

ผลของสนามไฟฟ้าพัลส์ต่อการดองน้ำแบบออสโมติก และจลนพลศาสตร์การถ่ายเทมวลของเนื้อสตรอว์เบอร์รี

Effects of Pulsed Electric Field on the Osmotic Dehydration and Mass Transfer Kinetics of Strawberries Tissue

ชิตวัน สมบัติ, ตะชี มาลัยไพรวัลย์, วรณรัช แก้วดวงตา,

ณัฐินี ทรายแก้ว, ชัชวาลย์ กันทะลา และพานิช อินต๊ะ

หน่วยวิจัยสนามไฟฟ้าประยุกต์ในงานวิศวกรรม วิทยาลัยเทคโนโลยีและสหวิทยาการ
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ตำบลป่าป้อง อำเภอต๋อยสะแกต จังหวัดเชียงใหม่ 50220

ปพน สะอาดยาง*

สาขาเทคโนโลยีไฟฟ้าอุตสาหกรรม คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏเทพสตรี

ถนนนารายณ์มหาราช ตำบลทะเลชุบศร อำเภอเมือง จังหวัดลพบุรี 15000

Chitawan sombat, Tachi Malaipraiwan, Wannatad kaewduangta,

Nuttinee Saikaew, Chatchawan Kantala and Panich Intra

Research Unit of Applied Electric Field in Engineering, College of Integrated Science and Technology,

Rajamangala University of Technology Lanna, Papong, Doisaket, Chiang Mai 50220

Papol Sardyoung*

Department of Electrical Technology Industrial, Faculty of Technology Industrial, Thepsatri Rajabhat

University, Naraimaharat Road, Talay Chubsorn, Muang, Lopburi 15000

บทคัดย่อ

วัตถุประสงค์ของงานนี้ คือ เพื่อศึกษาผลของสนามไฟฟ้าพัลส์ต่อการดองน้ำแบบออสโมติกและจลนพลศาสตร์การถ่ายเทมวลของเนื้อสตรอว์เบอร์รี และเพื่อเปรียบเทียบสมบัติทางกายภาพสตรอว์เบอร์รีที่ผ่านการแช่ด้วยสนามไฟฟ้าพัลส์และการแช่แบบดั้งเดิม การศึกษานี้ใช้ความเข้มข้นสนามไฟฟ้าพัลส์ที่ 4 กิโลโวลต์ต่อเซนติเมตร และจำนวนพัลส์ 50, 100, 150 และ 200 พัลส์ ตามลำดับ ผลการศึกษาพบว่า การสูญเสียน้ำและของแข็งของสตรอว์เบอร์รีที่ผ่านสนามไฟฟ้าพัลส์จะสูงกว่าแบบดั้งเดิม มีร้อยละการสูญเสียน้ำและร้อยละของของแข็งที่เพิ่มขึ้นสูงกว่าการแช่แบบช้า ส่งผลให้ปริมาณน้ำในสตรอว์เบอร์รีลดลงเฉลี่ยร้อยละ 11.99 ± 0.18 และทำให้สารละลายซูโครสน้ำหนัก

เพิ่มเฉลี่ยขึ้นร้อยละ 0.31 ส่งผลให้ค่าความหวานในสารละลายซูโครสลดลงจนมีค่าเฉลี่ย 58 องศาบริกซ์ สตรอเบอร์รี่เข้มข้นประมาณ 37.67 องศาบริกซ์ ที่มีจำนวนพัลส์ 50, 100, 150 และ 200 พัลส์ สูงกว่าประมาณ 39.67, 40.33, 46.33 และ 45.33 องศาบริกซ์ ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าสนามไฟฟ้าพัลส์ทำให้การถ่ายเทมวลซูโครสเข้าสู่สตรอเบอร์รี่สูงกว่าการแช่อิ่มแบบดั้งเดิม วิธีนี้ลดเวลาการแช่ของสตรอเบอร์รี่แช่อิ่มด้วย 40 องศาบริกซ์ โดยจำนวนพัลส์ที่ 150 พัลส์ ใช้ระยะเวลาสั้นที่สุด 11 ชั่วโมง ส่วนการแช่อิ่มแบบช้าใช้ระยะเวลามากกว่า 24 ชั่วโมง และจากการวิเคราะห์ค่าทางสถิติพบว่าด้านสีของค่า L^* , a^* และ b^* ของสตรอเบอร์รี่ที่ผ่านสนามไฟฟ้าพัลส์ไม่มีความแตกต่างกับการแช่อิ่มแบบช้าอย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$) งานวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่าสนามไฟฟ้าพัลส์ช่วยลดระยะเวลาในการดองน้ำแบบออสโมติกได้ ทำให้สีพื้นผิวและลักษณะเหมือนสตรอเบอร์รี่สดที่ไม่เปลี่ยนแปลงต่างไปจากเดิม

คำสำคัญ : การแช่อิ่ม; สตรอเบอร์รี่; สนามไฟฟ้าพัลส์; การถ่ายเทมวลซูโครส

Abstract

The aim of this work is to study the effect of pulsed electric field (PEF) on the osmotic dehydration and mass transfer kinetics of strawberries tissue and to compare the physical properties of pre-treated strawberries by the PEF and the traditional treatment. In this study, the PEF intensity was about 4 kV/cm and pulsed numbers of 50, 100, 150 and 200 pulses, respectively. The result showed that the water loss and the solid gain of pre-treated strawberries by the PEF were higher than of the traditional treatment. The average percentage of the weight loss was decreased to 11.99 ± 0.18 and the percentage of the weight of sucrose solution was increased to 0.31 as a result of the concentrated in the sucrose solution decreased of about 58 °Brix. The values of the concentrated strawberries of about 37.67 °Brix with the pulsed numbers of 50, 100, 150 and 200 pulses were higher than about 39.67, 40.33, 46.33, and 45.33° Brix, respectively. It was shown that the PEF method resulted in sucrose higher than the traditional treatment, this method was also reduced the immersion time of the strawberry compote with 40° Brix. The pulsed numbers of 150 pulses lasts for 11 hrs., which was less than the traditional treatment that lasts more than 24 hrs. The color of L^* , a^* and b^* of pre-treated strawberries by the PEF was not significantly different ($p > 0.05$). It was shown that the pulsed electric fields can be reduced the osmotic dehydrate time, maintaining to color, texture and same the fresh-like characteristics of strawberries.

Keywords: strawberry; osmotic dehydrated; pulsed electric field; sucrose mass transfer

1. บทนำ

สตรอเบอร์รี่เป็นพืชเศรษฐกิจชนิดหนึ่งที่มีการปลูกเพื่อทดแทนการปลูกฝิ่นและแก้ปัญหาการทำไร่

เลื่อนลอยบนพื้นที่ราบสูง พื้นที่ราบสูงในประเทศไทย ได้แก่ อำเภอฟาง แม่ริม สะเมิง จอมทอง (บนดอยอินทนนท์) ในจังหวัดเชียงใหม่ อำเภอแม่สายในจังหวัด

เชียงราย และในพื้นที่ภาคกลาง ได้แก่ จังหวัดกาญจนบุรี ข้อดีของการปลูกสตอร์วเบอร์รี่ คือ ผลตอบแทนสูงในระยะเวลาอันสั้น พื้นที่ 1 ไร่ สามารถให้ผลผลิต 1,500-3,000 กิโลกรัม โดยราคาที่เกษตรกรขายเพื่อบริโภคผลสดราคา กิโลกรัมละ 40-50 บาท และเข้าสู่โรงงานแปรรูปราคา กิโลกรัมละ 10-15 บาท สำหรับการส่งออกผลสตอร์วเบอร์รี่แปรรูป เช่น อบแห้ง แช่อิ่ม ในเชิงอุตสาหกรรมไปยังต่างประเทศนั้น สามารถสร้างรายได้ให้ประเทศไทยหลายร้อยล้านบาทต่อปี [1]

การแช่อิ่มผลไม้เป็นวิธีการแปรรูปอาหารเพื่อลดหรือจำกัดปริมาณน้ำในอาหารที่จุลินทรีย์สามารถนำไปใช้ ด้วยการใช้น้ำตาลซูโครสให้เกิดการแทรกซึมเข้าสู่เนื้อผลไม้ให้มีรสหวานตามต้องการ หรือทำให้มีความเข้มข้นของน้ำตาลซูโครสในเนื้อผลไม้เพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ จนกระทั่งถึงจุดอิ่มตัว [2] ความแตกต่างของแรงดันออสโมติกที่ทำให้เกิดการถ่ายเทมวลสารของน้ำในเนื้อเยื่อผลไม้ ออกสู่สารละลาย และตัวถูกละลายของแข็งของซูโครสแพร่เข้าสู่เนื้ออาหารเพิ่มมากขึ้น [3] ซึ่งอุตสาหกรรมอาหารแปรรูปแช่อิ่มในปัจจุบันมีการใช้ความร้อนเข้ามาช่วยในการแช่อิ่ม เนื่องจากทำให้กระบวนการแช่อิ่มผลไม้เกิดขึ้นได้เร็ว เพราะทำให้เนื้อเยื่อผลไม้อ่อนตัวลงที่นำไปสู่การเปิดเนื้อเยื่อออกเกิดการถ่ายเทมวลสารได้ดีและเร็วขึ้น แต่การให้ความร้อนที่สูงและใช้เวลานานทำให้โครงสร้างบางส่วนของผลไม้เกิดการเปลี่ยนแปลงสภาพไป เนื้อเยื่อถูกทำลายอย่างรุนแรง ส่งผลให้ผลไม้มีเนื้อสัมผัสและ สีคล้ำขึ้น มีกลิ่นน้ำตาลไหม้ [4] และเสียคุณค่าทางโภชนาการ [5]

ปัจจุบันมีรายงานวิจัยที่ประยุกต์ใช้สนามไฟฟ้าพัลส์เพื่อดึงน้ำออกจากวัตถุดิบก่อนการแช่อิ่ม เช่น การแช่อิ่มมะม่วง [6] ที่ไม่ใช้ความร้อนในกระบวนการเตรียมก่อนแช่อิ่มผลไม้ [7] โดยใช้การสร้างสนามไฟฟ้าที่มีความเข้มสูงจ่ายแรงดันไฟฟ้าให้ตกคร่อมที่เซลล์

หรือเยื่อหุ้มเซลล์ ทำให้เกิดกระบวนการอิเล็กโทรโพรเซชัน (electroporation) แบบทำลายเซลล์อย่างสมบูรณ์ เป็นผลให้โครงสร้างเซลล์และเยื่อหุ้มเซลล์ถูกทำลายอย่างถาวร [8] ซึ่งนำไปสู่การเกิดรูพรุนจำนวนมากบริเวณเซลล์ และรูพรุนเหล่านี้เป็นช่องทางให้เกิดการดึงน้ำออกจากเซลล์ในอัตราที่ออสโมติกสูง [9] ส่งผลให้การแพร่ของสารละลายซูโครสเข้าสู่เนื้อเยื่อมากขึ้น จึงทำให้ปริมาณของแข็งเพิ่มขึ้นและการสูญเสียน้ำเพิ่มขึ้นเช่นกัน [10]

Parniakov และคณะ [11] ออกแบบกระบวนการเตรียมก่อนดึงน้ำออกในชั้นแอปเปิล ด้วยสนามไฟฟ้าพัลส์ที่มีแหล่งกำเนิดแรงดันไฟฟ้า 1 กิโลโวลต์ และกระแสไฟฟ้า 1 กิโลแอมแปร์ รูปร่างพัลส์เป็นคลื่นเนียร์เร็คแทนกูล่า ความเข้มสนามไฟฟ้า 800 โวลต์ต่อเซนติเมตร ความยาวช่วงพัลส์ 100 มิลลิวินาที ลักษณะแอมป์เป็นแบบทรงกระบอกทำจากวัสดุเพปลอน ระบบปิดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางด้านใน 110 มิลลิเมตร แท่งขั้วอิเล็กโทรด 2 ขั้ว วางติดตรงกันของแอมป์ ส่วนอีกขั้วหนึ่งเคลื่อนที่ได้ จะอยู่ด้านบนดึงขึ้นลงได้อย่างอิสระ และกำหนดระยะห่างขั้วอิเล็กโทรด 50 มิลลิเมตร จากนั้นนำชิ้นแอปเปิลผ่านสนามไฟฟ้า และต่อเนื่องด้วยการแช่ในสารละลายความเข้มข้นสูงให้เกิดการดึงน้ำออกตามเวลาที่กำหนด พบว่าชิ้นแอปเปิลมีปริมาณของแข็งที่ละลายทั้งหมดได้เพิ่มขึ้น และปริมาณความชื้นลดลงอย่างมีนัยสำคัญ

Eugene และ Nikolai [12] ประยุกต์ใช้สนามไฟฟ้าพัลส์ที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงเนื้อเยื่อของพืช ความเข้มสนามไฟฟ้าพัลส์ในช่วง 0.9 กิโลโวลต์ต่อเซนติเมตร จำนวนพัลส์ 750 พัลส์ ทำให้แอปเปิลที่หั่นเป็นแผ่นบางมีการสูญเสียน้ำเพิ่มขึ้นประมาณ 50 เปอร์เซ็นต์ และปริมาณของแข็งเพิ่มขึ้นประมาณ 50 เปอร์เซ็นต์ ที่ความเข้มของความเข้มข้นสารละลายออสโมติกต่างกัน

Tylewicz และคณะ [13] ศึกษาผลของการใช้สนามไฟฟ้าพัลส์ในการเตรียมก่อนการดองน้ำออกต่อลักษณะทางกายภาพและเคมีของชิ้นสตรอร์เบอร์รี่ ได้ออกแบบพรีทรีตเมนต์แชมเบอร์รี่เป็นห้องสี่เหลี่ยม ขั้วอิเล็กโทรดเป็นแบบแผ่นคู่ขนานมีขนาดพื้นที่ 20×20 ตารางมิลลิเมตร วางระยะห่างของขั้ว 30 มิลลิเมตร สตรอร์เบอร์รี่หันเป็นชิ้นสี่เหลี่ยมขนาด $5 \times 10 \times 20$ มิลลิเมตร ใช้ความเข้มสนามไฟฟ้า 400 โวลต์ต่อเซนติเมตร พบว่าจำนวนพัลส์ที่มากขึ้นไม่มีผลทำให้ปริมาณการสูญเสียน้ำและปริมาณของแข็งเพิ่มขึ้นสูงขึ้นเสมอไป ส่วนค่าสีความสว่างมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ

Tedjo และคณะ [6] ศึกษาการเปรียบเทียบวิธีการก่อนการดองน้ำออกแต่ละแบบที่มีผลต่อการสูญเสียน้ำและการเพิ่มขึ้นปริมาณของแข็งในมะม่วงที่หั่นเป็นแว่นหนา 8 มิลลิเมตร และเส้นผ่านศูนย์กลาง 38 มิลลิเมตร พบว่าการใช้ความเข้มสนามไฟฟ้าพัลส์ การใช้ความดันสูง หรือคาร์บอนไดออกไซด์ยิ่งยวด เกิดการแตกของเซลล์ 0.50-0.58 แต่การใช้สนามไฟฟ้าพัลส์ช่วยให้เกิดการสูญเสียน้ำมากกว่า ส่วนการเพิ่มขึ้นของแข็งอยู่ในระดับปานกลางในระยะเวลาการแช่ที่เท่ากัน

บทความวิจัยนี้นำเสนอการประยุกต์ใช้สนามไฟฟ้าพัลส์ในการดองน้ำแบบออสโมติกและจลนพลศาสตร์การถ่ายเทมวลก่อนการแช่อิมสตรอร์เบอร์รี่เพื่อสร้างรูปทรงก่อนการแช่อิม โดยไม่ใช้ความร้อนที่ทำลายคุณค่าทางโภชนาการ และยังทำให้โมเลกุลซูโครสสามารถแพร่เข้าสู่รูพรุนของเซลล์เนื้อเยื่อมากขึ้น โดยหาผลของการใช้จำนวนพัลส์ในระดับต่าง ๆ ของสนามไฟฟ้าพัลส์ต่อการถ่ายเทมวลซูโครสระหว่างการแช่อิมของสตรอร์เบอร์รี่แช่แข็ง เปรียบเทียบสมบัติทางกายภาพของสตรอร์เบอร์รี่ที่ผ่านสนามไฟฟ้าพัลส์ก่อนการแช่อิมและการแช่อิมแบบช้า ซึ่งทำให้ทราบอัตรา

การถ่ายเทมวลซูโครสที่จำนวนพัลส์ในระดับต่าง ๆ ระหว่างการแช่อิมสตรอร์เบอร์รี่และสมบัติทางกายภาพของสตรอร์เบอร์รี่ที่ใช้สนามไฟฟ้าพัลส์ก่อนการแช่อิม เพื่อให้ผู้ผลิตนำไปปรับใช้ในระบบการผลิตได้ ซึ่งผลที่ได้จากการวิจัยสามารถนำไปใช้ในการพัฒนากระบวนการผลิตสตรอร์เบอร์รี่แช่อิมให้มีคุณภาพที่ดีขึ้น รวมทั้งสามารถลดระยะเวลาในระบบการแช่อิม

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 หลักการการดองน้ำออกและการถ่ายเทมวลสาร

การดองน้ำออกด้วยวิธีออสโมซิส (osmotic dehydration) อาศัยหลักการเคลื่อนย้ายน้ำบางส่วนจากเนื้อเยื่ออาหาร ซึ่งเกิดจากความแตกต่างของแรงดันออสโมติกระหว่างภายในเซลล์ของอาหารและสารละลายออสโมติกเกิดเป็นแรงขับ ทำให้มีการถ่ายเทมวลสารระหว่างเซลล์ของอาหารและสารละลายออสโมติกในลักษณะสวนทางกัน ผ่านเยื่อหุ้มเซลล์ที่ทำหน้าที่เป็นเยื่อเลือกผ่าน ในที่นี้คือ เยื่อหุ้มเซลล์ไปสู่สารละลายที่มีความเข้มข้นมากกว่าที่ล้อมรอบอยู่ ขณะเดียวกันตัวถูกละลายบางส่วนจะเคลื่อนที่เข้าสู่เซลล์ [5] สำหรับผนังเซลล์ของผักและผลไม้สามารถยืดขยายตัว เมื่อมีแรงดันเกิดขึ้นภายในเซลล์ เยื่อหุ้มเซลล์จะยอมให้น้ำแพร่ผ่านได้มากกว่าตัวถูกละลายของสารละลายออสโมติก [2] ในการแช่อิมผลไม้ใช้หลักการการถ่ายเทมวลสารของน้ำและตัวถูกละลายจากแรงดันออสโมติกของสารละลายซูโครสที่เกิดขึ้นระหว่างการออสโมซิสออกของน้ำในเนื้อเยื่ออาหาร ดังรูปที่ 1

การถ่ายเทมวลสารนี้จะเกิดขึ้นจนเข้าสู่ภาวะสมดุลของสารละลายภายในและภายนอกเซลล์ตามกฎการแพร่ข้อที่ 2 ของฟิกค์ [14] ส่วนการเคลื่อนย้ายของสารที่มีอยู่ตามธรรมชาติในเซลล์ผักและผลไม้

นั้นจะเกิดขึ้นเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ดังนั้นการดึงน้ำออกด้วยวิธีออสโมซิสจะทำให้ปริมาณน้ำในผักผลไม้ลดลง ปริมาณของแข็งเพิ่มขึ้น ทำให้น้ำหนักสุทธิลดลงได้ รวมถึงทำให้ค่ากิจกรรมของน้ำของผักผลไม้ลดลงด้วย [15] นอกจากนี้ยังส่งผลต่อคุณค่าทางโภชนาการและลักษณะทางประสาทสัมผัสของผลิตภัณฑ์อีกด้วย โดยตัวถูกละลายที่นำมาใช้จะต้องไม่เป็นพิษและมีรสชาติที่ดี โดยทั่วไปสำหรับผลไม้ คือ น้ำตาลซูโครส [5] ซึ่งกระบวนการดึงน้ำออกมีค่าตัวแปรในการศึกษาที่เกี่ยวข้อง คือ ปริมาณการสูญเสียยา (water loss, WL) และปริมาณของแข็งที่เพิ่มขึ้น (solid gain, SG) โดยการคำนวณหาการสูญเสียยาและตัวถูกละลายในระหว่างการดึงน้ำออกนั้น อยู่ภายใต้เงื่อนไขการไม่เปลี่ยนแปลงส่วนประกอบของแข็งทั้งหมดที่ไม่ละลายของตัวอย่างระหว่างการแช่ รายนงานของ Del และคณะ [16] กล่าวว่า การสูญเสียยา คือ การสูญเสียความชื้นและของแข็งที่เพิ่มขึ้นในเนื้อผลไม้หลังจากการทำออสโมซิส โดยการคำนวณน้ำที่สูญเสียและของแข็งที่เพิ่มขึ้นหลังจากแช่ตามสมการที่ 1 และ 2 ตามลำดับ [17]

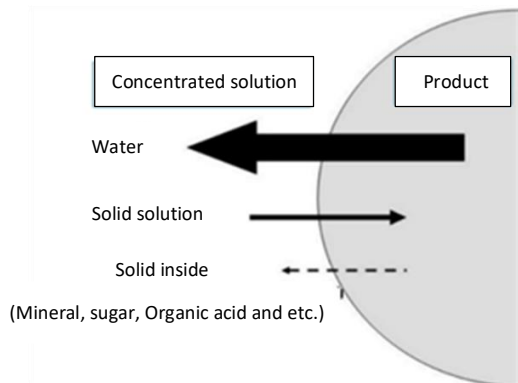


Figure 1 Mass transfer between osmosis in vegetables and fruits [2]

$$WL = \left[\frac{W_0 M_0 - W_t M_t}{W_0} \right] \times 100 \quad (1)$$

$$SG = \left[\frac{W_t (1 - M_t) - W_0 (1 - M_0)}{W_0} \right] \times 100 \quad (2)$$

เมื่อ W_0 คือ น้ำหนักตัวอย่างที่เวลาเริ่มต้น (กรัม); W_t คือ น้ำหนักตัวอย่างที่เวลาหลังการแช่ (กรัม); M_0 คือ ปริมาณความชื้นเฉลี่ยของตัวอย่างที่เวลาเริ่มต้น (กรัมน้ำต่อกรัมน้ำหนักตัวอย่าง); M_t คือ ปริมาณความชื้นเฉลี่ยของตัวอย่างที่ที่เวลาหลังการแช่ (กรัม น้ำต่อกรัมน้ำหนักตัวอย่าง)

2.2 สนามไฟฟ้าพัลส์

สนามไฟฟ้าหมายถึงบริเวณโดยรอบประจุไฟฟ้า ซึ่งประจุไฟฟ้าสามารถส่งอำนาจไปถึง หรือ บริเวณที่เมื่อนำประจุไฟฟ้าทดสอบเข้าไปวางแล้ว จะเกิดแรงกระทำบนประจุไฟฟ้าทดสอบนั้นตามจุดต่าง ๆ ในบริเวณสนามไฟฟ้าย่อมมีความเข้มของสนามไฟฟ้าต่างกัน จุดที่อยู่ใกล้ประจุไฟฟ้าต้นกำเนิดสนามจะมี ความเข้มของสนามไฟฟ้าสูงกว่าจุดที่อยู่ห่างไกลออกไป หน่วยของสนามไฟฟ้า คือ นิวตันต่อคูลอมบ์ หรือโวลต์ ต่อเมตร [18] โดยสนามไฟฟ้าพัลส์สามารถสร้างโดยจ่ายไฟฟ้ารูปคลื่นพัลส์สู่ขั้วอิเล็กโทรดสองขั้วที่ต่างกัน ค่าความต่างศักย์ที่ทำให้กระบบจะขึ้นอยู่กับระยะห่างของแผ่นอิเล็กโทรดการคำนวณความเข้มสนามไฟฟ้า (E) โดยทั่วไปค่าความเข้มสนามไฟฟ้าแสดงหน่วยเป็น กิโลโวลต์ต่อเซนติเมตร (kV/cm) ที่ระยะห่างของอิเล็กโทรดสามารถหาได้จากสมการที่ 3

$$E = \frac{V}{d} \quad (3)$$

เมื่อ E คือ ความเข้มสนามไฟฟ้า มีหน่วยเป็นกิโลโวลต์ต่อเซนติเมตร; V คือ แรงดันไฟฟ้า มีหน่วยเป็น กิโลโวลต์; d คือ ระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรด มีหน่วยเป็นเซนติเมตร

โดยทั่วไปลักษณะรูปแบบสนามไฟฟ้าแบ่งเป็น 2 ชนิด คือ สนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ และสนามไฟฟ้า

ไม่สม่ำเสมอ ชนิดไม่สม่ำเสมอแบ่งเป็น 2 แบบ คือ แบบที่ไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย และแบบไม่สม่ำเสมอสูง สนามไฟฟ้าจะเป็นแบบไหนขึ้นอยู่กับรูปลักษณะของ อิเล็กโทรด ถ้าป้อนแรงดันให้กับอิเล็กโทรดลักษณะ ต่าง ๆ ที่วางอยู่ในอากาศ จะพบว่าแรงดันที่ทำให้เกิด เบรกดาวน์ไม่เท่ากัน ถึงแม้ว่าจะจัดระยะและให้เท่ากัน ก็ตาม ค่าแรงดันที่ทำให้เกิดเบรกดาวน์สามารถวัดหา ค่าได้ง่าย ฉนวนแต่ละชนิดจะมีค่าความคงทนต่อ แรงดันไฟฟ้า ไม่ใช่ตายตัวค่าใดค่าหนึ่ง ส่วนใหญ่จะเป็น ค่าสถิติหรือค่าโดยประมาณ จะกำหนดหรือระบุด้วยค่า ความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดที่เกิดขึ้น ณ จุดใดจุดหนึ่ง ระหว่างอิเล็กโทรดในขณะที่เกิดเบรกดาวน์เริ่มเกิดขึ้น ซึ่ง จะมีค่ามากหรือน้อยก็ขึ้นอยู่กับแฟกเตอร์ต่าง ๆ หลาย ประการ

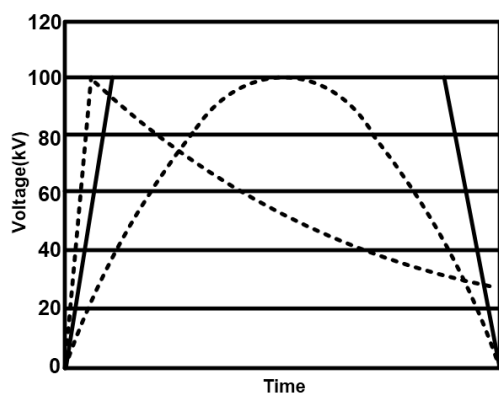


Figure 2 The real shape of all 3 types of pulse voltage waves which are square shape, exponential shape and half and sine wave shapes [18]

รูปร่างของพัลส์ โดยปกติการใช้งานของ ระบบสนามไฟฟ้าพัลส์จะขึ้นอยู่กับค่าของแรงดันที่สูง พอและระยะเวลาที่เกิดสนามไฟฟ้ากำลังสูงต้องมากพอ เพื่อให้เกิดผลในการเปลี่ยนแปลงสภาพเนื้อเยื่อของพืช ต่าง ๆ รูปทรงในอุดมคติของแรงดันพัลส์จะมีระยะเวลา

ที่แรงดันเพิ่มสูงขึ้นและลดลงเป็นศูนย์ และยอดของ แรงดันเป็นเส้นเรียบที่ให้แรงดันคงที่ตามระยะเวลา และพลังงานหรือค่าแรงดันที่ต้องการ แต่ในทางปฏิบัติ รูปทรงพัลส์แบบนี้ไม่สามารถเกิดขึ้นได้จริง โดยพัลส์ที่ เกิดขึ้นนั้นจะใช้เวลาในการไต่หรือลดระดับความดัน จนถึงค่าแรงดันสูงสุดที่ต้องการ และค่าแรงดันเป็น เส้นตรงคงที่ที่ยอดก็ไม่สามารถเกิดได้จริง ดังนั้นการ กำหนดค่าและระยะเวลาของแรงดันพัลส์ในทางปฏิบัติ จึงขึ้นอยู่กับวิธีการประมาณคลื่นทั้ง 3 ดังรูปที่ 2 ที่ ค่าสูงสุด ($V_{\max} = 100$) และค่าความกว้างของพัลส์ที่ เท่ากันค่าคัตออฟ (cut-off) ของกราฟเอ็กซ์โปเนนเชียลอยู่ที่ 25 % ของ $V_{\max}$ พัลส์ทั้ง 3 รูปแบบ นี้เป็น ตัวอย่างที่นักวิจัยนำมาใช้โดยประมาณว่าเป็นลักษณะ ของพัลส์ที่มีค่าเดียวกัน ($V = 100, t = 100$) อย่างไรก็ตาม ค่าพลังงานที่ได้และระยะเวลาที่ค่าแรงดันอยู่เหนือค่าเทรชโฮลด์ (threshold) จะต่างกันอย่างมาก ความแตกต่างที่ได้กล่าวมาแล้วนี้ทำให้มีผลทางมิชวิทยาที่มีรายงานออกมาต่าง ๆ กัน

สนามไฟฟ้าพัลส์ เป็นการสร้างสนามไฟฟ้า ความเข้มสูง (E) โดยจ่ายแรงดันกระแสไฟฟ้ากระแสตรงแบบพัลส์ให้อีกขั้วหนึ่ง และอีกขั้วหนึ่งมีศักย์ไฟฟ้า เป็นกราวด์ที่ขั้วอิเล็กโทรด 2 ขั้ว วางซ้อนกันแบบขนาน เมื่อขั้วอิเล็กโทรดที่สัมผัสกับอาหารจะเกิดการเหนี่ยวนำไฟฟ้าทำให้เกิดประจุไฟฟ้าที่เนื้อเยื่อของอาหารแล้ว มีการสะสมประจุไฟฟ้าที่เนื้อเยื่อของอาหารจนทำให้มี ค่าความเข้มสนามไฟฟ้ามากกว่าค่าความเข้มสนามไฟฟ้าวิกฤต จึงนำไปสู่การแตกของเซลล์หรือเยื่อหุ้มเซลล์ (E_c) ปรากฏการณ์นี้เรียกว่ากระบวนการอิเล็กโทรโพรเซชัน ซึ่งจะใช้เวลานานมาก มีอยู่ด้วยกัน 2 แบบ คือ เออร์รีเวอร์ซิเบิลอิเล็กโทรโพรเซชัน (irreversible electroporation) เป็นการแตกของเยื่อหุ้มเซลล์ที่มีความเข้มสนามไฟฟ้าสูงมากกว่าค่าความเข้มสนามไฟฟ้าวิกฤตอย่างมาก ($E \gg E_c$) เกิดการทำลายเยื่อหุ้ม

เซลล์ที่ถาวรเป็นรูพรุนขนาดใหญ่ถาวร และรีเวอร์ซิเบิลอิเล็กโทรโพรเซชัน (reversible electroporation) เป็นการแตกของเยื่อหุ้มเซลล์ที่มีความเข้มสนามไฟฟ้าสูงมากกว่าค่าความเข้มสนามวิกฤตเล็กน้อย ($E \geq E_c$) เกิดการทำลายเยื่อหุ้มเซลล์เป็นรูขนาดเล็ก ถ้าต้องการเพิ่มความเข้มสนามไฟฟ้าที่สูงทำได้โดยการเพิ่มความนำไฟฟ้า และค่าสภาพยอมไฟฟ้าของเซลล์หรือเยื่อหุ้มเซลล์ โดยการใช้สนามไฟฟ้าที่มีลักษณะเป็นพัลส์หรือเป็นช่วงเวลาที่เกิดจากการจ่ายพัลส์แรงดันไฟฟ้าให้กับขั้วอิเล็กโทรดให้ความเข้มสนามไฟฟ้าสูงประมาณ 3-5 กิโลโวลต์ต่อเซนติเมตร และมีลักษณะเป็นพัลส์ในช่วงประมาณ 10-20 นาโนวินาที สนาม

ไฟฟ้าพัลส์ที่มีความเข้มสูงนี้จะส่งผลทำให้แรงดันไฟฟ้าของไดอิเล็กทริก (dielectric strength) ของเซลล์หรือเยื่อหุ้มเซลล์เกินค่าความคงทน มีผลให้ของเหลวไซโตพลาสซึม (cytoplasm) ภายในเซลล์ เกิดการขยายตัวมากยิ่งขึ้นและนำไปสู่การเบรกดาวน์เกิดเป็นรูรั่วจำนวนมากที่เซลล์หรือเยื่อหุ้มเซลล์ [20] ดังรูปที่ 3 ซึ่งการทำลายเซลล์จะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับความเข้มของสนามไฟฟ้าและจำนวนพัลส์ที่ยิงให้กับชิ้นวัตถุดิบชนิดนั้นๆ มีค่าครั้นการแตกของเซลล์ 0-1 โดย 0 คือ เซลล์ไม่ถูกทำลายให้แตกออก และ 1 คือ เซลล์ถูกทำลายให้แตกออกอย่างสมบูรณ์

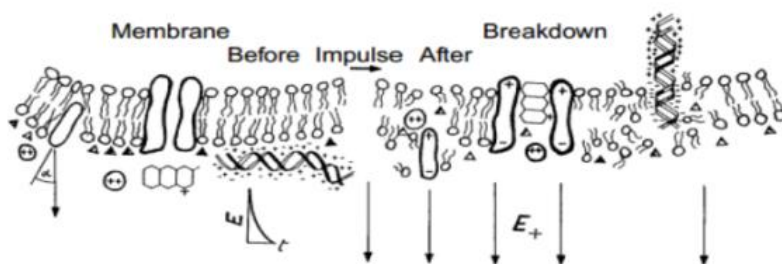


Figure 3 Breakdown of the cell when receiving a high electric field due to the electromagnetic phenomenon [20]

2.3 การดื่มน้ำออกและการแพร่ของซูโครสด้วยสนามไฟฟ้าพัลส์

การดื่มน้ำออกในอาหารเกิดขึ้นตามธรรมชาติกับผักและผลไม้ ที่แช่ในบริเวณสารละลายความเข้มข้นสูง ซึ่งเรียกว่าสารละลายออสโมติก เช่น สารละลายน้ำตาล หรือสารละลายเกลือ แรงดันออสโมติกสูง และค่ากิจกรรมของน้ำต่ำ โดยอาศัยการแพร่จากปรากฏการณ์ที่น้ำเกิดการเคลื่อนย้ายบางส่วนออกจากเนื้อเยื่ออาหาร และสวนทางกับสารละลายของแข็งที่เคลื่อนเข้าสู่เนื้อเยื่ออาหาร ซึ่งกลไกการนำน้ำออกและการเพิ่มของแข็งในอาหารเป็นกระบวนการออสโม

ซิสที่สามารถลดปริมาณน้ำในวัตถุดิบลงโดยไม่จำเป็นต้องใช้ความร้อนสูงที่แพร่ออกผ่านทางเยื่อเลือกผ่านและช่องว่างของเซลล์ เป็นการใช้วิธีการลดปริมาณน้ำในผักและผลไม้ที่ไม่รุนแรง จึงไม่ทำให้เกิดการเสื่อมเสียคุณภาพไปจากของสดมากนักทั้งสีและรสชาติของอาหาร [22] แต่เนื่องด้วยตามธรรมชาติเนื้อเยื่อของเซลล์ผลไม้มีการต้านหรือจำกัดการถ่ายเทมวลสารสูง จึงทำให้อัตราเร็วการดื่มน้ำออกช้าและของแข็งที่ละลายในสารละลายแพร่เข้าสู่เนื้อเยื่ออาหารได้น้อย ซึ่งปัจจุบันมีการประยุกต์ใช้สนามไฟฟ้าพัลส์ที่สร้างการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของเนื้อเยื่อจากการสร้างความ

เครื่องสูงบนผิววัตถุอาหารนำไปสู่การทำลายเนื้อเยื่ออย่างสมบูรณ์ ผนังเซลล์และไซโตพลาสซึมถูกทำลาย จึงนำไปสู่การแตกออกเกิดรูพรุนบริเวณเซลล์หรือเยื่อหุ้มเซลล์จำนวนมาก ดังรูปที่ 4 ในช่วงเวลาสั้น ๆ (ระดับวินาที) และไม่มีความร้อนเกิดขึ้นในกระบวนการทำลายเซลล์ [23] โดยรูพรุนเหล่านี้มีขนาดระดับไมโครเมตรไม่สามารถมองเห็นด้วยตาเปล่า จึงไม่ทำให้ลักษณะทางกายภาพของชิ้นวัตถุดิบเสียไป แต่ช่วยให้เกิดการดึงน้ำออกในชิ้นวัตถุดิบได้ดีขึ้นเมื่อนำ

ชิ้นวัตถุดิบแช่ในสารละลายออสโมติก โดยรูพรุนเป็นช่องทางให้ซูโครสแพร่เข้าสู่เซลล์แทนที่น้ำได้อย่างรวดเร็ว แล้วเกิดการสะสมของโมเลกุลซูโครสภายในเซลล์ ทำให้ปริมาณของแข็งเพิ่มขึ้นและปริมาณน้ำที่สูญเสียในชิ้นวัตถุดิบมากขึ้นเช่นกัน ซึ่งกระบวนการขั้นต้นนี้ได้นำมาใช้ในการเตรียมชิ้นวัตถุดิบก่อนการดึงน้ำออกแบบออสโมซิส [24] กับผลไม้ชนิดต่าง ๆ รวมถึงนำมาใช้กับสตรอว์เบอร์รี่ซึ่งปรับปรุงกระบวนการดึงน้ำออกได้ดี [25]

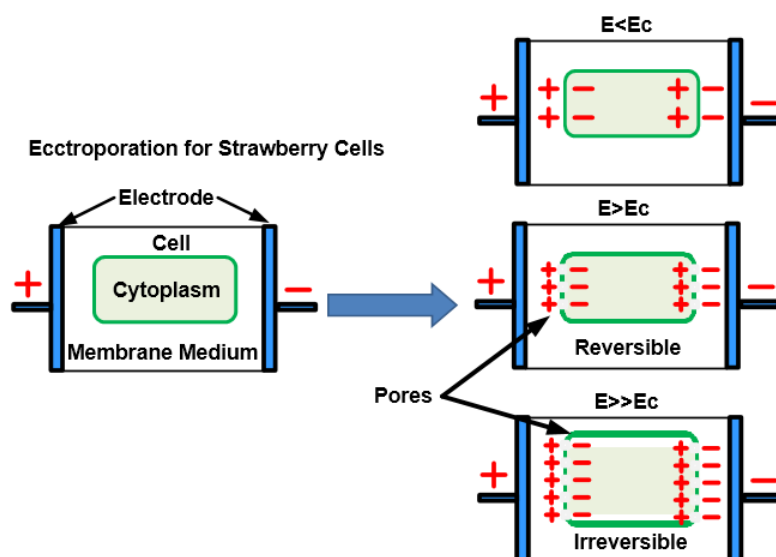


Figure 4 Model of cell structure destruction or strawberry membranes from high pulsed electric field strength

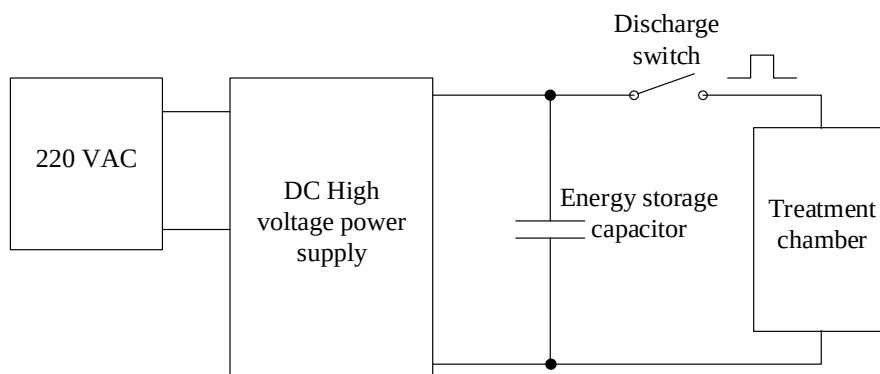
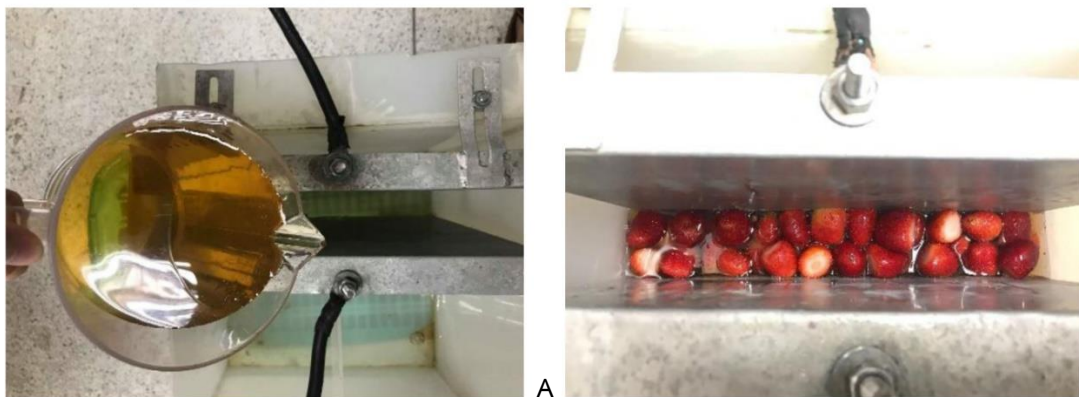


Figure 5 Schematic diagram of the pulsed electric field system used in this study**Figure 6** (a) Strawberry while pulsed electric field of 100 pulses and (b) Strawberry while pulsed electric field of 150 pulses

3. ระเบียบวิธีวิจัย

ลำดับขั้นตอนการแช่ด้วยสนามไฟฟ้าแบบพัลส์ในการศึกษานี้ทดลองเกี่ยวกับการประยุกต์ใช้สนามไฟฟ้าพัลส์มาช่วยในการทำลายที่เซลล์ผิวของสตอร์วเบอร์รี่ เพื่อเพิ่มรพุนให้มีการแพร่เข้ามวลงของโครสได้เร็วมากขึ้น โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อหาผลของ

การใช้จำนวนพัลส์ในระดับต่าง ๆ ของสนามไฟฟ้าพัลส์ต่อการถ่ายเทมวลของโครสระหว่างการแช่ของสตอร์วเบอร์รี่แช่แข็ง และเพื่อเปรียบเทียบสมบัติทางกายภาพของสตอร์วเบอร์รี่ที่ผ่านสนามไฟฟ้าพัลส์ก่อนการแช่และการแช่แบบช้า โดยการศึกษาลักษณะทางกายภาพของสตอร์วเบอร์รี่ก่อนจ่ายสนามไฟฟ้าพัลส์

โดยคัดเลือกสตรอร์เบอร์รี่แช่แข็ง ได้แก่ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3.50-4.50 เซนติเมตร และเมื่อเปรียบเทียบกับมันเชลลียูอยู่ในช่วงเกรดสี 5R 4/18 (เหลืองแดง) ไม่ซ้ำและสีไม่ซีด จากนั้นนำสตรอร์เบอร์รี่แช่แข็งไปละลายด้วยวิธีแบบเร็ว โดยนำสตรอร์เบอร์รี่ออกจากตู้แช่แข็งที่อุณหภูมิ -28 องศาเซลเซียส และนำออกมาทิ้งไว้ในอุณหภูมิห้อง จากนั้นสังเกตการเปลี่ยนแปลงของสตรอร์เบอร์รี่ ได้แก่ ร้อยละปริมาณการสูญเสีย น้ำแข็ง การศึกษาได้ใช้ระบบสนามไฟฟ้าพัลส์ที่พัฒนาขึ้นโดย พานิช และคณะ [18] จ่ายสนามไฟฟ้าพัลส์ก่อนการแช่สตรอร์เบอร์รี่พัลส์

รูปที่ 5 แสดงไดอะแกรมของระบบสนามไฟฟ้าพัลส์ที่ใช้ในการศึกษานี้ โดยระบบประกอบด้วย 3 ส่วนหลัก ได้แก่ แหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงแบบพัลส์ (DC pulsed high voltage power supply) ทรีทเมนต์แชมเบอร์ (treatment chamber) สามารถจ่ายแรงดันพัลส์ (pulse voltage) ขาออกชั่วคราวได้ในช่วง 0-20 กิโลโวลต์ ความกว้างพัลส์ (pulse width) ประมาณ 1-2,000 ไมโครวินาที และมีความถี่พัลส์ (pulse frequency) 0.5-5 เฮิรตซ์ โดยทรีทเมนต์แชมเบอร์ระยะทาง 4 เซนติเมตร จะให้ความเข้มสนามไฟฟ้า 4 กิโลโวลต์ต่อเซนติเมตร ความถี่ 1 เฮิรตซ์ ที่จำนวนพัลส์ 50, 100, 150 และ 200 พัลส์ (รูปที่ 6) สำหรับการแช่ อิ่มและวิเคราะห์การถ่ายเทมวลสารระหว่างการแช่ อิ่มในสารละลายซูโครสจะชั่งน้ำหนักสตรอร์เบอร์รี่ก่อนแช่ อิ่ม 30 กรัม จำนวน 24 ตัวอย่าง แช่ อิ่มในสารละลายซูโครส 65 องศาบริกซ์ และชั่งน้ำหนักสตรอร์เบอร์รี่ หลังแช่ อิ่มทุก ๆ 1 ชั่วโมง เป็นเวลา 24 ชั่วโมง และอบแห้งเพื่อหาน้ำหนักแห้งสตรอร์เบอร์รี่ โดยวิเคราะห์การถ่ายเทมวลสารระหว่างการแช่ อิ่ม ได้แก่ ปริมาณการสูญเสียในสตรอร์เบอร์รี่ ปริมาณของแข็งที่เพิ่มขึ้นในสตรอร์เบอร์รี่ ปริมาณของแข็งที่ละลายได้

ทั้งหมดในสตรอร์เบอร์รี่ และปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมดในสารละลายซูโครส จากนั้นวิเคราะห์และเปรียบเทียบลักษณะทางกายภาพของสตรอร์เบอร์รี่ หลังการแช่ อิ่ม โดยเลือกระยะเวลาการแช่ อิ่มที่สภาวะจำนวนพัลส์มีค่าปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมดในสตรอร์เบอร์รี่ถึง 40 องศาบริกซ์ สำหรับวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพ ตรวจวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพ ได้แก่ ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมดด้วยเครื่องรีแฟรกโตมิเตอร์แบบพกพา (hand refractometer) และค่าสีของสตรอร์เบอร์รี่ด้วยระบบ CIE Lab และวิเคราะห์โดยใช้สถิติการวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูลสถิติและเปรียบเทียบความแตกต่างด้วยสถิติ F-test แบบ one way ANOVA และจำแนกข้อมูลที่มีความแตกต่างค่าเฉลี่ยด้วยวิธี Tukey's HSD ที่ระดับนัยสำคัญ (α) 0.05 และเปรียบเทียบสมบัติทางกายภาพของการใช้จำนวนพัลส์ที่ระดับต่าง ๆ กับการแช่ อิ่มแบบซ้ำ

4. ผลการทดลองและวิจารณ์ผล

การวิจัยครั้งนี้เป็นการใช้จำนวนพัลส์ของสนามไฟฟ้าพัลส์ก่อนการแช่ อิ่มสตรอร์เบอร์รี่ โดยใช้จำนวนพัลส์ 4 ระดับ คือ 50, 100, 150 และ 200 พัลส์ ความเข้มสนามไฟฟ้า 4 กิโลโวลต์ต่อเซนติเมตร แล้วศึกษา ลักษณะทางกายภาพของสตรอร์เบอร์รี่ก่อนการจ่ายสนามไฟฟ้าพัลส์ เพื่อดูการเปลี่ยนแปลงลักษณะภายนอกของลูกสตรอร์เบอร์รี่ และศึกษาผลของการใช้จำนวนพัลส์ในระดับต่าง ๆ ต่อการถ่ายเทมวลซูโครสระหว่างการแช่ อิ่มของสตรอร์เบอร์รี่แช่แข็ง เปรียบเทียบสมบัติทางกายภาพของสตรอร์เบอร์รี่ที่ผ่านสนามไฟฟ้าพัลส์ก่อนการแช่ อิ่มและการแช่ อิ่มแบบซ้ำ มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

ศึกษาลักษณะทางกายภาพของสตรอร์เบอร์รี่ก่อนการจ่ายสนามไฟฟ้าพัลส์ โดยการคัดเลือกลูกสด

รอร์เบอร์รี่ที่สมบูรณ์ มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3.50-4.50 เซนติเมตร และเมื่อเปรียบเทียบกับมันเชลนู้คอยู่ในช่วงเฉลี่ย 5R 4/18 (เหลืองแดง) จากนั้นละลายน้ำแข็งและวัดการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของลูกสตรอร์เบอร์รี่และลักษณะเนื้อสัมผัส มีร้อยละการสูญเสียน้ำเฉลี่ย 37.24 เมื่อสังเกตลักษณะเนื้อสัมผัสพบว่าเนื้อสัมผัสของลูกสตรอร์เบอร์รี่นุ่มขึ้น เนื่องจากในระหว่างการแช่เยือกแข็งเซลล์ของอาหารถูกทำลายบางส่วนจากผลึกน้ำแข็งรวมถึงน้ำบางส่วนเกิดการเคลื่อนที่ออกมาภายนอกเซลล์ [26] เมื่อละลายน้ำแข็งของเหลวบางส่วนในเซลล์จึงเกิดการสูญเสียออกจากสตรอร์เบอร์รี่ เป็นผลทำให้น้ำหนักสตรอร์เบอร์รี่ลดลงและเนื้อสัมผัสอ่อนนุ่มขึ้น ก่อนที่จะจ่ายสนามไฟฟ้าพัลส์ในขั้นตอนต่อไป

จ่ายสนามไฟฟ้าพัลส์ก่อนการแช่แข็งสตรอร์เบอร์รี่ เป็นการเตรียมสตรอร์เบอร์รี่ก่อนที่จะเข้าสู่กระบวนการแช่แข็งในสารละลายซูโครสด้วยสนามไฟฟ้าพัลส์ ซึ่งขั้นตอนนี้มีการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสตรอร์เบอร์รี่ในขณะที่จ่ายสนามไฟฟ้าพัลส์จะมีการสูญเสียน้ำของสตรอร์เบอร์รี่เฉลี่ยรวมร้อยละ 11.99 ส่วนน้ำหนักของสารละลายซูโครสหลังจากจ่ายสนาม

ไฟฟ้าพัลส์มีน้ำหนักเพิ่มขึ้นเฉลี่ยรวม 8.72 เห็นได้ชัดหลังจากการจ่ายสนามไฟฟ้า สตรอร์เบอร์รี่มีน้ำหนักที่ลดลงและน้ำหนักของสารละลายซูโครสเพิ่มขึ้น เนื่องจากการจ่ายสนามไฟฟ้าพัลส์ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของเนื้อเยื่อพืช [8] พืชเซลล์และไซโตพลาสซึมถูกทำลาย จึงนำไปสู่การแตกออกเกิดรูพรุนบริเวณเซลล์หรือเยื่อหุ้มเซลล์จำนวนมาก [7] เป็นผลให้น้ำในสตรอร์เบอร์รี่บางส่วนเคลื่อนที่ออกมาสู่สารละลายขณะที่จ่ายสนามไฟฟ้าพัลส์ จึงทำให้น้ำหนักสตรอร์เบอร์รี่ลดลง ส่วนน้ำหนักของสารละลายซูโครสจะเพิ่มขึ้น โดยที่รูพรุนเหล่านี้จะเพิ่มขึ้นตามจำนวนพัลส์ที่ยิงและเป็นผลให้ลักษณะเนื้อสัมผัสของสตรอร์เบอร์รี่อ่อนนุ่มเพิ่มขึ้นหลังจ่ายสนามไฟฟ้าพัลส์ ยังพบอีกว่าสภาวะการจ่ายสนามไฟฟ้าพัลส์ที่ 200 พัลส์ เป็นการให้จำนวนพัลส์ที่มากเกินไป จึงทำให้ลักษณะเนื้อสัมผัสมีความนิ่มมากที่สุด และพื้นผิวบางส่วนเกิดรอยยุ่ยเล็ก ๆ สามารถมองเห็นด้วยตาเปล่า ซึ่งทุกวิธีการทดลองจะเข้าสู่กระบวนการแช่แข็ง เพื่อวิเคราะห์การถ่ายเทมวลสารระหว่างการแช่แข็งในสารละลายซูโครส มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

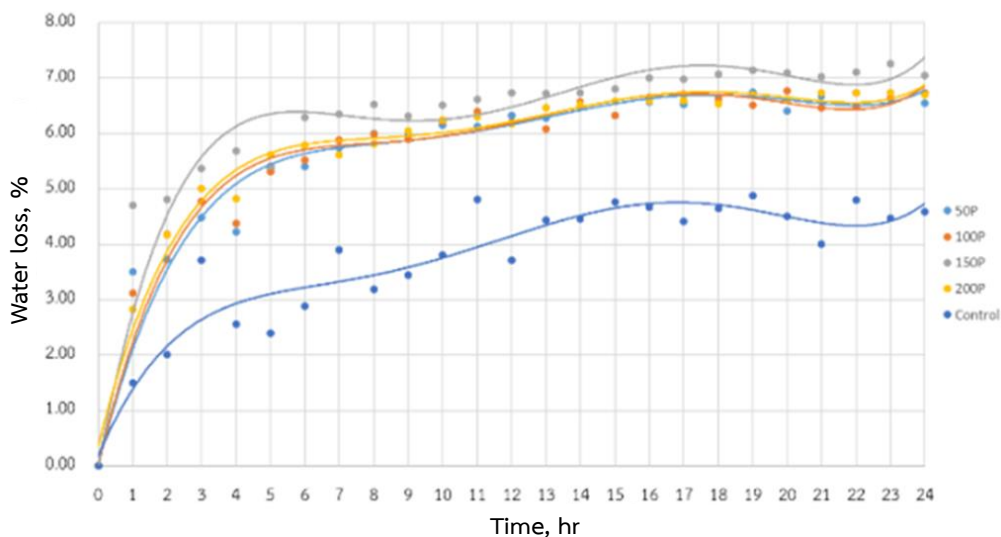


Figure 7 The percentage of water loss from strawberries during the PEF process

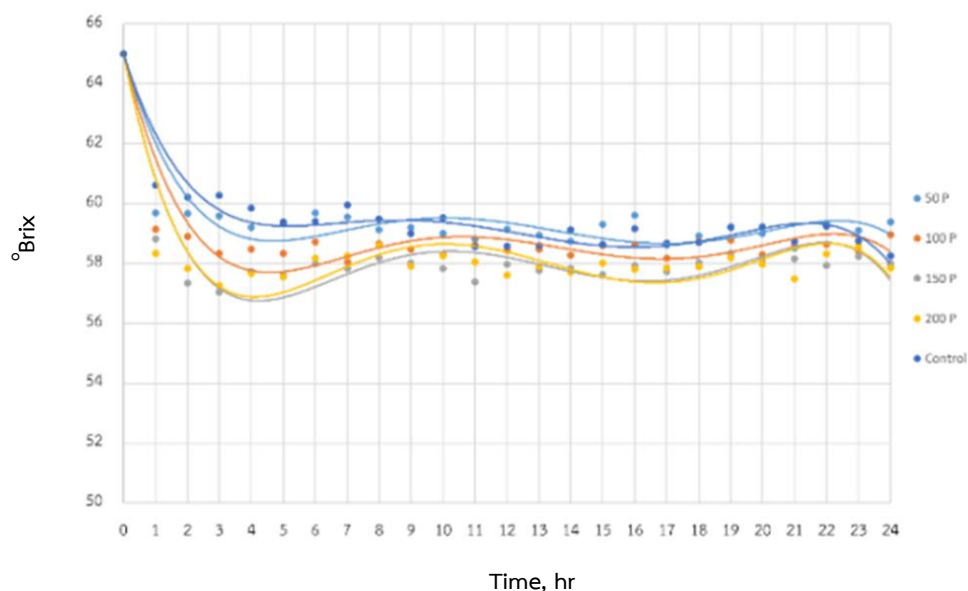


Figure 8 Changes in total soluble solids in sucrose solution during PEF process

การเชื่อมและวิเคราะห์การถ่ายเทมวลสารระหว่างการเชื่อมในสารละลายซูโครส การศึกษาการสูญเสียน้ำที่ออกจากเนื้อสตอร์เบอร์รี่สามารถพิจารณาจากค่าร้อยละปริมาณการสูญเสีย (water loss) การทดลองได้ผลดังรูปที่ 7 โดยการเปลี่ยนแปลงร้อยละการสูญเสียน้ำที่ออกจากสตอร์เบอร์รี่ระหว่างกระบวนการเชื่อมพบว่าลักษณะแนวโน้มของเส้น กราฟมีการเปลี่ยนแปลงค่าร้อยละการสูญเสียน้ำใน สตอร์เบอร์รี่ทุกสภาวะการเชื่อม สามารถแบ่งตามความชันของเส้นกราฟเป็น 2 ช่วง ได้แก่ 0-4 ชั่วโมงแรก ลักษณะเส้นกราฟมีความชันสูง และ 4-24 ชั่วโมง ลักษณะเส้นกราฟมีความชันต่ำ โดย 0-4 ชั่วโมงแรก พบว่าการเชื่อมแบบซ้ำทำให้สตอร์เบอร์รี่เกิดการสูญเสียน้ำร้อยละ 3 และการใช้สนาม ไฟฟ้าพัลส์ทำให้เกิดการสูญเสียน้ำมากกว่าการเชื่อมแบบซ้ำ โดยการใช้พัลส์ที่ระดับ 50, 100, 150 และ 200 พัลส์ ทำให้เกิดการสูญเสียน้ำร้อยละ 5.1, 5.2, 6.2 และ 5.3 ตามลำดับ ซึ่งการใช้

พัลส์ที่ระดับ 150 พัลส์ ทำให้เกิดการสูญเสียน้ำสูงสุดใน 0-4 ชั่วโมง แสดงให้เห็นว่าเนื้อเยื่อสตอร์เบอร์รี่ได้ถูกทำลายให้เกิดรูพรุนที่เหมาะสมต่อการเคลื่อนที่ออกของน้ำจากเนื้อเยื่อสตอร์เบอร์รี่มากที่สุด จึงทำให้การดึงน้ำออกของน้ำทั้งเป็นแบบการออสโมซิสและแบบการแพร่ แต่การใช้พัลส์ที่สูงขึ้น คือ 200 พัลส์ มีผลให้เนื้อเยื่อสตอร์เบอร์รี่ถูกทำลายมากเกินไป การดึงน้ำออกจะเป็นแบบการแพร่จึงทำให้ถูกกักไว้ภายในเซลล์ของสตอร์เบอร์รี่ในปริมาณที่น้อย จึงทำให้มีการเคลื่อนที่เข้าออกของน้ำได้อย่างอิสระระหว่างเซลล์ของเนื้อเยื่อสตอร์เบอร์รี่และสารละลายซูโครส ส่วนการใช้พัลส์ที่ระดับ 50 และ 100 พัลส์ มีการทำลายของสนามไฟฟ้าพัลส์น้อยเกินไป จึงทำให้การดึงน้ำออกของน้ำเป็นแบบการออสโมซิส มากกว่าการแพร่ ทั้งนี้การเชื่อมใน 0-4 ชั่วโมงแรก มีแนวโน้มการสูญเสียน้ำออกจากสตอร์เบอร์รี่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว เนื่องจากช่วงเริ่มต้นของกระบวนการเชื่อมมีความแตกต่างของ

ความเข้มข้นของสารละลายซูโครสที่ใช้ในการแช่ขั้วและน้ำในสตรอว์เบอร์รี จึงเกิดการออสโมซิสออกของน้ำจากแรงขับสูงที่ความเข้มข้นของสารละลาย 2 บริเวณ ที่แตกต่างกันมาก และ 4-24 ชั่วโมง พบว่าการแช่ขั้วแบบซ้ำทำให้สตรอว์เบอร์รีเกิดการสูญเสียน้ำร้อยละ 1.7 และการใช้สนามไฟฟ้าพัลส์ทำให้เกิดการสูญเสียน้ำน้อยกว่าการแช่ขั้วแบบซ้ำ โดยการใช้พัลส์ที่ระดับ 50, 100, 150 และ 200 พัลส์ ทำให้เกิดการสูญเสียน้ำร้อยละ 1.6, 1.4, 1.2 และ 1.3 ตามลำดับ ซึ่งการแช่ขั้วแบบซ้ำจะเกิดการสูญเสียน้ำสูงสุดใน 4-24 ชั่วโมง แต่ระดับของร้อยละการสูญเสียจะต่ำกว่าการใช้สนามไฟฟ้าพัลส์ แสดงให้เห็นว่าความเข้มข้นของสารละลายในสตรอว์เบอร์รีและในสารละลายซูโครสมีความแตกต่างกันมาก และเมื่อพิจารณา ลักษณะของเส้นกราฟจะเห็นว่ามีความโน้มที่เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องจนถึงชั่วโมงที่ 17 เกิดการสูญเสียน้ำสูงสุดร้อยละ 1.8 แสดงให้เห็นว่าน้ำในเนื้อเยื่อ สตรอว์เบอร์รียังมีปริมาณที่มาก จึงทำให้เกิดการออสโมซิสของน้ำสูงตามไปด้วย โดยที่ลักษณะของเส้นกราฟดังกล่าวมีความโน้มต่ำลงจนถึงต่ำสุดในชั่วโมงที่ 22 เนื่องจากช่วงเวลาดังกล่าวเกิดการดึงกลับของน้ำที่ละลายในสารละลายซูโครสเข้าสู่สตรอว์เบอร์รี และลักษณะของเส้นกราฟมีความโน้มที่สูงขึ้นอีกครั้งจนจบกระบวนการแช่ขั้วที่ 24 ชั่วโมง เกิดการสูญเสียน้ำ ร้อยละ 1.7 เนื่องจากน้ำที่ถูกดึงกลับเข้าไปในสตรอว์เบอร์รีทำให้สารละลายซูโครสมีความเข้มข้นเพิ่มขึ้นจึงเกิดการออสโมซิสของน้ำออกจากสตรอว์เบอร์รีอีกครั้ง การใช้สนามไฟฟ้าพัลส์เป็นการเตรียมก่อนแช่ขั้วที่ สตรอว์เบอร์รีผ่านสนามไฟฟ้าพัลส์สำหรับการสร้างรูพรุนให้กับสตรอว์เบอร์รีมีผลให้ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทมวลสารได้ แต่เมื่อพิจารณาร้อยละการสูญเสีย น้ำจะต่ำกว่าการแช่ขั้วแบบซ้ำ ซึ่งแสดงว่าเนื้อเยื่อสตรอว์เบอร์รีถูกทำลายทำให้เกิดรูพรุน จึงทำให้เกิดการ

สูญเสียน้ำออกจากสตรอว์เบอร์รีสูงสุดใน 0-4 ชั่วโมงแรก น้ำในสตรอว์เบอร์รีเหลือน้อย แต่การออสโมซิสและการแพร่ของน้ำยังเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องในระดับที่ต่ำ ซึ่งแนวโน้มของเส้นกราฟแบ่งได้ 2 ลักษณะ คือ การใช้พัลส์ที่ 150 พัลส์ มีระดับของ ร้อยละการสูญเสียสูงกว่าการใช้จำนวนพัลส์อื่น ๆ โดยชั่วโมงที่ 5-10 เส้นกราฟมีความโน้มต่ำลง ทำให้เกิดการสูญเสียน้ำลดลงร้อยละ 0.3 เนื่องจากช่วงเวลาดังกล่าวเกิดการดึงกลับของน้ำที่ละลายในสารละลายซูโครสเข้าสู่สตรอว์เบอร์รี เพื่อรักษาสภาพของสตรอว์เบอร์รีตามธรรมชาติ แต่ตราบดีที่มีความเข้มข้นของสารละลาย 2 บริเวณต่างกันการออสโมซิสก็จะเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องเช่นเดียวกัน โดยชั่วโมงที่ 11-18 เส้นกราฟมีความโน้มสูงขึ้น ทำให้เกิดการสูญเสียน้ำเพิ่มขึ้นร้อยละ 1 เนื่องจากสภาพเนื้อเยื่อของสตรอว์เบอร์รีมีความอ่อนตัวเพิ่มขึ้นจากแรงดันออสโมติก จึงทำให้เกิดการออสโมซิสของน้ำในสตรอว์เบอร์รีเพิ่มขึ้นอีกครั้ง ในชั่วโมงที่ 19-22 เส้นกราฟมีความโน้มต่ำลงอีกครั้ง ทำให้เกิดการสูญเสียน้ำลดลงร้อยละ 0.2 เนื่องจากเกิดการดึงน้ำกลับเข้าสู่สตรอว์เบอร์รี และชั่วโมงที่ 23-24 เส้นกราฟมีความโน้มสูงขึ้น ทำให้เกิดการสูญเสียน้ำเพิ่มขึ้นร้อยละ 0.4 เนื่องจากน้ำที่ถูกดึงกลับเข้าไปในสตรอว์เบอร์รีทำให้สารละลายซูโครสมีความเข้มข้นเพิ่มขึ้น จึงเกิดการออสโมซิสของน้ำออกจากสตรอว์เบอร์รีอีกครั้ง และการใช้พัลส์ที่ 50, 100 และ 200 พัลส์ มีลักษณะเส้นกราฟที่คล้ายคลึงกัน ซึ่งสามารถอธิบายลักษณะการถ่ายเทน้ำระหว่างสตรอว์เบอร์รีและสารละลายซูโครสเหมือนกับการใช้พัลส์ที่ 150 พัลส์ โดยชั่วโมงที่ 4-11 เส้นกราฟมีความโน้มสูงขึ้นทำให้เกิดการสูญเสียน้ำเพิ่มขึ้นร้อยละ 0.7 ชั่วโมงที่ 11-17 มีลักษณะเส้นกราฟคล้ายกับการแช่ขั้วแบบซ้ำ โดยเส้นกราฟมีความโน้มสูงขึ้น ทำให้เกิดการสูญเสียน้ำเพิ่มขึ้นร้อยละ 0.8 ชั่วโมงที่ 18-22 เส้นกราฟมีความโน้มต่ำลง ทำให้เกิด

การสูญเสีย น้ำลดลงร้อยละ 0.1 และชั่วโมงที่ 23-24 เส้นกราฟมีแนวโน้มสูงขึ้นอีกครั้ง ทำให้เกิดการสูญเสีย น้ำเพิ่มขึ้นร้อยละ 0.3 ทั้งนี้การถ่ายเทน้ำจากการ

ออสโมซิสจะเริ่มคงที่ได้ หรือเริ่มเข้าสู่ภาวะสมดุลนั้น จะต้องมีความเข้มข้นของสารละลายภายในชั้นวัตถุติด เริ่มเท่ากับสารละลายภายนอก [3]

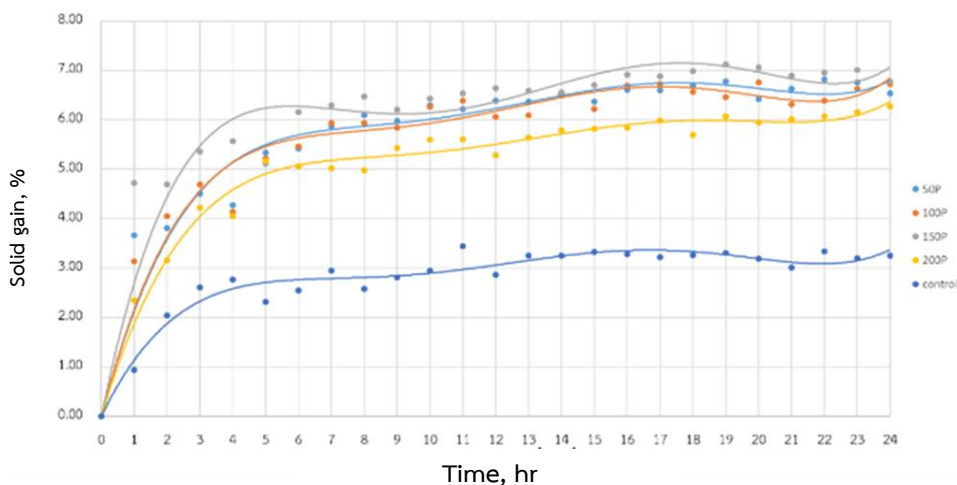


Figure 9 The percentage of solid increase in the pulp of strawberries during the PEF process

ปริมาณน้ำในเนื้อสตรอว์เบอร์รี่ที่ลดลงในกระบวนการแช่โอมีมีความสอดคล้องกับน้ำหนักสารละลายซูโครสที่เพิ่มขึ้นดังรูปที่ 8 จากปริมาณน้ำในเนื้อสตรอว์เบอร์รี่ที่ลดลงในกระบวนการแช่โอมีทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมดในสารละลายซูโครสที่ลดลงดังรูปที่ 8 เมื่อวิเคราะห์ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมดในสารละลายซูโครสพบว่าสารละลายความเข้มข้นเริ่มต้น 65 องศาบริกซ์ โดยใน 0-4 ชั่วโมงแรก ค่าปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมดในสารละลายซูโครสจะลดลงอย่างรวดเร็ว เมื่อเรียงจากค่าน้อยไปค่ามากของจำนวนฟลักซ์ที่ 150, 200, 100 และ 50 และการแช่โอมีแบบซ้ำ มีค่าเป็น 56, 57, 58.25, 58.75 และ 60 องศาบริกซ์ ตามลำดับ ค่าที่ได้ในทุกสภาวะไม่มีความแตกต่างกันมาก จากนั้นใน 4-24 ชั่วโมง ค่าจะลดลงเล็กน้อยจนใกล้คงที่หรือเข้าสู่สภาวะสมดุลมากขึ้นจนจบกระบวนการแช่โอมี ซึ่งระดับสภาวะการใช้จำนวนฟลักซ์มีผลต่อการ

ลดลงของค่าของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมดในน้ำเชื่อมอย่างชัดเจน แต่จะมีค่าลดลงมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับความเหมาะสมของสภาวะที่ให้กับสตรอว์เบอร์รี่ โดยสภาวะที่ใช้ 150 ฟลักซ์ มีแนวโน้มการลดลงของค่าสูงกว่า รองลงมา คือ 200, 100 และ 50 ฟลักซ์ ตามลำดับ จึงทำให้น้ำหนักของน้ำเพิ่มขึ้นในสารละลายซูโครสไม่เท่ากัน หลังจากนั้นทุกสภาวะน้ำในสารละลายซูโครสจะลดลงเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยจนใกล้คงที่หรือเข้าสู่สภาวะสมดุลมากขึ้นจนจบกระบวนการแช่โอมี แสดงว่าปริมาณของแข็งของน้ำตาลซูโครสเข้าไปในเนื้อของสตรอว์เบอร์รี่ จึงทำให้สารละลายซูโครสมีปริมาณลดลง เนื่องจากการใช้จำนวนฟลักซ์ที่ระดับต่าง ๆ เป็นการสร้างรูพรุนให้กับเซลล์ของสตรอว์เบอร์รี่ จึงเพิ่มช่องทางการเข้าออกของมวลสารมากขึ้น นอกจากช่องทางตามธรรมชาติแล้ว คือ น้ำจะเกิดการแพร่ออกมาผ่านทางรูพรุนทำลายเป็นรูพรุน และจากการออสโมซิสออกมาที่เกิดจากแรงขับของความแตกต่าง

ความเข้มข้นของสารละลายระหว่างสารละลายซูโครส และภายในสตรอร์เบอร์รี่ผ่านช่องพลาสมอดีสมาตา (plasmodesmata) ลักษณะของเซลล์ภายในจะหดตัวลงอย่างมากจึงทำให้โมเลกุลซูโครสแพร่เข้าไปการสะสมในบริเวณดังกล่าวจำนวนมากขึ้น สอดคล้องกับงานวิจัยของ Dellarosa และคณะ [23] ที่พบว่าการใช้สนามไฟฟ้าพัลส์นำไปสู่การทำลายเนื้อเยื่อพืชอย่างสมบูรณ์ โดยที่ผนังเซลล์และไซโตพลาสซึมจะเปิดออก ซึ่งเป็นช่องทางให้น้ำภายในอาหารออกมาได้มากขึ้น การศึกษาของแข็งที่เพิ่มขึ้นในเนื้อสตรอร์เบอร์รี่สามารถพิจารณาจากค่าร้อยละปริมาณของแข็งที่เพิ่มขึ้น (solid gain) การทดลองให้ผลดังรูปที่ 9 การเปลี่ยนแปลงร้อยละของแข็งที่เพิ่มขึ้นในเนื้อสตรอร์เบอร์รี่ระหว่างกระบวนการแช่แข็ง พบว่าลักษณะแนวโน้มของเส้นกราฟมีการเปลี่ยนแปลงค่าร้อยละของแข็งเพิ่มขึ้นในสตรอร์เบอร์รี่ทุกสภาวะการแช่แข็งสามารถแบ่งตามความชันของเส้นกราฟเป็น 2 ช่วง ได้แก่ 0-4 ชั่วโมงแรก ลักษณะเส้นกราฟมีความชันสูง และ 4-24 ชั่วโมง สามารถอธิบายอัตราการเพิ่มขึ้นของแข็งได้ว่าวิธีการแช่แข็งแบบแช่มีอัตราการเพิ่มขึ้นของของแข็งต่ำกว่าวิธีการใช้สนามไฟฟ้าพัลส์ทุก ๆ ช่วง เนื่องจากสตรอร์เบอร์รี่ที่ผ่านสนามไฟฟ้าพัลส์มีจำนวนรูพรุนที่มากกว่า จึงทำให้เกิดการถ่ายเทมวลซูโครสใน 0-4 ชั่วโมง สูงสุด และช่วงที่ 2 อัตราการเพิ่มขึ้นของของแข็งจะเริ่มเพิ่มขึ้นโดยลดลงจากช่วงแรก และในช่วงที่ 3, 4 และ 5 มีอัตราการเพิ่มขึ้นของของแข็งที่น้อยมาก และในช่วงที่ 6 เริ่มไม่มีอัตราการเพิ่มขึ้นของของแข็ง ดังนั้นอัตราการเพิ่มขึ้นของของแข็งจะมีการเพิ่มขึ้นของของแข็งมากในช่วงที่ 1-3 และจะค่อย ๆ ลดลงจนเริ่มไม่มีอัตราการเพิ่มขึ้นของของแข็งในช่วงที่ 3-6 โดยที่อัตราการเพิ่มขึ้นของของแข็งในวิธีการใช้สนามไฟฟ้าพัลส์ที่ระดับจำนวนพัลส์ที่ 150 พัลส์ มีอัตราการเพิ่มขึ้นของของแข็งมากสุดในช่วงที่ 1, 2 และ

3 และในช่วงที่มีอัตราค้อย ๆ ลดลง จะมีอัตราที่ใกล้เคียงกับจำนวนพัลส์ที่ 50, 100 และ 200 พัลส์ และการแช่แข็งแบบแช่มีอัตราการเพิ่มขึ้นของของแข็งต่ำสุดโดยมีลักษณะการเพิ่มขึ้นของของแข็งคล้ายกับวิธีการใช้สนามไฟฟ้าพัลส์ที่ระดับจำนวนพัลส์ต่าง ๆ แต่ในช่วงที่ 5 มีอัตราการเพิ่มขึ้นของของแข็งต่ำกว่าช่วงสุดท้าย เนื่องจากมีการเพิ่มขึ้นของของแข็งในสตรอร์เบอร์รี่ได้น้อยลง เป็นเพราะว่าของแข็งไม่สามารถเข้าไปในสตรอร์เบอร์รี่ได้ในช่วงนี้และเกิดการแพร่ออกมาจากสตรอร์เบอร์รี่ ทำให้อัตราการเพิ่มขึ้นของของแข็งในช่วงที่ 5 มีการแพร่เข้าของของแข็งเข้าไปอีกครั้ง เนื่องจากการเกิดในลักษณะนี้หมายความว่าในการทำลายเซลล์ในสตรอร์เบอร์รี่ของวิธีการแช่แข็งแบบแช่ โดนทำลายที่ไม่สามารถเข้าไปถึงระดับเซลล์ผิวหนังด้านใน จึงมีรูพรุนแค่นอกเซลล์ การแพร่เข้าและออกของมวลซูโครสจึงเกิดไม่ถึงภายในเซลล์ เป็นผลทำให้มีอัตราการเพิ่มขึ้นของของแข็งที่น้อยในช่วงที่ 4 คือ ซูโครสแพร่เข้าเติมเซลล์ผิวหนังนอกแล้ว จึงมีการไหลออกและแพร่กลับเข้าไปอีกในช่วงที่ 5 และจะลดลงจนไม่มีอัตราการเพิ่มขึ้นของของแข็งในช่วงสุดท้าย ทั้งนี้การถ่ายเทน้ำจากการออสโมซิสจะเริ่มคงที่ได้หรือเริ่มเข้าสู่ภาวะสมดุลนั้นจะต้องมีความเข้มข้นของสารละลายภายในชั้นวัตถุดิบเริ่มเท่ากับสารละลายภายนอก [3] ซึ่งการดึงน้ำออกที่ไม่ได้ใช้สนามไฟฟ้าพัลส์มีปริมาณของแข็งต่ำกว่าการสนามไฟฟ้าพัลส์ แสดงว่าสนามไฟฟ้าพัลส์มีผลต่อเยื่อหุ้มเซลล์เกิดเป็นรูพรุนที่เป็นช่องทางให้น้ำในชั้นวัตถุดิบถูกดึงน้ำออกมามากขึ้น และขณะเดียวกันของแข็งที่ละลายในสารละลายออสโมติกแพร่เข้าไปในชั้นวัตถุดิบผ่านทางรูพรุนเช่นกัน จึงทำให้ชั้นวัตถุดิบมีความเข้มข้นของของแข็งที่สูงขึ้น

Tylewicz และคณะ [13] ทดลองการใช้สนามไฟฟ้าพัลส์เตรียมก่อนการแช่แข็งสตรอร์เบอร์รี่

พบว่าการใช้จำนวนพัลส์มีแนวโน้มการเพิ่มขึ้นของปริมาณของแข็งในเนื้อสตรอว์เบอร์รี่สูงกว่าการไม่ใช้พัลส์ และจำนวนพัลส์ที่มากขึ้นจะทำให้ปริมาณของแข็งในเนื้อสตรอว์เบอร์รี่เพิ่มขึ้นเช่นกัน

ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมดในเนื้อสตรอว์เบอร์รี่มีผลทำให้ปริมาณซูโครสเข้าไปในเนื้อสตรอว์เบอร์รี่เพิ่มขึ้น ดังรูปที่ 10 จากค่าปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมดในเนื้อสตรอว์เบอร์รี่พบว่าลักษณะเส้นกราฟของปริมาณของแข็งสูงขึ้นอย่างต่อเนื่องทุกวิธีการจนจบกระบวนการแช่ โดยไม่สามารถแบ่งช่วงอย่างชัดเจน โดยที่การแช่แบบข้ามมีเส้นกราฟของปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมดต่ำที่สุด สำหรับการใช้จำนวนพัลส์สามารถเรียงจากเส้นกราฟสูงไปต่ำ

คือจำนวนพัลส์ที่ 150, 200, 100 และ 50 พัลส์ ตามลำดับ อธิบายได้ว่าการแช่แบบข้าม เส้นกราฟมีแนวโน้มปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมดมีการเปลี่ยนแปลงน้อย เนื่องจากการถ่ายเทมวลที่ค่อยเป็นค่อยไป และในช่วงเวลาที่ 23 มีแนวโน้มปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมดมีการเปลี่ยนแปลงน้อยที่สุด ส่วนสภาวะการใช้จำนวนพัลส์ที่ระดับต่าง ๆ มีการเปลี่ยนแปลงสภาพเซลล์ทำให้เกิดรูพรุนที่ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทมวลของซูโครส ทำให้เกิดการแพร่เข้าผ่านทางรูพรุนของเนื้อเยื่อสตรอว์เบอร์รี่ จึงเกิดการสะสมของโมเลกุลซูโครสตามผนังรูพรุนและเนื้อเยื่อมากขึ้นในระยะเวลาที่สั้นลง

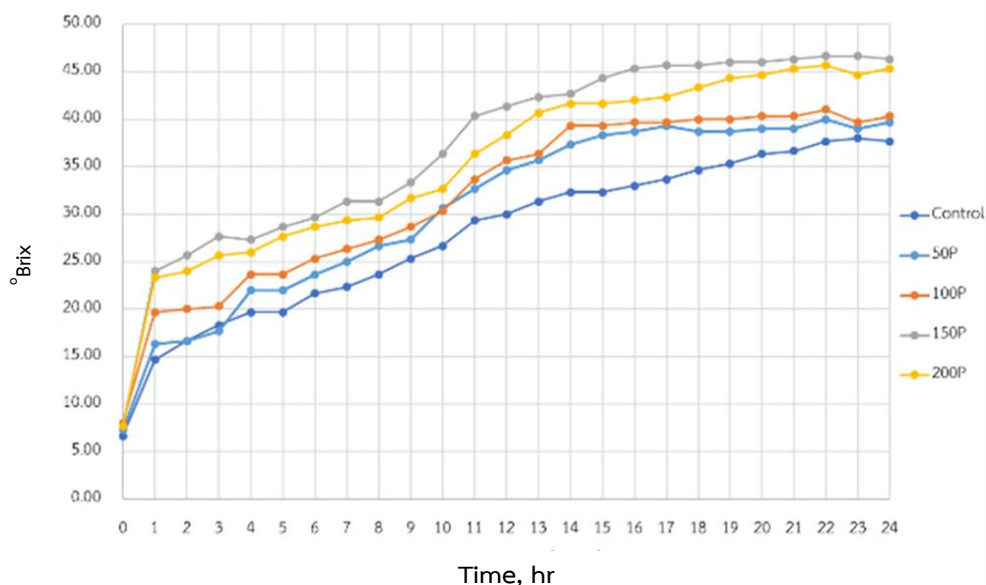


Figure 10 Changes in total dissolved solids in strawberries

ดังนั้นเมื่อเปรียบเทียบการแช่สตรอว์เบอร์รี่ที่เตรียมสตรอว์เบอร์รี่แบบไม่ผ่านสนามไฟฟ้าพัลส์ คือ การแช่แบบข้าม และผ่านสนามไฟฟ้าพัลส์ที่จำนวนพัลส์ระดับต่าง ๆ ที่มีผลต่อปริมาณการสูญเสีย น้ำ ปริมาณของแข็งที่เพิ่มขึ้น ปริมาณของแข็งที่ละลาย

ได้ทั้งหมดในเนื้อสตรอว์เบอร์รี่ พบว่าการแช่แบบข้าม มีการถ่ายเทมวลต่ำกว่าการใช้สภาวะจำนวนพัลส์ในระดับต่าง ๆ ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบระดับจำนวนพัลส์ด้วยกันเองพบว่าจำนวนพัลส์ที่ 150 พัลส์ มีการถ่ายเทมวลของปริมาณการสูญเสีย น้ำ ปริมาณของแข็งที่เพิ่มขึ้น

และปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมดในเนื้อสตรอร์เบอร์รี่สูงสุด เนื่องจากการใช้จำนวนพัลส์ของสนามไฟฟ้าระดับดังกล่าวมีความเหมาะสมต่อการทำลายเซลล์ทำให้เกิดรูพรุนในเนื้อเยื่อสตรอร์เบอร์รี่ที่สุด ส่วนการใช้สภาวะจำนวนพัลส์ที่สูงกว่า 150 พัลส์ ส่งผลทำให้เกิดรูพรุนในเนื้อเยื่อสตรอร์เบอร์รี่มากเกินไป จึงเกิดการทำลายเนื้อเยื่อมีความเสียหายมาก ทำให้เสียเสถียรภาพการควบคุมการถ่ายเทมวลสารเข้าออกตามธรรมชาติ จึงเป็นผลให้มีประสิทธิภาพการรักษาการถ่ายเทมวลน้ำภายในเนื้อเยื่อสตรอร์เบอร์รี่ต่ำไปด้วย ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Traffano-Schiffo และคณะ [25] ที่พบว่าการใช้จำนวนพัลส์ที่มากขึ้นกับเนื้อเยื่อพืชจะเกิดการทำลายและสร้างความเสียหายแก่เนื้อเยื่อมาก จึงทำให้ของเหลวทั้งภายในและภายนอกเซลล์เคลื่อนที่สวนทางกันอย่างต่อเนื่อง และการสะสมของตัวถูกละลายของแข็งในเนื้อเยื่อน้อยลง ซึ่งทั้ง 2 ช่วงของกระบวนการแช่แข็งสตรอร์เบอร์รี่มีความสอดคล้องกับปริมาณของแข็งในเนื้อสตรอร์เบอร์รี่และอัตราการถ่ายเทของมวลซูโครส

ดังนั้นสามารถสรุปกลไกของการถ่ายเทมวลซูโครสระหว่างการแช่แข็ง คือ การใช้จำนวนพัลส์ที่ 50, 100, 150 และ 200 พัลส์ มีอัตราการถ่ายเทมวลสูงกว่าการแช่แข็งแบบช้า ซึ่งสภาวะทั้งหมดมีลักษณะการถ่ายเทมวลที่คล้ายกันของค่าปริมาณน้ำที่สูญเสียและปริมาณของแข็งที่เพิ่มขึ้น โดยสนามไฟฟ้าพัลส์สามารถทำลายเซลล์ที่ระดับเยื่อหุ้มผ่านทำให้เซลล์ของสตรอร์เบอร์รี่เกิดเป็นช่องที่ใหญ่กว่าเดิม เมื่อแช่ในสารละลายที่มีความเข้มข้นสูงเป็นผลทำให้เกิดความต่างของแรงดันออสโมซิส ส่งผลให้เกิดการถ่ายเทมวลสารเกิดขึ้น คือ น้ำในสตรอร์เบอร์รี่เกิดการออสโมซิสออกมาจากสตรอร์เบอร์รี่ และขณะเดียวกันมีการแพร่ของมวลซูโครสเข้าไปแทนที่น้ำในสตรอร์เบอร์รี่ จึงเกิดการเจือจางระหว่างความเข้มข้นของสารละลายซูโครส

ภายในสตรอร์เบอร์รี่และน้ำเชื่อม เมื่อความเข้มข้นของสารละลายซูโครสภายในและภายนอกมีความเข้มข้นที่ไม่ต่างกันมาก ส่งผลให้แรงดันออสโมซิน้อยลงและคงที่จนจบกระบวนการแช่แข็ง ขณะเดียวกันการแช่แข็งแบบช้าก็มีกลไกการถ่ายเทมวลสารที่ช้ากว่าการใช้สนามไฟฟ้าพัลส์ เนื่องจากไม่เกิดการทำลายเซลล์ที่มากพอและมีรูพรุนน้อย การถ่ายเทมวลซูโครสจึงเกิดขึ้นได้ช้ากว่าการใช้สนามไฟฟ้าพัลส์

การตรวจวิเคราะห์วัดค่าความสว่างและค่าความเป็นสีแดง-เขียว ของสตรอร์เบอร์รี่แช่แข็งที่ใช้จำนวนพัลส์ของสนามไฟฟ้าพัลส์ก่อนการแช่แข็งสตรอร์เบอร์รี่ที่ระดับ 50, 100, 150 และ 200 พัลส์และการแช่แข็งแบบช้าดังรูปที่ 11 พบว่า การใช้จำนวนพัลส์ที่ระดับต่าง ๆ มีค่าความเป็นสีแดง-เขียว 18.74 ซึ่งสูงกว่าการแช่แข็งแบบช้า (เฉลี่ย 16.45) ส่วนการใช้จำนวนพัลส์ที่ระดับต่าง ๆ มีค่าความสว่างเฉลี่ย 41.70 ซึ่งต่ำกว่าการใช้การแช่แข็งแบบช้า (เฉลี่ย 42.85) และค่าความเป็นสีเหลือง-น้ำเงิน การใช้จำนวนพัลส์ที่ระดับต่าง ๆ มีค่าเฉลี่ย 14.85 ซึ่งต่ำกว่าการใช้การแช่แข็งแบบช้า (เฉลี่ย 13.67) เมื่อเปรียบเทียบค่าสีทางสถิติของวิธีการใช้สนามไฟฟ้าพัลส์และวิธีการแช่แข็งแบบช้า พบว่าไม่มีความแตกต่างในด้านค่าสีที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 เนื่องจากการใช้จำนวนพัลส์ที่ระดับต่าง ๆ มีค่าความเป็นสีแดง-สีเขียวสูง และค่าความสว่างต่ำเล็กน้อย จึงทำให้สีของสตรอร์เบอร์รี่ดูเข้ม ส่วนการแช่แข็งแบบช้ามีค่าความเป็นสีแดง-สีเขียวต่ำ และค่าความสว่างสูงเล็กน้อย จึงทำให้สีของสตรอร์เบอร์รี่สว่าง แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนพัลส์ที่ใช้กับค่าสีในสตรอร์เบอร์รี่ พบว่าจำนวนพัลส์จะแปรผกผันกับค่าความเป็นสีแดง-สีเขียวและค่าความสว่าง สอดคล้องกับงานวิจัยของ Dellarosa และคณะ [23] ที่พบว่า การใช้สนามไฟฟ้าพัลส์นำไปสู่การทำลายเนื้อเยื่อพืชอย่างสมบูรณ์ พังเซลล์ และไซโต

พลาสซึมเปิดออก Tylewicz และคณะ [13] ที่พบว่า การใช้สนามไฟฟ้าพัลส์ความเข้มสูงสามารถยับยั้ง กิจกรรมของเอนไซม์เพอร์ออกซิเดส (peroxidase, POD) และพอลิฟีนอลออกซิเดส (polyphenol oxidase, PPO) อันนำไปสู่การเกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาลที่เกี่ยวข้องกับเอนไซม์ได้ จึงช่วยให้สีแดงตามธรรมชาติในสตรอว์เบอร์รีไม่ซีดหรือสีหมองคล้ำ แต่มองเห็นเป็นสีแดงได้ชัดเจนขึ้น เกิดจากสารแอนโทไซยานิน (anthocyanin) ซึ่งเป็นรงควัตถุที่จัดอยู่ในกลุ่มฟลาโวนอยด์ สตรอว์เบอร์รีสดพันธุ์พระราชทาน 80 เมื่อผล

สุกทั้งลูกโดยทั่วไปความเป็นสีแดงที่มองเห็นจะมีความลึกประมาณ 2 ใน 3 จากผิวถึงจุดศูนย์กลาง และค่าความเป็นสีแดง-สีเหลืองอยู่ที่ 36.73 [26] เมื่อละลายสตรอว์เบอร์รีที่แช่แข็งจะมีการสูญเสียค่าความเป็นสีแดง 11-15 ซึ่งสีแดงนี้สามารถละลายในน้ำได้ด้วยสังเกตได้จากน้ำของสารละลายซูโครสที่แช่สตรอว์เบอร์รีมีสีออกมา แต่เนื่องจากสารละลายซูโครสมีความเข้มข้นสูง สีคงตัวในเนื้อเยื่อมากขึ้น มีเพียงส่วนน้อยที่ละลายออกมา ซึ่งจะมองเห็นน้ำเชื่อมเป็นสีส้มอมชมพู

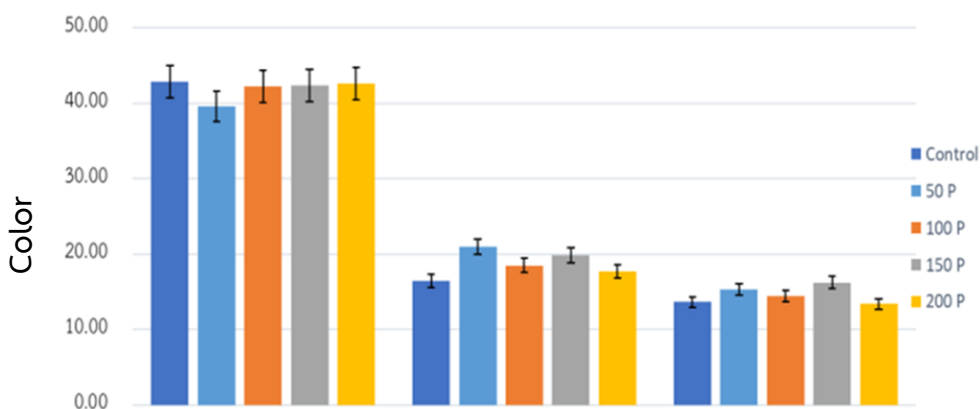


Figure 11 Brightness (L*), red-green (a*), and yellow-blue (b*) of strawberries

5. สรุปผล

การศึกษาผลของการใช้จำนวนพัลส์ของสนามไฟฟ้าพัลส์ก่อนการแช่สตรอว์เบอร์รีที่ความเข้มสนามไฟฟ้า 4 กิโลโวลต์ต่อเซนติเมตร ความถี่ 1 เฮิร์ตซ์ ที่จำนวนพัลส์ 50, 100, 150 และ 200 พัลส์ เปรียบเทียบกับการแช่แบบช้า โดยแช่สตรอว์เบอร์รีทั้ง 2 วิธีการ และหาผลของการถ่ายเทมวลซูโครสเข้าสู่สตรอว์เบอร์รีระหว่างการแช่และวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพของสตรอว์เบอร์รีแช่ สามารถสรุปดังนี้

5.1 สนามไฟฟ้าพัลส์มีผลต่อเนื้อเยื่อของสตรอว์เบอร์รี สนามไฟฟ้าพัลส์ทำให้น้ำเซลล์และเยื่อ

หุ้มเซลล์ของสตรอว์เบอร์รีแตกออก ทำให้เกิดรูพรุนซึ่งจะทำให้ลักษณะเนื้อของสตรอว์เบอร์รีมีความนิ่มมากกว่าสตรอว์เบอร์รีที่ไม่ผ่านสนามไฟฟ้าพัลส์ ทำให้กลไกการถ่ายเทมวลสารระหว่างการแช่สตรอว์เบอร์รีเกิดขึ้นได้เร็วกว่าการแช่แบบช้าที่ไม่ผ่านสนามไฟฟ้าพัลส์ โดยการใช้สนามไฟฟ้าพัลส์มีลักษณะการถ่ายเทมวลสารทั้งแบบการออสโมซิสของน้ำ และการแพร่ของมวลซูโครส ส่วนการแช่แบบช้าจะมีลักษณะถ่ายเทมวลสารแบบการออสโมซิสตามปกติ

5.2 สมบัติทางกายภาพของสตรอว์เบอร์รีที่ผ่านการใช้สนามไฟฟ้าพัลส์ก่อนแช่ พบว่ามีปริมาณ

ของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมดในสตรอว์เบอร์รี่สูงกว่าการแช่แข็งแบบช้า และเมื่อเปรียบเทียบค่าสีทั้ง 2 วิธีการพบว่าค่าสีไม่มีความแตกต่างกันที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 0.05 ($p > 0.05$) และพบว่าการใช้สนามไฟฟ้าที่ระดับจำนวนพัลส์ที่ 150 และ 200 พัลส์ เหมาะสมสำหรับการแนะนำให้บริษัทนำไปปรับใช้ในกระบวนการแช่แข็ง โดยใช้เวลาที่ 14 ชั่วโมงเป็นต้นไปที่ทำให้ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมดในสตรอว์เบอร์รี่มีค่าระหว่าง 40 ถึง 45 องศาบริกซ์

การเปรียบเทียบผลการทดลองในกระบวนการแช่แข็งสตรอว์เบอร์รี่ที่ผ่านการใช้สนามไฟฟ้าพัลส์ก่อนเป็นวิธีการที่เหมาะสมที่จะนำไปพัฒนาต่อในระดับอุตสาหกรรม สำหรับการพัฒนาระบบการผลิตสตรอว์เบอร์รี่แช่แข็งให้มีคุณภาพที่ดีขึ้น สำหรับปริมาณการผลิตจำนวนมาก และระยะเวลาที่เหมาะสมในกระบวนการแช่แข็งต่อไป รวมทั้งสามารถลดระยะเวลาในกระบวนการแช่แข็งได้

6. กิตติกรรมประกาศ

ผลการวิจัย พัฒนา และวิศวกรรมภายใต้โครงการนี้ได้รับการสนับสนุนจากเงินทุนอุดหนุนโครงการวิจัย พัฒนา และวิศวกรรมจากฝ่ายบริหารคลัสเตอร์และโปรแกรมวิจัย ด้านบริหารจัดการการวิจัย สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ ประจำปีงบประมาณ 2561

7. References

- [1] Inthasen, K., 2015, Strawberry Planting, Kanchanaburi Agricultural Occupation Promotion and Development Center (Highland Agricultural Extension), Kanchanaburi. (in Thai)
- [2] Suphamitayothin, P., 2013, Sugar Usage in Fruit and Vegetable Processing, Vegetable and Fruit Technology, Odeon Store Publisher, Bangkok, 185 p. (in Thai)
- [3] Claudine, P.T., Anny, F.B. and Robert, N., 2006, Air drying behavior of fresh and osmotically dehydrated onion slices (*Allium cepa*) and tomato fruits (*Lycopersicon esculentum*), Int. J. Food Prop. 4: 877-888.
- [4] Yuenyongphutthamonthon, V., 2013, Factors influencing on dewatering by osmotic dehydration of fruits and vegetables, Burapha Sci. J. 18: 226-233. (in Thai)
- [5] Chandra, S. and Kumari, D., 2015, Recent development in osmotic dehydration of fruit and vegetables, Crit. Rev. Food Sci. Nutr. 55: 552-561.
- [6] Tedjo, W., Taiwo, K.A., Eshtiaghi, N. and Knorr, D., 2002, Comparison of pretreatment methods on water and solid diffusion kinetics of osmotically dehydrated mangos, J. Food Eng. 53: 133-136.
- [7] Claudia, S., Stefan, T. and Volker, H., 2012, Mass transport improvement by PEF – Applications in the area of extraction and distillation, pp. 211-232, In Zereski, S. (ED.), Distillation – Advances from Modeling to Applications, InTech, Rijeka.
- [8] Ade-Omowaye, B.I.O., Angersbach, N.K., Taiwo K.A. and Knorr, D., 2001, Use of pulsed electric field pre-treatment to

- improve dehydration characteristics of plant based foods, Trends Food Sci. Technol. 12: 285-295.
- [9] Aprajeeta, J.R., Gopirajah, R. and Anandha ramakrishnan, C. , 2015, Shrinkage and porosity effects on heat and mass transfer during potato drying, J. Food Eng. 144: 119-128.
- [10] Ashok, S.Y. and Satya, V.S., 2014, Osmotic dehydration of fruits and vegetables: A review, J. Food Sci. Technol. 51: 1654-1673.
- [11] Parniakov, O., Olivier B., Nikolai, L. and Eugene, V., 2016, Effects of pulsed electric fields assisted osmotic dehydration on freezing- thawing and texture of apple tissue, J. Food Eng. 183: 32-38.
- [12] Eugene, V. and Nikolai, L. , 2008, Pulsed-Electric Fields Induced Effects in Plant Tissues: Fundamental Aspects and Perspectives of Applications, pp. 68-69, In Vorobiev, E. and Lebovka, N. (Eds.), Electrotechnologies for Extraction from Food Plants and Biomaterials, Springer-Verlag, New York.
- [13] Tylewicz, T.L., Silvia, T., Cinzia, M., Santina, R., Nocolo, D., Luca, L. and Maeco, D.R. , 2017, Effect of dehydration on physico-chemical characteristics of organic strawberries, J. Food Eng. 213: 2-7.
- [14] Chenlo, F. , Moreira, C. , Fernández-Herrero, C. and Vázquez, G. , 2007, Mass transfer during osmotic dehydration of chestnut using sodium chloride solutions, J. Food Eng. 73: 164-173.
- [15] Daniel. M, Prasad, R. , Aniraban, D. , Sawinder, K. and Chayanika, S. , 2017, Recent advances in conventional drying of foods, J. Food Technol. Pres. 1: 25-34.
- [16] Maria, A.M., Sandra, M.M. and Alan, E.R., 2004, Vacuum drying of osmotic dehydrated apple slices, pp. 2084-2090, Proceedings of the 14th International Drying Symposium, São Paulo.
- [17] Kaymak-Ertekin, F. and Sultanoglu, M. , 2000, Modelling of mass transfer during osmotic dehydration of apple, J. Food Eng. 46: 243-250.
- [18] Sardyoung, P., Singkat, C., Thongbai, P., Sriyod, O., Yawootti, A. and Intra, P., 2017, Effect of electric field strength on quality of milk tea in pulsed electric field disinfection process, J. KMUTNB 27: 265-279. (in Thai)
- [19] Kempkes, M.A., 2010, Pulsed electric field (PEF) systems for commercial food and juice processing, Case Stud. Novel Food Process. Technol. 2010: 73-102.
- [20] Eshtiagh, M.N. and Knorr, D., 2002, High electric field pulse pretreatment: Potential for sugar beet processing, J. Food Eng. 52: 265-272.
- [21] Jayaram, S. , 2000, Sterilization of liquid foods by pulsed electric fields, IEEE Electr. Insul. Mag. 16(6): 17-25.
- [22] Vorobiev, E. and Lebovka, N., 2008,

- Pulsed-electric fields induced effects in plant tissues: Fundamental aspects and perspectives of applications, *J. Food Eng.* 10: 68-69.
- [23] Dellarosa, N., Tappi, S., Ragni, L., Laghi, L., Rocculi, P. and Dalle R.M., 2016, Metabolic Response of fresh-cut apples induced by pulse electric fields, *Innov. Food Sci. Technol.* 38: 356-364.
- [24] Von, V., Ingenieur, D. and Topft, S., 2006, Pulsed electric fields (PEF) for permeabilization of cell Membranes in food and bioprocessing applications, pp. 1- 7, In *Process and Equipment Design and Cost Analysis*, Berlin University, Berlin.
- [25] Traffano-Schiffo, M.V., Tylewicz, U., Castro-Giraldez, M., Fito, P.J., Ragni, L. and Dalla Rosa, M., 2016, Effect of pulsed electric fields pre-treatment on mass transport during the osmotic dehydration of organic kiwifruit, *Innov. Food Sci. Emerg. Technol.* 38: 243-251.
- [26] Sirichariwanawat, A. , Phakun, W. and Asanok, A., 2015, Effect of freezing on quality of ripe mango flesh, *KKU Agric. J.* 43: 846-850. (in Thai)
- [27] Srivongphet, S., Bunyakiet, D. and Boonprasompoo, P., 2014, Postharvest quality of strawberry fruit cv. No. 80 and No. 329, *KKU Agric. J.* 42(4): 463-472. (in Thai)