้อมะละกอดีปความเข้มข้น 10, 15, 20 และ 25°Brix ในช่วงอุณหภูมิ 40, 50, 60, 70 และ 80°C สามารถนำมาหาค่าการแพร่กระจายความร้อนของเนื้อมะละกอดีปได้ดังสมการที่ (3.4)

ค่าการแพร่กระจายความร้อนของเนื้อมะละกอดีปมีค่าเฉลี่ยในช่วง 1.127×10^{-7} m²/s ถึง 1.650×10^{-7} m²/s ดังแสดงในรูปที่ 4.4 จะเห็นว่าความเข้มข้นและอุณหภูมิมีผลต่อค่าการแพร่กระจายความร้อนของเนื้อมะละกอดีป โดยค่าการแพร่กระจายความร้อนจะมีค่าลดลงเมื่อความเข้มข้นเพิ่มขึ้น แต่ค่าการแพร่กระจายความร้อนจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งผลการทดลองนี้มีลักษณะเช่นเดียวกันกับค่าการนำความร้อนของเนื้อมะละกอดีปตรงกับ Sweat (1995) กล่าวว่าโดยทั่วไปค่าการแพร่กระจายความร้อนมีลักษณะคล้ายกับค่าการนำความร้อน

ค่าการแพร่กระจายความร้อนของเนื้อมะละกอดีปมีค่าลดลงเมื่อความเข้มข้นเพิ่มขึ้น อาจเป็นเพราะ น้ำซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักของเนื้อมะละกอดีป และเป็นองค์ประกอบทางเคมีของอาหารที่มีค่าการแพร่กระจายความร้อนมากที่สุด (Nesvadba และ Eunson, 1984) เมื่อเนื้อมะละกอดีปถูกทำให้มีความเข้มข้นมากขึ้นปริมาณน้ำที่เหลืออยู่ในเนื้อมะละกอดีปจึงน้อยลง ส่งผลให้ค่าการแพร่กระจายความร้อนมีค่าน้อยลงตามความเข้มข้นที่เพิ่มขึ้นของเนื้อมะละกอดีป ผลการทดลองที่ได้เช่นเดียวกับ Rapusas และ Driscoll (1995) ที่ศึกษาค่าการแพร่กระจายความร้อนของหัวหอมใหญ่หั่นชิ้น กับ Kim และ Bhowmik (1997) ที่ศึกษาค่าการแพร่กระจายความร้อนของโยเกิร์ต และที่ค่าการแพร่กระจายความร้อนของเนื้อมะละกอดีปมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นซึ่งมีลักษณะคล้ายกับค่าการแพร่กระจายความร้อนของน้ำที่มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นเช่นกัน น่าจะเป็นเพราะน้ำเป็นองค์ประกอบหลักของเนื้อมะละกอดีปจึงมีพฤติกรรมคล้ายกัน ผลการทดลองสอดคล้องกับงานวิจัยของ Fasina และคณะ (2003) ที่ศึกษาค่าการแพร่กระจายความร้อนของเนื้อมัน

เทศติป่น (73.3% น้ำหนักเปียก) ที่ช่วงอุณหภูมิ 5 ถึง 80°C และพบว่าค่าการแพร่ กระจายความร้อนของเนื้อมันเทศติป่นมีค่าเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิเหมือนกับค่าการนำความร้อน



รูปที่ 4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการแพร่กระจายความร้อนของเนื้อมะละกอติป่นที่ระดับความเข้มข้น (◆) 10°Brix, (■) 15 °Brix, (▲) 20 °Brix, (●) 25 °Brix กับอุณหภูมิ 40-80°C

สมการทำนายทางคณิตศาสตร์ที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการแพร่กระจายความร้อนของเนื้อมะละกอติป่นกับความเข้มข้นและอุณหภูมิ พิจารณาจากสมการที่มีผลสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ทางสถิติ มีค่า R^2 สูง SE ต่ำ สามารถทำนายค่าการแพร่กระจายความร้อนได้ใกล้เคียงกับค่าทดลอง และมีรูปแบบที่ง่าย สะดวกต่อการนำไปใช้ ได้ผลดังนี้

$$\text{ค่าการแพร่กระจายความร้อน} : \alpha \times 10^7 = 1.38 - 1.51 \times 10^{-2}B + 1.51 \times 10^{-3}T + 5.0 \times 10^{-5}T^2 \quad ; (R^2 = 0.993 \quad SE = 0.012)$$

4.2 ผลการศึกษาจลนพลศาสตร์การเปลี่ยนแปลงสีของเนื้อมะละกอตีป่นที่ผ่านกระบวนการระเหยน้ำแบบต่างๆ

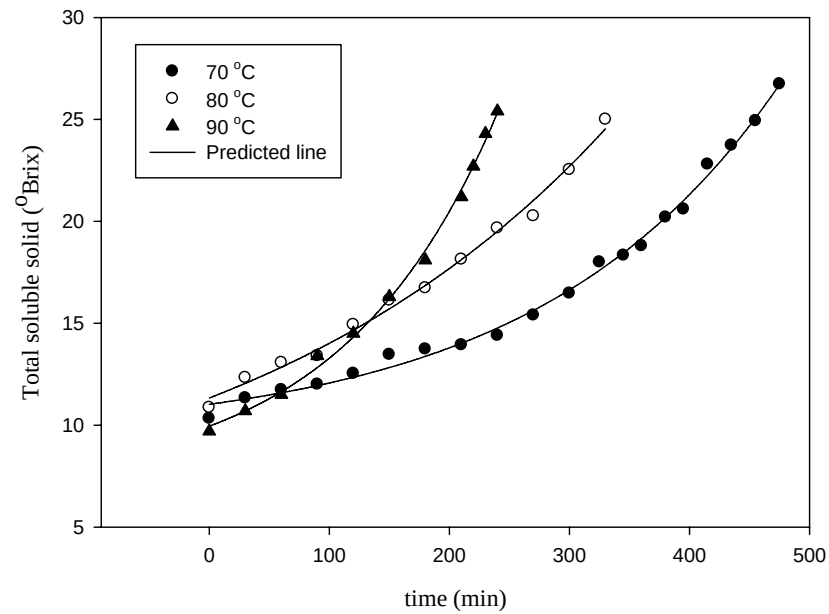
ในงานวิจัยนี้ใช้มะละกอตีป่นความเข้มข้น 10 ปริกซ์ เป็นวัตถุดิบเริ่มต้นในการทำให้เข้มข้น ตารางที่ 4.1 แสดงสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของมะละกอตีป่นความเข้มข้น 10 ปริกซ์ ได้แก่ ของแข็งที่ละลายน้ำทั้งหมด ความเป็นกรดทั้งหมด pH ความชื้น ค่าสี L a b ซึ่งผลการทดลองที่ได้สอดคล้องกับการศึกษาก่อนหน้านี้ของ Rodrigues และคณะ (2003) ซึ่งทำการศึกษาสมบัติการไหลและสีของมะละกอรหว่างกระบวนการทำแห้งแบบออสโมติก โดยค่าของแข็งที่ละลายน้ำทั้งหมดเป็นปัจจัยหลักที่ใช้บ่งชี้ความสุกของมะละกอในงานวิจัยนี้

ตารางที่ 4.1 สมบัติทางกายภาพและเคมีของเนื้อมะละกอตีป่นเข้มข้น 10 ปริกซ์

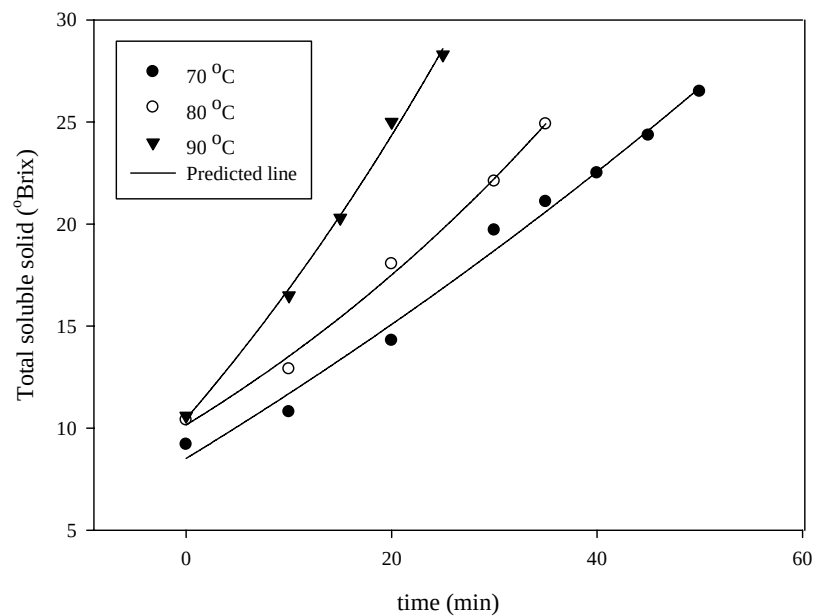
คุณสมบัติ	ปริมาณ $\pm$ ความเบี่ยงเบน
ของแข็งที่ละลายน้ำทั้งหมด (ปริกซ์)	10.10 ± 0.35
ความเป็นกรดทั้งหมด (เทียบกับกรดซิตริก)	0.16 ± 0.04
pH	4.84 ± 0.09
ความชื้น (เปอร์เซ็นต์ฐานเปียก)	88.41 ± 0.47
ค่าสี L	25.58 ± 0.98
ค่าสี a	13.95 ± 0.11
ค่าสี b	9.35 ± 0.11

4.2.1 ผลการศึกษาเปรียบเทียบกระบวนการระเหยน้ำแบบต่างๆของเนื้อมะละกอตีป่น

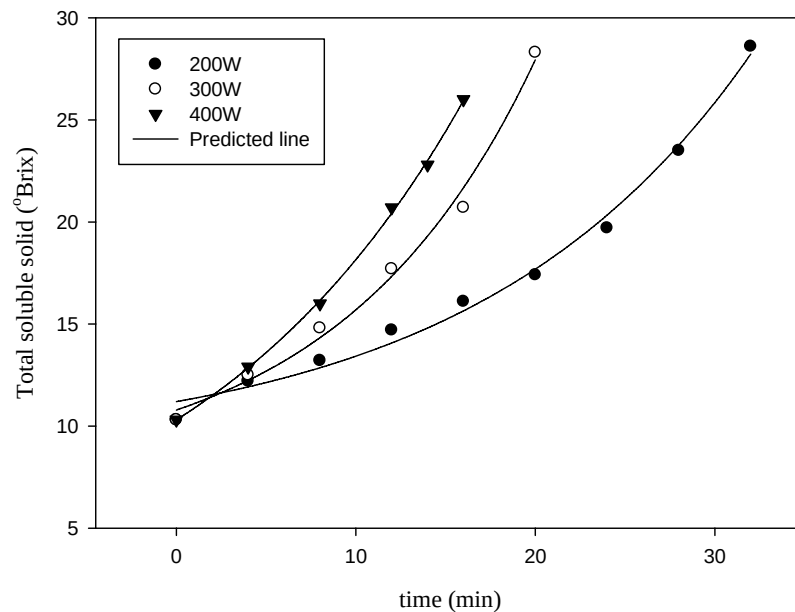
การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นต่อเวลาของกระบวนการระเหยน้ำแบบต่างๆถูกศึกษาเพื่อทำการประมาณเวลาในการระเหยน้ำเพื่อให้ได้ความเข้มข้น 15 20 และ 25 ปริกซ์ รูปที่ 4.5 – 4.7 แสดงการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นต่อเวลาของกระบวนการระเหยน้ำแบบดั้งเดิม แบบภายใต้ความดันสุญญากาศ และแบบไมโครเวฟ ตามลำดับ จากการศึกษาพบว่า กระบวนการระเหยน้ำแบบไมโครเวฟใช้เวลาในการระเหยน้ำในมะละกอตีป่นสั้นกว่าอีกสองวิธี



รูปที่ 4.5 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นต่อเวลาของกระบวนการระเหยน้ำแบบดั้งเดิม
ที่อุณหภูมิ 70 80 และ 90°C



รูปที่ 4.6 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นต่อเวลาของกระบวนการระเหยน้ำแบบภายใต้ความดัน
สุญญากาศ ที่อุณหภูมิ 70 80 และ 90°C



รูปที่ 4.7 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นต่อเวลาของกระบวนการระเหยน้ำแบบไมโครเวฟ
ที่กำลังไฟฟ้า 200 300 และ 400 วัตต์

ตารางที่ 4.2 แสดงเวลาที่ใช้ในการระเหยน้ำที่จะทำความเข้มข้นของมะละกอดีป็นจาก 10 บริกซ์ เป็น 15 20 และ 25 บริกซ์ จากตารางดังกล่าวพบว่า การระเหยน้ำแบบไมโครเวพระเหยน้ำได้เร็วกว่าแบบวิธีภายใต้ความดันสุญญากาศและแบบวิธีดั้งเดิมตามลำดับ ค่าคงที่ของจลนพลศาสตร์แสดงในตารางที่ 2 ซึ่งแสดงผลเช่นเดียวกัน Pereira, N. R. และคณะ (2007) พบว่าคลื่นไมโครเวฟไม่ได้สร้างความร้อนแต่จะสร้างอยู่ในรูปพลังงานซึ่งทำตัวเสมือนความร้อนผ่านไปทำปฏิกิริยากับวัสดุนั้นๆ เวลาในการระเหยน้ำสามารถลดลงได้ด้วยการใช้พลังงานคลื่นไมโครเวฟซึ่งคลื่นไมโครเวฟจะถูกดูดซับพลังงานจากน้ำที่อยู่ในผลิตภัณฑ์ได้อย่างรวดเร็วและผลคือการระเหยน้ำได้รวดเร็วและรวมกับอัตราการระเหยน้ำยังสูงอีกด้วย อุณหภูมิภายในของผลิตภัณฑ์ที่ระเหยน้ำด้วยวิธีไมโครเวฟจะสูงกว่าอุณหภูมิที่ผิวของผลิตภัณฑ์นั้นและความชื้นจะเคลื่อนไปที่ผิวซึ่งมีการเคลื่อนที่มากกว่าการระเหยน้ำแบบดั้งเดิม บนพื้นฐานจากผลการทดลองการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นพบว่าผลของการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นมีความใกล้เคียงกับการศึกษาของ Maskan (2006) ที่ศึกษาในหัวข้อการผลิตน้ำทับทิมเข้มข้น

ตารางที่ 4.2 เวลาในการระเหยน้ำเพื่อเตรียมตัวอย่างเนื้อมะละกอดีป็นที่ความเข้มข้นต่างๆ

กระบวนการระเหยน้ำ	สถานะของการทดลอง	เวลาในการระเหยน้ำ (นาที)		
		15 ปริกซ์	20 ปริกซ์	25 ปริกซ์
ดั้งเดิม	70°C	250.00	375.00	455.00
	80°C	130.00	250.00	340.00
	90°C	130.00	195.00	240.00
ภายใต้ความดันสุญญากาศ	70°C	19.75	28.25	38.75
	80°C	14.00	25.50	35.25
	90°C	7.50	14.50	20.75
ไมโครเวฟ	200W	14.50	23.50	29.25
	300W	9.00	14.75	18.50
	400W	6.75	11.75	15.50

4.2.2 ผลการเปลี่ยนแปลงสีของเนื้อมะละกอดีป็นเข้มข้นระหว่างกระบวนการระเหยน้ำ

สีเป็นคุณลักษณะที่สำคัญเพราะเป็นลักษณะปรากฏแรกที่ผู้บริโภคมองเห็น ค่าสี Hunter L a b เป็นที่ยอมรับและเป็นวิธีที่ง่ายและรวดเร็วเพื่อกำหนดค่าสีของผลิตภัณฑ์ ดังนั้นผลที่ทำการศึกษานี้สามารถใช้คำนวณขอบเขตของการเปลี่ยนแปลงสีระหว่างกระบวนการผลิตเนื้อมะละกอดีป็น ในงานวิจัยนี้ ปฏิบัติการเกิดสีน้ำตาลแบบไมใช่เอนไซม์และการทำลายเม็ดสีถูกพิจารณาเป็นสาเหตุหลักของการเปลี่ยนแปลงสีระหว่างกระบวนการทำเข้มข้นเนื้อมะละกอดีป็น อย่างไรก็ตามปฏิบัติการเกิดสีน้ำตาลแบบไมใช่เอนไซม์ถูกยับยั้งด้วยกระบวนการให้ความร้อนระหว่างกระบวนการระเหยน้ำ ทั้งนี้ 25 ปริกซ์เป็นความเข้มข้นสุดท้ายที่ต้องการของมะละกอดีป็นในงานวิจัยนี้ Hunter L , a , b , และค่าการเปลี่ยนแปลงสีทั้งหมด (ΔE) ถูกพิจารณาและแสดงค่าในตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ค่า Hunter $L a b$ และค่าการเปลี่ยนแปลงสีทั้งหมด (ΔE) ที่ 25 บริกซ์ของเนื้อมะละกอดีป็นซึ่งใช้การระเหยน้ำแบบต่างๆ

กระบวนการ ระเหยน้ำ	สถานะของ การทดลอง	L	a	b	ΔE
ดั้งเดิม	70°C	23.50±0.22 ^a	19.56±0.01 ^a	11.17±0.33 ^a	6.31±0.41 ^a
	80°C	26.14±0.37 ^b	20.34±0.34 ^a	11.12±0.41 ^a	6.67±0.18 ^a
	90°C	22.87±0.50 ^c	19.67±0.20 ^a	10.35±0.42 ^a	5.99±0.09 ^a
ภายใต้ความดัน สุญญากาศ	70°C	22.78±0.45 ^c	19.83±0.12 ^a	11.40±0.58 ^{ab}	7.25±0.33 ^b
	80°C	22.60±0.17 ^c	19.13±0.11 ^a	11.25±0.04 ^{ab}	7.02±0.14 ^b
	90°C	22.38±0.20 ^c	20.11±0.07 ^a	11.69±0.11 ^{ab}	7.10±0.11 ^b
ไมโครเวฟ	200W	22.98±0.59 ^c	20.10±0.18 ^a	11.84±0.11 ^b	7.25±0.08 ^b
	300W	23.05±0.46 ^a	20.15±0.06 ^a	11.77±0.18 ^b	6.74±0.13 ^b
	400W	26.16±1.75 ^b	20.16±0.10 ^a	11.83±0.08 ^b	7.72±0.04 ^b

ค่าในตารางคือ ค่ากลาง และ ค่าการเบี่ยงเบนของการทดลองสองซ้ำ

ค่าคอลัมน์เดียวกันซึ่งมีอักษรตัวกเหมือนกันหมายความว่าแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญ ($P < 0.05$).

ตารางที่ 4.3 แสดงค่า Hunter $L a b$ และค่าการเปลี่ยนแปลงสีทั้งหมด (ΔE) ที่ 25 บริกซ์ของมะละกอดีป็นในงานวิจัยนี้ ค่า ΔE ของมะละกอดีป็นสุดท้ายเท่ากับ 6.31 6.67 5.99; 7.25 7.02 7.10; และ 7.25 6.74 7.72 ในกรณีที่เป็นการระเหยน้ำแบบดั้งเดิมที่ 70 80 และ 90°C; แบบภายใต้ความดันสุญญากาศที่ 70 80 และ 90°C; และแบบไมโครเวฟที่ 200 300 และ 400W ตามลำดับ จากผลการทดลองพบค่า Hunter $L a b$ และค่า ΔE มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

ค่า Hunter $L a b$ ถูกใช้ในการคำนวณค่าการเปลี่ยนแปลงสีทั้งหมดระหว่างกระบวนการระเหยน้ำ ซึ่งค่าการเปลี่ยนแปลงสีเป็นตัวชี้วัดโดยรวมของการเปลี่ยนแปลงสีระหว่างเนื้อมะละกอดีป็นเริ่มต้นกับมะละกอดีป็นเข้มข้น ค่าการเปลี่ยนแปลงสีโดยรวมเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาในการระเหยน้ำเพิ่มขึ้นดังแสดงในรูปที่ 4.8 – 4.10 พบว่าการเปลี่ยนแปลงสีของเนื้อมะละกอดีป็นเข้มข้นที่ถูกกระเหยด้วยวิธีภายใต้ความดันสุญญากาศและไมโครเวฟทำให้สีเปลี่ยนแปลงมากที่สุด ค่าการเปลี่ยนแปลงสีโดยรวมเป็นตัวบ่งชี้การเปลี่ยนแปลงสีอย่างมากที่เกิดขึ้นเนื่องจากทั้งสองกระบวนการนี้และวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่ากลางแล้วแสดงผลแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($P < 0.05$) เปรียบเทียบผลของการเปลี่ยนแปลงสีโดยรวมที่ทำการศึกษาในงานวิจัยนี้มีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงเหมือนกันกับงานวิจัยก่อนหน้านี้ในเรื่อง การผลิตน้ำทับทิมเข้มข้น (Maskan, M., 2006) การศึกษาจนพลาสมาการเปลี่ยนแปลงสีของมะละกอดีป็นเนื่องจากความร้อน (Ahmed, J., และคณะ, 2002) กระบวนการให้

ความร้อนของลูกแพรติปุ่นที่อุณหภูมิสูง (Ibarz, A., และคณะ, 1999) และการให้ความร้อนกับลูกพีชติปุ่นที่ 110-135°C (Avila, I.M.L.B. & Silva, C.L.M., 1999) แม้ใช้ระบบและวิธีการให้ความร้อนที่แตกต่างกัน

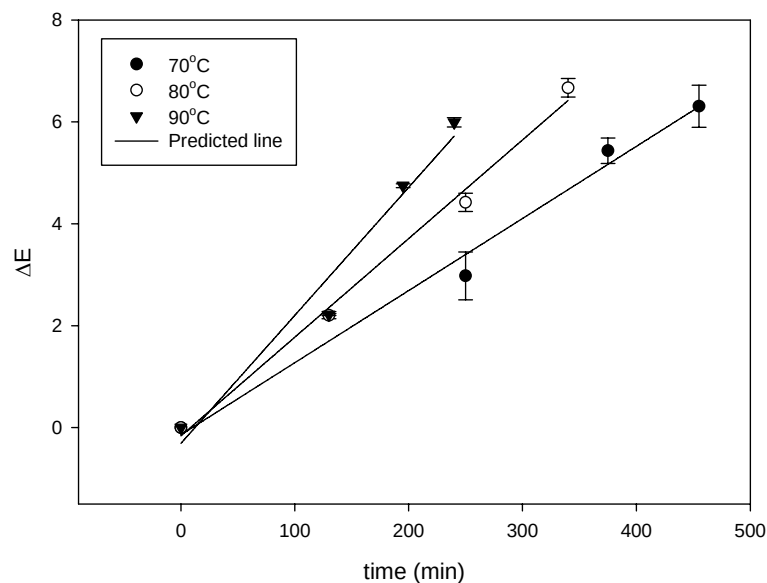
จากการศึกษาพบว่าจลนพลศาสตร์การเปลี่ยนแปลงของการเปลี่ยนแปลงสีโดยรวม เป็นไปตามปฏิกิริยาลำดับที่ศูนย์ ในกรณีที่เป็นการให้ความร้อนแบบดั้งเดิม, เป็นไปตามปฏิกิริยาแบบผสม ในกรณีที่เป็นการให้ความร้อนภายใต้ระบบความดันสุญญากาศ, และเป็นไปตามปฏิกิริยาลำดับที่ศูนย์ ในกรณีที่เป็นการให้ความร้อนด้วยเครื่องไมโครเวฟ รูปที่ 4.8 – 4.10 แสดงการเปลี่ยนแปลงทางจลนพลศาสตร์ของค่าการเปลี่ยนแปลงสีโดยรวม

จากการเปลี่ยนแปลงสีต่อเวลา สมการที่ (4.1) และ (4.2) ถูกนำมาทำนายหาค่าคงที่ของการเปลี่ยนแปลงทางจลนพลศาสตร์ของค่าการเปลี่ยนแปลงสี (Maskan, M., 2006)

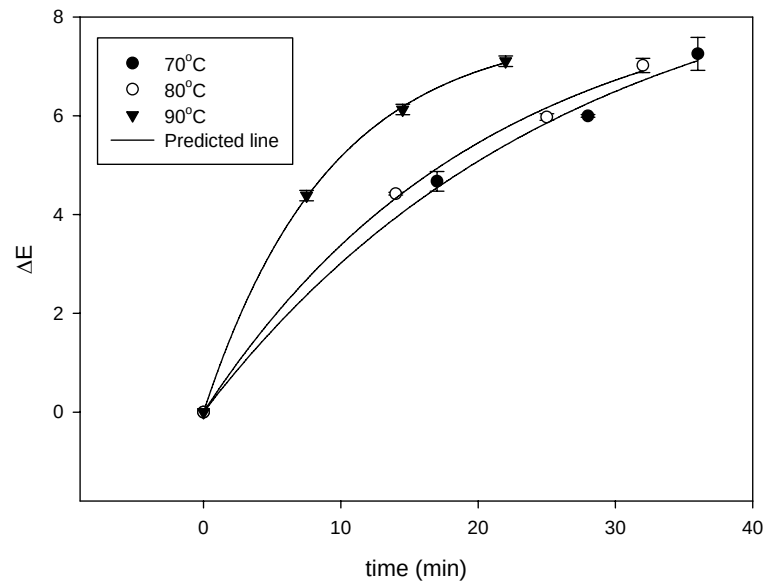
ปฏิกิริยาลำดับที่ศูนย์: $C = C_o \pm k_o t$ (4.1)

ปฏิกิริยาแบบผสม $C = \frac{k_o}{k_1} - \left[\frac{k_o}{k_1} - C_o \right] \exp(\pm k_1 t)$ (4.2)

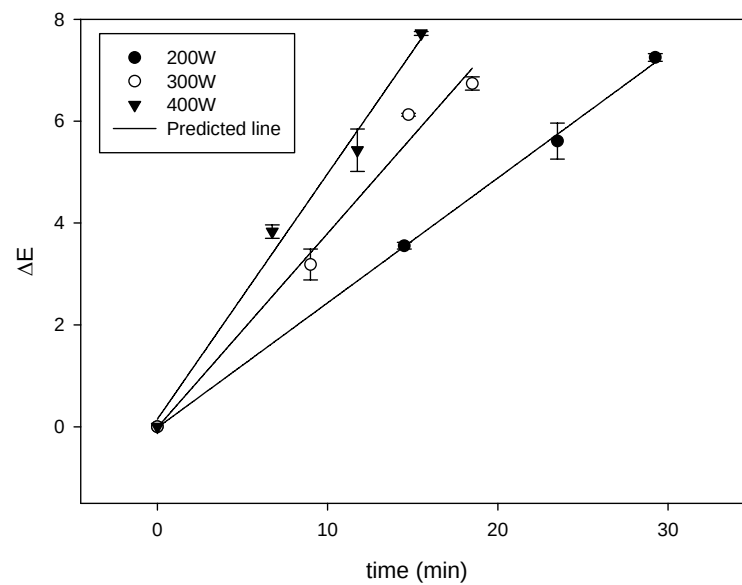
โดย C คือ ค่าตัวแปรที่เวลาใดๆ C_o คือ ค่าตัวแปรที่เวลาเริ่มต้น k_o คือ ค่าคงที่ทางจลนพลศาสตร์ (นาที่⁻¹) ของปฏิกิริยาลำดับที่ศูนย์ k_1 คือ ค่าคงที่ทางจลนพลศาสตร์ (นาที่⁻¹) ของปฏิกิริยาลำดับที่หนึ่ง และ t คือ เวลาในกระบวนการระเหยน้ำ (นาที่)



รูปที่ 4.8 ค่าการเปลี่ยนแปลงสีโดยรวมของกระบวนการระเหยน้ำแบบวิธีดั้งเดิมที่ 70 80 และ 90°C



รูปที่ 4.9 ค่าการเปลี่ยนแปลงเอนทัลปีโดยรวมของกระบวนการระเหยน้ำแบบภายใต้ความดันสุญญากาศ
ที่ 70 80 และ 90°C



รูปที่ 4.10 ค่าการเปลี่ยนแปลงเอนทัลปีโดยรวมของกระบวนการระเหยน้ำแบบไมโครเวฟที่ 200 300 และ
400W

ตารางที่ 4.4 แสดงค่าคงที่ทางจลนพลศาสตร์ของการเปลี่ยนแปลงสีโดยรวมของเนื้อมะละกอ ตีป่นในงานวิจัยนี้เท่ากับ 0.0142 0.0194 0.0251; 0.3621 0.4271 0.8495; และ 0.2451 0.3813 0.4818 นาที⁻¹ สำหรับการระเหยน้ำแบบดั้งเดิมที่ 70 80 และ 90°C ($R^2 > 0.96$); แบบภายใต้ความดันสุญญากาศที่ 70 80 และ 90°C ($R^2 > 0.99$); และแบบไมโครเวฟที่ 200 300 และ 400W ($R^2 > 0.98$) ตามลำดับ จากค่านี้ สังเกตได้ว่า ค่าคงที่ทางจลนพลศาสตร์ของการเปลี่ยนแปลงสีโดยรวมเพิ่มขึ้นเมื่อระดับของปัจจัยเพิ่มสูงขึ้นทั้งของสามวิธีการระเหยน้ำ ขณะที่ค่าคงที่ทางจลนพลศาสตร์ของระบบการระเหยน้ำแบบภายใต้ความดันสุญญากาศแสดงออกมาสองค่า นั่นคือมาจากสองปฏิกิริยาหลักคือ การสร้างสี และการที่สีถูกทำลาย เปรียบเทียบผลที่ได้จากการศึกษาในงานวิจัยนี้มีแนวโน้มเหมือนกันกับงานวิจัยก่อนหน้าซึ่งค่าคงที่ทางจลนพลศาสตร์เพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น ในงานวิจัยเรื่อง การเกิดสีน้ำตาลแบบไม่ใช้เอนไซม์ในลูกพีชตีป่นระหว่างการให้ความร้อน (Garza และคณะ, 1999) และการให้ความร้อนกับลูกแพร์ตีป่นที่อุณหภูมิสูง (Ibarz และคณะ, 1999) ค่าคงที่ทางจลนพลศาสตร์ของการระเหยน้ำแบบภายใต้ความดันสุญญากาศและแบบไมโครเวฟมีค่าสูงกว่าแบบดั้งเดิม เท่ากับ 25-34 เท่า และ 17-19 เท่า ตามลำดับ นั่นหมายความว่า ค่าการเปลี่ยนแปลงสีโดยรวมของมะละกอตีป่นภายใต้การระเหยน้ำแบบภายใต้ความดันสุญญากาศและแบบไมโครเวฟ มีค่าสูงกว่าแบบดั้งเดิม แต่อย่างไรก็ตาม เวลาในการระเหยน้ำของทั้งสองวิธีจะมีระยะเวลาที่สั้นกว่าการระเหยน้ำแบบดั้งเดิม

ตารางที่ 4.4 ตัวแปรทางจลนพลศาสตร์ของสมการที่ (4.1) และ (4.2) สำหรับการเปลี่ยนแปลงสีโดยรวมของเนื้อมะละกอตีป่นเข้มข้นที่ใช้วิธีการระเหยน้ำแบบต่างๆ

กระบวนการ ระเหยน้ำ	สถานะของ การทดลอง	ลำดับ	$k_0 \pm$ ค่าเบี่ยงเบน	$k_1 \pm$ ค่าเบี่ยงเบน	R^2
ดั้งเดิม	70°C	$n=0$	0.0142±0.0011	-	0.9889
	80°C	$n=0$	0.0194±0.0012	-	0.9929
	90°C	$n=0$	0.0251±0.0034	-	0.9653
ภายใต้ความดัน สุญญากาศ	70°C	แบบผสม	0.3621	0.0379±0.0091	0.9966
	80°C	แบบผสม	0.4271	0.0489±0.0079	0.9980
	90°C	แบบผสม	0.8495	0.1092±0.0036	0.9998
ไมโครเวฟ	200W	$n=0$	0.2451±0.0054	-	0.9990
	300W	$n=0$	0.3813±0.0325	-	0.9856
	400W	$n=0$	0.4818±0.0367	-	0.9885

ค่าเบี่ยงเบน: ค่าประมาณของความเบี่ยงเบน R^2 : สัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์

4.3 ผลการศึกษาสมบัติทางรีโอโลยีของเนื้อมะละกอตีปั่น

4.3.1 ผลของความเข้มข้นและอุณหภูมิต่อสมบัติการไหลของเนื้อมะละกอตีปั่น

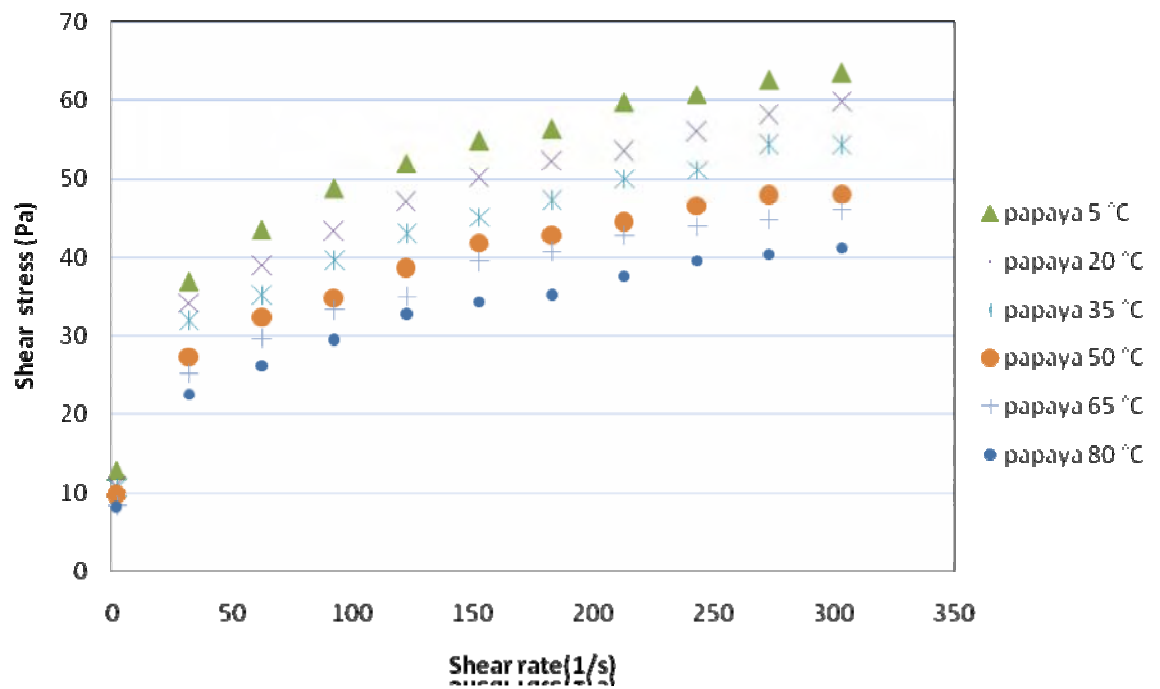
จากการทดลองพบว่าเนื้อมะละกอตีปั่นเข้มข้นมีพฤติกรรมการไหลแบบนอนนิวโตเนียนแบบที่ขึ้นกับเวลา และเป็นของไหลแบบทิกโซทรอปิก และเมื่อพิจารณาผลการทดลองในช่วงเพิ่มอัตราเฉือนจาก 0 เป็น 300 s^{-1} พบว่าสมบัติการไหลของเนื้อมะละกอตีปั่นที่มีความเข้มข้น 10, 15, 20 และ 25 °Brix ที่อุณหภูมิ 5, 20, 35, 50, 65 และ 80 °C มีแนวโน้มเดียวกัน(รูปที่ 4.11-4.14) นั่นคือ ณ อัตราเฉือนเดียวกันความเค้นเฉือนเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของเนื้อมะละกอตีปั่นเพิ่มขึ้นและอุณหภูมิของเนื้อมะละกอตีปั่นลดลง

เมื่อนำข้อมูลผลการทดลองไปเทียบกับ Herschel-Bulkley model (สมการที่ 4.3)

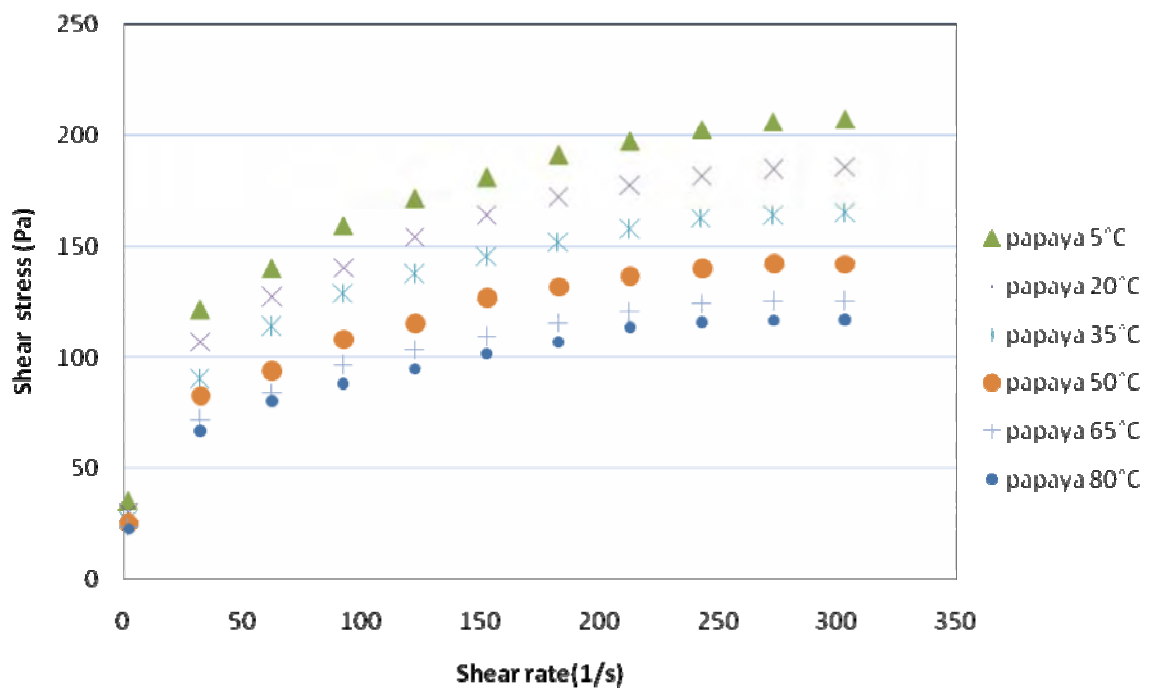
$$\tau = \tau_y + m \dot{\gamma}^n \quad (4.3)$$

เมื่อ	τ	คือ	ความเค้นเฉือน (N/m^2)
	$\dot{\gamma}$	คือ	อัตราเฉือน ($1/\text{s}$)
	τ_y	คือ	ความเค้นเฉือนคลาก (N/m^2)
	m	คือ	สัมประสิทธิ์ความข้นหนืด
			flow consistency coefficient / index (Pa.s^n)
	n	คือ	ดัชนีพฤติกรรมการไหล
			flow behavior index (dimensionless)

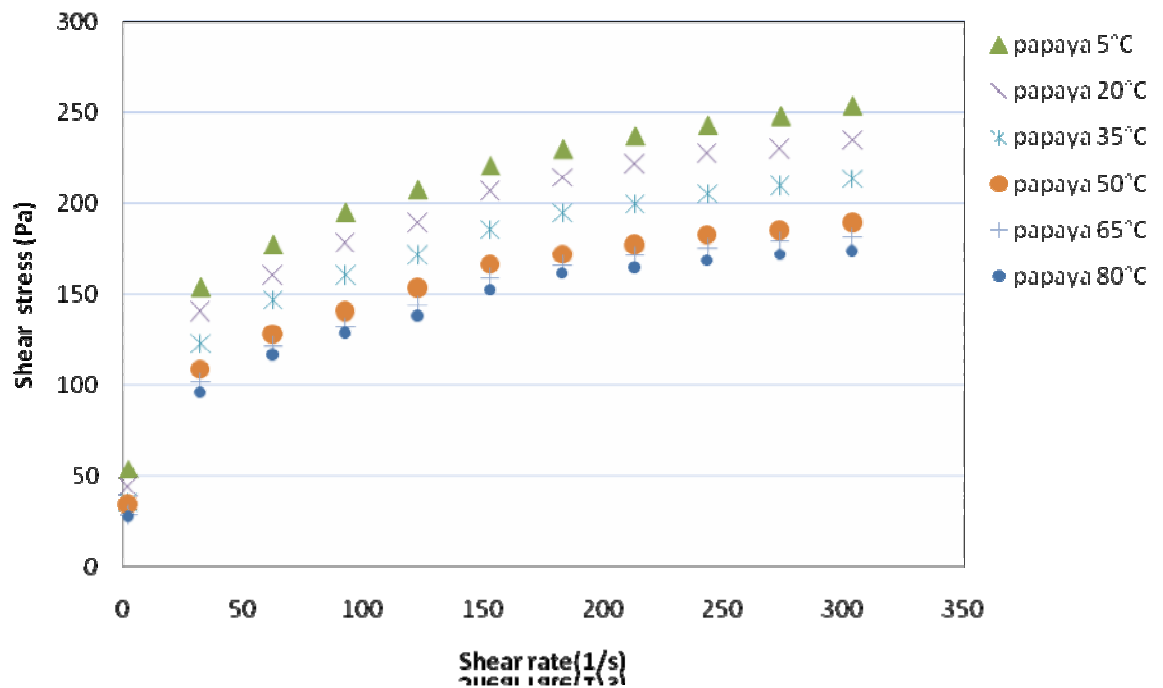
สามารถกำหนดค่า τ_y , K และ n ของเนื้อมะละกอตีปั่นที่มีความเข้มข้น 10, 15, 20 และ 25 °Brix ที่อุณหภูมิ 5, 20, 35, 50, 65 และ 80 °C ดังแสดงในตารางที่ 4.5



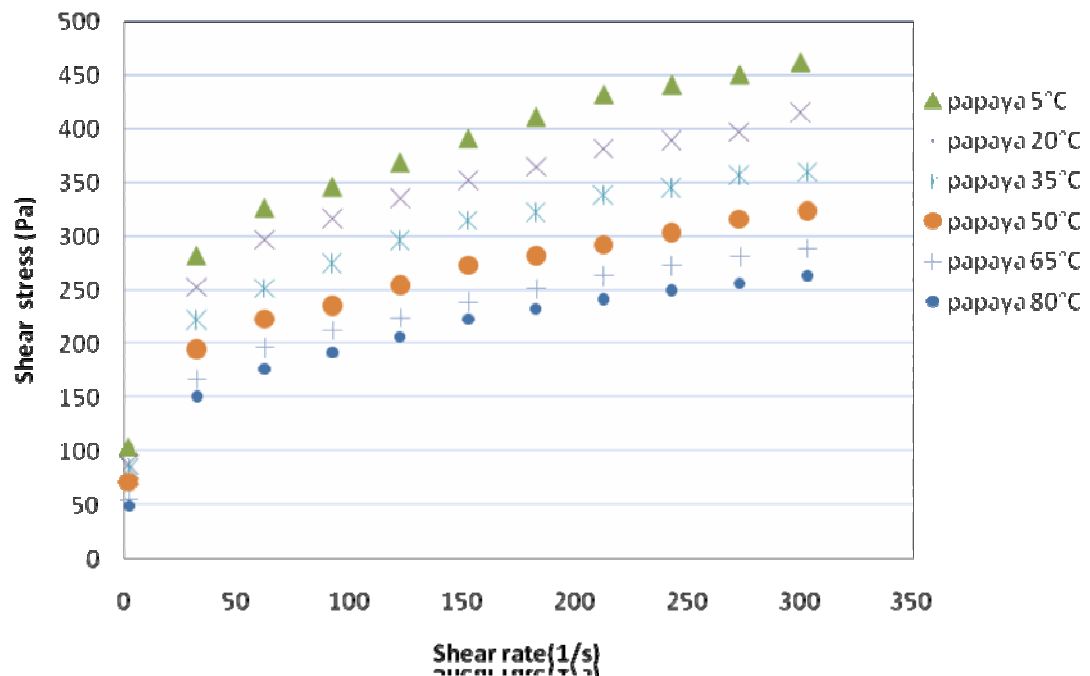
รูปที่ 4.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นเฉือนและอัตราเฉือนของเนื้อมะละกอตีปั่น ที่ระดับความเข้มข้น 10 ปริกซ์ ที่อุณหภูมิ 5, 20, 35, 50, 65 และ 80 °C



รูปที่ 4.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นเฉือนและอัตราเฉือนของเนื้อมะละกอตีปั่น ที่ระดับความเข้มข้น 20 ปริกซ์ ที่อุณหภูมิ 5, 20, 35, 50, 65 และ 80 °C



รูปที่ 4.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นเฉือนและอัตราเฉือนของเนื้อมะละกอตีป่น ที่ระดับความชื้น 20 บริกซ์ ที่อุณหภูมิ 5, 20, 35, 50, 65 และ 80 °C



รูปที่ 4.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นเฉือนและอัตราเฉือนของเนื้อมะละกอตีป่น ที่ระดับความชื้น 25 บริกซ์ ที่อุณหภูมิ 5, 20, 35, 50, 65 และ 80 °C

ตารางที่ 4.5 Yield stress (τ_y), Flow behavior index (n) and Consistency coefficient (m)
ของเนื้อมะละกอสีปนเข้มข้น

TSS* (°Brix)	อุณหภูมิ (°C)	τ_y (Pa)	n	m (Pa.s ⁿ)
10	5	12.700	0.333	7.786
	20	10.900	0.336	7.173
	35	10.600	0.340	6.304
	50	9.700	0.358	5.119
	65	8.350	0.369	4.666
	80	8.180	0.380	3.827
15	5	35.400	0.323	28.379
	20	30.300	0.327	25.177
	35	26.700	0.341	20.917
	50	25.300	0.342	17.394
	65	23.980	0.347	14.733
	80	22.600	0.350	13.459
20	5	53.900	0.312	34.096
	20	44.200	0.316	32.278
	35	35.400	0.321	29.174
	50	34.400	0.335	23.561
	65	28.400	0.341	22.568
	80	27.700	0.347	20.989
25	5	104.067	0.305	61.916
	20	87.400	0.308	56.807
	35	85.336	0.318	45.740
	50	71.350	0.320	40.031
	65	54.960	0.326	36.166
	80	48.910	0.334	32.048

*TSS = ของแข็งละลายน้ำได้โดยรวม

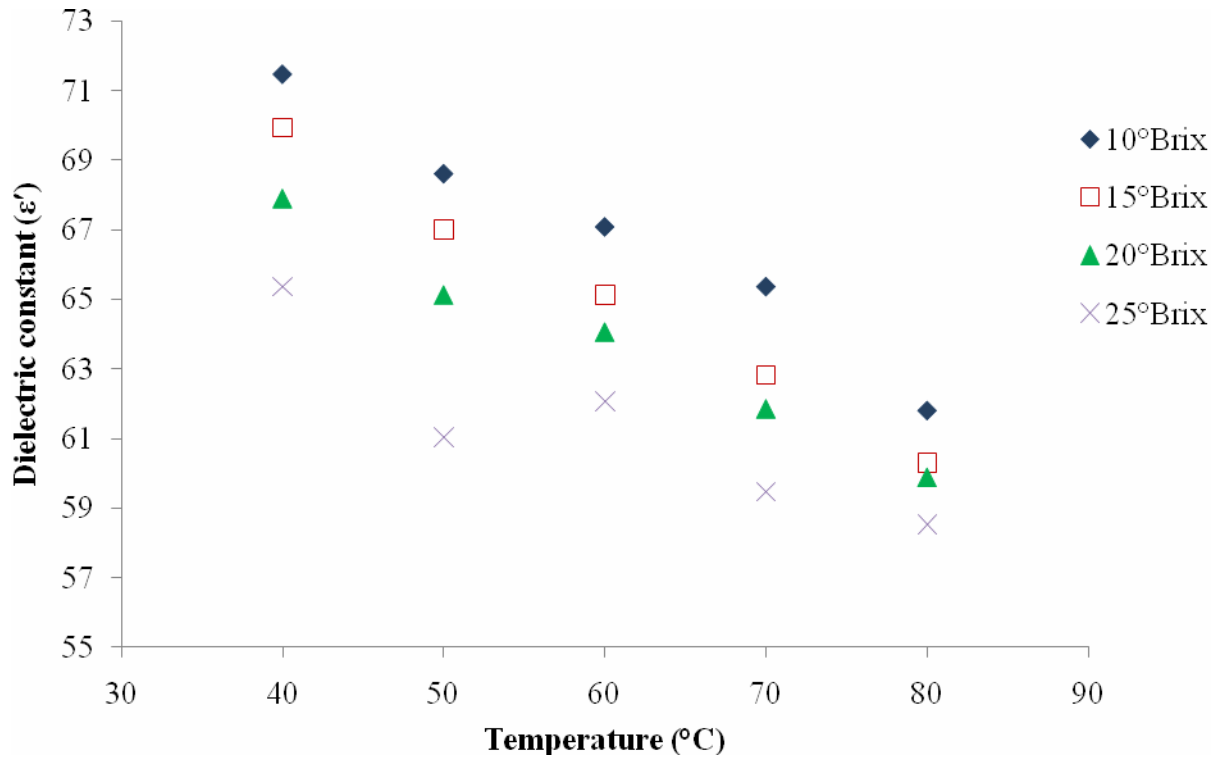
4.4 ผลการศึกษาสมบัติทางไดอิเล็กทริกของเนื้อมะละกอตีป่น

4.4.1 ผลของความเข้มข้นและอุณหภูมิต่อค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของเนื้อมะละกอตีป่น

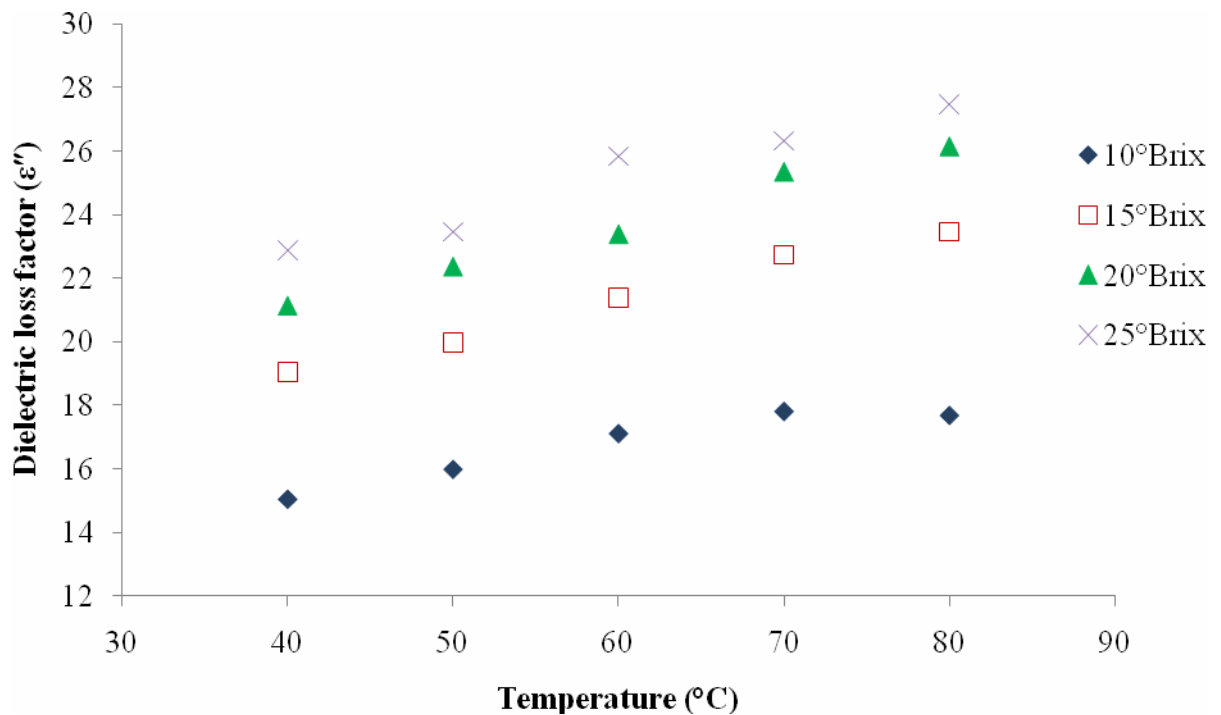
ผลของปริมาณของแข็งที่ละลายได้ และอุณหภูมิของเนื้อมะละกอตีป่น ในช่วงความเข้มข้น 10, 15, 20 และ 25 °Brix และในช่วงอุณหภูมิ 40, 50, 60, 70, และ 80°C พบว่าค่าคงที่ไดอิเล็กทริกมีค่าลดลงเมื่อปริมาณของแข็งที่ละลายได้เพิ่มขึ้นและอุณหภูมิเพิ่มขึ้น ณ ความถี่ 915 และ 2450 MHz (รูปที่ 4.15-4.16)

4.4.2 ผลของความเข้มข้นและอุณหภูมิต่อค่าแฟกเตอร์การสูญเสียไดอิเล็กทริกของเนื้อมะละกอตีป่น

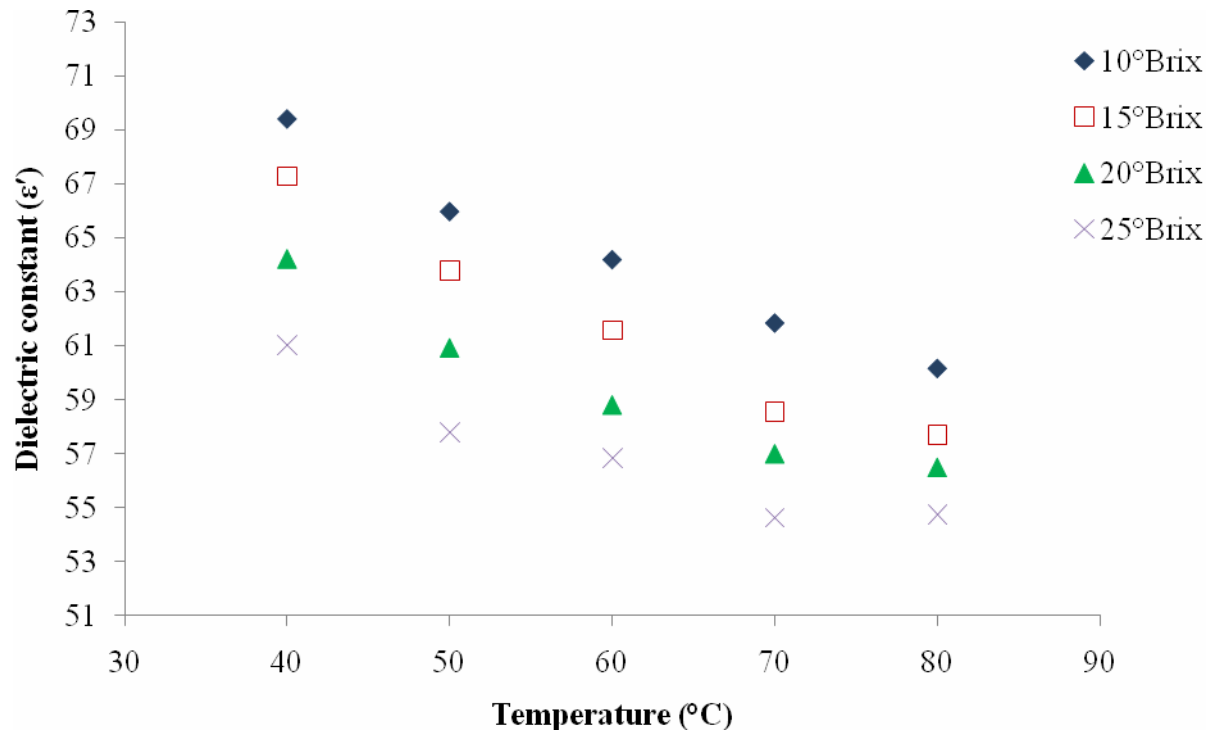
ผลของปริมาณของแข็งที่ละลายได้ และอุณหภูมิของเนื้อมะละกอตีป่น ในช่วงความเข้มข้น 10, 15, 20 และ 25 °Brix และในช่วงอุณหภูมิ 40, 50, 60, 70, และ 80°C พบว่าค่าแฟกเตอร์การสูญเสียไดอิเล็กทริกมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณของแข็งที่ละลายได้เพิ่มขึ้นและอุณหภูมิเพิ่มขึ้น ณ ความถี่ 915 MHz แต่ที่ความถี่ 2450 MHz ผลของอุณหภูมิไม่มีแนวโน้มที่ชัดเจน (รูปที่ 4.17-4.18)



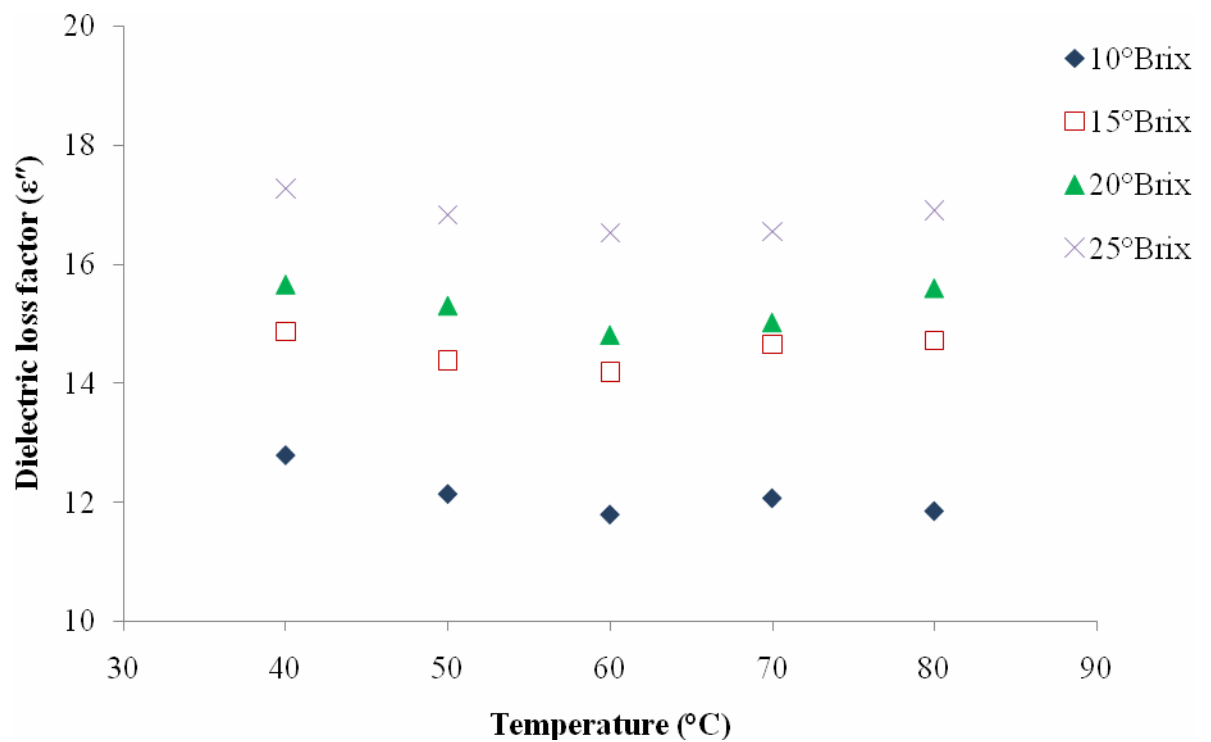
รูปที่ 4.15 ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของเนื้อมะละกอดีปน ในช่วงความเข้มข้น 10, 15, 20 และ 25 °Brix และในช่วงอุณหภูมิ 40, 50, 60, 70, และ 80°C ณ ความถี่ 915 MHz



รูปที่ 4.16 ค่าแฟกเตอร์การสูญเสียไดอิเล็กทริกของเนื้อมะละกอดีปน ในช่วงความเข้มข้น 10, 15, 20 และ 25 °Brix และในช่วงอุณหภูมิ 40, 50, 60, 70, และ 80°C ณ ความถี่ 915 MHz



รูปที่ 4.17 ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของเนื้อมะละกอตีป่น ในช่วงความเข้มข้น 10, 15, 20 และ 25 °Brix และในช่วงอุณหภูมิ 40, 50, 60, 70, และ 80°C ณ ความถี่ 2450 MHz



รูปที่ 4.18 ค่าแฟกเตอร์การสูญเสียไดอิเล็กตริกของเนื้อมะละกอตีป่น ในช่วงความเข้มข้น 10, 15, 20 และ 25 °Brix และในช่วงอุณหภูมิ 40, 50, 60, 70, และ 80°C ณ ความถี่ 2450 MHz

5. สรุปผลการทดลอง

5.1 สมบัติทางกายภาพและความร้อนของเนื้อมะละกอดีป็น

เนื้อมะละกอดีป็นที่ความเข้มข้น 10, 15, 20 และ 25°Brix ในช่วงอุณหภูมิ 40, 50, 60, 70 และ 80°C มีความหนาแน่นเฉลี่ยอยู่ในช่วง 1014.61 - 1098.86 kg/m³ และมีความร้อนจำเพาะเฉลี่ยในช่วง 3.652 - 4.092 kJ/kg°C ส่วนค่าการนำความร้อน และค่าการแพร่ กระจายความร้อนมีค่าเฉลี่ยในช่วง 0.452 - 0.6485 W/m°C และ 1.127×10^{-7} - 1.650×10^{-7} m²/s ตามลำดับ ค่าความหนาแน่นจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นเพิ่มขึ้นเพราะน้ำมีค่าความหนาแน่นต่ำกว่าองค์ประกอบทางเคมีอื่นๆ ของอาหาร (ยกเว้นไขมัน) แต่ค่าความหนาแน่นจะมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น เนื่องจากเนื้อมะละกอดีป็นเกิดการขยายตัวเมื่อได้รับความร้อน ซึ่งค่าความหนาแน่นจะมีลักษณะตรงข้ามกับสมบัติทางความร้อน คือ ค่าความร้อนจำเพาะ ค่าการนำความร้อน และค่าการแพร่กระจายความร้อนจะมีค่าลดลงเมื่อความเข้มข้นเพิ่มขึ้น แต่ค่าความร้อนจำเพาะ ค่าการนำความร้อน และค่าการแพร่กระจายความร้อนจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น สมการทำนายทางคณิตศาสตร์ที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติทางกายภาพและความร้อนของเนื้อมะละกอดีป็นกับความเข้มข้นและอุณหภูมิ สามารถทำนายค่าสมบัติทางกายภาพและทางความร้อนได้ใกล้เคียงกับค่าทดลอง

5.2 จลนพลศาสตร์การเปลี่ยนแปลงสีของเนื้อมะละกอดีป็นที่ผ่านกระบวนการระเหยน้ำแบบต่างๆ

การเปลี่ยนแปลงของสีของเนื้อมะละกอดีป็นระหว่างกระบวนการระเหยน้ำแบบวิธีต่างๆ พบว่าการระเหยน้ำออกจากมะละกอดีป็นจากความเข้มข้น 10 °Brix เป็น 25 °Brix ด้วยการให้ความร้อนแบบไมโครเวฟใช้เวลาในการระเหยน้ำสั้นกว่าวิธีการระเหยน้ำแบบภายใต้ความดันสุญญากาศ และแบบวิธีดั้งเดิมตามลำดับ และพบว่า ค่าการเปลี่ยนแปลงสีโดยรวม (ΔE) เปลี่ยนแปลงตามจลนพลศาสตร์อันดับศูนย์ แบบผสม และอันดับศูนย์ สำหรับการระเหยน้ำแบบดั้งเดิม แบบภายใต้ความดันสุญญากาศ และแบบการให้ความร้อนแบบไมโครเวฟตามลำดับ จากผลที่เกิดขึ้นแสดงว่าการระเหยน้ำแบบไมโครเวฟประสบความสำเร็จที่จะนำไปใช้ในกระบวนการผลิตมะละกอดีป็นเข้มข้น และวิธีนี้ยังเป็นกระบวนการผลิตที่ดีกว่าการระเหยน้ำแบบภายใต้ความดันสุญญากาศและแบบดั้งเดิม เนื่องจากใช้เวลาในการระเหยน้ำออกสั้นกว่าและการเปลี่ยนแปลงสีโดยรวมของผลิตภัณฑ์น้อยกว่า

5.3 สมบัติทางรีโอโลยีของเนื้อมะละกอดีป็น

จากการทดลองพบว่าสมการของHerschel – Bulkley สามารถอธิบายพฤติกรรมทางการไหลของมะละกอดีป็นที่มีปริมาณของแข็งที่ละลายได้เท่ากับ 10, 15, 20 และ 25 °Brix ณ อุณหภูมิ 5,

20, 35, 50, 65 และ 80 °C ได้ดี เมื่ออัตราเนื้อมะละกอตีปั่นมีพฤติกรรมการไหลแบบซูโดพลาสติกที่มีความเค้นคลาก นอกจากนี้พบว่าความหนืดปรากฏเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณของแข็งที่ละลายได้เพิ่มขึ้นและอุณหภูมิลดลง

5.4 สมบัติทางไดอิเล็กทริกของเนื้อมะละกอตีปั่น

ผลของปริมาณของแข็งที่ละลายได้ และอุณหภูมิของเนื้อมะละกอตีปั่น ในช่วงความเข้มข้น 10, 15, 20 และ 25 °Brix และในช่วงอุณหภูมิ 40, 50, 60, 70, และ 80°C พบว่าค่าคงที่ไดอิเล็กทริกมีค่าลดลงเมื่อปริมาณของแข็งที่ละลายได้เพิ่มขึ้นและอุณหภูมิเพิ่มขึ้น ณ ความถี่ 915 และ 2450 MHz ในขณะที่ค่าแฟกเตอร์การสูญเสียไดอิเล็กทริกมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณของแข็งที่ละลายได้เพิ่มขึ้นและอุณหภูมิเพิ่มขึ้น ณ ความถี่ 915 MHz แต่ที่ความถี่ 2450 MHz ผลของอุณหภูมิไม่มีแนวโน้มที่ชัดเจน

เอกสารอ้างอิง

วิชัย โหมสิทธิ์ตัน และคณาจารย์ภาควิชาโรคพืช คณะเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2544, มะละกอและโรคใบด่างวงแหวน, ศูนย์พันธุ์วิศวกรรมและเทคโนโลยีชีวภาพแห่งชาติ, กรุงเทพฯ, หน้า 37-60.

AbuDagga, Y. and Kolbe, E. 1997. Thermophysical Properties of Surimi Paste at Cooking Temperature. *Journal of Food Engineering*. 32:325 -337.

Ahmed J., and Ramaswamy H.S. 2006. Viscoelastic properties of sweet potato puree infant food. *Journal of Food Engineering*. 74(3):376-382.

Ahmed, J.; Shivhare, U.S. and Sandhu, K.S. 2002. Thermal degradation kinetics of carotenoids and visual color of papaya puree. *Journal of Food Science*. 67(7):2692-2695.

AOAC. 1995. Official Methods of Analysis, 15th ed., The Association of Official Analytical Chemists: Gaithersburg, MD.

Augusto, P.E.D., Fakguera, V., Cristianini, M. and Ibarz, A. 2010. Rheological Behavior of Tomato Juice: Steady-State Shear and Time-Dependent Modeling. *Food and Bioprocess Technology*. DOI 10.1007/s11947-010-0472-8.

Avila, I.M.L.B. and Silva, C.L.M. 1999. Modelling kinetics of thermal degradation of color in peach puree. *Journal of Food Engineering*. 39:161-166.

Barreiro, J.A., Milano, M. and Sandoval, A.J. 1997. Kinetics of colour change of double concentrated tomato paste during thermal treatment. *Journal of Food Engineering*, 33:359-371.

Barrett, D.M., Somogyi, L. and Ramaswamy, H. 2005. Processing Fruits : Science and Technology, 2nd edition, CRC Press, Boca Raton, p. 696.

Chan Jr., H.T. 1983. "Papaya", In Handbook of Tropical Foods, Chan Jr., H.T. (Ed.), Marcel Dekker Inc., New York, pp. 469-488.

Choi, Y.; Okos, M.R. 1986. Effects of temperature and composition on the thermal properties of foods. In *Food Engineering and Process Applications (vol. 1)*; Maguer M.L., Jelen P., Eds.; Elsevier: London. pp. 93-101.

Chowdary, T. P. 1988. Thermal Properties of Mangoes. M.Eng. Thesis. Asian Institute of Technology, Bangkok.

Dutta D., Dutta A., Raychaudhuri U., and Chakraborty R. 2006 . Rheological characteristics and thermal degradation kinetics of beta-carotene in pumpkin puree. *Journal of Food Engineering*. 76(4):538-546.

Espinoza-Guevara, R.; Caro-Corrales, J.; Ordorica-Falomir, C.; Zazueta-Morales, J.; Vega-Carcia, M. and Crnin, K. 2010. Thermophysical properties of pulp and rind of papaya cv. Maradol. *International Journal of Food Properties*. 13:65-74.

Fasina, O.O.; Farkas, B.E. and Fleming, H.P. 2003. Thermal and dielectric properties of sweetpotato puree. *International Journal of Food Properties*. 6:461-472.

Food Market Exchange. 2008. Fruits Market Report : Raw Material Situation [Online], Available:www.foodmarketexchange.com/datacenter/indicate/dc_ip_mkt_fruits_th.htm [2008, June 6]

Garza, S., Ibarz, A., Pagan, J., and Giner, J. 1999. Non-enzymatic browning in peach puree during heating. *Food Research International*. 32:335-343.

Guan, D., Cheng, M., Wang, Y., and Tang, J. 2004. Dielectric properties of mashed potatoes relevant to microwave and radio-frequency pasteurization and sterilization processes. *Journal of Food Science*. 69:FEP30-37.

Ibarz, A., Pagan, J., and Garza, S. 1999. Kinetic models for color changes in pear puree during heating at relatively high temperatures. *Journal of Food Engineering*. 39:415-422.

Kim, S.S. and Bhowmik, S.R. 1997. Thermophysical properties of plain yogurt as a function of moisture content. *Journal of Food Engineering*. 32:109-124.

Kurozawa, L.E.; El-Aouar, A.A.; Simões, M.R.; Azoubel, P.M.; and Murr, F.E.X. 2005. Determination of thermal conductivity and thermal diffusivity of papaya (*Carica papaya* L.) as a function of temperature. In *Proceedings of the 2nd Mercosur Congress on Chemical Engineering and the 4th Congress on Process Systems Engineering*.

Maceiras, R., Alvarez, E. and Cancela, M.A. 2007. Rheological properties of fruit purees: Effect of cooking. *Journal of Food Engineering*. 80(3):763-769.

Maskan, M. 2006. Production of pomegranate (*Punica granatum* L.) juice concentrate by various heating methods: color degradation and kinetics. *Journal of Food Engineering*. 72:218-224.

Mohsenin, N. N. 1980. *Thermal properties of foods and agricultural materials*; Gordon and Breach: New York. 407 pp.

Nakasone, H.Y.; and Paull, R.E. 1998. Papaya. In *Tropical Fruits*; Nakasone H.Y., Paull, R.E., Eds; CAB International: New York. 445 pp.

Nesvadba, P. and Eunson, C. 1984. Moisture and Temperature Dependence of Thermal Diffusivity of Cod Minces. *Food Technology*. 19: 585-594.

Nindo C.I., Tang J., Powers J.R., and Takhar, P.S. 2007. Rheological properties of blueberry puree for processing applications. *LWT-Food Science and Technology*. 40(2):292-299.

Nisha, P., Singhal, R.S. and Pandit, A.B. 2010. Kinetic Modelling of Colour Degradation in Tomato Puree (*Lycopersicon esculentum* L.). Food and Bioprocess Technology. DOI 10.1007/s11947-009-0300-1.

Nithatkusol, A. 1998. The development of apparatus for determination of thermal conductivities of nonfrozen food by the line heat source method; Master's degree thesis. King Mongkut's University of Technology Thonburi. 116 pp.

Pereira, N. R., Marsaioli, A.J. and Ahrne, L.M. 2007. "Effect of microwave power, air velocity and temperature on the final drying of osmotically dehydrated bananas". Journal of Food Engineering. 81:79-87.

Philippine Herbal Medicine Site. 2006. Papaya Fruit Nutrition Facts [Online], Available: <http://herbal-medicine.philsite.net/papaya.htm>, [2006, August 3]

Priyanto, S. M. 1992. Thermal Properties of Melon. M.Eng. Thesis. Asian Institute of Technology, Bangkok.

Rahman, S. 1995. Food properties handbook. CRC Press: Boca Raton. 500 pp.

Ramos, A.M. and Ibarz M. 1998. Density of Juice and Fruit Puree as a Function of Soluble Solids Content and Temperature. Journal of Food Engineering. 35:57 -63.

Ramteke, R.S., Singh, N.L., Rekha, M.N. and Eipeson, W.E. 1993. Method for Concentration of Fruit Juice : A Critical Evaluation. Journal of Food Science and Technology. 30(6): 391-402.

Rao, M.A., Cooley, H.J., and Vitali, A.A. 1984. Flow properties of concentrated fruit juices at low temperatures. Food Technol. 38(3): 113-119.

Rao, M.A., Rizvi, S.S.H., and Datta, A.K.. 2005. Engineering Properties of Foods. 3rd Edition. Taylor&Francis.

Rapusas, R.S. and Driscoll, R.H. 1995. Thermophysical properties of fresh and dried white onion slices. *Journal of Food Engineering*. 24:149-164.

Rodrigues, A.C.C., Cunha R.L. and Hubinger, M.D. 2003. "Rheological properties and colour evaluation of papaya during osmotic dehydration processing". *Journal of Food Engineering*. 59: 129-135.

Singh, R. P.; Heldman, D. R. 1981. *Food Process Engineering* (2nd ed.); AVI Publishing Company: Connecticut.

Sipaghioglu, O, Barringer SA. 2003. Dielectric properties of vegetables and fruits as a function of temperature, ash and moisture content. *Journal of Food Science* 68(1):234-9.

Sweat, V.E. 1995. Thermal properties of foods. In *Engineering properties of foods* (2nd ed.); Rao, M.A., Rizvi S.S.H., Eds.; Marcel Dekker: New York. 126pp.

Sweat, V.E.; Haugh, C.G. 1974. Thermal conductivity probe for small food samples. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*. 17(1):56-58.

Tansakul, A. and Chaisawang, P. 2006. Thermophysical properties of coconut milk. *Journal of Food Engineering*. 73:276-280.

Tansakul, A. and Lumyong, R. 2008. Thermal properties of straw mushroom. *Journal of Food Engineering*. 87:91-98.

Thijssen, H.A.C. 1975. "Current Development in the Freeze Concentration of Liquid Foods", In *Freeze Drying and Advanced Food Technology*, Goldblith, S.A., Rey, L. and Rothmayr, W.W. (Eds.), Academic Press, London. pp. 481-501.

Tiwari, B.K., O' Donnell, C.P., Muthukumarappan, K. and Cullen, P.J. 2009. Effect of low temperature sonication on orange juice quality parameters using response surface methodology. *Food Bioprocess Technology*. 2:109-114.

Tsen, J.-H.; King, V.A.-E. 2002. Density of Banana Puree as a Function of Soluble Solids Concentration and Temperature. *Journal of Food Engineering*. 55:305 -308.

Vagenas, G.K., Drouzas, A.E., Marinos-Kouris, D. and Saravacos, G.D. 1990. "Predictive Equations for Thermophysical Properties of Plant Foods", In *Engineering and Food*; Vol.1, Spiess, W. E. L. and Schubert, H.(Eds.), Elsevier Applied Science Publishers, New York. pp. 399-407.

Weemaes, C.A., Ooms, V., Van Loey, A.M., and Hendrickx, M.E. 1999. Kinetics of chlorophyll degradation and colour loss in heated broccoli juice. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 47:2404-2409.

Output ที่ได้จากโครงการ

ผลงานวิจัยที่ตีพิมพ์ในวารสารวิชาการระดับนานาชาติ (หากยังไม่มี ให้ระบุชื่อเรื่องและชื่อวารสารนานาชาติที่คาดว่าจะตีพิมพ์ได้ และจะตีพิมพ์ได้เมื่อใด)

1) Tansakul, A., Kantrong, H, Saengrayup, R. and Sura, P. (in press). Thermophysical Properties of Papaya Puree. International Journal of Food Properties. doi: 10.1080/10942912.2010.513467 (ดังปรากฏในภาคผนวก)

2) Tansakul, A. and Korakot, I. (in preparation). Color Degradation Kinetics of Papaya Puree undergoing Different Evaporation Methods. International Journal of Food Properties.

การไปเสนอผลงานในที่ประชุมวิชาการระดับนานาชาติ (ดังปรากฏในภาคผนวก)

1) Tansakul, A., Kantrong, H, Saengrayup, R. and Sura, P. 2009. Thermophysical Properties of Papaya Puree. Prodeedings of the 4th International conference on Innovations in Food Processing Technology and Engineering. January 19-20. Asian Institute of Technology. Bangkok.

2) Korakot, I. and Tansakul, A. 2009. Color Degradation Kinetics of Papaya Puree undergoing Different Evaporation Methods. Prodeedings of the 10th International Agricultural Engineering Conference. December 7-10. Asian Institute of Technology. Bangkok.

การผลิตนักศึกษาปริญญาโท

ชื่อ-นามสกุล	หัวข้อวิทยานิพนธ์
นางสาวกณทิลา สุระ	สมบัติทางกายภาพและความร้อนของเนื้อมะละกอดีปั่น
นายกรกต อธิธิวิทยาวาทย์	จลนพลศาสตร์การเปลี่ยนแปลงของสีและเบต้าแคโรทีนของเนื้อมะละกอดีปั่นที่ผ่านกระบวนการทำเข้มข้นแบบต่างๆ
นางสาวนวลพรรณ ธีรจิตโต	สมบัติทางไดอิเล็กทริกและสมบัติทางการไหลของเนื้อมะละกอดีปั่น

การพัฒนาการเรียนการสอนในระดับปริญญาโทและเอก

วิชา FDE 622 สมบัติทางกายภาพและวิศวกรรมของอาหารและวัสดุชีวภาพ

ภาคผนวก

Thermophysical Properties of Papaya Puree

Authors: Ampawan



Tansakul^a; Hataichanok Kantrong^a; Rattapon Saengrayup^a; Panthila Sura^a

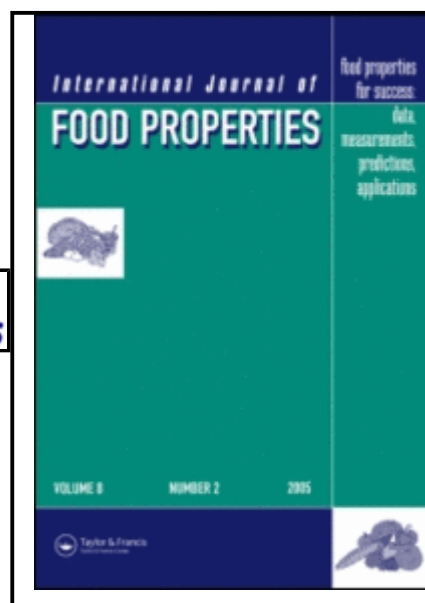
Affiliation: ^a Department of Food Engineering,
Faculty of Engineering, King
Mongkut's University of Technology
Thonburi, Bangkok, Thailand

DOI: 10.1080/10942912.2010.513467

Published in: International Journal of Food Properties

Publication Frequency: 6 issues per year

Accepted uncorrected manuscript posted online: 19 April 2011



View Related Articles

To cite this Article: Tansakul, Ampawan , Kantrong, Hataichanok , Saengrayup, Rattapon and Sura, Panthila (2011) 'Thermophysical Properties of Papaya Puree', International Journal of Food Properties, 1, doi: 10.1080/10942912.2010.513467, First posted on: 19 April 2011 (iFirst)

Disclaimer: *This is a full text version of an unedited manuscript that has been accepted for publication. As a service to authors and researchers we are providing this version of the accepted manuscript (AM). Copyediting, typesetting, and review of the resulting proof will be undertaken on this manuscript before final publication of the Version of Record (VoR). During production and pre-press, errors may be discovered which could affect the content, and all legal disclaimers that apply to the journal relate to this version also.*

Abstract

The effects of soluble solids content and temperature on thermal properties of papaya puree were studied. Density and specific heat were measured using pycnometer and differential scanning calorimeter (DSC), respectively while thermal conductivity was measured using line heat source probe. Thermal diffusivity was then calculated from the experimental results of the specific heat, thermal conductivity and density. Thermal properties of papaya puree was experimentally determined within a soluble solids content range of 10 to 25 °Brix and temperature between 40 and 80°C. The density, specific heat, thermal conductivity and thermal diffusivity of papaya puree were found to be in the ranges of 1014.6 to 1098.9 kg/m³, 3.652 to 4.092 kJ/kg °C, 0.452 to 0.685 W/m °C and 1.127×10⁻⁷ to 1.650×10⁻⁷ m²/s, respectively. Moreover, the empirical

models for each property as a function of soluble solids content and temperature were obtained.

Keywords: Papaya puree; Density; Specific heat; Thermal conductivity; Thermal diffusivity

Introduction

Papaya (*Carica papaya* L.) is an important fruit of the tropical and subtropical regions of the world including Thailand. Nutritionally, it is a good source of provitamin A, ascorbic acid, some B complex vitamins and many phytochemicals having antioxidant properties. Papaya is consumed fresh and processed into various forms such as dehydrated slices, chunk and slices for tropical fruit salad and cocktail, or processed into puree which is an intermediate papaya products and is thermally processed and stored for the production of beverage, ice cream, jam, jelly, juice and nectar.[1-2] Papaya is considered as one of the climacteric fruits, which can be ripened after harvest. Chemical changes, i.e., soluble solids content, pH and acidity in papaya are indicators to identify and evaluate its degree of ripeness. The chemical changes in ripened papaya involve a decrease in acidity and an increase in soluble solids content. The degree of ripeness of papaya causes different food compositions which consequently affects thermal properties.

Knowledge of thermal properties of food, i.e., thermal conductivity, specific heat, and thermal diffusivity, and how these properties change during processing are necessary for proper designing and development of the equipment and processes.[3] The substantial changes of these properties strongly depend on the temperature, chemical composition and the physical structure of food. General models for predicting thermal properties of each specific food material based on its basic components (fat, protein, water, carbohydrate, fiber, and ash) and temperature was proposed by Choi and Okos [4]. The experimental data on thermal properties of an individual food material are needed for model development. It is expected that empirical models of thermal properties for food materials would give more specific and accurate predictions.[5-8]

Many literatures related to thermal properties of several food products are available.[9] Kurozawa et al.[10] reported the thermal conductivity and the thermal diffusivity of fresh ripe papaya in the temperature range of 20-40 °C. Espinoza-Guevara et al.[11] observed the thermophysical properties of pulp and rind of papaya (*Carica papaya* L., cv. *Maradol*) in the temperature range of 20-60 °C. Fasina et al.[12] reported thermal properties of sweetpotato puree at temperature of 5-80°C. However, there is no information on thermal properties of papaya puree as a function of both soluble solids content and temperature. Thermal properties of papaya puree would be necessary for designing equipment and evaporating process during the value-added utilization of papaya puree. Thus, the objectives of this research were to investigate the effects of soluble solids content within the concentration range of 10 to 25°Brix and temperature between 40 and 80°C on thermal properties of papaya puree and to propose an empirical correlation relating each thermal property as a function of soluble solids content and temperature.

MATERIALS AND METHODS

Sample Preparation

Each fresh ripe papaya (*Carica papaya* L., cv. Kaekdum) from the local market was washed with tap water to remove pesticides and contaminated substances. Then, papaya was peeled, halved, deseeded and cut into small pieces. Papaya puree was prepared from papaya flesh using a pilot plant crushing machine fitted with a screen of 1.5 mm opening size and operated at 100 rpm. Initial concentration of papaya puree was about 10 °Brix. Then, 250 g of papaya puree obtained was concentrated in a rotary evaporator (Resona Model Labo Rata S-300, Germany) at vacuum pressure of 80 kPa and water bath temperature of 70 °C to various soluble solids contents of 15, 20 and 25 °Brix. The evaporation time required to concentrate papaya puree to 15, 20 and 25 °Brix were 20, 28 and 39 minutes, respectively. The papaya puree samples were finally packed into polyethylene bottles and stored in the refrigerator at 4°C for experimental measurement.

Determination of Physicochemical Characteristics

Proximate compositions including fat, moisture content, protein, fiber and ash of the single strength papaya puree samples were first analyzed according to the Association of Official Analytical Chemists method.[13] The moisture content was determined by the oven drying method at 70 °C for 24 h. The protein content, the fat content, and the fiber content were determined by the Kjeldahl method, the Soxhlet method, and acid and alkali digestion, respectively. For ash content, the sample was first dried in an oven at 105 °C before being transferred to a muffle furnace at 550 °C until a white or light gray ash obtained. In addition, soluble solids content, pH and acidity were measured by refractometer (Atago, Japan), pH meter (Schott Gerate, Model CG841, Hofheim, West Germany) and titration, respectively. For soluble solids content determination, 30 g of sample was centrifuged at 20,000 rpm for 30 minutes using a refrigerated centrifuger (Hitachi, model CR21, Japan). After centrifugation, the supernatant was poured off. The obtained supernatant was used to find soluble solids content by refractometer.

Density Measurement

Papaya puree was filled into a known weight volumetric pycnometer using a syringe. The pycnometer of 25 ml capacity had previously been calibrated with distilled water. The reference values of water density at 40, 50, 60, 70 and 80°C are 992.2, 988.1, 983.2, 977.8, and 971.8 kg/m³, respectively.[9] The temperature was controlled by a thermostatic water bath (Hato-Holten A/S Type AT 110, Denmark). Density was then calculated from the ratio of weight of sample in the pycnometer to the volume of pycnometer.

Specific Heat Measurement

Specific heat of papaya puree was measured using a Differential Scanning Calorimeter (DSC), model Pyris1 (Perkin Elmer, USA). The DSC was calibrated prior to the experiments with indium (temperature and enthalpy) as described in the DSC operating manual. Papaya puree samples (10-15 mg) with different soluble solids contents were sealed in aluminum pans and were scanned from 40 to 80°C at a heating rate of 5°C/min using an empty pan as the reference. Thermograms of sample, baseline and sapphire, as a standard with a known specific heat value, were used to determine the specific heat of sample as expressed in **Eq. (1)**. [3]

$$C_p = \frac{d}{d'} \frac{m'}{m} C_p' \quad (1)$$

where C_p and C_p' are the specific heats of sample and sapphire, respectively (kJ/kg°C), m and m' are the weights of sample and sapphire, respectively (kg), d and d' are the deflections from baseline due to sample and sapphire, respectively (mW).

Thermal Conductivity Measurement

Thermal conductivity was determined by the line-heat source probe method. A schematic diagram of the apparatus used in this research is shown in **Fig. 1**. The thermal conductivity probe was constructed according to the research of Nithatkusol. [14] To test a sample, a cylinder containing papaya puree was placed in a controlled temperature water bath (Hato-Holten A/S Type AT 110, Denmark). The sample was then allowed to equilibrate to the desired temperature. After equilibration, the thermal conductivity probe was inserted into the sample and the power for the heater wire in the probe was turned on, resulting in a constant electric current through the heater wire. A digital multi-meter was used to monitor the current. Power levels of 9-10.4 W/m were used to raise the temperature of the probe to about 5.8-10.1 °C. Time and temperature data were recorded by a datalogger (Hybrid Temperature Recorder, Yokogawa DR230, Japan) every 0.5 second for a total duration of 1 minute. The datalogger contains an accuracy of $\pm(0.05\%$ of reading + 2 digits) and a resolution of 0.1 °C.

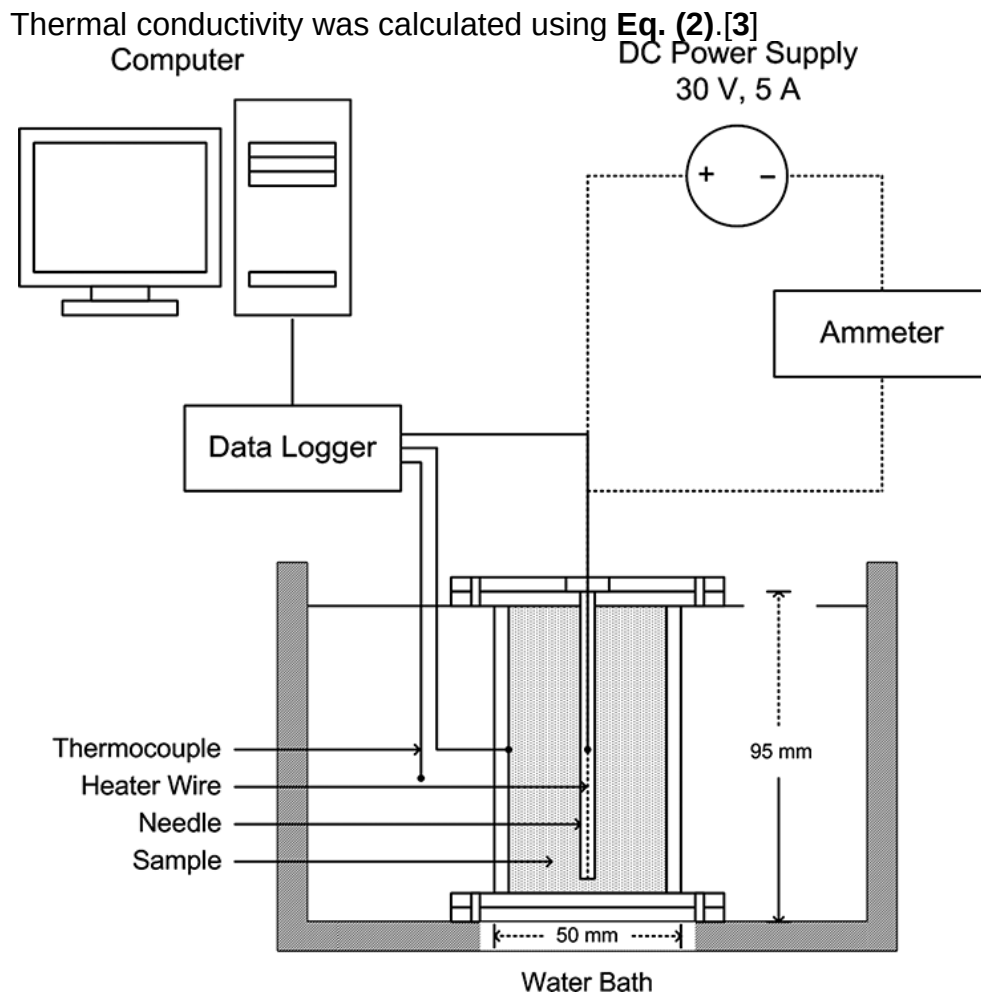


Fig. 1 Thermal conductivity apparatus.

$$k = \frac{Q \ln(t_2/t_1)}{4\pi(T_2 - T_1)} \quad (2)$$

where k is thermal conductivity ($\text{W/m}^\circ\text{C}$), Q is heat input per unit length of the line heat source (W/m), T is temperature ($^\circ\text{C}$) and t is time (s). The temperature versus $\ln$ (time) curve converges toward a straight line as time increases from 5 to 60 s. The range of temperature rise (ΔT) were from 2.83 to 4.19 $^\circ\text{C}$. Slopes with R^2 values of more than 0.990 were used in the thermal conductivity determination.

Before measuring the samples, the probe was calibrated with 0.5 % agar gel and glycerine. The expected values of 0.5 % agar gel and glycerine at 30 $^\circ\text{C}$ was 0.628 and 0.289 $\text{W/m}^\circ\text{C}$, respectively.[15] The expected values of glycerine at 80 $^\circ\text{C}$ was 0.285 $\text{W/m}^\circ\text{C}$. [16] The measured average thermal conductivity (3 replications) of 0.5% agar gel at 30 $^\circ\text{C}$ was 0.625 $\pm$ 0.007 $\text{W/m}^\circ\text{C}$, an approximately 0.48 % deviation from the expected value. The measured average thermal conductivity (3 replications) of glycerine at 30 $^\circ\text{C}$ was 0.287 $\pm$ 0.008 $\text{W/m}^\circ\text{C}$, an approximately 0.69 % deviation from the expected value. The measured average thermal conductivity (3 replications) of glycerine at 80 $^\circ\text{C}$ was 0.281 $\pm$ 0.008 $\text{W/m}^\circ\text{C}$, an approximately 1.1 % deviation from the expected value.

Determination of Thermal Diffusivity

Thermal diffusivity was calculated from the experimental results of density, specific heat and thermal conductivity of papaya puree, using the relationship given in **Eq. (3)**:

$$\alpha = \frac{k}{1000\rho C_p} \quad (3)$$

where α is thermal diffusivity (m^2/s), k is thermal conductivity ($\text{W}/\text{m } ^\circ\text{C}$), C_p is specific heat ($\text{kJ}/\text{kg } ^\circ\text{C}$), and ρ is density (kg/m^3).

Experimental Design and Data Analysis

The experiments were performed at five levels of temperature as 40, 50, 60, 70 and 80°C and four levels of soluble solids content as 10, 15, 20 and 25°Brix which are common conditions applied during evaporation processes of papaya puree. A 2-factor factorial design was used in scheduling of the experiments with three replications in each case. The results were reported as an average of three replicates. Analysis of variance of the two factors and interactions were applied to the different sets of data. Least significant differences were calculated by the Fisher test ($\alpha = 0.05$). The analysis was performed using Microsoft Excel.

RESULTS AND DISCUSSION

The physicochemical characteristics of single strength papaya puree are given in **Table 1**. Among the physicochemical determinants; pH, acidity and soluble solids are very good quantifiers of ripening of the papaya fruit. In addition, the corresponding values of moisture content of papaya puree with 15, 20 and 25° Brix were 84.3, 80.0 and 75.8 g/100 g sample, respectively.

Table 1 Physicochemical characteristics of the single strength papaya puree

Total soluble solids ($^\circ\text{Brix}$)	10.10
pH	4.84
Acidity (g citric acid/ 100 mL)	0.16
Water (%)	88.41

* Calculated from [100 - water - protein - fat - fiber - ash]

Protein (%)	0.54
Fat (%)	0.06
Fiber (%)	0.66
Ash (%)	0.52
Carbohydrate* (%)	9.81

* Calculated from [100 - water - protein - fat - fiber - ash]

Density

The average density values of papaya puree with various soluble solids contents at different temperatures varied in the range of 1014.61 to 1098.86 kg/m³. It was observed from **Fig. 2** and **Table 2** that density of papaya puree decreased with increasing temperature but increased with increasing soluble solids content. Similar response has been reported for banana puree[17], Brazilian orange juice [18], and apple and quince puree[19]. The density of papaya puree decreased with increasing temperature is due to thermal expansion. While the density of papaya puree increased with increasing soluble solids content (decreasing moisture content) because the density of water is lower than that of all other components except for fat.[20] From statistical analysis, both soluble solids content and temperature were found to have significant effects on density of papaya puree at a 95% confidence level. Multiple regression of density as a function of soluble solids content (B) and temperature (T) was developed as shown in **Eq. (4)**. The suitability of the fitted model was evaluated by high coefficient of determination (R^2) and low standard error of prediction (SE) which is the standard deviation of the residuals.

Table 2 Density of papaya puree at different soluble solids contents and temperatures

Temperature (°C)	Density (kg/m ³)			
	10 °Brix	15 °Brix	20 °Brix	25 °Brix
40	1,035.5±1.3 ^{A,a}	1,059.2±1.2 ^{B,a}	1,081.7±1.2 ^{Ca}	1,098.9±0.9 ^{D,a}
50	1,032.5±1.3 ^{A,b}	1,055.1±1.1 ^{B,b}	1,076.3±1.2 ^{C,b}	1,092.4±2.7 ^{D,b}
60	1,028.5±0.5 ^{A,c}	1,051.4±1.2 ^{B,c}	1,072.0±1.5 ^{C,c}	1,088.3±1.5 ^{D,c}
70	1,022.8±1.6 ^{A,d}	1,046.6±1.6 ^{B,d}	1,065.8±2.0 ^{C,d}	1,082.1±0.8 ^{D,d}
80	1,014.6±0.6 ^{A,e}	1,039.7±1.7 ^{B,e}	1,061.4±0.6 ^{C,e}	1,075.6±0.3 ^{D,e}

* -The mean values with the same capital letters are not significantly different at the same temperature.

-The mean values with the same lowercase letters are not significantly different at the same soluble solids content.

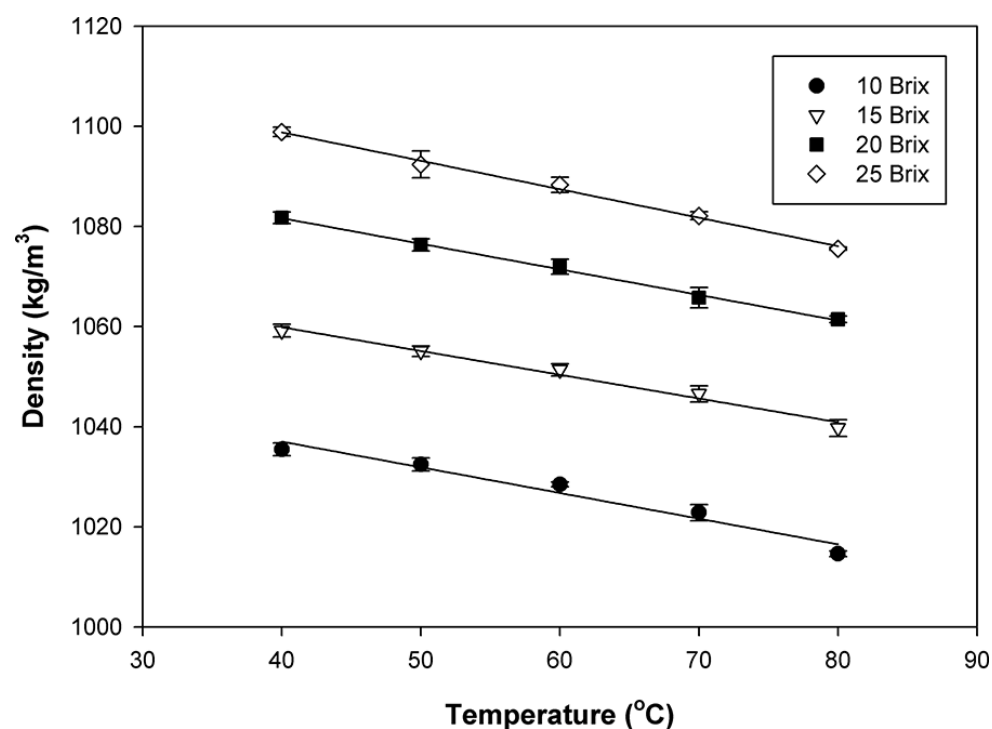


Fig. 2

Density of papaya puree at different soluble solids contents and temperatures.
 $\rho = 1019 + 4.06B - 0.517T$ (4)

($R^2 = 0.992$, SE = 2.368)

The calculated density values of papaya puree based on Eq. (5)[4], Eq. (6)[21], Eq. (7)[22] were compared with the experimental data and those from the regression model based on Eq. (4) as shown in Fig. 3. Within the range of the study, all predictive equations had similar relationships that increasing soluble solids content resulted in an increase in density whereas increasing temperature caused a decrease in density. The different values obtained from those predictive equations were variability in the magnitude because those equations were developed from the different types of food products.

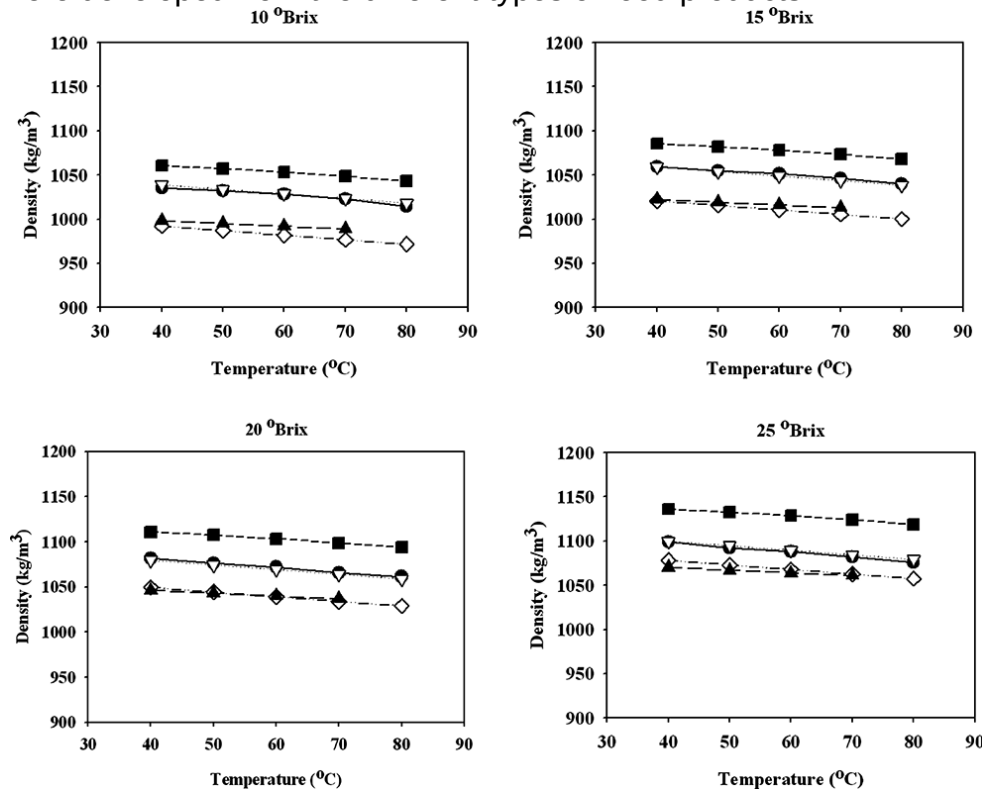


Fig. 3 Experimental data and predicted density of 10-25 °Brix papaya puree in the temperature range of 40 to 80°C.

Specific Heat

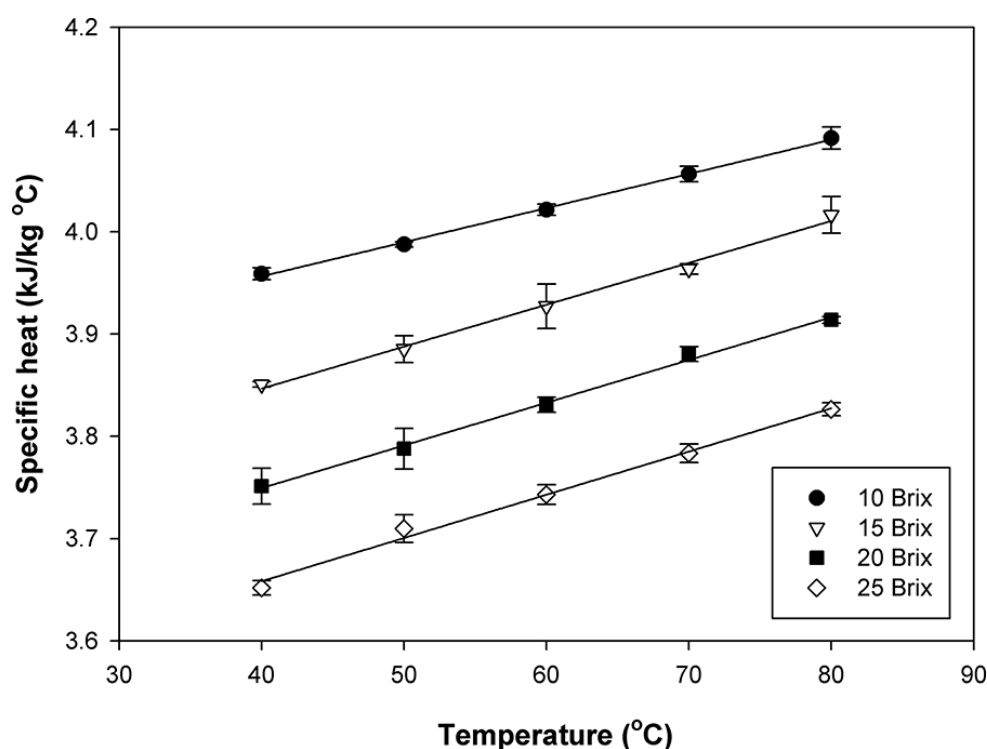
The average specific heat values of papaya puree with various soluble solids contents at different temperatures varied in the range of 3.652 to 4.092 kJ/kg °C. The experimental data obtained for the specific heat of papaya puree at the studied soluble solids contents and temperatures are shown in Fig. 4 and Table 3. Specific heat of papaya puree was found to decrease with increasing soluble solids contents but increased with increasing temperature. Similar response has been reported for Brazilian orange juice.[18] An increase in soluble solids content means a decrease in moisture content which in turn decreases the specific heat of papaya puree due to the relatively high specific heat of water.[3] Both soluble solids content and temperature were found to have significant effects on specific heat of papaya puree at a 95% confidence level. Multiple regression of specific heat as a function of soluble solids content (B) and temperature (T) was obtained as shown in Eq. (8).

Table 3 Specific heat of papaya puree at different soluble solids contents and temperatures

Temperature (°C)	Specific heat (kJ/kg·°C)			
	10 °Brix	15 °Brix	20 °Brix	25 °Brix
40	3.959±0.006 ^{A,a}	3.851±0.003 ^{B,a}	3.751±0.018 ^{C,a}	3.652±0.007 ^{D,a}
50	3.988±0.003 ^{A,b}	3.855±0.013 ^{B,b}	3.788±0.020 ^{C,b}	3.710±0.013 ^{D,b}
60	4.022±0.005 ^{A,c}	3.927±0.022 ^{B,c}	3.831±0.007 ^{C,c}	3.743±0.010 ^{D,c}
70	4.056±0.008 ^{A,d}	3.964±0.005 ^{B,d}	3.880±0.007 ^{C,d}	3.783±0.009 ^{D,d}
80	4.092±0.011 ^{A,e}	4.017±0.018 ^{B,e}	3.914±0.003 ^{C,e}	3.827±0.006 ^{D,e}

* -The mean values with the same capital letters are not significantly different at the same temperature.

-The mean values with the same lowercase letters are not significantly different at the same soluble solids content.

**Fig. 4**

Specific heat of papaya puree at different soluble solids contents and

temperatures.

$$C_p = 3.97 - 0.019B + 0.004T \quad (8)$$

$$(R^2 = 0.997, SE = 0.007)$$

The calculated specific heat values of papaya puree based on Eq. (9) [4], Eq. (3) [21], Eq.(3) [22] and the regression model based on Eq. (8) were compared with the experimental data as shown in Fig. 5. All predictive equations had similar trend that the specific heat decreased with soluble solids content and increased with temperature.

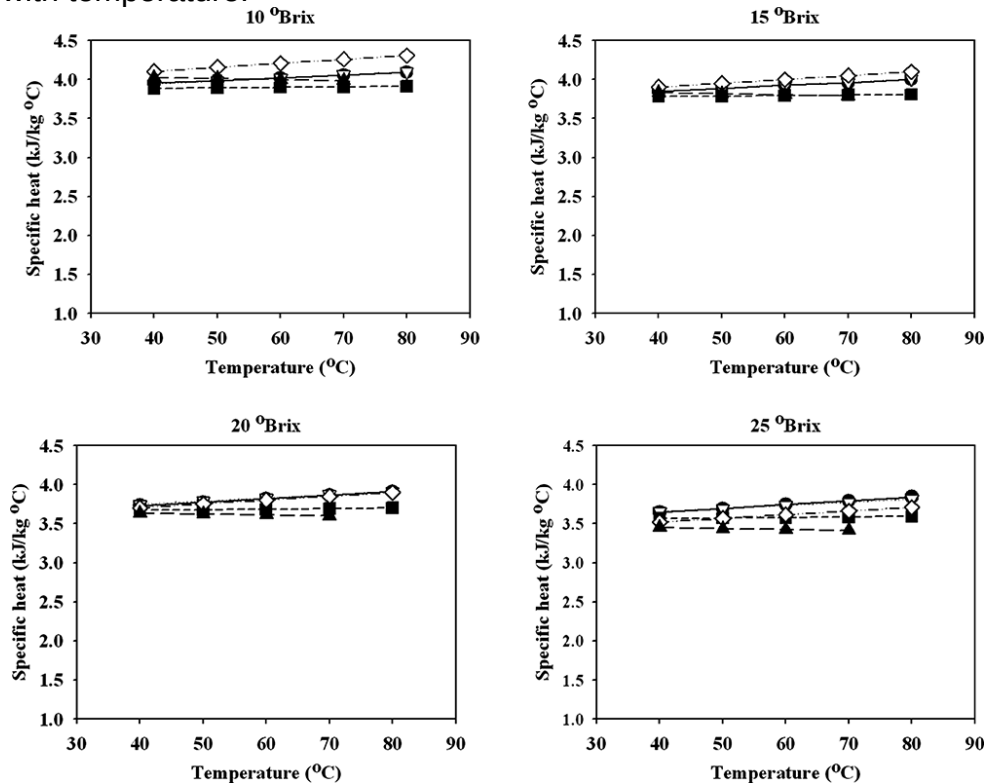


Fig. 5 Experimental data and predicted specific heat of 10-25 °Brix papaya puree in the temperature range of 40 to 80°C.

Thermal Conductivity

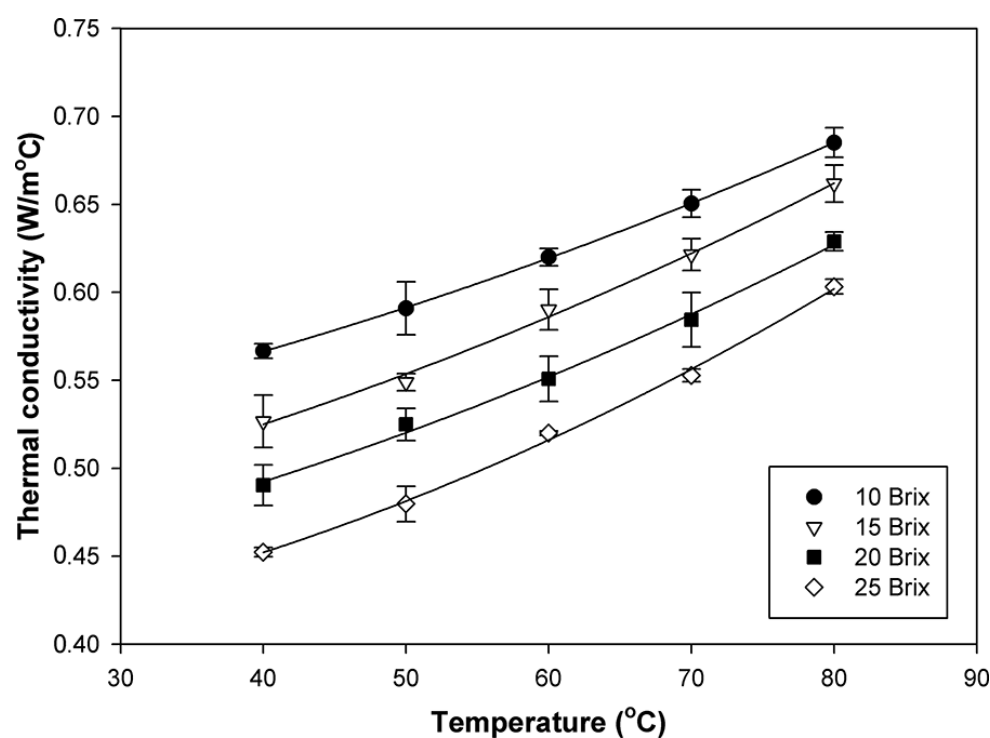
The thermal conductivity of papaya puree with various soluble solids contents at different temperatures ranged from 0.452 to 0.685 W/m °C as shown in Fig. 6 and Table 4. An increase in temperature resulted in an increase in thermal conductivity whereas an increase in soluble solids content resulted in a decrease in thermal conductivity. Similar response has been reported for Brazilian orange juice.[18] Among all basic components, i.e., water, protein, fat, carbohydrate, fiber and ash, the thermal conductivity of water is the highest.[9] Therefore, as the moisture content decreased due to concentration, the thermal conductivity decreased accordingly. In addition, the thermal conductivity of water is higher at higher temperature.[9] Thus, as the temperature increased, the thermal conductivity of papaya puree increased. Both the soluble solids content and temperature were found to have significant effects on thermal conductivity of papaya puree at a 95% confidence level. Multiple regression of thermal conductivity as a function of soluble solids content (B) and temperature (T) was obtained as shown in Eq. (10).

Table 4 Thermal conductivity of papaya puree at different soluble solids contents and temperatures

Temperature (°C)	Thermal conductivity (W/m·°C)			
	10 °Brix	15 °Brix	20 °Brix	25 °Brix
40	0.567±0.004 ^{D,a}	0.527±0.015 ^{C,a}	0.490±0.012 ^{B,a}	0.452±0.003 ^{A,a}
50	0.591±0.015 ^{D,b}	0.549±0.005 ^{C,b}	0.525±0.009 ^{B,b}	0.480±0.010 ^{A,b}
60	0.620±0.005 ^{D,c}	0.590±0.012 ^{C,c}	0.551±0.013 ^{B,c}	0.520±0.001 ^{A,c}
70	0.651±0.008 ^{D,d}	0.621±0.009 ^{C,d}	0.584±0.015 ^{B,d}	0.553±0.004 ^{A,d}
80	0.685±0.008 ^{D,e}	0.662±0.011 ^{C,e}	0.629±0.005 ^{B,e}	0.603±0.004 ^{A,e}

* -The mean values with the same capital letters are not significantly different at the same temperature.

-The mean values with the same lowercase letters are not significantly different at the same soluble solids content.

**Fig. 6**

Thermal conductivity of papaya puree at different soluble solids contents and

temperatures.

$$k = 0.557 - 6.74 \times 10^{-3}B + 9.2 \times 10^{-4}T + 2.0 \times 10^{-5}T^2 \quad (10)$$

$$(R^2 = 0.994, SE = 0.005)$$

The calculated thermal conductivity values of papaya puree based on Eq. (11) [4], Eq. (12) [21], Eq. (13)[22] were compared with the experimental data and those from the regression model based on Eq. (6) as shown in **Fig. 7**. Within the range of the study, all predictive equations had similar trend that increasing temperature and decreasing soluble solids content resulted in an increase in thermal conductivity. The different values obtained from those predictive equations were variability in the magnitude because those equations were developed from the different types of food products.

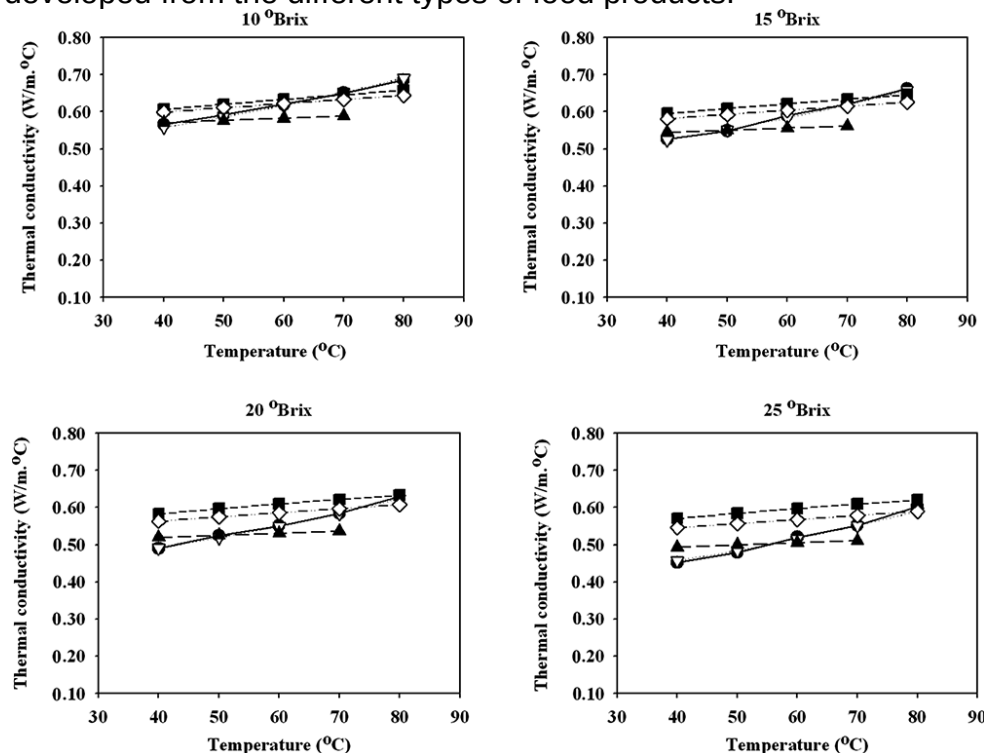


Fig. 7 Experimental data and predicted thermal conductivity of 10-25 °Brix papaya puree in the temperature range of 40 to 80°C.

Thermal Diffusivity

The calculated thermal diffusivity values of papaya puree at different soluble solids contents and temperatures are illustrated in **Fig. 8** and **Table 5**. An increase in temperature resulted in an increase in thermal diffusivity whereas an increase in soluble solid contents resulted in a decrease in thermal diffusivity. Similar response has been reported for Brazilian orange juice.[18] Among all basic components, i.e., water, protein, fat, carbohydrate, fiber and ash, the thermal diffusivity of water is the highest.[9] Therefore, as the moisture content decreased due to concentration, the thermal diffusivity decreased accordingly. In addition, the thermal diffusivity of water is higher at higher temperature.[9] Thus, as the temperature increased, the thermal diffusivity of papaya puree increased. The thermal diffusivity values of papaya puree samples varied from 1.127×10^{-7} to $1.650 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$. Both the soluble solids content and temperature were found to

have significant effects on thermal diffusivity of papaya puree at a 95% confidence level. Multiple regression of thermal diffusivity as a function of soluble solids content (B) and temperature (T) was obtained as given in **Eq. (14)**.

Table 5 Thermal diffusivity of papaya puree at different soluble solids contents and temperatures

Temperature (°C)	Thermal diffusivity ($\times 10^{-7}$ m ² /s)			
	10 °Brix	15 °Brix	20 °Brix	25 °Brix
40	1.382 $\pm$ 0.012 ^{A,a}	1.291 $\pm$ 0.038 ^{B,a}	1.208 $\pm$ 0.034 ^{C,a}	1.127 $\pm$ 0.006 ^{D,a}
50	1.435 $\pm$ 0.038 ^{A,b}	1.339 $\pm$ 0.014 ^{B,b}	1.288 $\pm$ 0.024 ^{C,b}	1.184 $\pm$ 0.018 ^{D,b}
60	1.499 $\pm$ 0.012 ^{A,c}	1.429 $\pm$ 0.034 ^{B,c}	1.341 $\pm$ 0.034 ^{C,c}	1.277 $\pm$ 0.005 ^{D,c}
70	1.568 $\pm$ 0.019 ^{A,d}	1.498 $\pm$ 0.024 ^{B,d}	1.413 $\pm$ 0.036 ^{C,d}	1.350 $\pm$ 0.007 ^{D,d}
80	1.650 $\pm$ 0.017 ^{A,e}	1.585 $\pm$ 0.028 ^{B,e}	1.514 $\pm$ 0.012 ^{C,e}	1.466 $\pm$ 0.009 ^{D,e}

* -The mean values with the same capital letters are not significantly different at the same temperature.

-The mean values with the same lowercase letters are not significantly different at the same soluble solids content.

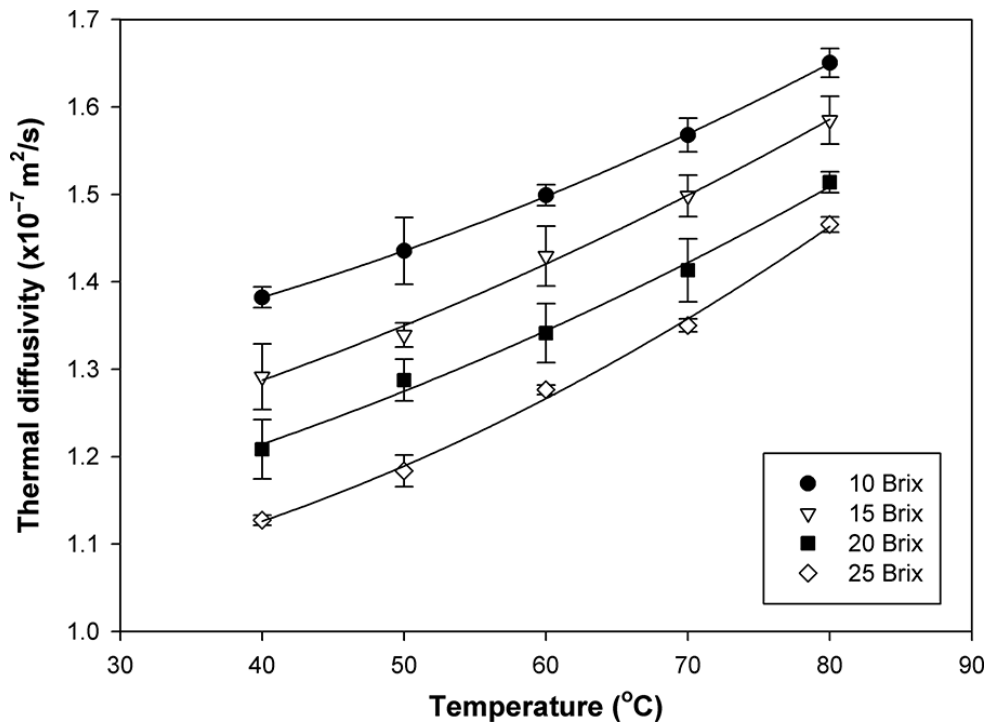


Fig. 8

Thermal diffusivity of papaya puree at different soluble solids contents and temperatures.

$$\alpha \times 10^7 = 1.38 - 1.51 \times 10^{-2}B + 1.51 \times 10^{-3}T + 5.0 \times 10^{-5}T^2 \quad (14)$$

$$(R^2 = 0.993 \text{ SE} = 0.012)$$

The calculated bulk thermal diffusivity values of papaya puree based on Eq. (15) [4], Eq. (16)[21], Eq. (17)[22] and the regression model based on Eq. (14) were compared with the experimental data as shown in Fig. 9. All predictive equations had similar trend that an increase in temperature increased in thermal diffusivity for all soluble solids contents considered.

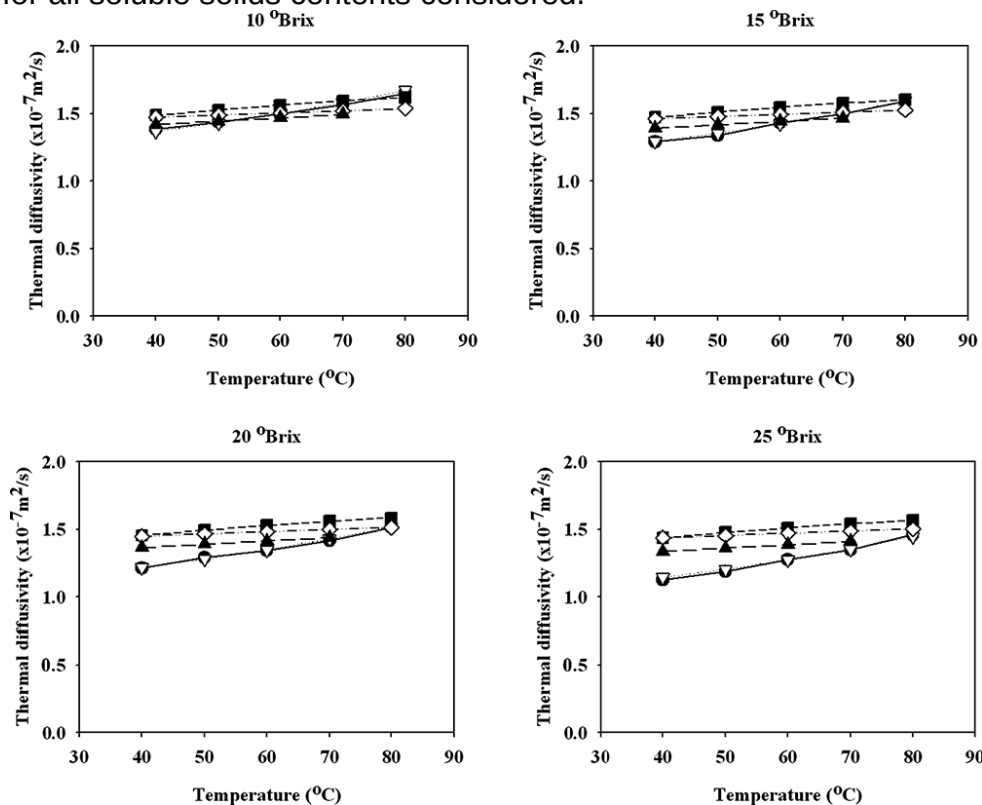


Fig. 9 Experimental data and predicted thermal diffusivity of 10-25 °Brix papaya puree in the temperature range of 40 to 80°C.

CONCLUSIONS

The effects of soluble solids content in the range of 10-25 °Brix and temperature in the range of 40-80 °C on the thermophysical properties, i.e., density, thermal conductivity, specific heat and thermal diffusivity of papaya puree were determined in this research. Density, specific heat and thermal conductivity were determined through experiments while thermal diffusivity was calculated afterwards. For the range of soluble solids content and temperature used in this study, it was concluded that an increase in temperature decreased the density but increased the specific heat and thermal conductivity. While an increase in soluble solids content increased the density but decreased the specific heat and thermal conductivity. These two effects (i.e., temperature and soluble solids content) on density, specific heat and thermal conductivity could not compensate each other in calculation of thermal diffusivity. Thus, an increase in temperature resulted in an increase in thermal diffusivity whereas an increase in soluble solid contents resulted in a decrease in thermal diffusivity. In addition, empirical models for these thermal properties of papaya puree were also proposed and compared with other models.

ACKNOWLEDGEMENTS

This work was supported by the Thailand Research Fund (TRF) and the Commission on Higher Education (CHE) under TRF-CHE Research Grant for Mid-Career University Faculty.

REFERENCES

1. Nakasone, H. Y. and Paull, R. E. Nakasone, H. Y. and Paull, R. E. (eds) (1998) *Papaya. Tropical Fruits* p. 445. CAB International , New York — InEdspp.
2. Ahmed, J. , Shivhare, U. and S; Sandhu, K.S. (2002) Thermal degradation kinetics of carotenoids and visual color of papaya puree. *Journal of Food Science* **67**:7 , pp. 2692-2695. [[crossref](#)]
3. Mohsenin, N. N. (1980) *Thermal properties of foods and agricultural materials* p. 407. New York , Gordon and Breach — pp.
4. Choi, Y. and Okos, M. R. Maguer, M. L. and Jelen, P. (eds) (1986) Effects of temperature and composition on the thermal properties of foods. *Food Engineering and Process Applications (vol. 1)* pp. 93-101. Elsevier , London — InEds
5. Sweat, V. E. Rao, M. A. and Rizvi, S. S. H. (eds) (1995) Thermal properties of foods. *Engineering properties of foods* p. 126. 2, Marcel Dekker , New York — Ined.Eds
6. Singh, R. P. and Heldman, D. R. (1981) *Food Process Engineering* 2, AVI Publishing Company , Connecticut — ed.
7. Tansakul, A. and Chaisawang, P. (2006) Thermophysical properties of coconut milk. *Journal of Food Engineering* **73** , pp. 276-280. [[crossref](#)]

- 8. Tansakul, A. and Lumyong, R. (2008) Thermal properties of straw mushroom. *Journal of Food Engineering* **87** , pp. 91-98.
- 9. Rahman, S. (1995) *Food properties handbook* p. 500. CRC Press , Boca Raton — pp.
- 10. Kurozawa, L. E. , El-Aouar, A. A. , Simões, M. R. , Azoubel, P. M. and Murr, F. E. X. (2005) Determination of thermal conductivity and thermal diffusivity of papaya (*Carica papaya* L.) as a function of temperature.
- 11. Espinoza-Guevara, R. , Caro-Corrales, J. , Ordorica-Falomir, C. , Zazueta-Morales, J. , Vega-Carcia, M. and Crnin, K. (2010) **Thermophysical properties of pulp and rind of papaya cv. Maradol. International Journal of Food Properties** **13** , pp. 65-74. [informaworld]
- 12. Fasina, O. O. , Farkas, B. E. and Fleming, H. P. (2003) **Thermal and dielectric properties of potato puree. International Journal of Food Properties** **6** , pp. 461-472. [informaworld]
- 13. AOAC (1995) *Official Methods of Analysis* 15, The Association of Official Analytical Chemists , Gaithersburg, MD — ed
- 14. Nithatkusol, A. (1998) *The development of apparatus for determination of thermal conductivities of nonfrozen food by the line heat source method* p. 116. King Mongkut's University of Technology Thonburi — Master's degree thesis
- 15. Sweat, V. E. and Haugh, C. G. (1974) Thermal conductivity probe for small food samples. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers* **17**:1 , pp. 56-58.
- 16. Bates, O. K. (1936) Binary Mixtures of Water and Glycerol. *Industrial and Engineering Chemistry*. **28** , pp. 495-498. [crossref]
- 17. Tsen, J. -H. and King, V. A. -E. (2002) Density of Banana Puree as a Function of Soluble Solids Concentration and Temperature. *Journal of Food Engineering* **55** , pp. 305-308. [crossref]
- 18. Telis-Romero, J. , Telis, V. R. N. , Gabas, A. L. and Yamashita, F. (1998) Thermophysical properties of Brazilian orange juice as affected by temperature and water content. *Journal of Food Engineering* **38** , pp. 27-40. [crossref]
- 19. Ramos, A. M. and Ibarz, M. (1998) Density of Juice and Fruit Puree as a Function of Soluble Solids Content and Temperature. *Journal of Food Engineering*. **35** , pp. 57-63. [crossref]
- 20. AbuDagga, Y. and Kolbe, E. (1997) Thermophysical Properties of Surimi Paste at Cooking Temperature. *Journal of Food Engineering* **32** , pp. 325-337. [csa] [crossref]
- 21. Assis, M. M. M. , Lannes, S. C. S. , Tadini, C. C. , Telis, V. R. N. and Telis-Romero, J. (2006) Influence of Temperature and Concentration on Thermophysical Properties of Yellow Mombin (*Spondias mombin*, L.). *European Food Research and Technology*. **233** , pp. 585-593.
- 22. Cabral, R. A. F. , Orrego-Alzate, C. E. , Gabas, A. L. and Telis-Romero, J. (2007) Rheological and Thermophysical Properties of Blackberry Juice. *Ciência e Tecnologia de Alimentos* **27** , pp. 589-596. [crossref]

List of Figures

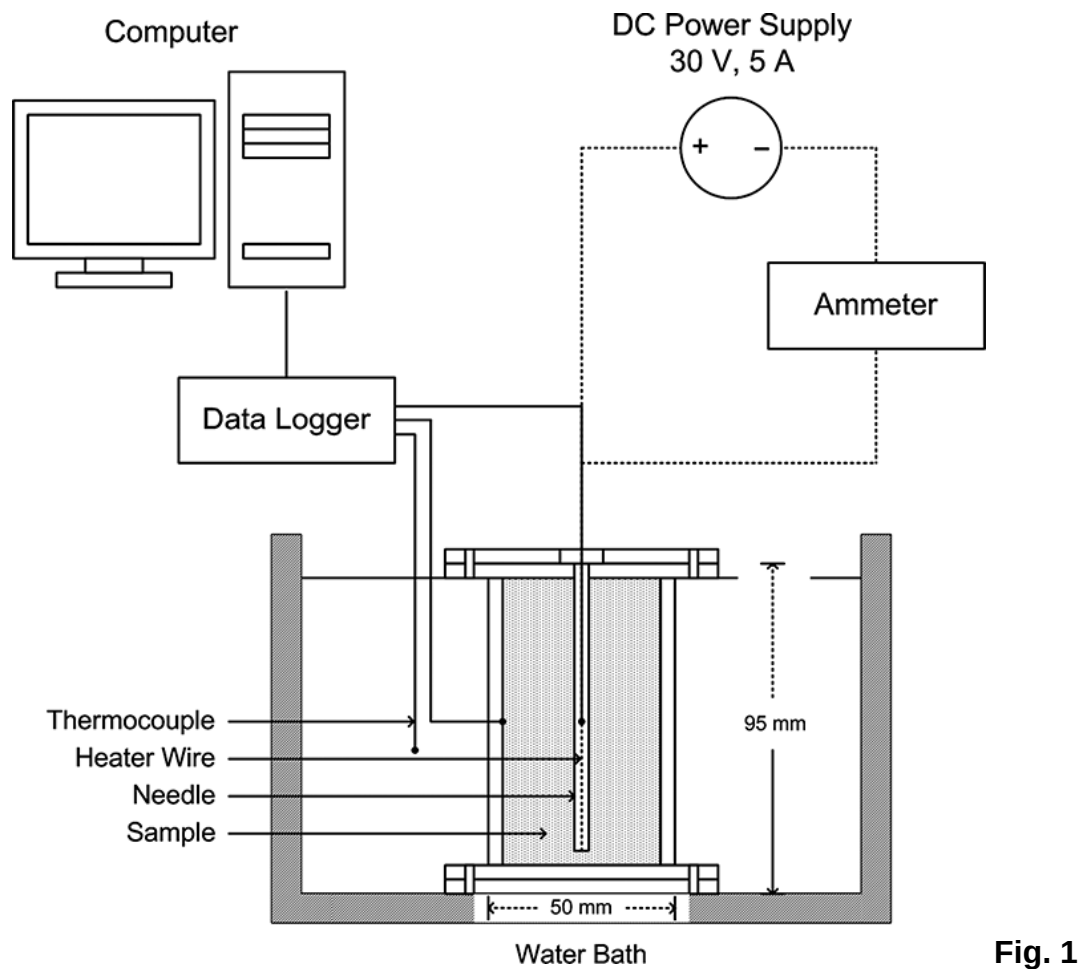


Fig. 1

Thermal conductivity apparatus.

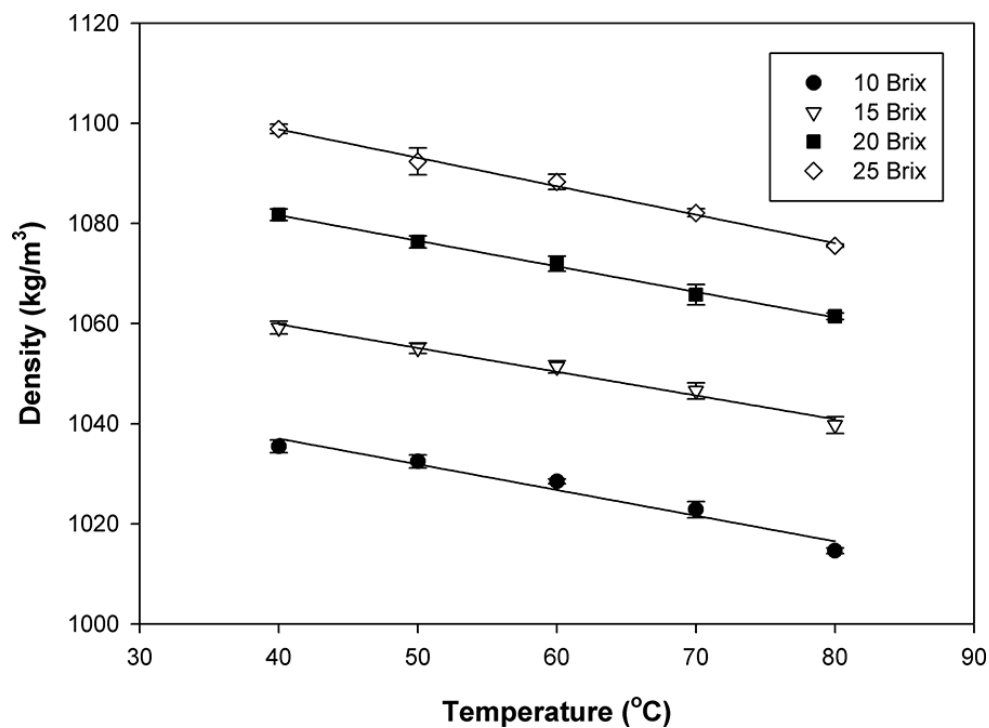
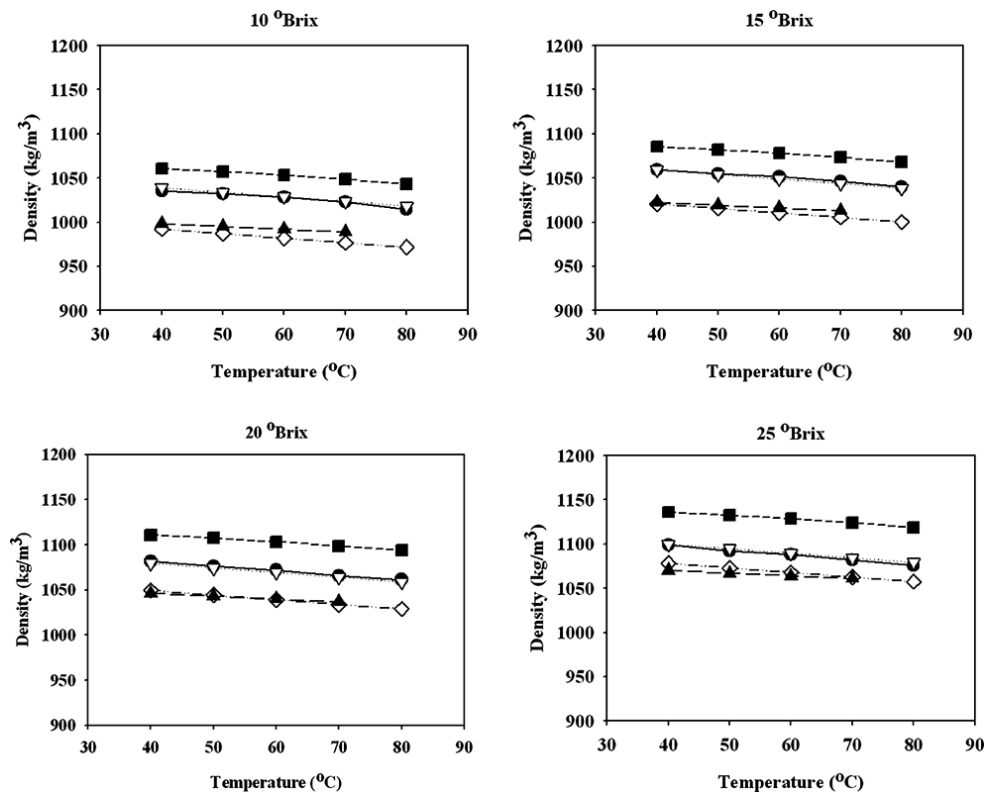
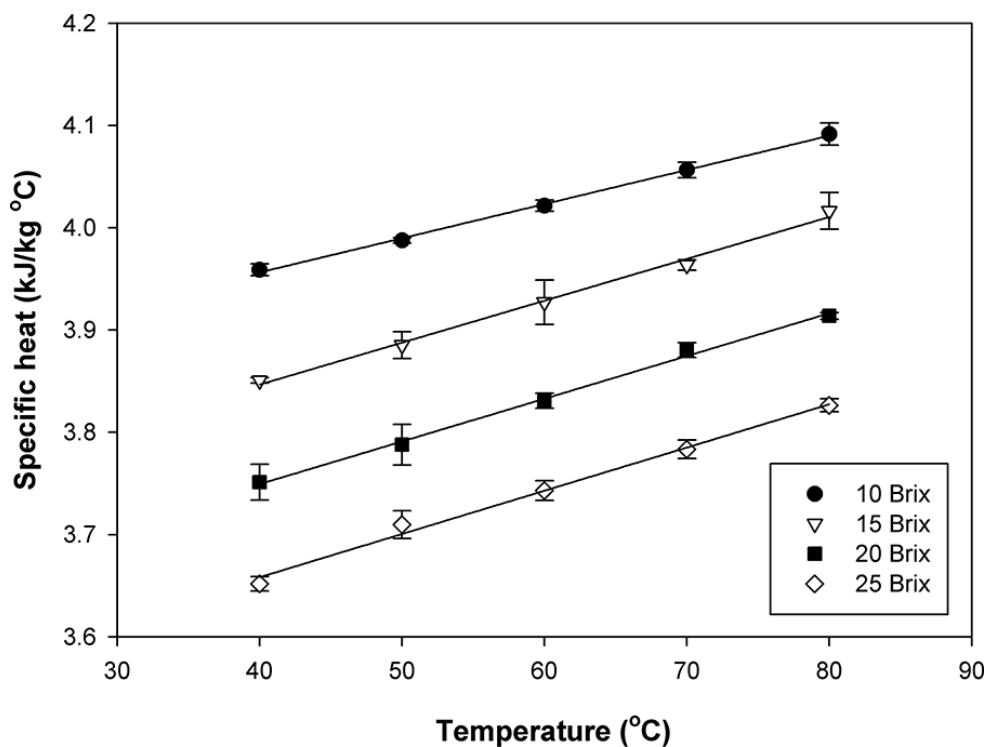


Fig. 2

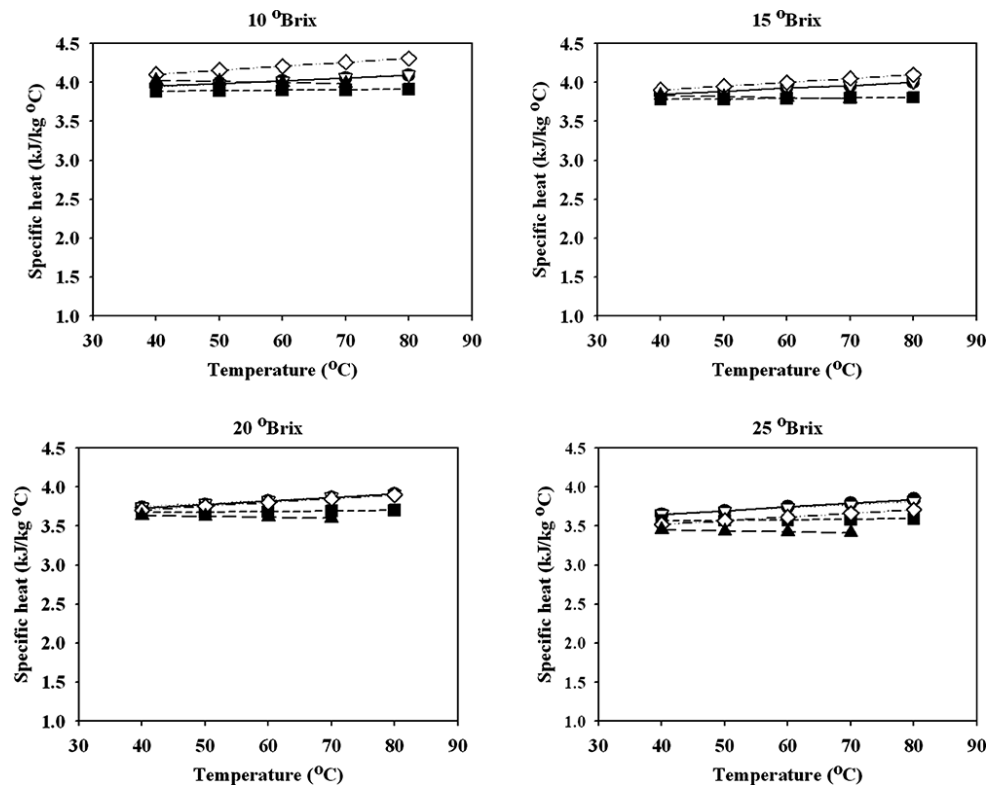
Density of papaya puree at different soluble solids contents and temperatures.

**Fig. 3**

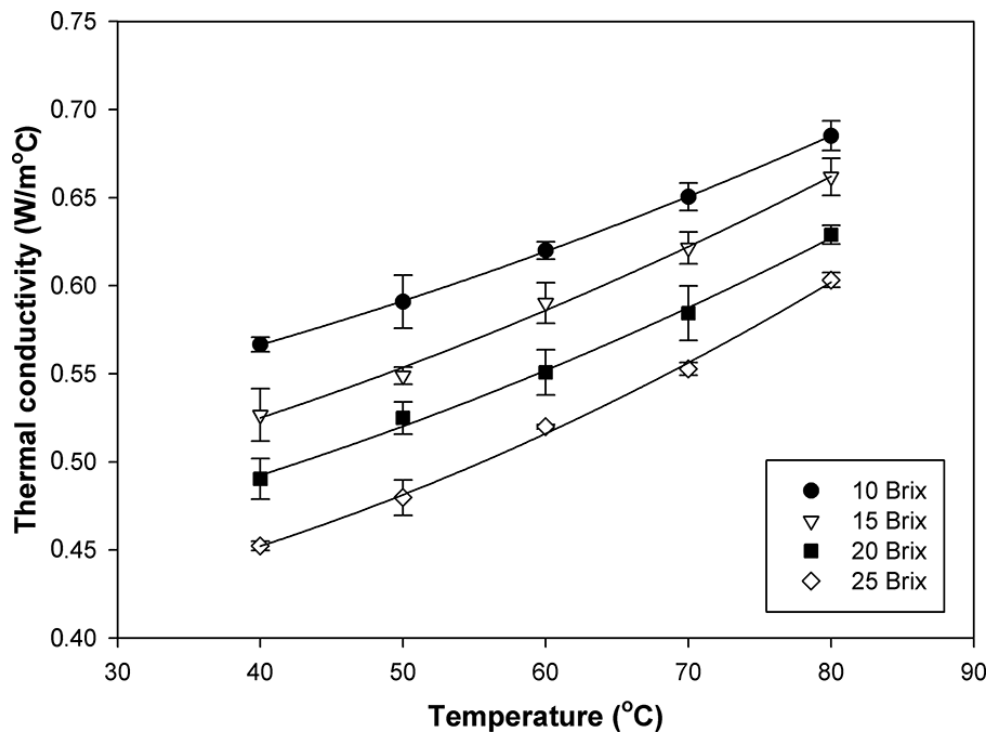
Experimental data and predicted density of 10-25 °Brix papaya puree in the temperature range of 40 to 80 °C.

**Fig. 4**

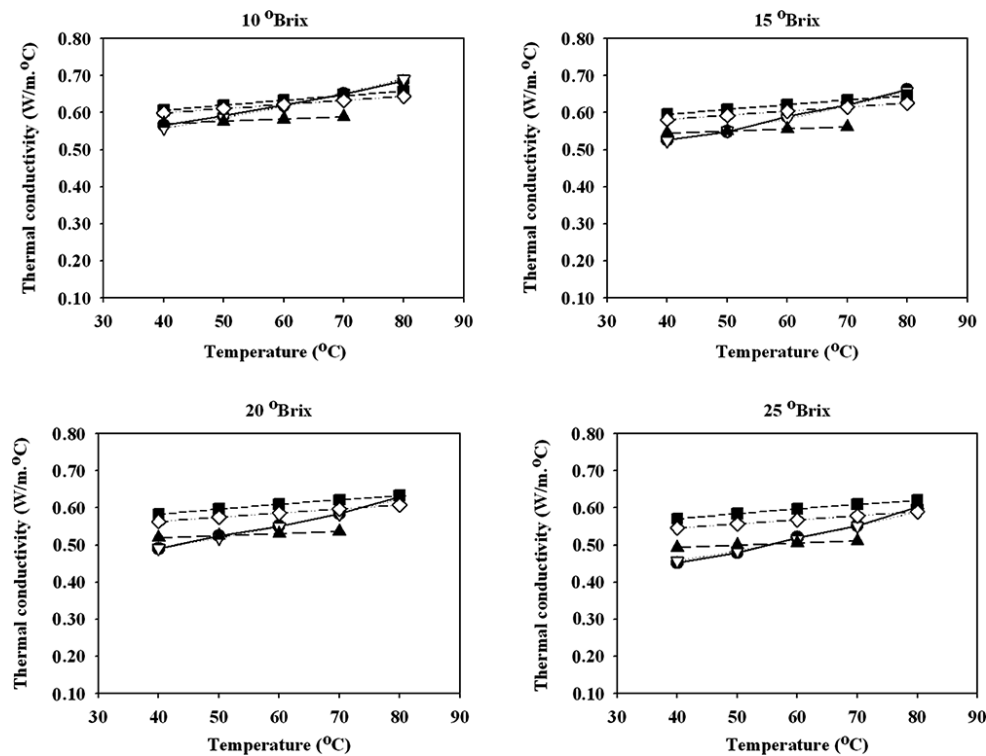
Specific heat of papaya puree at different soluble solids contents and temperatures.

**Fig. 5**

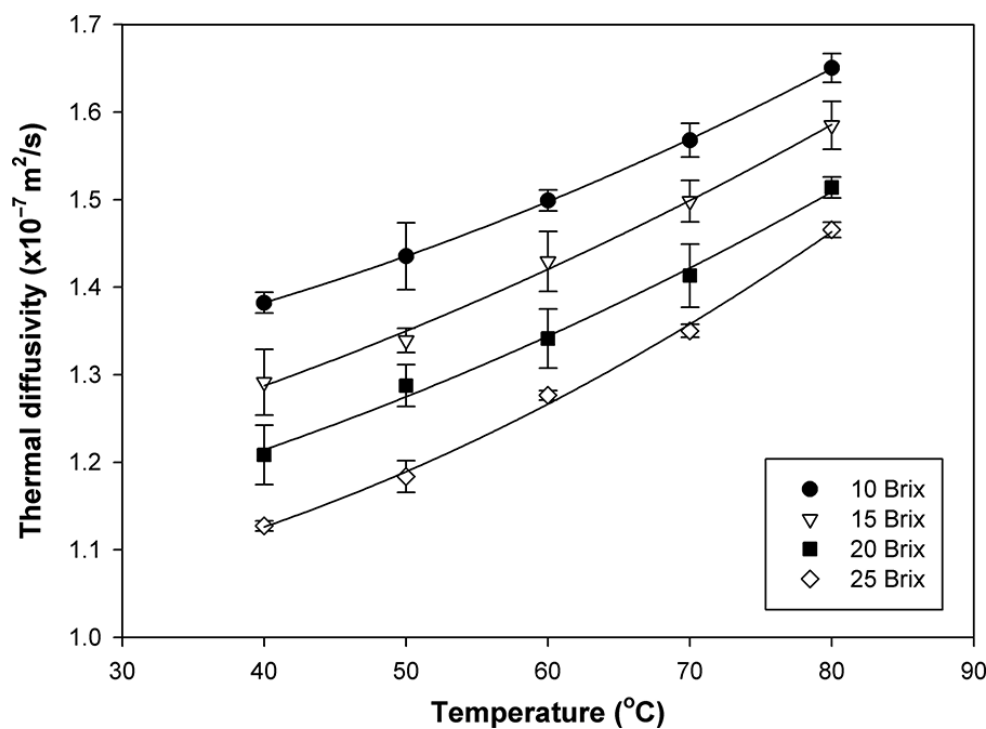
Experimental data and predicted specific heat of 10-25 °Brix papaya puree in the temperature range of 40 to 80 °C.

**Fig. 6**

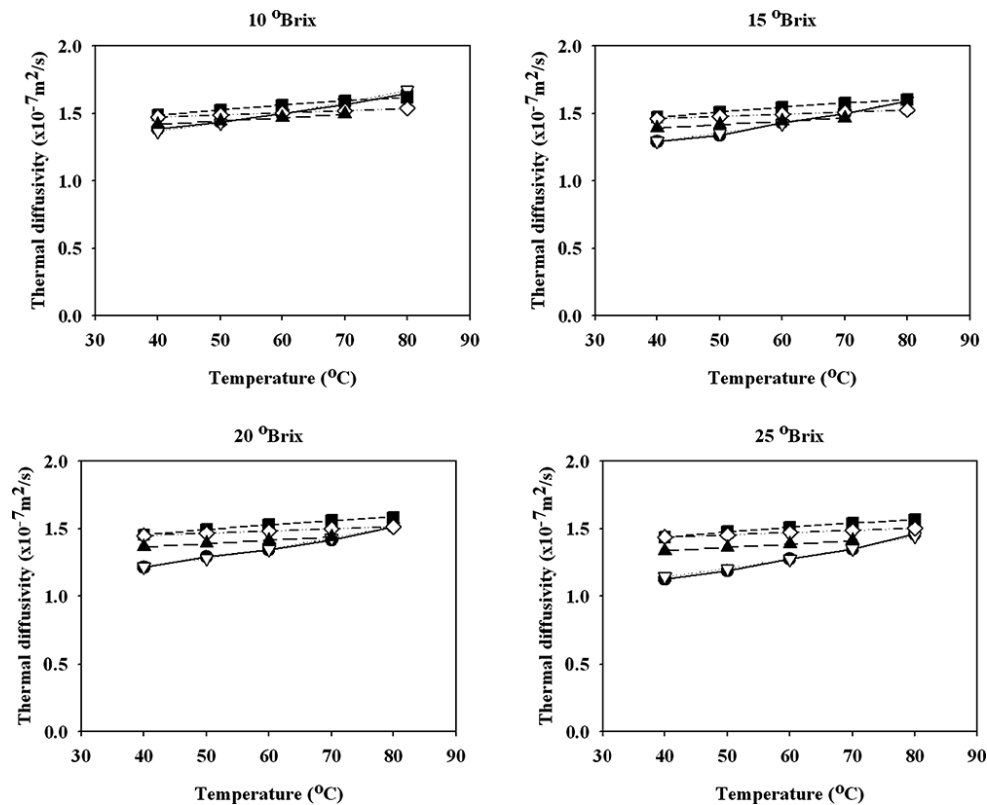
Thermal conductivity of papaya puree at different soluble solids contents and temperatures.

**Fig. 7**

Experimental data and predicted thermal conductivity of 10-25 °Brix papaya puree in the temperature range of 40 to 80°C.

**Fig. 8**

Thermal diffusivity of papaya puree at different soluble solids contents and temperatures.

**Fig. 9**

Experimental data and predicted thermal diffusivity of 10-25 °Brix papaya puree in the temperature range of 40 to 80°C.

List of Tables

Table 1 Physicochemical characteristics of the single strength papaya puree

Total soluble solids (°Brix)	10.10
pH	4.84
Acidity (g citric acid/ 100 mL)	0.16
Water (%)	88.41
Protein (%)	0.54
Fat (%)	0.06

* Calculated from [100 - water - protein - fat - fiber - ash]

Fiber (%)	0.66
Ash (%)	0.52
Carbohydrate* (%)	9.81

* Calculated from [100 - water - protein - fat - fiber - ash]

Table 2 Density of papaya puree at different soluble solids contents and temperatures

Temperature (°C)	Density (kg/m ³)			
	10 °Brix	15 °Brix	20 °Brix	25 °Brix
40	1,035.5±1.3 ^{A,a}	1,059.2±1.2 ^{B,a}	1,081.7±1.2 ^{Ca}	1,098.9±0.9 ^{D,a}
50	1,032.5±1.3 ^{A,b}	1,055.1±1.1 ^{B,b}	1,076.3±1.2 ^{C,b}	1,092.4±2.7 ^{D,b}
60	1,028.5±0.5 ^{A,c}	1,051.4±1.2 ^{B,c}	1,072.0±1.5 ^{C,c}	1,088.3±1.5 ^{D,c}
70	1,022.8±1.6 ^{A,d}	1,046.6±1.6 ^{B,d}	1,065.8±2.0 ^{C,d}	1,082.1±0.8 ^{D,d}
80	1,014.6±0.6 ^{A,e}	1,039.7±1.7 ^{B,e}	1,061.4±0.6 ^{C,e}	1,075.6±0.3 ^{D,e}

* -The mean values with the same capital letters are not significantly different at the same temperature.

-The mean values with the same lowercase letters are not significantly different at the same soluble solids content.

Table 3 Specific heat of papaya puree at different soluble solids contents and temperatures

Temperature (°C)	Specific heat (kJ/kg·°C)			
	10 °Brix	15 °Brix	20 °Brix	25 °Brix
40	3.959±0.006 ^{A,a}	3.851±0.003 ^{B,a}	3.751±0.018 ^{C,a}	3.652±0.007 ^{D,a}
50	3.988±0.003 ^{A,b}	3.855±0.013 ^{B,b}	3.788±0.020 ^{C,b}	3.710±0.013 ^{D,b}
60	4.022±0.005 ^{A,c}	3.927±0.022 ^{B,c}	3.831±0.007 ^{C,c}	3.743±0.010 ^{D,c}
70	4.056±0.008 ^{A,d}	3.964±0.005 ^{B,d}	3.880±0.007 ^{C,d}	3.783±0.009 ^{D,d}
80	4.092±0.011 ^{A,e}	4.017±0.018 ^{B,e}	3.914±0.003 ^{C,e}	3.827±0.006 ^{D,e}

* -The mean values with the same capital letters are not significantly different at the same temperature.

-The mean values with the same lowercase letters are not significantly different at the same soluble solids content.

Table 4 Thermal conductivity of papaya puree at different soluble solids contents and temperatures

Temperature (°C)	Thermal conductivity (W/m·°C)			
	10 °Brix	15 °Brix	20 °Brix	25 °Brix
40	0.567±0.004 ^{D,a}	0.527±0.015 ^{C,a}	0.490±0.012 ^{B,a}	0.452±0.003 ^{A,a}
50	0.591±0.015 ^{D,b}	0.549±0.005 ^{C,b}	0.525±0.009 ^{B,b}	0.480±0.010 ^{A,b}

* -The mean values with the same capital letters are not significantly different at the same temperature.

-The mean values with the same lowercase letters are not significantly different at the same soluble solids content.

Temperature (°C)	Thermal conductivity (W/m·°C)			
	10 °Brix	15 °Brix	20 °Brix	25 °Brix
60	0.620±0.005 ^{D,c}	0.590±0.012 ^{C,c}	0.551±0.013 ^{B,c}	0.520±0.001 ^{A,c}
70	0.651±0.008 ^{D,d}	0.621±0.009 ^{C,d}	0.584±0.015 ^{B,d}	0.553±0.004 ^{A,d}
80	0.685±0.008 ^{D,e}	0.662±0.011 ^{C,e}	0.629±0.005 ^{B,e}	0.603±0.004 ^{A,e}

* -The mean values with the same capital letters are not significantly different at the same temperature.

-The mean values with the same lowercase letters are not significantly different at the same soluble solids content.

Table 5 Thermal diffusivity of papaya puree at different soluble solids contents and temperatures

Temperature (°C)	Thermal diffusivity ($\times 10^{-7}$ m ² /s)			
	10 °Brix	15 °Brix	20 °Brix	25 °Brix
40	1.382±0.012 ^{A,a}	1.291±0.038 ^{B,a}	1.208±0.034 ^{C,a}	1.127±0.006 ^{D,a}
50	1.435±0.038 ^{A,b}	1.339±0.014 ^{B,b}	1.288±0.024 ^{C,b}	1.184±0.018 ^{D,b}
60	1.499±0.012 ^{A,c}	1.429±0.034 ^{B,c}	1.341±0.034 ^{C,c}	1.277±0.005 ^{D,c}
70	1.568±0.019 ^{A,d}	1.498±0.024 ^{B,d}	1.413±0.036 ^{C,d}	1.350±0.007 ^{D,d}

* -The mean values with the same capital letters are not significantly different at the same temperature.

-The mean values with the same lowercase letters are not significantly different at the same soluble solids content.

Temperature (°C)	Thermal diffusivity ($\times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$)			
	10 °Brix	15 °Brix	20 °Brix	25 °Brix
80	1.650 $\pm$ 0.017 ^{A,e}	1.585 $\pm$ 0.028 ^{B,e}	1.514 $\pm$ 0.012 ^{C,e}	1.466 $\pm$ 0.009 ^{D,e}

* -The mean values with the same capital letters are not significantly different at the same temperature.

-The mean values with the same lowercase letters are not significantly different at the same soluble solids content.

Bookmark with:

-  CiteULike
-  Del.icio.us
-  BibSonomy
-  Connotea
-  More bookmarks
- 

Thermophysical Properties of Papaya Puree

Ampawan Tansakul^{*}, Hataichanok Kantrong, Rattapon Saengrayup and Panthila Sura

Department of Food Engineering, Faculty of Engineering,
King Mongkut's University of Technology Thonburi, Bangkok 10140, Thailand
Corresponding author: ampawan.tan@kmutt.ac.th

Abstract

The effects of soluble solid content and temperature on thermophysical properties of papaya puree were studied. Density and specific heat were measured using pycnometer and differential scanning calorimeter (DSC), respectively while thermal conductivity was measured using line heat source probe. Thermal diffusivity was then calculated from the experimental results of the specific heat, thermal conductivity and density. The papaya puree was experimentally determined within a soluble solid content range of 10 to 25°Brix and temperature between 40 and 80°C. The density, specific heat, thermal conductivity and thermal diffusivity of papaya puree were found to be in the ranges of 1014.61 to 1098.86 kg/m³, 3.652 to 4.092 kJ/kg°C, 0.452 to 0.685 W/m°C and 1.127×10^{-7} to 1.650×10^{-7} m²/s, respectively.

Keywords: Papaya puree / Density / Specific heat / Thermal conductivity / Thermal diffusivity

Introduction

Papaya (*Carica papaya* Linn.) is an important fruit of the tropics and subtropics regions of the world (Ahmed et al., 2002) including Thailand. Nutritionally, it is a good source of provitamin A and ascorbic acid. Papaya is consumed fresh and processed into various forms such as dehydrated slices, chunk and slices for tropical fruit salad and cocktail, or processed into puree which is an intermediate papaya products and stored for using as an ingredient in beverage, ice cream, jam, jelly, juice and nectar (Nakasone and Paull, 1998).

In the food and agricultural industries, all processing operations as well as storage of many of their products are subjected to various types of thermal processing before they are sold to the consumers. The thermal processes that involve heat transfer are heating, cooling, drying, and freezing. Knowledge of thermal properties of food, such as thermal conductivity,

specific heat, and thermal diffusivity, are crucial for proper designing of the equipment and prediction of those processes (Mohsenin, 1970). These properties greatly depend on the temperature, state (frozen or unfrozen), compositional parameters (moisture content, fat content, protein, and ash), and fiber orientation. However, many food and agricultural products contain individual constituents hence their thermal properties are also different. Choi and Okos (1986), have developed a general model to predict thermal properties of each specific food material based on its compositions (fat, protein, water, carbohydrate, fiber, and ash) and temperature. However, in the mentioned models, it was assumed that each component has the same thermal properties regardless of structure in different food materials. This is not always true (Choi and Okos, 1986; Sweat, 1995; Singh and Heldman, 1981; Tansakul and Chaisawang, 2006; Tansakul and Lumyong, 2008). Therefore, empirical models of thermal properties for food materials would give more specific and accurate predictions.

The objectives of this study were to investigate the effects of soluble solid content and temperature on thermophysical properties of papaya puree and to propose an empirical correlation relating each thermal property as a function of soluble solid content and temperature.

Materials and methods

Sample preparation

Each full ripe papaya (*Carica papaya* L., cv. Keak Dam) from the local market was washed with tap water to remove pesticides and contaminated substances. Then, papaya was peeled, halved, deseeded and cut into small pieces. Papaya puree was prepared from papaya flesh using a crushing machine. Then it was passed through a screen of 1.5 mm opening size. Initial concentration of papaya puree was about 10 °Brix. After that the papaya puree was heated in a water bath (Hato-Holten A/S Type AT 110, Denmark) at a temperature of 80°C for 1 minute to inactivate enzyme activity and prevent deterioration due to microbial spoilage. Then, the papaya puree samples at different soluble solid contents of 15, 20 and 25 °Brix were prepared using a rotary evaporator (Resona Model Labo Rata S-300, Germany) at 60 °C. The papaya puree samples were finally packed into polyethylene bottles and stored in the refrigerator at 4°C before measurement.

Density measurement

Papaya puree was filled into a known weight volumetric pycnometer using a syringe. The pycnometer had previously been calibrated with distilled water at 10°C interval from 40 to 80°C and the temperature was controlled by a thermostatic water bath (Hato-Holten A/S Type AT 110, Denmark). Density was then calculated from the ratio of weight of sample in the pycnometer to the volume of pycnometer.

Specific heat measurement

Specific heat of papaya puree was measured using a Differential Scanning Calorimeter (DSC), model Pyris1 (Perkin Elmer, USA). The DSC was calibrated prior to the experiments with indium (temperature and enthalpy) as described in the DSC operating manual. Papaya puree samples (10-15 mg) with different soluble solid contents were sealed in aluminum pans and were scanned from 40 to 80°C at a heating rate of 5°C/min using an empty pan as the reference. Thermograms of sample, baseline and sapphire, as a standard with a known specific heat value, were used to determine the specific heat of sample as expressed in Eq. (1).

$$C_p = \frac{d}{d'} \frac{m'}{m} C_p' \quad (1)$$

where C_p and C_p' are the specific heats of sample and sapphire, respectively (kJ/kg°C), m and m' are the weights of sample and sapphire, respectively (kg), d and d' are the deflections from baseline due to sample and sapphire, respectively (mW).

Thermal conductivity measurement

Thermal conductivity was determined by the line-heat source probe method. The probe apparatus was constructed according to the research of Nithakusol (1998). To test a sample, a cylinder containing papaya puree was placed in a controlled temperature water bath (Hato-Holten A/S Type AT 110, Denmark). The sample was then allowed to equilibrate to the desired temperature. After equilibration, the thermal conductivity probe was inserted into the sample and the power for the heater wire in the probe was turned on. Time and temperature data were recorded by a datalogger (Hybrid Temperature Recorder, Yokokawa DR230, Japan) every 0.5 second for a total duration of 1 minute. Thermal conductivity was calculated using Eq. (2).

$$k = \frac{Q \ln(t_2/t_1)}{4\pi(T_2 - T_1)} \quad (2)$$

where k is thermal conductivity (W/m°C), Q is heat input per unit length of the line heat source (W/m), T is temperature (°C) and t is time (s).

Thermal diffusivity measurement

Thermal diffusivity was calculated from the experimental results of density, specific heat and thermal conductivity of papaya puree, using the relationship given in Eq. (3):

$$\alpha = \frac{k}{\rho C_p} \quad (3)$$

where α is thermal diffusivity (m²/s), k is thermal conductivity (W/m°C), C_p is specific heat (kJ/kg°C), and ρ is density (kg/m³).

Experimental design

The experiments were performed at five levels of temperature (40, 50, 60, 70 and 80°C) and 4 levels of soluble solid content (10, 15, 20 and 25°Brix). A 2-factor factorial design was used in scheduling of the experiments with three replications in each case.

Results and discussion

Density of papaya puree

The average density values of papaya puree with various soluble solid contents at different temperatures varied in the range of 1014.61 to 1098.86 kg/m³. It was observed from Fig. 1 that density of papaya puree decreased with temperature but increased with soluble solid content. Multiple regression of density as a function of soluble solid content (B) and temperature (T) was developed as shown in Eq. (4).

$$\rho = 1019 + 4.06B - 0.517T \quad (4)$$

($R^2 = 0.992$, $SE = 2.368$)

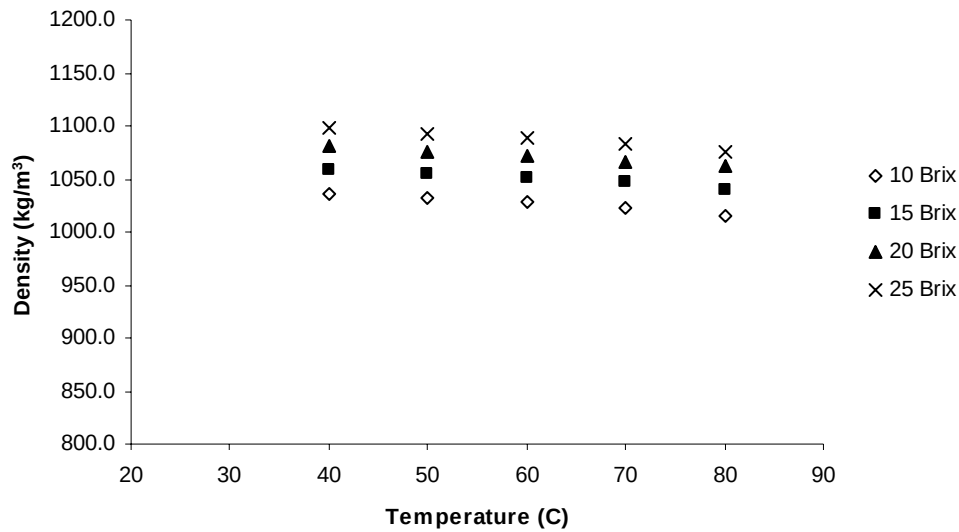


Fig.1 Density of papaya puree at different soluble solid contents and temperatures.

Specific heat of papaya puree

The experimental data obtained for the specific heat of papaya puree at the studied soluble solid contents and temperatures are shown in Fig. 2. Specific heat of papaya puree was found to decrease with soluble solid contents and increased with temperature. An increase in soluble solid contents means a decrease in moisture content (Table 1) which in turn decreases the specific heat of papaya puree due to the relatively high specific heat of water (Mohsenin, 1980). Multiple regression of specific heat as a function of soluble solid content (B) and temperature (T) was obtained as shown in Eq. (5).

$$C_p = 3.96 - 0.0187B + 0.0041T \quad (5)$$

$$(R^2 = 0.992, SE = 0.011)$$

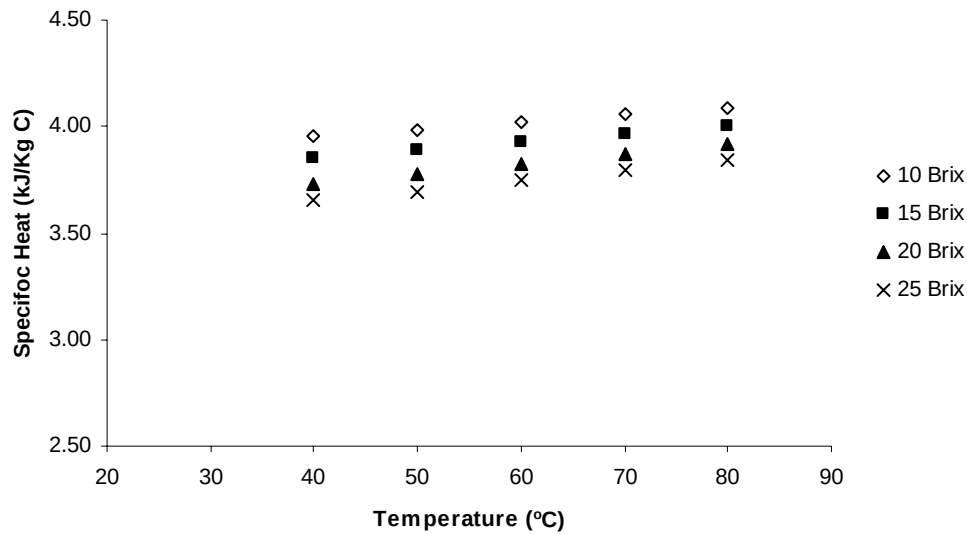


Fig.2 Specific heat of papaya puree at different soluble solid contents and temperatures.

Thermal conductivity of papaya puree

The thermal conductivity of papaya puree with various soluble solid contents at different temperatures ranged from 0.452 to 0.685 W/m °C as shown in Fig. 3. An increase in temperature resulted in an increase in thermal conductivity whereas an increase in soluble solid contents resulted in a decrease in thermal conductivity. Among all basic components, i.e., water, protein, fat, carbohydrate, fiber and ash, the thermal conductivity of water is the highest (Rahman, 1995). Therefore, as the moisture content decreased due to evaporation, the thermal conductivity decreased accordingly. Multiple regression of thermal conductivity as a function of soluble solid content (B) and temperature (T) was obtained as shown in Eq. (6).

$$k = 0.488 - 0.0067B + 0.0034T \quad (6)$$

($R^2 = 0.991$, SE = 0.006)

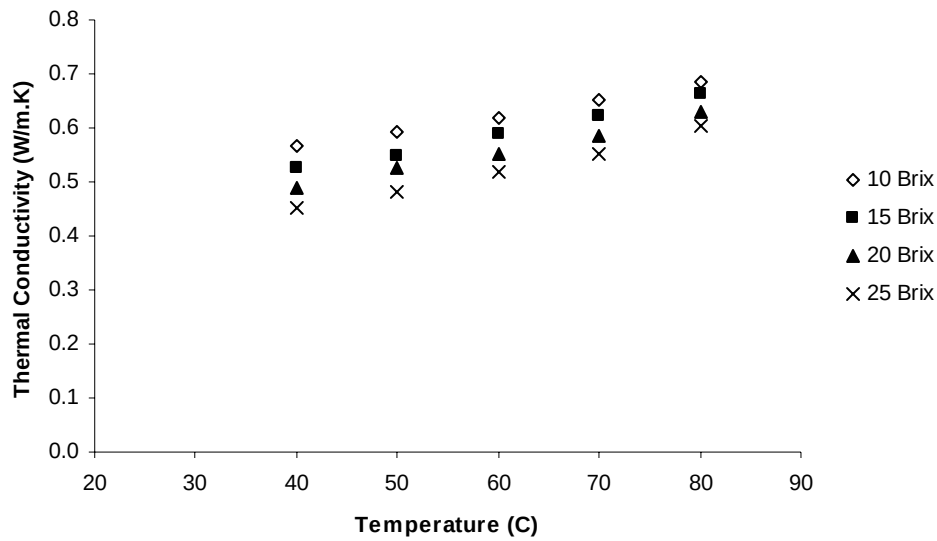


Fig. 3 Thermal conductivity of papaya puree at different soluble solid contents and temperatures.

Thermal diffusivity of papaya puree

The calculated thermal diffusivity values of papaya puree at different soluble solid contents and temperatures are illustrated in Fig. 4. The thermal diffusivity values of papaya puree samples varied from 1.127×10^{-7} to $1.650 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$. Multiple regression of thermal diffusivity as a function of soluble solid content (B) and temperature (T) was obtained as given in Eq. (7).

$$\alpha \times 10^7 = 1.21 - 0.0151B + 0.0075T \quad (7)$$

$$(R^2 = 0.991, \text{ SE} = 0.014)$$

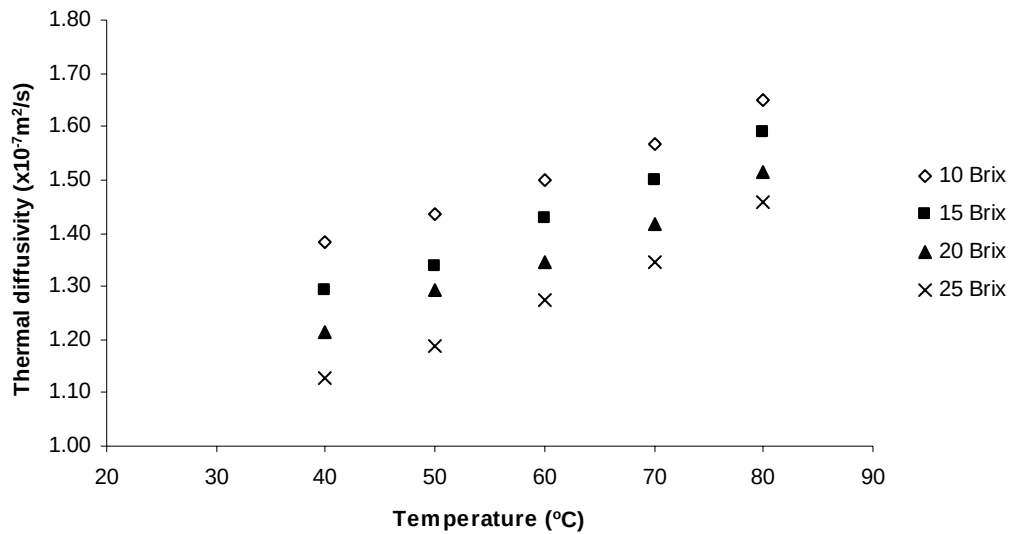


Fig. 4 Thermal diffusivity of papaya puree at at different soluble solid contents and temperatures.

Conclusions

The effects of soluble solid content in the range of 10-25 °Brix and temperature in the range of 40-80 °C on the thermophysical properties, i.e., density, thermal conductivity, specific heat and thermal diffusivity of papaya puree were determined in this research. It was concluded that a decrease in soluble solid content of papaya puree samples and an increase in temperature resulted in an increase in values of thermal properties, i.e., thermal conductivity, specific heat and thermal diffusivity of papaya puree. An empirical correlation for each thermal property of papaya puree was obtained.

Acknowledgements

This work was supported by the Thailand Research Fund (TRF) and the Commission on Higher Education (CHE) under TRF-CHE Research Grant for Mid-Career University Faculty.

References

- Ahmed J., Shivhare U.S. and Sandhu K.S., (2002). Thermal Degradation Kinetics of Carotenoids and Visual Color of Papaya Puree. *Journal of Food Science*, 67(7): 2692-2695.
- Choi, Y., & Okos, M.R. (1986). Effects of temperature and composition on the thermal properties of foods. In M. Le Maguer & P. Jelen, *Food Engineering and Process Applications* (vol. 1, pp. 93-101). London: Elsevier.
- Mohsenin, N. N. (1970). *Physical properties of plant and animal materials* (pp.3-7). New York, USA: Gordon and Breach.
- Mohsenin, N.N. (1980). *Thermal properties of food and agricultural materials* (pp. 1-196). New York, USA: Gordon and Breach.
- Nakasone, H.Y. and Paull, R.E. (1998). Papaya. In H.Y. Nakasone & R.E. Paull, *Tropical Fruits* (pp. 239-269). New York: CAB International.
- Nithatkusol, A. (1998). The development of apparatus for determination of thermal conductivities of nonfrozen food by the line heat source method. Master's degree thesis. King Mongkut's University of Technology Thonburi.
- Rahman, S. (1995). Thermal conductivity of foods. In *Food properties handbook* (pp. 275-335) Boca Raton: CRC Press.
- Singh, R. P. and Heldman, D. R. (1981). *Food Process Engineering*. (2nd ed.). Connecticut, USA: AVI Publishing Company.
- Sweat, V.E. (1995). Thermal properties of foods. In M.A. Rao, & S.S.H. Rizvi (Eds.), *Engineering properties of foods* (2nd ed., pp.126). New York, USA: Marcel Dekker.
- Tansakul, A. and Chaisawang, P. (2006). Thermophysical properties of coconut milk. *Journal of Food Engineering*, 73:276-280.
- Tansakul, A. and Lumyong, R. (2008). Thermal properties of straw mushroom. *Journal of Food Engineering*, 87:91-98.

Color Degradation Kinetics of Papaya Puree Undergoing Different Evaporation Methods

(IAEC Ref. 168)

Korakot Ittiwittayawat and Ampawan Tansakul*

Department of Food Engineering, Faculty of Engineering,
King Mongkut's University of Technology Thonburi, Bangkok, Thailand,
Tel: (662) 4709252, Fax: (662) 4709240

*Corresponding author: ampawan.tan@kmutt.ac.th

ABSTRACT

Color change of papaya puree during different evaporation processes (i.e., conventional evaporation, vacuum evaporation, and microwave heating processes) was studied in this research. The initial and final concentrations of papaya puree were approximately 10°Brix and 25°Brix, respectively. The conditions studied in this research were the temperatures of 70, 80, 90°C for the conventional and vacuum evaporation methods and microwave powers of 200W, 300W, and 400W for the microwave heating method. The total color difference (ΔE) was then investigated. ΔE was fitted with the zeroth order kinetic model in the case of conventional evaporation, with the combined kinetic model in the case of vacuum evaporation, and with the zeroth order kinetic model in the case of microwave heating.

Keywords: *Color, Concentration, Evaporation method, Kinetic Model*

1. INTRODUCTION

Papaya (*Carica papaya* L.), a native of tropical world is rich in antioxidants. It is an important fleshy fruit of the tropics and is an excellent source of vitamins A and C. The color of fruit varies from yellow to orange or reddish-orange and the pigments responsible for the attractive color are the carotenoids. Puree is one of the important intermediate papaya products, and is thermally processed and stored for the manufacture of beverage, ice cream, jam, jelly, and so on. In terms of thermal treatment, it is generally applied to extend the shelf life of fruit products. However, heating processes can affect the quality of product which leads to consumer dissatisfaction. For examples of evaporation treatments which are direct heat at atmospheric condition, vacuum evaporation, microwave heating, membrane process, freeze concentration, and others. For papaya, color and vitamin have affected quality of product. Color is one of the most important appearance attribute of food materials, since it influences consumer acceptability. Abnormal colors, especially those associated with deterioration or with spoilage cause the product to be rejected by the consumer (Maskan, 2001).

Microwave is a form of electromagnetic energy. The microwave range has two narrow bands which are 915 and 2450 MHz. When a dielectric material is placed in an electric or electromagnetic field, the material becomes polarized, and stores electric energy through polarization. The level and mechanism of polarization available to materials depend on the state and composition of the material, and the frequency of the applied electric field. Microwaves are not forms of heat, but rather forms of energy that are manifested as heat through their interaction with materials (Piotrowski et al., 2004).

In 2006, Maskan studied the production of concentrated pomegranate juice by various heating methods and studied kinetics of degradation of visual color during processes. The final concentration is 60.5°Brix using microwave, rotary vacuum, and atmospheric heating processes. The evaporation rate constant of microwave heating is greater than both vacuum heating process and atmospheric heating process because the microwave process is a rapid heating. Based on the color change during evaporation process, it was found that the microwave energy can use in the processes successfully. The objectives of this study were to investigate evaporation process of papaya puree by conventional heating, vacuum evaporation, and microwave heating methods and to compare color degradation kinetics of papaya puree undergoing different evaporation methods and conditions.

2. MATERIAL AND METHODS

2.1 Material and Sample Preparation

Ripe papaya with 50% yellow of skin was purchased from local market and washed by tap water. Then it was peeled, deseeded and cut into small pieces. Then, papaya flesh was ground by grinder (WCG75E, Waring, USA) and passed through sieve with 1.5 mm opening size. Finally puree was measured the initial total soluble solid and concentrated using different evaporation methods.

2.2 Papaya Puree Concentration

250 gram of single strength papaya puree sample with 10°Brix was used to prepare concentrated papaya puree with 15, 20, and 25°Brix. The papaya puree was concentrated by three evaporation methods, i.e., conventional evaporation, rotary vacuum evaporation and microwave heating. The details of the three evaporation methods were as follows:

- (a) Conventional evaporation (atmospheric condition) was a heating method using water bath (W600, MEMMERT, Germany) to control the temperature of samples at 70, 80, and 90°C.
- (b) Rotary vacuum evaporation was a heating method using laboratory rotary vacuum evaporator (Labo Rata S-300, Resona, Germany). It was another method to concentrate the sample at three temperature levels which are 70, 80, 90°C.
- (c) Microwave heating was a heating method using microwave oven (TR X3841, Lotus, Thailand). This method was used to evaporate the sample at three energy levels which were 200, 300, and 400W.

2.3 Soluble Solids Content Determination

Sample was measured the total soluble solid by hand refractometer (ATAGO/N1, °Brix 0-32%, ATAGO, USA). The refractometer was calibrated by distilled water before each measurement.

2.4 Color Measurement

Sample was measured the color using a Hunter Lab Color Measurement System Model ColorQuest XE (Hunter Associates Laboratory Inc., USA) in terms of universally accepted Hunter Lab color scale. L value signifies “lightness”, a value represents changes from

“greenness to redness”, and b value from “blueness to yellowness”. The instrument (10° observer, Illuminant D-65) was calibrated against a standard white reference tile.

2.5 Kinetics Models

The change in concentration (°Brix) of samples against time was fitted to a three-parameter exponential equation (Eq. (1)).

$$B = B_0 - B_1 \exp(-kt) \quad (1)$$

where B is Brix concentration at time t (°Brix), B_0 , B_1 are the constant, k is evaporation rate constant (min^{-1}), and t is process time (min).

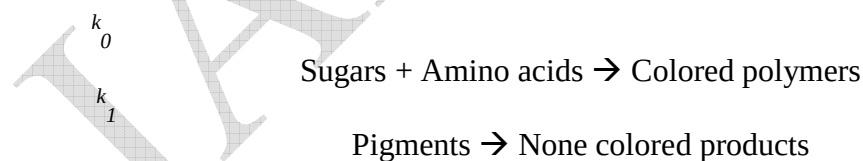
A basic approach to determine the reaction order for a simple reaction is as follows.

The zeroth order: $C = C_0 - k_0 t \quad (2)$

The first order: $C = C_0 \exp(-k_1 t) \quad (3)$

where C is the variable content studied at time t , C_0 the value at time zero, k is kinetics constant, k_0 the zeroth order kinetic constant, and k_1 is the first order kinetic constant, t is process time.

For the zeroth order reaction, rate of reaction is independent on concentration. However, for the first order reaction, rate of reaction is dependent on concentration as expressed in Eq. (3). Application of kinetics for visual color is not as simple as the first order or the zeroth order for describing the color changes of purees because the changing of color was due to the Maillard reaction and the thermal destruction of pigments. The Maillard reaction caused the reaction between reducing sugars and amino acids following the zeroth order kinetics and the thermal destruction of pigments following the first order kinetics. A two stage mechanisms are proposed. The first stage which is color formation follows the zeroth order kinetics and the second stage which is color destruction follows the first order kinetics (Ibarz et al., 1999). This can be written as:



The reaction kinetics equation can express by:

$$\frac{dC}{dt} = k_0 - k_1 C \quad (4)$$

Eq. (4) can be integrated and employed the limit of initial condition, at $t=0$ the color has $C=C_0$. Eq. (5) was then obtained.

$$C = \frac{k_0}{k_1} - \left(\frac{k_0}{k_1} - C_0 \right) \exp(-k_1 t) \quad (5)$$

2.6 Statistical Analysis

The data were analyzed and presented as mean values with standard deviations. Differences between mean values were established by using Tukey's pairwise comparison tests. Values were considered at 95% level of significance ($P < 0.05$) and analysis of variance (ANOVA) was conducted to determine the effect of processing variables on color parameters and β -carotene degradation using a MiniTab program (Minitab® version 15.1.0.0). The data were fitted to reaction kinetics equation by SigmaPlot program (SigmaPlot version 11.0).

3. RESULTS AND DISCUSSION

Papaya puree with 10°Brix was used as a raw material for concentration. The physical and chemical properties of papaya puree with 10°Brix are total soluble solid (°Brix), total acidity, pH, moisture content, L value, a value and b value which are 10.1 ± 0.35 , 0.16 ± 0.04 , 4.84 ± 0.09 , 88.41 ± 0.47 , 25.58 ± 0.98 , 13.95 ± 0.11 , and 9.35 ± 0.11 , respectively.

3.1 Changing the Concentration during different Evaporation Processes

The concentration profiles were studied using different evaporation methods to estimate evaporating time to achieve 15, 20, and 25°Brix. **Fig. 1(a)-1(c)** shows the concentration profile of conventional evaporation, vacuum evaporation, and microwave heating, respectively. It was found that microwave heating used shorter evaporation time to concentrate the papaya puree than the other two methods. **Table 1** shows the kinetics parameters of concentration papaya puree from 10°Brix to 25°Brix using different evaporation processes. It was found that microwave heating required less evaporating time than vacuum evaporation and conventional evaporation. Based on the results of concentration profile, it was found that they were similar to those studied by Maskan (2006) on the production of pomegranate juice concentrate.

Table 1 Kinetics parameters of Eq. (1) for changing the concentration of papaya puree concentration

Evaporation process	Condition	$B_0 \pm SE$	$B_1 \pm SE$	$k \pm SE$	R^2
Conventional	70°C	9.4053 ± 0.4107	1.6182 ± 0.2547	0.0050 ± 0.0003	0.9953
	80°C	4.0446 ± 2.6627	7.2901 ± 2.4444	0.0031 ± 0.0007	0.9924
	90°C	7.0664 ± 0.8019	2.8843 ± 0.6053	0.0077 ± 0.0007	0.9971
Vacuum	70°C	38.6363 ± 58.2389	47.1571 ± 57.7801	0.0065 ± 0.0068	0.9887
	80°C	-7.9266 ± 15.6643	18.0909 ± 15.2951	0.0170 ± 0.0108	0.9949
	90°C	24.8204 ± 27.5641	35.2915 ± 27.2364	0.0166 ± 0.0105	0.9966
Microwave	200W	8.7622 ± 1.2026	2.4346 ± 0.8458	0.0650 ± 0.0095	0.9915
	300W	7.5003 ± 2.1181	3.2853 ± 1.6211	0.0914 ± 0.0205	0.9917
	400W	1.6222 ± 1.8525	8.6784 ± 1.7127	0.0644 ± 0.0079	0.9992

SE: Standard error of estimation, R^2 : correlation coefficient.

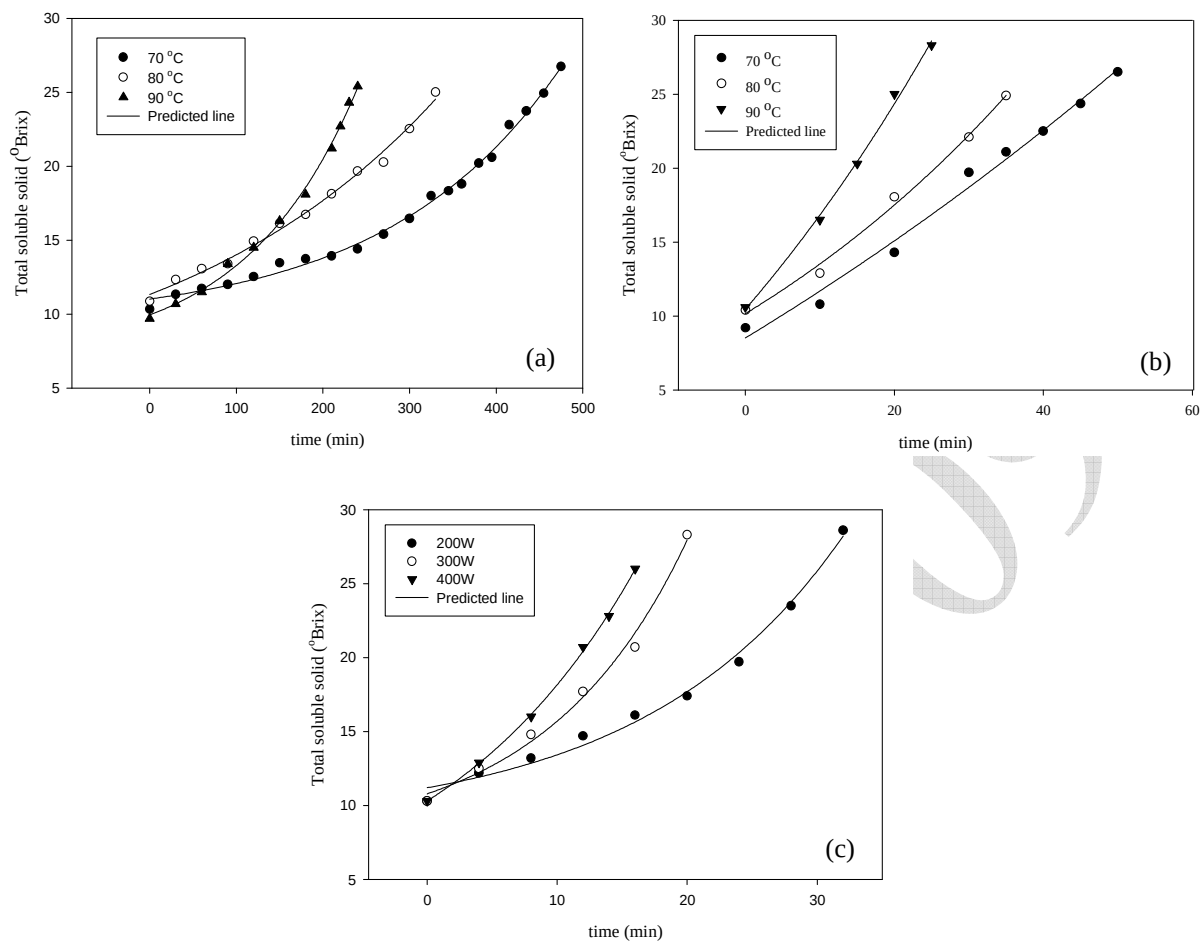


Figure 1 Concentration profile of papaya puree concentrated using
(a) Conventional evaporation, (b) Vacuum evaporation, (c) Microwave heating

3.2 Changing the Color of Papaya Puree Concentrated using different Evaporation Processes

Color is an important attribute because it is usually the first property that the consumer observes. The Hunter $L a b$ has been accepted as rapid and simple instrumental method of specifying color of the food products. Therefore, the results of this study can be used to compute the extent of color degradation during evaporation processes of papaya puree. Hunter L , a , and b values were used to calculate total color differences (ΔE) during evaporation processes, which indicated the overall color change between initial papaya puree and concentrated papaya puree. ΔE values increased with time during all evaporation processes as shown in **Fig. 2(a)-2(c)**. Comparing these results and those previously reported by other researchers for production of pomegranate juice concentrate (Maskan, 2006), thermal degradation kinetics of carotenoids and visual color of papaya puree (Ahmed et al., 2002), heating of pear puree at high temperatures (Ibarz et al., 1999), and heating peach puree at 110–135°C (Avila & Silva, 1999); the ΔE values in this study showed similar trend despite different systems and the heat treatment applied.

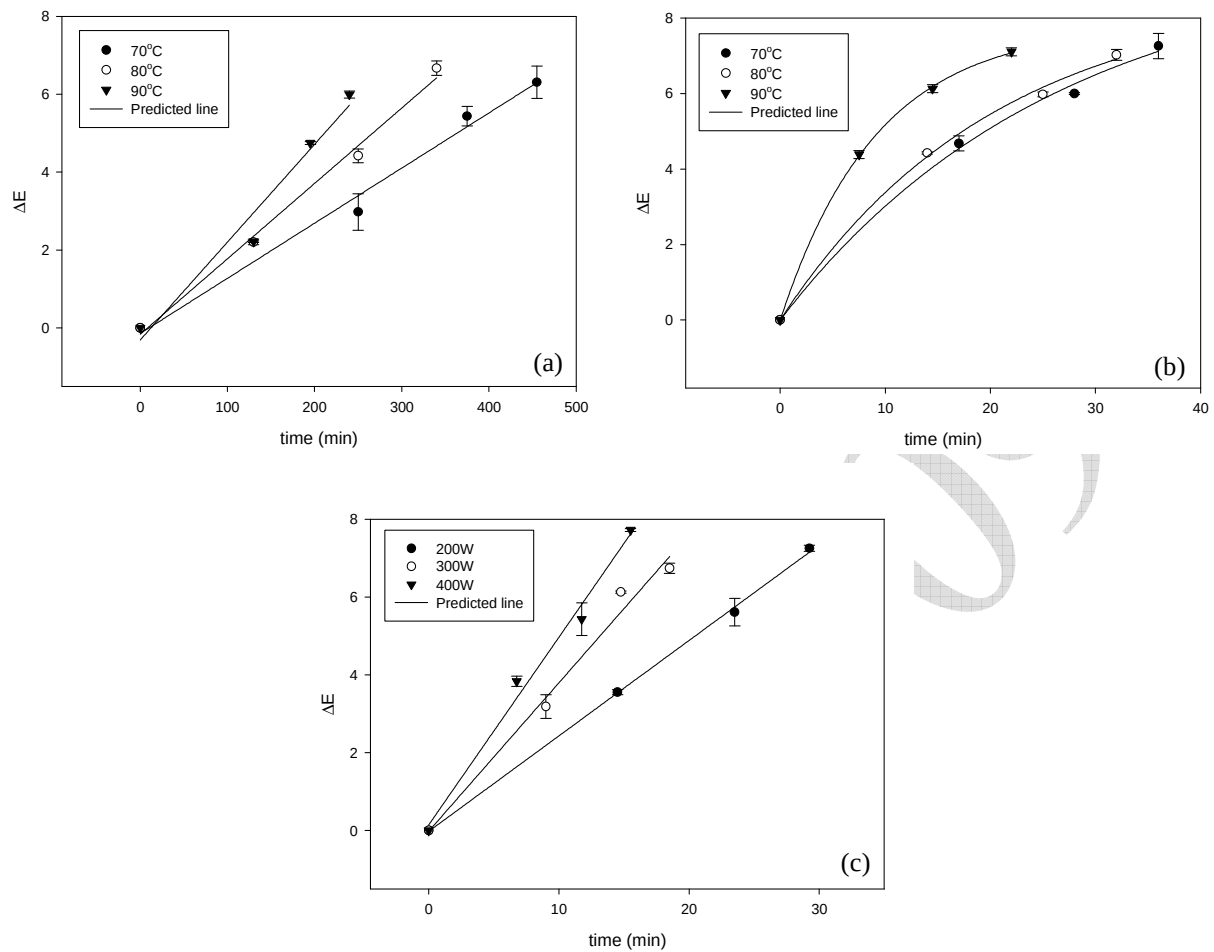


Figure 2 Total color differences (ΔE) of papaya puree concentrated using:
(a) Conventional evaporation, (b) Vacuum evaporation, (c) Microwave heating

In this study, total color difference value (ΔE) was studied for the kinetic degradation. It was found that total color difference value was fitted with the zeroth order, the combined, and the zeroth order kinetics model for conventional evaporation, vacuum evaporation, and microwave heating processes, respectively. Thus, correlation coefficients and kinetics constant value of estimating parameters were used for making a decision in selecting the best model describing the experimental data. The values of estimating parameters from the fittings were shown in **Table 2**.

Table 2 Kinetics parameters of Eq. (2) and (5) for total color difference (ΔE) of papaya puree concentrated using different evaporation methods

Evaporation process	Condition	Order	$k_0 \pm SE$	$k_1 \pm SE$	R^2
Conventional	70°C	$n=0$	0.0142±0.0011	-	0.9889
	80°C	$n=0$	0.0194±0.0012	-	0.9929
	90°C	$n=0$	0.0251±0.0034	-	0.9653
Vacuum	70°C	Combined	0.3621	0.0379±0.0091	0.9966
	80°C	Combined	0.4271	0.0489±0.0079	0.9980
	90°C	Combined	0.8495	0.1092±0.0036	0.9998
Microwave	200W	$n=0$	0.2451±0.0054	-	0.9990
	300W	$n=0$	0.3813±0.0325	-	0.9856
	400W	$n=0$	0.4818±0.0367	-	0.9885

SE: Standard error of estimation, R^2 : correlation coefficient.

It was noticed that the kinetic constant values of total color difference of concentrated papaya puree from conventional evaporation, vacuum evaporation, and microwave heating increased with increasing treatment levels. While the kinetic constant values of total color difference for the vacuum evaporation showed two values due to the two main reactions, i.e., color formation and color destruction. Comparing these results with those previously reported by other researchers for non-enzymatic browning in peach puree during heating (Garza et al., 1999), and heating of pear puree at high temperatures (Ibarz et al., 1999) the kinetic constant values increased as temperature increased. The kinetics constant values of vacuum evaporation and microwave heating were 25-34 times, and 17-19 times, respectively higher than those of conventional evaporation process. This means that the total color difference values of papaya puree undergoing vacuum evaporation and microwave heating were higher than those of conventional evaporation. However, the evaporation times of the two processes were shorter than that of conventional evaporation.

4. CONCLUSIONS

The change of color of papaya puree during different evaporation processes was studied. It was found that ΔE value was fitted with the zeroth order, with combined model, and with the zeroth order kinetic models for conventional evaporation, vacuum evaporation, and microwave heating methods, respectively. Based on the results obtained, microwave heating could be successfully used in the production of concentrated papaya puree with acceptable color. In addition, microwave heating required shorter evaporating time than vacuum evaporation and conventional evaporation.

5. ACKNOWLEDGEMENTS

This work was supported by the Thailand Research Fund (TRF) and the Commission on Higher Education (CHE) under TRF-CHE Research Grant for Mid-Career University Faculty.

6. REFERENCES

1. Ahmed, J., Shivhare, U.S., & Sandhu, K.S. (2002). Thermal degradation kinetics of carotenoids and visual color of papaya puree. *Journal of Food Science*, Vol. 67, 2692-2695.
2. [AOAC] Association of Official Analytical Chemists (2000). *Official methods of analysis*. 17th ed., Gaithersburg, MD: AOAC.
3. Avila, I.M.L.B., & Silva, C.L.M. (1999). Modelling kinetics of thermal degradation of color in peach puree. *Journal of Food Engineering*, Vol. 39, 161-166.
4. Garza, S., Ibarz, A., Pagan, J., & Giner, J. (1999). Non-enzymatic browning in peach puree during heating. *Food Research International*, Vol. 32, 335-343.
5. Ibarz, A., Pagan, J., & Garza, S. (1999). Kinetic models for color changes in pear puree during heating at relatively high temperatures. *Journal of Food Engineering*, Vol. 39, 415-422.
6. Lozano, J.E., & Ibarz, A. (1997). Color changes in concentrated fruit pulp during heating at high temperatures. *Journal of Food Engineering*, Vol. 31, 365-373.
7. Maskan, M. (2001). Kinetics of color change of kiwifruits during hot air and microwave drying. *Journal of Food Engineering*, Vol. 48, 169-175.
8. Maskan, M. (2006). Production of pomegranate (*Punica granatum* L.) juice concentrate by various heating methods: color degradation and kinetics. *Journal of Food Engineering*, Vol. 72, 218-224.
9. Piotrowski, D., Lenart, A., & Wardzynski, A. (2004). Influence of osmotic dehydration on microwave-convective drying of frozen strawberries. *Journal of Food Engineering*, Vol. 65, 519-525.