

## บทที่ 2

### ทฤษฎี

#### 2.1 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับพลาสติกและพอลิเมอร์

##### 2.1.1 ความหมายและประเภทของพลาสติกและพอลิเมอร์

#### พลาสติก (plastic)

เป็นคำที่ใช้เรียกวัสดุที่มีสภาพคงรูปในสถานะของแข็งหลังจากกระบวนการขึ้นรูปเป็นชิ้นงานที่ต้องการ พลาสติกประกอบขึ้นจากโมเลกุลใหญ่จำนวนมากที่เรียกว่า พอลิเมอร์

#### พอลิเมอร์ (polymer)

คือ สารโมเลกุลใหญ่ซึ่งเกิดจากสารโมเลกุลหน่วยเล็กที่มีโครงสร้างซ้ำกัน เรียกว่า โมโนเมอร์ (monomer) ต่อกันเป็นสายโซ่ยาว พอลิเมอร์เกิดจากปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชัน (polymerization) โดยโมโนเมอร์ที่ประกอบเป็นสายโซ่สามารถเป็นโมโนเมอร์ชนิดเดียวกันหรือโมโนเมอร์ต่างชนิดกันก็ได้ หากจำแนกพอลิเมอร์ตามลักษณะของโมโนเมอร์สามารถจำแนกได้เป็น 3 กลุ่มคือ

(ก) โฮโมพอลิเมอร์ (homopolymer) คือพอลิเมอร์ที่สายโซ่โมเลกุลประกอบด้วยโมโนเมอร์เพียงชนิดเดียว เช่น พอลิเอทิลีน (polyethylene)

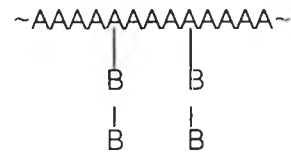
(ข) โคพอลิเมอร์ (copolymer) คือพอลิเมอร์ที่สายโซ่โมเลกุลประกอบด้วยโมโนเมอร์ตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไป สามารถแบ่งตามลักษณะการเรียงตัวของโมโนเมอร์เป็น 4 ชนิดคือ

1. โคพอลิเมอร์แบบสุ่ม (random copolymer) คือโคพอลิเมอร์ชนิดที่มีการกระจายของโมโนเมอร์ 2 ชนิดในสายโซ่โมเลกุลเป็นแบบสุ่ม ไม่เป็นระบบ เช่น ~AABBBABA~

2. โคพอลิเมอร์แบบสลับ (alternating copolymer) คือโคพอลิเมอร์ที่มีการจัดเรียงตัวของโมโนเมอร์ในสายโซ่โมเลกุลที่มีรูปแบบสลับกันอย่างมีระเบียบสม่ำเสมอ เช่น ~ABABABABAB~

3. โคพอลิเมอร์แบบบล็อก (block copolymer) คือโคพอลิเมอร์ที่มีการกระจายตัวของโมโนเมอร์แต่ละชนิดในสายโซ่โมเลกุลเป็นแบบแถบหรือแบบกลุ่ม เช่น ~AAABBBAAABBB~

4. โคพอลิเมอร์แบบกราฟท์ (graft copolymers) คือโคพอลิเมอร์ที่มีการกระจายตัวของแถบหรือกลุ่มของโมโนเมอร์ชนิดหนึ่งเกาะอยู่บนสายโซ่โมเลกุลหลักของโมโนเมอร์อีกชนิดหนึ่งที่เรียกว่า backbone ในลักษณะที่เป็นเหมือนกิ่งก้านหรือสาขา บางครั้งเรียกโคพอลิเมอร์แบบนี้ว่า branched block copolymer เช่น

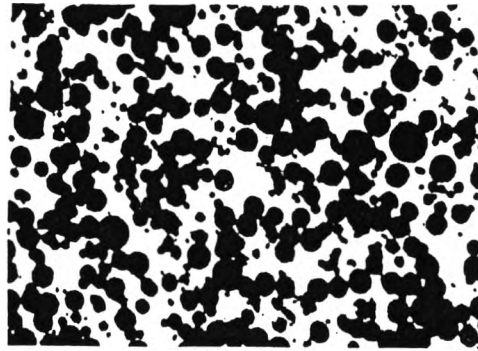


(ค) เทอร์พอลิเมอร์ (terpolymer) คือพอลิเมอร์ซึ่งในสายโซ่โมเลกุลประกอบด้วยโมโนเมอร์ 3 ชนิด เช่น acrylonitrile-butadiene-styrene (ABS)

พอลิเมอร์ถูกนำมาใช้ทดแทนวัสดุอื่นในการผลิตชิ้นงานต่าง ๆ เพราะพอลิเมอร์สามารถผลิตเป็นชิ้นงานที่มีรูปร่างซับซ้อนได้ มีความทนทานต่อการกัดกร่อนและสารเคมี เป็นฉนวนไฟฟ้า มีค่าความแข็งแรง (strength) และค่าโมดูลัส (modulus) ต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนักหรือปริมาตรในระดับที่ยอมรับได้ แต่พอลิเมอร์มีข้อด้อยบางประการได้แก่ มีค่าความแข็งแรงและความแข็งเกร็ง (stiffness) ต่ำ สามารถใช้งานได้ในช่วงอุณหภูมิที่จำกัด และคุณสมบัติเปลี่ยนแปลงกับระยะเวลาที่ใช้งาน [8]

ต้นฉบับ หน้าขาดหาย

สัดส่วนขององค์ประกอบโมโนเมอร์ทั้งสามชนิดนี้สามารถปรับเปลี่ยนได้หลากหลายเช่น การเปลี่ยนแปลงมวลโมเลกุล เปอร์เซ็นต์การ grafting และอื่น ๆ เพื่อให้ได้พอลิเมอร์ที่มีคุณสมบัติใกล้เคียงกับวัตถุประสงค์การใช้งาน และ morphology สำหรับโครงสร้างทางกายภาพของพอลิเมอร์เอบีเอสที่ได้จากรูปถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope) พบว่ามีอนุภาคของ polybutadiene กระจายตัวอยู่ในเฟส SAN ดังรูปที่ 2.2 [4]



particles of butadiene (rubber) in ABS.  
MagX10,000.

รูปที่ 2.2 ลักษณะการกระจายตัวของอนุภาค polybutadiene ในเฟส SAN [4]

พอลิเมอร์เอบีเอสยังคงได้รับการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง เพื่อให้มีคุณสมบัติที่เหมาะสมต่อการใช้งาน โดยการนำพอลิเมอร์เอบีเอสผสมเข้ากับพอลิเมอร์ชนิดอื่นเพื่อให้ได้คุณสมบัติพิเศษเพิ่มขึ้น ดังนั้นพอลิเมอร์เอบีเอสจัดเป็นทางเลือกหนึ่งของการเลือกใช้ผลิตภัณฑ์จากพอลิเมอร์

### 2.1.3 สมบัติของพลาสติกเอบีเอส

พอลิเมอร์เอบีเอสแบ่งเป็นหลายเกรด แต่ละเกรดมีคุณสมบัติที่แตกต่างกันไป เกรดของพอลิเมอร์เอบีเอสขึ้นกับ สัดส่วนองค์ประกอบของโมโนเมอร์ น้ำหนักโมเลกุล การกระจายของน้ำหนักโมเลกุล เปอร์เซ็นต์การ grafting (โดยนำ acrylonitrile และ styrene มาพอลิเมอร์ไว้ใน polybutadiene latex) โครงสร้างการ grafting และอื่น ๆ ซึ่งคุณสมบัติของพอลิเมอร์เอบีเอสแต่ละเกรดจะขึ้นกับการควบคุมรายละเอียดเหล่านี้ ตารางที่ 2.1 จะแสดงคุณสมบัติของพอลิเมอร์เอบีเอสเกรดต่าง ๆ [21]

สำหรับความต้านทานต่อสารเคมีนั้นเป็นผลจากส่วนของโมโนเมอร์ acrylonitrile ซึ่งลักษณะตัวของหมู่นไไตรล์ (nitrile group) นั้น จะลดการเกิดปฏิกิริยาของพอลิเมอร์กับตัวทำละลายพวกไฮโดรคาร์บอน ดังนั้นพลาสติกเอบีเอสจึงต้านทานต่อการเกิดปฏิกิริยากับแร่ธาตุ น้ำมันพืช แวกซ์ และมีความทนต่อพวกสารอินทรีย์ รวมถึงสารละลายเบสเจือจาง ความทนของพอลิเมอร์เอบีเอสต่อสารเคมีภายใต้ความเค้นแสดงดังตารางที่ 2.2 [21] แต่การมีพันธะไม่อิ่มตัวของ polybutadiene นั้น ทำให้พอลิเมอร์มีความไวต่อการเกิดปฏิกิริยาต่าง ๆ เช่น ออกซิเดชัน ฮาโลจีเนชัน ซัลโฟเนชัน และอื่นๆ

นอกเหนือจากพลาสติกเอบีเอสแล้ว ยังมีพลาสติกอีกหลายชนิดที่สามารถทำการชุบเคลือบผิวได้เช่น polyphenylene oxide, polypropylene และอื่น ๆ [11,13,17] แต่เนื่องจากพลาสติกเอบีเอสมีความเหมาะสมในงานชุบเคลือบผิว (เพราะเป็นพลาสติกที่ง่ายต่อการชุบเคลือบผิว ให้ความตึงเครียดสูง และมีความต้านทานต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ) ผลิตภัณฑ์ที่ได้เหมาะสมแก่การนำไปใช้งานได้หลายแบบ และมีข้อได้เปรียบด้านค่าใช้จ่ายโดยรวมในการผลิตมากกว่าพลาสติกตัวอื่น ๆ [15] จึงทำให้พลาสติกเอบีเอสเป็นที่นิยมในงานชุบเคลือบผิว

ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติของพอลิเมอร์เอบีเอสเกรดต่าง ๆ [21]

Properties	ASTM method	Units	Low impact	Medium impact	High impact	Heat resistant	Flame retardant	Plating	Clear	ABS-PVC	ABS-PC
Izod impact	D 256	J/m	105-215	215-375	375-440	120-320	185-280	265-375	134	340-695	370-560
Tensile strength	D638	MPa	41-52	41-47	33-44	41-52	40-50	38-44	43	30-41	45-60
Tensile elongation	D638	%	5-30	15-50	15-70	5-20	5-25	10-30	20-35	25-100	25-80
Tensile modulus	D638	GPa	2.2-2.6	2.1-2.4	1.7-2.1	2.1-2.6	2.1-2.5	2.3-2.6	2.3	2.1-2.3	2.4-2.6
Flexural yield strength	D790	MPa	68-87	68-80	55-68	68-90	69-86	69-80	72	54-73	79-90
Flexural modulus	D790	GPa	2.3-2.6	2.2-2.5	1.8-2.2	2.1-2.8	2.3-2.8	2.3-2.7	2.4	2.1-2.3	2.2-2.6
Rockwell hardness	D785	R	105-110	95-105	88-100	100-112	97-111	103-110	103	95-100	111-120
Heat deflection temp at 1820 Kpa	D648	°C	94-100	96-100	98-104	105-121	90-107	95-100	88	70-90	114-121
at 455 Kpa	D648	°C	100-108	102-104	103-108	108-127	96-111	99-104	92	77-96	117-124
Coefficient of thermal expansion	D696	$\times 10^{-5}$ cm/cm/°C	7.0-8.8	7.8-8.8	9.5-11.0	6.4-9.3	7.0-8.8	6.5-7.0	8.6	7.6-8.5	6.2-7.4
Sp.gr.	D792		1.05-1.07	1.04-1.05	1.02-1.04	1.04-1.06	1.20-1.22	1.04-1.06	1.07	1.16-1.20	1.07-1.12

ตารางที่ 2.2 ความทนต่อสารเคมีภายใต้ความเค้นของพอลิเมอร์เอบีเอส [21]

Medium	Rate <sup>a</sup>	Medium	Rate <sup>a</sup>
Acetic acid, 50 %	1	Ethyl alcohol, 50 %	3
Glycerol	1	2-propanol, 50 %	3
Corn syrup	1	Kerosene	3
Hydrochloric acid, 25 %	1	Propylene glycol	3
Potassium chloride, 25 %	1	Acetone	4
Sodium hydroxide, 2 %	1	Chlorobenzene	4
Carnauba wax	2	Chloroform	4
Hexane	2	Ethyl acetate	4
Nitric acid, 25 %	2	Sulfur dioxide	4
Sulfuric acid, 25%	2	Toluene	4

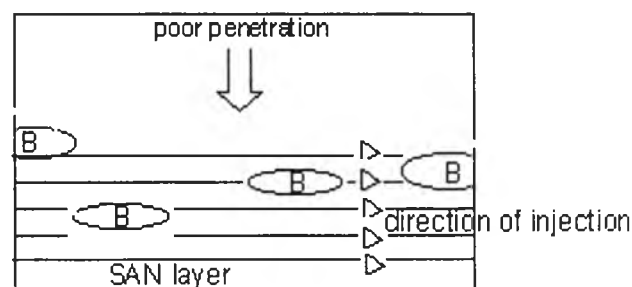
<sup>a</sup> อัตราความทนต่อสารเคมีซึ่งเป็นผลสะท้อนมาจากการทดสอบโดยปล่อยพอลิเมอร์ในสภาพแวดล้อมที่ทดสอบอย่างต่อเนื่องเช่นเป็นเวลา 7 วัน ที่อุณหภูมิ 23 องศาเซลเซียส ข้อมูลเหล่านี้แสดงถึงพฤติกรรมของพอลิเมอร์เอบีเอสเกรดทั่วไป ซึ่งสัญลักษณ์ 1 = ดีเยี่ยม (excellent) (คือไม่เกิดปฏิกิริยาหรือเกิดปฏิกิริยาน้อยมาก โดยความเค้นที่จุดวิกฤติไม่เกิน 21 เมกะปาสคาล (MPa) (หรือ 3000 psi)) 2 = ดี (good) (คือเกิดปฏิกิริยาระดับหนึ่ง โดยความเค้นที่จุดวิกฤติมีค่าระหว่าง 14 – 21 เมกะปาสคาล (MPa) (หรือ 2000 – 3000 psi)) 3 = ปานกลาง (fair) (สามารถเกิดปฏิกิริยาระดับปานกลางถึงมาก โดยความเค้นที่จุดวิกฤติมีค่าระหว่าง 7 – 14 เมกะปาสคาล (MPa) (1000 – 2000 psi)) และ 4 = แย่ (poor) (สามารถเกิดปฏิกิริยาได้อย่างมาก โดยความเค้นที่จุดวิกฤติน้อยกว่า 7 เมกะปาสคาล (MPa) (1000 psi))

2.1.4 ผลของการขึ้นรูปด้วยวิธีการฉีดขึ้นรูป (injection moulding) ต่อความตึงเครียดระหว่างชั้นเคลือบโลหะและพลาสติกเอบีเอส [40,29]

พอลิเมอร์เอบีเอสนิยมขึ้นรูปด้วยวิธีฉีดขึ้นรูป (injection moulding) เช่นเดียวกับพลาสติกทั่วไป หลังจากที่พอลิเมอร์เอบีเอสหลอมเหลวแล้วจะถูกอัดฉีดเข้าไปในแม่แบบที่เย็น ทำให้พอลิเมอร์หลอมเหลวเกิดเย็นตัวอย่างรวดเร็วที่บริเวณผิวแม่แบบ ทำให้ได้รับความเค้นซึ่งจะส่งผลให้เกิดความเครียดที่สูงบนผิวของชิ้นงานพลาสติกที่ฉีดขึ้นรูป โดยเกิดการเรียงตัวของสายโซ่พอลิเมอร์ไปในทิศทางเดียวกัน นั่นคืออนุภาคของบิวทอะไดอินและเฟส SAN เกิดการยึดตัวและเรียงตัวไปในทิศทางการฉีดพลาสติกเข้าสู่แม่แบบดังรูปที่ 2.3 ซึ่งการเกิด orientation จะเกิดขึ้นเพียงชั้นบาง ๆ บริเวณผิวของชิ้นงานพลาสติกเท่านั้น

ความตึงเครียดระหว่างชั้นเคลือบโลหะและพลาสติกเอบีเอสที่ขึ้นรูปด้วยวิธีฉีดขึ้นรูปลดลงกว่าการขึ้นรูปพลาสติกเอบีเอสจากวิธีอื่น การลดลงนี้คาดว่าเป็นผลจากการจัดเรียงตัวของพอลิเมอร์ในทิศทางเดียวกันซึ่งสามารถอธิบายได้ดังนี้

(ก) การเกิด orientation ในเฟส SAN ทำให้บริเวณผิวพลาสติกมีความต้านทานต่อสารเคมีที่จะเข้าทำปฏิกิริยา เมื่อสารกัดผิวเข้าทำปฏิกิริยาได้น้อยลง รูปทรงที่เกิดขึ้นจึงลดลง

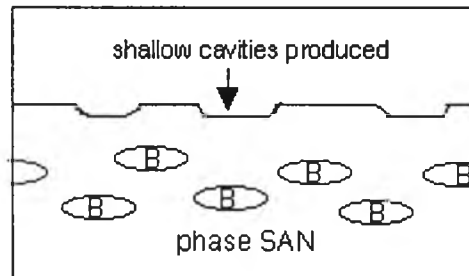


B = อนุภาคบิวทอะไดอิน

รูปที่ 2.3 การเรียงตัวของเฟส SAN ในทิศทางการฉีดพอลิเมอร์เข้าสู่แม่แบบ [40]



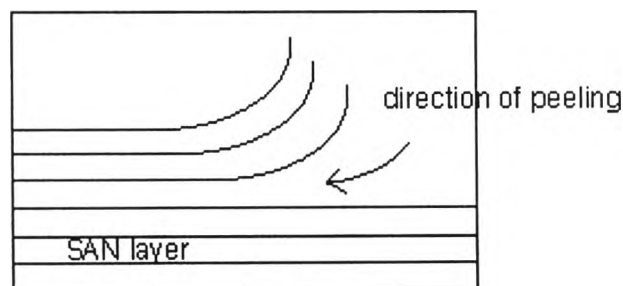
(ข) รูพรุนที่เกิดจากการกำจัดอนุภาคบิวทะไดอินมีลักษณะตื้นและยาวกว่าปกติ จึงทำให้การยึดเกาะทางกลในลักษณะ interlock ระหว่างชั้นเคลือบกับผิวพลาสติกเป็นได้ไม่ดีเท่าที่ควร



B = อนุภาคบิวทะไดอิน

รูปที่ 2.4 อนุภาคบิวทะไดอินเกิดการยึดตัวตามทิศทางการฉีดพอลิเมอร์เข้าสู่แม่แบบ [40]

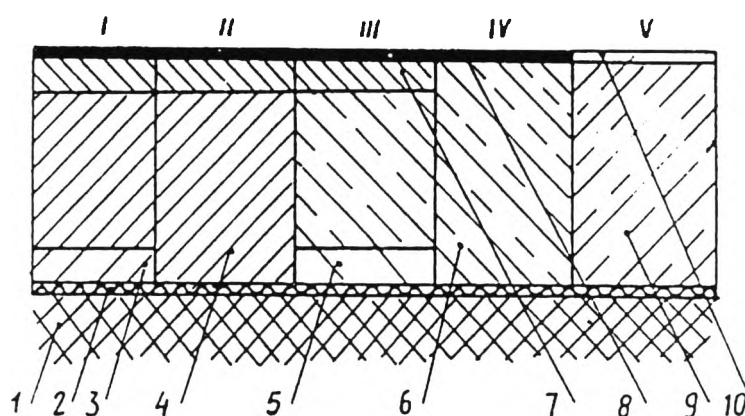
(ค) พลาสติกเอบีเอสที่ผ่านการชุบเคลือบผิวแล้วเมื่อนำมาทดสอบ peel test โดยการลอกแถบโลหะจากชิ้นงานทดสอบ จะพบการแยกตัวของแถบโลหะเกิดขึ้นในชั้นพลาสติก ซึ่งชิ้นงานพลาสติกเอบีเอสที่ถูกฉีดขึ้นรูป พอลิเมอร์บริเวณผิวจะเกิดการเรียงตัวในทิศทางเดียวกับการฉีดขึ้นรูปดังที่ได้กล่าวไว้ในข้อ (ก) ทำให้เมื่อทำการลอกแถบโลหะในทิศทางขนานกับผิวพลาสติก (ในทิศทางการฉีดขึ้นรูป) จะเกิดการฉีกขาดหรือแยกตัวในชั้นพลาสติกได้ง่ายดังแสดงในรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 การเรียงตัวเป็นชั้นของพอลิเมอร์ในทิศทางการฉีดขึ้นรูป [40]

### 2.1.5 สมบัติของพลาสติกภายหลังการชุบเคลือบผิว [26]

การชุบเคลือบผิวพลาสติกเพื่อความสวยงามโดยใช้เทคนิคการชุบผิวแบบไร้กระแส และการชุบผิวด้วยไฟฟ้า จะมีการวางชั้นเคลือบโลหะต่าง ๆ ลงบนพลาสติกได้หลายแบบแสดงดังรูปที่ 2.6 [26]



รูปที่ 2.6 ชนิดของชั้นเคลือบโลหะแต่ละชั้น (I – V) 1) พลาสติก 2) electroless Cu, Ni 3) dull Cu 4) bright Cu 5) dull Ni 6) semibright Ni 7) bright Ni 8) bright Cr 9) Zn, Sn, etc. 10) conversion (chromate, oxide, etc.) coating. [26]

ชั้นแรกสุดถัดจากพลาสติกจะเป็นชั้นฟิล์มทองแดงหรือนิกเกิลที่ถูกวางโดยอาศัยปฏิกิริยาเคมี (จากการชุบผิวแบบไร้กระแส) จากนั้นจะเป็นการวางชั้นโลหะชนิดต่าง ๆ ด้วยการชุบเคลือบผิวด้วยไฟฟ้า ชั้นโลหะชนิดต่าง ๆ ที่ถูกวางจะขึ้นกับการใช้งานและความต้องการของผู้ผลิตพลาสติกที่ผ่านการชุบเคลือบผิวด้วยขั้นตอนการชุบเคลือบผิวแบบไร้กระแสและการชุบเคลือบผิวด้วยไฟฟ้าอาจกล่าวได้ว่าเป็นวัสดุคอมโพสิตที่ประกอบไปด้วยชั้นเคลือบโลหะต่าง ๆ ซึ่งนำคุณสมบัติที่ดีของวัสดุแต่ละชนิดรวมเข้าด้วยกัน ผลิตภัณฑ์พลาสติกที่ผ่านการชุบเคลือบจะมีน้ำหนักเบากว่าผลิตภัณฑ์จากโลหะลักษณะเดียวกัน 5-10 เท่า มีความสวยงาม ทนทานต่อการขีดสี ความร้อน แสง ตัวทำละลาย และสารเคมีต่าง ๆ และมีคุณสมบัติทางกลที่ดีขึ้น อย่างไรก็ตามพลาสติกที่ผ่านการชุบเคลือบผิวไม่ทนต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่ต่ำมากหรือสูงมาก [12,13,26]

#### (ก) ความต้านทานต่อความร้อน (Heat resistance)

ปกติพลาสติกสามารถใช้งานได้ที่อุณหภูมิไม่สูงมาก แต่เมื่อพลาสติกผ่านการชุบเคลือบผิวแล้วพบว่าความต้านทานต่อความร้อน (heat resistance) เพิ่มขึ้น 10 -15 % เนื่องจากโลหะที่เคลือบอยู่บนชิ้นงานพลาสติกจะช่วยรักษาพลาสติกภายในผิวเคลือบโลหะให้คงรูปร่างเดิม โดยไม่

เกิดการบิดเบี้ยวเมื่อได้รับความร้อน [26] พลาสติกที่ผ่านการชุบเคลือบผิวแล้วจึงสามารถใช้งานได้ ที่อุณหภูมิสูงถึง 120 องศาเซลเซียส ขณะที่พลาสติกเอบีเอสที่ไม่ได้ผ่านการชุบเคลือบผิวทั่วไป สามารถใช้งานได้ที่อุณหภูมิเพียง 75 องศาเซลเซียส ก็จะเกิดการบิดเบี้ยวของพลาสติก นอกจากนี้ การเคลือบผิวด้วยโลหะยังช่วยป้องกันการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของพลาสติกกับออกซิเจนใน อากาศ (เป็นสาเหตุของการเสื่อมสภาพของพลาสติกหรือการ degradation) [18,26] อย่างไรก็ตาม พลาสติกที่ผ่านการชุบเคลือบผิวจะไม่สามารถทนต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิได้อย่างฉับพลัน เพราะสัมประสิทธิ์การขยายตัวของพลาสติกและโลหะมีความแตกต่างกันมาก เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิจะทำให้วัสดุทั้งสองเกิดการขยายหรือหดตัวที่ไม่เท่ากัน ดังนั้นหากกำลัง ความตึงเครียดระหว่างวัสดุทั้งสองมีไม่เพียงพอจะทำให้เกิดตำหนิ ปุ่มบวม [12,26]

#### (ข) ความต้านทานทางกล (Mechanical resistance)

เมื่อชั้นเคลือบโลหะถูกวางด้วยความหนาในระดับหนึ่งบนชิ้นงานพลาสติก ผลิตภัณฑ์ที่ได้ จะมีความแข็งเกร็ง (stiffness) ความแข็งแรง (strength) เพิ่มขึ้น โดยเฉพาะเมื่อเคลือบชั้นนี้เกิด และโครเมียม การเคลือบผิวด้วยชั้นโลหะต่าง ๆ จะช่วยส่งเสริมความแข็งแรงให้เพิ่มมากขึ้น ในทางกลับกันเมื่อชิ้นงานพลาสติกที่ผ่านการชุบเคลือบผิวมีความแข็งแรงมากขึ้น ความทนต่อแรง กระทบ (impact strength) ก็จะมีค่าลดลง [26,43]

#### (ค) ความต้านทานต่อการกัดกร่อน (Corrosion resistance)

พลาสติกที่ชุบเคลือบผิวด้วยโลหะจะมีความต้านทานต่อการกัดกร่อนดีกว่าวัสดุที่ทำจาก โลหะ รอยแตกหรือรูที่เกิดขึ้นจากการกัดกร่อนในชั้นเคลือบโลหะบนตัวรองรับพลาสติกไม่ได้ขยาย เป็นวงกว้างเช่นในกรณีที่ตัวรองรับเป็นโลหะ [26,43] เป็นผลให้การกัดกร่อนเกิดขึ้นไม่มากนักและ ยังไม่มีผลกระทบต่อตัวรองรับที่เป็นพลาสติก ด้วยเหตุนี้พลาสติกที่ผ่านการชุบเคลือบผิวจะยังคง สภาพความสวยงามได้ยาวนานกว่าพวกโลหะที่ผ่านการชุบเคลือบผิว

### 2.1.6 การเลือกใช้สารเคมีในการกัดผิว

พลาสติกเอปียีสสามารถละลายได้ในตัวทำละลายอินทรีย์ (organic solvent) เช่น diethyl ether, acetone, methyl alcohol ซึ่งพบว่าพลาสติกที่ถูกละลายด้วยตัวทำละลายเหล่านี้ จะทำให้ผิวเกิดความหยาบและเหนียวหนืดไม่เหมาะสมต่อการชุบผิวแบบไร้กระแสไฟฟ้าในขั้นตอนต่อไป [7] ดังนั้นจึงไม่ทำการชุบแบบไร้กระแสหลังจากการใช้สารกัดผิวจากพวกตัวทำละลายอินทรีย์ ตัวอย่างผลของตัวทำละลายอินทรีย์ที่มีต่อพลาสติกเอปียีสแสดงดังตารางที่ 2.3

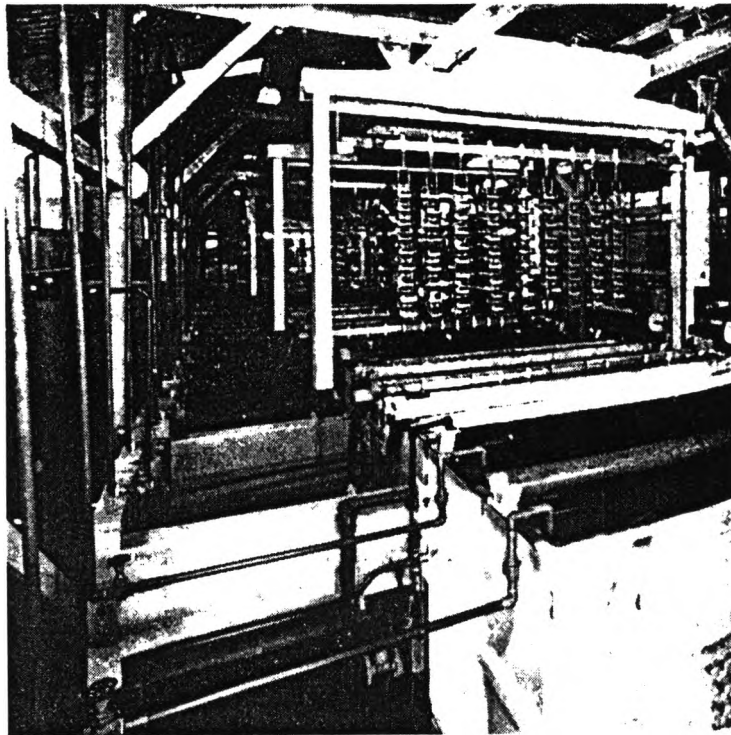
ตารางที่ 2.3 ผลของตัวทำละลายอินทรีย์ที่มีต่อพลาสติกเอปียีส [7]

ตัวทำละลายอินทรีย์	สภาพผิวพลาสติกเอปียีสที่เกิดขึ้น
Diethyl ether	ละลาย
Acetone	ละลาย
Methyl alcohol	ละลาย
50 % v/v diethyl ether 50 % v/v acetone	ละลาย
50 % v/v acetone 50 % v/v methyl alcohol	ละลาย
50 % v/v diethyl ether 50 % v/v methyl alcohol	ละลาย

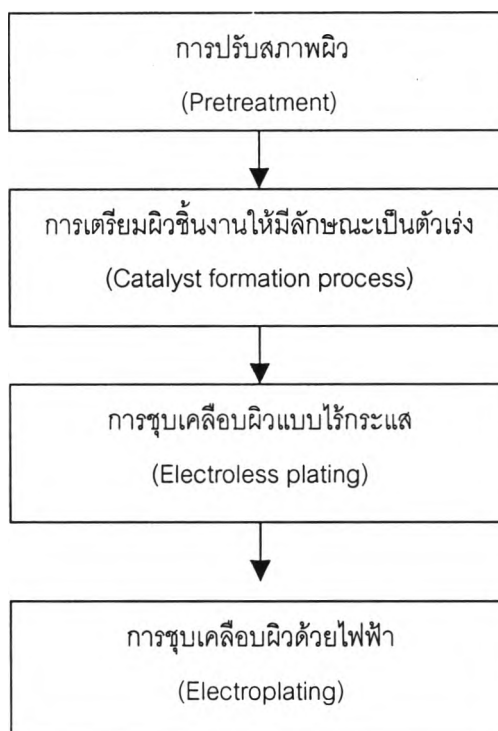
## 2.2 หลักการชุบเคลือบโลหะลงบนผิวพลาสติกเอปียีเอส

ในการชุบเคลือบผิววัสดุด้วยโลหะชนิดต่าง ๆ โดยใช้ไฟฟ้านั้น วัสดุที่จะถูกชุบเคลือบผิวต้องสามารถนำไฟฟ้าได้ เพื่อให้การไหลของกระแสครบวงจรและเกิดการแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอนเป็นผลให้เกิดการชุบเคลือบผิวขึ้นได้ ดังนั้นสำหรับวัสดุที่ไม่นำไฟฟ้า เช่น พลาสติก จึงไม่สามารถทำการชุบเคลือบโลหะลงบนผิวด้วยไฟฟ้าได้โดยตรง จำเป็นต้องทำให้พลาสติกสามารถนำไฟฟ้าได้เพียงพอก่อนโดยอาจจะเป็นเพียงบริเวณผิวหน้าของพลาสติกเท่านั้น [4]

ในอุตสาหกรรมการชุบเคลือบผิวโลหะลงบนผิวพลาสติกประกอบด้วยหลายขั้นตอนดังรูปที่ 2.7 ซึ่งสามารถสรุปเป็นหลักการชุบเคลือบโลหะบนผิวพลาสติกเอปียีเอสได้เป็น 4 ขั้นตอนหลัก [4] ดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.7 อุตสาหกรรมการชุบเคลือบผิวพลาสติกด้วยโลหะ [42]



รูปที่ 2.8 ขั้นตอนการชุบเคลือบโลหะบนพลาสติกเอบีเอส [4]

หลังจากการขึ้นรูปชิ้นงานพลาสติกเอบีเอสแล้ว ต้องมีการเตรียมผิวชิ้นงานพลาสติกเพื่อให้สามารถวางชั้นเคลือบโลหะลงบนผิวพลาสติกได้อย่างเหมาะสม ขั้นตอนแรกคือการปรับสภาพผิวชิ้นงาน (pretreatment) เป็นการทำความสะอาดผิวชิ้นงานพลาสติกโดยกำจัดไขมันบนผิวของชิ้นงานด้วยสารละลายต่าง จากนั้นจึงทำการกัดผิว (etching) ด้วยสารออกซิไดซ์ (oxidising agent) ชนิดกรด การกัดผิวทำให้ผิวพลาสติกมีความหยาบขึ้นซึ่งจะช่วยเพิ่มการยึดเกาะระหว่างชั้นเคลือบโลหะและพลาสติกให้มีความแข็งแรงขึ้น และยังเป็นการทำทำความสะอาดอีกครั้งหนึ่ง ขั้นตอนถัดมาเป็นการเตรียมผิวชิ้นงานพลาสติกให้มีลักษณะเป็นตัวเร่ง (catalyst formation process) วัตถุประสงค์ของขั้นตอนนี้คือเพื่อวางอนุภาคโลหะมีตระกูลเช่น พัลลาเดียม (palladium) ให้กระจายตัวบนผิวพลาสติก ซึ่งอนุภาคเหล่านี้เสมือนกับเป็นตัวเร่งหรือตัวชักนำให้เกิดการวางชั้นฟิล์มโลหะบนผิวพลาสติกเอบีเอสในขั้นการชุบเคลือบผิวแบบไร้กระแสถัดไป หากปราศจากอนุภาคตัวเร่งเหล่านี้แล้ว จะไม่สามารถเกิดปฏิกิริยารีดักชันหรือการวางตัวของอนุภาคโลหะจากการชุบเคลือบผิวแบบไร้กระแสได้ ขั้นตอนต่อไปเป็นการชุบเคลือบผิวด้วยโลหะลงบนผิวตัวเร่งหรือการชุบเคลือบผิวแบบไร้กระแส (autocatalytic plating หรือ electroless plating) หลังจากการเตรียมผิวชิ้นงานพลาสติกให้เป็นผิวที่มีลักษณะเป็นตัวเร่งแล้ว จะนำชิ้นงานไปจุ่มในน้ำยา

ชุบเคลือบผิวด้วยโลหะแบบไร้กระแส (หรือการชุบเคลือบผิวด้วยโลหะโดยอาศัยปฏิกิริยาเคมี) ทำให้ไอออนของโลหะที่ต้องการชุบเกิดปฏิกิริยาเคมีขึ้นบนตัวเร่งที่อยู่บริเวณผิวของชิ้นงาน โดยไอออนของโลหะจะถูกรีดิวซ์กลายเป็นอะตอมของโลหะเกาะติดอยู่บริเวณผิวของชิ้นงานตามต้องการ หลังจากพลาสติกเอป็อกไซด์ผ่านการปรับสภาพผิวจนกระทั่งการชุบเคลือบผิวด้วยโลหะแบบไร้กระแสแล้วบนผิวตัวเร่งจะเกิดขึ้นฟิล์มบาง ๆ ของโลหะเคลือบอยู่บนผิวพลาสติกซึ่งมีความหนาเพียงพอที่จะนำไฟฟ้าได้ในระดับหนึ่ง ดังนั้นจึงสามารถทำการชุบเคลือบโลหะลงบนผิวชิ้นงานพลาสติกด้วยไฟฟ้าในขั้นตอนสุดท้ายได้เช่นเดียวกับการชุบเคลือบผิวโลหะโดยทั่วไป [4] สำหรับผลิตภัณฑ์พลาสติกชุบเคลือบผิวที่ใช้งานเพื่อความสวยงาม (หรือใช้งานในช่วงเวลาสั้นๆ) ค่ากำลังความตึงเครียดจะมีค่าอยู่ในช่วง 0.3 – 0.5 กิโลนิวตันต่อเมตร และสำหรับผลิตภัณฑ์ชุบเคลือบผิวที่มีขนาดใหญ่ค่ากำลังความตึงเครียดจะอยู่ในช่วง 1.5 – 3 กิโลนิวตันต่อเมตร [26]

## 2.3 ขั้นตอนการชุบเคลือบผิวพลาสติกเอบีเอสด้วยโลหะ

ในส่วนนี้จะอธิบายถึงขั้นตอนการชุบเคลือบผิวพลาสติกด้วยโลหะ สำหรับองค์ประกอบสารเคมีที่ใช้ในแต่ละขั้นตอนแสดงไว้ในภาคผนวก ก

### 2.3.1 การปรับสภาพผิว (pretreatment) [3]

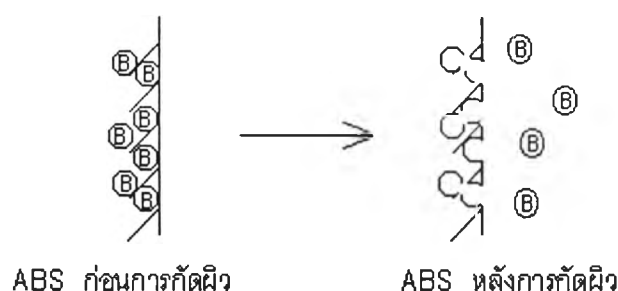
การปรับสภาพผิวแบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอนหลักคือ การทำความสะอาดผิว (cleaning) และการกัดผิว (etching)

#### (ก) การทำความสะอาดผิว (cleaning)

เป็นขั้นตอนทำความสะอาดชิ้นงานหลังจากการขึ้นรูป เพื่อกำจัดฝุ่นผง ไขมัน และสิ่งปนเปื้อนที่เกาะติดบนผิวชิ้นงานพลาสติก โดยล้างด้วยสารละลายต่างอ่อนหรือกรด การชุบเคลือบผิวบนชิ้นงานที่สกปรกจะทำให้ผิวงานที่ผ่านการชุบหลุดลอกได้ง่ายหรือบวมพอง

#### (ข) การกัดผิว (etching)

สารกัดผิวจะทำการกัดผิวชิ้นงานพลาสติกเอบีเอสให้เกิดความขรุขระและเกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีบนผิวชิ้นงาน โดยกลไกการกัดผิวเกิดจากการที่สารกัดผิวเข้ากำจัดส่วนของอนุภาคบิวทอะไดอินที่กระจายตัวอยู่ในเฟสของ SAN จนเกิดเป็นหลุมตื้นและขยายลึกลงในเนื้อพลาสติกดังรูปที่ 2.9

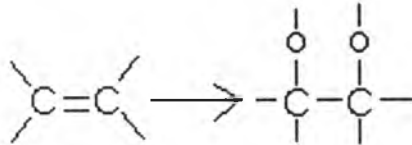


ⓑ = อนุภาคบิวทอะไดอิน

รูปที่ 2.9 กลไกการกัดผิวพลาสติกเอบีเอส [23]

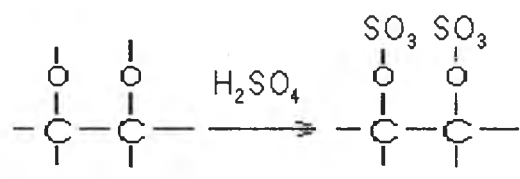
ส่วนการเปลี่ยนแปลงทางเคมีบนผิวชิ้นงานนั้นเชื่อว่าเกิดจากพันธะคู่ของคาร์บอนที่บริเวณผิวของพลาสติกถูกออกซิไดส์ได้ง่ายโดยกรดโครมิกในสารกัดผิวทำให้เกิดเป็นหมู่คีโตนและไฮดรอกซิล (ketonic และ hydroxyl group) ดังรูปที่ 2.10 (ซึ่งจะช่วยให้อนุภาคโลหะสามารถยึดเกาะกับผิวพลาสติกผ่านพันธะออกซิเจนไม่อิมิตัวได้)





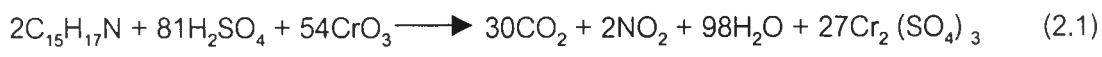
รูปที่ 2.10 พันธะที่เกิดขึ้นบริเวณผิวพลาสติกภายหลังการกัดผิว [22]

ส่วนกรดซัลฟูริกในสารกัดผิวจะช่วยทำให้เกิดกลุ่มซัลโฟนิคที่มีความว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยาบนผิวชิ้นงาน (จึงช่วยในการแทนที่ของไฮดรอกซิลโหระดีบุกจากการ sensitizing) ดังรูปที่ 2.11 ซึ่งพันธะทางเคมีทั้งหมดที่เกิดขึ้นนี้ช่วยให้เกิดการวางอนุภาคโลหะพัลลาเดียมหรือโลหะมีตระกูลอื่น ๆ บนผิวพลาสติกเอปียเอสได้ [22] ในขั้นตอนการเตรียมผิวชิ้นงานให้มีลักษณะเป็นตัวเร่งต่อไป



รูปที่ 2.11 การเกิดกลุ่มซัลโฟนิคบนผิวชิ้นงานพลาสติกเอปียเอส [22]

สำหรับสารกัดผิวที่ประกอบด้วยสารละลายผสมของกรดโครมิก ( $\text{CrO}_3$ ) และกรดซัลฟูริก ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) ในน้ำจะช่วยให้เกิดการกัดผิวอย่างมีประสิทธิภาพ [6,7,22] นอกจากนี้ความเข้มข้นของสารกัดผิว อุณหภูมิและระยะเวลาในการกัดผิวเป็นปัจจัยสำคัญต่อการทำงาน สมการแสดงปฏิกิริยารวมการกัดผิวหรือปฏิกิริยาออกซิเดชันของ 1:1:1 acrylonitrile-butadiene-styrene polymer สามารถแสดงได้ดังสมการที่ (2.1) [18]



ลักษณะพื้นผิวขรุขระที่ได้จากการกัดผิวนี้ช่วยให้ผิวชิ้นงานพลาสติกพร้อมต่อการวางชั้นโลหะและช่วยเพิ่มความสามารถในการยึดเกาะทางกลระหว่างผิวพลาสติกกับชั้นเคลือบโลหะตามกลไกการยึดติดแน่น (ดังที่จะได้อธิบายในข้อ 2.9)

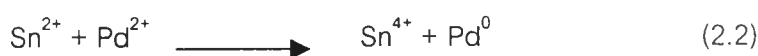
อเนียงขึ้นงานพลาสติกที่ได้จากวิธีการฉีดขึ้นรูป (injection moulding) จะได้รับความเค้น (stress) บริเวณผิวพลาสติกซึ่งจะทำให้เกิดความเครียด (strain) ดังที่ได้กล่าวไว้แล้วในข้อ 2.1.4 โดยความตึงเครียดระหว่างชั้นเคลือบโลหะและพลาสติกจะได้รับการปรับปรุงหากชั้นผิวพลาสติกที่เกิดความเครียดถูกขจัดออกไปโดยการกัดผิว

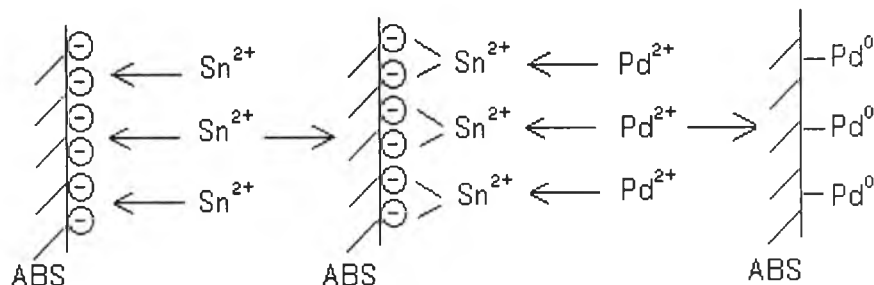
### 2.3.2 การเตรียมผิวขึ้นงานให้มีลักษณะเป็นตัวเร่ง (catalyst formation process) [3]

การเตรียมผิวขึ้นงานพลาสติกเอบีเอสให้มีลักษณะเป็นตัวเร่งสามารถแบ่งได้เป็น 2 ลักษณะขึ้นกับสารละลายที่ใช้ดังนี้

#### (ก) Sensitizing/Activating Process

ภายหลังการกัดผิวขึ้นงานพลาสติกเอบีเอส บริเวณผิวหน้าของขึ้นงานพลาสติกจะเกิดประจุลบขึ้น ดังนั้นเมื่อจุ่มขึ้นงานในสารละลาย sensitizer (ประกอบด้วย  $\text{SnCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{HCl}$ ) ดีบุกไอออนประจุ +2 ( $\text{Sn}^{2+}$ ) จะถูกดูดกลืนบริเวณผิวพลาสติก ซึ่งประจุบวกของดีบุกนี้จะชักนำให้โลหะที่เป็นตัวเร่งในการทำปฏิกิริยาเกิดการวางตัวบนผิวของพลาสติกเอบีเอส ดังนั้นเมื่อจุ่มขึ้นงานพลาสติกที่มีประจุบวกของดีบุกในสารละลาย activator ( $\text{PdCl}_2$ ,  $\text{HCl}$ ) พบว่าอิเล็กตรอนสามารถย้ายที่จากดีบุกไอออนประจุ +2 ( $\text{Sn}^{2+}$ ) ที่ถูกดูดกลืนอยู่บนผิวพลาสติกเอบีเอสไปสู่พัลลาเดียมไอออนประจุ +2 ( $\text{Pd}^{2+}$ ) ดังสมการที่ 2.2 และรูปที่ 2.12 โดยที่ดีบุกไอออนประจุ +2 ( $\text{Sn}^{2+}$ ) จะเปลี่ยนเป็นดีบุกไอออนประจุ +4 ( $\text{Sn}^{4+}$ ) ได้ง่าย เพราะดีบุกไอออนประจุ +4 ( $\text{Sn}^{4+}$ ) มีความเสถียรมากกว่าดีบุกไอออนประจุ +2 ( $\text{Sn}^{2+}$ ) ในทางตรงข้ามโลหะพัลลาเดียม ( $\text{Pd}^0$ ) มีความเสถียรมากกว่าพัลลาเดียมไอออนประจุ +2 ( $\text{Pd}^{2+}$ ) ทำให้พัลลาเดียมไอออนประจุ +2 ( $\text{Pd}^{2+}$ ) กลายมาเป็นโลหะพัลลาเดียม ( $\text{Pd}^0$ ) และอนุภาคโลหะพัลลาเดียมนี้ถูกดูดกลืนอยู่บนผิวหน้าของพลาสติกเอบีเอสแทนที่ดีบุกไอออนประจุ +2 ( $\text{Sn}^{2+}$ ) และทำหน้าที่เสมือนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในขั้นการชุบเคลือบผิวแบบไร้กระแสต่อไป

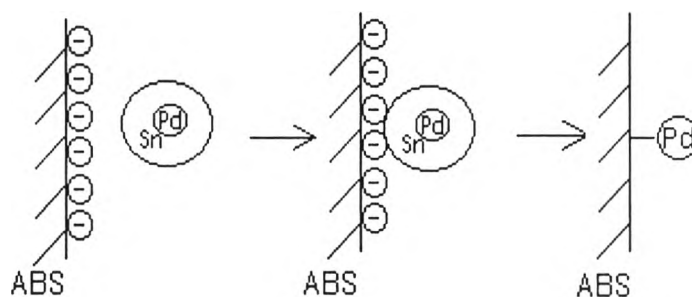




รูปที่ 2.12 ลักษณะการวางอนุภาคโลหะพัลลาเดียมลงบนผิวพลาสติกเอบีเอสด้วยวิธี Sensitizing/Activating Process [25]

#### (ข) Catalyzing/Accelerating Process

วิธีการนี้เป็นที่นิยมในปัจจุบัน ชิ้นงานพลาสติกถูกจุ่มในสารละลาย catalyzer (ประกอบด้วย  $\text{PdCl}_2$ ,  $\text{SnCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  และ  $\text{HCl}$ ) โดยสารละลายดีบุกและพัลลาเดียมถูกเตรียมอยู่ในสารละลายชุดเดียวกัน เป็นลักษณะสารแขวนลอย (colloid) ประกอบด้วยอนุภาคดีบุกล้อมรอบอนุภาคโลหะพัลลาเดียม ซึ่งถูกดูดกลืนบนผิวหน้าของพลาสติกเอบีเอสดังรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 ลักษณะการวางอนุภาคโลหะพัลลาเดียมลงบนผิวพลาสติกเอบีเอสด้วยวิธี Catalyzing/Accelerating Process [25]

เมื่อจุ่มชิ้นงานในสารละลาย accelerator ( $\text{H}_2\text{SO}_4$  หรือ  $\text{HCl}$ ) จะช่วยกำจัดดีบุกที่ตกค้างให้คงเหลือเพียงอนุภาคพัลลาเดียมเกาะติดบนผิวพลาสติก ซึ่งพัลลาเดียมนี้จะทำหน้าที่เสมือนตัวเร่งปฏิกิริยาในการชุบเคลือบผิวแบบไร้กระแสในขั้นต่อไป

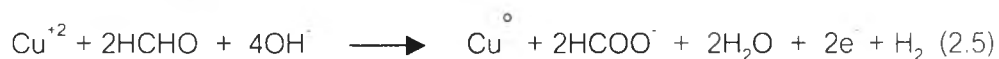
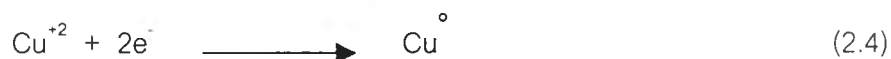
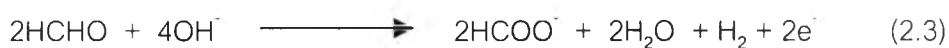
### 2.3.3 การชุบเคลือบผิวแบบไร้กระแส (Autocatalytic Plating หรือ Electroless Plating) [7,10,11]

หลังจากการปรับสภาพผิวพลาสติกเอบีเอส พบว่าบริเวณผิวพลาสติกจะมีอนุภาคพัลลาเดียมกระจายตัวอยู่ ซึ่งอนุภาคของพัลลาเดียมนี้เสมือนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาให้เกิดการชุบเคลือบผิวแบบไร้กระแส การชุบเคลือบผิวด้วยสารเคมีหรือการชุบเคลือบผิวแบบไร้กระแสอาศัยการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน-รีดักชันทางเคมีโดยไม่ใช้แหล่งพลังงานจากภายนอก (เช่น กระแสไฟฟ้า) ไอออนของโลหะในสารละลายถูกรีดิวซ์กลายเป็นอะตอมของโลหะเกาะติดบนผิวพลาสติกได้โดยมีอนุภาคโลหะพัลลาเดียมเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ต่อมาเมื่ออนุภาคของโลหะถูกวางตัวจนเกิดเป็นชั้นของอนุภาคโลหะปกคลุมอนุภาคพัลลาเดียมที่กระจายตัวอยู่ อนุภาคโลหะที่ปกคลุมเหล่านี้จะทำหน้าที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาแทนอนุภาคพัลลาเดียม ทำให้ปฏิกิริยาเกิดขึ้นได้อย่างต่อเนื่องจากการชักนำของอนุภาคโลหะที่ถูกวางไว้ก่อน (ซึ่งเสมือนกับเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา) อย่างไรก็ตามมีเพียงโลหะบางชนิดเท่านั้นที่สามารถชักนำให้เกิด autocatalytic plating ได้ เช่น นิเกิล ทองแดง และอื่น ๆ [10] สำหรับองค์ประกอบสำคัญของสารละลายชุบเคลือบผิวแบบไร้กระแสประกอบด้วย [11]

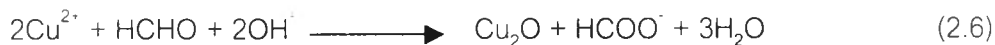
- metal salt เป็นแหล่งของไอออนโลหะที่ต้องการจะเคลือบผิว เช่น ทองแดง ซึ่งได้มาจากการละลายของคอปเปอร์ซัลเฟตในน้ำยาชุบ
- reducing agent เป็นสารเคมีที่ทำให้ไอออนของโลหะแปรสภาพไปเป็นอะตอมของโลหะเกาะที่ผิวของชิ้นงาน ซึ่งน้ำยาชุบแต่ละชนิดจะใช้ตัวรีดิวซ์ที่แตกต่างกันไป เช่น ฟอรัมาลดีไฮด์ (Formaldehyde) สำหรับการชุบเคลือบผิวด้วยทองแดงแบบไร้กระแส โซเดียมไฮโปฟอสไฟต์ (Sodium Hypophosphite) สำหรับการชุบเคลือบผิวด้วยนิเกิลแบบไร้กระแส เป็นต้น
- complexing agent สารนี้จะทำปฏิกิริยาหรือรวมตัวกับไอออนของโลหะแล้วเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่ละลายได้ดีในน้ำยาชุบ ประโยชน์ของสารเหล่านี้นอกจากจะป้องกันการตกตะกอนของเกลือโลหะแล้ว ยังลดการเสื่อมสภาพของน้ำยาชุบ และช่วยให้ไอออนของโลหะเกิดปฏิกิริยาเคมีกับตัวรีดิวซ์ได้ดียิ่งขึ้น สารประกอบเชิงซ้อนที่นิยมใช้ เช่น โซเดียมโปตัสเซียมทาร์เทรต (Sodium potassiumtartrate) หรือเกลือร็อคเชลล์ (Rochelle Salt)
- pH adjusting agent หรือ buffer เป็นตัวรักษาระดับ pH ของน้ำยาชุบให้เปลี่ยนแปลงช้าลง
- stabilizing agent, buffering agent และ additive อื่น ๆ เพื่อให้สารละลายอยู่ในสภาวะที่เหมาะสมต่อการทำงาน

ปฏิกิริยาออกซิเดชัน-รีดักชันของการชุบทองแดงแบบไร้กระแสแสดงได้ดังสมการ (2.3)

(2.4) และ (2.5) [7,26]



ปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นในการชุบเคลือบผิวด้วยทองแดงโดยไม่ใช้ไฟฟ้านี้จะเกิดต่อเนื่องไปจนกระทั่งตัวรีดิวซ์หรือไอออนของทองแดงหมดไป ปฏิกิริยาส่วนใหญ่จะเกิดขึ้นที่ผิวของพลาสติก แต่ยังมีปฏิกิริยาบางส่วนที่ไม่ได้เกิดขึ้นที่ผิวของพลาสติก โดยปฏิกิริยานี้จะทำให้เกิดตะกอนคิวปริสออกไซด์ ( $\text{Cu}_2\text{O}$ ) ดังสมการ 2.6 [4] ซึ่งการเกิดปฏิกิริยาเช่นนี้จะลดประสิทธิภาพการชุบเคลือบผิวแบบไร้กระแส

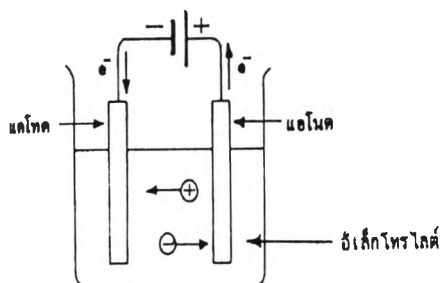


วิธีการแก้ปัญหานี้ทำได้โดยการกวนน้ำยาด้วยอากาศหรือออกซิเจน เพื่อให้ออกซิเจนไปออกซิไดซ์คิวปริส ( $\text{Cu}^+$ ) ไปเป็นคิวปริค ( $\text{Cu}^{2+}$ ) ซึ่งละลายได้ในน้ำยาชุบนี้ หรืออาจใช้วิธีใส่สารรักษาสภาพของน้ำยาลงไปก็ได้ซึ่งสารเหล่านี้ได้แก่ ไทโอยูเรีย (thiourea) เมอร์แคปโตเบนโซไทอะโซล (mercaptobenzothiazole) และอื่นๆ

นอกจากการชุบเคลือบผิวแบบไร้กระแสด้วยโลหะทองแดงเป็นที่นิยมแล้ว ยังมีโลหะชนิดอื่นเช่น นิกเกิล ก็ได้รับความนิยมในการใช้งานเช่นกัน แต่เนื่องจากเมื่อเปรียบเทียบความเหมาะสมแล้วพบว่า การชุบเคลือบผิวแบบไร้กระแสด้วยโลหะทองแดงจะสามารถควบคุมการทำงานได้ง่ายกว่าจึงถูกเลือกใช้สำหรับในงานวิจัยนี้ [25]

### 2.3.4 การชุบเคลือบทองแดงบนผิวพลาสติกด้วยไฟฟ้า (electroplating) [4,19]

หลังจากพลาสติกเอปียเอสได้ผ่านการชุบเคลือบผิวแบบไร้กระแสแล้ว สามารถนำมาทำการชุบเคลือบชั้นโลหะด้วยไฟฟ้าได้เช่นเดียวกับโลหะทั่วไป โดยชิ้นงานพลาสติกจะถูกต่อเข้ากับขั้วลบ (แคโทด-cathode) ของแหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง ส่วนตัวล่อหรือโลหะที่จะใช้เคลือบผิวบนชิ้นงานถูกต่อเข้ากับขั้วบวก (แอโนด-anode) จากนั้นจึงจุ่มขั้วทั้งสองลงในน้ำยาชุบหรือเรียกว่า "สารอิเล็กโทรไลต์ (electrolyte)" ซึ่งสามารถแสดงเป็นแผนภาพได้ดังรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 แผนภาพการชุบเคลือบผิวด้วยไฟฟ้า [4]

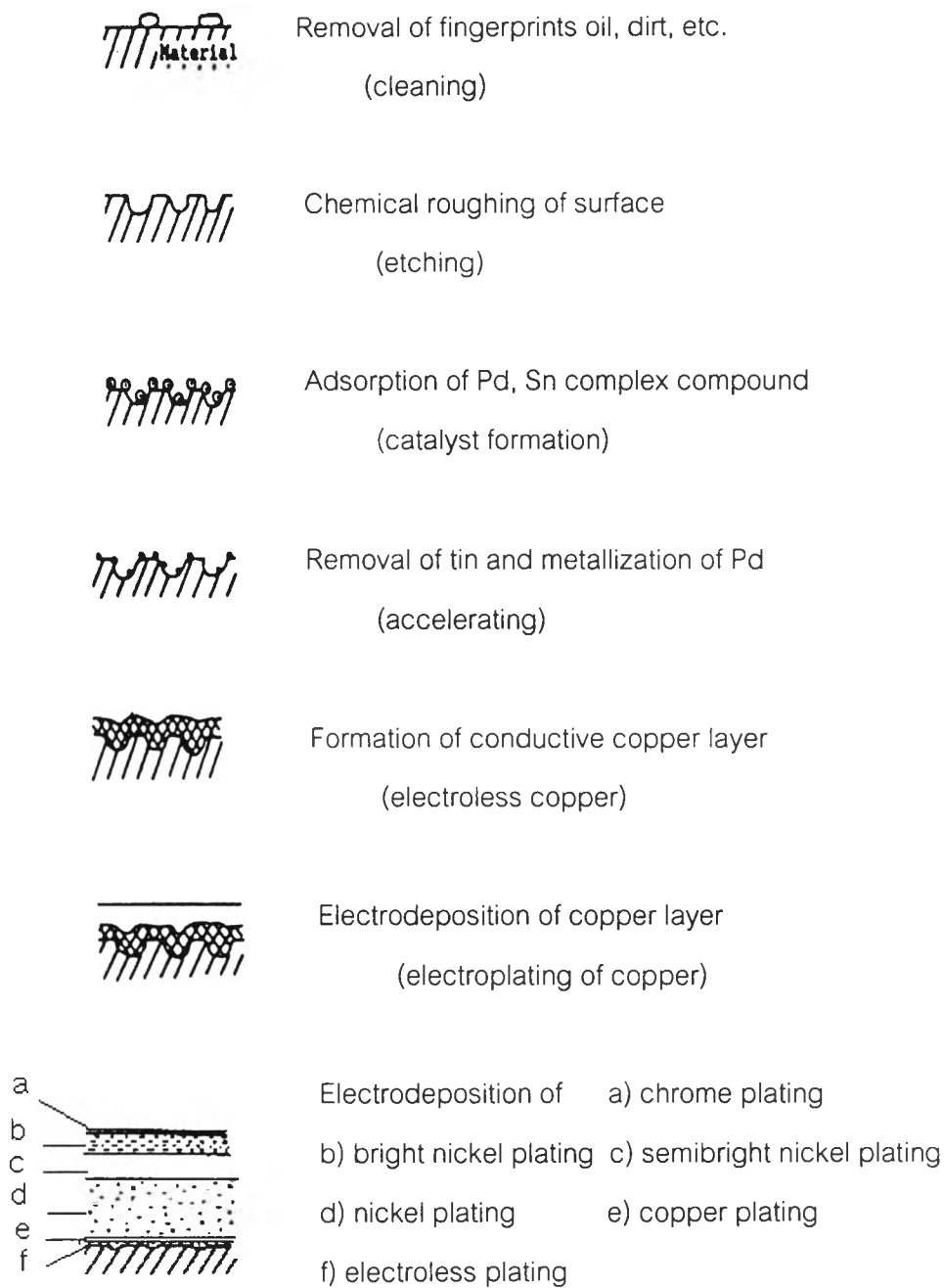
น้ำยาชุบหรือสารอิเล็กโทรไลต์ (electrolyte) เมื่อละลายน้ำจะแตกตัวเป็นไอออนบวก (หรือแคตไอออน (cation)) และไอออนลบ (หรือแอนไอออน (anion)) ทำให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านได้ครบวงจร การชุบเคลือบผิวด้วยไฟฟ้าเกิดโดยแคตไอออนวิ่งไปเกาะที่ขั้วแคโทดซึ่งเป็นชิ้นงานที่ต้องการชุบ และแอนไอออนวิ่งไปเกาะที่ขั้วแอโนดซึ่งเป็นตัวล่อหรือโลหะที่จะใช้เคลือบผิว

การชุบเคลือบผิวด้วยทองแดงกรณีนั้น น้ำยาชุบประกอบด้วยคอปเปอร์ซัลเฟต ( $\text{CuSO}_4$ ) ในสารละลายกรดซัลฟูริก ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) โดยมีแท่งทองแดงเป็นตัวล่อต่อเข้ากับขั้วแอโนด และชิ้นงานที่ต้องการชุบเคลือบผิวต่อกับขั้วแคโทด เมื่อต่อเข้ากับแหล่งกำเนิดพลังงานภายนอกจะพบว่า คอปเปอร์ซัลเฟตที่ละลายในน้ำยาชุบจะสลายตัวเป็นสองส่วนคือ ไอออนทองแดงที่มีประจุบวก ( $\text{Cu}^{2+}$ ) และไอออนซัลเฟตที่มีประจุลบ ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) ไอออนทองแดงประจุบวกจะวิ่งไปเกาะที่ขั้วลบซึ่งเป็นชิ้นงานที่ต้องการชุบเคลือบผิวเพื่อรับอิเล็กตรอน (ที่มาจากแหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง) แล้วเปลี่ยนเป็นโลหะทองแดงเคลือบบนชิ้นงาน ส่วนไอออนซัลเฟตประจุลบ ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) จะวิ่งไปที่แท่งตัวล่อหรือโลหะที่จะใช้เคลือบผิวแล้วทำปฏิกิริยากับแท่งทองแดงกลายเป็นคอปเปอร์ซัลเฟตแทนคอปเปอร์ซัลเฟตในน้ำยาชุบที่ถูกแยกสลายตัวไป คอปเปอร์ซัลเฟตที่เกิดขึ้นใหม่นี้ก็จะถูกแยกสลายตัว

ให้กลายเป็นไอออนทองแดงประจุบวก ( $\text{Cu}^{2+}$ ) และไอออนซัลเฟตประจุลบ ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) ต่อไป ทำให้  
ขบวนการชุบเคลือบผิวด้วยไฟฟ้าเกิดได้อย่างต่อเนื่อง

หลังจากการชุบเคลือบชั้นทองแดงลงบนชิ้นงานพลาสติกตามขบวนการข้างต้นแล้ว  
สามารถทำการชุบเคลือบชั้นโลหะชนิดต่าง ๆ ในขั้นถัดไปได้ตามต้องการ เช่น ชุบนิเกิลเงา และชุบ  
โครเมียม ตามลำดับ จะได้ชิ้นงานพลาสติกชุบเคลือบผิวด้วยโครเมียมที่สวยงาม หรืออาจจะ  
เปลี่ยนเป็นการชุบเคลือบผิวด้วยโลหะมีค่าอื่น ๆ ตามความต้องการได้

โดยสรุปกระบวนการชุบเคลือบโลหะบนพลาสติกเอบีเอส มีการเปลี่ยนแปลงลักษณะ  
ของผิวพลาสติกดังแผนภูมิรูปที่ 2.15 [3] (ความหนาต่ำสุดของชั้นเคลือบโลหะแต่ละชั้นของ  
พลาสติกที่ชุบเคลือบผิวด้วยโลหะตามมาตรฐาน JIS แสดงไว้ในภาคผนวก ฉ)

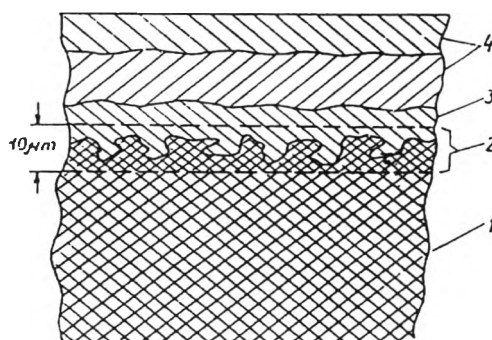


รูปที่ 2.15 ภาพรวมลักษณะการเปลี่ยนแปลงของผิวพลาสติกเอปี้เอสในกระบวนการชุบเคลือบโลหะบนพลาสติก [3]



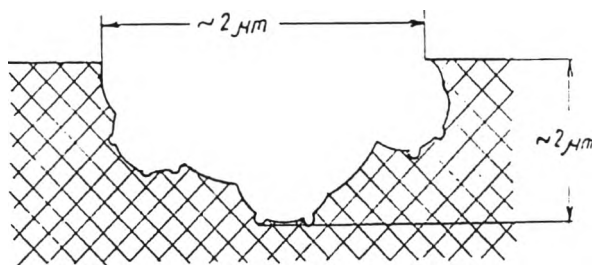
## 2.4 กลไกการยึดติดแน่นของชั้นเคลือบโลหะ (Mechanism of adhesion)

การกัดผิวเป็นการเปลี่ยนแปลงสภาพชิ้นงานพลาสติก [18] เพื่อให้สามารถรับการวางชั้นฟิล์มโลหะได้ กลไกที่เป็นที่ยอมรับในปัจจุบันได้อธิบายว่าการติดแน่นของชั้นเคลือบโลหะกับผิวพลาสติกเกิดจากพันธะทางกลและพันธะทางเคมี [7,12,15,22] พันธะทางกล (หรือที่เรียกว่า anchor effect หรือ mechanical keying หรือ mechanical interlocking) เกิดขึ้นจากอนุภาคของบิวทอะไดอินที่กระจายตัวอยู่ในเฟส SAN ถูกกำจัดออกด้วยสารกัดผิว เป็นผลให้ผิวพลาสติกเกิดเป็นหลุมหรือรูพรุน การเกิดหลุมขรุขระบนผิวพลาสติกเช่นนี้ช่วยเพิ่มกำลังการยึดเกาะของพันธะทางกลระหว่างผิวพลาสติกและชั้นฟิล์มโลหะ สำหรับการยึดเกาะที่ดีระหว่างผิวเคลือบโลหะกับพลาสติกนั้น ชั้นที่เกิดการสัมผัสระหว่างวัสดุทั้งสองชนิดหรือชั้น intermediate จะมีลักษณะโครงสร้างพิเศษดังรูปที่ 2.16 [26]



รูปที่ 2.16 พื้นที่หน้าตัดพลาสติกที่ผ่านการชุบเคลือบผิวด้วยไฟฟ้า 1) ชิ้นงานพลาสติก 2) ชั้น intermediate 3) ชั้นเคลือบโลหะเริ่มต้น (Cu, Ni) 4) ชั้นเคลือบโลหะต่าง ๆ กันในแต่ละชั้นเช่น ทองแดง นิกเกิล โครเมียม [26]

จากรูปแสดงให้เห็นถึงภาคตัดขวางของพลาสติกที่ผ่านการชุบเคลือบผิวแล้ว เห็นได้ว่าในชั้น intermediate มีการประสานกันอย่างแน่นหนาระหว่างชั้นเคลือบเริ่มต้นและชิ้นงานพลาสติก การประสานกันระหว่างผิวสัมผัสทั้งสองชั้นอยู่กับลักษณะพื้นผิวของพลาสติก และลักษณะเฉพาะที่เกิดขึ้นของรูพรุนบนพื้นผิวพลาสติกก็ส่งผลต่อการยึดเกาะทางกลเช่นกัน จากงานวิจัยในอดีตได้แสดงถึงลักษณะรูพรุนให้กำลังความติดแน่นที่สูงระหว่างชั้นเคลือบโลหะและพลาสติกดังรูปที่ 2.17 [26]

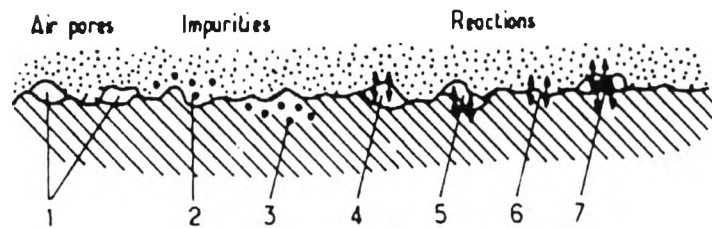


รูปที่ 2.17 ลักษณะรูพรุนที่ให้อำนาจความตึงเครียดสูง [26]

หากมีการยึดเกาะของพันธะทางกลที่ดี จะช่วยลดปัญหาต่าง ๆ เช่น การถูกแทรกระหว่างผิวสัมผัสของชั้นฟิล์ม การเกิดปฏิกิริยาเคมีบริเวณผิวสัมผัส และการหลุดลอกเนื่องจากการขยายตัวและหดตัวของชั้นฟิล์มโลหะและพลาสติก [12]

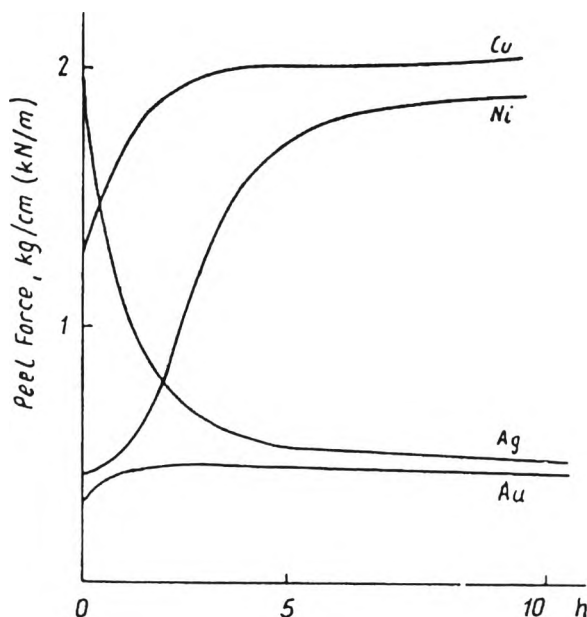
ส่วนพันธะทางเคมีก็เป็นอีกกลไกหนึ่งที่จะช่วยเพิ่มกำลังการยึดเกาะ (ถึงแม้จะเป็นแรงดึงดูดที่อ่อนเมื่อเทียบกับพันธะทางกล) นอกจากการกัดผิวจะเป็นการกำจัดอนุภาคบิวทอะไดอินแล้ว ยังส่งผลให้บริเวณผิวและภายในเนื้อชิ้นงานพลาสติกเอปียเอสเกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมี โดยกรดโครมิกในสารกัดผิวจะออกซิไดซ์พันธะคู่ของคาร์บอน ( $C=C$ ) บริเวณผิวชิ้นงานเพื่อสร้างพันธะออกซิเจนไม่อิ่มตัวดังรูปที่ 2.10 ซึ่งจะทำให้ชั้นเคลือบโลหะสามารถยึดติดกับพลาสติกผ่านพันธะออกซิเจนไม่อิ่มตัวได้ และกรดซัลฟูริกในสารกัดผิวจะช่วยให้เกิดกลุ่ม sulfonic ที่มีความว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยาบนผิวชิ้นงาน จึงช่วยให้การแทนที่ระหว่างไอออนโลหะดีบุก (จากการ sensitizing) กับกลุ่ม sulfonic ง่ายขึ้น [22] พันธะทางเคมีเหล่านี้ช่วยให้เกิดการวางอนุภาคโลหะพัลลาเดียมหรือโลหะมีตระกูลอื่น ๆ บนผิวพลาสติกเอปียเอสได้ ดังนั้นโดยสรุปจุดมุ่งหมายของการปรับสภาพผิวพลาสติกคือ เพื่อสร้างสภาพผิวให้กับผิวพลาสติกและให้เกิดลักษณะพื้นผิวพลาสติกที่เหมาะสมต่อการวางชั้นเคลือบโลหะ

สำหรับชั้นเคลือบโลหะและชิ้นงานพลาสติกที่มีการสัมผัสกันไม่เพียงพออาจจะส่งผลถึงความตึงเครียดที่เกิดขึ้นได้ [38] แม้ว่าความหนาของผิวชิ้นงานพลาสติกเพิ่มขึ้นแต่กำลังความตึงเครียดที่ได้กลับลดลง ซึ่งอาจเป็นเพราะบริเวณพื้นผิวที่ขรุขระของชิ้นงานพลาสติกเกิดการไม่สัมผัสกันกับชั้นเคลือบโลหะในบางจุด จึงเกิดช่องว่างหรือโพรงขึ้น ซึ่งเป็นจุดบกพร่องระหว่างผิวสัมผัสทั้งสองทำให้เกิดการประสานกันไม่สนิท ส่งผลให้อำนาจความตึงเครียดในบริเวณนั้นลดลง ดังแสดงในรูปที่ 2.18 [38]



รูปที่ 2.18 แบบจำลองของชั้นเชื่อมต่อที่ไม่ดี (weaken boundary layer) : 1) โฟรงอากาศ 2) และ 3) สิ่งปนเปื้อนบริเวณผิวสัมผัส 4) ถึง 7) ปฏิกิริยาเคมีที่เกิดระหว่างองค์ประกอบต่าง ๆ กับชั้นงานพลาสติก [38]

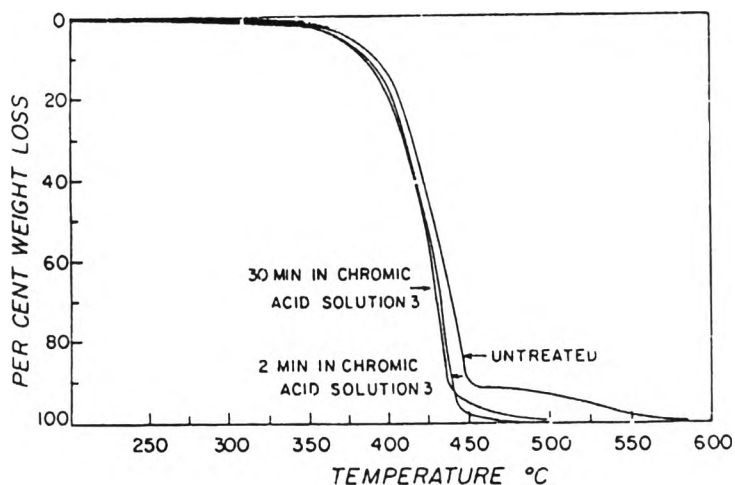
ค่ากำลังความตึงเครียดยังขึ้นอยู่กับประเภทของวัสดุที่เคลือบอยู่บนผิวชิ้นงานพลาสติกด้วย เช่น โลหะมีตระกูล (Au, Ag) จะให้กำลังความตึงเครียดต่ำกว่าโลหะทองแดงหรือนิกเกิล นอกจากนี้กำลังความตึงเครียดของชิ้นงานพลาสติกยังขึ้นกับระยะเวลาที่ล่องมาหลังการชุบเคลือบผิว ถ้าระยะเวลาที่ล่องมาหลังการชุบเคลือบผิวเพิ่มขึ้น ค่ากำลังความตึงเครียดของชิ้นงานพลาสติกจะเพิ่มขึ้นด้วย แต่เมื่อระยะเวลาที่ล่องมาของการชุบเคลือบผิวมีค่านานพอ ค่ากำลังความตึงเครียดของชิ้นงานพลาสติกจะเริ่มมีค่าคงที่ ดังรูปที่ 2.9 [26]



รูปที่ 2.19 ความสัมพันธ์ระหว่างความตึงเครียดของโลหะชนิดต่าง ๆ บนพลาสติกกับระยะเวลาที่ล่องมาหลังการชุบเคลือบผิว [26]

การที่ค่ากำลังความตึงเครียดหลังจากการชุบเคลือบผิวเป็นระยะเวลานาน ๆ มีค่าไม่สูงนัก อาจเป็นเพราะปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นภายในระหว่างชั้นเคลือบกับผิวพลาสติกยังดำเนินอยู่ เมื่อเวลาผ่านไปนานพอปฏิกิริยาอาจหยุดลง จึงทำให้ค่าความยึดตึงเครียดมีค่ามากขึ้นและลู่เข้าสู่ค่าคงที่ดังรูปที่ 2.19 [26]

กำลังความตึงเครียดที่ลดลงอาจได้รับผลจากการเสื่อมสภาพในบางลักษณะของบริเวณผิวช่วงบนของพลาสติก เนื่องมาจากผลของการออกซิไดซ์ด้วยสารละลายกรดโครมิก ดังผลการทดลองที่ได้จากการกัดผิวด้วยสารละลายกรดโครมิก ที่ระยะเวลาในการกัดผิว 2 นาที และ 30 นาที ที่ความเข้มข้นของสารกัดผิวและอุณหภูมิในการกัดผิวค่าหนึ่ง ดังรูปที่ 2.20 ซึ่งพบว่ามีการเสื่อมสภาพของคุณสมบัติของผิวพลาสติกมากขึ้นเมื่อระยะเวลาการกัดผิวเพิ่มขึ้น [15]

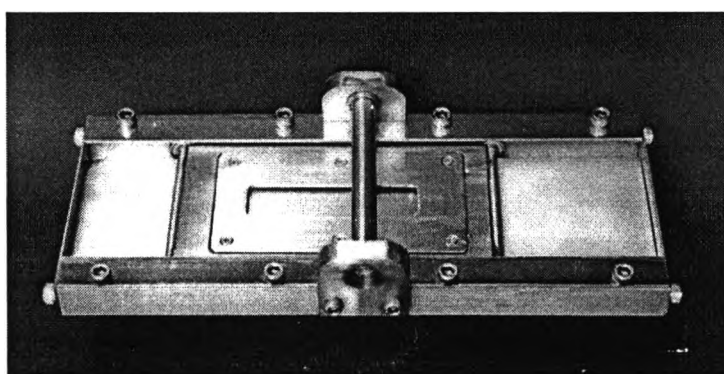


รูปที่ 2.20 Thermogram ของพลาสติกเอบีเอสก่อนและหลังการกัดผิวด้วยสารละลายกรดโครมิก (ทดสอบการชุบชิ้นงานทดสอบเอบีเอสพลาสติกโดยเริ่มต้นที่อุณหภูมิห้องและเพิ่มอุณหภูมิให้สูงขึ้น 10 องศาเซลเซียสทุกหนึ่งนาที) [15]

จากทฤษฎีกลไกความตึงเครียดข้างต้นเห็นได้ชัดว่า การกัดผิวนั้นก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทั้งทางกลและทางเคมีขึ้นตรงบริเวณพื้นผิวพลาสติกซึ่งจะช่วยเพิ่มความตึงเครียดระหว่างชั้นเคลือบโลหะและผิวพลาสติกเอบีเอสเป็นอย่างมาก แต่ถ้าหากการกัดผิวไม่เหมาะสมผิวเคลือบโลหะอาจเกิดการหลุดลอก บวมพอง หรือเกิดการชุบไม่ติดผิว [12,15,18,23]

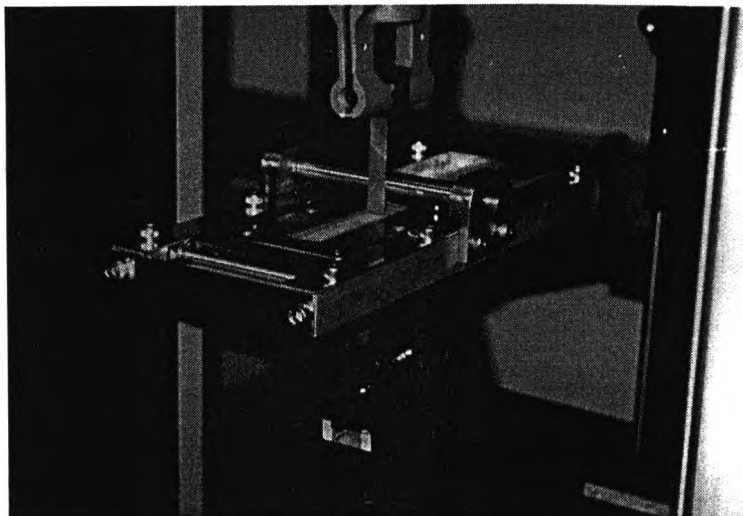
## 2.5 การทดสอบความติดแน่นระหว่างชั้นเคลือบทองแดงและพลาสติกเอปียเอสด้วยวิธี Peel Test [24]

เป็นวิธีการวัดความแข็งแรงของการยึดติดแน่นระหว่างชั้นโลหะกับชั้นงานพลาสติก (หรือเป็นการวัดความแข็งแรงของชั้นที่อ่อนแอที่สุดของชั้นงานที่เคลือบด้วยโลหะ) ด้วยการดึงชั้นเคลือบออกจากผิวชั้นงานพลาสติก ซึ่งอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบได้แก่ tensile machine และ ตัวจับยึดชั้นงานทดสอบ (fixture) ดังรูปที่ 2.21



รูปที่ 2.21 ตัวจับยึดชั้นงานสำหรับทดสอบ Peel test [24]

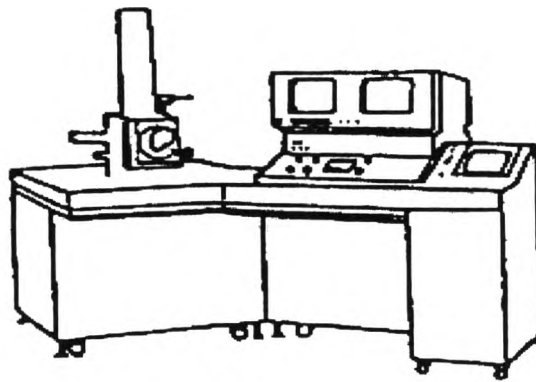
โดยชั้นงานทดสอบจะถูกวางบนตัวจับยึด และชั้นเคลือบโลหะที่ถูกลอกเริ่มต้นจะถูกหนีบไว้กับหัวจับส่วนบนของ tensile machine ดังรูปที่ 2.22 [24] โดยวิธีการทดสอบจะเป็นไปตามมาตรฐาน JIS (ดูรายละเอียดในภาคผนวก ข) หัวจับส่วนบนของ tensile machine จะเคลื่อนที่ขึ้นเพื่อดึงลอกชั้นเคลือบโลหะเป็นมุมคงที่ 90 องศา กับตัวชั้นงาน ด้วยอัตราเร็วคงที่ 25 มิลลิเมตรต่อวินาที จนกระทั่งผิวเคลือบหลุดลอกออกจากชั้นงานพลาสติก ค่าที่วัดได้คือ ค่าความแข็งแรงในการลอกชั้นเคลือบโลหะจากชั้นงาน (peel strength)



รูปที่ 2.22 ลักษณะการจับยึดชิ้นงานในการทดสอบ peel test [24]

## 2.6 การศึกษาลักษณะพื้นผิวพลาสติกเอปียเอสด้วยเครื่อง SEM (Scanning Electron Microscope) [39]

เป็นเครื่องมือที่ช่วยในการศึกษาลักษณะพื้นผิวของวัสดุต่างๆ ด้วยกำลังขยายที่สูงมากกว่ากล้องจุลทรรศน์ โดยอาศัยแหล่งกำเนิดแสงเป็นอิเล็กตรอนที่ถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้าในสุญญากาศ ลำแสงอิเล็กตรอนจะถูกบังคับให้เคลื่อนที่ไปบนผิวตัวอย่าง จากนั้นอุปกรณ์วัดจะรวบรวมสัญญาณที่เกิดขึ้นและส่งผลไปยังอุปกรณ์อื่นเพื่อแปรผลให้เป็นสัญญาณภาพที่หน้าจอ ซึ่งงานจะถูกเตรียมให้มีขนาดที่เหมาะสมกับที่วางชิ้นงานและจะถูกฉาบทองอย่างทั่วถึงเพื่อให้บริเวณที่ต้องการศึกษาสามารถนำไฟฟ้าจากอิเล็กตรอนที่มากกระทบได้ เครื่อง SEM สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.23



รูปที่ 2.23 เครื่อง scanning electron microscope (SEM) [39]