

การเตรียมสารเคลือบผิวในกลุ่มยูรีเทนอคริเลทสำหรับเคลือบผิวเหล็กด้วยอิเล็กตรอน빔เคียวริง

นายวิจักขณ์ กุปตะเวทิน

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี ภาควิชาวิศวกรรมนิวเคลียร์  
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
ปีการศึกษา 2555  
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)  
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR)  
are the thesis authors' files submitted through the Graduate School.

PREPARATION OF STEEL COATING MATERIAL FROM URETHANE ACRYLATE  
GROUP BY ELECTRON BEAM CURING

Mr. Wijak Kuptawetin

A Thesis Submitted in Partial Fullfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Science Program in Nuclear Technology

Department of Nuclear Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Acedemics Year 2012

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การเตรียมสารเคลือบผิวในกลุ่มยูรีเทนอคริเลทสำหรับ  
เคลือบผิวเหล็กด้วยอิเล็กตรอนบีมเดียวรัง

โดย

นายวิจักขณ์ คุปตะเวทิน

สาขาวิชา

นิวเคลียร์เทคโนโลยี

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

รองศาสตราจารย์ ศิริวัฒนา บัญชรเทวกุล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เป็นส่วน  
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(รองศาสตราจารย์ ดร.บุญสม เลิศหิรัญวงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ นเรศร์ จันทน์ขาว)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก  
(รองศาสตราจารย์ ศิริวัฒนา บัญชรเทวกุล)

..... กรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร.สุพิชชา จันทโรโยธา)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย  
(รองศาสตราจารย์ ชยากริต ศิริอุปถัมภ์)

วิจัยณ์ คุปตะเวทิน : การเตรียมสารเคลือบผิวในกลุ่มยูรีเทนอคริเลทสำหรับเคลือบผิวเหล็กด้วยอิเล็กตรอนบีมเคียวริง(PREPARATION OF STEEL COATING MATERIAL FROM URETHANE ACRYLATE GROUP BY ELECTRON BEAM CURING) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : รศ. ศิริวัฒนา บัญชรเทวกุล, 61 หน้า

งานวิจัยนี้ศึกษาการเตรียมสารเคลือบผิวในกลุ่มยูรีเทนอคริเลทสำหรับเคลือบผิวเหล็กด้วยอิเล็กตรอนบีมเคียวริง โดยใช้ Ebecryl 8701 และ Ebecryl 8702 เป็นโอลิโกเมอร์ ใช้มอนอเมอร์คือ Tripropylene glycol diacrylate (TPGDA) และ Pentaerythritol tri-tetraacrylate (PETIA) และสารเติมแต่งคือ Maleic anhydride และ 4-Hydroxy anisole (หนัก 2 กรัมและ 480 มก คงที่ตามลำดับ) พบว่า ส่วนผสมของสารเคลือบผิวที่ดีมี 4 สูตร แต่ละสูตรประกอบด้วย Ebecryl 8701 : Ebecryl 8702 : TPGDA : PETIA เท่ากับ 50:0:50:0, 50:0:0:50, 25:25:0:50, และ 50:0:25:25 ตามลำดับ สารเคลือบผิวที่มีส่วนผสมทั้ง 4 สูตรดังกล่าวข้างต้นสามารถทนต่อการชุบขีดตามมาตรฐาน ASTM 2240 ด้วยดินสอดชนิด 6H และสามารถทนต่อสารเคมีที่ใช้ในครัวเรือนตามมาตรฐาน ASTM D1308.

ภาควิชา.....วิศวกรรมนิวเคลียร์.....ลายมือชื่อนิสิต.....  
 สาขาวิชา.....นิวเคลียร์เทคโนโลยี.....ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....  
 ปีการศึกษา.....2555.....

## 5270495021 : NUCLEAR TECHNOLOGY

KEYWORDS : ELECTRON BEAM / COATING / CURING / ACRYLATE

WIJAK KUPTAWETIN : PREPARATION OF STEEL COATING MATERIAL FROM URETHANE ACRYLATE GROUP BY ELECTRON BEAM CURING. THESIS ADVISOR : ASSOC. PROF. SIRIWATTANA BANCHORNDHEVAKUL, 61 pp.

Preparation of steel coating material from urethane acrylate and electron beam curing were investigated. Ebecryl 8701 and Ebecryl 8702, Tripropylene glycol diacrylate (TPGDA) and Pentaerythrotol tri-tetraacrylate (PETIA), Maleic anhydride (2 grams) and 4-Hydroxy anisole (480 mg) were used as oligomers, monomers, and additives, respectively. The four best coating formulation obtained from this study consist of Ebecryl 8701 : Ebecryl 8702 : TPGDA : PETIA at 50:0:50:0, 50:0:0:50, 25:25:0:50, and 50:0:25:25, respectively. All above 4 coatings could withstand ASTM 2240 scratch test (with 6H pencil type) and had good chemical resistance (ASTM D1308) to household chemicals.

Department : ..... Nuclear Engineering ..... Student's Signature .....

Field of Study : ..... Nuclear Technology ..... Advisor's Signature .....

Academic Year : ..... 2012 .....

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สามารถสำเร็จลุล่วงได้ตามวัตถุประสงค์ ผู้วิจัยต้องขอกราบขอบพระคุณ รศ. ศิริวัฒนา บัญชรเทวกุล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ให้คำแนะนำและคำปรึกษาอย่างดียิ่งตลอดการทำงานวิจัยชิ้นนี้ และขอกราบขอบพระคุณ รศ.ดร.สุพิชชา จันทโรโยธา รศ.นเรศร์ จันทน์ขาว และ รศ.ชยากริต ศิริอุปถัมภ์ คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่ให้คำแนะนำในการตรวจสอบและแก้ไขวิทยานิพนธ์ รวมทั้งคณาจารย์ทุกท่านในภาควิชาวิศวกรรมนิเวศศาสตร์ ที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ต่างๆ ให้กับผู้วิจัยตลอดมา

นอกจากนี้ ผู้วิจัยต้องขอกราบขอบพระคุณหน่วยงานต่างๆ และผู้ทรงคุณวุฒิทุกท่านที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยชิ้นนี้ อันได้แก่

บริษัท ไชเทค อินคัสตรีส์ (ประเทศไทย) จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์สารเคมีสำหรับผสมสารเคลือบผิว

สถาบันเทคโนโลยีนิวเคลียร์แห่งชาติ (องค์การมหาชน) องค์กรฯ ที่ให้ความอนุเคราะห์เครื่องเร่งอนุภาคอิเล็กตรอน สำหรับฉายรังสีอิเล็กตรอนที่ใช้ในงานวิจัยนี้

บริษัท แคลเซิร์ฟ ประเทศไทย จำกัด ที่รับทดสอบการทนการกัดกร่อนของสนิม (Salt Spray Test) ของชิ้นงานที่เตรียมได้จากงานวิจัยนี้

ภาควิชาวัสดุศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ความอนุเคราะห์เครื่องมือที่ใช้ทดสอบคุณสมบัติของผิวเคลือบ

สุดท้ายนี้ ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ที่คอยสนับสนุนและให้กำลังใจมาโดยตลอด ขอขอบคุณ นาย ภาณุวัฒน์ ศรีหมอก ผู้ที่ช่วยเหลือและให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์ต่องานวิจัยนี้ รวมทั้งเพื่อนๆ รุ่นพี่ รุ่นน้องทุกคนที่ให้กำลังใจและความเอื้อเฟื้อต่างๆ นอกจากนี้ยังมีบุคคลอื่นที่มีส่วนช่วยเหลือต่างๆอีกมากมายซึ่งมิได้กล่าวถึง ข้าพเจ้าจึงขอขอบคุณเป็นอย่างสูงมา ณ โอกาสนี้

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 การบ่มสารเคลือบผิวด้วยรังสี.....	5
2.2 ลำแสงอิเล็กตรอน (Electron beam).....	6
2.2.1 เครื่องเร่งอนุภาคอิเล็กตรอน.....	6
2.2.2 อัตรากิริยาของอิเล็กตรอนกับสสาร (Electron – Material Interaction).....	7
2.2.3 การทะลุทะลวงและการดูดกลืนของลำแสงอิเล็กตรอน (Penetration depth and absorbed dose of electron).....	10
2.3 องค์ประกอบของสารเคลือบผิวที่บ่มด้วยลำแสงอิเล็กตรอน.....	11
2.3.1 ตัวเจือจางที่ว่องไว (Reactive diluent).....	11
2.3.2 โอลิโกเมอร์ (Oligomer).....	12
2.3.3 สารเติมแต่ง (Additive).....	13
2.4 การบ่มสารเคลือบผิวด้วยลำแสงอิเล็กตรอน (Electron beams curing).....	17
2.4.1 ปฏิกิริยาแบบอนุมูลอิสระ (Free radical polymerization).....	17
2.4.2 ปฏิกิริยาแบบประจุบวก (Cationic polymerization).....	18
2.5 การสุกก่อนของเหล็ก.....	19
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	21
3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง.....	21

	หน้า
3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง.....	21
3.3 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์.....	24
3.4 วิธีทดลอง.....	25
3.4.1 การเตรียมสารเคลือบผิว.....	25
3.4.2 การเคลือบผิวแผ่นเหล็ก.....	26
3.4.3 การทดสอบคุณสมบัติของสารเคลือบผิว.....	27
บทที่ 4 ผลการวิจัยและวิเคราะห์ผล.....	30
4.1 หาสัดส่วนที่เหมาะสมของสารที่ใช้เป็นสารเคลือบผิว.....	30
4.2 ทดสอบคุณสมบัติของสารเคลือบผิว.....	33
4.2.1 ทดสอบการทนต่อการขูดขีด.....	33
4.2.2 ทดสอบการทนต่อการขัดถูแบบเปียก.....	34
4.2.3 ทดสอบการทนต่อการกัดกร่อนด้วยหมอกเกลือ.....	38
4.2.4 ทดสอบความคงทนต่อสารเคมี.....	54
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย.....	57
รายการอ้างอิง.....	59
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	61



## บทที่ 1

### บทนำ

#### ความเป็นมาและความสำคัญ

กระบวนการเคลือบผิววัสดุด้วยสารเคลือบผิวโดยใช้การฉายรังสี (Radiation curing) ได้ถูกใช้กันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมเคลือบผิว เช่น การเคลือบผิวไม้ พลาสติก ช่วยป้องกันการเกิดรอยขีดข่วนบนผิวชิ้นงาน ทำให้ผิววัสดุมีความเงางาม เมื่อเทียบกับการเคลือบผิววัสดุด้วยวิธีอื่นพบว่า มีขั้นตอนที่รวดเร็ว ช่วยปรับปรุงคุณสมบัติผิวของวัสดุ ป้องกันการขีดข่วน (Scratching) การกัดกร่อน (Corrosion) ทนต่อสารเคมีและอากาศ

ด้วยประโยชน์ดังกล่าวจึงมีการนำกรรมวิธีการฉายรังสีเพื่อเคลือบผิวมาใช้ในการเคลือบผิวโลหะอย่างแพร่หลาย ได้แก่ การเคลือบผิวเหล็กสำหรับใช้เป็นวัสดุก่อสร้างหรืออุตสาหกรรมผลิตภัณฑ์ เครื่องใช้ในบ้าน บรรจุภัณฑ์ เช่น กระจก เพื่อให้ได้โลหะที่มีคุณสมบัติเป็นที่ต้องการ การเลือกสารที่ใช้เคลือบผิวจึงมีความสำคัญ สารเคลือบผิวประกอบด้วย Monomer , Oligomer , Photoinitiators (สำหรับการเคลือบผิวด้วยรังสี UV ) และ Additive โดยขึ้นอยู่กับการจัดสรรส่วนประกอบของสารที่กล่าวมาให้มีองค์ประกอบที่เหมาะสม แหล่งกำเนิดรังสีที่นิยมใช้ คือ รังสีอุลตราไวโอเลต (Ultraviolet radiation, UV) และ อิเล็กตรอนบีม ( Electron Beam, EB)

ในงานวิจัยนี้จะทำการหาองค์ประกอบที่เหมาะสมในการเตรียมสารเคลือบผิวในกลุ่มยูรีเทนอคริเลทเพื่อเคลือบผิวเหล็กโดยใช้อิเล็กตรอนบีม เพื่อให้เหล็กที่ผ่านกระบวนการเคลือบผิวมีคุณสมบัติที่ดีขึ้น เช่น ทนต่อการขีดข่วน มีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น

## ตัวอย่างงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 1. Effect of UV/EB radiation dosages on the properties of nanocomposite coatings

Nik GhazaliNikSalleh, MohdFirdausYhaya, AzmanHassan, Aznizam AbuBakar, MunirahMokhtar

ศึกษาและทำการทดลองเปรียบเทียบคุณสมบัติ ระหว่างการใช้แสงยูวี และอิเล็กตรอนบีม ในการเคลือบผิวด้วยสารเคลือบผิวที่ผสมวัสดุนาโน พบว่าปริมาณการเชื่อมต่อของพอลิเมอร์เพิ่มมากขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณรังสีที่ฉาย ทำการวิเคราะห์ค่า Pendulum Hardness ค่า gel content ค่าการคงสภาพ หลังจากเคลือบผิวให้แห้งแล้ว ทำการทดสอบการทนต่อการขีดข่วน การขัดถู จากการทดสอบ วิธีเคลือบผิวให้แห้งด้วยแสงยูวี จะทนต่อการขัดถูได้ดีกว่า ส่วนการเคลือบผิวให้แห้งด้วยอิเล็กตรอนบีมจะทำให้ผิวของวัสดุมีความทนต่อการขีดข่วนมากกว่า

### 2. Characterization of a clear coating cured by UV/EB radiation

C.S.B Ruiza, L.D.B. Machadob, E.S. Pinob, M.H.O Sampa

ทดลองฉายรังสีทำให้ฟิล์มแห้งด้วยแสงยูวี และอิเล็กตรอนบีม ใช้ปริมาณรังสีระหว่าง 50-1200 mJ/cm<sup>2</sup> และ 1-30 kGy ตามลำดับ วิเคราะห์คุณสมบัติทางความร้อน และเชิงกล พบว่า การใช้อิเล็กตรอนบีมให้ผลการทดสอบที่ดีกว่าในการทนต่อแรงดึง ที่ปริมาณรังสี 20 kGy ขึ้นไป

### 3. Electron-beam initiated polymerization of acrylate compositions 3: compared reactivity of hexanediol and tripropyleneglycol diacrylates under UV or EB initiation

Colette Patacza, Xavier Coquereta, Christian Decker

ทำการทดลองเปรียบเทียบสารมอนอเมอร์สองตัว คือ 1,6-hexanediol diacrylate (HDDA) และ tripropyleneglycol diacrylate (TPGDA) ใช้โพลิโกเมอร์เป็น polyurethane acrylate กับแหล่งกำเนิดรังสีระหว่าง แสงยูวี และอิเล็กตรอนบีม พบว่า TPGDA เกิดพอลิเมอร์ไรเซชันได้ดีและเร็ว ซึ่งน่าจะมาจากความสามารถดึงไฮโดรเจนออกได้ง่ายกว่าใน oxypropylene segment ของ TPGDA

## วัตถุประสงค์

เพื่อหาค่าประกอบและสัดส่วนของสารเคลือบที่เหมาะสมสำหรับเคลือบผิวเหล็กด้วย อิเล็กตรอนบีมเคียวริง

## ขอบเขต

1. ศึกษาและทดลองหาค่าประกอบและสัดส่วนที่เหมาะสมของ โอลิโกเมอร์ ในกลุ่ม Urethane acrylates เช่น Aliphatic Urethane Triacrylate มอนอเมอร์ เช่น Tripropylene Glycol Diacrylate (TPGDA) , Pentaerythritol Tri-Tetraacrylate (PETIA) และสารเติมแต่ง สำหรับเตรียมสารเคลือบผิวโดยใช้ลำอิเล็กตรอนเพื่อให้เกิดพอลิเมอร์ไรชันให้แห้งติดกับผิวเหล็ก
2. ทดสอบคุณสมบัติของเหล็กที่ผ่านการเคลือบผิวแล้ว เช่น ทนต่อการขีดข่วน การขัดถู ความทนต่อสารเคมี เป็นต้น

## ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ได้ส่วนผสมสารเคลือบผิวที่ทำให้เหล็กที่เคลือบมีคุณสมบัติที่ดีขึ้น

## วิธีการดำเนินงานวิจัย

1. ศึกษาค้นคว้าเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
2. จัดหาอุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง คือ โอลิโกเมอร์ มอนอเมอร์ และสารเติมแต่งต่างๆ
3. ทดลองหาค่าประกอบและสัดส่วนที่เหมาะสม ของโอลิโกเมอร์ในกลุ่ม Urethane acrylates มอนอเมอร์ และสารเติมแต่ง เพื่อใช้เป็นสารเคลือบผิวโลหะ ด้วยลำอิเล็กตรอน
4. ทำการเคลือบผิวเหล็กด้วยสารเคลือบผิวจากข้อ 3. และทำให้แห้งติดกับเหล็กโดยใช้ลำอิเล็กตรอน

5. ทดสอบคุณสมบัติของชิ้นงานที่เคลือบผิว เช่น ทนต่อการขีดข่วน การขัดถู ความทนต่อสารเคมี
6. สรุปผลการทดลองและเขียนวิทยานิพนธ์

## บทที่ 2

### ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 การบ่มสารเคลือบผิวด้วยรังสี

การบ่มสารเคลือบผิวด้วยรังสี ใช้หลักการแผ่รังสีลงบนสารเคลือบผิวที่มีคุณสมบัติพิเศษในการตอบสนองต่อรังสี ทำให้สารเคลือบผิวนั้นเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันและเกิดการเชื่อมขวางอย่างสมบูรณ์ ซึ่งจะแปรสภาพจากฟิล์มของเหลวเป็นสารเคลือบแข็งในทันที

กระบวนการบ่มสารเคลือบผิวด้วยรังสีมี 2 วิธีคือ

1. การบ่มสารเคลือบผิวด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ต (Ultraviolet curing) ใช้หลักการของกระบวนการทำให้สารเคลือบผิววัสดุอยู่ตัวหรือแข็งตัว โดยการนำตัวริเริ่มปฏิกิริยาทางแสง (Photoinitiators) ที่มีคุณสมบัติตอบสนองต่อรังสีอัลตราไวโอเล็ต จากนั้นฉายรังสีอัลตราไวโอเล็ตเพื่อทำให้ตัวริเริ่มปฏิกิริยาทางแสงแตกตัวให้อนุมูลอิสระหรือประจุบวก เพื่อเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันกับมอนอเมอร์หรือ โอลิโกเมอร์ตั้งต้น

2. การบ่มสารเคลือบผิวด้วยลำแสงอิเล็กตรอน (Electron beams curing) ใช้ลำแสงอิเล็กตรอนกระตุ้นให้มอนอเมอร์หรือโอลิโกเมอร์ตั้งต้นเกิดอนุมูลเสรีขึ้น จากนั้นอนุมูลอิสระที่เกิดขึ้นนี้จะทำปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันจนได้พอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างเชื่อมโยงจนเป็นร่างแห

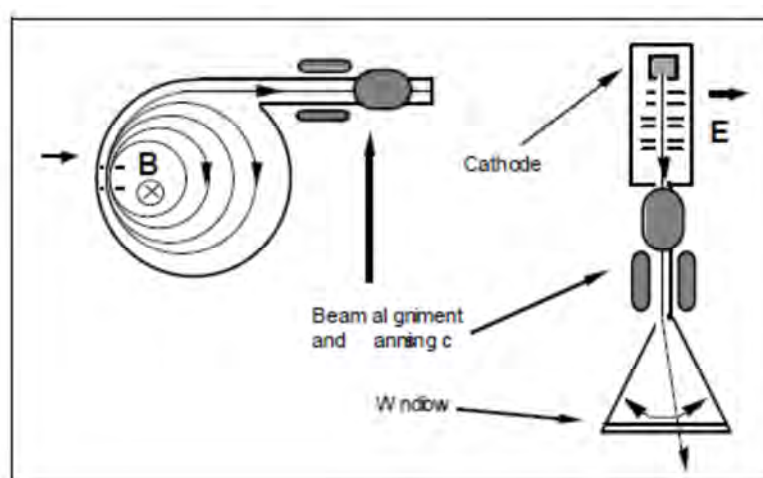
สำหรับงานวิจัยนี้จะอธิบายเฉพาะการบ่มสารเคลือบผิวด้วยลำแสงอิเล็กตรอน

## 2.2 ลำแสงอิเล็กตรอน (Electron beam)

### 2.2.1 เครื่องเร่งอนุภาคอิเล็กตรอน

ลำแสงอิเล็กตรอนที่ใช้ในอุตสาหกรรมส่วนใหญ่ถูกผลิตโดยเครื่องเร่งอนุภาค เครื่องเร่งอนุภาคเชิงเส้น (linear accelerator : linac) เป็นชนิดที่ใช้กันมากที่สุด ในอุตสาหกรรม อิเล็กตรอนที่ได้จากขั้วคาโทดในสภาวะสุญญากาศจะถูกเร่งในสนามไฟฟ้าให้เร็วและมีพลังงานมากขึ้น อนุภาคของอิเล็กตรอนถูกบังคับทิศทางโดยสนามแม่เหล็กให้เคลื่อนที่เป็นลำ ทะลุออกทางหน้าต่างที่ปิดด้วยแผ่นโลหะบางเข้าชนกับเป้าหมาย

เครื่องไมโครตรอน (Microtron) เป็นเครื่องเร่งอนุภาคอีกชนิดหนึ่ง มีหลักการทำงานคล้ายกับเครื่อง linac แต่อิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่เป็นวงกลมและตั้งฉากกับสนามแม่เหล็ก พลังงานของอิเล็กตรอนจะเพิ่มขึ้นตามจำนวนรอบที่เคลื่อนที่



รูปที่ 2.1 เครื่องเร่งอนุภาคอิเล็กตรอน

ซ้าย : Microtron

ขวา : Linac

พลังงานของอิเล็กตรอนที่ผลิตได้ถูกแบ่งออกเป็น 3 ช่วงพลังงาน สำหรับใช้ในทางอุตสาหกรรม คือ ช่วงพลังงานต่ำ (พลังงานไม่เกิน 300 keV) พลังงานปานกลาง (ระหว่าง 300 keV ถึง 5 MeV) และพลังงานสูง (มากกว่า 5 MeV) ในที่นี้จะกล่าวถึงระดับพลังงานปานกลาง และพลังงานสูง ซึ่งเป็นช่วงพลังงานที่ใช้ในการเคลือบผิว

#### 1. เครื่องเร่งอนุภาคพลังงานปานกลาง (Medium energy accelerators)

เป็นเครื่องเร่งอนุภาคที่ผลิตอิเล็กตรอนพลังงานในช่วง 300 keV ถึง 5 MeV ส่วนใหญ่ใช้ระบบ direct action หรือ potential drop บางเครื่องอาจใช้ระบบ radio frequency หรือ microwave แหล่งพลังงานมักเป็น high voltage dc power supply อิเล็กตรอนที่ขั้วลบของหลอดรังสี (ส่วนใหญ่เป็นขดลวดทังสเตนที่ถูกทำให้ร้อน) จะถูกเร่งด้วย electrostatic fields ผ่านช่องทาง beam window (มักทำจาก titanium alloy หนาไม่เกิน 100  $\mu\text{m}$ )

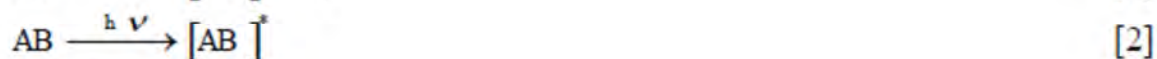
#### 2. เครื่องเร่งอนุภาคพลังงานสูง (High-energy accelerators)

เครื่องเร่งอนุภาคที่ให้อิเล็กตรอนพลังงานสูงกว่า 5 MeV เป็นชนิด microwave linear accelerators (linacs) หรือ high frequency และชนิด resonant cavity accelerators เครื่องเร่งเหล่านี้ไม่ต้องใช้ high voltage power supplies เป็นตัวเร่งแต่อิเล็กตรอนจะถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้าที่สร้างจาก grounded metallic enclosures อิเล็กตรอนจะถูกปล่อยเป็นกลุ่มใน alternating fields พลังงานสุดท้ายของอิเล็กตรอนขึ้นอยู่กับความแรงของ fields และระยะทางใน enclosures

### 2.2.2 อันตรกิริยาของอิเล็กตรอนกับสสาร (Electron – Material Interaction)

เมื่ออิเล็กตรอนความเร็วสูง (Primary electron) ชนกับวัตถุ อิเล็กตรอนจะสูญเสียพลังงานให้กับอิเล็กตรอนในวงโคจรของอะตอมหรือโมเลกุลเป้าหมายจนหลุดออกมา (Secondary electron) ทำให้อะตอมกลายเป็นประจุ (Ionization - [1]) หรืออาจเลื่อนไปอยู่ในระดับพลังงานที่สูงขึ้น ทำให้อะตอมหรือโมเลกุลอยู่ในสภาวะกระตุ้น (Excitation – [2]) อะตอมที่เป็นประจุจะไม่เสถียร อาจสลายตัว (Decomposition – [3]) หรือทำปฏิกิริยากับโมเลกุลอื่นที่อยู่ใกล้ ถ้าประจวบกับกับอิเล็กตรอน [4] หรือประจุลบเสียอิเล็กตรอน จะทำให้อะตอมหรือโมเลกุลนั้นอยู่ในสภาวะกระตุ้น อิเล็กตรอนที่หลุดออกมาอาจกลับเข้าไปรวมกับอะตอมเดิมจนอะตอมอยู่ในสภาวะกระตุ้น [4] หรือ

อาจถูกจับโดยอะตอมตัวอื่นกลายเป็นประจุลบ [5] การถ่ายเทพลังงานดังกล่าวนี้ทำให้สมบัติทางกายภาพและ/หรือทางเคมีเปลี่ยนไป



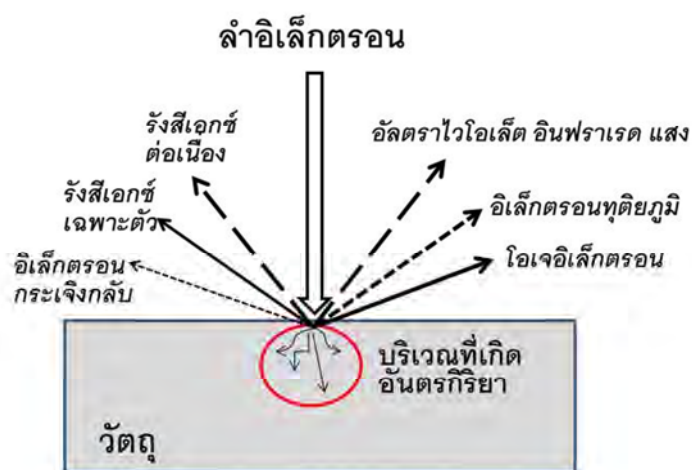
รูปที่ 2.2 สมการการถ่ายเทพลังงานของอิเล็กตรอนพลังงานสูงกับเป้าหมาย

จากสมการ [1] ถึง [5] ผลิตรังสีทุกตัวจะเกิดขึ้นขณะฉายแสงอิเล็กตรอน  $[AB]^*$  ที่เกิดขึ้นถ้ามีพลังงานมากพอและอยู่ตรงตำแหน่งพันธะ โมเลกุลจะแตกตัวเป็นอนุมูลอิสระ 2 ตัว [6] ซึ่งอาจรวมตัวกันใหม่เป็นโมเลกุลใหม่หนึ่งตัว (Recombination) [7] หรือสองตัว (Disproportionation) [8] หรือแทนที่ตัวอื่น (Substitution) [9]

อิเล็กตรอนเป็นอนุภาคขนาดเล็กที่มีประจุลบ มีมวลเพียงประมาณ  $1/1860$  ของอนุภาคโปรตอนและอนุภาคนิวตรอนเท่านั้น การชนของอิเล็กตรอนกับอะตอมจึงทำให้อิเล็กตรอนในวงโคจรของอะตอมหลุดออกจากอะตอมได้ถ้ามีการถ่ายเทพลังงานให้เกินค่าพลังงานยึดเหนี่ยว เมื่ออิเล็กตรอนใน ๆ หลุดออกจากอะตอม อิเล็กตรอนวงนอกซึ่งมีระดับพลังงานสูงกว่าจะเข้ามาแทนที่พร้อมกับปลดปล่อยพลังงานออกมาในรูปของรังสีเอกซ์ที่มีพลังงานเฉพาะสำหรับแต่ละธาตุและแต่ละระดับชั้นวงโคจรของอิเล็กตรอน จึงเรียกว่า “รังสีเอกซ์เฉพาะตัว (characteristic x-ray)” รังสี



เอกซ์เฉพาะตัวที่เกิดขึ้นอาจชนกับอิเล็กตรอนในอะตอมทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกจากอะตอมแทน เรียกว่า "ไอเจีอิเล็กตรอน (Auger electron)" หากเป็นอิเล็กตรอนวงนอก (valence electron) ของอะตอม ซึ่งมีระดับพลังงานสภาวะกระตุ้น (excited state) การถ่ายเทพลังงานให้อิเล็กตรอนวงนอกสามารถทำให้เกิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในรูปของอัลตราไวโอเล็ต (ultraviolet, UV) อินฟราเรด (infrared, IR) และแสงที่มองเห็น (visible light) ได้ เมื่ออิเล็กตรอนวิ่งเข้าชนวัสดุอาจเกิดรังสีเอกซ์ต่อเนื่อง (continuous x-ray) หรือที่มักเรียกเป็นภาษาเยอรมันว่า “เบรมส์สตราห์ลุง (bremsstrahlung)” ซึ่งแปลเป็นภาษาอังกฤษว่า “braking radiation” ซึ่งหมายถึงรังสีที่เกิดจากการทำให้อิเล็กตรอนที่วิ่งอยู่ด้วยความเร็วสูงลดความเร็วลงมา จากการที่อิเล็กตรอนถูกดึงดูดโดยประจุบวกของโปรตอนที่อยู่ในนิวเคลียสของอะตอมทำให้อิเล็กตรอนวิ่งที่เข้าหาอะตอมด้วยความเร่ง แต่เมื่อเข้าใกล้อะตอมจะถูกผลักโดยอิเล็กตรอนทำให้เกิดความหน่วงและปลดปล่อยพลังงานออกมาในรูปของรังสีเอกซ์ การสูญเสียพลังงานในลักษณะนี้แต่ละครั้งจะแตกต่างกันไปจึงมีสเปกตรัมพลังงานแบบต่อเนื่อง โดยมีพลังงานสูงสุดเท่ากับพลังงานจลน์ของอิเล็กตรอน การเกิดรังสีเอกซ์ต่อเนื่องนี้เป็นหลักการที่ค้นพบโดยโรนต์เกน (Roentgen) ที่ใช้ในการผลิตรังสีเอกซ์ของหลอดกำเนิดรังสีเอกซ์ที่ใช้กันอยู่ทั่วไป



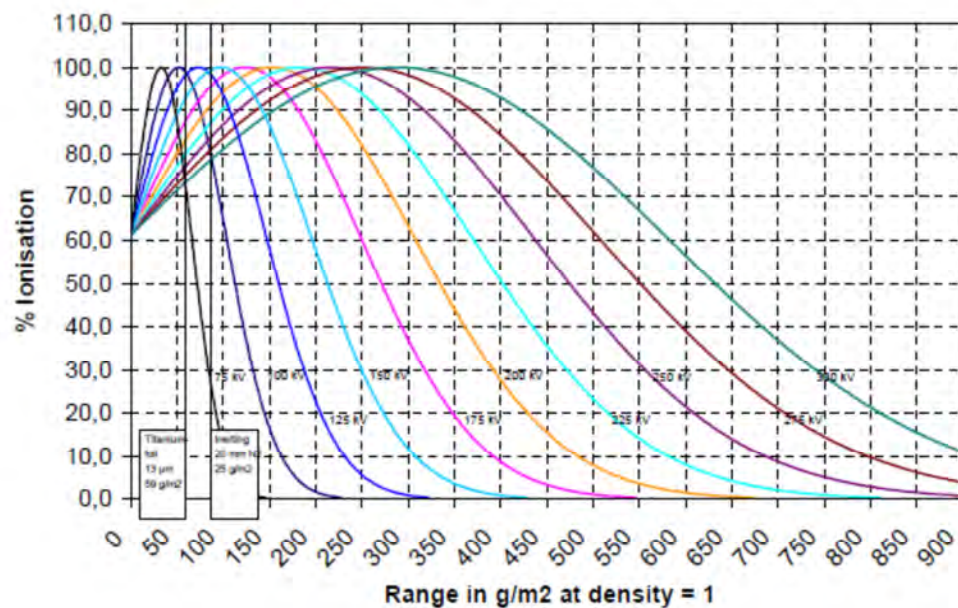
รูปที่ 2.3 แผนภาพแสดงผลที่เกิดจากอันตรกิริยาของอิเล็กตรอนกับวัตถุ

เนื่องจากอิเล็กตรอนมีขนาดเล็ก จึงเกิดการกระเจิง (scatter) ไปในทิศทางต่าง ๆ โดยการกระเจิงกลับ (backscatter) จากผิววัสดุจะเพิ่มขึ้นตามเลขอะตอม (atomic number, Z) ของธาตุตาม Tittle's formular คืออัตราส่วนของ  $1 - \exp(-Z/40)$

สำหรับงานวิจัยนี้สารที่ใช้เคลือบแผ่นเหล็กมีความหนาแน่นน้อยมาก คือต่ำกว่า 100 ไมครอน แต่เครื่องเร่งอนุภาคอิเล็กตรอนที่ใช้มีพลังงานสูง คือ 8 MeV ดังนั้นการถ่ายเทพลังงานงานให้กับสารเคลือบโดยตรงจึงมีน้อย แต่จะได้พลังงานจากอนุภาคและโฟตอนที่เกิดจากอันตรกิริยาของอิเล็กตรอนกับแผ่นเหล็ก ทำให้เกิดรังสีเอกซ์จาก Bremsstrahlung ซึ่งถูกใช้ในการบ่มสารเคลือบผิวให้แห้งเป็นส่วนใหญ่ อิเล็กตรอนบางตัวที่ยังมีพลังงานเหลือหลังจากถ่ายเทพลังงานจะหักเหออกไป

### 2.2.3 การทะลุทะลวงและการดูดกลืนของลำแสงอิเล็กตรอน (Penetration depth and absorbed dose of electron)

การทะลุทะลวงของลำแสงอิเล็กตรอนในวัสดุจะขึ้นอยู่กับพลังงานของมัน และความหนาแน่นของวัสดุ ตำแหน่งที่มีการดูดกลืนอิเล็กตรอนมากที่สุด ไม่ได้อยู่ที่ผิววัสดุ แต่อยู่ลึกลงไปใฝิวระดับหนึ่งเนื่องจากการกระเจิงกลับของอิเล็กตรอน



รูปที่ 2.4 การทะลุทะลวงของลำแสงอิเล็กตรอนในวัสดุที่หนาแน่น 1 g/cm<sup>3</sup> ที่พลังงานต่าง ๆ

## 2.3 องค์ประกอบของสารเคลือบผิวที่ป่นด้วยลำแสงอิเล็กตรอน

องค์ประกอบของสารเคลือบผิวที่ป่นด้วยลำแสงอิเล็กตรอน โดยทั่วไปประกอบด้วย 3 องค์ประกอบหลัก ได้แก่

### 2.3.1 ตัวเจือจางที่ว่องไว (Reactive diluent)

ใช้สำหรับปรับลดความหนืดของสารเคลือบผิว และยังมีส่วนในการเกิดพอลิเมอร์ด้วย นอกจากนี้ยังกำหนดคุณสมบัติของสารเคลือบผิวได้ แบ่งตามหมู่ฟังก์ชัน ได้แก่

#### 1. ตัวเจือจางว่องไวที่มีหมู่ฟังก์ชันเดียว (Monofunctional diluent)

เป็นมอนอเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ มีความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยา มีโอกาสเข้าไปรวมตัวกับสารเคลือบผิวแล้วแห้งติดกับผิวมากกว่าระเหยเป็นไอ การยึดหยุ่นและการหดตัวต่ำ ตัวอย่างเช่น Phenol ethoxylate monoactylate

#### 2. ตัวเจือจางว่องไวที่มีหมู่ฟังก์ชันสองหมู่ (Difunctional diluent)

มอนอเมอร์ชนิดนี้ทำให้เกิดการแห้งตัวอย่างรวดเร็ว ช่วยทำให้เกิดการเชื่อมขวางภายในโมเลกุลของสารเคลือบผิว มีอัตราการระเหยของตัวทำละลายต่ำ ว่องไวต่อการทำปฏิกิริยา ตัวอย่างเช่น Tripropylene Glycol Diacrylate (TPGDA), 1-6 Hexanediol Diacrylate (HDDA)

#### 3. ตัวเจือจางว่องไวที่มีหมู่ฟังก์ชันหลายหมู่ (Multifunctional diluent)

ทำให้เกิดการเชื่อมขวางเช่นเดียวกับตัวเจือจางว่องไวที่มีหมู่ฟังก์ชันสองหมู่ เนื่องจากมีหมู่ฟังก์ชันที่ทำปฏิกิริยาได้หลายหมู่ ทำให้เกิดการเชื่อมขวางอย่างหนาแน่น ยึดเกาะผิวได้ดี ตัวอย่างเช่น Trimethylolpropane Triacrylate (TMPTA)

### 2.3.2 โอลิโกเมอร์ (Oligomer)

โอลิโกเมอร์ หรือ 프리โพลิเมอร์ (Prepolymer) ที่ใช้สำหรับเคลือบผิวด้วยรังสีส่วนใหญ่มีหมู่ฟังก์ชันหลายหมู่ที่ทำให้เกิดการเชื่อมขวางระหว่างพอลิเมอร์ต่างๆ โครงสร้างทางเคมีของโอลิโกเมอร์เป็นตัวกำหนดคุณสมบัติต่างๆของสารเคลือบผิว เช่น ความแข็ง ความทนต่อการขัดถู ความทนต่อสารเคมี ความอ่อนตัว เป็นต้น

โอลิโกเมอร์ที่นิยมใช้เป็นส่วนผสมของสารเคลือบผิว ได้แก่

#### 2.3.2.1 โอลิโกเมอร์ที่มีกลไกการเกิดปฏิกิริยาแบบอนุมูลเสรี (Free Radical System)

##### 1. อะคริเลตและเมทาคริเลต

เป็นชนิดที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมการบ่มสารเคลือบผิวด้วยรังสีมากที่สุด เนื่องจากสามารถสังเคราะห์โอลิโกเมอร์จำพวกอะคริเลตนี้ได้จากมอนอเมอร์หลายชนิด เช่น พอลิเอสเทอร์ อะคริเลต อีพอกซีอะคริเลต ยูรีเทนอะคริเลต เป็นต้น

มอนอเมอร์ในกลุ่มนี้มีกลไกในการเกิดปฏิกิริยาเป็นแบบอนุมูลเสรี (free radical polymerization) โดยอะคริเลตมีความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันมากกว่ามาลิเอต เนื่องจากมาลิเอตมีโครงสร้างที่มีความเกะกะ (sterically hindered) มากกว่าจึงทำให้ปฏิกิริยาในขั้นขยายตัว (propagation polymerisation) เกิดขึ้นได้ช้า

##### 2. สไตรีน / พอลิเอสเทอร์ไม่อิ่มตัว

สไตรีนสามารถใช้เป็นตัวเจือจางที่ว่องไว (reactive diluent) สำหรับพอลิเอสเทอร์ไม่อิ่มตัวเตรียมได้จากมาลิอิกแอนไฮดรายและกรดฟูมาริก พอลิเมอร์ที่ได้จะเป็นโคพอลิเมอร์ระหว่างพอลิสไตรีนพอลิเอสเทอร์และนิยมใช้ในอุตสาหกรรมไม้

### 2.3.2.2 โอลิโกเมอร์ที่มีกลไกการเกิดปฏิกิริยาแบบประจุบวก (Cationic System)

#### 1. อีพอกไซด์

สารประกอบอีพอกไซด์สามารถเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันได้โดยการเปิดวง เนื่องจากในวงของสารประกอบอีพอกไซด์มีความไม่เสถียรสามารถเปิดออกได้ง่ายโดย Brønsted acid (เช่น ไฮโดรเจนฟลูออไรด์) หรือ Lewis acid (เช่น โบรอนไตรฟลูออไรด์ ฟอสฟอรัสเพนตะฟลูออไรด์)

#### 2. ไวนิลอีเทอร์

ไวนิลอีเทอร์สามารถเกิดการบ่มได้ด้วยรังสีที่มีกลไกในการเกิดปฏิกิริยาแบบประจุบวกได้ เช่นเดียวกับสารประกอบอีพอกไซด์ การใช้ไวนิลอีเทอร์ที่มีหมู่ฟังก์ชันหลายหมู่ทำให้สามารถเกิดโครงสร้างที่เป็นร่างแหได้ง่าย

### 2.3.2.3 โอลิโกเมอร์ที่มีกลไกการเกิดปฏิกิริยาแบบผสม (hybrid system)

โอลิโกเมอร์ที่มีกลไกการเกิดปฏิกิริยาแบบผสมนี้เช่น โอลิโกเมอร์ของสารประกอบอีพอกไซด์ผสมกับตัวเจือจางที่ว่องไวจำพวกอะคริเลต โอลิโกเมอร์ของอะคริเลตผสมกับตัวเจือจางที่ว่องไวจำพวกไวนิลอีเทอร์ โอลิโกเมอร์ของไวนิลอีเทอร์ผสมกับตัวเจือจางที่ว่องไวจำพวกอะคริเลต เป็นต้น

สารเคลือบผิวในระบบนี้มีกลไกการเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันแตกต่างกัน ตัวอย่างของโอลิโกเมอร์ที่มีกลไกการเกิดปฏิกิริยาแบบผสมนี้ได้แก่ โอลิโกเมอร์ของสารประกอบอีพอกไซด์ ผสมกับตัวเจือจางที่ว่องไวจำพวกอะคริเลต โดยอะคริเลตมีกลไกในการเกิดปฏิกิริยาแบบอนุมูลอิสระ ส่วนอีพอกไซด์มีกลไกการเกิดปฏิกิริยาแบบประจุบวก ดังนั้นจึงต้องใช้ตัวริเริ่มปฏิกิริยาทางแสงชนิดผสมนี้ จึงจะทำให้โอลิโกเมอร์ทั้ง 2 ชนิดสามารถบ่มด้วยรังสี

### 2.3.3 สารเติมแต่ง (Additive)

สารเติมแต่งใช้เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติของสารเคลือบผิวให้ดีขึ้น มักใช้ในปริมาณน้อย ตัวอย่างที่ใช้ผสมในสูตรสารเคลือบผิว มีดังนี้

1. สารลดฟอง (Defoaming agent)
2. สารช่วยเปียก (Wetting agent)
3. สารคงสภาพ (Stabilizers)
4. สารเพิ่มการยึดเกาะ (Adhesion Promoter)
5. สารควบคุมความเงา (Gloss control agent)
6. เม็ดสี (Pigment)
7. สารลดความหนืด (Diluent agent)
8. สารยับยั้งการทำปฏิกิริยากับออกซิเจน (Oxygen scavengers)
9. สารลดกลิ่น (Odor agent)
10. สารเพิ่มการขัดถู (Abrasion resistance agent)

ในงานวิจัยนี้ ได้เลือกใช้สารเคมีเพื่อเตรียมเป็นสารเคลือบผิวสำหรับบ่มให้แห้งด้วยลำแสง  
อินฟราเรด ดังต่อไปนี้

#### 1. Oligomer

เลือกใช้ EBECRYL 8701 และ EBECRYL 8702 เป็นชนิด Urethane acrylate oligomer โดยตัวแรกมีหมู่ฟังก์ชัน 3 ตัว (Aliphatic Urethane Triacrylate) ตัวที่สองมีหมู่ฟังก์ชัน 6 ตัว (Aliphatic Urethane Hexaacrylate) มีคุณสมบัติต่างๆ ตามตารางที่ 2.1 และ 2.2

ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติทางกายภาพของโพลิโกเมอร์ 2 ตัว ที่เลือกใช้เป็นสารเคลือบผิว

Product	Description • Key Features & Performance	Functionality	Diluting Acrylate	Viscosity, cP	Color, Gardner	Tensile Strength, psi	Tensile Elongation, %	Tg, °C	Density, g/ml at 25°C
<b>EBECRYL 8701</b>	Aliphatic Urethane Triacrylate ♦ Excellent abrasion resistance ♦ Good adhesion ♦ Excellent exterior durability ♦ High Tg ♦ Good chemical resistance	3	–	420000 (25°C) 5440 (60°C)	0.1	7800	4	75	1.13
<b>EBECRYL 8702</b>	Aliphatic Urethane Hexaacrylate ♦ Good toughness ♦ Excellent abrasion and stain resistance ♦ Impact resistance ♦ Non-yellowing ♦ Good exterior durability	6	–	364000 (25°C) 5800 (60°C)	0.4	4700	10	28	1.13

ตารางที่ 2.2 เปรียบเทียบคุณสมบัติการใช้งานของโพลิโกเมอร์ 2 ตัว ที่เลือกใช้เป็นสารเคลือบผิว

Resins	UV/EB Reactivity	Viscosity	Adhesion	Hardness	Flexibility	Weatherability	Chemical Resistance	Moisture Resistance	Abrasion Resistance	Scratch Resistance
<b>Aliphatic Urethane Acrylates</b>	3	2	3	4	5	5	2	4	5	5
<b>EBECRYL 8701</b>	●●●	●●	●●●	●●●●	●●	●●●●●	●●●●	●●●●	●●●●●	●●●●
<b>EBECRYL 8702</b>	●●●	●●	●●●	●●●●	●●●	●●●●	●●●●	●●●●	●●●●●	●●●

2. Monomer

เลือกใช้ 2 ตัว คือ Tripropylene glycol diacrylate (TPGDA) เป็นมอนอเมอร์ชนิดที่มีหมู่ฟังก์ชันสองหมู่ และ Pentaerythritol tri-tetraacrylate (PETIA : tetra- to tri- acrylate ester ratio 1 to 1) เป็นชนิดที่มีหมู่ฟังก์ชันหลายหมู่ มีคุณสมบัติต่างๆ ตามตารางที่ 2.3 และ 2.4

ตารางที่ 2.3 คุณสมบัติทางกายภาพของมอนอเมอร์ 2 ตัว ที่เลือกใช้เป็นสารเคลือบผิว

Product	Description	Viscosity cP at 25°C	Color, Pt-Co (Gardner)	Water, %	Residual Solvent, %	Acid Value, (% Acrylic Acid)	Density, g/ml at 25°C
<b>Difunctional</b>	<b>+ Key Features &amp; Performance</b>						
<b>TPGDA</b>	Tripropylene Glycol Diacrylate <ul style="list-style-type: none"> <li>◆ Branched alkyl polyether backbone</li> <li>◆ Combines flexibility, moisture resistance, low viscosity and good reactivity without causing brittleness</li> </ul>	11.8	11	0.16	0.03	0.11	1.03
<b>Tri &amp; Higher Functional</b>	<b>+ Key Features &amp; Performance</b>						
<b>PETIA</b>	Pentaerythritol Tri-Tetraacrylate <ul style="list-style-type: none"> <li>◆ Tetra- to Tri- acrylate ester ratio ~ 1 to 1</li> <li>◆ Liquid at normal ambient temperature</li> <li>◆ High reactivity</li> <li>◆ Very good hardness, scratch resistance</li> <li>◆ Pendant hydroxyl functionality</li> </ul>	1044	30	–	0.007	6.8	1.18

ตารางที่ 2.4 เปรียบเทียบคุณสมบัติการใช้งานของมอนอเมอร์ 2 ตัว ที่เลือกใช้เป็นสารเคลือบผิว

Diluting Acrylates	UV/EB Reactivity	Dilucency	Adhesion	Hardness	Flexibility	Weather- ability	Chemical Resistance	Moisture Resistance	Abrasion Resistance	Scratch Resistance
Diluting Acrylates Difunctional	3	4	3	3	2	4	2	3	3	3
<b>TPGDA</b>	••	•••	••••	•••	••••	•••	••••	••••	••••	•••
Diluting Acrylates Trifunctional & Higher	4	3	2	5	1	3	4	3	3	4
<b>PETIA</b>	•••••	••	••	••••	•	••	••••	••	••	••••

สำหรับตารางที่ 2.2 และ 2.4 ให้นำค่าตัวเลข (Performance property of family) คูณกับจำนวนจุด (Performance property of product within its product family) ในการเปรียบเทียบคุณสมบัติต่างๆ เช่น ในตารางที่ 4 ค่า Reactivity ของ TPGDA เท่ากับ 3 x •• = 6 ส่วนของ PETIA เท่ากับ 4 x ••••• = 20 แสดงว่า PETIA มีคุณสมบัติในการเกิดปฏิกิริยาสูงกว่า TPGDA



## 2.4 การบ่มสารเคลือบผิวด้วยลำแสงอิเล็กตรอน (Electron beams curing)

การเกิดพอลิเมอร์ไรเซชันของลำแสงอิเล็กตรอน มี 2 ชนิด คือ ชนิดปฏิกิริยาแบบอนุมูลอิสระ (Free radical polymerization) และชนิดปฏิกิริยาแบบประจุบวก (Cationic polymerization)

### 2.4.1 ปฏิกิริยาแบบอนุมูลอิสระ (Free radical polymerization)

การเกิดพอลิเมอร์ไรเซชันของลำแสงอิเล็กตรอนแบบอนุมูลอิสระ จะเกิดกับสารเคลือบผิวที่มีกลไกการเกิดปฏิกิริยาแบบอนุมูลอิสระ เช่น อะคริเลตและเมทาคริเลต มี 3 ขั้นตอน

#### 1. Initiation

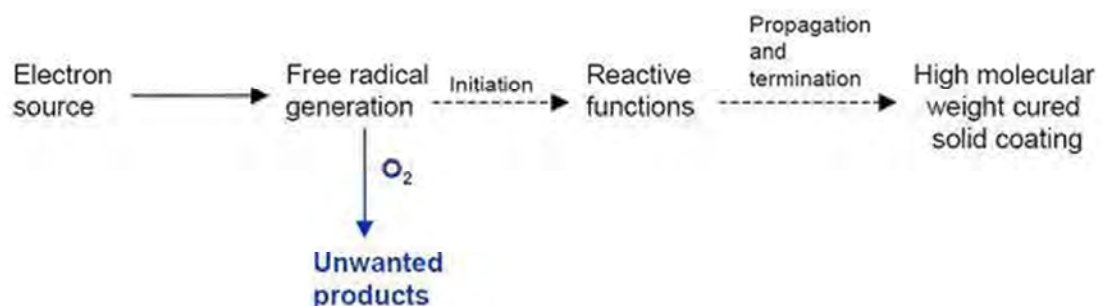
อิเล็กตรอนพลังงานสูง ชนกับสารเคลือบผิว อิเล็กตรอนถ่ายเทพลังงาน เกิดอนุมูลอิสระ ซึ่งสามารถเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชัน

#### 2. Propagation

อนุมูลอิสระที่เกิดขึ้น รวมตัวกับ reactive functions ของ โอลิโกเมอร์ และมอนอเมอร์ เกิดการเชื่อมขวางของสารเคลือบผิว

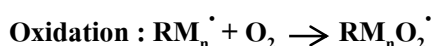
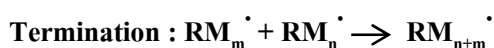
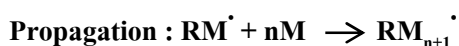
#### 3. Termination

ปฏิกิริยาสิ้นสุดลง เมื่อไม่มี reactive functions เหลือ



รูปที่ 2.5 ปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันของสารเคลือบผิวด้วยลำแสงอิเล็กตรอน

อนุมูลอิสระที่เกิดขึ้นจะเกิดพอลิเมอร์ไรเซชันได้ดีกับออกซิเจนในอากาศ เกิดเป็นอนุมูลของเปอร์ออกไซด์ที่เสถียร เรียกว่า Oxygen inhibition effect สำหรับการบ่มแห้งด้วยรังสี ทำให้เหลืออนุมูลอิสระที่จะทำปฏิกิริยาในขั้นตอน Propagation น้อยลง ขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาของอนุมูลอิสระกับออกซิเจนเป็นดังนี้



การบ่มผิวเคลือบให้แห้งด้วยลำแสงอิเล็กตรอนแบบอนุมูลอิสระ จำเป็นต้องทำในสภาวะเฉื่อย (Inert atmosphere) เพื่อกันไม่ให้ออกซิเจนจับกับอนุมูลอิสระ ในทางอุตสาหกรรมนิยมใช้ก๊าซไนโตรเจนเนื่องจากมีราคาถูกและมีมากในอากาศ โดยบรรจุชิ้นงานในภาชนะปิดที่เติมก๊าซไนโตรเจน หรือฉายลำแสงอิเล็กตรอนใน Chamber ที่มีไนโตรเจน

#### 2.4.2 ปฏิกิริยาแบบประจุบวก (Cationic polymerization)

เกิดขึ้นกับสารเคลือบผิวที่มีกลไกการเกิดปฏิกิริยาแบบประจุบวก เช่น สารประกอบอพิพอกไซด์ ปฏิกิริยานี้ต้องการตัวริเริ่มปฏิกิริยาทางแสงชนิดประจุบวก (Cationic photoinitiators) เช่น Diaryliodonium salts, Triarylsulfonium salts ตัวริเริ่มปฏิกิริยาทางแสงชนิดนี้จะรับพลังงานจากรังสีแล้วแตกตัวให้ Brønsted acid หรือ Lewis acid เพื่อเกิดปฏิกิริยาขึ้นเริ่มต้น (Initiation) กับสารเคลือบผิวแบบเดียวกับที่เกิดขึ้นเมื่อฉายรังสีอัลตราไวโอเล็ต แต่กรณีของลำแสงอิเล็กตรอนจะมีความซับซ้อนกว่าและยังไม่ทราบกลไกที่แน่ชัด อนุมูล (radical) อนุมูลที่มีประจุ (radical ion) และไอออน (ionic species) ที่เกิดขึ้นหลายตัวขณะฉายรังสี ได้สร้างบริเวณที่ไวต่อการเกิดปฏิกิริยากับ

ประจุบวก (cationic active center) หนึ่งในนั้นมีประจุของไฮโดรเจน ( $H^+$ ) ที่ทำปฏิกิริยากับหมู่ไฮดรอกซิล เกิดเป็นสารที่ว่องไว (active species) ซึ่งสามารถเกิดพอลิเมอร์ไรเซชัน

ปฏิกิริยาแบบประจุบวกจะไม่ถูกยับยั้งด้วยออกซิเจน แต่ปฏิกิริยาจะใช้เวลานานกว่าแบบอนุมูลอิสระ และต้องการสารเติมแต่งที่เพิ่มคุณสมบัติเหนียวแน่น (fracture toughness)

## 2.5 การผุกร่อนของเหล็ก

ในปัจจุบันนี้ได้มีการนำเหล็กมาใช้อย่างแพร่หลาย ทั้งในวัสดุอุปกรณ์ และเครื่องจักรในโรงงานอุตสาหกรรมทั่วไป แต่ก็พบว่ามีปัญหาเกิดขึ้นกับเหล็ก คือ การผุกร่อน (Corrosion) เป็นการสูญเสียเนื้อของวัสดุ เนื่องจากเกิดปฏิกิริยากับสภาพแวดล้อม

องค์ประกอบของการเกิดปฏิกิริยาระหว่างวัสดุ กับสภาพแวดล้อม จะอธิบายในรูปของ Electrochemistry ซึ่งต้องมีองค์ประกอบ 3 อย่าง คือ

### 1. Electrodes ประกอบด้วย

-Anode จะเป็นบริเวณที่ผุกร่อน หรือเสียเนื้อโลหะ คือ เกิดปฏิกิริยา Oxidation (จ่าย  $e^-$ ) เป็นบริเวณที่กระแสเดินทางออกสู่ Electrolyte

-Cathode เป็นบริเวณที่ไม่มี Corrosion เกิดขึ้น เกิดปฏิกิริยา Reduction (รับ  $e^-$ )

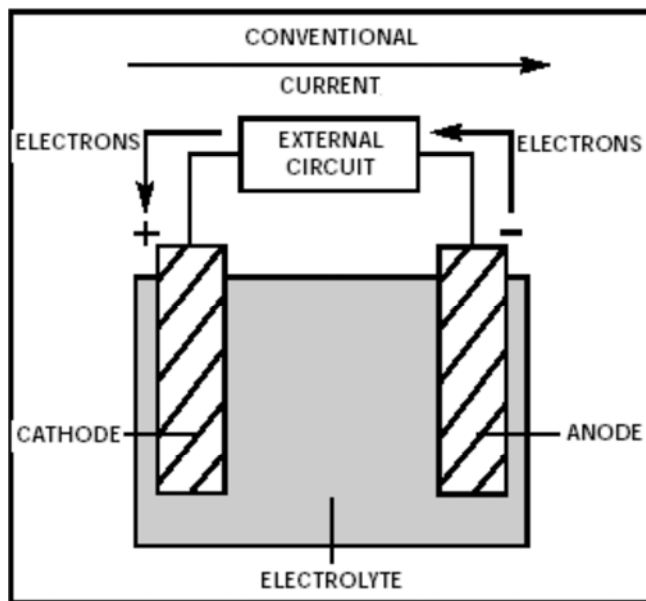
Anode และ Cathode อาจเป็นโลหะต่างชนิดกัน หรือชนิดเดียวกันก็ได้ แต่มีความเข้มข้นของสภาพแวดล้อมที่แตกต่างกัน

### 2. Electrolyte

เป็นสื่อกลางของ Electron เคลื่อนที่จาก Anode ไปยัง Cathode ไม่จำเป็นต้องเป็นของเหลวเท่านั้น

### 3. Driving Force หรือ Electric Potential

คือ แรงดันให้ Electron เคลื่อนที่จาก Anode ไปยัง Cathode ซึ่งเกิดจากความแตกต่างของเนื้อวัสดุในรูปของโครงสร้าง, ชนิดของวัสดุและองค์ประกอบ



รูปที่ 2.6 Cell Potential and the EMF Series



รูปที่ 2.7 โลหะที่ถูกกัดกร่อนจนเสื่อมสภาพ

การป้องกันการเกิดการผุกร่อน มีหลายวิธี เช่น การเลือกชนิดของโลหะให้เหมาะสมกับสภาพการใช้งาน, การเปลี่ยนสถานะแวดล้อมให้ Corrosive ลดลง, การใช้สารยับยั้ง (Inhibitor), การทาวัดตุที่ต้องการป้องกันให้มีหน้าที่เป็น Cathode (นิยมใช้สังกะสี)

### บทที่ 3

#### วิธีดำเนินการวิจัย

#### 3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

1. Urethane acrylate oligomer (EBECRYL 8701 Lot no. HTIB52002, EBECRYL 8702 Lot no. HTJD52002) จากบริษัท CYTEC SURFACE SPECIALITIES Co.
2. Tripropylene glycol diacrylate (TPGDA) Lot no. JAID00368 จากบริษัท CYTEC SURFACE SPECIALITIES Co.
3. Pentaerythritol tri-tetraacrylate (PETIA : tetra- to tri- acrylate ester ratio 1 to 1) Lot no. JBHB0021T จากบริษัท CYTEC SURFACE SPECIALITIES Co.
4. Maleic anhydride, Puriss  $\geq 99\%$  Lot no. BCBF2644V จากบริษัท SIGMA-ALDRICH Co.
5. 4-Hydroxyanisole, Puriss  $\geq 99\%$  Lot no. STBB5738V จากบริษัท SIGMA-ALDRICH Co.

#### 3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

1. Magnetic hotplate stirrer พร้อมแท่งแม่เหล็กกวนสารและหัววัดอุณหภูมิ
2. เครื่องชั่งน้ำหนัก Digital scale
3. Wet film applicator ชนิด 4-sided
4. บีกเกอร์ ขนาด 200 มล.
5. กรวยเคมึนสาร
6. ปิเปต
7. ขวดใส่สารละลาย ขนาด 100 มล.
8. แท่งแก้วคนสารละลาย
9. อลูมิเนียมฟอยล์
10. เหล็กแผ่นขาว

11. ถังพลาสติกแบบมีชิปปิดปากถุง
12. ก๊าซไนโตรเจน ความบริสุทธิ์ 99%
13. เครื่องเร่งอนุภาคอิเล็กตรอน



รูปที่ 3.1 เครื่องเร่งอนุภาคอิเล็กตรอน



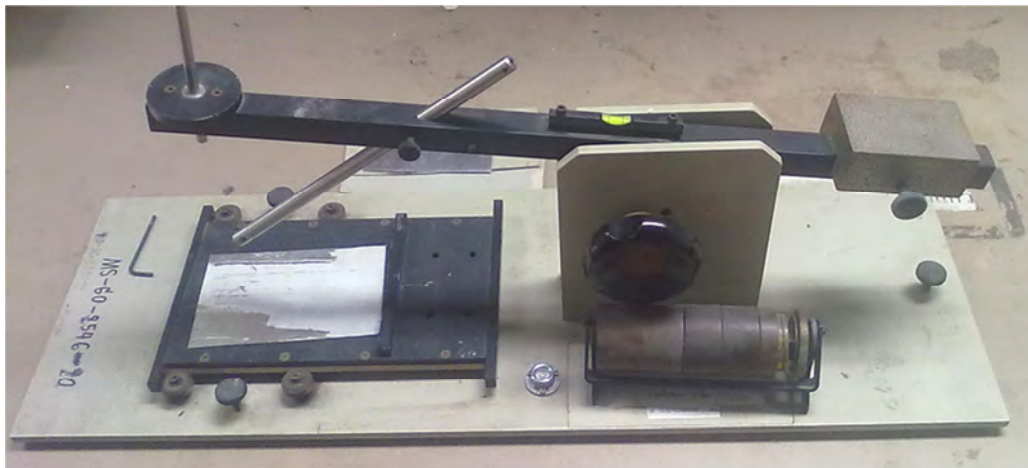
รูปที่ 3.2 บริเวณที่อนุภาคอิเล็กตรอนฉายผลิตกัมมันต์

ตารางที่ 3.1 คุณสมบัติของเครื่องเร่งอนุภาคอิเล็กตรอนที่ใช้

PROPERTIES OF E-BEAM AT END OF LINAC	
Beam orientation (Horizontal or Vertical)	Vertical for this application
Beam energy	20-25 MeV
Energy Spread	±5%
Beam pulse current (nominal)	100 - 230 mA
Beam pulse duration (nominal)	10-16 μsec
Repetition rate	0-330 Hz
Average Beam Current	800 μA
Beam Power capability	16 kW
Beam spot size	6-12 mm. at end of accelerator

### 3.3 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์

#### 1. เครื่องมือทดสอบการขีดขีด (Mechanized scratch tester)



รูปที่ 3.3 เครื่องมือทดสอบการขีดขีด

#### 2. เครื่องทดสอบการขัดถูแบบเปียก (Wet scrub abrasion tester)



รูปที่ 3.4 เครื่องทดสอบการขัดถูแบบเปียก



### 3. เครื่องทดสอบการทนการกัดกร่อนของสนิม (Salt spray tester)



รูปที่ 3.5 เครื่อง Salt spray tester

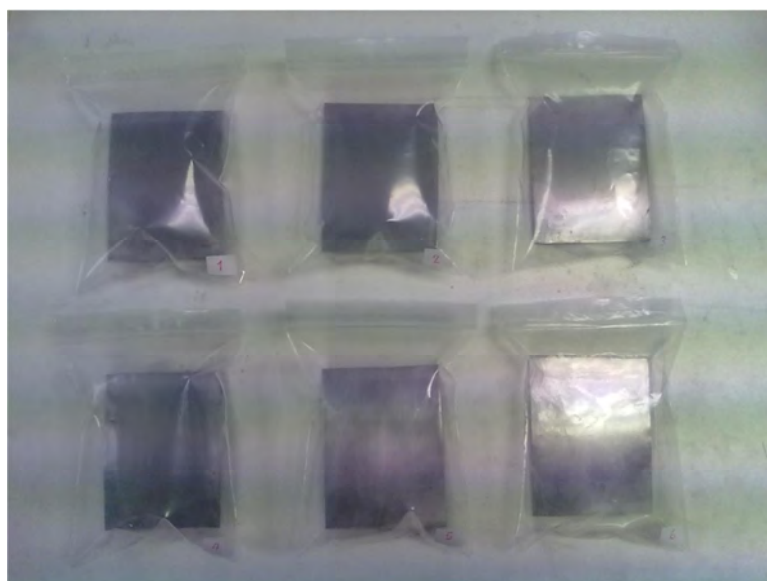
### 3.4 วิธีทดลอง

#### 3.4.1 การเตรียมสารเคลือบผิว

1. นำ Urethane acrylate oligomer (Ebecryl 8701 และ/หรือ Ebecryl 8702) ตามปริมาณที่กำหนดในสูตร เติลงในบีกเกอร์ขนาด 200 มล.
2. ต้ม Oligomer ในบีกเกอร์ บน Magnetic hotplate stirrer ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส
3. เติมนิวเมอเมอร์ (TPGDA และ/หรือ PETIA) ตามปริมาณที่กำหนด
4. เติมนิวเมอเมอร์ Maleic anhydride 2 กรัม และ 4-Hydroxyanisole 480 กรัม ตามลำดับ คนสารละลายเข้าด้วยกัน
5. ปิดปากบีกเกอร์ด้วยอลูมิเนียมฟอยล์ กวนสารละลายทิ้งไว้ 3 ชั่วโมง
6. เก็บสารตัวอย่างที่เตรียมได้ในขวดเก็บสารตัวอย่างไว้ในตู้ ไม้ให้ถูกแสง

### 3.4.2 การเคลือบผิวแผ่นเหล็ก

1. วางแผ่นเหล็กที่ต้องการเคลือบผิวบนกระดานรอง คัดเทพกาวให้แผ่นเหล็กยึดติดกับกระดานรอง
2. เทสารเคลือบผิวลงที่ขอบด้านหนึ่งของแผ่นเหล็ก
3. ใช้ Film applicator เคลือบสารเคลือบผิวไปทางเดียว (อย่าเกลี่ยไปมา)
4. นำแผ่นเหล็กที่เคลือบสารเคลือบผิวแล้วบรรจุในถุงพลาสติกแบบมีซิปปิดปากถุง ระวังอย่าให้ถุงสัมผัสกับสารเคลือบผิว
5. เต็มก๊าซไนโตรเจนในถุงที่บรรจุแผ่นเหล็กที่เคลือบสารเคลือบผิว ปิดปากถุงให้สนิท



รูปที่ 3.6 แผ่นเหล็กที่เคลือบด้วยสารเคลือบผิว บรรจุในถุงที่เต็มก๊าซไนโตรเจน

6. นำถุงที่บรรจุแผ่นเหล็กที่เตรียมไว้วางบนถาดสายพานของเครื่องเร่งอนุภาคอิเล็กตรอน
7. ฉายรังสีอิเล็กตรอนให้สารเคลือบผิวบนแผ่นเหล็กได้รับปริมาณรังสีจนแห้ง

### 3.4.3 การทดสอบคุณสมบัติของสารเคลือบผิว

3.4.3.1 ทดสอบคุณสมบัติในการทนต่อการขีดขีดของสารเคลือบผิว (Hardness) ตามมาตรฐาน ASTM 2240 ด้วยเครื่องมือทดสอบการขีดขีด (Mechanized scratch tester) ซึ่งประกอบด้วยแผ่นที่เลื่อนได้ในแนวนอน แผ่นเลื่อนนี้วางอยู่ใต้เข็มซึ่งยึดติดกับที่จับ เนื้อที่จับเข็มเป็นที่วางน้ำหนัก

การทดสอบทำได้โดยนำแผ่นทดสอบซึ่งเคลือบผิวเรียบร้อยแล้ว (แผ่นทดสอบควรเป็นแผ่นโลหะ) มายึดติดแน่นกับแผ่นเลื่อน โดยให้ด้านยาวของแผ่นทดสอบขนานกับทิศทางของการขีด วางน้ำหนักลงบนที่วางน้ำหนักเหนือเข็ม โดยเริ่มต้นจากน้ำหนักที่เบากว่าน้ำหนักที่คาดว่าจะทำให้เข็มแทงทะลุผิวเคลือบ จากนั้นจึงเพิ่มน้ำหนักให้พอเหมาะไปเรื่อยๆจนกระทั่งเข็มแทงทะลุผิวเคลือบถึงแผ่นทดสอบ ทดสอบซ้ำโดยใช้น้ำหนักนั้นบนชิ้นงานเดิมและชิ้นงานใหม่ ความแข็งของสารเคลือบผิวที่ทดสอบก็คือ น้ำหนักน้อยที่สุดที่ทำให้เข็มแทงทะลุผิวเคลือบ

ทดสอบหาความแข็งของสารเคลือบผิวอีกวิธีคือ การทดสอบความแข็งโดยใช้ดินสอด (Pencil hardness test) ซึ่งเป็นวิธีที่ง่ายที่สุด ทดสอบโดยใช้ดินสอดที่มีความแข็งต่างๆ กดลงบนแผ่นทดสอบ (ความแข็งของไส้ดินสอดเพิ่มขึ้นจากเบอร์ 6B ถึง 6H) หันไส้ดินสอดไปทิศทางที่ขีดเพียงทำมุม 45° กับผิวทดสอบ ถ้าปลายดินสอดเบอร์ใดแตกในระหว่างที่แทงทะลุผิวเคลือบไป ถือว่าสารเคลือบดังกล่าวมีความแข็งเท่ากับความแข็งของดินสอดนั้น เช่น ถ้าฟิล์มมีความแข็งมากจนทำให้ดินสอดเบอร์ 6H ซึ่งแข็งที่สุดแตก แสดงว่าฟิล์มนั้นมีความแข็งมาก นั่นคือ เท่ากับดินสอดเบอร์ 6H แต่ถ้าดินสอดเบอร์ 6B ที่มีความแข็งน้อยที่สุด สามารถแทงทะลุผ่านผิวเคลือบได้โดยที่ดินสอดไม่แตกเลย แสดงว่าแผ่นทดสอบนั้นมีผิวเคลือบที่อ่อน (Soft coating)

3.4.3.2 ทดสอบคุณสมบัติในความทนต่อการขัดถูแบบเปียก (Wet scrub resistance) ด้วยเครื่องทดสอบการขัดถูแบบเปียก (Wet scrub abrasion tester) ประกอบด้วย แปรงสำหรับขัด 2 แปรง ติดกับแขนจับที่เลื่อนไป-กลับในแนวราบ แผ่นชิ้นงานที่นำมาทดสอบจะถูกตรึงไว้ด้วยที่ยึดกด น้ำยาล้างถูถูกหยดลงอย่างสม่ำเสมอบนผิวทดสอบโดยเครื่องปั๊ม สามารถเซตระยะขัดถู (Stroke length) ของแปรงขัด และมีอัตราการรอบของการขัดถูสม่ำเสมอ (37±1 รอบต่อนาที)

ทดสอบความทนต่อการกัดกร่อนแบบเปียก ตามมาตรฐาน ISO 11998 โดยขัดถูแผ่นโลหะที่เคลือบผิวแล้ว 200 รอบ พร้อมกับน้ำยาล้างลงบนผิว ประเมินผลการทดสอบจากมวลที่หายไปของตัวอย่างภายหลังจากขัดถู (มวลของตัวอย่างก่อนขัดถูลบกับมวลหลังจากขัดถูแล้ว) ต่อพื้นที่ผิวบริเวณที่ขัดถู (ระยะขัดถูคูณด้วยความกว้างของแปรงขัด) แล้วคำนวณหาความหนาที่หายไปจากการขัดถู

3.4.3.3 ทดสอบคุณสมบัติการทนต่อการกัดกร่อนด้วยหมอกเกลือ (Salt spray testing) ตามมาตรฐาน ASTM B117 โดยใช้สารละลายเกลือที่มีความเข้มข้น 5% เตรียมจากละลายเกลือโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) ในน้ำ จัดเก็บไว้ใน Chamber ภายใต้อุณหภูมิของสารละลายประมาณ 35 องศาเซลเซียส และพ่นหมอกเกลือความเข้มข้น 5% ในอัตรา 12 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง อัตราการเก็บสะสมของหมอกเกลือจะวัด โดยการวางกระบอกตวงปริมาตรไม่น้อยกว่า 80 มิลลิลิตร 2 กระบอก อยู่ใน Chamber โดยกระบอกแรกวางให้อยู่ใกล้กับหัวฉีดพ่นหมอกเกลือให้มากที่สุด อีกกระบอกวางไว้ให้อยู่ตรงมุมที่อยู่ห่างจากกระบอกฉีดให้มากที่สุด

เมื่อกำหนดเงื่อนไขต่างๆดังกล่าวหมดแล้ว ชิ้นงานที่ต้องการทดสอบจะถูกนำมาวางทำมุม 15-30 องศา กับแนวตั้ง เพื่อให้ไอน้ำเกลือไหลลงอย่างอิสระทั่วผิวชิ้นงานอย่างสม่ำเสมอ ลดการเกิดเป็นแอ่งน้ำของหยดน้ำ ชิ้นงานแต่ละชิ้นควรจัดวางในตำแหน่งที่หยดน้ำจากชิ้นงานหนึ่งไม่สามารถหยดลงบนอีกแผ่นได้ ระยะที่ทำการทดสอบอยู่ระหว่าง 24 ถึง 5000 ชั่วโมง ชิ้นงานจะอยู่ใน Chamber ที่ปิดสนิทตลอดเวลาที่ทำการทดสอบ และตรวจสอบปริมาณน้ำเกลือที่สะสมในกระบอกเป็นรายวัน

3.4.3.4 ทดสอบคุณสมบัติความคงทนต่อสารเคมี (Chemical resistance) ตามมาตรฐาน ASTM D1308 สารเคมีที่ทดสอบเป็นสารเคมีที่ใช้ตามบ้านเรือน ตัวอย่างสารเคมีที่ทดสอบ ได้แก่

1. Distilled Water, cold.
2. Distilled Water, hot.
3. Ethyl Alcohol (50% volume).
4. Vinegar (3% acetic acid).
5. Alkali Solution.
6. Acid Solution.
7. Soap Solution.
8. Detergent Solution.
9. Lighter Fluid and Other Volatile Reagents.
10. Fruit—Piece of cut fruit, with cut portion placed face down on panel
11. Oils and Fats—Butter, margarine, lard, shortening, vegetable oils, etc.
12. Condiments—Mustard, catsup (ketchup).
13. Beverages—Coffee, tea, cocoa.
14. Lubricating Oils and Greases.
15. Other Reagents.

เลือกสารข้างต้นมาทดสอบกับผิวชิ้นงานตามเวลาที่กำหนด ผลลัพธ์ดูจากการเปลี่ยนแปลงของผิวเคลือบ เช่น สีตก ความเงาเปลี่ยนไป ผิวแตก ผิวนุ่มขึ้น พองตัว สูญเสียการยึดเกาะ หรือลักษณะการเปลี่ยนแปลงอื่น





นำสารเคลือบผิวสูตรต่างๆที่ผสมได้ตามตารางที่ 2 มาทำให้แห้งกับผิวเหล็ก โดยใช้พลังงาน 8 MeV เท่าเดิม แต่เพิ่มจำนวนรอบที่ฉายเพิ่มเป็น 15 รอบ ปริมาณรังสีรวม 150 kGy เพื่อเพิ่มอัตราการเกิดของสารเคลือบผิวบนผิวแผ่นเหล็ก

ผลที่ได้คือ สารเคลือบผิวยังคงไม่แห้ง จึงศึกษาค้นคว้าข้อมูลเพิ่มเติม พบว่าออกซิเจนในอากาศทำอัตราการเกิดกับรังสี เกิดเป็นอนุมูลอิสระและยับยั้งการ Crosslink ของสารเคลือบผิว จึงทำการทดสอบใหม่ โดยให้ตัวอย่างที่ต้องการเคลือบผิวอยู่ในก๊าซเฉื่อยในขั้นตอนการทดลองต่อไป

### ขั้นตอนที่ 3

จากการศึกษาในขั้นตอนที่ 2 ได้ปรับส่วนผสมใหม่เพื่อลดความหนืดของสารเคลือบผิว และเพิ่มปริมาณรังสีที่ฉายเพื่อเพิ่มอัตราการเกิด พบว่าสารเคลือบผิวยังไม่แห้ง ในขั้นตอนนี้จึงได้นำแผ่นเหล็กที่เคลือบสารเคลือบผิวใส่ในถุงที่บรรจุก๊าซไนโตรเจน เพื่อให้ได้ออกซิเจนออกไปไม่ให้เกิดอัตราการเกิดกับรังสี โดยเลือกใช้สูตรผสมของสารเคลือบและเทคนิคที่ใช้ในการฉายรังสีเหมือนในขั้นตอนที่ 2

ผลการทดลอง พบว่าสารเคลือบผิวแห้งติดกับแผ่นเหล็ก หลังจากนั้นจึงทำการเคลือบผิวตามขั้นตอนดังกล่าวขึ้นมาอีกหลายชุด สำหรับทำการทดสอบคุณสมบัติของสารเคลือบผิว การทดสอบการทนต่อการขีด การทนต่อการกัดกร่อน และความทนต่อสารเคมีใช้แผ่นเหล็กขนาด 4 x 3 นิ้ว (10.2 x 7.6 cm) ส่วนการทดสอบการทนต่อการขีดแบบเปียกใช้แผ่นเหล็กขนาด 35 x 20 cm

การเลือกความหนาของผิวเคลือบจะพิจารณาจากการนำไปใช้งาน โดยปกติการเคลือบผิวแผ่นเหล็กที่ใช้ในอุตสาหกรรมเพื่อป้องกันการผุกร่อน จะมีความหนาของชั้นเคลือบตั้งแต่ 50  $\mu\text{m}$  ขึ้นไป ตามตัวอย่างมาตรฐานความหนาชั้นเคลือบสังกะสีที่ระบุไว้ใน ISO 1461 สำหรับเหล็กกล้าโครงสร้างที่ผ่านกระบวนการ Hot Dip Galvanizing



ตารางที่ 4.3 ความหนาชั้นเคลือบสังกะสีขั้นต่ำที่ระบุใน ISO 1461 สำหรับเหล็กกล้าโครงสร้างที่ผ่านกระบวนการ HDG\*

ความหนาของชั้นงานเหล็กกล้าโครงสร้าง (mm)	ความหนาของชั้นเคลือบสังกะสี (microns)
< 1.5	45
≥ 1.5 จนถึง < 3	55
≥ 3 จนถึง < 6	70
≥ 6	85

\*ความหนาดังกล่าว เป็นความหนาขั้นต่ำที่ระบุไว้ในมาตรฐานการชุบสังกะสี คือ “ธรรมชาติ” ของความหนา เนื่องจากธรรมชาติของกระบวนการชุบสังกะสี ไม่ได้ตั้งขึ้นมาจากการพิจารณาจากอายุการใช้งานที่ต้องการ

สำหรับงานวิจัยนี้ ใช้เหล็กแผ่นเรียบ ความหนา 0.4 mm ผู้วิจัยเลือกใช้ความหนาในการเคลือบที่ 50  $\mu\text{m}$  ซึ่งใกล้เคียงกับความหนาขั้นต่ำตามมาตรฐานดังกล่าว

## 4.2 ทดสอบคุณสมบัติของสารเคลือบผิว

### 4.2.1 ทดสอบการทนต่อการขีด

ขั้นแรกของการทดสอบการทนต่อการขีด ทดสอบด้วย Pencil hardness tester เริ่มจากไล่ดินสอเบอร์ที่อ่อนที่สุด (6B) จนถึงเบอร์ที่แข็งที่สุด (6H) แล้วคว่ำเบอร์แรกที่ขีดลงบนผิวแล้วทำให้สารเคลือบผิวถลอก บันทึกค่าความแข็งของสารเคลือบผิวเท่ากับดินสอเบอร์นั้น

จากนั้นจึงทดสอบด้วยเครื่อง Impact strength tester ค่อยๆเพิ่มน้ำหนักที่กดลงบนผิวเคลือบจนเริ่มทะลุผิวเคลือบ บันทึกน้ำหนักดังกล่าว

ตารางที่ 4.4 ผลการทดสอบการทนต่อการขูดขีดของสารเคลือบผิว

สารเคลือบผิว (สูตร)	1	2	3	4	5	6	7	8
ความแข็ง (เบอร์ดินสอ)	6H	6H	6H	6H	6H	6H	6H	6H
ความแข็ง (กรัม)	80	90	80	90	90	90	90	90

จากการทดสอบ ไม่พบว่ามีดินสอเบอร์อะไรที่สามารถขูดทะลุผิวเคลือบได้เลย โดยเบอร์ 6H ซึ่งเป็นเบอร์ที่แข็งที่สุดก็ยังไม่ทะลุผิวเคลือบ จึงบันทึกค่าความแข็งของผิวเคลือบที่ 6H ส่วนการทดสอบด้วยน้ำหนักกดที่ทำให้ทะลุผิวเคลือบ พบว่าน้ำหนักกดที่เริ่มทะลุผิวเคลือบอยู่ในช่วง 80-90 กรัม

#### 4.2.2 ทดสอบการทนต่อการขัดถูแบบเปียก

ทดสอบตามมาตรฐาน ISO 11998 ซั่งมวลดแผ่นชิ้นงานที่เคลือบผิวแล้ว (ความละเอียดของเครื่องซั่ง 1 mg) จากนั้นนำมาขัดถูด้วยเครื่องทดสอบการขัดถูแบบเปียก 200 รอบ เสร็จแล้วล้างให้สะอาด ทิ้งไว้ให้แห้ง ซั่งมวลดอีกครั้งเพื่อหามวลที่สูญหายไป นำไปคำนวณหาความหนาของผิวเคลือบที่หายไป เทียบคลาตามมาตรฐาน EN 13300

น้ำยาสำหรับทดสอบการขัดถู เตรียมจาก Linear alkylbenzene sulfonate (LAS) 2.5 กรัมในน้ำ 1 ลิตร ตั้งระยะที่ใช้ในการขัดถู (Stroke length)  $300 \pm 5$  มิลลิเมตร อัตรารอบ (Cycles) ของการขัด  $37 \pm 2$  รอบต่อนาที น้ำหนักกดของแปรงขัด  $135 \pm 1$  กรัม แปรงขัดที่ใช้มีขนาด  $90 \pm 0.5$  มิลลิเมตร x  $39 \pm 0.5$  มิลลิเมตร

อย่างไรก็ตาม เนื่องจากข้อจำกัดของเครื่องที่ใช้ทดสอบ ทำให้ไม่สามารถกำหนดเงื่อนไขบางอย่างให้ตรงตามมาตรฐานดังกล่าวได้ ตารางที่ 10 แสดงรายละเอียดของการทดสอบที่แตกต่างจากมาตรฐาน

ตารางที่ 4.5 รายละเอียดของการทดสอบที่แตกต่างจากมาตรฐาน ISO 11998

รายละเอียด	ตามมาตรฐาน	ทดสอบจริง
Stroke length (mm)	300	200
Scrub cycles per minute	37	42
Downward force (g)	135	475

#### 4.2.2.1 ขั้นตอนทดสอบ

ขั้นตอนในการทดสอบโดยละเอียด เป็นดังนี้

1. วางแผ่นทดสอบที่เคลือบผิวแล้วบนแผ่นวางของเครื่อง ยึดแผ่นทดสอบกับตัวยึด
2. เทน้ำยาสำหรับขัดถูลงบนผิวของแผ่นทดสอบ ใช้แปรงเกลี่ยให้น้ำยากระจายไปทั่วผิวทิ้งไว้ 60 วินาที
3. ให้ขนแปรงสัมผัสกับน้ำยาจนชุ่มพอ ติดตั้งแปรงขัดกับตัวยึดจับแปรง ให้ขนแปรงสัมผัสกับผิวแผ่นทดสอบ
4. เริ่มทดสอบการขัดถู จำนวน 200 รอบ
5. นำแผ่นทดสอบออกจากเครื่อง ล้างน้ำยาออกด้วยก๊อมน้ำ ทิ้งไว้ให้แห้ง
6. บันทึกมวลของแผ่นทดสอบภายหลังการขัดถู

#### 4.2.2.2 การประเมินผลทดสอบ

1. คำนวณหามวลของสารเคลือบผิวที่หายไป

1.1 คำนวณหาพื้นที่  $A1$  ( $m^2$ ) ของการขัดถูจาก

$$A1 = \frac{W \times S}{10^6}$$

ซึ่ง  $S$  คือระยะที่ใช้ในการขัดถู (mm)  
 $W$  คือความกว้างของแปรงขัด (mm)

1.2 คำนวณหามวลของสารเคลือบผิวที่หายไปต่อพื้นที่  $L$  ( $\text{g}/\text{m}^2$ )

$$L = \frac{m_1 - m_2}{A_1}$$

ซึ่ง	$A_1$	คือพื้นที่ที่ขัดถู ( $\text{m}^2$ )
	$m_1$	คือมวลเริ่มต้นของแผ่นทดสอบที่เคลือบผิวแล้ว (g)
	$m_2$	คือมวลของแผ่นทดสอบที่เคลือบผิวแล้ว หลังจากขัดถู 200 รอบ (g)

2. คำนวณหาความหนาแน่นของสารเคลือบผิวที่แห้งแล้ว

คำนวณหาความหนาแน่นของสารเคลือบผิวที่แห้งแล้ว  $\rho_{df}$  ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ) จากสมการ

$$\rho_{df} = \frac{m}{A_2 \times d} \times 1000$$

ซึ่ง	$m$	คือมวลของสารเคลือบผิวที่แห้งแล้ว หากจากมวลของ แผ่นชิ้นงานที่เคลือบผิวแล้ว ลบกับมวลของแผ่นชิ้นงาน แผ่นเดียวกันที่ยังไม่เคลือบผิว (mg)
	$d$	คือความหนาเฉลี่ยของสารเคลือบผิวที่แห้งแล้ว หากจาก ความหนาของแผ่นทดสอบที่เคลือบผิวแห้งแล้ว ลบกับ ความหนาของแผ่นชิ้นงานที่ยังไม่เคลือบผิว ( $\mu\text{m}$ )
	$A_2$	คือพื้นที่ของสารเคลือบผิวที่เคลือบบนแผ่นชิ้นงาน ( $\text{mm}^2$ )

### 3. คำนวณหาความหนาของสารเคลือบผิวที่หายไป

คำนวณหาความหนาเฉลี่ยของสารเคลือบผิวที่หายไป  $L_{df}$  ( $\mu\text{m}$ ) จากสมการ

$$L_{dft} = \left( \frac{m_1 - m_2}{A_1 \times \rho_{df}} \right) = \frac{L}{\rho_{df}}$$

ซึ่ง  $\rho_{df}$  คือความหนาแน่นของสารเคลือบผิวที่แห้งแล้ว ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )

$A_1, m_1, m_2$  และ  $L$  คือค่าในข้อเดียวกับ 1.1 และ 1.2

### 4. ประเมินผลการทนต่อการขัดถูแบบเปียก

ความหนาเฉลี่ยของสารเคลือบผิวที่หายไป  $L_{df}$  ( $\mu\text{m}$ ) ที่คำนวณได้จากข้อ 3. เทียบกับมาตรฐาน EN 13300 ตามนี้

class 1	น้อยกว่า 5 $\mu\text{m}$ หลังการขัดถู 200 รอบ
class 2	ตั้งแต่ 5 $\mu\text{m}$ แต่น้อยกว่า 20 $\mu\text{m}$ หลังการขัดถู 200 รอบ
class 3	ตั้งแต่ 20 $\mu\text{m}$ แต่น้อยกว่า 70 $\mu\text{m}$ หลังการขัดถู 200 รอบ
class 4	น้อยกว่า 70 $\mu\text{m}$ หลังการขัดถู 40 รอบ
class 5	ตั้งแต่ 70 $\mu\text{m}$ หลังการขัดถู 40 รอบ

หากความหนาเฉลี่ยของสารเคลือบผิวที่หายไป มากกว่า 70  $\mu\text{m}$  หลังการขัดถู 200 รอบ ให้ทดสอบใหม่ โดยทดสอบขัดถูที่ 40 รอบ แล้วดูว่าความหนาเฉลี่ยของสารเคลือบผิวที่หายไปน้อยกว่า 70  $\mu\text{m}$  หรือไม่ เพื่อพิจารณาว่าอยู่ใน class 4 หรือ 5

#### 4.2.2.3 ผลการทดสอบ

การทดสอบครั้งนี้เกิดความผิดพลาด ในการเคลือบผิวไม่ได้ใช้ film applicator กำหนดความหนาของผิวเคลือบ ทำให้ผิวเคลือบหนาไม่สม่ำเสมอ จึงทำให้ไม่สามารถ mass balance จึงไม่สามารถประเมินผลการทดสอบการขัดถูแบบเปียกได้

### 4.2.3 ทดสอบการทนต่อการกัดกร่อนด้วยหมอกเกลือ

#### 4.2.3.1 รายละเอียดการทดสอบ

การทดสอบ จัดทำโดย บริษัท แคลเซิร์ฟ (ประเทศไทย) จำกัด ทดสอบด้วยเครื่อง Salt spray tester ยี่ห้อ T-Machine รุ่น ST-ISO-3 ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM B117 เป็นเวลา 48 ชั่วโมง วันที่ 1 เริ่มนำชิ้นงานเข้าทดสอบ บันทึกสถานะที่ทำการทดสอบทุก 24 ชั่วโมง ถึงวันที่ 3 จึงครบ 48 ชั่วโมง สถานะที่ทำการทดสอบตามตาราง 11

ตารางที่ 4.6 สถานะที่ใช้ทดสอบการทนต่อการกัดกร่อนด้วยหมอกเกลือ

วันที่	ความเข้มข้น NaCl (g/l) / ค่า pH	อัตราการพ่น (ml/80cm <sup>3</sup> hr)	อุณหภูมิใน Chamber (°C)	อุณหภูมิใน อากาศอ้อมตัว (°C)	ความดัน (kPa)
1	50 / 6.5	1.7	35.1	47.0	100
2	50 / 6.5	1.7	35.0	47.0	100
3	50 / 6.5	1.7	35.0	47.0	100



รูปที่ 4.1 สภาพภายใน Chamber ที่ใช้ทดสอบ

สภาพของแผ่นเหล็กก่อนการทดสอบ



รูปที่ 4.2 แผ่นเหล็กเคลือบผิวแห้ง สูตรที่ 1



รูปที่ 4.3 แผ่นเหล็กเคลือบผิวแห้ง สูตรที่ 2

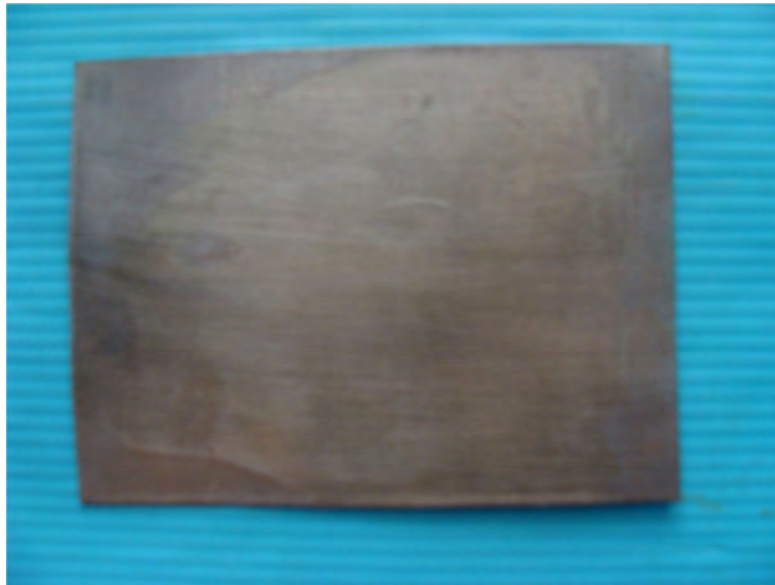


รูปที่ 4.4 แผ่นเหล็กเคลือบผิวแข็ง สูตรที่ 3



รูปที่ 4.5 แผ่นเหล็กเคลือบผิวแข็ง สูตรที่ 4





รูปที่ 4.6 แผ่นเหล็กเคลือบผิวแข็ง สูตรที่ 5



รูปที่ 4.7 แผ่นเหล็กเคลือบผิวแข็ง สูตรที่ 6



รูปที่ 4.8 แผ่นเหล็กเคลือบผิวแข็ง สูตรที่ 7



รูปที่ 4.9 แผ่นเหล็กเคลือบผิวแข็ง สูตรที่ 8

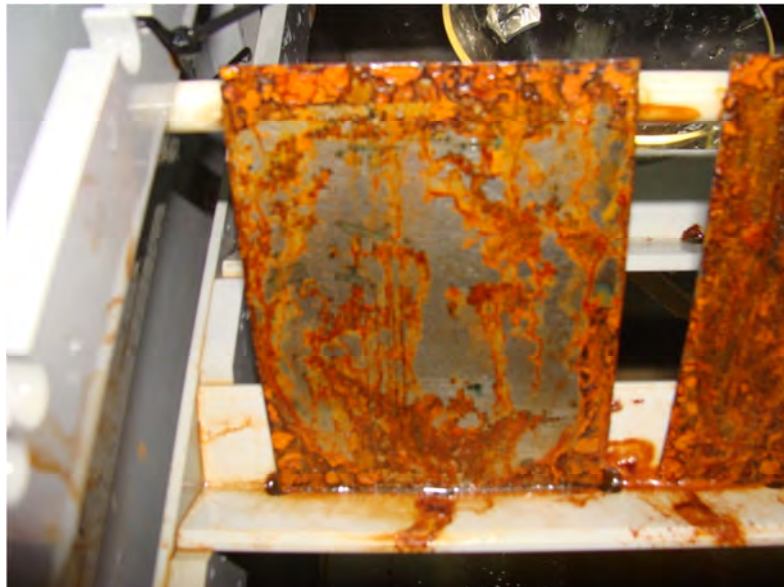


รูปที่ 4.10 แผ่นเหล็กเคลือบผิวแห้ง สูตรที่ 9

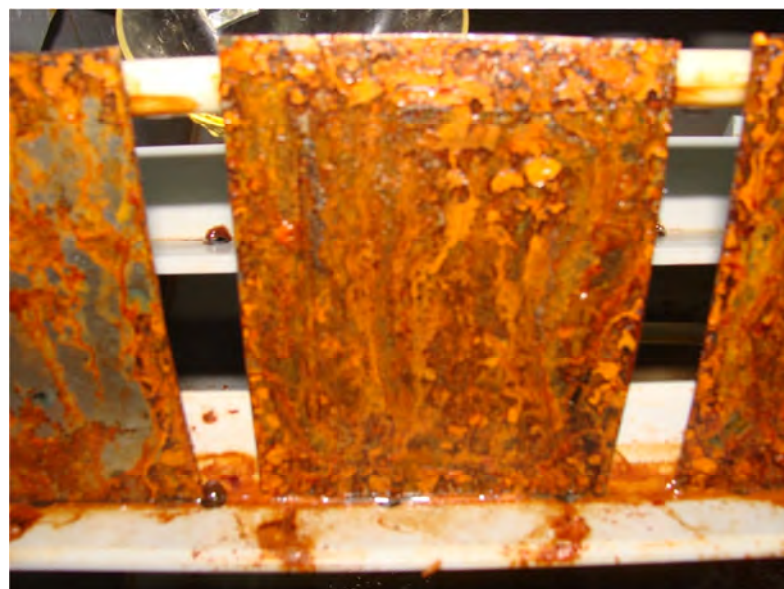
#### 4.2.3.2 ผลการทดสอบ

เมื่อครบกำหนดเวลาที่ทำการทดสอบแล้ว นำแผ่นทดสอบออกจาก Chamber ดำเนินการทำความสะอาดแผ่นทดสอบ วิเคราะห์ผลการทนต่อการกัดกร่อนของแผ่นเหล็กที่เคลือบผิวแห้ง โดยดูจากการหลุดลอกของสารเคลือบผิว การเปลี่ยนสี และการเกิดสนิมของผิวเหล็ก (ไม่สนใจบริเวณขอบทั้งสี่ด้าน และที่ด้านหลังของแผ่นเหล็กซึ่งไม่ได้ถูกเคลือบผิว)

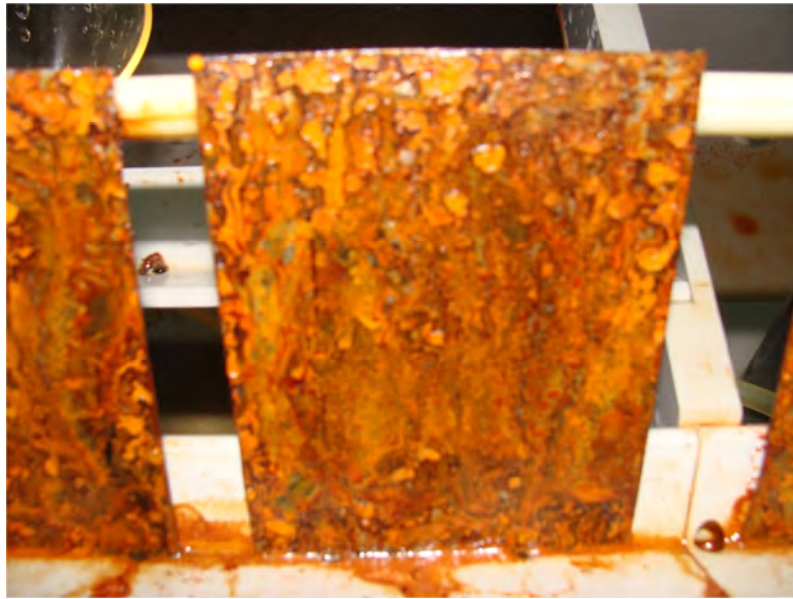
สภาพของแผ่นเหล็กหลังการทดสอบ 48 ชั่วโมง



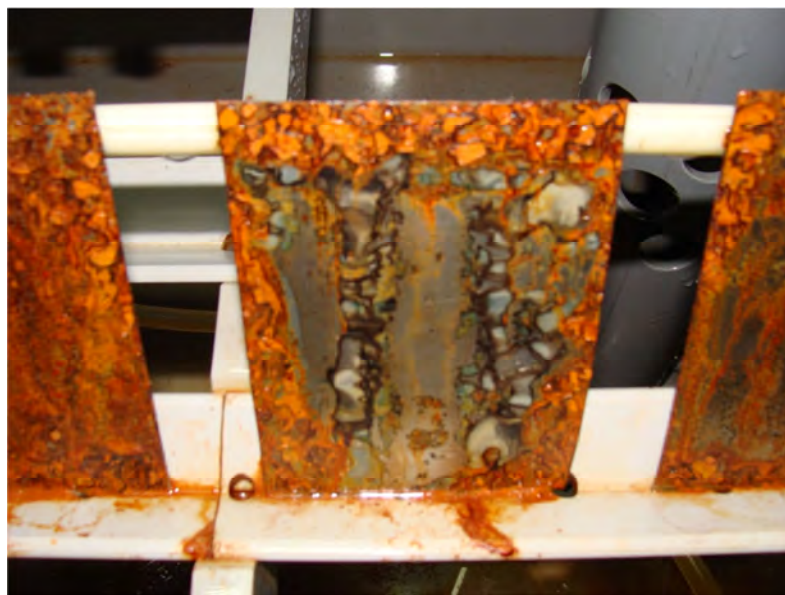
รูปที่ 4.11 แผ่นเหล็กเคลือบผิวแห้ง สูตรที่ 1



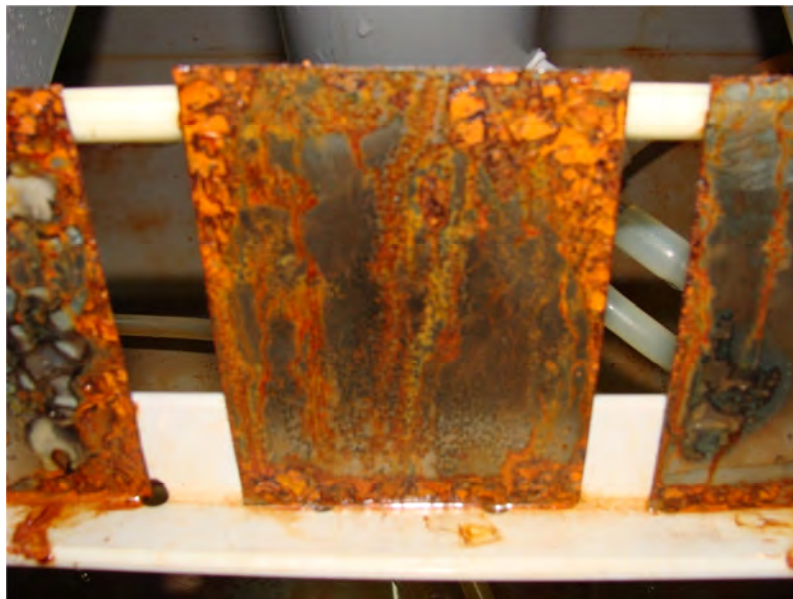
รูปที่ 4.12 แผ่นเหล็กเคลือบผิวแห้ง สูตรที่ 2



รูปที่ 4.13 แผ่นเหล็กเคลือบผิวแห้ง สูตรที่ 3



รูปที่ 4.14 แผ่นเหล็กเคลือบผิวแห้ง สูตรที่ 4



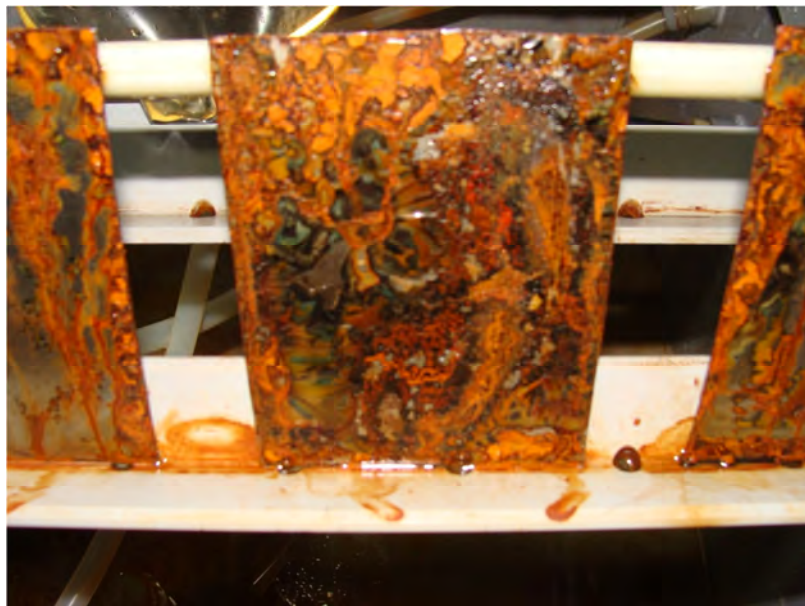
รูปที่ 4.15 แผ่นเหล็กเคลือบผิวแห้ง สูตรที่ 5



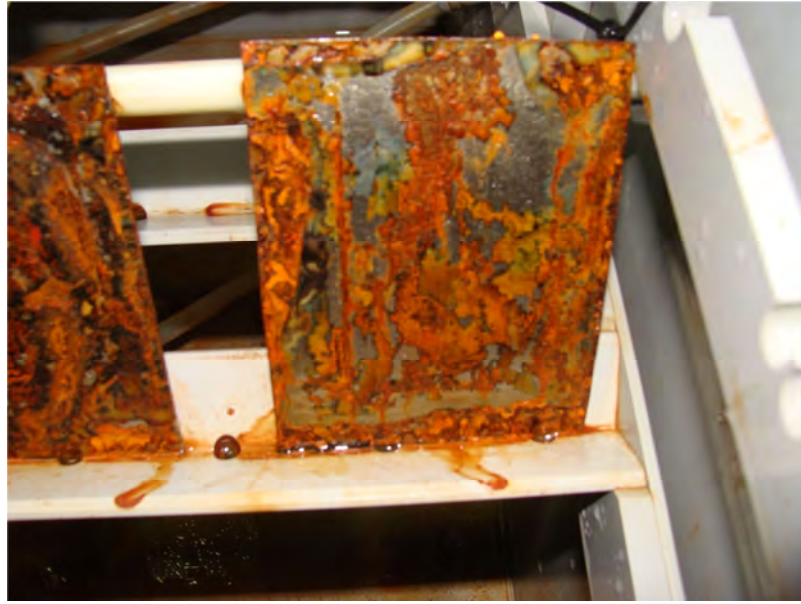
รูปที่ 4.16 แผ่นเหล็กเคลือบผิวแห้ง สูตรที่ 6



รูปที่ 4.17 แผ่นเหล็กเคลือบผิวแห้ง สูตรที่ 7

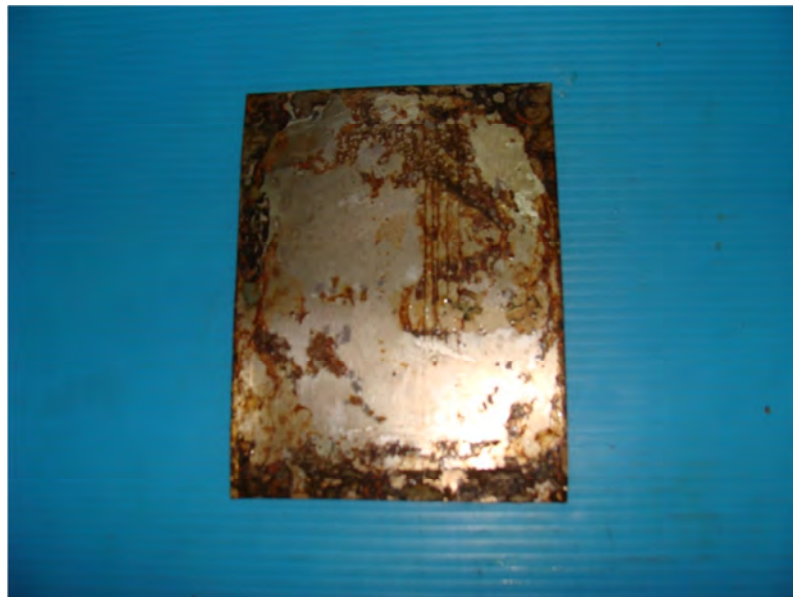


รูปที่ 4.18 แผ่นเหล็กเคลือบผิวแห้ง สูตรที่ 8



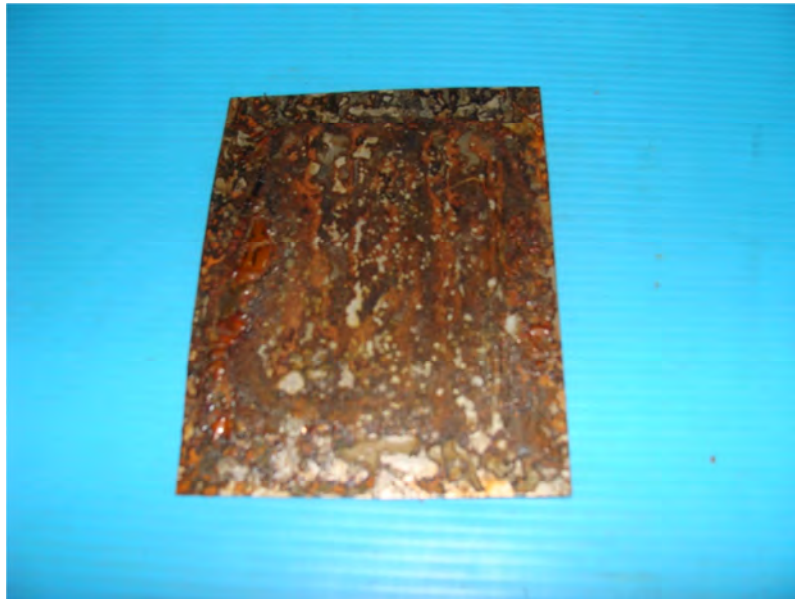
รูปที่ 4.19 แผ่นเหล็กเคลือบผิวแห้ง สูตรที่ 9

สภาพของแผ่นเหล็กหลังการล้าง



รูปที่ 4.20 แผ่นเหล็กเคลือบผิวแห้ง สูตรที่ 1





รูปที่ 4.21 แผ่นเหล็กเคลือบผิวแห้ง สูตรที่ 2



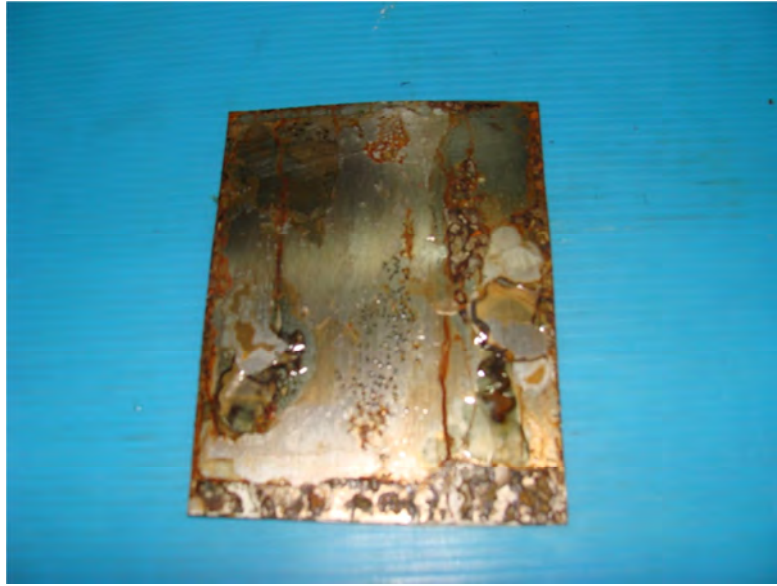
รูปที่ 4.22 แผ่นเหล็กเคลือบผิวแห้ง สูตรที่ 3



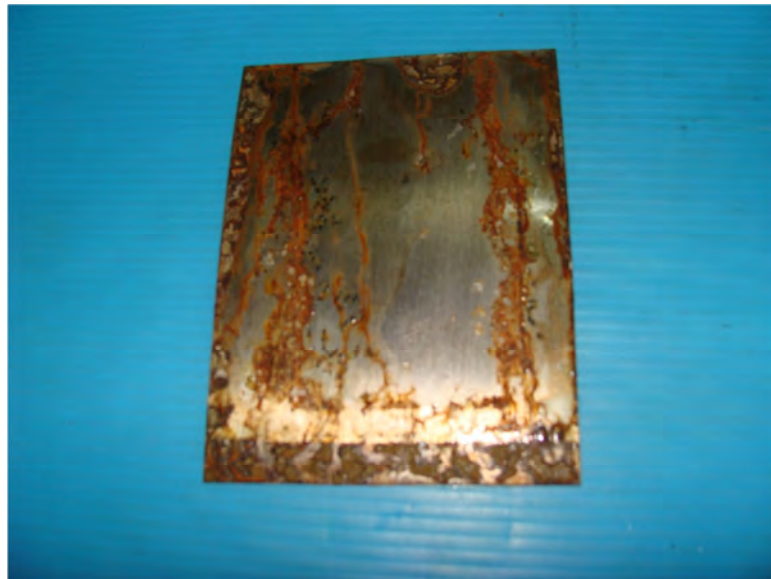
รูปที่ 4.23 แผ่นเหล็กเคลือบผิวแข็ง สูตรที่ 4



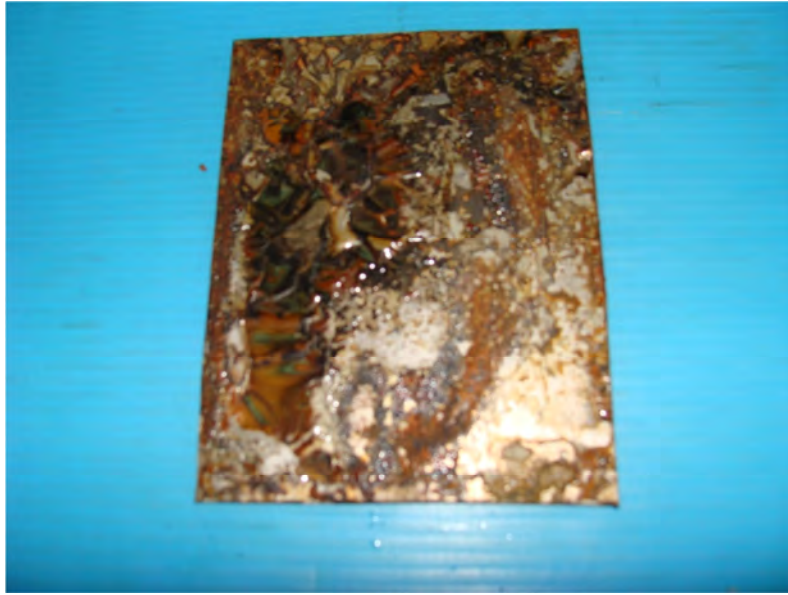
รูปที่ 4.24 แผ่นเหล็กเคลือบผิวแข็ง สูตรที่ 5



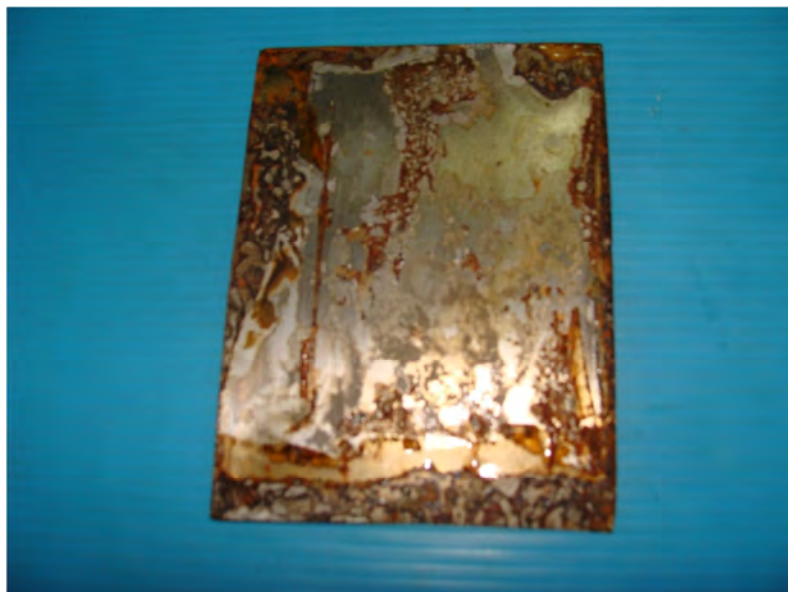
รูปที่ 4.25 แผ่นเหล็กเคลือบผิวแข็ง สูตรที่ 6



รูปที่ 4.26 แผ่นเหล็กเคลือบผิวแข็ง สูตรที่ 7



รูปที่ 4.27 แผ่นเหล็กเคลือบผิวแข็ง สูตรที่ 8



รูปที่ 4.28 แผ่นเหล็กเคลือบผิวแข็ง สูตรที่ 9

ตารางที่ 4.7 ผลการทดสอบการทนต่อการกัดกร่อนของแผ่นเหล็กที่เคลือบผิวสูตรต่างๆ

สูตร	สี	ลักษณะผิวเคลือบ	การยึดเกาะ	การเกิดสนิม
1	น้ำตาลอ่อน	เปราะ	หลุดลอก	ค่อนข้างน้อย
2	น้ำตาลไหม้	นุ่ม	หลุดลอก	มาก
3	น้ำตาลไหม้	เปราะ	หลุดลอก	ค่อนข้างมาก
4	น้ำตาลไหม้	เปราะ	หลุดลอก	ปานกลาง
5	น้ำตาลอ่อน	เปราะ	หลุดลอก	ปานกลาง
6	น้ำตาลอ่อน	เปราะ	หลุดลอก	ค่อนข้างน้อย
7	น้ำตาลอ่อน	เปราะ	หลุดลอก	ค่อนข้างน้อย
8	น้ำตาลไหม้	นุ่ม	หลุดลอก	ค่อนข้างมาก
9	น้ำตาลอ่อน	เปราะ	หลุดลอก	ค่อนข้างน้อย

หลังการทดสอบ พบว่าไม่มีสารเคลือบผิวสูตรไหนที่ยึดเกาะกับแผ่นเหล็ก ส่วนใหญ่จะหลุดลอกออกเกือบทั้งหมด อาจเกิดจากเคลือบผิวบางเกินไป, สารเคลือบผิวที่ผสมไม่ทนต่อการกัดกร่อน และ/หรือสารเคลือบผิวยึดผิวได้ไม่แน่นพอ จากมาตรฐานการทดสอบชิ้นส่วนอากาศยานที่ชุบด้วย anodizing และรถยนต์ที่ผ่านการเคลือบผิวหรือทาสี จะทำการทดสอบด้วยหมอกเกลือเป็นเวลานานกว่า 100 ชั่วโมง สารเคลือบผิวที่เตรียมได้นี้จึงยังไม่ดีพอสำหรับใช้ในอุตสาหกรรม

การเกิดสนิม พบว่าเหล็กแผ่นที่ 2, 3, 8 จะเกิดสนิมมาก พิจารณาจากชนิดของโอลิโกเมอร์ และตัวเจือจาง จากตารางที่ 2.1 บ่งบอกว่าชนิด Ebecryl 8701 ทนต่อสารเคมีได้ดี เหล็กแผ่นที่ 2 และ 8 เคลือบด้วยโอลิโกเมอร์ Ebecryl 8702 ซึ่งน่าจะทนสารเคมีได้น้อยกว่า จึงเกิดสนิมมากกว่า ส่วนตัวเจือจางที่มีหมู่ฟังก์ชันมากกว่าจะทนสารเคมีได้มากกว่าจากตารางที่ 2.4 PETIA มีหมู่ฟังก์ชันมากกว่า TPGDA มีทนสารเคมีได้มากกว่า โดยเหล็กแผ่นที่ 2, 5 และ 8 ที่ใช้โอลิโกเมอร์ Ebecryl 8702 เหมือนกัน แผ่นที่ 5 เกิดสนิมน้อยกว่า ซึ่งน่าจะมาจากตัวเจือจางชนิด PETIA ที่ใช้ผสม

#### 4.2.4 ทดสอบความคงทนต่อสารเคมี

##### 4.2.4.1 สารเคมีที่ใช้ทดสอบ

เลือกใช้สารเคมีทั้งหมด 6 ชนิด ซึ่งเป็นสารเคมีที่ใช้ในครัวเรือน (Household chemicals) ตามมาตรฐาน ASTM D1308 ตามตารางที่ 4.8

ตารางที่ 4.8 สารเคมีที่เลือกทดสอบ

ประเภทสารเคมี	เลือกใช้	วิธีทดสอบ
Vinegar	น้ำส้มสายชูกลั่น 5%	Spot Test, Covered
Soap Solution	น้ำสบู่	. Immersion Test
Oils and Fats	น้ำมันถั่วเหลือง	Spot Test, Open
Condiments	ซอสมะเขือเทศ	Spot Test, Open
Beverages	กาแฟ	Spot Test, Open
Lubricating Oils and Greases	น้ำมันเครื่อง	Spot Test, Open

##### 4.2.4.2 วิธีทดสอบ

ทดสอบได้ 3 วิธี เลือกใช้วิธีที่เหมาะสมกับสารเคมีที่ใช้ทดสอบ

1. **Spot Test, Covered** หยดสารเคมีที่ใช้ทดสอบลงบนผิวชิ้นงาน นำแผ่นกระจกใสปิดทับ

2. **Spot Test, Open** หยดสารเคมีที่ใช้ทดสอบลงบนผิวชิ้นงาน ไม่ต้องเอาอะไรปิด ใช้กับสารเคมีชนิด citrus fruit, oils, greases, beverages

3. **Immersion Test** นำชิ้นงานแช่ลงในสารเคมีที่ใช้ทดสอบครึ่งหนึ่ง ใช้กับสารเคมีชนิด Distilled Water, Alkali Solution, Acid Solution, Soap Solution, Detergent Solution

ระยะเวลาที่ทดสอบตามที่มาตรฐานแนะนำ คือ 15 นาที 1 ชั่วโมง และ 16 ชั่วโมง สำหรับงานวิจัยนี้เลือกใช้เวลาทดสอบ 1 ชั่วโมง

#### 4.2.4.3 ผลการทดสอบ

สังเกตผลการทดสอบจากลักษณะการเปลี่ยนแปลงที่แย่งของผิวเคลือบ เช่น สีตก ผิวขุ่นไหม้สี ผิวน้ิมลง บวมพอง สูญเสียการยึดเกาะ หรืออื่นๆ ผลการทดสอบเป็นไป ตามตารางที่

4.9

ตาราง 4.9 ผลการทดสอบความคงทนต่อสารเคมีของแผ่นเหล็กที่เคลือบผิวสูตรต่างๆ

สูตร	สารเคมี					
	น้ำส้มสายชู กลั่น 5%	น้ำสบู่	น้ำมันถั่ว เหลือง	ซอสมะเขือ เทศ	กาแฟ	น้ำมัน เครื่อง
1	ไม่เปลี่ยน	ไม่เปลี่ยน	ไม่เปลี่ยน	ไม่เปลี่ยน	ไม่เปลี่ยน	ไม่เปลี่ยน
2	สีน้ำตาล ผิว หลุดลอก	สีน้ำตาล ผิว หลุดลอก	ไม่เปลี่ยน	ไม่เปลี่ยน	ไม่เปลี่ยน	ไม่เปลี่ยน
3	สีน้ำตาล ผิว ขรุขระ	ไม่เปลี่ยน	ไม่เปลี่ยน	ไม่เปลี่ยน	ไม่เปลี่ยน	ไม่เปลี่ยน
4	ไม่เปลี่ยน	ไม่เปลี่ยน	ไม่เปลี่ยน	ไม่เปลี่ยน	ไม่เปลี่ยน	ไม่เปลี่ยน
5	สีน้ำตาล ผิว หลุดลอก	สีน้ำตาล ผิว หลุดลอก	ไม่เปลี่ยน	ไม่เปลี่ยน	ไม่เปลี่ยน	ไม่เปลี่ยน

6	ไม่เปลี่ยน	ไม่เปลี่ยน	ไม่เปลี่ยน	ไม่เปลี่ยน	ไม่เปลี่ยน	ไม่เปลี่ยน
7	ไม่เปลี่ยน	ไม่เปลี่ยน	ไม่เปลี่ยน	ไม่เปลี่ยน	ไม่เปลี่ยน	ไม่เปลี่ยน
8	สีน้ำตาล ผิว ขรุขระ	ไม่เปลี่ยน	ไม่เปลี่ยน	ไม่เปลี่ยน	ไม่เปลี่ยน	ไม่เปลี่ยน
9	สีน้ำตาล ผิว หลุดลอก	ไม่เปลี่ยน	ไม่เปลี่ยน	ไม่เปลี่ยน	ไม่เปลี่ยน	ไม่เปลี่ยน

มีเฉพาะสารเคมีชนิดที่เป็นกรด-ด่าง อย่างน้ำส้มสายชูและน้ำสบู่ ที่มีผลต่อการทดสอบผิว โดยเหล็กแผ่นที่ 2, 5, 8, 9 ที่เห็นการเปลี่ยนแปลงอย่างรุนแรง แผ่นที่ 3 เห็นการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยกับน้ำส้มสายชู เหล็กแผ่นที่ 2, 5, และ 8 เคลือบด้วยโพลิโกเมอร์ Ebecryl 8702 ซึ่งน่าจะทนต่อสารเคมีได้น้อยกว่าชนิด Ebecryl 8701 ผิวเคลือบจึงหลุดลอก

ส่วนชนิดของตัวเจือจาง สังกัดจากแผ่นที่ 3, 6 และ 9 ซึ่งผสมด้วยโพลิโกเมอร์ Ebecryl 8701 และ Ebecryl 8702 อย่างละเท่าๆกัน แผ่นที่ 6 ใช้ตัวเจือจาง PETIA ไม่เห็นการเปลี่ยนแปลง แผ่นที่ 3 ใช้ตัวเจือจาง TPGDA เปลี่ยนแปลงเล็กน้อย และแผ่นที่ 9 ใช้ตัวเจือจาง TPGDA และ PETIA ผสมกันอย่างละครึ่ง ผิวเคลือบหลุดลอกเมื่อทดสอบด้วยน้ำส้มสายชู น่าจะมาจากการยึดเกาะของ TPGDA ในแผ่นที่ 3 ที่มากกว่าแผ่นที่ 9



## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัย

องค์ประกอบและสัดส่วนของสารเคลือบสำหรับเคลือบผิวเหล็กด้วยอิเล็กตรอนบีมเดียวจริง

จากการศึกษาหาองค์ประกอบของสารเคลือบผิวที่มีสารตั้งต้นหลัก ได้แก่ โอลิโกเมอร์ชนิด ยูรีเทนอคริเลท 2 ตัว คือ Ebecryl 8701 (Aliphatic Urethane Triacrylate) และ Ebecryl 8702 (Aliphatic Urethane Hexaacrylate), มอนอเมอร์ 2 ชนิดคือ Tripropylene glycol diacrylate (TPGDA) และ Pentaerythritol tri-tetraacrylate (PETIA) และผสม Maleic anhydride สำหรับเป็นตัวเร่งการเกิดการเชื่อมขวาง และ 4-Hydroxyanisole เพื่อให้สารเคลือบผิวที่ผสมอยู่ตัว จากการศึกษาพบว่า องค์ประกอบที่เหมาะสมสำหรับทำสารเคลือบผิวเหล็กมี 4 สูตร (จาก 9 สูตรที่ทำการทดลอง) ดังนี้

สูตรที่ 1 Ebecryl 8701: Ebecryl 8702: TPGDA: PETIA อัตราส่วน 50:0:50:0

สูตรที่ 4 Ebecryl 8701: Ebecryl 8702: TPGDA: PETIA อัตราส่วน 50:0:0:50

สูตรที่ 6 Ebecryl 8701: Ebecryl 8702: TPGDA: PETIA อัตราส่วน 25:25:0:50

สูตรที่ 7 Ebecryl 8701: Ebecryl 8702: TPGDA: PETIA อัตราส่วน 50:0:25:25

ในทุกสูตรใช้ Maleic anhydride 2 กรัม และ 4-Hydroxy anisole 480 มิลลิกรัม เมื่อนำสารเคลือบผิวทั้ง 4 สูตรไปเคลือบให้แห้งติดกับผิวเหล็กด้วยลำอิเล็กตรอนพลังงานสูง (8 MeV) ส่งผลให้อิเล็กตรอนทะลุสารเคลือบผิวลงไปบนเนื้อเหล็ก ทำให้อิเล็กตรอนถ่ายเทพลังงานให้กับอะตอมของเหล็ก เกิดBremstrahlung X-Ray และ Scatter electron ดังนั้น พลังงานที่ใช้ในการทำให้สารเคลือบผิวแห้งติดกับผิวเหล็กจึงเกิดจาก Primary electron, Bremstrahlung X-Ray และ Scatter electron

จากการทดสอบคุณสมบัติของสารเคลือบผิว 4 อย่าง ได้แก่ การทนต่อขีดขีด การขัดถูแบบเปียก การทนต่อการกัดกร่อน และการทนต่อสารเคมี พบว่า สูตรสารเคลือบผิวทั้ง 4 สูตร มีความทนต่อการขีดขีดด้วยดินสอ 6H ตามมาตรฐาน ASTM D3363 และทนต่อแรงขีด 80-90 กรัม ตามมาตรฐาน ASTM 2240 ส่วนคุณสมบัติการขัดถูแบบเปียกไม่สามารถประเมินได้ เนื่องจากฟิล์มที่เคลือบมีความหนาไม่สม่ำเสมอ และเครื่องทดสอบไม่ได้มาตรฐาน ISO 11998 ผลการทดสอบการ

กั้ดกร่อนด้วยหมอกเกลือตามมาตรฐาน ASTM B117 พบว่าสารเคลือบผิวทั้ง 4 สูตรไม่สามารถยึดเกาะผิวไว้ได้ แต่ยังพอกันสนิมได้บ้าง ส่วนผลการทดสอบการทนต่อสารเคมีที่ใช้ในครัวเรือนตามมาตรฐาน ASTM D1308 สารเคลือบทั้ง 4 สูตร แล้วดูการเปลี่ยนแปลงที่แย่งของผิวเคลือบ เช่น สีตก ผิวขุ่นไม่ใส ผิวน้้มลง บวมพอง สูญเสียการยึดเกาะ พบว่า ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงดังกล่าว แสดงว่า สารเคลือบผิวทั้ง 4 สูตรทนต่อสารเคมีได้ดี จากคุณสมบัติที่ทนต่อการขูดขีดและทนต่อสารเคมีของสารเคลือบผิวทั้ง 4 สูตร ทำให้สารเคลือบผิวที่ได้นี้เหมาะแก่การใช้เคลือบผิวเหล็กที่ใช้งานทั่วไป เช่น ในบ้านหรือสำนักงาน

## รายการอ้างอิง

- [1] Nik Ghazali Nik Salleh, Mohd Firdaus Yhaya, Azman Hassan, Aznizam Abu Bakar, and Munirah Mokhtar. Effect of UV/EB radiation dosages on the properties of nanocomposite coatings. *Radiation Physics and Chemistry* 80 (2011):136–141.
- [2] C.S.B Ruiza, L.D.B. Machadob, E.S. Pinob, and M.H.O Sampa. Characterization of a clear coating cured by UV/EB radiation. *Radiation Physics and Chemistry* 63 (2002):481–483.
- [3] Colette Patacza, Xavier Coquereta, and Christian Decker. Electron-beam initiated polymerization of acrylate compositions 3: compared reactivity of hexanediol and tripropyleneglycol diacrylates under UV or EB initiation. *Radiation Physics and Chemistry* 62 (2001):403–410.
- [4] ระวีวรรณ อินทร์ตัน. การใช้ น้ำมันทานตะวันอีพอกซีไดซ์และน้ำมันทานตะวันอีพอกซีไดซ์/มอนต์มอริลโลไนต์เป็นสารเคลือบผิวที่บ่มด้วยรังสีอัลตราไวโอเล็ต. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, สาขาวิชาวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ประยุกต์และเทคโนโลยีสิ่งทอ ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2548.
- [5] Anthony J. Borejka, Daniel Montoney, Marshall R. Cleland, and Loïc Loiseau. Radiation curing: coatings and composites. *NUKLEONIKA* 2010;55(1):97–106
- [6] Emily Clark. *An Innovative Way to Print : Ultra Violet and Electron Beam Curing*. Rochester Institute of Technology. Rochester, New York. January 2009.
- [7] Daniel L. Goodman, and Giuseppe R. Palmese. *Curing and Bonding of Composites using Electron Beam Processing*. 2002 Rapra Technonoly Limited.
- [8] Thierry GLAUSER 1999. *Electron-Beam Curing of Thermoset Resins for Composites*. Kungliga Tekniska Högskolan, Stockholm.

- [9] B. Laurell, E. Föll. INDUSTRIAL APPLICATION OF ELECTRON BEAM CURING IN THE FIELD OF COATINGS. Electron Crosslinking AB, Pilefeltsgatan 81, SE-302 50 Halmstad, Sweden.
- [10] Marshall R. Cleland, and Lewis A. Parks. Medium and high-energy electron beam radiation processing equipment for commercial applications. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B 208 (2003):74–89.
- [11] Nik Ghazali Nik Salleh, Mohd Sofian Alias, H-J. Gläsel, and R. Mehnert. High performance radiation curable hybrid coatings. Radiation Physics and Chemistry 2012
- [12] J L Garnett. RADIATION CURING - TWENTY FIVE YEARS ON. Radiat Phys.Chem. Vol. 46 No. 4-6 ; pp. 925-930, 1995
- [13] David R, Kerluke and Song Cheng. ELECTRON BEAM PROCESSING FOR AUTOMOTIVE COMPOSITE APPLICATIONS. IBA, Advanced Materials Division, 7695 Formula Place, San Diego, CA 92121-2418
- [14] สยาม แก้วคำไสย. ASTM B117 ; The standard in Salt Spray Testing-มาตรฐานการทดสอบด้วยหมอกเกลือ ASTM B117. ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ

### ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายวิจักขณ์ คุปตะเวทิน เกิดเมื่อวันที่ 20 สิงหาคม พ.ศ. 2526 สำเร็จการศึกษา  
ระดับปริญญาตรีวิทยาศาสตร์บัณฑิต (รังสีเทคนิค) ภาควิชารังสีเทคนิค คณะเทคนิคการแพทย์  
มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ปีการศึกษา 2550 หลังจากนั้นจึงเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตร  
มหาบัณฑิต สาขาวิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี ภาควิชาวิศวกรรมนิวเคลียร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อภาคต้นของปีการศึกษา 2552 และสำเร็จการศึกษาในภาคปลายปี  
การศึกษา 2555 รวมระยะเวลาในการศึกษา 4 ปี