

ผลของวิธีการเตรียมขั้นต้นและปริมาณการเสริมธาตุเหล็ก กับสาหร่ายผักกาดทะเลในกระบวนการออสโมซิส

Effect of Pre-treatment Method and Iron Content Enrichment on Sea Lettuce (*Ulva rigida*) in Osmosis Process

วิชมนิ ยืนยงพุททกาล*, ดุจดือน ทิมทอง และวรัญญา บางศรี

ภาควิชาวิทยาศาสตร์การอาหาร คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

ตำบลแสนสุข อำเภอเมือง จังหวัดชลบุรี 20131

สุวรรณา วรสิงห์

ศูนย์วิจัยและพัฒนาประมงชายฝั่งตราด ตำบลอ่าวใหญ่ อำเภอเมือง จังหวัดตราด 23000

Wichamanee Yuenyongputtakal*, Dutduan Thimthong and Waranya Bangsri

Department of Food Science, Faculty of Science, Burapha University, Saensook, Muang, Chonburi 20131

Suwanna Worasing

Trat Coastal Fisheries Research and Development Center, Ao-yai, Muang, Trat 23000

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของการเตรียมขั้นต้นต่อค่าการถ่ายเทมวลสารของสาหร่ายผักกาดทะเลระหว่างการออสโมซิส และเพื่อศึกษาผลของปริมาณการเสริมธาตุเหล็กต่อค่าการถ่ายเทมวลสารและปริมาณเหล็กของสาหร่ายผักกาดทะเลที่ผ่านการออสโมซิส เตรียมขั้นต้นสาหร่ายผักกาดทะเลด้วยการลวกในน้ำเดือดเป็นเวลา 1 นาที และการแช่ภายใต้สภาวะสุญญากาศความดัน 200 mbar เป็นเวลา 10 นาที ผลการทดลองพบว่าการเตรียมขั้นต้นด้วยการลวกร่วมกับการแช่ในสภาวะสุญญากาศมีผลให้ตลอดการออสโมซิสสาหร่ายผักกาดทะเลมีปริมาณน้ำที่สูญเสียและปริมาณน้ำหนักรวมที่ลดลงสูงที่สุด แต่มีปริมาณของแข็งที่เพิ่มขึ้นต่ำที่สุด โดยทำให้ค่าการถ่ายเทมวลสารแตกต่างจากการเตรียมขั้นต้นด้วยการลวกหรือการแช่ในสภาวะสุญญากาศเพียงอย่างเดียวอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ผลของการเสริมธาตุเหล็กในสาหร่ายผักกาดทะเลโดยการออสโมซิสพบว่าการเติมเฟอร์รัสซัลเฟตลงในสารละลายออสโมติกเพิ่มขึ้นทำให้ค่าการถ่ายเทมวลสารมากขึ้น รวมทั้งสาหร่ายผักกาดทะเลมีปริมาณเหล็กมากขึ้นด้วย ($p < 0.05$) โดยพบว่าการเติมเฟอร์รัสซัลเฟต 15 เปอร์เซ็นต์ ทำให้สาหร่ายผักกาดทะเลมีปริมาณเหล็กมากที่สุดเท่ากับ 11.84 กรัม/100 กรัม

คำสำคัญ : การออสโมซิส, การเตรียมขั้นต้น, การเสริมธาตุเหล็ก, สาหร่ายผักกาดทะเล

*ผู้รับผิดชอบบทความ : wich@buu.ac.th

Abstract

The aim of this research was to study the effect of pre-treatments of sea lettuce on mass transfer parameters during osmosis. Effect of iron content enrichment on mass transfer parameters and iron content of osmosed sea lettuce was also studied. Sea lettuce pre-treatment using boiled water blanching for 1 min and vacuum impregnation under pressure 200 mbar for 10 min were carried out. It was found that during osmosis, blanching combined with vacuum impregnation pre-treatment resulted in the highest water loss and weight reduction but the lowest in solid gain. This mass transfer parameters were significantly different from blanching or vacuum impregnation pre-treatment alone ($p < 0.05$). The result from iron enrichment on sea lettuce using osmosis technique was found that the addition of ferrous sulfate into the osmotic solution increased mass transfer parameters and also iron content of sea lettuce ($p < 0.05$). The addition of 15 % ferrous sulfate could produce the sea lettuce with the highest iron as 11.84 g/100 g.

Key words: osmosis, pretreatment, iron enrichment, sea lettuce

1. บทนำ

สาหร่ายผักกาดทะเล (*Ulva rigida*) เป็นสาหร่ายทะเลชนิดหนึ่งที่มีสีเขียว มีลักษณะแผ่นใบแผ่กว้าง ใบหยักคล้ายใบผักกาด มีรายงานว่างค์ประกอบทางเคมีโดยประมาณประกอบด้วยโปรตีน 13-18 เปอร์เซ็นต์ ไขมัน 0.3-1.9 เปอร์เซ็นต์ คาร์โบไฮเดรต 53-58 เปอร์เซ็นต์ ใยอาหาร 9-12 เปอร์เซ็นต์ (น้ำหนักแห้ง) และความชื้น 15-20 เปอร์เซ็นต์ มีแร่ธาตุได้แก่ แคลเซียม 388.8 มิลลิกรัม/100 กรัม โซเดียม 1,051.8 มิลลิกรัม/100 กรัม และไอโอดีน 227.7 มิลลิกรัม/1,000 กรัม นอกจากนี้ยังมีวิตามินชนิดต่าง ๆ เช่น วิตามินบี และวิตามินซี [1] การออสโมซิสเป็นวิธีหนึ่งที่สามารถนำสารที่มีประโยชน์ต่อร่างกาย (physiologically active compounds) เช่น ธาตุแคลเซียม และธาตุเหล็ก เข้าสู่อาหารได้ โดยการเติมแร่ธาตุซึ่งเป็นตัวถูกละลายลงในสารละลายออสโมติกที่ใช้แช่อาหาร และการออสโมซิสยังเป็นการดึงน้ำบางส่วนออกจากชิ้น

อาหารได้ ซึ่งเป็นการลดปริมาณน้ำในอาหารลง [2-4] อัตราการถ่ายเทมวลสารระหว่างการออสโมซิสจะเพิ่มขึ้น เมื่อเชื้อหุ้มเซลล์ของชิ้นอาหารนั้นถูกทำลาย แต่อย่างไรก็ตามจะต้องไม่ถูกทำลายมากเกินไปจนทำให้อาหารเกิดการเปลี่ยนแปลงจากของสดไปมาก การเตรียมชิ้นดินเป็นแนวทางหนึ่งที่สามารถเพิ่มอัตราการถ่ายเทมวลสารได้ งานวิจัยนี้สนใจการเตรียมชิ้นดินก่อนการออสโมซิสโดยการลวกและการแช่ในสภาวะสุญญากาศ การลวกเป็นการให้ความร้อนกับชิ้นอาหารจะทำให้เชื้อหุ้มเซลล์อ่อนตัวลง เป็นผลทำให้เพิ่มอัตราการถ่ายเทมวลสารระหว่างการออสโมซิส [5,6] และการออสโมซิสภายใต้สภาวะสุญญากาศทำให้โครงสร้างภายในเซลล์ถูกบีบอัดตัวลงและอากาศในช่องว่างระหว่างเซลล์อาจถูกดูดออกมาด้วยเมื่อนำมาแช่ต่อที่สภาวะบรรยากาศทำให้เนื้อเยื่อเกิดการคลายตัว เป็นผลให้เกิดการถ่ายเทมวลสารมากขึ้น [7,8] งานวิจัยนี้ใช้สารละลายออสโมติกในรูปแบบสารละลายผสมของน้ำตาลโอลิโกฟรุคโตส โซเดียม

คลอไรด์ และกรดซิตริก ร่วมกับการเสริมธาตุเหล็กในรูปของเฟอรัสซัลเฟต โดยเลือกใช้น้ำตาลโอลิโกฟรุคโตสแทนน้ำตาลซูโครส เนื่องจากมีความหวานน้อยกว่าน้ำตาลซูโครส 50 เปอร์เซ็นต์ และมีสมบัติเป็นพรีไบโอติกที่มีประโยชน์ต่อร่างกาย [3] ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของการเตรียมขึ้นต้นต่อค่าการถ่ายเทมวลสารของสาหร่ายผักกาดทะเลระหว่างการออกซิโมซิส และเพื่อศึกษาผลของปริมาณการเสริมธาตุเหล็กต่อการถ่ายเทมวลสารและปริมาณเหล็กของสาหร่ายผักกาดทะเลที่ผ่านการออกซิโมซิส

2. อุปกรณ์และวิธีการ

วัตถุดิบสาหร่ายผักกาดทะเลรับจากศูนย์วิจัยและพัฒนาประมงชายฝั่งตรัง สารละลายออกซิโมติกเตรียมโดยใช้โอลิโกฟรุคโตส (RAFTULOSE® P95, Belgium) เฟอรัสซัลเฟต (Ajex, Australia) โซเดียมคลอไรด์ (Food grade, Thailand) และกรดซิตริก (Food grade, Thailand)

2.1 การศึกษาผลของการเตรียมขึ้นต้นต่อการถ่ายเทมวลสารระหว่างการออกซิโมซิสสาหร่ายผักกาดทะเล

นำสาหร่ายผักกาดทะเลมาล้างด้วยน้ำสะอาด ตัดเป็นชิ้นขนาด 5 x 5 เซนติเมตร แล้ววางบนตะแกรงให้สะเด็ดน้ำ และเตรียมสารละลายออกซิโมติกสำหรับแช่โดยเตรียมในรูปสารละลายผสมของโอลิโกฟรุคโตสความเข้มข้น 40 เปอร์เซ็นต์ โซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 10 เปอร์เซ็นต์ และปรับ pH ด้วยกรดซิตริกให้มีค่า pH ประมาณ 3 นำไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 80-85 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 นาที เตรียมขึ้นต้นก่อนการนำสาหร่ายไปแช่ในสารละลายออกซิโมติก โดยแปรวิธีการเตรียมขึ้นต้นเป็น 4 วิธี

ได้แก่ (1) การลวก (2) การแช่ในสภาวะสุญญากาศ (3) การลวกและแช่ในสภาวะสุญญากาศ และ (4) ไม่มีการเตรียมขึ้นต้น (ตัวควบคุม)

การลวก ดำเนินการโดยลวกสาหร่ายผักกาดทะเลในน้ำเดือดอุณหภูมิ 95±2 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 นาที โดยลวกสาหร่ายผักกาดทะเลครั้งละ 200 กรัม กำหนดอัตราส่วนระหว่างน้ำหนักสาหร่ายผักกาดทะเลและน้ำที่ใช้ลวกเท่ากับ 1 : 10 เมื่อครบกำหนดเวลาแช่ในน้ำเย็นทันที การแช่ในสภาวะสุญญากาศ ดำเนินการโดยแช่สาหร่ายผักกาดทะเลในสารละลายออกซิโมติกที่เตรียมไว้ การแช่ดำเนินการในขวดรูปชมพู่ ใช้จุกยางปิดให้อยู่ในระบบปิดแล้วเชื่อมต่อกับปั๊มสุญญากาศ กำหนดที่ความดันสุญญากาศ 200 mbar เป็นเวลา 10 นาที กำหนดอัตราส่วนระหว่างน้ำหนักสาหร่ายผักกาดทะเลและสารละลายออกซิโมติกเท่ากับ 1 : 10

นำสาหร่ายผักกาดทะเลทั้ง 4 สิ่งทดลองมาแช่ในสารละลายออกซิโมติกที่สภาวะบรรยากาศ โดยแช่ในโหลแก้ว ปิดฝาด้วยอลูมิเนียมฟอยด์ กำหนดอัตราส่วนระหว่างน้ำหนักสาหร่ายผักกาดทะเลและสารละลายออกซิโมติกเท่ากับ 1 : 10 แช่ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 240 นาที สุ่มตัวอย่างทุก 40 นาที เพื่อวิเคราะห์ค่าการถ่ายเทมวลสาร ได้แก่ ปริมาณน้ำที่สูญเสีย ปริมาณของแข็งที่เพิ่มขึ้น และปริมาณน้ำหนักที่ลดลง ดังนี้

(1) ปริมาณน้ำที่สูญเสีย (water loss, WL)

คำนวณได้จาก

$$WL \text{ (เปอร์เซ็นต์)} = \frac{[W_i (X_i/100) - W_f (X_f/100)] \times 100}{W_i}$$

(2) ปริมาณของแข็งที่เพิ่มขึ้น (solid gain, SG)

คำนวณได้จาก

$$SG \text{ (เปอร์เซ็นต์)} = \frac{[(W_f(100-X_f)/100) - (W_i(100-X_i)/100)] \times 100}{W_i}$$

(3) ปริมาณน้ำหนักที่ลดลง (weight reducing, WR) คำนวณได้จาก

$$WR \text{ (เปอร์เซ็นต์)} = \frac{(W_i - W_f) \times 100}{W_i}$$

เมื่อ W_i = น้ำหนักเริ่มต้นของตัวอย่าง (กรัม)

W_f = น้ำหนักของตัวอย่างที่เวลาใด ๆ (กรัม)

X_i = ปริมาณความชื้นเริ่มต้นของตัวอย่าง (กรัมของน้ำ/100 กรัมของน้ำหนักเริ่มต้น)

X_f = ปริมาณความชื้นของตัวอย่างที่เวลาใด ๆ (กรัมของน้ำ/100 กรัมของน้ำหนักเริ่มต้น)

2.2 การศึกษาการเสริมธาตุหลักในสาหร่ายผักกาดทะเลโดยการออสโมซิส

เตรียมตัวอย่างขึ้นต้นตามวิธีที่เลือกได้จาก

ข้อ 2.1 เติมธาตุหลักในรูปเฟอร์รัสซัลเฟตลงไปในสารละลายออสโมติก โดยแปรความเข้มข้นเป็น 0, 5, 10 และ 15 เปอร์เซ็นต์ ดำเนินการออสโมซิสตามวิธีในข้อ 2.1 เมื่อครบเวลา นำสาหร่ายหลังการออสโมซิสมาวิเคราะห์ค่าการถ่ายเทมวลสารและปริมาณหลัก [9] รวมถึงวิเคราะห์ค่าการนำไฟฟ้าของสารละลายออสโมติกทั้งก่อนและหลังการออสโมซิส โดยใช้เครื่องวัดค่าการนำไฟฟ้า (Conductivity ExStik EC400)

2.3 การวิเคราะห์ทางสถิติ

ทำการทดลอง 3 ซ้ำ วิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูล (ANOVA) โดยวางแผนการทดลองแบบ CRD เปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยโดยใช้ Duncan's new multiple rang test วิเคราะห์ผลทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ ด้วยโปรแกรม SPSS version 13

3. ผลการวิจัยและวิจารณ์

3.1 ผลของการเตรียมขึ้นต้นต่อการถ่ายเทมวลสารระหว่างการออสโมซิสสาหร่ายผักกาดทะเล

3.1.1 ปริมาณน้ำที่สูญเสีย (water loss, WL)

จากรูปที่ 1 พบว่าสาหร่ายผักกาดทะเลทุกสิ่งทดลองมีค่า WL เพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาในการออสโมซิสนานขึ้น แสดงให้เห็นว่าเกิดกลไกการถ่ายเทมวลสารระหว่างการออสโมซิสโดยน้ำในขึ้นสาหร่ายสามารถแพร่ออกมานอกเซลล์ได้ โดยพบว่าทุกสิ่งทดลองมีแนวโน้มการสูญเสีย น้ำคล้ายกัน กล่าวคือ ค่า WL เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องในช่วงแรกของการออสโมซิส (40-160 นาที) และเมื่อเวลาผ่านไป (200-240 นาที) ค่า WL มีการเปลี่ยนแปลงน้อยลงจนเกือบคงที่ ทั้งนี้เนื่องจากในช่วงแรกของการออสโมซิสมีความแตกต่างของความเข้มข้นของสารละลายภายในเซลล์กับสารละลายออสโมติกมากจึงเกิดแรงขับมาก สามารถเร่งการถ่ายเทมวลสารเป็นผลทำให้มีค่า WL มาก และเมื่อเวลานานขึ้น น้ำภายในเซลล์น้อยลงและเกิดการสะสมของน้ำที่แพร่ออกมาในสารละลายออสโมติก ทำให้สารละลายออสโมติกเจือจางลงจึงเกิดความแตกต่างของความเข้มข้นของสารละลายภายในเซลล์กับสารละลายออสโมติกลดลง จึงเกิดแรงขับในการถ่ายเทมวลสารลดลงเป็นผลทำให้มีค่า WL มีแนวโน้มคงที่ [10]

เมื่อพิจารณาแนวโน้มค่า WL ตลอดการออสโมซิสสามารถเรียงลำดับได้ดังนี้ สาหร่ายผักกาดทะเลที่เตรียมขึ้นต้นโดยการลวกและแช่ในสถานะสุญญากาศมีค่า WL สูงที่สุด (มีค่า WL ในช่วง 14.73-33.72 เปอร์เซ็นต์) รองลงมาคือสาหร่ายผักกาดทะเลที่เตรียมขึ้นต้นโดยการแช่ในสถานะสุญญากาศ (มีค่า WL ในช่วง 11.88-31.11 เปอร์เซ็นต์) สาหร่าย

ผักกาดทะเลที่เตรียมขึ้นต้นโดยการลวก (มีค่า WL ในช่วง 7.74-20.22 เปอร์เซ็นต์) และสาหร่ายผักกาดทะเลที่ไม่ผ่านการเตรียมขึ้นต้น (มีค่า WL ในช่วง 3.96-13.74 เปอร์เซ็นต์) ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องมาจากการเตรียมขึ้นต้นด้วยการลวกร่วมกับการแช่ในสภาวะสุญญากาศเป็นสภาวะที่รุนแรงที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีอื่น ซึ่งน่าจะเป็นผลให้โครงสร้างของเซลล์สาหร่ายถูกทำลายไปมากกว่าวิธีอื่นส่งผลให้เชื้อหุ้มเซลล์ยอมให้น้ำในสาหร่ายแพร่ออกมาได้มากที่สุดในการลวกทำให้อาหารได้สัมผัสกับตัวกลางที่ร้อน ความร้อนระหว่างการลวกจึงทำให้โครงสร้างของเซลล์ผักอ่อนตัวลง เชื้อหุ้มเซลล์เกิดการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางกายภาพไป โดยสูญเสียสมบัติการเป็นเยื่อเลือกผ่านจึงทำให้อัตราการถ่ายเทมวลน้ำออกจากเซลล์เกิดขึ้นได้มากและเร็วขึ้น [5,6] ส่วนการใช้สภาวะสุญญากาศทำให้เกิดการถ่ายเทมวลสารดีขึ้น เนื่องจากการใช้สภาวะสุญญากาศเป็นการลดความดันอากาศลง ทำให้ผนังเซลล์มีลักษณะมีความเป็นรู (porosity) มากขึ้น อาจกล่าวได้ว่า การลดลงของความดันในสภาวะสุญญากาศทำให้โครงสร้างภายในเซลล์ถูกบีบอัดขยุบตัวลงและอากาศในช่องว่างระหว่างเซลล์อาจถูกดูดออกมาด้วย เมื่อนำมาแช่ต่อที่สภาวะบรรยากาศทำให้น้ำเยื่อเกิดการขยายตัว เป็นผลให้เกิดการถ่ายเทมวลสารมากขึ้น โดยน้ำหรือสารต่าง ๆ ที่อยู่ระหว่างช่องว่างระหว่างเซลล์จะแพร่ออกมาได้ง่ายจากผนังเซลล์ที่มีลักษณะอ่อนนุ่มและมีความเป็นรูมากขึ้น [2,3,7,8] จากผลการทดลองพบว่าการเตรียมขึ้นต้นโดยการแช่ในสภาวะสุญญากาศมีผลทำให้สาหร่ายผักกาดทะเลมีค่า WL มากกว่าการเตรียมขึ้นต้นด้วยการลวก อาจแสดงให้เห็นว่าการใช้สภาวะสุญญากาศที่ความดัน 200 mbar เป็นเวลา 10 นาที เป็นการเตรียมขึ้นต้นที่รุนแรงกว่าสามารถทำลาย

เซลล์ของสาหร่ายจนทำให้เกิดการแพร่ของน้ำออกจากเซลล์ได้มากกว่าการลวกในน้ำเดือดเป็นเวลา 1 นาที ทั้งนี้สอดคล้องกับผลการวิจัยที่พบว่า การเตรียมขึ้นต้นโดยการแช่ขึ้นมะพร้าวในสภาวะสุญญากาศที่ความดัน 50 mbar เป็นเวลา 10 นาที ทำให้ปริมาณน้ำที่สูญเสียสูงกว่าการเตรียมขึ้นต้นโดยการลวกขึ้นมะพร้าวที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที [11]

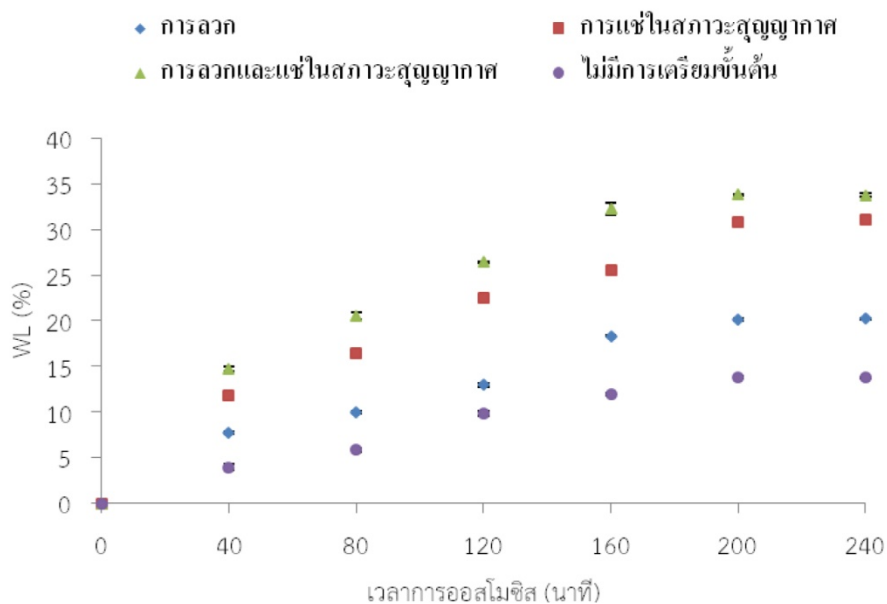
3.1.2 ปริมาณของแข็งที่เพิ่มขึ้น (solid gain, SG)

จากรูปที่ 2 พบว่าสาหร่ายผักกาดทะเลทุกสิ่งทดลองมีค่า SG ตลอดระยะเวลาในการออสโมซิส (0.56-5.08 เปอร์เซ็นต์) น้อยกว่าค่า WL (3.96-33.82 เปอร์เซ็นต์) มาก แสดงให้เห็นว่าปริมาณของแข็งที่เพิ่มขึ้นในขึ้นสาหร่ายผักกาดทะเลมีปริมาณเพียงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับปริมาณน้ำที่สูญเสีย เนื่องจากในกลไกการถ่ายเทมวลสารจะเกิดการแพร่ของน้ำจากเซลล์และการแพร่ของของแข็งจากตัวถูกละลายในสารละลายออสโมติก โดยเคลื่อนที่แบบสวนทางกัน ผนังเซลล์ทำหน้าที่เป็นเยื่อเลือกผ่าน ซึ่งจะยอมให้น้ำสามารถแพร่ผ่านมากกว่าตัวถูกละลายซึ่งมีขนาดโมเลกุลใหญ่กว่าโมเลกุลของน้ำ จึงทำให้การแพร่ของของแข็งเกิดขึ้นได้น้อยกว่า [12,13] ในโครงการวิจัยนี้ ของแข็งซึ่งเป็นตัวถูกละลายหลักในสารละลายออสโมติก ได้แก่ โอลิโกฟรุกโตส (มวลโมเลกุล 180 g/mol) และกลีโคไซด์คลอไรด์ (มวลโมเลกุล 58.44 g/mol) ซึ่งมีมวลโมเลกุลสูงกว่าน้ำ (มวลโมเลกุล 18.02 g/mol) มากจึงทำให้แพร่ผ่านเข้าไปในขึ้นสาหร่ายได้น้อยกว่าการแพร่ของน้ำมาก

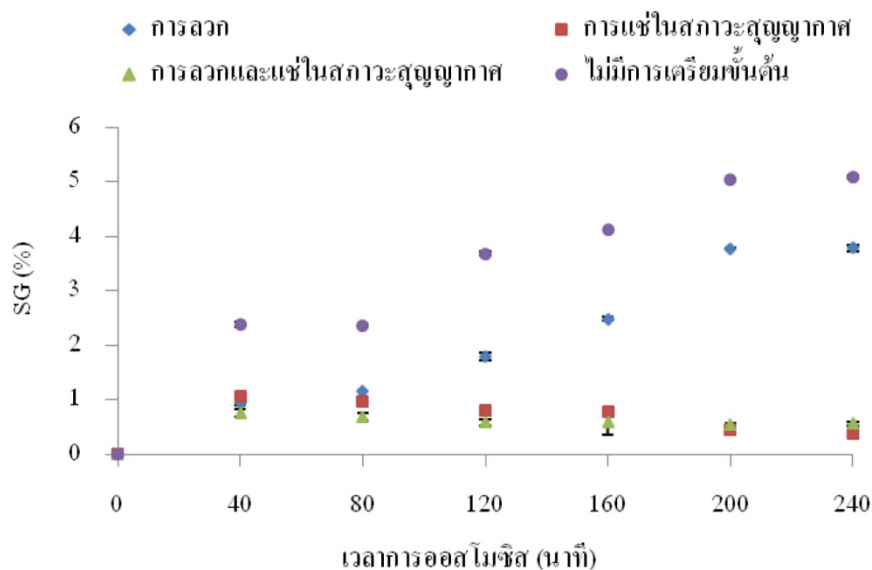
เมื่อพิจารณาแนวโน้มน้ำค่า SG ตลอดการออสโมซิส สามารถเรียงลำดับได้ดังนี้ สาหร่ายผักกาดทะเลที่ไม่ผ่านการเตรียมขึ้นต้นมีค่า

SG สูงที่สุด (มีค่า SG ในช่วง 2.38-5.08 เปอร์เซ็นต์) รองลงมาคือสาหร่ายผักกาดทะเลที่เตรียมขึ้นต้นโดยการลวก (มีค่า SG ในช่วง 0.94-3.78 เปอร์เซ็นต์) สาหร่ายผักกาดทะเลที่เตรียมขึ้นต้นโดยการแช่ในสภาวะสุญญากาศ (มีค่า SG ในช่วง 0.37-1.07 เปอร์เซ็นต์) และสาหร่ายผักกาดทะเลที่เตรียมขึ้นต้นโดยการลวกและแช่ในสภาวะสุญญากาศ (มีค่า SG ในช่วง 0.56-0.76 เปอร์เซ็นต์) ตามลำดับ ซึ่งแสดงแนวโน้มให้เห็นว่าเมื่อใช้วิธีการเตรียมขึ้นต้นโดยการลวกและแช่ในสภาวะสุญญากาศ มีผลทำให้มีค่า SG ต่ำที่สุด ในขณะที่เมื่อไม่มีการเตรียมขึ้นต้นมีผลทำให้ค่า SG สูงที่สุด ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการทำลายเซลล์ในการเตรียมขึ้นต้นทั้งสองวิธีที่ใช้ร่วมกันทำให้เซลล์ถูกทำลายไปมากและมีการเปลี่ยนแปลงลักษณะโครงสร้างจนไม่เอื้อต่อการแพร่เข้าของของแข็ง กล่าวคือ ในกรณีของการลวกซึ่งมีความร้อนเข้ามาเกี่ยวข้องอาจมีผลให้ผนังเซลล์ของสาหร่ายผักกาด

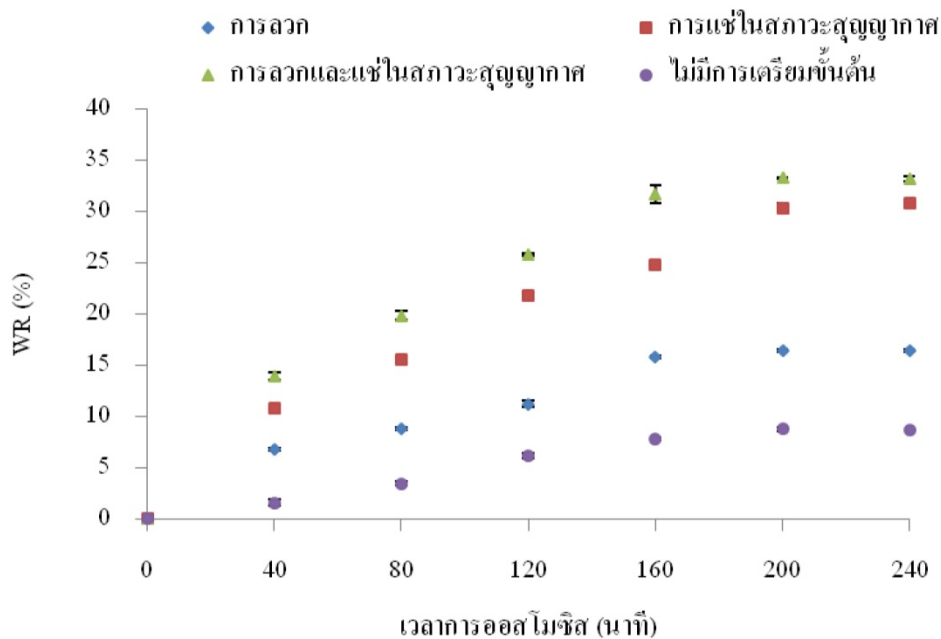
ทะเลซึ่งมีองค์ประกอบของเซลลูโลสและใยอาหารที่ละลายน้ำได้ พวกเพกตินเกิดการเปลี่ยนรูปไปโดยอาจมีผลให้เกิดโครงสร้างลักษณะคล้ายเจลที่มีลักษณะเป็นตาข่าย [14,15] ทำให้ขัดขวางการเคลื่อนที่ของโมเลกุลของของแข็งต่างๆเข้าไปในเซลล์และในกรณีการแช่ในสภาวะสุญญากาศซึ่งเป็นการใช้แรงกลในการทำลายเซลล์มีผลทำให้เซลล์ยุบตัวลง และเนื้อเยื่อมีโอกาสเกิดการซ้อนทับกัน เป็นผลทำให้กีดขวางการแพร่ของของแข็งซึ่งมีมวลโมเลกุลใหญ่กว่าน้ำ การถ่ายเทมวลของแข็งจากสารละลายออสโมติกเข้าไปในเซลล์จึงเกิดได้อย่างจำกัด จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการเตรียมขึ้นต้นอาจมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของเซลล์ที่ไม่เอื้อต่อการแพร่ของของแข็งเข้าไปในเซลล์ ดังนั้นสาหร่ายผักกาดทะเลที่ไม่ผ่านการเตรียมขึ้นต้นจึงทำให้ตัวถูกละลายสามารถแพร่เข้าไปในเซลล์ได้มากกว่าจึงมีแนวโน้มค่า SG มากกว่าทุกสิ่งทดลอง



รูปที่ 1 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำที่สูญเสีย (WL) กับเวลาการออสโมซิสของสาหร่ายผักกาดทะเลที่ผ่านการเตรียมขึ้นต้นวิธีต่างๆ



รูปที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของแข็งที่เพิ่มขึ้น (SG) กับเวลาการออสโมซิสของสาหร่ายผักกาดทะเลที่ผ่านการเตรียมชิ้นดินวิธีต่าง ๆ



รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำหนักรที่ลดลง (WR) กับเวลาการออสโมซิสของสาหร่ายผักกาดทะเลที่ผ่านการเตรียมชิ้นดินวิธีต่าง ๆ

3.1.3 ปริมาณน้ำหนักที่ลดลง (weight reduction, WR)

ปริมาณน้ำหนักที่ลดลง (WR) คือ ปริมาณน้ำหนักสุทธิที่ได้จากกลไกการถ่ายเทมวลสารที่เกิดขึ้นระหว่างการออสโมซิส โดยเป็นผลมาจากปริมาณน้ำที่สูญเสียไปจากชิ้นอาหารกับปริมาณของแข็งที่เพิ่มขึ้น จากรูปที่ 3 พบว่าค่า WR มีแนวโน้มเช่นเดียวกับค่า WL เนื่องจากค่า SG มีค่าน้อยกว่า WL มาก ดังนั้นน้ำหนักที่ลดลงซึ่งแสดงด้วยค่า WR จึงเป็นผลมาจาก WL เป็นสำคัญ โดยสำหรับผักกาดทะเลทุกสิ่งทดลองมีค่า WR เพิ่มขึ้น เมื่อระยะเวลาการออสโมซิสนานขึ้น ทุกสิ่งทดลองมีค่า WR เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องในช่วงแรกของการออสโมซิส (40-160 นาที) และเมื่อเวลาผ่านไป (200-240 นาที) ค่า WR มีการเปลี่ยนแปลงน้อยลงจนเกือบคงที่ เมื่อพิจารณาแนวโน้มค่า WR ตลอดการออสโมซิสสามารถเรียงลำดับได้ดังนี้ สำหรับผักกาดทะเลที่เตรียมขึ้นต้นโดยการลวกและแช่ในสภาวะสุญญากาศ มีค่า WR สูงที่สุด (มีค่า WR ในช่วง 13.97-33.16 %) รองลงมาคือสำหรับผักกาดทะเลที่เตรียมขึ้นต้นโดยการแช่ในสภาวะสุญญากาศ (มีค่า WR ในช่วง 10.82-30.74 เปอร์เซ็นต์) สำหรับผักกาดทะเลที่เตรียมขึ้นต้นโดยการลวก (มีค่า WR ในช่วง 6.79-16.44 เปอร์เซ็นต์) และสำหรับผักกาดทะเลที่ไม่มีการเตรียมขึ้นต้น (มีค่า WR ในช่วง 1.58-8.66 เปอร์เซ็นต์) ตามลำดับ

จากผลการวิเคราะห์ทางสถิติเพื่อพิจารณาสิ่งทดลองที่มีค่าการถ่ายเทมวลสารดีที่สุด พบว่าสิ่งทดลองที่ทำให้เกิดการถ่ายเทปริมาณน้ำดีที่สุดและน้ำหนักลดลงมากที่สุด (ค่า WL และ WR สูงที่สุด) ตลอดเวลาการออสโมซิส คือ การเตรียมขึ้นต้นด้วยการลวกและแช่ในสภาวะสุญญากาศ ($p<0.05$) โดย

การออสโมซิสเป็นเวลา 200 และ 240 นาที ทำให้มีค่า WL และ WR ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p\geq 0.05$) โดยมีค่าประมาณ 33 เปอร์เซ็นต์ และพบว่าสิ่งทดลองที่ทำให้เกิดการถ่ายเทปริมาณของแข็งเพิ่มขึ้นมากที่สุด (ค่า SG สูงที่สุด) ตลอดเวลาการออสโมซิส คือ ไม่มีการเตรียมขึ้นต้น ($p<0.05$) โดยการออสโมซิสเป็นเวลา 200 และ 240 นาที ทำให้มีค่า SG ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p\geq 0.05$) โดยมีค่า SG ประมาณ 5.0 เปอร์เซ็นต์

ในการพิจารณาภาวะที่เหมาะสมของการออสโมซิสจากอัตราการถ่ายเทมวลสารด้านปริมาณน้ำที่สูญเสีย ปริมาณของแข็งที่เพิ่มขึ้นและปริมาณน้ำหนักที่ลดลงขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ของผู้วิจัยเป็นสำคัญ โดยทั่วไปการออสโมซิสมีวัตถุประสงค์หลักคือต้องการลดปริมาณน้ำในวัตถุดิบ ดังนั้นตัวชี้วัดที่สำคัญของการถ่ายเทมวลสารที่ให้ความสำคัญมากที่สุด คือ ปริมาณน้ำที่สูญเสีย และหากต้องการพิจารณาถึงผลสุทธิของการลดลงของปริมาณน้ำและการเพิ่มขึ้นของปริมาณของแข็ง ตัวชี้วัดที่สำคัญของการถ่ายเทมวลสารที่ให้ความสำคัญมากที่สุดคือปริมาณน้ำหนักที่ลดลง นอกจากนี้หากต้องการเพิ่มปริมาณของแข็งในชิ้นอาหาร เช่น ตัวถูกละลายพวกน้ำตาลหรือเกลือ เพื่อช่วยปรับปรุงด้านรสชาติหรือลดค่า a_w ตัวชี้วัดที่สำคัญของการถ่ายเทมวลสารที่ให้ความสำคัญมากที่สุด คือ ปริมาณของแข็งที่เพิ่มขึ้น [16,17] จากผลการทดลองพบว่าค่า SG ซึ่งแสดงปริมาณการเพิ่มขึ้นของของแข็งมีค่าค่อนข้างต่ำ (ไม่เกิน 5 เปอร์เซ็นต์) จึงเลือกพิจารณาด้วยค่าปริมาณน้ำที่สูญเสียและปริมาณน้ำหนักที่ลดลงเป็นสำคัญ ดังนั้นจากผลการทดลองข้างต้นวิธีการเตรียมขึ้นต้นที่เหมาะสมที่สุด คือ การลวกร่วมกับการแช่ในสภาวะสุญญากาศ สำหรับด้าน

เวลาในการออสโมซิสที่ทำให้ค่าการถ่ายเทมวลสารคงที่ คือ การออสโมซิสนาน 200 นาที

3.2 ผลการเสริมธาตุหลักในสาหร่ายผักกาดทะเลโดยการออสโมซิส

จากตารางที่ 1 แสดงปริมาณน้ำที่สูญเสีย (WL) ปริมาณของแข็งที่เพิ่มขึ้น (SG) และปริมาณน้ำหนักรีดลดลง (WR) ของสาหร่ายผักกาดทะเลหลังการออสโมซิสเป็นเวลา 200 นาที โดยมีการเติมธาตุหลักในรูปเฟอริสซัลเฟตในสารละลายออสโมติกพบว่าปริมาณธาตุหลักที่เติมลงในสารละลายออสโมติกมีผลให้ค่า WL SG และ WR แตกต่างกันอย่างมี

นัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) โดยเมื่อเติมธาตุหลักมากขึ้นมีแนวโน้มให้ค่า WL, SG และ WR สูงขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากการเพิ่มธาตุหลักเป็นการเพิ่มความเข้มข้นของตัวถูกละลาย จึงเพิ่มแรงขับให้เกิดการถ่ายเทมวลสารได้ดีขึ้น โดยที่ไอออนของเหล็กมีโมเลกุลขนาดเล็กกว่าโมเลกุลของน้ำตาลและเกลือจึงเป็นผลให้สามารถแพร่เข้าไปในชั้นสาหร่ายผักกาดทะเลได้ดีกว่าจึงทำให้มีการถ่ายเทมวลสารมากขึ้น และหากมีการเพิ่มปริมาณธาตุหลักมากขึ้นยังเป็นการเพิ่มโอกาสในการแพร่ของไอออนของเหล็กเข้าไปได้มากส่งผลให้เกิดการเร่งการสูญเสียน้ำออกนอกเซลล์

ตารางที่ 1 ปริมาณน้ำที่สูญเสีย (WL) ปริมาณของแข็งที่เพิ่มขึ้น (SG) และปริมาณน้ำหนักรีดลดลง (WR) ของสาหร่ายผักกาดทะเลหลังการออสโมซิสเมื่อเติมเฟอริสซัลเฟตในสารละลายออสโมติกระดับต่าง ๆ

ปริมาณการเติมเฟอริสซัลเฟต (เปอร์เซ็นต์)	ค่าเฉลี่ย $\pm$ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (เปอร์เซ็นต์)		
	WL	SG	WR
0	33.73 ± 0.20^d	0.56 ± 0.03^d	33.16 ± 0.23^c
5	37.97 ± 0.32^c	3.66 ± 0.14^c	34.47 ± 0.47^c
10	44.76 ± 0.12^b	6.29 ± 0.07^b	38.48 ± 0.20^b
15	51.53 ± 0.09^a	11.14 ± 0.08^a	40.06 ± 0.18^a

^{a b c, ...} ในแนวคอลัมน์เดียวกัน หมายถึง มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

ตารางที่ 2 ปริมาณเหล็ก (กรัม/100 กรัม) ของสาหร่ายผักกาดทะเลหลังออสโมซิสที่แปรปริมาณการเสริมธาตุหลัก

ปริมาณการเติมเฟอริสซัลเฟต (เปอร์เซ็นต์)	ปริมาณเหล็กเฉลี่ย $\pm$ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (g/100 g)
0	0.07 ± 0.05^d
5	3.92 ± 0.06^c
10	6.76 ± 0.59^b
15	11.84 ± 0.43^a

^{a b c, ...} ในแนวคอลัมน์เดียวกัน หมายถึง มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

จากตารางที่ 2 แสดงให้เห็นว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของเฟอริสซัลเฟตในสารละลาย

ออสโมติกมีผลทำให้ปริมาณเหล็กในสาหร่ายผักกาดทะเลมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ

ทางสถิติ ($p < 0.05$) โดยพบว่าการเติมเฟอร์สซัลเฟต 15 เปอร์เซ็นต์ ทำให้สาหร่ายผักกาดทะเลมีปริมาณเหล็กสูงสุดเท่ากับ 11.84 กรัม/100 กรัม รองลงมาคือการเติมเฟอร์สซัลเฟต 10, 5 และ 0 เปอร์เซ็นต์ โดยทำให้สาหร่ายผักกาดทะเลมีปริมาณเหล็กเท่ากับ 6.76, 3.92 และ 0.07 กรัม/100 กรัม ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าเฟอร์สซัลเฟตที่เติมลงไปในการละลายออกซิเจนสามารถทำให้สาหร่ายผักกาดทะเลมีปริมาณเหล็กเพิ่มขึ้นได้ โดยปริมาณเหล็กเพิ่มขึ้นเมื่อเติมเฟอร์สซัลเฟตมากขึ้น ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการเพิ่มธาตุเหล็กมีผลให้เกิดความแตกต่างของความเข้มข้นของเฟอร์สไอออนระหว่างสารละลายออกซิเจนกับเนื้อเยื่อของสาหร่าย มีผลให้เกิดแรงขับในการแพร่ของเฟอร์สไอออนเข้าไปในเนื้อเยื่อของสาหร่าย ซึ่งเมื่อผ่านการเตรียมขึ้นต้นโดยการลวกและแช่ในสถานะสุญญากาศทำให้เซลล์ของสาหร่ายถูกทำลายไปบ้างโดยเฟอร์สไอออนอาจแพร่เข้าไปในชั้นสาหร่ายหรือยึดเกาะบริเวณผนังเซลล์ของสาหร่ายได้ ในการออกซิซิต้องใช้ออกซิเจนในสารละลายออกซิเจนที่มีความเข้มข้นสูงกว่าความเข้มข้นภายในชั้นผักผลไม้ เพื่อให้เกิดความแตกต่างของแรงดันเกิดเป็นแรงขับให้มีการถ่ายเทมวลสาร ระดับความเข้มข้นของสารละลายออกซิเจนจึงเกี่ยวข้องโดยตรงกับประสิทธิภาพการแพร่ของน้ำและตัวถูกละลาย โดยมีแนวโน้มคือเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายออกซิเจนส่งผลให้อัตราการถ่ายเทมวลสารของน้ำและตัวถูกละลายมีค่าเพิ่มขึ้น

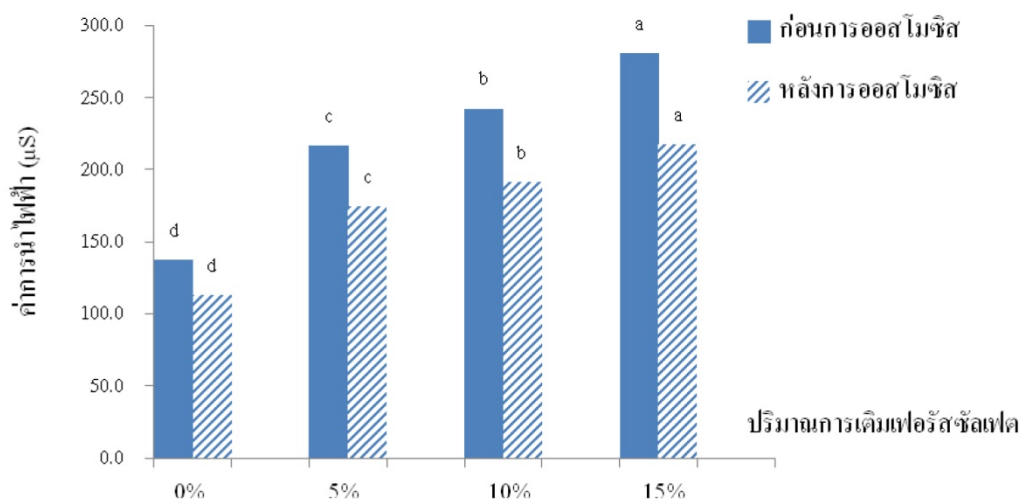
ในงานวิจัยนี้เหล็กคือตัวถูกละลายชนิดหนึ่งที่เติมลงในสารละลายออกซิเจนจึงมีโอกาสน้ำเข้าไปในชั้นสาหร่ายได้มากขึ้นนั่นเอง จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าสามารถเสริมธาตุเหล็กซึ่งเป็นสารที่มีประโยชน์ต่อร่างกายในอาหารได้ สอดคล้อง

กับที่มีการรายงานว่าสามารถเสริมธาตุแคลเซียมและเหล็กให้กับแอปเปิ้ลได้ โดยการเติมแคลเซียมใช้ในรูปแคลเซียมแลคเตต และเติมเหล็กในรูปเฟอร์ส-กลูโคเนตลงไปในการละลายออกซิเจนที่เตรียมจากน้ำตาลซูโครส แล้วแช่แอปเปิ้ลในสถานะสุญญากาศ พบว่าการใช้สารละลายผสมระหว่างน้ำตาลซูโครส 12.297 กรัม/ลิตร กับแคลเซียม 44.229 กรัม/ลิตร สามารถเสริมแคลเซียมได้โดยทำให้แอปเปิ้ลมีแคลเซียมเพิ่มขึ้นในผลิตภัณฑ์สุดท้าย 23 เท่า ของแอปเปิ้ลสด และการใช้สารละลายผสมระหว่างน้ำตาลซูโครส 146.702 กรัม/ลิตร กับเหล็ก 1.135 กรัม/ลิตร สามารถเสริมเหล็กให้กับแอปเปิ้ลได้เช่นกัน โดยมีเหล็กเพิ่มขึ้นในผลิตภัณฑ์สุดท้าย 5.6 เท่าของแอปเปิ้ลสด [2]

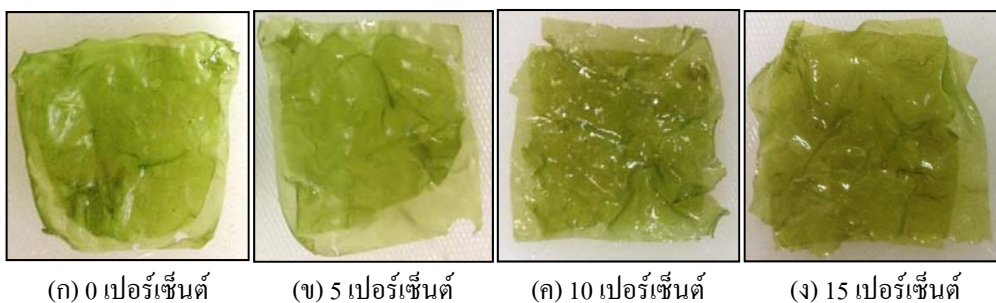
ค่าการนำไฟฟ้าแสดงถึงความสามารถของน้ำที่กระแสไฟฟ้าสามารถไหลผ่าน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของไอออนโดยรวมในน้ำ จึงอาจกล่าวได้ว่าค่าการนำไฟฟ้าบ่งบอกถึง ความเข้มข้นของเกลือแร่ และแร่ธาตุทั้งหมดที่ละลายอยู่ในสารละลาย อีกทั้งยังรวมถึงสารต่าง ๆ ที่มีสมบัติในการแตกตัวเป็นประจุบวกและประจุลบ ซึ่งประจุบวกและประจุลบที่เกิดขึ้นจะเป็นตัวนำไฟฟ้า [18] จากรูปที่ 4 พบว่าค่าการนำไฟฟ้าของสารละลายออกซิเจนมีแนวโน้มมากขึ้นเมื่อเติมเฟอร์สซัลเฟตในสารละลายออกซิเจนเพิ่มขึ้น โดยมีค่าการนำไฟฟ้าแตกต่างกันระหว่างสิ่งที่ทดลองอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) และพบว่าจากการออกซิซิเป็นเวลา 200 นาที ค่าการนำไฟฟ้าของสารละลายออกซิเจนมีแนวโน้มลดลง เป็นข้อมูลสนับสนุนที่แสดงให้เห็นว่าในระหว่างการออกซิซิสารละลายออกซิเจนที่มีการเสริมธาตุเหล็กทุกระดับสามารถเกิดกลไกการแพร่ของเฟอร์สไอออนเข้าไปภายในเนื้อเยื่อของสาหร่ายผักกาดทะเลจึงเป็นผลให้

ความเข้มข้นของเฟอร์รัสไอออนลดลง ค่าการนำไฟฟ้าที่เกิดจากประจุของไอออนจึงลดลง โดยผลการทดลองพบว่าสารละลายออสโมติกที่เติมเฟอร์รัสซัลเฟตมากที่สุดคือ 15 % มีค่าการนำไฟฟ้าลดลงมากที่สุด คิดเป็น 22.74 เปอร์เซ็นต์ (จาก 281.13 ไมโครซีเมนต์ เหลือ 217.20 ไมโครซีเมนต์) รองลงมาคือการเติมเฟอร์รัสซัลเฟต 10, 5 และ 0 เปอร์เซ็นต์ โดยทำให้สารละลายออสโมติกมีค่าการนำไฟฟ้าลดลงคิดเป็น

21.15, 19.70 และ 17.98 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ซึ่งมีแนวโน้มสอดคล้องกับปริมาณเหล็กที่วิเคราะห์ได้ในสาหร่ายผักกาดทะเล ที่แสดงให้เห็นว่าการเสริมธาตุเหล็กโดยการเติมลงไปนสารละลายออสโมติกที่ใช้แช่สาหร่ายผักกาดทะเลมีผลให้เกิดการแพร่ของธาตุเหล็กเข้าไปในสาหร่ายผักกาดทะเลได้ โดยหากมีการเติมปริมาณเหล็กเพิ่มขึ้นมีผลให้สาหร่ายผักกาดทะเลมีปริมาณเหล็กมากขึ้นด้วย



รูปที่ 4 ค่าการนำไฟฟ้า (μS) ของสารละลายออสโมติกทั้งก่อนและหลังออสโมซิสเมื่อเติมเฟอร์รัสซัลเฟตในสารละลายออสโมติกระดับต่าง ๆ (a, b, c, d แสดงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ระหว่างสิ่งทดลอง)



รูปที่ 5 สาหร่ายผักกาดทะเลหลังการออสโมซิสเมื่อเติมเฟอร์รัสซัลเฟตในสารละลายออสโมติกระดับต่าง ๆ

สาหร่ายผักกาดทะเลหลังการออสโมซิส แสดงดังรูปที่ 5 จากการสังเกตลักษณะปรากฏ เบื้องต้นของสาหร่ายทะเลที่ผ่านการออสโมซิสพบว่า สาหร่ายผักกาดทะเลที่ได้จากการเติมเฟอร์สซัลเฟต มากที่สุด คือ 15 เปอร์เซ็นต์ มีกลิ่นรสของเหล็กเข้ม มากและสังเกตเห็นสีคล้ำจากการเกาะติดของสารละลายเหล็กที่ชั้นของสาหร่ายมาก สิ่งทดลองที่เติม เฟอร์สซัลเฟต 10 เปอร์เซ็นต์ มีกลิ่นรสของเหล็กลด น้อยลงและสีไม่คล้ำมากนัก ส่วนสิ่งทดลองที่เติม เฟอร์สซัลเฟต 5 และ 0 เปอร์เซ็นต์ มีกลิ่นรสและสีไม่ แตกต่างกัน

4. สรุป

การเตรียมขึ้นต้นด้วยวิธีการลวกและแช่ใน สภาวะสุญญากาศมีผลให้ลดการออสโมซิส สาหร่ายผักกาดทะเลมีปริมาณน้ำที่สูญเสีย (WL) และ ปริมาณน้ำหนักที่ลดลง (WR) สูงที่สุด แต่มีปริมาณ ของแข็งที่เพิ่มขึ้น (SG) ต่ำที่สุด ($p < 0.05$) การเติม เฟอร์สซัลเฟตในสารละลายออสโมติก 15 เปอร์เซ็นต์ ทำให้สาหร่ายผักกาดทะเลหลังการออสโมซิสมีค่า WL, SG และ WR สูงที่สุด ($p < 0.05$) โดยมีปริมาณ เหล็กเท่ากับ 11.84 กรัม/100 กรัม

5. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ มหาวิทยาลัยบูรพาและ สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ สำหรับการ สนับสนุนทุนอุดหนุนการวิจัย งบประมาณรายได้ (เงินอุดหนุนจากรัฐบาล)

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] สุวรรณ วรสิงห์, ธวัช ศรีวีระชัย, อรุณ ศรี อนันต์ และภาคภูมิ วงศ์แจ้ง, 2552, สันฐาน วิทยา การเลี้ยง และการนำมาใช้ประโยชน์ของ สาหร่ายผักกาดทะเล *Ulva rigida* C. Agardh, 1823, เอกสารเผยแพร่ฉบับที่ 1/2552, สำนักวิจัย และพัฒนาประมงชายฝั่ง, กรมประมง กระทรวงเกษตรและสหกรณ์, 25 น.
- [2] Barrera, C., Betoret, N. and Fito, P., 2004, Ca^{2+} and Fe^{2+} influence on the osmotic dehydration kinetics of apple slices (var. Granny Smith), J. Food Eng. 65: 9-14.
- [3] Derossi, A., de Pilli, T. and Severini, C., 2010, Reduction in the pH of vegetables by vacuum impregnation: A study on pepper, J. Food Eng. 99: 9-15.
- [4] Jokić, A., Gyura, J., Lević, L. and Zavargó, Z., 2007, Osmotic dehydration of sugar beet in combined aqueous solutions of sucrose and sodium chloride, J. Food Eng. 78: 47-51.
- [5] Escobar, M.P., Galindo, F.G., Wadsö, L., Nájera, J.R. and Sjöholm, I., 2007, Effect of long-term and blanching pre-treatments on the osmotic dehydration kinetics of carrots (*Daucus carota* L. cv. Nerac), J. Food Eng. 81: 313-317.
- [6] Kowalska, H., Lenart, A. and Leszczyk, D., 2008, The effect of blanching and freezing on osmotic dehydration of pumpkin, J. Food Eng. 86: 30-38.
- [7] Fito, P., Andrés, A. and Chiralt, A., 1996, Coupling of hydrodynamic mechanism and deformation-relaxation phenomena during vacuum treatments in solid porous food-liquid systems, J. Food Eng. 27: 229-240.

- [8] Chafer, M., Gonzalez-Martinez, C., Fernandez, B., Perez, L. and Chiralt, A., 2003, Effect to blanching/and vacuum pluse application on osmotic dehydration of pear, Food Sci. Tech. Int. 9: 321-328.
- [9] AOAC, 1990, Official methods of analysis, 15th Ed., Association of Official Analytical Chemists, Washington DC.
- [10] Sacchetti, G., Gianotti, A. and Rosa, M.D., 2001, Sucrose-salt combined effect on mass transfer kinetics and product acceptability: Study on apple osmosis treatment, J. Food Eng. 49: 163-173.
- [11] พิมพ์ใจ มณีพันธ์, 2553. การพัฒนาผลิตภัณฑ์มะพร้าวกึ่งแห้งด้วยวิธีการคังน้ำออกแบบออสโมซิสร่วมกับการอบแห้งโดยใช้ความร้อน, วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยบูรพา, 145 น.
- [12] Torreggiani, D., 1993, Osmotic dehydration in fruit and vegetable processing, Food Res. Int. 26 : 59-69.
- [13] Lazarides, H.N., Katsanidis, E. and Nickolaidis, A., 1995, Mass transfer kinetics during osmotic preconcentration aiming at minimal solid uptake, J. Food Eng. 25: 151- 166.
- [14] นิธิยา รัตนพานนท์, 2549, เคมีอาหาร, โอเคชั่นสโตร์, กรุงเทพฯ.
- [15] สุปราณี มนุรักษ์ชินากร, โพรตีนในอาหารเรื่องการเกิดเจล, แหล่งที่มา : <http://nqf.agro.ku.ac.th>, 5 มกราคม 2556.
- [16] Azoubel, P.M. and Murr, F.E.X., 2003, Optimisation of osmotic dehydration of cashew apple (*Anacardium occidentale* L.) in sugar solutions, Food Sci Tech. Int. 9: 427-433.
- [17] Manivannan, P. and Rajasimman, M., 2009, Optimization of osmotic dehydration of radish in sugar solution, Food Sci. Tech. Int. 15: 575-586.
- [18] สุนทรี ยิ่งชัชวาล, มาทำความเข้าใจให้ถูกกับคำว่า “ค่านำไฟฟ้า (electrical conductivity) ของสารละลาย”, แหล่งที่มา : <http://www.cab.ku.ac.th>, 1 มกราคม 2556.