

จลนพลศาสตร์และการพัฒนาโครงสร้างทางจุลภาคของเหล็กชุบสังกะสีที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อน



นายหลักชัย ชันธน์ภา

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CHULALONGKORN UNIVERSITY

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโลหการและวัสดุ ภาควิชาวิศวกรรมโลหการ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2556

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)

เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

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 University Graduate School.

KINETICS AND MICROSTRUCTURAL DEVELOPMENT OF GALVANIZED STEELS
UNDERGONE HEAT TREATMENTS

Mr. Luckchai Kanapa



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CHULALONGKORN UNIVERSITY

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering Program in Metallurgical and Materials

Engineering

Department of Metallurgical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2013

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	จลนพลศาสตร์และการพัฒนาโครงสร้างทางจุลภาคของ
	เหล็กชุบสังกะสีที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อน
โดย	นายหลักชัย ชันธน์ภา
สาขาวิชา	วิศวกรรมโลหการและวัสดุ
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	อาจารย์ ดร. มาวิน สุประดิษฐ์ ณ อยุธยา
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ยุทธนันท์ บุญยงมณีรัตน์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร. บัณฑิต เอื้ออาภรณ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ธาชาย เหลืองวรานันท์)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(อาจารย์ ดร. มาวิน สุประดิษฐ์ ณ อยุธยา)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ยุทธนันท์ บุญยงมณีรัตน์)

.....กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. กอบบุญ หล่อทองคำ)

.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ราชธีร์ เตชไพศาลเจริญกิจ)

หลักชัย ชั้นธรรมา : จลนพลศาสตร์และการพัฒนาโครงสร้างทางจุลภาคของเหล็กชุบสังกะสีที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อน. (KINETICS AND MICROSTRUCTURAL DEVELOPMENT OF GALVANIZED STEELS UNDERGONE HEAT TREATMENTS) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: อ. ดร. มาวิน สุประดิษฐ์ ณ ออยุธยา, อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม: ผศ. ดร. ยุทธนันท์ บุญยงมณีรัตน์, หน้า.

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาและพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ช่วยในการอธิบายผลกระทบของอุณหภูมิและเวลาในการอบร้อนต่อลักษณะของชั้นเคลือบของเหล็กชุบสังกะสีแบบกัลวานีล เนื่องจากสมบัติต่างๆของเหล็กชุบสังกะสีแบบกัลวานีลนั้นขึ้นอยู่กับลักษณะของชั้นเคลือบเป็นสำคัญ และในอุตสาหกรรมนั้นตัวแปรสำคัญที่ต้องควบคุมอย่างเข้มงวดเป็นอันดับต้นๆคือ อุณหภูมิและเวลาในการอบร้อน โดยงานวิจัยนี้ได้แบ่งการศึกษาออกเป็น 2 ส่วน คือ 1. การสร้างแบบจำลองเพื่อทำนายลักษณะของชั้นเคลือบที่จะเกิดขึ้นและ 2. ศึกษาผลของลักษณะชั้นเคลือบต่อความต้านทานการกัดกร่อน

ในส่วนของการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์นั้นได้ประยุกต์ใช้กฎข้อที่ 2 ของการแพร่ในการสร้างแบบจำลอง และใช้ระเบียบวิธีผลต่างสี่เหลี่ยมในการแก้สมการเชิงอนุพันธ์ประกอบกับการกำหนดเงื่อนไขขอบเขตในการคำนวณแบบพิเศษ เพื่อให้ง่ายต่อการทำนายรอยต่อระหว่างเฟส และใช้ภาษา C++ ในการเขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับแก้สมการ จากนั้นนำผลการคำนวณที่ได้มาสอบเทียบกับงานวิจัยของนักวิจัยท่านอื่นและสอบเทียบกับผลการทดลองของตนเองซึ่งผลที่ได้ออกมาอยู่ในเกณฑ์ที่น่าพอใจโดยสามารถทำนายการพัฒนาของเฟสบางเฟสในชั้นเคลือบซึ่งให้ผลที่มีค่าคลาดเคลื่อนเพียง 7% เท่านั้นซึ่งเมื่อเทียบกับความซับซ้อนของปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นนั้นถือว่าผลอยู่ในเกณฑ์ที่น่าพอใจ

ในส่วนของการศึกษาผลของลักษณะชั้นเคลือบต่อความต้านทานการกัดกร่อนนั้นได้ทำการทดสอบโดยกระบวนการทดสอบความต้านทานต่อละอองเกลือ ซึ่งผลที่ออกมา นั้นยืนยันว่าลักษณะของชั้นเคลือบนั้นส่งผลต่อความสามารถในการต้านทานการกัดกร่อนจริงโดยชิ้นงานที่มีลักษณะของชั้นเคลือบภายนอกเป็นเฟสของเซตต้าจะแสดงค่าอัตราส่วนของสนิมแดงต่อพื้นที่สูงถึง 80% ที่เวลาทดสอบ 320 ชั่วโมง ซึ่งชิ้นงานอื่นๆที่ชั้นเคลือบภายนอกเป็นเฟสของเอต้ามีอัตราส่วนของสนิมแดงเพียง 4-5% เท่านั้น

ภาควิชา วิศวกรรมโลหการ
สาขาวิชา วิศวกรรมโลหการและวัสดุ
ปีการศึกษา 2556

ลายมือชื่อนิสิต
ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะไม่สำเร็จได้ถ้าปราศจากความช่วยเหลือในด้านต่างๆไม่ว่าจะเป็นด้านวิชาการและการดำเนินชีวิต เพราะ ถ้าปราศจากความช่วยเหลือในด้านต่างๆแล้วการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้สำเร็จก็คงจะยากยิ่งขึ้นหลายเท่าตัวหรือไม่สามารถให้สำเร็จได้เลย

ผมขอขอบพระคุณอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ดร. มาวิน สุประดิษฐ์ ณ อยุธยา และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ยุทนันท์ บุญยงมณีรัตน์ ที่ให้คำปรึกษา ถ่ายทอดความรู้ต่างๆ ซึ่งเป็นแนวทางอย่างดีในการแก้ปัญหาในการทำวิทยานิพนธ์และการแก้ปัญหาทางวิศวกรรมที่จะเกิดขึ้นเมื่อเข้าสู่การทำงานด้านวิศวกรรม และขอขอบคุณท่านคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ อันประกอบไปด้วย รองศาสตราจารย์ ดร. กอบบุญ หล่อทองคำ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ธาชาย เหลืองวรานันท์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ราชธีร์ เตชไพศาลเจริญกิจ ที่ช่วยแนะนำและชี้จุดอ่อนที่จะต้องปรับปรุงเพื่อให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมโลหการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยให้การศึกษารวมทั้งให้คำแนะนำต่างๆที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้จริงทั้งในการทำวิทยานิพนธ์และการทำงาน และเจ้าหน้าที่ประจำภาควิชาวิศวกรรมโลหการที่ช่วยให้คำปรึกษาเรื่องเอกสารต่างๆและคอยดูแลการทำงานในภาควิชาให้มีความสะดวกเรียบร้อย

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ประจำสถาบันวิจัยโลหะและวัสดุ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยที่ช่วยอำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมือ

ขอขอบคุณ นายชัยวัฒน์ ตั้งพัฒน์เจริญ, นายรัฐชน์ สงวนหมู่, นายธนกร เลิศจิระกุล, น.ส. แคททาริยา สุวรรณทรัพย์, นายธนพัฒน์ แก้วมณีกุล, น.ส.ณัฐนิชา เต็งอำนวย, นายธนิต เคนหงษ์, น.ส.กุลนรี ฤทธิ์แดง, น.ส.กมลชนก ทิพย์รัต นิสิตจากภาควิชาวิศวกรรมโลหการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ผู้ให้การช่วยเหลือในด้านต่างๆไม่ว่าจะเป็นด้านการศึกษาและการให้กำลังใจเสมอเมื่อมีปัญหาต่างๆ

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณ บิดา-มารดา และสมาชิกตระกูลชั้นธรรมา ที่ให้การสนับสนุนในทุกด้านของชีวิตและเป็นผู้ที่เข้าใจถึงแนวทางต่างๆที่ผมเลือกกระทำ และขอขอบคุณน้องชายและน้องสาวทั้ง 2 คนที่ช่วยดูแลเรื่องราวต่างๆ ตลอดจนกิจการต่างๆ ในครอบครัวให้สำเร็จลุล่วงและเรียบร้อยตลอดระยะเวลาที่ผมไม่ได้กลับบ้าน ซึ่งทำให้ผมสามารถออกจากบ้านมาทำการทดลองตลอดจนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้โดยไม่ต้องกังวลถึงเรื่องราวต่างๆ

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฌ
สารบัญภาพ.....	ญ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
บทที่ 2 การศึกษาข้อมูลเบื้องต้น.....	3
2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	3
2.1.1 กระบวนการชุบสังกะสีแบบกัลวานีล.....	3
2.1.2 การแพร่ของมวลสาร.....	4
2.1.3 ระเบียบวิธีผลต่างสืบเนื่อง (Finite Difference Method).....	5
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	7
2.2.1 การเปลี่ยนแปลงและการโตของเฟส (Phase transformation & growth).....	7
2.2.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Mathematical modeling & simulation).....	12
2.2.3 ความต้านทานการกัดกร่อนของเหล็กชุบสังกะสีแบบกัลวานีล.....	14
2.2.4 การทดสอบความต้านทานการกัดกร่อนต่อละอองน้ำเกลือ (Salt Sprays testing).....	17
บทที่ 3 ระเบียบวิธีวิจัย.....	18
3.1. อุปกรณ์และเครื่องมือ.....	18
3.1.1. อุปกรณ์ในการทำชิ้นงานเหล็กชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อน.....	18
3.1.2. อุปกรณ์ในการอบร้อน.....	18
3.1.3. อุปกรณ์และสารเคมีสำหรับเตรียมผิวชิ้นงานเพื่อศึกษาโครงสร้างจุลภาค.....	18
3.1.4. เครื่องมือในการตรวจสอบ โครงสร้างทางจุลภาค เฟส และสมบัติต่างๆของชิ้นงาน ..	18

3.1.5. เครื่องมือในการทดสอบความต้านการกัดกร่อน	19
3.1.6 อุปกรณ์ในการสร้างแบบจำลอง	19
3.2. ระเบียบวิธีการวิจัย	19
3.2.1 การเตรียมชิ้นงานเหล็กแผ่นชุบสังกะสีแบบกัลวานีล	19
3.2.2 การวิเคราะห์ โครงสร้างจุลภาคและเฟส	19
3.2.3 การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์	19
3.2.4 ทดสอบความต้านทานการกัดกร่อน	21
บทที่ 4 ผลการทดลองและการอภิปราย	23
4.1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการอธิบายการแพร่ของอะตอมเหล็กในชั้นเคลือบและการพัฒนาของเฟสในชั้นเคลือบกัลวานีลที่มีลักษณะของชั้นเคลือบแบบบาง	23
4.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการอธิบายการแพร่ของอะตอมเหล็กในชั้นเคลือบและการพัฒนาของเฟสในชั้นเคลือบกัลวานีลที่มีลักษณะของชั้นเคลือบแบบหนา	29
4.3 การศึกษาสมบัติความต้านทานการกัดกร่อนโดยวิธีการทดสอบความต้านทานการกัดกร่อนต่อละอองน้ำเกลือ	44
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	51
รายการอ้างอิง	53
ภาคผนวก ก	56
ภาคผนวก ข	62
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	68

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 1 ตารางแสดงเฟสของระบบ Fe-Zn ที่ปรากฏ ณ อุณหภูมิต่างๆ[15].....	13
ตารางที่ 2 ตารางแสดงความเข้มข้นของอะตอมเหล็กที่รอยต่อระหว่างเฟสค่า Q และ D ₀ ของแต่ละเฟส[14].....	20
ตารางที่ 3 ตารางเฟสที่ปรากฏ ณ ช่วงอุณหภูมิต่างๆ	20
ตารางที่ 4 ตารางแสดงค่าความเข้มข้นวิกฤต.....	21
ตารางที่ 5 ตารางแสดงค่า ค่า D ₀ และ Q ของแต่ละเฟส.....	24
ตารางที่ 6 ตารางแสดงค่า D ₀ และQ ของแต่ละเฟส.....	36
ตารางที่ 7 ตารางแสดงการพัฒนาของสนิมเหล็กจากการทดสอบการต้านทานการกัดกร่อนต่อละอองน้ำเกลือของเหล็กชุบสังกะสีแบบกัลวานีลที่ผ่านการอบที่อุณหภูมิ 500°C	46
ตารางที่ 8 ตารางแสดงการพัฒนาของสนิมเหล็กจากการทดสอบการต้านทานการกัดกร่อนต่อละอองน้ำเกลือของเหล็กชุบสังกะสีแบบกัลวานีลที่ผ่านการอบที่อุณหภูมิ 550°C	48
ตารางที่ 9 แสดงค่า E _{corr} และ i _{corr} ของชิ้นงานกัลวานีล	50

สารบัญภาพ

หน้า

ภาพที่ 1	ภาพแสดงกระบวนการผลิตเหล็กชุบสังกะสีแบบกัลวานีล	4
ภาพที่ 2	แผนภาพการคำนวณแบบ explicit finite difference method [6].....	7
ภาพที่ 3	แผนภูมิสมมูลของระบบเหล็กและสังกะสี [12].....	8
ภาพที่ 4	แผนภูมิสมมูลของระบบเหล็กและสังกะสี [12].....	9
ภาพที่ 5	ภาพแสดงการเกิดและการโตเฟสต่างๆในบ่อสังกะสีตามเวลา[9].....	10
ภาพที่ 6	ภาพแสดงโครงสร้างจุลภาคของชั้นเคลือบของเหล็กชุบสังกะสี[9].....	10
ภาพที่ 7	ภาพแสดงลักษณะชั้นเคลือบชนิด 0 [13].....	11
ภาพที่ 8	ภาพแสดงลักษณะชั้นเคลือบชนิด 1 [13].....	11
ภาพที่ 9	ภาพแสดงชั้นเคลือบชนิด 2 [13].....	12
ภาพที่ 10	กราฟแสดง ความสัมพันธ์ระหว่าง ความเข้มข้นของเหล็กต่อระยะทางจากผิวชิ้นงานเมื่อทำการเปลี่ยนแปลงเวลา[14].....	13
ภาพที่ 11	ภาพแสดงผลการทดสอบ Salt spray test[1].....	15
ภาพที่ 12	ภาพแสดงผลการทดสอบ Salt spray test[1].....	16
ภาพที่ 13	ภาพแสดงแผนงานการทดลอง.....	22
ภาพที่ 14	ภาพแสดงปริมาณของเหล็กในชั้นเคลือบที่เวลา 5, 10, 15, 20 และ 30 วินาที	24
ภาพที่ 15	ภาพแสดงการเปรียบเทียบปริมาณของเหล็กในชั้นเคลือบที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์กับการทดลอง.....	25
ภาพที่ 16	ภาพแสดงความหนาของเฟสต่างๆในชั้นเคลือบที่เวลาการอบร้อน(Annealing) ต่างกัน a). ผลการการคำนวณโดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์b). การทดลองของ Lin et al.....	26
ภาพที่ 17	แสดงการอบชิ้นงานเหล็กชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนโดยใช้เตาท่อแบบตั้ง.....	29
ภาพที่ 18	กราฟแสดงลักษณะของของอุณหภูมิในเตาท่อแบบตั้งเทียบกับตำแหน่ง.....	30
ภาพที่ 19	ภาพแสดงภาคตัดขวางของชิ้นงานเหล็กชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนที่อุณหภูมิ 450°C เป็นเวลา 1 นาที.....	31
ภาพที่ 20	ภาพแสดงภาคตัดขวางของชิ้นงานเหล็กชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนที่ผ่านการอบร้อนที่อุณหภูมิ 500°C เป็นเวลา 1 นาที.....	31
ภาพที่ 21	ภาพแสดงภาคตัดขวางของชิ้นงานเหล็กชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนที่ผ่านการอบร้อนที่อุณหภูมิ 500°C เป็นเวลา 5 นาที.....	32
ภาพที่ 22	ภาพแสดงภาคตัดขวางของชิ้นงานเหล็กชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนที่ผ่านการอบร้อนที่อุณหภูมิ 500°Cเป็นเวลา 10 นาที.....	32

ภาพที่ 23 ภาพแสดงภาพตัดขวางของชิ้นงานเหล็กชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนที่ผ่านการอบร้อนที่อุณหภูมิ 500°C เป็นเวลา 20 นาที.....	33
ภาพที่ 24 กราฟแสดงความเข้มข้นของเหล็กในชั้นเคลือบของเหล็กชุบสังกะสีที่ได้จากการทำ EPMA	33
ภาพที่ 25 กราฟแสดงความเข้มข้นของเหล็กในชั้นเคลือบของเหล็กชุบสังกะสีที่ผ่านการอบร้อนเป็นเวลา 1 นาทีที่ได้จากการทำ EPMA.....	34
ภาพที่ 26 กราฟแสดงความเข้มข้นของเหล็กในชั้นเคลือบของเหล็กชุบสังกะสีที่ผ่านการอบร้อนเป็นเวลา 5 นาทีที่ได้จากการทำ EPMA.....	34
ภาพที่ 27 กราฟแสดงความเข้มข้นของเหล็กในชั้นเคลือบของเหล็กชุบสังกะสีที่ผ่านการอบร้อนเป็นเวลา 10 นาทีที่ได้จากการทำ EPMA.....	35
ภาพที่ 28 กราฟแสดงความเข้มข้นของเหล็กในชั้นเคลือบของเหล็กชุบสังกะสีที่ผ่านการอบร้อนเป็นเวลา 20 นาทีที่ได้จากการทำ EPMA.....	35
ภาพที่ 29 กราฟแสดงการเปรียบเทียบรูปแบบความเข้มข้นของเหล็กในชั้นเคลือบ(Concentration Profile)ระหว่างค่าที่ได้จาก EPMA และค่าเริ่มต้นที่ทำการใส่ลงในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์.....	37
ภาพที่ 30 กราฟแสดงการพัฒนาความเข้มข้นของเหล็กในชั้นเคลือบที่เทียบกับตำแหน่งที่เวลาต่างๆ	38
ภาพที่ 31 กราฟแสดงการเปรียบเทียบความเข้มข้นของเหล็กในชั้นเคลือบกับค่าที่ได้จาก EPMA ของชิ้นงานเหล็กชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อน	38
ภาพที่ 32 กราฟแสดงการเปรียบเทียบความเข้มข้นของเหล็กในชั้นเคลือบกับค่าที่ได้จาก EPMA ของชิ้นงานเหล็กชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนที่ผ่านการอบเป็นเวลา 1 นาที.....	39
ภาพที่ 33 กราฟแสดงการเปรียบเทียบความเข้มข้นของเหล็กในชั้นเคลือบกับค่าที่ได้จาก EPMA ของชิ้นงานเหล็กชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนที่ผ่านการอบเป็นเวลา 5 นาที.....	39
ภาพที่ 34 กราฟแสดงการเปรียบเทียบความเข้มข้นของเหล็กในชั้นเคลือบกับค่าที่ได้จาก EPMA ของชิ้นงานเหล็กชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนที่ผ่านการอบเป็นเวลา 10 นาที.....	40
ภาพที่ 35 กราฟแสดงความหนาของเฟสต่างๆของชิ้นงานที่ผ่านการอบ เป็น เวลา 1, 5 และ 10 นาที ที่ได้จากการวัดค่าโดยโปรแกรมไดโนไลท์ 2.0 (Dino lite 2.0 [®]).....	41
ภาพที่ 36 กราฟแสดงความหนาของเฟสต่างๆของชิ้นงานที่ผ่านการอบ เป็น เวลา 1, 5 และ 10 นาที ที่ได้จากการแปลงค่าความเข้มข้นของเหล็กในชั้นเคลือบที่ได้จากกระบวนการ EPMA.....	41

ภาพที่ 37 กราฟแสดงความหนาของเฟสต่างๆของชิ้นงานที่ผ่านการอบ เป็น เวลา 1, 5 และ 10 นาที
 ที่ได้จากการแปลงค่าความเข้มข้นของเหล็กในชั้นเคลือบที่ได้จากการคำนวณโดย
 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ 42

ภาพที่ 38 ภาพแสดงความเข้มข้นของเหล็กในชั้นเคลือบที่ถูกลดค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ 44

ภาพที่ 39 กราฟแสดงปริมาณของสนิมแดงโดยพื้นที่ของชิ้นงานเหล็กชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนและเหล็ก
 ชุบสังกะสีแบบกัลวานีลที่อุณหภูมิ 500°C เป็นเวลา 1, 5, 10 และ 20 นาที 45

ภาพที่ 40 กราฟแสดงปริมาณของสนิมแดงโดยพื้นที่ของชิ้นงานเหล็กชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนและเหล็ก
 ชุบสังกะสีแบบกัลวานีลที่อุณหภูมิ 500°C เป็นเวลา 1, 5, 10 และ 20 นาที 47

ภาพที่ 41 ภาพแสดงโครงสร้างทางจุลภาคของชั้นเคลือบกัลวานีลที่ที่อบร้อนที่เวลา 20 ที่ ก) 500°C
 และ ข) 550 °C 47

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

เหล็กชุบสังกะสีแบบกัลวานไนซ์นั้นเป็นหนึ่งในวัสดุที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในปัจจุบันโดยสมบัติที่โดดเด่นของเหล็กชุบสังกะสีแบบกัลวานไนซ์ คือ สามารถผลิตได้ง่าย ราคาไม่สูง และสามารถทดการกัดกร่อนได้ดี แต่อย่างไรก็ตามเหล็กชุบสังกะสีแบบกัลวานไนซ์นั้นก็ยังมีสมบัติในการใช้งานบางประการที่ไม่ตอบสนองต่อการใช้งานในหลายๆภาคส่วน ดังนั้นเพื่อตอบสนองการใช้งานที่ต้องการสมบัติของชั้นเคลือบที่แตกต่างกันจึงได้มีการพัฒนาต่อยอดกระบวนการผลิตเหล็กชุบสังกะสีแบบกัลวานไนซ์ออกมามากมายหลายกระบวนการ ซึ่งหนึ่งในกระบวนการที่เป็นที่รู้จักกันดีในอุตสาหกรรมยานยนต์ปัจจุบัน คือ กระบวนการผลิตชิ้นงานเหล็กชุบสังกะสีที่ผ่านกระบวนการทางความร้อน หรือ กัลวานีล (Galvanneal steel)

กระบวนการผลิตเหล็กชุบสังกะสีแบบกัลวานีลนั้นเป็นส่วนต่อของกระบวนการผลิตเหล็กชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนแบบต่อเนื่อง โดยจะมีการให้ความร้อนกับชิ้นงานเพื่อให้สมบัติของชั้นเคลือบเปลี่ยนไปโดยสมบัติที่เปลี่ยนไปนั้นเกิดจากการที่ลักษณะเฟสต่างๆในชั้นเคลือบเปลี่ยนไปโดยสมบัติที่โดดเด่นของเหล็กชุบสังกะสีกัลวานีลนั้นมีอยู่ 3 ข้อ คือ 1. ความสามารถในการทำ spot welding 2. ความสามารถในการต้านทานการกัดกร่อนที่ดี และ 3. ความสามารถในการยัดเกาะของสี (Painting ability) จากสมบัติที่โดดเด่นทั้ง 3 นั้น ทำให้มีการนำมาใช้ในการผลิตชิ้นส่วนต่างๆในอุตสาหกรรมยานยนต์มากขึ้น[1]โดยสมบัติของชั้นเคลือบนั้นจะขึ้นกับอัตราส่วนของเฟสต่างๆในชั้นเคลือบเป็นสำคัญถ้าลักษณะของชั้นเคลือบไม่เหมาะสมแล้วจะทำให้สมบัติในด้านต่างๆแย่ง เช่น ความสามารถในการตัดงอ ความสามารถในการต้านทานการกัดกร่อน เป็นต้น โดยตัวแปรสำคัญที่จะกำหนดลักษณะและความหนาของชั้นเคลือบ คือ วัตถุประสงค์ในบ่อสังกะสี อุณหภูมิ และเวลาที่ใช้ในการอบให้ความร้อน[2; 3]

จากเหตุผลดังกล่าวนี้ถ้าสามารถทำนายความหนาของเฟสต่างๆของชั้นเคลือบได้ก็จะสามารถช่วยในการออกแบบชั้นเคลือบให้มีความเหมาะสมกับความต้องการของการใช้งานที่สภาวะต่างได้เหมาะสมมากยิ่งขึ้น ซึ่งหนึ่งในวิธีที่ช่วยลดค่าใช้จ่ายและเวลาในการทดลองเพื่อหาเงื่อนไขการผลิตที่เหมาะสมของอุณหภูมิและเวลาได้ คือการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เข้ามาช่วยในการทำค่าที่เหมาะสม ซึ่งที่ผ่านมานั้นก็ได้มีการพัฒนาแบบจำลองที่ช่วยในการทำนายลักษณะของชั้นเคลือบซึ่งได้ผลที่ดีแต่ยังมีความซับซ้อนอยู่มาก[4]และจากงานวิจัยที่มีอยู่นั้นส่วนใหญ่อธิบายเฉพาะเหล็กชุบสังกะสีแบบกัลวานีลที่มีความหนาไม่เกิน 10 μm เท่านั้น มีส่วนน้อยเท่านั้นที่อธิบายในการผลิตเหล็ก

ซูปสังกะสีแบบกัลวานีลที่มีความหนากว่า 10 μm ด้วยเหตุนี้งานวิจัยนี้จึงมุ่งที่จะศึกษาผลกระทบ อุณหภูมิและเวลาต่อลักษณะของชั้นเคลือบในกระบวนการผลิตเหล็กซูปสังกะสีแบบกัลวานีล โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการอธิบายการพัฒนาของเฟสต่างๆในกระบวนการผลิตเหล็กซูปสังกะสีแบบกัลวานีล ที่ครอบคลุมทุกความหนาของชั้นเคลือบ

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 ศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิกับเวลาในการผลิตเหล็กซูปสังกะสีแบบกัลวานีล ที่มีผลต่อลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคของชั้นเคลือบ

1.2.2 พัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการอธิบายและทำนายการพัฒนาของเฟสต่างๆของเหล็กซูปสังกะสีที่แบบกัลวานีล

1.2.3 ศึกษาความต้านทานการกัดกร่อนของเหล็กซูปสังกะสีแบบกัลวานีล

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1.3.1 ทำการซูปชิ้นงานเหล็กซูปสังกะสีที่อุณหภูมิ 450°C เป็นเวลา 1 นาที

1.3.2 นำชิ้นงานเหล็กซูปสังกะสีไปอบที่ 500°C และ 550°C เป็นเวลา 1, 5, 10, 20 นาที

1.3.3 กำหนดแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เป็นแบบอุณหภูมิคงที่ ที่อุณหภูมิ 500°C

1.3.4 กำหนดให้ความเข้มข้นของอะตอมเหล็กในเฟสต่างๆนั้นมีความต่อเนื่องและเป็นไปตามสมการเส้นตรง

1.3.5 ศึกษาความสามารถในการต้านทานการกัดกร่อนโดยใช้การทดสอบความต้านทานการกัดกร่อนต่อละอองน้ำเกลือ

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ได้ความสัมพันธ์ระหว่าง อุณหภูมิและเวลาอบร้อน และโครงสร้างทางจุลภาคของเหล็กซูปสังกะสีที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อน

1.4.2 ได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการอธิบายการพัฒนาของเฟสต่างๆของเหล็กซูปสังกะสีที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนได้ที่มีความหนาไม่จำกัด

1.4.3 สามารถอธิบายและทำนายผลของอุณหภูมิและเวลาที่มีต่อลักษณะของเฟสต่างๆในชั้นเคลือบได้

1.4.4 สามารถอธิบายลักษณะของชั้นเคลือบกับความต้านทานการกัดกร่อนได้

บทที่ 2

การศึกษาข้อมูลเบื้องต้น

2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องและองค์ความรู้ที่จะใช้พัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และยืนยันความถูกต้องของแบบจำลองเมื่อเทียบกับชิ้นงานทดลองนั้นจำเป็นต้องใช้ความรู้หลายส่วนได้แก่ การแพร่ของมวลสารในตัวกลางที่เป็นของเหลวและของแข็ง ความรู้ทางคณิตศาสตร์ในการแก้ปัญหาสมการเชิงอนุพันธ์ที่ไม่สามารถแก้ปัญหามาแบบแม่นยำตรงได้ ความรู้ทางโลหะวิทยาเบื้องต้นในการแปลงเฟสของโลหะสังกะสี และความรู้ในกระบวนการผลิต

2.1.1 กระบวนการชุบสังกะสีแบบกัลวานีล

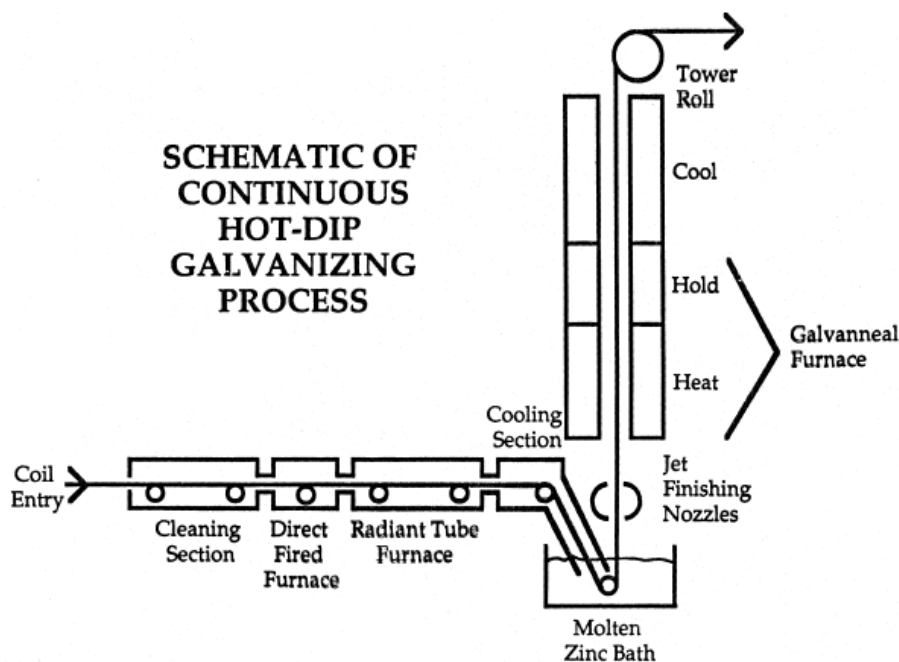
กัลวานีลนั้นเป็นกระบวนการต่อเนื่องของกระบวนการชุบสังกะสีแบบต่อเนื่อง (Continuous process galvanizing) คำว่า Galvannealing นั้นมาจากคำว่า Galvanizing รวมกับคำว่า Annealing โดยหัวใจหลักของกระบวนการ คือ การปรับปรุงลักษณะของชั้น intermetallic เพื่อปรับปรุงสมบัติของชั้นเคลือบให้เป็นที่ต้องการด้วยความร้อน โดยประกอบด้วยส่วนการผลิต 2 ส่วนคือ 1. ส่วนจุ่มร้อน และ 2. ส่วนทำการอบร้อน

สำหรับกระบวนการชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนนั้นเป็นกระบวนการที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมมาเป็นเวลามากกว่า 100 ปี โดยจุดประสงค์หลักของการชุบสังกะสี คือ ป้องกันการกัดกร่อนของเหล็กเพื่อยืดอายุการใช้งานชิ้นส่วนนั้นๆ โดยมีกระบวนการผลิตดังนี้

- ทำการล้างคราบน้ำมันหรือไขที่ทำการเคลือบผิวไว้ด้วยต่าง (Degreasing)
- ทำการกัดสนิมออกจากเนื้อเหล็กโดยทำการแช่ลงในกรด (Pickling)
- ทำการจุ่มลงในน้ำยาประสาน (Fluxing)
- ทำการจุ่มชิ้นงานที่จุ่มชิ้นงานลงในสังกะสีหลอมเหลว

โดยปัจจัยที่ส่งผลต่อลักษณะของเฟสและความหนาของชั้นเคลือบ คือ อุณหภูมิของบ่อสังกะสี และเวลาที่ทำการชุบ

หลังจากที่เหล็กแผ่นที่ผ่านการชุบสังกะสีที่ผ่าน air knife แล้วจะเข้าสู่เตาอบที่อุณหภูมิประมาณ 500 - 530 °C จากนั้นทิ้งไว้ประมาณ 10 วินาที จากนั้นปล่อยให้เกิดการเย็นตัวในอากาศ โดยระหว่างที่อยู่ในเตานั้นจะเกิดการแพร่ของอะตอมเหล็กทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของเฟสต่างๆในชั้นเคลือบซึ่งจะทำให้สมบัติต่างๆของชั้นเคลือบเปลี่ยนแปลงไปจากเดิม



ภาพที่ 1 ภาพแสดงกระบวนการผลิตเหล็กชุบสังกะสีแบบกัลวานีล

2.1.2 การแพร่ของมวลสาร

การแพร่สามารถใช้เป็นองค์ความรู้หนึ่งที่ใช้ในการอธิบายการเปลี่ยนแปลงสมบัติต่างๆ เนื่องจากเมื่อเกิดการแพร่ของมวลสารนั้นจะทำให้ปริมาณของมวลสาร ณ จุดนั้นๆ เปลี่ยนแปลงไป ส่งผลให้เกิดการแปลงเฟสหรือเกิดสารประกอบขึ้นซึ่งส่งผลให้สมบัติของวัสดุเปลี่ยนแปลงไป โดยกฎที่สำคัญที่ใช้ในการอธิบายการแพร่ของสารคือ Fick's Law

โดย Fick's law นั้นเป็นองค์ความรู้สำคัญที่ใช้ในการประมาณปริมาณของมวลสารที่เกิดการแพร่ในระบบโดยมีกฎสำคัญ 2 ข้อคือ

2.1.1.1 Fick's First Law

$$J = -D \left[\frac{\partial C}{\partial x} \right]$$

โดย J คือ ฟลักซ์

D คือ ค่า diffusion coefficient ใช้เป็นตัวชี้วัดว่าสารสามารถแพร่ได้เร็วแค่ไหน

C คือ ความเข้มข้นของสาร ณ ตำแหน่งนั้น

x คือ ตำแหน่งของชิ้นงานที่สนใจ

สำหรับกฎข้อ 1 นั้นใช้ในการอธิบายการแพร่โดยอธิบายกรณีที่ระบบอยู่ในระบบสมดุล (Equilibrium) คือ มีอัตราของมวลสารที่เข้าและออก ณ จุดนั้นๆ เท่ากันจนเหมือนกับว่าไม่มีมวลสารผ่านจุดนั้นเลย[5]

2.1.1.2 Fick's Second Law

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2}$$

โดย D คือ ค่า diffusion coefficient ใช้เป็นตัวชี้วัดว่ามวลสารสามารถแพร่ได้เร็วแค่ไหนในระบบนั้น

C คือ ความเข้มข้นของมวลสาร ณ ตำแหน่งนั้น

x คือ ตำแหน่งของชิ้นงานที่สนใจ

t คือ เวลา

โดย Fick 2nd law นั้นใช้ในการอธิบายการเปลี่ยนแปลงของมวลสาร ณ จุดหนึ่งๆ ที่เปลี่ยนไปตามเวลา [5]

2.1.3 ระเบียบวิธีผลต่างสี่เหลี่ยม (Finite Difference Method)

ระเบียบวิธีผลต่างสี่เหลี่ยมนี้เป็นกระบวนการทางคณิตศาสตร์ขั้นสูงที่ใช้ในการแก้ปัญหาสมการเชิงอนุพันธ์ชั้นสูงที่ไม่สามารถแก้ได้โดยวิธีหาค่าผลเฉลยแบบแม่นยำตรงหรือสมการแบบ nonlinear hydrodynamics equation

โดยกระบวนการแก้ปัญหาโดยใช้ระเบียบวิธีผลต่างสี่เหลี่ยมนี้มีแนวคิดพื้นฐาน 3 ข้อคือ

- แบ่งสมการออกเป็นช่วงการคำนวณย่อยๆ หลายๆ จุด
- แปลงสมการอนุพันธ์เป็นสมการในระบบของระเบียบวิธีผลต่างสี่เหลี่ยม
- กำหนดขอบเขตการคำนวณ (Boundary condition) ที่สอดคล้องกับสมการคำนวณ

โดยรูปแบบของสมการนั้นมี 3 แบบคือ

- Forward-difference formula

$$f'(x_0) \cong \frac{f(x_0 + \Delta x) - f(x_0)}{\Delta x}$$

- Backward-difference formula

$$f'(x_0) \cong \frac{f(x_0) - f(x_0 - \Delta x)}{\Delta x}$$

- Central-difference formula

$$f'(x_0) \cong \frac{f(x_0 + \Delta x) - f(x_0 - \Delta x)}{2\Delta x}$$

โดยทั้ง 3 สมการนั้นมาจากการประมาณค่าโดยใช้ Taylor's series

สำหรับการคำนวณในโปรแกรมคำนวณนั้นจะใช้ระเบียบวิธีผลต่างสี่เหลี่ยมแบบชัดแจ้ง (Explicit finite difference) ในการคำนวณหาปริมาณของอะตอมเหล็กที่แพร่ในชั้นเคลือบโดยสามารถแปลงสมการของ Fick's 2nd Law ได้สมการดังนี้

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2}$$

โดย

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{C_n^{t+1} - C_n^t}{\Delta t}$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{\partial C}{\partial x} \right]_n = \frac{1}{\Delta x} \left[\left[\frac{\partial C}{\partial x} \right]_{n+1} - \left[\frac{\partial C}{\partial x} \right]_{n-1} \right]$$

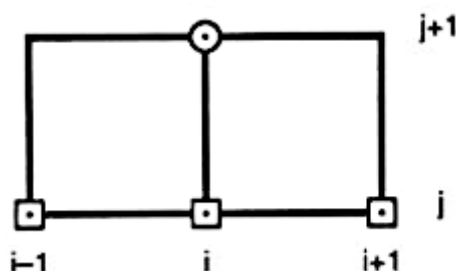
แทนค่าได้

$$\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} = \frac{1}{\Delta x} \left[\frac{C_{n+1}^t - C_n^t}{\Delta x} - \frac{C_n^t - C_{n-1}^t}{\Delta x} \right]$$

$$\frac{C_n^{t+1} - C_n^t}{\Delta t} = D \left[\frac{C_{n+1}^t - C_n^t}{(\Delta x)^2} - \frac{C_n^t - C_{n-1}^t}{(\Delta x)^2} \right]$$

โดยข้อกำหนดที่สำคัญคือค่าของ $D \frac{\Delta t}{\Delta x^2}$ ต้องมีค่าน้อยกว่า 0.5 เพื่อความถูกต้องของการคำนวณ[5; 6] เนื่องจากการแปลงค่าในรูปของสมการเชิงอนุพันธ์ชั้นสูงโดยใช้ Taylor's series เข้ามาช่วยนั้นจะพบความไม่เสถียรของการคำนวณเกิดขึ้นทำให้ค่าที่ได้นั้นมีลักษณะของกราฟที่มีความขึ้นลงของข้อมูลซึ่งขัดกับความเป็นจริง John von Neumann นักคณิตศาสตร์และบิดาของอิเล็กทรอนิกส์คอมพิวเตอร์ จึงได้นำเสนอข้อกำหนดนี้ขึ้นเพื่อช่วยให้ค่าจากการคำนวณมีความเสถียรขึ้น

โดยจากสมการนั้นสามารถกล่าวได้ว่าระเบียบวิธีผลต่างสี่เหลี่ยมแบบชัดเจนนั้นคือการนำค่าที่อยู่ทางซ้ายและขวาของตำแหน่งที่เราสนใจในมาทำการคำนวณหาค่าของตำแหน่งที่เราสนใจในอนาคตซึ่งสามารถแสดงแผนภูมิการคำนวณเพื่อให้สามารถเข้าใจได้โดยง่ายดังภาพที่ 2



ภาพที่ 2 แผนภาพการคำนวณแบบ explicit finite difference method [6]

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

เนื่องจากมีการใช้งานของเหล็กชุบสังกะสีแบบกัลวานีลมากขึ้นในหลายภาคส่วนของอุตสาหกรรมโดยเฉพาะอุตสาหกรรมยานยนต์ จึงมีงานวิจัยมากมายที่ออกมาเพื่อตอบปัญหาต่างๆของชิ้นงานเหล็กชุบสังกะสีแบบกัลวานีลโดยในงานวิจัยต่างนั้นอาจแบ่งได้ดังนี้

2.2.1 การเปลี่ยนแปลงและการโตของเฟส (Phase transformation & growth)

เริ่มต้นนั้นจำเป็นที่จะต้องทำความเข้าใจในส่วนของการเกิดเฟสต่างๆในกระบวนการผลิตเหล็กชุบสังกะสีแบบกัลวานีลเสียก่อนเพื่อที่จะเข้าใจธรรมชาติของกระบวนการผลิตเนื่องจากผลิตเหล็กชุบสังกะสีแบบกัลวานีลนั้นเป็นกระบวนการต่อเนื่องของการผลิตเหล็กชุบสังกะสีแบบกัลวานีล โดยในปี 2000 A.R. Marder et al.[2] ได้ทำการสรุปการเกิดเฟสต่างโดยเทียบกับแผนภูมิสมดุลของระบบเหล็ก-สังกะสีไว้ดังนี้

ระบบสมดุลของเหล็ก-สังกะสีนั้นเมื่อดูจากแผนภูมิสมดุลแล้วจะพบเฟสที่เป็นสารประกอบเชิงโลหะทั้งหมด 4 เฟสดังนี้

2.1.1.1 เฟสเซต้า (zeta, ζ)

เฟสเซตานั้นมีสูตรทางเคมีเป็น FeZn_{13} มีปริมาณของเหล็กอยู่ประมาณร้อยละ 5-6 โดยน้ำหนัก มีระบบผลึกเป็นแบบโมโนคลินิก มีความแข็งอยู่ที่ 208 VHN และ 118 VHN ที่น้ำหนักกระทำ 25 มิลลิกรัม และ 25 กรัมตามลำดับ โดยการเฟสซีตาเกิดจากปฏิกิริยาเพอริเทคติกระหว่างเฟสเดลต้าและส่วนที่เป็นสังกะสีหลอมเหลวที่อุณหภูมิ 530 ± 10 °C [7]

2.1.1.2 เฟสเดลต้า (Delta, δ)

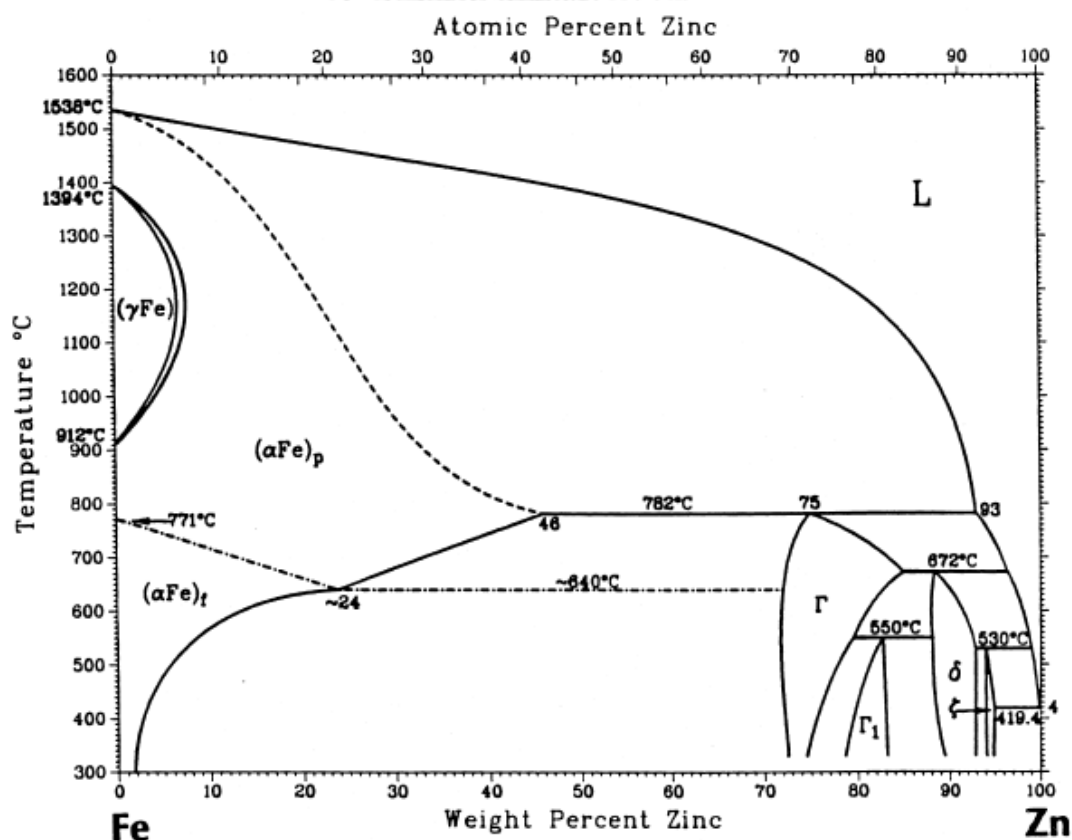
เฟสเดลต้านั้นมีสูตรทางเคมีเป็น FeZn_{10} มีปริมาณของเหล็กอยู่ที่ร้อยละ 7-11.5 โดยน้ำหนัก มีระบบผลึกเป็น แบบเฮกซะโกนอล มีความแข็งอยู่ที่ 358 VHN และ 273 VHN ที่น้ำหนักกระทำ 25 มิลลิกรัม และ 25 กรัมตามน้ำหนักโดยการเกิดเฟสเดลต้านั้นเกิดจากปฏิกิริยาเพอริเทคติกระหว่าง เฟสแกมมา1และสังกะสีหลอมเหลวที่อุณหภูมิ 665°C [8; 9]

2.1.1.3 เฟสแกมมา1 (Γ_1)

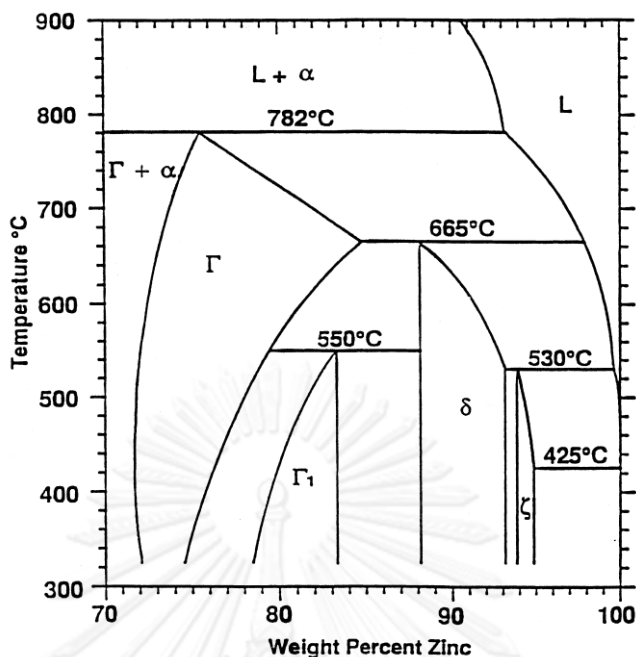
เฟสแกมมานั้นมีสูตรทางเคมีเป็น $\text{Fe}_5\text{Zn}_{21}$ มีปริมาณเหล็กอยู่ร้อยละ 17-19.5 โดยน้ำหนัก มีระบบผลึกเป็น FCC เฟสแกมมานั้นเกิดจากปฏิกิริยาเพอริเทคตอยด์ของเฟสแกมมาและเฟสเดลต้าที่ อุณหภูมิ 550°C โดยมีความแข็งอยู่ที่ 505 VHN ที่น้ำหนักกระทำ 25 มิลลิกรัม[10]

2.1.1.4 เฟสแกมมา (Γ)

เฟสแกมมานั้นมีสูตรทางเคมีเป็น $\text{Fe}_3\text{Zn}_{10}$ มีปริมาณเหล็กอยู่ร้อยละ 23.5-28 โดยน้ำหนัก มีระบบผลึกเป็น BCC เฟสแกมมานั้นเกิดจากปฏิกิริยาเพอริเทคติกของเฟสเหล็กแอลฟาและสังกะสีหลอมเหลวที่อุณหภูมิ 782°C โดยมีความแข็งอยู่ที่ 326 VHN ที่น้ำหนักกระทำ 25 มิลลิกรัม[11]

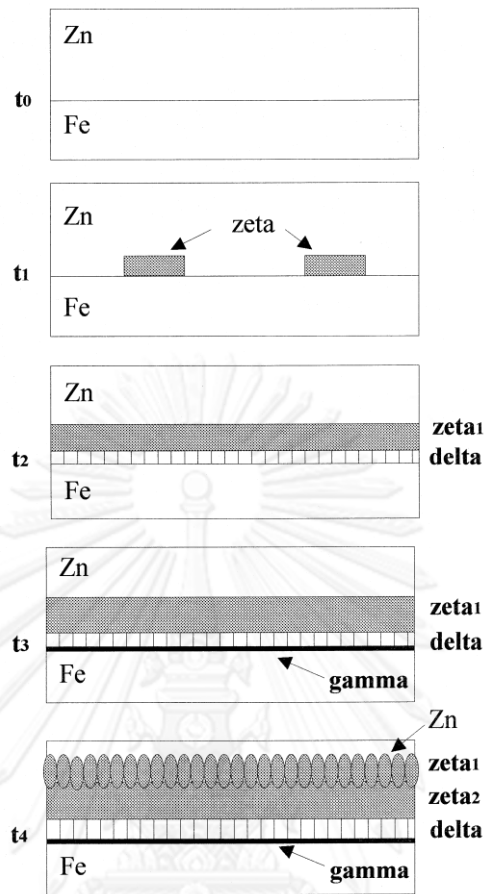


ภาพที่ 3 แผนภูมิสมดุลของระบบเหล็กและสังกะสี [12]

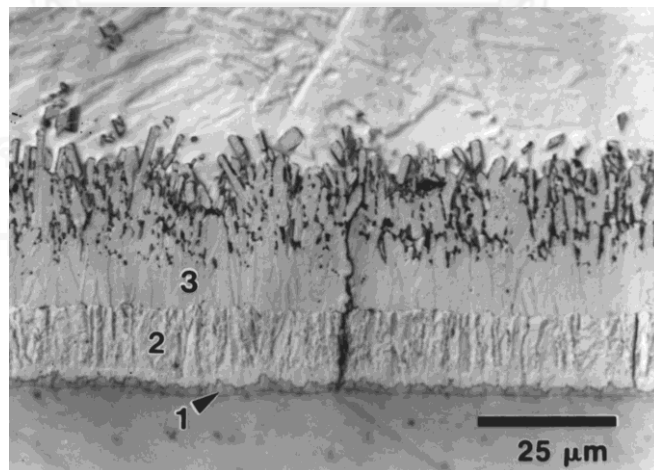


ภาพที่ 4 แผนภูมิสมดุลของระบบเหล็กและสังกะสี [12]

เมื่อทำการศึกษาการเกิดเฟสจากแผนภูมิสมดุลของระบบเหล็กและสังกะสีข้างต้นจะได้ลำดับการเกิดเฟสเป็น เฟสแกมมา เฟสแกมมา1 เฟสเดลต้า และเฟสเซต้า ตามลำดับ แต่จากการทดลองนั้นพบว่าลำดับการเกิดเฟสของชั้น intermetallic เป็น เฟสซีตา เฟสเดลต้า เฟสแกมมา1 เฟสแกมมา ตามลำดับ โดยกลไกการเกิดจะเริ่มจากการเกิดขึ้นของเฟสเซต้าขึ้นที่รอยต่อระหว่างแผ่นเหล็กซึ่งมีเฟสเป็นแอลฟา กับสังกะสีหลอมเหลว จากนั้นก็จะเกิดเฟสของเดลต้าขึ้น ณ รอยต่อของเหล็กและเฟสซีตา และมีการโตของเฟสเซต้า จากนั้นเมื่อเวลานานพอก็จะเกิดขึ้นบางๆของแกมมา1และแกมมาขึ้น ดังปรากฏในภาพที่ 6 โดย ณ เวลา t_0 จะยังไม่มีเฟสต่างๆขึ้นเลย จากนั้นเมื่อเวลา t_1 จะเกิดเฟสของเซต้าขึ้นระหว่างรอยต่อของเหล็กและสังกะสีหลอมเหลว จากนั้นเมื่อถึงเวลา t_2 จะเกิดเฟสของเดลต้าขึ้นพร้อมกับการโตขึ้นของเฟสเซต้า เมื่อเวลาผ่านไปถึง t_3 จะเกิดเฟสของแกมมา1 ขึ้น และเกิดการโตของเฟสเดลต้าและเซต้าขึ้น และเมื่อถึงเวลา t_4 มีเกิดเฟสที่สองของเฟสเดลต้าขึ้นและมีการเกิดเฟสของแกมมาโดยความหนาของแกมมานั้นมีความบางมากจนไม่สามารถแยกได้ โดยโครงสร้างจุลภาคนั้นจะเป็นดังภาพที่ 7 นั้นเป็นโครงสร้างของเหล็กชุบสังกะสีที่ทำการชุบที่ 450°C เป็นเวลา 300 วินาทีโดย (1) คือเฟสแกมมา (2) คือเฟสเดลต้า (3) คือเฟสซีตา [9; 13]



ภาพที่ 5 ภาพแสดงการเกิดและการโตเฟสต่างๆในบ่อสังกะสีตามเวลา[9]

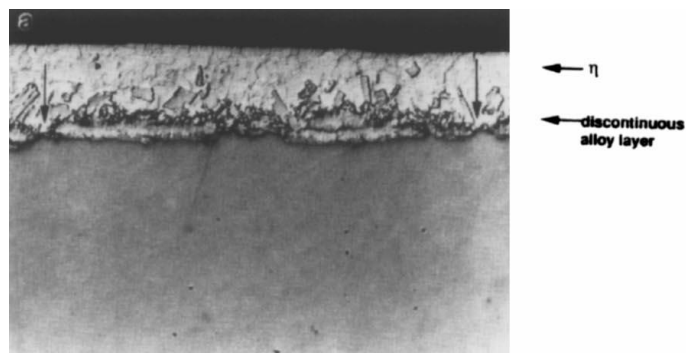


ภาพที่ 6 ภาพแสดงโครงสร้างจุลภาคของชั้นเคลือบของเหล็กชุบสังกะสี[9]

สำหรับชิ้นงานเหล็กชุบสังกะสีแบบกัลวานีลนั้นสามารถจำแนกได้ตามลักษณะของชั้นเคลือบเป็นดังนี้

- ชนิด-0 (type-0)

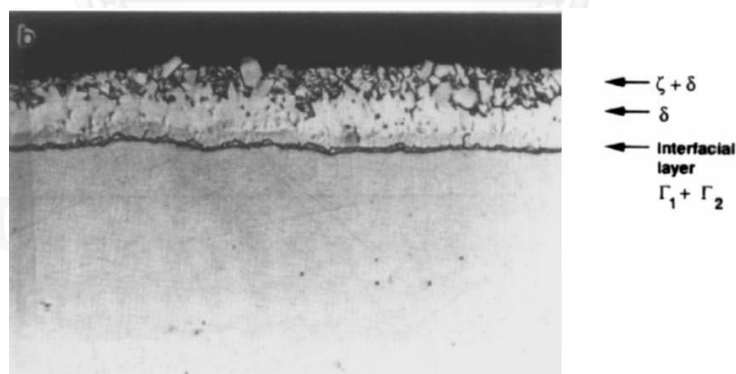
สำหรับชิ้นงานชนิด-0 นั้นเมื่อทำการตรวจสอบชั้นเคลือบด้วยกล้องจุลทรรศน์นั้นจะพบชั้นหนาของเฟสเอด้าซึ่งเป็นชั้นของสังกะสีกับชั้นของ intermetallic ของเฟสเซต้าที่มีลักษณะไม่ต่อเนื่องดังภาพที่ 8



ภาพที่ 7 ภาพแสดงลักษณะชั้นเคลือบชนิด 0 [13]

- ชนิด-1 (type-1)

สำหรับชิ้นงานชนิด-1 นั้นจะพบชั้นบางๆของเฟสแกมมาระหว่างชั้นหนาของเฟสเดลต้าความหนาของเฟสแกมมาที่เหมาะสมนั้นต้องไม่เกิน 1 ไมครอน และในชั้นของเฟสเดลตานั้นจะมีเฟสเซต้าปนอยู่บางส่วน

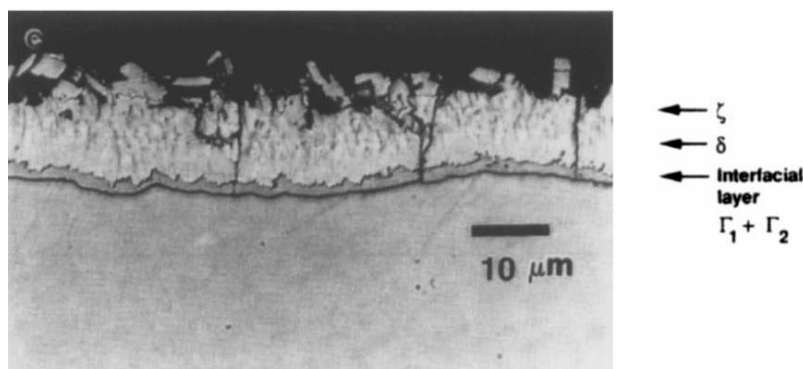


ภาพที่ 8 ภาพแสดงลักษณะชั้นเคลือบชนิด1 [13]

- ชนิด-2 (type-2)

สำหรับชิ้นงานชนิด-2 นั้นจะพบว่าเฟสเซต้าปริมาณน้อยมากอยู่ในชิ้นงานหรือบางครั้งจะพบชั้นของเฟสแกมมาและชั้นหนาของเฟสเดลต้าเท่านั้น โดยความหนาของเฟสแกมมานั้นจะมีค่ามากกว่า 1

ไมครอน นอกจากนี้ยังพบรอยแตกตั้งฉากกับชั้นงานนั้นโดยรอยแตกจะผ่านชั้นหนาของเฟสเดลด้า และแกมมาจนถึงผิวของเหล็กที่ถูกเคลือบไว้



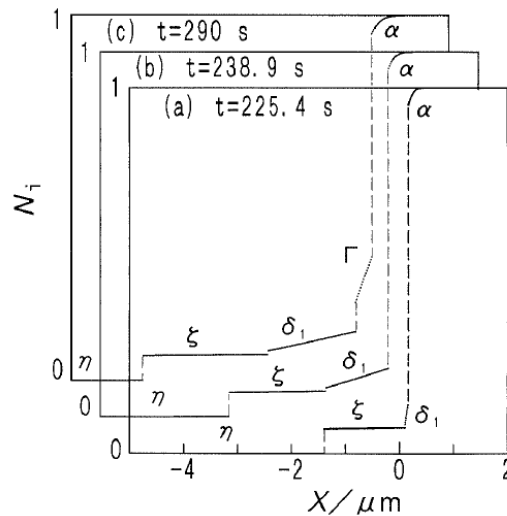
ภาพที่ 9 ภาพแสดงชั้นเคลือบชนิด 2 [13]

โดยลักษณะของชั้นเคลือบที่แตกต่างกันก็จะส่งผลต่อความแตกต่างของสมบัติของชั้นเคลือบไม่ว่าจะเป็น ความสามารถในการทำ spot welding , ความสามารถในการต้านทานการกัดกร่อน ความสามารถในการยึดเกาะของสี (Painting ability) การยึดติดของชั้นเคลือบ จากเหตุผลดังกล่าว นั้นถ้าสามารถทำนายลักษณะของเฟสที่จะเกิดขึ้นได้ก็จะช่วยลดเวลาในการทดลองได้มากจึงมีงานวิจัยต่างๆที่ใช้แบบจำลองช่วยในการทำนายลักษณะของเฟสที่จะเกิดขึ้นซึ่งแต่ละงานวิจัยก็จะมีข้อจำกัดต่างๆที่ต้องการส่วนเติมเต็มให้สมบูรณ์ต่อไป

2.2.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Mathematical modeling & simulation)

จากเหตุผลที่ได้กล่าวไว้ในตอนท้ายของหัวข้อ 2.2.1 นั้นจะเห็นได้ว่าถ้าสามารถทำนายลักษณะของเฟสที่จะเกิดขึ้นได้ก็จะช่วยลดเวลาในการทดลองได้มากซึ่งมีงานวิจัยมากมายทั้งที่เกี่ยวข้องทั้งทางตรงและทางอ้อมที่จะช่วยเป็นแนวทางที่จะใช้ในการตอบปัญหาของกระบวนการผลิตเหล็กชุบสังกะสีแบบกัลวานีลโดยมีตัวอย่างดังนี้

ในปี 1993 Shimosaki et al.[14] ได้ทำการศึกษาการเกิดและการโตเฟสของต่างๆของระบบ เหล็ก-สังกะสี โดยใช้กระบวนการทางคณิตศาสตร์ทั้งในช่วงที่อุณหภูมิไม่คงที่ในกระบวนการผลิตเหล็กชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อน โดยมีการใช้ทฤษฎีการแพร่และ Forward Finite Difference ในการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ซึ่งผลการทดลองจะได้ดังภาพที่ 11



ภาพที่ 10 กราฟแสดง ความสัมพันธ์ระหว่าง ความเข้มข้นของเหล็กต่อระยะทางจากผิวชิ้นงาน เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงเวลา[14]

จากงานวิจัยนั้นแสดงได้ว่า forward finite difference นั้นสามารถนำมาแก้โจทย์ปัญหาของการแพร่ผ่านชั้นเคลือบแบบ multilayer ได้ นอกจากนั้น Shimozaki et al. แนะนำว่าการกำหนดตัวแปร Δt ในสมการ finite difference นั้นจำเป็นที่จะต้องใช้ค่าน้อยๆเมื่อค่า Diffusivity มีค่าน้อยเพื่อให้ได้ความแม่นยำมากขึ้น แต่จะทำให้การคำนวณใช้เวลานานไปด้วย ซึ่งงานวิจัยนี้เป็นแนวทางที่ใช้อ้างอิงในการทำงานวิจัยต่อไปมากมายซึ่ง ในปี 2005 A.K. Vermer et al.[15] ได้ต่อยอดงานวิจัยโดยทำการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยใช้ทฤษฎีบทของ implicit finite difference โดยทำการกำหนดให้ช่องการคำนวณคงที่ ในการทำนายการโตของเฟสต่างของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการ Galvannealing โดยทำการกำหนดให้ระบบเป็นแบบอุณหภูมิคงที่ 500°C โดยเฟสต่างๆในระบบจะปรากฏดังตาราง

ตารางที่ 1 ตารางแสดงเฟสของระบบ Fe-Zn ที่ปรากฏ ณ อุณหภูมิต่างๆ[15]

The Phase present in the iron-zinc system various temperature	
Temperature	Phase present
Below 530 °C	$\alpha, \Gamma, \Gamma_1, \delta, \zeta,$ and η
530 - 550 °C	$\alpha, \Gamma, \delta, \zeta,$ and η
Above 530 °C	$\alpha, \Gamma, \delta,$ and η

และให้รอยต่อระหว่างชั้นเหล็กกับชั้นของแกมมานั้นเป็นแหล่งที่มาของอะตอมเหล็กที่แพร่เข้าสู่ชั้นเคลือบโดยจากตารางข้างต้นจะพบว่ามีค่าตัวแปรและการเพิ่มผลของการมีเฟส Γ ขึ้นในระบบซึ่งทำให้ระบบสมการมีความถูกต้องมากยิ่งขึ้น นอกจากนี้ A.K. Vermer et al. ยังเสนอแนะว่า

ถ้าต้องการปรับค่าของตัวแปรที่มีผลต่อลักษณะของชิ้นงาน ให้ทำการปรับตัวแปรของอุณหภูมิจะเป็นเรื่องง่ายที่สุด

แต่อย่างไรก็ตามผลที่ได้จากแบบจำลองนี้ยังมีความไม่แม่นยำอยู่มากที่เวลาน้อยๆ แต่จะแม่นยำขึ้นเมื่อเวลานานกว่า 20 วินาที ดังนั้นจึงจำเป็นที่จะต้องมีการเสนองานวิจัยที่สามารถตอบปัญหานี้ได้อย่างแม่นยำมากยิ่งขึ้นไป

นอกจากงานวิจัยข้างต้นนั้นยังมีงานวิจัยอีกมากที่เกี่ยวข้องกับการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยใช้กระบวนการ Finite difference method ซึ่งหนึ่งในนั้นคืองานของ J.M. Brossard et al.[16] ซึ่งนำเสนอการกำหนด boundary condition ของระบบที่มีความไม่ต่อเนื่องของชั้นเคลือบโดย ในปี 2007 J.M. Brossard et al. ได้ทำการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อทำการทำนายลักษณะเฟสที่จะเกิดขึ้นรวมถึงความหนาของแต่ละเฟสด้วย โดยใช้กระบวนการ Finite Difference แบบ Crank-Nicholson ในการแก้ปัญหาการแพร่ของระบบ Ni-Al โดยกำหนดให้ Ni เป็น Diffusion specie เข้าไปในชั้นสารประกอบเชิงโลหะและกำหนดให้ระบบที่สนใจเป็นแบบสมการคงที่ แต่จากความไม่ต่อเนื่องของเฟสที่เกิดขึ้นในระบบ ซึ่งปัญหานี้ J.M. Brossard et al. ได้ทำการแก้ปัญหาโดยทำการกำหนดค่า Critical Concentration ขึ้น ณ รอยต่อระหว่างเฟส ซึ่ง Critical Concentration นั้นมาจาก ผลเฉลี่ยของค่า concentration ของ 2 เฟสที่อยู่ติดกัน โดยนำค่ามากที่สุดของเฟสที่อยู่ทางซ้ายมือมาเฉลี่ยกับเฟสที่อยู่ทางขวามือ โดย เป็นดังสมการ

$$C^{Crit} = \frac{C_i^{left} + C_{i+1}^{right}}{2}$$

จากเหตุที่กล่าวมานั้นทำให้งานวิจัยนี้มุ่งเน้นที่จะพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ระเบียบวิธีผลต่างสืบเนื่องพร้อมทั้งการกำหนดข้อกำหนดแบบพิเศษต่างๆมาช่วยเพื่อลดความซับซ้อนของการคำนวณและยังได้ผลที่น่าพอใจ

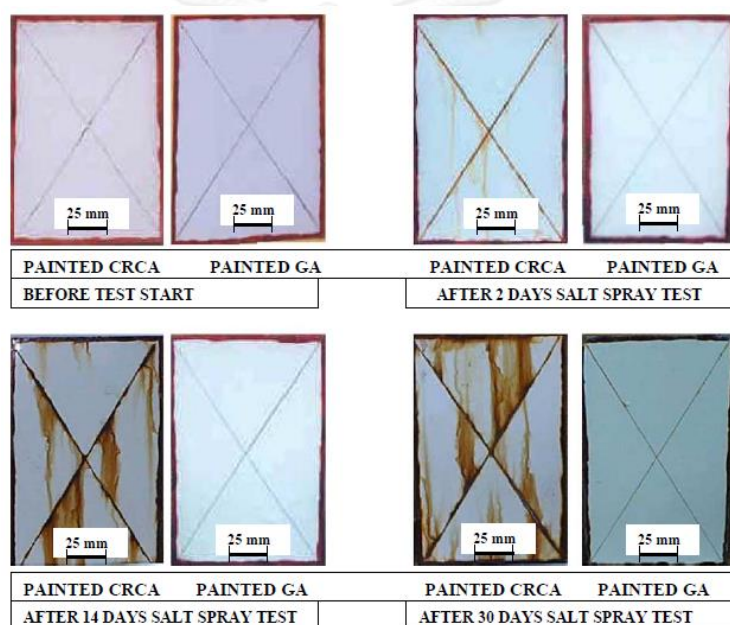
2.2.3 ความต้านทานการกัดกร่อนของเหล็กชุบสังกะสีแบบกัลวานีล

จากสมบัติที่โดดเด่นหลายอย่างที่ได้อธิบายมาแล้วนั้นสมบัติความต้านทานการกัดกร่อนที่ดีของเหล็กชุบสังกะสีแบบกัลวานีลเป็นสิ่งที่ทำให้เหล็กชุบสังกะสีชนิดนี้ได้รับความสนใจอย่างมากในอุตสาหกรรมยานยนต์แต่อย่างไรก็ตามการใช้เหล็กชุบสังกะสีแบบกัลวานีลนั้นยังไม่แพร่หลายนักในอุตสาหกรรมขนาดเล็กซึ่งในปี 2004 กลุ่มนักวิจัยของ บริษัท TATA Steel ประเทศอินเดียซึ่งนำโดย N.Bandyopadhyay et al.[1] ได้ทำการทดสอบสมบัติของเหล็กชุบสังกะสีแบบกัลวานีล (GA) เทียบกับเหล็กแผ่นที่ทำการรีดเย็นแล้วทำการอบอ่อน (CRCA) โดยทำการทดสอบจำลองสภาวะใช้จริงใน

อุตสาหกรรมยานยนต์โดยทำการทดสอบในรูปแบบของเหล็กแผ่น CRCA และ GA ที่ไม่ผ่านการทาสี และเหล็กแผ่น CRCA และ GA ที่ทำการขึ้นรูปแล้วทาสีโดยมีการทดสอบดังนี้

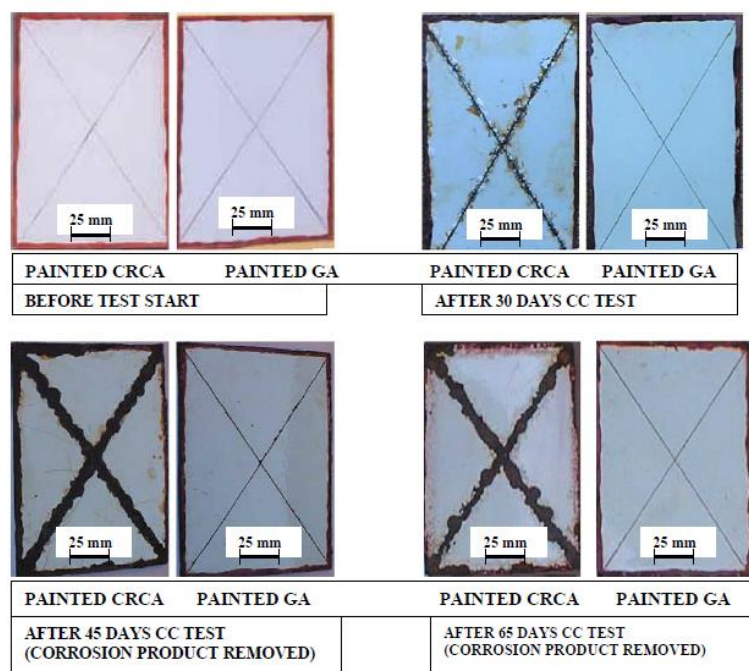
สำหรับเหล็กแผ่น CRCA และ GA ที่ทำการขึ้นรูปแล้วทาสีนั้นจะทำการทดสอบความต้านทานการกัดกร่อนโดยสามวิธีคือ 1. Salt spray 2. Cycle corrosion test (CCT) และ 3. Electro- chemical impedance spectroscopy (EIS) โดยผลการทดสอบเป็นดังนี้

- การทดสอบแบบ Salt spray นั้นได้ผลการทดสอบดังภาพที่ 12



ภาพที่ 11 ภาพแสดงผลการทดสอบ Salt spray test[1]

โดยจากรูปจะเห็นว่า เมื่อเวลาผ่านไปแล้ว 48 ชั่วโมง จะพบว่าชิ้นงาน CRCA นั้นจะเกิดสนิมแดงขึ้นและจะเกิดมากขึ้นเมื่อเวลาผ่านไป แต่สำหรับชิ้นงาน GA นั้นแม้จะผ่านเวลาไปแล้วมากกว่า 720 ชั่วโมง จะยังไม่เกิดสนิมแดงขึ้นด้วยเหตุผล 2 ประการคือ 1. การมีความต้านทานการกัดกร่อนที่สูงกว่าเนื่องจากมีชั้นฟิล์มของสังกะสีอยู่ที่ผิวนอกและ 2. การที่ชั้นของสีนั้นมีความสามารถในการยึดติดที่ดีว่าในชิ้นงาน CRCA เนื่องจากที่ผิวนอกสุดนั้นเป็นชั้นของเฟสเดลต้าของสารประกอบเหล็กและสังกะสีซึ่งมีความเสถียรมากและเกิดออกไซด์ได้น้อยจึงทำให้มีความสามารถในการยึดเกาะของเนื้อพ่นกับสีที่ดีว่า CRCA ที่ที่ผิวนั้นมีฟิล์มของออกไซด์อยู่สำหรับ CCT นั้นจะได้ผลการทดสอบดังภาพ 13



ภาพที่ 12 ภาพแสดงผลการทดสอบ Salt spray test[1]

การทดสอบจะพบว่า ชิ้นงาน CRCA นั้นจะพบสนิมแดงขึ้นเมื่อผ่านการทดสอบเพียง 2 รอบ การทดสอบเท่านั้นหลังจากนั้นจะเกิดสนิมแดงมากขึ้นเรื่อยๆ แต่ในส่วนของ GA นั้นแม้ผ่านไปแล้ว 65 รอบการทดสอบก็ยังไม่พบสนิมแดง และเมื่อทำการตรวจสอบ น้ำหนักที่หายไปเพื่อทำการประมาณค่าของอัตราการกัดกร่อนโดยทำการเก็บข้อมูลในรอบการทดสอบที่ 30 และ 45 จะพบว่า ชิ้นงาน CRCA นั้น มีค่าอยู่ที่ 5.17 และ 11.56 mpy ส่วนชิ้นงาน GA นั้นจะอยู่ที่ 0.412 และ 0.73 mpy ซึ่งจากค่าที่ได้จะพบว่าต่างกันอย่างมากเนื่องจาก CRCA นั้นเกิดการกัดกร่อนได้ชั้นสีมากกว่า GA เนื่องจากความสามารถในการยึดเกาะของสีที่แย่กว่าและการที่ GA มีชั้นเคลือบสังกะสีอยู่ซึ่งคอยป้องกันการกัดกร่อนของชั้นเหล็ก

การทดสอบแบบ EIS นั้นจะพบว่าค่าของ polarization resistant นั้นของ CRCA ที่จากเดิมมีค่า 6.38 ohm/cm^2 จะลดลงเหลือเพียง 0.8 ohm/cm^2 เท่านั้น แต่ในส่วนของ GA นั้นค่าเดิมอยู่ 6.07 ohm/cm^2 จะลดลงเหลือ 4.07 ohm/cm^2 ซึ่งค่าที่ได้แสดงให้เห็นว่า GA นั้นมีความต้านทานการกัดกร่อนที่ดีกว่า CRCA

จากงานวิจัยนี้แสดงผลที่น่าสนใจอย่างมากและเป็นแนวทางที่ดีในการศึกษาสมบัติความต้านทานการกัดกร่อนของเหล็กชุบสังกะสีแบบกัลวานีล แต่อย่างไรก็ตามงานวิจัยนี้ลักษณะของชั้นเคลือบมีเพียงลักษณะเดียวเท่านั้นจึงยังมีช่องว่างที่จะทำการศึกษาหาที่ลักษณะของชั้นเคลือบที่ดีที่สุดที่จะทำให้ค่าความต้านทานการกัดกร่อนที่สูงยิ่งขึ้นไป

2.2.4. การทดสอบความต้านทานการกัดกร่อนต่อละอองน้ำเกลือ (Salt Sprays testing)

เนื่องจากวัสดุต่าง ๆ นั้นมีค่าความต้านทานการกัดกร่อนที่ไม่เท่ากันโดยเฉพาะวัสดุที่ผ่านการเคลือบผิวด้วยวิธีต่างๆ เช่น การชุบสังกะสีที่ผิว การเคลือบผิวโลหะด้วยไฟฟ้า หรือการเคลือบผิวด้วยสารจำพวกพลาสติก นั้นจะมีความต้านทานการกัดกร่อนที่สูงมากเมื่อเทียบกับวัสดุพื้นดั้งเดิม ดังนั้น จำเป็นที่จะต้องมีการทดสอบเพื่อทำการประเมินค่าความต้านทานการกัดกร่อนของวัสดุ ซึ่งหนึ่งในกระบวนการทดสอบความต้านทานการกัดกร่อนของวัสดุที่ใช้กันอย่างแพร่หลายตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน คือ การทดสอบความต้านทานการกัดกร่อนต่อละอองน้ำเกลือ หรือ Salt Sprays testing ตามมาตรฐาน เอเอสทีเอ็ม บี117 (ASTM B117) เนื่องจากการทดสอบความต้านทานการกัดกร่อนต่อน้ำเกลือนั้นสามารถทำได้ง่าย ราคาถูก สามารถทำซ้ำได้โดยให้ผลที่ไม่คลาดเคลื่อนมากนัก และผลการทดสอบสามารถเข้าใจได้ง่ายกว่าการทดสอบแบบอื่นที่จำเป็นต้องใช้ความรู้ขั้นสูงในการอธิบายผลจึงเป็นที่นิยมอย่างมากในแวดวงอุตสาหกรรม โดยการทดสอบการต้านทานการกัดกร่อนต่อน้ำเกลือนั้นจะเป็นการเร่งปฏิกิริยาการเกิดการกัดกร่อนของวัสดุโดยใช้ละอองน้ำเกลือและทำการแปลงผลการทดลองว่าวัสดุนั้นมีความต้านทานการกัดกร่อนดีเพียงใดเพื่อเป็นแนวทางในการวางแผนเลือกใช้วัสดุนั้นต่อไป

สำหรับการทดสอบความต้านทานการกัดกร่อนต่อน้ำเกลือตามมาตรฐาน ASTM B117 นั้น จะทำการทดสอบใน แชมเบอร์ปิดที่มีขนาด 120 ถึง 58,300 ลิตรแต่โดยทั่วไปขนาดของแชมเบอร์จะอยู่ที่ 420 ถึง 4,530 ลิตร ที่อุณหภูมิ $35 \pm 2^{\circ}\text{C}$ โดยจะทำการวางชิ้นงานที่มุม 15° ถึง 30° แต่สำหรับอุตสาหกรรมยานยนต์นั้นมักจะทำการจัดวางชิ้นงานตามตำแหน่งที่วัสดุนั้นๆ อยู่ในตัวของยานยนต์ (In Car Position) จากนั้นทำการพ่นละอองของสารละลายเกลือโซเดียมคลอไรด์ที่มีความเข้มข้น 5% โดยน้ำหนัก (Neutral salt spray, NSS) โดยจะทำการปรับความดันให้อยู่ที่ 1 บรรยากาศและรักษา ค่า pH. ของสารละลายนั้นให้อยู่ที่ประมาณ 6.5 ถึง 7.2 เวลาในการทดสอบนั้นจะขึ้นอยู่กับชิ้นงานเป็นวัสดุแบบใดซึ่งจากข้อกำหนดของมาตรฐาน ASM B117 กลุ่มเหล็กชุบสังกะสีนั้นจะทำการทดสอบที่เวลา 720 ชั่วโมงโดยจะต้องไม่เกิดสนิมแดงขึ้นจึงจะถือว่าผ่านเกณฑ์มาตรฐาน

บทที่ 3

ระเบียบวิธีวิจัย

3.1. อุปกรณ์และเครื่องมือ

3.1.1. อุปกรณ์ในการทำชิ้นงานเหล็กชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อน

- 3.1.1.1 เหล็กกล้าแผ่นคาร์บอนต่ำ
- 3.1.1.2 เตาทลอมสังกะสี
- 3.1.1.3 สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก (NaOH 10wt%)
- 3.1.1.4 สารละลายไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 14 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก (HCl 14wt%)
- 3.1.1.5 น้ำยาประสานทั่วไป $ZnCl_2 \cdot 3NH_4Cl$ โดยมีส่วนผสมเป็น $ZnCl_2$ 160 g/dm³ และ NH_4Cl 170 g/dm³

3.1.2. อุปกรณ์ในการอบร้อน

- 3.1.2.1 เตาท่อแบบตั้ง
- 3.1.2.2 ชูตรอก

3.1.3. อุปกรณ์และสารเคมีสำหรับเตรียมผิวชิ้นงานเพื่อศึกษาโครงสร้างจุลภาค

- 3.1.3.1 กระดาษทรายเบอร์ 240, 360, 600, 800, 1200 และ 2000
- 3.1.3.2 ผงเพชร ความละเอียด 6, 3 และ 1 ไมครอน
- 3.1.3.3 ผ้าสักหลาด
- 3.1.3.4 เครื่องขัดจานหมุน
- 3.1.3.5 สารละลายไนตอล 2 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร (Nital 2vol%)

3.1.4. เครื่องมือในการตรวจสอบ โครงสร้างทางจุลภาค เฟส และสมบัติต่างๆของชิ้นงาน

- 3.1.4.1 กล้องจุลทรรศน์แสง (OM)

- 3.1.4.3 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนหัววัดระดับไมโคร (EPMA)

3.1.5. เครื่องมือในการทดสอบความต้านการกัดกร่อน

3.1.5.1 เครื่องวัดความต้านทานการกัดกร่อนต่อละล่อน้ำเกลือ

3.1.6 อุปกรณ์ในการสร้างแบบจำลอง

3.1.6.1 คอมพิวเตอร์พร้อมโปรแกรม Dev C++

3.2. ระเบียบวิธีการวิจัย

3.2.1 การเตรียมชิ้นงานเหล็กแผ่นชุบสังกะสีแบบกัลวานีล

กระบวนการชุบชิ้นงานเหล็กชุบสังกะสีนั้น เริ่มต้นจำเป็นที่จะต้องล้างคราบไขมันและน้ำมันออกจากผิวของชิ้นงานเสียก่อนโดยทำการล้างในด่างโซเดียมไฮดรอกไซด์ 10wt%. อุณหภูมิที่อุณหภูมิประมาณ 65 °C โดยทำการแช่ไว้เป็นเวลา 10 นาทีแล้วล้างด้วยน้ำสะอาด จากนั้นทำการแช่แผ่นเหล็กลงในกรดไฮโดรคลอริก 14wt%. เพื่อทำการกำจัดสนิมที่เกิดบนผิวเหล็กโดยแช่แผ่นเหล็กไว้ 20 นาทีแล้วล้างกรดออก จากนั้นทำการจุ่มชิ้นงานที่ทำความสะอาดแล้วลงไปในน้ำยาประสาน $ZnCl_2 \cdot 3NH_4Cl$ โดยมีส่วนผสมเป็น $ZnCl_2$ 160 g/dm³ และ NH_4Cl 170 g/dm³ จากนั้นทำจุ่มเหล็กแผ่นที่ทำการชุบน้ำยาประสานลงในบ่อสังกะสีที่ควบคุมอุณหภูมิ 450 °C เป็นเวลา 1 นาที โดยเป่าลมร้อนนั้นทำจากกราฟิต จากนั้นทำการอบชิ้นงานในเตาที่อุณหภูมิตั้งที่อุณหภูมิ 500 °C และ 550 °C เป็นเวลา 1, 5, 10, 20 นาทีตามลำดับ โดยท่อเซรามิกที่ใช้นั้นมีเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 2.5 cm. ภายใน 2.45 cm. ยาว 60 cm. โดยท่อนั้นไม่ต้องทำการปิดฝา จากนั้นปล่อยให้เย็นตัวในอากาศ

3.2.2 การวิเคราะห์ โครงสร้างจุลภาคและเฟส

ทำการวิเคราะห์ โครงสร้างทางจุลภาคเบื้องต้น โดยใช้กล้องจุลทรรศน์แสง จากนั้นทำการวัดความหนาของแต่ละเฟสที่เกิดขึ้นจากภาพถ่ายที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์แสง จากนั้นนำค่าที่ได้มาเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการคำนวณโดยโปรแกรม

ทำการวิเคราะห์เฟสที่เกิดขึ้นโดยใช้เครื่อง EPMA เพื่อยืนยันชนิดของเฟสที่เกิดขึ้นว่ามีตรงกับที่ปรากฏตามการคำนวณหรือไม่

3.2.3 การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

ทำการเขียนสมการ Fick's 2nd law ที่อยู่ในรูป analytical form ให้อยู่ในรูปของ numerical form โดยใช้ explicit finite difference method ในการแก้ระบบสมการ จากนั้นทำการกำหนดค่าตัวแปรและ boundary condition ต่างๆดังนี้

- ค่าinter-diffusivityของเหล็กในเฟสต่างของชั้นเคลือบ

ตารางที่ 2 ตารางแสดงความเข้มข้นของอะตอมเหล็กที่รอยต่อระหว่างเฟสค่า Q และ D₀ ของแต่ละเฟส[14]

N _{Fe} (at%)	η		ζ		δ		Γ		α	
	N_{η}^{-}	N_{η}^{+}	N_{ζ}^{-}	N_{ζ}^{+}	N_{δ}^{-}	N_{δ}^{+}	N_{Γ}^{-}	N_{Γ}^{+}	N_{α}^{-}	N_{α}^{+}
	0	0.1	6.8	7.2	8.1	13.4	21.2	33.8	95	100
D ₀ (m ² /s)	1×10 ⁻⁶		4×10 ⁻⁷		1×10 ⁻⁷		5×10 ⁻⁹		1×10 ⁻⁶	
Q (kJ/mol)	104.6		75.3		83.7		85.35		125.5	

- กำหนดระบบที่สนใจไม่มีการถ่ายเทความร้อนระหว่างชิ้นงานกับสิ่งแวดล้อมโดยกำหนดให้ชิ้นงานมีอุณหภูมิคงที่ที่ 500°C และ 550°C ตามลำดับ

- เฟสที่ปรากฏ ณ อุณหภูมิๆต่างเป็นดังนี้

ตารางที่ 3 ตารางเฟสที่ปรากฏ ณ ช่วงอุณหภูมิต่างๆ

The Phase present in the iron-zinc system various temperature	
Temperature	Phase present
Below 530 °C	$\alpha, \Gamma, \Gamma_1, \delta, \zeta,$ and η
530 - 550 °C	$\alpha, \Gamma, \delta, \zeta,$ and η
Above 550 °C	$\alpha, \Gamma, \delta,$ and η

- กำหนดให้ค่าความเข้มข้นวิกฤต (Critical concentration) ณ รอยต่อระหว่างเฟสเป็นดังนี้

ตารางที่ 4 ตารางแสดงค่าความเข้มข้นวิกฤต

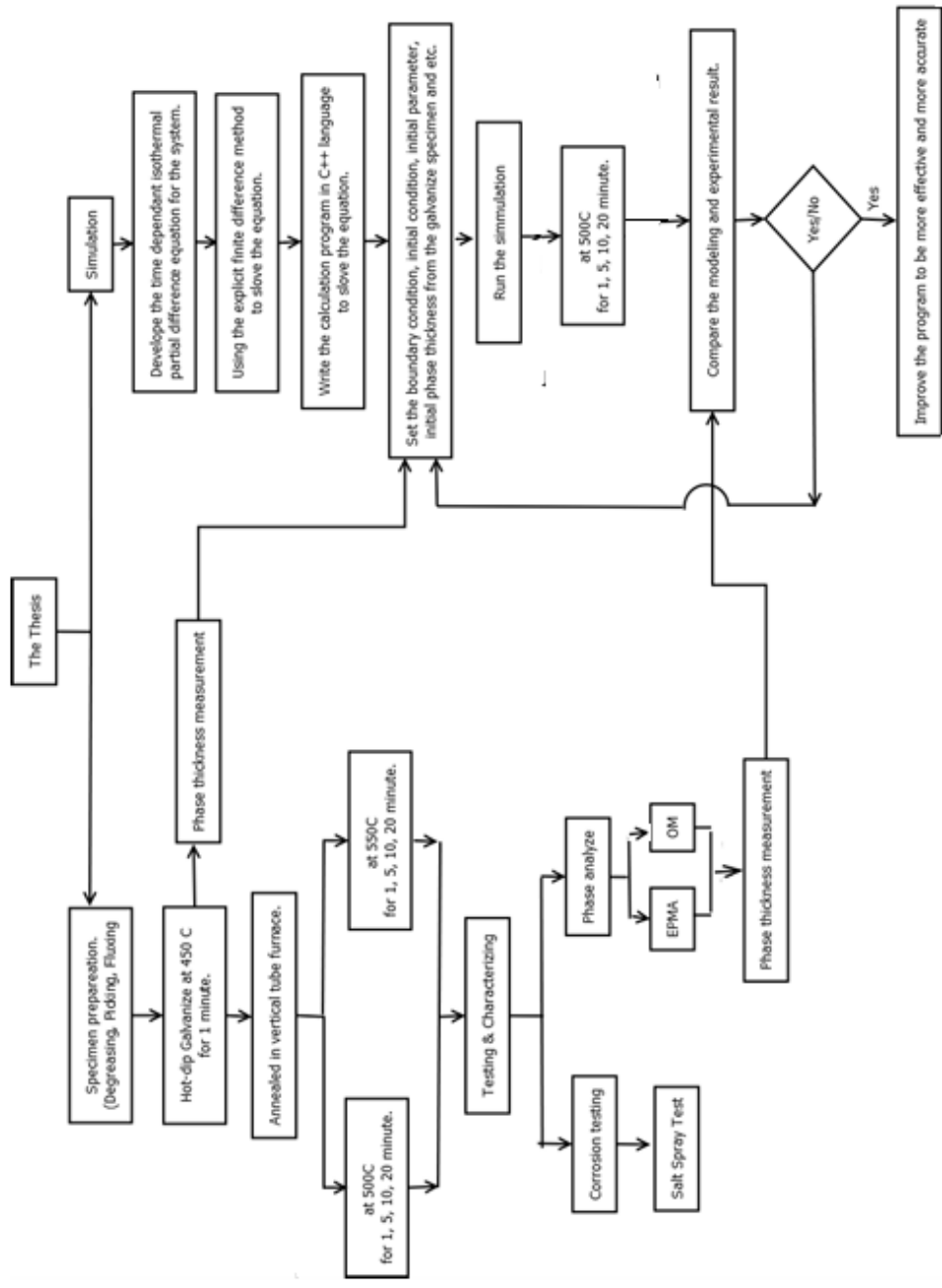
Phase	Wt%.Fe
Fe/Gamma	28.29
Gamma / Gamma 1	21.5
Gamma I / Delta	14.25
Delta / Zeta	6.5
Zeta / Ada	2.5

- ใส่ค่าความหนาเริ่มต้นของแต่ละเฟสของชิ้นงานกล้าวาไนซ์ที่ได้จากการวัด
- ทำการเขียนโปรแกรมคำนวณในภาษา C++ โดยใช้โปรแกรม Dev C++ เป็น compiler
- ทำการเปรียบเทียบค่าที่ได้จากการคำนวณกับค่าที่ได้จากการวัดชิ้นงานจากการทดลอง

3.2.4 ทดสอบความต้านทานการกัดกร่อน

ทำการทดสอบหาความต้านทานการกัดกร่อนของชิ้นงานที่ทำการอบร้อนที่ 1 นาที, 10 นาที และ 20 นาที โดยเครื่องทดสอบความต้านทานการกัดกร่อนต่อละอองน้ำเกลือ

แผนงานการทดลองของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะสามารถสรุปได้ดังแผนภาพในภาพที่ 14



ภาพที่ 13 ภาพแสดงแผนงานการทดลอง

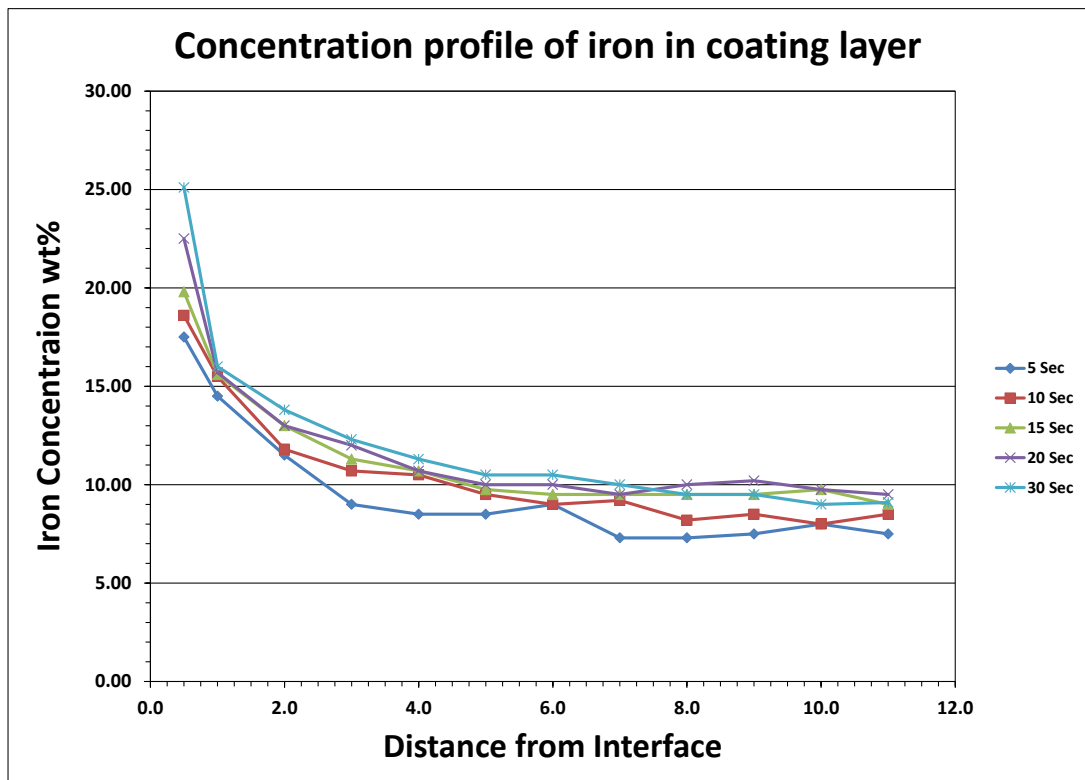
บทที่ 4

ผลการทดลองและการอภิปราย

ในงานวิจัยนี้จะแบ่งการทดลองออกเป็น 3 ส่วนคือ 1.การพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการอธิบายการแพร่ของอะตอมเหล็กในชั้นเคลือบและการพัฒนาของเฟสในชั้นเคลือบกล้าวานิลที่มีลักษณะของชั้นเคลือบแบบบาง 2.การพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการอธิบายการแพร่ของอะตอมเหล็กในชั้นเคลือบและการพัฒนาของเฟสในชั้นเคลือบกล้าวานิลที่มีลักษณะของชั้นเคลือบแบบหนา และ 3.การศึกษาสมบัติความต้านทานการกัดกร่อนโดยวิธีการทดสอบความต้านทานการกัดกร่อนต่อละอองน้ำเกลือ

4.1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการอธิบายการแพร่ของอะตอมเหล็กในชั้นเคลือบและการพัฒนาของเฟสในชั้นเคลือบกล้าวานิลที่มีลักษณะของชั้นเคลือบแบบบาง

ในขั้นแรกของการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อทำการอธิบายการการแพร่ของอะตอมเหล็กในชั้นเคลือบเหล็กชุบสังกะสีแบบกล้าวานิลนั้นจะทำการสร้างแบบจำลองที่ใช้ในการอธิบายการแพร่ของอะตอมเหล็กในชั้นเคลือบและการพัฒนาของความหนาของเฟสต่างๆในชั้นงานที่มีความหนาชั้นเคลือบแบบบางก่อน เนื่องจากในปัจจุบันมีการทดลองและการพัฒนาแบบจำลองเพื่อใช้ในการอธิบายผลกระทบต่างๆของอุณหภูมิ, เวลาและ/หรือปัจจัยอื่นๆที่ส่งผลต่อลักษณะของชั้นเคลือบแบบบางเนื่องจากปัจจุบันมีการใช้เหล็กชุบสังกะสีแบบกล้าวานิลที่มีความหนาของชั้นเคลือบแบบบางในอุตสาหกรรมยานยนต์อย่างแพร่หลาย โดยชุดการทดลองที่ได้ทำการยกมาเพื่อทำการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง(validation)ของการแพร่ของเหล็กในชั้นเคลือบ คือ ชุดการทดลองของ Lin et al. เนื่องจากเป็นชุดการทดลองที่ได้รับอ้างอิงอย่างแพร่หลายในส่วนของภาคของทดลองและการนำข้อมูลมาทำการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง โดยการทดลองของ Lin et al. นั้นได้ทำการอบชิ้นงานเหล็กชุบสังกะสีที่อุณหภูมิ 500 °C เป็นเวลา 5, 10, 15, 20 และ 30 วินาที ตามลำดับ สำหรับความหนาของชั้นเคลือบในชุดการทดลองของ Lin et al.จะอยู่ที่ประมาณ 11 μm จากนั้นทำการวิเคราะห์ผลการทดลอง โดยส่วนการทดลองที่จะทำการยกมาเพื่อทำการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองนั้น คือ ปริมาณของเหล็กในชั้นเคลือบของเหล็กชุบสังกะสีแบบกล้าวานิลซึ่งทำการวิเคราะห์โดยกระบวนการวิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงาน (Energy Dispersive X-Ray Spectrometer, EDS) ซึ่งจะได้ปริมาณของเหล็กในชั้นเคลือบดังปรากฏในภาพที่ 15



ภาพที่ 14 ภาพแสดงปริมาณของเหล็กในชั้นเคลือบที่เวลา 5, 10, 15, 20 และ 30 วินาที

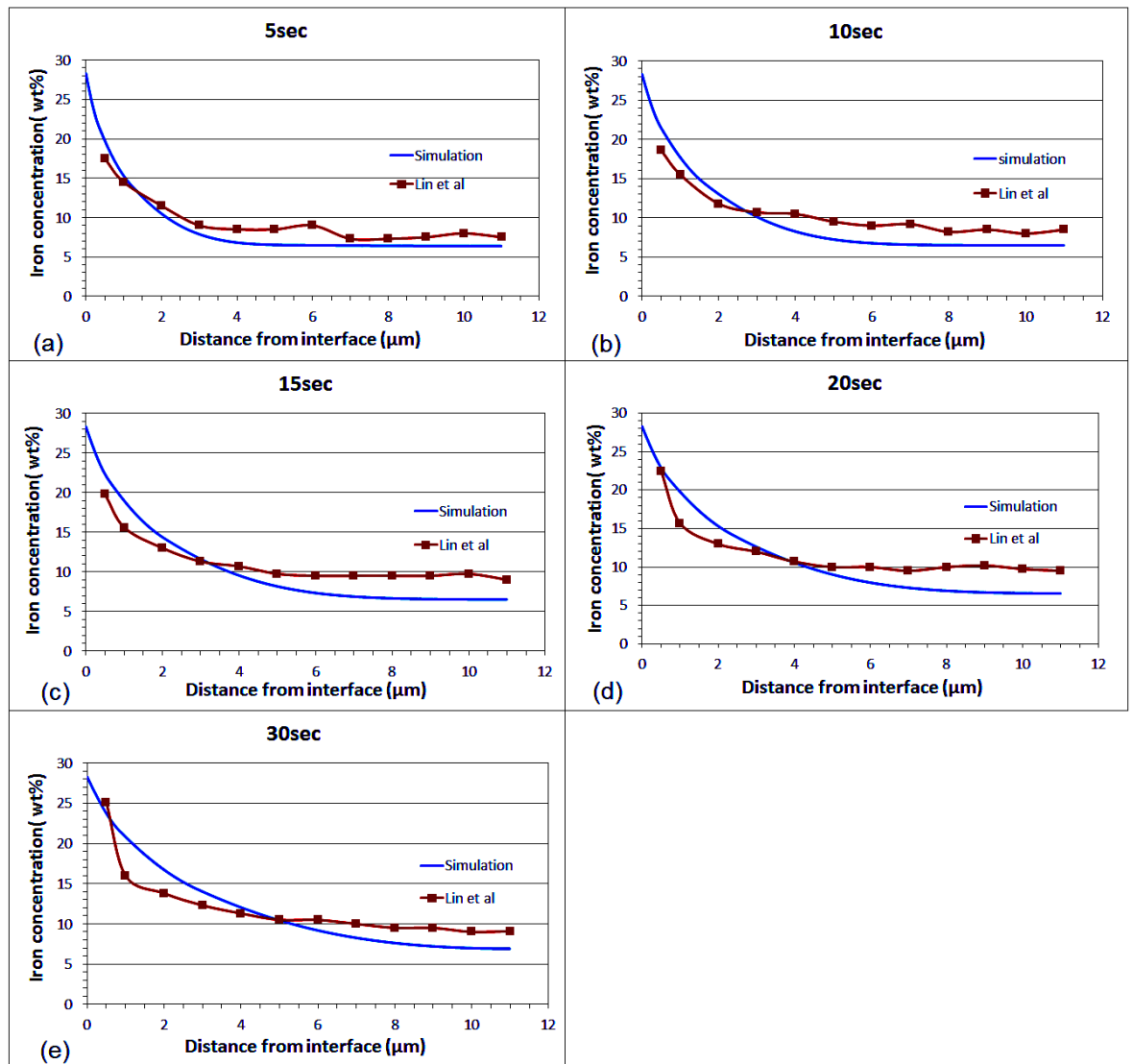
สำหรับแบบจำลองการแพร่ของเหล็กในชั้นเคลือบของเหล็กชุบสังกะสีแบบกัลวานีลที่มีชั้นเคลือบบาง ที่ได้ทำการพัฒนาขึ้นมา นั้นมี เงื่อนไขเริ่มต้น (Initial Condition) เป็นดังนี้

- กำหนดให้ ณ เวลาเริ่มต้นนั้นมีเพียงชั้นของเหล็กและสังกะสีเท่านั้น และเหล็กเป็นตัวแพร่จากเนื้อพื้นไปสู่ผิวนอก
- ณ ที่ตำแหน่งการคำนวณที่ 0 เทียบเท่ากับ ณ ตำแหน่งรอยต่อของชั้นเหล็กและสังกะสี มีค่าปริมาณของเหล็กเท่ากับ 28.29 wt% ซึ่งตรงกับปริมาณของเหล็กที่มากที่สุดที่ ณ ที่อุณหภูมิ 500°C
- ตำแหน่งและที่ $X=L$, $\frac{\partial C}{\partial x} = 0$
- ค่า D_0 และ Q ของแต่ละเฟสปรากฏดังตาราง

ตารางที่ 5 ตารางแสดงค่า ค่า D_0 และ Q ของแต่ละเฟส

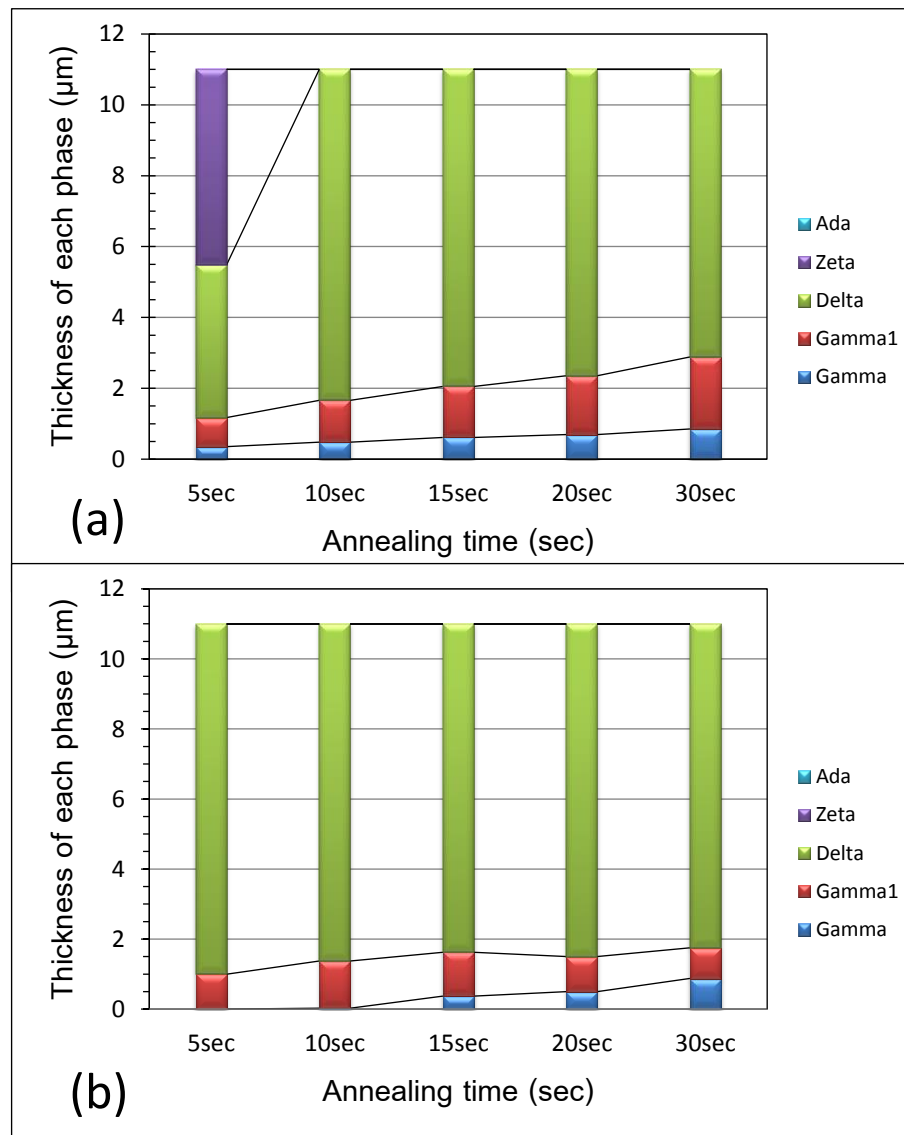
Variable/phase	η	ζ	δ	Γ_1	Γ
D_0 (m^2/s)	-	1×10^{-4} [ref]	-	2.04×10^{-6} [ref]	5×10^{-9} [ref]
Q (kJ/mol)	-	99.6[ref]	-	80.0[ref]	85.35[ref]
D (m^2/s)	1×10^{-10}	1.85×10^{-11}	3.36×10^{-13}	8.0×10^{-14}	8.5×10^{-15}

โดยผลการการคำนวณที่ทำการการเปรียบเทียบกับผลการทดลองของ Lin et al. เป็นดังนี้



ภาพที่ 15 ภาพแสดงการเปรียบเทียบปริมาณของเหล็กในชั้นเคลือบที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์กับการทดลอง

จากภาพจะเห็นว่าปริมาณของเหล็กในชั้นเคลือบที่ได้จากการคำนวณนั้นจะค่อยๆเพิ่มขึ้นตามเวลาที่เปลี่ยนไปซึ่งสอดคล้องกับผลการการวัดปริมาณของเหล็กในชั้นเคลือบโดยกระบวนการวิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงาน (Energy Dispersive X-Ray Spectrometer, EDS) จากนั้นทำการแปลงค่าปริมาณของเหล็กในชั้นเคลือบเป็นความหนาของเฟสต่างในชั้นเคลือบจะได้ลักษณะดังปรากฏในภาพที่ 17



ภาพที่ 16 ภาพแสดงความหนาของเฟสต่างๆในชั้นเคลือบที่เวลาการอบร้อน(Annealing) ต่างกัน a). ผลการการคำนวณโดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์b). การทดลองของ Lin et al

สำหรับปริมาณของเหล็กในชั้นเคลือบที่ได้จากการคำนวณนั้นจะมีความคลาดเคลื่อนจากผลที่ได้จากการทดลองของ Lin et al. อยู่บ้าง โดยผลที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะแยกออกเป็น 2 ส่วน คือ 1.ส่วนที่เวลาในการอบร้อนต่ำกว่า 10 วินาที และ 2.ส่วนที่เวลาในการอบร้อนสูงกว่า 10 วินาที ณ เวลา 5 วินาที กับ 10 วินาทีนั้นจะเห็นว่าลักษณะของกราฟที่ได้นั้นมีลักษณะของกราฟที่มีความแนบชิดกับกราฟที่ได้จากการทดลองของ Lin et al. และเมื่อทำการพิจารณากราฟในช่วงเวลา 15, 20 และ 30 วินาที นั้นจะเห็นความห่างของกราฟที่มีความแนบชิดน้อยกว่าที่เวลา 5 และ 10 วินาที ซึ่งกราฟทั้ง 5 กราฟนั้นจะมีลักษณะร่วมกันอย่างหนึ่ง คือ ในช่วงต้นของกราฟนั้นปริมาณของเหล็กที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะมีค่าสูงกว่าค่าที่ได้จากการวิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงาน (Energy Dispersive X-Ray Spectrometer, EDS) ของชิ้นงานทดลอง และ ณ ช่วงปลายนั้นปริมาณ

ของเหล็กที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะมีค่าต่ำกว่าค่าที่ได้จากการวิเคราะห์ชิ้นงานทดลอง ปรากฏการณ์นี้เกิดขึ้นจากผลของค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ระหว่างกัน (Inter diffusion coefficient, D) ที่ทำการเลือกมาใช้ในการคำนวณ โดยจากตารางจะเห็นว่าค่าของค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ระหว่างกัน (Inter diffusion coefficient, D) ในเฟส เอต้า(Eta, η) มีค่ามากที่สุดตามมาด้วย เซต้า(Zeta, ζ), เดลต้า (Delta, δ), แกมมา1(Gamma1, Γ_1) และ แกมมา(Gamma, Γ) ตามลำดับ โดย การแพร่ของเหล็กจะเกิดมากและเร็วในส่วนของเฟสที่มีค่าของค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ระหว่างกัน (Inter diffusion coefficient, D) สูง และจะเกิดได้ช้าในกรณี ที่ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ระหว่างกัน ต่ำ ซึ่งจากตารางที่ 5 จะเห็นว่าค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ระหว่างกัน ของเฟสที่อยู่ติดกันจะมีค่าต่างกัน ประมาณ 10 เท่า ดังนั้นเมื่อเกิดขึ้น ณ ตำแหน่งที่อยู่ใกล้กับรอยต่อระหว่างชั้นเหล็กและสังกะสี ซึ่งถูกระบุว่าเป็นเฟส Gamma ที่มีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ระหว่างกันต่ำ นั้นจะเกิดการสะสมของปริมาณเหล็กขึ้นทำให้เมื่อทำการวาดกราฟของปริมาณเหล็กในชั้นเคลือบสังกะสีแบบกัลวานีลทำให้ปริมาณของเหล็กที่คำนวณได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ณ ตำแหน่งนั้นมีปริมาณสูงกว่าปริมาณของเหล็กที่วัดได้จากการทดลองและเกิดการยกตัวของเส้นกราฟที่มากกว่าปริมาณของเหล็กที่วัดได้จากการทดลอง และในทางกลับกันเฟสที่มีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ระหว่างกันที่สูง เช่น เอต้า(Eta, η), เซต้า(Zeta, ζ) และเดลต้า (Delta, δ) นั้นจะอยู่ใกล้บริเวณผิวนอกของชิ้นงานซึ่งเทียบได้กับตำแหน่งการคำนวณท้ายๆของตำแหน่งการคำนวณโดย ณ ตำแหน่งนี้จะเกิดการแพร่ของเหล็กที่เร็วและมีปริมาณมากทำให้เกิดการสะสมของเหล็กน้อยทำให้ลักษณะของกราฟที่เกิดขึ้นนั้นปริมาณของเหล็กที่คำนวณได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์นั้นมีปริมาณน้อยกว่าปริมาณของเหล็กที่วัดได้จากการทดลอง และเกิดการยกตัวของเส้นกราฟที่ช้ากว่าความเป็นจริงเมื่อเวลาในการอบร้อนเพิ่มขึ้น

จากนั้นทำการเปรียบเทียบความหนาของเฟสต่างในชั้นเคลือบของเหล็กชุบสังกะสีแบบกัลวานีลจะพบว่าโดยภาพรวมนั้นความหนาของเฟสเดลต้า (Delta, δ) ที่ทำการการคำนวณของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์นั้นมีความหนาที่ได้ใกล้เคียงกับความหนาที่ได้จากการทดลองของ Lin et al. โดยสำหรับเฟสเดลต้า (Delta, δ) นั้นค่าความผิดพลาดจากการคำนวณนั้นจะอยู่ที่ประมาณ 7-8% เท่านั้น อย่างไรก็ตาม ณ เวลา 5 วินาทีที่กลับพบว่าจากการคำนวณของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์นั้นปริมาณของเหล็กที่คำนวณได้เมื่อทำการเทียบค่าที่ได้กับเฟสไดอะแกรมจะพบว่าอยู่ในช่วงของเฟส เซต้า(Zeta, ζ) ทำให้เมื่อทำการแปลงค่ามาจะพบว่าไม่มีเฟส Zeta ปรากฏอยู่ แต่จากผลการทดลองของ Lin et al. ที่ได้ทำการรายงานมานั้นจะพบว่าไม่ปรากฏชั้นของเฟสเซต้า(Zeta, ζ) อยู่เลยโดยเหตุผลของการปรากฏเฟส Zeta นั้น คือ มีปริมาณการแพร่ของเหล็กจากเนื้อพื้นของเหล็กที่มาจากการคำนวณมีปริมาณน้อยเกินไป โดยเหตุผล คือ ระบบการคำนวณของ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์นั้นมีเฟสของ แกมมา1(Gamma1, Γ_1) และ แกมมา(Gamma, Γ) ที่ทำตัวเหมือนฉนวนที่คอยยับยั้งการแพร่ของเหล็กจากเนื้อพื้น ณ รอยต่อของชั้นเคลือบเกิดขึ้น เนื่องจากในการคำนวณนั้นกำหนดให้เมื่อปริมาณของเหล็กในชั้นเคลือบ ณ จุดหนึ่งๆมีค่าอยู่ระหว่างปริมาณของเหล็กในเฟสใดดังปรากฏในเฟสไดอะแกรมจะทำการปรับค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ระหว่างกัน (Inter diffusion coefficient, D) ให้เป็นไปตามค่าของเฟสนั้นๆในทันที ทำให้ในการคำนวณของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์นั้นเฟสต่างๆเกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็วจนเปรียบเสมือนว่าผลของอุณหพลศาสตร์ (Thermodynamic) ที่เป็นตัวกำหนดว่าเฟสต่างๆจะปรากฏ ณ ที่สภาวะนั้นๆถูกยกเว้นออกไป และเมื่อมีชั้นของ แกมมา

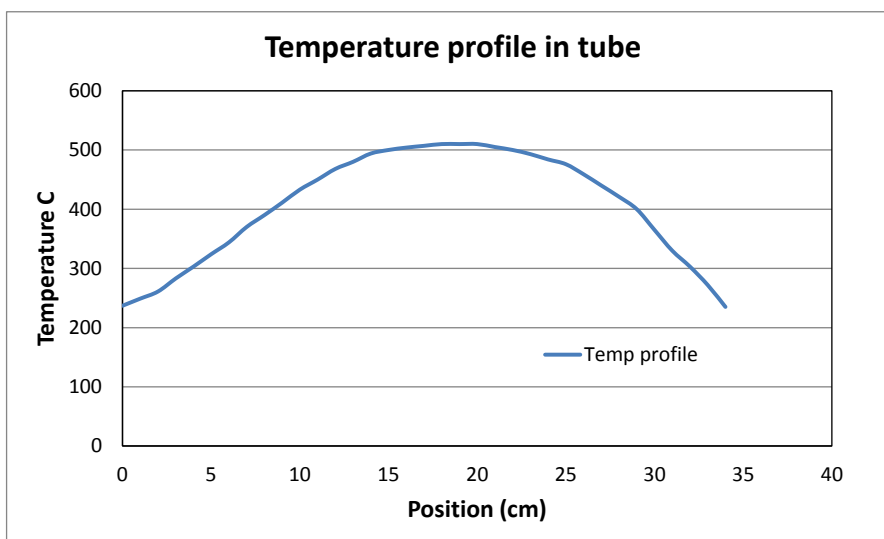
1(Gamma1, Γ_1) และ แกมมา(Gamma, Γ) มีความหนาแน่นประมาณ $1\mu\text{m}$ การลดปริมาณของเหล็กที่จะแพร่ไปถึงปลายชิ้นงาน และเมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลองของ Lin et al. ที่รายงานว่าคุณสมบัติของเฟสแกมมา1(Gamma1, Γ_1) และ เฟสแกมมา(Gamma, Γ) มีความหนาแน่นของทั้ง 2 เฟสนี้มีค่าน้อยกว่า 0.1 ไมครอน ก็เป็นเหตุผลที่ช่วยยืนยันถึงว่าทำไมถึงมีชั้นของเฟสเซต้า(Zeta, ζ) เหลือค้ำอยู่ในผลที่ได้จากการคำนวณของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ นอกจากนี้ประเด็นความหนาของชั้นของเฟสแกมมา1(Gamma1, Γ_1) และ เฟสแกมมา(Gamma, Γ) ที่ได้จากการคำนวณของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์นั้นมีความแตกต่างจากผลที่ได้จากการวัดจากทดลองของ Lin et al. โดยเมื่อทำการเปรียบเทียบค่าความหนาของชั้นของเฟสแกมมา1(Gamma1, Γ_1) และ เฟสแกมมา(Gamma, Γ) นั้นจะพบว่าความหนาที่ได้จากการคำนวณนั้นล้วนแต่หนากว่าทั้งสิ้นโดยเฉพาะที่เวลา 20 และ 30 วินาทีนั้นจะพบว่ามีความผิดพลาดค่อนข้างมากซึ่งเหตุผลของความแตกต่างนี้คาดว่าเป็นผลมาจากอิทธิพลของ เทอร์โมไดนามิกส์(Thermodynamic) ที่มีต่อการเกิดเฟสต่างๆในชั้นเคลือบ ดังเช่นที่ได้กล่าวไว้ข้างต้นว่ากระบวนการคำนวณของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์นั้นจะทำการสร้างเฟสต่างๆขึ้นทันทีเมื่อปริมาณของเหล็กในชั้นเคลือบสูงถึงค่าที่อ้างอิงจากเฟสไดอะแกรม แต่ในความเป็นจริงนั้นจำเป็นที่จะต้องอาศัยเวลาระยะเวลาหนึ่งเพื่อทำการสะสมปริมาณของเหล็กในชั้นเคลือบให้สูงเกินกว่าที่จะปรากฏในเฟสไดอะแกรมเพื่อให้เกิดแรงขับเคลื่อน (Driving force) ที่มากพอที่จะทำให้เกิดการแปลงเฟส ซึ่งจากผลการทดลองของ Claus.G et al.[17] นั้นกล่าวว่าการที่จะเกิดเฟสแกมมา1(Gamma1, Γ_1) และ เฟสแกมมา(Gamma, Γ) นั้นจำเป็นที่จะต้องใช้เวลาในระยะเวลาหนึ่งในการบ่มเพาะ(Incubation) ซึ่งนั่นหมายความว่าเวลาเป็นปัจจัยหนึ่งที่ส่งผลต่อการเกิดเฟสต่างๆ และด้วยเหตุผลข้างต้นนั่นเองที่ทำให้ความหนาของเฟสแกมมา1(Gamma1, Γ_1) และ เฟสแกมมา(Gamma, Γ) นั้นมีความหนามากกว่าค่าที่ได้จากการทดลองของ Lin et al.

4.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการอธิบายการแพร่ของอะตอมเหล็กในชั้นเคลือบและการพัฒนาของเฟสในชั้นเคลือบกัลวานีลที่มีลักษณะของชั้นเคลือบแบบหนา

สำหรับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการอธิบายการแพร่ของอะตอมเหล็กในชั้นเคลือบและการพัฒนาของเฟสในชั้นเคลือบกัลวานีลที่มีลักษณะของชั้นเคลือบแบบหนานั้นจะทำการสอบเทียบค่ากับชิ้นงานที่ได้ทำการผลิตขึ้นเอง โดยจะทำการนำเหล็กกล้าแผ่นคาร์บอนต่ำได้ทำการชุบในบ่อสังกะสีที่มีความบริสุทธิ์ 99.95% ที่อุณหภูมิ 450°C เป็นเวลา 1 นาทีมาทำการอบในเตาท่อแบบตั้งโดยไม่มีการปิดปลายทั้ง 2 ข้างดังภาพที่ 16 ที่อุณหภูมิ 500°C เป็นเวลา 1, 5, 10 และ 20 นาที โดยลักษณะของอุณหภูมิเทียบกับตำแหน่งต่างๆในท่อ (Temperature profile) จะเป็นดังภาพที่ 17 และมี working temperature อยู่ที่ 3-4 เซนติเมตรดังปรากฏในภาพ

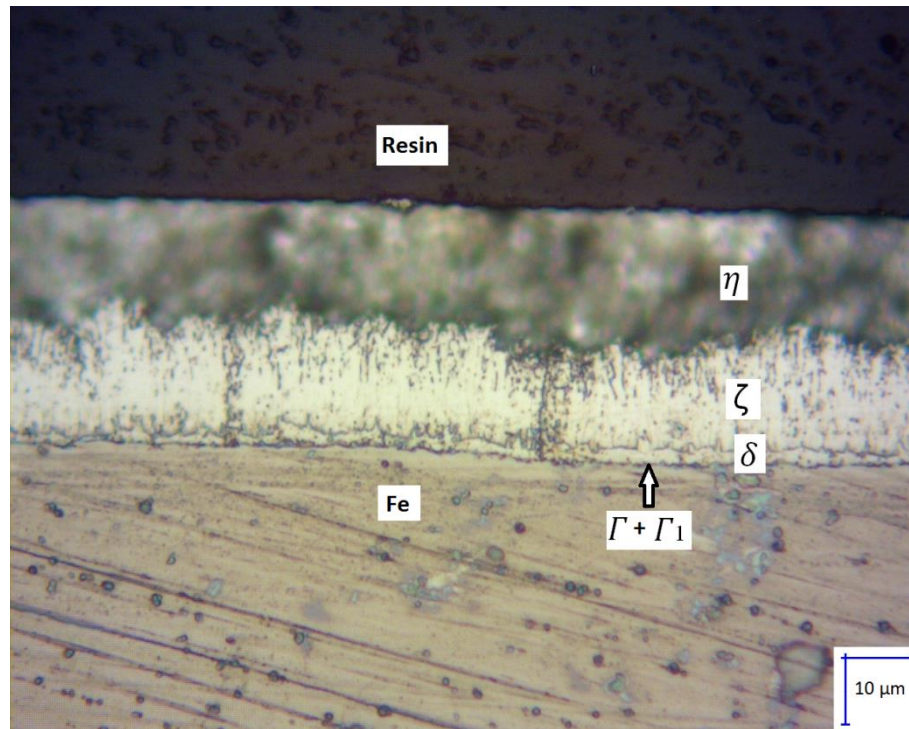


ภาพที่ 17 แสดงการอบชิ้นงานเหล็กชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนโดยใช้เตาท่อแบบตั้ง

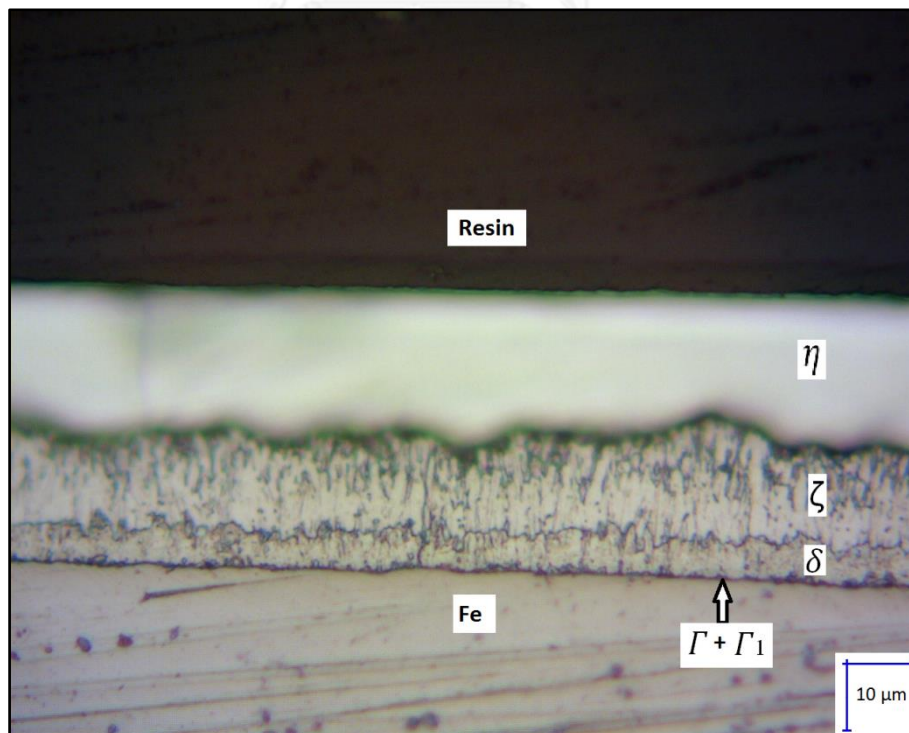


ภาพที่ 18 กราฟแสดงลักษณะของของอุณหภูมิในเตาท่อแบบตั้งเทียบกับตำแหน่ง

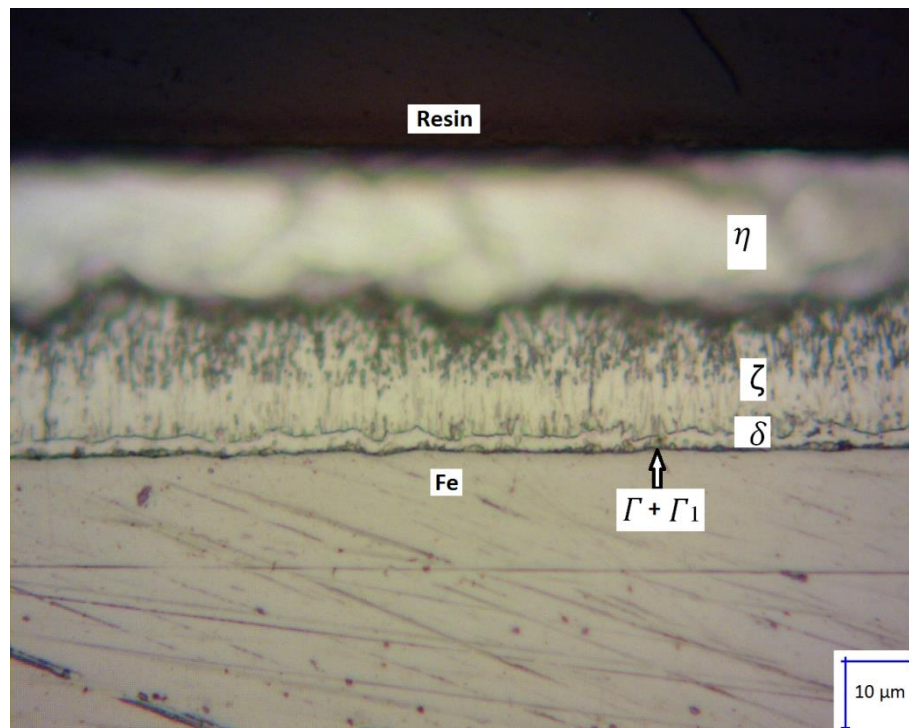
ลักษณะภายนอกที่ปรากฏของชิ้นงานที่ผ่านการอบเป็นเวลา 1, 5, 10 และ 20 นาทีนั้นมีลักษณะที่ไม่ต่างจากชิ้นงานเหล็กชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนมากนักโดยลักษณะของเกรนหยาบๆ ที่เห็นได้ด้วยตาเปล่าที่ผิวนอกเท่านั้น ส่วนชิ้นงานที่ทำการอบที่ 20 นาทีนั้นจะมีลักษณะที่แตกต่างอย่างชัดเจนคือ มีลักษณะผิวนอกที่มีสีด้านไม่สะท้อนแสงต่างจากชิ้นงานเหล็กชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนและเมื่อทำการศึกษาภาคตัดขวางของชิ้นงานก็จะพบว่าที่ชั้นเคลือบนอกสุดบริเวณที่ติดกับชั้นเรซินของชิ้นงานเหล็กชุบสังกะสีที่ผ่านการอบเป็นเวลา 20 นาทีมีความแตกต่างจากชิ้นงานเหล็กชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนที่ไม่ผ่านการอบและผ่านการอบเป็นเวลา 1, 5 และ 10 นาที โดยเมื่อดูจากภาพที่ 20 ถึงภาพที่ 22 ที่แสดงภาคตัดขวางจากชิ้นงานจะพบว่าที่ชั้นเคลือบนอกสุดที่ติดกับเรซินสำหรับชิ้นงานที่ผ่านการอบมา 20 นาทีนั้นเป็นชั้นเคลือบของเฟสเซต้า ตามด้วยชั้นของเฟส เดลต้า และชั้นของเฟสแกมมา 1 รวมกับชั้นของแกมมา ส่วนชิ้นงานอื่นๆ นั้นที่ชั้นนอกสุดจะเป็นชั้นของเฟสเอต้าตามด้วยชั้นของเฟสเซต้า เดลต้า และชั้นของเฟสแกมมา 1 รวมกับชั้นของแกมมา ตามลำดับ ซึ่งยืนยันได้จากผลค่าของความเข้มข้นของเหล็กในชั้นเคลือบที่ได้จากของกราฟ EPMA ดังปรากฏในภาพที่ 25 ถึงภาพที่ 29 โดยค่าความเข้มข้นของเหล็กในชั้นเคลือบนั้นได้ถูกรายงานในงานวิจัยของ Shimonzaki et al [14]



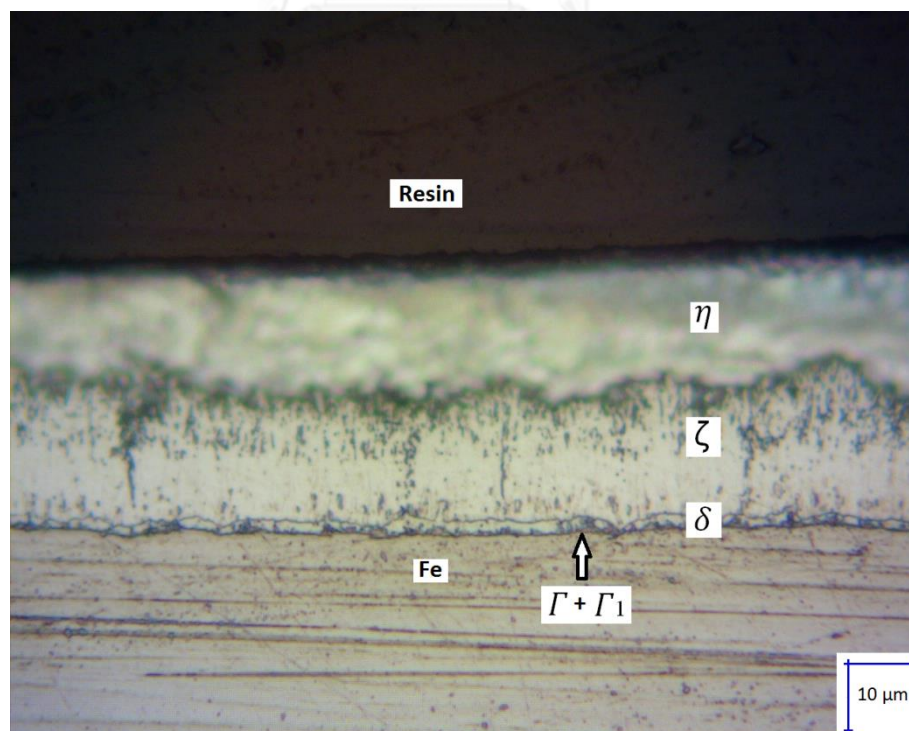
ภาพที่ 19 ภาพแสดงภาคตัดขวางของชิ้นงานเหล็กชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนที่อุณหภูมิ 450°C เป็นเวลา 1 นาที



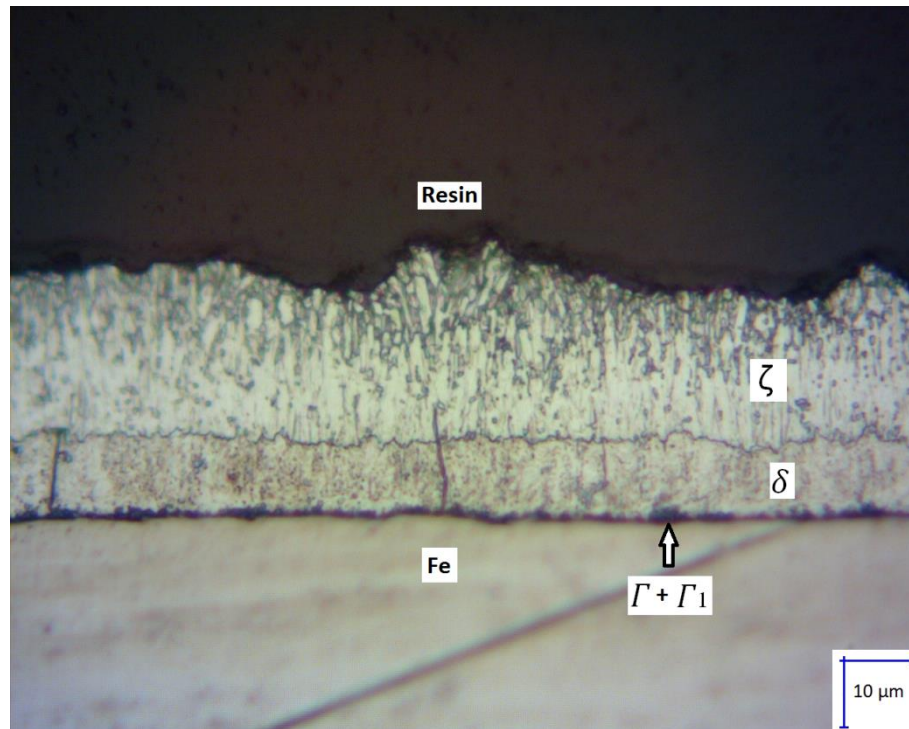
ภาพที่ 20 ภาพแสดงภาคตัดขวางของชิ้นงานเหล็กชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนที่ผ่านการอบร้อนที่อุณหภูมิ 500°C เป็นเวลา 1 นาที



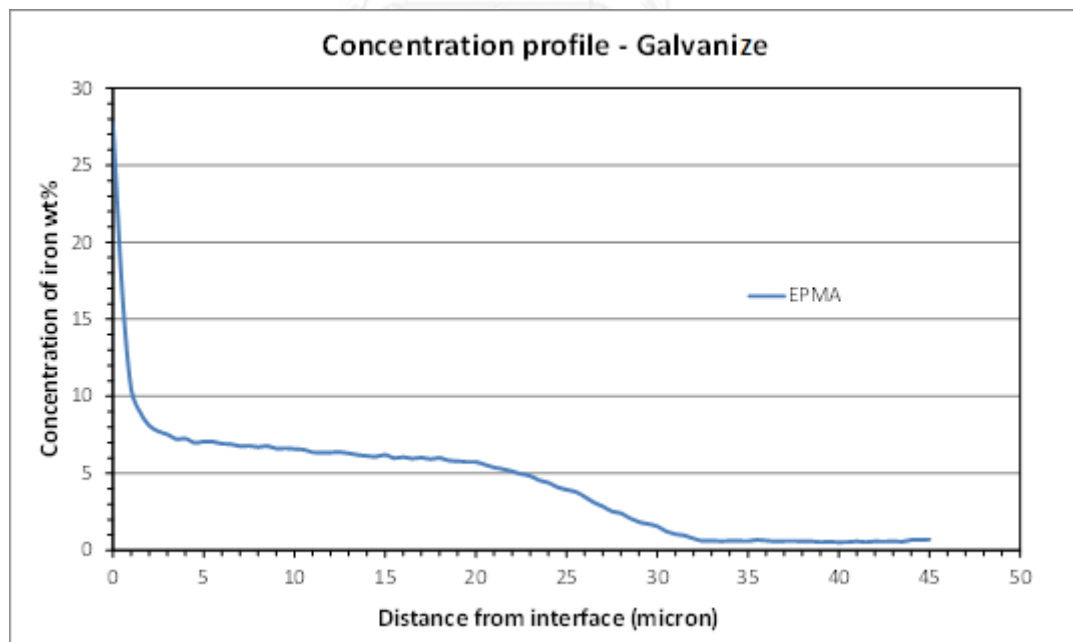
ภาพที่ 21 ภาพแสดงภาคตัดขวางของชิ้นงานเหล็กชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนที่ผ่านการอบร้อนที่อุณหภูมิ 500°C เป็นเวลา 5 นาที



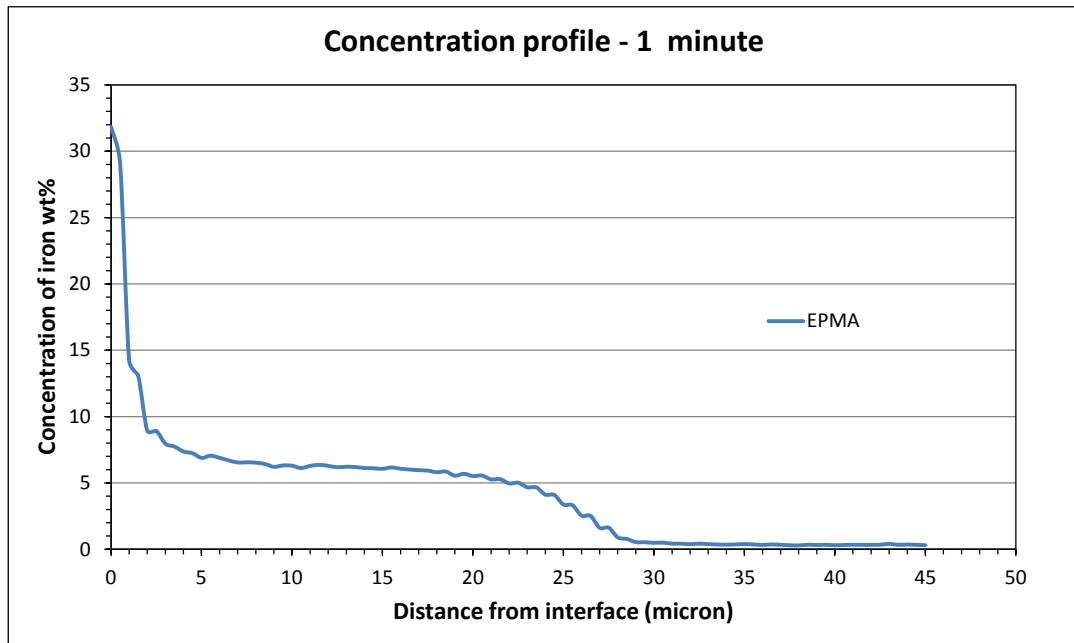
ภาพที่ 22 ภาพแสดงภาคตัดขวางของชิ้นงานเหล็กชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนที่ผ่านการอบร้อนที่อุณหภูมิ 500°C เป็นเวลา 10 นาที



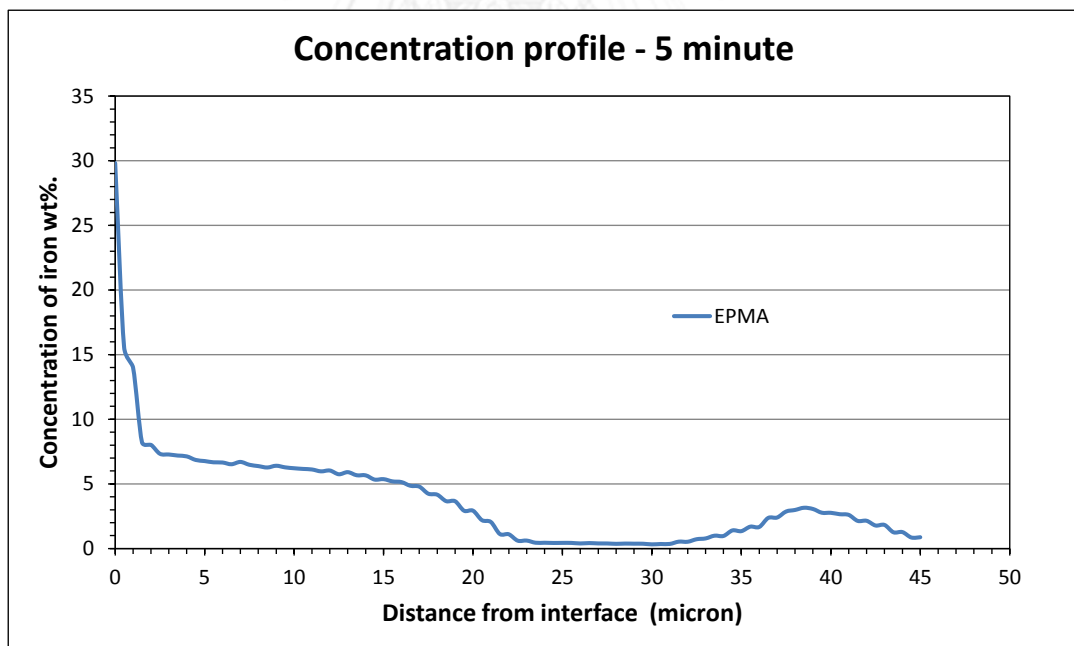
ภาพที่ 23 ภาพแสดงภาพตัดขวางของชิ้นงานเหล็กชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนที่ผ่านการอบร้อนที่อุณหภูมิ 500°C เป็นเวลา 20 นาที



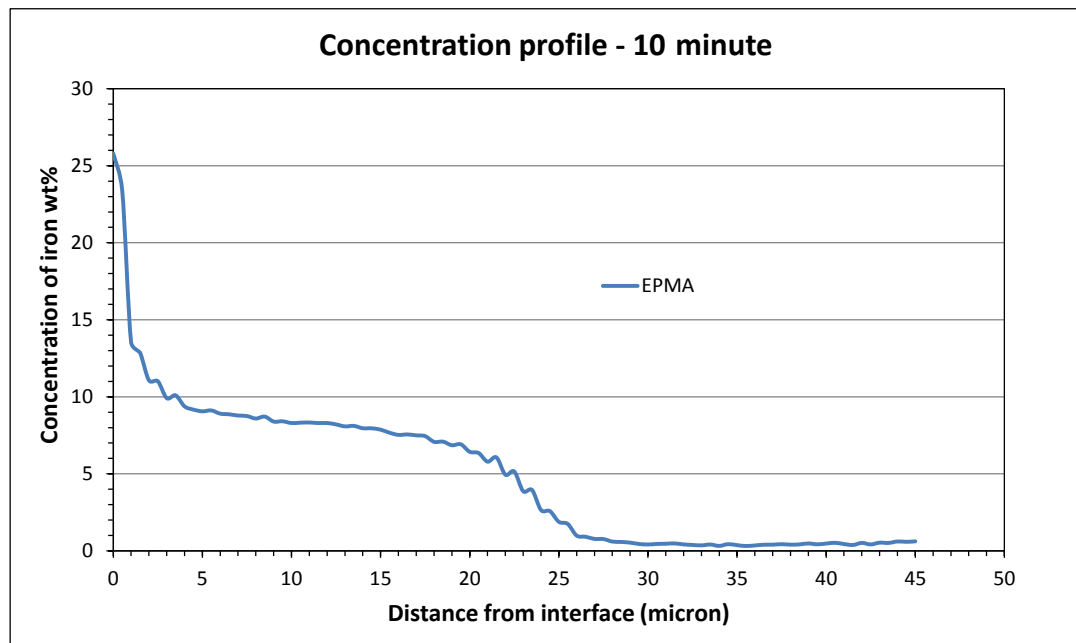
ภาพที่ 24 กราฟแสดงความเข้มข้นของเหล็กในชั้นเคลือบของเหล็กชุบสังกะสีที่ได้จากการทำ EPMA



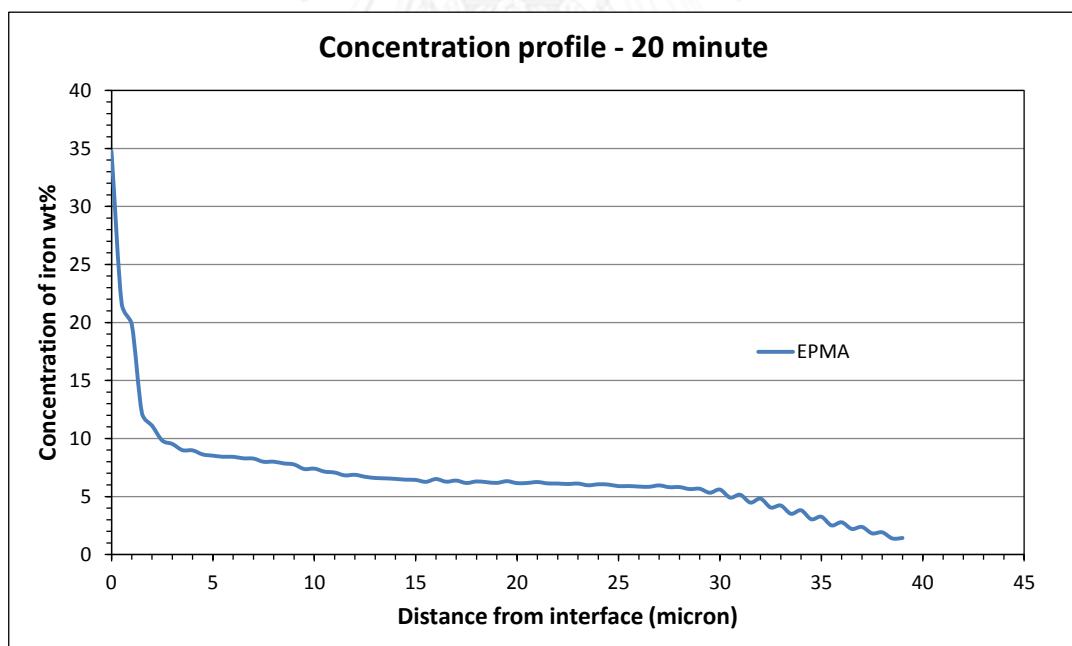
ภาพที่ 25 กราฟแสดงความเข้มข้นของเหล็กในชั้นเคลือบของเหล็กชุบสังกะสีที่ผ่านการอบร้อนเป็นเวลา 1 นาทีที่ได้จากการทำ EPMA



ภาพที่ 26 กราฟแสดงความเข้มข้นของเหล็กในชั้นเคลือบของเหล็กชุบสังกะสีที่ผ่านการอบร้อนเป็นเวลา 5 นาทีที่ได้จากการทำ EPMA



ภาพที่ 27 กราฟแสดงความเข้มข้นของเหล็กในชั้นเคลือบของเหล็กชุบสังกะสีที่ผ่านการอบร้อนเป็นเวลา 10 นาทีที่ได้จากการทำ EPMA



ภาพที่ 28 กราฟแสดงความเข้มข้นของเหล็กในชั้นเคลือบของเหล็กชุบสังกะสีที่ผ่านการอบร้อนเป็นเวลา 20 นาทีที่ได้จากการทำ EPMA

จากนั้นทำการวัดค่าความหนาของเฟสต่างๆในชั้นเคลือบของแต่ละชั้นงานเพื่อนำไปเป็นค่าเริ่มต้นในการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และทำการสอบเทียบความถูกต้องต่อไป แต่จากการวัดความหนาของชั้นเคลือบจะพบว่าชั้นงานที่ผ่านการอบเป็นเวลา 20 นาทีจะมีความหนาของชั้นเคลือบ

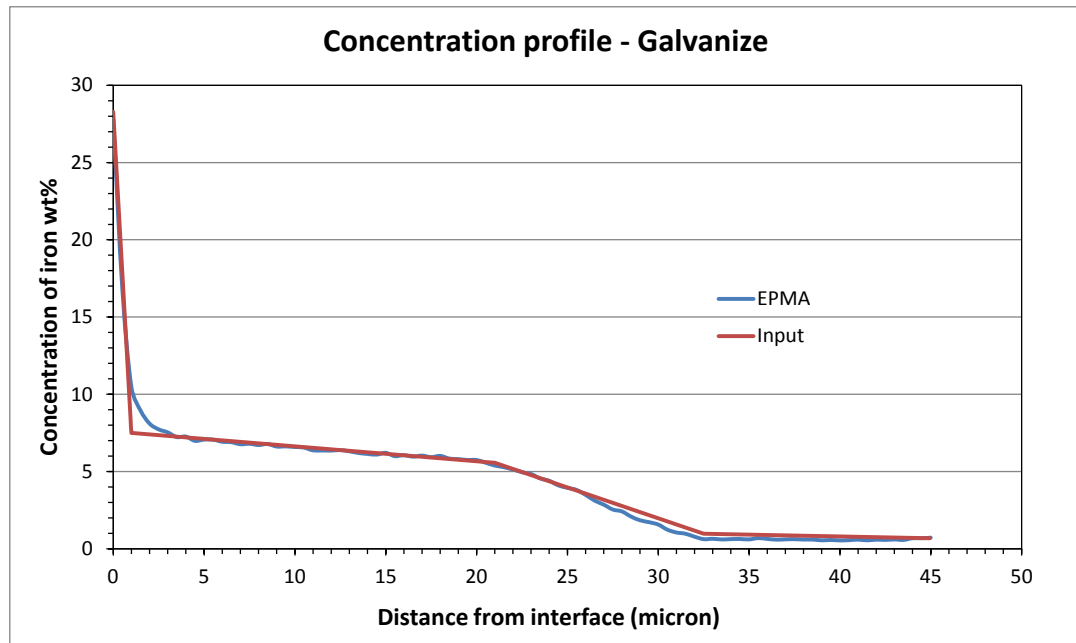
เฉลี่ยที่น้อยกว่าชั้นงานอื่นๆมากโดย ชั้นงานทั้งหมดจะมีความหนาประมาณ 45 ไมโครเมตร ซึ่งจากการสังเกตที่ผิวจะพบว่าพบการไหลย่อยของสังกะสีจากด้านบนลงสู่ด้านล่างของชั้นงานที่ทำการอบทำให้ชั้นงานมีความหนาของชั้นเคลือบที่เปลี่ยนแปลงไปซึ่งในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่พัฒนาไว้ไม่ครอบคลุมในจุดนี้ จึงทำการตัดชั้นงานที่ผ่านการอบที่ 20 นาทีออกไปจากการสอบเทียบความถูกต้องของแบบจำลอง ในการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้อธิบายการแพร่และการพัฒนาของเฟสต่างๆในชั้นเคลือบนั้นจะใช้สมมุติฐานและแนวทางในการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เหมือนกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการอธิบายการแพร่และการพัฒนาของเฟสต่างๆในชั้นเคลือบแบบบาง โดยจะทำการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรบางตัวเพื่อให้มีความเหมาะสมมากยิ่งขึ้นเนื่องจากในระบบนี้ไม่มีการผสมอลูมิเนียมลงไปซึ่งจากงานวิจัยที่ผ่านมาค่าของสัมประสิทธิ์การแพร่ชุดนี้มีความเหมาะสมที่สุด โดยมีการเปลี่ยนแปลงค่าดังนี้

- ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่

ตารางที่ 6 ตารางแสดงค่า D_0 และ Q ของแต่ละเฟส

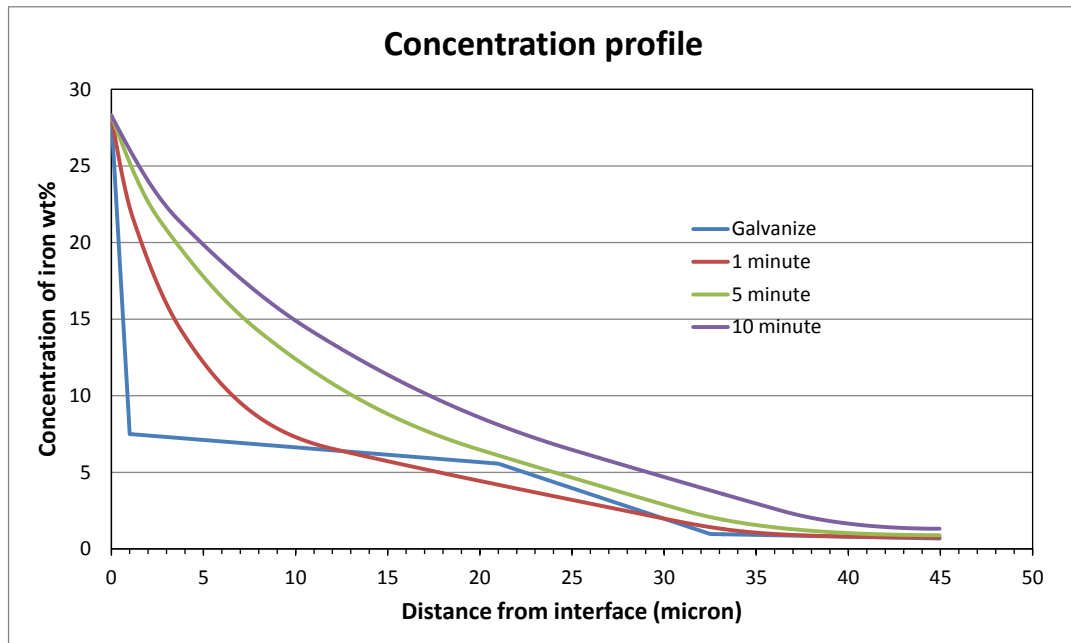
Phase	Gamma	Gamma1	Delta	Zeta	Eta
$D_0(m^2/s)$	5×10^{-9}	2.04×10^{-8}	1.0×10^{-7}	4.0×10^{-7}	1.0×10^{-6}
$Q(kJ/mol)$	85.35	80.00	83.7	75.3	104.6
$D(m^2/s)$	8.5×10^{-15}	8.0×10^{-14}	2.2×10^{-13}	3.2×10^{-12}	8.541×10^{-14}

- $dx = 5 \times 10^{-8}$ เมตร
- $dt = 1.25 \times 10^{-5}$ วินาที
- ช่องของการคำนวณใน1รอบ(Calculation node for position) = 900 ช่อง
- รอบการคำนวณ 96000000 รอบ
- ลักษณะของรูปแบบความเข้มข้นในชั้นเคลือบจะเป็นดังภาพที่ 30 โดยมีชั้นของสารประกอบโลหะอยู่ระหว่างชั้นของเหล็กและสังกะสี



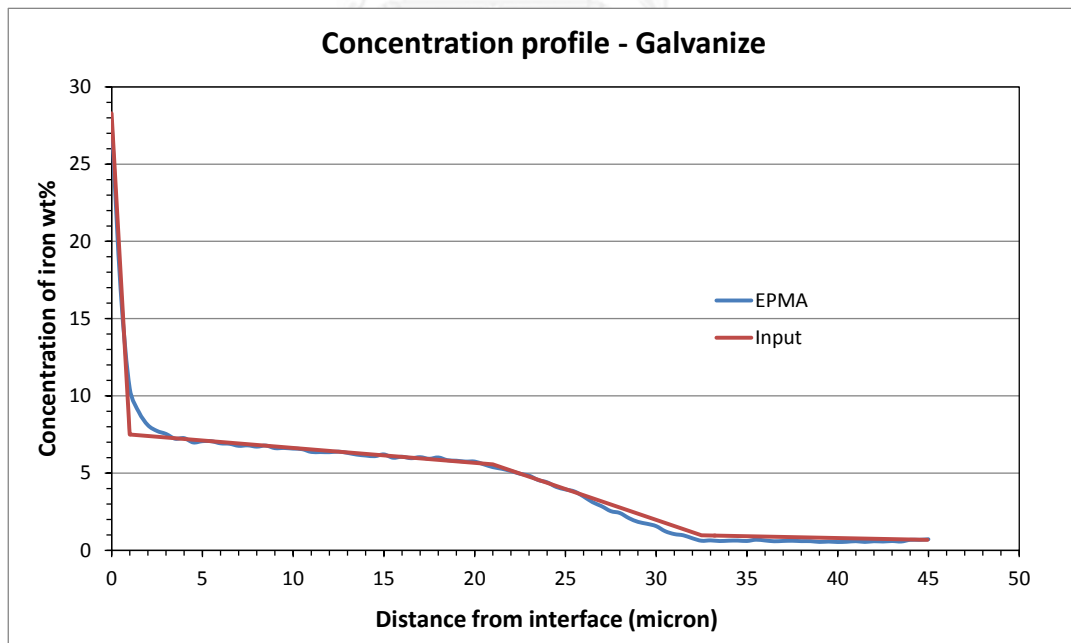
ภาพที่ 29 กราฟแสดงการเปรียบเทียบรูปแบบความเข้มข้นของเหล็กในในชั้นเคลือบ (Concentration Profile) ระหว่างค่าที่ได้จาก EPMA และค่าเริ่มต้นที่ทำการใส่ลงในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

จากนั้นทำการเขียนโปรแกรมการคำนวณขึ้นในโปรแกรม C++ จากนั้นการรันโปรแกรมก็จะได้อ่านค่าของความเข้มข้นของเหล็ก ณ จุดต่างๆ ที่เวลาต่างกัน จากนั้นทำการเขียนกราฟความเข้มข้นกับตำแหน่งที่เวลาต่างกันก็จะได้อ่านค่าความเข้มข้นของเหล็กในชั้นเคลือบก็จะยกตัวสูงขึ้นซึ่งเป็นไปตามสมมุติฐาน

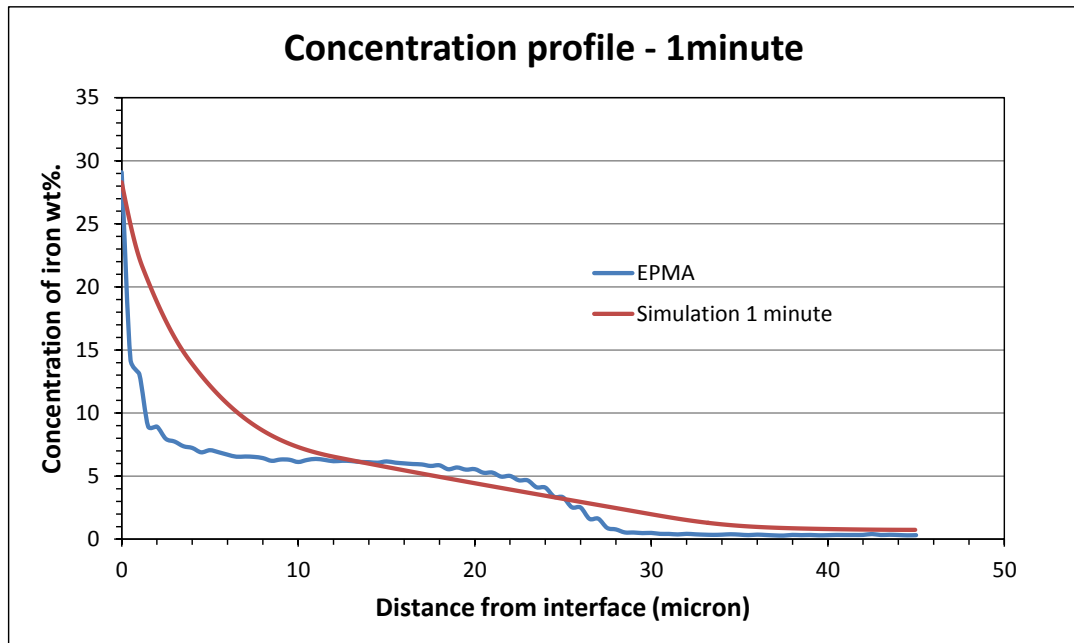


ภาพที่ 30 กราฟแสดงการพัฒนาความเข้มข้นของเหล็กในชั้นเคลือบที่เทียบกับตำแหน่งที่เวลาต่างๆ

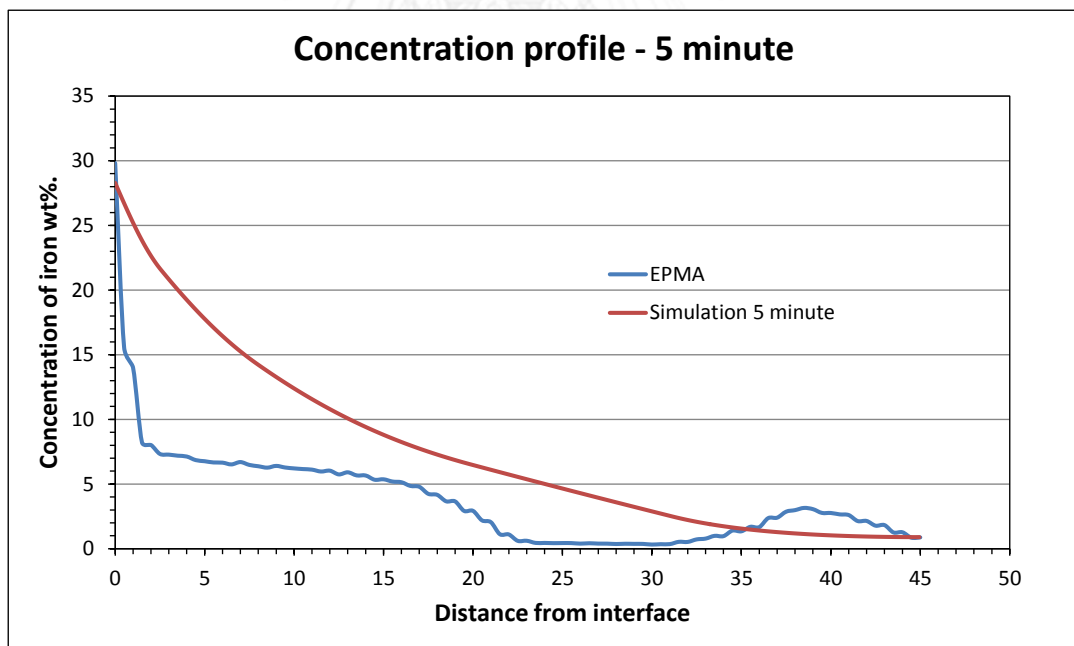
จากนั้นทำการนำค่าที่คำนวณได้มาเปรียบเทียบกับผลของ EPMA ก็ได้กราฟดังภาพที่ 32 ถึงรูปที่ 35



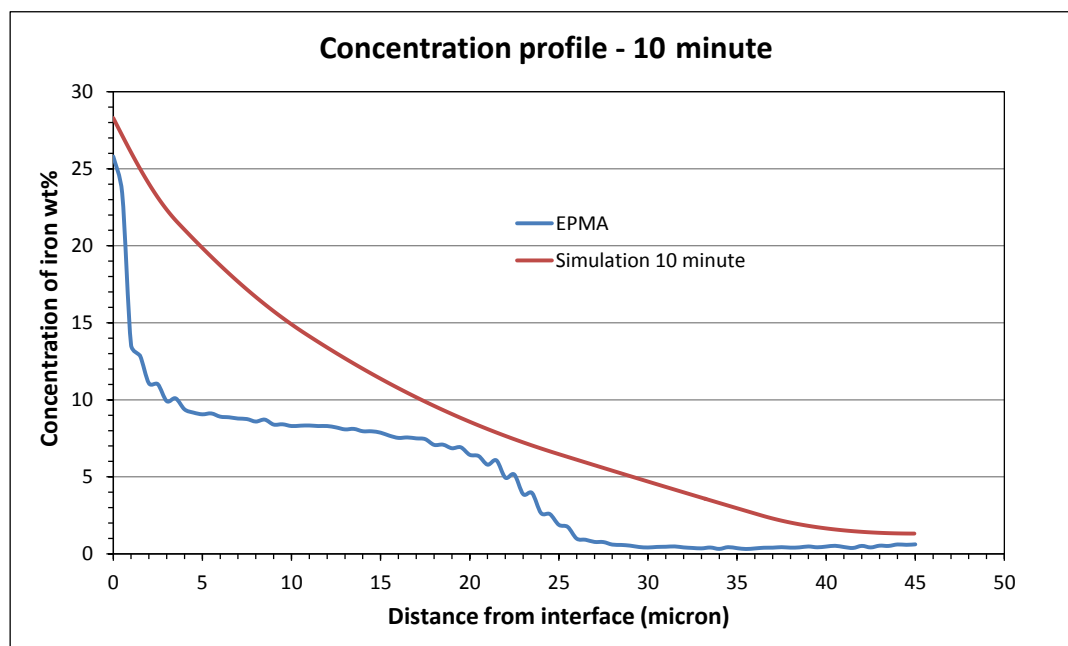
ภาพที่ 31 กราฟแสดงการเปรียบเทียบความเข้มข้นของเหล็กในชั้นเคลือบกับค่าที่ได้จาก EPMA ของชิ้นงานเหล็กชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อน



ภาพที่ 32 กราฟแสดงการเปรียบเทียบความเข้มข้นของเหล็กในชั้นเคลือบกับค่าที่ได้จาก EPMA ของชิ้นงานเหล็กชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนที่ผ่านการอบเป็นเวลา 1 นาที

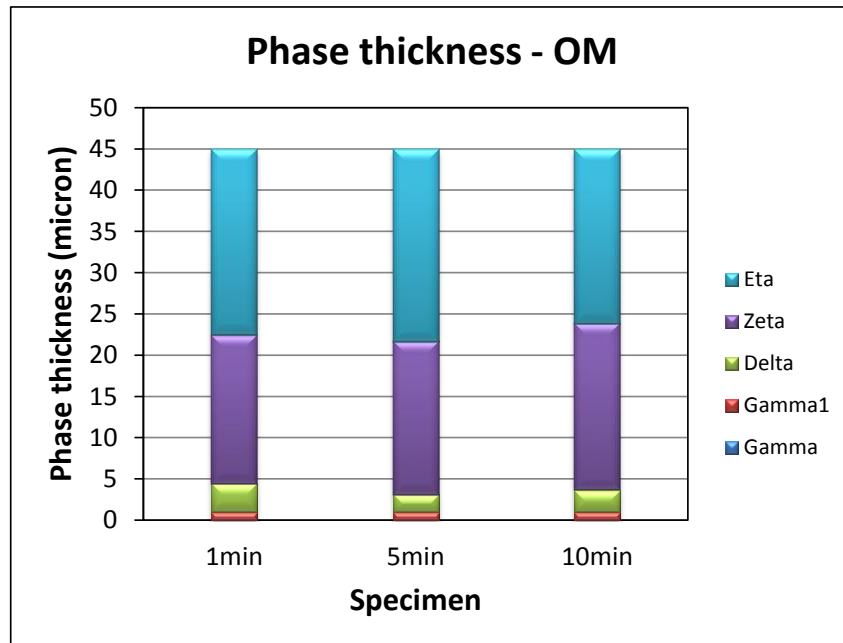


ภาพที่ 33 กราฟแสดงการเปรียบเทียบความเข้มข้นของเหล็กในชั้นเคลือบกับค่าที่ได้จาก EPMA ของชิ้นงานเหล็กชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนที่ผ่านการอบเป็นเวลา 5 นาที

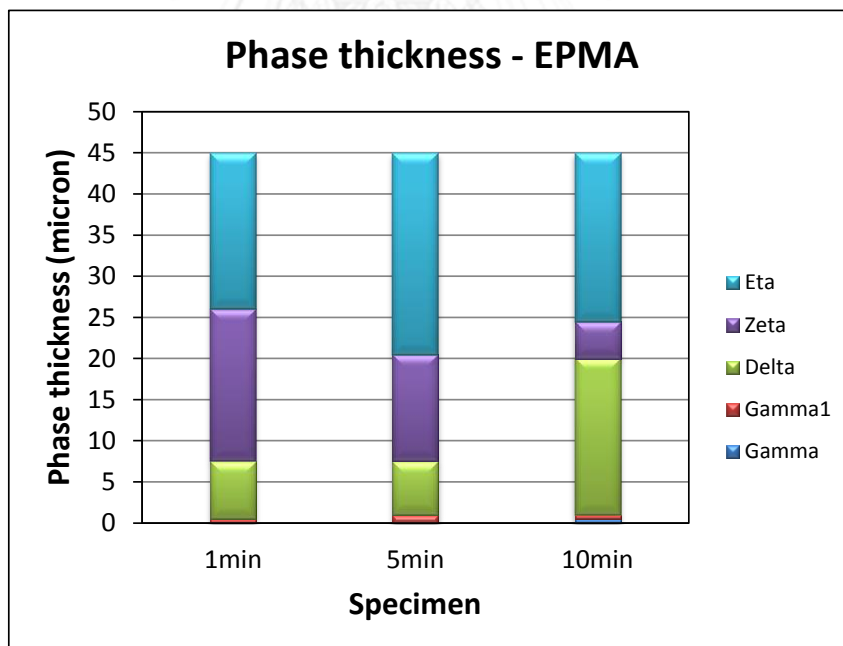


ภาพที่ 34 กราฟแสดงการเปรียบเทียบความเข้มข้นของเหล็กในชั้นเคลือบกับค่าที่ได้จาก EPMA ของ ชิ้นงานเหล็กชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนที่ผ่านการอบเป็นเวลา 10 นาที

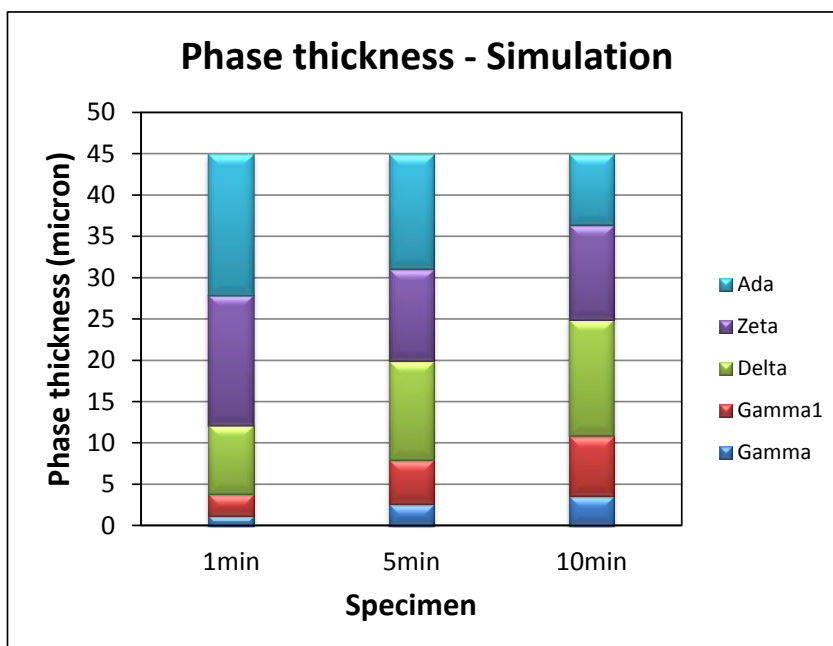
จากกราฟจะเห็นว่าที่เวลา 1 นาที นั้นกราฟของความเข้มข้นของเหล็กในชั้นเคลือบที่ได้จากการคำนวณโดยแบบจำลองนั้นจะมีค่าที่ใกล้เคียงกับกราฟของความเข้มข้นของเหล็กในชั้นเคลือบที่ได้จาก EPMA ส่วนที่เวลาอื่นๆจะพบว่าค่าของความเข้มข้นของเหล็กในชั้นเคลือบจะสูงกว่าค่าที่ได้จาก EPMA จากนั้นทำการแปลงค่าความเข้มข้นของเหล็กในชั้นเคลือบที่ได้จากการคำนวณและค่าที่ได้จากการทำ EPMA มาทำการสร้างกราฟความหนาของแต่ละเฟส โดยใช้แนวคิดที่ให้นำค่าความเข้มข้นที่น้อยที่สุดและมากที่สุดของเฟสที่อยู่ติดกันมาหาค่าเฉลี่ยเพื่อทำการหารอยต่อระหว่างเฟสซึ่งถูกนำเสนอโดย J.M. Brozzard et al[16] จากนั้นทำการเทียบกับค่าที่ได้จากการวัดความหนาของเฟสโดยโปรแกรมไดโนไลท์ 2.0 (Dino lite 2.0[®]) จะได้ลักษณะของกราฟที่ปรากฏดังภาพที่ 36 ถึงภาพที่



ภาพที่ 35 กราฟแสดงความหนาของเฟสต่างๆของชิ้นงานที่ผ่านการอบ เป็น เวลา 1, 5 และ 10 นาทีที่ได้จากการวัดค่าโดยโปรแกรมไดโนไลท์ 2.0 (Dino lite 2.0[®])



ภาพที่ 36 กราฟแสดงความหนาของเฟสต่างๆของชิ้นงานที่ผ่านการอบ เป็น เวลา 1, 5 และ 10 นาทีที่ได้จากการแปลงค่าความเข้มข้นของเหล็กในชั้นเคลือบที่ได้จากกระบวนการ EPMA



ภาพที่ 37 กราฟแสดงความหนาของเฟสต่างๆของชิ้นงานที่ผ่านการอบ เป็น เวลา 1, 5 และ 10 นาทีที่ได้จากการแปลงค่าความเข้มข้นของเหล็กในชั้นเคลือบที่ได้จากการคำนวณโดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

จากภาพที่ 36 ถึง 38 กราฟแสดงผลของความหนาของเฟสต่างๆในชั้นเคลือบที่ผ่านการอบเป็นเวลา 1, 5, และ 10 นาทีและภาพที่ 33 ถึง 35 กราฟแสดงความเข้มข้นของเหล็กในชั้นเคลือบจะเห็นว่า ที่เวลา 1 นาทีนั้นค่าที่ได้จากการคำนวณโดยแบบจำลองจะมีความใกล้เคียงมากที่สุดเมื่อทำการเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการคำนวณที่เวลาการอบ 5 และ 10 นาที โดยสำหรับเฟสเซตานั้นความหนาของเฟสที่คำนวณได้นั้นจะมีความผิดพลาดที่ประมาณ 15% ส่วน เอตานั้นจะผิดพลาดประมาณ 25% ซึ่งเมื่อเทียบกับความไม่ซับซ้อนของแบบจำลองแล้วถือว่าผลอยู่ในเกณฑ์ที่น่าพึงพอใจ

สำหรับความไม่แม่นยำของการคำนวณของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์นั้นโดยภาพรวมจะพบว่าค่าความเข้มข้นของเหล็กในชั้นเคลือบนั้นมีค่าสูงกว่าค่าที่ได้จากการวัดโดย EPMA โดยเฉพาะค่าที่ได้ที่อยู่ใกล้กับรอยต่อระหว่างเหล็กในเนื้อพื้นกับชั้นเคลือบซึ่งทำให้เฟส แกมมา, แกมมา1 มีความหนากว่าความเป็นจริงค่อนข้างมาก โดย จากการคำนวณโดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์นั้นจะพบว่าความหนารวมจะอยู่ที่ 3.8 μm , 7.95 μm และ 10.8 μm ที่เวลาการอบ 1, 5 และ 10 นาทีตามลำดับ แต่จากทั้งผลของ EPMA และจากการวัดโดยโปรแกรมไดโนไลท์ 2.0 (Dino lite 2.0[®]) จะพบว่ามีความหนารวมไม่เกิน 1 μm ไม่ว่าจะเป็ชิ้นงานที่ผ่านการอบเป็นเวลา 1,5 และ 10 นาที หรืออาจกล่าวได้ว่าไม่พบการพัฒนาของเฟสต่างๆในชิ้นงานขึ้น ปรากฏการณ์นี้ได้ถูกรายงานในงานวิจัยของ Claus.G et al.[17] ที่ระบุว่าจำเป็นที่จะต้องอาศัยเวลาในการบ่มเพาะเพื่อที่จะเกิดการโตของเฟส แกมมาและแกมมา1 และเฟสของแกมมาและแกมมา1 นั้นจะมีการโตขึ้นเมื่อชั้นของเอต้า หดไปจาก

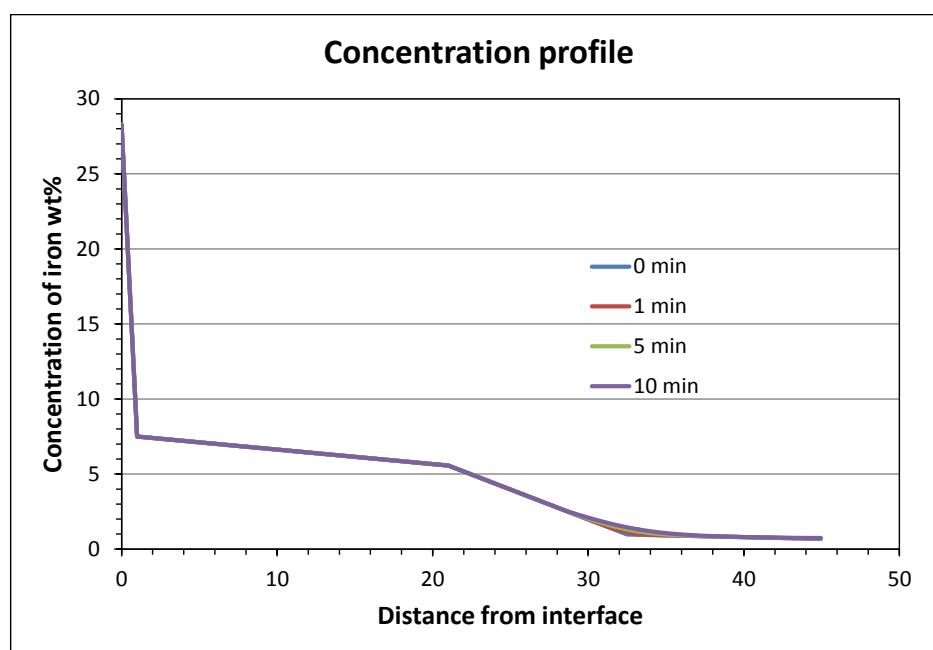
ชิ้นงานซึ่งคาดว่าปรากฏการณ์นี้ก็มีแนวโน้มที่จะเกิดกับชิ้นงานเหล็กชุบสังกะสีแบบกัลวานีลที่มีความหนาแน่นเช่นกัน

สำหรับเฟสเดลต้านั้นจะพบว่ามีขนาดของเฟสที่ได้จากการวัดด้วยโปรแกรมไดโนไลท์ 2.0 (Dino lite 2.0®) อยู่ที่ประมาณ 3 μm ไม่ว่าจะเป็ชิ้นงานที่ทำการอบเป็นเวลา 1,5 หรือ 10 นาที แต่เมื่อดูจากราฟค่าความเข้มข้นของเหล็กในชั้นเคลือบที่ได้จากการทำ EPMA จะพบว่า ปริมาณที่มีปริมาณของเหล็กอยู่ที่ประมาณ 7-11.5 wt% นั้นจะมีความกว้างประมาณ 7 μm สำหรับชิ้นงานที่ผ่านการอบร้อนเป็นเวลา 1 นาทีและ 5 นาที และจะหนาประมาณ 19 μm เมื่อทำการอบเป็นเวลา 10 นาที ซึ่งจากการตรวจดูจากภาพถ่ายโดยกล้องจุลทรรศน์แสงจะพบว่าที่ระยะนั้นจะยังคงแสดงเฟสของเซต้าอยู่ แม้ผลของ EPMA จะระบุว่า ณ บริเวณนั้นมีค่าของเหล็กอยู่ในระดับที่ว่าจะแสดงเฟสของเดลต้าแล้วก็ตาม ซึ่งปรากฏการณ์ในลักษณะนี้ก็ถูกรายงานโดย Syahbuddin et al.[18] ที่ทำการทดลองอบ diffusion couple ของเหล็กและสังกะสีที่อุณหภูมิ 400°C เป็นเวลา 40 นาที โดย Syahbuddin et al. ได้รายงานว่ เดลต้าเฟสนั้นจะต้องใช้เวลาในการบ่มเพาะในการโตเช่นกันแม้ความเข้มข้น ณ จุดนั้นจะถึงจุดที่จะแปลงเฟสแล้วก็ตาม

สำหรับเซตานั้นถึงแม้ว่าที่เวลา 1 นาที นั้นจะได้ค่าของความหนาเมื่อเทียบกับการวัดและผลที่ได้จาก EPAM จะอยู่ในเกณฑ์ที่น่าพอใจแล้วก็ตามแต่ ที่เวลา 5 และ 10 นาทีผลที่ได้ยังไม่น่าพอใจนักซึ่งเมื่อดูจากภาพที่ 36 และ ภาพที่ 37 จะพบว่ามีกรีนโตของชั้นเซต้าเข้าไปในเอด้ามากกว่าผลที่ได้จากการวัดค่าจากภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์แสงและผลจากการวัดปริมาณของเหล็กในชั้นเคลือบโดยกระบวนการ EPMA โดยเหตุผลที่อธิบายความไม่แม่นยำนี้ น่าจะมาจาก การที่ อะตอมของเหล็กเองนั้นเลือกที่จะแพร่อยู่ในชั้นของเซต้ามากกว่าชั้นของเอด้า โดยปรากฏการณ์นี้ถูกเสนอโดย Horstmann D. et al.[19] ระบุว่า จากงานวิจัยที่ผ่านมาเป็นที่ทราบโดยทั่วไปว่าเซต้าเฟสที่ปรากฏในชิ้นงานเหล็กชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนนั้น จะมีการเกิดเซต้าเฟส 2 ครั้งโดยเซต้าเฟสที่เกิดขึ้นในครั้งที่ 2 ระหว่างการชุบนั้นจะมีลักษณะเป็นคอร์รันาเกรนที่มีกลุ่มของเอด้าอยู่ระหว่างเกรนโดยกลุ่มของเอด้านี้จะมีเหล็กอยู่ในปริมาณสูงเมื่อเทียบกับชั้นของเฟสเอด้าที่อยู่เลยจากชั้นของเซต้าออกไป โดย Horstmann D. et al.[19] ได้เสนอว่าเหล็กที่แพร่เข้าไปนั้นจะวิ่งไปตามชั้นของเซต้า 1 เข้าไปในชั้นของเซต้า 2 จากนั้นก็จะเข้าสู่กลุ่มของเอด้าที่อยู่ระหว่างขอบเกรนจากนั้นก็ทำการแปลงเฟสเป็นเฟสของเซต้าทานที่จะแพร่ออกไปสู่ชั้นของเอด้าทำให้ชั้นของเซตานั้นมาความเป็นคอลัมน์น้อยลงซึ่งตรงกับที่ปรากฏในชิ้นงานที่ผ่านการอบเป็นเวลา 5 และ 10 นาทีดังภาพที่ 22 และภาพที่ 23 จากความไม่แม่นยำข้างต้นนั้นถ้าต้องการปรับโมเดลให้มีค่าที่ใกล้เคียงจะลักษณะที่ได้จากการวัดแนวทางหนึ่งที่สามารถทำได้คือถอดการโตของเฟสแกมมา 1 และเฟสเดลต้า โดยทำการปรับให้มีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ให้มีค่าน้อยๆโดยทำการปรับค่าดังนี้

- แกมม่า เปลี่ยนจาก 8.5×10^{-15} เป็น 8.5×10^{-30}
- แกมม่า 1 เปลี่ยนจาก 8×10^{-14} เป็น 8.5×10^{-28}
- เดลต้า เปลี่ยนจาก 2.2×10^{-13} เป็น 2.2×10^{-26}
- เซต้า เปลี่ยนจาก 3.2×10^{-12} เป็น 3.2×10^{-24}

โดยลักษณะของกราฟที่ได้จะปรากฏในรูปที่ 39



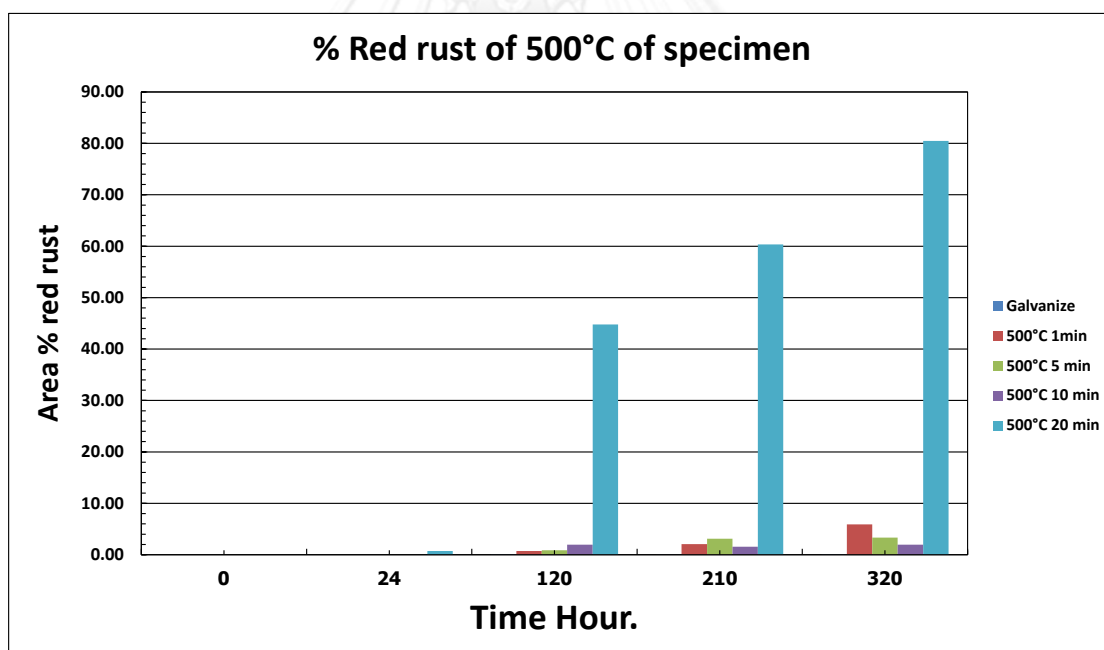
ภาพที่ 38 ภาพแสดงความเข้มข้นของเหล็กในชั้นเคลือบที่ถูกลดค่าสัมประสิทธิ์การแพร่

ซึ่งจากกราฟจะเห็นว่าสามารถลดการโตของเฟสต่างๆได้จริงซึ่งทำให้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีความแม่นยำมากขึ้นได้แต่อย่างไรก็ตามค่าสัมประสิทธิ์การแพร่นั้นจำเป็นที่จะต้องเป็นค่าที่มีความน่าเชื่อถือเพียงพอ[20]

4.3 การศึกษาสมบัติความต้านทานการกัดกร่อนโดยวิธีการทดสอบความต้านทานการกัดกร่อนต่อละอองน้ำเกลือ


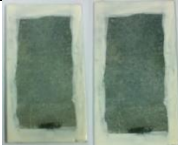
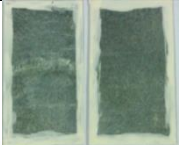
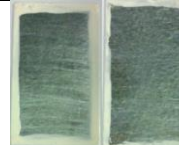
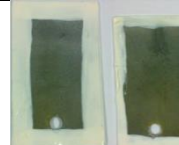
















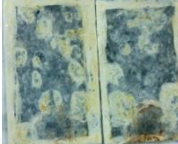
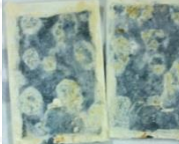


สำหรับการทดสอบความต้านทานการกัดกร่อนต่อละอองน้ำเกลือนั้นชิ้นงานเหล็กชุบสังกะสีแบบกัลวานีลที่ทำกรอบร้อนที่อุณหภูมิ 500°C และที่อุณหภูมิ 550°C ที่เวลา 1, 5, 10 และ 20 นาที จะถูกนำมาทำการทดสอบและเปรียบเทียบกับชิ้นงานเหล็กชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อน โดยชิ้นงานทั้งหมดจะถูกนำเข้าสู่แชมเบอร์โดยจะวางทำมุมประมาณ $15-30^{\circ}$ กับแนวตั้ง จากนั้นทำการพ่นละอองของสารละลายเกลือโซเดียมคลอไรด์ที่มีความเข้มข้น 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ปรับความดันของแชมเบอร์ให้อยู่ที่ 1 บรรยากาศและรักษาค่าพีเอชของสารละลายนั้นให้อยู่ที่ประมาณ 6.5 ถึง 7.2

จากตารางที่ 7 ซึ่งแสดงภาพการพัฒนาของสนิมแดงของชิ้นงานเหล็กชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อน กับชิ้นงานเหล็กชุบสังกะสีแบบกัลวานีลที่ผ่านการอบร้อนที่อุณหภูมิ 500°C ที่เวลา 1, 5, 10 และ 20 นาที เมื่อเวลาผ่านไป 24 ชั่วโมงจะพบว่ามีลักษณะของฝ้าสีขาวเกิดขึ้นในทุกชิ้นงานโดย E. Almeida et al ระบุว่าสนิมขาวที่เกิดจากการทดสอบโดยสนิมขาวที่เห็นคือซิงค์ไฮดรอกไซด์ ($Zn(OH)_2$) ซึ่งจะสามารถหลุดลอกออกได้ง่าย[21] แต่เมื่อทำการสังเกตชิ้นงานที่ผ่านการอบที่ 500°C เป็นเวลา 20 นาทีจะพบว่ามีคราบสีเหลืองปรากฏอยู่บ้างตามผิวของ จากนั้นเมื่อทำการตรวจดูชิ้นงานที่เวลา 120, 220 และ 320 ชั่วโมงจะเห็นว่าพบคราบสีเหลืองอยู่เพียงเล็กน้อยในชิ้นงานเหล็กชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนและเหล็กชุบสังกะสีแบบกัลวานีลที่ทำการอบที่อุณหภูมิ 500°C เป็นเวลา 1, 5 และ 10 นาที โดยผลจากการหาปริมาณของสนิมแดงดังปรากฏในภาพที่ 40 จะพบว่าปริมาณการเกิดสนิมแดงจะแปรผันโดยตรงกับเวลา โดยปริมาณสนิมแดงจะค่อยๆเพิ่มขึ้นตามเวลาที่มากขึ้นแต่ปริมาณจะมีค่าไม่เกิน 5% โดยพื้นที่ สำหรับชิ้นงานที่ทำการอบที่ 20 นาทีนั้นจะพบสนิมสีแดงเกิดขึ้นเป็นปริมาณมากโดยผลจากการวัดปริมาณสนิมแดงนั้นจะพบว่ามีค่าประมาณ 44% โดยพื้นที่ที่เวลา 120 ชั่วโมง จากนั้นจะเพิ่มเป็น 60 และ 80%โดยพื้นที่เมื่อเวลาผ่านไป

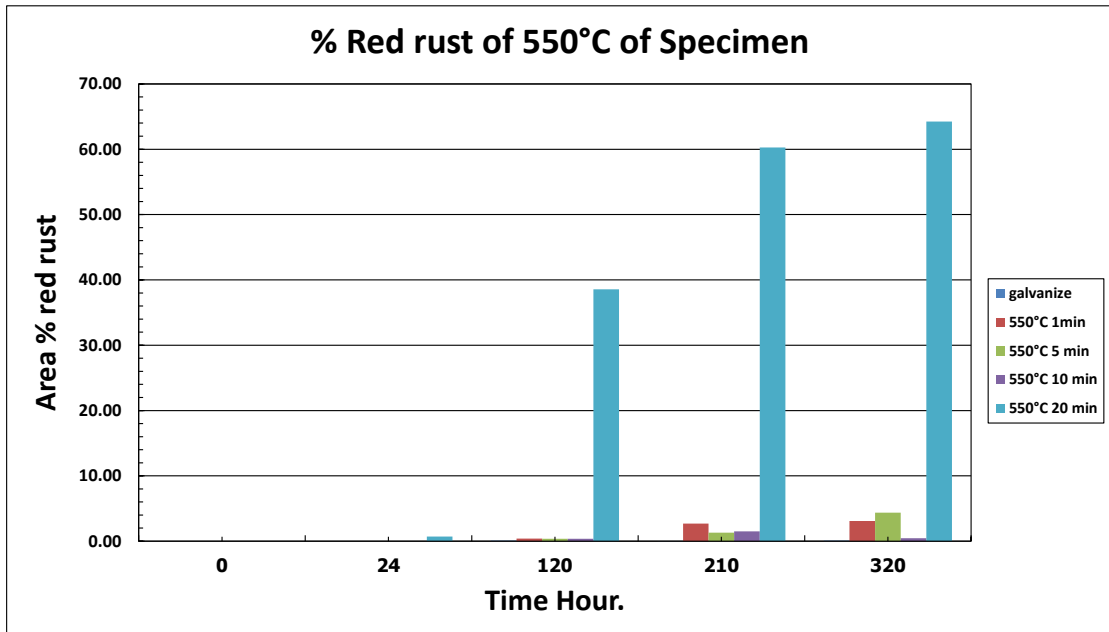


ภาพที่ 39 กราฟแสดงปริมาณของสนิมแดงโดยพื้นที่ของชิ้นงานเหล็กชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนและเหล็กชุบสังกะสีแบบกัลวานีลที่อุณหภูมิ 500°C เป็นเวลา 1, 5, 10 และ 20 นาที

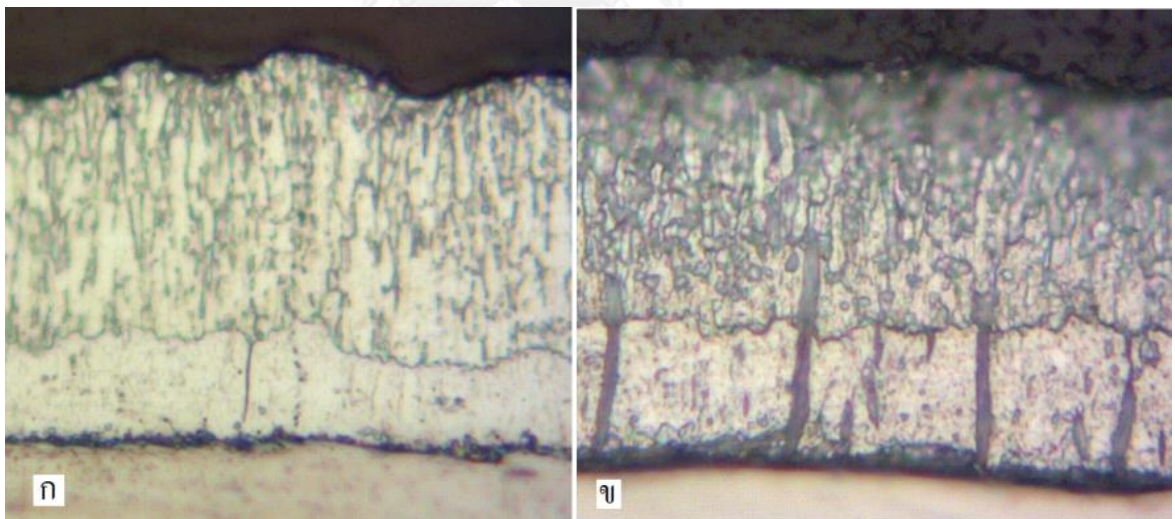
ตารางที่ 7 ตารางแสดงการพัฒนาของสนิมเหล็กจากการทดสอบการต้านทานการกัดกร่อนต่อ
ละอองน้ำเกลือของเหล็กชุบสังกะสีแบบกัลวานีลที่ผ่านการอบที่อุณหภูมิ 500°C

เวลา\ ชิ้นงาน	Galvaniz e	500°C 1minute	500°C 5minute	500°C 10minute	500°C 20 minute
0 ชั่วโมง	 ก	 ข	 ค	 ง	 จ
24 ชั่วโมง	 ฉ	 ช	 ซ	 ฅ	 ญ
120 ชั่วโมง	 ฎ	 ฏ	 ฐ	 ฑ	 ฒ
220 ชั่วโมง	 ณ	 ด	 ต	 ถ	 ท
320 ชั่วโมง	 ธ	 น	 บ	 ป	 ผ

และจากตารางที่ 8 ซึ่งแสดงภาพการพัฒนาของชิ้นงานเหล็กชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนกับชิ้นงานเหล็กชุบสังกะสีแบบกัลวานีลที่ผ่านการอบร้อนที่อุณหภูมิ 550°C ที่เวลา 1, 5, 10 และ 20 นาที จะพบว่าที่เวลา 1, 5 และ 10 นาทีนั้นปริมาณของสนิมแดงต่อพื้นที่นั้นมีค่าไม่ต่างกับช่วงอุณหภูมิอบร้อนที่ 550°C คือ โดยจากภาพที่ 41 จะพบว่าปริมาณของสนิมแดงจะค่อยๆเพิ่มขึ้นตามเวลาที่เปลี่ยนแปลงไปแต่ปริมาณของสนิมแดงที่เกิดขึ้นก็จะมีปริมาณไม่เกิน 5% โดยพื้นที่ และสำหรับชิ้นงานที่ผ่านการอบที่ 20 นาทีนั้นก็จะเกิดสนิมแดงขึ้นอย่างรวดเร็วคล้ายกับชิ้นงานที่ผ่านการอบร้อนที่อุณหภูมิ 550°C โดยค่าจะเพิ่มจากปริมาณ 38%โดยพื้นที่เป็น 60% โดยพื้นที่แต่ปริมาณจะเพิ่มขึ้นเล็กน้อยโดยที่เวลา 320 ชั่วโมงปริมาณสนิมแดงจะอยู่ที่ 65%โดยพื้นที่


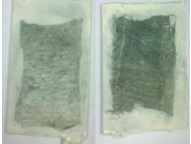

























ภาพที่ 40 กราฟแสดงปริมาณของสนิมแดงโดยพื้นที่ของชิ้นงานเหล็กชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนและเหล็กชุบสังกะสีแบบกัลวานีลที่อุณหภูมิ 500°C เป็นเวลา 1, 5, 10 และ 20 นาที



ภาพที่ 41 ภาพแสดงโครงสร้างทางจุลภาคของชิ้นเคลือบกัลวานีลที่ที่อบร้อนที่เวลา 20 ที่ ก) 500°C และ ข) 550 °C

ตารางที่ 8 ตารางแสดงการพัฒนาของสนิมเหล็กจากการทดสอบการต้านทานการกัดกร่อนต่อ
ละอองน้ำเกลือของเหล็กชุบสังกะสีแบบกัลวานีลที่ผ่านการอบที่อุณหภูมิ 550°C

เวลา ชิ้นงาน	Galvanize	550°C 1minute	550°C 5minute	550°C 10minute	550°C 20minute
0 ชั่วโมง					
	ก	ข	ค	ง	จ
24 ชั่วโมง					
	ฉ	ช	ซ	ฅ	ญ
120 ชั่วโมง					
	ฎ	ฏ	ฐ	ฑ	ฒ
220 ชั่วโมง					
	ณ	ด	ต	ถ	ท
320 ชั่วโมง					
	ธ	น	บ	ป	ผ

จากภาพของการพัฒนาของสนิมแดงที่เกิดขึ้นกับชิ้นงานเหล็กชุบสังกะสีแบบกัลวานีลที่ทำการอบร้อนที่อุณหภูมิและเวลาต่างกัันดังที่ปรากฏในตารางที่ 7 และ 8 และกราฟแสดงปริมาณของ

สนิมแดงที่เกิดขึ้นดังที่ปรากฏในรูป 40 และ 41 จะพบว่าชิ้นงานที่ผ่านการอบร้อนที่เวลา 20 นาที ทั้งที่อุณหภูมิ 500°C และ 550 °C นั้นจะมีการเกิดสนิมแดงที่มากกว่าชิ้นงานอื่นเป็นอย่างมากเหตุผลที่เกิดสนิมแดงขึ้นมากนั้นเกิดจากความแตกต่างของเฟสที่ปรากฏที่ผิวชั้นเคลือบมีความแตกต่างกัน เนื่องจากที่ผิวของชั้นเคลือบของชิ้นงานที่ผ่านการอบที่ 20 นาทีทั้งที่อุณหภูมิ 500°C และ 550 °C จะพบชั้นของเฟสเซต้าที่ผิวซึ่งจากการรายงานผลการวัดปริมาณของเหล็กจะอยู่มีประมาณ 5-6 โดยน้ำหนัก แต่สำหรับชิ้นงานอื่น ๆ นั้นจะเป็นชั้นของเอด้าซึ่งมีปริมาณของเหล็กที่น้อยมาจนในงานวิจัยหลายๆชิ้นระบุว่าไม่มีเหล็กอยู่ในชั้นนี้เลย ซึ่งจากการการที่เซต้าเฟสนั้นมีปริมาณของเหล็กในเฟสที่มากกว่าทำให้เกิดการสร้างสนิมแดงที่มากกว่าชิ้นงานอื่นที่ชั้นนอกสุดเป็นเฟสเอด้าและนอกจากนี้เนื่องจากชั้นของเซต้ามีความเป็นคอลัมน์จึงมีความเป็นไปได้ว่าจะมีการเกิดสนิมตามคอลัมน์นั้นทำให้ปริมาณสนิมแดงที่พบมีปริมาณมาก ซึ่งผลจากการหาปริมาณเหล็กในชั้นเคลือบของชิ้นงานที่ทำการอบร้อนที่อุณหภูมิ 500°C เป็นเวลา 20 นาที ด้วยกระบวนการ EPMA นั้นจะพบว่าเหล็กอยู่ที่ประมาณ 2.5% โดยน้ำหนักแต่จากภาพโครงสร้างทางจุลภาคจะพบว่าเป็นเฟสของเซต้าจึงอาจกล่าวได้ว่าโครงสร้างทางจุลภาคที่ผิวของชั้นเคลือบส่งผลอย่างมากต่อการเกิดสนิมแดงที่ผิวของชั้นเคลือบ

จากผลของการหาปริมาณสนิมแดงต่อพื้นที่ที่เกิดขึ้นหลังจากทำการทดสอบการกัดกร่อนต่อละอองน้ำเกลือชิ้นงานที่ผ่านการอบร้อนเป็นเวลา 20 นาทีซึ่งจากภาคตัดขวาง นั้นระบุว่าเป็เฟสของเซตานั้นจะพบว่าเกิดสนิมแดงประมาณ 80% โดยพื้นที่เมื่อทำการอบที่อุณหภูมิอบ 500°C และประมาณ 65% โดยพื้นที่เมื่อทำการอบที่อุณหภูมิ 550°C ซึ่งจากงานทดลองนี้อาจกล่าวได้ว่าเมื่อเฟสที่ผิวของชั้นเคลือบเปลี่ยนแปลงไปเป็นเฟสที่มีปริมาณของเหล็กที่มากขึ้นโอกาสที่สนิมแดงที่เกิดขึ้นก็มีแนวโน้มที่จะมากขึ้นด้วยซึ่งจากประเด็นนี้เองทำให้มีความน่าสนใจอีกประเด็นหนึ่ง คือ ถ้าผิวนอกสุดของชั้นเคลือบนั้นเป็นเฟสของเดลต้าหรือแกมมาจะมีแนวโน้มในการเกิดสนิมแดงอย่างไรโดยเมื่อทำการวิเคราะห์ผลงานการวิจัยของ H.Y.Ha et al[22] ซึ่งได้ทำการหาค่าศักย์ไฟฟ้าในการกัดกร่อน E_{corr} และความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน i_{corr} ของชั้นเคลือบจากกระบวนการโพเทนชิโอสแตติกนั้นจะพบว่าค่า E_{corr} และ i_{corr} ของแต่ละเฟสนั้นจะมีค่าดังตาราง

ตารางที่ 9 แสดงค่า E_{corr} และ i_{corr} ของชั้นงานกัลวานีล

Each phase and galvanic couple		$i_{\text{corr}} / \text{mA cm}^{-2}$	$E_{\text{corr}} / \text{Vsec}$
Measured	Estimate		
ζ		0.565	-0.991
$\zeta - \delta$		1.641	-0.952
	δ	0.619	-0.909
$\delta - \Gamma$		2.089	-0.875
	Γ	0.608	-0.814
$\Gamma - \text{substrate}$		3.133	-0.782
substrate		0.479	-0.651

ซึ่งจากค่าในตารางจะเห็นว่าในแต่ละเฟสนั้นมีค่าของ i_{corr} และ E_{corr} ที่ต่างกันและเมื่อพิจารณาจากค่า i_{corr} ของแต่ละเฟสจะพบว่า i_{corr} ของเฟสเซตานั้นมีค่าต่ำที่สุดรองลงมาคือ เฟสเดลต้า และแกมมาซึ่งมีค่าใกล้เคียงกันซึ่งอาจกล่าวได้ว่าชั้นของเฟสเซตานั้นมีความต้านทานการกัดกร่อนสูงกว่าเฟสอื่นๆ จากค่าของ i_{corr} ที่ไม่เท่ากันนี้เองถือเป็นแนวทางในการออกแบบลักษณะของชั้นเคลือบของเหล็กชุบสังกะสีแบบกัลวานีลที่มีความต้านทานการกัดกร่อนที่เหมาะสมได้ โดยถ้าต้องการให้เหล็กชุบสังกะสีแบบกัลวานีลที่มีผิวออกสุดเป็นเฟสของชั้นสารประกอบโลหะให้มีความต้านทานการกัดกร่อนสูงนั้นจำเป็นที่จะต้องควบคุมให้ชั้นของเฟสเซตามีความหนาและมีความหนาที่สม่ำเสมอเนื่องจากถ้าพิจารณาที่ค่าของ i_{corr} ที่รอยต่อของชั้นเซต่าและเดลตานั้นจะพบว่าค่า i_{corr} ของรอยต่อนั้นมีค่ามากกว่า i_{corr} ของเฟสเซต่าและเดลต้า ถึงประมาณ 3 เท่าซึ่งถ้าชั้นเคลือบมีความสม่ำเสมอแล้วจะทำให้เกิดการกัดกร่อนเฉพาะที่ (localize corrosion) ได้ยากขึ้น

นอกจากวิจัยนี้ยังมีส่วนอื่นที่น่าสนใจในการทดสอบเพิ่มเติมเพื่อทำให้งานวิจัยในส่วนของความต้านทานการกัดกร่อนมีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น เช่น การตรวจสอบความลึกสนิมและลักษณะของการกัดกร่อนที่เกิดขึ้นในชั้นเคลือบว่าเป็นอย่างไร เพราะจากรายงานของ E.Almeida et al.[23; 24] กล่าวว่าสนิมแดงที่เกิดขึ้นนั้นจะทำตัวเป็นชั้นป้องกันการกัดกร่อนทำให้ความลึกจากการกัดกร่อนค่าน้อยลงกว่าแม้จะเกิดสนิมแดงที่ผิวมากกว่าก็ตามและในกรณีที่มีการอบร้อนชิ้นงานเหล็กชุบสังกะสีแบบกัลวานีลให้มีชั้นของเอาต้าเหลืออยู่จะส่งผลต่อลักษณะของการกัดกร่อนจะเป็นไปในลักษณะใดเนื่องจากผลการทดสอบความต้านทานการกัดกร่อนต่อละอองน้ำเกลือของชิ้นงานทดสอบเมื่อทำการอบร้อนที่ 320 นาที่กลับมีปริมาณของสนิมแดงที่น้อยลงทั้งที่ปริมาณของชั้นเอาต้าที่ผิวน้อยลงกว่าเดิมซึ่งประเด็นนี้อาจเป็นผลมาจากการที่เกิดการเปลี่ยนแปลงของระนาบที่ผิวของชั้นเคลือบซึ่ง H.Asgari et al [25] รายงานไว้ว่าระนาบของเฟสเอต่านั้นส่งผลต่อสมบัติการต้านทานการกัดกร่อน

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

สำหรับงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาจลนพลศาสตร์และการพัฒนาโครงสร้างทางจุลภาคของเหล็กชุบสังกะสีที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อน โดยทำการอธิบายการพัฒนาของเฟสต่างๆในชั้นเคลือบโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยสามารถสรุปผลได้ดังนี้

1. สำหรับการพัฒนาแบบจำลองที่ใช้ในการอธิบายการพัฒนาของเฟสต่างๆในชั้นเคลือบแบบบางนั้นให้ผลเป็นที่น่าพอใจในส่วนของเวลาในการอบไม่เกิน 10 วินาทีที่จะได้ค่าของความเข้มข้นของเหล็กในชั้นเคลือบที่ใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากผลของ EDS โดยเฉพาะความหนาของเฟสเคลตตันั้นมีความผิดพลาดประมาณ 7% เท่านั้น
2. สำหรับการพัฒนาแบบจำลองที่ใช้ในการอธิบายการพัฒนาของเฟสต่างๆในชั้นเคลือบที่มีความหนามากนั้นได้ผลเป็นที่น่าพอใจในช่วงเวลาการอบ 1 นาที โดยเฉพาะค่าความหนาของเฟส Zeta นั้นมีผลที่น่าพึงพอใจโดยมีความผิดพลาดเพียง 15% เท่านั้นโดยเมื่อเทียบกับความไม่ซับซ้อนของกระบวนการคำนวณ
3. ผลของการทดสอบความต้านทานการกัดกร่อนของล่องเกลือพบว่าที่เวลาการอบ 1,5 และ 10 นาที ที่อุณหภูมิ 500°C และ 550°C นั้นให้ผลที่ไม่แตกต่างจากชิ้นงานเหล็กชุบสังกะสีที่ไม่ได้ผ่านการอบมากนักโดยเมื่อเวลาผ่านไป 320 ชั่วโมงก็จะมีปริมาณของสนิมแดงน้อยกว่า 5% โดยพื้นที่แต่สำหรับชิ้นงานที่ผ่านการอบเป็นเวลา 20 นาทีนั้นจะพบว่าที่ทั้ง 2 อุณหภูมิจะเกิดสนิมแดงถึงประมาณ 80% โดยพื้นที่
4. สำหรับผลของเวลาที่ส่งผลต่อลักษณะของชั้นเคลือบนั้นจะพบว่าที่เวลาการอบ 1, 5 และ 10 ที่อุณหภูมิ 500°C และ 550°C นั้นจะไม่ส่งผลต่อลักษณะภายนอกมากนักแต่จะส่งผลต่อ โครงสร้างภายในคือจะทำให้ชั้นของเฟสซีตานั้นมีความเป็นคอลัมน์น้อยลงแต่ที่เวลาอบ 20°C ส่งผลอย่างชัดเจนคือ จะทำให้ชั้นของเอต้าหลอมเหลวส่งผลให้ที่ผิวนอกสุดเป็นชั้นของเซต้า และเมื่อทำการทดสอบความต้านทานต่อล่องเกลือทำให้ได้ค่าความต้านทานน้อยกว่าชิ้นงานอื่นๆ
5. สำหรับผลกระทบของอุณหภูมิต่อชิ้นงานนั้นผลที่ได้ไม่แสดงความแตกต่างมากนักเนื่องจากความต่างของอุณหภูมิจึงไม่มากพอ

ข้อเสนอแนะ

เนื่องจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ยังแสดงผลได้ไม่ดีนักที่เวลาการอบนานและผลของการทดสอบความต้านทานการกัดกร่อนยังมีช่องว่างให้ศึกษาอยู่มากจึงมีข้อเสนอแนะเพื่อทำให้งานวิจัยมีความสมบูรณ์ดังนี้

1. ปรับปรุงโมเดลให้มีความแม่นยำสูงขึ้นโดยปรับปรุงการประมาณการแบ่งแยกรอยต่อของชั้นเคลือบให้แม่นยำกว่านี้โดยอาจใช้กระบวนการเขียนโปรแกรมขั้นสูงมาช่วย
2. เพิ่มอิทธิพลของอุณหภูมิศาสตร์เข้ามาในชุดคำนวณเพิ่มความแม่นยำ
3. ทำการศึกษาความสามารถของความต้านทานการกัดกร่อนในเชิงลึก เช่นมีการ หาความสัมพันธ์ของสนิมที่กินเข้าไปในเนื้อชั้นเคลือบแล้วนำมาเปรียบเทียบว่ามีความลึกเท่าใดเพราะการหาพื้นที่ของสนิมแดงที่ผิวอาจไม่เพียงพอเนื่องจากการรายงานว่า สนิมที่เกิดขึ้นจะทำตัวเป็นฉนวนป้องกันการกัดกร่อน

รายการอ้างอิง

- [1] N. Bandyopadhyay, G. Jha, A.K. Singh, T.K. Rout, N. Rani, Surface and Coatings Technology 200 (2006) 4312-4319.
- [2] A.R. Marder, Progress in Materials Science 45 (2000) 191-271.
- [3] F.E. Goodwin, Transactions of the Indian Institute of Metals 66 (2013) 671-676.
- [4] X. Su, P. Xu, Y. Liu, J. Wang, H. Tu, C. Wu, H. Peng, Surface and Coatings Technology 206 (2012) 5012-5021.
- [5] D.R.P.G.H. Geiger, Transport Phenomena in Materials Process, TMS, 1994.
- [6] C.F.G.a.P.O. Wheatley, Applied Numerical Analysis, Addison Wesley Longman, 1997.
- [7] B. PJ., Acta Crystall 15 (1962) 608.
- [8] d.B.E. Gellings PJ, Gierman G. , Z Metallkde 70 (1979) 312.
- [9] A.R.M. C. E. JORDAN, JOURNAL OF MATERIALS SCIENCE 32 (1997) 5593 - 5602.
- [10] v.L.F. Bastin GF, Rieck GD., Z Metallkde 68 (1977) 359.
- [11] G.G. Gellings PJ, Koster D, Kuit J., Z Metallkde 71 (1980) 70.
- [12] M. TB., Phase Diagrams. ASM Metals Handbook 1992, 1992.
- [13] M.A. Jordan CE, Met Mater Trans 25a (1994) 937.
- [14] Y.W. Toshitada Shimosaki, Masami Onishi, ISIJ International 33 (1993) 1003-1008.
- [15] A.K. Verma, S. Chandra, B.K. Dhindaw, R.D.K. Misra, Materials Science and Engineering: A 418 (2006) 335-340.
- [16] J.M. Brossard, B. Panicaud, J. Balmain, G. Bonnet, Acta Materialia 55 (2007) 6586-6595.
- [17] D.J. Claus G, De Cooman BC, Meers U., GALVATECH '95, Chicago, IL: Iron and Steel Society (1995) 107.
- [18] Syahbuddin, P.R. Munroe, B. Gleeson, Materials Science and Engineering: A 264 (1999) 201-209.
- [19] H. D., Formation and growth of iron-zinc alloy layers, London: Zinc Development Association.
- [20] K. Bai, P. Wu, Journal of Alloys and Compounds 347 (2002) 156-164.
- [21] E. Almeida, M. Morcillo, Surface and Coatings Technology 124 (2000) 169-179.
- [22] H.Y. Ha, S.J. Park, J.Y. Kang, H.D. Kim, M.B. Moon, Corrosion Science 53 (2011) 2430-2436.
- [23] E. Almeida, M. Morcillo, Surface and Coatings Technology 124 (2000) 180-189.
- [24] E. Almeida, M. Morcillo, Surface and Coatings Technology 124 (2000) 44-52.
- [25] H. Asgari, M.R. Toroghinejad, M.A. Golozar, Current Applied Physics 9 (2009) 59-66.



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY



ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาคผนวก ก

โค้ดที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของชั้นเคลือบบาง

สำหรับโค้ดที่ใช้ในการคำนวณนั้นจะทำการพัฒนาลงในโปรแกรม Dev-C++ โดยทำการแบ่งระยะของการคำนวณออกเป็น 1000 ช่อง ทำการคำนวณทั้งหมด 60000000 รอบการคำนวณ การเลือกค่าของ D ในแต่ละช่องการคำนวณตามที่ได้ระบุไว้ในส่วนของ ค่า Critical Concentration

```
// Call function
```

```
#include<iostream>
```

```
#include<math.h>
```

```
#include<fstream>
```

```
#include<string>
```

```
using namespace std;
```

```
main()
```

```
{//main
```

```
    // Insert Variable
```

```
    double T = 773.00;
```

```
    double R = 8.314;
```

```
    double DZet = 1.85e-11;
```

```
    double DDel = 3.36e-13;
```

```
    double D0Gam1 = 2.04e-8;
```

```
    double QGam1 = 80000.00;
```

```
    double DGam1 = D0Gam1*exp(-QGam1/(R*T));
```

```
    double D0Gam = 5.0e-9;
```

```
double QGam = 85350.00;

double DGam = D0Gam*exp(-QGam/(R*T));

double DAda = 1.0e-10;

double D = 0.0;

double dt = 5.0e-7;

double dx = 1.1e-8;

double tx = dt/(dx*dx);

double comp_str[1000];

double comp_bef[1000];

double comp_aft[1000];

int i;

// 60 sec mod every 5 sec 12 file

// set initial concentration

comp_str[0]=28.29;

for(i=1;i<1000;i++){

comp_str[i] = 0.00;}

{ofstream output ("tmetc_9_0sec.txt");

for(i=0;i<1000;i++){

comp_bef[i]=comp_str[i];

output<<comp_bef[i]<<","<<i<<endl;}

}
```

```

//Calculation for concentration of each node

for(int t=1;t<60000001;t++){//time

    comp_bef[0]=28.29;

    for(i=1;i<1000;i++){//node

        // select D for each node

        if (comp_bef[i]<=2.5){

            D=DAda;}

        else if(comp_bef[i]>2.5  && comp_bef[i]<=6.5){

            D=DZet;}

        else if(comp_bef[i]>6.5  && comp_bef[i]<=14.25){

            D=DDel;}

        else if(comp_bef[i]>14.25 && comp_bef[i]<=21.5){

            D=DGam1;}

        else {

            D=DGam;}

        comp_aft[i]= comp_bef[i]+D*tx*(comp_bef[i+1]-2*comp_bef[i]+comp_bef[i-1]);

    }//node

    comp_aft[999]=comp_bef[999]+D*tx*(comp_bef[998]-

2*comp_bef[999]+comp_bef[998]);

    // print out

    if(t==10000000){

        ofstream output ("tmetc_9_5sec.txt");

```

```
output<<comp_aft[0]<<","<<"0"<<","0"<<endl;

for(i=1;i<1000;i++){

    output<<comp_aft[i]<<","<<i<<","<<(i*dx)<<endl;}

}

//print out result
else if(t==20000000){

    ofstream output ("tmetc_9_10sec.txt");

    output<<comp_aft[0]<<","<<"0"<<","0"<<endl;

    for(i=1;i<1000;i++){

        output<<comp_aft[i]<<","<<i<<","<<(i*dx)<<endl;}

    }

else if(t==30000000){

    ofstream output ("tmetc_9_15sec.txt");

    output<<comp_aft[0]<<","<<"0"<<","0"<<endl;

    for(i=1;i<1000;i++){

        output<<comp_aft[i]<<","<<i<<","<<(i*dx)<<endl;}

    }

else if(t==40000000){

    ofstream output ("tmetc_9_20sec.txt");

    output<<comp_aft[0]<<","<<"0"<<","0"<<endl;

    for(i=1;i<1000;i++){
```

```
        output<<comp_aft[i]<<","<<i<<","<<(i*dx)<<endl;
    }
else if(t==50000000){
    ofstream output ("tmetc_9_25sec.txt");
    output<<comp_aft[0]<<","<<"0,0"<<endl;
    for(i=1;i<1000;i++){
        output<<comp_aft[i]<<","<<i<<","<<(i*dx)<<endl;
    }
else if(t==60000000){
    ofstream output ("tmetc_9_30sec.txt");
    output<<comp_aft[0]<<","<<"0,0"<<endl;
    for(i=1;i<1000;i++){
        output<<comp_aft[i]<<","<<i<<","<<(i*dx)<<endl;
    }
// return value
for(i=0;i<1000;i++){
    comp_bef[i]=comp_aft[i];}

} //time

//cal
system("pause");

} //main
```


// End of calculation program



ภาคผนวก ข

โค้ดที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของชั้นเคลือบหนา

สำหรับโค้ดที่ใช้ในการคำนวณนั้นจะทำการพัฒนาลงในโปรแกรม Dev-C++ โดยทำการแบ่งระยะของการคำนวณออกเป็น 900 ช่อง ทำการคำนวณทั้งหมด 96000001 รอบการคำนวณ การเลือกค่าของ D ในแต่ละช่องการคำนวณตามที่ได้ระบุไว้ในส่วนของ ค่า Critical Concentration

```
// Call function

#include<iostream>

#include<math.h>

#include<fstream>

#include<string>

using namespace std;

main()

{//main

    // Insert variable

    double T = 773.00;

    double R = 8.314;

    double D0Zet = 4.0e-7;

    double QZet = 75300.00;

    double DZet = D0Zet*exp(-QZet/(R*T));

    double D0Del = 1.0e-7;

    double QDel = 83700.00;

    double DDel = D0Del*exp(-QDel/(R*T));
```

```
double D0Gam1 = 2.04e-8;

double QGam1 = 80000.00;

double DGam1 = D0Gam1*exp(-QGam1/(R*T));

double D0Gam = 5.0e-9;

double QGam = 85350.00;

double DGam = D0Gam*exp(-QGam/(R*T));

double D0Eta = 1.0e-6;

double QEta = 104600.00;

double DEta = D0Eta*exp(-QEta/(R*T));

double D = 0.0;

double dt = 1.25e-5;

double dx = 5.0e-8;

double tx = dt/(dx*dx);

double comp_str[900];

double comp_bef[900];

double comp_aft[900];

int i;

int t;

// 20 minute

// set initial concentration profile using liner equation

    comp_str[0]=28.29;
```

```

for(i=1;i<21;i++){

comp_str[i] = (-1.0395*(i))+28.29;}

for(i=21;i<421;i++){

comp_str[i] = -0.00483*i+7.596;}

for(i=421;i<651;i++){

comp_str[i]=-0.01997*i+13.9554;}

for(i=651;i<900;i++){

comp_str[i]=-0.001176*i+1.7384;}

{ofstream output ("Test_liner_int_u10.txt");

for(i=0;i<900;i++){

    comp_bef[i]=comp_str[i];

    output<<comp_bef[i]<<","<<i<<endl;}

}

//Start Calculation
for(t=1;t<96000001;t++){//tine

    comp_bef[0]=28.29;

    // select D for each node

    for(i=1;i<899;i++){//node

        if (comp_bef[i]<=2.5){

            D=DEta;}

```

```

else if(comp_bef[i]>2.5  && comp_bef[i]<=6.5){

    D=DZet;}

else if(comp_bef[i]>6.5  && comp_bef[i]<=14.25){

    D=DDel;}

else if(comp_bef[i]>14.25 && comp_bef[i]<=21.5){

    D=DGam1;}

else {

    D=DGam;}

    comp_aft[i]= comp_bef[i]+D*tx*(comp_bef[i+1]-2*comp_bef[i]+comp_bef[i-1]);

} //node

    comp_aft[899]=comp_bef[899]+D*tx*(comp_bef[898]-
2*comp_bef[899]+comp_bef[898]);

// print out result

if(t==80000){

    ofstream output ("Test_liner_Code_u10_1sec.txt");

    output<<comp_aft[0]<<","<<"0"<<","<<0"<<endl;

    for(i=1;i<900;i++){

        output<<comp_aft[i]<<","<<i<<","<<(i*dx)<<endl;}

    }

else if(t==4800000){

    ofstream output ("Test_liner_Code_u10_60sec.txt");

    output<<comp_aft[0]<<","<<"0"<<","<<0"<<endl;

```

```
for(i=1;i<900;i++){  
    output<<comp_aft[i]<<","<<i<<","<<(i*dx)<<endl;}  
}  
else if(t==24000000){  
    ofstream output ("Test_liner_Code_u10_300sec.txt");  
    output<<comp_aft[0]<<","<<"0"<<"0"<<endl;  
    for(i=1;i<900;i++){  
        output<<comp_aft[i]<<","<<i<<","<<(i*dx)<<endl;}  
    }  
else if(t==48000000){  
    ofstream output ("Test_liner_Code_u10_600sec.txt");  
    output<<comp_aft[0]<<","<<"0,0"<<endl;  
    for(i=1;i<900;i++){  
        output<<comp_aft[i]<<","<<i<<","<<(i*dx)<<endl;}  
    }  
else if(t==96000000){  
    ofstream output ("Test_liner_Code_u10_1200sec.txt");  
    output<<comp_aft[0]<<","<<"0,0"<<endl;  
    for(i=1;i<900;i++){  
        output<<comp_aft[i]<<","<<i<<","<<(i*dx)<<endl;}  
    }  
}
```

```
for(i=0;i<900;i++){  
  
    comp_bef[i]=comp_aft[i];  
  
} //time  
  
//cal  
  
system("pause");  
  
} //mai
```



ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

ชื่อ - นามสกุล : นายหลักชัย ชันธน์ภา
วัน-เดือน-ปีเกิด : 22 ธันวาคม 2531
ที่อยู่ : 3 ซอยทานสัมฤทธิ์ 32/3 ต.ท่าทราย อ.เมือง
จ.นนทบุรี
11000
วุฒิการศึกษา : - สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาบัณฑิต
ภาควิชาวิศวกรรมโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปีการศึกษา 2553
- สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาโท
ภาควิชาวิศวกรรมโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปีการศึกษา 2556
อีเมลล์ : lt14584@hotmail.com