

การวิเคราะห์ชั้นฟิล์มบนผิวเหล็กกล้าไร้สนิมอสเทนติกและเฟอร์ติกที่ผสม
โครเมียมและนิกเกิลด้วยเอ็กซ์พีเอส

นาย สวริษฐ ชัยกิตติศิลป์

สถาบันวิทยบริการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโลหการ ภาควิชาวิศวกรรมโลหการ

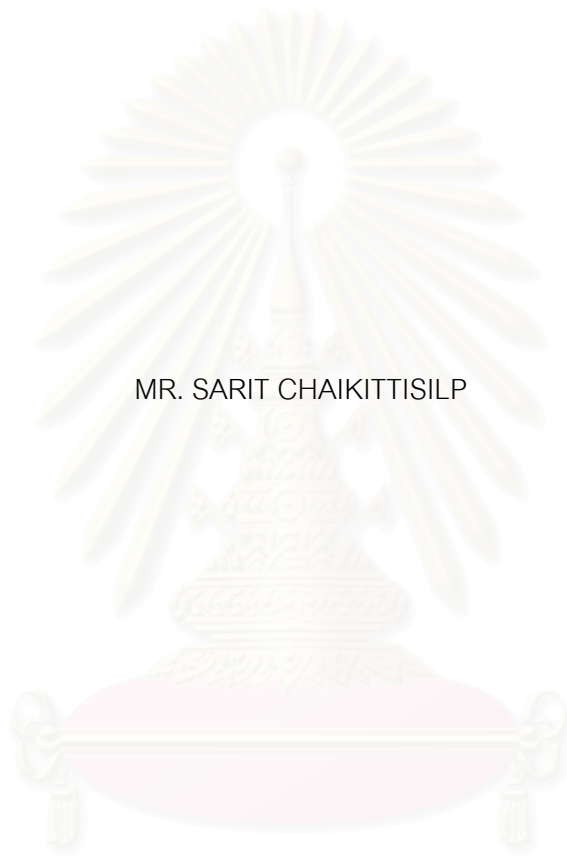
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2543

ISBN 974-13-0457-9

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

INVESTIGATION OF SURFACE FILM OF Fe-Cr-Ni AUSTENITIC AND
FERRITIC STAINLESS STEELS BY XPS



MR. SARIT CHAIKITTISILP

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

Department of Metallurgical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2000

ISBN 974-13-0457-9

สารบัญ ชัยกิตติศิลป์: การวิเคราะห์ชั้นฟิล์มบนผิวเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิติกและเฟอริติกที่ผสมโครเมียมและนิกเกิลด้วยเอกซ์พีเอส. (INVESTIGATION OF SURFACE FILM OF Fe – Cr – Ni AUSTENITIC AND FERRITIC STAINLESS STEELS BY XPS) อ.ที่ปรึกษา : ผศ.ดร. กอบบุญ หล่อทองคำ, 95 หน้า. ISBN 975 – 13 – 0457 – 9

งานวิจัยนี้ศึกษาลักษณะของชั้นฟิล์มที่ผิวเหล็กกล้าไร้สนิมเฟอริติกและออสเทนิติกที่มีโครเมียมผสม 20 ถึง 39 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และนิกเกิลผสม 4 ถึง 29 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก หลังจากทิ้งไว้ในอากาศ 24 ชั่วโมงด้วยเทคนิคเอกซ์พีเอส ชั้นฟิล์มของเหล็กกล้าไร้สนิมทั้ง 2 เกรดมีลักษณะคล้ายกัน ชั้นฟิล์มประกอบด้วย 2 ส่วน ชั้นนอกเป็นชั้นไฮดรอกไซด์ของโครเมียม ชั้นในเป็นออกไซด์ของโครเมียม ชั้นออกไซด์โครเมียมอาจแบ่งออกได้เป็น 2 ส่วนคือ ชั้นออกไซด์ของโครเมียมและเหล็กรวมกับโลหะเหล็ก และชั้นออกไซด์ของโครเมียมรวมกับโลหะโครเมียม เหล็ก และนิกเกิล ความหนาของชั้นออกไซด์ของโครเมียมจะน้อยลงเมื่อเพิ่มปริมาณโครเมียมในเหล็กกล้าไร้สนิม แต่ชั้นออกไซด์ของโครเมียมและเหล็กรวมกับโลหะเหล็กจะมีความหนามากขึ้น ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของชั้นออกไซด์ของโครเมียมและเหล็กรวมกับโลหะเหล็กกับปริมาณโครเมียมเป็นเส้นโค้งรูปตัวเอส ซึ่งมีลักษณะคล้ายกับความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณโครเมียมกับค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนแบบรูพูน ดังนั้นการต้านทานการกัดกร่อนแบบรูพูนของเหล็กกล้าไร้สนิมอาจเป็นผลมาจากความหนาของชั้นออกไซด์ของโครเมียมและเหล็กรวมกับโลหะเหล็ก ชั้นออกไซด์ของโครเมียมและเหล็กรวมกับโลหะเหล็กอาจจะมีส่วนประกอบของโลหะนิกเกิลขึ้นกับส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้าไร้สนิม โดยทั่วไปในเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิติกจะมีโอกาสพบโลหะนิกเกิลในชั้นออกไซด์ของโครเมียมและเหล็กรวมกับโลหะเหล็กมากกว่าในเหล็กกล้าไร้สนิมเฟอริติก ชั้นฟิล์มออกไซด์ของโครเมียมและเหล็กที่มีโลหะนิกเกิลผสมอาจจะช่วยเพิ่มการต้านทานการกัดกร่อน

ภาควิชา วิศวกรรมโลหการ ลายมือชื่อนิสิต

สาขาวิชา วิศวกรรมโลหการ ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา

ปีการศึกษา 2543

4170578121: MAJOR METALLURGICAL ENGINEERING

KEY WORD: XPS/ PASSIVE FILM/ FERRITIC STAINLESS STEELS/
AUSTENITIC STAINLESS STEELS

SARIT CHAIKITTISILP: INVESTIGATION OF SURFACE FILM OF Fe – Cr – Ni AUSTENITIC AND FERRITIC STAINLESS STEELS BY XPS. THESIS ADVISOR : ASST. PROF. Dr. – Ing. GOBBOON LOTHONGKOM, 95 pp. ISBN 974 – 13 – 0457 - 9

This work investigates the surface film of ferritic and austenitic stainless steels, which has chromium contents of 20 - 39 Wt% and nickel contents of 4 - 29 Wt%, after exposure in air 24 h by XPS technique. The surface films of both stainless steel grades are similar, which compose of 2 layers: the chromium hydroxide and chromium oxide layers. The chromium oxide layer can be divided to be 2 layers: the chromium and iron oxide with iron, and the chromium oxide with chromium, iron and nickel layers. The thickness of chromium oxide layer decrease as the chromium contents in alloy increase, but the thickness of the chromium and iron oxide layer with iron increase. The relation between chromium contents and the thickness of the chromium and iron oxide layer with iron look like the S curve of that between chromium contents and pitting potentials. It may be said that the pitting corrosion resistant of stainless steels depends on the thickness of the chromium and iron oxide layer with iron. Nickel may participate in the chromium oxide layer. Generally, the possibility to detect nickel in the chromium oxide layer is higher in austenitic stainless steels than in ferritic stainless steels. The surface film contained nickel may increase the corrosion resistant of stainless steels.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Department...METALLURGICAL ENGINEERING..... Student's signature.....
Field of study...METALLURGICAL ENGINEERING..... Advisor's signature.....
Academic year.....2000.....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งของผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กอบบุญ หล่อทองคำ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งได้ให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่างๆ ในการวิจัยด้วยดีมาตลอด ตลอดจนรองศาสตราจารย์ ดร.ประสงค์ ศรีเจริญชัย ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุมาลี วงศ์จันทร์ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ อีกทั้งอาจารย์และเจ้าหน้าที่ทุกคนในภาควิชา วิศวกรรมโลหการที่คอยให้ความช่วยเหลือ ให้คำปรึกษา ตลอดจนคำแนะนำต่างๆ เนื่องจากงานวิจัยได้รับการสนับสนุนเงินทุนจากสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย ผู้เขียนขอขอบคุณมา ณ ที่นี้ด้วย

ทั้งนี้ผู้เขียนใคร่ขอขอบคุณ บิดา – มารดา ซึ่งสนับสนุนในด้านการเงินและให้กำลังใจแก่ผู้เขียนเสมอมาจนสำเร็จการศึกษา

สาริษฐ์ ชัยกิตติศิลป์

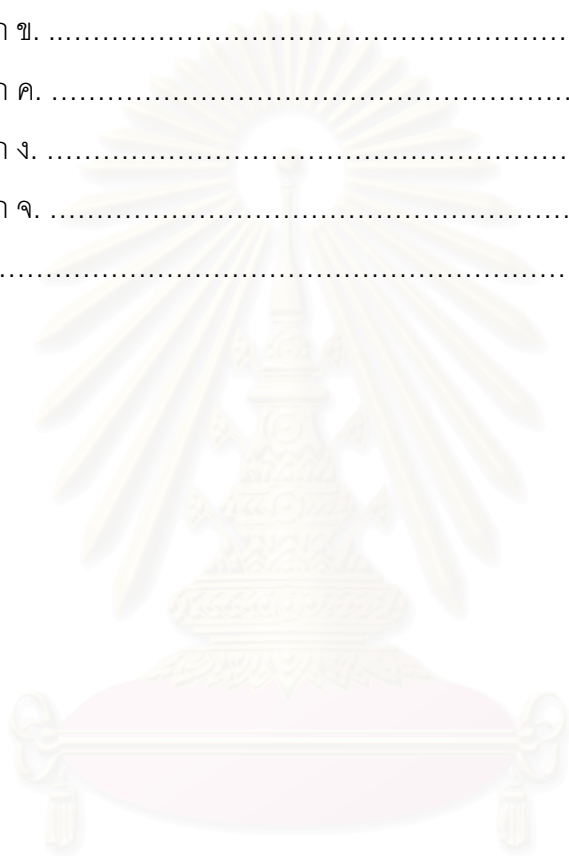
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญรูป.....	ญ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
วัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	3
ขอบเขตการศึกษา.....	4
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
2 การปริทัศน์วรรณกรรม.....	5
แนวคิดและทฤษฎี.....	5
เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	7
3 วิธีการทดลอง.....	20
4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล.....	25
การหาอัตราการลอกผิวของชั้นฟิล์ม.....	25
ส่วนประกอบของชั้นฟิล์มเหล็กกล้าไร้สนิมทั้งสองชนิด.....	25
ความหนาของชั้นฟิล์มต่างๆ ในเหล็กกล้าไร้สนิม.....	38
การวิเคราะห์เชิงปริมาณของชั้นฟิล์มพาสซีฟ.....	42
เปรียบเทียบลักษณะของชั้นฟิล์มที่เกิดกับการต้านทานการกัดกร่อนแบบ รูพรุน.....	51
การทดลองหาเส้นโพลาริเซชันด้วยเครื่องโพเทนทีโอสแตท.....	52
5 สรุปผลการทดลอง.....	54

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
รายการอ้างอิง.....	55
ภาคผนวก.....	57
ภาคผนวก ก.	58
ภาคผนวก ข.	61
ภาคผนวก ค.	62
ภาคผนวก ง.	90
ภาคผนวก จ.	93
ประวัติผู้เขียน.....	95



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
ตารางที่ 2.1 แสดงชนิดของชั้นฟิล์มที่เกิดขึ้นในสภาพแวดล้อมต่างๆ	18
ตารางที่ 3.1 แสดงผลการวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้าไร้สนิมที่ใช้ในการทดลอง ด้วยเครื่อง X – Ray Diffraction และ X – Ray Fluorescent	21
ตารางที่ 4.1 อัตราการลอกผิวโดยประมาณจากการคำนวณ.....	25
ตารางที่ 4.2 ค่าศักย์ไฟฟ้าที่เกิดการกัดกร่อนแบบทั่วไป (E_{cor}) ค่าศักย์ไฟฟ้า ของการกัดกร่อนแบบรูพูน (E_p) และค่ากระแสพาสซีฟ (i_{pass}) ที่วัดได้.....	51



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญภาพ

ภาพประกอบ	หน้า
รูปที่ 1.1 ผลของธาตุโครเมียมในเหล็กต่ออัตราการกัดกร่อนของเหล็กผสมคาร์บอนต่ำในบรรยากาศ	1
รูปที่ 2.1 กระบวนการการแผ่โฟโตอิเล็กตรอน.....	6
รูปที่ 2.2 ผลของธาตุโครเมียมต่ออัตราการกัดกร่อนแบบรูพูนของเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ ในสารละลายไฮเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 3 เปอร์เซ็นต์ ที่อุณหภูมิ 30 °C	7
รูปที่ 2.3 อิทธิพลของธาตุนิกเกิลต่ออัตราการกัดกร่อนแบบรูพูนของเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ ที่ผสมโครเมียม 22 และ 25 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ในสารละลายเพอร์ริกคลอไรด์ ความเข้มข้น 10 เปอร์เซ็นต์ ที่อุณหภูมิ 50°C	8
รูปที่ 2.4 แสดงผลของธาตุผสมในเหล็กกล้าไร้สนิมต่อเส้นโพลาริเซชัน	8
รูปที่ 2.5 การเกิดการกัดกร่อนของเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์	9
รูปที่ 2.6 อัตราการกัดกร่อนแบบรูพูนต่อปริมาณส่วนผสมในเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ ในสารละลาย 6 เปอร์เซ็นต์เพอร์ริกคลอไรด์ ที่ 50°C เป็นเวลา 20 ชั่วโมง.....	10
รูปที่ 2.7 ผลของปริมาณเพอร์ไรท์ต่ออัตราการกัดกร่อน ในสารละลาย 6 เปอร์เซ็นต์ เพอร์ริกคลอไรด์ ที่ 50°C เป็นเวลา 20 ชั่วโมง.....	11
รูปที่ 2.8 ผลของปริมาณโครเมียมต่อการต้านทานการกัดกร่อนในน้ำทะเลที่อุณหภูมิห้อง.....	12
รูปที่ 2.9 แผนภูมิสมดุล 3 เฟส ของ เหล็ก – โครเมียม – นิกเกิล ที่อุณหภูมิ 1200°C แสดงส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้าไร้สนิมจากการศึกษาของ H. Hoffmeister และ G. Lothongkum	12
รูปที่ 2.10 ผลของปริมาณธาตุผสมต่อการต้านทานการกัดกร่อนของเหล็กกล้าไร้สนิม ออสเทนิติก เฟอร์ริติก และดูเพล็กซ์ในน้ำทะเลจำลอง DIN 50905 ที่อุณหภูมิ 25°C	13
รูปที่ 2.11 การเริ่มต้นของการเกิดการกัดกร่อนของเหล็กกล้าไร้สนิม.....	14
รูปที่ 2.12 ความหนาชั้นฟิล์มพาสซีฟของเหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ริติกที่ผสมโครเมียม 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และชนิดที่ผสมโครเมียม 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก โมลิบดีนัม 2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก กับค่าศักย์ไฟฟ้า	15
รูปที่ 2.13 ปริมาณของอ็อกไซด์ที่เกิดขึ้นบนชั้นฟิล์มของเหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ริติก ซึ่งผ่านการทำโพลาริเซชันที่ศักย์ไฟฟ้าค่าต่างๆ เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ในสารละลาย HCl เข้มข้น 1 โมลต่อลิตร	16

ภาพประกอบ	หน้า
รูปที่ 2.14 ปริมาณของ O^{2-} , OH^- , Cl^- และน้ำ ต่อจำนวนอิออนบวกที่เกิดขึ้นบนชั้นฟิล์มของเหล็กกล้าไร้สนิมเพอริติกซึ่งผ่านการทำโพลาริเซชันที่ศักย์ไฟฟ้าค่าต่างๆ เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ในสารละลาย HCl เข้มข้น 1 โมล/ลิตร	16
รูปที่ 2.15 ความหนาของชั้นฟิล์มต่อปริมาณโครเมียมที่ผสมในโลหะผสมเหล็ก – โครเมียมที่สิ่งแวล้อมต่างๆ	17
รูปที่ 3.1 แผนภูมิสมดุล 3 เฟส ของ เหล็ก – โครเมียม – นิกเกิล ที่อุณหภูมิ 1200 °C แสดงบริเวณเฟส δ , γ และ $\delta + \gamma$	20
รูปที่ 3.2 ซึ้นงานที่ใช้ทดสอบในเครื่องเอ็กซ์พีเอส	22
รูปที่ 3.3 เครื่องเอ็กซ์พีเอสที่ใช้ในการทดลอง	23
รูปที่ 4.1 ตัวอย่างผลการวิเคราะห์ธาตุออกซิเจนด้วยเครื่องเอ็กซ์พีเอสที่ผิวเหล็กกล้าไร้สนิมเพอริติกที่ผสมโครเมียม 38.80 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก นิกเกิล 12.50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่เวลาการลอกผิวต่างๆ อัตราการลอกผิว 17 องศาต่ออนาที หลังทิ้งไว้ในเดสซิเคเตอร์ ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง	27
รูปที่ 4.2 ตัวอย่างผลการวิเคราะห์ธาตุออกซิเจนด้วยเครื่องเอ็กซ์พีเอส ที่ผิวเหล็กกล้าไร้สนิม ออสเทนิติกที่ผสมโครเมียม 31.94 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก นิกเกิล 28.25 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่เวลาการลอกผิวต่างๆ อัตราการลอกผิว 17 องศาต่ออนาที หลังทิ้งไว้ในเดสซิเคเตอร์ ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง	28
รูปที่ 4.3 ตัวอย่างผลการวิเคราะห์ธาตุโครเมียมด้วยเครื่องเอ็กซ์พีเอส ที่ผิวเหล็กกล้าไร้สนิมเพอริติกที่ผสมโครเมียม 38.80 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก นิกเกิล 12.50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่เวลาการลอกผิวต่างๆ อัตราการลอกผิว 17 องศาต่ออนาที หลังทิ้งไว้ในเดสซิเคเตอร์ ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง 30	
รูปที่ 4.4 ตัวอย่างผลการวิเคราะห์ธาตุโครเมียมด้วยเครื่องเอ็กซ์พีเอสที่ผิวเหล็กกล้าไร้สนิม ออสเทนิติกที่ผสมโครเมียม 31.94 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก นิกเกิล 28.25 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่เวลาการลอกผิวต่างๆ อัตราการลอกผิว 17 องศาต่ออนาที หลังทิ้งไว้ในเดสซิเคเตอร์ ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง	31

ภาพประกอบ	หน้า
รูปที่ 4.5 ตัวอย่างผลการวิเคราะห์ธาตุเหล็ก ด้วยเครื่องเอ็กซ์ฟลูออเรสเซนซ์ที่ผิวเหล็กกล้าไร้สนิม เฟอริติกที่ผสมโครเมียม 38.80 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก นิกเกิล 12.50 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก ที่เวลาการลอกผิวต่างๆ อัตราการลอกผิว 17 องศาต่ออนาที หลังทิ้งไว้ในเดสซิเคเตอร์ ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง33	
รูปที่ 4.6 ตัวอย่างผลการวิเคราะห์ธาตุเหล็กด้วยเครื่องเอ็กซ์ฟลูออเรสเซนซ์ที่ผิวเหล็กกล้าไร้สนิม ออสเทนิติกที่ผสมโครเมียม 31.94 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก นิกเกิล 28.25 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก ที่เวลาการลอกผิวต่างๆ อัตราการลอกผิว 17 องศาต่ออนาที หลังทิ้งไว้ในเดสซิเคเตอร์ ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง.....34	
รูปที่ 4.7 ตัวอย่างผลการวิเคราะห์ธาตุนิกเกิลด้วยเครื่องเอ็กซ์ฟลูออเรสเซนซ์ที่ผิวเหล็กกล้าไร้สนิม เฟอริติกที่ผสมโครเมียม 38.80 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก นิกเกิล 12.50 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก ที่เวลาการลอกผิวต่างๆ อัตราการลอกผิว 17 องศาต่ออนาที หลังทิ้งไว้ในเดสซิเคเตอร์ ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง.....36	
รูปที่ 4.8 ตัวอย่างผลการวิเคราะห์ธาตุนิกเกิลด้วยเครื่องเอ็กซ์ฟลูออเรสเซนซ์ที่ผิวเหล็กกล้าไร้สนิม ออสเทนิติกที่ผสมโครเมียม 31.94 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก นิกเกิล 28.25 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก ที่เวลาการลอกผิวต่างๆ อัตราการลอกผิว 17 องศาต่ออนาที หลังทิ้งไว้ในเดสซิเคเตอร์ ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 24 ชั่วโมง37	
รูปที่ 4.9 แบบจำลองของชั้นฟิล์มที่ผิวของเหล็กกล้าไร้สนิมเฟอริติกและออสเทนิติก หลังจากเก็บไว้ในเดสซิเคเตอร์เป็นเวลา 24 ชั่วโมง38	
รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของชั้นฟิล์มโครเมียมออกไซด์กับปริมาณธาตุ โครเมียมที่ผสมในเหล็กกล้าไร้สนิมทั้งสองชนิด39	
รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของชั้นฟิล์มออกไซด์โครเมียมและเหล็กรวมกับ โลหะเหล็กกับปริมาณธาตุโครเมียมที่ผสมในเหล็กกล้าไร้สนิมทั้งสองชนิด40	
รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างความลึกที่เริ่มพบนิกเกิลในชั้นฟิล์มกับปริมาณนิกเกิลที่ผสม ในเหล็กกล้าไร้สนิม41	

สารบัญภาพ (ต่อ)

ฐ

ภาพประกอบ	หน้า
รูปที่ 4.13 แสดงปริมาณของธาตุต่างๆ ในชั้นฟิล์มที่เกิดขึ้น ตามความลึกของเหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ริติกที่ผสมโครเมียม 20.50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก นิกเกิล 4.75 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก	42
รูปที่ 4.14 แสดงปริมาณของธาตุต่างๆ ในชั้นฟิล์มที่เกิดขึ้น ตามความลึกของเหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ริติกที่ผสมโครเมียม 25.24 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก นิกเกิล 6.40 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก	43
รูปที่ 4.15 แสดงปริมาณของธาตุต่างๆ ในชั้นฟิล์มที่เกิดขึ้น ตามความลึกของเหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ริติกที่ผสมโครเมียม 27.62 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก นิกเกิล 6.97 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก	43
รูปที่ 4.16 แสดงปริมาณของธาตุต่างๆ ในชั้นฟิล์มที่เกิดขึ้น ตามความลึกของเหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ริติกที่ผสมโครเมียม 29.58 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก นิกเกิล 8.29 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก	44
รูปที่ 4.17 แสดงปริมาณของธาตุต่างๆ ในชั้นฟิล์มที่เกิดขึ้น ตามความลึกของเหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ริติกที่ผสมโครเมียม 32.01 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก นิกเกิล 9.35 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก	44
รูปที่ 4.18 แสดงปริมาณของธาตุต่างๆ ในชั้นฟิล์มที่เกิดขึ้น ตามความลึกของเหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ริติกที่ผสมโครเมียม 34.79 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก นิกเกิล 10.82 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก	45
รูปที่ 4.19 แสดงปริมาณของธาตุต่างๆ ในชั้นฟิล์มที่เกิดขึ้น ตามความลึกของเหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ริติกที่ผสมโครเมียม 38.80 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก นิกเกิล 12.50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก	45
รูปที่ 4.20 แสดงปริมาณของธาตุต่างๆ ในชั้นฟิล์มที่เกิดขึ้น ตามความลึกของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิติกที่ผสมโครเมียม 21.11 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก นิกเกิล 9.89 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก	46
รูปที่ 4.21 แสดงปริมาณของธาตุต่างๆ ในชั้นฟิล์มที่เกิดขึ้น ตามความลึกของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิติกที่ผสมโครเมียม 22.43 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก นิกเกิล 11.57 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก	46

ภาพประกอบ	หน้า
รูปที่ 4.22 แสดงปริมาณของธาตุต่างๆ ในชั้นฟิล์มที่เกิดขึ้น ตามความลึกของเหล็กกล้า ไร้สนิมออสเทนิติกที่ผสมโครเมียม 22.90 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก นิกเกิล 13.72 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก	47
รูปที่ 4.23 แสดงปริมาณของธาตุต่างๆ ในชั้นฟิล์มที่เกิดขึ้น ตามความลึกของเหล็กกล้า ไร้สนิมออสเทนิติกที่ผสมโครเมียม 23.49 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก นิกเกิล 16.56 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก	47
รูปที่ 4.24 แสดงปริมาณของธาตุต่างๆ ในชั้นฟิล์มที่เกิดขึ้น ตามความลึกของเหล็กกล้า ไร้สนิมออสเทนิติกที่ผสมโครเมียม 25.45 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก นิกเกิล 17.54 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก	48
รูปที่ 4.25 แสดงปริมาณของธาตุต่างๆ ในชั้นฟิล์มที่เกิดขึ้น ตามความลึกของเหล็กกล้า ไร้สนิมออสเทนิติกที่ผสมโครเมียม 27.65 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก นิกเกิล 19.96 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก	48
รูปที่ 4.26 แสดงปริมาณของธาตุต่างๆ ในชั้นฟิล์มที่เกิดขึ้น ตามความลึกของเหล็กกล้า ไร้สนิมออสเทนิติกที่ผสมโครเมียม 31.94 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก นิกเกิล 28.25 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก	49
รูปที่ 4.27 แสดงการเปลี่ยนแปลงปริมาณโครเมียมและนิกเกิลที่อยู่ในชั้นฟิล์ม ตามความลึก.....	50

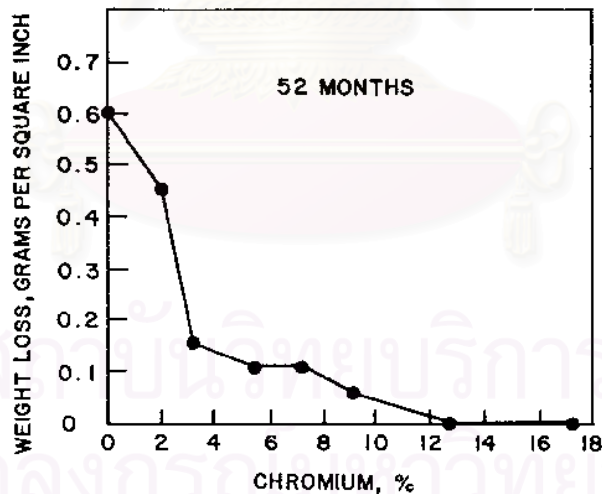
บทที่ 1

บทนำ

ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันเหล็กกล้าไร้สนิมเป็นโลหะที่ใช้กันอย่างกว้างขวางในงานอุตสาหกรรมทุกๆแขนง เช่น อุตสาหกรรมอาหาร อุตสาหกรรมปิโตรเคมี อุตสาหกรรมผลิตน้ำมัน อุตสาหกรรมการผลิตต่างๆ เนื่องจากเหล็กกล้าไร้สนิมมีคุณสมบัติทนทานต่อการกัดกร่อน จึงถูกนำมาใช้สร้างอุปกรณ์เพื่อการใช้งานที่ทนทานต่อการกัดกร่อน ช่วยในด้านเทคโนโลยีการผลิต การลดต้นทุนของโรงงานอุตสาหกรรม และการซ่อมบำรุงเป็นอย่างมาก

โดยทั่วไปเหล็กกล้าไร้สนิม คือโลหะผสมของเหล็กที่มีปริมาณโครเมียมผสมอยู่อย่างน้อย 11 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก⁽¹⁾ ซึ่งเป็นปริมาณที่เพียงพอในการป้องกันการกัดกร่อนในบรรยากาศการกัดกร่อนดังแสดงไว้ในรูปที่ 1.1 ทั้งนี้เนื่องจากเหล็กกล้าไร้สนิมสร้างชั้นฟิล์มที่ผิวขึ้นมาป้องกันการกัดกร่อนซึ่งเรียกว่า “ชั้นฟิล์มพาส สิว (Passive Film)” ชั้นฟิล์มนี้จะเกิดขึ้นเองตามสภาพแวดล้อมต่างๆ อย่างไรก็ตามเหล็กกล้าไร้สนิมก็ยังมีปัญหาเมื่อนำไปใช้งานในสภาวะที่ต้องรับแรงกระทำสูงในสภาวะแวดล้อมที่มีคลอไรด์เป็นส่วนผสม เช่น ในน้ำทะเล



รูปที่ 1.1 ผลของธาตุโครเมียมในเหล็กต่ออัตราการกัดกร่อนของเหล็กผสมคาร์บอนต่ำในบรรยากาศ⁽¹⁾

การแบ่งประเภทของเหล็กกล้าไร้สนิมสามารถทำได้หลายวิธี แต่โดยทั่วไปสามารถแบ่งตามโครงสร้างจุลภาคได้เป็น 5 กลุ่ม ได้แก่

เหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ริติก (Ferritic Stainless Steel) มีโครงสร้างพื้นฐานเป็นเฟอร์ไรท์

เหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติก (Martensitic Stainless Steel) มีโครงสร้างพื้นฐานเป็นมาร์เทนไซต์

เหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก (Austenitic Stainless Steel) มีโครงสร้างพื้นฐานเป็นออสเทนไนต์

เหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ (Duplex Stainless Steel) มีโครงสร้างพื้นฐานผสมระหว่างออสเทนไนต์ และเฟอร์ไรท์

เหล็กกล้าไร้สนิมพีเอช (Precipitation Hardening Stainless Steel) มีโครงสร้างพื้นฐานเป็นโครงสร้างมาร์เทนไซต์ ออสเทนไนต์ และมีสารประกอบอื่นแยกเฟสออกมา

เหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ เป็นเหล็กกล้าไร้สนิมที่มีโครงสร้างจุลภาคผสมระหว่างเฟอร์ไรท์และออสเทนไนต์ โดยทั่วไปจะมีอัตราส่วนของโครงสร้างทั้งสองเท่าๆกัน ผลดีขึ้นโดยมีวัตถุประสงค์เพื่อที่จะรวมคุณสมบัติทางด้านทานทานการกัดกร่อน และคุณสมบัติทางด้านความแข็งแรงเข้าไว้ด้วยกัน เพื่อจะนำมาใช้ทดแทนการใช้งานเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกในงานที่ต้องการความแข็งแรงสูง เช่น ในอุตสาหกรรมปิโตรเคมี ในอุตสาหกรรมน้ำมัน ในการทำตัวแลกเปลี่ยนความร้อน (Heat Exchanger) การทำภาชนะทนความดัน (Pressure Vessel) ถัง วาล์วต่างๆ จึงได้มีการศึกษาคุณสมบัติการต้านทานการกัดกร่อนของเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ ไม่ว่าจะเป็นคุณสมบัติการต้านทานการกัดกร่อนมีความเค้นร่วม (Stress Corrosion Cracking) การต้านทานการกัดกร่อนที่ขอบเกรน (Intergranular Corrosion Cracking) และโดยเฉพาะคุณสมบัติการต้านทานการกัดกร่อนแบบเฉพาะที่ (Localize Corrosion) เนื่องจากกรกัดกร่อนแบบนี้มักจะเป็นสาเหตุหลักของจุดเริ่มต้นการแตกหักอันเนื่องมาจากความล้า (Fatigue) ของเครื่องจักรอุตสาหกรรม จากเหตุผลเหล่านี้เองจึงนำไปสู่การเก็บข้อมูลทางด้านพฤติกรรมกรกัดกร่อนแบบรูพรุน (Pitting Corrosion) ของเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ ให้สมบูรณ์ที่สุด แม้ว่าจะมีการศึกษาข้อมูลการต้านทานการกัดกร่อนแบบรูพรุนของทั้งเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกและเหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ริติกอยู่มากมายแล้วก็ตาม แต่พฤติกรรมกรกัดกร่อนแบบรูพรุนของเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ต่างจากเหล็กกล้าไร้สนิมที่มีโครงสร้างจุลภาคเดียวโดยสิ้นเชิง เนื่องจากปริมาณการละลายที่แตกต่างกันของธาตุผสมในแต่ละโครงสร้างจุลภาค

ชั้นฟิล์มพาสซีฟของเหล็กกล้าไร้สนิมจะสามารถป้องกันการละลายของโลหะออกสู่สารละลาย คุณสมบัติการสร้างชั้นฟิล์มเป็นตัวตัดสินคุณสมบัติการต้านทานการกัดกร่อนของเหล็กกล้าไร้สนิม ความเสถียรของชั้นฟิล์มพาสซีฟจะเป็นตัวแปรสำคัญต่อพฤติกรรมต่อต้านทานการกัดกร่อน ดังนั้นการศึกษาชั้นฟิล์มพาสซีฟจะทำให้สามารถเข้าใจถึงความสามารถในการต้านทานการกัดกร่อนของเหล็กกล้าไร้สนิมได้

นับตั้งแต่มีการใช้เครื่องเอกซเรย์โฟโตอิเล็กตรอน (XPS; X-ray Photoelectron Spectroscopy) ในการวิเคราะห์ที่สภาวะสุญญากาศยิ่งยวดในปี ค.ศ. 1967⁽²⁾ ทำให้สามารถวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีทั้งด้านคุณภาพและปริมาณของผิววัสดุในระดับความลึกนาโนเมตร และนำผลการวิเคราะห์ไปใช้ในการหาความสัมพันธ์ของตัวแปรการกัดกร่อนของชั้นฟิล์มพาสซีฟเพื่ออธิบายการต้านทานการกัดกร่อนของโลหะได้

จากการศึกษาและค้นคว้าข้อมูลเอกสารและสิ่งตีพิมพ์ที่เกี่ยวข้องกับเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์พบว่ายังไม่มีข้อมูลที่อธิบายถึงลักษณะของชั้นฟิล์มพาสซีฟกับพฤติกรรมต่อต้านทานการกัดกร่อนแบบรูปทรงของเหล็กกล้าไร้สนิมชนิดดูเพล็กซ์ และเนื่องจากเหล็กกล้าไร้สนิมชนิดนี้น่าจะเป็นวัสดุที่มีแนวโน้มการใช้งานในประเทศสูงขึ้น การศึกษานี้จึงเป็นส่วนช่วยให้เกิดความเข้าใจพฤติกรรมของการเกิดชั้นฟิล์มของเหล็กกล้าไร้สนิมชนิดดูเพล็กซ์ต่อการต้านทานการกัดกร่อนแบบรูปทรง เพื่อเป็นข้อมูลในการเลือกใช้งานและการพัฒนาเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์

เนื่องจากเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ประกอบด้วยโครงสร้างจุลภาคออสเทนไนต์และเฟอไรต์ การศึกษาชั้นฟิล์มพาสซีฟที่ง่ายจึงควรศึกษาจากโลหะจำลองที่มีส่วนผสมทางเคมีคล้ายกับส่วนผสมทางเคมีของโครงสร้างออสเทนไนต์และเฟอไรต์ในเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์และนำผลมาอธิบายพฤติกรรมการกัดกร่อนของเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ต่อไป

วัตถุประสงค์ของการศึกษา

1. เพื่อศึกษาชั้นฟิล์มของผิวเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนติกและเฟอริติก ที่มีส่วนผสมของโครเมียม 20 ถึง 39 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักและนิกเกิล 4 ถึง 29 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก
2. เพื่ออธิบายพฤติกรรมการกัดกร่อนของเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์

ขอบเขตการศึกษา

1. ตรวจสอบส่วนผสมทางเคมีและโครงสร้างจุลภาคของชั้นตัวอย่าง
2. วิเคราะห์ส่วนประกอบทางเคมีของฟิล์มที่เกิดขึ้นทั้งทางด้านคุณภาพและปริมาณด้วยเครื่องเอ็กซ์พีเอส
3. วัดเส้นโพลาริเซชันของเหล็กตัวอย่างด้วยเครื่องโพเทนทีโอ สเตท (Potentiostat)
4. อธิบายความสัมพันธ์ระหว่างพฤติกรรมการกัดกร่อนของเหล็กตัวอย่างกับชั้นฟิล์มที่เกิดขึ้น
5. นำผลที่ได้จากข้อ 1 – 4 มาอธิบายพฤติกรรมการกัดกร่อนของเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ช่วยให้เกิดความเข้าใจของการเกิดขึ้นฟิล์มของเหล็กกล้าไร้สนิมออกซิเดติกและเฟอริติกที่ผสมโครเมียม 20 ถึง 39 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักและนิกเกิล 4 ถึง 28 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก
2. สามารถอธิบายพฤติกรรมการกัดกร่อนแบบรูพรุนของเหล็กกล้าไร้สนิมออกซิเดติกและเฟอริติกได้
3. สามารถนำไปใช้เป็นแนวทางในการป้องกันการกัดกร่อนของเหล็กกล้าไร้สนิมออกซิเดติกและเฟอริติกที่ผสมโครเมียมและนิกเกิลได้
4. สามารถอธิบายพฤติกรรมการกัดกร่อนแบบรูพรุนของเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ ซึ่งมีส่วนผสมทางเคมีของโครงสร้างออกซิเดติกและเฟอริต์ที่ใกล้เคียงกับที่ศึกษาในข้อ 1 – 3

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2 การปรีทัศน์วรรณกรรม

แนวคิดและทฤษฎี

เอ็กซ์พีเอสเป็นเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์พื้นผิว (Surface Analysis) ชนิดหนึ่ง ซึ่งอาศัยปรากฏการณ์สองชนิดได้แก่ ปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กตริก และปรากฏการณ์การเปลี่ยนแปลงเนื่องมาจากการแผ่รังสี (Radiationless Transition) นำมาประยุกต์ใช้ โดยหลักการทั่วไป จะเริ่มที่การทำปฏิกิริยาระหว่างคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ากับอะตอม โดยผลที่ได้จะบอกข้อมูลและระดับพลังงานของอิเล็กตรอน

กระบวนการแผ่ของโฟโตอิเล็กตรอน สามารถแบ่งได้เป็น 2 ขั้นตอน⁽³⁾ (รูปที่ 2.1)ได้แก่

1. อะตอมได้รับรังสีเอ็กซ์ และโฟโตอิเล็กตรอนแผ่ออกมา และโฟโตอิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นภายในอะตอมของวัสดุเคลื่อนมาที่ผิว ดังรูปที่ 2.1ก.
2. โฟโตอิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นแผ่ออกสู่อวกาศ ดังแสดงในรูป 2.1ข.

หลังจากการแผ่ของโฟโตอิเล็กตรอนแล้วจะเกิดปรากฏการณ์หลายอย่างตามมาได้แก่

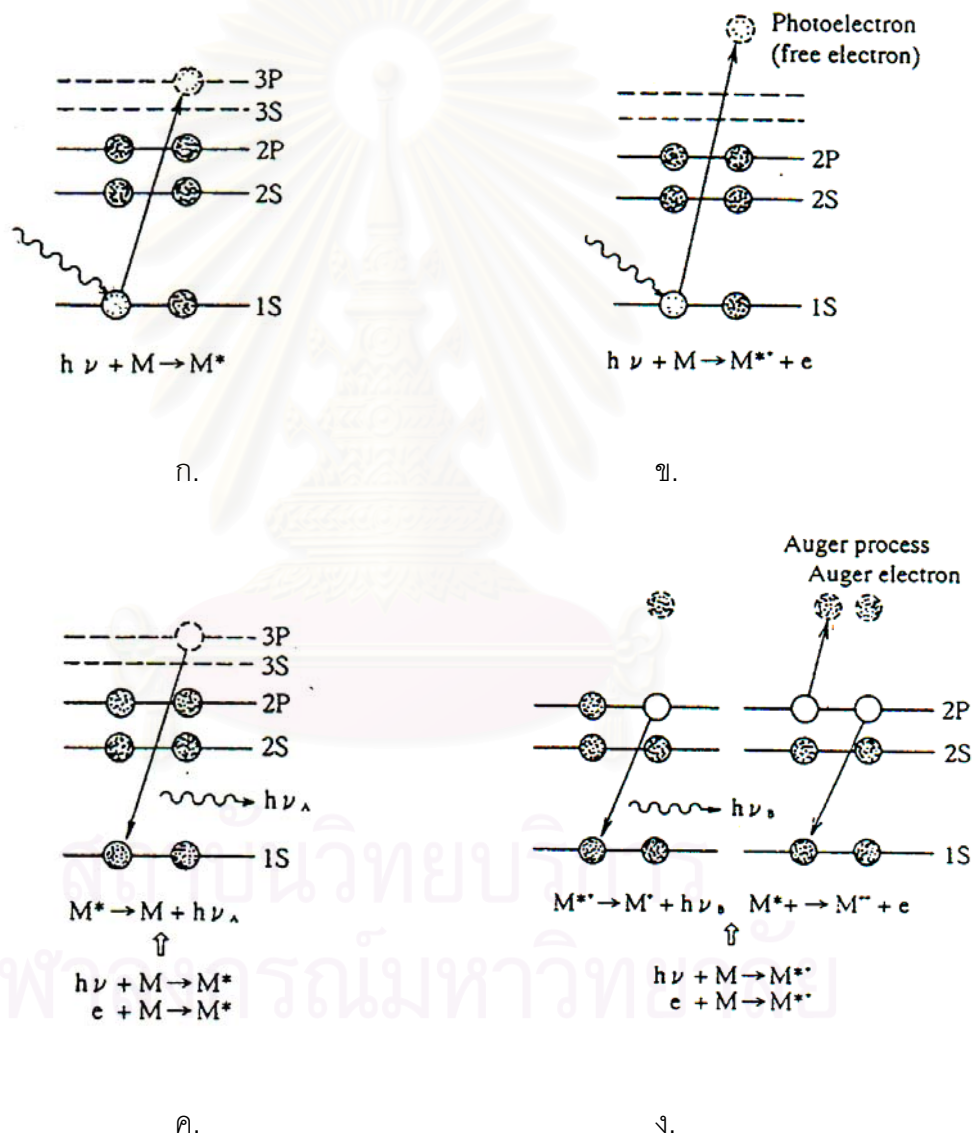
1. อิเล็กตรอนชั้นนอกคลายพลังงานออกมาในรูปของโฟตอน เพื่อให้ตัวเองลงมาสู่ชั้นพลังงานที่โฟโตอิเล็กตรอนแผ่ออกไปแล้ว ดังแสดงในรูปที่ 2.1ค.
2. อิเล็กตรอนชั้นนอกคลายพลังงานลงมาสู่ชั้นพลังงานที่โฟโตอิเล็กตรอนแผ่ออกไป แล้วทำการคลายพลังงานโดยการแผ่อิเล็กตรอนที่สอง (Secondary Electron) ออกมาซึ่งเรียกอิเล็กตรอนที่แผ่ออกมาว่าออเจอิเล็กตรอน (Auger Electron) ดังแสดงในรูปที่ 2.1ง.

โดยกระบวนการแผ่ของโฟโตอิเล็กตรอนสามารถอาศัยกฎการทรงพลังงาน (Energy Conservation) ในการอธิบายดังสมการ

$$E_k = h\nu - E_b - \phi$$

โดย พลังงานจลน์ (E_k)	- เป็นพลังงานของโฟโตอิเล็กตรอนหลังจากออกสู่อวกาศ
พลังงานที่ใช้กระตุ้น ($h\nu$)	- พลังงานของรังสีเอ็กซ์ที่ให้กับอะตอม
พลังงานยึดเหนี่ยวของอิเล็กตรอน (E_b)	- เป็นพลังงานที่โฟโตอิเล็กตรอนใช้ในการหลุดออกจากอะตอม
Work Function (ϕ)	- พลังงานที่ใช้เพื่อหลุดออกจากผิวหน้าของวัสดุ

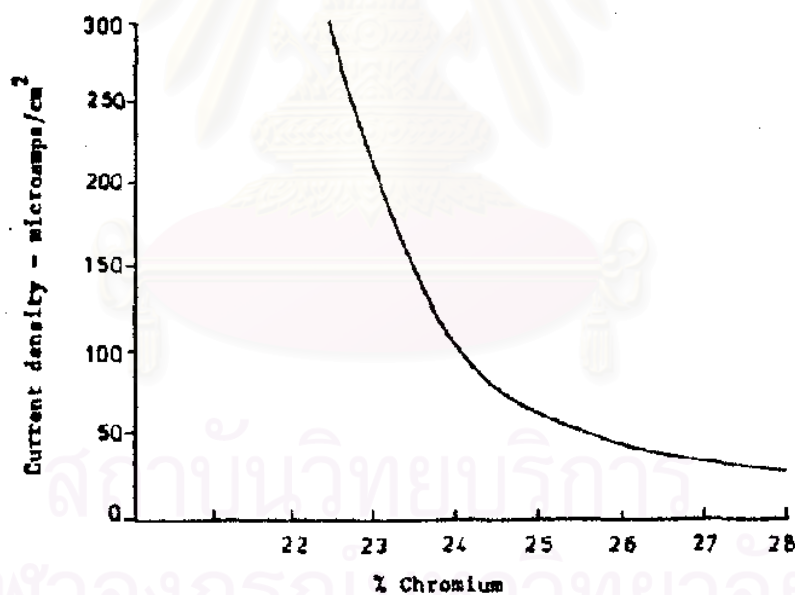
โดยถือว่าค่า ϕ เป็นค่าคงที่ค่าหนึ่งซึ่งมีค่าน้อยมาก ดังนั้นค่าพลังงานยึดเหนี่ยว (E_b ; Binding Energy) จึงกลายเป็นค่าความแตกต่างระหว่างพลังงานเริ่มต้น ($h\nu$) และค่าพลังงานสุดท้าย (E_k) ของกระบวนการแผ่โฟโตอิเล็กตรอน เมื่อให้ค่าพลังงานของรังสีเอกซ์คงที่ การที่โฟโตอิเล็กตรอนของแต่ละธาตุมีพลังงานจลน์ที่แตกต่างกันก็เป็นเพราะมีพลังงานยึดเหนี่ยวที่ต่างกััน ดังนั้นค่าพลังงานยึดเหนี่ยวจึงสามารถบ่งชี้ชนิดของธาตุและสภาวะทางเคมี (Chemical State) ของธาตุนั้นๆ ได้



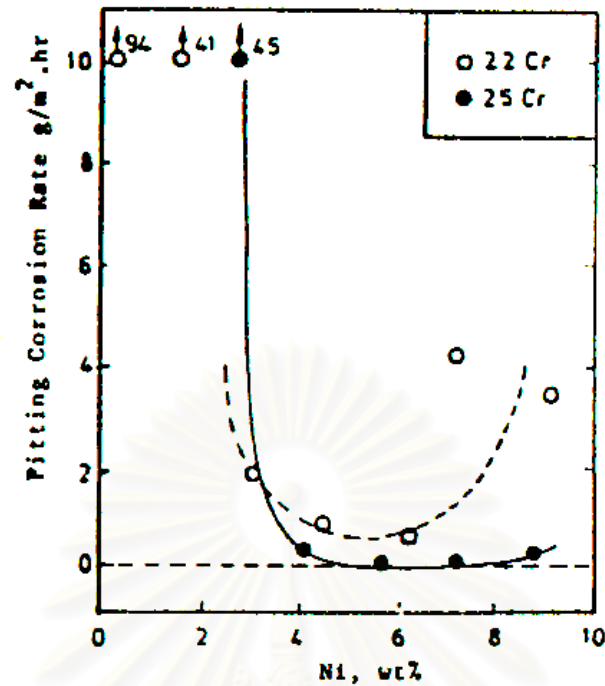
รูปที่ 2.1 กระบวนการการแผ่โฟโตอิเล็กตรอน⁽³⁾

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

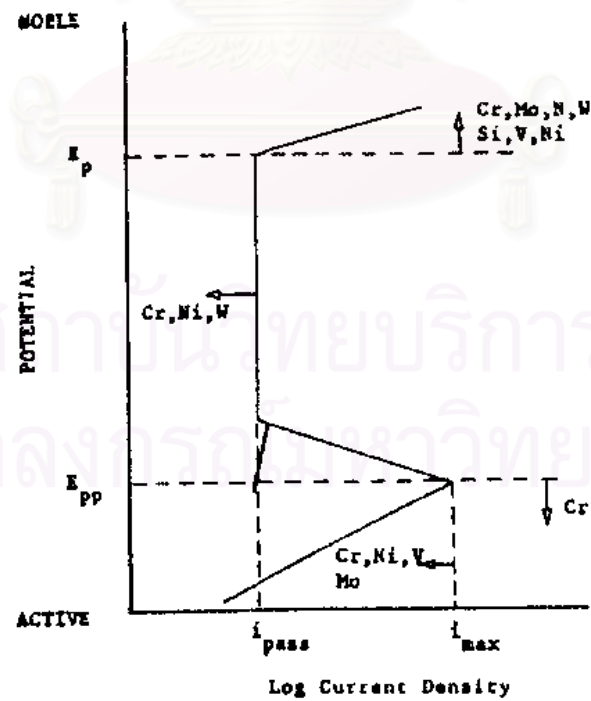
นับตั้งแต่มีการผลิตเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ขึ้นเพื่อให้เป็นอีกทางเลือกหนึ่งในการนำวัสดุไปใช้งานแทนเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิติก ได้มีการศึกษาทั้งคุณสมบัติทางกลและการต้านทานการกัดกร่อนอย่างมากมาย C.V. Roscoe และ K.J. Gradwell⁽⁴⁾ ได้ศึกษาถึงผลของธาตุผสมต่อคุณสมบัติการต้านทานการกัดกร่อนแบบรูพรุนของเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ในสารละลายคลอไรด์ พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณของธาตุโครเมียมจะสามารถลดอัตราการกัดกร่อนของเหล็กกล้าไร้สนิมชนิดดูเพล็กซ์ดังแสดงในรูปที่ 2.2 และการเติมนิกเกิลจะเพิ่มการต้านทานการกัดกร่อนซึ่งแสดงไว้ในรูปที่ 2.3 จะเห็นได้ว่าที่ปริมาณนิกเกิล 4 – 8 เปอร์เซ็นต์ในเหล็กกล้าไร้สนิมที่ผสมโครเมียม 25 เปอร์เซ็นต์ และการผสมปริมาณนิกเกิล 4 – 7 เปอร์เซ็นต์ในเหล็กกล้าไร้สนิมที่ผสมโครเมียม 22 เปอร์เซ็นต์ จะมีอัตราการกัดกร่อนแบบรูพรุนต่ำที่สุด อีกทั้งธาตุโครเมียมและนิกเกิล ยังช่วยทำให้ ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนแบบรูพรุน (Pitting Potential) มีค่ามากขึ้นและช่วยลดอัตราการกัดกร่อนอีกด้วยดังรูปที่ 2.4 โดยจะดูได้จากเมื่อเติมธาตุผสม ค่ากระแสพาสซีฟ (I_{pass}) จะมีค่าลดลงซึ่งจะแปรผันกับอัตราการกัดกร่อน



รูปที่ 2.2 ผลของธาตุโครเมียมต่ออัตราการกัดกร่อนแบบรูพรุนของเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 3 เปอร์เซ็นต์ ที่อุณหภูมิ 30 °C⁽⁴⁾

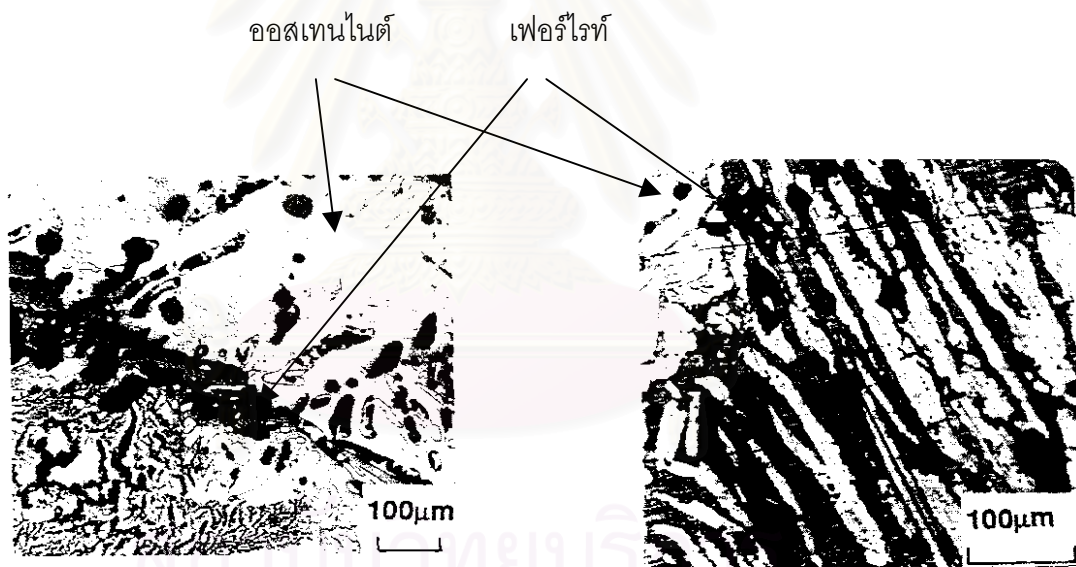


รูปที่ 2.3 อิทธิพลของธาตุникเกิดต่ออัตราการกัดกร่อนแบบรูพูนของเหล็กกล้าไร้สนิม
 ดูเพล็กซ์ที่ผสมโครเมียม 22 และ 25 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ในสารละลายเฟอร์
 ริกคลอไรด์ ความเข้มข้น 10 เปอร์เซ็นต์ ที่อุณหภูมิ 50°C⁽⁴⁾



รูปที่ 2.4 แสดงผลของธาตุผสมในเหล็กกล้าไร้สนิมต่อเส้นโพลาริเซชัน⁽⁴⁾

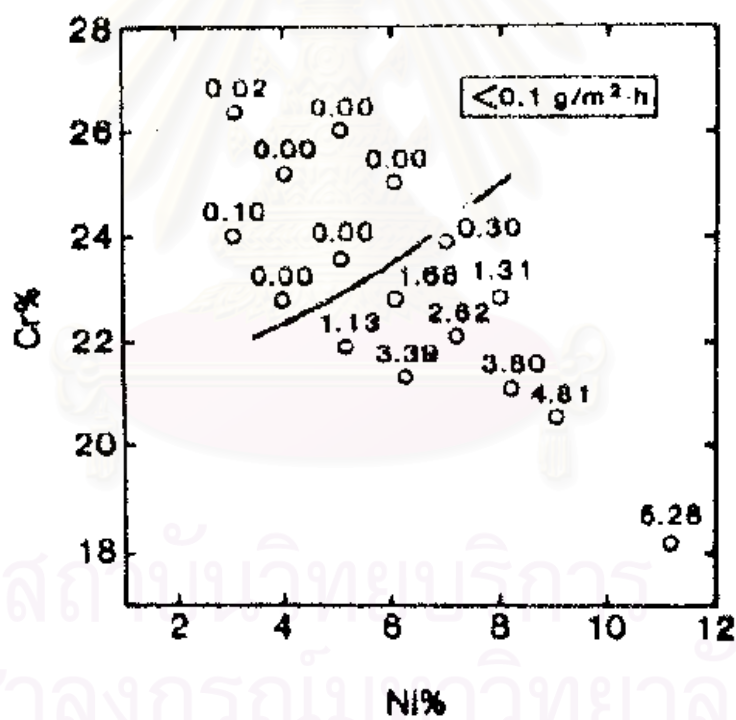
R. Sriram และ D. Tromans⁽⁵⁾ ได้ศึกษาผลของธาตุผสมต่อคุณสมบัติด้านทานการกัดกร่อนของเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ที่ผลิตโดยการหล่อ (โครเมียม 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก นิกเกิล 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก โมลิบดีนัม 2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และไนโตรเจน 0.02 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก) และผ่านการขึ้นรูป (โครเมียม 22.4 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก นิกเกิล 5.8 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก โมลิบดีนัม 2.6 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และไนโตรเจน 0.14 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก) ในสารละลายกรดที่มีคลอไรด์ผสม พบว่า การต้านทานการกัดกร่อนแบบรูพรุนจะเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มปริมาณของธาตุโครเมียมและโมลิบดีนัม และยังพบอีกว่าในชิ้นงานหล่อของเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ จะเกิดการกัดกร่อนขึ้นที่บริเวณที่เป็นโครงสร้างจุลภาค ออสเทนไนท์ ทั้งนี้เนื่องจากในส่วนที่มีโครงสร้างจุลภาคเฟอร์ไรท์นั้นมีปริมาณของโครเมียมและโมลิบดีนัมมากกว่าในส่วนที่เป็นออสเทนไนท์ แต่ในขณะที่ชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูปนั้นเกิดการกัดกร่อนที่บริเวณที่เป็นโครงสร้างเฟอร์ไรท์เพราะผลของปริมาณธาตุไนโตรเจนซึ่งเป็นที่รู้กันว่ามีส่วนช่วยในการป้องกันการกัดกร่อนแบบรูพรุนดังแสดงในรูป 2.5 ก. และ ข. ตามลำดับ



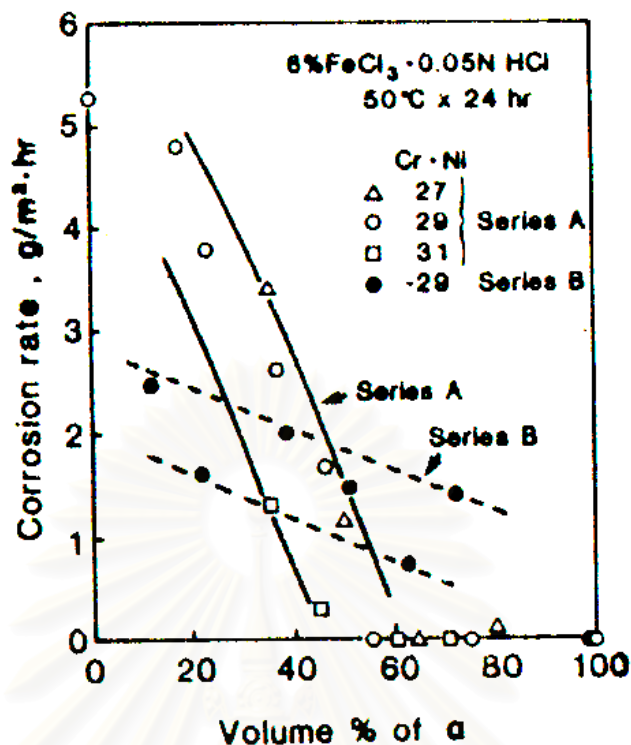
รูปที่ 2.5 การเกิดการกัดกร่อนของเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์⁽⁵⁾

- ก. การเกิดการกัดกร่อนในโครงสร้างออสเทนไนท์ในชิ้นงานเหล็กหล่อ
- ข. การกัดกร่อนที่โครงสร้างเฟอร์ไรท์ในชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูป

ผลการทดลองการต้านทานการกัดกร่อนของเหล็กกล้าไร้สนิมชนิดดูเพล็กซ์ที่มีโครเมียมผสม 20.4 ถึง 26.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และนิกเกิลผสม 3 ถึง 9 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ในสารละลายเฟอริกคลอไรด์ 6 เปอร์เซ็นต์ของ Y.Ishizawa และ T. Inazumi ⁽⁶⁾ พบว่าการต้านทานการกัดกร่อนแบบรูพรุนเป็นผลมาจากส่วนผสมทางเคมีและสัดส่วนระหว่างโครงสร้างจุลภาคเฟอร์ไรท์ – ออสเทนไนท์ ดังแสดงในรูป 2.6 เมื่อเหล็กกล้าไร้สนิมที่มีปริมาณธาตุโครเมียมสูง และปริมาณนิกเกิลน้อย จะมีอัตราการกัดกร่อนในสารละลายเฟอริกคลอไรด์ที่ต่ำและอัตราการกัดกร่อนจะเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณของโครเมียมลดต่ำลงและปริมาณนิกเกิลสูงขึ้น และยังได้กล่าวถึงผลของโครงสร้างเฟอร์ไรท์ต่ออัตราการกัดกร่อน ดังแสดงในรูปที่ 2.7 พบว่าเมื่อปริมาณโครงสร้างเฟอร์ไรท์เพิ่มขึ้นอัตราการกัดกร่อนจะลดลง ซึ่งแสดงให้เห็นว่าโครงสร้างจุลภาคออสเทนไนท์ว่องไวต่อการเกิดการกัดกร่อนแบบรูพรุนมากกว่าโครงสร้างจุลภาคเฟอร์ไรท์ ทั้งสองได้สรุปว่าอัตราการกัดกร่อนของเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์เป็นสัดส่วนกับปริมาณของโครงสร้างจุลภาคออสเทนไนท์



รูปที่ 2.6 อัตราการกัดกร่อนแบบรูพรุนต่อปริมาณส่วนผสมในเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ในสารละลาย 6 เปอร์เซ็นต์เฟอริกคลอไรด์ ที่ 50°C เป็นเวลา 20 ชั่วโมง ⁽⁶⁾

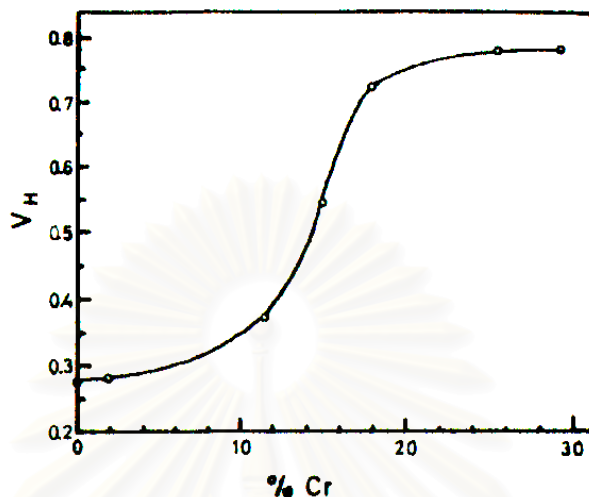


รูปที่ 2.7 ผลของปริมาณเฟอร์ไรท์ต่ออัตราการกัดกร่อน ในสารละลาย 6 เปอร์เซ็นต์ เฟอร์ริกคลอไรด์ ที่ 50°C เป็นเวลา 20 ชั่วโมง ⁽⁶⁾

G. Hochoerler และ K. Kriszt ⁽⁷⁾ ได้ทดลองวัดศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนแบบรูพรุน (Pitting Potential) ของเหล็กกล้าไร้สนิมชนิดออสเทนนิติก ในสารละลายน้ำทะเลจำลอง ที่อุณหภูมิ 40°C และในสารละลาย FeCl₃ ความเข้มข้น 10 เปอร์เซ็นต์ผสมกับ NaCl ความเข้มข้น 5 เปอร์เซ็นต์ ที่อุณหภูมิ 30°C พบว่าเหล็กกล้าไร้สนิมชนิดออสเทนนิติกที่มีธาตุผสมปริมาณต่ำ หรือมีการเติมธาตุที่ทำให้โครงสร้างเฟอร์ไรท์มีความเสถียรจะทำให้มีความต้านทานการกัดกร่อนต่ำ และจะมีการต้านทานการกัดกร่อนสูงขึ้นเมื่อมีธาตุผสมในปริมาณสูง และการกัดกร่อนแบบรูพรุนจะเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของอิออนคลอไรด์ในสารละลายมากขึ้น

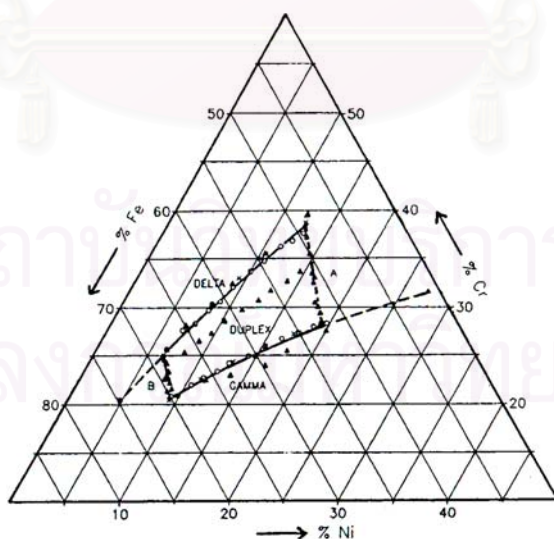
การศึกษาของ Klaus Biehl และ Helmut Wehner ⁽⁸⁾ พบว่าเมื่อปริมาณของโครงสร้างเฟอร์ไรท์ในเหล็กกล้าไร้สนิมชนิดออสเทนนิติกน้อยลง จะเกิดการกัดกร่อนของเหล็กกล้าไร้สนิมชนิดออสเทนนิติกที่อยู่ในสารละลายเฟอร์ริกคลอไรด์มากขึ้น ซึ่งได้ให้เหตุผลไว้ว่าการกัดกร่อนแบบรูพรุนเกิดในโครงสร้างจุลภาคออสเทนนิทเนื่องจากในออสเทนนิทที่มีปริมาณโครเมียมและโมลิบดีนัมน้อยกว่าในโครงสร้างจุลภาคเฟอร์ไรท์

จากการศึกษาของ W. Gysel, G. Dybonski, H.J. Wojtas และ R. Schenk⁽⁹⁾ พบว่า เหล็กกล้าไร้สนิมที่มีปริมาณของโครเมียมผสมอยู่มากกว่า 20 เปอร์เซ็นต์ขึ้นไป จะไม่เกิดการกัดกร่อนแบบรูพรุนในการใช้งานในน้ำทะเลที่อุณหภูมิห้อง ซึ่งสามารถดูได้จากรูปที่ 2.8

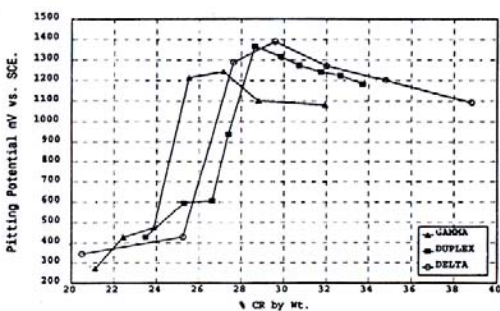


รูปที่ 2.8 ผลของปริมาณโครเมียมต่อการต้านทานการกัดกร่อนในน้ำทะเลที่อุณหภูมิห้อง⁽⁹⁾

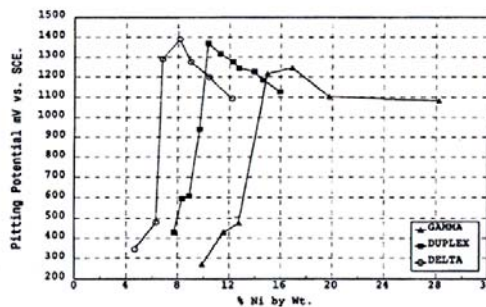
H. Hoffmeister และ G. Lothongkum⁽¹⁰⁾ ได้ทำการศึกษ เหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิติก เฟอริติก และดูเพล็กซ์ที่มีส่วนผสมทางเคมีดังแสดงในรูปที่ 2.9 ผลที่ได้สอดคล้องกับการศึกษาของ W. Gysel และคณะ คือเมื่อเพิ่มปริมาณของโครเมียมและนิกเกิลในเหล็กกล้าไร้สนิมทั้ง 3 ชนิด พบว่าค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนแบบรูพรุนจะมีค่าสูงขึ้นดังแสดงในรูปที่ 2.10 ก. ข. และ ค.



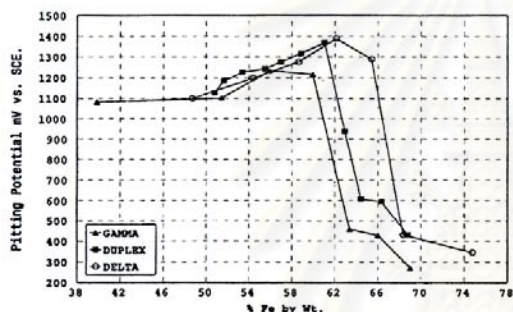
รูปที่ 2.9 แผนภูมิสมดุค 3 เฟส ของ เหล็ก - โครเมียม - นิกเกิล ที่อุณหภูมิ 1200°C แสดงส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้าไร้สนิมจากการศึกษาของ H. Hoffmeister และ G. Lothongkum⁽¹⁰⁾



ก. ผลของโครเมียม



ข. ผลของนิกเกิล



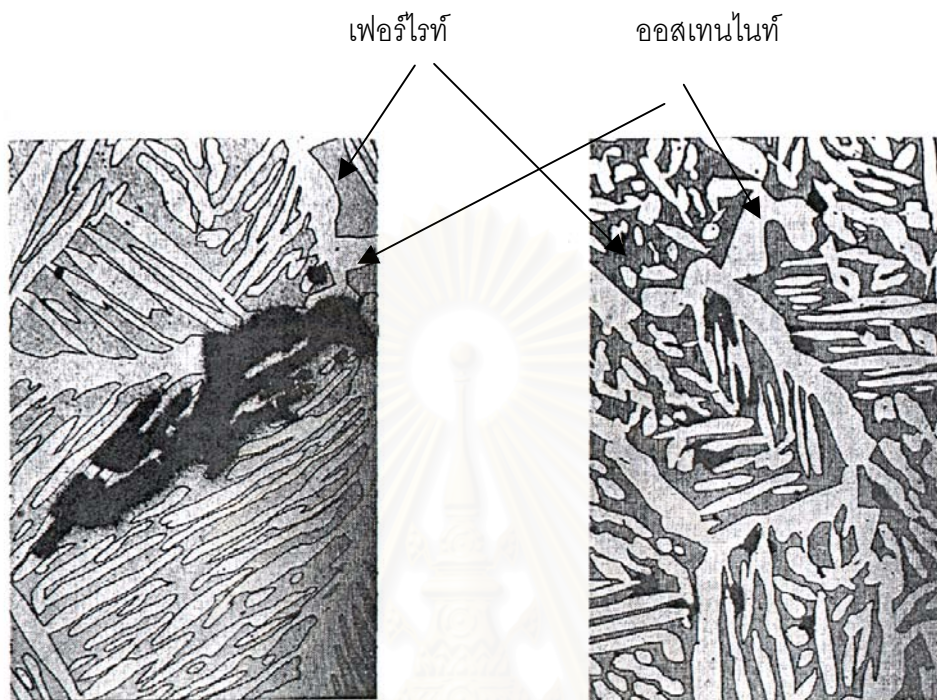
ค. ผลของเหล็ก

รูปที่ 2.10 ผลของปริมาณธาตุผสมต่อการต้านทานการกัดกร่อนของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิติก เฟอร์ริติก และดูเพล็กซ์ในน้ำทะเลจำลอง DIN 50905 ที่อุณหภูมิ 25°C⁽¹⁰⁾

ก. ผลของโครเมียม ข. ผลของนิกเกิล ค. ผลของเหล็ก

นอกจากนั้น H. Hoffmeister และ G. Lothongkum ยังพบอีกว่า เกิดการกัดกร่อนแบบรูพรุนในบริเวณที่มีโครงสร้างจุลภาคออสเทนไนท์ ในเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ ที่มีปริมาณธาตุผสมต่ำ (รูปที่ 2.9 บริเวณ A) แต่จะเกิดการกัดกร่อนในบริเวณที่มีโครงสร้างจุลภาคเฟอร์ไรท์ในเหล็กกล้าไร้สนิมแบบดูเพล็กซ์ที่มีปริมาณธาตุผสมสูง (บริเวณ B รูปที่ 2.9) ดังรูปที่ 2.11ก. และ 2.11ข. ซึ่งได้ให้เหตุผลไว้ว่าการเกิดการกัดกร่อนแบบรูพรุนที่โครงสร้างออสเทนไนท์ที่มีปริมาณโครเมียมและนิกเกิลต่ำเนื่องจาก บริเวณที่มีโครงสร้างออสเทนไนท์จะมีค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนแบบรูพรุนต่ำกว่าในบริเวณที่เป็นโครงสร้างเฟอร์ไรท์ และที่ปริมาณโครเมียมและนิกเกิลสูงค่า

ศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนแบบรูปวงของโครงสร้างทั้งสองจะมีค่าใกล้เคียงกัน การกัดกร่อนที่เกิดจึงน่าจะมีส่วนเกิดมาจากลักษณะของชั้นฟิล์มพาสซีฟที่ต่างกัน



ก. โครเมียม 23.48 % โดยน้ำหนัก
นิกเกิล 7.73 % โดยน้ำหนัก

ข. โครเมียม 32.25 % โดยน้ำหนัก
นิกเกิล 15.96 % โดยน้ำหนัก

รูปที่ 2.11 การเริ่มต้นของการเกิดการกัดกร่อนของเหล็กกล้าไร้สนิม⁽¹⁰⁾

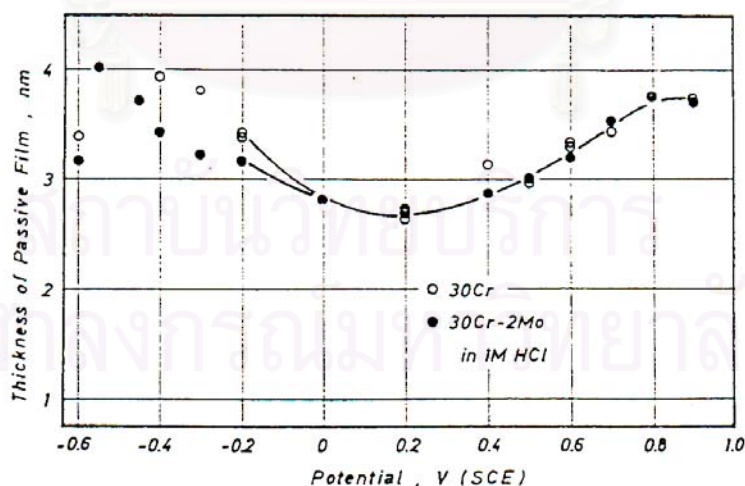
- ก. การกัดกร่อนที่โครงสร้างจุลภาคออสเทนไนท์ในเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์
- ข. การกัดกร่อนที่โครงสร้างจุลภาคเฟอร์ไรท์ในเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์

สถาบันวิจัยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

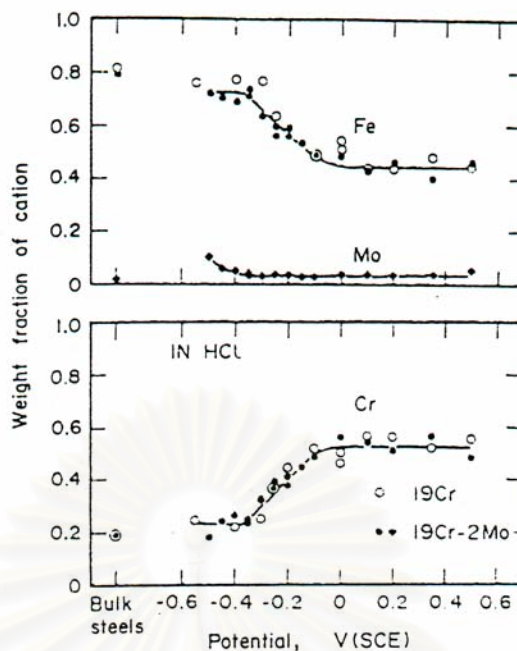
นับตั้งแต่มีวิธีการใช้เอ็กซ์พีเอสเพื่อทำการวิเคราะห์ในสภาวะสูญญากาศยิ่งยวดนับตั้งแต่ปี 1967 ทำให้สามารถที่จะวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีที่บริเวณผิววัสดุได้

G.Fierro⁽¹¹⁾ ศึกษาพฤติกรรมทางกักรัดกร่อนของเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติค ที่มีปริมาณ โครเมียม 13 เปอร์เซ็นต์ ในสารละลายของคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H₂S) และอ็อกซิเจนไดออกไซด์ (Cl₂) พบว่าฟิล์มที่ประกอบด้วยเหล็กออกไซด์และซัลไฟด์สูงการต้านทานการกัดกร่อนจะต่ำ ในขณะที่ชั้นฟิล์มที่ประกอบด้วยโครเมียมสูง การต้านทานการกัดกร่อนจะดีกว่า

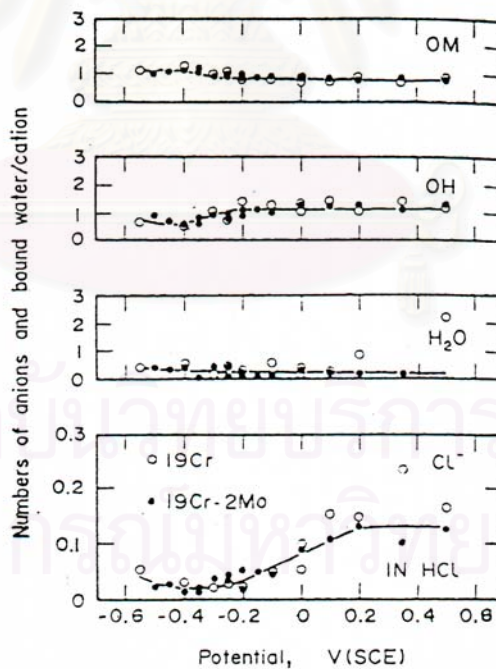
K. Hashimoto, K. Asami และ K. Teraamoto^{(12) (13)} ศึกษาชั้นฟิล์มของเหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ริคที่ผสมโครเมียม 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และชนิดที่ผสมโครเมียม 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก โมลิบดีนัม 2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ผ่านการทำโพลาริเซชันที่ค่าศักย์ไฟฟ้าต่างๆ เป็นเวลา 1 ชั่วโมงในสารละลายกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 1 โมลต่อลิตร พบว่าความหนาของฟิล์มมีความสัมพันธ์กับศักย์ไฟฟ้าเป็นรูปตัว U ดังแสดงในรูปที่ 2.12 และยังได้ทำการศึกษาชั้นฟิล์มของเหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ริคที่ผสม โครเมียม 19 เปอร์เซ็นต์ และชนิดที่ผสมโครเมียม 19 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก โมลิบดีนัม 2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักในสภาวะเดียวกันทำให้ได้ความสัมพันธ์ของปริมาณองค์ประกอบต่างๆ กับค่าศักย์ไฟฟ้างแสดงในรูปที่ 2.13 และ 2.14 ซึ่งจากการทดลองทำให้สามารถสรุปสูตรทั่วไปของฟิล์มที่เกิดขึ้นคือ $(Fe_a^{II} Fe_b^{III} Cr_c^{III} Mo_d^{VI}) O_x(OH)_yCl_z \cdot nH_2O$ ในสภาวะที่มีคลอไรด์และองค์ประกอบหลักของฟิล์มที่ป้องกันการกัดกร่อนคือธาตุโครเมียม ซึ่งมีสูตร $CrO_x(OH)_{3-2x} \cdot nH_2O$ ซึ่งเรียกว่าไฮดรอกไซด์โครเมียมออกไซด์ไฮดรอกไซด์



รูปที่ 2.12 ความหนาชั้นฟิล์มพาสซีฟของเหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ริคที่ผสมโครเมียม 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และชนิดที่ผสมโครเมียม 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก โมลิบดีนัม 2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก กับค่าศักย์ไฟฟ้า⁽¹²⁾



รูปที่ 2.13 ปริมาณของอิออนบวกที่เกิดขึ้นบนชั้นฟิล์มของเหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ริกซึ่งผ่านการทำโพลาริเซชันที่ศักย์ไฟฟ้าค่าต่างๆ เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ในสารละลาย HCl เข้มข้น 1 โมลต่อลิตร⁽¹³⁾

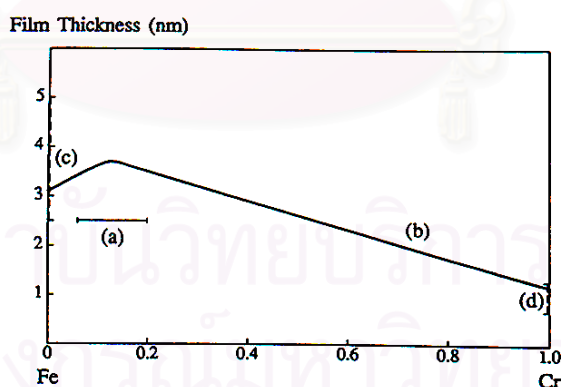


รูปที่ 2.14 ปริมาณของ O²⁻, OH⁻, Cl⁻ และน้ำ ต่อจำนวนอิออนบวกที่เกิดขึ้นบนชั้นฟิล์มของเหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ริกซึ่งผ่านการทำโพลาริเซชันที่ศักย์ไฟฟ้าค่าต่างๆ เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ในสารละลาย HCl เข้มข้น 1 โมล/ลิตร⁽¹³⁾

การศึกษาของ J. Sabseree และ G. Lothongkum⁽¹⁴⁾ พบว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายกรดไฮโดรคลอริกและโซเดียมคลอไรด์ ปริมาณโครเมียมในชั้นฟิล์มของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกเกรด 304L จะมีปริมาณลดลงและชั้นฟิล์มจะเปลี่ยนจากชั้นฟิล์มออกไซด์ไปเป็นชั้นฟิล์มของไฮดรอกไซด์แทน

จากการศึกษาของ G. Lothongkum, A. Klinkesorn และ P. Jivavibul⁽¹⁵⁾ พบว่าชั้นฟิล์มของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก เกรด 304 L ประกอบด้วยสารประกอบ ออกซี - ไฮดรอกไซด์ของโครเมียมและเหล็ก แต่หลังจากแช่ในสารละลายกรดไฮโดรคลอริกชั้นฟิล์มจะมีส่วนประกอบของไฮดรอกไซด์เพิ่มขึ้น เมื่อผ่านการแช่ในสารละลายกรดซัลฟูริกจะเกิดเป็นออกไซด์ของเหล็กและถ้าแช่ในสารละลายกรดไนตริกชั้นฟิล์มจะกลายเป็นชั้นฟิล์มของโครเมียมออกไซด์เป็นส่วนใหญ่

S.Sin และ A.Atrens^{(16) (17)} ได้ทำการศึกษาลักษณะของชั้นพาสซีฟฟิล์มของเหล็กกล้าไร้สนิมในสารละลายต่างๆ พบว่าความหนาของชั้นฟิล์มออกไซด์จะลดลงเมื่อปริมาณโครเมียมที่ผสมมีปริมาณมากขึ้นดังแสดงไว้ในรูปที่ 2.15 โดยชั้นฟิล์มพาสซีฟจะมีความหนาระหว่าง 10 - 50 อังสตรอม และชั้นฟิล์มพาสซีฟที่เกิดขึ้นจะมีส่วนประกอบ 3 ชั้น โดยจะมีชั้นบางๆของไฮดรอกไซด์ที่ชั้นนอกสุดของชั้นฟิล์มพาสซีฟซึ่งจะเปลี่ยนชนิดไปตามสิ่งแวดล้อมต่างๆ ดังรวบรวมไว้ในตารางที่ 2.1 ชั้นที่สองเป็นชั้นออกไซด์ซึ่งมีเหล็กและโครเมียมออกไซด์เป็นส่วนประกอบหลักทั้งเหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ริติกและออสเทนนิติก และชั้นสุดท้ายเป็นชั้นที่ประกอบด้วยส่วนประกอบที่อยู่ในรูปของโลหะต่างๆ



รูปที่ 2.15 ความหนาของชั้นฟิล์มต่อปริมาณโครเมียมที่ผสมในโลหะผสมเหล็ก - โครเมียมที่สิ่งแวดล้อมต่างๆ

- ในบรรยากาศออกซิเจน ความดัน 0.2 atm ที่อุณหภูมิห้อง
- ผ่านการขัดผิวในเอธิดีน
- เหล็กบริสุทธิ์
- โครเมียมบริสุทธิ์

ตารางที่ 2.1 แสดงชนิดของชั้นฟิล์มที่เกิดขึ้นในสภาพแวดล้อมต่างๆ⁽¹⁶⁾

a. สภาพแวดล้อมบรรยากาศ

b. สภาพแวดล้อมในสารละลาย

Environment	Film composition	Thickness [Å]	Bulk material	Technique
a				
Dry oxygen, RT	Outer ^a : (Fe, Cr) ₂ O ₃ Inner ^b : FeCr ₂ O ₄	25	Fe(6–20)Cr	ESCA
Dry oxygen, RT 2 min–300 h	Outer: Cr(OH) ₃ Fe–Cr oxides	5~30	Fe(6–15)Cr	ESCA
Polished in air, RT	Fe & Cr oxides	25	(15–20)Cr(10–20)Ni & (0.28–4)Mo	ESCA, AES
Vacuum, 323~653 K	Bound water Cr _{2-x} Fe _x O ₃ , Cr-enrich	~20	Fe15Cr	ESCA
Dry polishing	Bound water Fe & Cr oxides	38	18Cr8Ni	ESCA
Dry polishing	Bound water Fe & Cr oxides	40	17Cr11Ni2Mo	ESCA
Oxygen, 1173 K, 10 ⁻⁶ and 10 ⁻⁹ atm	Cr ₂ O ₃		Fe30Cr	ESCA, AES
UHV-chamber, 657 K	Fe & Cr oxides	20~40	Fe24Cr11Mo	ESCA
Air, RT	Bound water Fe & Cr oxides Mo oxides	22	Fe17Cr	ESCA, AES
Air, RT	Bound water Fe & Cr oxides Mo oxides	19	Fe15Cr4Mo	ESCA, AES
b				
Oxygenated water, 343 K (after breakdown)	Outer ^a : Cr(OH) ₃ Inner ^b : Fe _{1+x} Cr _{2-x} O ₄ Outer: FeOOH Inner: Fe _{1+x} Cr _{2-x} O ₄		(15–18)Cr(10–20)Ni & (0.17–4)Mo	ESCA
De-Oxygenated water 313–353 K	Bound water Fe-rich & Cr-rich	15–30	18Cr8Ni	ESCA
Neutral water, RT 2 min–300 h	Outer: Cr(OH) ₃ Fe–Cr oxides	8–25	Fe(6–15)Cr	ESCA
TCE polishing	Bound water Fe & Cr oxides	14–38	Fe(12–100)Cr	ESCA
Wet polishing	Bound water Fe & Cr oxides	40	18Cr8Ni 17Cr11Ni2Mo	ESCA
HF + HNO ₃	Bound water Fe & Cr oxides	38	18Cr8Ni	ESCA
HF + HNO ₃	Bound water Fe & Cr oxides	40	17Cr11Ni2Mo	ESCA
10% HNO ₃	Bound water Fe & Cr oxides	35	18Cr8Ni, 17Cr11Ni2Mo	ESCA
30% HNO ₃	Bound water Fe & Cr oxides	34	18Cr8Ni 17Cr11Ni2Mo	ESCA
5M HCOOH, 0.1 M H ₂ SO ₄ , 343 K	Bound water Fe & Cr oxides Cr-rich		Fe17Cr, Fe17Cr4Mo	AES, SIMS
Pure water, 563 K	Outer: oxyhydroxides Mixed oxides		18Cr8Ni	ESCA, AES
Electropolished (EP) –800–400 mV(SCE)	Outer: (Fe, Cr) ₂ O ₃ Inner: FeCr ₂ O ₄	25–17	Fe26Cr	AES

จากการศึกษาขั้นต้น จะเห็นได้ว่าพฤติกรรมการเกิดการกักร่อนแบบรูพรุนของเหล็กกล้าไร้สนิม สามารถอธิบายได้โดยพฤติกรรมการเกิดชั้นฟิล์มของเหล็กกล้าไร้สนิม การศึกษานี้เป็นการศึกษาชั้นฟิล์มของเหล็กกล้าไร้สนิมออกสเทนิติกและเฟอร์ริติก เพื่อที่จะนำไปอธิบายพฤติกรรมการกักร่อนแบบรูพรุนของเหล็กกล้าไร้สนิมชนิดูเพิลท์ซ์ในการศึกษาของ H. Hoffmeister และ G. Lothongkum ที่แสดงไว้ในรูปที่ 2.10 และ 2.11 อีกทั้งจากผลงานวิจัยที่ผ่านมายังไม่มีการศึกษาฟิล์มชั้นฟิล์มของเหล็กกล้าไร้สนิมชนิดูเพิลท์ซ์ และคาดว่าเหล็กกล้าไร้สนิมชนิดูเพิลท์ซ์นี้ จะเข้ามามีบทบาทสำคัญในอุตสาหกรรมเคมีในประเทศ การศึกษานี้จึงมีส่วนช่วยให้เกิดความเข้าใจพฤติกรรมการเกิดการกักร่อนแบบรูพรุนของเหล็กกล้าไร้สนิมชนิดูเพิลท์ซ์ เพื่อเป็นข้อมูลในการเลือกใช้งาน การศึกษา และการพัฒนาต่อไป

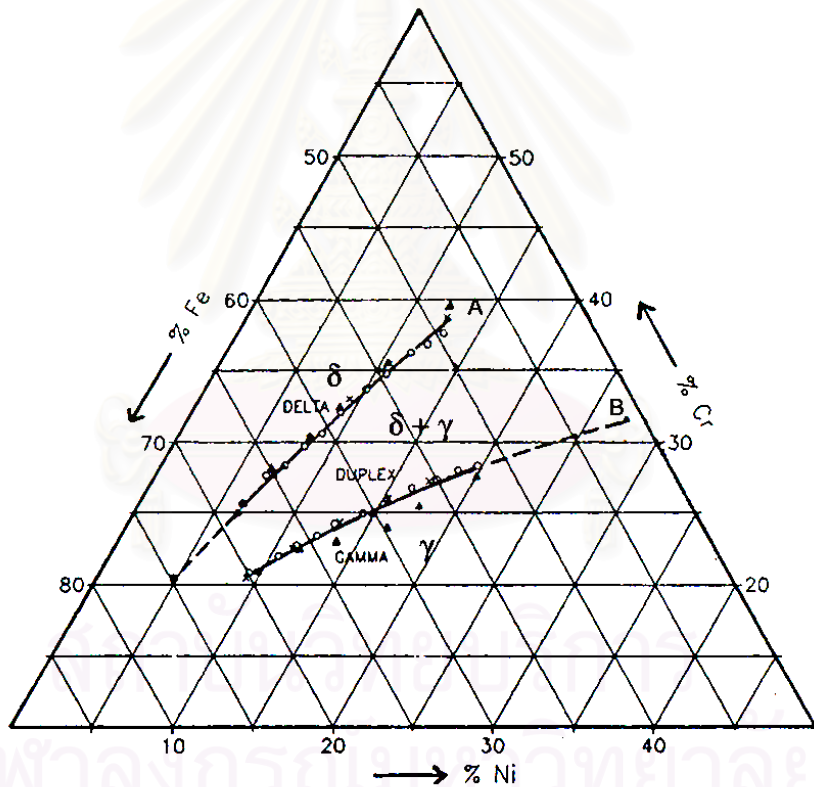


สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3 วิธีการทดลอง

ชิ้นงานทดลอง

1. เตรียมชิ้นงานหล่อของเหล็กกล้าไร้สนิมตามการทดลองของ H. Hoffmeister และ G. Lothongkum โดยเลือกส่วนผสมเคมีตามเส้นที่เป็นโครงสร้างจุลภาคออสเทนไนต์ (เส้น A) จำนวน 7 ส่วนผสม และที่เป็นโครงสร้างจุลภาคเฟอร์ไรต์ (Cr 20.5% - 39% ,Ni 4.5% - 12.5%) ตามเส้น B จำนวน 7 ส่วนผสม ดังแสดงในแผนภูมิสมดุลง 3 เฟสระหว่าง เหล็ก - โครเมียม - นิกเกิล (รูปที่ 3.1) โดยชิ้นงานหลอมมีขนาด 11 x 25 x 25 มิลลิเมตร นำมาทำการอบอ่อนที่อุณหภูมิ 1200°C เป็นเวลา 52 ชั่วโมงเพื่อให้เปลี่ยนเป็นโครงสร้างเฟอร์ไรต์และออสเทนไนต์ตามต้องการทั้งชิ้นงานแล้วทำการชุบในน้ำเกลือที่อุณหภูมิห้อง



รูปที่ 3.1 แผนภูมิสมดุลง 3 เฟส ของ เหล็ก - โครเมียม - นิกเกิล ที่อุณหภูมิ 1200 °C แสดงบริเวณเฟส δ , γ และ $\delta + \gamma$

ชิ้นงานที่ได้ นำมาหาส่วนผสมทางเคมีและโครงสร้างจุลภาคด้วยเครื่อง X - Ray Diffraction และ X - Ray Fluorescent เป็นบางชิ้นเพื่อยืนยันส่วนผสมทางเคมีจากเครื่อง X - Ray Diffraction ได้ผลตามตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 แสดงผลการวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้าไร้สนิมที่ใช้ในการทดลองด้วยเครื่อง X - Ray Diffraction* และ X - Ray Fluorescent

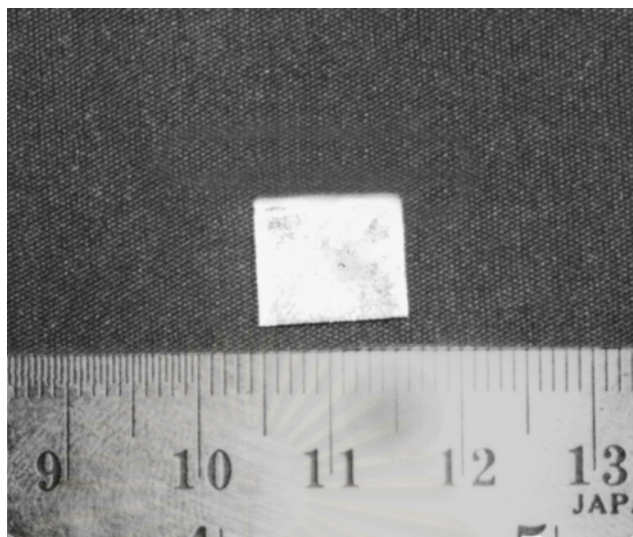
เหล็กกล้าไร้สนิม	ชั้นที่	ส่วนผสมทางเคมี (%โดยน้ำหนัก)			โครงสร้าง	
		Fe	Cr	Ni		
เฟอร์ริติก	1	74.75 (75.42)*	20.50 (19.22)*	4.75 (5.36)*	เฟอร์ไรท์	
	2	68.36	25.24	6.40		
	3	65.40	27.62	6.97		
	4	62.13	29.58	8.29		
	5	58.64 (57.10)*	32.01 (31.56)*	9.35 (11.34)*		
ออสเทนนิติก	6	54.39	34.79	10.82	เฟอร์ไรท์	
	7	48.70	38.80	12.50		
	1	69.00 (69.00)*	21.11 (21.31)*	9.89 (10.69)*		ออสเทนไนท์
	2	66.00	22.43	11.57		
	3	63.38	22.90	13.72		ออสเทนไนท์
	4	59.95 (59.59)*	23.49 (22.67)*	16.56 (17.74)*		
	5	57.01	25.45	17.54		
6	52.39	27.65	19.96	ออสเทนไนท์		
7	39.81	31.94	28.25			

* = ข้อมูลจากเอกสารอ้างอิง 16

()* = ผลการวิเคราะห์จากเครื่อง X - Ray Fluorescent

สเปกตรัมการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยเครื่อง X - Ray Diffraction แสดงไว้ในภาคผนวก ก.

2. ตัดชิ้นงานที่ผ่านการอบชุบความร้อนเพื่อทดสอบชั้นพาสซีฟฟิล์มด้วยเครื่องเอ็กซ์พีเอส ขนาด 10 x 10 x 2 มิลลิเมตร (รูปที่ 3.2) นำมาขัดด้วยกระดาษทรายจนถึงเบอร์ 1200 ล้างด้วยอะซิโตนในเครื่องทำความสะอาด อุลตราโซนิก แล้วเก็บไว้ในเดสซิเคเตอร์เป็นเวลา 24 ชั่วโมง



รูปที่ 3.2 ชิ้นงานที่ใช้ทดสอบในเครื่องเอ็กซ์พีเอส

3. นำชิ้นงาน 1 และ 7 ของเหล็กกล้าไร้สนิมทั้งสองชนิดมาขัดด้วยกระดาษทรายจนถึงเบอร์ 1200 แล้วล้างด้วยอะซิโตนในเครื่องทำความสะอาด อุลตราโซนิค แล้วทิ้งไว้ในเดสซิเคเตอร์เป็นเวลา 24 ชั่วโมงเพื่อเตรียมการทดสอบหาด้วยเครื่องโฟเทนที่ ไอสแตท

การวิเคราะห์พื้นผิว

1. นำชิ้นงานมาวิเคราะห์ด้วยเครื่อง เอ็กซ์พีเอส (รูปที่ 3.3) เพื่อศึกษาส่วนประกอบและสถานะทางเคมี (Chemical State) ของชั้นฟิล์มโดยตั้งสภาวะการทำงานของเครื่องในขณะวิเคราะห์ดังนี้

- แหล่งกำเนิด X-ray		AIK α
ศักย์การเร่ง (VX)		10 กิโลโวลท์
กระแสการเร่ง (IX)		20 มิลลิแอมป์
- เครื่องวิเคราะห์พลังงาน จลน์		
พลังงานผ่าน (Pass Energy; ES)	10	อิเล็กตรอนโวลท์
ความกว้างของช่วงวิเคราะห์ (SW)	0.1	อิเล็กตรอนโวลท์
ระยะเวลาสะสมข้อมูล (SI)	100	มิลลิวินาที



รูปที่ 3.3 เครื่องเอ็กซ์พีเอสที่ใช้ในการทดลอง

2. ลอกผิวของชั้นฟิล์มโดยการทำสปัตเตอริง (Sputtering) ด้วยปืนอาร์กอนชนิดคอปแมน (Argon Ion Sputtering Gun ; Kaufman type) โดยตั้งสภาวะทำงาน

- ความดัน	0.03	ปาสคาล
- ความต่างศักย์เร่งอิเล็กตรอน	500	โวลท์
- อัตราการลอกผิว (Etching Rate)	30	เปอร์เซ็นต์

หลังจากนั้นทำการวิเคราะห์ลักษณะชั้นฟิล์มที่มีความลึกต่างๆ

3. คำนวณหาอัตราการลอกผิวของฟิล์มเพื่อใช้ในการคำนวณความหนาของชั้นฟิล์มโดยเทียบกับอัตราการลอกผิวของ Commonwealth Scientific Co. Ltd. และ Hakuto Co.Ltd.⁽¹⁸⁾ ซึ่งหาอัตราการลอกผิวโดยใช้ปืนอาร์กอนชนิดเดียวกัน ซึ่งจะให้แนวโน้มของอัตราการลอกผิวเป็นสัดส่วนกัน

4. วิเคราะห์เชิงคุณภาพ (Qualitative Analysis) และเชิงปริมาณ (Quantitative Analysis) ของสารประกอบของชั้นฟิล์มทั้งหมดที่ได้จากเครื่องเอ็กซ์พีเอส

การวิเคราะห์การต้านทานการกัดกร่อน

นำชิ้นงานชิ้นที่ 1 และ 7 ของเหล็กกล้าไร้สนิมทั้งสองโครงสร้างที่เตรียมไว้มาทดลองหาเส้นโพลาริเซชันด้วยเครื่องโพเทนทีโอสแตท เพื่อหาค่าศักย์ไฟฟ้าที่เกิดการกัดกร่อน (E_{corr}) ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนแบบรูพรุน (E_p) และค่ากระแสพาสซีฟ (I_{pass}) ในสารละลายไฮเดียมคลอไรด์เข้มข้น 3.5 % โดยน้ำหนักที่อุณหภูมิห้อง โดยตั้งสภาวะทำงาน

- | | | |
|-------------------------------------|-----|---------------------|
| - อัตราการสแกน (Scan Rate) | 0.1 | มิลลิโวลต์ต่อวินาที |
| - พื้นที่ของชิ้นงานที่แช่ในสารละลาย | 5.5 | ตารางเซนติเมตร |

แล้วนำค่าที่ได้จากเหล็กกล้าไร้สนิมทั้งสองชนิดมาเปรียบเทียบกัน



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล

การหาอัตราการลอกผิวของชั้นฟิล์ม

จากการศึกษาเบื้องต้นและการทดลองหาลักษณะของชั้นฟิล์มพาสซีฟของเหล็กกล้าไร้สนิมทั้งสองชนิดแสดงให้เห็นว่าชั้นฟิล์มพาสซีฟมีองค์ประกอบหลายอย่างซึ่งมีชั้นออกไซด์ของโครเมียมเป็นส่วนประกอบหลัก ทำให้ไม่สามารถทราบอัตราการลอกผิวที่แน่นอนได้เนื่องจากอัตราการลอกผิวจะเปลี่ยนไปตามชนิดของชั้นฟิล์มที่เกิด

อย่างไรก็ตามได้คำนวณหาอัตราการลอกผิวโดยประมาณ โดยเปรียบเทียบกับผิว SiO_2 ที่มีความหนา 1000 อังสตรอม ซึ่งแสดงรายละเอียดการคำนวณในภาคผนวก ข. ดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 อัตราการลอกผิวโดยประมาณจากการคำนวณ

ชนิดของผิว	ผลการคำนวณหาอัตราการลอกผิว (อังสตรอมต่อนาที)
SiO_2	87
Cr_2O_3	17
Fe – Cr – Ni (เหล็กกล้าไร้สนิม 304)	87

ในที่นี้จะใช้อัตราการลอกผิวของโครเมียมออกไซด์ไปคำนวณหาความหนาของชั้นฟิล์มโดยประมาณต่อไป

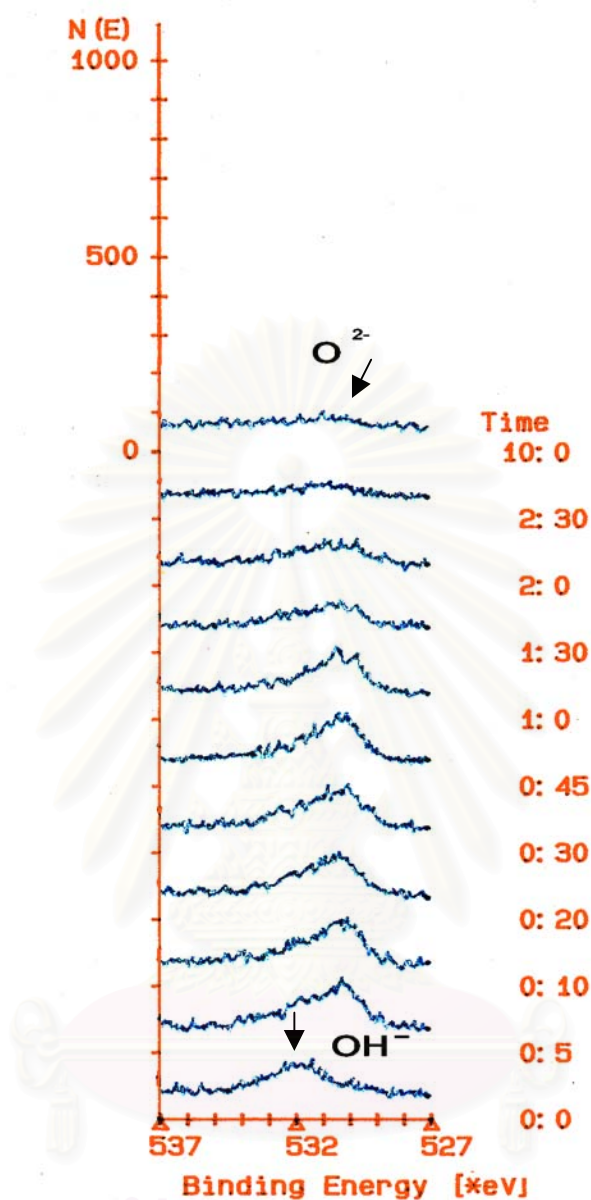
ส่วนประกอบของชั้นฟิล์มเหล็กกล้าไร้สนิมทั้งสองชนิด

จากการศึกษาข้อมูลเบื้องต้นพบว่าโครงสร้างและส่วนประกอบต่างๆ ของชั้นพาสซีฟฟิล์มของเหล็กกล้าไร้สนิมจะมีผลต่อการต้านทานการกัดกร่อน โดยทั่วไปชั้นพาสซีฟฟิล์มมีส่วนประกอบแบ่งเป็น 3 ชั้นหลัก โดยชั้นนอกสุดเป็นส่วนประกอบของไฮดรอกไซด์ ชั้นกลางเป็นส่วนประกอบของออกไซด์ของโครเมียมและเหล็ก และชั้นในเป็นฟิล์มที่มีส่วนประกอบในรูปของโลหะที่ผสมในเหล็กกล้าไร้สนิม ก่อนจะถึงชั้นของเนื้อเหล็กกล้าไร้สนิม

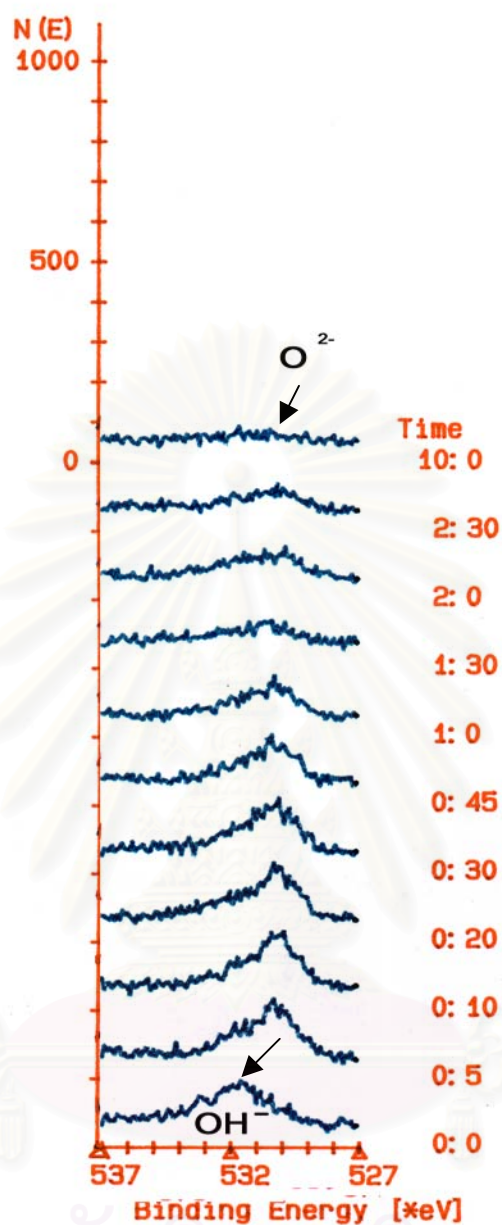
จากการทดลองพบว่าชั้นฟิล์มที่เกิดขึ้นของเหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ริกและออสเทนิติกมีโครงสร้างคล้ายกันและคล้ายกับการศึกษาเบื้องต้น⁽¹⁶⁾ ส่วนที่แตกต่างกันคือ ความหนาและปริมาณธาตุผสมในชั้นฟิล์ม ในที่นี้จะอธิบายส่วนประกอบของฟิล์มโดยแยกเป็นแต่ละธาตุ การ

วิเคราะห์ชั้นฟิล์มในที่นี่จะยกตัวอย่างชั้นฟิล์มของเหล็กกล้าไร้สนิมเฟอริติกที่ผสมโครเมียม 38.80 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก นิกเกิล 12.50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิติกที่ผสมโครเมียม 31.94 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก นิกเกิล 28.25 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก สำหรับการวิเคราะห์ชั้นฟิล์มของเหล็กเกรดอื่นๆ จะแสดงในภาคผนวก ค.

ผลการวิเคราะห์ผิวของเหล็กกล้าไร้สนิมในแนวลึก (Depth Analysis Technique) ด้วยเครื่อง เอ็กซ์พีเอสหลังทิ้งไว้ในเดสลิเคเตอร์ เป็นเวลา 24 ชั่วโมง โดยลอกผิวด้วยอาร์กอนอิออน (Argon Sputtering) เป็นเวลาต่างๆ ทำให้ทราบสถานะเคมีของธาตุออกซิเจน โครเมียม เหล็ก และนิกเกิลของชั้นพาสซีฟฟิล์มของเหล็กกล้าไร้สนิมที่ระดับความหนาต่างกันโดยนำค่าพลังงานยึดเหนี่ยวที่ได้เปรียบเทียบกับค่าพลังงานยึดเหนี่ยวมาตรฐานซึ่งรวบรวมไว้ในภาคผนวก ง. ดังรูปที่ 4.1 ถึง 4.8 แสดงตัวอย่างสเปกตรัมของธาตุออกซิเจน โครเมียม เหล็ก และนิกเกิลของเหล็กกล้าไร้สนิมทั้งสองชนิด ในรูปที่ 4.1 และ 4.2 แสดงการเปลี่ยนแปลงพลังงานยึดเหนี่ยวของออกซิเจนในชั้นฟิล์มเหล็กกล้าไร้สนิมเฟอริติกที่ผสมโครเมียม 38.80 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก นิกเกิล 12.50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิติกที่ผสมโครเมียม 31.94 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก นิกเกิล 28.25 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักตามลำดับ สำหรับสเปกตรัมออกซิเจนของเหล็กกล้าไร้สนิมเฟอริติกและออสเทนิติกเกรดอื่นแสดงในภาคผนวก ค.1 ผลการวิเคราะห์สเปกตรัมของออกซิเจนพบว่าที่ผิวชั้นนอกสุด (0 วินาที) มีพลังงานยึดเหนี่ยว 531.8 อิเล็กตรอนโวลต์ เมื่อเทียบกับพลังงานยึดเหนี่ยวมาตรฐานพบว่าสถานะทางเคมีของออกซิเจนอยู่ในรูปของไฮดรอกไซด์ (M – OH) ถือเป็นชั้นของไฮดรอกไซด์แต่เป็นชั้นที่บางมากประมาณ 1.5 อังสตรอม ความหนาชั้นนอกสุดของเหล็กกล้าไร้สนิมทั้งสองชนิดอาจใกล้เคียงกัน เนื่องจากชั้นฟิล์มนี้เกิดขึ้นในอากาศ ชั้นฟิล์มไฮดรอกไซด์ที่เกิดขึ้นอาจจะเกิดจากขั้นตอนการเตรียมชิ้นงานเมื่อทำการลอกผิวให้ลึกลงไป ตำแหน่งสเปกตรัมออกซิเจนจะเลื่อนไปที่พลังงานยึดเหนี่ยว 530.2 อิเล็กตรอนโวลต์เพียงอย่างเดียวเมื่อเทียบกับพลังงานยึดเหนี่ยวมาตรฐานแสดงให้เห็นว่าออกซิเจนอยู่ในรูปของออกไซด์และมีปริมาณในชั้นฟิล์มน้อยลงโดยดูได้จากความสูงของสเปกตรัม ที่เวลาการลอกผิว 150 วินาที (ความหนาประมาณ 43.5 อังสตรอม) สเปกตรัมออกซิเจนจะหายไป ผลการวิเคราะห์แสดงว่าชั้นฟิล์มบนผิวเหล็กกล้าไร้สนิมทั้งสองชนิดหลังจากปล่อยทิ้งไว้ในเดสลิเคเตอร์ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง จะประกอบด้วย ชั้น M – OH ที่ชั้นนอกสุดมีความหนาน้อย และส่วนประกอบของ M – O ที่ผิวชั้นใน ซึ่งจะมีปริมาณลดลงจนหมดไปเมื่อถึงเนื้อของโลหะ นั้นแสดงว่าส่วนประกอบเป็นชั้นฟิล์มออกไซด์อาจจะเป็นตัวควบคุมคุณสมบัติการต้านทานการกัดกร่อนของเหล็กกล้าไร้สนิมเนื่องจากชั้นฟิล์มที่เกิดขึ้นจะประกอบด้วยชั้นฟิล์มออกไซด์เป็นส่วนใหญ่

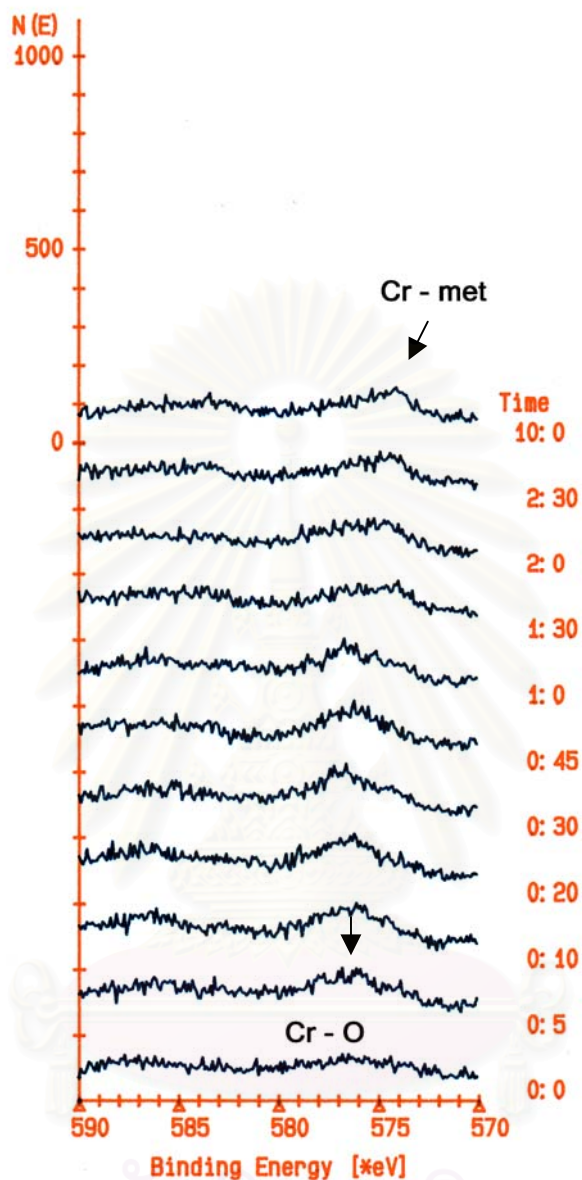


รูปที่ 4.1 ตัวอย่างผลการวิเคราะห์ธาตุออกซิเจน(O1s) ด้วยเครื่องเอ็กซ์พีเอส ที่ผิวเหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ริกที่ผสมโครเมียม 38.80 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก นิกเกิล 12.50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่เวลาการลอกผิวต่างๆ อัตราการลอกผิว 17 องศาต่อวินาที หลังทิ้งไว้ในเดสซิเคเตอร์ ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง

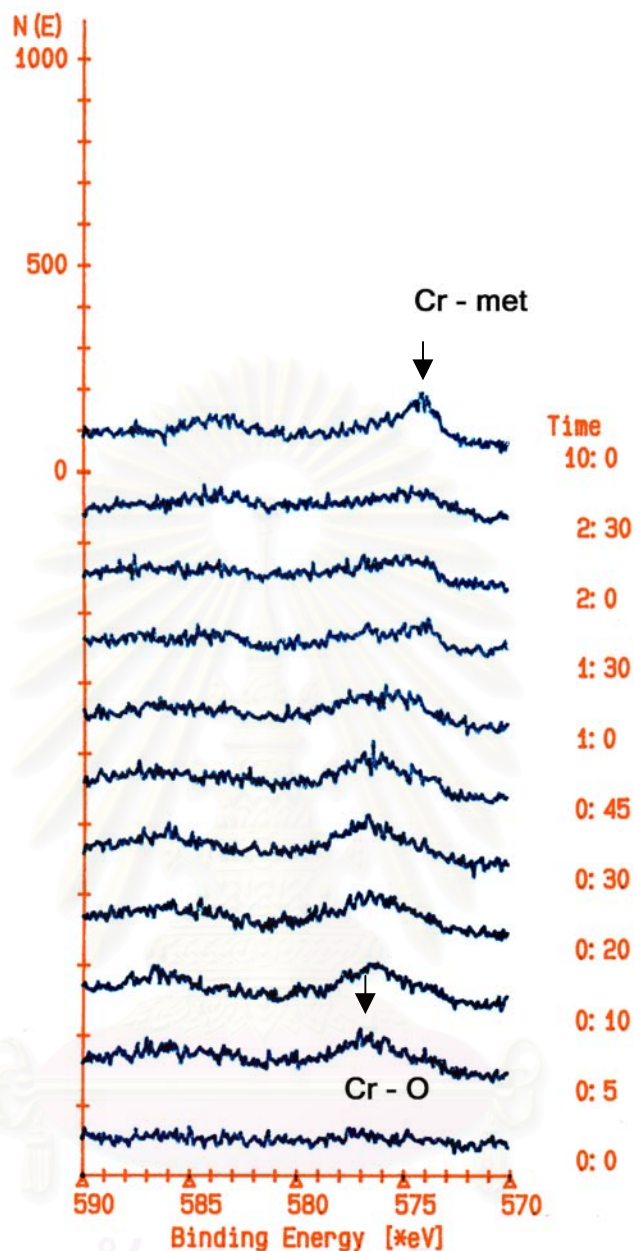


รูปที่ 4.2 ตัวอย่างผลการวิเคราะห์ธาตุออกซิเจน(O1s) ด้วยเครื่องเอ็กซ์พีเอส ที่ผิวเหล็กกล้าไร้สนิมออกสเทนิติกที่ผสมโครเมียม 31.94 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก นิกเกิล 28.25 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่เวลาการลอกผิวต่างๆ อัตราการลอกผิว 17 องศาต่อวินาที หลังทิ้งไว้ในเดสซิเคเตอร์ ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง

รูปที่ 4.3 และ 4.4 แสดงสเปกตรัมการเปลี่ยนแปลงพลังงานยึดเหนี่ยวของโครเมียมตามความลึกจากผิวของเหล็กกล้าไร้สนิมเพอริติกที่ผสมโครเมียม 38.80 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก นิกเกิล 12.50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิติกที่ผสมโครเมียม 31.94 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก นิกเกิล 28.25 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักตามลำดับ สำหรับสเปกตรัมโครเมียมของเหล็กกล้าไร้สนิมเกรดอื่นแสดงในภาคผนวก ค.1 พบว่าโครเมียมที่ผิวออกสุดมีปริมาณน้อยมาก ทำให้ยากที่จะบอกว่าโครเมียมที่พบอยู่ในสถานะใดระหว่าง $\text{Cr}(\text{OH})_3$ ซึ่งมีค่าพลังงานยึดเหนี่ยว 577.3 อิเล็กตรอนโวลท์ และ Cr_2O_3 ซึ่งมีค่าพลังงานยึดเหนี่ยวอยู่ที่ 576.6 อิเล็กตรอนโวลท์ เมื่อพิจารณาร่วมกับสเปกตรัมของออกซิเจนในรูปที่ 4.1 และ 4.2 อาจกล่าวได้ว่า ที่ชั้นนอกสุดของชั้นฟิล์มพาสซีฟซึ่งมีความหนาน้อยมากโครเมียมมีสถานะทางเคมีในรูปของไฮดรอกไซด์ หลังจากนั้นในชั้นฟิล์มที่ลึกลงไปโครเมียมจะอยู่ในรูปโครเมียมออกไซด์อย่างเดี่ยวอยู่ที่ความลึกช่วงหนึ่ง หลังจากนั้นสเปกตรัมของโครเมียมออกไซด์จะมีปริมาณน้อยลงแล้วค่อยๆ หมดไปที่ความลึกค่าหนึ่ง ในขณะที่เดียวกันจะมีสเปกตรัมของโลหะโครเมียมเกิดขึ้นและมีปริมาณมากขึ้นตามเวลาการลอกผิวหรือเพิ่มความลึกจนกระทั่งเหลือสเปกตรัมของโลหะโครเมียมเพียงอย่างเดียวเมื่อถึงชั้นของเนื้อเหล็กกล้าไร้สนิม

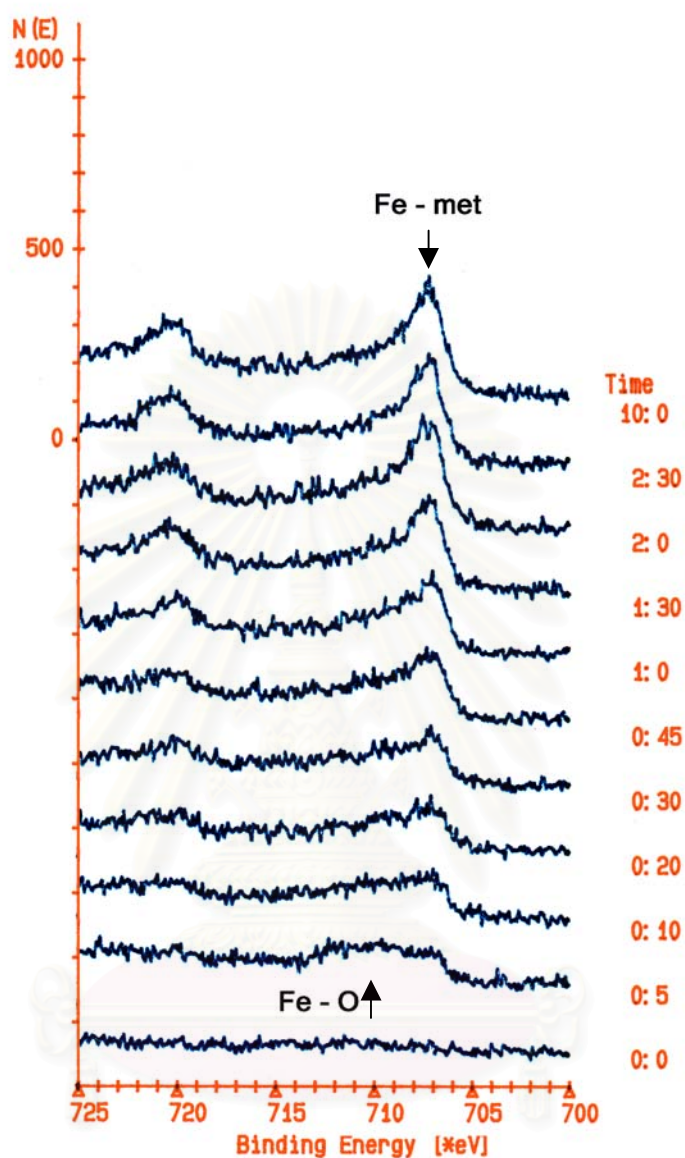


รูปที่ 4.3 ตัวอย่างผลการวิเคราะห์ธาตุโครเมียม(Cr_{2p}) ด้วยเครื่องเอกซเรย์โฟโตอิเล็กทริกที่ผิวเหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ริกที่ผสมโครเมียม 38.80 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก นิกเกิล 12.50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่เวลาการลอกผิวต่างๆ อัตราการลอกผิว 17 องศาต่อวินาที หลังทิ้งไว้ในเดสซิเคเตอร์ ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง

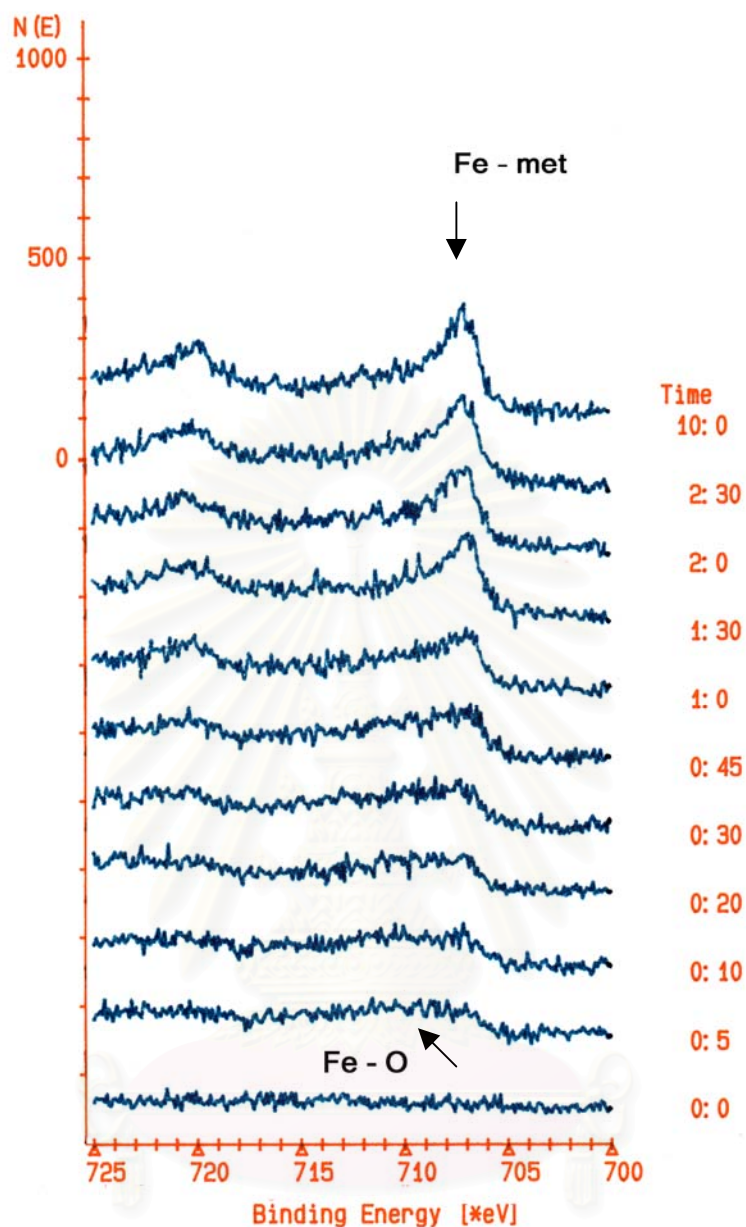


รูปที่ 4.4 ตัวอย่างผลการวิเคราะห์ธาตุโครเมียม(Cr2p) ด้วยเครื่องเอ็กซ์พีเอส ที่ผิวเหล็กกล้าไร้สนิมออกสเทินดิกที่ผสมโครเมียม 31.94 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก นิกเกิล 28.25 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่เวลาการลอกผิวต่างๆ อัตราการลอกผิว 17 องศาต่ออนาที หลังทิ้งไว้ในเดสซิเคเตอร์ ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง

ลักษณะสเปกตรัมการเปลี่ยนแปลงพลังงานยึดเหนี่ยวตามความลึกของเหล็กในเหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ริติกที่ผสมโครเมียม 38.80 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก นิกเกิล 12.50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักและเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกที่ผสมโครเมียม 31.94 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก นิกเกิล 28.25 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักแสดงไว้ในรูปที่ 4.5 และ 4.6 ตามลำดับ พบว่าที่ชั้นฟิล์มนอกสุดจะมีเหล็กน้อยมากแต่จะมีปริมาณมากขึ้นในชั้นลึกเข้าไป ซึ่งเหล็กที่พบจะอยู่ในรูปธาตุออกซิไดซ์ (มีพลังงานยึดเหนี่ยว 710.9 อิเล็กตรอนโวลท์) เมื่อลอกผิวลึกลงไปพบว่าปริมาณเหล็กในรูปธาตุออกซิไดซ์จะลดลงพร้อมๆ กับพบเหล็กที่มีสถานะเคมีเป็นซึ่งมีพลังงานยึดเหนี่ยว 706.9 อิเล็กตรอนโวลท์ แสดงว่าที่ผิวชั้นนอกสุดของชั้นฟิล์มจะมีเหล็กอยู่ในปริมาณต่ำมากอยู่ในรูปของเหล็กออกไซด์ ในชั้นฟิล์มที่ลึกเข้าไปเหล็กจะอยู่ในรูปของโลหะในปริมาณมากขึ้น ผลการวิเคราะห์อาจชี้ให้เห็นว่าชั้นฟิล์มออกไซด์ของเหล็กมีผลต่อการต้านทานการกัดกร่อนของเหล็กกล้าไร้สนิมน้อยมาก สาเหตุที่พบเหล็กในรูปโลหะและโครเมียมออกไซด์ในชั้นฟิล์มมากกว่าเหล็กออกไซด์นั้นสามารถอธิบายได้จากความสามารถดึงดูดออกซิเจน (Oxygen Affinity) ของโครเมียมมากกว่าความสามารถของเหล็ก สำหรับสเปกตรัมเหล็กของเหล็กกล้าไร้สนิมเกรดอื่นแสดงในภาคผนวก ค.2



รูปที่ 4.5 ตัวอย่างผลการวิเคราะห์ธาตุเหล็ก(Fe2p_{3/2}) ด้วยเครื่องเอ็กซ์พีเอส ที่ผิวเหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ริติกที่ผสมโครเมียม 38.80 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก นิกเกิล 12.50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่เวลาการลอกผิวต่างๆ อัตราการลอกผิว 17 องศาต่อนาที หลังทิ้งไว้ในเดสซิเคเตอร์ ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง

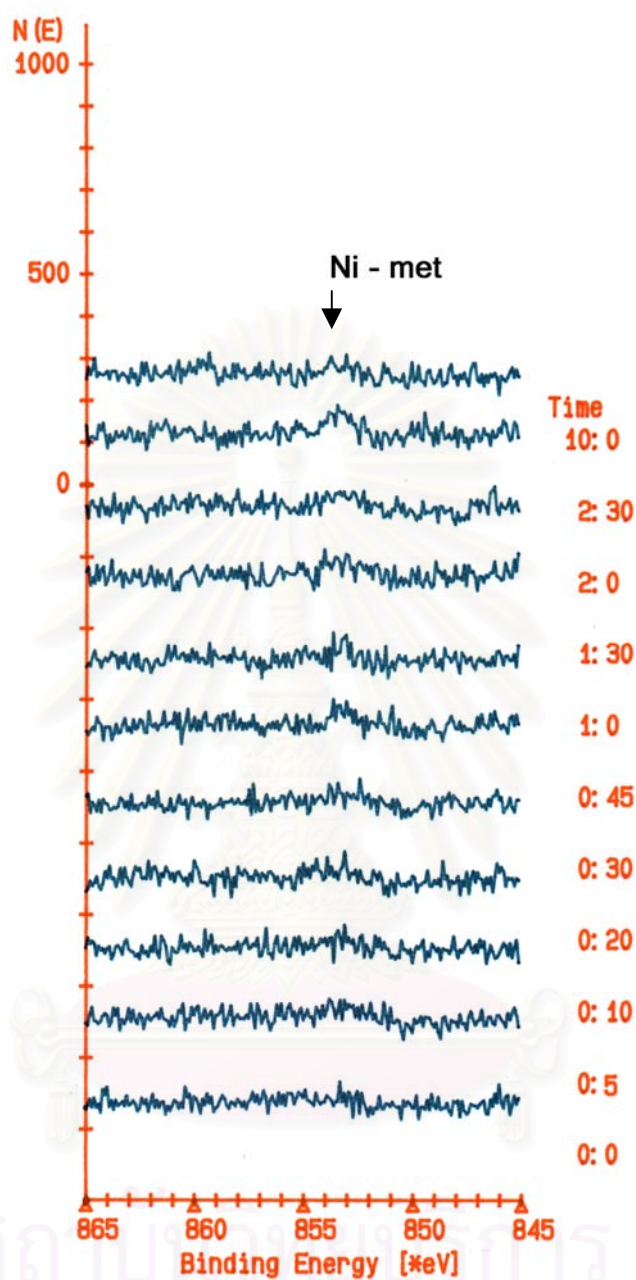


รูปที่ 4.6 ตัวอย่างผลการวิเคราะห์ธาตุเหล็ก(Fe2p_{3/2}) ด้วยเครื่องเอ็กซ์พีไอเอส ที่ผิวเหล็กกล้าไร้สนิมออกสเทนิติกที่ผสมโครเมียม 31.94 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก นิกเกิล 28.25 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่เวลาการลอกผิวต่างๆ อัตราการลอกผิว 17 องศาต่อรอบต่อนาที หลังทิ้งไว้ในเดสซิเคเตอร์ ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง

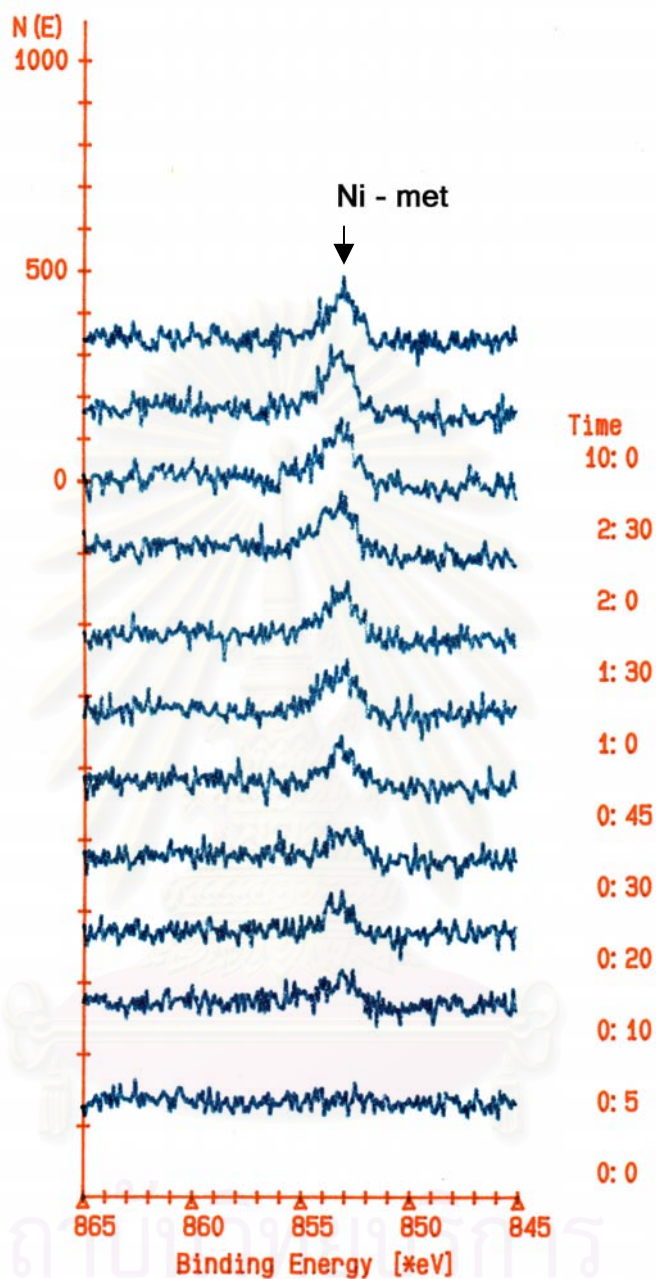
รูปที่ 4.7 และ 4.8 แสดงการเปลี่ยนแปลงพลังงานยึดเหนี่ยวของนิกเกิลตามความลึกของเหล็กกล้าไร้สนิมเพอริติกที่ผสมโครเมียม 38.80 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก นิกเกิล 12.50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักและเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิติกที่ผสมโครเมียม 31.94 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก นิกเกิล 28.25 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักตามลำดับ พบว่าในชั้นฟิล์มพาสซีฟของเหล็กกล้าไร้สนิมทั้งสองชนิดจะไม่พบนิกเกิลที่ชั้นนอกสุดของชั้นฟิล์ม (ชั้นไฮดรอกไซด์) แต่จะพบนิกเกิลในชั้นฟิล์มที่ลึกลงมา โดยอยู่ในรูปโลหะนิกเกิลซึ่งมีพลังงานยึดเหนี่ยวอยู่ที่ 853.1 อิเล็กตรอนโวลท์ และไม่พบนิกเกิลในสภาวะเคมีอื่น และสเปกตรัมของโลหะนิกเกิลที่พบจะเริ่มปรากฏอยู่ในชั้นฟิล์มที่ความลึกต่างกันขึ้นอยู่กับส่วนผสมนิกเกิลในเหล็กกล้าไร้สนิม สำหรับสเปกตรัมนิกเกิลของเหล็กกล้าไร้สนิมเกรดอื่นแสดงในภาคผนวก ค.2



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.7 ตัวอย่างผลการวิเคราะห์ธาตุ निकเกิล($Ni_{2p_{3/2}}$) ด้วยเครื่องเอกซเรย์โฟโตอิเล็กทริกที่ผิวเหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ริติกที่ผสมโครเมียม 38.80 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก นิกเกิล 12.50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่เวลาการลอกผิวต่างๆ อัตราการลอกผิว 17 องศาต่อมนาที หลังทิ้งไว้ในเดสซิเคเตอร์ ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง



รูปที่ 4.8 ตัวอย่างผลการวิเคราะห์ธาตุนิกเกิล(Ni2p_{3/2}) ด้วยเครื่องเอ็กซ์พีเอสที่ผิวเหล็กกล้าไร้สนิมออกสเตนดิกที่ผสมโครเมียม 31.94 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก นิกเกิล 28.25 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่เวลาการลอกผิวต่างๆ อัตราการลอกผิว 17 องศาต่อนาที หลังทิ้งไว้ในเดสซิเคเตอร์ ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

จากการวิเคราะห์ที่ผ่านมาพบว่าลักษณะของชั้นฟิล์มของเหล็กกล้าไร้สนิมจะมีลักษณะคล้ายกันแต่จะมีความแตกต่างกันในด้านความหนาขององค์ประกอบ ในที่นี้จะเสนอแบบจำลองไว้เป็นสังเขปเพื่อการศึกษาต่อไปดังรูปที่ 4.9 ชั้นฟิล์มที่ผิวประกอบด้วย 3 ส่วนหลัก ชั้นนอกสุดเป็นไฮดรอกไซด์ของโครเมียมมีความหนาประมาณ 1.5 อังสตรอม ชั้นกลางเป็นชั้นโครเมียมออกไซด์มีความหนาระหว่าง 25 ถึง 45 อังสตรอม และชั้นสุดท้ายคือเนื้อโลหะผสม โดยชั้นโครเมียมออกไซด์จะแบ่งเป็นชั้นออกไซด์ของโครเมียมและเหล็กรวมกับโลหะเหล็กมีความหนาประมาณ 5 ถึง 25 อังสตรอม และชั้นออกไซด์ของโครเมียมรวมกับโลหะเหล็ก โครเมียมและนิกเกิล ความหนาประมาณ 9 ถึง 35 โดยความหนาของชั้นฟิล์มอาจเปลี่ยนแปลงได้ตามสภาวะแวดล้อม⁽¹⁶⁾

ไฮดรอกไซด์ของโครเมียม				~ 1.5 Å
ออกไซด์ของโครเมียม และ เหล็ก	เหล็ก	(นิกเกิล)		~ 5 – 25 Å
ออกไซด์ของโครเมียม	โครเมียม	เหล็ก	นิกเกิล	~ 9 – 35 Å
เหล็ก	โครเมียม	นิกเกิล		

รูปที่ 4.9 แบบจำลองของชั้นฟิล์มที่ผิวของเหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ริติกและออสเทนนิติก

หลังจากเก็บไว้ในเดสสิเคเตอร์เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

() = อาจจะพบขึ้นอยู่กัส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้าไร้สนิม

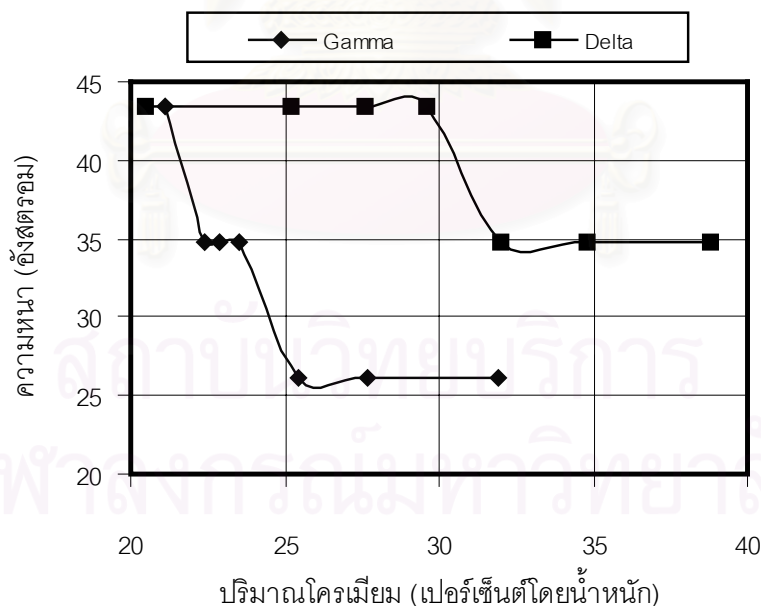
ความหนาของชั้นฟิล์มต่างๆ ในเหล็กกล้าไร้สนิม

จากการทดลองหาส่วนประกอบของชั้นฟิล์มที่ผิวของเหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ริติก (เดลด้า) และเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก (แกมม่า) ร่วมกับผลการคำนวณหาอัตราการลอกผิวโดยประมาณ สามารถที่จะประเมินความหนาของชั้นฟิล์มและองค์ประกอบของชั้นฟิล์มได้ ในที่นี้จะแบ่งการวิเคราะห์ความหนาของชั้นฟิล์มเป็น 3 ส่วน ส่วนแรกคือความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของชั้นฟิล์มโครเมียมออกไซด์เทียบกับปริมาณโครเมียมในเหล็กกล้าไร้สนิม ส่วนที่สองคือความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของชั้นฟิล์มออกไซด์โครเมียมและเหล็กรวมกับโลหะเหล็กกับปริมาณ

โครเมียมในเหล็กกล้าไร้สนิม และส่วนสุดท้ายคือความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของชั้นฟิล์มก่อนพบโลหะ निकเกิดกับปริมาณ निकเกิดที่ผสมในเหล็กกล้าไร้สนิม การแบ่งการวิเคราะห์เป็นส่วนๆ นี้ เพื่อนำผลการวิเคราะห์ไปอธิบายความสัมพันธ์กับความต้านทานการกัดกร่อนของเหล็กกล้าไร้สนิมต่อไป

ความหนาของชั้นฟิล์มโครเมียมออกไซด์

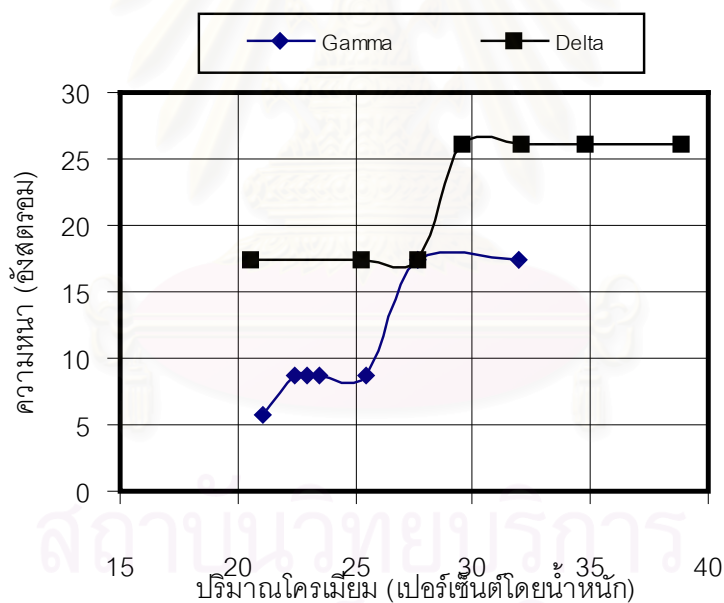
จากผลการทดสอบทางด้านลึกของชั้นฟิล์มเหล็กกล้าไร้สนิมทั้งสองชนิดทำให้ได้ข้อมูลความหนาของชั้นฟิล์มของโครเมียมออกไซด์ที่เกิดขึ้น สามารถดูได้จากการเปลี่ยนแปลงสภาวะทางเคมีของโครเมียมออกไซด์พลังงานยึดเหนี่ยว 576.6 อิเล็กตรอนโวลต์เป็นโลหะโครเมียมพลังงานยึดเหนี่ยว 574.2 อิเล็กตรอนโวลต์ โดยสมบรูณ์ (ไม่มีสเปกตรัมโครเมียมออกไซด์เหลืออยู่) ทำให้ได้ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของชั้นฟิล์มโครเมียมออกไซด์กับปริมาณธาตุโครเมียมที่ผสมในเหล็กกล้าไร้สนิมทั้งสองชนิด ดังแสดงในรูปที่ 4.10 พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณโครเมียมในเหล็กกล้าไร้สนิมทั้งสองชนิดความหนาของชั้นฟิล์มของโครเมียมออกไซด์ก็ลดลงคล้ายเส้นโค้งรูปตัวแซด (Z Curve) ทั้งในเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิติกและเฟอริติก ซึ่งผลการทดลองมีแนวโน้มเกี่ยวกับการศึกษาของ S. Jin และ A. Atrens⁽¹⁷⁾ อาจเป็นไปได้ว่าเมื่อปริมาณโครเมียมในเหล็กกล้าไร้สนิมมากขึ้นจะทำให้โครเมียมที่ผิวมีปริมาณมากและเกิดเป็นชั้นออกไซด์ที่มีมากจนออกซิเจนไม่สามารถแพร่เข้ามาในเนื้อโลหะทำให้มีความหนาของชั้นฟิล์มลดลง



รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของชั้นฟิล์มโครเมียมออกไซด์กับ ปริมาณธาตุโครเมียมที่ผสมในเหล็กกล้าไร้สนิมทั้งสองชนิด

ความหนาของชั้นฟิล์มออกไซด์โครเมียมและเหล็กรวมกับโลหะเหล็ก

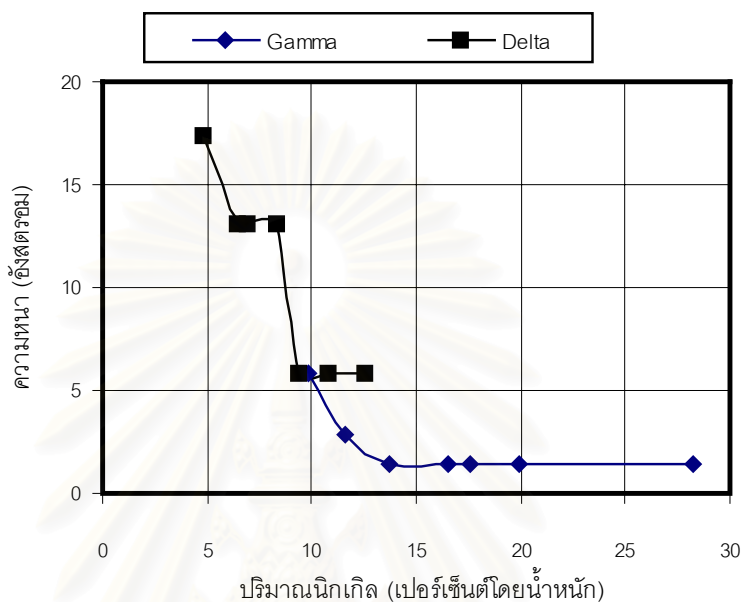
จากผลการทดสอบทางด้านลึกของชั้นฟิล์มเหล็กกล้าไร้สนิมทั้งสองชนิด ทำให้รู้ความหนาของชั้นฟิล์มที่มีองค์ประกอบเป็นโครเมียมออกไซด์ พลังงานยึดเหนี่ยว 576.6 อิเล็กตรอนโวลต์ โดยยังไม่พบโลหะโครเมียมชั้นที่สองจากผิว (ดูรูปที่ 4.9) ได้ความสัมพันธ์ของความหนาของชั้นฟิล์มออกไซด์โครเมียมและเหล็กรวมกับโลหะเหล็กกับปริมาณธาตุโครเมียมที่ผสมในเหล็กกล้าไร้สนิมในรูปที่ 4.11 พบว่าความหนาของชั้นฟิล์มออกไซด์โครเมียมและเหล็กรวมกับโลหะเหล็กจะมีความหนาเพิ่มขึ้นในลักษณะเส้นโค้งรูปตัวเอส (S Curve) เมื่อเพิ่มปริมาณโครเมียมที่ผสมในเหล็กกล้าไร้สนิม อาจเป็นเพราะว่าเมื่อปริมาณโครเมียมที่ผสมในเหล็กกล้าไร้สนิมมากขึ้น จะมีโครเมียมที่ผิวซึ่งพร้อมทำปฏิกิริยากับออกซิเจนเกิดเป็นโครเมียมออกไซด์มากขึ้น เมื่อเปรียบเทียบความหนาของชั้นฟิล์มออกไซด์โครเมียมและเหล็กรวมกับโลหะเหล็กระหว่างเหล็กกล้าไร้สนิมทั้งสองชนิด พบว่าความหนาของชั้นฟิล์มออกไซด์โครเมียมและเหล็กรวมกับโลหะเหล็กของเหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ริติกจะมีความหนามากกว่าชั้นฟิล์มของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกเนื่องจากเหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ริติกมีโครเมียมผสมมากกว่า



รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของชั้นฟิล์มออกไซด์โครเมียมและเหล็กรวมกับโลหะเหล็กกับปริมาณธาตุโครเมียมที่ผสมในเหล็กกล้าไร้สนิมทั้งสองชนิด

ความหนาของชั้นฟิล์มก่อนพบโลหะนิกเกิลในชั้นฟิล์ม

จากผลการทดลองพบว่า ลักษณะของนิกเกิลที่พบในชั้นฟิล์มของเหล็กกล้าไร้สนิมทั้งสองชนิดจะต่างกันที่ความหนาของชั้นฟิล์มก่อนพบโลหะนิกเกิลในชั้นฟิล์มซึ่งจะมีความสัมพันธ์กับปริมาณนิกเกิลที่ผสมในเหล็กกล้าไร้สนิม ดังแสดงไว้ในรูปที่ 4.12

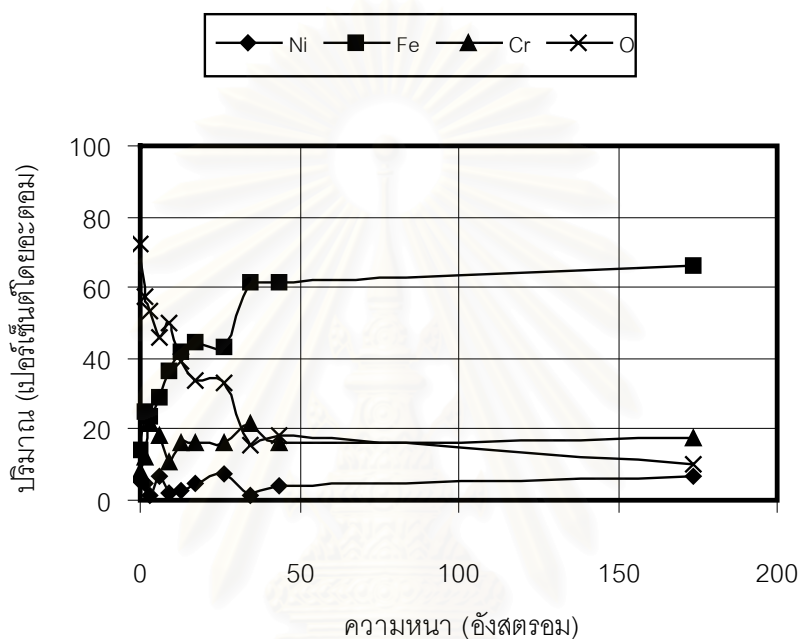


รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างความลึกที่เริ่มพบนิกเกิลในชั้นฟิล์มกับปริมาณ นิกเกิลที่ผสมในเหล็กกล้าไร้สนิม

จากรูปที่ 4.12 พบว่าเมื่อผสมนิกเกิลในเหล็กกล้าไร้สนิมมากขึ้น ความหนาของชั้นฟิล์มก่อนพบโลหะนิกเกิลในชั้นฟิล์มจะน้อยลง โดยเฉพาะอย่างยิ่งในเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิติกซึ่งจะผสมนิกเกิลในปริมาณสูง (13.72 เปอร์เซ็นต์ถึง 28.25 เปอร์เซ็นต์) จะพบนิกเกิลปรากฏอยู่ในชั้นฟิล์มที่ความหนาประมาณ 1.5 อังสตรอมเท่านั้น จากการศึกษาเบื้องต้น^(14, 16, 17) พบว่านิกเกิลไม่มีผลต่อการต้านทานการกัดกร่อนแบบรูพรุนโดยตรงซึ่งจะอธิบายต่อไป

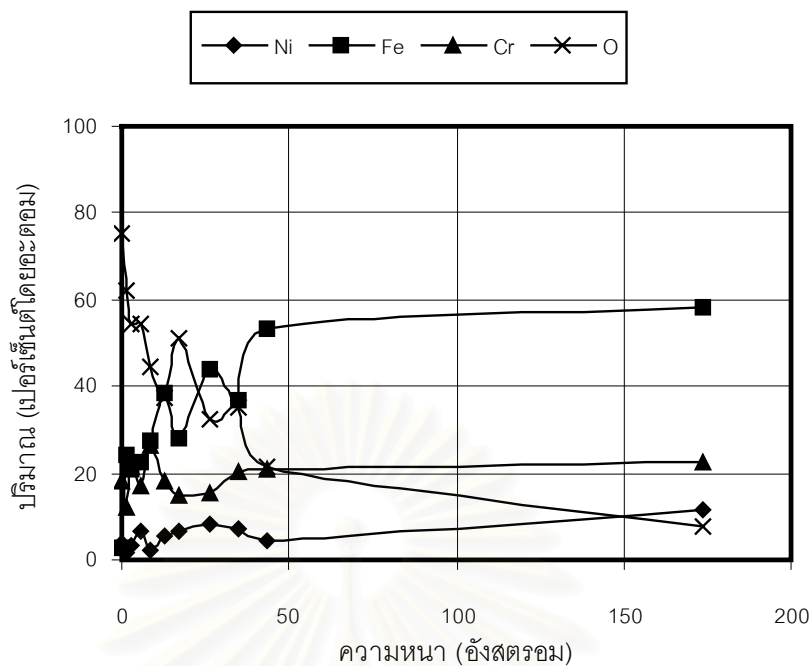
การวิเคราะห์เชิงปริมาณของชั้นฟิล์มพาสซีฟ

จากการทดสอบเชิงปริมาณจากสเปกตรัมของชั้นฟิล์มทั้งหมดทำให้ได้การเปลี่ยนแปลงของปริมาณธาตุที่ประกอบในชั้นฟิล์ม (เปอร์เซ็นต์โดยอะตอม) ตามความหนาของชั้นฟิล์มโดยแบ่งตามโครงสร้างของเหล็กกล้าไร้สนิมดังแสดงในรูปที่ 4.13 ถึง 4.19 เป็นผลการวิเคราะห์เชิงปริมาณของเหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ริติกตามปริมาณธาตุผสม และรูปที่ 4.20 ถึง 4.26 แสดงการเปลี่ยนแปลงของปริมาณธาตุในชั้นฟิล์มของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก

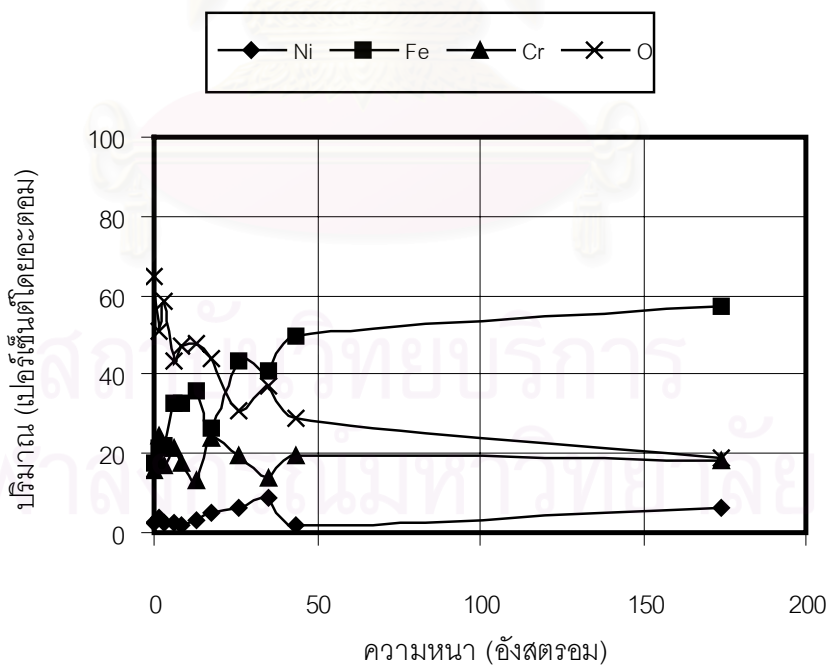


รูปที่ 4.13 แสดงปริมาณของธาตุต่างๆ ในชั้นฟิล์มที่เกิดขึ้น ตามความลึกของเหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ริติกที่ผสมโครเมียม 20.50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก นิกเกิล 4.75 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

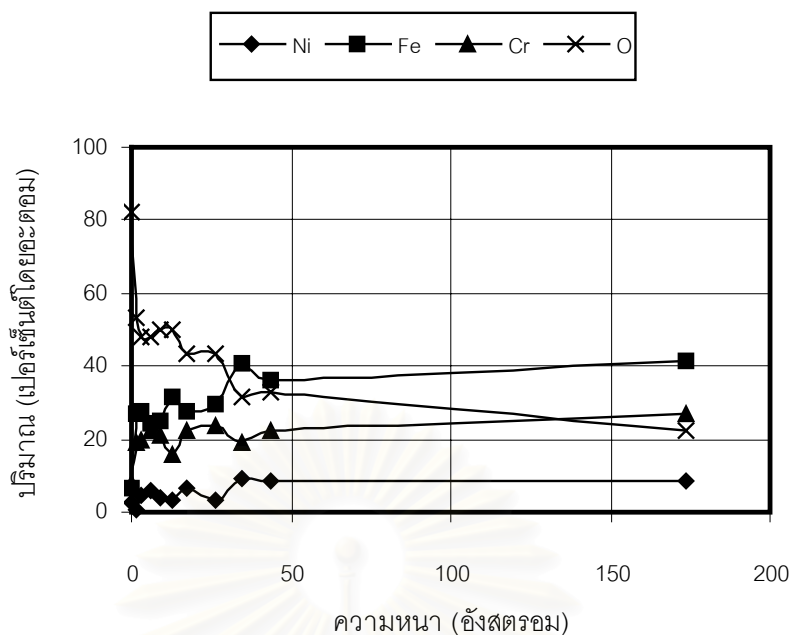
สภามหาวิทยาลัย
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



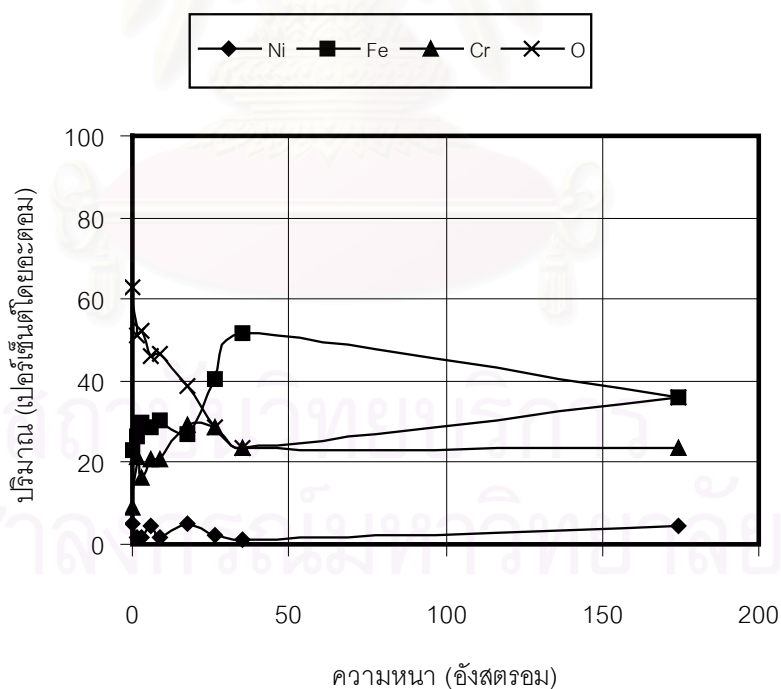
รูปที่ 4.14 แสดงปริมาณของธาตุต่างๆ ในชั้นฟิล์มที่เกิดขึ้น ตามความลึกของเหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ริกที่ผสมโครเมียม 25.24 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก นิกเกิล 6.40 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก



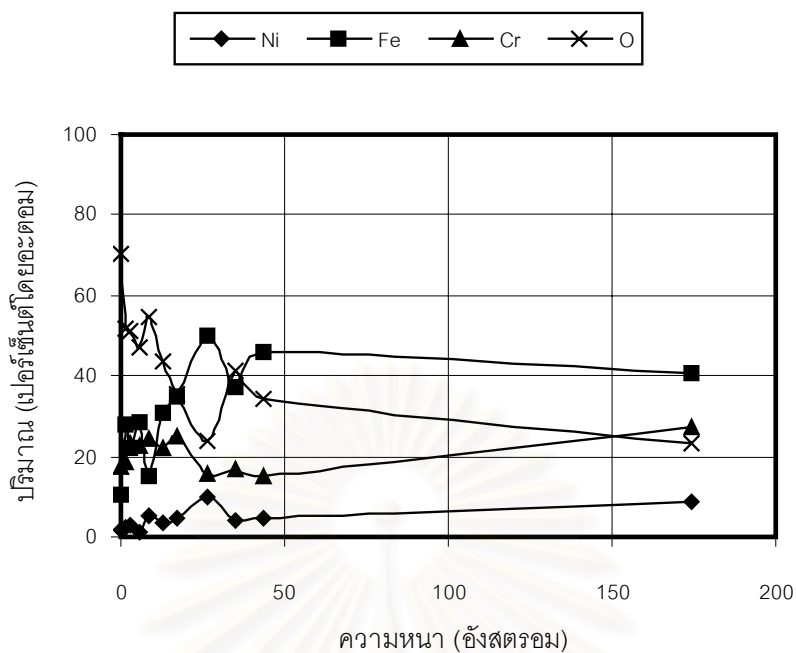
รูปที่ 4.15 แสดงปริมาณของธาตุต่างๆ ในชั้นฟิล์มที่เกิดขึ้น ตามความลึกของเหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ริกที่ผสมโครเมียม 27.62 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก นิกเกิล 6.97 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก



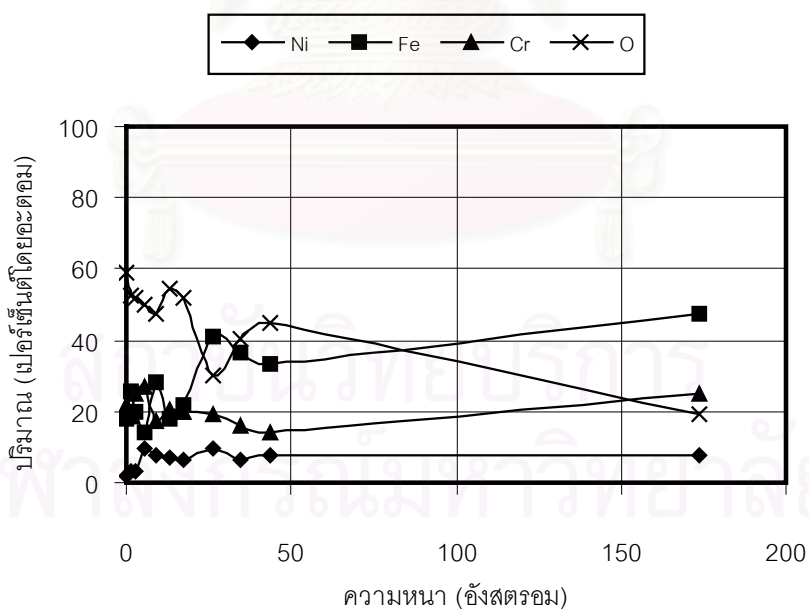
รูปที่ 4.16 แสดงปริมาณของธาตุต่างๆ ในชั้นฟิล์มที่เกิดขึ้น ตามความลึกของ
 เหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ริติกที่ผสมโครเมียม 29.58 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก
 นิกเกิล 8.29 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก



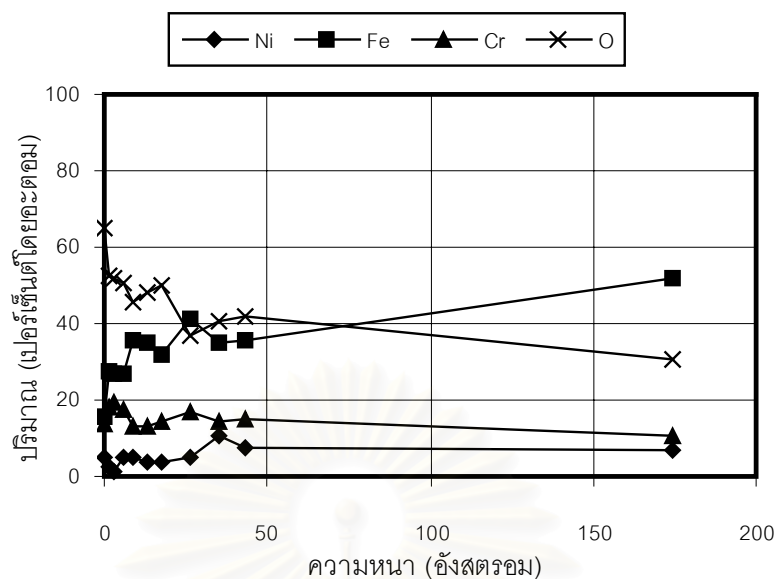
รูปที่ 4.17 แสดงปริมาณของธาตุต่างๆ ในชั้นฟิล์มที่เกิดขึ้น ตามความลึกของ
 เหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ริติกที่ผสมโครเมียม 32.01 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก
 นิกเกิล 9.35 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก



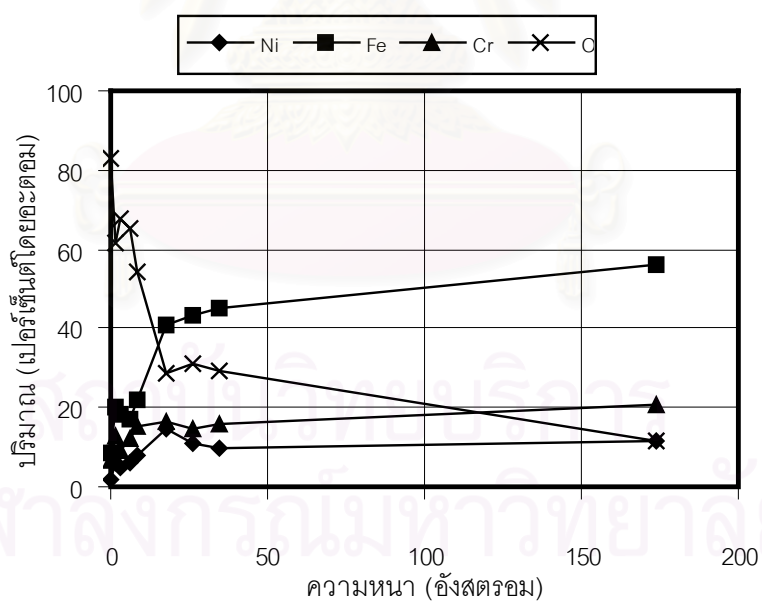
รูปที่ 4.18 แสดงปริมาณของธาตุต่างๆ ในชั้นฟิล์มที่เกิดขึ้น ตามความลึกของ
 เหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ริติกที่ผสมโครเมียม 34.79 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก
 นิกเกิล 10.82 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก



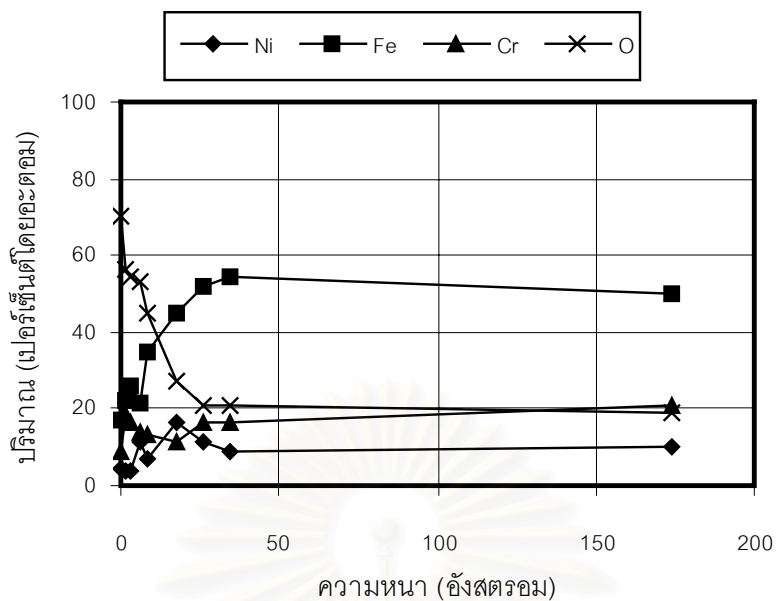
รูปที่ 4.19 แสดงปริมาณของธาตุต่างๆ ในชั้นฟิล์มที่เกิดขึ้น ตามความลึกของ
 เหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ริติกที่ผสมโครเมียม 38.80 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก
 นิกเกิล 12.50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก



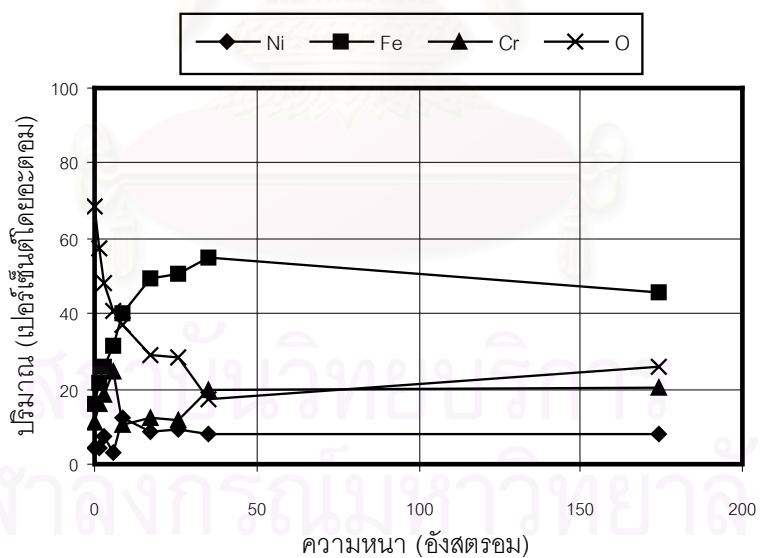
รูปที่ 4.20 แสดงปริมาณของธาตุต่างๆ ในชั้นฟิล์มที่เกิดขึ้น ตามความลึกของเหล็กกล้า
ไร้สนิมออสเทนิติกที่ผสมโครเมียม 21.11 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก นิกเกิล 9.89
เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก



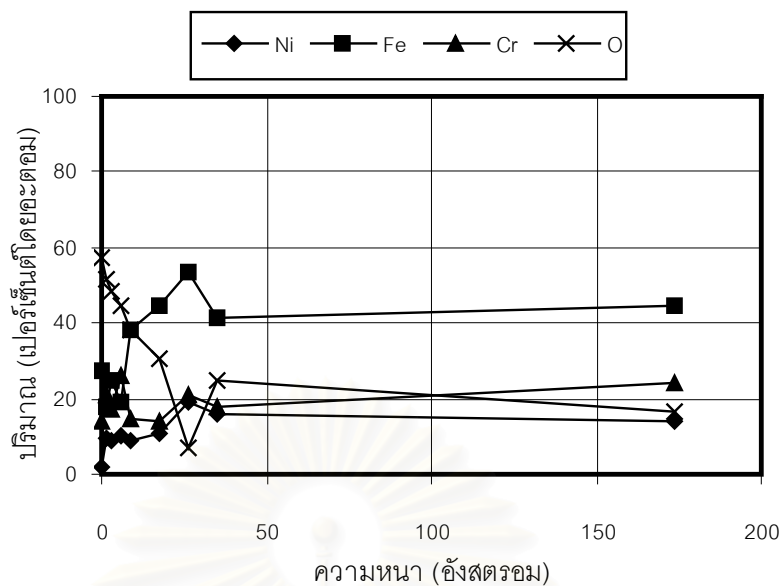
รูปที่ 4.21 แสดงปริมาณของธาตุต่างๆ ในชั้นฟิล์มที่เกิดขึ้น ตามความลึกของเหล็กกล้า
ไร้สนิมออสเทนิติกที่ผสมโครเมียม 22.43 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก นิกเกิล
11.57 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก



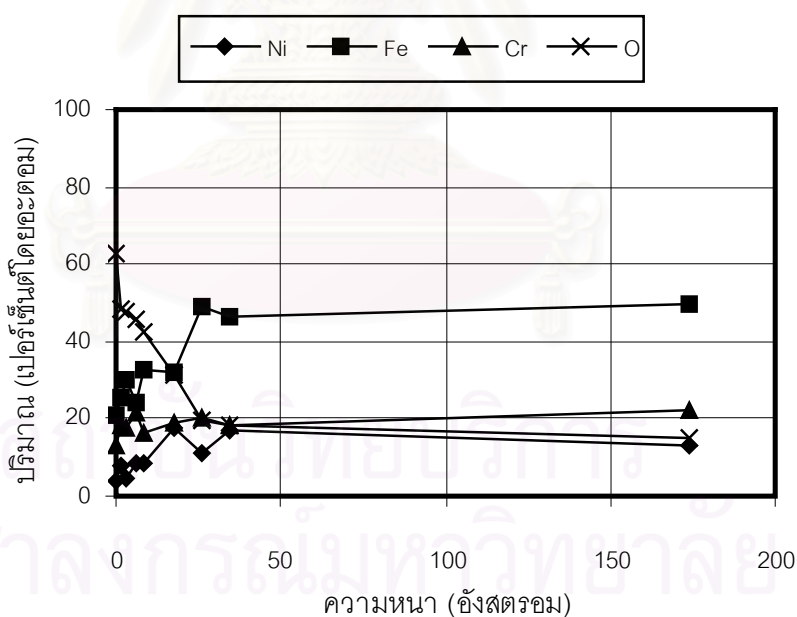
รูปที่ 4.22 แสดงปริมาณของธาตุต่างๆ ในชั้นฟิล์มที่เกิดขึ้น ตามความลึกของ
 เหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิติกที่ผสมโครเมียม 22.90 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก
 นิกเกิล 13.72 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก



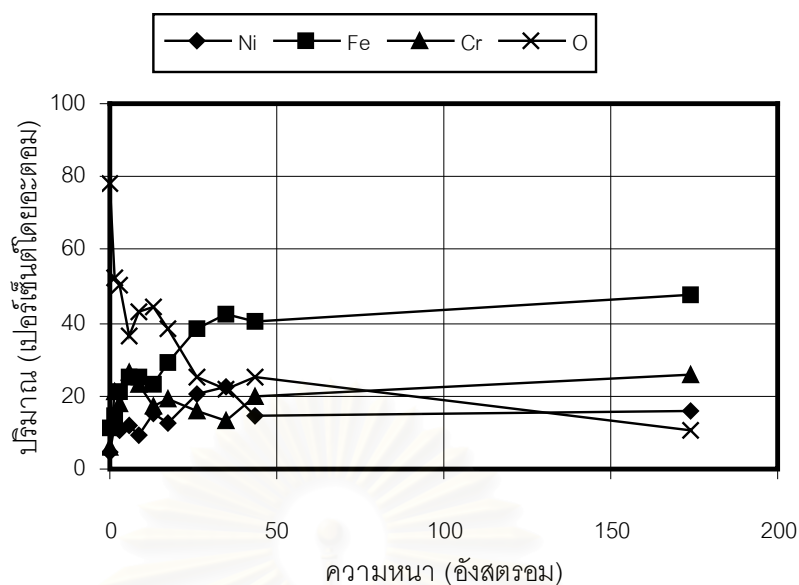
รูปที่ 4.23 แสดงปริมาณของธาตุต่างๆ ในชั้นฟิล์มที่เกิดขึ้น ตามความลึกของ
 เหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิติกที่ผสมโครเมียม 23.49 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก
 นิกเกิล 16.56 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก



รูปที่ 4.24 แสดงปริมาณของธาตุต่างๆ ในชั้นฟิล์มที่เกิดขึ้น ตามความลึกของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิติกที่ผสมโครเมียม 25.45 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก นิกเกิล 17.54 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก



รูปที่ 4.25 แสดงปริมาณของธาตุต่างๆ ในชั้นฟิล์มที่เกิดขึ้น ตามความลึกของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิติกที่ผสมโครเมียม 27.65 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก นิกเกิล 19.96 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก



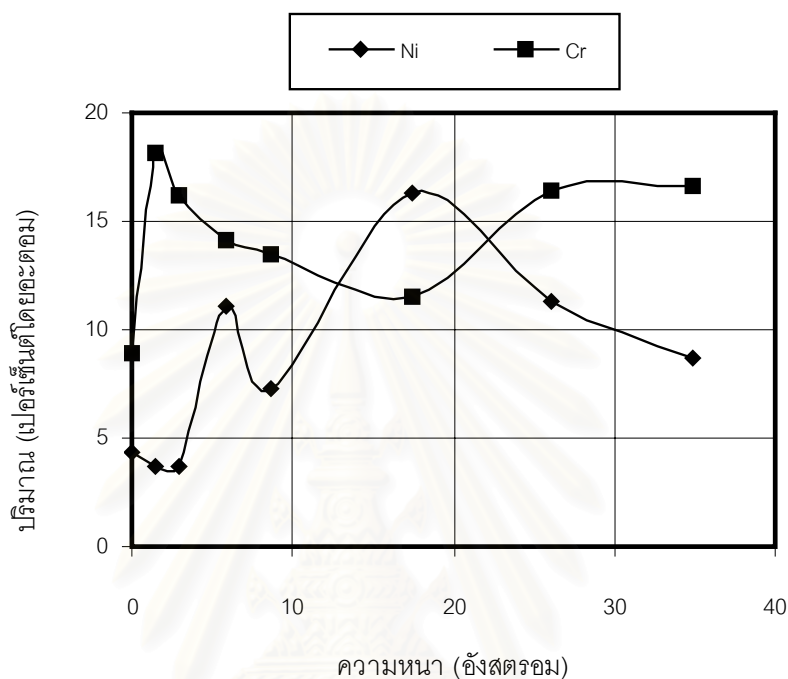
รูปที่ 4.26 แสดงปริมาณของธาตุต่างๆ ในชั้นฟิล์มที่เกิดขึ้น ตามความลึกของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิติกที่ผสมโครเมียม 31.94 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก นิกเกิล 28.25 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

จากการศึกษาเชิงปริมาณของชั้นฟิล์มเหล็กกล้าไร้สนิมพบว่า แนวโน้มของการเปลี่ยนแปลงปริมาณของธาตุต่างๆ ในชั้นฟิล์มของเหล็กกล้าไร้สนิมทั้งสองโครงสร้างเป็นไปในทางเดียวกัน โดยจะกล่าวในรายละเอียดของแต่ละธาตุดังนี้

ปริมาณธาตุออกซิเจนจะพบมากที่สุดบริเวณผิวนอกสุดของชั้นฟิล์มซึ่งเป็นส่วนของชั้นไฮดรอกไซด์ แล้วจะค่อยๆ ลดลงจนเหลือประมาณ 20 เปอร์เซ็นต์โดยอะตอมที่ความลึกประมาณ 174 อังสตรอม สาเหตุที่ออกซิเจนไม่หมดไปเป็นผลมาจากการคำนวณซึ่งจะมีความเข้มของออกซิเจนอยู่ตลอดแม้ว่าจะไม่มีสเปกตรัมของออกซิเจนแล้วก็ตาม ดังนั้นการพิจารณาจึงต้องดูลักษณะสเปกตรัมของธาตุประกอบกันไปด้วย

จากการศึกษาเชิงปริมาณของโครเมียมพบว่าในแต่ละส่วนผสมของเหล็กกล้าไร้สนิมจะมีลักษณะของการเปลี่ยนแปลงปริมาณคล้ายกัน จะแตกต่างกันที่ปริมาณของโครเมียมที่พบในแต่ละส่วนผสมของเหล็กกล้าไร้สนิมซึ่งลักษณะการเปลี่ยนแปลงปริมาณโครเมียมในชั้นฟิล์มแสดงไว้ในรูปที่ 4.27 พบว่าโครเมียมจะมีปริมาณน้อย (น้อยกว่า 10 เปอร์เซ็นต์โดยอะตอม) ที่บริเวณผิวนอกสุด และจะมีปริมาณมากขึ้นจนถึงบริเวณกึ่งกลางของชั้นฟิล์มออกไซด์ของโครเมียมและเหล็กพร้อมกับโลหะเหล็กซึ่งเป็นบริเวณที่โครเมียมมีปริมาณมากที่สุดแล้วปริมาณของโครเมียมออกไซด์จะลดลงจนถึงรอยต่อระหว่างชั้นฟิล์มออกไซด์ของโครเมียมและเหล็กพร้อมกับโลหะเหล็ก

กับชั้นฟิล์มออกไซด์โครเมียมรวมกับโลหะเหล็ก โครเมียม และนิกเกิล หลังจากนั้นปริมาณของโครเมียมจะเพิ่มขึ้นเล็กน้อยและจะมีปริมาณค่อนข้างคงที่จนถึงชั้นของเหล็กกล้าไร้สนิม อาจกล่าวได้ว่าในชั้นฟิล์มออกไซด์ของโครเมียมและเหล็กรวมกับโลหะเหล็กมีปริมาณของโครเมียมมากที่สุดไนชั้นฟิล์ม



รูปที่ 4.27 แสดงการเปลี่ยนแปลงปริมาณโครเมียมและนิกเกิลที่อยู่ในชั้นฟิล์มตามความลึกต่างๆ

- ชั้นฟิล์มออกไซด์ของโครเมียมและเหล็ก รวมกับโลหะเหล็ก
- ชั้นฟิล์มออกไซด์ของโครเมียม รวมกับโลหะเหล็ก โครเมียม นิกเกิล

จากการศึกษาเชิงปริมาณของนิกเกิลในชั้นฟิล์มเหล็กกล้าไร้สนิม (รูปที่ 4.27) จะพบนิกเกิลปริมาณน้อย (น้อยกว่า 5 เปอร์เซ็นต์โดยอะตอม) และมีปริมาณค่อนข้างคงที่ในชั้นฟิล์มออกไซด์ของโครเมียมและเหล็กรวมกับโลหะเหล็ก จากนั้นปริมาณของธาตุนิกเกิลจะเพิ่มมากขึ้นจนมีปริมาณมากกว่าสองเท่าของปริมาณที่ผิวในชั้นฟิล์มออกไซด์ของโครเมียมรวมกับโลหะเหล็ก โครเมียม และนิกเกิล หลังจากนั้นจะมีปริมาณลดลงและคงที่ในชั้นที่ลึกลงมาจนถึงชั้นที่เป็นเหล็กกล้าไร้สนิม ทำให้อาจกล่าวได้ว่านิกเกิลจะมีปริมาณมากในชั้นฟิล์มออกไซด์ของโครเมียมรวมกับ

โลหะเหล็ก โครเมียม และนิกเกิล จากการศึกษาเบื้องต้น⁽¹⁶⁾ ได้ให้คำอธิบายไว้ว่าการสร้างชั้นฟิล์มในเหล็กกล้าไร้สนิม โครเมียมที่ผิวจะทำปฏิกิริยากับออกซิเจนเกิดเป็นชั้นโครเมียมออกไซด์ทำให้เกิดช่องว่าง (Vacancies) จำนวนมาก ทำให้นิกเกิลแทรกอยู่ในช่องว่างเหล่านี้ และเมื่อเปรียบเทียบปริมาณนิกเกิลที่พบในชั้นฟิล์มระหว่างเหล็กกล้าไร้สนิมทั้งสองชนิดพบว่าปริมาณนิกเกิลที่พบในเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิติกจะมีปริมาณมากกว่าปริมาณที่พบในเหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ริติก เนื่องจากปริมาณนิกเกิลที่ผสมในเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิติกมีมากกว่านั่นเอง แสดงว่าเมื่อเพิ่มปริมาณนิกเกิลในเหล็กกล้าไร้สนิมจะมีโอกาสพบนิกเกิลในชั้นฟิล์มของเหล็กกล้าไร้สนิมมากขึ้น

เปรียบเทียบลักษณะของชั้นฟิล์มที่เกิดกับการต้านทานการกัดกร่อนแบบรูพรุน

ผลการทดลองพบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณโครเมียมในเหล็กกล้าไร้สนิมจะทำให้ชั้นฟิล์มออกไซด์ของโครเมียมและเหล็กรวมกับโลหะเหล็กมีความหนาเพิ่มขึ้นในลักษณะเส้นโค้งรูปตัวเอส (รูปที่ 4.11) คล้ายกับแนวโน้มของความสัมพันธ์ระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนแบบรูพรุนกับปริมาณโครเมียมที่ผสมในเหล็กกล้าไร้สนิมของการศึกษาของ H. Hoffmeister และ G. Lothongkum (รูปที่ 2.10) อาจอธิบายได้ว่าเหล็กกล้าไร้สนิมที่มีปริมาณธาตุผสมต่ำ (โครเมียม 20.50 และ 21.11 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และนิกเกิล 4.75 และ 9.89 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก) การป้องกันการกัดกร่อนของชั้นฟิล์มจะมีค่าน้อยเมื่อเทียบกับส่วนผสมสูงกว่า เนื่องจากชั้นฟิล์มออกไซด์ของโครเมียมและเหล็กรวมกับโลหะเหล็กมีความหนาน้อย และเมื่อเพิ่มปริมาณโครเมียมและนิกเกิลที่ผสมในเหล็กกล้าไร้สนิมก็จะทำให้ความหนาของชั้นออกไซด์ของโครเมียมและเหล็กรวมกับโลหะเหล็กมีความหนาเพิ่มขึ้น รวมทั้งมีปริมาณของนิกเกิลแทรกอยู่ในชั้นฟิล์มมากขึ้นซึ่งจากการศึกษาของ S. Jin และ A. Atrens⁽¹⁶⁾ ได้กล่าวว่ นิกเกิลที่แทรกอยู่ในช่องว่างของชั้นฟิล์มจะช่วยเพิ่มการต้านทานการกัดกร่อน ทำให้การต้านทานการกัดกร่อนแบบรูพรุนของเหล็กกล้าไร้สนิมทั้งสองชนิดมีค่าสูงขึ้น

เมื่อเทียบระหว่างเหล็กกล้าไร้สนิมทั้งสองชนิดพบว่าที่ปริมาณธาตุผสมในเหล็กกล้าไร้สนิมต่ำ (โครเมียม 20.50 และ 21.11 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และนิกเกิล 4.75 และ 9.89 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก) เหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ริติกมีค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนแบบรูพรุนสูงกว่าเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิติกอาจเป็นผลมาจากเหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ริติกมีชั้นฟิล์มออกไซด์ของโครเมียมและเหล็กรวมกับโลหะเหล็กหนากว่าชั้นฟิล์มของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิติก และที่ส่วนผสมสูง (โครเมียม 38.80 และ 31.94 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และนิกเกิล 12.50 และ 28.25 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก) การต้านทานการกัดกร่อนแบบรูพรุนของเหล็กกล้าไร้สนิมทั้งสองโครงสร้างมีค่าใกล้เคียงกัน อาจมีสาเหตุจากปริมาณของโลหะนิกเกิลที่แทรกอยู่ตามช่องว่างในชั้นฟิล์มเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิติกช่วยเพิ่มการต้านทานการกัดกร่อนแบบรูพรุนให้มีค่าใกล้เคียงกับเหล็กกล้าไร้

สนิมเฟอริติก แม้ว่าเหล็กกล้าไร้สนิมเฟอริติกจะยังมีชั้นฟิล์มออกไซด์ของโครเมียมและเหล็กรวมกับโลหะหนักหนากว่าก็ตาม

อย่างไรก็ตาม การศึกษานี้ยังไม่สามารถหาผลของนิกเกิลต่อการต้านทานการกัดกร่อนได้อย่างชัดเจน จึงควรมีการศึกษาถึงอิทธิพลของนิกเกิลที่อยู่ในชั้นฟิล์มออกไซด์ของโครเมียมและเหล็กต่อไป

การทดลองหาเส้นโพลาริเซชันด้วยเครื่องโพเทนทีโอสแตท

จากการทดลองหาเส้นโพลาริเซชันของเหล็กกล้าไร้สนิมเฟอริติกที่มีส่วนผสมโครเมียม 20.50 และ 38.80 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก นิกเกิล 4.75 และ 12.50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิติกที่มีโครเมียม 21.11 และ 31.94 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก นิกเกิล 9.89 และ 28.25 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักด้วยเครื่องโพเทนทีโอสแตท ทำให้ได้ค่าศักย์ไฟฟ้าที่เกิดการกัดกร่อน (E_{corr}) ศักย์ไฟฟ้าของการเกิดการกัดกร่อนแบบรูปพูน (E_p) และค่ากระแสพาสซีฟ (I_{pass}) ดังแสดงในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ค่าศักย์ไฟฟ้าที่เกิดการกัดกร่อน (E_{corr}) ค่าศักย์ไฟฟ้าของการเกิดการกัดกร่อนแบบรูปพูน (E_p) และค่ากระแสพาสซีฟ (I_{pass}) ที่วัดได้ (เทียบกับ Ag/AgCl)

เกรด	E_{corr} (โวลต์)	E_p (โวลต์)	I_{pass} (mA/cm ²)
1. เฟอริติกผสม Cr 20.50 %โดยน้ำหนัก Ni 4.75 %โดยน้ำหนัก	-0.217	0.800	4.10×10^{-6}
2. เฟอริติกผสม Cr 38.80 %โดยน้ำหนัก Ni 12.50 %โดยน้ำหนัก	-0.360	1.065	3.92×10^{-5}
3. ออสเทนิติกผสม Cr 21.11 %โดยน้ำ หนัก Ni 9.89 %โดยน้ำหนัก	-0.310	0.640	6.05×10^{-5}
4. ออสเทนิติกผสม Cr 31.94 %โดยน้ำ หนัก Ni 28.25 %โดยน้ำหนัก	-0.300	1.070	6.93×10^{-5}

จากตารางที่ 4.2 เมื่อเปรียบเทียบระหว่างเหล็กกล้าไร้สนิมเฟอริติกเกรดที่ 1 กับออสเทนิติกเกรดที่ 3 ซึ่งเป็นส่วนผสมที่อยู่บนเส้นสมดุลเฟส (Tie Line) เดียวกัน (รูปที่ 2.9 เส้น A) พบว่าค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนและค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนแบบรูปพูนของเหล็กกล้าไร้สนิมเฟอริติกมี

ค่าสูงกว่าเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิติก หากพิจารณาผลของกัลวานิกโดยดูจากค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน เหล็กกล้าไร้สนิมที่มีค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนสูงกว่าจะมีความเป็นโนเบิล (Noble) ตามอนุกรมกัลวานิกมากกว่าเหล็กกล้าไร้สนิมที่มีศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนต่ำกว่าหรือแอคทีฟ (Active) กว่าตามอนุกรมกัลวานิก ส่วนค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนแบบรูปวงอาจบอกถึงความแข็งแรงหรือความหนาของชั้นฟิล์ม ชั้นฟิล์มที่แข็งแรงกว่าจะมีค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนแบบรูปวงสูงกว่าแม้ค่ากระแสพาสซีฟมีค่าใกล้เคียงกัน อาจกล่าวได้ว่าเหล็กกล้าไร้สนิมเฟอริติกเกรด 1 จะมีการต้านทานการกัดกร่อนดีกว่าเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิติกเกรด 3 ไม่ว่าจะเป็ผลของกัลวานิกและผลของความแข็งแรงของชั้นฟิล์ม แต่เมื่อเทียบระหว่างเกรดที่ 2 และ 4 ซึ่งเป็นส่วนผสมที่อยู่บนเส้นสมดุลเฟสเส้นเดียวกัน (รูปที่ 2.9 เส้น B) พบว่าเหล็กกล้าไร้สนิมทั้งสองเกรดจะมีค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนแบบรูปวงใกล้เคียงกัน แต่เหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิติกเกรดที่ 4 จะมีค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนสูงกว่าเหล็กกล้าไร้สนิมเฟอริติกเกรดที่ 2 การเกิดการกัดกร่อนของเหล็กกล้าไร้สนิมที่เส้นสมดุลเฟสนี้อาจเป็นผลของกัลวานิกมากกว่าผลของชั้นฟิล์ม ดังนั้นถ้าเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 2 และ 4 ต่อกันเหล็กกล้าไร้สนิมเกรดที่ 2 จะถูกกัดกร่อน ซึ่งเหตุผลดังกล่าวอาจใช้ในการอธิบายการเกิดการกัดกร่อนของเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์จากการศึกษาของ H. Hoffmeister และ G. Lothongkum⁽¹⁰⁾ ได้

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

จากการวิเคราะห์ชั้นฟิล์มเหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ริติก และออสเทนนิติกที่ผสมโครเมียม 20 ถึง 39 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และนิกเกิล 4 ถึง 28 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก หลังทิ้งไว้ในเดซีเคเตอร์ 24 ชั่วโมง ด้วยเทคนิคเอ็กซ์พีเอสพบว่า

1. องค์ประกอบของชั้นฟิล์มแบ่งเป็น 3 ส่วนดังนี้
 - ชั้นไฮดรอกไซด์ของโครเมียมเป็นชั้นนอกสุด มีความหนาประมาณ 1.5 อังสตรอม
 - ชั้นออกไซด์ของโครเมียมและเหล็กรวมกับโลหะเหล็กมีความหนาประมาณ 5 ถึง 25 อังสตรอม
 - ชั้นออกไซด์ของโครเมียมรวมกับโลหะเหล็ก โครเมียม และนิกเกิล ความหนาประมาณ 9 ถึง 35 อังสตรอม
2. ชั้นฟิล์มโครเมียมออกไซด์จะมีความหนาน้อยลงเมื่อเพิ่มปริมาณธาตุโครเมียมที่ผสมในเหล็กกล้าไร้สนิม ซึ่งมีความสัมพันธ์เป็นรูปเส้นโค้งตัวแซด
3. ชั้นฟิล์มออกไซด์ของโครเมียมและเหล็กรวมกับโลหะเหล็กจะมีความหนามากขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณโครเมียมในเหล็กกล้าไร้สนิม โดยมีความสัมพันธ์เป็นรูปเส้นโค้งตัวเอส
4. เมื่อเพิ่มปริมาณนิกเกิลที่ผสมในเหล็กกล้าไร้สนิมจะทำให้ความหนาของชั้นฟิล์มก่อนพบนิกเกิลน้อยลง
5. ชั้นฟิล์มออกไซด์ของโครเมียมและเหล็กรวมกับโลหะเหล็ก และปริมาณนิกเกิลในชั้นฟิล์มอาจจะมีผลต่อการต้านทานการกัดกร่อนแบบรูพรุนของเหล็กกล้าไร้สนิม
6. พฤติกรรมการกัดกร่อนของเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์อาจมีผลทั้งกัลวานิกและผลของฟิล์มร่วมกัน

รายการอ้างอิง

1. A. John Sedrik. Corrosion of Stainless Steel. New York. John Wiley and Sons, 1996: p.1.
2. D. Briggs and M.P. Seah. Practical Surface Analysis. Chichester: John Wiley and Sons, 1990: p.9, 598 – 625.
3. N. Ikeo, Y. Iijima, N. Niimura, M. Sigematsu, T. Tazawa, S. Matsumoto, K. Kojima, Y. Nagasawa. Handbook of X – Ray Photoelectron Spectroscopy. Tokyo: JEOL Ltd., 1991: p.7, Appendix 6, Appendix 9A – 2.
4. C.V. Roseoe and K.J. Gradwell. Proceeding of the International conference on duplex stainless steels the Hague, N.L., Preprints (1986): paper no.34 127 – 135.
5. R. Sriram and D. Tromaus. Corrosion Vol.45, no.10(1989): 804-810.
6. Y. Ishizawa and T. Tnazumi. Proceeding of the International conference on duplex stainless steels the Hague, N.L., Preprints (1986): paper no.23 302 – 308.
7. G. Hochoertter and K. Kriszt. Proceeding of the International conference on duplex stainless steels the Hague, N.L., Preprints(1986), paper no.14 114 – 120.
8. Klaus Bichl and Helmut Wehner. Proceeding of the International conference on duplex stainless steels the Hague, N.L., Preprints (1986): paper no.17 388 – 391.
9. W. Gysel, G. Dybowski, H.J. Wojtas and R. Schenk. Proceeding of the International conference on duplex stainless steels the Hague, N.L., Preprints (1986): paper no.15 98 – 108.
10. H. Hoffmeister and G. Lothongkum. Welding in the world Vol.33, no.2(1994):
11. G. Fierro, G.M. Ingo and F. Mancia. Corrosion Vol.45, no.10(1989): 814 – 823.
12. K. Hashimoto, K. Asami and K. Teramoto. Corrosion Science Vol. 19 (1979): 3 – 14.
13. K. Hashimoto and K. Asami. Corrosion Science Vol. 19(1979): 251 – 260.
14. J. Subseree and G. Lothongkum. Proceeding of the 13th International Corrosion Congress. Melbourne Australia (1996): paper 363.
15. G. Lothongkum, A. Klinkeson, P. Jivavibul. Proceeding of the 14th International Corrosion Congress. Cape Town South Africa (1999): 531 – 538.

16. S. Jin and A. Atrens. Applied Physics A, no.42 (1987): 149-165.
17. S. Jin and A. Atrens. Applied Physics A, no.50 (1990): 287-300.
18. K. Asami and K. Hashimoto. Corrosion Science Vol. 17 (1977): 559 – 570.
19. K. Asami, K. Hashimoto and S. Shemodaira. Corrosion Science vol. 16 (1976): 35 – 45.



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

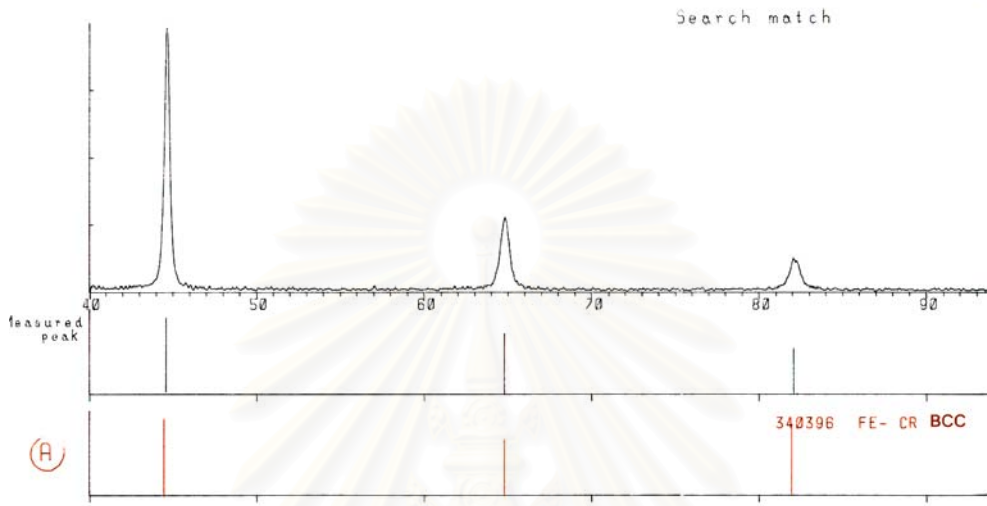


ภาคผนวก

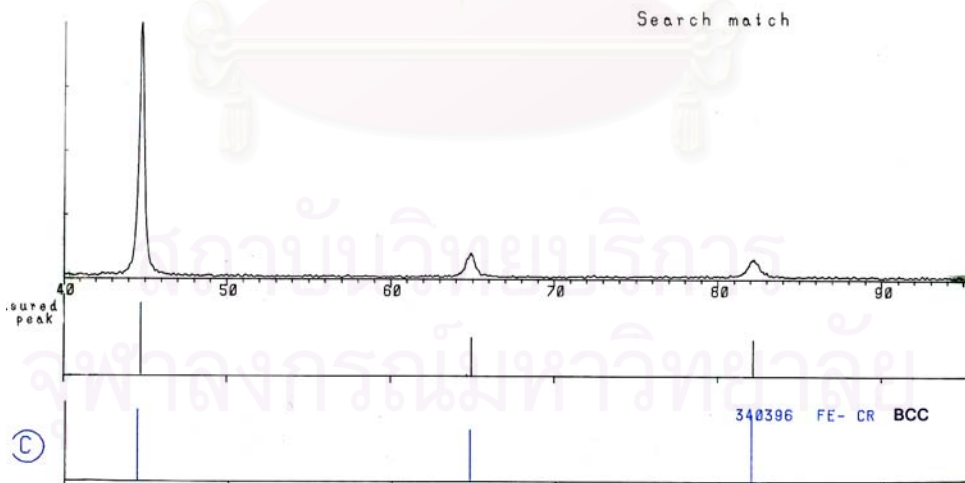
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก.
สเปกตรัมที่ได้จากการทดสอบด้วยเครื่อง XRD

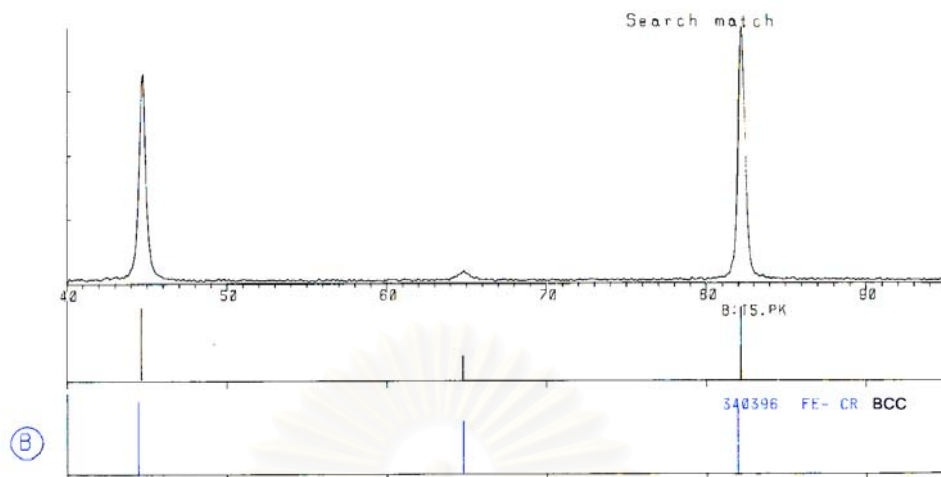
นำชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิมทั้งสองชนิด ชนิดละ 3 ส่วนผสมไปทดสอบด้วยเครื่อง XRD เพื่อวิเคราะห์โครงสร้างของชิ้นงานเพื่อยืนยันโครงสร้างของชิ้นงานทั้งหมด ได้ผลดังรูปที่ ก.1 – ก.6



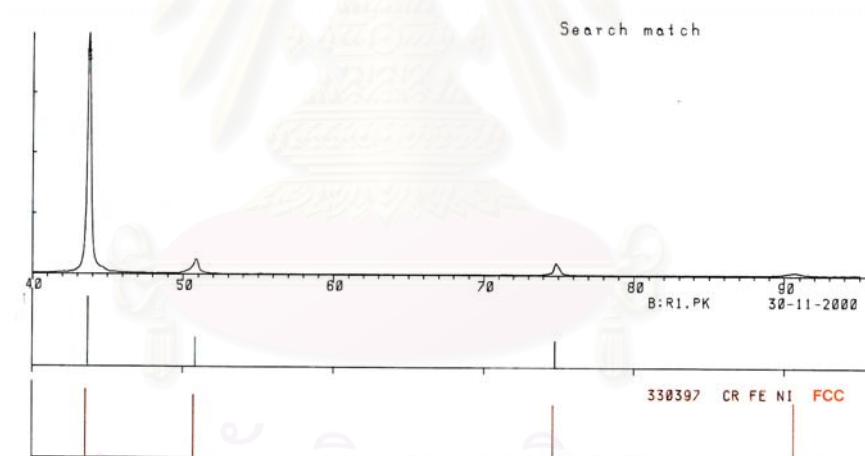
รูป ก.1 แสดงสเปกตรัมที่ได้จากการทดสอบหาโครงสร้างจุลภาคด้วยเครื่อง XRD ของเหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ริติกที่มีโครเมียม 20.50 % โดยน้ำหนักและนิกเกิล 4.75 % โดยน้ำหนัก



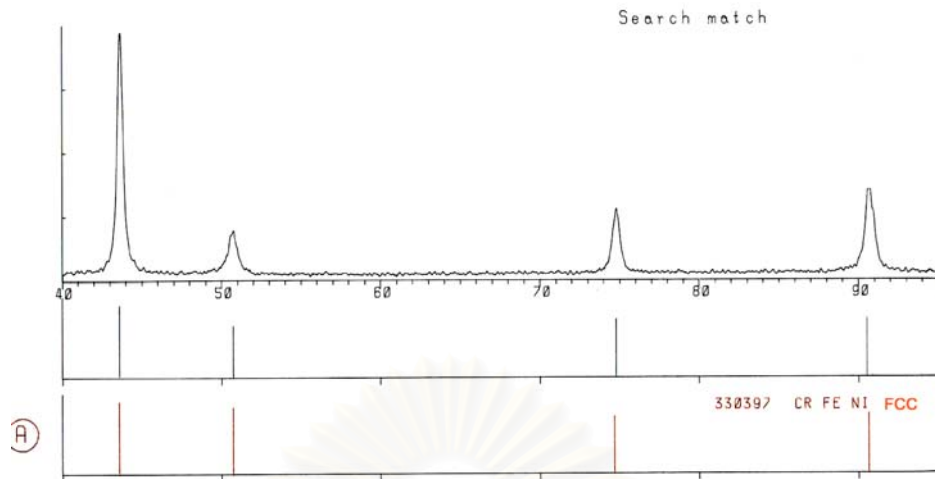
รูป ก.2 แสดงสเปกตรัมที่ได้จากการทดสอบหาโครงสร้างจุลภาคด้วยเครื่อง XRD ของเหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ริติก ที่มีโครเมียม 32.01 % โดยน้ำหนักและนิกเกิล 9.35 % โดยน้ำหนัก



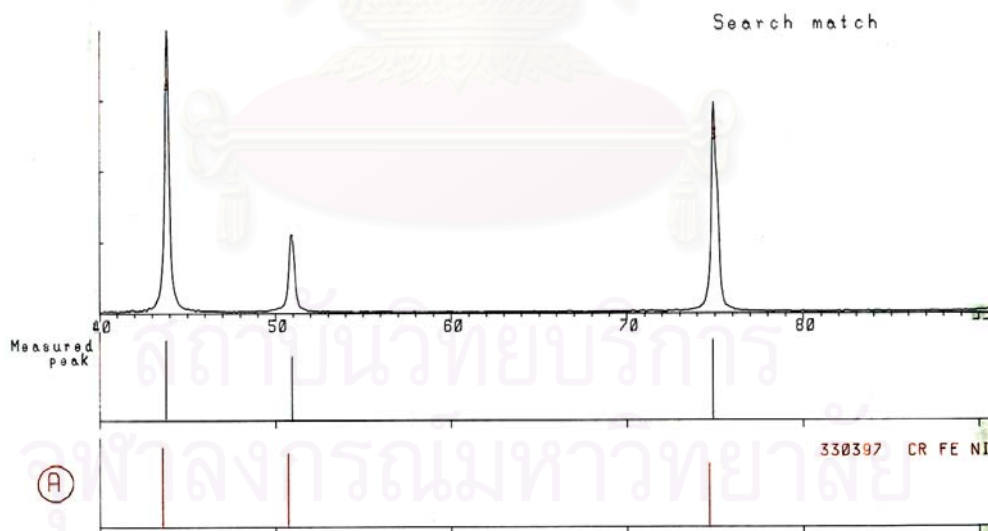
รูป ก.3 แสดงสเปกตรัมที่ได้จากการทดสอบหาโครงสร้างจุลภาคด้วยเครื่อง XRD ของ เหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ริติกที่มีโครเมียม 38.80 % โดยน้ำหนักและนิกเกิล 12.50 % โดยน้ำหนัก



รูป ก.4 แสดงสเปกตรัมที่ได้จากการทดสอบหาโครงสร้างจุลภาคด้วยเครื่อง XRD ของ เหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก ที่มีโครเมียม 21.11 % โดยน้ำหนักและนิกเกิล 9.89 % โดยน้ำหนัก



รูป ก.5 แสดงสเปกตรัมที่ได้จากการทดสอบหาโครงสร้างจุลภาคด้วยเครื่อง XRD ของ เหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิติกที่มีโครเมียม 23.49 %โดยน้ำหนักและนิกเกิล 16.56 %โดยน้ำหนัก



รูป ก.6 แสดงสเปกตรัมที่ได้จากการทดสอบหาโครงสร้างจุลภาคด้วยเครื่อง XRD ของ เหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิติกที่มีโครเมียม 31.94%โดยน้ำหนักและนิกเกิล 28.25 %โดยน้ำหนัก

ภาคผนวก ข.

การเทียบหาอัตราการลอกผิว

ทำการเทียบค่าหาอัตราการลอกผิวของชั้น SiO_2 ซึ่งมีความหนา 1000 อังสตรอม โดยใช้สภาวะการลอกผิวดังนี้

- ความดัน	0.03	ปาสคาล
- ความต่างศักย์แรงอิออน	500	โวลท์
- กระแสการแรงอิออน	8.6	มิลลิแอมป์
- อัตราการลอกผิว (Etching Rate)	30	เปอร์เซ็นต์
ทำการลอกผิวจนชั้นของ SiO_2 หหมดใช้เวลา	11.5	นาที
สามารถคำนวณหาอัตราการลอกผิวของ SiO_2 เท่ากับ	87	อังสตรอมต่อนาที

จากข้อมูลของ Commonwealth Scientific Co. Ltd. และ Hakuto Co.Ltd. ⁽¹⁸⁾ ซึ่งหาอัตราการลอกผิวโดยใช้ปืนอาร์กอนชนิดเดียวกัน วิเคราะห์หาอัตราการลอกผิวของ SiO_2 , Cr_2O_3 และเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 304 ได้ดังนี้

อัตราการลอกผิวของ SiO_2	250	อังสตรอมต่อนาที
อัตราการลอกผิวของ Cr_2O_3	50	อังสตรอมต่อนาที
อัตราการลอกผิวของเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 304	250	อังสตรอมต่อนาที

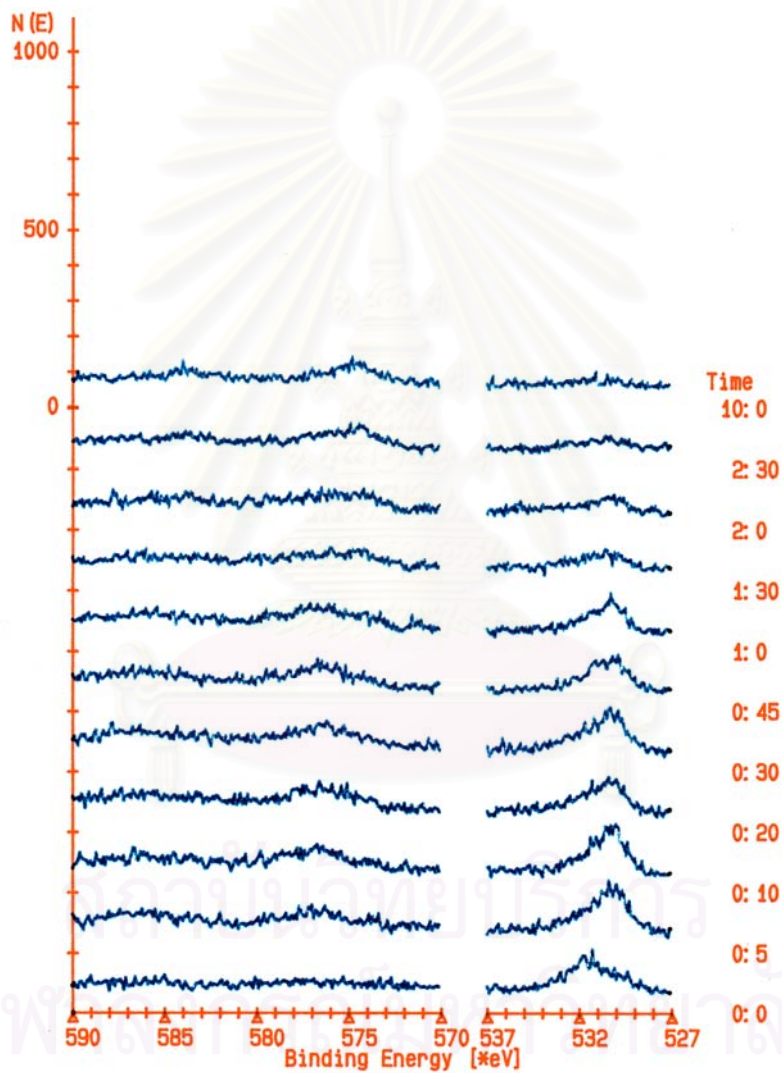
จากผลดังกล่าวทำให้สามารถคำนวณหาอัตราการลอกผิวโดยประมาณได้ดังนี้

อัตราการลอกผิวของ Cr_2O_3	17	อังสตรอมต่อนาที
อัตราการลอกผิวของเหล็กกล้าไร้สนิม	87	อังสตรอมต่อนาที

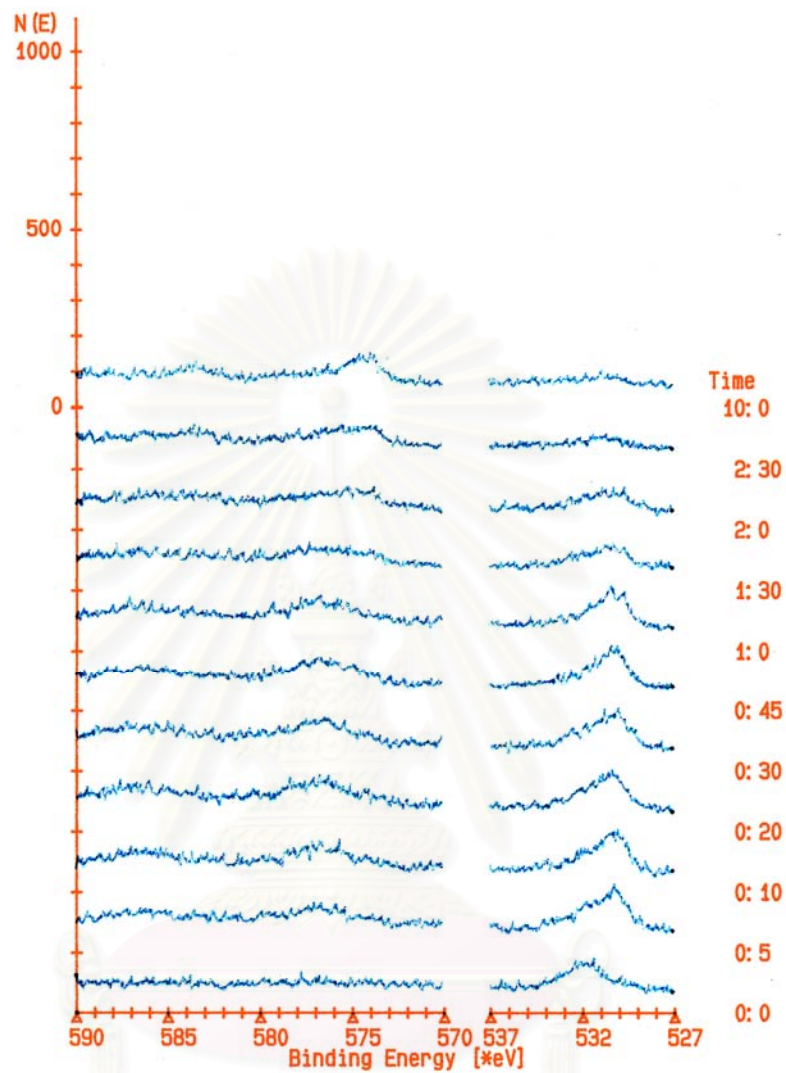
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ค.
สเปกตรัมของธาตุที่ประกอบในชั้นฟิล์มจากเครื่อง XPS

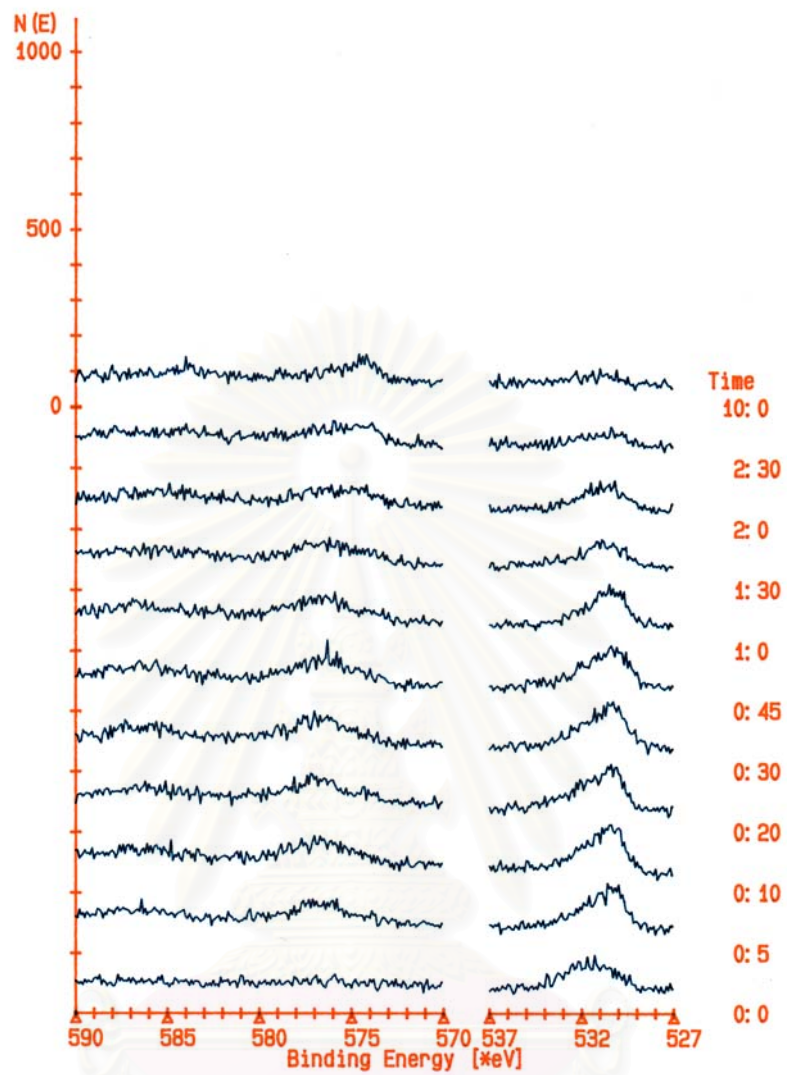
ค.1 สเปกตรัมของโครเมียมและออกซิเจน
เหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ติก



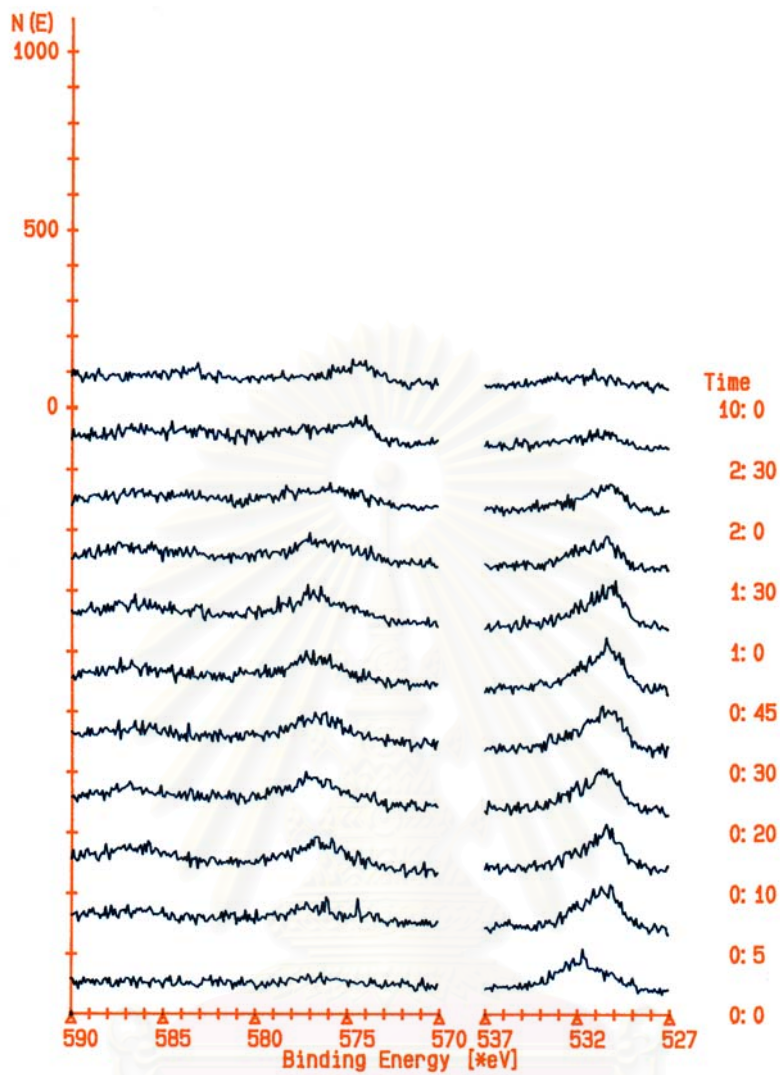
รูปที่ ค.1 สเปกตรัมของธาตุโครเมียมและออกซิเจนของเหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ติกที่ผสมโครเมียม 20.50 % และนิกเกิล 4.75 % โดยด้านซ้ายเป็นโครเมียม และด้านขวาเป็นสเปกตรัมของออกซิเจน



รูปที่ ค.2 แสดงสเปกตรัมชั้นฟิล์มของธาตุโคโรเมียมและออกซิเจนของเหล็กกล้าไร้สนิม
เฟอร์ริติกที่ผสมโคโรเมียม 25.24 %และนิกเกิล 6.40 % โดยด้านซ้ายเป็น
โคโรเมียม และด้านขวาเป็นสเปกตรัมของออกซิเจน



รูปที่ ค.3 แสดงสเปกตรัมชั้นฟิล์มของธาตุโครเมียมและออกซิเจนของเหล็กกล้าไร้สนิม
เฟอร์ริติกที่ผสมโครเมียม 27.62 %และนิกเกิล 6.97 %โดยด้านซ้ายเป็น
โครเมียม และด้านขวาเป็นสเปกตรัมของออกซิเจน

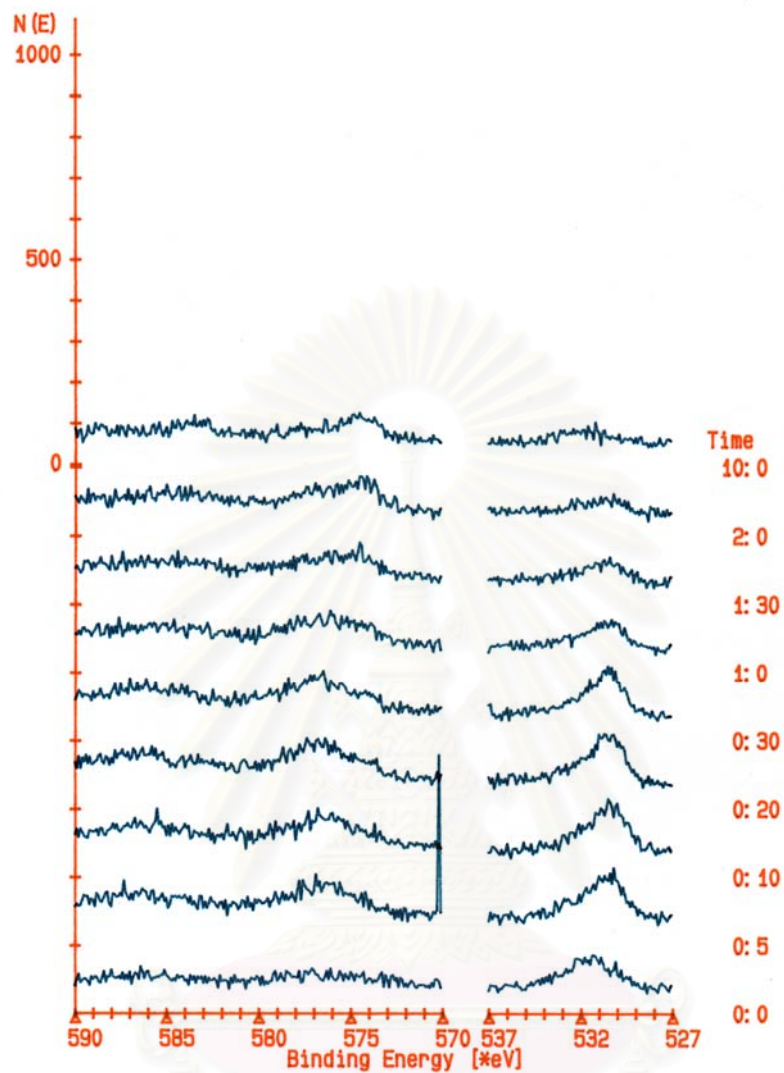


รูปที่ ค.4 แสดงสเปกตรัมชั้นฟิล์มของธาตุโคโรเนียมและออกซิเจนของเหล็กกล้าไร้สนิม

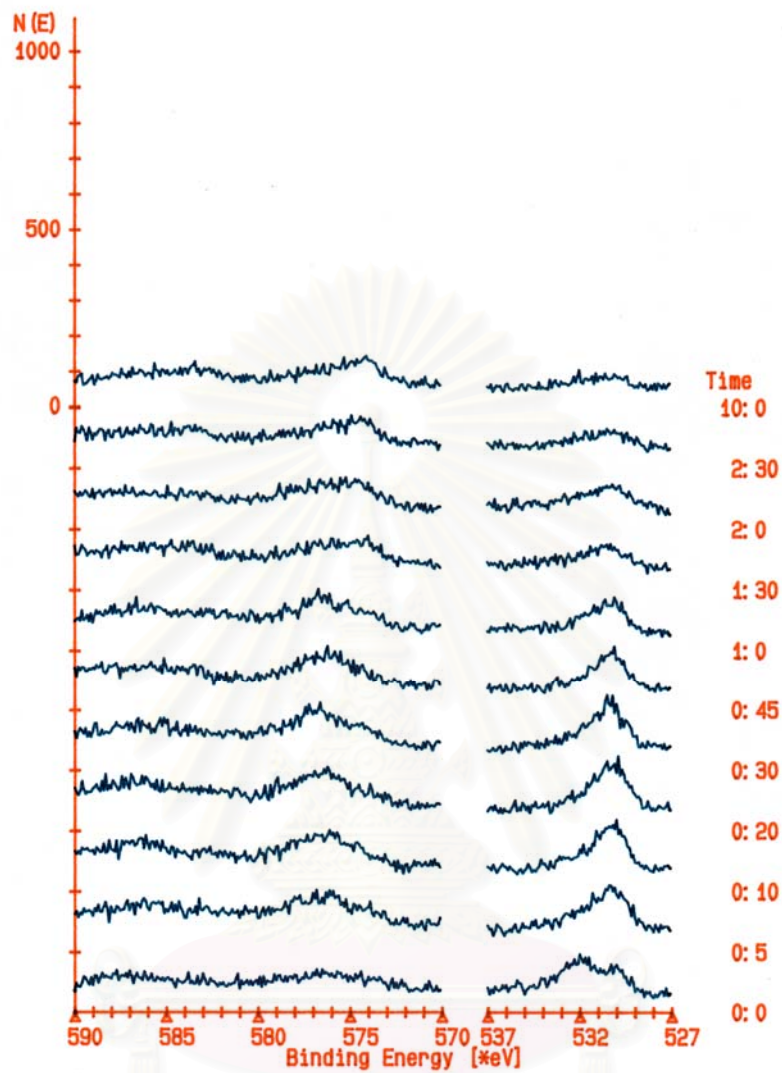
เฟอร์ริติกที่ผสมโคโรเนียม 29.58 % และนิกเกิล 8.29 % โดยด้านซ้ายเป็น

โคโรเนียม และด้านขวาเป็นสเปกตรัมของออกซิเจน

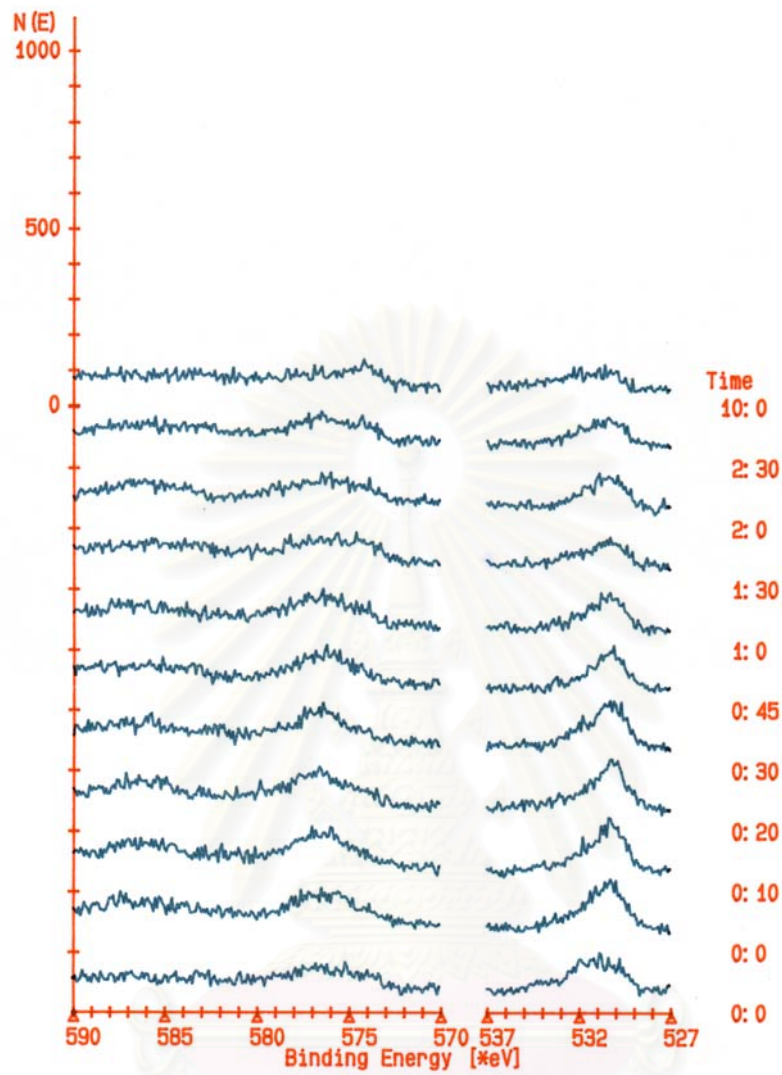
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ ค.5 แสดงสเปกตรัมชั้นฟิล์มของธาตุโคโรเมียมและออกซิเจนของเหล็กกล้าไร้สนิม
เฟอร์ริติกที่ผสมโคโรเมียม 32.01 %และนิกเกิล 9.35 % โดยด้านซ้ายเป็น
โคโรเมียม และด้านขวาเป็นสเปกตรัมของออกซิเจน

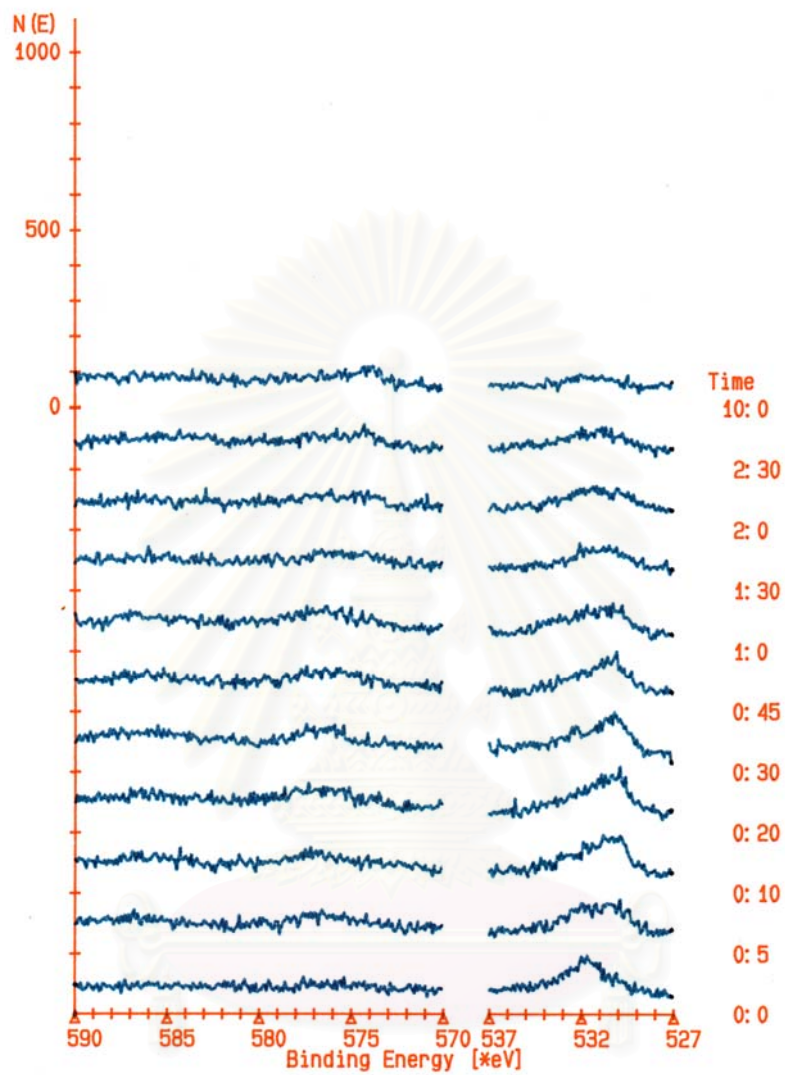


รูปที่ ค.6 แสดงสเปกตรัมชั้นฟิล์มของธาตุโคโรเนียมและออกซิเจนของเหล็กกล้าไร้สนิม
เฟอริติกที่ผสมโครเมียม 34.79 %และนิกเกิล 10.82 % โดยด้านซ้ายเป็น
โครเมียม และด้านขวาเป็นสเปกตรัมของออกซิเจน

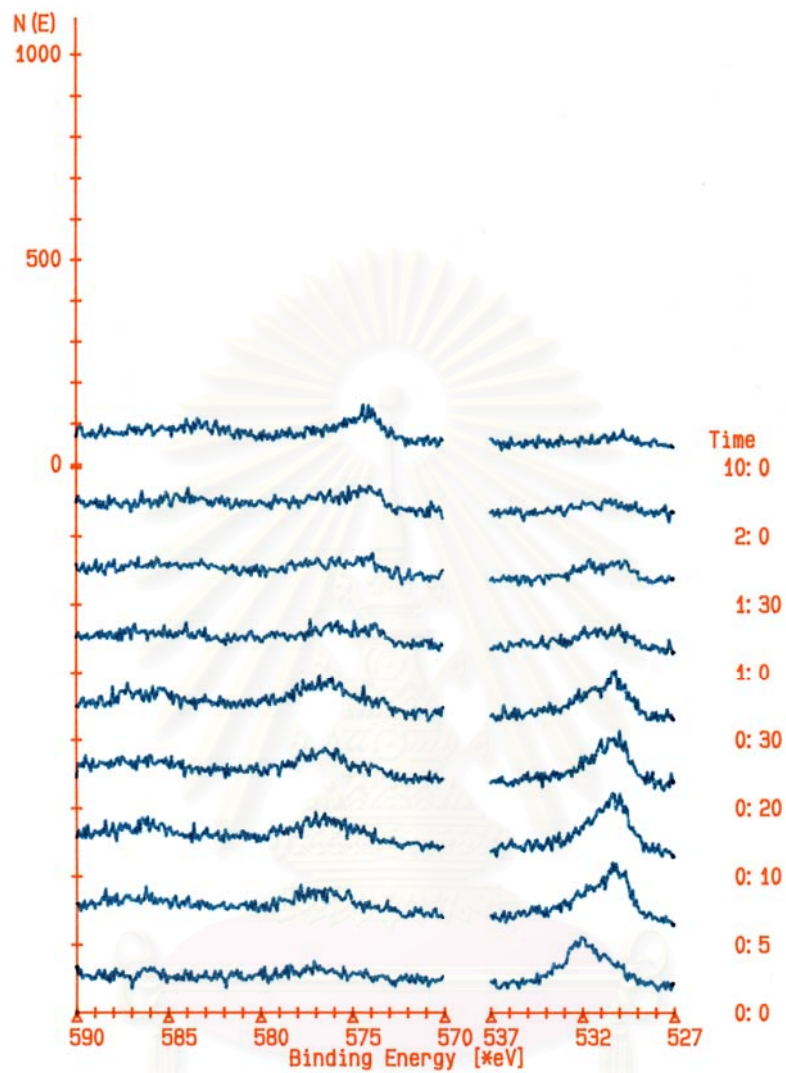


รูปที่ ค.7 แสดงสเปกตรัมชั้นฟิล์มของธาตุโคโรเมียมและออกซิเจนของเหล็กกล้าไร้สนิม
เฟอร์ริกที่ผสมโคโรเมียม 38.80 % และนิกเกิล 12.50 % โดยด้านซ้ายเป็น
โคโรเมียม และด้านขวาเป็นสเปกตรัมของออกซิเจน

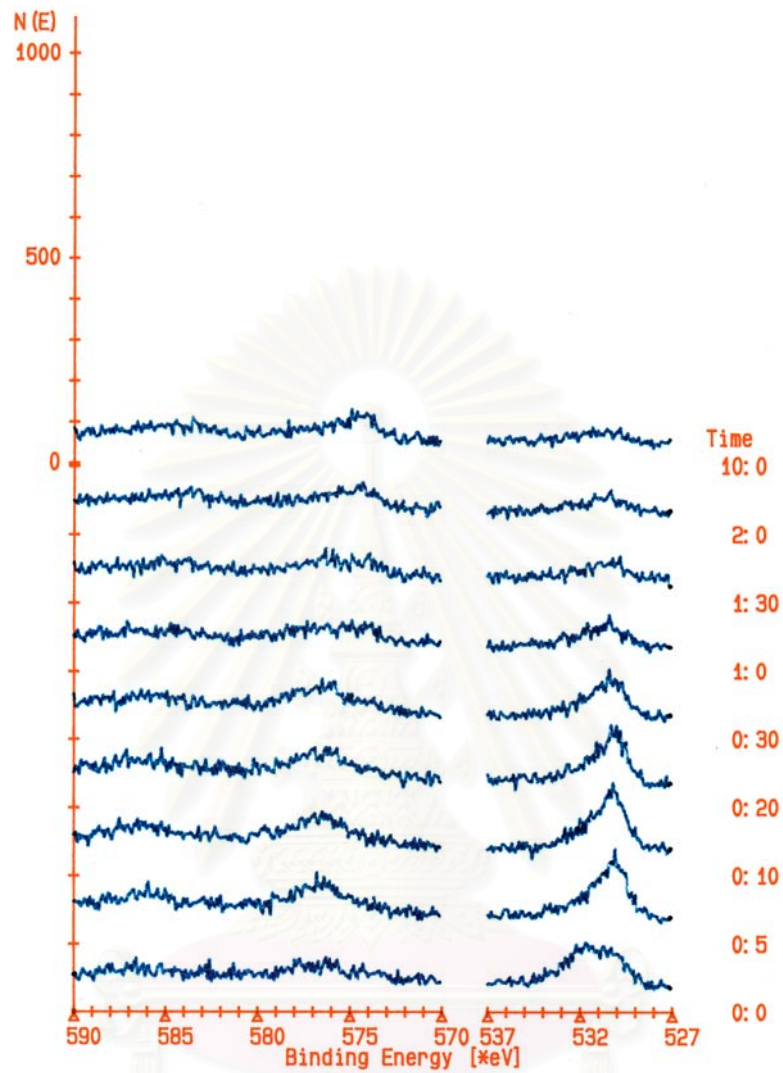
เหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิติก



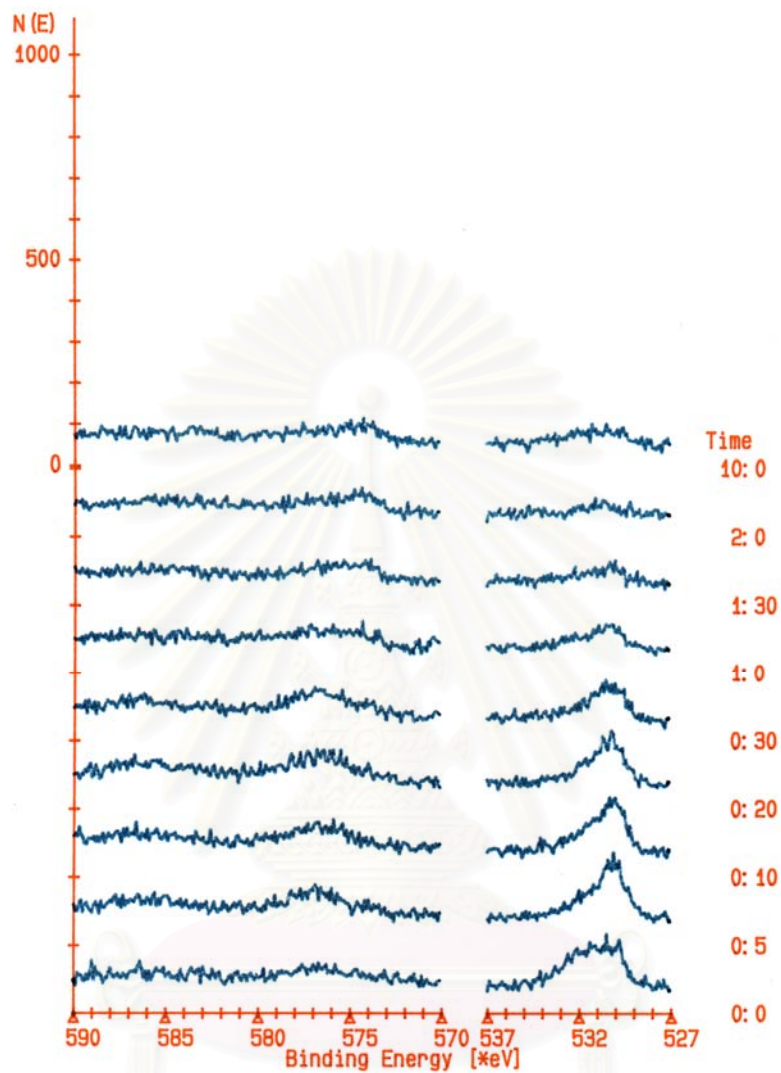
รูปที่ ค.8 แสดงสเปกตรัมชั้นฟิล์มของธาตุโครเมียมและออกซิเจนของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิติกที่ผสมโครเมียม 21.11 % และนิกเกิล 9.89 % โดยด้านซ้ายเป็นโครเมียม และด้านขวาเป็นสเปกตรัมของออกซิเจน



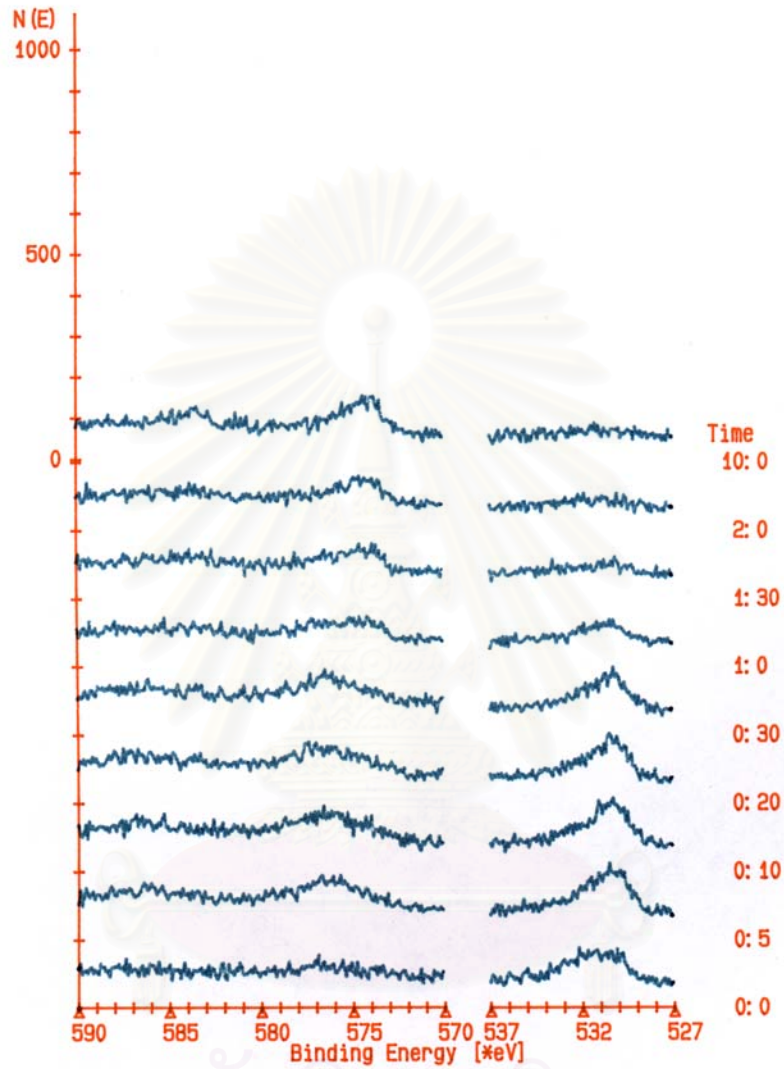
รูปที่ ค.9 แสดงสเปกตรัมชั้นฟิล์มของธาตุโครเมียมและออกซิเจนของเหล็กกล้าไร้
สนิมอสเทนดิกที่ผสมโครเมียม 22.43 %และนิกเกิล 11.57 %โดยด้านซ้าย
เป็นโครเมียม และด้านขวาเป็นสเปกตรัมของออกซิเจน



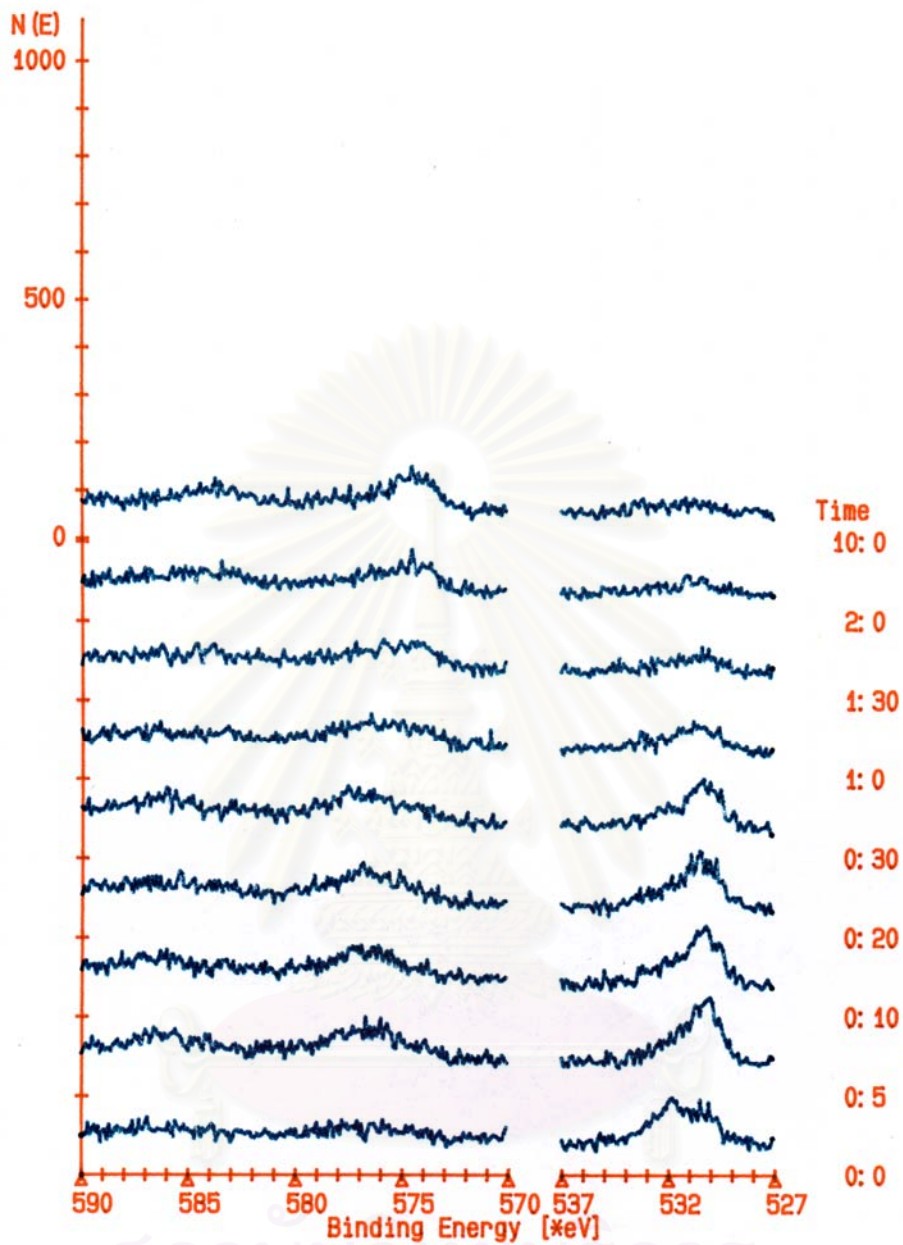
รูปที่ ค.10 แสดงสเปกตรัมชั้นฟิล์มของธาตุโครเมียมและออกซิเจนของเหล็กกล้าไร้สนิม
 ออกสเทนิติกที่ผสมโครเมียม 22.90 %และนิกเกิล 13.72 %โดยด้านซ้ายเป็น
 โครเมียม และด้านขวาเป็นสเปกตรัมของออกซิเจน



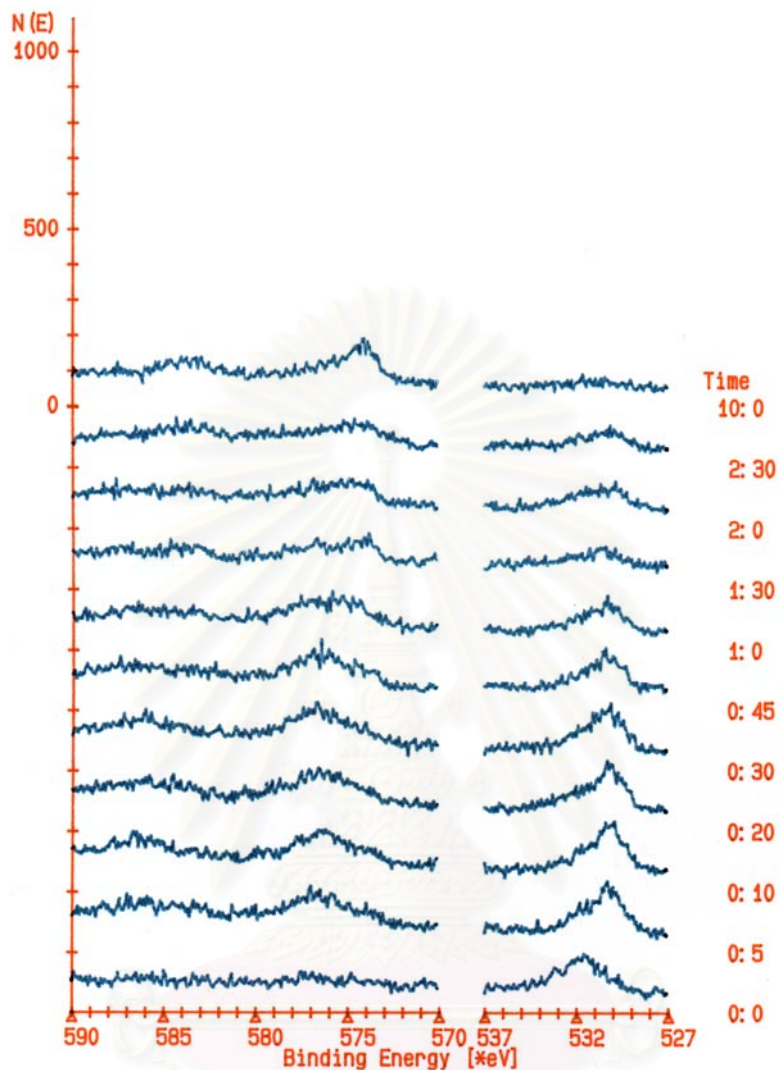
รูปที่ ค.11 แสดงสเปกตรัมชั้นฟิล์มของธาตุโครเมียมและออกซิเจนของเหล็กกล้าไร้สนิมอสเทนดิกที่ผสมโครเมียม 23.49 %และนิกเกิล 16.56 %โดยด้านซ้ายเป็นโครเมียม และด้านขวาเป็นสเปกตรัมของออกซิเจน



รูปที่ ค.12 แสดงสเปกตรัมชั้นฟิล์มของธาตุโครเมียมและออกซิเจนของเหล็กกล้าไร้
สนิมอสเทนดิกที่ผสมโครเมียม 25.45 %และนิกเกิล 17.54 %โดยด้านซ้าย
เป็นโครเมียม และด้านขวาเป็นสเปกตรัมของออกซิเจน

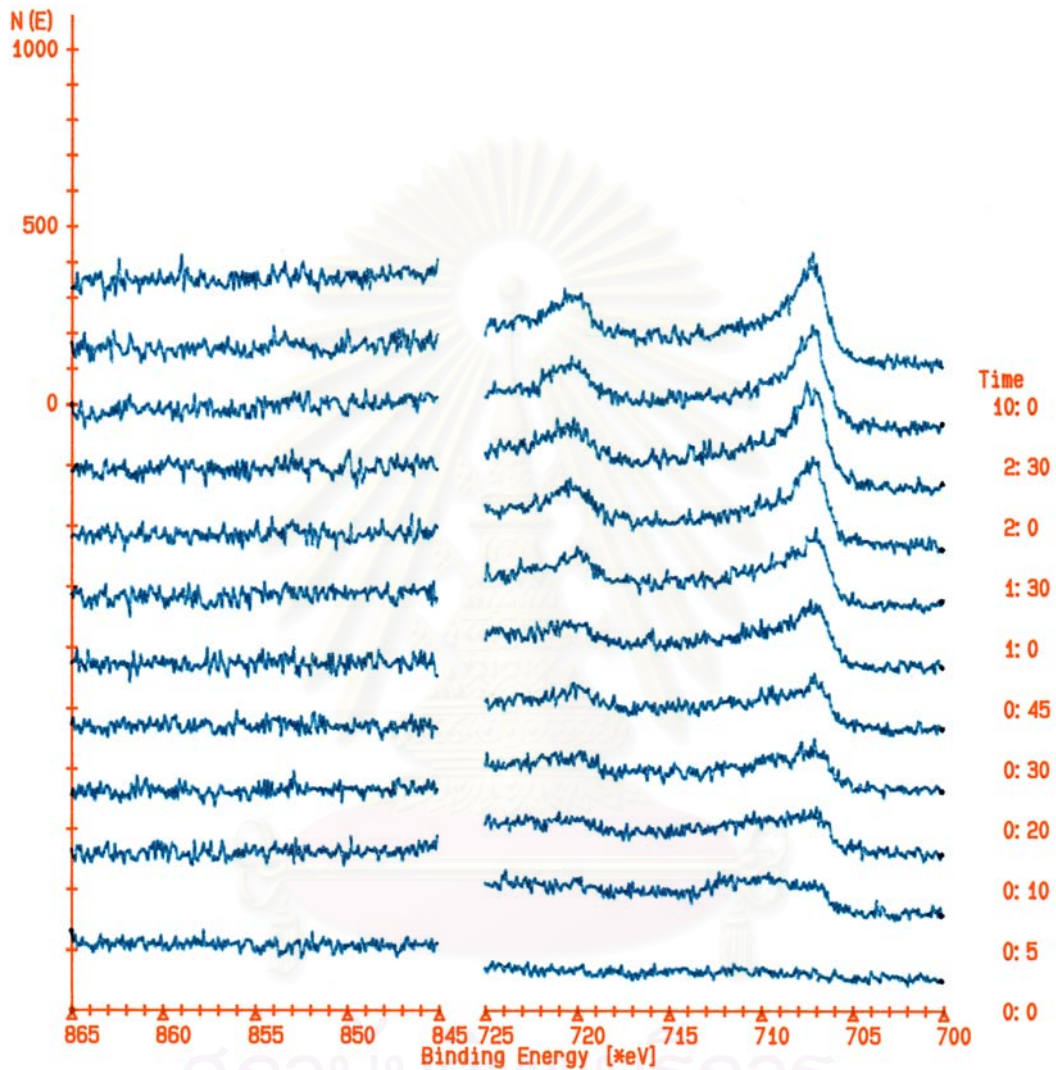


รูปที่ ค.13 แสดงสเปกตรัมชั้นฟิล์มของธาตุโครเมียมและออกซิเจนของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกที่ผสมโครเมียม 27.65 %และนิกเกิล 19.96 %โดยด้านซ้ายเป็นโครเมียม และด้านขวาเป็นสเปกตรัมของออกซิเจน

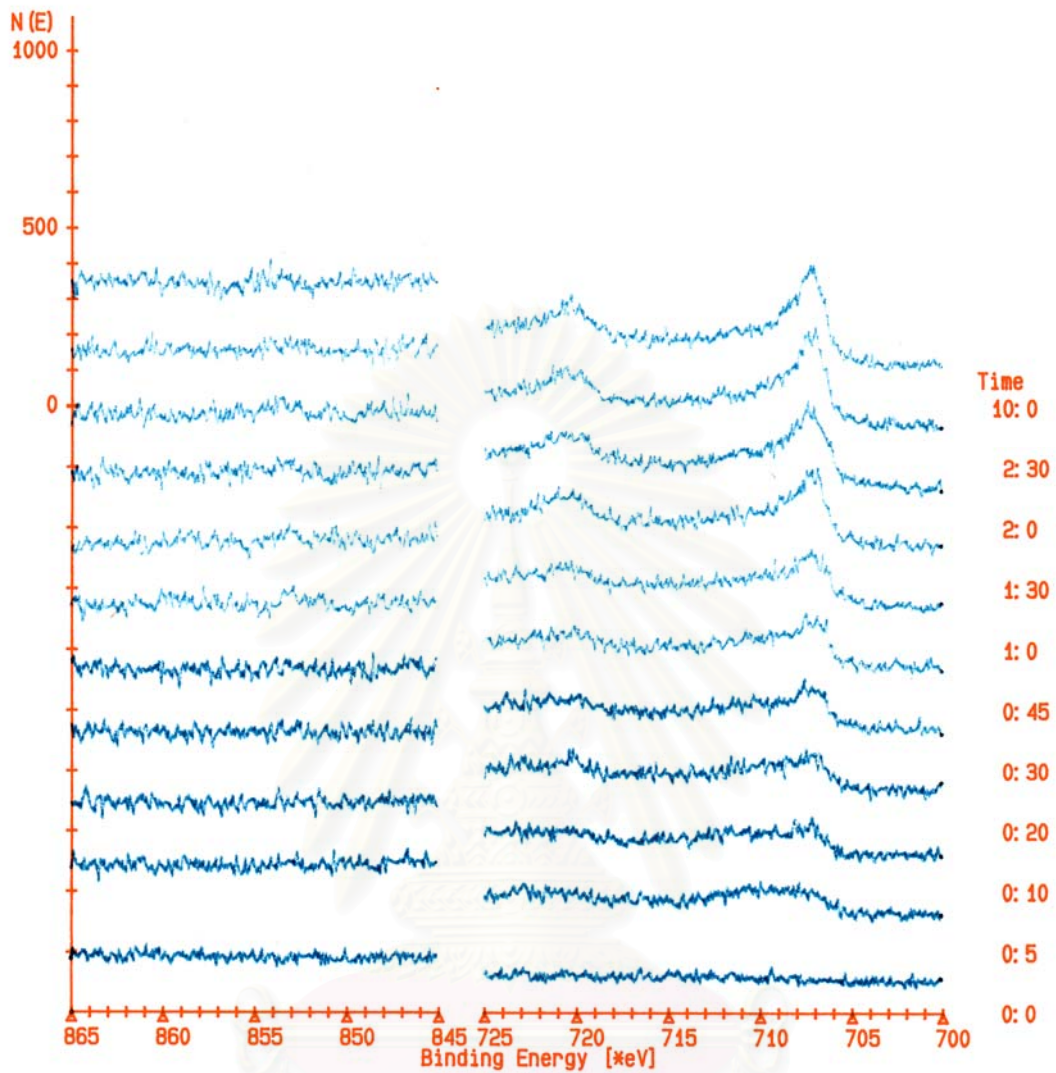


รูปที่ ค.14 แสดงสเปกตรัมชั้นฟิล์มของธาตุโครเมียมและออกซิเจนของเหล็กกล้าไร้
 สนิมอสเทนนิคที่ผสมโครเมียม 31.94 %และนิกเกิล 28.25 %โดยด้านซ้าย
 เป็นโครเมียม และด้านขวาเป็นสเปกตรัมของออกซิเจน

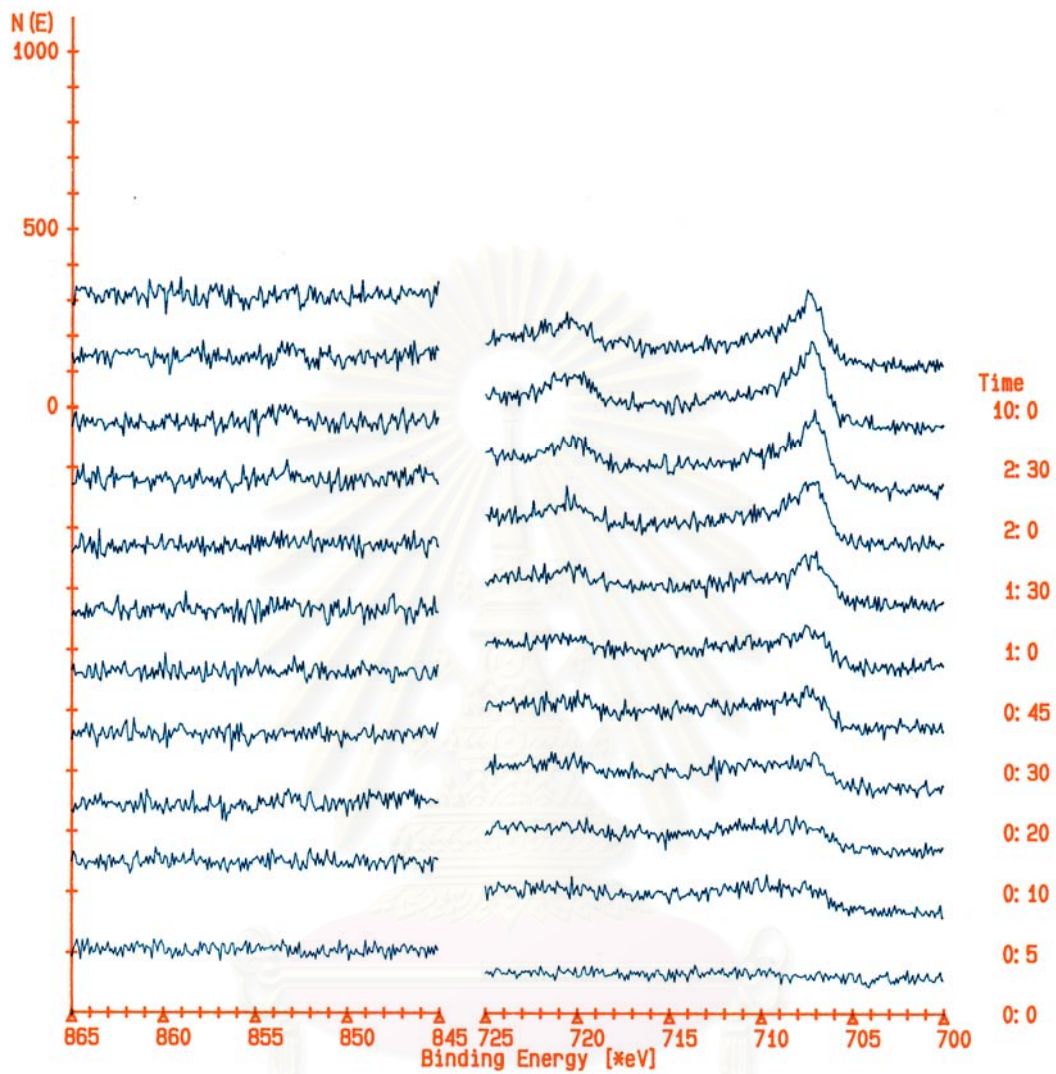
ค.2 สเปกตรัมของนิกเกิลและเหล็ก
เหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ริติก



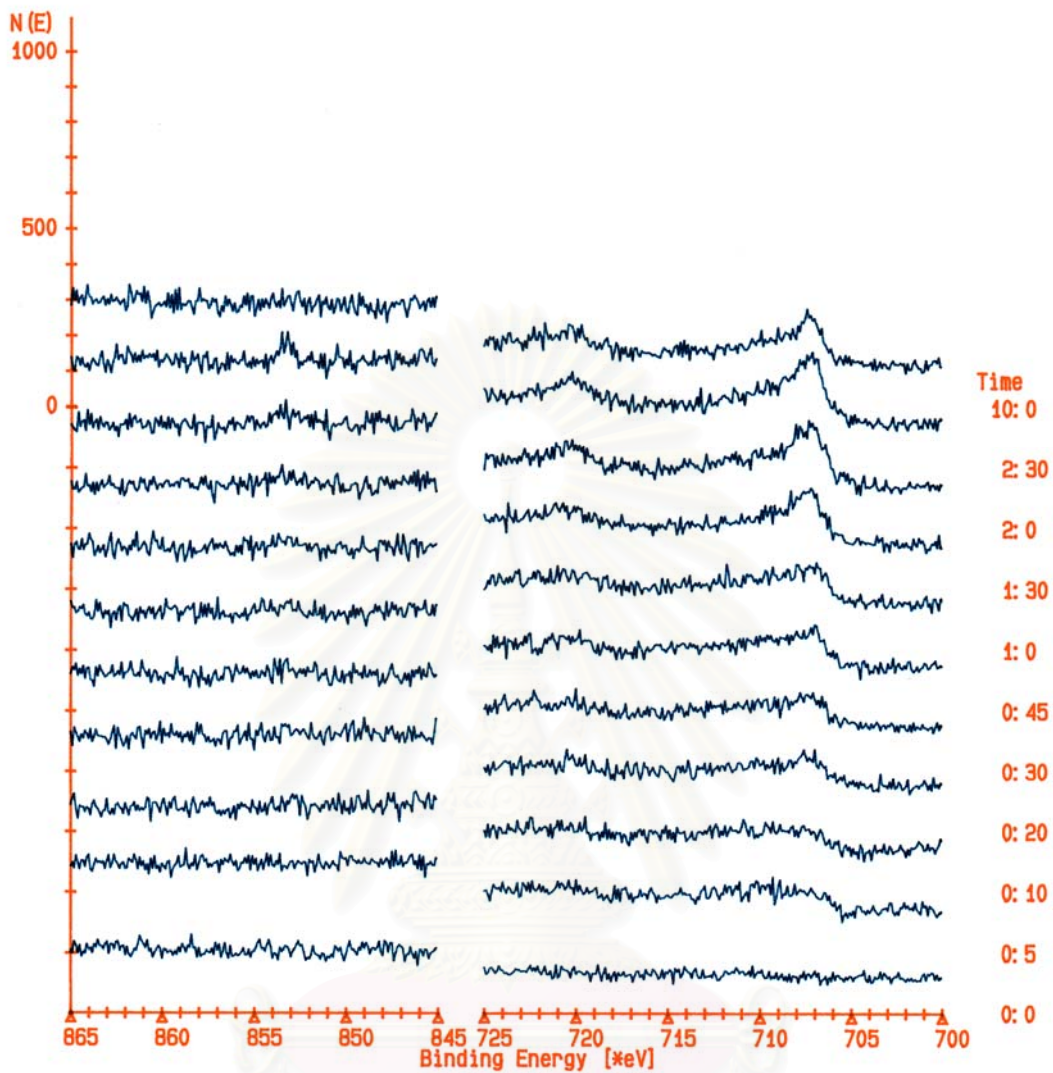
รูปที่ ค.15 สเปกตรัมของธาตุนิกเกิลและเหล็กของเหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ริติกที่ผสม
โครเมียม 20.50 % และนิกเกิล 4.75 % โดยด้านซ้ายเป็นนิกเกิล และด้านขวา
เป็นสเปกตรัมของเหล็ก



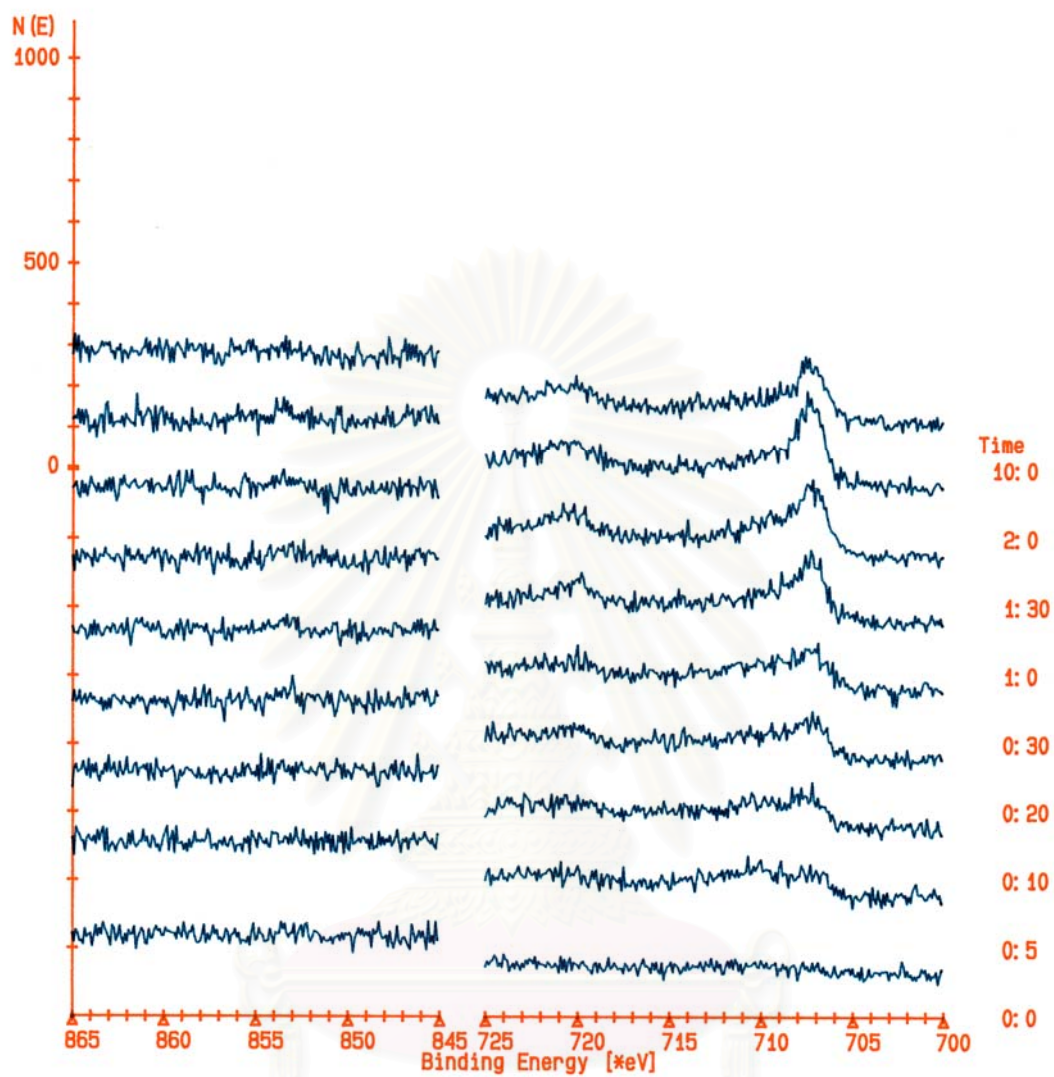
รูปที่ ค.16 แสดงสเปกตรัมของธาตุ निकิลและเหล็กของเหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ริติกที่ผสมโครเมียม 25.24 % และ निकิล 6.40 % โดยด้านซ้ายเป็น निकิล และด้านขวาเป็นสเปกตรัมของเหล็ก



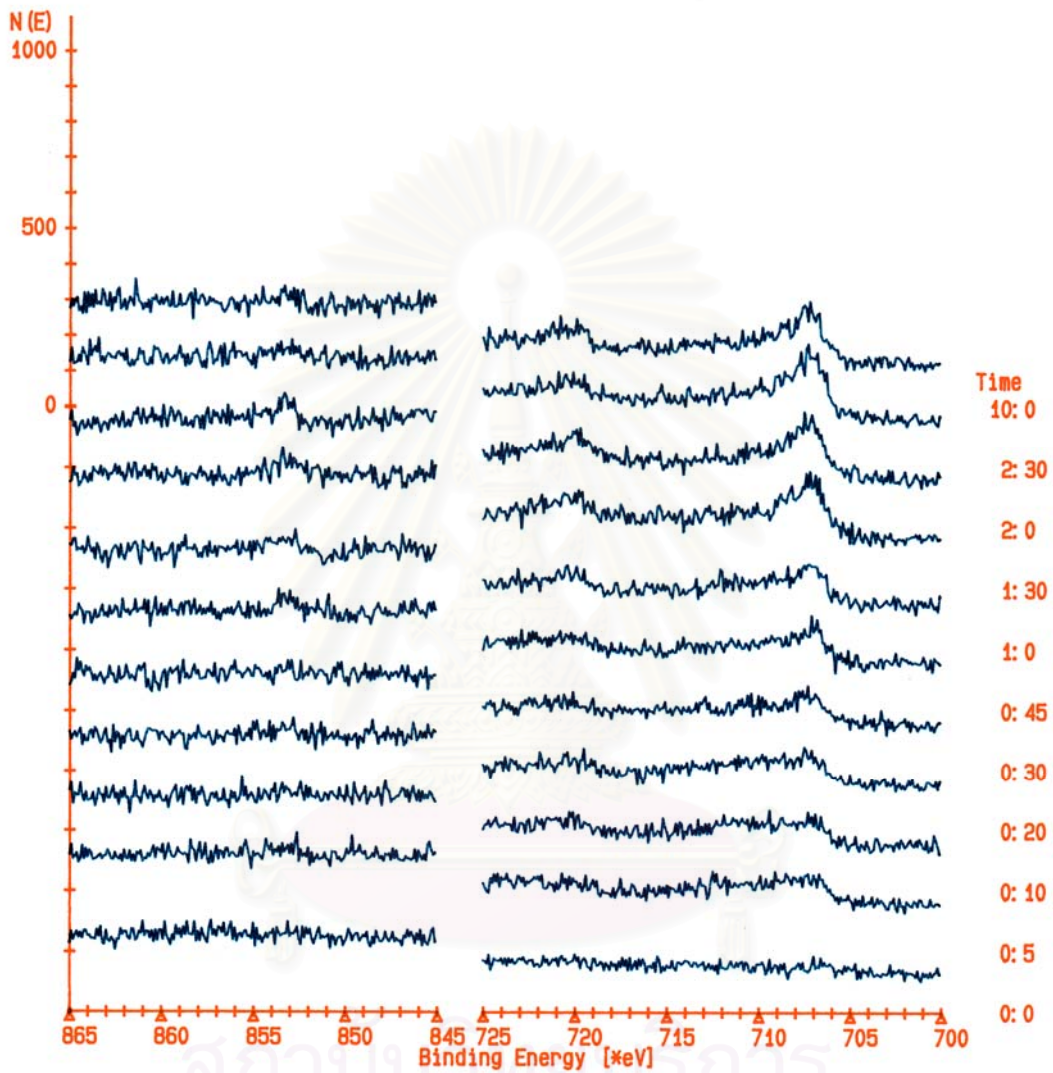
รูปที่ ค.17 แสดงสเปกตรัมของธาตุ निकเกิดและเหล็กของเหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ริติกที่ผสมโครเมียม 27.62 %และนิกเกิล 6.97 % โดยด้านซ้ายเป็นนิกเกิล และด้านขวาเป็นสเปกตรัมของเหล็ก



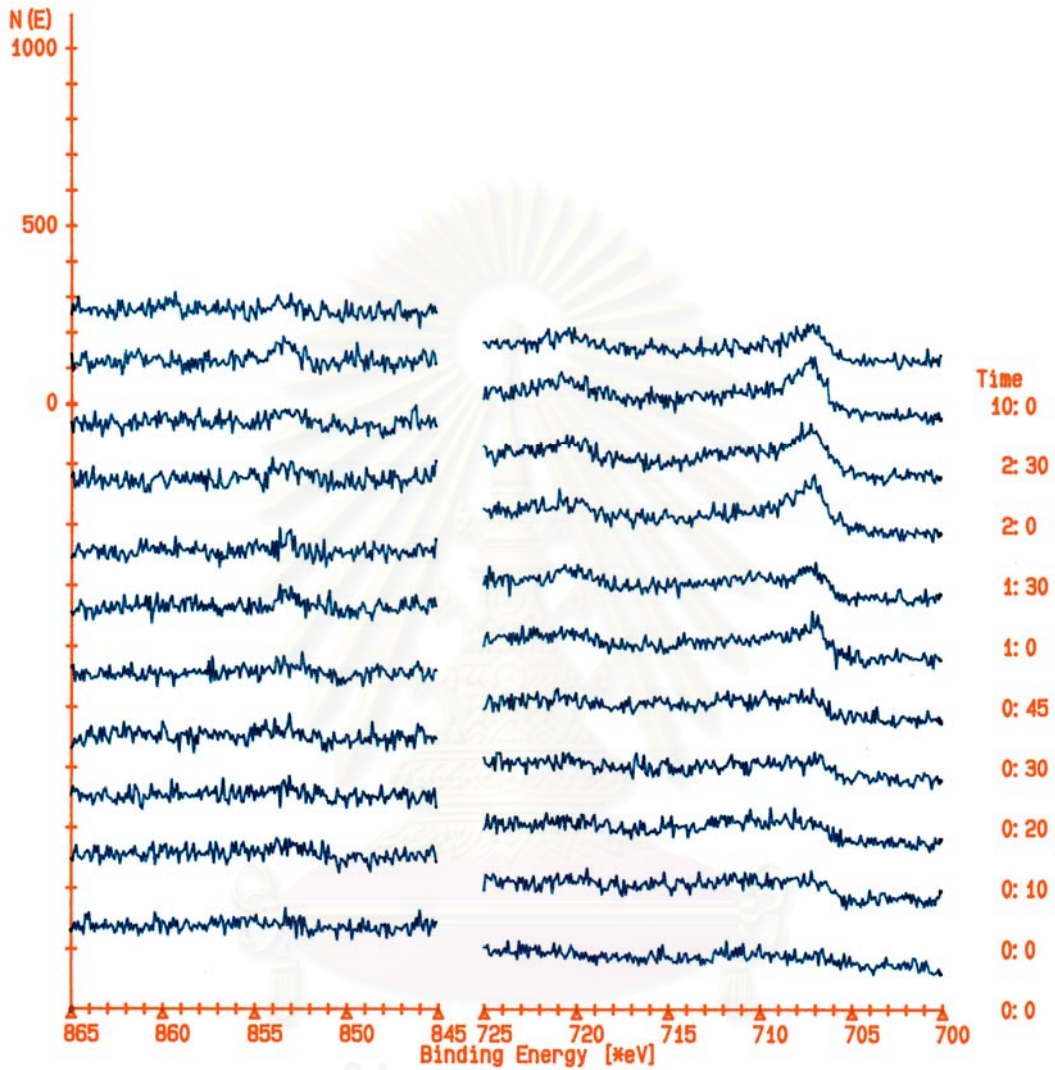
รูปที่ ค.18 แสดงสเปกตรัมของธาตุเหล็กและเหล็กของเหล็กกล้าไร้สนิม เฟอริติกที่ผสม
โครเมียม 29.58 % และนิกเกิล 8.29 % โดยด้านซ้ายเป็นนิกเกิล และด้านขวา
เป็นสเปกตรัมของเหล็ก



รูปที่ ค.19 แสดงสเปกตรัมของธาตุเหล็กและเหล็กของเหล็กกล้าไร้สนิม เฟอร์ริติกที่ผสม
โครเมียม 32.01 %และนิกเกิล 9.35 % โดยด้านซ้ายเป็นนิกเกิล และด้านขวา
เป็นสเปกตรัมของเหล็ก

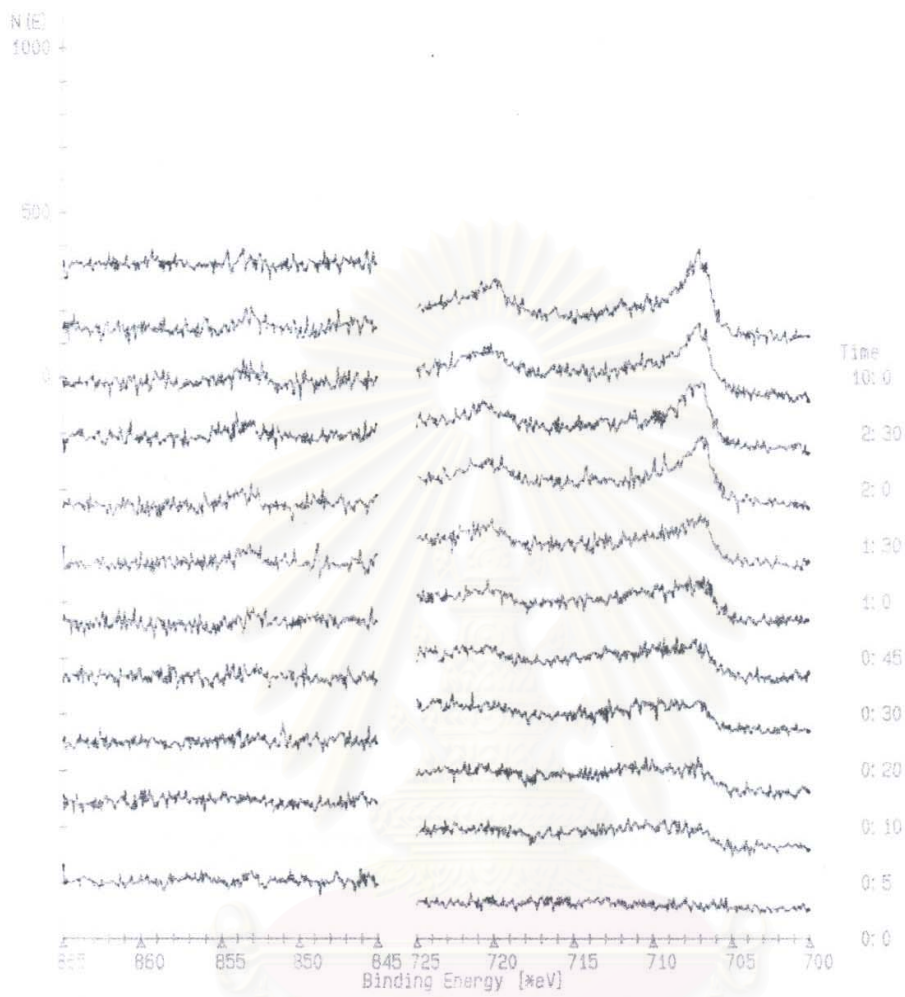


รูปที่ ค.20 แสดงสเปกตรัมของธาตุนิกเกิลและเหล็กของเหล็กกล้าไร้สนิม เฟอร์ติกที่ผสมโครเมียม 34.79 %และนิกเกิล 10.82 %โดยด้านซ้ายเป็นนิกเกิล และด้านขวาเป็นสเปกตรัมของเหล็ก

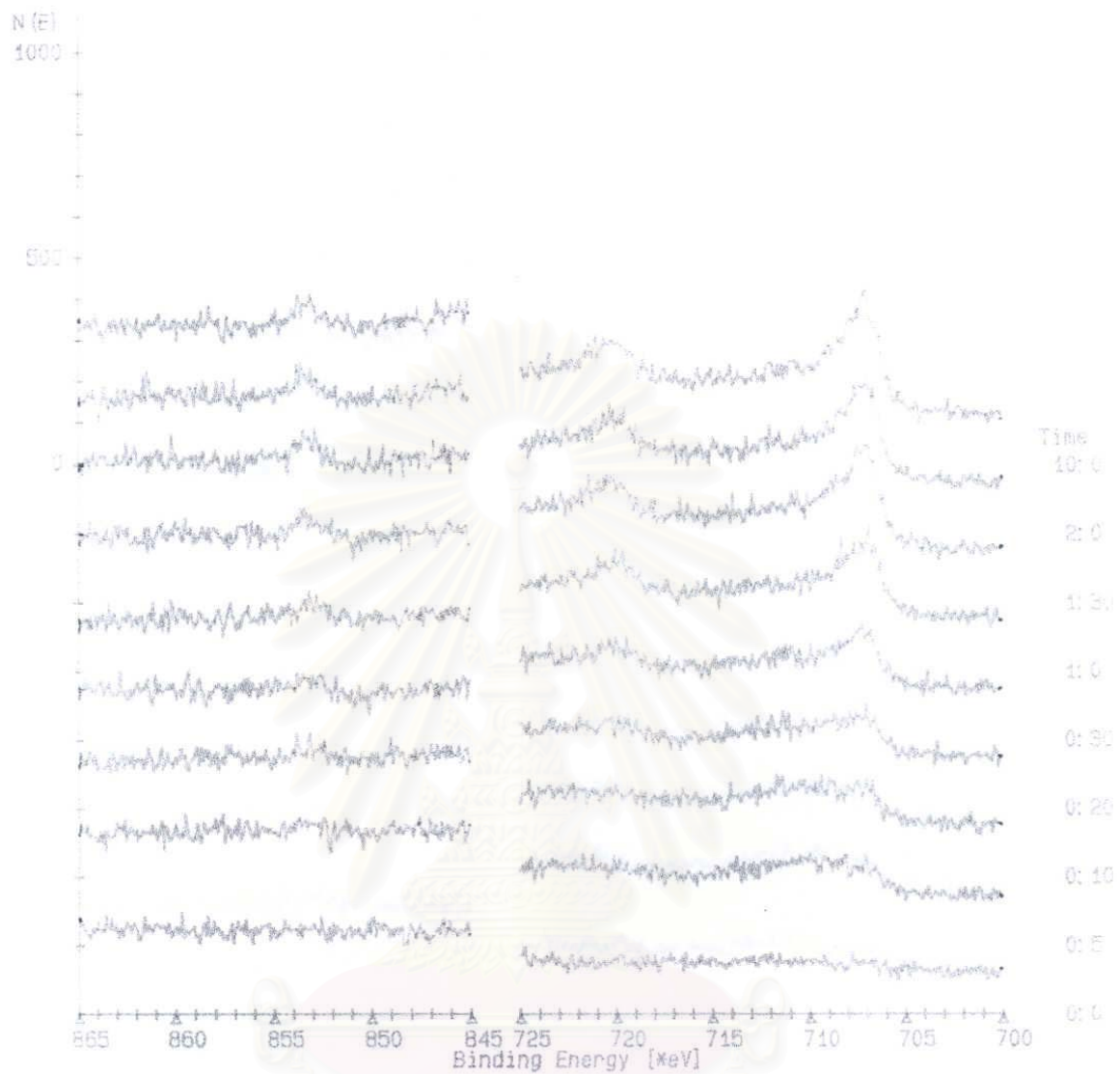


รูปที่ ค.21 แสดงสเปกตรัมของธาตุเหล็กและเหล็กของเหล็กกล้าไร้สนิม เฟอร์ตริกที่ผสมโครเมียม 38.80 %และนิกเกิล 12.50 % โดยด้านซ้ายเป็นนิกเกิล และด้านขวาเป็นสเปกตรัมของเหล็ก

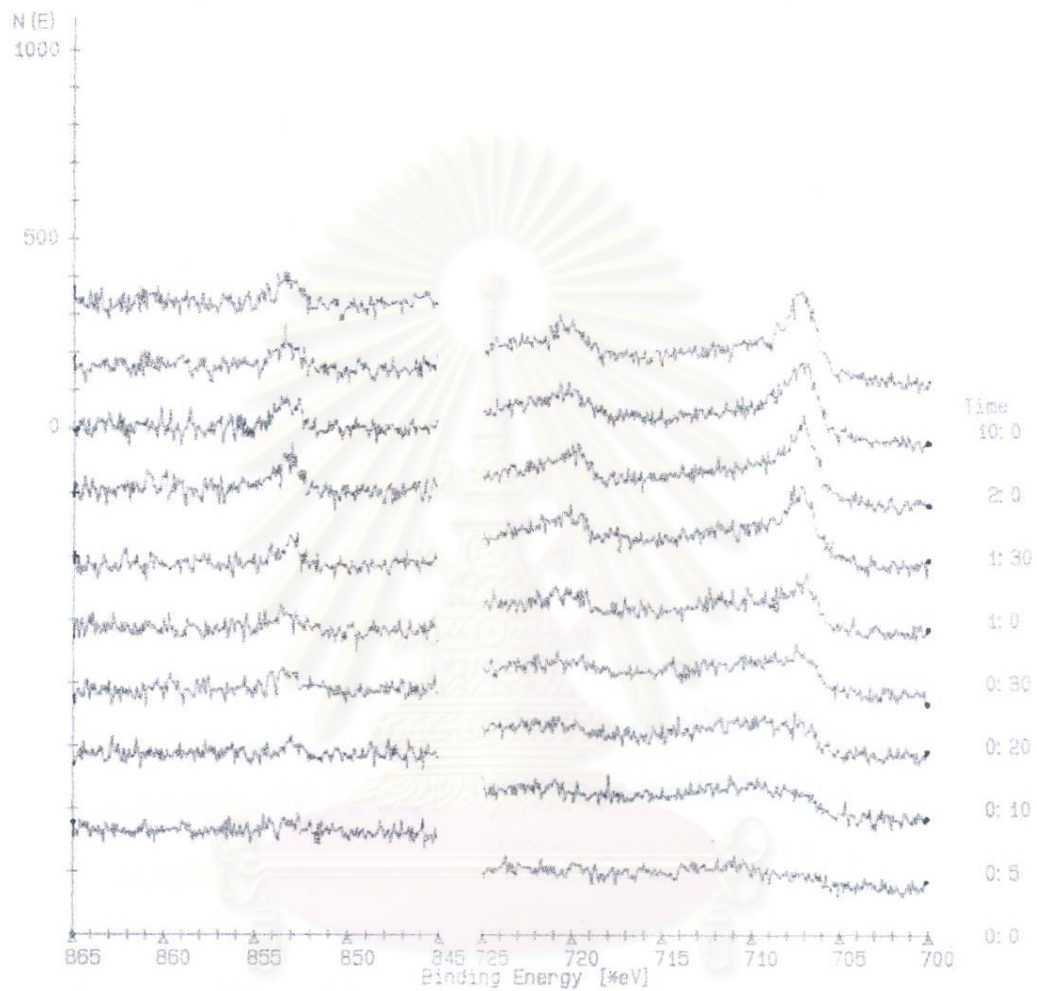
เหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิติก



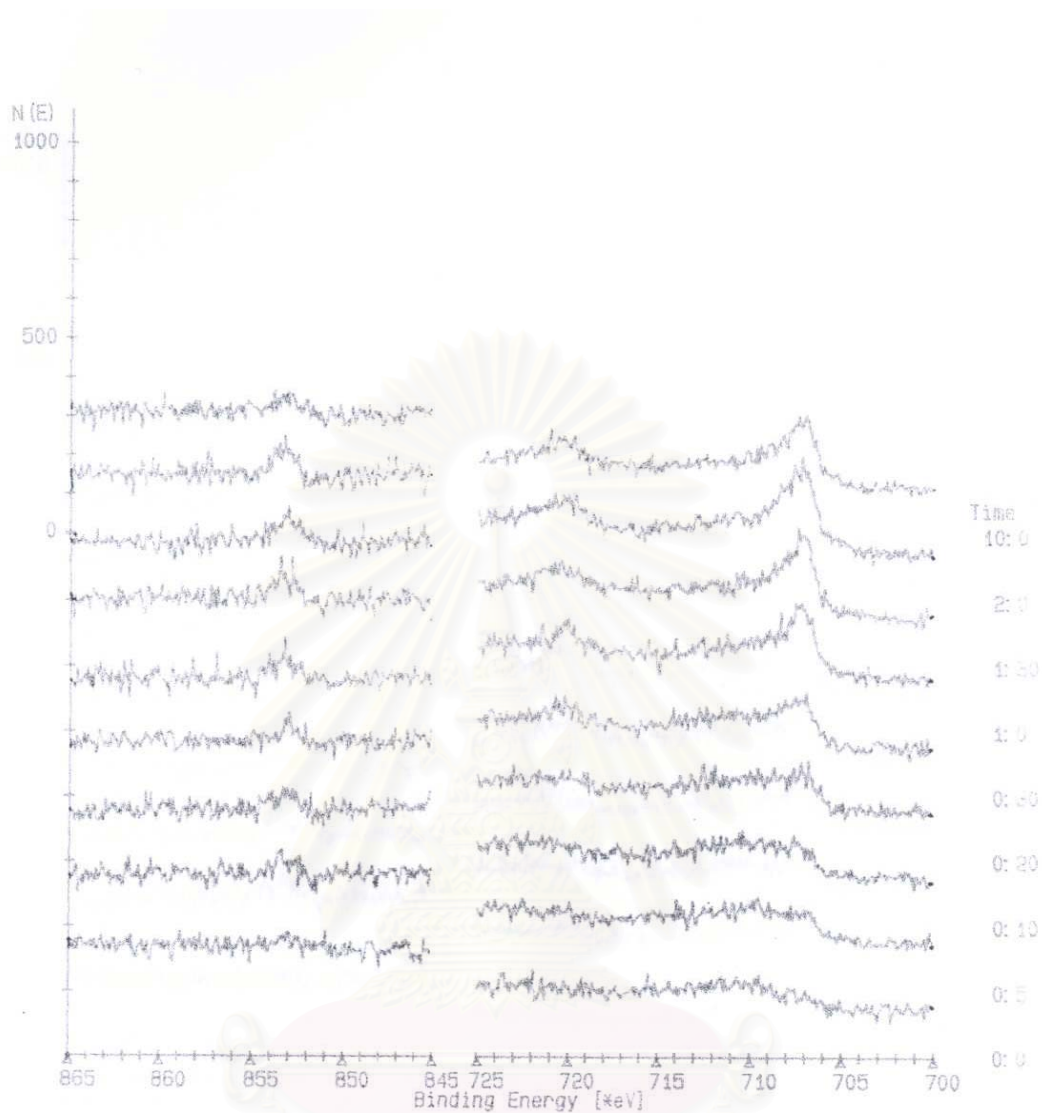
รูปที่ ค.22 แสดงสเปกตรัมของธาตุ निकเกิดและเหล็กของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิติกที่ผสมโครเมียม 21.11 % และ निकเกิด 9.89 % โดยด้านซ้ายเป็น निकเกิด และด้านขวาเป็นสเปกตรัมของเหล็ก



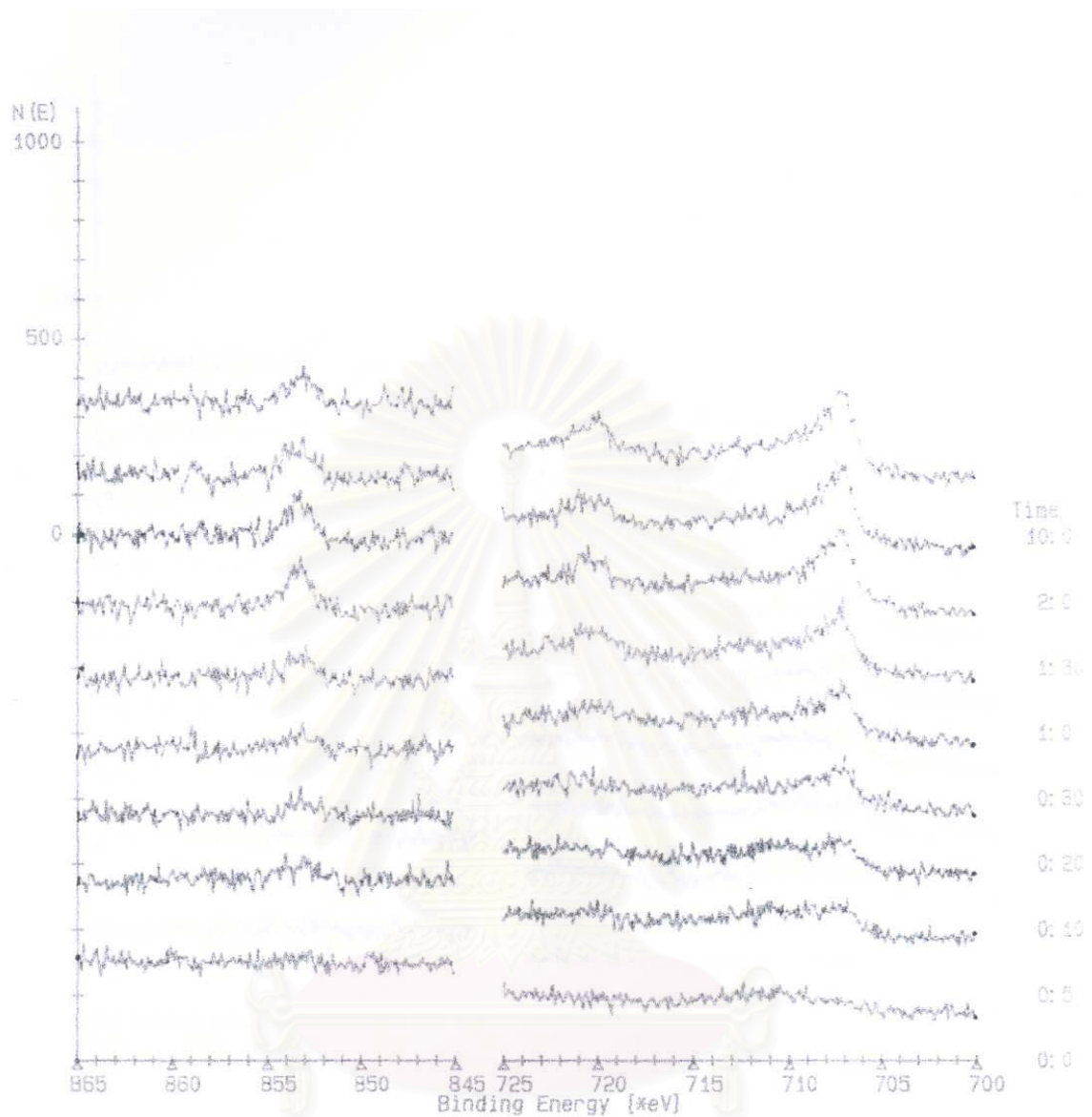
รูปที่ ค.23 แสดงสเปกตรัมของธาตุนิกเกิลและเหล็กของเหล็กกล้าไร้สนิมอสเทนดิกที่ผสมโครเมียม 22.43 % และนิกเกิล 11.57 % โดยด้านซ้ายเป็นนิกเกิล และด้านขวาเป็นสเปกตรัมของเหล็ก



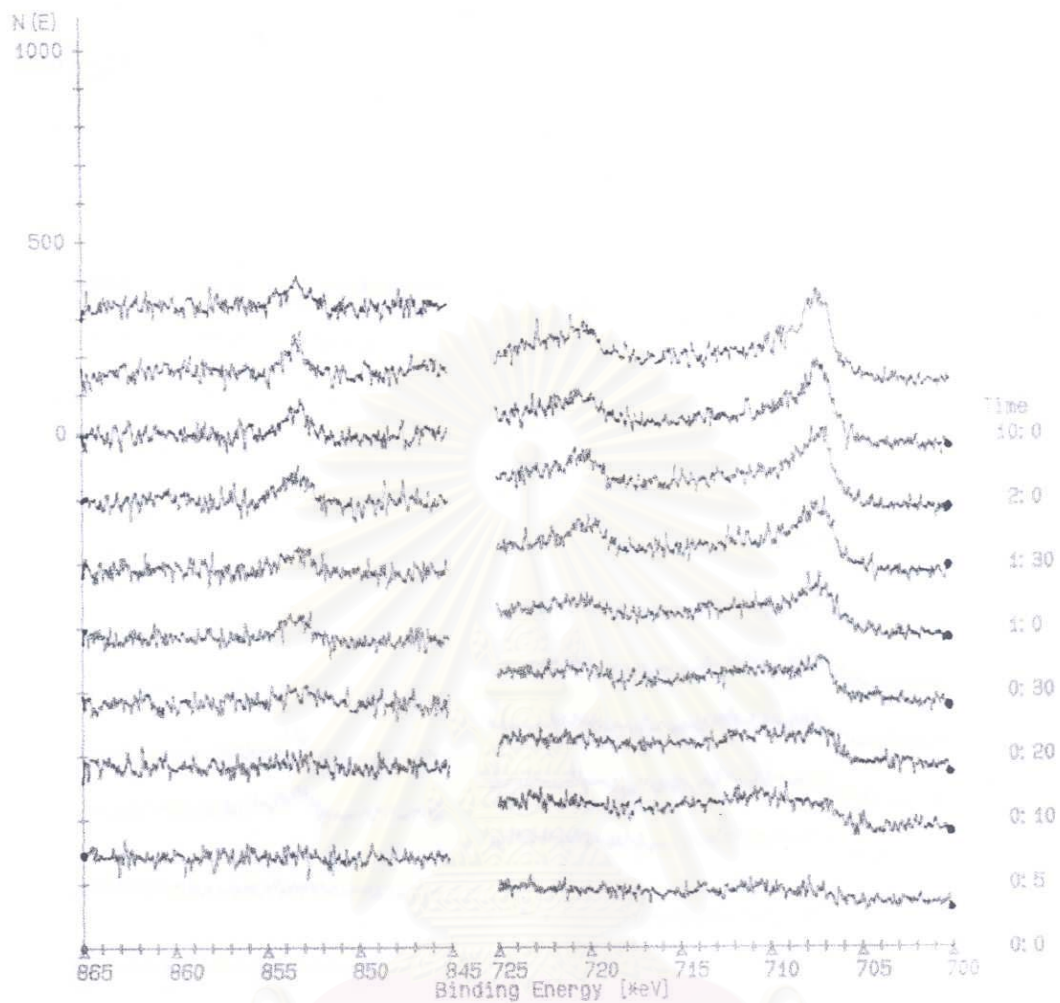
สถาบันวิทยบริการ
 รูปที่ ค.24 แสดงสเปกตรัมของธาตุ निकเกิดและเหล็กของเหล็กกล้าไร้สนิมออกสเทนิติกที่
 ผสมโครเมียม 22.90 % และ निकเกิด 13.72 % โดยด้านซ้ายเป็น निकเกิด และด้าน
 ขวาเป็นสเปกตรัมของเหล็ก



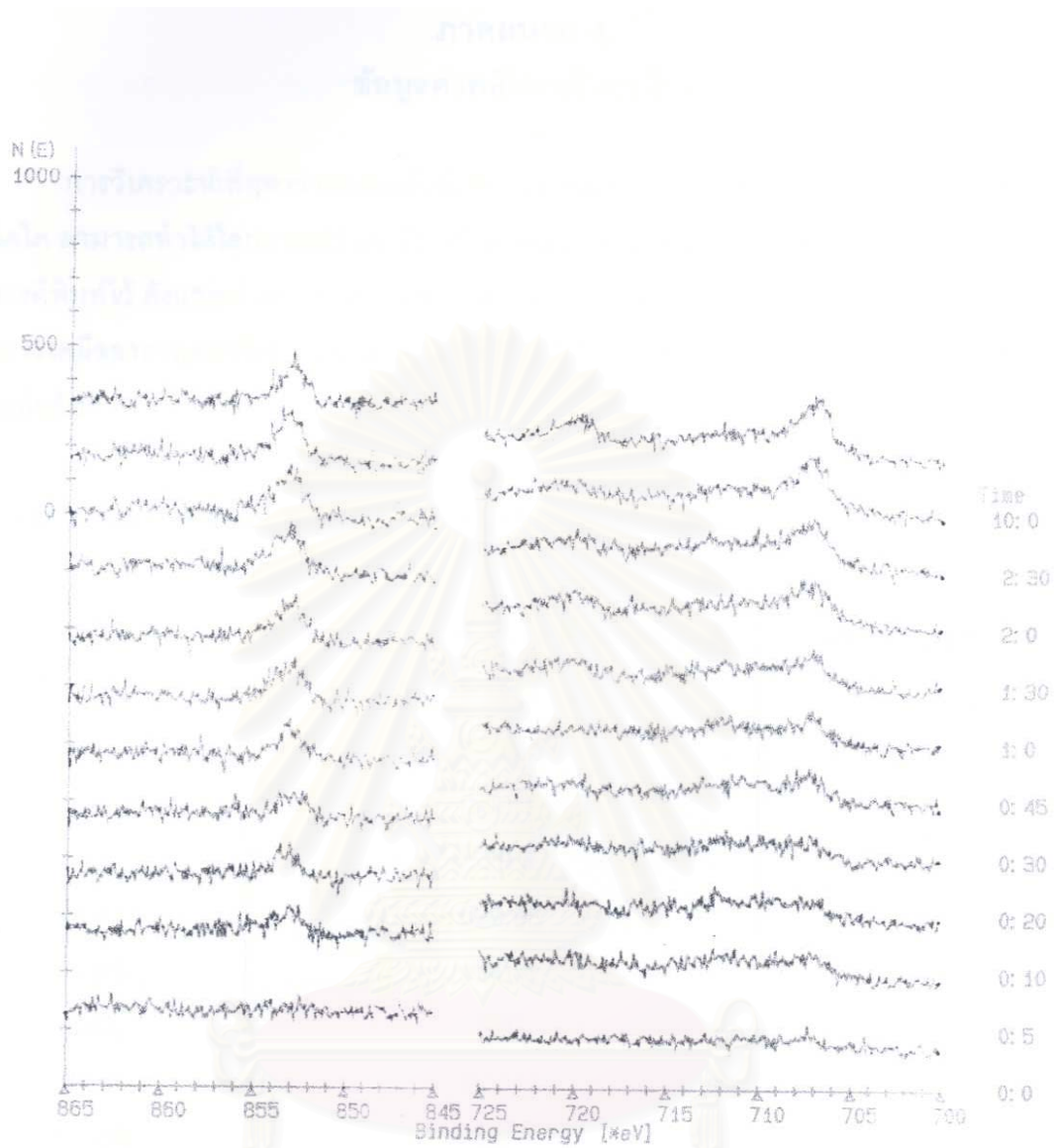
รูปที่ ค.25 แสดงสเปกตรัมของธาตุ निकิลและเหล็กของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิติกที่ผสมโครเมียม 23.49 %และ निकิล 16.56 % โดยด้านซ้ายเป็น निकิล และด้านขวาเป็นสเปกตรัมของเหล็ก



รูปที่ ค.26 แสดงสเปกตรัมของธาตุนิกเกิลและเหล็กของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิติกที่ผสมโครเมียม 25.45 % และนิกเกิล 17.54 % โดยด้านซ้ายเป็นนิกเกิล และด้านขวาเป็นสเปกตรัมของเหล็ก



รูปที่ ค.27 แสดงสเปกตรัมของธาตุนิกเกิลและเหล็กของเหล็กกล้าไร้สนิมออกสเตนดิกที่ผสมโครเมียม 27.65 % และนิกเกิล 19.96 % โดยด้านซ้ายเป็นนิกเกิล และด้านขวาเป็นสเปกตรัมของเหล็ก



รูปที่ ค.28 แสดงสเปกตรัมของธาตุนิกเกิลและเหล็กของเหล็กกล้าไร้สนิมอสเทนดิกที่ผสมโครเมียม 31.94 % และนิกเกิล 28.25 % โดยด้านซ้ายเป็นนิกเกิล และด้านขวาเป็นสเปกตรัมของเหล็ก

ภาคผนวก ง.
ข้อมูลค่าพลังงานยึดเหนี่ยว

การวิเคราะห์เพื่อหาว่าสเปกตรัมที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเอ็กซ์พีเอสเป็นสารประกอบชนิดใด สามารถทำได้โดยการเปรียบเทียบกับค่าพลังงานยึดเหนี่ยวมาตรฐานจากเอกสารต่างๆ ซึ่งมีการตีพิมพ์ไว้ ดังแสดงในตาราง ค.1 ตาราง ค.2 ตาราง ค.3 และตาราง ค.4 โดยแบ่งตามชนิดสภาวะเคมีของธาตุออกซิเจน (O1s) โครเมียม (Cr 2p3/2) เหล็ก (Fe 2p3/2) และนิกเกิล (2p3/2) ตามลำดับ

ตารางที่ ง.1 แสดงค่าพลังงานยึดเหนี่ยวของออกซิเจน (O1s) ในสภาวะเคมีต่างๆ

สภาวะเคมี	ค่าพลังงานยึดเหนี่ยว (อิเล็กตรอนโวลท์)	เอกสารอ้างอิง
Fe ₃ O ₄	530.17	18
Fe ₂ O ₃	529.98	18
	530.1	3
FeO	529.8	3, 19
Cr ₂ O ₃	529.98	18
Cr(OH) ₃	530.9	19
CrO ₃	530	18
NiO	529.5	2
Ni(OH) ₂	531.2	2
O ²⁻	529 – 530	16
OH ⁻	531.5	16

ตารางที่ ง.2 แสดงค่าพลังงานยึดเหนี่ยวของโครเมียม (Cr 2p3/2) ในสภาวะเคมีต่างๆ

สภาวะเคมี	ค่าพลังงานยึดเหนี่ยว (อิเล็กตรอนโวลท์)	เอกสารอ้างอิง
Cr ₂ O ₃	576.5	18
	576.6	2, 16
CrO ₃	579.07	18
	578.9	3
	580.1	2
Cr(OH) ₃	577.3	3
CrOOH	577.0	3
Cr (met)	574.14	3
	574.3	2
	574.2	14
	573.9 – 574.2	16

ตารางที่ ง.3 แสดงค่าพลังงานยึดเหนี่ยวของเหล็ก (Fe 2p3/2) ในสภาวะเคมีต่างๆ

สภาวะเคมี	ค่าพลังงานยึดเหนี่ยว (อิเล็กตรอนโวลท์)	เอกสารอ้างอิง
Fe ₃ O ₄	710.95	18
	710.8	3
Fe ₂ O ₃	710.97	18
	710.9	2, 3
FeO	709.6	2, 3
FeOOH	711.25	18
Fe (met)	706.82	18
	706.74	19
	706.7 – 706.8	16
	706.9	14

ตารางที่ ง.4 แสดงค่าพลังงานยึดเหนี่ยวของนิกเกิล ($2p_{3/2}$) ในสภาวะเคมีต่างๆ

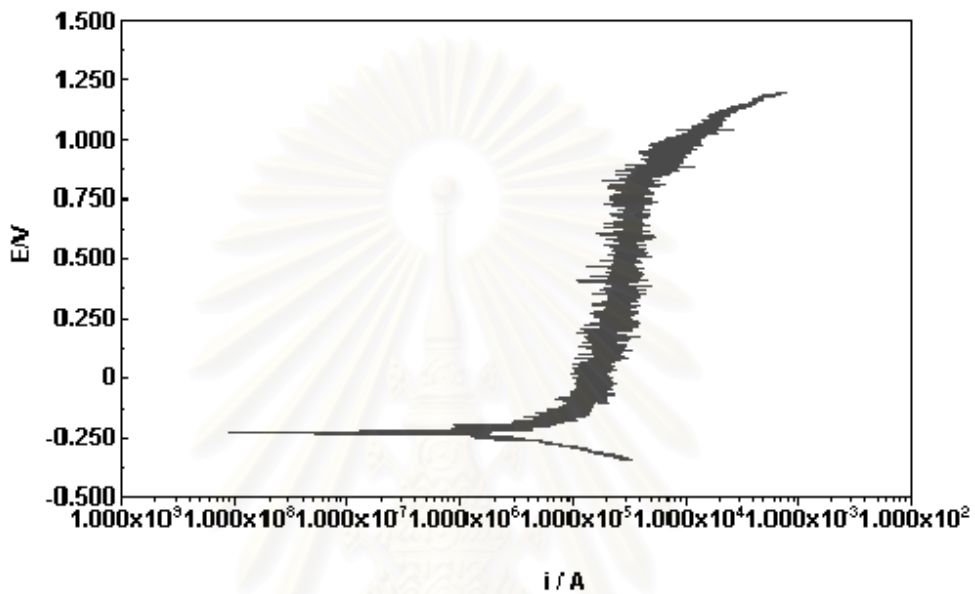
สภาวะเคมี	ค่าพลังงานยึดเหนี่ยว (อิเล็กตรอนโวลท์)	เอกสารอ้างอิง
Ni_2O_3	856.0	2, 3
NiO	853.5	3
Ni (met)	855.9	2
	853.1	14
	852.9	3
	852.6	16



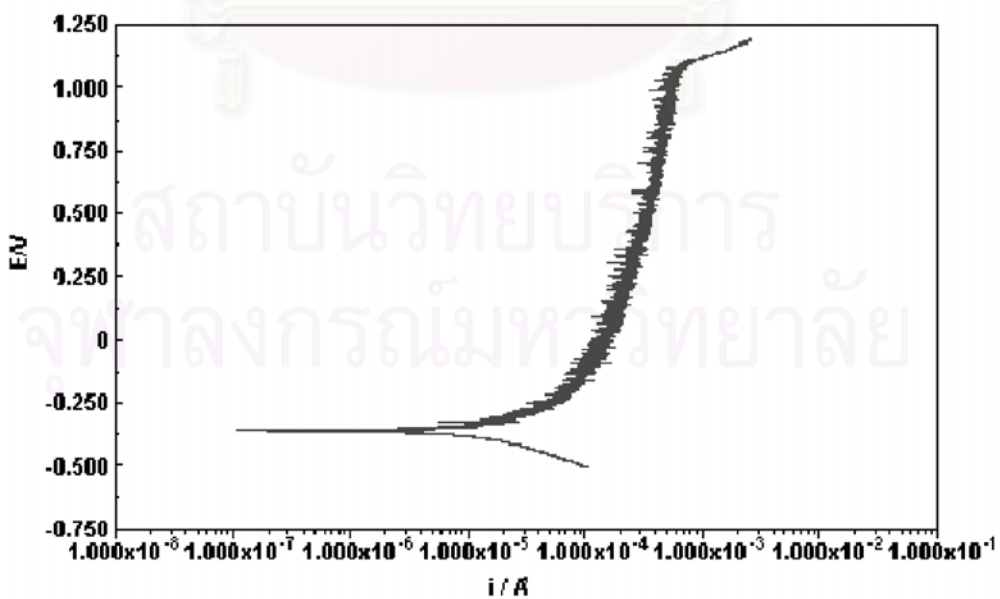
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก จ. เส้นโพลาริเซชัน

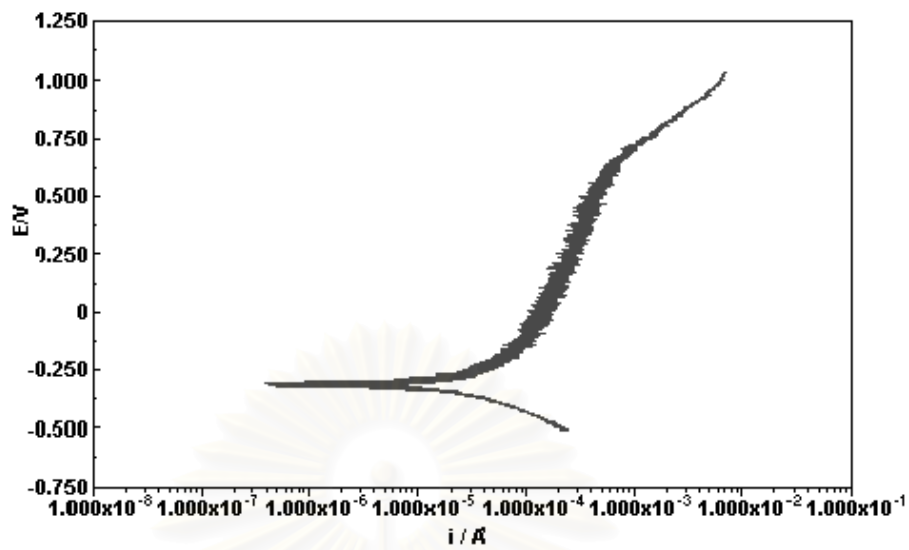
จากการทดลองหาเส้นโพลาริเซชันด้วยเครื่องโพเทนทีโอสแตทในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 3.5 % โดยน้ำหนักที่อุณหภูมิห้องได้ผลดังแสดงในรูปที่ จ.1 ถึง จ.4



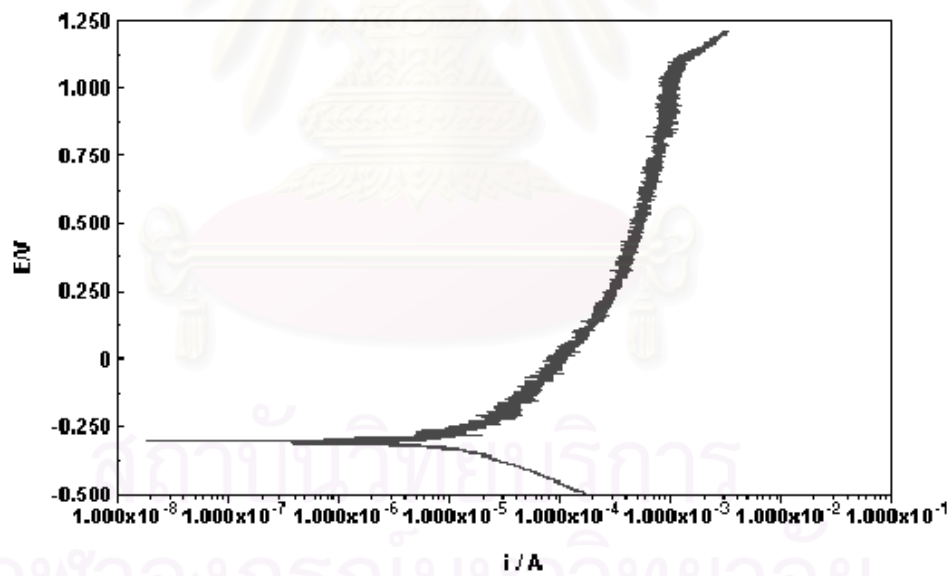
รูปที่ จ.1 เส้นโพลาริเซชันของเหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ริติกที่มีโครเมียม 20.50% และ นิกเกิล 4.75%



รูปที่ จ.2 เส้นโพลาริเซชันของเหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ริติกที่มีโครเมียม 38.80% และ นิกเกิล 12.50%



รูปที่ ๑.3 เส้นโพลาริเซชันของเหล็กกล้าไร้สนิมออกสเทนิติกที่มีโครเมียม 21.11% และ นิกเกิล 9.89%



รูปที่ ๑.4 เส้นโพลาริเซชันของเหล็กกล้าไร้สนิมออกสเทนิติกที่มีโครเมียม 31.94% และ นิกเกิล 28.25%

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

ชื่อ	นายสาริษฐ์ ชัยกิตติศิลป์
วันเกิด	2 กันยายน พ.ศ. 2519 จังหวัด กรุงเทพมหานคร
ที่อยู่	50/93 ซ.เสนานิคม1 ถ.พหลโยธิน แขวงลาดพร้าว เขตลาดพร้าว กรุงเทพมหานคร 10230 โทร 5780832
ประวัติการศึกษา	
มัธยมศึกษา 1 – 3	โรงเรียนกุนนทีรุทธARAMวิทยาคม พ.ศ. 2531 – 2533
มัธยมศึกษา 4 – 6	โรงเรียนบดินทรเดชา(สิงห์ สิงหเสนีย์) พ.ศ. 2534 – 3536
วศบ. (โลหการ)	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย พ.ศ. 2537 – 2540
วศม. (โลหการ)	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย พ.ศ. 2541 – ปัจจุบัน
ประวัติการทำงาน	
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย	มิถุนายน พ.ศ.2541 – มีนาคม พ.ศ. 2543

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย