

## อิทธิพลของการขึ้นรูปกระป๋องต่อการกัดกร่อนของแผ่นเหล็กเคลือบดีบุก

### Influence of Can Forming on Corrosion Behavior of Tinplate

อรรถพล ตะระ

Attapon Tare

ภาควิชาเทคโนโลยีวัสดุ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยรามคำแหง กรุงเทพฯ

#### บทคัดย่อ

การผลิตกระป๋องบรรจุอาหารที่เป็นการขึ้นรูปกระป๋องจากการม้วนแผ่นเหล็กเคลือบดีบุกแล้วผ่านกระบวนการเชื่อมด้วยความร้อนเป็นทรงกระบอก และผ่านกระบวนการขึ้นรูปเย็นเป็นรูปลอนเพื่อเพิ่มความแข็งแรง ในทางโลหวิทยาการขึ้นรูปเหล่านี้ อาจส่งผลกระทบต่อโครงสร้างจุลภาคของโลหะและความหนาของชั้นเคลือบ ซึ่งจะส่งผลโดยตรงต่อพฤติกรรม ความต้านทานและอัตราการกัดกร่อนของกระป๋อง ผลการวิจัยจากการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคพบว่าบริเวณที่ผ่านการขึ้นรูปเย็นความหนาของชั้นเคลือบดีบุกมีความสม่ำเสมอลดลง และมีลักษณะพื้นผิวเป็นคลื่นของการเสียรูปถาวรอย่างชัดเจน ส่วนบริเวณที่ผ่านการเชื่อมพบว่ามีลักษณะพรมตัวมีรูอากาศจำนวนมาก และเมื่อทำการทดสอบความหนาของชั้นเคลือบดีบุกพบว่าบริเวณที่ผ่านการขึ้นรูปเย็นทั้งก่อนและหลังขึ้นรูปมีความหนาของชั้นเคลือบดีบุกและ โลหะผสมใกล้เคียงกัน แต่บริเวณที่ผ่านการเชื่อมพบว่าความหนาของชั้นเคลือบดีบุกลดลง แต่ความหนาของชั้น โลหะผสมเพิ่มขึ้น สำหรับการทดสอบความต้านทานการกัดกร่อนพบว่าบริเวณที่ผ่านการเชื่อมมีความต้านทานการกัดกร่อนต่ำกว่าบริเวณที่ผ่านการขึ้นรูปลอนและแผ่นเหล็กเคลือบดีบุก ตามลำดับ ส่วนอัตราการกัดกร่อนพบว่าบริเวณที่เป็นรอยเชื่อมจะมีอัตราการกัดกร่อนสูงที่สุดและสูงกว่าเป็นอย่างมากในกรณีที่ใช้ฟิล์มปกป้องแตกหักเมื่อเทียบกับบริเวณที่เป็นลอนและแผ่นเหล็กเคลือบดีบุก ตามลำดับ

คำสำคัญ : แผ่นเหล็กเคลือบดีบุก การกัดกร่อน การขึ้นรูปกระป๋อง กระป๋องบรรจุอาหาร กระป๋องดีบุก

#### Abstract

Fabrication of food cans consists of rolling and welding tinplate into a cylinder and cold-forming the cylinder with corrugated texture in order to strengthen the cans. Metallurgically these processes may affect both the microstructure of metal and the thickness of tin coating with consequent effects on cans' corrosion resistance and rate of corrosion. Results from the microstructure examination indicate that in the cold-formed region, the thickness of tin layer has a decreasing uniformity and wavy surface

characteristics of plastic deformation. In the welded region, porosity and air pockets are present. The tin-layer thickness tests show that in the cold-formed region, the thickness of prior and post forming of the tin-layer and the substrate alloy are similar whereas in the welded region the thickness of the tin-layer decreases but that of the substrate alloy increases. Corrosion resistance tests indicate that the welded region has less corrosion resistance than either the corrugated region or tin-plated steel. The welded region has the highest corrosion rates, much higher than in the case of protective film breakage with respect to the corrugated region and tin-plated steel respectively.

**Keywords:** tinplate, corrosion, cans forming, food cans, tin cans

## 1. บทนำ

กระป๋องเป็นบรรจุภัณฑ์หนึ่งที่ยอมรับใช้บรรจุอาหารเพื่อการเก็บรักษาคุณภาพอาหาร ตลอดจนเพื่อความสะดวกในการจัดเก็บและขนส่ง โดยกระป๋องในปัจจุบันนิยมเคลือบแล็กเกอร์ทั้งภายในและภายนอก [1-3] ซึ่งเป็นการแก้ปัญหาที่ปลายเหตุ เมื่อแล็กเกอร์มีปัญหา เช่น เคลือบไม่สมบูรณ์ มีรอยขีดข่วน หรือหลุดลอก ทำให้อาหารสัมผัสกับตัวกระป๋องและเกิดการกัดกร่อน และโดยเฉพาะอาหารที่ไม่นิยมใช้กระป๋องเคลือบแล็กเกอร์ [4-5] เช่น สับปะรดกระป๋อง เนื่องจากที่ผ่านมามีปัญหาที่ละลาย [6] ได้กลายเป็นส่วนหนึ่งของรสชาติอาหาร (metal taste) เมื่อเปลี่ยนมาใช้กระป๋องเคลือบแล็กเกอร์รสชาติของอาหารจะเปลี่ยนไป ซึ่งผู้บริโภคเข้าใจผิดว่าเป็นสินค้าแปลกปลอม นอกจากนี้ยังมีผลไม้และอาหารกระป๋องอื่นๆอีกที่เป็นสินค้าส่งออก ซึ่งล้วนแต่เป็นสินค้าที่สร้างรายได้ให้กับประเทศ แต่เนื่องจากประเทศต่างๆมีกฎหมายควบคุมคุณภาพอาหารทั้งภายในและที่นำเข้า โดยเฉพาะข้อกำหนดในเรื่องสารปนเปื้อนประเภทโลหะหนัก ทำให้สินค้าอาหารกระป๋องถูกกีดกันและบางครั้งถูกส่งกลับหรือถูกทำลาย สร้างความเสียหายอย่างมากในทางเศรษฐกิจของประเทศ จึงมีความสำคัญยิ่งในการศึกษาต้นเหตุปัญหาที่มาจากตัวกระป๋อง ซึ่งปกติแผ่นเหล็กเคลือบดีบุกจะมีความต้านทานการกัดกร่อนระดับหนึ่ง แต่เมื่อผ่านการขึ้นรูปโครงสร้างทางโลหะวิทยาจะเปลี่ยนไป ส่งผลต่อความต้านทานการกัดกร่อน [7] ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้ทำการศึกษาอิทธิพลของการขึ้นรูปกระป๋องต่อพฤติกรรมกัดกร่อนของแผ่นเหล็กเคลือบดีบุก โดยเปรียบเทียบการกัดกร่อนในบริเวณต่างๆ ของกระป๋องกับแผ่นเหล็กเคลือบดีบุกก่อนขึ้นรูป [8-9] เพื่อให้ทราบถึงตำแหน่งและระดับความรุนแรงของการกัดกร่อนในแต่ละตำแหน่ง โดยการพิจารณาในส่วนของตัวกระป๋องซึ่งผ่านการขึ้นรูปเย็นและบริเวณรอยเชื่อมที่ผ่านการขึ้นรูปร้อนในบริเวณต่างๆ ทั้งส่วนที่เป็นพื้นเรียบ ส่วนที่เป็นลอนและส่วนของยอดลอน

## 2. วิธีการทดลอง

### 2.1 วัสดุ

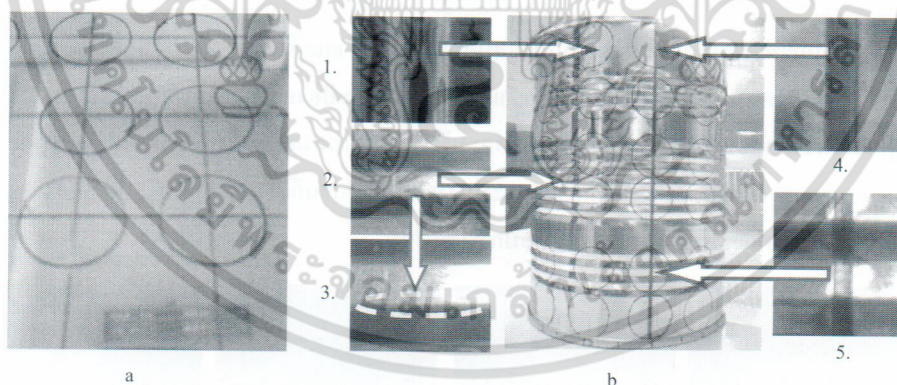
แผ่นเหล็กเคลือบดีบุก 50/100 (ตาม ASTM A624 Designation No. 100/50 หรือตาม Euro morm 145-78 Designation No. D 11.2/5.6) คือแผ่นเหล็กเคลือบดีบุกสองด้าน ด้านหนึ่งเคลือบดีบุก 5.6 กรัมต่อตารางเมตร และอีกด้านหนึ่งเคลือบดีบุก 11.2 กรัมต่อตารางเมตร ชนิดไม่เคลือบแลกเกอร์ จากบริษัทแผ่นเหล็กวิลาสไทย รหัส T-4B # 50/100 D หนา 0.32 มิลลิเมตร และกระป๋องเหล็กเคลือบดีบุก 50/100 จากบริษัททรอแอลแคน อินดัสทรีส์ จำกัด รหัส 307x409 (3)TP 50/100 เป็นกระป๋องชนิด 3 ชั้น ลักษณะเป็นลอนสลับเรียบ เส้นผ่าศูนย์กลาง 83.5 มิลลิเมตร สูง 115 มิลลิเมตร

### 2.2 อุปกรณ์และสารเคมี

กล้องจุลทรรศน์แบบแสงสะท้อน ยี่ห้อ ZEISS รุ่น Axiovert 100A ดิจิตอลวิดีโอ Sony เครื่อง Potentiostat / Galvanostat ของ VersaStat<sup>TM</sup> EG&G เครื่องวัดค่า pH ยี่ห้อ DELTA 320 สีรองพื้น PRIMER สำหรับโลหะและสีอะครีลิก กรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น (Hydrochloric, HCl) จาก Carlo Erba Reagents เกลือโปแตสเซียมคลอไรด์ (Potassium Chloride, Crystal, KCl) จาก Baker Analyzed พอลิเอสเตอร์เรซิน และ UP resin ผสมสไตรีนโมโนเมอร์

### 2.3 วิธีการทดลอง

2.3.1 ตรวจสอบทางกายภาพกับแผ่นเหล็กเคลือบดีบุกและกระป๋องเหล็กเคลือบดีบุกก่อนและหลังการทดสอบการกัดกร่อนด้วยกล้องจุลทรรศน์ โดยการถ่ายภาพพื้นผิวและภาพตัดขวางของชิ้นตัวอย่างในตำแหน่งต่าง ๆ ได้แก่ แผ่นเหล็กเคลือบดีบุก (รูปที่ 2.1 a) กระป๋องเหล็กเคลือบดีบุกช่วงเรียบ (รูปที่ 2.1 b1) ช่วงลอน (รูปที่ 2.1 b2) ช่วงยอดลอน (รูปที่ 2.1 b3) ช่วงรอยเชื่อมระหว่างเรียบ (รูปที่ 2.1 b4) และช่วงรอยเชื่อมระหว่างลอน (รูปที่ 2.1 b5) ที่กำลังขยาย 200, 500 และ 1,000 เท่า



รูปที่ 2.1 a แผ่นเหล็กเคลือบดีบุก และ b กระป๋องเหล็กเคลือบดีบุก

2.3.2 ศึกษาพฤติกรรมการกัดกร่อนของแผ่นเหล็กเคลือบดีบุกและกระป๋องเหล็กเคลือบดีบุก ในตำแหน่งต่างๆ เช่นเดียวกับในข้อ 2.3.1 ด้วยเทคนิคทางเคมีไฟฟ้า 3 เทคนิค คือ เทคนิค Galvanostatic ในการตรวจหาความหนาของชั้นเคลือบดีบุกและชั้นของโลหะผสม [3-4] ตามมาตรฐาน ASTM: A630-91 ในสารละลายกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 1.8 นอร์แมล ด้วยกระแสไฟฟ้า 10 มิลลิแอมแปร์ เป็นเวลา 250 วินาที เทคนิค  $E_{corr}$  vs Time ในการหาค่าความต้านทานการกัดกร่อน [4,7] ในสารละลายกรดไฮโดรคลอริก pH 2.7 เป็นเวลา 2500 วินาที และเทคนิค Potentiodynamic Polarization ในการหาค่าอัตราการกัดกร่อนและความแข็งแรงของฟิล์มปกป้อง [4,5] ในสารละลายกรดไฮโดรคลอริก pH 2.7 ด้วยอัตรา 7.0 มิลลิโวลต์ต่อวินาที ในช่วงศักย์ไฟฟ้า -250.0 มิลลิโวลต์ OC ถึง 500 มิลลิโวลต์ ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส

### 3. ผลการทดลอง

#### 3.1 ผลการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค

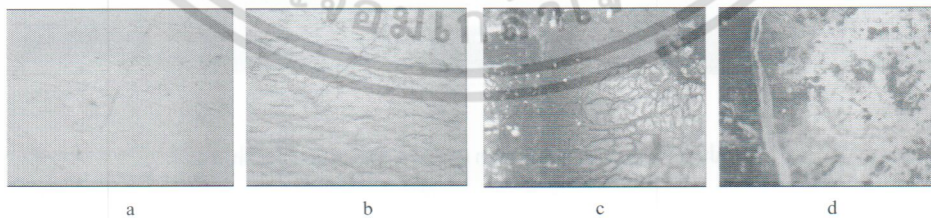
##### 3.1.1 ลักษณะและความหนาของชั้นเคลือบดีบุก



รูปที่ 3.1 ลักษณะชั้นเคลือบดีบุกบริเวณต่างๆ a แผ่นเหล็กเคลือบดีบุก (1000x) b กระป๋องเคลือบดีบุกช่วงลอน (1000x) c ช่วงรอยเชื่อมระหว่างรีบ (1000x) และ d ช่วงรอยเชื่อมระหว่างลอน (1000x)

ชั้นเคลือบดีบุกของกระป๋องเหล็กเคลือบดีบุกช่วงรีบและแผ่นเหล็กเคลือบดีบุก (รูปที่ 3.1a) มีลักษณะใกล้เคียงกันคือค่อนข้างเรียบสม่ำเสมอทั่วทั้งผิวหน้าและยึดแน่นอยู่กับชั้นของเหล็ก และมีความหนาและความเรียบสม่ำเสมอมากกว่าเมื่อเทียบกับกระป๋องเหล็กเคลือบดีบุกช่วงลอน (รูปที่ 3.1b) ส่วนชั้นเคลือบดีบุกบริเวณรอยเชื่อมแต่ละบริเวณไม่สม่ำเสมอ (รูปที่ 3.1c) และมีความหนา มากกว่าบริเวณอื่นแต่มีลักษณะพูนตัวสูงและมีบางจุดเป็นรูลึกจนถึงชั้นของเหล็ก (รูปที่ 3.1d)

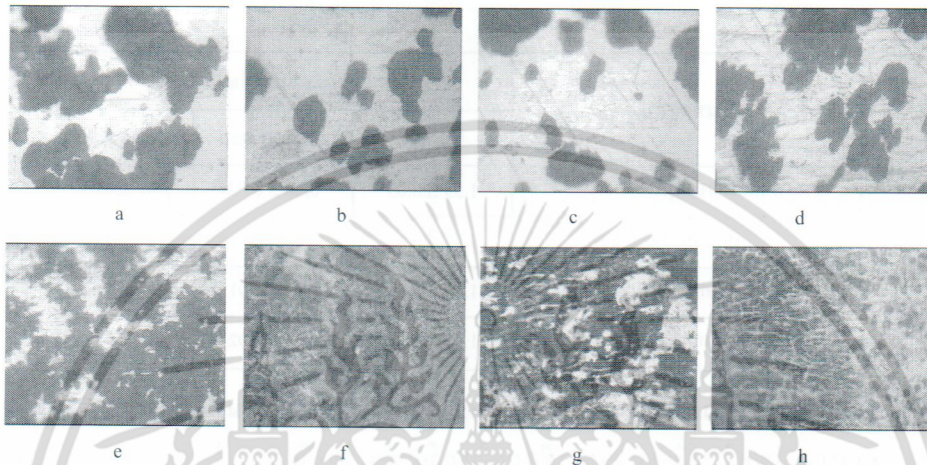
##### 3.1.2 ลักษณะพื้นผิวก่อนการทดสอบการกัดกร่อน



รูปที่ 3.2 ลักษณะพื้นผิวบริเวณต่างๆก่อนทดสอบการกัดกร่อน a แผ่นเหล็กเคลือบดีบุก (200x) b กระป๋องเคลือบดีบุก ช่วงยอลอน (200x) c ช่วงรอยเชื่อมระหว่างรีบ (500x) และ d ช่วงรอยเชื่อมระหว่างลอน (500x)

พื้นผิวของแผ่นเหล็กเคลือบดีบุก (รูปที่ 3.2a) และพื้นผิวกระป๋องเหล็กเคลือบดีบุกช่วงเรียบ จะมีลักษณะเหมือนกันคือมีพื้นเรียบแต่มีรอยขีดเล็ก ๆ จำนวนมากทั่วทั้งผิวหน้า ซึ่งต่างจากพื้นผิว บริเวณขดลอนที่มีลักษณะเป็นคลื่นจากการเสียรูปถาวรอย่างชัดเจน (รูปที่ 3.2b) ส่วนพื้นผิวบริเวณ รอยเชื่อมมีลักษณะเป็นรอยไหม้อย่างรุนแรงของชั้นเคลือบดีบุก (รูปที่ 3.2c และ d)

### 3.1.3 ลักษณะพื้นผิวหลังการทดสอบการกัดกร่อน



รูปที่ 3.3 a พื้นผิวแผ่นเหล็กเคลือบดีบุก (200x) b พื้นผิวกระป๋องเหล็กเคลือบดีบุกช่วงเรียบ (200x) c และ d พื้นผิวช่วงเรียบระหว่างลอนและพื้นผิวขดลอนที่ได้จากการทดสอบช่วงลอน (200x) e พื้นผิวช่วงขดลอน ที่ได้จากการทดสอบเฉพาะช่วงขดลอน (200x) f พื้นผิวช่วงรอยเชื่อมระหว่างเรียบ (500x) g และ h พื้นผิว ช่วงรอยเชื่อมระหว่างลอน (500x) หลังการทดสอบ  $E_{\text{corr}}$  vs Time และ Potentiodynamic polarization

พื้นผิวของแผ่นเหล็กเคลือบดีบุก (รูปที่ 3.3 a) และกระป๋องเหล็กเคลือบดีบุกช่วงเรียบ (รูปที่ 3.3b) หลังการทดสอบการกัดกร่อนพบว่า มีลักษณะการกัดกร่อนแบบเดียวกันคือเกิดการกัดกร่อนแบบเฉพาะที่กระจายทั่วทั้งผิวหน้า โดยมีขนาดและความรุนแรงแตกต่างกันไม่มากนัก แต่เมื่อทำการทดสอบบริเวณช่วงลอนพบว่าบริเวณขดลอน (รูปที่ 3.3d) ซึ่งได้รับผลกระทบจากการขึ้นรูปมากกว่าจะมีลักษณะการกัดกร่อนแบบเฉพาะที่รุนแรงกว่าบริเวณช่วงเรียบระหว่างลอน (รูปที่ 3.3c) และรุนแรงกว่าแผ่นเหล็กเคลือบดีบุกและกระป๋องเหล็กเคลือบดีบุกช่วงเรียบ ยิ่งกว่านั้นเมื่อทดสอบเฉพาะส่วนขดลอนซึ่งถูกขึ้นรูปมากที่สุดพบว่ามีกรกัดกร่อนรุนแรงที่สุด (รูปที่ 3.3e) ส่วนบริเวณที่ผ่านการขึ้นรูปร้อนเมื่อนำไปทดสอบพบว่าเกิดการกัดกร่อนแบบทั่วทั้งผิวหน้าอย่างรุนแรง (รูปที่ 3.3f) และปรากฏเป็นขนาดเล็กเรียวยาวที่บริเวณรอยเชื่อม (รูปที่ 3.3g และ h) ตลอดจนบริเวณข้างเคียงจากรอยเชื่อมประมาณ 1 เซนติเมตร มีลักษณะการกัดกร่อนแบบเฉพาะที่ชัดเจน (รูปที่ 3.3h)

### 3.2 ผลการทดลองทางเคมีไฟฟ้าด้วยเทคนิค Galvanostatic

ค่าความหนาของชั้นเคลือบดีบุกและชั้น โลหะผสมจากเทคนิค Galvanostatic เมื่อนำค่าระยะเวลาที่ใช้ในการละลายของชั้นเคลือบดีบุกและชั้นของโลหะผสมจากการทดสอบด้วยเทคนิค Galvanostatic มาคำนวณหาความหนาของชั้นดีบุกและโลหะผสม โดยเรียงลำดับตามขนาดของการจุ่มรูปจะได้ดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 แสดงค่าความหนาของชั้นเคลือบดีบุกและชั้น โลหะผสมจากบริเวณต่าง ๆ ดังนี้

ชั้นทดสอบ	ความหนาชั้นเคลือบ (ไมโครเมตร)		
	ชั้นดีบุก	ชั้นโลหะผสม	ชั้นรวม
a แผ่นเหล็กเคลือบดีบุก	1.33 ±0.03	0.28 ±0.02	1.61 ±0.03
b กระจ่างเหล็กเคลือบดีบุกช่วงเรียบ	1.32 ±0.03	0.29 ±0.01	1.61 ±0.03
c กระจ่างเหล็กเคลือบดีบุกช่วงลอน	1.34 ±0.02	0.27 ±0.01	1.60 ±0.02
d กระจ่างช่วงรอยเชื่อมระหว่างเรียบ	1.18 ±0.03	0.38 ±0.02	1.56 ±0.03

เมื่อพิจารณาตารางที่ 3.1 พบว่าค่าความหนาชั้นเคลือบดีบุกและชั้น โลหะผสมระหว่างเหล็กและดีบุกของแผ่นเหล็กเคลือบดีบุก กระจ่างเหล็กเคลือบดีบุกช่วงเรียบและช่วงลอนมีค่าใกล้เคียงกัน แต่เมื่อพิจารณาถึงความหนารวมของกระจ่างเหล็กเคลือบดีบุกช่วงลอนมีความหนาลดลงเล็กน้อย ส่วนกระจ่างเหล็กเคลือบดีบุกช่วงรอยเชื่อมระหว่างเรียบพบว่าความหนาของชั้นเคลือบดีบุกและความหนารวมลดลงมากที่สุด แต่มีความหนาของชั้น โลหะผสมเพิ่มขึ้น

### 3.3 ผลการทดลองทางเคมีไฟฟ้าด้วยเทคนิค $E_{corr}$ vs Time

ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน ( $E_{corr}$ ) จากเทคนิค  $E_{corr}$  vs Time เมื่อนำค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน ( $E_{corr}$ ) ของชั้นทดสอบที่ได้จากการทดสอบด้วยเทคนิค  $E_{corr}$  vs Time มาเรียงลำดับตามขนาดของการจุ่มรูปจะได้ดังตารางที่ 3.2

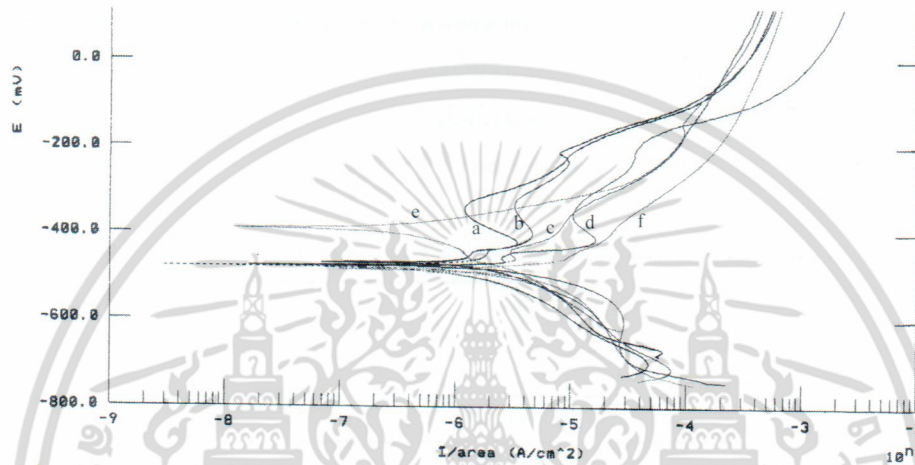
ตารางที่ 3.2 ค่าศักย์ไฟฟ้ากัดกร่อน  $E_{corr}$  ในบริเวณต่าง ๆ ดังนี้

ชั้นทดสอบ	ค่าศักย์ไฟฟ้ากัดกร่อน $E_{corr}$ (mV) / (SCE)
a แผ่นเหล็กเคลือบดีบุก	-474.00 ±1.0
b กระจ่างเหล็กเคลือบดีบุกช่วงเรียบ	-484.40 ±5.0
c กระจ่างเหล็กเคลือบดีบุกช่วงลอน	-486.00 ±4.0
d กระจ่างเหล็กเคลือบดีบุกช่วงขอลอน	-489.98 ±5.0
e กระจ่างช่วงรอยเชื่อมระหว่างลอน	-514.00 ±5.0

จากตารางที่ 3.2 ค่าศักย์ไฟฟ้ากักร่อนของแผ่นเหล็กเคลือบดีบุกมีค่าสูงที่สุดที่  $-474 \text{ mV}$  และเมื่อผ่านการขึ้นรูปลอนพบว่าค่าศักย์ไฟฟ้ากักร่อนของกระป๋องเหล็กเคลือบดีบุกช่วงเรียบและช่วงยอดลอนมีค่าลดลงอยู่ในช่วง  $-484.40 \text{ mV}$  ถึง  $-489.98 \text{ mV}$  ตามลำดับ และมีค่าลดลงอย่างมากเมื่อผ่านการขึ้นรูปด้วยการเชื่อมที่  $-514.00 \text{ mV}$

### 3.4 ผลการทดลองทางเคมีไฟฟ้าด้วยเทคนิค Potentiodynamic polarization

#### 3.4.1 กราฟผลการทดลองด้วยเทคนิค Potentiodynamic polarization



รูปที่ 3.4 กราฟการทดลองด้วยเทคนิค Potentiodynamic polarization a แผ่นเหล็กเคลือบดีบุก b กระป๋องเหล็กเคลือบดีบุกช่วงเรียบ c ช่วงลอน d ช่วงยอดลอน e ช่วงรอยเชื่อมระหว่างเรียบ และ f ช่วงรอยเชื่อมระหว่างลอน

จากรูปที่ 3.4 แผ่นเหล็กเคลือบดีบุกและกระป๋องเหล็กเคลือบดีบุกทั้งช่วงเรียบและช่วงยอดลอนมีลักษณะของการเกิดฟิล์มปกป้อง ( $\text{SnO}_2$ ) ชัดเจน ในขณะที่กระป๋องเหล็กเคลือบดีบุกช่วงรอยเชื่อมมีลักษณะกราฟของการเกิดฟิล์มปกป้องปรากฏเล็กน้อย แต่กระป๋องเหล็กเคลือบดีบุกช่วงรอยเชื่อมแทบไม่ปรากฏลักษณะกราฟของการเกิดฟิล์มปกป้องเลย และจากรูปนี้สามารถหาค่าต่างๆ ดังตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 ค่าต่างๆ จากการทดลองด้วยเทคนิค Potentiodynamic polarization ในบริเวณต่างๆ ดังนี้

ชั้นทดสอบตามรูปที่ 3.4	กระแสปกป้อง $i_p (\mu\text{A} / \text{cm}^2)$	ค่าศักย์ฟิล์มแตก $E_b (\text{mV}) / \text{SCE}$	กระแสฟิล์มแตก $i_b (\mu\text{A} / \text{cm}^2)$
a แผ่นเหล็กเคลือบดีบุก	$1.80 \pm 0.6$	$-218.00 \pm 4.0$	$11.71 \pm 2.0$
b กระป๋องเหล็กเคลือบดีบุกช่วงเรียบ	$4.20 \pm 0.8$	$-213.00 \pm 4.0$	$13.63 \pm 4.0$
c กระป๋องเหล็กเคลือบดีบุกช่วงลอน	$10.54 \pm 4.0$	$-151.60 \pm 24.0$	$87.98 \pm 26.0$
d กระป๋องเหล็กเคลือบดีบุกช่วงยอดลอน	$9.91 \pm 1.0$	$-204.60 \pm 14.0$	$36.07 \pm 6.0$
e กระป๋องช่วงรอยเชื่อมระหว่างเรียบ	$36.26 \pm 3.0$	-	-
f กระป๋องช่วงรอยเชื่อมระหว่างลอน	$28.02 \pm 3.0$	-	-

จากตารางที่ 3.3 ซึ่งเรียงลำดับชั้นทดสอบตามขนาดของการขึ้นรูปจากน้อยไปมาก คือ a ไป f สามารถนำไปหาค่าความแข็งแรงของฟิล์มปกป้องจากค่าศักย์ฟิล์มแตก (Eb) ค่าอัตราการกัดกร่อนขณะมีฟิล์มปกป้องจากค่ากระแสปกป้อง (ip หรือ  $i_{passive}$ ) และหาค่าอัตราการกัดกร่อนขณะฟิล์มแตกจากค่ากระแสฟิล์มแตก (ib) ดังนี้

3.4.2 ค่าศักย์ไฟฟ้าฟิล์มแตก Eb จากเทคนิค Potentiodynamic polarization เมื่อพิจารณาจากค่าศักย์ไฟฟ้าฟิล์มแตกจากตารางที่ 3.3 พบว่ากระป่องเหล็กเคลือบดีบุกช่วงลอนมีความแข็งแรงของฟิล์มปกป้องสูงสุด และแผ่นเหล็กเคลือบดีบุกมีความแข็งแรงของฟิล์มปกป้องน้อยที่สุด ส่วนกระป่องเหล็กเคลือบดีบุกช่วงเรียบและช่วงยอดลอนพบว่ามีความแข็งแรงของฟิล์มปกป้องใกล้เคียงกับแผ่นเหล็กเคลือบดีบุกโดยมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นเล็กน้อย

3.4.3 ค่าอัตราการกัดกร่อน (mpy) ขณะมีฟิล์มปกป้องค่ากระแสปกป้อง ip ( $i_{passive}$ ) จากตารางที่ 3.3 เมื่อนำมาคำนวณหาอัตราการกัดกร่อน (mpy) จะได้ดังตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 แสดงอัตราการกัดกร่อน (mpy) ขณะมีฟิล์มปกป้องในบริเวณต่างๆ ดังนี้

ชั้นทดสอบตามรูปที่ 3.4	อัตราการกัดกร่อน (mpy)
a) แผ่นเหล็กเคลือบดีบุก	$0.94 \pm 0.4$
b) กระป่องเหล็กเคลือบดีบุกช่วงเรียบ	$2.30 \pm 0.7$
c) กระป่องเหล็กเคลือบดีบุกช่วงลอน	$5.50 \pm 2.0$
d) กระป่องเหล็กเคลือบดีบุกช่วงยอดลอน	$5.20 \pm 0.5$
e) กระป่องช่วงรอยเชื่อมระหว่างเรียบ	$19.01 \pm 2.0$
g) กระป่องช่วงรอยเชื่อมระหว่างลอน	$14.69 \pm 1.2$

จากตารางที่ 3.4 พบว่าอัตราการกัดกร่อนแผ่นเหล็กเคลือบดีบุกมีค่าน้อยที่สุด และกระป่องเคลือบดีบุกช่วงรอยเชื่อมระหว่างเรียบมีค่ามากที่สุด ส่วนกระป่องเคลือบดีบุกช่วงยอดลอนและช่วงลอนซึ่งผ่านการขึ้นรูปเย็นมีอัตราการกัดกร่อนใกล้เคียงกัน โดยช่วงลอนมีค่ามากกว่าเล็กน้อย และกระป่องเคลือบดีบุกช่วงรอยเชื่อมซึ่งผ่านการขึ้นรูปร้อนมีอัตราการกัดกร่อนมากกว่าแผ่นเหล็กเคลือบดีบุกซึ่งไม่ผ่านการขึ้นรูปประมาณ 15 ถึง 19 เท่า และมากกว่ากระป่องเคลือบดีบุกช่วงที่ขึ้นรูปเย็นประมาณ 3 ถึง 4 เท่า ส่วนกระป่องเคลือบดีบุกช่วงยอดลอนและช่วงลอนมีอัตราการกัดกร่อนมากกว่าแผ่นเหล็กเคลือบดีบุกประมาณ 5 เท่า

3.4.4 ค่าอัตราการกัดกร่อน (mpy) ภายหลังจากฟิล์มแตกหาค่ากระแสไฟฟ้าฟิล์มแตก ib จากตารางที่ 3.3 เมื่อนำมาคำนวณหาอัตราการกัดกร่อน (mpy) จะได้ดังตารางที่ 3.5

ตารางที่ 3.5 อัตราการกัดกร่อน (mpy) หลังฟิล์มแตกในบริเวณต่างๆ ดังนี้

ขั้นตอนทดสอบตามรูปที่ 3.4	อัตราการกัดกร่อน (mpy)
a) แผ่นเหล็กเคลือบดีบุก	6.14 ± 1.2
b) ครอบป้องกันเหล็กเคลือบดีบุกช่วงเรียบ	7.14 ± 2.2
c) ครอบป้องกันเหล็กเคลือบดีบุกช่วงลอน	46.15 ± 14.5
d) ครอบป้องกันเหล็กเคลือบดีบุกช่วงขดลอน	18.91 ± 4.0

จากตารางที่ 3.5 พบว่าอัตราการกัดกร่อนแผ่นเหล็กเคลือบดีบุกมีค่าน้อยที่สุด และครอบป้องกันเหล็กเคลือบดีบุกช่วงลอนมีค่ามากที่สุด โดยครอบป้องกันเหล็กเคลือบดีบุกช่วงลอนมีอัตราการกัดกร่อนมากกว่าแผ่นเหล็กเคลือบดีบุกประมาณ 7.5 เท่า และมากกว่าครอบป้องกันเหล็กเคลือบดีบุกช่วงเรียบประมาณ 6.5 เท่า ส่วนครอบป้องกันเหล็กเคลือบดีบุกช่วงขดลอนมีอัตราการกัดกร่อนมากกว่าแผ่นเหล็กเคลือบดีบุกประมาณ 3 เท่า

#### 4. สรุปผลการทดลอง

##### 4.1 อิทธิพลการขึ้นรูปการป้องกันต่อโครงสร้างของแผ่นเหล็กเคลือบดีบุก

จากการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคพื้นผิวของแผ่นเหล็กเคลือบดีบุกก่อนและหลังขึ้นรูปขึ้น พบว่ามีรอยขีดข่วนเล็กๆ จำนวนมาก ส่วนภาคตัดขวางพบว่าแผ่นเหล็กเคลือบดีบุกมีชั้นของดีบุกและโลหะผสมเรียบและสม่ำเสมอมากกว่าบริเวณที่ผ่านการขึ้นรูปลอน ซึ่งมีลักษณะพื้นผิวเป็นคลื่นจากการเสียรูปถาวรชัดเจน สำหรับโครงสร้างหลังขึ้นรูปรีดอบบริเวณรอยเชื่อมพบว่ามีลักษณะพื้นผิวเป็นรอยไหม้ของดีบุกและมีลักษณะเกรนเล็กเรียวยาวจากการเย็นตัวอย่างรวดเร็วหลังการเชื่อม ส่วนภาคตัดขวางพบว่าชั้นของดีบุกและชั้นโลหะผสมมีความหนาไม่สม่ำเสมอและหนากว่าบริเวณอื่น แต่มีลักษณะพรุนตัวมีรูอากาศจำนวนมาก โดยบางรูลึกจนถึงชั้นของโลหะผสมและชั้นของเหล็ก

##### 4.2 อิทธิพลการขึ้นรูปการป้องกันต่อความหนาของชั้นดีบุกและโลหะผสม

เมื่อทำการทดสอบความหนาด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้าพบว่าความหนารวมของชั้นดีบุกและโลหะผสมก่อนและหลังขึ้นรูปลอนมีค่าใกล้เคียงกัน คืออยู่ระหว่าง 1.60 – 1.61 ไมโครเมตร โดยมีความหนาของชั้นดีบุกอยู่ระหว่าง 1.32 – 1.34 ไมโครเมตร และมีความหนาของชั้นโลหะผสมระหว่าง 0.27 – 0.29 ไมโครเมตร ซึ่งได้ตามมาตรฐาน มอก.16-2536 ที่กำหนดความหนาของดีบุกไว้ที่ 1.26 – 1.40 ไมโครเมตร ส่วนบริเวณที่ขึ้นรูปรีดอบพบว่าชั้นความหนารวมและชั้นดีบุกลดลงอย่างชัดเจนมีค่า 1.56 และ 1.18 ไมโครเมตร ตามลำดับ และมีค่าความหนาของชั้นโลหะผสมระหว่างเหล็กและดีบุกมีค่าเพิ่มมากขึ้น มีความหนา 0.38 ไมโครเมตร ซึ่งไม่เป็นไปตามมาตรฐาน มอก.16-2536 โดยบริเวณนี้จะครอบคลุมจากระยะรอยเชื่อมออกไปประมาณ 1 เซนติเมตร

#### 4.3 อิทธิพลการขึ้นรูปประป่องต่อพฤติกรรมการกัดกร่อนของแผ่นเหล็กเคลือบดีบุก

พิจารณาความต้านทานการกัดกร่อนแบบทั่วผิวหน้าของแผ่นเหล็กเคลือบดีบุกจากค่าศักย์ไฟฟ้าที่กัดกร่อนพบว่า การขึ้นรูปประป่องส่งผลให้ความต้านทานการกัดกร่อนลดลง โดยรอยเชื่อมบริเวณลอนมีความต้านทานการกัดกร่อนต่ำสุดที่  $-514.00$  mV จากนั้นเป็นส่วนยอดลอนที่  $-489.98$  mV ส่วนลอนที่  $-486.00$  mV ส่วนเรียบที่  $-484.40$  mV และแผ่นเหล็กเคลือบดีบุกซึ่งไม่ผ่านการขึ้นรูปมีความต้านทานการกัดกร่อนสูงสุดที่  $-474.00$  mV ตามลำดับ เมื่อพิจารณาความต้านทานการกัดกร่อนแบบเฉพาะที่จากค่าศักย์ไฟฟ้าฟิล์มแตกพบว่าแผ่นเหล็กเคลือบดีบุกมีความต้านทานการกัดกร่อนแบบเฉพาะที่น้อยที่สุดอยู่ที่  $-218.00$  mV และเมื่อขึ้นรูปขึ้นพบว่าแผ่นเหล็กเคลือบดีบุกมีความต้านทานการกัดกร่อนแบบเฉพาะที่เพิ่มขึ้น โดยส่วนเรียบมีความต้านทานมากกว่าส่วนยอดลอนและส่วนลอน ซึ่งมีค่าอยู่ที่  $-213.00$ ,  $-204.60$  และ  $-151.60$  mV ตามลำดับ ส่วนแผ่นเหล็กเคลือบดีบุกบริเวณที่ผ่านการขึ้นรูปร้อนโดยการเชื่อมพบว่าฟิล์มปกป้องเกิดขึ้นน้อยมากจึงเกิดการกัดกร่อนแบบทั่วผิวหน้า

ส่วนอัตราการกัดกร่อนขณะมีฟิล์มปกป้องพบว่าแผ่นเหล็กเคลือบดีบุกซึ่งไม่ผ่านการขึ้นรูปมีค่าต่ำสุดคือ  $0.94$  mpy และเมื่อขึ้นรูปขึ้นพบว่าส่วนเรียบ ส่วนยอดลอน และส่วนลอนมีอัตราการกัดกร่อนเพิ่มขึ้นเป็น  $2.30$ ,  $5.20$  และ  $5.50$  mpy ตามลำดับ ส่วนบริเวณที่ผ่านการขึ้นรูปร้อนพบว่าส่วนรอยเชื่อมบริเวณลอนและเรียบมีอัตราการกัดกร่อนสูงสุดและสูงกว่าบริเวณอื่นอย่างมากที่  $14.69$  และ  $19.01$  mpy ตามลำดับ และอัตราการกัดกร่อนขณะไม่มีฟิล์มปกป้องพบว่ามีค่าสูงกว่าขณะที่มีฟิล์มปกป้องหลายเท่า โดยแผ่นเหล็กเคลือบดีบุกก่อนขึ้นรูปมีอัตราการกัดกร่อน  $6.14$  mpy เมื่อขึ้นรูปขึ้นพบว่าส่วนเรียบ ส่วนยอดลอนและส่วนลอนมีค่า  $7.14$ ,  $18.91$  และ  $46.15$  mpy ตามลำดับ

เมื่อพิจารณารูปแบบและความรุนแรงของการกัดกร่อนพบว่าแผ่นเหล็กเคลือบดีบุกก่อนขึ้นรูปมีพื้นผิวหลังทดสอบเกิดการกัดกร่อนแบบเฉพาะที่กระจายทั่วทั้งบริเวณ และบางจุดลึกถึงชั้นโลหะผสมและชั้นของเหล็ก ส่วนแผ่นเหล็กเคลือบดีบุกหลังขึ้นรูปขึ้นส่วนลอนพบว่าพื้นผิวมีลักษณะของการกัดกร่อนแบบเฉพาะที่รุนแรงกว่าบริเวณเรียบระหว่างลอนและรุนแรงกว่าแผ่นเหล็กเคลือบดีบุก สำหรับบริเวณยอดลอนซึ่งถูกขึ้นรูปขึ้นมากที่สุดพบว่ามีลักษณะของการกัดกร่อนที่รุนแรงกว่าทุกบริเวณที่ผ่านการขึ้นรูปขึ้น ส่วนโครงสร้างหลังขึ้นรูปร้อนพบว่ารอยเชื่อมบริเวณส่วนเรียบและส่วนลอนเกิดการกัดกร่อนอย่างรุนแรงเป็นบริเวณกว้างตลอดจนบริเวณข้างเคียง โดยรอยเชื่อมมีลักษณะของการกัดกร่อนแบบทั่วผิวหน้า

#### 4.4 วิจารณ์ผลการทดลอง

จากการตรวจสอบโครงสร้างพบว่า การขึ้นรูปลอนกระป่องมีผลต่อโครงสร้างบริเวณยอดลอนค่อนข้างมาก สังเกตได้จากลักษณะคลื่นของการเสียรูปถาวรที่เกิดขึ้น แต่ส่งผลไม่มากนักต่อความหนาของชั้นดีบุกและโลหะผสม เพราะแผ่นเหล็กที่นำมาขึ้นรูปค่อนข้างบาง เมื่อตัดลอนจึงส่งผลต่อการดัดขึ้นของดีบุกและโลหะผสมน้อยมาก เมื่อพิจารณาพฤติกรรมการกัดกร่อนพบว่าแผ่นเหล็กเคลือบดีบุกซึ่งไม่ผ่านการขึ้นรูปมีความต้านทานการกัดกร่อนมากที่สุด เนื่องจาก

โครงสร้างของดินบุกยังสมบูรณ์ แต่เมื่อผ่านการขึ้นรูปขึ้นทำให้โครงสร้างของดินบุกเสียรูปและมีความ  
เค้นตึงค้ำจึงส่งผลทำให้ห่วงโซ่การเกิดปฏิกิริยาเคมีเพิ่มขึ้น ทำให้บริเวณส่วนเรียบ ส่วนลอนและ  
ยอดลอนมีความต้านทานการกัดกร่อนลดลงตามลำดับ ส่วนอัตราการกัดกร่อนและความรุนแรงใน  
การกัดกร่อนพบว่ามีความโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณการขึ้นรูปขึ้น

ส่วนการขึ้นรูปร้อนด้วยการเชื่อมจะมีผลกระทบต่อโครงสร้างของชั้นดินบุกและโลหะผสม  
อย่างมาก เนื่องจากขณะที่ทำการเชื่อมจะเกิดการหลอมของชั้นเคลือบดินบุก ทำให้ชั้นของดินบุกบางลง  
และเกิดเป็นโลหะผสมมากขึ้น (ตารางที่ 3.1) จนชั้นเคลือบดินบุกบางช่วงหายไปหรือมีความหนาไม่  
สม่ำเสมอ (รูปที่ 3.1d) ตลอดจนมีขนาดเกรนที่เล็กเรียวยาว (รูปที่ 3.3g และ h) อันเนื่องจากการเย็น  
ตัวอย่างรวดเร็วหลังการเชื่อม ซึ่งส่งผลกระทบต่อพฤติกรรมกรรมการกัดกร่อน ทำให้มีความ  
ต้านทานการกัดกร่อนต่ำที่สุดและมีอัตรากัดกร่อนสูงสุด ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากการที่ชั้นเคลือบดินบุกที่  
เสียหายอย่างมากทำให้มีฟิล์มปกป้องเกิดขึ้นน้อยมาก จึงเกิดการกัดกร่อนแบบทั่วผิวหน้าอย่างรุนแรง  
ส่วนบริเวณที่เป็นรอยเชื่อมระหว่างเรียบซึ่งได้รับอิทธิพลจากการขึ้นรูปร้อนเพียงอย่างเดียวแต่มีอัตรา  
การกัดกร่อนสูงกว่าบริเวณรอยเชื่อมระหว่างลอนซึ่งถูกขึ้นขึ้นด้วย ทั้งนี้อาจเนื่องจากบริเวณส่วน  
ลอนจะมียอดลอนเป็นแอโนดด้วย ทำให้พื้นที่คาโทดลดลงอัตราการกัดกร่อนจึงต่ำกว่า

#### 4.5 ข้อเสนอแนะจากการทดลอง

4.5.1 การขึ้นรูปแผ่นเหล็กเคลือบดินบุกมีผลต่อการกัดกร่อนอย่างชัดเจนเมื่อเทียบกับบริเวณที่  
ไม่ผ่านการขึ้นรูป ดังนั้นควรหลีกเลี่ยงหรือออกแบบกระป๋องให้มีการขึ้นรูปน้อยที่สุด

4.5.2 การขึ้นรูปกระป๋องอาจทำให้เกิดรอยขีดข่วนจำนวนมาก ซึ่งเป็นการขึ้นรูปขึ้นกับชั้นของ  
ดินบุกและเป็นจุดเริ่มต้นของการกัดกร่อน ดังนั้นจึงควรระมัดระวังและป้องกันการเกิดรอยขีดข่วนนี้

4.5.3 การเชื่อมตะเข็บข้างของกระป๋องด้วยไฟฟ้าเป็นเหตุทำให้เกิดการกัดกร่อนอย่างรุนแรง  
ดังนั้นจึงควรหาวิธีลดฟองอากาศและความไม่สม่ำเสมอของชั้นเคลือบดินบุกจากการเชื่อม

4.5.4 อิทธิพลจากการขึ้นรูปกระป๋องต่อพฤติกรรมกรรมการกัดกร่อนนี้อาจแก้ไขได้ด้วย  
กระบวนการทางความร้อนซึ่งเป็นการตกผลึกใหม่ของชั้นเคลือบดินบุก จะทำให้ชั้นเคลือบดินบุกกลับคืน  
สู่สภาพเดิมแบบเดียวกันกับแผ่นเหล็กเคลือบดินบุกก่อนขึ้นรูป ซึ่งจะสามารถลดการกัดกร่อนได้อย่างมาก

ท้ายนี้หากผู้ผลิตสามารถระมัดระวัง หลีกเลี่ยงและป้องกันตามที่ได้เสนอไว้ในข้อเสนอแนะ  
ข้างต้น ก็จะสามารถลดอัตราการกัดกร่อน ยืดอายุของกระป๋อง ลดปริมาณโลหะหนักในอาหาร และ  
เพิ่มระยะเวลาการวางจำหน่าย ตลอดจนลดความเสียหายทางเศรษฐกิจของประเทศได้

#### กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณภาควิชาเทคโนโลยีวัสดุ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยรามคำแหงที่  
สนับสนุนการวิจัยครั้งนี้ ขอขอบคุณบริษัทแผ่นเหล็กวิลาศไทย จำกัด ที่อนุเคราะห์แผ่นเหล็กเคลือบ  
ดินบุก และบริษัทรอยแอลแคน อินดัสทรี จำกัด ที่ให้การอนุเคราะห์กระป๋องเหล็กเคลือบดินบุก

## เอกสารอ้างอิง

- [1] จิตต์ประกอบ สมชาย. 2529. กรรมวิธีการผลิตและคุณสมบัติของแผ่นเล็กเคลือบดีบุกและแผ่นเหล็กทินฟรี. ในรายงานการสัมมนาเรื่องภาชนะโลหะเพื่อบรรจุภัณฑ์. ศูนย์การบรรจุหีบห่อไทย สถาบันวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย.
- [2] Footitt, R.J. and Lewis, A.S. 1995. The Canning of Fish and Meat. Chapman & Hall, London.
- [3] Marcelo, J.L. Gines., Gonzalo, J. Benitez., Walter Egli., Zubimend, J.L. and Teresa Pérez. 2003. Formation of an Fe-Sn Intermetallic Layer During the Reflow Process After Tin Plating. Plating & Surface Finishing, Retrieved 3 September 2006, Available at: <http://www.fudetec.com.ar/preprint/PaperAESFFinal.pdf>. [Accessed 2008]
- [4] นครินทร์ ศรีสุวรรณ และสุมิสา จินดาสุวรรณ. 2542. พฤติกรรมการกัดกร่อนของกระป๋องเหล็กเคลือบดีบุกที่สัมผัสกับน้ำเชื่อมสับปะรด. โครงการงานพิเศษวิทยาศาสตร์บัณฑิต. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ คณะวิทยาศาสตร์ประยุกต์ ภาควิชาเคมีอุตสาหกรรม.
- [5] สุัญญา มะเหม็ง. 2544. พฤติกรรมเคมีไฟฟ้าการกัดกร่อนของกระป๋องเหล็กเคลือบดีบุกและแลคเกอร์ในน้ำหวานว่านหางจระเข้. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ภาควิชาเคมีอุตสาหกรรม สาขาวิชาเคมีอุตสาหกรรม.
- [6] ชิดดวง พลเลิศ และสุมาลี ทังพิทยกุล. 2540. เอกสารผลงานที่เสนอให้ประเมินเพื่อแต่งตั้งให้ดำรงตำแหน่งนักวิทยาศาสตร์ 7ว.. เรื่องที่ 2 การละลายของโลหะหนักในผลิตภัณฑ์อาหารกระป๋อง. กรมวิทยาศาสตร์บริการ กองวิทยาศาสตร์ชีวภาพ. ข้อมูลข่าวสารราชการกรมวิทยาศาสตร์บริการตาม พ.ร.บ.
- [7] ศิริลักษณ์ นิวิฐจรยงศ์. 2545. การกัดกร่อนและการเลือกใช้ชีวิต. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือภาควิชาเคมีอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์ประยุกต์.
- [8] สุมาลี ทังพิทยกุล. 2540. เรื่องที่ 1 การพัฒนาวิธีวิเคราะห์ปริมาณดีบุกที่เคลือบบนแผ่นเหล็กเคลือบดีบุก. เอกสารผลงานที่เสนอให้ประเมินเพื่อแต่งตั้งให้ดำรงตำแหน่งนักวิทยาศาสตร์ 7ว.. กระทรวงวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม กรมวิทยาศาสตร์บริการ กองวิทยาศาสตร์ชีวภาพ.
- [9] สุมาลี ทังพิทยกุล และสุนทร เป็รื่องการ. 2540. เรื่องที่ 3 การศึกษาเรื่องการเปลี่ยนแปลงปริมาณโลหะและการเสื่อมสภาพของผลิตภัณฑ์อาหารกระป๋อง. เอกสารผลงานที่เสนอให้ประเมินเพื่อแต่งตั้งให้ดำรงตำแหน่งนักวิทยาศาสตร์ 7ว.. กระทรวงวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม กรมวิทยาศาสตร์บริการ.
- [10] Turner, T.A. 2001. Canmaking for Can Fillers. Consultant in Packaging Technology Oxford, Sheffield, UK.