การเคลือบวุ้นบนผิวเนื้อมะพร้าวด้วยเทคนิคการเคลือบด้วยไฟฟ้าสถิต
Agar Coating on Coconut Meat Surface Using Electrostatic Coating Technique

สุธิชา ชิณบุตร สัภยา ทองงาม ปัณฑารีย์ เทพมาลา และ กอบศักดิ์ กาญจนาพงศ์กุล*
Suthicha Chinnabutr, Sapphaya Thong-ngam, Pantaree Thepmala
and Kobsak Kanjanapongkul*

Received: July 18, 2019
Revised: December 9, 2019
Accepted: December 12, 2019

บทคัดย่อ

เทคนิคการเคลือบด้วยการใช้ไฟฟ้าสถิตโดยใช้ไฟฟ้ากระแสตรงที่แรงดันต่ำได้ถูกใช้ในการเคลือบวุ้นบนผิวเนื้อมะพร้าว จากการศึกษาพบว่า น้ำวุ้นที่ความเข้มข้น 0.5-1 %w/v มีความเหมาะสมที่จะถูกนำมาใช้เป็นวัสดุเคลือบ ชั้นวุ้นของตัวอย่างที่ผ่านการเคลือบโดยวิธีใหม่มีความหนากว่าตัวอย่างที่ถูกเคลือบด้วยวิธีปกติร้อยละ 150 ถึง 200 ซึ่งมีสาเหตุจากแรงดันไฟฟ้าดึงดูดโมเลกุลของวุ้นเข้ามาโดยรอบเนื้อมะพร้าว ทำให้เร่งการเกิดชั้นวุ้นได้เร็วขึ้น โดยความหนาของชั้นวุ้นเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มแรงดันไฟฟ้า ความเข้มข้นของน้ำวุ้น และเวลาในการเคลือบ ในขณะที่ความหนาแน่นของชั้นวุ้นเคลือบขึ้นกับอุณหภูมิที่ใช้ในการเคลือบอย่างชัดเจน นอกจากนี้ยังพบว่าชั้นวุ้นที่เคลือบบนตัวอย่างมีความสม่ำเสมอกว่าและใช้เวลาของกระบวนการที่สั้นลง ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าเทคนิคการเคลือบด้วยการใช้ไฟฟ้าสถิตสามารถนำมาประยุกต์ในกระบวนการเคลือบอาหารได้ โดยสามารถลดเวลาของกระบวนการ ควบคุมความสม่ำเสมอ ความหนา และความหนาแน่นของชั้นวัสดุเคลือบได้

คำสำคัญ: การเคลือบด้วยไฟฟ้าสถิต การให้ความร้อนแบบโอห์มมิก เนื้อมะพร้าว วุ้น

ABSTRACT

Electrostatic coating technique using direct current at low voltage was employed for agar coating on coconut meat surface. The study revealed that 0.5-1 %w/v agar solutions can be used as coating materials. The agar coating layer (ACL) of the electrostatic coated sample was 150 to 200% thicker than that of the samples coated using the tradition method. This could be due to the action of electrostatic attraction force so that the agar molecules were accumulated around the sample surface and therefore accelerated gel formation. The thickness of the ACL increased with the voltage concentration and coating time, while the ACL's concentration strongly depended on the coating temperature. It was also found that the ACL on the electrostatic coated sample was more uniform while the process time was much shorter. The results suggests that electrostatic coating technique can be applied to a food coating process as it can shorten the process time and control the uniformity, thickness and density of the coating layer.

Keywords: agar, coconut meat, electrostatic coating, ohmic heating

*Corresponding author e-mail: fengkska@ku.ac.th
ภาควิชาวิศวกรรมการอาหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ นครปฐม
Food Engineering Department, Faculty of Engineering at Kamphaengsaen, Kasetsart University, Nakhon Pathom

บทนำ

ในปัจจุบัน น้ำมะพร้าวได้รับความนิยมเพิ่มขึ้นและเป็นเครื่องดื่มที่เติบโตทางด้านธุรกิจเร็วที่สุดชนิดหนึ่ง เนื่องจากเป็นเครื่องดื่มจากธรรมชาติที่มีรสชาติดีและมีประโยชน์ต่อสุขภาพ อย่างไรก็ดี ผลิตภัณฑ์ที่จำหน่ายในท้องตลาดโดยส่วนมากเป็นน้ำมะพร้าวที่ไม่มีเนื้อมะพร้าวผสม เนื่องจากในเนื้อมะพร้าวมีองค์ประกอบหลักคือไขมันมากกว่าร้อยละ 35.2 [1] การเติมเนื้อมะพร้าวผสมในน้ำมะพร้าวลงไปจึงอาจเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดปัญหาการหืนเนื่องจากการทำปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสระหว่างออกซิเจน ไขมัน และน้ำโดยปฏิกิริยานี้อาจถูกเร่งได้ถ้าหากในอาหารมีเอ็นไซม์ไลเพสอยู่ [2] จากความจริงที่ว่า มีผู้บริโภคจำนวนไม่น้อยนิยมบริโภคเนื้อมะพร้าวอ่อนพร้อมน้ำมะพร้าวเนื่องจากจะได้รับรสสัมผัสและคุณประโยชน์ทางโภชนาการที่ครบถ้วนและทำให้รู้สึกคุ้มค่ามากยิ่งขึ้น หากสามารถผลิตน้ำมะพร้าวที่มีเนื้อผสมอยู่ได้จะทำให้ลดต้นทุนการแปรรูปเนื้อมะพร้าวและตอบโจทย์ของผู้บริโภคได้หลากหลายมากขึ้น

การเคลือบอาหารด้วยวัตถุดิบที่รับประทานได้เป็นเทคนิคหนึ่งที่ช่วยป้องกันผลิตภัณฑ์อาหารจากผลกระทบจากสิ่งแวดล้อมภายนอก [3] โดยปกติวิธีการเคลือบมักทำโดยการนำอาหารที่ต้องการเคลือบจุ่มลงไปในวัตถุดิบที่นิยมใช้เคลือบ เช่น น้ำวุ้นที่มีความเข้มข้นที่เหมาะสม แล้วนำขึ้นมาพักไว้ให้แห้ง วิธีนี้ถึงจะเป็นวิธีการที่ไม่ซับซ้อนแต่ประสิทธิภาพในการเคลือบอาจไม่ดีเท่าที่ควร เนื่องจากผิวสัมผัสของวัสดุเคลือบไม่ค่อยสม่ำเสมอ การใช้ไฟฟ้าในการเคลือบ (Electrodeposition Painting-EDP) เป็นเทคนิคการเคลือบวัตถุด้วยการใช้ไฟฟ้า นิยมใช้กันมากในอุตสาหกรรมรถยนต์เนื่องจากมีประสิทธิภาพในการเคลือบที่ดีกว่าวิธีการพ่นสีโดยปกติ [4] วัตถุเป้าหมายจะถูกจุ่มลงในบ่อที่มีของเหลวที่ต้องการใช้เคลือบวัตถุ ขณะที่เคลือบวัตถุจะถูกยึดติดกับอิเล็กโทรดขั้วหนึ่งที่อาจมีขั้วลบหรือบวกก็ได้ แล้วแต่ความเหมาะสม ในขณะที่ของเหลวจะถูกเชื่อมต่อทางไฟฟ้ากับกับอิเล็กโทรดอีกขั้วหนึ่งที่มีขั้วตรงกันข้ามกับอิเล็กโทรดที่มีวัตถุเป้าหมายอยู่ ของเหลวจึงถูกดึงดูดให้ยึดติดกับผิวของวัตถุด้วยแรงทางไฟฟ้าสถิต วิธีนี้เป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพสูง การเคลือบผิวมีความสม่ำเสมอ [5]

ในงานวิจัยนี้ เทคนิคการให้ความร้อนแบบโอห์มมิกที่แรงดันกระแสไฟฟ้าตรงที่แรงดันต่ำได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้ในการเคลือบวุ้นบนเนื้อมะพร้าว โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของความเข้มข้นของน้ำวุ้น แรงดันไฟฟ้า อุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการเคลือบต่อความหนาของชั้นวุ้นและความหนาแน่นของวุ้นบนเนื้อมะพร้าว และมุ่งหวังว่าผลที่ได้จะนำไปสู่การผลิตผลิตภัณฑ์น้ำมะพร้าวพร้อมเนื้อมะพร้าวที่มีอายุการจัดเก็บได้นาน

วัสดุ อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

มะพร้าวที่ใช้ คือ มะพร้าวน้ำหอมสด ที่ระยะเก็บเกี่ยว 200 วัน เนื้อมะพร้าวจะถูกขูดและหั่นให้มีขนาดประมาณ 1 cm × 2 cm × 0.2 cm ส่วนน้ำวุ้นที่ใช้เคลือบเตรียมจากการละลายผงวุ้น (ตราโทรศัพท์) ในน้ำเดือดแล้วคนจนละลายให้เข้ากัน

1. การศึกษาความเป็นไปได้ของการเคลือบด้วยการใช้ไฟฟ้าสถิต (Electrodeposition Coating หรือ EDC)

การศึกษาในส่วนนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อหาข้อสรุปเบื้องต้นว่าน้ำวุ้นมีความเหมาะสมที่จะถูกนำมาใช้ในกระบวนการ EDC หรือไม่ ผ่านการวัดค่าการนำไฟฟ้าของน้ำวุ้น โดยเกณฑ์การพิจารณา คือ หากน้ำวุ้นนำไฟฟ้าได้แสดงว่าน้ำวุ้นมีความเหมาะสมในการเคลือบด้วยการใช้ไฟฟ้าสถิต การวัดค่าการนำไฟฟ้าของน้ำวุ้นเริ่มจากการเติมน้ำวุ้นลงในโอห์มมิกเซลล์ขนาด 6 cm × 7 cm × 16 cm ติดตั้งเซนเซอร์วัดอุณหภูมิแบบ RTD ชนิด Pt100 แบบ 3 สาย ทำการจ่ายแรงดันไฟฟ้า (V-V) บันทึกค่ากระแสไฟฟ้า (I-A) และอุณหภูมิ (T-°C) เพื่อนำมาใช้ในการคำนวณค่าการนำไฟฟ้า (σ-S/cm) ตามสมการที่ 1 และหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำไฟฟ้ากับอุณหภูมิตามสมการที่ 2

$$\sigma = \frac{IL}{VA} \quad (1)$$

$$\sigma = aT + b \quad (2)$$

*Corresponding author e-mail: fengkska@ku.ac.th
ภาควิชาวิศวกรรมการอาหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ นครปฐม
Food Engineering Department, Faculty of Engineering at Kamphaengsaen, Kasetsart University, Nakhon Pathom

โดย L และ A คือ ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด และพื้นที่หน้าตัดของอิเล็กโทรดที่สัมผัสกับอาหาร a และ b คือสัมประสิทธิ์อุณหภูมิ และค่าการนำไฟฟ้าของน้ำวุ้นที่ 0 °C ตามลำดับ

2. วิธีการเคลือบวุ้น

2.1 การเคลือบวุ้นด้วยวิธีปกติ (Traditional Method)

การเคลือบวุ้นทำได้โดยใช้โอห์มมิกเซลล์สี่เหลี่ยมที่มีลักษณะตาม Figure 1 ตัวอย่างเนื้อมะพร้าวจะถูกยึดโดยใช้เข็มอิเล็กโทรดจำนวน 8 เล่ม การเคลือบวุ้นทำโดยเทน้ำวุ้น (0.5 %w/v และ 1 %w/v ที่ 40 °C และ 45 °C) 500 mL ลงในห้องเคลือบ ติดตั้งเข็มอิเล็กโทรดที่ยึดเนื้อมะพร้าวที่บริเวณกึ่งกลางโอห์มมิกเซลล์ ทำการเคลือบโดยปล่อยชิ้นตัวอย่างจุ่มในน้ำวุ้นทิ้งไว้จนครบระยะเวลาที่ต้องการ (15 s - 45 s) และนำตัวอย่างมาพักเพื่อรอการวิเคราะห์สมบัติต่าง ๆ ต่อไป

2.2 การเคลือบวุ้นด้วยวิธีการใช้ไฟฟ้าสถิต (Electrodeposition Coating-EDC)

การเคลือบวุ้นด้วยการใช้ไฟฟ้าสถิตมีขั้นตอนการเตรียมอุปกรณ์และชิ้นตัวอย่างเช่นเดียวกับวิธีปกติ แต่มีการจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง (1 V, 2 V และ 4 V) เข้าในระบบการเคลือบโดยป้อนไฟบวกเข้าที่เข็มอิเล็กโทรด และไฟลบเข้าที่แผ่นอิเล็กโทรดที่อยู่ด้านข้างทั้งสองแผ่นจนครบระยะเวลาที่กำหนด และนำตัวอย่างมาพักเพื่อทดสอบต่อไปเช่นเดียวกับวิธีปกติ ในระหว่างการเคลือบจะมีการบันทึกค่ากระแสไฟฟ้าเพื่อสังเกตพฤติกรรมทางไฟฟ้าของตัวอย่าง

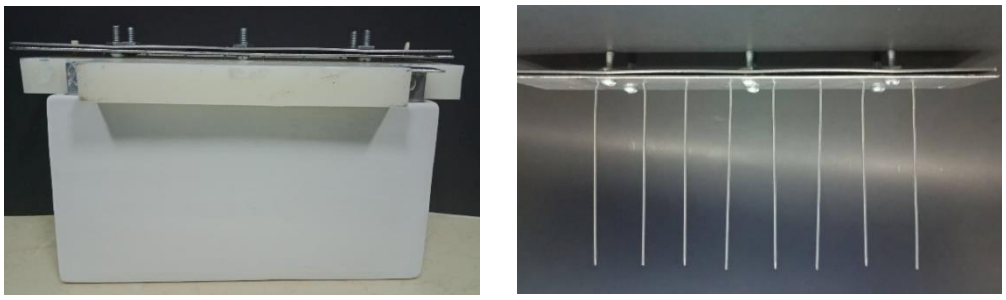

Figure 1 (Left) Coating chamber and (Right) electrodes inside the chamber

3. การวัดความหนาของชั้นวุ้น

นำชิ้นตัวอย่างไปวัดความหนาด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง โดยการนำชิ้นตัวอย่างมาตัดให้เป็นชิ้นบางๆ ให้มีลักษณะตัดขวางเนื้อมะพร้าวตามแนวยาว บันทึกความหนาของชั้นวุ้นทั้ง 8 ตำแหน่งดัง Figure 2

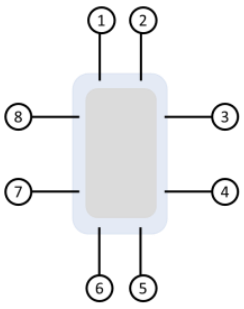

Figure 2 Cross sectional view of the sample. The numbers are the positions where the sample's thickness were measured.

4. การวัดความหนาแน่น

แยกวุ้นที่เคลือบออกจากเนื้อมะพร้าวแล้วนำไปชั่งน้ำหนัก (w_a) หลังจากนั้นนำวุ้นใส่ในหลอดแก้วและเติมน้ำจนได้ปริมาตร 6 mL พร้อมทั้งบันทึกน้ำหนักรวมของวุ้นและน้ำ (w_t) เพื่อนำไปคำนวณตามสมการที่ 3

$$D_a = \frac{w_a}{6-(w_t - w_a)/\rho_w} \qquad (3)$$

โดย D_a คือ ความหนาแน่นของวุ้น (g/cm^3)
w_a คือ น้ำหนักของวุ้น (g)
w_t คือ น้ำหนักรวมของวุ้นและน้ำ (g)
ρ_w คือ ความหนาแน่นของน้ำ (g/cm^3)

*Corresponding author e-mail: fengkska@ku.ac.th
ภาควิชาวิศวกรรมการอาหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ นครปฐม
Food Engineering Department, Faculty of Engineering at Kamphaengsaen, Kasetsart University, Nakhon Pathom

5. วิเคราะห์ค่าทางสถิติ

วางแผนการทดลองแบบ Full factorial Design วิเคราะห์ค่าทางสถิติโดยการวิเคราะห์ค่าความแปรปรวนที่ระดับความเชื่อมั่น 0.95 (α =0.05) โดยทำการทดลอง 3 ซ้ำ

ผลการทดลองและวิจารณ์

1. สมบัติทางไฟฟ้าของน้ำวุ้น

Figure 3 แสดงค่าการนำไฟฟ้าของน้ำวุ้นที่ความเข้มข้น 0.5 %w/v - 2 %w/v ค่าการนำไฟฟ้าของทุกตัวอย่างเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นแบบเชิงเส้น เนื่องจากการเพิ่มของอุณหภูมิทำให้ความหนืดของตัวอย่างมีค่าลดลงและโมเลกุลมีพลังงานมากขึ้น ความสามารถในการเคลื่อนที่ของไอออนจึงดีขึ้นและทำให้กระแสไฟฟ้าไหลได้มากขึ้น ตัวอย่างจึงมีค่าการนำไฟฟ้าสูงขึ้น การเพิ่มความเข้มข้นจะทำให้ค่าการนำไฟฟ้าเพิ่มตามด้วย ยกตัวอย่างเช่นค่าการนำไฟฟ้าของน้ำวุ้นที่มีความเข้มข้น 0.5 %w/v อยู่ในช่วง 0.022 S/m - 0.030 S/m ในขณะที่ความเข้มข้น 2 %w/v ตัวอย่างจะมีค่าการนำไฟฟ้าเพิ่มเป็น 0.033-0.048 S/m โดยมีอัตราการเพิ่มอยู่ที่ 0.0009 S/m °C การเพิ่มของค่าการนำไฟฟ้าเมื่อความเข้มข้นของน้ำวุ้นเพิ่มขึ้นนี้เป็นผลมาจากโมเลกุลของวุ้นประกอบด้วย Agarose และ Agaropectin [6] ซึ่งมีประจุลบอ่อนๆ เนื่องจากมีหมู่ OH^- อยู่ [7] โมเลกุลวุ้นจึงสามารถนำไฟฟ้าได้ การเพิ่มความเข้มข้นของโมเลกุลวุ้นจึงเป็นการเพิ่มจำนวนประจุในน้ำวุ้น เป็นผลให้ค่าการนำไฟฟ้าของน้ำวุ้นสูงขึ้น ผลการทดลองในส่วนนี้แสดงให้เห็นว่า น้ำวุ้นสามารถนำไฟฟ้าและค่าการนำไฟฟ้าสามารถปรับได้โดยการปรับความเข้มข้นให้เหมาะสม น้ำวุ้นจึงมีความเหมาะสมที่จะถูกนำมาใช้ในกระบวนการ EDC

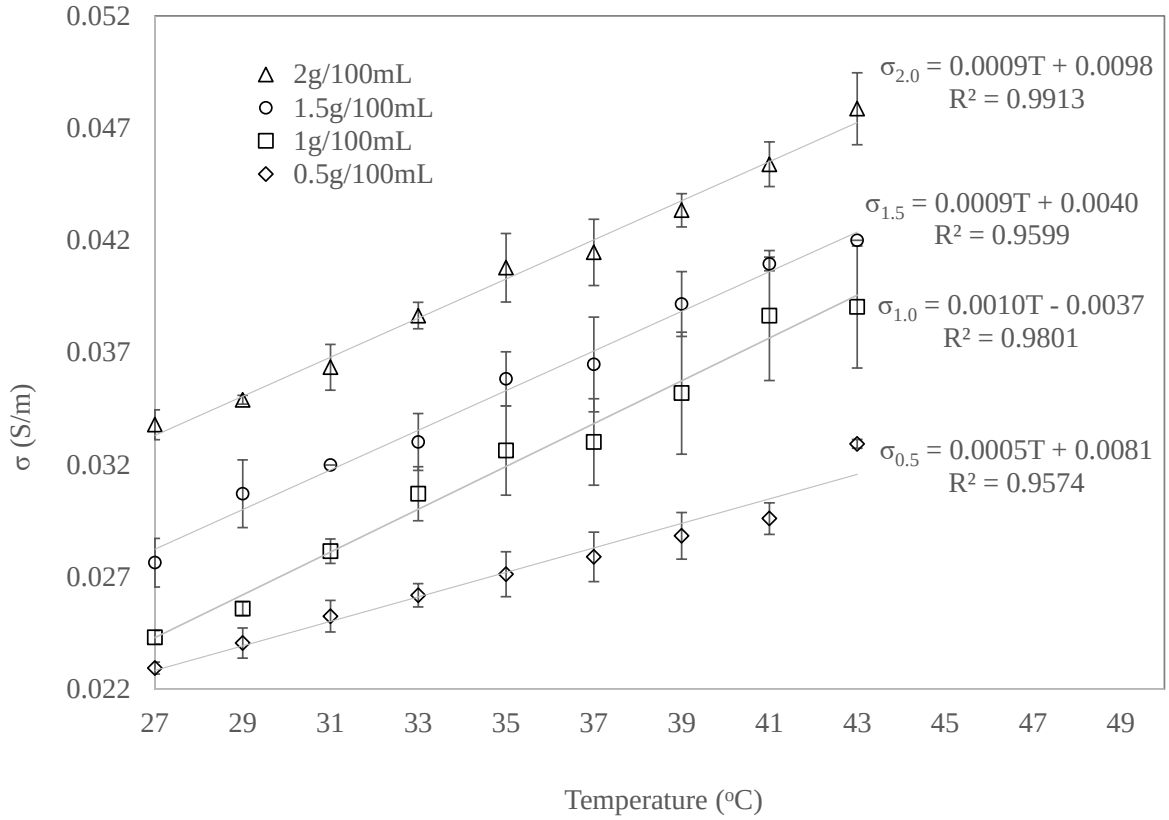

Figure 3 Electrical conductivity of the agar solutions

*Corresponding author e-mail: fengkska@ku.ac.th
ภาควิชาวิศวกรรมการอาหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ นครปฐม
Food Engineering Department, Faculty of Engineering at Kamphaengsaen, Kasetsart University, Nakhon Pathom

นอกจากนี้ยังสังเกตพบว่า น้ำวุ้นที่ความเข้มข้น 1.5 %w/v และ 2 %w/v เกิดการเซตตัวเป็นเจลเร็วมากขณะทดสอบและเกิดรอยไหม้ที่น้ำวุ้นบริเวณรอบเข็มอิเล็กโทรด แต่ไม่พบรอยไหม้ที่แผ่นอิเล็กโทรด สาเหตุที่เป็นเช่นนี้เป็นเพราะที่บริเวณรอบเข็มอิเล็กโทรดมีพื้นที่ผิวน้อยกว่าที่แผ่นอิเล็กโทรดมาก ทำให้ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าและความเข้มสนามไฟฟ้าบริเวณรอบตัวเข็มอิเล็กโทรดมีค่าสูงกว่าแผ่นอิเล็กโทรด ตัวอย่างน้ำวุ้นความเข้มข้น 1.5 %w/v และ 2 %w/v จึงไม่เหมาะแก่การนำมาใช้เคลือบ และยังพบว่า ที่อุณหภูมิ 35 °C น้ำวุ้นมีความหนืดมากและเกิดเจลได้เร็วมากเป็นเหตุให้วุ้นแข็งตัวเป็นก้อนยึดติดกันเองมากกว่าบนผิวเนื้อมะพร้าว เนื่องจากอุณหภูมิที่ใช้เคลือบมีค่าใกล้เคียงกับอุณหภูมิที่เกิดเจลของวุ้นความเข้มข้น 1 %w/v ซึ่งมีค่าประมาณ 30 °C [8] ในขณะที่หากเพิ่มอุณหภูมิเป็น 50 °C น้ำวุ้นมีความหนืดน้อยเกินไป ดังนั้นอุณหภูมิในการเคลือบที่เหมาะสมคือ 40 °C - 45 °C

2. พฤติกรรมการไหลของกระแสไฟฟ้าขณะเคลือบ

Figure 4 แสดงค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านน้ำวุ้นในระหว่างกระบวนการเคลือบ เมื่อเวลาผ่านไปกระแสไฟฟ้าจะมีค่าค่อยๆ ลดลง ตัวอย่างเช่น ตัวอย่างที่เคลือบด้วยแรงดันไฟฟ้า 1 V อุณหภูมิ 45 °C ที่เวลาเริ่มต้น (5 s) มีค่ากระแสไฟฟ้า 0.12 mA และลดลงเหลือ 0.02 mA เมื่อเวลาผ่านไป 45 s การลดลงของกระแสไฟฟ้าอาจมาจาก 2 สาเหตุ คือ 1) ช่วงเวลาที่ทำการเคลือบ โมเลกุลของวุ้นจะถูกดึงดูดให้เคลื่อนที่เข้าหาบริเวณเนื้อมะพร้าวทำให้น้ำวุ้นรอบเนื้อมะพร้าวมีความเข้มข้นสูงขึ้นและน้ำวุ้นบริเวณรอบนอกมีความเข้มข้นลดลงเป็นผลให้ค่าการนำไฟฟ้าบริเวณรอบนอกลดลงด้วย กระแสไฟฟ้าจึงเคลื่อนที่ได้น้อยลง 2) ขณะทำการเคลือบโมเลกุลของวุ้นจะถูกดึงดูดเข้ามาสะสมบริเวณรอบเนื้อมะพร้าว เมื่อความเข้มข้นสูงพอน้ำวุ้นจะสามารถก่อตัวเป็นเจลซึ่งมีสภาพเป็นฉนวนไฟฟ้าส่งผลให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านบริเวณที่เป็นเจลได้น้อยลง

เพื่อศึกษาระดับความเป็นฉนวนไฟฟ้าของเนื้อมะพร้าวและเจลของชั้นวุ้น ค่ากระแสไฟฟ้าในทางทฤษฎีจึงถูกคำนวณโดยใช้ข้อมูลค่าการนำไฟฟ้าของน้ำวุ้นความเข้มข้น 1 %w/v อุณหภูมิ 40 °C ที่แรงดัน 1 V เป็นเวลา 5 s ตามสมการที่ 4

$$i = \frac{V}{R} \qquad (4)$$

ค่า *R* สามารถคำนวณได้จาก $R = \frac{L}{\sigma A}$ โดย L คือระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด (3.5 cm) σ คือค่าการนำไฟฟ้าของน้ำวุ้นซึ่งสามารถหาได้จากข้อมูลใน Figure 3 (0.000351 S/cm) และ A คือพื้นที่ที่น้ำวุ้นสัมผัสกับอิเล็กโทรดซึ่งคำนวณได้จากผลคูณระหว่างความยาวแผ่นอิเล็กโทรด (16 cm) และความสูงของน้ำวุ้น (5.1 cm) เมื่อแทนค่าตัวแปรดังกล่าวลงในสมการที่ 4 จะได้ค่ากระแสไฟฟ้าเท่ากับ $16\ \mathrm{mA}$ เมื่อนำค่าที่คำนวณได้ไปเทียบกับค่าจริงจะพบว่าค่ากระแสไฟฟ้าที่วัดได้จริง (0.12 mA) มีค่าน้อยกว่าค่าที่คำนวณประมาณ 130 เท่า Pomfret et al. [9] ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับสมบัติทางไฟฟ้าของเจลที่ทำมาจาก Agarose และพบว่าค่าความต้านทานต่อพื้นที่ประมาณ 530 Ω/mm^2 แต่จากการคำนวณพบว่าค่าความต้านทานต่อพื้นที่ของน้ำวุ้นในงานวิจัยนี้มีค่าประมาณ 0.109 Ω/mm^2 เท่านั้น ซึ่งมีค่าน้อยกว่าค่าความต้านทานต่อพื้นที่ของเจล Agarose ประมาณ 5,000 เท่า แสดงให้เห็นว่าชั้นวุ้นที่เคลือบรอบผิวเนื้อมะพร้าวมีระดับความเป็นฉนวนไฟฟ้ามากกว่าน้ำวุ้นจึงทำให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านในระบบได้น้อยลง นอกจากนี้การที่กระแสไฟฟ้าไหลผ่านได้น้อยลงยังเป็นผลมาจากการที่มะพร้าวมีไขมันเป็นองค์ประกอบ สำหรับกรณีอื่น ๆ กระแสไฟฟ้าที่วัดได้จริงก็มีค่าน้อยกว่าค่าที่คำนวณได้ตามทฤษฎี

*Corresponding author e-mail: fengkska@ku.ac.th
ภาควิชาวิศวกรรมการอาหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ นครปฐม
Food Engineering Department, Faculty of Engineering at Kamphaengsaen, Kasetsart University, Nakhon Pathom

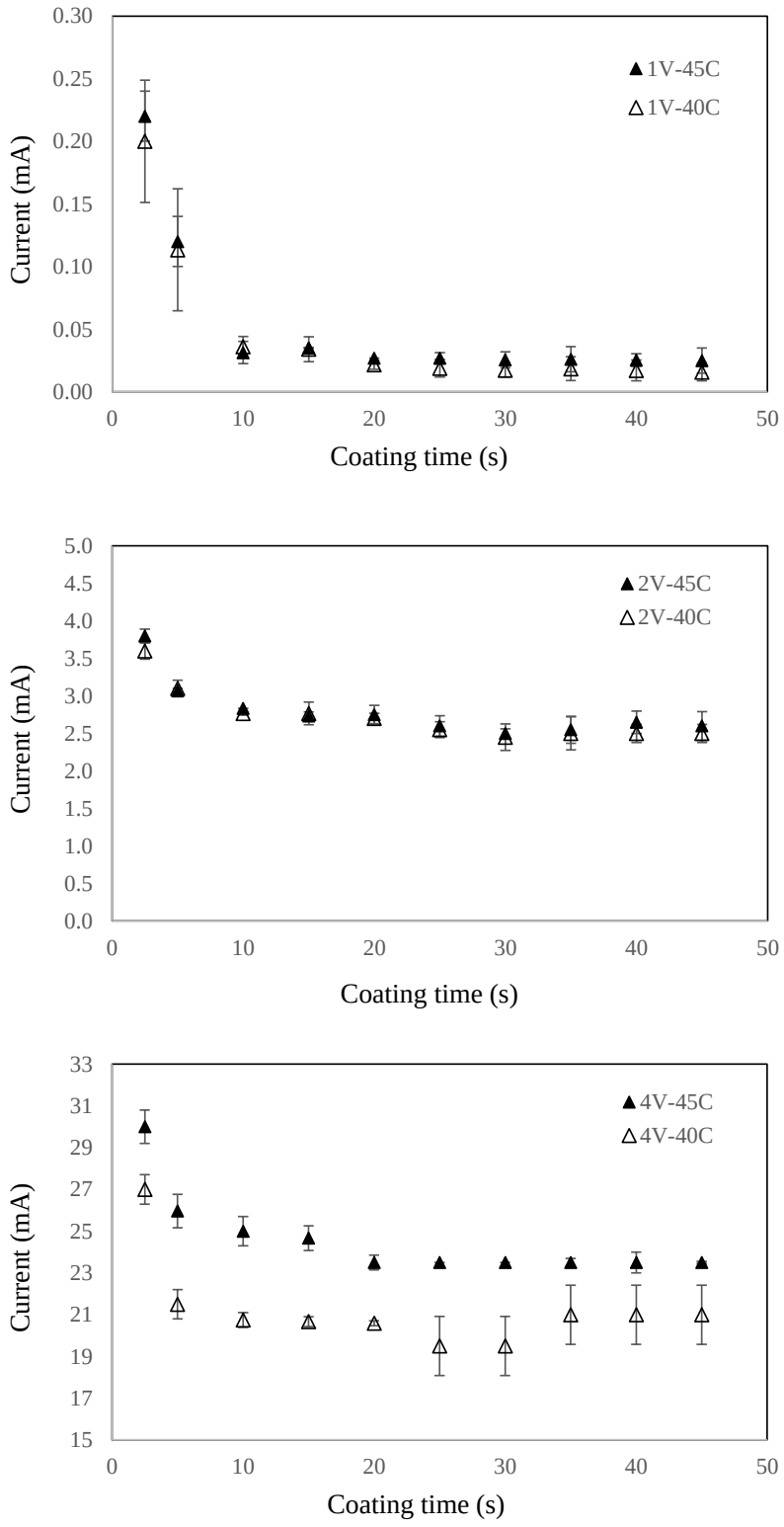

Figure 4 Electric current passing through the 1 %w/v agar solution at 40 and 45 °C at a voltage of: 1 V (top), 2V (middle) and 4V (bottom)

*Corresponding author e-mail: fengkska@ku.ac.th
ภาควิชาวิศวกรรมการอาหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ นครปฐม
Food Engineering Department, Faculty of Engineering at Kamphaengsaen, Kasetsart University, Nakhon Pathom

3. ผลของวิธีการเคลือบต่อความหนา

Figure 5 แสดงการเปรียบเทียบความหนาและความหนาแน่นของชั้นวุ้นเคลือบโดยการทดลองแบบวิธีปกติกับวิธีการใช้ไฟฟ้า ความหนาของชั้นวุ้นของตัวอย่างที่ผ่านการเคลือบโดยวิธีปกติมีค่าอยู่ในช่วง 400 µm - 600 µm ในขณะที่ความหนาของชั้นวุ้นของตัวอย่างที่ผ่านการเคลือบโดยวิธี EDC มีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 800 µm - 900 µm นอกจากนี้ยังพบว่าการใช้แรงดันไฟฟ้าในการเคลือบจะทำให้ความหนาแน่นของชั้นวุ้นเพิ่มขึ้นจาก 1.01 g/cm^3 เป็น 1.03 g/cm^3 โดยความหนาแน่นของชั้นวุ้นเคลือบจะใกล้เคียงกันไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา (ไม่ได้รายงานผลไว้)

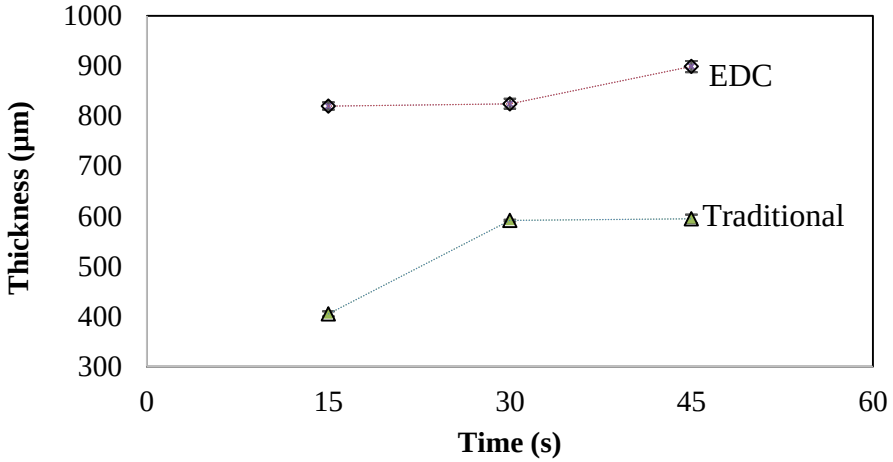

Figure 5 Thickness of the agar layer on the samples surface coated using the traditional method and electrodeposition coating (EDC) technique using 1 %w/v agar solution at 40 °C for 15 s to 45 s

กลไกการเกาะติดของวุ้นในวิธีการเคลือบแบบปกติมี 2 ขั้นตอน คือ 1) เมื่อทำการจุ่มเนื้อมะพร้าวลงในน้ำวุ้น จะมีวุ้นบางส่วนมาเคลือบอยู่ที่โดยรอบเนื้อมะพร้าวทันทีเนื่องจากตัวอย่างมีอุณหภูมิเย็นกว่าน้ำวุ้นเล็กน้อย และ 2) เมื่อยกตัวอย่างขึ้นน้ำวุ้นบางส่วนที่เคลือบอยู่บนเนื้อมะพร้าวจะค่อยๆ เซตตัวเป็นเจล ซึ่งโดยปกติจะใช้เวลาประมาณ 1 นาที

ส่วนในกรณีของวิธีการเคลือบแบบ EDC นอกจากกลไกการเกาะติดของวุ้นบนตัวอย่างตามที่ระบุข้างต้นแล้ว อีกหนึ่งขั้นตอนการเกาะติดของวุ้นบนผิวเนื้อมะพร้าวคือการที่แรงดันไฟฟ้าดึงดูดโมเลกุลของวุ้นเข้ามาโดยรอบเนื้อมะพร้าว Figure 6 แสดงแนวคิดเรื่องกลไกการเกาะติดของวุ้นบนเนื้อมะพร้าว เมื่อจ่ายแรงดันไฟฟ้าขั้วบวกให้กับเข็มอิเล็กโทรด และขั้วลบให้กับแผ่นอิเล็กโทรดที่อยู่ด้านข้างทั้งสองแผ่น โมเลกุลของวุ้นซึ่งมีสภาพทางไฟฟ้าเป็นลบอ่อนๆ จะถูกแรงทางไฟฟ้าดึงดูดให้เคลื่อนที่ไปทิศทางที่มีศักย์ไฟฟ้าสูงกว่า จึงไปยึดเกาะที่เนื้อมะพร้าวซึ่งเชื่อมต่อทางไฟฟ้ากับเข็มอิเล็กโทรดซึ่งขั้วมีศักย์ไฟฟ้าเป็นบวก กลไกดังกล่าวทำให้ 1) ความเข้มข้นของโมเลกุลวุ้นรอบชิ้นตัวอย่างสูงขึ้นซึ่งส่งผลให้น้ำวุ้นเปลี่ยนเฟสจากโซลเป็นเจลได้ในขณะที่ตัวอย่างยังอยู่ในกระบวนการเคลือบ 2) ชั้นวุ้นมีความสม่ำเสมอ 3) ความหนาของตัวอย่างหนากว่าวิธีปกติประมาณร้อยละ 150 - 200 และ 4) เวลาในการเซตตัวสั้นกว่าวิธีการเคลือบปกติ กลไกดังกล่าวนับเป็นข้อเด่นของวิธีการ EDC เทียบกับวิธีปกติ

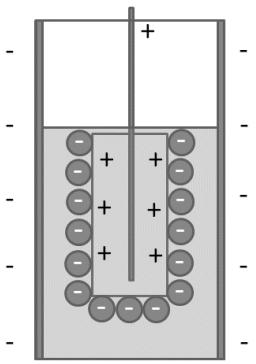

Figure 6 Agar layer formation on the sample's surface during the electrodeposition coating process

*Corresponding author e-mail: fengkska@ku.ac.th
ภาควิชาวิศวกรรมการอาหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ นครปฐม
Food Engineering Department, Faculty of Engineering at Kamphaengsaen, Kasetsart University, Nakhon Pathom

4. ผลของปัจจัยต่างๆ ต่อความหนาและความหนาแน่นของชั้นวุ้นที่เคลือบด้วยวิธีการ EDC

4.1 ผลของเวลา

Table 1 แสดงให้เห็นว่าตัวอย่างที่ผ่านการเคลือบที่แรงดัน 1 V ความเข้มข้น 1 %w/v อุณหภูมิ 45 ℃ เวลาที่ใช้ในการเคลือบ 15 s จะมีความหนาของชั้นวุ้น 42 µm เมื่อทำการเพิ่มเวลาเป็น 30 s และ 45 s ความหนามีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 86 µm และ 120 µm ตามลำดับ การที่ความหนาเพิ่มขึ้นเมื่อเวลานานขึ้นเป็นผลมาจากโมเลกุลวุ้นจะถูกดึงดูดให้เคลื่อนที่เข้ามาโดยรอบเนื้อมะพร้าวได้มากขึ้น ทำให้เกิดการสะสมตัวกันจนสามารถเกิดเจลที่มีความหนาเพิ่มขึ้น ในทำนองเดียวกันความหนาของชั้นวุ้นของตัวอย่างที่ผ่านการเคลือบที่ทุกระดับความเข้มข้น แรงดันไฟฟ้าและอุณหภูมิจะมีลักษณะเช่นเดียวกัน คือ เมื่อเพิ่มเวลาในการเคลือบความหนาจะเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ (p=0.000) แต่ไม่ทำให้ความหนาแน่นของวุ้นแตกต่างกัน (p=0.883) โดยตัวอย่างที่ผ่านการเคลือบที่อุณหภูมิ 40 ℃ มีความหนาแน่นใกล้เคียงอยู่ในช่วงประมาณ 1.011 g/cm^3 - 1.053 g/cm^3 โดยไม่ขึ้นกับระยะเวลาในการเคลือบ

เป็นที่น่าสังเกตว่า อัตราการเพิ่มความหนาของชั้นวุ้นมีแนวโน้มช้าลงในช่วงเวลา 30 s-45 s ยกตัวอย่างเช่น อัตราการเพิ่มความหนาของชั้นวุ้นบนตัวอย่างที่ผ่านการเคลือบที่แรงดัน 1 V 1 %w/v 45 ℃ ที่ช่วงเวลา 0 s-15 s, 15 s-30 s และ 30 s-45 s มีค่าเท่ากับ 2.8 µm/s, 2.9 µm/s และ 2.3 µm/s การลดลงของอัตราการเพิ่มความหนาของชั้นวุ้นนี้จะสังเกตได้ชัดขึ้นเมื่อแรงดันไฟฟ้าที่ใช้มีค่าสูงขึ้นเป็น 2 V และ 4 V ในระยะเริ่มต้นโมเลกุลวุ้นจะเริ่มก่อตัวเป็นเจล ทำให้ความเข้มข้นของน้ำวุ้นบริเวณรอบนอกค่อยๆ ลดลง เมื่อเวลาผ่านไปความหนาของชั้นวุ้นจะเพิ่มขึ้นทำให้ความเข้มข้นของโมเลกุลรอบนอกลดลงมากขึ้นเป็นผลให้เวลาในการเกิดเจลนานขึ้น

4.2 ผลของแรงดันไฟฟ้า

เมื่อใช้น้ำวุ้นความเข้มข้น 1 %w/v การเพิ่มแรงดันไฟฟ้าจะทำให้ความหนาของชั้นวุ้นเพิ่มขึ้น โดยตัวอย่างที่ผ่านการเคลือบที่แรงดัน 1 V, 2 V และ 4 V ที่ 45℃ เป็นเวลา 15 s จะมีความหนาของชั้นวุ้นเพิ่มขึ้นจาก 42.2 µm เป็น 51.3 µm และ 71.6 µm ตามลำดับ ผลที่ได้สอดคล้องกับการทดลองเบื้องต้นในส่วนที่ 1 ซึ่งได้สรุปไว้แล้วการเคลือบภายใต้แรงดันไฟฟ้าสูงจึงสามารถเกิดเจลที่มีความหนามากกว่าการเคลือบภายใต้แรงดันไฟฟ้าต่ำ อย่างไรก็ดี ระดับของแรงดันไฟฟ้าที่ใช้ในงานวิจัยนี้ไม่มีผลต่อความหนาของชั้นวุ้นเมื่อใช้น้ำวุ้นที่ความเข้มข้นต่ำ (0.5 %w/v)

ตัวอย่างที่ผ่านการเคลือบที่เงื่อนไขเดียวกับข้างต้นพบว่าความหนาแน่นของวุ้นมีค่าเป็น 1.239 g/cm^3, 1.247 g/cm^3 และ 1.271 g/cm^3 ตามลำดับ ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการเพิ่มแรงดันไฟฟ้าไม่ทำให้ความหนาแน่นของวุ้นแตกต่างกัน (p=0.793) อย่างไรก็ดี พบว่าชั้นวุ้นเคลือบของตัวอย่างที่ผ่านการเคลือบที่แรงดัน 1 V โดยใช้น้ำวุ้นความเข้มข้น 0.5 %w/v ที่ 45 ℃ เป็นเวลา 15 s มีความหนาแน่นลดลงกว่าตัวอย่างอื่นๆ อย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งน่าจะเกิดสาเหตุร่วมกันระหว่างการใช้น้ำวุ้นที่มีระดับความเข้มข้นต่ำและใช้เวลาในการเคลือบน้อย

4.3 ผลของอุณหภูมิ

จาก Table 1 จะเห็นว่าอุณหภูมิมีผลต่อความหนาของชั้นวุ้นยกเว้นที่ความเข้มข้นต่ำ เมื่อลดอุณหภูมิที่ใช้ในการเคลือบความหนาของวุ้นจะเพิ่มขึ้น โดยทุกตัวอย่างที่ผ่านการเคลือบที่ 40 ℃ จะมีความหนาของชั้นวุ้นมากกว่าตัวอย่างที่ถูกเคลือบที่ 45 ℃ เป็นที่ทราบกันดีว่าที่อุณหภูมิต่ำ ความเข้มข้นที่ของเหลวจะเกิดการเปลี่ยนเฟสจากโซลเป็นเจลมีค่าน้อยกว่าที่อุณหภูมิสูง [8] ดังนั้นหากเปรียบเทียบระหว่างตัวอย่างที่ถูกเคลือบโดยใช้สภาวะเดียวกันแต่ใช้อุณหภูมิแตกต่างกัน น้ำวุ้นบริเวณรอบเนื้อมะพร้าวที่ถูกเคลือบโดยใช้อุณหภูมิต่ำกว่าจะเข้าสู่จุดเกิดเจลได้เร็วกว่าที่อุณหภูมิสูง ปรากฏการณ์นี้ทำให้เกิดผล 2 อย่างคือ 1) ผลต่อความหนา กล่าวคือ หากใช้เวลาในกระบวนการเท่ากัน ชั้นวุ้นบนผิวตัวอย่างที่อุณหภูมิต่ำจะมีความหนามากกว่าที่อุณหภูมิสูงเพราะเกิดเจลได้เร็วกว่า เมื่อเวลาผ่านไปโมเลกุลวุ้นจะถูกดึงดูดเข้ามารอบชั้นวุ้นและสามารถก่อตัวเป็นเจล พอกทับชั้นแรกส่งผลให้ชั้นวุ้นรอบเนื้อมะพร้าวมีความหนาเพิ่มขึ้น กระบวนการจะเกิดซ้ำในลักษณะเดียวกันนี้จนสิ้นสุดการเคลือบ และ 2) ผลต่อความ

*Corresponding author e-mail: fengkska@ku.ac.th
ภาควิชาวิศวกรรมการอาหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ นครปฐม
Food Engineering Department, Faculty of Engineering at Kamphaengsaen, Kasetsart University, Nakhon Pathom

หนาแน่น โดยชั้นวุ้นบนผิวตัวอย่างที่อุณหภูมิต่ำจะมีความหนาแน่นน้อยกว่าเนื่องจากความเข้มข้นในการเปลี่ยนเฟสจากโซลเป็นเจลที่อุณหภูมิต่ำมีค่าน้อยกว่านั่นเอง โดยจากผลการทดลองพบว่าอุณหภูมิที่ใช้ในการเคลือบยังมีผลต่อความหนาแน่นของวุ้นอย่างมาก (p=0.000) การลดอุณหภูมิทำให้ความหนาแน่นของชั้นวุ้นลดลง ยกตัวอย่าง เช่น ตัวอย่างที่ผ่านการเคลือบวุ้นที่อุณหภูมิ 45 ℃ และ 40 ℃ แรงดันไฟฟ้า 1 V ความเข้มข้น 1 %w/v เป็นเวลา 15 s ความหนาแน่นของวุ้นมีค่าเป็น 1.239 g/cm^3 และ 1.021 g/cm^3 ตามลำดับ

4.4 ผลของความเข้มข้นน้ำวุ้น

ความเข้มข้นของน้ำวุ้นถือเป็นปัจจัยมีผลต่อความหนาของชั้นวุ้นมากที่สุด (p=0.000) โดยตัวอย่างที่ผ่านการเคลือบที่ความเข้มข้น 0.5 %w/v อุณหภูมิ 45 ℃ ภายใต้แรงดัน 1 V เป็นเวลา 15 s ความหนาของชั้นวุ้นมีค่า 17.7 μm เมื่อเพิ่มความเข้มข้นเป็น 1 %w/v ความหนาเพิ่มขึ้นเป็น 42.2 μm โมเลกุลของวุ้นในน้ำวุ้นที่มีความเข้มข้นสูงจะเรียงตัวกันอย่างหนาแน่นกว่าตัวอย่างที่มีความเข้มข้นต่ำกว่า ทำให้ถูกดึงดูดเข้าไปบริเวณรอบๆ เนื้อมะพร้าวได้เร็วกว่า โมเลกุลของวุ้นบริเวณนี้จะสะสมรวมตัวกันจนถึงจุดเกิดเจลได้เร็วกว่าและกลายเป็นชั้นวุ้นที่มีความหนามากกว่าชั้นวุ้นของตัวอย่างที่ผ่านการเคลือบด้วยน้ำวุ้นที่มีความเข้มข้นต่ำกว่า ในทำนองเดียวกันความหนาของชั้นวุ้นที่ถูกเคลือบภายใต้เงื่อนไขอื่นๆ ก็จะเพิ่มตามความเข้มข้นด้วย

ความเข้มข้นของน้ำวุ้นไม่มีผลต่อความหนาแน่นของชั้นวุ้น (p=0.064) เนื่องจากค่าความเข้มข้นในการเกิดเจลที่อุณหภูมิหนึ่งๆ จะมีค่าคงที่ ทำให้ความหนาแน่นของชั้นวุ้นที่เคลือบโดยใช้น้ำวุ้นทั้ง 2 ความเข้มข้นไม่แตกต่างกัน โดยตัวอย่างที่ผ่านการเคลือบที่ความเข้มข้น 0.5 %w/v และ 1 %w/v ที่แรงดัน 1 V อุณหภูมิ 45 ℃ เป็นเวลา 15 s จะมีความหนาแน่นของวุ้นเป็น 1.184 g/cm^3 และ 1.239 g/cm^3 ตามลำดับ

สรุปผล

ในงานวิจัยนี้ได้นำการเคลือบด้วยการใช้ไฟฟ้าสถิต (Electrodeposition Coating หรือ EDC) มาใช้ในการเคลือบวุ้นบนเนื้อมะพร้าวเพื่อศึกษาผลของความเข้มข้นของน้ำวุ้น แรงดันไฟฟ้า อุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการเคลือบต่อสมบัติทางกายภาพของชั้นวุ้นที่เคลือบบนผิวเนื้อมะพร้าว ได้แก่ ความหนาและความหนาแน่น จากผลการทดลองพบว่า ค่าการนำไฟฟ้าของน้ำวุ้นเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นแบบเชิงเส้นโดยมีอัตราการเพิ่มที่แตกต่างกันขึ้นกับความเข้มข้นของวุ้น การเพิ่มเวลาในการเคลือบจะทำให้ความหนาเพิ่มขึ้น โดยอัตราการเพิ่มความหนาของชั้นวุ้นมีแนวโน้มลดลงเมื่อเวลาในการเคลือบนานขึ้น ส่วนผลของแรงดันไฟฟ้าที่มีต่อความหนาของชั้นวุ้นนั้นมีลักษณะเหมือนกันกับเวลาที่ใช้ในการเคลือบคือ เมื่อเพิ่มแรงดันไฟฟ้าจะทำให้ความหนาของชั้นวุ้นเพิ่มขึ้น โดยอัตราการเพิ่มความหนาประมาณร้อยละ 10 - 20 ขึ้นอยู่กับเงื่อนไขในการเคลือบ ในทำนองเดียวกันการเพิ่มความเข้มข้นของน้ำวุ้นทำให้ชั้นวุ้นมีความหนามากขึ้นแต่มีอัตราการเพิ่มของความหนาสูงกว่ามาก ซึ่งแสดงให้เห็นว่าความเข้มข้นมีผลต่อความหนาอย่างมาก ในทางตรงกันข้าม การเพิ่มอุณหภูมิจะทำให้ความหนาของชั้นวุ้นลดลงเนื่องจากน้ำวุ้นที่อุณหภูมิสูงมีความเข้มข้นในการเกิดเจลที่สูงกว่าน้ำวุ้นที่อุณหภูมิต่ำอย่างเห็นได้ชัด แต่จะทำให้ความหนาแน่นของชั้นวุ้นเพิ่มขึ้นประมาณร้อยละ 20 ความสามารถในการปรับความหนาแน่นของชั้นวุ้นได้นี้ถือเป็นข้อเด่นของวิธีการเคลือบแบบ EDC ที่คิดค้นขึ้นในงานวิจัยนี้ องค์ความรู้ที่ได้จากวิจัยนี้สามารถนำไปสู่การต่อยอดเพื่อผลิตผลิตภัณฑ์น้ำมะพร้าวพร้อมเนื้อมะพร้าว รวมทั้งอาจนำไปใช้ในการปรับปรุงกระบวนผลิตภัณฑ์อาหารที่ต้องใช้กระบวนการเคลือบเพื่อทำให้ผิวของผลิตภัณฑ์มีลักษณะเนื้อสัมผัสตามต้องการได้แม่นยำมากขึ้น

*Corresponding author e-mail: fengkska@ku.ac.th
ภาควิชาวิศวกรรมการอาหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ นครปฐม
Food Engineering Department, Faculty of Engineering at Kamphaengsaen, Kasetsart University, Nakhon Pathom

Table 1 Thickness and density of the agar layer of the samples coated under different conditions

Concentration (%w/v)	Voltage (V)	Temperature (°C)	Time (s)	Thickness* (μm)	Density* (g/cm^3)
1	1	45	15	42±8^{g}	1.239±0.020^{a,b}
			30	86±12^{f,g}	1.243±0.010^{a,b}
			45	120±23^{f}	1.249±0.021^{a,b}
		40	15	575±36^{e}	1.021±0.032^{c}
			30	765±76^{d}	1.022±0.024^{c}
			45	1167±133^{c}	1.024±0.012^{c}
	2	45	15	51±8^{g}	1.247±0.049^{a,b}
			30	107±19^{f,g}	1.249±0.052^{a,b}
			45	139±24^{f}	1.258±0.022^{a,b}
		40	15	650±90^{d,e}	1.031±0.020^{c}
			30	1069±60^{c}	1.036±0.004^{c}
			45	1334±106^{b}	1.037±0.002^{c}
	4	45	15	72±12^{f,g}	1.271±0.022^{a}
			30	117±16^{f}	1.274±0.002^{a}
			45	171±14^{f}	1.276±0.027^{a}
		40	15	743±72^{d}	1.045±0.019^{c}
			30	1385±91^{a,b}	1.049±0.012^{c}
			45	1560±62^{a}	1.053±0.038^{c}
0.5	1	45	15	18±5^{g}	1.184±0.012^{b,c}
			30	30±2^{g}	1.192±0.021^{a,b}
			45	35±4^{g}	1.195±0.001^{a,b}
		40	15	26±2^{g}	1.011±0.010^{c}
			30	32±12^{g}	1.013±0.030^{c}
			45	43±4^{g}	1.018±0.032^{c}
	2	45	15	24±4^{g}	1.206±0.050^{a,b}
			30	33±5^{g}	1.212±0.024^{a,b}
			45	45±2^{g}	1.217±0.021^{a,b}
		40	15	34±9^{g}	1.024±0.022^{c}
			30	39±8^{g}	1.028±0.004^{c}
			45	49±6^{g}	1.031±0.002^{c}
	4	45	15	33±3^{g}	1.230±0.022^{a,b}
			30	39±2^{g}	1.235±0.030^{a,b}
			45	51±3^{g}	1.238±0.060^{a,b}
		40	15	39±11^{g}	1.041±0.02^{c}
			30	43±1^{g}	1.044±0.038^{c}
			45	58±2^{g}	1.046±0.039^{c}

*The values shown in the table are the average values ± standard deviation (n=3). The different superscript character means significant difference between the average values ($p<0.05$).

*Corresponding author e-mail: fengkska@ku.ac.th
ภาควิชาวิศวกรรมการอาหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ นครปฐม
Food Engineering Department, Faculty of Engineering at Kamphaengsaen, Kasetsart University, Nakhon Pathom

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากคณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เอกสารอ้างอิง

[1] Wetwitayaklung, P. (2013). Coconut proteins. Thai Bulletin of Pharmaceutical Sciences. 8(1): 9-18.

[2] Pootao, S. and Kanjanapongkul, K. (2016). Effects of ohmic pretreatment on crude palm oil yield and key qualities. Journal of Food Engineering. 190: 94-100.

[3] Klinsoda, J. (2016). Edible coating and film for vegetables and fruits. Institute of Food Research and Product Development Journal. 46: 33-39.

[4] Chaisomboonphan, P. (2012). Study and analysis of iron color coating technology using sustainable industry development. Master's thesis. Rajamangala University of Technology Phra Nakhon. (In Thai).

[5] Trirongrat, W. (2014). Defectives reduction in steel spray painting process using FMEA technique: Case study of Gold Press Industry Co., Ltd. Rajamangala University of Technology Thanyaburi. (In Thai).

[6] Tsuchiya, Y. and Hong, K.C. (1965). Agarose and agaropectin in gelidium and gracilaria agar. **In** Proceedings of the Fifth International Seaweed Symposium, Pergamon. August 25–28, 1965. 315-321.

[7] Rioux, L.E. and Turgeon, S.L. (2015). Seaweed carbohydrates. Seaweed Sustainability. Elsevier Science Publishing Co Inc.

[8] Somboom, N. (2013). Properties of agar and fish gelatin mixed gels. Master's Thesis. Prince of Songkla University. (In Thai).

[9] Pomfret, R., Sillay, K. and Miranpuri, G. (2013). Investigation of the electrical properties of agarose gel: characterization of concentration using nyquist plot phase angle and the implications of a more comprehensive in vitro model of the brain. Annals of neurosciences. 20(3): 99–107.

*Corresponding author e-mail: fengkska@ku.ac.th

ภาควิชาวิศวกรรมการอาหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ นครปฐม

Food Engineering Department, Faculty of Engineering at Kamphaengsaen, Kasetsart University, Nakhon Pathom