**The Journal of Applied Science** **Vol. 15 No. 1: 1-16 [2016]**
วารสารวิทยาศาสตร์ประยุกต์ doi: 10.14416/j.appsci.2016.04.001
ISSN 1513-7805 Printed in Thailand

**Research Article**

# การประเมินความเสียหายจากการกัดกร่อนของกระป๋องบรรจุอาหารเคลือบแล็กเกอร์ด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้าและวิธีใช้กล้องจุลทรรศน์

# Evaluation of corrosion failure of lacquer coated food can by electrochemical and microscopic method

**รัชพล มหรัตนวิโรจน์[1] ธนภัทร สุภาพันธุ์[1] ณรงค์ ผังวิวัฒน์[1*] และนพรัต กาญจนประยุธ[2]**

**Rachapon Maharatanaviroj[1], Thanapat Supapan[1], Narong Pungwiwat[1*] and Noparat Kanjanaprayut[2]**

[1]ภาควิชาเคมีอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์ประยุกต์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ กรุงเทพฯ 10800

[2] สถาบันนวัตกรรมเทคโนโลยีไทย-ฝรั่งเศส มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ กรุงเทพฯ 10800

[1]Department of Industrial Chemistry, Faculty of Applied Science, King Mongkut's University of Technology North Bangkok, Bangkok, 10800

[2]Thai-French Innovation Institute, King Mongkut's University of Technology North Bangkok, Bangkok 10800

***E-mail**: npw@kmutnb.ac.th

**บทคัดย่อ**

กระป๋องเหล็กเคลือบแล็กเกอร์ที่นิยมใช้บรรจุอาหารที่มีฤทธิ์กัดกร่อนที่แตกต่างกัน เช่น อาหารทะเล และผลไม้ เป็นต้น ดังนั้นโรงงานผลิตกระป๋องจึงต้องการตรวจสอบคุณภาพกระป๋องเคลือบแล็กเกอร์ว่าจะมีความทนทานต่อสารอาหารเหล่านี้เพียงใด ในการบรรลุวัตถุประสงค์นี้ผู้วิจัยเลือกใช้วิธีการทางเคมีไฟฟ้าโดยการกระตุ้นด้วยการป้อนศักย์ไฟฟ้ากระแสตรงเพื่อให้การทดสอบความทนทานของแล็กเกอร์สามารถทำได้รวดเร็วขึ้นวิธีการคือการป้อนศักย์ไฟฟ้ากระแสตรง 6 โวลต์ เป็นเวลา 10 วินาที ให้แก่กระป๋องที่มีสารละลายชนิดต่าง ๆ คือ โซเดียมคลอไรด์ 2%, โซเดียมไฮดรอกไซด์ 2%, กรดซิตริก 2% และโซเดียมเมตาไบซัลไฟต์ 2% โดยน้ำหนัก ตามลำดับ ในกรณีที่กระป๋องเหล็กเคลือบแล็กเกอร์ในสารละลายชนิดใดชนิดหนึ่งไม่สามารถทนต่อศักย์ไฟฟ้าสูง ๆ ได้ ทำให้เหล็กใต้ผิวแล็กเกอร์เกิดการกัดกร่อน ซึ่งสามารถตรวจสอบปริมาณความเสียหายของกระป๋องได้จากค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดและประจุไฟฟ้าที่หาได้โดยเทคนิคโพเทนชิโอสแตติกซึ่งลงจุดระหว่างกระแสไฟฟ้ากับเวลา ในการนี้จำเป็นต้องมี

กราฟมาตรฐานบอกความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าสูงสุดและประจุไฟฟ้ากับพื้นที่เสียหายที่เหล็กเกิดการละลาย ซึ่งทำได้โดยใช้ขดลวดขนาดเล็กจนถึงแผ่นเหล็กขนาดใหญ่ซึ่งมีพื้นที่หน้าตัดแตกต่างกันเป็นแบบจำลองของพื้นที่เสียหาย เมื่อนำกระป๋องจากโรงงานผลิตกระป๋องมาทดสอบด้วยสารละลายต่าง ๆ ก็พบว่ามีค่ากระแสอยู่ในระดับ 10-1700 ไมโครแอมป์ ซึ่งแสดงว่ากระป๋องส่วนใหญ่ยังอยู่ในสภาพดีมีการกัดกร่อนน้อยมาก ส่วนกระป๋องบรรจุอาหาร เช่น ปลาซาร์ดีนในซอสมะเขือเทศ (สามยี่ห้อ) และผักผสมดองเค็ม ที่ใกล้หมดอายุ พบว่ามีค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุด และประจุไฟฟ้าของการกัดกร่อนค่อนข้างสูง (ระดับ 10-100 mA และ 80,000-800,000 μC) เมื่อนำมาส่องดูด้วยกล้องจุลทรรศน์ แล้วคำนวณหาพื้นที่ที่ถูกกัดกร่อนเปรียบเทียบกับค่าที่หาได้จากกราฟมาตรฐาน พบว่าพื้นที่กัดกร่อนที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์มีค่าต่ำกว่าที่ได้จากกราฟมาตรฐาน (ค่าที่ประเมินจากกล้องจุลทรรศน์เป็น 0.3847, 0.0891, 0.096 และ0.2829 $mm^2$ เทียบกับ 1.143, 0.246, 0.108 และ 0.269 $mm^2$ ตามลำดับ เมื่อประเมินจากกระแสสูงสุดสำหรับปลากระป๋องทั้ง 3 ยี่ห้อและผักผสมดองเค็มซีเซ็กฉ่าย)

**คำสำคัญ**: แผ่นเหล็กเคลือบแล็กเกอร์, เทคนิคโพเทนชิโอสแตติก, กล้องจุลทรรศน์

**Abstract**

Lacquer coated steel can is widely used for different types of food e.g. sea-food and fruit. Thus, can factories have to inspect the quality of lacquered can for corrosion resistance on surrounding food. For this purpose electrochemical technique was used to accelerate corrosion process by DC voltage. 6V potential was applied for 10 seconds to lacquered can containing different kinds of solutions i.e., 2%w/w NaCl, 2%w/w NaOH, 2%w/w citric acid and 2%w/w $Na_2S_2O_5$, respectively. Lacquered can which could not endure the solution at high voltage would corrode. Failure of lacquered can could be analyzed quantitatively from the amount of maximum currents and total amount of charges (current time) released. Current was potentiostatically plotted against time and calibration curve was made from maximum of the dissolution currents and charges of different sites of wires in various solutions. Corrosion currents and charges of dissolved wires were plotted against corroded area on the calibration curve. Lacquered cans from factory were tested and it was found that the currents were in the range of 10-1700 μA. The results showed that these cans were in good conditions and least or no corrosion was found. Food cans were purchased from supermarket and were tested in similar ways. Maximum currents and charges were determined and calculated as corroded areas. When compared the outcome from calibration curve with the result from microscope, it was evidently revealed that corroded areas calculating from optical microscope images were under estimated which were a little bit lower than those calculated from calibration curves of maximum currents and charges [evaluated values from microscope were 0.3847, 0.0891, 0.096 and 0.2829 $mm^2$ compared

with 1.143, 0.246, 0.108 and 0.269 $mm^2$, respectively, which were evaluated from maximum current for sardines in tomato sauce (Three brands) and salted mixed vegetables].

**Keywords:** lacquer coated steel, potentiostatic technique, microscope

**บทนำ**

ปัจจุบันอุตสาหกรรมทางด้านบรรจุภัณฑ์โลหะอาหารกระป๋องได้เข้ามามีบทบาทในชีวิตประจำวันและมีบทบาทในอุตสาหกรรมอาหารมากขึ้นเรื่อย ๆ มีอัตราการเติบโตควบคู่ไปกับการเติบโตของอุตสาหกรรมอาหาร เนื่องจากความสะดวกสบาย รวดเร็วในการบริโภค ปรุงอาหารตอบสนองต่อการบริโภคของผู้บริโภคในยุคปัจจุบันได้เป็นอย่างดีเนื่องจากสภาพการดำรงชีวิตของมนุษย์มีความเร่งรีบมากกว่าในอดีต การบริโภคอาหารจึงเน้นที่ความสะดวกและรวดเร็วยิ่งขึ้น ฉะนั้นการถนอมอาหารด้วยการบรรจุกระป๋องเป็นวิธีการถนอมอาหารที่ช่วยให้ยืดอายุการเก็บรักษาและรักษาคุณภาพอาหาร ทั้งในด้านกลิ่นสี รสชาติ และความอร่อยให้คงอยู่จนกระทั่งถึงมือผู้บริโภค ทั้งยังช่วยให้การขนส่งผลิตภัณฑ์มีความสะดวกมากขึ้น นอกจากนี้ยังช่วยในการส่งเสริมการตลาดบรรจุภัณฑ์ที่ออกแบบสวยงามสามารถสร้างมูลค่าเพิ่มให้กับผลิตภัณฑ์และใช้เป็นสื่อโฆษณาได้ด้วยทั้งนี้เนื่องจากโลหะสามารถขึ้นรูปได้ง่าย มีความแข็งแรงทนทาน ทั้งในกระบวนการแปรรูป การขนส่งผลิตภัณฑ์มีความสะดวกมากขึ้น เก็บรักษาได้นาน ทนความร้อนและสุญญากาศได้ดีอีกทั้งยังสามารถนำมารีไซเคิลหมุนเวียนกลับมาใช้ใหม่ได้ (Cancluster, 2008)

โลหะที่ใช้แปรรูปเป็นบรรจุภัณฑ์ที่นิยมใช้มีทั้งเหล็กและอะลูมิเนียม (OldringและNehring, 2007; The Saylor foundation, 2015) มีโอกาสที่วัสดุโลหะจะเกิดการกัดกร่อนจากบรรยากาศ สิ่งแวดล้อม และสินค้าบางประเภทที่บรรจุภายในบรรจุภัณฑ์ โลหะเมื่อถูกกัดกร่อนเป็นสนิม 1% ความแข็งแรงจะลดลง 5 ถึง 10% ด้วยเหตุนี้จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องรู้ถึงกระบวนการกัดกร่อนที่อาจเกิดขึ้น สารที่กัดกร่อนโลหะง่ายที่สุดคือ สารที่เป็นกรด และสารที่เป็นด่าง ผลิตภัณฑ์ที่บรรจุมีสภาวะเป็นด่างนั้นมีค่อนข้างน้อย ผลิตภัณฑ์อาหารส่วนใหญ่มีสภาวะเป็นกรดที่มีระดับ pH น้อยกว่า 7.0 โดยในอุตสาหกรรมผลไม้บรรจุกระป๋องมีการเติมกรดซิตริกลงในน้ำเชื่อมทำให้เป็นกรดจนมีค่า pH 3.5 ทำให้เกิดการกัดกร่อนของกระป๋องผลไม้ในน้ำเชื่อม การกัดกร่อนโลหะส่วนใหญ่เป็นปรากฏการณ์ละลายโลหะออกมาด้วยสารเคมีที่อยู่ในสินค้า และมักเกิดขึ้นภายในกระป๋อง การกัดกร่อนที่เกิดกับเหล็กด้านนอกกระป๋องมักจะเกิดเป็นสนิม (rust) กลายเป็นจุด (dot) หรือฟอง (bubble) สีแดง สนิมที่เกิดขึ้นมากอาจมีผลทำให้กัดกร่อนจนกลายเป็นรูพรุน (perforate) เหมือน รูเข็ม (pinholes) (Boelenและคณะ, 2004) แล้วเปิดโอกาสให้จุลินทรีย์ผ่านเข้าไปในกระป๋องได้หรือปล่อยให้สินค้ารั่วซึมออกมาภายนอกกระป๋องทำให้ปนเปื้อนกระป๋องอื่นๆ

กระป๋องอะลูมิเนียมมีโอกาสเกิดการกัดกร่อนได้ถ้าบรรจุสินค้าที่เป็นกรดมากและสภาวะอากาศภายในกระป๋องมีปริมาณออกซิเจนลดลง นอกจากนี้ควรหลีกเลี่ยงบรรจุสินค้าที่มีน้ำเกลือเป็นส่วนผสม เพราะการกัดกร่อนจากน้ำเกลือสามารถทำให้กระป๋องอะลูมิเนียมเกิดรูพรุนได้ ส่วนเหล็กประเภทชุบด้วยโครเมียม (tin free) ที่นำมา

แปรรูปเป็นกระป๋องก็มีปฏิกิริยากับสภาวะกรดได้ง่าย ซึ่งสภาวะดังกล่าวการกัดกร่อนเป็นปัญหาหลักที่มักเกิดจากประเภทของอาหารซึ่งสามารถกัดกร่อนบรรจุภัณฑ์โลหะอันเนื่องมาจากประสิทธิภาพสารเคลือบที่หน่วงการกัดกร่อนลดลงจนทำให้โลหะละลายออกมาปะปนกับสินค้า ส่งผลต่อสี รสชาติ กลิ่น เปลี่ยนแปลงไป คุณภาพและความปลอดภัยต่ำส่งผลโดยตรงต่อผู้บริโภค และยังส่งผลเสียต่อภาพลักษณ์การส่งออกของสินค้าบรรจุภัณฑ์โลหะ

แผ่นโลหะซึ่งนิยมใช้ทำบรรจุภัณฑ์กระป๋องที่เหมาะสมกับอุตสาหกรรมอาหาร แบ่งออกเป็น 3 ชนิด คือ อะลูมิเนียม (aluminium) แผ่นเหล็กเคลือบดีบุก (tin plate) แผ่นเหล็กชุบโครเมียม (tin-free steel: TFS) (ศูนย์เครือข่ายข้อมูลอาหารครบวงจร, 2554) บรรจุภัณฑ์โลหะที่นำมาจากโรงงานอุตสาหกรรมโดยตรง พบการกัดกร่อนแบบรูเข็ม (pitting corrosion) มากที่สุด ร้อยละ 80 การกัดกร่อนใต้ผิวเคลือบ (filiform) เกิดขึ้นร้อยละ 5 (ศิริลักษณ์, 2546) จากปัญหาที่กล่าวมาข้างต้นพบว่าการกัดกร่อนเป็นปรากฏการณ์ธรรมชาติของโลหะ ซึ่งต้องหาหนทางป้องกันการกัดกร่อนและหาแนวทางในการแก้ไขปัญหาการกัดกร่อนอย่างสม่ำเสมอ

กระป๋องเหล็กเคลือบแล็กเกอร์ที่นิยมใช้บรรจุอาหารมีฤทธิ์กัดกร่อนที่แตกต่างกัน เช่น อาหารทะเล และผักผลไม้ เป็นต้น ดังนั้นโรงงานผลิตกระป๋องจึงต้องตรวจสอบคุณภาพกระป๋องเหล็กเคลือบแล็กเกอร์ว่ามีคุณภาพดีเพียงใด ในงานวิจัยนี้ต้องการศึกษาว่าพารามิเตอร์ทางเคมีไฟฟ้าที่เหมาะสำหรับการประเมินความเสียหายของบรรจุภัณฑ์และใช้บ่งชี้ความเสียหายที่เริ่มเกิดขึ้นควรมีค่าเท่าใด และเมื่อผิวเคลือบแล็กเกอร์ถูกทำลายหรือหลุดออกไป พารามิเตอร์ดังกล่าวจะสามารถประเมินพื้นที่ความเสียหายที่แตกต่างกันได้แม่นยำเพียงใด โดยใช้เทคนิคการหาพื้นที่เสียหายจริงจากกล้องจุลทรรศน์มาเป็นตัวเปรียบเทียบ

## วิธีการทดลอง

### 1. ขั้นตอนการเตรียมชิ้นงาน

1.1 เตรียมเส้นลวดขนาดเล็กที่มีพื้นที่ 0.08, 0.16, 0.24 และ 0.32 $mm^2$ ตามลำดับ และเตรียมแผ่นเหล็กที่มีพื้นที่ 20, 40, 60, 80 และ 117 $mm^2$ ตามลำดับ

1.2 นำเหล็กที่ถูกตัดแล้ว มาเชื่อมกับสายไฟโดยการบัดกรีแต่ต้องปอกเปลือกสายไฟออกก่อน

1.3 เมื่อเชื่อมเหล็กต่อกับสายไฟเสร็จแล้ว นำเหล็กเข้าไปในแม่แบบเพื่อเตรียมการหล่อเรซิน แต่ต้องวางเหล็กในรูปแบบที่สันเหล็กทิ่มลงไปในแม่แบบ เพราะต้องการใช้พื้นที่หน้าตัดจากสันเหล็ก (ตามความหนาของแผ่นเหล็ก)

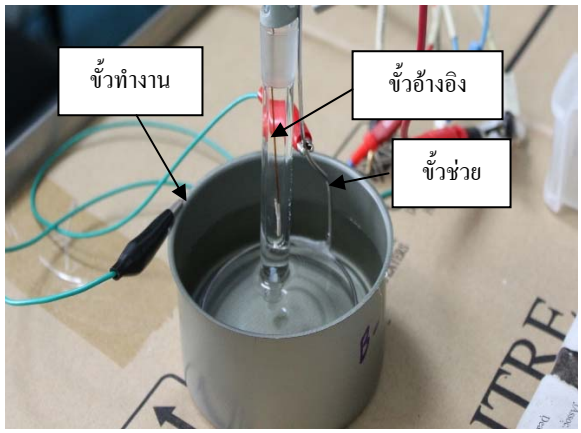
1.4 หล่อเรซินโดยใช้ อีพอกซี-ฟีนอลิกเรซินกับ สารทำให้แห้ง (hardener) ในอัตราส่วน 25:4 กวนให้เข้ากันแต่พยายามให้เกิดฟองน้อยที่สุดหลังจากนั้นเทลงไปในแม่แบบรอเป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อให้เรซินแข็งตัวแล้วนำเรซินออกจากแม่แบบ

1.5 นำเรซินไปขัดเพื่อให้ผิวหน้าของชิ้นงานเปิดออกจากเรซิน

doi: 10.14416/j.appsci.2016.04.001

**2. การทดสอบการกัดกร่อนด้วยเทคนิคโพเทนชิโอสแตติก (potentiostatic technique)**

2.1 นำชิ้นงานที่เตรียมได้ข้างต้นต่อกับขั้ววงจรไฟฟ้าโดยใช้ขั้วไฟฟ้า 3 ขั้ว (three– electrode cell) คือขั้วอ้างอิง ใช้ SCE (saturated calomal electrode) ขั้วช่วยใช้ลวดแพลตตินัม และขั้วทำงานเป็นชิ้นงานลวดหรือแผ่นเหล็ก (รูปที่ 1)




**รูปที่ 1.** การต่อขั้วอิเล็กโทรดเข้ากับกระป๋องเหล็กเคลือบแล็กเกอร์

2.2 เมื่อต่อขั้วไฟฟ้าเข้ากับเซลล์ที่ประกอบขึ้นเรียบร้อยแล้ว ทำการตั้งค่าเพื่อกำหนดสภาวะ โดยในการทดสอบจะป้อนศักย์ไฟฟ้าคงที่ที่ 6 โวลต์เพื่อเร่งการกัดกร่อนและใช้สารละลายโซเดียมคลไรด์, โซเดียมไฮดรอกไซด์, โซเดียมเมตาไบซัลไฟด์, กรดซิตริก 2% (w/w) เป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ตามลำดับและเวลาที่ใช้ในการทดสอบคือ 10 วินาที

2.3 ทำการวิเคราะห์ผ่านโปรแกรม Potentiostat Test Unit V2.1 เพื่อสั่งการทำงานของเครื่องโพเทนชิโอสแตตของ Radikos รุ่น PTU 1.0

2.4 วัดค่ากระแสไฟฟ้าของการละลายของเหล็กกับเวลาแล้วลงจุดเป็นกราฟ 4 จุด จากนั้นบันทึกค่ากระแสสูงสุดที่ได้และคำนวณค่าประจุไฟฟ้าที่เกี่ยวข้องจากพื้นที่ใต้กราฟ

2.5 สร้างกราฟมาตรฐานระหว่างค่ากระแสสูงสุดกับพื้นที่กัดกร่อน (พื้นที่หน้าตัดของขดลวดและแผ่นเหล็ก) และกราฟมาตรฐานระหว่างค่าประจุไฟฟ้ากับพื้นที่กัดกร่อน

2.6 ศึกษาสภาพการกัดกร่อนของกระป๋องเคลือบแล็กเกอร์ออร์แกโนซอล ที่ได้รับจากโรงงานผลิตกระป๋อง โดยการทดสอบกับสารละลายต่าง ๆ กัน

2.7 ศึกษาสภาพกัดกร่อนและประเมินพื้นที่เสียหาย จากการกัดกร่อนของกระป๋องบรรจุอาหารที่วางขายในซุปเปอร์มาเก็ต ได้แก่ ปลากระป๋องตราปุ้มปุ้ย ตรานกพิราบคู่ ตราสามแม่ครัว และผักผสมดองเค็มตราซีเซ็กฉ่าย โดยใช้ระบบอิเล็กโทรด 3 ขั้ว ดังนี้คือ ขั้วอ้างอิงมาตรฐาน ใช้ saturated calomal electrode (SCE) ขั้วช่วยเป็นแพลตตินัม

และขั้วทำงาน (WE) คือกระป๋องเคลือบแล็กเกอร์จากโรงงานที่เตรียมไว้ก่อนหน้านี้ จากนั้นเติมสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 2%(w/w) ให้มีปริมาตรประมาณ 3 ใน 4 ของปริมาตรกระป๋อง เพื่อเป็นสารละลายอิเล็กโตรไลต์ แล้วป้อนศักย์ไฟฟ้า 6 โวลต์ เป็นเวลา 10 วินาที

**3. การหาพื้นที่เสียหายจากการกัดกร่อนด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง**

3.1 นำกระป๋องที่ผ่านการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคโพเทนชิโอสแตติก ไปศึกษาลักษณะพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์

3.2 ใช้กำลังขยายของกล้องจุลทรรศน์ที่ 5-10 เท่า เลื่อนตำแหน่งกระป๋องเพื่อให้ได้ตำแหน่งที่ต้องการดู

3.3 ปรับระยะโฟกัสของภาพจนได้ภาพที่ชัดเจนที่สุด

3.4 จากนั้นใช้โปรแกรม Scope Photo 3.0 Digital Camera for Microscope and Telescope คำนวณค่าพื้นที่เสียหายภายในภาพที่ต้องการประเมินโดยการลากเส้นรอบรูปพื้นที่เสียหาย โปรแกรมจะสามารถคำนวณพื้นที่ให้เอง

**ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง**

**1. ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าสูงสุดและประจุไฟฟ้ากับพื้นที่การกัดกร่อนด้วยเทคนิคโพเทนชิโอสแตติก**

จากการทดลองนี้ได้ทำการป้อนศักย์ไฟฟ้ากระแสตรงคงที่ 6 โวลต์ เพื่อเร่งการกัดกร่อน เนื่องจากเป็นศักย์ไฟฟ้าที่โรงงานอุตสาหกรรมเลือกใช้ในการตรวจสอบ และจากการวิเคราะห์รูปแบบของการกัดกร่อนโดยการใช้กล้องจุลทรรศน์ (optical microscope) ที่กำลังขยาย 5-10 เท่า พบว่ามีการกัดกร่อนแบบรูเข็ม (pitting corrosion) เกิดขึ้นทั่วทั้งผิวหน้า ซึ่งการกัดกร่อนแบบนี้สามารถประเมินเป็นเปอร์เซ็นต์ความเสียหายได้โดยการวัดกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในเวลา 10 วินาทีและลงจุดกราฟกระแสกับเวลา การศึกษานี้ใช้สารละลาย 4 ชนิด ได้แก่ สารละลายโซเดียมคลอไรด์, สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์, กรดซิตริก, สารละลายโซเดียมเมตาไบซัลไฟต์ ความเข้มข้น 2 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก สารละลาย 3 ชนิดแรกเป็นสารละลายที่ใช้เพื่อเปรียบเทียบผลของ pH หรือความเป็นเกลือ, ด่าง และกรดในผลิตภัณฑ์อาหารเพราะมีสมบัติที่เป็นสารละลายที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมมาก ส่วนสารละลายโซเดียมเมตาไบซัลไฟต์เป็นสารที่นิยมใช้เป็นสารกันบูดในน้ำกะทิซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ใหม่ที่มีการส่งออกไปต่างประเทศ

จากรูปที่ 2 ถึง 5 จะเห็นได้ว่าค่าเฉลี่ยกระแสสูงสุดกับค่าเฉลี่ยประจุไฟฟ้าของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์มีค่ามากที่สุด เนื่องจากสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์มีฤทธิ์เป็นเบสทำให้เมื่อทำปฏิกิริยากับโลหะแล้วเกิดออกไซด์เกาะที่บริเวณผิวโลหะทำให้การกัดกร่อนดำเนินต่อไปได้ยาก ดังนั้นจึงต้องใช้กระแสมากเพื่อที่จะทำให้เกิดการกัดกร่อนได้ นอกจากนี้จะเห็นว่ากระแสที่ได้จากการทดสอบในสารละลายโซเดียมคลอไรด์มีค่ารองลงมา ตามด้วยกระแสจากการทดสอบในสารละลายโซเดียมเมตาไบซัลไฟต์และกรดซิตริกตามลำดับ ซึ่งย่อมแสดงให้เห็นว่าฤทธิ์กัดกร่อนของสารละลายกรดซิตริกมีค่ามากที่สุด ซึ่งอาจเนื่องมาจากสารละลายดังกล่าวมีฤทธิ์เป็นกรด ส่วนสารละลายโซเดียมเมตาไบซัลไฟต์มีฤทธิ์เป็นกรดได้เมื่อละลายน้ำดังสมการที่ (1) และ (2) (Parkและคณะ, 2015;

Tolmachevและ Scherson, 1999) และสารละลายโซเดียมคลอไรด์เป็นสารละลายที่เป็นกลาง มีฤทธิ์กัดกร่อนสูง (ณรงค์, 2547) ส่วนสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์มีฤทธิ์เป็นเบสกัดกร่อนได้น้อย

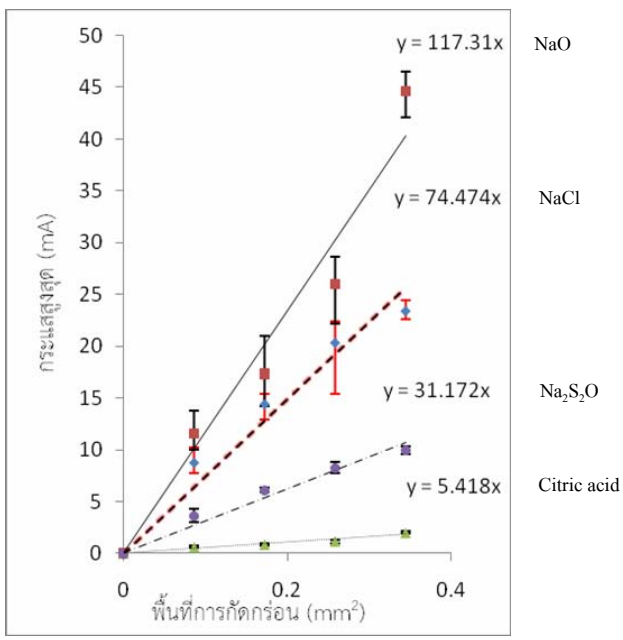
$$Na_2S_2O_5 + H_2O = 2Na^+ + 2HSO_3^- \quad (1)$$

$$HSO_3^- + H^+ = SO_2 + H_2O \quad (2)$$

**2. การนำผลการศึกษาที่ได้มาประเมินความเสียหายที่เกิดขึ้นกับบรรจุภัณฑ์โลหะจริง**

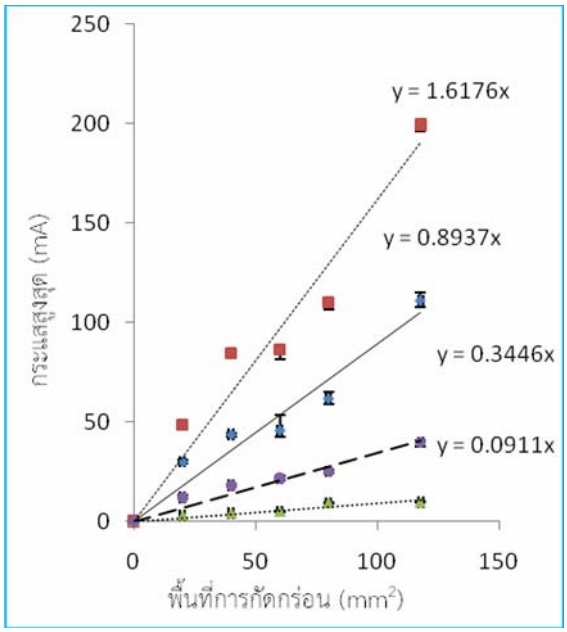
***2.1 การประเมินคุณภาพของกระป๋องเคลือบแล็กเกอร์ที่ได้รับจากโรงงานผลิตกระป๋อง***

ในการตรวจสอบบรรจุภัณฑ์กระป๋องเคลือบแล็กเกอร์ตัวอย่างจำนวน 12 ใบที่ได้รับจากโรงงาน เป็นตัวอย่างกระป๋องเคลือบแล็กเกอร์ที่โรงงานนี้ผลิตแต่ยังไม่ได้บรรจุอาหาร เมื่อนำมาทดสอบประสิทธิภาพของแล็กเกอร์ด้วยวิธีการเทคนิคโพเทนชิโอสแตติก ด้วยการใช้กระป๋องเปล่าเคลือบแล็กเกอร์เป็นขั้วทำงานโดยบรรจุสารละลายโซเดียมคลอไรด์, โซเดียมไฮดรอกไซด์, กรดซิตริก, โซเดียมเมตาไบซัลไฟต์ที่ความเข้มข้น 2% โดยน้ำหนัก ตามลำดับ ซึ่งถ้าวิเคราะห์ได้ว่ามีเหล็กละลายผ่านชั้นแล็กเกอร์ออกมาได้หรือไม่ และออกมาที่ตำแหน่งใดจะทำให้ทราบถึงบริเวณของกระป๋องที่มีปัญหาได้ง่ายขึ้นจากการเคลือบแล็กเกอร์ที่ไม่ได้คุณภาพ

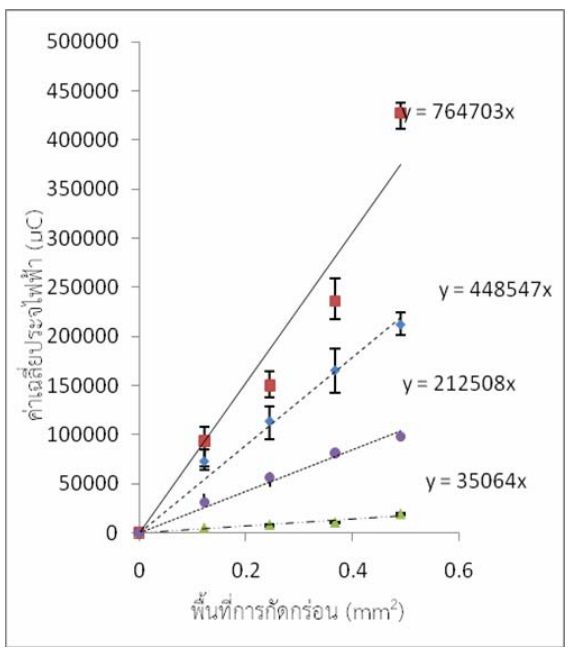



**รูปที่ 2.** ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยกระแสสูงสุดกับพื้นที่การกัดกร่อนของเส้นลวดในสารละลายทั้ง 4 ชนิด

doi: 10.14416/j.appsci.2016.04.001

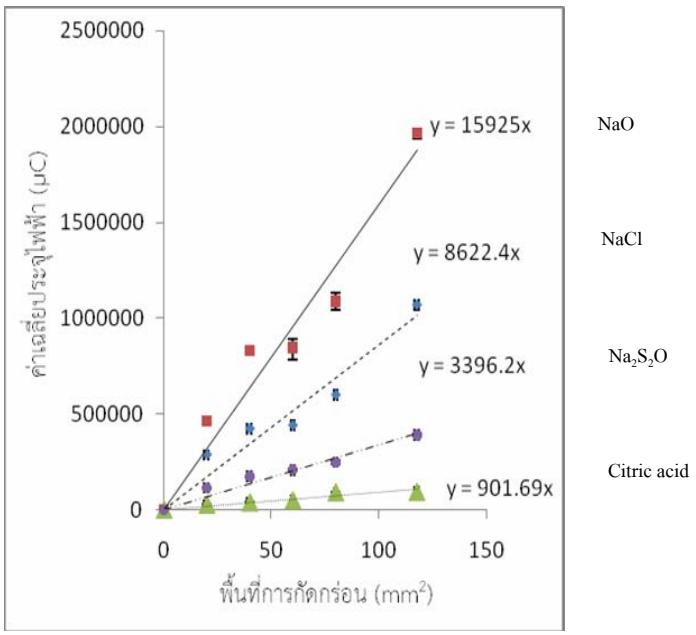



**รูปที่ 3.** ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยกระแสสูงสุดกับพื้นที่การกัดกร่อนของแผ่นหล็กในสารละลายทั้ง 4 ชนิด




**รูปที่ 4.** ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยประจุไฟฟ้ากับพื้นที่การกัดกร่อนของเส้นลวดในสารละลายทั้ง 4 ชนิด

doi: 10.14416/j.appsci.2016.04.001




**รูปที่ 5.** ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยประจุไฟฟ้ากับพื้นที่การกัดกร่อนของแผ่นเหล็กในสารละลายทั้ง 4 ชนิด

จากตารางที่ 1 และ 2 จะเห็นว่ากระป๋องเคลือบแล็กเกอร์ทั้ง 12 ใบ ที่บรรจุสารละลายชนิดต่าง ๆ มีพื้นที่กัดกร่อนหรือพื้นที่เสียหายในหน่วย $mm^2$ ที่ประเมินได้จากกราฟมาตรฐานค่อนข้างน้อยมาก ๆ ซึ่งบ่งชี้ว่าแล็กเกอร์เคลือบกระป๋องยังมีประสิทธิภาพดีและมีสภาพสมบูรณ์สามารถปกป้องผิวเหล็กด้านในได้เป็นอย่างดี

**ตารางที่ 1.** ค่าเฉลี่ยกระแสไฟฟ้าสูงสุดที่วัดได้จากกระป๋องเคลือบแล็กเกอร์ของโรงงานในสารละลายต่าง ๆ

| | ค่าเฉลี่ยกระแสไฟฟ้าสูงสุดที่ได้ (μA) ในเวลา 10 วินาที | | | |
|---|---|---|---|---|
| ครั้งที่ | 2%w/w NaCl | 2%w/w NaOH | 2%w/w Citric acid | 2%w/w $Na_2S_2O_5$ |
| 1 | 1742 | 715.2 | 18.60 | 69.60 |
| 2 | 1233 | 685.3 | 17.10 | 87.50 |
| 3 | 1440.4 | 947.2 | 21.10 | 50.50 |

 doi: 10.14416/j.appsci.2016.04.001

**ตารางที่ 2.** ค่าพื้นที่ที่ถูกกัดกร่อนที่ประเมินได้ เมื่อนำค่าเฉลี่ยกระแสไฟฟ้าสูงสุดของกระป๋องเคลือบแล็กเกอร์ ไปเทียบกับกราฟมาตรฐาน

| | พื้นที่ที่ถูกกัดกร่อน ($mm^2$) | | | |
|---|---|---|---|---|
| ครั้งที่ | 2%w/w NaCl | 2%w/w NaOH | 2%w/w Citric acid | 2%w/w $Na_2S_2O_5$ |
| 1 | 0.023 | $6.10 \times 10^{-3}$ | $3.43 \times 10^{-3}$ | $2.23 \times 10^{-3}$ |
| 2 | 0.017 | $5.84 \times 10^{-3}$ | $3.16 \times 10^{-3}$ | $2.81 \times 10^{-3}$ |
| 3 | 0.019 | $8.07 \times 10^{-3}$ | $3.89 \times 10^{-3}$ | $1.62 \times 10^{-3}$ |

**2.2 การประยุกต์ใช้เส้นกราฟมาตรฐานในการประเมินความเสียหายจากกระบวนการกัดกร่อนของกระป๋องบรรจุอาหารที่วางจำหน่ายทั่วไป**

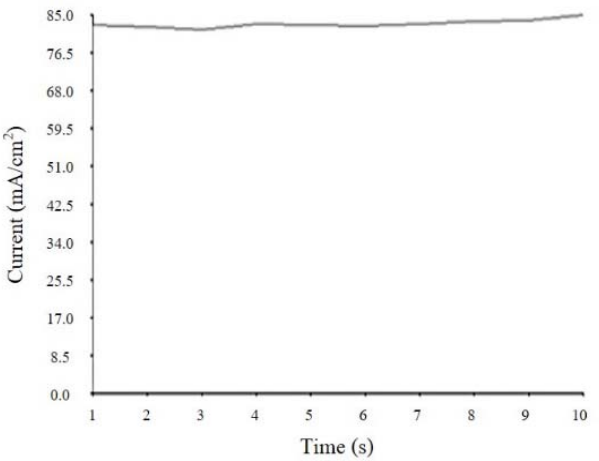
รูปที่ 6 และรูปที่ 7 แสดงกราฟกระแสกับเวลาที่ได้จากการทดสอบด้วยเทคนิคโพเทนชิโอสแตติกของกระป๋องเคลือบแล็กเกอร์บรรจุอาหาร คือ ปลากระป๋อง 3 ยี่ห้อ และ ผักผสมดองเค็มซีเซ็กฉ่าย 1 ยี่ห้อ เมื่อทำการคำนวณหาค่ากระแสสูงสุดและค่าประจุไฟฟ้าของการละลายของเหล็ก เพื่อนำไปเปรียบเทียบกับกราฟมาตรฐานแล้วทำนายพื้นที่กัดกร่อนหรือพื้นที่เสียหายพบว่าได้ผลดังตารางที่ 3 และเมื่อนำผลที่ได้เปรียบเทียบกับกราฟมาตรฐานเพื่อคำนวณหาพื้นที่กัดกร่อนในกระป๋องทั้ง 4 ชนิด ได้ผลตามตารางที่ 4

**3. การตรวจหาพื้นที่เสียหายของการกัดกร่อนบนกระป๋องบรรจุอาหารโดยใช้เทคนิคกล้องจุลทรรศน์ (optical microscopy: OM) กำลังขยาย 5-10 เท่า**

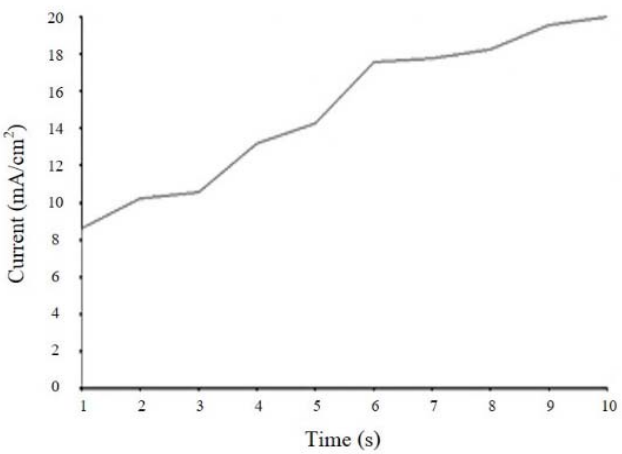
กระป๋องเหล็กเคลือบแล็กเกอร์ทั้ง 4 ชนิดที่นำมาศึกษาโดยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์ส่วนใหญ่จะบรรจุอาหารประเภทปลา ซึ่งมีความเป็นกรดสูง หรือ pH น้อยกว่า 7 ในขณะที่อาหารส่วนใหญ่มีเกลือเป็นส่วนประกอบของอาหารที่บรรจุอยู่ภายในกระป๋องจึงเป็นสิ่งเร้าอย่างดีต่อการกัดกร่อน

จากรูปที่ 8 ถึง 11 และตารางที่ 5 จะเห็นว่าพื้นที่ที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์มีค่าน้อยกว่าที่คำนวณได้จากค่ากระแสสูงสุดและค่าประจุไฟฟ้าของการกัดกร่อนสำหรับกระป๋องปลากระป๋องทั้ง 3 ยี่ห้อ ส่วนในกรณีของกระป๋องผักผสมดองเค็มตราซีเซ็กฉ่ายได้ค่าพื้นที่จากกล้องมากกว่าค่าที่ได้จากกราฟมาตรฐานของกระแสสูงสุดและประจุไฟฟ้าของการละลายเล็กน้อย อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาจากกระป๋องปลาทั้ง 3 ประเภท โดยเฉพาะรูปถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์จะเห็นว่า การกัดกร่อนเกิดเป็นรูเข็มทั้งเล็กและใหญ่กระจายอยู่ทั่วไป รูเข็มขนาดเล็กจำนวนมากไม่สามารถหาพื้นที่กัดกร่อนได้เนื่องจากมีเป็นจำนวนมาก และมีขนาดเล็กมากๆ โดยจะสังเกตได้จาก background ของ

ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์ของกระป๋องปลากระป๋องตราปุ้มปุ้ย ทำให้ไม่อาจหาพื้นที่กัดกร่อนรวมที่ถูกต้องได้ ซึ่งนี่อาจเป็นข้อดีของการใช้กราฟมาตรฐานมาช่วยในการหาพื้นที่การกัดกร่อนทั้งหมด




**รูปที่ 6.** กราฟความสัมพันธ์ของกระแสการกัดกร่อนและเวลาของกระป๋องปลากระป๋องตราปุ้มปุ้ย



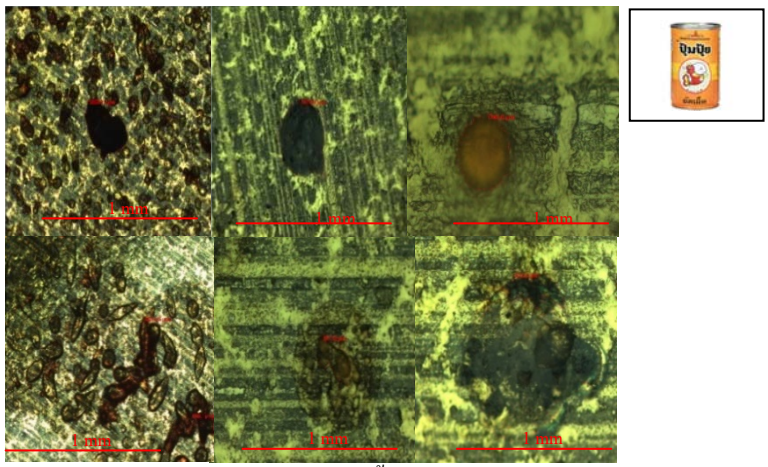

**รูปที่ 7.** กราฟความสัมพันธ์ของกระแสการกัดกร่อนและเวลาของกระป๋องผักผสมดองเค็มตราซีเซ็กฉ่าย

**ตารางที่ 3.** ค่ากระแสสูงสุดและค่าประจุไฟฟ้าที่วัดได้จากกระป๋องบรรจุอาหารชนิดต่างๆ

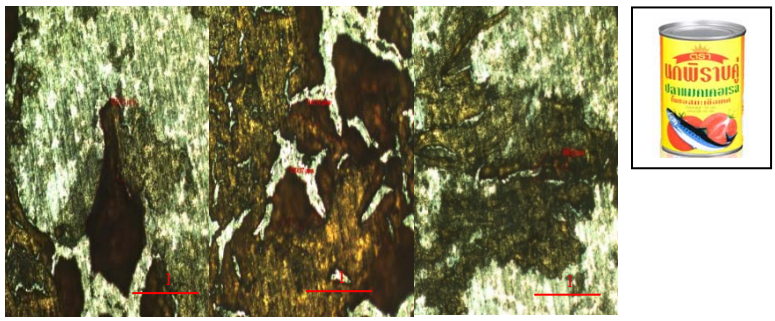
| กระป๋องบรรจุอาหาร | กระแสสูงสุดที่วัดได้ (mA) | ประจุไฟฟ้าที่คำนวณได้ (μC) |
|---|---|---|
| ปลากระป๋องปุ้มปุ้ย | 85.10 | 831330 |
| ปลากระป๋องนกพิราบคู่ | 18.354 | 177951 |
| ปลากระป๋องตราสามแม่ครัว | 8.079 | 79184 |
| ผักผสมดองเค็มซีเซ็กฉ่าย | 20.027 | 150290 |

**ตารางที่ 4.** พื้นที่กัดกร่อนที่ประเมินได้จากค่ากระแสสูงสุดและจากค่าประจุไฟฟ้าของกระป๋องบรรจุอาหาร

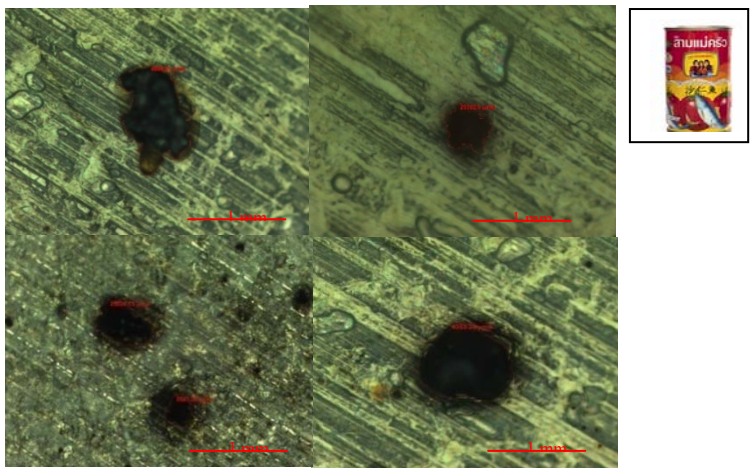
| กระป๋องบรรจุอาหาร | พื้นที่กัดกร่อนที่ประเมินได้จากค่ากระแสสูงสุด ($mm^2$) | พื้นที่กัดกร่อนที่ประเมินได้จากค่าประจุไฟฟ้า ($mm^2$) |
|---|---|---|
| ปลากระป๋องปุ้มปุ้ย | 1.143 | 1.301 |
| ปลากระป๋องนกพิราบคู่ | 0.246 | 0.280 |
| ปลากระป๋องตราสามแม่ครัว | 0.109 | 0.124 |
| ผักผสมดองเค็มซีเซ็กฉ่าย | 0.269 | 0.235 |



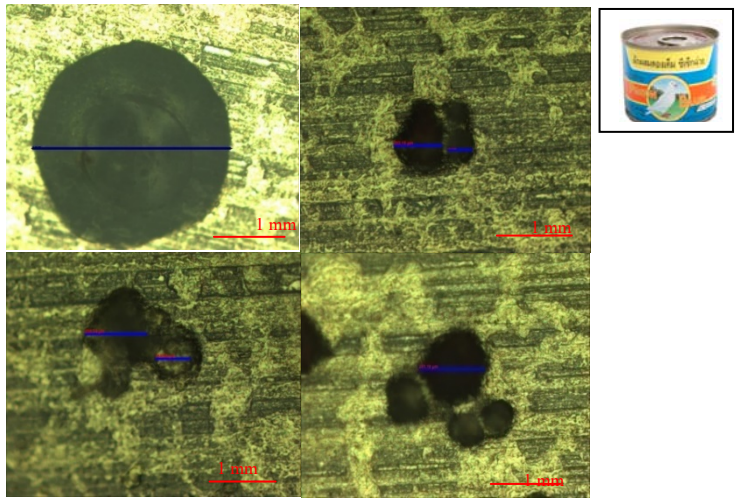
**รูปที่ 8.** ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์กำลังขยาย 5 เท่า แสดงพื้นผิวของกระป๋องเคลือบแล็กเกอร์ปลากระป๋องตราปุ้มปุ้ยที่เกิดการกัดกร่อนแบบรูเข็ม (วันที่ผลิต ไม่ระบุ วันหมดอายุ 10/09/2016)




**รูปที่ 9.** ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์กำลังขยาย 5 เท่า แสดงพื้นผิวของกระป๋องเคลือบแล็กเกอร์ปลากระป๋องตรานกพิราบคู่ที่เกิดการกัดกร่อนแบบรูเข็ม (วันที่ผลิต 26/03/2013 วันหมดอายุ 26/03/2016)




**รูปที่ 10.** ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์กำลังขยาย 5 เท่า แสดงพื้นผิวของกระป๋องเคลือบแล็กเกอร์ปลากระป๋องตราสามแม่ครัวที่เกิดการกัดกร่อนแบบรูเข็ม (วันที่ผลิต 12/12/2014 วันหมดอายุ 12/12/2017)




**รูปที่ 11.** ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์กำลังขยาย 5 เท่า แสดงพื้นผิวของกระป๋องเคลือบแล็กเกอร์ผักผสมดองเค็มตราซีเซ็กฉ่ายที่เกิดการกัดกร่อนแบบรูเข็ม (วันที่ผลิต 14/06/2012 วันหมดอายุ 14/06/2015)

**ตารางที่ 5.** เปรียบเทียบพื้นที่กัดกร่อนของกระป๋องอาหาร 4 ชนิด ที่คำนวณได้จากกล้องจุลทรรศน์ จากกระแสสูงสุด และจากประจุไฟฟ้า ของการทดสอบด้วยเทคนิคโพเทนชิโอสแตติก

| | พื้นที่จากกล้องจุลทรรศน์ ($mm^2$) | พื้นที่จากกระแส ($mm^2$) | พื้นที่จากประจุไฟฟ้า ($mm^2$) |
|---|---|---|---|
| ปลากระป๋องปุ้มปุ้ย | 0.3847 | 1.143 | 1.301 |
| ปลากระป๋องนกพิราบคู่ | 0.0891 | 0.246 | 0.280 |
| ปลากระป๋องตราสามแม่ครัว | 0.0960 | 0.108 | 0.124 |
| ผักผสมดองเค็มซีเซ็กฉ่าย | 0.2829 | 0.269 | 0.235 |

**สรุปผลการทดลอง**

1. จากการทดลองโดยการใช้เครื่องโพเทนชิโอสแตต จากเทคนิคโพเทนชิโอสแตติกมาหาค่ากระแสไฟฟ้ากับประจุไฟฟ้าโดยใช้ขดลวดกับแผ่นเหล็กตามพื้นที่ที่กำหนดมาเป็นตัวอย่าง จะเห็นได้ว่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดกับประจุไฟฟ้านั้นแปรผันตามพื้นที่กัดกร่อนของขดลวดและแผ่นเหล็ก

2. กราฟมาตรฐานที่ได้ นำมาประเมินความเสียหายที่เกิดขึ้นกับกระป๋องเคลือบแล็กเกอร์ โดยกระป๋องบรรจุภัณฑ์อาหารจากโรงงานที่ยังไม่ได้ผ่านการใช้งาน เมื่อทดสอบในสารละลายชนิดต่าง ๆ กันได้ค่าเฉลี่ยกระแสไฟฟ้าสูงสุดดังนี้ ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์จะได้ค่าเฉลี่ยของกระแสไฟฟ้า 4415.4 μA,ในโซเดียมไฮดรอกไซด์ 2347.7 μA, ในกรดซิตริก 56.8 μA และ ในโซเดียมเมตาไบซัลไฟต์ 207.6 μA ซึ่งบ่งชี้ว่าแล็กเกอร์เคลือบกระป๋องยังมีประสิทธิภาพดีและมีสภาพสมบูรณ์สามารถปกป้องผิวเหล็กด้านในได้เป็นอย่างดี (โดยพิจารณาจากกราฟรูปที่ 2. ซึ่งจะเห็นว่าการกัดกร่อนเริ่มปรากฏให้เห็นได้ อย่างน้อยกระแสสูงสุดของการกัดกร่อนต้องเป็นระดับ mA ประกอบกับการหยดสารละลาย KSCN ลงไปขณะทดสอบก็ไม่ปรากฏสีแดงเลือดนกของสารประกอบเชิงซ้อน $Fe(SCN)_3$

3. จากกระป๋องบรรจุอาหารใกล้หมดอายุ 4 ชนิด จะเห็นได้ว่าพื้นที่การกัดกร่อนจากกระแสสูงสุดมีค่าใกล้เคียงกับพื้นที่การกัดกร่อนจากประจุไฟฟ้า เช่น กระป๋องปลากระป๋องตราสามแม่ครัว และกระป๋องผักผสมดองเค็มตราซีเซ็กฉ่าย มีค่าพื้นที่การกัดกร่อนจากกระแสสูงสุด ค่าพื้นที่การกัดกร่อนจากประจุไฟฟ้า และค่าพื้นที่จากกล้องจุลทรรศน์ใกล้เคียงกัน แสดงว่าการใช้ค่ากระแสสูงสุด และค่าประจุไฟฟ้าของการกัดกร่อนเพื่อการประเมินพื้นที่เสียหายสามารถทำได้ ส่วนผลจากอาหารประเภทปลากระป๋องอีก 2 ยี่ห้อ อาจได้พื้นที่การกัดกร่อนจากกล้องจุลทรรศน์น้อยกว่าที่คำนวณได้จากค่ากระแสสูงสุดและค่าประจุไฟฟ้าก็เพราะการกัดกร่อนที่เกิดขึ้นมีลักษณะเป็นรูเข็มขนาดเล็กที่กระจายอยู่ยากแก่การวัดหาพื้นที่จากภาพได้ทั้งหมด หรืออาจกินพื้นที่กว้างจนยากแก่การลากเส้นรอบรูป

ข้อมูลความสัมพันธ์ที่ได้ทั้งหมด เหมาะอย่างยิ่งที่จะนำไปใช้เพื่อพัฒนาและปรับปรุงให้บรรจุภัณฑ์เหล็กเคลือบแล็กเกอร์ มีคุณสมบัติและมีคุณภาพดียิ่งขึ้น โดยดูได้จากกราฟมาตรฐานของค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุด ค่าประจุไฟฟ้า และพื้นที่การกัดกร่อน

**เอกสารอ้างอิง**

ณรงค์ ผังวิวัฒน์, (2547) การกัดกร่อนและการเลือกใช้วัสดุ. หจก.จิรรัชการพิมพ์, กรุงเทพมหานคร, 212 หน้า.

ศิริลักษณ์ นิวิฐจรรยงค์, (2546) เทคนิคเคมีไฟฟ้าสำหรับตรวจสอบปัญหาการกัดกร่อนของกระป๋องเหล็กเคลือบดีบุกและแลคเกอร์. วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, 13(4): 49-57.

ศูนย์เครือข่ายข้อมูลอาหารครบวงจร, (2554) มาตรฐานของกระป๋องบรรจุอาหาร, ที่มา: http://www.foodnetworksolution.com/news_and_articles/article/0031/มาตรฐานของกระป๋องบรรจุอาหาร, สืบค้น 1 ธันวาคม 2558.

Cancluster, (2008) กระป๋องโลหะ และ Lacuer. ที่มา: http://www.cancluster.com/tip_detail.php?id=3, สืบค้น 1 ธันวาคม 2558.

Boelen B., den Hartog H. and van der Weijde H., (2004) Product performance of polymer coated packaging steel, study of the mechanism of defect growth in cans. Prog. Org. Coat., 50(1): 40-46.

Park I.-J., Lee S.-M., Kang M., Lee S. and Lee Y.-K., (2015) Pitting corrosion behavior in advanced high strength steels. J. Alloy. Compd., 619: 205-210.

Oldring P.K.T. and Nehring U., (2007) Packaging Materials: 7. Metal Packaging for Foodstuffs, ILSI Europe Packaging Materials Task Force, 41 P.

The Saylor foundation, (2015) Steels. Available from: http://www.saylor.org/site/wp-content/uploads/2013/01/ME203-2.1.1-Steels.pdf, Cited 1 December 2015.

Tolmachev Y.V. and Scherson D.A., (1999) Electrochemical reduction of bisulfite in mildly acidic buffers: Kinetics of sulfur dioxide-bisulfite interconversion. J. Phys. Chem. A, 103: 1572-1578.